

测量系统分析

——理论、方法和应用

董双财 编著 .

中国计量出版社

推荐序

有人说,不懂统计学的质量工程师不是合格的质量工程师。同样,不能在制造过程或服务过程中正确运用统计过程控制和测量系统分析方法的企业,也不是产品和服务质量值得信赖的企业。从某个方面来说,这应该算是对质量工作者和追求卓越质量的企业是否达到要求的一种客观评价。

我十分欣喜地接受了本书作者要我为这本关于测量系统分析的新书作序的请求。因为到目前为止,在我国这一领域内,我还没有发现有比本书更为系统和全面地介绍有关测量系统分析的指南类专业书籍。

在咨询实践中,我发现非常多的企业在实施六西格玛项目时存在困难。通常的六西格玛改进项目中,测量系统分析往往被放在测量阶段进行,即 M 阶段(在 M 阶段对变量 $Y=f(x)$ 中的变量 Y 进行测量系统分析,在最后的阶段则对影响 Y 的关键因素 Xs 的测量系统进行分析验证),项目人员对测量系统如何进行分析往往无从下手。项目结束时,如何保持并改进测量系统能力又成为黑带人员必须面对并努力解决的实际问题。我曾想,如果有一本关于这方面的指南性专著作为指导,则可能会很好地解决这个难题。现在本书作者使我的想法成为了现实。

作者通过对测量系统分析具体应用的不断研究,对实施测量系统分析的理论背景进行了深入的挖掘,实现了理论、方法和应用的完美结合。书中不仅阐述了制造业如何实施测量系统分析研究,而且涵盖了如何将测量系统分析的方法运用到非制造业,如服务及其他领域。

本书作者在三年前曾就测量系统分析的有关内容与我探讨,当时给我的感觉是他在这方面颇有研究。他本人多年来一直从事质量工作,为大大小小的各种公司提供咨询、培训和实施指导。这本书得益于他对统计方法应用的长期研究,凝聚了他多年来的实践经验和研究成果。

对我而言,《测量系统分析——理论、方法和应用》一书最有价值之处是它的系统性和可操作性。特别在对属性一致性分析的内容方面,它使我受益匪浅。

这本书不但描述了与测量系统分析特性相关的数理统计理论知识,

建立了与实际应用之间的对应关系,而且阐述了实施和应用的可行性的方法及其约束条件。同时,作者还列举了大量既有针对制造业的,也有针对将所提供的方法更广泛地应用于其他领域的实例。另外,还从管理战略角度对测量系统的管理和改进提出了指南。

凭我多年来对各种企业的咨询工作经验,可以肯定本书是适合工程师、质量咨询师、六西格玛绿带和黑带等人员经常学习和查阅的一本很有价值的参考书,它可以帮助解决当今测量系统分析实践中的许多实际问题。

张彦玲 资深咨询师
普罗维智资讯有限公司
六西格玛国际管理学院

前 言

当看到《测量系统分析——理论、方法和应用》这本书的书名的时候,您期望从中可以发现和获得什么呢?是测量系统分析应用的行业案例,还是具有可操作性的实施指南?是为了寻找测量系统改进的解决方案,还是更想理解数据分析和处理的理论基础?本书所提供的就是关于测量系统分析的全面指南,是一门充满了统计韵味的测量数据质量保证的学问。

有人说,当今的世纪是质量的世纪,在某种程度上,应该说是统计质量控制深入应用的世纪。在质量管理实践的某些方面,我国奉行的是“拿来主义”,不论是ISO 9000等质量管理体系标准,或是ISO/TS 16949汽车行业技术规范,还是以追求卓越为目标的六西格玛管理方法,实践证明非常有效。但由于这些“外来的东西”具有其独特的文化、理论和实践背景,在我国企业的应用中出现了许多的困难和问题。测量系统分析是以上标准或规范要求的重要组成部分,它的应用越来越显著地表现出这一点。

根据标准或规范要求编写程序,按照固定表格填写数据,采用一成不变的方法进行数据分析,依据规定的准则进行最终的判断,难道这对于真正地认识测量系统的能力已经足够了吗?认识事物的目的是为了更好地改进它,怎样才能达到测量系统的持续改进呢?这不但是质量专业技术人员会思考的问题,更重要的是咨询师要思考,六西格玛黑带也要思考的问题。

