JJF



**中华人民共和国国家计量技术规范**

**JJFXXXX－XXXX**

**环境γ能谱仪校准规范**

Calibration Specification of γ Ray Spectrometer for Environmental Monitoring

(征求意见稿)

XXXX－XX－XX发布 XXXX－XX－XX实施

**国家市场监督管理总局 发布**

环境γ能谱仪校准规范

JJF XXXX-XXXX

Calibration Specification of   
γ Ray Spectrometer for Environmental Monitoring

归口单位: 全国电离辐射计量技术委员会

起草单位: 上海市计量测试技术研究院

中核核电运行管理有限公司

浙江省辐射环境监测站（生态环境部辐射环境监测技术中心）

本规范委托全国电离辐射计量技术委员会负责解释

**本规范主要起草人：**

赵 超 （上海市计量测试技术研究院）

何林锋 (上海市计量测试技术研究院)

朱月龙 (中核核电运行管理有限公司)

张 瑜 (浙江省辐射环境监测站)

陆小军 (上海市计量测试技术研究院)

**参加起草人：**

颜 华 (中核核电运行管理有限公司)

李 斌 (浙江省辐射环境监测站)

目 录

[引 言 3](#_Toc176163373)

[1 范围 4](#_Toc176163374)

[2 引用文件 4](#_Toc176163375)

[3 术语和计量单位 4](#_Toc176163376)

[3.1 术语 4](#_Toc176163377)

[3.2 计量单位 5](#_Toc176163378)

[4 概述 5](#_Toc176163379)

[5 计量特性 6](#_Toc176163380)

[5.1 本底计数率 6](#_Toc176163381)

[5.2 能量分辨力 6](#_Toc176163382)

[5.3 探测效率系数 6](#_Toc176163383)

[6 校准条件 6](#_Toc176163384)

[6.1 环境条件 6](#_Toc176163385)

[6.2 测量标准及其他设备 6](#_Toc176163386)

[6.2.1 137Cs点参考源 6](#_Toc176163387)

[6.2.2 能量校准源 7](#_Toc176163388)

[6.2.3 其它校准用设备 7](#_Toc176163389)

[7 校准项目和校准方法 7](#_Toc176163390)

[7.1 本底计数率 7](#_Toc176163391)

[7.2 能量分辨力 7](#_Toc176163392)

[7.3 能量校准 8](#_Toc176163393)

[7.4 探测效率系数 8](#_Toc176163394)

[8 校准结果表达 9](#_Toc176163395)

[9 复校时间间隔 9](#_Toc176163396)

[附录A 10](#_Toc176163397)

[附录B 11](#_Toc176163398)

[附录C 12](#_Toc176163399)

[附录D 17](#_Toc176163400)

## 

引 言

本规范依照JJF 1071-2010《国家计量校准规范编写规则》编制。

本规范的编制主要参考JJF1001-2011《通用计量术语及定义》、GB/T 4960.6-2008《核科学技术术语 第6部分：核仪器仪表》、IEC 61453:2007《核仪器 放射性核素分析用闪烁体γ探测器系统 校准和常规测试》 （Nuclear instrumentation - Scintillation gamma ray detector systems for the assay of radionuclides - Calibration and routine tests）、JJF 1744-2019 《闪烁体探测器γ谱仪校准规范》等标准、规范。

本规范为首次制定。

环境γ能谱仪校准规范

## 1 范围

本规范适用于布置在室外环境，用于监测环境中γ放射性核素的闪烁体探测器γ能谱仪的现场校准。

本规范不适用于实验室用半导体或闪烁体探测器γ能谱仪的校准。

## 2 引用文件

本规范引用下列文件：

JJF1001-2011 通用计量术语及定义

GB/T 4960.6-2008 核科学技术术语 第6部分：核仪器仪表

IEC 61453:2007核仪器 放射性核素分析用闪烁体γ探测器系统 校准和常规测试（Nuclear instrumentation - Scintillation gamma ray detector systems for the assay of radionuclides - Calibration and routine tests）

