

国家计量技术法规统一宣贯教材

测量不确定度理解 评定与应用

叶德培 编 著
国家质量监督检验检疫总局计量司 审 定

JJF 1059.1—2012

JJF 1059.1—2012

JJF 1059.1—2012

国家计量技术法规统一宣贯教材

测量不确定度理解 评定与应用

国家质量监督检验检疫总局计量司 审定
叶德培 编著

中国质检出版社

北 京

图书在版编目(CIP)数据

测量不确定度理解 评定与应用/叶德培编著. —北京:中国质检出版社,2013.7
(国家计量技术法规统一宣贯教材)

ISBN 978-7-5026-3836-8

I. ①测… II. ①叶… III. ①测量—不确定度—研究 IV. ①TB9

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 116484 号

中国质检出版社出版发行

北京市朝阳区和平里西街甲 2 号(100013)

北京市西城区三里河北街 16 号(100045)

网址:www.spc.net.cn

总编室:(010)64275323 发行中心:(010)51780235

读者服务部:(010)68523946

中国标准出版社秦皇岛印刷厂印刷

各地新华书店经销

*

开本 880×1230 1/16 印张 15 字数 467 千字

2013 年 7 月第一版 2013 年 7 月第一次印刷

*

定价:68.00 元

如有印装差错 由本社发行中心调换

版权专有 侵权必究

举报电话:(010)68510107

前 言

国家质量监督检验检疫总局最新发布 JJF 1059.1—2012《测量不确定度评定与表示》和 JJF 1059.2—2012《用蒙特卡洛法评定测量不确定度》，替代了原有的 JJF 1059—1999。新的规范中使用的计量术语采用了 JJF 1001—2011《通用计量术语及定义》中的术语和定义，替代了 JJF 1001—1998。为了更好地理解和应用新的规范，国家质量监督检验检疫总局计量司组织编写了本宣贯教材。本书的编写依据是上述最新的计量技术规范以及十多年来我国贯彻 JJF 1059—1999 的经验。

本书主要详细宣贯 JJF 1059.1—2012《测量不确定度评定与表示》，即 GUM 法评定测量不确定度的方法，说明了 JJF 1059.1 的适用条件，并对测量不确定度评定中所用到的通用计量术语的变化情况做了必要的讲解，补充了一些 GUM 法评定测量不确定度的举例。本书也对用蒙特卡洛法评定测量不确定度作了简单介绍。

本书在附录中给出了两篇国际标准的译文：测量不确定度表示指南（ISO/IEC Guide 98 - 3:2008）和用蒙特卡洛法传播分布（ISO/IEC Guide 98 - 3/Suppl. 1:2008），以便于有兴趣的读者阅读。

本书帮助读者正确理解 JJF 1059.1—2012《测量不确定度评定与表示》，可供科研、生产和教学等有关人员使用，也可作为注册计量师的学习材料，是从事计量、标准、质量及实验人员的参考资料。

在 JJF 1059.1—2012 编制过程中得到许多单位和资深计量专家提供的宝贵意见和建议，对于教材的编写也受益匪浅。在

此谨向：全国几何量长度计量技术委员会、全国环境化学计量技术委员会、全国力值硬度计量技术委员会、中国测试技术研究院、辽宁省计量科学研究院、上海市计量测试技术研究院、广东省计量科学研究院、中国工程物理研究院计量测试中心、中航工业北京长城计量测试技术研究所、山东电力研究院、钢铁研究总院和宝钢工业检测公司等单位，以及李正东、李慎安、肖明耀、陈成仁、中航工业北京长城计量测试技术研究所周自力、武汉大学叶晓明、清华大学朱鹤年、广东省计量协会赵天川等同志表示衷心的感谢。

国家质量监督检验检疫总局计量司

韩 毅

2013 年 5 月

目 录

第一章 概 述	(1)
第一节 测量的重要性和规范测量不确定度的必要性	(1)
第二节 测量不确定度的产生与发展	(2)
第三节 测量不确定度的适用范围	(5)
第二章 基本术语及其概念	(10)
第一节 关于概率与统计的术语及其概念	(10)
第二节 通用计量术语	(23)
第三章 用 GUM 法评定测量不确定度	(32)
第一节 GUM 法评定测量不确定度的一般要求	(32)
第二节 建立测量模型	(33)
第三节 分析测量不确定度的来源	(34)
第四节 评定输入量的标准不确定度	(36)
第五节 计算合成标准不确定度	(45)
第六节 确定扩展不确定度	(54)
第四章 测量结果的报告形式	(58)
第一节 测量结果的报告	(58)
第二节 合成标准不确定度的报告形式	(59)
第三节 扩展不确定度的报告形式	(59)
第四节 被测量估计值及其测量不确定度的有效位数	(60)
第五节 符号的正确书写	(62)
第五章 测量不确定度应用的介绍	(64)
第一节 实验室认可时关于应用测量不确定度的要求	(64)
第二节 测量不确定度在合格评定中的应用	(64)
第三节 实验室间量值比对时测量不确定度的考虑	(68)
第四节 科研项目方案论证时不确定度的预估	(74)
第五节 实验室的校准和测量能力的表示	(74)
第六节 测量仪器的不确定度及计量标准的不确定度	(75)
第七节 证书报告中对测量不确定度的要求	(76)

第六章 蒙特卡洛法评定测量不确定度简介 (78)

第一节 什么是蒙特卡洛法 (78)

