

不确定度及其实践

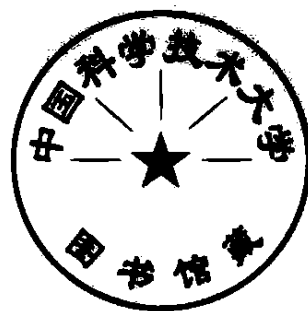
Uncertainty and Its Practice

刘智敏 著

中国标准出版社

不确定度及其实践

○ 刘智敏 著
○ 欧阳俊 审



中国标准出版社

图书在版编目(CIP)数据

不确定度及其实践/刘智敏著. —北京:中国标准出版社,1999.12

ISBN 7-5066-2028-6

I. 不... II. 刘... III. 不确定度 IV. O177.91

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 49130 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:68522112

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

版权专有 不得翻印

*

开本 850×1168 1/32 印张 17 $\frac{5}{8}$ 字数 485 千字

2000 年 6 月第一版 2000 年 6 月第一次印刷

*

印数 1—2 000 定价 48.00 元

前 言

不确定度是一门基础学科,它在科学技术、生产、商业贸易、医疗、环保等方面有广泛应用,在技术监督中有重要应用。

20 世纪初开始注意到不确定度,随着不确定度重要性的突出,1970 年国际计量局开始提出了不确定度建议,1986 年由国际标准化组织、国际电工委员会、国际计量委员会、国际法制计量组织成立了国际不确定度工作组,著者为不确定度工作组成员。工作组对不确定度进行了系统研究,1993 年提出了《测量不确定度表示指南》,该指南得到了上述四个组织和国际理论与应用化学联合会、国际理论与应用物理联合会、国际临床化学联合会的批准。现在该指南已在各国得到了广泛应用。

为了研究不确定度理论及其应用,国家自然科学基金委员会先后建立了研究项目“不确定度原理”和“现代不确定度方法与应用”,著者为两项目负责人,对不确定度及其应用作了系统研究。

本书根据国际《测量不确定度表示指南》,在我国国家自然科学基金研究项目基础上写成。全书系统分析了不确定度的基础和原理,详细研究了各种不确定度方法,最后对不确定度在数据处理、测量、质量监督、认可认证、信息熵、实验设计等方面的应用作了介绍。本书取材先进新颖,内容完整实用,为一本对不确定度及其应用的系统专著,望能有助于读者。

国际不确定度工作组 成员

刘智敏

1999 年 11 月

第一篇

不确定度基础与原理



1.1 不确定度的重要性

1.1.1 不确定度的基本意义

不确定度对人们认识自然与改造自然极为重要^[1~9]。

人类从学会使用劳动工具改造环境之时起,很早就开始了测量。远古时代,人们为安排农作、狩猎、交换粮食和贵重物品,就在进行时间、距离、面积、体积和重量的测量。测量就有不确定度,随着社会生产、交换的发展和科学技术的进步,测量范围不断扩大,测量不确定度愈来愈小。

现在,在科学技术中,在生产、商业、贸易、医疗、环保等等中,进行着大量的测量工作,用以认识事物。测量的质量如何,要用不确定度来说明。不确定度愈小,测量结果的质量愈高,水平愈高,其使用价值也愈高;不确定度愈大,测量结果的质量愈低,水平愈低,其使用价值也愈低。

测量不确定度必须正确评定。不确定度评定过大,会因测量不能满足需要而再投资,造成浪费;不确定度评定过小,会对生产与国防造成危害。如我国石油每年出口以千万吨计,不确定度评定不当,则输出石油过多会亏损并增加运费,过少也会赔偿,从而会造成巨大的损失。医疗设备仪表不确定度不可靠,就会使人体承受过大或过小的药量或放射剂量,量过大造成伤亡,量过小不能治病。在航空航天系统中,频率不确定度不可靠会使导航失去联系,燃料重量不确定度不可靠会使卫星或火箭发射因推力不足而失败。

1.1.2 不确定度在技术监督中意义^[1~8]

不确定度与计量科学技术密切相关。不确定度用以表明基准标准、检定测试、校准的水平,作为量值溯源的依据,并用来表明测量设备的质量,测量过程控制所用的计量保证,就是要保证经过验证的测量不确定度要尽可能小,以满足计量校准或计量检测的要求。