本书的目的是希望有关专业人员在学习和参考之后,能够对测量系统分析这门学问有较为深刻的认识,并能正确而灵活地运用,知道哪些实际问题应进行哪些特性的分析,应如何判断和决策,即使不能完全解决实际问题,也能发现问题的真实存在,做到“知其然,更知其所以然”。

到目前为止,我尚未发现一本有关测量系统分析指南类的书像本书这样系统和全面。我觉得,有关测量系统分析的内容本来并不深奥,只是要谈及到其背后的数理统计知识,使得它让人“望而生畏”。本书就是要揭示其应用的本来面目,使得其易于理解和掌握。我们的目的并不在于要将提供的有关数理统计知识和其中的公式都背诵下来,而是要了解这些知识的基本应用以及与我们所研究的特性和方法之间的关系。

本书主要分为三大部分内容,第一部分主要是对测量系统分析基本概念以及与其他专业内容之间关系的介绍;第二部分是对测量系统分析理论的阐述,重点是测量系统变差研究的数理统计基础内容;第三部分包括测量系统分析的应用和改进,主要介绍不同行业的案例分析,以及为实现测量系统持续改进的管理策略。

本书以通俗的语言解释所涉及的概念和方法,必要时辅以实例来说明。为适合不同层次的读者的需要和加深对各种方法的理解以及期望读者能灵活运用这些方法,对理论阐述部分注重理论的实际应用,而非抽象的理论叙述。同时,本书介绍的各种统计方法,读者可以通过各种统计软件来进行分析,所提供的电子版数据包括 Excel 格式和 MTW 格式,均收录在随书所附光盘中。

在统计应用软件方面,经过仔细斟酌并考虑实际应用效果,本书主要使用国外的 Minitab 软件和国内的 Sysplan 统计分析软件,因为 Minitab 软件是实施六西格玛管理法的首选统计工具,而 Sysplan 软件则对测量系统分析提供了更加专业的分析。

本书可作为各领域质量专业的培训教材,是实施 ISO/TS 16949 和相关标准或规范以及六西格玛管理法的指南,也可作为质量技术人员、质量咨询师、质量审核员、六西格玛绿带、黑带及广大实际工作者的参考书。

本书的编写得益于我众多的业界朋友的建议和鼓励及大力支持。中国计量出版社一直关心着本书的完成和出版。特别要指出的是,我国知名的六西格玛黑带大师、来自普罗维智资讯公司的张彦玲女士在百忙之中抽出时间为本书作序,并提出许多宝贵意见,使我深感荣幸,使本书增色匪浅。没有这些支持和帮助,本书是不可能面世的。谨在此对所有各方面表示衷心的感谢。

由于水平有限,书中难免有不足之处,欢迎批评指正。

若读者欲与作者联系沟通,可发送电子邮件至:patrickdong@163.com。

作者

2006年2月6日

目 录

第 1 章 概论	(1)
1.1 测量系统分析基本概念	(1)
1.1.1 关于数据	(1)
1.1.2 数据的质量	(2)
1.1.3 关于测量系统分析	(2)
1.2 有关术语	(3)
1.2.1 术语比较	(3)
1.2.2 有关测量和测量结果的术语	(6)
1.2.3 有关测量系统的术语	(11)
1.3 与其他相关内容之间的关系	(16)
1.3.1 统计过程控制(SPC)与测量系统分析(MSA)	(16)
1.3.2 测量不确定度与测量系统分析	(17)
1.3.3 ISO 10012 与测量系统分析	(17)
1.3.4 QS—9000、ISO/TS 16949 与测量系统分析	(18)
1.3.5 六西格玛(6sigma)与测量系统分析	(20)
1.4 应用软件选择	(20)
第 2 章 测量系统分析数理统计基础	(22)
2.1 数据的分类及描述	(22)
2.1.1 数据的分类	(22)
2.1.2 数据的图示化描述	(26)
2.1.3 描述性统计	(41)
2.2 概率分布函数	(43)
2.2.1 概率密度函数	(43)
2.2.2 累积分布函数	(44)
2.2.3 累积分布函数逆函数	(45)
2.3 离散变量典型分布	(45)
2.3.1 二项分布	(45)
2.3.2 超几何分布	(46)
2.3.3 泊松分布	(47)
2.4 连续变量典型分布	(48)
2.4.1 正态分布	(48)