第二节 蒙特卡洛法评定测量不确定度的步骤 (78)

第三节 MCM 所用的几个术语..... (79)

第四节 用蒙特卡洛法验证 GUM 法 (79)

第五节 GUM 法与 MCM 的比较 (79)

第七章 GUM 法评定测量不确定度举例 (81)

第一节 圆柱形工件直径的测量 (81)

第二节 模拟指示秤示值误差的检定..... (82)

第三节 容器内温度的测量 (83)

第四节 工作用玻璃液体温度计的校准 (85)

第五节 微波衰减器的衰减量校准 (87)

第六节 脉冲产生器通道时延校准 (88)

第七节 量块的校准..... (89)

第八节 样品中所含氢氧化钾的质量分数测定 (93)

第九节 数字多用表的检定 (95)

第十节 确定电阻的温度修正值 (97)

第十一节 高稳晶振日漂移率的测量..... (99)

第十二节 硬度计量 (101)

附录 1 不确定度评定中常用的公式 (105)

附录 2 t 分布在不同概率 p 与自由度 ν 时的 $t_p(\nu)$ 值 (t 值) 表 (107)

附录 3 测量不确定度表示指南 ISO/IEC Guide 98-3: 2008 (译文) (109)

附录 4 用蒙特卡洛法传播分布 ISO/IEC Guide 98-3/Suppl. 1: 2008 (译文) ... (187)

附录 5 有关量的符号汇总 (229)

参考文献 (231)

第一章 概述

本书以 ISO/IEC Guide 98-3:2008《测量不确定度 第3部分:测量不确定度表示指南》(Uncertainty of measurement—Part 3:Guide to the expression of uncertainty in measurement,简称 GUM)为基础,对测量不确定度的概念和评定方法做了较详细的讲解,有助于对测量不确定度的理解、评定、表示与应用,可作为贯彻 JJF 1059.1—2012《测量不确定度评定与表示》的学习资料。

本书旨在帮助我国各级计量人员、注册计量师、计量科研人员及其他需要了解测量不确定度的人员了解和学习测量不确定度。

贯彻 JJF 1059.1—2012 的目的是:

1. 促进以充分完整的信息表示带有测量不确定度的测量结果

当完成测量时,应该给出测量结果。如果给出测量结果时未给出其可信程度或可信的范围,这种测量结果是不完整的。因为测量结果是否有用,很大程度上取决于其可信程度,也就是取决于测量的质量。如何给出完整的测量结果呢?虽然历史上曾经长期使用测量误差来表示测量结果的质量,但测量误差与测量不确定度是两个不同的概念,测量误差只能表示测量结果的量值与真值或参考值的偏差,不能从统计学上来表示测量结果的可信程度。所以,现在国际上约定的做法是用测量不确定度来表示测量的质量。带有测量不确定度的测量结果才是完整的和有意义的。给出测量不确定度时还应给出其有关的必要信息,这样才是充分的。

2. 为测量结果的比较提供国际上公认一致的依据

GUM 是由国际标准化组织(ISO)等八个国际权威组织于 2008 年联合发布的。自 1993 年以来,GUM 经近 20 年的推广和应用,现已成为各国在表示测量结果时统一遵循的准则。JJF 1059.1—2012 是 JJF 1059—1999 的修订版,该规范修订的依据是国际标准,在评定和表示测量不确定度的方法以及包括术语和所用符号等方面的规定均采用国际标准的规定,以便与国际接轨。该规范的贯彻为测量结果的表示提供了一个国际公认的方法,便于测量结果间的比较,将对测量不确定度应用在我国进一步推广和深化起到推动作用。

3. 规范测量不确定度的评定与表示方法

JJF 1059.1—2012 规定的测量不确定度评定方法有以下优点:

(1)内部协调一致性:测量结果的不确定度可以从对不确定度有贡献的分量导出,与这些分量怎样分组没有关系,也与这些分量如何进一步分解为下一级分量无关。

(2)可传递性:当上一个测量结果用于下一个测量时,其不确定度可作为下一个测量结果量值的不确定度分量。

(3)具有广泛的适用性:在诸如工业、商业及与健康或安全等有关的一些领域中,往往要求提供一个较高概率的区间,也就是给出的测量结果是一个区间,被测量的值以 95% 或 99% 的概率在此区间内,规范规定的方法能方便地给出这样的区间及相应的概率,因此适用于绝大多数领域。

第一节 测量的重要性和规范测量不确定度的必要性

一、测量的重要性

测量是在科学技术研究、工农业生产、国内外贸易、工程项目以及日常生活的各个领域不可缺少的一项工作。人们每天都在进行大量的测量,测量在我国在司法执法、维护消费者权益、保护资源和环境、

医疗卫生保障人民健康安全、国防建设等方面起着越来越大的作用。随着当前经济的全球化趋势和我国经济的飞速发展,测量结果是否可信或者说测量的质量如何,是人们极其关心的问题。测量的准确性和可信性可能直接影响到国家和企业的经济利益。我们的出口货物如果称量不准,就有可能引起经济纠纷或赔偿,造成很大的损失。测量的结果是科学研究成果的评价依据,也是产品检验合格判定、司法裁定等裁判的依据。凭什么说某项成果达到了国际先进水平?凭什么说该项产品不合格?——测量结果的数据才是最有说服力的。测量的质量还往往成为科学试验成败的重要因素,同时也会影响到人民的健康和安全。在使用放射性治疗仪治疗疾病时,若对剂量测量不准,剂量太小,达不到治病的目的,延误治疗;剂量过大,则会造成对人体的伤害。由测量结果得出的结论还可能成为决策的重要依据。例如,决策投资方向、决策是否可以做发射试验、决策采取什么样的应对措施等。错误的或不可信的测量结果会动摇决策者的决心,延误时机。