在质量管理和质量保证中,不确定度极为重要。ISO 9001《质量体系——设计/开发、生产、安装和服务的质量保证模式》(Quality Systems——Model for Quality Assurance in Design/Development, Production, Installation and Servicing)中规定,使用时,应保证所用设备的不确定度已知。

在 ISO/IEC Guide 25《校准实验室和测试实验室能力的通用要求》(General Requirements for the Competence of Calibration and Testing Laboratory)中指出,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。在 ISO/IEC Guide 43《利用实验室间比对的能力验证》(Proficiency Testing by Interlaboratory Comparisons)中,多处指明不确定度的重要性;如 A.2 中说,协调者应考虑各参加实验室的不确定度,6.5 中说,试验计划报告应包含不确定度,A.16 中说,协调者按照不确定度承认指定值等。

很多标准涉及生产、测量,都须讨论不确定度。如 ISO 5168 研究流量测量不确定度,ISO 14253 讨论几何量产品测量不确定度等等。

1.2 不确定度进程

1.2.1 不确定度名称与历史

不确定度名称如下:

英文: Uncertainty

法文: Incertitude

德文: Unsicherheiten

俄文: Неопределённость

日文: 不確かさ

不确定度进程较长^{[1][9][10~22]}。

400年前,德国天文学家开普勒(Kepler)籍助于已校准仪器进行天文测量,得以发现行星运动规律,从测量结果比较中,他知道轨道测量中有不确定度^[23]。

200年前,工业发展推动了精确测量的发展,机械工具、汽轮机、枪等维修时的零件互换要求考虑制造的允差,并要求仔细考虑测量工具不能精确测量引起的测量不确定度。

1927年,海森伯(Heisenberg)提出了不确定度关系(Uncertainty Relation),又称测不准关系。在量子力学中,测不准关系指对A、B测量时

$$\overline{(A - \bar{A})^2} \cdot \overline{(B - \bar{B})^2} \geq \frac{h^2}{16\pi} (\bar{C})^2$$

而 \bar{A} 、 \bar{B} 、 \bar{C} 为量A、B、C的平均, h 为普朗克(Planck)常数。

上式以标准差表示为

$$\sigma_A^2 \cdot \sigma_B^2 \geq \frac{h^2}{16\pi} (\bar{C})^2$$

以坐标 x 、动量 p 为例,不确定度关系为

$$\sigma_x^2 \cdot \sigma_p^2 \geq \frac{h^2}{16\pi}$$

上式表明,在任何情况下对 x 、 p 测量,两者的标准差 σ_x 、 σ_p 都小是不可能的,即两者所得值都离平均值很近是不可能的,一个量越接近平均值,则另一个量越远离平均值。

1.2.2 不确定度的发展^[24~41]

1953年,比尔斯(Beers)在《误差理论导引》(Introduction to the Theory of Error)书中指明:当我们给出实验误差为

$\pm 0.000\ 009 \times 10^{-10}$ 时,它实际上是以标准差等表示的估计实验不确定度。

1970年前后,一些计量学者和其他领域学者,逐渐使用不确定度一词。

1963年,美国标准局(NBS)埃森哈特(Eisenhart)在《仪器校准系统的精密度与准确度估计》一文中,提出了使用不确定度的建议。

1970年,英国校准机构(British Calibration Service)迪特里希(Dietrich)在《不确定度、校准和概率》(Uncertainty, Calibration and Probability)一书中谈到:“测量不确定度为一组测量的平均值任何一边的范围,当作了很大数目测量时,读数的给定部分位于该范围内。”

1973年,英国国家物理实验室(NPL)的伯恩斯(Burns)、坎皮恩(Campion)、威廉斯(Williams)在国际计量刊物 Metrologia Vol. 9 No. 2《误差和不确定度》(Error and Uncertainty)一文指出,当讨论结果 accuracy 时,宜用不确定度,并又谈到,说测量结果误差为 $\pm 1\%$,实际上是指测量结果的不确定度。

1978年,霍恩比(Hornby)等所编《现代高级英汉双解词典》(The Advanced Learner's Dictionary, English-English-Chinese)指出:“不确定度(Uncertainty)为变化、不可靠、不确知、不确定。”

