

目 录

(下 册)

第三部分 核监测技术及其应用的研究成果

核技术与公共安全及其应用的研究成果

^{60}Co - γ 大功率量热计的设计与研究	
Design and study of high power ^{60}Co -calorimete.....	张文在, 綦杰, 姚历农, 王晓静等 (363)
CoMo170 污染监测仪放射性表面活度检测方法.....	
Method of Surface Radioactive Contamination using CoMo170 Contamination monitor	
.....	刘树亮, 王百荣, 鲁建英, 单坤, 史丽生 (373)
Nal 探测效率的 MCNP 模拟和东北地区土壤及建筑材料中天然放射性核素含量的抽样测量	
MCNP Simulation of Detection Efficiency of Nal and Measuration of Natural Radionuclide Contents in soil in the northeast China	彭帮保, 颜强, 李桃生, 李智 (378)
$\text{N}(^{231}\text{Pa})/\text{N}(^{235}\text{U})$ 法高浓铀年龄测量研究	
The Study of HEU Age by $\text{N}(^{231}\text{Pa})/\text{N}(^{235}\text{U})$	张宏俊, 任忠国, 熊忠华, 刘振汉等 (383)
Sr 在粉质粘土上的吸附比研究	
Study on adsorption distribution coefficient of Sr on Silty Clay.....	周旭, 曾可, 张瑞荣, 王煜, 马特奇 (388)
爆炸冲击波的数值模拟	
Numerical simulation of shock wave.....	绪梅, 朱继, 王良厚, 王锋 (393)
测角装置模拟训练器研究	
Research of Training Device on Goniometry Detector of Nuclear Burst.....	何水军, 吴江峰, 秦晋 (397)
车载放射性废物体在线监测技术	
The On-site Monitoring Technique for Carborne Radioactive Waste Container	
.....	龙斌, 贾明雁, 冯天成, 马怀成等 (401)
城市地铁核生化一体化监测技术研究	
Study on City Underground NBC Monitoring Technology.....	胡洁微, 房宗良, 文其林, 曹剑锋等 (409)
氚系统在线氚测量电离室研制进展	
Ionization chamber development for tritium on-line monitoring.....	陆光达, 程亮, 秦城, 张桂凯 (414)

福岛核事故泄漏放射性监测	
Radionuclide monitoring of the Fukushima nuclear accident leaking.....	殷经鹏, 周崇阳, 申茂泉等 (418)
固体钾肥样品钾含量的放射性快速测定	
The Rapid Determination of the Content of Potassium in Solid Potash Fertilizer Samples by Radioactivity.....	
.....	石国柱, 李松林, 陈若富, 秦芝等 (424)
航空放射性测量技术对核事故泄露核素的探测能力评估.....	
Evaluation of airborne radiation survey used for monitoring leakage of radionuclides in nuclear accident	
.....	李惠彬, 冯元举, 韩斌 (429)
核监测电子设备方舱电气布线的电磁兼容设计	
Military electronic equipment shelter electrical wiring design of electromagnetic compatibility.....	杨雪梅 (434)
核应急行动中的剂量监测	
Dose Monitoring in Nuclear Emergency.....	南宏杰, 杨忠平, 雷鑫 (442)
厚样法在低本底 α β 测量仪上的应用研究	
The application study of thickness method on the low background α/β measures instrument	
.....	沈春霞, 南宏杰, 鲁远 (445)
静态批示法研究铯在新疆托克逊粘土上的吸附分配比.....	
Study on the Distribution of Sr on Xin Jiang Tuokexun Silty Clay by batch experiments	
.....	曾可, 周旭, 张瑞荣, 何希, 王煜 (448)
就地 HPGe γ 谱仪测量隧道空气中氡子体	
Radon Progeny Concentrations Measurement in Tunnel by In-situ HPGe γ Spectrometry.....	
.....	吴睿, 冯天成, 苏川英, 贾明雁等 (453)
空气中的氚监测在重水堆核电站中的应用	
Monitoring of airborne tritium in the heavy water reactor nuclear power plant.....	杨冬 (458)
镭-铍中子源库及邻近实验室内氡浓度分布特征双滤膜法测量	
Characteristics of Radon Concentration Distributions Measurement with Two-filter Method in the Storage Rooms of Ra-Be Neutron Source and the Adjacent Laboratories	
.....	刘书焕, 褚俊, 包利红, 赵耀林等 (463)
利用核反应堆建立快中子辐射场的理论设计研究.....	
Designing Research of Fast Neutron Radiation Field based on the Reactor	
.....	张文仲, 王百荣, 张晓敏, 骆亿生, 周畅 (469)

全国环境水平样品活度测量比对研究	
The Summarization of National Activity Comparison Measurement of Radioactive Nuclides in Enviroment Samples.....	孙健, 姜文华, 来永芳, 郑启燕, 陈琳 (473)
职业外照射个人剂量监测和评价的准确度要求	
Study on requirements of precisions for monitoring and evaluation of individual occupational external exposure	来永芳, 王永红, 孙健, 高静, 刘克平 (478)
核电设施重大事故应急专用装备编配问题探讨	
Research on the organization of equipments of nuclear emergency	李晓明, 杨钧 (483)
基于 GIS 的核事故危害预测预警与优化控制系统集成方法研究	
Study on integrated approach of Nuclear Accident Hazard Predicting, Warning, and Optimized Controlling System based on GIS.....	唐丽娟, 黄顺祥, 王新明 (487)
基于 GPRS 的核应急指挥控制系统.....	
The Nuclear Emergency Information System Based on GRRS.....	王百荣, 付黎, 马捷等 (491)
基于 MACCS 程序的反应堆核事故周边地区剂量估算.....	
Calculation of Radiation Dose of Area Surrounding Nuclear Power Plant with MACCS during Sever Accident	
.....	曾君, 刘书焕, 田浩 (495)
现代城市遭 IND 袭击应对措施探讨	
Dissussion on Measures against IND Attack in Modern Cities	耿小兵, 陈琳, 绪梅, 王倩 (501)
一种简单可行的放射性去污效能评估方法	
A Simple and feasible Method of Effectiveness Evaluation on Radioactive Decontamination Action	
.....	陈琳, 郭立军, 耿小兵, 孙健, 王季红 (506)
宇宙射线 μ 子成像检测技术研究进展	
Cosmic-ray Muon imaging for nuclear materials detection	王丽萍, 肖洒 (510)

第四部分 核仪器仪表及其应用的研究成果

EDXRF 法测定载 Pd - Al ₂ O ₃ 小球的 Pd 含量	
Determination the Content of Palladium of Pd-Al ₂ O ₃ Pellets by EDXRF ..	王雯, 余春荣, 高戈, 赵忠刚 (517)
核仪器中下位机的比较与选择	
Comparison and Selection of Client Computer in Nuclear Instrument ..	马桂珍, 谢艳辉, 彭婧, 胥飞燕 (521)

基于 FPGA 串行通讯的容错设计.....	
Fault tolerance based on serial communication of FPGA	彭婧, 房宗良, 徐权周, 胡洁微, 马桂珍 (524)
基于硅半导体探测器的个人剂量仪数据处理方法.....	
Research of Data Processing algorithm Based on Silicon Semiconductor Personal dosimeters.....	
.....	姚永刚, 邓长明 (526)
数字核信号智能采样理论和方法研究	
The study of the intelligent sampling theory and methods of the Digital nuclear signal.....	
.....	闫洋洋, 郝德建, 王鹏, 张软玉 (529)
微型反应堆控制系统改进	
Improvement Research on the Control Console of Miniature Neutron Source Reactor	
.....	刘心灵, 彭旦, 洪景彦, 张金花, 鲁谨 (534)
一套用于现场视察的车载 NaI(Tl) γ 谱仪系统的研制.....	
Development of a carborne NaI(Tl) γ spectrometry system for OSI ..	冯天成, 贾明雁, 雷卫国, 刘俊等 (539)
一种虚拟核仪器的实现原理及方法	
Principle and Realization Method of a Virtual Nuclear Instruments.....	王鹏, 张软玉, 闫洋洋, 郝德建 (546)

第五部分 计算机技术及其应用的研究成果

CO ₂ 在 UO ₂ (001)表面化学吸附的第一性原理计算.....	
CO ₂ Molecule chemisorption on the (001) Surface of UO ₂ :A First Principle Calculation	
.....	王飞, 何彬, 左广霞, 黎素芬 (551)
CSNS ³ He 管阵列样机数据获取系统研制	
Development of Data Acquisition System for CSNS ³ He Detector	赵东旭, 章红宇 (556)
CSNS 靶站谱仪控制系统客户端权限管理	
User rights management of the CSNS Control System Client.....	张卓豫, 初元萍, 刘毓倩, 庄建等 (561)
SDUV-FEL 实验装置电源控制系统.....	
The SDUV-FEL Power Supply Control System	赵欢, 丁建国, 郑丽芳 (566)
SDUV-FEL 实验装置控制系统	
The Control System of the SDUV-FEL Test Facility	丁建国, 胡守明, 蒋舸扬等 (571)

辐射图像迭代重建算法研究	
Research on the iterative algorithms for radiation image	贾小龙, 张全虎, 黎素芬 (577)
基于 C8051 单片机电子光纤封记系统设计	
Design of Fiber Optic Electronic Seal System Based on C8051 Microcontroller	弟宇鸣, 陈荣桦, 左广霞, 宋仓 (584)
基于 Web 的大亚湾探测器监测系统	
Web monitor in Daya Bay Detector Control System	杜小峰, 李小男, 叶梅等 (590)
基于 LM 算法 BP 神经网络的放射性核素识别	
Radioactivity Nuclide Identification Based on BP and LM algorithm neural network.....	王季红, 王良厚, 孙健 (597)
基于计算资源管理的监控系统设计, 实现与可视化.....	
Batch management based monitoring system: design, implement, and visualization.....	阚博文, 石京燕 (601)
基于嵌入式 FPGA 的 CSNS 网络数据传输方案及比较	
FPGA-based Network Data Transmission Scheme for CSNS.....	王修库, 章红宇, 顾旻皓, 肖亮 (607)
数字核信号图形化识别和处理研究	
The study on the method of image recognition and processing for digital nuclear signals.....	万东阳, 张软玉, 王鹏, 闫洋洋, 郝德建 (612)
同步辐射光束线运动控制硬件系统的集成	
The Integrated Hardware of the Motion Control System in SSRF eamlines.....	郑丽芳, 刘平, 张招红, 胡纯等 (617)
外弹道天幕立靶弹丸信号处理方法研究	
Research on the Method of Signal Processing which ConcentrationMeasuring Target Exterior Trajectory by Sky Screen	董华, 董涛, 王铁岭 (621)
移动式加速器中子源控制系统的设计与研制	
Design and Development of mobile accelerator neutron source	唐君, 刘湾, 黄瑾, 刘百力等 (627)
一种基于关联规则挖掘的入侵检测系统	
Apriori-based Network Intrusion Detection System	王文瑾, 刘俊荣, 刘宝旭 (632)
一种基于网络行为分析的木马检测模型	
Trojan Detection Model Based on Network Behavior Analysis.....	刘俊荣, 王文瑾, 刘宝旭 (638)

一种基于以太网收发机的远程辐射监测	
A long-distance radiation monitoring based on wireless transceiver	彭婧, 房宗良, 徐权周, 曹剑锋, 文其林 (642)
以太网技术在核辐射监测系统中的应用	
Ethernet technology in the nuclear radiation monitoring system	张怀强, 汤彬, 吴和喜 (645)
应用于高能物理实验数据的基数排序算法	
Application of Radix Sorting in High Energy Physics Experiment	湛炫, 顾旻皓, 朱科军 (649)
有源中子多重性测量计算机模拟研究	
Computer Simulation Research of Active Neutron Multiplicity Counting and Analysis	黎素芬, 张全虎, 弟宇鸣, 管才路, 贾小龙 (654)

^{60}Co - γ 大功率量热计的设计与研究

张文在, 慕杰, 姚历农, 王晓静, 龚凌凌, 段利民

(中国原子能科学研究院, 北京 102413)

摘要: 本文介绍了一个绝对测量 γ 放射源活度的等温 γ 量热计。该量热计的热输出器为一直径 200mm, 高 354mm 的铅圆柱体, 测量元件同时采用了热敏电阻和热电偶。在没有恒温的条件下, 在该装置上测量了一个约 300 居里的 $\text{Co-60}\gamma$ 源和一个约 160 居里的 Pu-238 α 源, 热平衡时间约 40 小时, 测量值扩展不确定度为 5%。

关键词: 热敏电阻; 热电偶; 量热计

文章分类: 核监测技术及其应用的研究成果

1 γ 量热计设计原理^[1]

1.1 热方程及其解

某一壳体内的物体, 受一恒定功率的热源加热, 其温度的变化遵从牛顿冷却定律, 即:

$$\frac{CdT}{dt} = W - K(T - T_0) \quad (1)$$

式中: C 为热输出器的热容;

K 为热输出器与外壳之间的导热系数,

$k=1/K$;

W 为加热功率;

T 为热输出器温度, T_0 为热输出器加热前的温度, T_j 为外壳的温度。

求解方程有以下二种情况:

1) $T=T_j$, 或 $K=0$ 则有

$$\frac{dT}{dt} = \frac{W}{C} \quad T(t) = \frac{W}{C}t \quad (2)$$

满足以上条件的量热计称绝热量热计, 量热计的温升与系统的热阻无关, 而只与系统的热容有关。

2) T_j =常数, 若 $t=0$ 时, $T=T_0 \neq T_j$, 解方程则有:

$$T - T_j = (1 - e^{-\frac{t}{kC}})kW + (T_0 - T_j)e^{-\frac{t}{kC}} \quad (3)$$

若 $t=0$ 时 $T=T_j$ 则有:

$$T - T_j = (1 - e^{-\frac{t}{kC}})kW \quad (k = \frac{1}{K}) \quad (4)$$

满足以上条件的量热计称等温量热计, 等温量热计有以下三个特点。

a) 平衡温度与 C 无关而只与 K 有关;

b) 等温量热计的稳定性, 很大程度上取决于 K 的稳定性;

c) 等温量热计的热平衡时间理论上是无穷大, 但当 $t > 4.6kC$ 时, 该时的量热计温度和平衡温度之差就 $< 1\%$ 。

3) 关于量热计原理的几点结论

a) 等温量热计的温升服从指数规律;

b) 量热计的性能和稳定性取决于仪器的参数热导率 K 和热容 C , 而和源的几何结构无关;

c) 量热计的灵敏度和响应时间是互相矛盾的, 要提高灵敏度, 就会加长响应时间, 因此, 须根据测量的对象和目的进行选择;

d) 量热计的精密度 (A 类不确定度) 主要取决于参数 T_j , K 和 C 的恒定性。

1.2 射线辐射能的转换

放射源的辐射能通过吸收体转换为热能，其输出功率按以下公式计算：

已知 1Bq 的放射源每秒输出的能量 E 为：

$$E = 1 \times \sum \bar{E}_i \quad (5)$$

$\sum \bar{E}_i$ 为每次衰变发射各种射线平均能量的总和，以 MeV 为单位。

已知 1 MeV/秒 = 1.602×10^{-13} 焦耳，1 焦耳/秒 = 1 瓦

故有 $P (W) = 1.602 \times 10^{-13} N_0 (Bq) \cdot \sum \bar{E}_i$ (MeV)， N_0 为源的活度。

根据以上公式，给出若干重要常用核素每居里的输出功率，见下表 1。

核素	Co-60	Po-210	Pu-238	Am-241
mw/Ci	15.39	31.60	32.85	32.53

2 量热计设计的基本考虑

1) 尽管钨合金比较理想，但由于加工困难，量热器仍采用铅为吸收体。又因为待测源为线状源，量热器几何将采用园柱体；

2) 由于量热计是在高辐照剂量下工作，因此测温元件采用耐温热敏电阻和热电偶并用；

3) 由于量热器质量比较大，铅的重量达 150 公斤，热容 C 较大，因而时间常数大，热平衡时间长，对温度的恒定性有较高要求。但由于测量功率较大，温升较高，对环境温度恒定性的要求又可以降低，因而在设计中采用循环恒温水稳定外壳温度和作为外壳降温的后备措施。

3 γ 量热计的结构

γ 量热计由 γ 吸收体（又称能量转换器或热输出器）、恒温器、温度测量、电功率刻度四部分组成。简要框图和实体结构图 1 如下：

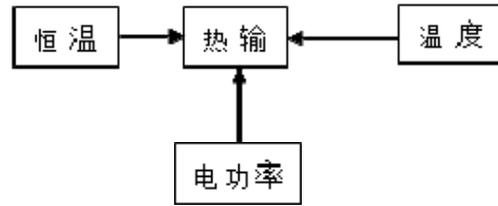


图 1 γ 量热计简要框图

根据以上的参数和考虑，我们设计的百瓦级 γ 量热计如附图 2 所示：

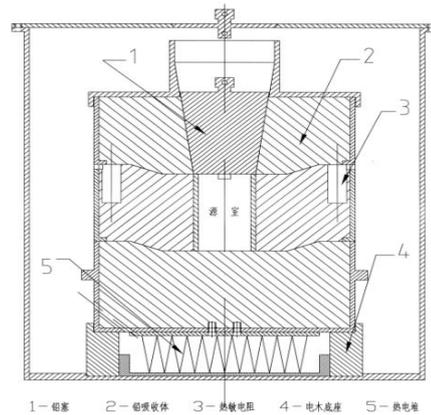


图 2 γ 量热计实体结构图

3.1 热输出器

γ 吸收体也就是热输出器，也可以说是一个能量转换器。它的作用就是将辐射能转换成热能，并通过热电转换元件输出电讯号。为了获得最大的温升，要求量热器热容尽可能小，而量热器对外壳的热阻尽可能大。我们设计的量热器直径为 200mm，高为 354mm，由五块高为 70mm 左右的铅园柱体叠加组成。中心有 $\phi 50 \times 70$ 放置测量样品和刻度线圈的空腔。该铅园柱体放置在一 $\phi 350 \times 400$ 的不锈钢筒内，且底座导热率很小的电木园圈上。总重量约为 150 公斤，已知铅的比热为 0.031 千卡/公斤，量热器的热容量为：

$$C = 120 \times 0.031 = 3.72 \text{ 千卡/度} \quad (6)$$

由于考虑到高辐照下可能对热敏电阻产生影响和损害，同时采用了热敏电阻和热电偶两种测温元件。热敏电阻的阻值约为 $27K\Omega$ ($20^\circ C$)，温度系数 $\sim 4\%/度$ 。热电偶为 12 对康铜-镍铬热电偶

串联的热电偶，热端与铅圆柱体的底部接触，冷端浸在不锈钢筒底部一硅油池中。对绝热型量热计，一般采用热敏电阻做为测温元件，因为它不需要有冷热端温差 ($T=T_j$)。对于等温量热计，既可采用热敏电阻，亦可采用热电偶做为测温元件。我们设计的是等温 γ 量热计，同时采用了热敏电阻和热电偶做为测温元件。而热敏电阻在高辐照和高温下是否有变性情况，还需要实验给予测定。

我们准备杆状和珠状两种类型的热敏电阻。其主要性能参数如表 2。

表 2 两种不同热敏电阻主要性能参数

形状	标称阻值	温度系数	工作温度
MF13 (杆状)	120~300K Ω	(2.7~4.1) $10^{-2}/^{\circ}\text{C}$	125 $^{\circ}\text{C}$
MF51 (珠状)	0.1~1.0M Ω	(3.5~6.0) $10^{-2}/^{\circ}\text{C}$	300 $^{\circ}\text{C}$

热电偶采用 $\phi 0.5\text{mm}$ 的铜—考铜 12 对串联。由于该量热计为大功率量热计，温升较高，热电偶对数不必过多，只求稳定可靠。

如有条件，铬合金—考铜热电偶也可采用，该种热电偶在性能上要较铜—考铜为好，测温可达 800 $^{\circ}\text{C}$ 。

测量元件的布局，如图所示，测温元件将放置在量热器圆柱体的顶部、腰部和底部。而热敏电阻放在顶部，12 对热电偶放在圆柱体的底部，腰部亦放置两个热敏电阻，用来检验由于热分布的不同所带来差异的大小。所用热敏电阻都需做高温和高辐射剂量的考验。

功率刻度线圈—或电加热器将采用购置和自制相结合的办法，若购置的电加热器在高辐照下的满足要求，则放弃自制电加热器。

1) 购买的电加热器的绝缘材料为氧化镁或云母，几何形状有不同长度 $\phi 15$ 的棒状加热器；有 $20 \times 30 \times 8\text{mm}$ 的片状陶瓷加热器，还有螺旋状加热器等。功率几何尺寸可根据用户需要加以订做，每个在 50~150 元之间。

2) 自制电加热器可用 0.1mm 的康铜线，绕在 $\phi 38$ 的空心陶瓷棒上。0.1mm 的康铜每米 60 Ω ，用 100V 2A 输出的稳压电源即可得到 150W 的电功率。根据以下公式可计算出 0.1mm 康铜的熔断电流为

$$I = \frac{d - 0.005}{K'} = \frac{d - 0.005}{0.034} = 2.8A \quad (7)$$

式中 0.034 为康铜的 K' 值。即用 0.1mm 的康铜线获得 150W 的电功率是安全的。

3) 电功率线圈的放置

电功率线圈为热源模拟线圈，原则上应在结构、形状和放置位置上和待测热源一致，但由于 $^{60}\text{Co}-\gamma$ 射线是在整个铅圆柱体中被吸收，电功率线圈要在位置上模拟待测热源是很困难的。但只要使 k_1/k_2 值足够小，则模拟差异引起的误差可以忽略。例如：在绝热情况下，可视 k_2 为 ∞ ， $k_1/k_2 \rightarrow 0$ ，则量热器的温升只与其热容 C 有关，而与热阻 k_1 、 k_2 无关，也就是说与待测热源和电模拟线圈的结构和位置无关。对等温量热计，使 k_1 尽可能小，而 k_2 尽可能大，则即可减小热分布的带来的不确定度。我们是将螺旋状和片状加热器可放在源室中，而圆柱状可放置在铅圆柱体的中部外侧处，以检验模拟电加热线圈放置位置的不同所带来的差异。

3.2 恒温器

恒温器在量热计中相对来说是比较复杂的装置，特别是对于测量 μW 级的微量热计，对温度稳定性的要求要达到 $<10^{-3}\text{^{\circ}C}$ 或更高，因而难度较大。而对于 mw 级以上的量热计，恒温要求较低，恒温技术难度不大。对于 W 级以上的量热计，在保温比较好的场所中，例如：密闭的实验室，操作放射性的“热室”等，甚至可以不考虑恒温问题。根据理论分析：对测量结果精密度的要求和温度稳定度的要求是相当的，即对于等温量热

计, 对所测的功率 W , 要求精确到百分之几, 则对温度稳定度的要求, 也需达到百分之几。例如: 若测量不确定度要求小于 0.1%, 则温度的稳定度也要求达到 0.1%。我们的 γ 量热计要求测量的不确定度为 $\pm 3\%$, 热室的温度为 20°C 。实验测定, 热室的温度变化, 一般可达到 $\pm 0.3^\circ\text{C}$, 因此, 现在的 γ 量热计可以不考虑恒温装置。

该 ^{60}Co - γ 大功率量热计将在热室中工作。在没有通风和照明的条件下, 热室将是一个具有一定恒温作用的恒温室, 在室外温度没有剧烈变化的条件下, 例如气温 $\pm 2^\circ\text{C}$ 的变化, 热室内的温度变化, 在 24 小时保持 1.0°C 的变化还是有可能的。准备在量热计按装前对热室的温度变化将进行一次实测。

由于是大功率量热计, 量热器温升较高, 在以上量热器的结构下, 对 150W 的热源温升约在 200°C 左右, 因此, $0.5\text{--}1.0^\circ\text{C}$ 的温度涨落将不会带来较大的误差。但为了保证让测量值的稳定可靠, 我们在设计中仍然采取了用恒温槽循环的恒温水进行恒温的措施, 希望能对量热计外壳, 保持小于 1.0°C 的变化。当然, 由于量热计在热室中工作, 用循环恒温水恒温仍然不太方便, 因此, 当冷实验确定对大功率量热计, 环境温度不大的变化对测量结果影响不大时, 仍采用简单的保温层恒温。并将在量热计的外壳用热敏电阻监测外壳温度变化。

3.3 γ 量热计的温度测量

γ 量热计的温度测量, 采用热电偶和热敏电阻两种测温元件, 而对于热电势和热敏电阻值的测量则比较简单, 我们是用 5 位半的数字万用表对热电偶和热敏电阻进行直接测量的。若采用外推平衡温度和零点温升速度法进行测量, 则需要大量的实验数据, 才能保证足够的精度, 这时最好采用数据自动获取和处理系统, 这样, γ 量

热计的测量系统就比较复杂了, 这是我们下一步工作的重点。

量热计的温度测量主要有两类方法, 一种是用热电偶温度计测量, 另一种是用电阻温度计进行测量。

1) 用热电偶测量温度

热电偶可分一般金属热电偶和半导体热电偶, 后者比前者每度温差电动势输出要高近一个量级, 一般常用热电偶的特性如下表 3。

表 3 一般常用热电偶的特性

电偶	电势 (μV)	电偶	电势 (μV)
康铜-优等铜	40	铂-铁	92
康铜-铜	41	铂-铈	100
康铜-锰铜	41	铂-镍	330-520
康铜-镍铬	53	铂-铂	500
康铜-合洛宁	56	铂-铋	500-550

半导体热电偶的电动势输出虽然比一般金属热电偶要高近一个量级, 但它的导热率要较一般金属热电偶大, 减小了温升, 抵消了一部份热电势输出。为了提高测量温度的灵敏度, 可将单个热电偶串接起来, 增加温差电势的输出, 但随着串接热电偶的增多, 导热率也将迅速增大, 在量热器达到一最大热电势输出后, 随着热电偶数目的增加, 热电势输出开始减少, 因此, 对一特定量热计, 有一最佳热电偶串接数。

2) 用电阻温度计测量温度

用电阻元件测温度亦可分一般电阻温度计和热敏电阻温度计。一般电阻测量是利用电阻温度系数较大的电阻金属, 根据其电阻率随温度变化的特性来测量温度, 这种电阻金属一般是铜、镍、锌、等的合金, 其温度系数可在 0.04% 左右, 灵敏度较低, 因此一般用在较高温度测量。其稳定性较好。

灵敏度较高的测量电阻元件是热敏电阻, 它比一般金属电阻温度系数要高 1-2 个量级。下表 4 为南京某厂一组热敏电阻的典型参数。

表 4 南京某厂一组热敏电阻的典型参数

型号	MF11 (片状)	MF13 (杆状)	MF51 (珠状)
标称阻值 R_{25} (Ω)	10~15K	820~300K	100-1M
温度系数 α_{25}	-(2~4)%/°C	-(3~4)%/°C	-(3.5~6)%/°C
额定功率 P_e (瓦)	0.25	0.25	
时间常数 τ (s)	≤30	≤30	≤5
工温度范围 (°C)	-50~85	-50~125	-50~300

3) 测量仪表

量热计中所需的重要仪表，主要是能测量电压、电流、电阻的多功能数字仪和能输出一定功率的直流稳压电源。由于所设计的 $^{60}\text{Co}-\gamma$ 量热计的高功率量热计，温升较高，对直流稳压电源的输出功率要求较高，150W 左右，而对多功能数字仪的精度或位数的要求则不需要特高，一般在六位左右即可。量热计热电偶电势输出和热敏电阻阻值将通过数字多用表记录，一般 6 位半台式数字多用表测量直流电压的精度可达 0.004%，测量电阻的范围为 100~100M Ω ，并具有 RS-232 接口和相应的一些软件。

3.4 电功率刻度系统

量热计电加热器中的电功率，是由一直流稳定电源提供的。一般由直流电源直接读出供给电加热器的电压和电流，或由数字万用表测量其电压和电流，便可得到输入到量热计中的电功率。主要的问题是，要使连接电加热器到直流稳压电源的导线电阻，相对于电加热器的电阻值尽可能小，使导线中损耗的电能降至最小，或便以更准确的加以校正。

1) 量热计的温度曲线^[2]

对于等温量热计，当输入一恒定热功率，则量热器的温升服从

$$T = T_{\infty}(1 - e^{-kt}) \quad (8)$$

对热电偶有 $\varepsilon = \varepsilon_{\infty}(1 - e^{-kt}) \quad (9)$

对热敏电阻有 $R = R_{\infty}(1 - e^{-kt}) \quad (10)$

ε_{∞} 、 R_{∞} 为 $t \rightarrow \infty$ 时的 ε 、 R 值

2) 量热器的热容

在绝对量热计中根据

$$T(t) = \frac{W}{C}t \quad (11)$$

给量热计输入一恒定功率 W ，从 $T(t)$ 直线方程的斜率，即可得到量热器的热容值 C 。

对等温量热计，可从量热器材料的质量和其比热的乘积得到。即 $C=mc$ 。当然，对绝热量热计也可这样来计算。

3) 量热计导热系数 K 的测定

量热计 K/C 的比值，在外壳温度恒定下，可以从测量其冷却曲线获得。设 t_1 是冷却从 T_0 到 T_1 的时间， t_2 是温度从 T_1 到 T_2 的时间，使 $T_1 - T_0 = T_2 - T_1$ 则有

$$\frac{K}{C} = \frac{2(t_2 - t_1)}{t_1^2 + t_2^2} \quad (12)$$

由于量热器的热容 C 已知， K 可以从上式获得。

4) 从温升曲线求平衡温度

在量热器中输入一恒定功率，热敏电阻阻值按指数规律变化有

$$\Delta R = \Delta R_{\infty}(1 - e^{-t/kC}) \quad (13)$$

$$\Delta R_{\infty} = \frac{\Delta R}{1 - e^{-t/kC}} \quad (14)$$

在某一时间 t 测得相应的 ΔR 值，根据已测得的 kC 值代入上式，便可得到该恒定功率热平衡时的热敏电阻值 ΔR_{∞} 。

5) 温升曲线的起始斜率

输入量热计不同的热功率，可有不同的温升曲线，而不同的温升曲线有不同的初始斜率，因此，不同的输入热功率 W ，就会有不同的初始斜率 $(dR/dt)_{t=0}$

在温升曲线上，设量热器温度与外壳温相同时的时间为 t_0 ，热敏电阻值为 R_0 ，在 t_1 时的阻值

为 R , 令 $t=t_1-t_0$, $\Delta R=R_1-R_0$ $\Delta R_\infty=R_\infty-R_0$ 则温升曲线在 t_0 时的斜率为

$$\left(\frac{dR}{dt}\right)_{t_0} = \frac{\Delta R_\infty}{t} \cdot \ln \frac{\Delta R_\infty}{\Delta R_\infty - \Delta R} \quad (15)$$

计算表明: 热功率输入后, 在 $t/\tau > 0.2$ 的条件, 即 $t > 0.2\tau$ (τ 为量热计的时间常数 $1/kc$) 进行测量, 测量的不确定度将最小。

4 测量数据的记录及处理

量热计数据的记录和处理将分二个阶段进行:

第一阶段工作: 手动记录和处理、待量热计可进行正常工作后, 将完成第二阶段工作;

第二阶段工作: 通过微机将自动的收集数据和处理数据, 主要的内容有:

1) 记录热室、量热计外壳、量热器的初始温度 (本底、电势、初始热敏电阻值);

2) 输入一定电功率做冷却曲线, 从冷却曲线求出系统的热导率 K 值;

3) 输入不同的电功率, 求出不同电功率的初始斜率 $(dR/dt)_0$, 并用最小二乘法得到电功率和初始斜率的关系式;

4) 求出待测 ^{60}Co 源一组 $(dR/dt)_0$ 值, 并求出平均值及标准差;

5) 以待测源的 $(dR/dt)_0$ 值, 从功率与 $(dR/dt)_0$ 关系式中求出待测源的功率和活度。

5 $^{60}\text{Co}-\gamma$ 量热计的刻度^[3]

量热计的刻度就是用一组电功率输入量热计得到一组斜率值, 然后用最小二乘法处理得到一个输入功率和初始斜率的关系式 (或关系曲线), 一般为二次多项式。将待测放射源放入量热计中, 得到一个初始斜率。然后从刻度曲线中便可得到待测源的输出功率。

根据关系式

$$\Delta T_\infty = \frac{W}{K} \quad (16)$$

设源的输出功率为 W_S , 电加热器的输出功率为 W_E 。相应的导热系数分别为 K_S , K_E , 则有

$$\frac{(\Delta T_\infty)_S \cdot K_S}{(\Delta T_\infty)_E \cdot K_E} = \frac{W_S}{W_E} \quad (17)$$

如果在测量保持 $K_S=K_E$, 则有

$$W_S = \frac{(\Delta T_\infty)_S}{(\Delta T_\infty)_E} \cdot W_E \quad (18)$$

在实际上 $K_S=K_E$ 是很易满足的

$$W_S = \frac{(dR/dt)_{0S}}{(dR/dt)_{0E}} W_E \quad (19)$$

量热计的组装、调试、和部分刻度是在一般实验室内进行的, 初步完成后再放入热室内做进一步的刻度, 具体内容有以下几项:

5.1 量热计的“本底”电势随室温的变化范围, 所谓“本底”电势即量热计未输入功率时的电势。

下表 5 给出室外温度变化 10°C 时“本底”电势的最大变化为 $40 \mu\text{V}$ 。

表 5 电势与温度变化关系

日期	17日	19日	23日	25日	26日	27日	2日	3日
室外 $^\circ\text{C}$	1~-3	5~-5	4~-3	6~-4	9~-3	10~-3	6~-4	10~-1
室内 $^\circ\text{C}$	9.7	9.7	9.0	8.4	8.6	8.6	8.7	9.0
电势 (mV)	-0.024	-0.051	-0.081	-0.048	-0.061	-0.064	-0.057	-0.056

5.2 量热计的温升曲线

下图 3 为 5W 量级输入电功率, 量热计电势和热敏电阻值随部分时间的变化曲线。

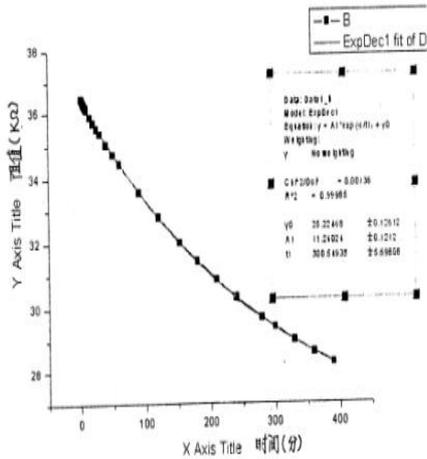


图 3 热电势与热敏电阻随时间变化曲线

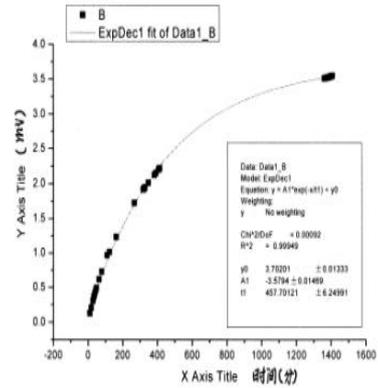


图 5 1408 分量热计温升曲线和外推结果

5.3 外推平衡温度和零点温升速度

1) 外推平衡温度

由于量热计的温升遵从指数规律，我们可以根据测量的部分时间的温升数据，外推到 $t \rightarrow \infty$ 时温度达到平衡时的数据。不过这要求距起始时间需有一定长的时间和一定数量的数据。否则，外推平衡温度和实际平衡温度就会有较大的差别。下面为 4.630W 输入电功率，3 个不同测量时间量热计温升曲线和外推结果如图 4、5、6。

- a) 413 分测量结果的外推值为 2.926mV。
- b) 1408 分测量结果的外推值为 3.702mV。
- c) 2868 分测量结果的外推值为 3.722mV。

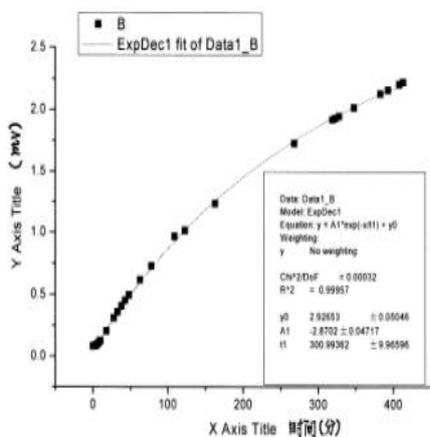


图 4 413 分量热计温升曲线和外推结果

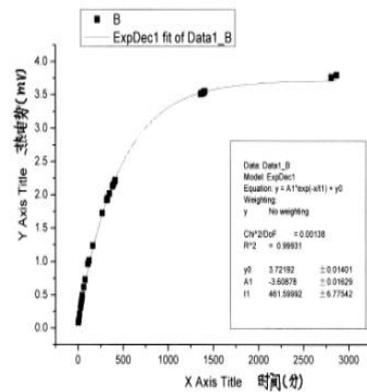


图 6 2868 分量热计温升曲线和外推结果

从以上结果可以看出 413 分的结果和 1408，2868 分的结果相差较大。这是因为前者数据点较少而外推较长的关系所致，如果采取自动获取数据，大大增加数据量，则三者的差别可大大减少。

2) 零点温升速度

输入量热计不同的热功率，可有不同的温升曲线，而不同的温升曲线有不同的初始斜率（即温升速度），因此，不同的输入热功率，就会有初始斜率（不同温升速度），即 $(dE/dt)_{t=0}$ 和 $(dR/dt)_{t=0}$ 。做不同功率和其初始斜率或热平衡时的电势、电阻值的关系式或关系曲线，即完成了对 γ 量热计的刻度。

设量热计加功率 t 时后测得的电势为 ε_t ，热敏电阻值为 R_t ，外推平衡值分别为 ε_∞ ， R_∞ ；系统的起始值为 ε_0 ， R_0 ，

$$\Delta \varepsilon = \varepsilon_1 - \varepsilon_0 \quad \Delta \varepsilon_\infty = \varepsilon_\infty - \varepsilon_0 \quad (20)$$

$$\Delta R = R_1 - R_0 \quad \Delta R_\infty = R_\infty - R_0 \quad (21)$$

经理论推导有：

$$V_\varepsilon = (d\varepsilon/dt)_0 = \frac{\Delta \varepsilon_\infty}{t} \ln \frac{\Delta \varepsilon_\infty}{\Delta \varepsilon_\infty - \Delta R} \quad (22)$$

$$V_R = (dR/dt)_0 = \frac{\Delta R_\infty}{t} \ln \frac{\Delta R_\infty}{\Delta R_\infty - \Delta R} \quad (23)$$

5.4 不同功率下外推平衡电势和温升速度

下表 6 给出了 2.298W、3.132W、3.919W、5.075W 四种电功率下，量热计的外推电势、零点温升速度、以及等温升时间内的电势增量。

表 6 四种电功率下量热计的外推电势、零点温升速度、以及等温升时间内的电势增量

电功率 (W)	2.298	3.132	3.919	5.075
电势增量 (mv/分)	0.871/387	1.203/405	1.475/400	1954/400
外推电势 (mv)	1.445	1.820	2.338	2.929
温升速度 (mv/h)	0.2525	0.3394	0.4270	0.5522

5.5 量热计的电功率刻度曲线

根据表 6 中的测量和计算数据，最后得到该量热计功率对零点温升速度，外推平衡电势的刻度曲线，只要得到未知待测源的以上两个值，即可刻度曲线得到待测源的功率和活度。

下面给出了 4 个输入功和其零点温升速度的关系式和关系曲线。

$$y=0.01362+0.1017x+0.0008791x^2 \quad (24)$$

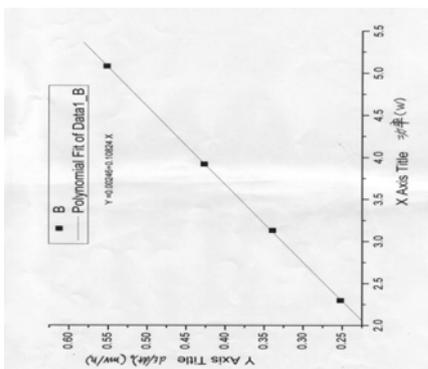


图 7 量热计功率对零点温升速度

6 量热计对放射源活度的测量

6.1 用 γ 量热计测量 Pu-238 α 源

α 、 β 量热计一般不能测量 γ 放射源的活度，但 γ 量热计可以测量 α 、 β 源的活度。由于在一般实验室受防护条件的限制，我们首先用 γ 量热计测量了一个近 5W 功率的 Pu-238 α 源。

1) 进口 Pu-238 源的参数

该源是从俄罗斯进口，化学形态为 PuO₂ 粉末，活度为 163.2Ci (6038.4GBq)，参考时间为 2007 年 12 月 18 日。

2) 用热电偶测量结果

a) 测量条件及外推电势

测量日期	总测量时间	室温变化	零点电势	终点电势	外推电势
08.12.29	6.70 小时	10.4—10.8℃	0.13 mV	2.01 mV	2.185 mV

b) 测量结果

根据以上测量得到的外推电势，进行了不同测量时间零点温升速度的计算，求出平均值及标准差，再以该平均值查对刻度曲线，即可得到待测 Pu-238 源的输出功率，具体结果见下表。

时间 (h)	3.2	3.7	4.2	5.2	6.2
温升 (mV/h)	0.5702	0.5669	0.5707	0.5655	0.5712
平均值 (mV/h)	0.5688±0.0023				
功率 (W)	5.243				
活度 (Ci)	159.6				

3) 用热敏电阻测量结果

a) 测量条件

测量日期	总测量时间	室温变化	零时阻值	终点阻值	外推阻值
09.1.5	7 小时	10.8— 11.7℃	36.46 K Ω	27.95 K Ω	25.22 K Ω

b) Pu-238 温升速度测量数据

计算时间 (h)	2.7	3.2	3.7	4.2	5.0	6.7
温升速度 (K Ω /h)	2.141	2.132	2.127	2.126	2.139	2.153
平均值 (K Ω /h)	2.136±0.5%					

c) 电功率对量热计的刻度

将量热计输入与 Pu-238 功率接近的二个电功率, 测得其相应的温升速度, 然后与 Pu-238 源的功率和活度。

输入功率	5.14W				5.40W	
测量时间	6.7h				6.7h	
室温变化	10.6-11.3℃				10.8-11.7℃	
计算时间 (h)	2.83	3.83	5.33	6.67	3.00	4.00
温升速度 (KΩ/h)	2.090	2.083	2.080	2.090	2.227	2.230
平均值 (KΩ/h)	2.086				2.236	

d) 用热敏电阻测量 Pu-238 源活度的结果

根据 Pu-238 源, 电功率在量热计中测量的结果, 计算出 Pu-238 源的活度如下:

d1) 根据 5.14W 电功率刻度结果有

$$A_1 = \frac{2.136}{2.086} \times 5.14 = 1.024 \times 5.14 = 5.263W$$

$$= (5.263/32.85) \times 10^3 = 160.2Ci$$

d2) 根据 5.40W 电功率刻度结果有

$$A_2 = \frac{2.136}{2.236} \times 5.40 = 0.9552 \times 5.40 = 5.158W$$

$$= (5.158/32.85) \times 10^3 = 157.0Ci$$

d3) 平均值 $A_3 = \frac{A_1 + A_2}{2} = 158.6Ci$

4) 用 γ 量热计测量 Pu-238 源最后结果

- 量热计用热电偶测得的结果为 159.6Ci
- 量热计用热敏电阻测得的结果为 158.6Ci
- 量热计用两种测温元件测得结果的平均值为

$$A = \frac{159.6 + 158.6}{2} = 159.1Ci$$

5) 结论

a. 根据俄罗斯厂家 2007 年 12 月 18 日给出的结果 163.2Ci, 经 Pu-238 源 87.7 年半衰期校到 2008 年 12 月 29 日的值为 161.8Ci

b. γ 量热计测量值 159.1Ci, 与俄罗斯厂家给

出值 161.8Ci 两者相差。

$$\frac{161.8 - 159.1}{160.5} = 0.017 = 1.7\%$$

6.2 用 γ 量热计测量 Co-60 γ 源

将 γ 量热计输入 3.990W、4.63W 电功率, 测量其各时刻的热电势和热敏电阻阻值, 直到温度接近平衡, 或外推其热平衡时的热电势或热敏电阻值, 以及其零点温升速度。用同样方式将待测的二个钴源 A 和 B, 分别放入量热计中, 按以上步骤进行测量, 结果如下:

1) 升温平衡法测量结果

测量对象	4.626W 电功率	钴源 A	钴源 B
本底电势 (mv)	0.043		
平衡电势 (mv)	4.431	3.079	4.247
净增电势 (mv)	4.388	3.036	4.204
相对比值	1.000	0.6919	0.9581
功率 (w)	4.630	3.203	4.436
活度 (Ci)		208.2	288.3

2) 零点温升速度法 (热电偶) 测量结果

测量对象	3.990W	4.626W	钴源 A	钴源 B
温升速度 (mv/m)	0.07303	0.08542	0.06395	0.08639
相对比值	1.000	1.157	0.8757	1.183
功率 (W)	3.990	4.616	3.494	4.720
活度 (Ci)			227.1	306.8

3) 零点温升速试法 (热敏电阻) 测量结果

测量对象	3.990W	4.626W	钴源 A	钴源 B
温升速度 (KΩ/m)	0.02008		0.01694	0.02434
相对比值	1.000		0.8436	1.212
功率 (W)	3.990		3.366	4.836
活度 (Ci)			218.8	314.3

4) γ 量热计不同测量方法测量钴源活度结果

测量方法 \ 测量对象	钴源 A	钴源 B
升温平衡法	208.2	288.3
零点温升速度法 (E)	227.1	306.8
零点温升速度法 (R)	218.8	314.3
平均值	218.0	303.1

5) 小结

以上结果表明, 速度法结果要高于平衡法,

具体原因有待进一步研究。

将以上结果平均值经 γ 射线逃逸校正+1.20%和加热器导线的功率损耗校正-0.5%，最后得到钴源活度为：钴源 A 为 219.5Ci，钴源 B 为 303.1Ci。

7 测量不确定度分析

7.1 A 类不确定度

根据下表测量结果得出，A 类不确定

测量日期	2009.01.15	2009.03.09	2009.03.17
加热功率 (W)	5.120	5.075	5.082
闻声速度 (mV/h)	0.5504	0.5522	0.5525
温升功率 (Mv/h·W)	0.1075	0.1088	0.1087
平均值	0.1083		
标准差	7.234×10^{-4}		
相对标准差	0.67%		
A 类不确定度	0.7%		

7.2 B 类不确定度 (估算)

- 1) ^{60}Co 衰变纲图导致功率因子不确定度：0.2%；
- 2) γ 射线逃逸校正因子不确定度：0.5%；
- 3) 电功率刻度因子不确定度：0.5%。

7.3 合成不确定度：1.2%

7.4 扩展 (总合成) 不确定度：2.4% (k=2)

8 结论

1) γ 量热计测量一个结果，在没有数据自动获取和处理系统的情况下，需要几十个小时。

由于时间紧迫，对该量热计的调试和刻度还不是很充分，各种性能实验几乎没有做过重复性实验，因此，目前对于该 γ 量热计的 A 类不确定度还很难估计。仅从同一装置不同方法得出的结果，相差达 $\pm 5\%$ 。不过，经过实验改进后，这一差别是可以缩小的；

2) 几种测量方法都表明：在相同功率下， γ 源的零点温升速度要较电刻的大，这可能是由于 γ 源和电加热的热传导的机理不同所致，需要做进一步的实验加以研究证实；

3) 以上实验和测量结果大都在室外温度变化不大的情况下进行的。对室外温度变化较大时，室外温度与“热室”温度变化的规律，以及对“本底”电势和测量结果的影响，还需要做进一步的实验研究。

致谢：

该工作得到了公司和中心领导的大力支持，以及其他班组同志的帮忙，同时也得到姚历农老师的指点，在此向他们表示衷心的感谢！

参考文献：

- [1] I. T. Myers. Rev. Sei. Inetr 29, 758, 1958;
- [2] I. T. Myers. Rev Sei Inetr 32, 1013, 1961;
- [3] W. B. Mann. Nucl. Inetr Meth 112, 273, 1973。

Design and study of high power ^{60}Co - γ calorimeter

ZHANG Wen-zai, QI Jie, YAO Li-nong, WANG Xiao-jing, GONG Ling-ling, DUAN Li-min
(China Institute of Atomic Energy, Bei Jing 102413, China)

Abstract: This paper introduces an isothermal gamma calorimeter which is used for absolute measurement of activity of gamma radioactive source. The shape of its thermal output device is a lead cylinder whose diameter and height are 200mm and 354mm, respectively. Its measuring components use thermal resistance and thermopair. Under the condition of no constant temperature, a about 300Ci Co-60 gamma source and a about 160Ci Pu-238 alpha source are measured by using this device. The thermal balance time is about 40 hours and the uncertainty of measured data is 5%.

Key words: thermal resistance; thermopair; calorimeter

CoMo170 污染监测仪放射性表面活度检测方法

刘树亮, 王百荣, 鲁建英, 单 坤, 史丽生

(防化学院, 北京 102205)

摘 要: 放射性污染对人体的伤害实质是放射性污染物中发出射线对人体的危害, 这些射线主要有 α 射线、 β 射线和 γ 射线。对 α 射线、 β 射线和 γ 射线表面活度的检测是放射性污染测量的基础, 是首要测量的辐射量。本文简要介绍了放射性污染的来源和监测目的, 研究了利用 CoMo170 污染监测仪检测放射性表面污染的方法, 分析了仪器使用过程中的质量控制。

关键词: CoMo170; 表面污染; 检测

文章分类: 核监测技术及其应用的研究成果

去年日本发生了历史上最严重的地震引发核电站事故, 放射性核素在全球范围内扩散, 对人类生产、生活环境造成严重的放射性污染。对环境放射性污染测量包括活度测量和能量测量, 活度测量即确定物质中所含放射性核素的量, 能量测量是为了确定物质中放射性核素种类。放射性表面活度测量是放射性污染测量的基础, 不仅在核科学、辐射防护等领域常常遇到, 而且在工业、农业、生物、医学、环境科学等领域的研究和应用中都会遇到。

CoMo170 污染监测仪是一种多功能便携式放射性污染监测仪器, 广泛应用于测量室内、室外各种场合多种核素的放射性污染检测。CoMo170 污染监测仪使用面广但操作复杂, 本文是在作者多年使用基础上总结得来, 旨在为使用者提供准确的技术指导。

1 放射性表面污染来源

1.1 核试验沉降

二十世纪以来, 世界主要核大国都在大气层进行了核试验。核爆炸形成了高温高压的火球, 携带着弹壳、碎片和地面物品上升到空中, 形成放射性

烟云。核裂变产物、核装料和感生放射性物质凝聚成微粒或附着在其它的尘粒上, 最终又沉降到地面, 形成放射性污染。核武器试验是地球表面放射性污染的主要来源。

1.2 核燃料循环和核能生产产生的“三废”

随着人类对核燃料的需求增加, 核燃料的生产、使用与再利用过程中产生越来越多的“三废”排放, 对周围环境产生不同程度的污染。

1.3 核设施和核活动事故源项释放

虽然进行了周密的认证, 但在利用核能的过程中, 曾出现了切尔诺贝利核电站事故和日本福岛核事故那样严重的全球范围内污染的七级事故, 曾出现过巴西戈亚尼亚市 ^{137}Cs 辐射源泄漏并造成整个城市污染的辐射源丢失事故。事故造成大量放射性核素源项释放, 形成严重的环境放射性污染。

1.4 放射性同位素生产与应用污染

辐射源在核医学广泛应用, 核医学中越来越多使用 ^{99}Tcm 、 ^{131}I 等开放性放射源, 极易放射性污染。据统计, 医用辐射源已成为主要的环境人工污染源

[1]。在居民消费用品中,包括含有天然或人工放射性核素的产品,如放射性发光表盘、夜光表,虽然放射性污染很低,但其会对接触人群产生长期的照射。

1.5 其他放射性污染源

可归纳为两类:一类是人为故意造成的放射性布洒和扩散,如战时攻击核电站、核反应堆、和平时期恐怖分子利用获得的辐射源袭击公众等,造成严重放射性释放。另一类是核能源太空飞行器意外返回地球,造成放射性物质散落。

2 放射性表面污染监测目的

2.1 快速筛选样品

对大量待测样品进行分类或筛选,初步判断有无放射性污染,如果有,判断是否接近或超过控制量,以筛选出需进一步仔细测量的样品。

2.2 监测环境本底

在较大地域范围内,比较同类样品、同类方法获得的放射性表面污染测量数据,以判断本底是否升高或样品是否被污染的可能。

2.3 概率测量比活度和放射性浓度

在核战争或核事故应急等情况下,已知样品中核素的大致组成时,利用放射性表面污染测定结果,参照核素组成资料,推算出样品中各单个核素活度的水平。

2.4 测量 α/β 活度比

测量样品中的 α/β 活度比,作为环境放射性监测工作事件识别的补充判据。

3 表面污染监测仪

CoMo170 污染监测仪是德国 SEA 公司生产的多用途表面染污快速检测设备,是大表面多核素快

速放射性污染检测仪器的典型代表,在民用行业应用十分广泛。

3.1 用途

可直接测量各种物体表面 α 、 β γ 或者 $\alpha+\beta$ γ 的放射性污染活度,也可外接探头测量辐射剂量率。

3.2 性能

探测器类型选用覆盖有 ZnS 外层的大体积薄塑料层闪烁探测器,探测器尺寸 $170\times 100\times 1\text{mm}^3$ 。塑料闪烁体外覆盖两面涂铝金属箔,金属箔厚 $3\mu\text{m}$ 。探测窗为覆盖栅格结构,采用透明度为 87.5% 的 0.5mm 坚固的蜂巢栅格,加上边框后总透明度为 83%。

测量数据显示使用 cpm 或者对于核素使用 Bq 或 Bq/cm^2 ,接外部探测器使用 $(\text{n}/\text{u}/\text{m})\text{Sv}/\text{h}$ 作为单位。测量时间和报警值设置连续可调。能存储 750 个数据,并有打印功能。可通过 RS232 端口连接到计算机,将测量数据传输到计算机。使用两节 AA 电池供电,电流消耗 50mA,可快速充电。不接外挂探头,仪器质量 700g。使用温度 $-10^\circ\text{C}\sim 40^\circ\text{C}$,储存温度 $-20^\circ\text{C}\sim 50^\circ\text{C}$ 。

3.3 仪器操作流程

(1) 开机前的准备。将 2 节 5 号 AA 电池按正极朝里方式的串联装入,拧紧电池盖。取下探测器防护罩。

(2) 开机自检。按下仪器电源“开关”,仪器开始自检,自检通过后显示公司名称、仪器名称、电池电压、序号、版本,而后自动进入以前设置的测量状态。

(3) 选择核素。根据待测核素种类,选择测量核素。对未知放射性核素污染,仪器选用“污染”选项进行测量。

(4) 选择单位。在快捷菜单下选择测量结果显示单位。

(5) 本底测量。等待仪器预热 10 分钟。再次按下电源“开关”键进入快捷菜单，用向下光标键选择本底测量，按“确认”键，仪器开始检测，并显示本底测量结果。系统默认时间 30s，测量结束后按“确认”键存储测量结果。

(6) 开始测量。按下“确认”键返回仪器测量界面。保持仪器探测器正对着被测物体，保持探测器灵敏区距被检测物体表面 0.5cm(α 监测) 和 1cm(β 监测)情况下,慢慢地移动(移动速度 15cm/s) 探测器。当找到严重污染点时，仪器停留在污染源上方并保持稳定，等待读数稳定后，读出仪器读数。

(7) 测量结果保存。按下“确认”键进入测量结果保存界面，用上下光标键选择存储文件名，按下“确认”保存。

(8) 关机。按“开关”键返回主菜单界面，再次按下“开关”键关机仪器。重新罩上探测窗防护罩。取出 2 节 5 号电池。

4. 放射性表面污染检测

4.1 检测方法

放射性表面污染的检测有直接测量法和间接测量法。

4.1.1 直接测量法

直接测量法是指直接利用 CoMo170 污染监测仪测量污染物表面污染值，即通过仪器直接读数反映污染严重程度，仪器读数单位为 Bq/cm²。通常在污染较重、污染面较规整或较固定的污染，或者进行大面积巡测时，采用直接测量的方法。为提高巡测效率，在巡测的过程中，初始移动速度可以稍快(30~50cm/s)，距被检测物体表面距离稍大(不超过 2cm)，当读数有可能超过控制水平时，应减缓

速度，放低高度，做仔细测量。

4.1.2 间接测量法

间接测量法也称比较测量法，适用于受染程度较轻时的测量，对于仪器、设备表面受污或其他不便于直接测量的表面污染，可采用此方法。通常用湿棉球或面积一定的滤纸对污染表面擦拭取样，而后测量擦拭样品。其检测分两步，第一步用 CoMo170 表面污染监测仪测标准物质的读数率 cpm，计算出仪器的探测效率响应 ε_i ；

$$\varepsilon_i = \frac{n_i}{A \cdot K_n} \quad (1)$$

式中， ε_i 为仪器的探测效率； n_i 为标准物质计数率, cpm；A 为标准源的活度, Bq⁻¹； K_n 为平均一次衰变放出的粒子数, s⁻¹/Bq, 约等于 1。

第二步测量污染物计数率，并计算受染物体表面污染值 A_s 。

$$A_s = \frac{n_c}{\varepsilon_i \cdot \varepsilon_s \cdot F_s \cdot S} \quad (2)$$

式中， A_s 为单位面积 β 或 α 放射性表面活度，Bq/cm²； n_c 为测量样品计数率，cpm； ε_i 为装置的仪器效率； ε_s 为源效率，Bq/s； F_s 为擦拭滤纸或棉球的去污因数；S 为擦拭面积，cm²。

对 ε_s 在缺少实验测定值时,可采用下述值：

$$\varepsilon_s = 0.5[\beta\text{-发射体}(E_{\beta\max} \geq 0.4\text{Mev})]$$

$\varepsilon_s = 0.25[\beta\text{-发射体}(0.15\text{Mev} < E_{\beta\max} < 0.4\text{Mev})$
和 $\alpha\text{-发射体}]$

4.2 检测程序

(1) 进行测量前，在待测污染区域外测量本底计数率，测量时间不低于 30s；

(2) 对已知核素污染，在仪器核素库内选取该放射性核素，直接测量该核素的放射性表面污染；对不明放射性核素污染，仪器选用“污染”选项进行测量。

(3) 放射性污染面积较大时, 需确定放射性污染区域边界和严重污染区位置。根据国标控制量的规定, 表面放射性污染边界值按下表 1 来设置。

表 1 表面放射性物质污染控制水平 Bq/cm²

表面类型		α 放射性物质		β 放射性物质
		极毒组	其他	
工作台、设备、 墙壁、地面	控制区、监督区	4	40	40
	非限制区	0.4	4	4
工作服、手套、 工作鞋	控制区、监督区	0.4	0.4	4
	非限制区	0.04	0.04	0.4
手、皮肤、内 衣、工作袜		0.04	0.04	0.4

(4) 当测量值接近或超过报警阈值时, 操作时应更小心, 以防探测窗接触受染物。

(5) 测量期间的几何条件应该与仪器校准期间所采用的几何条件尽可能保持一致。为保持探测器和被检测表面在探测时的固定距离, 可采用与规定距离相同厚度的垫圈。

(6) 间接测量法先测出样品总活度, 再利用(2)式计算出待测表面污染。

5. 质量控制

5.1 仪器刻度

5.1.1 标准源选择

仪器探测效率按照 GB14056-93 规定的方法, 采用已知单位面积表面活度的标准放射源或已知表面发射率的参考源进行刻度。标准放射源的面积应足以覆盖仪器探测器的窗口, 标准放射源的表面活度的分布应是均匀的。

5.1.2 刻度时机

仪器效率每年至少刻度一次。每次调试或修理后也应重新刻度。

5.2 测量过程质量控制

(1) 进行测量前必须确定测量位置的本底计数率, 测量时间以读数不再变化为准。

(2) 仪器必须经预热后是稳定的, 可用监测源经常进行核准, 当检测偏差大于约定值的 25% 时, 应对仪器进行重新刻度[2]。

(3) 测量严格按照仪器操作规程和测量程序进行。在开放性工作场所测量时, 测量人员动作要轻, 防止灰尘扬起, 造成仪器污染。在条件允许的情况下, 可在仪器上部盖上一层透明塑料布。

(4) 测量过程必须按操作规程保持仪器高度、速度。仪器探头严禁接触待测量物表面, 以免造成探头受染。

(5) 对感兴趣测量部位和严重污染部位, 仪器测量时读数更新次数应大于 3 次, 待仪器读数稳定后, 方可存储测量结果。

5.3 检查保养

(1) 仪器管理员每月定期对仪器设备进行开机检查和保养。仪器超过 1 周不用, 需取出电池。电池低于 2.1V 时, 应及时充电或更换电池。

(2) 在仪器本底读数突然增大时, 应立即关机, 检查探测窗金属箔是否漏光。漏光仪器立即送修, 严禁再开机。

参考文献:

- [1] 张凤翔、任伟、韩淑萍, 表面放射性污染检查能力, 计量工作, 2008 年第 2 期;
- [2] 赵清, 徐春长、杨元第, 放射性污染及表面沾污测量, 现代测量与实验室管理, 2007 年第 6 期。

Method of Surface Radioactive Contamination using CoMo170 Contamination monitor

LIU Shu-liang, WANG Bai-rong, LU Jian-ying, Shan Kun, SHI li-sheng

(Institute of Chemical defends, Beijing 102205, China)

Abstract: Harm of radioactive contamination on human body comes from the radiation released from the radioactive material. The radiation primarily includes α -rays, β -rays and γ -rays. Detecting surface activity of α -rays, β -rays and γ -rays are bases of detecting radioactive contamination. In the paper, the sources of radioactive contamination were briefly described and purpose of monitoring the radioactive contamination is given. The method of detecting radioactive surface contamination using the CoMo170 contamination monitor is introduced and the quality control in the process of using the apparatus is analyzed.

Key words: CoMo170; contamination monitor; radioactive contamination; measure

NaI 探测效率的 MCNP 模拟和 东北地区土壤及建筑材料中天然放射性核素含量的抽样测量

彭帮保, 颜强, 李桃生, 李智

(哈尔滨工程大学 核科学与技术学院, 哈尔滨 150001)

摘要: 对于 NaI(Tl)探测器, 利用参考土壤源样品和 MCNP 模拟软件分别以实验测量和模拟计算两种方法确定土壤中 ^{40}K 、 ^{226}Ra 、 ^{232}Th 、 ^{238}U 四种核素所发出的最大 γ 分支比能峰的全能峰探测效率, 结果显示两者的相对偏差均不超过 5%, 说明两种方法得到的探测效率一致性较好。在此基础上利用 MCNP 研究了不同土壤源密度下探测效率的变化, 以确定密度变化给探测效率的测量带来的最大误差。本文还对东北地区常见土壤和建筑材料抽样测量, 与文献对比发现所测天然放射性核素含量在合理范围内, 有一定参考价值。

关键词: NaI 探测器; MCNP; 探测效率; 土壤; 天然放射性核素

文章分类: 核监测技术及其应用的研究成果

NaI(Tl)探测器具有工艺成熟、价格低廉、性能优越等优点, 可以测量 γ 射线和 X 射线的能量和强度, 因此在基础科学研究和核辐射仪器中得到了广泛的应用^[1]。在射线强度测量中, 由于探测效率与随 γ 能量、源对于探测器的几何立体角、源与探测器的距离、探测器的尺寸等条件的变化而变化^[2], 所以探测效率的合理性是一个关键性指标。本文采用了参考土壤源样品测量和 MCNP 蒙特卡罗理论计算的方法分别得到了实验室所用探测器的全能峰探测效率, 并将它们进行相互比较和分析。

本文采集了 4 种常见土壤与建筑样品, 每一种至少制作了两份样品进行测量, 测定了它们中的天然放射性核素 ^{40}K 、 ^{226}Ra 、 ^{232}Th 、 ^{238}U 的含量, 并和参考文献进行了对比。

1 探测效率的确定

1.1 探测效率的定义

探测效率有很多种, 本文所涉及的是一个特

定的探测效率, 具体指: 在铅屏蔽室内, NaI(Tl)晶体的尺寸为 $\phi 6.8 \times 6\text{cm}$, 土壤源样品的尺寸为 $\phi 7.8 \times 4\text{cm}$ 且土壤源样品离探测器距离为 0.5cm 处时 NaI(Tl)探测器的全能峰探测效率。其计算公式为:

$$\varepsilon = \frac{S}{A \cdot t \cdot f} \quad (1)$$

其中: ε 为全能峰探测效率, S 为全能峰下净面积, A 为放射源活度(单位:Bq), t 为测量时间(单位:s), f 为分支比。

1.2 探测效率的实验测定

本实验所使用的仪器为北京核仪器厂生产的 BH1936 低本底多道 γ 谱仪。首先利用 ^{137}Cs 标准放射源的 0.662MeV 能峰进行能量刻度, 得出能量与道址之间的对应关系。刻度之后在实验测量 ^{40}K 、 ^{226}Ra 、 ^{232}Th 、 ^{238}U 参考土壤源样品的 γ 射线能谱时, 可以很方便地从测得的全能峰对应的能量得出该全能峰所对应的核素种类。在有多个峰

的源的探测效率计算中，选用衰变纲图中 γ 分支比较大的能峰进行数据计算，表 1 给出了 ^{40}K 、 ^{226}Ra 、 ^{232}Th 、 ^{238}U 参考土壤源样品的相关参数。将实验测得的全能峰下净面积、测量时间以及已知的参考土壤源样品的活度、分支比等数据代入公式(1)中，便可以得到 NaI(Tl)探测器对 ^{40}K 、 ^{226}Ra 、 ^{232}Th 、 ^{238}U 四种核素的探测效率，计算结果见表 2。

1.3 MCNP 建立模型、模拟能谱及探测效率

MCNP 是一种基于模拟光子和电子耦合运输问题的计算方法，它可用于计算中子、光子、中子-光子耦合以及光子-电子耦合的运输问题[3]。根据 BH1936 所用的探测器的结构建立 NaI(Tl)探测器的 MCNP 模型。图 1 是本文建立的 NaI(Tl)探测器的 MCNP 模型，各部分形状与尺寸见表 3。

经过 MCNP 程序模拟，得到 ^{40}K 、 ^{226}Ra 、 ^{232}Th 、 ^{238}U 四种核素所选择全能峰的探测效率，计算结果见表 2。通过与实验测量的该四种核素的探测效率比较后发现，实验测出的探测效率与 MCNP 模拟得出的数据的相对偏差都不超过 5%，说明两种方法得到的探测效率一致性较好，由 MCNP 程序模拟 NaI 探测效率是可行的。

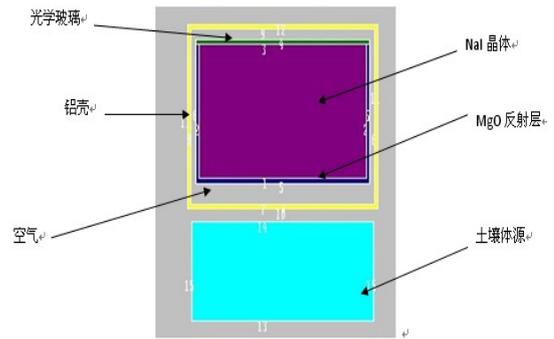


图 1 NaI(Tl)探测器的 MCNP 模型

表 1 参考土壤源样品的说明

源种类	^{40}K	^{226}Ra	^{232}Th	^{238}U
γ 射线能量	1460KeV	295KeV	239KeV	143KeV
γ 射线来源	自身衰变	子体 ^{214}Pb 发出	子体 ^{212}Pb 发出	自身衰变
分支比	10.8%	18.7%	44.6%	10.5%

表 2 ^{40}K 、 ^{226}Ra 、 ^{232}Th 、 ^{238}U 四种核素的探测效率

	$^{40}\text{K}(1460\text{KeV})$	$^{226}\text{Ra}(295\text{KeV})$	$^{232}\text{Th}(239\text{KeV})$	$^{238}\text{U}(143\text{KeV})$
实验数据	1.32%	4.08%	6.66%	1.21%
模拟数据	1.31%	4.17%	6.73%	1.25%
相对偏差	0.90%	1.96%	1.10%	3.05%

表 3 模型中各部分形状与尺寸

区域	材料	形状/尺寸
碘化钠晶体	NaI	圆柱形，半径 3.4cm 高 6cm
氧化镁反射层	MgO	薄膜，厚 0.1cm
光学玻璃	SiO_2	圆盘，厚 0.1cm
铝壳	Al	铝壳，厚 0.2cm
土壤体源	土壤	圆柱形，半径 3.9cm 高 4cm

1.4 探测效率影响因素的 MCNP 模拟计算

土壤源密度的改变对于探测效率有一定的影响[4]，实际测量中必须加以考虑。以 ^{232}Th 参考土

壤源样品为例，在源对于探测器的几何立体角，源与探测器的距离，探测器的尺寸等几何条件不变的情况下，在 MCNP 程序中改变土壤的密度，

可以得到探测效率随土壤密度变化的关系, 见表 4。分析表 4 中数据可知, 土壤密度在 1.4 g/cm^3 至 2.2 g/cm^3 范围内变化时, 放出 γ 射线能量最高的核素 ^{40}K 探测效率的相对偏差较低(4.5%), γ 射

线能量低的核素 ^{238}U 探测效率的相对偏差较大 (16.7%)。可见探测效率受到土壤密度的影响随着 γ 射线能量的增加而降低, 这是因为射线对于同一种物质的穿透能力随着能量的增加而增强。

表 4 探测效率与土壤密度关系

土壤密度(g/cm^3)	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2.0	2.1	2.2
$^{40}\text{K}(1460\text{KeV})$	1.33%	1.32%	1.31%	1.31%	1.3%	1.29%	1.29%	1.28%	1.27%
$^{226}\text{Ra}(295\text{KeV})$	4.50%	4.46%	4.43%	4.41%	4.38%	4.36%	4.33%	4.29%	4.25%
$^{232}\text{Th}(239 \text{KeV})$	6.73%	6.70%	6.66%	6.61%	6.54%	6.49%	6.43%	6.40%	6.37%
$^{238}\text{U}(143\text{KeV})$	1.31%	1.27%	1.25%	1.23%	1.20%	1.18%	1.15%	1.12%	1.09%

2 东北地区几种土壤样品中天然放射性核素含量的测量

在确定探测效率以后, 对东北地区部分典型土壤和建筑材料进行了测量。实际采集一定的土壤样品, 经过简单处理之后进行测量, 对测量得到的 γ 能谱进行分析, 通过各个全能峰对应的道址确定土壤中放射性核素的种类。并由以下公式

$$A = \frac{S}{\varepsilon \cdot t \cdot f} \quad (2)$$

可以计算出 ^{40}K 、 ^{226}Ra 、 ^{232}Th 、 ^{238}U 的放射性活

度。本文中, 采集了 4 种常见土壤与建筑材料样品, 每一种至少制作了两份样品进行测量, 它们分别为: 风沙土, 黑土, 水泥和砂。其测量结果见表 5。由表 5 可知, 在 4 种样品中, ^{40}K 含量以风沙土最高 (725.1Bq/kg); ^{226}Ra 含量以水泥最高 (44.1Bq/kg); ^{232}Th 含量以黑土最高(47.5Bq/kg); ^{238}U 含量以水泥最高 (49.5Bq/kg); 四种核素的含量均以砂最低(含量分别为 75.8Bq/kg , 17.6Bq/kg , 6.6Bq/kg , 19.8Bq/kg)。

表 5 样品放射性核素比活度总览

	^{40}K (Bq/kg)		^{226}Ra (Bq/kg)		^{232}Th (Bq/kg)		^{238}U (Bq/kg)	
	实验值	平均值	实验值	平均值	实验值	平均值	实验值	平均值
风沙土样品 1	745.2	725.1 ± 29.0	26.1	29.2 ± 1.7	38.3	44.0 ± 2.5	29.3	32.9 ± 6.6
风沙土样品 2	740.1		27.6		40.6		31.0	
风沙土样品 3	767.7		27.2		46.1		30.6	
风沙土样品 4	765.2		27.4		44.8		30.8	
风沙土样品 5	670.2		32.8		52.6		37.0	
风沙土样品 6	662.1		34.0		41.4		38.3	
黑土样品 1	570.4	570.8	36.6	35.4	46.9	47.5	41.1	39.7
黑土样品 2	571.2	± 29.5	34.1	± 1.9	48.1	± 3.0	38.3	± 1.8
水泥样品 1	183.6	186.0	43.3	44.1	17.6	18.2	48.6	49.5
水泥样品 2	188.3	± 9.2	44.8	± 2.5	18.7	± 1.4	50.3	± 2.1
砂样品 1	77.9	75.8	18.2	17.6	6.6	6.6	20.5	19.8
砂样品 2	73.6	± 4.1	16.9	± 1.1	6.5	± 0.7	19.0	± 1.6

表 6 中将上面结果与相关文献中的数据进行比较^[5-7]，从中可以简单分析核素含量随时间的变化关系。虽然本文实验样品选取较少，但是数据显示，土壤中放射性核素 ^{40}K 和 ^{232}Th 的含量变

化很小，而 ^{226}Ra 和 ^{238}U 有不同程度的增加。这种增长有多种影响因素，与气候变化，环境污染，植被生长情况等都有很大的关系。而建筑材料中，水泥和大理石沙土的放射性活度基本不变。

表 6 2012 年（实验平均值）与相关文献核素比活度比较

	^{40}K (Bq/kg)		^{226}Ra (Bq/kg)		^{232}Th (Bq/kg)		^{238}U (Bq/kg)	
	实验	文献	实验	文献	实验	文献	实验	文献
黑土	570.8	562.4	35.4	19.6	47.5	42.5	39.7	23.6
风沙土	725.1	722.8	29.2	17.0	44.0	34.3	32.9	23.6
水泥	186.0	188.7	44.1	43.6	18.2	26.5	49.5	49.3
砂	75.8	85.1	17.6	15.1	6.6	7.5	19.8	18.1

3 结论

本文通过实验测量和 MCNP 程序模拟，得出 NaI(Tl)探测器对 ^{40}K ， ^{226}Ra ， ^{232}Th ， ^{238}U 四种核素的探测效率，得到模拟值与实验计算值的相对偏差均不超过 5%，说明两种方法得到的探测效率一致性较好，由此得出 MCNP 程序模拟 NaI 探测效率是可行的。

本文采集了 4 种常见土壤与建筑样品，每一种至少制作了两份样品进行测量，测定了它们中的天然放射性核素 ^{40}K ， ^{226}Ra ， ^{232}Th ， ^{238}U 的含量，和参考文献进行对比发现：东北地区建材的天然放射性核素含量基本不变，但相对于全国绝大部分地区，东北地区建材的天然放射性核素含量处于较低的水平。建筑材料的 γ 放射性比天然土壤的放射性低很多，这是由于天然土壤中植被死亡腐烂分解易于吸收空气中放射性污染， ^{40}K 在移动过程中容易流失等原因造成的。

本实验所测样品种类较少，计划在进一步的工作中选取更多的土壤样品和建材样品进行研究，以得到更能代表东北地区天然放射性核素含

量的结果。

参考文献：

- [1] 李帮军.碘化钠 NaI(Tl)单晶闪烁体探测器的应用[J]光谱实验室, 2010, 27 (2): 777-780.
- [2] 周银行, 马玉刚.MCNP 能峰展宽的 NaI 探测效率研究[J].核电子学与探测技术, 2007, 27(6): 1061-1063.
- [3] 许淑艳.蒙特卡罗方法在实验核物理中的应用[M].北京:原子能出版社,1996: 267-268.
- [4] 唐碧华, 白立新, 王辉东. HPGe γ 谱仪体源探测效率与射线能量和体源密度的关系[J].核电子学与探测技术, 2006, 26(5): 683-686.
- [5] 吴成祥, 董善武, 赵德峰.黑龙江省土壤中天然放射性核素含量调查研究[J].辐射防护, 1993, 13(4): 295-298.
- [6] 秦宗会, 唐博, 谢兵.水泥中放射性物质与比活度[J].广州化工, 2011, 39(18): 8-12
- [7] 江有玲, 孟文斌.我国建材天然放射性核素含量[J].工业卫生与职业病, 1998, 247-250

MCNP Simulation of Detection Efficiency of NaI and Measurement of Natural Radionuclide Contents in soil in the northeast China

B. B. Peng, K. Yan, T. S. Li and Z. Li

(College of nuclear science and technology, Harbin Engineering University, Harbin 150001)

Abstract: Using the standard earth sample, the full-energy peak detection efficiency of NaI(Tl) detector for γ rays with the biggest branching ratio emitted from the isotopes of ^{40}K , ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{238}U in earth was measured. And the same efficiency also simulated with the code of MCNP. The results obtained by both methods matched well and the difference between the two results was no more than 5 percent. To calculate the maximum error induced by the variation of detection efficiency from the difference of the density of earth samples, the detection efficiency under the different density of earth samples was investigated with MCNP code. Based on the work mentioned above, some typical samples of earth and architectural materials were measured. Compared with data from literature, the results were reasonable and had some reference value in this field.

Key words: NaI(Tl)detector; MCNP; detection efficient; Natural Radionuclide Contents in soil

$N(^{231}\text{Pa})/N(^{235}\text{U})$ 法高浓铀年龄测量研究

张宏俊, 任忠国, 熊忠华, 刘振汉, 莫钊洪, 何西尧, 赵德山
(中国工程物理研究院, 四川 绵阳 621900)

摘要:理论分析结果显示 $N(^{231}\text{Pa})/N(^{235}\text{U})$ 法测量 HEU 是可行的, 本方法通过测量 ^{235}U 发出的多条 γ 射线, 进行相对效率刻度曲线的拟合, 并将曲线延长至邻近的 ^{231}Pa 发出的 γ 射线能量点, 从而得到 $N(^{231}\text{Pa})/N(^{235}\text{U})$ 的值, 即可测出 HEU 的年龄。分别利用 ^{231}Pa 发出的 302.65 keV 与 330.06 keV γ 射线进行分析, 其结果与参考值的偏差分别为-11%和+86%。由于 ^{231}Pa 发出的 γ 射线能量偏低, 因此其较复杂的解谱方法和其它核素的干扰, 使得测量结果的偏差较大, 但是较简单的相对效率刻度值得进行更深入的研究。

关键词: 高浓铀; 年龄; $N(^{231}\text{Pa})/N(^{235}\text{U})$; 相对效率刻度

文章分类: 核监测技术及其应用的研究成果

1 引言

通过测量高浓铀的年龄可得到铀浓缩活动的相关信息, 判断是否有新的 HEU (高浓缩铀) 生产活动或被测 HEU 是否被替代。一般认为铀年龄是从最后一次浓缩或化学分离至测量时的时间间隔。核材料年龄测定的主要手段是借助于质谱仪的化学方法^[1]。但质谱法属于破坏性测量, 在许多不允许取样的情况下这种方法是不可行的。近年来, 国外提出了运用 HPGe γ 谱仪的非破坏性测量方法, 该方法是通过测量 $N(^{214}\text{Bi})/N(^{234}\text{U})$ 的值来推断 HEU 的年龄^[1-3]。国内也曾有人提出测量 $N(^{231}\text{Pa})/N(^{235}\text{U})$ 值的方法, 但是仅仅限于理论分析。根据国内外的相关文献, 测量的对象通常为 1 g 至十几 g 的 HEU 氧化铀粉末或 100 ml 的硝酸铀溶液^[1-6], 测量的方法均为 $N(^{214}\text{Bi})/N(^{234}\text{U})$ 比值法, 本实验室也采用过该方法进行了研究^[7]。1 g 铀样品在年龄大于 20 年时, 测量的不确定度 6.0%^[4]。但是, 未见大质量纯 HEU 样品的年龄测量方法及结果的相关文献。

本实验室近年来开展了相关的研究工作, 利用 HPGe γ 谱仪测量了大质量的 HEU 样品。采用首次

公开提出的 $N(^{231}\text{Pa})/N(^{235}\text{U})$ 法测量了年龄参考值为 30 年的 HEU 样品, 获得了较好的结果。

2 原理

2.1 理论分析

目前世界各国铀浓缩采用的几乎都是气体扩散法和离心法这两种技术。所以, 假设浓缩铀中的 Th、Pa 等核素都是在浓缩铀生产出来之后逐渐产生的, 这些核素在未到达平衡前其含量是随着时间增长的, 这是铀年龄测量的理论基础。实际上人们也未在新生产的高浓铀中测到 Th、Pa 等核素。此时, 若能测出子体核素与母体核素之比, 即可推算出浓缩铀的年龄。采用 γ 谱法测量浓缩铀年龄被提出来的方法主要有两种: 测量 $N(^{231}\text{Pa})/N(^{235}\text{U})$ 和 $N(^{214}\text{Bi})/N(^{234}\text{U})$ 的值。 $N(^{214}\text{Bi})/N(^{234}\text{U})$ 法已有较多的文献进行过讨论, 这里重点对 $N(^{231}\text{Pa})/N(^{235}\text{U})$ 法进行讨论。

在 ^{235}U 衰变链中, 有可能用来测量 HEU 年龄的子核是 ^{231}Pa 、 ^{227}Th 、 ^{223}Ra 、 ^{219}Rn 和 ^{211}Bi 。 ^{231}Pa 衰变放出的 γ 射线主要集中在 283 keV-330 keV 能

量区间内, 在此能量区间内, ^{235}U 有多条可测量的 γ 射线: 240.87 keV、246.84 keV、275.13 keV、291.65 keV 和 294.30 keV, ^{231}Pa 也有多条可测量的 γ 射线: 283.69keV、300.07 keV、302.65 keV、330.06 keV^[8]。

$N(^{231}\text{Pa})/N(^{235}\text{U})$ 的比值测量可利用 ^{235}U 在这个能区的多条 γ 射线进行相对效率刻度, 得到测量系统在这个能区的相对效率刻度曲线。然后根据相对

$$S_{235} = A_{235} \cdot \gamma_{235} = N(^{235}\text{U}) \cdot \lambda_{235} \cdot \gamma_{235} = \frac{M_{235}}{235} \cdot Na \cdot \lambda_{235} \cdot \gamma_{235} \approx 1.1 \times 10^3 \text{ s}^{-1} \quad (1)$$

式中, A_{235} 为 ^{235}U 的活度, λ_{235} 为 ^{235}U 的衰变常数, γ_{235} 为 ^{235}U 发射能量为 246.84keV 的 γ 射线的发射强度, M_{235} 为 ^{235}U 的质量, Na 为阿佛加德罗常

效率刻度曲线对 ^{231}Pa 进行相对效率刻度, 最后可算得 $N(^{231}\text{Pa})/N(^{235}\text{U})$ 的值。

^{235}U 的半衰期为 7.038×10^8 年, 可认为样品中的 $N(^{235}\text{U})$ 为常数。假设 HEU 样品重量为 270 g, 由放射性衰变规律可算得样品中 ^{235}U 能量为 246.84 keV 的 γ 射线发射率 S_{235} 为:

数。

由(1)式可以算出年龄为 30 a 的该样品中 ^{231}Pa 的量 $N(^{231}\text{Pa})$:

$$N(^{231}\text{Pa}) = 9.85 \times 10^{-10} \cdot t \cdot N(^{235}\text{U}) = 9.85 \times 10^{-10} \times 30 \times N(^{235}\text{U}) \quad (2)$$

根据(2)式, ^{231}Pa 能量为 283.69 keV 的 γ 射线 发射率 S_{231} 为:

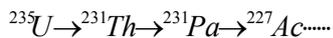
$$S_{231} = A_{231} \cdot \gamma_{231} = N(^{231}\text{Pa}) \cdot \lambda_{231} \cdot \gamma_{231} = 9.85 \times 10^{-10} \times 30 \times N(^{235}\text{U}) \cdot \lambda_{231} \cdot \gamma_{231} \approx 2.9 \times 10^2 \text{ s}^{-1} \quad (3)$$

在这种强度下, ^{235}U 和 ^{231}Pa 是可以进行测量的。在 1.5 h 的测量条件下, ^{235}U 的 246.84 keV 的 γ 射线已能很好地进行测量。若延长测量时间, 强度

约为 246.84 keV 的 1/4 的 283.69keV 的 γ 射线理论上是可以进行测量的。

2.2 $N(^{231}\text{Pa})/N(^{235}\text{U})$ 法

^{235}U 通过如下方式进行衰变:



根据核衰变的指数衰减规律以及级联衰变规律可得到各核素的量随时间变化的方程

组,

解方程组可得:

$$N(^{231}\text{Pa}) = \lambda_{235\text{U}} \lambda_{231\text{Th}} N_0(^{235}\text{U}) \left(\frac{e^{-\lambda_{235\text{U}}t}}{(\lambda_{231\text{Th}} - \lambda_{235\text{U}})(\lambda_{231\text{Pa}} - \lambda_{235\text{U}})} + \frac{e^{-\lambda_{231\text{Th}}t}}{(\lambda_{235\text{U}} - \lambda_{231\text{Th}})(\lambda_{231\text{Pa}} - \lambda_{231\text{Th}})} + \frac{e^{-\lambda_{231\text{Pa}}t}}{(\lambda_{235\text{U}} - \lambda_{231\text{Pa}})(\lambda_{231\text{Th}} - \lambda_{231\text{Pa}})} \right) \quad (4)$$

根据 ^{235}U 、 ^{231}Th 和 ^{231}Pa 的衰变常数及高浓铀年龄

小于 60 a, $N(^{231}\text{Pa})$ 可简化为:

$$\frac{N(^{231}\text{Pa})}{N(^{235}\text{U})} = \lambda_{235\text{U}} t = 9.85 \times 10^{-10} t \quad (5)$$

通过实验测得 $N(^{231}\text{Pa})/N(^{235}\text{U})$ 的值, 即可通过上式算出铀年龄。

3 实验

实验使用的是 Canberra 公司的便携式 HPGe γ 谱仪, 其能量分辨率见表 2。它的探头为同轴型锗探测器, 灵敏区 $\Phi 80 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$, 可测能量范围为

45 keV~7 MeV。

表 2 γ 谱仪的能量分辨率

能量 (keV)	5.9	122	1332
分辨率 (eV)	474	688	2080

测量的 HEU 样品年龄参考值为 30 a。测量时探头正对 HEU 样品，测量 2 次，时间分别为 1.5 h 和 12 h。考虑到死时间不能太大，探头与样品的距离为 60 cm。

4 结果与讨论

在对测量时间为 1.5 h 得到的 HEU 样品在 243 keV-335 keV 能区的 γ 谱分析可知，在此能量区间内，谱形较复杂，不但有很多峰重叠，而且强度均偏低，这给谱分析带来不小的困难。在此能量区间内，还存在 ^{212}Pb 的 300.09 keV 的 γ 射线， ^{212}Bi 的

288.07 keV 及 351.06 keV 的 γ 射线， ^{208}Tl 的 252.61 keV 和 277.358 keV 的 γ 射线， ^{214}Pb 的 295.21 keV 的 γ 射线，以及能量约为 266 keV 和 311 keV 的未知 γ 射线。283.69keV 能峰被完全淹没，几乎无法进行峰面积计算。由于 300.07 keV 和 302.65 keV 的 γ 射线被 ^{212}Pb 的 300.09 keV 的 γ 射线所掩盖， ^{211}Bi 发出的 351.06 keV γ 射线，其周围虽然谱形较简单，但是该谱线被 ^{214}Pb 发出的 351.92 keV γ 射线淹没了，无法较为准确计算峰面积。为了提高测量结果的统计精度，将谱测量时间延长至 12 h。

测量时间为 12 h 的 HEU 在 243 keV-360 keV 能区的 γ 谱中，一些强度较弱的峰变得可以分辨。根据谱图的复杂情况，分别选择了 300 keV 和 330 keV 两处附近进行了尝试解谱，见图 1、图 2。

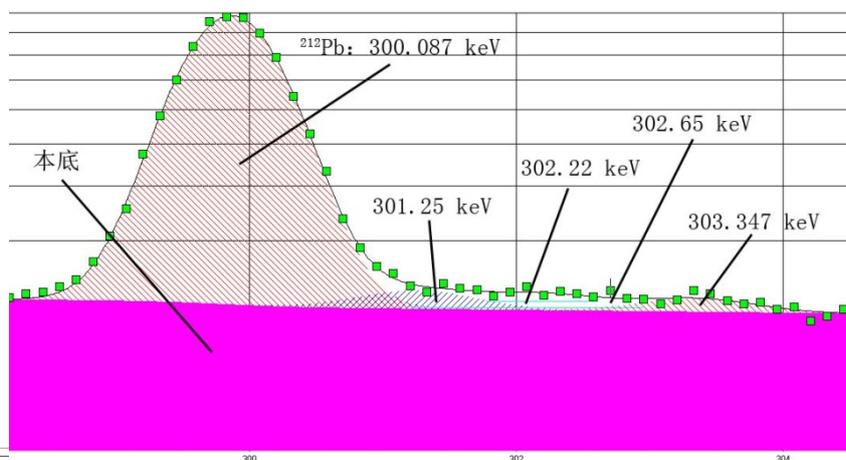


图 1 300 keV 处峰拟合

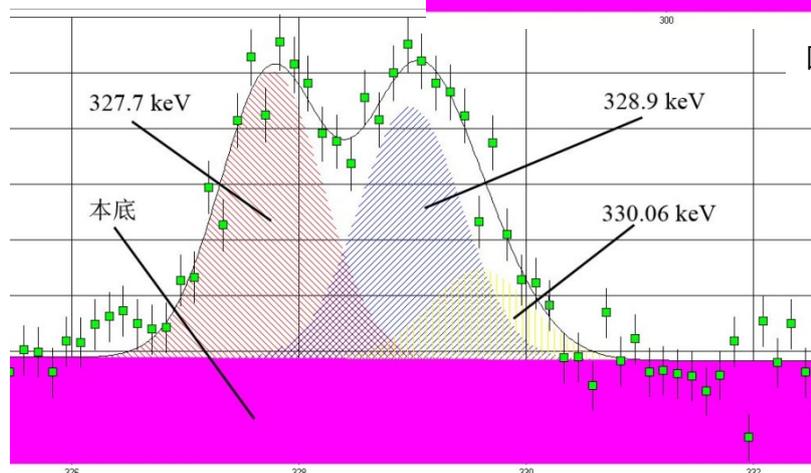


图 2 330 keV 处峰拟合

根据拟合结果,可获得²³¹Pa的302.65 keV与330.06 keV特征 γ 射线的峰面积。然后借助于²³⁵U多条可测量的 γ 射线进行相对效率自刻度,拟合出

相对效率刻度曲线,见图3。拟合时选用的 γ 射线包括:143.76 keV、163.33 keV、185.72 keV、205.31 keV、221.38 keV和246.84 keV。

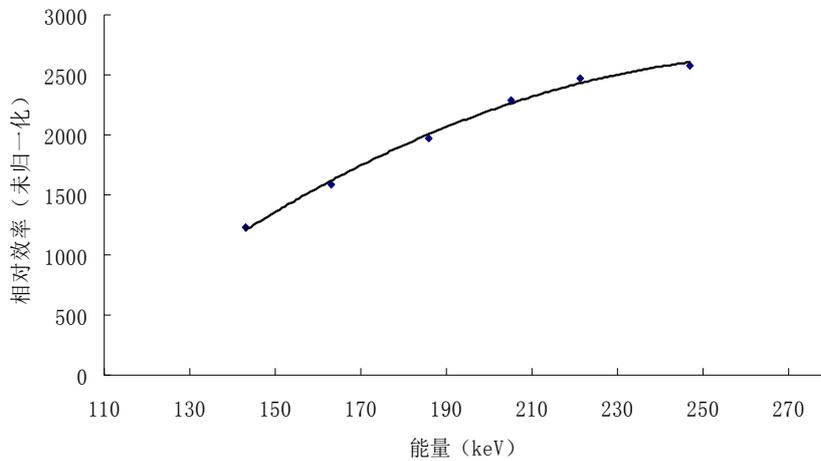


图3 ²³⁵U自身特征射线效率拟合曲线

将拟合得到的相对效率曲线进行延长,获得302.65 keV与330.06 keV的效率值,结合这两条 γ 射线的峰面积以及公式(5)即可计算出HEU年龄。计算结果见表3。

程度;3) 优化解谱——拟合算法。

5 结论

测量高浓铀(HEU)的年龄在军控中具有重要意义,可以获得HEU活动的相关信息。通过理论分析 $N(^{231}\text{Pa})/N(^{235}\text{U})$ 法测量HEU是可行的。 $N(^{231}\text{Pa})/N(^{235}\text{U})$ 法通过测量²³⁵U发出的多条 γ 射线,进行相对效率刻度曲线的拟合,并将曲线延长至邻近的²³¹Pa发出的 γ 射线能量点,从而得到 $N(^{231}\text{Pa})/N(^{235}\text{U})$ 的比值,即可测出HEU的年龄。分别利用²³¹Pa发出的302.65 keV与330.06 keV γ 射线进行分析,其结果与参考值的偏差分别为-11%和+86%。由于²³¹Pa发出的 γ 射线能量偏低,因此其较复杂的解谱方法和其它核素的干扰,使得测量结果的偏差较大,但是较简单的相对效率刻度值得进行更深入的研究。

致谢

感谢刘成安教授对 $N(^{231}\text{Pa})/N(^{235}\text{U})$ 法所做的初步理论分析。

表3 $N(^{231}\text{Pa})/N(^{235}\text{U})$ 法年龄测量结果

特征峰能量 keV	参考值 a	年龄测量值 a	偏差 %
302.65	30	26.8	-11
330.06	30	55.9	+86

表3中利用302.65 keV的峰测出的结果与参考值偏差为-11%,而利用330.06 keV的峰测出的结果与参考值偏差为+86%。虽然表3中测量结果与参考值的一致性一般,但是至少说明了 $N(^{231}\text{Pa})/N(^{235}\text{U})$ 法测量HEU年龄的可行性。由于其极其简单的相对效率刻度,这种方法值得进一步深入探讨。下一步的工作准备从三个方面进行优化:1) 延长测量时间,获得更好的峰形;2) 采用16K多道分析器,同时增加放大倍数,提高300 keV能区 γ 谱的精细

参考文献:

- 417-424.
- [1] CONG TAM NGUYEN. Age-dating of highly enriched Uranium by γ -spectrometry [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, 2005, 229: 103-110.
- [2] CONG TAM NGUYEN, JÓZSEF ZSIGRAI. Gamma-spectrometric uranium age-dating using intrinsic efficiency calibration [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, 2006, 243: 187-192.
- [3] CONG TAM NGUYEN, JÓZSEF ZSIGRAI. Basic characterization of highly enriched uranium by gamma spectrometry [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, 2006, 246: 417-424.
- [4] 吕学升. γ 能谱法测量浓缩铀样品年龄的方法研究 (硕士学位论文). 北京: 中国原子能科学研究院, 2007: 27-33.
- [5] 吕学升, 金惠民, 刘大鸣, 等. γ 能谱法测定高浓铀样品年龄. 核化学与放射化学, 2008, 30(4): 243-247.
- [6] 何周国, 李安利, 范显华, 等. 高浓铀年龄的测定. 核化学与放射化学, 2005, 27(2): 91-95+124.
- [7] 张宏俊, 任忠国, 胡碧涛, 等. 被动法高浓铀年龄测量技术研究. 原子核物理评论, 2012, 29(1): 77-80.
- [8] Richard B. Firestone. Table of Isotopes. 1996, Version 1.0.

The Study of HEU Age by $N(^{231}\text{Pa})/N(^{235}\text{U})$

ZHANG Hongjun, REN Zhongguo, XIONG Zhonghua, LIU Zhenhan,

MO Zhaohong, HE Xiyao, ZHAO Deshan

(China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

Abstract: Theoretically it is feasible that $N(^{231}\text{Pa})/N(^{235}\text{U})$ can be used to measure HEU age, but no more experiment and result could be found in vend literature. Several γ -rays of ^{235}U can be used to self-calibrating efficiency relatively, and the γ -rays of ^{231}Pa can also becalibrated on the efficiency curve achieved by that. So the ratio of $N(^{231}\text{Pa})/N(^{235}\text{U})$ can be calculated, and HEU age is given. 302.65 keV and 330.06 keV γ -ray were used to measure the HEU age in this experiment, error of result are -11% and +86% respectively. Because the emitting sensitivity of γ -ray of ^{231}Pa is weak, so the γ -spectrum analysis is complex. It results in large error, but the simple self-calibrating efficiency is worth to research deeply.

Key words: HEU; age; $N(^{231}\text{Pa})/N(^{235}\text{U})$; relative efficiency self-calibration

Sr 在粉质粘土上的吸附比研究

周旭, 曾可, 张瑞荣, 王煜, 马特奇

(西北核技术研究所, 西安 710024)

摘要: 采用静态批示法研究了接触时间、固液比、PH值、离子强度、示踪液浓度及温度对锶在粉质粘土上吸附比的影响。结果表明, Sr在粉质粘土上约7天达到吸附平衡, 平均吸附比为20 mL/g; Sr的吸附比随粘土粒度、固液比和初始浓度的增大而减小; 随pH增大而增大; 粉质粘土对锶的吸附能力很强, 粘土是核废物处置的很好的备选回填材料。

关键词: 锶; 静态批示法; 粉质粘土; 吸附比。

文章分类: 核监测技术及其应用的研究成果

随着世界核工业的迅速发展, 放射性核废物的处置已经成为国际社会面临的一个重要课题, 深地质处置是目前国际上公认的处置放射性废物的极具前景的方法^[1], 该方法一般由固化体、废物罐、缓冲回填材料和天然地质体四部分组成。其中, 缓冲回填材料的主要作用是阻止地下水进入废物包装窗口和阻滞核素向外迁移, 是放射性废物深地质处置库中置于处置岩体与放射性废物包装体之间的最后一道人工屏障材料。目前还没有一个国家完全确定最佳的缓冲回填材料制作方案。我国对其还处在不断筛选和研究阶段, 其中膨润土、沸石、海泡石和凹凸棒石粘土等被作为研究重点^[2]。而粘土作为一种很重要的矿物原料, 其颗粒细小, 常在胶体范围内, 可塑性高, 比表面积大, 颗粒上带有负电性, 具有良好的物理吸附性和表面化学活性, 因而可以灌入高放废物处置库的花岗岩-粘土界面的岩石裂隙中, 遇水膨胀, 对核素具有较大的吸附容量。目前对其作为缓冲回填材料可行性的研究已有不少文献报道^[3-5], 而锶是放射性核废物中的主要裂变产物, 其在缓冲回填材料中的吸附与迁移是一个重要的研

究课题^[6-10], 静态批示法因具有实验条件较简单, 可同时做大量的平行实验, 并且实验周期较短等优点, 被作为研究放射性废物核素在回填材料中吸附与迁移行为时用得最多的一种方法。因此, 本文拟采用静态批示法研究接触时间、固液比、pH值、示踪液浓度及温度对锶在新疆某地粉质粘土上的吸附比影响。

1 实验部分

1.1 试剂与设备

仪器: pHs-3C 型酸度计, 上海大普仪器有限公司; Q2X-C 空气浴振荡器, 哈尔滨市东明医疗器械厂; D/MAX-rA X 射线衍射仪; Xseries II 型 ICP-M S (配有 MCN-50 微量雾化器, 美国 GE 公司), 美国 Thermo Electron 公司。

试剂: 所用试剂均为分析纯, 实验用水为超纯水。Sr 标准溶液浓度 1000 mg/L, 国家标准物质中心提供。模拟地下水 pH 为 7.5, 新疆某地粘土样品若干。

1.2 模拟地下水制备及镉示踪溶液配制

本实验所用水相是根据实验所用粘土地区地下水组分配制的模拟地下水，其组分及 pH 值列于表 1 中。

1.2.1 模拟地下水制备

表 1 模拟地下水的组分及 pH 值

地点	浓度/(mg/L)								pH 值
	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SiO ₂	SO ₄ ²⁻	
新疆某地	10.28	1.53	7.11	26.3	85.6	26.2	40.2	27.5	6.68

1.2.2 镉示踪溶液配制

准确称取 1000 mg/L 稳定镉标准溶液 10 g 于 1 L 容量瓶中，用模拟地下水稀释至刻度线，配制浓度为 10 mg/L 的镉示踪溶液。

1.3 粘土矿化组成

本实验粘土取自新疆乌鲁木齐夏子街，粘土各粒径矿物组成如表 2。若以粘土粘粒中矿物组分划分，该区域属于我国 6 大典型粘土区域中的以伊利石（水云母）为主的地带，该类地带包括新疆、内蒙古高原西部漠境和半漠境粘土，粘土矿物处于初期风化阶段。各粒径粘土中主要的化学组分见表 3，粘土中 SiO₂、Al₂O₃、CaO 三者占的比例

达 72.4%~79.3%，粘土脱钾较少（K₂O<4%）。由于不同粒径矿物组分差异较大，导致其元素组成也不大相同。小粒径中由于主要的次生矿物伊利石及高岭石含量的增加导致其含有更多的 Fe₂O₃ 及 Al₂O₃。

1.4 实验方法

1.4.1 粘土矿化组成测定

将粘土原样筛分为不同目数样品备用（分别为 50 目、100 目、150 目、200 目、250 目和 400 目），用 D/MAX-rAX 射线衍射仪测定不同粒径粘土的矿化组成。

表 2 粘土各粒径矿物组成

	粒度 (mm)	10~20	5~10	2~5	1~2	0.5~1
	伊利石	20.9	24.5	27.2	26.5	29.2
	绿泥石	12.6	23.9	14.1	25.7	21.5
	高岭石/绿泥石	13.1	25.7	29.8	27.4	30.7
	石英	53.3	25.9	29.0	20.5	18.6
	蒙脱石	未测出	未测出	未测出	未测出	未测出
矿物组成 (%)	粒度 (mm)	0.25~0.5	0.1~0.25	0.05~0.1	<0.074	全土
	伊利石	31.6	37.5	60.3	48.8	34.2
	绿泥石	20.8	20.9	16.9	18.7	20.9
	高岭石/绿泥石	28.5	22.8	22.8	26.2	26.1
	石英	19.1	0.0	0.0	3.6	18.3
	蒙脱石	未测出	未测出	未测出	5.2	0.9

表 3 粘土各粒径化学组成

化学组成	粒度 (mm)	10~20	5~10	2~5	1~2	0.5~1
	SiO ₂		60.2	52.6	43.5	49.4
Al ₂ O ₃		7.3	7	6.7	8.7	8.7
Fe ₂ O ₃		2.9	2.7	2.6	3.5	3.6
MgO		3.4	2.9	3.7	2.8	2.8
CaO		11.9	16.9	20.5	15.9	16.1
Na ₂ O		2.4	2.4	2.1	2.7	2.7
K ₂ O		1.4	1.5	1.6	1.9	1.9
化学组成 (%)	粒度 (mm)	0.25~0.5	0.1~0.25	0.05~0.1	<0.074	全土
	SiO ₂	61.2	58.6	54.6	46.8	52.8
Al ₂ O ₃	10.3	10.7	10.4	11.5	9.4	
Fe ₂ O ₃	3.9	4.2	3.8	4.8	3.7	
MgO	2.3	2.9	3.4	5.6	3.3	
CaO	8.2	8.8	10.6	14	13.2	
Na ₂ O	2.6	2.5	2.4	1.6	2.4	
K ₂ O	2.3	2.3	2.2	2.4	2	

1.4.2 各因素对粘土吸附铯的影响测定

分别称取 1.0 g 的粘土样品于两个 100 mL 塑料离心管中，分别加入 30 mL 去离子水（用作空白）及铯示踪溶液，室温下于恒温水浴振荡器中振荡。研究铯在粘土上的吸附平衡时间以及固液比、pH、载体初始浓度、粘土粒度和温度对 R_d 的影响。

2 结果与讨论

2.1 吸附平衡时间与吸附比的测定

按 1.4.2 中方法，分别于 1 d、3 d、7 d 取溶液 0.1 mL 稀释至 10 mL，过 0.45 μm 滤膜过滤后，用 ICP-MS 测量溶液中 ⁸⁸Sr 含量，按照公式 1 得出 ⁸⁸Sr 在粘土上的平衡时间及吸附比，之后每隔一周取样一次，直至达到吸附平衡（吸附比不再变化），结果见图 1。Sr 在粉质粘土中吸附比 R_d 按式 1 计算。

$$R_d = \left[\frac{C_0 - (C_1 - C_2)}{C_1 - C_2} \right] \times \left(\frac{V}{m} \right) \quad \text{式 (1)}$$

式中, C_0 为示踪溶液中 Sr 初始浓度, mg/L, C_1 为示踪溶液与吸附剂接触振荡一定时间后样品

溶液中 Sr 浓度, mg/L, C_2 为空白样品中 ⁸⁸Sr 背景浓度, mg/L, V 为溶液总体积, 30 mL, m 为粘土质量, 1g。

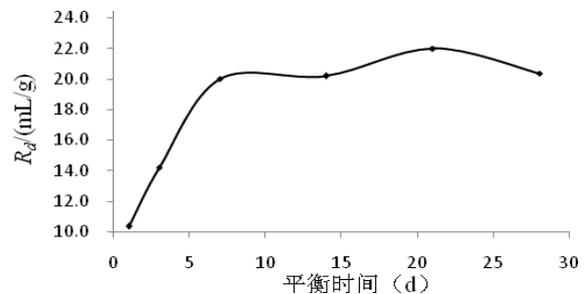


图 1 平衡时间与吸附比

由图 1 知，在吸附开始后最初几天内，吸附比变化较大，在一周后达到吸附平衡，其吸附比为 20 ml/g。

2.2 固液比、粒度及示踪液 PH 对吸附比的影响

2.2.1 固液比的影响

固定吸附剂质量为 1g，粘土粒度为 <200 目，在 5 个试管中分别另入 10、20、30、40、50、60 mL 铯示踪溶液，平衡一周后测量，得到不同固液比下

粘土对锶的吸附比。见表 4。

由表 4 可知，随着固液比的减小，粘土对锶的吸附比增大。

表 4 固液比对吸附比的影响

固液比	1: 10	1: 20	1: 30	1: 40	1: 50	1: 60
R_d	9.0	13.8	19.0	20.0	21.8	22.0

2.2.2 粒度与 pH 的影响

用上述方法，采用六个不同粒度的粘土样品，平衡一周后后测量不同粒度土样对锶的吸附比，结果见图 2。同时，保持固液比不变(1: 30)，改变示踪液 PH (PH 范围为 3<PH<11)，在 30℃ 下振荡 7d 后，测量粘土对锶的吸附比，结果见图 3。

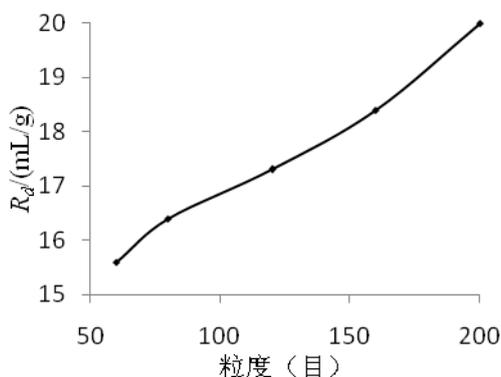


图 2 粘土粒度对吸附比的影响

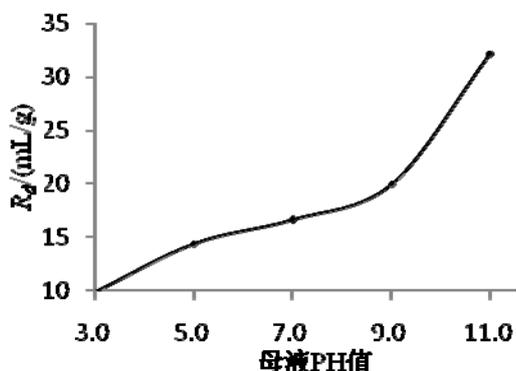


图 3 母液 pH 对吸附比的影响

由图 2 与图 3 可知，随着粘土粒度的减小，其

对锶的吸附比逐渐增大，这是由于颗粒度越小，粘土比表面积大，离子交换容量增大，有利于锶吸附的缘故。与此同时，中性和碱性环境更有利于吸附进行，随着示踪液 pH 的增大，粘土对锶的吸附比增大（当 pH 从 3 增大到 11 时，粘土对锶的吸附比从 10 增大到 30），这是由于随着体系 pH 的增大，金属离子的水解产物增多，羟基金属离子相对于未水解的离子更易在吸附剂表面吸附，同时，碱性条件下一些金属离子（如 Ca, Mg 等）的沉淀使得共沉淀吸附作用更加明显。

2.3 示踪液初始浓度对吸附比的影响及吸附等温线

2.3.1 示踪液初始浓度的影响

保持固液比不变，通过改变示踪液中锶的浓度，进行静态吸附实验，分析不同初始浓度对吸附比 R_d 的影响，初始浓度范围为 10-60 mg/L，其结果见图 4。

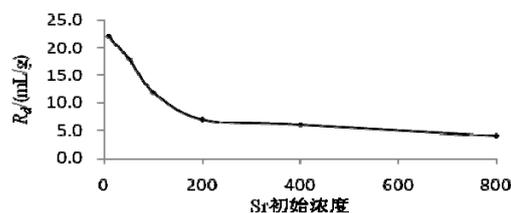


图 4 示踪液初始浓度对吸附比的影响

由图 4 看出，示踪溶液中锶的初始浓度增大，其在粉质粘土中 R_d 减小。

2.3.2 吸附等温线

取一系列不同浓度(C_0)的 Sr 示踪溶液，测定在达到吸附平衡时粘土对 Sr 的吸附容量 q 以及吸附平衡时水相中 Sr 的浓度 C_t ，以 $\lg q$ 对 $\lg C_t$ 作图即得 Sr 的吸附等温线。如图 5 所示。 q 可用下式计算：

$$q = R_d \times C_0 \quad \text{式 (2)}$$

式(2)中， q 为粘土对 Sr 的吸附容量(mmol/g)； R_d 为粘土对 Sr 的吸附比 (mL/g)； C_0 为 Sr 示踪液的初始浓度(mol/L)

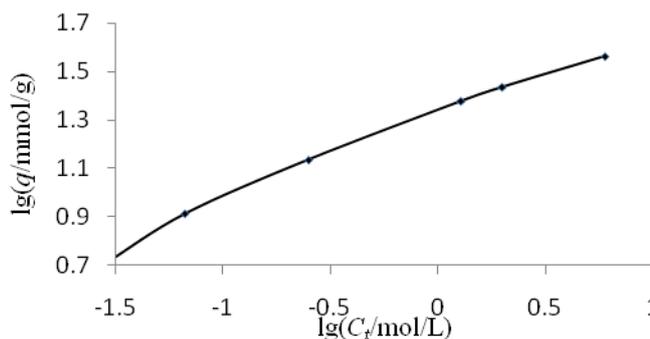


图 5 粘土对锶的吸附等温线

由图 5 可见，粘土对锶的吸附符合 Freundlich 经验公式。

3 结论

在固液比为 1:30 时，Sr 在粉质粘土上约 7 天达到吸附平衡，平均吸附比为 20 ml/g，Sr 的吸附比随粘土粒度、固液比和初始浓度的增大而减小，随示踪液 pH 增大而增大。粘土对锶的吸附能力很强，在实验浓度范围内，其吸附作用符合 Freundlich 经验公式，粘土是核废物处置的很好的备选回填材料。

参考文献

[1] 刘月妙,温志坚.用于高放射性废物深地质处置的粘土材料研究[J].矿物岩石,200(4):3:42-45.
 [2] 李虎杰,易发成.沸石对放射性核素 Cs,Sr 的吸附

阻滞作用[J].矿物岩石,2006.3,26(1):5-8.

[3] 于静,金玉仁,司高华等.铀在粉质粘土上的吸附吸附比[J].中国稀土学报,2011,39(3):377-379.
 [4] 唐方华.两种粘土材料对 ^{137}Cs 吸附特性的研究[J].核技术,1997,20(3):179-182.
 [5] 杜金洲,曹铁星,李卫东等.氯化钠-乙酸钠水溶液中放射性核素在粘土矿物和沸石上吸附机理的研究[J].核化学与放射化学,1992,14(1):53-57.
 [6] 石正坤,康厚军,张东等 Sr, Cs 在水泥固化体中的吸附和迁移行为[J].同位素,2001,14(3-4):174-176.
 [7] 李玉香,易发成,陈雅澜等.Sr,Cs 在碱矿渣-粘土复合水泥水化物粉体中的吸附行为[J].四川大学学报(工程科学版),2005,37(4):59-61.
 [8] 李祯堂,陈式,王辉等. ^{85}Sr , ^{134}Cs 和 ^{60}Co 在黄土中吸附和迁移的研究[J].辐射防护,2000,20(1):68-70.
 [9] 韩玉虎,王治惠,沙连茂. ^{90}Sr , ^{103}Ru 和 ^{137}Cs 在地下砂土中吸附比的测定[J].辐射防护,1997,17(5):396-398.
 [10] 李利华,傅依备,周秀鹏等. Sr、Cs 在回填材料中的吸附与迁移研究[J].原子能科学技术,1998,32(1):76-78.

Study on adsorption distribution coefficient of Sr on Silty Clay

ZHOU Xu, ZENG Ke, ZHANG Rui-rong, WANG Yu, MA Te-qi
 (Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024)

Abstract: The adsorption distribution coefficient of Sr on silty clay was studied by batch experiments. The factors that affected the adsorption experiment were size of clay, ratio of solid to liquid, concentration and pH. The result showed, the value of distribution in the rocks was increased while size of rock, ratio of solid to liquid and concentration were decreasing, meanwhile, the pH was increased. Silty clay is a very good backfill material for Sr in nuclear waste disposal.

Key words: Strontium; batch experiments; silty clay; adsorption ratio

爆炸冲击波的数值模拟

绪梅¹, 朱继¹, 王良厚², 王锋¹

(1. 防化学院二系, 北京 102205; 2. 防化研究院二所, 北京 102205)

摘要: 根据目标属性的不同, 分析并建立了爆炸冲击波的不同数值模拟模型。依据爆炸相似律建立了冲量准则下的冲击波模拟模型, 适用于对超压冲量敏感, 且动压作用效果不明显的物体; 用“局部提取, 分层处理”的方法建立了超压-冲量准则下的冲击波模拟模型, 适用于拖曳型目标; 而结构物内部的冲击波模拟, 为有限空间内的冲击波破坏效应研究打下基础。

关键词: 冲击波; 数值模拟模型; 超压; 冲量; 有限空间

文章分类: 核监测技术及其应用的研究成果

核武器爆炸时释放的能量巨大, 冲击波的作用距离可以达到几百米甚至几十千米的地方, 如果在如此大的范围内建立从爆心至作用点的有限元数值分析模型, 考虑流固耦合时的计算效率, 在保证计算精度的条件下, 即使采用最少量的有限元网格划分, 计算量仍然十分庞大, 几乎是无法完成的。因此对核爆炸冲击波的等效模拟是进行目标破坏效应研究首先需要解决的问题。

冲击波对目标产生的载荷及破坏作用的大小, 主要决定于冲击波阵面上超压的大小, 冲击波的作用时间及作用压力随时间变化的性质, 目标所处的位置, 即目标与冲击波阵面的相对关系, 目标的材料、形状、大小和结构特点。冲击波对目标的毁伤作用通常用超压峰值 Δp 、正压作用时间 t_+ 、和超压冲量 I_+ 这三个参量来度量, 也正是利用这三种测量值的大小作为衡量战斗部威力大小^[1]。爆炸冲击波的毁伤程度, 决定于冲击波的超压作用过程, 即超压时间曲线, 相关的毁伤准则有超压准则、冲量准则和超压-冲量准则。在爆炸作用下不同目标的动态响应不同, 目标与装药有一定距离时, 所适用的毁伤准则由结构本身振

动周期 T 与冲击波正压区作用时间 t_+ 决定。资料表明^[2], 当满足 $t_+/T \geq 10$ 时, 适用超压准则; 当满足 $t_+/T \leq 0.25$ 时, 适用冲量准则; 当 $0.25 < t_+/T < 10$ 时, 情况比较复杂, 目标将受到超压峰值和冲量的双重破坏机制的作用。

1 冲量准则下的冲击波数值模拟

以爆炸相似律为依据, 结合冲击波冲量的影响, 提出了计算机仿真计算核爆炸冲击波对结构作用的等效模型。对于同一个目标, 在距离 r_1 和 r_2 处各有一次爆炸, 如果满足以下 3 个条件: 1) 目标与两次爆心的关系位置相同 (或者说, 两次爆炸的爆心以及目标中心在同一条线上); 2) 两次爆炸的冲击波传播到目标处时, 球面波都可当作是近似平面波; 3) 在目标处, 两次爆炸的冲击波超压冲量相等。则可认为两次爆炸对该目标的破坏程度、破坏部位和破坏方式是一致的, 即对目标的破坏是等效的, 如图 1 所示。

为了描述近似平面冲击波对目标的破坏, 又为了节约计算空间, 等效爆炸定于 6 倍目标宽度以远处比较理想, 3 倍目标宽度以远是满足计算

结果相差在同一个数量级的极限等效距离。等效当量的计算公式为由文献^[3]给出。

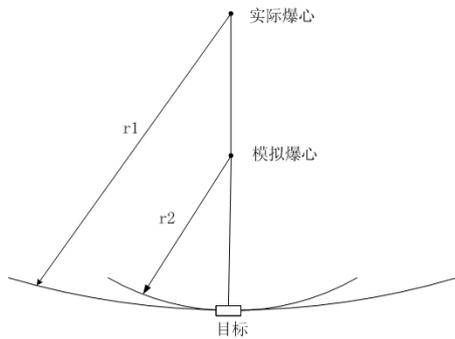


图 1 等效模型示意图

该方法的优点是在超压冲量相等的前提下，可以将较远处的大当量爆炸冲击波效应等效为近处的小当量的爆炸冲击波效应，这样使远距离的核爆效应模拟成为可能。该方法的不足之处在于保证超压冲量相等的前提下，两次爆炸的动压冲量却存在很大的差异，对动压敏感的目标用这种方法误差会较大。

2 超压-冲量准则下的冲击波数值模拟

在这一准则下，模拟的冲击波超压峰值、动压峰值、超压冲量、动压冲量都应理论与理论值相近。该方法的核心思想是将大尺寸空间中的冲击波的传播与固体结构的耦合作用分开模拟。其思路是首先建立大尺度空间的冲击波流场（此时不考虑与目标作用），而后采用“局部提取，分层处理”的方法，将目标所在处的冲击波参数提取出来，建立新的局部的冲击波流场，然后将目标放入新建的冲击波流场中进行流固耦合。

具体方法描述如下：当冲击波与地面反射的传播距离大于一倍爆高时，冲击波进入非规则反射区内，入射波阵面与反射波阵面形成合成波阵面，其下部与地面垂直，此时就可以将作用点之前的一小段冲击波流场的气体参数分层提取出来，然后在提取参数的一小段区域内建立一个新

的冲击波模型，新模型能够反应出原爆炸流场的性质^[4]。这样流场区域减小，划分的单元成倍的减少，使得流固耦合的数值算法在计算上成为了可能。下文模拟一个 220m×100m×50m（长×高×宽）空间大小的爆炸冲击波流场，爆炸当量为 1kt，爆高 H=60m，如图 2 所示。

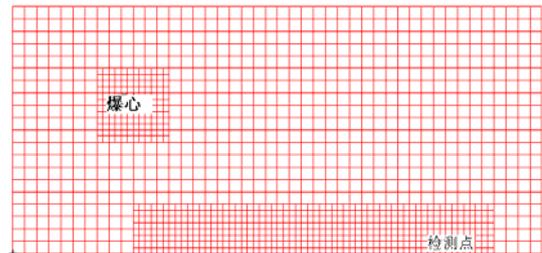


图 2 爆炸空间



图 3 局部流场初始时刻的压强云图

检测点到爆心投影点的距离大于一倍爆高，位于非规则反射区，冲击波的运动方向与地面平行。从网格部分细化的数值模型中提取检测点之前 90m 区域内空气层的参数（每隔 2.5m 提取一组气体参数，共 36 层），建立一个新的空间范围大大缩小了的爆炸冲击波流场。新建立的流场几何模型尺寸为 100m×10m×10m（长×高×宽），前 90m 分 36 层。

图 3 为局部流场模拟初始时刻的压强云图。根据爆炸冲击波计算的的经验公式，以及数值模拟

的结果，得到改进的等效流场中检测点处数值模拟与理论结果的对比关系，如表 1 所示^[5]。

表 1 数值模拟与理论值的对比

	超压峰值 (pa)	动压峰值 (pa)	超压持续时间 (s)	超压冲量 (pa)	动压冲量 (pa)
数值模拟	5.49×10^5	5.07×10^5	0.16	1.82×10^4	2.59×10^4
理论值	5.03×10^5	5.22×10^5	0.14	1.92×10^4	3.13×10^4
相对误差 (%)	9	2	17	5	17

由表 1 可知，采用“局部提取，分层处理”的方法，得到的冲击波各参数的模拟值与理论值的相对误差在一个较小的范围。如此，就可以应用于更大的空间范围，模拟更大范围的核爆炸。这种方法尤其适用于冲击波对动压敏感型目标作用的模拟分析。

3 冲击波侵入结构内部的数值模拟

在冲击波与结构作用的仿真效应研究中，多数情况都假设固体结构在冲击波的整个作用过程中始终保持密闭状态，然后观察这个密闭壳体的响应。实际情况中一个坚固的实体结构往往存在某些脆弱的部位（例如房屋的门窗，车辆等装备的窗和各种通风设施等），那么冲击波与结构作用时会首先对这些脆弱的部位产生破坏，随后冲击波会从破坏部位进入到结构内部，在结构物内部继续传播。下文利用有限元分析软件模拟冲击波侵入结构内部的传播情况。

在已经建立的冲击波流场中放入一个简单的嵌有玻璃的钢壳，用于模拟冲击波打碎玻璃后进入结构的传播情况。钢壳的尺寸 $2\text{m} \times 2\text{m} \times 2\text{m}$ ，厚度为 0.015m 。厚度 0.005m 的正方形玻璃嵌在钢壳迎爆面的中心，为了观察玻璃大小与进入钢壳内部冲击波压强大小的关系，这里取边长为 0.2m 、 0.4m 、 0.6m 、 0.8m 四个不同的玻璃尺寸进行模拟。在四个玻璃尺寸的计算模型中，钢壳内部中心同一位置的欧拉体单元的压强时间历程曲线如图 4 所示。由图 4 可知，冲击波进入钢壳内部后会经过多次反射，压强存在多个峰值，并且

经过多次反射后峰值压强会大于第一峰值压强，随着玻璃尺寸的增加，内部冲击波的压力峰值也随之增加。这些结果与冲击波在有限空间中传播的结论一致^[5]，说明了模拟结果的可靠性。

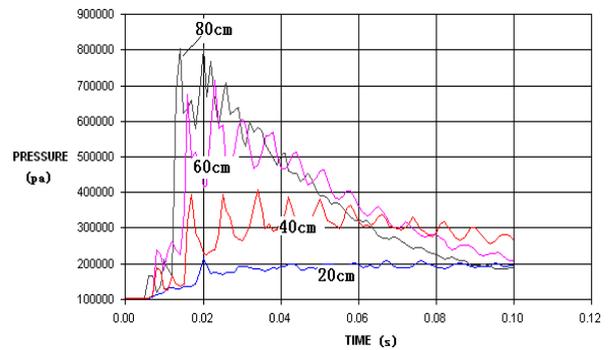


图 4 钢壳镶嵌不同尺寸的玻璃时内部同一位置处的超压

4 结论

在进行爆炸冲击波对目标破坏效应的研究时，冲击波流场的正确模拟是前提和基础。本文分析并建立了不同的冲击波模拟的方法。冲量准则模拟只适用于对超压冲量敏感，且动压作用效果不明显的物体；超压—冲量准则模拟的优点是在作用点处的冲击波参数与全比例模型一致，但应用的尺寸范围仍有限，而且作用点必须位于非规则反射区；冲击波在有限空间中存在复杂的反射情况，理论解法遇到很大难度，大多采用试验或数值模拟，本文建立的结构物内部的冲击波模拟与冲击波在有限空间中传播规律一致，为内部冲击波的破坏效应研究打下基础。在对具体的爆炸问题分析时，需要综合分析各种因素，选取合理的模拟方法。

参考文献:

[1]沈晓军, 苗勤书, 王晓鸣, 爆炸冲击波对主战坦克的毁伤研究[J], 弹箭与制导学报, 2006, 26(1): 224-226

[2] Henrych J. The dynamics of explosion and its use [M]. Elsevier Scientific Publishing Company, 1979

[3] 绪梅, 王良厚, 爆炸冲击波对目标作用的等效计算模型[J], 防化研究, 2004(3): 17-23

[4] 王锋, 核爆冲击波对拖曳型目标作用的数值模拟[D], 北京, 防化指挥工程学院, 2007

[5] 朱继, 绪梅, 核爆冲击波侵入结构内部的数值模拟[J], 防化学报, 2011(4):51-53

Numerical simulation of shock wave

XU Mei¹, ZHU Ji¹, WANG Liang-hou², WANG Feng¹

(1. Institute of Chemical Defense, Beijing 102205, China;

2. Research Institute of Chemical Defense, Beijing 102205, China)

Abstract: In this paper, different numerical simulation models of shock wave are established according to the different nature of objects. Simulation model under impulse criterion is established based on the scaling law which is suitable for diffraction targets. Simulation model under overpressure-and-impulse criterion is set up with the method of extracting the shock wave parameters from whole-scale space and then calculating partially. Simulation model of shock wave entering into structure through openings is also established which will be the basis for the research on destroy effect within limit space.

