



CNAS-GL007

电器领域测量不确定度的评估指南

Guidance on Evaluating the Uncertainty of Measurement in Electrical Apparatus Testing

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

中国合格评定国家认可委员会

目录

1 概述.....	3
2 引用和参考文件.....	3
3 定义和符号.....	3
3.1 不确定度的基本术语.....	3
3.2 通用符号.....	4
4 不确定度的评估.....	5
4.1 不确定度来源.....	5
4.2 测量模型.....	8
4.3 测量值的基本分布	10
4.4 标准不确定度的 A 类评定.....	15
4.5 标准不确定度的 B 类评定.....	17
4.6 合成标准不确定度	20
4.7 扩展不确定度.....	21
4.8 不确定度报告.....	22
4.9 不确定度评定方法流程图.....	23
4.10 评定测量不确定度的注意事项	23
4.11 不确定度与限值的符合性判定	25
附录 A: (资料性附录) 电器领域测量不确定度评估案例.....	26
A1 温度(热电偶法)不确定度评估	26
A2 电流和功率测量不确定度评估	29
A3 电量不确定度评估	32
A4 电容器电容量不确定度评估	34
A5 接地电阻不确定度评估	40
A6 噪声不确定度评估	42
A7 电气间隙和爬电距离测量方法不确定度	46
A8 绕组温升(电阻法)不确定度评估	49
A9 频率不确定度评估	54
A10 工作温度下的泄漏电流不确定度评估	56
A11 光伏组件开路电压、短路电流及最大功率测量方法不确定度	59
附录 B: (资料性附录) 电器领域仪器设备准确度限值	73

前言

本文件由中国合格评定国家认可委员会实验室专门委员会电气专业委员会编制，旨在为电器检测实验室进行不确定度评估提供指南。

本文件是 CNAS 的指南性文件，对电器检测实验室在实施认可时提供指引，并不增加对 CNAS-CL01《检测和校准实验室能力认可准则》和 CNAS-CL01-A003《检测和校准实验室能力认可准则在电气检测领域的应用说明》的要求。

本文件部分采用了 IEC Guide 115 *Application of uncertainty of measurement to conformity assessment activities in the electrotechnical sector*《电工领域合格评定活动测量不确定度的应用》的内容，附录 A 中的案例由各专业领域机构提供。附录 B 采用了 IEC 60141: 2019 *Instrument Accuracy Limits*《仪器设备精确度》。

本文件的编制得到了中国家用电器研究院大力支持和协助，在此表示感谢。



电器领域测量不确定度的评估指南

1 概述

本文件根据 CNAS-CL01-G003: 2019《测量不确定度的要求》，并结合电器检测实践制定，本文件参照了国际相关组织有关不确定度应用指南，如：IEC Guide 115，对于防爆和高压领域还可进一步参考以下两个文件：IECEX OD012 *ExTAG Guide for Application of Uncertainty of Measurement to conformity for laboratory tests carried out under the IECEx System* 和 STL 技术报告 *Handling of Measurement Uncertainties in Testing and Test Documents*。

本文件不包括电磁兼容测量不确定度的评估内容。

2 引用和参考文件

CNAS-CL01-G003: 2019《测量不确定度的要求》

CNAS-GL015: 2018《声明检测或校准结果及与规范符合性的指南》

JJF 1059.1-2012《测量不确定度评定与表示》

JJF 1001-2011《通用计量术语及定义技术规范》

ISO/TS 16491-2012: *Guidelines for the evaluation of uncertainty of measurement in air conditioner and heat pump cooling and heating capacity tests*

APLAC TC 005: *Interpretation and Guidance on the estimation of uncertainty of measurement in testing*

IEC Guide 115: *Application of uncertainty of measurement to conformity assessment activities in the electrotechnical sector*

IECEE OD-5014: 2019 (Ed1.1): *Instrument Accuracy Limits*

IECEX OD012 ExTAG GUM Edition 2: *ExTAG Guide for application of uncertainty of measurement to conformity for laboratory tests carried out under the IECEx System*

STL Technical Report: *Handling of Measurement Uncertainties in Testing and Test Documents*

3 定义和符号

3.1 不确定度的基本术语

3.1.1 测量不确定度

与测量结果相联系的参数，表征合理地赋予被测量之值得分散性。

3.1.2 标准不确定度(Standard uncertainty)

以标准偏差表示的测量不确定度。

3.1.3(不确定度的)A类评定(Type A evaluation of uncertainty)

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。

注：规定测量条件是指重复性测量条件，期间精密度测量条件或复现性测量条件。

3.1.4（不确定度的）B类评定（Type B evaluation of uncertainty）

用不同于测量不确定度 A 类评定的方法对测量不确定度分量进行的评定。

3.1.5 合成标准不确定度（Combined standard uncertainty）

由在一个测量模型中各输入量的标准测量不确定度获得的输出量的标准测量不确定度。

注：在数学模型中的输入量相关的情况下，当计算合成标准不确定度时必须考虑协方差。

3.1.6 扩展不确定度（Expanded uncertainty）

合成标准不确定度与一个大于 1 的数字因子的乘积。（JJF 1059.1 3.18）

用于确定测量结果区间的量。合理赋予被测量的值分布的大部分可望落于该区间。扩展不确定度有时也称为展伸不确定度、范围不确定度。

合理赋予被测量的值不只一个，而是多个，且具有一定分散性，对测量结果 y 而言，若其扩展不确定度为 U ，则被测量的值将以一定概率包含于区间 $[y - U, y + U]$ 中。

3.1.7 包含因子（Coverage factor）

为获得扩展不确定度，对合成标准不确定度所乘的数字因子，记为 k 。

3.1.8 包含概率（Level of confidence）

扩展不确定度确定的测量结果区间包含合理赋予被测量值分布的概率，记为 p ，有时也称为置信水平、包含概率。

3.1.9 相对标准不确定度（Relative uncertainty）

标准不确定度除以测得值的绝对值。（JJF 1059.1 3.17）

3.2 通用符号

X_i : 输入量

x_i : X_i 的估计值

$u(x_i)$: x_i 的标准不确定度

- c_i : 灵敏系数
 y : 测量结果, 被测量的估计值
 $u_c(y)$: y 的合成标准不确定度
 k : 包含因子
 U : y 的扩展不确定度

4 不确定度的评定

4.1 不确定度来源

从影响测量结果的因素考虑, 测量结果的不确定度一般来于: 被测对象、测量设备、测量环境、测量人员和测量方法。

4.1.1 被测对象

1) 被测量的定义不完善

被测量即被测对象的特定量, 深刻全面理解被测量的定义是进行正确测量的前提。如果定义本身不明确或不完善, 则按照这样的定义得出的测量值必然和真值之间存在一定偏差。

2) 实现被测量定义的方法不完善

被测量本身定义明确, 但由于技术的困难或其它原因, 在实际测量中, 对被测量定义的实现存在一定误差或采用与定义近似的方法去测量。例如: 被测对象的输入功率是在额定电压、正常负载和正常工作温度下工作时的功率。但在实际测量中, 电压是由稳压源提供的, 由于稳压源自身的精度影响, 使得工作电压不可能精确为额定值, 故测量结果中应考虑此项不确定因素。因此, 只有对被测量的定义和特点, 仔细研究、深刻理解, 才能尽可能减小采用近似测量方法所带来的误差或将其控制在一个确定范围内。

3) 测量样本不能完全代表定义的被测量

被测量对象的某些特征, 如: 表面光洁度, 形状、温度膨胀系数、导电性、磁性、老化、表面粗糙度、重量等在测量中有特定要求, 但所抽取样本未能完全满足这些要求, 自身具有缺陷, 这种情况对测量结果的不确定度产生影响。

4) 被测量不稳定

当被测量的某些特性受环境或时间因素影响, 在整个测量过程中保持动态变化, 这种情况对测量结果的不确定度产生影响。

4.1.2 测量设备

计量标准器、测量仪器和附件及其状态均会引入误差。计量标准器和测量仪器校准不确定度,或测量仪器的最大允差或测量仪器的准确度等级均是测量不确定度评定必须考虑的因素。

4.1.3 测量环境

1) 当环境条件在一定范围内变化,或在环境条件不完善的情况下进行测量时产生不确定度。此类环境条件如:温度、振动噪声、供给电源的变化、空气组成、空气污染、空气流动、热辐射、大气压、空气流动等。

2) 由于对影响测量结果的环境条件认识不足,致使测量中或分析中忽视了对某些环境条件的设定和调整,从而造成不确定度。

4.1.4 测量人员

1) 人员读数误差

测量人员使用模拟式测量仪器引起的读数误差即估读误差。即测量人员读取带指针仪表或带标线仪器的示值,也就是读取非整数刻度值时,由于估读不准而引起的误差。

2) 人员瞄准误差

采用显微镜等光学仪器,通过使视场中的两个几何图形重合对线进行测量,对线准确度与操作者经验和对线形状有关。

3) 人员操作误差

测量过程中时间的控制、测试点的布置等取决于测试人员的经验、能力、知识水平及工作态度、身体状态等人为因素而引入的操作误差。

4.1.5 测量方法

1) 测量原理误差

测量方法本身就存在一定的原理误差,对被测量定义实现不完善。例如,在电气强度试验中,由于耐压试验台自身内阻影响,使得加于样品两端的电压低于实际设定值,这样必然造成试验结果存在一定的不确定度。

2) 测量过程

①测量顺序

应严格按照测量规范的规定顺序进行。遗漏或颠倒某一操作过程都有可能造成测量结果的误差,甚至使测量失去意义。

②测量次数

一般来说测量次数不同，测量精密度也不同，增加测量次数，可以提高测量精度。但 $n > 10$ 以后， σ_x 已减少得非常缓慢。此外，由于测量次数愈大，也愈难保证测量条件的恒定，从而带来新的误差，因此一般情况下取 $n=10$ 以内较为适合。

③测量所需时间

有的测量规定必须在一定条件下，一定时间内完成，超出则结果不准确。如器具耐潮湿试验后的泄漏电流测试必须在 5s 内完成。

④测量点数

操作规范规定测量若干点，但实际检测中，为节省时间或出于其它考虑减少或增加了测量点数，也对最终结果有影响。

⑤瞄准方式

测量方法不同，采用的测量仪器不同，对应的瞄准方式也不同，如采取目测或用光学瞄准，其瞄准精度必然不同。

⑥方向性

测量结果须在一定稳态下获得，试验往往以不同方向趋于稳态，对于有些测量仪器，如具有滞后性或磁滞性的仪器读数是不同的。

3) 数据处理

①测量标准和标准物质的赋值不准

标准器具本身不可避免存在着制造偏差，它是由更高一级的标准来检定的，这些高一级的标准本身也存在着误差。

②物理常数或从外部资料得到的数据不准

外部资料中提供的数据很多是由以前的测量为基础或单纯凭经验得出的，不可避免地存在着误差。

③算法及算法实现

采用不同的算法处理数据，如计算标准差 σ ，分别运用贝塞尔法和极差法，所得结果必然不同。

④有效位数

数据有效位数不同，测量精密度不同，应根据测量要求或所采用的测量设备而定。

⑤数值修约

由于数字运算位数有限，数值修约或截尾造成不确定度。

⑥修正

有些系统误差是可以修正的，但由于对误差因素本身的认识不充分，修正值也存在着不确定度。

测量结果的不确定度评定，既不能过大，也不能过小，以免造成误判。在考虑不确定度分量时，应作到不遗漏、不重复、不增加，并正确评定其数值。

评定不确定度的原则，不能代替人的思维、理智和专业技巧。它取决于对测量和被测量本质的深入了解和认识。因此，测量结果的不确定度评定的质量和实用性，主要取决于对不确定度影响量的认识程度和细致而中肯的分析。

4.2 测量模型

通常，被测量 Y 并非直接测得，而是由其它 N 个已知量 $X_1, X_2, \dots, X_N$ ，通过函数关系 f 来确定，即：

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N)$$

为简便起见，同一符号既表示物理量（被测量），又代表该量可能的观测结果（随机变量）。

例如：导线直径为 d ，电阻率为 ρ ，匝数为 N 的线圈，其电阻值为：

$$R = 4\rho Nl/\pi d^2$$

l ——线圈平均匝长

测量模型，即测量过程中的数学模型，往往与测量程序有关。

例如，被测产品的输入功率测量，其数学模型完全取决于被测产品的测量程序。

1) 对于整个测试过程中能保持稳定工作状态的被测产品，输入功率测量方法如图 4-1，测量结果可直接由数字功率分析仪表头读取，数学模型为：

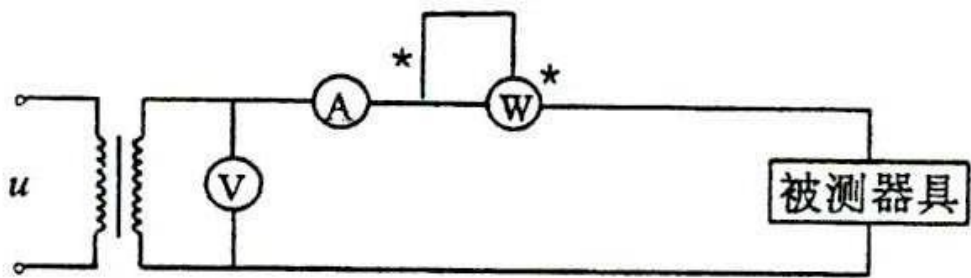
$$P_x = P$$

P_x ——被测功率 W ；

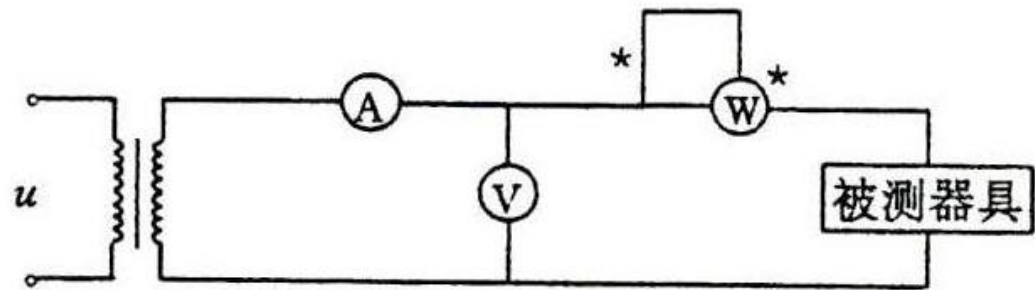
P ——表头读数 W

A 单相器具

内接法



外接法



B 三相器具

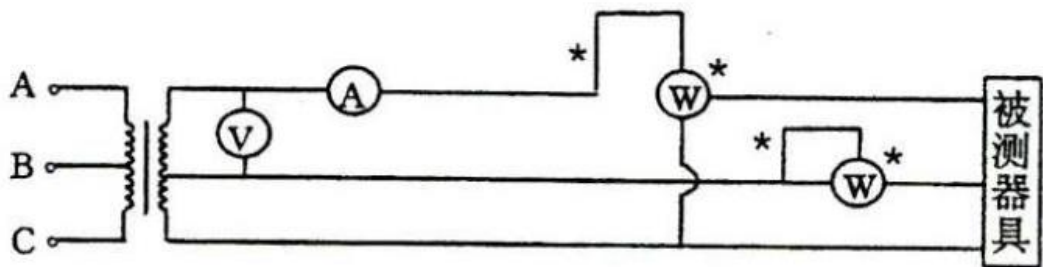


图 4-1 输入功率测量（稳态）

2) 对于整个测试过程中工作状态会发生变化的被测产品，其输入功率测量方法如图 4-2，数学模型为：

$$P_x = \frac{w}{t} = \frac{n}{N} \times 3.6 \times 10^6 \text{ 瓦秒}$$

- P_x ——被测功率 w ;
- w ——电度表累积测得电能;
- N ——电度表每千瓦时盘转动数;
- n ——电度表的转数转;
- t ——测量时间 s

A 单相器具

内接法

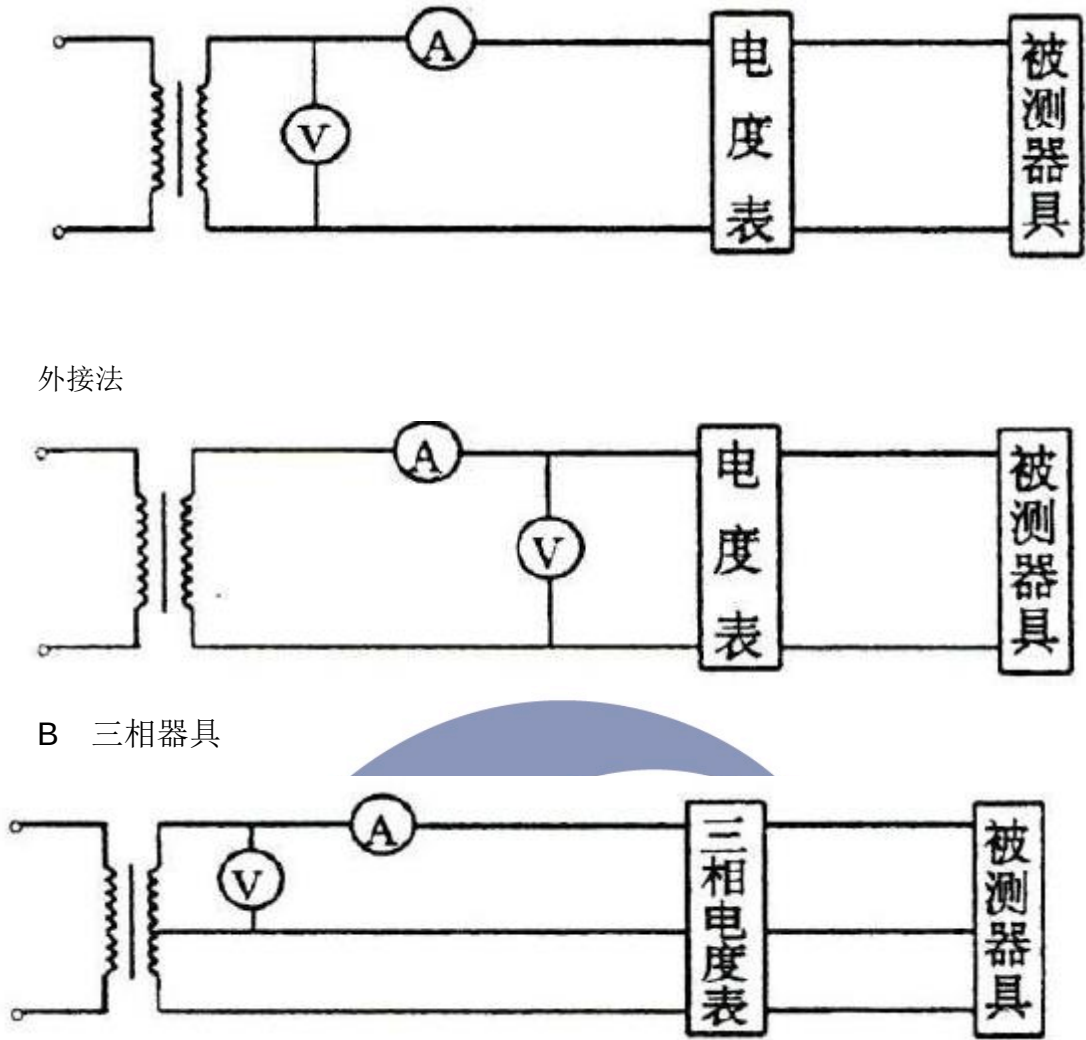


图 4-2 输入功率测量（非稳态）

4.3 测量值的基本分布

在同一条件下，对某个量值进行多次重复测量，由于测量不确定度的影响，所得结果具有分散性，且呈现一定的分布规律，常见的分布情况有以下几种：

4.3.1 正态分布

测量值 x 服从期望 μ 标准差 σ 的正态分布，记为

$$x \sim N(\mu, \sigma)$$

正态分布 $N(\mu, \sigma)$ ，如图 4-3 所示，其测量值具有以下特点：

- （1）单峰性：距 μ 近的值比距 μ 远的值出现的概率大；
- （2）对称性：比 μ 大某量的测量值出现的机会等于比 μ 小同一量的测量值出现的机会；

(3) 有界性：在一定的测量条件下，很大或很小的测量值不会出现。

(4) 抵偿性：各测量值的平均值随测量次数增大而趋于期望 μ 。

正态分布 $N(\mu,\sigma)$ ，其概率密度函数 $f(x)$ 为：

$$f(x)=\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}$$

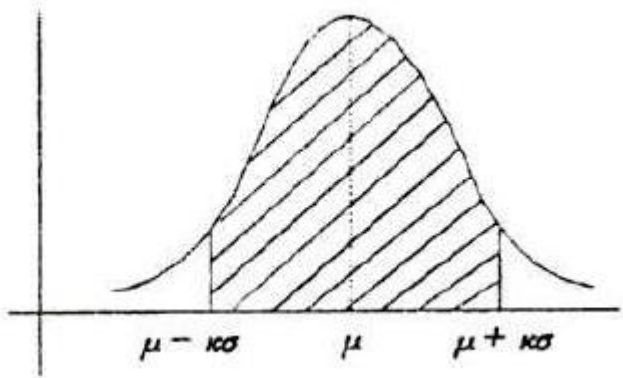


图 4-3 正态分布

$f(x)$ 具有以下性质：

- (1) 曲线关于 $x = \mu$ 对称；
- (2) 当 $x = \mu$ 时取到最大值。

欲使 x 落于区间 $[\mu - k\sigma,\mu + k\sigma]$ 的包含概率为 p ，即

$$\int_{\mu-k\sigma}^{\mu+k\sigma} f(x) dx = p$$

可通过查正态分布密度函数数值表得出对应一定 p 的 k 值，常见如下表：

表 4-1 常见正态分布密度函数表

p	k	p	k
0.5	0.6745	0.9545	2
0.6827	1	0.99	2.576
0.9	1.645	0.9973	3
0.95	1.96		

正态分布是测量中的基本分布。理论研究表明，若测量值受到大量的、独立的、大小可比的多个效应的影响，则该测量值服从正态分布。

4.3.2 均匀分布

在实际测量中，均匀分布是经常遇到的一种分布，其主要特点是：测量值在某一范围中各处出现的机会一样，即均匀一致。故又称为矩形分布或等概率分布，如图 4-4 所示。

测量值 x 服从均匀分布 $U[a_-, a_+]$ ，其中 a_- 为 x 出现的下界， a_+ 为 x 出现的上界，其概率分布密度函数：

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{a_+ - a_-} & a_- \leq x \leq a_+ \\ 0 & \text{其它} \end{cases}$$

