

doi: 10.7690/bgzd.2015.09.015

站立式高纯锗全身计数器的设计及实现

杨素¹, 刘勇²

- (1. 中国兵器工业第五八研究所智能检测部, 四川 绵阳 621000;
- 2. 中国电能成套设备有限公司海阳项目部, 山东 海阳 265100)

摘要: 为快速准确测量进入人体的放射性物质, 设计一种六角形屏蔽室、可定点测量和扫描测量的站立式高纯锗全身计数器。利用自动控制处理技术、核辐射探测处理技术、核辐射屏蔽处理技术、计算机技术及通信技术等, 采用 ORTEC 公司电制冷一体化高纯锗 γ 谱仪、GALILI 公司的运动控制器, 并经过刻度后对体模及放射源进行了测量。结果表明: 该计数器能准确有效地检测放射性物质及活度, 其环境影响小、产品能量分辨率高。

关键词: 高纯锗探测器; 能量分辨率; 刻度; 体模

中图分类号: TP302 **文献标志码:** A

Design and Achievement of Stand-up Whole-body Counter System Using HPGE

Yang Su¹, Liu Yong²

- (1. Intelligent Detection Division, No. 58 Research Institute of China Ordnance Industry, Mianyang 621000, China;
- 2. Haiyang Project Department, China Power Complete Equipment Co., Ltd., Haiyang 265100, China)

Abstract: In order to quickly and accurately measure the radioactive material into the human body, we have designed a hexagonal shield and the standing high pure germanium body counter system which can measure in fixed point and scan of the vertical height. Used automatic control technology, nuclear radiation detection, nuclear radiation shielding, computer technology and communication technology and so on, adopted electricity-cooled and integrated high purity germanium gamma spectrometer of ORTEC company and motion controller of GALILI company, after calibration, the phantom and radioactive source were measured. It achieves accurate and effective detection of radioactive substances and activity, environmental impact is small, the product energy resolution is higher.

Keywords: high pure germanium (HPGE) detector; energy resolution; calibration; phantom

0 引言

随着核能和核技术的快速发展, 人工和天然的放射性核素在科学研究、核电站、工农业和医学等方面得到广泛应用, 参与放射性环境工作人员越来越多, 放射性物质进入人体的机会越来越大。放射性污染对人的危害众所周知, 特别是超过一定强度和剂量, 将导致不可恢复的严重伤害; 因此, 有必要定期或不定期地对参与放射性环境工作人员进行内照射测量, 有效保护进入放射性环境人员, 确保人员身心健康。

全身计数器能测量进入人体的放射性物质。早在 20 世纪初, 施伦德 (Schlundt) 就利用电离室对涂料工人体内镭的测定, 随后相继利用 GM 计数管、正比计数器、塑料闪烁体、NaI 探测器、Ge (Li) 探测器和高纯锗探测器等研制出各种类型全身计数器, 其探测灵敏度、探测效率等指标越来越高, 测量准确性不断提升, 到目前为止高纯锗探测器是人体内照射测量最佳探测方式, 具有较高的能量分辨

率和探测效率^[1]。笔者利用一套高纯锗探测器, 在自动控制系统配合下对人体全身扫描测量, 并对关键或疑似部位进行定位检测, 以确保测量的准确性。

1 全身计数器的组成及工作原理

站立式高纯锗全身计数器由运动控制系统、测量装置、屏蔽室、计算机及其分析处理系统等组成, 如图 1。运动控制系统由电源变换器、运动控制器、伺服驱动器、伺服电机及执行机构等构成; 测量装置由探测器、能谱分析仪和准直器等构成; 屏蔽室由机架、钢板、铅板、铜板及面板等构成; 计算机及其分析处理系统由计算机、运动控制软件、 γ 谱分析软件及内照射剂量评估软件等构成。

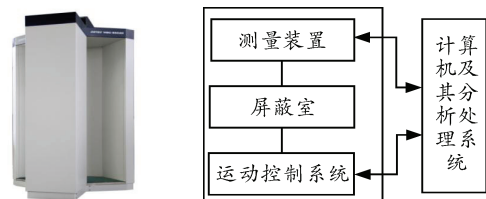


图 1 设备及组成框图

收稿日期: 2015-05-29; 修回日期: 2015-07-26

作者简介: 杨素(1970—), 男, 四川人, 高级工程师, 从事测控技术、通信技术及应用电子技术研究。

测量装置在运动控制系统的控制下实现扫描或定位测量,测量信息通过有线网络上传至计算机,经过计算机分析处理后以报表形式存储、显示及打印输出。扫描测量过程如图2所示:当人员进入屏蔽室内,站在指定位置,胸部面对探测器探头。根据人员身体状况设置安装在计算机的测量控制软件的运动及测量参数,启动测量按钮,指令运动控制器控制伺服驱动器,伺服驱动器驱动电机运动,电机及执行机构带动高纯锗探测器从底部向顶部运动,探测器在运动中测量人员身体各部分的照射情况,探测器运动至最高位置后扫描结束,探测信息经过信号放大处理后及时上传至计算机,待计算机全部分析处理后得到全身内照射资料,保存测量数据并显示打印输出,同时探测器返回原始位置,测量完毕。

