



高等教育“十三五”应用型规划教材

传感器与检测技术



主编 文家雄 朱俊

CHUANGANQI YU
JIANCE JISHU

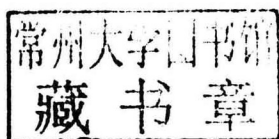


电子科技大学出版社

高等教育“十三五”应用型规划教材

传感器与检测技术

主 编 文家雄 朱 俊



电子科技大学出版社

传感器与检测技术 / 文家雄, 朱俊主编. -- 成都 :

电子科技大学出版社, 2016. 12

ISBN 978-7-5647-3946-1

I. ①传… II. ①文… ②朱… III. ①传感器—检测
IV. ①TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 228512 号

内 容 简 介

本书包括自动检测技术的基础知识、传感器原理与应用和检测仪表三部分内容。第一部分介绍传感器与检测技术的基本概念、测量误差与数据处理以及传感器的静态特性。第二部分介绍电阻式传感器、电感式传感器、电容式传感器、磁电式传感器、压电式传感器、光电式传感器的工作原理和应用。第三部分介绍温度检测、流量检测和物位检测。

本课程在培养高级工程技术人才的全局中, 具有提高学生对相关专业理论的认知能力、增强学生对专业技术工作适应能力和开发创新能力的作用。

传感器与检测技术

主编 文家雄 朱 俊

出 版: 电子科技大学出版社 (成都市一环路东一段 159 号电子信息产业大厦 邮编: 610051)

策划编辑: 刘 愚

责任编辑: 刘 愚

主 页: www.uestcp.com.cn

电子邮箱: uestcp@uestcp.com.cn

发 行: 新华书店经销

印 刷: 北京航天伟业印刷有限公司

成品尺寸: 185mm×260mm 印张: 13.25 字数: 313 千字

版 次: 2016 年 12 月第一版

印 次: 2016 年 12 月第一次印刷

书 号: ISBN 978-7-5647-3946-1

定 价: 32.00 元

■ 版权所有 侵权必究 ■

◆ 本社发行部电话: 028-83202463; 本社邮购电话: 028-83201495。

◆ 本书如有缺页、破损、装订错误, 请寄回印刷厂调换。

目 录

项目一 自动检测的基础知识	1
任务一 自动检测技术	1
任务二 测量误差与不确定度	4
任务三 传感器的特性	16
任务四 数据处理	25
项目二 测力传感器	35
任务一 电阻应变式传感器测量力	35
任务二 压电式传感器	50
任务三 压阻式传感器	63
项目三 测位移传感器	71
任务一 电感式传感器	71
任务二 光栅和磁栅式传感器	83
任务三 光电编码器测位移	93
项目四 测液位传感器	99
任务一 电容式传感器	99
任务二 超声波传感器	106
项目五 测速度与位置传感器	112
任务一 霍尔传感器	112
任务二 磁电感应式传感器	121
任务三 光电传感器	130
项目六 温度检测	143
任务一 热电阻传感器	143
任务二 热电偶	152
项目七 流量检测	163
任务一 流量-转速转换法	163
任务二 流量-差压转换法	169

任务三	流量-力、位移转换法	175
任务四	流量-频率转换法	177
任务五	超声波流量计	181
任务六	电磁流量计	186
任务七	质量流量计	189
附录		198
参考文献		205

项目一 自动检测的基础知识

检测就是去认识。

——西门子



学习目标

1. 理解自动检测的组成；
2. 熟悉传感器的定义、组成及分类。



重点难点

重点：传感器的组成及分类。

难点：理解自动检测技术的工作原理。

任务一 自动检测技术



任务情景

24 小时在线扬尘监测系统是集监测、治理空气质量于一体的监测系统，拥有全方位的视频监控设备，可以检测空气中的二氧化碳、PM2.5、PM10、PM100，以及风速、风向、雨量等环境因素，该套扬尘监测系统由扬尘监测终端、视频采集终端、数据监测及传输、中心服务器（计算机）、监控管理软件、手机客户端组成。