Key words: Shock Wave; Simulation Model; Overpressure; Impulse; Limit Space

测角装置模拟训练器研究

何水军¹, 吴江峰¹, 秦晋²

(1.防化学院, 北京 102205; 2.第二炮兵工程大学, 西安 710025)

摘要: 针对某型测角装置由于不具备真实训练条件和缺乏模拟训练环境无法进行训练的问题, 分析了其基本工作原理, 提出了适用于该装置的模拟训练器的整体方案, 并对方案中的光源设计部分进行了阐述。在此基础上, 研制了一套实验装置并进行了实验, 实验结果表明该方案技术途径可行, 基本性能满足训练需要。通过改进, 将能够解决该装置的实际训练难题, 发挥重要的军事效益。

关键词: 核爆炸; 测角; 训练

文章分类: 核监测技术及其应用的研究成果

核武器作为一种战略威慑力量, 在平时和战时使用的概率都极低, 但由于其强大的杀伤威力和破坏作用, 并随着核武器当量的逐渐减小和功能的单一化发展, 战术核武器在战场上使用的可能性反而升高。核爆炸探测主要任务是通过探测核武器爆炸产生的信号, 获取核武器爆炸相关信息。为了做好军事斗争准备, 在平时非常必要进行核爆炸探测的训练。位置信息的探测在核爆炸探测中又显得尤为重要。军用某型测角装置是通过探测大气层核爆炸火球, 确定核爆炸空间位置的装备。因此, 该装备的训练重要性不言而喻。平时不可能为了该型装备的军事训练而进行核武器爆炸实验, 在不具备真实训练条件的情况下, 研究该型装备的模拟训练器就显得极为重要。

1 测角装置基本工作原理

测角装置由机械扫描头、绝对式编码器、光电传感器和相应的电子线路等组成。机械扫描头如图 1 所示。

测角装置的扫描头以 4P/S 的速度逆时针绕垂直水平面的轴线旋转。在扫描头下面不动的底座

上, 对应扫描头三组狭缝安装有三支柱面硅光伏电池。当核爆炸发生后, 带有三组狭缝的扫描头, 按照小孔成像的原理, 逐次地把火球的光线“扫描”到三支硅光伏电池上, 硅光伏电池把光能量转换成电信号。在硅光伏电池有信号输出的情况下, 采集与扫描头同轴的编码器的计角值, 即可得到三组狭缝从绝对零位到核爆火球之间的水平夹角。按照一定的数学计算方法, 经过计算, 便可给出火球中心的方位角和俯仰角。如果有 3 个及以上测角装置同时测量到核爆炸火球的测量数据, 在测角装置自身坐标已知的情况下, 可以通过空间交会法确定核爆炸的空间三维坐标^[1]。

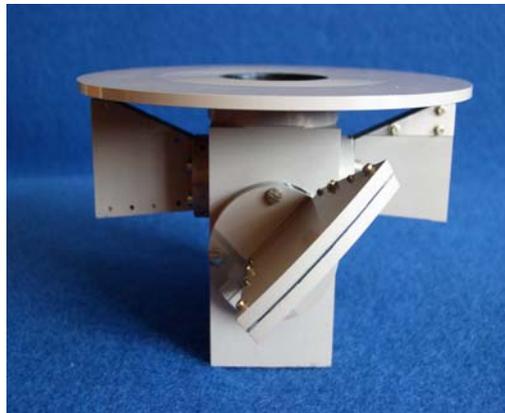


图 1 测角装置扫描头的构造图

2 模拟训练器方案

由于核爆炸产生的光辐射强度相当强，一般情况下利用各种模拟方法产生核爆炸光辐射这种外观景象几乎是不可能的，或者是代价相当高，因此模拟训练器主要针对测角装置的物理信号响应进行模拟。通过前面知道，只要有3个及以上测角装置同时测量到核爆炸火球的方位角和俯仰角，就可以得到核爆炸的空间三维坐标。模拟训练器所产生的物理信号如果能够使一个测角装置有响应，并能够输出方位角和俯仰角，通过在每个测角装置安装一套模拟训练器，就能够进行组网训练，最终得到模拟核爆炸事件的三维坐标。下面仅以一个测角装置相应的模拟训练器进行说明。

模拟训练器由控制部分和执行部分两个大的部分组成。

控制部分主要由控制软件、格式转换模块、无线数传模块组成。控制软件是运行在通用计算机或基于嵌入式平台的软件，能够根据不同训练情况，计算处理得到模拟光源相对测角装置的发光位置数据，包括水平位置和垂直位置数据。数据经计算机的串行口传输至格式转换单元，通过控制部分的无线数传模块发送至执行部分的无线数传模块。

执行部分主要由无线数传模块、水平零位标定、单片机系统、位置编码模块、电机驱动模块、步进电机、机械传动和模拟光源等组成。模拟光源是执行部分的关键，模拟光源由垂直方向上8个红外发光管的LED点阵组成。模拟光源能够在电机的驱动下绕测角装置做圆周运动。执行部分通过无线数传模块接收数据，并解析出模拟光源相对测角装置的水平和垂直方向的角度值。单片机系统产生步进电机驱动需要的相应信号，在机械传动的作用下将模拟光源转动到水平零位。根据水平角度值、机械传动比计算步进电机的步数，产生相应的脉冲串将模拟光源驱动到水平相应位置。根据垂直位置

数据点亮模拟光源红外发光LED点阵的某一个红外发光管。训练器框图和实验装置如图2、图3所示。

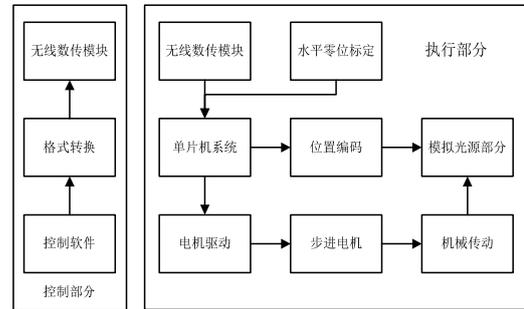


图2 模拟训练器框图



图3 模拟训练器实验装置

3 光源部分设计

测角装置的光信号接收器件为硅光伏接收器(如图4)，硅光伏接收器的主要原件为三支柱面P型单晶硅光伏电池，三支硅光伏电池由上至下成直线排列，垂直于测角装置底座，每只硅光伏电池对应于一条通光准直狭缝(如图1)。光谱响应范围为 $0.4\sim 1.06\mu\text{m}$ ，峰值波长为 $0.86\mu\text{m}^{[1]}$ ，根据峰值波长、功率等条件选用型号为HIR7393C的红外发光管作为模拟光源。HIR7393C红外发光二极管，其采用砷铝化镓(GaAlAs)制成，为透明树脂 $\phi 5\text{mm}$ 封装，峰值波长为850nm，与硅光伏电池的峰值波长符合较好。

模拟光源距测角装置的距离越小所需光源功率就越小，耗电量也随之下下降，因此在满足条件的

情况下尽量减小模拟光源与测角装置的距离。由于测角装置中的光接收器件的三支硅光伏电池由上至下垂直于水平面成直线排列，三条通光准直狭缝各对应一个硅光伏电池，光线由通光准直狭缝至硅光伏电池，如果模拟光源距测角装置过近，会造成光源产生的信号无法同时被三条通光准直狭缝后面的三支硅光伏电池接收。同时，距离越近，经测角装置计算得到的误差相应增大。在误差允许的范围内，经实验测试发现，模拟光源距测角装置中心轴线的距离在 200mm 左右比较理想。此时，在测角装置俯仰角测量范围内，模拟光源产生的信号能够被三支硅光伏电池接收，误差在允许范围之内。



图 4 硅光伏接收器

4 测试

该装置在某实验室利用测角装置和专业仪器进行了初步测试。部分实验数据如图 5。

通过实验数据分析和专业仪器实际测量的数

据进行比对，直缝方位角与计算后得到方位角误差在可接受范围之内，基本满足训练要求。

5 结论与应用展望

通过对某型测角装置工作原理的分析，利用目前先进的嵌入式技术，提出了适应于该设备的模拟训练器的方案。通过实验，结果表明该方案技术可行，能够满足训练的基本需求。在此基础上进一步完善，将能够解决该装备由于没有相应模拟器材无法训练的难题。

测角探头检测数据				
序号:	俯仰角	方位角	直缝方位	时间
25:	11°24.7'	303°18.6'	306°6.7'	16:09:13
26:	11°24.1'	303°20.6'	306°15.3'	16:09:58
27:	11°21.3'	303°26.9'	306°17.3'	16:10:49
28:	11°27.2'	303°29.2'	306°13.3'	16:11:00
29:	11°18.2'	303°32.8'	306°16.0'	16:11:07
30:	11°29.7'	303°30.5'	306°17.3'	16:11:12
31:	11°24.7'	303°27.2'	306°17.3'	16:11:16
32:	11°24.7'	303°30.5'	306°16.6'	16:11:45
33:	11°25.0'	303°26.9'	306°17.9'	16:11:49
34:	6°58.7'	297°55.0'	300°32.5'	16:13:48
35:	4°11.1'	298°58.3'	301°43.1'	16:14:20
36:	5°17.3'	300°54.6'	303°37.7'	16:14:36
37:	5°18.6'	300°55.9'	303°34.5'	16:14:40

图 5 部分实验数据

参考文献:

- [1] 齐向辰.核爆炸测角定位装置研制(设计)报告[R].中国运载火箭技术研究院二三〇厂、防化研究院二所、中国科学院长春光机所,1996.10

Research of Training Device on Goniometry Detector of Nuclear Burst

He ShuiJun¹, Wu JiangFeng¹, Qin Jin²

(1.Institute of Chemical Defense, Beijing 102205;

2. Second Artillery Engineering University Xi'an of Shanxi Prov. 710025)

Abstract: The problem is that a Goniometry Detector is unable to be used to train, which lacks of simulation training environment and real training conditions. Its basic working principle is analyzed, and the overall program

which is suitable to the training simulator is raised. We also describe the design of light source. We developed a set of experimental device and did some experiments on the basis of it. The experimental results show that technical approach of the program is feasible and the basic performance can meet training needs. The set of experimental device can solve practical training problems and play an important military benefit by improvements.

Key words: nuclear burst; goniometry detect; training

车载放射性废物体在线监测技术

龙斌, 贾明雁, 冯天成, 马怀成, 吴睿, 苏川英, 田言杰, 刘俊

(西北核技术研究所, 西安, 841700)

摘要: 本文研究了车载放射性废物体在线监测技术, 包括测量模型和效率刻度方法。该技术采用便携 HPGe 探测器对车载放射性废物体的三面同时快速扫描测量, 得到废物体中感兴趣核素的比活度。采用理想条件下的均匀和非均匀分布的体源对测量模型进行了检验, 实验结果证实了采用三面同时扫描测量的必要性。测量 1000s 时, ^{241}Am , ^{137}Cs , ^{60}Co 和 ^{152}Eu 的最小可探测比活度分别为 170 Bq/kg, 1 Bq/kg, 1 Bq/kg 和 5Bq/kg。对于 3m×2m×1m 的车载放射性废物体, ^{241}Am 测量结果的不确定度小于 40%(1 σ); ^{137}Cs 和 ^{60}Co 的不确定度小于 33%(1 σ); ^{152}Eu 的不确定度小于 34%(1 σ)。与同类技术相比, 该技术不需要附加透射源装置和准直器, 效率刻度方法简单, 且分析测量时间短; 局限在于测量结果不能给出放射性核素活度的空间分布, 其结果为整个废物体的平均比活度, 且对低能核素的测量存在困难。

关键词: 车载放射性废物体; 扫描测量; 便携式 HPGe 探测器

文章分类: 核监测技术及其应用的研究成果

放射性废物的核素种类和活度水平是废物处置和辐射防护的重要数据之一, 对车载放射性废物体进行在线监测可以为废物的处置接收和安运输提供参考数据。放射性废物的无损分析技术包括主动、被动中子分析方法以及 γ 分析方法等^[1,2]。在放射性废物的 γ 分析技术方面, 一些公司或者研究所研制出相应的测量装置, 如 Canberra 公司的模块化箱包计数装置^[3,4,5]、ORNL (Oak Ridge National Laboratory) 的箱包分析系统、ETTP(The East Tennessee Technology Park) K-25 箱包分析系统、ORNL WEAFF B-25 箱包分析系统等^[5]。上述装置一般具有以下特点: (1) 采用连续扫描测量, 降低了计数的空间分布依赖性, 提高了测量的精确度; (2) 考虑了基质的不均匀, 采用透射测量进行衰减校正, 但需要附加透射源装置; (3) 采用透射测量和发射测量, 增加了废物体的测量时间; (4) 将废物体划分为很多体素,

分别测出每个体素的活度, 从而得到废物体的放射性活度的空间分布, 求和即为总活度; (5) 需要测量出每个体素的活度, 因此必须对每个体素进行效率刻度。效率刻度的工作量大, 耗时多。Sang Chui Lee 等人提出一种剂量转换活度的改进方法^[6], 该方法仍然不能解决核素分布不均匀、基质不均匀等问题。然而, 对于某些大型放射性退役场址, 退役所产生的放射性废物基质组成相近, 放射性废物表征仅关注感兴趣核素在废物体中的总活度水平, 且有较强的时效性要求。

因此, 本文研究了一种对车载放射性废物体在线监测的技术, 采用便携 HPGe 探测器对车载放射性废物体进行快速的三面同时扫描测量, 降低了放射性核素分布不均匀对测量结果的影响, 从而得到整个车载放射性废物体中感兴趣核素的平均比活度; 采用蒙特卡罗积分与基于 BECK 公式的理论公式相结合的抽样算法进行效率刻度。与同类技术

相比，该技术不需要附加透射源装置(transmission source device)和准直器、效率刻度方法简单、且分析测量时间短。

1 测量模型推导

1.1 测量模型

车载放射性废物体在线监测模型示意图如图 1 所示。如图所示，令废物体尺寸为 $a \times b \times c$ ，车厢挡板的厚度为 g 。以废物车右侧边中心为原点，沿长边方向定义为 x 轴，右侧边定义为 y 轴，探测器轴线方向

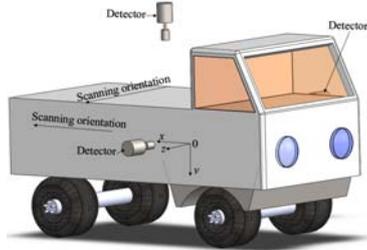


图 1 车载放射性废物体在线监测模型

$$\bar{A} = \frac{S_{side1} \cdot A_{side1} + S_{top} \cdot A_{top} + S_{side2} \cdot A_{side2}}{S_{side1} + S_{top} + S_{side2}} \quad (1)$$

其中， \bar{A} —感兴趣核素的平均比活度/(Bq/kg)； $A_{侧面1}$ 、 $A_{侧面2}$ 、 $A_{顶部}$ —探测器在侧面和顶部测得的感兴趣核素的比活度/(Bq/kg)； $S_{侧面1}$ 、 $S_{侧面2}$ 、 $S_{顶部}$ —车载废物体侧面和顶部的表面积/ m^2 。

探测器在顶部的扫描测量公式跟侧面类似，本文详细推导了探测器在侧面扫描的计数率测量公式。探测器的扫描测量为连续测量过程，相当于很多单次测量过程组成。探测器在侧面扫描测量得到的计数率为 N ，感兴趣核素的比活度为 A_i ，探测器与原点的水平距离为 p ，单点测量的计数率为 N_i 。探测器对车载放射性废物体的比活度转换系数如式(2)~(4)所示。

$$eff = \frac{N}{A_i} \quad (2)$$

$$N = \frac{1}{2d + a + 2g_1} \int_{-d}^{a+2g_1+d} N_i dp \quad (3)$$

$$dV = dx dy dz \quad (4)$$

为 z 轴。探测器分别沿 X 方向对废物体两侧进行连续扫描，同时探测器沿 Z 方向在废物体顶部上方进行连续扫描，最终的测量结果为三面同时扫描测量结果的加权平均值（权值取离探测器最近的废物体表面的面积），如式(1)。

测量模型基于如下假设：（1）使用平均密度计算比活度转换系数（相当于假设整个车载废物体的基质服从均匀分布）；（2）假设整个车载废物体的放射性核素活度服从均匀分布（核素分布不均匀的影响将在下节讨论）。

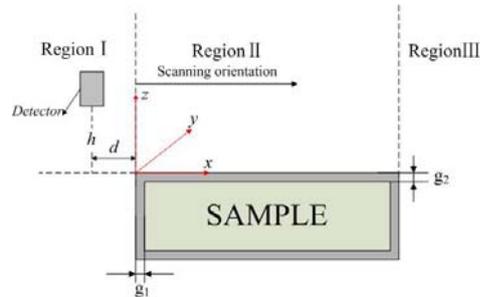


图 2 车载放射性废物体监测模型平面图(Top view)

考虑车厢挡板的影响，需要对 N_i 进行分段积分，积分区域的划分方式如图 2。令探测器在区域 I 的单点测量计数率为 N_{Ii} 、区域 II 的单点测量计数率为 N_{IIi} 、区域 III 的单点测量计数率为 N_{IIIi} 。

$$N = \frac{1}{2d + a + 2g} \left(\int_{-d}^g N_{Ii} dp + \int_g^{a+g} N_{IIi} dp + \int_{a+g}^{a+2g+d} N_{IIIi} dp \right) \quad (5)$$

根据 BECK 公式^[7]推导出单点测量计数率公式。区域 I 单点积分示意图如图 3 所示。

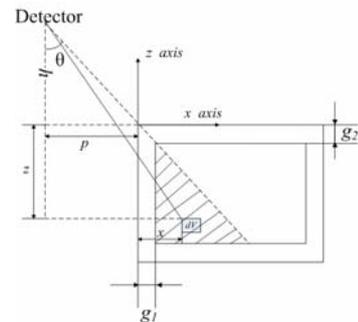


图 3 区域 I 单点积分示意图

$$dV = dx dy dz \quad (6)$$

$$N_{II} = \int_{-g_1}^{\frac{g_1}{2}} \int_{-\frac{g_2}{2}}^{\frac{g_2}{2}} \int_0^h \frac{A \cdot p_1 \cdot \rho \cdot S_0 \cdot R(\cos\theta)}{4\pi((h-z)^2 + (x-p)^2 + y^2)} \exp(-\mu_a p - \mu_g g_1 - \mu_s(x-g_1)) \frac{\sqrt{(h-z)^2 + (x-p)^2 + y^2}}{x-p} dx dy dz + \int_{-\frac{g_1}{2}}^{\frac{g_1}{2}} \int_{-\frac{g_2}{2}}^{\frac{g_2}{2}} \int_0^h \frac{A \cdot p_1 \cdot \rho \cdot S_0 \cdot R(\cos\theta)}{4\pi((h-z)^2 + (x-p)^2 + y^2)} \exp(-\mu_a h + \mu_g g_2 - \mu_s(z+g_2)) \frac{\sqrt{(h-z)^2 + (x-p)^2 + y^2}}{h-z} dx dy dz \quad (7)$$

$$\cos\theta = \frac{h-z}{\sqrt{(x-p)^2 + y^2 + (h-z)^2}} \quad (8)$$

式中， A —车载废物体中土壤样品的比活度/(Bq/kg)； p_1 —感兴趣核素的特征 γ 射线的绝对强度； ρ —土壤样品的密度/(kg/m³)； S_0 —探测器的有效前面积/m²； $R(\cos\theta)$ —探测器的角响应函数； μ_a —空气对 γ 射线的线衰减系数/m⁻¹； μ_g —车厢挡板对 γ 射线的线衰减系数/m⁻¹； μ_s —废物体中土壤对 γ 射线的线衰减系数/m⁻¹。

区域II单点积分示意图如图4所示。

$$N_{III} = \int_{-\frac{g_1}{2}}^{\frac{g_1}{2}} \int_{-\frac{g_2}{2}}^{\frac{g_2}{2}} \int_0^h \frac{A \cdot p_1 \cdot \rho \cdot S_0 \cdot R(\cos\theta)}{4\pi((p-x)^2 + y^2 + (h-z)^2)} \exp(-\mu_a h + \mu_g g_2 - \mu_s(z+g_2)) \frac{\sqrt{(h-z)^2 + (p-x)^2 + y^2}}{h-z} dx dy dz + \int_{-\frac{g_1}{2}}^{\frac{g_1}{2}} \int_{-\frac{g_2}{2}}^{\frac{g_2}{2}} \int_0^h \frac{A \cdot p_1 \cdot \rho \cdot S_0 \cdot R(\cos\theta)}{4\pi((x-p)^2 + y^2 + (h-z)^2)} \exp(-\mu_a h + \mu_g g_2 - \mu_s(z+g_2)) \frac{\sqrt{(h-z)^2 + (x-p)^2 + y^2}}{h-z} dx dy dz \quad (9)$$

区域III单点积分示意图如图5所示。

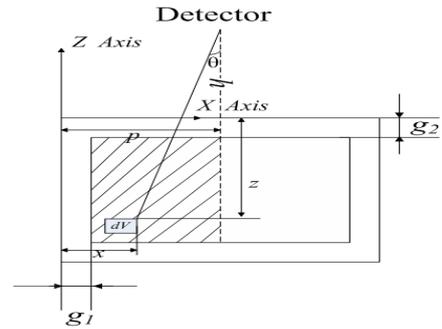


图4 区域II单点积分示意图

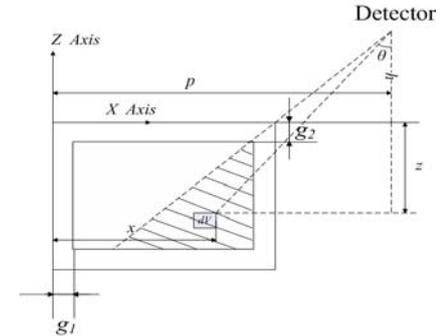


图5 区域III单点积分示意图

$$N_{III} = \int_{-\frac{g_1}{2}}^{\frac{g_1}{2}} \int_{-\frac{g_2}{2}}^{\frac{g_2}{2}} \int_0^h \frac{A \cdot A(x) \cdot p_1 \cdot \rho \cdot S_0 \cdot R(\cos\theta)}{4\pi((p-x)^2 + y^2 + (h-z)^2)} \exp(-\mu_a h + \mu_g g_2 - \mu_s(z+g_2)) \frac{\sqrt{(h-z)^2 + (p-x)^2 + y^2}}{h-z} dx dy dz + \int_{-\frac{g_1}{2}}^{\frac{g_1}{2}} \int_{-\frac{g_2}{2}}^{\frac{g_2}{2}} \int_0^h \frac{A \cdot A(x) \cdot p_1 \cdot \rho \cdot S_0 \cdot R(\cos\theta)}{4\pi((p-x)^2 + y^2 + (h-z)^2)} \exp(-\mu_a h + \mu_g g_2 - \mu_s(z+g_2)) \frac{\sqrt{(h-z)^2 + (p-x)^2 + y^2}}{h-z} dx dy dz \quad (10)$$

1.2 核素分布不均匀影响评估

核素分布不均匀影响评估的原理是：总活度相同情况下，计算将非均匀分布视作均匀分布的平均比活度与均匀分布时比活度的相对偏差，以此作为测量模型降低样品不均匀性影响能力的评价依据。

本文计算了两侧面沿 X 方向远端扫描、顶部沿 Z 方向延长距离的连续扫描时，随着 h 和 d 变化，¹³⁷Cs 非均匀分布视作均匀分布与均匀分布的比活度的相对偏差绝对值的变化情况。非均匀分布时，假设放射性核素呈指数分布，张弛长度 (relaxation length) 的倒数 α 取为 0、0.5、1、2、3，单位 m^{-1} 。计算结果如图 6、图 7 所示。

如图所示，当 $h=0.5m$ 、 $d=0$ 时，即探测器与车载废物体表面垂直距离为 $0.5m$ 时作连续扫描，受不均匀影响程度最小。

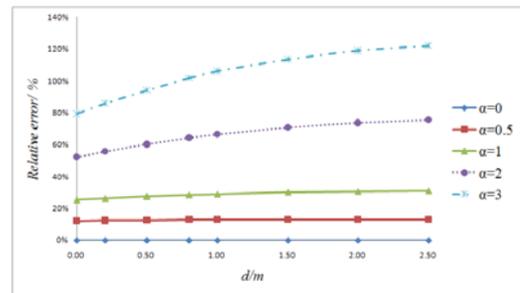


图6 非均匀分布视作均匀分布与均匀分布¹³⁷Cs平均比活度相对偏差绝对值随 d 变化图($h=1m$)

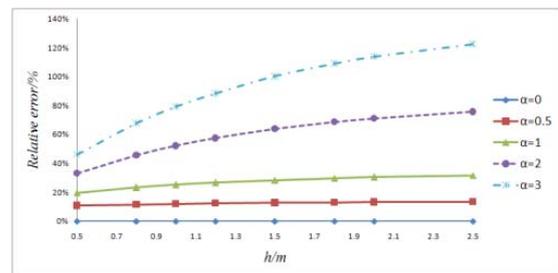


图7 非均匀分布视作均匀分布与均匀分布¹³⁷Cs平均比活度相对偏差绝对值随 h 变化图($d=0m$)

2 效率刻度

效率刻度的原理是：分别对探测器位置以及样品进行均匀抽样，得到抽样点坐标；建立探测器与样品抽样点之间的直线方程；计算出该直线与探测器和废物体的交点的坐标；根据交点坐标分别计算出 γ 射线在介质中的衰减路径长度；将衰减路径及其他参数代入被积函数；然后利用蒙特

卡罗积分得到测量模型的比活度转换系数。算法的流程图参见 Reference 8。本文对几何尺寸为 $3m \times 2m \times 1m$ 的车载放射性废物体（废物体包装层厚度为 $4mm$ ，材质为铁）进行了效率刻度。探测器参数如表 1 所示，效率刻度参数如表 2 所示，刻度结果如表 3 所示。

表 1 HPGe 探测器参数

参数	数值
晶体直径/mm	53.2
晶体长度/mm	59.1
冷指孔直径/mm	9.2
冷指孔长度/mm	51.2
能量分辨率 ^{60}Co @1332keV /keV	1.74
峰康比 ^{60}Co	58.4

表 2 效率刻度参数

核素	能量 /keV	P_7 /%	EFA /m ²	角响应函数	μ_a /m ⁻¹	μ_g /m ⁻¹	μ_s /m ⁻¹
^{241}Am	59.54	35.90	6.16E-05	$y=1.112+0.136*x+0.339*x^2-0.585*x^3$	2.48E-02	963.9	46.3
^{137}Cs	661.66	85.10	1.86E-05	$y=1.133-0.178*x+0.339*x^2-0.287*x^3$	9.78E-03	57.8	12.9
^{60}Co	1173.2	99.97	9.74E-06	$y=1.126-0.176*x+0.283*x^2-0.224*x^3$	7.84E-03	43.4	10.1
	1332.5	99.99	8.70E-06	$y=1.132-0.206*x+0.330*x^2-0.246*x^3$	7.46E-03	40.7	9.3
^{152}Eu	344.28	26.50	4.56E-05	$y=1.154-0.064*x+0.194*x^2-0.275*x^3$	1.26E-02	80.1	16.8
	778.9	12.93	2.13E-05	$y=1.139+0.129*x-0.509*x^2+0.248*x^3$	9.19E-03	53.4	11.9

注: 表中 x 定义为 $\cos(\theta), x \in [0, 1]$.

表 3 效率刻度结果

能量 /keV	侧面扫描效率 /(cps/(Bq/kg))	顶部扫描效率 /(cps/(Bq/kg))
59.54	4.09×10^{-5}	4.15×10^{-5}
344.3	3.15×10^{-3}	4.19×10^{-3}
661.66	8.45×10^{-3}	1.15×10^{-2}
778.9	1.10×10^{-3}	1.51×10^{-3}
1173.2	7.03×10^{-3}	9.76×10^{-3}
1332.5	6.90×10^{-3}	9.63×10^{-3}

3 实验

3.1 砂土模拟均匀体源

砂土模拟均匀体源扫描测量示意如图 8 所示。如图所示，将一个尺寸为 $\phi 7.5cm \times 2.5cm$ 的样品盒装满放射性土壤做成小体源（质量为 $166.1g$ ， ^{241}Am 比活度为 $6 \times 10^5 \text{Bq/kg}$ ）并放置在所模拟体源的某一位置，然后探测器从原点上方 $50cm$ 处开始沿 X 轴扫描至所模拟体源的另一端，测量完成后改变小体源的位置并重复扫描程序。考虑体源的对称性，小体源只需在所模拟体源的四分之一体积范围内移动。当所有点的扫描测量完成后，对测量

所得的计数率进行曲面拟合得到计数率随小体源位置变化的曲面 $N(x, y)$ ，按式 (11) 积分得到探测器对所模拟均匀体源扫描测量的计数率。然后，按均匀模型计算出该体源的平均比活度，乘以重量得到该体源的总活度，并与真实体源的活度（小体源的活度）比较。本文所模拟均匀体源的尺寸为 $50 \text{cm} \times 30.2 \text{cm} \times 2.6 \text{cm}$ ，重量为 7.19kg 。

$$N = \frac{\int_{-15.1}^{15.1} \int_0^{50} N(x, y) dx dy}{S} \quad (11)$$

式中， S 为体源表面的面积，其值为 $50cm \times 30.2 \text{cm}$ 。

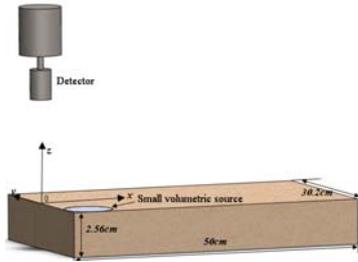


图 8 均匀体源扫描测量示意图

图 9 为小体源位于不同位置时，扫描测量得到的计数率。表 4 为对计数率做曲面拟合的结果。

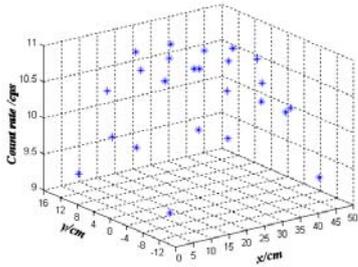


图 9 小体源位于不同位置处，扫描测量计数率结果

表 4 均匀体源扫描计数率曲面拟合结果

拟合系数	值
Z_0	9.39
a	1.48×10^{-1}
b	2.71×10^{-17}
c	-2.96×10^{-3}
d	-3.82×10^{-3}
f	-3.65×10^{-19}
函数形式	$N(x, y) = a \cdot x + b \cdot y + c \cdot x^2 + d \cdot y^2 + f \cdot x \cdot y + z_0$
R^2	0.9197

表 5 为均匀体源扫描测量结果。

表 5 均匀体源扫描测量结果

计数率 /cps	转换因子 /cps/(Bq/kg)	测量值		参考值 /Bq	相对偏差 /%
		比活度 /(Bq/kg)	活度 /Bq		
10.34	7.50×10^{-4}	1.38×10^4	9.91×10^4	9.97×10^4	-0.6

表 5 结果表明，探测器对均匀体源连续扫描测量所得的活度结果与真实值的相对偏差为-0.6%，二者符合得很好。

3.2 X 方向分布不均匀体源

X 方向不均匀即体源在探测器扫描方向分布不均匀，实验装置如图 10 所示。如图所示，木盒的尺寸为 $52.9\text{cm} \times 33.1\text{cm} \times 9.8\text{cm}$ ，木板的厚度为

1.5cm ；砂土样品的厚度为 2.8cm （使用游标卡尺测量），质量为 6.85kg 。木盒内装有 18 个内部尺寸为 $\varnothing 7.5\text{cm} \times 2.5\text{cm}$ 的样品盒，其中 6 个样品盒填充的放射性活度不同的砂土（编号 1-6，核素为 ^{241}Am ，简称小体源），其余 12 个样品盒填充本底土用于控制小体源在木盒内的位置（如图 11 所示），其余位置填充相同的本底土。



图 10 X 方向分布不均匀体源的扫描测量



图 11 木盒内砂土样品的摆放方式

探测器扫描测量时，探测器与样品的垂直距离为 50cm ，扫描起始位置的水平距离 d 分别为 0cm 、 49cm 、 99cm 。探测器沿图 13 中绿线的方向进行扫描，考虑测量模型的几何对称性，所模拟体源的尺寸变为 $50\text{cm} \times 49\text{cm} \times 2.8\text{cm}$ 。当探测器完成一次扫描测量后，将 1#~6# 样品盒与其他几排样品盒交换位置并保证样品盒沿 X 方向的顺序不变，然后重复扫描测量，直到带放射性的样品盒与其他两排样品盒位置都完成了交换为止。1#~6# 样品盒中砂土样品的 ^{241}Am 活度信息如表 6 所示，从而构成在 X 方向分布不均匀的体源。所模拟体源的总活度为表 3 中 1#~6# 样品活度之和的 6 倍。

实验数据处理的方法：将探测器对三排带放射性样品的扫描测量计数率求和，然后根据几何对称性乘以 2 倍后，得到探测器对整个模拟体源的扫描

测量效率。最后根据均匀模型的活度转换系数计算出比活度并转换成总活度后与模拟体源的真实活度比较。表 7 为实验数据处理结果。

表 6 1#~6#样品的活度信息

序号	质量 /g	比活度 /(Bq/kg)	活度 /Bq
1#	174	3.00×10^5	5.22×10^4
2#	152	5.82×10^4	8.85×10^3
3#	166.1	6.00×10^5	9.97×10^4
4#	144.6	1.32×10^5	1.91×10^4
5#	161.5	2.45×10^5	3.96×10^4
6#	118	1.22×10^5	1.44×10^4
活度之和			2.34×10^5
总活度			1.40×10^6

表 7 实验数据处理结果

d/cm	计数率 /cps	转换因子 /(cps/(Bq/kg))	测量值		参考值 /Bq	相对偏差 /%
			比活度 /(Bq/kg)	活度 /Bq		
0	127.84	9.39×10^{-4}	1.36×10^5	1.51×10^6	1.40×10^6	7.88
49	94.75	7.43×10^{-4}	1.28×10^5	1.42×10^6	1.40×10^6	1.06
99	66.53	5.30×10^{-4}	1.26×10^5	1.40×10^6	1.40×10^6	-0.49

如表 7 所示，随着水平距离 d 的增加，测量值与真实值之间的相对偏差呈现减小的趋势，相对偏差的最大值为 7.88%，最小值为-0.49%。说明当水平距离 $d=99\text{cm}$ 时，测量值几乎不受样品分布不均匀的影响。

3.3 X、Y 方向分布不均匀体源

探测器对 X、Y 方向分布不均匀体源的检验实验布局示意图如图 12 所示。图中木盒的尺寸为 $52.9\text{cm} \times 33.1\text{cm} \times 9.8\text{cm}$ ，木板的厚度为 1.45cm ；砂土样品的厚度为 2.5cm （使用游标卡尺测量），重量为 6.37kg ；图中 1#~6#为含 ^{241}Am 的砂土样品，其活度信息及重量见表 8。探测器扫描测量时，探测器与样品的垂直距离为 50cm ，扫描起始位置的水平距离 d 分别为 0cm 、 49cm 、 99cm ，沿图中 X 轴方向进行扫描。实验数据处理结果如表 6 所示。

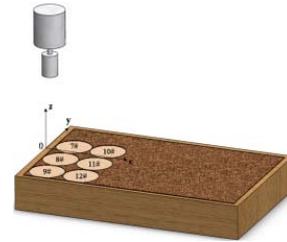


图 12 X、Y 方向分布不均匀体源检验实验示意图

表 8 7#~12#砂土样品的相关信息

序号	质量 /g	比活度 /(Bq/kg)	活度 /Bq
7#	161.5	2.46×10^5	3.97×10^4
8#	166.1	6.00×10^5	9.97×10^4
9#	174	3.00×10^5	5.22×10^4
10#	118	1.22×10^5	1.44×10^4
11#	95.9	1.36×10^5	1.30×10^4
12#	166.1	6.00×10^5	9.97×10^4
Sum			2.38×10^5

表 9 X、Y 方向分布不均匀体源检验实验结果

d/cm	计数率 /cps	转换因子 /(cps/(Bq/kg))	测量值		参考值 /Bq	相对偏差 /%
			比活度 /(Bq/kg)	活度 /Bq		
0	23.33	6.16×10^{-4}	3.78×10^4	2.41×10^5	2.38×10^5	1.23
49	17.16	4.58×10^{-4}	3.75×10^4	2.39×10^5	2.38×10^5	0.27
99	12.09	3.26×10^{-4}	3.71×10^4	2.36×10^5	2.38×10^5	-0.79

表 9 中，真实值与测量值的相对偏差很小，因为放射源的梯度不够明显，且厚度很薄，从而导致非均匀影响不是很明显。

3.4 X、Y、Z 方向分布不均匀体源的检验

本文用砂土样品模拟了 X、Y、Z 方向分布都不均匀体源，并使用探测器对其进行了扫描测量。扫描测量的示意图如图 13 所示，右图为体源左侧面剖面图。



图 13 三维分布不均匀体源检验实验示意图

图中木盒的尺寸为 $52.9\text{cm} \times 33.1\text{cm} \times 9.8\text{cm}$ ，木板的厚度为 1.5cm ；砂土样品的厚度为 4.8cm （使用

游标卡尺测量), 重量为 13.05kg; 图中 1#~6#为装有放射性砂土的样品盒, 其活度信息及质量见表 5, 排列方式如 15 右图, 从而构成三维分布不均匀体源。探测器扫描测量时, 探测器与样品的垂直距离为 50cm, 扫描起始位置的水平距离 d 分别为 0cm、49cm、99cm, 沿图中 X 轴方向进行扫描。

表 10 为 X、Y、Z 分布不均匀体源实验结果。

表 10 X、Y、Z 分布不均匀体源实验结果

d/cm	计数率 /cps	转换因子 /($\text{cps}/(\text{Bq}/\text{kg})$)	测量值		参考值 /Bq	相对偏差 /%
			比活度 /(Bq/kg)	活度 /Bq		
0	20.86	7.49×10^{-4}	2.79×10^4	3.64×10^5	2.38×10^5	52.7
49	15.71	5.43×10^{-4}	2.89×10^4	3.77×10^5	2.38×10^5	58.4
99	11.09	3.81×10^{-4}	2.91×10^4	3.80×10^5	2.38×10^5	59.4

如表 10 所示, 随着水平距离 d 的增加, 测量值与真实值之间的相对偏差呈现增大的趋势。这是由于 γ 射线穿透样品侧面进入探测器的几率随距离 d 的增大而增大, 而侧面的计数受样品在探测器轴线即 Z 方向的分布不均匀影响程度更大, 而沿 X 方向的扫描测量不能降低 Z 方向分布不均匀对测量结果的影响, 从而导致测量值与真实值之间的相对偏差很大。该实验在一定程度上说明了当车载废物体三维分布不均匀时采用三面同时扫描并加平均的测量模型的必要性。

4 最小可探测活度浓度计算及不确定度评定

4.1 最小可探测活度浓度计算

计算了当废物体的几何尺寸为 $3\text{m} \times 2\text{m} \times 1\text{m}$, 探测器与废物体的垂直距离为 50cm、扫描测量的初始位置和结束位置与样品一端的水平距离为 0 时的最小可探测活度浓度。探测器对废物体测量的本底计数率通过蒙特卡罗方法模拟得到。当扫描测量时间设定为 1000s 时, 计算结果如表 11 所示。

表 11 MDA 估算结果

核素	能量 /keV	MDA/(Bq/kg)
^{241}Am	59.54	169
^{152}Eu	344.28	5
^{137}Cs	661.66	1
^{60}Co	1173.2	1

因为废物体的包装材料铁以及砂土废物本身都对 ^{241}Am 的特征 γ 射线的衰减程度很高, 对探测器能够产生计数贡献的实际上只有表层的砂土废物, 因此 ^{241}Am 的 MDA 较高。

4.2 不确定度评定

测量结果的不确定度来源包括: (1) 活度浓度转换系数的不确定度; (2) 计数率的统计涨落;

(3) 测量模型的不确定度。三面同时扫描不确定度评定结果如表 12 所示。

表 12 三面扫描活度浓度不确定度

能量/keV	不确定度/%
59.54	40
661.66	32
1173.2	33
1332.5	33
344.28	34

结果表明, ^{241}Am (59.54keV) 测量结果的不确定度 $<40\%(1\sigma)$; ^{137}Cs (661.66keV) 和 ^{60}Co (1173.2 keV、1332.5 keV) 的不确定度 $<33\%(1\sigma)$; ^{152}Eu (344.28 keV) 的不确定度 $<34\%(1\sigma)$ 。

5 结论

本文研究了一种车载放射性废物体在线监测技术, 包括测量的理论模型和效率刻度方法。该技术采用便携式 HPGe 探测器对车载放射性废物体进行快速的三面同时扫描测量, 降低了核素比活度分布不均匀对测量结果的影响, 从而得到整个车载放射性废物体中感兴趣核素的平均比活度。通过对理想条件下的均匀分布和非均匀分布的体源进行测量, 检验了三面同时扫描测量的必要性。

该技术能够用于车载放射性废物体的测量, 同时能够用于废物箱包的监测以及其他领域。在后续的研究中, 我们拟采用阵列探测器技术建立真实的测量系统, 同时使用该系统对实际大小的

车载放射性废物体进行测量，检验测量模型在真实使用条件下的适用性。

参考文献:

- [1] Robert J. Estep, Thomas H. Prettyman, Sheppard GA. Tomographic Gamma Scanning to Assay Heterogeneous Radioactive Waste. Nuclear Science and Engineering, 1994, (118) ;145~152
- [2] Thomas H. Prettyman, Brown SK, Catlett DS, et al. Development of a Transportable Tomographic Scanner for Safeguards and Waste Measurement at Rocky Flats . 2000-12-30.
<http://www.antech-inc.com/paper/TGS%20Paper%20LA-UR-99-5117.html>
- [3] Canberra Industry. Product catalog(edition twelve). 2002:383~384
- [4] Canberra Industry. Model S573 ISOCS Calibration Software: User's Manual.2002
- [5] G. Becker, M. McIlwain, M. Connolly. Transuranic and low level boxed waste form nondestructive assay technology overview and assessment. Idaho National Engineering and Environmental Laboratory Department. INEEL/EXT-99-00121.February 1999
- [6] Sang Chui Lee, Sang Hee Kang, Ki Ha Hwang etc. Improved methodology in radioactive container assay using dose to curie conversion method. The 10th International Conference on Environmental Remediation and Radioactive Waste Management. September 4-8, 2005, Scottish Exhibition & Conference Centre, Glasgow, Scotland
- [7] Harold L. Beck, Joseph Decampo, Carl Gogolak. In-situ Ge(Li) and NaI(Tl) gamma-ray spectrometry. Health and Safety Laboratory U.S. Atomic Energy Commission,1972.9
- [8] 龙斌,贾明雁,李公平,冯天成等. 长方体废物箱效率刻度的抽样算法 [M]. 核电子学与探测技术,2011,31(3):338-343

The On-site Monitoring Technique for Carborne Radioactive Waste Container

B. Long, M. Y. Jia, T. C. Feng, H. C. Ma, R. Wu, C. Y. Su, Y. J. Tian, J. Liu
(Northwest Institute of Nuclear Technology, 710024 Xi'an, China)

Abstract: This paper presents an on-site monitoring technique for carborne radioactive waste container, including theoretic model and efficiency calibration method. Three portable HPGe detectors are used to scan three surfaces of the carborne waste container. And then the weighted average is performed to get the average specific activity of the interested nuclides. The experiments which turned out the necessity of scanning three surfaces successfully were completed with uniform and non-uniform volumetric sources on the ideal condition. When the measurement time is 1000s, the MDAs of ^{241}Am , ^{137}Cs , ^{60}Co and ^{152}Eu are 170 Bq/kg, 1 Bq/kg, 1 Bq/kg and 5Bq/kg, respectively. And the uncertainty is less than 40%(1 σ) for ^{241}Am , 35%(1 σ) for ^{137}Cs , ^{60}Co and ^{152}Eu . Compared with the other techniques, transmission source device and collimators are not required, and the assay time is shorter. However, the limitations of this technique are that measurement results are not radionuclide activity for every voxel but specific activity for the whole container, and that it is difficult to measure for the low energy gamma emitters (e.g. ^{241}Am) in the waste with high density matrix based on gamma-assay method.

Key words: Carborne radioactive waste container; Scanning measurement; Portable HPGe detector

城市地铁核生化一体化监测技术研究

胡洁微, 房宗良, 文其林, 曹剑锋, 彭婧, 胥飞燕

(防化学院, 北京 102205)

摘要: 近年, 核生化恐怖威胁已成为影响国家安全、危害公众生命和财产安全的主要恐怖形式。作为政治、经济大国和世界反恐的主要力量, 我国亦面临着防范核生化恐怖袭击的严峻挑战。地铁以其经济性和便捷性成为民众出行的首选交通工具, 却也因此成为恐怖袭击的重要目标。本文就如何建立起一套适用于城市地铁的核生化一体化监测技术进行了探讨, 并提供了相应的技术解决方案。

关键词: 公共安全; 地铁; 核生化; 监测

文章分类: 核监测技术及其应用的研究成果

0 引言

目前, 地铁作为缓解城市交通压力的有效工具, 具有能源消耗低、符合可持续发展的特点, 已经在许多国家的城市中得到广泛应用。我国正处于轨道交通建设的高峰时期, 但由于其具有人员密集、流动性大, 成分复杂, 空间相对封闭的特点, 使地铁在防范和防止恐怖袭击危害方面, 先天性存在劣势, 因此地铁安全已成为一个世界性的问题, 特别是在全球恐怖袭击频繁活动的今天, 地铁作为重要城市的主要公共交通设施, 一旦发生恐怖袭击, 受伤人员将难以估计, 并会直接导致交通受阻, 严重影响城市人民的正常生活秩序, 且极易引起一定的政治影响和社会轰动^[1]。因此, 完善有效的地铁核生化监测技术是确保城市安全运行和对“‘城市生命线’实时监测”的必要手段。

1 地铁核生化一体化监测的必要性

1995 年日本东京地铁沙林事件揭开了恐怖分子使用化学武器实施恐怖袭击的序幕, 2001 年“9.11”事件及其随后的炭疽事件改变了世界安全

战略走向, 引发了世界范围内的反恐与防恐浪潮, 世界各主要国家都将防范、应对核生化恐怖袭击纳入重要议事日程, 并逐步建立了比较成熟的防范与应对体系。

恐怖主义活动形式和潜在的威胁主要有纵火、爆炸、投放毒气和放射性物质等等, 其中化学毒气和放射性物质的施放, 由于有其独特性且危害后果巨大, 也成为恐怖活动的主要手段。一旦出现核生化物质入侵或泄露事故, 最初的几秒钟或者几分钟的判断和提供相应应急措施是至关重要的, 任何延迟和误判都会引发对人员和设备的更大范围损伤, 更有可能导致恐怖袭击发生后期的救援失败和事后处置失效等严重后果。因此, 配备完善有效的核生化监测系统可以: 减少恐怖袭击发生的风险概率; 变事后分析为主动侦测; 变盲目救援为针对性施救, 为紧急疏散赢得时间; 可及时将获取的信息传送给环控中心人员, 使其准确掌握核生化物质的种类、物质的浓度、扩散的方向、气流的方向、速度等信息, 工作人员则可以提前穿戴相应的

作者简介: 胡洁微 (1980-), 女, 辽宁营口人, 讲师, 硕士研究生, 主要从事核技术应用、检测技术、电子技术等方面的研究和教学工作。

防护用具，保护工作人员的自身安全；提供城市预警功能。^[2]

2 核生化一体化监测技术

2.1 核生化一体化监测技术

核生化一体化监测是指能够在同一平台上对核辐射、化学毒剂及生物战剂进行实时监测，并对获取数据进行分析、处理、整合并实时显示的系统，主要包括控制中心的监测平台和监测终端两大部分，二者之间具备数据通信能力；监测平台可对各个监测终端进行指令控制；可进行数据实时采集，并对监测数据进行备份、分析；具备数据处理能力，可对终端采集的复杂数据进行算法分析，得出结论；具备多种组网方式，可与控制中心或其他授权单位之间进行数据指令交互。

2.2 国内外核生化监测技术发展概况

国外核生化监测设备的发展一般在最初阶段都源于满足军用需求为前提，因此在装备建设方面，十分重视装备体系的融合集成，始终将实现装备功能一体化作为核生化防护装备发展的重点方向，并指出核生化一体化信息监测系统，应具有集先进的核生化检测、报警、取样以及信息传输功能于一体的基本模式。

如英国的核生化探测系统，该系统装有可以接入无线和有线数据传输的设备，是一套即插即用的设备组合，可以独立地连续对某一区域周围环境进行核生化监测；美国 MICAD/M27 型数字化核生化报警和报告系统，该系统包括显控单元、通用接口单元、标准串行通讯接口、无线遥测单元和核生化个人报警寻呼机等，系统配置十分灵活。

我国近年来相继举办了奥运会、国庆 60 周年庆典、世博会、大运会等一系列大型活动，这些活动的特点是参与人员多、周期长、突发状况多、信

息量大，使核生化安保任务执行起来相对困难。因此为确保活动安全顺利进行，各场地通常会配备全套的核生化监测设备，如移动物体放射性监测系统、固定式生物气溶胶监测报警系统、毒剂报警器、个人剂量计、侦毒包、生物剂快速侦检箱、核生化综合检测车等，这些设备基本代表了我国核生化监测领域的领先水平。

2.3 核生化一体化监测现有技术能力与差距

目前用于核生化监测的各类设备，无论是固定式的、个人便携式的还是车载式的，其监测功能还处于相互独立的状态，每次执行监测任务必须携带各式装备，才能组建较为完备的核生化综合监测系统，且监测设备与控制中心的组网能力差、自动化功能不强，与城市需要构建的核生化防护体系尚存在很大差距。

3 地铁核生化一体化监测系统构架

本文针对城市轨道交通的特点、遭受潜在威胁的可能性，结合现有防御手段，探讨建立灵活有效的防御体系、任务设备和实施手段，将自主研发与成熟技术相结合，研究设计可应用于城市地铁的核生化一体化监测系统。

3.1 地铁核生化一体化监测系统构建原则

反核生化恐怖任务复杂、繁重，对设备的需求种类多、范围广，因此在探测设备建设上，应主要考虑测量精度与速度优于现役防化装备、成本低于国外设备、且便于维护修理、在线升级及人员培训的国内自主研发型设备为主，类上突出建设现场快速检测设备和报警监控设备；在技术性能上注重一体化、智能化，确保其工作的可靠性、准确性和机动性；在指挥手段、通信方式等方面需互相兼容。

3.2 地铁核生化一体化监测技术建设内容

地铁核生化监测系统应基于信息一体化自动监测与处理的新架构，利用最新的核生化传感器技术、综合性信息平台、标准化数据接口和多种组网模式，将核生化信息采集与传输进行系统集成；实现智能探头、诸多终端与控制中心的有效联接；建立实时监控和预警报知体系，加强情报报告与信息交流的时效性和可信度；建立、完善反核生化恐怖信息库；减少核生化监测装备信息化集成费用，即具备集核生化探测报警、报知分析软件、指挥控制单元于一体的基本模式，使其操作维护更加简便，并贯穿于地铁运营全过程的各个环节，从而有效地提高地铁核生化一体化整体监测能力。

该构架的建立旨在通过设置于地铁主要部门的监控平台监测分布于地铁各主要位置的终端信

息，终端需挂载核生化多个不同种类探头，用于对核、生、化等可疑物质进行实时监测和探测，当某处第一次探测到核生化等可疑物质时，信号立即传输到终端进行快速处理，处理结果与地理信息打包再传输到所辖区域的监控平台，并自动显示在相关车站、控制中心和指挥中心的显示屏，若监测结果超过阈值，则立即报警，工作人员可根据监测信息做好个人防护后，一边指导人员及时疏散，一边处理可疑物质；若监测结果未超过阈值，可在不惊动群众的情况下，直接派专业人员携带个人监测设备或侦毒设备等赶往事发地进行相关处理。城市地铁核生化一体化监测系统的架构模型如图 1 所示。

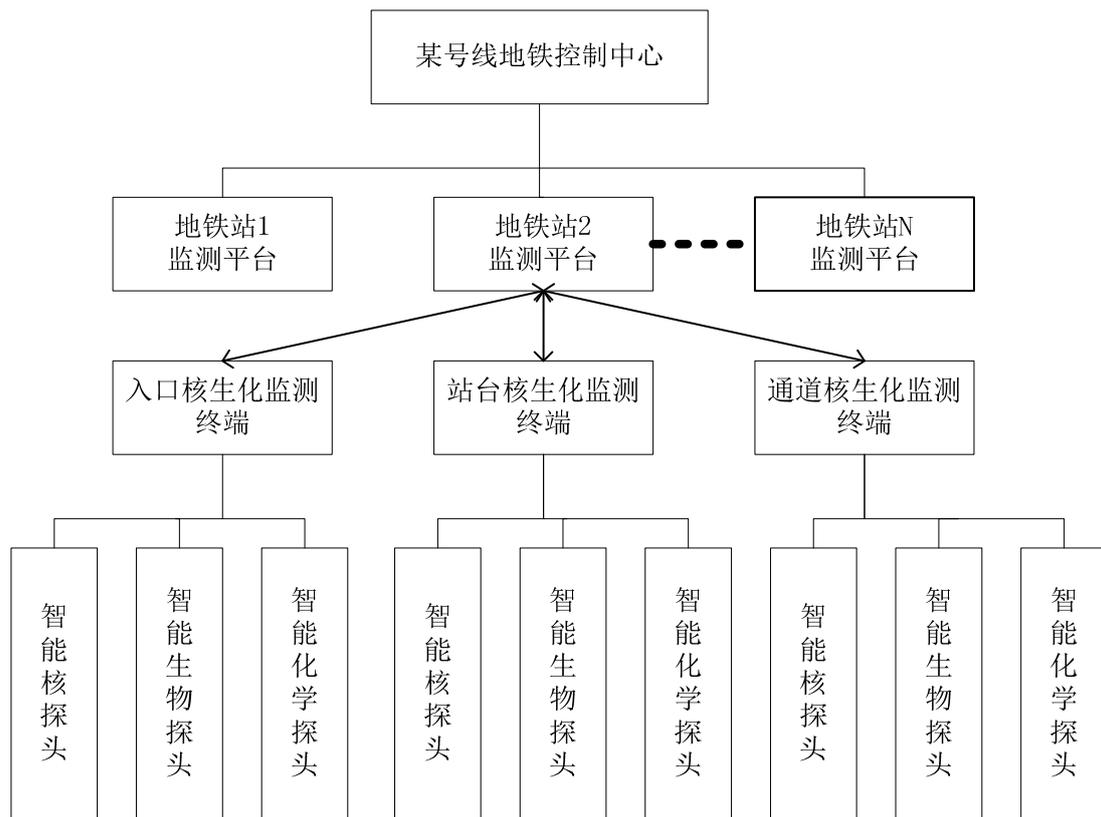


图 1 城市地铁核生化一体化监测系统架构

对于同期建设或建设期限相差小于两年的换乘站，车站监测设备尽量由统一的一家供货商提供，以便于系统的维护、升级及人员的培训，购入的设备可接入自辖车站的监测平台，先建的车站还

应具备接收、发送、管理和显示后建线车站信息的能力，监测平台尽量采用统一的人机界面和信令格式，以实现各相关控制中心监测数据的互传及指挥命令的上传下达。

3.3 地铁核生化一体化监测系统中的主要任务设备

地铁核生化一体化监测技术的建设既需考虑现有成熟技术,又需兼顾设备发展需求,集中精力解决好系统主要功能集成、系统功能实现方面的问题。地铁核生化一体化监测系统主要包括控制中心的监测平台和终端两大部分,监测平台用于对各个监测终端进行指令控制和数据交互,终端需挂载核生化多个不同种类探头,目前尚无此类系统,因此技术实现为自主研发。

城市核生化一体化自动监测系统的监测平台设计应能满足未来城市防御体系的建设需求,具有兼容性和扩展性,符合体系化、信息化、网络化和精确化的发展趋势,功能应具备集核生化报警探测装备、报知分析软件、指挥控制单元于一体的基本模式。监测平台基于 PC 机端进行开发,可与终端实时通信,信息汇总到 PC 端后可根据探头类型进入相应的分析、显示界面,界面操作应简单可靠、标准通用、维护简便。

终端总体定位为集核、生物和化学探测信息收集、处理、通信传输于一体的终端系统。该终端能够与核、生物、化学探测器探头相联,探头采取外挂式设计,利用嵌入式技术进行数据处理,基于 Windows CE 操作系统,首先对来自探头的信号进行调理、采集和判选,然后将信号分别经相应的处理模块,如核辐射信号处理模块、生物信号处理模块、化学信号处理模块等处理后给出辐射剂量率和核素种类、化学毒剂种类和毒剂浓度、生物毒剂种类和浓度等信息,若所测参数超过阈值可发出报警信号,同时配以由地理信息模块提供的测量点地理坐标及系统时间,通过串口或以太网等标准接口打包发送给监测平台、上级领导机关或有权限的友邻单位等^[3]。

探头由能够被终端平台自动识别的智能核辐射探测探头、智能生物探测器探头和智能化学探测器探头构成。探头主要完成核生化原始信息采集的任务,并将原始信号转换为符合终端处理要求的信号;探头自带身份信息,通过与终端相连,终端可自动获取探头信息,如探头类别、型号及编号、初始状态信息等,终端识别探头后可自启动相应的数据处理模块^[4]。

监测平台、终端与智能探头的有效联接,加强了地铁信息交流与情报报告的时效性和可信度,通过城市核生化情报预警系统的逐步联网,将使反核生化恐怖信息库愈加完善,这为有效防范核生化恐怖事件提供了可靠的情报保障。

4 结语

城市建设与“防御体系”建设相结合,可以有效提高城市的整体防护功能,同时也是现代化城市建设的必然要求。完备的核生化监测系统,可以降低大中型城市成为恐怖袭击目标的可能性,减少恐怖袭击发生的风险概率。本文提出的地铁核生化一体化监测技术解决了多任务设备功能独立、信息汇总难,组网能力差,自动化功能不强等诸多难题,同时也为未来城市地铁核生化监测技术的发展指引了方向。

参考文献:

- [1] 王静, 李佳明. 初探城市地铁反核化生恐怖袭击[J]. 民防苑, 2008 年增刊: 15-16.
- [2] 夏嫣. 轨道交通核生化/炸药监测系统技术初探[J]. 中国安防, 2010 年 5 期.
- [3] 房宗良. 一种用于核化生监测的防化信息终端: 中国, ZL 201010047533.7.2011-3-30
- [4] 房宗良. 一种智能防化探头: 中国, ZL 201010047534.1.2011-3-30

Study on City Underground NBC Monitoring Technology

Hu Jie-wei, Fang Zong-liang, Wen Qin-lin, Cao Jian-feng, Peng Jing, Xu Fei-yan
(Institute of Chemical Defense, Beijing 102205)

Abstract: Recent years, the NBC terrorism threat has become the major terrorist form which affects the national security and the public lives and properties. As the great power of politics and economy, and the main power of anti-terrorism around the world, China also faces the critical challenge of guarding against the NBC terrorist attack. The subway has become the main transportation due to its inexpensiveness and convenience, which also makes subway the target of terrorism attack. The paper discusses how to set up an NBC integrated monitoring technique suitable for city subways, and proposes a relative solution.

Key words: Public Security; Subway; NBC; Monitoring

氦系统在线氦测量电离室研制进展

陆光达, 程亮, 秦城, 张桂凯

(中国工程物理研究院, 四川省绵阳市 919 信箱, 621900)

摘要: ITER 产氦实验包层模块氦处理系统需要对管线内的氦浓度进行实时监测, 工艺在线测氦电离室是有效的手段。应用的基本要求包括, 电离室记忆效应低、气密性高和实时在线、快速反应式的测量。根据实际测量需求的技术指标, 作为初次研制的电离室, 设计的氦测量范围为 $10^4\text{Bq/ml} \sim 5 \times 10^8\text{Bq/ml}$ 。在现有检测条件下, 对电离室样机的相关性能进行了检测, 已经证明其记忆效应确实低于常规电离室。进一步的测试、试验和标定工作有待今后开展。

关键词: 氦工艺; 在线测量; 电离室; 设计

文章分类: 核监测技术及其应用的研究成果

1 前言

作为国际热核聚变实验堆 (International Thermonuclear Experimental Reactor, ITER) 建设项目的参与国之一, 我国将利用 ITER 提供的专用实验窗口, 放置产氦的实验包层模块 (Test Blanket Module, TBM), 以考核聚变堆自足式产氦实验的可行性。

依据 ITER 中国专家组总体安排, 将集中力量发展一套可供两种概念的 TBM 共用的氦处理系统, 包括氦提取系统 (TES)、氦冷却气纯化系统 (CPS), 氦系统的工艺技术均要为未来大型聚变堆氦的生产、提取、产氦率测量及冷却剂除氦等工艺奠定技术基础。为监测 TES 和 CPS 工艺管线内氦浓度, 需要在线低记忆效应的氦测量电离室, 要求具有的特性包括:

(1) 在线检测: 要求电离室有气体出、入接口, 能够被方便地接入 He 的气流路径中;

(2) 连续监测: 要求电离室能够实时地、连续地测出管路 He 气中的氦浓度, 氦浓度能被独立显

示和作为中心控制计算机的信号输入;

(3) 电离室材料无老化效应: 要求电离室使用的全部材料与氦的相容性好, 抗氦渗透性能好, 无老化效应;

(4) 低记忆效应: 要求电离室在长时间工作后, 由于管路气体中水汽和其它杂质气体吸附引起的本底增高小, 并且能够通过一定的方式降低或消除;

(5) 密封性能好: 要求电离室在被接入管路后对系统的整体漏率增加不大于 $2 \times 10^{-10} \text{Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$;

(6) 可靠性要求: 要求电离室测量的可靠性高, 数据误差小, 重复性好, 性能随时间的变化小。

(7) 体积与重量: 要求电离室的体积和重量尽可能小;

(8) 量程: 计划任务书提出是量程范围是 $10^4\text{Bq/ml} \sim 5 \times 10^8\text{Bq/ml}$ 。

2 电离室设计

当带电粒子通过气体时, 与气体原子的核外电子发生库仑作用, 入射粒子损失部分能量, 而气体

原子则电离或激发。轨道电子获得的能量足以克服原子的束缚成为自由电子，形成电子-离子对。通过收集射线产生的电子-离子对，获得单个或大量射线产生的电离电流，通过进一步分析可以得出与辐射相关的性质，这就是气体探测器所依据的物理基础。

氚电离室收集的是大量 β 辐射在气体中产生的电离电荷或电流，它通常由高压电极和收集电极组成，两个电极由绝缘体隔开并密封于容器内。辐射使电极间的气体电离，生成的电子和正离子在电场作用下漂移，最后到达电极，同时在电极上将感生电荷或电流。电离室后接信号测量电子学系统需要对极间电压或电流进行测量，得出电子-离子对的生成速率，可以转换为气体中氚的浓度。

2.1 基本参数依据

- (1) 氚放射性强度范围： $10^4 \sim 5 \times 10^8 \text{ Bq/ml}$
- (2) 氚 β 的平均能量：5.7 keV
- (3) 最小可测电流：按 $5 \times 10^{-14} \text{ A}$ 计算
- (4) 工作介质：He；电离能： $W=42.3 \text{ eV}$ （不同资料给出的数据不同，见到的最小数据为 29.9 eV，最低电离电位 24.5eV）。

2.2 电极绝缘方法

两电极间的绝缘电阻：要保证在极间电压 200V 下的漏电电流要不大于 $2 \times 10^{-16} \text{ A}$ ，则理论上绝缘电阻应大于等于 $10^{18} \Omega$ ，工程实际上应保证不小于 $10^{20} \Omega$ 。

目前，工程上，陶瓷材料是比较可行的高阻率绝缘材料，也有较好的机械强度。从机械强度的角度考虑，壁厚大些好，从加工的角度考虑，壁厚应不大于 4mm。设计确定为 4mm，电极间的电阻为：

$$R = \int_{r_1}^{r_2} \frac{\delta \cdot l}{S} dl = \int_{r_1}^{r_2} \frac{\delta}{2\pi r \cdot D} dr = \frac{\delta}{2\pi D} \cdot \ln(r_2 / r_1)$$

$$= 1 \times 10^{13} \Omega$$

上式中， δ 为电导率 (10^{14})， D 为材料厚度， r_1 、 r_2 分别为电极间绝缘材料的内、外半径。据上述计算结果，显然无法满足工程应用要求，因此，保护极的设计是必须的。

2.3 与电子学测量系统间的配套

(1) 前置放大器是收集极电流或电压极灵敏的初级感应与放大器件，其性能直接制约测量性能。因为前置放大器对输入电流或电压的敏感性，所以设计成与室体连为一个整体，其输入与陶瓷电极直接焊接，并希望前置放大器体积尽可能小，能安装在电离室底部的安装盒里。

(2) 极间电压：按 200V 计。

(3) 测量电流下限： $5 \times 10^{-14} \text{ A}$ ，测量电流上限： $3 \times 10^{-8} \text{ A}$ 。

(4) 测量显示范围：4 个量级量程范围。

3 电离室性能初步测试结果

3.1 电离室样机

电离室样机如图 1 所示。对电离室进行了几天的真空保持检漏，结果非常好，完全符合氚工艺系统要求，说明在密封性方面达到了加工技术要求。



图 1 电离室样机

3.2 漏电电流

环境气体条件下的漏电电流（含仪器本身漏电。该参数测量使用的是国外进口仪器）是无任何

氙（输入）条件下，仪器给出的输出信号。一般来说，漏电电流与极间电压有关。实际测得的数据是，在极间电压 70V~240V 范围内，漏电电流 $\leq 5 \times 10^{-15}$ A。

3.3 低压放电特性

极间电压分别为 100V 和 240V 时，在 2Pa~105Pa 气压范围内，未见到放电引起的读数跳动现象。因为检验了很多次，故可确认，在极间电压 250V 以下，电离室可以处在任意真空-压力范围。这一特点大大提高了测量操作的方便性，减少了保护仪器的约束性要求。

3.4 记忆效应

给电离室充入一定量的氙，然后加充 He 气至 1×10^5 Pa (1bar)，测量输出信号；再将电离室内气体用 He 气置换，测量残留的氙记忆效应。几次测量试验得出的结果为，记忆效应比原信号约小 4 个量级，且基本不随原来氙浓度的变化而变化。

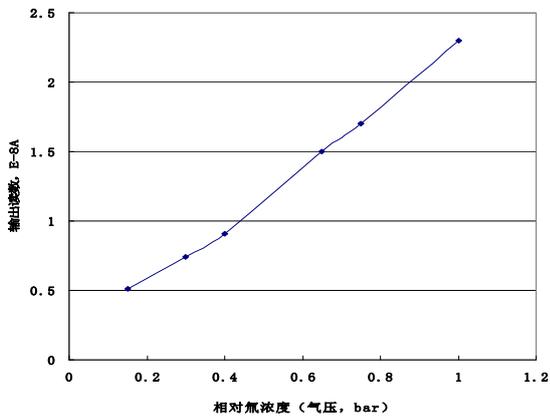


图 2 电离室对氙浓度的输出响应—降压过程中输出电流与氙浓度的关系

3.5 对氙浓度的输出响应

电离室对氙浓度的输出响应是其主要性能之一。初步进行了一下测试，方法是充入电离室一定量氙，再充入 He 至 0.1MPa，然后测量其输出信号；再逐渐抽除气体，在气压不断降低的过程中，测量输出信号。所得结果如图 2 所示。

4 初步结论

根据初步测试结果，所研制的电离室在气密性、漏电电流、极间电压、漏电保护等方面已经符合设计要求；电离室内气压在 0.04~0.1MPa 范围内，输出信号与氙浓度能成线性关系。下一步的工作目标是对电离室进行精密的校验，而在测量电子学方面也需要进一步加以研究发展。

参考文献：

- [1] 复旦大学、清华大学、北京大学，原子核物理实验方法[M]，修订第三版，北京：原子能出版社，1997.
- [2] 清华大学，核辐射物理及探测学[M]，北京：2004 年修改版，学校教材.
- [3] 卢希庭，原子核物理（修订版）[M]，北京：原子能出版社，2000 年.
- [4] 罗德礼，陈长安，陆光达，罗阳明，罗天勇. TBM 涉氙系统设计及关键技术研究[R]，国际热核聚变实验堆（ITER）计划专项（国内配套）项目申请书，四川材料与工艺研究所，2009 年 12 月

Ionization chamber development for tritium on-line monitoring

LU Guangda, CHEN Liang, QIN Chen, ZHANG Guikai

(China Academy of Engineering Physics, P.O. Box: 919-71, Mianyang, 621900, PR China)

Abstract: ITER Test Blanket Module associated tritium handling system is being researching and developing in china. The tritium concentration in its line pipe need to been monitored in real time. To achieve this goal, on-line tritium monitoring ionization chamber is the effective means. The basic requirements for the monitoring include ionization chamber memory effect in low, high air tightness, real-time and fast responding on-line measurement. According to the technical index for actual measurement requirements, as the initial development of the ionization chamber, the design of tritium measurement range is 10^4 Bq/ml $\sim 5 \times 10^8$ Bq/ml. In the current detection conditions, the ionization chamber prototype correlation properties are tested, and has proved its memory effect is lower than that of conventional products. Further testing and calibration work to be carried out in the future.

Key words: Tritium technology; On-line monitoring; Ionization chamber; Design

福岛核事故泄漏放射性监测

殷经鹏, 周崇阳, 申茂泉, 杨文静, 成智威, 周国庆, 胡之茜, 金玉仁

(西北核技术研究所, 陕西 西安 710024)

摘要: 为了解福岛核事故泄漏放射性核素造成的污染情况, 2011年4月2日至5月19日间, 在新疆某地利用大流量采样器对空气中的气溶胶进行了采集, 共获取36个样品; 应用自主研发的放射性氙取样、分离和测量系统(XESPM-II)于3月30日在新疆某地采集空气氙样品1个; 4月13日至26日在北京国家数据中心采集氙样品13个; 此外, 4月5日在新疆某地采集了雪水样品1个。所得的样品利用超低本底HPGe γ 谱仪进行分析。监测到福岛核事故释放并扩散至新疆某地的放射性核素有 ^{131}I 、 ^{137}Cs 、 ^{134}Cs 和 ^{133}Xe 。3月30日所取空气样品 ^{133}Xe 活度浓度为 100mBq/m^3 ; 气溶胶样品中 ^{131}I 、 ^{134}Cs 、 ^{137}Cs 于4月5日达到最大值, 活度浓度分别为: 0.95mBq/m^3 、 0.25mBq/m^3 和 0.24mBq/m^3 ; 雪水样品中 ^{131}I 的活度浓度值为 240mBq/L ; ^{134}Cs 和 ^{137}Cs 活度浓度分别为 19mBq/L 和 23mBq/L 。此外, 在北京地区放射性氙的监测中, 监测到了 ^{133}Xe 和 $^{131\text{m}}\text{Xe}$, 最高浓度分别为 377mBq/m^3 和 81mBq/m^3 , 随着时间的推移呈现降低的趋势, 此结果与放射性核素台站系统的监测结果接近。

关键词: 福岛核事故; 人工放射性核素; ^{134}Cs s/ ^{137}Cs ; 辐射环境监测

文章分类: 核监测技术及其应用的研究成果

引言

2011年3月11日14时46分, 日本本州岛东北发生9.0级地震, 福岛第一核电站由于地震和海啸导致多个核反应堆机组冷却系统故障, 冷却水面下降致堆芯裸露。冷却不足使堆芯温度超过了锆-水反应极限温度产生大量氢气, 氢气爆炸导致了放射性物质泄漏。日本原子能安全委员会指出, 福岛第一核电站核事故发生后, 每小时1万兆贝克的大量放射性物质泄漏可能持续了“几个小时”。根据国际放射性事件评估标准, 按放射性 ^{131}I 换算, 泄漏的放射性物质活度达到数万兆贝克勒尔时, 事故级别将定为7级。核事故后, 主要释放的核素包括放射性氙的同位素、 ^{131}I 、 ^{134}Cs 、 ^{137}Cs 、 ^{90}Sr 、 ^{89}Sr 等。这些人工放射性核素随着大气环流快速扩散, 美国、冰岛、法国、瑞典、俄罗斯、韩国等国都宣布检测到了福岛核事故释放出的 ^{131}I 、 ^{137}Cs 、 ^{134}Cs 、

^{133}Xe 等放射性核素^[1,2,3,4]。

根据我国环境保护部(国家核安全局)发布的数据^[5,6,7]: 3月26日首次在黑龙江监测到微量 ^{131}I 。三个监测点的气溶胶活度浓度分别为 $0.083 \sim 0.45\text{mBq/m}^3$ 、 $0.068 \sim 0.68\text{mBq/m}^3$ 、 $0.069 \sim 0.69\text{mBq/m}^3$, 远低于国家标准(GB18871-2002)^[6,8]规定的 ^{131}I 导出限值 24.3Bq/m^3 。此后, 3月29日首次在安徽省、广东省、广西壮族自治区和宁夏回族自治区监测点的气溶胶取样中检测到了极微量的人工放射性核素 ^{134}Cs 和 ^{137}Cs , 浓度均不高于 10^{-5}Bq/m^3 量级。4月1日新疆地区首次报告监测到 ^{131}I , 活度浓度为 0.42mBq/m^3 , 并于4月6日首次监测到 ^{134}Cs 和 ^{137}Cs , 活度浓度分别为 0.45mBq/m^3 和 0.38mBq/m^3 。

为掌握福岛核事故泄漏放射性核素造成的污染, 对新疆某地空气、降雪和北京地区空气中人工

放射性核素进行了监测。在 2011 年 3 月到 5 月间,共进行了 36 次空气气溶胶样品分析,14 次空气中放射性氙取样分析和 1 次降雪中放射性核素分析,监测到的核素有 ^{131}I 、 ^{134}Cs 、 ^{137}Cs 、 ^{133}Xe 和 $^{131\text{m}}\text{Xe}$ 。

1 器材与方法

1.1 主要器材

利用 121FT 型大流量采样器进行气溶胶样品的采集,其实际工作流量经校准为 $64.5\text{m}^3/\text{h}$; 取样滤材选用 NR2 型聚丙烯,其对 $10\mu\text{m}$ 以下的大气总悬浮物收集效率大于 98%。气体经过大流量采样器时气溶胶颗粒被滤纸收集。

利用自主研制的放射性氙取样、分离和测量系统 (XESPM-II) 对空气中氙进行采集,该系统对 ^{133}Xe 的最小可探测浓度 (MDC) 可达 $0.25\text{mBq}/\text{m}^3$ (测量 12h)。

样品分析仪器采用超低本底 HPGe γ 谱仪测量系统 (ULB)。该系统由 BE3830 宽能型 HPGe 探测器、DSA1000 多道分析器、Genie2000 能谱采集与分析软件、777 型铅屏蔽室及 LabSOCS 无源效率刻度软件等组成。该谱仪系统测量不同能量全能峰的半高宽 (FWHM) 为 $0.56\text{keV}@59.54\text{keV}$, $1.84\text{keV}@1332\text{keV}$, 其 $20\text{keV}-1500\text{keV}$ 积分本底为 0.95cps 。

1.2 样品采集及预处理

2011 年 4 月 2 日至 5 月 19 日间,利用 121FT 型大流量采样器定点进行气溶胶取样,取样时间为 24 小时,直至大气中 ^{131}I 活度浓度低于监测方法的最小可探测活度后 14 天,停止取样,获取了 36 个样品。气体经过大流量采样器时气溶胶颗粒被滤纸收集,采集结束后,将取得的滤纸样品进行折叠并用压样机压制后,在 $\Phi 75\text{mm}\times 25\text{mm}$ 聚乙烯样品盒中待测。

2011 年 3 月 30 日利用放射性氙取样、分离和测量系统 (XESPM-II),在新疆某地对空气中氙进行了取样、纯化、富集,制源后用 ULB 系统测量。2011 年 4 月 11 日在北京市北五环外的北京核素实验室五楼,进行放射性氙样品的取样分析,4 月 26 日结束。

2011 年 4 月 5 日新疆某地降雪,当日 10 时采集降雪样品,置于实验室内自然融化成雪水,装入 $\Phi 14\text{cm}\times 17\text{cm}$ 塑料杯内密封后测量;采用磷钼酸铵法^[9],对采集的 60 升雪水中的 Cs 元素进行富集,富集后的样品装于 $\Phi 75\text{mm}\times 25\text{mm}$ 聚乙烯样品盒内待测。

1.3 样品测量与分析

ULB 谱仪系统利用 $^{241}\text{Am}-^{137}\text{Cs}-^{60}\text{Co}$ 混合点源进行能量刻度。利用 LabSOCS 软件进行无源效率刻度,LabSOCS 软件可快速地计算不同形状、基质和密度样品的探测效率,经实验对比,该方法与标准体源效率刻度相比较,二者之间的相对偏差小于 8%。

空气中放射性核素的监测包括取样、等待和测量三个过程,时间分配如图 1 所示。

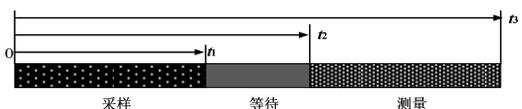


图 1 空气中放射性核素取样分析时间分配

空气气溶胶样品中放射性核素 (^{131}I 、 ^{134}Cs 、 ^{137}Cs 、 ^{133}Xe 和 $^{131\text{m}}\text{Xe}$) 活度浓度计算公式为:

$$A = \frac{N}{\varepsilon \cdot P_{\gamma} \cdot v \cdot \eta} \cdot \frac{\lambda^2}{(e^{\lambda \cdot t_1} - 1) \cdot (e^{-\lambda \cdot t_2} - e^{-\lambda \cdot t_3})} \quad (1)$$

雪水样品中放射性核素 (^{134}Cs 、 ^{137}Cs) 的活度浓度计算公式为:

$$A = \frac{N}{\varepsilon \cdot P_{\gamma} \cdot t \cdot V \cdot \eta} \quad (2)$$

式中: A 为取样期间空气中核素的平均活度浓度,

Bq/m^3 ; λ 为核素的衰变常数, s^{-1} ; v 为空气取样速率, m^3/s ; V 为取样体积, m^3 ; t 为测量时间, s ; t_1 为取样时间, s ; t_2 为开始取样至等待完成时间, s ; t_3 为开始取样至测量完成时间, s ; N 为待测核素特征峰净计数; \mathcal{E} 为待测核素特征 γ 射线的探测效率; P_γ 为待测核素发射特征能量 γ 射线的几率; η 为滤材的收集效率、氙的回收效率或水中铯的化学回收效率。

2 结果与讨论

2.1 大气气溶胶样品分析结果

采用超低本底 HPGe γ 谱仪对采集的 36 个气溶胶样品进行 γ 能谱分析, 其中人工放射性核素主要有 ^{131}I 、 ^{134}Cs 、 ^{137}Cs , 不同采样时间的活度浓度的变化曲线如图 2。

从图 2 可见, 各核素的活度浓度变化趋势基本一致。空气中气溶胶样品中人工放射性核素 ^{131}I 、 ^{134}Cs 和 ^{137}Cs 的活度浓度最大值均出现在事故后的 4 月 6 日, 以 ^{131}I 的活度浓度最高为 0.95mBq/m^3 , ^{134}Cs 和 ^{137}Cs 的活度浓度分别为 0.25mBq/m^3 和 0.24mBq/m^3 , 此后活度浓度总体上逐渐变小, 4 月 14 日以后样品中的 ^{134}Cs 和 ^{137}Cs 的活度浓度降低至仪器的探测限以下, 5 月 5 日 ^{131}I 的活度浓度降低至仪器探测限以下。

此外, 由于初级宇宙射线通过核反应, 在高层大气中不断产生宇生核素 ^7Be , 然后逐渐沉降到地表大气中, 此次气溶胶取样分析可监测到 ^7Be 辐射的 477.6keV 特征 γ 射线。空气中 ^7Be 活度浓度与宇宙射线、天气、海拔高度、降水等因素有关, 其活度浓度变化可作为人工放射性核素监测的参考, 也可作为剂量评价的参考^[10], 图 3 为 ^7Be 的活度浓度的变化曲线, 除 5 月 15 日监测结果较高为 30.6mBq/m^3 外, 其它时间均保持在一个比较平稳的

水平, 为 $9.1\text{--}17.3\text{mBq/m}^3$ 。

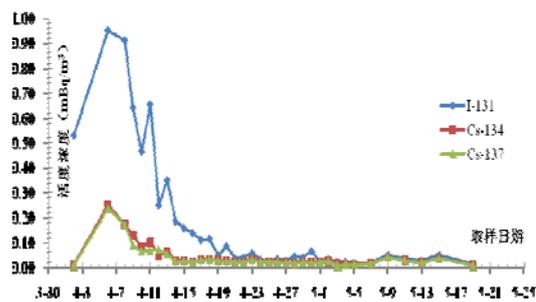


图 2 空气气溶胶人工放射性核素监测结果

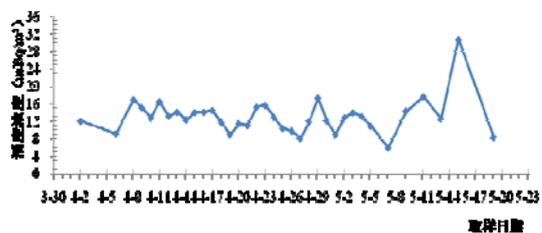


图 3 空气气溶胶中 ^7Be 活度浓度的变化

2.2 空气中放射性氙监测结果

监测结果表明, 2011 年 3 月 30 日新疆某地空气中放射性 ^{133}Xe 平均活度浓度为 100mBq/m^3 。

2011 年 4 月 12 日~4 月 26 日, 在北京国家数据中心监测到空气中放射性 ^{133}Xe 活度浓度为 394 至 35mBq/m^3 。监测周期内, 共采集分析有效样品 14 个, 测到了 ^{133}Xe 和 $^{131\text{m}}\text{Xe}$ 两种核素, 其在空气中的浓度如表 1 所示。该地空气中 ^{133}Xe 活度浓度以 4 月 12 日最高 394mBq/m^3 , 随后快速下降, 至 26 日为 35mBq/m^3 。

北京疾病预防控制中心使用法国 SPALAX 台站系统进行了 ^{133}Xe 监测, 其监测结果如图 4 黑色曲线所示。两套系统给出的 ^{133}Xe 活度浓度变化趋势一致, 具体活度浓度值存在一定差异, 其主要原因是采样地点不同, 且两套系统之间没进行过比对, 可能存在小的系统差。

表 1 日本地震后北京核素实验室放射性氙监测数据

取样开始时间	有效取样体积 (m ³)	¹³³ Xe 活度浓度 (mBq/m ³)	^{131m} Xe 活度浓度 (mBq/m ³)
2011-4-11 17:13	15.9	377	
2011-4-12 22:00	14.4	327	81
2011-4-13 20:00	18.4	213	
2011-4-14 22:40	13.7	92	39
2011-4-15 09:15	15.9	136	
2011-4-16 22:00	15.0	133	
2011-4-18 07:17	20.7	135	
2011-4-19 07:14	16.3	90	
2011-4-20 07:10	16.8	74	
2011-4-20 22:43	18.0	74	
2011-4-22 19:30	17.8	48	
2011-4-24 21:50	16.9	33	8
2011-4-25 16:12	17.8	32	
2011-4-26 13:15	18.4	25	

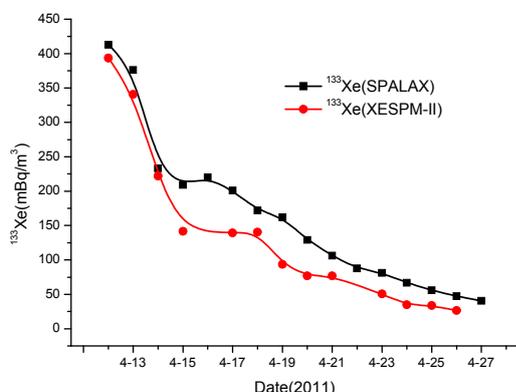


图 4 XESPM-II 和 SPALAX 的监测结果对比

2.3 新疆某地降雪中人工放射性核素监测

2011年4月5日在新疆某地降雪雪中监测到了¹³¹I、¹³⁴Cs和¹³⁷Cs等人工放射性核素。其中γ谱直接测量雪水样品给出的¹³¹I活度浓度为240mBq/L；经磷钼酸铵对铯进行富集，γ谱测量分析得出¹³⁴Cs和¹³⁷Cs的活度浓度分别为19mBq/L和23mBq/L，两者的比值为0.83，测量不确定度为10%；使用超低本底液体闪烁能谱仪测量得出雪水样品中³H的活度浓度为10.7Bq/L，与新疆某地自来水中³H的活度浓度相当。

2.4 ¹³⁴Cs与¹³⁷Cs比值

易裂变核材料发生裂变反应放出瞬发中子后形成裂变产物，与中等质量数的核素相比具有过多的中子，是不稳定的β放射性核素，构成了同量异

位链^[9]。¹³⁷Cs既可通过核裂变反应直接产生（有一定的独立产额），也可由质量数为137的同量异位链中¹³⁷Xe产生（有一定的累积产额），其独立产额和累积产额都较高。¹³⁴Cs在瞬发核裂变的独立产额和累积产额都很小，如在核爆炸的过程中产生的¹³⁴Cs量很少。但¹³⁴Cs可由稳定的裂变产物¹³³Cs俘获热中子产生，所以在长期辐照和高比功率的热中子反应堆中¹³⁴Cs不断得到积累，最后达到动态平衡^[11]。因此，¹³⁴Cs与¹³⁷Cs比值可作为核反应堆事故和核试验泄漏的判据之一。

本次监测到不同日期的¹³⁴Cs/¹³⁷Cs比较稳定，均值为1.09±0.44。如图5所示。

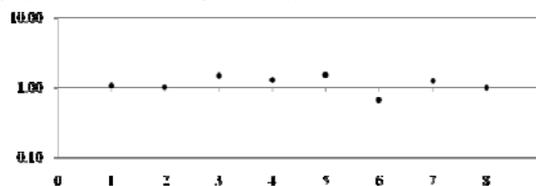


图 5 ¹³⁴Cs与¹³⁷Cs比值

3 结论

(1) 通过对新疆某地的空气气溶胶和雪水、北京空气中放射性氙取样分析，监测到福岛核事故释放的部分放射性核素，有¹³¹I、¹³⁴Cs、¹³⁷Cs、¹³³Xe和^{131m}Xe。

(2) 新疆某地气溶胶样品中人工放射性核素的活度浓度最大值出现在事故后的4月6日,此后活度浓度总体上逐渐变小。此外,4月5日在新疆某地的降雪中监测到了 ^{131}I 、 ^{134}Cs 和 ^{137}Cs 。

(3) 2011年4月12日~4月26日,在北京国家数据中心监测到空气中的 ^{133}Xe 、 $^{131\text{m}}\text{Xe}$ 。其中,放射性 ^{133}Xe 活度浓度以4月12日最高为 394mBq/m^3 ,随后快速下降。

(4) 多个空气气溶胶样品和雪水样品中的 ^{134}Cs 与 ^{137}Cs 比值为 1.09 ± 0.44 ,与文献中美国的监测结果相符。

(5) 福岛核电事故释放的放射性物质对新疆某地的大气和大气沉降物造成了一定的污染,但污染程度轻微,在可接受范围。

参考文献:

- [1] IAEA Briefing on Fukushima Nuclear Accident[EB/OL].
<http://www.iaea.org/newscenter/news/tsunamiupdate01.html>,2011.6.2,
- [2] 东京电力公司官网
[EB/OL].http://www.tepco.co.jp/nu/fl-np/press_fl/2010/2010-j.html
- [3] world-nuclear-news [EB/OL].

http://www.world-nuclear-news.org/RS_Battle_to_stabilise_earthquake_reactors_1203111.html

[4] Radiological Monitoring and Consequences of Fukushima Nuclear Accident[EB/OL].

<http://www.slideshare.net/iaea/radiological-monitoring-and-consequences-of-fukushima-nuclear-accident-2-june-2011>,2011.6.2.

[5]环境保护部(国家核安全局)在黑龙江检测出极微量放射性碘[EB/OL].

索引号:000014672/2011-00224,2011.3.26.

[6] 环保部门发布4月6日全国环境辐射监测结果[EB/OL].

索引号:000014672/2011-00280,2011.4.6.

[7] 环保部门继续在我国部分地区检测出极微量人工放射性核素[EB/OL].

索引号:000014672/2011-00280,2011.4.6.

[8] GB18871-2002,电离辐射防护与辐射源安全标准[S].

[9] GB 6767-86,水中铯-137放射性化学分析方法[S].

[10] 戴科荐,祝莉,姜让荣.气溶胶 ^7Be 活度浓度的测量方法及其应用[J].原子能科学技术,2011(45)4:487-490.

[11] H.F.古雪夫等编著,华明川,刑馥吏译.裂变产物放射性特性手册[M].北京:原子能出版社,1980.206-207.

Radionuclide monitoring of the Fukushima nuclear accident leaking

YIN Jing-peng, ZHOU Chong-yang, SHEN Mao-quan, YANG Wen-jing, CHENG Zhi-wei,
ZHOU Guo-qing, HU Zhi-qian, JIN Yu-ren

(Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

Abstract: In order to realize the pollution episodes caused by the radionuclide leakage of the Fukushima nuclear accident, Somewhere in Xinjiang, On 2 April to 19 May 2011, collected 36 aerosol samples by Large flow of air sampler; On March 30th, collected a sample of Radioactive Xenon in the air by the self-developed Radioactive Xenon sampling、separation and measurement system (XESPM-II); On April 5th, collected a sample of snow water; On April

13 to 26, collected 13 Xenon samples in Beijing national data center; and the samples were analyzed by using Ultra-Low Background HPGe γ spectrometer system. Monitored and found some radionuclide which spread to release somewhere in Xinjiang in China after Fukushima nuclear accident, including ^{131}I 、 ^{134}Cs 、 ^{137}Cs and ^{133}Xe . The activity concentration of ^{133}Xe in air samples that collected on March 30 was 100mBq/m^3 ; and on April 5, the radiation levels of ^{131}I 、 ^{134}Cs and ^{137}Cs in Aerosol samples achieved maximum, and their activity concentration were respectively 0.95mBq/m^3 、 0.25mBq/m^3 and 0.24mBq/m^3 ; And the activity concentration of ^{131}I 、 ^{134}Cs and ^{137}Cs in snow water samples were respectively 240mBq/L 、 19mBq/L 、 23mBq/L . In addition, in Beijing area Radioactive Xenon monitoring, found ^{133}Xe and $^{131\text{m}}\text{Xe}$, and their highest concentration were respectively 377mBq/m^3 81mBq/m^3 , the concentration were presenting the trend of the lower with the passage of time, and were close to the results monitored by radionuclide stations system.

Keywords: Fukushima Nuclear Accident; Artificial radionuclide; ^{134}Cs divided by ^{137}Cs ; Environmental radiation monitoring

固体钾肥样品钾含量的放射性快速测定

石国柱, 李松林, 陈若富, 秦芝, 雷富安, 李恒远, 沈爱花, 程宏生

(中国科学院近代物理研究所, 甘肃兰州 730000)

摘要: 采用近代物理研究所自行生长的铯激活碘化铯晶体, 以日本 Hamamatsu 公司生产的高灵敏度光电倍增管 R7724 耦合为探头, 并配以自主研发的前端电子学和数据采集系统, 研制出一款高精度测钾仪。通过对 ^{40}K 能量为 1.461MeV γ 射线的测量, 确定了探测器的放大倍数和阈值。采用放射性法与重量法, 在完全无屏蔽条件 (300s) 下测高含量钾盐, 测量结果对比, 其相对误差 $\leq 13.22\%$; 在简单屏蔽条件下, 延长测量时间 (600s) 测低含量钾盐, 两种测量方法相对误差 $\leq 10\%$ 。上述结果表明, 利用我们研制的测钾仪测量 ^{40}K γ 辐射, 对粉末状固体钾盐样品的钾含量进行即时快速测定是可行的。

关键词: 测钾仪; CsI(Tl)晶体; K; 放射性法; 重量法

文章分类: 核监测技术及其应用的研究成果

1 引言

当今化肥工业的主要矿物原料 80%来源于化工矿产中磷、硫、钾, 我国磷资源储量居世界首位, 不仅能够满足国内需求, 还可有部分出口; 硫资源对外依存度超过 50%; 钾资源的自给率却低于 35%, 而且主要依靠国外进口。近年来随着我国农业经济稳步较快的增长, 使得中国对化肥乃至整个化工矿业的需求急剧增加, 磷、硫、钾供需矛盾也日益突出。自然界中天然存在钾的同位素有三种 ^{39}K 、 ^{41}K 、 ^{40}K , 其天然丰度分别为 93.26%、6.73%和 0.0117%。前两者均为稳定同位素, 而后者 ^{40}K 是钾的放射性同位素, 其主要衰变模式为 89.3%的 β^- 衰变 (β^- 端点能量为 1.31MeV) 及其伴随的 γ 衰变 (γ 射线能量为 1.461MeV)。 ^{40}K 的半衰期很长 ($T_{1/2}=1.28\times 10^9\text{a}$), 故可认为它在钾元素中的含量是固定的, 因此可以通过测量这些 γ 射线的强度来计算钾盐样品中钾的含量^[1-2]。

在盐湖开发、钾矿勘探和钾肥生产过程中, 如

何快速测定钾矿、卤水、油田水或钾肥中钾离子的含量, 目前国内外尚无较好的方法。传统的化学分析方法一般分析周期较长, 采用大型分析仪器在野外又难以实现。国外公司生产的放射性仪器也仅能用于特定的场合且测量精度难以达到要求^[3]。1992年青海盐湖所曾研制出便携式 β 计数管测钾仪^[4]用于钾矿中 ^{40}K 的探测, 它仅能反映样品表层的钾含量, 不适用于探矿工作中所涉及到的大体积容器内和块状固体样品中钾含量的测量。北京核闪烁元件厂研制出的FD3022四通道 γ 谱仪^[5], 它使用的是碘化钠 (NaI) 晶体, 存在着探测效率较低、易潮解等缺点。因此, 开展快速 γ 测钾仪的研究工作, 对于钾资源的可持续开发, 提高钾盐的质量和钾肥生产企业的生产效益以及加快钾盐矿床的勘探, 都具有非常重要的现实意义。中国科学院近代物理研究所自行生长的铯激活的碘化铯 (CsI(Tl)) 晶体, 具有密度大、平均原子序数高等特点, 从而阻止本领强、探测效率和灵敏度高, 可使晶体探头体积减小而更加紧凑; 晶体基本不潮解, 无需真空封装, 具有很

好的抗辐照能力，是一种综合性能优良的闪烁晶体；CsI(Tl)晶体没有解理面、具有较强的可塑性，可制成各种形状的探测器，同时能承受猛烈的冲击、震动以及大的环境温度梯度而不会损坏；一般光产额比NaI(Tl)晶体高40%左右，在 γ 射线能量低于5MeV左右、环境要求比较苛刻的条件下常用CsI(Tl)代替NaI(Tl)晶体，在给定的某一峰总比下，可以采用较小尺寸的CsI(Tl)晶体；由于对 γ 射线和X射线有较高的探测效率，而被广泛用于高能物理、医疗仪器、宇宙射线探索、安全检测和工业探测等领域。因此，利用闪烁晶体碘化铯制作探测器，测量 ^{40}K 的特征 γ 射线(1.461MeV)的研发是可行与实用的。

在开展研制工作之前我们利用高纯锗探测器测量了环境的本底谱，观察到在钾特征 γ 射线附近没有其他干扰射线，拟使用的碘化铯晶体其能量分辨率好于8%，已足够分辨出钾的特征 γ 射线。亟待解决的问题在于将这些技术集成化，能在恶劣环境中使用，做到便携、可靠以及方便。快速测钾仪主要由作为探测介质的CsI(Tl)晶体、光电倍增管、后继电子学和计数器等构成，其探测的原理是 γ 射线进入闪烁晶体中激发而产生荧光光子，利用反射物和光导将闪烁光子尽可能多地收集到灵敏度极高的光电倍增管的光阴极上，由于光电效应，光子在光阴极上击出光电子，然后在光电倍增管中倍增，将光子转换成电信号，再经自制的前置放大器放大，并经过多功能的成形放大器和幅度分析器处理选择送入脉冲数字信号计数，应用微处理器软硬件处理功能实现了仪器的智能化；配合总线技术的存储器，完成了数据的存储；同时应用字符显示模块，实现了人机交换，整个仪器的供电实现了低功耗、电池电压的有效值报警，通过接口，结合仪器测量结果分析软件实现了数据的分析处理。

2 测钾仪的实验测量

2.1 实验仪器与试剂

快速测钾仪的电路主要由自制的电荷灵敏前置放大器 (Charge Sensitive Preamplifier, CSA)、自制的成形放大器 (Shaping Amplifier)、单道分析器 (Single Channel Analyzer, SCA)、MCU 单片机、LCD 为液晶显示面板、电源电路构成；闪烁晶体为近代物理研究所自行生长的 CsI(Tl)晶体 (尺寸： $\Phi 50 \times 50$)；标准样品采用分析纯的固体粉末 KCl 和 NaCl 试剂配制成总质量均为 172g 的系列样品，系列标准样品均置于一规定几何尺寸的圆筒内测量。

2.2 仪器性能的测试过程

2.2.1 自制主放放大倍数的确定

自制主放的放大倍数是通过调节主放的输出电压来确定，因而与自制获取系统 (单道) 连接，调节输出电压，计数值会随输出电压变化而发生改变，从而可以确定出主放的最佳放大倍数，如图 1 所示。测试条件设为：上阈：2.0V；下阈：1.1V；测量时间为 300s；闪烁晶体探头端用自制小铅套屏蔽，95%KCl 样品放置于探头前端，通过计数器记录其计数值。横坐标为主放的输出电压，纵坐标为 95%KCl 样品与本底之间计数值的差值。从图 1 中可以读出，对应计数值为最大时输出电压为 9.4mV，我们认为此时自制主放的放大倍数为最佳值。

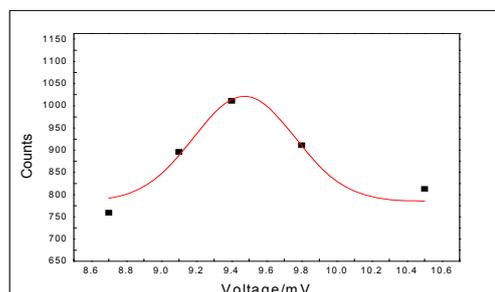


图 1 放大倍数的确定

2.2.2 单道分析器阈值的确定

根据射线能量确定峰位时需要预先对谱仪进行能量刻度，能量刻度就是利用脉冲幅度谱中全能

峰的位置来刻度能量^[6],因为它对 γ 射线能量的改变最灵敏,而对各种干扰效应最不灵敏。由于CsI(Tl)晶体的光输出与 γ 射线能量之间并不具有严格的正比关系。因此,一般利用一套能量已知的标准 γ 源来进行刻度。即测量各种单能 γ 射线的脉冲幅度谱,求出 γ 射线能量与全能峰的脉冲幅度一一对应的刻度曲线。那么待测的峰位就可以通过已测得的能量刻度曲线找出射线能量及该能量所对应的峰值电压^[7]。由于 ^{40}K 中的 γ 射线(1.461MeV)是一个单能峰,虽然天然本底中存在 ^{40}K ,但在该 γ 峰附近却没有其他干扰射线的能量峰,因而我们可通过设定上、下阈来降低本底对计数的贡献。本工作研制的测钾仪为减少本底对探测计数的影响,采用阈值只取 ^{40}K 的1.461MeV的全能峰,探测器所测计数值主要为 ^{40}K 的贡献。由于谱仪的峰位能量和峰位电压是一一对应的,我们分别测量了 ^{137}Cs 源、 ^{60}Co 源及 ^{152}Eu 源的 γ 能谱,阈宽设为0.05V,调节阈值的变化范围为0.05V~3.0V。由测得的 γ 谱图可读出具体能量与峰位电压的结果,以峰位电压为横坐标,所对应能量为纵坐标,对前面测试结果进行线性拟合,可得到能量刻度曲线近似为一条直线^[7],如图2所示。

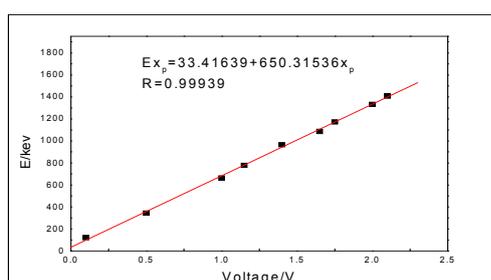


图2 能量-峰位电压线性拟合曲线图

由拟合曲线可以看出, ^{40}K 能量为1.461MeV的 γ 射线所对应峰位电压为2.2V,所以确定 ^{40}K 全能峰对应的下阈为1.9V,阈宽0.6V。在线性方程中, X_p 为道中心平台电压,直线斜率为每0.05V对应的能量间隔,又称增益。

3 测量结果及讨论

在测量时间、温度、电压等一定的条件下,对一组已知钾含量的标准样品进行测试,以钾含量为横坐标,有样品时测得的计数为纵坐标进行线性拟合。样品测试的条件分别设定为:(1)测试高含量样品时没有屏蔽,每个样品测量时间均为300s;(2)测试低含量样品时晶体端用自制小铅套屏蔽,测量时间设为600s。不同测试条件下探测器下阈均为:1.9V,阈宽:0.6V,其测试步骤如下:

(i)首先作标准曲线的测量,对KCl含量不同的系列标准样品逐一进行测量计数。每个样品测量5次,求其平均计数值,根据系列标准样品的计数结果作出KCl含量与对应计数值关系的标准曲线。

(ii)对未知含量的待测样品进行测量,测量方法和过程同上。

(iii)对待测样品的计数值进行处理,将其结果采用标准曲线法换算成KCl含量测定结果。

(iv)用重量法对待测样品的KCl含量进行分析,由放射性测定结果与重量法分析结果进行对比和分析,可算出放射性测量法的误差。

先对高含量样品进行测试,由于待测样品KCl含量一般都在10%以上,因而我们调配的标准样品的取样都在10%以上。根据标准样品KCl含量与每300s平均计数的关系作标准曲线如图3所示,曲线中所给误差为统计误差,由图3可见样品计数与钾含量是成正比的。

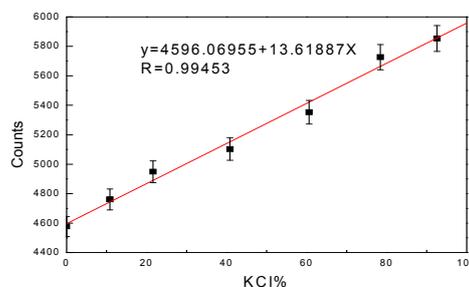


图3 标准样品计数与KCl含量关系的标准曲线(300s)

表 1 列出了待测样品的平均计数值, 根据测量的计数值用标准曲线计算出的 KCl 含量(放射性测量法结果)、重量法分析结果以及两种测量法结果

对比的相对误差。由表 1 所列的测量结果可以看出, 用放射性方法测量粉末状待测样品 KCl 的含量与重量法测量结果对比, 相对误差均在 13.22%以内。

表 1 样品测量结果

待测样品编号	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7
平均计数值	4732.4	4821.4	4982.8	5132.6	5271.8	5564.2	5583.4
放射性法测量值(KCl%)	10.01	16.55	28.40	39.40	49.62	71.09	94.53
重量法测量值(KCl%)	10.83	15.17	25.08	40.83	50.70	69.13	91.05
放射性法相对误差(%)	-7.57	+9.10	+13.22	-3.50	-2.13	+2.84	+3.82

对低含量 KCl 的样品的测量, 采用与高含量 KCl 的样品相同的测量和数据处理方法, 因为待测样品 KCl 含量一般都在 0~25%以内, 所以我们调配的标准样品的取样也都在这个范围内。可得到标准样品计数与 KCl 含量的关系曲线如图 4 所示, 标准样品的 KCl 含量与每 600s 平均计数值及放射性测量结果与重量法分析结果对比的相对误差如表 2 所列。

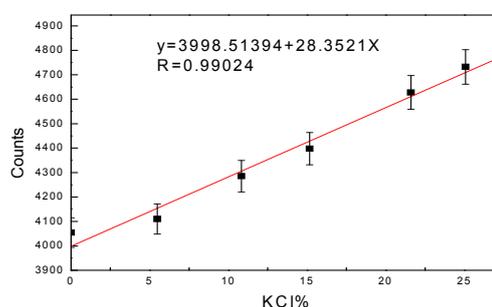


图 4 标准样品计数与 KCl 含量关系的标准曲线(600s)

表 2 样品测量结果

待测样品编号	D1	D2	D3	D4	D5	D6
平均计数值	4095.60	4255.20	4387.20	4407.00	4532.20	4604.80
放射性法测量值(KCl%)	3.42	9.05	13.71	14.41	18.82	21.38
重量法测量值(KCl%)	3.49	9.55	12.96	15.17	19.22	23.51
放射性法相对误差(%)	-2.01	-5.24	+5.79	-5.01	-2.08	-9.04

由表 2 所列的测试结果表明, 用放射性方法测量粉末状 KCl 样品的含量与重量法分析结果对比, 误差均在 9.04%以内; 而放射性测定方法具有速度快、简便、准确等特点, 不污染被测样品, 也无需对样品进行任何处理, 特别是对固体样品和高浓度卤水也不需要溶解和稀释, 这些是重量法等传统的化学分析方法无法做到的。我们采用测量 ^{40}K 的 γ 辐射方法研制出的测钾仪, 仪器简单、操作方便, 所以特别适合于钾盐生产流程在线分析和野外现场的自动监测以及厂家和用户对产品快速分析。

通过对一系列的固体钾盐样品中钾含量的放射性测定结果, 我们可以归纳出如下结论: ①输出电压为 9.4mV 时, 自制主放的放大倍数为最佳值; ②确定 ^{40}K 全能峰对应的下阈为 1.9V, 阈宽 0.6V; ③测高含量钾盐在完全无屏蔽条件(300s)下适用, 相对误差 \leq 13.22%; 简单屏蔽条件下延长测量时间(600s)测低含量钾盐, 所得相对误差 \leq 10%。因此放射性方法测定粉末状固体钾肥样品的钾含量同重量法等传统的化学分析方法相比, 前者具有测定速度快, 还可以在现场直接测定, 不需要专门的实验室, 也无需对样品进行任何处理等优势。是一种适用范围

4 小结与展望

较广、测量精度较高的钾含量直接快速测量方法。除了适用于一般性场合外，也可在温度梯度变化较大的野外现场使用。测钾仪的仪器和探头结构简单，具有便携、可靠以及操作方便等优点。具有很好的推广应用价值，不仅可满足于钾肥生产厂家即时快速测量原料和产品中钾含量的要求，而且也为广大农民用户和质检部门随时随地对钾肥产品进行质量检测提供了便利。

参考文献:

- [1] AH.H. 涅斯米扬洛夫。放射化学[M]. 何建玉等, 译. 北京: 原子能出版社, 1985.
- [2] G.弗里德兰德, E.S.麦夏斯, J.W.肯尼迪等。核化学与放

射化学[M]. 冯锡璋, 柴之芳, 等, 译. 北京: 原子能出版社, 1988.

[3] 祁永唐, 王相明, 李青凤等。固体钾肥产品中钾含量的放射性测定[J]. 盐湖研究, 2002, 10(1): 24-27.

[4] 祁永唐, 马育华, 王相明等。智能测钾仪[P]. 中国专利: CN99212579.0, 2000-07-12.

[5] 黄显太。无机闪烁体的发展和国内现状[J]. 核电子学与探测技术, 1993, 13(2): 98-104.

[6] 王韶舜, 叶云秀, 卞祖和等。核与粒子物理实验方法[M]. 北京: 原子能出版社, 1989.

[7] 复旦大学, 清华大学, 北京大学合编。原子核物理试验方法[M]. 北京: 原子能出版社, 1985.

The Rapid Determination of the Content of Potassium in Solid Potash Fertilizer Samples by Radioactivity

SHI Guo-zhu, LI Song-lin, Chen Ruo-fu, Qin zhi, Lei Fu-an, LI Heng-yuan, Shen Ai-hua, Cheng Hong-sheng
(*Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China*)

Abstract: An instrument for high-accuracy detection of potassium (K) through measuring the γ -ray of ^{40}K at 1.461MeV in sample were developed based on the CsI(Tl) crystal grown at Institute of Modern Physics coupled with the high sensitive Hamamastu R7724 photomultiplier tube (PMT) and the front-end electronics and data acquisition system. The amplification factor and the threshold value of the detector for measuring ^{40}K were determined. The relative error between the result measured by radioactivity method and weighting method is $\leq 13.22\%$ when the high levels of K content was measured using the developed K detector (measuring time=300s) under the condition of no shielding. However, when the low levels of potassium content were measured under the simple shielding condition and extension of time (measuring time=600s), the relative error between two kinds of measuring methods is $\leq 10\%$. These results showed that the developed K detector was a useful instrument to rapid measure the content of the potassium in material.

Key words: Detector; CsI(Tl) crystal; potassium (K); radioactivity method; weighting

航空放射性测量技术对核事故泄露核素的探测能力评估

李惠彬, 冯元举, 韩斌

(西北核技术研究所, 陕西 西安 710024)

摘要: 航空放射性测量是突发核事故后对广大区域的辐射状况进行快速测量的关键技术手段之一。本文分析了国内外航测技术现状, 以及适用于核应急监测的航测系统的特点。以此为基础, 通过小面源累加刻度实验估算了国内的 GRS-16 航测系统对地表沉积的 ^{137}Cs 和 ^{131}I 的探测限。另外, 通过文献调研和蒙卡模拟计算, 估算了国外先进航测系统对上述核素的探测限。并分析了二者的差距。

关键词: 航空放射性测量; 核应急监测; 探测限

文章分类: 核监测技术及其应用的研究成果

引言

随着核技术的发展, 核电站以及其它核设施的辐射监测问题日益得到人们的关注。其中, 突发核事故后如何对广大区域的辐射状况进行快速测量是一个重要的问题。在这种情况下, 一般放射性调查手段, 如采样实验室分析、车载扫描测量, 速度慢、效率低, 而且无法对人和车辆难以到达的区域进行测量, 不满足上述要求。在这种情况下, 航空放射性测量是唯一有效的技术手段^[1]。

1957 年英国温茨凯尔核事故后, 英国最先使用该技术测量了 ^{131}I 的污染分布图。这项技术得到人们的广泛关注是在 1986 年, 苏联切尔诺贝利核事故后, 莫斯科工程物理研究所和苏联国防部在事故后的数月内使用该技术测量了事故释放的 11 种放射性核素的分布图^[2]; 欧洲的其它一些国家也使用该技术测量了事故释放的 ^{137}Cs 在本国的分布图。2011 年日本福岛核电站事故后, 美国协助日本采用航测技术测量了核电站周围 80km 半径范围内的辐射状况, 测量对象是 ^{137}Cs 、 ^{134}Cs

和地表 1m 高处的空气吸收剂量率^[3]。

1 国内外技术现状

航空放射性测量技术, 即是把 γ 谱仪安装在飞行器上进行飞越测量, 是一个特殊的环境放射性能谱测量装置。通常情况下放射源分布在地表, 探测器远离地表的情况下, 对 γ 射线的探测效率比靠近放射源进行测量低得多; 另外, 航测的测量周期一般仅为 1 秒或数秒。为了获取较多的总计数以降低统计涨落, 需要使用尽可能大的探测器, 否则因为探测效率低和测量周期短, 所测能谱的总计数低, 统计涨落大, 难以进行能谱分析。

国际上, 美国在该领域的技术位于世界领先水平, 其它国家与其相比存在很大差距。这项技术最早应用于 20 世纪四十年代后期, 使用的是大量列装的气体探测器。但是它们很快被探测效率更高的 NaI 探测系统取代。到了七十年代, 多道分析系统开始得到广泛应用, 1977 年 $4\times 4\times 16$ 英寸 NaI 探测器研发成功, 并被广泛使用在航测系统上, 至今仍然是应用最广的探测器。所安装的探测器数量一般由所使用飞机的运载能力决

定。轻型直升飞机一般安装 4-8 条，重型直升飞机和固定翼飞机为 10 条以上。这类航测系统主要用于测量天然放射性核素和铀矿勘探。测量对象是三种天然核素发射的高能 γ 射线：铀系 ^{214}Bi 发射的 $1.76\text{MeV}\gamma$ 射线，钍系 ^{208}Tl 发射的 $2.62\text{MeV}\gamma$ 射线和 ^{40}K 发射的 $1.46\text{MeV}\gamma$ 射线。

我国该方面的任务主要由石家庄核工业航测遥感中心承担，目前该中心使用的 GRS-16 航空多道 γ 谱仪系统也属于该类航测系统。GRS-16 由 15 条 $4\times 4\times 16$ 立方英寸 NaI(Tl)晶体组成，分装成 3 箱，其中每箱各有 1 条为上测晶体，它直接平放在下测晶体上面，每条晶体前端有一直径为 3.5 英寸的光电倍增管。能谱仪分上、下测，各设 512 道。上测主要测量大气中的放射性，根据其测量结果扣除大气中的放射性对下测晶体产生的计数。此外还有铯光泵磁力仪、数据收录系统、GPS 导航定位系统以及辅助设备(如无线电高度计、气压高度计、温度测量仪和航迹录像系统)等。整套系统安装在运 12 运输机内部进行测量，主要用于铀矿勘探^[4]。

该类航测系统用于核应急监测的能力较差，因为在核事故中泄漏放射性核素发射的 γ 射线能量普遍较低，如最可能出现的 ^{131}I 的特征 γ 射线能量为 364.5keV ， ^{137}Cs 为 661.6keV 。首先，飞机外壳相当于数厘米厚的铝壳，对低能 γ 射线的衰减很严重，采用飞机内放置探测器的测量模式的探测效率很低。其次，空气层对低能 γ 射线的衰减也很严重，为了减少空气层对 γ 射线的衰减，应当在尽可能低的高度进行飞行测量，而固定翼飞机的最低飞行高度仅为约 100m。

为满足核应急监测的要求，20 世纪末，美国的一些研究机构研发了一些新型的航测系统。该类航测系统与用于铀矿勘探的航测系统有很大区别，主要有以下三个方面的特点^{[5][6]}：

(1) 航测谱仪系统通常安装在直升飞机上，与固定翼飞机相比，直升飞机有以下几个方面的优点：① 可以在很低的高度(十余米)飞行，受地形条件的限制较少。特别是在地形复杂的山区，固定翼飞机的飞行高度受到很大限制，而直升飞机没有该缺陷。② 能够在可疑地点进行长时间悬停测量，可以很大程度地提高测量灵敏度。但直升飞机测量的缺点在于：使用成本高，测量速度慢。

(2) 为避免飞机外壳对 γ 射线的衰减，一般采用外挂探测器的方式。

(3) 一般使用薄型 NaI 阵列探测器 ($2\times 4\times 16$ 英寸)、HPGe 阵列探测器，或联合使用 NaI 和 HPGe 探测器。

因为低能 γ 射线的穿透能力较弱， $2\times 4\times 16$ 英寸 NaI 探测器对低能 γ 射线的探测效率与 $4\times 4\times 16$ 英寸 NaI 探测器接近，但是前者对天然核素发射的高能 γ 射线的探测效率低，在其能谱的低能端产生的康普顿坪高度低，有利于分辨低能 γ 射线产生的能峰。NaI 探测器最大的缺点是能量分辨率差，难以分辨核素种类。特别是在干扰能峰较多的低能区，关注污染核素产生的能峰经常会与天然核素的能峰重叠，使其难以分辨和定量。例如， ^{131}I 的 364.5keV 峰位与 U 系核素 ^{214}Pb 的 351.9keV 峰位重叠； ^{137}Cs 的 661.6keV 峰位与 ^{214}Pb 的 609.3keV 峰位重叠。

HPGe 阵列探测器的主要优点是能量分辨率高。一般航测 NaI 谱仪系统的能量分辨率约为 10%，而 HPGe 系统的该值约为 1%。但是其缺点也不容忽视：① 价格昂贵。单个 HPGe 探测器的价格在 5-10 万美元之间，价格主要由探测器体积决定(从 65%至 110%)，如果采用电制冷，每个探测器需要再增加约 5 万美元；另外，目前市场上没有商用的 HPGe 阵列探测器核电子系统，需要单独研发制作，成本很高。② 野外维护不方便。

如果单个探测器损坏, 很难在野外更换; 而且每次飞行测量前, 需要至少四小时进行冷却。③ 探测效率低。目前 HPGe 探测器的体积不能做得很大, 导致其探测效率比大体积 NaI 探测器低得多。因为上述原因, 虽然 HPGe 探测器的优势很大, 但是目前没有在航测中得到大规模推广应用。

还有一种可以选择的方案是联合使用 NaI 阵列探测器和 HPGe 阵列探测器, 以互相弥补二者的缺陷。测量过程中首先使用 NaI 探测器进行初测, 根据其能谱总计数或剥离后的人工核素能区净计数判定放射性异常区域, 然后使用 HPGe 探测器在该区域进行较长时间的连续测量, 或者降落到地面进行测量。苏联在切尔诺贝利事故航空放射性测量中就采用了这种技术手段^[2]。

目前世界上最先进的航测系统是美国 20 世纪末开发了 ERSS 航测系统, 使用 20 个相对效率 110% 的电制冷 HPGe 探测器, 该航测系统还安装 3He 探测器, 用于测量中子^[7]。该系统是目前世界上最先进的航测系统, 但造价非常高。

2 典型航测系统探测能力评估

2.1 航测系统探测限定义

表征航测系统探测灵敏度的指标是对某种核素的探测限, 表示为 MDA。该值表示: 如果某核素的活度大于其 MDA 值, 则其可以被探测系统较可靠地测量到。国际上通用的航测系统 MDA 计算公式如下:

$$MDA = \frac{3\sigma}{\varepsilon \cdot t} \quad (1)$$

式中, σ 表示本底能谱中该核素能区计数的标准偏差。能区宽度由该核素峰位的半高宽值 FWHM 确定, 为 2 倍的 FWHM 值。

ε 表示航测系统的刻度系数。核应急测量测量中, 所测量的 ^{137}Cs 、 ^{131}I 等核素均分布于地表, 所以其单位为 cps/(Bq/m²)。

t 表示测量时间, 一般为 1s。

一定能区内的计数满足泊松分布, 其标准偏差 σ 根据下式计算:

$$\sigma = \sqrt{m} \approx \sqrt{N_b} = \sqrt{\dot{N}_b t} \quad (2)$$

式中, m 表示本底能谱中该能区计数的期望值, N_b 表示其测量值, 当 $N_b \geq 100$ 时, $m \approx N_b$ 。 \dot{N}_b 表示其计数率。

2.2 典型航测系统探测限估算

采用小面源累加测量的方法刻度了航测遥感中的 GRS-16 航测系统对 ^{137}Cs 和 ^{131}I 的探测效率, 并根据本底能谱估算了其在普通天然本底地区的探测限。实验装置示意图如图 1 和图 2 所示。

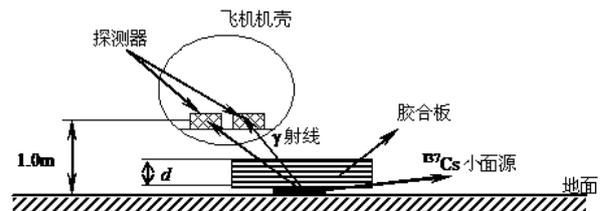


图 1 小面源叠加测量实验原理图

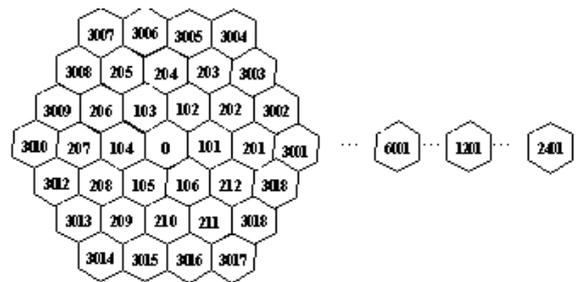


图 2 面源放置位置示意图

如图 1 所示, 把航测系统安装在运 12 飞机内, 探测器距离地面高度约为 1m。按照叠加测量的原理, 将边长 1m 的正六边形面源放置在如图 2 所示不同位置进行测量。中心位置编号为 0; 第一圈编号为 101-106, 共 6 个位置; 第二圈编号为 201-212, 共 12 个位置; 以此类推。把六边

形面源分别放在编号为：0、101、201、202、3001、3002...的位置进行测量，扣除本底计数后得到在每个位置测量的净计数率，然后按照下式计算无限大面源产生的计数率：

$$n_{\infty} = n_0 + 6n_{101} + 6n_{201} + 6n_{202} + 6n_{3001} + 12n_{3002} + \dots \quad (3)$$

式中， n_{∞} 表示无限大面源产生的计数率； n_i 表示在第*i*个位置的小面源产生的计数率，*i*=0、101、201、202、3001、3002...

