



## CNAS 技术报告

# 校准和测量能力（CMC）的评定与实例

### 版权声明

本文件版权归中国合格评定国家认可委员会（CNAS）所有，CNAS 对其享有完全的著作权及与著作权有关的权利。

在遵守《中华人民共和国著作权法》及其他相关法律法规的前提下，机构及人员等可免费使用本文件进行非商业性的学习和研究。

未经 CNAS 书面授权准许，禁止任何单位和个人复制、传播、发行、汇编、改编、翻译或以其他方式对本文件再创作等，侵权必究。

CNAS 网站：[www.cnas.org.cn](http://www.cnas.org.cn)

中国合格评定国家认可委员会

## 目 录

|                                     |    |
|-------------------------------------|----|
| 1 适用范围.....                         | 4  |
| 2 引用文件.....                         | 4  |
| 3 术语和定义.....                        | 4  |
| 4 测量不确定度评定.....                     | 4  |
| 4.1 不确定度来源分析.....                   | 4  |
| 4.2 测量模型建立.....                     | 6  |
| 4.3 测量不确定度的 A 类评定.....              | 8  |
| 4.4 测量不确定度的 B 类评定.....              | 12 |
| 4.5 合成标准不确定度.....                   | 18 |
| 4.6 扩展不确定度.....                     | 23 |
| 4.7 自由度的评估.....                     | 23 |
| 4.8 可以忽略的不确定度分量.....                | 24 |
| 5 实验室如何提高校准和测量能力.....               | 24 |
| 5.1 实验室的日常管理.....                   | 24 |
| 5.2 被校仪器的选择.....                    | 24 |
| 5.3 方法、设备的选择.....                   | 25 |
| 5.4 合理评估测量重复性引入的测量不确定度分量.....       | 25 |
| 5.5 充分识别和正确评估测量不确定度 B 类分量.....      | 25 |
| 6 实验室间比对在校准和测量能力评定中的应用.....         | 25 |
| 附件 A 部分校准领域不确定度主要来源分析.....          | 26 |
| A1 电磁和无线电校准过程不确定度的来源.....           | 27 |
| A2 质量校准过程不确定度的来源.....               | 32 |
| A3 温度校准过程不确定度的来源.....               | 34 |
| A4 尺寸校准过程不确定度的来源.....               | 35 |
| A5 使用活塞式压力计校准过程不确定度的来源.....         | 37 |
| 附件 B 0.1 级精密压力表校准结果的 CMC 评定：压力..... | 40 |
| 附件 C 扭矩扳子校准结果的 CMC 评定：扭矩.....       | 47 |
| 附件 D 数字指示秤校准结果的 CMC 评定：质量.....      | 51 |
| 附件 E 布氏硬度计校准结果的 CMC 评定：硬度.....      | 57 |
| 附件 F 量块校准结果的 CMC 评定：长度.....         | 63 |
| 附件 G 工作用玻璃液体温度计校准结果的 CMC 评定：温度..... | 70 |
| 附件 H 工作用廉金属热电偶校准结果的 CMC 评定：温度.....  | 84 |

|                                      |     |
|--------------------------------------|-----|
| 附件 I 指针式仪表校准结果的 CMC 评定：电压、电流、电阻..... | 95  |
| 附件 J 数字多用表校准结果的 CMC 评定：电压、电流、电阻..... | 103 |
| 附件 K 功率传感器校准结果的 CMC 评定：校准因子 .....    | 119 |
| 附件 L 信号发生器校准结果的 CMC 评定：绝对电平.....     | 125 |



## 前 言

计量溯源性是国际间相互承认测量结果的前提条件，中国合格评定国家认可委员会（CNAS）将计量溯源性视为测量结果有效性的基础，并确保获认可的测量活动的计量溯源性满足国际规范的要求。

校准实验室认可制度是中国合格评定国家认可委员会（CNAS）建立和实施的主要认可制度之一，校准实验室通过获得 CNAS 认可，使其为客户提供校准服务的能力得到认可，出具的校准证书得到国际承认。CNAS 对校准实验室的认可证书附件中，校准和测量能力（CMC）是体现校准实验室提供校准服务的能力范围和水平的重要指标。

ILAC-P14《ILAC 对校准领域测量不确定度的政策》和 CNAS-CL07《测量不确定度的要求》规定了校准实验室 CMC 的表述方式，国内外在校准结果测量不确定度评定方面的相关文献较多，但基本没有结合 CMC 表述方式给出完整的实例。

为提高实验室在 CMC 评定方面的能力，规范 CMC 评定文件，以及提高校准实验室认可评审中对 CMC 评定要求的一致性。CNAS 组织编制了本技术报告。

本技术报告正文部分为测量不确定度评定的通用方法，附件 A 分析了部分校准领域不确定度的主要来源，附件 B 至附件 L 提供了几何量、热学、力学、电磁和无线电领域部分校准项目 CMC 评定的完整实例，这些实例覆盖了 CMC 用单一值、范围、函数和矩阵等方式表述。但本技术报告所给出的实例并不试图统一该项目的 CMC 评定和表述方式，仅供相关方参考。

本技术报告由中国合格评定国家认可委员会提出并归口，主要起草者：

中国合格评定国家认可中心：张龙、王阳、林志国、张鹏杰、高俊斌、冯涛

北京东方计量测试研究所：黄晓钉、李晶晶

北京长城计量测试技术研究所：徐晓梅、张泽光、李鑫武

北京市计量检测科学研究院：刘玉兴、刘兴荣、刘伟

北京青云航空仪表有限公司理化计量中心：陈德录、唐军

工业和信息化部通信计量中心：张睿

江苏省计量科学研究院：胡强

# 校准和测量能力（CMC）的评定与实例

## 1 适用范围

本文件作为 CNAS-CL07《测量不确定度的要求》中对校准实验室校准和测量能力（CMC）的评定和表示方式在实施中的参考文件，描述了依据 JJF 1059.1《测量不确定度评定与表示》（简称 GUM 法）进行 CMC 评定的程序、要求和注意事项，以及 CMC 评定的实例，供拟申请和已获认可的校准实验室评定 CMC 以及 CNAS 评审员对 CMC 进行评审时参考。

## 2 引用文件

JJF 1059.1 测量不确定度评定与表示

JJF 1001 通用计量术语及定义

CNAS CL07 测量不确定度的要求

UKAS M3003 The Expression of Uncertainty and Confidence in Measurement

## 3 术语和定义

JJF 1059.1 中的术语和定义适用于本文件。

校准和测量能力(Calibration and Measurement Capability, CMC)是实验室在常规条件下能够提供给客户的校准和测量的能力，用包含概率约为 95%的扩展不确定度表示，通常是实验室在常规条件下的校准中可获得的最小的测量不确定度。

注 1：CMC 是实验室采用常规的测量程序和测量条件可达到的最高的校准水平（该校准水平应能够复现），但并不意味着实验室在所有日常校准中均能达到这一水平。获得 CNAS 认可的实验室在认可范围内的所有活动中，特别是出具校准证书时，不应报告或宣称比获认可的 CMC 更小的测量不确定度。

注 2：申请 CNAS 认可的校准实验室应评定每个校准参量的 CMC，且评定的 CMC 应能覆盖申请认可的测量范围。当人员、设备、校准方法、设施环境或者溯源链等发生变化时，实验室应分析相关的 CMC 是否需要重新评定。

## 4 测量不确定度评定

### 4.1 不确定度来源分析

不确定度的来源可以分为包括人员、设备、被校对象、方法、环境等方面带来的不确定性、各种随机影响和修正系统影响的不完善。不确定度来源分析尽可

能做到不遗漏、不重复。

测量中的失误或突发因素不属于测量不确定度的来源。例如，在测量不确定度的 A 类评定时，如果怀疑存在粗大误差，应按统计判别准则进行判别，如发现异常值（即离群值），应仔细分析其产生的原因，在明确是粗大误差时，可考虑剔除该异常值（即离群值），然后再评定其标准不确定度。

本文件附件 A 中关于不确定度主要来源分析的资料可供实验室参考。

#### 4.1.1 测量人员引入的不确定度

(1) 测量人员读取指针式仪表或带标线量具等模拟式测量仪器示值时，由于估读引入的不确定度。

(2) 测量人员由于经验、理解、能力的差异，在测量点布置、测量时间控制等方面引入的不确定度。

#### 4.1.2 测量设备引入的不确定度

(1) 计量标准、测量仪器（包括辅助设备）、参考物质在量值溯源中引入的不确定度。

(2) 上述测量设备由于重复性、稳定性、响应特性、灵敏度、鉴别力、分辨力、死区、漂移等计量性能的局限性引入的不确定度。

#### 4.1.3 被测对象引入的不确定度

(1) 被测对象的代表性不够，如材料的成分或均匀性方面不理想引入的不确定度。

(2) 被测对象的某些特性由于受环境或时间等因素的影响不稳定引入的不确定度。

实验室评定 CMC 时应选择一台可获得的、按溯源关系可校准的最佳仪器作为被校仪器，可参阅本文件 5.2 节内容。

#### 4.1.4 校准方法引入的不确定度

(1) 对被测量的定义不完整或复现被测量的测量方法不理想等因素引入的不确定度。

(2) 测量过程中引入的不确定度，如测量过程的偏离、近似和假设、测量次数、测量时间、瞄准方式（目测和光学）、加载方向（进程和回程）等方面。

(3) 数据处理过程引入的不确定度，如外部资料中提供的物理常数或引用数据的不确定度、数据修约引入的不确定度等。

#### 4.1.5 测量环境引入的不确定度

校准应在规定的环境条件下进行，实验室的环境因素包括：温度、相对湿度、照明、大气压力、空气流动、空气组成、污染、振动、噪声、热辐射、电磁干扰、供电电源变化等。实验室对环境条件测量和控制不准确或者对校准过程受环境影响认识不足均会对校准结果产生影响而引入不确定度。

## 4.2 测量模型建立

建立满足测量不确定度评定所要求的测量模型，应以计算测量结果的公式为基础，确定被测量（输出量） $Y$  和其他量（输入量） $X_i (i=1,2,\dots,n)$  间的具体函数关系，一般形式可写为：

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad (1)$$

若被测量  $Y$  的估计值为  $y$ ，输入量  $X_i$  的估计值为  $x_i$ ，则有：

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (2)$$

测量模型的输入量通常是直接可测的量、物理量或相关量（如修正量）。表示不确定度或误差区间的量不能作为输入量，但这些应纳入不确定度来源分析。

### 4.2.1 线性测量模型

当被测量  $Y$  由  $N$  个其他量  $X_1, X_2, \dots, X_n$  通过线性量函数  $f$  确定时，线性测量模型中仅包含各输入量的一阶项，基本形式为：

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_n) = y_0 + m_1 X_1 + m_2 X_2 + \dots + m_n X_n \quad (3)$$

【例 1】-【例 3】为线性测量模型实例。测量方法不同时，建立的测量模型也是不同的，如【例 2】和【例 3】测量模型所示。测量模型中输入量可以由另外函数关系导出，如【例 4】的测量模型所示。

#### 【例 1】数字压力计的测量模型

使用 0.02 级活塞式压力计标准装置，依据 JJG 875-2005《数字压力计检定规程》的要求，对样品进行校准。建立测量模型：

$$\delta = P_1 - P_0$$

式中： $\delta$ —数字压力计各校准点示值误差；

$P_1$ —数字压力计各校准点示值；

$P_0$ —标准压力值。

#### 【例 2】1 级角度块（15°10′）工作角偏差的测量模型

依据 JJG70-2004《角度块检定规程》，15°10′ 的角度块在光栅分度头的工作台上均匀分布的五个位置分别测量，取其测量值的算术平均值为测量结果。测量时把角度块安放于已调整到工作状态的光栅分度头的工作台上，转动工作台，使自准直仪照准角度块的第 1 工作面，同时在光栅分度头读数系统获取读数  $a_1$ ，然

后再转动工作台使自准直仪照准角度块的第 2 工作面,再次在光栅分度头读数系统获取读数  $a_2$ , 通过计算就可得到被测角度块工作角偏差。建立测量模型:

$$\alpha = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 (|180^\circ - |a_2 - a_1|| - \alpha_0)$$

式中:  $\alpha$  — 工作角偏差;

$a_1$  — 角度块第 1 工作面读数值;

$a_2$  — 角度块第 2 工作面读数值;

$\alpha_0$  — 被测角度块标称角度值。

### 【例 3】1 级角度块 (90°) 工作角偏差的测量模型

依据 JJG70-2004 《角度块检定规程》, 90° 的角度块的测量采取以下四组测回方式。第一个测回: 转动工作台, 使自准直仪照准角度块的第一个工作面, 同时在光栅分度头读数系统获取读数。接着转动光栅分度头使自准直仪依次照准第二个面、第三个面和第四个面, 并在光栅分度头读数系统获取读数。利用封闭计算的方法计算得到各个角度值。第二个测回: 转动分度头使其回到第一次读数的位置附近, 并调整角度块的位置使自准直仪照准角度块的第二个面, 接着依次照准第三个面、第四个面和第一个面, 计算方法如第一个测回。以此类推, 依次起始于第三面和第四面, 完成四组封闭测量, 每个被测角度得到四组数据, 取其平均值作为测量结果。建立测量模型:

$$\alpha = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 a_i$$

式中:  $a_i$  — 四组测回分别得到的相应角度块测量值。

#### 4.2.2 非线性测量模型

当测量模型  $Y = f(X_1, X_2, \dots, X_n)$  为非线性模型时, 在各输入量估计值  $x_{10}, x_{20}, \dots, x_{n0}$  处由泰勒级数展开为近似线性的测量模型:

$$y = f(x_{10}, x_{20}, \dots, x_{n0}) + \sum_{i=1}^n \frac{\partial f}{\partial x_i} \delta x_i + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \left\{ \frac{\partial^2 f}{\partial x_i^2} \delta x_i^2 + 2 \frac{\partial^2 f}{\partial x_i \partial x_j} + \frac{\partial^2 f}{\partial x_j^2} \delta x_j^2 \right\} + \dots \quad (4)$$

当公式 (4) 中输入量  $x_i$  二阶及以上偏导数均为零时, 该模型为线性测量模

型，因此线性测量模型仅是非线性测量模型的特例。【例 4】为非线性测量模型实例。非线性测量模型的处理较为复杂，如可能，可将非线性测量模型转化为线性测量模型（可参阅本文件 4.5.2 节内容）或在合成标准不确定度时忽略高阶项（可参阅本文件 4.5.3 节内容），也可参阅 JJF 1059.2 《用蒙特卡洛法评定测量不确定度》（本文件不涉及这部分内容）。

#### 【例 4】直流电阻箱的测量模型

依据 JJG 982-2003 《直流电阻箱检定规程》校准直流电阻箱，由于恒流源输出的电流在规定的测量范围内不随负载变化，将电阻之比转化为电压之比。在实际校准中，随着被测电阻阻值的变化，恒流源的稳定性和负载调节能力会引起输出变化，因此在测量模型中需要考虑恒流源输出的变化。建立测量模型：

$$R_x = \frac{U_x}{U_N} \cdot K \cdot R_N \quad \text{其中 } K = \frac{I_N}{I_x}$$

式中： $R_x$ —电阻箱被测电阻值；

$U_x$ —测量电阻  $R_x$  时电压表读数；

$U_N$ —测量电阻  $R_N$  时电压表读数；

$I_N$ —测量电阻  $R_N$  时恒流源提供的电流；

$I_x$ —测量电阻  $R_x$  时恒流源提供的电流；

$R_N$ —II 等标准电阻的标称值。

### 4.3 测量不确定度的 A 类评定

测量不确定度的 A 类评定是对在规定测量条件下测得的量值用统计分析的方法进行的测量不确定度分量的评定，其信息来源于对一个输入量  $x$  进行多次测量得到的测量列  $x_1, x_2, \dots, x_n$ 。最常用的分析方法是贝塞尔法和极差法。

#### 4.3.1 贝塞尔法

在重复性或复现性条件下对同一被测量  $X$  独立重复测量，得到结果为  $x_k (k = 1, 2, \dots, n)$ ，则被测量  $X$  的最佳估计值可以用  $n$  次独立测量结果的平均值来表示：

$$\bar{x} = \frac{\sum_{k=1}^n x_k}{n} \quad (5)$$

用标准偏差表示的不确定度称为标准不确定度。单次测量结果的标准不确

定度  $u(x_k)$  即单次实验标准差  $s(x_k)$  可用贝塞尔公式表示, 其中  $x_k - \bar{x}$  称为残差:

$$u(x_k) = s(x_k) = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (x_k - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (6)$$

在实际测量中, 采用  $n$  次测量结果算术平均值的实验标准偏差  $s(\bar{x})$  作为测量结果的最佳估计值。被测量  $X$  估计值  $\bar{x}$  的 A 类不确定度  $u(\bar{x})$  为测量列算术平均值的实验标准偏差:

$$u(\bar{x}) = s(\bar{x}) = \frac{s(x_k)}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (x_k - \bar{x})^2}{n(n-1)}} \quad (7)$$

#### 4.3.2 极差法

在重复性条件或复现性条件下, 对同一被测量  $X$  进行  $n$  次独立测量, 测量结果中的最大值和最小值之差  $R$  称为极差。在被测量  $X$  接近正态分布的前提下, 单次测量结果  $x_k$  的实验标准差  $s(x_k)$  可按下式近似的评定:

$$u(x_k) = s(x_k) = \frac{R}{C} \quad (8)$$

式中极差系数  $C$  可由下表给出, 其值与测量次数  $n$  有关。

|     |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| $n$ | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   |
| $C$ | 1.13 | 1.69 | 2.06 | 2.33 | 2.53 | 2.70 | 2.85 | 2.97 | 3.08 |

作为一种简化的  $s(x_k)$  的估计, 还可以采用  $C \approx \sqrt{n}$ , 这一关系可用于  $n \leq 10$  情况, 而不会产生较大偏差。

被测量  $X$  估计值  $\bar{x}$  的 A 类不确定度  $u(\bar{x})$  可按下式计算:

$$u(\bar{x}) = s(\bar{x}) = \frac{s(x_k)}{\sqrt{n}} = \frac{R}{C\sqrt{n}} \quad (9)$$

#### 4.3.3 贝塞尔法和极差法的区别

通常情况下, 测量次数较少时, 如小于 6 次, 极差法优于贝塞尔法。当测量次数较大时, 由于极差法所采用的信息量较少的原因 (仅采用了一个极大值和一个极小值), 极差法得到的标准差不如贝塞尔法准确。使用贝塞尔法, 测量次数应不小于 6 次, 通常情况下测量次数不小于 10 次为宜。

由于对多次测量取平均值后正、负误差相互抵消, 随着测量次数的增加  $s(\bar{x})$  会减小。当期望 A 类不确定度较小时, 可适当增加测量次数, 但同时需要考虑测

量时间的增长和测量成本的增加的影响。

#### 4.3.4 重复性测量条件

重复性测量条件是相同的测量程序、相同的操作者、相同测量系统、相同操作条件和相同地点,并在短时间内对同一或相类似被测对象重复测量的一组测量条件。重复性测量条件适用于 CMC 评定以及预评估重复性时 A 类不确定度的评定。

##### 4.3.4.1 相同的测量程序

相同的测量程序可以理解为按照规定的校准规范、检定规程及技术规范等完成从校准前准备到最终给出校准结果和测量不确定度的全过程,包括校准要求的环境条件、设备、数据处理方法等。

##### 4.3.4.2 相同的操作者

操作者可以是同一人,也可以是不同的人。但由于人员的差异性,即便是同一人也会因为身体状态、精力状态、外界干扰等因素使得测量结果分散性不同。通常实验室日常校准工作并非同一人,在能力接近的操作者也可以认为是相同的操作者。当确认操作者间的差异性时,可以在其他重复性条件均保持不变的情况下,由不同操作者分别对同一被测对象进行大于等于 10 次独立重复测量,如果不同操作者对合成标准不确定度产生的差异可以忽略时,则可认为是相同的操作者。

##### 4.3.4.3 相同测量系统

相同测量系统是指同一个测量标准、测量设备、辅助设备、参考物质等。不同的测量系统在同一测量点的示值误差不一定相同,甚至出现不同的符号。

##### 4.3.4.4 相同操作条件

相同的操作条件是为保证指测量过程中环境条件的一致性。

##### 4.3.4.5 相同地点

相同地点是为了消除某些校准结果受地点的影响。

##### 4.3.4.6 短时间

短时间是保证重复性条件(相同的测量程序、相同的操作者、在相同的操作条件下使用相同的测量系统以及相同地点)不变的时间段,主要取决于人员的素质、仪器的性能、环境条件等影响量的监控。从数理统计和数据处理的角度来看,在这段时间内测量应处于统计控制状态,即符合统计规律的随机状态。

#### 4.3.5 合并样本标准差

如果有  $m$  组对被测量的独立测量结果,每组测量结果的实验标准差为  $s_j(x_k), (j=1,2,\dots,m)$ ,且每组包含的测量次数均为  $n$ ,则合并样本标准差为:

$$s_p(x_k) = \sqrt{\frac{1}{m(n-1)} \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^n (x_{jk} - \bar{x}_j)^2} = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{j=1}^m s_j^2(x_k)} \quad (10)$$

当各组包含的测量次数不完全相同时，合并样本标准差为：

$$s_p(x_k) = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^m (n_j - 1) s_j^2(x_k)}{\sum_{j=1}^m (n_j - 1)}} \quad (11)$$

式中， $n_j$  为第  $j$  组的测量次数。

合并标准差  $s_p(x_k)$  仍是单次测量结果的实验标准差，当最终的测量结果是  $n'$  测量结果的平均值，测量结果最佳估计值的 A 类标准不确定度为：

$$u(\bar{x}) = s(\bar{x}) = \frac{s_p(x_k)}{\sqrt{n'}} \quad (12)$$

其中， $n'$  应小于等于  $n_j$  的最小值。

为提高 CMC 评定的可靠性、充分考虑测量过程的分散性，实验室可以采用合并样本标准差的方法。这种分散性包括不同校准人员、同类型多台/套标准设备、测量时间以及测量环境等差异性带来的。例如，对同一校准参量有多名校准人员，实验室可以将不同人员独立测量结果的实验标准差进行合并，如此评价的 A 类标准不确定度可以认为在日常校准中均能达到的水平或者说日常校准的 A 类不确定度评定可以直接利用该结果（即 6.6 节提到的预评估重复性）。但需要注意的是，当实验室人员、测量设备、环境等方面发生变化时，应重新评估 A 类不确定度评定的合理性。

合并样本标准差需要明确的前提条件：

(1) 确保测量过程的规范化。样品处理、测量仪器的等级或技术要求、环境条件要求、测量程序、数据处理等测量全过程应严格依据校准规范文件的要求。

(2) 不同组的独立测量值大小各异，但各组单次测量结果的实验标准差  $s_j(x_k)$  不应有显著差异。当不同组的  $s_j(x_k)$  差异较显著时，实验室可选择在常规条件下能够达到的最高水平作为 CMC 评定的 A 类分量。这里提到的最高水平可以是若干组数值较小的  $s_j(x_k)$  合并的结果，也可以仅是一组最小值。

#### 4.3.6 预评估重复性

实际校准工作中，测量结果的 A 类标准不确定度不一定每次测量时都需要重新评定，可以利用预先评定的结果。如测量仪器比较稳定， $n$  次重复测量得到的单次测量实验标准差  $s(x_k)$  可以保持相当长的时间不变，可以在一段时间内的同类测量中直接采用之前评估的数据。当测量结果是  $m(1 \leq m < n)$  次重复测量的平

均值，测量结果最佳估计值的A类标准不确定度为：

$$u(\bar{x}) = s(\bar{x}) = \frac{s(x_k)}{\sqrt{m}} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (x_k - \bar{x})^2}{m(n-1)}} \quad (13)$$

其中，单次测量实验标准差  $s(x_k)$  也可以用合并标准差  $s_p(x_k)$  代替。

利用预评估结果的前提条件：

- (1) 预评估的单次测量实验标准差可以保持相当长的时间不变。
- (2) 日常校准时与预评估的实验标准差不存在显著差异，需要对被校对象的稳定性、重复性等性能进行评估。

实验室在评定CMC的A类分量时，可以用以下方式：

- (1) 适当增加样本数量，并以这些样本算术平均值的实验标准偏差作为CMC评定中的A类分量，从而降低重复性的影响，此时按公式（7）计算，不涉及重复性预评估。实验室在日常校准中，如果校准方法规定的测量次数  $m < n$ ，应按公式（13）对日常校准结果进行测量不确定度的A类评定。需要注意，实验室评定的CMC与日常校准结果的测量不确定度可能是有差异的。

(2) 适当增加样本数量，并以单次测量的实验标准偏差作为预先评定的结果。实验室在评定CMC的A类分量时，根据日常校准中校准方法规定的测量次数  $m$  ( $m < n$ ) 按公式（13）计算。

(3) 测量次数与日常校准中校准方法规定的次数一致，此时按公式（7）计算，不涉及重复性预评估。

#### 4.3.7 随机效应来源

标准不确定度的A类评定过程应尽可能考虑随机效应的来源，这些随机效应将导致重复测量的分散性。例如：

- (1) 考虑不同样品间以及同一样品不同部位的均匀性可能存在的随机差异，如圆形直径应随机选取不同方向进行重复测量。
- (2) 每次重复测量时应确保测量程序操作的完整性，尤其是可能导致随机性的部分不应省略。考虑测量程序中连接线分布电感等因素对测量重复性的影响，如电流互感器每次重复测量时应重新连线；若测量仪器的调零是测量程序的一部分，应考虑调零的随机差异，如电流表每次重复测量时应重新调整零点。
- (3) 在一个气压表上重复多次读取示值时，每次把气压表扰动一下，然后让它恢复到平衡状态后再进行读数。

#### 4.4 测量不确定度的B类评定

测量不确定度的B类评定是用不同于A类评定方法（统计方法）对测量不确定度分量进行的评定，至少应考虑以下来源：

- (1) 标准器和测量设备的溯源（校准证书或检定证书中）给出的不确定度或

通过厂家提供的说明书、手册等技术资料中的信息推算出的不确定度，以及各种因素导致的读数漂移或不稳定引入的不确定度；

注：由此可见，标准器溯源的不确定度仅作为 CMC 的一个分量，实验室评定的 CMC 在数值上不应小于其标准器向上级机构溯源时给出的不确定度。

(2) 被校仪器的分辨力和短期稳定性，通常不包括被校仪器的长期稳定性；

注：实验室在评定 CMC 时应选择一台可获得的最佳仪器作为被校仪器，通常情况下可以认为仪器在测量过程中是稳定的。

(3) 操作程序不严密或人员能力水平可能引入的不确定度；

(4) 结合对有关技术资料 and 测量仪器特性的了解和经验，考虑可能引入的不确定度；

(5) 环境条件的影响引入的不确定度。

#### 4.4.1 评定方法

根据 B 类不确定度的来源，确定被测量的不确定度区间  $[\bar{x}-a, \bar{x}+a]$  或误差范围（其中  $a$  为区间半宽度），根据被测量在该区间的概率分布和包含概率  $p$  确定包含因子  $k$ ，则 B 类标准测量不确定度为：

$$u(x) = \frac{a}{k} \quad (14)$$

##### 4.4.1.1 包含因子的确定

当被测量服从正态分布，根据下表的包含概率  $p$  确定包含因子：

|         |      |       |       |       |       |       |       |
|---------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $p(\%)$ | 50   | 68.27 | 90    | 95    | 95.45 | 99    | 99.73 |
| $k$     | 0.67 | 1     | 1.645 | 1.960 | 2     | 2.576 | 3     |

当被测量服从其他常用分布时，包含因子按下表确定，其中，包含概率  $p = 100\%$ ：

|      |            |            |                       |            |    |
|------|------------|------------|-----------------------|------------|----|
| 分布情况 | 矩形（均匀）     | 三角         | 梯形 ( $\beta = 0.71$ ) | 反正弦        | 两点 |
| $k$  | $\sqrt{3}$ | $\sqrt{6}$ | 2                     | $\sqrt{2}$ | 1  |

当不能确定分布情况时，可认为被测量在区间  $[-a, a]$  内服从均匀分布，取包含因子  $k = \sqrt{3}$ 。

##### 4.4.1.2 校准或检定证书中不确定度的应用

当信息来源于校准或检定证书等技术文件并同时给出被测量的扩展不确定度  $U(x)$  和包含因子  $k$ ，B 类标准不确定度为：

$$u(x) = \frac{U(x)}{k} \quad (15)$$

当校准或检定证书中未给出包含因子  $k$  值，一般情况，可按  $k = 2$  处理。如可能，实验室应选择测量仪器常用的工作点或 CMC 评定的关键点（如导致 CMC 分段表示的工作点）制定溯源计划，这样 B 类不确定度的评定更有针对性。

通常情况下，使用校准或检定证书给出的不确定度信息评定 B 类不确定度时，应考虑测量仪器稳定性（年漂移）引入的不确定度，当其对不确定度的贡献较小时可忽略不计。当直接使用测量仪器的最大允差评定 B 类不确定度时，可以认为仪器的最大允差包含了仪器稳定性（年漂移）的影响，不需再考虑长期稳定性引入的不确定度分量。实验室在评定 CMC 时，应尽量使用校准或检定证书中给出的不确定度信息，因为这样评定的 B 类分量数值上小于使用最大允差评定的结果。

当检定证书中未给出不确定度信息时，由于测量仪器的等级基本上都是按最大允许误差（Maximum Permissible Error, MPE）来划分的，可按该级别的最大允许误差进行评价，此时需要参阅检定规程等相关文件。

#### 4.4.1.3 技术资料中不确定度的应用

当技术资料中的信息表示被测量分布的极限范围为  $[a_-, a_+]$ ，则对应包含概率  $p = 100\%$  的包含区间半宽度  $a = (a_+ - a_-) / 2$ 。

当被测量分布的极限范围由 MPE 给出时，可分为以下三种情况：

(1) 按误差定义给出的示值误差允许值，如千分表类、千分尺类、硬度计类、液体温度计类等，由此引入的标准不确定度可按最大允许误差绝对值（MPEV）除以包含因子得到；

(2) 按相对误差给出的允许值，如材料试验机类等，由此引入的标准不确定度可按最大允许误差绝对值（MPEV）乘以示值再除以包含因子得到；

(3) 按引用误差给出的允许值，如压力表类、流量计类等，由此引入的标准不确定度可按最大允许误差绝对值（MPEV）乘以量程范围再除以包含因子得到。

#### 4.4.1.4 测量仪器分辨力引入的标准不确定度

测量仪器分辨力可以通过测量仪器的显示装置或读数装置能有效辨别的最小示值差来评定。根据 JJF 1094-2002《测量仪器特性评定》，带数字显示装置的测量仪器分辨力为最低位数字显示变化一个步进量时的示值差。如，数字电压表最低位数字显示变化一个字的示值差为  $1\mu\text{V}$ ，则分辨力为  $1\mu\text{V}$ 。用标尺作为读数装置（包括带有光学机构的读数装置）的模拟式测量仪器分辨力，为标尺上任何两个相邻标记之间（即最小分度值）的一半。如，线纹尺的最小分度为  $1\text{mm}$ ，则分辨力为  $0.5\text{mm}$ 。但模拟式仪器的分辨力受标尺间距大小、指示标记与标尺间

的空隙大小及观测者经验等因素的影响,不同的观测人员对同一示值估读的数值可能是不同的。分辨力是测量仪器的固有特性,在 CMC 评定时应予以考虑。

#### (1) 数字式仪器分辨力

当测量结果由数字式仪器单次读数得出时,仪器分辨力 $\delta_x$ 引入的标准不确定度服从均匀分布,可按下式计算:

$$u(x) = \frac{\delta_x}{2\sqrt{3}} \approx 0.29\delta_x \quad (16)$$

当测量结果由数字式仪器两次读数差得出时,仪器分辨力 $\delta_x$ 引入的标准不确定度服从三角分布,可按下式计算:

$$u(x) = \frac{\delta_x}{\sqrt{6}} \quad (17)$$

#### (2) 模拟式仪器分度值

当测量结果由模拟式仪器单次读数得出时,仪器分度值 $\delta_x$ 引入的标准不确定度为:

$$u(x) = \frac{\delta_x}{3} \quad (18)$$

当测量结果由模拟式仪器两次读数差得出时,仪器分辨力 $\delta_x$ 引入的标准不确定度为:

$$u(x) = \frac{\sqrt{2}\delta_x}{3} \quad (19)$$

通常情况下,由于模拟式仪器测量过程中均要估读,由于估读引入的不确定度分量可以包含在重复性标准差(即 A 类不确定度评定)中,故可以在 B 类定中不考虑分辨力的分量。但当仪器分辨力较低,A 类评定不能充分反映该分量时,应在 B 类评定中单独考虑。

### 4.4.2 不确定度分布的保守估计

当影响量的分布情况没有任何信息时,可以使用均匀分布作保守估计。若已知非三角分布时,可假设为均匀分布或反正弦分布。若已知非均匀分布时,可假设为反正弦分布。由于反正弦分布的包含因子 $k$ 值最小(其次是均匀分布),由此得到的标准不确定度最大,故反正弦分布和均匀分布是比较保守的假设。

### 4.4.3 常用的分布情况举例

#### 4.4.3.1 均匀分布

##### (1) 数据修约导致的不确定度

- (2) 数字式测量仪器的分辨力导致的不确定度
- (3) 测量仪器的滞后或摩擦效应导致的不确定度
- (4) 按级使用的数字式仪表及测量仪器的最大允差导致的不确定度
- (5) 用上、下界给出的材料的线膨胀系数
- (6) 测量仪器的度盘或齿轮的回差引起的不确定度
- (7) 平衡指示器调零不准导致的不确定度
- (8) 如果对影响量的分布情况没有任何信息时，可以将其近似估计为均匀分布。

【例 1】根据 JJG 307-2006《机电式交流电能表检定规程》，不同等级电能表的测量结果应按对应的修约间距化整，修约引入的不确定度可按均匀分布考虑，区间半宽度  $a = \frac{b\% \times h}{2}$ （ $b$  为准确度等级， $h$  为修约间距）。

【例 2】湿度测量仪表读数的数字量化到 1%RH，由此引入的不确定度可按均匀分布考虑，区间半宽  $a = 0.5\%RH$ 。

【例 3】一等水银温度计读数通过望远镜可估读至分度值的 1/10，由于需要取正反面两次读数的平均值，估读误差应为 1/20 分度值，由此引入的不确定度可按均匀分布考虑，区间半宽度  $a = 1/40$  分度值。

【例 4】0.01 级电位差计示值误差校准时使用 UJ42 型直流比较仪式电位差计作为标准器，标准器的最大允差为  $\pm 1 \times 10^{-6} V$ ，根据其历年检定数据，认为由此引入的不确定度可按均匀分布考虑，区间半宽度  $a = 1 \times 10^{-6} V$ 。

【例 5】使用多功能校准源时，如最大允许示值误差为  $\pm(0.0003\% \times \text{输出值} + 3\mu V)$ ，由此引入的不确定度可按均匀分布考虑，区间半宽度  $a = 0.0003\% \times \text{输出值} + 3\mu V$ 。

【例 6】按最大允许误差计算的标准器年稳定度可按均匀分布考虑。如直流双臂桥示值误差校准时使用电阻箱（型号 ZX71，准确度 0.02 级）作为标准器，电阻箱在  $1\Omega$  时示值的年稳定误差为  $\pm 2 \times 10^{-4} \times 0.1\Omega$ ，区间半宽度  $a = 2 \times 10^{-5} \Omega$ 。

【例 7】通常被校对象和标准器材料热膨胀系数引入的不确定度可按均匀分布考虑。如千分尺校准中，千分尺和标准量块的热膨胀系数在  $(11.5 \pm 1) \times 10^{-6} / ^\circ C$  范围内服从均匀分布。

【例 8】标准电池校准时，电池比较仪的最小十进盘的步进值为  $0.1\mu V$ ，由

此引入的不确定度可按均匀分布考虑，区间半宽度  $a = 0.05\mu\text{V}$ 。

【例 9】电位差计校准中，根据检定规程，电位差计测量盘在任意示值下工作电流的变化不应超过  $0.1b\%$ （ $b$  为准确度等级），由电流变化引入的不确定度可按均匀分布考虑，区间半宽度  $a = 0.05b\%$ 。

【例 10】标准电池校准时，如测量装置灵敏度为  $0.07\mu\text{V}/\text{mm}$ ，由灵敏度引入的不确定度可按均匀分布考虑，区间半宽度  $a = 0.035\mu\text{V}/\text{mm}$ 。

【例 11】湿度检定箱的湿度场不均匀性引入的不确定度以及恒温槽（水槽、油槽、低温槽）的温度场不均匀性引入的不确定度可按均匀分布考虑。

【例 12】二等标准铂铑 10-铂热电偶校准时，由经验可知，测量回路寄生电势不超过  $\pm 0.4\mu\text{V}$ ，由寄生电势引入的不确定度可按均匀分布考虑。

【例 13】活塞式压力计校准时，校准温度影响压力的变化量，可按均匀分布考虑，如压力变化量  $\Delta p = \pm p_0(\alpha + \beta) \times (t - t_0)$ ，其中  $p_0$  为校准时压力， $\alpha$  为活塞杆膨胀系数， $\beta$  为活塞筒膨胀系数， $t$  为校准时温度， $t_0$  为校准时标准温度。

#### 4.4.3.2 正态分布

正态分布通常适用于重复性条件或复现性条件下多次测量的算术平均值以及特定条件下合成标准不确定度的分布（本文件不再讨论合成标准不确定度属正态分布的特定条件，通常情况，在评定 CMC 时，可以认为合成标准不确定度为正态分布）。在 B 类不确定度评定时，可以考虑为正态分布的示例如下：

【例 1】二等标准铂铑 10-铂热电偶校准时，作为标准器的一等标准热电偶，在校准间隔内热电动势变化一般不超过  $\pm 5\mu\text{V}$ ，由此引入的标准不确定度可按正态分布考虑。

【例 2】标准电池校准时，作为标准器的 I 等标准电池允许的年变化为  $\pm 2\mu\text{V}$ ，由此引入的标准不确定度可按正态分布考虑。

【例 3】标准铂铑 10-铂热电偶校准时，由经验，因捆扎和热偶在管状炉工作温场中防止重复性引入的测量结果变化不大于  $\pm 2\mu\text{V}$ ，可认为服从正态分布。

#### 4.4.3.3 反正弦分布

【例】微波功率衰减测量中，失配误差  $M = \frac{20\ln(|1 - \Gamma_u \Gamma_s|)}{\ln 10}$  在不确定度分析

中一般认为是反正弦分布。

#### 4.4.3.4 三角分布

【例】钢质量块的热膨胀系数为 $(11.5 \pm 1) \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ ，假定标准量块和被校量块的热膨胀系数在 $(11.5 \pm 1) \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ 范围内均服从均匀分布，两者热膨胀系数之差应在 $\pm 2 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ 范围内服从三角分布，区间半宽度 $a = 2 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ 。

## 4.5 合成标准不确定度

### 4.5.1 线性测量模型的合成标准不确定度

#### 4.5.1.1 不确定度传播率

由公式（3）建立的线性测量模型中被测量的估计值 $y$ 的合成标准不确定度 $u(y)$ 可以表示为：

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left[ \frac{\partial f}{\partial x_i} \right]^2 u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} r(x_i, x_j) u(x_i) u(x_j)} \quad (20)$$

其中， $\frac{\partial f}{\partial x_i}$ 是在 $X_i = x_i$ 时导出的，称为灵敏系数，用符号 $c_i$ 表示； $r(x_i, x_j)$ 为输入量 $x_i$ 和 $x_j$ 的相关系数； $u(x_i, x_j) = r(x_i, x_j) u(x_i) u(x_j)$ 为输入量 $x_i$ 和 $x_j$ 的协方差。

#### 4.5.1.2 输入量不相关时合成标准不确定度

当各输入量相互独立或各输入量之间的相关性可以忽略的情况下，即 $r(x_i, x_j) = 0$ 时，被测量的估计值 $y$ 的合成标准不确定度可以表示为：

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left[ \frac{\partial f}{\partial x_i} \right]^2 u^2(x_i)} = \sqrt{\sum_{i=1}^n c_i^2 \cdot u^2(x_i)} = \sqrt{\sum_{i=1}^n u_i^2(y)} \quad (21)$$

其中， $u_i(y)$ 是对应输入量 $x_i$ 的输出量 $y$ 的标准不确定度分量。

当测量模型为 $Y = X$ ，即被测量 $y$ 由测量仪器直接测量得到测量值 $x$ ，如果不确定度来源为 $N$ 个不相关分量 $u_i$ 且假定其影响测量值的灵敏程度相同，则合成标准不确定度为：

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n u_i^2} \quad (22)$$

当测量模型为 $Y = A_1 X_1 + A_2 X_2 + \dots + A_n X_n$ 且各输入量不相关，合成标准不确定度为：

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n A_i^2 u^2(x_i)} \quad (23)$$

### 4.5.3 非线性测量模型的合成标准不确定度

#### 4.5.3.1 不确定度传播率

非线性测量模型由公式 (4) 展开为近似线性的测量模型, 当每个输入量均为正态分布时, 被测量的估计值  $y$  的合成标准不确定度  $u(y)$  可以表示为:

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)^2 u^2(x_i) + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \left[\frac{1}{2} \left(\frac{\partial^2 f}{\partial x_i \partial x_j}\right)^2 + \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial^3 f}{\partial x_i \partial x_j^2}\right] u^2(x_i) u^2(x_j)} \quad (24)$$

非线性测量模型中高阶项的处理较为复杂, 应尽量避免。当高阶项远小于一阶项时, 如模型近似线性的情况, 可以忽略高阶项, 按线性模型处理。当高阶项的数值不可忽略时, 如一阶项的灵敏系数较小或为零的情况, 应考虑高阶项。

#### 4.5.3.2 相对标准不确定度的合成

当非线性测量模型为  $Y = f(X_1, X_2, \dots, X_n) = mX_1^{p_1} X_2^{p_2} \dots X_n^{p_n}$  时, 可以转化为线性测量模型。在各输入量  $x_i$  不相关并且  $y \neq 0$  和  $x_i \neq 0$  的条件下, 其合成标准不确定度可表示为:

$$\left[\frac{u_c(y)}{y}\right]^2 = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)^2 u^2(x_i)}{y^2} = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{p_i y}{x_i}\right)^2 u^2(x_i)}{y^2} = \sum_{i=1}^n \left[\frac{p_i u(x_i)}{x_i}\right]^2 \quad (25)$$