2.4.2	卡方(χ^2)分布	(50)
2.4.3	t 分布	(50)
2.4.4	F 分布	(52)
2.5	参数估计	(53)
2.5.1	运用估计量估计参数	(53)
2.5.2	点估计	(53)
2.5.3	区间估计	(54)
2.5.4	置信区间辨析	(55)
2.5.5	正态总体参数的置信区间和单侧置信限	(56)
2.5.6	二项分布的比率估计	(57)
2.6	假设检验	(58)
2.6.1	假设检验基本概念	(59)
2.6.2	假设检验的逻辑步骤	(60)
2.6.3	正态总体均值的检验	(61)
2.6.4	正态总体方差的检验	(62)
2.6.5	比率 p 的假设检验	(62)
2.7	方差分析	(64)
2.7.1	方差分析概念	(64)
2.7.2	单因子方差分析	(64)
2.7.3	两因子方差分析	(68)
2.8	简单线性回归分析	(77)
2.8.1	一元线性回归模型	(78)
2.8.2	参数估计	(78)
2.8.3	方程的显著性检验	(80)
2.8.4	估计与预测	(83)
2.9	列联表	(84)
2.9.1	二维列联表的检验问题	(84)
2.9.2	二维列联表的 χ^2 检验	(86)
2.9.3	二维列联表的费希尔(Fisher)精确检验	(88)
2.10	非参数统计	(90)
2.10.1	关于非参数统计	(90)
2.10.2	次序(顺序)统计量、秩和秩统计量	(91)
2.10.3	相关性检验	(92)
2.10.4	一致性检验	(98)

第3章 测量系统分析原理 (106)

3.1	测量过程特征	(106)
-----	--------	-------

3.2 测量系统变差的类型	(108)
3.2.1 位置变差	(108)
3.2.2 宽度变差	(110)
3.3 研究变差	(112)
3.4 测量系统变差来源及对决策的影响	(113)
3.4.1 测量系统变差来源	(113)
3.4.2 对决策的影响	(113)
3.5 测量系统能力和性能	(116)
3.5.1 测量系统能力	(116)
3.5.2 测量系统性能	(117)
3.6 测量系统的统计特性	(121)
第4章 测量系统分析方法	(122)
4.1 概述	(122)
4.1.1 测量系统分析的过程方法	(122)
4.1.2 测量系统类型	(123)
4.1.3 测量系统评估程序的适用性	(124)
4.2 简单测量系统分析流程	(124)
4.3 测量系统研究的准备	(126)
4.3.1 研究准备	(126)
4.3.2 可接受性准则	(127)
4.4 简单测量系统研究指南	(127)
4.4.1 计量型测量系统研究指南	(127)
4.4.2 计数型测量系统研究指南	(168)
4.4.3 属性一致性研究	(181)
4.5 复杂测量系统研究指南	(202)
4.5.1 研究背景	(202)
4.5.2 破坏性测量的 GRR 研究的试验设计	(209)
4.5.3 其他应注意的内容	(214)
4.5.4 案例研究	(215)
第5章 测量系统分析的应用	(221)
5.1 供方测量保证能力	(221)
5.2 制造业案例研究	(222)
5.2.1 计数型数据的属性一致性分析	(222)
5.2.2 同质小批量破坏性检验时的测量系统分析	(226)
5.3 非制造业案例研究	(229)
5.3.1 适用于连续型数据的非传统(Non-Traditional)的测量系统分析	(229)

5.3.2 有序数据的属性一致性分析	(233)
第6章 测量系统管理与改进	(237)
6.1 公司范围的 MSA 规划	(237)
6.2 测量系统改进	(238)
6.3 顾客的认可	(239)
附录	(256)
附录 1 偏倚研究用 d_2^* 参数表	(256)
附录 2 控制图系数表	(260)
附录 3 GRR 研究计算置信区间的 ANOVA 法	(261)
附录 4 量具重复性和再现性研究(平均值和极差法)记录格式	(272)
附录 5 测量设备计量确认过程	(276)
参考文献	(277)

