

# $\beta$ 射线剂量仪校准因子不确定度分析



张璇, 黄建微, 李德红\*, 杨扬

中国计量科学研究院, 北京 100029

**【摘要】** 为准确评估  $\beta$  射线剂量仪校准因子的不确定度, 将经过溯源的薄窗电离室放置在  $\beta$  射线辐射场的测量点处进行测量得到剂量率参考值, 然后采用替代法将  $\beta$  射线剂量仪放在同一位置进行测量得到指示值, 通过二者的比值得到  $\beta$  射线剂量仪的校准因子, 并对校准因子的不确定度进行评定。不确定度的来源主要包括参考辐射场的均匀性、替代法测量过程中位置的一致性、显示值的统计标准偏差等。结果表明在校准过程中, 通过提高参考辐射场的均匀性和参考位置的一致性可以改善校准因子的不确定度。

**【关键词】** 计量学;  $\beta$  射线; 剂量当量; 校准因子; 不确定度

DOI: 10.12338/j.issn.2096-9015.2021.0228

**【引用本文】** 张璇, 黄建微, 李德红, 等.  $\beta$  射线剂量仪校准因子不确定度分析 [J]. 计量科学与技术, 2022, 66(2): 21-24.

## Uncertainty Evaluation for the Calibration Factor of $\beta$ -ray Dosimeters

ZHANG Xuan, HUANG Jianwei, LI Dehong, YANG Yang

National Institute of Metrology, Beijing 100029, China

Corresponding author: LI Dehong, Email: lidh@nim.ac.cn

**【Abstract】** To accurately evaluate the uncertainty in the calibration factor of a  $\beta$ -ray dosimeter, a traceable thin window ionization chamber was used to measure the reference dose rate at the reference position of the  $\beta$ -ray radiation field, and then the  $\beta$ -ray dosimeter was placed in the same position for measurement to obtain the indicated value. The calibration factor of the  $\beta$ -ray dosimeter was obtained, and the uncertainty in the calibration factor was evaluated. The main sources of uncertainty include the uniformity of the reference radiation field, the uniformity of the position in the measurement process of the substitution method, and the statistical standard deviation of the indicated value. The results show that in the calibration process, the uncertainty in the calibration factor can be reduced by improving the uniformity of the reference radiation field and the uniformity of the reference position.

**【Key words】** metrology,  $\beta$ -ray, dose equivalent, calibration factor, uncertainty

## 0 引言

$\beta$  射线作为弱贯穿辐射的一种, 大量存在于核燃料生产与加工环节、反应堆检修、废物处理和退役等场合, 相关人员可能会受到过量的  $\beta$  辐射, 通常采用经过校准的  $\beta$  射线剂量仪表进行监测以保证人员安全<sup>[1]</sup>。 $\beta$  射线主要对人体的皮肤组织造成损伤, 尽管有些  $\beta$  射线(如  $E_{\max} > 2 \text{ MeV}$ )可穿透 10 mm 组织厚度的物体<sup>[2]</sup>, 但大部分采用个人剂量当量

$H_p(0.07)$  或定向剂量当量  $H'(0.07)$  来评估  $\beta$  射线剂量的大小。仪表量值的准确与否直接关系到如何采取相应的防护措施, 同时  $\beta$  射线作为带电粒子, 其与物质发生作用的能量变化机制与光子辐射(非带电粒子, 如 X、 $\gamma$ )不同, 校准过程中的所采用的模体、标准器等也不尽相同<sup>[3-8]</sup>, 因此  $\beta$  射线剂量仪表的校准显得尤为重要, 其校准因子的确定及不确定度分析方法有必要予以研究。本文主要针对个人剂量当量  $H_p(0.07)$  的校准进行说明。

基金项目: 中央公益类科研机构的基础研究经费(AKY1410)。

作者简介: 张璇(1993-), 中国计量科学研究院实习研究员, 研究方向: 电离辐射剂量量值传递等, 邮箱: zhangx@nim.ac.cn; 通讯作者: 李德红(1980-), 中国计量科学研究院副研究员, 研究方向: 电离辐射剂量基标准研究, 邮箱: lidh@nim.ac.cn。

