

792

国家自然科学基金资助项目

TM1506  
Y28

# 电器质量检测不确定度

杨世元 吴国平 等著



A0950845

中国标准出版社

**图书在版编目(CIP)数据**

电器质量检测不确定度/杨世元、吴国平等著. —北京:  
中国标准出版社, 2001. 5

ISBN 7-5066-2445-1

I. 电… II. 杨… III. 电器—质量检验—不确定度 研究  
IV. TM506

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 26269 号

中国标准出版社出版  
北京复兴门外三里河北街 16 号  
邮政编码: 100045

电话: 68523946 68517548

中国标准出版社秦皇岛印刷厂印刷  
新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

\*

开本 880×1230 1/32 印张 4 字数 105 千字  
2001 年 6 月第一版 2001 年 6 月第一次印刷

\*

印数 1—4 000 定价 16.00 元  
网址 [www.bzcbs.com](http://www.bzcbs.com)

版权专有 侵权必究  
举报电话: (010)68533533

## 前 言

不确定度是评定测量和检测结果质量的依据,它对科学技术、生产、质量技术监督、商业贸易、环保和国际技术交流等领域,具有现实的和重要的意义。

“基于质量信息技术的质量控制理论和方法研究”是国家自然科学基金委员会资助的项目。产品质量信息大部分是通过测量和检测而得到的,质量检测数据的质量直接影响质量控制;而不确定度是评定检测水平的指标。因此,有必要以质量检测不确定度作为该项目研究内容的一个部分,进行研究。

为此,作者对质量管理、质量检测、误差理论与数据处理、数理统计、精密测试技术以及现代不确定度理论等多学科知识,开展交叉研究;并结合我国产品质量检测实践,在国家日用电器质量监督中心进行实证研究。本书在论述现代不确定度的原理和方法的基础上,以电器质量检测为实际案例,提出了输入电流和功率、泄漏电流、接地电阻、电气强度、温升、螺钉直径和长度、螺钉力矩、爬电距离与电气间隙、噪声、制冷量等电器安全与性能参数检测结果不确定度的全面评估与正确评定方法。本书理论联系实际,内容详实、具体,可在科研、生产、计量测试、产品检验、质量监督管理、认可认证等方面实际应用。

本书由合肥工业大学和国家日用电器质量监督检验中心共同研究写成,本书的作者是:杨世元、吴国平、薛守仁、柳荣贵、姜萍萍、曹敬。

本书由国际不确定度工作组中国成员刘智敏研究员主审,张序星、陈伟升和刘晓东参加审定工作。杨宗辉、刘跃占、钟志刚、凌宏浩、陈斌、刘功桂等同志就检验原理、试验方法、数据采集和分析

等方面作了大量工作,本书的录入工作由谢良玉完成。在此对他们表示感谢。

感谢国家自然科学基金委员会对研究工作的支持,并感谢中国标准出版社对本书出版的支持。

本书不足之处,愿请读者给予指正。

作 者

2000 年 5 月

## 1.1 研究不确定度的意义

长期以来,误差和误差分析一直是计量学领域的一个重要组成部分。由于测量实验方法和实验设备的不完善、周围环境的影响、以及受人们认识能力所限等,测量和实验所得数据和被测量真值之间,不可避免地存在着差异,即误差。目前,人们普遍认为,即使对完全已知或猜测的误差因素进行补偿、修正后,所得结果依然只能是被测量的一个估计值,即对如何用测量结果更好地表示被测量的值仍有怀疑。这时,不确定度概念作为测量史上的一个新生事物出现了。只有伴随不确定度的定量陈述,测量结果才可以说是完整的。

不确定度,顾名思义即测量结果的不能肯定程度,反过来也即表明该结果的可信赖程度。它是测量结果质量的指标。不确定度愈小,所述结果与被测量真值越接近,质量越高,水平越高,其使用价值也越高;不确定度越大,测量结果的质量越低,水平越低,其使用价值也越低。在报告物理量的测量结果时,必须给出相应的不确定度,一方面便于使用它的人评定其可靠性,另一方面也增强了测量结果之间的可比性。

测量不确定度必须正确评定。不确定度如果评定过大,会使用户认为现有的测量水平不能满足需要而去购买更加昂贵的仪器,导致不必要的投资,造成浪费,或对检定实验室的服务工作产生干扰;不确定度评定过小,会因要求过于严格对产品质量、生产加工造成危害,使企业蒙受经济损失。