该系统可在无人坚守情况下自动检测扬尘排放的数据、抓拍扬尘超标的现场图片，通过 GPRS 无线传输到计算机终端，当扬尘超标后，该系统可分级上报。



任务分析

环境保护部门需要检测物质的化学成分、浓度等分量。自动检测技术与我们的生产、生活密切相关。它是自动化领域重要的组成部分，尤其在自动控制中，如果对控制参数不能有效准确地检测，控制就成为无本之木。



知识精讲

一、自动检测系统的组成

在自动检测系统中，各个组成部分常以信息流的过程划分，一般可分为信息的提取、

转换、处理和输出四个部分。它首先要获取被测量的信息，把它转换成电量，然后把已转换成电量的信息进行放大、整形等处理，再通过输出单元把信息显示出来，或者通过单元把已处理的信息送到控制系统其他单元使用，成为控制系统的一部分。其组成如图 1-1 所示。

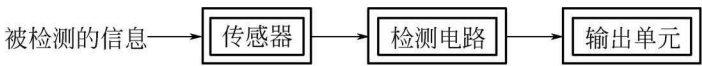


图 1-1 检测系统的组成

在检测过程中，传感器把被测非电量转换成与之有确定对应关系，且便于应用的某些物理量的检测装置。传感器获得信息的正确与否，关系到整个检测系统的精度，如果传感器的误差很大，即使后续检测电路等环节精度很高，也难以提高检测系统的精度。

检测电路的作用是将传感器输出的变量转换成电流或电压信号，使之能在输出单元的指示仪上指示或记录仪上记录，或者能够作为控制系统的检测或反馈信号。测量电路的种类由传感器类型而定，如电阻式传感器需用一个电桥电路把电阻值变化转换成电流或电压值变化输出，由于电桥输出信号一般比较微弱，常常要将电桥输出信号加以放大，所以在检测电路中一般还带有放大器。

输出单元可以是记录仪、指示仪、累加器、数据处理电路等。若输出单元是显示器或者记录器，则该检测系统为自动测量系统；若输出单元是计数器或累加器，则该检测系统为自动计量系统；若输出单元是报警器，则该检测系统是自动保护系统或自动诊断系统；如输出系统单元是处理电路，则该检测系统为部分数据分析系统，或部分自动管理系统，或部分自动控制系统。

二、传感器

（一）传感器定义

传感器是检测系统的第一个环节。它是以一定的精度把被测量按一定规律转换成可用输出信号的器件或装置。

顾名思义，传感器的功能是一感二传，即感受被测信息，并传送出去。在某些科学领域，传感器又称为敏感元件、检测器、转换器、发讯器等。这些不同的提法，反映了在不同技术领域，根据器件的用途对同一类型的器件使用着不同的技术语言，其实它的内含是相同或相似的。

（二）传感器的组成

根据传感器的功能要求，它一般应由三部分组成，即：敏感元件、转换元件和测量电路，其组成框图如图 1-2 所示。

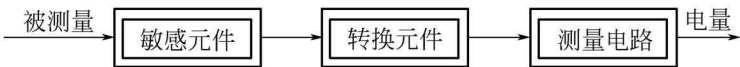


图 1-2 传感器组成

1. 敏感元件

能够灵敏地感受被测量并做出响应的元件。如金属或半导体应变片，能感受压力的大小而引起形变，形变程度就是对压力大小的响应。铂电阻能感受温度的升降而改变其阻值，阻值的变化就是对温度升降的响应，所以铂电阻就是一种温度敏感元件，而金属或半导体应变片，就是一种压力敏感元件。

2. 转换元件

敏感元件的输出就是转换元件的输入，它把输入转换成电路参数。如热敏电阻，它不仅能直接感受温度的变化，而且能将温度变化转换成电阻的变化，也就是将非电路参数（温度）直接变成了电路参数（电阻）。

3. 测量电路

将上述电路参数接入测量电路，并转换成电量输出。

实际上，有些传感器很简单，有些则较为复杂，大多数为开环系统，也有些是带反馈的闭环系统。最简单的传感器由一个敏感元件组成，它感受被测量时直接输出电量，如热电偶传感器。有些传感器，转换元件不止一个，需要经过若干次转换。