令  $u_{rel}(y) = \frac{u_c(y)}{y}$  和  $u_{rel}(x_i) = \frac{u_c(x_i)}{x_i}$ , 公式 (24) 可变为:

$$u_{rel}^2(y) = \sum_{i=1}^n p_i^2 u_{rel}^2(x_i) \quad (26)$$

合成标准不确定度在形式上与 4.5.1.2 所述线性模型一致, 只是不确定度的传播率中所有的不确定度均用相对不确定度表示。

相对标准不确定度合成示例如下:

(1) 当测量模型为  $P = f(V, I) = VI$  时, 合成标准不确定度为:

$$\frac{u(P)}{|P|} = \sqrt{\left[\frac{u(V)}{V}\right]^2 + \left[\frac{u(I)}{I}\right]^2} \quad (27)$$

(2) 当测量模型为  $P = f(V, R) = V^2/R$  时, 合成标准不确定度为:

$$\frac{u(P)}{|P|} = \sqrt{\left[\frac{2u(V)}{V}\right]^2 + \left[\frac{u(R)}{R}\right]^2} \quad (28)$$

(3) 当测量模型为  $V = f(P, Z) = (P \cdot Z)^{1/2}$  时, 合成标准不确定度为:

$$\frac{u(V)}{|V|} = \sqrt{\left[\frac{u(P)}{2P}\right]^2 + \left[\frac{u(Z)}{2Z}\right]^2} \quad (29)$$

#### 4.5.3.3 非线性测量模型合成标准不确定度的简化示例

(1) 当测量模型为  $Y = X^2$  时, 根据公式 (24) 合成标准不确定度为:

$$u_c(y) = \sqrt{4x^2u^2(x) + 2u^4(x)} \quad (30)$$

通常  $x$  远大于  $u(x)$ , 高阶项可以忽略, 简化为:

$$u_c(y) \approx \sqrt{4x^2u^2(x)} \quad (31)$$

当  $u(x)$  远大于  $x$  时, 一阶项可以忽略, 简化为:

$$u_c(y) \approx \sqrt{2u^4(x)} \quad (32)$$

当  $x$  与  $u(x)$  大小接近时, 应按公式 (30) 计算。

(2) 当测量模型为  $Y = X^3$  时, 根据公式 (24) 合成标准不确定度为:

$$u_c(y) = \sqrt{9x^4u^2(x) + 36x^2u^4(x)} \quad (33)$$

简化方式可参考 4.5.3.3(1) 所示。

(3) 当测量模型为  $Y = X_1X_2$  时, 根据公式 (24) 合成标准不确定度为:

$$u_c(y) = \sqrt{x_2^2u^2(x_1) + x_1^2u^2(x_2) + u^2(x_1)u^2(x_2)} \quad (34)$$

通常  $x_1$  远大于  $u(x_1)$  且  $x_2$  远大于  $u(x_2)$ , 可简化为:

$$u_c(y) = \sqrt{x_2^2u^2(x_1) + x_1^2u^2(x_2)} \quad (35)$$

其余情况的简化方式可参考 4.5.3.3(1) 所示。

(4) 当测量模型为  $Y = X_1^2X_2$  时, 根据公式 (24) 合成标准不确定度为:

$$u_c(y) = \sqrt{4x_1^2x_2^2u^2(x_1) + x_1^4u^2(x_2) + 2x_2^2u^4(x_1) + 6x_1^2u^2(x_1)u^2(x_2)} \quad (36)$$

当  $x_1$  远小于  $u(x_1)$  时, 可简化为:

$$u_c(y) = \sqrt{2x_2^2 u^4(x_1)} \quad (37)$$

当  $x_2$  远小于  $u(x_2)$  时, 可简化为:

$$u_c(y) = \sqrt{x_1^4 u^2(x_2) + 6x_1^2 u^2(x_1) u^2(x_2)} \quad (38)$$

(5) 当测量模型为  $Y = X_1 X_2 X_3$  时, 根据公式 (24) 合成标准不确定度为:

$$u_c(y) = \sqrt{x_2^2 x_3^2 u^2(x_1) + x_1^2 x_3^2 u^2(x_2) + x_1^2 x_2^2 u^2(x_3) + x_3^2 u^2(x_1) u^2(x_2) + x_2^2 u^2(x_1) u^2(x_3) + x_1^2 u^2(x_2) u^2(x_3)} \quad (39)$$

简化方式可参考 4.5.3.3(4) 所示。

#### 4.5.4 各输入量间相关性的处理

##### 4.5.4.1 相关系数的取值

相关系数  $r(x_i, x_j)$  恒为  $[-1, +1]$  之间。当  $r = 0$  或  $r \approx 0$  时认为  $x_i$  和  $x_j$  是不相关。

当  $r(x_i, x_j) > 0$  时为正相关,  $x_i$  和  $x_j$  之间的联系倾向于成正比; 当  $r(x_i, x_j) = 1$  时,  $x_i$  和  $x_j$  的偏大或偏小完全相同。当  $r(x_i, x_j) < 0$  时为负相关,  $x_i$  和  $x_j$  之间的联系倾向于反比; 当  $r(x_i, x_j) = -1$  时,  $x_i$  和  $x_j$  的偏大或偏小完全相反。在统计理论中, 可以认为当  $|r(x_i, x_j)| \geq 0.7$  时为强相关, 否则为弱相关。相关系数可以采用两种方法取值:

##### (1) 实验测量

对输入量  $X_i$  和  $X_j$  分别进行  $n$  次重复观测得到  $x_{ik}$  和  $x_{jk}$ ,  $k = 1, 2, \dots, n$ 。相关系数的估计值为:

$$r(x_i, x_j) = \frac{\sum_{k=1}^n (x_{ik} - \bar{x}_i)(x_{jk} - \bar{x}_j)}{(n-1)s(x_i)s(x_j)} \quad (40)$$

其中,  $s(x_i)$  和  $s(x_j)$  分别是  $x_i$  和  $x_j$  的单次实验标准偏差。

##### (2) 理论估计

由于实验测量相关系数的方法较为复杂, 建议一般在 CMC 评定中输入量间只按强相关和不相关的简化处理,  $r(x_i, x_j)$  可取值为  $-1$ 、 $0$  和  $+1$ 。

##### 4.5.4.2 相关性产生的原因

通常情况下, 输入量间的相关性由于使用了同一台测量仪器、相同的实物标准 (如使用同一砝码、量块、标准电阻、标准电池等) 或参考数据 (如使用同一

种原子或分子的相对原子质量或相对分子质量、同一个重力加速度等估计值)所致。

例如,用同一个压力表测量压力差  $\Delta P = P_1 - P_2$ , 输入量  $P_1$  和  $P_2$  之间会产生相关性。当  $P_1$  和  $P_2$  的估计值较为接近时,由于同时受相近的示值误差的影响导致几乎相同的偏大或偏小,此时输入量间可以按强正相关处理。

#### 4.5.4.3 相关性的处理

(1) 当两个相关性输入量中的任一个量可以作为常量处理时可以去除相关性。

(2) 使用不同的测量仪器或实物标准可以避免输入量间的相关性。原则上,当若干台测量仪器均由同一个上级计量标准进行校准时,这些校准值是相关的,但实际应用中其相关性可以忽略。

(3) 使用同一测量仪器或实物标准测量不同的输入量,当输入量的估计值相差较远时,可以认为各输入量间相互独立,忽略相关性。

(4) 建立测量模型时应尽量选择不相关的输入量,或变换输入量形式以去除相关性。例如,在量块校准中标准量块的温度  $\theta_s$  与被较量块的温度  $\theta$  之间以及标准量块的线膨胀系数  $\alpha_s$  与被较量块的线膨胀系数  $\alpha$  之间存在较强的相关性,但只要将  $\theta$  变为  $\theta = \theta_s + \Delta\theta$  以及  $\alpha$  变为  $\alpha = \alpha_s + \Delta\alpha$ , 输入量间的相关性即可消除。

(5) 将引起相关的量作为独立的附加输入量引入测量模型。例如,若测量模型为  $Y = f[X_1(T), X_2(T)]$ , 输入量  $X_1$  和  $X_2$  均与温度  $T$  有关,是相关的。但只要在测量模型中将温度  $T$  作为独立的附加输入量,即  $Y = f[X_1, X_2, T]$ , 附加输入量  $T$  具有与  $X_1$  和  $X_2$  不相关的标准不确定度,输入量间的相关性即可消除。

(6) 当已证明输入量间的相关性较弱时,即相关系数的绝对值较小,可以忽略相关性。

(7) 如果相关的输入量在合成标准不确定度中非主要贡献时,可忽略相关性。

(8) 当量输入量之间为较强的正相关而使相关系数不可忽略时,可以假定为强相关,即设相关系数为+1。虽然假定强相关的合成标准不确定度会稍大,但合理、适度的放大测量不确定度以简化 CMC 评定过程是允许的。

(9) 仅当上述处理方式均不适用时,才应考虑用实验测量的方法计算相关系数。

#### 4.5.4.4 正强相关条件下的合成标准不确定度

对于线性测量模型,当输入量为正强相关(即相关系数为+1)时,合成标准不确定度公式(20)可简化为:

$$u_c(y) = \left| \sum_{i=1}^n \frac{\partial f}{\partial x_i} u(x_i) \right| = \left| \sum_{i=1}^n c_i u(x_i) \right| \quad (41)$$

此时灵敏系数  $c_i$  不取绝对值，应连同算术符号带入运算。

但当输入量为负强相关（即相关系数为-1）时，合成标准不确定度不应按公式（41）计算。

## 4.6 扩展不确定度

### 4.6.1 用扩展不确定度表示 CMC

扩展不确定度  $U$  由合成标准不确定度  $u_c$  乘包含因子  $k$  得到，是被测量可能值包含区间的半宽度。CMC 均使用包含概率  $p = 95\%$  和包含因子  $k = 2$  的扩展不确定度表示。申请 CNAS 认可的实验室在填写扩展不确定度（校准和测量能力）时可以采用绝对值或相对值形式表示 CMC。

用绝对值表示的 CMC 为：

$$U = 2u_c$$

用相对值表示的 CMC 为：

$$U_{rel} = 2u_{crel}$$

当相关校准方法、技术资料中对扩展不确定度计算推荐的包含概率不是  $p = 95\%$  时，应转换为包含概率  $p = 95\%$  的扩展不确定度。

### 4.6.2 有效数字位数

用扩展不确定度表示的 CMC 有效数字位数不应超过 2 位。在 CMC 评定中的过程量，如 A 类和 B 类标准不确定度、合成标准不确定度，可以保留 3 位有效数字，计算扩展不确定度时修约为 1~2 位有效数字。实验室在确定 CMC 有效数字位数时，当第一位有效数字为 1 或 2 时，建议保留 2 位有效数字；第一位为 3 及以上时，可以保留 1 位有效数字。

修约规则可以参照 GB/T 8170《数值修约规则与极限数值的表示和判定》，通常情况下，扩展不确定度末位后面的数字应采取进位的方式处理。

### 4.6.3 末位对齐原则

扩展不确定度应与测量结果末位对齐，当测量结果位数不够无法与测量不确定度对齐时，应将测量结果补零后对齐。

## 4.7 自由度的评估

根据 JJF 1059.1《测量不确定度评定与表示》，以下两种情况需要考虑自由度：

- (1) 当需要评定  $U_p$  时, 为求得  $k_p$  必须计算有效自由度  $\nu_{eff}$ ;
- (2) 当用户为了解所评定的不确定度的可靠程度而提出要求时。  
通常情况下, 申请 CNAS 认可的 CMC 评定时可以不考虑自由度。

#### 4.8 可以忽略的不确定度分量

在不确定度分量彼此独立(相关系数为 0)的前提下, 所有分量的合成标准不确定度为  $u_c$ , 忽略其中一个较小的分量后得到的合成标准不确定度为  $u_{c-1}$ 。通

常情况下, 如果  $\frac{u_c - u_{c-1}}{u_c} \leq 10\%$ , 则认为被忽略的这个来源导致的不确定度分量

对测量不确定度评定的影响较小, 该分量可以忽略。但当不确定度分量相关时, 尤其是强相关时, 不可直接按上述原则处理。

例如, 高等级的测量设备重复性较好, 当设备稳定后, 输出值与设定值完全相同或非常接近, 实验标准差为零或接近零, 用统计方法得出的 A 类不确定度分量为零或可忽略。此时, 只要设备没有工作在死区, 可仅评估 B 类分量的不确定度。但上述测量设备的重复性条件需要定期验证。

## 5 实验室如何提高校准和测量能力

### 5.1 实验室的日常管理

为确保评估的 CMC 反映真实的校准水平, 实验室应充分分析校准结果不确定度的影响因素, 并在日常管理中做好质量控制, 这是一切校准工作的基础。根据 ISO/IEC 17025:2005《检测和校准实验室能力的通用要求》, 实验室应特别关注质量管理体系在重点要素的运行情况, 如 5.2 人员、5.3 设施和环境条件、5.4 检测和校准方法及方法的确认、5.5 设备、5.6 测量溯源性、5.9 检测和校准结果质量的保证。

### 5.2 被校仪器的选择

实验室评估 CMC 时应选择一台可获得的、按量传关系可校准的最佳仪器作为被校仪器。理论上, 被校仪器对 CMC 的影响应不显著, 尤其是应避免其性能缺陷对 CMC 产生影响, 如性能不稳定、分辨力过低、重复性差等影响因素。必要时, 可选取多台被校仪器对评定的 CMC 进行验证, 确保 CMC 的真实可靠。但实际上, 实验室很难找到所谓理想的被校仪器, 通常选择被校仪器应考虑以下几个方面:

- (1) 稳定性好的被校仪器。短期稳定性差的仪器, 其测量重复性也必然差, 这将导致评定 CMC 时 A 类分量偏大。稳定性通常与环境条件的波动以及仪器的固有特性有关。

- (2) 重复性好的被校仪器。被校仪器的重复性直接影响评定 CMC 的 A 类分量的大小。通常重复性除与被校仪器的固有特性有关外, 还与环境条件或工作条件的

变化，以及人员操作有关。

(3) 分辨力高的被校仪器。一般情况下，被校仪器的分辨力通常应与测量标准的分辨力相当或低一个数量级。但被校仪器的分辨力过低，可能导致重复性引入的测量不确定度分量偏大。

### 5.3 方法、设备的选择

当检定规程、校准规范、技术规范中对同一被校仪器有多种校准方法，应分别评估其相应的CMC，或明确只使用某种方法，并且CMC评估使用的校准方法应与常规校准服务中使用的校准方法相同。当对同一参量或被校仪器实验室有多台/套标准设备时，应选择性能最佳的标准设备。此外，实验室在CMC评估时还应对人员、设施和环境以及测量溯源性等要素进行控制，确保其符合校准方法的要求。

### 5.4 合理评估测量重复性引入的测量不确定度分量

(1) 选择接近理想的被校仪器，使得被校仪器的缺陷对测量不确定度的贡献最小。

(2) 选择操作熟练的人员进行测量，提高测量结果的一致性，减少操作误差的影响。

(3) 注意环境条件的控制，如温度、湿度等，确保其在校准方法规定的范围内，并且在校准过程中温度、湿度的波动尽可能小。

(4) 为减少随机影响导致重复性引入的不确定度异常，可以增加对被测量的测量次数，并且注意识别异常值。

### 5.5 充分识别和正确评估测量不确定度 B 类分量

(1) 在测量模型基础上，应充分识别测量不确定度B类分量来源，正确评估每一个B类分量，分析分量之间的相关性。

(2) 对于测量标准引入的不确定度分量，可以使用校准值引入的不确定度和校准值的稳定性（年漂移）引入的不确定度计算B类分量，通常情况下，这两项不确定度的合成值小于使用仪器示值允差计算的B类分量。

## 6 实验室间比对在校准和测量能力评定中的应用

实验室间比对是按照预先规定的条件，由两个或多个实验室对相同或类似的物品进行测量或检测的组织、实施和评价。校准实验室间比对的结果采用国际上普遍接受的  $E_n$  值进行评价， $E_n$  值表明测量结果是否符合对实验室要求的不确定度。此外，实验室应采用申请认可的CMC计算  $E_n$  值，因此实验室间比对在评价测量结果的准确性以及验证CMC评定的合理性上具有重要意义。

## 附件 A 部分校准领域不确定度主要来源分析

附件 A 的内容直接引用 UKAS M3003 The Expression of Uncertainty and Confidence in Measurement 中附录 E-附录 J，分析了部分校准领域不确定度的主要来源，可作为不确定度评定的资料供实验室参考，包括：

- A1 电磁和无线电校准过程不确定度的来源
- A2 质量校准过程不确定度的来源
- A3 温度校准过程不确定度的来源
- A4 尺寸校准过程不确定度的来源
- A5 使用活塞式压力计校准过程不确定度的来源



## A1 电磁和无线电校准过程不确定度的来源

以下内容描述了电磁和无线电校准中系统误差和不确定度较为常见的来源，以及关于它们特性的说明。更加详细的资料可以在技术论文和产品手册或者其它参考文献中查询。

### A1.1 输入型不确定度

A1.1.1 无论是测量仪器还是参考标准，仪器校准证书上所给出的不确定度均应考虑。

### A1.2 长期稳定性

A1.2.1 仪器性能和参考标准的值会随着时间发生变化。无源器件比如标准电阻、高等级射频微波衰减器的指标也会随时间缓慢漂移。这种漂移应该在以往校准数据的基础上进行评估，不能简单地认为漂移是线性的。图形化的数据容易获取，对时间上越近的校准值赋以越大的权重的曲线拟合方法可以使评估时得到最佳值。曲线拟合的复杂度需要判断，有时候，通过数据点手工画出一条平滑的曲线就可以了。每当获得一个新的校准数据，我们需要重新评估漂移特性。对漂移所做的修正值的不确定度，取决于漂移的离散性。仪表漂移的幅度和随机不稳定性以及准确度要求决定了仪表的校准周期。

A1.2.2 对于复杂的电子仪器，由于在相对较长的时间上其性能变化更加随机，因此我们不可能总是运用以上评估方式。使用无源标准进行核查可以判断出仪表是否满足指标或者是否需要校准和后续调整。制造商提供的仪表指标可以用来评估漂移带来的不确定度，但应该通过质量控制和校准数据分析来进行确认。

### A1.3 环境条件

A1.3.1 实验室测量环境是电子校准的最重要的影响因素之一。室内温度通常是最重要的影响因素，例如标准电阻的温度系数信息必须求取。相对湿度的变化也会影响未密封元件的测量值。对于某些电学测量标准，大气压也会产生显著的影响。在射频和微波频段，环境温度会影响衰减器、阻抗标准以及其它基于机械尺寸的精密器件的值。热敏感设备，如功率探头，会被阳光或者其它热源导致的环境温度的快速变化而影响。

A1.3.2 我们还应注意电子测量时操作条件所带来的影响，如功率损耗，谐波失真，或者仪器使用时和校准时电压的不同。在任何频段上，标准阻抗，电阻分压器和衰减器都是能够被自热和电压影响的器件。应当保证所有的仪器都在生产商所标称的使用电压范围内操作使用。

A1.3.3 AC 校准信号的谐波失真和噪声会对校准信号值有明显的影响。同样地，任何测试系统中出现的共模信号的影响都应该被考虑。

#### A1.4 校准数据的内插

A1.4.1 较宽测量范围的仪器通常在校准时只会被给出限的测试点的校准数据，测量时的频率可能与校准点频率不同。当测量点处于两个校准点之间时，系统误差需要考虑，例如，非线性。

A1.4.2 如果测量频率在两个校准点之间，我们需要评估插值引起的额外的不确定度，除非确认以下方面：

- a) 仪器的工作原理是已知的，并且我们可知其频率特性，或者有同类型的其它型号仪器的频率校准数据。
- b) 实际使用的仪器经过扫频测试系统验证，没有共振效应、制造上的偏差或者其它影响性能的因素

#### A1.5 分辨力

A1.5.1 仪器显示被测数值最小变化的能力，称为分辨力，或者数据舍入误差，看作是不确定度的系统分量。

A1.5.2 数显功能的仪器都使用 AD 转换器将所测模拟信号转换为数字。所显示数字的末位通常四舍五入，而其产生的误差通常在 $-0.5$ （否则末位会小 1）到 $0.5$ 之间（否则末位会多 1），这样便产生了 $\pm 0.5$ 的量化误差。由于无法知道该范围内真实的测量数值，我们假设所产生的误差为 0，上下限在 $\pm 0.5$ 位以内。

A1.5.3  $\pm 0.5$  位的数据舍入误差并不适用于所有情况。在实际计算不确定度时需要了解仪器的工作原理。例如，由于被测信号和内部时钟的随机关系，direct-gating 频率计数器的数据舍入误差为 $\pm 1$ 位。有些仪器也可能显示滞后，可能导致好几位的不确定度。

A1.5.4 对于模拟显示的仪器，分辨力是由刻度盘上指针的实际读取能力决定的。无论是哪种情况，实际记录的最后一位数值都至少有 $\pm 0.5$ 位的不确定度。电子噪声的存在，会导致仪器读数的波动，该波动决定仪器的可用分辨力。目测时，尽量通过指针平均位置来获得良好的估值。

#### A1.6 设备布置

A1.6.1 在一些测量中，仪器之间的摆放和这些仪器的与地之间的关系比较重要。校准和之后的测量时仪器不同摆放，可能会带来系统误差。主要的影响因素包括对地泄漏电流，干扰回路电流和电磁场泄漏等。在电感测量中，需要规定好导线的布置，同时注意地或者周围强磁物质的影响。设备间相互的热效应也应当考虑。

## A1.7 热电电压

A1.7.1 一个电导经过温度梯度会在温度梯度内产生电位差，此即我们不想要的塞贝克效应。这种寄生电压会导致测量系统的误差，尤其在测量较小的直流电压时。

A1.7.2 我们可以通过设计热对称的接线来最小化塞贝克效应，一根导线中的塞贝克电压能够被另一根导线中完全相同但方向相反的塞贝克电压抵消。有些情况下，如交流直流转换器测试，直流电源极性反接，再取直流测量的两组数的平均值也可以减小塞贝克效应的影响。

A1.7.3 通常应当对由于热电动势的存在带来的 B 类不确定度分量进行评估。

## A1.8 负载和电缆阻抗

A1.8.1 电压表，示波器以及其他电压测量仪器具有一定的输入阻抗，会对它们所连接的电路形成负载，带来系统误差。如果阻抗已知，可以进行修正。尤其是有些多功能校准仪，存在较小的输出感性阻抗，当外接电容负载时，共振影响会造成输出电压相对于开路值升高

A1.8.2 在所有频率上，连接线或线缆的阻抗和电长度也会带来系统误差。在一些直流和交流测量中，使用四端连接会最小化这种误差。

A1.8.3 对于电容测量，连接线的电感性能比较重要，尤其是在高电容或者高频时。同样，在电感测量时，连接导线之间的电容较为重要。

## A1.9 射频失配误差和不确定度

A1.9.1 在射频和微波频段，组件和测量系统传输线特性阻抗之间的失配是功率和衰减测量中误差的重要来源之一，也是由系统误差引入的重要不确定度分量。这是因为电压反射系数的相位通常不可知，因而无法修正。

A1.9.2 功率测量系统中，与传输线特性阻抗匹配的负载上吸收的功率  $P_0$  和瓦特计吸收的实际功率  $P_L$  有如下关系：

$$P_0 = \frac{P_L}{1 - |\Gamma_L|^2} \left[ 1 - 2|\Gamma_G||\Gamma_L| \cos \Phi + |\Gamma_G|^2 |\Gamma_L|^2 \right] \quad (\text{A1-1})$$

其中  $\Phi$  是信号发生器和负载电压反射系数  $\Gamma_G$  和  $\Gamma_L$  的相对相位。当  $\Gamma_G$  和  $\Gamma_L$  很小时， $P_0$  变成：

$$P_0 = \frac{P_L}{1-|\Gamma_L|^2} [1 - 2|\Gamma_G||\Gamma_L| \cos \Phi] \quad (\text{A1-2})$$

A1.9.3 当  $\Phi$  未知时, 吸收功率的表达式有以下极值:

$$P_0(\text{limits}) = \frac{P_L}{1-|\Gamma_L|^2} [1 - 2|\Gamma_G||\Gamma_L|] \quad (\text{A1-3})$$

A1.9.4 可计算的失配误差为  $1-|\Gamma_L|^2$ , 失配不确定度的极限是  $\pm 2|\Gamma_G||\Gamma_L|$ 。由于不确定度的概率分布为余弦函数, 该分布为  $U$  型分布, 其标准差为:

$$u(\text{mismatch}) = \frac{2|\Gamma_G||\Gamma_L|}{\sqrt{2}} = 1.414\Gamma_G\Gamma_L \quad (\text{A1-4})$$

A1.9.5 当测量一个插在信号发生器和负载之间的两端口器件衰减器, 并且该发生器和负载与传输线并不完全匹配时, Harris 和 Warner 已证明失配的标准差  $M$ , 以 dB 为单位, 约为:

$$M = \frac{8.686}{\sqrt{2}} \left[ |\Gamma_G|^2 (|s_{11a}|^2 + |s_{11b}|^2) + |\Gamma_L|^2 (|s_{22a}|^2 + |s_{22b}|^2) + |\Gamma_G|^2 |\Gamma_L|^2 (|s_{21a}|^4 + |s_{21b}|^4) \right]^{0.5} \quad (\text{A1-5})$$

其中  $\Gamma_G$  和  $\Gamma_L$  分别是源电压和负载的电压反射系数,  $s_{11}$ 、 $s_{22}$ 、 $s_{21}$  是两端口组件的散射系数。Harris 和 Warner 已证明  $M$  的分布近似正态分布。

A1.9.6 方程 (A1-4) 和 (A1-5) 中  $\Gamma_G$  和  $\Gamma_L$  的数值, 以及方程 (A1-5) 中的散射系数本身具有不确定度, 这是因为它们是从测量中获得的。在计算失配不确定度时它们的不确定度应予以考虑, 建议可以对反射系数的测量或导出值平方相加再开根号, 例如, 如果  $\Gamma_L$  为  $0.03 \pm 0.02$ , 则其用于计算失配不确定度的值为  $\sqrt{0.03^2 + 0.02^2}$ , 即 0.036。

## A1.10 方向性

A1.10.1 在射频和微波频段测量电压反射系数 (VRC) 时, 如仅知道电桥和反射计方向性的幅度而不知道方向性的相位分量, 会使 VRC 测量值的不确定度升高。以线性表示, 其不确定度等于方向性, 例如 30dB 的方向性相当于 0.0316VRC 的不确定度。(注:  $20\log(0.0316) = -30\text{dB}$ )

A1.10.2 根据上述 A1.9.6 节, 我们推荐以如下的方式考虑方向性测量的不确定

度：将测试值的线性以平方相加再开根号。例如，如果电桥的方向性测量值为  $36dB(0.016)$ ，不确定度为  $+8dB - 4dB(\pm 0.01)$ ，则计算方向性不确定度为：

$$\sqrt{0.016^2 + 0.01^2} = 0.019(34.4dB)$$

### A1.11 测试端口匹配

A1.11.1 测量反射系数时，电桥或反射计的测试端口匹配会由于再反射而对 VRC 的测量产生误差。其不确定度为  $u(TP) = TP \cdot \Gamma_x^2$ ，其中  $TP$  是测试端口匹配， $\Gamma_x$  为测得的反射系数。当用定向耦合器去监视功率计校准时的入射功率时，耦合器的有效源匹配定义 A1.9 节中的  $\Gamma_x$  值。测试端口匹配的测量值需如 A1.9.6 和 A1.10 节中的方法评估不确定度。

### A1.12 射频连接器的重复性

A1.12.1 当一设备在同轴测量系统中校准而后在某些其他系统中使用，插入损耗与（较次要的）电压反射系数的重复性欠佳就会成为问题。虽然反复连接装置可以评估所使用的特定连接器的重复性，但这些连接器只是部分样本而已。获得所使用各种类型接头的的数据超出大多数实验室的能力范围。

## A2 质量校准过程不确定度的来源

以下内容简述了质量校准中常见的不确定度来源，这些影响量可能并非在所有等级砝码的校准中都表现的很显著，因此在评定不确定度时需要适当考虑。

### A2.1 参考砝码的校准

2.1.1 应考虑参考砝码校准证书给出的不确定度。

### A2.2 参考砝码的长期稳定性

A2.2.1 应考虑参考砝码自上次校准后质量可能的变化，该变化可由参考砝码历次校准的结果来评估。若无历次校准数据，通常可假设砝码质量可能的变化量与对应的校准不确定度量值相当。砝码的稳定性可能受到以下因素影响：材料和制造品质（例如： $F_2$ 等级以下砝码的螺丝）、表面处理、不稳定的调整材料、物理磨损与损伤、大气污染等。当砝码的使用方式或环境改变时，需要评估校准数据的稳定性从而确定校准结果是否可以使用。应依据参考砝码的稳定性制定砝码校准周期。

### A2.3 称重装置和称重过程

A2.3.1 应评估校准砝码的称重装置的功能来估计称重过程的不确定度来源，评估的内容应针对称重装置在称重过程的显著特点。例如：称重过程只使用置换方式（波达法 Borda's method），则等臂天平的臂长误差（假设为常数）就无需评估。评估内容可包括以下内容：

- (1) 测量重复性；
- (2) 使用范围内的线性（直接测量时）；
- (3) 每刻度的数值大小 / 重量值，即灵敏度；
- (4) 偏心度（偏载），尤其当多个砝码同时放在秤盘上时；
- (5) 磁性效应（例如：磁性砝码或力平衡马达作用于铸铁砝码的效应）；
- (6) 温度效应，例如：砝码与称重装置间的温度差；
- (7) 称重装置的臂长误差（机械天平中直接测量时）；
- (8) 分辨力。

### A2.4 空气浮力效应

A2.4.1 空气浮力修正的精度可根据砝码密度和空气密度测定值的准确度而定，尽管有些实验室可以测定砝码密度，但大多数情况可采用假定值。空气密度通常

是由测量空气温度、湿度与压力后计算得到。对于更准确的算法，可能需要测量空气中二氧化碳的含量。在相对湿度为 30%至 70%，空气温度为 10℃至 30℃，以及大气压力为 95kPa（950mbar）至 105kPa（1050 mbar）时，对应的空气密度范围为 $1.079\text{kg/m}^{-3}$ 至 $1.291\text{kg/m}^{-3}$ ，下文中采用的空气密度数值在此范围内。

A2.4.2 对一般砝码材质如不锈钢、电镀的黄铜、德银（镍锌铜合金）及炮铜（青铜），在质量比较时，一般浮力效应采用的数值为外加质量的 $\pm 1 \times 10^{-6}$ 。对铸铁而言，该数值会提高到 $\pm 3 \times 10^{-6}$ ，铝则会达到 $\pm 30 \times 10^{-6}$ 。如果质量比较过程是在空气温度、湿度和压力变化范围更小的环境中进行，测量结果的不确定度可以更小。如对空气浮力效应进行修正，则不必考虑上述的不确定度，但需要计算空气浮力修正的不确定度。

A2.4.3 一般称重装置显示的质量单位直接由所施加的力得出，通常为降低浮力效应会在设备上使用辅助砝码，称为替代砝码（spanning weight），用来使在一般条件下读值符合规格，如同装置本身改变的补偿一样，此替代砝码可以外加或内建於装置中。如果此装置在使用的时候不替代，校准可能会因负载砝码的浮力效应而提高不确定度。对使用不锈钢、电镀黄铜、德银及炮铜砝码的称重装置，此效应可能会提高到 $\pm 16 \times 10^{-6}$ 。对铸铁该读数会提高到 $\pm 18 \times 10^{-6}$ ，铝则会达到 $\pm 45 \times 10^{-6}$ 。

A2.4.4 根据上述的环境条件，测量体积时，浮力效应导致的不确定度界限可能分别为 $\pm 110 \times 10^{-6}$ 和 $\pm 140 \times 10^{-6}$ ，直接称重则分别为 $\pm 125 \times 10^{-6}$ 和 $\pm 155 \times 10^{-6}$ 。

A2.4.5 除了空气浮力效应外，校准过程的环境条件也会引入不确定度。温度梯度会提高天平盒内的空气对流而影响读数值，如空调系统出风口所造成的影响。实验室内温度急速改变会影响秤重过程。由于低湿度会造成某些比较测定仪的静电效应，因此实验室湿度的改变，会造成砝码质量显示值的短期变化。灰尘污染也会将不确定度引入校准中。校准时砝码的移动也会造成局部环境的扰动。

### A3 温度校准过程不确定度的来源

以下内容简述了温度测量中常见的系统误差与不确定度的来源,每一种来源可能有多个不确定度分量。

#### A3.1 参考温度计校准

A3.1.1 参考温度计校准证书上各参量所给定的不确定度均需考虑。

#### A3.2 测量仪器

A3.2.1 任何在测量时使用的电学或其他仪器(例如:标准电阻器、电桥及数字多用表)校准证书中给出的不确定度。

#### A3.3 其他影响量

A3.3.1 使用参考温度计在温度测量中附加的不确定度有:

- (1) 参考温度计及任何附带的测量仪器自上次校准以来的漂移;
- (2) 读数的分辨力,玻璃温度计和数字温度计会比较显著;
- (3) 热环境(如:恒温槽)的不稳定性与温度梯度,包括任何参考标准实际使用中的浸入方式、位置等与其校准时差异的情况;
- (4) 当使用铂电阻温度计作为参考标准时,任何由于自热效应(self-heating effects)所产生的不确定因素应予以考量。这种情况主要适用于如果测量电流不同于校准时的电流及/或测量条件(例如在空气中或在搅拌过的液体中)。

#### A3.4 被校温度计附带因素

A3.4.1 可包括 A3.3 中提到的其他影响量和附带电子式指示器所产生的因素。当部份浸入式玻璃温度计校准时,虽然露出的液面温度已经测量,但由于浸入深度不同所产生的额外不确定度应考虑。

A3.4.2 热电偶校准时,补偿导线及参考接点所产生的任何不确定度应考虑,开关旋钮与扫描单元所产生任何热电动势对结果的影响应予以评估。被校准热电偶的不均匀性会产生显著的影响,理想情况下,可通过改变热电偶在检定炉浸入的深度来评估。但这种做法通常不太实用,可以按特定类型热电偶最大允许误差的 20%来评估。

#### A3.5 数学内插法

A3.5.1 由数学内插法(例如:采用刻度修正或偏离参考表,或考虑标度非线性的拟合曲线)引入的不确定度应进行评估。

## A4 尺寸校准过程不确定度的来源

以下内容简述尺寸校准中常见的系统误差与不确定度的来源。

### A4.1 参考标注与仪表

A4.1.1 给定参考标准及校准用到的测量仪器的不确定度。

### A4.2 参考标准与仪表的长期稳定性

A4.2.1 应考虑随时间产生的变化,通常用参考仪器设备的历次校准数据来评估,尤其是当仪器正常操作可能产生物理磨损时需要特别注意。

### A4.3 温度效应

A4.3.1 被校准的量规与参考标准及使用的测量仪器间的温度差异所产生的不确定度应予以考虑,当长度较长以及涉及不同材质时最为明显。当可能对温度效应进行修正时,应考虑由采用的膨胀系数值的不确定度与测量温度计校准的不确定度所获得的残余不确定度。

### A4.4 弹性压缩

A4.4.1 被校准的量规与参考标准材质间对于弹性压缩的差异所产生的不确定度,在高精密校准及不同材质的情况下可能更为明显,影响量的大小与使用的测量力以及与接触量规及参考标准的测头性质有关。当可以进行数学修正时,测量结果会包含由测量力和所涉及材料性质的不确定度产生的残余不确定度。

### A4.5 余弦误差

A4.5.1 任何被校准的量规或使用的参考标准相对于测量轴有任何未对准时,会造成测量的误差,该误差通常称为余弦误差,可以通过调整量规对应于测量轴的方位找到适合的转折点以得到最大或最小结果从而将余弦误差差降到最低。小的残余误差可能还是会存在,例如,对有关数据对准的任何特征所做的不正确的假设。

### A4.6 几何误差

A4.6.1 被校准的量规、使用的参考标准或用来测量的仪器之间关键特征(critical features)在几何上的误差,会产生额外的不确定度。典型的几何误差包括有测头端的平面度或球度,用来作为基准面特征表面的直线度、平面度、

平行度或直角度，及圆柱量规或参考标准的圆度或锥度。该误差通常在于错误的假设完美几何形状，及在选择测量方法未能获得、抑制或考虑到几何误差时最为显著。



## A5 使用活塞式压力计校准过程不确定度的来源

以下简述使用活塞式压力计（dead weight tester, DWT）校准中常见的系统误差与不确定度的来源。

### A5.1 标准活塞式压力计

A5.1.1 标准活塞式压力计校准证书上各值所给定的不确定度均须纳入不确定度估算表。包括如下分量：

(1) 面积的不确定度包括压力形变引起的不确定度，此不确定度常随压力而变化；

(2) 活塞与砝码承重盘质量。

### A5.2 标准活塞式压力计的长期稳定性

A5.2.1 应考虑自从上次校准后标准活塞式压力计面积与质量的可能变化，此变化可由标准活塞式压力计的历次校准来评估。面积的长期稳定度的不确定度将取决于校准周期，且有可能大于校准不确定度。活塞式压力计的面积校准的变化根据其使用、设计、及材料成分而定，因此最好是由实际数据来评估。如果没有相关数据信息，建议采用保守的评估并设定较短的校准周期。

A5.2.2 油压活塞式压力计活塞质量的漂移会较大，这会表现在浸入油介质中的活塞重复称重时产生困难。这些困难是由于清洁处理不彻底和溶剂挥发可能带来的不稳定性。

### A5.3 标准活塞式压力计专用砝码质量不确定度

A5.3.1 对标准活塞式压力计质量砝码组的校准证书上各值所给定的不确定度均应考虑。加放专用砝码质量以产生压力的不确定度的评估应覆盖整个活塞式压力计范围。相对不确定度通常在低压力时会比较高。

### A5.4 标准活塞式压力计质量组的长期稳定性

A5.4.1 应考虑活塞式压力计专用砝码组自上次校准后的可能变化，参考 A2.2 节专用砝码长期稳定性的论述。

### A5.5 使用地点重力加速度测定的不确定度

A5.5.1 由活塞式压力计所产生的压力直接受到地区重力加速度（ $g$ ）的影响，最佳测量状态时，重力加速度的测量不确定度可小于 $1 \times 10^{-6}$ 。重力加速度的估计值

可从权威的地质测量组织提供的重力参考信息中查到，引入的不确定度约为  $3 \times 10^{-6}$ 。重力加速度的估计值也可从纬度与海拔高度的信息计算求出，但其不确定度将大得多——在英国约为  $50 \times 10^{-6}$ 。想由这些信息计算达到上述不确定度水平，需要布格异常 (Bouguer anomalies) 的相关知识。

## A5.6 空气浮力效应

A5.6.1 空气浮力在某些方面会影响活塞式压力计砝码组，参考 A2.4 节的论述。

## A5.7 温度对活塞式压力计活塞有效面积的影响

A5.7.1 活塞式压力计面积随温度而改变，温度膨胀系数与活塞及活塞筒制造所用的特殊材料有关。任何不同于活塞式压力计校准时参考温度的温度变化、校准期间温度的变化及测定活塞温度的不确定度均需考虑。

## A5.8 由高度差压力修正引入的不确定度

A5.8.1 标准活塞式压力计参考平面 (datum level) 的高度与被校件的高度有任何差异时，会影响产生的压力值。对气压校准而言，该效应正比于压力且通常约为  $116 \times 10^{-6} / \text{m}$ 。对液压校准而言，该效应为固定的压力，根据使用的流体密度、当地重力加速度及高度差而定 (流体扬程压力 =  $\rho \cdot g \cdot h$ )。对多数活塞式压力计用油而言，该效应介于 (8–9)Pa/mm 之间。

A5.8.2 活塞悬浮高度位置也会构成扬程压力修正的不确定度因素。此效应与活塞下降速度及使用的特定测量程序有关。

## A5.9 流体性质的影响

A5.9.1 对液压校准而言，流体性质对流体扬程压力修正、浮力体积修正及表面张力修正的影响应予考虑。这些信息通常会在活塞式压力计的校准证书中体现。如果实际用油不同于标准活塞式压力计校准时使用的，转换任何引用的修正时须小心。多数情况下，这些影响量的不确定度可以忽略不计。

## A5.10 活塞式压力计活塞不垂直

A5.10.1 活塞的垂直度引入的不确定度。如果完全垂直，则所有的力量都会作用于面积上，而任何偏离垂直都会降低该力值及其产生的压力。该效应会以产生的压力表示，大小正比于与真垂线夹角的余弦函数。

## A5.11 校准程序引入的不确定度

A5.11.1 任何因校准程序引入的不确定度均需评估。这些包括被校件的分辨力与重复性及环境的影响。由校准结果的计算或数据拟合产生的不确定度也应考虑。



## 附件 B

### 0.1 级精密压力表校准结果的 CMC 评定：压力

#### B1 概述

##### B1.1 测量依据

依据 JJG 49-2013 《弹性元件式精密压力表和真空表检定规程》校准 0.1 级精密压力表。

##### B1.2 被测对象

被校对象为准确度等级 0.1 级的精密压力表，测量范围为 (-0.1~400) MPa。

表 1 被测精密压力表分度值举例

| 准确度等级 | 测量范围        | 分度值/MPa |
|-------|-------------|---------|
| 0.1 级 | (-0.1~0)MPa | 0.0002  |
|       | (0~0.25)MPa | 0.0005  |
|       | (0~2.5)MPa  | 0.005   |
|       | (0~6)MPa    | 0.01    |
|       | (0~10)MPa   | 0.01    |
|       | (0~60)MPa   | 0.1     |
|       | (0~100)MPa  | 0.2     |
|       | (0~250)MPa  | 0.5     |
|       | (0~260)MPa  | 0.5     |
|       | (0~400)MPa  | 1       |

##### B1.3 测量方法及主要设备

采用直接比较法校准精密压力表。将精密压力表安装在计量标准装置上，当整个加压系统平衡时，分别读取计量标准器和精密压力表的示值，精密压力表的压力值与计量标准器的压力值之差即为精密压力表的示值误差。校准中用使用的主要设备如表 2 所示。

表 2 实验室的计量标准器和配套设备

| 序号 | 设备名称  | 技术性能           |        |
|----|-------|----------------|--------|
|    |       | 测量范围           | 准确度等级  |
| 1  | 压力控制器 | (-0.1~0.25)MPa | 0.01 级 |
| 2  | 压力控制器 | (0~10) MPa     | 0.01 级 |

|   |        |              |         |
|---|--------|--------------|---------|
| 3 | 活塞式压力计 | (0.1~70) MPa | 0.02 级  |
| 4 | 活塞式压力计 | (10~260) MPa | 0.005 级 |
| 5 | 活塞式压力计 | (5~526) MPa  | 0.005 级 |

