

大面积多探头 α 、 β 、 γ 辐射监测校准方法研究

摘要: 本文通过对大面积多探头 α 、 β 、 γ 辐射监测设备校准测试技术的深入研究,运用“多点法”校准测试技术,针对不同形状和面积的探测器,确定校准点的数量与布点方案,设计了由系列校准放射源、空心人体躯干模型、实心人体躯干模型、专用系列校准器具等部分组成的校准测试系统,实现了大面积多探头 α 、 β 、 γ 辐射监测设备的校准测试与检定。结果:活度值测量范围:0~1.6×10⁴Bq,单位面积活度值不确定度≤10%。

关键词: 多探头; 监测设备; 测试技术; 辐射监测

引言

在核能应用、国防工业等领域,使用大面积多探头 α 、 β 、 γ 辐射监测设备对工作人员手、脚及全身污染进行监测,这是现阶段评价工作人员在辐射场所中所受 α 、 β 和 γ 个人表面污染程度的主要技术手段。监测设备各项参数指标的检测结果是否准确可靠,将直接关系到广大工作人员的辐射防护安全。例如,监测设备报警阈值设置过高可能会引起放射性污染物的扩散,报警阈值过低则会导致频繁报警^[1],妨碍正常工作,引起人员恐慌。因此,表面污染监测设备的精确校准及报警阈值的准确设置是及早发现放射性污染、减小人员受照剂量、避免污染向控制区外扩散的关键。而目前,国内还鲜有针对这类大面积、多探头个人表面污染监测设备的校准测试技术手段和方法。

为了解决大面积多探头 α 、 β 、 γ 辐射监测设备的校准测试技术难题,确保广大辐射防护工作人员个人表面污染监测数据的准确可靠,研制大面积多探头 α 、 β 、 γ 辐射监测设备测试系统并开展校准技术研究,是非常迫切和必要的。

1 大面积多探头 α 、 β 、 γ 辐射监测设备校准测试中存在的问题

大面积多探头 α 、 β 、 γ 辐射监测设备主要包括:手脚 α 、 β 表面污染监测仪、全身 α 、 β 表面污染监测仪、全身 α 、 β 和 γ 表面污染监测仪等。其 α 、 β 量程通常为0~10⁶计数/分,对不同核素的探测效率通常在1%~50%之间,在其整个有效测量范围内基本误差应不超过±25%(不包括标准源活度的不确定度)。

这类大面积多探头辐射监测设备的探测器窗口面积远远大于150cm²,按照国家相关计量法规要求,对表面污染监测设备进行测试时使用的校准参考源活性区面积应等于或大于探测器窗口的面积^[2]。而目前,国内外的放射源制作工艺和技术还无法制作出均匀性指标达到国家要求的面积大于150cm²的标准放射源,因此,使用现有标准放射源和校准测试方法,无法满足大面积多探头辐射监测设备的校准测试要求。现有滞后的校准测试手段和方法已经成为开展大面积多探头辐射监测设备校准测试的瓶颈问题。

2 大面积多探头 α 、 β 、 γ 辐射监测设备的校准测试技术研究

2.1 “多点法”校准测试技术

在对长期计量检定工作实践经验全面总结的基础上,依据国家相关规程的要求,结合现代电离辐射计量测试新技术,我们探索出采用“多点法”,用小面积参考源替代大面积参考源来完成大面积探测器校准的方案。在“多点法”校准过程中,针对不同形状和面积的探测器,选取不同的校准点数量与布点方案。IEC61098:2003 国际标准建议手部探测器(15cm×10cm)的校准选取24个点,脚部探测器(30cm×10cm)选取44个点^[3]。

利用“多点法”对多探头辐射监测设备校准测试,探测器面积越大校准时间越长,为了提高校准效率,对于150cm²以上更大面积的探测器,采用以下多种布点方案和数值积分方法,以减少需要测量的点数,缩短校准测试时间,提高校准效率。

