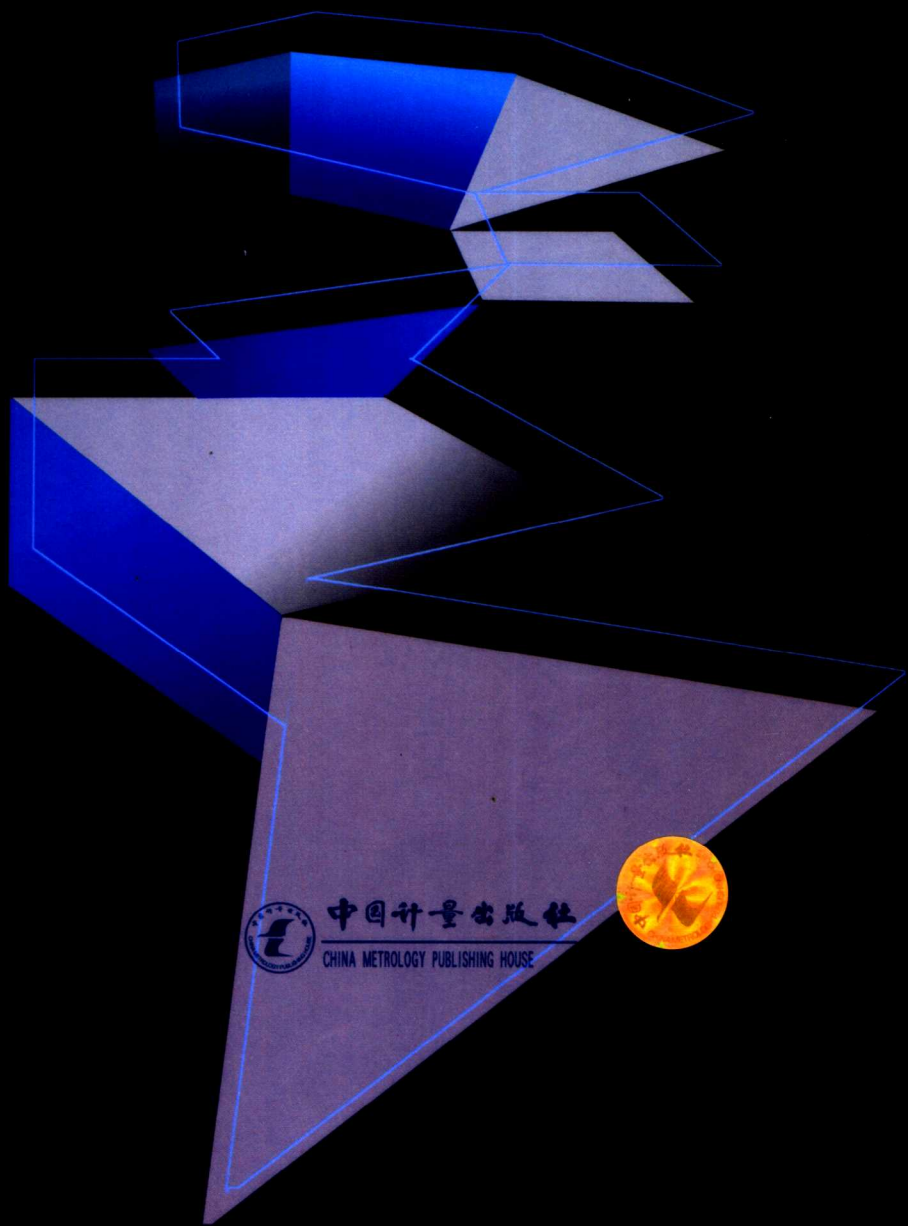


# 实用

# 测量不确定度评定

倪育才 编著



中国计量出版社  
CHINA METROLOGY PUBLISHING HOUSE



# 实用测量不确定度评定

倪育才 编著

中国计量出版社

## 图书在版编目(CIP)数据

实用测量不确定度评定/倪育才编著. —北京:中国计量出版社,2004.5  
ISBN 7-5026-1940-2

I. 实… II. 倪… III. 测量—不确定度—评价 IV. TB9

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 021359 号

## 内 容 提 要

针对科技人员在测量不确定度评定中遇到的实际问题,结合 JJF1059—1999, VIM 以及 JJF1001—1998 阐述了有关术语的关系;介绍了方差合成定理,测量不确定度的评定步骤、来源、数学模型,输入量的标准不确定度和不确定度分量,合成标准不确定度,扩展不确定度,自由度和正态分布时的包含因子,测量不确定度的表示,合格评定与测量不确定度,测量结果的比较;给出了不确定度评定的实例,大部分实例后边作者还给出了非常实用的评注。

本书可供科研单位、检测/校准机构及工矿企业从事计量检定、检测/校准、产品检验、精密测试、质量管理及科学实验的人员使用,还可供高等院校有关专业的师生使用。

中国计量出版社出版  
北京和平里西街甲 2 号  
邮政编码 100013  
电话 (010)64275360  
E-mail jilxb@263.net.cn  
北京市迪鑫印刷厂印刷  
新华书店北京发行所发行  
版权所有 不得翻印