JJF 1744-2019 闪烁体探测器γ谱仪校准规范

上述凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本规范；凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本规范。

## 3 术语和计量单位

## 3.1 术语

JJF 1001-2011、JJF 1035-2006界定的及以下术语和定义适用于本规范。

* + 1. 本底 background

除环境辐射外无外部辐射来源时，仪器测量数据。

* + 1. 全能峰 full-energy peak

入射射线的能量全部损失在仪器探测器灵敏体积内时，所形成的谱峰。

* + 1. 总计数 gross count

测量能谱在一定能量/道址区域内的总计数。对于全能峰，优先取仪器配套软件自动识别的全能峰区域，无配套软件或软件无法识别的，对扣除本底的能谱，以峰尖处的十分之一高度对应位置为边界确定全能峰区域。

* + 1. 净计数 net count

总计数扣除对应区域本底计数所得结果。

* + 1. 半高宽 full width at half maximum, FWHM

扣除本底后的能谱，峰高一半处的峰宽度，以能量或道址表示。

* + 1. 活时间 live time

测量期间，仪器对入射射线有响应的持续时间，由仪器给出。

* + 1. 计数率 count rate

计数与活时间之比。

* + 1. 能量分辨力 energy resolution

仪器对不同能量γ射线的分辨能力，以全能峰半高宽与全能峰峰位之比表示。

* + 1. 探测效率系数 detection efficiency coefficient

不考虑空气对γ射线的吸收，随着测量距离增加，仪器对某核素点源特征射线的全能峰探测效率与距离平方乘积趋向于常数，定义该常数为仪器对该核素特征射线的探测效率系数。

## 3.2 计量单位

* + 1. [放射性] 活度

贝可[勒尔]，符号：Bq。

* + 1. 探测效率系数

平方厘米，符号：cm2。

## 4 概述

环境γ能谱仪主要包括闪烁体探测器、高压电源、光电倍增管、前置放大器、多道脉冲幅度分析器、数据处理系统等部件，其中闪烁体探测器主要有NaI(Tl)和LaBr3(Ce)两种类型。环境γ能谱仪布置于室外环境，环境中放射性核素发射的γ射线与闪烁体探测器相互作用，激发的光子被光电倍增管转化为电信号，经过前置放大器、多道脉冲幅度分析器、数据处理系统处理转化为γ能谱。通过分析测量的γ能谱，可确定环境中存在的γ放射性核素种类，并估算其放射性水平。

环境γ能谱仪主要用于核设施周边、城市等代表性区域的环境放射性水平连续在线监测。

## 5 计量特性

## 5.1 本底计数率

标准试验条件下，环境γ能谱仪在（59~3 000） keV能区内，本底计数率典型值不大于1000 s-1。

## 5.2 能量分辨力

标准试验条件下，NaI(Tl)晶体的环境γ能谱仪能量分辨力不超过9 %，LaBr3(Ce)晶体的环境γ能谱仪能量分辨力不超过5 %。

## 5.3 探测效率系数

标准试验条件下，环境γ能谱仪对137Cs 661.7 keV全能峰的探测效率系数不小于0.5 cm2。

注：以上指标不用于合格性判别，仅供参考

## 6 校准条件

## 6.1 环境条件

* + 1. 温度：（-15～40） ºC，校准测量过程中变化不超过±3 ºC。
    2. 相对湿度：不大于95 %。
    3. 校准时，仪器不应受到震动和电磁场干扰。
    4. 校准时，环境中不得存在明显干扰测量的辐射源。

## 6.2 测量标准及其他设备

## 6.2.1 137Cs点参考源

活度范围：（103-106） Bq。

相对扩展不确定度：*U*rel ≤ 5% （*k*=2）。

137Cs点源为点状薄膜源，源斑位于源托中心，直径不大于3.0 mm，偏离中心小于1.5 mm。用于探测器分辨率测试、探测效率系数的校准。

## 6.2.2 能量校准源

推荐核素：241Am、57Co、 137Cs、60Co、22Na、228Th（208Tl）。

活度范围：（103-104） Bq。

能量校准源用于能量校准。

## 6.2.3 其它校准用设备

包括校准测量用支架、激光水平仪、测距仪与卷尺等。用于支撑137Cs点参考源和能量校准源，保证137Cs点参考源处于被校仪器晶体中心点所在水平面。距离测量相对标准不确定度不超过1 %。