第1章

概 论

1.1 测量系统分析基本概念

1.1.1 关于数据

早在原始社会,由于生产劳动的发展和社会的进步,人们就已经开始有了计数概念和计数的活动,出现了“上古结绳而治”(《周易·系辞下》中记载)这种最原始的计量方法。随后代结绳记事而起的一种有所进步的计量方法是书契记数,随着社会的不断变革出现了数字。汉字中的“数”、“算”两个字,至今被视为计数方法的“活化石”。古代的“数”字,左边是一条绳子打了一串大小不同的结,右边是一只手。“算”字从“竹”到“具”,表示以小竹签(筹)为工具进行计算,后来在这一基础上发展为算盘。它证明早在我国文字出现之前,上述计数方法已经发明和通行。直至当今时代,我们的周围已经被各种各样的数据所包围,而且也越来越依赖于对数据的分析计算并进行推断和决策。

在日常生活和工作中,您留意过下面的有关数据吗?

- ① 虽然不必每天都测量体温,但我们还是知道人体的正常体温在 $36.3\sim 37.2^{\circ}\text{C}$ 之间;
- ② 水在 1 标准大气压*下沸腾的温度是 100°C ,而凝固的温度则是 0°C ;
- ③ 对于葡萄酒香味浓度的评价一般分为 5 级,分别编码为 1,2,3,4,5。“1”表示非常淡,“2”表示淡,“3”表示一般,“4”表示浓,“5”表示很浓;
- ④ 当每天早餐以饼干为主时,经常不断的更换饼干品牌,而且对各种品牌进行比较,如分为松脆的、淡香的、夹心的等等。

其实,这些都是关于数据的例子。这种例子不胜枚举,因为数据几乎渗透到了所有生存空间。上述例子中所包含的数据类型和测量分析方法将会在本书后面章节中陆续介绍。虽然我们的例子不恰好是上面的数据。

那么数据是怎样得到的呢?每天打开电视或翻看报纸,就可以看到各种数据。比如天气预报、体育比赛、外汇牌价、股票行情等数据,这些数据都是间接得到的,称为间接数据或二手收据。

* 1 标准大气压 $= 1.01 \times 10^5 \text{ Pa}$ 。

当然还有一种数据是第一手的数据或称为直接数据。获得第一手数据并不像得到二手数据那么容易,通常需要付出较大的代价去收集。比如企业每年都要安排一定数量的资金对顾客满意度进行调研,这是企业生存和竞争的需要。

上面所说的数据是自然的、不受控条件下观测到的,称为观测数据。而对于有些情况,比如在不同的肥料和土壤条件下某农作物的产量是否有差别,两台同型号数控车床生产的同种零件尺寸是否存在显著差异等等,这种在人为因素干预情况下收集或测量的数据称为试验数据。

1.1.2 数据的质量

当今时代的生产和服务实践中,对数据的应用比以往任何时候更广泛、更频繁,也更加依赖。在数据应用中不可避免地受到一种潜在风险的影响,这种风险因素就是数据的质量。因为数据的质量直接决定了基于数据的推断和决策的准确性!

对于具有自动数据反馈功能的数控机床来说:如果输入的参数存在较大的偏差,则加工出来的零件很可能是不合格品;如果只从很少的几个调查对象中获取数据,并因此得到满意或不满意的结果,这种结果是靠不住的,因为数据是不充分的;而如果采用分辨力只有 1mm 的尺子去测量必须精确到 0.1mm 的物体的长度,所得到的数据是不准确的;……只要获得的数据不能准确表征所测量的对象,则表明数据的质量不高。

通常,对于测量值与规定特性的参考值或已知基准值很“接近”时,则认为数据的质量“高”;同样,如果测量值与参考值或已知基准值相差比较“远”时,则称数据的质量“低”。而数据是在某种稳定条件下,通过一个由多因素构成的系统多次测量某统计特性的结果,这个系统称为测量系统。所以,数据的质量取决于测量系统的性能。

对于数据质量的描述,可以采用误差、偏差、准确度、精密度等术语,也可采用某测量系统的偏倚及变差来表征。所以产生低质量数据的原因最普遍的是数据中的变差过大。数据中的变差是由于测量系统及其环境的相互作用造成的。例如,在长度的精密测量中,环境温度对测量结果的影响较大,在标准的环境温度($25^{\circ}\text{C} \pm 0.5^{\circ}\text{C}$)下测量的数据与其他环境温度下的测量数据就可能产生较大的变差。另外,被测对象的被测特性(如长度量)也可能会随温度的变化而发生变化,所以对测量数据就很难加以解释,因此所使用的测量系统是不理想的。