然后根据下式计算该航测系统距离地面 1m 高度时，对无限大面源的刻度系数：

$$\varepsilon = \frac{n_{\infty}}{A_s} \quad (4)$$

A_s 表示标准面源的面活度，单位为 Bq/m^2 。

实验中共使用两种六边形面源，分别是 ^{137}Cs 和 ^{152}Eu 。其中 ^{152}Eu 的 344.3keV γ 射线的能量与 ^{131}I 的 364.5keV γ 射线能量接近，所以使用 ^{152}Eu 替代 ^{131}I 进行刻度。实验中，还使用木板模拟空气。如图 1 所示，在小面源上加不同厚度的木板，可模拟不同厚度的空气，从而得到不同测量高度的刻度系数。

根据该航测系统在天然本底地区的测量能谱计算其在 ^{137}Cs 和 ^{131}I 特征 γ 射线能区的本底计数率，然后根据(1)式计算其对 ^{131}I 和 ^{137}Cs 的探测限，结果如表 1 所示。

表 1 GRS-16 航测系统对 ^{131}I 和 ^{137}Cs 的探测限

估算，单位：Bq/m ²		
核素种类	特征 γ 射线能量 (keV)	探测限
^{131}I	364.5	1.5×10^4
^{137}Cs	661.6	3×10^3

注：测量周期为1s，飞行高度为100m。

还通过蒙卡计算的方法估算了一些先进航测系统对这两种核素的探测限，结果如表 2 所示。

表 2 典型航测系统对典型放射性面源的探测限估算结果，单位：Bq/m²

核素种类	薄型NaI阵列探测器，较高飞行高度 ¹	薄型NaI阵列探测器，较低飞行高度 ²	ERSS系统 ³
	^{131}I	2000	
^{137}Cs	700	150	30

注 1：小型直升飞机外挂 8 个 2×4×16 英寸 NaI 探测器，飞行高度 45m，测量时间 1s。引用文献[5]的结果。

注 2：小型直升飞机外挂 8 个 2×4×16 英寸 NaI 探测器，飞行高度 15m，测量时间 1s。根据文献[6]采用蒙卡计算得出结果。

注 3：使用大型直升飞机外挂 20 个相对效率 110%电制冷 HPGe 探测器，飞行高度 15m，测量时间 1s。根据文献[6]和[7]采用蒙卡计算得出结果。

对比表(1)和表(2)的数据可以看出国内航测技术与国外先进水平的差距。原因有三个方面：

- (1) 飞机外壳对低能 γ 射线的衰减很强；
- (2) 固定翼飞机不能在很低的高度飞行；
- (3) 4×4×16 英寸 NaI 探测器不适用于测量低能 γ 射线。

3 结论

从上述对比分析中可以看出，在核应急响应测量方面，国内采用的航测系统与国际先进水平之间存在较大差距，主要是航测系统的探测限太高，限制了其在核应急响应测量中的应用。该类航测系统仅能在发生严重核泄漏事故的情况下使用，而在放射性物质泄漏量较少的情况下很难发挥作用。

参考文献：

- [1] IAEA. Airborne Gamma Ray Spectrometer Surveying. Technical Report Series No. 323[R]. IAEA. VIENA, 1991.
- [2] V.V. Drovnikov, N.Y. Egorov, et al. Some Results

of the Airborne High Energy Resolution Gamma-Spectrometry Application for the Research of the USSR European Territory Radioactive Contamination in 1986 Caused by the Chernobyl Accident[J]. J Environ Radioactivity, 1997, 37(2): 223-234.

[3] U.S. Department of Energy, Japan Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology. Results of Airborne Monitoring by the Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology and the U.S. Department of Energy[R]. Japan, 2011.

[4] 航测遥感中心. 航空放射性测量技术的理论与

实验研究[R]. 内部报告, 石家庄, 2003.

[5] H. Clark and C. A. MacLeod. Analysis of Spectral Gamma Overflight Data. On-Site Inspection Workshop-3[R], VIENA, 1998

[6] U.S. Department of Energy. Aerial radiation detection[R], USA, 1999

[7] E. A. Lepel, B. D. Geelhood, W. K. Hensley A field-deployable, aircraft-mounted sensor for the environmental survey of radionuclides[J]. J Radioanal Nucl Ch, 1998, 233(1): 211-215.

Evaluation of airborne radiation survey used for monitoring leakage of radionuclides in nuclear accident

LI Hui-bin, FENG Yuan-ju, HAN Bin

(Northwest Institute for Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

Abstract: Airborne radiation survey is the only effective technology when nuclear accident has happened, and rapid survey of the contaminated areas is needed. In this article, available instruments used in China and all over the world, and the instrument best suit for this task were analyzed. Based on the analysis, minimum detectable activities (MDAs) of ^{137}Cs and ^{131}I measured by GRS-16 in China were calculated according to the results obtained by accumulative calibration of small sources. Forth more, MDAs of more advanced airborne radiation survey instrument were calculated according to the relative article and Monte Carlo simulation. At last, differences between various instruments were analyzed.

Key words: Airborne radiation survey; Nuclear emergency survey; Minimum detectable activity

核监测电子设备方舱电气布线的电磁兼容设计

杨雪梅

(国营第七八五厂军品第一研究所, 山西 太原 030024)

摘要: 电磁兼容性是电子设备方舱设计的一项重要指标, 而方舱的电气布线又是电磁兼容性设计的关键。本文介绍了电磁兼容性的基本概念, 并着重阐述了电子设备方舱布线设计需要注意的问题, 以及解决这些问题的方法。

关键词: 电磁兼容性; 方舱; 电缆布线; 接地

文章分类: 核监测技术及其应用的研究成果

0 引言^{[1][3]}

应用于室外的移动式电子学为主体的核监测系统, 例如核事故辐射探测系统、环境辐射监测系统等, 其各组成部分多以双铝合金板中间夹塑的板式方舱集纳, 安置于卡车底盘上, 称为电子设备方舱, 简称电子方舱。一个电子方舱可能自成一个探测系统(其中包括信息源), 也可能是分布式探测系统的一个信息接收与处理的节点(其中不包括信息源, 但一定包括有线或无线通信系统)。舱外的电磁场剧烈变化(如雷暴、大功率无线电设备工作, 工矿企业大功率用电设备工作等)也可能通过多种途径对舱内系统工作状态产生影响。因此, 电子方舱一般由承载平台、通信系统、计算机系统、环境保护系统、传感器系统等几部分组成。

由于舱内空间比较狭小, 设备密集度高, 各种设备同时工作致使舱内电磁环境恶劣, 可能使一些设备不能正常工作, 从而使整个系统工作状态受到影响。因此, 解决电子方舱的电磁兼容性问题显得尤为重要, 它是电子方舱能正常工作的基本保证。

本文主要从设计程序、电气布线和接地的角度说明电子方舱在电磁兼容性设计方面应遵循的原则、解决问题的措施和方法以及应注意的问题。

1 设计程序^{[4][5]}

电磁兼容性是指仪器设备在可能的电磁干扰环境下仍能正常工作的能力。即要求功能不同的电气及电子设备在同一电磁环境中都能正常工作又互不干扰, 达到兼容状态。

在产品的设计之初就要考虑产品的电磁兼容性, 否则在产品的测试和试验阶段才发现问题, 或许要花更高的代价和精力才能解决问题。

1.1 干扰要素的分析

为了保证多个电子设备在方舱的有限空间内同时正常工作, 首先要预测一下各设备间相互干扰的情况。

从干扰预测角度说, 无论舱内设备简单或复杂, 都可归结为三类要素, 即干扰源(发射器)、传输途径、被干扰对象(感受器)。其中干扰源和被干扰对象可以是单个的, 也可以是多个的。传输途径取决于电磁能耦合方式, 可以是空间(辐射干扰), 也可以是导电实体(传导干扰)。

实际上, 发射器、传输途径和感受器都不可能是纯线性的, 发射器输出的除了基波还有高次谐波

和宽带噪声，接收器也不只对单一频率响应，对杂波也有响应，传输途径也不是单一的。干扰过程是很复杂的。

为了预计方便将电磁干扰划分为系统内电磁干扰和系统间电磁干扰。系统内干扰是由于近处的电源上的噪声通过磁场或电场耦合到低电平灵敏电路中产生的，此外，共地电源阻抗耦合和机柜~机柜、机柜~电缆的直接辐射也是电磁干扰原因。对于系统间的电磁干扰，主要是由于一个系统的发射天线到另一个系统的接收天线间的信号耦合。对

电子方舱来说既有系统内电磁干扰，也有系统间电磁干扰。

对系统的电磁干扰预测不同于对单个设备电磁干扰的预测。对单个设备确定其电磁干扰特性时应考虑组成该设备的元器件和电路的具体特性，对系统的电磁干扰预测是集中分析各个设备之间的相互作用，仅需要确定各干扰源的输出特性和各感受器的敏感度，这些在设备定型时是已知的。在系统级干扰预测时不必了解各设备的详细内部特性。

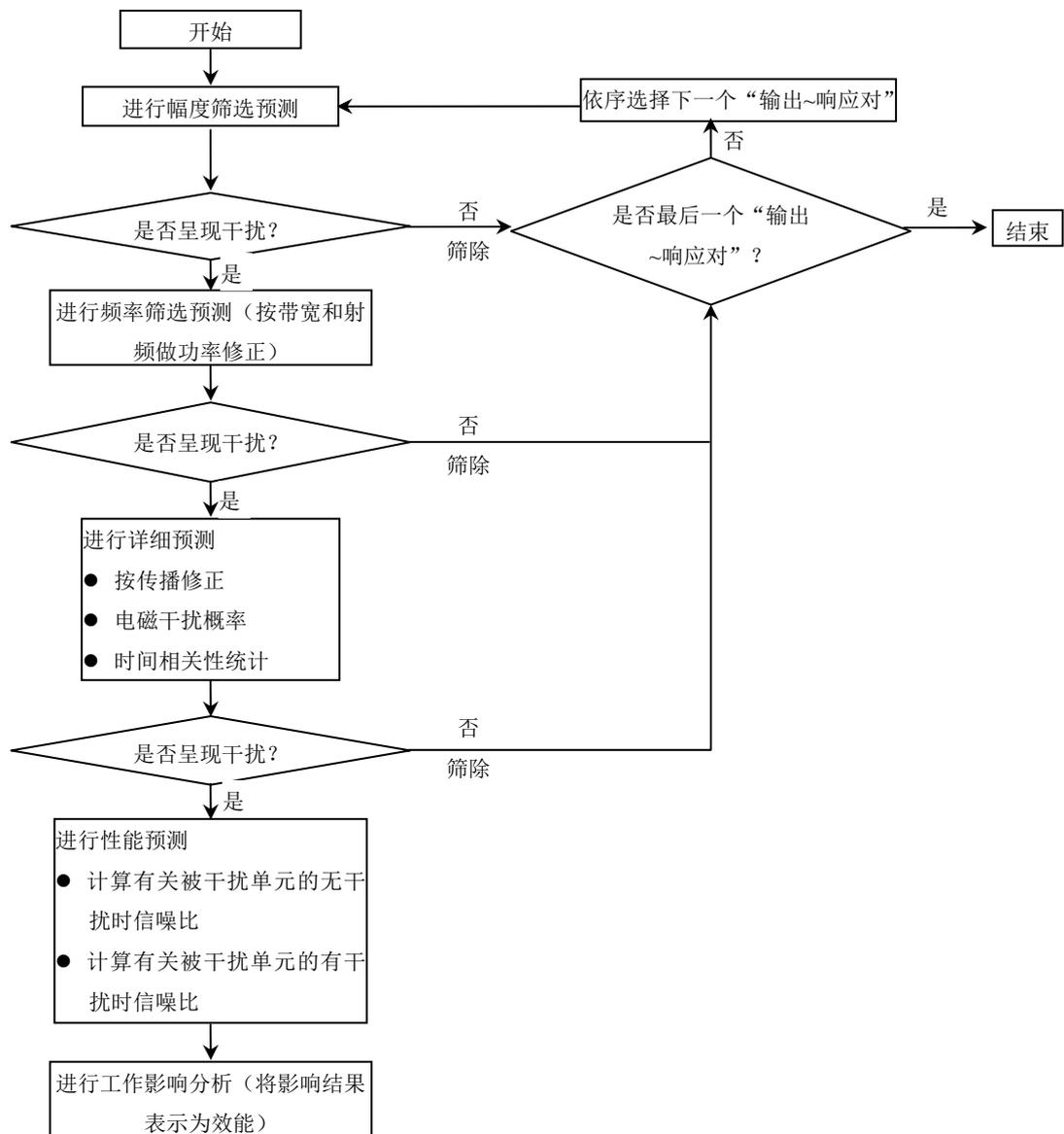


图 1 对多个“输出~响应对”的系统电磁干扰预测的流程

1.2 主要干扰的确定

主要干扰要素采用逐对考虑，分级预测的方法确定。每次只选一个发射器和一个感受器，通过一种耦合方式，这称为一个“发射~响应对”。一个系统可能包括许多对，由于“发射~响应对”的数目通常很大，采用同一种干扰模型预测，不仅精度不高，耗时也很长，采用各对的精确模型预测，工作量更是大得不能接受。因此通常采用快捷的分级预测方法，通常分四个等级或阶段，即幅度筛选、频率筛选、详细预测、性能预测，其工作流程如图 1 所示。

开始时可利用干扰输入的最简单形式对整个系统“快扫”一遍，将明显不可能呈现电磁干扰的“输出~响应对”筛除考虑范围，每一级筛选约可将无干扰情况的 90%剔除，经过四级筛选留下来的便是主要干扰的预测结果。预测的级别和各级考虑的因素、取得结果示于图 1。

根据笔者的经验，按照图 1 的流程对电子方舱的预测结果，在大多数情况下干扰都是由电气布线不当和接地不良引起的。实践表明，只要对电子方舱内外进行合理布线和接地良好，其干扰是可以得较理想的控制，保证电子方舱正常工作的。

2 电缆与电缆间的干扰 [2]

电子方舱内的线缆种类多、数量多，方舱内的电缆分为电源电缆、控制电缆、信号电缆和射频电缆，选用电缆时需要考虑传输信号的波形、频率范围、功率电平、电路敏感度以及电磁环境。

方舱内设备一般采用机柜安装形式、机柜内部线缆比较密集，这些电缆的相互位置以及走向都将对方舱内部的电磁兼容性能产生影响，所以必须对导线和电缆进行合理的分类、规划，进行合理有效地空间布局设计，以减少线缆间的相互干扰。

电缆是导致各种电磁兼容（EMC）问题的主要因素。电缆造成电磁干扰（EMI）的原因主要是因

为电缆上存在着干扰电流。

线缆中存在的干扰电流分为 2 种：一种是 2 根导线分别作为往返线路传输，称为“差模”；另一种是 2 根导线作去路，地线作返回路传输，这种称为共模。

电缆上的差模干扰电流和共模干扰电流可以通过电缆直接传导进入电子设备的电路模块或其他设备，也可以在空间产生电磁场形成辐射干扰。

共模干扰的频率一般分布在 1 MHz 以上，在传输的同时，会向临近空间辐射，耦合到信号电路中形成干扰，很难防范。差模干扰的频率相对较低，不易形成空间辐射。差模干扰可以通过滤波的方法，比较容易解决。

由于电子方舱内设备的工作频率一般都在 1M 以上，本文我们主要讨论如何防范共模干扰。

电缆上的共模干扰电流可以通过分布电容和电感耦合到其他电缆上，再经由电缆影响与之相连接的器件和设备；也可以通过空间电场辐射直接干扰其他设备。

经常采用这些方法来降低电缆对外界的共模干扰：减小线间的电容耦合和电感耦合；实际情况允许的情况下截短电缆长度、使用屏蔽电缆及接地。

2.1 电缆间的电容性干扰

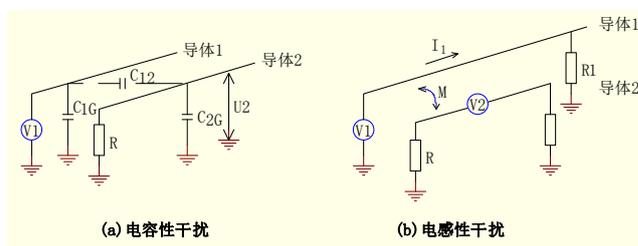


图 2 (a) 是两导体间的电容性干扰原理图， C_{12} 是导体 1 与导体 2 之间的分布电容， C_{1G} 、 C_{2G} 分别为导体 1 和导体 2 与地之间的分布电容，导体之间的分布电容也称耦合电容。电阻 R 为接于导体 2 的总电阻值，2 根导线之间就存在电压，也就是说电

压是串联于受扰导线的。若导体 1 上的电压 V_1 为干扰源, 导体 2 为被干扰源, 不考虑 C_{1G} 的情况下, 干扰电源 U_1 在导体 2 电路产生的干扰电压 U_2 为:

$$U_2 = \frac{j\omega \left[\frac{C_{12}}{(C_{12} + C_{2G})} \right]}{j\omega + \frac{1}{R}(C_{12} + C_{2G})} V_1 \quad (2-1)$$

式中若 R 为低阻抗, 且小于分布电容 C_{12} 及 C_{2G} 之和, 即:

$$R \ll \frac{1}{j\omega + (C_{12} + C_{2G})}$$

则式 (2-1) 可简化为:

$$U_2 = j\omega R C_{12} V_1 \quad (2-2)$$

从式 (2-2) 可以看出, U_2 正比于噪声源的信号频率, 受干扰的电路阻抗 R , 导体 1 与导体 2 之间的电容 C_{12} 及电压 V_1 的值。具体可采取如下措施:

- ①减小受扰导线对地的电阻 R ;
 - ②减小分布电容 C_{12} 。2 个导线平行时电容最大, 而方向改为垂直时, 电容最小。在一定范围内增加导线之间的距离和减小导线的长度都可以减小导线间的电容;
 - ③使受扰导线接近地线, 或在接收导线的邻近设置地线, 从而增大 C_{2G} 的电容。
- 另外, 将受扰导线屏蔽也可以减小导线间的电容耦合。

2.2 电缆间的电感性干扰

电感性干扰原理如图 1 (b) 所示, 当干扰回路 1 中有交变电流流过时, 会产生交变磁能, 交变磁通穿过回路 2 并在回路 2 中产生感应电动势, 可表示为:

$$U_2 = j\omega M I_1$$

式中, M 为, 2 个电路间的互感, $M = \Phi / I_1$ (H), Φ 为电流 I_1 流过电路 2 时在回路 2 中产生的磁

通, I_1 为干扰回路的电流; ω 为交变电流的角频率。

从式中可以看出, 感应电动势主要与互感耦合相关, 减小 Φ 的值可以使互感耦合变弱, 具体可采取如下措施:

- ①减小受扰电路的回路面积。受扰电路的信号线与回线尽量靠近, 如使用双绞线或同轴电缆;
- ②磁场随距离的增加衰减非常快, 可以增加施扰导线与受扰导线的之间的距离。也可以调整 2 个回路之间的相对角度。

避免信号返回线路共享共同的路径, 也可以减少电感串扰。

2.3 空间辐射

线缆之所以会辐射电磁波, 是因为电缆端口处有共模电压存在, 电缆在共模电压的驱动下, 产生共模电流, 存在共模电流的电缆如同一根单极天线, 产生电场辐射。

共模电场辐射可用对地电压激励的、长度小于 $1/4$ 波长的短单极天线来模拟。对于接地平面上长度为 L 的短单极天线来说, 在远场 r 处的电场强度为:

$$E = 4\pi \times 10^{-7} \times (fIL) \times (1/\gamma) \sin \theta \quad (2-3)$$

式中, L 为天线长度 (m)。

从式 (2-3) 中可以看出, 共模电场辐射与频率 f 、共模电流 I 及天线长度 L 成正比, 分别限制 f 、 I 、 L 可以使共模电场辐射得到控制, 而其中限制共模电流 I 是减小共模辐射的基本方法。具体可采取的有效措施如下:

- ①尽量减小激励此天线的源电压, 即地电位, 电缆靠近接地平板走线;
- ②在设备内部, 电缆长度尽可能短, 避免环绕电路走线;
- ③提供与电缆串联的高共模阻抗, 使用共模扼流圈, 如计算机的外连线上经常使用铁氧体磁环;

④使用电容等器件将共模电流旁路到地；

⑤使用屏蔽电缆。以前通常的做法，在电缆与接口连接器相连的地方都是将屏蔽层拧成一条小辫，然后固定到连接器的螺钉上，这样形成的搭接阻抗较大，正确的方法应该是将电缆屏蔽层与屏蔽壳体作 360 端接。

另外，为了对线缆进行防护、防止电磁干扰，常常将线缆敷设在金属走线槽内，并将金属线槽可靠接地。同一线槽内的走线应当性质相近，不同性质的走线槽尽量分开一定距离布置，以防相互干扰。比如将交直流线缆在机柜的不同侧面分开布线；强弱信号分开走线，例如：对于安装在机柜内的电台设备采用前面板接线方式以避免与其它线缆一起敷设。

3 接地 [2][3]

3.1 接地线的电流分析

从电磁场理论得知：通过接地点流入地中的总电流由传导电流和位移电流两部分组成。判断地是导体，半导体还是电介质，取决于接地点流入地中的传导电流和位移电流的比值。设大地为各向同性介质，接地电流为正弦电流，由麦克斯韦方程，

$$\operatorname{rot} \dot{H} = \frac{1}{\rho} \dot{E} + j\omega\varepsilon \dot{E} \quad (3-1)$$

(3-1) 式右端第一项是传导电流密度，

$$\dot{\delta} = \frac{1}{\rho} \dot{E} \quad (3-2)$$

第二项是位移电流密度

$$\dot{\delta}_d = j\omega\varepsilon \dot{E} \quad (3-3)$$

$\dot{\delta}_c$ 和 $\dot{\delta}_d$ 相差 90° ，可以看出电阻率 ρ 和介电常数 ε 是大地介质的两个主要电性参数。 ρ 和 ε 及电流的频率 ω 决定了大地中的交变电流分布。传导电流密度和位移电流密度绝对值之比为

$$K = \frac{\delta_c}{\delta_d} = \frac{1}{\omega\varepsilon\rho} \quad (3-4)$$

式中

$$\varepsilon = \varepsilon_r \frac{1}{4\pi \times 9 \times 10^9}$$

为介电常数(法/米)

ε_r 为相对介电常数

ρ 为电阻率(欧·米)

大地中电流的两个分量同时存大于大地介质中的任一点上，但两者大小不同，常常遇到一个分量远大于另一个分量而使问题大大简化。当 $K > 10$ ，可以不计位移电流近似为导体；当 $K < 0.1$ ，可以不计传导电流近似为电介质；当 $10 > K > 0.1$ ，大地既是导体又是电介质。在大多数情况下，大地的介电常数在 5~50 之间。

在核监测系统的接地点上，当接地点电流是低频 ($f < 1KH$) 电流时，在 $\rho < 10^5$ 欧·米的条件下，可以忽略不计位移电流的影响，只考虑传导电流，因此，工频接地时，可以把大地看成导体。在冲击接地时，在一般电阻率地区，也可只考虑传导电流。只有在很高电阻率地区，才需要计入位移电流的影响。

例如，通信天线避雷器接地，假设 $\rho = 1000$ 欧·米， $\varepsilon_r = 9$ ，雷电脉冲波头为时间 3 微秒的余弦波，可由 (3-4) 式求得 $K = 12$ ，即传导电流为位移电流 12 倍。又如，核电磁脉冲的前沿为纳秒量级，设为 60 纳秒，取 $\rho = 1000$ 欧·米， $\varepsilon_r = 9$ 时，可由 (3-4) 式求得 $K = 0.48$ ，即传导电流将近位移电流的 50%，接收时必须计及接地分布电容的影响。

还应该说明的是，上述分析都认为电阻率和相对介电常数与频率无关。实际上它们都与频率有关，在高频情况下大地的电阻率将会减小。

3.2 工频接地电阻分析

核监测电子方舱，通常在野外设站工作，且由油机发电自行供电，工频接地需自行设计。

工频电流从接地点向周围的大地介质流散时，土壤呈现的电阻称为接地电阻。接地电阻的数值等于接地的电位与通过接地体流入地中电流的比值。

工频电流在大地中流散时，不同于直流电，由于地电阻率相当大，在接地体附近由感应电动势引起的电压降与电阻电压降比较起来可以忽略不计，工频接地可按直流接地计算。根据静电比拟法，直流电场的接地电阻可按相应条件下静电场的电容计算求取。

由高斯定理，穿过任一闭合表面的电位移矢量等于包围此表面所限定的空间内的电荷，即：

$$\oint_S \dot{D} ds = \oint_S \varepsilon \dot{E} ds = Q \quad (3-5)$$

又，欧姆定律的微分形式为：

$$\oint_S \dot{\delta} ds = \oint_S \frac{1}{\rho} \dot{E} ds = I \quad (3-6)$$

由电阻电容定义：

$$C = \frac{Q}{V} \quad (3-7)$$

$$R = \frac{V}{I} \quad (3-8)$$

由此得

$$R = \frac{1}{c} \cdot \frac{\oint_S \varepsilon \dot{E} ds}{\oint_S \frac{1}{\rho} \dot{E} ds} \quad (3-9)$$

假设大地的电阻率为各向同性， ρ, ε 可从积分号内提出，

$$R = \frac{\rho \cdot \varepsilon}{C} \quad (3-10)$$

式中：R-接地体的接地电阻（欧）

C-接地体的电容（法）

ρ -大地电阻率（欧·米）

ε -大地介电常数（法/米）

由（3-10）式可知，接地体的接地电阻和它的电容成反比， ρ, ε 为常数，说明传导电流和位移电流具有相似的分布。这可使接地电阻的计算大大简化，并可看出增大接地网面积，使接地电容增大是减小接地电阻的主要因素。

利用电容概念，可以便于理解增加地网的埋深对减小接地电阻的作用不大。因为电容在电路中的作用是储存电能，它所储存的能量是以电荷在电场中具有能量的方式，并不是将电能量储存在板板上，而是储存在整个介质中，即整个电场中。介质中储存的能量和电场分布及介电常数有关。因此比接地网尺寸小得多的有限埋深，使储能介质空间的增加极为有限，对增加储存能量作用不大，实践中应考虑扩大地网。

3.3 接地线的经验设计

接地也属布线，地线设计是一种具有特殊要求的电气布线设计。

在电子设备方舱的设计中，接地的实施与系统的其他电路的设计同样重要，接地的效果无法在产品的设计之初看出，但在产品的生产与测试过程中，即可发现其优点。

接地的一般定义为供电电路或系统电压参考的等位点或等位面，它不一定是实际的大地电位。有 2 个理由要求电路或电气设备实施接地的措施：一是为了安全；二是提供信号电压一个实质的等位参考点。

安全地总是接到大地上，但信号地并不一定要真正利用导体接于大地。在许多应用场合，安全接地点与信号接地点绝对不能为同一个位置，否则信号端会引入许多意想不到的噪声。安全接地又可称为保险接地与信号接地的目的不同，它是将电气设备的外壳，利用低阻抗导体连至大地，而人员意外接触时，不易发生电击危险。

一般而言，1MHZ 以下的电路最好采用单点接地；而 10MHZ 以上的电路最好采取多点接地的方法；介于 1~10MHZ 之间的电路则视接地导线的长短来决定才用何种接地方法。如接地导线所需长度少于 1/20 工作信号的波长时，则以单点接地较为合适，否则就需要采用多点接地。

机壳或机架的接地通常需要紧密连接，如焊接、熔断等。如接合处不适合做焊接或熔断的处理，再利用螺钉、螺母及垫圈进行紧固连接，目的是为了保证结合处有极佳的导电性质，使接地路径尽量无瑕疵。

3.4 不同接地方式的比较

上述接地方式可概括为浮地、单点接地和多点接地。浮地的目的是将电路设备或可能产生环流的公共导线隔离开。这种方式的缺点是设备不与大地直接相连，容易产生静电积累现象，积累电荷达到一定数量时，在设备和大地之间会产生很高电压发生击穿放电，这种放电是一种破坏性很大的强干扰源。为此可考虑折衷办法，即浮地设备与大间接入一个电阻值很大的放电电阻，以消除静电积累。

单点接地是在一个线路中，只有一个物理点被定义为接地参考点。其它各个需要接地的点都直接接到这一点上。如果系统包含多个机柜，则每个机柜的地是独立的，在每个机柜内部，对每个接地系统则是采用单点接地的方式，然后把整个系统中的各个机柜连接到一个唯一的参考点上。如果系统的工作频率很高，以致工作波长 λ 缩小到与系统的接地平面尺寸或接地引线的长度可以比拟时，就不能再用这种方式了，因为当地线长度接近于 $\lambda/4$ 时，它更像一根终端短路的传输线，而不能起着“地”的作用。因此考虑接地效果时，必须注意系统中信号的频谱成分和干扰的频谱成分。

多点接地是将系统中各个接地点都直接接到

距它最近的接地平面上，以使接地引线长度为最短。接地平面可以是设备底板，贯通系统的接地导线，或大系统中设备的框架，如果可能还可以用一个大型导电物体做公共地。

多点接地优点是电路构成比单点接地简单，且地线上可能出现的高驻波现象显著减小，但设备内部出现较多的地线回路，对设备内部较低的频率会产生不良影响。为此，可采用混合接地，将那些只须高频接地的点，用滤波电容和接地平面连接起来。不过要注意尽量防止滤波电容和引线电感构成的回路产生谐振。

3.5 接地设计准则

电子设备方舱的接地设计应由具体设备的设计要求决定，以下的设计准则是根据经验总结出的，可供接地线设计时参考。

(1) 基本要求

电路尺寸小于 0.05λ 时，可采用单点接地，大于 0.15λ 时，可采用多点接地，电路尺寸介于 0.05λ 和 0.15λ 之间时，根据接地线的实际位置以及被接地电路的传导发射和传导敏感度容限决定接地方式。

对工作频率范围很宽的电路，应采用混合接地。

- 所有接地线应尽可能短。
- 接地参考平面应具有较高的电导率，且便于维护，以保持有良好的导电性。
- 出现地线环路时，可采用浮地隔离（例如使用变压器）。

(2) 注意事项

安全方面

- 设备之间地线直接联接。
- 确保接地联接装置能应付故障电流，室外终端接地时能应付雷电电流冲击。

电路接地

- 信号回线，信号屏蔽层回线，电源回线及底板外壳均要有单独的接地，然后将这些回线接到一个地参考点上。
- 可能出现较大突变电流的电路，要单独接地以减小对其它电路的瞬态耦合。
- 低电平电路的接地线要与其它接地线隔离。
- 对最大尺寸远小 $\lambda/4$ 的电路，使用单点接地的紧绞合线（是否屏蔽视实际情况决定），以使设备敏感度最小。

电缆屏蔽

- 终端接电缆屏蔽层时，避免屏蔽层辫状引出线。
- 用同轴电缆传输信号时，应通过屏蔽层提供信号回路，低频电路可在信号源单点接地，高频则应采用多点接地。
- 低电平传输线要多层屏蔽，各屏蔽层应采用单点接地。

4 结束语

布线是造成设备或系统电磁兼容实验失败的主要因素。由于布线造成的 EMI 问题涉及到产品

设备从设计到组装的方方面面，布线方面的电磁兼容问题必须在电磁兼容设计阶段就充分考虑，否则一旦设计完成，所造成的影响就很难消除。

多个型号的电子方舱通过采用良好的接地、合理的布局和布线、有效的屏蔽措施等多种设计手段，电磁兼容性符合产品设计要求。实现了舱内设备同时正常工作，并实现了系统的最大通信距离。

参考文献：

- [1] 林国荣 电磁干扰及控制 北京 电子工业出版社 2003
- [2] 电磁兼容性工程设计手册 北京 国防工业出版社 1999
- [3] GJB6109 军用电子方舱通用规范 2007
- [4] [美]B.E.凯瑟 肖华庭等译 电磁兼容原理 北京 电子工业出版社 1985
- [5] 周开基 电磁兼容讲义（第三册） 中国系统工程咨询服务中心 中国造船工程学会电子技术委员会 1985
- [6] 曾永林 接地技术 水利电力出版社 1979

Military electronic equipment shelter electrical wiring design of electromagnetic compatibility

YANG Xue-Mei

(State Owned 785 Factory, Taiyuan 030024, China)

Abstract: Electromagnetic compatibility is the military electronics shelter design is an important indicator of the shelter's electrical wiring is the key to the design of electromagnetic compatibility. Introduces the basic concepts of electromagnetic compatibility, and focusing on the shelter layout design problems that need attention, and to solve these problems.

Key words: electromagnetic compatibility; shelter; cable arrangement; filtering grounding

核应急行动中的剂量监测

南宏杰¹, 杨忠平¹, 雷霆²

(1. 防化学院, 北京 102205; 2. 南京 73017 部队, 南京 211122)

摘要: 在核应急行动中, 出于对工作人员、公众的保护, 以及对事故环境影响评价, 需要对个人及环境进行剂量监测。本文主要以热释光剂量计的使用为基础, 对核应急行动中的人员、环境剂量监测中剂量计的发放、测量点的选择以及环境剂量监测时剂量计的布放进行了探讨。

关键词: 核应急; 剂量监测; TLD

文章分类: 核监测技术及其应用的研究成果

随着核技术的不断发展, 核能、核技术与人类的生活关联也愈加紧密。但任何事物都有其双面性, 我们享受核技术给生活带来利益的同时也要防好它, 一旦发生涉核事故, 将会对整个周边地区造成巨大的影响。当出现事故时, 一方面要尽一切努力保持公众(包括工作人员)个人接受的辐射剂量低于相关阈值, 防止发生确定性效应, 同时确保采取合理措施, 减少随机性效应发生的概率; 另一方面还要对事故周边环境进行剂量监测, 并利用测量结果对辐射场进行重建, 以评估事故对环境造成的影响。

1 热释光剂量计

目前使用比较广泛的剂量监测仪主要有直读式电子剂量计以及热释光剂量仪。直读式电子剂量计具有可以直接读数、快速反应、携带方便等优点。但是直读式电子剂量计价格较高, 执行应急任务时很难编配到每个应急人员和每个测量点, 主要是对一组工作人员进行大概的测量, 或者对某一个固定场所进行测量。热释光剂量计由于价格便宜, 且不需要电源供应, 可以发放给每个应急工作人员, 或布放在需要测量的地点, 因此在剂量监测中, 热释光因其独有的特点而占有重要的地位。

在核应急的情况下, 热释光剂量计的使用应有一个使用流程来规范, 这样就可以更好地完成剂量监测任务。在接到应急任务后, 应启动应急预案, 并进行前期准备工作, 然后按照人员工作要求发放剂量计, 并对测量的数据及时进行读取、分析。

2 人员剂量监测

派出先遣队伍携带直读式电子测量仪等操作简便、反应速度快的仪器进入受污染地段进行初步查探, 查明不同区域的辐射剂量率以及温度、湿度等气象参数, 然后将受污染地段以 1 mSv/d 为分界线分为重度污染区和轻度污染区, 大于该剂量值的区域就划定为重度污染区, 其余情况为轻度污染区。

对进入重度污染区的工作人员应配备两组热释光片, 其中一组是每进出重度污染区就测量一次, 看人员等单次任务剂量; 另一组是在整个任务完成后进行测量。进入轻度污染区的工作人员配备一组热释光片, 若任务时间短, 那么在整个任务结束后进行测读, 若任务时间长, 那么应选取适当的测读频率。

在对人群进行辐射剂量监测时,应选取具有代表某地区人群特点的部分人(关键群组)发放剂量计。对每部分人群随机发放五到十支热释光剂量计,并做好发放记录,这样在数据读取时可以观察到每部分人群的群体剂量,也可评估这一地区的群体剂量,从而得出这一地区的辐射剂量率水平。

3 环境剂量监测

当发生核事故时,为了评估事故释放的放射性物质引起周围区域内辐射水平的升高,并对烟羽轨迹和辐射场进行重建,以评估事故对环境的影响,我们还需要对环境剂量进行监测。

3.1 测量点的选择

3.1.1 同心圆布点法

同心圆布点法主要用于多个放射性物质释放点构成的辐射场。先找出放射性物质的泄露点,以此为圆心在地面上画若干个同心圆,再从圆心做若干条放射线,将放射线与圆周的交点作为测量点。圆周上的测量点数目不一定相等或均匀分布,常年主导风向的下风向应多设测量点。例如,同心圆半径分别取 5km、10km、15km、20km 从里向外各圆周上分别设 4、8、8、4 个测量点。

3.1.2 扇形布点法

扇形布点法适用于比较孤立的释放点,且主导风向明显的地区。以释放点为顶点,成 45°扇形展开,夹角可大些,但不能超过 90°,测量点设在扇形平面内据释放点不同距离的若干弧线上,每条弧线上设 3 或 4 个测量点,相邻两点与顶点的夹角一般取 10°~20°,在上风向应设对照点。

在一个监测区域内,测量点数目是与经济投资和精度要求相应的一个效益函数,应根据监测范围大小,放射性物质的空间分布特征,人口分布密度及气象、地形、经济条件等因素综合考虑确定。

3.2 测量时间和测量频率

测量时间指每次从开始到结束所经历的时间,也称测量时段。测量频率指一定时间范围内的测量次数。测量时间和频率要根据监测目的、辐射场分布特征及人力物力等因素决定。

短时间测量,缺乏代表性,监测结果不能反映辐射场强度随时间的变化,仅适用于事故性污染、初步调查等的应急监测。增加测量频率,也就相应地增加了测量时间,积累足够多的数据,测量结果就具有较好的代表性。

最佳测量和测定方式是使用两组热释光剂量计进行测量,其中一组用于长期测量,而另一组则进行短期测量,这样监测结果能很好地反映辐射场强度的变化,能取得任意一段时间的代表值(平均值)。

3.3 热释光剂量计的布放

按指令到达指定点位后,在开阔的区域内寻找一个合适的位置,并记录在相关工作单中或标示在地图上。同时测量并记录下周围剂量率,以计算热释光剂量计可放置的时间。

将两组 TLD 放在一个可密封的塑料袋中,并把它可靠的固定在一个离地面大约 1m 的小亭或构架架上,使其面向烟羽投影区域污染源的

中心;在相关工作单上记录下 TLD 的编码,并标明每一个环境监测点的方向,以便使得 TLD 易于回收。记录 TLD 的放置日期和时间;

在 TLD 布放完毕后,将记录单交回相关负责人;

根据周围剂量率的测量结果,估计所需放置时间,到时回取所有放置的 TLD。

采取合适的污染测量仪,在 TLD 从测量区回收之前,对它们进行污染测量。若发现被污染的 TLD,应将它们进行隔离,并附以污染读数标签,

并将污染读数记录在相关工作单内；

将每一套收集到的 TLD 放入第二个尺寸合适的塑料袋中包装；

保证辨认到所收集的 TLD 的编码与工作单上的记录一致。记录 TLD 的回收日期和时间。如果发现 TLD 损伤或丢失，应在工作单上注明；

在完成的任务后，按程序对人员及设备进行一次污染检查，并进行沾染消除。

4 剂量分析管理

测量完毕后，应根据热释光片的编号把相应的剂量值输入到数据管理系统中。指挥中心应对每名执行任务的工作人员的工作位置和任务有一定的了解，并将他们的工作进行细致分类，据此进行个人剂量或集体剂量的统计分析，有助于制定合理的辐射防护最优化方案。而对环境剂量，则是根据测量结果重建辐射场，了解辐射分布情况，以划分隐蔽、迁移等区域，制定环境恢复措施。

综上所述，在核应急行动中，完成剂量监测任务需要认真细致的前期准备以及完善的作业方案，在执

行过程中还应根据实际情况进行调整，尽量确保在完成救援任务的前提下避免作业人员接受过量的辐射照射，以及在经济损失最小的情况下，保证公众免受过量的照射。

参考文献：

- [1] 施仲齐.核或辐射应急的准备与响应[M].北京：原子能出版社，2010：72-92.
- [2] 个人与环境监测用 X、 γ 辐射热释光剂量测量系统. JJG 593-2006[P].北京：国家质量监督检验检疫总局，2006.
- [3] 张力军.核事故应急救援理论[M].北京：军事谊文出版社，2007：65.
- [4] 贾育新等.热释光个人剂量测量的质量控制[M]，中国辐射卫生，2007.
- [5] 王建英，杨永红.环境监测. 北京：化学工业出版社，2009.03.

Dose Monitoring in Nuclear Emergency

Nan Hongjie¹, Yang Zhongping¹, Lei Xin^{2*}

(1. Institute of Chemical Defense, Beijing 102205; 2. Unit 73017, Nanjing 211122)

Abstract: In order to protect people from irradiation sickness and rebuild the radiation filed in nuclear emergency, personal and environmental dose need to be monitored. The application of TLD in dose monitoring is discussed in this paper.

Key words: nuclear emergency; dose monitoring; TLD

厚样法在低本底 α β 测量仪上的应用研究

沈春霞, 南宏杰, 鲁远

(防化学院, 北京, 102205)

摘要: 论文主要根据厚样法测量原理, 从厚样法应用方案、厚样法测量方法设计、厚样法可行性检验等三个方面阐述了厚样法在低本底 α β 测量仪上的应用, 提出了厚样法测量可以适应野外需求, 实现核爆或核事故条件下大批量样品的快速测量任务, 加快样品测量速度, 及时对人员内照射监测做出合理的评价依据。

关键词: 低本底; 厚样法; 当量吸收厚度

文章分类: 核监测技术及其应用的研究成果

低本底总 α / β 测量仪的主要特点是采用反符合探测技术, 具有本底低、灵敏度高的特点, 采用薄样法进行放射性样品的总 α 、 β 活度测量。其主要优点就是灵敏度高, 但制样程序多、周期长, 适用于环境样品的测量。

核爆或核事故条件下, 放射性落下灰分布面积大、范围广, 会造成粮秣、水以及蔬菜的污染。为了控制放射性落下灰对人员的内照射危害, 必须实施快速检测, 仅用薄样法测量在短时间内难以完成大批量放射性沾染样品的比活度测量。本论文对现有低本底总 α / β 测量仪在不改变原有仪器性能的基础上增加厚样法测量, 厚样法与薄样法测量整合配套可以实现野外条件下大批量放射性样品的测量筛选, 以便能够适合野外任务需求, 及时为部队提供人员食(饮)用量, 对人员内照射做出合理的评价。

1 厚样法应用方案

1.1 厚样法测量原理

无论是一种核素还是多种核素的样品, 当样品厚度不断增加时都会出现饱和自吸收现象(见图1)。这种现象可以解释为当样品的厚度超过 β 粒子

在其内的射程, 距离样品表面大于 β 粒子射程的那部分样品对表面计数无贡献, 其射线被样品自身吸收。厚样法是基于所取样品的厚度大于粒子射程时, 单位面积表面射出的粒子数与放射性比活度成正比。即

$$I=KC \quad (1)$$

式中: I ——单位表面射出粒子数

K ——与物质射程有关的比例系数

C ——样品的放射性比活度

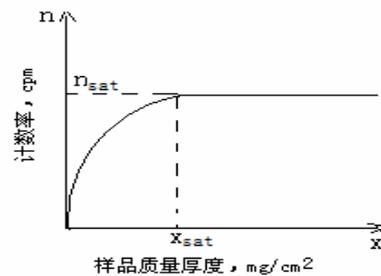


图1 均匀样品的饱和自吸收曲线

由(1)式可以看出, 当比例系数 K 确定时, 只要测出射出粒子数 I , 则不需要称量样品质量直接测出样品的放射性比活度 C 。对于核爆炸落下灰沾染的粮秣, 水源等高强度放射性样品, 其 β 谱成分复杂, 且随爆炸后时间的变化, 可以用“饱和层厚样法”测量, 但是需要作自吸收修正。其基本原理是应用薄标准源求出仪器活度响应 ϵ , 测量

饱和层厚样品的计数率，对样品作自吸收修正，按下式计算样品β放射性质量活度。总β放射性质量活度计算公式：

$$C = \frac{(n_c - n_b) \times 0.45}{\varepsilon \times D_{\text{当}} \times S} \quad (2)$$

式(2)中，C为样品(测量用)的总活度(Bq/kg)， n_c 为样品计数率(包括本底)(cps)， n_b 为本底计数率(cps)， ε 为仪器的活度响应等于净计数率除以样品活度($s^{-1} \cdot Bq^{-1}$)，S为样品源面积(cm^2)， $D_{\text{当}}$ 为样品物质的β粒子饱和层厚度(mg/cm^2)。

1.2 硬件改造

1、操作台的改造

目前，商品低本底α/β测量仪的操作台不能满足厚样品放射性测量方法的使用，也不支持厚样法相配套的裂变产物数据库和操作软件，原有仪器配套使用数据采集箱已经停产，所以必须对数据采集箱进行设计改造。

2、测量室及附件的加工设计

β粒子饱和层厚度 $D_{\text{当}}$ 是将同样一个平面源和不同厚度的吸收体作吸收曲线测得。文献[1]根据作图和计算结果表明，厚度大于三个半值层的样品都是厚样品，所造成的计数约占总计数的90%。对于大多数放射性核素来说，样品厚度为0.6cm就够了。也就是说，厚样法测量中样品厚度必须不小于0.6cm，所以认为样品盘的加工深度设为1cm即可满足测量要求。现有仪器探头的测量室主要是用于薄样测量的，其配备的样品盘深度不能满足厚样品测量的要求，如图2所示，需要对测量室进行相应的改造，当然改造的过程中需要进行详细的计算，保证仪器原有的性能指标不能改变。

1.3 软件的改进

仪器本身是通过操作软件的控制完成整个测量过程的，所以厚样品测量方法的增加需要操作软件的支持才能实现，对原有软件进行厚样品测量方法的添加。按照公式(2)可以看出，厚样法测量中放

射性比活度的获取需要参数有净计数率、仪器的活度响应、当量吸收厚度、样品源的面积等四个参数，所以在软件设计中净计数率是仪器测量值，其他三个参数应为已知的值，然后通过调用公式(2)即可得到样品的放射性比度值。



1、平板，2、测量室

图2 仪器测量室

2 厚样法的测量方法设计

2.1 当量吸收厚度的测量方法

厚样法测量中饱和层厚度既和样品所含的β粒子能量有关，也与样品的成份有关，其值直接影响到方法的准确度。其值的求法有：粗略估计法、作图法和吸收法。我们采用吸收法，具体求解方法是将同一个平面源和不同质量厚度的吸收体进行测定，以 N/N_0 为纵坐标，吸收片厚度(mg/cm^2)为横坐标，在直角坐标纸上作吸收曲线图，将图形下面的面积进行归一化求出等效矩形面积，在横坐标上的宽度(mg/cm^2)即得 $D_{\text{当}}$ ，如图3所示。

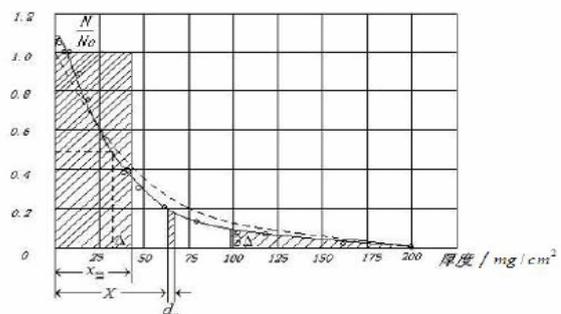


图3 图形积分法求当量吸收厚度原理图

鉴于在核试验期间用FJ367闪烁探头实测了四次核爆炸放射性落下灰的 $D_{\text{当}}$ 值，因此将它们用于低本底α/β测量仪上将是本课题要解决的关键技术。其方法是：用一块标准源在两种探测器上采用

吸收法测定 β 吸收体饱和层厚度值进行比较,找出其差异的规律,将FJ367探头的 $D_{\text{当}}$ 值移植到低本底 α 、 β 测量仪上面使用。

2.2 仪器的活度响应测量方法

厚样法测量中仪器的活度响应也是一个关键参数。厚样法属于相对测量,用标准源来确定装置的活度响应,从相对测量条件要求出发,则标准源与待测样品必须是相同的核素或能量相近的核素,且几何条件相同。

由于裂变产物的放射性核素组成复杂,随爆后时间变化较大,特别是在爆后较短的时间内短寿命的核素迅速衰变而使裂变产物的放化组成变化更为明显。对粮秣、水的 β 放射性测量来说,由于样品含有多种核素,所以选择一种有代表性的标准源相当困难。目前, β 放射性污染测量器材的标准源均用 ^{90}Sr - ^{90}Y ,它的优点在于半衰期长,不需要经常修正其强度,使用方便;另外它是纯 β 放射性,作为 β 相对测量的标准源比较准确。所以厚样法测量中仍然选用仪器自带的工作源 ^{90}Sr - ^{90}Y 作为仪器的活度响应测量。但是由于 ^{90}Sr - ^{90}Y 的平均能量与落下灰平均能量差别比较大,闪烁体探测器测量 β 射线时,仪器效率与 β 射线能量有关,总的趋势是随 β 射线能量的增加而增加,到一定能量时,变化趋于缓慢,所以需要对于不同能量的 β 射线需要做能量响应修正。

低本底测量仪使用的是型 α 、 β 复合闪烁体,其厚度为 $9\text{mg}/\text{cm}^2$ 左右,有效直径 5cm ,被封压在 5mm 厚的有机玻璃上。建议使用

^{90}Sr 、 ^{90}Y 、 ^{137}Cs 、 ^{60}Co 、 ^{147}Pm 、 ^{204}Tl 等源放射出的 β 粒子能量,测定该仪器工作状态下的能量响应,求出仪器效率 ε_i 对 β 能量的关系,并对 ^{90}Sr - ^{90}Y 标准源的探测效率进行归一化。

3 厚样法可行性检验方法

3.1 仪器性能的检验

仪器是在不改变自身相对测量法的基础上添加厚样法测量。所以按照国标GB/T 11682-2008《低本底 α 和/或 β 测量仪》检定规程,检验装置改变前后的本底计数率、效率比、稳定度等技术指标。

3.2 厚样法测量检验

用已知活度标准源进行厚样法测量,获取标准源的放射性比度,然后与已知活度值进行比较。

3.3 能量响应误差检验

依据裂变产物 β 平均能量的分布公式和仪器探测效率随着能量变化的拟合公式,获取仪器对于核爆裂产物能量的最大探测效率和 ^{90}Sr - ^{90}Y 刻度源的探测效率之比,确定测量装置应满足能量响应修正后误差不超过20%。

参考文献

- [1] 蒋和兴. 射线的自吸收修正因子及其在样品测量中的应用[D], 1980年
- [2] 戴沅浏. 塑料闪烁体粮秣、水厚样 β 测量装置, 防化学院本科毕业论文, 1984

The application study of thickness method on the low background α / β measures instrument

Shen Chun-xia, Nan Hong-jie, Lu-yuan
(Institute of Chemical Defense, Beijing 102205, China)

Abstract: This paper is introduced from three aspects with thickness method applied on the low background α/β measures instrument. The first is thickness method project, the second is thickness measurement, and the third is possibility examines of thickness.

Keywords: low background ; thickness method; equivalent absorption thickness

静态批示法研究铯在新疆托克逊粘土上的吸附分配比

曾可, 周旭, 张瑞荣, 何希, 王煜

(西北核技术研究所, 西安, 710024)

摘要: 采用静态批示法研究了Cs在新疆托克逊粘土上的吸附行为, 分析了平衡时间、pH、固液比和粘土粒度对Cs在粘土上吸附性能的影响。结果表明, Cs在粘土上约7天达到吸附平衡, 吸附分配系数 R_d 为 $487 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$, Cs的吸附分配比随固液比、粘土粒度、液相铯浓度的增大而减小, 随pH增大而增大, 计算得Cs在粘土层中迁移速率为 $0.214 \text{ m}\cdot\text{a}^{-1}$ 。结果表明, 粘土对铯的吸附能力较强, 粘土是核废物处置的较好的备选回填材料。

关键词: 静态批示法; 铯; 粘土; 吸附分配比

文章分类: 核监测技术及其应用的研究成果

随着核电事业的发展, 产生了大量的放射性废物, 目前处置放射性废物的主要手段为深地层地质处置。废物处置填埋后, 这些废物释放并输送到人类环境中最主要的途径是地下水的侵入和核素随地下水的迁移。因此, 必须设置各种天然、人工的屏障, 使废物与地下水隔离, 并在隔离失效后阻滞放射性核素的迁移。放射性核素在地质介质和回填材料上吸附的研究是核废物地质处置的关键。批式法、柱法、循环柱法和扩散池法为国际上较常见的研究核素在填充材料上吸附分配系数的方法。以上几种实验方法中, 批式法实验条件较简单, 可同时做大量的平行实验, 并且实验周期较短, 但是该实验方法存在着对实验的地质介质进行破坏性预处理(如破碎和分选)的过程, 将改变地质介质的原有物理性质。虽然如此, 在没有找到更好的实验方法之前, 批式法仍是国际上用得最多的一种方法。我国高放废物深地层地质处置库预选址位于甘肃北山深地层花岗岩体中^[1]。粘土是可塑性极强的物质, 它能灌入高放废物处置库的花岗岩-粘土界面的岩石裂隙中, 遇水膨胀, 对核素具有较大的吸附

容量, 因此其被世界上许多核废物处置工程视为首选的缓冲回填材料。我国已对全国各地如甘肃, 新疆, 四川, 河北, 云南, 海南岛等地粘土、膨润土、水泥固化体等做了大量研究^[2-6], 但由于各地地理位置、气候水文条件的差异, 导致核素迁移数据的平行性差(如各地粘土对铯吸附的阻滞系数 K_d 可由个位数变化到 10^4 量级), 不具有通用性。作为高产额、高毒性的裂变核素, 铯-137一直是放射性废物处置研究的关注核素之一。国内外研究铯-137吸附的方法大多为引入放射性铯-137示踪剂的放射性测量法, 而根据同位素交换原则及文献[3]报道, 在加入铯载体情况下¹³³Cs能与¹³⁷Cs达到完全的交换平衡(加入及未加入铯载体条件下铯-137在回填材料中阻滞系数 K_d 分别为 $1886 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$ 及 $1957 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$)。因此, 这种模拟的冷实验在普通实验室就能进行, 不仅可以为含¹³⁷Cs废物的处置提供有益的参数, 也节省了大量的物力和人力。本文报道用静态批示法研究¹³³Cs在新疆托克逊粘土中的吸附行为, 探讨其作为回填材料的可行性, 为核废物地下处置的回填材料选择及安全评估提供参考。

1 实验

1.1 仪器与试剂

载体溶液: Cs 标准溶液, 国家标准物质中心提供, 浓度为 10mg/ml。

仪器: pHs-3C 型酸度计, H2Q-C 空气浴振荡器, D/MAX-rA X 射线衍射仪, 美国 Thermo

Electron 公司生产的 XII 系列四极杆型 ICP-MS, 配有微量雾化器(MCN-50, 美国 GE 公司)。

试剂: 所用试剂为分析纯, 实验用水为超纯水。制备模拟地下水时取粘土样品与去离子水混合(固液比 1: 30), 震荡预平衡 14d。地下水组成见表 1。

表 1 地下水组成 (mg · L⁻¹)

指标	K	Na	Ca	Mg	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	F ⁻
含量	76.3	8415	678	820	20145	2.54	1.83

1.2 粘土矿化组成

采用托克逊粘土作吸附材料。粘土主要矿化成分列于表 2。土壤含较多层状硅酸盐矿物, 包括伊利石、绿泥石、高岭石, 伴生极少量蒙脱石。

土壤中 SiO₂, Al₂O₃, CaO 三者占的比例达 72.4%~79.3%。土壤脱钾较少 (K₂O<4%), 处于初步风化阶段^[3]。

表 2 土壤矿化组成

化合物	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	CaO
含量 (%)	52.8	9.4	3.7	2.0	3.3	13.2
矿物组成	伊利石	绿泥石	高岭石	石英	蒙脱石	
含量 (%)	34.2	20.9	26.1	18.3	0.9	

1.3 Cs 吸附平衡时间, 水相 pH

25 °C 下, 精确称取 1.000g 小于 200 目的粘土样品于一有盖 100ml 塑料离心管中, 加入 30ml 模拟地下水 (加入 Cs 载体溶液使模拟地下水 Cs 初始浓度为 100ug/ml), 室温下振荡。分别在 1, 3, 7, 14, 21, 28, 35, 42, 56 天取 1 只塑料离心管, 4200r/min 条件下离心后吸取上清液过滤, ICP-MS 测量 Cs 浓度。Cs 在粘土中分配比阻滞系数 K_d (mL · g⁻¹) 按 1 式计算。

$$R_d = \left[\frac{C_0 - (C_t - C_0)}{(C_t - C_0)} \right] \times \left(\frac{V}{m} \right) \quad (1)$$

式中, C₀ 为不加吸附材料的起始溶液中 Cs 浓度(1mg/L, 0.0075mmol/L); C_t 为溶液与吸附

材料接触一定时间后溶液中 Cs 浓度 (mmol/L); C_b 为土壤加入不含铯载体的模拟地下水中铯含量的背景值 (mmol/L); V 为溶液总体积(30mL); m 为粘土质量(1g)。

1.4 粘土粒度、pH、固液比对阻滞系数 K_d 的影响

测定粒度分别为 20-60 目、60-80 目、80-120 目、120-160 目、160-200 目, 小于 200 目的粘土在吸附平衡后的 R_d。以固液比 1: 5, 1: 10, 1: 20, 1: 40 在吸附平衡后的 R_d。以盐酸, 氢氧化钠溶液调节溶液的 pH 为 3.0, 5.0, 7.0, 9.0, 11.0 测量吸附平衡后的 R_d。

1.5 初始浓度对阻滞系数Kd的影响及吸附等温线的绘制

以 Cs 作为示踪剂，取一系列不同浓度的 Cs 溶液，在达到吸附平衡后，测量溶液中的 Cs 浓度，确定初始浓度对阻滞系数 Kd 的影响。同时计算出吸附材料对 Cs 的吸附容量 q_a ($\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$)，以及吸附平衡水相中 Cs 的浓度 C_E ($\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)，以 $\lg q_a$ 对 $\lg C_E$ 作图即得 Cs 的吸附等温线，公式 2, 3。

$$q_a = \left[\frac{C_0 - (C_t - C_b)}{(C_t - C_b)} \right] \times C_0 \times \left(\frac{V}{m} \right) \quad (2)$$

$$C_E = C_t - C_b \quad (3)$$

2 结果及讨论

2.1 Cs 吸附平衡时间、水相 pH

在 25 °C，颗粒粒径为 0.075mm，固液比为 1:30，Cs 初始浓度为 $100\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ 的条件下，Cs 在粘土中分配比与振荡时间之间的关系，如图 2, 3。

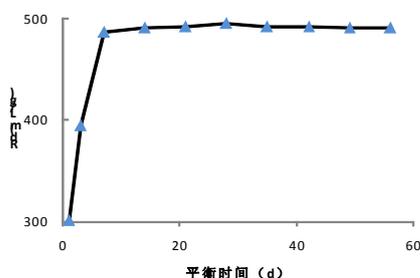


图 1 Rd 与时间的关系

2.2 粘土粒度、pH 及固液比对 Rd 的影响

粒度为 20-60 目、60-120 目、120-160 目、160-200 目的粘土对 Cs 的 R_d 分别为 350、379、399、421、448、487 $\text{mL}\cdot\text{g}^{-1}$ (图 3)。可以看出，粒度在 20-200 目范围内， R_d 随粘土颗粒度减小而增大。

粘土对铯的吸附与吸附前水相 pH 有关，随 pH 增大而增大 (图 4)。Poinsot 等认为铯在伊

液相 pH 随时间无明显变化。粘土对铯吸附的阻滞系数 K_d 由第 1 天 $300\text{mL}\cdot\text{g}^{-1}$ 增至第 56 天的 $459\text{mL}\cdot\text{g}^{-1}$ ，约 7 天达到吸附平衡。铯虽然与钠，钾等同为第一主族元素，但其离子半径很大 ($\text{Cs}, 265\text{pm} > \text{Sr}, 215\text{pm} > \text{Ca}, 197\text{pm}$)，导致其极化能力弱，水和程度低，所以比易水和的 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Sr^{2+} 等阳离子更易被粘土吸附固定。且 Cs^+ 的离子势为 1/169，而锶、钙的迁移形态为 CaHCO_3^+ 、 SrHCO_3^+ ，从而决定了锶、钙的吸附能力远小于铯。而由矿物组分分析结果可以看出，实验用粘土主要矿物成分为伊利石，而伊利石属于 2:1 型结构的层状硅酸盐。由于四面体中约 1/4 的 Si^{4+} 、 Al^{3+} 被置换，产生的负电荷大于 1。其电荷平衡方程为近程 (层) 中和，故晶体层间能牢固地吸引住层间十二配位的大阳离子钾，其他离子不易与其发生交换。而铯的离子半径及电负性与钾近似，易与其发生置换，导致铯较其他离子更易与伊利石牢固地结合^[6]。

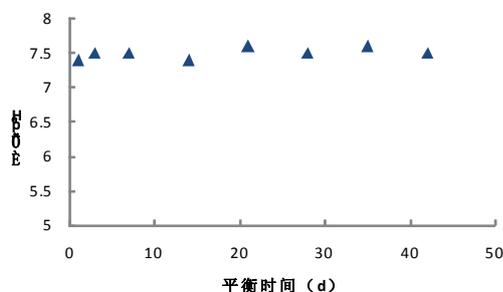


图 2 pH 与时间的关系

利石上的吸附随 pH 变化的原因不在于固相吸附位点本身性质、容量和有效性的变化，而是因为随 pH 增大竞争离子的吸附共沉淀，导致竞争离子含量降低^[7]。

粘土质量为 1.000g，改变模拟地下水的加入量以得到一系列不同的固液比。固液比对 ^{133}Cs 在吸附材料上吸附比见图 5， R_d 随固液比值的减小而增大。

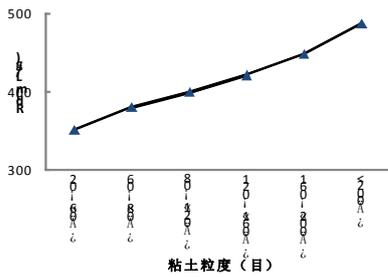


图3 Rd与粘土粒度的关系

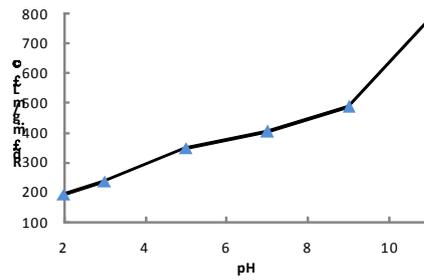


图4 Rd与pH的关系

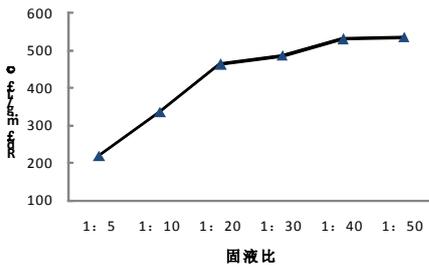


图5 Rd随固液比的变化

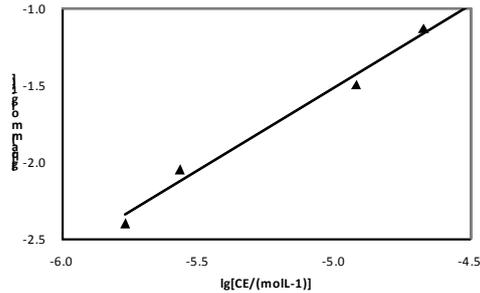


图6 铯在粘土上的吸附等温线

2.3 Cs 吸附等温线

吸附材料对 Cs 的吸附容量 q_a ($\text{mmol}\cdot\text{g}^{-1}$), 以及吸附平衡水相中 Cs 的浓度 C_E ($\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$) 见图 6, 对数据拟合结果表明($n=3$), 铯在粘土上的吸附行为可用 Freundlich 吸附等温式表示, 既符合 $q_a=K\times C_E^\beta$ 。

2.4 Cs 在粘土层中迁移速率的估算

野外实验是确定阻滞系数的一种有效方法, 但由于费用昂贵, 很多情况下是不可行的。室内柱实验可模拟野外实验获取阻滞系数 K_d , 因周期短、费用低等优点而得到广泛应用。但工作中粘土孔隙率低, 铯 R_d 值较大, 即使采用柱实验, 也可预见实验周期较长。本文阻滞系数 K_d 可由实验室测定的分配系数 R_d 按 4 式推导, 它表示为水流运动速度和放射性核素迁移速度之比, 计算得阻滞系数 K_d 为 2923。依据文献 2 报道, 粘土层中地下水渗流流速为 $626\text{m}\cdot\text{a}^{-1}$, 则 Cs 在该土层

中迁移速率为 $0.214\text{m}\cdot\text{a}^{-1}$, 与文献 2 结果 $0.113\text{m}\cdot\text{a}^{-1}$ 基本一致。

$$K_d = 1 + \left(\frac{\rho}{\epsilon}\right) \times R_d \quad (4)$$

式中: ρ 为土壤介质的容重, $1.8\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$; ϵ 为土壤介质的孔隙率 0.3。

3 结论

由结果可知, Cs 在粘土上约 7 天达到吸附平衡, 吸附分配系数为 $487\text{ml}\cdot\text{g}^{-1}$, Cs 的吸附分配比随固液比、粘土粒度的增大而减小, 随 pH 增大而增大, Cs 在粘土中迁移速率约 $2.85\times 10^{-4}\text{m}\cdot\text{d}^{-1}$ 。因此, 托克逊粘土可以作为核废物处置的备选充填材料。

参考文献:

- [1] 罗兴章, 王驹, 金新远, 等。甘肃北山花岗岩中填系粘土对 U(VI), ^{234}U (VI)和 ^{238}U (VI)的吸附性状: 应用于中国高放废物处置库选址, 中国科学 D 辑, 2004, 34(10): 935-940

- [2] 唐方华。两种粘土材料对 ^{137}Cs 吸附特性的研究核技术, 1997,20(3): 179-183
- [3] 李利华, 傅依备, 周秀鹏, 等。Sr、Cs 在回填材料中的吸附与迁移研究。原子能科学技术, 1998,32(增刊): 76-81
- [4] 易发成, 李玉香, 唐蓉, 等。矿物材料对核素Sr、Cs的吸附性能研究, 中国矿业, 2004,13(12): 67-70
- [5] 石正坤, 康厚军, 张东, 等。 ^{90}Sr 、 ^{137}Cs 在水泥固化体中的吸附和迁移行为, 同位素, 2001,14(3): 174-178
- [6] 李宽良, 周俊一, 于乃琇, 等。锶、钴、铯溶质的竞争吸附与锶的动态迁移机理。环境科学学报, 1994,14(3): 330-333
- [7] C.Poinssot, B.Baeyens, M.H.Bradbury, et.al. Experimental and modeling studies of Caesium sorption on illite[J]. Geochimica et cosmochimica Acta. 1999,63(19-20):3217-3227.

Study on the Distribution of Sr on Xin Jiang Tuokexun Silty Clay by batch experiments

ZENG Ke, ZHOU Xu, ZHANG Rui-rong, HE Xi WANG Yu
(Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

Abstract: The distribution of Sr on Tuokexun silty clay was studied by batch experiments. The factors that affected the absorption experiment were size of rock, pH, and ratio of solid. In conclusion, the adsorption equilibrium is achieved within 7d and distribution coefficient(R_d) is $487 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$, the value of distribution in the rocks was increased while size of rock was decreasing, meanwhile, the pH and ratio of solid to liquid was increased. Migration rate of Cs in silty clay is $0.214\text{m}\cdot\text{a}^{-1}$. Silty clay is a very good backfill material for Cs in nuclear waste disposal.

Key words: Batch experiments; Cs; Silty Clay; Distribution

就地 HPGe γ 谱仪测量隧道空气中氡子体

吴睿^{1,2}, 冯天成², 苏川英^{1,2}, 贾明雁², 李公平¹, 张洋², 庞璐²

(1.兰州大学, 核科学与技术学院, 甘肃 兰州 730000; 2.西北核技术研究所, 陕西 西安 710024)

摘要: 研究了就地 HPGe γ 谱仪测量隧道空气中氡子体浓度的方法。就地 HPGe γ 谱仪可直接测量隧道中²¹⁴Pb (或²¹⁴Bi) 的特征 γ 射线, 其计数来自于空气与岩石中²¹⁴Pb (或²¹⁴Bi) 的贡献。利用²¹⁴Pb (或²¹⁴Bi) 不同能量特征 γ 射线的计数率及其效率转换因子建立方程组, 用期望最大 (EM) 算法求解空气中²¹⁴Pb (或²¹⁴Bi) 的活度浓度。²¹⁸Po 无法通过就地 HPGe γ 谱仪直接测量, 但可通过²¹⁴Pb 的活度浓度推算。在一常年封闭的隧道中连续测量 24 小时, 按不同时长获取 8 个能谱, 分别计算出不同时段空气中²¹⁴Pb 和²¹⁴Bi 的活度浓度, 并由此计算出²¹⁸Po 的活度浓度。结果验证了方法的可行性。

关键词: 就地 HPGe γ 谱仪; 氡子体; 效率转换因子

文章分类: 核监测技术及其应用的研究成果

传统方式测量空气中氡子体浓度, 测量周期较长, 且易受空气湿度和气溶胶浓度等诸多因素的影响^[1]。结合就地 HPGe γ 谱仪测量快捷、简便、无损等特点, 研究了就地 HPGe γ 谱仪测量空气中氡子体浓度的方法, 并用此方法对某一隧道空气中氡子体的活度浓度进行了验证测量。与传统测量方式相比, 采用就地 HPGe γ 谱测量空气中氡子体浓度, 能够有效避免气溶胶等因素对氡子体测量的影响, 并简化了测量流程。该方法难点在于岩石中氡子体对测量结果影响的扣除, 以及子体中²¹⁸Po 浓度的计算。根据不同能量的 γ 光子在介质中的衰减不同, 可利用探测器对²¹⁴Pb、²¹⁴Bi 不同能量的 γ 光子的响应建立方程组, 求解得到空气中氡子体的活度浓度, 其中²¹⁸Po 浓度通过²¹⁴Pb 的活度浓度推算。

1 原理

1.1 测量方法

就地 HPGe γ 谱仪测量基本原理基于文献[2-4], 假设就地 HPGe 探测器对被测核素所发射特征 γ 射线的效率转换因子为 f , 全能峰计数率为 N , 被测核素的活度浓度为 A , 则存在如下关系:

$$A = N / f \quad (1)$$

效率转换因子 f 可根据测量对象的几何尺寸、密度等参数通过计算得出。当测量对象由 n 种不同介质组成时, 若不同介质中被测核素的活度浓度分别为 A_i , 某一 γ 能峰计数率为 N_i , 则有如下关系:

$$N_i = \sum_{i=1}^n A_i f_i \quad (2)$$

假设被测核素能够被测得特征 γ 射线个数为 m , 则有:

$$\begin{pmatrix} f_{11} & f_{12} & \cdots & f_{1n} \\ f_{21} & f_{22} & \cdots & f_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ f_{m1} & f_{m2} & \cdots & f_{mn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_1 \\ A_2 \\ \vdots \\ A_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} N_1 \\ N_2 \\ \vdots \\ N_m \end{pmatrix} \quad (3)$$

在 (3) 式中, 由 f_{ij} 组成的矩阵称为效率矩阵 F , 由于 f_{ij} 可以通过计算得到, 所以只要 $m \geq n$, 即可由 (3)

式求出不同介质中核素的活度浓度 A_i 。

当在隧道中进行测量时, ^{214}Pb (或 ^{214}Bi) 的特征 γ 能峰的计数是由空气和岩石中 ^{214}Pb (或 ^{214}Bi) 贡献的。则根据 (3) 式建立方程组:

$$\begin{pmatrix} f_{1a} & f_{1r} \\ f_{2a} & f_{2r} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_a \\ A_r \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} N_1 \\ N_2 \end{pmatrix} \quad (4)$$

式中, N_1 、 N_2 为 ^{214}Pb (或 ^{214}Bi) 的两个特征 γ 射线的计数率; A_a 、 A_r 为空气和岩石中 ^{214}Pb (或 ^{214}Bi) 的活度浓度; f_{ia} 、 f_{ir} ($i=1, 2$) 为就地 HPGe 探测器对空气和岩石中的 ^{214}Pb (或 ^{214}Bi) 的两条特征 γ 射线的效率转换因子。求解可得空气和岩石两种介质中 ^{214}Pb (或 ^{214}Bi) 的活度浓度。

1.2 效率矩阵计算

计算效率矩阵即分别计算 (4) 式中 HPGe 探

测器对空气与岩石中 ^{214}Pb (或 ^{214}Bi) 特征 γ 射线的效率转换因子 f_{ij} 。 f_{ir} 根据 Beck 公式通过数值积分方法计算得到^[2-4]。 f_{ia} 则需分两部分计算, 分别是探测器 1m 范围内的效率转换因子 f_{a1} , 以及除去这一部分后隧道内剩余区域的效率转换因子 f_{a2} 。这样做的原因在于, 当测量点到 HPGe 探测器距离小于 1m 时, 若使用 Beck 公式^[2]计算须对计算结果进行距离和立体角修正, 十分复杂。故此, 对探测器 1m 范围内的效率转换因子使用蒙卡方法计算; 剩余区域效率转换因子仍使用 Beck 公式进行计算。假设 ^{214}Pb (或 ^{214}Bi) 的活度浓度在隧道空气中均匀分布, 则由 (5) 式可计算出 HPGe 探测器对隧道空气中 ^{214}Pb (或 ^{214}Bi) 的效率转换因子 f_a 。计算得到 ^{214}Pb (或 ^{214}Bi) 的效率转换因子如表 1 所示。

$$f_a = f_{a1} + f_{a2} \quad (5)$$

表 1 就地 HPGe γ 谱仪对于隧道空气与岩石中 ^{214}Pb 和 ^{214}Bi 的效率转换因子

转换因子	^{214}Pb		^{214}Bi	
	295.4keV	351.92keV	609.31keV	1764.5keV
f_a	1.0×10^{-3}	1.7×10^{-3}	1.3×10^{-3}	1.9×10^{-4}
f_r	1.7×10^{-2}	3.0×10^{-2}	2.3×10^{-2}	3.3×10^{-3}

1.3 ^{218}Po 活度浓度计算

当测量点位于密封隧道内时, 可认为在一段时间内隧道内空气中子体核素均匀分布且隧道内通风率约等于零, 故此时只需考虑氡子体自身衰变对子体浓度的影响, 根据放射性核素递次衰变规律^[6], 当初始时刻子体核素活度浓度为 B_0 时, t 时刻其母体核素活度浓度 A 及 t 时刻子体核素活度浓度 B 存在如下关系:

$$\frac{dB}{dt} = \lambda_2 (A - B) \quad (6)$$

根据边界条件, 当 $t=0$ 时 $B=B_0$ 。求解 (6) 式即可得到 ^{214}Pb 的活度浓度与 ^{218}Po 的活度浓度

的关系如 (7) 式所示。

$$A = \frac{B_0 - B e^{\lambda_2 t}}{1 - e^{\lambda_2 t}} \quad (7)$$

2 实验

实验选择在一常年封闭的隧道内进行。测量时就地 HPGe γ 探测器放于地表 1.5m 高处。连续测量约 24 小时, 按不同时长获取 8 个 γ 能谱。测量所得的计数率见表 2。

就地 HPGe γ 探测器测量同时, 使用 RAD7 氡测量仪对测量点的氡浓度 (C_{Rn}) 进行了测量, 每小时获取一个数据, 共获得 24 个氡浓度数据, 具体测量信息见表 3。

表 2 就地 HPGe γ 谱仪测量得到 ^{214}Pb 与 ^{214}Bi 计数率

测量 编号	$^{214}\text{Pb}/\text{s}^{-1}$		$^{214}\text{Bi}/\text{s}^{-1}$	
	295.2keV	351.8 keV	609.3 keV	1764.6 keV
1	42.27	68.94	54.71	7.99
2	42.23	68.31	54.84	8.10
3	42.74	72.06	55.63	8.05
4	45.30	74.18	57.66	8.41
5	39.95	65.83	52.35	7.64
6	44.28	72.04	54.43	8.06
7	42.94	72.89	55.83	8.11
8	45.65	74.84	58.94	8.60

表 3 氡浓度 (C_{Rn}) 测量结果

测量 时刻	氡浓度/ kBq/m^3	测量 时刻	氡浓度/ kBq/m^3	测量 时刻	氡浓度/ kBq/m^3
11:55	46.8	19:53	48.2	3:54	43.7
12:55	46.7	20:53	48.7	4:54	43.3
13:53	44.2	21:53	47.7	5:54	43.3
14:53	45.2	22:53	45.3	6:54	44.8
15:53	45.3	23:54	44.8	7:54	43.0
16:53	45.2	0:54	47.0	8:54	43.2
17:53	45.3	1:54	46.3	9:54	43.2
18:53	45.8	2:54	45.5	10:55	45.2

3 结果

将表 1 中的效率转换因子带入 (4) 式, 计算得到空气和岩石中 ^{214}Pb (或 ^{214}Bi) 的活度浓度。由于 ^{214}Pb 和 ^{214}Bi 效率矩阵 (F_1 、 F_2) 的条件数较大, 分别为 3.6×10^3 、 1.8×10^4 , 故采用期望最大算法 (EM 算法) [5] 求解方程组。得到 ^{214}Pb 和

^{214}Bi 的活度浓度后, 根据 (6) 式计算出 ^{218}Po 的活度浓度, 为了减小计算误差, 在计算 ^{218}Po 活度浓度时, 将 ^{214}Pb (或 ^{214}Bi) 的活度浓度作为测量时段中间点的活度浓度值带入 (6) 式进行计算。计算结果见表 4。

表 4 氡子体核素活度浓度实验值

测量 编号	测量 时刻	^{218}Po		^{214}Pb		^{214}Bi	
		空气中 $/\text{Bq}/\text{m}^3$	空气中 $/\text{Bq}/\text{m}^3$	空气中 $/\text{Bq}/\text{kg}$	空气中 $/\text{Bq}/\text{m}^3$	岩石中 $/\text{Bq}/\text{kg}$	
1	14:20	3.9×10^4	4.0×10^3	13	4.1×10^3	9	
2	17:27	4.0×10^4	4.0×10^3	8	4.2×10^3	5	
3	18:23	4.2×10^4	4.1×10^3	18	4.2×10^3	25	
4	19:38	4.3×10^4	4.3×10^3	19	4.4×10^3	10	
5	3:32	3.8×10^4	3.8×10^3	48	4.0×10^3	9	
6	11:16	4.2×10^4	4.2×10^3	11	4.1×10^3	5	
7	12:02	4.3×10^4	4.3×10^3	16	4.2×10^3	14	
8	13:30	4.4×10^4	4.4×10^3	21	4.5×10^3	10	

4 结果验证

由于隧道常年封闭，洞内通风率很小，隧道中氡子体平衡因子应接近于 1。因此，使用氡平衡因子作为比较值对实验结果进行验证。

$$EEC_{Rn} = 0.105C_{218Pb} + 0.515C_{214Pb} + 0.380C_{214Bi} \quad (7)$$

将氡子体活度浓度的计算值代入(7)式，可

得到空气中氡子体的平衡等效氡浓度 (EEC_{Rn})，结合表 3 数据得出不同测量时刻下氡平衡因子，结果见表 6，氡平衡因子平均值为 0.90 ± 0.03 。与文献[1]中给出通风率等于 $0.1h^{-1}$ 时的氡平衡因子数值 0.928 吻合。

表 5 平衡因子 F 实验值

编号	测量时刻	EEC_{Rn} /Bq/m ³	氡浓度/ Bq/m ³	F=	$\frac{ECC_{Rn}}{C_{Rn}}$
1	14:20	4.0×10^4	4.6×10^4		0.89
2	17:27	4.1×10^4	4.6×10^4		0.89
3	18:23	4.2×10^4	4.7×10^4		0.89
4	19:38	4.3×10^4	4.8×10^4		0.89
5	3:32	3.8×10^4	4.5×10^4		0.85
6	11:16	4.2×10^4	4.6×10^4		0.91
7	12:02	4.3×10^4	4.7×10^4		0.91
8	13:30	4.4×10^4	4.5×10^4		0.97

5 结论

上述结果与分析表明，利用就地 HPGe 探测器测量空气中氡子体核素活度浓度的方法是可行的。与传统的氡子体测量方式相比，该方法避免了环境温度、湿度及气溶胶浓度对测量结果的影响，且可以做到即时测量，较传统的测量方式更

加快捷。

本次实验是在氡浓度较高、通风率较低的近似密闭环境下进行，测量环境较为特殊。而在其它环境下，尤其是通风率较高的环境下，该方法的适用性还有待进一步研究。

参考文献:

- [1] 张智慧. 空气中氡及其子体的测量方法[M]. 北京: 原子能出版社, 1994: 21.
- [2] Beck H L, Decampo J, Gogolak C. In situ Ge(Li) and NaI(Tl) gamma-ray spectrometry[J]. New York: health and safety laboratory, 1972: Report HASL-258: 1-64.
- [3] ICRU report 53. Gamma-ray spectrometry in the environment[R]. USA: International Commission on Radiation Units and Measurements, 1994: 24-39.
- [4] 冯天成, 成智威, 苏川英等. 就地 HPGe 谱仪应用技术研究[C]. 中国核科学技术进展报告, 2009, 4: 286-294.
- [5] FENG Tiancheng, Cheng Zhiwei, Su Chuanying, et al. Study of applications technical for in-situ HPGe gamma spectrometry[C]. Progress Report on China Nuclear Science & Technology, 2009, 4: 286-294(in Chinese).
- [6] 冯天成, 贾明雁, 龙斌等. 核素深度分布就地测量中病态线性方程组的迭代解法[J]. 核电子学与探测技术, 2009, 29(6): 1299-1302.

Feng Tiancheng, Jia Mingyan, Long Bin et al. Iteration algorithm of one linear ill-conditioned equation group for in-situ Measurement of Radionuclide-depth-distribution[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2009, 29(6) : 1299-1302(in Chinese).

[7] 卢希庭. 原子核物理[M]. 北京: 原子能出版社, 2000: 25-27.

社, 2000: 25-27.

[8] A.Clouvas,S.Xanthos. Simultaneous measurements of indoor radon, radon-thron progeny and high-resolution gamma spectrometry in Greek dwellings[J]. Radiation Protection Dissymmetry, 2006, 118(4) : 482-490.

Radon Progeny Concentrations Measurement in Tunnel by In-situ HPGe γ Spectrometry

Wu Rui^{1,2}, Feng Tian-cheng², Su Chuan-ying^{1,2}, Jia Ming-yan², Li Gong-ping¹, Zhang Yang², Pang Lu²

(1. School of Nuclear Science and technology, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China;

2. Northwest Institute of Nuclear technology, Xi'an 710024, China)

Abstract: The method was studied to determine the radon progeny Concentrations in tunnel by in-situ HPGe γ spectrometry. The characteristic γ rays of ^{214}Pb (^{214}Bi) in tunnel could be detected by in-situ HPGe γ spectrometry directly, but the contributions for count rates were from air and rocks in tunnel, respectively. The systems of equations composed of count rates, efficiency factors and activity concentrations of ^{214}Pb (^{214}Bi) in the air and rocks were constructed. The system of equations were solved by the expectation maximization algorithm (EM) to obtain the activity concentrations of ^{214}Pb (^{214}Bi) in the air. Although ^{218}Po wasn't able to be measured by in-situ HPGe detector directly, its concentration could be calculated on the basis of ^{214}Pb . An experiment had been performed for 24 hours in a perennial closed tunnel, and 8 γ -spectrums were obtained. The concentrations of ^{214}Pb and ^{214}Bi in the air were calculated respectively. Then the concentrations of ^{218}Po were calculated in accordance with the concentrations of ^{214}Pb and ^{214}Bi . And this method was feasible by verification the results.

Key words: in-situ HPGe spectrometry; radon progeny; Conversion factors of efficiency

空气中的氙监测在重水堆核电站中的应用

杨 冬

(秦山第三核电有限公司, 浙江海盐, 314300)

摘 要: 放射性氙是重水堆核电站特有的产物, 同时也是核电站辐射防护工作的主要对象。在本文中, 主要阐述重水堆核电站中对空气中的氙进行连续监测采取的工作方法, 以及对设备的工作原理进行简要分析。

关键字: 放射性测量; 复合效应; 电流电离室;

文章分类: 核监测技术及其应用的研究成果

重水堆核电站使用重水作为反应堆的慢化剂和冷却剂, 根据 $^2\text{H}(\text{n}, \gamma)^3\text{H}$, $^{10}\text{B}(\text{n}, 2\alpha)^3\text{H}$, $^7\text{Li}(\text{n}, \alpha)^3\text{H}$, $^3\text{He}(\text{n}, \text{p})^3\text{H}$ 等反应产生氙。由于氙的放射性危害和在环境中的特性, 氙的管理越来越受到关注。秦山第三核电站是国内首个重水堆核电站, 电站在日常运行过程中产生放射性氙, 为了控制排放到环境中氙的总量, 必须在线对重要区域进行放射性氙的监测。目前, 秦山第三核电站使用美国 Overhoff 公司生产的 MODEL 347 型氙监测仪和 Sartrex 公司生产的 MODEL 275 型氙监测仪对空气中的氙进行在线监测, 而使用液闪分析仪进行轻水中的氙监测; 当监测设备监测到放射性氙导致测量值超过报警阈值后, 并将报警信号送到主控室, 运行人员立即通知辐射防护人员对该区域的气体或者液体采取手动取样, 进行人工分析, 经过双重认证确保对该区域氙的定性分析。本文主要阐述 MODEL 347 型氙监测仪。

1、氙的产生与危害

1.1 氙的产生

在重水反应堆中, 重水被容纳在两个分开的系统中(慢化剂和冷却剂中), 实际上大部分氙产生

于慢化剂系统。这两个系统设备的老化及现场工作导致的泄漏是含氙流出物的主要来源。表 1 给出了国际上重水堆核电站的重水泄漏数据。

表 1.重水堆 D2O 的泄漏点

部件	电站慢性 D2O 泄漏比例 (%)	泄漏率 (%)	
		< 0.1g/d	> 0.1g/d
管道与连接件	5.4	100	0
仪器与控制部件	1.4	78	22
法兰盘	28.1	56	44
阀门	59.8	78	22
观察窗玻璃	0.8	57	53
其它	4.5	-	-

1.2 氙的危害

人体的氙摄入量与受到多大的剂量照射效果等同呢? 伴随着怎样的危险度呢? 表 2 以经验数据给出它们之间的关系。

表 2.氙摄入量与待积剂量当量, 危险度的关系^[1]

摄入量	待积剂量当量	致癌概率或遗传性疾病危险度
2.9×10^{11} Bq	5 Sv	有死亡危险
5.5×10^{10} Bq	1 Sv	中等程度放射性疾病症状
2.9×10^9 Bq	50 mSv	10^{-3}
2.9×10^8 Bq	5 mSv	10^{-4}
2.9×10^7 Bq	0.5 mSv	10^{-5}
2.9×10^6 Bq	50 μ Sv	10^{-6}

随机性效应是指发生几率（而不是严重程度）与剂量大小有关的效应；对于这种效应不存在剂量的阈值。确定性效应是指产生的效应，其严重程度随剂量大小而变化的效应。

2、电离室工作原理

2.1 氚的基本性质

氚是氢唯一的放射性同位素，记作 ^3H 或者 T 。虽然氚的物理化学性质同氘和氢非常相似，但由于它们之间的质量比差别很大，因此存在较显著的同位素效应。氚通过发射弱 β 粒子衰变，子体产物为 ^3He 。氚是一种比活度很高的低能 β 发射体。表 3 列出了氚 β 粒子在各种物质中的射程。

表 3 氚 β 粒子的射程[1]

物质介质	能量 $E(\beta)$ keV	射程 R
T_2 气, STP	5.7	0.26 cm
T_2 气, STP	18.5	3.2 cm
空气, STP	5.7	0.036 cm
H_2O , 液体	5.7	0.42 μm
H_2O , 液体	18.5	5.2 μm
不锈钢	5.7	0.06 μm

由上表可知，物质介质中每单位体积的原子密度越高，每个原子的电子数越多，射程就越短。由此可推，选取越大原子序数稳定的金属合金作为氚的屏蔽物，屏蔽效果更佳。在电站实际运行期间，虽然有机形态的氚和金属氚化物也会遇到，但主要存在的化学形态是氚化水 ($\text{HTO}, \text{DTO}, \text{T}_2\text{O}$) 和氚化氢 ($\text{HT}, \text{DT}, \text{T}_2$)。而氧化氚的吸入危害是气态氚的 2.5×10^4 倍，而且还能通过皮肤渗透进入体内。

从氚安全操作的观点出发，电站运行期间对重要系统管件有一定的要求。

A、包容的完整性

由于腐蚀脆裂或化学反应产生的机械故障，氚同密封材料的化学反应产生的泄露，或由于渗透等物理特性，可能破坏对氚的包容。

B、污染控制

氚在工艺材料中的吸收，释放气体，以及由于同位素交换和通过材料的渗透发生的迁移，都是控制污染需要考虑的问题。

C、氚化物的产生

HT 向危害较大的 HTO 转化和其他有机物质的产生可能造成附加的放射性危害。而且，这类氚与材料相互作用的产物，在空气净化系统和废物处理设施中也可能要求做特殊的考虑。

2.2 电流电离室的工作原理^[2]

秦山第三核电站使用的 Overhoff 公司生产的 MODEL 347 型氚监测仪，采用了电流电离室测量放射性的方法。电流电离室是通过测定单位时间内入射的粒子在电离室内产生的平均电流来探测核辐射的。

2.2.1 电离量及其测量

若单位时间内入射的粒子数为 n_λ ，每个粒子在电离室内平均损失能量为 E ，而在电离室的工作气体中产生一对离子的平均电离能为 w 。如果每个入射粒子的能量 E_0 全部损失到电离室内（这是完全可以做到的，只要使电离室的有效尺寸大于入射粒子的射程），则

$$I_{\text{饱和}} = E_0 \times n_\lambda \times e/w$$

如果 E_0 、 w 已知，测量出 $I_{\text{饱和}}$ 就可以知道 n_λ ，则根据探测效率可知粒子辐射量。电离电流的强弱与入射粒子流的强弱有关；在强辐射场中，电离电流若达到 10^{-6}A 或者更大时，可用电流计测量。对于弱电流 ($< 10^{-7}\text{A}$)，常用测量高电阻 R (10^9 - $10^{13}\Omega$) 上的电压压降 ΔV 的方法，利用 $I = \Delta V/R$ 求出电离电流。测量微小电压降的仪器有电子管静电计、场效应管静电计、动电容静电计等。在测量前，静电计的输入端要先短路，测量时再打开接到电离室的输出端。这是因为静电计线路必须直流耦合，任何小的漂移或者元件值的渐变都会使所测的输

出电流产生响应的变化。

2.2.2 电流电离室的主要工作特性

使用电流电离室时，常需要考虑的特性指标包括饱和特性、灵敏度、线性电流、时间响应和能量响应等。

A、饱和特性

饱和特性表示电离室输出电流与工作电压的关系，有时又称为伏安特性。实际的电流电离室在其饱和区内电离电流仍随电压升高而略为增大，表现出一定的斜率。形成斜率的主要原因：一是电压升高时，电极边缘的电场增强，使实际的灵敏体积扩大；二是由于负电性气体杂质的存在，消除负离子和正离子复合需要更强的电场，刚达到饱和区的场强仍不足以消除这些复合，随着电压的增高复合率还会逐渐减少。电离室的工作电压应该选在饱和区。

影响饱和特性的因素很多，包括射线的种类和注量率；电离室内充入气体的种类、压力和纯度；电离室的自身结构等。

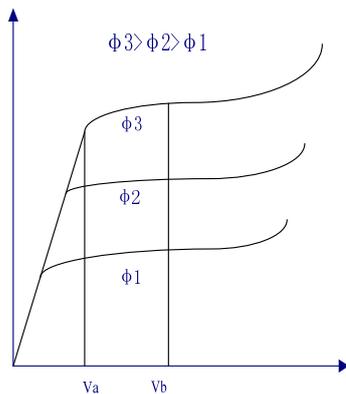


图 1. 电流电离室的饱和曲线

B、灵敏度 S

对于给出能量的粒子，电流电离室的灵敏度定义为：

$$S = I / \phi \quad (\text{A} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$$

I 为输出电流，单位为 A； ϕ 为探测器所在位

置上粒子的注量率。

实际应用中，灵敏度都是实验标定的，在一定注量率的射线照射下测得电离电流，即可算出探测器的灵敏度。

电流电离室的灵敏度与电离室的壁材料、气压和结构有关。

C、线性电流

在一定工作电压下，电离室输出的电离电流与辐射注量率（或粒子通量密度）保持线性关系，相应的最大输出电流为在这个工作高压时的最大线性电流。我们常以额定工作电压下保持线性关系的最大输出电流来表示电离室的线性范围。对于电离室的使用，必须使其输出电流在线性范围内，才能保证电离室工作在饱和区（即才能保证输出和辐射注量率成正比）。但是工作电压不能太高，过高会引起放电等问题。对于电离室，提高其线性电流范围的最好办法是改善其饱和特性。

一个好的电流电离室应该在相当宽的粒子注量率范围内，其饱和电流与入射粒子注量率保持线性关系。

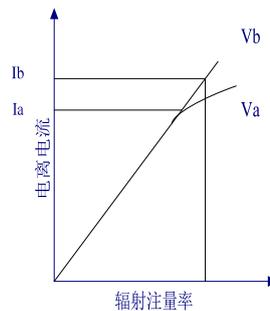


图 2. 电离室的线性电流

D、时间响应

时间响应是指辐射注量率改变时，整个测量系统的反应速度。但整个测量系统的时间响应主要决定于探测器的时间响应，而探测器的时间响应由射线作用产生电荷的过程和电荷收集过程决定。

电流电离室用作辐射水平检测或反应堆控制

部件时，其时间响应非常重要。时间响应反映了所能测量的电离变化率，实际应用中还必须考虑测量仪器指示对电离变化率的滞后。

3、MODEL 347 氡分析仪使用情况

分析秦山第三核电站现拥有 2 套 MODEL347 氡分析仪，用于在线监测房间内的空气，当检测到空气中有氡存在时及时发出报警信息。

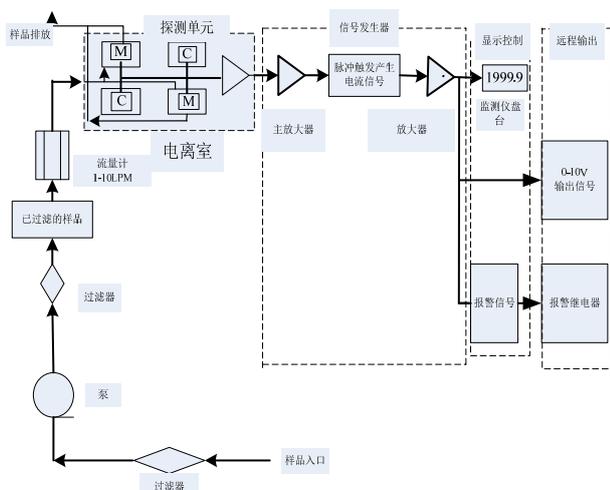


图 3 MODEL 347 流程图

监测仪包括四个容量为 2L 的电离室，并通过静电计连接成电气回路。测量腔室嵌入在监测仪内部。监测仪主要实现信号发生，输出报警和消除外部干扰电流信号和提供供电电源。电离室主要负责收集含氡的放射性射线产生的脉冲信号；补偿电离室主要统计不含氡的放射性射线产生的脉冲信号。这样就可以去除外部 γ 射线造成的干扰。由于电流信号非常弱，使用静电计能将微弱的电流信号转换为显示的数字信号，报警信号等其它需要的信号。信号发生器去除掉干扰信号产生的贡献后，通过静电计将信号传输到后续显示设备和报警设备。当测量值超过报警阈值时，报警回路将产生一个声光报警信号。

电离电流产生于一次核事件导致气体电离后，而引起电子被电离室的阳极吸收的过程。电离粒子

的数量（电流大小）取决于入射粒子的能量，材料的物理性质以及粒子的射程。

β 粒子在空气中电离一次成为一个正电子和电子将损失 34eV 能量。居里定义为 1 秒钟发生 3.71×10^{10} 次放射性事件。当氡的射线能量为 5.69keV，经计算 1 Ci 的氡产生电流大小约为 1×10^{-6} A。在容量为 1L 的腔室内，放射性浓度为 $1 \mu\text{Ci} / \text{m}^3$ 将产生 1×10^{-15} A 的电流。

需要注意的是，电离室对该活度的氡产生的响应是基于氡完全损失在腔室内部。除此之外，需要对工作环境的温度和压力进行说明，尽管气体样品中氡的活度是确定的，但是浓度值可能受到温度和压力的影响。而且电离室只对腔室内部的放射性粒子做出响应。

除此之外，电离室还有一些特殊的效应可能会输出信号产生一定的影响，包括势垒效应和复合效应。

势垒效应是指射线粒子行进的射程与腔室的大小尺寸之间的关系。如果电离室尺寸较小，相当于电离粒子的射程相当长，大部分粒子的能量将损失在电离室的范围之外。所以腔室尺寸越小势垒效应越明显，损失在腔室外的能量越多，尺寸越大势垒效应越微弱。在标准大气压下，空气中的氡（ β 射线）的最大行进路线是 5mm，当腔室的直径大于等于 10cm 的情况下，势垒效应造成的影响可忽略不计。

在放射性浓度高的情况下，会出现复合效应。当电子的密度越来越高（离阳极越远）的情况下，产生电子和正电子会发生复合效应，对电压幅值产生一定的影响。众所周知，当电离室内部电场越弱的情况下，电离产生的电子和正电子越容易发生复合。因此，可以提高电压值来减少复合效应造成的影响。当测量对象含有高浓度的氡或者为纯 T_2 气时，尤其是在腔室形状为狭长型，此时腔室有一个

较大的阳极和两级之间有一个较短的距离，用来保证消除复合效应造成的影响。甚至当两级电压在 100V 左右时，这种几何形状的腔室产生的脉冲幅度与样品中氚的浓度呈线性关系。

此外， α 射线所带的能量是 β 射线所带能量的 10000 倍，因此需要区分在低能级的 α 射线对氚 β 射线造成的干扰。电离室能获取能量连续，放射性浓度稳定在 $5 \mu\text{Ci}/\text{m}^3$ 的射线，从而排除 α 射线的干扰。

α 射线能量不能持续。电离室利用这一性能来区分 α 射线产生的干扰。在脉冲排除期间，电离室工作在取样模式下，利用集成电路根据 α 信号之间的不连续性来排除 α 射线的影响。随机取样随时发生，并增加了产生电离的取样时间。对产生电离的响应时间增长将减少其他射线造成的本底干扰。因此，通过取样模式，可以排除本底和 α 射线产生对

脉冲的影响。

MODEL 347 的测量范围在 $0.1\text{--}1999.9 \mu\text{Ci}/\text{m}^3$ ，分辨率为 $0.1 \mu\text{Ci}/\text{m}^3$ ，而 MDA（最小可探测下限）为 $0.5 \mu\text{Ci}/\text{m}^3$ ，使得测量的数据有较高的准确性。随着技术的不断革新和进步，放射性监测设备在测量精度和实用性方面有了长足的进步，在一个核电站的寿期内，放射性监测设备也在不断更新换代。做好对放射性物质的监测，从源头上减少放射性物质对环境造成的影响，为员工的工作环境提出保障，安全可靠的发展核电事业。

参考文献：

- 1、作者：凌球，郭兰英；《核辐射探测》[G]。原子能出版社，2002.12；
- 2、作者：杨怀远；《氚的安全与防护》[G]。原子能出版社，1997.3；

Monitoring of airborne tritium in the heavy water reactor nuclear power plant

Yang dong

(Third Qinshan Nuclear Power Co.,Ltd., Zhejiang Haiyan 314300)

Abstract: Tritium is a radioactive product of the heavy water reactor nuclear power plant, is also the main target of the nuclear power plant radiation protection. In this article, described the methods of work adopted by continuous monitoring of tritium in the air in the heavy water reactor nuclear power plant, as well as a brief analysis of the equipment works.

Key words: Radioactivity monitoring; Composite effecting; The current ionization chamber

镭-铍中子源库及邻近实验室内氡浓度分布特征双滤膜法测量

刘书焯¹, 褚俊¹, 包利红², 赵耀林¹, 吴岳雷³, 陈伟²

(1. 西安交通大学, 陕西 西安 710049;

2. 西北核技术研究所, 陕西 西安 710613 ,

3. 环保部核与辐射安全中心 北京 100082)

摘要:介绍了双滤膜法氡气测量原理,采用 FT-648 型测氡仪测量对比了 Ra-Be 中子源库及其邻近实验室内氡的分布水平,结果显示中子源库内氡的浓度较其它实验室没有明显偏高,表明镭-铍中子源没有发生氡气泄漏;实验室内氡的浓度处于西安市室内氡浓度监测结果的平均水平,没有超过国标控制标准(200Bq.m⁻³)。对比测量结果发现阴雨天实验室内氡的浓度较晴天的偏低,通风可有效降低实验室内氡的浓度;同时分析了不同天气情况(降雨、晴天、阴天)、通风条件和测量时段等因素对实验室内氡水平分布的影响机制。研究结果为评估 Ra-Be 中子源的密封状况及人员防护提供了相关实验参考数据。

关键词: Ra-Be 中子源; 氡; 双滤膜法

文章分类: 核监测技术及其应用的研究成果

Ra-Be中子源是一种常用的同位素中子源,在利用镭及其衰变子体产生的 α 粒子轰击铍核辐射中子的过程中,不仅伴随有较强的 β 、 γ 辐射,同时还伴随有无色无味放射性气体氡的释放。氡易溶于水和多种液体,也易溶于脂肪和血液,在脂肪中的溶解度高于水中的120倍;流行病学研究表明发现高浓度的氡暴露可致肺癌,氡及其子体对人体产生危害本质是其衰变产生的 α 粒子对机体的辐射损伤。氡已被国际权威癌症机构组织定为具有确定性致癌效应的A类致癌物,在肺癌诱因中仅次于吸烟,排在第二位^[1-2]。研究数据显示,瑞典20%的肺癌、美国10%~15%的肺癌、德国7%的肺癌以及荷兰4%的肺癌都是由氡暴露引起^[3]。2002年4月召开的首届全国室内空气质量与健康研讨会上发布预估数据显示,我国每年因室内环境污染而诱发的致死危险高达11万人之多,而其中一半(5.5万人)归因于室内氡^[4]。此外,天然放射系中的铀系、钍系也在

环境中引入一定量的氡其子体,UNSCEAR 2000年报告指出,对世界正常本底地区,²²²Rn/²²⁰Rn及其子体产生的年有效剂量平均为1.3mSv,占天然电离辐射源所致成人年有效剂量的54.2%^[3]。因此,开展实验室环境氡浓度的监测可为中子源的安全处置及实验人员的防护提供重要实验数据支持。

氡的测量方法很多,按其测量原理不同可分为双滤膜法、闪烁室法、固体核径迹法、活性炭吸附法、静电吸收法、气球测量法、电离室法、半导体探测法等^[2]。根据采样目的和采样方式的不同可分为瞬时采样测量、累积采样测量、连续采样测量三大类;本工作主要采用双滤膜法,通过FT-648型测氡仪测量瞬时采集的气体样本,得到测量环境氡的浓度。

1 双滤膜法绝对测氡原理

双滤膜法是六十年代由 Jacobi 和 Blanc 等人发

展起来的，该方法不受氡与其子体放射性平衡程度、结合态子体占总子体的份额以及带电子体所占的份额对测量结果的影响^[11]。如图1所示，环境大气经过取样管（衰变室）入口端滤膜时，入口滤膜过滤空气中的氡子体，只有氡随空气以一定流速流过取样管到达出口滤膜，在衰变管内新衰变的氡的子体被出口滤膜收集，通过测量出口滤膜衰变子体 α 粒子数，由下式计算得到氡浓度^[2,6-8,11]：



图1 双滤膜管结构原理示意图

$$C_{Rn} = \frac{16.65(N_c - N_b)}{EVZF_f \Sigma \beta S \Omega G} \quad (1)$$

式中， C_{Rn} 为氡浓度，单位为 $Bq \cdot m^{-3}$ ； N_c 为出口滤膜的时间积分计数； N_b 为本底计数； V 为衰变室容积， L ； E 为 α 探测器的 4π 角探测效率； Z 为对应于不同的取样时间 t 和计数时间间隔（ $T_1 \sim T_2$ ）的参数， Z 的取值见文献【7】附表； Σ 为出口滤膜的过滤效率； β 为出口滤膜的 α 自吸收修正； Ω 为探头的几何因子； S 为能谱修正系数； G 为重力沉降修正因子，值取1， F_f 为扩散修正因子；表示为^[6]：

$$F_f = \begin{cases} \frac{1}{\mu} \sum_{n=1}^{\infty} S_n [1 - \exp(-a_n \mu)] & \mu \leq 0.23 \\ 1 & \mu > 0.23 \end{cases} \quad (2)$$

式中， $\mu = \frac{1}{\mu} \sum_{n=1}^{\infty} B_n [1 - \exp(-a_n \mu)]$ 为气体流速， μ 为衰变室长度， D 为氡衰变子体的扩散系数， $m^2 \cdot s^{-1}$ ， D 值受环境湿度影响，可表示为^[8]：

$$D = [7.9 - 5.2e^{(-0.005Y)}] \times 10^{-6} \quad (3)$$

式中 Y 为监测点大气的绝对湿度， $g \cdot m^{-3}$ ； Y 值可以通过测量测点环境大气相对湿度 H 、气压 P 和温度 T 等参数计算求解；式（2）中其它参数的取值见文献[6]。

2 实验测量

2.1 实验测量装置

实验室环境氡的浓度主要采用FT-648型测氡仪

（图2）进行测量；测量之前首先进行测量系统漏气检查，利用²³⁹Pu α 标准源进行探测器 4π 角效率标定及系统本底测量；根据FT-648系统探头几何、滤膜材料厚度及测量氡子体衰变 α 粒子能量等特征参数，取值 $\Omega=0.735$ ， $\beta=0.91$ ，能谱修正因子 S 取值为1.06。出口滤膜的过滤效率 Σ 的测定采用“双层滤膜法”^[7]，本实验中取 Σ 的典型值为0.94。根据双滤膜法测氡要求的空气动力学条件及测氡仪流量计测量范围，实验中采样流速选取为 $v=40L \cdot min^{-1}$ 。

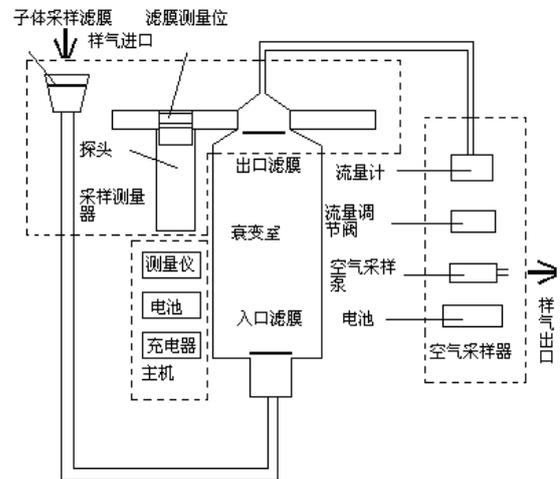


图2 FT648测氡仪结构组成示意图

2.2 实验设计及测量结果

Ra-Be 中子源库及邻近实验室平面结构示意图如图3所示；60年代从前苏联购置的两枚 Ra-Be 中子源强分别约为 250mCi（中子源1）、500mCi（中子源2），源置于铅罐内，铅罐外面包有石蜡，最外层用钢壳固定。所有实验房间都处一楼，实验室于1963年左右建成，砖混结构，通风条件良好，每个房间都装有换气扇；实验室1、2及走廊更衣室、卫生间地面上铺有瓷砖，且经常有人活动，通风良好；库室1~库室3很少有人活动，平常基本不通风。

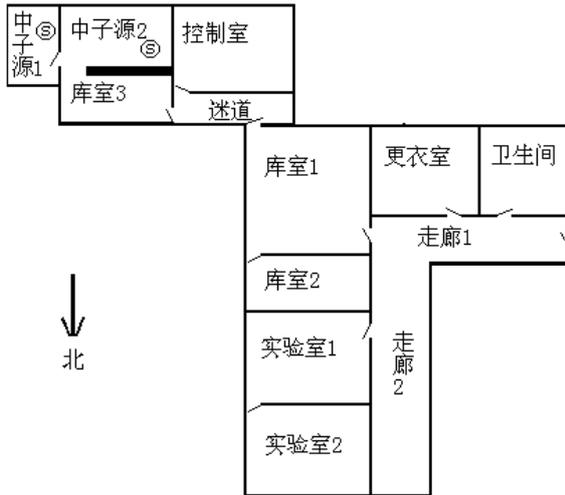


图3 Ra-Be中子源实验室结构示意图

实验室测点的布置如图4所示，为检测中子源是否有氡气泄漏，首先在久未不通风和通风条件下分别检测对比了距中子源库不同距离8个测点（7~12）氡的水平；为检测到日平均浓度，测量时间段选在每天的10:00~13:00^[14]，测量时天气均为晴天，测量测量结果如图5所示；在不通风条件下，测得的中子源1（测点14）和中子源2（测点13）所在库室的平均浓度分别为 $105.07 \pm 35.20 \text{ Bq} \cdot \text{cm}^{-3}$ 、 $99.68 \pm 20.36 \text{ Bq} \cdot \text{cm}^{-3}$ ；在打开实验室排气扇，通风一天后，测得的中子源1、2库室的氡浓度分别降为 $61.96 \pm 17.18 \text{ Bq} \cdot \text{cm}^{-3}$ 、 $58.37 \pm 16.42 \text{ Bq} \cdot \text{cm}^{-3}$ ；与其它10个测点（测点1~4,7-12）相比，中子源库室氡的水平并未出现明显偏高（图5），与Ra-Be中子源实验室有氡气泄露的报道结果对比^[12]，可初步判断Ra-Be中子源没有发生氡气泄露；对比通风前后的测量结果可以看出，实验室通风对室内氡的浓度分布影响显著，通风一天后，测得的中子源库室及其近区实验室内氡水平较通风前下降了38%~47%。通风条件好的走廊（测点4、5、6）氡浓度平均值为 $28.74 \pm 10.12 \text{ Bq} \cdot \text{cm}^{-3}$ ，较其它实验室内偏低；实验室内氡浓度水平未超过我国GB18871-2002中的控制标准。

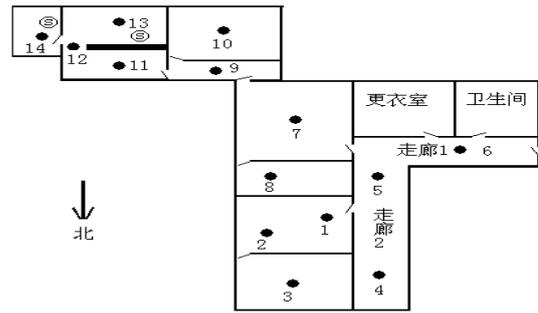


图4 测点布置示意图

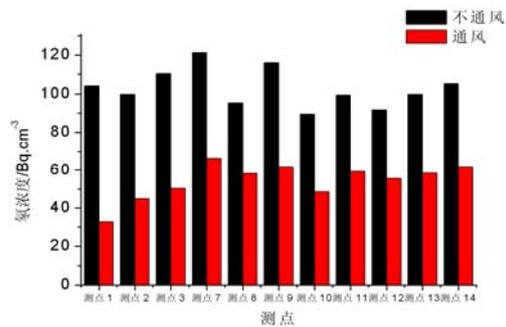


图5 通风前后，Ra-Be中子源库室及其邻近实验室氡浓度分布对比

已有研究表明，除通风条件外，室内氡的浓度还受到诸如温度、气压、湿度、建筑材料、人员活动情况、水源、地质、季节、测量时段等多种因素的影响^[8-17]。为监测实验室内氡浓度在一天内不同时段的分布变化，对于正常通风的实验室（这里选取测点2），在同一天的不同时刻（9:00、14:00、17:00、21:30）分别开始采集气体样本，采集时间皆为20分钟，测得对应时段的氡浓度分别为 44.9 Bq/m^3 、 28.74 Bq/m^3 、 30.53 Bq/m^3 和 47.59 Bq/m^3 。可以初步看出，实验室氡浓度的变化趋势为早上和晚上氡浓度相对较高，白天的相对较低，下午16:00~17:00出现氡浓度最小值。这一变化趋势与文献[14]测量结果变化趋势类似（图6）。已有研究表明，氡浓度分布与气压、湿度呈正相关，与温度呈负相关^[17]；而在一天当中，一般清晨气压高、气温低、湿度大，空气密度较大，不利于居室内氡的扩散；下午气压小、温度高、大气湿度较清晨低，空气密度小，对流

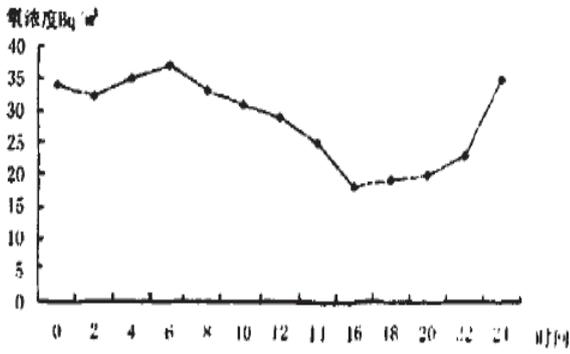


图6 西安市室内氡浓度日变化趋势[14]

作用加强，有利于实验室内氡气扩散而使其氡浓度降低。为监测降雨天气对实验室内氡的分布影响，在4~6月期间，分别在阴天、雨天和晴天条件下，初步监测了实验室（测点1、2、3）的氡的浓度分布差异，测得的实验室内氡浓度在不同天气条件下的均值分别为：晴：47.60 Bq/m³、阴：39.06 Bq/m³、雨：31.43 Bq/m³。初步测试结果显示，降雨天气实验室内氡的浓度较小，晴天最大；根据室内氡的主要来源（表1），就世界平均水平而言，建筑物的地基及周围土壤对室内氡的水平贡献比例占到了室内氡的60.4%，建筑材料和室外空气的贡献分别占19.5%和17.8%^[16]。在晴天，室内外地基土壤干裂，使孔隙和裂隙增多，有利于氡的释放和迁移，氡析

表1 室内空气氡的来源^[13,16]

氡源	世界平均	
	进入率 (Bq · m ⁻³ · h ⁻¹)	相对份额 (%)
房基及其周围土壤	34	60.4
建筑材料	11	19.5
室外空气	10	17.8
供水	1	1.8
家用燃料	0.3	0.5
合计	56.3	100

出率的增大对实验室内氡的贡献占主导地位；阴雨天气对实验室内氡浓度的影响较为复杂，阴雨天气大气湿度、气压较晴天高，减小了实验室内氡的扩散，其影响使室内氡浓度增大；但降雨可快速降低室内外地表土壤氡的析出率及室外氡向室内的扩

散，使室内氡的浓度呈下降趋势。降雨及各种气象因素对氡析出率的影响如图7所示^[17]：

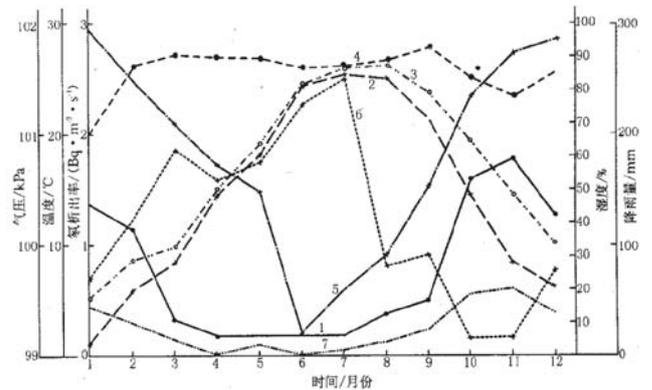


图7 各种气象因素对氡析出率的影响[17]

1-氡析出率, 2-气温, 3-地温, 4-湿度, 5-气压, 6-降雨量, 7-地温与气温之差

3 小结

采用双滤膜法初步对比测量了 Ra-Be 中子源库及其实验室氡浓度分布特征，分析了 Ra-Be 中子源的密闭性及影响实验室内氡浓度水平的主要因素，初步测量结果显示：

1) Ra-Be 中子源库室氡的浓度较其临近实验室没有明显偏高；表明中子源密闭性能良好，没有发生氡气泄漏；实验室内氡的来源主要来自实验室建筑材料、地基及室外大气天然氡的贡献；

2) 通风可有效降低实验室内氡的浓度，在正常通风条件下，实验室氡的浓度处于西安市碑林区室内氡浓度的平均水平^[14]，没有超过国标控制标准；

3) 实验室内氡浓度的日平均变化特点主要源于一天之中气温、气压及大气湿度的分布差异；

4) 晴天及阴雨天气室内氡的浓度分布变化特点主要归因于各种气象因素对氡析出率的影响，各种气象因素综合影响机制较为复杂，复杂气象条件下实验室内氡的实际分布水平目前主要依赖于实验测量手段获取，理论预估模型有待进一步完善。

参考文献:

- [1] 张丽娇, 谢波. 室内氡的测量及防护[J]. 中国辐射卫生, 2006,15(1):84-85.
- [2] 潘志强 主编. 电离辐射环境监测与评价[M]. 北京: 原子能出版社, 2009:439-480.
- [3] 王津, 刘娟, 陈永亨. 氡及其子体的形成机制及危害研究进展 [J]. 环境与健康杂志, 2011,28(9):832-835.
- [4] 孟文斌, 葛红, 于海燕, 等. 室内辐射标准概述[J]. 辐射防护通讯, 2003,23(3):26-29.
- [5] 刘艳丽. 钍射气 (^{220}Rn) 室中 ^{222}Rn 、 ^{220}Rn 浓度测量方法的研究[D]. 硕士学位论文, 南华大学, 2007.
- [6] 吴和喜, 刘玉娟, 杨波, 等. 某核电厂员工因氡及 $^{222}\text{Rn}/^{220}\text{Rn}$ 子体所致剂量平价[J]. 核动力工程, 2011,32(4):123-126.
- [7] 汲长松. 环境氡浓度绝对测量方法[R]. 中国科技报告, CNIC-00364, BNIF-0002.
- [8] 韩国胜, 李晓戈, 王庆恒. 双滤膜法测氡中湿度影响的校正[J]. 辐射防护通讯, 1999,19(6):26-28.
- [9] R.S. Kher, M.S.K. Khokhar, V.B. Rathore, et.al. Measurement of indoor radon and thoron levels in dwellings and estimation of uranium, thorium and

potassium in soil samples from central part of India[J]. Radiation Measurements, 2008, 43 :414-417.

[10] D. Cortina, I. Dura'n, J.J. Llerena. Measurements of indoor radon concentrations in the Santiago de Compostela area[J]. Journal of Environmental Radioactivity, 2008, 99 :1583-1588.

[11] 陈志恒, 傅耀宗. 改进的双滤膜法测定氡钍浓度的计算公式[J]. 辐射防护, 1983, 3(4):267-274.

[12] 史永谦, 陈凌. 固体径迹探测器测定 Ra-Be 中子源的氡气泄漏[J]. 原子能科学技术, 1994, 28(6):561-564.

[13] 卢志娟, 涂彧, 俞荣生. 三十年来我国室内外氡浓度的变化[J]. 中国辐射卫生, 2010,19(1): 118-120.