\*

787mm×1092mm 16 开本 印张 13.5 字数 321 千字  
2004 年 5 月第 1 版 2004 年 5 月第 1 次印刷

\*

印数 1—3000 定价:28.00 元

# 前 言

测量不确定度是对测量结果可能误差的度量,也是定量说明测量结果质量好坏的一个参数,因此它是一个与测量结果相联系的参数。一个完整的测量结果,除了应给出被测量的最佳估计值之外,还应同时给出测量结果的不确定度。在对测量结果进行不确定度评定时,很多已经从事多年测量工作的科技人员经常会提出这样的问题:为什么要用测量不确定度评定来代替过去的误差评定?并且在初次尝试进行测量不确定度评定时,往往会感到十分困难。究其原因,笔者认为大体上主要有两个方面。其一,关于测量不确定度评定的指导性文件 GUM 和 JJF1059—1999 只是原则性地规定了应该如何进行测量不确定度的评定,但在评定过程中经常使大家感到困惑的具体问题,例如,如何写出适合于进行测量不确定度评定的数学模型,在将各不确定度分量合成得到合成标准不确定度时应如何处理各输入量之间的相关性,对于非线性数学模型是否需要考虑高阶项,在最后给出扩展不确定度时如何选择包含因子  $k$  的数值,如何判断被测量的分布,以及是否需要计算自由度等等,都没有给出比较具体的解决办法。其二,大部分初学者对于 GUM 和 JJF1059—1999 比较重视,而忽略了对它们的配套文件 VIM 和 JJF1001—1998 的仔细研究。殊不知,后者正是前者的基础。后者规定了在测量领域和测量不确定度评定中所用术语的定义,正是这一套有关术语的定义,奠定了测量不确定度评定的基础。有些术语在过去误差评定时就经常使用,并且其含义也没有什么变化,因此理解和使用这类术语一般不会有很大问题。有些术语在过去误差评定中是没有的,对于这类术语就应该仔细地研究它们的定义,以便准确地使用这些术语。另有一些术语在过去也经常使用,但与过去相比,其定义已经变更。也就是说,这些术语的含义已发生变化。对于这类术语则应予以特别注意。许多科技人员至今仍对测量不确定度评定感到困惑和不理解,很大程度上是由于对这些术语的理解不深,有时甚至还错误理解。为了便于读者查阅,本书中凡首次出现已由有关文件给出明确定义的术语时,均采用黑体字,并在第二章中给出其定义和出处。

需要特别关注的是对“误差”和“不确定度”这两个术语的理解。要求对测量结果进行不确定度评定来代替过去的误差评定,并不是简单地将“误差”一词改为“不确定度”这么简单的事情,也不是“误差”一词一律不再使用。“误差”和“不确定度”各有各的定义,它们是相互有关但又各不相同的两个量。它们各自应用于不同的场合,一般情况下是不能相互替代的,应该根据这两个术语的定义来判断,该用“误差”的地方就用“误差”,该用“不确定度”的地方就用“不确定度”。例如,对于测量仪器,我们常用“示值误差”这一术语,在这里“示值误差”的含义是测量仪器的示值与对应输入量真值之差,它符合 VIM 和 JJF1001—1998 对“误差”所作的定义,因此用“示值误差”这一说法是正确的。笔者见到过有的文章将其改为“示值不确定度”,这就显得有些不知所云了。

初学者往往觉得测量不确定度评定十分困难,实则不然。从原则上说,过去能熟练地进行误差评定的测量人员,只要对所用术语的定义和不确定度的评定过程有一基本了解,再掌握一些评定中的技巧,则合理地进行不确定度评定就不应该有很大的困难。完成测量不确定度评定的前提最主要的还是对测量方法的全面了解和找出能影响测量结果的所有测量不确定度来源。

本书是笔者根据近年来在各种不确定度学习班上的讲稿经补充而成,其目的正是希望帮

助读者正确地了解和掌握测量不确定度评定的基本概念和方法。对于在评定过程中容易产生困惑的问题,或者是需要评定者在几种方法中作出选择的问题,笔者尽可能根据自己的经验,力求给出一些具体的实用性解决办法。

要深入了解测量不确定度评定中的理论问题,需要扎实的数理统计和误差理论方面的知识。有许多理论问题在本书中并未涉及也无法涉及,因为笔者并不是误差理论方面的专家,因此希望对这方面进行深度研究的读者们在本书中是找不到答案的,而是应该去参阅有关的专著。笔者和大多数读者一样,都是从事具体测量工作的科技人员,只是因为测量工作的需要,才开始接触有关测量不确定度评定的问题。相信大多数读者和笔者一样,关心和学习测量不确定度评定的目的是需要解决测量不确定度评定中遇到的具体问题,而不是要对这些问题进行深入的理论上的研究,这也就是为什么本书的书名冠以“实用”两字的原因。

虽然如此,在本书中还是不可避免地会涉及到许多统计数学方面的公式。熟悉高等数学的读者理解这些公式不应该有很大的困难。对于那些实在不熟悉高等数学,或者对其比较生疏的读者,则可以不理睬这些复杂的数学公式的推导或证明,最关键的还是要了解这些公式的物理意义,应该在什么样的条件下使用,以及如何使用这些公式。

