直读式中子剂量当量仪和监测仪校准规范（制定）

编制说明

# 1 任务来源

中国工程物理研究院材料研究所向全国电离辐射计量技术委员会提出申请，申请制定《直读式中子剂量当量仪和监测仪校准规范》。2019年9月，依据市监计量函[2019] 42号《市场监管总局计量司关于国家计量技术规范制定、修订及宣贯计划有关事项的通知》等有关文件的要求，经各专业计量技术委员会委员专家评审、上报市场监管总局批复后，下达了2019年国家计量技术规范制修订计划项目表。《直读式中子剂量当量仪和监测仪校准规范》主要起草单位有中国工程物理研究院材料研究所、中国计量科学研究院、中国工程物理研究院应用电子学研究所，参加起草单位有中国原子能科学研究院和中国工程物理研究院材料研究所，归口单位为全国电离辐射计量技术委员会。

# 2 编制过程

本规范由中国工程物理研究院材料研究所、中国计量科学研究院、中国工程物理研究院应用电子学研究所、中国原子能科学研究院共同起草，负责制定。本规范制定计划任务的完成时间为2024年第4季度。

自2020年起，本规范起草小组开始查阅收集相关资料，参考国内、国际相关计量技术法规、标准、文件等形成校准规范初稿。《直读式中子个人剂量当量仪和监测仪校准规范》为首次制定，起草小组对参考依据、验证试验等保持谨慎态度。

在编制《直读式中子个人剂量当量仪和监测仪校准规范》初稿期间，起草小组引用了GB/T 14055.1-2008/ISO 8529-1: 2001《中子参考辐射 第1部分：辐射特性和产生方法》、GB/T 14055.2-2012/ISO 8529-2: 2000《中子参考辐射 第2部分：与表征辐射场基本量相关的辐射防护仪表校准基础》、ISO 8529-3: 1998《中子参考辐射 第3部分：场所剂量仪和个人剂量仪的校准及其能量响应和角响应的确定》（Reference neutron radiations – Part 3: Calibration of area and personal dosimeters and determination of their response as a function of neutron energy and angle of incidence）。但是，2021年，ISO发布了ISO 8529-1: 2021《中子参考辐射 第1部分：辐射特性和产生方法》（Reference neutron radiations – Part 1: Characteristics and methods of production），ISO 8529-1: 2021相较于ISO 8529-1: 2001有较大变化。2023年，ISO发布了ISO 8529-3: 2023《中子参考辐射 第3部分：场所剂量仪和个人剂量仪的校准及其能量响应和角响应的确定》（Reference neutron radiations – Part 3: Calibration of area and personal dosimeters and determination of their response as a function of neutron energy and angle of incidence），ISO 8529-3: 2023相较于ISO 8529-3: 1998有较大变化。GB/T 14055.1、GB/T 14055.2、ISO 8529-2尚未有新的版本。经多方面考虑，起草小组仍引用GB/T 14055.1、GB/T 14055.2和ISO 8529-3，但不注日期。

ISO 8529-3并没有明确规定中子个人剂量当量仪的校准程序，一个模糊的校准方法是扣除中子辐照房间中散射中子对被校仪器读数的贡献。GB/T 14055.2/ISO 8529-2给出了中子周围剂量当量率仪的4种散射中子扣除方式，但是并没有推荐中子个人剂量当量仪的散射中子扣除方法。此外，由于中子个人剂量当量仪的灵敏度低，校准中子个人剂量当量仪存在诸多困难。相较于中子周围剂量当量仪，中子个人剂量当量测量的主要是剂量当量，而不是剂量当量率，通过重复测量减少统计不确定性使测量时间更长。因此，中子个人剂量当量仪的校准要更复杂得多，起草小组在验证试验中耗时更多。

在对初稿进行修改期间，BIPM组织了BIPM.CCRI(III)-S2.Hp(10)直读式中子个人剂量当量仪国际校准比对，16个国家计量院参比，韩国KRISS为主导实验室，比对期限为2022年2月至2024年12月，各参比单位应在比对报告中描述散射中子的影响。中国计量科学研究院于2022年参与了此次国际比对，并提交了比对报告。参与此次国际比对，为形成本规范征求意见稿提供了宝贵的经验。