（三）传感器的分类

传感器集多种技术于一身，其原理各种各样，与许多学科有关，种类繁多，分类方法也很多，目前广泛采用的分类方法有以下几种。

（1）按照传感器的工作原理，可分为物理型、化学型、生物型等。

（2）按照构成原理，可分为结构型和物性型两大类。

结构型传感器利用了物理学中场的定律，包括力场的运动定律、电磁场的定律等。这类传感器的特点是传感器的性能与它的结构材料没有多大的关系，如差动变压器。

物性型传感器利用了物质定律，如欧姆定律等。它的性能随材料的不同而异，如光电子管、半导体传感器等。

（3）按传感器的能量转换情况，可分为能量控制型传感器和能量转换型传感器。

能量控制型传感器在信息转换过程中，其能量需要外电源供给，如电阻、电感、电容等电路参量传感器。

能量转换型传感器，主要由变换元件构成，它不需要外电源，如基于压电效应、热电效应、光电效应等原理的传感器。

（4）按照物理原理分类，可分为电参量式传感器、磁电式传感器、压电式传感器、光电式传感器、气电式传感器、波式传感器、射线式传感器、半导体式传感器以及其他原理的传感器。

（5）按照传感器的使用分类，可分为位移传感器、压力传感器、振动传感器和温度传感器等。

课堂提问

1. 简述自动检测系统的组成。
2. 传感器由哪些部分组成？传感器的分类方法有哪些？

自动检测技术的地位和作用

在科学研究上,一些研究成果必须通过实验来验证,这就需要一定的测试手段来完成;在工农业生产中,为了保证能正常、高效地生产,也需要一定的测试手段进行生产过程的检查和监测,这就离不开测试仪器仪表。

最早得到广泛应用的是机械式仪表,后来发展到光学、电子的仪表等。仪表的发展随着科学技术的发展而发展,每当科学技术前进一步,就要求能够提供新的测试手段,因而推动了仪器仪表的发展,同时,科学技术的成果也为发展新型仪器仪表提供了条件。

由于微电子技术、计算机技术、通信技术及网络技术的迅速发展,对电量的测试技术得到了相应提高,如准确度高、灵敏度高、反应速度快、能够进行连续测量、自动记录、远距离传输和组成控制网络等。可是,在工程上所要测量的参数大多数为非电量,如机械量、热工量、成分量和状态量等,人们要使用电测的方法来测量非电量,因而促使人们研究如何能正确和快速地测量非电量的技术。

由于非电量电测技术具有测量精度高、反应速度快、能自动连续地进行测量,可以进行遥测、便于自动记录、可以与计算机连接进行数据处理、可采用微处理器做成智能仪表、能实现自动测量与转换等优点,在国民经济各领域得到了广泛应用。

在机械制造中,需要测量位移、尺寸、力、振动、速度、加速度等机械量参数,利用非电量电测仪器,监测刀具的磨损和工件表面质量的变化,防止机床过载,控制加工过程的稳定性。此外还可利用非电量电测单元部件作为自动控制系统中测量反馈量的敏感元件来控制机床的行程、启动、停止和换向。在化工行业需要在线检测生产过程的温度、压力、流量、物位等热工量参数,实现对工艺过程的有效控制,确保生产过程能正常高效地进行,确保安全生产,防止事故发生。在烟草行业,如卷烟包装等自动化生产线,利用非电量电测技术,监控产品质量,剔除废品,并在线统计产品的产量、合格率等管理信息,为生产自动化、管理现代化提供可靠的技术保障。在现代物流行业,如控制搬运机器人作业过程中,需要实时地检测工件安放的放置参数,以便准确地控制执行机构工作,可靠地安放货物。在科学研究和产品开发中,将非电量电测技术应用到逆向设计和逆向加工过程中,可缩短产品设计和开发周期。甚至在文物保护领域中,研究人员已开始用非电量电测技术进行文物的保护和修复。

讨论:传感器应用的领域。

任务二 测量误差与不确定度

用某量规测量一个圆柱的直径,单次测量所得的示值为 14.7mm,则该值是未修正结

果。如果重复进行了 10 次测量, 所得示值分别是: 14.9、14.6、14.8、14.6、14.9、14.7、14.7、14.8、14.9、14.8 (mm), 则这 10 个示值的平均数 $14.77 \approx 14.8$ (mm) 即为未修正结果。