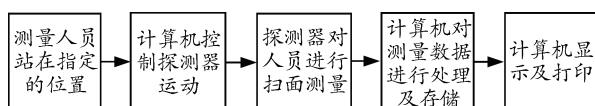


图2 测量过程

2 全身计数器的设计

2.1 探测器的选择及特点

探测器是全身计数器的核心部件,系统性能与其有着密切关联。目前常用的探测器是NaI闪烁体和高纯锗探测器,其中80%以上全身计数器都采用NaI闪烁体探测器^[2]。高纯锗探测器的能量分辨率高于NaI探测器几十倍,NaI探测器的探测效率比高纯锗探测器优越,对单核素或有限核素测量宜选用NaI探测器。对于多核素测量宜选用高纯锗探测器,进入人体内核素一般含有多种,高纯锗探测器是最佳选择。笔者采用ORTEC公司IDM-200电制冷一体化高纯锗探测器谱仪,集成了探测器、制冷器及多道分析器,其能量响应范围宽,可快速有效地检测出不同种核素及活度。IDM-200高纯锗探测器谱仪为高度集成的模块化 γ 能谱仪,其主要技术指标及特征有:

- 1) 晶体尺寸: $\Phi 85 \text{ mm} \times L 30 \text{ mm}$, P型同轴高纯锗。
- 2) 能量响应范围: $60 \text{ keV} \sim 10 \text{ MeV}$ 。
- 3) 相对探测效率: $\geq 50\%$ 。
- 4) 能量分辨率:
对 122 keV 峰(Co-57): $\leq 1.6 \text{ keV}$;
对 1.332 MeV 峰(Co-60): $\leq 2 \text{ keV}$ 。

- 5) 峰康比: $\geq 50:1$ 。
- 6) 峰形参数: $\text{FW}0.1\text{M}/\text{FWHM} \leq 2.2$;
 $\text{FW}0.2\text{M}/\text{FWHM} \leq 3.3$ 。
- 7) 制冷: 采用全金属密封、长寿命无分子塞冷指;低功率斯特林制冷机,可连续工作5a,冷却时间一般不会超过15h。
- 8) 数字化多道分析器: 具有系统增益、数字化形成时间和坪顶等参数设置具有自动极零、死时间校正、数字化稳谱、噪声抑制、过载恢复、脉冲抗堆积及数字化门控基线恢复等功能。
- 9) 通信端口: USB 2.0,可转换为网络接口,无限距离传输。
- 10) 内置电池,可维持仪器工作3h。
- 11) 物理尺寸: 长(即探测器前端至后面板的距离)47.3 cm(探测器前端到安装支架长度为48.6 cm);宽45.6 cm(包括安装支架在内为48.3 cm);高22.9 cm。
- 12) 重量: 无探测器背屏蔽为22.7 kg;带探测器背屏蔽为27.2 kg。
- 13) 工作温度: $-10 \sim +50 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

2.2 屏蔽室的设计

屏蔽室一般采用钢或铅构建。如果仅采用钢,虽然其强度好,但体积大且笨重(达几十吨),难于移动;如果采用铅,虽然其体积小、易于拆装,但却具有易变性。笔者综合二者特长,并利用铜消除钢或铅材料中特征射线对谱分析的干扰,通过放射性水平极低的钢板、铅板和铜板等屏蔽材料,构建六角形屏蔽室,有效屏蔽外界射线,形状简洁大方,便于安装拆卸和运输,能容纳和方便各种身材和体型人员进出,达到屏蔽舱室本底为环境本底的1/10以下,确保测量准确。根据有关屏蔽材料的屏蔽特性^[3],可屏蔽10倍本底的材料要求见表1。

表1 衰减10倍材料厚度 cm

能量	水	混凝土	铁	铅	钨
100 keV	30	8.2	2.1	0.3	0.21
662 keV	57	27.3	7.1	2.4	1.5
1.0 MeV	62	29.9	8.5	3.8	2.4
1.25 MeV	66	31.9	9.3	4.5	3.0