起草小组成员经多次讨论、修改，就规范的校准项目、校准方法等达成共识。2024年3月，起草小组完成校准规范的征求意见稿，向全国电离辐射计量技术委员会全体委员及专家征求意见。

# 3 规范名称和适用范围

## 3.1 规范名称

本规范名称为《直读式中子个人剂量当量仪和监测仪校准规范》。

## 3.2 适用范围

在适用范围中，本规范规定了适用于监测中子个人剂量当量*H*p(10)的直读式中子个人剂量当量仪和监测仪的校准，不适用于脉冲中子辐射场的直读式中子个人剂量当量仪和监测仪的校准。

# 4 编写依据

本规范主要编写依据如下：

1. JJF 1001-1998《通用计量术语及定义》；
2. JJF 1035-2006《电离辐射计量术语及定义》；
3. JJF 1071-2010《国家计量校准规范编写规则》；
4. GB/T 13161-2015/IEC 61526: 2010《辐射防护仪器 测量X、γ、中子和β辐射个人剂量当量*H*p(10)和*H*p(0.07)——直读式个人剂量当量仪（Radiation protection instrumentation – Measurement of personal dose equivalents *H*p(10) and *H*p(0.07) for X, gamma, neutron and beta radiations – Direct reading personal dose equivalent meters）》；
5. GB/T 14055.1-2008/ISO 8529-1: 2001《中子参考辐射 第1部分：辐射特性和产生方法（Reference neutron radiations – Part 1: Characteristics and methods of production）》；
6. GB/T 14055.2-2012/ISO 8529-2: 2000《中子参考辐射 第2部分：与表征辐射场基本量相关的辐射防护仪表校准基础（Reference neutron radiations – Part 2: Calibration fundamentals of radiation protection devices related to the basic quantities characterizing the radiation field）》；
7. ISO 8529-3: 2023《中子参考辐射 第3部分：场所剂量仪和个人剂量仪的校准及其能量响应和角响应的确定（Reference neutron radiations – Part 3: Calibration of area and personal dosimeters and determination of their response as a function of neutron energy and angle of incidence）》。

同时，本规范还参考了以下文件：

1. JJG 393-2018《便携式X、γ辐射周围剂量当量（率）仪和监测仪》；
2. JJG 593-2016《个人和环境监测用X、γ辐射热释光剂量测量系统》；
3. JJG 852-2019《中子周围剂量当量（率）仪》；
4. JJG 1009-2016《X、γ辐射个人剂量当量*H*p(10)监测仪》；
5. JJG（军工） 25-2012《直读式中子个人剂量当量计和监测仪》；
6. JJG（军工） 36-2014《15 keV ~ 7 MeV直读式X、γ辐射个人剂量计》；
7. JJG（军工） 38-2014《个人监测用X、γ辐射光释光剂量测量（装置）系统》；
8. JJG（军工） 246-2021《X、γ射线周围剂量当量（率）仪》；
9. GB/T 14959-1994《个人中子剂量计的性能要求与刻度》；
10. EJ/T 901-1994《直读式中子个人剂量当量和剂量当量率监测仪》；
11. ICRP 74号出版物: 1996《用于外照射防护中的转换系数（Conversion Coefficients for use in Radiological Protection Against External Radiation）》
12. ICRU 57号报告: 1998《用于外照射防护中的转换系数（Conversion Coefficients for use in Radiological Protection Against External Radiation）》；
13. ISO 8529-1: 2021《中子参考辐射 第1部分：辐射特性和产生方法（Reference neutron radiations – Part 1: Characteristics and methods of production）》；
14. ISO 8529-3: 1998《中子参考辐射 第3部分：场所剂量仪和个人剂量仪的校准及其能量响应和角响应的确定（Reference neutron radiations – Part 3: Calibration of area and personal dosimeters and determination of their response as a function of neutron energy and angle of incidence）》；
15. ISO 12789-1: 2008《中子参考辐射 第1部分：模拟工作场所中子场的辐射特性及产生方法（Reference radiation fields – Simulated work place neutron fields – Part 1: Characteristics and methods of production）》
16. ISO 12789-2: 2008《中子参考辐射 第2部分：与表征模拟工作场所中子场基本量相关的辐射防护仪表校准基础（Reference radiation fields – Simulated work place neutron fields – Part 2: Calibration fundamentals related to the basic quantities）》。

