

◎ 施昌彦 主审 ◎ 宣安东 主编

实用测量不确定度 评定及案例

(上册)

实验室的产品是测量结果，测量结果的质量是其不确定度。本书旨在促进测量结果的表示与国际接轨。

——编者



中国计量出版社

CHINA METROLOGY PUBLISHING HOUSE

实用测量不确定度 评定及案例

(上册)

主审 施昌彦

主编 宣安东

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及案例/宣安东主编. —北京:中国计量出版社,2007.7
ISBN 978-7-5026-2678-5

I. 实… II. 宣… III. 测量—不确定度—基本知识 IV. TB9

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第091317号

内 容 提 要

本书系统地介绍了测量不确定度的概念、分类、来源,测量不确定度与测量误差的主要区别,以及其评定与表示方法,列举了几何量、力学、温度、电磁、无线电、时间频率、声学、光学、电离辐射、物理化学等十大计量专业领域及部分检测领域的226个不确定度评定实例,对掌握测量不确定度评定和表示方法具有指导作用。

本书具有较强的可操作性和借鉴性,易学、易懂、易会、易用,可供从事校准、计量、检测、检验的生产、科研、教学等相关人员使用,是从事计量、标准化、质量及实验人员的实用工具书。

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

<http://www.zgjl.com.cn>

北京市媛明印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

版权所有 不得翻印

*

787 mm×1092 mm 16开本 印张 55.75 字数 1357千字

2007年8月第1版 2007年8月第1次印刷

*

定价:138.00元(上、下册)

编 委 会

| | | | | | | | |
|----|----|-----------|-----|-----|-----|-----|--|
| 顾 | 问 | 张瀚闻 | | | | | |
| 主 | 审 | 施昌彦 | | | | | |
| 主 | 编 | 宣安东 | | | | | |
| 副 | 主 | 周正 | 乐嘉东 | 张民浩 | 刘波 | 何英 | |
| | | 张曦弘 | 王志刚 | 杨长治 | 陈明华 | | |
| 执行 | 编辑 | 张民浩 | 张曦弘 | 李会艳 | 冯卫华 | | |
| 撰 | 稿 | (以姓氏笔画排序) | | | | | |
| | | 方培 | 王凤亮 | 王军 | 王成 | 王丽 | |
| | | 王宏燕 | 王志刚 | 王学欣 | 王保武 | 王清朝 | |
| | | 王猛 | 王登新 | 王慧喆 | 王丛皓 | 王嘉东 | |
| | | 付红霞 | 冯卫华 | 卢春伟 | 丛新宇 | 乐嘉东 | |
| | | 白宏山 | 白桦 | 刘波 | 刘爽 | 宁樾 | |
| | | 孙大勇 | 孙嘉静 | 刘智丹 | 刘朱辉 | 刘超英 | |
| | | 闫大鹏 | 闫铁璋 | 吴景涛 | 何英弓 | 邢晓舟 | |
| | | 何艳光 | 张静岩 | 宋瀚 | 张曦弘 | 何民浩 | |
| | | 张雨春 | 李杨霞 | 李俊宏 | 李春蕊 | 李会艳 | |
| | | 李宇治 | 周金森 | 李沈涛 | 陈明华 | 李瑾 | |
| | | 杨长正 | 周金泉 | 罗金瑟 | 罗嘉瑞 | 李明智 | |
| | | 周迎春 | 金洪雁 | 罗金瑟 | 姜英子 | 陈苗友 | |
| | | 金施昌 | 洪钟娜 | 金贺唐 | 赵子贵 | 苗安东 | |
| | | 赵婉旭 | 彭晓耕 | 唐忠厚 | 贾卫民 | 苗安东 | |
| | | 黄明秋 | 彭满玉 | 喻晓兵 | 董卫民 | 赵高海 | |
| | | 韩淑秋 | | 蔡志军 | 樊晓牧 | 延丽 | |

序

如果我们把测量结果、量值或数据看做是实验室的“产品”，它们经过适当处理后最终成为报告或证书，那么评价该“产品”制造水平高低或质量优劣的指标是什么呢？是测量不确定度。

测量是旨在获得量值的一组操作，是通过实验获得一个或多个量值并合理地对被测量进行赋值的过程。实验室是为获得自然科学某学科领域内认知对象的有关知识而进行实验研究的机构，定量的实验研究结果总是用数据表征，而数据的质量则用测量不确定度表征，即用不确定度作为衡量的尺度来评价其水平或价值。测量不确定度是“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”。国际上用这个概念使不同实验室出具的数据具有一定的可信性、可比性和可接受性。从而使世界各地的用户可以判断测量结果的等效性，避免不必要的重复检测/校准，为测量结果的表示与国际接轨提供依据。

