

国际原子能机构第 133 号技术报告

辐射防护仪器校准手册

原子能出版社

辐射防护仪器校准手册

施学勤译

丁健生 张延生 丁明德 校

原子能出版社

内 容 简 介

本手册是国际原子能机构出版的第 133 号技术报告, 原名«Handbook on Calibration of Radiation Protection Monitoring Instruments» 1971 年出版。手册系统而扼要地介绍了辐射防护仪器的校准问题, 可供使用和校准辐射防护仪器的人员参考。本书对 X 辐射、 γ 辐射、 β 辐射、中子辐射和 α 辐射防护仪器以及个人剂量计和可携式巡测计的校准问题分别进行了论述, 讨论了校准设备、校准技术等问题。本书还提到误差和质量控制等问题。

辐射防护仪器校准手册

施 学 勤 译

丁健生 张延生 丁明德 校

☆

原子能出版社出版

北京印刷一厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

(限国内发行)

☆

开本 787 × 1092 ¹/₃₂ · 印张 3⁵/₁₆ · 字数 74 千字

1976 年 6 月北京第一版·1976 年 6 月北京第一次印刷

印数 001—4500 · 定价: 0.28 元

统一书号: 15175 · 065

目 录

1. 引言	(1)
1.1. 概要	(1)
1.2. 目的和范围	(1)
1.3. 量、单位、符号	(2)
2. 校准实验室的要求及应用技术	(4)
2.1. 校准的目的	(4)
2.2. 方法	(5)
2.3. 电磁辐射	(6)
2.3.1. X 辐射	(7)
2.4. β 辐射	(24)
2.5. 中子辐射	(27)
2.5.1. 概论	(27)
2.5.2. 用封装中子源进行校准	(32)
2.5.3. 用加速器源进行校准	(35)
2.5.4. 慢中子通量密度	(38)
2.5.5. 各种类型中子仪器的校准问题	(40)
2.6. α 辐射	(43)
2.7. 校准源	(44)
3. 校准设备	(49)
3.1. 个人剂量计	(49)
3.1.1. β - γ 剂量计	(49)
3.1.2. 中子剂量计	(54)
3.2. 可携式巡测计	(57)
3.2.1. 剂量率或照射量率监测仪器	(57)

3.2.2. 污染监测仪器	(61)
3.3. 用相似法检验分量程的线性	(63)
4. 误差和质量优劣的控制	(67)
4.1. 不确定值的限度	(67)
4.2. 误差的成因	(68)
4.3. 校准的周期	(71)
4.4. 经常性检验	(72)
4.5. 机械性能与电性能评价	(73)
4.5.1. 机械性能评价	(74)
4.5.2. 电性能评价	(75)
4.5.3. 环境的评价	(77)
5. 仪器的维修	(82)
附录 苏联国家标准:	(83)
参考文献	(91)
资料目录	(98)

1. 引 言

1.1. 概 要

辐射测量仪器的使用与校准，近来成为各国及国际上很关心的问题。国际辐射单位与测量委员会 (ICRU) 即将出版关于这方面的报告*。本手册尽量避免与它的内容重复，侧重在论述校准仪器、校准设备以及校准标准等方面的问题。

1.2. 目的和范围

本手册供建立和操作辐射监测仪器校准设备的人员参考。书中介绍的辐射源以及有关器械和校准技术，为建立校准实验室提供了若干供参考的例子，但并非说参考例子中所提到的方法和仪器是校准工作中唯一适用的。读者还可以在本书末所列的参考文献中找到其他大量的校准技术。

在计算剂量时，不良的校准设备曾经引起过很大的误差。使用辐射监测仪器的新手往往以为，仪器出厂前，对所有剂量率和能量范围都已进行过校准，并且都已在说明书中作了准确的说明。有了这种想法，在判断测量结果时，会导致很大的误差。

辐射测量仪器在医药、射线照像以及农业等方面应用很广，因此不可能在这本手册中对所有仪器的校准问题全部论述到。然而，这本手册中所谈到的校准原理，可以作为研究

* 国际辐射单位与测量委员会于 1971 年曾出版过第 20 号报告《Radiation Protection Instrumentation and Its Application》，有中译本。——译者注

