

Excel

在测量不确定度评定中的应用及实例

主 编 范巧成

副主编 田 静 徐雁东 宋 韬 邢成岗



中国质检出版社
中国标准出版社

Excel 在测量不确定度评定中的 应用及实例

主 编 范巧成

副主编 田静 徐雁东 宋韬 邢成岗

中国质检出版社

中国标准出版社

北京

图书在版编目(CIP)数据

Excel 在测量不确定度评定中的应用及实例/范巧成主编.

—北京:中国质检出版社,2013.4

ISBN 978-7-5026-3677-7

I. ①E… II. ①范… III. ①表处理软件—应用—计量检测 IV. ①TB9-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 228633 号

内 容 提 要

本书主要介绍了测量不确定度评定方法及其简化处理,测量不确定度在符合性评定中的作用,CNAS对测量不确定度的要求,与测量不确定度评定应用有关的 Excel 基本知识,Excel 在测量不确定度评定中的应用原理和各种电子表格的设计方法。按照本书提出的原理,给出了校准和检测两部分应用实例,在实例的选择上注重了专业的代表性,或是一些测量模型相对复杂,用传统方法评定有一定困难的实例,目的是介绍并引导大家使用这种方法,达到对测量不确定度的简化评定,能够方便快捷地给出每一个校准/检测结果的不确定度。同时也可用于校准和测量能力的计算,能够快速准确地回答实验室认可或计量标准考核过程中以及客户提出的有关测量不确定度评定问题。

本书可供所有需要进行测量不确定度评定的测量领域,特别是申请认可和已获认可的校准或检测实验室借鉴和参考,也可作为有关院校学习测量不确定度的参考书。

中国质检出版社 出版发行
中国标准出版社

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 787×1092 1/16 印张 10.5 字数 239 千字

2013 年 4 月第一版 2013 年 4 月第一次印刷

*

定价 38.00 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

中国合格评定国家认可委员会(英文缩写:CNAS)在校准和测量能力(CMC)的表述,以及实验室出具的证书或报告中对不确定度的表达提出了更高的要求,对校准实验室,必须给出每一个测量结果的不确定度。编者就近几年对测量不确定度评定与表示的理解,以及对使用 Excel 电子表格辅助不确定度评定的探索和研究,在 2003 年编著出版的《Excel 在测量不确定度评定中的应用》基础上,编写了这本《Excel 在测量不确定度评定中的应用及实例》。

与原版相比,本书主要增加了测量不确定度的评定(已包含部分 JJF 1059.1 的内容),评定中可能采用的简化途径和方法,CNAS 对测量不确定度的要求,保护电子表格的设置方法等内容,删除和增加了部分校准和检测应用实例。与原版的实例相比在评定上更为简化,输出量分布的估计和扩展不确定度的评定更为合理,对 Excel 电子表格的阅读更加直观。

在测量不确定度评定中采用 Excel 电子表格软件来辅助计算,是因为它比使用计算器和其他软件更直观,更具有优势。同时用它代替不确定度汇总表,只要制作出一个典型值的电子表格,就可以复制出 n 个计算其他值的工作表,便于演算以及日后的检查和追溯。同样,有了一个实例的电子表格,类似实例可以非常方便地复制修改。另外,有些表格具有普遍适用性,例如实例 5.1~5.5,这些实例多参照参考文献 16 中的相关实例改写,相比之下本书应用 Excel 的程度更彻底,无需先将每个输入量的标准不确定度计算出来,再使用 Excel 来合成。

本书由山东电力集团公司电力科学研究院(山东电力研究院)范巧成、山东大学物理学院田静、中国计量学院徐雁东、山东省计量科学研究院宋韬、山东电力集团公司日照供电公司邢成岗共同编著完成。在编写过程中,得到了李慎安老师和席德熊老师的精心指导和帮助,中国质检出版社朱和平主任和黄洁主任对书的出版给予了热情的帮助,在此表示衷心感谢!

本书编制的所有 Excel 电子表格可无偿提供给读者参考,望能起到抛砖引玉的作用。

由于学识有限,书中可能存在一些不足,敬请批评指正。

编 者
2012 年 6 月

原版序言

测量不确定度是与测量结果相联系的参数。严格地说，无论校准实验室还是检测实验室，只要给出一个测量结果就应附以一个不确定度，以表示测量结果的质量。

对校准实验室，这个要求是理所应当的，因为用户要根据校准证书给出的示值误差以及该误差的不确定度，去评定它往下传递量值时的测量结果的不确定度。目前，国外校准实验室出具的校准证书确实是按此要求做的，国内的校准实验室也正在朝此目标努力。对检测实验室，当不确定度与检测结果的应用或有效性有关、或用户有要求，特别当不确定度影响到对标准或规范限值的符合性时，也应在检测报告上给出有关不确定度的信息，这种信息当然也应该是有一个检测结果就对应一个不确定度。