测量不确定度的概念以及评定与表示方法的采用，是测量科学的新发展。从1963年至1993年，《测量不确定度表示指南》(GUM)的出台整整花了30年时间，它汇集了世界各国计量学家的经验和智慧。从1993年到1999年我国的JJF 1059产生，又花了6年的时间，其后我国的计量工作者在测量结果的不确定度推广应用上，作出了不懈的努力。

由于不确定度概念在我国应用时间较短，实验室从事校准、检测、检验及计量工作的专业人员难免会对其应用感到困难。沈阳计量测试院组织编写的《实用测量不确定度评定及案例》，深入浅出，注重通俗性和实用性，并且具有较强的可操作性，尤其是书中列举了几何量、力学、温度、电磁、无线电、时间频率、声学、光学、电离辐射、物理化学等十大计量专业以及部分检测领域的共226个不确定度评定实例，对掌握和应用测量不确定度评定和表示方法具有指导意义。本书的出版将为我国科技和经济交流作出有益的贡献。

施昌彦

2007年2月

前 言

测量在人们日常生产、生活、贸易和科研等方面发挥着越来越重要的作用,量值的准确、可靠和统一,是测量相关各方共同的追求。然而,被测量的真值只是一个理想化的概念,测量设备、测量人员、测量方法、测量环境和被测对象的不完善等不确定因素,都对测量的准确性产生影响。为了考核量值的准确性,反映测量结果与被测真值的接近程度,国际计量局(BIPM)等国际相关组织引用了“测量不确定度”的概念,利用它来评定测量的水平或质量。所以我们可以说测量的产品是数据,数据的质量是测量不确定度。

随着经济发展的全球化,为了保证国际量值传递的一致性,ISO 17025:2005《检测和校准实验室能力的通用要求》指明,校准实验室出具的每份证书或报告,均应包括有关测量结果不确定度的说明;ISO 9001:2000《质量管理体系 要求》规定,使用测量设备时应保证其测量不确定度为已知。因此,为了使测量结果的表示与国际接轨,并具有一定的先进性,1999年我国制定、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》,并在实验室认可、质量认证、法定计量检定机构考核等领域广泛应用。

由于测量不确定度概念引用时间不长,其涉及的理论较深,数学公式多且繁杂,使得学习起来有一定的困难,应用则更不容易。为了便于从事计量工作的各类人员学习和运用测量不确定度,我们组织具有丰富理论知识和实践经验的有关专业技术人员,依据和参照《测量不确定度表示指南》(GUM)、《检测和校准实验室能力的通用要求》(ISO 17025:2005)和《测量不确定度评定与表示》(JJF 1059—1999),结合实际工作,编写了本书。

全书共分三章:第一章阐述了测量不确定度的基本概念等基础知识;第二章从测量不确定度的评定方法、测量不确定度来源及数学模型、标准不确定度 A 类评定、标准不确定度 B 类评定、合成标准不确定度评定、扩展不确定度评定、测量不确定度报告与表示等七方面,详细阐述了测量不确定度的评定与表示方法;第三章,按照十大计量分类,逐一列举了测量不确定度的评定和表示方法的应用实例。

我们在编写中,侧重通俗性和实用性,力争摆脱抽象的理论束缚和数学公式的困扰,将复杂的问题简单化、抽象的问题具体化,通过应用案例,使本书具有很强的借鉴性和可操作性,让人一看就懂、一学就会。本书可供科研、生产、检定、教学等有关计量人员使用,是从事计量、标准、质量及实验人员的实用工具书。

本书在编写过程中,得到了国内计量界知名专家施昌彦教授的热切关心和指导,我们局系统长期从事计量管理和计量检测的同志付出了辛勤的努力,在此深表谢意。由于当代计量科学技术发展较快以及编者水平有限,本书不足之处在所难免,恳请有关人士批评指正。

