

JJF

中华人民共和国国家计量技术规范

JJFXXXX—XXXX

电离法辐射剂量测量不确定度评定技术规范

Technical Specification for Evaluation of Measurement Uncertainty for Radiation
Dosimetry with Ionizing Method

（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

电离法辐射剂量测量不确定度 评定技术规范

JJF XXXX-XXXX

Technical specification for evaluation of Measurement Uncertainty for
Radiation Dosimetry with Ionizing Method

归口单位：全国不确定度计量技术委员会

起草单位：中国计量科学研究院

江苏省计量科学研究院（江苏省能源计量数
据中心）

本规范委托全国不确定度计量技术委员会负责解释

本规范主要起草人：

参加起草人：

目录

引言	1
1 范围	2
2 引用文件	2
3 术语和计量单位	3
3.1 术语	3
3.2 计量单位	4
4 概述	4
5 测量原理与数学模型	5
5.1 测量原理	5
5.2 通用数学模型	5
5.3 典型测量模型	6
6 不确定度来源识别	8
6.1 来源识别原则	8
6.2 主要不确定度来源	8
6.3 不确定度来源清单	10
6.4 相关性分析	11
7 不确定度评定方法分类	12
7.1 A类评定和B类评定	12
7.2 合成标准不确定度和扩展不确定度的评定	12
8 A类标准不确定度评定	13
8.1 评定原则	13
8.2 重复测量数据处理	14
8.3 标准不确定度计算	14
8.4 复现性条件下的A类评定	14
8.5 合并样本标准偏差	15
9 B类标准不确定度评定	15

9.1	评定原则与信息来源	15
9.2	概率分布选取	16
9.3	各输入量 B 类评定方法	17
10	合成标准不确定度	21
10.1	合成原则	21
10.2	不相关输入量的合成	22
10.3	相关输入量的处理	22
10.4	灵敏系数	22
11	扩展不确定度	23
11.1	确定原则	23
11.2	有效自由度	23
11.3	包含因子选取	24
11.4	修约规则	24
12	不确定度报告	25
12.1	报告基本要求	25
12.2	校准证书中的不确定度表述	25
12.3	报告应包含的信息	25
12.4	表述注意事项	26
附录 A		27

引言

本规范的编写以 JJF 1071—2010《国家计量校准规范编写规则》、JJF1001—2011《通用计量术语及定义》、JJF 1035—2006《电离辐射计量术语及定义》、JJF 1059.1-2012《测量不确定度评定与表示》、GB/T 27418-2017《测量不确定度评定和表示》为基础和依据。

本规范在制定过程中主要参考了 ISO/ASTM 51707:2015《评估辐射加工用剂量不确定性测量的标准指南》（Guide for estimation of measurement uncertainty in dosimetry for radiation processing）、IAEA-TECDOC-1585《测量不确定度：次级标准剂量测定实验室实用指南》（Measurement Uncertainty: A Practical Guide for Secondary Standards Dosimetry Laboratories）等技术资料。

本规范为首次发布。

电离法辐射剂量测量不确定度评定

1 范围

本规范适用于电离辐射计量领域采用电离法进行辐射剂量测量中不确定度评定活动，本规范的目的是给出完成不确定度报告的全部信息。

本规范适用于基于电离效应的辐射剂量测量，包括但不限于以下情形：

- a) 采用自由空气电离室、空腔电离室（平板型、圆柱型、球型）等电离探测器开展的空气比释动能的测量；
- b) 在国家计量基准、次级标准实验室、工作级计量标准条件下开展的校准测量；
- c) 在放射诊疗、辐射防护、核工业、辐照加工、安检等领域开展的现场检测与监督监测；
- d) 科研活动中基于电离法的辐射剂量精密测量。

本规范不适用于以下情形：

- a) 采用热释光、光致发光、胶片、半导体等非电离探测原理的剂量测量；
- b) 个人剂量计的佩戴评价与个人剂量监测；
- c) 中子剂量测量。

2 引用文件

本规范引用了下列文件：

JJF1001-2011 《通用计量术语及定义》

JJF 1059.1-2012 《测量不确定度评定与表示》

JJF 1071—2010 《国家计量校准规范编写规则》

GB/T 27418-2017 《测量不确定度评定和表示》

GB/T 16509-1996 辐射加工剂量测量不确定度评估导则

JCGM 100: 2008, GUM 1995, with minor corrections, 测量数据评估——测量不确定度表示指南（Evaluation of measurement data – Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement）

ICRU Report 85a 电离辐射的基本量和单位（Fundamental Quantities and Units for Ionizing Radiation）

ICRU Report 90 Key Data For Ionizing-Radiation Dosimetry: Measurement Standards And Applications

IEC 60050-300:2001 国际电工词汇 电气和电子测量及测量仪器 第 311 部分：关于测量的一般术语 第 312 部分：关于电气测量的一般术语 第 313 部分：电气测量仪器类型 第 314 部分：按仪器类型的专门术语（International Electrotechnical Vocabulary - Electrical and electronic measurements and measuring instruments - Part 311: General terms relating to measurements; Part 312: General terms relating to electrical measurements; Part 313: Types of electrical measuring instruments; Part 314: Specific terms according to the type of instrument）

ISO/ASTM 51707:2015(E) 辐射加工剂量测量不确定度评估标准指南（Standard Guide for Estimation of Measurement Uncertainty in Dosimetry for Radiation Processing）

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

JJF1001-2011、JJF 1035-2006 界定的及以下术语和定义适用于本规范。

3.1 术语

3.1.1 辐射剂量学 radiation dosimetry

研究辐射对物质影响程度的学科，研究内容主要包括电离辐射能量在物质中的转移和沉积的规律，剂量分布与辐射场的关系，辐射剂量与辐射效应的联系以及辐射剂量的测量、计算方法等。

3.1.2 电离法辐射剂量测量 ionization method for radiation dosimetry

利用电离辐射在气体中产生电离效应，通过收集和测量电离电荷或电离电流来确定辐射剂量量值的测量方法。常用探测器包括自由空气电离室、空腔电离室等。

3.1.3 空气比释动能 air kerma

在空气中某一点，不带电电离粒子在质量为 dm 的空气中释放的全部带电粒子的初始动能之和 dE 除以 dm 所得的商，符号为 K_a ，单位为戈瑞（Gy）。

3.1.4 参考辐射 reference radiation

为校准辐射测量仪表以及确定其能量响应而规定的一系列具有不同能量发射率

和其他特征的辐射。

3.1.5 修正因子 correction factor

用它与未修正的测量结果相乘，以补偿系统误差的数值因子。

3.1.6 绝对测量 absolute measurement

指用最高计量学量的仪器测量一个量，以便根据其定义进行确定的测量方式。一般来说，它是在初级测量标准实验室中进行。

3.1.7 相对测量 relative measurement

使用校准系数或者修正系数的非参考条件下进行各种测量。

3.1.8 标准不确定度 standard uncertainty

以标准偏差表示的测量不确定度，符号为 u 。

3.1.9 合成标准不确定度 combined standard uncertainty

由各标准不确定度分量按规定方法合成得到的标准不确定度，符号为 u_c 。

3.1.10 扩展不确定度 expanded uncertainty

确定测量结果区间的量，合理赋予被测量之值分布的大部分可望含于此区间，符号为 U 。

3.1.11 有效自由度 effective degrees of freedom

在合成标准不确定度计算中，由各分量自由度按 Welch-Satterthwaite 公式计算得到的有效自由度，符号为 ν_{eff} 。

3.2 计量单位

3.2.1 空气比释动能的计量单位是戈瑞，符号：Gy， $1 \text{ Gy} = 1 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

3.2.2 周围剂量当量的计量单位是希沃特，符号：Sv， $1 \text{ Sv} = 1 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

3.2.3 个人剂量当量的计量单位是希沃特，符号：Sv， $1 \text{ Sv} = 1 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