[14] 郁会莲, 常峰, 徐增康. 西安市区居民住宅室内氡浓度调查[J]. 浙江预防医学, 2008,20(8): 45-46.

[15] 卢新卫, 李贵斌. 室内氡暴露及其对人体健康影响[J]. 辐射防护, 2005,25 (2) : 122-127.

[16] 任天山. 室内氡的来源、水平和控制[J]. 辐射防护, 2001,21 (5) : 291-299.

[17] 李韧杰. 氡析出率的测定及其影响因素的探讨[J]. 铀矿冶, 2000, 19(1):56-61.

Characteristics of Radon Concentration Distributions Measurement with Two-filter Method in the Storage Rooms of Ra-Be Neutron Source and the Adjacent Laboratories

LIU Shu-huan¹, CHU Jun¹, BAO Li-hong², ZHAO Yao-lin¹, WU Yue-lei³, CHEN Wei²

(1. School of Energy and Power Engineering of Xi'an Jiaotong University, Xi'an 100037, China;

2. Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710613, China;

3. Nuclear and Radiation Safety Center, Beijing 100082)

Abstract: The basic principle of radon measurement with two-filter method is introduced in this paper. The levels of radon concentration in the storage rooms and the adjacent laboratories are measured and compared with the type of FT-648 radon measurement instrument. The measurement results showed that the levels of radon concentration in Ra-Be neutron source storage rooms are not higher than those in the adjacent

laboratories, then it can be deduced that no radon gas was leaked out from the shielded and sealed Ra-Be neutron sources. The radon concentrations measured in the laboratories were near to the average level compared to the statistical results of the indoor dwellings' radon concentrations in Xi'an. The values didn't exceed the national standard limits($200\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$). Furthermore, it is found that the radon concentration value measured at rainy or cloudy day is lesser than that at sunny day, and good ventilation conditions can effectively decrease the indoor radon concentration level. Meanwhile, the mechanisms of the radon concentration distributions in the laboratories influenced by the factors including various weather conditions (rainy, sunny and cloudy), ventilation and different measurement time periods in a day ,*etc.* are primarily analyzed. The measurement results in this work provide some relative reference data for prediction the situations of Ra-Be neutron sources safety storage and experimenters' radiation protection in the laboratories.

Key words: Ra-Be neutron source; Radon; Two-filter method

利用核反应堆建立快中子辐射场的理论设计研究

张文仲¹, 王百荣¹, 张晓敏², 骆亿生², 周畅¹

(1. 防化学院, 北京 102205; 2. 军事医学科学院, 北京 100850)

摘要: 本文以清华大学试验核反应堆为中子源源项, 通过蒙特卡罗方法模拟的手段, 设计出了实现快中子辐射场的理论技术方案, 确定了此方案中各种材料的厚度, 获得了典型快中子辐射场能谱。

关键词: 核反应堆; 蒙特卡罗方法; 模拟计算; 快中子辐射场

文章分类: 核监测技术及其应用的研究成果

快中子辐射场是中子能量主要在 0.1MeV 以上, 而要求热中子、中能中子及 γ 射线都应尽量少的辐射场, 由于快中子属于高 LET 射线, 具有 x 、 γ 射线无可比拟的优势, 因此快中子辐射场的建立在快中子治疗、辐射育种、辐照杀菌等领域有着广泛的应用。本课题利用清华大学试验核反应堆中子源一号实验孔道, 在其中填入适当的介质材料, 使堆芯出射中子与材料作用后, 热中子与中能中子成分大大减少, 而快中子成分相对减少较小, 从而达到建立快中子辐射场的目的。

1 几何模型的建立

清华大学 901 核反应堆是一个游泳池式研究反应堆, 改造之前只有一号堆芯, 目前共有 2 个堆芯,

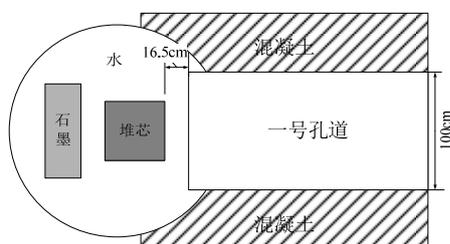


图 1 一号孔道几何模型

均安装于同一铝制水池中。该反应堆堆芯热功率为 1MW, 堆芯采用强制冷却; 燃料元件为棒状, 直径

为 7mm, 平均高度为 50cm, 包覆材料为铝, 平均热释放率为 53.3 W/cm; 燃料中的 ^{235}U 富集度为 10%, 弥散于镁中, 装载量为 3.008kg。元件棒分放在 24 个方形元件盒中, 一号堆芯共使用了 376 根元件棒, 元件盒外布置有 BeO 和石墨材料构成的反射层。该反应堆有七个水平中子束孔道和八个垂直的中子束孔道, 一号孔道是水平中子束孔道, 面向一号堆芯, 孔道中心线与堆芯中心在同一高度, 孔道口垂直平面与反应堆堆芯的侧面中间的水层厚度为 16.5cm, 孔道口的长和宽分别为 126cm 和 100cm, 图 1 所示的是一号孔道的计算几何模型。

为减少计算时间, 在计算过程中, 将水池简化成一个半径为 1m 的圆柱形水池, 除离堆芯很近的七号孔道的石墨柱外, 水池中的其它设备均略去, 水池外的屏蔽材料也只保留一号孔道周围的屏蔽材料。需要注意的是此模型将孔道口与堆芯之间 16.5cm 厚的水层换成一个空铝箱, 为的是减少水对中子的慢化, 尽量增加入射到孔道内的中子数。

2 介质材料的选取

无论中子与物质发生弹性散射还是非弹性散射作用, 中子的能量都会降低, 而在这些过程中的中子数目则保持不变, 因此若要尽量减少堆芯出射

的热中子和中能中子份额，必须使中子尽量多地与材料发生吸收作用，而不是散射作用。同样，对于堆芯出射的快中子，若与材料发生散射作用，不可

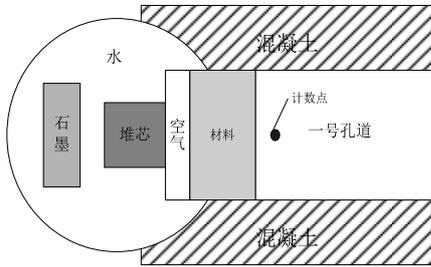


图2 材料研究计算模型

避免地要减少能量而成为中能中子或热中子，这样快中子的份额会减少；若发生吸收作用后，同样也会使快中子份额减少，因此快中子减少是在所难免的。由此在选取材料时，要求热中子和中能中子吸

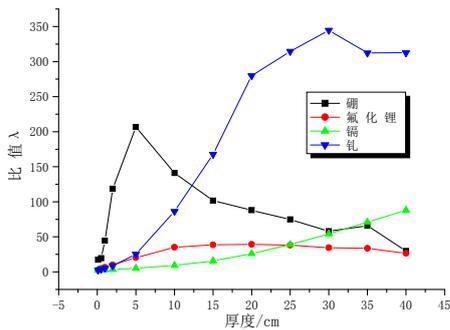


图3 硼、氟化锂、镉和钆对应的比值

收截面大，而快中子吸收截面要小。热中子与某些物质作用时的吸收截面较大，这类材料的选取比较方便；中能中子与物质作用时，吸收截面一般都较小，这对于中能中子的减少是不利的，但若中能中子在经过散射作用后变为热中子，之后再被吸收，这样便间接地减少了中能中子；快中子与物质发生作用时，吸收截面一般都很小，因此适当选取热中子吸收截面大的材料，只要厚度合适，就可以达到建立快中子场的目的。

典型的热中子吸收截面大的材料有是硼、氟化锂、镉和钆，它们对热中子都有较强的吸收作用，

这里还要关心其对快中子的散射和吸收情况，在研究中选择了图2所示的模型，在图中计数点记录的是通过不同材料后的热中子注量率、中能中子注量率和快中子注量率，选择快中子注量率尽量大，热中子和中能中子注量率尽量少的材料，就可以达到建立快中子场的目的。为了定量考查材料特性，定义λ为快中子注量率与热中子注量率、中能中子注量率之和的比值，即：

$$\lambda = \frac{\text{快中子注量率}}{\text{热中子注量率} + \text{中能中子注量率}}$$

若λ越大，则认为所选材料越合适。图3示出了不同厚度的四种材料对应λ值变化情况，可以看出，在0~12cm的厚度内，硼材料对应的λ最大，厚度大于12cm后，钆对应的λ最大，在30cm厚度时，钆的λ可达到最大值。不同厚度的硼和钆分别具有不同的优势，在实际操作中，可根据快中子场的不同要求，选择合适厚度的硼、钆两种材料。

3 总体设计方案的确定

由于快中子比γ射线的辐射品质因数大很多，因此在快中子辐射场中不用考虑γ射线的影响，理论设计方案主要包括热中子吸收材料部分和准直器部分。图4、图5和图6所示的是拟设计的三种理论方案，它们的主要不同点是准直器所用的材料不同，方案1中准直器由石墨材料组成，准直器外是硼材料；方案2中准直器只采用钆材料；方案3中准直器也用钆材料，只是在其外面再附上硼材料。通过具体模拟计算，得到出口处的中子能谱，通过比较选择一种较合适的方案。在对三种方案进行比较时，三种方案准直器的顶角度数暂时都为60度，钆材料厚度分别设置为25cm和30cm，硼材料厚度设置为5cm。图7显示的钆厚度分别为25cm和30cm时，三种方案出口处的中子能谱。从图中可明显看出，当钆材料为25cm时，方案3对应的中子能谱较方案1和方案2好，其热中子注量率及

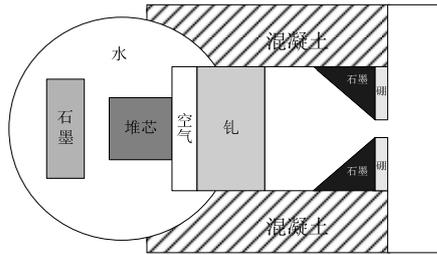


图4 方案1

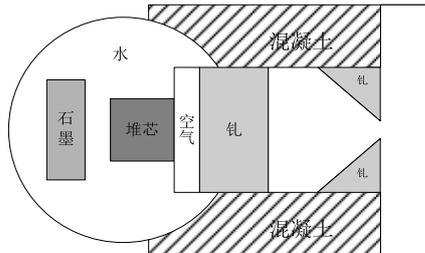


图5 方案2

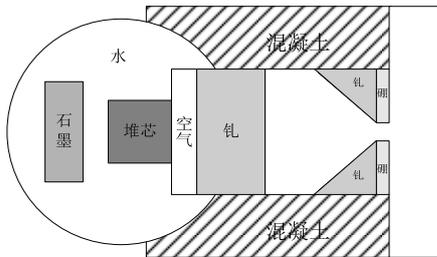


图6 方案3

中能中子注量率较低；当钆材料为 30cm 时，方案 2 与方案 3 对应的中子能谱差别不大，这是因为 30cm 时钆的 λ 值达到最大，硼对热中子及中能中子的吸收作用与钆相比显得较小，因此从出口处的中子能谱形状可以看出，方案 3 应该为最佳总体设计方案。

4 材料厚度的确定

由于钆材料在 30cm 厚时，其 λ 值最大，在方案 3 中，钆材料厚度固定为 30cm，并使准直器角度也固定不变，通过改变硼材料厚度，研究出口处中子能谱变化，从而确定硼材料的最佳厚度。

图 8 示出了不同厚度的硼材料对应的中子能谱（距出口 2cm 处），可以看出当硼材料达到 10cm 时，出口处的中子能谱基本上能够达到快中子辐射场的要求，即相对于快中子成分，热中子和中能中

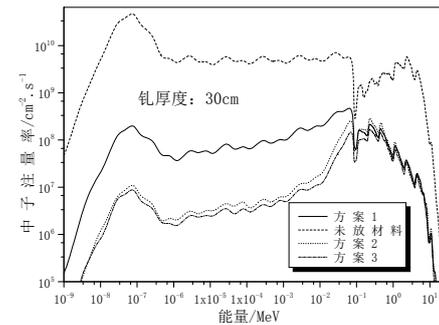
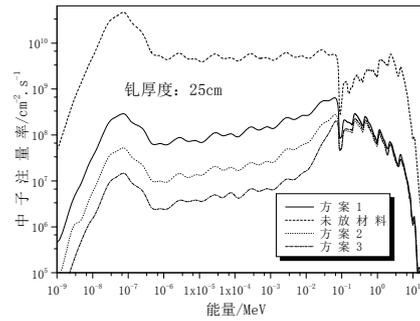


图7 三种方案出口处中子能谱

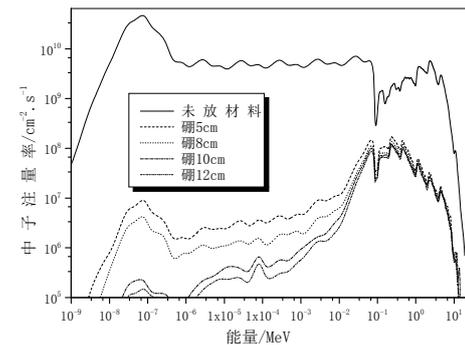


图8 不同厚度硼对应的中子能谱

子成分较少；硼的厚度达到 12cm 时，快中子谱和 10cm 时的快中子谱基本重合，而热中子谱和中能中子谱有较大差别；硼厚度大于 12cm 后，快中子成份明显下降。硼厚度为 12cm 时对应的中子能谱形状优于 10cm 时的中子能谱，故确定硼厚度为 12cm。至此便确定了快中子辐射场理论设计方案中的主要材料厚度：钆、硼两者材料厚度分别可选择为 30cm、12cm。

5 快中子辐射场的获得

表 1 给出了距出口不同距离处的热中子注量率 (Φ_{th})、中能中子注量率 (Φ_m) 和快中子注量率 (Φ_f)，可以看出快中子注量率达到了 10^9 数量级，

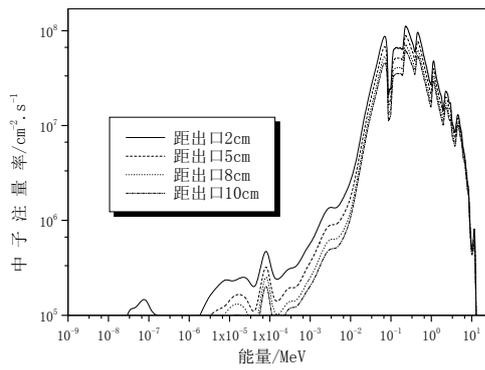


图 9 距出口不同距离处的中子能谱

而热中子和中能中子注量率很少，都在 10^6 数量级左右；并且随着距出口距离的增大，热中子注量率、中能中子注量率和快中子注量率都逐渐减小，距出口距离增大到 10cm 时，快中子注量率大约减少了一半左右，在实际应用中，应选择适当照射位置。图 9 示出了距出口不同距离处的中子能谱，可知其形状基本相同，并且具有明显的快中子辐射场特征。

表 1 距出口不同距离处的中子注量率

距出口距离(cm)	$\Phi_{th} (\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	$\Phi_m (\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	$\Phi_f (/ \text{cm}^2 \cdot \text{s})$
2	8.85380×10^5	1.00716×10^7	3.13183×10^9
5	5.11642×10^5	6.58033×10^6	2.52713×10^9
8	3.71495×10^5	4.74119×10^6	2.05101×10^9
10	3.21420×10^5	3.89216×10^6	1.79638×10^9

Designing Research of Fast Neutron Radiation Field based on the Reactor

Zhang Wenzhong¹, Zhang Xiaomin²

(1. college of Chemical Defense , Beijing 102205, China; 2. Beijing Institute of Radiation Medicine, Beijing 100850, China)

Abstract: Based on the Tsinghua University experimental nuclear reactor neutron source, this research designed moderate theory technical scheme, and s the thickness of materials in the scheme were selected by means of Monte Carlo simulating method. An fast neutron radiation field was gained.

Key words: nuclear reactor; Monte Carlo method; simulative calculation; fast neutron radiation field

全国环境水平样品活度测量比对研究

孙健¹, 姜文华², 来永芳¹, 郑启燕¹, 陈琳¹

(1. 防化指挥工程学院二系, 北京 102205; 2. 环保部核与辐射安全中心, 北京 100084)

摘要:介绍了本实验室参加 2010 年核工业放射性计量测试中心组织的全国环境水平样品活度测量比对活动的情况: 使用一台电制冷 HPGe γ 谱仪对对比样品进行测量, 利用国产无源刻度软件 GammaCalibV3.0 对系统进行效率刻度, 通过效率曲线法完成对样品的分析, 对复合相加效应进行了修正, 并分析了测量结果的不确定度, 得到比较满意的结果。

关键词: 环境样品; 比对; HPGe γ 谱仪

文章分类: 核监测技术及其应用的研究成果

2010 年 11 月核工业放射性计量测试中心组织了一次全国环境样品比对, 我室使用一台电制冷低本底 HPGe γ 谱仪对统一发放的对比样品进行了测量和分析, 对测量结果的不确定度进行了评定, 最终得到对比样品核素的比活度与核工业放射性计量测试中心提供的参考值一致。

1 样品描述

对比样品为核工业放射性计量测试中心提供, 编号为 7065-1, 净重 340 克, 基质成分主要为 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 ; 测量的本底样品是用相同样品盒封装的与对比样品相同基质的空白样品; 封装的标准样品盒尺寸为 $\Phi 75\text{mm} \times 68\text{mm}$, 壁厚 2mm, 密度 1.05g/cm^3 , 成分聚乙烯 C_2H_5 。

2 测试系统的标定

此次所样品测量采用的是 ORTEC 公司生产的型号为 DSPEC-LF-NEGGE 的电制冷低本底 HPGe γ 谱仪, 对 ^{60}Co 核素 1.33MeV 全能峰的能量分辨率达到 2.2keV, 相对探测效率达到 50%, 晶体尺寸为 $\Phi 65\text{mm} \times 67.9\text{mm}$, 可测量射线能量范围 3keV~3MeV; 系统配备了 DSP 数字化谱仪、

GammaVision 谱分析软件, 具有 γ 能谱寻峰、峰面积计算、本底扣除等功能。同时系统还配备了一款国产无源效率刻度软件 GammaCalibV3.0, 它能够快速刻度出谱仪对样品的探测效率, 对样品进行较精确的分析, 给出样品中所含核素的活度。在使用系统前先要对测量系统进行标定包括能量刻度和全能峰效率刻度。

2.1 能量刻度

比对实验开始前使用 ^{241}Am 、 ^{137}Cs 、 ^{99}Mo 、 ^{60}Co 四种 γ 射线源对谱仪进行能量刻度, 刻度结果如下:

$$E_{\gamma} = 0.52 + 5x \quad (1)$$

其中: E_{γ} 能量, 单位 keV; x 表示道址。

2.2 效率刻度

对系统的效率刻度通过无源效率刻度软件 GammaCalibV3.0 完成, 该软件使用探测器表征的参数及放射源的几何信息来完成系统的无源效率刻度。所谓无源效率刻度就是利用模拟计算的方法计算出标准源分布与测量几何条件下的探测效率, 形成数据库资源, 测量时能谱分析软件可调用这些数据资源实现谱仪效率刻度的方法^[1]。

在使用 GammaCalibV3.0 软件进行效率刻度前需要完成源参数由用户输入，参数包括样品形状、尺寸、材料类型、密度以及与探测器之间的距离。首先，根据样品的形状在 GammaCalibV3.0 定义的九种标准几何模块（简单箱体、复杂箱体、简单柱体、复杂柱体、马林杯、球体等）中选择简单柱体，而后将柱体的几何尺寸（样品盒的直径、壁厚、底厚等）输入软件。其次，输入样品的参数，包括样品的直径和高度以及样品的成分。最后，将 HPGe 探测器表征参数（本次比对使用的 HPGe 探测器表

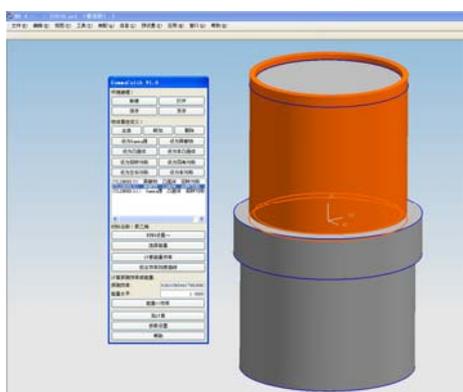


图 1. 刻度模型

征参数通过国防计量一级站完成）和输入的样品及样品盒参数结合起来，产生一条效率刻度曲线。对本次样品检测建立的模型如图 1 所示。软件计算的 γ 能量点范围为 50keV~3MeV，各能量点效率值通过双对数多项式拟合得到能量-效率曲线如图 2 所示，其方程为：

$$\ln y = 57.56 - 82.05(\ln x) + 40.96(\ln x)^2 - 10.07(\ln x)^3 + 1.31(\ln x)^4 - 0.09(\ln x)^5 + 0.002(\ln x)^6 \quad (2)$$

其中：y 为探测效率；x 为能量。



图 2. 效率刻度曲线

3 样品测量及数据处理

3.1 样品测量

将比对样品放入 HPGe 探测器顶端的样品固定盘内，之后关上铅室顶盖即可进行测量，测量时间设定为 2 小时，相同条件下共测量 6 组数据。比对

样品测量完毕后扣除本底计数即得到样品净谱，通过定性分析，得到样品中含有 ^{241}Am 、 ^{137}Cs 、 ^{60}Co 三种核素。应用 GammaVision 软件进行分析，得到三种核素的特征峰净计数，数据如表 1 所示。

表 1 比对样品特征峰净计数

核素	^{241}Am	^{137}Cs	^{60}Co	
	59.5keV	661.6 keV	1173.2 keV	1332.5 keV
1 组	13344	9666	11422	10397
2 组	13045	9554	11304	10452
3 组	13180	9746	11535	10475
4 组	13206	9602	11480	10552
5 组	13370	9709	11289	10696
6 组	13183	9579	11207	10342
平均净计数	13221.33	9642.67	11372.83	10485.67

3.2 数据处理

3.2.1 活度计算

本文采用效率曲线法计算未知样品中核素的活度，即：在所测的能谱上获取核素特征峰的净面积 S，利用下式计算其活度^[2]：

$$A = \frac{S}{f \cdot t \cdot \varepsilon} \quad (5)$$

式中：A—样品中某一种放射性核素的活度，Bq；

S—样品中该核素特征峰的净峰面积；

f—该核素发射特征 γ 射线的概率；

t—样品测量的时间，s；

ε —探测器对样品中核素发射的某一能量 E 的 γ 射线的效率。

在 3.1 节中获取了各核素的净峰面积 S，将 2.2 节中刻度的效率曲线导入 GammaVision 软件，软件就能自动利用式 (5) 计算出各核素的活度，数据见表 3。

3.2.2 复合相加修正

由于测量样品时直接将样品放在探头顶部的样品托盘上，样品与 HPGe 探头之间的距离为 0.1cm（探头上方有一塑料端帽厚 0.1cm），此时样品中的 ^{60}Co 核素的两条射线 1.17MeV、1.33 MeV 会产生复合相加效应，使其全能峰计数遭受损失，分析结果将产生误差，所以需要对其进行复合相加修正。对于两条射线 γ_1 、 γ_2 的符合相加修正因子可以通过下公式^[2]计算：

$$C_1 = (1 - \varepsilon_{T2} P_2 / T_2) \quad (6)$$

$$C_2 = (1 - \varepsilon_{T1} P_1 / T_1)^{-1} \quad (7)$$

式中： C_1 为 γ_1 的符合相加修正因子；

C_2 为 γ_2 的符合相加修正因子；

ε_{T1} 为 γ_1 的总效率；

ε_{T2} 为 γ_2 的总效率；

P_1 为 γ_1 的发射几率；

P_2 为 γ_2 的发射率；

T_1 为进入到 γ_1 退激到的能级L的 M_1 个跃迁几率及 α 、 β 衰变强度之和；

T_2 为从产生 γ_2 的能级L产生的 M_2 个 γ 跃迁几率之和。

复合相加修正有两种方法：一种是结合实验进行，用几组不同能量的单能 γ 标准源（无复合相加效应），通过实验方法拟合一条相关的效率曲线，用插值法可求得待测核素能量范围内所有能量的修正因子；另外一种方法是通过蒙特卡洛方法模拟放射性核素放射出的特征 γ 射线在探测器能量沉积的过程，可得到探测器对该放射性核素的模拟 γ 能谱（模拟过程中不会产生复合相加效应），通过该能谱就能计算出探测器对各特征峰的探测效率 ε_{T1} 、 ε_{T2} ，通过式 (6) (7) 就能计算出复合相加修正系数。第一种方法比较复杂，本文采用第二种方法，计算得到 ^{60}Co 的复合相加修正系数 C_1 为 1.11， C_2 为 1.12^[3]。应用修正系数对 ^{60}Co 全能峰净计数进行修正，数据见表 2。

表 2 样品测量数据表

识别的核素种类	^{241}Am	^{137}Cs	^{60}Co	
全能峰能量(keV)	59.50	661.66	1173.2	1332.5
全能峰平均净计数	13221.33	9642.67	11372.83	10485.67
合峰修正后全能峰净计数	13221.33	9642.67	12623.84	11743.95
样品活度(Bq)	142.88	97.14	157.96	159.91
样品比活度(Bq/kg)	420.20	285.70	467.45	

3.2.3 不确定度评定

应用 HPGe γ 谱仪分析样品比活度的不确定度

主要来源有：核素半衰期的相对不确定度、 γ 射线分支比的相对不确定度、比对样品自身的相对不确

定度、谱仪稳定性的相对不确定度、探测效率的相对不确定度、计数率的相对不确定度、复合相加效应修正引入的相对不确定度。

3.2.3.1 核素半衰期的相对不确定度 μ_1

样品中所含放射性核素 ^{241}Am 、 ^{137}Cs 、 ^{60}Co 的半衰期及其相对不确定度通过查阅 IAEA 公布的推

荐值获得，见表 3。

3.2.3.2 γ 射线分支比的相对不确定度 μ_2

样品中所含放射性核素 ^{241}Am 、 ^{137}Cs 、 ^{60}Co 的分支比及其相对不确定度通过查阅 IAEA 公布的推荐值获得，见表 3。

表 3 核素半衰期、分支比及其相对不确定度^[4]

核素名称	能量 (keV)	分支比 (相对不确定度)	半衰期 (相对不确定度)
^{241}Am	59.5	0.359 (0.1%)	432.2a (0.1%)
^{137}Cs	661.6	0.851 (0.35%)	30.07a (0.01%)
^{60}Co	1173.24	0.9987 (0.02%)	5.2714a (0.02%)
	1332.5	0.9998 (0.001%)	5.2714a (0.02%)

3.2.3.3 比对样品自身的相对不确定度 μ_3

样品自身的相对不确定度由核工业放射性计量测试中提供， $\mu_3 \leq 1\%$ 。

3.2.3.4 谱仪稳定性的相对不确定度 μ_4

根据中国计量科学研究院对本套 HPGe 谱仪检定后提供的检定证书^[5]中表明谱仪的长期稳定性引入的相对不确定度为 0.15%。

3.2.3.5 探测效率的相对不确定度 μ_5

利用 GammaCalibV3.0 软件对 HPGe 探头进行效率刻度时引入的相对不确定度为 3%。

3.2.3.6 计数率的相对不确定度 μ_6

计数率的相对不确定度由样品各核素特征峰净计数率的标准偏差求^[6]得，即：

$$\mu(\bar{x}) = \frac{s(\bar{x})}{n} \quad (8)$$

$$s(\bar{x}) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (9)$$

式中：

$s(\bar{x})$ ：计数率的标准差；

x_i ：第 i 个独立观测；

n：独立观测次数；

\bar{x} ：n 次独立观测结果的算术平均值

将表 1 的数据代入式 (8)、(9) 计算得到核素 ^{241}Am 、 ^{137}Cs 、 ^{60}Co 特征峰计数率的相对标准不确定度 μ_6 分别为：0.28%、0.18%、0.26%。

3.2.3.7 复合相加效应修正引入的相对不确定度 μ_7

在对 ^{60}Co 核素的分析中，使用蒙特卡洛模拟计算方法对 ^{60}Co 全能峰净计数进行复合相加效应修正引入的不确定度为 1.5%。

3.2.3.8 不确定度的合成

样品中放射性核素活度合成相对不确定度由以上各相对不确定度分量通过下式^[6]计算获得：

$$\mu_c = \sqrt{\mu_1^2 + \mu_2^2 + \mu_3^2 + \mu_4^2 + \mu_5^2 + \mu_6^2 + \mu_7^2} \quad (10)$$

取置信系数为 95% 时，K=2，可根据以下公式可得测量结果的扩展不确定度：

$$U_{95} = 2 \mu_c \quad (11)$$

式中： U_{95} 为扩展不确定度；

μ_c 相对合成不确定度。

将以上各相对不确定度分量代入公式 (10) 和 (11) 计算得到本次测量核素 ^{241}Am 、 ^{137}Cs 、 ^{60}Co 活度时引入的扩展相对不确定度分别为：6.36%、6.34%、7.04%。

4 结果分析

核工业放射性计量测试中心提供的比对样品测量分析和数据处理后的结果如表 4 所示。

相对不确定度在 10%以内，比对结果复合预期测量要求。

从表中可以看出，测量值与参考值很接近，且

表 4 7065-1#样品比活度比对结果

核素	参考值		本次测量值	
	比活度 (Bq/kg)	相对不确定度 (k=2, %)	比活度 (Bq/kg)	相对不确定度 (k=2, %)
²⁴¹ Am	426.00	12.90	420.20	6.36
¹³⁷ Cs	283.00	3.50	285.70	6.34
⁶⁰ Co	479.00	6.10	467.45	7.04

参考文献:

[1]ORTEC. GammaCalibV3.0 使用说明[M],2006.
 [2]古当长.放射性核素活度测量的方法和技术[M].科学出版社,1994. 282
 [3]孙健.蒙特卡罗方法在符合相加效应修正计算中的

应用. 待发

[4]Richard B.Firestone.Table of Isotopes.1996.
 [5]中国计量科学研究院.检定证书 Dyhd2010-0181.2010.3
 [6]JJF 1059-1999.测量不确定度评定与表示[S]. 1999.

The Summarization of National Activity Comparison Measurement of Radioactive Nuclides in Enviroment Samples

Sunjian¹, JiangWenhua², LaiYongfang¹, ZhenQiyang¹, Chenlin¹

(1. Institute of Chemical Defense, Beijing 102205, China;

2. Nuclear and Radiation Safety Center, Beijing 100082, China)

Abstract: The comparision result of activities of radioactive nuclides in enviromental sample were discribed. This comparision was organized by Nuclear Industry Radiation Metrology Test Center. The sample was measured by HPGe gamma-ray spectrometers, which was calibrated by efficiency calibration sourceless sofeware called GammaCalibV3.0.Then, it was analyzed by using efficiency curve method. And, the data was corrected in coincidence summing effect. Evaluation of uncertainty in the measurement was also studied. The result were agreement with the reference radioactivities.

Key words: enviroment sample; comparison; HPGe

职业外照射个人剂量监测和评价的准确度要求

来永芳, 王永红, 孙 健, 高 静, 刘克平

(防化学院, 北京 102205)

摘 要: 随着当前我国核能科学的发展与核技术应用的日益广泛, 职业外照射个人剂量监测和评价的工作显得愈加重要。本文在简要阐述职业外照射个人剂量监测和评价量的基础上, 根据相关职业外照射剂量监测和评价的技术规范, 从技术角度对职业外照射个人剂量监测和评价的准确度要求和改善方法进行了分析和研究。

关键词: 个人剂量; 外照射; 准确度

文章分类: 核监测技术及其应用的研究成果

1 前言

职业照射是除国家法规、标准所排除的照射和已规定予以豁免的实践或源的照射以外, 工作人员在工作过程中所受的所有照射。根据GBZ 128-2002《职业性外照射个人监测规范》, 任何放射工作单位都应根据从事的实践和放射源的具体情况对职业照射进行监测和评价, 评价主要应以个人外照射监测为基础; 所有从事或涉及放射工作的个人都应接受职业外照射的个人剂量监测。职业外照射的个人剂量监测和评价是辐射防护工作的重要组成部分, 不仅能反映职业人员的受照剂量, 为放射病的诊断和救治提供依据; 也能反映辐射安全与防护的管理状态, 为加强辐射安全管理和完善辐射防护措施提供技术依据, 以减少或避免超剂量照射事故的发生。进入新世纪, 我国以核电为代表的核能科学与工程发展快速, 其他核技术应用也日益广泛, 保证外照射个人剂量监测和评价结果准确度是职业照射监测和评价工作的基本要求, 是实现核与辐射实践活动长期安全发展, 确保职业人员身体健康的基本前提, 应引起所有涉核涉放管理机构、运营单

位和职业人员的高度重视。

2 外照射的个人监测量和评价依据

2.1 外照射的个人监测量

职业外照射的个人监测量是个人剂量当量 $H_p(d)$, d 指的是人体表面指定点下面的深度。根据 d 取值不同, $H_p(d)$ 可分为 $H_p(10)$ 、 $HP(0.07)H_p(3)$ 和三个量。其中 $H_p(10)$ 适用于体表下 10mm 深处的器官或组织, 在特定条件下也适用于有效剂量的评价, $HP(0.07)$ 适用于体表下 0.07mm 深处的器官或组织, 多用于皮肤, $H_p(3)$ 适用于体表下 3mm 深处的器官或组织, 多用于眼晶体。

2.2 外照射个人剂量的评价依据

外照射个人剂量评价所用的量为辐射防护量, 基本依据是 GB 18871-2002《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》和 GBZ 128-2002《职业性外照射个人监测规范》中有关职业人员的剂量限值。

2.2.1 外照射个人剂量的评价量

根据 GBZ 128-2002《职业性外照射个人监测规范》，辐射安全分析或剂量评价应以吸收剂量 D_T 、当量剂量 H_T 或有效剂量 E 等防护量为依据。但是，在职业外照射个人监测中，由个人剂量监测仪器获得的是个人剂量当量 $H_p(d)$ ，为实用量。因此，进行辐射安全评价时，应将 $H_p(d)$ 转换为防护量。转换的基本方法有两种，第一种，在 γ 或 X 辐射的外照射剂量监测中，如果人员年受照剂量低于 20 mSv、职业外照射个人监测得到的个人剂量当量又为 $H_p(10)$ ，那么进行辐射安全评价时，可采用既不低估也不过分高估的有效剂量值 E ；第二种，如果年剂量监测结果超过当量剂量或有效剂量相应限值，那么进行辐射安全评价时，需进一步估算主要受照器官或组织的当量剂量 H_T 和有效剂量值 E 。

2.2.2 外照射个人剂量的评价依据

根据 GB 18871-2002《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》和 GBZ 128-2002《职业性外照射个人监测规范》，职业外照射剂量评价一般原则是，当放射工作人员的年受照剂量小于 5mSv 时，只需记录个人监测的剂量结果；当放射工作人员年受照剂量达到并超过 5mSv 时，除应记录个人监测结果外，还应进一步进行调查；当放射工作人员年受照剂量大于年限值 20 mSv 时，除应记录个人监测结果外，还应估算人员主要受照器官或组织的当量剂量；必要时，还需估算人员的有效剂量，以进行辐射安全评价，查明原因，并进行防护改进。

在内、外照射并存条件下，个人受照剂量的评价原则是：任何放射工作人员正常情况下的职业照射水平的限值是：连续 5 年内年均有效剂量为 20mSv，任何一年的有效剂量为 50mSv，眼晶体的年当量剂量为 150mSv，四肢（手和脚）或皮肤的年当量剂量为 500mSv；对于年龄为 16

岁~18 岁接受涉及辐射照射就业培训的徒工和年龄为 16 岁~18 岁在学习过程中需要使用放射源的学生，其照射水平的限值是：年有效剂量为 6 mSv，眼晶体的年当量剂量为 50 mSv，四肢（手和脚）或皮肤的年当量剂量为 150 mSv。

3 影响监测结果准确度的因素

3.1 监测结果的准确度

外照射监测的准确度指的是职业外照射个人剂量监测结果中系统误差与偶然误差的综合，反映了测结果与职业人员所受实际外照射剂量真值之间的一致程度，是一个定性的概念。与之相关的量主要有：误差、正确度、精密度和不确定度。其中误差指的是监测结果与真值间的差异，误差越小，准确度越高；正确度指的是监测结果中系统误差的大小，系统误差大往往会导致监测结果单向性偏离真值；精密度指的是监测结果中偶然误差的大小，偶然误差大往往会导致监测结果分散性的偏离真值；不确定度则指的是监测结果中不确定的系统误差与偶然误差的综合，反映了监测结果偏离真值的不确定程度。因此，用不确定度来衡量外照射个人剂量监测结果的准确度是较为合理的。

根据 EJT 822-1994《辐射防护仪器误差规定》，在职业人员外照射个人剂量常规监测中，若全年受照的总剂量接近年剂量限值，其不确定度应不超过 +50%、-33.3%，若总剂量小于 10 mSv，可接受的不确定度为 +100%、-50%。这为外照射剂量监测结果的准确度评定提供了基本参考依据。

3.2 监测结果准确度的影响因素

影响职业外照射个人剂量监测结果准确度的因素是多方面的，与监测人员、监测仪器、辐射

环境、监测方法、职业人员工作条件和实践方式等诸多因素紧密相关。

3.2.1 监测人员

即使在同一条件下，不同监测人员使用相同的个人剂量仪，所得监测结果的准确度也会存在差异，尤其在使用累积型个人剂量仪（如热释光个人剂量仪和胶片型个人剂量仪等）时，监测人员对剂量仪后期处理的技能、技巧和经验往往会在很大程度上影响监测结果的准确度。因此，为了保证监测结果准确度的一致性，在上岗前，须对职业受照人员和监测人员进行外照射个人剂量监测的培训，合格后才能从事核与辐射实践活动。

3.2.2 监测仪器

外照射个人剂量监测仪器多种多样。根据能否实时获得监测结果，个人剂量仪可分为直读式和累积型两大类，前者主要包括静电计型和 EPD（Electronic personal dose-meter）型两种，静电计是一种历史悠久的直读式个人剂量仪，其优势在于环境适应性强、价格低廉，但也存在探测下限过高和误差较大的缺陷，EPD 型个人剂量仪、即电子型个人剂量仪，是随着核辐射探测器技术和电子技术发展而出现的一类新型直读式个人剂量仪，多采用 G-M 计数管、CsI 闪烁探测器或硅光半导体探测器，与相应的测量电路和显示模块构成，突出优点在于能实时显示剂量（率），并能根据任务需要预先设置报警阈值，但是因能量响应和角响应的问题，往往会使监测结果在 X/γ 辐射的低能量段产生较大误差。

对直读式个人剂量仪准确度的一般要求是，对 X、γ 射线外照射剂量率的相对固有误差不大于±30%、剂量的相对固有误差不大于±20%，对皮肤外照射剂量率的相对固有误差不大于±15%；对 neutron 外照射剂量率和剂量的相对固有

误差不大于±30%，因能量响应和角响应共同引入的附加误差不大于±30%；累积型个人剂量仪主要包括热释光个人剂量仪 TLD（Thermoluminescence Dose-meter）、RPL（Radio photoluminescence）、OSL（Optically Stimulated Luminescence）和胶片型的个人剂量仪。目前我国涉核涉放单位大多采用 TLD，对 TLD 准确度的一般要求是，在一个监测周期内，累积剂量的相对固有误差不大于±10%、因存储而造成的剂量损失不大于±10%。

3.2.3 辐射环境与监测方法

辐射环境是影响个人外照射剂量监测结果准确度的另一重要因素，辐射环境决定着监测人员采用监测仪器的类型和监测方法。

在γ或 X 射线辐射场中进行外照射个人剂量监测时，如果γ或 X 射线为单一成份、能量已知，可使用无能量鉴别功能的普通个人剂量计；如果γ或 X 射线为单一成份、能量未知，γ或 X 射线由多种成份构成、能量已知，或γ或 X 射线由多种成份构成、能量未知，这时均应采用具有能量鉴别功能的个人剂量计进行监测。

在强贯穿辐射和弱贯穿辐射的混合辐射场中进行监测时，应采用具有能量鉴别功能的个人剂量计来测定个人剂量当量。对于弱贯穿辐射（如β射线和低能 X 射线）不明显的强、弱贯穿辐射混合辐射场，一般可只监测 $H_p(10)$ ；对于弱贯穿辐射很明显的强、弱贯穿辐射混合辐射场，应采用具有甄别上述两种辐射的个人剂量计，或采用躯体剂量计和四肢剂量计分别测量 $H_p(10)$ 、 $H_p(3)$ 和 $H_p(0.07)$ 。

在中子和γ射线的混合辐射中，通常要求采用中子剂量和γ剂量计分别监测中子和γ射线的个人剂量当量，然后计算出总剂量；但是如果中子剂量与γ剂量比不超过10%，且该比值已知，此时也可只用γ剂量计测量γ剂量，然后根据γ剂量的监测结果比

值计算出总剂量。

当职业人员处于复杂的混合辐射场或受到非均匀照射时，除了应佩戴常规个人剂量计外，还应在身体可能受到较大照射的部位，或与主要器官相对应的体表部位佩戴局部剂量计（例如头箍剂量计、腕部剂量计、指环剂量计或足踝剂量计等）。

3.2.4 工作条件与实践方式

在一定程度上，工作条件和辐射实践活动也会对个人外照射剂量监测结果的准确度造成较大影响，例如，放射性药物处理人员使用指型剂量计测量低能量的 β 射线，但在实际工作中，指尖所受的剂量常常是最大的，指型剂量计提供的数据就可能严重影响剂量监测结果的准确度。

通常，对于比较均匀的辐射场，当辐射主要来自前方时，剂量计应佩戴在人体躯干前方中部位，一般在左胸前；当辐射主要来自人体背面时，剂量计应佩戴在背部中间；对于工作中穿戴铅围裙的场合（如医院放射科），应将剂量计佩戴在围裙里面躯干部位；当受照剂量比较大时（如介入放射学操作），则需在围裙外面衣领上额外佩戴一个剂量计，以估算人体未被屏蔽部分的剂量；只有当受照剂量很小，个人监测只是为了获得剂量上限估计值时，剂量计才可佩戴在围裙外面的胸前位置；对于短期工作和临时进入放射工作场所的人员（包括参观人员和检修人员等），应佩戴直读式个人剂量计，并按规定记录和保存他们的剂量资料。

4 提高监测结果准确度的基本方法

实际上，提高个人外照射剂量监测结果准确度的技术依据就是尽可能消除或降低影响监测结果准确度的因素。基本方法包括：

一是监测时使用质量控制的个人剂量监测仪器。所用仪器应满足国标《职业性外照射个人监

测规范》和其他国标、行标中个人剂量监测仪器的相关技术要求。作为组成个人剂量计的探测器应具有良好的组织等效性，具有良好的稳定性和重复性，每次实施监测前应对剂量计进行筛选。

二是确保剂量读出系统稳定可靠。应经常对热释光个人剂量计的读出系统进行校验和维护，在每次剂量测量前后，应对读出系统的校准值进行验证，每年至少应对其最低探测水平进行依次核准。

三是本底扣除。个人外照射剂量监测中的本底来源主要有环境本底、探测器本底和读出系统本底三部分。对于环境本底，可在射线源、射线发生器或核设施建立之前预先测定，当进行野外辐射实践活动时，可利用国家或当地环保部门提供的该地区平均值；当采用可重复使用的直读式剂量计和热释光剂量计进行个人外照射剂量监测时，探测器本底和读出系统的本底容易确定，可用单个剂量计来确定，也可用一批剂量计确定探测器的本征本底和读出系统的本底，但是采用一次性剂量计时，探测器本底和读出系统的本底却是很难确定的，这种情况下，可采用随机抽样的方法进行确定，但是可能会带来较大的不确定度。

四是辐射环境和实践方式的修正。在常规监测中，放射源位置、辐射场分布和实践方式往往是已知的，在这种条件下，可利用蒙-卡模拟计算和体模测量等方法来估算职业人员的外照射剂量，将此结果与职业人员所带个人剂量计的测量结果进行比较和分析，能得到剂量监测结果的修正因子，从而提高监测结果的准确度，应指出，当放射源位置、辐射场分布和实践方式发生改变时，需及时对修正因子进行调整。

五是确保个人剂量计在非工作期间避免受到任何人工辐射的照射。

5 结语

本文仅从技术角度对职业外照射个人剂量监测和评价的准确度要求进行了分析和研究,提出了提高个人剂量监测结果准确度的基本方法。但是在实践中,职业外照射的个人剂量监测和评价还涉及到国家、地方政府和涉核运营单位的个人外照射剂量管理问题,管理的规范性、科学性和长效性在保证职业外照射个人剂量监测和评价结果准确度上也具有十分重要的作用。

参考文献

- [1] GBZ 128-2002, 职业性外照射个人监测规范
- [2] JJF1001- 1998, 通用计量术语及定义
- [3] 沙定国, 实用误差理论与数据处理, 北京: 北京理工大学出版社, 1993
- [4] GB 18871-2002, 电离辐射防护与辐射源安全基本标准
- [5] EJT 822-1994, 辐射防护仪器误差规定
- [6] GBZ 207-2008, 外照射个人剂量系统性能检验规范

Study on requirements of precisions for monitoring and evaluation of individual occupational external exposure

LAI Yong-fang, WANG Yong-hong, SUN Jian, GAO Jing, LIU Ke-ping

(Institute of Chemical Defense, Beijing 102205, China)

Abstract: With the rapid development of nuclear energy industries and application of nuclear radiation, It will be more important to pay attention to individual occupational dose from external exposure. Based on some norms for individual external exposure monitoring, this paper analyzes the requirements on precisions for monitoring and evaluation of individual occupational external exposure, and presents some methods to improve the precisions.

Key words: Individual dose; External exposure; Precision

核电设施重大事故应急专用装备编配问题探讨

李晓明, 杨钧

(防化学院, 北京 102205)

摘要: 核电设施重大事故应急救援行动须具备指挥控制、辐射防护、辐射监测和放射性消除四种能力, 为提高应急行动的效率, 需为应急救援力量编配能够满足上述能力需求的核应急专用装备。核应急专用装备的编配应符合我国核应急装备建设实际, 以结构精干、品种简约、性能先进为目标, 做到管用、好用、够用。在编配方法上, 可按照先编组后编配的思路, 依据应急救援力量编组情况实施编配。

关键词: 核事故应急; 专用装备; 编配

文章分类: 核技术与公共安全及其应用的研究成果

核电设施重大事故属于特别重大的突发公共事件, 核应急专用装备(含配套器材, 以下简称核应急专用装备)是开展核电设施重大事故应急救援行动的物质基础, 其编配问题关乎核应急行动的效率, 有必要进行深入论证。

本文结合近年来国内业已开展的核应急响应工作实践和核应急装备建设实际, 从给谁编、编什么、如何编三个方面, 就核应急专用装备的编配问题提出一些看法。

1 核应急专用装备的编配对象

研究核应急专用装备的编配问题, 明确对象是前提。以放射性污染为主要危害方式的核电设施重大事故属于特别重大突发公共事件, 能够造成严重的环境灾害, 影响面积大、范围广, 应急响应需要动用较大的行政与人力资源。依照《国家核应急救援条例》相关规定, 有关部门需视情决策救援力量动员规模。核应急专用装备的编配对象可以有多种分类方法, 本文从核防护专业的角度出发, 参照国外核电设施重大事故应急救援过程中应急力量动员情况, 结合目前国内业已出

台的相关计划和预案, 认为编配对象可分为三类: 一是担负指挥协调任务的各级应急现场指挥机构, 二是担负辐射监测、去污洗消任务的专业分队, 三是担负医疗救治、工程抢险、运输、通道控制、区域警戒和气象等任务的应急响应分队。

从任务分工的角度来看, 核电厂核事故应急救援行动专业性强、分工明细, 核应急专用装备的编配对象主要是防化专业分队。而从防护的角度来看, 进入应急区域的人员都应采取必要的防护, 编配对象应为参加应急响应的所有专业队。

2 核应急专用装备的编配种类

论证核应急专用装备编配问题, 种类选型是重点。按照装备需求论证的一般要求, 核应急专用装备种类的选择应以条例规定的核应急救援任务为依据、以实际需求为牵引进行论证。在核电设施重大事故应急行动中, 涉及核应急救援力量的部分主要是核辐射监测和放射性消除, 但鉴于应急行动本身对指挥通信、辐射防护的依赖, 参加核电设施重大事故应急响应的救援力量需同时具备指挥控制、辐射防护、辐射监测和放射性消

除四种能力，为此需要相应地编配指挥通信、核辐射侦察监测、辐射防护和放射性消除四类装备。以四类装备为主连同配套的辅助器材一道，构成核应急专用装备体系。

考虑到核监测技术的持续发展、相关装备的不断更新，核应急专用装备体系的构建应该是一个不断完善的动态过程：体系内装备类别相对稳定，而装备品种需适时变化，相关型号将经常更新。近年来核辐射防护与监测技术越来越成熟，相关装备不仅性能先进、品种多样，其来源也呈现多渠道态势。既有现役和在研的军用装备，也有各具特色的民用装备；不仅有国产装备可供选型，还有进口装备任我择优物色。就目前而言，对核电设施重大事故应急所需专用装备编配种类的论证应本着合理配套、适度前瞻的原则，重点选用最新型号和“十二五”期间内能够列装的先进装备，包括国产和进口装备。

核应急专用装备的选型追求适用、管用。近年来，随着国家陆上核生化应急救援队等国家级救援力量的组建，汇集了一批核应急救援专用装备，其中部分专用装备还在北京奥运、上海世博会、广州亚运会以及深圳世界大学生运动会的安保中得到应用，在实战中经受了检验，已经达到了适用、管用的目标要求，可以考虑将上述专用装备作为选型的重要选项。

基于上述考虑，以结构精干、品种简约、性能先进为目标，可建立一套相对简洁的核应急专用装备体系，由指挥控制、核辐射监测、防护、消除及辅助器材等五大类装备构成。其中指挥控制装备分为核应急指挥装备和核应急通信装备，品种包括核应急指挥平台、核事故后果评估软件和核应急辅助决策软件、可视化单兵通信装备、近距离语音通信装备和单兵 GPS 定位装备（后三种通信装备作为核应急指挥装备的配套装备列

入）；核辐射监测装备分为核辐射侦察装备、放射性污染监测装备和核辐射剂量监测装备，品种包括机载核辐射监测装备、机器人核辐射侦察装备、核辐射巡测装备、便携式核素识别装备、便携式 r 测量装备、便携式中子测量装备、人员车辆沾染检查装备、表面放射污染测量装备、放射性污染取样分析装备和直读式个人剂量监测装备；防护装备分为外照射防护装备、内照射防护装备，品种包括贯穿辐射防护装备、呼吸道防护装备和皮肤防护装备；放射性污染监测装备的品种包括无水放射性沾染消除装备和有水放射性污染洗消装备；辅助器材主要包括便携式气象观测器材和警示照明器材。

本文所选各类核应急专用装备在功能用途及操作性能方面具有以下技术进步：

核应急指挥通信专用装备 拥有核应急指挥控制专用平台及相关软件，指挥机构与一线分队之间、指挥机构之间具备卫星通信能力，具有近距离分队内部无线通信能力。

核辐射防护专用装备 具备贯穿辐射防护能力，呼吸道护更加舒适，皮肤防护更加轻便。

核辐射侦察监测专用装备 具备宽响应范围、高灵敏度的核辐射剂量率监测能力，对人员、装备放射性沾染的检测更加快速高效，个人核辐射剂量监测更加便捷，环境放射性污染监测手段更加先进，能准确识别多种核素，能在高危高放环境下实施无人核辐射侦察，能实施机载核辐射侦察。

放射性污染消除专用装备 能对人员、装备实施更加有效的放射性污染消除作业。

3 核应急专用装备的编配方法

实施核应急专用装备的编配，正确的方法至为关键。编配核应急专用装备的目的是满足核电设施重大事故应急力量对装备的需求，所编装备

不仅要符合核电厂核事故应急行动的特点，还必须与我国核应急装备建设实际相衔接，不仅要实现管用、好用、够用，还要做到用得值、养得起、好保障。为此，对核应急专用装备的编配应认真采循以任务为依据、以需求为牵引、以编制为依托、以现状为基础的方法。具体工作中需要特别关注以下两点：

一是体现应急任务的差别，突出重点，兼顾一般。如前所述，参加核电设施重大事故应急响应的救援力量可分为三类。专业分队作为辐射监测、放射性去污作业的主要力量，编配品种既有防护装备、辐射监测（侦察）装备和洗消去污装备，也有指挥通信装备和相关配套器材。各级核应急指挥机构主要编配轻便型防护装备、高性能指挥通信装备和个人剂量监测装备。担负医疗救治、工程抢险、运输保障、通道控制、区域警戒和气象保障等应急响应支援任务的分队主要编配轻便型防护装备和个人剂量监测装备。考虑到在核辐射污染区内作业的需要，核应急指挥机构也可以指挥所、其他专业应急响应专业分队以基本建制单位为单元编配少量辐射监测装备。需要注意的是，虽然核应急专用装备的编配重点是核防护专业分队，但面向全体救援力量的防护装备的编配数量很大，编配与回收工作的实施需付出较大的精力。鉴于核电设施重大事故应急作业环境的特殊性，防化装备与个人剂量监测装备的编配具有特别的重要性，事关应急人员自身安全和应

急救援行动的顺利实施，其编配工作需要给予足够的重视。

二是理清核应急分队一线编组情况，先编组后编配，依据编组情况据实编配。与其它各类突发公共事件应急的编组方式有所不同，在遂行核电设施重大事故应急救援行动的过程中，专业分队可依据条例规定任务内容实施的特殊编组方式。根据任务要求以及目前通用、专用防化装备的功能用途，参加核电设施重大事故应急救援时，应急分队可采取以下几种编组：

机载核辐射监测组（含直升机航测）——执行空中辐射监测任务。

辐射环境监测组（放射性取样分析组）——执行空气、水（江、河、湖、海）面、食品的辐射污染监测任务。

机器人辐射侦察组：执行高危、高放环境下辐射监测任务。

巡测车辐射侦察组：执行区域辐射巡测任务。

普通侦察组：执行常规辐射侦察任务。

沾染检查组：执行人员、装备（车辆）放射性沾染检查任务。

洗消组：执行放射性污染消除任务。

编组方法一经确定，即可针对不同的作业编组实施编配。篇幅所限，本文对具体编配方案不做展开。

Research on the organization of equipments of nuclear emergency

LI Xiao-ming, YANG Jun

(Institute of chemical defense, Beijing 102205)

Abstract: The emergency rescue operation on major accident of nuclear facilities contains four kinds of abilities that are command and control, radiation protection, radiation monitoring and radioactive decontamination, so it needs to organize some equipments of nuclear emergency to enhance the efficiency of

nuclear emergency operation. The organization of equipments of nuclear emergency should accord to the reality of the development in our country. It should have extractive structure, brief variety and advance capability, and also should be convenient, useful and adequate. The method of organization can first accord to the organization of group and organize the facilities accord to the organization of group of the emergency rescue force.

Key words: nuclear emergency; equipment of special purpose; organization

基于 GIS 的核事故危害预测预警与优化控制系统集成方法研究

唐丽娟, 黄顺祥, 王新明

(防化学院, 北京 102205)

摘要: 日本福岛核事故后, 核安全问题成为国际社会关注的焦点。针对核事故防范与控制的需要, 建立核事故危害预测预警与控制系统是国家和军队亟需解决的重大课题, 涉及到核反应堆安全、辐射防护、大气科学、计算机科学、地理信息技术等多学科领域。基于 GIS 技术将多平台多系统多模式有效集成, 构建了核事故危害预测预警与优化控制技术体系。

关键词: GIS; 核事故; 系统集成

文章分类: 核技术与公共安全及其应用的研究成果

日本福岛核事故发生之后, 其巨大的破坏力和深远的影响力, 使得核安全问题引起了全世界的关注。我国是核工业大国, 同时以日本、朝鲜为代表的周边国家大力发展核工业, 潜在的核危害更应引起高度重视。核事故危害的预测预警与优化控制涉及到气象学、核物理学、安全科学、地理信息科学等多个学科领域。将涉及到的多平台多系统多模式有效地集成, 从而形成一个完整的体系, 对于建立核事故危害预测预警与优化控制体系有重大的推动作用。

1 核事故危害预测预警与优化控制系统概况

1.1 系统组成

核事故危害预测预警与优化控制系统主要包括以下几个模块:

a. 气象场预报与资料同化模块

应用全球尺度的背景场作为气象预报模式初始场, 通过多层网格嵌套, 输入或选取目标模拟区域的坐标, 系统自动调用该区域内的 GIS 数据作为边界条件, 气象场预报模式通过滚动并行计

算, 预报未来数十小时内目标区域的气象场^[1]。

b. 事故危害预测预警模块

一旦核事故发生, 将事故地点输入数据同化系统, 该系统调用区域内气象场预报结果和气象观测网实时观测结果, 得出未来数小时内精细的流场和湍流量。扩散模式调用经过数据同化的气象场和核素数据库, 计算核事故剂量场的时空分布。同时将应急监测结果和扩散模拟结果进行数据同化, 得出撤离、服碘、隐蔽范围等关键技术数据, 发布预警信息^[2]。

c. 应急方案优化控制模块

在对核事故进行监测, 对事故后果进行预测的基础上, 采取最佳措施有效地控制事故损失。核事故风险控制充分考虑到污染物传输、扩散稀释、沉积转化等自然过程, 在核事故风险预测的基础上进行的人为优化调控, 力求以尽量小的代价将风险降低到一个合理水平。我们将自然控制论思想用于指导核事故风险的防范与控制。

1.2 系统架构

核设施遭受事故危害预测预警与控制系统主要包括计算系统和展示系统两大部分。

a. 计算系统

在计算系统，气象预报系统对未来几十小时内的气象实时滚动预报，根据事故地点自动调用气象数值预报系统和气象观测系统相应的数据进行同化，得出实时的精细三维风场和湍流场，扩散模式计算烟羽外照射、吸入内照射、地面沉积外照射，得出重水反应堆 44 种或轻水反应堆 54 种核素对 19 种器官的危害状况，得出危害状况和事故后果。

b. 展示系统

展示系统与计算系统通过数据转换引擎实现无缝耦合。首先，展示系统界面将事故源的位置、种类、大小及发生事故的时间输入数据转换引擎提供给计算系统计算。然后，计算系统将计算结果通过数据转换引擎自动传给展示系统，展示系统将隐蔽、区域、服碘区域以及危害开始时间、持续时间等结果在 ArcGIS9.3 系统或三维 GIS 系

统上进行展示。同时展示需隐蔽、撤离和服碘的人数及相应的面积，通过计算机网络实时在线发布。

2 核事故危害预测预警与优化控制系统集成方法

2.1 系统集成技术路线

系统集成技术路线如图 1 所示。系统主要分为核事故危害预测预警系统 (NAPWS) 和危害优化控制系统 (NH-CII) 两部分，两个系统通过数据转换引擎实现在整个系统中的统一。在 NAPWS 系统中，气象预报模式在 Linux 系统中运行，危害预测、预警系统在 Windows 系统中运行；在 NH-CII 系统中，各个部分均在 Windows 系统中运行。服务器的中心节点通过异步通信和虚拟化技术实现 Windows 和 Linux 两个操作系统同步计算和数据共享^[3]。

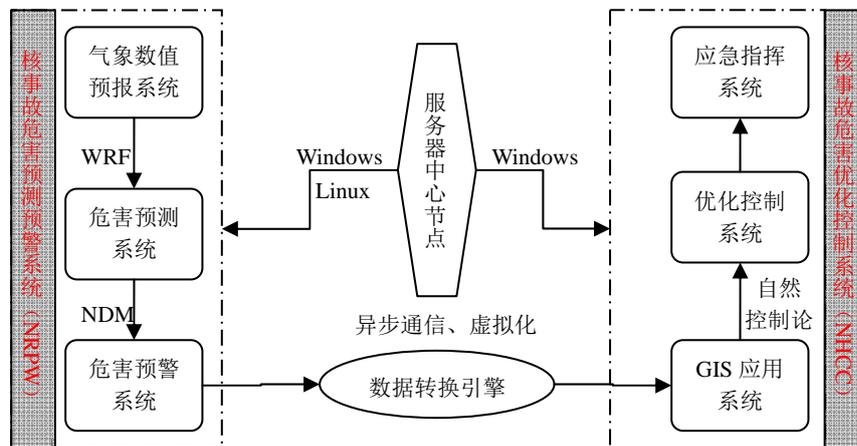


图 1 系统集成技术路线图

2.2 数据转换引擎

数据转换引擎通过用户的选择或输入，在 GIS 平台上获取源的地理信息，调用坐标转换计算方法，将源的地理信息转换为模式能够识别和直接应用的数值，模式在获取源参数后自动进行计算，输出计

算结果。GIS 系统自动读取数值模式计算的结果，并调用坐标转换计算方法，将模式计算的结果转换为 GIS 系统能够识别的数据形式，根据危害指标体系，GIS 系统对预测预警结果进行二次分析，并将分析结果进行实时在线发布。数据转换引擎设

计多个硬件平台、多个系统环境、多个数值模式和多种坐标转换计算方法，是一个复杂智能的“桥梁”和“枢纽”，使整个应急预测预警与控制体系各个系统、各种环境、各个模式和各种方法相互耦合，形成一个功能完善的整体。

2.3 多平台、多系统、多模式集成技术

本项目一大特点是一个多平台、多系统、多模式体系，计算平台和环境多级化、计算模式嵌套和耦合化、运行环境复杂和交互化，如图 2 所示。首

先，模式需要分别运行在 Linux 或 Windows 环境下；模式间有数据交换，且耦合紧密，交换频繁。其次，模式结果要通过 GIS 方式表现，增加了与决策数据库和 GIS 应用系统的耦合需求。因此理想的方案是采用多处理的“胖节点”或者多节点的 Cluster 集群系统。如此可通过多节点有效分担不同模式的计算强度，与此同时以高速以太网络保证频繁的数据通讯。开发平台为 Intel XEON 服务器，用于集成应用层的气象场模式、扩散模式，及其基于决策数据库的 GIS 可视化业务。

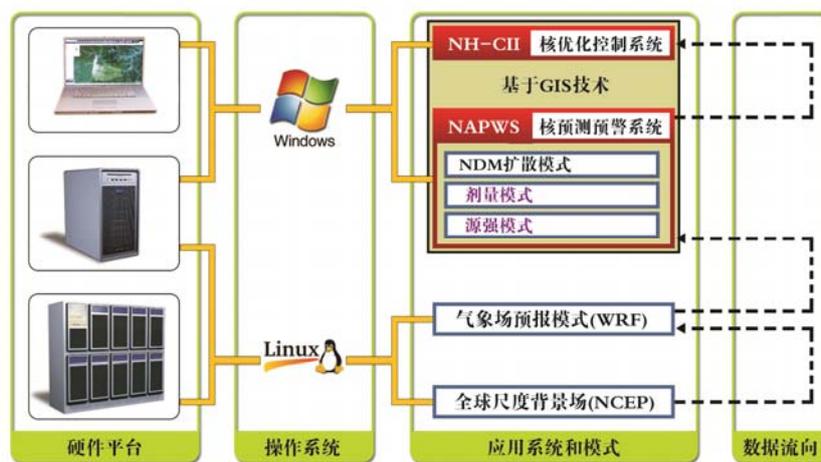


图 2 核事故危害预测预警与优化控制系统集成

3 预测预警模拟示范

利用集成后的系统进行模拟示范，结果如下：

假设大亚湾核电站，于 2009 年 8 月 1 日 12: 06 有功率为 100 兆瓦的轻水反应堆发生 PWR1 级事故，人员处于隐蔽状况，人口密度为 2000 人/平方公里。

隐蔽面积为 24200 公顷，撤离面积为 11500 公顷，服碘面积为 7200 公顷；隐蔽纵深为 90.4 公里，撤离纵深为 63.25 公里，服碘面积为 46.87 公里；隐蔽人数为 48.4 万人，撤离人数为 23.0 万人，服碘人数为 14.4 万人。如图 3 所示。

危害开始时间的分布，如图 4 所示。

放射性烟羽持危害持续时间的分布，如图 5 所示。

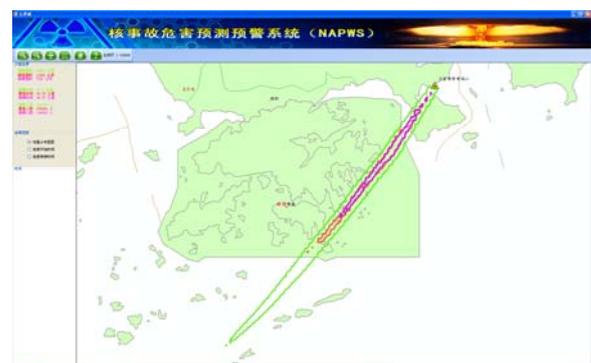


图 3 大亚湾核电站发生 PWR1 级事故计算结果（剂量）

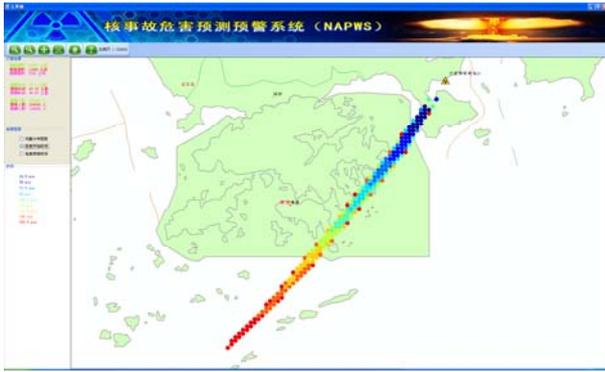


图 4 大亚湾核电站发生 PWR1 级事故计算结果
(危害开始时间)

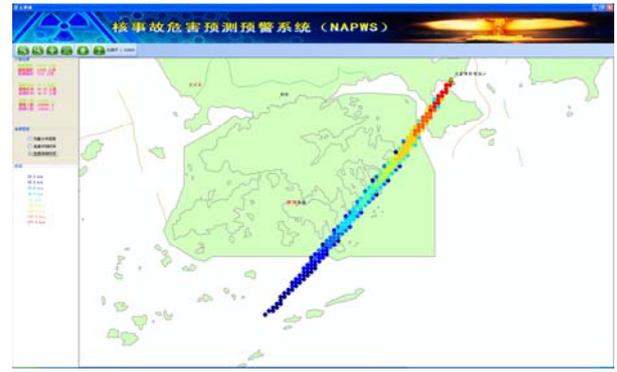


图 5 大亚湾核电站发生 PWR1 级事故计算结果
(危害开始时间)

4 结论

利用集成后的核事故危害预测预警与优化控制系统对大亚湾核电站和朝鲜秦川核设施的模拟核事故进行了应用研究。结果表明，基于 GIS 的集成方法能将核事故危害预测预警系统与优化控制系统高效集成，对于建立该体系有着举足轻重的作用。

参考文献:

[1] 毕天平; 金成洙; 钟圣俊; 尚剑红; 基于 GIS 的环境污染扩散模型 东北大学学报(自然科学

版), 2008, (02), 273-276

[2] 陈晓秋; 潘自强; 张永兴; 陈家宜, 核事故早期应急响应的预报模式及其设计方案, 辐射防护, Radialization Protection, 2005 年 01 期

[3] Huang Shunxiang An Integrated Approach on Predicting ,Warning ,and Optimized Controlling System Based on GIS for Nuclear Accident Hazard Hazrad CCCA2011:301-305

Study on integrated approach of Nuclear Accident Hazard Predicting, Warning, and Optimized Controlling System based on GIS

TANG Lijuan, HUANG Shunxiang, WANG Xinming
(Institute of Chemical Defence, Beijing 102205, China)

Abstract: The issue of nuclear safety becomes the attention focus of international society after the nuclear accident happened in Fukushima. Aiming at the requirements of the prevention and controlling of Nuclear Accident establishment of Nuclear Accident Hazard Predicting, Warning and optimized Controlling System (NAPWS) is a imperative project that our country and army are desiderating, which includes multiple fields of subject as nuclear physics, atmospheric science, security science, computer science and geographical information technology, etc. Multi- platform, multi- system and multi- mode are integrated effectively based on GIS, accordingly the Predicting, Warning, and Optimized Controlling technology System of Nuclear Accident Hazard is established.

Key words: GIS; Nuclear Accident; System integrating

基于 GPRS 的核应急指挥控制系统

王百荣, 付黎, 马捷, 郑启燕

(防化学院二系 北京 102205)

摘要: 利用 GPRS 通信速度快、效率高、不轻易掉线的优点, 建立一个了基于无线网络传输和智能应急指挥辅助决策的新一代核应急系统, 为核应急指挥行动提供集数据、短消息、图像、文件传输、储存、处理等功能为一体的全新控制平台。

关键字: GPRS 核应急; 指挥控制; 信息系统

文章分类: 核技术与公共安全及其应用的研究成果

在现有核辐射监测装备中, 核应急指挥中心与救援现场之间缺乏有效的信息共享与信息交互, 因此核应急有待于提高救援时间和救援效率。近年来, 随着现代通信网络技术、地理信息服务的发展, 核应急指挥控制系统平台能够及时地共享实时信息。因此, 建立基于 GPRS 的核应急指挥控制系统, 为核应急指挥和通信提供一个集中控制、配置灵活、安全可靠的信息处理平台, 确保核应急技术支持中心的正常运作。使用的 GPRS 技术是通过增加相应的功能模块对现有的基站系统进行改造实现分组交换, 让数据传输速率相当可观^[1]; GPRS 技术具有: 资源利用率高、传输速度快、接入时间短、实时在线、实用性强等特点。本文主要介绍了核应急指挥控制系统的构成、技术路线、软件功能三个方面的内容。

1 系统构成

核应急指挥控制系统包括基于 GPRS 的核应急数据通信处理中心和核应急现场技术信息系统。核应急数据通信处理中心是核应急指挥控制系统中的核心部分, 它通过 GPRS 无线网络将指挥方舱、各级指挥中心、巡测侦察车、机动

布设侦察哨和其它接入系统的核生化监测设备紧密的联接在一起(如图 1)。核应急数据通信处理中心由一条带固定 IP 的宽带专线、硬件防火墙、接入路由器、网络交换机、通信服务器、标准机柜、备用电源、防雷设备等组成(如图 2)。



图 1. 核应急指挥控制系统总体结构图

2 系统技术路线

核应急指挥控制系统通过 GPRS 通信方式传送的信息有 GPRS 模块心跳信号、监测数据、短消息、预测图像和文件。各种类型的数据传送技术处理路线如下:



图 2. 核应急数据通信处理中心结构图

2.1 GPRS 模块心跳信号

每个 GPRS 模块都要设置一个（或多个）数据上报服务器的 IP 地址，把每个 GPRS 模块的数据上报服务器 IP 地址设为处理中心网络专线的固定 IP 地址。模块上电后，定时自动向处理中心发送心跳信号，心跳信号包含模块标识地址、动态 IP 地址二个重要信息，处理中心根据标识地址在数据库中找到对应的终端，把 IP 地址绑定，并向指挥中心、指挥方舱控制系统发送端机已经上线的信息，在中心控制软件界面显示各侦察终端的上线和掉线情况。

2.2 监测数据

核应急指挥控制系统软件向侦察终端发送点测、补调、通信方式转换等控制命令，终端收到命令后向指挥方舱上报实时监测数据和 GPS 定位数据、历史数据和通信方式转换结果等信息。

2.3 短语

指挥中心可以通过核应急指挥控制系统软件向侦察终端发送短语，侦察终端可以向指挥中心和其它侦察终端发送短语；当接收方成功收到短语，将会返回已经收到的回复。指挥中心可以对下进行短语群发，侦察终端只能一对一发送。所有短语均要通过处理中心转发。

2.4 预测图像和文件

预测和图文收发系统主要用于国家和地方核应急指挥中心与指挥方舱之间传送有关核事故的预测图像，互相传送文件和短信，使指挥方舱在获得核事故现场实时信息的同时，也能够及时获得后方提供的预测分析数据和各种辅助决策文件信息。此外，文件发送时先要取得接收方文件接收许可才能进行文件内容发送。

3 系统软件功能

3.1 数据通信服务器软件功能

(1) 下位机动态 IP 解析：设备的 GPRS 通信模块上电或重新上电后，都会自动定时向通信服务器发送心跳信号，通信服务器软件先从心跳信号中分解出登录网络的 GPRS 终端模块的标识码和动态 IP 地址，然后在系统数据库中的设备登记表中找到与该标识码对应的设备，并更新动态 IP 地址和向中心控制软件发送端机上线信息^[2]。

(2) 数据转发：通信服务器收到端机发来的数据后，判断是否通信数据，所有通信单元发送的通信数据都包含发送端控制模块的地址码。通信服务器首先在设备登记表中找到对应该地址码的 IP 地址，然后在通信参数表中找到要转发数据的指挥方舱和指挥中心的记录，再向这些记录对应的 IP 地址进行数据转发。系统软件收到数据后，只对收发事件进行记录，不对数据包数据部分进行解析和保存。数据包中含有剂量、剂量率值、测量位置经纬度、日期、时间等信息；在数据打包时，应将测量的十进制数据转换成数据处理中心认可的十六进制的数据^[3]。

3.2 核应急现场技术信息系统软件功能

无线通信专网数据中心可以通过 GPRS 将全国各地的定点辐射监测和巡测数据实时地显示在

电子地图上，如图 3 所示。核应急指挥控制系统软件可通过从无线通信专网数据中心指定的位置读取相关的测量数据，利用专门开发的数据接收程序，定义巡测点结构以及读取巡测点的类型。巡测点内容包含七个信息：测量日期、时间、序列号、经度、纬度、剂量率值、剂量率整数。在读取巡测点类型时，先读取指定日期和时间，再读取巡测点列表。从指定的列表中经过比较日期和时间，确定最新的数据，并将巡测点的七个信息值读取出来，并标记在数字地图上。通过不断的比较测量数据日期和时间，可连续取得测量点的数据^[4]。

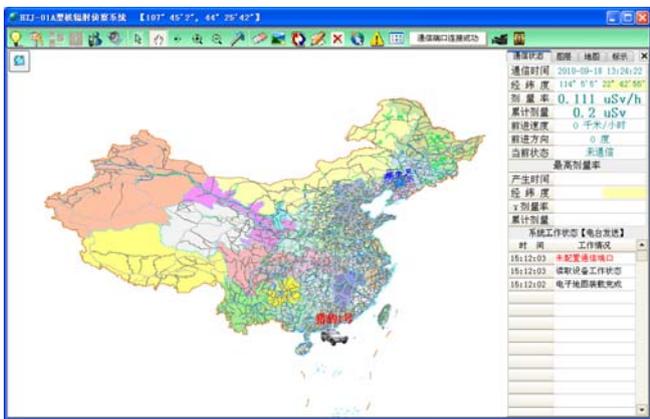


图 3. 全国各地定点辐射监测和巡测界面

将电子地图定位于区域辐射巡测界面，随着车载测量系统地移动，测量的数据不断地更新，在服务器端监控的数据也在不停的变化，如图 4。

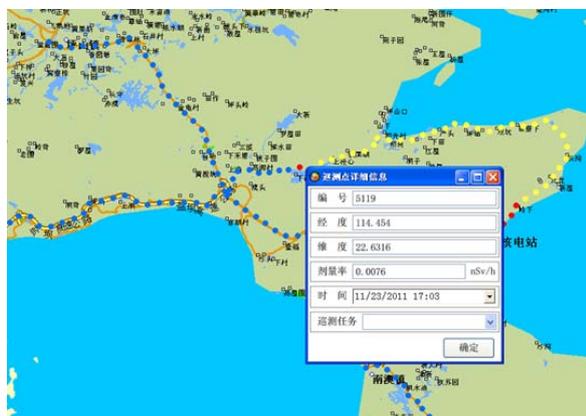


图 4. 区域辐射巡测界面

此时在地图上可以清楚的看到巡测点位置的变化

情况，双击任意一个点，可以得到该点的基本信息：包括地理位置，时间以及剂量率值等，与现地作业的车载辐射监测系统的数据完全一致和基本同步，表明核应急现场技术信息系统无线数据传输得以实现并运行稳定可靠。蓝色代表本底计数，黄色代表低剂量率，而红色代表高剂量率。

3.3 中心控制系统远程参数设置

在平时训练和演习中，可能需要改变通信服务器的通信参数设置，把原来属于某分队的数据也转发到其他指挥中心，这时就需要在通信参数设置中把该中心加入到所属分队中。系统在中心控制系统软件中增加了远程参数设置功能，操作人员可以在指挥中心或指挥方舱通过这个功能远程设置通信服务器的通信参数。

3.4 中心控制系统终端上线状态显示

为了能让指挥中心了解终端是否成功登录系统，新系统设置了终端设备上线状态，当处理中心通信服务器收到终端模块心跳信号后，都将向中心控制系统发送终端上线通知，中心控制系统在设备状态列表中把对应终端上线状态变为上线。系统定时检查每个终端的上线状态，如果经过一定时间没有新的上线通知，则把对应终端的上线状态改为掉线。

4 结束语

本文设计方案在军队核应急技术支持中心得以实现，中心软件系统运行于 Windows2000、WindowsXP 及 Windows 2003 操作系统平台、Oracle9i 数据库。巡测车上只需配置 GPRS 通信模块和带有 GPRS 通信功能的手机卡即可将测得的数据发送到该数据通信处理中心。测量系统也可以根据监测的数据量及实时性要求随意设置传输数据的时间，数据通信处理中心可以永远在线的

接收测量系统发送的数据^[5]。根据接收的数据指挥人员可以快速准确的判断前方战场的污染情况，正确快速的指挥核应急救援行动。数据通信处理中心连续运行一年来，数据接收稳定、准确、可靠。经实际运行，效果很好，具有较强的实用性和行业推广价值。

参考文献:

- [1] 宫召杰,郭忠文.基于GPRS的无线自组织网络远程抄表系统[J].计算机应用研究.2006,4:187-189.
- [2] 王华奎.移动通信原理与技术[M].北京:清华大学

出版社,2009.

- [3] 王百荣,付黎等.TRADOS系统无线数传实现[C].重庆:危险物质与安全应急技术研讨会论文集,2011:598- 600.
- [4] 广州杰赛科技股份有限公司.核应急无线通讯专用数据中心[M].广州,2010
- [5] 王严良,宿小辉.GPRS在远程X、 γ 辐射监测系统中的应用[J].核电子学与探测技术.2008,6:1314-1316.

The Nuclear Emergency Information System Based on GPRS

Wang Bairong, Fu Li, Ma Jie, Zheng qiyan

(Institute of Chemical Defense, Beijing 102205)

Abstract: By utilizing high operation characteristic of GPRS and advantage of transferring largely data packets, this paper set up a wireless communication network and nuclear emergency information system. This system studies useful data, short message, picture, storage and processing function for wireless control network platform.

Key words: GPRS; nuclear emergency; Information System; data processing and communication center

基于 MACCS 程序的反应堆核事故周边地区剂量估算

曾君¹, 刘书焕¹, 田浩²

(1. 西安交通大学 核科学与技术学院, 陕西 西安 710049;

2. 深圳中广核工程设计有限公司, 广东 深圳 518052)

摘要: 本文结合福建某核电站周围 80km 内的人口分布、农业、种植业、畜牧业等大量统计数据信息, 采用 MACCS1.5 程序在基于 PWR4 应急源项的基础上计算了核电站周边地区的公众及个人最大有效剂量, 模拟结果显示在核电站近场区域 (0~3km) 辐射剂量场变化速度最快; 计算得出厂址半径 5km 和 10km 范围内短期集体有效剂量分别为 6.05×10^4 人·Sv/a 和 5.25×10^5 人·Sv/a, 对居民所致个人最大有效剂量为 9.77×10^{-1} mSv/h, 其中, 气态 ^3H 对公众的剂量贡献最大。根据模拟结果及标准剂量限值, 给出了相应的应急防护行动建议。

关键词: MACCS; 严重事故; 剂量估算; 核应急

文章分类: 核技术与公共安全及其应用的研究成果

0 引言

核电作为一种清洁、高效的新能源, 但不能完全排除其发生事故的可能性, 在能源日渐紧缺和环境问题日益严重的今天越来越受到各国关注。尽管核电站有非常严密的预防措施, 但是当发生超设计基准的地震、海啸等极端自然灾害的情况时, 包括初始事件叠加和失效叠加, 还是会有可能发生堆芯熔化类的最严重事故。如 2011 年 3 月, 日本福岛核电站在地震叠加海啸的影响下造成了核电站堆芯熔化, 造成了大规模的放射性物质释放和环境的放射性污染。福岛核电站的本次事故最终被评定为七级事故, 造成了对自然环境、公众健康和社会环境的广泛不利影响。自从美国三里岛事故和前苏联切尔诺贝利事故发生之后^[1], 核电站应急准备与响应研究就引起世界各国的重视, 世界各国投入了大量的资源研究核电站在严重事故时可能发生的现象、它们可能导致的严重后果以及应该采取的应急对策。

MACCS^[2]是在美国 NRC 资助下由 Sandia 国家

实验室(SNL)开发的三级 PSA 分析工具程序, 用于估算核电厂潜在严重事故的环境后果。MACCS 包含的模型有: 大气弥散和输运、干湿沉积、气象学上的概率处理、环境迁移以及应对策略、对健康的影响和经济代价等。MACCS 程序于 1987 年正式公布, 经 NRC 和其它有关用户广泛使用, 并经过多次改进, 已经成为国际上应急领域的权威程序之一。

本文以福建省某核电 1, 2 号机组为例, 假想该核电站为事故发生地, 选取核电站周围 80km 内的区域为研究对象并采用了 MACCS1.5 程序进行了模拟计算, 在此基础上给出了基于 PWR4 源项计算的核电站周边地区严重事故后各种核素、各种气态照射途径对附近居民造成的最大个人有效剂量及短期内集体有效剂量。

1 模型简介^[2,3]

MACCS 模拟了严重反应堆事故通过烟羽向大气释放放射性物质, 而对场外产生后果的情况。MACCS 把事故发生后分三个阶段: 应急阶段、中

期阶段和长期阶段。对于这三个时间阶段，用户必须定义的仅有一个，即应急阶段，另外两个是可选的。

应急阶段在事故发生后立即开始，可延至事故后七天。在程序中，这个阶段由 MACCS 的 EARLY 模块模拟。在此阶段，公众接受放射性烟云和地面污染两方面的照射。这个阶段可规定不同的防护措施，包括撤离、隐蔽和与剂量有关的避迁。

在中期阶段，将进行评价并决定需采取的防护措施行动。在程序中，这个阶段由 MACCS 的 CHRONC 模块模拟。在此期间，假定放射性烟云已过去，照射途径仅为地而污染的照射。此时采取的防护措施是暂时避迁。

长期阶段指中期阶段过后的所有时间。程序中这个时期由 MACCS 的 CHRONC 模块模拟。与中期阶段相同，所考虑的照射途径只是由地面污染引起的照射。为了把剂量减小到可接受水平，在长期阶段可能要采取多种防护措施去污、管制和财物的长期禁用。长期阶段模拟的照射时间本质上说是无限长的。

MACCS 程序可以估算的量有：1)从失效反应堆安全壳释放入大气的放射性物质在下风向的运输、扩散和沉降；2)受照公众以直接方式（烟云照射、烟云吸入、地面照射和再悬浮吸入）和非直接方式食入接受的短期和长期辐射剂量；3)通过防护

行为对这些剂量的减缓（撤离、隐蔽和事故后避迁；牛奶、肉类和农作物的销毁；去污、暂时管控或土地和建筑物的长期禁用）；4)事故后一年内预期发生的早期死亡和损伤（早期健康效应）和预期受照人员终生发生的滞后晚期癌症死亡和损伤；5)短期应急响应行动撤离、隐蔽、避迁、农作物和牛奶销毁以及去污、暂时管控、土建和建筑物长期禁用的场外代价（Economic Cost）。

2 剂量模式与计算结果

2.1 剂量模式

核电站产生的电离辐射可在受照物的内部引起各种变化。核电站的辐射防护问题涉及到保护公众免受由于建立核电站而产生的有害辐射影响，因此，所选定的核电站应保证在正常运行状态下，厂址附近的居民接受到的每年来自核电站的照射不得超过国家规定的剂量约束限值(25mSv)，并尽可能的保持在合理的、低的水平。

核电站中反应堆芯内的放射性物质总量及其释放参数是进行大气弥散研究的起始输入源项，而核电站的事故类型又可以分为设计基准事和严重事故，本工作中设定的起始输入源项重点参照了反应堆典型严重事故类型分类及对应释放的源项特征作为气载放射性物质大气弥散过程理论模拟的输入源项参数（表 1）。

表 1 福建省某核电站 PWR4 源项均匀持续释放

开始时间：0.0s 持续时间：28800.0s 释放高度：25.0m		
核素名	量/Bq	形态
^3H	2.55×10^{17}	气溶胶
^{131}I	2.71×10^{16}	气溶胶
^{132}I	2.77×10^{16}	惰性气体
^{133}I	2.98×10^{16}	气溶胶
^{134}I	1.12×10^{12}	气溶胶
^{135}I	3.63×10^{15}	气溶胶

^{131m}Xe	2.14×10^{15}	惰性气体
^{133}Xe	8.53×10^{18}	惰性气体
^{133m}Xe	1.29×10^{17}	惰性气体
^{135}Xe	2.54×10^{16}	惰性气体
^{138}Xe	1.58×10^{15}	惰性气体
^{134}Cs	7.93×10^{14}	气溶胶
^{136}Cs	3.08×10^{14}	气溶胶
^{137}Cs	8.79×10^{15}	气溶胶
^{85}Kr	1.34×10^{16}	惰性气体
^{85m}Kr	1.65×10^{17}	惰性气体
^{87}Kr	2.28×10^{12}	惰性气体
^{88}Kr	4.41×10^{15}	惰性气体
^{89}Sr	5.64×10^{16}	气溶胶
^{90}Sr	8.79×10^{15}	气溶胶
^{60}Co	9.19×10^{16}	气溶胶

在计算公众成员的辐射剂量时，考虑的主要有以下几种照射途径：空气浸没外照射、地面沉积外照射、水浸没外照射、吸入污染空气引起的内照射

和食入评价区域食用产物的内照射。为了简化计算和分类，在剂量估算中我们通常只考虑对总剂量贡献较大的核素组合^[4]，如表 2 所示。

表 2 各种气态照射途径中的主要核素组合

照射途径	关键核素
烟羽浸没外照射	^{60}Co , ^{85}Kr , ^{90}Sr , ^{131}I , ^{133}Xe , ^{137}Cs
地面沉积外照射	^{60}Co , ^{131}I , ^{137}Cs
通过皮肤吸收	^3H
吸入空气内照射	^3H , ^{60}Co , ^{90}Sr , ^{131}I , ^{133}Xe , ^{137}Cs
食入动植物产品内照射	^3H , ^{60}Co , ^{90}Sr , ^{131}I , ^{133}Xe , ^{137}Cs

2.2 计算结果

本文采用 MACCS1.5 程序对福建省某核电站发生类似于 PWR4 事故时(即在失水事故以后，堆芯冷却系统和安全壳喷淋注入系统失效，安全壳系统不能很好隔离但安全壳再循环喷淋和热量去除系统能去除安全壳大气中的热量)周围 80 公里内公众所受的辐射剂量进行了计算，根据“宁德统计年鉴”^[5]统计出了 2008 年核电站周围 80 公里内的人

口分布、动物分布、蔬菜作物生产面积等等，使计算尽可能的接近真实值。计算中考虑的器官包括全身、甲状腺、肺、骨内膜细胞、胃、红骨髓、大肠、肝、肾、睾丸、卵巢等 12 种，采用了相应的源项数据和地理气象数据及各种放射性核素的短期大气弥散因子、地面沉积因子、食物摄入量、剂量转换因子等有关参数分别计算得出了各种放射性核素(表 3)及各种气态照射途径(表 4)对附近居民所致的公众最大有效剂量。

表 3 采用 PWR4 源项计算的各种核素对附近居民所致的最大有效剂量(mSv/h)

核素	距离: 1~2km 方位: 下风向						所占份额 (%)
	吸入空气	空气淹没	地表沉积	食入植物	食入动物	合计	
H-3	3.78E-01	0.00E+00	0.00E+00	3.90E-01	2.67E-03	7.71E-01	97.11
Kr-85m	0.00E+00	7.00E-03	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	7.00E-03	0.88
Kr-87	0.00E+00	2.87E-07	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	2.87E-07	0
kr-88	0.00E+00	8.41E-04	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	8.41E-04	0.11
Kr-83m	0.00E+00	7.12E-11	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	7.12E-11	0
Kr-85	0.00E+00	1.19E-06	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	1.19E-06	0
Xe-131m	0.00E+00	2.71E-05	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	2.71E-05	0
Xe-133	0.00E+00	8.33E-03	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	8.33E-03	1.05
Xe-133m	0.00E+00	1.92E-06	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	1.92E-06	0
Xe-135	0.00E+00	2.65E-07	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	2.65E-07	0
Xe-135m	0.00E+00	1.58E-08	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	1.58E-08	0
Xe-137	0.00E+00	6.56E-09	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	6.56E-09	0
I-129	6.69E-14	1.15E-17	5.33E-13	4.34E-11	2.09E-13	4.42E-11	0
I-131	1.78E-06	2.98E-08	1.30E-05	3.66E-03	7.60E-12	3.68E-03	0.46
I-132	1.85E-07	4.01E-07	1.92E-06	1.77E-09	0.00E+00	2.50E-06	0
I-133	1.43E-06	1.34E-07	5.86E-06	2.10E-04	0.00E+00	2.17E-04	0.03
I-134	1.45E-07	8.04E-07	1.35E-06	2.88E-15	0.00E+00	2.29E-06	0
I-135	5.61E-07	3.97E-07	4.54E-06	2.80E-06	0.00E+00	8.22E-06	0
Cs-137	2.73E-07	0.00E+00	0.00E+00	1.14E-05	5.53E-08	1.16E-06	0
Sr-89	3.69E-06	1.50E-11	3.64E-09	1.69E-04	8.01E-08	1.72E-04	0.02
Sr-90	9.29E-07	0.00E+00	0.00E+00	1.54E-04	9.21E-07	1.55E-04	0.02
Cs-134	3.53E-06	1.47E-07	5.40E-04	1.86E-04	7.40E-07	7.29E-04	0.09
Co-60	3.89E-06	1.99E-07	1.42E-03	2.84E-04	1.27E-06	1.70E-03	0.21
合计	3.78E-01	1.61E-02	1.97E-03	3.95E-01	2.67E-03	7.93E-01	100.00
所占份额 (%)	47.60	2.04	0.25	49.77	0.33	100.00	/

由表 3 可见, 在核电站发生类似于 PWR4 事故时各种核素中经气态照射途径对附近居民个人所致最大剂量的核素为 ^3H , 为 $7.71 \times 10^{-1} \text{mSv/h}$, 它的贡献约占其剂量值的 97.11%。这可能是由于当

暴露于被氟化水污染的大气中时, 则会由于吸入和通过皮肤接触而摄入氟化水。氟化水通过皮肤很容易进入体液, 一旦在体内, 就跟所有体液很快达到平衡。

表 4 采用 PWR4 源项计算的各种气态照射途径对附近居民造成的最大有效剂量

途径	受照剂量 (mSv/h)	份额 (%)
吸入空气	3.78E-01	38.00
氡通过皮肤吸收	1.84E-01	20.21
空气淹没	1.61E-02	1.61
地表沉积	1.97E-03	0.19
食入动植物	3.97E-01	39.99
合计	9.77E-01	100

由表 4 所见,在气态照射途径中以食入动植物途径的贡献最大,约占其剂量值的 39.99%。由于公众可能受到的照射剂量与受照个人的年龄有关。对个人剂量评价,假定受照者是处在电厂非居住区边界和发展限制区外边界上的成人,个人剂量是释放核素通过上述途径所致剂量的总和;对集体剂量评价,受照者为评价区域内的全体居民,他们按年龄划分为幼儿(0—6岁)、儿童(7—17岁)和成人(17岁以上)三个年龄组。那么集体剂量就是评价区域内各年龄组的个人剂量与对应年龄组人数乘积的总和^[6],结合现有人口分布计算得出厂址半径 5km 和 10km 范围内短期集体有效剂量分别为 6.05×10^4 人·Sv/a 和 5.25×10^5 人·Sv/a。在采取应急防护行动中,若按照近场区最大有效剂量率 9.77×10^{-1} mSv/h 来计算的话,大约在事故后 25.5 小时左右达到我国隐蔽水平的中间值(25mSv)。

图 1 是 ^{131}I , ^{133}Xe , ^{134}Cs 这三种典型放射性核素随着下风向距离变化而变化的最大有效剂量。从图中可以看出三种核素的最大有效剂量都是随着下风向距离的增加而减少且其变化趋势几乎一样,在 0-3km 范围内下降的趋势最快然后再趋于平缓。放射性核素 ^{131}I 在 0-1km 处的有效剂量为 32.2mSv/a,而在 75.6-80.5km 处仅为 1.35mSv/a,在经过了距离为 80km 的大气扩散途中由 ^{131}I 所贡献的最大有效剂量减小了约 30 倍。而 ^{133}Xe 大约减

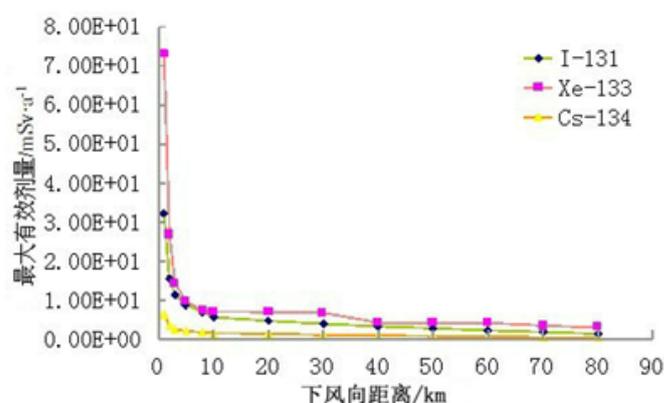


图 1 三种典型放射性核素随下风向距离变化的最大有效剂量

少了 24.7 倍, ^{134}Cs 是 17.8 倍。

3 结论

本文选取核电站周边 80km 范围内作为研究对象,模拟了 PWR4 事故条件下,典型放射性核素对核电厂区域形成的公众剂量负担,分析了不同放射性核素剂量贡献的差异性;模拟结果显示在核电站近场区域 (0~3km) 辐射剂量场变化速度最快,计算得出厂址半径 5km 和 10km 范围内短期集体有效剂量分别为 6.05×10^4 人·Sv/a 和 5.25×10^5 人·Sv/a,对居民所致个人最大有效剂量为 9.77×10^{-1} mSv/h,发现在该事故源项条件下,气态 ^3H 对公众的剂量贡献最大;根据模拟结果及剂量限值标准,给出了相应的应急防护行动建议。

参考文献:

- [1] U.S.NRC. Reactor Safety Study – An Assessment of Accident Risk in U.S. Commercial Nuclear Power Plants[R], WASH-1400 (1975).
- [2] U.S.NRC. Code Manual for MACCS2: User's Guide Volume 1[R]. NUREG/CR-6613. 1998.
- [3] H-N Jow, J.L.Sprung, J.A.Rollstin. MELCOR Accident Consequence Code System(MACCS) Model

Description[R]. SAND86-1562-Vol.2, 1990.

- [4] 潘自强, 王志波, 陈竹舟等. 中国核工业三十年辐射环境质量评价[J]. 北京: 原子能出版社, 1990
- [5] 宁德市统计局. 宁德统计年鉴 2009[M]. 北京: 中国统计出版社, 2009
- [6] 核事故应急情况下公众受照剂量估算的模式和参数[S], GB/T17982-2000

Calculation of Radiation Dose of Area Surrounding Nuclear Power Plant with MACCS during Sever Accident

ZENG Jun¹, LIU Shuhuan¹, TIAN Hao²

(1. Institute of Nuclear Science and Technology, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. China Nuclear Power Design Company. LTD, Shenzhen 518052, China)

Abstract: According to statistical data information of the population distribution, agriculture, farming and animal husbandry in the 80km long range area around a nuclear power plant in Fujian and the radiative source term released from the power plant during severe accident, the maximum equivalent dose distributions received by the public in the area are simulated with the program of MACCS1.5. The results show that radiation dose distribution near-field region(0~3km) of the nuclear power plant change fastest. The simulation values of the short-term collective effective dose within the radius of 5km and 10km regions are 6.05×10^4 person·Sv/a and 5.25×10^5 person·Sv/a, respectively. The calculation maximum individual effective dose value is about 9.77×10^{-1} mSv/h. However, it is found that the maximum dose contribution source to the public or individual comes from the gaseous state nuclide of ^3H . Then, the appropriate emergency protective action suggestions are offered in the work based on the simulation results and standard dose limits.

Key words: MACCS; Severe accident; Dose estimation; Nuclear emergency

现代城市遭 IND 袭击应对措施探讨

耿小兵, 陈琳, 绪梅, 王倩

(防化学院, 北京 102205)

摘要: 由于具有制造方便、杀伤范围大等特点, 粗糙核装置易于得到恐怖分子青睐, 极有可能在大城市中使用。与开阔地域相比, 城市中的建筑物会对粗糙核装置爆炸的毁伤效应产生两种影响: 一是对瞬时效应的遮挡; 二是对延时效应的屏蔽。二者都在一定程度上使粗糙核装置爆炸毁伤的地理范围得以缩减。另一方面, 由于城市人口密集, 居民伤亡的人数却有可能增加。本文在分析 IND 效应特点的基础上, 根据国外的研究结果, 从预防预防和应急响应两方面, 探讨了尽可能减少城市居民伤亡的具体应对措施。

关键词: 粗糙核装置; 核与辐射恐怖袭击; 核应急

文章分类: 核技术与公共安全及其应用的研究成果

1 引言

有学者指出^[1], 核与辐射恐怖袭击大致分为 3 种类型, 即引爆粗糙核装置、袭击或破坏核设施、利用炸药爆炸或特殊手段将放射性物质散布到环境中(如脏弹)。杨东^[2]等也采用风险分类-要素分析-风险排序的思路, 对北京市核与辐射恐怖事件风险进行了分析, 认为北京市发生核与辐射恐怖事件风险最大的场所为核研究机构, 最容易发生的核与辐射恐怖事件类型为涉及放射源的恐怖事件。然而, 在大城市中引爆粗糙核装置的可能性也不能完全排除。

由于各国对核武器控制都相当严格, 恐怖分子从核武器拥有国武器库直接得到一枚核武器非常困难, 甚至几乎是不可能的。但是, 他们获得易裂变材料并制造一个简易核爆炸装置比较容易, 主要原因如下:

(1) 制造 IND 的资料容易得到。如物理学家 Amory B. Lovins 在《科学》杂志自然版上发表了设计 IND 的所有物理数据。

(2) 制造 IND 的材料容易得到。随着核燃料再处理能力增加, 大量民用再处理厂分离的钚数量会迅速增加。恐怖分子一旦获得一定数量的分离钚(约 8kg), 将会尝试制造 IND。

(3) 制造 IND 的工艺要求不高。20 世纪 80 年代中期, 前美国核武器设计专家 J. Carson Mark, Theodore Taylor 和其他设计者估计: 制造粗糙核装置或许仅仅需要 3-4 个人就足以完成任务。

(4) IND 易于运输和引爆。恐怖分子制造的核装置重量很可能在 1t 或更重一些, 可由卡车、飞机或船只运载。他们制造的核武器不需要进行试验, 这些基本类型核武器的设计者可以有充分的信息, 可以秘密地生产和装配核武器。

虽然核与辐射恐怖事件属小概率事件, 而且在国内外反核与辐射恐怖力量的努力下, 至今为止也尚未发生, 而且在三种可能的方式中, 发生 IND 爆炸的可能性也最低。然而, 谁也不能担保 IND 袭击不会发生, 而一旦发生, 造成的后果必将是灾难性的。因此, 分析 IND 爆炸的毁伤效应与特点, 并采取相应的应急响应措施, 以使对居民的伤害效果最

小化，也显得十分必要。

2 城市环境下的核爆炸毁伤效应

与战场使用核武器相同，城市遭 IND 爆炸袭击同样会对城市建筑和居民产生几种重要的毁伤效应，包括光辐射、冲击波、早期核辐射、核电磁脉冲和放射性落下灰^[3, 4]。

2.1 光辐射

光辐射会使易燃物燃烧，进而引燃天然气或是破裂的输油管道或是油罐。火灾会破坏基础设施，对幸存者或是响应人员造成威胁，还可能会威胁到隐蔽居民或是待撤离人员。

核爆炸闪光会造成闪光盲，白昼条件下持续时间达几秒，接下来的几分钟内看物体都会有黑色的背景。如果核爆炸发生在夜间，人眼的瞳孔会自然扩大，闪光盲会达 30 分钟之久，影响距离达 24km，会导致严重的交通事故，进而导致交通阻塞。

2.2 冲击波

冲击波是核爆炸产生的主要毁伤效应之一。冲击波源于爆炸火球快速扩张生成的压力波。距爆心越远，冲击波超压及其传播速度越小，其经过距爆心第二公里约需 5 秒，因此，居民在这段时间内采取最基本的防护措施是可能的。

冲击波会对城市建筑物造成破坏，根据破坏程度的不同可将破坏区域划分为轻、中、重三种，各个破坏区之间没有明显的边界。一般来说，轻度破坏区内窗户的玻璃破碎，建筑物有轻微破坏；中度破坏区会有大量建筑物遭破坏、电线杆倒地、汽车被掀翻；重度破坏区将成为一片废墟。

2.3 核辐射与落下灰

核辐射是核爆炸的一个典型特征，具体分为早期核辐射和剩余核辐射。早期核辐射在传播过程中

会受到大气和建筑物的吸收、散射。建筑物会大大缩减早期核辐射的影响范围。然而，来自大气的反射会使居民产生急性放射病，甚至会在接下来的几周或是几个月内死亡。

落下灰的大部分辐射来自于爆炸生成的放射性核素，其半衰期可长达数月甚至数年。放射性烟云会上升，并被输送至下风方向很远的距离。落下灰模式不规则，因此难以预测。

放射性落下灰造成的污染会阻碍当地的响应行动。对地面辐射水平的监测是必要的。地面辐射水平结合烟羽模型的预测以及气象条件的测量，这些对于响应决策与行动至关重要。

2.4 核电磁脉冲

通常认为，当量为 10kt 的地面爆产生 NEMP 的影响范围不会超过 3-8km，这个范围内的车辆将无法行驶，通信设备会瘫痪，计算机元器件会遭破坏，水力和电力控制系统将无法正常工作。在此范围之外的通信站和对讲机仍能正常工作。

3 研究应对措施的必要性

粗糙核装置爆炸与核事故应急比较，有其自身的特点，比如：

(1) IND 爆炸事件更具突发性，它没有或者很少有什么先兆。这给应急响应增加了难度，要求更加快速和有效的响应；

(2) IND 爆炸事件的发生地点不可预知，可能发生在任何地方，不像核设施事故那样只发生在核设施所在的地方，这就要求各地都要做好预防和应急准备。特别是国家的政治、经济和文化中心城市、重点居民区等可能成为恐怖分子攻击的目标，更要做好应急准备。我国的核设施及其周边地区都已经有了或正在完善核与辐射应急准备，而没有核设施的地方基本没有相应的应急准备；

(3) IND 爆炸事件中的放射性源项难以预计。

在核事故中，可以由事故工况预估可能释放到环境中的放射性物质的核素组成和大致的数量。然而在 IND 爆炸事件中，人们不可能预先对放射性源项有任何了解，这无疑会增加应急响应的难度。

关于核爆炸的主要效应，冷战期间的实验与分析提供了坚实的科学基础，并开发了大量工具，获得了大量结果。这些工具也用于分析 IND 袭击情景以估计核爆炸瞬时毁伤效应和延时毁伤效应。然而，需要注意的是，过去的研究大多集中于核武器的现象与破坏效应，而很少针对其研究响应计划。

近年来，越来越多的分析人员和政策制定人员开始重视当地的医疗机构和最初响应人员爆后如何应对的问题。2006 年，美国 DHS 的 RNRR(Radiological and Nuclear Response and Recovery)专门启动了一个项目以为应对城市核爆炸和制定响应决策提供坚实的科学基础。项目第一阶段的成果集中体现在 2007 年 2 月的一个研讨会上，美国主要的核效应专家都参加了这个会议，目的在于确定爆后州和当地响应决策的影响因素。

4 应急响应措施

过去的研究表明，爆后 72 小时内采取积极的响应能够大大降低人员伤亡水平。城市中小当量核爆炸响应计划中，最为重要的莫过于制定有效的隐蔽与撤离策略。然而，所应采取的最佳策略却取决于多个因素，比如落下灰烟羽的性质、附近隐蔽体的屏蔽效果、以及从沾染区撤离的有效方式。

文献^[5, 6]利用 NUEVAC^[7]对 LA 发生 10kt 核爆炸的假想情景进行了深入研究。重点讨论了 LA 发生 10kt 核爆炸后的隐蔽撤离原则及其有效性，其目的是为制定城市响应计划提供技术支持。考虑了多种隐蔽撤离策略组合，以分析不同条件下的人员剂量水平，也通过在假想区内选取一系列示范点加以研究以凸显实际操作中的不足和不确定性所带来的影响。结果表明，如果附近有防护能力强的掩体，

扩展的就地隐蔽(shelter-in-place)方式鲁棒性最佳。若附近没有有效的屏蔽物，在正确的时间通知撤离能大大降低人员的整体照射剂量。然而，沾染区及撤离路线中存在的确定性使得撤离成为一项冒险的措施，即使是在良好知情撤离的条件下，也只有少数城市居民能大幅降低照射剂量。报告的主要结论如下：

1) 如果附近有屏蔽效果良好（屏蔽因子大于 10）的屏蔽体，就近隐蔽至少 24 小时；

2) 如果附近没有好的屏蔽体，先就近隐蔽，而后听通知撤离（此时应已得知最佳撤离路线）能大幅降低照射剂量。

3) 处于重度沾染区，辐射水平高而附近又无好的屏蔽体，撤离是主要的救命措施。这样的情况只限于城市中很小的范围。

4) 从屏蔽效果差的屏蔽体经外部转移到好的屏蔽体可大幅降低照射量，条件是爆后立即转移，而且转移时间要短。

以上建议可供我国制定针对城市中 IND 爆炸应急响应计划时参考。

5 预想预防措施

对核与辐射恐怖袭击的应急准备，国家已经做了大量工作。针对核与辐射恐怖袭击下的公众应急疏散，薛一江^[8]提出应当加强的几方面工作。具体到城市中 IND 爆炸，可从以下四方面着手预防工作，从而未雨绸缪，防患于未然：

5.1 健全组织

我国已经成立了核事故应急组织，负责核事故或辐射紧急情况应急工作以及应急准备、应急响应能力的保持和其他应急管理，主要有国家核事故应急组织、地方政府核事故应急组织、营运单位核事故应急组织和军队核事故应急组织等。

国外对恐怖事件的应急响应一般都纳入统一

的公共突发事件应急体制之内，应急指挥由地方政府与军队联合的组织机构负责。我国《国家突发事件总体应急预案》和专项预案《核应急预案》均没有明确核与辐射恐怖袭击时公众应急疏散的指挥问题。有人认为，应在反恐和应急办公室的领导下，由各级人防部门具体负责指挥公众的应急疏散。理由有三：1) 我国各级人防部门是由军队、各级政府以及各有关部门领导组成的综合性机构，是军政双重领导的部门，具有较为健全的市、区、街道指挥机构；2) 当地的人防部门大都建立了基于 GIS 的公众疏散指挥与辅助决策系统，包括发达的通讯网络和报警系统，同样胜任核与辐射恐怖袭击时公众应急疏散的指挥工作；3) 各级人防部门熟悉辖区公众、交通等情况，有能力协调其它部门，组织公众迅速疏散。

5.2 加强科研

国内科研人员已经进行了一些探索性的研究工作，包括防化研究院的张文仲^[9]、王善强^[11]等对 IND 威胁的评估，清华大学的李文茜^[12]进行的毁伤效应初步估算和防化研究院韩超^[13]对中子辐射效应的研究。然而，相比国外尤其是美国的研究，这些工作显得比较零散、不成系统，另外，还有大量的工作要做。比如：

(1) 开发或是改进核爆炸效应估算的相应模型和软件；

(2) 具体针对重点城市进行相关的毁伤估计，为制定屏蔽撤离计划提供参考；

(3) 研发对建筑物、车辆和人员的快速清污技术，及早进行鉴定、测试并且部署；

(4) 建立快速处置大量伴有放射性污染物的能力。

5.3 制定计划

(1) 完善相应的立法工作，把针对核与辐射

恐怖袭击的应急准备和应急响应工作纳入法制轨道；

(2) 制定中央、地方和一些可能遭受 IND 袭击城市的应急预案，包括公众应急疏散预案。

5.4 经常演习

(1) 再完美的预案，不通过演习的检验不可能就有很好的，应通过立法确定应急疏散预案的演习程序；

(2) 组织对应急响应人员的专业培训，明确公众应急疏散预案和疏散行动的组织指挥工作、责任到人；

(3) 加强关于核与辐射基础知识和反恐袭击可能造成的恐怖、忧虑和混乱，避免或减小事件的社会后果。

6 结论

核与辐射恐怖袭击的三种方式中，在大城市引爆粗糙核装置的可能性依然存在。虽然爆炸的瞬时效应受到遮挡、延时效应受到屏蔽，但其仍然可能造成城市居民的大规模伤亡和建筑的严重破坏。研究表明，爆后 72 小时内采取积极的响应能够大大降低人员伤亡水平。从应急响应的角度，本文结合国外研究结果，分析了制定屏蔽疏散策略、采取屏蔽疏散行动时需考虑的重要因素。另外，本文从健全组织、加强科研、制定计划与经常演习四个方面提供了未雨绸缪、防患于未然的建议。

参考文献：

- [1] ICRP. Protecting People Against Radiation Exposure in the Aftermath of a Radiological Attack. ICRP, 2004.
- [2] 杨东, 刘森林, 於凡. 北京核与辐射恐怖事件风险分析[J]. 中国安全科学学报, 2008, 18(6): 127-133.
- [3] Cross R. Planning Guidance for Response to a Nuclear Detonation[M]. 2010.

- [4] Buddemeier B R, Valentine J.E., Millage K K, et al. National Capital Region Key Response Planning Factors for the Aftermath of Nuclear Terrorism[R]. 2011.
- [5] Brandt L D, Yoshimura A S. Analysis of Sheltering and Evacuation Strategies for a Chicago Nuclear Detonation Scenario[R]. 2011(August).
- [6] Brandt L D, Yoshimura A S. Analysis of Sheltering and Evacuation Strategies for an Urban Nuclear Detonation Scenario[R]. Livermore, California: 2009(May).
- [7] Brandt L D, Yoshimura A S. NUclear EVacuation Analysis Code (NUEVAC): A Tool for Evaluation of Sheltering and Evacuation Responses Following Urban Nuclear Detonations[R]. 2009(November).
- [8] 薛一江, 朱万红, 汪剑辉. 核与辐射恐怖袭击下的公众应急疏散[J]. 辐射防护通讯, 2008, 28(5): 1-4.
- [9] 张文仲, 毛用泽, 邹士亚, et al. 核材料 Pu 用于 IND 可能性分析[C]//全国第六届核监测学术研讨会论文集. 2005.
- [10] 张文仲, 邹士亚, 毛用泽. 核恐怖事件中 IND 威胁评析[C]//全国第六届核监测学术研讨会论文集. 2005.
- [11] 王善强. 核与辐射恐怖事件及其应对策略[J]. 核电子学与探测技术, 2004, 24(1): 97-103.
- [12] 李文茜, 曾志, 李君利. 粗糙核装置袭击效应预测[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2009(2).
- [13] 韩超. 粗糙核装置(IND)核爆炸早期中子辐射效应研究[C]//全国计算物理学会第六届年会和学术交流会论文摘要集. 北京: 2007: 66.

Dissussion on Measures against IND Attack in Modern Cities

GENG Xiao-bing, CHEN Lin, XU Mei, WANG Qian

(Institute of Chemical Defense, Beijing 102205, China)

Abstract: Improvised Nuclear Device (IND) has some characteristics such as ease of manufacture and mass destruction, which attract terrorists to use it in modern cities. Two influences would huge city buildings pose on the effects of IND explosion. One is shielding to its prompt effect, the other is shelter to its fallout. Both of the influences can reduce the range of IND destruction to some extent. On the other hand, casualties may increase because of the intense population in modern big cities. Based on analysis of IND effects and related foreign research, measures of prevention and emergency response on how to reduce casualties in modern city are discussed in this article.

Key words: Improvised Nuclear Device (IND); Nuclear and Radiation Terrorist Attack; Nuclear Emergency

一种简单可行的放射性去污效能评估方法

陈琳¹, 郭立军², 耿小兵¹, 孙健¹, 王季红¹

(1. 防化学院, 北京 102205; 2. 海军陆战学院, 广东 广州 510430)

摘要: 放射性去污是核事故应急的一项重要任务, 评估去污效能对应急决策有重要意义。建立了放射性去污效能评估的指标体系, 提出了基于层次分析法和模糊综合评判的放射性去污效能评估方法。通过层次分析确定指标权重, 采用模糊综合评判法判定各层次目标的得分, 进而得到顶层目标的综合效能值, 能够为去污决策提供依据。

关键词: 放射性去污; 效能评估; 指标体系; 层次分析法; 模糊综合评判

文章分类: 核技术与公共安全及其应用的研究成果

放射性去污是核事故应急的一项重要任务。针对具体的去污任务, 根据可用的去污方法可以形成多个备选去污方案。对备选方案进行效能评估得到方案的优劣排序, 可为选择最优方案提供依据。放射性去污效能是综合分析各影响因素得到的去污效用值, 是去污方案满足任务需求程度的量度。对去污方案进行效能评估能够得到方案优劣的定量认识, 为指挥部门提供决策支持。

本文分析了放射性去污效能的影响因素, 建立了去污效能评估的指标体系。基于层次分析法和模糊综合评判, 提出了一种简单可行的放射性去污效能评估方法。

1 评估指标体系的建立

评估指标体系的建立是对去污效能进行有效评估的前提, 是效能评估的基础性工作。去污效能评估指标体系的建立要遵循客观性、科学性和可操作性原则。

根据对去污效能影响因素的分析, 初步建立去污效能评估指标体系, 如表 1 所示。

表 1 去污效能评估指标体系

顶层目标	一级指标	二级指标
去污效能 A	去污能力 B_1	去污率 C_{11}
		去污速度 C_{12}
		二次污染风险 C_{13}
	保障能力 B_2	装备数量和性能 C_{21}
		人员操作能力 C_{22}
	防护能力 B_3	人员防护能力 C_{31}
装备防护能力 C_{32}		

2 评估方法

2.1 底层指标权重的计算

2.1.1 构造两两比较判断矩阵

指标体系的层次关系确定了上下层元素之间的隶属关系。如以上一层元素 C 为准则, 支配的下一层的元素为 u_1, u_2, \dots, u_n , 按它们对于准则 C 的相对重要性赋予相应的权重。针对准则 C , 两个元素 u_i 和 u_j 的重要性采用 1-9 及其倒数的标度方法赋值, 这样对于准则 C , n 个比较元素构成了一个两两比较判断矩阵^[1]:

$$A = (a_{ij})_{n \times n} \quad (1) \quad \text{比例标度。}$$

其中, a_{ij} 就是元素 u_i 和 u_j 相对于准则 C 的重要性的

表 2 1-9 标度的含义[1]

标 度	含 义
1	表示两个指标相比, 具有同样重要性
3	表示两个指标相比, 前者比后者稍重要
5	表示两个指标相比, 前者比后者明显重要
7	表示两个指标相比, 前者比后者强烈重要
9	表示两个指标相比, 前者比后者极端重要
2, 4, 6, 8	表示上述判断的中间值
倒数	若指标 i 与指标 j 的重要性之比为 a_{ij} , 那么指标 j 与指标 i 的重要性之比为 $a_{ji}=1/a_{ij}$

2.1.2 单一准则下元素相对权重的计算

根据 n 个元素 u_1, u_2, \dots, u_n 对于准则 C 的判断矩阵 A , 求出它们对于准则 C 的相对权重 w_1, w_2, \dots, w_n 。首先计算权重, 然后检验判断矩阵的一致性。

解判断矩阵 A 的特征根:

$$Aw = \lambda_{\max} w \quad (2)$$

其中 λ_{\max} 是 A 的最大特征根, w 是相应的特征向量。所得到的 w 经归一化后就可作为权重向量。

需要对判决矩阵进行一致性检验。

首先需要计算一致性指标 (CI, consistency index) [1]:

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (3)$$

然后查找平均随机一致性指标 (RI, random index), 如表 3 所示。

表 3 平均随机一致性指标 RI[2]

矩阵阶数	1	2	3	4	5	6	7	8
RI	0	0	0.52	0.89	1.12	1.26	1.36	1.41
矩阵阶数	9	10	11	12	13	14	15	
RI	1.46	1.49	1.52	1.54	1.56	1.58	1.59	

最后计算一致性比例(CR, consistency ratio)[1]:

$$CR = CI/RI \quad (4)$$

当 $CR < 0.10$ 时, 认为判断矩阵的一致性是可以接受的, 否则应对判断矩阵作适当修正。

2.1.3 计算各层元素对目标层的合成权重

上一步得到一组元素对其上层某元素的权重

向量。最终要得到各元素对于总目标的相对权重, 特别是最底层元素对于目标层的权重, 即“合成权重”。合成权重的计算要自上而下, 将单准则下的权重进行合成, 并逐层进行总的一致性检验。

假定已算出第 $k-1$ 层上 n_{k-1} 个元素相对总目标的权重向量[1]:

$$w^{(k-1)} = (w_1^{(k-1)}, w_2^{(k-1)}, \dots, w_{n_{k-1}}^{(k-1)})^T \quad (5)$$

第 k 层上 n_k 个元素对第 $k-1$ 层上第 j 个元素为准则的权重向量设为:

$$p_j^{(k)} = (p_{1j}^{(k)}, p_{2j}^{(k)}, \dots, p_{n_{k-1}j}^{(k)})^T \quad (6)$$

其中不受 j 支配的元素的权重为零。令:

$$P^{(k)} = (p_1^{(k)}, p_2^{(k)}, \dots, p_{n_{k-1}}^{(k)})^T \quad (7)$$

这是 $n_k \times n_{k-1}$ 的矩阵, 表示 k 层上元素对 $k-1$ 层上各元素的排序, 那么第 k 层上元素对总目标的合成权重向量 $w^{(k)}$ 为^[1]:

$$w^{(k)} = (w_1^{(k)}, w_2^{(k)}, \dots, w_{n_k}^{(k)})^T = P^{(k)} w^{(k-1)} \quad (8)$$

或:

$$w_i^{(k)} = \sum_{j=1}^{n_{k-1}} p_{ij}^{(k)} w_j^{(k-1)} \quad i=1, 2, \dots, n_k \quad (9)$$

一般的有:

$$w^{(k)} = P^{(k)} P^{(k-1)} \dots w^{(2)} \quad (10)$$

其中 $w^{(2)}$ 是第二层上元素对总目标的权重向量。

同样需要从上到下逐层进行一致性检验。若得到以 $k-1$ 层上元素 j 为准则的一致性指标 $CI_j^{(k)}$, 平均一致性指标 $RI_j^{(k)}$ 以及一致性比例 $CR_j^{(k)}$, $j=1, 2, \dots, n_{k-1}$, 那么 k 层的综合指标 $CI^{(k)}$, $RI^{(k)}$, $CR^{(k)}$ 为:

$$CI^{(k)} = (CI_1^{(k)}, CI_2^{(k)}, \dots, CI_{n_{k-1}}^{(k)}) w^{(k-1)} \quad (11)$$

$$RI^{(k)} = (RI_1^{(k)}, RI_2^{(k)}, \dots, RI_{n_{k-1}}^{(k)}) w^{(k-1)} \quad (12)$$

$$CR^{(k)} = \frac{CI^{(k)}}{RI^{(k)}} \quad (13)$$

当 $CR^{(k)} < 0.10$ 时认为递阶层次结构在 k 层以上的所有判断具有整体的一致性。

2.2 确定底层指标得分

2.2.1 建立评估指标的评语集

指标体系中的每一个评估指标对去污效能的影响可划分为 4 个等级, 组成评语集 V :

$$V = \{v_1, v_2, v_3, v_4\} = \{\text{优, 良, 中, 差}\} \quad (14)$$

2.2.2 单指标模糊评判

单独从一个指标出发进行评判, 以确定评判对象对评语集 V 的隶属程度, 即为单指标模糊评判。设评判对象按指标集 U 中第 i 个指标 u_i 进行评判, 对评语集中第 j 个元素 v_j 隶属程度为 r_{ij} , 则 u_i 的评判结果可用模糊集合式表示^[3]:

$$R_i = \frac{r_{i1}}{v_1} + \frac{r_{i2}}{v_2} + \dots + \frac{r_{in}}{v_n} \quad (15)$$

或简记为一维模糊向量的形式:

$$R_i = [r_{i1}, r_{i2}, \dots, r_{in}] \quad (16)$$

式中, n 为评语集中元素的个数。若指标集 U 中有 m 个指标, 与 U 对应的 m 个单指标评判值 R_i 可构成一个关于指标集 U 的评判矩阵 R :

$$R = \begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ \vdots \\ R_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \cdots & r_{mn} \end{bmatrix} \quad (17)$$

对去污效能的单指标模糊评价值, 采用专家组来确定。对于某指标, 根据去污任务需求, 由 10 位专家进行评估, 若有 5 人认为优, 4 人认为良, 1 人认为中, 没有人认为差, 则该指标的评价值为 $\{0.5, 0.4, 0.1, 0\}$ 。

2.3 确定效能评价等级

2.3.1 模糊综合评判

设模糊评判矩阵用 R 表示, 权重向量用 w 表示, 则综合评判结果 B 为:

$$B = (b_1, b_2, \dots, b_n) = w \cdot R$$

$$= (w_1, w_2, \dots, w_m) \cdot \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \cdots & r_{mn} \end{bmatrix} \quad (18)$$

根据最大隶属原则从综合评判模糊向量 B 中选择最大值 b_j 对应的评语 v_j 作为总的效能评估结果。

2.3.2 等级评判

在去污效能评价中, 为了便于量化对比, 可

分为4个等级：A级，效能为优；B级，效能为良；C级，效能为中；D级，效能为差。对应的评估结果分别为：90-100分、70-90分、50-70分、30-50分。

由模糊综合评判得出的评判结果是等级模糊子集 B ，相对于各等级 v_j 规定的参数列向量为 $C = (c_1, c_2, \dots, c_n)^T$ ，以4个等级为例，取 $C = (90, 70, 50, 30)^T$

则等级参数评判结果为：

$$A = B \cdot C = (b_1, b_2, \dots, b_n) \cdot \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ \vdots \\ c_n \end{bmatrix} = \sum_{j=1}^n b_j \cdot c_j \quad (19)$$

对多个备选去污方案逐一进行效能评估，对比各方案的评估效能值，可得出方案的优劣排序。

3 结论

本文尝试建立核应急放射性去污效能评估的指标体系，基于层次分析法和模糊综合评判方法评估去污方案的综合效能，得出量化的效能评估值，能够为指挥部门提供决策依据。

参考文献：

- [1] 王莲芬, 许树柏. 层次分析法引论[M]. 北京: 中国人民大学出版社, 1989
- [2] 许树柏. 实用决策方法——层次分析法原理[M]. 天津: 天津大学出版社, 1988
- [3] 肖位枢. 模糊数学基础及其应用[M]. 北京: 航空工业出版社, 1991

A Simple and feasible Method of Effectiveness Evaluation on Radioactive Decontamination Action

Chen Lin¹, Guo lijun², Geng xiaobing¹, Sun jian¹, Wang jihong¹

(1. Institute of Chemical Defense, Beijing 102205, China;

2. Naval Marine Academy, Guangzhou of Guangdong Prov. 510430, China)

Abstract: Radioactive decontamination is a vital task in nuclear emergency response. The assessment of decontamination effectiveness is of great importance to decision-making. An index system for effectiveness evaluation of radioactive decontamination action in nuclear emergency response is produced. A method of decontamination effectiveness evaluation based on analytic hierarchy process and fuzzy comprehensive evaluation is presented. Index weights are determined through analytic hierarchy process. And scores of objects in each hierarchy are judged by fuzzy comprehensive evaluation. Then comprehensive effectiveness of the top object can be obtained, which can offer a basis for decision-making of decontamination action.