二、规范测量不确定度评定和表示方法的必要性

1. 完整的测量结果应包括测量不确定度的说明,使人们能够了解该测得的量值的可信程度。在市场竞争激烈、经济全球化的今天,测量不确定度评定与表示方法的统一,乃是科技交流和国际贸易的迫切要求。

2. 我国用统一的准则对测量结果及其质量进行评定和表示是与国际接轨的需要,也是我国经济发展的必然趋势。它有利于:

- (1) 测量结果间的比较;
- (2) 科学技术成果的评价与交流;
- (3) 商品贸易中减少技术壁垒和避免不必要的误会;
- (4) 对计量标准、标准物质和标准参考数据的评定与发布;
- (5) 用户对计量技术机构校准或检测服务后给出的证书或报告的理解;
- (6) 校准或检测实验室的技术能力认可和国际互认;
- (7) 生产中的质量控制以及质量体系认证时对产品质量保证能力的评价;
- (8) 有利于根据测量结果做出有效的决策等。

第二节 测量不确定度的产生与发展

一、发展历程

早在 1963 年,美国国家标准局(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的估计”时提出了定量表示不确定度的概念和建议,受到了国际上的普遍关注。

20 世纪 70 年代,NBS 在研究和推广测量保证方案(MAP)时在不确定度的定量表示方面有了进一步的发展。不确定度这个术语逐渐在测量领域广泛使用,用它来定量表示测得的量值的不可确定的程度,但在具体表示方法方面很不统一,并且不确定度与误差同时并用。

1977 年 5 月,国际电离辐射咨询委员会(CCEMRI)的 X- γ 射线和电子组讨论了关于校准证书如何表达不确定度的几种不同建议,但未作出决议。1977 年 7 月的 CCEMRI 会上提出了这个问题的迫切性,CCEMRI 主席、美国 NBS 局长 Amber 同意将此问题列入送交国际计量局的报告,并且由他作为国际计量委员会(CIPM)的成员向 CIPM 发起了解决测量不确定度表示方面的国际统一问题的提案。

1977 年,CIPM 要求国际计量局(BIPM)联合各国家标准实验室着手解决这个问题。1978 年,BIPM 就此问题制定了一份调查表,分发到 32 个国家的计量院及 5 个国际组织征求意见,1979 年底得到了 21 个国家实验室的复函。

1980 年,BIPM 召集和成立了不确定度表述工作组,在征求各国意见的基础上起草了一份建议书——INC-1(1980)。该建议书向各国推荐了测量不确定度的表述原则,自此,得到了国际初步统一的测

量不确定度的表示方法。

1981年,第70届国际计量委员会批准了上述建议,并发布了一份CIPM建议书——CI-1981。1986年,CIPM再次重申采用上述测量不确定度表示的统一方法,并又发布了一份CIPM建议书——CI-1986。CIPM建议书推荐的方法是以INC-1(1980)为基础的。CIPM要求所有参加CIPM及其咨询委员会赞助下的国际比对及其他工作中,各参加者在给出测得的量值的同时必须给出合成不确定度。

20世纪80年代以后,CIPM建议的不确定度表示方法首先在世界各国的计量实验室中得到广泛应用。但正如国际单位制计量单位不仅在计量部门使用一样,测量不确定度应该可以应用于一切使用测量结果的领域。如何进一步推广使用的问题提上了日程。

1986年,CIPM要求国际标准化组织(ISO)能在INC-1(1980)建议书的基础上起草一份能广泛应用的指导性文件,该项工作得到了7个国际组织的支持和倡议,这7个国际组织是:国际标准化组织(ISO)、国际电工委员会(IEC)、国际计量委员会(CIPM)、国际法制计量组织(OIML)、国际临床化学联合会(IFCC)、国际理论化学和应用化学联合会(IUPAC)、国际理论物理和应用物理联合会(IUPAP)。这7个国际组织包括两个权威的标准化组织、两个权威的计量组织和3个物理、化学、医学方面的权威组织。自此,成立了专门的工作组,即国际标准化组织(ISO)的第四技术顾问组(TAG4)第三工作组(WG3),开始起草“测量不确定度表示指南”,该工作组的成员是由BIPM、ISO、IEC和OIML四个国际组织提名的。

1993年,经过工作组近7年的努力,完成了“测量不确定度表示指南”的第一版,并以7个国际组织的名义联合发布,由ISO正式出版发行。同时终止了ISO/TG69/SC6/WG3关于测量不确定度标准的起草工作。

1995年,在对“测量不确定度表示指南—1993”做了一些更正后重新印刷,即《Guide to the expression of uncertainty in measurement—Corrected and reprinted, 1995》(简称GUM 1995)。它为在全世界采用统一的测量不确定度评定和表示方法奠定了基础。