记为 $x \sim U[a_-, a_+]$

若测量值服从均匀分布 $U[a_-, a_+]$ ，则其期望 E 为区间 $[a_-, a_+]$ 的中点，

$$E = \frac{a_- + a_+}{2}$$

而其标准差为

$$\sigma = \frac{1}{2\sqrt{3}}(a_+ - a_-)$$

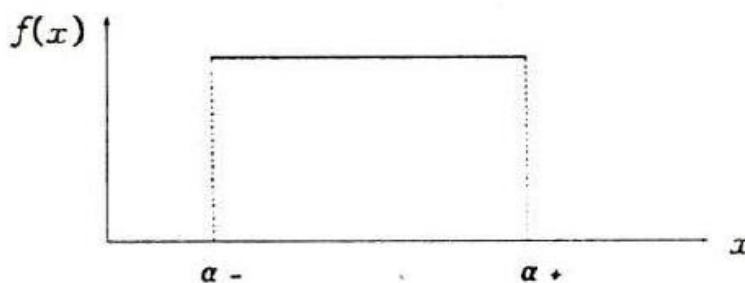


图 4-4 均匀分布

遵从均匀分布或假设为均匀分布的测量值为：

(1) 数据修约引起的舍入误差，例如：测量结果要求保留到小数点后 3 位，将实测或算出的数据第 4 位按四舍五入原则舍去，则存在舍入误差 0.0005；

(2) 电子计算器的量化误差；

- (3) 摩擦引起的误差;
 - (4) 仪表度盘刻度误差或仪器传动机构的空程误差;
 - (5) 平衡指示器调零不准引起的误差, 此项误差和仪器的调节精度与人员操作有关;
 - (6) 数字示值的分辨力;
- 显示装置的分辨力指显示装置能有效辨别的最小示值差, 一般即为最小显示单位, 设为 Δ , 则其标准差:

$$s = \frac{\Delta}{2\sqrt{3}}$$

- (7) 人员瞄准误差;

用人眼进行瞄准时的精度与人眼的分辨本领指标线的形状和对准方式有关。当用两条实线重合时瞄准精度为 $\pm 60'' \times 250\text{mm}$ (明视距离); 用两条实线的线端对准, 瞄准精度为 $\pm (10'' \sim 20'') \times 250\text{mm}$; 用一条虚线压一条实线或轮廓边缘瞄准精度为 $\pm (20'' \sim 30'') \times 250\text{mm}$; 用双线对移跨单位线, 瞄准精度为 $\pm 5'' \times 250\text{mm}$ 。以上数据均是直接由人眼观测时的数据。

- (8) 人员读数误差。

因为视差引起的读数误差或读取非整数刻度值时, 由于估读不准而导致的误差, 一般为最小分度的 $\frac{1}{10}$ 。

4.3.3 三角分布

若测量值出现的机会在中点最大, 随即自中点向两边直线下降, 在边缘处为 0, 则称其服从三角分布, 如图 4-5 所示。

两独立均匀分布 $\xi_1, \xi_2 \sim U[-a, a]$, 则 $\eta = \xi_1 + \xi_2$ 服从三角分布。

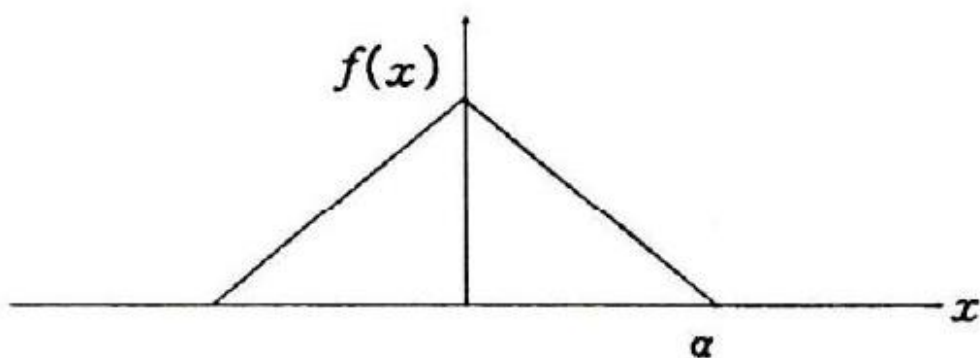


图 4-5 三角分布

在实际测量中若整个测量过程必须进行两次才能完成,而每次测量均服从相同的均匀分布,则总的结果服从三角分布,其概率密度函数为:

$$f(x) = \begin{cases} (x+a)/a^2 & -a \leq x < 0 \\ (a-x)/a^2 & 0 \leq x < a \\ 0 & \text{其它} \end{cases}$$

其标准差、期望为:

$$E = 0$$

$$\sigma = \frac{a}{\sqrt{6}}$$

服从三角分布的情况有:

- (1) 两独立同均匀分布之和或差;
- (2) 由数值修约或分辨力影响的两测量值之和或差;
- (3) 用替代法检定标准元件时两次调零不准的影响。

4.3.4 反正弦分布

均匀分布变量的正弦或余弦函数服从反正弦分布。

测量值 x 服从 $[-a, a]$ 上反正弦的分布,如图 4-6 所示,其概率密度函数为:

$$f(x) = \begin{cases} 1/\pi\sqrt{a^2 - x^2} & -a \leq x \leq a \\ 0 & \text{其它} \end{cases}$$

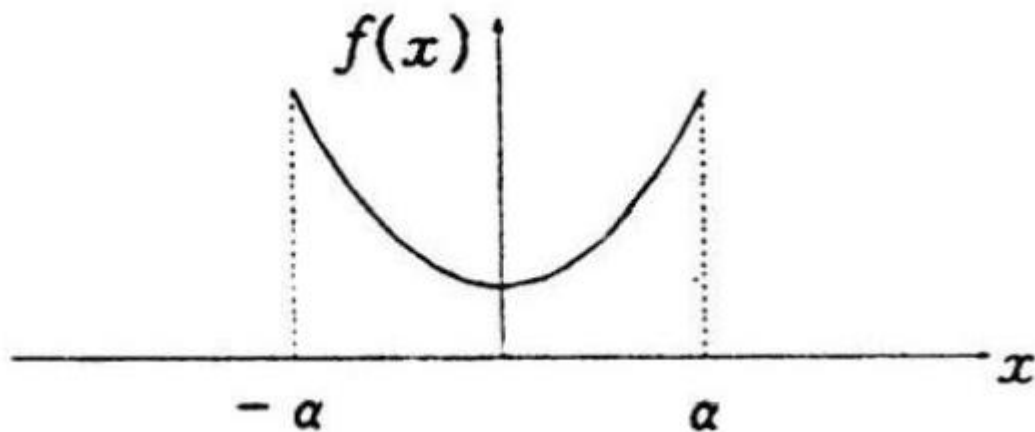


图 4-6 反正弦分布

其期望与标准差为：

$$E = 0$$

$$\sigma = \frac{1}{\sqrt{2}}a$$

服从反正弦分布的情况有：

- (1) 度盘偏心引起的测角误差；
- (2) 正弦噪声引起的误差；
- (3) 无线电失配引起的误差。

4.4 标准不确定度的 A 类评定

4.4.1 贝塞尔法

对一系列观测值进行统计分析以计算标准不确定度的方法称 A 类评定。

由于随机效应的存在，对同一量进行多次重复测量，所得结果都不相同。它们围绕着该测量列的算术平均值有一定的分散，此分散度说明了测量列中单次测得值的不可靠性。一般用按贝塞尔公式计算出的实验标准偏差 s 来表征，也就是不确定度的 A 类评定。

在重复性条件或复现性条件下对同一被测量独立重复测量 n 次，得到 n 个测得值 x_i ($i=1, 2, \dots, n$)，被测量 X 的最佳估计值是 n 个独立测得值的算术平均值 $\bar{x}$ ，按公式 [1] 计算：

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad [1]$$

(每个测得值 x_i 与 $\bar{x}$ 之差称为残差 v_i : $v_i = x_i - \bar{x}$)

单个测得值 x_k 的实验方差 $s^2(x_k)$ 按公式[2]计算:

$$s^2(x_k) = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 [2]$$

单个测得值 x_k 的实验标准偏差 $s(x_k)$ 按公式[3]计算:

$$s(x_k) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad [3]$$

式[3]是贝塞尔公式。实验标准偏差 $s(x_k)$ 表征了单个测得值的分散性。

被测量估计值 $\bar{x}$ 的A类评定的标准不确定度 $u(\bar{x})$ 按公式[4]计算:

$$u(\bar{x}) = s(\bar{x}) = s(x_k)/\sqrt{n} \quad [4]$$

注:

(1) 多次测量必须在重复测量条件下进行, 重复性条件指:

- ①相同的测量程序;
- ②相同的测量人员;
- ③在相同条件下使用相同的测量设备;
- ④相同的地点;
- ⑤短时间内重复测量, 所谓短时间, 一般理解为其它条件能充分保证的时间。

(2) 以算术平均值作为测量结果时, 通常为未修正的结果, 如有修正值或修正因子, 应对其进行适当修正才能作为最终测量结果。

4.4.2 预评估重复性

在日常开展同一类被测对象的常规检测工作中, 如果测量系统稳定, 测量重复性无明显变化, 则可用该测量系统以与测量被测件相同的测量程序、操作者、操作条件和地点, 预先对典型的被测件的典型被测量值, 进行 n 次测量(一般 n 取值6-10次为宜), 由贝塞尔公式计算出单个测得值的实验标准偏差 $s(x_k)$, 即测量重复性。在对某个被测件实际测量时可以只测量 n' 次 ($1 \leq n' < n$), 并以 n' 次独立测量的算术平均值作为被测量的估计值, 则该被测量估计值由于重复性导致的A类标准不确定度按公式[5]计算:

$$u(\bar{x}) = s(\bar{x}) = s(x_k)/\sqrt{n'} \quad [5]$$

应注意,当怀疑测量重复性有变化时,应及时重新测量和计算实验标准偏差 $s(x_k)$ 。

例如,在对压力计校准中,我们预先对与被校压力计同类的压力计的典型刻度上测量10次($n=10$),用贝塞尔公式计算出测量系统的重复性 $s(x_k)$,然后在重复性条件下,对被校压力计的刻度进行5次测量($n'=5$),取5次测量的平均值作为被测量的估计值,则由测量重复性引入的标准不确定度分量用A类评定为: $u_A = s(x_k)/\sqrt{5}$ 。

4.5 标准不确定度的 B 类评定

4.5.1 B 类评定的分量来源

测量工作中,有时无法取得观测列并作统计分析,如由于时间或资源不足不能进行或不需进行重复测量的情况下,不确定度就无法由 A 类评定得到,而只能采取非统计方法即 B 类评定方法。

B 类评定需要根据有关信息进行科学判断和评估得出,这些信息可来自:

- (1) 以前的测量数据;
- (2) 对有关材料及仪器的特点、性能的经验或一般知识;
- (3) 生产部门提供的制造说明书或技术文件;
- (4) 检定证书、校准证书提供的数据,包括目前暂在使用的极限误差等;
- (5) 取自手册的赋予参考数据的不确定度。

此类信息往往也是通过统计方法得到的,只不过给出的信息不全,不能直接用以作为测量不确定度的一个分量。这类信息往往只是一个极大值与极小值,或提供了结果的一个概率区间,但未给出其分布。根据现有信息,对这一分量进行评定,包括计算近似的相应方差或标准不确定度,这就是不确定的B类评定。

4.5.2 B 类评定的方法

(1) 若输入估计值 x_i 取自说明书、检定或校准证书或其他来源,并说其不确定度 $U(x_i)$ 为标准差的 k_i 倍,则 x_i 的标准不确定度 $u(x_i)$ 如下式表达:

$$u(x_i) = \frac{U(x_i)}{k_i}$$

例:校准证书上指出标称值为 1kg 的法码的质量为 $m=1000.00032g$,该值的不确定度按三倍标准差为 0.24mg,则该标准法码的标准不确定度为:

$$u(m) = \frac{0.24}{3} = 0.08mg$$

(2) 如 x_i 的扩展不确定度不是按标准差 $s(x_i)$ 的 k 倍给出,而是给出了包含概率

p 为 0.9, 0.95, 0.99 的置信区间的半宽 $U_{0.9}, U_{0.95}, U_{0.99}$, 除非另有说明, 一般按正态分布考虑评定其标准不确定度 $u(x_i)$, 对应于上述三种包含概率的包含因子分别为 1.645, 1.960 和 2.576。

例: 检定证书上给出某千分尺的示值误差扩展不确定度为 $1.3\mu\text{m}$, ($p=0.99$) 则其标准不确定度为:

$$u_i = \frac{1.3}{2.58} = 0.50\mu\text{m}$$

(3) 若输入量 X_i 的值以 50% 的概率落于区间 $[a_-, a_+]$, 则 X_i 的最佳估计值为该区间中点, 该范围的半宽用 $\frac{a_+ - a_-}{2} = a$ 表示, 假设 X_i 近似正态分布, 则 x_i 的标准不确定度为:

$$u(x_i) = \frac{a}{k_{0.5}} = \frac{a}{0.67} = 1.49a$$

例: 某电器产品的额定功率估计以 50% 的概率落于区间 56W 和 64W, 则额定功率的最佳估计值为 $P = (56+64)/2 = 60\text{W}$, 区间半宽 $= (64-56)/2 = 4\text{W}$, 假设 P 值为正态分布, 则标准不确定度为:

$$u(P) = 1.49 \times 4 = 5.96\text{W}$$

(4) 若输入量 X_i 的值以 2/3 的概率落于区间 $[a_-, a_+]$, 则 X_i 的最佳估计值为该区间中点, 该范围的半宽用 $\frac{a_+ - a_-}{2} = a$ 表示, 假设 X_i 近似正态分布, 则 x_i 的标准不确定度为:

$$u(x_i) = \frac{a}{k_{2/3}} = a$$

(5) 若输入量 X_i 的值以概率 1 落于区间 $[a_-, a_+]$, 即全部落于其中而不在区间外出现, 如果对 X_i 在该范围内的可能值无具体了解, 则只能假设 X_i 在该区间内各处出现的机会均等, 即服从均匀分布。该范围的半宽用 $\frac{a_+ - a_-}{2} = a$ 表示, 则 x_i 的标准不确定度为:

$$u(x_i) = \frac{a}{\sqrt{3}}$$

(6) B 类也可按其它分布考虑, 当 X_i 落在 $[x_i - a, x_i + a]$ 区间内, 则其标准不确定度

$$u(x_i) = \frac{a}{k}$$

k 的取值根据 X_i 的实际分布来确定:

当 X_i 受到两独立同均匀分布影响, 则服从三角分布,

$$k = \sqrt{6} \quad u(x_i) = \frac{a}{k} = \frac{a}{\sqrt{6}}$$

当 X_i 受到均匀分布的正余弦函数影响, 则服从反正弦分布,

$$k = \sqrt{2} \quad u(x_i) = \frac{a}{k} = \frac{a}{\sqrt{2}}$$

当 X_i 在某两点取值概率各为 50%, 即服从两点分布,

$$k = 1 \quad u(x_i) = \frac{a}{k} = a$$

(7) 在输入量 X_i 可能值的下界和上界相对于其最佳估计值 x_i 并不对称的情况下, 这时 x_i 不处在区间 $[a_-, a_+]$ 的中心, 在缺乏准确判定其分布状态的信息时, 按均匀分布处理, 近似评定为:

$$u^2(x_i) = \frac{(a_+ - a_-)^2}{12}$$

例: 设手册中给出的铜膨胀系数 $\alpha_{20}(Cu) = 16.52 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 并说 “最小可能值为 $16.40 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, 最大可能值为 $16.92 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ”, 可见, 最佳值并不处于区间中心, 则标准不确定度为:

$$u(\alpha_{20}) = \sqrt{\frac{(16.92 \times 10^{-6} - 16.40 \times 10^{-6})^2}{12}} = 0.15 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

在标准不确定度的 B 类评定中, 只有具有一定经验和对相关知识的透彻了解,

才能正确使用提供的有效信息，这种技巧需要通过实验逐步掌握。

4.6 合成标准不确定度

4.6.1 相关

为了有效应用统计方法合成各不确定度分量，各分量之间应没有相关的公共因素，输入量应相互独立。

相关输入量可能产生增大或减小合成标准不确定度的影响。

例如，为了测量矩形面积，使用同一工具测量宽度和长度，那么相关性将增大不确定度。另一方面，如果使用不同的同质材料量块测量，由于温度对不确定度的影响将取决于两个量块之间的温差，因而相关性对不确定度的影响将趋于抵消。

如果相关将导致合成不确定度增加，最直接的方法是在合成统计结果之前，对这些分量增加标准不确定度。

如果相关导致标准不确定度减小，在进行标准不确定度合成时，应将标准不确定度的差异作为输入量。

4.6.2 合成标准不确定度

测量结果 y 由测得量 $x_1, x_2, \dots, x_N$ 按测量模型算出：

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

根据 A 类评定和 B 类评定，得到 x_i 的标准不确定度 $u(x_i)$ ，它对 y 的影响的分量标准不确定度 $u_i(y) = \left| \frac{\partial f}{\partial x_i} \right| u(x_i)$ ， $\left| \frac{\partial f}{\partial x_i} \right|$ 是灵敏系数，表示 x_i 变化单位量时，引起 y 变化的绝对值。则测量结果的合成标准不确定度为：

$$\begin{aligned} u_c(y) &= \sqrt{\sum_{i=1}^N u_i^2(y) + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N u_i(y) u_j(y) r(x_i, x_j)} \\ &= \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} u(x_i) u(x_j) r(x_i, x_j)} \end{aligned}$$

