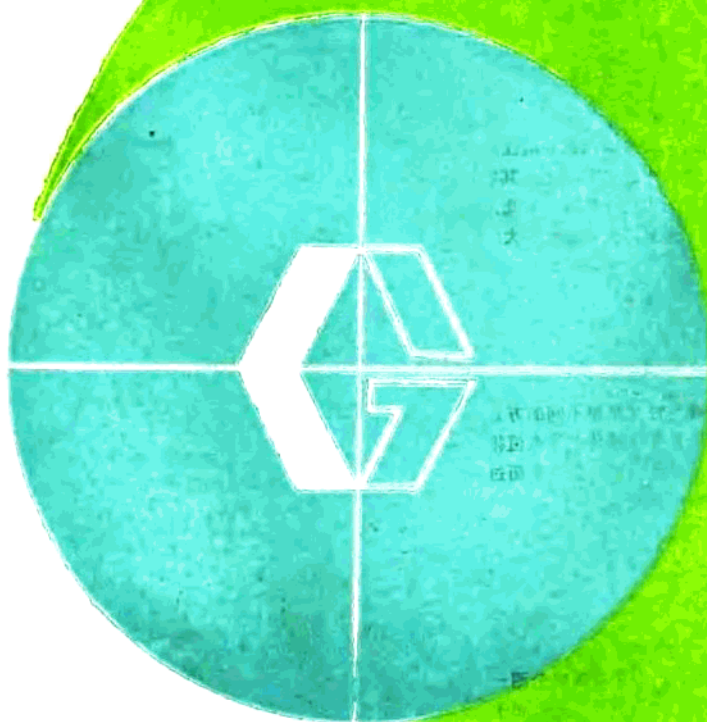


工程计量检测技术

李孟源 主编



西北工业大学出版社

内 容 简 介

本书共分八章,包括计量学基础、常用传感器和测量电路、温度、压力、流量、质量与密度、力值与硬度、振动与噪声等的计量检测技术。

本书系统地论述了计量检测的基本概念、基本原理和基本测量技术。着重介绍计量误差理论和计量检测数据的处理,专章叙述各种机械量(温度、压力、流量、质量、密度、力值、振动、噪声等)的静态、动态计量测试方法的原理及其应用,论述清晰,简洁明了,便于自学。

本书可作为工科院校机械、热工、化工、冶金、外贸等类专业的教材,亦可供计量技术与管理人员及其他工程技术人员参考。

工程计量检测技术

主 编 李孟源
责任编辑 杨乃成
责任校对 钱伟峰

西北工业大学出版社出版发行

(西安市友谊西路 127 号)

陕西省印刷科技研究所印装

ISBN 7-5612-0266-0 / TH · 13

开本 787×1092 毫米 1/16 28.875 印张 706 千字

1990 年 4 月第 1 版 1990 年 4 月第 1 次印刷

印数 1—3100 册

定价 10.33 元

前 言

本书是为适应计量检测技术及管理人员的需要而编写的。它以机械工程、化工、冶金、交通、国防、外贸等计量检测中所涉及的物理量为主,介绍计量学基础、传感器、温度、压力、流量、质量、密度、力值、硬度、转矩、振动、噪声等计量检测技术。

本书在叙述机械量计量检测技术的基本知识时,除着重介绍仪器仪表及传感器的原理和特性外,还阐明其静、动态检定、标定的方法及原理,试图在标准测量和工程检测的相互联系、相互促进方面作大胆的尝试。