## 1 原理和方法

使用溯源至上一级标准的标准电离室在参考辐射场中进行测量,得到测量点位置处的组织吸收剂量率<sup>[9-10]</sup>,然后采用替代法,将待校准的β射线剂量仪置于测量点,使得待校仪表等效中心与测量点位置重合,再进行校准操作。

### 1.1 测量原理

1) 薄窗电离室作为标准电离室测量辐射场中仪器校准位置处的组织吸收剂量率,并归一到标准条件(20℃, 101.325 kPa)下,其表达式如下<sup>[11]</sup>:

$$\dot{D}_R = N_S^{\text{ref}} \cdot M_{\text{corr}}^{\text{ref}} \cdot K_{TP} \cdot k_{Q,Q_0} \quad (1)$$

式中,  $\dot{D}_R$  为标准电离室测得参考辐射场的组织吸收剂量率;  $N_S^{\text{ref}}$  为标准电离室溯源至上一级标准得到的刻度因子;  $M_{\text{corr}}^{\text{ref}}$  为标准电离室测量系统的测得值;  $k_{Q,Q_0}$  为对上一级标准实验室和本级实验室射线束之间差异进行修正的修正因子;  $K_{TP}$  为环境空气的温度气压修正因子,计算方法见式(2)。

$$K_{TP} = \frac{P_0(273.15 + T)}{P(273.15 + T_0)} \quad (2)$$

式中,  $T$  为测量时的环境温度,℃;  $P$  为测量时的环境大气压, kPa;  $T_0$  为环境温度参考值, 20℃;  $P_0$  为环境大气压参考值, 101.325 kPa。

2) 在相关标准中查询组织吸收剂量到个人剂量当量的转换因子<sup>[12]</sup>,按下式计算可以得到该位置处所对应的总个人剂量当量率  $\dot{H}_p(0.07)$  (包含光子和β射线的剂量):

$$\dot{H}_p(0.07) = h_{p,D} \cdot \frac{\dot{D}_R}{1 - \tau_{br}} \quad (3)$$

式中,  $h_{p,D}$  为组织吸收剂量到个人剂量当量的转换因子,单位为 Sv/Gy,其它参数与上述一致;  $\tau_{br}$  为光子(韧致辐射)剂量与总剂量的比值。

3) 校准过程中辐射束的截面应完全覆盖标准电离室和待校仪表,同时将待校仪表置于规定体模上,校准因子为:

$$N = \frac{\dot{H}_p(0.07)}{\bar{M} \cdot K_d} \quad (4)$$

式中,  $\dot{H}_p(0.07)$  为个人剂量当量率参考值;  $\bar{M}$  为待校准仪器的读数平均值;  $K_d$  为校准时源到测量仪器的实际距离与标称校准距离的可能偏差引入的修正因子。

### 1.2 校准装置

用于β射线剂量仪表的校准装置由β射线参考

辐射场、标准电离室(电离室及剂量仪)、温湿度计、气压计和定位装置等设备组成。

1) β射线参考辐射场:用于提供一定剂量率,其技术指标须满足 ISO 6980.1<sup>[9]</sup> 或者 GB/T 12164.1<sup>[10]</sup> 等技术标准。对于β射线剂量仪表的校准通常在放射性同位素<sup>90</sup>Sr/<sup>90</sup>Y 的系列 1 参考辐射场中进行。