3.2.4 本规范所用到的其他量均采用国际单位制（SI）单位。另外对辐射能量也采用电子伏，符号：eV， $1 \text{ eV} = 1.602 \times 10^{-19} \text{ J}$ 。

4 概述

本规范旨在为基于电离法的辐射剂量测量及其不确定度的评定提供明确的指导。一般辐射剂量学的量是与辐射本身有关的量，致电离辐射传播所通过的区域即辐射场，它是由各种致电离辐射构成的，因此辐射场的性质和特征通常用粒子通量、能

通量、粒子注量、能注量、粒子注量率、能注量率等物理量来进行描述。本质上是辐射剂量学的量和相互作用系数的乘积。虽然剂量学量可以用这种乘积计算，但一般不用这种方法定义，它们通常是直接测量出来。主要涉及的辐射包括 X 射线、 γ 射线和电子射束；量值范围通常分为辐射加工量级、放射治疗（和诊断）量级、辐射防护量级和辐射环境量级；测量内容主要为照射量、空气比释动能、吸收剂量以及在辐射防护量级的剂量当量。

辐射剂量学广泛应用于医学诊疗、核电能源、军事国防、航空航天、工业无损检测等诸多领域。辐射剂量学所涉及射线种类主要是 X 射线、 γ 射线、 β 射线和电子束，能量的范围较宽，皮肤治疗用的几个 keV，深部肿瘤治疗用高达 50MV 的 X 射线和 50MeV 的电子束。测量的剂量率范围：环境水平为 10^{-8}Gy/h ，辐射加工高剂量水平为 10^3Gy/min 。

本规范从剂量测量采用的计量基准到计量标准最后到工作计量器具，规定了在 X 射线、 γ 射线辐照装置剂量测量中误差的来源，规定了测量结果不确定度的评定程序。阐述了不确定度的分量和评估这些分量的方法。列举了这些分量对空气比释动能报告值的标准不确定度的贡献，并评估了合成标准不确定度和扩展不确定度。

5 测量原理与数学模型

5.1 测量原理

电离法辐射剂量测量的基本原理是：电离辐射穿过探测器内的灵敏气体时，与气体分子发生相互作用并产生电子-离子对。在探测器两极间施加收集电压，电离产生的电荷被收集电极收集，形成电离电流或积分电荷。通过测量收集到的电荷量或电流大小，并结合探测器的校准因子和各项修正因子，即可确定辐射场在测量点处的剂量量值。

对于自由空气电离室，通过测量空气中产生的电离电荷，结合空气密度、离子对产生能等物理常数，可直接复现空气比释动能或照射量。对于空腔电离室，依据 Bragg-Gray 空腔理论，空腔内气体的吸收剂量与周围介质中的吸收剂量通过质量阻止本领比和质能吸收系数相关联。

5.2 通用数学模型

电离法辐射剂量测量的输出量（被测量）通常表示为探测器读数与一系列修正

因子的乘积。通用数学模型为：

$$Y = M \cdot N \cdot k_{TP} \cdot k_h \cdot k_{pol} \cdot k_s \cdot k_{sc} \cdot k_d \cdot k_e \cdot k_{ang} \cdot k_{other} \quad (1)$$

式中：

Y ——被测量（空气比释动能、照射量及其剂量率）；

M ——探测器经本底修正后的读数（电荷、电流或仪表显示值）；

N ——探测器的校准因子（由上一级标准装置校准给出）；

k_{TP} ——温度和气压修正因子；

k_h ——湿度修正因子；

k_{pol} ——极化效应修正因子；

k_s ——离子复合修正因子；

k_{sc} ——散射辐射修正因子；

k_d ——衰减或扰动修正因子；

k_e ——能量响应修正因子；

k_{ang} ——角度响应修正因子；

k_{other} ——其他必要的修正因子。

在实际应用中，并非所有修正因子均需独立列出。应根据具体测量装置、辐射质和测量条件，确定实际需要的修正因子。对于某些修正因子，若其数值与1的偏差在测量不确定度允许范围内且可忽略，可不予修正，但应评估其引入的不确定度分量。

对于乘法模型，输出量的相对合成标准不确定度可表示为各输入量相对标准不确定度的方和根（当各输入量不相关时）：

$$u_{c,rel}(Y) = \sqrt{u_{rel}^2(M) + u_{rel}^2(N) + \sum u_{rel}^2(k_i)} \quad (2)$$

5.3 典型测量模型

在使用计量学量最高的仪器的位置，根据其定义，即以绝对的方式测量数值。要达到这一水平，就需要非常复杂的设备、计算机控制系统、实验安排和非常熟练的工作人员，这导致了非常小的不确定性。但同时，所有可能的不确定性的来源必须在详细的不确定评定中加以考虑。

在低能量和中能量 X 射线束中使用自由空气电离室作为空气比释动能原级测量

标准;在 ^{137}Cs 和 ^{60}Co γ 射线中使用石墨空腔电离室作为空气比释动能原级测量标准。

5.3.1 基于自由空气电离室绝对测量 X 射线空气比释动能

采用自由空气电离室绝对测量 X 射线空气比释动能 K 时,复现基准量值的表达式为:

$$K_{\text{air}} = \frac{Q}{\rho_{\text{air}} \cdot V} \cdot \frac{W_{\text{air}}}{e} \cdot \frac{1}{1-g_{\text{air}}} \cdot \prod_i k_i \quad (3)$$

其中: Q 为参考条件下的电离电荷; ρ_{air} 为参考条件下的空气密度; V 为自由空气电离室的测量体积; W_{air} 为在空气中产生一对离子所需要的能量; g_{air} 为在空气中初始电子能量通过辐射过程损失的份额; $\prod_i k_i$ 为各种修正因子的乘积:

$$\prod_i k_i = k_a \cdot k_e \cdot k_{\text{sc}} \cdot k_{\text{fl}} \cdot k_s \cdot k_d \cdot k_p \cdot k_{\text{pol}} \cdot k_{\text{dia}} \cdot k_h \quad (4)$$

k_a 是空气减弱修正因子; k_e 是电子损失修正因子; k_{sc} 是电离室内散射光子的修正因子; k_{fl} 是电离室内荧光的修正因子; k_s 是复合损失修正因子; k_d 是电场畸变修正因子; k_p 是通过室壁的辐射穿透修正因子; k_{pol} 是极性修正因子; k_{dia} 是光阑边缘穿透修正因子; k_h 是对空气湿度影响的修正因子。

不确定度来源主要有电离室电流、体积、温度、气压测量,修正因子和物理常数等,根据不确定度传播定律,分析公式如下所示:

(5)

$$u_r(K) = \left[u_r(C)^2 + u_r(U)^2 + u_r(t)^2 + u_r(\rho)^2 + u_r(V)^2 + u_r\left(\frac{W_{\text{air}}}{e}\right)^2 + u_r(g)^2 + u_r\left(\prod_i k_i\right)^2 + u_r(T)^2 + u_r(P)^2 + u_r(d)^2 \right]^{1/2} \quad (6)$$

5.3.2 基于石墨空腔电离室绝对测量 γ 射线空气比释动能

采用石墨空腔电离室绝对测量 γ 射线空气比释动能 K 时,复现基准量值的表达式为:

$$K_{\text{air}} = \frac{Q}{\rho_{\text{air}} \cdot V} \cdot \frac{W_{\text{air}}}{e} \cdot \left(\frac{\mu_{\text{en}}}{\rho} \right)_{a,c} \cdot \bar{s}_{c,a} \frac{1}{1-g_{\text{air}}} \cdot \prod_i k_i \quad (7)$$

其中, Q 为参考条件下的电离电荷; ρ_{air} 为参考条件下的空气密度; V 为自由空气电离室的测量体积; W_{air} 为在空气中产生一对离子所需要的能量; g_{air} 为在空气中初始电子能量通过辐射过程损失的份额; $\bar{s}_{c,a}$ 为石墨和空气对电子的碰撞阻止本领之