本书可做为工科院校机械、热工类专业的教材,也可供从事计量技术、管理及其他工程技术人员参考。

书稿由李孟源(第一、三、四、五章)、徐国富(第二章)、成述长(第六、七章)、黄学志(第八章)编写。全书由李孟源同志主编,黄学志同志担任主审。

本书在编写过程中,得到许多兄弟院校、计量测试所、式厂的大力支持和帮助,特别是河南省计量测试学会米石树、田锁文同志给予很大的帮助,在此谨向他们表示诚挚的谢意。

由于编写时间仓促,加之编者水平有限,难免有不足和错误之处,恳请读者批评指正。

编 者

1989年2月

目 录

第一章 计量学基础	1
第一节 计量基本知识	1
第二节 测量误差及其分类	7
第三节 随机误差	10
第四节 粗差及坏值的剔除	22
第五节 系统误差	24
第六节 间接测量的误差传递	33
第七节 等精度测量的数据处理	35
第八节 不等精度测量的数据处理	38
第九节 误差的合成与分配	41
第十节 组合测量的数据处理	44
第十一节 经验公式与回归分析	53
第二章 常用传感器和测量电路	60
第一节 电阻式变换器	61
第二节 电阻应变计	64
第三节 电感式变换器	70
第四节 电容式变换器	76
第五节 磁电式变换器	80
第六节 压电式变换器	83
第七节 其它类型变换器	85
第八节 电桥电路	94
第九节 其它测量电路	100
第三章 温度计量检测	108
第一节 温度计量检测概述	108
第二节 膨胀式温度计	115
第三节 热电偶温度计	117
第四节 电阻温度计	129
第五节 接触法测温误差分析	134
第六节 辐射测温法	136
第七节 热电势、电阻的测量	143
第八节 温度计的检定	154

第四章 压力计量检测	159
第一节 概述	159
第二节 液体压力计	164
第三节 活塞式压力计	170
第四节 弹性压力计	178
第五节 动态压力传感器	189
第六节 压力传感器的动态标定	198
第七节 压力计的选择和安装	205
第八节 真空计量与检测	206
第五章 流量计量检测	217
第一节 流量计量检测基础	217
第二节 容积式流量计	224
第三节 节流式流量计	226
第四节 转子流量计	265
第五节 涡轮流量计	268
第六节 电磁流量计	272
第七节 靶式流量计	274
第八节 旋涡流量计	277
第九节 流量标准装置	280
第六章 质量密度计量检测	283
第一节 概述	283
第二节 砝码	288
第三节 天平	292
第四节 秤	303
第五节 密度计量	317
第七章 力值硬度计量检测	323
第一节 基本概念	323
第二节 标准测力机(计)	326
第三节 材料试验机	333
第四节 电子测力传感器	339
第五节 扭矩仪	363
第六节 硬度计量	377
第八章 振动噪声计量检测	389
第一节 振动概述	389
第二节 测振传感器	393
第三节 测振及记录仪器	401

第四节	振动计量	412
第五节	激振设备	415
第六节	机械振动基本参数的测量	418
第七节	噪声计量基本概念	424
第八节	噪声测量仪器	430
第九节	声级计的校准	434
第十节	噪声的测量方法	441
附 录		445
参考文献		452

第一章 计量学基础

国际法制计量组织称计量学是“关于测量的知识领域”。历史上科学家评论说：“没有测量，就没有科学”。现代化建设和科学技术的发展，学科之间的交叉渗透，需要各种参数的综合测量，测得的大量数据，不仅需要高度的准确性，而且需要高度的一致性。现代化生产和科学实验，则要求测量从实物测量转向绝对测量；从静态测量转向动态测量；从部件测量转向整体测量。这就要求工程技术人员必须了解计量常识，掌握必要的测量知识。

第一节 计量基本知识

一、计量的概念

1. 量和量值：“量”是阐述物质世界运动规律的一个最重要的基本概念，其定义为：现象、物体和物质的可以定性区别和定量确定的一种属性。

量由数值和计量单位组合而成，用没有计量单位的纯数值来表示量的大小是毫无意义的，因此，量的表示必须在其数值后注明计量单位。

量值是由一个数和合适的计量单位表示的量，如长度 2m，物重 1.5kg 等。

2. 计量：以确定量值为目的的一组操作称为计量。

计量是一种特定的测量，它是利用精确度符合要求的计量器具所进行的测量。其目的是为了确定量值，以比较量的大小，而且也为了统一量值。

3. 检定：是计量检定的简称。它是指为评定计量器具的计量性能、确定其是否合格所进行的工作。

我国计量法规定：“计量检定必须按照国家计量检定系统表进行”。就确定量值而言，检定是特定的计量，专门对计量器具进行的计量，检定所作出的计量器具合格与否的结论具有法律效力。