当各分量相互独立时， $r(x_i, x_j) = 0$ ，上式简化为：

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N u_i^2(y)} = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)^2 u^2(x_i)}$$

合成标准不确定度除以测量结果，即 $u_c(y)/y$ 称为相对合成标准不确定度。

例： $R = 4\rho Nl/\pi d^2$ ， d 、 ρ 、 N 相互独立，则其灵敏系数及合成标准不确定度为：

$$c_1 = \partial R / \partial \rho = 4Nl/\pi d^2$$

$$c_2 = \partial R / \partial l = 4\rho N/\pi d^2$$

$$c_3 = \partial R / \partial d = -8\rho Nl/\pi d^3$$

$$\begin{aligned} u^2(R) &= \left[\frac{\partial R}{\partial \rho}\right]^2 u^2(\rho) + \left[\frac{\partial R}{\partial l}\right]^2 u^2(l) + \left[\frac{\partial R}{\partial d}\right]^2 u^2(d) \\ &= [c_1 u(\rho)]^2 + [c_2 u(l)]^2 + [c_3 u(d)]^2 \\ &= u_1^2(R) + u_2^2(R) + u_3^2(R) \end{aligned}$$

4.7 扩展不确定度

4.7.1 包含因子

合成标准不确定度 $u_c(y)$ 已经可以直接用于表示测量结果的不确定度，但在某些工业、商业、规程应用及卫生和安全领域，通常需要将合成标准不确定度乘以一个系数 k ，得出扩展不确定度，用以提供测量结果的一个区间 $[y - U, y + U]$ ，期望对被测量有相当影响的值落在该区间内，并具有较高的包含概率。这里所乘的系数称为包含因子。

要计算扩展不确定度 U ，必须先确定包含因子 k （ k 是与置信区间所具有的包含概率 p 密切相关的），同时还需要对表征测量结果及合成标准不确定度的概率分布有详细的了解。例如对一个随机变量 $X \sim N(\mu_X, \sigma)$ ，可以很快算出包含概率 p 的置信区间 $X - k_p \sigma \leq \mu_X \leq X + k_p \sigma$ 的 k_p 值。常见的有 $p=68.27\%$, $k=1$; $p=90\%$, $k=1.645$; $p=95\%$, $k=1.96 \approx 2$; $p=99\%$, $k=2.576 \approx 3$; $p=99.73\%$, $k=3$ 。

在电气检测领域，一般情况下可取： $k=2$ 或者 $k=3$ ， $k=2$ 常用于一般的测量； $k=3$ 常用于有较高质量要求的测量。

4.7.2 扩展不确定度

$$U = k u_c(y)$$

U —扩展不确定度 k —包含因子

被测量的最终测量结果可表示为: $Y = y \pm U$

4.8 不确定度报告

当给出完整的测量结果时,一般应报告其测量不确定度。在实际工作中,正式报告测量结果及其不确定度时,应包括哪些信息,取决于测量目的,一般应有:

- (1) 阐明试验观测列和输入量得到测量结果及其不确定度的评定方法;
- (2) 列出全部不确定度分量,并给评定方法;
- (3) 数据的分析方法;
- (4) 列出不确定度分析中使用的全部修正因子和常数及其来源。

对于比较重要的测量,不确定度的报告一般应包括:

- (1) 被测量 Y 的明确定义;
- (2) 输出量与输入量之间的函数关系及灵敏系数;
- (3) 每个输入量的估计值、标准不确定度,并列出表格,见表 4-2;
- (4) 所有相关输入量的协方差或相关系数及得到的方法。
- (5) 被测量的估计值、合成标准不确定度或扩展不确定度及计算过程;
- (6) 对扩展不确定度应给出包含因子、包含概率;
- (7) 修正值和常数的来源及其不确定度;
- (8) 用 $Y = y \pm U$ 表示测量结果并有适当的单位。

表 4-2 不确定度分量汇总表

标准不确定度分量	不确定度来源	类型	数值	概率分布	包含因子	标准不确定度 $u(x_i)$	灵敏系数 C_i	不确定度贡献 $u_i(y)$
				合成标准不确定度 $u_c = \sqrt{\sum_i (u_i^2)}$				
				包含因子 k (包含概率: xx%) =				
				扩展不确定度 $U = k \times u_c$				

4.9 不确定度评定方法流程图

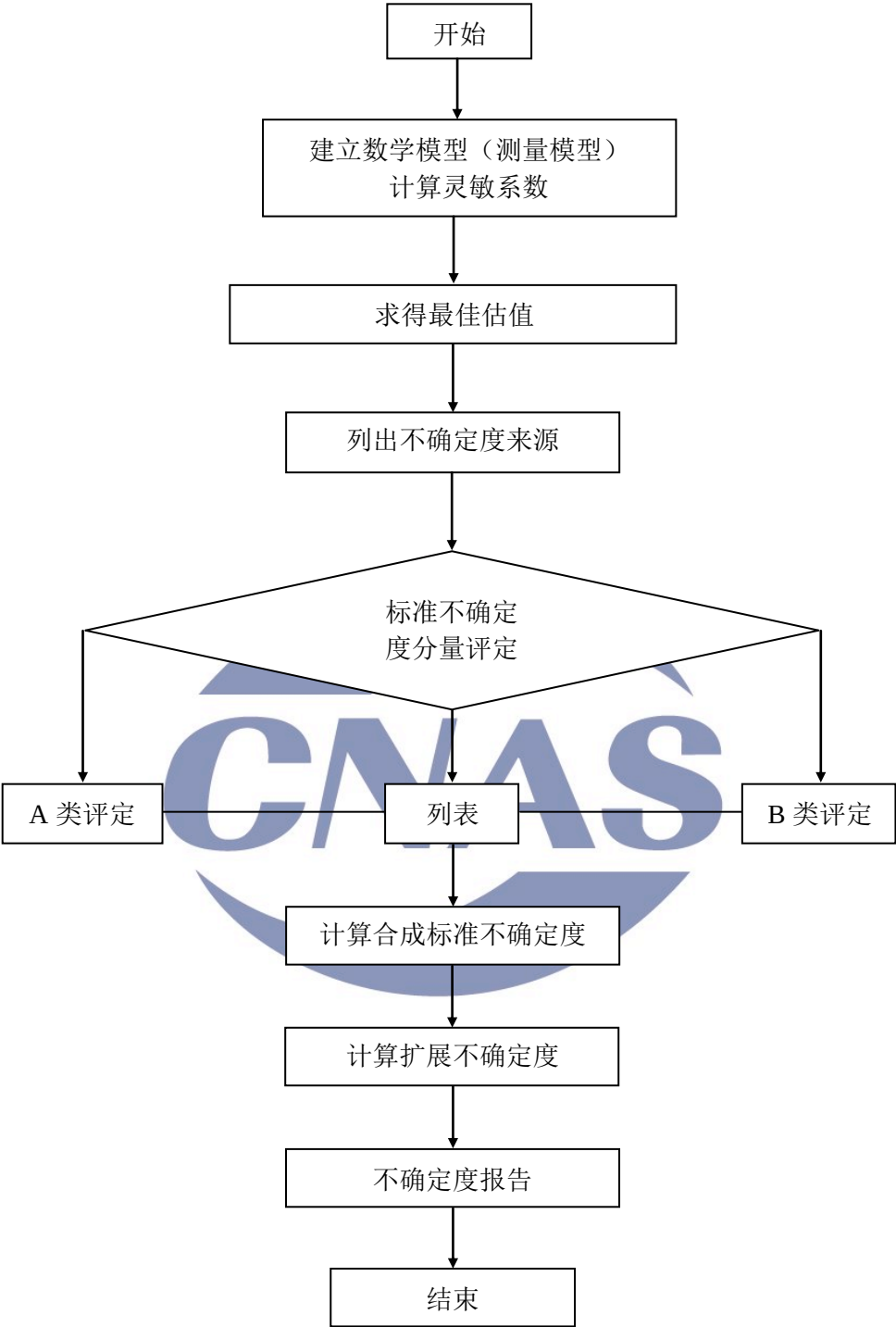


图 4-7 测量不确定度评定流程

4.10 评定测量不确定度的注意事项

评定测量不确定度的严密程度应以满足实际应用需要为依据，力求合理。

- (1) 首先要全面考虑不确定度的各种来源，应避免疏漏或重复估算；
- (2) 力求合理评定各个分量的数值，要避免不适当的高估或低估，尤其是主要

分量；

(3) 只要保持测量稳定，尽可能利用已有的标准不确定度信息，或已有的其它信息资源进行A类或B类评定；

(4) 当用相同的测量方法测量基本上相同的被测量时，可以利用预评估标准差计算当前被测量的不确定度；

(5) 当测量中有多个随机影响存在时，可以用测量结果的重复性标准差作为各个随机影响的合成重复性标准差；

(6) 各分量对合成标准不确定度的贡献和它们的标准差平方成正比。当某一分量比最大不确定度分量的三分之一还小时只需估计其上限。小于最大分量的五分之一或者小于合成标准不确定度的十分之一的分量可以忽略，除非数目较多。凡是忽略的分量需要说明，可以不评定；

(7) 用同一台计量仪器做增量或减量测量（求两次测量差值）时，由偏差和灵敏度引入的不确定度分量可以抵消；

(8) 当重复性引入的不确定度分量大于数值修约间隔和测仪器分辨率所引入的不确定度分量时，可以不考虑修约间隔和分辨率所引入的不确定度分量。反之必须考虑后者；

(9) 如果适合按合成标准不确定度运算规则计算合成标准不确定度，则无需求偏导数。

(10) 当测量模型中各输入量之间相关性不明显或不清楚时，可以视为不相关；

(11) 报告测量结果应报告修正后的结果，不确定度中不应包含已识别的系统误差；

(12) 如无特殊要求，对于通常的应用，在计算扩展不确定度 U 时，取包含因子 $k=2$ ；在报告扩展不确定度 U_p 时，包含概率取95%；

(13) 报告中不确定度的有效数字不要多于两位；

(14) 在完成不确定度评定后，可以利用以前的测量量和有关质量控制数据进行验证，以检查结果的合理性；

(15) 如果有关质量控制数据证明测量体系是稳定的，不确定度的估计值能可靠地适用于以后该实验室使用该方法所得到的结果中，并不需要在每测量之后重复评定不确定度；

(16) 检测实验室在下述情况中，应提供测量不确定度信息：

- ① 当客户在合同中有要求时；
- ② 当不确定度与检测结果的有效性或应用有关时；
- ③ 当不确定度影响到规格限的符合性判定时；
- ④ 通常，在报告测量不确定度时，应同时报告扩展不确定度和包含因子，包含因子 k 一般取2，除非另有说明；
- ⑤ 当需要对产品作合格判定时，需要根据与数据用户的协议考虑测量不确定度。

4.11 不确定度与限值的符合性判定

不确定度与限值的符合性判定依据CNAS-GL015:2018《声明检测或校准结果及与规范符合性的指南》执行。



附录 A：（资料性附录）电器领域测量不确定度评估案例

A1 温度（热电偶法）不确定度评估

A1.1 试验方法

本次检测项目为在工作温度下电动机绕组表面温度值，依据标准 GB/T 12350-2009，测试步骤与说明如下：

- （1） 根据电气产品的检测要求，选用合适的热电偶-数据采集器系统；
- （2） 按照操作规程规定，确定电动机绕组表面测量点（温度最高点），用专用粘接胶将热电偶的测量端固定在绕组表面上。预留粘胶固化时间；
- （3） 将热电偶连接到数据采集器的输入端上；
- （4） 样品按图 A1-1 接线，电动机带实际风扇负载运行。环境温度按样品的检测标准要求；
- （5） 通过稳压电源给被试样品供电；
- （6） 绕组温度稳定后，记录稳定的温度值。

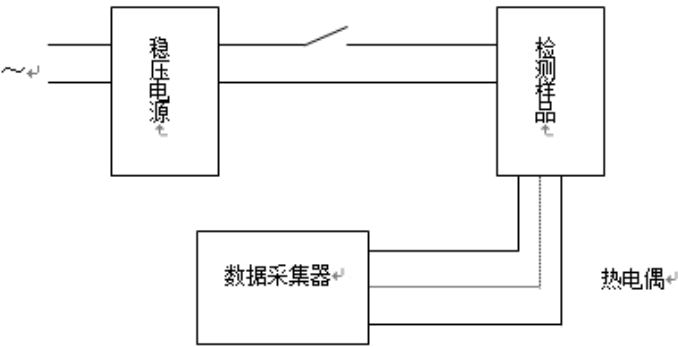


图 A1-1 电动机绕组表面温度测量原理图

主要检测设备：J 型热电偶、数据采集器

检测样品描述：空调器风扇电动机带实际风扇运行，电动机的额定参数为 220V/50Hz、90W、B 级绝缘。

A1.2 数学模型

$$T = t$$

其中： T 为温度值；
 t 为实际测试温度值。

A1.3 方差与灵敏系数

$$u_c^2(T) = u_c^2(t)$$

$$c(T) = 1$$

A1.4 不确定度汇总

标准不确定度分量	不确定度来源	类型	数值	概率分布	包含因子	标准不确定度 $u(x_i)$	灵敏系数 C_i	不确定度贡献 $u_i(y)$
u	重复性	A	0.31℃	正态	-	0.31℃	1	0.31℃
u	数据采集器校准	B	0.2℃	正态	$k = 2$	0.1℃	1	0.1℃
u_3	热电偶检定	B	0.042mV	正态	$k = 2$	0.44℃	1	0.44℃
u_4	热稳定的判定	B	0.5℃	均匀	$k = \sqrt{3}$	0.29℃	1	0.29℃
u_5	热电偶安装	B	0.5℃	均匀	$k = \sqrt{3}$	0.29℃	1	0.29℃
				合成标准不确定度 $u_c = \sqrt{\sum_i (C_i u)^2}$				0.68℃
				包含因子 k (包含概率: 95%) =				2
				扩展不确定度 $U = k \times u_c$				1.4℃

A1.5 标准不确定度

(1) 测量重复性 u

重复进行相同测量产生的不确定度，如果检测中进行 5 次测量，但实际检测中只进行 1 次，根据贝塞尔公式，不确定度为：

$$u_1 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [x - \bar{x}]^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{0.388}{4}} = 0.31^\circ\text{C}$$

(2) 数据采集器的校准 u

数据采集器的校准证书给出包含概率 95% 时，包含因子 $k = 2$ ，扩展不确定度 $u_p = 0.2^\circ\text{C}$ ，则标准不确定度：

$$u_2 = \frac{0.2}{2} = 0.10^\circ\text{C}$$

(3) 热电偶的检定 u_3

热电偶的检定证书给出包含概率 95% 时，包含因子 $k = 2$ ，扩展不确定度 $u_p = 0.042\text{mV}$ ，查阅 J 型热电偶分度表，可得热电偶在测量温度值附近的微分电势为 $S_g = 0.048\text{mV}/^\circ\text{C}$ ，则换算成温度值的不确定度为：

$$u_3 = \frac{0.042/2}{0.048} = 0.44^{\circ}\text{C}$$

(4) 热稳定的判定 u_4

在热稳定过程中,被测物表面的热稳定是一个动态平衡的状态。因此在测量中,一种通常使用的热稳定判定标准被引用:若被测物在 1 小时内的温度变化不超过 1°C ,即认为被测物已达到热稳定,均匀分布, $k = \sqrt{3}$,不确定度为

$$u_4 = \frac{1/2}{\sqrt{3}} = 0.29^{\circ}\text{C}$$

(5) 热电偶的固定 u_5

根据经验,热电偶的固定方式影响结果为 1°C ,均匀分布, $k = \sqrt{3}$,不确定度为:

$$u_5 = \frac{1/2}{\sqrt{3}} = 0.29^{\circ}\text{C}$$

A1.6 合成标准不确定度

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2 + u_5^2} = 0.68^{\circ}\text{C}$$

A1.7 扩展不确定度

取 $k = 2$ 计算扩展不确定度

$$U = k \times u_c = 2 \times 0.68 = 1.4^{\circ}\text{C}$$

A1.8 结果表示

测量的风扇的电动机绕组温度为 90.3°C ,则最后的结果表示为:

$$T = (90.3 \pm 1.4)^{\circ}\text{C} \quad (k = 2, \text{对应约 } 95\% \text{ 的包含概率})$$

A2 电流和功率测量不确定度评估

A2.1 试验方法

本次检测项目为室内加热器的电流和输入功率，依据标准GB4706.1-2005的第10章要求进行，测试步骤与说明如下：

- (1) 样品通过稳压电源供电，在正常工作条件下工作至稳定；
- (2) 整个检测过程中，环境温度保持在23±2℃。
- (3) 用数字式电参数表直接测量被试样品的电流和输入功率，测量线路如图A2-1所示；



图 A2-1 测量原理图

A2.2 数学模型

由于采用数字式电参数表直接测量被试样品的电流和输入功率，故测量模型为：

$Y = X$

A2.3 方差与灵敏系数

$u_c^2(Y) = u_c^2(X)$

$u_c^2(Y) = \left(\frac{\partial f}{\partial I}\right) u_c^2(X) = C^2(X) u_c^2(X)$

$c(X) = 1$

A2.4 不确定度汇总

表 A2-1 电流不确定度汇总表

标准不确定度分量	不确定度来源	类型	数值	概率分布	包含因子	标准不确定度 $u(x_i)$	灵敏系数 C_i	不确定度贡献 $u_i(y)$
u	重复性	A	0.0122A	正态	—	0.0122A	1	0.0122A
u	仪器测量准确度	B	±0.0297A	均匀	$k = \sqrt{3}$	0.0172A	1	0.0172A
u_3	电源电压波动	B	±0.0320A	均匀	$k = \sqrt{3}$	0.0185A	1	0.0185A
				合成标准不确定度 $u_c = \sqrt{\sum_i (C_i u_i)^2}$				0.0281A
				包含因子 k （包含概率：95%）=				2
				扩展不确定度 $U = k \times u_c$				0.056A

表 A2-2 功率不确定度汇总表

标准不确定度分量	不确定度来源	类型	数值	概率分布	包含因子	标准不确定度 $u(x_i)$	灵敏系数 C_i	不确定度贡献 $u_i(y)$
u	重复性	A	2.22W	正态	-	2.22W	1	2.22W
u	仪器测量准确度	B	$\pm 8.70W$	均匀	$k = \sqrt{3}$	5.02W	1	5.02W
u_3	电源电压波动	B	$\pm 1.40W$	均匀	$k = \sqrt{3}$	8.08W	1	8.08W
				合成标准不确定度 $u_c = \sqrt{\sum_i (C_i u)^2}$				9.77W
				包含因子 k (包含概率: 95%) =				2
				扩展不确定度 $U = k \times u_c$				20W

A2.5 标准不确定度

(1) 电流

1) 测量重复性分量 u

重复进行相同测量产生的不确定度，如果进行 4 次测量，但实际检测中只进行 1 次，根据贝塞尔公式，不确定度为：

$$u_1 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [x - \bar{x}]^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{0.000445}{3}} = 0.0122A$$

2) 数字仪表误差分量 u

根据仪表说明书，电流测量的准确度 $\pm (0.23\% \times \text{读数} + 0.15\% \times \text{量程})$ ，实际测量的量程和读数下，测量的误差为： $\pm (0.23\% \times 6.398 + 0.15\% \times 10) = \pm 0.0297A$ ，均匀分布， $k = \sqrt{3}$ ，

$$u_2 = \frac{0.0297}{\sqrt{3}} = 0.0172A$$

3) 电源波动分量 u_3

根据实践经验，电源电压波动对测量结果的影响取 $\pm 0.5\%$ ，均匀分布， $k = \sqrt{3}$ ，

$$u_3 = \frac{0.5\% \times 6.398}{\sqrt{3}} = 0.0185A$$

(2) 功率

1) 测量重复性分量 u

重复进行相同测量产生的不确定度，如果检测中进行 4 次测量，但实际检测中只进行 1 次，根据贝塞尔公式，

$$u_1 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [x_i - \bar{x}]^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{14.75}{3}} = 2.22W$$