任务分析

对系统误差进行修正后的测量结果, 称为已修正结果。用代数方法与未修正测量相加, 以补偿其系统误差的值, 称为修正值。上面的例子中, 若所用的量规经过检定, 修正值为 -0.1mm , 则单次测量的已修改结果为 $14.7-0.1=14.6$ (mm); 而 10 次测量的已修正结果为 $14.8-0.1=14.7$ (mm)。

需要强调的是系统误差虽然可用适当的修正值来估计并予以补偿, 但是这种补偿是不完全的, 即修正值本身也含有不确定度, 所以这种补偿只是有限程度的补偿, 不能完全消除。



知识精讲

一、测量误差的概念

(一) 测量结果

测量结果是按规定的测量程序所获得的量值。测量结果可以是观测值本身, 也可以是根据几个观测值通过计算的结果。例如一组观测值的平均数、中位数等。测量结果可以要求按使用的标准进行修正, 如气体体积按标准温度和压力进行的修正。

测量结果是人们对被测量的认识结果, 不仅与量本身有直接关系, 而且与测量方法、测量程序及测量环境与条件密切相关。

(二) 有关测量技术中的部分名词

(1) 等精度测量: 在同一条件下进行的一系列重复测量称为等精度测量。

(2) 非等精度测量: 在多次测量中, 如对测量结果精确度有影响的一切条件不能完全维持不变的测量称为非等精度测量。

(3) 真值: 被测量本身所具有的真正值称为真值。真值是一个理想的概念, 一般是不知道的, 但在某些特定情况下, 真值又是可知的, 如一个整圆圆周角为 360° 。

(4) 实际值: 误差理论指出, 在排除系统误差的前提下, 对于精密测量, 当测量次数无限多时, 测量结果的算术平均值极限接近于真值, 因而可将它视为测量的真值。但是测量的次数是有限的, 故按有限测量次数得到的算术平均值, 只是统计平均值的近似值, 而且由于系统误差不可能完全被排除, 因此, 通常只能把精度更高一级的标准器具所测得的值作为真值。为了强调它并非是真的真值, 故把它称为实际值。

(5) 标称值: 测量器具上所标出来的数值。

(6) 示值: 由测量器具读数装置所指示出来的被测量的数值。

(7) 测量误差: 用测量器具进行测量值时, 所测量出来的数值与被测量的实际值 (或真值) 之间的差值。

(三) 误差的分类

测量结果的误差往往是由若干分量组成的, 这些分量按其特性可分为随机误差和系统

误差两类，所以测量误差是随机误差与系统误差之和。

随机误差表示为在对同一量的多次测量结果中，结果以不可预测的形式变化，随机误差不可能被修正。

系统误差表示为在对同一量的多次测量结果中，结果保持常量或以一种可预测的形式变化。系统误差及其发生原因可以已知，也可以未知。

超出规定条件下预期的误差称为粗大误差，简称粗差，或称为“寄生误差”。

粗大误差值明显歪曲测量结果。在测量或数据处理中，如果发现某次测量结果所对应的误差特别大或特别小时，应判断是否属于粗大误差，如属粗差，此值应舍去不用。

（四）测量准确度

测量准确度与测量误差所表示的实际上是同一问题，不过文字表示的方式不同。测量误差小，则准确度高；反之，测量误差大，则准确度低。

准确度包括正确度和精密度两个概念。准确度的正式定义是测量结果与被测量的真值之间的一致程度。

正确度指的是大量测量结果的平均值与真值或接近参照值之间的一致程度，它表示测量中系统误差的影响。

精密度指的是测量结果之间的一致程度，它表示测量中各种随机误差的影响。最重要的精密度的度量是重复性和再现性。

对于具体的测量，精密度高的，准确度不一定高；准确度高的，精密度不一定高。但精确度高，则精密度和准确度都高。

（五）测量误差的表示方法

测量误差的表示方法有以下几种。

1. 绝对误差

绝对误差是示值与被测量真值之间的差值。设被测量的真值为 A_0 ，器具的标称值或示值为 x ，则绝对误差为

$$\Delta x = x - A_0 \quad (1-1)$$

由于一般无法求得真值 A_0 ，故在实际值应用时常用精度高一级的标准器具的示值，即实际值 A 来代替真值 A_0 。 x 与 A 之差称为测量器具的示值误差，记为