## B2 测量模型及不确定度来源分析

### B2.1 测量模型

测量模型以示值误差的形式给出，如公式(1)所示：

$$\Delta p = p_m - p_s \quad (1)$$

式中： $\Delta p$  —示值误差，Pa；

$p_m$  —精密压力表示值，Pa；

$p_s$  —计量标准器的压力值，Pa。

由于被校精密压力表的标准不确定度分量和活塞压力计的标准不确定度分量彼此独立，各不相关，根据不确定度传播定律，精密压力表示值误差合成标准不确定度由下式计算：

$$u_c^2(\Delta p) = \left(\frac{\partial \Delta p}{\partial p_m}\right)^2 \cdot u^2(p_m) + \left(\frac{\partial \Delta p}{\partial p_s}\right)^2 \cdot u^2(p_s) \quad (2)$$

由测量模型可得：灵敏系数  $c(p_m) = \frac{\partial \Delta p}{\partial p_m} = 1$ ， $c(p_s) = \frac{\partial \Delta p}{\partial p_s} = -1$  代入(2)式得：

$$u_c^2(\Delta p) = u^2(p_m) + u^2(p_s) \quad (3)$$

### B2.2 不确定度来源

精密压力计校准结果不确定度来源主要包括：

- (1) 被校精密压力表示值多次重复测量引入的标准不确定度  $u_1$ ；
- (2) 被校精密压力表估读引入的标准不确定度  $u_2$ ；
- (3) 标准器（活塞式压力计）溯源引入的标准不确定度  $u_3$ ；
- (4) 活塞压力计的活塞下端面与精密压力表指针轴之间的高度差引入的标准不确定度  $u_4$ ；
- (5) 环境温度变化引入的标准不确定度  $u_5$ 。

## B3 标准不确定度评定

以分析（7~70）MPa 测量范围内的校准和测量能力为例，选择（0~60）MPa 精密压力表为校准对象，选取 20MPa、40MPa 和 60MPa 三个测量点的校准结果进行测量不确定度评定。

### B3.1 被校精密压力表示值多次重复测量引入的标准不确定度 $u_1$

根据对被检精密压力表重复进行 3 个循环的测量，得到 6 组原始校准数据如下表所示：

表 3 压力表示值重复测量原始数据

| 序号（20MPa） | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     |
|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 示值（MPa）   | 20.01 | 20.02 | 20.02 | 20.02 | 20.01 | 20.02 |

| 序号（40MPa） | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     |
|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 示值（MPa）   | 40.01 | 40.01 | 40.02 | 40.02 | 40.02 | 40.02 |

| 序号（60MPa） | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     |
|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 示值（MPa）   | 59.99 | 60.00 | 60.00 | 60.00 | 60.00 | 60.00 |

各次测量值的算术平均值为：

$$20\text{MPa: } \bar{P} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^6 P_i = 20.02 \text{ MPa}$$

$$40\text{MPa: } \bar{P} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^6 P_i = 40.02 \text{ MPa}$$

$$60\text{MPa: } \bar{P} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^6 P_i = 60.00 \text{ MPa}$$

由贝塞尔公式，得出单次实验标准偏差：

$$20\text{MPa: } S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^6 (P_i - 20.02)^2}{6-1}} = 0.005164 \text{ MPa}$$

$$40\text{MPa: } S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^6 (P_i - 40.02)^2}{6-1}} = 0.005164 \text{ MPa}$$

$$60\text{MPa: } S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^6 (P_i - 60.00)^2}{6-1}} = 0.004082 \text{ MPa}$$

由示值重复性引入的标准不确定度分量  $u_1$  如下所示，均为正态分布：

$$u_{11} = \frac{S}{\sqrt{n}} = \frac{0.005164}{\sqrt{6}} = 0.002108 \text{ MPa}$$

$$u_{12} = \frac{S}{\sqrt{n}} = \frac{0.005164}{\sqrt{6}} = 0.002108 \text{ MPa}$$

$$u_{13} = \frac{S}{\sqrt{n}} = \frac{0.004082}{\sqrt{6}} = 0.001667 \text{ MPa}$$

### B3.2 被校精密压力表估读引入的标准不确定度 $u_2$

精密压力表的分度值  $R$  为 0.1MPa，根据检定规程，精密压力表估读误差为分度值的 1/10，属于均匀分布。精密压力表示值估读误差所引入的标准不确定度  $u_2$  如下所示：

$$u_2 = \frac{R}{10\sqrt{3}} = \frac{0.1}{10\sqrt{3}} = 0.005774 \text{ MPa}$$

### B3.3 上级 0.02 级活塞式压力计引入的标准不确定度 $u_3$

0.02 级活塞式压力计的测量不确定度为读数的 0.02%，属于正态分布，取  $k = 2.58$ 。在对应的压力校准点上，标准活塞式压力计引入的标准不确定度  $u_3$  如下表所示：

| 序号      | $u_3 = \text{校准点} \times \text{标准器等级} / 2.58$                           |
|---------|---|
| 20MPa 点 | $u_{31} = 20 \times 0.02\% \div 2.58 = 1.55 \times 10^{-3} \text{ MPa}$ |
| 40MPa 点 | $u_{32} = 40 \times 0.02\% \div 2.58 = 3.1 \times 10^{-3} \text{ MPa}$  |
| 60MPa 点 | $u_{33} = 60 \times 0.02\% \div 2.58 = 4.65 \times 10^{-3} \text{ MPa}$ |

### B3.4 活塞

压力计的活塞下端面与精密压力表指针轴之间的高度差引入的标准不确定度  $u_4$

用活塞式压力计校准精密压力表时，活塞式压力计的活塞下端面与精密压力表指针轴之间的高度差经过修正后，仍可能有 10mm 高度差。由高度差引入的标准不确定度  $u_4$ ，属于均匀分布，包含因子  $k = \sqrt{3}$ ，如下所示：

$$u_4 = \rho gh / k = 5 \times 10^{-5} \text{ MPa}$$

其中： $\rho$ —校准时使用介质的密度为  $916\text{kg/m}^3$

$g$ —校准地点的重力加速度为  $9.8015\text{m/s}^2$

### B3.5 环境温度变化引入的标准不确定度 $u_5$

根据检定规程，校准 0.1 级精密压力表的环境温度为  $(20\pm 2)^\circ\text{C}$ 。由于实际校准时的环境温度为  $20.5^\circ\text{C}$ ，在规定的温度范围内，且满足标准活塞压力计的使用条件，环境温度引入的标准不确定度可忽略不计，即  $u_5=0$ 。

## B4 合成标准不确定度及扩展不确定度

### B4.1 不确定度分量汇总

表 4 不确定度分量一览表（校准点 20MPa）

| 符号       | 来源      | 类型 | 标准不确定度                         | 概率分布 | 包含因子       |
|----------|---------|----|--------------------------------|------|------------|
| $u_{11}$ | 测量重复性   | A  | $2.11\times 10^{-3}\text{MPa}$ | 正态分布 | 1          |
| $u_2$    | 估读      | B  | $5.77\times 10^{-3}\text{MPa}$ | 均匀分布 | $\sqrt{3}$ |
| $u_{31}$ | 标准活塞准确度 | B  | $1.55\times 10^{-3}\text{MPa}$ | 正态分布 | 2.58       |
| $u_4$    | 高度差     | B  | $5\times 10^{-5}\text{MPa}$    | 均匀分布 | $\sqrt{3}$ |
| $u_5$    | 环境温度    | B  | 0                              | 均匀分布 | $\sqrt{3}$ |

表 5 不确定度分量一览表（校准点 40MPa）

| 符号       | 来源      | 类型 | 标准不确定度                         | 概率分布 | 包含因子       |
|----------|---------|----|--------------------------------|------|------------|
| $u_{12}$ | 测量重复性   | A  | $2.11\times 10^{-3}\text{MPa}$ | 正态分布 | 1          |
| $u_2$    | 估读      | B  | $5.77\times 10^{-3}\text{MPa}$ | 均匀分布 | $\sqrt{3}$ |
| $u_{32}$ | 标准活塞准确度 | B  | $3.1\times 10^{-3}\text{MPa}$  | 正态分布 | 2.58       |
| $u_4$    | 高度差     | B  | $5\times 10^{-5}\text{MPa}$    | 均匀分布 | $\sqrt{3}$ |
| $u_5$    | 环境温度    | B  | 0                              | 均匀分布 | $\sqrt{3}$ |

表 6 不确定度分量一览表（校准点 60MPa）

| 符号 | 来源 | 类型 | 标准不确定度 | 概率分布 | 包含因子 |
|----|----|----|--------|------|------|
|----|----|----|--------|------|------|

|          |         |   |                           |      |            |
|----------|---------|---|---------------------------|------|------------|
| $u_{13}$ | 测量重复性   | A | $1.67 \times 10^{-3}$ MPa | 正态分布 | 1          |
| $u_2$    | 估读      | B | $5.77 \times 10^{-3}$ MPa | 均匀分布 | $\sqrt{3}$ |
| $u_{33}$ | 标准活塞准确度 | B | $4.65 \times 10^{-3}$ MPa | 正态分布 | 2.58       |
| $u_4$    | 高度差     | B | $5 \times 10^{-5}$ MPa    | 均匀分布 | $\sqrt{3}$ |
| $u_5$    | 环境温度    | B | 0                         | 均匀分布 | $\sqrt{3}$ |

#### B4.2 合成标准不确定度

上述标准不确定度分量是互不相关的，合成标准不确定度为：

$$20\text{MPa: } u_c(\Delta p) = \sqrt{u^2(p_m) + u^2(p_s)} = \sqrt{u_{11}^2 + u_2^2 + u_{31}^2 + u_4^2} = 6.34 \times 10^{-3} \text{ MPa}$$

$$40\text{MPa: } u_c(\Delta p) = \sqrt{u^2(p_m) + u^2(p_s)} = \sqrt{u_{12}^2 + u_2^2 + u_{32}^2 + u_4^2} = 6.88 \times 10^{-3} \text{ MPa}$$

$$60\text{MPa: } u_c(\Delta p) = \sqrt{u^2(p_m) + u^2(p_s)} = \sqrt{u_{13}^2 + u_2^2 + u_{33}^2 + u_4^2} = 7.60 \times 10^{-3} \text{ MPa}$$

#### B4.3 扩展不确定度

取包含概率  $p=95\%$ ，包含因子  $k=2$ ，各校准点的扩展不确定度为：

$$20\text{MPa: } U = 1.27 \times 10^{-2} \text{ MPa} = \frac{1.27 \times 10^{-2} \text{ MPa}}{60 \text{ MPa}} \text{ FS} = 0.021\% \text{ FS}$$

$$40\text{MPa: } U = 1.38 \times 10^{-2} \text{ MPa} = \frac{1.38 \times 10^{-2} \text{ MPa}}{60 \text{ MPa}} \text{ FS} = 0.023\% \text{ FS}$$

$$60\text{MPa: } U = 1.52 \times 10^{-2} \text{ MPa} = \frac{1.38 \times 10^{-2} \text{ MPa}}{60 \text{ MPa}} \text{ FS} = 0.025\% \text{ FS}$$

### B5 申请认可的校准和测量能力

由于被校对象在其测量范围内的扩展不确定度变化无显著差异，因此该范围内可报告最大测量不确定度，即  $U=0.025\% \text{ FS}$  ( $k=2$ )。根据同样的方法，对测量范围内不同量程段的测量不确定度进行评定，如下表所示：

表 7 各量程段测量不确定度评定汇总表

| 测量范围        | 选用样品         | 不确定度分量   |          |          |          | $U$       |
|-------------|--------------|----------|----------|----------|----------|-----------|
|             |              | $u_1$    | $u_2$    | $u_3$    | $u_4$    |           |
| (-0.1~0.25) | (-0.1~0) MPa | 0.000003 | 0.000012 | 0.000004 | 0.000000 | 0.025% FS |

|            |              |             |          |          |          |           |
|------------|--------------|-------------|----------|----------|----------|-----------|
| MPa        | (0~0.25) MPa | 0.000011    | 0.000029 | 0.000010 | 0.000000 | 0.026% FS |
| (0.25~7)   | (0~2.5) MPa  | 0.000083    | 0.000289 | 0.000155 | 0.000000 | 0.027% FS |
| MPa        | (0~6) MPa    | 0.000167    | 0.000577 | 0.000233 | 0.000000 | 0.022% FS |
| (7~70) MPa | (0~10) MPa   | 0.000167    | 0.000577 | 0.000775 | 0.000052 | 0.020% FS |
|            | (0~60) MPa   | 0.002108    | 0.005774 | 0.004651 | 0.000052 | 0.025% FS |
| (70~260)   | (0~100) MPa  | 0.003333    | 0.011547 | 0.001938 | 0.000052 | 0.024% FS |
|            | MPa          | (0~250) MPa | 0.008333 | 0.028868 | 0.004845 | 0.000052  |
| (260~500)  | (0~260) MPa  | 0.010541    | 0.028868 | 0.005039 | 0.000052 | 0.024% FS |
|            | MPa          | (0~400) MPa | 0.021082 | 0.057735 | 0.007752 | 0.000052  |

由于在(-0.1~400) MPa 测量范围内扩展不确定度无显著差异, 其校准和测量能力可以按最大扩展不确定度取值用单一绝对值表示, 即  $U = 0.030\%FS$  ( $k=2$ )。实验室申请认可的能力范围如下表所示:

表 8 申请认可的校准能力范围

| 测量仪器名称 | 校准参量 | 规范代号(含年号)名称                      | 测量范围           | 扩展不确定度(校准和测量能力, $k=2$ ) | 限制说明     |
|--------|------|----------------------------------|----------------|-------------------------|----------|
| 精密压力表  | 压力   | JJG 49-2013 《弹性元件式精密压力表和真空表检定规程》 | (-0.1~400) MPa | $U = 0.030\%FS$         | 0.1 级及以下 |

## 附件 C

### 扭矩扳子校准结果的 CMC 评定：扭矩

#### C1 概述

##### C1.1 测量依据

依据 JJG 707-2014《扭矩扳子检定规程》校准扭矩扳子。

##### C1.2 被测对象

被检对象为 3 级及以下精度的扭矩扳子，测量范围为（1~2000）Nm。

##### C1.3 测量方法及主要设备

测量环境条件：温度：（23±5）℃，相对湿度：≤90%

测量过程：在规定的条件下，扭矩扳子检定仪对扭矩扳子进行测量。以被测扭矩扳子的示值为依据，在数字式扭矩扳子检定仪上读出扭矩值。

所使用的标准器的详细参数见表 1

表 1 实验室的计量标准器和配套设备

| 设备名称           | 技术性能       |       |
|----------------|------------|-------|
|                | 测量范围       | 准确度等级 |
| 数字式扭矩扳子<br>检定仪 | （1~2000）Nm | 1 级   |

#### C2 测量模型及不确定度来源分析

##### C2.1 测量模型

测量模型以示值误差的形式给出，如公式(1)所示：

$$\Delta n = n - n_0 \quad (1)$$

式中： $\Delta n$ —扭矩扳子的示值误差，Nm

$n$ —扭矩扳子的示值，Nm

$n_0$ —数字式扭矩扳子检定仪的示值，Nm

由于被校扭矩扳子的标准不确定度分量和数字式扭矩扳子检定仪的标准不确定度分量彼此独立，各不相关，根据不确定度传播定律，扭矩扳子的示值误差合成标准不确定度由下式计算：

$$u_c^2(\Delta n) = c_1^2(n)u^2(n) + c_2^2(n_0)u^2(n_0) \quad (2)$$

式中： $u(n)$ —被校扭矩扳子示值的标准不确定度分量

$u(n_0)$ —数字式扭矩扳子检定仪标准扭矩值的标准不确定度分量

灵敏系数  $c_1(n) = \frac{\partial \Delta n}{\partial n} = 1$  和  $c_2(n_0) = \frac{\partial \Delta n}{\partial n_0} = -1$  代入(2)式得：

$$u_c^2(\Delta n) = u^2(n) + u^2(n_0)$$

## C2.2 不确定度来源

扭矩扳子校准结果不确定度来源主要包括：

- (1) 扭矩扳子测量重复性引入的标准不确定度  $u_1$ ；
- (2) 数字式扭矩扳子检定仪引入的标准不确定度  $u_2$ ；
- (3) 扭矩扳子分辨力引入的标准不确定度  $u_3$

## C3 标准不确定度评定

为评定校准和测量能力，在扭矩扳子测量范围内选取 1Nm、20Nm、100Nm、300Nm、1000Nm、2000Nm 校准点的测量结果进行测量不确定度评定。

### C3.1 扭矩扳子测量重复性引入的标准不确定度 $u_1$

根据检定规程，在重复性条件下读取 3 次显示值，由于测量次数较少，采用极差法公式  $s(n) = \frac{n_{\max} - n_{\min}}{1.69}$  计算单次测量结果的实验标准差，相对形式的标准不

确定度为  $u_1 = \frac{s(n)}{n\sqrt{3}}$ ，如下表所示：

表 2 不确定度的 A 类评定

| 校准点<br>(Nm) | 示值 (Nm) |        |        |               | $s(n)$ | $u_1$ |
|-------------|---------|--------|--------|---------------|--------|-------|
|             | 1       | 2      | 3      | 平均值 $\bar{n}$ |        |       |
| 1           | 0.978   | 0.975  | 0.982  | 0.978         | 0.0041 | 0.24% |
| 20          | 20.63   | 20.56  | 20.53  | 20.57         | 0.059  | 0.17% |
| 100         | 102.24  | 101.98 | 101.63 | 101.95        | 0.361  | 0.20% |
| 300         | 297.12  | 296.81 | 295.24 | 296.39        | 1.112  | 0.22% |
| 1000        | 1010.3  | 1008.6 | 1007.1 | 1008.7        | 1.893  | 0.11% |
| 2000        | 2038    | 2032   | 2026   | 2032          | 7.101  | 0.20% |

### C3.2 数字式扭矩扳子检定仪引入的标准不确定度 $u_2$

数字式扭矩扳子检定仪的最大允差为  $\pm 1.0\%$ ，均匀分布， $u_2 = \frac{1.0\%}{\sqrt{3}} = 0.58\%$

### C3.3 扭矩扳子分辨力引入的标准不确定度 $u_3$

扭矩扳子在各校准点由分辨力引入的标准不确定度如下表所示：

表 3 分辨力引入的标准不确定度

| 校准点<br>(Nm) | 平均值 $\bar{n}$<br>(Nm) | 分辨力 $a$<br>(Nm) | $u_3 = \frac{a}{5\sqrt{3}} \cdot \frac{1}{n}$ |
|-------------|-----------------------|-----------------|---|
| 1           | 0.978                 | 0.02            | 0.23%   |
| 20          | 20.57                 | 0.5             | 0.29%   |
| 100         | 101.95                | 1               | 0.12%   |
| 300         | 296.39                | 2               | 0.08%   |
| 1000        | 1008.7                | 10              | 0.12%   |
| 2000        | 2032                  | 25              | 0.14%   |

## C4 合成标准不确定度及扩展不确定度

### C4.1 不确定度分量汇总表

表 4 不确定度分量一览表

| 不确定度<br>分量<br>校准点 | $u_1$ | $u_2$ | $u_3$ |
|-------------------|-------|-------|-------|
| 1 Nm              | 0.24% | 0.58% | 0.23% |
| 20 Nm             | 0.17% | 0.58% | 0.29% |
| 100 Nm            | 0.20% | 0.58% | 0.12% |
| 300 Nm            | 0.22% | 0.58% | 0.08% |
| 1000 Nm           | 0.11% | 0.58% | 0.12% |
| 2000 Nm           | 0.20% | 0.58% | 0.14% |

为避免重复计算，在测量重复性  $u_1$  与扭矩扳子分辨力  $u_3$  选取较大值合成。

### C4.2 合成标准不确定度

根据不确定度传播率，合成标准不确定度计算公式为  $u_c = \sqrt{\sum_{i=1}^3 u_i^2}$ ，各校准点

的合成标准不确定度如下表所示：

表 5 合成标准不确定度

| 校准点<br>(Nm) | $u_c$ |
|-------------|-------|
| 1           | 0.63% |
| 20          | 0.65% |
| 100         | 0.62% |
| 300         | 0.62% |
| 1000        | 0.59% |
| 2000        | 0.61% |

### C4.3 扩展不确定度

取包含因子  $k=2$ ，扩展不确定度  $U_{rel} = 2u_c$ ，各校准点的扩展不确定度如下表所示：

表 6 扩展不确定度

| 校准点 (Nm) | $u_c$ | $U_{rel}$ |
|----------|-------|-----------|
| 1        | 0.63% | 1.3%      |
| 20       | 0.65% | 1.3%      |
| 100      | 0.62% | 1.3%      |
| 300      | 0.62% | 1.3%      |
| 1000     | 0.59% | 1.2%      |
| 2000     | 0.61% | 1.3%      |

### C5 申请认可的校准和测量能力

扭矩扳子在(1~2000)Nm 测量范围内扩展不确定度无显著差异，其校准和测量能力可以按最大扩展不确定度取值用单一相对值表示，即  $U_{rel} = 1.3\%$  ( $k=2$ )。

实验室申请认可的能力范围，如下表所示：

表 7 申请的校准能力范围

| 测量仪器<br>名称 | 校准<br>参量 | 规范代号(含年号)名称                | 测量范围       | 扩展不确定度(校准<br>和测量能力, $k=2$ ) |
|------------|----------|----------------------------|------------|-----------------------------|
| 扭矩扳子       | 扭矩       | JJG 707-2014<br>《扭矩扳子检定规程》 | (1~2000)Nm | $U_{rel} = 1.3\%$           |

## 附件 D

### 数字指示秤校准结果的 CMC 评定：质量

#### D1 概述

##### D1.1 测量依据

依据 JJG 539-1997 《数字指示秤检定规程》校准数字指示秤。

##### D1.2 被测对象

被校对象为Ⅲ级及以下数字指示秤，如下表所示。

表 1 被校测数字指示秤的分类

| 设备名称  | 分度值  | 准确度等级 |
|-------|--|-------|
| 数字指示秤 | $1 \times 10^k$ , $2 \times 10^k$ , $5 \times 10^k$ (k 为正整数、负整数或等于零) | Ⅲ级、Ⅳ级 |

##### D1.3 测量方法及主要设备

数字指示秤校准时，采用标准砝码加载在数字指示秤上，读取显示器数值，其与标准砝码标称值之差为其示值误差。无扩展指示装置的秤，采用闪变点法确定化整前的示值。方法为秤盘上的砝码  $m$ ，示值  $I$ ，逐一加放  $0.1e$  的小砝码，直至秤的示值明显地增加了一个  $e$ ，变成  $(I+e)$ ，所有附加的小砝码  $\Delta m$ ，则化整前的示值为  $P = I + 0.5e - \Delta m$ ，化整前的示值误差为  $E = P - m = I + 0.5e - \Delta m - m$ 。

用于校准的标准砝码为  $F_2$  等级及以下标准砝码，规格 1mg ~ 1000kg。

表 2 实验室计量标准器和配套设备

| 序号 | 设备名称 | 规格                | 准确度等级    | 最大允许误差                                  |
|----|------|-------------------|----------|---|
| 1  | 标准砝码 | 测量范围：(1mg~1000kg) | $F_2$ 等级 | $\pm 0.02\text{mg} \sim \pm 5\text{g}$  |
| 2  | 标准砝码 | 测量范围：(1mg~1000kg) | $M_1$ 等级 | $\pm 0.06\text{mg} \sim \pm 16\text{g}$ |

## D2 测量模型及不确定度来源分析

### D2.1 测量模型

被校数字指示秤的测量模型为：

$$E = P - m = I + 0.5e - \Delta m - m \quad (1)$$

此模型为线性函数，式中：

$E$ ——化整前示值误差；

$P$ ——化整前的示值；

$I$ ——数字指示秤示值；

$e$ ——检定分度值；

$\Delta m$ ——附加砝码质量值；

$m$ ——标准砝码质量值。

在上述测量模型中，输入量  $I$ ， $\Delta m$ ， $m$  均为不相关的量。

根据测量模型，由于各输入量不相关，合成标准不确定度的计算公式：

$$u_c^2(E) = c_1^2 u^2(I) + c_2^2 u^2(e) + c_3^2 u^2(\Delta m) + c_4^2 u^2(m) \quad (2)$$

式中灵敏度系数分别为： $c_1 = c_I = \frac{\partial f}{\partial I} = 1$ ， $c_2 = c_e = \frac{\partial f}{\partial e} = 0.5$ ，

$$c_3 = c_{\Delta m} = \frac{\partial f}{\partial \Delta m} = -1, \quad c_4 = c_m = \frac{\partial f}{\partial m} = -1$$

合成标准不确定度为：

$$u_c(E) = \sqrt{u^2(I) + u^2(\Delta m) + u^2(m)}$$

### D2.2 不确定度来源

数字指示秤校准结果不确定度来源主要包括：

#### 1、由数字指示秤示值引入的标准不确定度 $u(I)$

(1) 由测量重复性引起测量结果的标准不确定度  $u_1(I)$ ；

(2) 偏载引起的不确定度  $u_2(I)$ ；

(3) 显示分辨力引起的不确定度  $u(e)$ 。

#### 2、附加小砝码引起的不确定度 $u(\Delta m)$ 。

3、标准砝码的不确定度  $u(m)$ 。

### D3 标准不确定度评定

以分析分度值 1g、载荷点 5kg 的测量不确定度为例，所用标准砝码为 F<sub>2</sub> 等级砝码。

#### D3.1 由测量重复性引起示值测量的标准不确定度 $u_1(I)$

在 5kg 载荷点的示值进行 3 次独立重复性观测，由极差法计算得到。对于所测量数字指示秤的重复性误差为 0.7g，根据极差法，数字指示秤重复性误差检定次数一般为 3 次，查表得 3 次对应的  $d_n$  值为 1.69， $s(I_i) = \frac{0.7g}{d_n} = \frac{0.7g}{1.69} = 0.414g$ 。

#### D3.2 偏载引起的不确定度 $u_2(I)$

对于偏载误差 D 为 0.4g 的数字指示秤，测量过程中近似认为由于砝码放偏位置造成的误差与 D 成正比，比值为  $d_1/d_2$ ，其中  $d_1$  为估计的称盘中心到砝码中心的距离， $d_2$  为称盘中心到一个角的距离，此处认为  $d_1/d_2$  为 1/10，则区间半宽度为  $\frac{d_1}{2d_2} \times D$ ，服从均匀分布，因而偏载引起的不确定度为：

$$u_2(I) = \frac{\frac{d_1}{d_2} \times D}{2 \times \sqrt{3}} = \frac{0.4/10}{2 \times \sqrt{3}} = 0.012(g)$$

在大部分情况下，该分量通常可忽略。

#### D3.3 显示分辨力引起的不确定度 $u_3(I)$

对于检定分度值  $e$  的数字式衡量仪器，其区间半宽度为  $0.5e$ ，服从均匀分布，因而由分辨力引起的不确定度是：

$$u_3(I) = \frac{e}{2\sqrt{3}} = \frac{1}{2\sqrt{3}} g = 0.29g$$

#### D3.4 附加小砝码引起的不确定度 $u(\Delta m)$

测量过程中采用的附加小砝码为 F<sub>2</sub> 等级 100mg 砝码，共 7 个，每个附加小

砝码质量的扩展不确定度  $U_i(\Delta m)$  为标准砝码允差的 1/3, 已知 100mg 的 F<sub>2</sub> 等级标准砝码的允差为 0.16mg, 则:

$$u(\Delta m) = U(\Delta m) / k = \delta / 3 / k = 7 \times \frac{0.16 / 3}{2} = 0.19(\text{mg}) = 0.0002\text{g}$$

### D3.5 标准砝码的不确定度 $u(m)$

由于测量过程中采用的是砝码的标称值, 因此标准砝码质量的标准不确定度  $u(m)$  由采用标准砝码允差的 1/3 作为其扩展不确定度  $U$  与扩展因子  $k$  的商得到, 5kg 的 F<sub>1</sub> 等级标准砝码的允差为 25mg, 则:

$$u(m) = \frac{25 / 3}{2} = 4.17\text{mg} = 0.0042\text{g}$$

## D4 合成标准不确定度及扩展不确定度

### D4.1 不确定度分量汇总

表 3 不确定度分量一览表

| 不确定度分量        | 不确定度来源              | 服从分布  | $u(x_i)$ 的值 | 灵敏系数 | $u_i(P) =  c_i u(x_i)$ |
|---------------|---------------------|-------|-------------|------|------------------------|
| $u(I)$        | $u_1(I)$            | 测量重复性 | 正态          | 1    | 0.506                  |
|               | $u_2(I)$            | 偏载    | 均匀          |      |                        |
|               | $u_3(I)$            | 分辨力   | 均匀          |      |                        |
| $u(\Delta m)$ | 闪变法确定化整前示值所加附加小砝码允差 | 正态    | 0.0002g     | -1   | 0.0002                 |
| $u(m)$        | 标准砝码允差              | 正态    | 0.0042      | -1   | 0.0042                 |

### D4.2 合成标准不确定度

由于各输入量不相关, 被检数字指示秤示值误差的合成标准不确定度为:

$$u_c(E) = \sqrt{u^2(I) + u^2(\Delta m) + u^2(m)} = 0.51\text{g}$$

### D4.3 扩展不确定度

取包含因子为 2, 扩展不确定度为:

$$U = ku_c(E) = 1.1g \quad (k=2)$$

## D5 申请认可的校准和测量能力

根据同样的方法,对测量范围内不同分度值和载荷点的测量不确定度进行评定,如下表所示:

表 4 对使用 F1 等级标准砝码校准Ⅲ级数字指示秤的测量不确定度评定

| 分度值<br>(g) | 载荷点<br>(g) | 不确定度分量             |                    |                  |                    |                         | 合成标准不<br>确定度(mg) | 扩展不<br>确定度<br>U (g) |
|------------|------------|--------------------|--------------------|------------------|--------------------|-------------------------|------------------|---------------------|
|            |            | $u_2(I)/\text{mg}$ | $u_3(I)/\text{mg}$ | $u(m)/\text{mg}$ | $u_1(I)/\text{mg}$ | $u(\Delta m)/\text{mg}$ |                  |                     |
| 0.1        | 2          | 0.02               | 28.86751           | 0.1732051        | 1.6053806          | 0.029166667             | 14.52383665      | 0.03                |
| 0.1        | 50         | 0.05               | 28.86751           | 0.1732051        | 3.2107612          | 0.029166667             | 14.78768649      | 0.03                |
| 0.1        | 200        | 0.1666667          | 28.86751           | 0.1732051        | 8.0269031          | 0.029166667             | 16.51735859      | 0.03                |
| 0.1        | 500        | 0.4166667          | 28.86751           | 0.1732051        | 16.053806          | 0.029166667             | 21.59311203      | 0.04                |
| 0.1        | 1000       | 0.8333333          | 28.86751           | 0.1732051        | 16.053806          | 0.029166667             | 21.60516884      | 0.04                |
| 1          | 20         | 0.0416667          | 288.6751           | 1.1547005        | 16.053806          | 0.058333333             | 145.2322158      | 0.3                 |
| 1          | 500        | 0.4166667          | 288.6751           | 1.1547005        | 32.107612          | 0.058333333             | 147.870695       | 0.3                 |
| 1          | 2000       | 1.6666667          | 288.6751           | 1.1547005        | 80.269031          | 0.058333333             | 165.1682934      | 0.3                 |
| 1          | 5000       | 4.1666667          | 288.6751           | 1.1547005        | 160.53806          | 0.058333333             | 215.9270719      | 0.4                 |
| 1          | 10000      | 8.3333333          | 288.6751           | 1.1547005        | 160.53806          | 0.058333333             | 216.0476422      | 0.4                 |
| 10         | 200        | 0.1666667          | 2886.751           | 5.7735027        | 160.53806          | 0.116666667             | 1452.287567      | 3                   |
| 10         | 5000       | 4.1666667          | 2886.751           | 5.7735027        | 321.07612          | 0.116666667             | 1478.673026      | 3                   |
| 10         | 20000      | 16.666667          | 2886.751           | 5.7735027        | 802.69031          | 0.116666667             | 1651.652563      | 3                   |
| 10         | 50000      | 41.666667          | 2886.751           | 5.7735027        | 1605.3806          | 0.116666667             | 2159.247487      | 4                   |
| 10         | 100000     | 83.333333          | 2886.751           | 5.7735027        | 1605.3806          | 0.116666667             | 2160.453204      | 4                   |
| 100        | 2000       | 1.6666667          | 28867.51           | 86.60254         | 1605.3806          | 0.233333333             | 14523.01908      | 29                  |
| 100        | 50000      | 41.666667          | 28867.51           | 86.60254         | 3210.7612          | 0.233333333             | 14786.87111      | 30                  |
| 100        | 100000     | 83.333333          | 28867.51           | 86.60254         | 8026.9031          | 0.233333333             | 16516.02104      | 33                  |
| 100        | 200000     | 166.66667          | 28867.51           | 86.60254         | 9632.2837          | 0.233333333             | 17353.65956      | 35                  |
| 100        | 500000     | 416.66667          | 28867.51           | 86.60254         | 16053.806          | 0.233333333             | 21592.57133      | 43                  |
| 100        | 1000000    | 2666.6667          | 28867.51           | 86.60254         | 16053.806          | 0.233333333             | 21752.62367      | 44                  |
| 1000       | 20000      | 16.666667          | 288675.1           | 577.35027        | 16053.806          | 0.583333333             | 145228.7562      | 290                 |
| 1000       | 500000     | 416.66667          | 288675.1           | 577.35027        | 32107.612          | 0.583333333             | 147867.3022      | 296                 |
| 1000       | 1000000    | 2666.6667          | 288675.1           | 577.35027        | 48161.418          | 0.583333333             | 152185.0847      | 304                 |
| 1000       | 2000000    | 5000               | 288675.1           | 577.35027        | 80269.031          | 0.583333333             | 165232.5149      | 330                 |

|      |         |           |          |           |           |             |             |     |
|------|---------|-----------|----------|-----------|-----------|-------------|-------------|-----|
| 1000 | 3000000 | 7666.6667 | 288675.1 | 577.35027 | 96322.837 | 0.583333333 | 173696.6705 | 347 |
| 1000 | 4500000 | 10750     | 288675.1 | 577.35027 | 160538.06 | 0.583333333 | 216152.0261 | 432 |
| 1000 | 9000000 | 144083.33 | 288675.1 | 577.35027 | 160538.06 | 0.583333333 | 259549.885  | 519 |

根据表 4 的评定结果，Ⅲ级数字指示秤的校准和测量能力可分段后用范围表示。实验室申请认可的能力范围如下表所示：

表 5 申请认可的校准能力范围

| 测量仪器名称 | 校准参量 | 规范代号(含年号)名称                     | 测量范围       | 扩展不确定度(校准和测量能力, $k=2$ ) |
|--------|------|---------------------------------|------------|-------------------------|
| 数字指示秤  | 质量   | JJG 539-1997<br>《数字指示秤<br>检定规程》 | (2~1000)g  | $U=(0.03\sim0.04)g$     |
|        |      |                                 | (1~10)kg   | $U=(0.04\sim0.4)g$      |
|        |      |                                 | (10~100)kg | $U=(0.4\sim4)g$         |
|        |      |                                 | (0.1~1)t   | $U=(4\sim44)g$          |
|        |      |                                 | (1~9)t     | $U=(44g\sim0.6kg)$      |



## 附件 E

### 布氏硬度计校准结果的 CMC 评定：硬度

#### E1 概述

##### E1.1 测量依据

依据 JJG150-2005《金属布氏硬度计检定规程》校准布氏硬度计。

##### E1.2 被测对象

金属布氏硬度计。

##### E1.3 测量方法及主要设备

用一定直径的硬质合金球，在规定的试验力的作用力压入试样（这里指标准布氏硬度块）表面，经过一定的试验力保持时间后卸除试验力，测量留在试件（标准布氏硬度块）表面压痕直径，以压痕表面积所承受的平均值来表示布氏硬度值。

所使用的标准器的详细参数如表 1 所示。

表 1 实验室的计量标准器和配套设备

| 序号 | 设备名称    | 技术指标            |       |       |
|----|---------|-----------------|-------|-------|
|    |         | 测量范围            | 均匀度/% | 稳定度/% |
| 1  | 标准布氏硬度块 | 325HBW10/3000   | 0.9   | 0.31  |
| 2  | 标准布氏硬度块 | 98.9HBW5/250    | 1.2   | 0.47  |
| 3  | 标准布氏硬度块 | 214HBW2.5/187.5 | 1.8   | 0.59  |

#### E2 测量模型及不确定度来源分析

##### E2.1 测量模型

测量模型以示值误差的形式给出，如公式(1)所示：

$$y = HBW_1 - HBW_0 \quad (1)$$

式中： $HBW_1$ —布氏硬度计示值；

$HBW_0$ —布氏硬度块标准值；

$y$ —布氏硬度计示值误差。

##### E2.2 不确定度传播率

根据测量模型，标准不确定度分量彼此独立、各不相关，布氏硬度计示值误差合成标准不确定度由下式计算：

$$u_c^2 = u_y^2 = (c_1 u_{HBW_1})^2 + (c_0 u_{HBW_0})^2 \quad (2)$$

式中，灵敏系数为  $c_1 = \frac{\partial \Delta HV}{\partial HV_1} = 1$ ， $c_0 = \frac{\partial y}{\partial HBW_0} = -1$

### E2.3 不确定度来源

布氏硬度计校准结果不确定度来源主要包括：

#### 1、 $u_{HBW_1}$ 引入的不确定度

- (1) 用每块标准块测量 5 点所引入的不确定度  $u_1$
- (2) 压痕测量装置引入的不确定度  $u_2$

#### 2、 $u_{HBW_0}$ 引入的不确定度

- (1) 标准布氏硬度块均匀度引入的不确定度  $u_3$
- (2) 标准布氏硬度块稳定度引入的不确定度  $u_4$
- (3) 标准布氏硬度块在上级定度时引入的不确定度  $u_5$

## E3 标准不确定度评定

根据检定规程对布氏硬度范围的划分，分别以 325HBW10/3000、98.9HBW5/250、214HBW2.5/187.5 三块标准硬度块对布氏硬度计进行校准。具体分析如下：

### E3.1 重复测量引入的标准不确定度 $u_1$

根据检定规程，硬度计分别在上述三块标准硬度块上均匀分布测量 5 点（视同重复测量），用极差法进行计算。用相对值表示的标准不确定度为：

$$s = \frac{R}{CHBW_1} \times 100\%$$

$$u_1 = \frac{R}{\sqrt{5}CHBW_1} \times 100\%$$

式中， $R = HBW_{\max} - HBW_{\min}$ ，

$C = 2.33$ ；

$\overline{HBW_1}$  分别是在 325HBW10/3000、98.9HBW5/250、214HBW2.5/187.5 三块标准硬度块上测量 5 点的的算术平均值，如下表所示。

表 2 重复性引入的标准不确定度

| 标准硬度块           | 示值   |      |      |      |      |                    | R   | s     | 标准不确定度          |
|-----------------|------|------|------|------|------|--------------------|-----|-------|-----------------|
|                 | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | $\overline{HBW}_i$ |     |       |                 |
| 325HBW10/3000   | 321  | 324  | 325  | 323  | 322  | 323                | 4   | 0.53% | $u_{11}=0.24\%$ |
| 214HBW2.5/187.5 | 212  | 213  | 212  | 214  | 215  | 213                | 3   | 0.60% | $u_{12}=0.27\%$ |
| 98.9HBW5/250    | 97.8 | 98.4 | 99.4 | 98.2 | 98.8 | 98.5               | 1.6 | 0.70% | $u_{13}=0.31\%$ |

### E3.2 压痕测量装置引入的标准不确定度 $u_2$

根据检定规程，压痕测量装置最大允许误差为 $\pm 0.5\%$ ，由此引入的标准不确定度按均匀分布，取 $k = \sqrt{3}$ 。

对 325HBW10/3000 硬度块进行测量，硬度计平均示值为 323HBW10/3000，查“布氏硬度值与其压痕直径对照表”可得：323HBW10/3000 压痕直径为 3.39mm，计算其 $\pm 0.5\%$ 所对应的长度范围为(3.37~3.41)mm、对应硬度范围为(319~326)HBW10/3000。则压痕测量装置最大允许误差 $\pm 0.5\%$ 在该硬度压痕直径点对应应为(-3~+4)HBW10/3000，故最大允许误差的绝对值 MPEV 取 4HBW10/3000。

标准不确定度为：

$$u_{21} = \frac{4}{323 \times \sqrt{3}} \times 100\% = 0.71\%$$

对 214HBW2.5/187.5 硬度块进行测量，硬度计平均示值为 213HBW2.5/187.5，按上述方法查表可得，压痕测量装置最大允许误差 $\pm 0.5\%$ 在该硬度压痕直径点对应的 MPEV 为 2HBW2.5/187.5。

标准不确定度为：

$$u_{22} = \frac{2}{213 \times \sqrt{3}} \times 100\% = 0.54\%$$

对 98.9HBW5/250 硬度块进行测量，硬度计平均示值为 98.5HBW5/250，按上述方法查表可得，压痕测量装置最大允许误差 $\pm 0.5\%$ 在该硬度压痕直径点对应的 MPEV 取 1.5HBW5/250。

标准不确定度为：

$$u_{23} = \frac{1.5}{98.5 \times \sqrt{3}} \times 100\% = 0.88\%$$

### E3.3 标准布氏硬度块均匀度引入的标准不确定度 $u_3$

根据标准硬度块检定证书，325HBW10/3000 标准布氏硬度块均匀度为 0.9%；214HBW2.5/187.5 标准布氏硬度块均匀度为 1.2%，98.9HBW5/250 标准布氏硬度