2) 标准电离室:要求溯源至上一级标准,用于参考辐射场校准位置处的组织吸收剂量率的定值。

3) 辅助设备:①温度计、气压计和湿度计在对参考辐射场进行定值以及剂量仪校准过程中监测环境温度、湿度和气压,以便进行温度和气压的修正。②体模在剂量仪校准过程中用来模拟人体躯干(或肢端)。对于全身剂量计的校准宜在由有机玻璃(PMMA)制成的板模上进行,其尺寸为 200 mm×200 mm×(至少 20 mm);对于腕部(或踝部)剂量计的校准宜在柱状体模上进行,其为直径 73 mm、高 300 mm 的 PMMA 充水圆柱(侧壁厚 2.5 mm,两端壁厚 10 mm);对于指环剂量计的校准宜在由 PMMA 制成的棒状体模上进行,尺寸为直径 19 mm,高 300 mm。当使用上述的体模时,不需对其与 ICRU 组织体模之间关于反散射特性可能存在的差别进行修正<sup>[12]</sup>。

### 1.3 校准过程

对于β射线剂量监测仪,只能采用替代法进行校准,总体来看校准通过以下两个步骤实现,相应的校准因子不确定度评定可按照校准过程的两个步骤进行。

第一步:将经过溯源的标准电离室置于辐射场中距源 20~50 cm 范围内某一位置处,β射线中心与电离室中心同轴,给电离室施加工作电压,待电离室内外温度达到平衡之后,在持续辐照条件下多次测量,同时记录温度计和气压计读数,使用式(1)~(3)计算得到该位置处的剂量当量率  $\dot{H}_p(0.07)$ 。

第二步:将待校准的剂量仪放置在体模上替代标准电离室,待校仪表的等效中心与电离室中心重合,待仪表稳定之后,记录在该位置处剂量仪的显示值,使用式(4)计算可得到该剂量仪的校准因子。

由于大多数β射线剂量仪对光子也有响应,因此仪器校准前应确保仪器工作正常且无放射性污染,同时对光子的响应贡献进行修正,可在仪器的探测器前面附加 10 mm PMMA 与不附加 PMMA 时的响应差来确定<sup>[12]</sup>。

## 2 不确定度评定

对校准因子的不确定度分析, 首先应确定校准因子的数学模型, 分析对校准结果有影响的不确定度来源, 每个影响的来源可作为一个不确定度分量, 分析并定量评定各不确定度分量<sup>[13]</sup>。标准不确定度分量评定可采用 A 类或 B 类评定方法: A 类评定是根据对  $X_i$  的一系列测得值  $x_i$  得到实验标准偏差的方法; B 类评定是根据有关信息估计的先验概率分布得到标准偏差估计值的方法<sup>[14-15]</sup>。

### 2.1 校准位置处剂量当量率

校准过程的第一步是通过溯源过的标准电离室测量和转换因子计算得到参考位置处的剂量当量率。通过公式(1)~(3)可知校准位置处剂量当量率  $\dot{H}_p(0.07)$  的不确定度来源如下:

1) 标准电离室溯源刻度因子引入的不确定度分量。根据溯源证书可得标准电离室刻度因子的相对扩展不确定度, 该不确定度采用 B 类评定方法。

2) 辐射场与上一级辐射场的差异。由于本级实验室与上一级标准实验室的辐射场可能存在差异, 标准电离室对于不同辐射场的响应差异将引入不确定度, 而实际上  $\beta$  射线参考辐射场满足 ISO 6980 标准的技术要求<sup>[9]</sup>, 可以认为辐射场与上级辐射场一致。

3) 标准电离室的长期稳定性。根据至少两次溯源至上一级标准的刻度因子的相对变化得到长期稳定性所引入的不确定度, 该项可通过标准电离室历年的溯源证书得到, 属于 B 类评定方法。

4) 温度气压测量不确定度。标准电离室测量过程中, 还需根据温度和气压进行气体密度修正, 温度气压修正值的不确定度应包括校准过程中温度和气压多次测量结果的统计相对标准偏差(A 类)和温度气压仪表本身溯源的不确定度(B 类)。

5) 标准电离室测量结果的统计标准偏差。在辐射场参考值确定过程中, 需采用标准电离室多次测量取平均值得到, 多次测量结果的统计涨落导致的不确定度采用 A 类评定方法。