$$\Delta x = x - A \quad (1-2)$$

通常以此值来代表绝对误差。

在实际工作中，经常使用修正值。为了消除系统误差用代数法加到测量结果上的值称为修正值，常用 C 表示。将测得示值加上修正值后可得到真值的近似值，即

$$A_0 = x + C \quad (1-3)$$

由此可得

$$C = A_0 - x \quad (1-4)$$

在实际工作中，可以用实际值 A 近似真值 A_0 ，则变为

$$C = A_0 - x = -\Delta x \quad (1-5)$$

修正值与误差值大小相等、符号相反，测得示值加上修正值可以消除该误差的影响，但必须注意，一般情况下难以得到真值，而用实际值 A 近似真值 A_0 ，因此修正值本身也有误差，修正后只能得到较测量值更为准确的结果。

修正值给出的方式不一定是具体的数据，可以是一条曲线、公式或数表。

2. 相对误差

相对误差是绝对误差 Δx 与被测量的约定值之比。相对误差有以下几种表现形式。

(1) 实际相对误差

实际相对误差 γ_A 是用绝对误差 Δx 与被测量的实际值 A 的百分比表示的相对误差。记为

$$\gamma_A = \frac{\Delta x}{A} \times 100\% \quad (1-6)$$

(2) 示值相对误差

示值相对误差 γ_x 是用绝对误差 Δx 与被测量的示值 x 的百分比表示的相对误差，记为

$$\gamma_x = \frac{\Delta x}{x} \times 100\% \quad (1-7)$$

(3) 满度相对误差

相对误差可以说明测量的准确度，但不能评价指示仪表的准确度。对于一个指示仪表的某一量限来说，标尺上各点的绝对误差相近，指针指在不同刻度上读数不同，所以各指示的示值相对误差差异很大，无法用示值相对误差评价该仪表。为了划分指示仪表的准确度级别，选择仪表的测量上限，即满度值作为基准，由满度相对误差来评价指示仪器的准确度。

满度相对误差 γ_n 又称满度误差或引用误差，是用绝对误差 Δx 与器具满度值 x_n 的百分比表示的相对误差，记为

$$\gamma_n = \frac{\Delta x}{x_n} \times 100\% \quad (1-8)$$

由于仪表各指示值得绝对误差大小不等，其值有正有负，因此国家标准规定仪表的准确度等级 α 是用最大允许误差来确定的。指示仪表的最大满度误差不超过该仪表准确度等级的百分数，即

$$\gamma_{nm} = \frac{\Delta x_m}{x_n} \times 100\% \leq \alpha\% \quad (1-9)$$

式中： γ_{nm} 为仪表的最大满度误差； Δx_m 为仪表示值中的最大绝对误差的绝对值； x_n 为仪表上的测量上限； α 为准确度的等级指数。

从使用仪表的角度出发，只有仪表表示值恰好为仪表上限时，测量结果的准确度才等于该仪表准确等级的百分数。在其他示值时，测量结果的准确度均低于仪表准确度等级的百分数，因为

$$x_m \leq \alpha\% x_n \quad (1-10)$$

当示值为 x 时，可能产生的最大相对误差为

$$r_m = \frac{\Delta x_m}{x} \leq \alpha \frac{x_n}{x} \quad (1-11)$$

式(1-11)表明,用仪表测量示值为 x 的被测量时,比值 x_n/x 越大,测量结果的相对误差越大。由此可见,选用仪表时被测量的大小越接近仪表上限越好。为了充分利用仪表的准确度,选用仪表要对被测量有所了解,被测量的值应大于仪表测量上限的 $2/3$ 。

二、测量不确定度

测量的目的是为了确定被测量的量值。测量结果的质量是量度,测量结果可信程度的最重要的依据。测量不确定度就是对测量结果的质量的定量表征,测量结果的可用性很大程度上取决于其不确定度的大小。所以,测量结果表述必须同时包含赋予被测量的值及与该值相关的测量不确定度,才是完整并有意义的。

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,称为测量不确定度。是通过对测量过程的分析和评定得出一个区间。

为了表征赋予被测量之值的分散性,测量不确定度往往用标准差表示。在实际使用中,由于人们往往希望知道测量结果的置信区间,因此测量不确定度也可以用标准差的倍数或说明了置信水平的区间半宽来表示。为了区分这两种不同的表示方法,分别称它们为标准不确定度和扩展不确定度。