块均匀度为 1.8%。按正态分布, 可得对硬度计平均示值的测量所引入的标准不确定度分别为:

$$325\text{HBW}10/3000 \text{ 硬度块: } u_{31} = \frac{0.9\%}{3} = 0.30\%$$

$$214\text{HBW}2.5/187.5 \text{ 硬度块: } u_{32} = \frac{1.2\%}{3} = 0.40\%$$

$$98.9\text{HBW}5/250 \text{ 硬度块: } u_{33} = \frac{1.8\%}{3} = 0.60\%$$

### E3.4 标准布氏硬度块稳定度引入的标准不确定度 $u_4$

根据硬度块检定证书, 325HBW10/3000 标准布氏硬度块稳定度为 0.31%; 214HBW2.5/187.5 标准布氏硬度块稳定度为 0.47%, 98.9HBW5/250 标准布氏硬度块稳定度为 0.59%, 由此引入的不确定度按均匀分布考虑, 分别为:

$$325\text{HBW}10/3000 \text{ 硬度块: } u_{41} = \frac{0.31\%}{\sqrt{3}} = 0.18\%$$

$$214\text{HBW}2.5/187.5 \text{ 硬度块: } u_{42} = \frac{0.47\%}{\sqrt{3}} = 0.27\%$$

$$98.9\text{HBW}5/250 \text{ 硬度块: } u_{43} = \frac{0.59\%}{\sqrt{3}} = 0.34\%$$

### E3.5 标准布氏硬度块在上级定度时引入的标准不确定度 $u_5$

查标准布氏硬度块的检定证书可知, 上级定度的不确定度  $U_{rel} = 0.4\%$

$$325\text{HBW}10/3000 \text{ 硬度块: } u_{51} = \frac{0.4\%}{2} = 0.2\%$$

$$214\text{HBW}2.5/187.5 \text{ 硬度块: } u_{52} = \frac{0.4\%}{2} = 0.2\%$$

$$98.9\text{HBW}5/250 \text{ 硬度块: } u_{53} = \frac{0.4\%}{2} = 0.2\%$$

## E4 合成标准不确定度及扩展不确定度

### E4.1 不确定度分量汇总

表 3 不确定度分量汇总表 (用 325HBW10/3000 标准硬度块校准)

|   | 不确定度来源                      | 分布    | 灵敏系数 $c_i$ | 标准不确定度 $u_{i1}$ | $ c_i  \cdot u_{i1}$ |
|---|-----------------------------|-------|------------|-----------------|----------------------|
| 1 | 测量重复性引入的不确定度 $u_{11}$       | 正态分布  | 1          | 0.24%           | 0.24%                |
| 2 | 压痕测量装置引入的不确定度 $u_{21}$      | 均匀分布  | 1          | 0.71%           | 0.71%                |
| 3 | 标准布氏硬度块均匀度引入的不确定度 $u_{31}$  | 正态分布  | -1         | 0.30%           | 0.30%                |
| 4 | 标准布氏硬度块稳定度引入的不确定度 $u_{41}$  | 均匀分布  | -1         | 0.18%           | 0.18%                |
| 5 | 标准硬度块上级定度引入的标准不确定度 $u_{51}$ | $k=2$ | -1         | 0.20%           | 0.20%                |

表 4 不确定度分量汇总表（用 214HBW2.5/187.5 硬度块校准）

|   | 不确定度来源                      | 分布    | 灵敏系数 $c_i$ | 标准不确定度 $u_{i2}$ | $ c_i  \cdot u_{i2}$ |
|---|-----------------------------|-------|------------|-----------------|----------------------|
| 1 | 测量重复性引入的不确定度分量 $u_{12}$     | 正态分布  | 1          | 0.27%           | 0.27%                |
| 2 | 压痕测量装置引入的不确定度 $u_{22}$      | 均匀分布  | 1          | 0.54%           | 0.54%                |
| 3 | 标准布氏硬度块均匀度引入的不确定度 $u_{32}$  | 正态分布  | -1         | 0.40%           | 0.40%                |
| 4 | 标准布氏硬度块稳定度引入的不确定度 $u_{42}$  | 均匀分布  | -1         | 0.27%           | 0.27%                |
| 5 | 标准硬度块上级定度引入的标准不确定度 $u_{52}$ | $k=2$ | -1         | 0.20%           | 0.20%                |

表 5 不确定度分量汇总表（用 98.9HBW5/250 硬度块校准）

|   | 不确定度来源                     | 分布   | 灵敏系数 $c_i$ | 标准不确定度 $u_{i3}$ | $ c_i  \cdot u_{i3}$ |
|---|----------------------------|------|------------|-----------------|----------------------|
| 1 | 测量重复性引入的不确定度分量 $u_{13}$    | 正态分布 | 1          | 0.31%           | 0.31%                |
| 2 | 压痕测量装置引入的不确定度 $u_{23}$     | 均匀分布 | 1          | 0.88%           | 0.88%                |
| 3 | 标准布氏硬度块均匀度引入的不确定度 $u_{33}$ | 正态分布 | -1         | 0.60%           | 0.60%                |

|   |                             |       |    |       |       |
|---|-----------------------------|-------|----|-------|-------|
| 4 | 标准布氏硬度块稳定度引入的不确定度 $u_{43}$  | 均匀分布  | -1 | 0.34% | 0.34% |
| 5 | 标准硬度块上级定度引入的标准不确定度 $u_{53}$ | $k=2$ | -1 | 0.20% | 0.20% |

#### E4.2 合成标准不确定度

由于以上各量不相关，合成标准不确定度为：

用 325HBW10/3000 标准硬度块校准：

$$u_{\text{rel1}} = \sqrt{u_{11}^2 + u_{21}^2 + u_{31}^2 + u_{41}^2 + u_{51}^2} = 0.85\%$$

用 214HBW2.5/187.5 标准硬度块校准：

$$u_{\text{rel2}} = \sqrt{u_{12}^2 + u_{22}^2 + u_{32}^2 + u_{42}^2 + u_{52}^2} = 0.80\%$$

用 98.9HBW5/250 标准硬度块校准：

$$u_{\text{rel3}} = \sqrt{u_{13}^2 + u_{23}^2 + u_{33}^2 + u_{43}^2 + u_{53}^2} = 1.18\%$$

#### E4.3 扩展不确定度

用 325HBW10/3000 标准硬度块校准：

$$U_{\text{rel1}} = 2 \times u_{\text{rel1}} = 1.7\% \quad (k=2)$$

用 214HBW2.5/187.5 标准硬度块校准：

$$U_{\text{rel2}} = 2 \times u_{\text{rel2}} = 1.6\% \quad (k=2)$$

用 98.9HBW5/250 标准硬度块校准：

$$U_{\text{rel3}} = 2 \times u_{\text{rel3}} = 2.4\% \quad (k=2)$$

### E5 申请认可的校准和测量能力

实验室申请认可的能力范围，如下表所示：

表 6 申请认可的校准能力范围

| 测量仪器名称 | 校准参量 | 规范代号(含年号)名称               | 测量范围                            | 扩展不确定度(校准和测量能力, $k=2$ )  |
|--------|------|---------------------------|---------------------------------|--------------------------|
| 布氏硬度计  | 硬度   | JJG 150-2005《金属布氏硬度计检定规程》 | $\leq 125\text{HBW}$            | $U_{\text{rel}} = 2.4\%$ |
|        |      |                           | $(125 \sim \leq 225)\text{HBW}$ | $U_{\text{rel}} = 1.6\%$ |
|        |      |                           | $> 225\text{HBW}$               | $U_{\text{rel}} = 1.7\%$ |

## 附件 F

### 量块校准结果的 CMC 评定：长度

#### F1 概述

##### F1.1 测量依据

依据 JJG146-2011《量块》测量 3 等量块的中心长度。

##### F1.2 被测对象

标称尺寸为 100mm 的 3 等量块。

##### F1.3 测量方法及主要设备

采用比较法方式，用相同标称长度的 2 等量块作标准，用接触式干涉仪测量标准量块和被校 2 等量块的长度差。所使用的主要设备详细参数如表 1 所示。

表 1 实验室的计量标准器和配套设备

| 序号 | 设备名称   | 技术性能         |   |
|----|--------|--------------|---|
|    |        | 测量范围         | 准确度等级   |
| 1  | 接触式干涉仪 | (0~100) mm   | MPE: $\pm(0.03+1.5n\Delta\lambda/\lambda)\mu\text{m}$ |
| 2  | 量块     | (0.5~100) mm | 2 等   |

#### F2 测量模型及不确定度来源分析

##### F2.1 测量模型

当两量块的温度相同并与标准温度 20℃ 相差不大时，被测量块的长度  $I_x$  可以表示为：

$$I_x = I_s + ri \quad (1)$$

式中：

$I_s$  —— 标准量块在标准状态（即：温度为 20℃）下的长度；

$I_x$  —— 被测量块在标准状态（即：温度为 20℃）下的长度；

$r$  —— 接触式干涉仪的读数；

$i$  —— 干涉仪分度值。

(1) 式是用来计算测量结果的计算公式。考虑到量块温度和量块材料线膨胀系数对测量结果的影响，实际上上式应更严格地表示为：

$$I_x (1 + \alpha_x (t_x - 20)) = I_s (1 + \alpha_s (t_s - 20)) + ri \quad (2)$$

式中：

$t_s$  和  $t_x$  分别表示检定时标准和被测量块的温度；  
 $\alpha_s$  和  $\alpha_x$  分别表示标准和被测量块的线膨胀系数。

由(2)式可得：

$$l_x = \{ l_s (1 + \alpha_s (t_s - 20)) + ri \} / (1 + \alpha_x (t_x - 20))$$

将上式展开并忽略二阶小量，于是可得：

$$l_x \approx l_s + ri + l_s ( \alpha_s (t_s - 20) - \alpha_x (t_x - 20) ) \quad (3)$$

设被测量块和标准量块的线膨胀系数差  $\Delta\alpha = \alpha_x - \alpha_s$ ，而它们的温度差  $\Delta t = t_x - t_s$ ，考虑到测量点对量块中心的偏离量  $\Delta P$  所引入的不确定度分量的影响，由式(3)可得评定测量不确定度的测量模型：

$$l_x = l_s + ri - l_s \alpha_s \Delta t - l_s \Delta\alpha (t_x - 20) + \delta (\Delta P_s) + \delta (\Delta P_x) \quad (4)$$

由此可知被测量块长度  $l_x$  的测量不确定度将由  $l_s$ 、 $r$ 、 $t_x$ 、 $\Delta\alpha$ 、 $\Delta t$ 、 $\alpha_s$ 、 $\Delta P_s$ 、 $\Delta P_x$  等不确定度分量确定。被测量块长度  $l_x$  的各测量不确定度分量除  $r$  可采用 A 类评定外，其余均采用 B 类评定，并且相互间均独立无关。

对(4)式中各参数求偏导数，可得灵敏度系数  $c_1 \sim c_8$  如下：

$$c_1 = \left| \partial l_x / \partial l_s \right| \approx 1$$

$$c_2 = \left| \partial l_x / \partial r \right| = i$$

$$c_3 = \left| \partial l_x / \partial \Delta\alpha \right| = l_s |t_x - 20|$$

$$c_4 = \left| \partial l_x / \partial \Delta t \right| = l_s \alpha_s$$

$$c_5 = \left| \partial l_x / \partial \alpha_s \right| = l_s \Delta t$$

$$c_6 = \left| \partial l_x / \partial t_x \right| = l_s \Delta\alpha$$

$$c_7 = \left| \partial l_x / \partial \Delta P_s \right| = h_s / 3.7 \text{ (量块截面短边 } (b-1.6) / 2 = 3.7 \text{)}$$

$$c_8 = \left| \partial l_x / \partial \Delta P_x \right| = h_x / 3.7$$

式中：

$h_s$  和  $h_x$  分别为标准量块与被测量块的长度变动量。

## F2.2 不确定度来源

量块校准的测量不确定度主要来源于以下几个方面：

- (1) 2 等标准量块长度  $l_s$  引入的标准不确定度分量；
- (2) 接触式干涉仪的读数  $r$  引入的不确定度分量；
- (3) 标准和被测量块的线膨胀系数差  $\Delta\alpha$  引入的标准不确定度分量；
- (4) 标准量块和被测量块温度差  $\Delta t$  引入的标准不确定度分量；
- (5) 标准量块线膨胀系数  $\alpha_s$  引入的标准不确定度分量；
- (6) 被测量块温度  $t_x$  引入的标准不确定度分量；

- (7) 标准量块测点位置偏离  $\Delta P_s$  引入的标准不确定度分量；  
 (8) 被测量块测点位置偏离  $\Delta P_x$  引入的标准不确定度分量。

### F3 标准不确定度评定

以 100mm 量块校准为例分析测量不确定度。

#### F3.1 2 等标准量块长度 $L_s$ 引入的标准不确定度分量 $u_1$

2 等量块长度测量不确定度为： $0.05 \mu\text{m} + 0.5 \times 10^{-6} L_n$ ，对于 100mm 2 等量块而言： $U_{99}=100\text{nm}$ ，按量块检定规程，包含概率  $p=0.99$ ，自由度为： $\nu_1=29$ ，则查阅  $t$  分布临界值表，得包含因子  $k_p=2.75$ ，故标准不确定度  $u(L_s)$  为：

$$u(L_s) = \frac{U_{99}}{k_p} = \frac{100}{2.75} = 36.4 \text{ nm}$$

标准不确定度分量  $u_1$  为：

$$u_1 = c_1 u(L_s) = 1 \times 36.4 = 36.4 \text{ nm}, \quad \nu_1 = 29$$

#### F3.2 接触式干涉仪的读数 $r$ 引入的不确定度分量 $u_2$

接触式干涉仪的读数  $r$  的不确定度来源于仪器的不稳定性和读数差。取一 100mm 量块放置于干涉仪上进行 20 次独立的重复测量，测量值为： $+0.1, 0.0, +0.2, +0.1, +0.1, -0.1, 0.0, -0.1, +0.1, +0.2, +0.2, 0.0, +0.1, 0.0, +0.1, 0.0, 0.0, -0.1, -0.1, -0.2$  格。计算其单次测量的标准不确定度  $\sigma(r) = 0.113$  格。实际测量时，干涉仪的读数由标准量块和被测量块的差构成，每个读数取 3 次测量的平均值，则标准不确定度  $u(r) = \frac{0.113 \times \sqrt{2}}{\sqrt{3}} = 0.092$  格。干涉

仪分度值  $i=0.1 \mu\text{m}/\text{格}$ ，对应的不确定度分量：

$$u_2 = c_2 u(r) = 0.092 \times 0.1 = 0.0092 \mu\text{m} = 9.2 \text{ nm}, \quad \nu_2 = 19$$

#### F3.3 标准和被测量块的线膨胀系数差 $\Delta \alpha$ 引入的标准不确定度分量 $u_3$

根据规定，钢质量块线膨胀系数  $\alpha = (11.5 \pm 1) \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ，假定标准量块和被测量块的线膨胀系数  $\alpha_s$  和  $\alpha_x$  均在  $\pm 1 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  范围内等概率分布，因此两量块线膨胀系数差  $\Delta \alpha$  应在  $\pm 2 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  范围内，并服从三角分布，其标准不确定度  $u(\Delta \alpha)$  为：

$$u(\Delta \alpha) = \frac{2 \times 10^{-6}}{\sqrt{6}} = 0.816 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

由于被测量块温度  $t$  与标准温度  $20^\circ\text{C}$  的偏差不超过  $0.3^\circ\text{C}$ ，则对于 100mm 量块，其标准不确定度分量  $u_3$  为：

$$u_3 = c_3 u(\Delta \alpha) = L_s |t_x - 20| u(\Delta \alpha) = 100 \times 10^6 \times 0.3 \times 0.816 \times 10^{-6} = 24.5 \text{ nm}$$

根据经验  $u(\Delta \alpha)$  的相对标准不确定度为 10%，其自由度为： $\nu_3 = \frac{1}{2 \times 0.1^2} = 50$

### F3.4 标准量块和被测量块温度差 $\Delta t$ 引入的标准不确定度分量 $u_4$

两量块应在温度达到平衡后进行测量，经 24 小时量块等温后，实际测量时两量块的最大温度差  $\Delta t$  在  $\pm 0.04^\circ\text{C}$  范围内，并假定在该区域内等概率分布，则

其标准不确定度  $u(\Delta t)$  为： $u(\Delta t) = \frac{0.04}{\sqrt{3}} = 0.0231^\circ\text{C}$

标准不确定度分量  $u_4$  为：

$$u_4 = c_4 u(\Delta t) = L_s \alpha_s u(\Delta t) = 100 \times 10^6 \times 11.5 \times 10^{-6} \times 0.0231 = 26.6 \text{ nm}$$

根据经验  $u(\Delta t)$  的相对标准不确定度为 10%，其自由度为： $\nu_4 = \frac{1}{2 \times 0.1^2} = 50$

### F3.5 标准量块线膨胀系数 $\alpha_s$ 引入的标准不确定度分量 $u_5$

根据检定规程，钢质量块线膨胀  $\alpha$  应在  $(11.5 \pm 1) \times 10^{-6}^\circ\text{C}^{-1}$  范围内，设其在该范围内等概率分布，故其标准不确定度为：

$$u(\alpha_s) = \frac{1 \times 10^{-6}}{\sqrt{3}} = 0.577 \times 10^{-6}^\circ\text{C}^{-1}$$

实际测量时两块量块的最大温度差  $\Delta t$  按  $0.04^\circ\text{C}$  计算，对于 100mm 量块，标准不确定度分量  $u_5$  为：

$$u_5 = c_5 u(\alpha_s) = L_s \Delta t u(\alpha_s) = 100 \times 10^6 \times 0.04 \times 0.577 \times 10^{-6} = 2.3 \text{ nm}$$

根据经验  $u(\alpha_s)$  的相对标准不确定度为 20%，其自由度为： $\nu_5 = \frac{1}{2 \times 0.2^2} = 12$

### F3.6 被测量块温度 $t_x$ 引入的标准不确定度分量 $u_6$

量块测量过程中，被测量块温度  $t_x$  与标准温度  $20^\circ\text{C}$  的差就是被测量块温度  $t_x$  的不确定度范围，由于被测量块温度  $t_x$  与标准温度  $20^\circ\text{C}$  的偏差不超过  $0.3^\circ\text{C}$ ，并在  $(20 \pm 0.3)^\circ\text{C}$  范围内等概率分布，则其标准不确定度为：

$$u(t_x) = \frac{0.3}{\sqrt{3}} = 0.173^\circ\text{C}$$

由于线膨胀系数差  $\Delta \alpha$  的绝对值在  $(0 \sim 2) \times 10^{-6}^\circ\text{C}^{-1}$  范围内服从三角分布，现取其最大值一半估算，即等于  $1 \times 10^{-6}^\circ\text{C}^{-1}$ ，对 100mm 量块的标准不确定度分量  $u_6$  为：

$$u_6 = c_6 u(t_x) = L_s \Delta \alpha u(t_x) = 100 \times 10^6 \times 1 \times 10^{-6} \times 0.173 = 17.3 \text{ nm}$$

根据经验  $u(t_x)$  的相对标准不确定度为 20%，其自由度为： $\nu_6 = \frac{1}{2 \times 0.2^2} = 12$

### F3.7 标准量块测点位置偏离 $\Delta P_s$ 引入的标准不确定度分量 $u_7$

假设测点位置在中心附近 1mm 区域内等概率分布，且测量时每一量块测量两次取平均值，则其标准不确定度为：

$$u(\Delta P_s) = \frac{1}{\sqrt{3} \times \sqrt{2}} = 0.408 \text{mm}$$

对于 100mm 量块，2 等量块的长度变动量允许值为： $\delta_{1s}=120\text{nm}$ ，则标准不确定度分量  $u_7$  为：

$$u_7 = c_7 u(\Delta P_s) = \frac{h_s}{3.7} \times u(\Delta P_s) = 32.4 \times 0.408 = 13.2 \text{nm}$$

根据经验  $u(\Delta P_s)$  的相对标准不确定度为 20%，其自由度为： $\nu_7 = \frac{1}{2 \times 0.2^2} = 12$

### F3.8 被测量块测点位置偏离 $\Delta P_x$ 引入的标准不确定度分量 $u_8$

$\Delta P_x$  的不确定度与  $\Delta P_s$  相同，故其标准不确定度为：

$$u(\Delta P_x) = 0.408 \text{mm}$$

三等 100mm 量块的长度变动量允许值  $\delta_{1s}=200\text{nm}$ ，则标准不确定度分量  $u_8$  为：

$$u_8 = c_8 u(\Delta P_x) = \frac{h_x}{3.7} \times u(\Delta P_x) = 54 \times 0.408 \approx 22.1 \text{nm}$$

根据经验  $u(\Delta P_x)$  的相对标准不确定度为 20%，其自由度为： $\nu_8 = \frac{1}{2 \times 0.2^2} = 12$

## F4 合成标准不确定度及扩展不确定度

### F4.1 合成标准不确定度

不确定度分量汇总如下表所示：

表 1 不确定度分量汇总表

| 序号 | 不确定度来源          | 标准不确定度 $u(x_i)$                      | 各分量自由度 $\nu_i$ | 灵敏系数 $c_i$                 | 标准不确定度分量 $u_i$ |
|----|-----------------|--------------------------------------|----------------|----------------------------|----------------|
| 1  | $l_s$           | 36.4nm                               | 29             | 1                          | 36.4nm         |
| 2  | r               | 9.2 格                                | 19             | 0.1 $\mu\text{m}/\text{格}$ | 9.2nm          |
| 3  | $\Delta \alpha$ | $0.816 \times 10^{-6} \text{C}^{-1}$ | 50             | $l_s \Delta t_x$           | 24.5nm         |
| 4  | $\Delta t$      | 0.023 $^{\circ}\text{C}$             | 50             | $l_s \alpha_s$             | 26.6nm         |
| 5  | $\alpha_s$      | $0.577 \times 10^{-6} \text{C}^{-1}$ | 12             | $l_s \Delta t$             | 2.3nm          |
| 6  | $t_x$           | 0.172 $^{\circ}\text{C}$             | 12             | $l_s \Delta \alpha$        | 17.3nm         |
| 7  | $\Delta P_s$    | 0.408mm                              | 12             | $h_s/3.7$                  | 13.2nm         |
| 8  | $\Delta P_x$    | 0.408mm                              | 12             | $h_x/3.7$                  | 22.1nm         |

### F4.2 合成标准不确定度及有效自由度

各输入量之间未发现任何值得考虑的相关性。

合成标准不确定度为:

$$u_c = \sqrt{\sum_{i=1}^8 u_i^2} = 60.7\text{nm}$$

有效自由度为:

$$v_{\text{eff}} = \frac{u_c^4}{\sum_{i=1}^8 \frac{u_i^4}{v_i}} = 125$$

### F4.3 扩展不确定度

对 100mm 量块, 其有效自由度  $v_{\text{eff}}=125$ , 取包含概率  $p=0.99$ , 查表可得:  $k_p = 2.62$ , 扩展不确定度为:

$$U_{99} = k_p u_c = 2.62 \times 60.7 = 159\text{nm} = 0.16 \mu\text{m}$$

### F5 申请认可的校准和测量能力

按上述方法分析量块长度为 0.5mm、1mm、5mm、10mm、25mm、50mm、70mm 和 100mm 3 等量块的扩展不确定度为:

表 2 各量程段测量不确定度评定汇总表

| 量块长度  | 不确定度分量 |       |       |       |       |       |       |       | $U_{99}$ |
|-------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|
|       | $u_1$  | $u_2$ | $u_3$ | $u_4$ | $u_5$ | $u_6$ | $u_7$ | $u_8$ |          |
| 0.5mm | 18.3   | 9.0   | 0.1   | 0.1   | 0.0   | 0.1   | 11.0  | 17.6  | 0.08     |
| 1mm   | 18.4   | 9.0   | 0.2   | 0.3   | 0.0   | 0.2   | 11.0  | 17.6  | 0.08     |
| 5mm   | 19.1   | 9.1   | 1.2   | 1.3   | 0.1   | 0.9   | 11.0  | 17.6  | 0.08     |
| 10mm  | 20.0   | 9.1   | 2.4   | 2.7   | 0.2   | 1.7   | 11.0  | 17.6  | 0.08     |
| 25mm  | 22.7   | 9.1   | 6.1   | 6.6   | 0.6   | 4.3   | 11.0  | 17.6  | 0.09     |
| 50mm  | 27.3   | 9.2   | 12.2  | 13.3  | 1.2   | 8.7   | 11.0  | 19.8  | 0.11     |
| 70mm  | 30.9   | 9.2   | 17.1  | 18.6  | 1.6   | 12.1  | 13.2  | 19.8  | 0.13     |
| 100mm | 36.4   | 9.2   | 24.5  | 26.6  | 2.3   | 17.3  | 13.2  | 22.1  | 0.16     |

由于校准结果的扩展不确定度与量块长度有关, 三等量块长度测量结果不确定度曲线拟合为:

$$U_{99} = 0.10\mu\text{m} + 1 \times 10^{-6} I_n \quad k_p = 2.62$$

转换为包含概率约为 95% 的扩展不确定度表示:

$$U = 0.076\mu\text{m} + 0.76 \times 10^{-6} I_n \quad k = 2$$

实验室申请认可的能力范围如下表所示:

表 3 申请认可的校准能力范围

| 测量仪器名称 | 校准参量 | 规范代号(含年号)名称     | 测量范围         | 扩展不确定度(校准和测量能力, $k=2$ )                     |
|--------|------|-----------------|--------------|---|
| 3 等量块  | 长度   | JJG146-2011《量块》 | (0.5~100) mm | $U = 0.076 \mu m + 0.76 \times 10^{-6} L_n$ |



## 附件 G

### 工作用玻璃液体温度计校准结果的 CMC 评定：温度

#### G1 概述

##### G1.1 测量依据

依据 JJG130-2011《工作用玻璃液体温度计检定规程》校准工作用玻璃液体温度计。

##### G1.3 被测对象

被校准温度计的分类见表 1。

表 1 被校准温度计的分类

| 温度计分类 | 工作用玻璃液体温度计 |      |      |    |    |    |
|-------|------------|------|------|----|----|----|
| 分度值   | 0.1℃,      | 0.2℃ | 0.5℃ | 1℃ | 2℃ | 5℃ |
| 温度范围  | -30℃~300℃  |      |      |    |    |    |

##### G1.3 测量方法及主要设备

温度计的工作原理是利用在透明玻璃感温泡和毛细管内的感温液体随被测介质温度的变化而热胀冷缩的作用来测量温度的。

工作用玻璃液体温度计示值误差的校准方法：将标准水银温度计和工作用玻璃液体温度计同时放入恒定温度的恒温槽中，待示值稳定后，先读取标准温度计示值（或偏差），再读取各被校温度计的偏差，再计算被校温度计的示值误差。

校准用标准器为标准水银温度计，测量范围（-30~300）℃，实验室的标准器和配套设备见表 2。

表 2 实验室的标准器及配套设备

| 序号 | 设备名称    | 技术性能            |         |             |
|----|---------|-----------------|---------|-------------|
| 1  | 标准水银温度计 | 测量范围：（-30~300）℃ |         |             |
| 2  | 恒温槽     | 温度范围            | 工作区最大温差 | 温度波动性       |
|    |         | （-30~100）℃      | 0.04℃   | 0.04℃/10min |
|    |         | （>100~300）℃     | 0.08℃   | 0.10℃/10min |
| 3  | 读数装置    | 放大倍数 5 倍以上，可调水平 |         |             |

工作用玻璃液体温度计校准示意图见图 1。

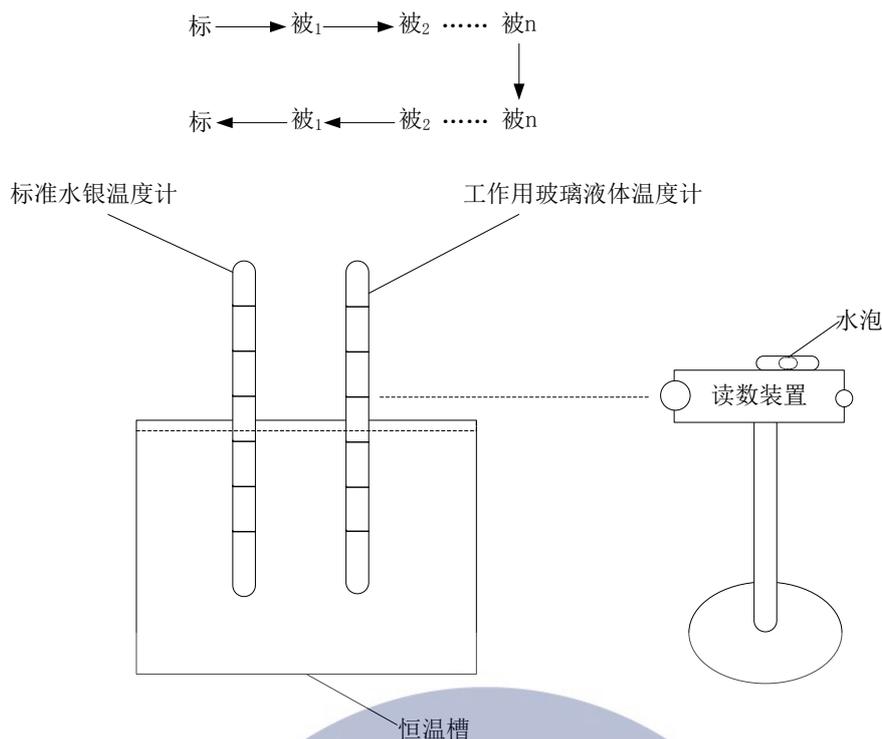


图 1 温度计校准示意图

## G2 测量模型及不确定度来源分析

### G2.1 测量模型

根据 JJG130-2011《工作用玻璃液体温度计检定规程》，工作用玻璃液体温度计实际温度修正值的计算公式为：

$$\Delta t = t_s + \Delta t_s - t$$

式中：

$\Delta t$  — 被检温度计的示值修正值；

$t_s$  — 标准水银温度计示值偏差平均值；

$\Delta t_s$  — 标准水银温度计的示值修正值；

$t$  — 被检温度计温度示值偏差平均值。

### G2.1 不确定度传播率

$$u_c^2(\Delta t) = c_1^2 u^2(t_s) + c_2^2 u^2(\Delta t_s) + c_3^2 u^2(t)$$

式中灵敏度系数分别为：

$$c_1 = \frac{\partial \Delta t}{\partial t_s} = 1; \quad c_2 = \frac{\partial \Delta t}{\partial \Delta t_s} = 1; \quad c_3 = \frac{\partial \Delta t}{\partial t} = -1。$$

## G2.2 不确定度来源分析

工作用玻璃液体温度计校准的不确定度主要来源四个方面：

- 1、 测量标准水银温度计引入的不确定度：
  - 1) 标准水银温度计测量重复性引入的不确定度；
  - 2) 标准水银温度计读数分辨力引入的不确定度；
  - 3) 标准水银温度计读数视线不垂直引入的不确定度；
- 2、 标准水银温度计自身引入的不确定度：
  - 1) 标准水银温度计检定证书引入的不确定度；
  - 2) 标准水银温度计年漂移量引入的不确定度；
- 3、 测量被检温度计引入的不确定度；
  - 1) 被检温度计测量重复性引入的不确定度
  - 2) 被检温度计读数分辨力引入的不确定度分量
  - 3) 被检温度计读数视线不垂直引入的不确定度
  - 4) 恒温槽温场不均匀性引入的不确定度
  - 5) 恒温槽温度波动引入的不确定度
- 4、 数据修约引入的不确定度。

## G3 标准不确定度评定

以测量范围为（0~50）℃、分度值为 0.1℃的工作用玻璃液体温度计为例，分析 30℃校准点的测量不确定度。

### G3.1 测量标准水银温度计引入的不确定度评定 $u(t_s)$

#### G3.1.1 标准水银温度计测量重复性引入的不确定度 $u_1$

用 A 类方法评定。将标准水银温度计和被检温度计同时放入恒温槽中，待示值稳定后，重复测量 6 次。标准器的变化量最大为 0.01℃，按极差法计算实验标准差为：

$$s(x) = \frac{x_{i\max} - x_{i\min}}{C} = 0.01^\circ\text{C} / 2.53 = 0.004^\circ\text{C}$$

实际测量以四次测量算术平均值作为测量结果：

$$u_1 = s(x) / \sqrt{4} = 0.002^\circ\text{C}$$

#### G3.1.2 标准水银温度计读数分辨力引入的不确定度 $u_2$

采用 B 类方法评定。二等标准水银温度计的分度值为 0.1℃，其读数分辨力为分度值的 1/10，则半区间宽度为 0.005℃，按均匀分布，取  $k=\sqrt{3}$  可得：

$$u_2 = 0.005^\circ\text{C} / \sqrt{3} = 0.0029^\circ\text{C}$$

### G3.1.3 标准水银温度计读数视线不垂直引入的不确定度 $u_3$

采用 B 类方法评定。读数时视线应与标准水银温度计感温液柱上端面保持同一水平面，温度计标尺不垂直引起的视差可达分度值的 1/10，分度值为  $0.1^\circ\text{C}$ ，则半区间宽度为  $0.005^\circ\text{C}$ ，按均匀分布，取  $k=\sqrt{3}$  可得：

$$u_3 = 0.005^\circ\text{C} / \sqrt{3} = 0.0029^\circ\text{C}$$

## G3.2 标准水银温度计自身引入的不确定度评定 $u(\Delta t_s)$

### G3.2.1 标准水银温度计检定证书引入的不确定度 $u_4$

采用 B 类方法评定。依据检定证书可知，标准水银温度计在  $30^\circ\text{C}$  时其扩展不确定度为： $U=0.03^\circ\text{C}$  ( $k=2$ )

$$u_4 = \frac{U}{k} = 0.015^\circ\text{C}$$

### G3.2.2 标准水银温度计年漂移量引入的不确定度 $u_5$

采用 B 类方法评定。根据标准水银温度计前 5 年的检定证书可得，标准水银温度计的年漂移在  $(0\sim 0.04)^\circ\text{C}$  之间，则半区间宽度为  $0.02^\circ\text{C}$ ，按均匀分布，取  $k=\sqrt{3}$  可得：

$$u_5 = \frac{0.02^\circ\text{C}}{\sqrt{3}} = 0.0116^\circ\text{C}$$

## G3.3 测量被校温度计引入的不确定度评定 $u(t)$

### G3.3.1 被校温度计测量重复性引入的不确定度 $u_6$

采用 A 类方法评定。被校温度计示值偏差重复性测量数据见表 3。

表 3 被校温度计示值偏差重复性测量数据（单位： $^\circ\text{C}$ ）

| 序号  | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   |
|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| $T$ | 0.05 | 0.05 | 0.05 | 0.05 | 0.04 | 0.05 | 0.05 | 0.04 | 0.05 | 0.05 |

计算其实验标准偏差： $n=10$ ，

$$s_p = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (x_k - \bar{x})^2}{(n-1)}} = 0.0042^\circ\text{C}$$

实际测量以四次测量算术平均值作为测量结果：

$$u_6 = s_p / \sqrt{4} = 0.0021^\circ\text{C}$$

### G3.3.2 被检温度计读数分辨力引入的不确定度分量 $u_7$

采用 B 类方法评定。被检温度计的分度值为  $0.1^\circ\text{C}$ ，其读数分辨力为分度值的  $1/10$ ，则半区间宽度为  $0.005^\circ\text{C}$ ，按均匀分布，取  $k=\sqrt{3}$  可得：

$$u_7 = 0.005^\circ\text{C} / \sqrt{3} = 0.0029^\circ\text{C}$$

### G3.3.3 被检温度计读数视线不垂直引入的不确定度 $u_8$

采用 B 类方法评定。读数时视线应与被检温度计感温液柱上端面保持在同一水平面，温度计标尺不垂直引起的视差可达分度值的  $1/10$ ，分度值为  $0.1^\circ\text{C}$ ，则半区间宽度为  $0.005^\circ\text{C}$ ，按均匀分布，取  $k=\sqrt{3}$  可得：

$$u_8 = 0.005^\circ\text{C} / \sqrt{3} = 0.0029^\circ\text{C}$$

### G3.3.4 恒温槽温场不均匀性引入的不确定度 $u_9$

采用 B 类方法评定。依据规程要求，恒温槽工作区域内最大温差为  $0.04^\circ\text{C}$ ，则半区间宽度为  $0.02^\circ\text{C}$ ，按均匀分布，取  $k=\sqrt{3}$  可得：

$$u_9 = 0.02^\circ\text{C} / \sqrt{3} = 0.0116^\circ\text{C}$$

### G3.3.5 恒温槽温度波动引入的不确定度 $u_{10}$

采用 B 类方法评定。依据规程要求，恒温槽温度波动度为  $0.04^\circ\text{C}$ ，则半区间宽度为  $0.02^\circ\text{C}$ ，按均匀分布，取  $k=\sqrt{3}$  可得：

$$u_{10} = 0.02^\circ\text{C} / \sqrt{3} = 0.0116^\circ\text{C}$$

### G3.4 数据修约引入的不确定度 $u_{11}$

采用 B 类方法评定。被检温度计修正值要求修约到温度计分度值的  $1/10$  位，分度值为  $0.1^\circ\text{C}$ ，则半区间宽度为  $0.005^\circ\text{C}$ ，按均匀分布，取  $k=\sqrt{3}$  可得：

$$u_{11} = 0.005^\circ\text{C} / \sqrt{3} = 0.0029^\circ\text{C}$$

## G4 合成标准不确定度及扩展不确定度

### G4.1 不确定度分量汇总

表 4 不确定度分量一览表 (单位:  $^\circ\text{C}$ )

| 标准不确定度分量        |             | 不确定度来源                | 标准不确定度 | $c_i$ | $ c_i u(x_i)$ |
|-----------------|-------------|-----------------------|--------|-------|---------------|
| $u(t_s)$        | $u_1$       | 标准水银温度计测量重复性引入的不确定度   | 0.002  | 1     | 0.002         |
|                 | $u_2$       | 标准水银温度计读数分辨力引入的不确定度分量 | 0.0029 | 1     | 0.0029        |
|                 | $u_3$       | 标准水银温度计读数视线不垂直引入的不确定度 | 0.0029 | 1     | 0.0029        |
| $u(\Delta t_s)$ | $u_4$       | 标准水银温度计检定证书引入的不确定度    | 0.015  | 1     | 0.015         |
|                 | $u_5$       | 标准水银温度计年漂移量引入的不确定度    | 0.0116 | 1     | 0.0116        |
| $u(t)$          | $u_6$       | 被检温度计测量重复性引入的不确定度     | 0.0021 | -1    | 0.0021        |
|                 | $u_7$       | 被检温度计读数分辨力引入的不确定度分量   | 0.0029 | -1    | 0.0029        |
|                 | $u_8$       | 被检温度计读数视线不垂直引入的不确定度   | 0.0029 | -1    | 0.0029        |
|                 | $u_9$       | 恒温槽温场不均匀性引入的不确定度      | 0.0116 | -1    | 0.0116        |
|                 | $u_{10}$    | 恒温槽温度波动引入的不确定度        | 0.0116 | -1    | 0.0116        |
| $u_{11}$        | 数据修约引入的不确定度 |                       | 0.0029 | 1     | 0.0029        |

#### G4.2 合成标准不确定度

根据读数分辨力引入的不确定度及重复测量引入的不确定度二者取大者的原则，为避免重复计算，在进行合成标准不确定度时，取两项中的最大影响量。

故舍去  $u_1$  和  $u_6$ 。

以上各项标准不确定度分量是互不相关的，所以合成标准不确定度为：

$$u_c = \sqrt{c_2^2 (u_2^2 + u_3^2) + c_4^2 (u_4^2 + u_5^2) + c_8^2 (u_8^2 + u_9^2 + u_{10}^2) + u_{11}^2} = 0.03^\circ\text{C}$$