1997年,由7个国际组织创立了计量学指南联合委员会(JCGM),由国际计量局(BIPM)局长任主任,JCGM有两个工作组。工作组1为“测量不确定度表示工作组”,其任务是促进GUM的使用并为其广泛应用而制定补充件及其他文件,发布的国际标准的代号为ISO/IEC Guide 98。工作组2为“国际计量学基本词汇和通用术语(VIM)工作组”,其任务是修订和促进VIM的使用。2005年,国际实验室认可合作组织(ILAC)正式参加该联合委员会后,成为8个国际组织联合发布有关文件。2007年发布了ISO/IEC Guide 99:2007《国际计量学基本词汇 基本和通用概念和术语》(VIM),2008年发布了ISO/IEC Guide 98-3:2008《测量不确定度表示指南》(GUM)。ISO/IEC Guide 98的总名称是《测量不确定度》,包括以下各部分。

标准已发布的部分:

——ISO/IEC Guide 98-1:2008《对测量不确定度表示的介绍》;

——ISO/IEC Guide 98-3:2008《测量不确定度表示指南》(GUM),其内容与GUM:1995基本相同,仅做了少量修改;

ISO/IEC Guide 98-3/Suppl. 1:2008《用蒙特卡洛法传播分布》,它是Guide 98-3的一个补充件。

标准在计划中待制订的部分:

——第2部分:概念和基本原理;

——第4部分:测量不确定度在合格评定中的作用;

——第5部分:最小二乘法的应用。

ISO/IEC Guide 98-3计划中待制订的补充件:

——补充件2:具有任意多个输出量的模型;

——补充件3:模型化。

二、GUM的特点

GUM的特点包括:

(1)因为GUM是由8个权威组织历经反复研究讨论并在征求了各国意见的基础上制定的,因此

GUM 具有国际权威性;

(2) GUM 是指导性技术文件,在术语定义、概念、评定方法和报告时的表达方式上都作了统一规定,并有许多解释性的内容。其利用附录的形式还回答了许多应用时所遇到的问题,并给出了许多应用举例。具有很强的操作性和实用性;

(3) GUM 代表了当前国际上在表示测量结果包括测量不确定度时的约定做法。使全世界不同国家、不同地区、不同学科、工程、商业、工业、法规等领域在表述测量结果和测量不确定度时具有一致的含义,便于理解、翻译和比对,它对推动科技进步和促进国际交流具有重要意义;

(4) 现在,各国都将 GUM 方法转化为本国标准或技术规范加以推广应用。为正确执行 GUM 方法,许多实验室或计量组织,例如美国的 NIST,制定了本单位的实施指南。一些区域性和全球性的国际组织,例如亚太地区计量组织(APMP)、欧盟计量组织(EUROMET)、国际实验室认可组织(ILAC)、亚太实验室认可组织(APLAC)及欧盟认可合作组织(EA)等,也都强调用 GUM 方法来表示带有测量不确定度的测量结果。在国际杂志上发表的论文或评论以及校准证书和测试报告等文件上,基本上都已采用了测量不确定度。测量不确定度已经被越来越多的人所理解和应用。

三、国家计量技术规范

1999 年 1 月,我国颁布了国家计量技术规范 JJF 1059—1999《测量不确定度评定与表示》,它以法规形式规定了我国贯彻 GUM 方法的具体要求。以便在测量结果及其不确定度的评定与表示方法上与国际接轨,以利于我国的国际交往和经济发展。法规颁布至今十多年来,对全国范围内使用和评定测量不确定度,尤其是在计量标准的建立、计量技术法规的制定、证书/报告的发布和量值的国际比对等方面起到了重要的指导和规范作用,使我国对测量结果的表述与国际一致,在科学技术交流、商贸交易、计量证书互认等方面都起到了积极的作用。测量不确定度在我国已经得到了广泛的应用,许多同志为宣传和贯彻测量不确定度做出了很多努力,许多单位与个人在总结应用经验的基础上撰写了不少有价值的文章和书籍。

测量不确定度的应用和规范化表示标志着我国计量事业发展的水平,国家质量监督检验检疫总局一直十分重视这项工作。随着我国科学技术的迅猛发展和计量管理工作的不断规范,特别是国际标准化组织已正式颁布了 ISO/IEC Guide 98-3:2008(GUM)及其补充标准,例如说明当 GUM 方法不适用时可以采用蒙特卡洛法即概率分布传播的方法进行不确定度评定,使不确定度的应用更加深化。《国际计量学词汇 基本和通用概念以及相关术语》(即 VIM 第三版)也相应提出了许多关于不确定度的新术语,例如定义的不确定度、仪器的不确定度、目标不确定度等。为了总结十多年来的经验以及进一步规范和推广测量不确定度评定的方法,国家质量监督检验检疫总局在广泛征求意见的基础上对 JJF 1059—1999 进行了修订。目前,修订后的 JJF 1059 分为两个部分,JJF 1059.1—2012《测量不确定度评定与表示》是依据十多年来我国贯彻 JJF 1059—1999 的经验以及最新的国际标准 ISO/IEC Guide 98-3:2008 对 JJF 1059—1999 修订后的版本;JJF 1059.2—2012《用蒙特卡洛法评定测量不确定度》是依据 ISO/IEC Guide 98-3/Suppl. 1:2008 制定的;其他方面的内容,根据需要以后也可能会陆续颁布。