鉴于不确定度的重要性,寻求一种便于使用、易于掌握且普遍

认可的计算和表示不确定度的方法具有很大意义。正如国际单位制(SI)的普遍应用使所有的科学与技术测量趋于一致那样,不确定度计算和表达在全世界范围内的一致,也将使得科学、工程、商业、工业和管理方面的测量结果的重要性易于理解和说明。也只有这样,才便于对不同国家所作的测量进行比较。在当今全球市场一体化的时代,这项研究是必然的也是必须的。

不确定度在本质上是由于测量技术水平、人类认识能力所限造成的。同时它也是判定基准标准精度、检定测试水平高低、测量设备质量的一个重要依据。在 ISO/IEC 导则 25《校准实验室与测试实验室能力的通用要求》中指明,实验室的每个证书或报告必须包含有关评定校准或测试结果不确定度的说明。

随着不确定度理论的推广与深入,现在,它不仅已成为计量科学领域的一个重要分支,在其它领域如质量管理和质量保证中,也得到了重视和应用。ISO9001:2000《质量管理体系 要求》中规定,所使用的测量设备应保证其测量不确定度为已知。

## 1.2 不确定度研究的国际动态

1927年,海森堡(Heisenberg)提出了量子力学中的不确定关系(Uncertainty Relation),又称测不准关系。1970年前后,一些计量学界和其它领域学者,逐渐使用不确定度一词,但含义不清。1978年,霍恩比(Hornby)等所编《现代高级英汉双解词典》指出:“不确定度(Uncertainty)为变化、不可靠、不确定、不确定。”

鉴于国际间理解和表示不确定度的不一致,1978年5月,国际计量局(BIPM)发出了不确定度征求意见稿。1980年国际计量局在讨论了各国及国际专业组织的意见后,提出了实验不确定度建议书 INC-1(1980)。1986年,国际计量委员会(CIPM)第75届会议,决定推广 INC-1,提出了建议书 1(CI-1986)《在 CIPM 赞助进行的工作中不确定度的表示》。

1986年,由国际标准化组织(ISO)、国际电工委员会(IEC)、

国际计量局(BIPM)、国际法制计量组织(OIML)组成了国际不确定度工作组,负责制定在标准、检定、实验室认证及计量服务中使用的测量不确定度指南。

国际不确定度工作组经多年研究、讨论,征求各国及国际专业组织意见,反复修改,1993年制定了《测量不确定度表示指南》(Guide the Expression of Uncertainty in Measurement,简称指南GUM)。指南GUM得到了BIPM、OIML、ISO、IEC及国际理论与应用化学联合会(IUPAC)、国际理论与应用物理联合会(IUPAP)、国际临床化学联合会(IFCC)的批准,由ISO出版,成为国际组织的重要权威文献。

GUM自1993年出版以来,在世界范围内得到了广泛的应用和发行。美国标准与技术研究院(NIST)于1993年制定了基于GUM的《NIST评定与表示测量结果不确定度准则》,所有NIST报告均以它为依据。欧洲实验室认证合作体(EAL)、加拿大国家研究委员会(NEC)、北美欧洲标准协作体(NORAMET)、北美校准合作体(NACC)、新加坡实验室认证体(SINGLAS)、英国国家实验室认可委员会(NAMAS)都已采用GUM。我国有关部门及人士对此也极为重视,中国计量科学院于1996年11月制定了《测量不确定度规范》。1999年1月又发布了国家计量技术规范《测量不确定度评定与表示》。

GUM的颁布与实施,使不确定度的评定与表示在世界范围内有了统一标准,从而推动不确定度的研究和应用进入一个新阶段。

## 1.3 应用范围

GUM指南文件建立了评定和表示不确定度的规则。它可用于各种准确度等级的测量,并可用于从基础研究到商业活动的各种场合。如:

- a. 建立国家计量基准、计量标准及国际比对;

- b. 标准物质、标准参考数据；
- c. 科学和工程领域内的基准研究、应用研究和开发；
- d. 测量方法、检定规程、检定系统、校准规范等；
- e. 计量认证、质量认证及实验室认证；
- f. 测量仪器的校准与检定；
- g. 生产过程中的质量控制和质量保证，产品的检验和测试；
- h. 商业贸易、医疗卫生、安全防护、环境监测等领域；
- i. 测量评定的被测量可以用唯一值表征的量，也可以是用与参数有关的一组有确定分布的值表征的量。