需要进行测量不确定度评定的场合很多。要进行测量就需要有一个测量的参考标准,国家规定社会公用计量标准,部门最高计量标准和企、事业单位最高计量标准都必须经过有关部门考核合格后方可使用。考核内容涉及到测量设备、环境条件、测量人员、管理制度等各个方面,而这些考核的核心就是要力求保证测量结果的可靠和所给不确定度的合理性。因此无论是建立或使用计量标准的人员,还是被授权对计量标准进行考核的人员,都必须熟练掌握测量结果的不确定度评定。

在通过测量对测量仪器或产品的合格与否进行判定时,测量不确定度也是一个不可忽视的问题。生产者在生产过程中对工件或产品的性能指标进行定量测量以判定工件或产品是否合格时,使用者在对工件或产品进行验收测量时,计量部门在对量具或测量仪器进行检定时,质检部门对产品质量进行检验时,以及环保部门对环境进行监测时都必须作出合格或不合格的判定。而要作出正确的结论就必须对测量不确定度有所了解,否则就有可能产生误判。并且其合格判定的标准也将与测量不确定度有关。

ISO/IEC 17025《检测和校准实验室能力的通用要求》(1999)规定,检测实验室和校准实验室都必须制定测量不确定度评定的程序,并且还应该在具体的检测和校准工作中应用这些程序来进行测量不确定度的评定。中国实验室国家认可委员会(CNAL)在其《测量不确定度政策》中也规定“鉴于测量不确定度在检测、校准和合格评定中的重要性和影响,CNAL遵循下列原则:对测量不确定度评定予以足够的重视,以满足有关各方的需求和期望;始终遵循国际规范的相关要求,与国际相关组织的要求保持一致;……”

特别要提出的是笔者在过去几年中经常与席德熊、葛楚鑫两位同仁讨论和切磋有关不同领域的测量不确定度评定问题,受益匪浅。书中有些观点是在相互讨论的过程中逐步形成的,笔者在此深表感谢。

笔者在工作中也经常向李慎安、刘智敏、肖明耀诸位老师求教,在此一并表示感谢。

倪育才

2004年1月

# 目 录

第一章 引言	(1)
第一节 为什么要用测量不确定度评定来代替误差评定	(1)
第二节 测量不确定度的发展历史	(2)
第三节 测量不确定度评定与表示的应用范围	(4)
第二章 基本概念	(6)
第一节 有关术语的定义	(6)
第二节 测量误差、测量准确度和测量不确定度	(16)
第三节 测量误差和测量不确定度的主要区别	(25)
第四节 测量仪器的误差、准确度和不确定度	(27)
第五节 关于误差和不确定度的小结	(29)
第六节 量具和测量仪器的误差、偏差和修正值	(30)
第七节 检定和校准	(32)
第三章 统计学基本知识	(35)
第一节 事件和随机事件	(35)
第二节 随机事件出现的频率和概率	(36)
第三节 随机变量及其概率密度分布函数	(37)
第四节 随机变量的特征值	(38)
第四章 方差合成定理和测量不确定度评定步骤	(47)
第一节 方差合成定理	(47)
第二节 测量不确定度评定的步骤	(48)
第五章 测量不确定度来源和数学模型	(52)
第一节 测量不确定度来源	(52)
第二节 建立数学模型	(53)
第六章 输入量的标准不确定度 $u(x_i)$ 和不确定度分量 $u_i(y)$	(60)
第一节 输入量估计值标准不确定度的 A 类评定	(60)
第二节 输入量估计值标准不确定度的 B 类评定	(67)
第三节 输入量分布情况的估计	(69)
第四节 关于测量不确定度的 A 类评定和 B 类评定	(76)

第五节	灵敏系数 $c_i$ 和不确定度分量 $u_i(y)$ .....	(78)
<b>第七章</b>	<b>合成标准不确定度</b> .....	(79)
第一节	线性数学模型的合成标准不确定度 .....	(79)
第二节	各输入量之间存在相关性时的合成标准不确定度 .....	(80)
第三节	非线性数学模型的合成标准不确定度 .....	(83)
第四节	若干种比较简单非线性函数的方差表示式 .....	(84)
<b>第八章</b>	<b>扩展不确定度</b> .....	(87)
第一节	被测量 $Y$ 可能值的分布及其判定 .....	(87)
第二节	不同分布时包含因子的确定和扩展不确定度的表示 .....	(91)
<b>第九章</b>	<b>自由度和正态分布时的包含因子</b> .....	(98)
第一节	自由度的定义及其含义 .....	(98)
第二节	A类评定不确定度的自由度 .....	(100)
第三节	B类评定不确定度的自由度 .....	(100)
第四节	合成标准不确定度的有效自由度 .....	(101)
第五节	被测量接近正态分布时的扩展不确定度 .....	(102)
第六节	安全因子 .....	(102)
第七节	被测量 $y$ 的分布不同时扩展不确定度的表示 .....	(103)
<b>第十章</b>	<b>测量结果的处理和测量不确定度的表示</b> .....	(105)
第一节	测量结果的处理和离群值的剔除 .....	(105)
第二节	修约规则 .....	(107)
第三节	测量不确定度的报告和表示 .....	(110)
第四节	测量不确定度评定步骤示例 .....	(111)
<b>第十一章</b>	<b>测量不确定度评定实例</b> .....	(116)
实例 A	标称值 10 kg 砝码的校准 .....	(116)
实例 B	标称长度 50 mm 量块的校准(方法 1) .....	(119)
实例 C	标称长度 50 mm 量块的校准(方法 2) .....	(124)
实例 D	游标卡尺的校准 .....	(130)
实例 E	N 型热电偶 1 000 °C 温度点的校准 .....	(134)
实例 F	180 °C 块状温度校准器的校准 .....	(140)
实例 G	18 GHz 频率点功率传感器的校准 .....	(144)
实例 H	同轴步进衰减器 30 dB 挡(增量衰减)的校准 .....	(149)
实例 I	手提式数字多用表 100 V DC 点的校准 .....	(152)
实例 J	10 k $\Omega$ 标准电阻的校准 .....	(156)
实例 K	同时测量电阻、电抗和阻抗 .....	(160)