比 $\prod_i k_i$ 为各种修正因子的乘积：

$$\prod_i k_i = k_a \cdot k_e \cdot k_{sc} \cdot k_{fl} \cdot k_s \cdot k_d \cdot k_p \cdot k_{pol} \cdot k_{dia} \cdot k_h \quad (8)$$

不确定度来源主要有电离室电流、体积、温度、气压测量，修正因子和物理常数等，根据不确定度传播定律，分析公式如下所示：

$$u_r(f) = \left[u_r(C)^2 + u_r(U)^2 + u_r(t)^2 + u_r(\rho)^2 + u_r(V)^2 + u_r\left(\frac{W_{air}}{e}\right)^2 + u_r(g)^2 + u_r(\prod_i k_i)^2 + u_r\left(\left(\frac{\mu_{en}}{\rho}\right)_{a,c}\right)^2 + u_r(\bar{s}_{c,a})^2 + u_r(T)^2 + u_r(P)^2 + u_r(d)^2 \right]^{1/2} \quad (9)$$

6 不确定度来源识别

6.1 来源识别原则

不确定度来源识别应遵循以下原则：

a) 全面性原则：应系统梳理测量过程的全部环节，确保不遗漏对测量结果有显著影响的不确定度来源；

b) 针对性原则：应结合具体测量装置、辐射质、测量条件和数学模型，识别该测量所特有的不确定度来源，避免生搬硬套；

c) 可操作性原则：每个被识别的不确定度来源应能够通过 A 类或 B 类方法进行评定，对于无法评定且影响极小的来源可合并或忽略，但应在评定记录中说明；

d) 不重复原则：应注意各不确定度来源之间的独立性，避免同一来源被重复计入不同分量；

e) 分级原则：对于复杂测量系统，可按“基准装置—标准装置—工作仪表—现场条件”等层级逐级识别。

6.2 主要不确定度来源

电离法辐射剂量测量的不确定度来源可按 A 类和 B 类进行分类。A 类不确定度来源于测量重复性和复现性；B 类不确定度来源较为广泛，主要包括以下类别。

6.2.1 电离室/探测器相关来源

a) 离子复合损失：在高剂量率或低收集电压条件下，电离室中正负离子在收集前发生复合，导致收集电荷偏低。复合修正因子 k_s 的不确定度取决于复合程度、电压极性和剂量率；

b) 极化效应：电离室收集极和保护环之间的漏电流、介质极化电荷以及辐射诱导电流等，可能叠加在真实电离信号上。极化修正因子 k_{pol} 的不确定度与电离室结构、绝缘材料和辐射条件有关；

c) 漏电与暗电流：电离室绝缘电阻有限、电缆漏电、静电计输入偏置电流等产生的虚假信号。本底扣除的不确定度包含此项。

d) 响应非均匀性：电离室灵敏体积内剂量分布不均匀，或探测器在辐射场中不同位置响应存在差异。对于大体积电离室或非均匀辐射场，此项贡献显著；

e) 能量响应：电离室对不同能量光子的响应差异。当实际辐射质与校准辐射质不一致时，需引入能量响应修正因子 k_e ，其不确定度取决于辐射质匹配程度和电离室能量响应曲线的不确定度；

f) 角度响应：电离室对不同入射方向辐射的响应差异。当实际入射角与校准入射角不同时，需引入角度响应修正因子 k_{ang} ；

g) 探测器长期稳定性：电离室校准因子随时间的漂移，包括辐射损伤、气体泄漏、绝缘性能变化等。

6.2.2 环境条件相关来源

a) 温度：电离室灵敏气体的密度随温度变化，需进行温度修正。温度测量的不确定度和温度修正公式的不确定度均需考虑；

b) 气压：气体密度随气压变化，需进行气压修正。气压测量的不确定度和气压计校准不确定度均需考虑；

c) 湿度：空气中水蒸气含量影响空气密度和离子对产生能 W 值，需进行湿度修正。湿度测量不确定度和湿度修正系数的不确定度均需考虑，一般可参照报告。

d) 环境辐射本底：测量场所的天然本底辐射和其他辐射源的散射贡献。本底测量和扣除的不确定度需考虑。

6.2.3 辐射场相关来源

a) 辐射质/能谱：实际辐射场的光子能谱与校准辐射质的差异。辐射质通常用半值层（HVL）或等效能量表征，辐射质确定的不确定度直接影响能量响应修正；

b) 场均匀性：辐射场在测量点附近的空间均匀性。对于大体积探测器或需要精确定位的测量，场均匀性是重要的不确定度来源；

c) 散射辐射：辐射场中散射光子的贡献。散射辐射的能量和方向与初级辐射不同，导致探测器响应差异。散射修正因子 k_{sc} 的不确定度取决于散射条件和探测器能量响应；

d) 光源稳定性：辐射源输出的短期波动和长期漂移。对于 X 射线机，包括管电压、管电流的稳定性；对于放射性核素源，包括衰变修正；

e) 半值层（HVL）：辐射质表征参数的测量不确定度。

6.2.4 几何条件相关来源

a) 源-探测器距离：辐射剂量随距离的变化遵循平方反比定律，距离测量偏差直接导致剂量偏差。距离测量的不确定度需考虑；

b) 定位偏差：探测器灵敏中心与辐射束轴或参考点的对准偏差。对于准直束或小照射野，定位偏差的影响显著；

c) 入射角：辐射入射方向与探测器参考轴的夹角偏差。角度响应修正的不确定度包含此项；

d) 探测器方位：探测器在辐射场中的朝向、旋转角度等。

6.2.5 标准装置与量值传递相关来源

a) 上一级标准装置的不确定度：校准因子 N 中包含的上一级标准的不确定度，通常由校准证书给出；

b) 校准条件与使用条件的差异：校准时的辐射质、几何条件、环境条件与实际使用时的差异所引入的不确定度；

c) 传递标准的稳定性：传递标准在校准周期内的变化；

d) 比对与验证：参加实验室间比对或能力验证时，参考值的不确定度。

6.2.6 数据采集与处理相关来源

a) 读数分辨率：静电计或剂量计的显示分辨率、模数转换分辨率；

b) 积分时间：电流测量时的积分时间设置和计时不确定度；

c) 本底扣除：本底测量的统计涨落和本底随时间变化；

d) 剂量线性：静电计在不同量程的线性偏差；

e) 物理常数： W/e 值、空气密度等物理常数的不确定度。

6.3 不确定度来源清单

为便于评定工作的系统化，建议在开展不确定度评定前，按照表 1 的格式编制不确定度来源清单。清单应根据具体测量对象和条件进行增删。

表 1 电离法辐射剂量测量不确定度来源清单（示例）

序号	不确定度来源	类型	评定方法	对应输入量	备注
1	测量重复性	A 类	重复测量统计	M	至少 6 次独立测量
2	校准因子	B 类	校准证书	N	包含上一级标准不确定度
3	温度修正	B 类	温度计校准	k_{TP}	含温度测量和修正公式
4	气压修正	B 类	气压计校准	k_{TP}	含气压测量不确定度
5	湿度修正	B 类	湿度计校准+报告	k_h	湿度修正系数不确定度
6	离子复合修正	B 类	双电压法/文献	k_s	高剂量率时贡献增大
7	极化效应修正	B 类	正负极性测量	k_{pol}	通常较小
8	能量响应修正	B 类	蒙特卡罗/实验	k_e	辐射质差异大时显著
9	散射辐射修正	B 类	蒙特卡罗/实验	k_{sc}	现场测量需重点考虑
10	源探距离	B 类	长度测量	几何	平方反比定律敏感
11	定位偏差	B 类	经验估计	几何	小照射野时显著
12	本底扣除	A/B 类	本底测量统计	M	低剂量率时贡献增大
13	读数分辨率	B 类	仪器说明书	M	数字仪表最小分度
14	探测器稳定性	B 类	期间核查/历史数据	N	校准周期内漂移