4. 标定（定度）：用计量标准给没有标明量值的计量器具赋值的操作过程称为标定。

5. 比对：在规定条件下，对同一精确度等级的同类计量基准、计量标准或工作计量器具的量值进行相互比较称为比对。

6. 校准：在规定条件下，为确定计量仪器或计量装置、实物量具所代表的值与相对应的被计量的已知值之间关系的全部操作称为校准。校准的结果可评定计量器具的示值误差，也可以确定其他计量性能。

7. 分度：用计量标准来确定计量器具指示部分所表示的刻线位置或确定仪器仪表分度特性的全部工作。

二、计量单位和单位制

1. 计量单位: 计量单位是约定采用的特定量, 用以定量表示具有相同量纲的量, 如 1m, 1kg 等。

计量单位是国家计量制度规定的。1984 年 4 月 27 日国务院关于在我国统一实行法定计量单位的命令中规定的单位就是计量单位。法定计量单位分基本单位和导出单位。

(1) 基本单位: 在量制中约定地认为是彼此独立、并有严格科学定义的量的单位。

(2) 导出单位: 在给定量制中, 根据量与量之间的关系, 用若干个基本单位表示的单位称为导出单位。

2. 单位制: 为给定量制建立的一组单位便构成单位制。在一种单位制中, 有一组选定的基本单位和由定义方程式给出的导出单位, 同一个量在不同的单位制中, 有大小不等的计量单位。

目前, 世界上使用的单位制大体有两大类, 即米制和英制。米制在不同学科又分为不同的单位制, 如力学领域的“厘米·克·秒”制 (CGS 制), “米·千克·秒”制 (MKS 制) 等。其中国际单位制 (SI) 是当前比较先进的一种单位制, 目前大多数工业发达国家和地区已采用或正在向国际单位制过渡。几乎所有国际学术、经济、政治组织都宣布采用国际单位制。原因在于, 国际单位制的构成原则比较科学, 大部分单位可涉及几乎所有专业领域且是实用单位, 它可以代替几乎所有其它单位制, 我国也开始推行这种先进的单位制。

3. 量纲: 以量制中基本量的幂的乘积表示该量制中一个量的表达式称为量纲。在国际单位制中, 量纲的表达式为:

$$\dim Q = L^{\alpha} M^{\beta} T^{\gamma} I^{\delta} \Theta^{\epsilon} N^{\zeta} J^{\eta} \quad (1-1)$$

式中 $\dim Q$ ——量 Q 的量纲符号;

L, M, T, I, Θ, N, J ——分别为长度、质量、时间、电流、热力学温度、物质的量和发光强度的量纲表示符号;

$\alpha, \beta, \gamma, \delta, \epsilon, \zeta, \eta$ ——量纲指数。

例如, 质量的量纲式为: $\dim M = M$, 力的量纲式为 $\dim F = LMT^{-2}$, 速度的量纲式为 $\dim V = LT^{-1}$ 等。

在给定量制中, 表达式内基本量的指数为零的量称作无量纲量, 如摩擦系数、线性应变其量纲式分别为 $L^{1-1}M^{1-1}T^{-2+2}$, L^{1-1} 。

量纲的实际意义在于定性确定基本量和导出量之间的关系。

4. 我国的法定计量单位: 法定计量单位是强制性的, 全国各行各业都要采用。我国的法定计量单位是以国际单位制单位为基础, 根据我国的具体情况, 又选用了一些非国际单位制单位而构成的。