沈阳市质量技术监督局副局长

宣安东

2007年1月

目 录

(上册)

| | |
|----------------------------|--------|
| 第一章 测量不确定度概述 | (1) |
| 第一节 测量不确定度的概念 | (1) |
| 一、测量不确定度的定义 | (1) |
| 二、测量不确定度的表示 | (2) |
| 三、测量不确定度在符合性判断中的应用 | (3) |
| 第二节 测量不确定度的构成和分类 | (3) |
| 一、测量不确定度的构成和分类 | (3) |
| 二、标准不确定度 | (4) |
| 三、(标准)不确定度的 A 类评定 | (4) |
| 四、(标准)不确定度的 B 类评定 | (4) |
| 五、合成标准不确定度 | (5) |
| 六、扩展不确定度 | (5) |
| 七、包含因子 | (5) |
| 第三节 测量不确定度的来源 | (6) |
| 一、测量人员引入的不确定度 | (6) |
| 二、测量设备引入的不确定度 | (6) |
| 三、测量方法引入的不确定度 | (12) |
| 四、被测对象引入的不确定度 | (13) |
| 五、测量环境引入的不确定度 | (14) |
| 第四节 测量误差与测量不确定度的主要区别 | (14) |
| 第二章 测量不确定度评定方法 | (19) |
| 第一节 适用范围 | (19) |
| 第二节 技术依据 | (19) |
| 第三节 评定步骤 | (19) |
| 一、测量过程简述 | (19) |
| 二、数学模型 | (20) |
| 三、各输入量标准不确定度分量的评定 | (20) |
| 四、合成标准不确定度及扩展不确定度的评定 | (24) |
| 五、测量不确定度的报告与表示 | (27) |

| | |
|--|---------|
| 第三章 测量不确定度评定实例 | (30) |
| 第一节 几何量 | (30) |
| 一、三等量块中心长度测量结果的不确定度评定 | (30) |
| 二、四等量块中心长度测量结果的不确定度评定 | (34) |
| 三、游标卡尺测量结果的不确定度评定 | (38) |
| 四、齿厚卡尺测量结果的不确定度评定 | (40) |
| 五、千分尺测量结果的不确定度评定 | (43) |
| 六、杠杆千分尺测量结果的不确定度评定 | (48) |
| 七、内径千分尺示值误差测量结果的不确定度评定 | (54) |
| 八、内测千分尺校准结果的不确定度评定 | (60) |
| 九、深度千分尺测量结果的不确定度评定 | (64) |
| 十、公法线千分尺测量结果的不确定度评定 | (69) |
| 十一、指示表检定仪测量结果不确定度的评定 | (75) |
| 十二、指示表测量结果的不确定度评定 | (81) |
| 十三、机械式比较仪示值误差测量结果的不确定度评定 | (87) |
| 十四、刀口形直尺测量结果的不确定度评定 | (92) |
| 十五、大量程百分表测量结果的不确定度评定 | (96) |
| 十六、杠杆表测量结果的不确定度评定 | (100) |
| 十七、测角仪示值误差测量结果的不确定度评定 | (106) |
| 十八、超声波测厚仪示值误差测量结果的不确定度评定 | (109) |
| 十九、内径表测量结果的不确定度评定 | (111) |
| 二十、合像水平仪测量结果的不确定度评定 | (118) |
| 二十一、平尺直线度测量结果的不确定度评定 | (122) |
| 二十二、宽座直角尺外角垂直度测量结果的不确定度评定 | (125) |
| 二十三、框式水平仪测量结果的不确定度评定 | (128) |
| 二十四、水平仪检定器测量结果的不确定度评定 | (130) |
| 二十五、钢直尺测量结果的不确定度评定 | (132) |
| 二十六、直角尺检定仪示值误差测量结果的不确定度评定 | (135) |
| 二十七、钢卷尺测量结果的不确定度评定 | (138) |
| 二十八、平板测量结果的不确定度评定 | (141) |
| 二十九、平行平晶平行度测量结果的不确定度评定 | (144) |
| 三十、千分尺校对量杆测量结果的不确定度评定 | (147) |
| 三十一、标准环规直径测量结果的不确定度评定 | (150) |
| 三十二、圆柱螺纹塞规螺距测量结果的不确定度评定 | (154) |
| 三十三、齿厚卡尺综合误差检具标准圆柱直径测量结果的不确定度评定 | (157) |
| 三十四、表面粗糙度比较样块 R_a 值测量结果的不确定度评定 | (161) |
| 三十五、二级角度块工作角角值示值偏差测量结果的不确定度评定 | (163) |
| 三十六、万能角度尺测量结果的不确定度评定 | (165) |