然而，要做到测量结果和不确定度一一对应，计算工作量很大而且容易出错。很多检测和校准人员就是因为怕麻烦，明知测量结果不确定度是要计及被校或被检样品的性能、状态以及它和装置的适配关系的，仍然笼统地提供整套校准或检测装置的不确定度，甚至给出自己也说不明白对应哪个量程的信息。

本书介绍的利用 Excel 电子表格处理测量结果的不确定度的方法可使问题迎刃而解。Excel 是人们经常使用的电子表格软件，用它进行涉及不确定度的有关信息处理，简单易行，值得推荐，希望广大校准和检测工作者尝试应用，定会收到事半功倍的实效。

中国计量科学研究院研究员 席德熊

2003年6月

原版前言

为了满足 ISO/IEC17025 和中国实验室国家认可委员会认可规则文件 CNAL/AR11:2003《测量不确定度政策》的要求以及各校准、检测实验室对测量不确定度评定的需求,帮助大家快捷地给出每一个校准、检测结果的测量不确定度,笔者就近两年对测量不确定度评定与表示的理解,以及对使用 Excel 电子表格辅助不确定度评定的探索和研究,编写了这本《Excel 在测量不确定度评定中的应用》。

本书主要介绍了测量不确定度评定的意义与表示,与不确定度评定应用有关的 Excel 基本知识,Excel 在测量不确定度评定中的应用原理和各种电子表格的设计方法,给出的应用实例分为校准和检测两部分。本书给出的实例为一些典型的和相对复杂的 Excel 应用实例,目的是介绍这种方法,引导大家使用这种方法,达到简化评定的目的。例如,实例 5.8 是相当复杂的,共有 10 个输入量 14 个计算公式,使用该方法后却变得十分简便。若某测量结果的不确定度随被测量的大小不同而不同,此时就可以根据测量模型的形式和具体的测量条件,将各不确定度分量汇总为一个 Excel 表格,利用它的计算功能来实现测量结果的合成标准不确定度及其有效自由度和扩展不确定度的计算,甚至将变化的不确定度分量与测量结果联系起来,输入不同的测量结果,即可快捷地得到最终测量结果的合成标准不确定度及其有效自由度和扩展不确定度,使给出每一个测量结果的不确定度变得简单易行,从而推动测量不确定度的评定和应用。

另外,通过设计好的 Excel 电子表格,可方便地改变某个不确定度分量的大小,来看合成标准不确定度或扩展不确定度的变化,据此可以获得在满足测量不确定度要求的情况下,如何去选择所用设备的准确度或不确定度,以及对环境条件的要求等,从而做到对测量系统的运作及测量方法的充分了解,为改进测量程序和准确度,以及对测量的哪些方面加以注意提供依据。

本书阐述的方法适用于所有需要进行测量不确定度评定的检测和校准工作。

本书由国家质量监督检验检疫总局教授级高级工程师, JJF 1059—1999 主要起草人李慎安(已离休)老师担任主审工作。在编写过程中,中国计量科学研究院研究员席德熊老师给予了热情帮助和指导,同时还得到了山东省疾病预防控制中心张霞、辽宁鲅鱼圈出入境检验检疫局郑江、山东省计量科学研究所纪建英以及编者所在单位山东电力研究院娄爱中、张杏梅等诸位专家的帮助和建议,在此表示衷心感谢!

由于时间仓促,加之学识有限,书中可能存在不少缺点错误,敬请批评指正。

编者

2003 年 6 月

本书主编简介

范巧成 1992年毕业于中国计量学院，同年进入山东电力研究院计量中心工作。现为高级工程师、副教授，山东电力集团公司高级专业技术人才，山东电力研究院专业首席工程师，中国合格评定国家认可委员会实验室认可评审员，全国电磁计量技术委员会直流和安规仪器工作组成员，中国计量测试学会高级会员，《电测与仪表》和《计量技术》杂志审稿人。

主持起草了国家计量检定规程、电力行业标准和国家电网公司企业标准各一部，编著、主编《Excel 在测量不确定度评定中的应用》、《测量不确定度评定的简化方法与应用实例》和《计量基础知识》等专著，副主编、参编其他专著五部，发表论文三十余篇。