1. 标准不确定度

以标准差表示的测量不确定度,称为标准不确定度,用符号 u 来表示,它不是由测量标准引起的不确定度,而是不确定度以标准差来表征被测量之值的分散性。

由于测量结果的不确定度往往由很多原因引起,对每个不确定度来源评定的标准差,称为标准不确定度分量。标准不确定度分量有两类评定方法,即A类评定和B类评定。

用对观测列进行统计分析的方法来评定标准不确定度,称为不确定度的A类评定,有时也称为A类不确定度评定。所得到的相应的标准不确定度称为A类不确定分量,用符号 U_A 表示。

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,称为不确定度的B类评定,有时也称为B类不确定度评定。所得到的相应的标准不确定度称为B类不确定度分量,用符号 U_B 表示。

当测量结果是由若干个其他量的值求得时,测量结果的标准不确定度,等于这些其他量的方差和协方差适当和的正平方根,称之为合成标准不确定度,用 U_C 表示。合成标准不确定度是测量结果标准差的估计值,它表征了测量结果的分散性。

2. 扩展不确定度

用标准差的倍数或说明了置信水平的区间的半宽表示的测量不确定度,称为扩展不确定度,通常用符号 U 表示。

扩展不确定度确定的是测量结果的一个区间,合理地赋予了被测量之值的分布的大部分可望包涵于此区间。实际上,扩展不确定度是由合成不确定的倍数表示的测量不确定度,它是将合成标准不确定扩展到了 k 倍得到的,即 $U=k_{uc}$ 称为包含因子。通常情况下, k 取2,3。

三、测量不确定度的评定

1. 概述

与输入估计值相关的测量不确定度，采用“A类”或采用“B类”方法评定。标准不确定度的A类评定，是通过观测列的统计分析来评定不确定度的方法。此时，标准不确定度为通过求平均程序或适当的回归分析求得的平均值的实验标准差。标准不确定度的B类评定，是不同于对观测列统计分析的方法来评定不确定度的方法。此时，标准不确定度是根据其他知识或信息得出的。

2. 标准不确定度的A类评定

当在相同的测量条件下，对某一输入量进行若干次独立的观测时，可采用标准不确定度的A类评定方法。

假定重复测量的输入量 x_i 为量 Q 。若在相同的测量条件下进行 n ($n>1$)次独立的观测，量 Q 的估计值为各个独立观测值($i=1,2,\dots,n$)的算术平均值

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1-12)$$

与输入估计值相关的测量不确定度可按以下方法之一评定。

(1) 值的实验方差 $s^2(q)$ 是概率分布方差的估计值，可按式计算

$$s^2(q) = \sum_{j=1}^n (q_j - \bar{q})^2 / (n-1) \quad (1-13)$$

其(正)平方根称为实验标准差。算术平均值方差的最佳估计值，是由下式给出的平均值的实验方差

$$s^2(\bar{q}) = s^2(q) / n \quad (1-14)$$

其(正)平方根称为平均值的实验标准差。与输入估计值相关的标准不确定度即平均值的实验标准差

$$u(\bar{q}) = s(\bar{q}) \quad (1-15)$$

值得注意的是，一般而言，当重复测量次数 n 较小($n<10$)时，按A类标准不确定度评定的可靠性就有所降低。此时，若无法增加观测次数，可以考虑采用其他方法来评定标准不确定度。

例：对一等标准活塞压力计的有效面积进行测量。在各种压力下，测得10次活塞有效面积 S_0 与工作基准活塞面积 S_s 之比 L_i 如下：

0.250 670, 0.250 673, 0.250 670, 0.250 671, 0.250 675, 0.250 671, 0.250 675, 0.250 670, 0.250 673, 0.250 670。则其最佳估计值，即测量结果 $\bar{L}$ 为

$$\bar{L} = \sum_{i=1}^{10} L_i / 10 = 0.250\ 672$$

由以上公式求得实验标准差 $s(L_i)$ 和 L 的标准不确定度 $u(\bar{L})$ 为

$$\bar{L} = \sqrt{\sum_{i=1}^{10} (L_i - \bar{L})^2 / (10 - 1)} = 2.05 \times 10^{-6}$$