# 5 校准项目与校准方法的有关说明

## 5.1 校准项目

直读式中子个人剂量当量仪和监测仪是指佩带在人体躯干，主要用于测量中子外照射在人体上产生的个人剂量当量的直读式仪器。此类仪器的探测部件和测量部件是一体化的，可使佩带者方便清晰地看到测量结果，显示单位主要为剂量当量单位Sv，或兼有剂量当量率Sv·h-1显示。

根据科学、合理、可行的原则，结合国内、国际中子计量实验室的实验条件，本规范确定了直读式中子个人剂量当量仪和监测仪的校准项目和校准方法，为直读式中子个人剂量当量仪和监测仪的校准提供依据。本规范规定的校准项目包括校准因子和重复性。同时，本规范建议了校准项目的计量特性指标要求，为直读式中子个人剂量当量仪和监测仪计量特性的评估提供参考。

此外，国内中子计量实验室通常采用GBT/14055.1-2008推荐的241Am-Be或252Cf中子源开展中子个人剂量当量仪和监测仪的校准，241Am-Be或252Cf中子源的强度一般在(1×106 ~ 1×108) s-1之间。252Cf中子源的源强可超过1×108 s-1，但252Cf的半衰期只有2.6470 a，252Cf中子源的强度会在较短的时间内降低至(1×106 ~ 1×108) s-1区间。由于中子源强度的限制，中子源产生的中子个人剂量当量率也受到限制。中子个人剂量当量仪和监测仪测量的主要是个人剂量当量，而不是个人剂量当量率。采用放射性核素中子源校准中子个人剂量当量仪和监测仪，需要照射很长时间才能累积得到较高的个人剂量当量。由于中子个人剂量当量仪和监测仪的灵敏度较低，通过重复测量减少统计不确定性会使测量时间更长。此外，示值准确性和重复性是辐射防护监测仪器的重要参数，在中子个人剂量当量仪和监测仪校准中可采用校准因子和重复性表征。

## 5.2 校准因子

直读式中子个人剂量当量仪和监测仪的示值准确性可通过校准因子、剂量当量（率）响应、相对固有误差等形式展现出来，被校仪器的校准因子、剂量当量（率）响应、相对固有误差的计算公式如下：

 （1）

 （2）

 （3）

式中：

——试验点处中子个人剂量当量（率）约定量值；

——试验点处直接中子引起的被校仪器读数。

从公式（1）~公式（3）可见，被校仪器的校准因子和剂量当量（率）响应互为倒数，且校准因子、剂量当量（率）响应、相对固有误差可相互转换。当校准因子0时，剂量当量（率）响应，相对固有误差。当校准因子0时，剂量当量（率）响应，相对固有误差。本规范规定采用校准因子作为直读式中子个人剂量当量仪和监测仪的校准项目，用户可根据校准因子的校准结果自行计算被校仪器的剂量当量（率）响应和相对固有误差。

ISO 8529-3: 1998中没有明确规定中子个人剂量当量的校准程序，一种模糊的方法是扣除中子照射室中散射中子的贡献。采用被校仪器在中子参考辐射场中受照时，被校仪器会同时受到直接中子和散射中子的照射并产生读数。为准确获得被校仪器的校准因子，应扣除散射中子对被校仪器读数的贡献。本规范规定采用放射性核素中子源开展直读式中子个人剂量当量仪和监测仪的校准因子的测量，放射性核素中子源可以为252Cf+D2O慢化、252Cf、241Am-B、241Am-Be。同时，本规范推荐了2种修正散射中子引起被校仪器读数的方法，即影锥法和距离变化法，详见《直读式中子个人剂量当量仪和监测仪》征求意见稿附录B。在公式（1）~公式（3）中，采用影锥法可以直接计算得到试验点处直接中子引起的被校仪器读数，从而较容易获得被校仪器的校准因子。采用距离变化法，需要在多个试验点处测得总中子引起的被校仪器读数，通过拟合数据并进一步得到被校仪器的剂量当量（率）响应，再计算得到校准因子。