2) 功率表误差分量 u

根据仪表说明书，功率测量的准确度为： $\pm(0.3\% \times \text{读数} + 0.15\% \times \text{量程})$ ，测量的最大误差： $\pm(0.3\% \times 1400 + 0.15\% \times 3000) = \pm 8.7\text{W}$ ，且假定为均匀分布， $k = \sqrt{3}$ ，

$$u_2 = \frac{8.7}{\sqrt{3}} = 5.02\text{W}$$

3) 电源电压波动分量 u_3

$$u_3 = \frac{1\% \times 1400}{\sqrt{3}} = 8.08\text{W}$$

根据实践经验，电源电压波动对测量结果的影响取 $\pm 1\%$ ，均匀分布， $k = \sqrt{3}$ 。

A2.6 合成标准不确定度

(1) 电流的合成标准不确定度为：

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2} = \sqrt{0.0122^2 + 0.0172^2 + 0.0185^2} = 0.0281\text{A}$$

(2) 功率的合成标准不确定度为：

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2} = \sqrt{2.22^2 + 5.02^2 + 8.08^2} = 9.77\text{W}$$

A2.7 扩展不确定度

(1) 电流： $k = 2$ ，电流的扩展不确定度

$$U = k \times u_c = 2 \times 0.0281 = 0.056\text{A}$$

(2) 功率： $k = 2$ ，功率的扩展不确定度

$$U = k \times u_c = 2 \times 9.77 = 20\text{W}$$

A2.8 结果表示

(1) 电流

测量的室内加热器电流 $I = 6.398\text{A} \pm 0.056\text{A}$ ($k=2$ ，对应约 95% 的包含概率)

(2) 功率

测量的室内加热器功率 $P = 1400\text{W} \pm 20\text{W}$ ($k=2$ ，对应约 95% 的包含概率)

A3 电量不确定度评估

A3.1 检测方法

本次检测项目为按摩椅的电量测量，依据标准GB4706.1-2005的第10章要求进行，测试步骤与说明如下：

- (1) 样品通过稳压电源供电，在正常工作条件下（样品施加额定负载）工作15min，用数字式电参数表直接测量被试样品消耗的电量；
- (2) 整个检测过程中，环境温度保持在 $23\pm2^{\circ}\text{C}$ 。
- (3) 用数字式电参数表直接测量被试样品的电量，测量线路如图A3-1所示；

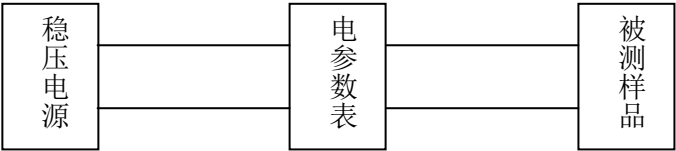


图 A3-1 测量线路图

A3.2 测量模型

由于采用数字式电参数表直接测量被试样品的电量，故测量模型为：

$Y=X$

A3.3 方差与灵敏系数

按不确定度传播律，灵敏系数的计算方法为：

$\frac{\partial f}{\partial u} = 1$

A3.4 不确定度汇总

表 A3-1 不确定度汇总表

标准不确定度分量 u_i	不确定度来源	类型	数值	概率分布	包含因子	标准不确定度 $u(x_i)$	灵敏系数 C_i	不确定度贡献 $u_i(y)$
u_1	重复性	A	0.134Wh	正态	——	0.134Wh	1	0.134Wh
u	仪器测量准确度	B	$\pm 0.135\text{Wh}$	均匀	$k = \sqrt{3}$	0.078Wh	1	0.078Wh
u_3	电源电压波动	B	$\pm 0.084\text{Wh}$	均匀	$k = \sqrt{3}$	0.049Wh	1	0.049Wh
u_4	秒表读数误差	B	$\pm 0.019\text{Wh}$	均匀	$k = \sqrt{3}$	0.011Wh	1	0.011Wh
				合成标准不确定度 $u_c = \sqrt{\sum (C_i u_i)^2}$				0.163Wh
				包含因子 k (包含概率: 95%) =				2
				扩展不确定度 $U = k \times u_c$				0.326Wh

A3.5 标准不确定度

1) 测量重复性分量

重复进行相同测量产生的不确定度，如果检测中进行 4 次测量，但实际检测中只进行 1 次，根据贝塞尔公式，不确定度为：

$u_1 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^4 (x_i - \bar{x})^2}{(n-1)}} = \sqrt{\frac{0.054}{3}} = 0.134\text{Wh}$

2) 数字仪表的准确度分量

根据仪表说明书，电能测量的准确度：(0.5%×读数+0.2%量程)，实际测量条件时，测量的误

差为: $\pm 0.135\text{Wh}$, 均匀分布, $k = \sqrt{3}$,

$$u_2 = \frac{0.135}{\sqrt{3}} = 0.078\text{Wh}$$

3) 电源电压波动分量 u_3

根据实践经验, 电源电压波动对测量结果的影响取 $\pm 0.5\%$, 均匀分布, $k = \sqrt{3}$,

$$u_3 = \frac{0.5\% \times 16.89}{\sqrt{3}} = 0.049\text{Wh}$$

4) 秒表读数误差分量 u_4

根据秒表说明书, 其测量准确度为 $\pm 1\text{s}$, 其对检测结果的影响为 $\pm 1/900$, 均匀分布, $k = \sqrt{3}$,

$$u_4 = \frac{1 \times 16.89}{900 \times \sqrt{3}} = 0.011\text{Wh}$$

A3.6 合成标准不确定度

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2} = \sqrt{0.134^2 + 0.078^2 + 0.049^2 + 0.011^2} = 0.163\text{Wh}$$

A3.7 扩展不确定度

取 $k = 2$, 扩展不确定度

$$U = k \times u_c = 2 \times 0.163 = 0.326\text{Wh}$$

A3.8 结果表示

测量的按摩椅消耗的电量 $W = 16.89\text{Wh} \pm 0.33\text{Wh}$ ($k = 2$, 对应约 95% 的包含概率)



A4 电容器电容量不确定度评估

A4.1 测量原理

电容器的电容量采用自动平衡电桥法如图 1-1 所示，首先由信号源发生一个一定频率和幅度的正弦交流信号，这个信号加到被测件上产生电流流到虚地“0V”，由于运放输入电流为零，所以流过 DUT 的电流完全流过 R_r ，最后根据欧姆定律算出 DUT 的阻抗： $Z = -V_1 \cdot R_r / V_2$ 。通过电容测量仪直接由仪器所显示的容量值得得。

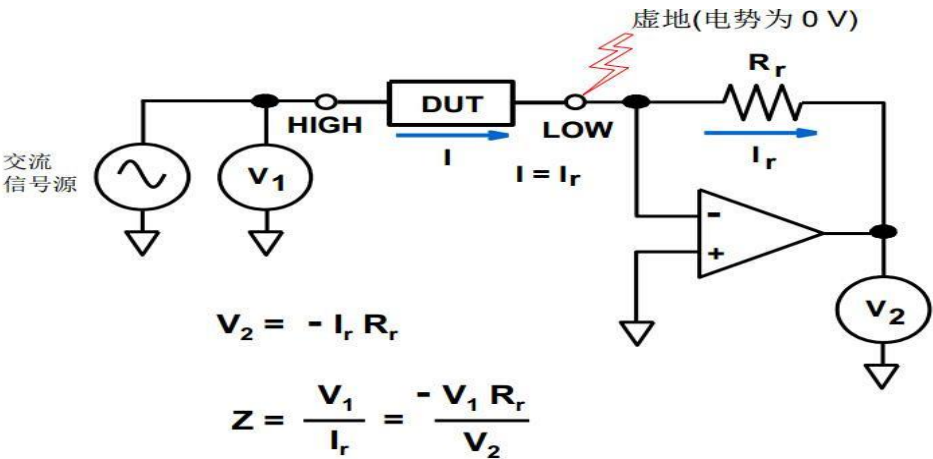


图 A4-1

本不确定度评定案例选取测量条件为 1kHz 频率下对 1nF、100nF、10uF 金属化聚丙烯膜抗干扰电容器测量方法情况下的测量不确定度进行评定为例。测量使用 TH2818 型电桥作为测量仪表，测试连接图如图 A4-2 所示。

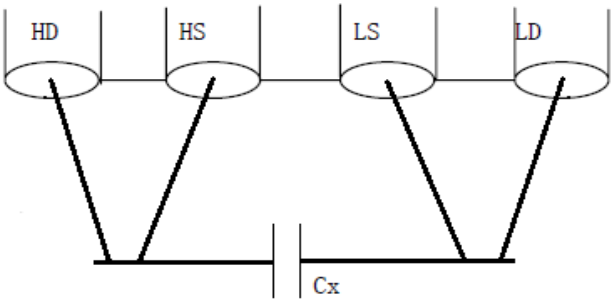


图 A4-2

对本电容器测量系统的测量不确定度分析可见，测量主要产生测量不确定度的来源有被测样品的额定容量值的不均匀性、测量设备准确度引入的测量不确定度、测量设备的显示精确度引入的不确定度和测量环境（含测试连接的分布电容、被测样品与测试设备连接的状态、测量环境的温度与湿度影响、测量环境的电磁场的影响和测量系统使用的电源影响）等，为此确定对电容器电容量参数测量的不确定度分量确定为重复性测量分量（吸收了环境影响部分）： u_1 ，测量设备的不确定度引入的分量： u_2 ，和测量设备显示引入的分量： u_3 。

A4.2 数学模型

$C = C_x$ (A4-1)

式中： C ----被测电容的电容值

C_x ---电容测量仪示值

A4.3 方差与灵敏系数

根据公式 $u^2(C) = C^2(C_x)u^2(C_x)$,

因 $C(C_x) = \frac{\partial f}{\partial C_x} = 1$,

故 $u^2(C) = u^2(C_x)$ 。

A4.4 不确定度汇总（1nF）

表 A4-1. 1nF 电容器容量测量不确定度计算表

标准不确定度分量 u_i	不确定度分量来源	类型	估计值	概率分布	包含因子	标准不确定度	灵敏系数	不确定度贡献
u	重复性测量分量	A	1.00542nF	正态	/	0.00028nF	1.0	0.00028
u	电容测量仪校准溯源分量	B	0.0010nF	正态	2	0.0005nF	1.0	0.0005
u_3	电容测量仪分辨率分量	B	0.00001/2nF	均匀	$\sqrt{3}$	0.0000029nF	1.0	0.0000029
合成标准不确定度 u_c (nF)			0.00057					
扩展不确定度 $U(k=2)$ (nF)			0.0011					

A4.5 标准不确定度评估（1nF）

对数学模型（A4-1）中等式右侧的各影响量的不确定度分量进行评估和计算。

1）测量重复性引入的标准不确定度分量 u_1

当样品到达实验室后，在恒温条件（23±2）℃下放置 2h 以后进行测量。测量条件是温度：（23±2）℃，相对湿度：（25-75）%，大气压：86kPa～106kPa。测量仪器规定正常工作温度为（0~40）℃，相对湿度≤75%。

实验中在相同的环境条件下，连续对 1nF 进行了 20 次重复测量，环境条件变化对测量结果

的贡献不确定分量影响可忽略不计。测得数据如表 A4-2 所示。

表 A4-2. 1nF 电容器容量重复测量数据表

第 i 次测量	1	2	3	4	5
指示值 (nF)	1.00625	1.00589	1.00567	1.00550	1.00547
第 i 次测量	6	7	8	9	10
指示值 (nF)	1.00539	1.00533	1.00538	1.00533	1.00525
第 i 次测量	11	12	13	14	15
指示值 (nF)	1.00521	1.00513	1.00513	1.00512	1.00511
第 i 次测量	16	17	18	19	20
指示值 (nF)	1.00563	1.00544	1.00532	1.00536	1.00549
20 次测量平均值 (nF)	1.00542				

根据贝塞尔公式计算实验标准差:

$$S(C) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} = 0.00028 \text{ nF}$$

在实际检测中只进行一次测量, 则测量重复性引入的标准不确定度 u_1 :

$$u_1 = 0.00028 \text{ nF}$$

2) 由电容测量仪校准溯源引入的标准不确定度分量 u_2 :

根据仪器校准证书查得, 该仪器 1nF 在 1kHz 频率下的扩展不确定度为 0.0010nF, $k=2$ 。

$$u_2 = \frac{0.0010}{2} = 0.0005 \text{ nF}$$

3) 由电容测量仪分辨率引入的标准不确定度分量 u_3

测量电桥测量 1nF 电容的分辨率为 0.00001nF, 估计为均匀分布, 包含因子 $k=\sqrt{3}$, 半宽 $a=0.000005\text{nF}$, 故:

$$u_3 = \frac{0.000005}{\sqrt{3}} = 0.0000029 \text{ nF}$$

A4.6 合成标准不确定度

$$\begin{aligned} u_c &= \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2} \\ &= \sqrt{0.00028^2 + 0.0005^2 + 0.0000029^2} \\ &= 0.00057 \text{ nF} \end{aligned}$$

A4.7 扩展不确定度

取包含因子 $k=2$, 则 1nF 的扩展不确定度为:

$$U = k u_c = 2 \times 0.00057 = 0.0011 \text{ nF}$$

A4.8 100nF、10 μF 测量点的测量不确定度评定

由于不确定度来源相同, 100nF、10μF 按以上相同不确定度评定方法评定, 具体评定结果见下表 A4-3 (100nF) 和表 A4-4 (10μF)。

表 A4-3. 100nF 电容器容量测量不确定度计算表

标准不确定度分量 u_i	不确定度分量来源	类型	数值	概率分布	包含因子	标准不确定度	灵敏系数	不确定度贡献
u	重复性测量分量	A	0.035nF	正态	/	0.035nF	1.0	0.035
u	电容测量仪校准溯源分量	B	0.0010nF	正态	2	0.05nF	1.0	0.05
u_3	电容测量仪分辨率分量	B	0.00001/2 nF	均匀	$\sqrt{3}$	0.0000029nF	1.0	0.000029
合成标准不确定度 u_c (nF)				0.061				
扩展不确定度 $U(k=2)$ (nF)				0.12				

表 A4-4. 10 μ F 电容器容量测量不确定度计算表

标准不确定度分量 u_i	不确定度分量来源	类型	数值	概率分布	包含因子	标准不确定度	灵敏系数	不确定度贡献
u	重复性测量分量	A	0.00012 μ F	正态	/	0.00012 μ F	1.0	0.00012
u	电容测量仪校准溯源分量	B	0.0010 μ F	正态	2	0.005 μ F	1.0	0.005
u_3	电容测量仪分辨率分量	B	0.00001/2 μ F	均匀	$\sqrt{3}$	0.0000029 μ F	1.0	0.0000029
合成标准不确定度 u_c (μ F)						0.0050		
扩展不确定度 $U(k=2)$ (μ F)						0.01		

连续对 100nF 和 10 μ F 分别进行了 20 次重复测量，测得数据分别如表 A4-5 和表 A4-6

表 A4-5. 100nF 电容器容量重复测量数据表

第 i 次测量	1	2	3	4	5
指示值 (nF)	96.2885	96.2785	96.2634	96.2483	96.2332
第 i 次测量	6	7	8	9	10
指示值 (nF)	96.2062	96.2278	96.2005	96.1943	96.1917
第 i 次测量	11	12	13	14	15
指示值 (nF)	96.1863	96.1858	96.1899	96.1944	96.1957
第 i 次测量	16	17	18	19	20

指示值 (nF)	96.1912	96.1838	96.1803	96.1763	96.1818
20 次测量平均值 (nF)	96.2098				

表 A4-6. 10 μ F 电容器容量重复测量数据表

第 i 次测量	1	2	3	4	5
指示值 (μ F)	9.52819	9.52822	9.52833	9.52840	9.52839
第 i 次测量	6	7	8	9	10
指示值 (μ F)	9.52844	9.52842	9.52844	9.52856	9.52839
第 i 次测量	11	12	13	14	15
指示值 (μ F)	9.52851	9.52847	9.52863	9.52850	9.52868
第 i 次测量	16	17	18	19	20
指示值 (μ F)	9.52845	9.52861	9.52859	9.52849	9.52842
20 次测量平均值 (μ F)	9.52845				

A4.9 电容量测量的不确定度报告

经过以上分析和计算得到测量电容器容量（3 个不同额定容量值的样品）的扩展测量不确定度分别为：

测量范围	扩展不确定度 ($k=2$)
1nF	$U=0.0011\text{nF}$
100nF	$U=0.12\text{nF}$
10 μ F	$U=0.01\mu\text{F}$

A5 接地电阻不确定度评估

A5.1 检测方法

本例以 GB 4706.1-2005《家用和类似用途电器的安全第 1 部分：通用要求》为检测依据，测量样品接地端子或接地触点与接地金属件之间的电阻值。

测量原理：在器具的接地端子（或接地触点）与易触及的金属部件之间施加 25A 恒定电流，测量接地端子和易触及的金属部件之间的电压降，用欧姆定律计算接地电阻值。实验室通常使用集成化的仪器，直接测量接地电阻值，不需进一步的换算。根据实际经验，试验电流值与温度环境在标准规定的范围内，对测试结果的影响可以忽略不计。

测量操作：用接地电阻测试仪的探棒分别夹住电源线的接地导线与易触及金属件，仪器设定电流值为 25A。检测环境温度为 20℃±5℃。直接读取仪器显示的电阻值。

检测样品：全自动波轮式洗衣机。

A5.2 测量模型

接地电阻可在接地电阻仪上直接读取，其测量模型为：

$$R_X = R_N$$

其中， R_X —接地电阻实测值， Ω ；

R_N —仪器直接读数， Ω 。

A5.3 方差与灵敏系数

$$u_c^2(R_X) = u_c^2(R_N)$$

$$u_c(R_X) = \left(\frac{\partial f}{\partial R}\right) u_c(R_N) = C^2(R_N) u_c(R_N)$$

$$c(R_N) = 1$$

A5.4 不确定度汇总

表 A5-1 不确定度汇总表

标准不确定度分量 u_i	不确定度来源	类型	数值	概率分布	包含因子	标准不确定度 $u(x_i)$	灵敏系数 C_i	不确定度贡献 $u_i(y)$
u	重复性	A	0.0018 Ω	正态	—	0.0018 Ω	1	0.0018 Ω
u	仪器准确度	B	±0.0035 Ω	均匀	$K=\sqrt{3}$	0.002 Ω	1	0.002 Ω
u_3	仪器分辨率	B	0.001/2 Ω	均匀	$K=\sqrt{3}$	0.00029 Ω	1	0.00029 Ω
				合成标准不确定度 $u=\sqrt{\sum_i(u_i^2)}$				0.0027 Ω
				包含因子 k （包含概率：95%）=				2
				扩展不确定度 $U=k\times u_c$				0.006 Ω

A5.5 标准不确定度

1) 测量重复性分量

重复进行相同测量产生的不确定度, 如果检测中进行 10 次, 但实际检测只进行了 1 次, 根据贝塞尔公式, 不确定度为:

$$u_1 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} x_i - \bar{x}^2}{(n-1)}} = \sqrt{\frac{0.0000284}{9}} = 0.0018\Omega$$

2) 仪器准确度分量

仪器准确度产生的不确定度 u_2 , 根据仪器技术规范, 偏差为 $\pm(2\% \times \text{读数} + 0.003) = (2\% \times 0.025 + 0.003) = \pm 0.0035\Omega$, 为均匀分布, $k=\sqrt{3}$

$$u_2 = \frac{0.0035}{\sqrt{3}} = 0.002\Omega$$

3) 仪器的分辨率分量

仪器分辨率为 0.001Ω , 其区间半宽为 0.0005Ω , 应为均匀分布, $k=\sqrt{3}$

$$u_3 = \frac{0.0005}{\sqrt{3}} = 0.00029\Omega$$

A5.6 合成标准不确定度

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2} = \sqrt{0.0018^2 + 0.002^2 + 0.00029^2} = 0.0027\Omega$$