实例 L	家用水表的校准	(164)
实例 M	校准用标准溶液的制备	(171)
实例 N	原子吸收光谱法测定陶瓷容器中镉的溶出量	(174)
实例 O	微生物分析测量不确定度评定	(181)
实例 P	金属试件拉伸强度测量	(184)
<b>第十二章</b>	<b>合格评定与测量不确定度</b>	<b>(188)</b>
第一节	测量不确定度对合格或不合格判定的影响	(188)
第二节	按规范检验合格和不合格的判据	(190)
第三节	双方对测量不确定度无法达成协议时的处理程序	(193)
第四节	检定与测量不确定度	(196)
<b>第十三章</b>	<b>两个或多个测量结果的比较</b>	<b>(198)</b>
第一节	同一实验室内两次测量结果之间的允差	(198)
第二节	两个不同实验室测量结果之间的允差	(201)
第三节	多个实验室之间的比对	(202)
第四节	校准实验室的能力验证试验	(203)
第五节	检测实验室的能力验证试验	(204)
<b>参考文献</b>		<b>(207)</b>



# 第一章 引言

## 第一节 为什么要用测量不确定度 评定来代替误差评定

很难追溯误差的概念起源于何时。但至少在 1862 年 Foucault 采用旋转镜法在地球上测量光的速度时,给出的测量结果为: $c = (298\ 000 \pm 500)$  km/s。即在给出测量结果的同时,还给出了测量误差。由此可见,误差的概念至少在 100 多年前就已经出现。当时已经知道,在给出测量结果的同时,还应给出其测量误差。

虽然误差的概念早就已经出现,但在用传统方法对测量结果进行误差评定时,还存在一些问题。简单地讲,大体上遇到两个方面的困难:逻辑概念上的问题和评定方法的问题。

测量误差常常简称为误差。国家计量技术规范 JJF1001—1998《通用计量术语及定义》中给出测量误差的定义为“测量结果减去被测量的真值”,该误差定义从 20 世纪 70 年代以来没有发生过变化。

真值定义为“与给定的特定量的定义一致的值”。也就是说,我们把被测量在观测时所具有的真实大小称为真值,因而这样的真值只是一个理想概念,只有通过完善的测量才有可能得到真值。任何测量都会有缺陷,因而真正完善的测量是不存在的。也就是说,严格意义上的真值是无法得到的。

根据误差的定义,若要得到误差就必须知道真值。但真值无法得到,因此严格意义上的误差也无法得到。虽然在误差定义的注解中同时还指出:“由于真值不能确定,实际上用的是约定真值”,但此时还需考虑约定真值本身的误差。因而可能得到的只是误差的估计值。在有些情况下对一个被测量进行测量的目的就是想要知道该被测量的值。如果知道了被测量的真值或约定真值,往往也就没有必要再进行测量了。例如,地球和月球之间距离的测量,对这一类测量根本不可能知道其真值或约定真值,也就是说不可能得到其误差。由于真值无法知道,因此实际上误差的概念只能用于已知约定真值的情况。

从另一个角度来说,根据误差的定义,真值等于测量结果减误差。因此一旦知道了测量结果的误差,就可以对测量结果进行修正而得到真值,这又是不可能的。

此外,在“误差”这一术语的使用上也经常出现概念混乱的情况,即“误差”这一术语的使用经常有不符合误差定义的情况。根据误差的定义,误差是一个差值,它是测量结果与真值或约定真值之差。在数轴上它表示为一个点,而并不表示为一个区间或范围。既然它是两个量的差值,就应该是一个具有确定符号的数值。当测量结果大于真值时,误差为正值;而当测量结果小于真值时,误差为负值。由此可见误差这一参数既不当,也不可能以“±”号的形式表示。过去人们在使用“误差”这一术语时,有时是符合误差定义的,例如测量仪器的示值误差,它表示“测量仪器的示值与对应输入量真值之差”。但经常也有误用的情况,例如过去通过误

差分析所得到的测量结果的所谓“误差”，实际上并不是真正的误差，而是被测量不能确定的范围，或者说是测量结果可能存在的最大误差，它不符合误差的定义。误差在逻辑概念上的混乱是经典的误差评定遇到的第一个问题。