| | |
|--|--------------|
| 三十七、量仪测力仪测量结果的不确定度评定 | (167) |
| 三十八、焊接检验尺尺寸边缘线性标尺示值误差测量结果的不确定度评定 | (170) |
| 三十九、专用卡板角度值测量结果的不确定度评定 | (172) |
| 四十、钢球直径测量结果的不确定度评定 | (174) |
| 四十一、螺纹样板牙型半角偏差测量结果的不确定度评定 | (176) |
| 四十二、半径样板尺寸偏差测量结果的不确定度评定 | (180) |
| 四十三、螺纹样板螺距测量结果的不确定度评定 | (182) |
| 四十四、光滑极限量规直径测量结果的不确定度评定 | (184) |
| 四十五、套管尺示值偏差测量结果的不确定度评定 | (188) |
| 四十六、焊接检验尺示值误差测量结果的不确定度评定 | (195) |
| 四十七、读数显微镜示值误差测量结果的不确定度评定 | (200) |
| 四十八、平面等厚干涉仪示值误差测量结果的不确定度评定 | (202) |
| 四十九、小角度检查仪定位指示计示值误差测量结果的不确定度评定 | (205) |
| 五十、光学倾斜仪示值误差测量结果的不确定度评定 | (207) |
| 五十一、分度头示值误差测量结果的不确定度评定 | (211) |
| 五十二、分度台分度误差测量结果的不确定度评定 | (213) |
| 五十三、光切显微镜示值误差测量结果的不确定度评定 | (216) |
| 五十四、干涉显微镜示值误差测量结果的不确定度评定 | (218) |
| 五十五、触针式表面粗糙度测量仪示值误差测量结果的不确定度评定 | (221) |
| 五十六、工具显微镜示值误差测量结果的不确定度评定 | (223) |
| 五十七、光学计示值误差测量结果的不确定度评定 | (227) |
| 五十八、测长仪示值误差测量结果的不确定度评定 | (229) |
| 五十九、测长机示值误差测量结果的不确定度评定 | (232) |
| 六十、测量显微镜示值误差测量结果的不确定度评定 | (236) |
| 六十一、自准直仪示值误差测量结果的不确定度评定 | (239) |
| 六十二、线纹比较仪示值误差测量结果的不确定度评定 | (242) |
| 六十三、接触式干涉仪示值误差测量结果的不确定度评定 | (245) |
| 六十四、投影仪示值误差测量结果的不确定度评定 | (248) |
| 六十五、水准仪水平视准线误差(i 角)测量不确定度的评定 | (252) |
| 第二节 力学 | (255) |
| 一、0.25级弹簧管式精密压力表示值误差测量结果的不确定度评定 | (255) |
| 二、1.6级弹簧管式一般压力表示值误差测量结果的不确定度评定 | (258) |
| 三、1.0级U形液体压力计示值误差测量结果的不确定度评定 | (260) |
| 四、二等补偿式微压计压力示值误差测量结果的不确定度评定 | (263) |
| 五、工作用电子血压计示值误差测量结果的不确定度评定 | (266) |
| 六、0.2级数字压力表示值误差测量结果的不确定度评定 | (269) |
| 七、工作用血压表示值误差测量结果的不确定度评定 | (272) |
| 八、二等活塞式压力真空计活塞有效面积测量结果的不确定度评定 | (274) |
| 九、0.5级压力变送器输出电流测量结果的不确定度评定 | (279) |