在以上各场合，凡给出测量结果或出具校准、检定、认证报告和证书，发表技术论文时均应按 GUM 正确评定与表述测量不确定度。



## 2.1 不确定度的定义及说明

测量不确定度的定义为：与测量结果相联系参数，表征合理地赋予被测量量值的分散性。

由于测试技术的不完善，人类认识能力所限，被测量的“真值”是不可知的，在实际工作中能得到的仅是“合理赋予被测量的值”，且不止一个，可以是多个。这些值的分散性就是不确定度。它表示出测量结果的范围，被测量的真值评定落于其中。

对不确定度的定义有以下几点补充说明：

a. 众所周知，对同一被测量进行多次重复测量，由于误差因素的影响，各个测得值一般皆不相同。它们围绕着测量列的算术平均值有一定的分散，此分散说明了测量列中单次测得值的不可靠性。误差理论中提出用标准差  $\sigma$  来表征这种不可靠性。

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

式中： $\bar{x}$ ——算术平均值；

$n$ ——测量次数。

标准差  $\sigma$  越小，分散度就小；反之，分散度就越大。

在不确定度应用中，依然采用标准差  $\sigma$  作为表征分散性的参数，也可以是标准差的给定倍数  $k\sigma$ ，( $k$  必须说明)，或是具备某置信水平的区间的半宽度。例如：多个值中 95% 落于区间  $[a_-, a_+]$

内，则具有置信水准  $p=95\%$ ，区间半宽度为  $\frac{1}{2}(a_+ - a_-)$ ，表征分

散性的参数也即为  $\frac{1}{2}(a_+ - a_-)$ 。

b. 测量不确定度一般包括许多分量。有些分量可由系列测量结果的统计分布评定,并用实验标准差表征。另外一些分量是根据经验或其它信息,通过假定的概率分布计算出来,也可用标准差表征。不确定度的这两类分量除了它们的评定方法不同外,并无计量学上的本质区别。两种计算方法实际上也都是基于概率分布的(前者确切已知,后者通过假设确定)。用任何一种方法得到的不确定度分量均可用标准差定量。

c. 不确定度是测量结果的一个参数,这里的测量结果应是被测量值的最佳估计。通常对一被测量进行多次重复测量,在剔除具有明显粗大误差的量值后,取测量列的算术平均值( $\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n}$ )作为最终测量结果。如果有确切已知的系统误差,还应对算术平均值再进行补偿修正,才能作为被测量值的最佳估计。

d. 全部不确定度分量,应包含由系统效应产生的分量,如修正值本身的不确定度和参考标准具有的不确定度,都会影响结果的分散性。

e. 不确定度恒为正值。

## 2.2 不确定度的基本术语

### 标准不确定度 standard uncertainty

以标准差表征的测量结果不确定度。标准不确定度记为  $U$ 。

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

用对观测列进行统计分析的方法来评定标准不确定度。

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

用不同于对观测列进行统计分析的方法来评定不确定度。

### 合成标准不确定度 combined standard uncertainty

测量结果由其它量值得来时,按其它量的方差或协方差算出的测量结果的标准不确定度。记为  $u_c(y)$ ,也可简记为  $u_c$  或  $u(y)$ 。

**扩展不确定度 expanded uncertainty**

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

由于合理赋予被测量的值不只一个,而是多个。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。

**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  $k$ 。包含因子有时也称为覆盖因子。

**置信概率 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  $p$ ,有时也称为置信水准。

**自由度 degrees of freedom**

在方差计算中,总和中的项数减去对总和的限制条件数,记为  $\nu$ 。

自由度反映相应实验标准差的可靠程度,自由度越大,可靠程度越高。

**相对不确定度 relative uncertainty**

不确定度除以测量结果  $y$  的绝对值(设  $|y| \neq 0$ )。

测量结果的不确定度有时可以用相对不确定度表示。相对不确定度有相对合成标准不确定度  $u'_c(y) = \frac{u_c(y)}{|y|}$ , 相对扩展不确定度  $U' = \frac{U}{|y|}$ 。

## 2.3 两组概念的辨析

### 2.3.1 误差与不确定度

误差与不确定度是计量学中两个相互关联又相互区别的概

念。人们提出这两个概念的目的都是为了寻求如何以实验和测量所得结果来更恰当、更准确地体现被测量的真实情况。

误差为测得值与被测量真值之差,即误差=测得值-真值。

不确定度是被测量值可能出现的范围。

### (1) 二者的联系

误差与不确定度都是由相同因素造成的:随机效应和系统效应。

随机效应是由于未预料到的变化或影响量随时间和空间变化所致。它引起了被测量重复观测值的变化。这种效应的影响不能借助修正进行补偿,但可通过增加观测次数而减小。其期望值为零。