E-mail: fanqiaocheng1999@sina.com。

目 录

| | |
|---|----|
| 1 测量不确定度评定 | 1 |
| 1.1 测量不确定度概述 | 1 |
| 1.2 测量不确定度的来源和测量模型 | 3 |
| 1.3 标准不确定度的评定 | 8 |
| 1.4 合成标准不确定度的评定 | 20 |
| 1.5 自由度 | 24 |
| 1.6 扩展不确定度的评定 | 29 |
| 1.7 测量结果的不确定度表示 | 36 |
| 1.8 测量不确定度评定的简化途径和方法 | 38 |
| 1.9 测量不确定度在符合性评定中的作用 | 40 |
| 1.10 CNAS 对测量不确定度的要求 | 44 |
| 2 Excel 知识概述 | 47 |
| 2.1 Excel 的工作窗口 | 47 |
| 2.2 基本操作 | 48 |
| 2.3 编辑工作表 | 51 |
| 2.4 工作表的格式 | 52 |
| 2.5 公式和函数的使用 | 54 |
| 2.6 在 Word 文档下插入 Excel 电子表格 | 57 |
| 2.7 Excel 电子表格中单元格的保护 | 58 |
| 3 Excel 在测量不确定度评定中的应用 | 59 |
| 3.1 Excel 在合并样本标准差计算中的应用 | 59 |
| 3.2 应用 Excel 计算合成标准不确定度及其有效自由度的原理 | 64 |
| 3.3 Excel 在线性最小二乘法校准的不确定度评定中的应用 | 77 |
| 3.4 应用 Excel 进行测量不确定度评定的步骤 | 80 |
| 4 校准结果不确定度评定的 Excel 应用实例 | 83 |
| 4.1 电能表示值误差测量结果的不确定度评定 | 83 |
| 4.2 数字多用表示值误差测量结果的不确定度评定 | 87 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 4.3 | 直流电阻箱示值误差测量结果的不确定度评定(数表法) | 92 |
| 4.4 | 直流高压高值电阻器阻值测量结果的不确定度评定 | 97 |
| 4.5 | 标准电阻阻值测量结果的不确定度评定 | 100 |
| 4.6 | 精密压力表示值误差测量结果的不确定度评定 | 102 |
| 4.7 | 0.05 级数字压力计示值误差测量结果的不确定度评定 | 105 |
| 4.8 | 二等标准铂铑 10-铂热电偶热电动势分度测量结果的不确定度评定 | 107 |
| 4.9 | 直流低阻表示值误差测量结果的不确定度评定 | 111 |
| 4.10 | (0.5~100)mm 3 等量块中心长度测量结果的不确定度评定 | 113 |
| 4.11 | 模拟式磁通表示值误差测量结果的不确定度评定 | 117 |
| 4.12 | F ₂ 等(级)标准砝码质量测量结果的不确定度评定 | 120 |
| 4.13 | 标准玻璃量器容量衡量法测量结果的不确定度评定 | 122 |
| 5 | 检测结果不确定度评定的 Excel 应用实例 | 127 |
| 5.1 | 校准标准溶液的制备结果的不确定度评定 | 127 |
| 5.2 | 标准溶液浓度稀释结果的不确定度评定 | 131 |
| 5.3 | 氢氧化钠溶液浓度标定结果的不确定度评定 | 133 |
| 5.4 | 酸碱滴定结果的不确定度评定 | 136 |
| 5.5 | 用原子吸收光谱法测定陶制品中镉溶出量的测量不确定度评定 | 139 |
| 5.6 | 生活饮用水中总硬度测量结果的不确定度评定 | 144 |
| 5.7 | 聚氯乙烯树脂溶液粘数测量结果的不确定度评定 | 147 |
| 5.8 | 轻质燃料油总酸值测量结果的不确定度评定 | 149 |
| 5.9 | 冷气机性能试验结果测量不确定度评定 | 151 |
| | 参考文献 | 160 |

1 测量不确定度评定

1.1 测量不确定度概述

测量误差的最新定义是测得的量值减去参考量值。以前的定义是测量结果与被测量的真值之间的差。总之，误差应该是一个确定的值，即其大小和符号都是确定的。真值通常无法知道，对于测量仪器的示值误差，我们可以采用更高准确度的计量标准的量值来获得测量仪器示值误差的估计值，这时取其负值就成为修正值。当对测量结果作了修正后，仍有随机效应和不能确定的系统效应导致的误差存在，也就是说数据经过已知的修正值修正后还剩有误差，这些误差是不确定的，须分析其诸因素，估算其各分量，最终给出一个测量结果不能确定的范围。这样在传统的误差评定中遇到了两方面的问题，一是遇到了概念上的麻烦，二是不同领域和不同的人往往对误差处理方法各有不同的见解，以致造成方法不统一，进而使各测量结果缺乏可比性。不确定度概念的提出较好地解决了这一问题，不确定度评定的对象就是这些不能修正的各误差分量，其评定的结果是表征被测量之值所处的范围。如果某测量结果为 $(100.25 \pm 0.15)\text{g}$ ， $k=2$ ，则说明被测量之值在 $(100.10 \sim 100.40)\text{g}$ 范围内。每一个测量结果总存在着不确定度，作为一个测量结果要给出其量值，还要给出测量不确定度才是完整的。不确定度愈小表明测量结果的质量愈高。测量结果的使用与其不确定度有密切关系，不确定度愈小，其使用价值愈高；不确定度愈大，其使用价值愈低。测量不确定度必须合理评定并表示，表示过小，会对产品质量造成危害；过大，会造成浪费。