| | |
|---|-------|
| 十、1.6 级轮胎压力表示值误差测量结果的不确定度评定 | (282) |
| 十一、二等标准活塞式压力计活塞有效面积测量结果的不确定度评定 | (284) |
| 十二、工作用血压计示值误差测量结果的不确定度评定 | (288) |
| 十三、氧气吸入器示值误差测量结果的不确定度评定 | (291) |
| 十四、1.0 级倾斜式微压计测量结果的不确定度评定 | (296) |
| 十五、1.0 级膜盒压力表示值误差测量结果的不确定度评定 | (299) |
| 十六、1.0 级压力控制器设定点误差测量结果的不确定度评定 | (301) |
| 十七、0.2 级压力传感器输出电压测量结果的不确定度评定 | (304) |
| 十八、扭力天平示值误差测量结果的不确定度评定 | (307) |
| 十九、液体相对密度天平测量结果的不确定度评定 | (309) |
| 二十、谷物水分测定仪示值误差测量结果的不确定度评定 | (312) |
| 二十一、F ₁ 等级砝码折算质量值测量结果的不确定度评定 | (315) |
| 二十二、机械天平示值误差测量结果的不确定度评定 | (318) |
| 二十三、电子天平示值误差测量结果的不确定度评定 | (321) |
| 二十四、架盘天平示值误差测量结果的不确定度评定 | (324) |
| 二十五、金属维氏硬度计示值误差测量结果的不确定度评定 | (326) |
| 二十六、金属布氏硬度计示值误差测量结果的不确定度评定 | (330) |
| 二十七、金属肖氏硬度计示值误差测量结果的不确定度评定 | (335) |
| 二十八、显微硬度计示值误差测量结果的不确定度评定 | (338) |
| 二十九、拉力、压力和万能试验机示值误差测量结果的不确定度评定 | (343) |
| 三十、金属洛氏硬度计示值误差测量结果的不确定度评定 | (345) |
| 三十一、转速表示值误差测量结果的不确定度评定 | (349) |
| 三十二、扭矩扳子示值误差测量结果的不确定度评定 | (352) |
| 三十三、出租汽车计价器本机误差测量结果的不确定度评定 | (354) |
| 三十四、出租汽车计价器使用误差测量结果不确定度评定 | (357) |
| 三十五、二等标准酒精计示值误差测量结果的不确定度评定 | (361) |
| 三十六、酒精计示值误差测量结果的不确定度评定 | (364) |
| 三十七、密度计示值误差测量结果的不确定度评定 | (367) |
| 三十八、非自行指示秤示值误差测量结果不确定度的评定 | (369) |
| 三十九、数字指示秤示值误差测量结果不确定度的评定 | (373) |
| 四十、模拟指示秤示值误差测量结果的不确定度评定 | (377) |
| 四十一、重力式自动装料衡器装料偏差测量结果的不确定度评定 | (380) |
| 四十二、非连续累计自动秤示值误差测量结果的不确定度评定 | (383) |
| 四十三、连续累计自动秤示值误差测量结果的不确定度评定 | (385) |
| 四十四、M ₁ 等级砝码质量值测量结果的不确定度评定 | (387) |
| 四十五、二等标准金属量器测量结果不确定度的评定 | (390) |
| 四十六、三等标准金属量器测量结果不确定度的评定 | (396) |
| 四十七、定容式灌装机灌装量测量结果的不确定度评定 | (401) |
| 四十八、定重式灌装机灌装量测量结果的不确定度评定 | (404) |

| | |
|---|-------|
| 四十九、常用玻璃量器容量测量结果的不确定度评定 | (407) |
| 五十、二等标准玻璃量器容量测量结果不确定度评定 | (411) |
| 五十一、汽车油罐车容积测量结果的不确定度评定 | (415) |
| 五十二、液化石油气汽车槽车容积测量结果的不确定度评定 | (422) |
| 五十三、税控燃油加油机体积量示值误差测量结果的不确定度评定 | (428) |
| 五十四、膜式煤气表示值误差测量结果的不确定度评定 | (433) |
| 五十五、水表示值误差测量结果的不确定度评定 | (437) |
| 五十六、转子流量计示值误差测量结果的不确定度评定 | (440) |
| 五十七、气体腰轮流量计示值误差测量结果的不确定度评定 | (445) |
| 五十八、明渠堰槽流量计示值误差测量结果的不确定度评定 | (448) |
| 五十九、速度式流量计平均仪表系数测量结果不确定度评定 | (451) |
| 六十、速度式流量计示值误差测量结果不确定度评定 | (454) |
| 六十一、质量流量计示值误差测量结果不确定度评定 | (458) |
| 六十二、F ₂ 等级砝码质量值测量结果的不确定度评定 | (460) |

第一章

测量不确定度概述

第一节 测量不确定度的概念

一、测量不确定度的定义

测量不确定度定义为“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”。

“测量结果”是作为测量对象的特定量，应理解为被测量之值的最佳估计。它是指对观测结果或测得值进行恰当处理、修正或经过必要计算而得到的量值或报告值。在不会引起混淆的情况下，有时也将测得值或观测值称为测量结果。一般地说，观测值是指从一次观测中由显示器所得到的单一值，有时也称为测得值。

使用测量结果这一术语时，应说明它是示值、未修正测量结果或已修正测量结果，还应表明它是否是几个值的平均，亦即它是由单次观测所得还是由多次观测所得。若是对同一量的多次观测，则其算术平均值才是测量结果。必须注意，测量结果只是被测量值的近似值或估计值。