系统效应是由固定不变的或按确定规律变化的因素造成的。但由于人类认识的不足,也不能确切知道其数值,因此也无法完全清除,但通常可以减小。系统效应产生的影响有些是可以识别的,有些是未知的,如果已知影响能定量给出,而且其大小对测量所要求的准确度而言有意义的话,则可采用估计的修正值或修正因子对结果加以修正。

由于随机效应和系统效应的存在,使得被测量的真值无法确知,每个测量结果也都具有一定的不可靠性,导致误差和不确定度的产生。

### (2) 二者区别

a. 误差是相对被测量真值而言的,它是测量结果与真值之差,由于真值的不可知性,实际上误差也只能是个理想概念,不可能得到它的准确值。

不确定度以测量结果本身为研究对象,其含义不是“与真值之差”或“误差限”、“极限误差”,而是表示由于随机影响和系统影响的存在而对测量结果不能肯定的程度,表征被测量值可能出现的范围。它是以测量结果为中心,以标准差或其倍数,或某置信区间半宽度确定的被测量的取值范围,确保真值以一定概率落于其中。因而,它是测量结果的一个量化属性。

b. 误差和不确定度的分类方法截然不同。

误差根据其性质可分为两类:随机误差和系统误差。

随机误差:测量结果与重复性条件下对同一量进行无限多次测量所得结果的平均值之差。随机误差大抵是由于随机影响造成的。注意,观察列的平均值的实验标准差并不是平均值的随机误差,而恰恰是随机影响引起的平均值的不确定度,这些效应产生的平均值的随机误差不可能准确知道。

系统误差:在重复性条件下,对同一被测量进行无限多次测量所得结果的平均值与被测量真值之差。系统误差是由已知系统影响和未知系统影响产生的,通过对已知系统影响的修正可以减小,但不可能为零。同时,修正值或修正因子的不完善,也会导致测量结果的不确定度,但不是由于系统影响补偿不理想而产生的误差。

不确定度按照分量的评定方法分为A类和B类,但并非“随机”和“系统”的代用词。用A类或B类评定方法均可得到已知系统影响修正值的不确定度,随机影响的不确定度计算也是如此。两种评定方法均基于概率分布,得到的分量在本质上不存在差异。实际应用中,无须将它们与随机或系统对应起来。

c. 误差取一个符号,非正即负。不确定度恒为正值。当由方差得出时,取其正平方根。

d. 不确定度是由随机影响和对系统影响结果的不完善修正产生的。在计算测量结果的不确定度时,不会考虑到未被认识的系统影响,但这种影响会导致误差的出现。因此,即使计算出来的不确定度很小,仍不能保证测量结果的误差很小。或者说,测量结果的不确定度未必是测量结果接近被测量值的指示值,它仅为与目前可用的知识相符的最佳值接近程度的近似性估计。不确定度不能用于测量结果和真值之间的差异显示,但可用于测量结果之间的比较。不确定度越小,则测量结果质量越高。

在测量中若没有忽略任何明显的系统影响时,才能认为测量结果即为被测值的可靠估计值,其合成标准不确定度即为可能误差的可靠量度。

被测量值、误差及不确定度关系如图 2-1 所示。

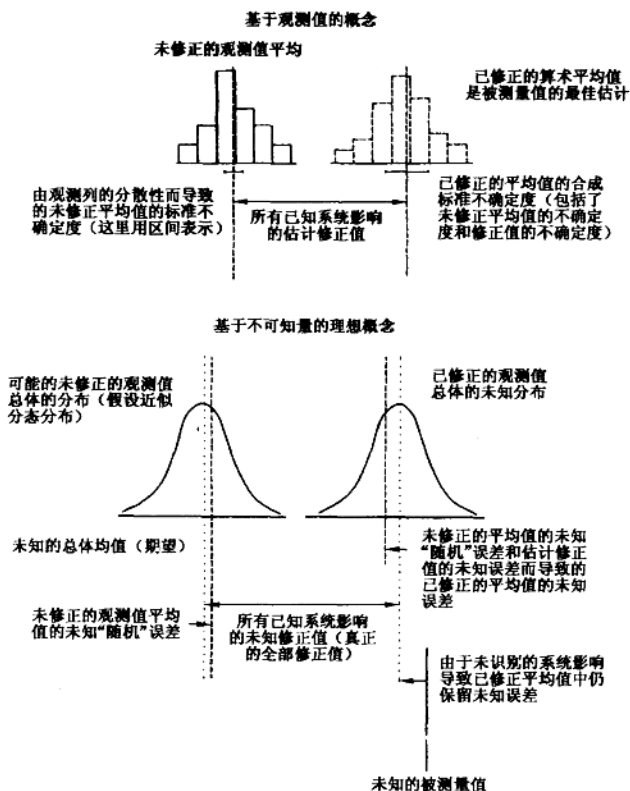


图 2-1 被测量值、误差及不确定度关系

### 2.3.2 准确度与不确定度

测量准确度 (Accuracy of measurement) 表示测量结果与被测量真值之间的一致程度。由于真值的不可知, 它也只能是个定性概念而绝不能把它定量地表达为一个量值。但可以说准确度高或低。