各种辐射防护仪器校准问题的基础。

1.3. 量、单位、符号

为使用本手册方便起见，下面规定一些与校准仪器有关的基本量的定义。其中大多数是从国际辐射单位与测量委员会第 11 号报告^[1]中摘录出来的。

1. 粒子注量(Φ)是 ΔN 除以 Δa 之商，其中 ΔN 为进入一个截面为 Δa 的球体的粒子数。

2. 注量率或通量密度 (φ) = $\Delta\Phi/\Delta t$ ，其中 $\Delta\Phi$ 为 Δt 时间内的粒子注量。

3. 照射量(X) = $\Delta Q/\Delta m$ ，其中 ΔQ 是在体积元内质量为 Δm 的空气中由光子释出的全部电子（负电子和正电子）在空气中完全被阻止时所产生的单一符号离子的总电荷。关于这个单位的详细论述参看国际辐射单位与测量委员会第 11 号报告^[1]。照射量是大部分 γ 仪器要测量的量，它的专用单位为伦琴(R)。

1 伦琴 = 2.58×10^{-4} 库仑/公斤。

4. 照射量率 = $\Delta X/\Delta t$ ， ΔX 为 Δt 时间内的照射量。

5. (\bar{W}) 为在气体中形成一离子对的平均能量，(\bar{W}) = E/N ，其中 N 为起始动能为 E 的粒子完全被气体阻止时形成的离子对的平均数。

6. 吸收剂量(D) = $\Delta E_D/\Delta m$ ， ΔE_D 为电离辐射传递给体积元内质量为 Δm 的物质的能量。

吸收剂量的专用单位为拉德(rad)。

1 拉德 = $\frac{1}{100}$ 焦耳/公斤 = 100 尔格/克。

7. 吸收剂量率 = $\Delta D/\Delta t$ ， ΔD 为 Δt 时间内被吸收的能

量。

8. 以雷姆(rem)为单位的剂量当量定义为吸收剂量 D 、线质因数(QF)、吸收剂量分布因数(DF)以及其他必要的修正因数之乘积。

$$DF = D \cdot (QF) \cdot (DF)。$$

9. 发射 γ 的核素的 γ 射线常数(Γ)为 $l^2(\Delta X/\Delta t)/A$, 其中 $\Delta X/\Delta t$ 是离放射性强度为 A 的该核素点源 l 距离处的照射量率。 Γ 可用专用单位 伦琴·米²·小时⁻¹·居里⁻¹ 或者在带有 0.5 毫米铂滤片的镭源的情况下用 伦琴·米²·小时⁻¹·克⁻¹。

10. kV_{cp} 是一个恒电压产生器的电位差, 以千伏为单位。

11. QF 是线质因数, 通常定义为线能量转移(LET)的函数(见国际辐射单位与测量委员会第 10 b^[2]号报告第三节 101 页)。

12. 半值厚度(HVT)是使初始照射量率减少 50% 所需的物质厚度。(这里的半值厚度又叫做“第一半值厚度”)

13. 具有某半值厚度的 X 射线束的有效能量定义为具有相同半值厚度的单能 X 射线束的能量。

14. 一定量放射性核素的放射性强度(A)为 ΔN 除以 Δt 之商, 其中 ΔN 为 Δt 时间内该量放射性核素的核变化数。

2. 校准实验室的要求及应用技术

2.1. 校准的目的

在叙述校准辐射仪器所需的设备和技术之前，首先须明确校准的目的。应用本手册所讲到的仪器进行测量，目的通常是确定现场的情况，特别是现场工作人员所受到的辐射剂量^[3]。