2.1.1 圆形探测器“多点法”布点方案

对于圆形探测器,其平均探测效率的实验布点方案示意图1(a)所示。设 x 处的探测效率为 $C(x)$,则对于半径为 r 、探测面积为 A 的探测器,其平均探测效率为:

$$C(A) = \frac{\int_0^r C(x) 2\pi x dx}{\int_0^r 2\pi x dx} = \frac{\int_0^r C(x) d(\pi x^2)}{A} \quad (1)$$

确定该探测器的探测效率，只需用一个对于探测器的探测面积足够小的“点”源，做出如图 1 (b) 的曲线，并按曲线下的面积求和，就可得到平均探测效率。

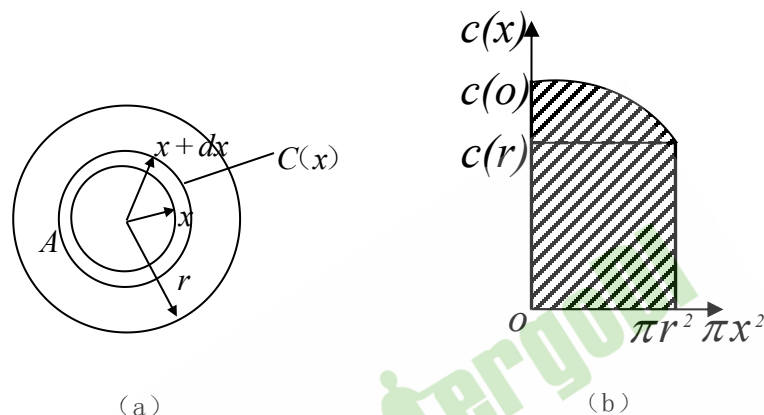


图 1 圆形探测器的平均探测效率计算示意图

2.1.2 矩形探测器“多点法”布点方案

对于矩形探测器，其平均探测效率的实验布点方案示意图 2 所示。

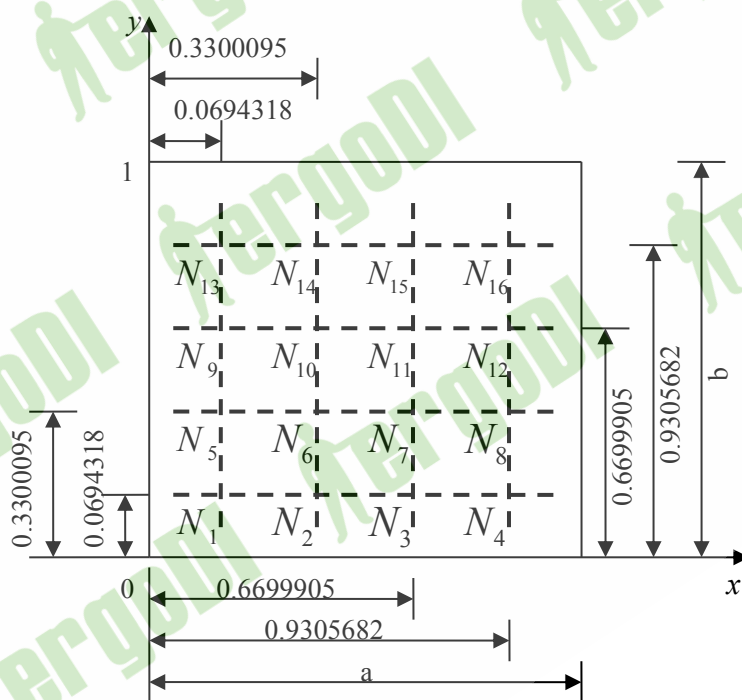


图 2: 矩形探测器的平均探测效率计算示意图

探测器的平均探测效率是建立在数值积分的高斯求积公式基础上的^[4]。取高斯求积公式中的插值点数为 4，并令 $N_1 = f(x_1, y_1)$, $N_2 = f(x_2, y_1)$, $N_3 = f(x_3, y_1)$... $N_{15} = f(x_3, y_4)$, $N_{16} = f(x_4, y_4)$ ，即 $N_1, N_2, N_3 \dots N_{15}$ 和 N_{16} 是各插值点的函数，重复运用高斯求积公式进行二重积分，可得探测器的平均探测效率为：