6.4 相关性分析

在合成标准不确定度之前，应分析各输入量之间是否存在相关性。电离法辐射剂量测量中常见的相关性包括：

a) 温度和气压修正因子 k_{TP} 中，温度和气压通常独立测量，一般不相关；但如果使用同一台多参数测量仪，需考虑仪器内部的相关性；

b) 复合修正因子 k_s 与剂量率相关，而剂量率又与读数 M 相关，在某些模型中可能存在间接相关性；

c) 散射修正 k_{sc} 与能量响应 k_e 均依赖于辐射能谱，当辐射质不确定时，二者可能存在相关性；

d) 同一标准装置校准的多个探测器，其校准因子之间可能存在相关性（共同来自上一级标准的不确定度）；

e) 本底测量与样品测量使用同一台仪器，读数不确定度可能相关。

对于存在显著相关性的输入量，应在合成时计入协方差项，或采用适当方法消

除相关性（如分别独立测量、使用不同标准源等）。

7 不确定度评定方法分类

7.1 A 类评定和 B 类评定

有两种不确定度分类方法，这取决于用来确定不确定度的方法。A 类不确定度是用统计分析方法计算得到的，B 类不确定度是不同于统计分析方法，用其他方法评估的。这种方法是 1981 年由国际计量大会（CIPM）首次推荐，并包括了合成不确定度的各种组成部分的方法。ISO 工作组随后将 CIPM 的建议扩展到《测量不确定性表达指南》（GUM）。

A 类不确定度分量， μ_A ，可以计算为一系列测量值的平均值的方差 s ，

$$s = \left[\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (z_i - \bar{z})^2 \right]^{1/2} \quad (10)$$

其中 n 为测量次数， z 为单个测量的结果， $\bar{z}$ 为平均值， $\bar{z}$ 由下式得到：

$$\bar{z} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n z_i \quad (11)$$

B 类不确定度分量， μ_B ，通常根据仪器制造商的规格、先前获取的数据中观察到的变化或调查人员自己的知识和经验（科学判断）进行评估。如果没有可用的信息来证明选择特定概率分布（即正态分布）是合理的，那么可以合理地估计测量值 a 的上下限 a_+ 和 a_- ，并使用均匀（矩形）分布来计算 μ_B ，

$$\mu_B = \frac{a_+ - a_-}{2\sqrt{3}} \quad (12)$$

7.2 合成标准不确定度和扩展不确定度的评定

来自测量或计算的最终报告量 y 通常是几个变量 x_i 的函数，每个变量都有自己的 A 类和 B 类不确定度分量，

$$y = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_N) \quad (13)$$

一旦测量或模拟中所有可能的不确定来源都被考虑在内，被归为到 A 类或 B 类，并计算出 μ_A 和 μ_B 的值，不确定度分量就被组合在一起，使用不确定度传播定律得到合成标准不确定度 u_c ：

$$u_c = \left[\sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} u(x_i, x_j) \right]^{1/2} \quad (14)$$

$$u^2(x_i) = u_A^2(x_i) + u_B^2(x_i) \quad (15)$$

$$u(x_i, x_j) = \frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (x_{ik} - \bar{x}_i)(x_{jk} - \bar{x}_j) \quad (16)$$

如果 x_i 和 x_j 是相关的，则协方差非零。通常假定所有变量 x_i 都是独立的，协方差为零。如果 $u(x_i, x_j)=0$ ，则方程简化为用于组合 A 类和 B 类分量的“平方根”方法，从而得到合成的标准不确定度：

$$u_c = \left[\sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) \right]^{1/2} \quad (17)$$

例如：如果 $y=x_1x_2$ ，

$$u_c = [x_2^2 u_A^2(x_1) + x_1^2 u_B^2(x_1) + x_1^2 u_A^2(x_2) + x_2^2 u_B^2(x_2)]^{1/2} \quad (18)$$

对等式两边展开并除以 y 得到：

$$\left(\frac{u_c}{y} \right)^2 = \left(\frac{u_A(x_1)}{x_1} \right)^2 + \left(\frac{u_B(x_1)}{x_1} \right)^2 + \left(\frac{u_A(x_2)}{x_2} \right)^2 + \left(\frac{u_B(x_2)}{x_2} \right)^2 \quad (19)$$

如果最终测量或计算结果 y 的概率分布近似正态分布，则认为该量有 67% 的置信水平在区间 $y \pm u_c$ 内。

扩展不确定度为：

$$y = k u_c \quad (20)$$

k 为包含因子，当置信水平为 95% 时， $k=2$ 。

8 A 类标准不确定度评定

8.1 评定原则

A 类标准不确定度是通过对观测列进行统计分析来评定的标准不确定度。在电离法辐射剂量测量中，A 类评定主要用于评估测量重复性和复现性引入的不确定度。

A 类评定应遵循以下原则：

- a) 测量应在重复性条件或复现性条件下进行，测量过程应覆盖实际测量中可能出现的随机变化因素；
- b) 重复测量次数一般不应少于 6 次；对于精密测量，建议不少于 10 次；
- c) 重复测量应独立进行，每次测量应重新调整仪器、重新定位或重新开始读数，避免将仪器的短期漂移误判为重复性；
- d) 应检查测量数据中是否存在异常值，必要时采用统计准则剔除；
- e) 当测量结果由多次测量的平均值给出时，应使用平均值的实验标准偏差作为

A 类标准不确定度。

8.2 重复测量数据处理

在重复性条件下，对被测量 X 进行 n 次独立测量，得到观测列 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 。

(1) 算术平均值：

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (21)$$

(2) 单次测量的实验标准偏差（贝塞尔公式）：

$$s(x) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (22)$$

(3) 平均值的实验标准偏差：

$$s(\bar{x}) = \frac{s(x)}{\sqrt{n}} \quad (23)$$

(4) 异常值检验：对于测量数据中的可疑值，可采用格拉布斯（Grubbs）准则进行检验。取显著性水平 $\alpha=0.05$ ，若统计量 $G = |x_d - \bar{x}|/s(x)$ 大于临界值 $G(\alpha, n)$ ，则该可疑值为异常值，应予剔除。剔除后应重新计算平均值和标准偏差。每次只能剔除一个异常值，重复检验直至无异常值。

8.3 标准不确定度计算

当测量结果由单次测量给出时，A 类标准不确定度为：

$$u_A = s(x) \quad (24)$$

当测量结果由 n 次测量的平均值给出时，A 类标准不确定度为：

$$u_A = s(\bar{x}) = s(x) / \sqrt{n} \quad (25)$$

A 类标准不确定度的自由度为：

$$\nu_A = n-1 \quad (26)$$

在电离法辐射剂量测量中，A 类不确定度通常对应于数学模型中读数 M 的重复性分量。应注意：如果读数 M 已经是多次测量的平均值，则 A 类分量应使用平均值的标准偏差；如果 M 为单次读数，则使用单次测量的标准偏差。