#### G4.3 扩展不确定度

取包含因子  $k=2$ ，扩展不确定度为：

$$U = ku_c = 0.06^\circ\text{C}$$

### G5 申请认可的校准和测量能力

根据同样的方法，对不同分度值的工作用玻璃液体温度计不确定度评定如表 5~表 10 所示。

表 5 分度值为  $0.1^\circ\text{C}$  工作用玻璃液体温度计校准结果不确定度评估（单位： $^\circ\text{C}$ ）

| 被校<br>温度<br>点 | 不确定度分量 |        |       |        |        |        |        |          |          | $u_c$ | $U$<br>( $k=2$ ) |
|---------------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|----------|----------|-------|------------------|
|               | $u_2$  | $u_3$  | $u_4$ | $u_5$  | $u_7$  | $u_8$  | $u_9$  | $u_{10}$ | $u_{11}$ |       |                  |
| -30           | 0.0029 | 0.0029 | 0.02  | 0.0116 | 0.0029 | 0.0029 | 0.0116 | 0.0116   | 0.0029   | 0.03  | 0.06             |
| -20           | 0.0029 | 0.0029 | 0.02  | 0.0116 | 0.0029 | 0.0029 | 0.0116 | 0.0116   | 0.0029   | 0.03  | 0.06             |
| -10           | 0.0029 | 0.0029 | 0.02  | 0.0116 | 0.0029 | 0.0029 | 0.0116 | 0.0116   | 0.0029   | 0.03  | 0.06             |
| 0             | 0.0029 | 0.0029 | 0.02  | 0.0116 | 0.0029 | 0.0029 | 0.0116 | 0.0116   | 0.0029   | 0.03  | 0.06             |
| 10            | 0.0029 | 0.0029 | 0.015 | 0.0116 | 0.0029 | 0.0029 | 0.0116 | 0.0116   | 0.0029   | 0.03  | 0.06             |
| 20            | 0.0029 | 0.0029 | 0.015 | 0.0116 | 0.0029 | 0.0029 | 0.0116 | 0.0116   | 0.0029   | 0.03  | 0.06             |
| 30            | 0.0029 | 0.0029 | 0.015 | 0.0116 | 0.0029 | 0.0029 | 0.0116 | 0.0116   | 0.0029   | 0.03  | 0.06             |
| 40            | 0.0029 | 0.0029 | 0.015 | 0.0116 | 0.0029 | 0.0029 | 0.0116 | 0.0116   | 0.0029   | 0.03  | 0.06             |
| 50            | 0.0029 | 0.0029 | 0.015 | 0.0116 | 0.0029 | 0.0029 | 0.0116 | 0.0116   | 0.0029   | 0.03  | 0.06             |
| 60            | 0.0029 | 0.0029 | 0.015 | 0.0116 | 0.0029 | 0.0029 | 0.0116 | 0.0116   | 0.0029   | 0.03  | 0.06             |
| 70            | 0.0029 | 0.0029 | 0.015 | 0.0116 | 0.0029 | 0.0029 | 0.0116 | 0.0116   | 0.0029   | 0.03  | 0.06             |
| 80            | 0.0029 | 0.0029 | 0.015 | 0.0116 | 0.0029 | 0.0029 | 0.0116 | 0.0116   | 0.0029   | 0.03  | 0.06             |
| 90            | 0.0029 | 0.0029 | 0.015 | 0.0116 | 0.0029 | 0.0029 | 0.0116 | 0.0116   | 0.0029   | 0.03  | 0.06             |
| 100           | 0.0029 | 0.0029 | 0.015 | 0.0116 | 0.0029 | 0.0029 | 0.0116 | 0.0116   | 0.0029   | 0.03  | 0.06             |
| 110           | 0.0029 | 0.0029 | 0.025 | 0.0116 | 0.0029 | 0.0029 | 0.023  | 0.0289   | 0.0029   | 0.05  | 0.10             |
| 120           | 0.0029 | 0.0029 | 0.025 | 0.0116 | 0.0029 | 0.0029 | 0.023  | 0.0289   | 0.0029   | 0.05  | 0.10             |
| 130           | 0.0029 | 0.0029 | 0.025 | 0.0116 | 0.0029 | 0.0029 | 0.023  | 0.0289   | 0.0029   | 0.05  | 0.10             |
| 140           | 0.0029 | 0.0029 | 0.025 | 0.0116 | 0.0029 | 0.0029 | 0.023  | 0.0289   | 0.0029   | 0.05  | 0.10             |
| 150           | 0.0029 | 0.0029 | 0.025 | 0.0116 | 0.0029 | 0.0029 | 0.023  | 0.0289   | 0.0029   | 0.05  | 0.10             |
| 160           | 0.0029 | 0.0029 | 0.025 | 0.0116 | 0.0029 | 0.0029 | 0.023  | 0.0289   | 0.0029   | 0.05  | 0.10             |
| 170           | 0.0029 | 0.0029 | 0.025 | 0.0116 | 0.0029 | 0.0029 | 0.023  | 0.0289   | 0.0029   | 0.05  | 0.10             |
| 180           | 0.0029 | 0.0029 | 0.025 | 0.0116 | 0.0029 | 0.0029 | 0.023  | 0.0289   | 0.0029   | 0.05  | 0.10             |
| 190           | 0.0029 | 0.0029 | 0.025 | 0.0116 | 0.0029 | 0.0029 | 0.023  | 0.0289   | 0.0029   | 0.05  | 0.10             |
| 200           | 0.0029 | 0.0029 | 0.025 | 0.0116 | 0.0029 | 0.0029 | 0.023  | 0.0289   | 0.0029   | 0.05  | 0.10             |
| 210           | 0.0029 | 0.0029 | 0.025 | 0.0116 | 0.0029 | 0.0029 | 0.023  | 0.0289   | 0.0029   | 0.05  | 0.10             |
| 220           | 0.0029 | 0.0029 | 0.025 | 0.0116 | 0.0029 | 0.0029 | 0.023  | 0.0289   | 0.0029   | 0.05  | 0.10             |
| 230           | 0.0029 | 0.0029 | 0.025 | 0.0116 | 0.0029 | 0.0029 | 0.023  | 0.0289   | 0.0029   | 0.05  | 0.10             |
| 240           | 0.0029 | 0.0029 | 0.025 | 0.0116 | 0.0029 | 0.0029 | 0.023  | 0.0289   | 0.0029   | 0.05  | 0.10             |
| 250           | 0.0029 | 0.0029 | 0.025 | 0.0116 | 0.0029 | 0.0029 | 0.023  | 0.0289   | 0.0029   | 0.05  | 0.10             |
| 260           | 0.0029 | 0.0029 | 0.025 | 0.0116 | 0.0029 | 0.0029 | 0.023  | 0.0289   | 0.0029   | 0.05  | 0.10             |
| 270           | 0.0029 | 0.0029 | 0.025 | 0.0116 | 0.0029 | 0.0029 | 0.023  | 0.0289   | 0.0029   | 0.05  | 0.10             |

|     |        |        |       |        |        |        |       |        |        |      |      |
|-----|--------|--------|-------|--------|--------|--------|-------|--------|--------|------|------|
| 280 | 0.0029 | 0.0029 | 0.025 | 0.0116 | 0.0029 | 0.0029 | 0.023 | 0.0289 | 0.0029 | 0.05 | 0.10 |
| 290 | 0.0029 | 0.0029 | 0.025 | 0.0116 | 0.0029 | 0.0029 | 0.023 | 0.0289 | 0.0029 | 0.05 | 0.10 |
| 300 | 0.0029 | 0.0029 | 0.025 | 0.0116 | 0.0029 | 0.0029 | 0.023 | 0.0289 | 0.0029 | 0.05 | 0.10 |

表 6 分度值为 0.2℃工作用玻璃液体温度计校准结果不确定度评估 (单位: ℃)

| 被校<br>温度<br>点 | 不确定度分量 |        |       |        |        |        |        |          |          | $u_c$ | $U$<br>( $k=2$ ) |
|---------------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|----------|----------|-------|------------------|
|               | $u_2$  | $u_3$  | $u_4$ | $u_5$  | $u_7$  | $u_8$  | $u_9$  | $u_{10}$ | $u_{11}$ |       |                  |
| -30           | 0.0029 | 0.0029 | 0.02  | 0.0116 | 0.0058 | 0.0058 | 0.0116 | 0.0116   | 0.0058   | 0.03  | 0.06             |
| -20           | 0.0029 | 0.0029 | 0.02  | 0.0116 | 0.0058 | 0.0058 | 0.0116 | 0.0116   | 0.0058   | 0.03  | 0.06             |
| -10           | 0.0029 | 0.0029 | 0.02  | 0.0116 | 0.0058 | 0.0058 | 0.0116 | 0.0116   | 0.0058   | 0.03  | 0.06             |
| 0             | 0.0029 | 0.0029 | 0.02  | 0.0116 | 0.0058 | 0.0058 | 0.0116 | 0.0116   | 0.0058   | 0.03  | 0.06             |
| 10            | 0.0029 | 0.0029 | 0.015 | 0.0116 | 0.0058 | 0.0058 | 0.0116 | 0.0116   | 0.0058   | 0.03  | 0.06             |
| 20            | 0.0029 | 0.0029 | 0.015 | 0.0116 | 0.0058 | 0.0058 | 0.0116 | 0.0116   | 0.0058   | 0.03  | 0.06             |
| 30            | 0.0029 | 0.0029 | 0.015 | 0.0116 | 0.0058 | 0.0058 | 0.0116 | 0.0116   | 0.0058   | 0.03  | 0.06             |
| 40            | 0.0029 | 0.0029 | 0.015 | 0.0116 | 0.0058 | 0.0058 | 0.0116 | 0.0116   | 0.0058   | 0.03  | 0.06             |
| 50            | 0.0029 | 0.0029 | 0.015 | 0.0116 | 0.0058 | 0.0058 | 0.0116 | 0.0116   | 0.0058   | 0.03  | 0.06             |
| 60            | 0.0029 | 0.0029 | 0.015 | 0.0116 | 0.0058 | 0.0058 | 0.0116 | 0.0116   | 0.0058   | 0.03  | 0.06             |
| 70            | 0.0029 | 0.0029 | 0.015 | 0.0116 | 0.0058 | 0.0058 | 0.0116 | 0.0116   | 0.0058   | 0.03  | 0.06             |
| 80            | 0.0029 | 0.0029 | 0.015 | 0.0116 | 0.0058 | 0.0058 | 0.0116 | 0.0116   | 0.0058   | 0.03  | 0.06             |
| 90            | 0.0029 | 0.0029 | 0.015 | 0.0116 | 0.0058 | 0.0058 | 0.0116 | 0.0116   | 0.0058   | 0.03  | 0.06             |
| 100           | 0.0029 | 0.0029 | 0.015 | 0.0116 | 0.0058 | 0.0058 | 0.0116 | 0.0116   | 0.0058   | 0.03  | 0.06             |
| 110           | 0.0029 | 0.0029 | 0.025 | 0.0116 | 0.0058 | 0.0058 | 0.023  | 0.0289   | 0.0058   | 0.05  | 0.10             |
| 120           | 0.0029 | 0.0029 | 0.025 | 0.0116 | 0.0058 | 0.0058 | 0.023  | 0.0289   | 0.0058   | 0.05  | 0.10             |
| 130           | 0.0029 | 0.0029 | 0.025 | 0.0116 | 0.0058 | 0.0058 | 0.023  | 0.0289   | 0.0058   | 0.05  | 0.10             |
| 140           | 0.0029 | 0.0029 | 0.025 | 0.0116 | 0.0058 | 0.0058 | 0.023  | 0.0289   | 0.0058   | 0.05  | 0.10             |
| 150           | 0.0029 | 0.0029 | 0.025 | 0.0116 | 0.0058 | 0.0058 | 0.023  | 0.0289   | 0.0058   | 0.05  | 0.10             |
| 160           | 0.0029 | 0.0029 | 0.025 | 0.0116 | 0.0058 | 0.0058 | 0.023  | 0.0289   | 0.0058   | 0.05  | 0.10             |
| 170           | 0.0029 | 0.0029 | 0.025 | 0.0116 | 0.0058 | 0.0058 | 0.023  | 0.0289   | 0.0058   | 0.05  | 0.10             |
| 180           | 0.0029 | 0.0029 | 0.025 | 0.0116 | 0.0058 | 0.0058 | 0.023  | 0.0289   | 0.0058   | 0.05  | 0.10             |
| 190           | 0.0029 | 0.0029 | 0.025 | 0.0116 | 0.0058 | 0.0058 | 0.023  | 0.0289   | 0.0058   | 0.05  | 0.10             |
| 200           | 0.0029 | 0.0029 | 0.025 | 0.0116 | 0.0058 | 0.0058 | 0.023  | 0.0289   | 0.0058   | 0.05  | 0.10             |
| 210           | 0.0029 | 0.0029 | 0.025 | 0.0116 | 0.0058 | 0.0058 | 0.023  | 0.0289   | 0.0058   | 0.05  | 0.10             |
| 220           | 0.0029 | 0.0029 | 0.025 | 0.0116 | 0.0058 | 0.0058 | 0.023  | 0.0289   | 0.0058   | 0.05  | 0.10             |

|     |        |        |       |        |        |        |       |        |        |      |      |
|-----|--------|--------|-------|--------|--------|--------|-------|--------|--------|------|------|
| 230 | 0.0029 | 0.0029 | 0.025 | 0.0116 | 0.0058 | 0.0058 | 0.023 | 0.0289 | 0.0058 | 0.05 | 0.10 |
| 240 | 0.0029 | 0.0029 | 0.025 | 0.0116 | 0.0058 | 0.0058 | 0.023 | 0.0289 | 0.0058 | 0.05 | 0.10 |
| 250 | 0.0029 | 0.0029 | 0.025 | 0.0116 | 0.0058 | 0.0058 | 0.023 | 0.0289 | 0.0058 | 0.05 | 0.10 |
| 260 | 0.0029 | 0.0029 | 0.025 | 0.0116 | 0.0058 | 0.0058 | 0.023 | 0.0289 | 0.0058 | 0.05 | 0.10 |
| 270 | 0.0029 | 0.0029 | 0.025 | 0.0116 | 0.0058 | 0.0058 | 0.023 | 0.0289 | 0.0058 | 0.05 | 0.10 |
| 280 | 0.0029 | 0.0029 | 0.025 | 0.0116 | 0.0058 | 0.0058 | 0.023 | 0.0289 | 0.0058 | 0.05 | 0.10 |
| 290 | 0.0029 | 0.0029 | 0.025 | 0.0116 | 0.0058 | 0.0058 | 0.023 | 0.0289 | 0.0058 | 0.05 | 0.10 |
| 300 | 0.0029 | 0.0029 | 0.025 | 0.0116 | 0.0058 | 0.0058 | 0.023 | 0.0289 | 0.0058 | 0.05 | 0.10 |

表 7 分度值为 0.5℃ 工作用玻璃液体温度计校准结果不确定度评估 (单位: ℃)

| 被校<br>温度<br>点 | 不确定度分量 |        |       |        |        |        |        |          |          | $u_c$ | $U$<br>( $k=2$ ) |
|---------------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|----------|----------|-------|------------------|
|               | $u_2$  | $u_3$  | $u_4$ | $u_5$  | $u_7$  | $u_8$  | $u_9$  | $u_{10}$ | $u_{11}$ |       |                  |
| -30           | 0.0029 | 0.0029 | 0.02  | 0.0116 | 0.0145 | 0.0145 | 0.0116 | 0.0116   | 0.0145   | 0.04  | 0.08             |
| -20           | 0.0029 | 0.0029 | 0.02  | 0.0116 | 0.0145 | 0.0145 | 0.0116 | 0.0116   | 0.0145   | 0.04  | 0.08             |
| -10           | 0.0029 | 0.0029 | 0.02  | 0.0116 | 0.0145 | 0.0145 | 0.0116 | 0.0116   | 0.0145   | 0.04  | 0.08             |
| 0             | 0.0029 | 0.0029 | 0.02  | 0.0116 | 0.0145 | 0.0145 | 0.0116 | 0.0116   | 0.0145   | 0.04  | 0.08             |
| 10            | 0.0029 | 0.0029 | 0.015 | 0.0116 | 0.0145 | 0.0145 | 0.0116 | 0.0116   | 0.0145   | 0.04  | 0.08             |
| 20            | 0.0029 | 0.0029 | 0.015 | 0.0116 | 0.0145 | 0.0145 | 0.0116 | 0.0116   | 0.0145   | 0.04  | 0.08             |
| 30            | 0.0029 | 0.0029 | 0.015 | 0.0116 | 0.0145 | 0.0145 | 0.0116 | 0.0116   | 0.0145   | 0.04  | 0.08             |
| 40            | 0.0029 | 0.0029 | 0.015 | 0.0116 | 0.0145 | 0.0145 | 0.0116 | 0.0116   | 0.0145   | 0.04  | 0.08             |
| 50            | 0.0029 | 0.0029 | 0.015 | 0.0116 | 0.0145 | 0.0145 | 0.0116 | 0.0116   | 0.0145   | 0.04  | 0.08             |
| 60            | 0.0029 | 0.0029 | 0.015 | 0.0116 | 0.0145 | 0.0145 | 0.0116 | 0.0116   | 0.0145   | 0.04  | 0.08             |
| 70            | 0.0029 | 0.0029 | 0.015 | 0.0116 | 0.0145 | 0.0145 | 0.0116 | 0.0116   | 0.0145   | 0.04  | 0.08             |
| 80            | 0.0029 | 0.0029 | 0.015 | 0.0116 | 0.0145 | 0.0145 | 0.0116 | 0.0116   | 0.0145   | 0.04  | 0.08             |
| 90            | 0.0029 | 0.0029 | 0.015 | 0.0116 | 0.0145 | 0.0145 | 0.0116 | 0.0116   | 0.0145   | 0.04  | 0.08             |
| 100           | 0.0029 | 0.0029 | 0.015 | 0.0116 | 0.0145 | 0.0145 | 0.0116 | 0.0116   | 0.0145   | 0.04  | 0.08             |
| 110           | 0.0029 | 0.0029 | 0.025 | 0.0116 | 0.0145 | 0.0145 | 0.023  | 0.0289   | 0.0145   | 0.06  | 0.12             |
| 120           | 0.0029 | 0.0029 | 0.025 | 0.0116 | 0.0145 | 0.0145 | 0.023  | 0.0289   | 0.0145   | 0.06  | 0.12             |
| 130           | 0.0029 | 0.0029 | 0.025 | 0.0116 | 0.0145 | 0.0145 | 0.023  | 0.0289   | 0.0145   | 0.06  | 0.12             |
| 140           | 0.0029 | 0.0029 | 0.025 | 0.0116 | 0.0145 | 0.0145 | 0.023  | 0.0289   | 0.0145   | 0.06  | 0.12             |
| 150           | 0.0029 | 0.0029 | 0.025 | 0.0116 | 0.0145 | 0.0145 | 0.023  | 0.0289   | 0.0145   | 0.06  | 0.12             |
| 160           | 0.0029 | 0.0029 | 0.025 | 0.0116 | 0.0145 | 0.0145 | 0.023  | 0.0289   | 0.0145   | 0.06  | 0.12             |
| 170           | 0.0029 | 0.0029 | 0.025 | 0.0116 | 0.0145 | 0.0145 | 0.023  | 0.0289   | 0.0145   | 0.06  | 0.12             |

|     |        |        |       |        |        |        |       |        |        |      |      |
|-----|--------|--------|-------|--------|--------|--------|-------|--------|--------|------|------|
| 180 | 0.0029 | 0.0029 | 0.025 | 0.0116 | 0.0145 | 0.0145 | 0.023 | 0.0289 | 0.0145 | 0.06 | 0.12 |
| 190 | 0.0029 | 0.0029 | 0.025 | 0.0116 | 0.0145 | 0.0145 | 0.023 | 0.0289 | 0.0145 | 0.06 | 0.12 |
| 200 | 0.0029 | 0.0029 | 0.025 | 0.0116 | 0.0145 | 0.0145 | 0.023 | 0.0289 | 0.0145 | 0.06 | 0.12 |
| 210 | 0.0029 | 0.0029 | 0.025 | 0.0116 | 0.0145 | 0.0145 | 0.023 | 0.0289 | 0.0145 | 0.06 | 0.12 |
| 220 | 0.0029 | 0.0029 | 0.025 | 0.0116 | 0.0145 | 0.0145 | 0.023 | 0.0289 | 0.0145 | 0.06 | 0.12 |
| 230 | 0.0029 | 0.0029 | 0.025 | 0.0116 | 0.0145 | 0.0145 | 0.023 | 0.0289 | 0.0145 | 0.06 | 0.12 |
| 240 | 0.0029 | 0.0029 | 0.025 | 0.0116 | 0.0145 | 0.0145 | 0.023 | 0.0289 | 0.0145 | 0.06 | 0.12 |
| 250 | 0.0029 | 0.0029 | 0.025 | 0.0116 | 0.0145 | 0.0145 | 0.023 | 0.0289 | 0.0145 | 0.06 | 0.12 |
| 260 | 0.0029 | 0.0029 | 0.025 | 0.0116 | 0.0145 | 0.0145 | 0.023 | 0.0289 | 0.0145 | 0.06 | 0.12 |
| 270 | 0.0029 | 0.0029 | 0.025 | 0.0116 | 0.0145 | 0.0145 | 0.023 | 0.0289 | 0.0145 | 0.06 | 0.12 |
| 280 | 0.0029 | 0.0029 | 0.025 | 0.0116 | 0.0145 | 0.0145 | 0.023 | 0.0289 | 0.0145 | 0.06 | 0.12 |
| 290 | 0.0029 | 0.0029 | 0.025 | 0.0116 | 0.0145 | 0.0145 | 0.023 | 0.0289 | 0.0145 | 0.06 | 0.12 |
| 300 | 0.0029 | 0.0029 | 0.025 | 0.0116 | 0.0145 | 0.0145 | 0.023 | 0.0289 | 0.0145 | 0.06 | 0.12 |

表 8 分度值为 1℃ 工作用玻璃液体温度计校准结果不确定度评估 (单位: °C)

| 被校<br>温度<br>点 | 不确定度分量 |        |       |        |       |       |        |          |          | $u_c$ | $U$<br>( $k=2$ ) |
|---------------|--------|--------|-------|--------|-------|-------|--------|----------|----------|-------|------------------|
|               | $u_2$  | $u_3$  | $u_4$ | $u_5$  | $u_7$ | $u_8$ | $u_9$  | $u_{10}$ | $u_{11}$ |       |                  |
| -30           | 0.0029 | 0.0029 | 0.02  | 0.0116 | 0.029 | 0.029 | 0.0116 | 0.0116   | 0.029    | 0.06  | 0.12             |
| -20           | 0.0029 | 0.0029 | 0.02  | 0.0116 | 0.029 | 0.029 | 0.0116 | 0.0116   | 0.029    | 0.06  | 0.12             |
| -10           | 0.0029 | 0.0029 | 0.02  | 0.0116 | 0.029 | 0.029 | 0.0116 | 0.0116   | 0.029    | 0.06  | 0.12             |
| 0             | 0.0029 | 0.0029 | 0.02  | 0.0116 | 0.029 | 0.029 | 0.0116 | 0.0116   | 0.029    | 0.06  | 0.12             |
| 10            | 0.0029 | 0.0029 | 0.015 | 0.0116 | 0.029 | 0.029 | 0.0116 | 0.0116   | 0.029    | 0.06  | 0.12             |
| 20            | 0.0029 | 0.0029 | 0.015 | 0.0116 | 0.029 | 0.029 | 0.0116 | 0.0116   | 0.029    | 0.06  | 0.12             |
| 30            | 0.0029 | 0.0029 | 0.015 | 0.0116 | 0.029 | 0.029 | 0.0116 | 0.0116   | 0.029    | 0.06  | 0.12             |
| 40            | 0.0029 | 0.0029 | 0.015 | 0.0116 | 0.029 | 0.029 | 0.0116 | 0.0116   | 0.029    | 0.06  | 0.12             |
| 50            | 0.0029 | 0.0029 | 0.015 | 0.0116 | 0.029 | 0.029 | 0.0116 | 0.0116   | 0.029    | 0.06  | 0.12             |
| 60            | 0.0029 | 0.0029 | 0.015 | 0.0116 | 0.029 | 0.029 | 0.0116 | 0.0116   | 0.029    | 0.06  | 0.12             |
| 70            | 0.0029 | 0.0029 | 0.015 | 0.0116 | 0.029 | 0.029 | 0.0116 | 0.0116   | 0.029    | 0.06  | 0.12             |
| 80            | 0.0029 | 0.0029 | 0.015 | 0.0116 | 0.029 | 0.029 | 0.0116 | 0.0116   | 0.029    | 0.06  | 0.12             |
| 90            | 0.0029 | 0.0029 | 0.015 | 0.0116 | 0.029 | 0.029 | 0.0116 | 0.0116   | 0.029    | 0.06  | 0.12             |
| 100           | 0.0029 | 0.0029 | 0.015 | 0.0116 | 0.029 | 0.029 | 0.0116 | 0.0116   | 0.029    | 0.06  | 0.12             |
| 110           | 0.0029 | 0.0029 | 0.025 | 0.0116 | 0.029 | 0.029 | 0.023  | 0.0289   | 0.029    | 0.07  | 0.14             |
| 120           | 0.0029 | 0.0029 | 0.025 | 0.0116 | 0.029 | 0.029 | 0.023  | 0.0289   | 0.029    | 0.07  | 0.14             |
| 130           | 0.0029 | 0.0029 | 0.025 | 0.0116 | 0.029 | 0.029 | 0.023  | 0.0289   | 0.029    | 0.07  | 0.14             |

|     |        |        |       |        |       |       |       |        |       |      |      |
|-----|--------|--------|-------|--------|-------|-------|-------|--------|-------|------|------|
| 140 | 0.0029 | 0.0029 | 0.025 | 0.0116 | 0.029 | 0.029 | 0.023 | 0.0289 | 0.029 | 0.07 | 0.14 |
| 150 | 0.0029 | 0.0029 | 0.025 | 0.0116 | 0.029 | 0.029 | 0.023 | 0.0289 | 0.029 | 0.07 | 0.14 |
| 160 | 0.0029 | 0.0029 | 0.025 | 0.0116 | 0.029 | 0.029 | 0.023 | 0.0289 | 0.029 | 0.07 | 0.14 |
| 170 | 0.0029 | 0.0029 | 0.025 | 0.0116 | 0.029 | 0.029 | 0.023 | 0.0289 | 0.029 | 0.07 | 0.14 |
| 180 | 0.0029 | 0.0029 | 0.025 | 0.0116 | 0.029 | 0.029 | 0.023 | 0.0289 | 0.029 | 0.07 | 0.14 |
| 190 | 0.0029 | 0.0029 | 0.025 | 0.0116 | 0.029 | 0.029 | 0.023 | 0.0289 | 0.029 | 0.07 | 0.14 |
| 200 | 0.0029 | 0.0029 | 0.025 | 0.0116 | 0.029 | 0.029 | 0.023 | 0.0289 | 0.029 | 0.07 | 0.14 |
| 210 | 0.0029 | 0.0029 | 0.025 | 0.0116 | 0.029 | 0.029 | 0.023 | 0.0289 | 0.029 | 0.07 | 0.14 |
| 220 | 0.0029 | 0.0029 | 0.025 | 0.0116 | 0.029 | 0.029 | 0.023 | 0.0289 | 0.029 | 0.07 | 0.14 |
| 230 | 0.0029 | 0.0029 | 0.025 | 0.0116 | 0.029 | 0.029 | 0.023 | 0.0289 | 0.029 | 0.07 | 0.14 |
| 240 | 0.0029 | 0.0029 | 0.025 | 0.0116 | 0.029 | 0.029 | 0.023 | 0.0289 | 0.029 | 0.07 | 0.14 |
| 250 | 0.0029 | 0.0029 | 0.025 | 0.0116 | 0.029 | 0.029 | 0.023 | 0.0289 | 0.029 | 0.07 | 0.14 |
| 260 | 0.0029 | 0.0029 | 0.025 | 0.0116 | 0.029 | 0.029 | 0.023 | 0.0289 | 0.029 | 0.07 | 0.14 |
| 270 | 0.0029 | 0.0029 | 0.025 | 0.0116 | 0.029 | 0.029 | 0.023 | 0.0289 | 0.029 | 0.07 | 0.14 |
| 280 | 0.0029 | 0.0029 | 0.025 | 0.0116 | 0.029 | 0.029 | 0.023 | 0.0289 | 0.029 | 0.07 | 0.14 |
| 290 | 0.0029 | 0.0029 | 0.025 | 0.0116 | 0.029 | 0.029 | 0.023 | 0.0289 | 0.029 | 0.07 | 0.14 |
| 300 | 0.0029 | 0.0029 | 0.025 | 0.0116 | 0.029 | 0.029 | 0.023 | 0.0289 | 0.029 | 0.07 | 0.14 |

表 9 分度值为 2℃ 工作用玻璃液体温度计校准结果不确定度评估 (单位: ℃)

| 被校<br>温度<br>点 | 不确定度分量 |        |       |        |       |       |        |          |          | $u_c$ | $U$<br>( $k=2$ ) |
|---------------|--------|--------|-------|--------|-------|-------|--------|----------|----------|-------|------------------|
|               | $u_2$  | $u_3$  | $u_4$ | $u_5$  | $u_7$ | $u_8$ | $u_9$  | $u_{10}$ | $u_{11}$ |       |                  |
| -30           | 0.0029 | 0.0029 | 0.02  | 0.0116 | 0.058 | 0.058 | 0.0116 | 0.0116   | 0.058    | 0.11  | 0.22             |
| -20           | 0.0029 | 0.0029 | 0.02  | 0.0116 | 0.058 | 0.058 | 0.0116 | 0.0116   | 0.058    | 0.11  | 0.22             |
| -10           | 0.0029 | 0.0029 | 0.02  | 0.0116 | 0.058 | 0.058 | 0.0116 | 0.0116   | 0.058    | 0.11  | 0.22             |
| 0             | 0.0029 | 0.0029 | 0.02  | 0.0116 | 0.058 | 0.058 | 0.0116 | 0.0116   | 0.058    | 0.11  | 0.22             |
| 10            | 0.0029 | 0.0029 | 0.015 | 0.0116 | 0.058 | 0.058 | 0.0116 | 0.0116   | 0.058    | 0.11  | 0.22             |
| 20            | 0.0029 | 0.0029 | 0.015 | 0.0116 | 0.058 | 0.058 | 0.0116 | 0.0116   | 0.058    | 0.11  | 0.22             |
| 30            | 0.0029 | 0.0029 | 0.015 | 0.0116 | 0.058 | 0.058 | 0.0116 | 0.0116   | 0.058    | 0.11  | 0.22             |
| 40            | 0.0029 | 0.0029 | 0.015 | 0.0116 | 0.058 | 0.058 | 0.0116 | 0.0116   | 0.058    | 0.11  | 0.22             |
| 50            | 0.0029 | 0.0029 | 0.015 | 0.0116 | 0.058 | 0.058 | 0.0116 | 0.0116   | 0.058    | 0.11  | 0.22             |
| 60            | 0.0029 | 0.0029 | 0.015 | 0.0116 | 0.058 | 0.058 | 0.0116 | 0.0116   | 0.058    | 0.11  | 0.22             |
| 70            | 0.0029 | 0.0029 | 0.015 | 0.0116 | 0.058 | 0.058 | 0.0116 | 0.0116   | 0.058    | 0.11  | 0.22             |
| 80            | 0.0029 | 0.0029 | 0.015 | 0.0116 | 0.058 | 0.058 | 0.0116 | 0.0116   | 0.058    | 0.11  | 0.22             |

|     |        |        |       |        |       |       |        |        |       |      |      |
|-----|--------|--------|-------|--------|-------|-------|--------|--------|-------|------|------|
| 90  | 0.0029 | 0.0029 | 0.015 | 0.0116 | 0.058 | 0.058 | 0.0116 | 0.0116 | 0.058 | 0.11 | 0.22 |
| 100 | 0.0029 | 0.0029 | 0.015 | 0.0116 | 0.058 | 0.058 | 0.0116 | 0.0116 | 0.058 | 0.11 | 0.22 |
| 110 | 0.0029 | 0.0029 | 0.025 | 0.0116 | 0.058 | 0.058 | 0.023  | 0.0289 | 0.058 | 0.11 | 0.22 |
| 120 | 0.0029 | 0.0029 | 0.025 | 0.0116 | 0.058 | 0.058 | 0.023  | 0.0289 | 0.058 | 0.11 | 0.22 |
| 130 | 0.0029 | 0.0029 | 0.025 | 0.0116 | 0.058 | 0.058 | 0.023  | 0.0289 | 0.058 | 0.11 | 0.22 |
| 140 | 0.0029 | 0.0029 | 0.025 | 0.0116 | 0.058 | 0.058 | 0.023  | 0.0289 | 0.058 | 0.11 | 0.22 |
| 150 | 0.0029 | 0.0029 | 0.025 | 0.0116 | 0.058 | 0.058 | 0.023  | 0.0289 | 0.058 | 0.11 | 0.22 |
| 160 | 0.0029 | 0.0029 | 0.025 | 0.0116 | 0.058 | 0.058 | 0.023  | 0.0289 | 0.058 | 0.11 | 0.22 |
| 170 | 0.0029 | 0.0029 | 0.025 | 0.0116 | 0.058 | 0.058 | 0.023  | 0.0289 | 0.058 | 0.11 | 0.22 |
| 180 | 0.0029 | 0.0029 | 0.025 | 0.0116 | 0.058 | 0.058 | 0.023  | 0.0289 | 0.058 | 0.11 | 0.22 |
| 190 | 0.0029 | 0.0029 | 0.025 | 0.0116 | 0.058 | 0.058 | 0.023  | 0.0289 | 0.058 | 0.11 | 0.22 |
| 200 | 0.0029 | 0.0029 | 0.025 | 0.0116 | 0.058 | 0.058 | 0.023  | 0.0289 | 0.058 | 0.11 | 0.22 |
| 210 | 0.0029 | 0.0029 | 0.025 | 0.0116 | 0.058 | 0.058 | 0.023  | 0.0289 | 0.058 | 0.11 | 0.22 |
| 220 | 0.0029 | 0.0029 | 0.025 | 0.0116 | 0.058 | 0.058 | 0.023  | 0.0289 | 0.058 | 0.11 | 0.22 |
| 230 | 0.0029 | 0.0029 | 0.025 | 0.0116 | 0.058 | 0.058 | 0.023  | 0.0289 | 0.058 | 0.11 | 0.22 |
| 240 | 0.0029 | 0.0029 | 0.025 | 0.0116 | 0.058 | 0.058 | 0.023  | 0.0289 | 0.058 | 0.11 | 0.22 |
| 250 | 0.0029 | 0.0029 | 0.025 | 0.0116 | 0.058 | 0.058 | 0.023  | 0.0289 | 0.058 | 0.11 | 0.22 |
| 260 | 0.0029 | 0.0029 | 0.025 | 0.0116 | 0.058 | 0.058 | 0.023  | 0.0289 | 0.058 | 0.11 | 0.22 |
| 270 | 0.0029 | 0.0029 | 0.025 | 0.0116 | 0.058 | 0.058 | 0.023  | 0.0289 | 0.058 | 0.11 | 0.22 |
| 280 | 0.0029 | 0.0029 | 0.025 | 0.0116 | 0.058 | 0.058 | 0.023  | 0.0289 | 0.058 | 0.11 | 0.22 |
| 290 | 0.0029 | 0.0029 | 0.025 | 0.0116 | 0.058 | 0.058 | 0.023  | 0.0289 | 0.058 | 0.11 | 0.22 |
| 300 | 0.0029 | 0.0029 | 0.025 | 0.0116 | 0.058 | 0.058 | 0.023  | 0.0289 | 0.058 | 0.11 | 0.22 |

表 10 分度值为 5℃工作用玻璃液体温度计校准结果不确定度评估 (单位: °C)

| 被校<br>温度<br>点 | 不确定度分量 |        |       |        |       |       |        |          |          | $u_c$ | $U$<br>( $k=2$ ) |
|---------------|--------|--------|-------|--------|-------|-------|--------|----------|----------|-------|------------------|
|               | $u_2$  | $u_3$  | $u_4$ | $u_5$  | $u_7$ | $u_8$ | $u_9$  | $u_{10}$ | $u_{11}$ |       |                  |
| -30           | 0.0029 | 0.0029 | 0.02  | 0.0116 | 0.145 | 0.145 | 0.0116 | 0.0116   | 0.145    | 0.26  | 0.52             |
| -20           | 0.0029 | 0.0029 | 0.02  | 0.0116 | 0.145 | 0.145 | 0.0116 | 0.0116   | 0.145    | 0.26  | 0.52             |
| -10           | 0.0029 | 0.0029 | 0.02  | 0.0116 | 0.145 | 0.145 | 0.0116 | 0.0116   | 0.145    | 0.26  | 0.52             |
| 0             | 0.0029 | 0.0029 | 0.02  | 0.0116 | 0.145 | 0.145 | 0.0116 | 0.0116   | 0.145    | 0.26  | 0.52             |
| 10            | 0.0029 | 0.0029 | 0.015 | 0.0116 | 0.145 | 0.145 | 0.0116 | 0.0116   | 0.145    | 0.26  | 0.52             |

|     |        |        |       |        |       |       |        |        |       |      |      |
|-----|--------|--------|-------|--------|-------|-------|--------|--------|-------|------|------|
| 20  | 0.0029 | 0.0029 | 0.015 | 0.0116 | 0.145 | 0.145 | 0.0116 | 0.0116 | 0.145 | 0.26 | 0.52 |
| 30  | 0.0029 | 0.0029 | 0.015 | 0.0116 | 0.145 | 0.145 | 0.0116 | 0.0116 | 0.145 | 0.26 | 0.52 |
| 40  | 0.0029 | 0.0029 | 0.015 | 0.0116 | 0.145 | 0.145 | 0.0116 | 0.0116 | 0.145 | 0.26 | 0.52 |
| 50  | 0.0029 | 0.0029 | 0.015 | 0.0116 | 0.145 | 0.145 | 0.0116 | 0.0116 | 0.145 | 0.26 | 0.52 |
| 60  | 0.0029 | 0.0029 | 0.015 | 0.0116 | 0.145 | 0.145 | 0.0116 | 0.0116 | 0.145 | 0.26 | 0.52 |
| 70  | 0.0029 | 0.0029 | 0.015 | 0.0116 | 0.145 | 0.145 | 0.0116 | 0.0116 | 0.145 | 0.26 | 0.52 |
| 80  | 0.0029 | 0.0029 | 0.015 | 0.0116 | 0.145 | 0.145 | 0.0116 | 0.0116 | 0.145 | 0.26 | 0.52 |
| 90  | 0.0029 | 0.0029 | 0.015 | 0.0116 | 0.145 | 0.145 | 0.0116 | 0.0116 | 0.145 | 0.26 | 0.52 |
| 100 | 0.0029 | 0.0029 | 0.015 | 0.0116 | 0.145 | 0.145 | 0.0116 | 0.0116 | 0.145 | 0.26 | 0.52 |
| 110 | 0.0029 | 0.0029 | 0.025 | 0.0116 | 0.145 | 0.145 | 0.023  | 0.0289 | 0.145 | 0.26 | 0.52 |
| 120 | 0.0029 | 0.0029 | 0.025 | 0.0116 | 0.145 | 0.145 | 0.023  | 0.0289 | 0.145 | 0.26 | 0.52 |
| 130 | 0.0029 | 0.0029 | 0.025 | 0.0116 | 0.145 | 0.145 | 0.023  | 0.0289 | 0.145 | 0.26 | 0.52 |
| 140 | 0.0029 | 0.0029 | 0.025 | 0.0116 | 0.145 | 0.145 | 0.023  | 0.0289 | 0.145 | 0.26 | 0.52 |
| 150 | 0.0029 | 0.0029 | 0.025 | 0.0116 | 0.145 | 0.145 | 0.023  | 0.0289 | 0.145 | 0.26 | 0.52 |
| 160 | 0.0029 | 0.0029 | 0.025 | 0.0116 | 0.145 | 0.145 | 0.023  | 0.0289 | 0.145 | 0.26 | 0.52 |
| 170 | 0.0029 | 0.0029 | 0.025 | 0.0116 | 0.145 | 0.145 | 0.023  | 0.0289 | 0.145 | 0.26 | 0.52 |
| 180 | 0.0029 | 0.0029 | 0.025 | 0.0116 | 0.145 | 0.145 | 0.023  | 0.0289 | 0.145 | 0.26 | 0.52 |
| 190 | 0.0029 | 0.0029 | 0.025 | 0.0116 | 0.145 | 0.145 | 0.023  | 0.0289 | 0.145 | 0.26 | 0.52 |
| 200 | 0.0029 | 0.0029 | 0.025 | 0.0116 | 0.145 | 0.145 | 0.023  | 0.0289 | 0.145 | 0.26 | 0.52 |
| 210 | 0.0029 | 0.0029 | 0.025 | 0.0116 | 0.145 | 0.145 | 0.023  | 0.0289 | 0.145 | 0.26 | 0.52 |
| 220 | 0.0029 | 0.0029 | 0.025 | 0.0116 | 0.145 | 0.145 | 0.023  | 0.0289 | 0.145 | 0.26 | 0.52 |
| 230 | 0.0029 | 0.0029 | 0.025 | 0.0116 | 0.145 | 0.145 | 0.023  | 0.0289 | 0.145 | 0.26 | 0.52 |
| 240 | 0.0029 | 0.0029 | 0.025 | 0.0116 | 0.145 | 0.145 | 0.023  | 0.0289 | 0.145 | 0.26 | 0.52 |
| 250 | 0.0029 | 0.0029 | 0.025 | 0.0116 | 0.145 | 0.145 | 0.023  | 0.0289 | 0.145 | 0.26 | 0.52 |
| 260 | 0.0029 | 0.0029 | 0.025 | 0.0116 | 0.145 | 0.145 | 0.023  | 0.0289 | 0.145 | 0.26 | 0.52 |
| 270 | 0.0029 | 0.0029 | 0.025 | 0.0116 | 0.145 | 0.145 | 0.023  | 0.0289 | 0.145 | 0.26 | 0.52 |
| 280 | 0.0029 | 0.0029 | 0.025 | 0.0116 | 0.145 | 0.145 | 0.023  | 0.0289 | 0.145 | 0.26 | 0.52 |
| 290 | 0.0029 | 0.0029 | 0.025 | 0.0116 | 0.145 | 0.145 | 0.023  | 0.0289 | 0.145 | 0.26 | 0.52 |
| 300 | 0.0029 | 0.0029 | 0.025 | 0.0116 | 0.145 | 0.145 | 0.023  | 0.0289 | 0.145 | 0.26 | 0.52 |

根据表 5~表 10 的测量不确定度评定结果，校准和测量能力可采用分段单一绝对值的形式表示，实验室申请认可的能力范围如下表所示。

表 11 申请认可的校准能力范围

| 测量仪器名称         | 校准<br>参量 | 规范代号(含年号)<br>名称                     | 测量范围          |            | 扩展不确定度(校准和<br>测量能力, k=2) |
|----------------|----------|-------------------------------------|---------------|------------|--------------------------|
|                |          |                                     |               |            |                          |
| 工作用玻璃液体<br>温度计 | 温度       | JJG130-2011<br>《工作用玻璃液体<br>温度计检定规程》 | 分度值 0.1℃、0.2℃ | (-30~100)℃ | $U=0.06^{\circ}\text{C}$ |
|                |          |                                     |               | (100~300)℃ | $U=0.1^{\circ}\text{C}$  |
|                |          |                                     | 分度值 0.5℃      | (-30~100)℃ | $U=0.08^{\circ}\text{C}$ |
|                |          |                                     |               | (100~300)℃ | $U=0.12^{\circ}\text{C}$ |
|                |          |                                     | 分度值 1℃        | (-30~100)℃ | $U=0.12^{\circ}\text{C}$ |
|                |          |                                     |               | (100~300)℃ | $U=0.14^{\circ}\text{C}$ |
|                |          |                                     | 分度值 2℃        | (-30~300)℃ | $U=0.22^{\circ}\text{C}$ |
|                |          |                                     | 分度值 5℃        | (-30~300)℃ | $U=0.52^{\circ}\text{C}$ |



## 附件 H

### 工作用廉金属热电偶校准结果的 CMC 评定：温度

#### H1 概述

##### H1.1 测量依据

依据 JJG351-1996《工作用廉金属热电偶检定规程》工作用廉金属热电偶。

##### H1.2 被测对象

被校对象为 II 级廉金属热电偶，不同型号的温度范围如下表所示：

表 1 被测热电偶的分类

| 类型        | II 级廉金属热电偶 |          |         |         |
|-----------|------------|----------|---------|---------|
| 型号        | K 型        | N 型      | E 型     | J 型     |
| 温度范围 (°C) | 300~1100   | 300~1100 | 300~900 | 300~750 |