## 校准项目和校准方法

## 本底计数率

待校准γ能谱仪开机超过60 min，在其日常监测环境中，且没有外部异常辐射来源的情况下，连续测量不少于30 min得到本底能谱（注：校准使用的能谱均可由多个连续测量的能谱叠加得到，以满足测量时间或总计数的要求），取本底能谱（59~3000） keV能区内总计数，按公式（1）计算待校准γ能谱仪本底计数率。

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
|  | | | （1） | |
| 式中： |  | — 待校准γ能谱仪本底计数率，s-1（cps）; | |
|  |  | — 本底能谱（59~3000） keV能区内总计数，无量纲； | |
|  |  | — 本底测量活时间（由仪器给出），s。 | |

环境γ能谱仪一般日常连续运行，测得的本底能谱应与其日常监测能谱做对比，本底计数率明显偏离日常监测结果的，应排查异常原因并重新测量。

## 能量分辨力

将137Cs点参考源置于探测器附近合适的位置，保证全谱净计数率小于1000 s-1，661.7 keV全能峰净计数率不小于对应区域本底计数率的10倍，661.7 keV全能峰净计数不少于10000个，记录该全能峰的半高宽和峰位（以能量或道数表示），仪器能量分辨力按式（2）计算。

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
|  | | | （2） | |
| 式中： | *R* | — 仪器能量分辨力，%； | |
|  | *FWHM* | — 全能峰的半高宽，以能量或道数表示； | |
|  | *P* | — 峰位，以能量或道数表示。 | |

## 能量校准

将能量校准源置于探测器附近合适的位置，保证全谱净计数率小于1000 s-1，校准用全能峰净计数率不小于对应区域本底计数率的10倍，校准用全能峰净计数不少于10000个，记录源的特征γ射线能量和相应全能峰峰位道址。能量校准的函数关系可近似由拟合二次多项式表示，表示为式（3）：

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
|  | | | （3） | |
| 式中： | *E* | — 特征γ射线能量，keV； | |
|  | *H* | — 全能峰峰位道址，无量纲； | |
|  |  | — 拟合参数，零道址对应能量，keV； | |
|  |  | — 拟合参数，线性项系数，keV； | |
|  |  | — 拟合参数，非线性项系数，keV。 | |

若被校仪器软件系统采用线性模型，或校准方与送检方协商一致，也可采用线性模型表示能量校准的函数关系，此情况下非线性项系数取0。

## 探测效率系数

定探测器晶体中心点到晶体边缘的最大距离为*r*（单位：cm）。在探测器中心点所在水平面，距离探测器中心点超过10倍*r*的任意位置放置137Cs点参考源（不得采用任何准直手段），保证661.7 keV全能峰净计数率不低于对应本底计数率，且661.7 keV全能峰净计数不少于10000。按公式（4）计算待校准γ能谱仪对137Cs 661.7 keV特征峰的探测效率系数。

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
|  | | | （4） | |
| 式中： |  | — 仪器对137Cs 661.7 keV特征峰的探测效率系数，cm2； | |
|  |  | — 137Cs点参考源到探测器中心点距离，cm； | |
|  |  | — 与距离*D*相关的空气吸收修正因子，参照附录D取值，无量纲； | |
|  |  | — 661.7 keV全能峰净计数率，s-1（cps）； | |
|  |  | — 137Cs点参考源活度参考值，Bq； | |
|  |  | — 137Cs 661.7 keV特征峰发射几率，85.1%。 | |

探测效率系数可用于定量估算周围环境中对应核素的活度浓度，详见附录D。由于探测效率系数的应用需要送校单位代入特定模型使用，建议仅在送校单位明确需要时开展。送交单位还可根据需要选做其它核素的探测效率系数，公式（4）做对应调整。