1.1.3 关于测量系统分析

测量系统分析,英文为“Measurement System Analysis”,缩写为“MSA”。它用于评估测量系统的质量,是运用统计方法来分析研究测量系统中的各个变差源以及它们对测量结果的贡献,并根据可接受的判断方法判断测量系统的符合性。

对测量系统分析的一个重要前提是将测量活动看成是一个过程——测量过程,这样就可以对测量过程应用任何与过程控制有关的管理、统计和逻辑技术。

随着近年来 QS-9000、ISO/TS 16949 等国际规范在我国众多企业中的广泛应用,为保证过程控制的有效性,测量系统分析越来越受到重视。测量系统分析不但可有效保证内部测量的准确,而且还可以保证与供应商、顾客或其他相关方之间关于数据的一致性比较。另外,通过测量系统分析深入了解影响测量结果的变差源,分析对过程控制和产品控制的影响,可以实

现测量系统的持续改进。

虽然测量系统分析方法源于传统的工业制造过程,但是否适用于非传统领域,如服务过程的测量分析,对于这个问题目前尚有颇多争论。例如在国际上著名的 isixsigma 论坛(网址: www.isixsigma.com)上,有些专家对该问题持肯定意见,而有些则持否定态度。在后续的章节中将举例说明,以供辨析。

1.2 有关术语

在进行测量系统分析时会用到许多术语,这些给出的术语有些来源于现行的国际或国家标准,有些则是为满足测量系统分析的实际应用而重新进行定义的。总的来说,这里提到的定义与美国汽车工业行动集团(AIAG)的规定是一致的。目的是避免在讨论测量系统分析时可能会造成混淆和误解。

经过整理和分类,对三组术语进行了比较,并将术语分为四类,即有关测量和测量结果的术语、有关测量系统的术语、有关测量变差的术语以及有关研究变差的术语,后两类术语将在第三章予以详述。

1.2.1 术语比较

1. 测量、测量过程与测量系统

(1) 测量(measurement)

以确定量值为目的的一组操作。(VIM:《国际通用计量学基本术语》第2.1条)

量值是通过测量来确定的。用皮尺去量某棒的长度,并从尺上读得棒长为5.34m,这样的操作称为进行了对某棒长度的测量。测量要有一定的手段(测量设备如量具、仪器等),要有人去操作,要用一定的测量方法,要在一定的环境下进行,并且必须给出测量结果。根据被测量或被测对象的复杂程度,测量可以是很简单的操作,也可能是相当复杂的过程。

按测量方法的不同,可分为直接测量和间接测量。用测量设备能直接得到被测量之量值的操作称为直接测量。通过测量与被测量有函数关系的其他量,然后由函数关系计算得到被测量的操作被称为间接测量。例如通过测量边的长度确定矩形面积,通过测量电阻器的电阻和电压确定流过该电阻器的电流,都属于间接测量。

按被测量状态的不同,有静态测量和动态测量之分。在测量期间可认为被测量的值是不变的,称为静态测量。为确定量的瞬时值或其随时间或其他影响量的变化所进行的测量称为动态测量。

按测量的操作方式不同,可以有手动测量和自动测量。

(2) 测量过程(measurement process)

在 GJB 2715—1996《国防计量通用术语》中给出的定义为:与实施测量有关的一组相互关联的资源、活动和影响量。

注:① 资源包括测量设备、测量程序、操作者。

② 影响量包括所有的影响因素,如由环境引起的影响可以是受控的、可控的,或不受控的、不可控的,这种环境的影响增加了过程的变动性和偏离性。

③ 过程是指将输入转化为输出的一组相关联的资源 and 活动。资源可包括人员、资金、设施、设备、技术和方法。

④ 测量过程包括各种测量,例如:

- a. 操作人员自一般工厂环境下采用通用仪器按照非正规的方法或程序所进行的测量;
- b. 经培训的校准实验室技术人员采用一套由温控油槽、标准电阻器、比对器和其他辅助设备组成的测量系统,按照详细的程序,为校准其他标准电阻器所进行的测量。