$$C(x,y)=\iint_{00}^{11}f(x,y)dx dy=0.0302507(N_1+N_4+N_{13}+N_{16})+0.1063233(N_6+N_7+N_{10}+N_{11}) \\ +0.0567129(N_2+N_3+N_5+N_8+N_9+N_{12}+N_{14}+N_{15}) \quad (2)$$

因此,当探测器的探测面积外形为正方形时,要确定该仪器的探测效率,只需用一个对于探测器的探测面积足够小的“点”源,在上述16个位置处测得各点的探测效率 $N_1, N_2, N_3 \dots N_{15}$ 和 N_{16} ,然后代入公式(2),就可得到该探测器的平均探测效率。对于长和宽分别为 a 和 b 的长方形,则其插值点的数值只需分别乘以 a 和 b ,而插值点的相对位置保持不变,公式(2)仍然适用。

2.2 异形探测器的校准测试方法

对于个人表面污染监测设备上的手部探测器(15cm×10cm)和脚部探测器(30cm×10cm)等异形探测器的校准,采用15cm×10cm=150cm²的参考源,结合专用校准器具可实现其快速校准。

3 大面积多探头 α 、 β 、 γ 辐射监测设备校准测试系统设计方案

在对“多点法”校准测试技术深入研究的基础上,针对不同形状和面积的探测器,确定校准点的数量与布点方案,设计由系列校准放射源、空心人体躯干模型、实心人体躯干模型、专用系列校准器具等部分组成的校准测试系统,以实现大面积多探头 α 、 β 和 γ 个人表面污染监测设备的校准测试与检定。

3.1 α 、 β 和 γ 系列参考源

IEC61098:2003 国际标准推荐的 α 参考源是²⁴¹Am, β 参考源应确保在以下三个能区(小于200keV,200keV~500keV,大于500keV能区)内至少各有一个参考源。考虑射线能量、核素半衰期、可获取性等因素,拟选择的放射性核素如表1所示。

表1 拟采用的 α 、 β 和 γ 参考源

参考源类型	核素	能量(keV)	半衰期(a)
α	²⁴¹ Am	5486	432
	¹⁴ C	155	5730
β	³⁶ Cl	714	3.01×10^5
	⁹⁰ Sr+ ⁹⁰ Y	2274	28.15
γ	²⁴¹ Am	59.5	432
	¹³⁷ Cs	661	30.17
	⁶⁰ Co	1250	5.27

参考源的表面发射率应覆盖污染监测设备的有效量程 $0 \sim 10^6 \text{min}^{-1}$,为方便手部探测器(15cm×10cm)和脚部探测器(30cm×10cm)的校准需要,优先选择150cm²的大面积参考源,为了“多点法”应用于大面积探测器校准的研究需要,还应选择10cm²的小面积参考源。参考源的单位面积活度值不确定度不超过10%,均匀性好于10%。参考源的单位面积活度值的确定由国家计量院或国防放射性计量一级站完成,均匀性检验自行采用小面积探测器以逐点扫描的方法或采用胶片感光的方法完成。

3.2 空心人体躯干模型和实心人体躯干模型

通过研究污染监测设备响应随各种影响量(如距离、位置、测量时间、干扰辐射等)的变化规律和功能性验证方法及被校准设备围绕人体表面不同位置的放射源水平响应规律,可以发现,与专门针对某一特定型号监测装置的校准需要而研制的校准梯相比,采用人躯干模体的方案具有更普遍的适用性。其中,对应于 β 和 γ 污染监测设备的人躯干模体分别是空心 and 实心人躯干模体。