A5.7 扩展不确定度

取 $k=2$, 计算扩展不确定度:

$$U = k \times u_c = 2 \times 0.0027 = 0.006\Omega$$

A5.8 结果报告:

测量的洗衣机接地电阻 $R=0.025\Omega \pm 0.006\Omega$ ($k=2$, 对应约 95% 的包含概率)

A6 噪声不确定度评估

A6.1、试验方法

- 1) 在测试环境符合 ISO 3745 《声学声压法测定噪声源声功率级消声室和半消声室精密法》要求的精密级半消声室中进行本试验。
- 2) 检测样品为 1 台空气净化器，样品大小为 240mm×240 mm×520mm。
- 3) 样品接通电源（220V，50Hz）后开机，切换至额定工作状态，样品在额定状态运转 15 min 后开始测量。
- 4) 以 GB/T 4214.1-2017《声学家用电器及类似用途器具噪声测试方法第 1 部分通用要求》为检测依据，测量该产品的噪声声功率级。采用第 7.1.4 章节规定的检测方法，取半球面为测量表面，半球面的测量半径取 1m，如图 A6-1 所示。使用噪声测试分析系统测量各点处的声压级，由各点声压级计算出噪声源的 A 计权声功率级。

传声器位置坐标：

N_0	x/R	y/R	z/R
1	-0.99	0	0.15
2	0.50	-0.86	0.15
3	0.50	0.86	0.15
4	-0.45	0.77	0.45
5	-0.45	-0.77	0.45
6	0.89	0	0.45
7	0.33	0.57	0.75
8	-0.66	0	0.75
9	0.33	-0.57	0.75
10	0	0	1.0

测量表面的面积：

$S=2\pi R^2$

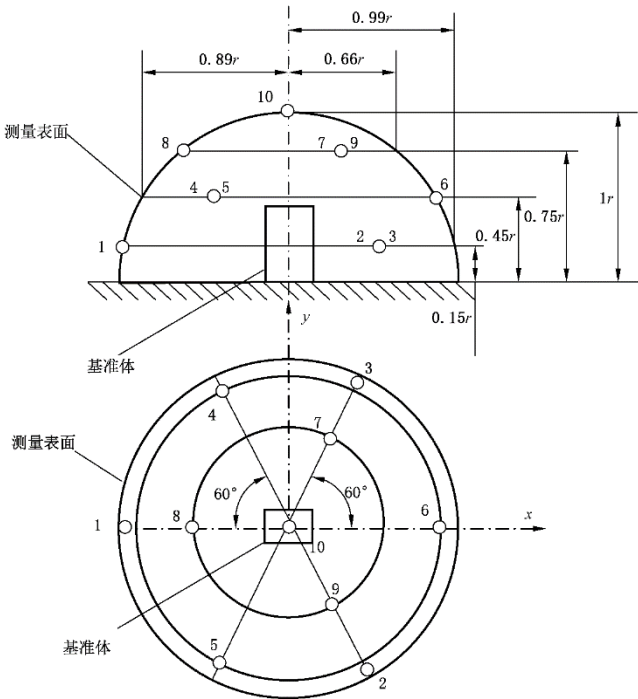


图 A6-1 半球面测量表面布点图

A6.2 数学模型

由声压级计算出噪声源的 A 计权声功率级计算方法如下：

$$L_w = \bar{L}_{PA} + 10lg(\frac{S}{S_0}) - k_1 - k$$

式中：

- $\bar{L}_{PA}$ —测量表面平均 A 计权声压级，dB(A)；
- k_1 —背景噪声修正值；
- k_2 —环境修正值；
- S —测量表面半球面的面积，半径为 1.5m 时， $S=14.14\text{ m}^2$ ；
- S_0 —基准面， 1 m^2 。

测量表面平均 A 计权声压级 $\bar{L}_{PA}$ 的测量与计算，采用对数平均法：

$$\bar{L}_{PA} = 10 \lg(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 10^{0.1L_{PAi}})$$

式中：

L_{PAi} —从第 i 个测点测得的 A 计权声压级，dB(A)；

n —测点数，半球法， $n=10$ 。

测试系统背景噪声不大于 17dB(A),而本次测试样品的声压级约在 65dB(A),已超过背景噪声至少 15dB，故其背景噪声修正值 k_1 为零。

由于该精密级半消声室符合 ISO 3745 的要求，故本次试验不需要进行消声室的环境修正，其环境修正值 k_2 为零。

故其声功率计算公式简化为：

$$L_w=\bar{L}_{PA}+11.5, \text{ dB(A)}$$

A6.3 方差与灵敏系数

$$u_c(L_w) = \frac{\partial f}{\partial L_i} u(\bar{L}_{PA})$$

灵敏系数为 1。

A6.4 不确定度汇总

表 A6-1 不确定度汇总表标准不确定度分量 u_i	不确定度来源	类型	数值	概率分布	包含因子	标准不确定度 $u(x_i)$	灵敏系数 C_i	不确定度贡献 $u_i(y)$
u	测量重复性分量	A	0.22 dB	正态	—	0.22 dB	1	0.22 dB
u	校准器校准	B	0.2 dB	均匀	$K=\sqrt{3}$	0.12 dB	1	0.12 dB
u_3	测试系统的声压级测量（1 级）	B	0.5 dB	均匀	$K=\sqrt{3}$	0.29dB	1	0.29dB
u_4	测试环境（精密级半消声室）	B	0.5 dB	均匀	$K=\sqrt{3}$	0.29dB	1	0.29 dB
u_5	包络面积	B	0.13dB	正态	$K=2$	0.09dB	1	0.09 dB
u_6	样品运行条件	B	0.5 dB	正态	$K=2$	0.25dB	1	0.25 dB

A6.5 标准不确定度

(1) 测量重复性引入的不确定度分量 u

本次试验共重复测试了 6 次，数据分别为 64.7、64.7、64.9、64.5、65.1、64.6，单位为 dB(A)。

根据贝塞尔公式，其不确定度为：

$$u_1 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^6 (x_i - \bar{x})^2}{(n-1)}} = \sqrt{\frac{0.235}{5}} = 0.22, \text{ dB}$$

(2) 校准器校准引入的不确定度分量 u

测试系统的校准会使用声级校准器，校准器自身的不确定度来源于计量机构校准检定时所用的仪器设备，有最大允许误差，为 $\pm 0.2\text{dB}$ ，为均匀分布， $k = \sqrt{3}$ 。

$$u_2 = \frac{0.2}{\sqrt{3}} = 0.12, \text{ dB}$$

(3) 测试分析系统引入的不确定度分量 u_3

声级校准器是 1000Hz,94dB 的单频率单声压级校准，不能保证在测试分析系统在测量范围内 (17~120)dB(A) 的各频段的绝对准确性，只能根据其测试分析系统 (1 级) 的技术规格书，其最大允许误差为 $\pm 0.5\text{dB}$ ，为均匀分布， $k = \sqrt{3}$ 。

$$u_3 = \frac{0.5}{\sqrt{3}} = 0.29, \text{ dB}$$

(4) 测试环境引入的不确定度分量 u_4

由于半消声室是模拟半自由场环境，不能保证地面 100%反射全部声音，也不能保证吸声墙面 100%吸收全部声音，其环境影响的测量不确定度 u_4 ，根据本精密级半消声室自由场分布情况，认为其环境带来的最大允许误差为 $\pm 0.5\text{dB}$ ，为均匀分布， $k = \sqrt{3}$ 。

$$u_4 = \frac{0.5}{\sqrt{3}} = 0.29, \text{ dB}$$

(5) 包络面积带来引入的不确定度分量 u_5

实际布点过程中，各测点位置距离半球面球心 1.5m，布点偏差为 $\pm 0.03\text{m}$ ，测点可能会分布在距离半球面的球心 147cm~153cm 范围内，其包络面积分布在 13.58 m²~14.71 m²范围内，但考虑 10 个测点的位置带来的最大偏差为 0.17dB，为正态分布， $k = 2$ 。

$$u_5 = \frac{0.17}{2} = 0.09, \text{ dB}$$

(6) 样品运行条件引入的不确定度分量 u_6

在标准规定的运行条件下，此样品（空气净化器）电功率稳定在 28W ~29W 的范围内，声音为稳定白噪声，故认为被测声源运行和安装条件所引起的最大偏差为 0.5dB，为正态分布， $k = 2$ 。

$$u_6 = \frac{0.5}{2} = 0.25, \text{ dB}$$

A6.6 合成标准不确定度

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2 + u_5^2 + u_6^2}$$

$$= \sqrt{0.22^2 + 0.12^2 + 0.29^2 + 0.29^2 + 0.09^2 + 0.25^2} = 0.55, \text{ dB}$$

A6.7 扩展不确定度

取 $k=2$ 计算扩展不确定度:

$$U=k \times u_c = 2 \times 0.55 = 1.10 = 1.1, \text{ dB}$$

A6.8 结果表示

此空气净化器的噪声声功率 $L_w=(64.8 \pm 1.1)\text{dB(A)}$, 包含因子 $k=2$, 对应约 95%的包含概率。



A7 电气间隙和爬电距离测量方法不确定度

A7.1 试验方法

本次检测项目是测试电路板中 T1 到 T2 的爬电距离，T1 和 T2 均为金属部件，中间为镂空部分，样品污染等级为 2，夹角按“尖角”考虑，如图 A7-1。

首先确定路径，从 T1 的 A 点出发，沿着镂空边壁走到 B 点，用尺寸为 1mm 测试卡定位 B 点，得出 1mm 位置点 C 点，即从 B 点通过“跨接”到达 C 点，之间距离 BC 为 1mm。再从 C 点做垂线段至 T2，D 点为垂点，可确定位置点 D，详见图 A7-2。

因此，BC 的爬电距离是 1mm，从 A 点到 B 点的距离和 C 点到 D 点的距离分别用游标卡尺进行测量，测得 $X_{AB}=2.66\text{mm}$ $X_{CD}=2.46\text{mm}$ ，将三段数值相加，得到 T1 到 T2 的爬电距离：

$$d_f=X_{AB}+X_{CD}+1=6.12\text{mm}$$

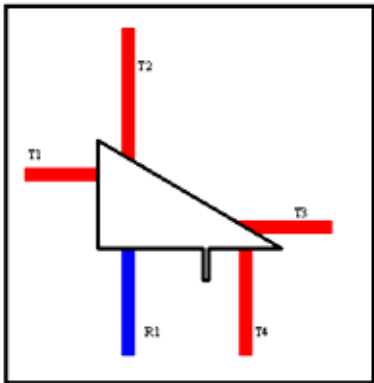


图 A7-1

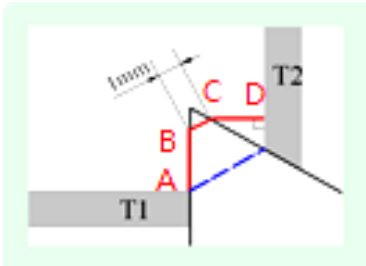


图 A7-2

A7.2 数学模型

每段爬电距离的数值均是直接读取，故：

$$d = L$$

A7.3 方差与灵敏系数

$$u_c(d) = \sum_{i=1}^n \frac{\partial f}{\partial L_i} u(L_i)$$

灵敏系数为 1

$$u_c(d) = \sum_{i=1}^n u(L_i)$$

A7.4 不确定度汇总

标准不确定度分量	不确定度来源	类型	数值	概率分布	包含因子	标准不确定度 $u(x_i)$	灵敏系数 C_i	不确定度贡献 $u_i(y)$
u_{AB1}	重复性	A	—	正态	2	—	—	$10.00\mu\text{m}$
u_{AB2}	游标卡尺示值误差	B	0.01mm	正态	2	$5.00\mu\text{m}$	1	$5.00\mu\text{m}$

u_{BC1}	测试卡示值误差	B	2.3 μm	正态	2	1.15 μm	1	1.15 μm
u_{BC2}	跨接点位置误差	B	$\pm 0.1\text{mm}$	均匀	$K=\sqrt{3}$	57.74 μm	1	57.74 μm
u_{CD1}	重复性	A	——	正态	2	——	——	16.00 μm
u_{CD2}	游标卡尺示值误差	B	0.01mm	正态	2	5.00 μm	1	5.00 μm
u_{CD3}	垂点位置误差	B	$\pm 0.1\text{mm}$	均匀	$K=\sqrt{3}$	57.74 μm	1	57.74 μm
				合成标准不确定度 $u_c = \sqrt{\sum_i (u_i)^2}$				84.11 μm
				包含因子 k (包含概率: 95%) =				2
				扩展不确定度 $U = k \times u_c$				0.17mm

A7.5 标准不确定度

(1) 标准不确定度 u_{AB}

① 测量重复性 u_{AB}

重复进行相同测量产生的不确定度，如果检测中进行 6 次测量，那么得出的 A 到 B 的长度值分别为：2.68mm，2.66mm，2.66mm，2.68 mm，2.68 mm，2.66mm，根据贝塞尔公式（Bézier curve）得出 $s=10.00\mu\text{m}$ ，具体计算公式如下。故不确定度为：

$$u_{AB1}=s=10.00\mu\text{m}$$

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} = 10.00\mu\text{m}$$

② 游标卡尺示值误差标准不确定度分量 u_{AB}

根据游标卡尺提供的检定/校准证书，该游标卡尺的扩展不确定度 $U_{95}=0.01\text{mm}$ ，正态分布，包含因子 $k=2$ ，标准不确定度为：

$$u_{AB2}=0.01\text{mm}/2 = 5.00\mu\text{m}$$

(2) 标准不确定度 u_{BC}

① 测试卡示值误差的不确定度 u_{BC}

根据测试卡提供的检定/校准证书，测试卡在 1mm 的扩展不确定度为 $U_{95}=2.3\mu\text{m}$ ，包含因子 $k=2$ ，标准不确定度为

$$u_{BC1}=2.3/2 = 1.15\mu\text{m}$$

② 确定跨接点位置误差的不确定度分量 u_{BC}

根据经验值，确定 C 为跨接点位置引入的误差最大为 $\pm 0.1\text{mm}$ ，该误差在测量的范围内均匀分布，包含因子 $k = \sqrt{3}$ ，不确定度为：

$$u_{BC2}=0.1\text{mm}/\sqrt{3} = 57.74\mu\text{m}$$

(3) 标准不确定度 u_{CD} ①测量重复性 u_{CD}

重复进行相同测量产生的不确定度, 如果检测中进行 6 次测量, 那么得出的 C 到 D 的长度值分别为: 2.46mm, 2.48mm, 2.48mm, 2.44 mm, 2.46 mm, 2.48 mm, 根据贝塞尔公式 (Bézier curve) 得出 $s=16.00\mu\text{m}$, 具体计算公式如下。故不确定度为:

$$u_{CD1}=s=16.00\mu\text{m}$$

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} = 16.00\mu\text{m}$$

②游标卡尺示值误差不确定度分量 u_{CD}

根据游标卡尺提供的检定/校准证书, 该游标卡尺的扩展不确定度 $U_{95}=0.01\text{mm}$, 正态分布, 包含因子 $k=2$, 标准不确定度为:

$$u_{CD2}=0.01\text{mm}/2 = 5.00\mu\text{m}$$

③确定垂点位置误差的不确定度分量 u_{CD3}

根据经验值, 确定 D 为垂点位置引入的误差最大为 $\pm 0.1\text{mm}$, 该误差在测量的范围内均匀分布, 包含因子 $k = \sqrt{3}$, 于是它的不确定度为:

$$u_{CD3}=0.1\text{mm}/\sqrt{3} = 57.74\mu\text{m}$$

A7.6 合成标准不确定度

$$u_c = \sqrt{u_{AB}^2 + u_{BC}^2 + u_{CD}^2} = \sqrt{u_{AB1}^2 + u_{AB2}^2 + u_{BC1}^2 + u_{BC2}^2 + u_{CD1}^2 + u_{CD2}^2 + u_{CD3}^2} = 84.11 \mu\text{m}$$

A7.7 扩展不确定度

取 $k=2$ 计算扩展不确定度

$$U=k \times u_c = 2 \times 84.11\mu\text{m} = 0.17\text{mm}$$

A7.8 结果表示

测量的爬电距离 $L=6.12\text{mm} \pm 0.17\text{mm}$, 包含因子 $k=2$, 对应约 95%的包含概率。

A8 绕组温升（电阻法）不确定度评估

A8.1 试验方法

电阻法测量绕组温升是利用金属导体电阻随温度变化的特性，通过测量温度变化前后导体的电阻值，再用公式计算出导体的温升值。这种方法一般用于测量如绕组等温升具有不均匀的器具，测量它们的平均温度。

本次检测项目为使用电阻法测量铜导线绕组的温升，依据标准 GB4943.1-2011 附录 E，测试步骤与说明如下：

- (1) 试验开始时，绕组处于室温状态。测量试验开始时绕组的电阻值 R_1 和室温 t_1 ；
- (2) 样品通过稳压电源供电，依据标准给样品施加额定负载条件；
- (3) 样品稳定工作一段时间；
- (4) 断开样品供电，立即测量试验结束时绕组的电阻值 R_2 和室温 t_2 ；
- (5) 绕组的温升 ΔT 通过以下公式计算得出：

$$\Delta T = \frac{R_2 - R_1}{R_1} \times (234.5 + t_1) - (t_2 - t_1)$$

测量的过程中，电阻的测量采用 34401A 数字多用表，温度的测量采用数据采集仪 MX100，并使用 K 型热电偶。

本例样品测量数据如下： $t_1=25.4^{\circ}\text{C}$ ； $t_2=26.1^{\circ}\text{C}$ ； $R_1=9.482\ \Omega$ ； $R_2=11.942\ \Omega$

$$\text{计算的绕组的温升 } \Delta T = \frac{11.942-9.482}{9.482} \times (234.5 + 25.4) - (26.1 - 25.4) = 66.73\text{K}$$

A8.2 数学模型

铜导线绕组的温升值按以下公式进行计算：

$$\Delta T = \frac{R_2 - R_1}{R_1} \times (234.5 + t_1) - (t_2 - t_1)$$

该公式简化为：

$$\Delta T = 234.5 \frac{R_2}{R_1} + \frac{R_2 t_1}{R_1} - 234.5 - t_1$$

式中：

ΔT —温升，单位 K；

R_1 —试验开始时绕组的电阻值， Ω ；

R_2 —试验结束时绕组的电阻值， Ω ；

t_1 —试验开始时的室温， $^{\circ}\text{C}$ ；

t_2 —试验结束时的室温， $^{\circ}\text{C}$ ；

A8.3 方差与灵敏系数

按不确定度传播律， ΔT 的标准不确定度的计算方法为：

$$u(\Delta T)^2 = c_1^2 u(R_1)^2 + c_2^2 u(R_2)^2 + c_3^2 u(t_1)^2 + c_4^2 u(t_2)^2$$