全身计数器的能量探测范围主要集中在 $100 \text{ keV} \sim 1.3 \text{ MeV}$ 。根据材料对射线的屏蔽特性及最优化屏蔽原则^[4],屏蔽室材料及厚度要求:仅采用铁,则厚度大于 95 mm ;仅采用铅,则厚度为大于 45 mm ;采用铁和铅混合则铁的厚度大于 70 mm ,铅的厚度大于 12 mm 。

屏蔽室由主屏蔽体和探测器升降系统屏蔽体 2 部分构成，两者间采用螺钉连接，屏蔽体由多层 13 mm 的钢板、12 mm 的铅板以及 1.5 mm 的铜板错缝层叠构成，主屏蔽体正面采用 6 层钢板、一层铅板和一层铜板层叠；侧面采用 6 层钢板层叠；脚部和顶部采用 6 层钢板和一层铅板层叠。主屏蔽体剖面示意图如图 2，探测器升降系统屏蔽体 3 个侧面采用 7 块钢板层叠，其剖面示意图如图 3、图 4。

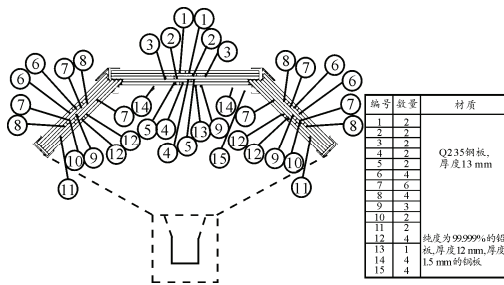


图 3 主屏蔽体剖示图

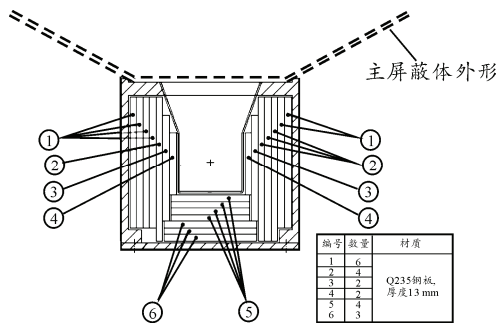


图 4 探测器升降系统屏蔽体剖示图

2.3 运动控制系统设计

运动控制系统以运动控制器 DMC1425 为控制核心，配置电源变换器、滤波器、安川伺服驱动器、伺服电机、限位开关及执行机构等，在计算机的控制下，通过运动控制器、伺服驱动器、伺服电机及执行机构带动高纯锗探测器运动，其控制原理框图如图 5。

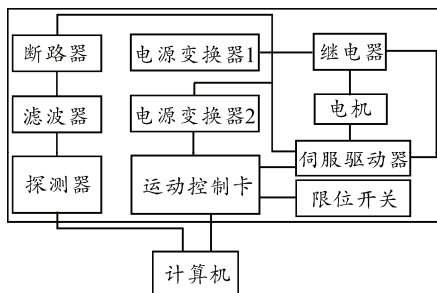


图 5 运动控制原理框图

运动控制器 DMC1425 的处理器为 32 位

Motorola68331 处理器，处理速度快，伺服回路采样速率达 125 μs，具有以太网和 RS232 通信接口、点-点定位、JOG、电子齿轮、电子凸轮、轮廓控制、直线及圆弧插补等运动方式；应用程序存储空间达 500 行×80 字符、126 个变量、14 个数组 2 000 个数组元素。带有速度、加速度前馈的 PID 补偿，凹陷滤波，双位置控制下的间隙补偿，消减冲击的速度平滑处理算法，积分限制、转矩限制和偏置调整等，可在温度 0~70 ℃、湿度 20%~95%RH 工作。

本项目对运动控制执行机构要求较高，需要上下平稳运动，其机械噪声要求极低，设备采用单伺服双丝杠同步升降机构实现。在伺服电机及减速器的传动下，由双丝杠共同带动探测器，同时采用 2 个导向杆协助，确保平稳低噪声运动。其结构示意图如图 6。第 1 丝杠、第 2 丝杠、第 1 导向杆、第 2 导向杆按顺序竖直放置，2 根丝杠顶端联接 2 个同步带轮，通过同步带连接两丝杠和减速器上的同步带轮；顶板上安装减速器的安装孔为条形孔；减速器上的同步带轮为主动轮，两丝杠上的同步带轮为从动轮；底板、顶板及升降台具有足够的刚度和强度。