我国法定计量单位包括 SI 的基本单位、辅助单位、导出单位、词头和国家选定的非国际单位制单位等。

国际单位制的基本单位共 7 个, 其名称、符号和定义见表 1-1。

在国际单位制中有两个单位尚未规定是属于基本单位或是导出单位, 因而称作辅助单位, 即弧度、球面角, 见表 1-2。

表 1-1 SI 基本单位

量的名称	单位名称	单位符号	定 义
长 度	米	m	米是光在真空中 $1/299\,792\,458$ 秒, 时间间隔内所经过路程的长度
质 量	千克 (公斤)	kg	千克是质量单位, 等于国际千克原器的质量
时 间	秒	s	秒是铯-133 原子基态的两个超精细能级之间跃迁所对应的辐射的 $9\,192\,631\,770$ 个周期的持续时间
电 流	安 [培]	A	安培是电流单位。在真空中截面积可忽略的两板相距 1 米的无限长平行圆直导线内通以等量恒定电流时, 若导线间相互作用力在每米长度上为 2×10^{-7} 牛顿, 则每根导线中的电流为 1 安培。
热力学温度	开 [尔文]	K	开尔文是水三相点热力学温度的 $1/273.16$ 。
物质的量	摩 [尔]	mol	摩尔是一系统的物质的量, 该系统中所包含的基本单元数与 0.012 kg 碳-12 原子数目相等。 注: 使用摩尔时应指明基本单元, 可以是原子、分子、离子及其它粒子, 或是这些粒子的特定组合。
发光强度	坎 [德拉]	cd	坎德拉是发射出频率为 540×10^{12} Hz 单色辐射的光源在给定方向上的发光强度, 而且在此方向上的辐射强度为 $1/683$ w/sr。

表 1-2 SI 辅助单位

量的名称	单位名称	单位符号	定 义
[平 面] 角	弧 度	rad	弧度是一圆内两条半径之间的平面角, 这两条半径在圆周上所截取的弧长与半径相等
立体角	球面角	sr	球面角是一立体角, 其顶点位于球心, 而它在球面上所截取的面积等于以球半径为边长的正方形面积

为了使相同量纲的量比较容易区别, 用起来方便, 国际单位制对部分导出单位规定了专门名称, 如规定力的导出单位为牛顿, 符号为 N 等, 表 1-3 是其中的一部分。

表 1-3 具有专门名称的 SI 导出单位示例

量的名称	单位名称	符号	用其他 SI 单位表示的关系式	用 SI 基本单位表示的关系式
频 率	赫 [兹]	Hz		s^{-1}
力、重力	牛 [顿]	N		$m \cdot kg \cdot s^{-2}$
压力、应力	帕 [斯卡]	Pa	N/m^2	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-2}$
能、功、热	焦 [耳]	J	$N \cdot m$	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$

国际单位制选用十进制，规定了 SI 单位的十进倍数单位和分数单位的词头名称和符号，见表 1-4。

表 1-4 SI 词头

因	数	词头名称	符 号	因	数	词头名称	符 号
	10^{18}	艾 [可萨]	E		10^{-1}	分	d
	10^{15}	拍 [它]	P		10^{-2}	厘	c
	10^{12}	太 [拉]	T		10^{-3}	毫	m
	10^9	吉 [加]	G		10^{-6}	微	μ
	10^6	兆	M		10^{-9}	纳 [诺]	n
	10^3	千	K		10^{-12}	皮 [可]	p
	10^2	百	h		10^{-15}	飞 [母托]	f
	10^1	十	da		10^{-18}	阿 [托]	a

根据我国的具体情况，国家还选定了一些非国际单位制单位作法定计量单位，见表 1-5。

表 1-5 国家选定的非国际单位制单位示例

量的名称	单位名称	单位符号	换算关系和说明
时 间	分	min	1 min = 60 s
	[小] 时	h	1 h = 60 min = 3600 s
	天 [日]	d	1 d = 24 h = 86400 s
旋转速度	转每分	r / min	1 r / min = (1 / 60) s ⁻¹
质 量	吨	t	1 t = 10 ³ kg
	原子质量单位	u	1 u $\approx$ 1.6605655 $\times$ 10 ⁻²⁷ kg

三、计量器具及其特性

1. 计量器具：计量器具（测量器具）是量具、计量仪器和计量装置的总称。

2. 计量器具的组成：计量器具原则上有三部分组成，即输入部分、中间变换部分、输出部分。

输入部分是计量器具与被测对象直接发生联系的部分，如体温计的温泡，其作用是感受被测量的变化，并转换成相应的输出信号，可见它直接影响计量器具的质量。输入部分一般又称作传感器。对传感器的要求是：精确、稳定、灵敏。