Key words: radioactive decontamination; effectiveness evaluation; index system; analytic hierarchy process; fuzzy comprehensive evaluation

宇宙射线 μ 子成像检测技术研究进展

王丽萍, 肖洒

(中国工程物理研究院, 四川绵阳市 621900)

摘要: 综述了近年来国内外宇宙射线 μ 子成像检测技术的发展与进步, 介绍了该技术的原理和优势及其图像重建中运用的主要算法, 简述了该技术的主要应用研究并对该项技术在核材料检测中的应用前景进行了展望。

关键词: 核材料; 探测; μ 子; 综述

文章分类: 核技术与公共安全及其应用的研究成果

自 1936 年实验物理学家安德森发现 μ 子以来, 研究人员已将 μ 子的自旋转动和穿透物质后的能量衰减广泛应用于表面物理、辐射化学、化学动力学和地质结构等的研究。2003 年, LANL 在 Nature 上发表简讯称^[1], 模拟和实验结果表明, 利用 μ 子的多重库伦散射可以探测隐藏在集装箱中核材料, 立刻引起世界上许多科学家广泛关注, 由此也掀起了 μ 子在核探测领域的研究应用的热潮。因为, 迄今为止还没有更好的技术手段可以在保证正常生产运输的情况下完成核材料的监控工作: 常规的检测装置如改进的中子和 γ 射线检测仪等虽然具有高灵敏度, 但对于少量封装良好的核材料则无法很好地发挥作用; X 射线穿透致密物质的能力有限, 探测工程复杂, 其准确性严重依赖操作者的经验技术, 测量过程中还会带来附加辐射剂量, 限制了它的广泛应用^[2]。

随着当今世界政治、军事版图的急剧变化, 核材料走私的日益猖獗, 需要开发一种新型高效、既可以维护边境安全又不干扰正常贸易的检测技术^[3]。宇宙射线 μ 子成像检测技术的主要研究领域便是核材料的探测, 该技术在核材料的监控方面具有很大优势。与传统的检测成像技术相比, μ

子成像检测技术不仅准确性高、可以穿透所有物质, 而且成本低、速度快、没有辐射危害。由此看来, μ 子是非常值得开发应用的天然资源^[4]。

1 μ 子成像检测技术的原理及特征

1.1 μ 子的来源及性质

宇宙射线与地球大气层的原子核相互作用会生成高能的 μ^+ 和 μ^- 粒子。 μ 子是轻子, 其通量和能量巨大, 到达地面时每平方米海平面上每分钟平均入射约 10000 个 μ 子, 其平均能量在 3 GeV ~4GeV, 相当于医学用的 X 射线能量的几百万倍, 可以穿透 2m 厚的铅, 更高能量的 μ 子甚至可穿透到地面下几 km 的深处。 μ 子寿命为 2.197×10^{-6} s, 是不稳定的粒子中除中子外平均寿命最长的粒子。由于 μ 子质量是电子质量的 206.77 倍, 其辐射损失远远小于电子, 在穿过某种物质时, μ 子能量损失主要来自原子的电离作用和与原子核发生的库仑散射, 因此具有很强的穿透能力。

1.2 技术原理

μ 子穿透物质时会发生三种行为, 即多重库仑散射、能量损失和终止。被用作 μ 子成像检测的主要作用是多重库仑散射^[5]。

当 μ 子通过物体时, 与物体中的原子不断发生库仑散射, 它的方向会发生小角度的偏转, 当最终穿透物体时, 累计达到 θ 角, 这种效应叫做多重库仑散射。 μ 子成像检测技术主要利用这一散射过程来探测核材料。由于 μ 子与物质原子核发生多次库仑散射后的角度偏离与物质的原子核电荷数及密度紧密相关, 宇宙射线 μ 子成像检测技术便利用这一特征来辨别探测区域是否有高 Z (原子序数) 物质的存在^[6]。

多重库仑散射使得 μ 子在物质中的迁移具有随机性, μ 子通过物质后由于多重库仑散射产生的累积散射角 θ 的分布近似满足均值为零的高斯分布:

$$\frac{dN}{d\theta_x} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\theta_0} e^{-\frac{\theta_x^2}{2\theta_0^2}} \quad (1)$$

$$\sigma_\theta \cong \frac{13.6\text{MeV}}{\beta cp} \sqrt{\frac{L}{L_{\text{rad}}}} \left[1 + 0.038 \left(\frac{L}{L_{\text{rad}}} \right) \right] \quad (2)$$

式(1)和式(2)中: L 为被穿透物体的厚度; L_{rad} 为被穿透物体的辐射长度; p 为 μ 子的动量; β 为 μ 子的速度; θ 为偏转弧度; c 为光速。通常, 随着原子序数 Z 值的增加材料的辐射长度递减^[7-9]。

在得到足够多的 μ 子的入射位置、入射方向、出射位置和出射方向以后, 对这些信息进行处理, 就可以推测被探测物体的各处的散射密度 λ 。散射密度的定义是这样的:

$$\lambda = \left(\frac{13.6}{p_0} \right) \frac{1}{L_{\text{rad}}} \quad (3)$$

通过散射密度的分级可以区别材料的种类: 将 $0.5 < \lambda < 5$ 的物质定义为低 Z 物质; $5 < \lambda < 30$

的物质为中等 Z 物质; 而 $\lambda > 30$ 的物质则为高 Z 物质, 也就是核材料所处的范围^[8]。而对于散射密度相同的材料, 还可通过测量 μ 子通过单位长度材料的能量损失对其进行进一步区分^[9]。

1.3 μ 子成像检测技术的优势

1.3.1 穿透能力强

X 射线、 γ 射线和中子穿透高 Z 物质能力有限, 尤其是对核材料进行少量分装和良好屏蔽的情况下, 而宇宙线 μ 子是一种通量大、穿透性极强的高能带电粒子, 因此利用它可以检测防护层内部的重核元素材料。

1.3.2 无辐照危害

传统的探测技术往往会引入额外的放射源, 而 μ 子成像检测技术使用的是天然存在的 μ 子, 因此不会对人体和被测物体带来额外的辐照损害。

1.3.3 检测时间短、准确性高

μ 子探测系统自动化程度高, 对人员的依赖大大减小, 可以在较短时间内给出高 Z 材料的位置和形状特征, 漏检和误检概率极低。

2 μ 子成像检测系统装置

2.1 装置结构

LANL 早期研制的小型 μ 子成像检测系统是通过在有效检测区上下分别放置两个位置灵敏探测器, 通过探测器上 X、Y 两个正交坐标来准确记录 μ 子的入射位置以及入射方向^[7]。此后, LANL 于 2004 年又研制出一种新型的小型材料探测系统, 如图 1 所示。该装置在原有探测装置的基础上, 在出射位置探测器下设置动量检测区, 即在探测区中间加入已知材料和厚度的板, 通过计算

粒子通过前后的动量来估算其能量，大大提高了 μ 子成像的效率和准确性^[10]。

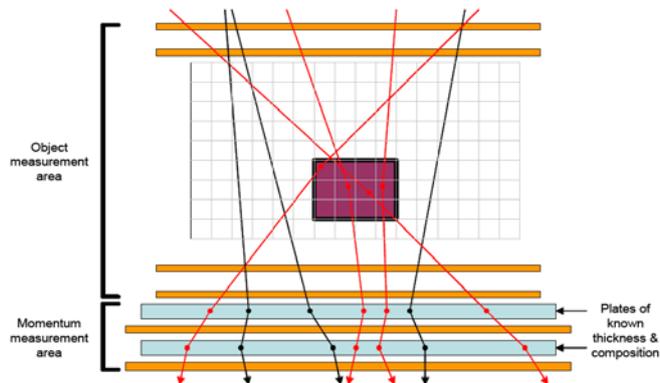


图 1. 宇宙射线 μ 子成像检测系统装置的改进

现在，LANL 已经成功开发出大型试验样机，通过在不同场景下采用不同的模拟方法、图像重建以及目标检测方法对目标物体进行探测，获得了检测核材料方法灵敏度的数据，并有效解决了实验中出现的如探测器的位置分辨率、系统成像时间延迟等问题^[11]。结果显示这种装置可以通过 μ 子触发器产生足够大的信号以检测高 Z 物质，可以做到提取个别 μ 子散射角的信息用以检测隐藏在低 Z 物质中 Z 值不是特别高的材料。

2.2 检测器

对于 μ 子，需要检测的包括能量损失和散射两方面的信息。相对而言散射信息更容易进行精确测定。常见的 μ 子探测器有漂移管和气体电子倍增器两种。

2.2.1 漂移管

漂移管是一种气体检测器。它们是轻金属制成的圆柱体，中心有一根细金属丝穿过。当 μ 子进入管道后使气体电离，引发电子雪崩，直至电离出的电子到达中心金属丝为止。根据电子向金属丝漂移所用时间，可以确定 μ 子的位置。2009年，LANL 研制成功大型漂移管探测器并建立了一套实时追踪算法，目前这套装置及算法在边境

安检方面得到了实验验证。该装置包括 12 根直径为 0.05m、长为 3.65m 的漂移管，有效探测区上下的探测器上分别分布着 3 个正交 X、Y 坐标，中间以细铁丝延伸，其位置分辨可达 $400\mu\text{m}$ ^[12]。该装置结合 GEANT/ML/EM 算法对目标进行三维重建，有效降低了背景干扰，可以在复杂背景中对 1000cm^3 的核材料进行快速、准确检测，17s 的扫描时间可达到 90% 以上的准确率^[13]。

2.2.2 气体电子倍增器

气体电子倍增器是一种新的微型气体腔检测器。气体腔检测器一般会放大带电粒子与气体碰撞产生的电子，测量电子雪崩到达信号感应带时的空间坐标。由于使用空间信息代替时间信息，其分辨可达约 $50\mu\text{m}$ 。目前 Florida 技术研究所的高能物理实验室已经制作出采用 GEM 检测器的 μ 子成像系统原型样机，并把采集得到的数据作为重建算法的输入数据，代替从模拟程序得到的数据^[14]。

3 主要重建算法

图像重建算法是宇宙射线 μ 子成像检测系统的关键难点，不同的算法会对系统的检测效率、图像质量以及分析结果的准确性产生直接影响。目前，常用的有三类重建算法：以最近点法（PoCA）为代表的径迹重建算法、最大似然法（MLS）和以期望最大化法（EM）为代表的迭代重建算法。

3.1 PoCA 算法

PoCA 是 LANL 开发的一种初级的、启发式算法。该算法的基本思想是将 μ 子通过目标物中的多重库伦散射简化为发生在某一点处的单次库伦散射。该算法通过作出 μ 子入射和出射轨迹的投影线，寻找两条线上最近邻的点，并将连接这

两点的线段中点作为散射点，同时测量入射线和出射线之间的夹角作为散射角。

PoCA 算法简单，容易实现，成像速度快，可进行二维或者三维的重建。但是该算法对于单个目标来说其重建结果往往比其实际尺寸大，这是因为射线交叉的平均点位于通过这段材料的射线的中点上，对于一个大块材料来说其射线交叉点往往倾向于向其中心集中，所以进行模拟时其中心附近的材料也会被错误地归类于高 Z 材料；除此之外，该算法成像质量较差，只适用于几何构造简单的物体，对于形状复杂的物体该算法将不再适用。由此看来，还需对 μ 子径迹的位移、入射和散射之间的最小距离等问题进行深入的研究和探讨^[8]。

3.2 MLS 算法

虽然 PoCA 算法可以沿射线路径大致推算出物体所处位置，但由于多重散射信息源固有的随机性，直接应用代数法和迭代法进行图像重建是不可能的。应用 MLS 算法结合目标物体统计模型的代数法，可以实现目标物体的完美重建。

研究^[6]在相同的模拟条件下分别以 PoCA 算法和 MLS 算法进行图像重建，箱子中从左到右依次放置 10cm^2 的铀块、铁块、混凝土块，测试空间中充满空气。该研究中 MLS 算法需要进行 49 次迭代才能发现目标物，但是重建图像的分辨率优于 PoCA 算法，重建后的散射密度值分别为铀 88，铁 14，混凝土块 2 mrad/cm^2 ，其真值分别为 78，14 和 2 mrad/cm^2 ，二者实现了较好吻合。

MLS 成像质量很好，但是它一次迭代的运算量非常庞大、运算时间长而且收敛速度比较慢，这极大地限制了它的应用。所以对其进行加速是十分有必要的。为了加快收敛速度，减少运算时间，则必须要寻找一个尽量接近真实收敛点的初始值。由于 PoCA 算法计算十分方便，算法简单，

容易实现，耗时很短，成像速度又快，虽然重建的精度不够高，但是大体的上位置是正确的。由此，清华大学用 PoCA 算法的结果作为 MLS-EM 重建算法的初始值，并结合在核医学领域中十分常见的 OSEM 重建算法，即将结果分为 B 个有序子集，入射 10000 个 μ 子，用每个子集分别对图像进行迭代更新，大大提高了运算速度，像素达到 2500^[16]。

3.3 EM 算法

EM 算法是寻找某种概率模型参数的最大似然估计，而该模型依赖于其他一些不可直接测量的参数。它是一种迭代算法，通常分为两步：第一步是 E 步，把模型的现有估计作为“隐蔽”参数，计算期望对数似然值；第二步是 M 步，寻找使得前一步的期望对数似然值达到最大而对应的参数，这些参数再次回传到 E 步作为新的“隐蔽”参数，开始新一轮循环，直至参数收敛。该算法主要有以校正值的平均来更新 λ 的平均数期望最大化法和以校正值的中位数来更新 λ 的中位数期望最大化法。

2007 年，LANL 开发了 EM 迭代算法用于形状复杂物体的探测，分别采用平均数期望最大化法和中位数期望最大化法进行图像重建，入射 240000 个 μ 子时像素可达 32000，图像重建结果如图 2 所示。由于每个像素在每一次迭代中都独立更新，并且并行执行都相当可行，所以该算法可实现目标物体的实时重建。研究人员认为该算法中探测器的空间分辨率（约几百微米）对重建结果不会产生太大影响，但成像时间将影响 μ 子动量的精确计算^[17]。

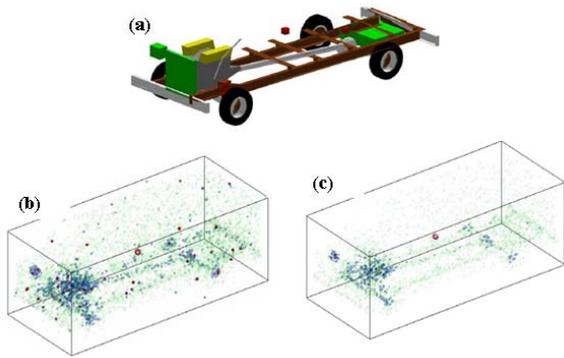


图 2. EM 算法重建结果：(a) 物体的几何构型；(b) 平均数期望最大化法；(c) 中位数期望最大化法

4 已开展的应用研究

4.1 地质、火山活动探测

从 20 世纪中后期开始，考古学家、地球物理学家们就开始利用 μ 子成像技术来探寻古建筑、地球内部岩层的结构组成。当时，主要采用的是传统的吸收射线成像技术，即通过测量 μ 子通过材料后的能量衰减程度来推算材料的厚度或密度。1995 年，研究人员提出了将 μ 子成像用于火山研究的想法。2007 年，Hiroyuki K.M. Tanaka 等人^[18]证实了该技术用于火山探测的可行性并获得了第一张火山的 μ 子成像图，通过研究火山口熔岩数量、密度结构的变化来研究火山喷发，如果熔岩表面上升，就意味着火山即将爆发。

4.2 核材料监控

到目前为止，宇宙射线 μ 子成像检测技术的主要应用便是核材料的监控和探测。不同于利用 μ 子在物质内部的吸收谱进行的成像技术，LANL 于上世纪九十年代便开始开展利用 μ 子的多重库伦散射效应进行的散射谱成像的研究，以此来探测高 Z 物质。早在 1996 年 LANL 便建造和测试了一台小型的 μ 子成像检测系统的原型样机(扫描区域为 6 英尺×6 英尺)，并用该样机进行

了高 Z 材料探测的演示验证实验，但直到 2003 年 LANL 才公开报道利用自然界本身就存在的 μ 子成功对中等到大尺寸物体的射线成像技术^[19]。在早期研究中，LANL 以 PoCA 算法结合计算机模拟，根据所获得的高 Z 材料所处位置处的散射数据以及无高 Z 材料的地方的散射数据，将高 Z 材料所处位置同其他位置区分开来。用蒙特卡罗模拟表明，利用他们的装置结合这种算法，如果大量集装箱中有 3% 含有核材料，那么 60s 内就可将它们识别出来，其错误率小于 3%；对于普通的没有高密度材料的集装箱，经 20s 测量就可放行；此外，增加成像时间可以对大宗货物中隐匿的微小核材料进行更准确地定位。此后，LANL 联合美国决策公司研发出用于检测车辆和集装箱的“守护者 MT”系统，并于 2007 年签署合作开发协议以使该技术实现商品化。研究人员预计 MT 系统不仅能够区分高 Z 材料和中 Z 材料，还能区分特种核材料中的其它高 Z 材料。现在研究者正设法将“守护者 MT”系统与中子探测和 γ 射线探测技术相结合，并在系统中配备各种卡车、小汽车、集装箱和拖车模型图像库，以提高系统性能和检测效率，降低和排除误报。

在国内，清华大学也非常关注 μ 子成像技术的研究，对探测器的偏移方式以及具体确定偏移量的大小进行了较为系统的研究并且提出了相应的探测器校正方法^[20]。此外，对 MLS 和 MLSD 图像重建算法进行了改进，较大的提高了图像重建速度^[21]。在完成 μ 子成像检测硬件系统之前，清华大学还开发了一套针对真实硬件系统的模拟系统，开展 μ 子成像方法的研究。这些对于宇宙射线 μ 子成像技术早日投入实际应用来说具有积极的意义。

4 结束语

作为一项新兴的技术，美国、英国、日本、

中国等国家相继投入大量人力物力对 μ 子成像检测技术进行研究。目前, 利用 μ 子进行地质结构的研究已相对成熟, μ 子在核材料监控方面的研究应用正在大力开展。但是在看到 μ 子成像技术的优势与价值的同时, 还必须重视其自身存在的缺点和问题。首先便是如何在复杂环境下降低检测背景和噪声、校正探测器误差, 从而获得准确有效的实验数据; 其次是如何在减少扫描时间的同时提高系统的准确性, 保证出入境口岸的安全与效益; 另外, 目前检测系统中运用的算法和配套软件依然不够成熟, 不能实现足够高的检测效率和准确性。随着这些问题进一步解决和完善, μ 子成像检测技术必将在核材料探测、医学、地质勘查等诸多领域发挥重要作用。

参考文献:

- [1] K. N. Borozdin, Gary E. Hogan, Christopher Morris. et al, Radio graphic imaging with cosmic-ray muons [J]. Nature, 2003, 422: 277-278.
- [2] 庞洪超, 刘森林, 王红艳, 等. 宇宙射线 μ 子探测裂变核材料的模拟研究 [J]. 辐射防护, 2011, 31(2):72-75.
- [3] 潘自强, 陈竹舟, 叶常青. 核和辐射恐怖事件后果的防护及其防范[J]. 核科学与工程, 2005, (1): 1-13.
- [4] E.I. Esch, T.J Bowlesa, A. Hime. et al. The cosmic ray muon flux at WIPP [J] . Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 2005 (538 A): 516-525.
- [5] L.J. Schultz. Cosmic ray muon radiography for contraband detection[J]. In Proceedings of Acc., 2003.
- [6] L.J. Schultz. Cosmic ray muon radiography [D]. Ph.D. dissertation, Portland State Univ., Portland, 2003.
- [7] Tom Asaki, Rick Chartrand. et al. Detecting nuclear materials from cosmic-ray muon scattering [J] . Mathematical Modeling and Analysis, Los Alamos National Laboratory,2006.
- [8] William C. Priedhorsky, Konstantin N. Borozdin, Gary E. Hogan. et al. Detection of high-Z objects using multiple scattering of cosmic ray muons[J]. Review of Scientific Instrument, 2003, 74(10): 4294-4297.
- [9] Konstantin Borozdin, Thomas Asaki, Rick Chartrand. et al. Information extraction from muon radiography data[J]. International Conference on Cybernetics and Information Technologies, Systems and Applications: CITSA, 2004:158-172.
- [10] L.J. Schultz, K.N. Borozdin, J.J. Gomeza, et al. Image reconstruction and material Z discrimination via cosmic ray muon radiography[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 2004, (519): 687-694.
- [11] Konstantin Borozdin, Thomas Asaki, Rick Chartrand. et al. Cosmic ray muon tomography and its application to the detection of high-Z materials[J]. Los Alamos National Laboratory, 2004, 72:1-7.
- [12] J. A. Green, C. Alexander, T. Asaki. et al. Optimizing the tracking efficiency for cosmic ray muon tomography [J]. 2006 IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record, 2006.
- [13] C.L. Morris, C.C. Alexander, J.D. Bacon. et al. Topographic imaging with cosmic ray muons[J]. Science & Global Security, 2009, 16 (1):37-53.

- [14] Kondo Gnanvo, LeonardV, GrassoIII. et al. Imaging of high-Z material for nuclear contraband detection with a minimal prototype of a muon tomography station based on GEM detectors[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2011 (652): 16-20.
- [15] Richard Claude Hoch. Advances in cosmic ray muon tomography reconstruction algorithms [D]. Ph.D. dissertation, Florida Institute of Technology, 2009.
- [16] 刘圆圆, 赵自然, 陈志强, 等. 用于宇宙射线 μ 子成像的MLS-EM重建算法加速研究[J]. CT理论与应用研究, 2007, 16(3):1-5.
- [17] Larry J. Schultz, Gary S. Blanpied, Konstantin N. Borozdin. et al. Statistical reconstruction for cosmic-ray muon tomography[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2007, 16(8): 1985-1993.
- [18] Hiroyuki K.M. Tanaka, Toshiyuki Nakano, Satoru Takahashi. et al. High resolution imaging in the inhomogeneous crust with cosmic-ray muon radiography[J]: The density structure below the volcanic crater floor of Mt. Asama, Japan. Earth and Planetary Science Letters, 2007 (263): 104-113.
- [19] Tom Asaki, Rick Chartrand. Detecting nuclear materials from cosmic-ray muon scattering [J]. Mathematical Modeling and Analysis, 2006, NM 87545.
- [20] 刘圆圆, 赵自然, 陈志强, 等. 一种用于 μ 子成像检测技术的探测器校正方法[J]. 核电子学与探测技术. 2008, 28(4): 712-716.
- [21] Liu Yuanyuan, Chen Zhiqiang, Zhao Ziran. et al. Imaging algorithms for cosmic ray muon radiography detection of nuclear materials[J]. Tsinghua Science and Technology, 2009,14(3):313-321.

Cosmic-ray Muon imaging for nuclear materials detection

WANG Li-ping, XIAO Sa

(China Academy of Engineering Physics, Mianyang of Sichuan Prov. 621900, China)

Abstract: Cosmic-ray muon radiography which has good penetrability and sensitivity to high-Z materials is an effective way for detecting shielded nuclear materials. The cosmic-ray muon imaging is designed to detect nuclear materials by taking advantage of natural.

cosmic-ray produced muons. The principle of the technique, its advantages in nuclear detecting field and main algorithm being used have been reviewed. At last we introduce some development of cosmic-ray muon imaging these years and prospect the application in detection of nuclear materials.

Key words: nuclear materials; detection; muon; review

EDXRF 法测定载 Pd-Al₂O₃ 小球的 Pd 含量

王雯, 余春荣, 高戈, 赵忠刚

(中国工程物理研究院, 四川 绵阳 621900)

摘要: 本文介绍了用能量色散 X 射线荧光光谱 (EDXRF) 法测定载 Pd-Al₂O₃ 小球 Pd 含量的分析方法。该方法在样品中定量加入内标元素 Mo, 再加入王水溶解载 Pd-Al₂O₃ 小球上的 Pd, 制成滤纸试样片, 用能量色散 X 射线荧光光谱仪测定其 Pd 含量。该方法简便、快速, 测定载 Pd-Al₂O₃ 小球 Pd 含量为 30 wt%~50 wt% 时, 其测量结果的相对标准偏差不大于 0.9%, 检出率为 98%~102%。该方法可通过调整加入内标元素 Mo 的量, 扩大测定 Pd 含量的分析范围。

关键词: EDXRF; 载 Pd-Al₂O₃; Pd 含量

文章分类: 核仪器仪表及其应用的研究成果

在储氢金属及合金中, Pd 是室温下氢同位素分离因子最高的金属^[1]。而多孔载体, 如 Al₂O₃^[2]、硅藻土^[3]等, 与纯 Pd 结合形成的复合材料, 在吸放氢方面的表现则更为突出。载 Pd-Al₂O₃ 小球是以高比表面积的 Al₂O₃ 球为基体, 将 Pd 涂敷在其表面而形成的, 其中的 Pd 含量无疑是直接影响其使用效果的重要质量指标。所以, 建立准确测量载 Pd-Al₂O₃ 小球中 Pd 含量的分析方法, 对于其性能研究、制备与使用都是至关重要的。

对材料中 Pd 含量的分析, 一般采用重量法、原子吸收法^[4]、光度法^[5]、ICP-AES^[6]、X 射线荧光法^[7, 8]等。对载 Pd-Al₂O₃ 小球中 Pd 含量的测量, 尚未见公开报道。X 射线荧光光谱法具有分析速度快、样品前处理简单、可分析元素范围广、谱线简单、干扰谱线少、灵敏度高等诸多优点, 近年来已成为合金成分定性及定量分析的有效手段。为摆脱传统化学方法的繁琐, 本课题建立了 EDXRF 法测定载 Pd-Al₂O₃ 小球中 Pd 含量的分析方法, 满足了高性能载 Pd-Al₂O₃ 小球的研制需求。

1 方法原理

用已知量的高纯 Pd 粉和 MoO₃ 粉配制系列标准溶液, 制备成适合于 X 射线荧光光谱仪测量的聚脂薄膜-滤纸标准试样, 在能量色散 X 射线荧光光谱仪上测得 MoK α 线与 PdK α 线强度 I_1 和 I_2 。基于被测元素的特征 X 射线强度与其含量成正比关系的基本原理, 函数关系为

$$\frac{C_2}{C_1} = a_0 + a_1 \frac{I_2}{I_1} \quad (1)$$

式中, C_1 、 C_2 分别为标准试样中 Mo 元素、Pd 元素的含量; a_0 、 a_1 为函数拟合系数。

将系列标准试样中 Pd 元素与 Mo 元素的特征 X 射线强度比及其含量比代入式 (1), 采用最小二乘法即可给出拟合系数, 得到元素含量比与其特征 X 射线强度比的函数关系式。分析未知样品时, 在能量色散 X 射线荧光光谱仪上测得 Mo、Pd 特征 X 射线强度, 代入建立的工作曲线, 即可求出样品中 Pd 元素的含量。

2 实验

作者简介: 王雯 (1984—), 女, 河南郑州人, 研究实习员, 硕士, 主要从事核物理测量及其核技术研究。

2.1 仪器与设备

谱仪(美国 EDAX 公司, DX—95 型, 对 MnK_{α} 的 FWHM= 160 eV); 电热板 (2400 W); 微量移液器。

2.2 试剂与材料

钯粉 (Pd, 99.9%); 三氧化钼粉 (MoO_3 , S.P); 盐酸 (HCl, A.R); 硝酸 (HNO_3 , A.R); 过氧化氢 (H_2O_2 , A.R); 柠檬酸 ($C_6H_8O_7 \cdot H_2O$, A.R); 王水; 定量滤纸 ($\phi 30$ mm); 迈拉膜 (厚 12 μm)。

2.3 实验室标样制备

Pd 标准溶液: 将 Pd 粉在 120 $^{\circ}C$ 烘烤 4 h, 干燥器中冷却, 称取 2.9993 g 置于聚四氟乙烯烧杯内, 加王水 10 mL, 在电热板上缓慢加热溶解, 用 20% 的王水稀释至 25 mL。此溶液浓度为 120 mgPd/mL。

Mo 标准溶液: 将 MoO_3 在 120 $^{\circ}C$ 烘烤 4 h, 干燥器中冷却, 称取 2.0863 g 置于烧杯内, 加 0.5 g 柠檬酸覆盖, 加 10 mL H_2O_2 , 在电热板上缓慢加热溶解, 用水稀释至 25 mL。此溶液浓度为 55.6 mg Mo/mL。

Pd-Mo 混合液: 用移液管移取 Pd 标准溶液 1 mL、2 mL、3 mL、4 mL 于 4 个烧杯内, 分别加入 1 mL Mo 标准溶液、摇匀, 制成 Pd、Mo 含量比不等的 Pd-Mo 混合液, 并将混合液定容至 5 mL, 待用。

滤纸标样: 用微量移液器分别移取 Pd-Mo 混合液 300 μL , 滴于聚四氟乙烯片上, 覆盖上滤纸片, 红外灯下烘干后夹入两片迈拉膜之间, 套封于塑料样品杯上, 制成滤纸标样片, 待测。

2.4 工作曲线的拟合

将能量色散 X 射线荧光光谱仪测量条件设定为: 管压 30 kV、管流 40 μA 、测量时间 400 s, 测量各滤纸标样 MoK_{α} (17.4 keV)、 PdK_{α} (21.1 keV)的

峰强度 (具有代表性的 Pd-Mo 标样能谱如图 1 所示), 重复测量 3 次, 取其平均值。用最小二乘法对标样 Pd、Mo 含量比与其 K_{α} 峰强度比进行线性拟合, 建立如式 (1) 所示的 Pd、Mo 含量比与其特征 X 射线强度比的函数关系式。本实验拟合的工作曲线如图 2 所示, 其线性相关系数为 0.998。

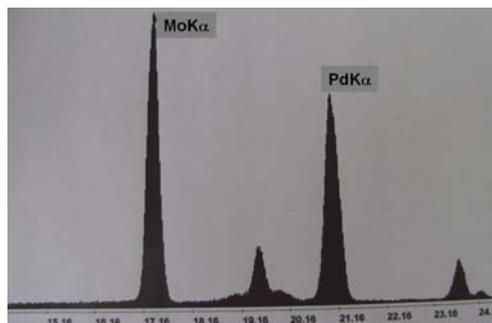


图 1. Pd-Mo 标样能谱

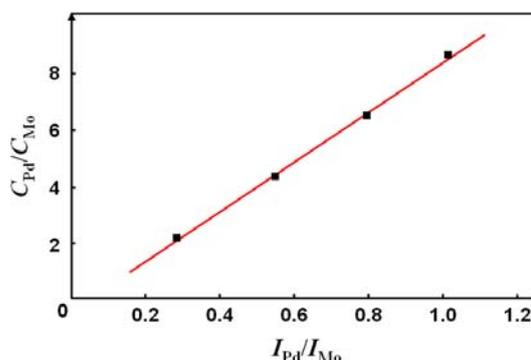


图 2. Pd、Mo 含量比——特征峰强度比拟合曲线

2.5 试样制备

本项目要求分析的样品(载 Pd- Al_2O_3)为 S1[#](小颗粒)和 S2[#](大颗粒)两种型号。用电子天平分别称取样品 S1[#] 896.2 mg、S2[#] 1005 mg, 置于两个聚四氟乙烯烧杯内, 分别加入 10 mL 王水和 Mo 标准溶液 1 mL; 在电热板上水浴缓慢加热至 50 $^{\circ}C$, 保温 20 min, 冷却定容至 5 mL 试液; 用微量移液器分别移取试液 300 μL , 滴于聚四氟乙烯片上, 覆盖上滤纸片, 红外灯下烘干后夹入两片迈拉膜之间, 套封于塑料样品杯上制成试样, 待测; 每个样品按上述方法分制成 6 个平行试样。

在试样制备中, 为检验本方法是否将 Pd 从

Al₂O₃ 小球上完全溶解,用蒸馏水对 Pd 溶解后的小球样品进行多次洗涤,然后在 X 射线荧光光谱仪上对其进行检测,未检测到 Pd 元素特征峰。

3 结果与讨论

3.1 方法准确度

为检测本课题建立的分析方法的可靠性,实验采用化学法配制了 7 个不同 Pd 含量的 Pd-Mo 溶液样,将其制备成滤纸试样片,在 X 射线荧光光谱仪上对其进行测量。表 1 所示为化学配制 Pd-Mo 溶

液样的配制值与相应样品 EDXRF 法的实测结果。

从表 1 可以看出,EDXRF 法测量值与其化学配制值吻合得很好,测定 Pd 含量的检出率为 98%~102%。

3.2 方法精度

用本实验建立的 EDXRF 法对两种载 Pd-Al₂O₃ 小球样品(S1[#]和 S2[#])的 6 个平行样测量其 Pd 含量,获得分析方法的精度信息,测量结果如表 2 所示。

表 1 化学配制样的实测结果 (Pd/mg)

编号	配置样 1	配置样 2	配置样 3	配置样 4	配置样 5	配置样 6	配置样 7
配置值	120.0	180.0	240.0	300.0	360.0	420.0	480.0
实测值	118.4	182.7	237.5	294.3	360.4	423.1	475.7
检出率	98.7%	101.5%	99.0%	98.1%	100.1%	100.7%	99.1%

表 2 EDXRF 法对 Pd-Al₂O₃ 平行样的测量结果 (Pd/%)

编号	平行样 1	平行样 2	平行样 3	平行样 4	平行样 5	平行样 6	平均值	RSD/%
S1 [#]	48.4	49.3	48.6	49.2	49.5	48.6	48.9	0.86
S2 [#]	30.0	29.9	29.8	29.5	29.5	29.9	29.7	0.72

从表 2 可以看出,用本课题建立的 EDXRF 法对载 Pd-Al₂O₃ 小球中 Pd 含量进行测定,当平行样数为 6 时,其测量结果的相对标准偏差不大于 0.9%。

为了考察本方法的稳定性,取两种载 Pd-Al₂O₃ 小球样品,分制成试样 S1[#]和 S2[#],在 2 周内分别对其进行多次测量(每次测量间隔一天),测量结果如表 3 所示。

3.3 方法稳定性

表 3 对 2 个样品在 2 周内进行 6 次重复测量结果 (Pd %)

编号	第一次	第二次	第三次	第四次	第五次	第六次	平均值	RSD/%
S1 [#]	48.4	48.5	48.6	48.7	48.5	48.3	48.5	0.24%
S2 [#]	30.0	30.0	30.1	30.0	29.9	30.0	30.0	0.25%

从表 3 可知,该方法在较长时间内稳定性很好,对两种载 Pd-Al₂O₃ 小球中 Pd 含量测定结果的相对标准偏差不大于 0.3%。

该方法的误差主要来源于两个方面:

- 1) 标样和试样制备:包括标样配制、工作曲线拟合、样品溶解、试样量及其均匀性;
- 2) 仪器测量:包括谱仪分辨率、谱仪系统稳

3.4 误差分析

定性、特征峰面积统计误差等。

4 结论

1) 本项目建立的测定载 Pd-Al₂O₃ 小球中 Pd 含量的分析方法简便、快速; 本方法所需样品量少 (不大于 1 g), 试样制备无须繁琐的化学操作, 制备的试样具有基体效应小、试样用量少、元素分布均匀等特点; 试样测量只需 400 s 即可获得准确可靠的分析结果。

2) 对于载 Pd-Al₂O₃ 小球中 Pd 含量为 30 wt%~50 wt% 的样品, 测量结果的相对标准偏差不大于 0.9%, 检出率为 98%~102%。

3) 通过调整标样中 Pd、Mo 含量比, 还可扩展本方法的分析范围。

参考文献:

- [1] Samsun B M, Fukada S, Fujiwara H. Hydrogen isotope absorption amount and rate of Pd-Al₂O₃ pellets [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2001, 26: 225-229.
- [2] Fukada S, Samsun B M, Fujiwara H. Hydrogen absorption-desorption cycle experiment of Pd-Al₂O₃ pellets[J]. *Int J Hydrogen Energy*, 2002, 27(2): 177-181.

[3] 陈伟, 李慎兰, 罗刚, 等. 载钯硅藻土的制备及其吸放氢性能研究[J]. *原子能科学技术*, 2010,44 (8): 920-925.

[4] Pawel Pohl. Determination of metal content in honey by atomic absorption and emission spectrometries[J]. *Trends in Analytical Chemistry*, 2009, 28(1): 117-128.

[5] 马东兰, 王昀, 马狂飏, 等. 光度法同时测定铂和钯[J]. *光谱学与光谱分析*, 2009,29 (10): 2833-2837.

[6] Malyutina T M, Alekseeva T Y, D'yachkova A V, et al. Determination of Platinum and Palladium in Dead Catalysts Using Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectrometry after Sample Digestion by High Temperature Fusion [J]. *Inorganic Materials*, 2010, 46(14): 1479-1482.

[7] 杨明太, 陈锦华, 齐红莲. 能量色散 X 射线荧光法测定涂钯硅藻土中的钯含量[J]. *核电子学与探测技术*. 2001, 21(2): 139-141,138.

[8] E. Margul, K. Van Meel, R. Van Grieken, et al. Method for the Determination of Pd-Catalyst Residues in Active Pharmaceutical Ingredients by Means of High-Energy Polarized-Beam Energy Dispersive X-Ray Fluorescence [J]. *Anal. Chem.* 2009, 81: 1404-1410.

Determination the Content of Palladium of Pd-Al₂O₃ Pellets by EDXRF

WANG Wen, YU Chun-rong, GAO Ge, ZHAO Zhong-gang

(China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

Abstract: A simple, fast, and accurate method of determination the content of palladium of Pd-Al₂O₃ pellets by EDXRF was established. By added the internal standard element Mo quantitatively to the sample, dissolved Pd on the Pd-Al₂O₃ pellets using aqua regia, and made filter paper sample, the content of Pd could be obtained Energy dispersive X-Ray Fluorescence Spectrometer. While the content of palladium between 30wt%~50wt% of the sample, the relative standard deviation less than 0.9% and the relevance ratio between 98%~102%. The measuring range of this method can be adjusted by changing the content of Mo.

Key Words: EDXRF; Pd-Al₂O₃ Pellets; the Content of Palladium

核仪器中下位机的比较与选择

马桂珍, 谢艳辉, 彭婧, 胥飞燕

(防化学院, 北京 102205)

摘要: 现代新型核仪器功能多, 信息化程度要求高, 其数据处理功能需要通过上位机和下位机的密切配合来实现。本文提出了一般核仪器数据处理单元中下位机的多种选择方案。重点分析比较了FPGA、ARM、DSP等几种常用下位机芯片的性能和特点, 讨论了它们的适用范围。同时, 以一个设计实例说明了下位机的一般选择思路, 对核仪器数据处理单元硬件的选择和设计有一定的借鉴价值。

关键词: 核仪器; 上位机; 下位机; 数据处理

文章分类: 核仪器仪表及其应用的研究成果

现代新型核仪器的数据处理单元通常采用双核设计, 即仪器有一个主处理器(或称上位机)和一个协处理器(或称下位机)。下位机对数据进行预处理, 把信号处理成符合上位机处理要求的信号, 上位机运行数据处理软件, 进行数据处理。随着数字电子技术的发展, 各种新型芯片的功能越来越强, 实现数据处理的方案有了多种选择。

1 数据处理单元的一般方案

目前核仪器数据处理单元典型的方案有以下几种:

- (1) PC机(或PDA)+DSP
- (2) PC机(或PDA)+FPGA
- (3) PC机(或PDA)+ARM
- (4) PC机(或PDA)+FPGA+单片机

可以看出, 核仪器数据处理系统基本上都是以计算机(或PDA)作为上位机, 以一个协处理器作为下位机, 下位机大多选择ARM、DSP、FPGA等芯片。这些不同的芯片各有自己的优缺点和适用范围, 如何根据需求选择合适的下位机是仪器硬件设计人员需要考虑的重要问题^[1]。

2 常用下位机的性能和特点

2.1 ARM的性能和特点

ARM是面向低预算市场设计的一款RISC微处理器, 基本是32位单片机的行业标准, 它提供一系列内核、体系扩展、微处理器和系统芯片方案, 四个功能模块可供生产厂商根据不同用户的要求来配置生产。由于所有产品均采用一个通用的软件体系, 所以相同的软件可在所有产品中运行。ARM可以有效地缩短应用程序开发与测试的时间, 降低了研发费用。现在的ARM系统可以自带操作系统, 可以写入应用软件, 几乎可以做到计算机的绝大部分功能, 在对CPU频率要求不是很高的场合, 基本可以代替计算机完成数据处理控制方面的任务。而且, ARM是一个开放的多接口的系统, 可以进行二次开发, 可以扩展多种接口。此外, ARM体积小、易安装、抗干扰能力强、功耗小^[2]。

2.2 DSP的性能和特点

DSP是一种独特的微处理器, 有自己完整的指令系统, 是以数字信号来处理大量信息的器件。一

个数字信号处理器在一块不大的芯片内包含有控制单元、运算单元、各种寄存器以及一定数量的存储单元等，在其外围还可以连接若干存储器，并可以与一定数量的外部设备互相通信，有软、硬件的全面功能，本身就是一个微型计算机。它可以接收到的模拟信号，转换为数字信号，再对数字信号进行修改、删除、强化，并在其他系统芯片中把数据解译回模拟数据或实际环境格式。它不仅具有可编程性，而实时运行速度可达每秒数以千万条复杂指令程序，远远超过通用微处理器。由于DSP具有强大数据处理能力和高运行速度，且体积小、编程灵活，因此为从事各种复杂的应用提供了一条有效途径^[3]。

2.3 FPGA 的性能和特点

FPGA是专用集成电路（ASIC）中集成度最高的一种，用户可对FPGA内部的逻辑模块和I/O模块重新配置，以实现需要的逻辑。它具有静态可重复编程和动态在系统重构的特性，使芯片的硬件功能可以像软件一样通过编程来修改。作为ASIC领域中的一种半定制电路，FPGA既解决了定制电路的不足，又克服了原有可编程器件门电路数有限的缺点。因此，FPGA能完成任何数字器件的功能，上至高性能CPU,下至简单的74电路，都可以用FPGA来实现。工程师可以通过传统的原理图输入法，或是硬件描述语言自由地设计一个数字系统。通过软件仿真，还可以事先验证设计的正确性。在PCB完成以后，可利用FPGA的在线修改能力，随时修改设计而不必改动硬件电路。使用FPGA来开发数字电路，可以大大缩短设计时间，减少PCB面积，提

高系统的可靠性。同一片FPGA，不同的编程数据，可以实现不同的电路功能^[1,4]。

3 ARM、DSP、FPGA 的区别和比较

从以上分析可以看出，ARM具有比较强的事务管理功能，通常可以用来跑界面及应用程序，其优势主要体现在控制方面。DSP是通用的信号处理器，用软件实现数据处理，主要用来计算，其优势是强大的数据处理能力和较高的运行速度。但是，与通用微处理器相比，DSP芯片的其他通用功能相对较弱些，而且DSP的功耗也非常高。因此，对于低功耗要求比较高的便携式设备一般不首先考虑使用DSP。与DSP不同，FPGA用硬件实现数据处理，可以用VHDL或verilogHDL来编程，灵活性强，能够进行编程、除错、再编程和重复操作，可反复进行设计开发和验证。目前的FPGA芯片还内嵌微处理器，如8位、16位或32位的PcolPlase，可以实现微处理器的某些功能。同时，很多FPGA芯片有丰富的IP核资源，比如DSP核，可以行使DSP的某些“职能”，其处理速度和处理能力非常强。因此，FPGA比较适用于核探测器等终端系统的实时数据采集与处理^[4,5]。

为了更好地实现核辐射信息的数据处理，实际应用中可以采取多种芯片结合的方案，以发挥每种芯片的优势。例如，国内某车载核辐射仪终端需要对核脉冲信号进行检测、峰值提取和谱分析，数据处理单元需要大量的数据分析和计算，因此仪器的下位机采用了FPGA+DSP的方案。数据处理单元结构框图如图1所示。

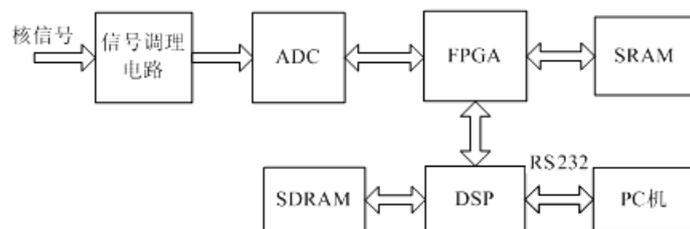


图1 数据处理单元结构框图

核探头采集的信号经放大和ADC转换为数字化脉冲信号后,送入FPGA进行预处理,在FPGA主要实现阈值甄别和有效波形的提取;经FPGA预处理的数据送入DSP,在DSP主要对数字化的核脉冲信号进行极零相消、梯形成形和峰值检测,得到核脉冲峰值;最后,由DSP通过RS-232接口发送数据给上位机进行谱分析处理。

4 结束语

由以上分析可以看出,如果为了缩短开发时间,减少开发成本,可选ARM;如仪器要求数据处理速度快、功耗小,一般选用FPGA;当需要大量的计算和数据处理时,通常考虑使用DSP。总之,核仪器数据处理单元的下位机需要仪器硬件设计人

员根据仪器的性能要求和功能要求去比较和选择。

参考文献:

- [1] 宋绍楼,彭继慎.便携式数据采集与处理系统的研究.辽宁工程技术大学学报[J],2002.6.
- [2] 李学桥,陈晓雷.基于ARM的远程数据采集系统的设计与实现.仪表技术与传感器[J],2004.2.
- [3] 张熊伟,陈亮.DSP芯片的原理与开发应用[M].第3版.北京:电子工业出版社,2003.
- [4] 孙宇,等.基于FPGA和DSP的数字多道设计与实现.核电子学与探测技术[J],2010,30(1):17-22.
- [5] 蔡顺燕.数字多道脉冲幅度分析器的硬件电路设计.核电子学与探测技术[J],2010,30(3):354-356.

Comparison and Selection of Client Computer in Nuclear Instrument

Ma Gui-zhen, Xie Yan-hui, Peng Jing, Xu Fei-yan
(Institute of Chemical Defense, Beijing 102205, China)

Abstract: The function of modern new nuclear instrument is very much. And the information degree is high requested. Through close matching for host computer and client computer, the data processing function can be carried out. This article puts forward a few of projects for the client computer of general nuclear instrument. The function and features of several common client computers, such as FPGA, ARM and DSP, are analyzed and compared. The applied scope is discussed also. At the same time, using a practical design as an example, the selection ideas of client computer are described. This article can be used for reference for the hardware design of data acquisition processing unit in nuclear instrument.

Key words: Nuclear Instrument; Host Computer; Client Computer; Data Processing

基于 FPGA 串行通讯的容错设计

彭婧, 房宗良, 徐权周, 胡洁微, 马桂珍

(防化学院, 北京 102205)

摘要: 在串行通讯过程中会出现数据传输错误的情况, 为避免这一问题应采用容错设计。本文描述的智能 γ 剂量率探头将计数结果通过串行口传给嵌入式上位机的核心处理单元 FPGA, 进行分析处理后形成剂量率数值。智能探头和 FPGA 间的通讯采用面向字符的同步协议方式, 针对数据传输错误的几种类型, FPGA 中设计了相应的容错程序, 有效地避免了错误数据的产生。

关键词: γ 剂量率仪; FPGA; 串行通讯

文章分类: 核仪器仪表及其应用的研究成果

随着用户对系统稳定性和可靠性要求的不断提高, 容错设计越来越被关注。容错是指系统或者程序在出现特定的故障情况下, 能继续正常运行的能力。在核仪器仪表的软硬件设计中容错设计也得到了广泛应用。本文介绍的 γ 剂量率仪 FPGA 程序设计中就采用了容错设计思想。

1 系统组成与通讯特点

γ 剂量率仪组成结构如图 1 所示。系统由多个智能 γ 剂量率探头和嵌入式上位机的核心处理单元 FPGA 组成, 智能探头给出每秒的 γ 计数率结果, 多个智能探头通过串口将输出结果传给上位机的分析处理单元 FPGA, FPGA 分析处理后给出各探头对应点的剂量率值, 实现多点监测。

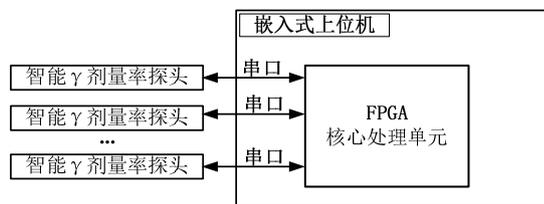


图 1 γ 剂量率仪系统组成

智能探头和 FPGA 之间采用串行通信的方式传输数据, 其特点是数据传输按位顺序进行, 连接简单。与并行通信相比, 串行通信具有传输距

离长、串行通信的时钟频率容易提高、信号抗干扰能力强的显著优点^[1]。

虽然串行通讯具有许多优点, 但数据传输过程中不可避免的会出现传输错误的情况, 因此, 利用 FPGA 解析通讯数据时, 容错设计非常必要。容错设计既可防止因为通讯链路故障或传输错误带来错误的的结果, 也可防止测量设备进入错误的死循环无法恢复正常工作流程。在容错设计中设计合理的通信协议是提高容错能力的重要环节之一。

2 γ 计数率的通信协议

串行通信协议是指通信双方的一种约定。对数据格式、同步方式、传输速率、纠错方式等问题作出统一规定, 通信双方按照这个协议工作。常见协议分为异步协议和同步协议。同步协议又有面向字符、面向比特、面向字节三种^[2]。

从智能探头到 FPGA 的 γ 计数率通信采用面向字符的同步协议。这种协议的典型代表是二进制同步通信协议 BSC。它的特点是一次传送若干的字符组成的数据块, 并规定一些字符作为这个数据块的开头和结束标志及整个传输过程的控制

信息, 这些特殊字符是通信控制字。SYN 是同步字符, 代表每一帧的开头, 接下来的是序号字符 SOH, 文始字符 STX, 然后是数据块, 数据块后面是组终字符 ETB, 帧的最后可设校验码。

本文 γ 计数率输出的数据协议格式为: “&JL123456%”, 通讯速率是 115200。“&JL” 是三同步字符 SYN, 后面紧跟着的“123456”表示计数结果, 数据固定占用 6 个字符位置, 当数据不足 6 位时在前面补零, “%” 为组终字符 ETB。

3 FPGA 容错设计

FPGA 容错设计通过在程序中增加消除或控制错误影响的措施, 实现提高系统 γ 计数率采集任务的可靠性和安全性的目的。根据数据通信协议的特点, FPGA 容错设计包含了 SYN 错误容错、ETB 错误容错、数据块错误容错三个方面。

3.1 SYN 错误容错设计

同步字符 SYN 为 “&JL”, 在程序设计时, 首先必须监控到串口数据流中某一个字符为 “&”, 下一个字符为 “J”, 再下一个字符为 “L” 时, 才表示找到这个数据帧头, 除此情况, 程序都不会认为是有效数据帧头。采用三同步方式判断帧头, 防止出现数据信息传输错误后和某一个同步字符相同发生错误判断的情况, 三个同步字符的严格判定使得这种错误影响的效果极大地降低。

3.2 ETB 错误容错设计

因为通信传输错误或链路的问题, 可能会丢失组终字符 “%” 或者是将此字符传输错误, 这样在同步字符 “&JL” 后的第 7 个字符就不是正常约定的字符 “%”, 此时发送重发指令给智能探头, 并重新开始找寻新的同步字符 SYN 工作。

3.3 数据块错误容错设计

数据块按协议规定由 6 个字符组成, 如果找到了正确的同步字符 SYN “&JL”, 找到了正确的组终字符 “%”, 但是中间的数据不是由 6 个数字字符组成, 此时发送重发指令给智能探头, 重新开始寻找同步字符 SYN 工作。

4 结束语

基于 FPGA 串行通讯程序进行容错设计后, 在通信故障的情况下, 程序不会阻断, 能够自动纠正错误, 并根据错误发送重发指令, 当数据包正常后, 程序会在下一周期恢复正常工作, 实验表明容错设计大大提高了系统稳定性和可靠性。

参考文献:

- [1] 曹卫彬. C/C++串口通信典型应用实例编程实践[M].北京: 电子工业出版社, 2009: 12-17
- [2] 李媛媛. Visual C++网络通信开发入门与编程实践[M].北京: 电子工业出版社, 2008: 115-12

Fault tolerance based on serial communication of FPGA

Peng Jing, Fang Zong-liang, Xu Quan-zhou, Hu Jie-wei, Ma Gui-zhen

(Institute of chemical Defense, Beijing 102205)

Abstract: There maybe appear mistake in serial communication. This paper was described the intellective detector of γ dose ratemeter communication with FPGA. The software of FPGA designed the code about fault tolerance, prevented mistake effectively.

Key words: γ dose ratemeter; FPGA; serial communication

基于硅半导体探测器的个人剂量仪数据处理方法

姚永刚¹, 邓长明²

(1.山西中辐科技有限公司, 太原 030006; 2.中国辐射防护研究院, 太原 030006)

摘要: 本文主要阐述硅半导体个人剂量仪在剂量率测量中所采用的数据处理方法, 此方法能快速准确的测出当前环境剂量率。

关键词: 硅半导体; 个人剂量仪; 数据处理;

文章分类: 核仪器仪表及其应用的研究成果

个人剂量仪主要用来监测 X 射线和 γ 射线。在测量范围内, 可预置剂量和剂量率报警阈值, 超阈值时发出声、光报警及时提醒工作人员注意安全。硅半导体探测器由于其体积小、抗辐照性能好、封装简单等特点, 使其在便携式个人剂量仪中得到应用广泛, 但是在低剂量场合下硅半导体二极管个人剂量仪的响应时间和准确度不是很高, 本文阐述了一种能快速准确的测量出当前剂量率的数据处理方法。

1 个人剂量仪结构及其工作原理

个人剂量仪器结构主要由探测器、主控电路、前放整形电路、LCD 显示器、声光报警电路, 功能按键组成。图 1 为电路结构框图。

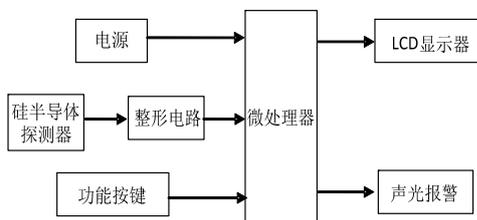


图 1 电路结构框图

主要工作原理: 探测器在 X、 γ 射线照射下输出脉冲, 脉冲经过前放整形电路输出矩形脉冲, 脉冲数与 X、 γ 射线的辐射量成正比, 主控芯片接收

脉冲数并换算成对应的剂量率显示在 LCD 显示器上。通过功能按键可以设置剂量率报警阈值, 当剂量率超过设定阈值时发出声光报警。

2 剂量率数据处理算法

2.1 常用的剂量仪数据处理方法

在辐射探测仪表中, 探测器输出的脉冲数与辐射射线的辐射量成正比, 根据脉冲数的多少来计算当前辐射剂量的大小。但由于辐射场和探测器的固有因素, 输出的脉冲数不是固定不变的, 所以需要重新处理以便能稳定准确地显示出当前剂量率。

常用的数据处理算法有滑动平均算法: 滑动平均滤波法把 N 个测量数据看成一个队列, 队列的长度固定为 N, 每进行一次新的采样, 把测量结果放入队尾, 而去掉原来队首的一个数据, 在队列中始终有 N 个最新的数据^[1]。

$$\bar{X}_n = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} X_{n-i} \quad \text{公式(1)}$$

公式(1)为滑动平均值算法, 其中:

\bar{X}_n 为第 n 次采样经滤波后的输出; X_{n-i} 为未经滤波的第 n-i 次采样值; N 为滑动平均项数。滑动平

均算法的最主要特点在于简捷性。它相对于其他动态测试数据处理方法而言，算法简单且计算量小，尤其可采用递推形式来计算，可节省存储单元，平滑度高，但灵敏度低。实际应用时，通过观察不同N值下滑动平均的输出响应来选取N值，又能达到最好的滤波效果。

2.2 硅半导体剂量仪数据处理方法

由于硅半导体二极管剂量仪在低辐射剂量环境下脉冲输出数量很少，通过测试发现在本底环境下一般 5~10 分钟才有脉冲输出，在相同测试条件下加上 CsI 晶体后 3 分钟左右有脉冲输出。如果采用常用的滑动平均算法来处理脉冲数据，这样仪器在低剂量环境下测量时响应时间就很慢^[2]。

突变算法：当前测量值如果小于上次测量值队列的平均值和 K 倍的标准偏差之和且大于上次测量队列的平均值和 K 倍的标准偏差之差，则判定此次测量值没有突变，放入队列滑动平均。否则判定为突变。突变又分为突变高和突变低两种。具体参见下面的公式(2)、公式(3)。

突变高算法：当前测量计数大于等于上次测量队列的平均值和 K 倍的标准偏差之和，跳出队列，重新建立队列取平均值。

突变低算法：当前测量计数小于等于上次测量队列的平均值和 K 倍的标准偏差之差，跳出队列，重新建立队列取平均值。

$$\text{标准偏差: } S = \sqrt{\frac{\sum(X_i - \bar{X}_n)^2}{N-1}} \quad \text{公式(2)}$$

判定突变公算法：

突变高公式(3)：

$$X_i \geq \bar{X}_{n-1} + KS$$

突变低公式(4)：

$$X_i \leq \bar{X}_{n-1} - KS$$

突变算法的优点是在不同的剂量场合下测量

能快速的反应出当前剂量的变化，缺点是测量值不稳定，数据值变得忽高忽低，很难正确的测出当前剂量率值。于是我们采用滑动平均和突变两种算法来实现数据处理，此数据算法既有滑动平均算法的稳定性又有突变算法的快速性。

为了确保数据的正确性和可靠性，在低剂量（剂量率低于 3 μ Sv/h）采用测脉冲周期法，高剂量（剂量率高于 3 μ Sv/h）采用定时计数法(流程图参见图 2)。

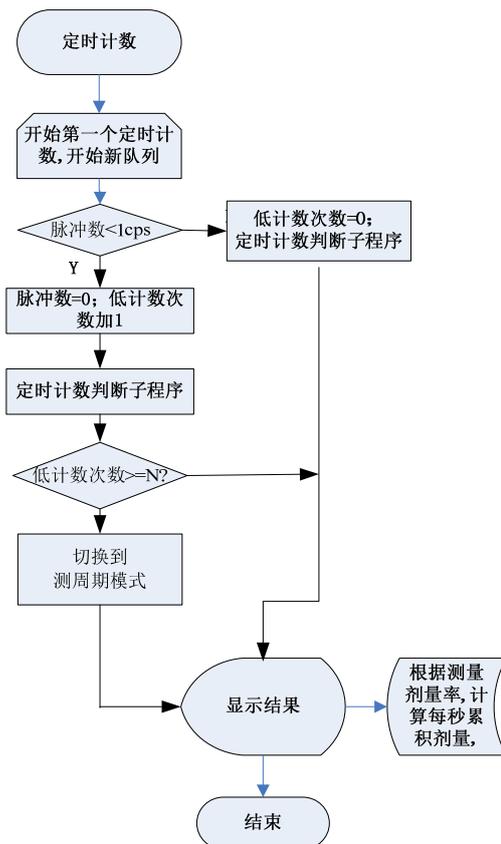


图 2 定时计数流程图

软件中同时采用连续三秒突变判断法，即如果连续三秒测量值都判定突变，则判定此数据值为真实值，否则判定为干扰值，予以滤除。此方法能在一定基础上滤除外界震动或偶然性的干扰，提高了仪表的抗干扰能力。采用此算法的剂量仪在国防科技工业电离辐射一级计量站经过检定，剂量率误差范围在-15%到+4.7% (国标±20%)，同时在 3 μ Sv/h 以上剂量场下响应时间小于 3s。

3 结束语

本文主要对剂量仪的电路结构和功能做了简单的介绍,着重阐述了常用的数据处理算法和一种快速稳定的数据处理算,并给出了公式和流程图。同时采用此算法的个人剂量仪通过了国防科技工业电离辐射一级计量站的检定,满足相应的标准。此算法也可用于其它同类仪表,对核辐射测量仪的数据处理算法具有一定参考价值。

参考文献:

- [1] 裴益轩, 郭民. 滑动平均法的基本原理及应用. 《火炮发射与控制学报》第 1 期 2000-11: 23-25.
- [2] 王敏, 方方. 个人剂量仪中测量方法的研究[J]. 《物探与化探》 2011 年 04 期: 138-140.

Research of Data Processing algorithm Based on Silicon Semiconductor Personal dosimeters

YAO Yonggang¹, DENG Changming²

(1. Shanxi Zhongfu technology Co., Ltd., Taiyuan 030006, China;

2. China institute For Radiation Protection, Taiyuan 030006, China)

Abstract: This article focuses on the data processing method used by the silicon semiconductor personal dosimeters in the dose rate measurements, this method can rapidly and accurately measure the current environmental dose rate.

Keywords: Silicon Semiconductor; Personal dosimeter; Data Processing

数字核信号智能采样理论和方法研究

闫洋洋, 郝德建, 王鹏, 张软玉*

(四川大学物理科学与技术学院, 成都 610064)

摘要: 本文提出了一种数字核测量系统中智能数采系统的组成原理和实现方法。通过预学习确定最佳数采方案;再以最佳采样频率对核信号实现波形数字化并通过后续数字化处理实现对同一核信号不同部分做变频采样,最后给出了相关算法的实现方式。此方法在保证信号数采精度的同时,大大减少数据量,实现资源的最优化配置。

关键词: 最佳数采方案;变频采样;低通滤波;数据抽取

文章分类: 核仪器仪表及其应用的研究成果

1 引言

核信号波形数字化是数字化核测量系统中重要环节,波形数字化精度直接决定系统测量水平。但是对核信号实现高频采样在获得高精度数字化波形的同时也会带来高成本及大数据量存储、传输和处理的压力。根据核信号的特点,核信号所携带的重要信息(如:时间、能量、粒子种类等)大多数集中在信号的快指数上升沿中。而对缓慢下降沿的数据存储则占据了大量存储资源。为解决这一矛盾,本文提出了一种最优化数采系统的构建原理和实现方法。

系统结构如图 1 所示。系统的工作原理是:先确定最优数采方案^[1]再进行正式采样,包括对数据抽取处理、存储和传输。

1) 首先以最高频率对信号预采样,再以不同倍数对信号上升沿和下降沿进行分频抽取,然后分析抽取后信号畸变率^[1],根据对畸变率的容忍度分别确定同一核信号上升沿和下降沿的最佳

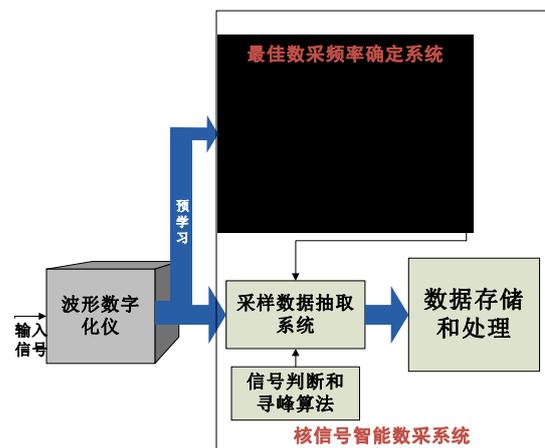


图 1 变频采样系统框图

数采频率。

- 2) 根据上一步获得的结论以上升沿最佳采样频率完成对输入核信号的波形数字化,然后对每个信号的下降沿以下降沿最佳频率完成数据抽取。
- 3) 将不同采样率的上升沿与下降沿合成为同一信号,并对信号实现存储和向后续模块的传输。

2 核信号变频数采原理

2.1 反混叠滤波器的设计

基金支持: 本工作由国家自然科学基金资助。项目批准号: 11075111

作者简介: 闫洋洋 (1989-), 男, 山西临汾, 硕士研究生, 粒子物理与原子核物理专业。

通讯作者: 张软玉 (1969-), 女, 山东莱州, 副教授, 博士, 核技术应用, 数字核电子学专业。

根据 Nyquist 采样定律，系统中最佳采样频率确定和信号正式采样两个环节中都需要对核信号进行数字反混叠低通滤波处理。为此本文讨论并设计基于 Butterworth 滤波器且适用于同一核信号变频数据抽取的低通滤波原理及方法。

根据 Butterworth 滤波器设计原理，本文设计了幅频

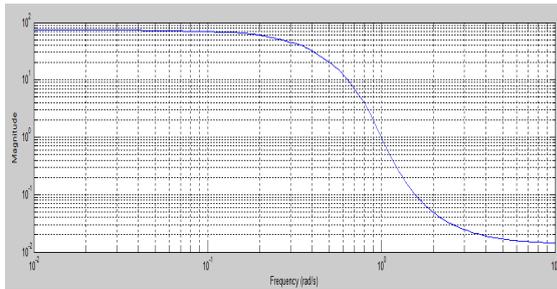


图 2 设计的巴特沃斯滤波器的幅频特性

特性如图 2 所示的低通滤波器。通带最大衰减和阻带最小衰减分别为 3dB, 25dB; 过渡带宽度为通带宽度 20%。

设核信号 $f(t)$ 的上升沿为 $f_1(t)$ 下降沿为 $f_2(t)$ ，

$$\text{表示为: } f_1(t) = \begin{cases} f(t); & t \leq t_0 \\ 0; & t > t_0 \end{cases}$$

$$f_2(t) = \begin{cases} 0; & t \leq t_0 \\ f(t); & t > t_0 \end{cases} \quad (1)$$

其中 t_0 为信号的峰值时刻。

对 $f_1(t)$ 以宽带滤波器实现反混叠滤波，滤波后信号的上升沿 $v_{or}(t)$ 由 (2) 式得到:

$$\begin{aligned} v_{or}(t) &= f_1(t) * h_1(t) \\ &= f(t) * h_1(t) \quad (t \leq t_0) \end{aligned} \quad (2)$$

(2) 式中 $h_1(t)$ 为宽带 Butterworth 低通滤波器的冲击响应。

由于，当 $t > t_0$ 时 $f(t) * h(t) \neq 0$ ，如图 3 所示。为了使低通滤波后原信号中有效信息不丢失，在得到经反混叠滤波后信号下降沿 $v_{of}(t)$ 时，需对整个信号做窄带低通滤波。如 (3) 式所示。

$$v_{of}(t) = f(t) * h_2(t) \quad (t > t_0) \quad (3)$$

$h_2(t)$ 为宽带 Butterworth 低通滤波器的冲击响应；将 (2) 式和 (3) 式所表示的信号分别进行不同倍数的抽取后再合成，即可得到处理后的信号。

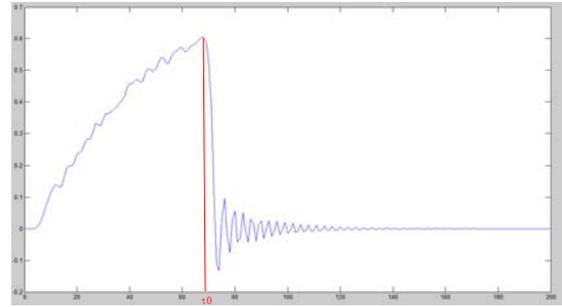


图 3 上升沿反混叠滤波

2.2 寻峰及变频原理

t_0 位置的确定——寻峰:

分两步: 1) 信号判断。 x_0 为所设定信号阈值，输入为 x ，当 $x(t) > x_0$ 时， t 时刻即为信号的起始时刻。

2) 峰位确定。采用取样数据逐点比较法获取信号峰值位置，若信号中某点幅度值比它临近的 m 个点的幅值都大，则该点对应的时刻为峰值时刻，表示为:

$$x(n) > x(n+j); j = -m, -m+1, -m+2, \dots, m-2, m-1, m$$

则 $x(n)$ 为对应的峰值时刻， $nT = t_{0i}$; 式中 T 为采样频率， t_{0i} 为第 i 个信号峰值位置。

数据抽取——分频: 为了减小数据的采样频率，可以把原始的采样序列每隔 $M-1$ 个点取一个点，形成新的采样序列，该过程为 M 倍抽取。输入信号为 $x_o(n)$ ，输出为 $x_{o1}(n)$ ，则表达式为:

$x_{o1}(n) = x_o(Mn)$; 对上升沿和下降沿信号做抽取处理，

$$\begin{cases} v_{or1}(n) = v_{or}(M_1 n); \\ v_{of1}(n) = v_{of}(M_2 n); \end{cases} \quad (4)$$

$v_{or1}(n)$ 、 $v_{of1}(n)$ 为抽取后的上升沿和下降沿; M_1 、 M_2 分别为上升沿和下降沿的抽取倍数。

3. 系统的实现方法

3.1 滤波器的实现算法

低通滤波器以差分算法实现，表示为：

$$y(n) = \sum_{k=1}^N -a_k y(n-k) + \sum_{k=0}^M b_k x(n-k) \quad (5)$$

式中 a、b 为滤波器的参数数组，可根据滤波器的性能指标求出。

滤波算法只需要延迟、相加、乘常数三种运算，可以很方便用 FPGA 实现，b 与 a 的值通过最佳数采频率确定系统给出^[1]。

3.2 多级滤波与抽取^[2]

为提高运算效率，滤波和抽取以多级方式实现，其过程如图 4 所示。本文采用分两级抽取的方

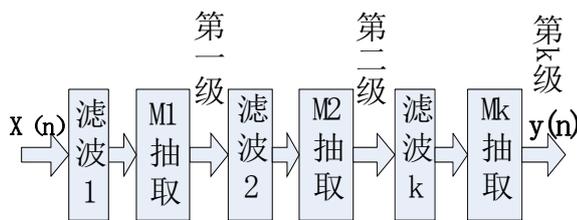


图 4 多级抽取示意图

式实现信号分频。

3.3 系统实现逻辑描述

将系统各功能算法模块化，并建立如图 5 所

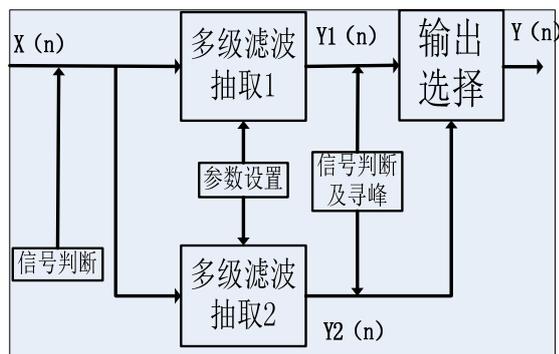


图 5 系统逻辑框图

示逻辑。

多级滤波抽取 1 对应的通带频率较高，抽取倍数小，生成高采样的上升沿，多级滤波抽取 2 的通带频率

较小，抽取倍数大，生成低采样的下降沿。

系统工作逻辑：1) 预采样，调用信号判断、寻峰及多级滤波抽取模块，确定本次测量上升沿和下降沿的最佳数采频率。2) 参数设置，调用参数模块，进行正式采样前参数设置。3) 正式采样，当判断有核信号输入时，两个多级滤波抽取同时开始处理，输出分别为 $y_1(n)$ 和 $y_2(n)$ ，此时输出选择输出 $y_1(n)$ ，即高采样的上升沿；同时，判断 $y_2(n)$ 是否达到峰值，当 $y_2(n)$ 达到峰值时刻，输出选择为输出 $y_2(n)$ ，低采样的下降沿。

4. 结果和结论

4.1 实验结果

原信号用 CdZnTd 探测器探测 ^{241}Am 的 γ 射线，经电荷灵敏前放输出模拟信号，用带宽 1GHz，采样率 10GHz 的高能性数字示波器对该信号实现波形数字化。图 6 所示对预采样的数字信号实现数字化分频后的结果。分别得到一组 120MHz、30 MHz、5 MHz 的数字化波形，黑色为原信号，白色为抽取后的信号。图中可见 5MHz 的上升沿与原信号已经不重合。利用畸变评估算法^[1]，可以得到对该信号上升沿的采样频率最小应为 30 MHz，下降沿采样频率最小应为 10MHz。

图 7 为对原信号变频采样的结果，上升沿采样率为 60MHz，下降沿采样率为 15MHz。上升沿和下降沿形状均与原信号保持一致，数据量降低为原来的 1/666。

图 8 为对采样频率为 100MHz 原信号做变频采样的结果，上升沿采样频率保持不变，下降沿采样频率为 20MHz。

4.2 结论

1) 通过理论分析及对实测信号的处理结果表明本文建立的最优化智能数采方法是正确可行的。

2) 本文所提出的对同一核信号不同部分分别处理的思路可以在保证信号的形状不变的情况下, 大大减少对数字核信号数据存储量, 同时提高信噪比。
 3) 对变频方法的具体实现进行了研究, 为该系统进一步的硬件实现奠定了基础。

[1] 闫洋洋, 张软玉, 核信号最优化数采方案的研究. 第十五届全国科学计算与信息化会议暨现代物理信息化论坛论文集[C].2011.315-318
 [2] 陶然, 张惠云, 王越 多抽样率数字信号处理理论及其应用. 清华大学出版社.2007.63-67.

参考文献:

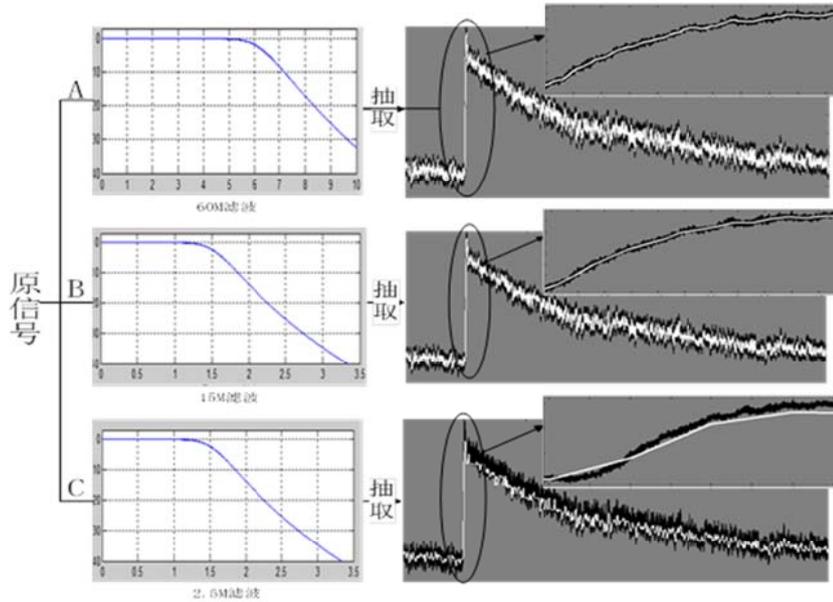
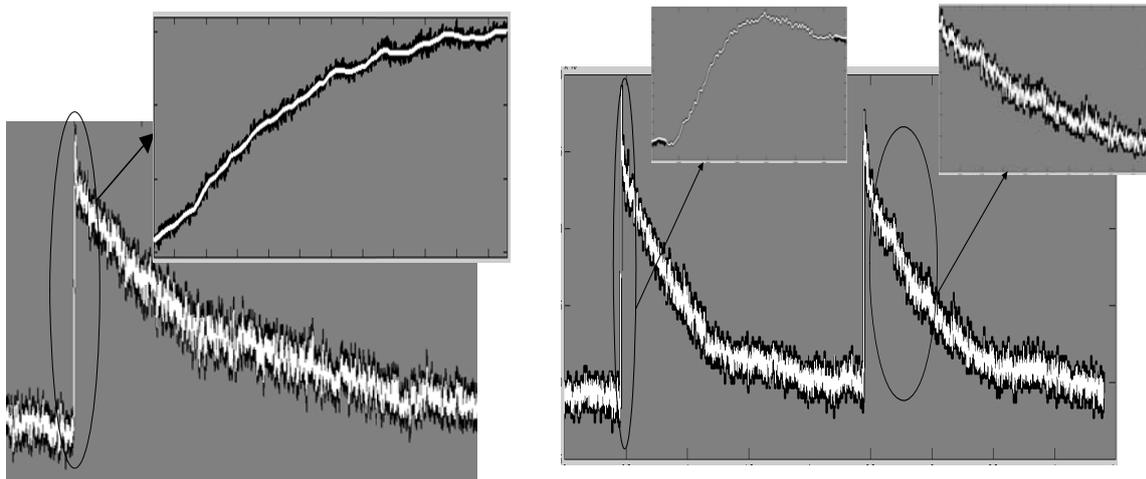


图 6 最佳采样频率确定实验结果
 A 为 120MHZ 抽取后信号与原信号比较, B 为 30MHZ 抽取后信号与原信号比较,
 C 为 5MHZ 抽取后信号与原信号比较



七 (1)

The study of the intelligent sampling theory and methods of the Digital nuclear signal

Yan Yangyang, Hao Dejian, Wang Peng, Zhang Ruanyu

(Sichuan University of the College of Physical Science and Technology, Chengdu 610064)

Abstract: This paper presents the principle and implementation of intelligent data acquisition system in a digital nuclear measurement system; determine the optimum data acquisition program through pre-sampling and analysing. Achieve the nuclear signal waveform digitalizing in the best sampling frequency and then achieve sampling different parts of the same nuclear signals in different frequency, and related the algorithms. Ensuring the accuracy of the signal data acquisition at the same time, this method greatly reduce the amount of data and obtain the optimal allocation of resources.

Key words: the best sampling program; frequency conversion sampling; Low-pass filter; Data Extraction.

微型反应堆控制系统改进

刘心灵, 彭旦, 洪景彦, 张金花, 鲁谨

(中国原子能科学研究院, 北京 102413)

摘要: 微型反应堆控制台用于微型反应堆(简称微堆)的启动、运行和停闭, 于上世纪八十年代设计加工而成。控制台主要由微堆功率控制、热工监测控制和 γ 剂量监测组成。由于使用时间长久, 设备老化, 而且, 随着技术的发展, 目前一些先进的设备可以替代原来的设备, 本文通过对自动控制仪器中的元器件的反复调研与试验, 对重要元器件的改进进行了探讨, 并对控制台的功能进行进一步的完善, 使得中子注量率的测量与控制更为精确。

关键词: 微型反应堆; 自动控制; 中子注量率

文章分类: 核仪器仪表及其应用的研究成果

1 微型反应堆及其控制台简介

微型反应堆(MNSR,原型微堆)是一种小型的、安全的、低功率的核装置, 堆通常运行在 $5 \times 10^{10} \sim 1 \times 10^{12} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$ 的中子通量水平上, 主要用于中子活化分析、少量短寿命的研究用的示踪同位素制备、核科学技术教学与培训等工作, 而中子活化分析要求中子通量具有很好的准确度和稳定性, 这就给微堆的控制系统提出了很高的要求。反应堆的控制系统包括控制台、控制仪器、控制棒传动机构和控制棒等, 其中控制台主要由微堆功率控制、热工监测和 γ 剂量监测三部分组成, 它为各种控制、检测仪表提供电源, 显示反应堆运行工况^[1]; 控制仪器是整个控制系统的重要环节, 它测量、调节反应堆内的中子注量率, 通过它可启动、停闭反应堆, 并可使反应堆在设定的功率下稳定运行^[2]。

2 微堆自动控制仪器控制原理

如图1所示: 此电路由A1、A2、A3放大器, 换档比较器、换档控制电路、换档电路、DA变换、

量级比较器、棒位比较器、通量比较器、通量控制电路、功率保护、音响报警电路以及低压电源组成。其中, A1为电流-电压转换器, 它将微型裂变室(或电离室)输出的微弱电流信号(10-11-10-6A)转变为可测量的电压信号V0, 该信号经A2比例放大器转换为与中子注量率相对应的电压信号V1, 经相关计算, 控制台上数字面板表可显示出中子注量率的有效值; V1再经A3比例放大器转换为电压信号V1', 输入换档电压比较器, 与设定的上下阈值(上阈值为4.7V, 下阈值为0.43V)相比较后进入换档控制电路, 当电压值V1'超过上阈值或者低于下阈值时, 比较器输出脉冲信号, 触发换档控制电路, 使其换档。换档控制电路输出信号经由DA转换, 输出通量量级信号V2, 并由控制台上的数字面板表显示, 便于监测。V2与量级比较器设定值比较, 其输出和棒位比较器的输出以及通量比较器的输出均送至通量控制电路; 调节控制棒传动机构的电机正转或者反转, 带动控制棒上升或下降, 以达到调节中子注量率(功率)的目的^[3]。

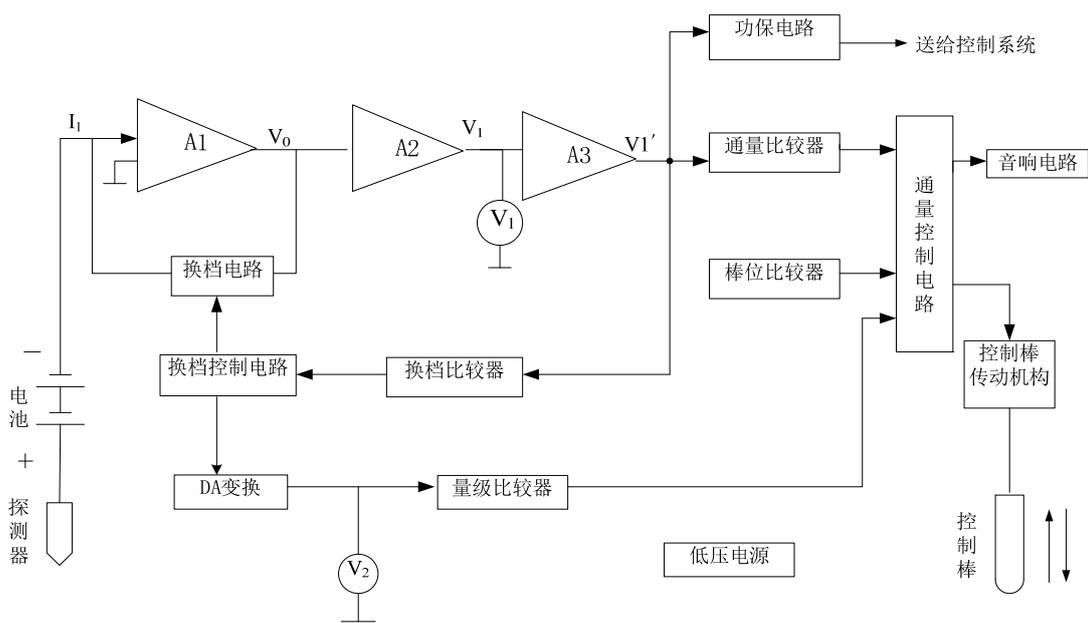


图 1 控制仪器原理图

3 控制仪器中电器元件的改进探讨

因控制仪器中某些电器元件的使用时间长久，有些器件出现老化，导致性能下降，影响着中子注量率的测量精确度，进而影响整个控制系统的控制性能。因此对控制仪器中一些重要元器件的改进进行了探讨。

3.1 供电设备改进

控制系统若正常工作，供电设备必不可少，而反应堆内微型裂变室（或电离室）探测采集电流信号，需要 150V 的电源系统，原控制仪器采用 150V 电池组来供电，由于电池电量有限，用过一段时间后，会由于电量不足导致电压下降使探测不精准，若长时间使用，而不及时维修检测，电池会老化甚至出现漏液，损坏整个电路板；为避免类似现象发生，现采用 150V 直流电源供电，相对于电池，不仅节省空间，而且能够稳定长久的使用。

3.2 电流电压转换器的选用

电流电压转换器包括主运算放大器和换挡电路，换挡电路又由通量定值电阻和模拟开关两部分构成。

3.2.1 主运算放大器的选用

裂变室（或电离室）探测出的信号为微弱的电流信号，不易直接测量，而电压信号可测量，因此可将电流信号转换为电压信号，图 2 为电流-电压变换原理；对于理想运算放大器 $V_o = -iR_f$ ，但实际运放输入阻抗不可能无穷大，则有 $V_o = -(i - i_b) R_f$ ，因被测电流信号非常微弱，且偏置电流 i_b 和温度漂移，都会影响测量精度。放大微弱电流信号，需要所选运算放大器具有较高的输入阻抗、大的共模抑制比和大的开环增益，并具有极小的输入偏置电流。而普通放大器的输入偏置电流 i_b 一般都在 μA 量级，远远大于被测电流 i ，无法满足测量要求，基于以上原因，本电路控制板选用了 ICL7650 高输入阻抗自动调零型放大器作为主放大器，其输入偏置电流 $i_b = 10pA$ ，输入电阻为 $10^{12} \Omega$ ，共模抑制比

和开环增益分别为 120dB 和 $5 \times 10^8 \text{V/V}$ ，符合测量要求。

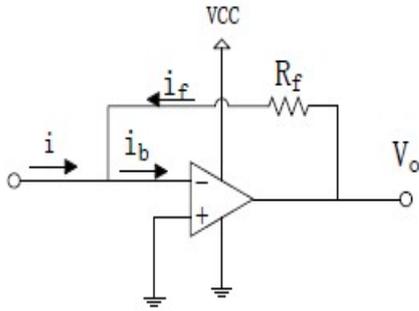


图 2 电流—电压 变换原理图

调研发现，新型贴片式芯片 AD8571 的主要参数与 ICL7650 对照如表 1，选用主放大器主要考虑选用器件的偏置电流 i_b ，AD8571 的偏置电流 $i_b=10\text{pA}$ ，与 ICL7650 相同，且低供电电流为 0.75mA，而 ICL7650 的供电电流为 2mA，相对于 ICL7650，AD8571 功耗更小，并且 AD8571 共 8 引脚，只采用其中 5 个引脚即可，ICL7650 共 14 个引脚；因斩波需要，需要外接两个电容，外围电路繁琐，AD8571 无需复杂外围电路；经实验验证，以 AD8571 代替 ICL7650，能够使得实验顺利进行，最终的测量结果也比较精确，所以，可考虑选用

AD8571 作为主放大器。

表 1 主要参数对照表

	偏置 电流	低供电 电流	共模 抑制比	开环 增益
ICL7650	10pA	2mA	120dB	174 dB
AD8571	10pA	0.75mA	140dB	145dB

3.2.2 换档电路的改进研究

(1) 因探测器输出电流信号的跨度较大，为 10-11A-10-6A，需对多个量级的信号放大，本控制板中采用六个反馈电阻（10K, 100K, 1M, 10M, 100M, 1G）以实现不同量级的放大^[3]，旧电路板中，因条件限制选用的 1G 电阻是稳定性差、误差也较大的真空兆欧合成膜电阻，而金属膜电阻具有稳定、受温度影响小，精确度高的优势，适用于高精密电子产品的基板中，因此新控制板中改用 1G 金属膜电阻来代替合成膜电阻，提高了测量信号的准确度。

(2) 在同一时刻六个反馈电阻只有一个导通，作为反馈支路，这一功能由三个 CD4016 模拟开关

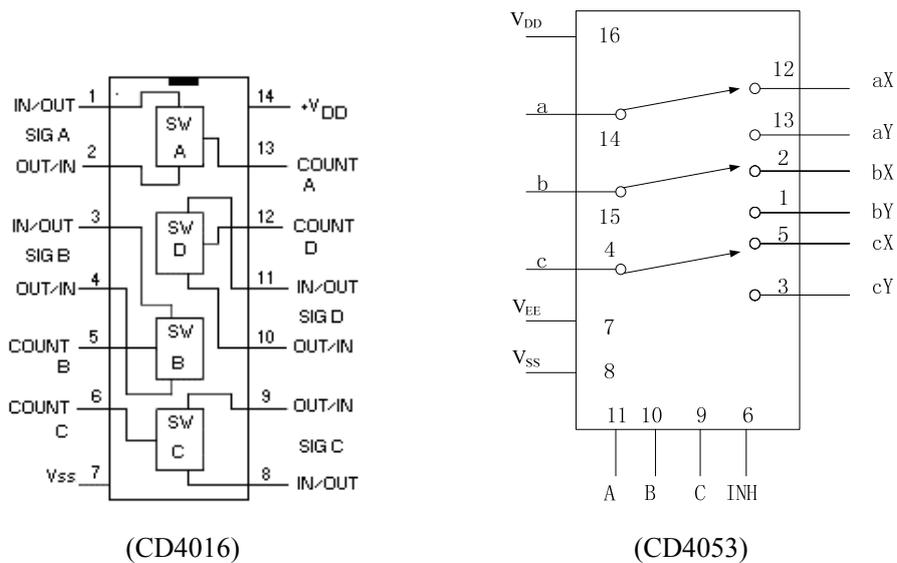


图 3 CD4016 及 CD4053 引脚结构图

来实现，每个 CD4016 内部封装有 4 个独立的模拟开关，每个模拟开关有输入、输出、控制三个端子（如图 3），输入端和输出端可互换。当控制端加高电平时，开关导通，导通电阻为几十欧姆；当控制端加低电平时开关截止，呈现很高的阻抗，可以看成开路。各开关间的串扰很小，互不影响。经试验证明，选用 CD4016 模拟开关能够较好的实现档位的转换。

数据选择器 CD4053，也可实现换档功能，其引脚简单易控，内部含有 3 组单刀双掷开关，有三个独立的数字控制输入端和 INH 输入，这些开关电路在整个 VDD-VSS 和 VDD-VEE 电源范围内具有极低的静态功耗，与控制信号的逻辑状态无关。若选 CD4053，两个芯片即可满足要求，相关实验验证，在实现切换功能的同时，节省了电路板面空间及成本，并进一步提高了准确度，在以后的电路板改进中，可考虑使用 CD4053 来代替 CD4016

实现量程切换功能。

3.3 比例放大器的选型

结合控制原理图 1，原控制仪器中 A2、A3 比例放大器选用的是四运放 LF347，来实现这一功能。现在的通用四运放 LM324 性能参数与 LF347 相近（表 2 所示），且精度高、成本低，应用广，选用 LM324 替代 LF347，使得中子注量率的显示更加准确。

3.4 三极管的选用

在进行棒位控制时，原电路板采用的是 9013NPN 型晶体小功率三极管，现采用 2N5551 型高耐压管来代替，其耐压值 160V，大于 9013（耐压 45V），且放大倍数增大，保证了电路板的使用寿命，减小误差和故障的出现。

表 2 LF347 与 LM324 主要参数对照表

	宽增益带宽	大电压增益	输入偏置电流	低输入失调电压	共模抑制比
LF347	4.0MHz	100dB	50pA	5mV	100 dB
LM324	1.3 MHz	100dB	20nA	3 mV	80 dB

4 二次仪表的改进探讨

控制台上的二次仪表都是机械式的，其中用于测量热工的两台仪表，一台用于测量反应堆水冷却剂进出口温差，当温差超过限定值 23℃时，功率保护会自动投入；另一台用于测量反应堆堆水温度，此外，控制台面板上温度值和温差值使用的是比较传统的打纸记录方式，这种记录方式，无法记录其历史值。同样，中子通量显示表也只能显示当前通量值，不能进行分析比较或查看历史值，针对上述

问题，经调研，目前数字仪表比较通用，可考虑以数字仪表替换老旧的机械式仪表；结合当前先进技术设备，可添加一部小型工控机，采用串口通信的方式，将采集的温度值和温差值以及中子注量率传送至工控机内，由组态软件（INTOUCH 或 WINCC）进行编程设计出相应的动态运行画面，实时显示并记录相应的参数值，当需要时，能够及时调出历史记录值，以便查看并分析比较等。

5 结论

通过调研，对反应堆自动控制仪器中的重要电子器件进行性能分析，原控制仪器的某些器件可以用先进的器件设备代替，其性能也更加优越，经相关试验验证，能够更为准确的测量堆内相关参数；对控制台的改进进行了设想及探讨，将使控制台布局更合理，操作更方便。

参考文献:

- [1] 高集金, 微型中子源反应堆概述, 微型反应堆培训资料 1991.04
- [2] 王永茂, 彭春元. 上海微型反应堆控制系统, 微型反应堆文件 1994.04
- [3] 彭春元, 微堆自动控制仪器, 微型反应堆培训资料 1991.04
- [4] 韩世菊, 薛城炳, 毛冬梅. 自动切换量程反应堆数字功率表[J].核动力工程.1982.3(4):30-35.

Improvement Research on the Control Console of Miniature Neutron Source Reactor

LIU Xin-ling, PENG Dan, HONG Jing-yan, ZHANG Jing-hua, LU Jin
(China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

Abstract: The Control Console Miniature Neutron Source Reactor (MNSR) is used for MNSR's startup, operation and shutdown, Which was designed and installed in the 1980s. The control console consists of the reactor power control system, thermal measurement system and γ dose measurement system. Owing to the equipment aging and the technology development at present, some advanced equipment can replace the original equipment, the paper describes the improvement of the important components of the power control circuit, and fleshes out the function of the console, making neutron note of the rate of measurement and control more accurately.

Key words: Miniature Nuclear Source Reactor; Automatic Control; Neutron flux

一套用于现场视察的车载 NaI(Tl) γ 谱仪系统的研制

冯天成, 贾明雁, 雷卫国, 刘俊, 殷经鹏, 龙斌, 王引东, 陈伟, 苏川英, 吴睿, 冯元举

(西北核技术研究所, 西安, 841700)

摘要: 研制了移动式车载 NaI(Tl) γ 谱仪扫描测量系统, 主要用于快速甄别地面及空气中的人工放射性异常。系统主要由大体积 NaI(Tl)探测器阵列、数字多道、GPS、电子学柜及越野车组成。系统研制中, 以 MC 计算和实验数据为依据, 选择订制了满足需要的探测器; 以 40K 1461keV 能峰为稳定参考峰, 实时校准峰位, 解决了系统谱漂移问题; 用抽样率转换方法实现了两个探测器能谱的合成; 采用基于噪声调整的奇异值分解法 (NASVD) 实现能谱降噪、本底剥离与放射性异常甄别; 采用实时读取与删除多道数据、在计算机缓存中处理数据后再备份的方法, 实现了对不允许测量核素的能窗屏蔽功能; 基于 C#编写测控软件, 实现了谱获取、储存与处理、扫描轨迹记录与显示等功能。

系统测速 $\leq 20\text{km/h}$, 耐震动; 探测器系统、信号/电源线接口防雨雪; 可在湿度 $< 80\%$ 、温度 $-10^\circ\text{C} \sim +50^\circ\text{C}$ 的环境下工作; 谱漂移控制在 ± 1 道内(1024多道); 能量分辨率 $< 8\%$ ($^{137}\text{Cs}662\text{keV}$); 软件界面简洁、稳定性好, 屏蔽数据不可恢复; 放射性异常甄别灵敏度高, 对地表面均匀分布 ^{131}I 的判断限 $< 100\text{Bq/m}^2$, 对空气中均匀分布 ^{133}Xe 的判断限 $< 50\text{Bq/m}^3$, 对地表 ^{241}Am 的探测限约 $< 1000\text{Bq/m}^2$ 。

系统适用于禁核试核查现场视察与大区域放射性污染场址污染治理, 还可应用于一般环境放射性调查及核应急等工作。

关键词: 现场视察; 车载 NaI(Tl) γ 谱仪; 稳谱; 能谱合成; 异常甄别; 能窗屏蔽

文章分类: 核仪器仪表及其应用的研究成果

车载 NaI(Tl) γ 谱仪主要由 NaI(Tl)探测器、数字多道、定位接收器、电源、控制电路、笔记本电脑、测控软件等组成。整套系统安装在轻型越野车上, 边行驶边测量, 可实现对大面积区域内放射性的快速搜索测量^[1,2]。市售国外成熟产品如美国的 IRSS、加拿大的 GR 等系列, 主要设计应用于环境放射性勘查、油气勘探、核事故等^[3,4], 其系统结构、测量模式、技术指标等不完全适应全面禁核试核查现场视察需要, 且价格昂贵。国内自主研发系统的性能如探测器分辨率、效率, 电子学稳定性等方面, 与国外产品尚存在一定差距^[5,6], 因此, 国内主要依赖进口^[7,8]。为适用于禁核试核查现场视察工作^[9,10], 并兼顾大区域放射性污染场址治理需要, 开展了扫

描测量关键技术研究, 解决了指标确定、探测器选型、稳谱、谱合成、能窗屏蔽、异常甄别、测控软件编写等问题, 研制成功一套车载 NaI(Tl) γ 谱仪系统。

1 系统指标确定与探测器选型

1.1 扫描速度

禁核试核查现场视察手册中最大视察面积约定为 $\leq 1000\text{km}^2$ 。设在此区域均匀布设测线, 如图 1 示。

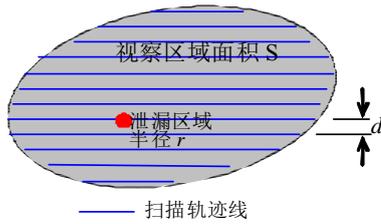


图 1 扫描测量布线示意

设放射性核素在以地下核试验爆心投影点为圆心、半径为 r 的圆面内均匀渗漏，则当测线间距为 d 时，某一条测线穿越渗漏区域的概率 p 如式(1)计算。

$$p = \frac{2r}{d} \quad (1)$$

要求不漏测，即 $p=1$ ，估算得测线间距 $d=200m$ 。将视察区域简化为正方形计算出测量路径总长约 5000m，根据视察时限、路况、实际视察面积等因素综合考虑，取车速 $v=20 \text{ km/h}$ 。

1.2 检测能力

基于易泄漏、产额高、半衰期适中三方面考虑，并结合美国 80 次地下试验气溶胶核素泄漏频次分布[11]，确定以 ^{133}Xe (81keV) 来保守设计系统的判断限，如式(2)估算得判断限 $LC \leq 75 \text{ Bq/m}^2$ 。

$$L_c = \frac{1}{t} \cdot \frac{K_\alpha \sqrt{B}}{F} \leq 75 \quad (\text{Bq/m}^2) \quad (2)$$

式(2)中， t 为能谱测量时长； B 为本底计数； $K_\alpha=1.645$ (对应于 95%置信水平)； F 为转换因子 ($\text{cps}/(\text{Bq/m}^2)$)，如式(3)计算。

$$F = \frac{S_0 P_\gamma}{2} \int_0^\pi \frac{R(\cos\theta)}{\cos\theta} e^{-\mu_a h / \cos\theta} d \cos\theta \quad (3)$$

式(3)中， P_γ 为核素特征 γ 射线发射几率； S_0 、 $R(\cos\theta)$ 分别为探测器对 γ 射线的有效前面积、角响应函数； h 为探测器距地高度； μ_a 为空气对 γ 射线的线衰减系数。

1.3 探测器选型

(1) 端面积

探测器架设于地面上 60cm 高度，为达到判断

限 $\leq 75 \text{ Bq/m}^2$ 要求，通过数值理论与 MC 模拟估算了所需探测器端面积 S_0 ，结果表明应有 $S_0 \geq 680 \text{ cm}^2$ 。

市售体积较大 NaI(Tl)探测器 (4"×4"×16")，前面积 400 cm^2 (以 4"×16"的面为探测端面)，两块合并时面积 800 cm^2 ，满足需求。

(2) 晶体厚度

从 γ 射线对 NaI(Tl)晶体的穿透率、探测效率和“信噪比”等几方面考虑，确定探测器晶体厚度。表 1 为穿透率计算值。

表 1 γ 射线对 NaI(Tl)穿透率为 1%时的 NaI(Tl)厚度

γ 能量/keV	81	164	233	250	364	537	660	1000
NaI(Tl)厚度/cm	0.4	1.1	1.9	2.1	3.7	6.8	9.3	17.8

MC 模拟获取了 81keV (^{133}Xe)、250keV (^{135}Xe) γ 射线的信噪比和探测效率随 NaI(Tl)厚度的变化曲线，如图 2、图 3。

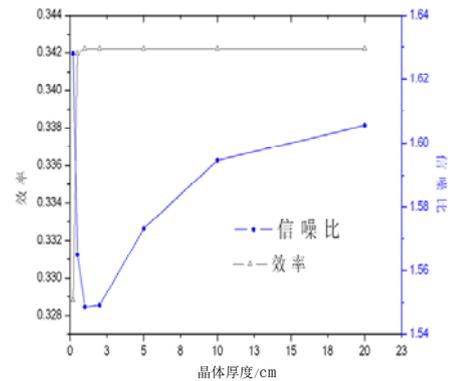


图 2 $^{133}\text{Xe}(81\text{keV})$ “信噪比”、探测效率变化

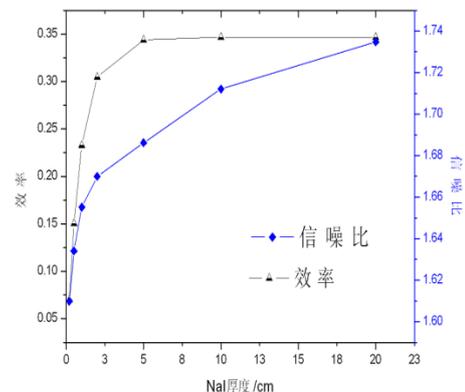


图 3 $^{135}\text{Xe}(250\text{keV})$ “信噪比”、探测效率变化

从图 2、图 3 可见，1) 探测效率随晶体厚度增加而增大，开始增加急剧，当厚度增加到使穿透率小于 1% 时，增大变缓；2) 信噪比的变化趋势不一致，对 250keV 射线，信噪比随晶体厚度增加而逐渐增大，对 81keV，信噪比在晶体厚度 2cm 时极小，之后随厚度增加而上升，厚度 5cm 时与 0.5cm 时信噪比约相等；3) 对 250keV 射线，当厚度达 10cm 时，信噪比约与厚度 0.2cm 时相当、探测效率趋于极大值，因此选择厚晶体有益于获得高的信噪比和探测效率，另外，机械强度提高；4) 对其他核素如 ^{131}I 、 ^{140}Ba 等，可检测裂变产物 γ 能量主要在 1000keV 范围内，因此选择 10cm 的晶体厚度，也为市售成熟产品 4"×4"×16" NaI(Tl)探测器的尺寸。

实验验证了 MC 结果正确性，见表 2。表明，通过 MC 计算选择探测器晶体尺寸是可行的。

表 2 信噪比的 MC 计算结果与实验结果比较

源与探测器间距离/cm	探测器 $\Phi 5'' \times 2\text{mm}$ 与 $\Phi 3'' \times 3''$ 信噪比的比值	
	实验结果	MC 结果
13.4	2.4	2.5

2 关键技术

2.1 稳谱

NaI(Tl)探测器脉冲幅度随温度漂移，实验显示在 $18^\circ\text{C} \sim 45^\circ\text{C}$ 范围内最大道漂达 80 道（1332.5KeV，1024 道多道）。采用天然 ^{40}K 的 1461KeV 能峰作为参考峰，进行能量与道址关系的实时刻度校正，达到了稳谱目的。实验显示，稳谱后在能峰最大道漂在 ± 1 道以内（ $0^\circ\text{C} \sim 45^\circ\text{C}$ 范围），效果良好。

2.2 能谱合成

由于阵列 NaI(Tl)探测器间不可避免的技术指标差异，导致单个仪器谱间存在差异。采用了基于抽样率转换的能谱合成技术^[12]，将不同探测器获取

的能谱，通过人为刻度转换为有效能量起始道址一致的能谱，以 ^{40}K 峰位最大的能谱作为标准谱，确定其它仪器谱由 ^{40}K 峰位移动量决定的扩展系数。根据扩展系数对其它谱先做抽样率倍增（插值），再做倍减（抽取）运算，使其它谱扩展为和标准谱具有相同刻度系数的能谱，之后将对应道址计数加和，完成能谱合成。使用四个 4"×4"×16" 尺寸 NaI(Tl) γ 探测器在实验室进行能谱合成实验，效果见图 4。合成谱与标准谱相比，钾、钷峰峰位偏移相差小于 1 道（约为 3keV），能峰半高宽变化小于 5%，净峰面积相差小于 1%。

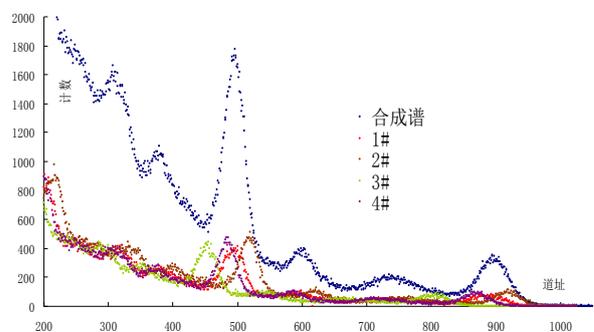


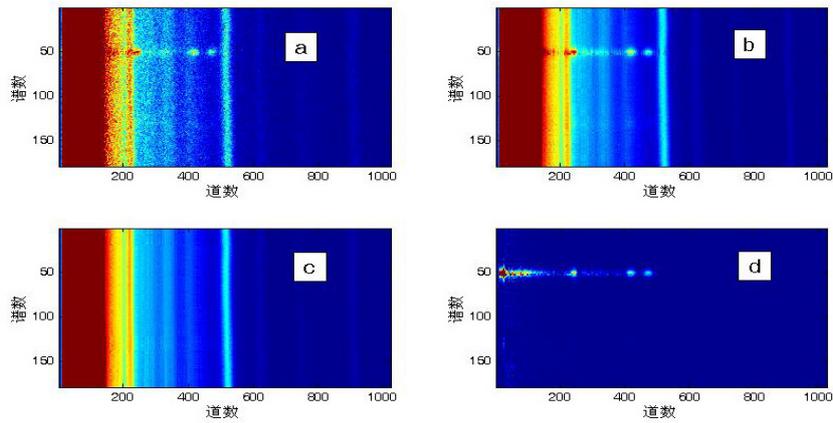
图 4 基于抽样率转换技术的能谱合成效果

2.3 异常甄别

采用基于噪声调整奇异值分解法（NASVD）进行放射性异常甄别^[13]。将获取的能谱转化为单位方差矩阵后进行奇异值分解，各主成份以各自对能谱的贡献大小按降序排列，用低序主成分重建能谱，去除原始能谱噪声。第一奇异值对应第一谱线主成分，反映能谱的平均谱形状，第二奇异值对应第二谱线主成分，是除去第一谱线主成分后最重要的能谱信号，反映各主要能峰的关系，变化幅度大。通过观测第二奇异值的变化可甄别放射性异常。用 NASVD 进行能谱降噪、异常甄别，及本底谱重构和剔除，之后采用彩虹图法显示异常。实验效果见图 5，不但显示出较高能量的放射性核素（图中 b，由右至左分别为 ^{40}K 、 ^{60}Co 、 ^{137}Cs ），本底剥离后还

显示出 ^{241}Am 能峰 (图中 d)。实现了对放射性异常的

的灵敏甄别和清晰显示。



a.原始彩虹图; b.降噪后彩虹图; c.本底彩虹图; d.剥离本底后彩虹图

图 5 NASVD 异常甄别效果

2.4 能窗屏蔽

核试核查现场视察只允许测量核素清单所列核素 (目前为 21 种), 因此须屏蔽其它信息。硬件屏蔽技术的硬件结构复杂、代价高, 本文采用软件方法实现能窗屏蔽。主要分两个步骤: 首先将能谱数据从多道谱仪读入到主机中, 为确保数据的唯一性及防止数据被他人获取, 将数据读入主机后立即删除多道谱仪缓存数据; 然后根据能谱刻度数据及预设的屏蔽能窗, 计算出对应的道址范围, 将应屏蔽道址的数据在计算机缓存中清零, 再将数据保存并显示在用户界面上。实现了数据屏蔽及被屏蔽数据的不可恢复功能, 实验效果见图 6。

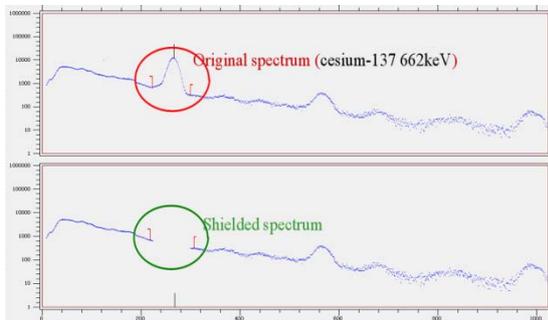


图 6 137Cs662KeV 能峰屏蔽前后的效果图

2.5 测控软件

用 C#语言模块化编程结构开发了测控软件, 实现了能谱数据获取与存储/寻峰、与 GPS 数据的融合、测量能谱/航迹实时显示、稳谱反馈控制、能谱合成、异常甄别算法嵌入及彩虹图显示等功能。软件界面如图 7, 主要由菜单、仪器控制及状态显示区、轨迹图、彩虹图四个部分组成。菜单中包含仪器参数设置、能量刻度、文件操作等功能菜单; 仪器控制及状态显示区包含扫描的开始和停止按键及仪器的状态显示和 GPS 信息显示; 轨迹图中显示车辆运行轨迹并用颜色标识全谱计数; 彩虹图中按时间顺序显示各能谱, 并用颜色表示各道址计数, 可方便判断异常能谱所在的位置及异常的核素种类。

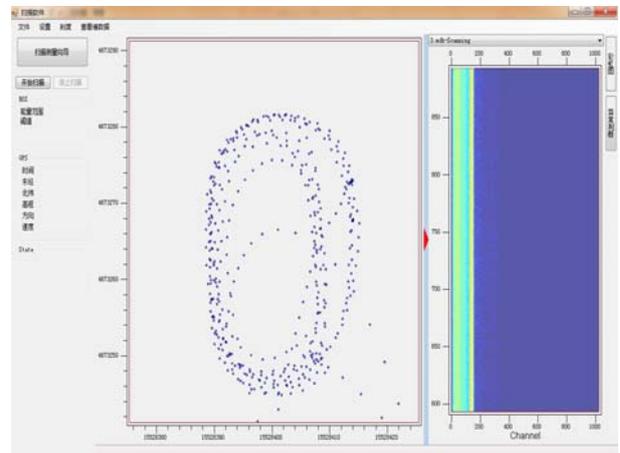


图 7 软件界面

3 系统总成与性能

3.1 总成

阵列 NaI(Tl)探测器安放在减震箱中,通过专用支架置于越野车保险杠上,距地 60cm 高,减震箱和支架分别如图 8,图 9 所示。



图 8 探测器减震箱



图 9 探测器支架

探测器支架由高强铝合金加工,机械强度高、对 γ 射线屏蔽小,可拆卸为两部分便于长途运输。“镂空式”支架的设计目的是扩大探测视野、减小屏蔽,提高探测效率。支架后部(与保险杠结合面)铝合金板厚度大、尺寸高,目的是增加机械强度与稳定性。



图 10 电子学柜

系统的电子设备集中布置于如图 10 所示的专用电子学柜中。越野车副驾驶座拆除后,电子学柜通过底座的连接固定架安装在副驾驶座位的导轨上,可前后滑动调整位置。

系统电子线路布局见图 11,系统的整体效果见图 12。

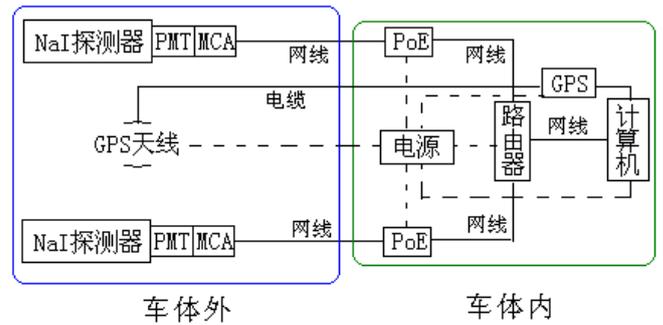


图 11 系统电子线路



图 12 车载 NaI(Tl) γ 谱仪系统整体效果

3.2 性能

系统具备稳谱、谱合成、能窗屏蔽、放射性异常甄别等功能。扫描测速 $\leq 20\text{km/h}$,耐震动;探测器系统、信号/电源线接口防雨雪,工作环境为湿度 $< 80\%$ 、温度 $-10^\circ\text{C} \sim +50^\circ\text{C}$;道漂 ± 1 道内(1024 多道);能量分辨率 $< 8\%$ (662keV);软件界面简洁、稳定性好,屏蔽数据不可恢复;异常甄别的灵敏度高,对地表均匀分布 ^{131}I 的判断限 $< 100\text{Bq/m}^2$,对空气中均匀分布 ^{133}Xe 的判断限 $< 50\text{Bq/m}^3$,对地表 ^{241}Am 的探测限约 $< 1000\text{Bq/m}^2$ 。

4 小结

研制了移动式车载 NaI(Tl) γ 谱仪扫描测量系统, 主要用于快速甄别地面及空气中的人工放射性异常。系统主要由大体积 NaI(Tl)探测器阵列、数字多道、GPS、电子学柜及越野车组成。系统研制中, 以 MC 计算和实验数据为依据, 选择订制了满足需要的探测器; 以 40K 1461keV 能峰为稳定参考峰, 实时校准峰位, 解决了系统谱漂移问题; 用抽样率转换方法实现了两个探测器能谱的合成; 采用基于噪声调整的奇异值分解法 (NASVD) 方法实现能谱降噪、本底剥离与放射性异常甄别; 采用实时读取与删除多道数据、在计算机缓存中处理数据后再备份的方法, 实现了对不允许测量核素的能窗屏蔽功能; 基于 C#编写测控软件, 实现了谱获取、储存与处理、扫描轨迹记录与显示等功能。

系统性能稳定, 放射性异常甄别灵敏度高。系统适用于禁核试核查现场视察与大区域放射性污染场址污染治理, 还可应用于一般环境放射性调查及核应急监测等工作。

拟进一步研究嵌入 NaI(Tl)阵列探测器实时测量空气吸收 γ 剂量率的功能。

参考文献:

[1] Marcos, Cesar, Ferreira, Moreira. RADIOLOGICAL SURVEY OF GOIANIA BY A MOBILE MONITORING UNIT [J]. Health Physics, 60(1991)1: 81-85.

[2] H.K. Aage, U. Korsbech. Search for lost or orphan radioactive sources based on NaI gamma spectrometry[J]. Applied Radiation and Isotopes, 58 (2003) :103-113.

[3] RS-700 Carborne Gamma-Ray Spectrometer Mobile Radiation Monitoring System [R], Applications. Terraplus Inc. 52 West Beaver Cr. Rd. #12, Richmond Hill, ON. Canada L4B 1L9.

[4] R.L. GRASTY, J.R. COS. A carborne gamma-ray spectrometer system for natural radioactivity mapping and environmental monitoring[R]. Presented at the Seminar "Exercise Résumé 95" Copenhagen, Denmark, 17-19th January,1996. (Exploranium Ltd. 264 Watline Rd. Mississauga, Ontario, L4Z 1P4, Canada.)

[5] 陆士立, 翟玉贵, 马艳芳等. CZD-6 型车载多道 γ 能谱仪测量系统[J]. 铀矿地质, 14(1998)2: 112-114.

[6] 王红艳, 刘森林, 潘大金. 车载式 NaI(Tl)大晶体组多道能谱仪[J]. 原子能科学技术, 38(2004)Suppl.: 252-254.

[7] 周锡华, 乔广志. 新一代航空多道伽马能谱仪的引进和初步应用[J]. 物探与化探, 26(2002)4: 318-324.

[8] 韩绍阳, 宋志艳, 翟玉贵, 柯丹 等. GR-660 车载 γ 能谱测量系统在砂岩型铀矿勘查中的应用研究[J]. 铀矿地质, 23(2007)4: 226-233.

[9] XU Zhenhua. Application of Radionuclide Measurement Techniques on OSI[R]. Presebtation on OSI Workshop 3, 18.11.1998-24.11.1998, Vienna.

[10] CTBTO preparatory commission. MODEL TEXT FOR THE DRAFT OSI OPERATIONAL MANUAL: BASIS FOR THE THIRD ROUND OF ELABORATION[R]. CTBT/WGB/TL-18/40, 24 February 2009.

[11] James H. Ely, James E. Fast, Carolyn E. Seifert, and etc. Estimation of ground-level radioisotope distributions for underground nuclear test leakage[R]. Pacific Northwest National Laboratory, US. DOE. 1996.

[12] 殷经鹏, 宋卫杰, 赖万昌, 冯天成. 基于数字信号处理的 γ 仪器谱合成方法研究[J]. 原子能科学技术, 45(2011)12:1516-1521.

[13] 刘俊, 冯天成, 龙斌, 雷卫国 等. 一种通过车载 NaI(Tl) γ 能谱甄别放射性异常的有效方法[J]. 核电子学与探测技术, 31(2011)12:1386-1390.

Development of a carborne NaI(Tl) γ spectrometry system for OSI

FENG Tian-cheng, JIA Ming-yan, LEI Wei-guo, LIU Jun, YIN Jing-peng, LONG Bin, EANG Yin-dong, CHEN

Wei, SU Chuan-ying, WU Rui, FENG Yuan-ju

(Northwest institute of Nuclear Technology, 710024 Xi'an, China)

Abstract: A carborne NaI(Tl) γ spectrum scanning system has been developed, mainly used for anomaly discrimination of artificial radioactivity on the surface or in the air. The system is made up of NaI(Tl) detector array, MCA, GPS, electric module and the car. The appropriate detector is selected based on the data from Monte Carlo simulation and experiment; The spectrum stabilization technique uses 40K as reference peak, and the spectrum is stabilized in real time; The spectra from different detectors are synthesized by the method of sampling rate conversion; The NASVD method is used for denoising, background deduction and anomaly discrimination; The information not allowed to acquire in OSI is blinded by the software; The software is programmed to implement the function of data acquiring, processing and showing.

The system can be worked under the speed of 20km/h in a rough, jolting movement; The working temperature range is between -10°C and 50°C ; The working humidity range is below 80%; The spectrum shift is within ± 1 channel(1024 channel); The energy resolution is 8%($^{137}\text{Cs}662\text{keV}$); The determination limit of ^{131}I on the surface is $100\text{Bq}/\text{m}^2$; The determination limit of ^{133}Xe in the air is $50\text{Bq}/\text{m}^3$; The detection limit of ^{241}Am on the surface is $1000\text{Bq}/\text{m}^2$.

This system can be used in On Site Inspection(OSI) and nuclear pollution treatment of large area, and also environment radioactive survey and nuclear emergency response.