6) 光子剂量与总剂量的比值。仪器校准前应确保仪器工作正常和无放射性污染, 大多数  $\beta$  测量仪器对光子有响应, 应予以修正。该修正因子可查询相关标准报告得到, 即采用 B 类不确定度评定方法分析光子剂量与总剂量的比值修正引入的不确定度<sup>[11]</sup>。

7) 剂量当量转换因子不确定度。校准点位置处

剂量当量率不确定度的来源还包括剂量当量转换因子的不确定度, 可通过查询相关标准, 采用 B 类不确定度评定方法分析得到<sup>[12]</sup>。

### 2.2 $\beta$ 射线剂量仪的校准

校准过程的第二步是将待校准的剂量当量仪表替代标准电离室, 待仪表稳定之后开始测量, 通过该位置处的剂量当量参考值和仪表读数之比, 得到校准因子, 其不确定度来源包括<sup>[16]</sup>:

1) 待校仪表的读数统计标准偏差。重复测量过程中统计涨落导致的不确定度, 采用 A 类不确定度评定方法分析。

2) 待校仪表位置与测量点位置差异导致的不确定度。标准电离室和待校准仪表的放置过程中, 采用量杆测量源与仪器之间的距离, 因此待校仪表与标准电离室位置偏差导致的不确定度可认为来自量杆本身, 该不确定度可通过量杆的溯源证书, 采用 B 类评定方法得到。

3) 辐射场不均匀导致的不确定度。实际校准过程中, 待校仪表和标准电离室的探测中心难以重合, 由于辐射场的不均匀性导致校准位置处的剂量率存在差异, 不均匀性是参考辐射场本身的性质, 采用 B 类评定方法确定。

综上,  $\beta$  射线剂量仪校准因子的不确定度评定如表 1 所示。

表 1  $\beta$  射线剂量仪校准因子的不确定度评价  
Tab.1 Uncertainty evaluation for the calibration factor of a  $\beta$ -ray dosimeter

第一步: 参考标准	A类 (%)	B类 (%)
溯源至上级标准的刻度因子		3.4
辐射质差异		-
标准的长期稳定性		0.5
温度气压修正	0.05	0.1
测量标准偏差	0.1	
光子剂量与总剂量比值		0.02
转换因子		0.51
第一步 相对合成标准不确定度	0.11	3.48
第二步: 待校仪表		
读数标准偏差	0.5	
与测量点位置的差异		3.0
辐射场不均匀		5.0
第二步 相对合成标准不确定度	0.50	5.83
相对合成标准不确定度		6.81
扩展不确定度(k=2)		14

### 3 结论

通过对 $\beta$ 射线剂量仪校准因子的不确定度分析和评定,得到该仪器校准因子的相对扩展不确定度为14%( $k=2$ )。通过评定过程可以看出,除溯源至上—级的刻度因子以外, $\beta$ 射线参考辐射场均匀性以及仪器位置与测量点的差异是不确定度的主要来源,这也是校准时 $\beta$ 辐射剂量仪表不同于X、 $\gamma$ 射线剂量监测仪表主要所在。产生这种情况的原因是 $\beta$ 射线属于弱贯穿辐射,易与空气等介质相互作用而产生衰减。在对 $\beta$ 辐射剂量仪表进行校准或量值传递时,需重点关注参考辐射场的均匀性和位置的一致性,通过减小上述两项的不确定度,以改善待校仪表校准因子的不确定度。

在校准过程中体模选取方面,现行的GB/T 12164.3-2013<sup>[17]</sup>和IEC 61526-2020<sup>[18]</sup>标准采用的是ISO 6980.3-2006<sup>[19]</sup>标准中推荐的体模,即尺寸为100 mm × 100 mm × 10 mm的有机玻璃(PMMA)板模,但ISO 6980.3-2019<sup>[12]</sup>标准推荐的体模尺寸为200 mm × 200 mm × (至少20 mm),考虑存在可穿透10 mm组织厚度的 $\beta$ 射线,因此本文推荐采用ISO 6980.3-2019所规定的体模。