如何正确、统一地表达校准结果或测量结果，在计量学中是一个十分重要的问题，涉及对测量结果可靠程度的定量评定以及被使用。早在1963年美国国家标准局(NBS)的埃森哈特就提出了采用“不确定度”的建议，在国际上经过多年的探讨，在测量不确定度的表达方面形成了不同的意见，由于缺乏统一，于是国际最高计量学权威机构——国际计量委员会(CIPM)于1977年要求国际计量局(BIPM)与各国家标准计量研究院协调解决这一问题，并制定出一个建议。首先国际计量局起草了一份征求意见书，分发到对这一问题感兴趣的32个国家级计量研究院及5个国际组织。1979年初，收到21个研究院的回信。差不多所有这些回信都认为，在测量不确定度的表述与不确定度分量合成出一个总不确定度方面，有一个国际公认的方法十分重要。基于上述情况国际计量局召集了一次会议，其目的是为了对不确定度规定一个统一的、能为大家所接受的评定和表述方法。11个国家级计量研究院的专家参加了这次讨论。不确定度表述工作组起草了一份建议书，编号为INC-1(1980)《实验不确定度表述(Expression of Experimental Uncertainties)》，其全文如下：

(1) 测量结果的不确定度一般包括几个分量，按其值的评定方法，这些分量可归纳为两

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 类与以前用的“随机(偶然)”和“系统”不确定度不一定有一个简单的对应关系。“系统”不确定度这个术语会引起误解, 应避免使用。

任何详细的不确定度报告应该有各个分量的完整表格材料, 每个分量应详细说明其量值获得方法。

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

(3) B 类分量用估计方差 u_i^2 表达。它考虑作为假设存在的相应方差的近似。像方差那样去处理 u_i^2 , 像标准差那样去处理 u_i 。必要时, 协方差应该用相似方式处理。

(4) 用对方差合成的通常方法, 可以得到合成标准不确定度的表达值。合成标准不确定度及其分量, 应用标准偏差形式表达。

(5) 对特殊用途, 若须对合成标准不确定度乘以一个因子获得总不确定度时, 所乘的因子通常必须加以说明。

CIPM 于 1981 年批准这个建议书, 在 1986 年又重新加以肯定。

INC-1(1980)只是一份十分简单的纲要性文件, 对于如何在具体工作中实施这些要点缺乏一个实用的、较为详细的指导性文件。1986 年 CIPM 把这一任务委托给了国际标准化组织(ISO)。这项工作同时得到了另外 6 个国际组织的支持。这 6 个国际组织分别是: 国际计量局(BIPM)、国际电工委员会(IEC)、国际临床化学联合会(IFCC)、国际纯化学和应用化学联合会(IUPAC)、国际纯物理和应用物理联合会(IUPAP)、国际法制计量组织(OIML)。1993 年以这 7 个组织的名义由 ISO 出版发行了《测量不确定度表示指南》(Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement 以下简称 GUM)第一版, 1995 年稍适修改后重印发行。1999 年我国制定的国家计量技术规范 JJF1059—1999《测量不确定度评定与表示》等同采用了该文本。另外, 我国于 1991 年制定的 JJF1027—1991《测量误差及数据处理》参考的国际上的主要文献是 INC-1 和国际标准化组织计量技术顾问组第三工作组 ISO/TAG4/WG3 于 1989 年公布的《物理量测量中不确定度表示导则(第二稿)》。JJF1059 实施后代替 JJF1027 中的测量误差部分, JJF1027 中有关计量器具准确度的评定部分也已被 JJF1094—2002《测量仪器特性评定》取代。JJF1027 中有关测量误差部分在 JJF1059 中作了大量修改与补充, 其中涉及那些有重要变化需引起注意的问题(不包括补充的新内容)主要有以下几个方面:

(1) 明确了测量误差与不确定度之间的原则区别, 对不确定度给出了新的定义。

(2) 改变了随机误差、系统误差的定义, 不再提粗大误差而只提测量结果中的异常值。

(3) 总不确定度(overall uncertainty)一词由扩展不确定度所代替。

(4) 不确定度的 A 类分量与 B 类分量不再采用不同的符号 s_i 与 u_i , 而统一用小写字母 u 表示, 一般记作 u_i 。

(5) 在概率 $p=95\%$ 时, 也必须明确指出 p , 而不是只在 $p \neq 95\%$ 时才给出 p 值。

(6) 在计算扩展不确定度 U 或 U_p 时, 不再采用把合成标准不确定度中的各个分量 $u_i(y)$

分别先乘以各自的 t 因子 $t_{68}(\nu_i)$ 作为一次扩大计算出 $u_c(y)$, 然后再按 $p=95\%$ 时或是 $p=99\%$ 分别取 $k=2$ 或 $k=3$ 的计算 U_{95} 或 U_{99} 的方法。JJF1059 按 GUM 规定, 只能用 $U=ku_c(y)$ 或 $U=k_p u_c(y)$ (这时输出量估计值的分布是接近正态分布, 要计算有效自由度 ν_{eff} ; 或是其他已知分布) 的评定方法。