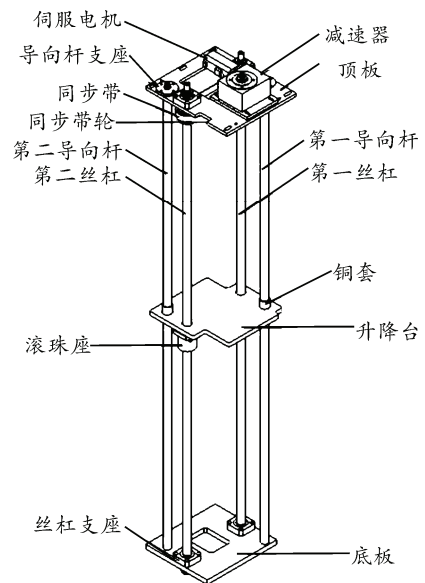


图 6 执行机构结构

2.4 软件设计

利用 ORTEC 公司提供的专用管理软件 Renaissance-32 operator、Renaissance-32 Supervisor 以及内照射剂量估算软件 IMBA Professional Plus，开发了运动控制软件，形成了一套完整的测量控制软件。

3 刻度技术

3.1 体模及刻度源

全身计数器是一套定量测量设备，必须定期对其进行刻度，以确定测量的准确性。严格的方法是采用人直接摄入已知的放射性物质进行，但其对人伤害严重，且一般半衰期长等原因不采用，一般采用体模刻度方法。

使用符合 ANSI N13.30、ANSI N44.3 标准的体模来刻度高纯锗全身计数器。该体模使用人体组织等效的聚乙烯材料，能够完全模拟 γ 射线在人体内的闪烁效应。其体模及刻度源如图 7 所示。

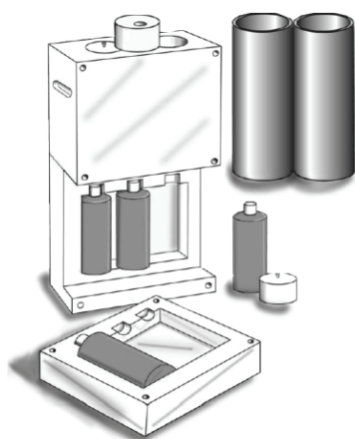


图 7 体模及刻度源

刻度源采用 5 大 1 小共 6 个液体放射源，每个放射源都含有 9 种核素，每个放射源的活度基本一样，误差在 5% 以内，总活度在 10 万贝可左右。每个放射源核素及活度如表 2。

表 2 刻度源核素及活度

核素	能量/keV	分支比	活度值/Bq
Am-241	59.5	0.363	5 559.2
Cd-109	88	0.037	56 351
Co-57	122	0.855 1	1 360
Ce-139	166	0.803 5	1 949
Hg-203	279	0.773	4 731
Sn-113	392	0.649	3 316
Cs-137	662	0.899 8	1 629
Y-88	898	0.934 17	6 003
Co-60	1 173	0.999	2 750
Co-60	1 332	0.999	2 750
Y-88	1 836	0.993 8	5 900

3.2 刻度方法

将 6 个放射源根据编号对应放置放在体模中，专用体模支架放置到高纯锗全身计数器屏蔽室内指定位置，放置体模于支架上。将设备处于通电状态，运行 Renaissance-32 Supervisor，对体模进行多次测量，保存测量数据，根据放射源数据进行曲线耦合，

得到效率刻度曲线，其刻度拟合图如图 8。

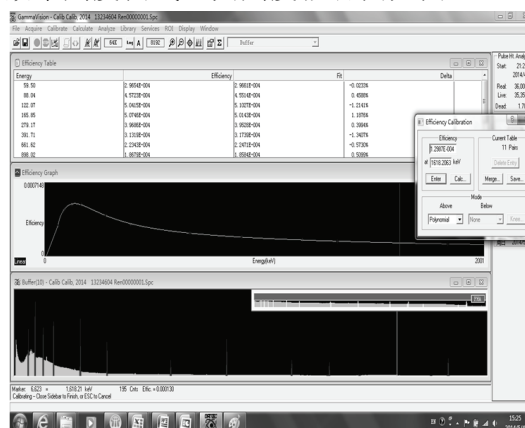


图 8 刻度曲线图

4 测试应用

4.1 本底测量

利用本项目产品在中国兵器工业第五八研究所试验室对屏蔽效果进行了多次测试，其本底计数平均在 11 CPS 左右，将探测器从屏蔽体中取出后对环境本底进行了多次测量，其本底计数平均在 120 CPS 左右，屏蔽效果达到 10 倍以上。其测量结果如图 9、图 10。