## 8 校准结果表达

按本规范进行校准，出具校准证书，校准证书内页格式见附录B；校准结果应给出响应校准结果的不确定度（评定示例见附录C）。

## 9 复校时间间隔

建议复校时间间隔为12个月。由于复校时间间隔的长短是由仪器的使用情况、使用者、仪器本身质量等多种因素所决定的，因此，送校单位可根据实际使用情况自主确定复校时间间隔。

## 附录A

校准记录推荐格式

A.1 本底计数率

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| （59~3 000）keV总计数 | 测量活时间（s） | 本底计数率（s-1） |
|  |  |  |

A.2 能量分辨力

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 半高宽*FWHM* | 峰位*P* | 能量分辨力*R*（%） |
|  |  |  |

A.3 能量校准

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 核素 | 特征γ射线能量*E*（keV） | 全能峰峰位道址*H* |
|  |  |  |
|  |  |  |
|  |  |  |
|  |  |  |
|  |  |  |

A.4探测效率系数

|  |  |
| --- | --- |
| 距离*D（*cm） |  |
| 全能峰总计数率（s-1） |  |
| 本底计数率（s-1） |  |
| 全能峰净计数率（s-1） |  |
| 空气吸收修正因子*F* |  |
| 参考源活度（Bq） |  |
| 特征峰发射几率*I* |  |
| 探测效率系数*K*（cm2） |  |

## 附录B

校准证书内页内容

B.1 校准证书内页内容

至少应包括下列信息：

a) 被校对象的名称、型号、编号；

b) 本次校准所用测量标准的溯源性及有效性说明；

c) 本次校准时的环境温度、湿度、气压；

e) 校准结果及其测量不确定度的说明。

B.2 校准结果

1. 本底计数率

2. 能量分辨力

3. 能量校准（提供拟合公式）

4. 探测效率系数（根据送校单位的实际需要提供）

## 附录C

探测效率系数的不确定度评定示例

C.1 测量条件与测量方法

C.1.1 环境条件：

暴露时实验室环境条件，温度：27 °C，相对湿度：60 %；

周围环境无干扰测量的电磁场与震动，不存在干扰测量的辐射源。

C.1.2 测量标准：

137Cs点参考源，活度：2.11×105 Bq，*U*rel = 4.0% （*k*=2）。源斑位于源托中心，直径约2.0 mm，偏离中心小于1.0 mm。

激光测距仪，最大允许误差：±（2 mm+10-4×读数）

直尺，最大允许误差：±0.5 mm

C.1.3 测量参数：环境γ能谱仪对137Cs 661.7 keV特征峰的探测效率系数。

C.1.4 测量方法：按照本校准规范第7.4条。

C.2 测量模型

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
|  | | | （C-1） | |
| 式中： |  | — 仪器对137Cs 661.7 keV特征峰的探测效率系数，cm2； | |
|  |  | — 137Cs点参考源到测器中心点距离，cm； | |
|  |  | — 与距离*D*相关的空气吸收修正因子，参照附录D取值，无量纲； | |
|  |  | — 661.7 keV全能峰净计数率，s-1（cps）； | |
|  |  | — 137Cs点参考源活度参考值，Bq； | |
|  |  | — 137Cs 661.7 keV特征峰发射几率，85.1%。 | |

本示例中涉及不确定度的计算，数字修约规则均采用进位修正。

C.3 输入量的标准不确定度评定

C.3.1 输入量的标准不确定度

输入量137Cs点参考源到测器中心点距离的标准不确定度，根据测量设备的最大允许误差，采用B类评定方法评定。

输入量137Cs点参考源到测器中心点距离由激光测距仪和直尺配合测量得到，其中激光测距仪测量点源到探测器表面的最短距离*d*1，直尺测量探测器直径*d*2，距离D按公式（C-2）计算。激光测距仪与直尺的测量结果不确定度均由其最大容许误差估算，根据均匀分布的假设，取倍半高宽。并由误差合成公式计算D的标准不确定度，各距离的结果及标准不确定度见表C.1。

|  |  |
| --- | --- |
|  | （C-2） |
|  | （C-3） |

表C.1 距离测量结果及不确定度

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  | *d*1 (cm) | *d*2 (cm) | *D* (cm) |
| 取值 | 76.0 | 8.0 | 80.0 |
| 标准不确定度 | 0.4 | 0.09 | 0.5 |