四、总结和展望

测量不确定度的概念以及不确定度的评定和表示方法是计量科学的一个新进展。从 1963 年提出测量不确定度概念,到 1993 年正式发布能统一全世界关于测量不确定度应用的指导性文件 GUM,整整花费了 30 年的时间,它汇集了世界各国计量学家的经验和智慧,并在与守旧的习惯力量不断辩论的过程中诞生。执行 GUM 20 年来,经过多次修改、完善和改进,最后形成 ISO/IEC Guide 98-3 这样一个较为科学、系统和完整的标准,而与之配套的文件已经列出计划,正在研究和制定之中。与所有的事物一样,随着社会的进步,测量不确定度的评定方法也会不断地完善和发展。人们在应用中不断总结经验 and 发现存在的问题,对有关测量不确定度的标准作进一步修订和补充是必然的。每一个人都可以积累这方面的经验和意见,把我国的想法收集起来,积极参与到标准的修订和推广应用工作中去,使其更实用,也为世界做出应有的贡献。

第三节 测量不确定度的适用范围

一、测量不确定度适用的领域

测量不确定度评定与表示的通用方法适用于各种准确度等级的各类测量领域。例如：

1. 国家计量基准及各级计量标准的建立

适用于在建立计量基准或各级计量标准时,评定和给出其复现的标准量值的测量不确定度。

2. 量值比对结果的评价

适用于各个测量领域内测得的量值间的比对、计量标准装置间量值的国内外比对以及检测设备的实验室间比对。在同一准确度等级上进行的测量间、计量标准装置间或检测设备间的量值比对时,参与比对的各方在给出测量结果的量值时必须按照统一的要求同时给出测量不确定度。通过对参加比对的各实验室所得数据的处理,可以得出测量结果一致性或计量兼容性的评价。带有这种评价的比对结果是测量结果可信度的证明,也是对实验室技术能力的一种验证。

3. 标准物质的定值,标准参考数据的发布

适用于标准物质按规定的方法定值后,其标准值连同其不确定度的发布。也适用于需要说明不确定度的标准参考数据的发布。

4. 测量方法、校准规范、检定规程、检定系统表等技术文件的编制

编制测量方法、校准规范和检定规程时,应该分析和评定该方法的测量不确定度,以便使用者在分析测量结果的不确定度时作为参考或作为一个分量加以使用。国家计量检定系统表是说明从国家基准将量值向下传递到各级计量标准直至工作计量器具的不确定度关系的技术文件,图中需明确标明量值传递链中各级的测量不确定度,并符合有关的比例关系要求。当用框图说明测量仪器与给定量的各级计量标准之间的关系时,该图称为溯源等级图,图中同样需明确标明溯源链中每个环节的测量不确定度。这些不确定度的表示应符合要求。

5. 科学技术研究及工程领域的测量

测量不确定度适用于一切科技与工程项目,这是一个非常广阔的应用领域,例如,无论是科学发明还是技术创新,科技成果大多必须以测量结果及其测量不确定度来评价其水平。重大工程的方案论证离不开测量不确定度的分析和预估,从而给出合理的技术要求;工程的验收大纲应该规定测量的要求,其中也包括测量不确定度的要求;高等学校学生在毕业论文涉及测量结果时也应该正确使用测量不确定度,因此关于测量不确定度的知识也适用于大专院校的测量课程。

6. 计量资质认定、计量确认、质量认证以及实验室认可中对测量结果和测量能力的表述

在计量资质认定、计量确认、质量认证中,要根据相关的标准,对测量设备能否满足产品质量检测的要求、测量不确定度能否满足使用的要求进行评审;在实验室认可中,对测量范围及测量不确定度的考核结果是评定该实验室技术能力的依据。

7. 测量仪器的校准、检定以及其他计量服务

测量仪器是人们测量时必不可少的工具,为了保证其计量特性能满足使用要求,必须进行定期校准或检定。也就是将测量仪器与相应的计量标准进行技术比较,从而给出仪器的校准值、校准曲线或修正值、修正曲线,此时应该同时给出这些值的测量不确定度;对于法制计量范围内的测量仪器必须按规定与相应的计量标准进行技术比较后,再与被检测量器具的技术指标作比较,给出合格或不合格的检定结论,此时应该考虑标准值的测量不确定度与被检仪器最大允许误差之间的比例关系,因为它关系到合格评定的可信程度或误判风险。

8. 贸易结算、医疗卫生、安全防护、环境监测及资源测量

由于贸易结算、医疗卫生、安全防护、环境监测等项目在国家经济和民生中的重要地位,有关的计量器具多数已列入了强制检定项目中,检定规程中应该分析测量不确定度的来源和评定测量不确定度,以确保检定结论的有效。对这类测量所用的计量标准及检测设备的要求及对测量结果的质量的评定通常应该是需要更严格把关的。

二、JJF 1059.1 的适用范围和适用条件

1. JJF 1059.1 的适用范围

(1) JJF 1059.1 是一个通用规范,该规范适用于涉及有明确定义并可以用唯一值表征的被测量估计值的不确定度的评定与表示。

例如:直接用数字电压表测量频率为 50Hz 的某实验室的电源电压,电压是被测量,它有明确的定义和特定的测量条件,用的测量仪器是数字电压表,进行 3 次测量,取其平均值为被测量的最佳估计值,其值为 220.5V,它是被测量的估计值并用一个值表征的。现有规范对这样的测得值进行测量不确定度评定和表示是适用的。

又如,通过对电路中的电流 I 和电压 V 的测量,用公式 $P = IV$ 计算出功率值 P ,这是属于间接测量,也符合有明确定义的并可用唯一值表征的条件,因此 JJF 1059.1 是适用的。

