

测量不确定度的分析及应用

邱鸣霞

(龙岩市计量所, 福建 龙岩 364000)

摘 要: 本文对测量误差和测量不确定度的基本概念作了简单介绍, 得出测量结果的可靠程度是通过分析和评定测量不确定度来确定的; 本文着重介绍和探讨了测量不确定度的计算步骤和计算方法, 并结合电气实验室经常遇到的电压测量给出不确定度分析和计算实例; 本文还介绍了单次测量条件下如何利用已知条件进行不确定度的估计以及不确定度的应用范围。

关键词: 测量; 误差; 不确定度; 计算; 估计; 应用范围

中图分类号: TB9

文献标识码: A

国家标准学科分类代码: 410.55

DOI: 10.15988/j.cnki.1004-6941.2016.03.037

Measurement Uncertainty Analysis and Application

Qiu Mingxia

1 引言

测量结果的质量如何, 测量结果是否有用, 在很大程度上取决于其不确定度的大小, 因此, 测量不确定度是测量系统最基本也是最重要的特征指标, 是测量质量的定量评定, 对产品的检测质量具有很重要的意义。国家实验认可委已经实施了等同于 ISO/IEC17025 的新版实验室认可准则。新规则特别在不确定度评估方面, 对各检测实验室增加了许多新的要求, 具体到电器产品的检测中, 不确定度的评估是各企业和认证实验室急需解决的一个课题。

过去的观点是通过误差分析, 给出被测量值不能确定的范围即是误差。按现在观点误差一词不宜用来定量表明测量结果的可靠程度。测量误差是表明测量结果偏离真值的差值, 它客观存在但人们无法准确得到。例如: 测量结果可能非常接近真值(误差很小), 但由于认识不足, 人们赋予的值却落在一个较大的区间(误差)内, 另一方面测量结果可能远远偏离真值(误差很大), 而人们赋予的值却落在一个较小的区间(误差)内。如何较准确地确定一个区间来表征被测量之值与真值之间的分散性, 就是说, 测量结果可信的程度在什么水平上? 根据现代计量学观点, 测量结果可信的程度是需要通过分析和评定测量不确定度来确定的。测量不确定度是用来表征被测量的真值所处量值范围的评定, 是用于表征合理赋予的被测量值的分散性参数。

2 测量不确定度的计算步骤

2.1 建立测量模型

被测量取决于输入的数据, 被测量的不确定度也取

决于输入数据的不确定度, 因此, 首先用数学式表示其相互关系, 即建立测量模型:

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

例如电压等于电阻乘以电流, 用数学式表示为:

$$V=f(R, I)=R \cdot I。$$

2.2 确定不确定度来源

每一个输入自变量 X_i 都是由 x_i 作为其估计值, 该值是不能准确知道的, 它有一个固有的不确定度, 主要来自以下方面:

- (1) 标准结果的不确定度或误差;
- (2) 仪器本身固有的测量误差;
- (3) 操作人员对测量结果的影响;
- (4) 环境对测量结果的影响;
- (5) 重复测量引入的数据离散性;
- (6) 其它。

2.3 不确定度的分类及评定

不确定度理论将不确定度按照测量数据的性质分类: 符合统计规律的, 称为 A 类不确定度, 用实验标准偏差表征, 而不符合统计规律的统称 B 类不确定度, 用根据经验或资料及假定的概率分布估计的标准偏差表征。

2.3.1 A 类评定

用对一系列观测值进行统计分析的方法, 得到的实验标准偏差就是 A 类标准不确定度值。

一般情况下, 对同被测量 X , 独立重复观测 n 次, 用算术平均值 $\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$ 作为测量结果时, 测量结果的 A 类评定的标准不确定度为:

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

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

其中, $n-1$ 为自由度

2.3.2 B类评定

用非统计的方法进行评定,用估计的标准偏差表征。一般,根据经验或有关信息和资料,分析判定被测量可能值的区半 $(-\delta, \delta)$,假设被测量的值落在该区间的概率分布,由要求的置信水平和选取的 k 因子,就可以估计标准偏差。如何假设其概率分布,主要有以下几种方法:(1)只要测量次数足够多,其算术平均值的概率分布为近似正态分布。(2)若被测量量既受随机影响又受系统影响,而对影响量缺乏任何其他信息的情况下,一般假设为均匀分布。(3)有些情况下,可采用同行的共识。

B类评定的标准不确定度为: $u_B(x) = \delta/k$ (3)

2.4 合成标准不确定度的确定

当被测量 Y 是由 n 个其他独立的可测量 $X_1, X_2, \dots, X_i, \dots, X_n$ 通过函数关系得到,如(1)式,则合成标准不确定度为:

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)^2 u^2(x_i)} \quad (4)$$

式中: $u(x_i)$ —输入量 x_i 的标准不确定度;

$c_i = \frac{\partial f}{\partial x_i}$ —偏导数值,称为灵敏系数;

$u_c(y)$ —被测量 Y 的合成标准不确定度。

如果(4)式中所有的偏导数值(灵敏系数)等于1,

$$\text{则(4)式可变为: } u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n u^2(x_i)} \quad (5)$$