Key words: OSI; carborne NaI(Tl) γ spectrometry; spectrum stabilization; spectrum synthesis; anomaly discrimination; spectrum blinding

一种虚拟核仪器的实现原理及方法

王鹏¹, 张软玉², 闫洋洋², 郝德建²

(1.四川大学原子核科学技术研究所, 辐射物理及技术教育部重点实验室;

2.四川大学物理科学与技术学院, 成都 610064)

摘要: 本文提出了一种虚拟核仪器的实现原理, 研制了基于 PCI-9820 波形数字化仪的虚拟核仪器中配套软件和必要硬件, 完成了智能数采算法和变频梯形滤波算法在虚拟核仪器中的实现。实验结果表明本文提出的原理和方法是正确的。本工作为全局化数字核测量系统开发和数字核信号处理研究等后续工作提供了很好的研发平台和实验支持。

关键词: 虚拟核仪器; 数字核信号处理; 数字化核测量

文章分类: 核仪器仪表及其应用的研究成果

1 引言^[1]

虚拟核仪器以其结构简洁、系统组建灵活、研发周期短、交互界面友好等诸多优势已成为新一代核仪器发展的重要方向之一和新型核仪器领域的研究热点。由于核信号发生的时间随机性、波形信息的多参数性和爆发式产生方式等特点, 使得虚拟核仪器还必须具备高精度波形数字化、大数据流存储和处理、多种信号处理算法灵活配置等特点。

本文研究并提出了一种多参数虚拟核仪器的实现方法。少量硬件系统+适当的总线+高性能计算机(其中包括各种功能模块构建的软件, 大容量数据存储单元)。系统的构建思路: 以“AD-Link 的 PCI-9820”波形数字化仪配自行研制的多适应前端控制器组成波形数字化系统; 根据核信息获取及处理需求, 在 ThinkStation 工作站上基于 Win7 开发

了 Visual C++ 环境下软件系统; 该软件系统分为基本模块和扩展模块两部分。其中基本软件模块包括数采控制、数据存取和实时显示等功能模块, 它们是启用该虚拟核仪器必备软件。扩展软件模块中则提供了一系列针对不同核测量对象和任务研发的各种数字核信号处理的功能模块, 如: 智能变频采样、双指数信号梯形成形、能谱获取和分析模块等。随着对数字核信号处理研究的进展, 该部分软件将可不断被丰富和完善。

本工作组建的数字化核测量系统, 通过加载不同信号处理软件, 可在一套物理硬件系统上实现多参数获取; 构建了一个用于数字核信号处理的研究、实验平台; 基于 VC++ 环境编写的算法编码增强了系统通用性, 为进一步在其它数字化系统中的实现提供了便利。

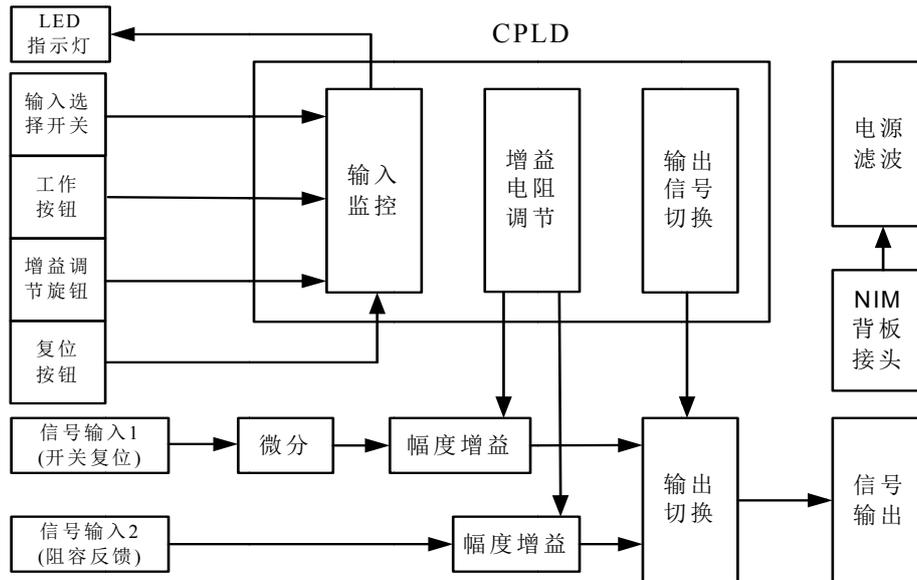


图 1. 虚拟核仪器的组成框图

基金项目: 本工作由国家自然科学基金资助。项目批准号: 11075111

作者简介: 王鹏 (1974-), 男, 四川成都, 讲师, 在职博士生, 核技术及应用专业

通讯作者: 张软玉 (1969-), 女, 山东莱州, 副教授, 博士, 核技术应用, 数字核电子学。



输入选择单元可以选择阻容反馈式或开关复位式前放输出；微分成形单元完成输入信号的交流耦合；幅度增益单元对输入信号进行量程内放大；通道切换单元选择信号的输出通道，输出通道切换通过 MAX-4729 来实现；控制单元由 CPLD (XC-95288XL)完成复位控制、LED 指示灯控制、通道切换单元控制和数字电位器参数读写，通过调节拨码开关来控制 CPLD 输出一组控制时序来设置数字电位器的阻值，从而实现调节幅度增益单元的放大倍数。图 3 为前端电路对 ^{241}Am 的 γ

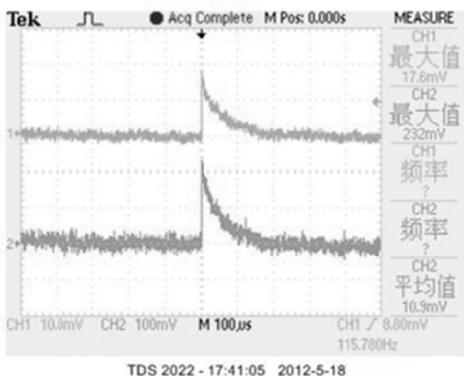


图 3. 前端线路实测探测器信号

射线实际测量结果，其中上方为 CdZnTe 探测器输出的信号，下方为前端输出的信号。

4 系统软件设计

本虚拟核仪器软件基于 VC++环境下开发。软件系统包括基本模块及扩展模块两部分。其中基本模块包括参数设置模块、采样控制模块、基本信号处理模块、图像显示模块，可完成波形采样、数据存储、动态波形图及能谱图显示等基本功能。扩展模块主要用于用户的后续数据处理算法的添加，目前实现了智能变频采样和变频滤波的功能。这些模块以控件或动态链接库的形式进行封装，组建测量系统时只需要根据需要定义好相关的接口，就可以灵活组合。虚拟核仪器软件的结构框图如图 4 所示。

4.1 参数设置和采样控制模块

通过调用 PCI-9820 所提供 SDK 中的 API 函数，实现对波形数字化仪的采样频率、采样方式、触发方式、触发电平、校准方式、输入量程等参数

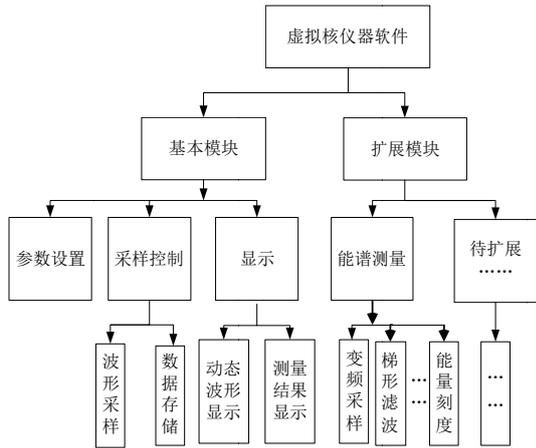


图 4. 虚拟核仪器软件结构框图

进行设置，还可以控制波形采集卡的控制及启动和停止。波形数字化仪采集的实时数据先保存在板载缓存中，当缓存存满后会通过 DMA 方式将数据传输到计算机内存中。这时我们可以对实时数据执行相关的信号处理算法，如智能变频采样、梯形滤波等。经过处理的数据可以用于动态显示或保存成文件。

4.2 波形数据的提取及数据结构的设计

波形数字化仪连续采集的实时数据，既包括了产生核事件时的数据，也包括了核事件之间间隔。当核事件计数率较低的时候，如果将这些连续采集的数据全部保存的话，其中的间隔期会浪费大量的磁盘空间。前文提到的智能变频采样算法及相应的梯形滤波算法都是针对单个核信号波形进行处理，因此我们只需要存储从原始采样数据中提取出完整的波形数据即可。为此，我们设计了如下脉冲波形的数据结构：

Struct PulseWave

```
{
    ULONG startTime; //脉冲起点
    ULONG endTime; //脉冲终点
    USHORT peakValue; //脉冲峰值
    ULONG peakTime; //峰值时刻
    USHORT *pValue; //波形数据
```

}

其中，startTime 和 endTime 记录了脉冲发生的起止时间信息；*pValue 为保存起止时刻间波形数据的指针；peakValue 和 peakTime 记录了波形的峰值及峰值到达的时间，以便后续数字信号处理等任务滤波算法及其他信号处理算法能直接使用，从而提高运算效率。采用此数据结构，实现了大幅度减少数据存储量的同时保留所有有效数据信息的目的。

虚拟核仪器的软件主界面如图 5 所示。

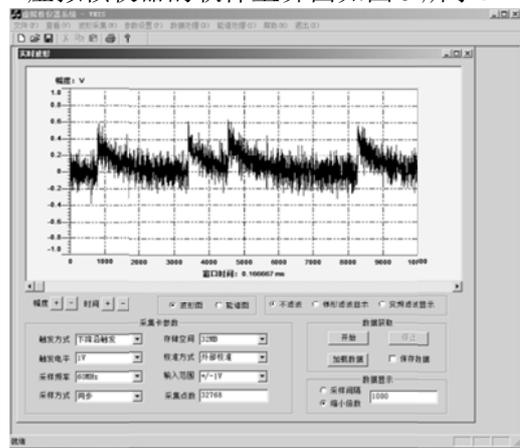


图 5. 虚拟核仪器软件界面图

5 实验结果及结论：

5.1 实验结果

图 6、7 显示了本文建立的虚拟核仪器对 Si-PIN 探测器输出 ^{55}Fe 的 X 射线信号测量和处理结果。图 6 中波形 1 为 PCI-9820 获得的原始信号，波形 2 为经变频算法处理后的变频信号及将变频信号做梯形滤波后的信号。图 7 中波形 1 为未经变频算法处理后的原始信号做梯形滤波后的信号；波形 2 为原始信号经变频算法处理后再将其做梯形滤波后形成的信号，两个信号基本一致。实验可见对信号的处理达到了预期效果，为下一步获取高精度能谱奠定了基础。

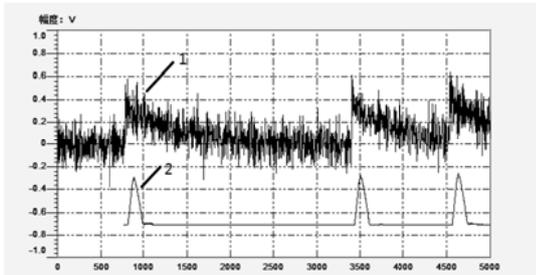


图 6. 原始信号与变频采样及滤波信号

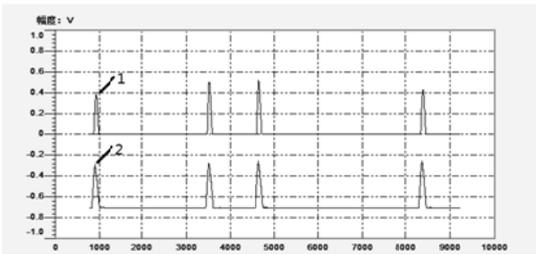


图 7. 非变频滤波与变频滤波的对比

5.2 结论

1) 本文讨论的虚拟核仪器的原理和方法是正确可行的。

2) 实验结果表明, 本文设计的智能数字变频采样算法可以在保证测量精度的前提下有效地减少数字核信号的数据量, 提高了核信息的传输及存储效率;

3) 对变频后双指数信号的梯形滤波算法可以有效提高数字信号信噪比

4) 虚拟核仪器系统的建立, 可以为研究数字核仪器的相关算法提供一个可靠的验证平台;

5) 该虚拟核仪器系统中进一步功能还在完善中。

参考文献:

[1] 赖万昌,于姗姗,唐 斌. 基于 Labwindows_CVI 的虚拟核仪器软件. 核电子学与探测技术,2009,29(3):580-583.

[2] Gennaro Evangelista. Design of digital systems for arbitrary sampling rate conversion [J]. Signal Processing,2003,83:377-387.

[3] 张软玉,罗小兵,许祖润. 参数最优化数字核能谱获取系统研究 [J]. 原子能科学技术, 2009,43(1):77-80.

Principle and Realization Method of a Virtual Nuclear Instruments

Wang Peng¹, Zhang Ruan-yu², Yan Yangyang², Hao Dejian²

(1. The Institute of Nuclear Science and Technology, Key Laboratory of Radiation Physics and Technology

2. College of Physical Science and Technology, Sichuan University, Chengdu, China, 610064)

Abstract: This paper introduces a composition principle of virtual nuclear instrument. This instrument is based on ADLINK PCI-9820 digitizer with necessary hardware and software, and it can implement the algorithms of intelligent data acquisition and frequency changing trapezoidal shaping. The result shows the principle and method we presented are feasible. Our work has provided a useful experimental platform for global digital nuclear measurement system and the digital nuclear signal processing.

Key words: Virtual Nuclear Instrument; Digital Signal Processing; Digital Nuclear Measurement

CO₂在 UO₂(001)表面化学吸附的第一性原理计算

王飞, 何彬, 左广霞, 黎素芬

(第二炮兵工程大学 102 教研室, 西安, 710025)

摘要: 运用密度泛函理论中的广义梯度近似 (GGA) 和 PW91 交换关联泛函, 结合周期性平板模型, 在非自旋极化水平下对 CO₂ 在 UO₂(001)表面化学吸附进行了研究。获得了吸附前后的能带结构和态密度, 比较和分析了吸附对能带结构和态密度的影响。研究表明: CO₂ 平行吸附于 UO₂(001)表面 Hollow 位最稳定。吸附后, CO₂ 获得电子。态密度分析表明, CO₂ 分子的 s、p 状态与 U 原子的 6d 状态发生杂化。经计算可知, CO₂ 在该位置的吸附能为 0.145516eV。

关键词: 密度泛函; 能带; 态密度; 吸附能

文章分类: 计算机技术及其应用的研究成果

1 引言

铀是广泛使用的核工程材料, 同时又是非常重要的战略能源材料。其原子结构中的 5f³ 6d² 价电子结构和特有的标准电极电位使得其化学性质极为活泼。铀的化学性质决定了纯净的金属铀几乎不可能得到。即使在真空中, 铀也会与微量的水蒸气和氧气生成 UO₂ 薄膜。由此, 铀的腐蚀实际上是从 UO₂ 表面开始的, 研究 UO₂ 的性质成为研究铀防腐蚀技术的前提。

UO₂ 是复杂铀-氧体系 (UO, UO₂, U₄O₉, U₃O₇, U₁₆O₃₇, U₈O₁₉, U₂O₅, U₃O₈ 和 UO₃) 中最稳定的氧化物之一, 并且被认为是铀氧化的基底模型。对 UO₂ 的研究主要集中在 UO₂ 晶体的表面吸附。Ferguson 等用实验测定了 O₂ 在 UO₂ 表面的吸附热^[1], 结果表明在 UO₂ 表面存在着物理和化学吸附的 O₂。Senanayake 等研究了水在完整和缺陷 UO₂(111) 表面的吸附^[2]。

CO₂ 在铀的腐蚀与防腐蚀中都能产生作用。研究表明, CO₂ 作为氧化性气体能够腐蚀金属铀^[3],

但经超量 CO₂ 处理过的铀却具有防腐蚀功能^[4]。本文用 DFT 方法研究 CO₂ 在 UO₂(001) 表面吸附和电子结构, 目的是完整地认识 CO₂ 与金属铀的反应机理。

2 计算方法

UO₂ 属萤石型氧化物, 晶体为面心立方结构, 晶胞参数 $a=0.527\text{nm}$ ^[3]。本文在计算中采用 $\sqrt{2} \times \sqrt{2}$ UO₂(001)超晶胞四层平板模型来研究 CO₂ 在 UO₂(001)面的吸附。

本文采用密度泛函理论中的广义梯度近似 (GGA) 和 PW91^[4-6] 交换—关联泛函和周期性平板模型方法模拟 CO₂ 分子在 UO₂(001)面的吸附, 所有计算均由 DMol3^[7] 软件包实现。U 原子内层电子由密度泛函半核赝势 (DFT Semi-core Pseudo Potentials)^[8], 价电子波函数采用双数值基 (DND) 展开, C、O 原子采用全电子基组。K 点设置 3×3×1。计算中, 取 4 个原子层为一个平板厚度, 相邻两层平板间真空层高度为 2nm, 固定下面两层原子进行计算。

UO₂属萤石型氧化物，晶体为面心立方结构，晶胞参数 $a=0.527\text{nm}^{[3]}$ 。本文在计算中采用 $\sqrt{2}\times\sqrt{2}$ UO₂ (001) 超晶胞四层平板模型来研究 CO₂ 在 UO₂ (001) 面的吸附。

本文采用密度泛函理论中的广义梯度近似 (GGA) 和 PW91^[4-6] 交换—关联泛函和周期性平板模型方法模拟 CO₂ 分子在 UO₂ (001) 面的吸附，所有计算均由 DMol3^[7] 软件包实现。U 原子内层电子由密度泛函半核赝势 (DFT Semi-core Pseudo Potentials)^[8]，价电子波函数采用双数值基 (DND) 展开，C、O 原子采用全电子基组。K 点设置为 $3\times 3\times 1$ 。计算中，取 4 个原子层为一个平板厚度，相邻两层平板间真空层高度为 2nm，固定下面两层原子进行计算。

计算了 CO₂ 分子在 UO₂ (001) 表面的吸附能 $E_{adsorption}$ ，计算公式如下：

$$E_{adsorption} = E_{adsorbate} + E_{adsorbent} - E_{system}$$

式中， $E_{adsorbate}$ 表示被吸附物的能量， $E_{adsorbent}$ 表示吸附剂的能量， E_{system} 为吸附后体系的总能量。

3 结果与讨论

3.1 UO₂ (001) 表面构建

对 UO₂ (001) 表面进行解离，由于原子位置的不同，存在两种不同的表面原子终止结构，分别为 A 类结构：最表层终止于铀原子，次层为氧原子；B 类结构：最表层终止于氧原子，次层为铀原子。本文研究氧气分子与表面铀原子的吸附，因此，只对 A 类结构进行研究。

对 UO₂ (001) 表面的真空厚度收敛性进行了测试，结果图 1 所示。结果表明，当真空层厚度至少为 1.7nm 时，体系能量变化小于 10mev，此时，可认为真空层厚度收敛。采用 2nm 的真空层厚度，以确保平板间的相互作用力可以被忽视。

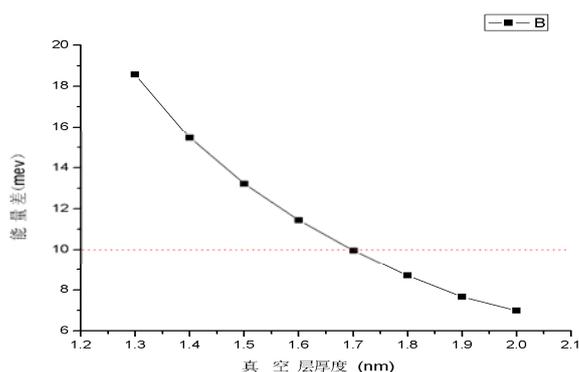


图 1 UO₂ (001) 表面真空层厚度测试结果

3.2 UO₂ (001) 表面的弛豫

由于体系的三维周期性在表面处突然中断，表面原子的配位情况、电荷分布及力场都会发生变化，根据第一性原理，体系趋于能量更低的状态，表面原子可能发生弛豫或重构。在计算吸附之前，选取了 6 个原子层为一个平板厚度，放开三层计算其弛豫。

为了定量描述表面原子的几何结构弛豫，取 X,Y,Z 轴沿晶体的 a,b,c 基轴，表面原子层数为 \vec{i} ，设 $\Delta X = X_i - X_{0i}$ ； $\Delta Y = Y_i - Y_{0i}$ ； $\Delta Z = Z_i - Z_{0i}$ 为原子偏离理想晶格位移， X_{0i} ， Y_{0i} ， Z_{0i} 为理想表面晶格为第 i 层原子位置坐标分量， X_i ， Y_i ， Z_i 为弛豫后表面第 i 层原子坐标分量。计算结果如表 1 所示。弛豫后，体系的总能量降低了约 0.489ev。

由计算结果可知，弛豫较小，因此，计算时可以固定底物进行计算。为减小误差，采取固定两层原子进行计算。

3.3 CO₂ 分子在 UO₂ (001) 表面的吸附计算

吸附分子趋向于高对称位置。Bridge 位和 Hollow 是公认的能量优先位置。为节约计算资源，本文只考虑 Bridge 和 Hollow 位，每个吸附位置考虑两种吸附构型，平行和垂直。基于能量最低原理，寻找各个吸附构型的最优吸附位置。计算表明，CO₂ 分子平行吸附在 Hollow 位时体系能量最低。

表 1 UO_2 (001) 表面弛豫结果

原子层数	原子序号	弛豫结果		
		ΔX (%)	ΔY (%)	ΔZ (%)
1	U_1	2.52	2.52	0.75
2	O_{21}	2.7	2.37	0.43
	O_{22}	2.37	2.7	0.43
3	U_3	1.17	1.17	0.32

对 CO_2 平行吸附于 UO_2 (001) 面的 Hollow 位进行了第一性原理计算, 将 CO_2 吸附前后的能带结构和态密度进行了比较, 并计算了 CO_2 分子的吸附能。

UO_2 (001) 表面在化学吸附前的能带结构和态密度如图 2 所示。从图中可以看出, 费米能级和导带之间存在能隙, 大小为 0.003Ha , 说明 UO_2 是半导体或绝缘体。在费米能级附近, 能带比较窄, 说明这条能级的本征态主要由局域的原子轨道组成, 这条能带上的电子局域性非常强, 有效质量相对较

大。因为 $5f$ 状态具有定域 $4f$ 状态和离域 $3d$ 状态之间的性质, 接近于费米能级的能带主要由 $5f$ 窄带构成, 所以 $5f$ 能带是 U 元素化学性质异常活泼的原因。

从图2中可以看出, UO_2 (001) 表面的分态密度主要由 $-0.8 \sim -0.55\text{Ha}$, $-0.3 \sim -0.2\text{Ha}$, $-0.1 \sim 0.5\text{Ha}$ 这三个能带的分态密度组成。 s 状态对总态密度的贡献主要分布于第一个能带内, p 状态对总态密度的贡献主要分布于第一、二个能带内, d 和 f 子壳层对总态密度的贡献主要分布于第三个能带内。

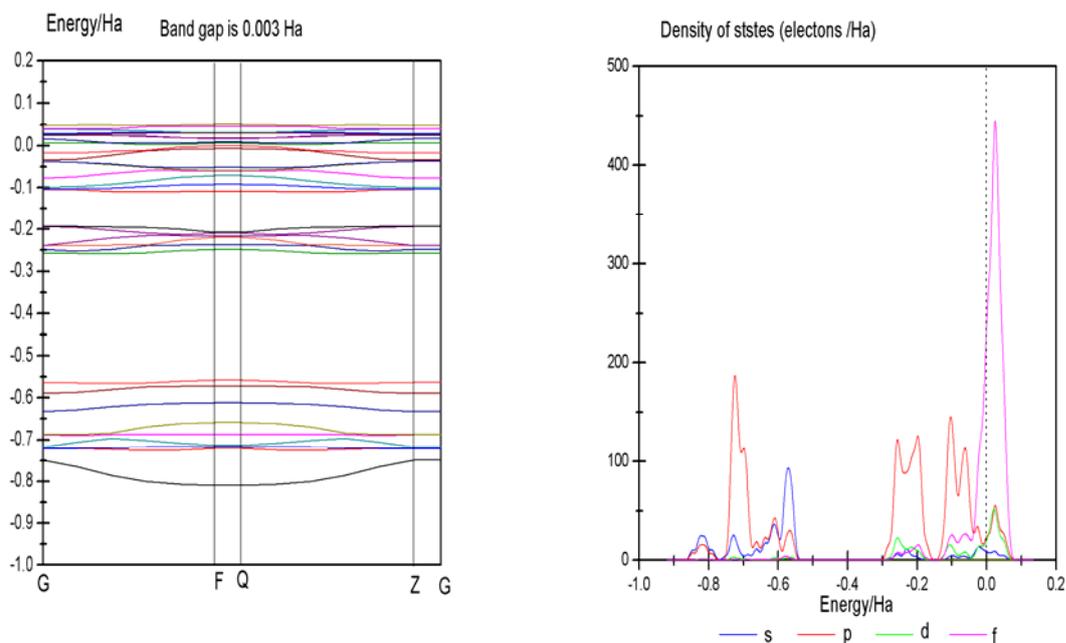


图 2 UO_2 (001) 面的能带结构和态密度

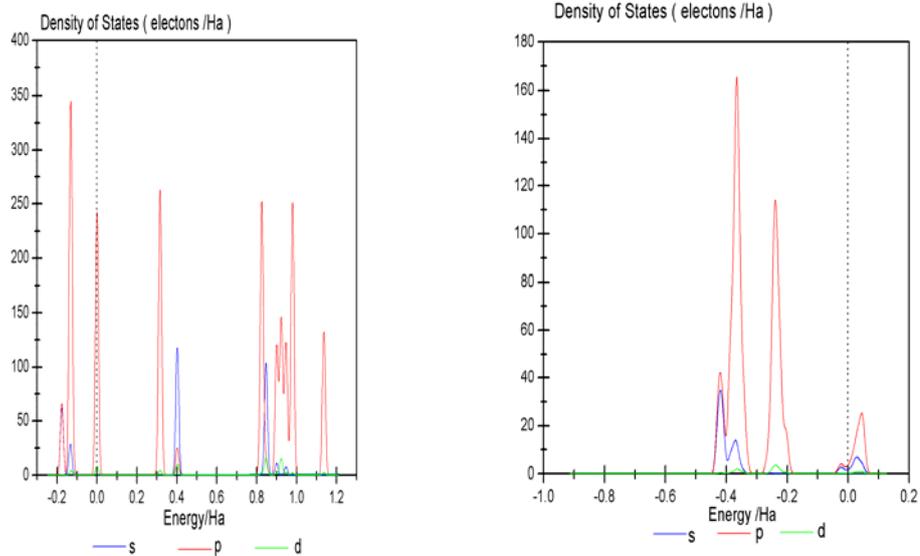


图 3 CO₂ 吸附前后的态密度

CO₂在化学吸附前、后的分态密度如图3所示。从图3可以看出，CO₂的态密度主要由s,p状态组成。其能带结构主要分布在-0.2~-0.1Ha，-0.05~0.05Ha，0.3~0.45Ha，0.8~1Ha和1.1~1.15Ha。

当CO₂平行吸附于UO₂(001)面时，CO₂分子的态密度向低能带移动。这与吸附后CO₂分子的频率发生红移相吻合。

当CO₂平行吸附于UO₂(001)表面的Hollow位时，UO₂(001)表面吸附后的能带结构与态密度

计算结果如图4所示。与图2相比较可以发现，分布在-0.85~-0.55Ha的能带的s子壳层几乎不受影响。在-0.15~0.1Ha能带的s，p，d状态发生了明显的变化，这表明分子的s，p状态与U的6d状态发生杂化行为，CO₂获得电子。-0.45~-0.3Ha能带上出现了新的s，p，d状态，且主要是p状态，说明CO₂分布在该能带上的电子通过跃迁（或热振动方式）过度至该能带。f状态几乎不受影响。

由计算可知化学吸附能为0.145516Ha。

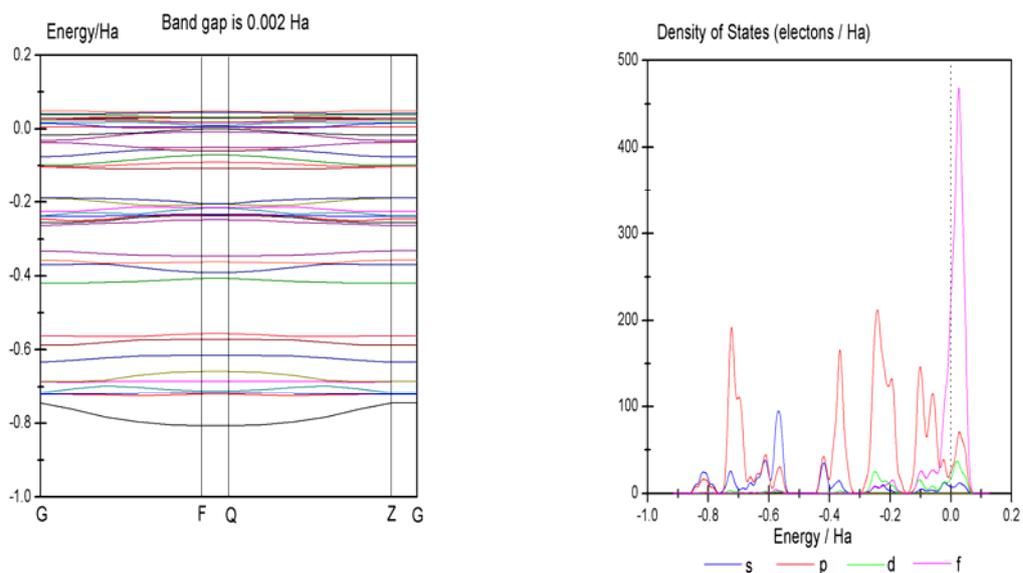


图 4 UO₂(001) 在化学吸附后的能带结构与态密度

4 结论

本文采用密度泛函理论中的广义梯度近似 (GGA) 和 PW91 交换—关联泛函, 通过周期性四层 UO_2 (001) 的超晶胞结构, 在非自旋极化水平下对 CO_2 平行吸附在 UO_2 (001) 表面的 Hollow 位的化学吸附进行了研究。获得了 CO_2 化学吸附前后的能带结构和态密度, 结果表明 CO_2 分子的 s, p 状态与 U 原子的 6d 状态发生杂化行为。在该位置下化学吸附能为 0.145516Ha。

参考文献:

- 1 Ferguson, I F; Mcconnell, J D M. Heat of adsorption of oxygen on Uranium dioxide at -183°C [J]. Proc R Soc A,1957,241:67-79
- 2 Senanayake, S D; Idriss,H. Water reactions over stoichiometric and reduced UO_2 (001) single crystal surfaces. Surface Science,2004,563(1~3):135-144.
- 3 Idriss H. Surface reactions of uranium oxide powder ,thin films and single crystals. Surface Science

Reports,2010,67-109.

- 4 Vosko, S J; Wilk, L and Nusair, M. Accurate spin-dependent electron liquid correction energies for local spin density calculations: a critical analysis. Can.J.Phys., 1980, 58(8): 1200-1211.
- 5 Becke,A D. Density-functional exchange-energy approximation with correct asymptotic behavior. Phys. Rev.,1988,A38,3098-3100
- 6 Perdew,J P and Wang,Y. Accurate and simple analytic representation of electron-gas correction energy. Phys. Rev. B, 1992, 45(23): 13244-13249
- 7 Delley,B. An all-electron numerical-method for solving the local density functional for polyatomic-molecules. J.Chem.Phys.,1990,92(1):508-517.
- 8 Delley, B. Hardness conserving semi-local pseudopotentials. Phys. Rev. B,2002,66(15):155125-155129.

CO_2 Molecule chemisorption on the (001) Surface of UO_2 : A First Principle Calculation

Wang Fei, HE Bin, Zuo Guang-xia, Li Su-fen

(The second artillery engineering college, Xi'an 710025)

Abstract: Chemisorption of CO_2 molecule on the (001) surface of UO_2 has been investigated with periodic slab model at the non-spin-polarized level. It has been used that the generalized gradient approximation of the density functional theory with the PW91 of exchange-correlation functionals. Band structure and density of states before and after CO_2 molecule chemisorption horizontally on the hollow position of the (001) surface of UO_2 have been compared and analyzed. The result shows that s and p states of CO_2 molecule interact with 6d states of U atoms. The chemisorption energy for this adsorption site was 0.145516Ha.

Key words: density functional; chemisorption; energy band; density of states

CSNS ^3He 管阵列样机数据获取系统研制

赵东旭^{1,2}, 章红宇^{1,2}

(1. 核探测与核电子学国家重点实验室, 北京 100049

2. 中国科学院高能物理研究所, 北京 100049)

摘要: 本文介绍了中国散裂中子源 (China Spallation Source, CSNS) 项目 ^3He 管阵列样机专用的数据获取系统。该数据获取系统精确的测试了电子学系统的各项性能指标并在在线模式下获取通过触发判选后的前端电子学事例数据, 进行处理, 并将数据记录到本地数据文件中, 供离线数据分析使用。该数据获取系统为后期工程建造阶段的数据获取系统的研发奠定了基础。

关键词: 数据获取; 电子学检测; 气体探测器; VME 总线; LabVIEW

文章分类: 计算机技术及其应用的研究成果

1 引言

中国散裂中子源 (China Spallation Source, CSNS) 是“十二五”规划中的“科技创新能力建设重点项目”, 建成后将成为开展前沿学科及高新技术研究的先进大型实验平台, 能够为我国的多学科创新在国际上占领一席之地提供良好的机遇。

高通粉末衍射仪 (High Intensity Powder Diffractometer, HIPD) 是 CSNS 一期建设的三台中子谱仪之一, 其核心仪器计划是采用 ^3He 管阵列方案。图 1 所示为 ^3He 管阵列样机系统示意图。整个 ^3He 管阵列样机系统包括 ^3He 管阵列探测器、读出电子学以及数据获取三大组成部分。该系统用于对探测器、电子学和数据获取系统进行工程化预制研究。

本文针对 ^3He 管阵列样机的特点, 研制了专用的数据获取系统。

2 ^3He 管阵列样机电子学系统简介

^3He 管阵列样机的读出电子学通过电荷和时间测量

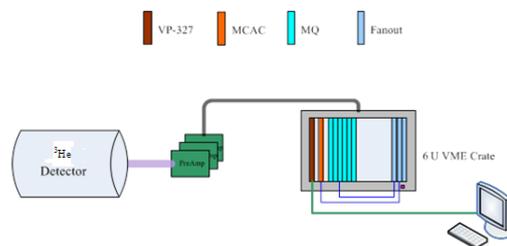


图 1 ^3He 管阵列样机系统

来判定中子到达 ^3He 正比管的时刻和位置。电子学设计基于 VME64X 规范, 系统包括一个 6U VME 机箱、一个 Concurrent 公司出产的 VP-327 (X86 体系结构) 型 VME 控制器 (外接显示器、键盘和鼠标)、前置放大器、校准刻度与逻辑控制插件 (MCAC)、若干个时间电荷测量插件 (MQ) 及扇出插件组成。MQ 插件支持链式块传输 (Chained BLock Transfer, CBLT) 数据读出。

3 ^3He 管阵列样机数据获取系统

^3He 管阵列样机数据获取系统的主要任务是获

作者简介: 赵东旭, 28 岁, 研究实习员, 硕士, 主要从事核技术及应用、数据获取方面的研究。

章红宇, 42 岁, 高级工程师, 硕士生导师, 主要从事核技术及应用、数据获取方面的研究。

取通过 CBLT 方式读出前端电子学以自触发方式采集到的事例数据，进行事例的在线处理，并将数据记录到本地数据文件中，供离线数据分析使用。

3.1 数据获取软件开发环境

数据获取软件系统的开发是基于 Visual C++ 6.0 和 LabVIEW 8.2。采用 C++ 程序设计语言在 Visual C++ 6.0 中编写动态链接库程序，用于底层对 VME 总线的 CBLT 访问，实现对电子学硬件配置和原始数据的获取，以及用于对原始数据进行存储，解析。采用 LabVIEW 图形化编程语言在 LabVIEW 8.2 中编写上层用户界面，调用动态链接库实现对电子学硬件的控制和数据获取，并对原始数据进行解析处理后得到的数据，进行电子学性能的计算、评估、直方图显示、数据拟合等。

3.2 数据获取系统读出数据格式

数据获取软件获取的电子学数据包中包含了各种的数据信息，包括有地理位置、 T_0 数据、管号、时间计数值、管子左端电荷值、管子右端电荷值，以及用于校验的数据包总字节数。电子学数据包输出格式如图 2 所示。

31	30	29	28	27	26	25	24	23	22	21	20	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0		
标志位	0	0	0	0	0	0	0	0	0	GEO	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	T0号																							
标志位	0	0	0	0	0	0	0	0	0	管号	时间计数值																						
管子左端电荷值										管子右端电荷值																							
标志位	0	0	0	0	0	0	0	0	0	管号	时间计数值																						
管子左端电荷值										管子右端电荷值																							
.....																																	
.....																																	
标志位	0	0	状态信息	0	GEO	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
传送字节数																															0	0	0

图 2 ^3He 管读出电子学 CBLT 数据输出格式

3.3 数据获取系统电子学配置

数据获取软件先要对电子学进行配置，设定系统的工作模式。电子学配置先配置校准刻度与控制插件，然后配置时间电荷测量插件。电子学配置流程及步骤如图 3 所示。

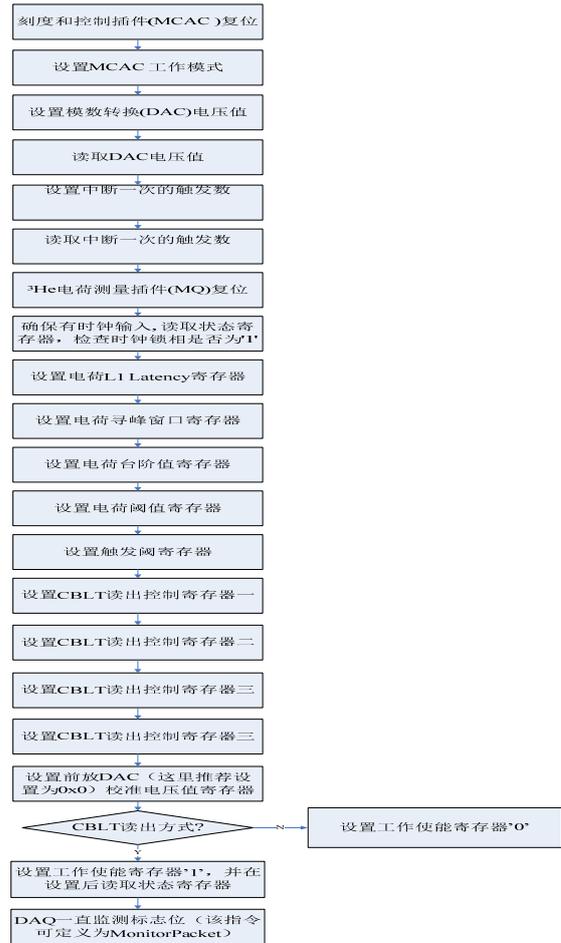


图 3 数据获取软件电子学配置流程图

3.4 数据获取软件

数据获取软件分为电子学检测和在线数据获取两部分。

3.5 电子学检测程序

电子学检测程序运行在校准刻度工作模式下。电子学检测程序不仅要能够帮助调试电子学硬件的各个功能插件，而且要能精确测试电子学系统的

各项性能指标。其工作原理是在校准刻度工作模式下利用系统本身可编程产生的校准刻度信号，对系统进行性能测试，以便对系统当前的性能状况做出评估，确保在进入在线取数工作模式后系统的取数质量。

本系统的电子学检测程序分为电荷分辨测试

程序、时间分辨测试程序和积分非线性测试程序。

1) 电荷分辨测试程序

电荷分辨测试用于测量电子学系统的噪声水平。其测量方法：在校准刻度工作模式下，取电荷域值 $D_{calib} = D_1$ (缺省值 100)；重复测量 N 次 (缺省值 10000)，得到 N 个峰值；计算给出 N 个峰值的平均值 $ADC1$ 和均方根值 σ_{D1} ；再取 $D_{calib} = D_2$ (缺省值 200)；重复测量 N 次 (缺省值 10000)，得到 N 个峰值；计算给出 N 个峰值的平均值 $ADC2$ 和均方根值 σ_{D2} ；将测量结果按如下公式计算出噪声 σ_Q 。

$$\sigma_Q = \frac{0.863 \times (D2 - D1)}{ADC2 - ADC1} \times \frac{\sigma_{D1} + \sigma_{D2}}{2} \text{ 单位: fc}$$

注：在进行 N 次重复测量时，相邻两次测量的时间间隔不要小于 50ms (重复频率不要大于 20 次/S)。

经测试，电子学系统的电荷分辨典型值为 $\sim 0.16fc$ 。电荷分辨测试程序的界面和测试结果显示如图 4 所示。

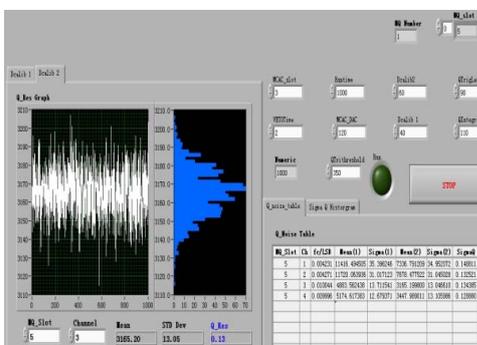


图 4 电荷分辨测试结果

2) 时间分辨测试程序

在校准刻度工作模式下，Start 脉冲与质子打靶周期信号 T_0 有确定的时间关系，可利用此时序关系来进行时间分辨的测量。测量方法为：Start 脉冲送至电荷灵敏前放，在其上升沿处产生一指数波信号，该指数波信号经主放、滤波成形及数字化后，送 FPGA 参与自触发逻辑，产生单管自触发 Trigger 信号。在 FPGA 中开启了一个 21bit 的计数器，当

T_0 信号到来时，对计数器进行清零；当 Trigger 信号到来时，读取当前计数器的值，此值即为中子击中 ^3He 管的时刻。对此值进行多次测量得到平均值及均方根值，均方根值即为系统的时间分辨。

实验测得，系统的时间分辨 $\sim 13\text{ns}$ 。时间分辨测试程序的界面和测试结果显示如图 5 所示。

3) 积分非线性测试程序

积分非线性测试程序用于检测随着电荷域值的提高，电荷值的的增长趋势。其测量方法：在电子

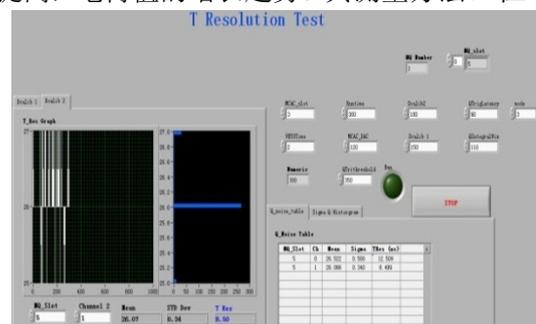


图 5 时间分辨测试结果

学检测工作模式下，按一定步长，在量程范围 (20-200fc) 内，从低到高向前放输入不同的 D_{calib} 值，对每一输入值，重复测量 100 次，取峰值的平均值作为该点的测量值。对各点平均值作一次项最小二乘法直线拟合，根据下式给出积分非线性。

$$INL = \frac{\text{实验点在Y轴方向偏离拟合直线的最大绝对值}}{\text{满刻度输入对应的值一拟合直线在Y轴上的截距}}$$

经测量，整个电子学系统的电荷积分非线性的典型值为 $\sim 0.15\%$ 。积分非线性测试程序的界面和测试结果显示如图 6 所示。

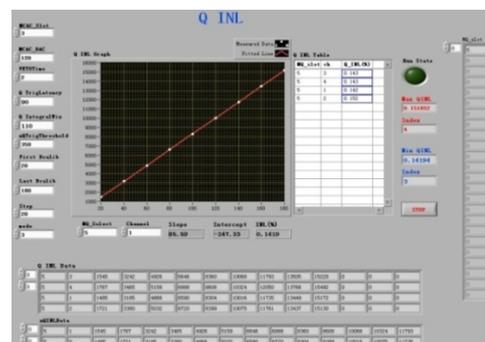


图 6 积分非线性测试结果

3.5.1 数据获取程序

数据获取程序运行在在线取数工作模式下。数据获取程序的主要任务是在线获取通过触发判选后的前端电子学事例数据，将分布在 VME 机箱中各电子学插件上的事例数据迅速地汇集到 VME 机箱控制器上进行处理，并将数据记录到本地数据文件中，供离线数据分析使用。

数据获取程序提供计数方式和计时方式两种取数方式供用户选择，用来取一定数量的事例数据或者在一定时间内进行取数。

1) 计数方式

用户设置以 CBLT 方式访问 VME 总线读取数据的次数。将设置的取数次数作为参数传递赋值给在程序中循环执行 CBLT 方式取数的次数。当取数次数达到所设置的次数时，程序自动跳出循环停止数据读取，结束运行。

2) 计时方式

用户设置数据获取的时间，程序中在循环执行 CBLT 方式取数之前，执行获取当前时间的程序得到循环前的时间，每次循环执行 CBLT 方式取数之后再次执行获取当前时间的程序得到当前时间，用下面的公式得到取数时间：取数时间 = 当前时间 - 循环前的时间。将取数时间作为循环执行中断 CBLT 方式取数的判断条件，第一次循环前，取数时间初始化为零。当取数时间等于所设置的时间时，程序自动跳出循环停止数据读取，结束运行。界面显示取数次数。

数据获取程序界面如图 7 所示。

3.5.2 事例数据的处理和组装

为提高事例率， ^3He 管阵列样机读出电子学采用自

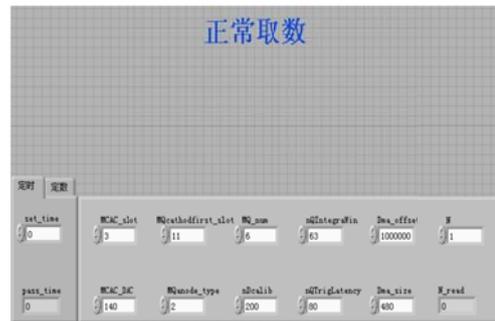


图 7 数据获取程序界面

触发方式来获取探测器数据，没有公共的触发信号。由于每个电子学通道独立进行流水线式的 FADC 数据采样、寻峰，进而组装成 CBLT 原始数据供数据获取软件读出，因此整个系统各个 ^3He 管被中子击中后两端产生的电荷信息需要根据其相应的时间信息来确定是否属于同一事例。故而，数据获取软件还需要编写程序对原始数据进行排序，以组装成离线分析所需的事例数据，这样才能按照电荷分配法计算出中子在 ^3He 管上的击中位置。

4 结论

经过与探测器和电子学系统的联合调试， ^3He 管阵列样机探测器数据获取系统的数据获取速度和数据传输的可靠性都达到预期目标。这个系统的数据获取软件已成功应用于中子实验测试中，获得了探测器的性能指标。为今后的工程应用打下了良好的基础。

参考文献：

- [1] 章红宇, CSNS 数据获取系统可行性研究报告, 中国科学院高能物理研究所内部文档, 2008
- [2] 赵豫斌、章红宇、卢云鹏、赵平平、陈少佳、邹敏, ^3He 管阵列的电子学和样机设计项目研制总结, 中国科学院高能物理研究所内部文档, 2011
- [3] 陈锡辉、张银鸿, LabVIEW 8.20 程序设计从入门到精通, 清华大学出版社, 2007
- [4] 江晓山、邹敏, ^3He 测试板寄存器、地址定义及配置流程, 中国科学院高能物理研究所内部文档, 2011

Development of Data Acquisition System for CSNS ^3He Detector

Zhao Dongxu^{1,2}, Zhang Hongyu^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Particle Detection and Electronics, Beijing 100049

2. Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract: This paper introduces the research and development of data acquisition system of CSNS ^3He detector prototype. This system provides high performance data acquisition capability of CSNS ^3He detector, as well as several performance tests of electronics prototype. This data acquisition system establishes foundation for the later data acquisition development.

Key words: data acquisition; Electronics calibration; LabVIEW; VME bus

CSNS 靶站谱仪控制系统客户端权限管理

张卓豫^{1,2,3}, 初元萍^{1,2}, 刘毓倩^{1,2,3}, 庄建^{1,2}, 胡磊^{1,2}, 金大鹏^{1,2}

(1. 核探测与核电子学国家重点实验室, 北京 100049; 2. 中国科学院高能物理研究所, 北京 100049; 3. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 中国散裂中子源 (CSNS) 将成为中国拥有的第一座脉冲散裂中子源, 其靶站谱仪控制系统 CSS (Control System Studio) 负责靶站和谱仪各部分设备的控制与参数监测。为了保证系统安全运行, 一些高级功能的界面和运行参数对普通用户必须受限, 只有高级专家用户才具备查看和修改权限, 因此必须对 CSS 用户进行权限的分组管理, 根据用户角色显隐工作台内容和用户控件, 并保证用户在不同客户端登陆时能够实现无缝切换。本文主要在 CSS 中实现了基于 JAAS 插件的认证与授权服务, 并在 LDAP 服务器上部署 CSS 用户组信息和主从同步信息, 并利用 Eclipse 的 activity 扩展点实现对 CSS 用户的 UI 显隐控制。

关键词: 散裂中子源; 权限管理; LDAP; JAAS; Eclipse activities 扩展点

文章分类: 计算机技术及其应用的研究成果

CSNS 靶站谱仪控制系统负责靶站和谱仪各部分设备的控制与参数监测, 该控制系统基于 EPICS 框架。CSS 是基于 EPICS 的工具集, 由 JAVA 开发, 是基于 Eclipse RCP 的客户端接口。CSS 提供监控界面显示、管理 PV 量、数据库服务、历史数据分析以及报警等功能。CSS 通过 JAAS 插件的登录模块访问 LDAP 这个轻量级数据库获取用户信息, 来实现用户认证登录和操作权限控制。CSS 利用 JAAS 插件实现了一个健壮而灵活的登录和身份验证模块。CSS 通过自定义扩展点 LoginModule 和 authorizationProvider 分别为认证与授权的插件提供接口, 如图 1^[1]。

通过认证与授权, 可以对 CSS 中右键菜单项的显隐以及一些 UI 组件的访问权限进行管理。例如, 只有 alarm 认证用户才能查看 alarm 监控视图, 只有拥有 alarm 配置权限的用户, 才能对 alarm 系统进行右键菜单的配置操作, 这样就可以防止非 alarm 管理人员的误操作或者非相关人

员的故意操作。

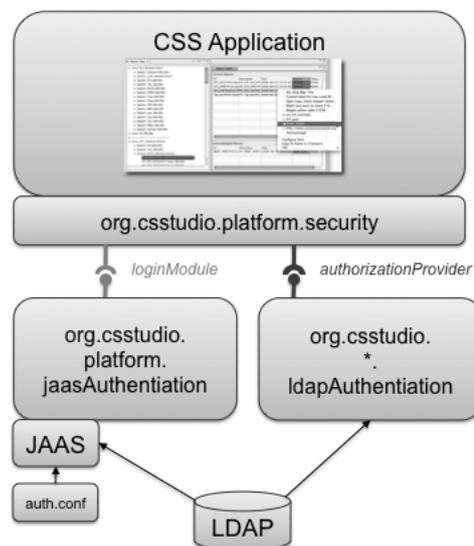


图1 与CSS认证授权相关的扩展点

本文在建立好的 CSNS 重水监控系统基础上, 实现用户权限管理的 demo, 重水监控系统如图 2。

1 LDAP 系统搭建

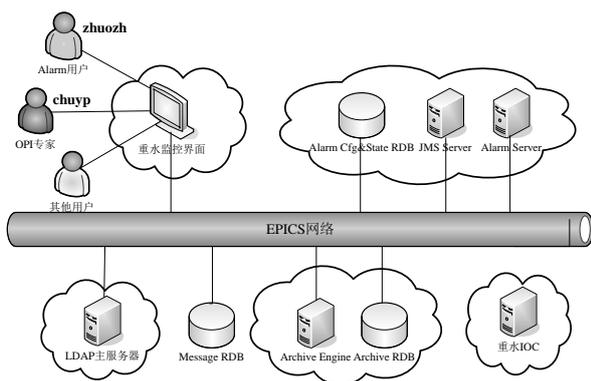


图2 重水监控系统

重水监控 demo 系统中，操作人员可以分为三类：普通用户、Alarm 用户、OPI 专家用户。普通用户可以查看系统的运行状态，使用 CSS 的 Data Browser、Probe 等工具集来查看和分析历史数据；Alarm 用户是值班人员，主要负责处理数据异常和配置报警信息；OPI 专家用户是高级用户，可以查看系统运行状态和修改系统参数。将用户权限进行分组如图 3。

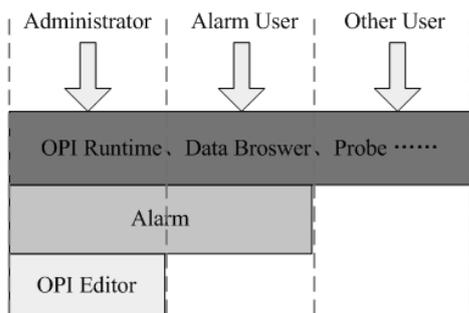


图3 用户权限分组设计

1.1 LDAP 存储结构设计

在搭建重水测试子系统时，我们采用 LDAP 这个轻量级的数据库作为用户信息数据库，并根据用户权限分组设计 LDAP 的存储结构。匿名用户是普通用户，可以查看系统的运行状态，可以使用 CSS 的 Data Browser、Probe 等普通工具集来查看和分析历史数据；zhuozh 是 Alarm 用户，可以对报警信息进行配置；chuyp 是专家用户，既可以修改 OPI 文件，又可以对报警进行配置。

根据以上描述，设计 LDAP 的存储结构，设计两个用户分支，用户组 People 用于认证登录，用户组 CSSAuthorization 用于管理授权信息。在用户组 People 中添加两个用户 chuyp 和 zhuozh。用户组 CSSGroupRole 用于管理用户角色信息，它的子树 alarm 组用于管理报警用户信息，子树 opi 用于管理 opi 专家用户信息。用户组 CSSAuthorizeID 用于管理操作权限信息，它的子树 AlarmSystem 用于管理报警权限，子树 OPISystem 用于管理 OPI 权限。根据以上描述的用户信息，设计 LDAP 目录的存储结构如图 4。

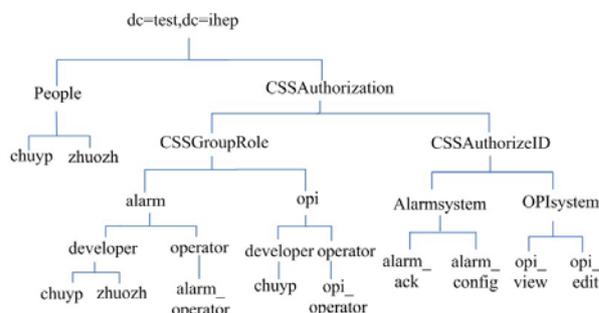


图4 LDAP目录结构图

1.2 搭建 LDAP 服务网络

搭建 demo 系统的 LDAP 网络时，采用星形拓扑结构，将用户信息放到一台主服务器上统一管理，本地 CSS 客户端通过访问这台主服务器获取认证和授权信息。

为了防止 LDAP 主服务器故障时，本地 CSS 用户无法登录。LDAP 网络必须采用“一主多从”的工作模式，将本地客户端主机作为从服务器，与主服务器随时同步。当管理员在主服务器上添加、修改、删除用户时，通过主从同步将修改推送到从服务器，从而保证数据在主从 LDAP 服务器上的一致性^[5]，并能保证主服务器故障时，CSS 仍能通过连接本地 LDAP 服务器正常登录。

2 认证

在重水监控 demo 系统中，我们采用 JAAS

LDAPBindLoginModule 来实现基于 LDAP 的认证。org.csstudio.platform.jaasAuthentication 这个插件实现了基于 JAAS 的认证。可以通过修改这个插件的 conf/auth.conf 文件，配置自己的认证方式。在重水测试系统中，我们使用本地的 LDAP 服务器来为用户提供登录目录服务。同时，在插件 org.csstudio.sns.product 的 plugin_customization.ini 文件中，也要设定认证方式为 Local_LDAP_bind。

3 授权

3.1 配置授权信息

在 OpenLDAP 中添加 CSS 自定义的 objectClass[1]。然后授权给用户。定义以下用户权限：用户 zhuozh 是值班人员，在 alarm 组中是 developer 角色。用户 chuyp 是专家，在 alarm 和 opi 组中都是 developer 角色；将授权信息通过 LDIF 文件导入 LDAP。

3.2 UI 权限管理

在重水监控 demo 系统中，为了保证控制系统的安全，我们对普通用户过滤掉 CSS 的高级功能。这里利用 Eclipse activity 扩展点^[6]，根据用户角色来隐藏工作台内容和用户控件，简化或者过滤 GUI。例如只有 Alarm 用户才能看到 Alarm GUI，只有 opi 用户才能修改 OPI 文件，对于非 OPI 用户来说，Alarm GUI 和 OPI Editor 是不可见的。

在插件 org.csstudio.utility.product 的 plugin.xml 清单中定义 activities 扩展点，比较重要的是 activityPatternBinding 中的 pattern 属性，它会以正则表达式的方式 disable 掉所有与 Alarm 相关 GUI。

```
<extension point="org.eclipse.ui.activities">
```

```
<activity
id="org.csstudio.utility.product.AlarmActivity"
name="AlarmActivity">
</activity>
<activityPatternBinding
activityId="org.csstudio.utility.product.Alarm
Activity"
pattern=".*/*alarm.*">
</activityPatternBinding>
</extension>
```

程序流程图如图 5:

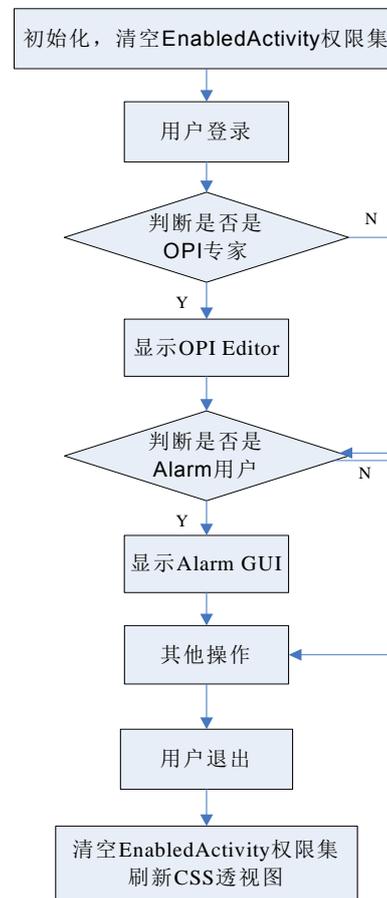


图5 程序流程图

CSS 窗口初始化时，清空初始 EnabledActivity 权限集。用户登录时，CSS 从 LDAP 服务器中读取授权信息，判断登录用户是否是 OPI 专家，如果是 OPI 专家就开放 OPI 文件的读写权限，并显示 OPI Editor，然后再判断用

户是否是 Alarm 用户，如果用户是 Alarm 用户，就把 org.csstudio.utility.product.AlarmActivity 加入到 enabledActivities 中，这时 Alarm UI 就会显示在界面上。用户退出登录时，收回 OPI 文件的读写权限，清空 EnabledActivity 权限集，并复原 CSS 透视图。

4 系统测试

利用建立好的重水监控 demo 系统对用户权限管理进行简单测试。

首先，对 LDAP 同步设置进行测试。LDAP 网络测试系统中有一台主服务器（10.10.10.96），两台从服务器（10.10.10.97、10.10.10.98），在主服务器和两个从服务器的 slapd.conf 中修改 replica 配置信息，保证主服务器更新数据时，该数据能复制到从服务器。在 LDAP 主服务器（10.10.10.96）上添加一个新用户 uid=operator。在从服务器（10.10.10.97、10.10.10.98）的 LDAP Browser 上刷新，可以看到从服务器上出现组织单元 uid=operator。如图 6，LDAP 同步测试成功。

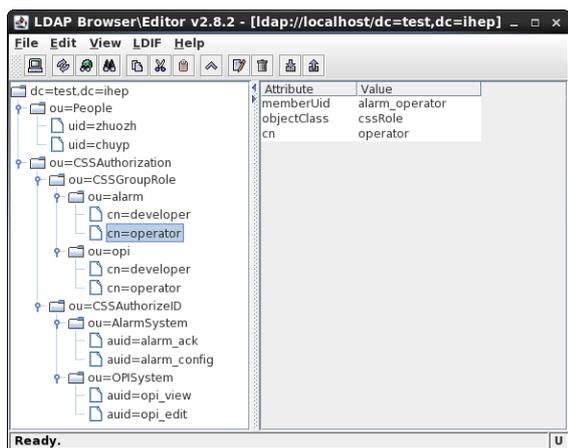


图6 LDAP主从同步测试图

其次，进行认证登录的测试。以用户名 zhuozh 登录。在控制台看到如图 7 的提示信息后，表明用户 zhuozh 成功登录。认证测试成功。

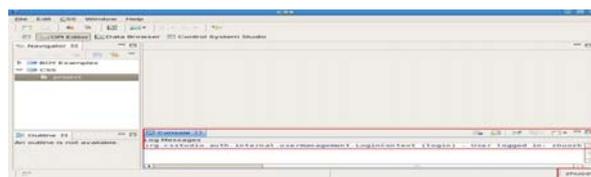


图7 成功登录提示信息

然后，进行授权测试，打开 CSS 的 Preference 页，配置 LDAP 的服务器 URL、用户名和密码如图 8。注意，用户名和密码分别为 LDAP 的 slapd.conf 中定义的域名和密码。

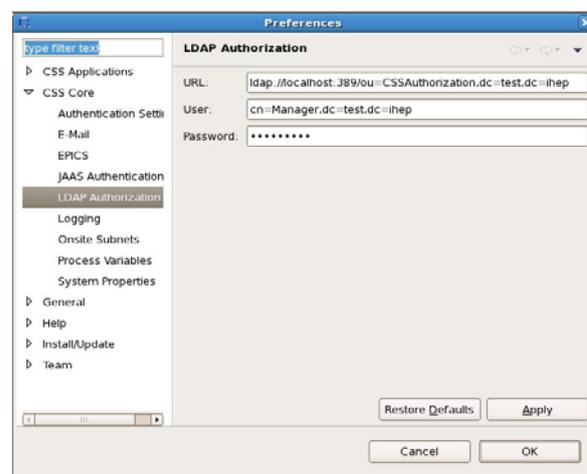


图8 LDAP授权信息配置图

打开重水的 OPI 文件，然后在 Alarm Table 中，选择任意报警 PV 量，点击右键，可以看到之前报警确认和报警配置按钮现在已经由不可用的灰色变成活动的了，如图 9。授权测试成功。

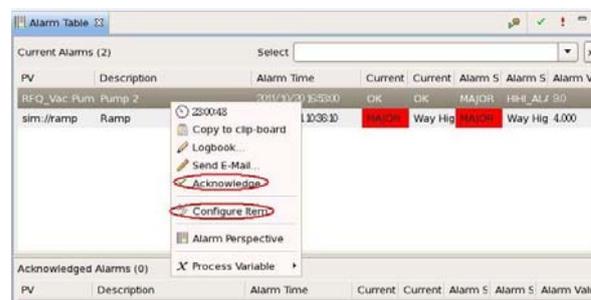


图9 CSS授权测试图

最后对 UI 权限管理进行简单测试，当我们打开 CSS 时，默认是匿名用户登录状态，这时看不到 Alarm GUI 和 OPI Editor。Alarm 用户 zhuozh

登录后, Alarm GUI 可见。OPI 专家 chuyp 登录后 Alarm GUI 和 OPI Editor 均可见。退出登录后, Alarm GUI 和 OPI Editor 再次被隐藏。测试成功。

5 小结

CSS 基于 JAAS 的认证与授权机制, 通过访问 LDAP 轻量级数据库管理 CSS 用户对一些组件的访问权限, 实现了对用户权限的分组管理。将用户权限统一用 LDAP 服务器管理, 用户名和密码就像移动身份证, 方便我们在不同主机的 CSS 上实现无缝切换。认证与授权对 CSS 系统的安全十分重要, 只有经过认证与授权的用户才能对 CSS 系统执行相关操作, 这样有利于保证系统的安全运行。

参考文献:

[1] Kay Kasemir, Gabriele Carcassi. css_book [EB/OL].http://cs-studio.sourceforge.net/docbook/css_

book.pdf, 2010.

[2] Jeff McAffer, Jean-Michel Lemieux, Chris Aniszczyk. Eclipse Rich Client Platform [M]. 2nd Edition. Boston: Pearson Education, Inc, 2010.

[3] Eric Clayberg, Dan Rubel. Eclipse Plug-Ins [M]. 3rd Edition. Boston: Pearson Education, Inc, 2009.

[4] 陈刚. Eclipse 从入门到精通 [M]. 第二版. 北京: 清华大学出版社, 2010.

[5] OpenLDAP Foundation. OpenLDAP Software 2.4 Administrator's Guide [EB/OL]. <http://www.openldap.org/doc/admin24/>, 2012.

[6] Rakesh Sahadevan. Creating a declarative security model for RCP applications [EB/OL]. http://www.ibm.com/developerworks/opensource/library/os-ecl-rcpsec/?S_TACT=105AGX52&S_CMP=cn-a-os, 2006

User rights management of the CSNS Control System Client

ZHANG Zhuo-yu^{1,2,3}, CHU Yuan-ping^{1,2}, LIU Yu-qian^{1,2,3}, ZHUANG Jian^{1,2,3}, HU Lei^{1,2,3}, JIN Da-peng^{1,2,3}

(1. State Key Laboratory of Particle Detection and Electronics, Beijing 100049, China;

2. Institute of High Energy Physics, CAS, Beijing 100049, China;

3. Graduate University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China)

Abstract: The China Spallation Neutron Source (CSNS) will become the first pulsed spallation neutron source owned by China, CSS (Control System Studio), used as the target station and spectrometer control system client, is mainly responsible for equipments controlling and parameter monitoring. In order to ensure the safety of the control system, the advanced GUI and important operating parameters must be restricted to ordinary users, only senior experts have the rights to view and modify them, so we must divide CSS users into different groups and give different rights to different groups. Based on user roles, CSS can implicit workbench contents and widgets, to ensure that users can seamlessly log into different clients. This article mainly talk about the JAAS authentication and authorization services in CSS, and deploy user information and master-slave synchronization information on the LDAP server, and use the Eclipse activity extension points to accomplish GUI explicit-implicit control according to the logged in user.

Key words: CSNS; Rights Management; LDAP; JAAS; Eclipse activities

SDUV-FEL 实验装置电源控制系统

赵欢, 丁建国, 郑丽芳

(中国科学院上海应用物理研究所, 上海 201800)

摘要: 上海深紫外自由电子激光 (SDUV-FEL) 实验装置电源控制系统是基于 Ethernet 的分布式控制技术, 在 EPICS 系统架构下进行系统开发与集成。本文介绍了系统的基本结构与工作原理、描述了针对模拟 I/O 电源、数字化控制电源、GPIB 接口电源所采取的控制方案, 以及基于嵌入式系统的 IOC 控制器开发、电源控制实时数据库和图形化操作界面的设计。

关键词: 上海深紫外自由电子激光; 磁铁电源; EPICS; 控制系统

文章分类: 计算机技术及其应用的研究成果

上海深紫外自由电子激光 (Shanghai Deep Ultra-Violet Free Electron Laser, SDUV-FEL) 是在 SINAP 100MeV 直线电子加速器 (Linear Accelerator, Linac) 基础上整合集成的自由电子激光实验装置^[1], 由包括注入器和主加速器的直线加速器和波荡器实验区部分组成。SDUV-FEL 电源控制系统在 100MeV Linac 电源控制系统的基础上, 根据设备及实验的要求, 升级改造而来。SDUV-FEL 磁铁电源数目多, 类型多样, 控制接口复杂, 物理位置分散。基于以上特点, SDUV-FEL 采用分布式结构, 针对多种通讯接口的不同控制方案设计。本文将介绍 SDUV-FEL 电源控制系统的 DCS 结构, 基于 EPICS 系统的电源控制方案, 嵌入式 IOC 开发, 以及软件实现。

1. 系统结构与工作原理

SDUV-FEL 共有 138 台磁铁电源, 其中包括 DeviceNet 现场总线控制的模拟电源、GPIB 接口的 Agilent 智能电源、上海光源研制的基于数字化反馈技术的数字化电源。SDUV-FEL 电源控制系

统选择使用实验物理和工业控制系统 EPICS (Experimental Physics and Industrial Control System)^{[2][3]}进行控制系统开发与运行。EPICS 是一个典型的完全分布式控制系统软件开发与运行工具集, 由美国洛斯阿拉莫斯国家实验室 (LANL) 和阿贡国家实验室 (ANL) 等联合开发, 在国内外加速器控制界广泛应用。

SDUV-FEL 电源控制系统结构分为三层, 即操作员接口层 (Operator Interface, OPI), 输入输出过程控制层 (Input/Output Controller, IOC), 设备控制层 (Device Control Layer) 及连接控制层的计算机网络与通讯总线。OPI 位于 SDUV-FEL 的中央控制室, 包括服务器和操作台电脑, 采用 Linux/pc 工作站, 以 GUI 图形界面, 实现对电源运行参数的监控显示和控制操作。OPI 控制台通过 LAN 与 IOC 进行数据交换。IOC 是控制系统的核心, 其作用是:

- 通过 LAN、现场总线等连接各个电源控制器;
- 运行分布式实时运行数据库执行磁铁电源

作者简介: 赵欢(1981-), 女, 江苏人, 中国科学院上海应用物理研究所助理工程师, 在职硕士。目前从事上海自由电子激光控制系统的建造工作。

的过程控制；

- 通过基于 TCP/IP 的通道访问协议 (Channel Access, CA) 接受 OPI 端的请求，反馈电源实时状态信息到 OPI。

设备控制器直接与受控设备接口，负责模拟信号和数字信号的输入输出及信号调理等。设备控制器多为具有通讯接口的智能控制器。在 SDUV-FEL 电源控制系统中，设备控制器主要包括：DeviceNet 现场总线控制器、具有光纤串行通讯接口的数字电源控制器和具有 GPIB 通讯接口

的 agilent 智能电源。

2. 电源控制方案实现

SDUV-FEL 在原 100MeV LINAC 基础上根据设备及实验的要求升级改造而来，不同时期制造的设备，技术方案有很大区别，磁电源系统同样如此。其中电源系统共涉及三种不同的类型的电源，针对不同的电源，控制系统分别采用了专门的解决方案，并在 EPICS 系统架构下集成。图 1 为 SDUV-FEL 电源控制原理图。

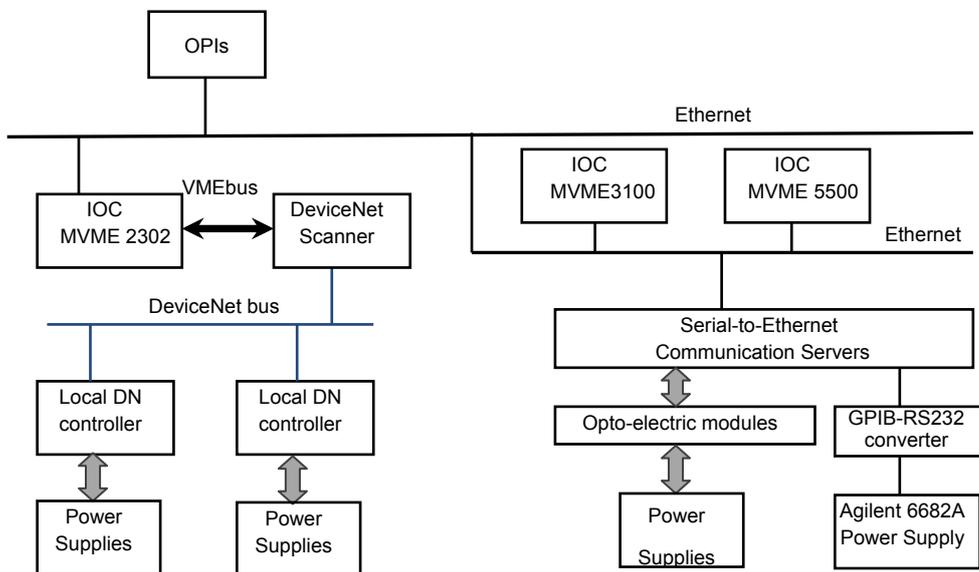


图 1 SDUV-FEL 电源控制方案原理图

2.1 基于 DeviceNet 现场总线的控制方案

SDUV-FEL 直线加速器电源，除新增磁压缩段外，大部分沿用原 100MeV LINAC 系统的直接 I/O 控制接口的模拟电源，采用 DeviceNet 现场总线控制方案^[4]。磁铁电源控制器采用具有 DeviceNet 现场总线接口的 Allen-Bradley 1794 Flex I/O 系列模块构建，其中通信模块 1794ADN 适配器向上通过现场总线 DeviceNet 与 IOC 通信，向下通过 Flexbus 总线与其它 1794 FLEX 系列数字、模拟 I/O 模块传输数据，这些 I/O 模块直接对受控电源进行控

制。系统中共有 6 台 DeviceNet 本地控制器，控制 45 台电源，每个控制器节点最多可以控制 8 台电源。IOC 是一台运行 VxWorks 实时操作系统的 VME 工控机，CPU 板采用 Motorola MVME2302 单板机，通过一个 VME 总线的 DeviceNet 扫描器与本地电源控制器节点交换数据。在系统启动时，vxWorks 与 EPICS 映像以及实时动态数据库通过 Ethernet 下载到 IOC 中并开始运行。

2.2 基于数字化电源控制器的控制方案

数字化电源控制器是上海光源采用基于 DSP 和 FPGA 技术开发的数字化控制电源控制器^[5]。控制器通过高速数字化调节反馈回路，实现高精度与高分辨率的电流输出控制，在 SDUV-FEL 新增的直线加速器磁压缩段与波荡器 FEL 实验区电源中大量使用。

数字电源控制器具有一组光纤输入输出通讯接口，实现电源与远程控制设备间的电气隔离。控制器定义了一组寄存器，存放电流调节控制参数和电源工作状态、联锁条件等属性，通过执行专门定义的基于内部寄存器编址访问的通讯协议，可以实现上层系统对电源的远程访问控制。

基于EPICS系统的控制方案为：通过一个16端口串行接口通讯服务器(MOXA NP5610)，将RS232串行通讯转化为Ethernet网络通讯，IOC通过基于TCP/IP的网络通讯协议实现对电源的访问控制。通讯服务器安装于电源机柜，在光纤信号进入通讯服务器之前，通过一组光电转换模块实现电源控制器光纤输入输出的信号转换。系统中共包含7台通讯服务器。

IOC 采用 VME 总线控制器：一个运行 vxWorks 实时操作系统的 Emerson MVME 5500 单板机，一台运行 RTEMS 实时操作系统的 Emerson MVME 3100，控制 92 台数字化磁铁电源。IOC 对电源的访问基于 Client/Server 模型实现。IOC 在启动时，首先建立起 IOC 与电源连接的通讯服务器对应 IP 端口的网络连接，IOC 通过数据库记录访问电源时，发出控制请求，并等待应答。通过超时处理、网络自动中断重接等手段，保证系统长期稳定运行。

2.3 Agilent 电源的控制方案

直线注入器部分还包含一台 GPIB 接口的 Agilent 6682 智能电源。电源可通过 GPIB SCPI 控制语言实现远程控制。系统中引入了 NI GPIB-RS232 模块进行协议转换，然后连接到通讯

服务器，IOC 通过 Ethernet 进行远程控制。Agilent 电源控制集成到与数字化电源控制相同的控制方案中，所不同的是电源访问执行不同的应用层协议规程。

3. 控制软件

电源控制软件是基于 EPICS 工具集开发实现的。控制软件的实现包括电源控制器软件、IOC 软件及控制台 OPI 软件。

3.1 电源控制器软件

DeviceNet 控制器按照制造商提供的工具进行地址与模块配置即可完成。数字化电源控制器由上海光源专业电源组研制，制造商出厂时固化在 flash EPROM 中，电源组根据负载的不同配置电流调节参数。

3.2 IOC 软件

IOC 软件由操作系统、EPICS 内核、实时运行数据库和设备支持 / 驱动模块组成。

3.2.1 嵌入式操作系统定制

IOC 为工业级单板机，所有软件是通过 FTP 下载运行的。操作系统的开发是根据系统发行包、板级支持包 BSP (Board Support Package)，进行系统剪裁配置，在宿主机 (Host) 上通过交叉编译等工具，产生可在目标机 (Target) 上装载运行映像等。

vxWorks 系统是美国 windRiver 公司的实时操作系统产品，MVME 2302 和 MVME 5500 IOC 运行 vxWorks。vxWorks 系统的开发，在 Windows Tornado 集成开发环境下进行，通过安装 MV2300、MV5500 等 BSP 发行包，先交叉编译产生可固化于目标板 EPROM 的初始启动系统 Bootrom.bin，然后通过 Config 文件进行系统剪裁，编译产生目标机 vxWorks 操作系统映像。目标版上都拥有两组

EPROM, 选择第一组启动后, 通过板载的 PPCBug 或 MotoLoad 工具, 将 Bootrom.bin 烧写至第二组 EPROM 中, 然后选择从第二组启动, 启动后根据提示设定本机 IP 地址、下载服务器 IP 地址、vxWorks 操作系统映像文件路径与文件名、以及应用程序启动脚本文件信息等, 进入运行方式即可通过下载服务器的 FTP 服务装载运行。MVME3100 选择的嵌入式操作系统为 RTEMS4.2.9。RTEMS 是一款开源的实时操作系统, 不同于 vxWorks 有专业的 Tornado 开发环境, RTEMS 需要通过命令行形式交叉编译生成映像。开发在 linux/PC 上进行, 首先须编译 RTEMS 所需的支持软件, 包括交叉编译工具; 然后选定 MVME 3100 BSP 支持包, 编译产生 MVME3100 的 RTEMS 映像。当 MVME3100 开机时, 在 Motoload 系统下通过 gevEdit 定义一组环境变量, 包括下载服务器的地址、主机地址和系统映像文件以及相关 EPICS 应用装载的脚本文件等。重新上电后, 通过 TFTP 和 NFS 从服务器中下载运行。

3.2.2 IOC 电源控制应用

IOC 应用开发都在 Linux/PC 主机上进行, 在对各种目标机建立交叉编译环境, 编译 EPICS 基础内核后, 就可以同时建立 EPICS 应用实例。在基本实例基础上, 增减控制对象的 Epics 设备支持与驱动程序包, 交叉编译后, 生成 EPICS 应用程序映像文件。

电源控制开发的核心是电源控制实时数据库的开发和用于电源控制的 EPICS 设备支持与驱动接口程序的开发。控制系统通过分布于各个 IOC 中的实时运行数据库实现对电源的控制访问, 通过数据库记录的扫描域定义触发记录的处理, 实现数据的实时刷新。扫描机制包括周期性扫描, 事件触发扫描和被动处理扫描等。数据库是简单的扁平 (flat) 表结构, 通过记录中对域 (field) 值的赋值, 描述 I/O 过程控制的属性。数据库在 IOC 操作系统与 EPICS

内核运行后装入运行。SDUV-FEL 电源控制系统定义了三种不同的标准数据库模板用于不同类型电源的控制。只要选择模板文件, 在数据库载入时给出电源名称、进行一些参数宏替换就可以生成实际需求的运行数据库。

电源控制的基本逻辑必须在数据库中实现, 除电源开关、电流设定与定时回读电流值、设备参数与工作状态外, 数据库要实现对磁铁消除剩磁的功能选择, 在电源从最小电流到最大电流运行 3 个周期后, 回到原来的电流设定值。IOC 复位后的透明化处理, 即在 IOC 遇故障重启后, IOC 各项设定自动回到故障前的运行状态, 整个过程不对束流产生任何影响。

设备支持/驱动程序提供特定控制对象的 EPICS 接口, 在记录处理时, 通过对相应的设备支持/驱动程序的调用, 完成记录的处理。对于数字化电源和 Agilent 电源, 设备支持与驱动程序采用了瑞士 PSI 开发的 streamDevice^[6] 和美国 APS 开发的 asynDriver^[7]。这是一组通用的面向各种异步通讯接口的 EPICS 设备支持与驱动程序。应用开发中首先根据电源控制器通讯协议的内容编写符合 streamDevice 格式的协议文件脚本, 然后在数据库记录的输入输出域中, 给出协议脚本文件名以及相关协议的名称, 需要时作一些宏替换就可以了。对 DeviceNet 总线电源的设备支持, 采用上海光源开发的 DeviceNet 设备支持程序包^[8]。

3.3 控制台软件

控制台界面基于图形化的界面设计。电源控制页面主要基于 EPICS 的 EDM (Enhanced Display Manager) 工具设计。EDM 具有图形化控件的界面编辑功能, 直接将各种控件与控制变量关联, 通过 CA 访问 IOC 中的过程变量, 在编辑完成可直接启动进入运行模式。图 2 为波荡器实验区电源控制界面。另外, 为了实现对机器运行参数存储与恢复的需

求, 通过Matlab及其EPICS MCA接口, 开发了FEL参数存储与恢复程序。

4 结束语

SDUV-FEL电源控制系统是SDUV-FEL控制系统的关键子系统之一。系统包含了3台VME/IOC, 共约8000个控制通道。基于EPICS体系结构SDUV-FEL实现了对138台不同类型磁铁电源的分布式控制。



图 2 SDUV-FEL 波荡器实验区磁铁电源控制主界面

按照 FEL 实验与电源系统调试的要求, 电源控制系统对实时运行数据库, 控制台操作界面进行了详细的设计。系统结构合理, 功能完整, 操作直接方便。在系统运行中, 随着 SASE、HGFG、ECHO

以及级联 HGFG 等 FEL 实验的不同要求, 系统进行了不断更新与完善, 性能满足了长期稳定可靠运行要求。

参考文献:

- [1] Zhao Z T, Wang D. Progress in the SDUV-FEL and Development of X-ray FELs in Shanghai[C]. Proceedings of FEL Conference, 2010, Sweden
- [2] Kraimer M R, Anderson J, Johnson A, et al. EPICS Input/Output controller application developer's guide Release 3.14.8[M], ANL, APS. 2005
- [3] 丁建国, 刘松强. EPICS 系统中的网络技术[J]. 核技术, 2006,29(5):380-383
- [4] 丁建国, 郑丽芳, 胡守明等. EPICS 环境下的 Linac 控制系统[J]. 核电子学与探测技术, 2006, 26:36-40
- [5] Shen T J, Li D M, Li R. Construction of SSRF magnet power supply[C], Proceedings of APAC'07, India, 2007.
- [6] Zimoch D. StreamDevice 2.0: A multi-purpose character driver for EPICS 3.14[M]. 2003
- [7] Kraimer M, Norum E, et al. asynDriver: Asynchronous driver support Release 4-11[M], 2009
- [8] Leng Y B, Shen G B, Zheng L F, et al. DeviceNet in SSRF control system[J]. Necl Sci. and Tech. 2001, 12(3):235-24

The SDUV-FEL Power Supply Control System

ZHAO Huan, DING Jian-guo, ZHEN Li-fang

(Shanghai Institute of Applied Physics, CAS, Shanghai 201800)

Abstract: The EPICS based magnet power control system of SDUV-FEL test facility is introduced. The system architecture and work principles are presented. Specific control solutions for analog I/O power supplies, digital controlled power supplies and the Agilent power supply, development of embedded I/O controllers and runtime databases for power control and graphic operation interface are described in details.

Key words: Shanghai deep UV free electron laser; magnet power; EPICS; control system

SDUV-FEL 实验装置控制系统

丁建国, 胡守明, 蒋舸扬, 缪海峰, 赵欢, 朱海君

(中国科学院上海应用物理研究所, 上海, 201800)

摘要: 本文介绍了 SDUV-FEL 实验装置控制系统基于 EPICS 系统的分布式控制结构和工作原理, 描述了磁铁电源控制、真空监控与保护、微波设备控制、波荡器隙缝调节等设备控制方案, 以及定时与机器联锁系统的技术实现, 介绍了系统集成化的运行环境和图形化的控制台操作界面设计。

关键词: 自由电子激光, EPICS, 控制系统, Ethernet

文章分类: 计算机技术及其应用的研究成果

上海深紫外自由电子激光实验装置 (Shanghai Deep Ultraviolet Free Electron Laser test facility, SDUV-FEL) 是进行多种 FEL 新原理与关键技术测试的实验平台。SDUV-FEL 由两部分组成: 直线加速器 (包括注入器与主加速器) 和波荡器。直线加速器 (Linear Accelerator, LINAC) 部分由上海应用物理所 100MeV 直线加速器升级改造实现, 由一个低发射度光阴极注入器、5 个 S-band 加速结构和一个束团磁压缩段 (Bunch Compressor, BC), 如图 1 所示。波荡器是进行 FEL 实验的部分, 如图 2 所示^[1]。

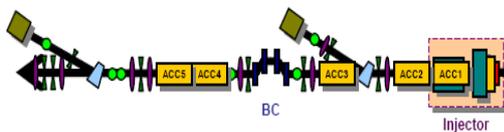
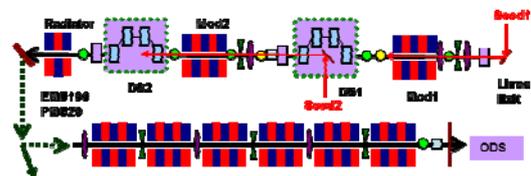


图 1. LINAC 布局图

控制系统是 SDUV-FEL 的重要组成部分, 其任务是通过计算机控制手段, 实现对 SDUV-FEL 中设备的全面运行控制, 满足通过中央控制室等授权计算机平台获取机器的运行信息, 在设备与人身安全联锁的前提下, 调整各种相关参数, 使装置达到最

佳运行状态的要求。控制系统由磁铁电源、真空监控等设备控制子系统、主定时与安全联锁系统、控制网络及其系统运行环境等组成。本文将介绍 SDUV-FEL 控制系统基于 Ethernet 的分布式控制结构与工作原理, 详细的设备控制实现方案, 集成化



系统运行环境等。

图 2. SDUV-FEL 实验区布局图 (seed: seeded laser; Mod1: EMU type modulator; Mod2: PMU type modulator with movable gap; DS: dispersive section; Radiator: small radiators with only a few periods; ODS: optical diagnostics system)

1 系统结构与工作原理

加速器系统具有设备多、地域分布广的特点。SDUV-FEL 中包括一百多台各种磁铁电源、数十台真空监控设备、多台波荡器与微波功率源等设备。同时 Linac 部分是在原系统上改造, 新老设备并存;

作者简介: 丁建国 (1964-), 男, 博士, 中科院上海应用物理所研究员, 研究方向: 大型加速器控制系统。

设备来源不同，设备接口类型多，为控制系统的实现增加了难度。SDUV-FEL 控制系统选择实验物理与工业控制系统 EPICS (Experimental Physics and Industrial Control System)^[2]作为系统开发与运行平台，在统一平台下实现系统集成。

EPICS 系统是基于标准模型的分布式控制系统工具集，基于 Ethernet 的层次式结构，包括操作员计算机 (Operator Interface, OPI)，输入输出控制器 (Input/Output Controller, IOC) 和连接 OPI 和 IOC 的计算机网络。OPI 工作站，在中央运行环境下，运行 GUI 图形界面，实现对设备运行参数的监控显示，或者运行上层基于模型的物理调束软件。OPI 通过基于 TCP/IP 的通道访问协议 (Channel Access, CA) 访问 IOC 中的 I/O 过程变量。IOC 控制器运行 EPICS 系统基础内核和实时运行数据库 (Runtime database) 实现对被控设备的访问操作。通过分布式运行于 IOC 中的数据库记录，控制系统实现过程控制功能。数据库记录根据定义的扫描方式触发记录的处理实时刷新记录内容，真实反映现实世界的变化。IOC 通过 CA 服务器对来自 OPI 的请求做出响应，同时将过程变量的变化及时通知关联的 OPI 进程。

IOC 对被控设备的访问通过各种通讯总线或直接 I/O 操作实现。对各种通讯总线的通讯协议，必须开发对应的 EPICS 设备支持与驱动程序，以此实现当记录激活处理时 IOC 对设备的 I/O 读写操作。

2 控制方案

2.1 IOC 控制器

为了实现系统稳定可靠运行的要求，系统中采用了两种 IOC 控制器：VME 总线控制器和嵌入式工业计算机。VME 总线的 IOC 系统，包括 PowerPC 结构的 Motorola MVME 2302 和 MVME 5500 单板机，运行 vxWorks 实时操作系统，以及 MVME 3100，

运行 RTEMS 实时操作系统。嵌入式 IOC 采用 MOXA DA66x 系列，嵌入式运行 Linux 操作系统。IOC 系统的开发在宿主机 (Host) 上进行。首先对目标机 (Target) 可装载运行的操作系统映像，vxWorks 操作系统的开发，在 Windows Tornado 集成开发环境下进行，通过系统剪裁和安装 BSP 发行包，交叉编译产生可装载运行的 vxWorks 操作系统映像。Rtems 是开源操作系统，在 Linux 主机上通过交叉编译工具包编译系统发行包得到操作系统映像。进一步在主机上安装 EPICS 应用开发环境，选择目标机类型编译 EPICS base，最后，建立包括特定设备支持与驱动接口的 EPICS 应用实例，编译产生下载运行的映像。嵌入式系统出厂时包含 Linux 系统，IOC 的开发，在 Linux/PC 开发主机上安装交叉编译后直接对目标机编译 EPICS base 和 EPICS 应用实例。

系统启动时，通过 FTP, TFTP 或 NFS 设置从 EPICS 服务器上下载系统映像后，运行启动脚本文件，装入数据库后开始执行。

多种 IOC 存在一是由于原 Linac 系统保留的旧设备，另一种原因是实验新的 IOC 型号，为其他大型科学装置建设积累数据。

表 1 SDUV-FEL 中的 IOC 控制器

IOC	数目	操作系统	控制设备
MVME 2302	1	vxWorks	Power supply
MVME 2302	1	vxWorks	RF, Shifter, Modulator
MVME 3100	1	RTEMS	Power supply
MVME 5500	1	vxWorks	Power supply
MVME 5500	1	vxWorks	Vacuum
Moxa DA 662	1	Linux	Undulator
Moxa DA662	1	Linux	Modulator
Moxa DA661	1	Linux	Vacuum protection

2.2 设备与通讯接口

SDUV-FEL 包括相当数量的设备控制，由于设备来源、制造与购买时间不同，这些设备的控制接口种类较多。主要有：直接 I/O (ADC/DAC、数字

I/O), 异步串行通讯接口 (RS232/485), 现场总线 (DeviceNet), NI GPIB, Allen-Bradley DCM^[3]和 Ethernet 等。对这些不同的通讯总线、接口与通讯协议, 必须采用不同的控制方案。对 100MeV Linac 保留下来的设备, 基本保持原控制方案^[4], 或稍作修改以节约成本和工作量。对新增设备, 许多具有串行通讯接口, 通过在设备机柜中接入 serial-to-Ethernet 通讯服务器 MOXA NP5610 的方法, 将串行通讯转换为 TCP/IP 的网络通讯, 突破串行通讯对距离的限制, 减少布线工作量。对 GPIB 接口设备, 同样转换为网络通讯。表 2 列出了 SDUV-FEL 被控设备与通讯接口。

表 2 设备与通讯接口

设备	数目	控制接口
电源	138	DeviceNet, GPIB, Serial/Ethernet
调制器	3	Ethernet, DCM
移相器	4	DCM
真空计	11	RS232/Ethernet
离子泵电源	31	RS232/Ethernet
真空保护	1	Ethernet
波荡器	4	RS232, Ethernet
RF 放大器	3	Direct I/O
定时系统	2	RS232

2.3 磁铁电源控制

SDUV-FEL 中共有 138 台各类磁铁电源。按照远控接口类型, 电源分为三种。一种是原 Linac 保留的具有直接 I/O 接口的模拟电源, 使用 DeviceNet 现场总线控制^[5]。总线编址的电源控制器采用具有 DeviceNet 总线接口的 Allen-Bradley 1794 Flex I/O 系列模块构建, 其中 1794ADN 通信模块向上通过现场总线 DeviceNet 与 IOC 通信, 向下通过 Flexbus 总线与 1794 FLEX 系列数字、模拟 I/O 模块传输数据, 这些 I/O 模块直接对受控电源进行控制。IOC 为 VME 总线计算机系统, CPU 板为 Motorola MVME2302 单板机。在 IOC 端, 通过一个 DeviceNet Scanner 模块, 将 IOC 命令发给指定节点, 并定时地从各本地节点获得电源的电流及状态信息。

系统中新增 92 台电源采用全数字化控制技术, 上海光源研制的基于 DSP 与 FPGA 芯片的电源控制器内置于电源中, 为电流输出提供高速反馈调节回路, 达到电流输出的高精度与分辨率。控制器提供一对光纤接口用于远程操作, 执行异步串行通讯协议, 远程控制在本电源机柜本地接入 MOXA 串行通讯服务器, 将 RS232 串行通讯协议转换为 Ethernet 网络通讯。在通讯服务器前端, 通过光电转换模块实现光电信号转换。IOC 通过 TCP/IP 通讯实现对电源的访问。

SDUV-FEL 注入器中包含一台具有 GPIB 通讯接口的 Agilent 6682A 电源, 电源可以通过国 GPIB SCPI 语言规范进行控制。通过一个 GPIB-Ethernet 转换器实现协议转换, 使得对 IOC 电源的操作通过 TCP/IP 网络通讯实现。

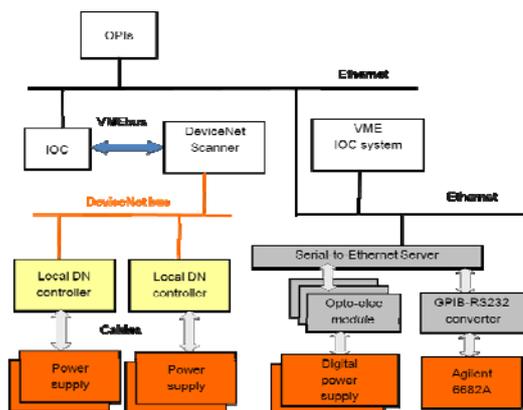


图 3. 磁铁电源控制原理图

数字化电源和 Agilent 电源通过二个 VME 总线的 IOC 控制, 分别为一块 Emerson MVME 5500 和一块 MVME 3100 单板机。图 3 为电源控制的 MVME 31004。

2.4 真空监控与真空保护

真空系统包括真空监控与保护两部分。真空监控是对真空控制仪器真空计与泵电源通过控制接口远程控制。真空计为 Varian XGS600, 具有 RS232 通讯接口。控制系统通过在本地接入 MOXA 通讯服务器, 将串行通讯协议转换为 TCP/IP 的网络通

讯，IOC 端通过网络连接访问真空计。新增的 21 泵电源也都具有 RS232 通讯接口，控制方案与真空计相同。14 台原系统的泵电源，采用 RS485 总线控制，保留原系统方案，在本地通过一台工控机对总线上的泵电源进行扫描，并通过其网络端口与 IOC 通讯。真空监控 IOC 为 1 块 Emerson MVME 5500 CPU 单板机。

一台 OMRON CS1 可编程控制器执行真空保护功能^[6]。每个真空计控制 2 路真空规，可对每个规设定若干 Setpoint 阈值，通过对应的常开 OC 门输出真空状态信号，PLC 根据读入的状态确定真空阀门的动作，以实现当某一段真空破坏时隔离保护真空的目的。PLC 同时根据运行模式不同和真空计的输出信号，产生联锁输出到主定时系统，实现真空破坏时立即停止触发，保护机器设备。PLC 包括一个网络通讯模块，IOC 在建立与网络模块的连接后，通过 OMRON 的 FINS/TCP 数据报文，可直接访问 PLC 内存，实现远程控制。IOC 为 Moxa DA661 嵌入式计算机系统。图 4 是真空监控与保护的原理图。

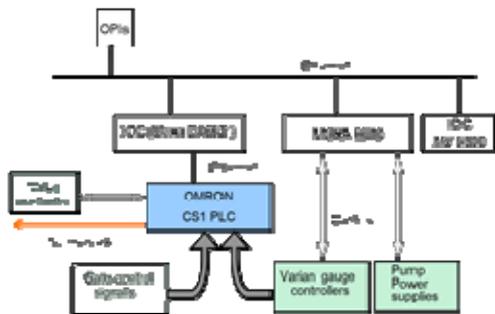


图 4 真空监控与保护原理图

2.5 RF 控制

SDUV-FEL 包括三个功率源，通过本地 PLC 控制调制器与束调管的运行并实现设备保护联锁。主定时系统分别提供功率源预触发和触发脉冲。由于制造时间与设备来源不同，这三台设备分别通过 OMRON CS1、AB SLC-500 和 SIEMENS S7/300 执

行本地控制，其中 OMRON 和 SIEMENS 通过网络模块与上层 IOC 通讯，SLC-500 采用 AB DCM 通讯模块与 VME/IOC 中的 AB Remote IO 模块通过内存映射的方法交换数据。

系统中通过 SLC-500 的一组步进马达控制模块，进行移相器和衰减器的运动控制，远程控制同样通过 DCM 模块实现。

对于微波放大器等其他设备，通过 VME/IOC 的模拟量与数字量直接 I/O 模块，直接操作设备。

RF 控制 IOC 采用一台 Moxa DA662 嵌入式计算机系统和一个 CPU 主板为 Motorola MVME 2302 的 VME 系统。

2.6 波荡器隙缝调节控制

SDUV-FEL 中共有 4 台波荡器需要通过对电机控制实现隙缝的调节，分别命名为 PMU、U40，UV40-1，UV40-2。其中 UV40-1、UV40-2 采用 SIEMENS S7/300 PLC 进行电机运动的本地控制与联锁，通过其网络通讯模块实现远程控制；PMU 的运动控制器采用 RORZE 智能运动控制器，通过 RS232 接口实现远程控制，在实现过程中，将其连接到通讯服务器转换为网络通讯；U40 通过一台 GALIL 2143 多轴运动控制器控制电机的运动，通过以太网接口实现远程控制。IOC 采用一台 Moxa DA662 嵌入式计算机系统。

2.7 定时与联锁

加速器主定时系统由两台串接的 8 通道高精度 BNC 555 同步时序脉冲信号发生器，每路脉冲的宽度，重复频率和相对基准的时延可调，用来控制时序信号的启动和停止。定时系统从 FEL 的非秒级激光同步系统获得基准触发信号，根据延时设定提供触发信号给注入器、微波放大器、微波低电平系统、调制器系统和束流诊断系统。

SDUV-FEL 通过设计的硬件逻辑电路实现及其

保护功能，当机器状态不能满足联锁条件时，屏蔽定时系统的触发脉冲输出。机器联锁信号来自真空保护系统的输出信号、调制器的联锁输出信号、人身保护系统的输出信号、冷却水的工作状态等。

2.8 服务器与运行环境

SUV-FEL 中，一台 IBM x3500 服务器用作 EPICS 系统服务器。服务器提供 FTP, TFTP 服务供 IOC 启动时的软件下载运行，NTP 服务供 IOC、OPI 的时间同步。服务器运行 NIS 用作统一的用户账号管理，NFS 服务供所有的用户共享系统资源。

控制室配备 4 台控制台 OPI 电脑，运行 Linux 系统，操作员须登录至服务器上运行，共享所有运行资源，包括 EPICS 系统开发与运行环境，控制台 OPI 控制界面，系统实用工具，物理调束软件、实验结果数据、以及应用程序开发工具等。

3 控制软件

基于 EPICS 控制系统应用开发的核心是 IOC 软件的开发。对不同的设备及其通讯协议，要实现基于 EPICS 的设备控制，必须开发专门的 EPICS 设备支持程序与驱动程序。在 EPICS 社区中已存在多种设备的 EPICS 设备支持与驱动程序供开发者共享。例如，在 SDUV-FEL 控制系统中，streamDevice^[7] 和 asyn-Driver^[8] 用于对 Ethernet 接口的设备控制，如数字化电源控制、真空监控，波荡器控制等；S7Driver 用于对 Siemens PLC 的控制；NetDev^[9] 用于对 OMRON PLC 的控制等。同时，针对 DeviceNet 总线电源控制、VME 的模拟量与数字量控制板等开发了相应设备支持程序软件^[10]。

物理的 I/O 数据是频繁变化的，EPICS 采用分布式运行于 IOC 中的实时运行数据库来记录数据。数据库在记录支持、设备支持、设备驱动支持下运行，每个 I/O 控制通道对应于控制该通道 IOC 中的

一个数据库记录。数据库记录采用结构简单的 (flat) 列表方式，由记录类型、记录名称、记录扫描处理方式、数据输入/输出定义、线性变换计算、报警值等一系列域 (field) 组成，域值描述了过程控制的所有属性。在 SDUV-FEL 实验装置中，控制系统中共开发了约 8000 个实时运行数据库记录。这些数据库记录分布运行于 IOC 中实现过程控制与执行基本控制逻辑。

在 OPI 控制台上，通过 EPICS 的 EDM 工具，设计了满足运行要求的图形化设备控制操作界面；通过 ALH 工具，实现了报警及其处理功能；通过 ChannelArchiver 工具，实现了对历史数据的存档与浏览。另外，为了实现对机器运行参数存储与恢复的需求，通过 Matlab 及其 EPICS MCA 接口，开发了 FEL 参数存储与恢复程序。图 5 是波荡器间隙调节的主页面。

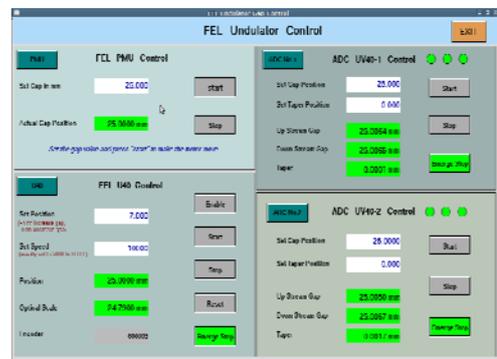


图 5. 波荡器控制页面

4 结论

SDUV-FEL 已先后进行了 SASE、seeded HGHG、ECHO 等多个 FEL 原理实验并在一些实验上取得重要进展，级联 HGHG FEL 实验也在进行中。控制系统在实验中进行了多次改造更新以不断满足 FEL 实验的新需求。

SDUV-FEL 控制系统是基于 EPICS 系统集成开发与运行的分布式控制系统。针对各种不同的设备控制需求，分别设计与实现了设备控制方案。控制

系统在实验中经过长期运行, 稳定性与可靠性得到检验。系统中, 对新增的设备基本采用了网络接口, 或通过通讯服务器将不适合长距离信号传输的异步串行通讯转换为网络通讯, 提升了系统性能及建设灵活性。

基于开源系统, 开发了性价比更高的嵌入式 Linux IOC, Rtems/MVME 3100 IOC 并在电源、波荡器、调制器、真空保护等设备控制中使用, 实现了长期稳定可靠运行。

参考文献:

- [1] Zhao Z T, Wang D. Progress in the SDUV-FEL and Development of X-ray FELs in Shanghai[R]. Proceedings of FEL 2010, 2010, Sweden
- [2] Kraimer M R, Anderson J, Johnson A. EPICS Input/Output controller application developer's guide [M], 2005
- [3] Kraimer M R, Delesio B. EPICS Allen Bradley driver and device support [Z], 1999
- [4] 丁建国, 郑丽芳, 胡守明等, EPICS 环境下的 LINAC 控制系统[J], 核电子学与探测技术, 2006, 26: 36-40
- [5] 李纪堂, 郑丽芳, 陆承蒙等, 基于 EPICS 的磁铁电源控制系统[J].核技术, 2005, 28(10): 729-732
- [6] 祁斌川, 朱海君, 丁建国, SDUV-FEL 真空联锁保护系统[J], 核技术, 2009,34(12):885-888
- [7] Zimoch D. StreamDevice: A multi-purpose character driver for EPICS 3.14[Z]. 2003
- [8] Kraimer M, Norum E, Rivers M. asynDriver: Asynchronour driver support [Z], 2009
- [9] Odagiri J, Chiba J, Furukawa K, et al. EPICS Device/driver support modules for network based intelligent controllers[C]. Proceedings of ICALEPCS 2003, 2003, Korea
- [10] Leng Y B, Shen G B, Zheng L F, et al. DeviceNet in SSRF control system[J]. Necl Sci. and Tech. 2001, 12(3):235-240

The Control System of the SDUV-FEL Test Facility

DING Jian-guo, HU Shou-ming, JIANG Ge-yang, MIAO Hai-feng, ZHAO Huan, ZHU Hai-jun
(Shanghai Institute of Applied Physics, CAS, Shanghai 201800)

Abstract: In this paper, the control system of the SDUV-FEL test facility is presented. Distributed architecture and working principles of the control system are introduced. Device control solutions for magnet power supply, vacuum monitor and protection, RF equipment, undulator gap adjustment, etc., and timing and interlock system are described in details. The integrated system running environment and the GUI console software are introduced as well.

Keyword: Free electron laser, EPICS; Control system, Ethernet

辐射图像迭代重建算法研究

贾小龙, 张全虎, 黎素芬
(第二炮兵工程大学, 陕西 西安 710025)

摘要: 在核材料/核部件的识别、认证研究过程中, 需要对贮存在密闭容器中的核材料/核部件的辐射图像进行测量分析。本文采用四种图像迭代重建算法, 针对多种测量模型, 模拟研究了其辐射图像, 通过对比分析, 对图像迭代重建算法进行了评估。结果表明: 为快速准确重建辐射图像, ML-EM 算法为最佳选择; 当介质结块现象严重时, Log 熵迭代算法可以作为参考。

关键词: 发射图像重建; 计算机模拟; 迭代重建算法

文章分类: 计算机技术及其应用的研究成果

非破坏性分析^[1] (NDA) 技术是军控核查技术中非常重要的技术, 其中层析 γ 扫描^[2] (TGS) 辐射成像是 NDA 技术中最先进的技术之一, 它专用于准确定量测量中高密度非均匀分布介质中的放射性核素及其含量。在技术上, 借用了当今先进的 CT^[3] 成像测量技术, 解决了 γ 射线能谱测量中由于样品介质不均匀分布而引起的射线衰减校正不准确的问题, 从而大大提高了非均匀样品中放射性含量分析的准确度。TGS 包括透射测量和发射测量: 透射测量类似于一般的 CT, 测量得到透射源发射的射线穿过介质的线衰减系数, 用 TGS 透射图像重建算法, 重建介质线性衰减系数; 发射测量利用透射测量得到的介质的线性衰减系数, 用 TGS 发射图像重建算法, 重建放射性强度^[4-6]。发射图像重建的好坏直接决定了 TGS 技术的准确性。

1 迭代重建算法的基本原理

TGS 发射测量方程可以表示为:

$$D = F \cdot S \quad (1)$$

其中: D 为测量值; S 为各体素的活度值, 即要重建的辐射图像; F 为衰减校正效率矩阵元。采

用图像迭代重建算法对活度值 S 进行求解。

迭代重建算法基本思想是: 先假设一个初始图像 S^0 , 构造迭代格式: $S^{(k+1)} = g_k(S^{(k)}, F, D)$ 。然后根据 S^0 求一次近似图像 S^1 , 再由 S^1 求二次近似图像 S^2 , 连续对所有的测量值逐次近似下去, 逐个修正。最后根据一定的判断准则, 决定迭代是终止还是继续进行, 最终得到重建值 S 。

迭代算法根据迭代顺序、迭代判据和迭代格式的不同分多种类型, 主要有加型 ART (Algebraic Reconstruction Technique)、乘型 ART、SIRT (Simultaneous Iterative Reconstruction Technique)、最大熵迭代 (也称作 EM 或 Lucy 迭代) 等^[7-9]。下面主要对加型 ART 算法、理查德森 (Richardson) 迭代算法、极大似然期望迭代算法 (Maximum Likelihood Expectation-maximization, ML-EM) 及其改进形式 Log 熵迭代算法进行研究和讨论。

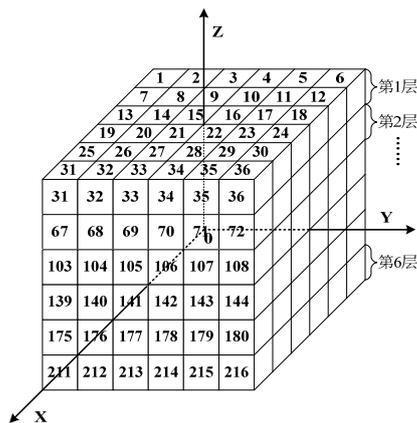
2 计算机模拟方法

为评估上述几种迭代算法对 TGS 发射图像重建的适用性, 需要对迭代重建算法的重建质量、

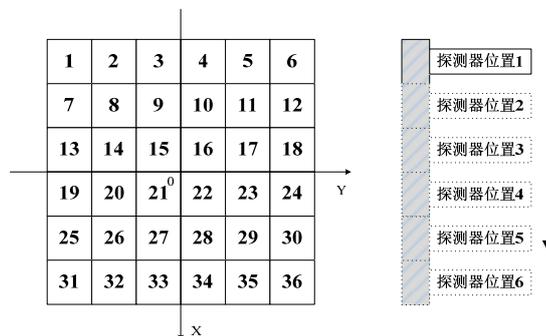
重建速度等重要指标进行评估来衡量算法优劣性。因为 TGS 实验周期较长, 采用实验测量不仅实验次数多, 耗费时间长, 且放射源 (标准样品) 的参数 (如活度和能量) 很难跟需要分析的特定参数一致, 相比之下, 运用计算机模拟仿真不仅可以节省大量的实验费用, 而且一次实验的周期很短 (≤ 100 s), 参数设置分布很广, 为评估迭代重建算法带来了很大的方便。所以建立合理的计算机模拟仿真平台进行数值仿真实验尤为重要。

2.1 模拟模型

体素的划分和编号如图 1 所示, 被测量样品划分为 $6 \times 6 \times 6$ 的模型。每个体素的大小为 $5\text{cm} \times 5\text{cm} \times 5\text{cm}$ 。为整个系统设定一个坐标系, 令



(a) 样品体素的划分



(b) 第一层体素编号及探测器位置示意图

图 1 样品的体素划分及编号

2.2 模拟方法

本文仅对发射测量进行模拟, 设定介质的线衰减系数 μ_k 已由透射测量得出, 具体的模拟过程分以下步骤:

- ① 应用 Cyrus-Beck 裁剪算法计算径迹长度 T_{ijk} 的值;
- ② 利用计算得到的径迹长度 T_{ijk} 及已知的线衰减系数 μ_k 计算出介质吸收衰减的因子 A_{ij} ;
- ③ 计算在所有平移位置、所有旋转角度, 探

坐标原点位于样品的正中心。

由于实际测量过程太过复杂, 对发射扫描测量的过程做如下合理简化:

- (1) 每个体素作为一个放射源, 将其看作是一个点源, 并位于各体素的正中心;
- (2) 每次测量中每个点源发出的 γ 射线都看作单向的, 且 γ 射线所经过的路径是连接此点源与探测器中心点的直线段;
- (3) 每个体素中介质的分布是均匀的, 即其线衰减系数 μ_k 是一个常数;
- (4) 忽略空气对 γ 射线的衰减作用及探测器的误差、噪声等因素;

测器对每个体素的探测效率 E_{ij} ;

④ 计算出衰减校正效率矩阵元 F_{ij} , 并结合预设的放射源的源强 S_j , 计算测量值 D_i , 作为探测器的测量到的 γ 射线计数率;

⑤ 将 S_j 作为未知量, 即需要重建的图像, 重建核材料发射图像, 即: 各体素的放射性强度。图 2 为整个模拟计算的流程图。

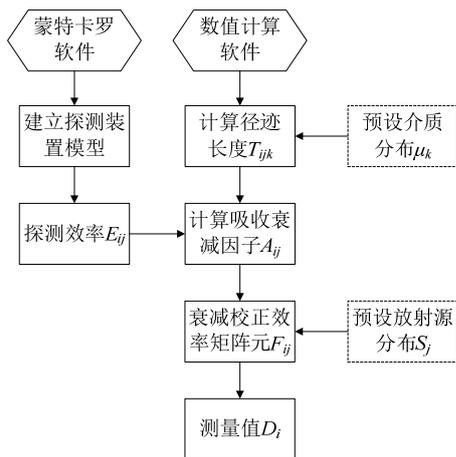


图2 模拟计算流程图

3 模拟研究结果分析

3.1 样品介质和源的分布

为检验加型 ART 算法、ML-EM 算法、Richardson 迭代算法、Log 熵迭代算法对 TGS 发射图像重建的适用性，建立了多种样品介质的分布，具有代表性的有以下几种：

① 相同介质的均匀分布

为叙述方便只对第二层分布进行介绍，第二层由均匀分布的聚乙烯构成，图 3 (a) 为第二层样品的介质分布情况示意图。放射源可以置于任

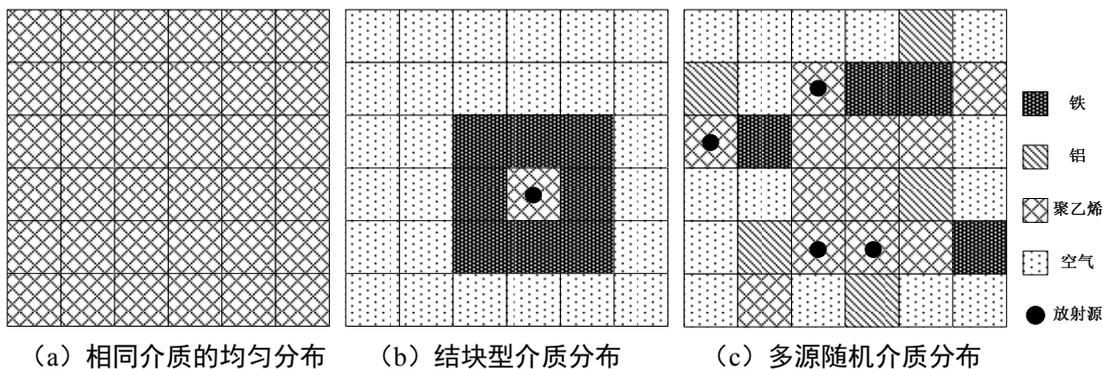


图3 样品介质和源的分布

3.2 计算结果分析

(a) 相同介质均匀分布发射图像重建

预设放射源强度 S_{58} 为：100000 Bq，位于 58 号体素（第 4 行和第 4 列较差位置）中，分别运用加型 ART 算法、ML-EM 算法、Richardson 迭代算法、Log 熵迭代算法进行图像重建。重建质

量体素的中心位置。同样也可用其他介质替换聚乙烯，如铁、铝、木屑等。这种均匀的同介质分布可以有效的检验重建图像的定位准确性和弥散情况。

② 结块型介质分布

在实际的样品测量中，介质一般不是均匀分布，有些情况下还会有结块，即局部介质的密度较大，从而影响重建结果。为评估迭代重建算法对结块型介质分布的适用性，设计了如图 3 (b) 所示的介质分布。放射源置于中间聚乙烯体素的中心，聚乙烯周围环绕一圈高密度的介质，如铁，铅、铜等。

③ 多源随机介质分布

更复杂的情况就是多源随机介质分布，这种情况最贴近实际测量，如图 3 (c) 所示，样品包含多种介质、多个放射源。对这种复杂情况的分析可以很好的评估迭代重建算法在实际应用中的适用性。

量的好坏由 3 个评价指标来表示： d 称为归一化均方距离判据，反应某些体素产生较大误差的情况； r 称为归一化平均绝对距离判据，对许多体素均有一些小误差的情况比较敏感； e 表示最坏情况距离判据。这几个指标数值越小，表示重建图像与原始图像越接近。

图 4 为这 4 种迭代算法收敛效果图，从图中可以看出加型 ART 算法在 200 次迭代以后 d、r 和 e 已经完全收敛，且收敛效果很好；ML-EM 算法在 150 次迭代以后 r 和 e 收敛，300 次迭代以

后 d 趋于平稳；Richardson 迭代算法在 200 次迭代以后 d 收敛，但是在 300 次迭代以后 r 和 e 仍未收敛；Log 熵迭代算法 r 和 e 在 50 次迭代以内收敛，150 次迭代后 d 收敛。

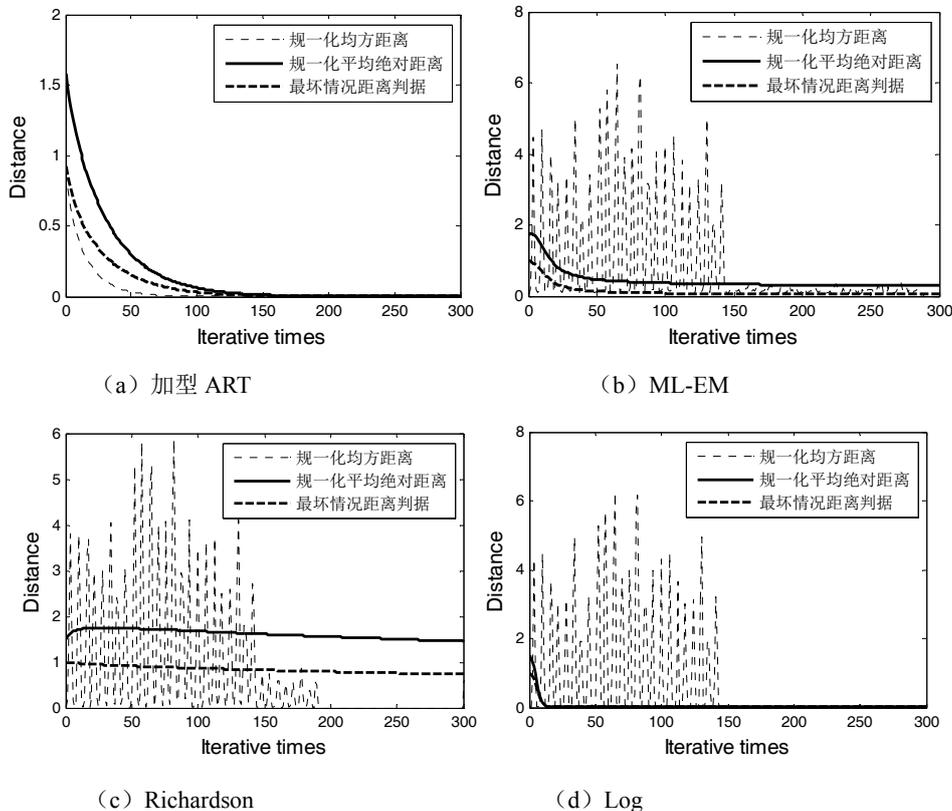


图 4 四种迭代算法收敛效果

为进一步对比 4 种算法的计算时间和准确度，将迭代次数 n 设为 300 次，在 Intel Pentium (R) Dual-Core E6500 2.93GHz CPU, 2G DDR2 内存，Windows XP Professional 的计算机和 MATLAB 7.8 软件平台上进行模拟计算，计算结果如表 1 所示。

从表中数据可以看出，Richardson 迭代算法收敛速度太慢，不能快速重建发射图像；ML-EM

算法耗时最短，但偏差相对较大；Log 熵迭代和加型 ART 算法准确度很高，尤其是 Log 熵迭代重建后图像与原始图像几乎一样，但是其计算时间相对较长。

综上所述，在均匀介质分布的情况下，加型 ART、ML-EM 算法和 Log 熵迭代算法都满足了快速、准确重建发射图像的要求，下面只对这 3 种算法进行讨论。

表 1 4 种算法重建质量和重建速度对比

算法种类	d	e	r	计算时间 (s)	58 号体素重建值 (Bq)	相对误差 (%)
加型 ART	0.0001	0.0001	0.0001	2.26	99995	-0.05
ML-EM	0.0048	0.0496	0.3080	0.05	95040	-4.96
Richardson	0.0001	0.7300	1.4500	57.82	27001	-73.00
Log	0.0001	0.0001	0.0001	85.52	100000	-2.57×10 ⁻⁴

(b) 结块型介质分布

预设放射源强度 S_{58} 为: 100000 Bq, 位于 58 号体素中, 分别运用加型 ART 算法、ML-EM 算法和 Log 熵迭代算法进行图像重建。由于 58 号体素周围有一圈高密度介质, 仅对 51、52、53、57、58、59、63、64、65 号体素进行着重分析。表 2 为 3 种算法的重建结果。从表中数据可以看出: 3 种算法对 58 号体素重建结果相对误差均在

10%以内, 其中 Log 熵迭代算法重建结果几乎与预设值相同, 没有弥散现象, 而 ART 算法和 ML-EM 算法在 52、53、64 号体素有不同程度的弥散。通过 (a) 和 (b) 对比可以发现, 弥散现象一般发生在放射源临近的重介质上。重介质的形成的结块对发射图像重建会产生较大的影响, 采用 Log 熵迭代算法可以有效地解决这一问题。

表 2 三种算法重建结果对比 (Bq)

体素号	51	52	53	57	58	59	63	64	65
加型 ART	0	35	0	36	99340	0	4	2172	0
ML-EM	0	456	485	0	90571	0	0	1240	0
Richardson	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Log	0	0	0	0	99965	0	0	2	0

(c) 多源随机介质分布

在这种介质分布情况下, 为了讨论不同算法对不同放射源分布的适用性, 设置了 4 组 S_j 值。第 1 组 S_j 值分布较均匀, 数值较小, 取值在 $1 \times 10^3 \sim 2 \times 10^3$ Bq 之间; 第 2 组 S_j 值分布较均匀,

数值较大, 取值在 $1 \times 10^7 \sim 2 \times 10^7$ Bq 之间; 第 3 组 S_j 值分布不均匀, 数值较小, 取值在 $1 \times 10^2 \sim 9 \times 10^4$ Bq 之间; 第 4 组 S_j 值分布不均匀, 数值较大, 取值在 $1 \times 10^5 \sim 9 \times 10^7$ Bq 之间。表 3 为在第 1 组 S_j 值情况下第二层体素重建结果。

表 3 在第 1 组 S_j 值情况下第二层体素重建结果

体素号	第 1 组 S_j 值 (Bq)	加型 ART 算法		EM-ML 算法		Log 算法	
		重建值 (Bq)	相对误差 (%)	重建值 (Bq)	相对误差 (%)	重建值 (Bq)	相对误差 (%)
37	1000	997	-0.30	1000	0	999	-0.10
38	1500	1503	0.20	1500	0	1501	0.07
39	1600	1600	0	1600	0	1600	0
40	1700	1699	-0.06	1700	0	1699	-0.06
41	1800	1802	0.11	1800	0	1801	0.06
42	1900	1901	0.05	1900	0	1900	0
43	2000	2007	0.35	2000	0	2003	0.15
44	1900	1897	-0.16	1900	0	1898	-0.11
45	1000	1004	0.40	1000	0	1002	0.20
46	2000	1990	-0.50	2000	0	1997	-0.15
47	1000	988	-1.20	1000	0	998	-0.20
48	1500	1498	-0.13	1500	0	1499	-0.07
49	1600	1599	-0.06	1600	0	1600	0
50	1800	1780	-1.11	1800	0	1788	-0.67
51	1900	1910	0.53	1900	0	1905	0.26
52	1700	1703	0.18	1700	0	1700	0

53	1600	1604	0.25	1600	0	1601	0.06
54	1500	1505	0.33	1500	0	1501	0.07
55	1000	1005	0.50	1000	0	1002	0.20
56	1500	1497	-0.20	1500	0	1500	0
57	1600	1599	-0.06	1600	0	1599	-0.06
58	1700	1689	-0.65	1700	0	1695	-0.29
59	1800	1789	-0.61	1800	0	1798	-0.11
60	1900	1900	0	1900	0	1900	0
61	2000	1996	-0.20	2000	0	1994	-0.30
62	1900	1816	-4.42	1900	0	1875	-1.32
63	1000	1020	2.00	1000	0	1009	0.90
64	2000	1997	-0.15	2000	0	1999	-0.05
65	1000	1006	0.60	1000	0	1002	0.20
66	1500	1501	0.07	1500	0	1501	0.07
67	1600	1594	-0.38	1600	0	1602	0.13
68	1800	1886	4.78	1800	0	1823	1.28
69	1900	1865	-1.84	1900	0	1892	-0.42
70	1700	1718	1.06	1700	0	1704	0.24
71	1600	1594	-0.38	1600	0	1599	-0.06
72	1500	1503	0.20	1500	0	1500	0

结果表明：在第 1 组 S_j 值情况下，ML-EM 算法的准确度最高，与原图像完全吻合；加型 ART 算法和 Log 熵迭代算法相对较差，但是重建结果相对误差都在 5% 以内，3 种算法都满足发射图像重建的要求。第 2 组与第 1 组结果相似，说明 3 种算法对较均匀的 S_j 值分布都能适用；第 3 组与第 4 组结果相似，其中以加型 ART 算法和 ML-EM 算法最优，相对误差都在 2% 以内；Log 熵迭代算法中个别体素的重建结果相对误差在 100% 以上，对非均匀 S_j 值分布不适用。因此，对于分布较均匀的 S_j 值，3 种算法都有很强的适用性。对于分布不均匀的 S_j 值，加型 ART 算法和 ML-EM 算法重建结果很好，Log 熵迭代算法不能满足发射图像重建的要求。

4 结论

本文建立了层析 γ 扫描发射测量过程的计算机模拟研究平台。针对多种测量模型，采用四种

图像迭代重建算法，模拟研究了层析 γ 扫描发射图像，并对辐射图像迭代重建算法进行了分析评估。模拟计算结果表明，为快速准确重建辐射图像，ML-EM 算法为最佳选择；当介质结块现象严重时 Log 熵迭代算法可以作为参考。

参考文献：

- [1] Doug Reilly, Norbter Ensslin, et al. Passive Nondestructive Assay of Nuclear Materials, LANL, 1991.
- [2] R.J.Estep, T.H.Prettyman, and G.A.Sheppard, Tomographic Gamma Scanning to Assay Heterogeneous Radioactive Waste[J], Nuclear Science and Engineering, 1994, 118:145-152.
- [3] A. C. Kak and M. Slaney, Principles of Computerized Tomographic Imaging, IEEE Press, New York ,1988.
- [4] 张全虎. 层析 γ 扫描 (TGS) 重建技术的研究[D]. 中国原子能科学研究院. 2003.
- [5] J. Steven Hansen, Tomographic Gamma-ray Scanning of

Uranium and Plutonium, Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, LA-UR-07-5150, 2007.