3.3 专用系列校准器具

针对大面积多探头 α 、 β 、 γ 辐射监测设备研制的手部 α 、 β 污染监测装置的校准器具、搜寻探测器的校准器具和包含 6 个 γ 平面源（100mm×100mm）的校准梯示意图如图 3 所示。

其中，手部 α 、 β 污染监测装置的校准器具由楔形手模体和其上安装的不同核素平面参考源组成，平

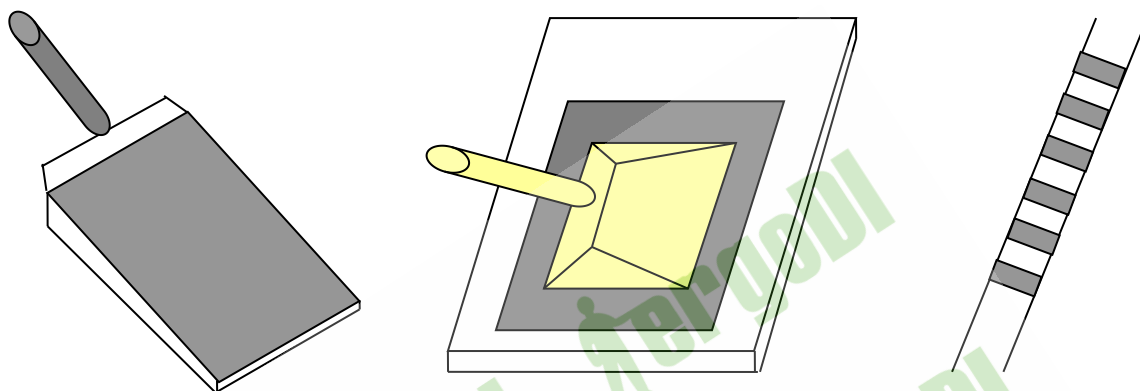


图 3: (左) 手部 α 、 β 污染校准器具、(中) 搜寻探头校准器具、(右) γ 校准梯示意图

面参考源可根据需要安装在手模体的一面或两面上；搜寻用 α 、 β 探测器通常是手脚污染监测报警装置上的辅助探测器，用于衣物表面的 α 、 β 污染监测和对手脚污染监测结果的验证，实现其现场的快速校准；针对特定型号的具有 γ 污染监测能力的全身污染监测设备的校准/测试目的，研制由多个 γ 平面源构成的校准梯。根据被校准设备的类型，可采用不同尺寸、不同活度、不同核素的平面参考源。

专用校准器具应用于 α 、 β 和 γ 污染监测设备的校准工作中，其优点在于：

- 可准确控制参考源与被校准探测器之间的距离。
- 大大缩短了现场校准工作的准备时间。
- 尽量避免操作人员与放射源的直接接触。

4 系统主要技术指标与性能测试分析

4.1 系统主要技术指标

校准系统的主要技术指标满足以下要求：

- α 参考源能量：5486 keV。
- β 参考源能量范围：66~2274 keV。
- γ 参考源能量范围：66~2274 keV。
- 参考源表面发射率：0~ 10^6 min^{-1} 。
- 单位面积活度值的不确定度小于 10%。
- 参考源的均匀性小于 10% (150cm^2)。
- 空心人躯干模体：材料质量密度为 1g/cm^3 ，壁厚大于 0.5cm，高度为 50~100cm，断面周长为 95cm，长轴为 35cm 的椭圆柱体。（用于 β 水平响应测试）
- 实心人躯干模体：材料质量密度为 1g/cm^3 ，高度为 50~100cm，断面周长为 95cm，长轴为 35cm 的椭圆柱体。（用于 γ 水平响应测试）

4.2 不确定度分析

本测试系统，不确定度分量由以下几部分构成：

- 单位面积活度值的不确定度 $u_1 < 10\%$ 。
- 参考源的不均匀性引起的不确定度 $u_2 < 10\%$ 。
- 表面发射率与单位面积活度值的转换系数的不确定度 $u_3 < 15\%$ 。
- 重复性引起的不确定度^[5] $u_4 < 5\%$ 。
- 校准距离偏差^[6]引起的不确定度 $u_5 < 5\%$ 。