2.5 扩展不确定度的确定

扩展不确定度用 U 表示: $U = k u_c(y)$ (6)

包含因子 k 表示在某些涉及安全、卫生健康检测的领域,为了提高不确定度的置信水平而将误差极限放宽所采用的系数。当数据为正态分布, k 为2时的不确定度置信水平约为95%。

3 关于不确定度应用的几点说明

3.1 单次测量测量值的不确定度

A类不确定度分量是在对重复测量测得的一系列数据进行数理统计后获得的。在电器产品的检测中,进行重复测量有时会受到时间和资源的限制,A类不确定度分析和评定是很难实现的,也是没有意义的。以测量温升为例,首先工程师根据样品的设计和工作原理,选出可能产生发热危险的部位,通常在20~30个部位之间,部位选定后,用水玻璃将热电偶粘贴在选定的部位。待水

玻璃固化后,使样品通电直至温度达到热平衡后开始测量。由于粘贴热电偶的时间需要几个小时,而且,水玻璃固化后,撕脱热电偶要损坏热电偶,必须重新焊接和整理,因此不可能将热电偶重复粘贴进行可重复测量,对工程类检测已无实际意义,因此检测实验室必须建立单次测量的不确定度的评估方法。

从理论上讲,完全独立的单次测量是没有方差的,因而也就不能获得不确定度。但是,在良好的测量状态下,每个单次测量并不是孤立的。如果某测量仪器已经被一台不确定度很小的标准仪器校准过,且对测量过程有满意的控制,重复测量的趋势是朝向中心值,则该测量仪器测量估计值的不确定度认为是可重复的,因而,可以用重复测量时计算出的方差对单次测量进行不确定度的确定。如果以前没有对该测量仪器进行过重复测量并估计方差,可以参考某结构和工作原理与其类似的仪器设备的已知方差进行估计。

3.2 关于不确定度的应用范围

由于电器产品的检测中,如果所有检测项目都给出不确定度,势必增加很多成本。是不是所有检测项目都必须给出不确定度呢?从IEC/ISO17025的5.10.3.1条和其中的C项规定可以看出,IEC/ISO17025并不要求所有检测项目都要给出一个测量不确定度。具体到实际检测工作中,哪些情况不必给出测量不确定度呢?当IEC/ISO17025的5.4.6.2条的注释2适用时,“即在某些情况下,公认的检测方法规定了检测不确定度主要来源值的极限,并规定了计算结果的表达方式”。此时,实验室只有遵守该检测方法和报告的说明(5.10条)则认为符合本条的要求。在这种情况下,可以不必给出不确定度。

4 测量不确定度应用实例

例如:在25℃环境下,测得流过一标准电阻的电流为20mA。已知该标准电阻在20℃时的校准值为100.05Ω,证书给出的校准不确定度为0.01Ω($k=2$),电阻的温度系数 α 为 $15 \times 10^{-3}/^\circ\text{C}$,其误差极限为 $\pm 1 \times 10^5/^\circ\text{C}$,测温用的温度计的允许误差极限为 ± 0.02 ;电压表的测量误差为读数的 $\pm 0.2\%$ 。求标准电阻的电压降及其测量不确定度。

4.1 测量模型

$$V = R_t I = R_0 [1 + \alpha(t - 20)] I$$

已知 $R_0 = 100.05\Omega$, $\alpha = 15 \times 10^{-3}/^\circ\text{C}$, $t = 25$, $I = 20\text{mA}$

$$\text{所以 } V = 100.05 [1 + 15 \times 10^{-3}(25 - 20)] 20 = 2.151\text{V}$$

4.2 各分量标准不确定度及灵敏系数

$$u(R_0) = \frac{0.01}{2} = 0.005\Omega$$

$$u(\alpha) = \frac{1 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}}{\sqrt{3}} = 0.577 \times 10^{-5}/^\circ\text{C} \text{ (设为均匀分布)}$$

$$u(t) = \frac{0.02^\circ\text{C}}{\sqrt{3}} = 0.0115^\circ\text{C} \text{ (设为均匀分布)}$$

$$u(I) = \frac{20 \times 0.2/100}{\sqrt{3}} = 0.023\text{mA} \text{ (设为均匀分布)}$$

$$c_1 = \frac{\partial V}{\partial R_0} = [1 + \alpha(t - 20)]I = [1 + 15 \times 10^{-3}(25 - 20)]20 = 21.5\text{mA}$$

$$c_2 = \frac{\partial V}{\partial \alpha} = R_0(t - 20)I = 10.05(25 - 20)20 = 10005\Omega^\circ\text{CmA}$$

$$c_3 = \frac{\partial V}{\partial t} = R_0\alpha I = 100.05 \times 15 \times 10^{-3} \times 20 = 30.015\Omega\text{mA}/^\circ\text{C}$$

$$c_4 = \frac{\partial V}{\partial I} = R_0[1 + \alpha(t - 20)] = 100.05[1 + 15 \times 10^{-3}(25 - 20)] = 107.554\Omega$$