根据 JJF 1001—1998《通用计量术语及定义》和 JJF 1094—2002《测量仪器特性评定》，表 1—1—1 综合给出了测量结果的各种表示方式，包括使用测量仪器或实物量具时的表示方式。

表 1—1—1 测量结果的各种表示方式

| 测量结果表示方式 | 使用测量仪器时 | 使用实物量具时 |
|--|---|---|
| 测得值(参考值) | 示值 | 标称值 |
| 真值(约定真值) | 实际值 | 实际值 |
| 未修正测量结果 = 单个测得值或 = 多个测得值的算术平均值 | 未修正测量结果 = 单次测量的示值读数或 = 多次测量的示值算术平均值 | 未修正测量结果 = 单次测量的标称值读数 |
| 已修正测量结果 = 未修正测量结果 + 误差 = 未修正测量结果 - 修正值 = 未修正测量结果 × 修正因子 | 已修正测量结果 = 未修正测量结果 + 示值误差 = 未修正测量结果 - 偏差 = 未修正测量结果 × 校准因子 | 已修正测量结果 = 未修正测量结果 + 示值误差 = 未修正测量结果 - 偏差 = 未修正测量结果 × 校准因子 |

“被测量之值”广义而言是指被测量的真值。但是,真值是一个理想的概念,不可能被确切地知道。在 GUM 以及我国计量技术规范 JJF 1059—1999《测量不确定度评定与表示》中,为了区别于误差的概念,定义中既没有使用被测量的“真值”,也没有使用被测量的“约定真值”。所以在测量不确定度的定义中采用了“被测量之值”。

“合理地”是指测量应处于统计控制状态之下,即测量过程是受控的;已识别的系统效应应予以修正,修正不掉的贡献给了不确定度。

“分散性”是一个区间,是表示测量结果之间相互不一致程度的一个量,例如重复性、复现性,以及测量不确定度。重复条件下测量列按贝塞尔法计算得到的实验标准偏差 s 就是表示测量结果分散性的一个量。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。所以所有的不确定度分量都是指分散性,都是指一个区间。

二、测量不确定度的表示

测量不确定度用于定量表示测量结果的可靠程度,它是“说明了置信水准的区间的半宽度”。也就是说,测量不确定度需要用两个数来表示:一个是不确定度的大小,即置信区间;另一个是置信概率(或称置信水准、置信水平、置信系数),表明测量结果落在该区间有多大把握。

例如:测量人体温度为 37.2°C 或加或减 0.05°C ,置信概率为 99%。该结果可以表示为:

$$37.2^{\circ}\text{C} \pm 0.05^{\circ}\text{C}, \text{置信概率为 } 99\%$$

即体温在 37.15°C 到 37.25°C 之间,有 99% 的把握。对于测量而言,没有给定置信概率的不确定度是不完整的。

我们可以用图 1—1—1 来说明为什么需要给出置信概率。例如某测量结果服从正态分布,对于相同的标准偏差 $s = 1\%$,报告了①、②、③三种测量不确定度。①的置信区间是 $(-1\%, +1\%)$,置信概率 $p \approx 68\%$;②的置信区间是 $(-2\%, +2\%)$,置信概率 $p \approx 95\%$;③的置信区间是 $(-3\%, +3\%)$,置信概率 $p \approx 99\%$ 。如果报告测量不确定度时不说明置信概率,就有可能引起他人误解。

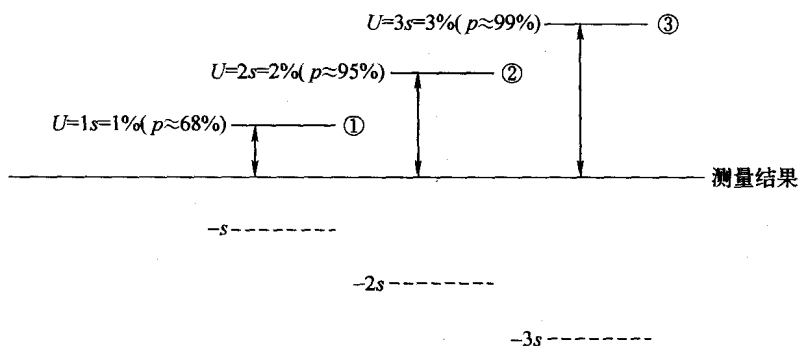


图 1—1—1 说明正确报告测量不确定度的示意图

规定测量不确定度为“说明了置信水准的区间的半宽度”,所以不确定度恒为正值。当由

方差得出时,取其正平方根。对于对称分布的不确定度,其上下区间相等;对于不对称分布的不确定度,其上下区间不等,但是区间半宽度都由上区间减下区间除以 2 给出。

三、测量不确定度在符合性判断中的应用

测量不确定度应用于诸多领域,以其在符合性判断中的应用为例,当数值处于规定的上、下限附近并要求作出符合性判断时,通过对不确定度的评定不仅可以定量地表示出测量水平的高低,而且可以降低误判的风险。