精确指的是：传感器的输出信号与输入量的关系必须是严格的单值函数关系，且最好是线性关系。一般要求，非被测参数对传感器的影响很小，可忽略不计。

稳定指的是：传感器输出与输入之间的单值函数关系不随时间和温度而变化。

灵敏指的是：较小的输入量可得到较大的输出信号。

中间变换部分的作用是对来自传感器的信号进行调制、解调、滤波、衰减、放大、线性化等，供输出部分显示或记录。

输出部分的作用是向观测者显示被测量值数值的大小。它可以是瞬时量的指示（刻度）或数字显示，也可以是相应的图形、图象、表格、字符的记录显示，记录可以是连续的，也可以是离散的。

3. 计量器具的性能指标：计量器具的性能指标是评价其性能好坏、质量优劣的依据，为了获得精确的计量结果，计量器具必须满足一定的要求。计量器具的性能指标很多，比较常用的有以下诸项。

(1) 计量器具的示值：由计量器具提供的被测量的量值。实物量具的示值即是它的标称值，如1千克砝码上刻明的质量数值，其示值为1千克。

(2) 分度值：相邻两刻线所代表的量值之差称为计量器具的分度值。

(3) 测量范围、量程：在允许误差限内计量器具的被测量值的范围称为测量范围，其最低值和最高值分别称作测量上限和下限。测量范围用下限值至上限值来表示。测量范围的上限值与下限值之代数差称为量程。

(4) 稳定性：在规定工作条件下，计量器具的性能随时间保持不变的能力。

(5) 灵敏限：引起计量器具示值可察觉变化的被测量的最小变化值，称为计量器具的灵敏限（灵敏阈）。

(6) 精确度：计量器具给出示值接近被测量真值的能力。精确度级别则是计量器具符合一定计量要求，使其误差保持在规定极限以内的级别。

4. 计量器具的误差

(1) 示值误差：计量器具的示值和被测量真值之间的差值。

(2) 允许误差：规范或标准允许的计量器具的误差界限。

(3) 基本误差：计量器具在正常工作条件下所具有的误差。“正常工作条件”指检定规程中规定的检定工作条件。

(4) 附加误差：计量器具超出正常工作条件时而增加的误差，如温度附加误差、电源电压波动附加误差等。

四、计量基准、标准

测量就是被测量与同性质的标准量进行比较，并确定被测量是标准单位量的多少倍。因此，标准单位量本身的精确与否直接影响被测量的测量精确度。此外，从科学研究、生产实践、国际贸易等方面看，标准单位量在国内或国与国之间必须达到统一。这就要求标准单位量（计量单位），不仅要有严格的科学定义，而且必须通过物质形式体现出来，为此需要建立计量基准和计量标准。

根据功能及作用，基准可分为：国际基准、国家基准（主基准）、副基准、工作基准。

(1) 国际基准：由国际协议所承认的、作为统一国际计量单位量值最高依据的基准称为国际基准。

(2) 国家基准：规定作为统一量值最高依据的计量标准称为“国家计量基准”，简称国家基准。国家基准是具有现代科学技术所能达到的最高精确度的计量器具，它经国家鉴定

并批准，具有复现、保存、传递单位量值的功能。

(3) 副基准：国家基准全国仅有一个，为保证国家基准的精确度不致因经常使用而降低，而制做了若干副基准。它是通过与国家基准比较来定值的，其量值代替国家基准向下一级传递，而国家基准仅起保存计量单位、调整或修正副基准之用。

(4) 工作基准：通过主基准与副基准比较来定值的计量标准称为工作基准。它作为科学研究、工业测试标准仪器的基本参考标准，一般保存在国家计量研究机构、各省级计量机构。

(5) 计量标准：根据基准量值制成的标准量具、仪器，它是一种把计量基准量值传递到工作计量器具的计量器具。根据其精确度的高低计量标准可分为一等、二等……，多数情况下各等计量标准的精确度不同，结构原理也不相同。