(7) JJF1059 中删去了评定标准不确定度的几种其他简化方法, 如最大残差法、最大误差法等, 而只保留了极差法一种。JJF1027 中曾明确提出使用这些简化的评定方法时, 重复次数 n 一般应多于 6 次, 而 JJF1059 未强调这一点, 反而指出极差法一般用于重复测量次数较少的情况下。JJF1027 强调了次数太少时所获得的标准偏差 s 太不可靠, JJF1059 指出在 $n=4$, $n=9$ 这样次数较少时, 得出 s 十分简单, 如当 $n=4$ 时, $s \approx R/2$, 当 $n=9$ 时, $s \approx R/3$ (这里 R 分别为 $n=4$ 与 $n=9$ 时得到的极差)。实用中应注意的是由此获得 s 的自由度 $\nu \neq n-1$, 而是 $\nu < n-1$ 。

JJF1059—1999 的修订版本修订的依据是国际标准 ISO/IEC Guide98 测量不确定度及其第三部分 ISO/IEC Guide98—3—2008《测量不确定度表示指南》, 该标准是在对 1995 版 GUM 修订的基础上以 8 个国际组织的名义于 2008 年联合发布, 这 8 个国际组织是在第一版 7 个国际组织的基础上增加了国际实验室认可合作组织(ILAC)。

与 JJF1059—1999 相比, 主要修订内容有:

(1) 所用术语采用新版 JJF1001—2011《计量学通用术语及定义》中的术语和定义。更新和增加了部分术语, 并以“包含概率”代替了“置信概率”。

(2) 弱化了给出自由度的要求, 只有当需要评定 U_p 或用户为了解所评定的不确定度的可靠程度而提出要求时才需要计算和给出合成标准不确定度的有效自由度 ν_{eff} 。

(3) 从实用出发规定: 一般情况下, 在给出测量结果时报告扩展不确定度 U 。在给出扩展不确定度 U 时, 一般应注明所取的 k 值。若未注明 k 值, 则指 $k=2$ 。

(4) 增加了测量不确定度的应用, 包括: 关于校准证书中报告测量不确定度的要求和实验室的校准和测量能力的表示方式等。

GUM 方法是当前国际通行的观点和方法, 可以用统一的准则对测量结果及其质量进行评定、表示和比较。在我国实施与国际接轨的测量不确定度评定以及测量结果包括其不确定度的表示方法, 不仅是不同学科之间交往的需要, 也是全球市场经济发展的需要。

测量不确定度是建立在误差理论基础上的一个新概念。不确定度评定方法是经典误差理论发展和完善的产物, 是运用概率论和统计学原理而形成的一种理论, 我们可称之为不确定度理论, 它是误差理论的新发展, 比经典的误差表示方法更为科学实用, 它是计量学发展的需要, 同时是计量学的重要组成部分, 世界各国的计量测试界已经广泛应用。

1.2 测量不确定度的来源和测量模型

1.2.1 测量不确定度的来源

测量过程中的随机效应及系统效应均会导致测量不确定度, 数据处理中的修约也会导致

不确定度。导致测量结果产生随机性变化的效应属于随机效应；导致产生系统性变化的效应属于系统效应。最常见的典型系统效应例如所用标准器修正值的不确定度，如果是重复性条件下的多次测量，它以保持不变的系统误差来影响测量结果，除非改变了所用的标准器。又如在测量中的调零，如果一次调零以后不再改变地进行重复测量，也将产生系统效应，其值为调零的不确定度。测量仪器的重复性则是典型的随机效应导致的结果。

在不确定度的评定中，系统效应导致的不确定度一般包括：测量仪器的最大允许误差（允许误差限）、测量仪器的偏移、引用误差限、修正值（校准结果）、标准物质的赋值等。

把所有不确定度分量划分为系统效应导致的分量和随机效应导致的分量，往往有利于标准不确定度的评定。

测量结果的不确定度反映了对被测量之值的认识不足，借助于已查明的系统效应对测量结果进行修正后，所得到的只是被测量的估计值，而修正值的不确定度以及随机效应导致的不确定度依然存在。

测量中可能导致不确定度的来源一般有：

(1) 被测量定义的不完整

由被测量的定义中对影响被测量的影响量的细节描述不足所导致的测量不确定度分量属于定义的不确定度。定义的不确定度是在任何给定被测量的测量中实际可达到的最小测量不确定度。为什么说被测量定义不完整会导致不确定度的产生？被测量是作为测量对象的特定量。对被测量的描述往往要求对其他的相关量，例如时间、地点、温度、气压等作出说明。在测量中，为完整地表述被测量之值，使其具有较严格的单一性，必须把影响被测量之值的量（当然也影响测量结果）加以说明。例如：在给出某物体上某两点间的距离时，必须有温度的规定；在给出地球表面某地的重力加速度，必须有时间的规定。只有对全部影响量之值都明确之后，才能完整地定义被测量。如果某个影响量之值未予确定，那么测量中对这个量存在随机性，这个量的影响导致测量结果出现某种程度的分散（一个不确定度的分量）。但是，实际工作中，对被测量的定义我们也往往有意地忽略那些影响不大的内容，不去评定这些影响甚小的不确定度分量，例如大气压力对量块中心长度造成的影响。