[6] 张全虎, 吕峰, 隋洪志, 等. 层析 γ 扫描透射图像重建方法[J]. 原子能科学技术. 2004. Vol.38 No.2 P.162~165.

[7] 庄天戈. CT 原理与算法[M]. 上海交通大学出版社.

1992.

[8] 张慧滔. 迭代法在图像重建中的研究与应用[D]. 北京: 首都师范大学, 2005.

[9] 李志鹏. 代数迭代算法进行 CT 图像重建的研究[J]. 核电子学与探测技术, 2005, 5 (2): 184-186.

Research on the iterative algorithms for radiation image

JIA Xiao-long, ZHANG Quan-hu, LI Su-fen

(The Second Artillery Engineering College, Shanxi Xi'an 710025, China)

Abstract: In the process of distinguishing and attesting the nuclear materials/ nuclear partsin, it is necessary to measure and analyse the radiation image of nuclear materials/ nuclear partsin in the airtight container. By help of using four iterative algorithms for image reconstruction, emission image of tomographic gamma scanning is simulated to some models, and the iterative algorithms are evaluated. On the TGS device in the laboratory, experiment of emission measurement is carried out. The results of experimental reconstruction is consistant with that of computer simulations, which proves the correctness and the validity of computer simulation methods this paper presents.

Key words: Emission Image Reconstruction; Computer Simulation; Iterative Reconstruction Algorithms

基于 C8051 单片机电子光纤封记系统设计

弟宇鸣, 陈荣桦, 左广霞, 宋 仓

(第二炮兵工程大学 102 室, 陕西 西安 710025)

摘要: 本文提出以 C8051 单片机为核心, 以光信号检测模块、移动检测模块、温度检测模块、电源模块为配套电路的电子光纤封记系统。实验结果表明, 无论是对单一篡改事件还是多种篡改手段, 电子光纤封记都能够快速准确地记录相应事件信息, 防篡改能力进一步增强。

关键词: C8051 单片机; 核查; 电子光纤封记; 设计

文章分类: 计算机技术及其应用的研究成果

1 引言

封记又叫篡改指示装置 (Tamper-Indicating Devices, TIDs)^[1,2], 是核裁军核查过程中监护链技术的重要组成部分, 广泛地应用于国际核保障和核不扩散等领域。电子光纤封记是封记技术发展到现在一定阶段的产物, 是封记技术逐渐成熟的一个重要标志。电子光纤封记, 即以微处理器为核心, 使用光纤等传感器对敏感对象进行封装、标记和监测, 可重复使用, 可对篡改事件加以实时记录的封记^[3]。封记的应用, 其目的在于对敏感目标加以封存和监控, 保证在核查时能够发现任何未经许可的开启或入侵行为, 实现对敏感目标的有效保护和监控, 提高现场核查效率^[4]。封记并不需要阻止访问, 它只需以某种永久或明确的方式记录曾经发生的访问^[5]。电子光纤封记的研制成功与广泛使用, 对核保障与安保工作具有重要意义。

2 系统需求分析

美国从事封记脆弱性分析的实验室声称他们仅需 2 小时就可以毫无痕迹地把现在国际上大部分正在使用的封记产品 (包括高技术含量的封记产

品) 成功篡改, 使其监视失效^[6]。因此如何降低封记的脆弱性是值得我们思考的问题。本文从以下两方面进行考虑。

(1) 封记应具有多重防篡改能力。首先电子光纤封记一定要确保光信号的安全, 只要光信号被中断, 一定记录篡改事件; 其次应具有抵抗对手使用物理层面上攻击手段的能力, 例如使用化学物质攻击、冷热攻击或者用一些简单的工具如可手持的专业探针、金属丝或者便携式电动装置等攻击。

(2) 封记应能够记录篡改事件发生的相关信息。电子光纤封记内部必须有能够记录下发生篡改事件的类型和时间信息的能力, 例如光纤光信号中断、撬动和移动的情况的记录、温度极端变化情况的记录等, 以方便核查人员核查, 作为鉴定有否违规行为的证据之一。

3 系统总体设计

根据系统功能需求, 按照高可靠性、低功耗的设计原则, 本文提出如图 1 所示的电子光纤封记系统总体结构图。电子封记系统主要包括微控制器模块、光信号检测模块、移动检测模块、温度检测模块、电源模块及通信接口。

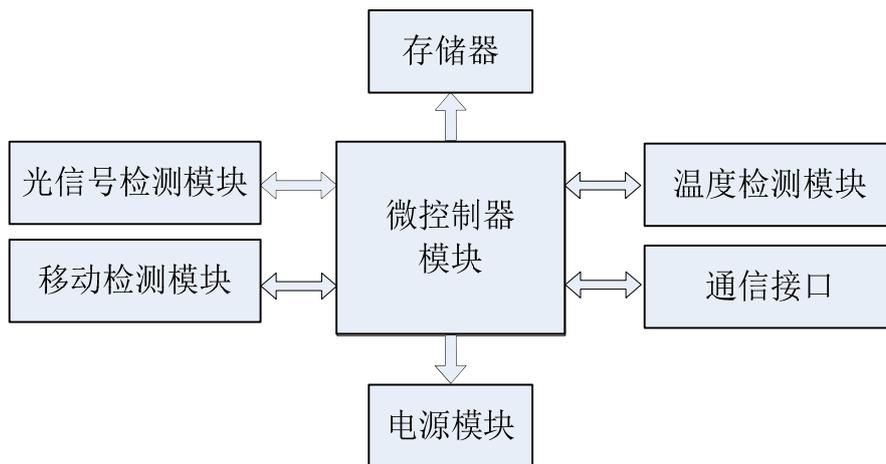


图 1 封记系统总体结构图

4 硬件模块设计

4.1 微控制器模块

封记系统要求防篡改能力强、功耗低。在综合比较了MSP430、AVR、C8051F、Scenix等系列单片机性能后，本文选择了Silicon Labs公司生产的C8051F020单片机作为封记系统的微处理器。它是有完全集成的混合信号系统级芯片，如内部有实时

钟的功能模块，可方便进行时间信息的采集，其工作电压3.3V，与8051兼容的CIP-51微控制器内核，采用流水线结构，单周期指令运行速度是8051的12倍，全指令集运行速度是原来的9.5倍，具有速度快、功耗低、体积小、可靠性高等优点^[7]。C8051与其它功能模块的连接如图2所示。

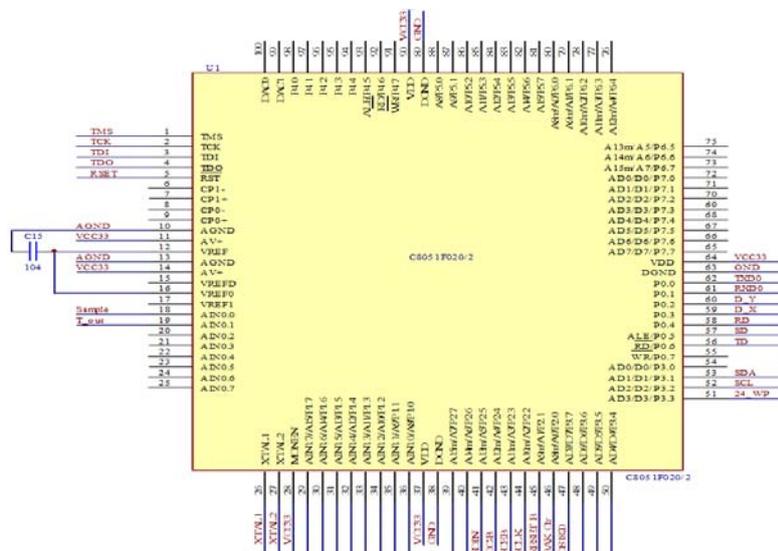


图 2 C8051 单片机与其他功能模块的连接电路

4.2 光信号检测模块

光信号检测模块是电子光纤封记的核心部分，通过检测光纤的连续性可以判断有无非授权访问。

本文选用的高集成度光收发一体模块 OCM3341。其主要芯片为光收发模块，它不但把光发射用的激光器与驱动电路集成到一起，而且把光接收用的探

测器与前置放大电路集成到了一起，两部分电路共同封装于一个器件中^[8]。光信号传送过程，首先由单片机产生特定信号传送至发送部分 TD 端，然后经由光纤到达接收部分的 RD 端，最终返回单片机。若数据传送异常，接收部分 SD 端便给出无光告警信号。OCM3341 与单片机的连接电路如图 3 所示。

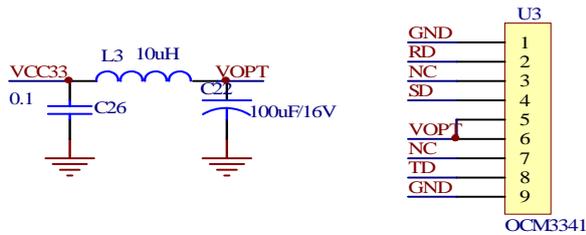


图 3 OCM3341 与单片机连接电路

4.3 移动检测模块

当攻击者试图破坏电子光纤封记时，很多行为都会使封记产生空间位置变动，从而使封记的加速度发生变化，所以本文 MEMSIC 加速度传感器作为封记移动检测传感器。MEMSIC 加速度传感器是基于单片 CMOS 集成电路制造工艺而生产出来的完整的双轴加速度测量系统，采用加热气体分子作为质量块，具有抗抵抗冲击能力、故障率低的优点^[9]。加速度传感器与单片机连接电路如图 4 所示。

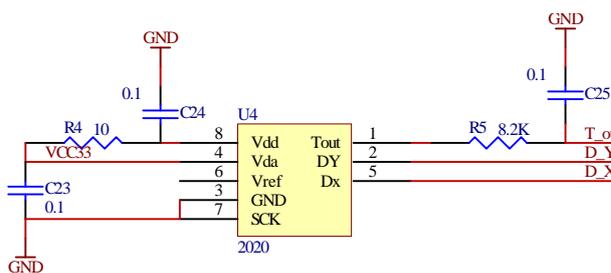


图 4 加速度传感器与单片机连接电路

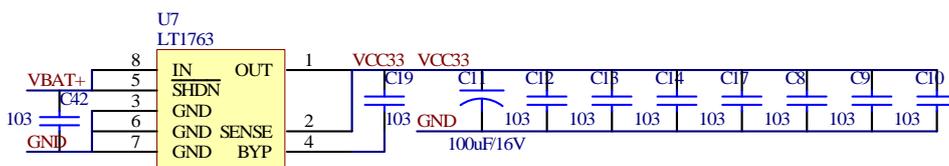


图 6 LT1763 电源芯片与单片机接口

4.4 温度检测模块

温度检测模块可探测任何将电子光纤封记暴露在极端高、低温度之下使之失效的行为，本文采用“一线总线”数字化温度传感器 DS18B20 来实现。DS18B20 测量温度范围为 $-55^{\circ}\text{C}\sim+125^{\circ}\text{C}$ ，在 $-10^{\circ}\text{C}\sim+85^{\circ}\text{C}$ 范围内，精度为 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 。它具有微型化、低功耗、高性能、抗干扰能力强、传输距离远等优点^[10]。DS18B20 完成温度测量并转化为数字量后，通过数字信号输入/输出端 DQ 传送给单片机。温度传感器与单片机连接电路如图 5 所示。

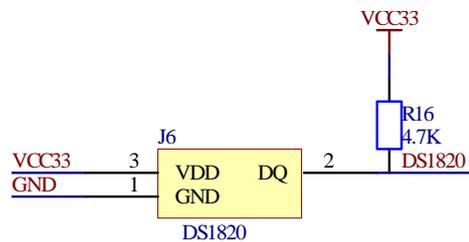


图 5 温度传感器与单片机连接电路

4.5 电源模块

本文设计中所使用的芯片工作电压多数为 3.3V，故采用市面上常见的 3.7V 锂电池配合 LT1763 电源变换器作为供电系统，以提供 3.3V 电压。LT1763 芯片输入电压范围宽（ $1.8\text{V}\sim 20\text{V}$ ），带负载能力强（输出电流可高达为 500mA），输出电压范围可选（可选择为 1.5V、1.8V、2.5V、3V、3.3V、5V）。LT1763 芯片连接相应电容器件便可产生系统所需电压。LT1763 与系统电源接口的典型电路如图 6 所示。

5 系统软件设计

为降低功耗，系统采用半休眠运行方式。软件主程序流程图如图 7 所示，主程序的主要任务是当定时中断或串口中断将 CPU 从休眠状态唤醒时，首先判断有无串口中断，如果有就根据命令进入各

功能模块执行串口通信服务程序后休眠；如果没有串口命令，系统设定每秒钟检测一次加速度传感器、温度传感器和光纤模块工作状态，判断参数是否合格，不合格则记录篡改事件的信息，然后休眠。

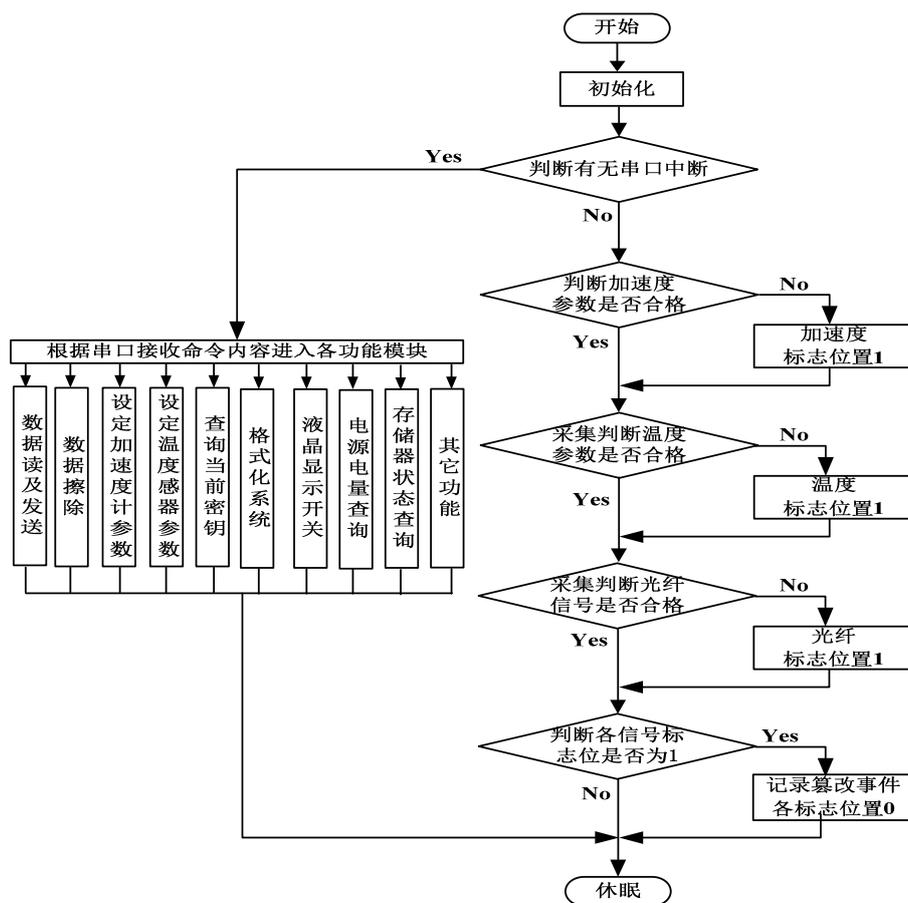


图 7 封记系统主程序流程图

6 试验与结果分析

将电子光纤封记通过串口线与计算机串口相连接，打开封记电源，在计算机中使用封记上位机软件设定封记的各参数为：①加速度传感器感应封记倾斜角度是 10 度；②温度传感器正常工作范围为 20℃到 30℃；③检测各传感器的值时间间隔设

为 1s。

本试验采用空间位置移动、插拔电子光纤、改变环境温度等措施，对设计完成的电子光纤封记进行防篡改性能测试，并在 PC 端通过 RS-232 接口授权读取篡改事件信息，结果如图 8 所示。



图 8 篡改事件信息

通过以上试验结果可以看到，当电子光纤封记发生光纤被插拔、空间位置变动或环境温度改变等破坏或篡改事件时，电子光纤封记都能够准确地记录这些事件类型及时间信息，时间信息以年、月、日、时、分、秒形式给出。这些信息自动保存于内部存储单模块中，核查人员可通过接口电路授权访问存储信息。本文设计的电子光纤封记基本实现了预定功能。

7 结束语

本文详细介绍了基于 C8051 单片机的电子光纤封记系统设计，通过使用微控制器模块、光信号检测模块、移动检测模块、温度检测模块、电源模块等模块设计，进一步提高了电子光纤封记的防篡改能力。本文所设计制作的电子光纤封记，无论是单一篡改事件还是多种篡改手段，都能够准确地做出反应并记录相应事件信息，基本实现了预期的功能，但在功耗处理、外壳封装等方面还存在值得改进的地方。本系统的成功设计，对今后电子光纤封记的自主研制具有一定参考价值。

参考文献:

- [1] Roger G. Johnston and Anthony R.E.Garcia. Physical Security and Tamper-Indicating Devices[C]. Proceeding of the Information Privacy, Security, and Data Integrity 1997 Mid-Year Meeting, Arizona, 1997. 43-46.
- [2] Roger G. Johnston. Tamper-Indicating Seals for Nuclear Disarmament and Hazardous Waste Management[J]. Science&Global Security, 2001, 9: 93-112.
- [3] 宋仓, 左广霞, 弟宇鸣. 电子光纤封记原理及脆弱性分析[A]. 第十五届全国核电子学与核探测技术年会论文集[C], 2010.
- [4] Roger G. Johnston. Effective Vulnerability Assessment of Tamper-Indicating Seals[J]. Journal of Testing and Evaluation, July, 1997, 25: 451-455.
- [5] G. David Richardson, Chris Pickett. The Seal Selection Tool[C]. INMM 47th Annual Meeting, Nashville, Tennessee, USA, July, 2006.
- [6] 刘恭梁, 解东. 透明与监测核查体制的发展与

技术挑战[R]. 中国国防科学技术报告, GF编号: GF-A0091932G, 2006.

[7] 孟臣, 李敏. 单片机C8051F020及其在仪器和仪表中的应用[J]. 电子元器件应用, 2003, (03).

[8] 谭浩强. C程序设计[M]. 清华大学出版社, 1999.

[9] 中国美新公司. AN-00MX-001-CN 加速度传感器原理, <http://www.memsic.com>.

[10] 颜丽娜, 张铁民. 基于DS18B20测温系统的设计[J]. 科技信息, 2010, (11).

Design of Fiber Optic Electronic Seal System Based on C8051 Microcontroller

Di Yu-ming, Chen Rong-hua, Zuo Guang-xia, Song Cang

(The Second Artillery Engineering College, Shanxi Xi'an 710025, China)

Abstract: This paper presents fiber optic electronic seal system, witch uses C8051 microcontroller as core, matching other circuits such as optical signal detection module, movement detection module, temperature detection module and power module, etc. The results show that the seal system can record the tampering events' information accurately and quickly no matter there is one tamper event or more, and the ability of anti-tamper is improved.

Key words: C8051MCU; nuclear verification; fiber optic electronic seal; design

基于 Web 的大亚湾探测器监测系统

杜小峰, 李小男, 叶梅, 徐俊, 张书华

(核探测与核电子学国家重点实验室; 中国科学院高能物理研究所; 北京, 100049)

摘要: 随着 Web 技术的发展, 基于 Web 的探测器监测系统逐渐成熟。针对传统的监测系统在分布式和交互性方面的不足, 本系统利用 JavaScript 框架和 Ajax 技术设计了一种用于大亚湾中微子实验的新的探测器监测和查询系统, 动态显示设备数据, 查询设备历史数据。系统具有跨平台, 动态刷新, 数据传输率高等特点。

关键词: 核探测技术; Web; 探测器监测; JavaScript; Ajax; 大亚湾

文章分类: 计算机技术及其应用的研究成果

为了保证大型粒子探测器的正常稳定运行以及设备和人身安全, 并同时探测器的辅助系统例如高压、气体、电子学设备等进行远程监控, 就需要一套远程监控系统对探测器及其辅助系统进行监测或控制。由于系统中所处理的信号基本上都是秒级的缓变量信号, 例如温湿度、压力、高压、风扇速度等, 因此高能物理一般将该系统称为探测器控制系统 (Detector Control System)。大亚湾反应堆中微子实验是一个前期研究中的中微子振荡实验, 主要目标是利用核反应堆产生的电子反中微子来测定一个具有重大物理意义的参数——中微子混合角 Θ_{13} 。该项目可测量混合角

在 90% 的置信度下达到 0.01 的精度, 较过去的实验提高近一个数量级, 对中微子物理的未来发展将提供方向性指导, 特别是对理解宇宙中“反物质消失之谜”具有重要意义。^[1] 本文所设计的系统为大亚湾反应堆中微子实验 DCS 中的一部分, 用以实现 Web 监测实验数据。

随着 Web 技术的兴起, 通过 Web 实现对探测器的监测已成为一种趋势, 其最大的好处是实现不同的人员, 从不同的地点, 以不同的接入方式 (比如 LAN, WAN, Internet/Intranet 等) 监测数据和了解设备运行状况。

1 系统设计

1.1 需求分析

DCS 远程数据浏览网页用于将 DCS 系统数据库中的所有数据发布到 Internet 供远程用户浏览或下载使用。但是原有的 Web 界面在交互性和可配置性上存在不足, 难以满足现在远程 Web 监测的要求。故本系统采用动态页面取代静态页面定时刷新的办法, 实现对数据量和数据曲线的动

态显示。系统包括实时曲线, 历史曲线, 历史数据, 阈值报警等功能, 分别的需求为:

实时曲线: 通过网页自动刷新实时显示数据库中最新数据的曲线趋势。用户可以自主选择显示哪些参量, 显示的时间范围以及显示的阈值等。

历史数据: 以表格的形式显示数据库中任何时间段内的历史数据。用户可以自主选择参量内容、时间范围和采样间隔等。用户也可以选择将

查询到的历史数据以 Excel 文件的形式下载到本地计算机。

历史曲线：以曲线的形式显示数据库中任何时间段内的历史数据。用户可以自主选择参量内容、时间范围和采样间隔等。在交互性方面，要求能够放大曲线，能够按要求控制 Y 轴。

阈值报警：在被监测数据量超过参考值时，弹出提醒，显示为红色。在实时曲线中标注合理范围。

另外，网页内容必须能够根据数据库内容自动更新，即不管数据库内容如何扩充或删减，只要符合慢控制数据库的表设计格式，都不需要更改网页程序；最大数据查询时间不超过 10 秒，避免用户感觉到系统迟钝；网页必须非常简洁直观，用户不需要数据库知识就可以通过网页浏览慢控制数据；用户不能通过网页向数据库写入或更改任何内容，以确保数据库的安全。^[2]

1.2 总体框架

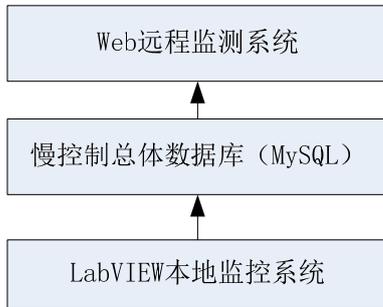


图 1 Web 远程监测系统在 DCS 中的位置

在 Web 应用系统中，前台的动态 Web 页面往往需要后台的数据库支持。本系统中服务器端采用 Apache 作为 Web 服务器，结合传统的 HTML 标记语言和 PHP 语言作为后台脚本，数据库选用总体 MySQL 数据库。总体数据库部署在全局控制层的 Web 服务器上，用户通过它能查看数据库中数据信息，进而达到查看或监测探测器的运行状态的目的。它是 DCS 中 LabVIEW 本地监控系

统功能的扩展和延伸，是 DCS 软件系统的重要组成部分。本系统在 DCS 系统中的位置如图 1 所示。

PHP 编程采用 MVC^[3]框架，见下文服务器端实现中的图 2.2 服务器类图，在图中，ProcessClass 为模型层 (Model)，getConfig，getData，getTableData 三者为控制器(Controller)，搜索页面和各厅页面为视图层(View)，使得各逻辑层分离，达到最大的代码重用，并且结构清晰方便维护。

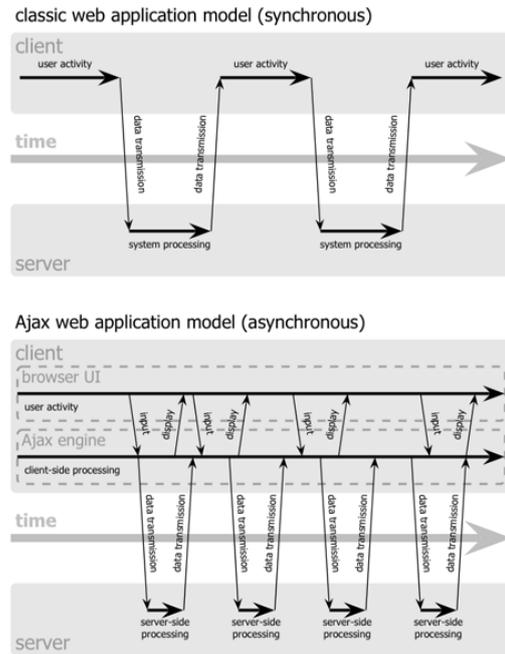


图 2. Ajax 流程图

客户端采用 JavaScript 语言和 Ajax 技术。JavaScript 是一种客户端脚本语言。主要目的是为了用来增强网页的交互性和分担 Web 服务器端语言的一部分功能，为客户提供更流畅的浏览效果和减轻不必要的服务器端负担。Ajax 技术是一种可以在浏览器端与服务器端无刷新进行数据交互的技术，使用 JavaScript 中的 XMLHttpRequest 对象实现异步数据请求和检索，而传统的请求-响应模式在服务器端处理请求时，客户端页面处于锁定状态，无法响应用户的指令，直到请求的数据返回。Ajax 请求流程图如图 2 所示。^[4] 这样 Ajax 不仅每次通过网络请求的数据量较少，减少

数据的相应时间，并且在浏览器等待服务器响应的时可以继续处理页面的数据。Ajax 可以返回多种格式的数据。在本系统中，小数据量用 XML 格式，在大数据量时使用 Json^[5]格式(JavaScript 原生支持的一种格式)，方便客户端脚本调用，解析速度和响应速度都比 XML 要好，在特殊情况下使用纯字符串，如取得数据的参考值。

引入 Ajax 技术后在 MVC 的视图层(View) 和控制层(Controller)发生了变化，数据的请求和接收到最后反映到页面的变化都是由 Ajax 解释器完成的，如图 3 所示。

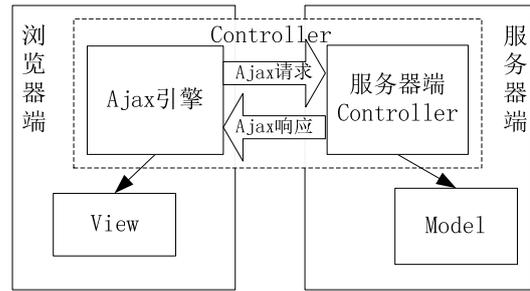


图 3. 引入 Ajax 的 MVC 框架

在业务逻辑上，PHP 和 MySQL 完成对数据的查询工作，Ajax 相关技术完成了对数据的后期处理，实现了负载均衡，有效的利用了服务器端和客户端的运算能力，并且提高了用户交互和浏览速度。系统整体流程如图 4 所示。

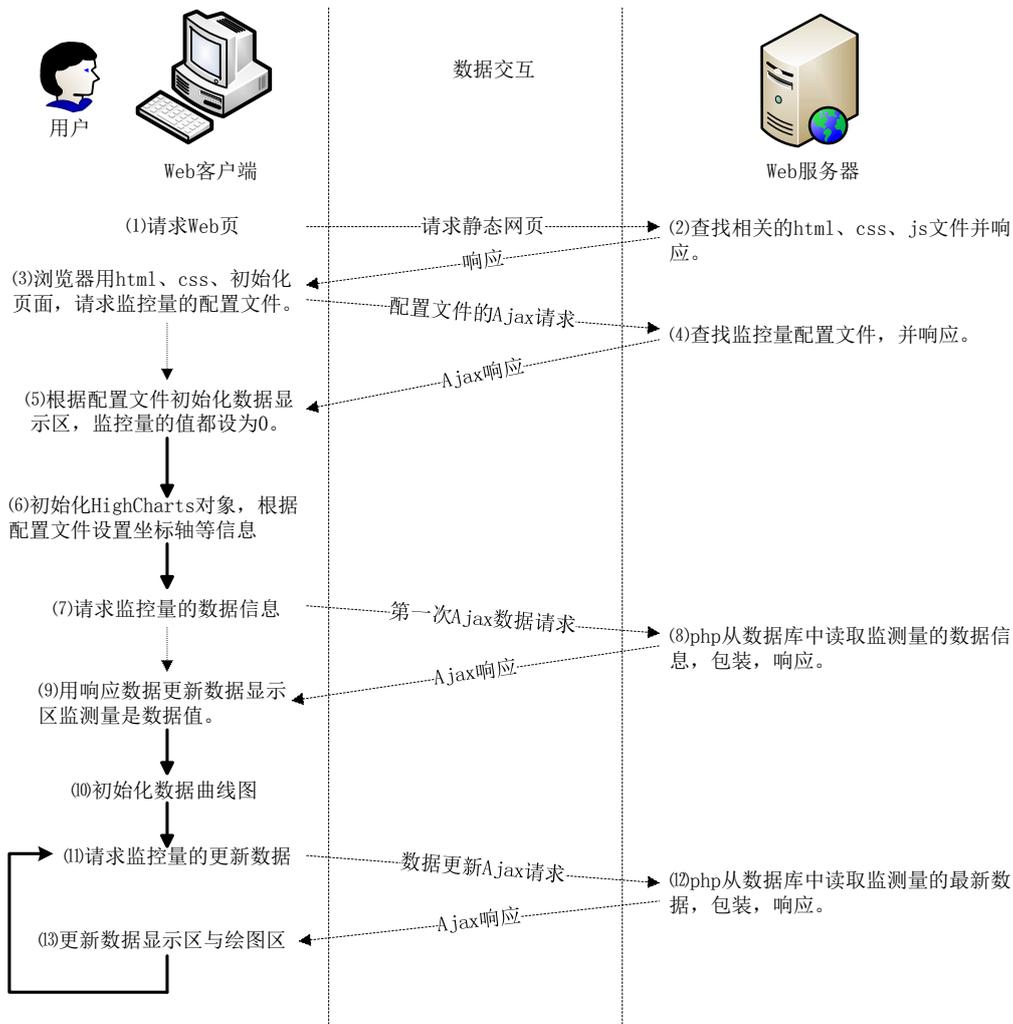


图 4. 系统整体流程

2 功能实现

2.1 页面实现

Web 静态页面主要采用 CSS 和 HTML 来实现整体布局。动态页面主要在客户端加载 JavaScript 文件来实现，详见 2.3 节客户端实现。主页实时显示各主系统的状态，按照各子系统进行分类监测数据，数据超出参考值范围时产生报警；各厅页面显示该主系统下的部分子系统列表，对必要的数据显示实时数值和实时曲线；Expert Mode 进入专家模式，可对所有慢控制数据库数据进行查询显示，例如配置历史曲线的数据项、时间范围和采样间隔；配置完成后点击 Real Time Chart 或者 History Chart 按钮即进入相应的数据显示页面。DCS 数据的组织结构是树形结构，每个系统分为不同的子系统。所以在搜索分类数据时采用了不同主系统，子系统，探测器进行分类查询，还添加了模糊查询功能，方便定位要监测的数据。具体组织结构如图 5 所示。

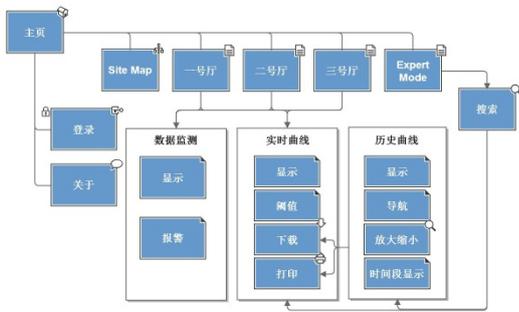


图 5. Web 页面的组织结构

2.2 服务器端实现

服务器端主要实现处理用户请求，并返回用户需要的信息，信息包括 HTML 页面和 Ajax 返回的数据。为了方便函数调用和代码重用，系统中所有与 MySQL 相关的自定义函数都放在一个大类中实现：ProcessClass，ProcessClass 中用到了 PHP 的 Mysqli 扩展，通过 Mysqli 调用数据库链接，并且用相关接口实现 SQL 语句查询，最终

返回以查询结果构成的 PHP 对象，其他类在需要使用时生成 ProcessClass 的实例进行调用。在主页和各个子页面中，通过 Ajax 调用 getData.php 获取 Json 格式实时数据和历史数据；调用 getTableData.php 获取一张表的最新一条数据库表项，然后根据实际情况使用调回的数据库表项，如取得最新的数据更新时间。在 Expert Mode 页面中，通过 Ajax 调用 getConfig.php 来获取 XML 格式的各系统子系统和表之间的对应关系的配置文件，方便搜索和分类，再通过 ProcessClass 类返回 XML/Json 格式的数据或者纯字符串。调用关系如图 6 所示。

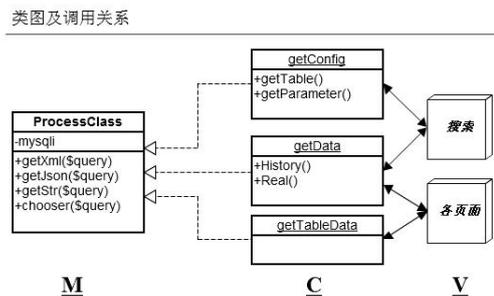


图 6. 服务器类图

2.3 客户端实现

在客户端通过 JavaScript 将服务器返回的数据进行解析，并根据不同需要，形成数据监控，实时曲线和历史曲线。在本系统中，采用 Highcharts^[6]进行曲线设计，Highcharts 是基于 JavaScript 的开源框架，用于绘制网页和 Web 应用的强有力的交互图形。将服务器端通过 Ajax 返回的数据输入到 HighChart 中提供的接口中，再对插件进行配置，即可在客户端绘图。本系统对 Highcharts 根据需要进行了封装，生成自定义类 myChart，方便功能定制。对于 myChart 中的主要配置如下，json 即为服务器端返回的 Json 格式数据：

```

var HighchartsOptions = {
  credits: {
    enabled: false
  },
  chart: {
    renderTo: self.Locate,
    type: 'line',
    animation: false,
    marginRight: 50,
    events: {
      load: function(){}
    }
  },
  title: {
    text: 'Realtime Chart at ' + self.Name
  },
  subtitle: {
    text: 'Source from Dayabay DCS'
  },
  xAxis: {
    type: 'datetime'
  },
  yAxis: {
    startOnTick: false,
    endOnTick: false,
    title: {
      text: 'Value'
    }
  },
  plotOptions: {
    line: {
      marker: {
        enabled: false
      }
    }
  }
}

```

```

},
series: {
  animation: false
},
tooltip: {
  formatter: _formatter
},
series: json
};

```

客户端类图参考图 7 所示。RealChart 为 myChart 类的一个对象，在各个页面通过 RealChart.js 调用来加载实时曲线，HisChart 为 Highchart 延伸类库 Highstock 的一个对象，通过 HisChart.js 调用来加载历史曲线。

类图

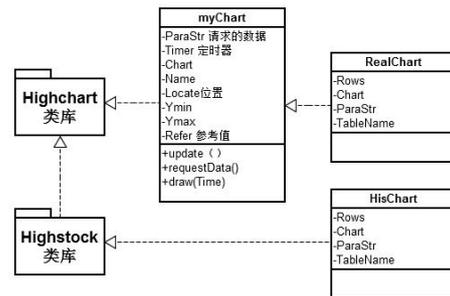


图 7. 客户端类图

由于从服务器返回的数据为真实数据，如果数据库实验数据因为停机或者错误出现被记录的异常数据，页面在绘制曲线时，会出现峰值突变的情况，导致整个曲线的波动趋近于一条直线，不利于相关人员对整体数据的监测。另一方面，数据采样虽然是离散的，但是被监测数据在短时间内的变化一般是连续的，故本系统对数据进行分段平均的做法，突变的峰值会被拉低，便于观察曲线趋势，需要仔细观察异常时，选择放大曲线，缩短时间段，这样的话分段平均的平均值就会变为真实值。本算法既可以看到数据的变化情况，

也不会忽略任意一个异常数据，是一个折衷的实现方法。

3 实例及测试

本系统网页监测的各个功能基本完成。此次测试重点测试响应速度。对于实时数据监测页面，由于一次返回数据量小，反应速度良好。在实时曲线中，如在一次请求3种数据，各2000组数据，响应时间在200ms，如图8所示。在历史曲线中，如在一次请求3种数据，各43000组数据，响应时间在6s左右，符合10s以内的需求。如图9所示。



图 8. 实时曲线测试图



图 9. 历史曲线测试图

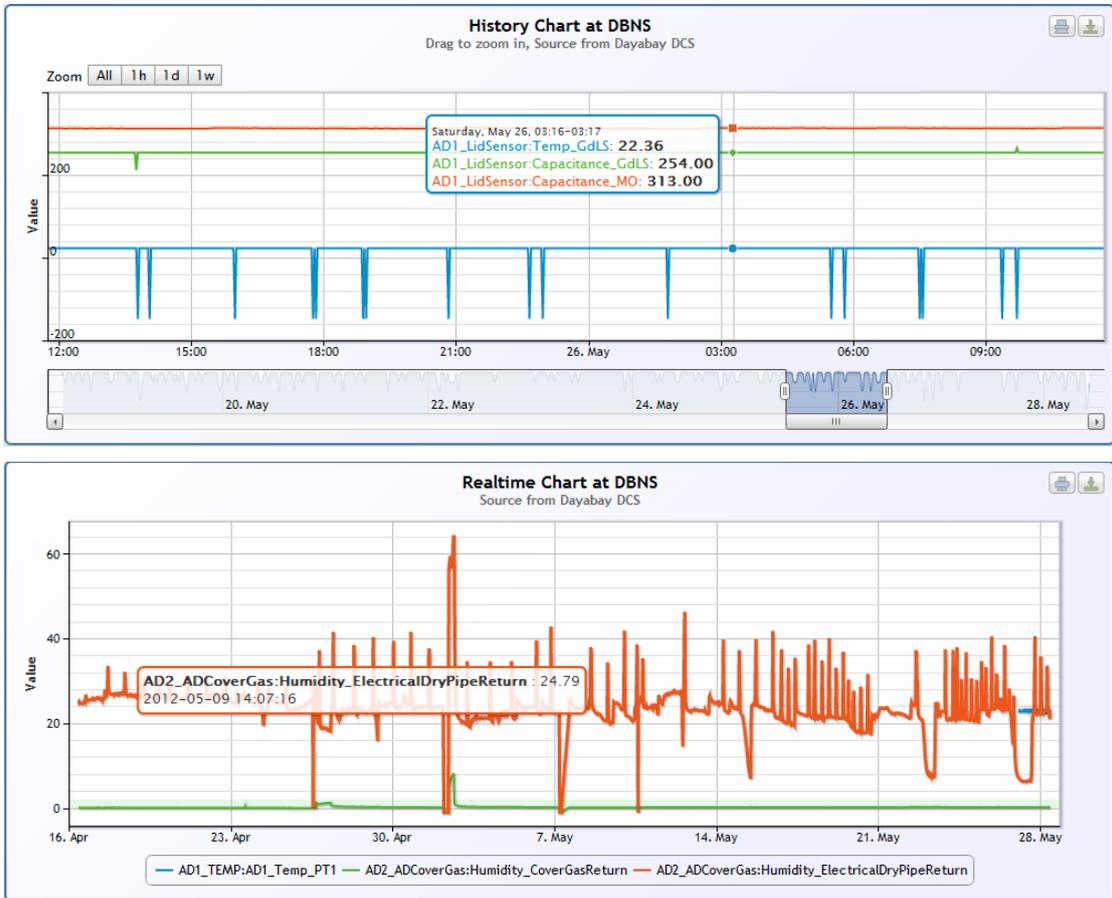


图 10. DCS 页面实例

最终实现的远程数据监测网页页面简洁直观，实现了功能需求所要求的所有功能，并满足性能要求，为用户提供了较好的用户体验。实例如图10所示。

上图为历史曲线实例，曲线下方为导航，用

于拉动显示一个时间段的数据，方便时间定位。左上方为以某一固定时间间隔显示数据，方便相关人员查看。同时整个页面支持鼠标随动显示和拉拽放大功能，这样既可以观察数据的整体变化趋势，也可以深入到每一个具体的时间段或者时

间点来监测数据，方便不同数据之间的比较和对应；下图为实时动态数据的截图，刷新频率可以

设置，在温度变化曲线中提供了参考值，用浅绿色带来表示合理范围。

4 结束语

本系统是对原有 DCS 网页监测系统的改进与升级，基本完成了预期目标，在用户界面和人机交互方面有了很大提升，尤其是对于数据的可操作性，可配置性和可视性方面做出了改进。在对实时性要求一般，数据用户面多的共享数据显示方面，本系统有着跨平台，显示直观，方便部署升级，动态刷新，传输率高等优点。本系统是对新的基于 Web 监控模式的探讨，方便了相关人员进行探测器和环境变量的监测，是多种监测手段的一种。

参考文献:

- [1] 王怡芳. 大亚湾反应堆中微子实验[J]. 物理, 36卷 3 期, 2007
- [2] 陈锡辉. BESIII 慢控制系统软件的设计与实现[D]. 北京高能物理研究所, 2008
- [3] 刘亮, 等. 基于 MVC 的通用型模式的设计与实现[J]. 中国科学技术大学学报, 2010, 40(6): 635-639.
- [4] 赫尔德尔, Ajax 权威指南 [M], 北京: 机械工业出版社, 2009
- [5] <http://www.json.org/>
- [6] <http://www.highcharts.com/ref/>

Web monitor in Daya Bay Detector Control System

DU Xiao-feng, LI Xiao-nan, YE Mei, XU Jun, ZHANG Shu-hua

(State Key Laboratory of Particle Detection and Electronics; Institute of High Energy Physics, CAS; Beijing 100049)

Abstract: With the developing of Web technology, condition monitoring systems based on Web were widely used. Traditional systems cannot meet the distributed monitor and interactive requirements, so we use JavaScript framework and Ajax to develop new remote monitor and query parts on DCS (Detector Control System) at The Daya Bay Reactor Neutrino Experiment. This part has advantages on cross-platform, dynamic refreshing and high ability of data transmission.

Key words: Web; Detector Control System; JavaScript; Ajax; Daya Bay

基于 LM 算法 BP 神经网络的放射性核素识别

王季红¹, 王良厚², 孙健¹

(1.防化学院二系, 北京 102205 2.防化研究院二所, 北京 102205)

摘要: γ 谱测量的最终目的是根据所测得的脉冲幅度谱, 通过数据处理分析方法求出待测样品中各种放射性核素的种类和含量。文章基于 LM 算法 BP 神经网络, 提出了一种放射性核素识别方法, 并将其与 FR 算法进行对比。通过 MATLAB 仿真结果表明, 基于 LM 算法 BP 神经网络对于放射性核素的识别效果非常好, 识别率可达 99%。通过与 FR 算法对比分析, LM 算法放射性核素识别模型更精确, 性能更好, 应用于放射性核素的识别非常理想。

关键词: BP 网络; 识别; LM 算法

文章分类: 计算机技术及其应用的研究成果

神经网络能反映人脑神经网络功能的许多基本特性, 是高度复杂的非线性动力学系统。神经网络的实质是依据各种已知的、可信赖的原始资料, 用学习训练方法找到一组更复杂的非线性映射, 再根据此映射特征来解决类似的问题。本文应用基于 LM 算法的 BP 神经网络模型, 试解析了 Am^{241} 、 Co^{60} 、 Cs^{137} 、 Th^{242} 、 K^{40} 核素的单一或混合 γ 能谱, 取得了较好的结果。

1 基于 LM 算法 BP 神经网络原理

原始的 BP 算法是梯度下降法, 参数沿着与误差梯度相反的方向移动, 使误差函数减小, 直到取得极小值, 它的计算复杂度主要是由计算偏导数引起的, 这种基于梯度下降的方法只是线性收敛, 速度很慢。BP 算法的改进主要有两种途径, 一种是采用启发式学习方法, 如带动量的梯度算法, 可看作是共轭梯度法的近似; 另一种是采用更有效的优化算法, 如共轭梯度法和牛顿等。而 LM^[1] 算法是一种利用标准的数值优化技术的快速算法。LM 算法是高斯-牛顿法的改进形式, 是梯度下降与高斯

一牛顿法的结合, 也可以说成是高斯-牛顿法的改进形式, 既有高斯-牛顿法的局部收敛性, 又具有梯度下降法的全局特性。由于它利用了近似的二阶导数信息, 因此比梯度法收敛速度要快得多, 并且算法稳定。LM 算法的计算步骤:

- (1) 给出训练误差允许值 ε 、系数 β 、 μ_0 , 以及初始化权值和阈值向量 x^0 , 令 $k=0, \mu=\mu_0$ 。
- (2) 计算网络输出及误差指标函数 $E(x^{(k)})$ 。
- (3) 计算 Jacobian 矩阵 $J(x)$ 。
- (4) 计算 Δx 和 $E(x^{(k)})$ 。
- (5) 若 $E(x^{(k)}) < \varepsilon$, 转到 (7); 否则, 以 $x^{(k+1)}$ 为权值和阈值, 计算误差指标函数 $E(x^{(k+1)})$ 。
- (6) 若 $E(x^{(k+1)}) < E(x^{(k)})$, 则令 $k=k+1, \mu=\mu/\beta$, 回到 (2); 否则这次不更新权值和阈值, 令 $x^{(k+1)}=x^{(k)}, \mu=\mu\beta$, 并回到 (4)。
- (7) 停止

2 模型设计方法

2.1 输入输出量的选择

输出量代表模型要实现的功能目标，其选择确定相对容易一些，以核素平均原子序数为输出，输出节点只有一个。输入量必须选择那些对输出影响大且能够检测或提取的变量，此外还要求各输入变

量之间互不相关或相关性很小。在此输入量选择 γ 能谱的能量峰值。获得的 γ 能谱输入输出量如表 1 所示。

表 1 实测核谱数据表

核素	能量	能量	能量	能量	能量	能量	能量	核素标识
Co ⁶⁰ (1号)	0	0	1173.02	1332.34	1460.78	0	0	50
Co ⁶⁰ (2号)	0	0	1172.84	1332.11	1460.44	0	0	50
Cs ¹³⁷ (1号)	0	661.33	0	0	0	0	0	137
Cs ¹³⁷ (2号)	0	661.33	0	0	0	0	0	137
混合源(1号)	59.86	660.67	1171.33	1330.38	1458.09	2501.58	2610.05	144
混合源(屏蔽)	59.86	661.04	1172.25	1331.29	1458.82	2503.78	2609.87	144
混合源(2号)	59.68	660.31	1170.78	1329.72	1457.72	2500.66	2609.32	144

2.2 输入输出数据的尺度变换

尺度变换也称归一化或标准化，是指通过变换处理将网络的输入、输出数据限制在[0, 1]或[-1, 1]区间内。将输入输出数据变换为[-1, 1]区间的值常用以下变换式

$$x_{mid} = (x_{max} + x_{min}) / 2 \quad (1)$$

$$\bar{x}_i = 2(x_i - x_{mid}) / (x_{max} - x_{min}) \quad (2)$$

式中， x_{mid} 代表数据变化范围的中间值， x_{min} 和 x_{max} 代表最小值和最大值。

这样，所有数据得到统一，减少了网络识别的动态范围，提高了系统的准确性。

上述表格中数据进行归一化后，如表 2:

表 2 归一化后的核谱数据表

核素	能量	能量	能量	能量	能量	能量	能量	核素标识
Co ⁶⁰ (1号)	-1	-1	-0.1012	0.0209	0.1194	-1	-1	-0.9617
Co ⁶⁰ (2号)	-1	-1	-0.1013	0.0208	0.1191	-1	-1	-0.9617
Cs ¹³⁷ (1号)	-1	-0.4932	-1	-1	-1	-1	-1	-0.895
Cs ¹³⁷ (2号)	-1	-0.4932	-1	-1	-1	-1	-1	-0.895
混合源(1号)	-0.9541	-0.4937	-0.1024	0.0194	0.1173	0.9169	1	-0.8897
混合源(屏蔽)	-0.9541	-0.4935	-0.1017	0.0201	0.1178	0.9186	0.9999	-0.8897
混合源(2号)	-0.9543	-0.494	-0.1029	-0.0189	0.117	0.9162	0.9994	-0.8897

3 MATLAB 仿真

前面已经讨论了网络的原理及其模型设计，下面利用 MATLAB^[2] 对于进行仿真，验证其识别效果。将表 2 中 Co⁶⁰ (1号)，Cs¹³⁷ (1号)，混合源

(1号) 作为其训练样本，Co⁶⁰ (2号)、混合源(屏蔽)、混合源(2号) 作为测试样本。表 2 中 Cs¹³⁷ (1号) 与 Cs¹³⁷ (2号) 的特征能量值一致，故不作为测试样本。在此采用 3 层 BP 网络，将表 2 中的归一化后的能量值作为网络的输入特征向量，输

入层的节点单元数为 7，其输入向量为 $p=[-1 \ -1 \ -0.9541; -1 \ -0.4932 \ -0.4937; -0.1012 \ -1 \ -0.1024; 0.0209 \ -1 \ 0.0194; 0.1194 \ -1 \ 0.1173; -1 \ -1 \ 0.9169; -1 \ -1 \ 1]$ ；输出层为核素标识，输出层节点单元为 1，其输出向量为 $t=[-0.9617 \ -0.895 \ -0.8897]$ 。经过经验公式反复试算，隐含层节点单元数确定为 4。将输入层、隐层、输出层确定后，设定训练目标误差为 10^{-8} ，对网络进行训练获得如图 1 所示的训练误差曲线。从图中可以看出训练到第 4 次时，输出的均方误差 MSE 很小了，满足误差要求，通过训练网络，权值阈值已经达到最优值，可以利用该模型进行识别。将测试样本 $p1=[-1; -1; -0.1013; 0.0208; 0.1191; -1; -1]$, $p2=[-0.9541; -0.4935; -0.1017; 0.0201; 0.1178; 0.9186; 0.9999]$, $p3=[-0.9543; -0.494; -0.1029; -0.0189; 0.117; 0.9162; 0.9994]$ 输入测试网络，得到测试结果为 -0.9617、-0.8897、-0.8891。与表中核素标识值 -0.9617、-0.8897、-0.8897 相比，其识别率高达 100%、100%、99.93%，说明其识别效果非常的理想。

为了与基于 LM 算法的放射性核素识别结果进行检验、比较，下面采用基于 Fletcher—Reeves 算

法（简称 FR 算法）的放射性核素识别结果与之进行比较分析。FR 算法是共轭梯度法的一种算法。共轭梯度法是梯度法的一种改进方法。其基本思想是寻找与负梯度方向和上一次搜索方向共轭的方向作为新的搜索方向，从而加快训练速度，并提高训练精度。二者的比较如表 3 所示，运算结果表明，与基于 FR 算法的放射性核素识别结果相比较，LM 算法神经网络模型的精度更高，性能更好。

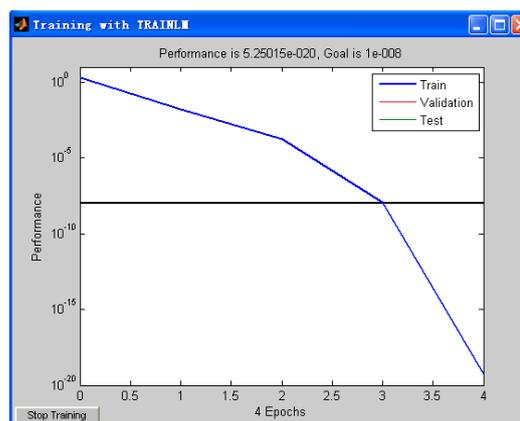


图 1. 网络训练误差曲线

表 3 LM 算法神经网络模型和 FR 算法神经网络模型识别结果对照表

方法	LM 算法神经网络			FR 算法神经网络		
期望值	-0.9617	-0.8897	-0.8897	-0.9617	-0.8897	-0.8897
测试值	-0.9617	-0.8897	-0.8891	-0.9616	-0.888	-0.9099
相对误差	0	0	0.07%	0.01%	0.19%	2.27%

4 结论

仿真试验表明：LM 算法可以明显提高网络的训练速度，节省训练时间，很有效的解决了标准 BP 算法存在的训练速度慢、易于陷入局部极小等问题，该算法的优点是非常显著的，不仅提高网络的训练速度，节省训练时间，而且其算法稳定，效果良好。测试结果表明：基于 LM 算法的放射性核素识别效果较好。通过与 FR 算法对比分析，基于 LM

算法预测更精确，性能更好。基于 LM 算法的放射性核素识别模型能识别出相应的核素，为放射性核素识别提供了一种行之有效的科学合理方法，应用于放射性核素的识别非常理想。

参考文献：

- [1] 黄豪彩, 黄宜坚, 杨冠鲁. 基于 LM 算法的神经网络系统辨识. 组合机床与自动化加工技术. 2003
- [2] 董长虹. Matlab 神经网络与应用. 北京: 国防工业出版社, 2007, 79-80

Radioactivity Nuclide Identification Based on BP and LM algorithm neural network

Wang JiHong¹, Wang LiangHou², ShunJian¹

(1. The Institute of Chemical Defense Beijing 102205 China;

2. 2nd department research institute of chemical defence Beijing 102205 China)

Abstract: The paper provides the method which can identify radioactivity nuclide based on the BP and LM algorithm neural network. Then, this paper compares the above-mentioned method with FR algorithm. Through the result of the Matlab simulation, the method of radioactivity nuclide identification based on the BP and LM algorithm neural network is superior to the FR algorithm. With the better effect and the higher accuracy, it will be the best choice.

Keywords: BP neural network; Identification; LM algorithm

基于计算资源管理的监控系统设计，实现与可视化

阚博文，石京燕

(中国科学院高能物理研究所计算中心，北京 100049)

摘要：Torque^[1]衍生于PBS，是一个高效的开源计算资源管理软件，最早由NASA的Ames研究中心开发，用于满足异构网络的计算需求。随着分布式计算技术的发展，Torque在高性能计算集群中得到广泛应用。但是作为开源软件，目前缺乏一个相对完善的监控系统，监视torque运行的实时状态，记录其历史运行情况，并实现部分控制功能，保证Torque运行稳定性、可靠性并提高其易管理性。为此，本文从以下五个方面设计实现了针对Torque的自适应轻量级监控系统：1)实现一个轻量级日志循环过滤功能，实时获取Torque的作业运行状态；2)为管理员提供可自定义的监控命令统一接口，用于查询Torque管理的各类资源信息；3)设计了监控信息存储策略，使监控信息持久化；4)为用户提供了可自定义的报警接口，能够将Torque运行时运行出现的异常错误以邮件或短信的方式实时提交给用户；5)利用HTML5技术，实现了Torque管理的作业状态可视化，实时化，并提供管理员Torque运行状态展示内容的可定制功能。

关键词：PBS；Torque；监控系统

文章分类：计算机技术及其应用的研究成果

Torque资源管理器衍生于PBS，是一个高效的开源资源管理软件，用于管理linux或unix的同构或异构资源。其源码完全开放，可以应用于大规模集群计算，在高性能计算领域有着广泛的应用。TORQUE的功能包括：接收批作业、将作业发送到计算资源运行、监视运行作业、返回作业输出等功能。虽然TORQUE在计算资源管理上功能强大，但是在监控方面，却缺乏一个实时有效的监控系统保障TORQUE高效、稳定工作。本文介绍的计算资源监控系统用于TORQUE运行状态可视化监控，为管理员提供丰富及时的实时作业管理信息，对异常错误及时纠正或发送报警。

1 系统设计

TORQUE的代码完全开放，免费获取，能够支持批处理、交互式作业和串行、并行作业，是

功能最为齐全，历史最为悠久，支持最为广泛的计算资源管理系统之一。TORQUE在业界和学术界都得到了颇为广泛的应用，可以轻松管理的成百上千台计算机资源，但是其提供的软件包中没有专用的监视工具，只有少量简单shell命令用于查看系统的有限状态。并且TORQUE提供的日志内容杂乱，没有可视化界面，缺少实时状态记录，也没有报警功能等。这使管理员不能及时确切了解系统运行情况，及时判断错误发生根源，快速定位异常位置。基于此本文设计实现了基于TORQUE计算资源管理器的监控系统，利用业界比较流行的HTML5技术，实现计算资源运行状态可视化，方便管理员以及用户的及时了解系统状态，作业情况。系统中的各个模块相互独立，具有良好的可扩展性。

作者简介：阚博文，研究实习员，主要从事高性能计算研究。
石京燕，副研究员，主要从事高性能计算研究。

1.1 整体设计

针对 TORQUE 的监控功能不够丰富完善的缺点，计算资源监控系统不仅可以提供 Torque 运行的实时状态，还可以实时修正 Torque 的运行错误。为了不影响资源管理器的正常运行，监视系统并不修改资源管理器代码，也不变更资源管理器配置，而是通过专用的监控服务器对系统的运行状态进行实时记录与分析监视。图 1 描述了计算资源监控系统的总体架构。我们设计实现了轻量级的日志采集处理功能，在 Torque 服务器上启动日志采集模块，并尽量减少 Torque 服务器的额外开销；日志采集模块将日志信息发送给监控服务器后，在监控服务器进行详尽的分析处理。为了保证系统的灵活性，信息管理模块为管理员提供统一接口，用于定制日志内容以及其他系统运行信息。信息管理模块根据管理员的定制内容，指挥日志收集模块筛选相应信息，发送给存储模

块。存储模块用于系统运行状态存储，以保持历史信息持久化。系统还提供了实时报警功能，即以邮件或短信的方式通知工作人员。最后基于 html5，设计实现了 web 界面，使系统具有良好的可视化效果。

在 Torque 服务器运行日志信息采集模块，有选择性地采集不同类型的日志信息，之后将日志信息发送给监控服务器中的日志收集模块。在这个过程中，系统管理员可以通过信息管理模块定制所收集日志信息类型或者通过关键字收集相关信息。日志采集模块与日志收集模块对日志内容分别进行过滤，将所需信息通过存储模块存储到数据库中，再由日志分析处理模块对于存储的数据进行分析整理，通过 web 网页的形式展现。此期间，如果出现的错误，将由日志分析处理模块转给报警模块，以便即时通知管理员。

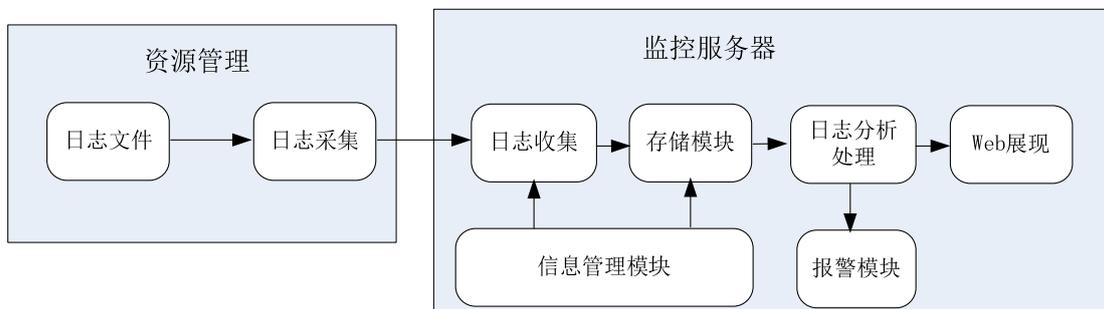


图 1. 监视系统总体架构

1.2 轻量级日志循环过滤与收集

日志的收集检测在整个监控系统中具有不可忽视的作用，它是基础中的基础，在本监视系统中的很多监视功能，都以日志内容为数据来源。在 Torque 服务器中部署日志采集模块，用于服务器日志信息过滤与采集。管理员通过信息管理模块设置日志信息过滤条件，采集模块过滤日志内容的条件由信息管理模块通过网络设置。为了不增加资源管理器的额外负担，日志采集模块对日

志信息进行初级过滤后传送给监视控服务器上的日志收集模块进行二次过滤与日志内容分类。日志采集模块和日志收集模块通过 ActiveMQ^[2]进行实时通信：日志收集模块将需要过滤的日志类别以及相关的关键字信息发送给日志采集模块，由采集模块分时段地在集群服务器上采集日志信息。所谓分时段收集，是指当采集模块检测到集群服务器进入睡眠状态，或者 CPU 以及内存占用低于设定水位线后，才启动采集日志内容功能。所采集到信息通过 ActiveMQ 以不同类别的方式传输

给日志收集模块，日志收集模块针对不同类别信息，进行二次过滤处理后，再将结果以同样按照相同的方式通过存储模块存储到数据库中。

由于 torque 运行时，各个作业队列的作业数目，排队长短，资源占用情况等属于瞬时状态，

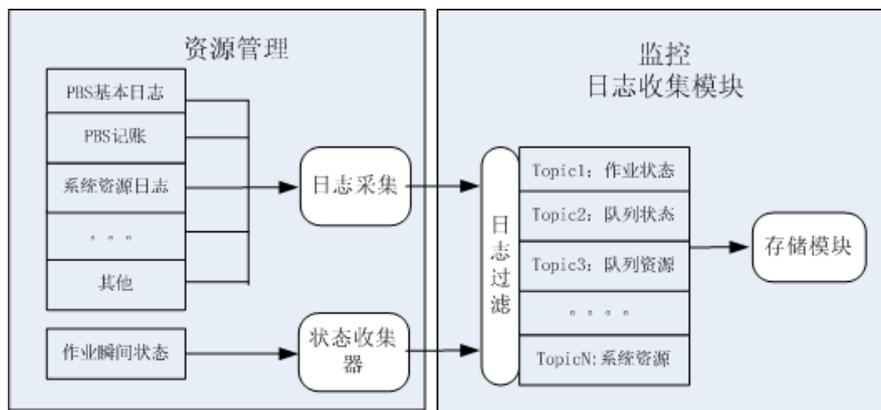


图 2. 日志采集与处理

1.3 Torque 信息管理模块

如图 3 所示，信息管理模块为管理员提供统一接口，设置日志信息采集，信息收集的基本规则，提供包括插入，查询，删除等基本操作。信息管理模块记录规则内容，并将其发送到收集模块和采集模块用于设置过滤内容，分类定义等。管理员采用设置关键字，指定日志文件名称等方式定制监控信息模板，并根据实际需求，设置采集匹配规则或是不匹配规则的内容。

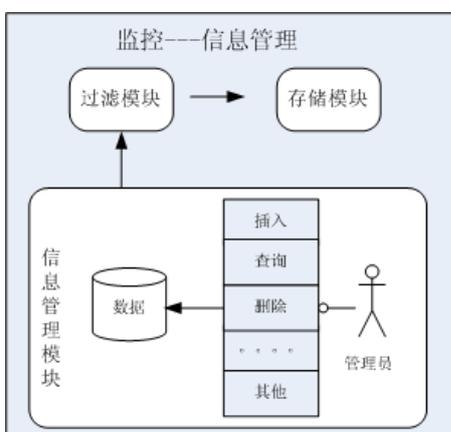


图 3. 信息管理模块设计

1.4 存储模块

即这些状态随着时间在不断变化，torque 对于这样的状态信息没有任何记录，状态收集器的目的是通过 torque 提供的有关命令，定期检查 torque 的运行状态，并整理生成标准格式的数据也发送到存储模块。

存储模块不仅可以使监控信息可持续化，还可以方便管理员查询历史信息。图 4 为监控系统中存储模块数据流程图。信息收集模块向存储模块发送分类的日志及当前状态信息，存储模块按照同样分类将信息分别存储到不同的存储区，存储区的划分也是遵循相同的分类原则：store1，store2 ...storeN，分别表示为：网络状态，作业状态，资源利用等。存储模块还提供信息管理模块接口，管理员通过信息管理模块对存储模块进行简单操作，例如增加，删除，或者更改存储内容等。这种的分层次存储结构可以方便管理员的管理操作，在为 web 展示提供数据源的同时，很好的屏蔽了存储模块的底层结构，即使数据库底层模块发生改变，也不会影响上一层的 web 展示服务。增强了整个系统的稳定性和可扩展性。

1.5 报警模块

报警模块是整个监控系统中一个相对独立的模块，和监控系统没有数据依赖关系。其为监控系统提供统一错误报警接口，当监控系统发现系统运行状态不正常时，需要发送报警信息通

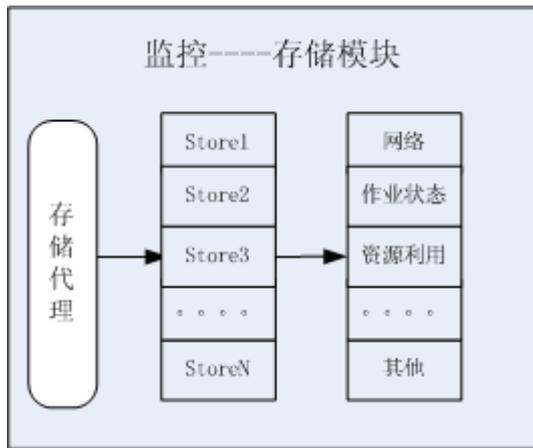


图 4. 存储模块设计

知管理员。报警系统采用 key-value 模式定义每一种错误类型，每一种错误类型对应着一个 key，key 对应着其处理方案 value，每一个 value 又对应着一个报警类型，监控系统中可以监视的错误与报警类型是一一对应的关系。为了管理方便，报警模块为管理员提供了统一的管理接口，管理员可以通过其提供的接口，对报警模块的错误类型，进行添加，删除，修改等操作。报警方式包括发送短信及电子邮件两种方式。

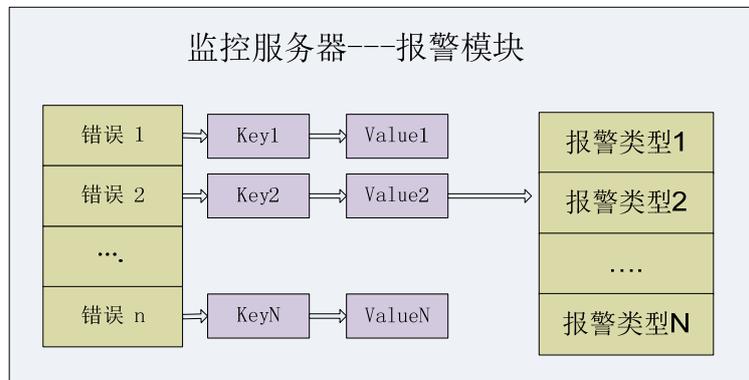


图 5. 报警模块设计

1.6 可视化

为了使监视系统具有良好的可扩展性，采用分层处理信息的方法实现监视信息的可视化功能。HTML5 是用于取代 1999 年制定的 HTML 4.01 和 XHTML 1.0 标准的 HTML 标准版本，现在仍处于发展阶段，但大部分浏览器已经支持某些 HTML5^[3] 技术。同时 html5 也是 web 技术发展的一个趋势，为了使监控系统适应未来的发展，作者决定使用 html5 技术来实现监控系统的网页展现功能。

作者使用 JSON(JavaScript Object Notation)^[4]生成 html5 文件库。JSON 是一种轻量级的数据交换格式，易于阅读和编写，同时也易于使用程序解析和生成。在 JSON 的下一层，编写 SERVER 服务，



图 6. 可视化实现

将数据从数据库中取出，并且做相应的修改和提炼，用于生成 JSON 格式数据信息。Html5 读取 JSON 数据再以图表网页的形式展现给管理员。

2 关键技术和实现

2.1 日志过滤系统的轻量级实现

在资源管理软件中，存在各种不同类型的日志，包括集群服务器的日志，系统日志，资源使

用日志等，进行实时详细的管理，在 Torque 服务器上将与相关的日志内容进行过滤操作，并且把过滤后的信息发送给监控服务器，如果不进行限制，采集操作将会占用资源管理器的很大一部分资源。当 Torque 服务器负载较重时，日志内容的过滤操作可能影响资源管理器的正常运行。

为了避免这种情况的发生，在日志循环过滤的采集模块中，作者设计并且实现了一个探测器，每隔一分钟对集群服务器进行探测，查看集群服务器的 CPU 和内存的使用情况，当这两个资源的占用率低于指定水位时，采集模块才启动日志过滤采集操作，开始日志内容采集；否则采集模块将安静等待直到资源空闲。如果服务器的 CPU 和内存占用率长期接近峰值，使日志采集操作无法

运行时，则认为 Torque 服务器运行负载过重，这将作为运行错误的一种，由采集模块发送信息给报警模块，通知管理员，查看 Torque 服务器运行是否正常。

2.2 JSON 和 HTML5 的结合

在此监控系统的可视化过程中，需要根据类别的数量生成相应数量的 HTML5 文件，而大批的 HTML5 文件很难管理，作者根据系统的特点制定了 HTML5 专用的模板，形成了统一的数据结构，使用 JSON 数据根据模板来生成不同类型的 html5 文件。从而使整个监控系统更为结构化，易于管理。



图 7. 监视系统可视化界面

图 7 展示了监控系统可视化的 web 界面，分别为计算资源的队列信息，作业信息，队列资源使用，系统资源使用，作业排队情况等。

3 总结

本文针对计算资源管理系统在监控方面的不足，设计实现了基于 Torque 的实时监控系统。使用了目前业界比较流行的 HTML5 技术，完成了监控系统的 web 实现。在本系统中，实现了轻量

级的日志采集，不影响资源管理器的正常运行。实现了信息管理模块，制定了分层次的存储策略，并且设计了专用的报警模块，最后完成了系统的可视化效果。

该系统内部各个模块相互独立，具有良好的可扩展性和容错性；JSON 和 HTML5 的完美结合，使 web 网页易管理并且具有较强的可视化效果。管理员可以实时的对资源管理器的运行进行监控和维护。

目前，此系统的基本框架以及基本内容均已设计实现完毕；在未来，还需要扩展更广泛的监控内容，使计算资源系统更易管理，使监视系统具有更强的可视化效果。

参考文献:

- [1] TORQUE_Administrator's_Guide
- [2] <http://activemq.apache.org/>
- [3] <http://www.w3.org/TR/html5/>
- [4] <http://www.json.org/>

Batch management based monitoring system: design, implement, and visualization

Bowen Kan, Jingyan Shi

(Institute of High Energy Physics, Beijing 100049)

Abstract: Torque, an efficient PBS (Portable Batch System) -based open source Resource Management system, was originally developed by Ames research center of NASA, which was designed to satisfy the computing requirements of heterogeneous network. With the development of distributed computing, Torque has been widely used in high performance computing cluster. However, because of the lack of a well designed monitoring system, it is difficult to monitor, record, and control, leading to low stability, reliability and manageability. To overcome those problems, this paper designs and implements an adaptive lightweight monitoring system for torque from five aspects. 1) A lightweight circulating filtration logging system is developed to obtain the real-time running status of torque; 2) One uniform interface was provided for administrators to define monitoring commands, which can query management resources of torque; 3) Storage strategy is designed to make monitoring information persistent; 4) One uniform interface is provided for users to customized alarms, which can submit exceptions and errors to users via emails and SMS in real time; 5) HTML5 technology is applied in the customizable visualization of the jobs' status in torque in real time.

Keywords: PBS; Torque; monitoring system

基于嵌入式 FPGA 的 CSNS 网络数据传输方案及比较

王修库^{1,2}, 章红宇^{1,2}, 顾旻皓^{1,2}, 肖亮^{1,2}

(1. 核探测与核电子学国家重点实验室, 北京 100049; 2. 中国科学院高能物理研究所, 北京 100049)

摘要: 本文针对中国散裂中子源 (China Spallation Neutron Source, CSNS) 数据获取系统的实际需求, 研究了基于 SOPC 技术的网络数据传输解决方案。使用以 FPGA 为核心的电路板作为硬件平台来实现网络数据传输, 构建了 SOPC 系统, 并在 PowerPC 核上移植嵌入式 Linux 操作系统。编写了基于 Linux 的应用程序来实现了嵌入式千兆网数据传输, 并通过编程测试得出网络传输性能和数据包大小的关系。此外, 本论文还尝试了其他的几种实验方案, 包括在 Microblaze 上移植 PetaLinux, 在 PowerPC 硬核和 Microblaze 上移植 Lwip 协议栈, 并对各自的优缺点加以分析比较, 以期对今后工程实际需求提供不同方案选择和建议。

关键词: FPGA; SOPC; 嵌入式 Linux; 千兆网; Lwip

文章分类: 计算机技术及其应用的研究成果

引言

正在建设中的中国散裂中子源 (China Spallation Neutron Source, CSNS) 是一个大型中子科学综合实验装置, 是探测材料微观结构的有力探针和超级显微镜。中子谱仪作为散裂中子源的重要组成部分对其探测器、电子学和数据获取系统的设计提出了很高的要求。对数据获取系统而言, 高事例率和海量数据读出是面临的挑战之一。以往高能物理实验, 如北京谱仪 III 和大亚湾反应堆中微子实验中普遍采用的 VME 体系结构和 VME 背板总线数据传输已不能满足实验的需求。

随着技术的发展, 可编程片上系统 (System-on-a-Programmable-Chip, SOPC) 以其体积小、性能高、功耗低以及可靠性高等优点越来越受到人们的重视。为此, 基于 SOPC 技术开展散裂中子源数据读出的研究是一种切实可行的

方案。

本文针对中国散裂中子源数据读出的需求, 以电子学自行研制的网络传输子板为硬件平台, 在带有网络功能的 FPGA 上实现了几种基于 FPGA 和 TCP/IP 协议的网络传输方案, 将前端电子学采集到的数据传到远程的数据获取服务器。

由于在 FPGA 上用硬件描述性语言实现复杂的 TCP/IP 协议难度较大, 本文采用的几种方案是嵌入式方案, 即使用 FPGA 内部的 CPU, 在 CPU 上运行软件来实现 TCP/IP 协议。由于 Xilinx FPGA 内部集成的 CPU 有 PowerPC 和 microblaze 之分, 且 TCP/IP 协议栈有运行在操作系统之上或不运行在操作系统之上的区别, 所以有几种不同的组合和各自的特点, 本文分别就这些方案加以实现, 并进行了结果分析与比较。

1 PowerPC 硬核上移植开源 Linux 的方法及实现

作者简介: 王修库(1979-), 男, 硕士研究生, 研究方向为数据获取。wangxk@ihep.ac.cn
章红宇(1969-), 女, 高级工程师, 研究方向为数据获取。

1.1 设计思想及系统的总体构成

本方案的思想是先在 FPGA 上构建基于 PowerPC 的 SOPC 硬件，然后在 SOPC 上移植嵌入式开源 Linux 操作系统，在操作系统之上再编写基于 TCP/IP 协议 socket 的应用程序来实现可靠的数据传输。该方案中主要硬件和软件都在 FPGA 内部实现，同时进行设计，即采用了软硬件融合的设计思想。由于系统的复杂性，需要采用分层设计的方法，来减少每一层次的耦合性，尽量减少每一层设计对其它层的影响。本系统实现时分为 5 个层次，如图 1 所示，最底层为外围电路硬件层，每一层都建立在下面一层基础之上。

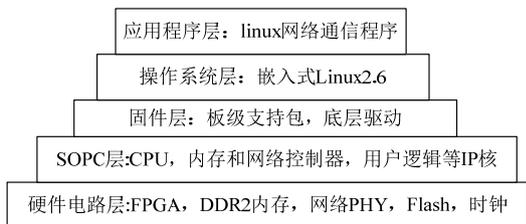


图1. 系统层次模型图

1.2 系统外围电路的简介

本方案电路板硬件设计选用了Xilinx公司带有 PowerPC硬核的V4Fx12型FPGA、DDR2内存颗粒、千兆网络PHY等，框图如图2所示。

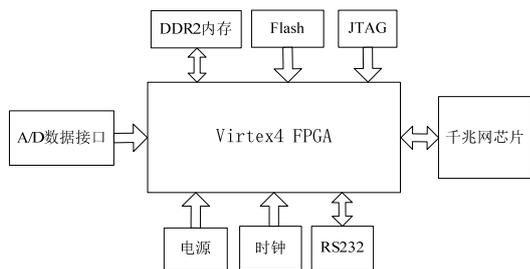


图2. 系统的硬件模块框图

1.3 SOPC 的构建及优化

PowerPC405是已经固化在FPGA内部的硬核，具有性能高的优点。PowerPC405通过PLB（Process Local Bus）总线核和各个IP模块互联构建了一个完

整的SOPC系统。图3为FPGA内部各个IP模块的框图。

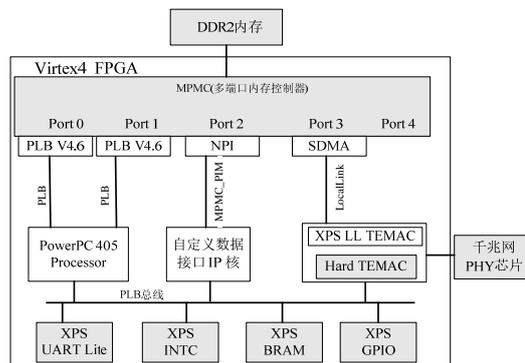


图3. FPGA内部各个IP模块框图

对于数据量不大的控制器 IP 核，例如串口、中断等控制器，由于都是字符型数据，数据量不大，一般采用总线共享的方式和 PowerPC 相连就可以了，这样能节省总线。但是本文的所需的千兆网络控制器，由于数据量很大，是大块的数据流，如果和其他控制器共用总线，就会造成 CPU 资源严重占用，降低系统性能。为了提高网络传送性能，需采用 DMA 方式，使得数据直接从内存到网络接口而不必经过 PowerPC 的搬运，这样在很大程度上减轻了 CPU 的负担，提高了数据传输速度。

如图 3 所示，在多端口内存控制器 MPMC port3 端口上采用 SDMA 控制器通过 LocalLink 总线和千兆网控制器连在一起来实现上述功能。

1.4 软件的设计概述

软件研制工作包括嵌入式开源 Linux 操作系统的移植以及 Socket 应用程序的编写。用于编译内核和应用程序的交叉编译工具是德国 DENX 公司提供的开发环境编译套件 ELDK4.1，所选用的 Linux 内核是专门针对 Xilinx FPGA 的 linux-2.6-xlnx.git。应用软件设计包括基于 Socket 的网络测试程序以及数据传输程序。

1.5 实验结果及分析

采用基于 socket 网络测试程序来测试本系统采用 TCP/IP 协议的传输性能，如图 4 所示。

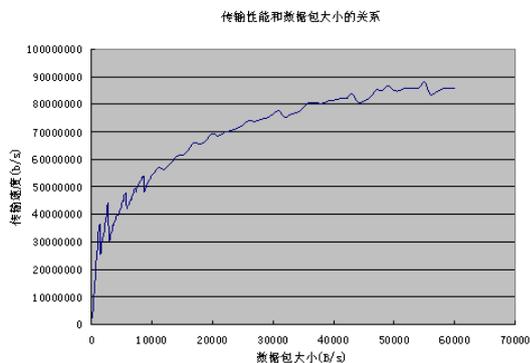


图4. 网络传输性能和数据包大小的关系

可见，在一定的范围内，每次发送的数据包越大，则网络传输的速率就会相应的变大。

这种现象的主要原因是：TCP/IP 协议传输不仅包含有效数据，还包含一些协议的头和尾，如果每次发送的包很小，则 TCP/IP 的头和尾占的比例就大，这样每个发送的包的有效信息的比例就减少了，有效信息传输效率就会很低；相反，如果每次发送的数据包很大，有效数据所占的比例就会增加，所以有效数据传输的速度就会增加。

但是，由于受此款 FPGA 内部资源的限制，内存位宽、PowerPC 频率、数据总线的频率的限制，传输速度不会一直上升，存在一个极限值。

2 在 PowerPC 硬核上移植 Lwip 的方案及结果

Lwip 即 Light Weight Internet Protocol 的缩写，是轻量级 IP 协议栈，保持了 TCP 协议的主要功能，但是对 TCP/IP 协议栈进行了简化和裁剪，代码可以做得很小，大大降低了对内存的占用，很适合在嵌入式系统中使用，有无操作系统的支持都可以运行。

Lwip 是开源的，可以移植到 Xilinx FPGA 内的 PowerPC CPU 上。Lwip 的运行有两种模式：一种是 socket 的模式，这种模式下 Lwip 需要运行在 Xilinx 公司自己的微型操作系统 Xilkernel

内核之上，优点是有操作系统可以多线程编程，缺点是网络传输性能受到很大的限制；另一种是 raw 模式，这种模式下，Lwip 不需要运行在操作系统之上，而是直接运行在 PowerPC 上，优点是其网络传输性能是 socket 模式的好几倍，缺点是没有操作系统的支持，不能进行复杂的多线程编程。

硬件平台采用本文前面所述的 V4Fx12 网络传输板，EDK 版本是 10.1。在 Lwip 正常运行后会从 FPGA 串口输出一些信息，如图 5 所示。让 Lwip 程序在 FPGA 端不断地传输数据，在 PC 主机端编写基于 Socket 的接收程序把数据接收、存储或显示出来。

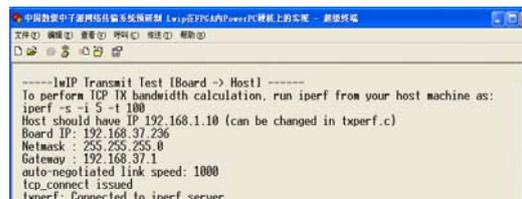


图5. Lwip在PowerPC硬核上移植的结果

3 在 Microblaze 软核上移植 PetaLinux 的方案及结果

Microblaze 是 Xilinx 公司自己开发的软核 CPU。PowerPC 硬核是 IBM 公司开发的 CPU，其优点是性能高，但是 PowerPC 核需要 IBM 公司的授权，成本很高，对于一些性能要求不是很高的场合，用 Microblaze 就比较经济了。PetaLinux 是众多 Linux 系统中的一种，它支持 Xilinx FPGA 的 Microblaze 软核 CPU。本文也尝试实现了在 Microblaze 软核上实现移植 PetaLinux 操作系统。

系统构建过程和前面在 PowerPC 上移植开源 Linux 有很多相似之处，都是先建立 SOPC 系统，接着建立交叉编译环境和移植操作系统，但是各自也有区别，篇幅有限不详细介绍，可以查阅相关文献。

本论文硬件平台用的是本实验室自己设计的

电路板，如图 6 所示。EDK 版本是 11.1。



图6. Microblaze软核方案的电路板

在 Xilinx V5 LX50T FPGA 上移植 PetaLinux 成功后通过串口输出的信息如图 7 所示。

```
Creating 1 MTD partitions on "ROM":
0x00000000-0x0007f800 : "ROMfs"
uclinux(mtd): set ROMfs to be root filesystem index=0
TCP cubic registered
NET: Registered protocol family 1
NET: Registered protocol family 17
VFS: Mounted root (ramfs filesystem) readonly.
Freeing unused kernel memory: 84k freed
Mounting proc:
Mounting sysfs:
Mounting tmpfs:
Populating /var:
Running local start scripts.
Mounting /etc/config:
Populating /etc/config:
flatfsd: Nonexistent or bad flatfs [-48], creating new one...
flatfsd: Failed to write flatfs [-48]: No such device
flatfsd: Created 5 configuration files (185 bytes)
Mounting sysfs:
Setting hostnames:
Setting up interface lo:
Setting up interface eth0:
SIOCSIFADDR: No such device
eth0: unknown interface: No such device
Starting portmap:
Starting lhttpd:
uclinux login: _
```

图7. PetaLinux在Microblaze软核上移植的结果

由于现在 PetaLinux 开始由免费转向收费，且很贵，本论文就没有再加以深入研究。

4 在 Microblaze 软核移植 Lwip 的方案及其结果

随着 FPGA 技术的发展，Xilinx 公司推出的芯片功能越来越强，其中 spartan6 系列的 FPGA 成本不高，性价比适合。本论文在这一 FPGA 上实现了添加 Microblaze 软核，并在 Microblaze 软核上面移植了 Lwip，用以测试其性能。移植与测试采用的硬件平台是 spartan6 系列 ML601 开发板，EDK 版本是 12.3。Lwip 的移植结果和在 PowerPC 上移植 lwip 类似，网络传输性能也很接近，但是成本却能大大地降低，是一种性价比较高的可选方案。

5 几种方案的分析比较及结论

综合几种嵌入式网络传输方案的实现和性能比较，可以看出：带 PowerPC 硬核的 FPGA 性能较好，但是价格高出很多，不带 PowerPC 只有 Microblaze 软核的 FPGA 性能较弱一些，但是价格也低。

在 PowerPC 硬核或 Microblaze 软核上移植嵌入式 Linux 操作系统的优势是有操作系统的支持，可以进行多线程编程，易于实现复杂的控制和配置，并且 Linux 下的程序很方便移植，具有通用性，但是网络传输性能会受到一定的限制。不运行操作系统，只移植 Lwip 并采用 raw 模式的代码能够实现很高的网络传输性能，但是不能进行复杂的多任务编程。

可见每种方案各有其优缺点，分别适用于不同的场合，可以根据不同项目的网络传输需求来选用最合适的方案。如果对性能要求较高，就可以采用带 PowerPC 硬核的 FPGA，如果对性能要求不高又需要降低成本，用 microblaze 软核就可以。如果需要完成复杂的多任务工作就可以选择在 CPU 核上移植 Linux 操作系统，如果简单的高速传输任务，就可以不必移植 Linux 操作系统只移植 Lwip 协议栈就可以了。而对于 CSNS 高事例率网络传输的需求，需要采用性能较高的解决方案。

参考文献:

- [1]王修库，基于 FPGA 的 CSNS 网络传输系统的预研，郑州大学硕士学位论文，2012
- [2] Kris Chaplin. Getting Started Using Git, Xilinx Corporation, 2009.1.
- [3]Stephen MacMahon, Nan Zang, Anirudha Sarangi, Light Weight IP (lwIP) Application Examples, Xilinx Corporation, 2009.4

FPGA-based Network Data Transmission Scheme for CSNS

WANG Xiuku^{1,2}, ZHANG Hongyu^{1,2}, GU Minhao^{1,2}, XIAO Liang^{1,2}

(1. State Key Laboratory for Technologies of Nuclear Detection and Electronics (Institute of High Energy Physics, CAS and University of Science and Technology of China), Beijing, 100049; 2. Institute of High Energy Physics, CAS, Beijing, 100049)

Abstract: This paper presents the FPGA-based network data transmission solutions for the Data Acquisition System of China Spallation Neutron Source (CSNS). The board with FPGA as the core is used as the hardware platform to realize the transmission of network data. A SOPC system is built and an embedded Linux is transplanted on PowerPC Core. An application program based on Linux has been finished to realize the data transmission via embedded Gigabit Ethernet. The relationship between network transfer performance and packet size was obtained by a test program. In addition, the paper also tried to realize some other ways to transfer data: transplanting PetaLinux on Microblaze, transplanting Lwip protocol stack on PowerPC Core and Microblaze. Their advantages and disadvantages are analyzed and compared in this paper, so that different options and recommendations can be given to meet the actual needs of different projects in the future.

Keywords: FPGA; SOPC; embedded Linux; Gigabit Network; Lwip

数字核信号图形化识别和处理研究

万东阳, 张软玉*, 王鹏, 闫洋洋, 郝德建

(四川大学物理科学与技术学院, 成都 610064)

摘要: 本文探索了一种基于图形识别的数字核信号处理原理和实现方法。它不同于传统数字核信号处理, 采用了一种不改变脉冲形状, 直接将时间序列数字核信号转化成像素可调的波形图像; 利用数字图像处理的方法和理论, 改善了数字核信号的信噪比, 并给出了相应实验结果; 提出了一种 ISC 方法, 以便对数字核信号图像的骨架模板的参数进行提取。

关键词: 数字核信号图像; 骨架提取; 模板建立; 波形信息提

文章分类: 计算机技术及其应用的研究成果

1 引言

目前数字化核仪器已成为核仪器主流产品, 广泛应用于核物理、粒子物理、核技术应用及高能物理等研究领域。在对数字核信号进行处理时, 多采用常规的数字信号处理思路和方法——对时间序列信号进行各种滤波成形。例如, 进行能谱测量时, 将信号成型为梯形或三角形; 完成时间测量时则将信号成型为双极性以实现准确定时。因此面对不同的测量任务需要不同的软硬件和算法配置。在实现多任务实时测量时就增加了系统的复杂性, 耗用资源多, 实时性变差。

为了解决上述矛盾和问题, 基于 1)核探测器系统参数一经设定其输出的核信号波形形状也被确定。2)核信号脉冲上升沿、顶部和脉冲形状分别携带着核辐射的不同信息。3)数字图像处理领域中有大量成熟理论和算法可以借鉴, 本文提出了一种基于图形化的数字核信号识别和处理的原理和实现方法。

2 数字核信号图像化原理和方法

若要将由 $A(t)$ 表示的数字核信号转化为一副高 h 像素, 宽 w 像素的图像, 可按 (1) 式实现。

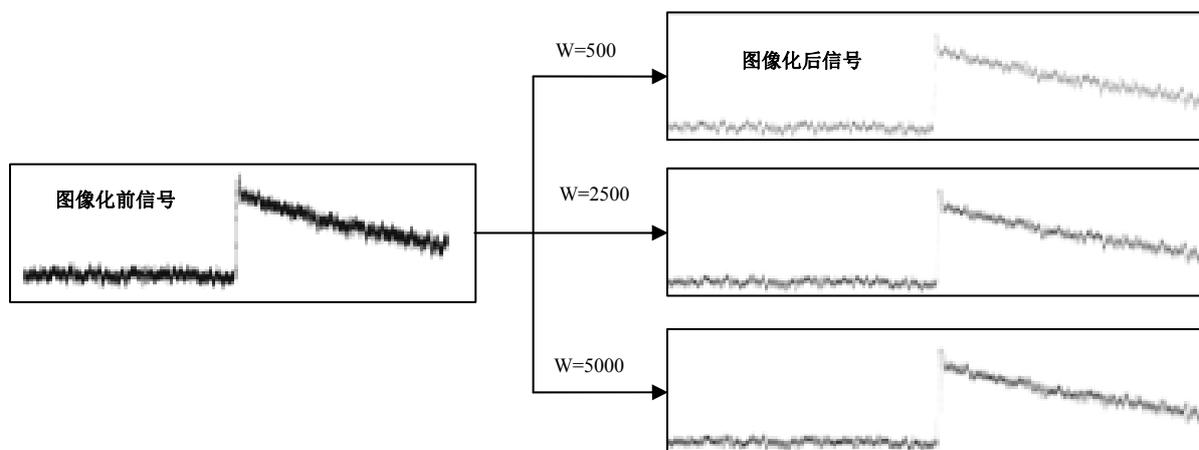


图 1. 真实核信号波形转化为数字核信号灰度

基金资助: 本工作由国家自然科学基金资助。项目批准号: 11075111

作者简介: 万东阳 (1990-), 男, 河南南阳, 本科生, 应用物理专业。

张软玉 (1969-), 女, 山东莱州, 副教授, 博士, 核技术应用, 数字核电子学专业。

$$\left\{ \begin{aligned} h(t) &= \left\lfloor \frac{A(t) - \min\{A(t), A(t + \Delta t), A(t + 2\Delta t), A(t + 3\Delta t), \dots, A(t + \Delta w)\}}{\text{range} - \min\{A(t), A(t + \Delta t), A(t + 2\Delta t), A(t + 3\Delta t), \dots, A(t + \Delta w)\}} \times h \right\rfloor + 1 \\ w(t) &= \lfloor t/\Delta w \rfloor + 1 \end{aligned} \right. \quad (1)$$

(1) 式中: Δw 表示 $\Delta w = \lfloor t/w \rfloor + 1$ 代表的是每列像素需要的信号数据量, Δt 表示 ADC 采样周期, $h(t)$ 表示时间为 t 的信号所在的行数, $\lfloor n \rfloor$ 表示取 n 的下整数。

根据(1)式可得核信号图像第 w 列的各行的灰度谱, 在图像矩阵的各列重复进行上述计算过程, 可计算出整幅图像各位置的灰度值, 从而实现了从时幅波形到灰度图像的转化。图 1 展示了把数字化核信号波形转化为数字核信号灰度图像的一组结果。其中 Δw 是可调参量, Δw 值越大, 每列像素的信息量就越大, 整幅图像的灰度级越分散, 图像越锐化; 相反, Δw 值越小, 图像的灰度级越少, 整幅图像的灰度级越平滑。

3 数字核信号图像增强和系统模板提取原理和方法初探

上述信号图像中携带了大量核探测器及后续模拟线路引入的噪声和干扰, 可用图像处理原理实现降噪。此过程称为数字核信号图像增强。本文采用将空间域线性滤波和数学形态学相结合的方法实现对数字核信号图像的图像增强并完成核探测器系统参数的图像化模版提取。

3.1 数字核信号图像空间域线性滤波

对于一个尺寸为 $m \times n$ 的掩模, 假设 $m=2a+1$ 且 $n=2b+1$, 其中 a, b 为非负数。即掩模的长与宽都为奇数, 其有意义的最小尺寸为 3×3 。在 $M \times N$ 的图像 f 上, 用 $m \times n$ 大小的滤波器掩模 ω 进行线性滤波的响应由(2)式给出:

$$g(x, y) = \sum_{s=-a}^a \sum_{t=-b}^b \omega(s, t) f(x + s, y + t) \quad (2)$$

(2) 式中 f 是输入图像, ω 是滤波掩模, g 为滤波结果数据。如果采用空间均值滤波器, 实现对核信号图像的低通滤波。其中 $a=(m-1)/2$ 且 $b=(n-1)/2$ 。 $f(x, y)$ 代表图像上 (x, y) 位置处的像素值, 对 $x=0, 1, 2, \dots, M-1$ 和 $y=0, 1, 2, \dots, N-1$, 依次应用(2)式, 得到滤波后的图像。^[1]

均值空间滤波器的响应函数为:

$$g(x, y) = \frac{1}{mn} \sum_{(s, t) \in S_{xy}} f(s, t) \quad (3)$$

(3) 式中, S_{xy} 表示输入图像 f 的 $m \times n$ 的子图像, S 的下标表示子图像中心的坐标 (x, y) , $g(x, y)$ 表示滤波器在这些坐标处的响应^[2]。图 2 所示为用三种类型的滤波掩模对数字核信号图像进行空间域滤波的效果图。可见均值滤波对信号的平滑效

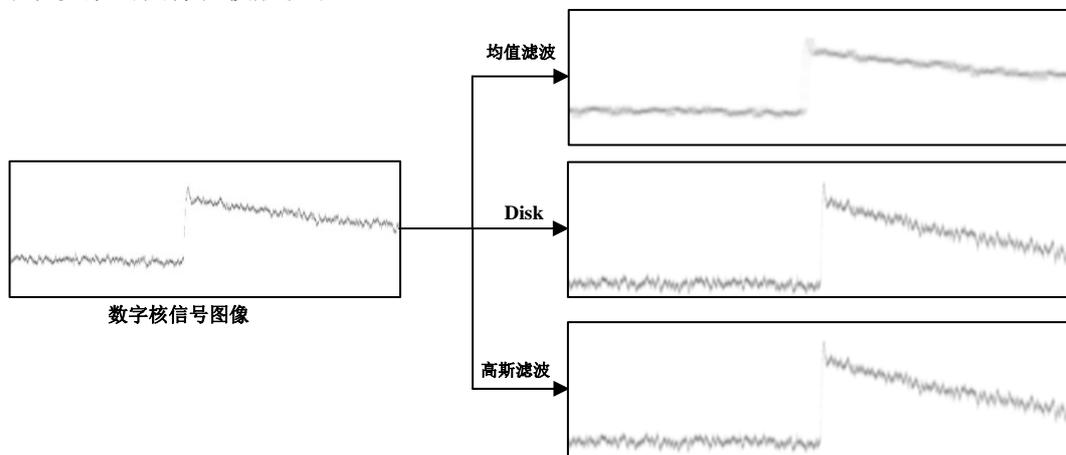


图 2. 数字核信号图像的不同滤波掩模滤波效果图

果最明显。

3.2 图像分析和模板建立

在数字化核测量和分析中，对探测器系统进行精准模式识别是构建最优信号处理系统的关键。在此，用图像处理的概念和方法完成该任务称为系统模板建立。本文根据图形骨架提取原理实现系统分析和模板建立。

特定图形 A 的骨架可用形态学中的腐蚀和开操作来表达。A 的骨架 S 可以表示为

$$S(A) = \bigcup_{k=0}^k S_k(A) \quad (4)$$

而

$$S_k(A) = (A \ominus kB) - (A \ominus kB) \circ B \quad (5)$$

其中 B 是一个结构元素， $(A \ominus kB)$ 表示对 A 的连续 k 次腐蚀：

$$(A \ominus kB) = (\dots (A \ominus B) \ominus B) \ominus \dots) \ominus B \quad (6)$$

第 k 次腐蚀是 A 被腐蚀为空集进行的最后一次迭代。

$$K = \max\{k | (A \ominus kB) \neq \emptyset\} \quad (7)$$

用此算法可实现对信号图像的骨架提取，从而初步得到系统模板图像。在此采用基于形态数学的 `bwmorph_shrink` 算法完成。图 3 展示的是经骨架提取后获得的核信号模板。在此可通过调整波形数据量和图形大小对一个信号全部或部分截取，通过抽取同一信号不同部分的骨架，可实现对同一个系统建立多角度多样式模板，为完成对系统参数高精度识别奠定了基础。图 3 的(a)、(b)、(c) 和 (d) 为 ^{241}Am 射线经 CdZnTe 探测器输出信号，其中 (a) 和 (b) 的采样频率为 10GS/s，(c) 和 (d) 的采样频率为 100MS/s；(e) 和 (f) 为 ^{55}Fe 的 X 射线经 Si (PIN) 探测器输出信号，采样频率为 60MS/s。对于不同辐射源、探测器和采样频率，均可以通过调节此算法中的参数来实现数字核信号骨架的提取，可见此方法具有较高的普适性和可调节性。

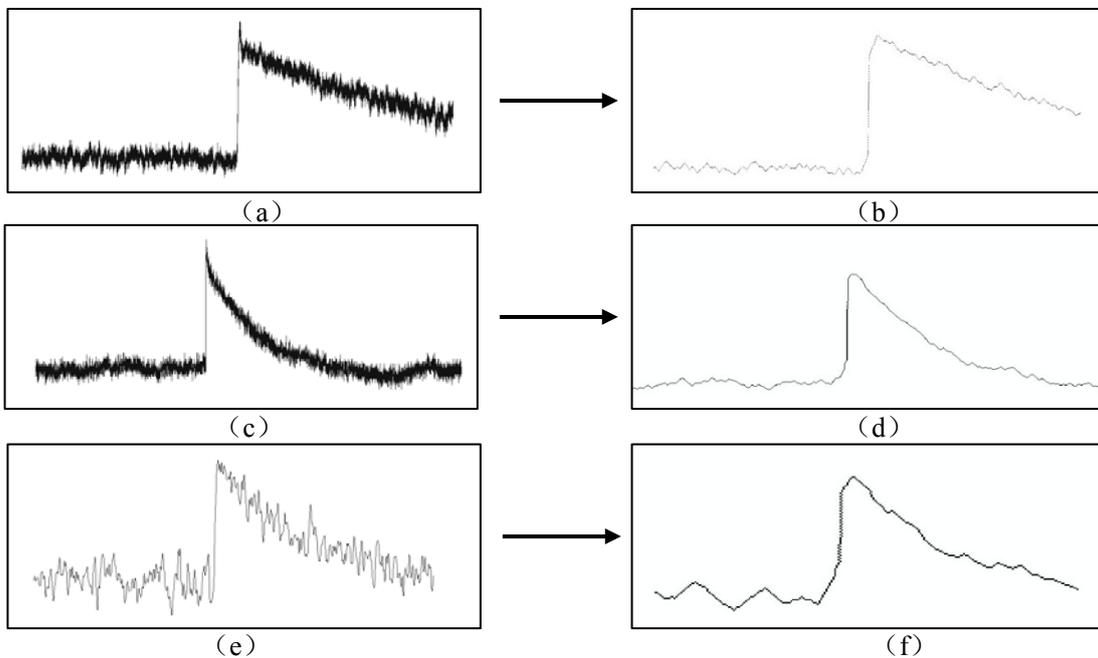


图 3. 数字核信号图像的骨架图

(a) ^{241}Am 原始核信号 (b) ^{241}Am 信号模板 (c) ^{241}Am 原始核信号 (d) ^{241}Am 信号模板 (e) ^{55}Fe 原始核信号 (f) ^{55}Fe 核信号骨架

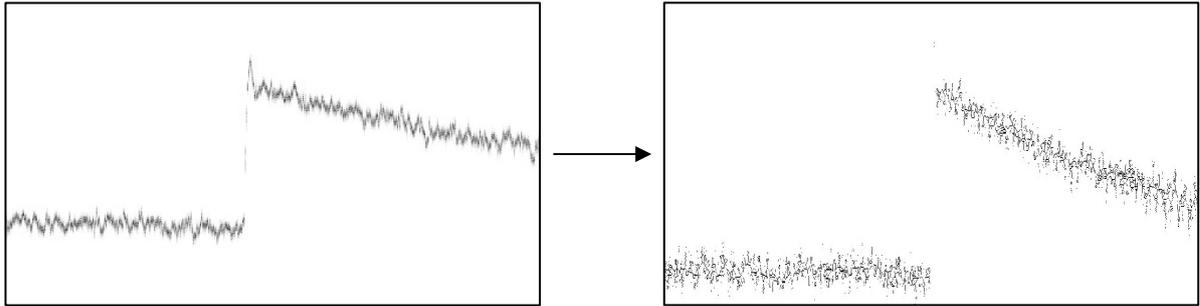


图 4. 未进行滤波时，数字核信号图像的骨架提取图

图 3 显示：数字核信号图像的骨架图与原始的图像相比，噪声信号已经被明显的削弱，而信号的上升沿，下降沿等携带着核信息的波形形状没有明显变化，能较准确反映出核探测器系统的参数分布和信号成形特征。

图 4 展示的是未经平滑滤波的数字核信号图像直接进行骨架提取的效果图，可见，如果不进行空间域线性滤波，骨架提取结果会很不理想，这也证明了滤波在数字核信号图像增强处理中的必要性。

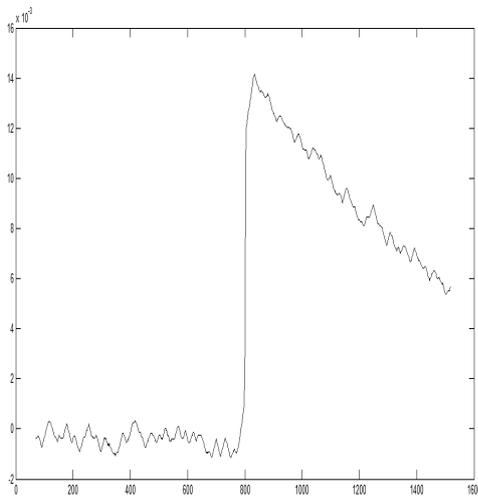


图 5. 数字核信号图像经过 ISC 处理后的效果图

4 数字核信号图像信息的提取——ISC 变换

本文完成对系统模板进行信息提取的思路为：先对波形骨架图进行图像到幅值信号的变换，(ISC, Image to Signal Convert) 再完成参数提取

的方法。通过对模板图像数据经相应变换，将图像的像素信息转化为时间和幅值信息即可方便地从数字核信号图像中提取模板高度、信号宽度等信息。图 5 是对一张数字核信号模板图进行 ISC 后的时幅图。

高度到幅度的转换方式：

图像数据第 N 行有意义像素点所代表的幅值为：

$$V_N = (N - N_0) \times \Delta V \quad (8)$$

其中 N_0 为 0 值像素所在行数， ΔV 为每行像素代表的幅值。

宽度到时间的转换方式：

$$FWHM = (N_1 - N_2) \times \Delta t \quad (9)$$

$(N_1 - N_2)$ 为模板图像峰值高度一半位置的两个最近的点的之间的列数差， Δt 为每列像素代表的时间。

5 结论

经以上研究本文得出下列结论：

1) 用文中讨论的方法成功地将数字核信号转化为灰度参数和图像大小可调的数字核信号灰度图像。

2) 通过空间域线性滤波和形态学方法结合的思路对数字核信号图像进行骨架提取，成功获取了系统模板。

3) 文中讨论的 ISC 方法，为系统模板图形参数化提供了思路。

6 感谢

在此感谢四川大学许祖润教授对本工作的大力支持和指导。

参考文献:

[1] Rafael C. Gonzalez, Richard E. Woods. 数字图像

处理. 阮秋琦等译. 第二版. 北京: 电子工业出版社, 2007: 91,440

[2] Rafael C. Gonzalea, Richard E. Woods, Steven L. Eddins. 数字图像处理 (MATLAB 版). 阮秋琦等译. 北京: 电子工业出版社, 2005: 120

The study on the method of image recognition and processing for digital nuclear signals

Wan Dong-yang, Zhang Ruan-yu*, Wang Peng

(College of Physical Science and Technology, Sichuan University, Chengdu 610064, China)

Abstract: Since there are many limits in the method of the traditional DSP system, a new method of digital nuclear signal processing based on the digital image recognition is presented in this paper. This method converts the time-series digital nuclear signal into the pulse image with adjustable pixels. A new principle and method have been taken to develop the SNR of the digital nuclear signal with the theory and method of the digital image processing. A method called ISC is presented, by which it is convenient to extract the template parameters.

Key words: digital nuclear signal image; skeleton extracting; template building; pulse information extracting

同步辐射光束线运动控制硬件系统的集成

郑丽芳, 刘平, 张招红, 胡纯, 吴盈锋, 米清茹, 贾文红
(中国科学院上海应用物理研究所, 上海 201204)

摘要: 本文介绍了上海同步辐射光束线运动控制系统的标准硬件集成体系, 该硬件体系与基于标准的 EPICS 环境下开发的控制软件一道圆满完成七条光束线的工程建设, 顺利完成调束, 达到验收指标, 目前已投入正常运行。

关键词: 同步辐射光束线; 运动控制; 硬件集成

文章分类: 计算机技术及其应用的研究成果

同步辐射光束线控制系统的任务是实时监测光束线各设备的运行状态, 为实验站用户提供能量、光斑尺寸、光通量满足要求的同步光。通过控制光束线上的单色器、压弯机构、白光狭缝和单色光狭缝等光学设备的运动机构, 可以调节同步光的能量、光斑尺寸和光通量。在上海光源首批七条光束线中, 运动控制设备数量众多、种类复杂、涉及国内外十几个加工厂家, 由于每个厂家通常有自己独特的设计方案, 因此每种设备甚至同一种设备的不同运动机构也不尽相同。为了便于与国际上同领域专家技术交流以及建成后光束线的运行维护、升级改造和后期光束线的建设, 光束线站控制系统选用国际上流行的标准软硬件体系结构。在充分调研、考察、访问国际上几大实验室如美国 APS、瑞士 SLS、英国 Diamond 的光束线控制系统, 经建立样机系统评估测试, 确定光束线控制系统软件在 EPICS(Experimental Physics and Industrial Control System)^[1]环境下开发; 硬件基于 VME 总线, 其中 VME/CPU 应用 MVME5500, 运动控制器应用 MAXv-8000, 驱动器应用瑞士光源的 SLS 2001 SMD^[2]。关于 VME/CPU 及运动控制器 MAXv-8000

的性能与使用方法已在相关文章^[3]中讲过, 本文重点介绍底层驱动器、电缆、接插件及硬件集成。

1. 驱动器

运动控制器 MAXv-8000 向驱动器发送的两个关键信号: 脉冲频率 Step 与电机运动方向 Dir, 与被控设备上应用的步进电机没有关系。直接与步进电机运动相关的是驱动器, 驱动器性能参数包括驱动电流范围、驱动电压、保持电流、细分数等。选择步进电机驱动器, 不仅要考虑步进电机本身的参数指标, 而且还要考虑被控参量物理要求、机械运动机构等因素。七条光束线中应用了以下四类驱动器:

1.1 SLS 2001 SMD

这是瑞士光源驱动器, 具有多种型号支持两相六线或八线、四相四线、五相五线或十线等步进电机。优点是用一专门 19" 标准机箱, 最多可安装八个驱动器模块, 通过接口模块 SLS 2017 与 MAXv-8000 连接, 电气工艺简单可靠。每个驱动器面板上配置了 Busy、上限位、下限位开关、Home 开关状态指示灯, 对驱动器的工作状态一目了然。

作者简介: 郑丽芳 (1966-), 女, 浙江龙游人, 2006 年获博士学位, 从事上海光源光束线控制系统的设计、建设、运行与维护。

面板上有专门的拨码开关用于调节保持电压、驱动电流、全步/半步模式等。当控制器发送命令给驱动器时，busy 灯亮；当电机寻零时遇到参考点，Home 开关指示灯亮。

该系列驱动器应用在白光狭缝、压弯机构、丝扫描、荧光靶等光束线大部分设备上，但两相、四相驱动器没有保持电流功能，不能满足一些特殊要求的场合。

1.2 SME 驱动器

四条插入件光束线的液氮冷却单色器中，第一晶体滚角、第二晶体滚角和投角运动机构上应用真空小电机，工作电流 250mA。为确保单步运动时不丢步，要求为电机提供一定的保持电流。考虑到电机在真空环境下不易散热，该保持电流要求尽可能小，只需 10mA，为此厂家特制了驱动器 sme145_700。

1.3 CCD93-70 Mini 驱动器

为满足单色器上 Bragg 角高精度和高速度的转动要求，选用德国 Phytron 公司的 CCD 93-70 Mini 驱动器，它具有 72V 驱动电压、最大 3.5A 的驱动电流和最多 20 细分功能。

1.4 基于串口通信的驱动控制器

有些专用的运动机构，厂家在购买零部件时直接配置驱动器控制器，如液氮冷却单色器中用于精调第二晶体滚角和投角的压电陶瓷控制器 E-621、变含包含角单色器中控制光栅和平面镜的伺服电机控制 C-862、水冷弧矢聚焦单色器中 Huber 转动台控制器 9011、Kohzu 滑台控制器 SC-400，它们均带有串口 RS232 通信接口。

2. 电缆

步进电机与驱动器之间的信号很多：电机每一相的驱动电流信号，正、负限位开关信号，参考点

信号，+5V 电源与接地信号。步进电机位于棚屋内的光束线设备上，驱动器安放在棚屋外的控制机柜内，因此步进电机与驱动器之间不仅信号多，而且电缆较长，大约 25m。

电缆的技术要求：电阻小，以尽量减小电缆对驱动器提供给电机的驱动电流的影响；具有防电磁干扰的屏蔽层，以减小电机运动时对限位开关及其它信号的影响；外面的护套层具有低烟低卤阻燃特性。

采用定制电缆，包含两种规格：截面积为 0.75mm² 的八芯四组对绞绝缘线芯用于驱动步进电机和截面积为 0.25mm² 的六根绝缘线芯用于开关信号。

3. 连接器

光束线精密设备，控制精度高，电缆长，因而对驱动器输出端与步进电机引出端的连接器要求很高，插拔方便、连接可靠、接触点电阻小。

驱动器输出端采用法国 FCI 公司的 UTG01619 连接器，在接触件、绝缘体、壳体和附件等方面具有非常好的质量。

各设备加工厂家都在步进电机引出端采用电缆连接器与外部电缆连接，因厂家多，很难对厂家提出应用统一型号的接插头，我们要求厂家尽可能应用 FCI 产品的电缆连接器，至少应用金属制圆形电缆插头插座。

仅以两相八线步进电机为例，表 1 列出了驱动器输出端、电缆、步进电机引出端的电气接线定义。

4. 硬件集成

由于七条光束线的设备类型、数量各异，应用的步进电机和驱动器的型号、数量也不相同。以生物大分子光束线为例，被控设备共 8 种，步进电机数量 25 个。图 1 是控制硬件的体系结构，VME/IOC1 内的一块运动控制器 MAXv-8000 控制 XBPM 和白

表 1 驱动器与两相八线步进电机的电气接线定义

驱动器连接器插针号	电机引出线	线芯颜色	驱动器连接器插针号	电机引出线	线芯颜色
3	Phase1	红	Shield	Shield	shield
4	Return1	蓝	19	Limit+	棕
10	Phase2	白	8	Limit+ Return	白
11	Return2	黑	18	Limit-	灰
12	Phase3	黄	17	Limit- Return	白
13	Return3	灰	6	Home	黄
14	Phase4	棕	7	Home Return	白
15	Return4	绿	1	+5V Supply	黄

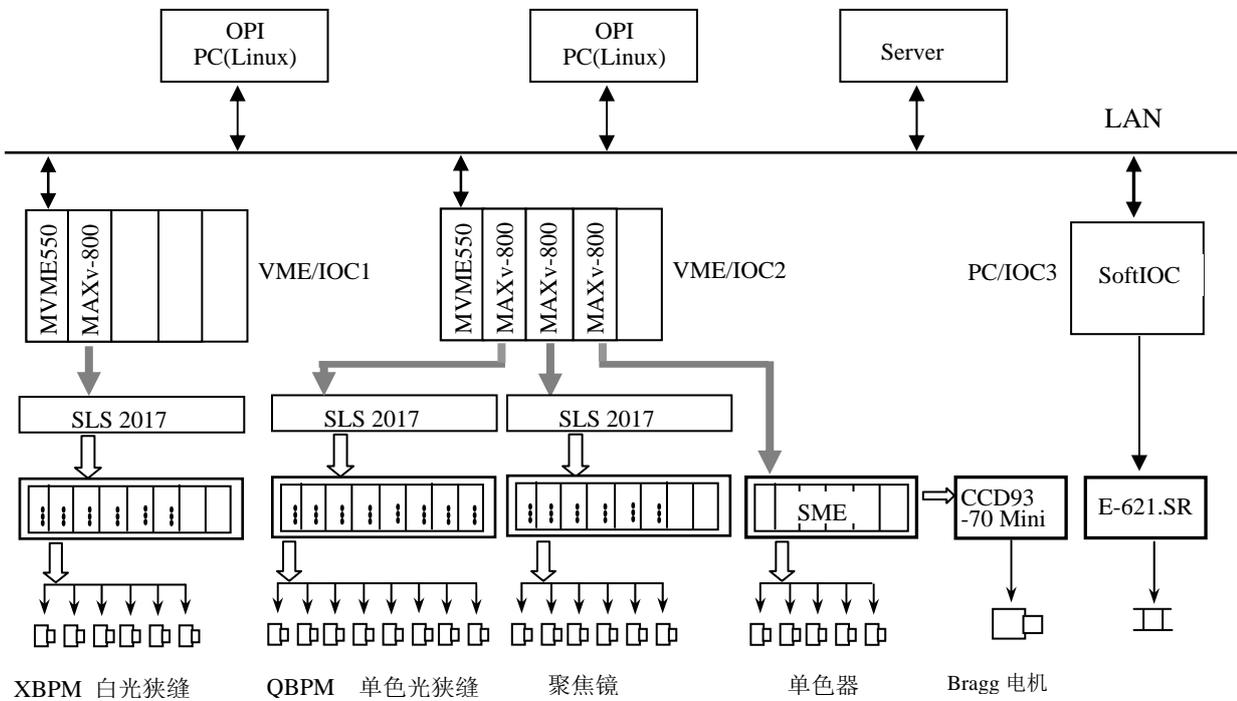


图 1 生物大分子光束线运动控制硬件结构

光狭缝的六个电机，IOC2 内有三块运动控制器，前两块通过 SLS 驱动器控制单色光狭缝、聚焦镜等设备，第三块通过 SME 驱动器控制单色器。单色器内的 Piezo 控制器 E-621.SR 具有 RS232 接口，应用 PC/SoftIOC 进行控制。图 2 为控制机柜内的硬件布局图。

安装硬件的总原则是利于 VME 机箱、驱动器



图 2 控制硬件布局图

的通风、散热，机箱接地，各种信号之间防止相互干扰。系统硬件与基于 EPICS 的控制软件相结合，于 2009 年 3 月 6 日顺利投入光束线调束中，并于 4 月 20 日协助光束线圆满完成由国内专家参加的验收指标测试，能量分辨率、光斑尺寸和光通量等所有指标均优于验收指标。

参考文献:

- [1] 郑丽芳, 李纪堂, 胡勇, 刘松强, SSRF 光束线控制系统初步设计, 中国科学院上海应用物理研究所, 2006
- [2] 胡勇, 郑丽芳, 李纪堂, 刘松强, 基于 EPICS 的运动控制系统, 核电子学与探测技术, 第 26 卷, 第 6 期, 2007 年 11 月

The Integrated Hardware of the Motion Control System in SSRF eamlines

ZHENG Li-fang, LIU Ping, ZHANG Zhao-hong Hu Chun Mi Qingru Jia Wenhong
(Shanghai Institute of Applied Physics, CAS , Shanghai 201204, China)

Abstract This paper describes the hardware architecture of the motion control in SSRF. The whole control system was used to finish the commissioning of seven beamlines and all of them reached their specifications. Currently it is being operated normally in the beamlines.