##### H1.3 测量方法

热电偶测温的基本原理是热电效应。两种不同的导体两端接合组成回路，当两个接合点的温度不同时，会在回路内产生热电势，这一现象称为热电现象。

校准工作用廉金属热电偶时，将二等标准铂铑 10-铂热电偶与被校工作用廉金属热电偶捆扎成一束后一起置于检定炉中，用双极比较法进行校准。

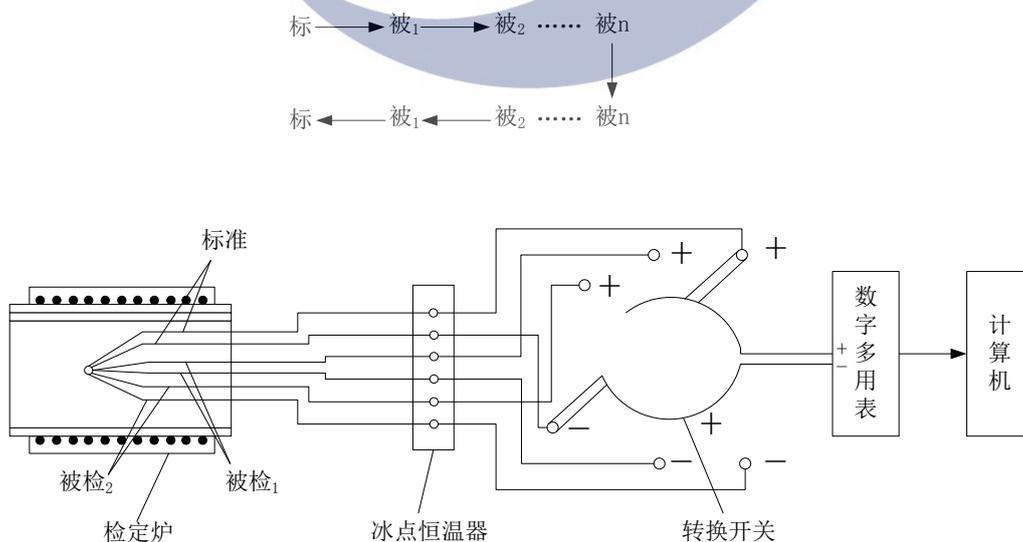


图 1 热电偶校准示意图

主要计量标准设备为二等标准铂铑 10-铂热电偶，测量范围 (300~1100) °C。相关设备及性能指标如下表所示。

表 1 实验室的计量标准器和配套设备

| 序号 | 设备名称              | 技术性能          |  |          |
|----|-------------------|---------------|--|----------|
|    |                   | 测量范围          |  | 准确度等级    |
| 1  | 二等标准铂铑<br>10-铂热电偶 | (300~1100) °C |  | 二等标准     |
| 2  | 检定炉               | 温度范围          | 任意两点温差   | 温度变化     |
|    |                   | (300~1200) °C | ≤1°C   | ≤±0.25°C |
| 3  | 数字多用表             | 测量范围          | 最大允许误差   |          |
|    |                   | (0~100)mV     | ±(50×10 <sup>-6</sup> ×测量值+35×量程<br>×10 <sup>-6</sup> )×10 <sup>3</sup> μV |          |
| 4  | 扫描开关              | 寄生电势          |  |          |
|    |                   | ≤0.4μV        |  |          |
| 5  | 冰点恒温器             | 最大允许温差        |  |          |
|    |                   | ±0.1°C        |  |          |

## H2 测量模型及不确定度来源分析

### H2.1 测量模型

根据检定规程,用双极比较法校准热电偶时被检热电偶在各固定点上的热电势为 $e_{\text{被}}(t)$ ,其计算公式为:

$$e_{\text{被}}(t) = \overline{e_{\text{被}}(t)} + \frac{e_{\text{标}}(t) - \overline{e_{\text{标}}(t)}}{S_{\text{标}}(t)} S_{\text{被}}(t)$$

式中:

$e_{\text{被}}(t)$ ——被测热电偶在校准温度点 $t$ 时的热电动势;

$\overline{e_{\text{被}}(t)}$ ——被测热电偶在校准点 $t$ 时的热电动势算术平均值;

$e_{\text{标}}(t)$ ——标准热电偶证书上在校准点 $t$ 时的热电动势值;

$\overline{e_{\text{标}}(t)}$ ——标准热电偶在校准点 $t$ 时的热电动势算术平均值;

$S_{\text{标}}(t)$ 、 $S_{\text{被}}(t)$ ——标准、被测热电偶在校准点温度 $t$ 的微分热电动势。

### H2.2 不确定度传播率

$$u_c^2(e_{\text{被}}(t)) = c_1^2 u^2(\overline{e_{\text{被}}(t)}) + c_2^2 u^2(e_{\text{标}}(t)) + c_3^2 u^2(\overline{e_{\text{标}}(t)})$$

式中灵敏度系数分别为:

$$c_1 = \frac{\partial e_{\text{被}}(t)}{\partial \overline{e_{\text{被}}(t)}}; \quad c_2 = \frac{\partial e_{\text{被}}(t)}{\partial e_{\text{标}}(t)} = \frac{S_{\text{被}}(t)}{S_{\text{标}}(t)}; \quad c_3 = \frac{\partial e_{\text{被}}(t)}{\partial \overline{e_{\text{标}}(t)}} = \frac{S_{\text{被}}(t)}{S_{\text{标}}(t)}。$$

当  $t=1000^{\circ}\text{C}$  时,  $c_1=1$ ;  $c_2=3.35$ ;  $c_3=3.35$

### H2.3 不确定度来源

热电偶校准的不确定度评估包括四个方面:

- 1、标准热电偶自身引入的不确定度:
  - 1) 标准热电偶校准证书引入的不确定度;
  - 2) 标准热电偶年漂移量引入的不确定度;
- 2、测量标准热电偶引入的不确定度:
  - 1) 标准热电偶热电动势测量值引入的不确定度;
  - 2) 数字多用表分辨力引入的不确定度;
  - 3) 扫描开关寄生电势引入的不确定度;
  - 4) 标准热电偶参考端温度变化引入的不确定度;
  - 5) 标准热电偶测量重复性引入的不确定度;
- 3、被测热电偶引入的不确定度:
  - 1) 被测热电偶热电动势测量值引入的不确定度;
  - 2) 数字多用表分辨力引入的不确定度;
  - 3) 扫描开关寄生电势引入的不确定度;
  - 4) 被测热电偶参考端温度变化引入的不确定度;
  - 5) 被测热电偶测量重复性引入的不确定度;
  - 6) 检定炉炉温变化引入的不确定度;
  - 7) 检定炉温场不均匀性引入的不确定度;
- 4、其他一些要考虑的因素:
  - 1) 被测热电偶补偿导线引入的不确定度;
  - 2) 被测热电偶不均匀性引入的不确定度。

### H3 标准不确定度评定

以 II 级工作用镍铬硅-镍硅热电偶 (N 型) 校准为例, 分析  $1000^{\circ}\text{C}$  校准点的测量不确定度。为后续计算方便, 标准不确定度均转换为电压值。

#### H3.1 标准热电偶自身引入的不确定度评定 $u_{e_{\text{ref}}}(t)$

##### H3.1.1 由标准热电偶校准证书引入的不确定度 $u_1$

采用 B 类方法评定。标准热电偶的检定证书给出,  $1000^{\circ}\text{C}$  时, 其扩展不确定度为:  $U=0.6^{\circ}\text{C}$  ( $k=2$ ), 由此引入的标准不确定度为:

$$u_1 = \frac{U \times S_{1000^{\circ}\text{C}}}{k} = \frac{0.6^{\circ}\text{C} \times 11.54 \mu\text{V} / ^{\circ}\text{C}}{2} = 3.5 \mu\text{V}$$

式中：

$S_{1000^{\circ}\text{C}}$ ——标准热电偶在  $1000^{\circ}\text{C}$  点的电压灵敏度，查表可得  $S_{1000^{\circ}\text{C}}=11.54\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$ ；

### H3.1.2 由标准热电偶年漂移量引入的不确定度 $u_2$

采用 B 类方法评定。根据标准热电偶前 5 次检定证书的校准结果，标准热电偶的漂移估计在  $(0\sim 4)\mu\text{V}$  之间，取其半宽区间，按均匀分布，取  $k=\sqrt{3}$  可得：

$$u_2 = \frac{2\mu\text{V}}{\sqrt{3}} = 1.2\mu\text{V}$$

## H3.2 测量标准热电偶引入的不确定度评定 $u_{e_{\text{ref}}(t)}$

### H3.2.1 标准热电偶热电动势测量值引入的不确定度 $u_3$

采用 B 类方法评定。采用的数字电压表为 KEITHLEY2000,根据其使用说明书，以每年检定一次计算，最大示值误差为  $\pm(50\times 10^{-6}\times\text{测量值}+35\times 100\times 10^{-6})\times 10^3\mu\text{V}$ ,测量值取标准热电偶在  $1000^{\circ}\text{C}$  的热电动势值，取其半宽区间，按均匀分布，取  $k=\sqrt{3}$  可得：

$$u_3 = \frac{50\times 10^{-6}\times 9.587 + 35\times 10^{-4}}{\sqrt{3}} \times 10^3\mu\text{V} = 2.3\mu\text{V}$$

### H3.2.2 数字多用表分辨力引入的不确定度 $u_4$

采用 B 类方法评定。校准工作用廉金属热电偶采用的数字电压表为 KEITHLEY2000,根据其使用说明书，分辨力为  $0.1\mu\text{V}$ ，取其半宽区间，按均匀分布，取  $k=\sqrt{3}$  可得：

$$u_4 = \frac{0.05\mu\text{V}}{\sqrt{3}} = 0.03\mu\text{V}$$

### H3.2.3 扫描开关寄生电势引入的不确定度 $u_5$

采用 B 类方法评定。扫描开关最大寄生电势为  $0.4\mu\text{V}$ ，取其半宽区间，按均匀分布，取  $k=\sqrt{3}$  可得：

$$u_5 = \frac{0.2\mu\text{V}}{\sqrt{3}} = 0.12\mu\text{V}$$

### H3.2.4 标准热电偶参考端温度变化引入的不确定度 $u_6$

采用 B 类方法评定。根据规程要求，标准热电偶参考端使用恒温器，冰点恒温器内温度为  $(0 \pm 0.1)^\circ\text{C}$ ，取其半宽区间，按均匀分布，取  $k = \sqrt{3}$  可得：

$$u_6 = \frac{0.1^\circ\text{C} \times S_{0^\circ\text{C}}}{\sqrt{3}} = \frac{0.1^\circ\text{C} \times 5.4 \mu\text{V}/^\circ\text{C}}{\sqrt{3}} = 0.3 \mu\text{V}$$

式中：

$S_{0^\circ\text{C}}$ ——标准热电偶在  $0^\circ\text{C}$  点的电压灵敏度，查表可得  $S_{0^\circ\text{C}} = 5.4 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ ；

### H3.2.5 标准热电偶测量重复性引入的不确定度 $u_7$

采用 A 类方法评定。每组测量 4 次，并进行 10 组测量，重复性数据见表 3。

表 3 标准热电偶重复性测量数据（单位：mV）

| 序号                                  | 1      | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      | 7      | 8      | 9      | 10     |
|-------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| $e_{1000^\circ\text{C}}$            | 9.5878 | 9.5875 | 9.5876 | 9.5878 | 9.5878 | 9.5890 | 9.5886 | 9.5885 | 9.5889 | 9.5883 |
| $e_{1000^\circ\text{C}}$            | 9.5879 | 9.5877 | 9.5878 | 9.5876 | 9.5886 | 9.5880 | 9.5883 | 9.5887 | 9.5888 | 9.5889 |
| $e_{1000^\circ\text{C}}$            | 9.5875 | 9.5878 | 9.5877 | 9.5886 | 9.5880 | 9.5885 | 9.5877 | 9.5881 | 9.5881 | 9.5883 |
| $e_{1000^\circ\text{C}}$            | 9.5881 | 9.5879 | 9.5878 | 9.5878 | 9.5883 | 9.5890 | 9.5896 | 9.5883 | 9.5882 | 9.5887 |
| $\overline{e_{1000^\circ\text{C}}}$ | 9.5878 | 9.5877 | 9.5877 | 9.5880 | 9.5882 | 9.5886 | 9.5886 | 9.5884 | 9.5885 | 9.5886 |

计算合并样品标准差：

$$s_p(x_k) = \sqrt{\frac{1}{m(n-1)} \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^n (x_{jk} - \bar{x}_j)^2} = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{j=1}^m s_j^2(x_k)}$$

实际测量以四次测量算术平均值作为测量结果：

$$u_7 = s(\bar{x}) = \frac{s_p(x_k)}{\sqrt{n}} = 0.18 \mu\text{V}$$

其中， $m=10$ （共 10 组）， $n=4$ （每组测量 4 次）

### H3.3 测量被测热电偶引入的不确定度评定 $\overline{ue}_{\text{被}}(t)$

#### H3.3.1 被测热电偶热电动势测量值引入的不确定度 $u_8$

采用 B 类方法评定。采用的数字电压表为 KEITHLEY2000，根据其使用说明书，以每年检定一次计算，最大示值误差为  $\pm(50 \times 10^{-6} \times \text{测量值} + 35 \times 100 \times 10^{-6}) \times 10^3 \mu\text{V}$ ，测量值取被测热电偶在  $1000^\circ\text{C}$  的热电动势值，取其半宽区间，按均匀分布，取  $k = \sqrt{3}$  可得：

$$u_8 = \frac{50 \times 10^{-6} \times 36.256 + 35 \times 10^{-4}}{\sqrt{3}} \times 10^3 \mu V = 3.1 \mu V$$

### H3.3.2 数字多用表分辨力引入的不确定度 $u_9$

采用 B 类方法评定。校准工作用廉金属热电偶采用的数字电压表为 KEITHLEY2000, 根据其使用说明书, 分辨力为  $0.1 \mu V$ , 取其半宽区间, 按均匀分布, 取  $k = \sqrt{3}$  可得:

$$u_9 = \frac{0.05 \mu V}{\sqrt{3}} = 0.03 \mu V$$

### H3.3.3 扫描开关寄生电势引入的不确定度 $u_{10}$

采用 B 类方法评定。扫描开关最大寄生电势为  $0.4 \mu V$ , 取其半宽区间, 按均匀分布, 取  $k = \sqrt{3}$  可得:

$$u_{10} = \frac{0.2 \mu V}{\sqrt{3}} = 0.12 \mu V$$

### H3.3.4 被测热电偶参考端温度变化引入的不确定度 $u_{11}$

采用 B 类方法评定。根据规程要求, 被测热电偶参考端使用恒温器, 冰点恒温器内温度为  $(0 \pm 0.1) ^\circ C$ , 取其半宽区间, 按均匀分布, 取  $k = \sqrt{3}$  可得:

$$u_{11} = \frac{0.1 ^\circ C \times S'_{0^\circ C}}{\sqrt{3}} = \frac{0.1 ^\circ C \times 26.16 \mu V / ^\circ C}{\sqrt{3}} = 1.5 \mu V$$

式中:

$S'_{0^\circ C}$  —— 被测热电偶在  $0^\circ C$  点的电压灵敏度, 查表可得  $S'_{0^\circ C} = 26.16 \mu V / ^\circ C$ 。

### H3.3.5 被测热电偶测量重复性引入的不确定度 $u_{12}$

采用 A 类方法评定。每组测量 4 次, 并进行 10 组测量, 重复性数据见表 4。

表 4 被测热电偶重复性测量数据 (单位: mV)

| 序号                 | 1       | 2       | 3       | 4       | 5       | 6       | 7       | 8       | 9       | 10      |
|--------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| $e_{1000^\circ C}$ | 36.1825 | 36.1815 | 36.1808 | 36.1820 | 36.1822 | 36.1854 | 36.1828 | 36.1848 | 36.1847 | 36.1858 |
| $e_{1000^\circ C}$ | 36.1825 | 36.1806 | 36.1808 | 36.1812 | 36.1821 | 36.1845 | 36.1826 | 36.1849 | 36.1849 | 36.1856 |
| $e_{1000^\circ C}$ | 36.1820 | 36.1824 | 36.1809 | 36.1804 | 36.1817 | 36.1844 | 36.1821 | 36.1840 | 36.1843 | 36.1855 |

|                                       |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
|---------------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| $e_{1000^{\circ}\text{C}}$            | 36.1820 | 36.1823 | 36.1809 | 36.1806 | 36.1816 | 36.1844 | 36.1830 | 36.1843 | 36.1846 | 36.1856 |
| $\overline{e_{1000^{\circ}\text{C}}}$ | 36.1822 | 36.1817 | 36.1808 | 36.1810 | 36.1819 | 36.1847 | 36.1826 | 36.1845 | 36.1846 | 36.1856 |

计算合并样品标准差:

$$s_p(x_k) = \sqrt{\frac{1}{m(n-1)} \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^n (x_{jk} - \bar{x}_j)^2} = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{j=1}^m s_j^2(x_k)}$$

实际测量以四次测量算术平均值作为测量结果:

$$u_{12} = s(\bar{x}) = \frac{s_p(x_k)}{\sqrt{n}} = 0.2\mu\text{V}$$

其中,  $m=10$  (共 10 组),  $n=4$  (每组测量 4 次)

### H3.3.6 检定炉炉温变化引入的不确定度 $u_{13}$

采用 B 类方法评定。由于测量过程中标准和被检热电偶测量不能同时进行, 根据规程要求, 在各分度点的测量过程中, 炉温变化不大于  $\pm 0.25^{\circ}\text{C}$ , 取其半宽区间, 按反正弦分布, 取  $k=\sqrt{2}$  可得:

$$u_{13} = \frac{0.25^{\circ}\text{C} \times S'_{1000^{\circ}\text{C}}}{\sqrt{2}} = \frac{0.25^{\circ}\text{C} \times 38.61\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}}{\sqrt{2}} = 6.8\mu\text{V}$$

式中:

$S'_{1000^{\circ}\text{C}}$ ——被测热电偶在  $1000^{\circ}\text{C}$  点的电压灵敏度, 查表可得  $S'_{1000^{\circ}\text{C}}=38.61\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$ 。

### H3.3.7 检定炉温场不均匀性引入的不确定度 $u_{14}$

采用 B 类方法评定。由于检定炉内温场存在不均匀性, 导致标准和被检热电偶测量温度有差异, 根据规程要求, 在检定温度区域内, 任意两点温差为  $1^{\circ}\text{C}$ , 取其半宽区间, 按均匀分布, 取  $k=\sqrt{3}$  可得:

$$u_{14} = \frac{0.5^{\circ}\text{C} \times S'_{1000^{\circ}\text{C}}}{\sqrt{3}} = \frac{38.61\mu\text{V}/^{\circ}\text{C} \times 0.5^{\circ}\text{C}}{\sqrt{3}} = 11.2\mu\text{V}$$

式中:

$S'_{1000^{\circ}\text{C}}$ ——被测热电偶在  $1000^{\circ}\text{C}$  点的电压灵敏度, 查表可得  $S'_{1000^{\circ}\text{C}}=38.61\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$ 。

## H3.4 其他一些因素引入的不确定度评定 (在本例中不考虑)

### H3.4.1 被测热电偶补偿导线引入的不确定度 $u_{15}$

采用 B 类方法评定。如果热电偶使用了补偿导线，还应该考虑补偿导线引入的不确定度。补偿导线规程要求允许误差范围为 $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ ，按均匀分布，取 $k=\sqrt{3}$ 可得：

$$u_{15} = \frac{0.2^{\circ}\text{C} \times S'_{1000^{\circ}\text{C}}}{\sqrt{3}} = \frac{0.2^{\circ}\text{C} \times 38.61 \mu\text{V}/^{\circ}\text{C}}{\sqrt{3}} = 4.46 \mu\text{V}$$

$S'_{1000^{\circ}\text{C}}$ ——被测热电偶在 $1000^{\circ}\text{C}$ 点的电压灵敏度，查表可得 $S'_{1000^{\circ}\text{C}}=38.61 \mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$

由于本次测量的被检热电偶未使用补偿导线，所以不考虑。

#### H3.4.2 被测热电偶不均匀性引入的不确定度 $u_{16}$

采用 B 类方法评定。按规程要求，检定过程中热电偶插入检定炉内的深度只有 $300\text{mm}$ ，当热电偶较长时，如果热电偶是完全均匀的，那么依据均质回路定则，测量结果与长度无关。然而，热电偶丝并非均质，处于温度梯度的场合，那么其局部将产生寄生电势。对该不确定度分量按特定类型热电偶最大允许误差的 $20\%$ 来评估，II级N型热电偶 $1000^{\circ}\text{C}$ 时允许误差为 $\pm 7.5^{\circ}\text{C}$ ，按均匀分布，取 $k=\sqrt{3}$ 可得：

$$u_{16} = \frac{7.5^{\circ}\text{C} \times 0.2 \times S'_{1000^{\circ}\text{C}}}{\sqrt{3}} = \frac{7.5^{\circ}\text{C} \times 0.2 \times 38.61 \mu\text{V}/^{\circ}\text{C}}{\sqrt{3}} = 33.4 \mu\text{V}$$

$S'_{1000^{\circ}\text{C}}$ ——被测热电偶在 $1000^{\circ}\text{C}$ 点的电压灵敏度，查表可得 $S'_{1000^{\circ}\text{C}}=38.61 \mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$

由于本次测量的被检热电偶长度合适，所以不考虑。

### H4 合成标准不确定度及扩展不确定度

#### H4.1 不确定度分量汇总

表 5 不确定度分量一览表

| 标准不确定度分量                      | 不确定度来源 | 标准不确定度              | $c_i$              | $ c_i u(x_i)$ |                    |
|-------------------------------|--------|---------------------|--------------------|---------------|--------------------|
| $ue_{\text{标}}(t)$            | $u_1$  | 标准热电偶校准证书引入的不确定度    | $3.5 \mu\text{V}$  | 3.35          | $11.7 \mu\text{V}$ |
|                               | $u_2$  | 标准热电偶年漂移量引入的不确定度    | $1.2 \mu\text{V}$  | 3.35          | $4.0 \mu\text{V}$  |
| $\overline{ue_{\text{标}}(t)}$ | $u_3$  | 标准热电偶热电动势测量值引入的不确定度 | $2.3 \mu\text{V}$  | -3.35         | $7.7 \mu\text{V}$  |
|                               | $u_4$  | 数字多用表分辨力引入的不确定度     | $0.03 \mu\text{V}$ | -3.35         | $0.1 \mu\text{V}$  |

|                |          |                     |              |       |              |
|----------------|----------|---------------------|--------------|-------|--------------|
|                | $u_5$    | 扫描开关寄生电势引入的不确定度     | 0.12 $\mu$ V | -3.35 | 0.4 $\mu$ V  |
|                | $u_6$    | 标准热电偶参考端温度变化引入的不确定度 | 0.3 $\mu$ V  | -3.35 | 1.0 $\mu$ V  |
|                | $u_7$    | 标准热电偶测量重复性引入的不确定度   | 0.18 $\mu$ V | -3.35 | 0.6 $\mu$ V  |
| $u_{e_{被}(t)}$ | $u_8$    | 被测热电偶热电动势测量值引入的不确定度 | 3.1 $\mu$ V  | 1     | 3.1 $\mu$ V  |
|                | $u_9$    | 数字多用表分辨力引入的不确定度     | 0.03 $\mu$ V | 1     | 0.03 $\mu$ V |
|                | $u_{10}$ | 扫描开关寄生电势引入的不确定度     | 0.12 $\mu$ V | 1     | 0.12 $\mu$ V |
|                | $u_{11}$ | 被测热电偶参考端温度变化引入的不确定度 | 1.5 $\mu$ V  | 1     | 1.5 $\mu$ V  |
|                | $u_{12}$ | 被测热电偶测量重复性引入的不确定度   | 0.2 $\mu$ V  | 1     | 0.2 $\mu$ V  |
|                | $u_{13}$ | 检定炉炉温变化引入的不确定度      | 6.8 $\mu$ V  | 1     | 6.8 $\mu$ V  |
|                | $u_{14}$ | 检定炉温场不均匀性引入的不确定度    | 11.2 $\mu$ V | 1     | 11.2 $\mu$ V |

#### H4.2 合成标准不确定度

根据读数分辨力引入的不确定度及重复测量引入的不确定度二者取大者的原则，为避免重复计算，在进行合成标准不确定度时，取两项中的最大影响量。故舍去  $u_4$  和  $u_9$ 。

由于  $u_3$  和  $u_8$  是用同一台数字多用表进行测量，短时间内数字多用表系统误差是稳定的，所以  $u_3$  和  $u_8$  是正强相关（即相关系数为+1），其余各项标准不确定度分量是互不相关的，所以合成标准不确定度为：

$$u_c = \sqrt{c_1^2(u_1^2 + u_2^2) + c_2^2(u_3^2 + u_5^2 + u_6^2 + u_7^2) + c_3(u_8^2 + u_{10}^2 + u_{11}^2 + u_{12}^2 + u_{13}^2 + u_{14}^2) + 2c_2c_3u_3u_8}$$

可得：

$$u_c = 19.7\mu\text{V} \quad (1000^\circ\text{C})$$

换算为温度可得：

$$u_c = \frac{19.7\mu\text{V}}{S'_{1000^\circ\text{C}}} = \frac{19.7\mu\text{V}}{38.61\mu\text{V}/^\circ\text{C}} = 0.52^\circ\text{C} \quad (1000^\circ\text{C})$$

式中：

$S'_{1000^\circ\text{C}}$  —— 被测热电偶在 1000 $^\circ\text{C}$  点的电压灵敏度，查表可得  $S'_{1000^\circ\text{C}} = 38.61\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ 。

### H4.3 扩展不确定度

包含因子  $k$  取 2，扩展不确定度为：

$$U = k \times u_c = 1.1^\circ\text{C} \quad (1000^\circ\text{C})$$

### H5 申请认可的校准和测量能力

根据检定规程，常规校准多在整百度进行校准。N 型、K 型、E 型、J 型廉金属热电偶的不确定度评定分别见表 6、表 7、表 8、表 9。

表 6 II 级工作用 N 型廉金属热电偶测量不确定度评估

| 校准点<br>(°C) | 不确定度分量 ( $\mu\text{V}$ ) |       |       |       |       |       |       |          |          |          |          |          | $u_c$<br>(°C) | $U$ (°C)<br>( $k=2$ ) |
|-------------|--------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|----------|----------|----------|----------|---------------|-----------------------|
|             | $u_1$                    | $u_2$ | $u_3$ | $u_5$ | $u_6$ | $u_7$ | $u_8$ | $u_{10}$ | $u_{11}$ | $u_{12}$ | $u_{13}$ | $u_{14}$ |               |                       |
| 300         | 5.5                      | 1.2   | 2.2   | 0.12  | 0.3   | 0.24  | 2.3   | 0.12     | 1.5      | 0.30     | 6.3      | 10.3     | 0.76          | 1.6                   |
| 400         | 3.4                      | 1.2   | 2.2   | 0.12  | 0.3   | 0.24  | 2.4   | 0.12     | 1.5      | 0.30     | 6.6      | 10.7     | 0.57          | 1.2                   |
| 500         | 3.0                      | 1.2   | 2.2   | 0.12  | 0.3   | 0.24  | 2.5   | 0.12     | 1.5      | 0.28     | 6.8      | 11.1     | 0.53          | 1.1                   |
| 600         | 3.1                      | 1.2   | 2.2   | 0.12  | 0.3   | 0.23  | 2.6   | 0.12     | 1.5      | 0.28     | 6.9      | 11.3     | 0.53          | 1.1                   |
| 700         | 3.2                      | 1.2   | 2.3   | 0.12  | 0.3   | 0.23  | 2.8   | 0.12     | 1.5      | 0.27     | 7.0      | 11.4     | 0.53          | 1.1                   |
| 800         | 3.3                      | 1.2   | 2.3   | 0.12  | 0.3   | 0.22  | 2.9   | 0.12     | 1.5      | 0.27     | 7.0      | 11.4     | 0.53          | 1.1                   |
| 900         | 3.4                      | 1.2   | 2.3   | 0.12  | 0.3   | 0.20  | 3.0   | 0.12     | 1.5      | 0.24     | 6.9      | 11.3     | 0.52          | 1.1                   |
| 1000        | 3.5                      | 1.2   | 2.3   | 0.12  | 0.3   | 0.18  | 3.1   | 0.12     | 1.5      | 0.20     | 6.8      | 11.2     | 0.52          | 1.1                   |
| 1100        | 3.6                      | 1.2   | 2.4   | 0.12  | 0.3   | 0.20  | 3.2   | 0.12     | 1.5      | 0.29     | 6.9      | 11.0     | 0.52          | 1.1                   |

表 7 II 级工作用 K 型廉金属热电偶测量不确定度评估

| 校准点<br>(°C) | 不确定度分量 ( $\mu\text{V}$ ) |       |       |       |       |       |       |          |          |          |          |          | $u_c$<br>(°C) | $U$ (°C)<br>( $k=2$ ) |
|-------------|--------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|----------|----------|----------|----------|---------------|-----------------------|
|             | $u_1$                    | $u_2$ | $u_3$ | $u_5$ | $u_6$ | $u_7$ | $u_8$ | $u_{10}$ | $u_{11}$ | $u_{12}$ | $u_{13}$ | $u_{14}$ |               |                       |
| 300         | 5.5                      | 1.2   | 2.2   | 0.12  | 0.3   | 0.30  | 3.3   | 0.12     | 2.3      | 0.32     | 7.3      | 12.0     | 0.79          | 1.6                   |
| 400         | 3.4                      | 1.2   | 2.2   | 0.12  | 0.3   | 0.31  | 3.4   | 0.12     | 2.3      | 0.30     | 7.4      | 12.2     | 0.60          | 1.2                   |
| 500         | 3.0                      | 1.2   | 2.2   | 0.12  | 0.3   | 0.29  | 3.5   | 0.12     | 2.3      | 0.30     | 7.5      | 12.3     | 0.57          | 1.2                   |
| 600         | 3.1                      | 1.2   | 2.2   | 0.12  | 0.3   | 0.29  | 3.6   | 0.12     | 2.3      | 0.30     | 7.5      | 12.3     | 0.57          | 1.2                   |
| 700         | 3.2                      | 1.2   | 2.3   | 0.12  | 0.3   | 0.26  | 3.7   | 0.12     | 2.3      | 0.26     | 7.4      | 12.1     | 0.56          | 1.2                   |
| 800         | 3.3                      | 1.2   | 2.3   | 0.12  | 0.3   | 0.26  | 3.8   | 0.12     | 2.3      | 0.25     | 7.2      | 11.8     | 0.56          | 1.2                   |
| 900         | 3.4                      | 1.2   | 2.3   | 0.12  | 0.3   | 0.23  | 4.0   | 0.12     | 2.3      | 0.23     | 7.0      | 11.6     | 0.56          | 1.2                   |
| 1000        | 3.5                      | 1.2   | 2.3   | 0.12  | 0.3   | 0.23  | 4.0   | 0.12     | 2.3      | 0.23     | 6.9      | 11.3     | 0.55          | 1.1                   |
| 1100        | 3.6                      | 1.2   | 2.4   | 0.12  | 0.3   | 0.23  | 4.1   | 0.12     | 2.3      | 0.25     | 6.6      | 10.9     | 0.55          | 1.1                   |

表 8 II 级工作用 E 型廉金属热电偶测量不确定度评估

| 校准点<br>(°C) | 不确定度分量 ( $\mu\text{V}$ ) |       |       |       |       |       |       |          |          |          |          |          | $u_c$<br>(°C) | $U$ (°C)<br>( $k=2$ ) |
|-------------|--------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|----------|----------|----------|----------|---------------|-----------------------|
|             | $u_1$                    | $u_2$ | $u_3$ | $u_5$ | $u_6$ | $u_7$ | $u_8$ | $u_{10}$ | $u_{11}$ | $u_{12}$ | $u_{13}$ | $u_{14}$ |               |                       |
| 300         | 5.5                      | 1.2   | 2.2   | 0.12  | 0.3   | 0.28  | 3.5   | 0.12     | 3.4      | 0.32     | 13.8     | 22.5     | 0.79          | 1.6                   |
| 400         | 3.4                      | 1.2   | 2.2   | 0.12  | 0.3   | 0.28  | 3.7   | 0.12     | 3.4      | 0.29     | 14.2     | 23.1     | 0.60          | 1.2                   |
| 500         | 3.0                      | 1.2   | 2.2   | 0.12  | 0.3   | 0.27  | 4.0   | 0.12     | 3.4      | 0.30     | 14.3     | 23.4     | 0.57          | 1.2                   |
| 600         | 3.1                      | 1.2   | 2.2   | 0.12  | 0.3   | 0.23  | 4.2   | 0.12     | 3.4      | 0.30     | 14.3     | 23.3     | 0.57          | 1.2                   |
| 700         | 3.2                      | 1.2   | 2.3   | 0.12  | 0.3   | 0.23  | 4.4   | 0.12     | 3.4      | 0.27     | 14.1     | 23.1     | 0.56          | 1.2                   |
| 800         | 3.3                      | 1.2   | 2.3   | 0.12  | 0.3   | 0.25  | 4.7   | 0.12     | 3.4      | 0.26     | 13.9     | 22.7     | 0.56          | 1.2                   |
| 900         | 3.4                      | 1.2   | 2.3   | 0.12  | 0.3   | 0.25  | 4.9   | 0.12     | 3.4      | 0.27     | 13.6     | 22.2     | 0.55          | 1.1                   |

表 9 II 级工作用 J 型廉金属热电偶测量不确定度评估

| 校准点<br>(°C) | 不确定度分量 ( $\mu\text{V}$ ) |       |       |       |       |       |       |          |          |          |          |          | $u_c$<br>(°C) | $U$ (°C)<br>( $k=2$ ) |
|-------------|--------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|----------|----------|----------|----------|---------------|-----------------------|
|             | $u_1$                    | $u_2$ | $u_3$ | $u_5$ | $u_6$ | $u_7$ | $u_8$ | $u_{10}$ | $u_{11}$ | $u_{12}$ | $u_{13}$ | $u_{14}$ |               |                       |
| 300         | 5.5                      | 1.2   | 2.2   | 0.12  | 0.3   | 0.27  | 3.4   | 0.12     | 2.9      | 0.31     | 9.8      | 16.0     | 0.79          | 1.6                   |
| 400         | 3.4                      | 1.2   | 2.2   | 0.12  | 0.3   | 0.29  | 3.5   | 0.12     | 2.9      | 0.30     | 9.8      | 16.0     | 0.60          | 1.2                   |
| 500         | 3.0                      | 1.2   | 2.2   | 0.12  | 0.3   | 0.32  | 3.7   | 0.12     | 2.9      | 0.29     | 9.9      | 16.2     | 0.57          | 1.2                   |
| 600         | 3.1                      | 1.2   | 2.2   | 0.12  | 0.3   | 0.22  | 3.9   | 0.12     | 2.9      | 0.27     | 10.4     | 16.9     | 0.57          | 1.2                   |
| 700         | 3.2                      | 1.2   | 2.3   | 0.12  | 0.3   | 0.20  | 4.0   | 0.12     | 2.9      | 0.26     | 11.0     | 18.0     | 0.56          | 1.2                   |

根据表 6、表 7、表 8、表 9 的测量不确定度评估结果，N 型、K 型、E 型、J 型廉金属热电偶的校准和测量能力如下表所示：

表 10 申请认可的校准能力范围

| 测量仪器名称    | 校准参量 | 规范代号(含年号)名称                  | 测量范围    |               | 扩展不确定度(校准和测量能力, $k=2$ ) |
|-----------|------|------------------------------|---------|---------------|-------------------------|
|           |      |                              |         |               |                         |
| 工作用廉金属热电偶 | 温度   | JJG351-1996<br>工作用廉金属热电偶检定规程 | N 型、K 型 | (300~1100) °C | $U=(1.6\sim 1.1)$ °C    |
|           |      |                              | E 型     | (300~900) °C  | $U=(1.6\sim 1.1)$ °C    |
|           |      |                              | J 型     | (300~700) °C  | $U=(1.6\sim 1.2)$ °C    |

## 附件 I

### 指针式仪表校准结果的 CMC 评定：电压、电流、电阻

#### I1 概述

##### I1.1 测量依据

依据 JJG124-2005《电流表、电压表、功率表及电阻表检定规程》校准 0.5 级指针式仪表。

##### I1.2 被测对象

被校对象 C19-V 及 T24-A 是目前使用量最大的指针式仪表，最大允差： $\pm 0.5\%$ 。

##### I1.3 测量方法及主要设备

校准采用直接测量法（标准源法），所使用的标准器的详细参数如表 1 所示。

表 1 实验室的计量标准器和配套设备

| 设备名称            | 技术性能                             |   |
|-----------------|----------------------------------|---|
|                 | 测量范围                             | 最大允许误差  |
| 多功能标准源<br>5520A | DCV: 10mV~1000V                  | $\pm(1.3 \times 10^{-5} \sim 1.2 \times 10^{-4})$ |
|                 | DCI: 10 $\mu$ A~2A               | $\pm(1.5 \times 10^{-4} \sim 2.2 \times 10^{-3})$ |
|                 | ACV: 10mV~1000V<br>(10Hz~500kHz) | $\pm(2.1 \times 10^{-4} \sim 9.0 \times 10^{-3})$ |
|                 | ACI: 1mA~20A<br>(10Hz~10kHz)     | $\pm(6.0 \times 10^{-4} \sim 3.0 \times 10^{-2})$ |
|                 | DCR: 1 $\Omega$ ~100M $\Omega$   | $\pm(3.0 \times 10^{-5} \sim 5.3 \times 10^{-4})$ |

#### I2 测量模型

$$\Delta = X_t - X_r \quad (1)$$

式中：

$X_t$ ——被检指针式仪表的指示值；

$X_r$ ——多功能标准源输出标准值；

$\Delta$ ——被检指针式仪表示值误差。

## I3 直流电压校准和测量能力评定

以 100V 量程 100V 校准点和 100V 量程 10V 校准点为例，分析其量程范围内的校准和测量能力。

### I3.1 评定 100V 量程 100V 校准点的测量不确定度

#### I3.1.1 多功能标准源 5520A 年误差引入的不确定度 $u(X_r)$

由多功能标准源 5520A 说明书可知，5520A 直流电压 100V 量程的技术指标为  $\pm(18 \times 10^{-6} \times \text{读数} + 150 \mu\text{V})$ ，置信概率为 95%， $k=2$ 。则多功能标准源 5520A 在校准 100V 时引入的不确定度：

$$u(X_r) = \frac{18 \times 10^{-6} \times 100\text{V} + 150 \mu\text{V}}{2} = \frac{2.0 \times 10^{-3} \text{V}}{2} = 1.0 \times 10^{-3} \text{V}$$

#### I3.1.2 被校表分辨力引入的标准不确定度 $u(X_i)$

被校指针表 C19-V 型共有 100 分格，其直流电压 100V 量程的分辨力按最小分度值的 1/5 计算，设为均匀分布，被校指针表分辨力引入的不确定度：

$$u(X_i) = \frac{0.2\text{V}}{2\sqrt{3}} = 5.77 \times 10^{-2} \text{V}$$

#### I3.1.3 测量重复性引入的标准不确定度 $u_A$

对被校测量点连续测量 10 次，得到一系列重复测量结果，见下表所示。用贝赛尔公式计算重复性引入的不确定度。

表 2 被校指针表 C19-V (100V 测试点) 重复性测量数据

|       |          |          |          |          |          |
|-------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 测量次数  | 1        | 2        | 3        | 4        | 5        |
| $X_i$ | 100.006V | 100.004V | 100.010V | 100.012V | 100.008V |
| 测量次数  | 6        | 7        | 8        | 9        | 10       |
| $X_i$ | 100.010V | 100.009V | 100.002V | 100.012V | 100.010V |

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^{10} X_i}{10} = 100.0081\text{V}; \quad s_n(X) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n-1}} = 3.3 \times 10^{-3} \text{V};$$

$$u_A = s_n(X) = 3.3 \times 10^{-3} \text{V}.$$

#### I3.1.4 各不确定度分量汇总表

各不确定度分量汇总表见下表所示。

表 3 不确定度分量汇总表 (100V 测试点)

| 不确定度分量   | 不确定度来源   | 不确定度                           |
|----------|----------|--------------------------------|
| $u(X_r)$ | 多能源引入    | $1.0 \times 10^{-3} \text{V}$  |
| $u(X_l)$ | 被检表分辨力引入 | $5.77 \times 10^{-2} \text{V}$ |
| $u_A$    | 重复性测量引入  | $3.3 \times 10^{-3} \text{V}$  |

### I3.1.5 合成标准不确定度 $u_c$

参照不确定度分量汇总表, 各分量不相关, 被校表分辨力引入的不确定度及重复测量引入的不确定度二者取大者的原则, 合成标准不确定度如下:

$$u_c = \sqrt{u^2(X_r) + u^2(X_l)} = 5.77 \times 10^{-2} \text{V}$$

### I3.1.6 扩展不确定度 $U$

取  $k=2$ , 扩展不确定度为:

$$U = ku_c = 2 \times 5.77 \times 10^{-2} \text{V} = 0.12 \text{V}$$

## I3.2 评定 100V 量程 10V 校准点测量不确定度

### I3.2.1 多功能标准源 5520A 年误差引入的不确定度 $u(X_r)$

由多功能标准源 5520A 说明书可知, 5520A 直流电压 100V 量程的技术指标为  $\pm(18 \times 10^{-6} \times \text{读数} + 150 \mu\text{V})$ , 置信概率为 95%,  $k=2$ 。则多功能标准源 5520A 在校准 10V 时引入的不确定度:

$$u(X_r) = \frac{18 \times 10^{-6} \times 10 \text{V} + 150 \mu\text{V}}{2} = \frac{3.0 \times 10^{-4} \text{V}}{2} = 1.5 \times 10^{-4} \text{V}$$

### I3.2.2 被校表分辨力引入的标准不确定度 $u(X_l)$

被校指针表的直流电压 100V 量程的分辨力按其最小分度值的 1/5 计算。由此引入的不确定度按 B 类评定, 设为均匀分布, 被校指针表分辨力引入的不确定度:

$$u(X_l) = \frac{0.2 \text{V}}{2\sqrt{3}} = 5.77 \times 10^{-2} \text{V}$$

### I3.2.3 测量重复性引入的标准不确定度 $u_A$

对被校测量点连续测量 10 次, 得到一系列重复测量结果, 见下表所示。用

贝赛尔公式计算重复性引入的不确定度。

表 4 被校指针表 C19-V (10V 测试点) 重复性测量数据

|       |          |          |         |          |          |
|-------|----------|----------|---------|----------|----------|
| 测量次数  | 1        | 2        | 3       | 4        | 5        |
| $X_i$ | 9.9998V  | 9.9997V  | 9.9990V | 10.0000V | 10.0005V |
| 测量次数  | 6        | 7        | 8       | 9        | 10       |
| $X_i$ | 10.0003V | 10.0010V | 9.9995V | 9.9990V  | 10.0003V |

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^{10} X_i}{10} = 9.99991\text{V}; \quad s_n(X) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n-1}} = 6.4 \times 10^{-4}\text{V};$$

$$u_A = s_n(X) = 6.4 \times 10^{-4}\text{V}。$$

### I3.2.4 各不确定度分量汇总表

各不确定度分量汇总表见下表所示。

表 5 不确定度分量汇总表 (10V 测试点)

| 不确定度分量   | 不确定度来源   | 不确定度                          |
|----------|----------|-------------------------------|
| $u(X_r)$ | 多能源引入    | $1.5 \times 10^{-4}\text{V}$  |
| $u(X_t)$ | 被检表分辨力引入 | $5.77 \times 10^{-2}\text{V}$ |
| $u_A$    | 重复性测量引入  | $6.4 \times 10^{-4}\text{V}$  |