(2) 当被测量为导出量,其测量模型即函数关系式中的多个变量又由另外的函数关系确定时,对于被测量估计值的不确定度评定, JJF 1059.1 的基本原则也是适用的,但是评定起来比较复杂。

例如:被测量功率 P 是输入量电流 I 和温度 t 的函数,其测量模型为 $P = C_0 I^2 / (t + t_0)$,而电流 I 和温度 t 又由另外的函数确定: $I = V_s / R_s$, $t = \alpha \beta^2 (t) R_s - t_0$ 。评定功率 P 的测量不确定度时,该规范同样适用。

(3) 对于被测量呈现为一系列值的分布,或对被测量的描述为一组量时,则被测量的估计值也应该是一组量值,测量不确定度应相应于每一个估计值给出,并应给出其分布情况及其相互关系。

(4) 当被测量取决于一个或多个参变量时,例如以时间或温度等为参变量时,被测量的测得值是随参变量变化的直线或曲线,对于在直线或曲线上任意一点的估计值,其测量不确定度是不同的。测量不确定度的评定可能要用到最小二乘法、矩阵等数学运算,但 JJF 1059.1 的基本原则也还是适用的,可参见第七章的第十节和第十一节的举例。

(5) JJF 1059.1 的基本原则也可用于在统计控制下的测量过程的测量不确定度的评定,但评定时需要考虑测量过程的合并样本标准偏差作为 A 类评定的标准不确定度。

(6) JJF 1059.1 也适用于实验、测量方法、测量装置和测量系统的设计和理论分析中有关不确定度的评定与表示,许多情况下是根据对可能导致不确定度的来源进行分析与评估,预估测量不确定度大小的。

(7) JJF 1059.1 仅提供了评定和表示测量不确定度的通用规则,涉及一些专门测量领域的特殊问题的不确定度评定,如果必要,本规范鼓励各专业技术委员会以此规范为依据制定专门的技术规范或指导书。

2. JJF 1059.1 的主要适用条件

JJF 1059.1 是采用 ISO/IEC Guide 98-3:2008《测量不确定度表示指南》的方法进行测量不确定度评定,简称 GUM 法,其主要适用条件为:

- (1) 可以假设输入量的概率分布呈对称分布;
- (2) 可以假设输出量的概率分布近似为正态分布或 t 分布;
- (3) 测量模型为线性模型、可转化为线性的模型或可用线性模型近似的模型。

规范中的“主要”两字是指:从严格意义上来说,在规定的该 3 个条件同时满足时,GUM 法是完全适用的,但并不是在不满足这些条件情况下绝对不能用。当其中某个条件不完全满足时,有些情况下可以作近似、假设或适当处理后使用。在测量要求不太高的场合,这种近似、假设或处理是可以接受的。但在要求相当高的场合,必须在了解 GUM 适用条件后予以慎重处理。

关于 GUM 法适用条件的理解,主要包括:

(1) GUM 法适用于可以假设输入量的概率分布呈对称分布的情况。

在 GUM 法评定测量不确定度时,首先要评定输入量的标准不确定度,除了 A 类评定外(一般由各种随机影响造成测得值的分散性可假设为对称的正态分布),许多情况下是采用 B 类评定的,只有输入量的概率分布为对称分布时,才可能确定区间半宽度,用于通过 B 类评定得到输入量的标准不确定度。常用的对称分布有正态分布、均匀分布、三角分布、梯形分布、反正弦分布等。如果输入量呈指数分布、泊松分布等非对称分布时,一般来说 GUM 法是不适用的。

实际情况中,常遇到有些输入量的估计值是由仪器测量得到的,仪器的最大允许误差可能是一个非对称的区间,甚至是单侧区间,此时,只有假设或近似为对称区间后才能进行 B 类评定。处理方法见本书第三章第四节中“界限不对称时的区间半宽度 a 的确定”。

(2) GUM 法适用于输出量的概率分布近似或可假设为正态分布或 t 分布的情况。对于这一条应理解为:GUM 法适用于输出量 y 为正态分布、近似为正态分布或者可假设为正态分布,此时, $(y-Y)/u_c(y)$ 接近 t 分布的情况。

①当测量模型中输入量很多或确定输出量时导致不确定度的来源很多,各不确定度分量相互独立且大小相近时,可以认为输出量的概率分布近似为正态分布。例如 $Y = c_1 X_1 + c_2 X_2 + \cdots + c_N X_N$, 如果其所有的输入量 X_i 是用正态分布表征,则 Y 的分布也是正态分布的。然而,当输入量很多时,即使 X_i 的分布不是正态的,根据“中心极限定理”, Y 的分布通常可以用正态分布近似。矩形分布是非正态分布的极端例子,但即使只有 3 个等宽度的矩形分布,其卷积仍接近正态分布[参见 ISO/IEC Guide 98 - 3:2008, G. 2.1, G. 2.2]。所以,许多情况下假设输出量接近正态分布是合乎实际的,GUM 中,约定采用 $k=2$ 的扩展不确定度 U ,由它确定的包含区间的包含概率约为 95% 左右,就是在接近正态分布的基础上得出的。

