

辐射防护仪表刻度

伏明灯 郑华智 李宗强
(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

摘要 概述了中子和 γ 辐射防护仪表刻度地标准、要求、方法和误差,还扼要介绍了近物所中子、 γ 辐射防护仪表的刻度工作。

关键词 辐射 仪表 刻度

1 辐射防护仪表刻度的标准和要求

1.1 标准

为了准确、可靠和高精度地测量辐射场的辐射剂量,确保工作人员的安全,需对辐射防护仪表进行定期或不定期的刻度。

辐射防护仪表刻度指确定待刻度仪表对一系列已知辐射值的响应或读数。刻度内容包括辐射防护仪表对辐射粒子数量,计数率,能量、方向和剂量率的响应,以及环境效应、重复性(精密度)、干扰辐射甄别等。

辐射防护仪表刻度的标准可分为国家基准,次级标准,三级标准(实验室标准)和四级标准(工作标准)四级。国家基准是指放射源、测量仪器和其它设备代表某一国家所能达到的最高准确度的刻度。次级标准是直接应用国家基准刻度过的源、仪器和其它设备进行比对和刻度之后,在国家基准实验室以外提供的一种高精度的刻度。三级标准是性能达到次级标准要求,尚未直接用国家基准刻度的源、仪器和其它设备进行刻度,但必须与次级刻度过的源、仪器和其它设备进行比对,它可作为某一单位或部门的内部标准。工作标准是一种具有一般准确度的现场常用辐射防护仪表的刻度,其不确定值的限度不应超过 50%^[1,2]。

1.2 要求

为了提高辐射防护仪表的准确度,刻度时应注意下列因素。

1) 通过刻度、校准,了解仪器的变异系数和固定误差。

2) 通常要求辐射防护现场剂量测量的不确定度小于 20%,那么测量仪器刻度时其不确定度应小于 10%;作为传递标准的仪器必须有小于 $\pm 10\%$ 的不确定度;对于中子、 γ 监测仪器的刻度,源与探测器之间的距离是放射源的有效中心与探测器的有效中心之间的测量距离,这个距离应大于源或探测器(视那个最大)的最大尺寸的 7 倍,否则必须加以适当修正;对小探测器,源与探测器的距离应是 30~100 cm,其辐射场应该遵守反平方律关系,当改变源与探测器的有效中心距离而与反平方律的偏差大于 5%时,就应换放射源,而不能再用改变距离的方法^[3]。

3) 对于中子、 γ 辐射防护仪表的刻度,应实现“自由空间”的几何条件,尽量增大源、探测器两者与周围四面墙壁、天花板和地面的距离,散射体与源和探测器的距离至少应该是探测器与源距离的 2 倍^[3],从而保证各刻度距离处的散射辐射都小于总照射量率的 5%。

2 辐射防护仪表刻度的方法与程序

辐射防护仪表刻度的方法大体分为标准源法和标准仪器法两种。标准源法又分为准直束法和自由空间法。标准仪器法又分为替代法和同时法。

2.1 标准源法

标准源准直束法是将标准源置于准直器^[2]中, 其具体的程序是, 用标准源的准直束法照射被刻度的仪器, 用理论计算和标准仪器测量准直束中各点的辐射量率. 对良好的准直束, 在射束之外物体的存在, 不应影响辐射场的分布, 也不引起附加的散射. 准直束法适用于源强较大, 场地较小的条件下刻度仪器. 自由空间法是将标准源放置在“自由空间”中, 形成一个标准辐射场, 用标准场来刻度辐射防护仪表. 自由空间法适用于源强较小、场地较大和较空旷的条件下刻度灵敏度较高的仪器.

气体电离室是测量 γ 、 X 剂量最通用的仪器. 仪表在刻度点处的照射量率 P (R/h) 为

$$P = P_{100} \left(\frac{100}{r} \right)^2 e^{-\mu(r-100)} K_d K_G \quad (1)$$

式中, P_{100} 为标准源在 100 cm 处产生的照射量率 (R/h), r 为标准源中心至探测器的有效中心距离 (cm), μ 为辐射在空气中的线性减弱系数 (cm^{-1}), K_d 为源本身变化的校正系数, K_G 为探测器有限大小修正系数. 对于球形电离室有