误差评定遇到的第二个问题是评定方法的不统一。在进行误差评定时，通常要求先找出所有需要考虑的误差来源，然后根据这些误差来源的性质将它们分为随机误差和系统误差两类。随机误差用测量结果的标准偏差来表示，如果有一个以上的随机误差分量。则将他们按方和根法（即各分量的平方和之平方根）进行合成，得到测量结果的总随机误差。并且由于在正态分布情况下，标准偏差所对应区间的置信概率仅为 68.27%，而通常都要求给出对应于较高置信概率的区间，故常将标准偏差扩大，用两倍或三倍的标准偏差来表示随机误差。系统误差则用该分量的最大可能误差，即误差限来表示。在有多个系统误差分量的情况下，同样采用方和根法将各系统误差分量进行合成，得到测量结果的总的系统误差。最后再将总的随机误差和总的系统误差进行合成得到测量结果的总误差。而问题正来自于最后随机误差和系统误差的合成方法上。由于随机误差和系统误差是两个性质不同的量，前者用标准偏差或其倍数表示，后者用可能产生的最大误差表示。由于在数学上无法解决两个不同性质的量之间的合成问题，因此长期以来在随机误差和系统误差的合成方法上一直无法统一。不仅各国之间不一致，即使在同一国家内，不同的测量领域、甚至不同的测量人员所采用的方法往往也不完全相同。

例如，前苏联的国家检定系统表中就分别给出计量标准的总的随机误差和总的系统误差两个技术指标，而并不给出两者合成后的总误差。其意是，两者如何合成的问题由使用者根据具体情况自己考虑。美国的有些国家基准往往以随机误差和系统误差之和作为其总误差，其原因是为了安全可靠。因为无论用何种方法合成，采用算术相加的方法得到的合成结果最大。而过去我国在大部分测量领域中习惯上仍采用方和根法对随机误差和系统误差进行合成。例如，在几何量测量领域，往往以三倍的标准偏差（ $3\sigma$ ，过去常称为极限误差）作为随机误差，再采用方和根法与系统误差进行合成，得到测量结果的总误差，并通常称之为“综合极限误差”。所谓“综合”是指其中既包括了随机误差也包括了系统误差，而“极限”是指其中的随机误差用  $3\sigma$  表示。

不仅各国的误差评定方法不同，不同领域或不同的人员对测量误差的处理方法也往往各有不同的见解。这种误差评定方法的不一致，使不同的测量结果之间缺乏可比性，这与当今全球化市场经济的飞速发展是不相适应的。社会、经济、科技的进步和发展都要求改变这一状况。用测量不确定度来统一评价测量结果的质量就是在这种背景下产生的。测量不确定度评定和表示方法的统一，是科技交流和国际贸易进一步发展的要求，它使得各国进行测量所得到的结果可以进行相互比较，可以得到相互承认并达成共识，因此各国际组织和各国的计量部门均十分重视测量不确定度评定方法和表示方法的统一。

## 第二节 测量不确定度的发展历史

为能统一地评价测量结果的质量，1963年原美国标准局(NBS)的数理统计专家埃森哈特(Eisenhart)在研究“仪器校准系统的精密度和准确度估计”时就提出了采用测量不确定度的概念，并受到国际上的普遍关注。20世纪70年代NBS在研究和推广测量保证方案(MAP)时

测量不确定度的定量表示又有了新的发展。术语“不确定度”源于英语“uncertainty”，原意为不确定，不稳定，疑惑等，是一个定性表示的名词。现用于描述测量结果时，将其含义扩展为定量表示，即定量表示测量结果的不确定程度。此后许多年中虽然“不确定度”这一术语已逐渐在各测量领域被越来越多的人采用，但具体表示方法并不统一。为求得测量不确定度评定和表示方法的国际统一，1980年国际计量局在征求了32个国家的国家计量院以及五个国际组织的意见后，发出了推荐采用测量不确定度来评定测量结果的建议书，即INC-1(1980)。该建议书向各国推荐了测量不确定度的表示原则。1981年第70届国际计量委员会(CIPM)讨论通过了该建议书，并发布了一份CIPM建议书，即CI-1981。该建议书所推荐的方法，以INC-1(1980)为基础，并要求在所有CIPM及其各咨询委员会参与的国际比对及其他工作中，各参加者在给出测量结果时必须同时给出合成不确定度。

由于测量不确定度不仅适用于计量领域，它也可以应用于一切与测量有关的其他领域，因此1986年国际计量委员会要求国际计量局(BIPM)、国际电工委员会(IEC)、国际标准化组织(ISO)、国际法制计量组织(OIML)、国际理论和应用物理联合会(IUPAP)、国际理论和应用化学联合会(IUPAC)以及国际临床化学联合会(IFCC)等七个国际组织成立专门的工作组，起草关于测量不确定度评定的指导性文件。经过工作组近七年的讨论，由ISO第四技术顾问组第三工作组(ISO/TAG4/WG3)负责起草，并于1993年以七个国际组织的名义联合发布了《测量不确定度表示指南》(*Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*，以下简称GUM)和第二版《国际通用计量学基本术语》(*International Vocabulary of Basic and General Terms in Metrology*，以下简称VIM)。1995年又发布了GUM的修订版。这两个文件为在全世界统一采用测量结果的不确定度评定和表示奠定了基础。