(2) 被测量定义的复现不理想

任何一种方法都有其不确定度，即所谓方法不确定度，不理想的方法导致较大的不确定度。

例如：在量块的比较测量中，要求测量量块测量面中心点的长度。但在实际测量中，测量点的位置一般是用肉眼确定的。由于量块测量面的平面度偏差和两测量面之间的平行度偏差，测量点对中心点的偏离会引入测量不确定度分量。

(3) 取样的代表性不够，即被测样本可能不完全代表所定义的被测量

例如：测量某种材料的密度，但由于材料的不均匀性，采用不同的样品可能得到不同的测量结果。由于所选择材料的样品不能完全代表定义的被测量，从而引入测量不确定度。也就是说，在测量不确定度的评定中，应考虑由于不同样品之间的差别所引入的不确定度分量。

(4) 对测量受环境条件的影响认识不足或对环境的测量不完善

例如：在钢板宽度测量中，钢板温度测量的不确定度以及用以对钢板宽度进行温度修正

的线膨胀系数数值的不确定度也是测量不确定度的来源。

(5) 对模拟式仪器的人员读数偏移

在较好的情况下,模拟式仪表的示值可以估读到最小分度值的十分之一,在条件较差时,可能只能估读到最小分度值的二分之一或更低。由于观测者的读数习惯和位置的不同,也会引入与观测者有关的不确定度分量。

(6) 测量仪器的计量性能(如最大允许误差、灵敏度、鉴别力、分辨力、死区及稳定性等)的局限性,即导致仪器的不确定度

例如:若测量仪器的分辨力为 δx ,则由测量仪器所得到的读数将会受到仪器有限分辨力的影响,从而引入标准不确定度为 $0.29\delta x$ 的不确定度分量。

(7) 测量标准或标准物质提供的标准值的不准确

例如:通常的测量是将被测量与测量标准或标准物质所提供的标准量值进行比较而实现的,因此测量标准或标准物质所提供标准量值的不确定度将直接影响测量结果。

(8) 引用的常数或其他参数值的不准确

物理常数、原子量以及某些材料的特性参数,例如密度、线膨胀系数等均可由各种手册得到,这些数值的不确定度同样是不确定度的来源之一。

(9) 测量方法和测量程序中的近似和假设

例如:用于计算测量结果的计算公式的近似程度等所引入的不确定度。

(10) 在相同条件下被测量重复观测值的变化

由于各种随机效应的影响,无论在实验中如何准确地控制实验条件,所得到的测量结果总会存在一定的分散性,即重复性条件下的各个测量结果不可能完全相同。这种分散性一部分是由测量仪器造成的,另一部分就是由被测量在重复观测中的变化造成的,除非测量仪器的分辨力太低,这几乎是所有测量不确定度评定中都会存在的一种不确定度来源。

上述不确定度的来源可能相关,例如,第(10)项可能与前面各项有关。

对于那些尚未认识到的系统效应,显然是不可能在不确定度评定中予以考虑的,但它可能导致测量结果的误差。不确定度的来源必须根据实际测量情况进行具体分析。

分析不确定度来源时,除了定义的不确定度外,可从测量仪器、测量环境、测量人员、测量方法等方面全面考虑,特别要注意对测量结果影响较大的不确定度来源,应尽量做到不遗漏、不重复。使评定得到的不确定度不致过小或过大。一般,测量重复性导致的不确定度中包含了测量时各种随机影响的贡献,如果其中包括由于分辨力不足引起的测得值的变化,这种情况下只要评定测量重复性导致的不确定度,就不必再重复评定分辨力导致的不确定度。但是特殊情况下,由于分辨力太差,以致无法获得测量重复性时,就需要评定分辨力导致的不确定度。例如用显示为七位半的多功能标准源去校准三位半的数字电压表时,多次测量的测得值不变,此时就应评定被校数字电压表分辨力导致的不确定度。

修正仅仅是对系统误差的补偿,修正值是具有不确定度的。在评定已修正的被测量的估计值的不确定度时,要考虑修正引入的不确定度。只有当修正值的不确定度较小,且对合成标准不确定度的贡献可忽略不计的情况下,可不予考虑。如果修正值本身与合成标准不确定度比起来也很小时,修正值可不加到被测量的估计值之中,而作为不确定度考虑。

什么情况下，我们可以认为某个不确定度分量可忽略不计？在各输入量相互独立的情况下，一切不确定度分量均贡献于合成标准不确定度，只会使合成标准不确定度增加。忽略任何一个分量都会导致合成标准不确定度变小。但由于采用的是方差相加得到合成方差，当某些分量小到一定程度后，对合成标准不确定度实际上起不到什么作用，为简化分析与计算，当然可以忽略不计。例如，忽略某些分量后，对合成标准不确定度的影响使之变小，不足十分之一，甚至不足二十分之一，未必不可忽略，这也可以称作微小不确定度准则。