#### 参考文献

- [1] 李景云. 肢端剂量计和核设施弱贯穿辐射(主要是 $\beta$ 辐射)的辐射防护监测[J]. 辐射防护, 2003, 23(5): 300-307.
- [2] 李景云.  $\beta$ 剂量仪和个人剂量计校准[J]. 辐射防护, 2003, 23(4): 1-15.
- [3] 孙亮, 李士骏. 电离辐射剂量学基础[M]. 第三版. 北京: 中国原子能出版社, 2014: 16-30.
- [4] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 用于校准剂量仪和剂量率仪及确定其能量响应的X和 $\gamma$ 参考辐射第1部分 辐射特性及产生方法: GB/T 12162.1-2000[S]. 北京: 中国标准出版社, 2000.
- [5] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 用于校准剂量仪和剂量率仪及确定其能量响应的X和 $\gamma$ 参考辐射第2部分: 辐射防护用的能量范围为8 keV ~ 1.3 MeV和4 MeV ~ 9 MeV的参考辐射的剂量测定: GB/T 12162.2-2004[S]. 北京: 中国标准出版社, 2004.
- [6] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 用于校准剂量仪和剂量率仪及确定其能量响应的X和 $\gamma$ 参考辐射第3部分: 场所剂量仪和个人剂量计的校准及其能量响应和角响应的测定: GB/T 12162.3-2004[S]. 北京: 中国标准出版社, 2004.

- [7] 吕雅竹, 赵瑞, 李德红, 等. X射线剂量当量仪校准因子不确定度评估[J]. 计量学报, 2020, 41(9): 1133-1137.
- [8] 宋飞, 赵瑞, 丁卫撑, 等. X射线环境辐射监测仪器校准方法的研究[J]. 计量学报, 2021, 42(9): 1237-1243.
- [9] International Organization for Standardization. Nuclear energy — Reference beta-particle radiation-Part 1: Methods of production: ISO 6980.1-2019[R]. Geneva: ISO, 2019.
- [10] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局.  $\beta$ 参考辐射第1部分: 产生方法: GB/T 12164.1-2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [11] International Organization for Standardization. Nuclear energy — Reference beta-particle radiation — Part 2: Calibration fundamentals related to basic quantities characterizing the radiation field: ISO 6980.2-2019[R]. Geneva: ISO, 2019.
- [12] International Organization for Standardization. Nuclear energy — Reference beta-particle radiation — Part 3: Calibration of area and personal dosimeters and the determination of their response as a function of beta radiation energy and angle of incidence: ISO 6980.3-2019[R]. Geneva: ISO, 2019.
- [13] Joint Committee for Guides in Metrology. Evaluation of measurement data - Guide to the expression of uncertainty in measurement: JCGM 100: 2008[R]. Paris: JCGM, 2008.
- [14] 国家质量监督检验检疫总局. 测量不确定度评定与表示: JJF 1059.1-2012[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
- [15] 靳浩元, 刘军. 测量不确定度的评定方法及应用研究[J]. 计量科学与技术, 2021, 65(5): 124-131.
- [16] International Atomic Energy Agency. Calibration of Radiation Protection Monitoring Instruments: Safety Series No. 16[R]. Vienna: IAEA, 2000.
- [17] International Organization for Standardization. Reference beta-particle radiation — Part 3: Calibration of area and personal dosimeters and the determination of their response as a function of beta radiation energy and angle of incidence: ISO 6980.3-2006[R]. Geneva: ISO, 2006.
- [18] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局.  $\beta$ 参考辐射第3部分: 场所和个人剂量仪的校准及其能量响应和角响应的确定: GB/T 12164.3-2013[S]. 北京: 中国标准出版社, 2013.
- [19] International Electrotechnical Commission. Radiation protection instrumentation- measurement of personal dose equivalents  $H_p(10)$ ,  $H_p(3)$  and  $H_p(0.07)$  for X, Gamma, neutron, and Beta radiations- direct reading personal dosimeters: IEC 61526-2020[R]. Geneva: IEC, 2020.

本文编辑: 石亚楠