各分量的灵敏系数为：

$$c_1 = \frac{\partial \Delta T}{\partial R_1} = -\frac{R_2}{R_1^2} \frac{34.5 + t_1}{R_1} = -34.5210^\circ\text{C} / \Omega$$

$$c_2 = \frac{\partial \Delta T}{\partial R_2} = \frac{234.5 + t_1}{R_1} = 27.4098^\circ\text{C} / \Omega$$

$$c_3 = \frac{\partial \Delta T}{\partial t_1} = \frac{R}{R} = 1.2594$$

$$c_4 = \frac{\partial \Delta T}{\partial t_2} = -1$$

A8.4 不确定度汇总

表 A8-1 不确定度汇总表

标准不确定度分量 u	不确定度来源	类型	误差量	概率分布	分布系数	标准不确定度 $u(x)$	灵敏系数 c	不确定度贡献 $u(y)$
u_{R_1}	电阻 R_1 的测量重复性	A	0.002 Ω	正态	—	0.002 Ω	-34.5210 $^\circ\text{C} / \Omega$	-0.0690 Ω
u_{R_1}	电阻 R_1 的误差	B	0.0033 Ω	均匀	$k = \sqrt{3}$	0.002 Ω	-34.5210 $^\circ\text{C} / \Omega$	-0.0690 Ω
u_{R_2}	电阻 R_2 的测量重复性	A	0.070 Ω	正态	—	0.070 Ω	27.4098 $^\circ\text{C} / \Omega$	1.9187 Ω
u_{R_2}	电阻 R_2 的误差	B	0.0034 Ω	均匀	$k = \sqrt{3}$	0.002 Ω	27.4098 $^\circ\text{C} / \Omega$	0.0548 Ω
u_{t_1}	温度 t_1 的测量重复性	A	0.055 $^\circ\text{C}$	正态	—	0.055 $^\circ\text{C}$	1.2594	0.0693 $^\circ\text{C}$
u_{t_1}	温度 t_1 的误差	B	0.7127 $^\circ\text{C}$	均匀	$k = \sqrt{3}$	0.4115 $^\circ\text{C}$	1.2594	0.5182 $^\circ\text{C}$
u_{t13}	温度 t_1 热稳定的判定	B	1 $^\circ\text{C}$	均匀	$k = \sqrt{3}$	0.29 $^\circ\text{C}$	1.2594	0.3652 $^\circ\text{C}$
u_{t_2}	温度 t_2 的测量重复性	A	0.055 $^\circ\text{C}$	正态	—	0.055 $^\circ\text{C}$	-1	-0.055 $^\circ\text{C}$
u_{t_2}	温度 t_2 的误差	B	0.71305 $^\circ\text{C}$	均匀	$k = \sqrt{3}$	0.4117 $^\circ\text{C}$	-1	-0.4117 $^\circ\text{C}$
u_{t23}	温度 t_2 热稳定的判定	B	1 $^\circ\text{C}$	均匀	$k = \sqrt{3}$	0.29 $^\circ\text{C}$	-1	-0.29 $^\circ\text{C}$
				合成标准不确定度 $u_c = \sqrt{\sum_i (c_i u_i)^2}$				2.088K
				包含因子 k (包含概率: 95%)				2
				扩展不确定度 $U = k \times u$				4.18K

A8.5 标准不确定度

(1) 标准不确定度 u_{R1}

① 测量重复性 u_R

重复进行相同测量产生的不确定度，如果预先进行了 10 次测量，根据贝塞尔公式，实验标准偏差 $s_1 = 0.002\Omega$ 。

实际检测只 1 次测量，测量值为 $9.482\ \Omega$ ，标准不确定度为：

$$u_{R11} = 0.002\Omega$$

②电阻 R_1 的误差引入的不确定度分量 u_R

由仪器说明书可知，数字多用表 34401A 在 $0\sim 100\ \Omega$ 量程范围内的误差为： $\pm (0.0030\%\text{读数} + 0.0030\%\text{量程})$ 。

由此带来的不确定度分量为： $U_{R12} = 9.482 \times 0.003\% + 100 \times 0.003\% = 0.0033\Omega$ ，概率分布为均匀分布，包含因子 $k = \sqrt{3}$ ，则标准不确定度为：

$$u_{R12} = 0.0033/\sqrt{3} = 0.002\Omega$$

(2) 标准不确定度 u_{R2}

①测量重复性 u_R

重复进行相同测量产生的不确定度，如果预先进行了 10 次测量，根据贝塞尔公式，实验标准偏差 $s_{R21} = 0.070\Omega$ 。

实际检测只 1 次测量，测量值为 $11.942\ \Omega$ ，标准不确定度为：

$$u_{R21} = 0.070\Omega$$

②电阻 R_2 的误差引入的不确定度分量 u_R

由仪器说明书可知，数字多用表 34401A 在 $0\sim 100\ \Omega$ 量程范围内的误差为： $\pm (0.0030\%\text{读数} + 0.0030\%\text{量程})$ 。由此带来的不确定度分量为：

$U_4 = 11.942 \times 0.003\% + 100 \times 0.003\% = 0.0034\Omega$ ，概率分布为均匀分布，包含因子 $k = \sqrt{3}$ ，则标准不确定度为：

$$u_{R22} = 0.0034/\sqrt{3} = 0.002\Omega$$

(3) 标准不确定度 u_{t1}

①测量重复性 u_t

重复进行相同测量产生的不确定度，如果预先进行了 10 次测量，根据贝塞尔公式，实验标准偏差 $s_5 = 0.055^\circ\text{C}$ 。

实际检测只 1 次测量，测量值为 25.4°C ，标准不确定度为：

$$u_{t11} = 0.055^\circ\text{C}$$

②温度 t_1 的误差引入的不确定度分量 u_t

由仪器说明书可知，数据采集仪 MX100 在使用 K 型热电偶时，在 $-100.0\sim 1370.0^\circ\text{C}$ 量程范围内的误差为： $\pm (0.05\%\text{读数} + 0.7^\circ\text{C})$ 。

由此带来的不确定度分量为： $U_{t12} = 25.4 \times 0.05\% + 0.7 = 0.7127^\circ\text{C}$ ，概率分布为均匀分布，

包含因子 $k = \sqrt{3}$ ，则标准不确定度为：

$$u_{t12} = 0.7127/\sqrt{3} = 0.4115^{\circ}\text{C}$$

③温度 t_1 热稳定的判定引入的不确定度分量 u_{t13}

在热稳定过程中，由于测量者对热稳定判定和读数的随机性影响结果为 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ ，概率分布为均匀分布，包含因子 $k = \sqrt{3}$ ，则标准不确定度为：

$$u_{t13} = 0.5/\sqrt{3} = 0.29^{\circ}\text{C}$$

(4) 标准不确定度 u_{t2}

①测量重复性 u_t

重复进行相同测量产生的不确定度，如果预先进行了 10 次测量，根据贝塞尔公式，实验标准偏差 $s_{t21} = 0.055^{\circ}\text{C}$ 。

实际检测只 1 次测量，测量值为 26.1°C ，标准不确定度为：

$$u_{t21} = 0.055^{\circ}\text{C}$$

②温度 t_2 的误差引入的不确定度分量 u_t

由仪器说明书可知，数据采集仪 MX100 在使用 K 型热电偶时，在 $-100.0 \sim 1370.0^{\circ}\text{C}$ 量程范围内的误差为： $\pm (0.05\% \text{读数} + 0.7^{\circ}\text{C})$ 。

由此带来的不确定度分量为： $U_{t22} = 26.1 \times 0.05\% + 0.7 = 0.71305^{\circ}\text{C}$ ，概率分布为均匀分布，包含因子 $k = \sqrt{3}$ ，则标准不确定度为：

$$u_{t22} = 0.71305/\sqrt{3} = 0.4117^{\circ}\text{C}$$

③温度 t_2 热稳定的判定引入的不确定度分量 u_{t23}

在热稳定过程中，由于测量者对热稳定判定和读数的随机性影响结果为 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ ，概率分布为均匀分布，包含因子 $k = \sqrt{3}$ ，则标准不确定度为：

$$u_{t23} = 0.5/\sqrt{3} = 0.29^{\circ}\text{C}$$

A8.6 合成标准不确定度

$$\begin{aligned} u_c &= \sqrt{\sum_i (c_i u_i)^2} \\ &= \sqrt{(-0.0690)^2 + (-0.0690)^2 + (1.9187)^2 + (0.0548)^2 + (0.0693)^2 + (0.5182)^2 + 0.3652^2 + (-0.055)^2 + (-0.4117)^2 + (-0.29)^2} \\ &= 2.088K \end{aligned}$$

A8.7 扩展不确定度

取 $k = 2$ ，计算扩展不确定度：

$$U = k \times u_c = 2 \times 2.088 = 4.18K$$

A8.8 结果报告

利用电阻法测量铜导线绕组的温升，最后的结果表示为：

$\Delta T = (66.7 \pm 4.2)K$ ，包含因子 $k=2$ ，对应约 95% 的包含概率。

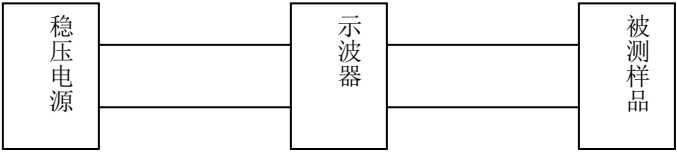


A9 频率不确定度评估

A9.1 试验方法

本次检测项目为测量电信号频率值, 测试步骤如下:

- (1) 样品通过稳压电源供电;
- (2) 将示波器调到水平测频功能;
- (3) 用示波器测试棒直接测量电信号电压输出端, 测量信号的频率值。



A9.2 数学模型

频率值是由示波器直接测量的, 故:

$$\Delta X=X-X_0$$

式中: ΔX ——频率测量误差
 X ——被测频率名义值
 X_0 ——被测频率实际值

A9.3 灵敏系数

$$C_1=\left|\frac{\partial X}{\partial \Delta X}\right|=1; \quad C_2=\left|\frac{\partial \Delta X_0}{\partial \Delta X}\right|=1$$

A9.4 不确定度汇总表

表 A9-1 频率测量不确定度汇总表

标准不确定度分量 u	不确定度来源	类型	误差量	概率分布	分布系数	标准不确定度 $u(x_i)$	灵敏系数 C_i	不确定度贡献 $u_i(y)$
u	重复性	A	0.014Hz	正态	—	0.014Hz	1	0.014Hz
u	仪器测量准确度	B	$\pm 0.02\text{Hz}$	均匀	$k=\sqrt{3}$	0.0115Hz	1	0.012Hz
				合成标准不确定度 $u_c=\sqrt{\sum_i(u_i^2)}$				0.018Hz
				包含因子 k (包含概率: 95%) =				2
				扩展不确定度 $U=k\times u_c$				0.04Hz

A9.5 标准不确定度

1) 测量重复性引起的不确定度 u

在相同条件下重复测量 10 次。得出的频率测量值分别为:996.79Hz, 996.77Hz, 996.80Hz, 996.77Hz, 996.76Hz, 996.78Hz, 996.79Hz, 996.78Hz, 996.76Hz, 996.79Hz

根据贝塞尔公式, 不确定度为:

$$u_1 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{(n-1)}} = 0.014(\text{Hz})$$

其中, x_i 为单次测量结果, n 为测量次数, $n=10$, $\bar{x}$ 测量结果的平均值。

2) 示波器水平测量误差引起的不确定度 u

示波器水平测量误差, 采用 B 类方法评定。示波器在 1000Hz 水平测频准确度为 $\pm 20\text{ppm}\times$ 读数, 均匀分布, $k=\sqrt{3}$,

$$u_2 = (0.002\% \times 1000) / \sqrt{3} = 0.012 \text{ (Hz)}$$

A9.6 合成标准不确定度

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2} = \sqrt{0.014^2 + 0.012^2} = 0.018\text{Hz}$$

A9.7 扩展不确定度

扩展不确定度： $U = k \times u_c = 2 \times 0.018 = 0.04$ (Hz)

A9.8 结果报告

以第一次测量值作为最终结果

测量的频率=996.79 Hz $\pm$ 0.04 Hz (包含因子 $k=2$, 对应约 95%的包含概率)。



A10 工作温度下的泄漏电流不确定度评估

A10.1 检测方法

依据 GB4706.1-2005 的 13.2 条的规定，被测量具在正常工作状态下工作一直延续到标准中规定的时间，用 GB/T12113 中图 4 所描述的电路装置（见图 A10-1）进行测量，测量在电源的任一极与连接金属箔的易触及金属部件之间进行。被连接的金属箔面积不得超过 20cm×10cm，并与绝缘材料的易触及表面相接触。

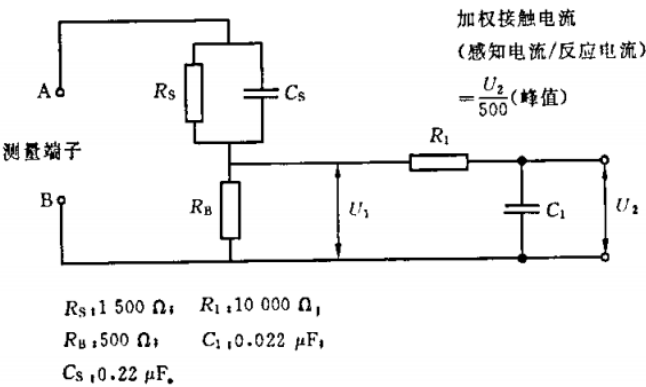


图 A10-1 加权接触电流（感知电流或反应电流）的测量网络

本次测量使用泄漏电流仪直接在仪器表头进行读数测量。

A10.2 测量模型

泄漏电流可在泄漏电流仪上直接读取，其测量模型为：

$$I_x = I_N$$

其中， I_x ——泄漏电流实测值，mA；

I_N ——仪器直接读数，mA。

A10.3 方差与灵敏系数

$$u_c^2(I_x) = u_c^2(I)$$
$$u_c^2(I_x) = \left(\frac{\partial f}{\partial I}\right) u_c^2(I) = C^2(I) u_c^2(I)$$
$$c(I) = 1$$

A10.4 不确定度汇总

标准不确定度分量 u_i	不确定度来源	类型	分布系数	标准不确定度 mA	灵敏系数 c_i	不确定度贡献 $ c_i \times u(x_i)$ mA
$u_A(I_x)$	重复测量	A	/	0.0152	1	0.0152
u_i	仪器固有误差	B	$\sqrt{3}$	0.0092	1	0.0092

u_2	仪器量化误差	B	$\sqrt{3}$	0.0003	1	0.0003
u_3	温度附加误差	B	3	0.0011	1	0.0011
u_4	试验功率、电压误差的影响	B	$\sqrt{3}$	0.0012	1	0.0012
			合成标准不确定度 $u=\sqrt{\sum_i(u_i)^2}$			0.018 mA
			包含因子 k (包含概率: 95%) =			2
			扩展不确定度 $U=k\times u_c$			0.036mA (0.04 mA)

A10.5 标准不确定度

(1) 测量重复性

以电热水壶产品的工作温度下的泄漏电流为例，进行 10 次独立测量，测量数据见表 A10-1。

表 A10-1 泄漏电流 10 次独立测量数据

序号	测量值/mA	序号	测量值/mA
1	0.32	7	0.33
2	0.32	8	0.36
3	0.33	9	0.35
4	0.34	10	0.36
5	0.35	平均值	0.341
6	0.35	实验标准偏差	0.0152

用贝塞尔公式计算测量结果，可得泄漏电流标准不确定度 A 类评定分量为：

$$u_A(I_x) = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n [I_{xi} - \bar{I}_x]^2}{n-1}} = 0.0152 \text{ mA}$$

(2) 泄漏电流仪固有系统误差的不确定度分量 u

对于泄漏电流仪，仪器的系统误差极限值为±5%，系统误差概率分布为均匀分布，取 $k=\sqrt{3}$ 。

$$u_1 = 0.32 \times 5\% / \sqrt{3} = 0.0092 \text{ mA}$$

(3) 泄漏电流仪读数时的量化误差的不确定度分量 u

泄漏电流仪在 2mA 档位、0.001mA 分辨率时，量化误差的概率分布为均匀分布，取 $k=\sqrt{3}$ 。

$$u_2 = 0.001 / 2 / \sqrt{3} = 0.0003 \text{ mA}$$

(4) 泄漏电流仪温度附加误差的不确定度分量 u_3

对于家用电器产品，试验环境温度保持在 20±5℃，示值变化极限值±1%，概率分布为正态分布，取 $k=3$ 。

$$u_3 = \frac{0.32 \times 0.0}{3} = 0.32 \times 0.01 / 3 = 0.0011 \text{ mA}$$

(5) 试验功率、电压误差引起的不确定度分量 u_4

对于电水壶产品，其功率受到供电电源影响，泄漏电流变化不超过 0.002 mA ，概率分布为均匀分布，取 $k=\sqrt{3}$ 。

$$u_4 = \frac{0.00}{\sqrt{3}} = 0.002 / \sqrt{3} = 0.0012 \text{ mA}$$

A10.6 合成标准不确定度

$$u(I_x) = \sqrt{[c_{I_x} u_A(I_x)]^2 + (c_1 u_1)^2 + (c_2 u_2)^2 + (c_3 u_3)^2 + (c_4 u_4)^2} \quad \text{A10-1}$$

式中：

$u(I_x)$ ----- 泄漏电流合成不确定度；

$u_A(I_x)$ 、 u_1 、 u_2 、 u_3 、 u_4 ----- 不确定度分量；

$u(x_i) = \frac{U}{k}$ ----- 各项灵敏系数

根据公式 A10-1，泄漏电流合成不确定度：

$$u(x_i) = 0.018 \text{ mA}$$

A10.7 扩展不确定度

取 $k=2$ ，计算扩展不确定度：

$$U = k \times u_c = 2 \times 0.018 = 0.036 \text{ mA} = 0.04 \text{ mA}$$

A10.8 结果报告

根据表 A10-1，取泄漏电流单次测量值 0.32 mA 作为测量结果，表示如下：

$$I = 0.32 \text{ mA} \pm 0.04 \text{ mA} \quad (k=2, \text{ 对应约 } 95\% \text{ 的包含概率})$$

A11 光伏组件开路电压、短路电流及最大功率测量方法不确定度评估

本部分针对两种情况进行了不确定度分析，一种是针对在固定场所实验室内部环境下，对光伏组件开路电压、短路电流及最大功率测量的分析；另外一种是针对非固定场所使用的移动检测车环境下的分析，由于移动环境控制困难，因此只针对最大功率进行了不确定度分析。

A11.1 试验方法

本检测项目是针对太阳电池（光伏组件）在 STC 条件下的电流-电压（I-V）特性参数：开路电压 V_{oc} ，短路电流 I_{sc} ，最大输出功率 P_m ，依据标准光伏电流-电压特性的测量（IEC60904-1）进行。测试步骤和说明如下：

（1）对光伏组件配备的小样（电池片和封装材料与被测光伏组件一致）进行光谱响应度（DSR）测试，

（2）将小样光谱响应度（ S_{test} ）、瞬态模拟器 WPVS 标准太阳电池光谱响应度（ S_{ref} ）、瞬态太阳模拟器光谱、AM1.5G 标准太阳光谱数据带入如下公式：

$$MMF = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_{ref}(\lambda) s_{ref}(\lambda) d\lambda \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_{source}(\lambda) s_{test}(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_{ref}(\lambda) s_{test}(\lambda) d\lambda \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_{source}(\lambda) s_{ref}(\lambda) d\lambda}$$

计算得到光谱失配因子 MMF，对瞬态模拟器 WPVS 标准太阳电池 CV 值进行光谱失配修正，并将修正后的 CV 值输入操作控制软件，作为 $1000\text{W}/\text{m}^2$ 定标的依据；

（3）将被测光伏组件置于测试面内，保证光伏组件与 WPVS 电池平行，偏差小于 1° ，并连接测试引线；

（4）调节控温装置，使得光伏组件各区域温差在 1.0°C 范围内，并且平均温度维持在 $(25.0 \pm 1.0)^\circ\text{C}$ 。

（5）开启电子负载箱和采集软件，采用多次闪光分段测试的模式测量光伏组件光电性能，各段重叠区域部分设置为 0.2（20%），分段数目的选取以满足正向扫描（ $I_{sc}-V_{oc}$ ）和反向扫描（ $V_{oc}-I_{sc}$ ）测量最大功率结果偏差小于 0.5% 为准则。

（6）测试并记录正向扫描和反向扫描所测得光电性能关键参数数据，（开路电压 V_{oc} ，短路电流 I_{sc} ，最大输出功率 P_m ，最佳工作电压 V_m ，最佳工作电流 I_m ），取正、反扫平均值作为单次测量结果。重复上述过程 2 次，若两次测量偏差 $< 0.1\%$ ，取 2 次结果的平均值作为最终测试结果。