另外一种情况是修正值加与不加，对不确定度的评定不产生任何影响。例如：在重复性条件下，对同一被测量进行多次的重复观测结果中，加不加进修正值，对按贝塞尔公式计算出的重复性实验标准偏差 s_r 结果相同。但如果是改变了测量标准器情况下的复现性标准偏差 s_R 的评定，每个观测结果由于使用了不同标准器而有不同修正值，则必须分别加以修正。

另一种情况是修正值本身甚小，远小于测量的不确定度。例如其绝对值只有合成标准不确定度的十分之一，则可不必要对测量结果进行修正。但是，修正值的不确定度是否可以忽略，则要看这个不确定度之值是否小到可以忽略的程度。修正值绝对值的大小与修正值的不确定度没有联系。例如，某个标准电阻的标称值与其校准结果之间的差的绝对值可以较小，但校准的不确定度却比这个值大不小，这是完全正常的现象。

当某些被测量是通过与物理常数相比较得出其估计值时，按常数或常量来报告测量结果，可能比用测量单位来报告测量结果，有较小的不确定度。

测量中的一些失误或突发原因不属于不确定度的来源。在测量不确定度评定中，也必须剔除测量结果中的异常值（通常由于读取、记录或分析数据的失误所导致）。异常值的剔除应通过对数据的适当检验进行。

1.2.2 测量模型的建立

测量中，被测量 Y （即输出量）由 N 个其他量 X_1, X_2, \dots, X_N ，通过函数关系 f 来确定，即：

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N) \quad (1.1)$$

式中， X_i 是对 Y 的测量结果 y 产生影响的影响量（即输入量）。上式称为测量模型或数学模型。大写字母表示的量的符号既可代表可测的量，也代表随机变量。

如被测量 Y 的估计值为 y ，输入量 X_i 的估计值为 x_i ，则有：

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_N) \quad (1.2)$$

在一系列输入量中，第 k 个输入量用 X_k 表示。如第 k 个输入量是电阻，其符号为 R ，则 X_k 可表示为 R 。

如，一个随温度 t 变化的电阻器两端的电压为 V ，在温度为 t_0 (20°C) 时的电阻为 R_0 ，电阻器的温度系数为 α ，则电阻器的损耗功率 P （被测量）取决于 V, R_0, α 和 t ，即

$$P = f(V, R_0, \alpha, t) = \frac{V^2}{R_0} [1 + \alpha(t - t_0)] \quad (1.3)$$

测量损耗功率 P 的其他方法可能有不同的测量模型。测量模型与测量程序有关。

输出量 Y 的输入量 X_1, X_2, \dots, X_N 本身可看做被测量，也可取决于其他量甚至包括具

有系统效应的修正值,从而可能导出一个十分复杂的函数关系式,以至函数 f 不能明确地表示出来。 f 也可以用实验的方法确定,甚至只用数值方程给出(数值方程为物理方程的一种,用于表示在给定测量单位的条件下,数值之间的关系,而无物理量之间的关系)。因此,如果数据表明 f 没有能将测量过程模型化至所要求的准确度,则必须在 f 中增加输入量,即增加影响量。例如,在式(1.3)的例中,再增加以下输入量:电阻器上已知的温度非矩形分布、电阻温度系数的非线性关系、电阻 R 与大气压力 p_{amb} 的关系等。

通过以上分析,测量的测量模型是通过测量的结果以及引入的值得到被测量估计值的数学函数关系式。最简单的测量模型,例如:体温表的示值 X 与被测量体温 Y 在不作任何修正的情况下,被测量体温 $Y=X$;用滴定管测量所消耗的溶液体积 Y 时,要通过滴定前的示值 X_1 与滴定终了的示值 X_2 之差得到所消耗的溶液体积 $Y=X_1-X_2$;采用砝码在等臂天平上衡量某一样品的质量 Y 时,砝码的质量 X_1 与天平上显示出的一个差值 X_2 得到样品的质量 $Y=X_1+X_2$ 。如果考虑到某些影响量的修正值或修正因子,就会使测量模型复杂化。

例如对标称值 10kg 砝码的校准,被校准砝码折算质量 m_x 的计算公式为: $m_x=m_s+\Delta m$ 。式中: m_s 是标准砝码的折算质量, Δm 是观测到的被校准与标准砝码之间的质量差。如果用此公式作测量模型就遗漏了比较仪的偏心度和磁效应以及空气浮力对测量结果的影响,因此比较完整的测量模型应修正为: $m_x=m_s+\Delta m+\delta m_D+\delta m_C+\delta m_B$ 。式中: δm_D 是自最近一次校准以来标准砝码质量的漂移, δm_C 是比较仪的偏心度和磁效应对测量结果的影响, δm_B 是空气浮力对测量结果的影响,其期望为零,但不确定度不为零。