根据国际放射防护委员会(ICRP)第12号报告[3a]，在记录剂量读数时，一般说来，与其确定真实的数值，不如确定器官剂量的上限。然而，习惯上还是记录个人剂量计探测阈以上的所有辐射剂量。因此，国际放射防护委员会建议，凡所接受年剂量很少可能超过年度最大容许水平1/3的工作人员，不需要进行个人监测和作相应的记录。但这种情况必须以常规个人监测中可能接受的不确定值不超过50%为限。该不确定值包括仪器校准和仪器本身的误差以及剂量计的灵敏度随入射能量和入射方向变化而产生的误差。尽管不确定值的限度(50%)是很宽裕的，但为了保证不超过这个限度，应特别慎重地对测量结果作出正确的判断。

即便使用最好的剂量计，至多也只能测出剂量的近似值。事实表明^[4]，纵使仪器准确地测出电磁辐射的照射量，但对测量结果进行换算以得到具体器官的剂量时，所应用的换算因数在很大程度上随光子的能量及射线对人体的入射方向而变化。例如，对于睾丸，该因数可以从0.05(对于从背后照射的30千电子伏的光子)，变到1.6(对于从正面照射的

100千电子伏的光子)。应该知道,绝大多数仪器只能反映辐射场中具体的物理参数,例如注量,而不能直接测出剂量。

校准室的主要任务如下:

1. 保证仪器使用正常;
2. 对于不带校准调节的仪器,弄清仪器读数的误差;对于带校准调节的仪器,尽可能改进仪器的总准确度;
3. 对不同设计的仪器进行细致的试验,以确定这些仪器测量结果的置信限。这类试验包括对仪器的能量响应、方向响应、环境效应的测量,以及本手册后面几个章节所叙述的其他测量;
4. 指导使用仪器的人选择他们所需的最有效的仪器,并向他们介绍与使用该仪器有重要关系的设计特点;
5. 提供用于设计和检验新仪器的辐射标准。

本手册广泛论述了一般校准设备和校准技术,至于具体校准室的规模大小,很大程度上决定于它所校准的仪器的类型以及使用这些仪器的条件。校准室的规模,小的可以只有一套简单的、用于常规检验的设备,大的可以具有进行不同辐射类型的能量响应实验以及环境实验的各种设备。比较好的校准室,一般有一套与国家基准相比较的次级标准设备,国家基准可能要在国际上进行对比。

本书后一部分将要论述次级标准与基准比较时、辐射仪器用次级标准校准时、以及这些仪器“在现场”测量时所产生的误差。

2.2. 方 法

校准辐射仪器的方法基本上有两种:一种是利用性质已经充分了解的辐射场;另一种是当辐射场不十分了解时采用

替代法。用第一种方法时，辐射场可以根据标准源某些参数的数据确定，或者用次级标准仪器测量。如果遇到某种情况（例如大量的散射辐射）使确定辐射场发生困难时，最好用替代法进行校准。替代法的基本原理是：先将一个与被校准仪器的型号相同的次级标准仪器放进辐射场中，记下它的读数，然后代之以被校准的仪器。比较两个仪器的读数，就得到校准结果。

如果所有校准测量都导源于基准（通常是通过次级标准），那是很理想的。然而，正如以后的章节将要谈到的，这点经常不能直接做到。例如，基准的 x 射线照射量率对所需校准的 γ 剂量计来说可能过高或过低，这就使得次级标准难以将剂量计的校准与基准联系起来，除非次级标准可以测量很广的照射量率范围。

对不同辐射类型响应的各种仪器的校准问题，将在下面论述该种辐射的章节中论述。

2.3. 电磁辐射

为校准 x 射线仪器和 γ 射线仪器提供数千电子伏至10兆电子伏的辐射场，需要一系列 x 射线设备及各种放射性核素源。还要求源强度的变化范围很宽，从天然本底到数千伦琴/小时。用于校准的理想辐射场，应具有分立的能量和准确了解的照射量率。分立能量之所以是理想辐射场的必要条件，是因为大多数仪器的灵敏度很大程度上随光子能量而改变。能量在300千电子伏以上，通常是用放射性核素源；在该能量以下，很少有足够长半衰期的放射性核素源，而且它们还往往发射不同能量的光子。因此，300千电子伏以下，通常用 x 射线机进行校准。