⑤ 一个测量过程可由单台测量仪器组成。

在 GB/T 19000—2000《质量管理体系 基础和术语》第 3.10.2 项给出的定义为:确定量值的一组操作。

从定义可以看出,“测量”与“测量过程”的定义基本相同,在语言描述上略有不同。“测量”强调的是确定被测量的量值,赋予测量结果;“测量过程”强调的是以过程方法进行测量,应识别和考虑影响测量过程的影响量。

在 AIAG《测量系统分析》(第三版)中,给出了一个测量过程模型示意图,如图 1—1 所示。

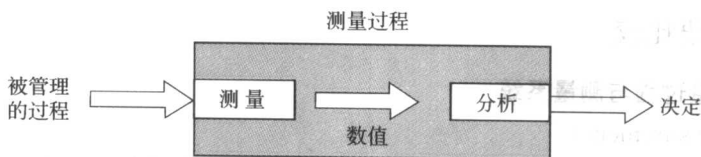


图 1—1 测量过程模型示意图

从图形中可以看出,测量过程这个“暗箱”中不但包含测量操作,而且还包括获得数据以及对数据进行分析。

在 GB/T 19022—2003《测量管理体系 测量过程和测量设备的要求》7.2 款中说明,测量过程是测量管理体系的组成部分。每一个测量过程的完整规范包括所有有关设备的标识、测量程序、测量软件、使用条件、操作者能力和影响测量结果可靠性的其他因素。测量过程应在设计的受控条件下实现,并对测量过程进行记录用以证明测量过程符合要求。

(3) 测量系统(measurement system)

这里所指的测量系统并非指 JJF 1001—1998《通用计量术语和定义》中给出的定义(组装起来以进行特定测量的全套测量仪器和其他设备),而是一个具有更加广泛内涵的大系统概念:对测量单元进行量化或对被测特性进行评估时,所使用的仪器或量具、标准、操作、方法、夹具、软件、人员、环境及假设的集合。亦即,用来获得测量结果的整个过程。

测量系统的目的是为了更好地了解变异的来源,这些变异会影响测量系统所产生的测量结果。在 AIAG《测量系统分析》(第三版)中提出了两种用来定义测量系统变差的基本来源的模型:

第一种模型简称为“S. W. I. P. E.”模型。它包含六个必要的要素:

S——标准(standard);

W——工作件或零件(workpiece);

I——仪器(instrument);

P——人和/或程序(person and/or procedure);

E——环境(environment)。

第二种模型简称为“P. I. S. M. O. E. A.”模型。它包含七个必要的要素:

P——零件(parts);

I——仪器(instrument);

S——标准(standard);

M——方法(method);

O——操作者(operator);

E——环境(environment);

A——假设(assumption)。

通常在测量实施前,要对测量系统性能进行评估,从而对其能力进行评价。

2. 计量器具、量具与测量设备

(1) 计量器具(metrological equipment)

计量器具又称测量器具,是实物量具和测量仪器的总称。测量仪器是单独的或连同辅助设备一起,用以进行测量的测量器具,如功率计、激光干涉仪等。在我国常称为计量器具。

(2) 量具(gage)

量具是实物量具的简称,是在使用时具有固定形态用来复现或提供定量的一个或多个已知值的测量器具。如砝码、量块等。在测量系统研究中常指任何用来获得测量的装置,通常特指用在工厂现场的装置。

(3) 测量设备(measuring equipment)

为实现测量过程所必需的测量仪器、软件、测量标准、标准物质或辅助设备或它们的组合(GB/T 19000—2000《质量管理体系 基础和术语》中 3.10.4 项),称为测量设备。

在计量学中,计量器具和量具标准的称谓统一为测量设备,只是根据计量要求的不同,测量设备能被用于某些特定的测量过程,而不被确认用于其他测量过程。测量设备作为物资资源被纳入测量管理体系进行控制和管理。

计量器具、量具和测量设备之间的关系如图 1—2 所示。

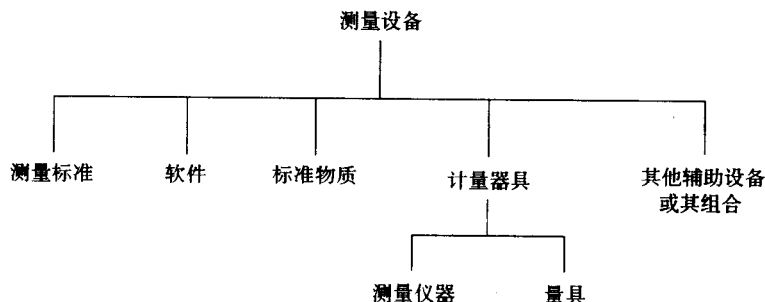


图 1—2 计量器具、量具和测量设备之间的关系

3. 测量系统分析与计量确认

测量系统分析(measurement system analysis)与计量确认(metrological confirmation)的不同点表现在定义、对象、目的、特性、方法及要求等方面,具体比较请参见表 1—1。