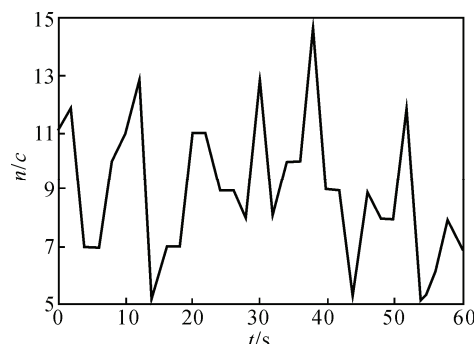


图 9 屏蔽体内本底测量

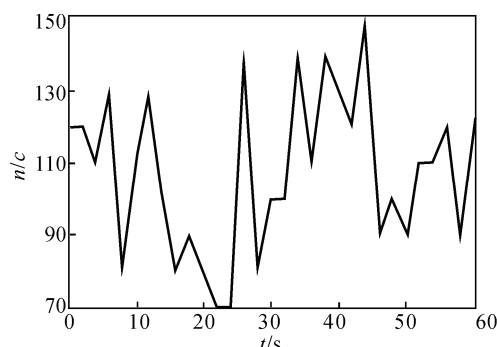


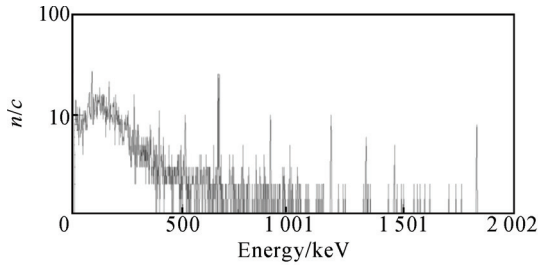
图 10 环境本底测量

4.2 标准源测量

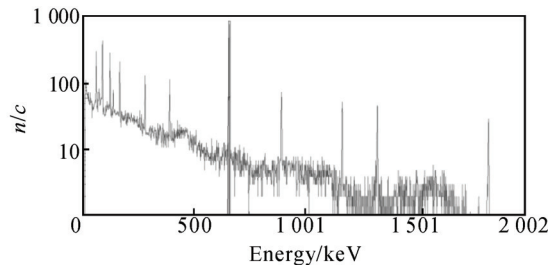
将编号为 1914，活度为 9 189 Bq 的点源 ¹³⁷Cs 放置于屏蔽体内主屏蔽体面上，从左至右对不同位

置点进行了定点测量和扫描测量^[5]。图 11 为 137CS 点源放置屏蔽体主屏蔽面的左边及中间定点测量，

图 12 为 137CS 点源放置屏蔽体主屏蔽面中间的上下扫描测量。



(a) 左边



(b) 中间

图 11 标准源能谱图

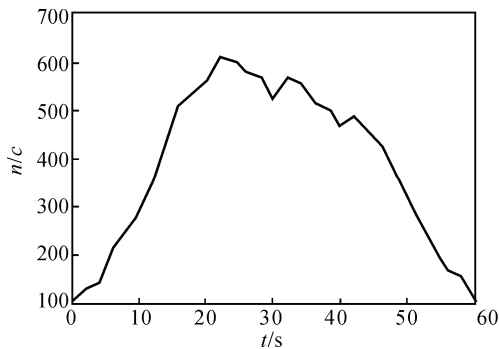


图 12 标准源扫描计数图

根据测量结果：测量 30 s 可以准确识别出探测核素，其计数率随着放射源离探测器的距离显著变化。随着距离增加，计数率减低，计数率与距离的平方成反比。

5 结束语

站式高纯锗全身计数器采用电制冷一体化高

纯锗探测器谱仪，利用铅板、钢板及铜板构建屏蔽室，运用运动控制实现快速扫描测量。项目产品通过体模及标准源刻度后，对几种标准放射源和人进行了测量，产品性能指标达到了设计要求，得到了核电用户认可。

参考文献：

- [1] 方晓明, 李欣年. 碘化钠探测器和高纯锗探测器 γ 能谱仪性能比较[J]. 上海大学学报, 2004, 10(4): 389-399.
- [2] Janoweretal M B. NewEngl J Med[J]. 1968, 279(186): 45-48.
- [3] 汲长松. 核辐射探测器及其实验技术手册[M]. 北京: 原子能出版, 2009: 142-147.
- [4] 钱建复, 沈庭云. 核辐射剂量学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009: 73-86.
- [5] 吴治华, 赵国庆. 原子能物理实验方法[M]. 北京: 原子能出版, 1997: 54-65; 99-165.