### I3.2.5 合成标准不确定度 $u_c$

参照不确定度分量汇总表, 各分量不相关, 被校表分辨力引入的不确定度及重复测量引入的不确定度二者取大者的原则, 合成标准不确定度如下:

$$u_c = \sqrt{u^2(X_r) + u^2(X_t)} = 5.77 \times 10^{-2}\text{V}$$

### I3.2.6 扩展不确定度 $U$

取  $k=2$ , 扩展不确定度为

$$U = ku_c = 2 \times 5.77 \times 10^{-2}\text{V} = 0.12\text{V}$$

## I4 交流电流校准和测量能力分析

以 1A 量程 1A/1kHz 校准点和 1A 量程 0.1A/1kHz 校准点为例, 分析其量程范围内的校准和测量能力。

#### I4.1 评定 1A 量程 1A/1kHz 校准点的测量不确定度

##### I4.1.1 多功能标准源 5520A 年误差引入的不确定度 $u(X_r)$

由多功能标准源 5520A 说明书可知, 5520A 交流电流 1A 量程 1kHz 的技术指标为  $\pm(5 \times 10^{-4} \times \text{读数} + 100 \mu\text{A})$ , 置信概率为 95%,  $k=2$ 。则多功能标准源 5520A 在校准 1A/1kHz 点时引入的不确定度:

$$u(X_r) = \frac{5 \times 10^{-4} \times 1\text{A} + 100 \mu\text{A}}{2} = \frac{6 \times 10^{-4} \text{A}}{2} = 3.0 \times 10^{-4} \text{A}$$

##### I4.1.2 被校表分辨力引入的标准不确定度 $u(X_t)$

被校指针表 T24-A 型共有 100 分格, 其交流电流 1A 量程的分辨力按最小分度值的 1/5 计算。由此引入的不确定度按 B 类评定, 设为均匀分布, 被校指针表分辨力引入的不确定度:

$$u(X_t) = \frac{0.002\text{A}}{2\sqrt{3}} = 5.77 \times 10^{-4} \text{A}$$

##### I4.1.3 测量重复性引入的标准不确定度 $u_A$

对被校测量点连续测量 10 次, 得到一系列重复测量结果, 见下表所示。用贝赛尔公式计算重复性引入的不确定度。

表 6 被校指针表 T24-A (1A/1kHz 测试点) 重复性测量数据

|       |          |          |          |          |          |
|-------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 测量次数  | 1        | 2        | 3        | 4        | 5        |
| $X_i$ | 1.00038A | 1.00045A | 1.00030A | 1.00040A | 1.00032A |
| 测量次数  | 6        | 7        | 8        | 9        | 10       |
| $X_i$ | 1.00028A | 1.00042A | 1.00037A | 1.00034A | 1.00040A |

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^{10} X_i}{10} = 1.00037\text{A}; \quad s_n(X) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n-1}} = 5.5 \times 10^{-5} \text{A};$$

$$u_A = s_n(X) = 5.5 \times 10^{-5} \text{A}。$$

##### I4.1.4 各不确定度分量汇总表

各不确定度分量汇总表见下表所示。

表 7 不确定度分量汇总表 (1A/1kHz 测试点)

| 不确定度分量 | 不确定度来源 | 不确定度 |
|--------|--------|------|
|--------|--------|------|

|          |          |                                 |
|----------|----------|---------------------------------|
| $u(X_r)$ | 多能源引入    | $3.0 \times 10^{-4} \text{ A}$  |
| $u(X_t)$ | 被检表分辨力引入 | $5.77 \times 10^{-4} \text{ A}$ |
| $u_A$    | 重复性测量引入  | $5.5 \times 10^{-5} \text{ A}$  |

#### I4.1.5 合成标准不确定度 $u_c$

参照不确定度分量汇总表，各分量不相关，被校表分辨力引入的不确定度及重复测量引入的不确定度二者取大者的原则，合成标准不确定度如下：

$$u_c = \sqrt{u^2(X_r) + u^2(X_t)} = 6.5 \times 10^{-4} \text{ A}$$

#### I4.1.6 扩展不确定度 $U$

取  $k = 2$ ，扩展不确定度为：

$$U = k u_c = 2 \times 6.5 \times 10^{-4} \text{ A} = 1.3 \times 10^{-3} \text{ A}$$

### I4.2 评定 1A 量程 0.1A/1kHz 校准点的测量不确定度

#### I4.2.1 多功能标准源 5520A 年引入的不确定度 $u(X_r)$

由多功能标准源 5520A 说明书可知，5520A 交流电流 1A 量程 1kHz 的技术指标为  $\pm(5 \times 10^{-4} \times \text{读数} + 100 \mu\text{A})$ ，置信概率为 95%， $k=2$ 。则多功能标准源 5520A 在校准 0.1A/1kHz 点时引入的不确定度：

$$u(X_r) = \frac{5 \times 10^{-4} \times 0.1 \text{ A} + 100 \mu\text{A}}{2} = \frac{1.5 \times 10^{-4} \text{ A}}{2} = 7.5 \times 10^{-5} \text{ A}$$

#### I4.2.2 被校表分辨力引入的标准不确定度 $u(X_t)$

被校指针表 T24-A 型共有 100 分格，其交流电流 1A 量程的分辨力按最小分度值的 1/5 计算。由此引入的不确定度按 B 类评定，设为均匀分布，被校指针表分辨力引入的不确定度：

$$u(X_t) = \frac{0.002 \text{ A}}{2\sqrt{3}} = 5.77 \times 10^{-4} \text{ A}$$

#### I4.2.3 测量重复性引入的标准不确定度 $u_A$

对被校测量点连续测量 10 次，得到一系列重复测量结果，见下表所示。按 A 类评定，用贝赛尔公式计算重复性引入的不确定度。

表 8 被校指针表 T24-A (0.1A/1kHz 测试点) 重复性测量数据

|       |          |          |          |          |          |
|-------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 测量次数  | 1        | 2        | 3        | 4        | 5        |
| $X_i$ | 0.10005A | 0.10000A | 0.10010A | 0.10008A | 0.10015A |
| 测量次数  | 6        | 7        | 8        | 9        | 10       |
| $X_i$ | 0.10000A | 0.10010A | 0.10005A | 0.10012A | 0.10007A |

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^{10} X_i}{10} = 0.10007A; \quad s_n(X) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n-1}} = 4.9 \times 10^{-5} A;$$

$$u_A = s_n(X) = 4.9 \times 10^{-5} A。$$

#### I4.2.4 各不确定度分量汇总表

各不确定度分量汇总表见下表所示。

表 9 不确定度分量汇总表 (0.1A/1kHz 测试点)

| 不确定度分量   | 不确定度来源   | 不确定度                    |
|----------|----------|-------------------------|
| $u(X_r)$ | 多能源引入    | $7.5 \times 10^{-5} A$  |
| $u(X_t)$ | 被检表分辨力引入 | $5.77 \times 10^{-4} A$ |
| $u_A$    | 重复性测量引入  | $4.9 \times 10^{-5} A$  |

#### I4.2.5 合成标准不确定度 $u_c$

参照不确定度分量汇总表，各分量不相关，被校表分辨力引入的不确定度及重复测量引入的不确定度二者取大者的原则，合成标准不确定度如下：

$$u_c = \sqrt{u^2(X_r) + u^2(X_t)} = 5.8 \times 10^{-4} A$$

#### I4.2.6 扩展不确定度 $U$

取  $k=2$ ，扩展不确定度为：

$$U = ku_c = 2 \times 5.8 \times 10^{-4} A = 1.2 \times 10^{-3} A$$

### I5 指针表各功能各量程校准和测量能力

综上所述，以指针表直流电压及交流电流的部分校准点为例，对其测量不确定度进行了分析。结果表明，测量重复性对测量结果的不确定度贡献很小，当标准源的不确定度较小时，指针表的校准不确定度主要由被校表的分辨力引入。指针表各功能各量程分辨力通常可按其最小分度值的 1/5 计算。指针表的校准和测量能力如下表所示：

表 10 申请认可的能力范围

| 测量仪器名称                      | 校准参量 | 规范代号(含年号)名称                                      | 测量范围                       | 扩展不确定度(校准和测量能力, $k=2$ ) |
|-----------------------------|------|--|----------------------------|-------------------------|
| 指针式<br>仪表                   | 直流电压 | JJG124-2005<br>《电流表、电<br>压表、功率表<br>及电阻表检定<br>规程》 | 10mV~100mV                 | $U=0.12mV$              |
|                             |      |  | 0.1V~1V                    | $U=0.0012V$             |
|                             |      |  | 1V~10V                     | $U=0.012V$              |
|                             |      |  | 10V~100V                   | $U=0.12V$               |
|                             |      |  | 100V~1000V                 | $U=1.2V$                |
|                             | 直流电流 |  | 10mA~100mA                 | $U=0.12mA$              |
|                             |      |  | 0.1A~1A                    | $U=0.0012A$             |
|                             |      |  | 1A~10A                     | $U=0.012A$              |
|                             |      |  | 10A~20A                    | $U=0.12A$               |
|                             | 交流电压 |  | 10mV~100mV (40Hz~10kHz)    | $U=0.12mV$              |
|                             |      |  | 0.1V~1V (40Hz~10kHz)       | $U=0.0012V$             |
|                             |      |  | 1V~10V (40Hz~10kHz)        | $U=0.012V$              |
|                             |      |  | 10V~100V (40Hz~10kHz)      | $U=0.12V$               |
|                             |      |  | 100V~1000V (40Hz~10kHz)    | $U=1.2V$                |
|                             | 交流电流 |  | 10mA~100mA (40Hz~10kHz)    | $U=0.13mA$              |
|                             |      |  | 0.1A~1A (40Hz~10kHz)       | $U=0.0013A$             |
|                             |      |  | 1A~10A (40Hz~10kHz)        | $U=0.013A$              |
|                             |      |  | 10A~20A (40Hz~10kHz)       | $U=0.13A$               |
|                             | 直流电阻 |  | 10 $\Omega$ ~100 $\Omega$  | $U=0.12\Omega$          |
|                             |      |  | 0.1k $\Omega$ ~1k $\Omega$ | $U=0.0012k\Omega$       |
| 1k $\Omega$ ~10k $\Omega$   |      | $U=0.012k\Omega$                                 |                            |                         |
| 10k $\Omega$ ~100k $\Omega$ |      | $U=0.12k\Omega$                                  |                            |                         |
| 0.1M $\Omega$ ~1M $\Omega$  |      | $U=0.0012M\Omega$                                |                            |                         |

## 附件 J

### 数字多用表校准结果的 CMC 评定：电压、电流、电阻

#### J1 概述

##### J1.1 测量依据

依据《JJG315-1983 直流数字电压表检定规程》、《JJG598-1989 直流数字电流表检定规程》、《JJG724-1991 直流数字欧姆表检定规程》、《JJG(航天)34-1999 交流数字电压表检定规程》和《JJG(航天)35-1999 交流数字电流表检定规程》对六位半数字多用表进行校准。

##### J1.2 被测对象

被校对象 Agilent34401 是目前使用量最大的数字多用表之一，分辨力为六位半，最大允差： $DCV \pm 3.5 \times 10^{-5}$ ； $DCI \pm 5.5 \times 10^{-4}$ ； $ACV \pm 0.1 \times 10^{-3}$ ； $ACI \pm 1.4 \times 10^{-3}$ ； $DCR \pm 1.1 \times 10^{-4}$

##### J1.3 测量方法及主要设备

选择多功能标准源 5720A 及放大器 5725A 为标准设备，采用直接测量法（标准源法）对 34401A 型数字多用表的交直流电压、交直流电流以及直流电阻功能进行校准。如下图所示：

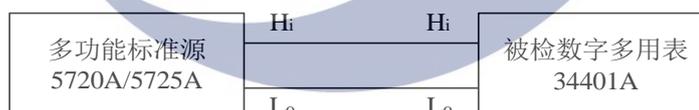


图 1 校准原理图

所使用的标准器的详细参数如表 1 所示。

表 1 实验室的计量标准器和配套设备

| 设备名称            | 技术性能                           |  |
|-----------------|--------------------------------|--|
|                 | 测量范围                           | 最大允许误差   |
| 多功能标准源<br>5720A | DCV: 10mV~1000V                | $\pm (4.3 \times 10^{-6} \sim 5.9 \times 10^{-5})$ |
|                 | DCI: 10 $\mu$ A~2A             | $\pm (4.5 \times 10^{-5} \sim 4.1 \times 10^{-4})$ |
|                 | ACV: 10mV~1000V<br>(10Hz~1MHz) | $\pm (6.2 \times 10^{-5} \sim 9.3 \times 10^{-3})$ |
|                 | ACI: 1mA~2A<br>(10Hz~10kHz)    | $\pm (1.8 \times 10^{-4} \sim 8.2 \times 10^{-3})$ |
|                 | DCR: 1 $\Omega$ ~100M $\Omega$ | $\pm (1.0 \times 10^{-5} \sim 1.2 \times 10^{-4})$ |
|                 |                                |  |

## J2 测量模型

$$\Delta = X_t - X_r \quad (1)$$

式中：

$X_t$ ——被检数字多用表的示值；

$X_r$ ——多功能标准源输出标准值；

$\Delta$ ——被检数字多用表示值误差。

## J3 直流电压校准和测量能力分析

直流电压校准和测量能力以 10V 量程为例进行分析。

### J3.1 评定 10V 点的测量不确定度

#### J3.1.1 多功能标准源 5720A 引入的不确定度 $u(X_r)$

由多功能标准源 5720A 说明书可知，5720A 直流电压 10V 量程 10V 点技术指标为  $\pm(3.5 \times 10^{-6} \times \text{读数} + 2.5 \mu\text{V})$ ，置信概率为 95%， $k=2$ 。则多功能标准源 5720A 引入的不确定度：

$$u(X_r) = \frac{3.5 \times 10^{-6} \times 10\text{V} + 2.5 \mu\text{V}}{2} = \frac{3.75 \times 10^{-5} \text{V}}{2} = 1.88 \times 10^{-5} \text{V}$$

#### J3.1.2 被校表 34401A 分辨力引入的标准不确定度 $u(X_t)$

被校数字多用表 34401A 的直流电压 10V 量程的分辨力为  $10 \mu\text{V}$ 。由此引入的不确定度按 B 类评定，设概率分布为均匀分布，被校数字多用表分辨力引入的不确定度：

$$u(X_t) = \frac{10 \mu\text{V}}{2\sqrt{3}} = 2.89 \times 10^{-6} \text{V}$$

#### J3.1.3 测量重复性引入的标准不确定度 $u_A$

对被校测量点连续测量 10 次，得到一系列重复测量结果，见下表所示。按 A 类评定，用贝赛尔公式计算被检数字多用表引入的不确定度。

表 1 被校数字多用表 34401A (10V 测试点) 重复性测量数据

| 测量次数  | 1        | 2        | 3        | 4        | 5        |
|-------|----------|----------|----------|----------|----------|
| $X_i$ | 9.99991V | 9.99992V | 9.99992V | 9.99992V | 9.99992V |

| 测量次数  | 6        | 7        | 8        | 9        | 10       |
|-------|----------|----------|----------|----------|----------|
| $X_i$ | 9.99992V | 9.99992V | 9.99991V | 9.99991V | 9.99992V |

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^{10} X_i}{10} = 9.999917V; \quad s_n(X) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n-1}} = 4.83 \times 10^{-6} V;$$

$$u_A = s_n(X) = 4.83 \times 10^{-6} V。$$

### J3.1.4 各不确定度分量汇总表

各不确定度分量汇总表见下表所示。

表 2 不确定度分量汇总表 (10V 测试点)

| 不确定度分量   | 不确定度来源   | 标准不确定度                  |
|----------|----------|-------------------------|
| $u(X_r)$ | 多功能源引入   | $1.88 \times 10^{-5} V$ |
| $u(X_i)$ | 被检表分辨力引入 | $2.89 \times 10^{-6} V$ |
| $u_A$    | 重复性测量引入  | $4.83 \times 10^{-6} V$ |

### J3.1.5 合成标准不确定度 $u_c$

参照不确定度分量汇总表，各分量不相关，被校表分辨力引入的不确定度及重复测量引入的不确定度二者取大者的原则，合成标准不确定度如下：

$$u_c = \sqrt{u^2(X_r) + u_A^2} = 1.94 \times 10^{-5} V$$

### J3.1.6 扩展不确定度 $U$

取  $k=2$ ，扩展不确定度为：

$$U = ku_c = 2 \times 1.94 \times 10^{-5} V = 3.88 \times 10^{-5} V$$

## J3.2 评定其他校准点的测量不确定度

同理分析，可得 8V、5V、3V、1V 各点的扩展不确定度，详见下表所示：

表 3 各校准点扩展不确定度数据

| 测试点 | 扩展不确定度                  |
|-----|-------------------------|
| 1V  | $1.20 \times 10^{-5} V$ |
| 3V  | $1.80 \times 10^{-5} V$ |

|     |                                |
|-----|--------------------------------|
| 5V  | $2.39 \times 10^{-5} \text{V}$ |
| 8V  | $3.29 \times 10^{-5} \text{V}$ |
| 10V | $3.88 \times 10^{-5} \text{V}$ |

### J3.3 直流电压校准和测量能力评定

CMC 的表示方式有多种，对于数字多用表而言，采取函数的表示方式更为直观便捷。假设被测数字表各量程的不确定度是线性的，设其线性方程为：

$$U = ax + b \quad (2)$$

式中：

$a$ ——线性方程的斜率；

$b$ ——线性方程的截距。

对于直流电压功能 10V 量程，利用 EXCEL 进行线性回归见下表所示：

|   | A    | B          | C         | D        | E |
|---|------|------------|-----------|----------|---|
| 1 |      | x          | U         |          |   |
| 2 |      | 1.0        | 0.0000120 |          |   |
| 3 |      | 3.0        | 0.0000233 |          |   |
| 4 |      | 5.0        | 0.0000258 |          |   |
| 5 |      | 8.0        | 0.0000371 |          |   |
| 6 |      | 10.0       | 0.0000388 |          |   |
| 7 |      |            |           |          |   |
| 8 | 截距b= | 0.00001158 | 斜率a=      | 2.93E-06 |   |
| 9 |      |            |           |          |   |

操作步骤如下所示：

- (1) 插入一个 Excel 电子表格，如上表所示；
- (2) 在 B2~B6 单元格中输入测试值；
- (3) 在 C2~C6 单元格中输入各测试值对应的不确定度；
- (4) 在 B8 单元格中输入 “=INTERCEPT(C2:C6, B2:B6)” 即得出线性曲线的截距；

- (5) 在 D8 单元格中输入 “=SLOPE(C2:C6, B2:B6)” 即得出线性曲线的斜率。

故直流电压功能 10V 量程各点的不确定度可用函数  $U = 3.0 \times 10^{-6}x + 1.2 \times 10^{-5} \text{V}$  计算得出。同理分析，可得直流电压功能其他量程不确定度。

## J4 直流电流校准和测量能力分析

直流电压校准和测量能力以 100mA 量程为例进行分析。

### J4.1 评定 100mA 点的测量不确定度

#### J4.1.1 多功能标准源 5720A 年引入的不确定度 $u(X_r)$

由多功能标准源 5720A 说明书可知，5720A 直流电流 100mA 量程 100mA 点技

术指标为 $\pm(45\times 10^{-6}\times \text{读数}+0.7\mu\text{A})$ ，置信概率为 95%， $k=2$ 。则多功能标准源 5720A 引入的不确定度：

$$u(X_r) = \frac{45\times 10^{-6}\times 100\text{mA}+0.7\mu\text{A}}{2} = \frac{0.0052\text{mA}}{2} = 2.60\times 10^{-3}\text{mA}$$

#### J4.1.2 被校表 34401A 分辨力引入的标准不确定度 $u(X_l)$

被校数字多用表 34401A 的直流电流 100mA 量程的分辨力为  $0.1\mu\text{A}$ 。由此引入的不确定度按 B 类评定，设概率分布为均匀分布，被校数字多用表分辨力引入的不确定度：

$$u(X_l) = \frac{0.1\mu\text{A}}{2\sqrt{3}} = 2.89\times 10^{-5}\text{mA}$$

#### J4.1.3 测量重复性引入的标准不确定度 $u_A$

对被校测量点连续测量 10 次，得到一系列重复测量结果，见下表所示。按 A 类评定，用贝赛尔公式计算被校数字多用表引入的不确定度。

表 4 被校数字多用表 34401A (100mA 测试点) 重复性测量数据

|       |           |           |           |           |           |
|-------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 测量次数  | 1         | 2         | 3         | 4         | 5         |
| $X_i$ | 99.9982mA | 99.9984mA | 99.9985mA | 99.9986mA | 99.9983mA |
| 测量次数  | 6         | 7         | 8         | 9         | 10        |
| $X_i$ | 99.9987mA | 99.9985mA | 99.9986mA | 99.9988mA | 99.9988mA |

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^{10} X_i}{10} = 99.99854\text{mA}; \quad s_n(X) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n-1}} = 2.01\times 10^{-4}\text{mA};$$

$$u_A = s_n(X) = 2.01\times 10^{-4}\text{mA}。$$

#### J4.1.4 各不确定度分量汇总表

各不确定度分量汇总表见下表所示。

表 5 不确定度分量汇总表 (100mA 测试点)

| 不确定度分量   | 不确定度来源   | 标准不确定度                        |
|----------|----------|-------------------------------|
| $u(X_r)$ | 多功能源引入   | $2.60\times 10^{-3}\text{mA}$ |
| $u(X_l)$ | 被检表分辨力引入 | $2.89\times 10^{-5}\text{mA}$ |

|       |         |                                 |
|-------|---------|---------------------------------|
| $u_A$ | 重复性测量引入 | $2.01 \times 10^{-4} \text{mA}$ |
|-------|---------|---------------------------------|

#### J4.1.5 合成标准不确定度 $u_c$

参照不确定度分量汇总表，各分量不相关，被校表分辨力引入的不确定度及重复测量引入的不确定度二者取大者的原则，合成标准不确定度如下：

$$u_c = \sqrt{u^2(X_r) + u_A^2} = 2.60 \times 10^{-3} \text{mA}$$

#### J4.1.6 扩展不确定度 $U$

取  $k=2$ ，扩展不确定度为：

$$U = ku_c = 5.20 \times 10^{-3} \text{mA}$$

### J4.2 评定其他校准点的测量不确定度

同理分析，可得 80mA、50mA、30mA、10mA 各点的不确定度，详见下表所示：

表 6 各校准点扩展不确定度数据

| 测试点   | 扩展不确定度                          |
|-------|---------------------------------|
| 10mA  | $1.16 \times 10^{-3} \text{mA}$ |
| 30mA  | $2.06 \times 10^{-3} \text{mA}$ |
| 50mA  | $2.96 \times 10^{-3} \text{mA}$ |
| 80mA  | $4.30 \times 10^{-3} \text{mA}$ |
| 100mA | $5.20 \times 10^{-3} \text{mA}$ |

### J4.3 直流电流校准和测量能力评定

对于直流电流功能 100mA 量程，利用 EXCEL 进行线性回归见下表所示：

|   | A    | B          | C         | D        | E |
|---|------|------------|-----------|----------|---|
| 1 |      | x          | U         |          |   |
| 2 |      | 10.0       | 0.0011600 |          |   |
| 3 |      | 30.0       | 0.0020600 |          |   |
| 4 |      | 50.0       | 0.0029600 |          |   |
| 5 |      | 80.0       | 0.0043000 |          |   |
| 6 |      | 100.0      | 0.0052000 |          |   |
| 7 |      |            |           |          |   |
| 8 | 截距b= | 0.00071331 | 斜率a=      | 4.49E-05 |   |
| 9 |      |            |           |          |   |

故直流电流功能 100mA 量程各点的不确定度可用函数  $U = 4.5 \times 10^{-5}x + 7.1 \times 10^{-4} \text{mA}$  计算得出。同理分析，可得直流电流功能其他量程不确定度。

### J5 交流电压校准和测量能力分析

交流电压校准和测量能力以 10V 量程 1kHz 为例进行分析。

### J5.1 评定 10V/1kHz 点的测量不确定度

#### J5.1.1 多功能标准源 5720A 年引入的不确定度 $u(X_r)$

由多功能标准源 5720A 说明书可知, 5720A 交流电压 10V 量程 10V/1kHz 点技术指标为  $\pm(45 \times 10^{-6} \times \text{读数} + 50 \mu\text{V})$ , 置信概率为 95%,  $k=2$ 。则多功能标准源 5720A 引入的不确定度:

$$u(X_r) = \frac{45 \times 10^{-6} \times 10\text{V} + 50 \mu\text{V}}{2} = \frac{0.0005\text{V}}{2} = 2.50 \times 10^{-4} \text{V}$$

#### J5.1.2 被校表 34401A 分辨力引入的标准不确定度 $u(X_l)$

被校数字多用表 34401A 的交流电压 10V 量程的分辨力为  $10 \mu\text{V}$ 。由此引入的不确定度按 B 类评定, 设概率分布为均匀分布, 被校数字多用表分辨力引入的不确定度:

$$u(X_l) = \frac{10 \mu\text{V}}{2\sqrt{3}} = 2.89 \times 10^{-6} \text{V}$$

#### J5.1.3 测量重复性引入的标准不确定度 $u_A$

对被校测量点连续测量 10 次, 得到一系列重复测量结果, 见下表所示。按 A 类评定, 用贝赛尔公式计算被校数字多用表引入的不确定度。

表 7 被校数字多用表 34401A (10V/1kHz 测试点) 重复性测量数据

|       |          |          |          |          |          |
|-------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 测量次数  | 1        | 2        | 3        | 4        | 5        |
| $X_i$ | 9.99849V | 9.99844V | 9.99840V | 9.99841V | 9.99840V |
| 测量次数  | 6        | 7        | 8        | 9        | 10       |
| $X_i$ | 9.99838V | 9.99830V | 9.99832V | 9.99829V | 9.99834V |

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^{10} X_i}{10} = 9.998377\text{V}; \quad s_n(X) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n-1}} = 6.41 \times 10^{-5} \text{V};$$

$$u_A = s_n(X) = 6.41 \times 10^{-5} \text{V}。$$

#### J5.1.4 各不确定度分量汇总表

各不确定度分量汇总表见下表所示。

表 8 不确定度分量汇总表 (10V/1kHz 测试点)

| 不确定度分量   | 不确定度来源   | 标准不确定度                          |
|----------|----------|---------------------------------|
| $u(X_r)$ | 多功能源引入   | $2.50 \times 10^{-4} \text{ V}$ |
| $u(X_i)$ | 被检表分辨力引入 | $2.89 \times 10^{-6} \text{ V}$ |
| $u_A$    | 重复性测量引入  | $6.41 \times 10^{-5} \text{ V}$ |

### J5.1.5 合成标准不确定度 $u_c$

参照不确定度分量汇总表，各分量不相关，被校表分辨力引入的不确定度及重复测量引入的不确定度二者取大者的原则，合成标准不确定度如下：

$$u_c = \sqrt{u^2(X_r) + u_A^2} = 2.58 \times 10^{-4} \text{ V}$$

### J5.1.6 扩展不确定度 $U$

取  $k=2$ ，扩展不确定度为：

$$U = ku_c = 5.16 \times 10^{-4} \text{ V}$$

## J5.2 评定其他校准点的测量不确定度

同理分析，可得 8V/1kHz、5V/1kHz、3V/1kHz、1V/1kHz 各点的不确定度，详见下表所示：

表 9 各校准点扩展不确定度数据

| 测试点      | 扩展不确定度                          |
|----------|---------------------------------|
| 1V/1kHz  | $1.73 \times 10^{-4} \text{ V}$ |
| 3V/1kHz  | $2.49 \times 10^{-4} \text{ V}$ |
| 5V/1kHz  | $3.26 \times 10^{-4} \text{ V}$ |
| 8V/1kHz  | $4.40 \times 10^{-4} \text{ V}$ |
| 10V/1kHz | $5.16 \times 10^{-4} \text{ V}$ |

## J5.3 交流电压校准和测量能力评定

对于交流电压功能 10V 量程 1kHz，利用 EXCEL 进行线性回归见下表所示：

|   | A                 | B    | C               | D | E |
|---|-------------------|------|-----------------|---|---|
| 1 |                   | x    | U               |   |   |
| 2 |                   | 1.0  | 0.0001730       |   |   |
| 3 |                   | 3.0  | 0.0002490       |   |   |
| 4 |                   | 5.0  | 0.0003260       |   |   |
| 5 |                   | 8.0  | 0.0004400       |   |   |
| 6 |                   | 10.0 | 0.0005160       |   |   |
| 7 |                   |      |                 |   |   |
| 8 | 截距 b = 0.00013491 |      | 斜率 a = 3.81E-05 |   |   |
| 9 |                   |      |                 |   |   |

故交流电压功能 10V 量程 1kHz 各点的不确定度可用函数  $U = 3.8 \times 10^{-5}x + 1.4 \times 10^{-4} \text{V}$  计算得出。同理分析，可得交流电压功能其他量程不确定度见。

## J6 交流电流校准和测量能力分析

交流电流校准和测量能力以 1A 量程 1kHz 为例进行分析。

### J6.1 评定 1A/1kHz 点的测量不确定度

#### J6.1.1 多功能标准源 5720A 年引入的不确定度 $u(X_r)$

由多功能标准源 5720A 说明书可知，5720A 交流电流 1A 量程 1A 点技术指标为  $\pm(260 \times 10^{-6} \times \text{读数} + 35 \mu\text{A})$ ，置信概率为 95%， $k=2$ 。则多功能标准源 5720A 引入的不确定度：

$$u(X_r) = \frac{260 \times 10^{-6} \times 1\text{A} + 35 \mu\text{A}}{2} = \frac{2.95 \times 10^{-4} \text{A}}{2} = 1.48 \times 10^{-4} \text{A}$$

#### J6.1.2 被校表 34401A 分辨力引入的标准不确定度 $u(X_t)$

被校数字多用表 34401A 的交流电流 1A 量程的分辨力为  $1 \mu\text{A}$ 。由此引入的不确定度按 B 类评定，设概率分布为均匀分布，被校数字多用表分辨力引入的不确定度：

$$u(X_t) = \frac{1 \mu\text{A}}{2\sqrt{3}} = 2.89 \times 10^{-7} \text{A}$$

#### J6.1.3 测量重复性引入的标准不确定度 $u_A$

对被校测量点连续测量 10 次，得到一系列重复测量结果，见下表所示。按 A 类评定，用贝赛尔公式计算被校数字多用表引入的不确定度。

表 10 被校数字多用表 34401A (1A/1kHz 测试点) 重复性测量数据

|       |           |           |           |           |           |
|-------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 测量次数  | 1         | 2         | 3         | 4         | 5         |
| $X_i$ | 0.999882A | 0.999878A | 0.999871A | 0.999877A | 0.999874A |
| 测量次数  | 6         | 7         | 8         | 9         | 10        |
| $X_i$ | 0.999875A | 0.999866A | 0.999859A | 0.999863A | 0.999865A |

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^{10} X_i}{10} = 0.9998710\text{A}; \quad s_n(X) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} (X_i - \bar{X})^2}{n-1}} = 7.45 \times 10^{-6} \text{A};$$

$$u_A = s_n(X) = 7.45 \times 10^{-6} \text{ A}。$$

#### J6.1.4 各不确定度分量汇总表

各不确定度分量汇总表见下表所示。

表 10 不确定度分量汇总表 (1A/1kHz 测试点)

| 不确定度分量   | 不确定度来源   | 标准不确定度                          |
|----------|----------|---------------------------------|
| $u(X_r)$ | 多功能源引入   | $1.48 \times 10^{-4} \text{ A}$ |
| $u(X_i)$ | 被检表分辨力引入 | $2.89 \times 10^{-7} \text{ A}$ |
| $u_A$    | 重复性测量引入  | $7.45 \times 10^{-6} \text{ A}$ |

#### J6.1.5 合成标准不确定度 $u_c$

参照不确定度分量汇总表，各分量不相关，被校表分辨力引入的不确定度及重复测量引入的不确定度二者取大者的原则，合成标准不确定度如下：

$$u_c = \sqrt{u^2(X_r) + u_A^2} = 1.48 \times 10^{-4} \text{ A}$$

#### J6.1.6 扩展不确定度 $U$

取  $k=2$ ，扩展不确定度为：

$$U = ku_c = 2 \times 1.48 \times 10^{-4} \text{ A} = 2.96 \times 10^{-4} \text{ A}$$

#### J6.2 评定其他校准点的测量不确定度

同理分析，可得 0.8A/1kHz、0.5A/1kHz、0.3A/1kHz、0.1A/1kHz 各点的不确定度，详见下表所示：

表 11 各校准点扩展不确定度数据

| 测试点       | 扩展不确定度                          |
|-----------|---------------------------------|
| 0.1A/1kHz | $6.15 \times 10^{-5} \text{ A}$ |
| 0.3A/1kHz | $1.14 \times 10^{-4} \text{ A}$ |
| 0.5A/1kHz | $1.66 \times 10^{-4} \text{ A}$ |
| 0.8A/1kHz | $2.44 \times 10^{-4} \text{ A}$ |
| 1.0A/1kHz | $2.96 \times 10^{-4} \text{ A}$ |

#### J6.3 交流电流校准和测量能力评定

对于交流电流功能 1A 量程 1kHz，利用 EXCEL 进行线性回归见下表所示：

|   | A               | B   | C            | D | E |
|---|-----------------|-----|--------------|---|---|
| 1 |                 | x   | U            |   |   |
| 2 |                 | 0.1 | 0.0000615    |   |   |
| 3 |                 | 0.3 | 0.0001140    |   |   |
| 4 |                 | 0.5 | 0.0001660    |   |   |
| 5 |                 | 0.8 | 0.0002440    |   |   |
| 6 |                 | 1.0 | 0.0002960    |   |   |
| 7 |                 |     |              |   |   |
| 8 | 截距b= 0.00003568 |     | 斜率a= 0.00026 |   |   |
| 9 |                 |     |              |   |   |

故交流电流功能 1A 量程 1kHz 各点的不确定度可用函数  $U = 2.6 \times 10^{-4}x + 3.6 \times 10^{-5} \text{ A}$  计算得出。同理分析，可得交流电流功能其他量程不确定度。

## J7 电阻校准和测量能力分析

直流电阻校准和测量能力以  $1\text{k}\Omega$  量程为例进行分析。

### J7.1 评定 $1\text{k}\Omega$ 点的测量不确定度

#### J7.1.1 多功能标准源 5720A 年引入的不确定度 $u(X_r)$

由多功能标准源 5720A 说明书可知，5720A 直流电阻  $1\text{k}\Omega$  点技术指标为  $\pm(8.5 \times 10^{-6} \times \text{读数})$ ，置信概率为 95%， $k=2$ 。则多功能标准源 5720A 引入的不确定度：

$$u(X_r) = \frac{8.5 \times 10^{-6} \times 1\text{k}\Omega}{2} = 4.25 \times 10^{-6} \text{ k}\Omega$$

#### J7.1.2 被校表 34401A 分辨力引入的标准不确定度 $u(X_t)$

被校数字多用表 34401A 的直流电阻  $1\text{k}\Omega$  量程的分辨力为  $1\text{m}\Omega$ 。由此引入的不确定度按 B 类评定，设概率分布为均匀分布，被校数字多用表分辨力引入的不确定度：

$$u(X_t) = \frac{1\text{m}\Omega}{2\sqrt{3}} = 2.89 \times 10^{-7} \text{ k}\Omega$$

#### J7.1.3 测量重复性引入的标准不确定度 $u_A$

对被校测量点连续测量 10 次，得到一系列重复测量结果，见下表所示。按 A 类评定，用贝赛尔公式计算被检数字多用表引入的不确定度。

表 12 被校数字多用表 34401A ( $1\text{k}\Omega$  测试点) 重复性测量数据

| 测量次数 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|------|---|---|---|---|---|
|      |   |   |   |   |   |

|       |                    |                    |                    |                    |                    |
|-------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| $X_i$ | 1.000016k $\Omega$ | 1.000017k $\Omega$ | 1.000016k $\Omega$ | 1.000016k $\Omega$ | 1.000016k $\Omega$ |
| 测量次数  | 6                  | 7                  | 8                  | 9                  | 10                 |
| $X_i$ | 1.000017k $\Omega$ | 1.000015k $\Omega$ | 1.000016k $\Omega$ | 1.000015k $\Omega$ | 1.000015k $\Omega$ |

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^{10} X_i}{10} = 1.0000159\text{k}\Omega; \quad s_n(X) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n-1}} = 7.38 \times 10^{-7} \text{k}\Omega;$$

$$u_A = s_n(X) = 7.38 \times 10^{-7} \text{k}\Omega。$$

#### J7.1.4 各不确定度分量汇总表

各不确定度分量汇总表见下表所示。

表 13 不确定度分量汇总表 (1k $\Omega$  测试点)

| 不确定度分量   | 不确定度来源   | 标准不确定度                               |
|----------|----------|--------------------------------------|
| $u(X_r)$ | 多能源引入    | $4.25 \times 10^{-6} \text{k}\Omega$ |
| $u(X_l)$ | 被检表分辨力引入 | $2.89 \times 10^{-7} \text{k}\Omega$ |
| $u_A$    | 重复性测量引入  | $7.38 \times 10^{-7} \text{k}\Omega$ |

#### J7.1.5 合成标准不确定度 $u_c$

参照不确定度分量汇总表, 各分量不相关, 被校表分辨力引入的不确定度及重复测量引入的不确定度二者取大者的原则, 合成标准不确定度如下:

$$u_c = \sqrt{u^2(X_r) + u_A^2} = 4.31 \times 10^{-6} \text{k}\Omega$$

#### J7.1.6 扩展不确定度 $U$

取  $k=2$ , 扩展不确定度为:

$$U = ku_c = 2 \times 4.31 \times 10^{-6} \text{k}\Omega = 8.62 \times 10^{-6} \text{k}\Omega$$

#### J7.2 评定其他校准点的测量不确定度

同理分析, 可得 0.8k $\Omega$ 、0.5k $\Omega$ 、0.3k $\Omega$ 、0.1k $\Omega$  各点的不确定度, 详见下表所示:

表 14 各校准点扩展不确定度数据

| 测试点           | 不确定度                                 |
|---------------|--------------------------------------|
| 0.1k $\Omega$ | $1.67 \times 10^{-6} \text{k}\Omega$ |
| 0.3k $\Omega$ | $3.21 \times 10^{-6} \text{k}\Omega$ |

|               |                                  |
|---------------|----------------------------------|
| 0.5k $\Omega$ | $4.76 \times 10^{-6}$ k $\Omega$ |
| 0.8k $\Omega$ | $7.07 \times 10^{-6}$ k $\Omega$ |
| 1.0k $\Omega$ | $8.62 \times 10^{-6}$ k $\Omega$ |

### J7.3 直流电阻校准和测量能力评定

对于直流电阻功能 1k $\Omega$  量程，利用 EXCEL 进行线性回归见下表所示：

|   | A               | B   | C             | D | E |
|---|-----------------|-----|---------------|---|---|
| 1 |                 | x   | U             |   |   |
| 2 |                 | 0.1 | 0.0000017     |   |   |
| 3 |                 | 0.3 | 0.0000032     |   |   |
| 4 |                 | 0.5 | 0.0000048     |   |   |
| 5 |                 | 0.8 | 0.0000071     |   |   |
| 6 |                 | 1.0 | 0.0000086     |   |   |
| 7 |                 |     |               |   |   |
| 8 | 截距b= 0.00000090 |     | 斜率a= 7.72E-06 |   |   |
| 9 |                 |     |               |   |   |

故直流电阻功能量程 1k $\Omega$  各点的不确定度可用函数  $U = 7.8 \times 10^{-6}x + 0.9 \times 10^{-6}$  k $\Omega$  计算得出。同理分析，可得直流电阻功能其他量程不确定度。