表 1—1 测量系统分析和计量确认比较对照表

项目	测量系统分析	计量确认
定义	对测量系统特性进行数据分析,以检查其满足测量要求的能力	为确保测量设备符合预期使用要求所需的一组操作
对象	由六要素构成的测量系统	测量设备
目的	能力和性能	确认状态
特性	系统特性: ——稳定性 ——偏倚 ——线性 ——重复性 ——再现性 ——属性一致性	计量特性: ——测量范围 ——偏移 ——重复性 ——稳定性 ——滞后 ——漂移 ——影响量 ——分辨力 ——鉴别力(阈) ——误差 ——死区
方法	测量及数据分析	检定、校准、验证、调整或维修等
要求	测量系统的 GRR、属性一致性等满足测量的要求	计量特性满足测量过程的计量要求

1.2.2 有关测量和测量结果的术语

有关可测的量的术语主要介绍六个,具体定义描述如下:

1. [可测]量([measurable] quantity)

定义:现象、物体或物质可定性区别和定量确定的属性。

例如,温度反映了物体冷热的程度,可以用温度计定量地确定某物体的温度的高低,因此温度是一个量。对有些物理现象或物质的属性,如酒的味道、气体的香臭等,虽然可以定性区别但目前尚无法定量确定,这些现象或属性就不是量。

术语“量”可指广义量或指特定量。例如长度、时间、质量、温度、电阻、物质的量的浓度等称为广义量。而某棒的长度、某根电线样品的电阻、某份酒样中乙醇的浓度等称为特定量。常把具有相同单位名称和单位符号的量称为同类量,如功、热、能量,厚度、周长、波长等。

2. [量的]真值(true value [of quantity])

定义:与给定的特定量的定义一致的值。

真值只有通过完善的测量才有可能获得。一个量的真值仅是一个理想的概念,通常是未

知的,但它是测量系统的目标,所有独立的测量值都要尽可能地(经济地)与该值接近。在所有的分析中,通常采用约定真值或参考值来替代真值使用。

3. [量的]约定真值(conventional true value [of a quantity]或参考值 reference value)

定义:对于给定目的具有适当不确定度的、赋予特定量的值,有时该值是约定采用的。它是为特定的目的,用以代替量的真值的量值。

约定真值或参考值通常被认为是非常接近真值的,就特定目的而言其差值可以忽略不计。

约定真值或参考值可用下列方法确定:

① 用高一级的测量设备(例如:度量衡实验室或全尺寸检验设备)多次测量的平均值来确定;

② 由法律定义并强制执行的法定值;

③ 根据理论方法确定的理论值;

④ 由国家或国际性有关组织的试验结果确定的指定值;

⑤ 由一些科学技术组织主持的合作试验所确定的一致同意的值;

⑥ 由受影响的各组织所协调一致得到的值。

例如,在给定地点由参照测量标准复现量所赋予的值,可取作约定真值。常数委员会(CODATA)1986年推荐的阿伏伽德罗常数值: $6.0221367 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ 。

4. [测量]误差(error [of measurement])

定义:测量结果减去被测量的真值。

由于真值不能确定,实际上使用约定真值。测量的目的是要确定被测量的量值,但由于人们对客观规律认识的局限性,测量设备的不准确,测量方法的不完善,温度、湿度、压力、振动、干扰等环境条件的不理想,测量人员的技术水平等原因都会使测量结果与被测量的定义值(即真值)不同。因此测量误差的存在是客观的和普遍的。

设测量误差用 Δ 表示,真值为 x_0 ,测量结果为 x 。则 $\Delta = x - x_0$, Δ 又称绝对误差。

绝对误差有大小和符号,其单位与测量结果的单位相同,如三角形的三个内角之和的真值为 180° ,实测结果为 178° ,则绝对误差为 $178^\circ - 180^\circ = -2^\circ$,符号为负,说明测量结果小于真值。不应将绝对误差与误差的绝对值相混淆,后者为误差的模。