除上述七个国际组织外，国际实验室认可合作组织(ILAC)也已表示承认GUM。这就是说，在各国的实验室认可工作中，无论检测实验室或校准实验室，在进行测量结果的不确定度评定时均应以GUM为基础。上述这些国际组织几乎包括了所有与测量有关的领域，这表明了GUM和VIM这两个文件的权威性。

GUM对所用术语的定义和概念，测量不确定度的评定方法以及不确定度报告的表示方式作了明确的统一规定。因此它代表了当前国际上在表示测量结果及其不确定度方面的约定做法。它使不同的国家和地区，以及不同的测量领域在表示测量结果及其不确定度时，具有相同的含义。

1998年我国发布了国家计量技术规范JJF1001—1998《通用计量术语及定义》，其中前六章的内容与第二版VIM完全相对应。除此之外，还增加了国际法制计量组织所发布的有关法制计量的术语及定义。1999年我国发布了国家计量技术规范JJF1059—1999《测量不确定度评定与表示》，其基本概念以及测量不确定度的评定和表示方法与GUM完全一致。这两个文件就成为我国进行测量不确定度评定的基础。

测量不确定度的概念以及不确定度的评定和表示方法的采用，是计量科学的一个新进展。从1963年提出测量不确定度的概念，到1993年正式发布测量不确定度评定的指导性文件GUM，整整花费了三十年时间，可见改用测量不确定度来对测量结果的质量进行评价，并不是一个简单的任务，也不是仅依靠少数几个科学家能做到的，它汇集了世界各国计量学家的经验和智慧。即使看来十分简单的测量不确定度的定义表述本身，也曾几经改动。至于测量不确定度的评定和表示方法，更是经历了不断的完善和改进，最后才形成了GUM这样系统而完整

的文件。

### 第三节 测量不确定度评定与表示的应用范围

国家计量技术规范 JJF1059—1999《测量不确定度评定与表示》规定了测量不确定度的评定与表示的通用规则,它适用于各种准确度等级的测量领域,因此它不仅限于计量领域中的检定、校准和检测。其主要应用领域列举如下:

- (1) 建立国家基准、计量标准及其国际比对;
- (2) 标准物质、标准参考数据;
- (3) 测量方法、检定规程、检定系统和校准规范等;
- (4) 科学研究和工程领域的测量;
- (5) 计量认证、计量确认、质量认证以及实验室认可;
- (6) 测量仪器的校准和检定;
- (7) 生产过程的质量保证以及产品的检验和测试;
- (8) 贸易结算、医疗卫生、安全防护、环境检测及资源测量。

国家计量技术规范 JJF1059—1999《测量不确定度评定与表示》主要涉及有明确定义的、并可用惟一值表征的被测量估计值的不确定度。至于被测量呈现为一系列值的分布或取决于一个或多个参量(例如以时间为参变量),则对被测量的描述是一组量,应给出其分布情况及其相互关系。

具体地说,测量不确定度评定可以应用于各种不同的场合,例如:

#### 1. 特定测量结果的不确定度评定

这是测量不确定度评定最基本的应用。由于测量已经完成,测量结果也已经得到,因此在这种情况下的测量对象、测量仪器、测量方法、测量条件以及测量人员等都是已经确定而不能改变的。如果对同一测量对象,用同样的方法和设备,并由相同的人员重新进行测量,则不仅测量结果可能会稍有不同,其测量不确定度也可能会受测量条件改变的影响而变化。这时评定得到的测量不确定度是该特定测量结果的不确定度。

#### 2. 常规测量的不确定度评定

在实际工作中,有许多测量是常规性的,例如量具和测量仪器的检定和校准,以及质检部门对一些大宗的材料或产品的检验,对于这类测量,测量仪器、测量方法和测量程序是固定不变的。测量对象是类似的,并且满足一定要求。测量人员可以不同,但均是经过培训的合格人员。同时测量过程是在由检定规程、校准规范、国际标准、国家标准或部门标准等技术文件所规定的重复性条件下进行的。一般说来,这时的测量不确定度会受测量条件改变的影响。但由于测量条件已被限制在一定的范围内,只要满足这一规定的条件,其测量不确定度就能满足使用要求。对于这类常规的测量工作,进行测量不确定度评定时应假设其环境条件正好处于合格条件的临界状态。这样评定得到的测量不确定度是在规定条件下可能得到的最大不确定度。也就是说,在实际的测量中只要测量条件满足要求,测量不确定度肯定不会大于此值。通常就将此不确定度提供给用户,这样做的好处是不必对每一个测量结果单独评定其不确定度,除非用户对测量不确定度另有更高的要求。这时给出的测量不确定度并不是该实验室所能达到的最小不确定度。

在建立计量标准时,计量标准考核规范 JJF1033—2001 规定,应在《计量标准技术报告》中给出这一不确定度。

### 3. 评定实验室的校准测量能力

校准测量能力(calibration measurement capability)也称为最佳测量能力(best measurement capability,常简称为 BMC)。其定义为:“通常提供给用户的最高校准测量水平,它用包含因子  $k=2$  的扩展不确定度表示”。校准测量能力是实验室对于特定的测量任务可能达到的最小不确定度。也就是说,它是当使用实验室中可能得到的最好测量设备,在可能达到的最佳测量条件下,对于性能最好的测量对象所得到的测量不确定度。或者说,它是当不确定度概算中所有的不确定度分量都达到最小时,实验室得到的测量不确定度。有时也用合成标准不确定度  $u_{c,\min}$  表示对于该测量任务的校准测量能力。因此,校准测量能力表示实验室可能达到的最高水平。但并不表示实验室在常规的校准中均能达到这一水平。在实验室认可工作中,要求对实验室申报的最佳测量能力进行认可。