不确定度则是被测量值分散性的一个量度,它不仅包括系统影响也包括随机影响,以一个定量的数据确定了被测量的取值范围,即所有量值可能出现的范围。它是以测量结果为中心,而并非是相对真值而言。因此是个可以量化的属性。

对于测量仪器来说,要表达其准确度,只能用等别或级别,如准确度为 0.1 级,准确度为 3 等。而决不能有诸如准确度为  $\pm 10\text{mA}$ , 相对准确度为  $\pm 2 \times 10^{-5}$  等类表达方式。

## 2.4 测量值的基本分布

在同一条件下,对某量进行多次重复测量,由于测量不确定度的影响,所得各个结果之间具有分散性,且呈现一定的分布规律,常见有以下几种。

### 2.4.1 正态分布

测量值  $x$  服从期望  $\mu$ 、标准差  $\sigma$  的正态分布,记为:

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

正态分布  $N(\mu, \sigma)$ , 如图 2-2 所示, 其测量值具有以下特点:

- 单峰性: 距  $\mu$  近的值比距  $\mu$  远的值出现的概率大。
- 对称性: 比  $\mu$  大某量的测量值出现的机会等于比  $\mu$  小同一量的测量值出现的机会。
- 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。
- 抵偿性: 各测量值的平均值随测量次数增大而趋于期望  $\mu$ 。

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

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

$f(x)$  具有以下性质:

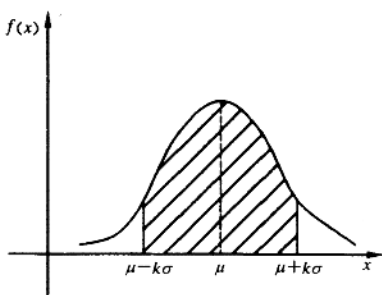


图 2-2 正态分布

- a. 曲线关于  $x=\mu$  对称；  
b. 当  $x=\mu$  时取到最大值。

欲使  $x$  落于区间  $[\mu-k\sigma, \mu+k\sigma]$  的置信概率为  $p$ , 即:

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

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, 常见如表 2-1:

表 2-1 常见正态分布密度函数表

| $P$     | $K$     | $P$     | $K$   |
|---------|---------|---------|-------|
| 0.5     | 0.674 5 | 0.954 5 | 2     |
| 0.682 7 | 1       | 0.99    | 2.576 |
| 0.9     | 1.645   | 0.997 3 | 3     |
| 0.95    | 1.96    |         |       |

正态分布  $N(\mu, \sigma)$  中以  $\mu$  为被测量的数学期望, 一般以测量列的算术平均值估计。对被测量进行一系列等精度测量, 由于存在随机效应, 其测得值皆不相同, 应以全部测得值的算术平均值作为最后测量结果。如图 2-3 所示,  $\mu$  越大被测量值越大(如第 3 条曲线); 反之, 则越小(如第 1 条曲线  $\mu=0$ )。

测量列中的各个不同测得值围绕着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不可靠性, 正态分布  $N$



$(\mu, \sigma)$  中的  $\sigma$  即是这种不可靠性的评定标准, 称为标准差。  $\sigma$  的数值小, 该测量列相应小的误差就占有优势, 任一单次测得值对算术平均值的分散度就小, 测量的可靠性就大, 即测量精度高 (如第 1 条曲线); 反之, 测量精度就低 (如第 2 条曲线)。

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。

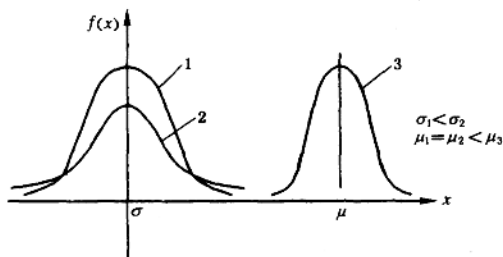


图 2-3 正态分布比较

#### 2.4.2 均匀分布

在测量实践中, 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 2-4 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, 即:

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