②若用算术平均值作为被测量(即输出量)的最佳估计值 y ,其给定包含概率的扩展不确定度为 U_p 。当 y 服从正态分布时,算术平均值与算术平均值的标准偏差之比服从缩放平移 t 分布,即 y/u_c 的分布为自由度为 ν_{eff} 输出估计值为 y 、方差为 $(U_p/k_p)^2$ 的 t 分布。所以,GUM 中规定,可以用查 t 分布的 t 值表来确定包含概率为 p 的包含因子 k_p ,从而得到 U_p 和包含概率为 p 的包含区间 $y \pm U_p$ 。

③当输出量的概率分布不能充分近似正态分布或 t 分布时,也就无法应用中心极限定理提供一个相应于规定包含概率的包含区间[参见 ISO/IEC Guide 98 - 3:2008, G. 2.1, G. 6.6]。这种不充分近似可能会出现以下情况之一时:

- 起主导作用的输入量 X_i 的概率分布不是正态分布或 t 分布;
- 测量模型是非线性的(当测量模型为非线性时,往往会改变输出量概率分布的形状);
- 使用 Welch-Satterthwaite 公式计算有效自由度时引入的近似误差不可忽略。

如果不能充分近似正态分布或 t 分布时,由 $k=2$ 的扩展不确定度 U 确定的包含区间的包含概率不是 95% 左右(可能远大于 95%),并且不能用查 t 分布的 t 值表来确定包含概率为 p 的包含因子 k_p 的方法得到 U_p 。此时,需要确定输出量的概率分布,并根据它来确定包含因子 k_p 的值,例如当输出量为均匀分布时, U_{95} 的包含因子 k_p 为 1.65。如何确定输出量的概率分布,并如何根据分布来确定包含因子 k_p 的值,这个内容没有包含在 GUM 内。实际评定时,往往仍然约定采用 $k=2$ 的扩展不确定度,但要知道此时的包含概率不是 95% 左右(处理方法见本书第三章第六节中“确定扩展不确定度时的注意事项”)。

④当输出量为非对称分布时应特别注意不能用扩展不确定度来确定包含区间,此时 GUM 法是不适用的。

(3) GUM 法适用于测量模型为线性模型、可转化为线性的模型或可用线性模型近似的情况。也就是说,测量函数在输入量估计值附近应近似为线性。在大多数情况下这是可以满足的。

GUM 法的核心是用不确定度传播律计算合成标准不确定度。测量模型表示为 $y = f(x_1, x_1, \cdots, x_N)$, 不确定度传播律公式表示为:

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

当各输入量间均不相关时,不确定度传播律公式为

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

式中, $\frac{\partial f}{\partial x_i}$ 是测量函数在第 i 个输入量 X_i 的估计值 x_i 处的一阶偏导数, 它是函数曲线在 $X_i = x_i$ 点的斜率, 又称灵敏系数。该不确定度传播律公式中只涉及一阶偏导数, 未包含二阶或更高阶的偏导数。

①在线性测量模型时, 只存在一阶偏导数, 且一阶偏导数为常数, 二阶或更高阶的偏导数均为 0, 所以线性模型时不确定度传播律公式完全适用。例如, 测量模型为 $Y = A_1 X_1 + A_2 X_2 + \cdots + A_N X_N$, 输出量与各输入量间均为线性关系, 则该模型为线性模型, 这种情况下完全可以用不确定度传播律公式计算合成标准不确定度。

②虽然测量模型为非线性模型, 但只要能转化成线性模型的情况, 则不确定度传播律公式仍然可用。

例如: 测量模型为 $Y = AX_1^{P_1} X_2^{P_2} \cdots X_N^{P_N}$, 该模型属于非线性的模型, 当 Y 具有这种形式时, 可进行对数变换:

设 $Z = \ln Y$ 和 $W_i = \ln X_i$, 可以使新的变量完全线性化为 $Z = \ln A + \sum_{i=1}^N P_i W_i$ ($\ln A$ 为常数)。不确定度传播律在该线性化情况下适用, 因此:

$$u(Z) = \sqrt{\sum_{i=1}^N [P_i u(W_i)]^2}$$

由于 $u(z) = u(\ln y) = u(y)/y$, $u(W_i) = u(\ln x_i) = u(x_i)/x_i$, 由此导出相应的合成标准不确定度公式

$$\frac{u_c(y)}{y} = \sqrt{\sum_{i=1}^N [P_i u(x_i)/x_i]^2}$$

实际上, 只要测量模型为 $Y = AX_1^{P_1} X_2^{P_2} \cdots X_N^{P_N}$, 就可直接用该公式计算相对合成标准不确定度, 不必每次评定时进行线性化处理。

③当测量函数为非线性时

a. 可用泰勒级数展开, 略去高阶项后, 测量模型成为近似的线性模型, 如果这种近似能够满足需求, 且各输入量间不相关, 则可以用不确定度传播律公式计算合成标准不确定度。

例如, 测量模型为 $L = \frac{1}{1 + \alpha\theta} [L_s(1 + \alpha_s\theta_s) + d]$, 该模型为非线性模型, 按泰勒级数展开, 忽略高阶项后得到近似的线性模型

$$L \approx L_s + d + L_s(\alpha_s\theta_s - \alpha\theta)$$

各输入量间不相关, 不确定度传播律在该线性化情况下适用。

计算时, 有可能得到某个输入量的一阶偏导数为 0, 这种情况下, 不要轻易断定该输入量的不确定度对输出量的测量不确定度没有贡献, 还应该考虑其二阶偏导数。

b. 若偏导数不难求得时, 可以直接使用不确定度传播律公式计算出合成标准不确定度。但要认识到, 这是基于一阶近似的。

c. 在高阶项不能忽略, 且输入量不相关的情况下, 被测量的估计值 y 的合成标准不确定度 $u_c(y)$ 的公式中还应该增加高阶项, 例如可按下式计算:

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

总之, 测量模型为线性时测量不确定度传播律公式是严格成立的, 而模型为非线性时使用测量不确定度传播律是有条件的。

由此可见, 只有同时满足上述 3 个条件时, GUM 法才完全适用。当上述适用条件不能完全满足时, 一般采用一些近似或假设的方法处理; 当怀疑这种近似或假设是否合理有效时, 若必要和可能, 最好采用蒙特卡洛法验证其评定结果; 当 GUM 法不适用时, 可以用蒙特卡洛法 (即采用概率分布传播的方法) 评定测量不确定度。

3. JJF 1059.2 的适用范围

JJF 1059.2 是用蒙特卡洛法评定测量不确定度的方法, 简称 MCM。MCM 的适用范围比 GUM 法广

泛,除了 GUM 法可用的情况外,还可适用于以下典型情况时的不确定度评定:

- (1)各不确定度分量的大小不相近;
- (2)输入量的概率分布不对称;
- (3)测量模型非常复杂,不能用线性模型近似;
- (4)不确定度传播律所需的模型的偏导数很难求得或不方便提供;
- (5)输出量的估计值与其标准不确定度大小相当;
- (6)输出量的概率分布不是正态分布或 t 分布,也可以是不对称分布。

JJF 1059.2 是对 JJF 1059.1 的补充。JJF 1059.2 提供了验证程序,GUM 法的评定结果可以用蒙特卡洛法进行验证,当评定结果一致时,仍然可以使用 GUM 法进行不确定度评定。因此,GUM 法仍然是不确定度评定最常用和最基本的方法。

第二章 基本术语及其概念

测量不确定度的概念涉及基本统计学术语及通用计量学术语。尤其是测量不确定度的采用和发展导致了概率论、统计学和计量学方面的不少术语定义的修订:

(1)1993 年 GUM 发布的同时,国际标准化组织发布了新版统计学术语 ISO 3534 - 1:1993《Statistics—Vocabulary and Symbols—Part 1:Probability and General Statistics Terms》(ISO 3534 - 1:1993《统计学—词汇和符号—第 1 部分:概率和通用统计学术语》)。2006 年发布了其修订版 ISO 3534 - 1:2006《Statistics—Vocabulary and symbols—Part 1:General statistical terms and terms used in probability》,我国相应地颁布了 GB/T 3358.1—2009《统计学词汇及符号 第 1 部分:一般统计术语与用于概率的术语》。

(2)在 1993 年 GUM 发布的同时,同样以 7 个国际组织的名义联合发布了 VIM 的修订版《International vocabulary of basic and general terms in Metrology ,Second edition》(国际计量学基本和通用术语,第二版,1993)。2007 年对 VIM 的第二版进行了修订,正式发布了 ISO/IEC Guide 99:2007《International vocabulary of metrology—Basic and general concepts and associated terms(VIM)》(国际计量学词汇 基本和通用概念以及相关术语,VIM),我国也相应地将 JJF 1001—1998 修订为 JJF 1001—2011《通用计量术语及定义》。

因此,在学习测量不确定度时,必须首先学习概率论、统计学和计量学方面的相关术语及其基本概念,并了解这些术语及其定义的新变化,由此加深我们对测量不确定度的理解。

我们可以发现,无论是概率论和统计学的通用术语还是计量学通用术语都有两类术语:

一类是理论性的、概念性的术语,它们是在理想条件下的术语,在无穷多次测量条件下可以计算得到其极限值,但不可能实际测量得到。

另一类是实用性的术语,它是在实际使用中可以定量得到其量值的术语,即在有限次测量条件下可以通过测量或评定得到的,它们是概念性术语的估计值。

在学习时应善于总结这些区别。

本章仅对与测量不确定度有密切关系的部分术语及其基本概念作简要的介绍。

第一节 关于概率与统计的术语及其概念

本节关于概率与统计的术语及其定义主要取自 GUM 的附录 C“基本统计学术语和概念”。

1. 随机变量 random variable

可以取指定的一个具有概率分布的值集中的任意值的变量。

①只能取孤立值的随机变量称为“离散随机变量”,能在一个有限或无限区间内取任意值的随机变量称为“连续随机变量”。

②事件 A 的概率用 $P_r(A)$ 或 $p(A)$ 表示。

2. 概率 probability

概率是一个 0 和 1 之间隶属于随机事件的实数。

它与在相当长的一段时间内事件发生的相对频率有关,或与事件发生的可信程度(degree of belief)有关,可信度高时概率接近 1。

(1)在对某一个被测量重复测量时,我们可以得到一系列数据,这些数据称观测值或测得值。测得值是随机变量,它们分散在某个区间内,概率是测得值在区间内出现的相对频率即可能性大小的度量;在此定义的基础上奠定了测量不确定度 A 类评定的理论基础。由于测量的不完善或人们对被测量及其影响量的认识不足,概率也可以是测得值落在某个区间内的可信度大小。在这新的定义中,对于那些我们不知道其大小的系统误差,可以认为是以一定的概率落在区间的某个位置,认为也属于随机变量。或者说,某项未知的