2.3.1. X 辐射

有两种辐射源可以用来确定仪器从数千电子伏至 300 千电子伏的能量响应,这就是荧光 X 射线和重过滤的 X 射线束。后者,不少人过去曾经用过^[5-7e],但目前应用荧光 X 射线技术较为普遍。

过滤的 X 辐射 在恒电压位下工作的 X 射线管所产生的 X 射线,其能谱强度在理论上为线性变化。参考文献[8]中,该变化用方程式 $N(E) dE = K \cdot i (E_0 - E) dE$ 表示,其中 $N(E)$ 为 E 至 $E + dE$ 能量范围内单位能量间隔的光子通量, i 为管流, K 为管的一个常数, E_0 为与管的恒电压相应的光子能量。图 1 中直线 a 表示这种谱。实际上,靶、管窗以及冷却剂都侧重吸收谱的低能部分。图 1 中曲线 b 表示经过固有过滤后的典型能谱。由于光子能量分布过宽,而且应用时一般照射量率过高,因而这种谱的 X 射线束实用价值不大。在 X 射线束的途中放上些厚滤片,可以获得用处较大的能谱。这些吸收片吸收谱的低能部分,大大缩小了谱的宽度(如图 1 中曲线 c 所示)。其侧重吸收低能光子是由于光电效应,(它在低能部分是主要的吸收过程)。最后得到的窄谱,照射量率也较低,便于校准辐射监测仪器。这里不一一列举适用的滤片,因为 X 射线机的固有过滤不同,它们的 X 射线谱也各不相同。各实验室所使用的滤片材料,已在本节开始所列举的参考资料中列出,表 1 综合了这些数据以及其他有关谱形的参数。在着手选择滤片以前,有一些问题须加以考虑,现阐述如下:

在滤片或靶材料的 K 吸收边缘产生的辐射,可能出现次级低能量峰^[9]。在使用 X 射线设备(例如调置在 200 千伏)加上厚的铅滤片时,可能在 88 千电子伏处出现一个由于铅的 K_{α} 辐射而产生的不需要的次级峰。可以用次级滤片来吸收

该 K_{α} 辐射。使用铅、锡、铜和铝组成的滤片可以得到合用的能谱。锡、铜及铝用来吸收铅的 K_{α} 辐射，铜与铝吸收锡的

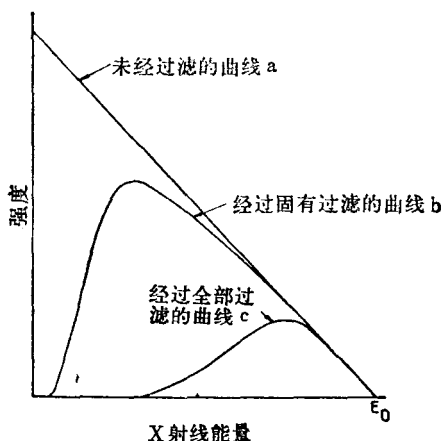


图 1 典型连续 X 射线谱

表 1 经过重过滤的 X 射线源详表
第一部分

固有过滤以外的附加过滤(毫米)				管电压 (千伏恒压)	平均 能量 ¹⁾ (千电 子伏)	宽度 ¹⁾ (千电 子伏)	有效 能量 (千电 子伏)	半值厚度 (毫米)
Pb	Sn	Cu	Al					
—	—	0.25	1.0	32	29	4	29	2.23 Al
—	—	1.0	1.0	53	46	8	46	0.245Cu
—	—	2.5	1.0	67	59	12	59	0.49 Cu
—	2.0	0.53	1.0	97	85	16	87	1.33 Cu
—	4.0	1.05	1.0	129	111	21	110	2.23 Cu
2.0	3.0	0.53	1.0	171	152	22	154	3.90 Cu
3.5	2.0	0.53	1.0	203	181	28	188	4.95 Cu
5.5	2.0	0.53	1.0	224	203	29	209	5.54 Cu