### 4. 测量过程的设计和开发

在实际工作中,经常会遇到测量过程的设计和开发问题。此时主要的测量设备往往已经确定,而且事先知道希望达到的测量不确定度。通过不确定度管理程序,采用逐步逼近法对测量不确定度进行反复评定,可以得到不仅满足所要求的测量不确定度,并且在经济上也是比较合理的测量程序和至少应满足的测量条件。

也可以通过不确定度管理程序来判定所用的测量设备是否能满足要求。

### 5. 两个或多个测量结果的比较

在常规的实验室测量中,为了避免可能产生的粗大误差,往往需要对同一个测量对象进行两次或更多次的重复测量。并根据这些测量结果之间差别的大小,来判别是否可能存在粗大误差。这就需要对同一测量对象的两个或多个测量结果进行比较,而其判断的标准,将与测量不确定度有关。或者说,应通过测量不确定度的评定来确定判断的标准。

在实验室认可工作中,要求通过能力验证来对实验室的测量能力作出评价,而能力验证的内容之一就是进行不同实验室之间的比对。在两个或多个实验室进行比对时,需要判定各实验室得到的测量结果是否处于合理范围内,这时的判断标准将与实验室所声称的测量不确定度有关。

### 6. 工件或测量仪器的合格判定

在生产和测量领域,经常需要通过测量来判定工件或产品,是否符合技术指标(称为规范)的要求,在计量部门,经常要判定所用的测量仪器是否合格,即测量仪器的示值误差是否符合所规定的最大允许误差(例如量具或测量仪器的检定)。在生产领域,经常要检验工件是否符合技术图纸上所标明的公差要求。在质检部门,也经常需要判定所用的材料是否合格。在这类合格判定中,其合格或不合格的判据除与所规定的技术指标有关外,也还与测量不确定度有关。

## 第二章 基本概念

测量的目的是为了得到测量结果,但在许多场合下仅给出测量结果往往还不充分。任何测量都存在缺陷,所有的测量结果都会或多或少地偏离被测量的真值,因此在给出测量结果的同时,还必须同时指出所给测量结果的可靠程度。在各种测量领域,人们经常使用一些术语来表示测量结果质量的好坏,例如:测量误差、测量准确度和测量不确定度等。在测量不确定度评定中,我们还经常使用许多其他有明确定义的术语,本章将从这些术语的定义出发来解释其含义,并阐明测量不确定度及其评定的基本概念。

### 第一节 有关术语的定义

本节给出在本书中所采用的有关术语的定义,这些定义都是在各种国内或国际文件中明确给出的,未标明出处的术语均取自于 JJF1001—1998《通用计量术语及定义》,源于其他文件的术语则给出其出处。

#### 1. 量纲 dimension of a quantity

以给定量制中基本量的幂的乘积表示某量的表达式。

例:若国际单位制中7个基本量的量纲分别用L、M、T、I、Θ、N和J表示,则某量A的量纲表达式为 $\dim A = L^{\alpha} M^{\beta} T^{\gamma} I^{\delta} \Theta^{\epsilon} N^{\zeta} J^{\eta}$ 。如力的量纲 $\dim F = LMT^{-2}$ ,电阻的量纲 $\dim R = L^2MT^{-3}I^{-2}$ 。

#### 2. 量纲一的量 quantity of dimension one

无量纲量 dimensionless quantity

在量纲表达式中,其基本量量纲的全部指数均为零的量。

例:线应变、摩擦因数、马赫数、折射率、摩尔分数(物质的量分数)、质量分数。

注:在国际单位制中,任何量纲一的量其一贯单位都是一,符号是1。

#### 3. 量值 value of a quantity

一般由一个数乘以测量单位所表示的特定量的大小。

例:5.34 m 或 534 cm, 15 kg, 10 s, -40 ℃。

注:对于不能由一个数乘以测量单位所表示的量,可以参照约定参考标尺,或参照测量程序,或两者都参照的方式表示。

#### 4. [量的]真值 true value [of a quantity]

与给定的特定量定义一致的值。

注:

- (1) 量的真值只有通过完善的测量才有可能获得。
- (2) 真值按其本性是不确定的。
- (3) 与给定的特定量定义一致的值不一定只有一个。

## 5. [量的]约定真值 conventional true value [of a quantity]

对于给定目的具有适当不确定度的、赋予特定量的值,有时该值是约定采用的。

例:a) 在给定地点,取由参考标准复现而赋予该量的值作为约定真值。

b) 常数委员会(CODATA) 1986年推荐的阿伏加得罗常数  $6.022\ 136\ 7 \times 10^{23}$  mol<sup>-1</sup>。

注:

(1) 约定真值有时称为指定值、最佳估计值、约定值或参考值。

(2) 常常用某量的多次测量结果来确定约定真值。

## 6. 测量 measurement

以确定量值为目的的一组操作。

注:

(1) 操作可以是自动进行的。

(2) 测量有时也称为计量。

## 7. 计量 metrology

实现单位统一、量值准确可靠的活动。

## 8. 计量学 metrology

关于测量的科学。

注:

(1) 计量学涵盖有关测量的理论与实践的各个方面,而不论测量的不确定度如何,也不论测量是在科学技术的哪个领域中进行的。

(2) 计量学有时简称计量。

(3) 计量学曾称度量衡学和权度学。

## 9. 测量原理 principle of measurement

测量的科学基础。

例:a) 应用于温度测量的热电效应;

b) 应用于电位差测量的约瑟夫森效应;

c) 应用于速度测量的多普勒效应;

d) 应用于分子振动波数测量的喇曼效应。

## 10. 测量方法 method of measurement

进行测量时所用的,按类别叙述的一组操作逻辑次序。

注:测量方法可按不同方式分类,如替代法、微差法、零位法。

## 11. 测量程序 measurement procedure

进行特定测量所用的,根据给定的测量方法具体叙述的一组操作。

注:测量程序(有时被称为测量方法)通常记录在文件中,并且足够详细,以使操作者在进行测量时不需要再补充资料。

## 12. 被测量 measurand

作为测量对象的特定量。

例:给定的水样品在 20℃ 时的蒸汽压力。

注:对被测量的详细描述,可要求包括对其他有关量(如时间、温度和压力)作出说明。

### 13. 影响量 influence quantity

不是被测量但对测量结果有影响的量。

例:a) 用来测量长度的千分尺的温度;

b) 交流电位差幅值测量中的频率;

c) 测量人体血液样品血红蛋白浓度时的胆红素的浓度。

### 14. 测量结果 result of a measurement

由测量所得到的赋予被测量的值。

注:

(1) 在给出测量结果时,应说明它是示值、未修正测量结果或已修正测量结果,还应表明它是否为几个值的平均。

(2) 在测量结果的完整表述中应包括测量不确定度,必要时还应说明有关影响量的取值范围。

### 15. [测量仪器的]示值 indication [of a measuring instrument]

测量仪器所给出的量的值。

注:

(1) 由显示器读出的值可称为直接示值,将它乘以仪器常数即为示值。

(2) 这个量可以是被测量、测量信号或用于计算被测量之值的其他量。

(3) 对于实物量具,示值就是它所标出的值。

### 16. 未修正结果

系统误差修正前的测量结果。

### 17. 已修正结果

系统误差修正后的测量结果。

### 18. 测量准确度 accuracy of measurement

测量结果与被测量真值之间的一致程度。

注:

(1) 不要用术语精密度代替准确度。

(2) 准确度是一个定性的概念。

### 19. [测量结果的]重复性 repeatability [of results of measurements]

在相同条件下,对同一被测量进行连续多次测量所得结果之间的一致性。

注:

(1) 这些条件称为重复性条件。

(2) 重复性条件包括:

相同的测量程序;

相同的观测者;

在相同的条件下使用相同的测量仪器;

相同地点;

在短时间内重复测量。

(3) 重复性可以用测量结果的分散性定量地表示。



## 20. [测量结果的]复现性 reproducibility [of results of measurements]

在改变了的测量条件下,同一被测量的测量结果之间的一致性。

注:

(1) 在给出复现性时,应有效地说明改变条件的详细情况。

(2) 改变条件可包括:

测量原理;

测量方法;

观测者;

测量仪器;

参考测量标准;

地点;

使用条件;

时间。

(3) 复现性可用测量结果的分散性定量地表示。

(4) 测量结果在这里通常理解为已修正结果。

## 21. 实验标准[偏]差 experimental standard deviation

对同一被测量作  $n$  次测量,表征测量结果分散性的量  $s$  可按下式算出:

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

式中:  $x_i$  为第  $i$  次测量的结果;

$\bar{x}$  为所考虑的  $n$  次测量结果的算术平均值。

注:

(1) 当将  $n$  个值视作分布的取样时,  $\bar{x}$  为该分布的期望的无偏差估计,  $s^2$  为该分布的方差  $\sigma^2$  的无偏差估计。

(2)  $\frac{s}{\sqrt{n}}$  为  $\bar{x}$  分布的标准偏差的估计,称为平均值的实验标准偏差。

(3) 将平均值的实验标准偏差称为平均值标准误差是不准确的。

## 22. 测量不确定度 uncertainty of measurement

表征合理地赋予被测量之值的分散性,与测量结果相联系的参数。

注:

(1) 此参数可以是诸如标准偏差或其倍数,或说明了置信水准的区间的半宽度。

(2) 测量不确定度由多个分量组成。其中一些分量可用测量列结果的统计分布估算,并用实验标准偏差表征。另一些分量则可用基于经验或其他信息的假定概率分布估算,也可用标准偏差表征。

(3) 测量结果应理解为被测量之值的最佳估计,而所有的不确定度分量均贡献给了分散性,包括那些由系统效应引起的(如,与修正值和参考测量标准有关的)分量。

## 23. 标准不确定度 standard uncertainty

以标准偏差表示的测量不确定度。