（7）最终获得光伏组件的短路电流、开路电压和最大功率。本光伏组件测得的光伏组件短路电流是 8.85A，光伏组件开路电压是 37.8V，光伏组件功率是 253.7W。

A11.2 不确定度因素来源

太阳电池光电性能测试结果包括短路电流、开路电压和最大功率等关键参数，根据各

影响因子，其函数关系表示如下：

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

不确定度为：

$$u_c(y)=\sqrt{\sum_{i=1}^N\left(\frac{\partial f}{\partial x}\cdot u(x_i)\right)}$$

相对不确定度为：

$$u_c(y)\equiv\frac{u_c(y)}{y}=\sqrt{\sum_{i=1}^N\left(\frac{1}{y}\frac{\partial f}{\partial x}\cdot u(x_i)\right)}$$

A11.3 不确定度汇总

光伏组件短路电流、开路电压及功率的不确定因素汇总如下

	关键参数	不确定度来源	统计分布	包含因子K	短路电流相对标准不确定度	开路电压相对标准不确定度	功率相对标准不确定度
u_1	重复性	测量重复性引入不确定度	均匀	$\sqrt{3}$	0.05%	0.05%	0.08%
u_2	光辐射强度（1000W/m ² ）的确定	标准太阳能电池校准引入不确定度	均匀	$\sqrt{3}$	0.75%	0.04%	0.74%
		标准太阳能电池测量准确性引入不确定度	正态	2			
		标准太阳能电池长期稳定性引入不确定度	均匀	$\sqrt{3}$			
		标准太阳能电池温度偏差引入不确定度	均匀	$\sqrt{3}$			
		标准电池与被测组件光谱失配引入不确定度	均匀	$\sqrt{3}$			
u_3	辐照不均匀性	测试面辐照不均匀度引入不确定度	均匀	$\sqrt{3}$	0.22%	0.00%	0.04%
u_4		标准太阳能电池与光伏组件辐照不均匀度引入不确定度	均匀	$\sqrt{3}$	0.00%	0.00%	0.00%
u_5	辐照长期不稳定性	基于监控电池进行辐照度修正引入的不确定度	均匀	$\sqrt{3}$	0.00%	0.00%	0.00%
u_6	温度偏差	被测组件温度测量及温度不均匀性引入不确定度	均匀	$\sqrt{3}$	0.02%	0.10%	0.13%
u_7	电学参数偏差	太阳模拟器电子箱电压、电流、功率测量准确度引入不确定度	均匀	$\sqrt{3}$	0.15%	0.34%	0.26%
u_8	几何位置及角度	标准太阳能电池与被测光伏组件平行度引入不确定度	均匀	$\sqrt{3}$	0.02%	0.01%	0.06%

U_9		标准太阳电池与被测光伏组件前后距离偏差引入不确定度	均匀	$\sqrt{3}$	0.12%	0.01%	0.12%
U_{10}	接触电阻	由于测试端子与组件接头接触电阻引入的不确定度	均匀	$\sqrt{3}$	0.00%	0.00%	0.16%
U_{11}	电容效应	由于光伏组件的容性引起测试过程中磁滞效应导致正反扫差异引入的不确定度	均匀	$\sqrt{3}$	0.00%	0.01%	0.13%
合成相对标准不确定度					0.8%	0.35%	0.85%
包含因子 k (包含概率: 95%) =					2	2	2
扩展相对不确定度 $U=k\times u_c$					1.6%	0.7%	1.7%
扩展不确定度 $U=k\times u_c$					0.14A	0.26A	4.31W

A11.4 标准不确定度

A11.4.1 测量重复性引入不确定度 u

通过开关设备，在不同时间段，分别测量光伏组件的 IV 特性，每次测量分别采用正扫、反扫模式进行。在实际测量过程中，通常测试正反扫三次取平均值作为最终结果，故重复性引入不确定度为 $u_1 = \frac{s}{\sqrt{n}} = \frac{s}{\sqrt{3}}$ ，计算结果如下：

I_{sc}	V_{oc}	P_m
0.05%	0.05%	0.08%

A11.4.2 辐照度定标引入的不确定度 u_2 (该项来源由 5 部分组成)

A11.4.2.1 标准太阳电池定标引入的不确定度 $u_{2.1}$

利用光谱响应度类似的标准太阳电池标定太阳模拟器的光强时，通过 IEC60904-4 所描述的 DSR 方法对标准太阳电池的光谱响应度测量，计算得出 STC 条件下的短路电流即标定值，其校准不确定度为 $U_{rel}=0.9\%$ ($k=2$)， $u_{2.1} = 0.45\%$ 。

A11.4.2.2 标准太阳电池电学测量准确性引入不确定度 $u_{2.2}$

太阳模拟器电子负载箱测量标准太阳电池短路电流值时，电学测量偏差引入的不确定度。此电路测量准确性经过太阳模拟器供应商出厂校准，最大允许误差在 0.1%之内。标准太阳电池短路电流测量准确性引入的不确定度：

$$u_{2.2} = 0.1\%/\sqrt{3} = 0.06\%$$

A11.4.2.3 标准太阳电池稳定性引入不确定度 $u_{2.3}$

考核标准太阳电池在 1 年校准周期内，校准值的变化情况。标准太阳电池近 3 年来校准最大偏差为：0.49%。故标准太阳电池校准周期内长期稳定性引入的不确定度：

$$u_{2.3} = 0.49\%/2/\sqrt{3} = 0.14\%$$

A11.4.2.4 标准太阳电池温度偏差引入不确定度 $u_{2.4}$

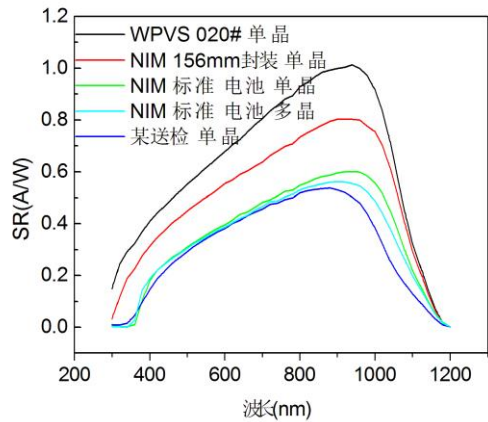
考核标准太阳电池温度控制偏差对其短路电流，进而对辐照度定标的影响。标准太阳电池温度系数经过校准，短路电流温度系数为 0.05%/℃。实验室品控可实现实际测试过程中保持 (25.0±1.0)℃。故由于标准太阳电池温度偏差引入不确定度为：

$$u_{2.4} = 0.05\%/\sqrt{3} = 0.03\%$$

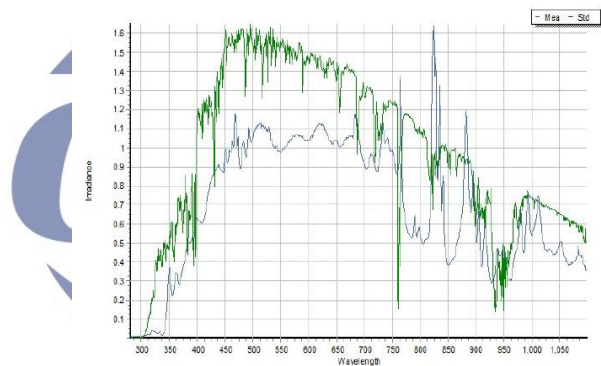
A11. 4. 2. 5 标准电池与被测组件光谱失配引入不确定度 $u_{2.5}$

光谱失配计算过程为：（1）测量标准太阳电池光谱响应度；（2）测量太阳模拟器光谱分布；（3）测量被测组件光谱响应度或者与被测组件相同批次封装电池片样品光谱响应度；（4）计算光谱失配因子 MMF 。

（1）标准太阳电池光谱响应度经过校准，各类型电池光谱响应度曲线如下：



（2）测量所用太阳模拟器在 $1000\text{W}/\text{m}^2$ 辐照度下的光谱如下：



（3）由于被评估实验室为校准实验室，测试样品不同响应度存在变化，如（1）中选取不同类型的太阳电池的响应度进行光谱失配计算。

将光谱响应度数据、太阳模拟器光谱数据及 AM1.5G 标准太阳光谱数据带入光谱失配因子计算公式（IEC60904-7）：

$$MMF = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_{ref}(\lambda) s_{ref}(\lambda) d\lambda \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_{source}(\lambda) s_{test}(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_{ref}(\lambda) s_{test}(\lambda) d\lambda \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_{source}(\lambda) s_{ref}(\lambda) d\lambda}$$

各样品之间光谱失配因子如下：

电池样品	WPVS&156mm单晶	WPVS&NIM单晶	WPVS&送检单晶	WPVS&NIM多晶
MMF值	1.0014	1.0096	1.0075	1.0078

光谱失配因子可限制在（0.99-1.01）之间，故由于光谱失配引入的不确定度为：

$$u_{2.5} = (1.01 - 0.99)/2/\sqrt{3} = 0.57\%。$$

不确定度分量 $u_{2.1}$ 至 $u_{2.5}$ 共同引起辐照度定标不确定度，合成不确定度 u_2 ，判定辐照度合成不确定度引起太阳模拟器辐照度的变化范围，实验判定模拟器辐照度在此范围内引起各参数变化情

况。

此 5 部分引起辐照度定标不确定度为:

$$u_2 = \sqrt{u_{2.1}^2 + u_{2.2}^2 + u_{2.3}^2 + u_{2.4}^2 + u_{2.5}^2} = \sqrt{0.45\%^2 + 0.06\%^2 + 0.14\%^2 + 0.03\%^2 + 0.57\%^2}$$
$$= 0.75\%$$

合成扩展不确定度为: $U_2 = 1.5\%(k = 2)$

(4) 调节太阳模拟器辐照度范围 (985W/m²-1015W/m²) , 各光电参数变化情况如下表所示:

辐照度 (W/m ²)		I_{sc}	V_{oc}	P_m
985		8.753	37.81	250.2
		8.749	37.81	250.1
		8.752	37.81	250.1
	平均值	8.751	37.81	250.1
1000		8.887	37.84	253.9
		8.885	37.83	253.9
		8.885	37.83	253.9
	平均值	8.886	37.83	253.9
1015		9.020	37.86	257.6
		9.018	37.86	257.6
		9.019	37.86	257.6
	平均值	9.019	37.86	257.6

由上述数据得到由辐照度定标引入短路电流、开路电压、最大功率的不确定度分别为:

参数	I_{sc}	V_{oc}	P_m
u	0.75%	0.04%	0.74%

A11.4.3 测试面辐照不均匀度引入不确定度 u_3

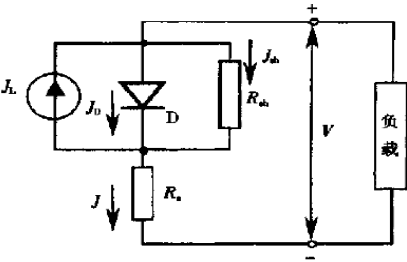
评估方法为: (1) 测量辐照面内光伏组件中各电池对应位置辐照不均匀度 u_3 ; (2) 编写不均匀度对光伏组件 IV 性能影响分析软件, 分析辐照不均匀度对光伏组件 IV 测量结果的影响。

(1) 测量光伏组件位置处辐照不均匀度, 数据如下:

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
A	184.8	184.9	184.8	184.8	185	184.7	184.4	184.6	184.5	185.1
B	184.8	185.2	185.3	185.2	185.1	185.1	185.2	185.2	184.9	185.6
C	184.3	185.1	185.4	185.9	185.4	184.9	185.1	184.9	184.8	185.6
D	184.9	185.3	184.9	184.6	184.6	184.5	184.6	184.4	184.4	184.6
E	184	184.3	184.5	184.4	184.4	184.4	184.3	184.3	184.3	184.3
F	184.8	184.5	184.1	184.2	184.3	184.3	184.2	184.6	184.5	184.6

不均匀度为: 0.5%。

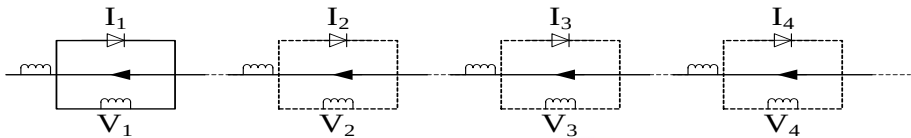
(2)



由太阳电池等效理论，电池片电流可以用以下公式得到：

$$I=I_{ph}-I_0[\exp\{\frac{q(V/m+R_s\cdot I)}{nkT}\}-1]-\frac{V/m+R_s\cdot I}{R_{sh}}-a(V/m+R_s\cdot I)(1-\frac{V/m+R_s\cdot I}{V_{br}})^{-nm}$$

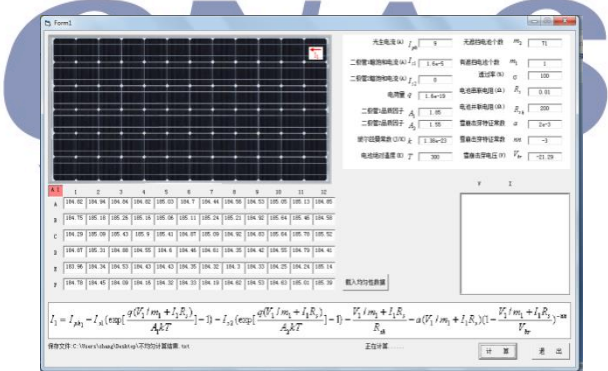
且光伏组件中各电池片是串联关系，



光伏组件的电流、电压、功率和各电池片电流、电压、功率关系如下：

$$V=V_1+V_2+V_3+\cdots\cdots; \quad I=I_1=I_2=I_3=\cdots\cdots; \quad P=I*V$$

由以上公式编写软件，界面如下图所示，



利用编写软件，分别计算：1、辐照度完全均匀；2、实际辐照度分布（取平均值位置调节WPVS监控电池辐照度至1000W/m²），两种情况下各光电参数偏差如下：

辐照度分布情况	I_{sc}	V_{oc}	P_m
均匀辐照度分布	9	45.62	258.4
实际辐照度分布	8.98	45.62	258.3
偏差	-0.22%	0.00%	-0.04%

由于辐照不均匀性引入不确定度 u_3 为：

I_{sc}	V_{oc}	P_m
0.22%	0.00%	0.04%

A11.4.4 标准太阳电池与光伏组件辐照不均匀度引入不确定度 u_4

测量光伏组件位置处辐照不均匀度，数据如下：

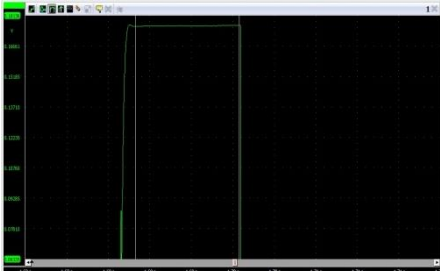
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
A	184.8	184.9	184.8	184.8	185	184.7	184.4	184.6	184.5	185.1
B	184.8	185.2	185.3	185.2	185.1	185.1	185.2	185.2	184.9	185.6
C	184.3	185.1	185.4	185.9	185.4	184.9	185.1	184.9	184.8	185.6
D	184.9	185.3	184.9	184.6	184.6	184.5	184.6	184.4	184.4	184.6
E	184	184.3	184.5	184.4	184.4	184.4	184.3	184.3	184.3	184.3
F	184.8	184.5	184.1	184.2	184.3	184.3	184.2	184.6	184.5	184.6

光伏组件测试面内平均辐照度相对值为：184.75，测量标准太阳电池位置处辐照度相对值为：184.47。

由于被评估实验室已将此比例因子（184.47/184.75）引入到标准太阳电池 CV 值的修正，故由于标准太阳电池位置辐照不均匀性引入的不确定度可忽略， $u_4 = 0$

A11.4.5 辐照长期不稳定性引入的不确定度 u_5

测量 IV 采集过程中的辐照度不稳定性，根据不稳定性大小和有无辐照度修正及修正公式进行判定。测量 IV 采集过程中，辐照度变化曲线如下图所示，



不稳定性 0.2%。

由于本太阳模拟器辐照长期不稳定性 0.2%较小，且设备具备基于标准太阳电池进行 IV 测试结果的辐照度修正功能，故由 IV 采集过程中长期辐照不稳定性引入的不确定度可忽略， $u_5 = 0$ 。

A11.4.6 被测组件温度测量及温度不均匀性引入不确定度 u_6

评估方法为：（1）测量组件不同位置温度分布；（2）组件温度系数；（3）测温仪器校准不确定度；（4）测温偏差；（5）组件背板温度与电池片温度差异。

（1）被评估实验室采用中央空调控温，光伏组件竖直放置，光伏组件温度上下存在对称温差。以下通过实验加热光伏组件某部分电池片，分析光电参数随温度均匀性的关系。

	室温	25℃				
	加热温度	37℃±3℃				
	I_{sc}	V_{oc}	P_m			
无加热	8.972	45.76	313.97			
加热 1cell	8.971	45.72	313.5			
加热 4cell	8.974	45.58	312.3			
加热 9cell	8.974	45.41	310.76			
加热 12cell	8.975	45.28	309.58			

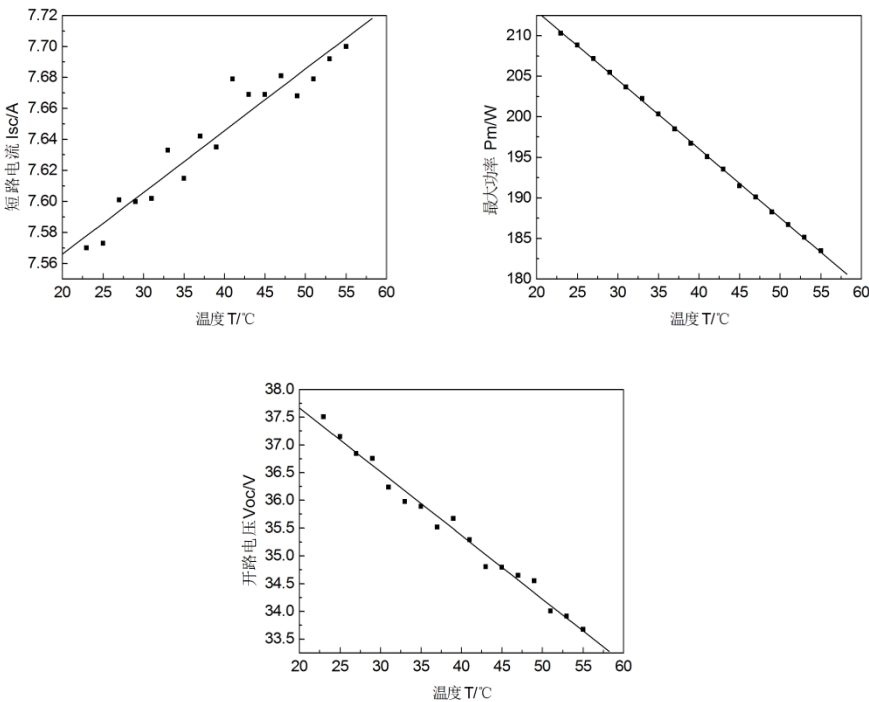
I_{sc} 差值 /cell 个 数	1cell	-0.001		V_{oc} 差值 /cell 个 数	1cell	-0.040
	4cell	0.001			4cell	-0.045
	9cell	0.000			9cell	-0.039
	12cell	0.000			12cell	-0.040
P_m 差值 /cell 个 数	1cell	-0.47				
	4cell	-0.42				
	9cell	-0.36				
	12cell	-0.37				

得到如下结论：

- 1) 温度不均匀对 I_{sc} 影响可忽略；
- 2) 温度对“组件 V_{oc} 的影响”与对“各电池片 V_{oc} 影响的线性叠加”等效，即：组件 V_{oc} 取决于各电池片温度的平均值；
- 3) 温度对“组件 P_m 的影响”与对“各电池片 P_m 影响的线性叠加”近似等效。