在250千伏时X射线机的固有过滤为2毫米铝，数据取自参考文献[6]。

¹⁾ 测量结果取自参考文献[12]。

第二 部 分

管电压 (千伏恒压)	$E_{\text{平均}}^{1)}$ (千电子伏)	半高度处 谱的宽度 (ΔE)	$\sigma^{2)}$ (千电 子伏)	$\Delta^{3)}$ (%)	1 米处的照射 量率(毫伦/ 小时·毫安)	滤 片 (毫米)
40	29	12	5.1	30	360	0.1Cu+4.0Al
60	48	17	7.6	29	1320	0.6Cu+4.0Al
80	66	20	9.0	26	240	2.0Cu+4.0Al
100	83	23	11.0	23	138	5.0Cu+4.0Al
120	99	27	12.7	22	210	1.0Sn+5.0Cu+ 4.0Al
150	119	43	16.5	29	1000	2.5Sn+4.0Al
200	157	50	20.4	25	210	1.0Pb+3.0Sn+ 2.0Cu+4.0Al
250	205	62	28.5	25	252	3.0Pb+2.0Sn+ 4.0Al
300	248	84	31.8	28	240	5.0Pb+3.0Sn+ 4.0Al

数据取自参考文献[11]。

1) $E_{\text{平均}}$ = 在谱的最大值处的能量。

2) σ = 高斯分布的标准偏差。

3) Δ = 以百分比计算的 ΔE /千伏恒压(“分辨率”)。

第 三 部 分

管电压 (千伏恒压)	X射线 电 流 (毫安)	主要滤片 ¹⁾ (克/厘米 ²)	有效能量 (千电子伏)	谱 峰 (千电子伏)	半高度处 谱的宽度 (千电子伏)	50厘米处的 照射量率 (毫伦/分)
100	15	2.0Mo	84	86	24	70
130	15	4.0Mo	108	108	30	67
170	15	8.0Mo	135	140	36	95
200	15	9.0Sn	162	164	39	72
250	10	15.0Sn	205	205	46	73
300	10	8.0Pb	242	247	60	68

数据取自参考文献[13]。

¹⁾ 滤片放在两张 0.8 毫米厚的铝片之间。

第四部分

千伏调整	滤片材料及厚度 (厘米)	理论平均 能量 (千电子伏)	实验有效 能量 (千电子伏)
100	0.0137Al+0.0457Pb+0.196Cu	85	88—92
150	0.245U+0.0368Cd	115	100—127
200	0.2208Cd+0.0254Pt	156	149—164
236	0.0254U+0.0457Pb+0.0254Pt+ 0.0368Cd	185	187

数据取自参考文献[14]。

29千电子伏 K_{α} 辐射，而铝滤片吸收铜的9千电子伏 K_{α} 辐射。铝的特征辐射能量为1.6千电子伏，很容易被几厘米的空气吸收。用做滤片的材料必须是高纯度的。参考文献[10]中对滤片不纯的效应进行了研究。如果使用一个尚未研究过的滤片组合，就要对得到的能谱进行一次测量。最好是用NaI晶体谱仪或Ge(Li)谱仪测量^[11]。如果用表1所示的滤片组合，要求在各种情况下总过滤效果（固有过滤加上附加过滤）必须是一样的。特别是对于低能X射线，当固有过滤与附加过滤之比增加时，这点更加重要。如果通过能谱测量测出总过滤的效果（固有过滤加上附加过滤）能产生满意的谱形时，那么，当使用原来的滤片而另换一架X射线机时，射线的性质最好用吸收法测定一下。吸收体在某一厚度，能减少原来照射量（当射线束中无吸收体时）50%时，该厚度叫做吸收体的半值厚度。在管压超过10千伏_{管压}时，铝是适用的吸收体，当管压超过35千伏_{管压}时，铜是适用的吸收体。从测出的铝的或铜的半值厚度，参考相应的吸收数据的文献，就可以推算出X射线束的有效能量。