图 1—1—2 示意了测量不确定度在符合性判断中的应用;表 1—1—2 列出了测量结果合格与否的可能情况。

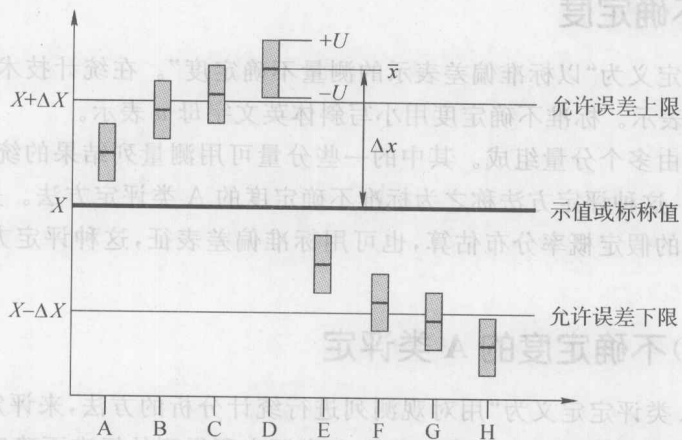


图 1—1—2 测量不确定度在符合性判断中的应用

图中: \bar{x} ——被测物品的测量结果;

Δx ——被测物品的示值误差, $\Delta x = X - \bar{x}$;

X ——被测物品的示值或标称值;

$\pm \Delta X$ ——规定的被测物品的允许误差限。

表 1—1—2 测量结果的可能情况

| | A | B | C | D | E | F | G | H |
|----|----|----------|----------|-----|----|----------|----------|-----|
| 结果 | 合格 | 合格 > 不合格 | 不合格 > 合格 | 不合格 | 合格 | 合格 > 不合格 | 不合格 > 合格 | 不合格 |

第二节 测量不确定度的构成和分类

一、测量不确定度的构成和分类

不确定度一词指可疑程度,广义而言,测量不确定度意味着对测量结果正确性的可疑程度。不带形容词的不确定度用于一般概念,当需要明确某一测量结果的不确定度时,要适当采

用一个形容词,比如合成标准不确定度或扩展不确定度;但不要用随机不确定度和系统不确定度这两个术语,必要时可用随机效应导致的不确定度和系统效应导致的不确定度。为此,可以用图 1—2—1 来说明测量不确定度的构成。

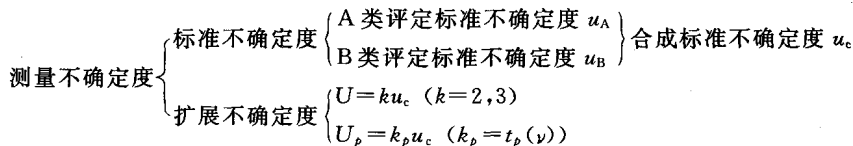


图 1—2—1 测量不确定度的构成

二、标准不确定度

标准不确定度定义为“以标准偏差表示的测量不确定度”。在统计技术中,标准偏差用小写斜体英文字母 s 表示。标准不确定度用小写斜体英文字母 u 表示。

测量不确定度由多个分量组成。其中的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,这种评定方法称之为标准不确定度的 A 类评定方法。另一些分量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,这种评定方法称之为 B 类评定方法。

三、(标准)不确定度的 A 类评定

不确定度的 A 类评定定义为“用对观测列进行统计分析的方法,来评定标准不确定度”,有时也称为 A 类不确定度评定。不确定度的 A 类评定所得到的标准不确定度分量称为 A 类不确定度分量,用符号 u_A 表示。也可以用相对不确定度 $u_{Arel} = \frac{u_A(x)}{|x|}$ ($x \neq 0$) 表示, x 是被测量 X 的最佳估计值。

四、(标准)不确定度的 B 类评定

不确定度的 B 类评定定义为“用不同于对观测列进行统计分析的方法,来评定标准不确定度”,有时也称为 B 类不确定度评定。不确定度的 B 类评定所得到的标准不确定度分量称为 B 类不确定度分量,用符号 u_B 表示。也可以用相对不确定度 $u_{Brel} = \frac{u_B(x)}{|x|}$ ($x \neq 0$) 表示, x 是被测量 X 的最佳估计值。