### J8 校准和测量能力评定

汇总各量程段的评定结果，实验室申请认可的校准和测量能力应为下表所示：

表 15 申请认可的校准能力范围

| 测量仪器名称     | 校准参量 | 测量范围  | 扩展不确定度（校准和测量能力， $k=2$ ）                                |
|------------|------|---|--|
| 数字多用表      | 直流电压 | 10mV~100mV  | $U = 9.0 \times 10^{-6}x + 5.0 \times 10^{-4}$ mV      |
|            |      | 100mV~1V  | $U = 6.0 \times 10^{-6}x + 0.8 \times 10^{-6}$ V       |
|            |      | 1V~10V  | $U = 3.0 \times 10^{-6}x + 1.2 \times 10^{-5}$ V       |
|            |      | 10V~100V  | $U = 6.0 \times 10^{-6}x + 5.0 \times 10^{-5}$ V       |
|            |      | 100V~1000V  | $U = 8.0 \times 10^{-6}x + 5.0 \times 10^{-4}$ V       |
|            | 直流电流 | 10 $\mu$ A~100 $\mu$ A                            | $U = 5.0 \times 10^{-5}x + 7.0 \times 10^{-3}$ $\mu$ A |
|            |      | 100 $\mu$ A~1mA                                   | $U = 5.0 \times 10^{-5}x + 8.0 \times 10^{-6}$ mA      |
|            |      | 1mA~10mA  | $U = 4.0 \times 10^{-5}x + 5.0 \times 10^{-5}$ mA      |
| 10mA~100mA |      | $U = 4.5 \times 10^{-5}x + 7.1 \times 10^{-4}$ mA |  |

| 测量仪器名称        | 校准参量       | 测量范围  | 扩展不确定度 (校准和测量能力,<br>$k=2$ )                                |
|---------------|------------|---|--|
|               |            | 100mA~1A  | $U = 9.0 \times 10^{-5} x + 1.5 \times 10^{-4} \text{ A}$  |
|               |            | 1A~3A   | $U = 3.6 \times 10^{-4} x + 4.8 \times 10^{-4} \text{ A}$  |
|               | 10mV~100mV | 10Hz~20Hz   | $U = 3.0 \times 10^{-4} x + 1.5 \times 10^{-2} \text{ mV}$ |
|               |            | 20Hz~40Hz   | $U = 1.2 \times 10^{-4} x + 8.0 \times 10^{-3} \text{ mV}$ |
|               |            | 40Hz~20kHz  | $U = 1.0 \times 10^{-4} x + 8.0 \times 10^{-3} \text{ mV}$ |
|               |            | 20kHz~50kHz   | $U = 2.5 \times 10^{-4} x + 8.0 \times 10^{-3} \text{ mV}$ |
|               |            | 50kHz~100kHz  | $U = 6.0 \times 10^{-4} x + 2.0 \times 10^{-2} \text{ mV}$ |
|               |            | 100kHz~300kHz   | $U = 1.1 \times 10^{-3} x + 2.5 \times 10^{-2} \text{ mV}$ |
|               | 100mV~1V   | 10Hz~20Hz   | $U = 3.0 \times 10^{-4} x + 5.0 \times 10^{-5} \text{ V}$  |
|               |            | 20Hz~40Hz   | $U = 1.1 \times 10^{-4} x + 2.0 \times 10^{-5} \text{ V}$  |
|               |            | 40Hz~20kHz  | $U = 5.2 \times 10^{-5} x + 1.0 \times 10^{-5} \text{ V}$  |
|               |            | 20kHz~50kHz   | $U = 9.0 \times 10^{-5} x + 1.2 \times 10^{-5} \text{ V}$  |
|               |            | 50kHz~100kHz  | $U = 1.3 \times 10^{-4} x + 4.0 \times 10^{-5} \text{ V}$  |
|               |            | 100kHz~300kHz   | $U = 5.0 \times 10^{-4} x + 1.0 \times 10^{-4} \text{ V}$  |
|               | 交流电压       | 10Hz~20Hz   | $U = 3.0 \times 10^{-4} x + 5.0 \times 10^{-4} \text{ V}$  |
|               |            | 20Hz~40Hz   | $U = 1.1 \times 10^{-4} x + 2.0 \times 10^{-4} \text{ V}$  |
|               |            | 40Hz~20kHz  | $U = 3.8 \times 10^{-5} x + 1.4 \times 10^{-4} \text{ V}$  |
|               |            | 20kHz~50kHz   | $U = 9.0 \times 10^{-5} x + 1.2 \times 10^{-4} \text{ V}$  |
|               |            | 50kHz~100kHz  | $U = 1.2 \times 10^{-4} x + 2.5 \times 10^{-4} \text{ V}$  |
|               |            | 100kHz~300kHz   | $U = 3.3 \times 10^{-4} x + 8.0 \times 10^{-4} \text{ V}$  |
|               | 1V~10V     | 10Hz~20Hz   | $U = 3.0 \times 10^{-4} x + 5.0 \times 10^{-3} \text{ V}$  |
|               |            | 20Hz~40Hz   | $U = 1.1 \times 10^{-4} x + 2.0 \times 10^{-3} \text{ V}$  |
|               |            | 40Hz~20kHz  | $U = 6.5 \times 10^{-5} x + 7.0 \times 10^{-4} \text{ V}$  |
| 20kHz~50kHz   |            | $U = 1.0 \times 10^{-4} x + 1.2 \times 10^{-3} \text{ V}$ |  |
| 50kHz~100kHz  |            | $U = 1.8 \times 10^{-4} x + 3.0 \times 10^{-3} \text{ V}$ |  |
| 100kHz~300kHz |            | $U = 1.1 \times 10^{-3} x + 2.0 \times 10^{-2} \text{ V}$ |  |
| 10V~100V      | 10Hz~20Hz  | $U = 3.0 \times 10^{-4} x + 5.0 \times 10^{-3} \text{ V}$ |  |
|               | 20Hz~40Hz  | $U = 1.1 \times 10^{-4} x + 2.0 \times 10^{-3} \text{ V}$ |  |
| 100V~750V     | 40Hz~1kHz  | $U = 8.5 \times 10^{-5} x + 4.0 \times 10^{-3} \text{ V}$ |  |
|               | 1kHz~20kHz | $U = 1.7 \times 10^{-4} x + 6.0 \times 10^{-3} \text{ V}$ |  |

| 测量仪器名称                       | 校准参量 | 测量范围   | 扩展不确定度 (校准和测量能力,<br>$k=2$ )                              |  |
|------------------------------|------|--|--|--|
|                              |      | 20kHz~50kHz  | $U = 6.0 \times 10^{-4} x + 1.1 \times 10^{-2} \text{V}$ |  |
|                              |      | 50kHz~100kHz   | $U = 2.3 \times 10^{-3} x + 4.5 \times 10^{-2} \text{V}$ |  |
|                              | 交流电流 | 100mA~1A   | 20Hz~1kHz  | $U = 2.6 \times 10^{-4} x + 3.6 \times 10^{-5} \text{A}$       |
|                              |      |  | 1kHz~5kHz  | $U = 5.0 \times 10^{-4} x + 1.0 \times 10^{-4} \text{A}$       |
|                              |      |  | 5kHz~10kHz   | $U = 8.0 \times 10^{-3} x + 2.0 \times 10^{-4} \text{A}$       |
|                              |      | 1A~3A  | 40Hz~1kHz  | $U = 4.6 \times 10^{-4} x + 1.7 \times 10^{-4} \text{A}$       |
|                              |      |  | 1kHz~5kHz  | $U = 9.5 \times 10^{-4} x + 3.8 \times 10^{-4} \text{A}$       |
|                              |      |  | 5kHz~10kHz   | $U = 3.6 \times 10^{-3} x + 7.5 \times 10^{-4} \text{A}$       |
|                              | 直流电阻 | 10 $\Omega$ ~ 100 $\Omega$                                     |  | $U = 1.2 \times 10^{-5} x + 1.0 \times 10^{-6} \Omega$         |
|                              |      | 10 $\Omega$ ~ 1k $\Omega$                                      |  | $U = 7.8 \times 10^{-6} x + 0.9 \times 10^{-6} \text{k}\Omega$ |
|                              |      | 1k $\Omega$ ~ 10k $\Omega$                                     |  | $U = 8.5 \times 10^{-6} x + 1.0 \times 10^{-6} \text{k}\Omega$ |
|                              |      | 10k $\Omega$ ~ 100k $\Omega$                                   |  | $U = 1.3 \times 10^{-5} x + 0.8 \times 10^{-6} \text{k}\Omega$ |
|                              |      | 100k $\Omega$ ~ 1M $\Omega$                                    |  | $U = 2.3 \times 10^{-5} x + 0.8 \times 10^{-6} \text{M}\Omega$ |
| 1M $\Omega$ ~ 10M $\Omega$   |      | $U = 4.6 \times 10^{-5} x + 1.1 \times 10^{-6} \text{M}\Omega$ |  |  |
| 10M $\Omega$ ~ 100M $\Omega$ |      | $U = 1.2 \times 10^{-4} x + 1.5 \times 10^{-6} \text{M}\Omega$ |  |  |

其中，交流电压和交流电流部分亦可用矩阵表示：

表 16 交流电压申请认可的能力范围

| 交流电压       | 频率  |   |   |   |   |   |
|------------|---|---|---|---|---|---|
|            | 10Hz~20Hz   | 20Hz~40Hz   | 40Hz~20kHz  | 20kHz~50kHz   | 50kHz~100kHz  | 100kHz~300kHz   |
| 10mV~100mV | $U = 3.0 \times 10^{-4}x + 1.5 \times 10^{-2} \text{ mV}$ | $U = 1.2 \times 10^{-4}x + 8.0 \times 10^{-3} \text{ mV}$ | $U = 1.0 \times 10^{-4}x + 8.0 \times 10^{-3} \text{ mV}$ | $U = 2.5 \times 10^{-4}x + 8.0 \times 10^{-3} \text{ mV}$ | $U = 6.0 \times 10^{-4}x + 2.0 \times 10^{-2} \text{ mV}$ | $U = 1.1 \times 10^{-3}x + 2.5 \times 10^{-2} \text{ mV}$ |
| 100mV~1V   | $U = 3.0 \times 10^{-4}x + 5.0 \times 10^{-5} \text{ V}$  | $U = 1.1 \times 10^{-4}x + 2.0 \times 10^{-5} \text{ V}$  | $U = 5.2 \times 10^{-5}x + 1.0 \times 10^{-5} \text{ V}$  | $U = 9.0 \times 10^{-5}x + 1.2 \times 10^{-5} \text{ V}$  | $U = 1.3 \times 10^{-4}x + 4.0 \times 10^{-5} \text{ V}$  | $U = 5.0 \times 10^{-4}x + 1.0 \times 10^{-4} \text{ V}$  |
| 1V~10V     | $U = 3.0 \times 10^{-4}x + 5.0 \times 10^{-4} \text{ V}$  | $U = 1.1 \times 10^{-4}x + 2.0 \times 10^{-4} \text{ V}$  | $U = 3.8 \times 10^{-5}x + 1.4 \times 10^{-4} \text{ V}$  | $U = 9.0 \times 10^{-5}x + 1.2 \times 10^{-4} \text{ V}$  | $U = 1.2 \times 10^{-4}x + 2.5 \times 10^{-4} \text{ V}$  | $U = 3.3 \times 10^{-4}x + 8.0 \times 10^{-4} \text{ V}$  |
| 10V~100V   | $U = 3.0 \times 10^{-4}x + 5.0 \times 10^{-3} \text{ V}$  | $U = 1.1 \times 10^{-4}x + 2.0 \times 10^{-3} \text{ V}$  | $U = 6.5 \times 10^{-5}x + 7.0 \times 10^{-4} \text{ V}$  | $U = 1.0 \times 10^{-4}x + 1.2 \times 10^{-3} \text{ V}$  | $U = 1.8 \times 10^{-4}x + 3.0 \times 10^{-3} \text{ V}$  | $U = 1.1 \times 10^{-3}x + 2.0 \times 10^{-2} \text{ V}$  |
|            | 频率  |   |   |   |   |   |
|            | 40Hz~1kHz   | 1kHz~20kHz  | 20kHz~50kHz   | 50kHz~100kHz  |   |   |
| 100V~750V  | $U = 8.5 \times 10^{-5}x + 4.0 \times 10^{-3} \text{ V}$  | $U = 1.7 \times 10^{-4}x + 6.0 \times 10^{-3} \text{ V}$  | $U = 6.0 \times 10^{-4}x + 1.1 \times 10^{-2} \text{ V}$  | $U = 2.3 \times 10^{-3}x + 4.5 \times 10^{-2} \text{ V}$  |   |   |

表 17 交流电流申请认可的能力范围

| 交流电流     | 频率   |  |  |
|----------|--|--|--|
|          | 20Hz~1kHz  | 1kHz~5kHz  | 5kHz~10kHz   |
| 100mA~1A | $U = 2.6 \times 10^{-4}x + 3.6 \times 10^{-5} \text{ A}$ | $U = 5.0 \times 10^{-4}x + 1.0 \times 10^{-4} \text{ A}$ | $U = 8.0 \times 10^{-3}x + 2.0 \times 10^{-4} \text{ A}$ |
|          | 频率   |  |  |
|          | 40Hz~1kHz  | 1kHz~5kHz  | 5kHz~10kHz   |
| 1A~3A    | $U = 4.6 \times 10^{-4}x + 1.7 \times 10^{-4} \text{ A}$ | $U = 9.5 \times 10^{-4}x + 3.8 \times 10^{-4} \text{ A}$ | $U = 3.6 \times 10^{-3}x + 7.5 \times 10^{-4} \text{ A}$ |

## 附件 K

### 功率传感器校准结果的 CMC 评定：校准因子

#### K1 概述

##### K1.1 测量依据

依据 GJB/J3598-99《小功率座检定规程》和 JJG（邮电）062-2010《微波功率计检定规程》校准功率传感器，校准参量为校准因子。

##### K1.2 被测对象

选用的被校对象是 Agilent 公司的 E4413A 和 8487A 功率传感器。选用的原因是通过在多种同类仪器进行重复性和稳定性试验，经过分析比较试验结果，该功率传感器指标的稳定性及重复性在同类仪表当中处于领先水平。

##### K1.3 测量方法及主要设备

校准功率传感器校准因子的系统框图如图 1 所示。

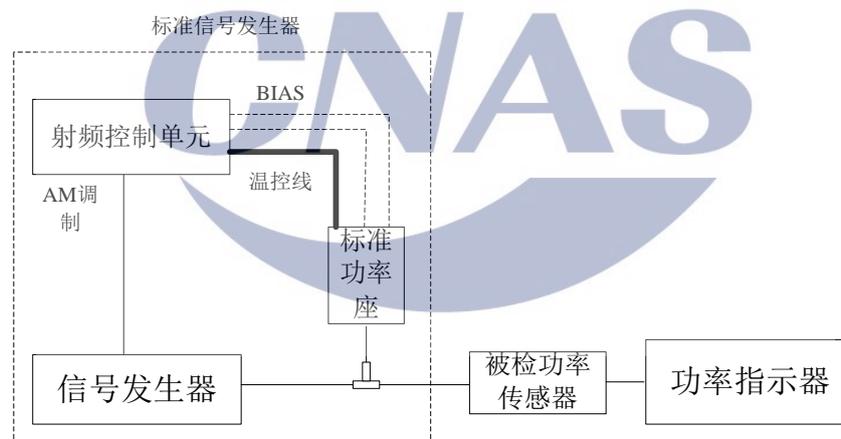


图 1 功率传感器校准因子校准系统框图

测试用主要设备及指标：

- (1) 信号发生器（型号 SMP04）
  - 频率范围：10MHz~40GHz
  - 频率准确度： $1 \times 10^{-6}$
- (2) 射频控制单元（型号 1805A）
  - 直流功率替代范围：0.5mW~10mW
  - 直流功率替代最大允许误差： $\pm (0.1\% + 0.5 \mu W)$
- (3) 标准功率座（型号 F1109）
  - 频率范围：10MHz~18GHz

校准因子不确定度：1.5%~2.0% ( $k=2$ )

## K2 测量模型及不确定度来源分析

### K2.1 测量模型

基于测量原理，由信号发生器、射频控制单元和标准功率座组成了标准信号发生器，标准信号发生器输出的射频信号被功率传感器吸收，其测量模型如式(1)所示：

$$P_s = P_u \frac{|1 - \Gamma_u \Gamma_s|^2}{1 - |\Gamma_u|^2} \quad (1)$$

式(1)中： $P_s$ 为信号源输出功率，单位W； $P_u$ 为功率传感器吸收的功率，单位W， $\Gamma_s$ 是信号发生器输出端口的反射系数， $\Gamma_u$ 是功率传感器的反射系数。

式(1)中，

$$P_s = \frac{P_{bs}}{K_s} \quad (2)$$

式(2)中： $P_{bs}$ 为射频控制单元直流替代功率设置值，W； $K_s$ 为标准功率座的校准因子；

式(1)中，

$$P_u = \frac{P_{bu}}{K_u} \quad (3)$$

式(3)中： $P_{bu}$ 为被校功率指示器测量值，W； $K_u$ 为被校功率传感器的校准因子。

则式(1)可表示为：

$$\frac{P_{bs}}{K_s} = \frac{P_{bu}}{K_u} \frac{|1 - \Gamma_u \Gamma_s|^2}{1 - |\Gamma_u|^2} \quad (4)$$

则被校准功率传感器的校准因子  $K_u$  为

$$K_u = K_s \frac{P_{bu}}{P_{bs}} \frac{|1 - \Gamma_u \Gamma_s|^2}{1 - |\Gamma_u|^2} \quad (5)$$

在一般的测量场景下， $\Gamma_u$  远小于 1，将式(5)写成自然对数的形式得到

$$K_u [dB] = K_s [dB] + P_{bu} [dB] + P_{bs} [dB] + M [dB] \quad (6)$$

式(6)失配误差项： $M = -8.68 |\Gamma_u| |\Gamma_s| [dB]$

考虑到标准功率座的温度漂移、校准因子随时间不稳定性、不平衡以及射频

控制单元的温度漂移等影响，式（6）可写为：

$$K_u [dB] = K_s [dB] + \Delta K_1 + \Delta K_2 + \Delta K_3 + P_{bu} [dB] + P_{bs} [dB] + \Delta P_t + M [dB] \quad (7)$$

式（7）中  $\Delta K_1$  为标准功率座温度漂移引入的不确定度分量， $\Delta K_2$  为标准功率座校准因子随时间不稳定性引入的不确定度分量， $\Delta K_3$  为标准功率座不平衡引入的不确定度分量， $\Delta P_t$  为射频控制单元温度漂移引入的不确定度分量。

## K2.2 不确定度来源

功率传感器校准因子校准结果不确定度来源主要包括：

- （1）标准功率座校准因子引入的不确定度  $u_1$ ；
- （2）标准功率座温度漂移引入的不确定度  $u_2$ ；
- （3）标准功率座校准因子随时间不稳定性引入的不确定度  $u_3$ ；
- （4）标准功率座不平衡（10mW/1mW）引入的不确定度  $u_4$ ；
- （5）射频控制单元 1805A 直流替代引入的不确定度  $u_5$ ；
- （6）射频控制单元 1805A 温度漂移引入的不确定度  $u_6$ ；
- （7）系统失配引入的不确定度  $u_7$ ；
- （8）测量重复性引入的不确定度  $u_8$ 。

## K3 标准不确定度评定

### K3.1 标准功率座校准因子引入的不确定度 $u_1$

标准功率座的校准因子的不确定度  $U_c$  ( $k=2$ ) 由其溯源证书得到，其引入的不确定度  $u_1$  计算结果见表 1。

表 1 标准功率座校准因子引入的不确定度计算表

| 标准功率座 | 频率范围                                 | 扩展不确定度 $U_c$ | 标准不确定度 $u_1$ |
|-------|--------------------------------------|--------------|--------------|
| F1109 | $f \leq 12\text{GHz}$                | 1.5%         | 0.75%        |
|       | $12\text{GHz} < f \leq 18\text{GHz}$ | 2.0%         | 1.0%         |

标准不确定度  $u_1 = U_c / k_1 = 0.75\% \sim 1.5\%$

### K3.2 标准功率座温度漂移引入的不确定度 $u_2$

由标准功率座的指标说明书得到，标准功率座温度漂移为  $\pm 0.05\%$ ，该值的概率分布为均匀分布  $k_2 = \sqrt{3}$ ，则

$$\text{标准不确定度 } u_2 = \frac{0.05\%}{\sqrt{3}} = 0.0289\%$$

### K3.3 标准功率座校准因子随时间不稳定性引入的不确定度 $u_3$

由标准功率座的指标说明书得到，标准功率座校准因子随时间的不稳定性为

±0.1%，该值的概率分布为均匀分布  $k_3 = \sqrt{3}$ ，则

$$\text{标准不确定度 } u_3 = \frac{0.1\%}{\sqrt{3}} = 0.0578\%$$

### K3.4 标准功率座不平衡（10mW/1mW）引入的不确定度 $u_4$

由标准功率座的指标说明书得到，标准功率座不平衡（10mW/1mW）为±0.1%，该值的概率分布为均匀分布  $k_4 = \sqrt{3}$ ，则

$$\text{标准不确定度 } u_4 = \frac{0.1\%}{\sqrt{3}} = 0.0578\%$$

### K3.5 射频控制单元 1805A 直流替代引入的不确定度 $u_5$

由 1805A 的指标说明书得到，射频控制单元的准确度为±（0.1%+5uW），校准过程中测试电平为 1mW，则射频控制单元的准确度为±0.6%，该值的概率分布为均匀分布  $k_5 = \sqrt{3}$ ，则

$$\text{标准不确定度 } u_5 = \frac{0.6\%}{\sqrt{3}} = 0.346\%$$

### K3.6 射频控制单元 1805A 温度漂移引入的不确定度 $u_6$

由 1805A 的指标说明书得到，射频控制单元温度漂移为±0.1%，该值的概率分布为均匀分布  $k_6 = \sqrt{3}$ ，则

$$\text{标准不确定度 } u_6 = \frac{0.1\%}{\sqrt{3}} = 0.0578\%$$

### K3.7 系统失配引入的不确定度 $u_7$

根据校准证书和仪表的指标说明书得到，

被校功率传感器输入端口电压驻波比典型值如下表 2：

表 2 被校功率传感器输入端口电压驻波比典型值

| 频率                                   | 电压驻波比 | 反射系数模  |
|--------------------------------------|-------|--------|
| $f \leq 12\text{GHz}$                | 1.05  | 0.0244 |
| $12\text{GHz} < f \leq 18\text{GHz}$ | 1.05  | 0.0244 |

标准功率座电压驻波比和反射系数模值如下表 3：

表 3 标准功率座电压驻波比和反射系数模值

| 标准功率座 | 频率范围                                 | 反射系数模 |
|-------|--------------------------------------|-------|
| F1109 | $f \leq 12\text{GHz}$                | 0.024 |
|       | $12\text{GHz} < f \leq 18\text{GHz}$ | 0.024 |

则失配引入的最大误差为  $a_2=4.34 \times 2 \times |\Gamma_s| \times |\Gamma_u|$ ，测量值落在该区间内的概率分布为反正弦分布， $k_7=\sqrt{2}$ ，则标准不确定度如表 4：

表 4 系统失配引入的不确定度  $u_7$ 

| 标准功率座 | 频率范围                                 | 失配误差      | 标准不确定度 |
|-------|--------------------------------------|-----------|--------|
| F1109 | $f \leq 12\text{GHz}$                | 0.00508dB | 0.12%  |
|       | $12\text{GHz} < f \leq 18\text{GHz}$ | 0.00508dB | 0.12%  |

### K3.8 测量重复性引入的不确定度 $u_8$

测量重复性引入的不确定度以实验标准差来计算，根据对功率传感器 E4413A 的多次测量结果，进行 10 次重复性测量，测试结果不大于：

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} = 0.1\%$$

## K4 合成标准不确定度及扩展不确定度

### K4.1 不确定度分量汇总

表 5 不确定度分量汇总表

| 序号 | 不确定度分量                     |    |            |      |            | 标准不确定度     |
|----|----------------------------|----|------------|------|------------|------------|
|    | 不确定度来源                     | 类型 | 测量误差或准确度   | 分布类型 | 包含因子       |            |
| 1  | 标准功率座 F1109 校准因子           | B  | 1.5%~3.0%  | /    | 2          | 0.75%~1.5% |
| 2  | 标准功率座 F1109 的温度漂移          | B  | 0.05%      | 均匀   | $\sqrt{3}$ | 0.02887%   |
| 3  | 标准功率座校准因子随时间不稳定性           | B  | 0.1%       | 均匀   | $\sqrt{3}$ | 0.05774%   |
| 4  | 标准热敏电阻座 F1109 不平衡 (10/1mW) | B  | 0.1%       | 均匀   | $\sqrt{3}$ | 0.05774%   |
| 5  | 1805A DC 替代                | B  | 0.6%       | 均匀   | $\sqrt{3}$ | 0.346%     |
| 6  | DC 替代 (1805) 随时间的漂移        | B  | 0.1%       | 均匀   | $\sqrt{3}$ | 0.05774%   |
| 7  | 系统失配                       | B  | 0.19%~2.4% | 反正弦  | $\sqrt{2}$ | 0.1%~0.87% |
| 8  | 连接、测量重复性                   | A  | 0.1%       | /    | /          | 0.1%       |

## K4.2 合成标准不确定度和扩展不确定度

$$\text{合成标准不确定度 } u_c = \sqrt{\sum_{i=1}^8 u_i^2}$$

取包含概率  $P=95\%$ , 按正态分布, 包含因子为  $k=2$ , 则扩展不确定度  $U=k \times u_c$ , 计算结果如下表 6:

表 6 功率传感器校准因子的不确定度评定结果

| 标准功率座 | 频率范围                                 | 合成不确定度 | 扩展不确定度 |
|-------|--------------------------------------|--------|--------|
| F1109 | $f \leq 12\text{GHz}$                | 0.85%  | 1.7%   |
|       | $12\text{GHz} < f \leq 18\text{GHz}$ | 1.07%  | 2.2%   |

## K5 申请认可的校准和测量能力

实验室申请认可的能力范围, 如下表所示:

表 7 申请认可的校准能力范围

| 测量仪器名称 | 校准参量 | 规范代号(含年号)名称  | 测量范围     | 扩展不确定度(校准和测量能力, $k=2$ )                                       |
|--------|------|--|----------|---|
| 功率传感器  | 校准因子 | GJB/J3598-99 《小功率座检定规程》<br>JJG(邮电)062-2010 《微波功率计检定规程》 | 25%~150% | $f \leq 12\text{GHz}$ : $U_{\text{rel}}=1.7\%$                |
|        |      |  |          | $12\text{GHz} < f \leq 18\text{GHz}$ : $U_{\text{rel}}=2.2\%$ |

## 附件 L

### 信号发生器校准结果的 CMC 评定：绝对电平

#### L1 概述

##### L1.1 测量依据

依据 JJG173-2003《信号发生器检定规程》校准信号发生器，校准参量为绝对电平。

##### L1.2 被测对象

选用的被校对象是 Agilent 公司的 E4438C 数字信号发生器。选用的原因是通过在多种同类仪表进行详细的分析和比较，该信号发射器指标的稳定性及重复性在同类仪表当中处于领先水平；经过多次重复性考核实验，采取每次对特定校准指标测试十次，得出的结论是该类型被校仪表的各项校准项目指标的测量重复性对不确定度的影响要小于其它同类被校仪表，基于以上分析，选用 Agilent 公司的 E4438C 数字信号发生器作为本校准项目校准测量能力的评定对象。

##### L1.3 测量方法及设备

根据射频信号发生器校准规范中的测量方法，在功率标称值大于等于 -45dBm 时，使用功率传感器校准射频信号发生器的输出功率；在功率标称值小于 -45dBm 时，首先在标称值大于等于 -45dBm 的某个功率点分别使用功率传感器和频谱分析仪进行校准，然后调整频谱仪的读数偏置，使频谱仪与功率传感器读数相等，然后在此基础上，利用频谱仪较好的线性度，校准标称值低于 -45dBm 的功率值。

不确定度分析的频率范围 50MHz~6GHz，功率范围 0dBm~-120dBm。

##### 测试用设备指标

(1) 功率计 NRVD+NRV-Z5

频率范围：50MHz~6GHz

功率测量范围：-50dBm~0dBm

校准因子不确定度： $U=2\%$  ( $k=2$ ) (50MHz~6GHz)

线性度： $\pm 0.03\text{dB}$  (-50dBm~0dBm)

电压驻波比：1.2

(2) 频谱分析仪 E4440A

线性度： $\pm 0.13\text{dB}$

## L2 测量模型及不确定度来源分析

### L2.1 测量模型

基于测量原理,首先考虑的是使用功率传感器校准射频信号发生器的输出功率的不确定度。其测量模型如下式(1)所示:

$$P_u = P_s \frac{|1 - \Gamma_u \Gamma_s|^2}{1 - |\Gamma_s|^2} \quad (1)$$

其中  $P_u$  是指信号源输出功率,即为被校准参量。而  $P_s$  为测量中功率传感器吸收的功率,  $\Gamma_u$  是信号发生器输出端口的反射系数,  $\Gamma_s$  是功率传感器的反射系数。如下图 1 所示:

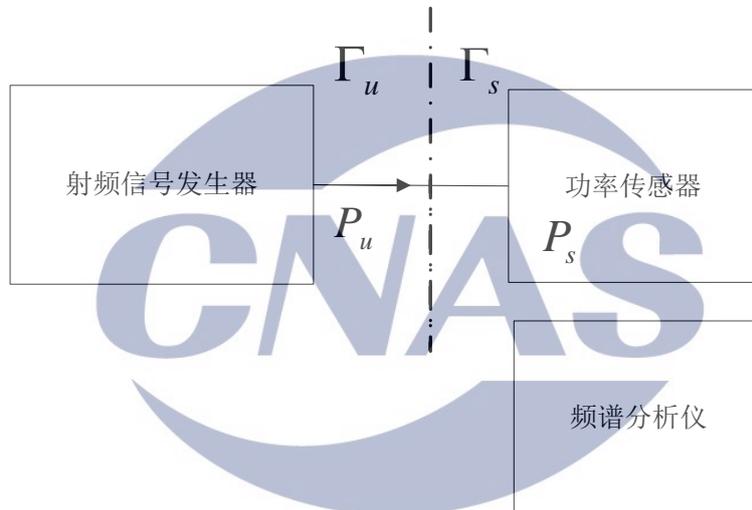


图 1 射频功率校准示意图

在一般的测量场景下,  $\Gamma_s$  远小于 1, 则进行泰勒级数展开且忽略高阶小量, 式(1)就可以近似为:

$$P_u = P_s |1 - \Gamma_u \Gamma_s|^2 \quad (2)$$

以对数形式表示为:

$$P_u [dBm] = P_s [dBm] + 10 \lg(|1 - \Gamma_u \Gamma_s|^2) [dB] \quad (3)$$

将(3)写成自然对数的形式有:

$$P_u [dBm] = P_s [dBm] + \frac{20 \ln(|1 - \Gamma_u \Gamma_s|)}{\ln 10} [dB] \quad (4)$$

式(4)中存在失配误差项  $M$ :

$$M = \frac{20 \ln(|1 - \Gamma_u \Gamma_s|)}{\ln 10} \quad (5)$$

在不确定度分析中一般认为  $M$  是反正弦分布。考虑反射系数的模值，由于  $|\Gamma_u \Gamma_s| \ll 1$ ，则将式 (5) 中自然对数项进行泰勒展开有  $\ln(1 - |\Gamma_u \Gamma_s|) \approx -|\Gamma_u \Gamma_s|$ ，且有  $\frac{20}{\ln 10} = 8.68$ ，即：

$$M = -8.68 |\Gamma_u| |\Gamma_s| [dB] \quad (6)$$

考虑到功率测量线性度引入的误差  $\Delta L$ ，则信号发生器的输出功率可由如下式得到：

$$P_u [dBm] = P_s [dBm] + \Delta L + M [dB] \quad (7)$$

在低于 -45dBm 的功率点使用频谱仪测量时，是利用频谱仪的线性度，代替功率计进行低量程的测量，但测量过程是一致的，可使用一致的测量模型进行分析。

### L2.2 不确定度来源

根据校准规范中的测量方法，在使用频谱分析仪校准时，在使用相同的量程，相同的测量参数设置条件下，频谱分析仪的量程误差，衰减器误差等因素带来的误差可以消除。因此不确定度来源如下：

- (1) 功率计参考电平测量不确定度分量引入的不确定度  $u_1$ ；
- (2) 功率计校准过程中的连接及读数重复性引入的不确定度  $u_2$ ；
- (3) 功率计校准过程中由系统失配引入的不确定度  $u_3$ ；
- (4) 功率计的功率测量线性度引入的不确定度  $u_4$ ；
- (5) 频谱分析仪的功率测量线性度引入的不确定度  $u_5$ ；
- (6) 频谱分析仪在校准过程中的连接及读数重复性引入的不确定度  $u_6$ 。
- (7) 功率传感器计量特性随温度漂移引入的不确定度  $u_8$ 。

## L3 标准不确定度评定

### L3.1 功率计参考电平测量不确定度分量引入的不确定度 $u_1$

标准功率计在功率参考点上测量结果的不确定度由上一级功率计和功率传感器的校准证书得到： $U=2\%$  ( $k=2$ )，转化为 dB 单位即  $U \approx 0.086\text{dB}$  ( $k=2$ )，标准不确定度为：

$$u_1 = 0.086\text{dB} / 2 = 0.043\text{dB}$$

### L3.2 功率计校准过程中的连接及读数重复性引入的不确定度 $u_2$

使用功率计对射频信号发生器输出重复测量 10 次，每次均重新连接后测量。

测量结果如下表 1 所示：

表 1 测量过程中的功率计连接及读数重复性

| 测量次数 | 功率计实测值 (dBm) |
|------|--------------|
| 1    | -10.12       |
| 2    | -10.13       |
| 3    | -10.10       |
| 4    | -10.15       |
| 5    | -10.12       |
| 6    | -10.07       |
| 7    | -10.12       |
| 8    | -10.11       |
| 9    | -10.11       |
| 10   | -10.13       |

单次测量结果的实验标准差为：

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \approx 0.02 \text{ dB}$$

由于日常校准时值测量 1 次，标准不确定度使用单侧测量结果的实验标准差表示  $u_2 = s = 0.02 \text{ dB}$

### L3.3 功率计校准过程中由系统失配引入的不确定度 $u_3$

由式 (6) 可得失配引入的最大误差  $M_{\max} = 8.68 \max(|\Gamma_s|, |\Gamma_u|)$

对功率计输入端口和射频信号发生器输出端口的驻波比进行测量，得到：

功率探头输入端口电压驻波比  $\leq 1.2$ ，即  $|\Gamma_s| \leq 0.091$

射频信号发生器输出端电压驻波比  $\leq 1.3$ ，即  $|\Gamma_u| \leq 0.125$

最大失配误差  $M_{\max} = a_3 = 8.68 \times 0.091 \times 0.125 = 0.099 \text{ dB}$ ，测量值落在该区间内的概率分布为反正弦分布， $k_3 = \sqrt{2}$ 。标准不确定度为：

$$u_3 = a_3 / k_3 \approx 0.07 \text{ dB}$$

### L3.4 功率计的功率测量线性度引入的不确定度 $u_4$

根据功率计和功率探头的指标说明书，测量线性度最大允许误差：

$a_4 = 0.03 \text{ dB}$ ，即设测量值落在该区间内的概率分布为均匀分布， $k_4 = \sqrt{3}$ ，标准不确定度为：

$$u_4 = a_4 / \sqrt{3} \approx 0.0173 \text{ dB}$$

### L3.5 频谱分析仪幅度线性引入的标准不确定度分量 $u_5$

根据频谱分析仪的指标说明书，其幅度线性准确度为 $\pm 0.13\text{dB}$ ，设测量值落在该区间内的概率分布为均匀分布， $k_5=\sqrt{3}$ ，标准不确定度为：

$$u_5 = a_5 / \sqrt{3} \approx 0.075\text{dB}$$

### L3.6 频谱分析仪在校准过程中的连接及读数重复性引入的不确定度 $u_6$

功率测量范围为 $-45\text{dBm} \sim -110\text{dBm}$ 时：

在射频信号发生器输出频率  $935.2\text{MHz}$ ，功率为 $-80\text{dBm}$  和 $-100\text{dBm}$  处，使用频谱分析仪对射频信号发生器重复测量 10 次，每次均重新连接后测量。测量结果如下表 2 和表 3 所示：

表 2 频谱仪测量读数重复性（射频信号发生器示值为 $-80\text{dBm}$ ）

| 测量次数 | 频谱分析仪实测值 (dBm) |
|------|----------------|
| 1    | -80.17         |
| 2    | -80.13         |
| 3    | -80.10         |
| 4    | -80.15         |
| 5    | -80.12         |
| 6    | -80.05         |
| 7    | -80.12         |
| 8    | -80.16         |
| 9    | -80.13         |
| 10   | -80.13         |

根据表 2 测量数据，单次测量结果实验标准差为：

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \approx 0.033\text{dB}$$

表 3 频谱仪测量读数重复性（射频信号发生器示值为 $-100\text{dBm}$ ）

| 测量次数 | 频谱分析仪实测值 (dBm) |
|------|----------------|
| 1    | -99.84         |
| 2    | -99.96         |
| 3    | -99.86         |
| 4    | -99.87         |
| 5    | -99.95         |
| 6    | -99.88         |
| 7    | -99.94         |

|    |        |
|----|--------|
| 8  | -99.97 |
| 9  | -99.89 |
| 10 | -99.93 |

根据表 3 测量数据，单次测量结果实验标准差为：

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \approx 0.05 \text{dB}$$

标准不确定度使用实验标准差表示，取  $u_6 = s = 0.05 \text{dB}$

通过分析测量范围  $-45 \text{dBm} \sim -110 \text{dBm}$  范围的实验数据，频谱分析仪的测量重复性为  $0.03 \text{dB} \sim 0.05 \text{dB}$ ，且对合成标准不确定度的影响不大，因此选择较大的数  $0.05 \text{dB}$  作为不确定度分量。

通过实验分析功率测量范围为  $-110 \text{dBm} \sim -120 \text{dBm}$  时的情况，每次均重新连接后测量。实验数据如表 4 所示。

表 4 频谱仪测量读数重复性（射频信号发生器示值为  $-120 \text{dBm}$ ）

| 测量次数 | 频谱分析仪实测值 (dBm) |
|------|----------------|
| 1    | -119.82        |
| 2    | -119.93        |
| 3    | -119.86        |
| 4    | -120.11        |
| 5    | -119.86        |
| 6    | -120.01        |
| 7    | -120.10        |
| 8    | -119.88        |
| 9    | -119.77        |
| 10   | -119.80        |

根据表 4 测量数据，则单次测量结果实验标准差

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \approx 0.12 \text{dB}$$

标准不确定度使用实验标准差表示，则  $u_6 = s = 0.12 \text{dB}$

### L3.7 功率传感器计量特性随温度漂移引入的不确定度 $u_7$

根据功率传感器参数手册，在校准温度变化范围  $\pm 5^\circ$  时，其功率测量准确度为  $\pm 0.04 \text{dB}$ ，则取温度漂移误差  $a_7 = 0.04 \text{dB}$ ，相应不确定度分量呈均匀分布， $k_7 = \sqrt{3}$ ，标准不确定度为：

$$u_7 = a_7 / k_7 = 0.023 \text{ dB}$$

## L4 合成标准不确定度及扩展不确定度

对各不确定度分量对应的灵敏度系数进行分析。依据测量模型，不确定度分量  $u_1$ 、 $u_2$ 、 $u_4$ 、 $u_5$ 、 $u_6$ 、 $u_7$  均对应 (7) 式中的  $P_s [\text{dBm}]$ ，其灵敏度系数为 1。在分析  $u_3$  时已经将系数 8.68 考虑进去，无须重复考虑。

### L4.1 不确定度分量汇总

表 5 不确定度分量汇总表 (测量范围 0~-45dBm)

| 序号 | 不确定度分量                |    |          |      |            |          |
|----|-----------------------|----|----------|------|------------|----------|
|    | 不确定度来源                | 类型 | 测量误差或准确度 | 分布类型 | 包含因子       | 标准不确定度   |
| 1  | 功率计参考电平测量             | B  | 0.086dB  | /    | 2          | 0.043dB  |
| 2  | 功率计校准过程中的连接及读数重复性     | A  | /        | /    | /          | 0.02dB   |
| 3  | 功率计校准过程中系统失配          | B  | 0.099dB  | 反正弦  | $\sqrt{2}$ | 0.07dB   |
| 4  | 功率计的功率测量线性度           | B  | 0.03dB   | 均匀   | $\sqrt{3}$ | 0.0173dB |
| 5  | 功率传感器计量特性随温度漂移引入的不确定度 | B  | 0.04dB   | 均匀   | $\sqrt{3}$ | 0.023dB  |

表 5 不确定度分量汇总表 (测量范围-45dBm~-110dBm)

| 序号 | 不确定度分量            |    |          |      |            |          |
|----|-------------------|----|----------|------|------------|----------|
|    | 不确定度来源            | 类型 | 测量误差或准确度 | 分布类型 | 包含因子       | 标准不确定度   |
| 1  | 功率计参考电平测量         | B  | 0.086dB  | /    | 2          | 0.043dB  |
| 2  | 功率计校准过程中的连接及读数重复性 | A  | /        | /    | /          | 0.02dB   |
| 3  | 功率计校准过程中系统失配      | B  | 0.099dB  | 反正弦  | $\sqrt{2}$ | 0.07dB   |
| 4  | 功率计的功率测量线性度       | B  | 0.03dB   | 均匀   | $\sqrt{3}$ | 0.0173dB |

|   |                       |   |        |    |            |         |
|---|-----------------------|---|--------|----|------------|---------|
| 5 | 频谱分析仪的功率测量线性度         | B | 0.13dB | 均匀 | $\sqrt{3}$ | 0.075dB |
| 6 | 频谱分析仪在校准过程中的连接及读数重复性  | A | /      | /  | /          | 0.05dB  |
| 7 | 功率传感器计量特性随温度漂移引入的不确定度 | B | 0.04dB | 均匀 | $\sqrt{3}$ | 0.023dB |

表 6 不确定度分量汇总表（测量范围-110dBm~-120dBm）

| 序号 | 不确定度分量                |    |          |      |            |          |
|----|-----------------------|----|----------|------|------------|----------|
|    | 不确定度来源                | 类型 | 测量误差或准确度 | 分布类型 | 包含因子       | 标准不确定度   |
| 1  | 功率计参考电平测量             | B  | 0.086dB  | /    | 2          | 0.043dB  |
| 2  | 功率计校准过程中的连接及读数重复性     | A  | /        | /    | /          | 0.02dB   |
| 3  | 功率计校准过程中系统失配          | B  | 0.099dB  | 反正弦  | $\sqrt{2}$ | 0.07dB   |
| 4  | 功率计的功率测量线性度           | B  | 0.03dB   | 均匀   | $\sqrt{3}$ | 0.0173dB |
| 5  | 频谱分析仪的功率测量线性度         | B  | 0.13dB   | 均匀   | $\sqrt{3}$ | 0.075dB  |
| 6  | 频谱分析仪在校准过程中的连接及读数重复性  | A  | /        | /    | /          | 0.12dB   |
| 7  | 功率传感器计量特性随温度漂移引入的不确定度 | B  | 0.04dB   | 均匀   | $\sqrt{3}$ | 0.023dB  |

#### L4.2 合成标准不确定度

测量范围为-45dBm 和-45dBm 以上时，合成标准不确定度为：

$$u_{c1} = \sqrt{\sum_{i=1}^5 u_i^2} \approx 0.089\text{dB}$$

测量范围为-45dBm~-110dBm 时，合成标准不确定度为：

$$u_{c2} = \sqrt{\sum_{i=1}^7 u_i^2} \approx 0.127\text{dB}$$

测量范围为-110dBm~-120dBm 时，合成标准不确定度为：

$$u_{c3} = \sqrt{\sum_{i=1}^7 u_i^2} \approx 0.167\text{dB}$$

#### L4.3 扩展标准不确定度

包含概率  $P=95\%$  时，按正态分布，取包含因子  $k=2$ 。

测量范围为 0~-45dBm 时，扩展不确定度为：

$$U=k \times u_{c1}=2 \times 0.089 \approx 0.18\text{dB}$$

测量范围为-45dBm~-110dBm 时，扩展不确定度为：

$$U= k \times u_{c2}=2 \times 0.127 \approx 0.26\text{dB}$$

测量范围为-110dBm~-120dBm 时，扩展不确定度为：

$$U= k \times u_{c3}=2 \times 0.167 \approx 0.34\text{dB}。$$

## L5 申请认可的校准和测量能力

实验室申请认可的能力范围，如下表所示：

表 8 申请认可的校准能力范围

| 测量仪器名称 | 校准参量 | 规范代号（含年号）名称            | 测量范围            | 扩展不确定度（校准和测量能力，k=2） |
|--------|------|------------------------|-----------------|---------------------|
| 信号发生器  | 绝对电平 | JJG173-2003《信号发生器检定规程》 | 0~-45dBm        | $U=0.18\text{dB}$   |
|        |      |                        | -45dBm~-110dBm  | $U=0.26\text{dB}$   |
|        |      |                        | -110dBm~-120dBm | $U=0.34\text{dB}$   |