基于以上结论，且被评估实验室温度探头置于光伏组件中心位置，上下温度差分布均匀，故由于温度温差分布引入的不确定度 $u_{6.1} = 0$ 可忽略。

(2) 测量光伏组件温度系数经第三方实验室校准，如下：



I_{sc} 、 V_{oc} 、 P_m 的温度系数分别为：

I_{sc}	V_{oc}	P_m
0.06%/°C	-0.30%/°C	-0.40%/°C

红外测温仪经过校准，校准扩展不确定度为：0.3℃（ $k=2$ ）。故由测温仪器校准引入标准不确定度为：

$u_{6.2}(I_{sc})=0.06\%/^{\circ}\text{C}/2\times0.3^{\circ}\text{C}=0.01\%;$
 $u_{6.2}(I_{sc})=0.30\%/^{\circ}\text{C}/2\times0.3^{\circ}\text{C}=0.05\%;$
 $u_{6.2}(I_{sc})=0.40\%/^{\circ}\text{C}/2\times0.3^{\circ}\text{C}=0.06\%;$

如下表所示：

I_{sc}	V_{oc}	P_m
0.01%	0.05%	0.06%

根据品控情况，温度平均值测量偏差及组件背板温度与电池片结温偏差可控制在±0.5℃内，由此引入的不确定度 $u_{6.3}$

$u_{6.3}(I_{sc})=0.06\%/^{\circ}\text{C}/2\times0.5^{\circ}\text{C}=0.02\%;$
 $u_{6.3}(I_{sc})=0.30\%/^{\circ}\text{C}/2\times0.5^{\circ}\text{C}=0.08\%;$
 $u_{6.3}(I_{sc})=0.40\%/^{\circ}\text{C}/2\times0.5^{\circ}\text{C}=0.10\%;$

如下表所示：

I_{sc}	V_{oc}	P_m
0.02%	0.08%	0.10%

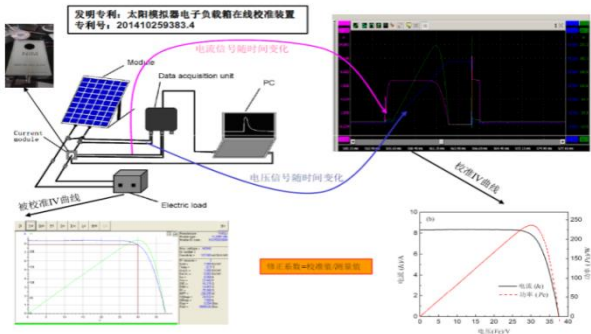
综上，由于被测组件温度测量及温度不均匀性引入的不确定度 u_6

$$u_6 = \sqrt{u_{6.1}^2 + u_{6.2}^2 + u_{6.3}^2}$$

I_{sc}	V_{oc}	P_m
0.02%	0.10%	0.12%

A11.4.7 太阳模拟器电子箱电压、电流、功率测量准确度引入不确定度 u_7

采用如下电子负载箱校准装置对被评估太阳模拟器电子负载箱电学测量准确性进行校准，



测量数据如下：

		I_{sc} / A	V_{oc} / V	P_m / W
标准	1	8.839	45.33	309.3
	2	8.837	45.33	309.1
	3	8.845	45.33	308.9
	4	8.835	45.32	309
	5	8.85	45.33	309.3
	平均值	8.841	45.33	309.1

被测	1	8.838	45.48	309.8
	2	8.838	45.47	309.7
	3	8.837	45.47	309.6
	4	8.833	45.47	309.5
	5	8.843	45.48	309.8
	平均值	8.838	45.47	309.7
	偏差	-0.04%	0.32%	0.18%

由太阳模拟器负载箱电学测量偏差引入不确定度 u_7 .

I_{sc}	V_{oc}	P_m
0.04%	0.32%	0.18%

电学校准不确定度 $U_{7.2}$:

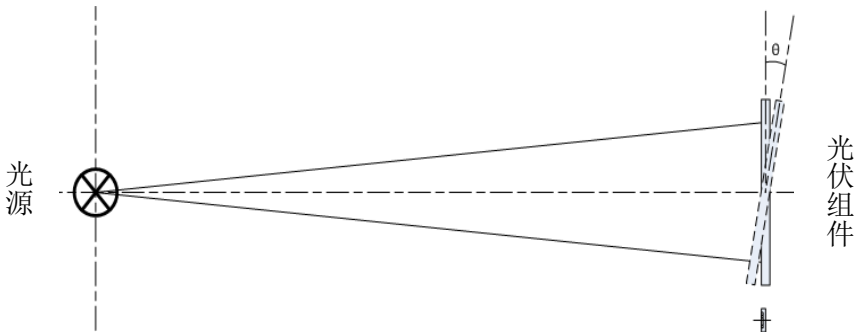
I_{sc}	V_{oc}	P_m
0.3% ($k=2$)	0.2% ($k=2$)	0.36% ($k=2$)

综上，由于电子负载箱测量准确度引入不确定度 u_7

I_{sc}	V_{oc}	P_m
0.15%	0.34%	0.26%

A11.4.8 标准太阳电池与被测光伏组件平行度引入不确定度 u_8

被评估实验室通过角度控制，可实现标准太阳电池和组件平行度在 1.0° 范围内。分别在如图 所示两种条件下测试光伏组件 IV 特性。



测量数据如下表所示:

	I_{sc} / A	V_{oc} / V	P_m / W
0deg-1	8.867	37.72	252.236
0deg-2	8.867	37.725	252.282
0deg-3	8.87	37.724	252.337
平均值	8.868	37.723	252.285
1deg-1	8.873	37.73	252.617
1deg-2	8.871	37.732	252.558
1deg-3	8.867	37.733	252.484
平均值	8.870	37.732	252.553

分析不确定度满足均匀分布，由于标准太阳电池和被测组件平行度引入不确定度 u_8

$u_8(I_{sc}) = (8.870 - 8.868) / (8.870 + 8.868) / 2 = 0.02\%$;

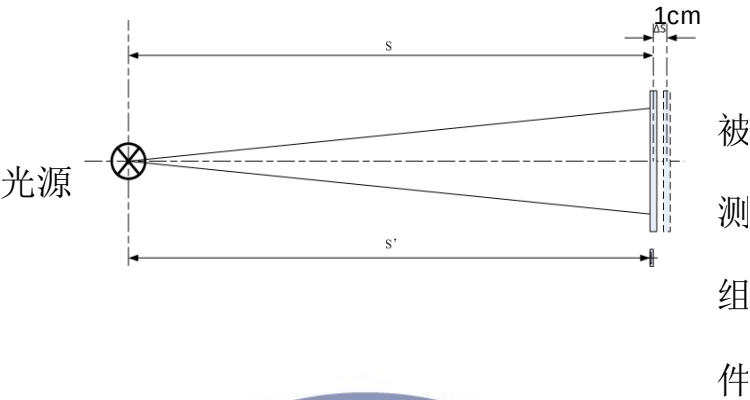
$u_8(V_{oc}) = (37.732 - 37.723) / (37.732 + 37.723) / 2 = 0.08\%$;

$u_8(I_{sc}) = (252.558 - 252.285) / (252.558 + 252.617) / 2 = 0.10\%$;

I_{sc}	V_{oc}	P_m
0.01%	0.01%	0.03%

A11. 4. 9 标准太阳电池与被测光伏组件前后距离偏差引入不确定度 u_9

被评估实验室通过距离控制，可实现标准太阳电池和组件纵向距离在 1cm 范围内。分别在如图
所示两种条件下测试光伏组件 IV 特性。



测量数据如下表所示:

	I_{sc} / A	V_{oc} / V	P_m / W
0cm-1	8.86	38.359	258.221
0cm-2	8.86	38.359	258.236
0cm-3	8.859	38.358	258.245
平均值	8.860	38.359	258.234
1cm-1	8.878	38.366	258.79
1cm-2	8.877	38.365	258.75
1cm-3	8.877	38.364	258.792
平均值	8.877	38.365	258.777

分析不确定度满足均匀分布，由于标准太阳电池和被测组件前后距离引入不确定度 u_9

$u_9(I_{sc}) = (8.877 - 8.86) / (8.877 + 8.86) / 2 = 0.02\%$;

$u_9(V_{oc}) = (38.365 - 38.359) / (38.365 + 38.359) / 2 = 0.08\%$;

$u_9(P_m) = (258.777 - 258.234) / (258.777 + 258.234) / 2 = 0.10\%$;

I_{sc}	V_{oc}	P_m
0.05%	0.00%	0.05%

A11. 4. 10 测试端与组件接头接触电阻引入的不确定度 u_{10}

测量测试端与组件接头的接触电阻，分析接触电阻对组件功率的影响。由统计知测量测试端
与组件接头的接触电阻，约为 2.5mΩ；两个接头总共引入接触电阻 5mΩ。通过理论计算得到由
于接触电阻引入的不确定度 u_{10}

I_{sc}	V_{oc}	P_m
0.00%	0.00%	0.16%

A11. 4. 11 光伏组件的容性引起测试过程中磁滞效应引入的不确定度 u_{10}

在单次闪光条件下，采用正扫和反扫两种模式测量组件功率，分析正反扫差别引起测量不确定度。采用 split 模式，分别在正扫和反扫条件下测量光伏组件 IV 特性，数据如下：

	I_{sc} /A	V_{oc} /V	P_m /W
direct-1	8.854	37.85	253.302
direct-2	8.852	37.85	253.313
direct-3	8.854	37.851	253.332
平均值	8.853	37.850	253.3
reverse-1	8.854	37.845	254.003
reverse-2	8.854	37.845	253.928
reverse-3	8.852	37.845	253.982
平均值	8.853	37.845	254.0

选取正反扫平均值作为最终结果，分析不确定度满足正态分布，由于光伏组件的容性引起测试过程中磁滞效应引入的不确定度 u

I_{sc}	V_{oc}	P_m
0.00%	0.01%	0.13%

结果：

扩展不确定度

由上述不确定分析，通过如下公式分别计算短路电流、开路电压、最大功率的合成标准不确定度

$$u = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2 + u_5^2 + u_6^2 + u_7^2 + u_8^2 + u_9^2 + u_{10}^2 + u}$$

合成扩展不确定度(k=2)

短路电流、开路电压、最大功率的扩展不确定度分别为：

I_{sc}	V_{oc}	P_m
1.6%	0.7%	1.7%

结论

光伏组件短路电流是 8.85A，其扩展不确定度为 $U_p=1.6\%$ ，它是由合成标准不确定度 $u_p=0.8\%$ 乘以包含因子 $k=2$ 得到的。

光伏组件开路电压是 37.8V，其扩展不确定度为 $U_p=0.7\%$ ，它是由合成标准不确定度 $u_p=0.35\%$ 乘以包含因子 $k=2$ 得到的。

光伏组件功率是 253.7W，其扩展不确定度为 $U_p=1.7\%$ ，它是由合成标准不确定度 $u_p=0.85\%$ 乘以包含因子 $k=2$ 得到的。

第二部分（非固定场所移动检测车）（上标*表示非固定场所）

A*11 标准不确定度评定

A*11.1 由重复性测试引入的标准不确定度分量的评定

在重复性条件下对被测光伏组件的功率作 10 次独立重复测试，得到的测量结果如下表所示：

次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
P_k (W)	270.58	270.46	270.48	270.32	270.43	270.29	270.41	270.23	270.22	270.16

根据贝塞尔公式得出：

标准不确定度： $s(p) = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^{10} (p_k - \bar{p})^2}{10-1}} = 0.13W$

相对标准不确定度： $u_{RT}=0.05\%$

A*11.2 标准电池标定值的标准不确定度分量的评定

试验中采用两块标准电池。根据标准电池的校准证书结果，在标准测试条件（STC）下，两块电池标定值的校准不确定度分别为 2.3%和 2.2%，服从均匀分布。因此标准电池标定值的校准引入的不确定度为

$$u_{RC1} = \frac{2.3\%}{\sqrt{3}} = 1.33\%$$
$$u_{RC2} = \frac{2.2\%}{\sqrt{3}} = 1.27\%$$

A*11.3 光谱失配修正因子 M 的标准不确定度评定

$$M = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_S(\lambda) \cdot S_t(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_S(\lambda) \cdot S_r(\lambda) d\lambda} \cdot \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_{ref}(\lambda) \cdot S_r(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_{ref}(\lambda) \cdot S_t(\lambda) d\lambda}$$

光谱失配修正因子按照上述公式计算得出。其不确定度来源包括单色光辐照度波动引起的不确定度、硅光二极管校准的不确定度、单色光辐照不均匀度引起的不确定度、光谱辐射计测量的不确定度。在实际试验过程中，光谱失配引入的不确定度为

$$u_{MM} = 0.42\%$$

A*11.4 测量读数引入的标准不确定度评定

根据太阳模拟器测量系统的校准证书给出的不确定度说明，直流 10A 量程、电压 100V 量程的测量不确定度为 0.2%，服从均匀分布。电压、电流读数的不确定度分别为

$$u_{IM} = \frac{0.2\%}{\sqrt{3}} = 0.12\%$$
$$u_{UM} = \frac{0.2\%}{\sqrt{3}} = 0.12\%$$

A*11.5 太阳模拟器辐照不均匀度的标准不确定度评定

根据太阳模拟器性能测试报告，模拟器辐照不均匀度为 1.71%，服从均匀分布。

$$u_{UNI} = \frac{1.71\%}{\sqrt{3}} = 0.99\%$$

A*11.6 温度引入的标准不确定度评定

在测试过程中，组件的功率会受到温度的影响。组件样品的功率温度系数(β)是-0.32%/℃，标准电池的短路电流温度系数(α)是 0.05%/℃。在实际测量中，组件样品和标准电池的温度可控制在 25℃±1℃范围内，服从均匀分布。

$$u_{MT} = \frac{0.32\%}{\sqrt{3}} = 0.18\%$$
$$u_{CT} = \frac{0.05\%}{\sqrt{3}} = 0.03\%$$

合成标准不确定度及扩展不确定度

不确定度分量表

标准不确定度分量	不确定度来源	标准不确定度值	概率分布
u_{RT}	重复性误差	0.05%	正态
u_{RC}	标准电池标定值	1.33%	均匀

u_{RC}	标准电池标定值	1.27%	均匀
u_{MM}	光谱失配修正因子	0.42%	正态
u_{IM}	电流测量读数的不确定度	0.12%	均匀
u_{UM}	电压测量读数的不确定度	0.12%	均匀
u_{UNI}	太阳模拟器的辐照不均匀度	0.99%	均匀
u_{CT}	标准电池的温度系数	0.03%	均匀
u_{MT}	组件样品的温度系数	0.18%	均匀
$U_p=4.28\%$			

合成标准不确定度

$$\begin{aligned}
 u_p &= \sqrt{(u_{RT})^2 + (u_{RC})^2 + (u_{MM})^2 + (u_{IM})^2 + (u_{UM})^2 + (u_{UNI})^2 + (u_{CT})^2 + (u_{MT})^2} \\
 &= \sqrt{(0.05)^2 + 1.33^2 + 1.27^2 + 0.84^2 + 0.12^2 + 0.12^2 + 0.99^2 + 0.18^2 + 0.03^2} \\
 &= 2.14\%
 \end{aligned}$$

扩展不确定度

$$U_p = 2 \cdot u_p = 4.3\%$$

报告

测得的光伏组件功率是 270.36W，其扩展不确定度为 $U_p=4.3\%$ ，它是由合成标准不确定度 $u_p=2.14\%$ 乘以包含因子 $k=2$ 得到的。



附录 B：（资料性附录）IECEE OD-5014:2019（Ed1.1）电器领域

CB 实验室仪器设备准确度要求

测量参数	测量范围	精度要求
电压		
$\leq 1\,000\text{ V}$	$\leq 1\text{ kHz}$	$\pm 1.5\%$
	$>1\text{ kHz} \leq 5\text{ kHz}$	$\pm 2\%$
	$>5\text{ kHz} \leq 20\text{ kHz}$	$\pm 3\%$
	$> 20\text{ kHz}$	$\pm 5\%$
$> 1\,000\text{ V}$	$\text{dc} \leq 20\text{ kHz}$	$\pm 3\%$
	$> 20\text{ kHz}$	$\pm 5\%$
电流		
$\leq 5\text{ A}$	$\text{dc} \leq 60\text{ Hz}$	$\pm 1.5\%$
	$>60\text{ Hz} \leq 5\text{ kHz}$	$\pm 2.5\%$
	$>5\text{ kHz} \leq 20\text{ kHz}$	$\pm 3.5\%$
	$> 20\text{ kHz}$	$\pm 5\%$
$> 5\text{ A}$	$\text{Dc} \leq 5\text{ kHz}$	$\pm 2.5\%$
	$>5\text{ kHz} \leq 20\text{ kHz}$	$\pm 3.5\%$
	$> 20\text{ kHz}$	$\pm 5\%$
泄漏电流 ¹	$>50\text{ Hz} \leq 60\text{ Hz}$	$\pm 3.5\%$
	$>60\text{ Hz} \leq 5\text{ kHz}$	$\pm 5\%$
	$>5\text{ kHz} \leq 100\text{ kHz}$	$\pm 10\%$
	$>100\text{ kHz} \leq 1\text{ MHz}$	考虑中
功率（50/60 Hz）	$\leq 3\text{ kW}$	$\pm 3\%$
	$> 3\text{ kW}$	$\pm 5\%$
功率因数	$50 \leq 60\text{ Hz}$	± 0.05
频率	$\leq 10\text{ kHz}$	$\pm 0.2\%$
阻抗	$1\text{ m}\Omega \leq 100\text{ m}\Omega$	$\pm 5\%$
	$>1\text{ M}\Omega \leq 1\text{ T}\Omega$	$\pm 5\%$
	$> 1\text{ T}\Omega$	$\pm 10\%$
	其他阻值	$\pm 3\%$
温度 ^{2,3}	$>-35^\circ\text{C} \leq 100^\circ\text{C}$	$\pm 2^\circ\text{C}$
	$100^\circ\text{C} \leq 500^\circ\text{C}$	$\pm 3\%$
	$< -35^\circ\text{C}$	$\pm 3^\circ\text{C}$
时间	$10\text{ ms} \leq 200\text{ ms}$	$\pm 5\%$
	$>200\text{ ms} \leq 1\text{ s}$	$\pm 10\text{ ms}$
	$> 1\text{ s}$	$\pm 1\%$
线性尺寸	$\leq 1\text{ mm}$	$\pm 0.05\text{ mm}$
	$>1\text{ mm} \leq 25\text{ mm}$	$\pm 0.1\text{ mm}$
	$> 25\text{ mm}$	$\pm 0.5\%$
质量	$>10\text{ g} \leq 100\text{ g}$	$\pm 1\%$
	$>100\text{ g} \leq 5\text{ kg}$	$\pm 2\%$

	> 5kg	± 5%
力	所有范围	± 6%
机械能量	所有范围	± 10%
力矩	所有范围	± 10%
角度	所有范围	± 1°
相对湿度	30 % ≤ 95 %RH	± 6%RH
空气压力	所有范围	± 10kPa
气体和液体压力	静态测量所有范围	± 5%

注1: 规定的限值与泄漏电流电路和测量设备的最大允许偏差有关, 具体可参考IECEE CTL OD 5013 "泄漏 (接触) 电流电路和测量设备"。

注2: 热电偶的精度未包含在测量设备的精度范围内。热电偶有K型, T型和J型, 一般推荐高品质的热电偶。开关电源会产生电干扰, 对测试系统产生影响。当测量开关电源的温度时, 电热偶将靠近或接触电将有干扰。J型热电偶是由磁性材料制成。K型热电偶是由略有磁性的材料制成。因此T型热电偶在高频磁场环境受到的影响最小, 能给出相对准确的结果。

注3: 与测量相对湿度无关的测量。