例如在“用原子吸收光谱法测定陶制品中镉溶出量的测量不确定度评定”实例中,容器单位表面积镉的溶出量 r 可表示为: $r=\frac{C_0 V_L}{a_v}$ 。式中: C_0 是在提取溶液中镉的质量浓度, V_L 是浸析液的体积, a_v 是器皿的表面积。显然除了计算式中出现的三个输入量,浸泡温度、浸泡时间和酸浓度对 r 的影响也是不能不考虑的,为此模型应加入这些影响量的修正因子,测量模型变为: $r=\frac{C_0 V_L}{a_v} \cdot f_{acid} f_{time} f_{temp}$ 。式中: f_{acid} 、 f_{time} 和 f_{temp} 的量值为 1.0,但存在不确定度。

同一被测量,当采用不同测量原理或方法时,其测量模型一般会不同。例如,测量一电阻上消耗的功率,用测量其两端的电压和通过其中的电流的方法时,其测量模型为 $P=VI$;当用测量其两端的电压和其电阻的方法时,其测量模型为 $P=V^2/R$;用测量通过其中的电流和其电阻的方法时,其测量模型为 $P=I^2 R$ 。

式(1.2)中,被测量 Y 的最佳估计值 y 在通过输入量 X_1, X_2, \dots, X_N 的估计值 x_1, x_2, \dots, x_N 得出时,可有以下两种方法:

(1) 方法一

$$y = \bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n y_k = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n f(x_{1k}, x_{2k}, \dots, x_{Nk}) \quad (1.4)$$

式中, y 是取 Y 的 n 次独立观测值 y_k 的算术平均值,其每个观测值 y_k 的不确定度相同,且每个 y_k 都是根据同时获得的 N 个输入量 X_i 的一组完整的观测值求得的。

(2) 方法二

$$y = f(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_N) \quad (1.5)$$

式中, $\bar{x}_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n x_{i,k}$, 它是独立观测值 $x_{i,k}$ 的算术平均值。这一方法的实质是先求 X_i 的最佳估计值 \bar{x}_i , 再通过函数关系式得出 y 。

以上两种方法, 当 f 是输入量 X_i 的线性函数时, 它们的结果相同。但当 f 是 X_i 的非线性函数时, (1.4) 式的计算方法较为优越。

输入量 X_1, X_2, \dots, X_N 可以是:

——由当前直接测定的量。它们的值与不确定度可得自单一观测、重复观测、依据经验对信息的估计, 并可包含测量仪器读数修正值, 以及对周围温度、大气压、湿度等影响的修正值。

——由外部来源引入的量。如已校准的测量标准、有证标准物质、由手册所得的参考数据等。

x_i 的不确定度是 y 的不确定度的来源。寻找不确定度来源时, 可从测量仪器、测量环境、测量人员、测量方法、被测量等方面全面考虑, 应做到不遗漏、不重复, 特别应考虑对结果影响大的不确定度来源。

评定 y 的不确定度之前, 为确定 Y 的最佳值, 应将所有修正量加入测得值, 并将所有测量异常值剔除。

y 的不确定度将取决于 x_i 的不确定度, 为此首先应评定 x_i 的标准不确定度 $u(x_i)$ 。评定方法可归纳为 A、B 两类。

一切测量结果都是被测量的一个近似值, 因而称之为被测量之值的估计或估计值。最佳估计是最好的一个近似值。因此, 如果是重复性条件下的多次测量, 则应是它们的算术平均值; 如果是复现性条件下的多次测量, 则应是它们的加权平均值; 当修正值不为零时, 还都必须修正后的测量结果。也就是说不确定度评定前应先可将修正的系统误差进行修正。即给出的结果必须是被测量之值的最佳估计。

如果一个被测量只进行了一次测量, 则修正后的测量结果就是被测量的最佳估计, 但如果是重复了多次, 则一定应以他们的平均值作为测量结果, 当然同时也要修正。

被测量 Y 的测量结果 y 、平均值 \bar{y} 和修正值 Δy 间的测量模型就是 $y = \bar{y} + \Delta y$, Δy 可以是零, 但 $u(\Delta y)$ 存在。

1.3 标准不确定度的评定

1.3.1 评定方法的分类

测量不确定度按照评定方法的不同, 可以分为测量不确定度的 A 类评定和 B 类评定。

测量不确定度的 A 类评定是对在规定测量条件下测得的量值, 用统计分析的方法进行的测量不确定度分量的评定。规定测量条件是指重复性测量条件、期间精密度测量条件或复现性测量条件。

测量不确定度的 B 类评定是用不同于测量不确定度 A 类评定的方法进行的测量不确定度分量的评定。它是根据有关信息估计的先验概率分布得到标准偏差估计值的方法。

A、B 分类旨在指出评定的方法不同, 只是为了便于理解和讨论, 并不意味着两类分量之