$$u(\bar{L}) = s(\bar{L}) = s(\bar{L}) = 0.63 \times 10^{-6}$$

(2) 对于特性比较明确且处于统计控制之下的测量过程来说, 使用所获得的合并样本标准差 s_p 来描述分散性, 可能比采用通过有限次数的观测值获得的标准差更为合适。 s_p 为测量过程长期的组内方差平均值的平方根。在此情况下, 若输入的 Q 的值由非常有限的 n 次独立观测值的平均值求得, 则平均值的方差可按式 (1-16) 估计

$$s^2(\bar{q}) = s_p^2 / n \quad (1-16)$$

根据该值, 可求出标准不确定度。

3. 标准不确定度的 B 类评定

B 类标准不确定度的评定时用不同于对观测列统计分析的方法, 来评定与输入量 X_i 的估计值 x 相关的不确定度。即根据所有可获得的关于 X_i 可能变异性的信息, 做出科学、经验的判断, 来评定标准不确定度 $u(x)$ 。不确定度 B 类评定一般包括以下信息来源。

- ① 以前的观测数据;
- ② 对有关材料和仪器特性的了解和经验;
- ③ 生产部门提供的技术说明文件;
- ④ 校准证书、检定证书或其他文件提供的数据;
- ⑤ 手册或某些资料给出的参考数据及其不确定度;
- ⑥ 规定实验方法的国家标准或类似技术文件中给出的重复性或再现性。

运用所掌握的信息进行测量不确定的 B 类评定, 要求有一定的知识、经验和技巧。适当评出的 B 类标准不确定度, 可与 A 类标准不确定度一样可靠。

B 类不确定度评定最常用的方法有以下 4 种。

(1) 已知扩展不确定度和包含因子

如输入估计值 X_i 来源于制造部门的说明书、校准证书、手册或其他资料, 其中同时还明确给出其扩展不确定度 $U(X)$ 包含因子 k 的大小, 则与输入估计值相关的标准不确定度 $u(x)$ 为

$$u(x) = U(X)/k \quad (1-17)$$

例: 校准证书上指出, 标称值为 1kg 的砝码的实际质量 $m=1000.000\ 32\text{g}$, 并说明按包含因子 $k=3$ 给出的扩展不确定度 $U=0.24\text{mg}$ 。则由该砝码导致的测量标准不确定度分量 $u(m)$ 为

$$u(m) = 0.24\text{mg}/3 = 80\mu\text{g}$$

相对标准不确定度为

$$U_{\text{rel}}(m) = U(m)/m = 8 \times 10^{-9}$$

(2) 已知扩展不确定度和置信水平的正态分布

如果给出 X_i 在一定置信水平 p 下的置信区间的半宽, 即扩展不确定度 U_p , 除非另有说明, 一般按正态分布来评定其标准不确定度 $u(x)$, 即

$$u(x) = u_p/k_p \quad (1-18)$$

式中, k_p 为置信水平 p 下的包含因子。

正态分布的置信水平 p 与包含因子 k_p 之间存在着表 1-1 所示的关系。

表 1-1 正态分布下置信水平 p 与包含因子 k_p 间的关系

$p(\%)$	50	68.27	90	95	95.45	99	99.73
k_p	0.67	1	1.645	1.96	2	2.576	3

例：校准证书上给出标称值为 $10\ \Omega$ 的标准电阻器的电阻 R_s 在 23°C 时为

$$R_s(23^\circ\text{C}) = (10.000\ 74 \pm 0.000\ 13)\ \Omega$$

同时说明置信水平 $p = 99\%$ 。

由于 $U_{99} = 0.13\ \text{m}\Omega$, 按表 1-1 所示, $k_p = 2.576$, 故其标准不确定度 $u(R_s) = 0.13\ \text{m}\Omega / 2.576 = 50\ \Omega$ 。