1978年,美国标准局局长安布勒(Ambler)提请国际计量委员会(CIPM)注意不确定度问题的重要性。

1978年5月,国际计量局(BIPM)发出不确定度征求意见稿。1980年,国际计量局召开会议,讨论了各国及国际专业组织意见,得出了结论,提出了实验不确定度表示建议书 INC-1(1980)。

INC-1 内容为如下 5 条:

1) 测量结果的不确定度一般包含若干分量,按其数值评定的方法,这些分量可归入两类:

A 类:用统计方法计算的那些分量;

B 类:用其他方法计算的那些分量;

A类和B类和以前用的“随机”和“系统”不确定度不一定存在简单的对应关系，“系统”不确定度这个术语可以引起误解，应避免使用。

任何详细的不确定度报告应该有各分量的完整清单，每个分量应详细说明其数值获得的方法。

2) A类分量用估计方差 s_i^2 (或估计标准差 s_i)、自由度 ν_i 表征。必要时，应给出估计协方差。

3) B类分量用量 u_j^2 表征。可以认为 u_j^2 是假设存在的相应方差的近似，像方差那样去处理 u_j^2 ，并像标准差那样去处理 u_j 。必要时，用相似方法处理协方差。

4) 用对方差合成的通常方法，可以得到表征合成不确定度的数值，应以“标准差”形式表示合成不确定度及其分量。

5) 对特殊用途，若须将合成不确定度乘以一个因子以获得总不确定度时，必须说明此因子的数值。

1981年，国际计量委员会第70届会议，提出了建议书1(CI-1981)《实验不确定度的表示》。建议书1(CI-1981)指出，考虑到找出一个可同意的表示不确定度方法的必要性，认识到INC-1可以作为最后同意的基础。

1986年，国际计量委员会第75届会议，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》。此建议书决定推广INC-1。并认识到INC-1第5条关系到实际应用，特别是有商业意义的应用，并要求在CIPM及咨询委员会赞助的国际比较及其他工作给出的工作中，所有参与者用INC-1第4条给出以一倍标准差表示的A类B类不确定度的合成不确定度。

1985年，中国计量科学研究院制定了《不确定度应用办法》，指出应按INC-1评定不确定度。

1985年，德国由联邦物理技术研究院(PTB)制订了DIN 1319 Teil 4《测量评定的不确定度处理》(Behandlung von Unsicherheiten bei der Auswertung von Messungen)。

1986年,由国际标准化组织(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)组成了国际不确定度工作组,负责制定用于计量、标准、质量、认证、科研、生产中的不确定度指南,我国代表刘智敏研究员为国际不确定度工作组成员。

国际不确定度工作组经多年研究、讨论,并广泛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 to the Expression of Uncertainty in Measurement)(简称指南 GUM),指南得到了 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。国际不确定度工作组制定的 GUM 是国际组织的重要权威文献。

GUM 含如下内容:

0. 引言;
1. 范围;
2. 定义:阐述不确定度定义及术语;
3. 基本概念:讨论测量、误差、效应、修正,不确定度分析、实际考虑;
4. 评定标准不确定度:测量模型化,标准不确定度的 A 类评定和 B 类评定,示例;
5. 确定合成标准不确定度:无关输入量,相关输入量;
6. 确定展伸不确定度:引言,展伸不确定度,选择包含因子;
7. 不确定度的报告:一般原则,专门准则;
8. 不确定度评定与表示程序汇总。

并有附录:A. 建议书 INC-1,1(CI-1981),1(CI-1986);B. 通用计量术语;C. 基本统计术语和概念;D. 真值、误差和不确定度;E. 建议书 INC-1 的动机和基础;F. 评定不确定度分量的实际指示;G. 自由度和置信水准;H. 例及符号、文献、索引。