8.4 复现性条件下的 A 类评定

当需要评估复现性（不同操作员、不同设备、不同时间、不同地点）引入的不

确定度时，应在复现性条件下组织多组测量。复现性标准偏差 s_R 可通过方差分析或合并标准偏差方法计算。

对于现场测量，由于环境条件、辐射场状态、定位操作等因素难以完全重复，建议在尽可能接近实际测量条件的复现性条件下进行 A 类评定，以充分包含现场随机因素的贡献。

8.5 合并样本标准偏差

当日常测量中每次仅进行少数几次测量（如 2~3 次），但有历史测量数据可资利用时，可采用合并样本标准偏差来评定 A 类不确定度。合并样本标准偏差的计算公式为：

$$s_p = \sqrt{\frac{\sum (n_j - 1) \cdot s_j^2}{\sum (n_j - 1)}} \quad (27)$$

式中： s_j 为第 j 组测量的实验标准偏差； n_j 为第 j 组测量的测量次数。

合并样本标准偏差的自由度为：

$$\nu_p = \sum (n_j - 1) \quad (28)$$

采用合并样本标准偏差时，应有充分的历史数据支撑（一般不少于 10 组），且历史测量条件应与当前测量条件一致。应定期复核合并样本标准偏差的有效性。

9 B 类标准不确定度评定

9.1 评定原则与信息来源

B 类标准不确定度是借助于一切可利用的有关信息进行科学判断来评定的标准不确定度。在电离法辐射剂量测量中，大部分不确定度分量需要通过 B 类方法评定。

B 类评定的信息来源主要包括：

- a) 校准证书、检定证书、测试报告中给出的不确定度或误差限；
- b) 测量仪器的说明书、技术手册、出厂校准数据；
- c) 国家计量技术规范、国家标准、国际标准中规定的技术要求和不确定度限值；
- d) ICRU、IAEA 等国际组织发布的技术报告和手册中给出的修正因子及其不确定度；
- e) 已发表的科学文献、实验数据和蒙特卡罗模拟结果；

f) 实验室积累的历史数据、期间核查数据和稳定性考核数据；

g) 有经验的技术人员基于专业知识做出的判断。

B 类评定应遵循以下原则：

a) 应尽可能利用权威、可靠的信息来源，对二手信息应进行核实；

b) 应根据信息的可靠程度合理估计被测量的概率分布和区间半宽度；

c) 对于重要的不确定度分量，应给出评定依据和推理过程，避免仅凭经验拍脑袋取值；

d) B 类评定的自由度应根据信息的可靠程度进行估计，可采用经验公式或查表方法。

9.2 概率分布选取

B 类评定中，应根据输入量的信息特征合理选取概率分布。常见概率分布及其包含因子见表 2。

表 2 常见概率分布及包含因子

概率分布	适用情形	包含因子 k	标准不确定度 u
正态分布	校准证书给出扩展不确定度 U ， $k=2$ ；多次测量平均值	2	$U/2$
矩形（均匀）分布	只知道区间上下限，无更多信息；仪器分辨率；数字仪表量化误差	$\sqrt{3}$	$a/\sqrt{3}$
三角分布	区间中心处概率最大，两端为零；两独立矩形分布之和	$\sqrt{6}$	$a/\sqrt{6}$
梯形分布	介于矩形和三角之间，上下底宽比 β	$\sqrt{[6/(1+\beta^2)]}$	$a \cdot \sqrt{[(1+\beta^2)/6]}$
两点分布	只有两种可能取值（如正负极性修正）	1	a

表中 a 为输入量可能值区间的半宽度。在电离法辐射剂量测量中，概率分布选取的一般原则为：

a) 由校准证书给出的不确定度，通常按正态分布处理；

b) 仪器分辨率、读数最小分度、几何定位的最大偏差等，通常按矩形分布处理；

c) 温度、气压等环境参数的测量误差，若已知最大允许误差且无更多信息，按矩形分布处理；

d) 修正因子的不确定度，若文献给出的是取值范围且中心值最可能，可按三角分布处理；

e) 对于难以确定分布类型的情况，保守起见可按矩形分布处理（给出较大的不确定度）。

9.3 各输入量 B 类评定方法

9.3.1 校准因子 N 引入的不确定度

校准因子 N 通常由上一级计量标准装置校准给出，其标准不确定度 $u(N)$ 由校准证书中给出的扩展不确定度 U 除以包含因子 k 得到：

$$u(N) = U / k \quad (29)$$

若校准证书给出的是相对扩展不确定度 U_{rel} ，则相对标准不确定度为：

$$u_{\text{rel}}(N) = U_{\text{rel}} / k \quad (30)$$

应注意：校准证书中给出的不确定度通常已经包含了上一级标准装置的不确定度、校准过程的重复性、校准条件下各修正因子的不确定度等。在使用校准因子时，不应重复计算已经包含在校准不确定度中的分量。

如果校准证书未给出不确定度，可根据该类器具的国家计量检定规程或校准规范中规定的最大允许误差（MPE）来评定。若最大允许误差为 $\pm\Delta$ ，按矩形分布处理：

$$u(N) = \Delta / \sqrt{3} \quad (31)$$

9.3.2 温度气压修正因子 k_{TP} 引入的不确定度

温度气压修正因子的计算公式为：

$$k_{\text{TP}} = (P_0 / P) \cdot (T / T_0) \quad (32)$$

式中： $P_0=101.325$ kPa 为标准气压； $T_0=293.15$ K（20℃）或 295.15 K（22℃）为标准温度； P 为实际气压； T 为实际温度（热力学温度）。

k_{TP} 的相对标准不确定度由温度测量和气压测量的不确定度合成：

$$u_{\text{rel}}(k_{\text{TP}}) = \sqrt{\left(\frac{u(T)}{T}\right)^2 + \left(\frac{u(P)}{P}\right)^2} \quad (33)$$

其中： $u(T)$ 为温度测量的标准不确定度，来源于温度计校准不确定度和温度读数分辨率； $u(P)$ 为气压测量的标准不确定度，来源于气压计校准不确定度和气压读数分辨率。

温度测量不确定度评定示例：若温度计最大允许误差为 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ ，按矩形分布，

$u(T)=0.5/\sqrt{3}\approx 0.29^{\circ}\text{C}$ 。在 $T=293.15\text{ K}$ 时， $u(T)/T\approx 0.0010$ （0.10%）。

气压测量不确定度评定示例：若气压计最大允许误差为 $\pm 0.2\text{ kPa}$ ，按矩形分布， $u(P)=0.2/\sqrt{3}\approx 0.12\text{ kPa}$ 。在 $P=101.3\text{ kPa}$ 时， $u(P)/P\approx 0.0012$ （0.12%）。

则 k_{TP} 的相对标准不确定度约为 $\sqrt{(0.10\%^2 + 0.12\%^2)}\approx 0.16\%$ 。

9.3.3 湿度修正因子 k_h 引入的不确定度

湿度修正用于修正空气中水蒸气含量对空气密度和离子对产生能 W 值的影响。

湿度修正因子通常表示为相对湿度的函数，其不确定度来源于：

- a) 湿度测量的不确定度：湿度计的校准不确定度和读数分辨率；
- b) 湿度修正系数本身的不确定度：来源于实验测定或理论计算的不确定度，可参考国际报告或相关文献。

对于一般的 X 和 γ 射线剂量测量，湿度修正因子的数值通常在 0.99~1.01 之间，其相对标准不确定度一般可估计为 0.03%。

9.3.4 离子复合修正因子 k_s 引入的不确定度

离子复合修正用于修正电离室中正负离子复合导致的电荷收集损失。复合修正因子的测定方法主要有：

a) 双电压法：在两个不同的收集电压下测量电离电流，根据 Boag 理论外推至无限电压下的电流，计算复合修正因子；

b) 理论公式法：结合剂量率、脉冲结构、电离室参数等计算复合修正因子。

复合修正因子的不确定度来源于：

- a) 双电压法测量的重复性和外推不确定度；
- b) 理论公式中参数（如离子迁移率、初始复合参数）的不确定度；
- c) 剂量率测量的不确定度（复合程度与剂量率相关）；
- d) 对于脉冲辐射，还包括脉冲重复频率、脉冲宽度等参数的不确定度。

在连续辐射（如 X 射线机、 γ 射线源）和低剂量率条件下，复合修正因子通常接近 1（如 1.001~1.01），其相对标准不确定度一般可估计为 0.1%~0.5%。在高剂量率条件下（如放疗剂量率），复合修正可能达到 1.01~1.05，其不确定度也相应增大，应进行专门评定。