Δ/x_0 称为相对误差,即测量的绝对误差与被测量真值之比,相对误差只有大小和符号,没有量纲。

由于通常情况下真值是未知的,因此无法准确确定测量误差的值。

测量误差按其性质可分为随机误差和系统误差两种:

① 随机误差(random error)是测量结果与同一被测量在重复性条件下的无限多次测量结果的平均值之差值。它受偶然因素影响而以不可预知的方式变化,由于只能进行有限次的测量,所以只可能确定随机误差的估计值,而且不可能被修正。

② 系统误差(systematic error)是同一被测量在重复性条件下的无限多次测量结果的平均值与被测量的真值之差值。在对同一被测量的多次测量中,它保持不变或按某种规律变化。系统误差及其引起的原因可以是已知的,也可以是未知的。

如果假设: Δ ——测量误差, δ ——测量的随机误差, ϵ ——测量的系统误差, μ ——无限多次测量结果的算术平均值,即期望, x ——测量结果, x_0 ——被测量的真值,则有:

- 随机误差: $\delta = x - \mu$
- 系统误差: $\epsilon = \mu - x_0$
- 误差: $\Delta = x - x_0 = \delta + \epsilon$

由于影响量的不可预期的随机变化,使每个测量值随机地偏离其期望值,这就是随机误差。随机误差不是测量值的实验标准偏差或其倍数,这一点要特别注意。

由于某种影响量的影响,使测量值的期望偏离真值,这就是系统误差。在实际工作中,测量不可能进行无限多次,通常被测量的真值又未知,所以无论随机误差还是系统误差均是理想的概念,无法确切知道其值的大小,但可通过改进测量系统来减小客观存在着的测量误差。

5. 偏差(deviation)

定义:一个值减去其参考值。

偏差是一个非常宽泛的概念,它表示某测量值偏离其参照值的程度,在具体应用中,常采用标准偏差及其估计量——实验标准偏差或样本标准偏差来表征同一被测量的多次测量结果的分散程度。

标准偏差是以无限多次测量情况来定义的,所以又称总体标准偏差,用 σ 表示。实际工作中不可能进行无限多次的测量,故无法得到总体标准偏差。用有限次测量的数据,估计得到的测量值的标准偏差称为实验标准偏差或样本标准偏差,用 s 表示,可按如下公式计算:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

式中: $\bar{x}$ —— n 个测量值的算术平均值; x_i ——第 i 次测量值; n ——测量次数或某测量总体的一个样本的样本容量。

误差和偏差两个术语都是测量结果的度量。

6. [测量]不确定度([measurable] uncertainty)

测量不确定度是经典的误差理论发展和完善的产物,目的是为了澄清一些模糊的概念和便于使用。误差的定义是测量结果减去被测量的真值。按定义,误差应该是一个确定的值,但由于真值往往是未知的,因此误差值无法准确得到。过去,给出测量结果的误差时,往往是通过误差分析给一个测量值不能确定的范围,而不是真正的误差值,并且在误差分析时,要区分随机误差和系统误差,要将随机误差和系统误差进行合成,在这类问题的处理上是不够严格和合理的。因此,自 1963 年美国国家标准局(NBS)的计量专家埃森哈特(Eisenhart)首先提出定量表示“不确定度”的建议以来,历时了近 30 年的时间才于 1993 年由 BIPM(国际计量局)、IEC(国际电工委员会)、IFCC(国际分析化学联盟)、ISO(国际标准化组织)、IUPAC(国际纯化学和应用化学联盟)、IUPAP(国际纯物理和应用物理联盟)及 OIML(国际法制计量组织)等七个权威的国际组织正式颁布了《测量不确定度表示指南》,对测量不确定度的评定和表示方法作了明确的规定。因为它比经典的误差表示方法更为科学和实用,世界各国的计量界已经广泛采用。

定义: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。

1) 不确定度这个词意思是不能肯定或有怀疑的程度。测量不确定度是对测量结果的不可信程度或对测量结果有效性的怀疑程度。

2) 由于测量条件的不完善及人们的认识不足,测量值是具有分散性的,每次测量的测量结果不