GUM 自 1993 年出版以来,得到广泛应用和发行,1995 年勘

误后又再重印。

GUM 已被译成中文、法文、德文,正被译成俄文、日文、意大利文、匈牙利文、爱沙尼亚文。

美国标准与技术研究院(NIST)于 1992 年制定了基于 GUM 的不确定度方针,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》(Guidelines for Evaluating and Expressing the Uncertainty of NIST Measurement Results)(NIST TN 1297),所有 NIST 报告均以它为依据。美国国家实验室自愿认可计划(NVLAP)要求遵循 GUM。美国国家标准实验室会议(NCSL)制定了 RP-12《测量不确定度的确定和报告》(Determining and Reporting Measurement Uncertainties),它以 GUM 为基础,分发到上千个单位使用。GUM 方法在美国工业部门也得到了应用,如美国国家标准会(ANSI)/美国机械工程学会(ASME)PTC 19.1—1985《测量不确定度(Measurement Uncertainty)》已靠拢 GUM;美国检测与材料协会(ASTM)E 1707—95《放射过程剂量测量中评定不确定度的标准指南》(Standard Guide for Estimating Uncertainties in Dosimetry for Radiation Processing)与 GUM 一致。

1997 年美国 ANSI/NCSL 发布了美国不确定度表示的国家标准《美国测量不确定度表示指南》(U. S. Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement),全部采用 GUM。

欧洲实验室认证合作体(EAL,它于 1994 年由西欧校准合作体 WECC 和西欧实验室认证会议 WELAC 合并而成)已把 GUM 方法用于数千个认证、校准和测试实验室,WECC 文件 19-1990 早已与 GUM 一致。欧洲计量标准合作体(EUROMET)于 1992 年已用 GUM 方法。欧洲测试组织(EUROLAB)基于 GUM 制定了文件。欧洲化学分析中心(EURACHEM)1995 年基于 GUM 发布了指导文件。西欧法制计量组织(WELMEC)按 OIML 要求已使用 GUM。

英国标准研究院(BSI)将 GUM 作为通用文件(Public Document)6461 Part 3 于 1995 年发表。

加拿大国家研究委员会(NEC)已使用 GUM。北美欧洲标准协作体(NORAMET)、北美校准合作体(NACC)也采用 GUM。

韩国标准和科学研究院(Korea Research Institute of Standards and Science, KRIS)采用 GUM,于 1998 年制定了《KRIS 测量不确定度表示指南》(KRIS Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement)。

新加坡实验室认证体(SINGLAS)于 1994 年在校准测试实验中采用 GUM。英国国家实验室认可委员会(NAMAS)于 1995 年公布了 NIS 3003 第八版《校准测量中不确定度与信任度表示》(The Expression of Uncertainty and Confidence in Measurement for Calibrations),遵循 GUM,1994 年公布的 NIS 80 第一版《检测中不确定度表示指南》(Guide to the Expression of Uncertainty in Testing),1994 年公布的 NIS 81 第一版《电磁兼容中不确定度处理》(The Treatment of Uncertainty in EMC Measurements),都遵循 GUM。

1997 年,欧洲 EAL 制定了与 GUM 一致的《校准中测量不确定度的表示》(Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration)。

国际实验室认可合作组织(ILAC)批准了 GUM。

国际结晶学联合会(IUCr)于 1994 年采用 GUM 以表达结晶测量不确定度。国际航空发展咨询组(AGARD)在风洞测量中采用 GUM。

中国计量科学研究院于 1996 年制订了《测量不确定度规范》。

ISO 技术局已将 GUM 作为 ISO/IEC 国际标准起草和提出时应执行的方针文件。

目前 GUM 在全世界的执行已推动不确定度达到了最新水平,它是不确定度及其应用的基础。

1.3 基本术语和有关术语

1.3.1 基本术语^{[1][7][42~49]}

1.3.1.1 〔测量〕不确定度(uncertainty〔of measurement〕)

用以表征合理赋予被测量的值的分散性,它是测量结果含有的一个参数。

注:方括号内的词表示可省去或不省去,后同。

1.3.1.2 标准不确定度(standard uncertainty)

以标准差表示的测量结果不确定度。

标准不确定度记为 u 。

1.3.1.3 〔不确定度的〕A类评定(Type A evaluation〔of uncertainty〕)

由观测列统计分析所作的 uncertainty 评定。

1.3.1.4 〔不确定度的〕B类评定(Type B evaluation〔of uncertainty〕)

由不同于观测列统计分析所作的 uncertainty 评定。

1.3.1.5 合成标准不确定度(combined standard uncertainty)