$$K_G = \frac{1}{\frac{1}{2(a/d)} \ln \frac{1+(a/d)}{1-(a/d)}} \quad (2)$$

式中, a 为电离室半径, d 为电离室中心到源距离. 对于圆柱形电离室, 如图 1 所示, 若侧

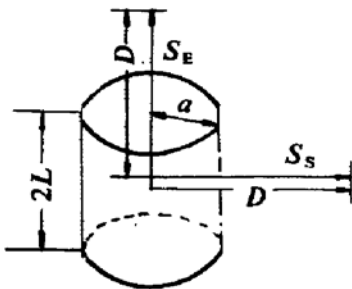


图 1 圆柱形电离室的侧面源和端面源示意图

面源和端面源分别用 S_s 和 S_e 来表示, 则修正系数分别为 $k_s = \lambda^{-1} \tan^{-1}$, 距离因子 $\lambda = a/\sigma$, $\sigma = a/L$ 为形状因子和 $K_E = a^{-2} \ln(L+a^2)$. 探测器有限大小的修正系数 $K_G = L/K_s$ 或

$1/K_E$, 是根据源位于探测器的侧面或端面而定.

2.2 标准仪器法

1) 替代法

替代法是将标准仪器置于辐射场中, 记下其读数然后准确地在同一位置代之以待刻度的仪表, 比较它们的读数, 就得到刻度的结果. 此法需要在辐射场中附加一台监督电离室, 以便检查辐射场的变化和对其变化进行修正.

2) 同时法

同时法是将待刻度仪表和标准仪器同时置于均匀辐射场中, 并使它们的探测器有效中心与辐射源处于同一距离, 待刻度仪表的刻度因子是通过其读数与标准仪器的读数比较而确定的.

3 误差分析

刻度的总不确定度, 应当考虑到刻度中出现的各种误差, 如标准误差、刻度方法误差、系统误差和偶然误差. 通常主要来源于标准源和传递仪器本身的误差, 散射的影响以及统计误差、源与探测器有效中心之间的距离误差、刻度操作中人为射量造成的误差等. 刻度的总不确定度, 由各单个不确定度的平方和平方根计算.

4 散射因子的确定

实验确定散射因子的方法有“挡锥法”和“间距法”. 挡锥法也叫角锥阴影法, 挡锥法是在源与探测器之间连线上置一锥体^[4~6], 以挡住中子、 γ 直接进入探测器, 仅记录散射中子、 γ 等. 间距法是以散射中子、 γ 的能谱和注量、照射量在一定距离范围内保持不变的假定为依据, 在忽略了源的各向异性、在空气中的衰减 (实验测得 ^{60}Co 的 γ 射线在空气中的吸收为 0.32% m^{-1}), 且宽束和窄束近似相同, 所以影响很小) 条件下, 导出任意两源距 L_1 与 L_2 之间的散射本底响应. 对精度要求高的仪器

还可以用自由空间法扣除散射, 其具体方法是把源和被刻度的仪器放置在空旷的地面上, 固定两者间的距离 d , 然后同时升高源和探测器的高度. 随着高度 h 的增加, 散射逐渐减少, 当升到一定高度后, 散射份额趋于零, 如此可得到散射份额和 d 、 h 的关系, 就可以对各个测量点的散射进行校正, 实际测量时源与探测器都应高出地平面 150 cm^[7]以上.

4.1 中子散射因子的确定

中子仪表刻度的准确度, 在很大程度上取决于对散射响应的修正. 中子探测器的灵敏度 ε 与计数率 N 有如下关系

$$N = \frac{\varepsilon Q}{4\pi(L + L_0)^2} K \exp \cdot [-\Sigma(L - r)] + S \quad (3)$$

式中, Q 为源强, K 为源的各向异性系数, L 为探测器几何中心至源中心的距离, L_0 为探测器几何中心与有效中心的距离 (简称有效中心距离), $\exp[-\Sigma(L-r)]$ 为中子在空气中的衰减系数, r 为探测器半径 (适用于球形或圆柱形探测器), Σ 为中子与空气相互作用的宏观截面, S 为散射本底响应. 用挡锥法可直接测到 S , 用间距法在忽略了源的各向异性、在空气中的衰减和有效中心距离 (即 $q(L) = QK \exp[-\Sigma(L-r)] \approx Q$) 的情况下, 式中 q 是源距 L 处修正后的强度. $L+L_0=L$, 则 (3) 式简化为

$$N = \frac{\varepsilon q(L)}{4\pi(L + L_0)^2} + S \quad (4)$$

由 (4) 式导出任意两源距 L_1 、 L_2 之间的散射本底响应为

$$S \approx \frac{N_2(L_2/L_1)^2 - N_1}{(L_2/L_1)^2 - 1} \quad (5)$$

式中, N_1 、 N_2 分别为源距 L_1 和 L_2 处的探测器所对的总响应.