9.3.5 极化效应修正因子 k_{pol} 引入的不确定度

极化效应修正用于修正电离室中由于介质极化、漏电流等导致的虚假信号。通常通过正负极性电压下分别测量，取平均值来消除极化效应的一阶影响。极化修正因子定义为：

$$k_{\text{pol}} = (I_+ + I_-) / (2 \cdot I_{\text{ref}}) \quad (34)$$

式中： I_+ 和 I_- 分别为正、负极性下的电离电流； I_{ref} 为参考电流。

极化修正因子的不确定度来源于正负极性测量的重复性和极化效应随时间的变化。对于设计良好的电离室，极化效应通常很小， $k_{\text{pol}} \approx 1.000 \pm 0.001$ ，其相对标准不确定度一般可估计为 0.05%~0.2%。对于新电离室或受到大剂量辐照后的电离室，极化效应可能增大，应进行专门测量。

9.3.6 能量响应修正因子 k_e 引入的不确定度

能量响应修正用于修正实际辐射质与校准辐射质不同时探测器响应的差异。能量响应修正因子定义为：

$$k_e = R(E_{\text{cal}}) / R(E_{\text{actual}}) \quad (35)$$

式中： $R(E_{\text{cal}})$ 为校准辐射质下的探测器响应； $R(E_{\text{actual}})$ 为实际辐射质下的探测器响应。

能量响应修正因子的不确定度来源于：

- a) 实际辐射质（半值层或能谱）确定的不确定度；
- b) 探测器能量响应曲线的不确定度（实验测量或蒙特卡洛计算）；
- c) 辐射质表征参数（如 HVL）与实际能谱之间的对应关系不确定度；
- d) 对于连续谱 X 射线，还包括能谱重建的不确定度。

当实际辐射质与校准辐射质接近时（如同一系列的辐射质），能量响应修正因子接近 1，其相对标准不确定度一般为 0.5%~2%。当辐射质差异较大时（如校准在 Cs-137 γ 射线，使用在诊断 X 射线能区），能量响应修正可能显著偏离 1，其不确定度可能达到 5%~10%甚至更大，必须进行专门的实验测定或蒙特卡洛模拟。

9.3.7 散射辐射修正因子 k_{sc} 引入的不确定度

散射辐射修正用于修正辐射场中散射光子对探测器读数的贡献。散射辐射的能量和方向与初级辐射不同，探测器对散射辐射的响应通常与初级辐射不同。

散射辐射修正因子的不确定度来源于：

- a) 散射辐射比例（散射分数）确定的不确定度；
- b) 散射辐射能谱和角分布确定的不确定度；
- c) 探测器对散射辐射响应的不确定度；
- d) 蒙特卡罗模拟的统计不确定度和模型不确定度。

在实验室标准辐射场中，散射条件通常得到良好控制，散射修正因子接近 1，其相对标准不确定度一般为 0.1%~0.5%。在现场测量中，散射条件复杂（如机房墙壁、设备、患者身体的散射），散射修正可能显著，其不确定度可能达到 1%~5%，应根据具体现场条件进行评定。

9.3.8 几何条件引入的不确定度

（1）源-探测器距离不确定度：辐射剂量遵循平方反比定律，距离偏差导致的剂量相对偏差约为 $2 \cdot u(d)/d$ 。若距离测量的标准不确定度为 $u(d)$ ，则距离引入的相对标准不确定度为：

$$u_{\text{rel}}(d) = 2 \cdot u(d) / d \quad (36)$$

示例：距离 $d=100$ cm，距离测量不确定度 $u(d)=0.2$ cm（矩形分布，最大偏差 0.35 cm），则 $u_{\text{rel}}(d)=2 \times 0.2/100=0.4\%$ 。

（2）定位偏差不确定度：探测器灵敏中心与辐射束轴的横向偏移。对于均匀辐射场，定位偏差影响较小；对于高斯分布或非均匀辐射场，应根据场分布梯度计算定位偏差的影响。

（3）入射角偏差不确定度：若探测器角度响应曲线已知，入射角偏差 $\Delta\theta$ 导致的响应变化为 $\Delta R = (dR/d\theta) \cdot \Delta\theta$ 。角度响应修正的不确定度包含角度测量不确定度和响应曲线不确定度。

9.3.9 读数与本底引入的不确定度

（1）读数分辨率：数字仪表的显示分辨率为 δ （最小显示单位），按矩形分布，标准不确定度为 $u=\delta/(2\sqrt{3})$ 。若读数为 M ，相对标准不确定度为 $u_{\text{rel}}=\delta/(2\sqrt{3} \cdot M)$ 。

（2）静电计线性：静电计在不同量程的线性偏差。若最大线性偏差为 $\pm L$ ，按矩形分布， $u=L/\sqrt{3}$ 。

（3）本底扣除：本底读数 R_0 的标准不确定度 $u(R_0)$ 来源于本底测量的重复性（A 类）和本底随时间的变化（B 类）。经本底修正后的读数 $M=R-R_0$ ，其标准不确定度

为：

$$u(M) = \sqrt{u^2(R) + u^2(R_0)} \quad (37)$$

在低剂量率测量中，本底计数占比较大，本底扣除的不确定度可能成为主要分量。应通过延长本底测量时间、定期监测本底变化等方式降低此项不确定度。

9.3.10 探测器稳定性引入的不确定度

探测器校准因子随时间的漂移是重要的不确定度来源，特别是对于使用时间较长或受到大剂量辐照的电离室。稳定性不确定度可通过以下方式评定：

- a) 期间核查数据：定期使用稳定辐射源核查探测器响应，根据多次核查数据的标准偏差评定；
- b) 历史校准数据：比较历次校准结果，计算校准因子的年变化率，根据校准周期内的最大可能漂移评定；
- c) 厂家技术指标：根据厂家给出的长期稳定性指标评定。

若校准周期内探测器响应的最大可能变化为 $\pm S$ （相对值），按矩形分布，相对标准不确定度为 $u_{\text{rel}}=S/\sqrt{3}$ 。对于设计良好的空腔电离室，年稳定性通常优于 0.5%，在一个校准周期内的稳定性不确定度一般为 0.1%~0.3%。

9.3.11 物理常数引入的不确定度

对于自由空气电离室等基准级测量，物理常数的不确定度需要考虑。主要物理常数包括：

- a) 空气中每离子对的平均能量 W/e ：推荐值 33.97 J/C，相对标准不确定度为 0.35%；
- b) 空气密度：由温度、气压、湿度计算，其不确定度已包含在环境修正中；

对于工作级测量，物理常数的不确定度通常已包含在校准因子的不确定度中，不需单独评定。

10 合成标准不确定度

10.1 合成原则

合成标准不确定度是根据各标准不确定度分量，按照测量模型的函数关系和各输入量之间的相关性进行合成得到的。合成应遵循以下原则：

- a) 应根据测量模型的函数形式选择合适的合成公式；
- b) 应正确处理输入量之间的相关性；

- c) 对于乘法模型，采用相对标准不确定度合成更为简便；
- d) 合成前应确认各分量已经过灵敏系数修正；
- e) 合成结果应进行合理性检查，确保主要分量已被正确识别和评定。

10.2 不相关输入量的合成

对于一般测量模型 $Y=f(X_1, X_2, \dots, X_N)$ ，当各输入量不相关时，合成标准不确定度为：

$$u_c^2(Y) = \sum [c_i^2 \cdot u^2(x_i)] \quad (38)$$

式中： $c_i = \partial f / \partial x_i$ 为输入量 x_i 的灵敏系数； $u(x_i)$ 为输入量 x_i 的标准不确定度。

对于电离法辐射剂量测量中常见的乘法模型 $Y = M \cdot N \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot \dots \cdot k_n$ ，各输入量不相关时，相对合成标准不确定度为：

$$u_{c,rel}^2(Y) = u_{rel}^2(M) + u_{rel}^2(N) + \sum u_{rel}^2(k_i) \quad (39)$$