(3) 其他几种常见的分布

除了正态分布外, 其他常见的分布有 t 分布、均匀分布、反正弦分布、三角分布、梯形分布、两点分布等。

若只知道输入量的估计值 x_i 分散区间的上限和下限分别为 a_+ 和 a^- (例如测量仪器的出厂指标、温度范围、由自动数据简化引起的舍入和截断误差), 则只能保守假定输入量 X_i 在上、下限之间的概率分布为均匀 (矩形) 分布。按照上述情况 (2) 的做法, 输入估计值 X_i 及其标准不确定度 $u(x)$ 分别为

$$x = (a_+ + a^-) / 2 \quad (1-19)$$

$$u^2(x) = (a_+ - a^-)^2 / 12 \quad (1-20)$$

如果上、下限之差用 $2a$ 表示, 即 $a_+ - a^- = 2a$, 则

$$u^2(x_i) = a^2 / 3 \quad (1-21)$$

或

$$u(x_i) = a / \sqrt{3} \quad (1-22)$$

4. 合成标准不确定度评定

(1) 合成标准不确定度的评定方法

当全部输入量彼此独立或不相关时, 与输出估计值 y 相关的标准不确定度, 即合成标准不确定度, 由式 (1-23) 得出

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N u_i^2(y) \quad (1-23)$$

式中, $u(y)$ 是输入估计值 x_i 相关的标准不确定度对于与输出估计值 y 相关的标准不确定度的贡献, 即

$$u_i(y) = c_i u(x_i) \quad (1-24)$$

式中, c 是与输入估计值 x 相关的灵敏系数, 它等于在输入估计值 x_i 处评定的模型函数 f

关于 x 的偏导数, 即

$$c_i = \frac{\partial f}{\partial x_i} = \frac{\partial f}{\partial X_i} \bigg|_{X_1=x_1, X_2=x_2, \dots, X_i=x_i, \dots, X_n=x_n} \quad (1-25)$$

灵敏系数 C 表示输出估计值 y 随输入估计值 x 的变化而变化的程度。它可以从模型函数 f 按式 (1-25) 评定, 或采用数值方法计算, 即分别计算因输入估计值 x 的 $+u(x_i)$ 和 $-u(x)$ 的变化而引起的输出估计值 y 的变化, 所得的 y 值之差除以 $2u(x)$ 即为 c 的值。有时, 可以通过实验, 例如分别在 $x \pm u(x)$ 重复测量, 找出输出估计值 y 的变化以求出 c_i 的值。

如果模型函数 f 是出入量 X_i 的和或差, 即

$$f(X_1, X_2, \dots, X_N) = \sum_{i=1}^N p_i X_i \quad (1-26)$$

则输出估计值应是相应的输入估计值的和或差, 即

$$y = \sum_{i=1}^N p_i x_i \quad (1-27)$$

式中, p 即为灵敏系数, 故与输出估计值相关的合成标准不确定度为

$$u^2(y) = \sum_{i=1}^N p_i^2 u^2(x_i) \quad (1-28)$$

如果模型函数 f 是输入量 X_i 的积或商, 即

$$f = (X_1, X_2, X_3, \dots, X_n) = c \prod_{i=1}^N X_i^{p_i} \quad (1-29)$$

则输出估计值应是相应的输入估计值的积和商, 即

$$y = c \prod_{i=1}^N X_i^{p_i} \quad (1-30)$$

在这种情况下, 灵敏系数等译 py/x , 如果采用相对标准不确定度 $w(y)=u(y)/|y|$ 和 $w(x_i)=u(x_i)/|x_i|$ 的话, 可以得到与式 (1-28) 类似的表达式

$$\omega^2(y) = \sum_{i=1}^N p_i^2 \omega^2(x_i) \quad (1-31)$$

(2) 当两个输入量 X_i 和 X_k 之间有一定程度的相关性时, 即它们之间不是相互独立的, 那么, 其协方差也应作为不确定度的一个分量来考虑。在以下情况下, 与两个输入量 x_i 和 x_k 的估计值相关的协方差可以认为是零或影响非常小。

- a. 输入量 x_i 和 x_k 相互独立, 例如, 它们是在不同的独立实验中重复而且非同时测得的, 或它们分别代表独立进行的不同评定所得出的量;
- b. 输入量 x_i 和 x_k 中的一个可作为常量看待;
- c. 研究表明, 输入量 x_i 和 x_k 之间没有相关性的迹象。

有时, 可以通过改变测量程序来避免发生相关性, 或者使协方差减小到可以忽略不计的程度, 例如: 通过改变所使用的同一台标准器等。