C.3.2 输入量的标准不确定度

输入量空气吸收修正因子接近1时，也即空气吸收比例非常低的情况下，其不确定度相对可以忽略。

具体对于本次测量来说，空气吸收修正因子为137Cs能量为661.7 keV的特征射线，在通过距离*D*（取值为80 cm）后，被空气吸收后的剩余比例，其取值根据附录D为0.992，也即空气吸收比例仅0.8%。此时，输入量的不确定度相对可以忽略。

C.3.3 输入量的标准不确定度

输入量净计数率按公式（C-3）计算。根据公式（C-3）按误差传递公式计算的不确定度。

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  | | | （C-4） |
| 式中： |  | — 661.7 keV全能峰总计数，无量纲； | |
|  |  | — 本底测量谱在661.7 keV全能峰区域计数，无量纲； | |
|  |  | — 探测效率系数测量的活时间，s； | |
|  |  | — 本底测量的活时间，s。 | |

总计数输入量净计数率按公式（C-4）计算。由公式（C-4），得到误差传递公式（C-5）。

|  |  |
| --- | --- |
|  | （C-5） |

总计数与本底计数满足珀松分布，其标准不确定度等于其平方根。测量时间*t*与本底测量时间*t*b的不确定度可以忽略。由此计算输入量净计数率的不确定度如表C.2所示。

表C.2 距离测量结果及不确定度

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  |  |  | (s) | (s) | (s-1) |
| 取值 | 42234 | 22027 | 599.84 | 3599.13 | 64.3 |
| 标准不确定度 | 206 | 149 | / | / | 0.4 |

C.3.4 输入量的标准不确定度

输入量137Cs点参考源活度参考值的标准不确定度，根据溯源证书给出的不确定度值，采用B类方法评定。

137Cs点参考源活度参考值为2.11×105 Bq，相对扩展不确定度*U*rel 为 4.0%，包含因子*k*=2。

|  |  |
| --- | --- |
|  | （C-6） |

C.3.5 输入量的标准不确定度

输入量137Cs 661.7 keV特征峰发射几率的标准不确定度，根据核数据库给出的标准不确定度直接确定。

根据IAEA的Nuclear Data Services数据库，取值为0.851，其标准不确定度取值为0.002。

C.4 合成标准不确定度的计算

对测量模型求偏导得灵敏系数计算公式如下（输入量贡献的不确定度可忽略）：









上述公式中各符号的含义及取值见表C.3。

表C.3 标准不确定度汇总表s

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 输入量 | 不确定度来源 | 标准不确定度 | 灵敏系数 |
|  | 测距仪器的 测量不确定度 | 0.5 cm | 0.049cm |
|  | 总计数、净计数的不确定度 | 0.4 s-1 | 0.012 cm2 Bq-1 |
|  | 137Cs点参考源活度参考值的不确定度 | 0.05×105 Bq | -0.047 cm2 Bq-1 |
|  | 核数据的不确定度 | 0.002 | -2.71 cm2 |

各种来源的不确定度相互独立，按方和根合成，输出量的合成标准不确定度为：



C.5 相对扩展不确定度

取包含因子*k* = 2，被校仪器响应的相对扩展不确定度为：



该环境γ能谱仪对137Cs探测效率系数测量结果的相对扩展不确定度为：

*U*rel = 7 %，*k* = 2

## 附录D

探测效率系数

D1. 用途

环境γ能谱仪的监测能谱反映了其周围环境中γ放射性核素的含量。理论上，周围环境中某放射性核素的平均浓度正比于其对应全能峰净计数，称该比例系数为响应系数。

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
|  | | | （D-1） | |
| 式中： |  | — 某核素在空气中（地表）的浓度，Bq cm-3（Bq cm-2）； | |
|  |  | — 某核素某特征峰的净计数率，无量纲； | |
|  |  | — 仪器对某核素某特征峰的响应系数，cm3（cm2）。 | |