即各输入量相对标准不确定度的方和根。这是电离法剂量测量不确定度合成中最常用的公式。

对于包含加减运算的模型（如 $M=R-R_0$ ），应使用绝对标准不确定度合成：

$$u^2(M) = u^2(R) + u^2(R_0) \quad (40)$$

10.3 相关输入量的处理

当输入量之间存在相关性时，合成标准不确定度应包含协方差项：

$$u_c^2(Y) = \sum c_i^2 \cdot u^2(x_i) + 2 \cdot \sum c_i \cdot c_j \cdot u(x_i) \cdot u(x_j) \cdot r(x_i, x_j) \quad (41)$$

式中： $r(x_i, x_j)$ 为输入量 x_i 和 x_j 之间的相关系数，取值范围为[-1, +1]。

在电离法辐射剂量测量中，处理相关性的方法包括：

- a) 若相关系数较小（ $|r| < 0.1$ ），可近似认为不相关，忽略协方差项；
- b) 若相关系数可估计，应在合成公式中计入协方差项；
- c) 对于强相关的输入量，可通过改变测量方法或数据处理方式消除相关性（如使用独立的测量仪器、分别测量等）；
- d) 对于共同来自上一级标准的不确定度分量，在多个被测量同时合成时应特别注意相关性。

10.4 灵敏系数

灵敏系数 c_i 描述输入量 x_i 的单位变化引起输出量 Y 的变化量。对于乘法模型，各输入量的灵敏系数为：

$$c_i = \partial Y / \partial x_i = Y / x_i \quad (42)$$

因此，输入量 x_i 的标准不确定度对输出量的贡献为 $c_i \cdot u(x_i) = Y \cdot u(x_i) / x_i = Y \cdot u_{\text{rel}}(x_i)$ ，即输出量乘以输入量的相对标准不确定度。这也是乘法模型采用相对不确定度合成的原因。

对于非线性模型，灵敏系数可能随输入量的取值而变化。在不确定度较小的情况下，可在输入量的最佳估计值处计算偏导数作为灵敏系数（一阶泰勒近似）。若不确定度较大或模型强非线性，应考虑采用蒙特卡罗方法进行不确定度传播。

11 扩展不确定度

11.1 确定原则

扩展不确定度 U 由合成标准不确定度 u_c 乘以包含因子 k 得到：

$$U = k \cdot u_c \quad (43)$$

扩展不确定度的确定应遵循以下原则：

- a) 应明确所采用的置信水平，通常取 95%；
- b) 应根据有效自由度确定包含因子 k ；
- c) 当各分量的自由度均较大（一般 $\nu > 10$ ）时，可近似取 $k=2$ ；
- d) 当有效自由度较小时，应查 t 分布表确定 k 值，不得简单取 $k=2$ ；
- e) 扩展不确定度的数值应按规定的修约规则进行修约。

11.2 有效自由度

合成标准不确定度的有效自由度 ν_{eff} 按 Welch-Satterthwaite 公式计算：

$$\nu_{\text{eff}} = u_c^4(Y) / \sum [c_i^4 \cdot u^4(x_i) / \nu_i] \quad (44)$$

式中： ν_i 为各标准不确定度分量的自由度。对于乘法模型，采用相对标准不确定度时，公式可写为：

$$\nu_{\text{eff}} = u_{c,\text{rel}}^4 / \sum [u_{\text{rel},i}^4 / \nu_i] \quad (45)$$

A 类分量的自由度 $\nu_A = n-1$ （ n 为测量次数）。B 类分量的自由度应根据信息的可靠程度估计，可参考表 3。

表3 B类评定自由度估计参考

信息可靠程度	自由度 ν	典型情形
很高	50	权威校准证书、多次精确实验测定
较高	20	有充分实验数据支撑、文献明确给出
中等	10	有限实验数据、经验丰富的判断
较低	5	少量数据、粗略估计、厂家一般指标
很低	2	仅凭经验猜测、信息来源不可靠

11.3 包含因子选取

根据有效自由度 ν_{eff} 和所要求的置信水平 p （通常 $p=95\%$ ），查 t 分布表得到包含因子 $k=t_p(\nu_{\text{eff}})$ 。表4给出了常用自由度下95%置信水平的 t 值。

表4 95%置信水平下 t 分布临界值（部分）

ν_{eff}	$k(t_{0.95})$	ν_{eff}	$k(t_{0.95})$
2	4.30	12	2.18
3	3.18	15	2.13
4	2.78	20	2.09
5	2.57	30	2.04
6	2.45	40	2.02
8	2.31	50	2.01
10	2.23	∞	1.96

在实际工作中，若各不确定度分量的自由度均较大（如均大于10），且有效自由度 $\nu_{\text{eff}} > 10$ ，可近似取 $k=2$ （对应约95%置信水平）。若 $\nu_{\text{eff}} \leq 10$ ，应查表取 k 值。

对于某些特殊应用（如工业检测、安全监测），若规范或标准有明确规定，可按规定选取 k 值。

11.4 修约规则

扩展不确定度的数值修约应遵循以下规则：

- 扩展不确定度通常取1~2位有效数字。当首位数字为1或2时，建议取2位有效数字；首位数字大于2时，可取1位有效数字；
- 测量结果的末位应与扩展不确定度的末位对齐；
- 不确定度的修约应采用“只进不舍”原则（向上修约），即修约后不确定度值不小于修约前的值。例如， $U=0.123 \text{ mGy}$ ，取1位有效数字修约为 0.2 mGy （而非 0.1 mGy ）；取2位有效数字修约为 0.13 mGy ；
- 相对扩展不确定度通常用百分数表示，取1~2位有效数字。

12 不确定度报告

12.1 报告基本要求

不确定度报告应清晰、准确、完整地表述测量结果及其不确定度，使报告使用者能够正确理解测量结果的可靠程度。报告应遵循以下基本要求：

- a) 应给出被测量的完整定义，包括测量对象、测量条件、辐射质等；
- b) 应给出测量结果的数值、单位和扩展不确定度；
- c) 应明确扩展不确定度对应的包含因子 k 和置信水平；
- d) 应说明不确定度评定所依据的规范或方法；
- e) 对于重要的测量，应附不确定度分量表，列出各分量的来源、评定方法、数值和自由度；
- f) 报告表述应规范，避免使用容易引起歧义的用语。

12.2 校准证书中的不确定度表述

校准证书中应给出校准结果的扩展不确定度。典型表述方式如下：

示例 1：空气比释动能校准因子

$$N_K = 4.523 \times 10^7 \text{ Gy/C}, U_{\text{rel}} = 0.8\%, k=2 \text{ } (v_{\text{eff}} \approx 50, \text{ 置信水平约 } 95\%)。$$

示例 2：剂量率测量结果

在参考点处，空气比释动能率 $K = 2.15 \text{ mGy/h}$, $U = 0.05 \text{ mGy/h}$ ($k=2$, 置信水平约 95%)。

12.3 报告应包含的信息

一份完整的不确定度报告（或不确定度评定记录）应包含以下信息：

- a) 被测量的定义和测量方法描述；
- b) 测量模型和数学公式；
- c) 各输入量的最佳估计值及其标准不确定度；
- d) 不确定度分量表，包括：来源、符号、数值、标准不确定度、灵敏系数、不确定度贡献、自由度、评定方法（A 类/B 类）；
- e) 相关性分析及处理说明；
- f) 合成标准不确定度 u_c ；
- g) 有效自由度 v_{eff} ；

- h) 包含因子 k 及置信水平;
- i) 扩展不确定度 U ;
- j) 测量结果的最终表述;
- k) 检定员/校准员、核验员和日期。

12.4 表述注意事项

在表述测量不确定度时, 应注意以下事项:

- a) 不应将扩展不确定度表述为“误差”或“精度”;
- b) 不应使用“ $\pm$ ”符号将扩展不确定度与测量结果连接, 除非明确说明其含义; 推荐使用“ $U=...$ ”的表述方式;
- c) 相对扩展不确定度应明确标注“相对”或使用下标“rel”, 如 U_{rel} ;
- d) 当给出扩展不确定度时, 必须同时给出包含因子 k (或有效自由度和置信水平), 否则扩展不确定度没有意义;
- e) 测量结果的有效数字位数应与不确定度相匹配, 不应给出过多无意义的数字;
- f) 对于不同测量点或不同辐射质下的测量结果, 理论上应分别给出各自的不确定度, 若差别不大, 可以统一给一个结果。

附录 A

空腔电离室空气比释动能测量不确定度评定示例

A.1 测量概述

采用 0.6 cm³空腔电离室在 X 射线标准辐射场中测量空气比释动能率。辐射质为 CCRI 100（管电压 100 kV，HVL=0.150 mmCu），源-探测器距离 100 cm，电离室校准因子 N_K 由上一级标准装置给出。测量目的是确定参考点处的空气比释动能率。

A.2 数学模型

空气比释动能率的数学模型为：

$$K = (I - I_0) \cdot N_K \cdot k_{TP} \cdot k_h \cdot k_{pol} \cdot k_s \cdot k_e \cdot k_{sc}$$

式中各符号含义见正文第 4 章。

A.3 各输入量的标准不确定度评定

A.3.1 读数重复性（A 类）

在重复性条件下进行 10 次独立测量，电离电流读数（经本底修正后）分别为（单位：pA）：2.145, 2.152, 2.148, 2.150, 2.147, 2.153, 2.149, 2.151, 2.146, 2.150。

计算得：平均值 $\bar{I}=2.1491$ pA，单次测量标准偏差 $s(I)=0.0025$ pA，平均值的标准偏差 $s(\bar{I})=0.0025/\sqrt{10}=0.00079$ pA。

相对标准不确定度： $u_{rel}(I)=0.00079/2.1491=0.037\%$ ，自由度 $\nu=9$ 。

A.3.2 校准因子 N_K （B 类）

校准证书给出 $N_K=5.234 \times 10^7$ Gy/C，相对扩展不确定度 $U_{rel}=1.0\%$ ， $k=2$ 。

相对标准不确定度： $u_{rel}(N_K)=1.0\%/2=0.50\%$ ，自由度 $\nu=50$ 。

A.3.3 温度气压修正 k_{TP} （B 类）

测量时温度 $t=20.2^\circ\text{C}$ ，气压 $P=101.2$ kPa。温度计最大允许误差 $\pm 0.3^\circ\text{C}$ ，气压计最大允许误差 ± 0.2 kPa，均按矩形分布。

$$u(T)=0.3/\sqrt{3}=0.173^\circ\text{C}, u(T)/T=0.173/293.35=0.059\%$$

$$u(P)=0.2/\sqrt{3}=0.115 \text{ kPa}, u(P)/P=0.115/101.2=0.114\%$$

$$u_{rel}(k_{TP})=\sqrt{(0.059\%^2 + 0.114\%^2)}=0.128\% \approx 0.13\%, \text{ 自由度 } \nu=10.$$

A.3.4 湿度修正 k_h （B 类）

相对湿度 45%，湿度修正因子 $k_h=1.001$ 。根据报告，湿度修正系数的相对不确定度约为 0.03%，按矩形分布，自由度 $\nu=10$ 。

A.3.5 极化修正 k_{pol} (B 类)

正负极性测量结果差异小于 0.05%，极化修正因子 $k_{\text{pol}}=1.000\pm0.0005$ ，按矩形分布。

$$u_{\text{rel}}(k_{\text{pol}})=0.05\%/\sqrt{3}=0.029\%\approx0.03\%, \text{ 自由度 } \nu=10。$$

A.3.6 复合修正 k_s (B 类)

双电压法测定复合修正因子 $k_s=1.003$ ，测量重复性和外推不确定度合计约 0.1%，按矩形分布。

$$u_{\text{rel}}(k_s)=0.1\%/\sqrt{3}=0.058\%\approx0.06\%, \text{ 自由度 } \nu=10。$$

A.3.7 能量响应修正 k_e (B 类)

校准辐射质与使用辐射质均为 CCRI 系列，能量响应修正因子 $k_e=0.998$ 。根据蒙特卡罗计算和实验验证，修正因子的相对不确定度约为 0.5%，按矩形分布。

$$u_{\text{rel}}(k_e)=0.5\%/\sqrt{3}=0.289\%\approx0.29\%, \text{ 自由度 } \nu=10。$$

A.3.8 散射修正 k_{sc} (B 类)

标准辐射场散射条件良好，散射修正因子 $k_{\text{sc}}=1.0005$ ，散射修正的相对不确定度约 0.2%，按矩形分布。

$$u_{\text{rel}}(k_{\text{sc}})=0.2\%/\sqrt{3}=0.115\%\approx0.12\%, \text{ 自由度 } \nu=10。$$

A.3.9 源-探测器距离 (B 类)

距离 $d=100$ cm，距离测量最大偏差 ± 0.2 cm，按矩形分布， $u(d)=0.2/\sqrt{3}=0.115$ cm。

平方反比定律， $u_{\text{rel}}(d)=2\times u(d)/d=2\times 0.115/100=0.23\%$ ，自由度 $\nu=10$ 。

A.3.10 读数分辨率 (B 类)

静电计显示分辨率 0.001 pA，读数约 2.15 pA，按矩形分布。

$$u_{\text{rel}}(\text{分辨率})=0.001/(2\sqrt{3}\times 2.15)=0.013\%, \text{ 可忽略。}$$

A.4 不确定度分量汇总

表 A.1 不确定度分量汇总表

序号	来源	类型	相对标准不确定度 $u_{\text{rel}}(\%)$	自由度 ν
1	读数重复性	A	0.037	9

2	校准因子 N_K	B	0.50	50
3	温度气压修正 k_{TP}	B	0.13	10
4	湿度修正 k_h	B	0.12	10
5	极化修正 k_{pol}	B	0.03	10
6	复合修正 k_s	B	0.06	10
7	能量响应修正 k_e	B	0.29	10
8	散射修正 k_{sc}	B	0.12	10
9	源-探测器距离	B	0.23	10

A.5 合成标准不确定度

各输入量不相关，相对合成标准不确定度为各分量的方和根：

$$u_{c,rel} = \sqrt{(0.037^2 + 0.50^2 + 0.13^2 + 0.12^2 + 0.03^2 + 0.06^2 + 0.29^2 + 0.12^2 + 0.23^2) \%}$$

$$= 0.757\% \approx 0.76\%$$

A.6 有效自由度

按 Welch-Satterthwaite 公式计算：

$$v_{eff} = 0.757^4 / (0.037^4/9 + 0.50^4/50 + 0.13^4/10 + 0.12^4/10 + 0.03^4/10 + 0.06^4/10 + 0.29^4/10 + 0.12^4/10 + 0.23^4/10)$$

计算得 $v_{eff} \approx 38$ 。

A.7 扩展不确定度

取置信水平 95%， $v_{eff}=38$ ，查 t 分布表得 $k \approx 2.02$ 。为简便起见，取 $k=2$ 。

$$U_{rel} = k \cdot u_{c,rel} = 2 \times 0.76\% = 1.52\% \approx 1.6\%$$

A.8 测量结果报告

在 CCRI 100 辐射质、100 cm 距离条件下，参考点处空气比释动能率为：

$$K = 2.15 \times 10^{-2} \text{ mGy/h}, \quad U = 0.03 \times 10^{-2} \text{ mGy/h} \quad (k=2)$$