应当特别指出,不确定度评定的分类是按评定方法分为 A 类和 B 类,不是不确定度性质的分类,不管是 A 类还是 B 类评定方法,两者之间不存在本质上的区别。它们都是基于概率分布,并都是用方差或标准偏差来表征。因此,不能简单地把不确定度的 A 类评定对应于随机误差导致的不确定度,把不确定度的 B 类评定对应于系统误差导致的不确定度。如果需要区分不确定度的性质,可以用“由随机效应导致的不确定度分量”或“由系统效应导致的不确定度分量”这两种表述方式。它们并不表明不确定度是用什么方法评定的,也就是说,由系统效应引起的不确定度分类既可用 B 类评定方法也可以用 A 类评定方法得到。不确定度的性质和评定方法之间没有对应关系。A 类和 B 类分类的目的只是表明不确定度评定的两种方法,仅为讨论的方便而已。

五、合成标准不确定度

合成标准不确定度定义为“当测量结果是由若干个其他量的值求得时,按其他各量的方差或(和)协方差算得的标准不确定度”,它是测量结果标准差的估计值,用符号 u_c 表示。也可以用相对不确定度 $u_{\text{rel}} = \frac{u_c(y)}{|y|}$ ($y \neq 0$) 表示, y 是被测量 Y 的最佳估计值。

方差是标准偏差的平方,协方差是由相关性导致的方差。当两个被测量的估计值具有相同的不确定度来源,特别是受到相同的系统误差效应的影响时(例如使用了同一台测量设备),两者之间就存在相关性。如果改变其中一个量,使得两个量的变化方向相同(同时增大或同时减小)称为正相关;如果两个量的变化方向相反(一个增大另一个就减小或一个减小另一个则增大)则称为负相关。由这种相关性所导致的方差称为协方差。显然,考虑协方差后将影响合成标准不确定度。

人们可以通过改变测量程序或者通过变量的变换来消除相关性。

六、扩展不确定度

在实际使用中,往往需要知道测量结果的置信区间。因此,规定不确定度可以用诸如标准偏差或其倍数或者说明了置信概率的区间的半宽度来表示。例如,如果用二倍标准偏差表示服从正态分布的测量结果的不确定度,其置信概率约为 95%,用三倍标准偏差表示的测量不确定度,其置信概率约为 99%。究竟用几倍标准偏差来表示测量结果的不确定度,应根据要求的置信概率来合理地赋予。

扩展标准不确定度定义为“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含于此区间”,扩展不确定度有时也称为展伸不确定度或范围不确定度。实际上,扩展不确定度是用合成标准不确定度的倍数表示的不确定度,通常用大写斜体英文字母 U 表示。也可以用相对不确定度 $U_{\text{rel}} = \frac{U}{|y|}$ ($y \neq 0$) 表示, y 是被测量 Y 的测量结果。

【例 1】 如果某被测量 X 的测量结果 x 的扩展不确定度 $U = 2u_c$, 则表明置信区间为 $(x - 2u_c, x + 2u_c)$, 测量结果 x 以大约 95% 的置信概率落在该区间内。如果测量结果 x 的扩展不确定度 $U = 3u_c$, 则表明置信区间为 $(x - 3u_c, x + 3u_c)$, 测量结果 x 以大约 99% 的置信概率落在该区间内。

在这里需要特别指出,在测量不确定度评定中,有关量的符号建议采用 GUM 中规定的符号,不要随意定义,以免引起他人误解。

七、包含因子

包含因子定义为“为求得扩展不确定度,对合成标准不确定度所乘之数字因子”,有时也称为覆盖因子。包含因子等于扩展不确定度与标准不确定度之比,其取值决定于扩展不确定度的置信概率。如图 1-2-1 所示,扩展不确定度有 U 与 U_p 两种表示方法,包含因子也有 k 与 k_p 两种表示方法。它们在称呼上并无区别,但在使用时, k 一般取 2 或 3; k_p 则为给定置信概率所要求的数字因子。在被测量估计值接近于正态分布的情况下, k_p 是 t 分布(学生氏分布)中的临界值 $t_p(\nu)$ 。在评定扩展不确定度 U_p 时,已知包含因子 k_p 和自由度 ν , 即可查 t 分布临界