响应系数代表仪器对无限大源项的响应能力，无法直接用实验方法测量。环境γ能谱仪对环境中放射性核素的探测效率决定了其响应系数。在不考虑空气吸收的情况下，环境γ能谱仪对环境源项的探测效率与其距离平方之积趋向于常数，即探测效率系数。利用探测效率系数，可以计算环境γ能谱仪对大部分空间源项的探测效率，代入适合的理论模型，可以计算仪器对该核素的响应系数，进而定量估算周围环境中该核素的浓度。

以悬浮在空气中的放射性核素浓度估算为例，根据半无限大理论模型：

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
|  | | | （D-1） | |
| 式中： |  | — 仪器对某核素某特征峰的探测效率系数，cm2； | |
|  |  | — 某核素某特征峰的发射几率，无量纲； | |
|  |  | — 空气质量吸收系数，cm2/g； | |
|  |  | — 空气密度，g/cm3； | |
|  |  | — 环境源项微元到探测器中心距离，cm。 | |

值得注意的是，公式（D-1）所描述的模型仅仅适用于地表较平整，周围无遮挡，且放射性核素均匀分布在仪器周围空气中的情况。对于其它情况，如周围存在明显遮挡、核素沉积在地表等情况，需要采用更复杂的模型计算响应系数。但不管何种情况，探测效率系数都是估算响应系数必不可少的参数。

D2. 修正计算

探测效率系数的计算，需要考虑空气吸收修正因子。空气吸收修正因子按公式（D-3）计算。

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
|  | | | （D-3） | |
| 式中： |  | — 空气吸收修正因子，无量纲； | |
|  |  | — 空气质量吸收系数，cm2/g； | |
|  |  | — 空气密度，g/cm3； | |
|  |  | — 点参考源到测器中心点距离，cm。 | |

表D-1列出了几种重要人工核素重要特征射线的空气质量吸收系数，由美国国家标准与技术研究院（NIST）光子截面数据库计算而来。

表D-1 重要特征射线空气吸收系数

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 核素 | 特征射线能量 (keV) | 发射几率 | 空气吸收系数 (cm2/g) |
| 85Kr | 151.20 | 75.18 % | 0.135 |
| 85Kr | 304.87 | 14.03 % | 0.106 |
| 133Xe | 81.00 | 36.90 % | 0.166 |
| 133Xe | 233.22 | 10.12 % | 0.117 |
| 131I | 284.31 | 6.12 % | 0.109 |
| 131I | 364.49 | 81.50 % | 0.099 |
| 131I | 636.99 | 7.16 % | 0.078 |
| 241Am | 59.54 | 35.90 % | 0.188 |
| 137Cs | 661.66 | 85.10 % | 0.077 |
| 60Co | 1 173.23 | 99.85 % | 0.059 |
| 60Co | 1 332.49 | 99.98 % | 0.055 |

空气密度按公式（D-4）计算

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
|  | | | （D-4） | |
| 式中： |  | — 空气密度，g/cm3； | |
|  |  | — 标准状况下空气密度，等于1.29×10-3 g/cm3； | |
|  |  | — 校准时环境气压，kPa； | |
|  |  | — 标准大气压，等于101 kPa； | |
|  |  | — 标准空气温度，273.15 K； | |
|  |  | — 校准时环境气温，ºC。 | |

参考文献

1. 何林锋, 唐方东, & 赵超. (2018). 环境 γ 谱仪对大气中放射性核素活度浓度响应系数测量方法. *核技术*, 41(8), 080401. <http://dx.doi.org/10.11889/j.0253-3219.2018.hjs.41.080401>