4.3 求合成标准不确定度

$$u_c(V) = \sqrt{c_1^2 u(R_0)^2 + c_2^2 u(\alpha)^2 + c_3^2 u(t)^2 + c_4^2 u(I)^2} = 2.5\text{mV} = 0.0025\text{V}$$

4.4 扩展不确定度

取 $k=2$, 则: $U = k u_c(V) = 2 \times 0.0025 = 0.0050\text{V}$ (置信水平为 95%)

结果表达为: 标准电阻的电压降 $V = 2.151\text{V}$, $U = 0.0050\text{V}$ ($k=2$)。

5 结束语

测量不确定度是测量技术的重要概念,也是保证计量、检测质量的重要要素。被我国纳入法制计量管理范

畴。随着我国加入 WTO 后,在实验室认证、计量、检测等领域全面贯彻国家计量技术规范,与国际上通用的做法接轨,是向我们从事计量、检测工作的专业人员提出的一项十分迫切的任务。在产品检测工作中,为了避免因测量方法和测量条件的不同对测量结果引起争议,对重要数据的测量应制定相应的检测规程,并依据测量不确定度的原理对测量结果进行不确定度的评定,这样可以有效地提高效益并降低风险,在此基础上推广应用国家计量标准规定的术语和测量不确定度评定方法,停止使用并逐步淘汰传统上习惯采用的但不确切的术语和做法,有利于我国计量、检测领域的整体水平提高。

参考文献

- [1] JJF1059-1999《测量不确定度评定与表示》. 中国质量技术监督局. 北京: 计量出版社, 2000.
- [2] 王克勤. 不确定度在检测实验室的应用《安全与电磁兼容》. 主办单位: 中国电子技术标准化研究所, 2001. 4.
- [3] 杨世元, 吴国平等. 电器质量检测不确定度. 北京: 中国标准出版社, 2002.
- [4] 赵家瑞. 关于电器产品检测不确定度相关问题的探讨. 家电科技, 主办单位: 中国家用电器研究所, 2004. 7.
- [5] 鲁绍曾. 现代计量学概论. 北京: 中国计量出版社, 1987.
- [6] 李慎安等. 测量误差及数据处理技术规范解说. 北京: 中国计量出版社, 1996.

作者简介: 邱鸣霞, 女, 高级工程师。工作单位: 龙岩市计量所。通讯地址: 364000 福建省龙岩市新罗区溪南路 40 号。

(上接第 79 页)

3.2.2 由标准针规与数显针规测量装置的温度差引入的标准不确定度 u_2

标准针规与数显针规测量装置在等温 24h 后校准, 标准针规与数显针规测量装置的温度差不超过 Δt : 0.2°C , 服从矩形分布, $k = \sqrt{3}$, 线膨胀系数为 α : $11.5 \times 10^{-6}^\circ\text{C}^{-1}$, 标准不确定度 u_2 :

$$u_2 = \frac{\alpha L \Delta t}{k} = \frac{0.2 \times 0.002 \times 11.5 \times 10^{-6}}{\sqrt{3}} = 0.01\mu\text{m}$$

3.2.3 由标准针规与数显针规测量装置线膨胀系数差引入的标准不确定度 u_3

标准针规与数显针规测量装置的线膨胀系数标称值相同, 假定实际相差 $\Delta\alpha$: $1 \times 10^{-6}^\circ\text{C}^{-1}$, 服从 U 形分布, $k = \sqrt{2}$, 当在规定的极限条件 t_Δ : $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 时, 标准不确定度 u_3 :

$$u_3 = \frac{\Delta\alpha L t_\Delta}{k} = \frac{1 \times 10^{-6} \times 0.002 \times 0.5}{\sqrt{2}} = 0.01\mu\text{m}$$

由以上各不确定度分量相互独立不相关, 则有:

$$u(L_0) = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2} = \sqrt{0.15^2 + 0.01^2 + 0.01^2} = 0.15\mu\text{m}$$

3.3 合成标准不确定度

以上各不确定度分量 $u(L)$ 、 $u(L_0)$ 相互独立不相关, 则合成标准不确定度 u_c :

$$u_c = \sqrt{u(L)_1^2 + u(L_0)_2^2} = \sqrt{0.07^2 + 0.15^2} = 0.17\mu\text{m}$$

取包含因子 $k=2$, 则扩展标准不确定度 U :

$$U = k \times u_c = 2 \times 0.17 = 0.34\mu\text{m}$$

4 结论

本文按照国家计量技术规范的要求, 建立测量模型, 对测量模型进行严密的分析。评定过程科学合理, 结果的不确定度符合相关技术要求。该结果对其计量检定和分析测试工作具有一定的指导意义。

参考文献

- [1] 陈欢. 针规检测几种方法的探讨[J]. 工业计量, 2015(7)
- [2] JJF 1207-2008《针规、三针校准规范》[S]. 中国计量出版社, 2008.
- [3] JJF 1059.1-2012《测量不确定度的评定和表示》[S]. 中国计量出版社, 2012.

作者简介: 陈欢, 男, 工程师。工作单位: 浙江省计量科学研究院。通讯地址: 310018 杭州市江干区下沙路 300 号。

潘璐, 浙江省计量科学研究院(杭州 310018)。