由以上各不确定度分量，得出测试系统测量合成标准不确定度^[7] u_c ：

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2 + u_5^2} \quad (3)$$

经计算验证，系统测量合成不确定度 $u_c < 22\%$ ，满足要求。

4.3 重复性分析

重复性是指在相同的测量条件下，对同一被测量连续进行多次测量所得结果之间的一致性。**经验证，本测试系统重复性^[8] $s_n < \frac{2}{3} u_c$ ，符合规定要求。**

5 技术创新点

5.1 采用“多点法”校准测试技术，实现大面积多探头探测器的高精度校准测试

根据国家计量法规要求，用于表面污染监测仪校准测试工作的参考源，其活性区面积应等于或大于探测器窗口的面积。由于受均匀性指标的限制，目前国内外标准源的面积不大于 150cm²。因而，大面积探测器的校准测试工作，无法采用常规的表面污染监测仪的校准测试方法进行检定。本方案通过采用“多点法”校准测试技术，在大面积探测器的有效探测范围内合理选取多个测量点，利用小面积标准源，对选取的点位分别进行测试，对所有测量点的数据综合分析处理后给出校准测试结果。

5.2 通过建立人体躯干模型，为研究探测器响应随各种影响量的变化规律提供了科学的测试研究模式

在大面积多探头 α 、 β 、 γ 辐射监测设备使用过程中，被测对象的位置变化、距离远近、测量时间以及干扰辐射等因素都会影响探测器的响应和测量数据。通过建立人体躯干模型，为研究探测器响应随各种影响量的变化规律提供了科学的测试研究模式。本方案研究了探测器响应随各种影响量的变化规律，建立了功能性验证的方法，最终确定被校准设备围绕人体表面不同位置的放射源水平响应规律。

5.3 通过研制系列专用校准器具，实现不同面积和不同形状探测器的快速校准测试

由于大面积多探头 α 、 β 、 γ 辐射监测设备的探测器形状各异，探测面积大小不一，校准测试设备如何布置和固定是开展校准测试工作必须面临和解决的难题，比如，标准放射源如何准确定位在距探测器符合规定要求的距离位置上等问题。本文根据现有大面积多探头表面污染监测设备的结构和功能特点，按照国家计量法规和规程的技术要求，研制适用于各种形状和不同面积探测器的专用系列校准器具，可实现不同面积和异形探测器的快速校准测试。

6 结论

本文在深入研究大面积多探头 α 、 β 、 γ 辐射监测设备测试校准技术，并研制由系列校准放射源、空心人体躯干模型、实心人体躯干模型、专用系列校准器具等部分组成的校准测试系统基础上，采用“多点法”校准测试技术，针对不同形状和面积的探测器，确定校准点的数量与布点方案，实现了大面积多探头 α 、 β 、 γ 辐射监测设备的校准测试与检定，解决了该类监测设备计量检定面临的难题。该校准测试技术的应用，将有效提高辐射防护领域该类大面积多探头 α 、 β 、 γ 辐射监测设备的受检率，确保辐射监测设备量值传递准确可靠，可有效保障工作人员的辐射防护安全。

参考文献

- [1] 李星洪.辐射防护基础.原子能出版社[M], 1982.
- [2] 容超凡.电离辐射计量[M].原子能出版社, 2002.
- [3] 韩奎初, 丁耀声.实用电离辐射计量学[M].原子能出版社, 1996.
- [4] 吴治华.原子核物理试验方法.原子能出版社[M], 1986.
- [5] 程玲莉, 张明.计量技术[J].中国计量科学研究院, 2012.10.
- [6] 王德发, 吴海.计量技术[J].中国计量科学研究院, 2012.09.
- [7] 王卓.计量技术[J].中国计量科学研究院, 2012.09.
- [8] 张国春.计量技术[J].中国计量科学研究院, 2012.10.