测量结果由其他量值得来时,按其他量的方差或协方差算出的测量结果的标准不确定度。

测量结果 y 的合成标准不确定度记为 $u_c(y)$,也简写为 u_c 或 $u(y)$ 。

1.3.1.6 展伸不确定度也称范围不确定度、扩展不确定度(expanded uncertainty)

确定测量结果区间的量,合理赋予被测量之值的分布的大部分可望含于该区间。

展伸不确定度记为 U 。

在 INC-1 中,展伸不确定度曾称为总不确定度(overall uncertainty)。

1.3.1.7 包含因子,也称范围因子(coverage factor)

为获得展伸不确定度,对合成标准不确定度所乘的数值。

包含因子记为 k 。

1.3.1.8 自由度(degrees of freedom)

求不确定度所用总和中的项数与总和的限制条件数之差。

自由度记为 ν 。

1.3.1.9 置信水准,也称包含概率、置信概率(level of confidence)

展伸不确定度确定的测量结果区间,包含合理赋予被测量值的分布的概率。

置信水准记为 p 。

1.3.1.10 相对不确定度(relative uncertainty)

不确定度除以测量结果 y 的绝对值(设 $|y| \neq 0$)。

相对不确定度有相对合成标准不确定度 $u'_c(y) = u_c(y)/|y|$ (也记为 $u_{c,r}$), 相对展伸不确定度 $U' = U/|y|$ (也记为 U_r)。

1.3.2 有关术语^{[9][15][16][42][50~54]}

1.3.2.1 [测量]误差与不确定度

[测量]误差(error[of measurement])为测量结果减被测量的真值。

如三角形内角和测量结果为 $180^\circ 00' 03''$, 因被测量的真值为 180° , 故

$$\text{误差} = 180^\circ 00' 03'' - 180^\circ = 3''$$

当知道被测量的真值时,才知道误差。

在实际工作中,正是由于不知道被测量的真值,所以才去进行测量,故误差经常是不知道的。

我们知道,真值是一个理想概念,按其本性说来,真值是不能测定的。实际上,量子效应的存在排除了唯一真值的存在。

现在,不确定度用表征合理赋予被测量的值的分散性定义。不确定度曾用“表征被测量真值所处量值范围的评定”等与误差相连的内容定义。但由于误差是一理想概念,不便操作,而分散性可用贝塞尔公式等计算,故不确定度用分散性定义是合适的。

过去常评定的测量误差,实际上是指测量不能肯定的程度,故

实际为不确定度。过去评定误差为标准差等于多少,应改为标准不确定度等于多少,过去评定误差为三倍标准差等于多少,应改为展伸不确定度(包含因子 $k=3$)等于多少。

1.3.2.2 准确度

测量准确度(accuracy of measurement)是测量结果与被测量真值之间的一致程度。

因测量准确度与真值相连,真值是一理想概念,故测量准确度也是一理想概念。

准确度是一定性概念,不是定量概念,定量表示宜用不确定度。

如有甲、乙两台设备,可以说甲设备相对展伸不确定度为1%,乙设备相对展伸不确定度为0.1%,不能说甲设备测量准确度为1%,乙设备测量准确度为0.1%,因1%大于0.1%,即甲设备准确度高于乙设备准确度。这恰与事实相反。为改正这一缺陷,历史上,曾说准确度为相对不确定度的倒数,即说甲设备测量准确度为 $(1\%)^{-1}=100$,乙设备测量准确度为 $(0.1\%)^{-1}=1\ 000$;也曾说准确度为 $1-(\text{相对不确定度})$,即说甲设备测量准确度为 $1-1\%=99\%$,乙设备测量准确度为 $1-0.1\%=99.9\%$,但并未取得一致意见。

可见,准确度不能与数字相连,因准确度是一定性概念,只能说准确度高与低。与数字相连应使用不确定度。如上例,我们可以说,甲设备测量准确度低,其相对展伸不确定度为1%,乙设备测量准确度高,其相对展伸不确定度为0.1%。

有人想用不准确度一词以解决上述问题,但过多名词只会导致混乱,故美国 NIST 指出,为避免混乱及未定义术语的乱用,不用“不准确度”。

测量器具的准确度是测量器具给出接近于真值的响应的能力。

测量器具准确度是一定性名词,其定量表示宜用不确定度。

测量器具不确定度为在规定条件下,测量器具使用于测量时