4.2 γ 散射因子的确定

强度为 A 的 γ 放射源, 在源与探测器间未放锥形屏蔽体时, 距源 D 处的照射量率为

$$X = \frac{A\Gamma}{D^2} + S \quad (6)$$

式中, Γ 为放射源照射量率常数 (ICRU 第 33

号报告中定义的空气比释动能常数), 散射本底响应 S 可用挡锥法测得, 也可根据 (5) 式算出. 当移入屏蔽体时, 探测器输出的散射照射量率为

$$X_s = R - R_{BG} \quad (7)$$

式中, R 为探测器读出的散射照射量率, R_{BG} 为探测器读出的本底照射量率. 散射份额 F_s 为

$$F_s = \frac{X_s}{X} = D^2 \frac{(-R_{BG})}{(A\Gamma)} \quad (8)$$

用挡锥法测得 ^{60}Co 、 ^{137}Cs 、 ^{226}Ra γ 源与探测器在不同距离 D 处的散射份额^[5]在全对数坐标中的关系如图 2 所示. 由图可见, 随着放射源能量增高相对散射减小; 随着探测器和源离地面距离增大相对散射也减小; 过屏蔽时相对散射减小; 欠屏蔽时相对散射增大, 在相同的几何条件下, 对不同强度的某一种核素源, 测得的散射份额相同.

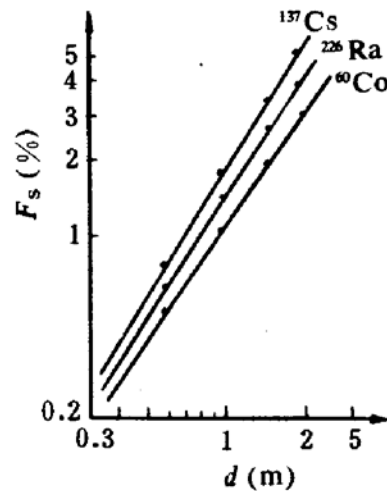


图 2 γ 散射份额 F_s 与源到探测器之间距离 d 的关系

5 近物所辐射防护仪表的刻度

近物所对常规辐射剂量测量仪表和兰州重离子研究装置 (HIRFL) 辐射监测系统及其系统所属的探测器每年刻度一次, 探测器刻度用标准源准直束法. 刻度在自己建立的、经过国家计量院刻度 (国家计量院刻度之后认为, γ 辐射场可以作为次级标准辐射场用于辐射仪表刻度) 过的仪表刻度室里进行. 刻度室系 $8 \times 9 \times 4.5 \text{ m}^3$ 的大厅, 大厅地面处于地平

面 2 m 以下, 储源槽具有足够屏蔽且可转动, 能够方便地储存、使用 6 个放射源, 现使用 ^{238}Pu -Be 中子和 ^{60}Co 、 ^{137}Cs 、 ^{226}Ra 四种放射源. 刻度仪器时, 源与探测器的最近水平距离为 1 m, 垂直离地面 1.6 m, 源距墙壁最近处 2 m. 由于准直器的屏蔽效果相当好, 墙壁的反散射可以忽略. 刻度的结果是: (1) 中子测量系统在标准源辐射场条件下, 其置信度大于 95%; (2) γ 测量系统用标准源在现场刻度, 其置信度大于 95%.

参 考 文 献

- 1 丁健生, 张建生. 辐射防护仪器校准手册, 北京: 原子能出版社, 1976
- 2 李德平, 潘自强等. 辐射防护手册第二分册, 北京: 原子能出版社, 1988, 419
- 3 ANSIN 323-1978 美国国家标准, 辐射防护仪器的检验与刻度
- 4 丁民德. 原子能科学技术, 1989, 33 (3): 8
- 5 丁建生, 褚晨. 辐射防护, 1984, 4 (4): 274
- 6 陈常茂等. 辐射防护, 1987, 7 (6): 420
- 7 McCaslin J B. Health Physics, 1983, 4 (4)

Calibration of Radiation Detector

Fu Mingdeng Zheng Huazhi Li Zongqiang

(Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000)

Abstract The calibration purposes, method, criterion, error analyses and requirement of radiation detector are briefly described. The calibration procedure for neutron and γ radiation detector at Institute of Modern Physics are also introduced.

Key Words radiation detector calibration