Key words: synchrotron radiation beamline; motion control; integrated hardware

外弹道天幕立靶弹丸信号处理方法研究

董华¹, 董涛², 王铁岭²

(1.中国兵器装备研究所, 北京 102202; 2.西安工业大学光电测试技术研究所, 西安 710032)

摘要: 弹丸信号处理方法是决定天幕立靶准确度的主要因素, 为了突破脉冲计时仪测时经典方法的局限, 研究了基于相关算法对六路弹丸信号进行处理的新方法。实验结果表明, 采用新方法后测试准确度更高, 稳定性更好。

关键词: 天幕立靶; 外弹道; 相关算法; 准确度

文章分类: 计算机技术及其应用的研究成果

0 引言

立靶精度是衡量低伸弹道武器性能优劣的一项重要指标, 实现弹丸着靶坐标的自动测探一直是国内外靶场测试领域积极研究的课题, 四光幕立靶交汇测试系统, 是采用四台天幕靶按一定的位置布靶形成天幕阵, 布靶比较复杂, 而且通过布靶形成的两个幕面夹角误差比较大。激光精度靶和六幕光幕靶测试系统, 有效靶面比较小, 不能适应大口径火炮的测试^[1-3]。所以, 在此基础上设计出了六幕天幕立靶, 六幕天幕立靶是利用天幕靶测速原理, 由主探测器-天幕靶组成六个天幕, 六个天幕在天空排列交汇成天幕阵, 当弹丸飞过, 其依次飞过六个天幕的时间被记录下来, 再结合六个天幕的结构参数, 通过计算公式, 计算出五个弹道参数。六幕天幕立靶是一种能够测量各种口径弹丸在弹道末端飞行速度、弹丸着靶点纵横坐标、弹丸着靶左右偏角以及上下倾角五个参数的新型外弹道测试仪器。它靶面大, 视场角达到 80° , 依据弹径变化可达到 $1\text{m} \times 1\text{m} \sim 20\text{m} \times 20\text{m}$ 的靶面。但是利用传统的脉冲触发计时仪测时方法灵敏度低, 天幕立靶测出的五个弹道参数受时间跳动的影响较大, 为了提高天幕

立靶的灵敏度和可探测射频指标, 对测时精度提出了更高的要求, 脉冲触发计时仪测时方法已经不能满足要求, 因此, 通过数据采集卡直接记录弹丸飞过六台天幕靶的六路输出信号, 通过计算机利用相关算法对其进行识别, 计算弹丸飞越任意两个天幕间的时间间隔, 进而计算出飞行弹丸的五个弹道参数。

1 外弹道参数天幕立靶测试原理

外弹道参数天幕立靶由主探测器一天幕靶、弹丸过靶时间间隔计算单元、安装有弹道参数计算软件的计算机、专用电源组成。天幕立靶是利用天幕靶测速原理, 由天幕靶组成六个天幕, 六个天幕在天空排列交汇成天幕阵。如图 1 所示是天幕立靶的天幕幕面结构原理图, 其中的天幕与测量坐标的位置关系为: 天幕 1 和 4 相互平行, 天幕 2 和 5 相互平行, 天幕 3 和 6 相互平行。天幕 1 和 3 这两个幕面是关于过它们交线与 XOY 平面平行的平面对称的, 天幕 4 和 6 这两个幕面也是关于过它们交线与 XOY 平面平行的平面对称的。天幕 1 和 3 相交, 4 和 6 相交, 幕面之间的夹角均为 2γ 。平行天幕 2

和 5 与 XOY 平面的夹角均为 β 。

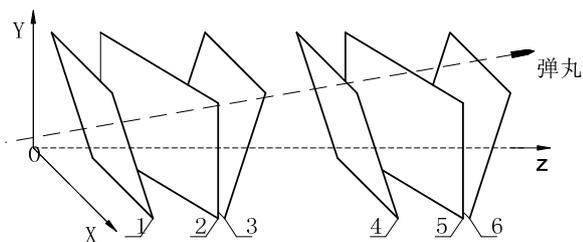


图 1 天幕立靶天幕面结构原理图

我们把弹丸飞行轨迹与 YOZ 平面的夹角称为弹丸飞行的偏角，与 XOZ 平面的夹角称为弹丸飞行的倾角。当有弹丸飞上天幕立靶的视场时，依次穿过六个天幕，通过测算弹丸依次飞过六个天幕的时间差，依据六个时刻值和立靶的结构参数，通过五个弹道参数计算公式的计算，就能测出弹丸在弹道末端的五个弹道参数：弹道倾角 θ （也称为俯仰角）、弹道偏角 α （也称为方位角）、弹丸飞行速度 V 、水平方向着靶坐标 X （横坐标）、竖直方向弹丸着靶坐标 Y （纵坐标）。

所以，精确快速的测量出弹丸飞过六个天幕的过靶时间间隔是天幕立靶需要解决的主要问题。

2 弹丸过靶时间的常规测量方法

2.1 脉冲触发计时仪实现弹丸过靶时间的测量方法概述

天幕靶实质上是一种弹丸穿过弹道预定位置的探测时刻探测器，其探测区域是一个具有一定厚度的平面，我们把这个平面称作天幕。弹丸飞行穿过天幕遮住了一部分到达光电器件的光，从而引起光电器件光电流的变化，放大电路放大该微弱变化的电流信号，最终输出一个代表弹丸到达该平面的数字脉冲信号^[4]。实际上，天幕是有厚度的，工程设计和现实做不到没有厚度的天幕，弹丸也具有一定的长度，弹丸穿过天幕是一段时期而不是一个时刻，使用较常规的弹丸过靶时间测量方法是给天幕立靶配接一台测时仪^[5]，天幕立靶通过天幕完成对弹丸到达天幕幕面位置的探测，计时仪记录六个天幕输出信号的时间间隔。

弹丸穿过天幕的一段时间内哪个时刻代表弹丸穿过天幕的时刻。根据弹丸到达天幕中的不同位置，有不同的触发计时仪的方式：弹尖触发方式、幕中触发方式和弹底触发方式。

弹丸飞行进入天幕的整个过程中，当弹尖刚进入天幕，开始遮住一部分光线，引起光电接收器件上光能量的变化，在放大电路的输出端便会有相应的电压变化。弹尖进入天幕多少能引起放大电路输出信号，这与天幕立靶的灵敏度有关。假设弹尖进入正好引起放大电路输出电压的时刻为 T_0 。理想状态下， T_0 对应放大电路的输出零值时刻。实际工程中，由于电路噪声的存在，很难准确找出这个时刻。通常设定一个电压阈值 V_0 ，我们把这个电压阈值称作触发电平，提取放大电路输出电压与触发电平相等的时刻为触发时刻，当弹丸穿过天幕时，天幕靶输出的弹丸模拟信号大于触发电平 V_0 时，比较器电路输出一个脉冲信号来触发或者停止计时仪，这样触发计时仪的方法称为弹尖触发。

幕中触发是指将弹丸底部触及天幕中间面时刻，电路输出一个脉冲信号来触发或者停止计时仪，幕中触发比较复杂，触发电平是根据幕厚和弹丸长度的关系不同而变化的。弹底触发是指以弹丸底部离开天幕的时刻为触发时刻，理想状态下，弹丸模拟信号降低到零值代表弹底刚离开天幕，弹底触发与弹尖触发一样，由于电路噪声的存在，很难准确找出这个时刻，实际工程中通常设定一个比噪声大的电压阈值来作为弹底触发电平。

2.2 脉冲触发计时仪实现弹丸过靶时间的测量方法的不足

由于天幕靶的天幕是有一定厚度的，当弹丸穿过去的时候，产生一个脉冲信号给测时仪，受各种因素的影响，这个脉冲信号什么时候触发测时仪带有随机性，有可能是弹尖刚进入天幕的时候触发，也有可能是弹丸全部进入再触发，这样由测时仪测出的时间就带有测量误差。

通过分析,脉冲触发计时仪测时方法存在诸多缺点。

1) 受到的影响因素比较多,不同的弹丸在同一台天幕靶上的时刻提取方法是不一样的,如果用同一种时刻提取方法,必然会产生大的误差。而且随着弹道的高低变换,弹丸同幕厚的关系也是不断变化的,所以存在很多不稳定性和不确定性。

2) 脉冲触发计时仪测时方法受到的影响因素比较多,受天空亮度、枪炮口火光、冲击波等因素的干扰。干扰信号具有复杂多样性和随机性。

3) 脉冲触发计时仪测时方法灵敏度低,由于有些弹丸比较小,或者弹道距离镜头很高,对于这种情况,当把比较器的比较电压调的较低时,往往容易引起噪声、振动、声波等信号的误触发,而比较电压调的较高时,会抓不住信号。虽然有研究者设计了数字滤波电路^[6],但对于日益复杂的弹种,加之干扰信号的复杂多样以及随机性,采用滤波器的方法滤除干扰,对于滤波器参数要求较高,而且需要针对不同的测量条件加以调整。

3 利用相关算法实现弹丸过靶时间的测量

对于外弹道参数天幕立靶,着靶坐标、弹丸速度、弹道倾角和偏角受时间跳动的的影响较大,所以对测时精度提出了更高的要求,脉冲触发计时仪测时方法已经不能满足要求,因此提出了一种利用相关算法计算弹丸飞越任意两个天幕面时间的方法。通过数据采集卡直接记录弹丸飞过六台天幕靶的六路输出信号,通过计算机利用相关算法对其进行识别,算出所需要的任意两个弹丸穿过的两个天幕间的时间间隔,代替测时仪记录信号间的时间间隔。由于相关算法采用多点相乘求卷积的方法,而不是采用判断单一的某一点是否达到比较电压值的方法,所以该相关算法可以减少由于天空亮度、传感器灵敏度、放大电路参数不一致,以及噪声等因素的影响而带来的测时误差。下面对用该相关算法实现测量弹丸飞越任意两个靶面时间的方法进

行论述。

3.1 相关算法计算弹丸过靶时间的算法原理

首先以计算弹丸穿越两个天幕面的信号的时间间隔为例来论述相关算法的测量原理。在预定弹道上,放置两台天幕靶。当弹丸穿过两个靶面时,两台天幕靶分别输出两个模拟信号,理想情况下,弹丸飞过两个靶面所产生的信号波形 $x_1(t)$ 和 $x_2(t)$ 应当完全相似,在实际使用中,数字信号采集仪所采集到的信号是按采样周期 Δt 输出的信号离散的各点的幅值,设两个信号的脉宽为 T , $x_1(t)$ 和 $x_2(t)$ 的互相关函数为:

$$R_{x_1x_2}(\tau) = \sum_{i=1}^n x_1(t_i)x_2(t_i + \tau)$$

根据相关函数性质可知,当我们给 τ 取不同的值时,会有不同的 $R_{x_1x_2}(\tau)$ 值与其对应,当 $R_{x_1x_2}(\tau)$ 取得最大值时所对应的 τ 值应为两个弹丸信号的时间间隔。上述原理相当于将弹丸信号 $x_1(t)$ 在时间轴上平移一段距离,然后与 $x_2(t)$ 的对应点相乘,当两个信号完全重合时,它们的相关函数 $R_{x_1x_2}(\tau)$ 取得最大值,此时移动的距离即为两个信号之间的时间间隔。

3.2 相关算法计算弹丸过靶时间的算法及实现

六台天幕靶安放在预设弹道的下方,并调平对准。每台天幕靶与弹丸信号采集仪连接,弹丸信号采集仪与安装有弹道参数计算软件的计算机连接。弹丸飞过天幕阵时,弹丸信号采集仪以一定的采集周期采集天幕靶传来的信号,当弹丸通过任一台天幕靶时都能感应到弹丸信号,并输出一个弹丸信号波形,当弹丸飞过天幕阵后,弹丸信号采集仪将收到六路弹丸信号,弹丸信号采集仪将这些波形采集下来,并立即传输给计算机,计算机对信号进行识别处理,计算出弹丸通过各个天幕的时间差,将测量出的时间差和已知的天幕阵的角度参数带入到弹丸参数计算公式计算,并以可视界面将弹丸的五个

弹道参数输出。

为了实现上述的相关算法，用 Delphi 编写了算法程序，程序流程图如图 2 所示。该程序可以处

理数据采集仪采集的弹丸波形信号，计算出弹丸穿过天幕的时间间隔。如图 3 为利用相关算法对六通道六个弹丸过靶时间计算的程序输出界面。

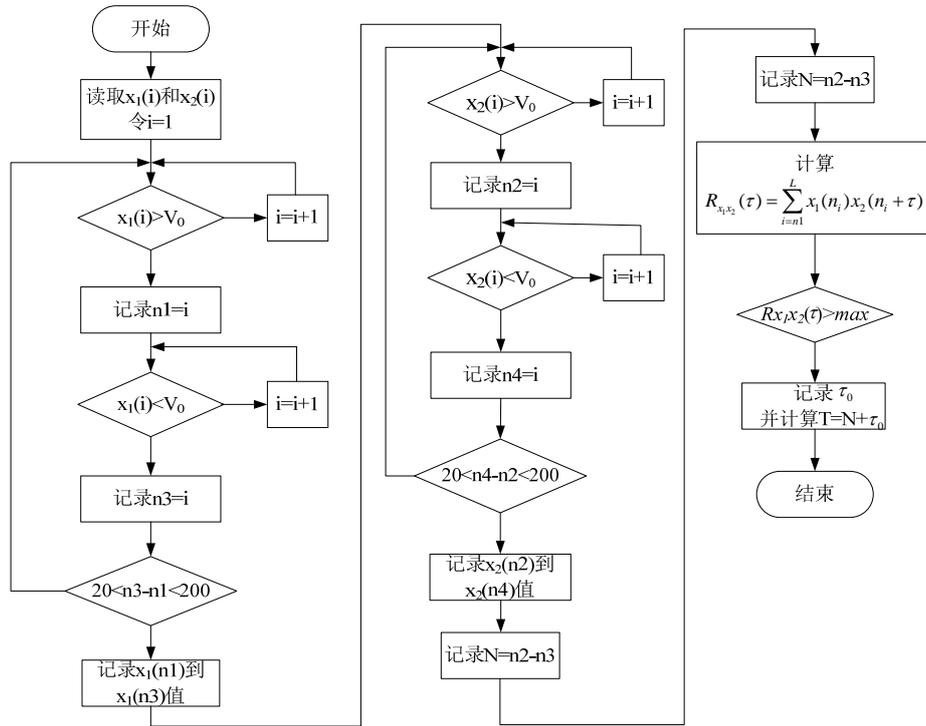


图 2 相关算法计算两个弹丸信号的时间间隔程序流程图

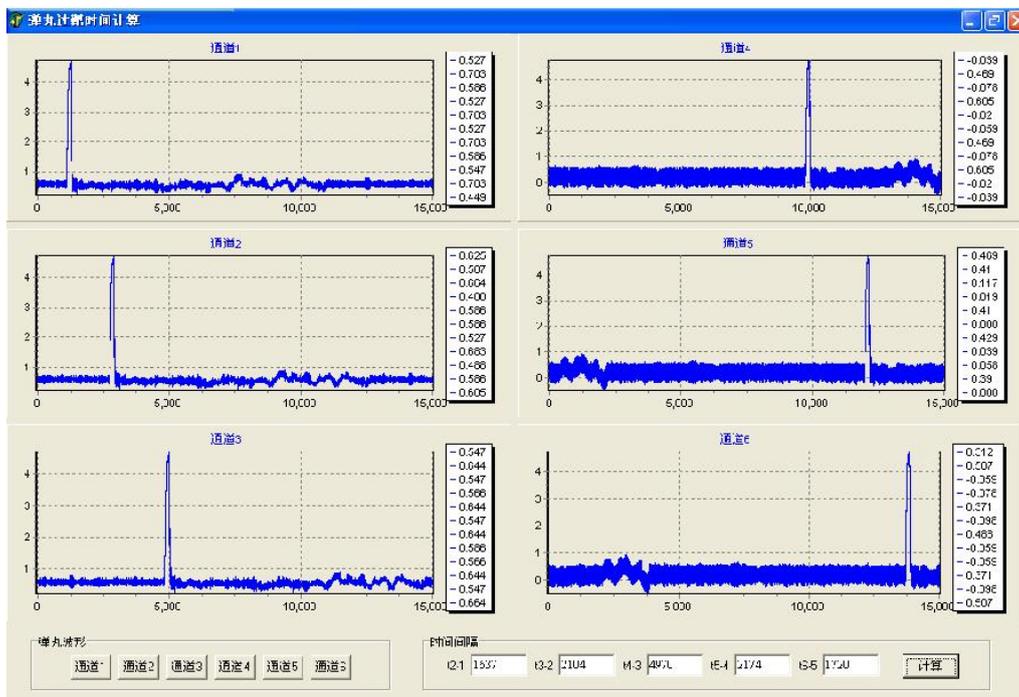


图 3 相关算法对六通道六个弹丸过靶时间计算的程序输出界面

4 实验及结果分析

在其它条件都相同的条件下进行天幕立靶测试实验,使用计时仪测时和用相关算法测时两种方法测得弹丸飞行时间,再通过两种方法所求时间分别计算得到的弹丸着靶坐标值,分别和纸靶对比,那个更接近于纸靶测量值,则说明相应的测时方法

更优化。

试验条件及参数设置为:弹种:7.62mm 步枪弹;靶距 S: 6.00m;镜头焦距: 1.5m;镜头光圈: 2.8;采样频率 f: 1M。如表 1 为步枪弹实弹射击的一组实验数据。

表 1 7.62mm 枪弹实弹射击实验数据

序号	纸靶坐标(mm)		用计时仪测得时间计算所得坐标 (mm)				用相关算法求得时间计算所得坐标 (mm)			
	X	Y	X	Y	ΔX	ΔY	X	Y	ΔX	ΔY
1	-25	-332	-24.8	-328.1	-0.2	-3.9	-24.5	-327.4	-0.5	-4.6
2	83	28	74.8	38.1	8.2	-10	78.3	36.2	4.7	-8.2
3	-77	-337	-71.7	-337.4	-5.3	0.4	-73.1	-338.7	-3.9	1.7
4	-164	116	-167.4	121.4	3.4	-5.4	-166.9	121.3	2.9	-5.3
5	-145	-138	-146.3	-143.8	1.3	5.8	-146	-142.6	1	4.6
6	-218	-71	-217	-72.6	-1	1.6	-216.5	-71.9	-1.5	0.9
7	-325	-70	-327	-72.4	2	2.4	-326.1	-72	1.1	2
8	122	-208	123.3	-206.9	-1.3	-1.1	122.8	-208.5	-0.8	0.5
9	73	-240	73.8	-237.6	-0.8	-2.4	72.9	-237.9	0.1	-2.1
10	67	-70	63	-61.6	4	-8.4	63.8	-61.1	3.2	-8.9

将表 1 中两种方法所求得的坐标值与实际纸靶所测得的坐标值进行比较。10 发数据中,用相关算法求得时间计算所得的 X 坐标有 8 发优于计时仪方法, Y 坐标有 7 发优于计时仪方法。所以可以得出结论:相关算法与脉冲触发计时仪的测时方法相比,所求时间更准确,测得的坐标值更准确。并且采用数字信号处理的方法还具有抗干扰能力强、稳定性好、可视化等优点。

关算法比常规的脉冲触发计时仪的处理方法准确度要高,稳定性好。

参考文献:

5 结论

通过研究和多次实弹试验表明,脉冲触发计时仪测时方法受到的影响因素比较多,不同的弹丸测试效果都不一样,干扰因素较多,这种方法不能满足测时精度要求较高的天幕立靶。因此提出了用数字采集卡采集弹丸通过每个天幕面的弹丸波形信号,运用相关算法对六路信号进行计算处理,计算出弹丸飞过天幕的时间间隔,实弹试验结果表明相

- [1] 王铁岭,安莹.一种新型立靶精度测试系统[J].西安工业学院学报,1997,17(1):37-40
- [2] 王铁岭,安莹,立靶精度测量方法研究[J].测试技术学报,1996,10(2):10-13.
- [3] 王昌明.实用弹道学[M].北京:国防工业出版社,1994.
- [4] 倪晋平,蔡荣立,崔长青,田会.弹丸着靶坐标测试系统的原理与信号处理电路[J].测试技术学报,2005,9(1):11-17.
- [5] 倪晋平,李晋惠.智能化多功能测时仪研制[J].西安工业学院学报,2000,20(3):182-186.
- [6] 席峰,倪晋平.一种测速光幕靶数字滤波电路设计[J].西安工业学院学报,2004,24(1):19-22.

Research on the Method of Signal Processing which Concentration Measuring Target Exterior Trajectory by Sky Screen

DONG Hua¹, DONG Dao², WANG Tie-ling²

(1 Research Institute of China Ordnance Industries, Beijing 102202;

2. Optoelectronic Test Institute, Xi'an Technological University, Xi'an 710032)

Abstract: The method of projectile signal processing is the major factor which determination the accuracy of the concentration measuring target by sky screen. To break through the limitation of classical time keeping method by impulsecalculagraph, researched the new method of process six-way projectile signal based correlation algorithm. The experimental result indicated more accuracy and stability that employ the new method.

Key words: the concentration measuring target by sky screen; exterior trajectory; correlation algorithm; accuracy

移动式加速器中子源控制系统的设计与研制

唐君¹, 刘湾, 黄瑾, 刘百力, 张钦龙, 李艳

(1. 中国工程物理研究院 核物理与化学研究所, 四川 绵阳, 621900)

摘要: 运用数字化处理、计算机网络、光纤通信等先进技术, 实现对移动式加速器中子源的远程控制。该系统运行稳定、操作性强, 很好地满足了用户的实验需求。

关键词: 加速器; 中子源; 控制; 连锁保护; 光纤通讯

文章分类: 计算机技术及其应用的研究成果

加速器中子源是一种技术复杂, 涉及很多学科的大型实验设施。本文介绍的移动式加速器中子源能够提供 300keV 能量的氘离子, 并产生不小于 1×10^{11} n/s 的 D-T 中子产额。同时具有重量轻、移动方便的特点, 可用于中子学参数检验、中子辐照、中子照相等。

为保障移动式加速器中子源的稳定运行, 需要开发相应的仪器控制系统, 以实现实验操作、数据采集和存储、及安全连锁等功能。本文系统阐述了移动式加速器中子源控制系统的设计方案及具体实现方法。

1 移动式加速器中子源工作原理

移动式加速器中子源工作原理: 在真空腔体采用氘气放电产生等离子体, 利用引出电极将等离子体中的氘离子引出形成氘离子束, 离子束通过预聚焦进入加速管被加速。用于加速的直流高压用 Cockcroft-Walton 倍压整流方法产生。被加速的氘离子束轰击氘靶, 通过氘氘反应产生中子。加速器中子源的结构示意图如图 1 所示, 其主要被控系统包括高压、离子源、真空、冷却、安全连锁等。

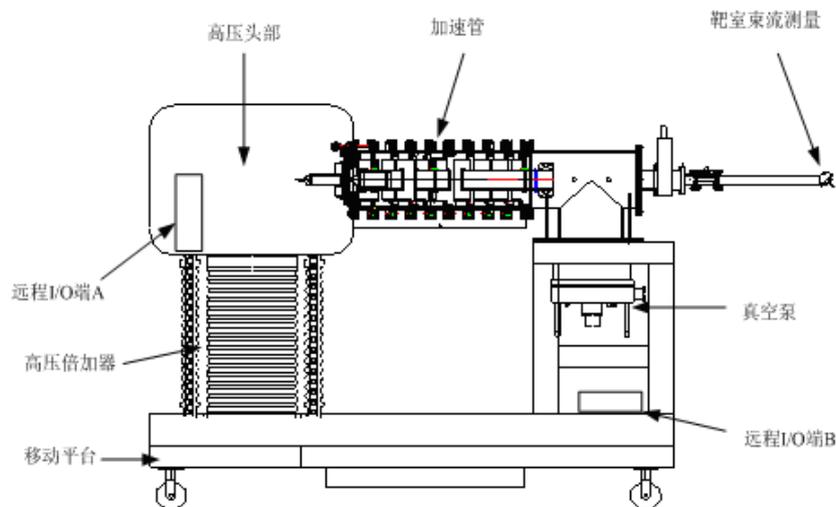


图 1. 加速器中子源结构示意图

2 控制系统功能

移动式加速器中子源控制系统功能是根据系统需求精确控制束流光学元件调束，获取实验数据；同时实时显示各束流收集器参数，监视中子发生器工作状态；此外提供加速器中子源操作人员友

好的人机接口（HMI）。控制器对不同的电源以及各类泵直接调节控制，最终达到对高压、离子源、真空、冷却、安全连锁等被控对象的控制；分别对最终对象或间接对象的测量得到所需的参数。图 2 为控制对象及功能示意图。

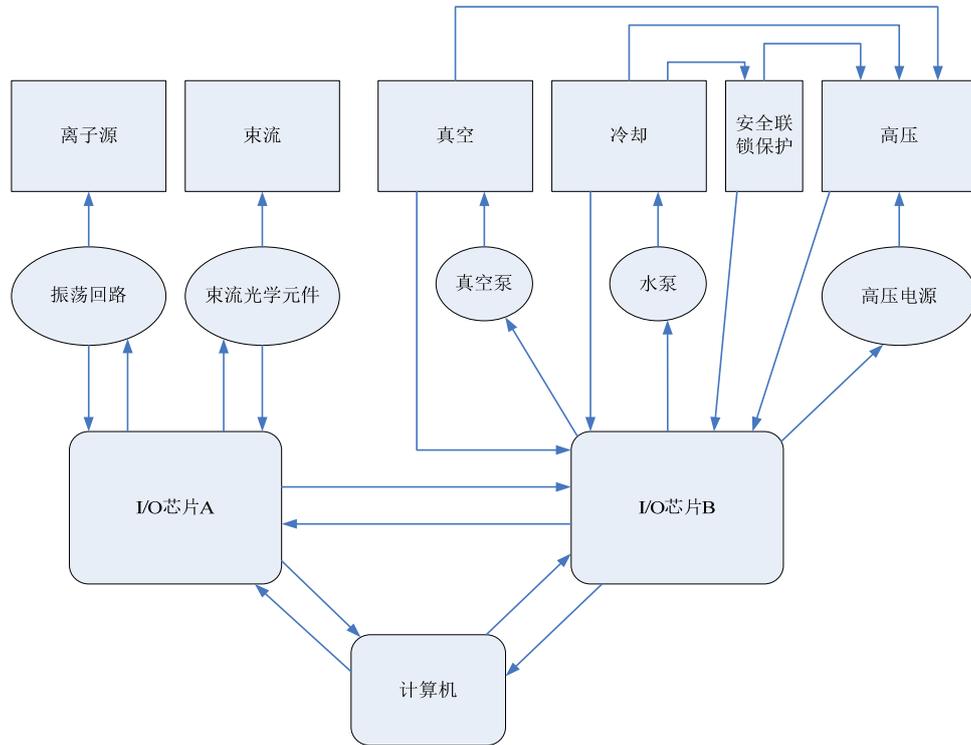


图 2. 控制功能示意图

移动式加速器中子源的控制系统主要控制 300 kV 高压电源、高压头部、真空系统等设备的启动、停止、参数调节、测量、连锁和报警。具体控制和监测对象为：

开关项：直流高压电源、高频振荡电源、磁场电源、钷管电源、离子源引出电源、预聚焦电源、直联泵、分子泵电源、真空计、水泵电源、真空阀、中子产额监测系统；

调节项：直流高压、高频振荡电源、钷管电源电流、离子源引出电压、预聚焦电压等；

测量项：直流高压、高压电源负载、高频振荡电压、钷管电源电流、离子源引出电流及电压、预

聚焦电流及电压、离子源引出束流、系统真空度、靶上束流、光阑束流、中子产额监测等；

连锁项：高压与真空连锁、高压与门连锁、高压与水冷连锁、高压与离子源连锁、真空阀门与真空连锁等；

报警项：冷却水报警、真空报警等。

其中，连锁项是加速器中子源控制系统中重要的安全保护系统。其保护逻辑是控制高压系统高压的正常输出和切断。设计考虑切断高压优先原则。当系统出现紧急状况时，高压被自动切断，以保护系统的安全性。如当真空度未达到 10Pa 以上，分子泵连锁无法开启；当靶温过高，自动切断高压；

当冷却水停止时，自动切断高压；当真空度低于 10^{-3}Pa 时，自动切断高压；当安全门打开时，自动切断高压；当紧急按钮按下时，自动切断高压；当真空急剧下降时，自动合下闸板阀。高压连锁保护系统还向信号系统提供相关的系统状态信息。

3 控制系统架构

移动式加速器中子源控制系统主要是运用数字化处理、计算机网络、光纤通信等先进技术对加速器进行远程控制。本系统能实现信息自动采集、动态监测监控、远程数据传输、自动连锁保护、远程控制调节等功能，保证加速器可靠运行。

为满足移动式加速器中子源移动性的要求，设计了该控制系统架构，令加速器主体与控制台之间仅由两根通讯光纤相连，将信号布线集中于主体内部，简化了加速器移动后的安装连线。并在通讯连接状态不良时，对高压作优先切断原则。加之，高压头部电位处于高压倍加速器的高压之上，所以对高

压头部内的采集信号与控制信号也需通过光纤传到地电位上。

移动式加速器中子源控制系统分三个部分，其中中央处理 CPU 部分在控制台上，远程 I/O 端 A 在高压头部内，远程 I/O 端 B 在移动平台上。三个部分通过光纤交换机以光纤介质相连，远程 I/O 端将采集到的电信号转换为光信号传输回中央处理器进行逻辑处理，再将中央处理主站处理后发送来的光信号转换为电信号送往各个被控单元。实现控制参数和连锁控制信号的采集、隔离、处理、逻辑运算和驱动输出。远程 I/O 端放在符合 EMC 要求等级的机箱内（作严格屏蔽处理，防止振荡功率馈入烧毁集成电路），中央处理器安放在控制台上。系统共有 76 路输入输出量，其中远程 I/O 端 A 有数字量 16 路、模拟量 20 路，远程 I/O 端 B 有数字量 24 路、模拟量 16 路。系统架构如图 3：

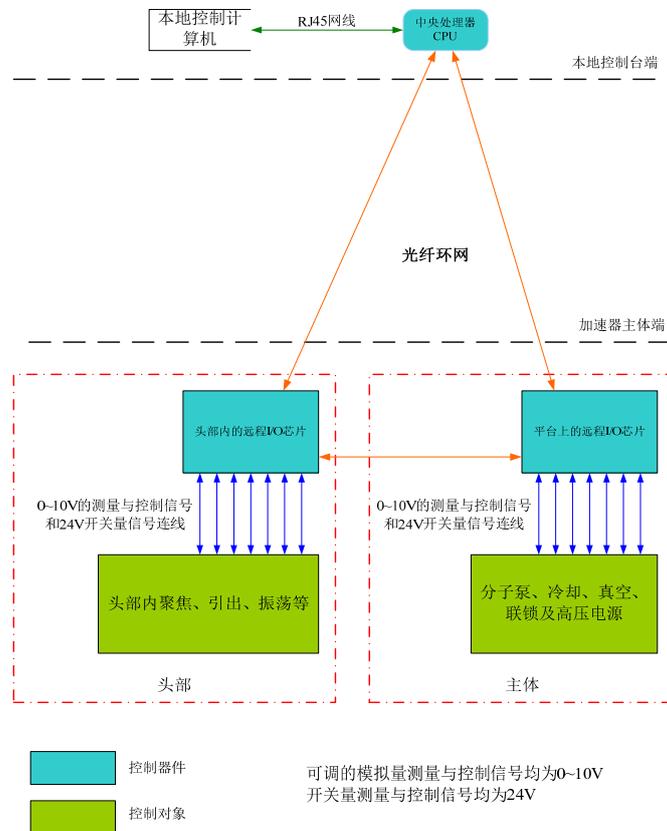


图 3. 控制系统架构图

由于高压头部内被控对象多为强电，所以对 I/O 芯片的采集信号与控制信号均做了光耦隔离，以保护弱电部分不被高压打火引起的浪涌烧毁，如图 4 所示。

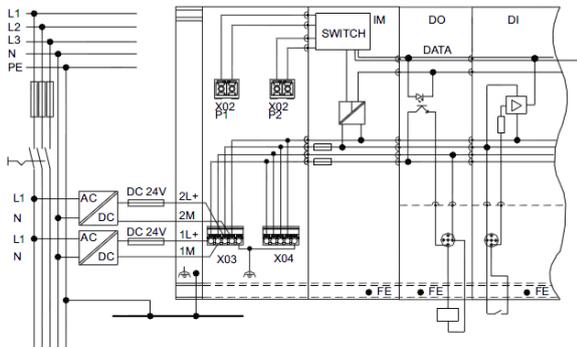


图 4. 光耦隔离模组示意图

I/O 芯片通过 220V 交流，经 AC/DC 得到两组 24V 直流分别对内部数据总线和外部信号接口供电，达到内部数据总线与外部信号的电气隔离。数据总线上的电信号经过电光转换，与其他芯片进行光通信数据交换。

移动式加速器中子源控制的人机接口（HMI）软件基于 Windows Control Center，该软件与 Windows 有着极高的兼容性与匹配性，内部集成 SQLserve 数据库。具有操作界面友好、直观、简洁、易用等优点。编写的人机接口界面如图 5 所示。



图 5. 人机界面

该控制系统的软件功能主要包括：高压、离子源、真空、冷却、安全连锁中各装置参数设定及状态监视，过程值归档，过程值趋势图表，报警监视，

查看/调用历史数据等。此外，还可提供操作员权限管理。通过人机接口，可对离子源的状态监测并实时调节；真空监视，控制负载；安全门、冷却水、温升、真空下降等安全保护及时报警等。

4 结论

结合移动式加速器中子源的仪器控制需求，设计并实现了移动式加速器中子源控制系统。该系统安全联锁保护稳定可靠，控制精度高、实时数据采集精确、操作友好简便，测试结果表明移动式加速器中子源控制系统的软硬件均能很好的满足各项性能指标。

参考文献:

- [1] 赵籍九, 尹兆升, 粒子加速器技术[M]. 高等教育出版社
- [2] 培仁, 等. 自动控制技术和应用——监测网络设计[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2001
- [3] 朱世雷, 等. 中子照相实验装置扫描系统的研制[J]. 核电子学与探测技术, 2011(03)-0312-03
- [4] B. Jeram, B. Lesjak, etc. Accelerator control with the LonWorks Fieldbus.
- [5] Kenda, I. Kriznar, etc. I/O control with PC and Fieldbus.
- [6] 李玉晓, 等. 静电加速器可视化自动控制系统设计[J].
- [7] 张天爵, 等. 串行加速器升级工程的计算机控制系统方案设计[C].
- [8] 孔祥成, 等. BEPC 注入器控制系统[C].

Design and Development of mobile accelerator neutron source

TANG Jun¹, LIU Wan, HUANG Jin, LIU Bai-li, ZHANG Qin-long, LI Yan

(China Academy Of Engineering Physics, Institute of Nuclear Physics and Chemistry, Mianyang of Sichuan Prov.
621900, China)

Abstract: Use advanced digital processing, computer networks, optical fiber communication technology to achieve mobile accelerator neutron source remote control. The system is stable, operational, and well positioned to meet the experimental needs of the user.

Key words: accelerator; neutron source; control; chain protection; optical fiber communication

一种基于关联规则挖掘的入侵检测系统

王文瑾^{1,2}, 刘俊荣¹, 刘宝旭¹

(1. 中国科学院高能物理研究所计算中心, 北京 100049;

2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 随着网络通信技术的发展, 越来越多的社会活动开始通过互联网来进行。与此同时, 网络信息的安全问题也日益严重。入侵检测系统的出现无疑很大程度上提高了网络的安全性, 但是目前的入侵检测系统普遍存在漏/误报率高, 特征库需频繁升级更新等问题。本文提出了一种基于关联规则挖掘算法的入侵检测系统。该系统可以通过训练数据生成通用的检测规则并且利用规则检测新的攻击。最后通过实验证明了该系统对未知攻击有较好的检测率。

关键字: 入侵检测; 关联规则挖掘; Apriori; K-Means 聚类

文章分类: 计算机技术及其应用的研究成果

随着网络安全威胁日益严重(如: 恶意代码、蠕虫、拒绝服务、钓鱼网站等), 构建一套行之有效的网络入侵检测系统(IDS)已成为各级网络信息系统的重要任务之一。IDS 代表的是一套能够在系统被攻击时发出警告的防卫工具的统称^[1]。

传统 IDS 通常运用模式匹配、统计分析、完整性分析等方法, 对网络行为和系统进行实时的监控和预测。模式匹配因为其准确性高, 速度快等优点, 对于检测已知的攻击非常有效, 但是无法检测未知类型的攻击。统计方法一般都是将用户的正常状态和合法行为建模, 然后将用户活动和正常模式比较, 判断入侵的行为。统计方法虽然可以一定程度弥补不能预测未知攻击等缺点, 但误报率和漏报率都非常高^[2]。

数据挖掘技术可以从海量数据中发现有意义的知识, 将数据挖掘技术应用于网络审计数据的分析, 生成的有意义的知识可以构建更好的入侵检测模型^[8]。本文基于关联规则挖掘, 首先提出了一种新的

Apriori 算法, 然后给出了基于 Apriori 算法的入侵检测算法的描述, 最后给出了实验结果的分析。从结果上看, 本文算法无论是在规则的提取还是海量数据的实时检测方面都有较好的效率, 同时对未知类型的攻击检测有较高的正确率。

1 关联规则挖掘的基本原理

1.1 基本原理和定义

关联规则挖掘发现大量数据中项集之间有趣的关联或相关关系。关联规则的获取是通过某个数据挖掘方法从事务数据库中找出隐含的频繁模式。在入侵检测技术中就是从海量的网络流量数据中挖掘出相应的频繁模式来判断当前网络是否正常。关联规则的挖掘主要有两种方法: Apriori 和 Fp-growth, 本文主要选用的是 Apriori 算法。

和关联规则挖掘有关的两个重要概念就是项集的支持度和置信度^[7]。定义如下:

(1) 项集的支持度

数据库中包含(支持)项集 X 的事务的数目称为项集 X 的支持度计数, 记为 $\sigma(X)$ 。项集 X 的支持度的定义为 $\sigma(X) = \left| \left\{ t_i \mid X \subseteq t_i, t_i \in T \right\} \right|$ 其中 T 为事务的集合。

(2) 规则的置信度

关联规则 $X \rightarrow Y$ 的置信度代表 Y 在包含 X 的事务中出现的频繁程度。可由如下公式计算得到。

$$c(X \rightarrow Y) = \frac{\sigma(X \cup Y)}{\sigma(X)}$$

支持度和置信度是描述关联规则的两个重要概念, 前者用于衡量关联规则在整个数据集中的统计重要性, 后者用于衡量关联规则的可信程度。一般来说, 只有支持度和置信度均较高的关联规则才可能是用户感兴趣、有用的关联规则。

1.2 一种改进的 Apriori 算法描述

Apriori 算法是第一个关联规则挖掘算法, 由 Agrawal 提出^[3]。它开创性的使用基于支持度的剪枝技术, 系统地控制候选项集的指数增长。算法利用第 k 次循环产生的最大长度为 k 的频繁项集构造长度为 $k+1$ 项的频繁候选集, 根据频繁项集的子集都是频繁项集的原则过滤 $k+1$ 项候选集, 然后扫描数据库, 计算候选项集的支持数, 得到 $k+1$ 项频繁项集。直到某次循环最大项集为空时算法停止。

候选项集的生成是 Apriori 算法的核心, 它基于向下闭包的性质, 即如果一个项集是频繁项集, 那么它的所有子集也是频繁项集。反之, 如果一个项集的某个子集不是频繁项集, 那么这个项集也一定不是频繁项集。因此, 由 k 项频繁集构造 $(k+1)$ 项频繁候选集时包括连接和剪枝两个步骤。

该算法的缺点是频繁项集的长度每增加一个, 都要遍历一次数据库。而且随着频繁项集长度的增加, 候选项集数目逐渐减少, 包含这些候选项集的

事务数据量也越来越少, 但在 Apriori 算法中并没有减少事务数据库的扫描范围^[6]。

考虑到传统 Apriori 算法在候选集生成上的缺点, 本文提出了一种基于字典的 Apriori 算法, 大大提高了算法在 IO 上的效率。算法首先将事务编码成精简的字符串并全部读入内存中, 然后从中生成由项集作为 key, 对应的支持度计数为 value 的字典。然后在此基础上迭代生成所有频繁项集。算法伪代码如下:

- (1) encode(D);
- (2) $L_1 = \text{find_frequent_1-itemsets}(D)$;
- (3) for ($k=2; L_{k-1} \neq \Phi; k++$) {
- (4) $C_k = \text{apriori_gen}(L_{k-1}, \text{min_sup})$;
- (5) for each transaction $t \in D$ {
- (6) $C_t = \text{subset}(C_k, t)$;
- (7) for each candidate $c \in C_t$
- (8) $c.\text{count}++;$ //
- (9) }
- (10) $L_k = \{c \in C_k \mid c.\text{count} \geq \text{min_sup}\}$
- (11) }
- (12) return $L = \cup_k L_k$;

2 基于 Apriori 的入侵检测技术

Apriori 算法处理的对象一般都是由二元属性组成事务数据库, 但是网络流量统计数据则大多都是连续的数据, 图 1 所示的是一个常规流量统计数据信息, 可以看到, 除了 service 和 flag 属性是离散的值外, 其他的如 time, duration, src_bytes 等属性都是连续的值。在这样的情况下, 如何正确科学地将网络流量统计数据离散化就成为将数据挖掘方法应用于入侵检测系统的一个主要挑战。

time	duration	service	src_bytes	dst_bytes	flag
1.1	10	telnet	100	2000	SF
2.0	2	ftp	200	300	SF
2.3	1	smtp	250	300	SF
3.4	60	telnet	200	12100	SF
3.7	1	smtp	200	300	SF
3.8	1	smtp	200	300	SF
5.2	1	http	200	0	REJ
3.7	2	smtp	300	200	SF

图 1. 常规的流量统计信息

2.1 数据预处理

将连续数据离散化，最常见的方法就是直接将数据按照一定的标准分组，形成有限个区间。分组的标准一般由用户根据数据的特点手工指定。但由于网络流量信息一般都是海量的数据，所以需要使用更加智能的自动化离散方法。

本文采用了 K-means 聚类方法根据每个属性的数据分布情况，科学地确定分段的边界。

k-means 算法接受输入量 k ；然后将 n 个数据对象划分为 k 个聚类以便使得所获得的聚类满足：同一聚类中的对象相似度较高；而不同聚类中的对象相似度较小。聚类相似度是利用各聚类中对象的均值所获得一个“中心对象”（引力中心）来进行计算的^[5]。

k-means 算法的工作过程说明如下：首先从 n 个数据对象任意选择 k 个对象作为初始聚类中心；而对于所剩下其它对象，则根据它们与这些聚类中心的相似度（距离），分别将它们分配给与其最相似的（聚类中心所代表的）聚类；然后再计算每个所获新聚类的聚类中心（该聚类中所有对象的均值）；不断重复这一过程直到标准测度函数开始收敛为止。一般都采用均方差作为标准测度函数。k 个聚类具有以下特点：各聚类本身尽可能的紧凑，而各聚类之间尽可能的分开。

本文首先使用 k-means 方法处理所有网络流量统计数据中的连续属性，将其分别映射到有限个类别中，最后对每个类别进行编码。通过这样的方式将属性较为复杂的流量数据编码成一个个符号组成的字符串。

例如，假设离散化系数为 3 且仅考虑 src_bytes 和 dst_bytes 两个属性，若 src_bytes 的聚类结果的质心为(480.052226, 693375640, 66407.895091)，dst_bytes 的聚类结果质心为(5074279.3125, 2217.760389, 1509908.315789)，上述六组质心对应六个类别，分别用 a~f 来表示。若一个网络连接的数据为：src_bytes = 450, dst_bytes = 1600000。则相应编码为 af。

2.2 系统设计

在将连续的属性数据离散化之后，我们已经可以通过 Apriori 算法来挖掘海量网络流量数据中的频繁模式，并生成可以被用来检测未知攻击类型的强规则。但是还有一些问题，在传统 Apriori 的思想中，只有置信度高的规则才会被认为是值得关注的，这样的思想并不适用与入侵检测系统，因为一个攻击不管多小都有可能造成很大的危害。所以在规则的产生中我们不能忽视一些相对置信度不高的攻击规则。要解决这个问题，比较科学的方法就是首先通过适当降低“强规则”的门槛，使用较低的置信度生成大量的规则，然后再根据规则所对应的攻击类型对结果集进行剪枝，最后得到一个较为全面且不冗余的规则库。

综上所述，我们可以得出基于 Apriori 算法的入侵检测系统流程如图 2 所示。

系统首先处理海量的历史网络审计数据，对于每一条连接信息，使用 k-means 算法将其对应的连

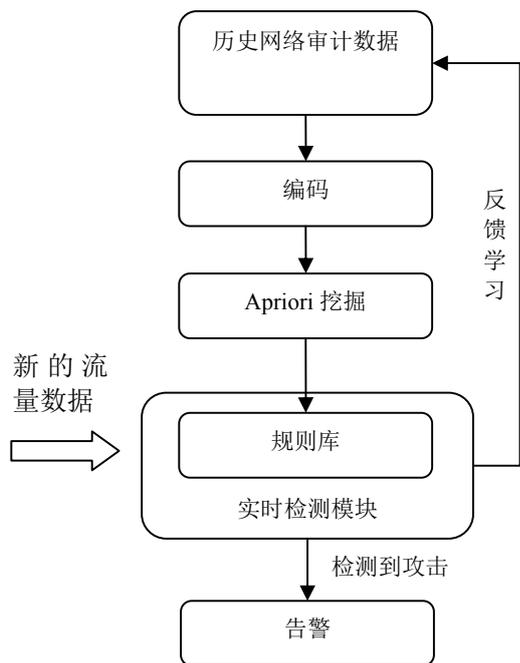


图 2. 基于 Apriori 算法的入侵检测系统

续值离散化然后将整条连接信息编码为字符串表示。接下来使用 Apriori 算法对之前处理的字符串结果进行挖掘，挖掘的规则都输出到规则库中。

规则库同时也是实时检测模块的一部分。实时检测模块不断地监听网络的流量数据，对于每一条连接信息都将其与规则库中的检测规则进行比对，如果发现攻击则触发告警，若没有发现则将当前连接信息存入历史网络审计数据参与下一轮的规则挖掘。

3 实验设计

本文最后采用 C#语言，基于 Visual Studio2010 实现了基于 Apriori 的入侵检测系统。并采用 KDDCup99 的数据集进行了测试。

3.1 KDDCUP99 数据集

KDDCUP 是 1999 年 KDDCUP 知识发现竞赛的数据集，由美国 DARPA 在 MIT 林肯实验室的模拟

实验数据集修改而来。在 KDDCUP99 的数据集中，一个网络连接定义为在某个时间内从开始到结束的 TCP 数据包序列，并且在这段时间内，数据在预定义的协议下（如 TCP、UDP）从源 IP 地址到目的 IP 地址的传递。每个网络连接被标记为正常（normal）或异常（attack），异常类型被细分为 4 大类共 39 种攻击类型，其中 22 种攻击类型出现在训练集中，另有 17 种未知攻击类型出现在测试集中。

4 种异常类型分别是^[4]：

1. DOS, denial-of-service. 拒绝服务攻击，例如 ping-of-death, syn flood, smurf 等；
2. R2L, unauthorized access from a remote machine to a local machine. 来自远程主机的未授权访问，例如 guessing password；
3. U2R, unauthorized access to local superuser privileges by a local unprivileged user. 未授权的本地超级用户特权访问，例如 buffer overflow attacks；
4. PROBING, surveillance and probing, 端口监视或扫描，例如 port-scan, ping-sweep 等。

虽然年代有些久远，但 KDD99 数据集仍然是网络入侵检测领域的事实 Benchmark，为基于计算智能的网络入侵检测研究奠定基础。

前 100000 条记录中攻击类型的分布如表 1 所示。

表 1.KDDCUP 前 100000 条记录攻击类型分布情况

normal	56237
buffer_overflow	5
loadmodule	2
perl	2
neptune	20482
smurf	19104

guess_passwd	53
pod	40
teardrop	199
portsweep	278
ipsweep	760
land	17
ftp_write	8
back	2002
imap	12
satan	539
phf	3
nmap	231
multihop	6
warezmaster	20

3.2 结果分析

本文实验首先从 kddcup.data_10_percent_corrected 数据集中提取了 100000 条记录生成相应的入侵检测规则，然后基于提取出的规则对未标记的测试数据进行了不同量级的测试，结果如表 2 所示。

表 2. 未知攻击检测算法结果

测试数据范围	检测正确率
10000 条	92.62%
100000 条	87.691%
200000 条	86.7025%
300000 条	87.1486%

从表 2 可以看出，在前 10000 条数据中，本文算法可以达到 92% 的准确率。在之后的 100000 条，200000 条和 300000 条数据的测试中，本文算法一直保持了高达 87% 的准确率，较好的解决了文章前

面提到的传统算法不能检测未知攻击以及统计分析不能保证检测的正确率等问题，其优势得以明显的体现。

4 小结

本文论述了一种基于改进的 Apriori 算法构建的入侵检测系统。首先通过 k-means 聚类方法对连续数据进行离散化，然后使用基于字典的 Apriori 算法挖掘攻击规则。实验证明该算法比传统的入侵检测系统更能准确的检测未知和已知攻击。如何更加精确的检测出攻击的类型和根据对应的攻击类型采取适当的应急措施是本文下一步的研究方向。

参考文献:

- [1] Flora S. Tsai. Network Intrusion Detection Using Association Rules[J]. International Journal of Recent Trends in Engineering, Vol 2, No. 2, November 2009.
- [2] 胡昌振.网络入侵检测原理与技术[M].北京理工大学出版社,1996
- [3] R. Agrawal, T. Imielinski, A. Swami. Mining association rules between sets of items in large databases[C]. ACM SIGMOD Conference on Management of Data (SIGMOD'93), 1993.4:307-328.
- [4] Mahbod Tavallae, Ebrahim Bagheri, Wei Lu and Ali A. Ghorbani. A Detailed Analysis of the KDD CUP 99 Dataset[C]. Proceedings of the 2009 IEEE Symposium on Computational Intelligence in Security and Defense Applications (CISDA 2009).
- [5] Pang-Ning Tan, Michael Steinbach, Vipin Kumar. Introduction to Data Mining[M].人民邮电出版社,2011.
- [6] 王宗晨. 基于数据挖掘的日志审计系统研究与实现[D]. 清华大学硕士论文,2008.
- [7] 王怡, 谢俊元. 入侵检测系统中关联规则挖掘技术

的研究[J]. 计算机科学, Vol35, No.10, 2008.

[D]. 哈尔滨工程大学硕士论文, 2007.

[8] 陈树刚. 关联规则挖掘在入侵检测系统中的研究

Apriori-based Network Intrusion Detection System

Wang Wen-jin^{1,2}, Liu Jun-rong¹, Liu Bao-xu¹

(1. Computing Center, Institute of High Energy Physics, CAS, Beijing 100049;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract: With the development of network communication technology, more and more social activities run by Internet. In the meantime, the network information security is getting increasingly serious. Intrusion Detection System(IDS) has greatly improved the general security level of whole network. But there are still many problem exists in current IDS, e.g. high leak rate detection/false alarm rates and feature library need frequently upgrade. This paper presents an association-rule based IDS. This system can detect unknown attack by generate rules from training data. Experiment in last chapter proved the system has great accuracy on unknown attack detection.

Keywords: Intrusion Detection; Association Rule Minding; Apriori; K-means Clustering

一种基于网络行为分析的木马检测模型

刘俊荣¹, 王文瑾^{1,2}, 刘宝旭¹

(1.中国科学院高能物理研究所计算中心, 北京 100049)

(2.中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 在分析现有木马检测技术的基础上, 该论文提出一种基于网络行为分析的木马检测模型。首先将木马网络行为进行抽象化描述, 然后根据某些特定的规则建立行为特征库, 进而利用支持向量机算法判断是否有木马入侵。最终利用该模型进行木马入侵检测实验, 实验表明了这种模型可以有效的检测木马。

关键词: 木马检测, 网络行为分析, Nprobe, SVM

文章分类: 计算机技术及应用的研究成果

1. 概述

2011年国内日均约853.1万台电脑遭到木马病毒等恶意程序攻击, 占每天开机联网的电脑比例约为5.7%, 相比2010年增长48.0%。其中1%-3%的电脑终端实际感染木马病毒, 主要原因为部分木马利用游戏外挂、盗版软件、视频等诱惑性网络资源伪装, 欺骗用户关闭安全软件防护^[1]。木马程序在数量上逐年递增, 造成了很大的危害。本文推出一种基于网络行为分析的木马检测模型, 实现对木马程序的检测。

2. 木马简介

木马是指附在应用程序中或独立存在的恶意程序, 主要采用客户端/服务器模式, 服务器端程序运行于被控制主机上, 远程客户端完成控制功能。客户端利用远程控制技术实现对感染木马的计算机进行控制, 进行恶意操作或窃取机密文件。

常用的按行为特征分类的木马检测方法有: 基于静态特征的木马检测方法和基于动态行为的木马检测方法。

2.1 基于静态特征的木马检测技术^[2]

静态木马检测技术通过检测木马程序在主机中驻留的静态特征进行判断, 包括木马程序在主机中放置的文件信息, 注册表信息等。静态的木马检测需要用户主动运行程序实现检测。木马的静态特征分为: 1. 木马在目标系统中生成文件及木马原始文件的特征字符串; 2. 木马在目标系统中运行时进程的名称; 3. 木马运行时打开的固定TCP/IP端口号; 4. 木马在目标系统中具体的启动加载方式; 5. 木马植入后在目标系统中的生成文件名、文件大小及所在目录等。静态木马检测技术的优点在于即使木马程序发生改变, 只要其特征不发生改变, 就能够很好地检测到木马程序, 误报率低。缺点是需要收集、提取大量的木马特征, 面对新的木马变种, 反应时间较长。

2.2 基于动态行为的木马检测技术^[3]

传统的基于静态特征的木马检测技术, 不仅面对已知木马的各种隐蔽和变化检测能力不足, 对于未知的木马更是无能为力。动态行为分析的木马检测技术就是控制木马植入、隐蔽和恶意操作行为所

需要的资源条件，监控木马运行、启动的隐蔽行为和恶意操作^[4]。根据监控这些动态行为，结合行为特征库对可疑程序是否是木马做出评估。主要监控的行为包括：1.对注册表操作监控；2.对系统端口和通信行为监控；3.对系统的进程进行监控；4.监视特定的 API 调用，发现木马的隐蔽和恶意操作行为；5.对文件目录操作监控。

本文建立在动态行为分析的基础上，提出一种基于网络行为分析的木马检测模型。

3. 体系框架与基本原理

3.1 网络行为分析

木马防护系统为系统的常驻进程，实时保护系统，对进程行为进行实时监控，利用网络行为分析技术，根据行为特征和基于 SVM 的木马网络行为分析算法，检测出可疑程序进程。系统结构示意图如图 1 所示。

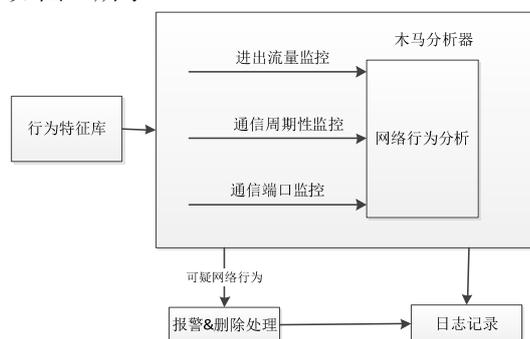


图 1 系统结构图

本文中的网络行为分析主要为三种：（1）流量监控；（2）通信时间监控（3）通信端口监控。

木马攻击的网络行为分析模块主要检测网络数据，首先通过 nProbe 获取所有网络数据信息，统计同一对地址之间传输的数据流量，并将这些数据流量划分为从外部网络流入内部的网络的数据流量（进流量）和从内部的网络流出到外部网络的数据流量（出流量）。

由于木马攻击行为的特点是从目标主机上隐秘的获取信息，所以如果出流量大于入流量，并超

过预设的阈值，则这种网络行为很可能是外部网络中的主机正在窃取内部网络主机中的重要信息，所以在检测到这种情况时立即做报警处理。

另一方面，目前很多木马程序在目标主机上种植木马服务器端，使目标主机自动连接木马客户端，这种行为往往是定时发生的，也就是说目标主机连接木马客户端在时间上具有周期性，所以通过检测内部网络中的主机向外部网络地址建立连接的行为是否具有周期性就可以有效的检测到这种反弹端口型木马攻击。在检测到内部地址与外部地址连接有周期性时立即报警处理。

此外，木马进行网络通信，大多数需要端口通信，监控目标程序的通信端口也是网络行为监控的一部分。

3.2 Nprobe^[5]

Nprobe 是一个能探测网络流量，并以 v5、v7、v9 及 IPFIX 等指定的格式输出，被大多数 OS 所支持(Wndows Solaris Linux MacOSX)。在未被指定输出格式的时候，默认以 V5 格式输出。nprobe 在 windows 中可以以服务的类型被启用，也可以应用进程的形式被启用。

CPU 占用率低，即有探针功能也有 flow 的收集能力，完全兼容 netflow v4/v5/v9 和 IPFIX，支持深度包检测，可以对 flow 和 packets 进行采样，还可以把 flow 以 txt 或二进制的形式保存在 MySQL 和 SQLite 中，而且是用户完全可配置的。

由于体积小，效率高，nProbe 容易被植入嵌入式系统。基于 libpcap 进行包捕获，并通过一个 hash 表建立维护 flow 状态，用户可通过更改 flow 属性参数对 NProbe 的输入输出进行控制。

本文中利用 NProbe 进行网络流量获取。

3.3 SVM

SVM^[6] 是从线性可分情况下的最优分类面发

展而来的，基本思想可用图 2 的二维情况说明。

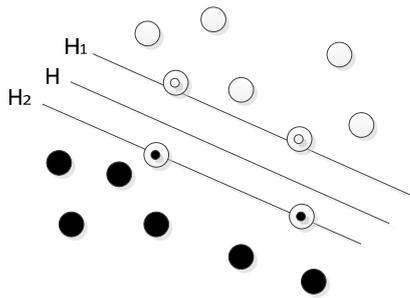


图 2 SVM 原理图

图中，实心点和空心点代表两类样本， H 为分类线， H_1 、 H_2 分别为过各类中离分类线最近的样本且平行于分类线的直线，它们之间的距离叫做分类间隔 (margin)。所谓最优分类线就是要求分类线不但能将两类正确分开 (训练错误率为 0)，而且使分类间隔最大。分类线方程为 $x^*w + b = 0$ ，我们可以对它进行归一化，使得对线性可分的样本集 (x_i, y_i) ，满足 $i = 1, \dots, n$ ， $x \in R^d$ ， $y \in \{+1, -1\}$ ，满足

$$y_i[(w^*x_i) + b] - 1 \geq 0, i = 1, \dots, n \quad (1)$$

此时分类间隔等于 $2/\|w\|$ ，使间隔最大等价于使 $\|w\|^2$ 最小。满足条件 (1) 且使 $\frac{1}{2}\|w\|^2$ 最小的分类面就叫做最优分类面， H_1 、 H_2 上的训练样本点就称作支持向量。

利用 Lagrange 优化方法可以把上述最优分类面问题转化为其对偶问题，即：在约束条件

$$\sum_{i=1}^n y_i \alpha_i = 0$$

和

$$\alpha_i \geq 0, i = 1, \dots, n$$

下对 α_i 求解下列函数的最大值：

$$Q(\alpha) = \sum_{i=1}^n \alpha_i - \frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^n \alpha_i \alpha_j y_i y_j (x_i x_j)$$

α_i 为原问题中与每个约束条件 (1) 对应的 Lagrange 乘子。这是一个不等式约束下二次函数

寻优的问题，存在唯一解。容易证明，解中将只有一部分 (通常是少部分) α_i 不为零，对应的样本就是支持向量。解上述问题后得到的最优分类

函数是

$$f(x) = \text{sgn}\{(w^*x) + b\} = \text{sgn}\left\{\sum_{i=1}^n \alpha_i^* y_i (x_i^*x) + b^*\right\}$$

式中的求和实际上只对支持向量进行。 b^* 是分类阈值，可以用任一个支持向量 (满足 (1) 中的等号) 求得，或通过两类中任意一对支持向量取中值求得。

在木马分析器中根据 $f(x)$ 的值判断程序的类别。

4. 试验及分析

本系统只对特定的程序进行监控，对系统效率不会造成明显影响。程序流程图如图 3 所示。

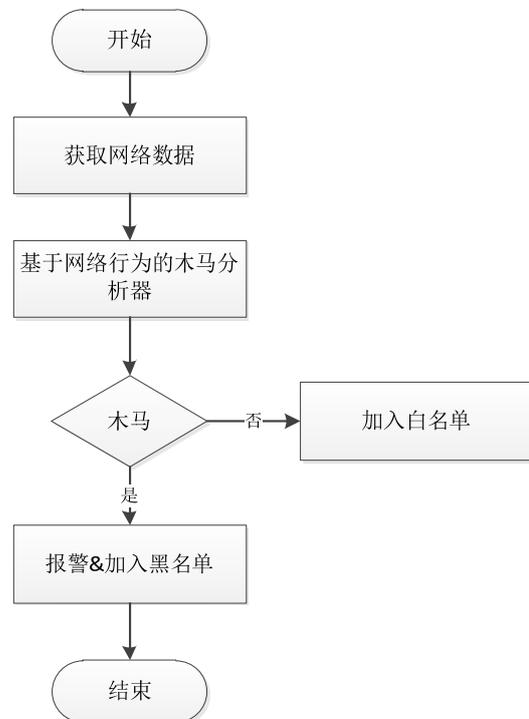


图 3 程序流程图

实验采用 150 个木马样本，50 个正常程序。木马网络行为特征库中共有 30 条木马网络行为特征，测试环境为 windows XP SP3。为了便于对实验结果进行分析，本文做以下定义：木马样本判断正确，定义为 TR；木马程序被判定为正常程序的情况，称为 TF；正常程序判断正确，称为 NR；正常程序被判定为木马程序的情况，称为 NF；测试指标

包括漏报率、误报率。其中漏报率为木马程序被报为正常程序的比例。误报率为正常程序被误报为木马程序的比例。

计算方式分别为：

$$\text{漏报率} = \frac{TF}{TR+TF} \quad (\text{公式 1})$$

$$\text{误报率} = \frac{NF}{NR+NF} \quad (\text{公式 2})$$

测试结果如表 1 所示。

表 1 测试结果

样本	TR	TF	NR	NF	误报	漏报
木马	136	14			90.6%	
普通			45	5		10%

5. 结束语

根据木马运行时的网络行为特征，设计并实现了基于网络行为分析的木马检测模型。介绍了系统的框架结构和关键技术，对其中的两个关键技术：Nprobe 技术和基于 SVM 的行为分析算法进行了描

述。通过对大量木马的测试表明，系统能比较准确的检测到木马的网络行为。由于木马的复杂性和多态性，下一步的工作需要通过实验提取更多的新型木马网络行为特征，进一步完善木马网络行为库内容，降低漏报率和误报率。

参考文献：

- [1] 《2011-2012 年度中国互联网安全报告》,360 安全中心,2012-02-20
- [2] 李晓东,罗平,曾志峰. 利用木马的自启动特性对其进行监控[J]. 计算机应用研究, 2007, 24(5): 141-143.
- [3] 陈婧婧, 李焕洲, 唐彰国等. 木马运行机制及行为特征分析[J]. 计算机安全, 2009, (10): 108-110.
- [4] 朱明,徐骞. 木马病毒分析及其检测方法研究[J]. 计算机工程与应用,2003,39 (28) :176-179.
- [5] <http://www.ntop.org>
- [6] 萧嵘,王继成,孙正兴,张福炎. 一种 SVM 增量学习算法[J]. 南京大学学报(自然科学版), 2002,(02).

Trojan Detection Model Based on Network Behavior Analysis

Liu Jun-rong¹, Wang Wen-jin^{1,2}, Liu Bao-xu¹

(1. Computing Center, Institute of High Energy Physics, CAS, Beijing 100049;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract: Based on the analysis of existing Trojan detection technology, this paper presents a Trojan detection model based on network behavior analysis. First of all, we abstract description of the Trojan network behavior, then according to certain rules to establish the characteristic behavior library, and then use the support vector machine algorithm to determine whether a Trojan invasion. Finally, through the intrusion detection experiments, shows that this model can effectively detect Trojans.

Keywords: Trojan Detection; Network Behavior Analysis; Nprobe; SVM

一种基于以太网收发机的远程辐射监测

彭婧, 房宗良, 徐权周, 曹剑锋, 文其林

(防化学院, 北京 102205)

摘要: 辐射监测的工作方式从过去的人员进驻现场监测逐步演变成布设智能探头, 借助无线通讯设备远程监控方式, 这种方式避免辐射对人体造成的伤害, 又能将测量数据准确实时的获取。本文详细阐述了利用 iNET300 无线 IP/以太网收发机, 远程实时回传数据的通讯方式, 以及远程监控软件的设计方法。

关键词: 辐射测量; 远程监控; 无线收发机

文章分类: 计算机技术及其应用的研究成果

随着人类对于环境辐射重视程度的日趋增强, 同时切尔诺贝利核电站和日本福岛核电站等大型事故的发生也向人们敲响警钟, 当核事故突然发生时, 我们必须有一定的应对措施和处置方法, 必须及时对事故发生的态势有准确的监控, 避免辐射对人体造成严重的伤害。于是辐射测量的工作从过去人员进驻现场测量方式逐渐转换为多点布设远程监控方式或物联网组网监控方式, 基于无线通讯传输模块的远程辐射监控系统应运而生。

1 远程辐射监控系统框架

本文介绍的远程辐射监控系统框架如图 1 所示, 智能谱测量探头和智能剂量率探头对 γ 剂量率、 γ 谱数据进行测量, 然后将结果传输给数据采集单元, 数据采集单元再通过串口或网口与以太网收发机 (Remote) 相连, 以太网收发机 (AP) 通过串口或网口与上位机相连, 无线收发机设备之间按照无线通信协议传输数据。

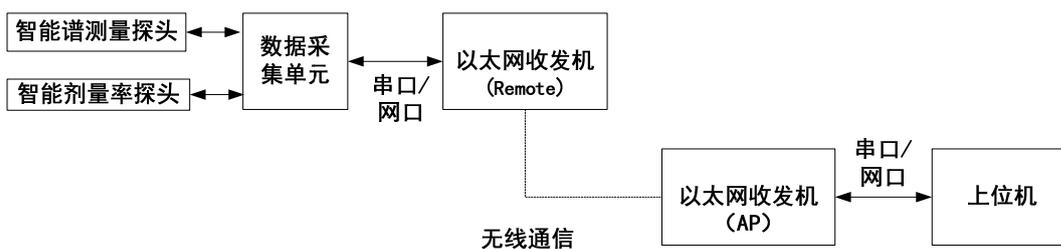


图 1 远程辐射监控系统框架

2 iNET300 无线 IP/以太网收机^[1]

iNET 300 收发机是为了解决无线以太网长距离连接而设计的。收发机有两种模式—AP (结点) 和 Remote (远程), AP 即为 Access Point-- 结点模式, Remote 即为远程模式。

Remote 远程单元可以有三种类型—网桥、串口网关、和双网关。收发机可以被用户设置为 AP 或 Remote, 也有一些限制。仅双网关的 Remote 才能被配置为 AP, 网桥和串口网关不能被配置为 AP, 除非它们首先升级到双网关类型。

2.1 收发机的配置参数

在一个链接被建立前，收发机有两个基本的设置，它们是：

- Device Mode—Access Point，或 Remote。
- Network Name—所有单元的通用标识符，同一网络的一部分。

Remote 单元和 AP 单元网络名称必须要相匹配。

需要检查或调整的参数如下：

- IP Address—通过局域网或无线网络，必须有唯一的地址允许访问菜单系统。（如：192.168.1.1）

- RF Output Power Level—为了遵守无线通讯标准相关规定，该指标必需调整为默认的正37dBm。

- Data Rate—在当前的信号电平，AUTO 选择（默认）允许传输的最大速率。较强的信号，较高的数据速率时可用的数据速率是 256kbps 和 512kbps。

无论通过局域网口还是空中远程访问菜单系统，必须有唯一的 IP 地址和子网掩码。

2.2 设置收发机的配置

使用直连线，连接电脑的串口到电台的 COM1 口。

运行 PC 机上的超级终端，设置串口参数为：波特率 19200bps，8 为数据位，无校验位，1 位停止位，无握手协议。

超级终端将打印菜单系统，选择进入主菜单，选择进入 Network Configuration Menu，配置电台的网络名称，检查其它的设置和必要的更改，如单元密码，IP 地址和安全性。

2.3 设备连接方式

连接以太网：

连接兼容以太网的数据设备到收发机的

LAN 口，使用一根直连以太网线连接到 LAN 口到 HUB，和用一个交叉线直接连到以太网 PLC/RTU。

IP-to-Serial：

- a、使用交叉线连接串口设备到电台的 COM2 口。

- b、配置端口。

- c、从电脑，建立一个 TCP 连接到 Remote 收发机的 IP 地址到 IP 口。Telnet 应用程序可以建立这种连接。数据现在可以在电脑和 RTU 或其它的连接设备间被发送。

2.4 iNET300 无线 IP/以太网收机性能指标

iNET300 无线 IP/以太网收机温度范围为 -30℃到 +60℃，湿度范围为 95% 在-40℃，电源为 10-16Vdc（13.8Vdc，标准），发射功率为 8W，接收功率为 2.8W。

iNET300 无线 IP/以太网收机不同于其它无线通讯设备的优点是它具有高速的无线传输速率。常见的 1024 道 chn 格式 γ 谱数据大小为 4.03KB，对于一般远程通讯设备串口无线传输的波特率只有 9600bps，传输谱数据时需要数十秒的时间，数据回传的实时性不好，而 iNET300 无线 IP/以太网收机最高速率可到 256kbps 甚至是 512kbps，对谱数据的回传工作能在 1 秒内完成，高速、稳定的传输特性是本文选择该模块做无线收发器的原因。

3 远程监控软件设计

智能探头在测量过程中将所处地域的 γ 剂量率信息、 γ 谱信息通过以太网接收机 Remote 模块发送给接收机 AP 模块，接收机 AP 模块再直接传输给远程控制上位机，分析数据、解析并显示的工作由远程监控软件完成。同时远程监控软件还可发送指令对探头参数进行设置，也可做进

一步的数据处理操作。

远程监控软件采用 Microsoft Visual Studio 6.0 集成开发环境开发,该软件设计基于串口通信技术,可实现实时剂量率数据动态显示、实时谱图显示和控制操作。

3.1 实时谱图显示和存储

实时谱图可显示辐射测量远程监控系统传回的谱数据,如图 2 所示。谱图显示界面横轴表示 0-1024 道,纵轴表示多道计数值,显示时用黄色绘制了网格线,按计数值标定了坐标轴取值,方便用户查看每一道的结果,每次接收到谱图后会按最大值更新坐标信息。监控软件还具有自动存谱的功能。

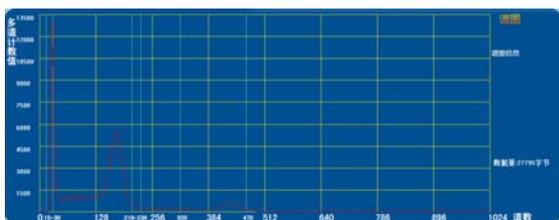


图 2 实时谱图显示

3.2 实时剂量率动态曲线显示

实时显示剂量率的动态曲线,如图 3 所示。每接收到一个新的剂量率数值时,会刷新剂量率动态谱线一次,历史的记录往前推移,当前剂量率为曲线最左处点,曲线形成动态滚动方式。

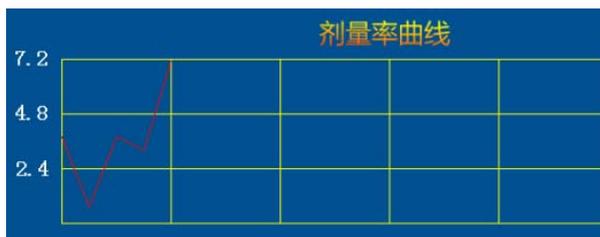


图 3 剂量率动态显示曲线

3.3 远程控制和参数设制

远程监控软件可对智能谱测量探头和智能剂量率探头进行远程控制,可发送指令开启、停止、重启探头的采集工作,可通过指令设置探头温度、高压、放大倍数等参数信息,并进行刻度与校准工作。

3.4 进一步的数据处理

远程监控软件在获取测量数据的同时,可进行 γ 剂量率的本底测量、扣除本底等处理,也可对 γ 谱数据做核素识别等专业分析处理。

4 结束语

基于 iNET300 无线 IP/以太网收发机的辐射测量远程监控系统在实际应用中取得了优良收效,实时回传、远程监控、控制的效果明显。

参考文献:

[1] 深圳市华夏盛科技有限公司. iNET300 无线 IP/以太网收发机使用手册

A long-distance radiation monitoring based on wireless transceiver

Peng Jing, Fang Zong-liang, Xu Quan-zhou, Cao Jian-feng, Wen Qi-lin

(Insitute of chemical Defense, Beijing 102205)

Abstract: The mode of radiation monitoring change form fieldwork to long-distance monitoring with wireless communication equipment.This mode averts the radiation damage to body ,and receives Real-time surveying date.This is an article on Real-time surveying date transmission and the design of long-distance monitoring software by iNET300 wireless transceiver.

Key words: radiation monitoring; long-distance monitoring; wireless transceiver

以太网技术在核辐射监测系统中的应用

张怀强^{1,2}, 汤彬¹, 吴和喜²

(1. 东华理工大学核技术应用教育部工程研究中心, 南昌, 330013;

2. 东华理工大学核工程学院, 江西抚州, 344000)

摘要: 随着核技术在众多领域的应用和核电的发展, 放射性物质对人类的危害、环境的污染越来越受到人们的关注。核辐射监测系统可对工作场所与环境中的放射性水平进行监测。在监测系统中引入以太网技术, 利用以太网的通讯功能将核辐射监测系统现场的监测点、监控中心与数据库系统有效的连接起来, 使得监控人员可在任何具有以太网接口功能的地方实现对现场监测点的控制、数据采集以及传输, 在远程数据服务器上实现数据的显示、分析与处理, 同时将以太网供电功能引入到监测系统中, 对现场监测点提供电力。通过测试, 基于以太网的核辐射监测系统使用方便、便于维护, 具有一定的实用性与经济性。

关键词: 核辐射监测; 以太网供电; TCP/IP

文章分类: 计算机技术及其应用的研究成果

近年来, 随着核技术在众多领域的应用, 放射性物质对人类的危害、环境的污染以及核安全越来越受到人们的关注。为了有效地防止放射性物质对职业工作人员、公众身体的危害, 对环境的污染和核事故的发生, 建立科学完善的核辐射监测系统显得尤为重要^[1]。国内一些科研单位开发了相关的核辐射监测系统, 如多路 γ 辐射在线剂量监测系统^[2]和基于PC的简便连续的 γ 辐射监测系统^[3], 随着网络技术与计算机技术的发展, 浙江大学开发了基于DDN网络的环境辐射监测系统和核事故应急环境辐射实时移动监测系统^[4]以及成都理工大学开发了基于CAN网络的环境辐射监测系统^[5]。针对上述辐射监测系统在通讯功能的局限性以及通用性方面的缺点, 本文在核辐射监测系统中引入了以太网技术, 对工作场所或是环境中多种放射性辐射进行全天24小时的不间断在线监测, 可以在任何具有以太网接口功能的地方实现核辐射测量仪器的控制、数据采集与传输, 并在远程数据服务器上进行数据的

处理、显示与分析, 对工作场所或是环境中的放射性水平进行及时地分析和对异常情况及时发现并处理。

1 核辐射监测系统的组成

核辐射监测系统是一个分布式的数据采集、传输、存储、处理和信息的系统。整个系统分为三部分: 现场监测点, 监控中心与数据库系统, 多个无人值守的现场监测点对各种核辐射的信息与参数进行采集、处理, 并将数据通过以太网传输给

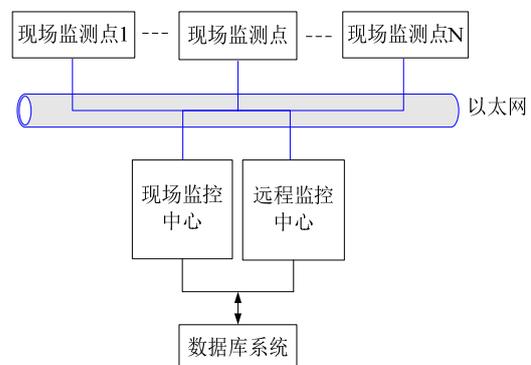


图1 核辐射监测系统结构图

监控中心，监控中心在控制现场监测点的同时，把数据传输至数据库系统，以进一步处理、显示、查询、统计、分析。监测系统的组成结构如图1所示。

2 系统的硬件设计

系统的硬件设计包括现场监测点与以太网接口部分，其中的每个现场监测点实际上是一台核辐射剂量测量仪。同时本系统引入的以太网技术在实现数据传输与命令通讯的同时，还引入了以太网供电技术，给现场监测点进行供电。因而主要的硬件部分包括现场监测点模块、以太网通讯模块以及以太网供电模块。

2.1 现场监测点的设计

每个现场监测点实际上是一台核辐射剂量测量仪，主要的结构如图 2 所示，该现场监测点中的探测器可以针对不同的测量对象（ γ ， β ，中子或是 X 射线等）进行选择，得到的辐射剂量数据实现在线显示或是通过以太网进行传输给监控中心，当超过设定的阈值，进行报警提示。同时每个现场监测点引入以太网进行供电。

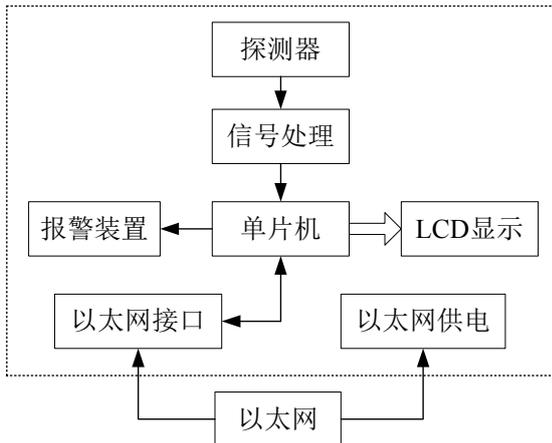


图 2 现场监测点结构框图

2.2 以太网接口电路

系统选用 Philips 公司的 P89C669 单片机，其含 Flash 程序存储器，可实现在系统编程，使得设计开发阶段非常方便。而网络芯片选用的 RTL8019 是台

湾 Realtek 公司的一种高度集成的全面支持 IEEE802.3 标准的以太网控制器芯片，支持微软的 PnP(即插即用)规范，能够同时接收和发送数据。74ALS373 为地址锁存器。具体连接如图 3 所示：

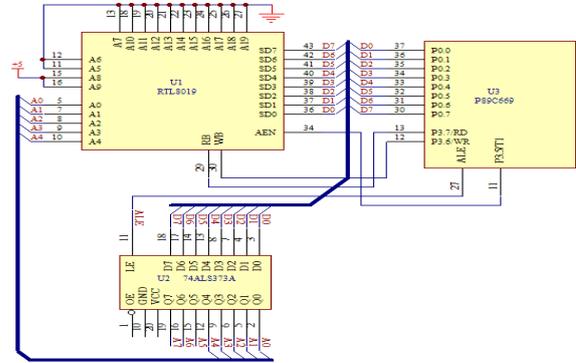


图 3 以太网接口电路图

2.3 以太网供电

以太网供电（PoE— Power over Ethernet）是利用现有的网络 5 类（CAT-5）数据电缆传输直流电源，在传递信号的同时也将电源传递给用电设备，不必再单独铺设电力线。这样大大简化了布线，降低了网络基础设施的建设成本。

在 PoE 系统中，提供电源的设备被称为供电设备（PSE — Power Sourcing Equipment），而使用电源的设备称为受电设备（PD — Power Device）。PSE 输出功率限制为每个 RJ45 端口 15.4W，PD 的功耗限制在 12.95W。其中 PSE 负责将电源注入以太网线，并实施功率的规划和管理。PSE 利用信号线对或备用线对提供 44V 到 57V（额定 48V）的直流电源。电源以共模方式施加在对绞线上，由于耦合变压器的隔离，也不会对数据收发器产生影响。

核辐射监测系统中任何连接到以太网并能在 13W 或更低功率下工作的现场监测点都可无需 AC 电源或电池供电，仅从 RJ45 插座就能够得到相应的电力。以太网供电具有图 4 所示的两种方案，本系统采用备用线供电的方式，将数据线与电源线分

开。以太网供电技术采用凌力尔特公司的供电设备控制器芯片组 LTC4270/LTC4271 实现。

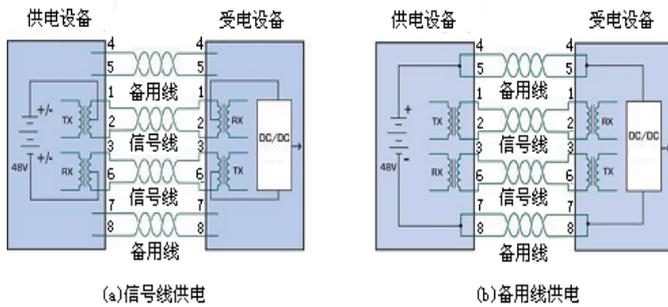


图 4 PSE 向 PD 输送电力的两种方式

3 系统的软件设计

核辐射监测系统需要实现以太网的通讯功能，在单片机中应用TCP/IP协议的关键是如何设计出精简、高效的TCP/IP协议子集，以此来减少对系统资源的占用^[6]。以太网中数据传输的方式分为TCP（传输控制协议）与UDP（用户数据报协议）两种，TCP方式的端与端之间必需通过三次握手建立连接并保持连接才能通信，同时为了保证数据的可靠传输，TCP设计并实现复杂的应答机制、超时与重传机制等。UDP不需要建立三次握手连接，由于没有后续的控制机制，其数据传输不可靠，故UDP协议适合实时性要求较高、而可靠性要求较低的场合。本核辐射监测系统选择UDP传输协议，主要原因在于：UDP协议消耗的资源少，实时性好，非常适合嵌入到单片机系统中；监测系统只有少量重要命令的传输要求较高的可靠性；利用UDP的广播、组播机制可有效的提高数据发送的效率；UDP协议简单易于修改，具有良好的扩展性。

TCP/IP是几百种网络协议的集合。需要进行精简以适应单片机的嵌入式系统中。系统设计出一个较为精简的TCP/IP协议子系统。具体如表1所示。在链路层，由于采用以太网的接入方式，系统必须要实现IEEE802.3所规定的CDMA/CD协议。此协议只要采用通用的以太网接口芯片就可支持。其次，

表1 精简的TCP/IP协议子系统

层次	需要实现的协议
应用层	无
传输层	UDP
网络层	IP、ICMP
链路层	ARP应答协议

为了保证系统在以太网中的通信，系统还需实现ARP应答协议，该协议用于将IP地址映射成以太网MAC地址。ARP的执行依靠映射表来完成IP地址和MAC地址的映射。在网络层，IP协议是TCP/IP协议的基础，它可以为不同网络的主机之间发送数据报的操作序列提供无连接的服务。在传输层，考虑到所要传输的核数据类型、系统简化及速度要求，采用了UDP协议，为确保UDP数据的到达，在应用程序中采用了重复发送、回复确认的方式来保证数据的正确性^[7]。

在监控中心采用LabVIEW开发了图形化的监控软件，能够实时的显示出每个监测点的监测结果、指示灯报警提示，同时提供数据查询功能，实现数据报表的管理，主控界面如图5所示，系统测试只采用了两个监测点。



图 5 辐射监测主界面

4 结论

本文将以太网技术引入到核辐射监测系统中，

实现测量数据与命令传输的以太网通讯功能的同时,采用以太网接口中的备用线给现场监测点提供电力。系统可实现远程监控,并将测量数据上传到数据库系统中,以供保存、查询以及进一步处理,该系统设计成本低,使用灵活,便于维护与扩展,具有一定的经济性,实用性与可靠性。

参考文献

- [1] 龚迪琛, 方方, 马雄楠等, 环境放射性网络监测系统的设计和实现[J], 核电子学与探测技术, 2009、29 (2)、316-319
- [2] 马国华, 杨元第, 多路 γ 辐射在线剂量监测系统的研究[J], 现代测量与实验室管理, 2003 (4)、8-10

- [3] 杨伟耿, 基于PC的简便的连续 γ 辐射监测系统[J], 核电子学与探测技术, 2000、20 (5)、357-360
- [4] 汪伟, 张宏建, 核事故应急辐射环境实时移动监测系统研究[D], 浙江: 浙江大学, 2003
- [5] 周建斌, 朱星, 方方等, 基于CAN网络的环境辐射监测系统的研究[J], 核电子学与探测技术, 2010、30 (1)、100-103
- [6] 戚新波, 范峥等, 嵌入式网络仪器的研究与实现[J], 微计算机信息, 2005、21 (9)、16-18
- [7] 张怀强, 葛良全, 熊盛青, 嵌入式网络化核辐射测量仪器的设计[J], 核电子学与探测技术, 2009、29 (6)、1268-1271

Ethernet technology in the nuclear radiation monitoring system

Zhang Huai-qiang^{1,2}, Tang Bin¹, Wu He-xi²

(1.Engineering Research Center of Nuclear Technology Application (East China Institute of Technology), Ministry of Education, Nanchang , Jiangxi, 330013;

2. School of Nuclear Engineering and Technology, East China Institute of Technology, Fuzhou, Jiangxi, 344000)

Abstract: With the application of nuclear technology in many fields and development of nuclear power, the people pay more and more attention to which the radioactive substances are harmful to the human, environmental pollution, the nuclear radiation monitoring system can monitor the levels of radioactivity in the workplace and the environment. The introduction of ethernet technology in monitoring system, the on-site monitoring points, monitoring center and database systems can be connected to each other,the worker can achieve control of monitoring points, data acquisition and transmission in any of the ethernet interface functions, complete data display, analysis and processing in the remote data server, and provide electricity on-site monitoring points in the monitoring system.Acorrding to the test, the nuclear radiation monitoring system which based on ethernet is easy to use and maintain, with a certain degree of practicality and economy.

Keywords: Nuclear radiation monitoring system; Power over Ethernet; TCP/IP

应用于高能物理实验数据的基数排序算法

湛炫^{1,2}, 顾旻皓^{1,2}, 朱科军^{1,2}

(1. 核探测与核电子学国家重点实验室, 北京 100049; 2. 中国科学院高能物理研究所, 北京 100049)

摘要: 在高能物理实验中, 所产生的实验数据通常是海量的, 在数据获取系统中如何按照特定的要求高效地对这些数据进行排序以满足后续工作中的需要是一个非常重要的问题。为了满足高能物理实验中对海量数据进行排序的需求, 本文结合高能物理实验数据通常以时间进行标记的特点, 提出并实现了一种基于基数排序的排序算法, 给出了算法的描述、算法的分析、算法的实现以及实验结果。该算法能很好地适应高能物理实验数据, 时间复杂度为 $O(n)$ 。

关键词: 高能物理; 时间标记; 基数排序; 计数排序

文章分类: 计算机技术及其应用的研究成果

1 引言

从上个世纪六十年代开始, 高能物理实验一直在不停地探索更为前沿的物理学。现在大型高能物理实验通常有上百万的电子学通道, 数据获取系统要以兆赫兹的频率完成工作, 这就意味着在现在的高能物理实验中, 将在短时间内产生大量的数据。这些数据通常是用时间进行标记, 我们可以将这个时间标记定制为我们熟悉的小时、分、秒、毫秒、微秒等单位制表示方式。对于这样大量的数据, 通常我们需要对其进行各种操作, 排序就是其中一种。

常见的排序算法分为两类: 一类是基于比较的排序, 如插入排序、冒泡排序、归并排序、快速排序等, 这些排序算法的排序结果中, 各元素的次序基于输入元素间的比较。可以证明这类基于比较的排序算法运行时间的下界是 $\Omega(n \log 2n)$ [1]。另一类是非比较排序, 这类排序通常根据各元素的分布情况进行一定的计数统计, 最终通过统计结果得到元素的次序, 其时间复杂

度可突破 $\Omega(n \log 2n)$ 的下界。

基于高能物理实验数据以时间进行标记的特点, 本文提出了一种结合计数排序和基数排序的非比较排序算法。该算法能很好地适应高能物理实验数据特点, 时间复杂度为 $O(n)$ 。



图 1 高能物理实验数据结构

2 算法介绍

2.1 基数排序

基数排序^[1]假设对 n 个数据元素进行排序, 每个元素的排序关键字都有 d 位, 则可以对这 n 个数据元素从高位到低位或者从低位到高位依次内排序并最终实现对这 n 个整数的排序。假设 A 是长度为 n 的数组, A 中每个数据元素排序关键字都有 d 位, 其中第 1 位是最低位, 第 d 位是最

高位。采取低位优先的基数排序算法描述如下：

RADIX-SORT(A, d)

1 for i <- 1 to d

2 使用一种稳定排序算法对 A 中数据元素的第 i

位进行排序

使用低位优先的基数排序算法对 5 个 3 位数的排序过程如表 1 所示：

表 1 低位优先的基数排序对 5 个 3 位数的排序过程

原数据	对个位进行排序	对十位进行排序	对百位进行排序
152	250	229	152
566	152	250	229
589	566	152	250
229	589	566	566
250	229	589	589

考虑高能物理实验数据以时间作为关键字进行标记的特点（这里作简化处理，假设时间只包含分、秒、毫秒三个域），可以把数据的时间关键字看作如下形式：

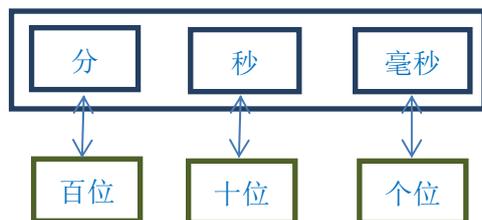


图 2 时间标记数据与十进制 3 位数据的格式对照

这就类似十进制的 3 位数。当需要对时间进行排序时，可以采用低位优先的基数排序算法依次对毫秒位、秒位、分位进行排序，最终完成对数据的排序。

关于基数排序算法很重要的一点是按位排序要稳定，从上面的例子中可以看出，如果按位排序不稳定，在对新的数位排序的过程中就可能打乱对之前数位的排序而导致算法不能正确完成排序，这就涉及到如何选择中间排序算法的问题。下面将介绍一种叫做计数排序的稳定排序算法。

2.2 计数排序

计数排序^[1]假设 n 个输入数据元素的排序关键字中的每一个都是介于 0 到 k 之间的整数，此处 k 为某个整数。计数排序的基本思想是对每一个输入元素 x，确定出小于 x 的元素个数，这样就可以把 x 直接放到它在最终输出数组中的位置上。假设 A 是长度为 n 的数组；B 是长度为 n 存放排序结果的数组；C 是长度为 k+1 存放计数统计的数组。计数排序算法描述如下：

COUNTING-SORT(A, B, k)

1 for i <- 0 to k

2 do C[i] <- 0

3 for j <- 1 to length[A]

4 do C[A[j]] <- C[A[j]] + 1

5 for i <- 1 to k

6 do C[i] <- C[i] + C[i - 1]

7 for j <- length[A] downto 1

8 do B[C[A[j]]] <- A[j]

9 C[A[j]] <- C[A[j]] - 1

前面对高能物理实验数据时间关键字的简化处理后，关键字有三个域，它们各自的取值范围明确地限定在一定的范围内，比如“分”的取值范围是[0, 59]，“秒”的取值范围是[0, 59]，“毫秒”

的取值范围是[0, 999]。基于这样的数据特点，可以对上面计数排序做一些修改，即在对“分”、“秒”和“毫秒”的进行排序时，分别取 k 值为 59、59 和 999。这样能很好的适应高能物理实验数据的特点。

计数排序在排序过程前后不会改变具有相同关键字的元素的相对次序，这是计数排序的一个重要的性质，即稳定性。这个性质在卫星数据需要随被排序的元素一起移动时是非常重要的，而高能物理实验数据正好具有这样的特点。

2.3 结合计数排序的基数排序

基数排序需要选择一个稳定的中间排序算法来对数据的各个数位进行排序，上面介绍的计数排序正是一个稳定的排序算法，因此可以选择计数排序作为基数排序的中间算法。假设 A 是长度为 n 的数组，A 中每个数据元素排序关键字都有 d 位，其中第 1 位是最低位，第 d 位是最高位；B 是长度为 n 存放排序结果的数组；K 是长度为 d 存放数据元素排序关键字各位 k 值的数组。结合计数排序的基数排序算法如下：

```

RADIX -COUNTING-SORT(A, B, K, d)
1 for i <- 1 to d
2   COUNTING-SORT(A, B, K[i])
3   for j <- 1 to length[A]
4     A[j] = B[j]
    
```

结合前面所述高能物理实验数据的特点，该排序过程即针对数据元素排序关键字的“分”、“秒”和“毫秒”这三个域，采用低位优先的方式分别

调用计数排序，然后将每次排序结果保存下来作为下一次计数排序的输入，完成对数据元素排序关键字所有域的计数排序后也就实现了对整个数据的排序。

3 算法分析

3.1 算法时间复杂度

分析计数排序可知，第 1-2 行 for 循环所用时间为 $O(k)$ ，第 3-4 行 for 循环所用时间为 $O(n)$ ，第 5-6 行 for 循环所用时间为 $O(k)$ ，第 7-9 行 for 循环所用时间为 $O(n)$ ，这样总的时间为 $O(k+n)$ 。根据高能物理实验数据的实际情况，这里 k 是常数，所以计数排序算法的时间复杂度为 $O(n)$ 。

对于结合计数排序的基数排序，第 2 行调用计数排序所用时间为 $O(n)$ ，第 3-4 行保存此次计数排序结果所用时间为 $O(n)$ ，所以整个 for 循环所用时间为 $O(dn)$ ，而针对高能物理实验数据的实际情况，这里 d 为常数，所以这里结合计数排序的基数排序时间复杂度为 $O(n)$ ，这个时间复杂度突破了基于比较的排序算法的下界 $\Omega(n \log_2 n)$ ，是能很好适应高能物理实验数据并且非常高效的一种算法。

3.2 算法实验

下面是对插入排序、快速排序和本文中提出的结合计数排序的基数排序进行多次随机数据测试取平均值得到的结果。

表 2 随机数据

	1 万	5 万	10 万	15 万
插入排序 (秒)	0.4748124	12.6790326	47.033886	108.1055356
快速排序 (秒)	0.0047062	0.0284178	0.062906	0.0979182
基数排序 (秒)	0.0008162	0.00475524	0.0138398	0.023450

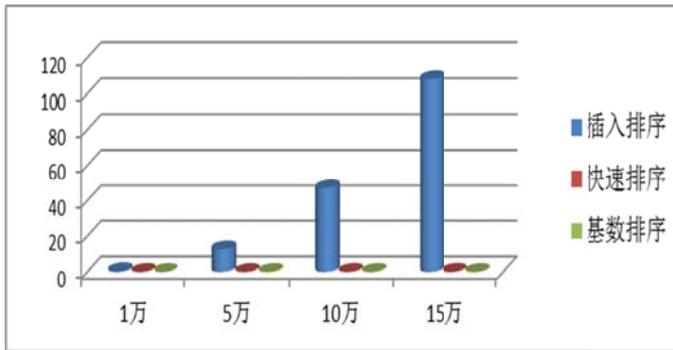


图 3 随机数据

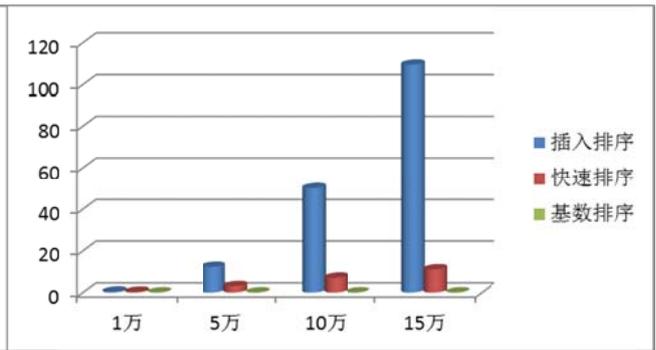


图 4 分段有序数据

由于在 高能物理实验中，每个电子学通道产生的数据通常是基于时间的有序数据，而不同的电子学通道产生的数据之间并非基于时间的有序

数据，所以在对算法的测试中，除了测试随机数据外，还测试了由多组有序子序列合并的分段有序数据。结果如下：

表 3 分段有序数据

	1 万	5 万	10 万	15 万
插入排序 (秒)	0.436084125	12.27214538	50.06480188	109.4273941
快速排序 (秒)	0.37580875	3.062451	7.110748125	11.1119805
基数排序 (秒)	0.00082	0.004785375	0.0132515	0.02281125

对于随机数据和分段有序数据，结合计数排序的

基数排序随着数据量的增长曲线如图。

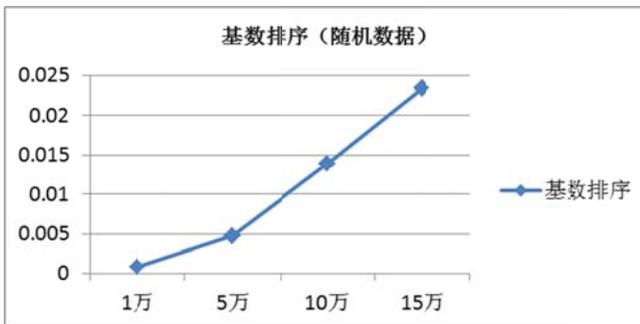


图 5 随机数据

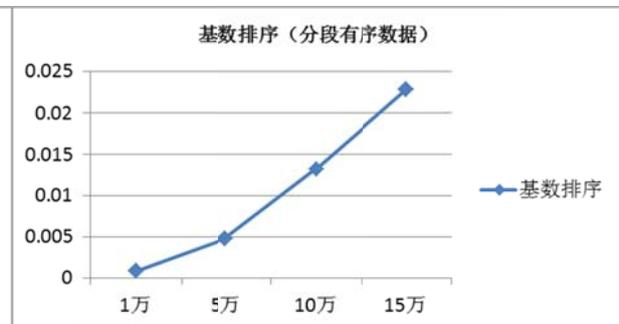


图 6 分段有序数据

4 结论

为满足高能物理实验中对海量数据进行高效排序操作的需求，本文针对高能物理实验数据的特点，提出并实现了结合计数排序的基数排序算法。该算法时间复杂度为 $O(n)$ ，突破了基于比较

的排序算法的下界 $\Omega(n \log_2 n)$ ，是一种能很好地适应高能物理实验数据特点的简单高效的排序算法。

参考文献

- [1] Cormen T H. Introduction to Algorithms [M].[s.l.]: The MIT Press, 1990.

Application of Radix Sorting in High Energy Physics Experiment

Chen Xuan^{1,2}, Gu Minhao^{1,2}, Zhu Kejun^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Particle Detection and Electronics, Beijing 100049;

2. Institute of High Energy Physics, CAS, Beijing 100049)

Abstract: In the high energy physics experiments, there are always requirements to sort the large scale of experiment data. To meet the demand, this paper introduces one radix sorting algorithms, whose sub-sort is counting sorting and time complex is $O(n)$, based on the characteristic of high energy physics experiment data that is marked by time stamp. This paper gives the description, analysis, implementation and experimental result of the sorting algorithms.

Key words: high energy physics, time mark, radix sorting, counting sorting

有源中子多重性测量计算机模拟研究

黎素芬, 张全虎, 弟宇鸣, 管才路, 贾小龙

(第二炮兵工程大学, 西安 710025)

摘要: 有源中子多重性测量是分析铀部件质量属性的重要技术之一, 本文在深入研究其测量原理和过程的基础上, 利用蒙特卡罗粒子输运程序, 以铀材料为对象, 针对有源井型符合计数器建立计算模型, 实现了有源中子多重性测量全过程模拟, 包括中子的产生、输运、俘获、移位寄存器处理等过程, 最终得到铀材料的质量属性, 质量已知值与模拟测量值相对偏差在 10%左右。

关键词: 质量属性; 中子多重性; 计算机模拟; 有源井型符合计数器

文章分类: 计算机技术及其应用的研究成果

引言

中子多重性测量^[1] (Neutron Multiplicity Counting-NMC) 技术是无损分析 (Non-Destructive Assay-NDA) 技术中最先进的技术之一, 是中子符合测量技术的继承和发展, 通过测量中子多重性分布, 得到核材料的质量属性。该方法无需标准样品刻度, 测量时间短, 测量精度高^[2], 已逐渐成为国际普遍采用的一种中子测量分析方法, 在国际核保障以及核武器军控核查等领域都具有广泛的应用^[3]。

铀材料中子多重性测量采用有源中子多重性测量 (Active Neutron Multiplicity Counting-ANMC) 技术, 通过分析一重、二重和三重计数率得到质量、中子增殖和 (α, n) 反应系数等样品信息。ANMC 技术对 HEU 样品进行类似的分析^[5], 采用有源井型符合计数器 (AWCC) 和外置中子源 (一般为 AmLi 源) 来诱发 HEU 样品中 ^{235}U 裂变放出中子, 分析一重、二重和三重计数率来得到样品自增殖系数、耦合系数和中子诱发裂变率等参数, 进而求解“点模型”测量方程得出 ^{235}U 质量^[6]。本文首先介绍有源中子多重性测量技术原理和方法; 然后, 结合特

定的多重性计数装置对 ANMC 技术进行了计算机模拟研究; 最后, 给出了研究结果并进行了讨论。

1 有源中子多重性测量技术原理和方法

有源多重性计数分析方法与无源多重性分析方法类似, 都是基于一重、双重和三重中子计数率, 二者主要的区别是前者增加了外加 AmLi 中子源, 能够引起 ^{235}U 的裂变。因此, 在有源中子多重性计数分析中, 裂变率并不是自发裂变率, 而是诱发裂变率, 此外, 总中子计数率受 AmLi 源影响较大, 通常对分析检验没有用处。同理, (α, n) 参数“ α ”, 也无法利用, 需要额外的信息来描述 AmLi 中子源与样品信息的联系^[7]。

有源中子多重性分析方程同样基于“点模型”假设, 若实际测量的几何尺寸和样品与假设不完全一致, 就会产生误差, 对大体积样品, “点模型”关于中子探测器探测效率和裂变率的假设并不总是正确的。

有源中子多重性计数器测量得到的一重、二重、三重计数率 (S、D、T) 由下式给出^[8]:

$$S = S_0 + B + S_s + FM \epsilon_f \nu_{s1} \quad (1)$$

$$D = \frac{F \varepsilon_f^2 f_d \nu_{s2}}{2} \cdot C_d \quad (2)$$

$$T = \frac{F \varepsilon_f^3 f_t \nu_{s3}}{6} \cdot C_t \quad (3)$$

其中: S_0 --AmLi源计数率, 与样品无关;

B--本底计数率;

S_s --样品对AmLi源 S_0 的散射和自吸收;

F--样品诱发裂变率;

M--中子增殖系数;

ε_f --诱发裂变中子探测效率;

$\nu_{s1}, \nu_{s2}, \nu_{s3}$ --AmLi诱发 ^{235}U 裂变1、2、3阶矩(与PNMC的定义不同);

C_d --二重自增殖修正因子;

C_t --三重自增殖修正因子;

f_d --双重符合门因子;

f_t --三重符合门因子。

$$M^3 + M^2 \left[\frac{3\nu_{s2}(\nu_{i1}-1)\nu_{i2} + \nu_{s1}(\nu_{i1}-1)\nu_{i3} - 6\nu_{s1}\nu_{i2}^2}{3\nu_{s1}\nu_{i2}^2} \right] + M \left[\frac{\nu_{s3}(\nu_{i1}-1)^2 + 3\nu_{s1}\nu_{i2}^2 - 3\nu_{s2}(\nu_{i1}-1)\nu_{i2} - \nu_{s1}(\nu_{i1}-1)\nu_{i3} - (3T/D\varepsilon_f)(f_d/f_t)\nu_{s1}(\nu_{i1}-1)\nu_{i2}}{3\nu_{s1}\nu_{i2}^2} \right] + \frac{3T}{D\varepsilon_f} \frac{f_d}{f_t} \left[\frac{\nu_{s1}(\nu_{i1}-1)\nu_{i2} - \nu_{s2}(\nu_{i1}-1)^2}{3\nu_{s1}\nu_{i2}^2} \right] = 0 \quad (6)$$

得到 M 的值后, 根据由大量实验数据拟合的关系式[9]确定耦合系数 C:

$$C = a - \frac{b(M-1)}{1+c(M-1)} \quad (7)$$

其中: a, b, c 是刻度常数。

由 C 及 AmLi 源在样品中的诱发裂变率 F 可得出 ^{235}U 质量等式:

$$m = \frac{F}{CY} \quad (8)$$

结合 ^{235}U 质量和样品浓缩度就可以最终计算出铀材料总质量。参考文献[10]给出了一种改进的

二重自增殖修正因子 C_d 和三重自增殖修正因子 C_t 可以由无源多重性方程推出, 公式如下:

$$C_d = M^2 \left[1 + \frac{(M-1)\nu_{s1}\nu_{i2}}{\nu_{s2}(\nu_{i1}-1)} \right] \quad (4)$$

$$C_t = M^3 \left[1 + \frac{(M-1)(3\nu_{s2}\nu_{i2} + \nu_{s1}\nu_{i3})}{\nu_{s3}(\nu_{i1}-1)} + \frac{(M-1)^2 3\nu_{s1}\nu_{i2}^2}{\nu_{s3}(\nu_{i1}-1)^2} \right] \quad (5)$$

其中 $\nu_{i1}, \nu_{i2}, \nu_{i3}$ 为诱发裂变中子再诱发 ^{235}U 裂变中子数目的 1、2、3 阶矩。

有源多重性测量方程中参数 S 大部分来自中子源计数, 并不反应质量信息, 方程求解需要另一个参数即耦合系数才能得到质量。利用测量值 D 和 T, 可以在未知裂变率 F 的情况下算出样品的自增值系数 M, F 可由 T/D 过程消除。得到关于 M 的方程:

求解方法。

2 铀材料中子多重性模拟测量

目前, 已经开发出多种基于蒙特卡罗方法的计算程序, 其中具有代表性的有 MCNP、EGS、GEANT、FLUKA、SRIM 等, 使用最广泛的是 EGS 和 MCNP。本文在开发研究 MCNP 程序的基础上, 利用 MCNP 程序对中子在测量装置内的产生、碰撞、俘获等一系列输运过程进行模拟仿真计算。

本文根据中子多重性测量系统的工作原理和多重性分析方法, 分别模拟计数器、移位寄存器以及数据分析过程, 实现了整个多重性测量过程的全模拟。流程图如图 1 所示。

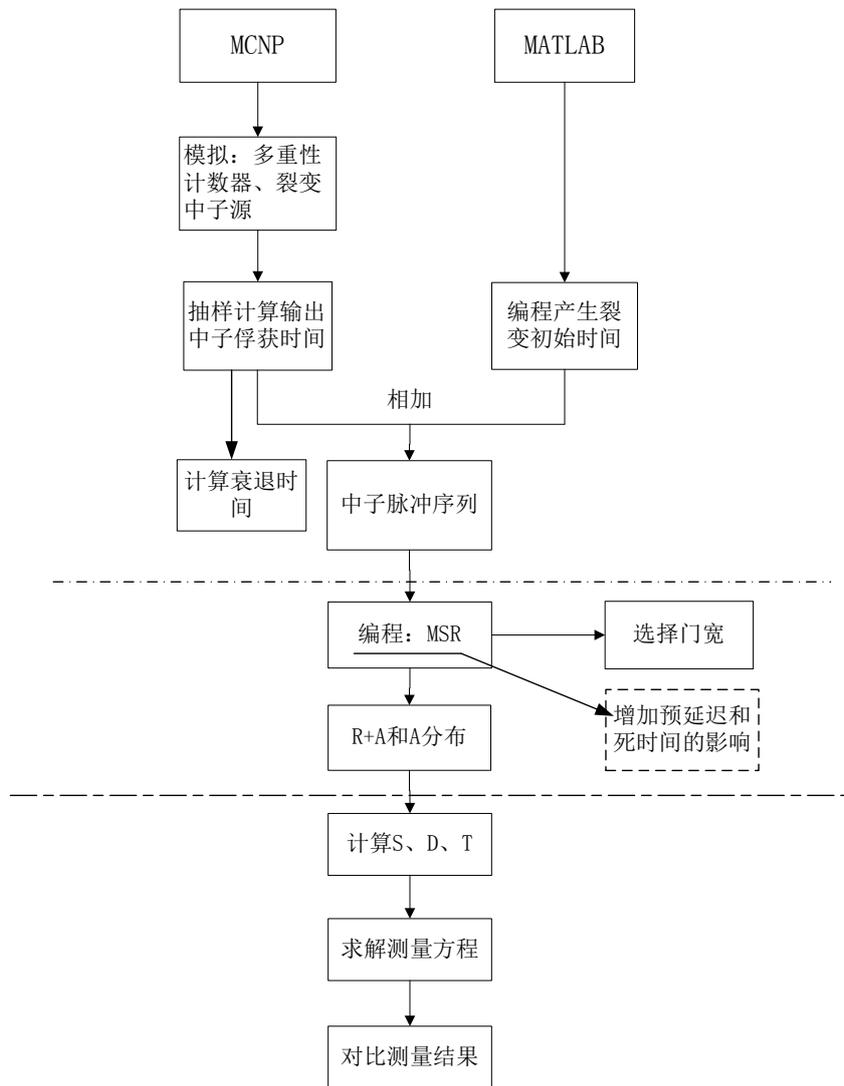


图 1 中子多重性模拟测量流程图

2.1 计算模型

本文模拟测量采用 AWCC 计数器，样品参考实验样品来设置，铀样品为 ^{235}U 的等高圆柱体源，直径、高均为 5.91cm，常温条件下， ^{235}U 的密度为

$19\text{g}/\text{cm}^3$ 。根据选取的直径和高，质量为 3080.39g。样品放置于计数器测量腔的中心位置，上下各放置一个 AmLi 中子源，用来诱发样品裂变放出中子，AmLi 中子源能谱见表 1。

表 1 AmLi 中子源能谱

中子能量	0.0eV~1.0eV	1.0eV~1.0keV	1.0keV~100keV	100keV~1.0MeV	1.0MeV 以上
概率 (%)	1.93	46.35	28.25	21.61	1.36

模拟计算的源项为 AmLi 中子源, 实际源强为 5×10^4 中子/秒, 两个源的总中子输出为 105 中子/秒, 中子脉冲模拟器 NPS 设为 1000000, 根据源强,

实际的测量时间为 10 秒。参考 AWCC 计数器的实际结构组成以及工程物理研究院实验装置建立模拟计算模型, 如图 2 所示。

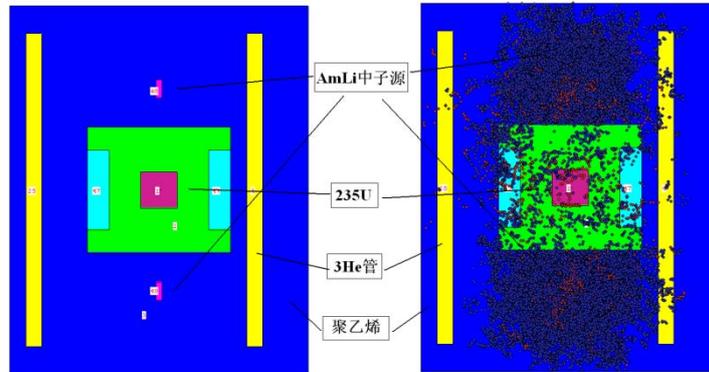


图 2 计算模型及中子碰撞示意图

2.2 探测效率

有源中子多重性计数的探测效率 ε 分为两种: AmLi源中子本底探测效率及样品诱发裂变出射中子探测效率。在基于“点模型”假设的测量方程中, 需要已知的探测效率是诱发裂变探测效率, 从这个意义上来说, 有源多重性的诱发裂变中子探测效率也即无源多重性的自发裂变探测效率, 方便起见, 本文直接用 ε 表示, 则有:

$$\varepsilon = \frac{n_{\text{detected}}}{n_{\text{emitted}}} \quad (9)$$

将PTRAC文件中栅元号为负值的事件筛选出来再除以诱发裂变产生的总中子就得到了计数器诱发裂变探测效率。

2.3 源的抽样

采用f8卡和ft8俘获计数卡, 粒子径迹输出卡ptrac记录每个中子在计数器内的俘获时间。图3为

本次模拟计算OUTP文件的一部分。

由输出OUTP文件中的table 117可得到 ^{235}U 的诱发裂变中子多重性分布, 从图3可以看出, 本次抽样计算中, AmLi源中子在 ^{235}U 样品共引起了25510次诱发裂变, 放出中子65481个, 其多重性分布如图4所示。

得到了每个中子在计数器内的俘获时间后, 利用 MATLAB 编程生成每个粒子的初始时间, 总粒子数为 1000000, 总时间为 10s。每个粒子的俘获时间加上粒子的初始时间就形成了完整的中子脉冲序列。

利用模拟的MSR程序对中子脉冲序列进行处理得到 (R+A) 分布和A分布 (A为偶然符合计数率, R是真符合计数率), 然后计算得到测量方程的输入参数: 一重、二重、三重符合计数率, 结果如表 2。

induced fission multiplicity and moments.

print table 117

	by number			by weight			error
	fissions	fission neutrons	multiplicity fraction	fissions	fission neutrons	multiplicity fraction	
nu = 0	928	0	3.63779E-02	9.28000E-04	0.00000E+00	3.63779E-02	0.0328
nu = 1	3582	3582	1.40416E-01	3.58200E-03	3.58200E-03	1.40416E-01	0.0167
nu = 2	7744	15488	3.03567E-01	7.74400E-03	1.54880E-02	3.03567E-01	0.0113
nu = 3	8083	24089	3.13720E-01	8.08300E-03	2.40890E-02	3.13720E-01	0.0111
nu = 4	4837	16148	1.58252E-01	4.83700E-03	1.61480E-02	1.58252E-01	0.0157
nu = 5	1053	5265	4.12779E-02	1.05300E-03	5.26500E-03	4.12779E-02	0.0308
nu = 6	154	924	6.03685E-03	1.54000E-04	9.24000E-04	6.03685E-03	0.0806
nu = 7	8	56	3.13603E-04	8.00000E-06	5.60000E-05	3.13603E-04	0.3536
nu = 9	1	9	3.92003E-05	1.00000E-06	9.00000E-06	3.92003E-05	1.0000
total	25510	65481	1.00000E+00	2.55100E-02	6.54810E-02	1.00000E+00	0.0062

Factorial moments	by number	by weight
nu	2.56688E+00 0.0029	2.56688E+00 0.0029
nu(nu-1)/2!	2.70557E+00 0.0062	2.70557E+00 0.0062
nu(nu-1)(nu-2)/3!	1.49451E+00 0.0117	1.49451E+00 0.0117
nu(nu-1) ... (nu-3)/4!	4.71109E-01 0.0243	4.71109E-01 0.0243
nu(nu-1) ... (nu-4)/5!	8.90239E-02 0.0707	8.90239E-02 0.0707
nu(nu-1) ... (nu-5)/6!	1.15249E-02 0.2965	1.15249E-02 0.2965
nu(nu-1) ... (nu-6)/7!	1.72481E-03 0.8207	1.72481E-03 0.8207

1 neutron captures, moments and multiplicity distributions. tally 8

print table 118

neutron captures on 3he

time gate: predelay = 0.0000E+00 gate width = 6.4000E+03

pulses in gate	histogram	occurrences		pulse fraction		error
		by number	by weight	by number	by weight	
captures = 0	52673	0	0.00000E+00	5.26730E-02	5.26730E-02	0.0044
captures = 1	3424	3424	3.42400E-03	3.42400E-03	3.42400E-03	0.0190
captures = 2	912	1824	1.82400E-03	9.12000E-04	9.12000E-04	0.0377
captures = 3	296	888	8.88000E-04	2.96000E-04	2.96000E-04	0.0652
captures = 4	113	452	4.52000E-04	1.13000E-04	1.13000E-04	0.1066
captures = 5	42	210	2.10000E-04	4.20000E-05	4.20000E-05	0.1579
captures = 6	32	192	1.92000E-04	3.20000E-05	3.20000E-05	0.2296
captures = 7	18	126	1.26000E-04	1.80000E-05	1.80000E-05	0.3239
captures = 8	13	104	1.04000E-04	1.30000E-05	1.30000E-05	0.3525
captures = 9	5	45	4.50000E-05	5.00000E-06	5.00000E-06	0.4472
captures = 10	3	30	3.00000E-05	3.00000E-06	3.00000E-06	0.7454
captures = 11	2	22	2.20000E-05	2.00000E-06	2.00000E-06	0.7071
total	57533	7317	7.31700E-03	5.75330E-02	5.75330E-02	0.0202

Factorial moments	by number	by weight
-------------------	-----------	-----------

图 3 OUPF 文件截图

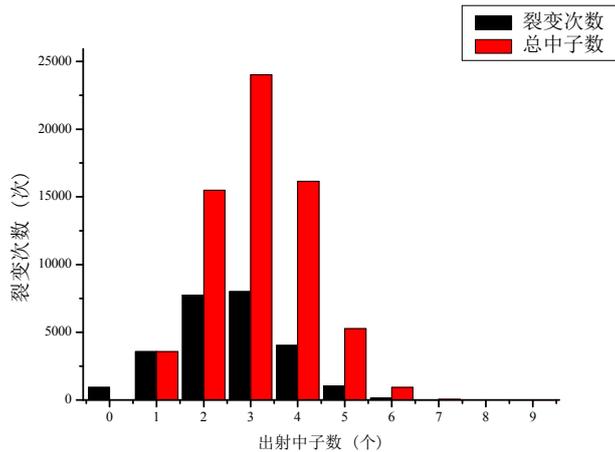


图 4 ²³⁵U 诱发裂变中子多重性分布

表 2 235U 多重性测量数据

bin	R+A	A
0	37210	40633
1	14789	13524
2	3942	2768
3	1058	461
4	309	108
5	109	23
6	55	10
7	28	3
8	19	1
9	7	0
10	4	2
11	2	0
12	1	0
S	5753.3 s ⁻¹	
D	734.4 s ⁻¹	
T	455.9 s ⁻¹	

将本次模拟计算的 S、D、T 代入方程，计算得到质量为 2890，与预置值偏差在 6.1%。

2.4 样品模拟测量及结果分析

利用同样的计数器模型计算了不同质量，不同尺寸的 ²³⁵U 样品，AmLi 源位置不变，抽样次数均为 1000000，分别计算 S、D、T 并代入测量方程求解质量，结果如表 3 所示。

有源中子多重性测量在进行计算机模拟时，会受到诸多因素影响。另外，针对特定的探测器结构与样品几何尺寸，必须建立专门的 C-M 曲线。

本次模拟还采用工程物理研究院的实验装置结构与样品尺寸，进行了模拟研究，模拟数据与实验数据对比如表 4。已知质量与模拟质量值相对偏差在 10%左右，对于有源多重性模拟来说，还是比较理想的。

表 3 模拟测量结果

预置质量 (g)	尺寸 (直径×高 cm)	一重计数率 S (s ⁻¹)	二重计数率 D(s ⁻¹)	三重计数率 T (s ⁻¹)	耦合系数 C(C*10 ⁶)	增殖系数 M	模拟质量 m(g)	质量偏差 (%)
3080	5.91×5.91	5753.3	734.4	455.9	4.67	1.499	2890	6.1
2606	5.91×5.0	5630.5	601.3	276	5.45	1.373	2735	4.9
2017	5.20×5.00	5377.8	476.1	202	5.70	1.344	2228	10.4
1581	4.80×4.60	5186.3	341.7	115	6.61	1.267	1698.4	7.4
1271	4.40×4.40	5051.4	286.3	96.3	6.61	1.265	1423.2	11.9

表 4 模拟与实验数据对比

已知质量(g)	一重计 数率 S (s ⁻¹)	二重计 数率 D (s ⁻¹)	三重计数 率 T (s ⁻¹)	耦合系数 C(C*10 ⁶)	增殖系 数 M	模拟质 量 m(g)	质量偏 差(%)
1728	5800	336	118	5.96	1.32	1556.5	9.9

其中，实验数据质量信息均为铀总质量乘以同位素丰度值后的 ²³⁵U 质量，从对比结果看，二重和三重计数率吻合较好，但质量偏差明显，初步分析为二者的探测效率偏差所导致。

3 结果与讨论

本文以 AWCC 计数器为模型，建立了铀材料的计算机模拟测量方法，主要模拟样品在计数器内产生中子脉冲序列，再经由模拟的移位寄存器对其进行处理，最后求解测量方程等整个实际测量过程。可以看出，铀材料模拟测量过程相对复杂。本文模拟测量结果的质量偏差在 10% 左右，存在一定的误差，需要实验测量以改进模拟过程。

参考文献：

[1] N. Ensslin, W.C.Harker, M.S.Krick, et al. Application Guide to Neutron Multiplicity Counting[M]. USA: Los Alamos National Laboratory, 1998, 5-10.

[2] W. H. Geist, L. A. Carrillo and D. R. Mayo .Active Multiplicity Analysis: Theoretical Development And Experimental Verification[R],Los Alamos National Laboratory, 2002.

[3]N. Ensslin, M. K. Smith, C. R. Rudy, and P. A. Russo, C. A. Pickett, W. Brosey, J. Swanson, The SO-20 MC&A Modernization Plan Measurement Needs Summary[R], Los Alamos National Laboratory report LA-UR-04-4189, 2004.

[4]N. Ensslin, M. S. Krick, D. G. Langner, and M. C.

Miller, Active Neutron Multiplicity Counting of Bulk Uranium[C], Los Alamos National Laboratory report LA-UR-91-2470, 32nd Annual INMM Meeting, 1991.

[5] N. Ensslin, M. S. Krick, W. C. Harker, M. C. Miller, R. D. McElroy, P. A. McClay, W. L. Belew, R. N. Ceo, L. L. Collins, and P. K. May, Analysis of Initial In-Plant Active Neutron Multiplicity Measurements[C], Los Alamos National Laboratory report LA-UR-93-2631, 34th Annual INMM Meeting, 1993.

[6] M. S. Krick, N. Ensslin, D. G. Langner, M. C. Miller, R. N. Ceo, P. K. May, and L. L. Collins, Jr., Active Neutron Multiplicity Analysis and Monte Carlo Calculations[C], LA-UR-94-2440, INMM Annual Meeting, 1994.

[7] M. S. Krick, N. Ensslin, R. N. Ceo, and P. K. May, Analysis of Active Neutron Multiplicity Data for Y-12 Skull Oxide Samples[R], Los Alamos National Laboratory report LA-UR-96-343, 1996.

[8] N. Ensslin, W. H. Geist, M. S. Krick, and M. M. Pickrell Active Neutron Multiplicity Counting[R],LA-UR-07-1403,2007.

[9] J. F. Briesmeister, Ed. MCNP - A General Purpose Monte Carlo Code for Neutron and Photon Transport[R], Los Alamos National Laboratory, LA-12625-M , 1993.

[10] M. M. Pickrell, An Alternative Method for Analyzing Active Neutron Multiplicity Data, unpublished technical note, August 2004.

Computer Simulation Research of Active Neutron Multiplicity Counting and Analysis

Li Sufen, ZHANG Quanhu, Di Yu-ming, GUAN Cailu, JIA Xiaolong, Di Yuming
(Research Inst. Of Hi-Tech, Xi'an 710025, China)

Abstract: It is one of the important techniques of analytical uranium quality attributes to active neutron multiplicity counting and analysis. In this paper based on principle and measurement process, Monte Carlo particle transport code is used to establish computer model of neutron counter toward uranium. All-process simulation of active neutron multiplicity counting (ANMC) is achieved, which include processes of neutron generation, transportation, capture, MSR function. at last ,getting the uranium quality attributes. The result shows the bias of data are smaller than 10%.

Keywords: Uranium Quality Attributes; Neutron Multiplicity Counting; Computer Simulation