本规范建议直读式中子个人剂量当量仪和监测仪的校准因子宜为0.80 ~ 1.20。

## 5.3 重复性

直读式中子个人剂量当量仪和监测仪的示值重复性可采用变异系数计算，如下所示：

 （4）

式中：

——总中子引起的被校仪器第次读数；

——被校仪器次读数的算术平均值；

——重复测量次数。

在重复性项目中，采用总中子引起被校仪器的读数作计算。

直读式中子个人剂量当量仪和监测仪的灵敏度较低，对于剂量当量测量功能，本规范规定在大于100 μSv的剂量当量条件下开展重复性项目的校准。对于剂量当量率测量功能，本规范规定在小于1 mSv·h-1的剂量当量率条件下开展重复性项目的校准。

此外，当开展校准因子项目时，校准因子的测量次数满足重复性要求的测量次数时，可同时开展重复性项目和校准因子项目。由于重复性项目的要求与校准因子项目的要求不同，可以分别展重复性项目和校准因子项目。相比于校准因子项目，可以在更近的校准距离条件下开展重复性项目，从而获得更高的剂量当量率条件，可以在更短的照射时间内得到更高的剂量当量。

本规范建议直读式中子个人剂量当量仪和监测仪的重复性宜不超过20%。

# 6 验证试验

## 6.1 试验项目

直读式中子个人剂量当量仪的校准因子和重复性。

## 6.2 测量装置

1. 名称：中子注量（率）标准装置；
2. 中子参考辐射：241Am-Be。

## 6.3 被校仪器

1. 名称：直读式中子个人剂量当量仪；
2. 生产商：MIRON；
3. 型号：DMC2000GN。

## 6.4 校准项目

1. 校准因子；
2. 重复性。

## 6.5 校准因子试验过程

### 6.5.1 影锥法

按《直读式中子个人剂量当量仪和监测仪》征求意见稿安装被校仪器和体模，体模前表面距离中子源120 cm。采用241Am-Be中子参考辐射照射被校仪器，中子个人剂量当量约定量值为1.86 mSv。在不使用影锥条件下，测量总中子引起的读数，重复测量6次。在使用影锥条件下，测量散射中子引起的读数，重复测量6次。计算被校仪器的校准因子。

### 6.5.2 距离变化法

按《直读式中子个人剂量当量仪和监测仪》征求意见稿安装被校仪器和体模，采用241Am-Be中子参考辐射照射被校仪器。在距离中子源100 cm ~ 200 cm之间，每间隔10 cm，测量总中子引起的读数，测量次数为1次，中子个人剂量当量约定量值~1.86 mSv。通过拟合数据，获得单位校准距离上室散射贡献的份额，并进一步计算得到校准距离为120 cm位置上被校仪器的校准因子。

## 6.6 重复性试验过程

按《直读式中子个人剂量当量仪和监测仪》征求意见稿安装被校仪器和体模，体模前表面距离中子源120 cm。采用241Am-Be中子参考辐射照射被校仪器，中子个人剂量当量约定量值为1.86 mSv。在不使用影锥条件下，测量总中子引起的读数，重复测量6次，计算被校仪器的重复性。重复性与影锥法校准因子是同时开展的。

## 6.7 试验结果

利用实验数据，分析得到了被校仪器的校准因子及其相对扩展不确定度、重复性。

影锥法得到被校仪器的校准因子为，其相对扩展不确定度为。

距离变化法得到被校仪器的校准因子为，其相对扩展不确定度为。

被校仪器的重复性为。

## 6.8 评估

参考CNAS—GL002《能力验证结果的统计处理和能力评价指南》，采用评估影锥法和距离变化法得到的被校仪器校准因子的一致性，计算公式如下：

 （5）

式中：

——影锥法得到被校仪器校准因子的扩展不确定度；

——距离变化法得到被校仪器校准因子的扩展不确定度。

当时，可以认为两种方法得到的校准因子是一致的。

经计算，，可以认为影锥法与距离变化法得到被校仪器的校准因子是一致的。