具有某一半值厚度的X射线束的有效能量，定义为具有

相同半值厚度的单能 X 射线束的能量。测量半值厚度的方法，在国际辐射单位与测量委员会第 85 号手册^[2]及特鲁特 (Trout) 的文献^[2 a]中进行了详细的论述。测量半值厚度时，要求管压和管流保持常数。如果用一个射线监测器检验输出，应当检查吸收片放进射线束中时是否影响监测器的读数。吸收片最好放在源与探测器之间的中点。用来测量半值厚度的电离室应放在离源 100 厘米处，吸收片应放在离源 50 厘米处。在可能使用的能谱范围内，电离室的灵敏度变化不应超过 5%，并须了解其变化的规律，以便利用相应的能量校正因数进行修正。

图 2 表示使用 X 射线机校准仪器时的器械布置简图。

使用重过滤时会发生两个问题：

i. X 射线机的电压或波形的任何变化会引起能谱和照射量率明显的改变。X 射线管的电压(千伏_{恒压})、发热程度和老化情况的改变都会引起辐射谱和照射量率的变化。不宜简单地通过改变管流去改变照射量率，因为管流的变化会引起管载的变化，因而管压和辐射谱也随着发生改变。要想得到可重复的能谱，最好是装置一个测量管压(千伏_{恒压})的量表。当改变管流时，相应地调整电压，使它保持固定的千伏_{恒压}，这样，一定的滤片组合可以得到相同的能谱。这种方

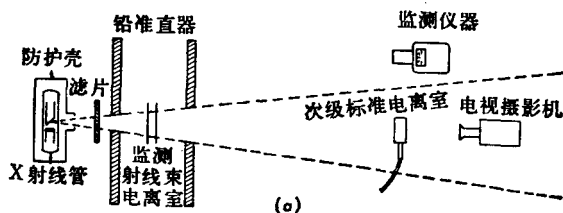


图 2 使用过滤过的 X 射线时的校准设备(a)简图

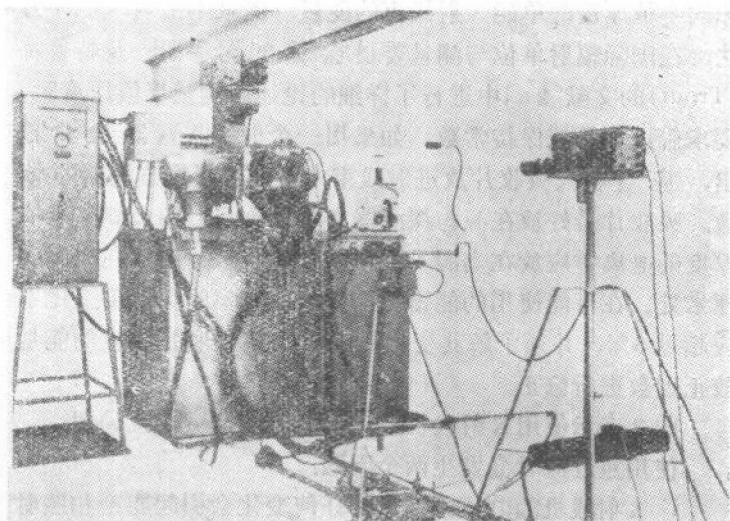


图 2 使用过滤过的 X 射线时的校准设备(b)照片
法获得可变的照射量率，比改变过滤片的方法更易做到。

ii. 用重过滤法产生的照射量率比对照基准进行校准时的照射量率要低得多。

对 30 千电子伏至 300 千电子伏间的能量，在国家实验室对照基准校准时通常是在高照射量率下进行的。测量重过滤 X 射线束中的照射量率，最好是用对照基准校准过的次级标准仪器，但往往不能做到，因为基准实验室所用的照射量率通常比次级标准实验室所用的照射量率高得多。解决这个问题的办法，是用两个相同的探测器[通常是用石墨电离室或塔诺耳(tufnol)空腔电离室]，一个探测器联接在适应基准水平产生的大电离电流的电子测量系统上，另一个探测器联接在可以测量低照射量率的较灵敏的电子测量系统上。第一个探测器对照基准进行校准，然后与第二个探测器比较在重过滤 X