五、量值传递

1. 量值传递：通过检定，将国家计量基准所复现的计量单位量值通过标准逐级传递到工作计量器具，以保证被计量对象的量值准确和一致，称为量值传递。

所谓量值准确一致，是指同一量值用不同计量器具进行计量，在要求的精确度范围内其计量结果达到统一。要做到单位统一、量值准确、测量误差限制在允许范围内，被计量的量值必须具有能与国家计量基准或国际计量基准相联系的特性，这就必须将基准的量值过渡到工作计量器具上，目前是通过量值传递来实现这种过渡的。

2. 量值传递层次：目前我国量值传递层次基本与行政区划层次一致，国际基准传递到国家基准，国家基准传递到省级计量技术机构，再传递到地、市、县级计量技术部门，最后传递到现场广泛使用的工作计量器具上。国家基准大部分保存在中国计量科学研究院及其成都分院。

六、有效数字及其运算

计量工作遇到测量、计算、对比结果等问题，必然要同数字打交道，因此，掌握正确的数字运算规则是十分必要的。若用一只分度为 0.1°C 的体温计测量某人的体温，其测量结果为 36.84°C ，显然数据中小数点后第二位数字是虚假无效的，称作可疑数字或可疑位，其它位的数字都是准确数字。可见，计量中所测取数据的位数不可以任意选取，而受数字有效性的限制。

1. 有效数字：从一个数的左边第一个非零数字开始到最右边的准确数字，称为该数的有效数字。该数有几个有效数字，该数的有效位数就是几位。

对于一般性计量，可按计量器具的最小刻度值来确定有效位数。若需对计量结果进行计算，如求算术平均值，在读数时可多估一位，但最后测量结果的有效位数仍根据计量器具最小刻度值确定。可见，测量数据的有效位数受计量器具及方法的精度限制。

2. 数字的取舍（修约）规则：在计量测试数据中需保留的有效位数的数字，应遵循下述规则进行取舍。

如果数据需保留 N 位有效数字，则第 N 位为末位，以末位为单位，其舍入原则为：

(1) 若末位后的数大于 0.5 个末位单位，末位数字加 1 后舍去末位后的数字；

(2) 若末位后的数小于 0.5 个末位单位，舍去末位后的数字，末位数字不变；

(3) 若末位后的数等于 0.5 个末位, 则按偶数原则处理, 即末位为偶数, 则舍去末位后的数, 末位不变; 若末位为奇数, 则末位数字加 1 变为偶数。

按偶数原则处理的目的是, 只是为便于计算, 避免进一步运算引起的除不尽情况下的舍入误差, 使舍入的机会趋于均等, 提高计量数据的计算精度。

示例 将下列数保留到小数点后第二位。

$$8.2829 \rightarrow 8.28 \quad 7.81756 \rightarrow 7.82$$

$$0.3750 \rightarrow 0.38 \quad 5.1050 \rightarrow 5.10$$

3. 数字的表示: 用 10 的整数次幂来表示一个数, 称作科学记数。采用科学记数便于准确无误地辨认一个数的有效数字位数。

例如, 某测量值为 5.4mm, 用不同的计量单位可表示为

$$5.4\text{mm}, \quad 5.4 \times 10^3 \mu\text{m},$$

$$5.4 \times 10^{-3}\text{m}, \quad 5.4 \times 10^{-1}\text{cm}.$$

4. 数字的运算规则: 在计量检测数据的计算中, 为提高计算速度, 保证计算精度, 需要掌握一定的运算规则:

(1) 加减法运算: 几个数相加(减)时, 按取舍规则将小数位数较多的数简化成比小数位数最少的数只多一位数字的数, 进行加(减)运算, 最后结果小数位数取至与原小数位数最少的数相同。

$$\begin{array}{r} \text{例} \quad \begin{array}{r} 178.65 \\ - 5.412 \\ \hline 173.238 \end{array} \approx 173.24 \quad \begin{array}{r} 0.013 \\ + 1.60012 \\ \hline 1.61312 \end{array} \approx 1.613 \end{array}$$

(2) 乘除法运算: 以有效位数最少的数为标准, 最后结果及参加运算的其他数的有效位数不超过该标准数(也可多保留一位)。

$$\text{例} \quad 2.7 \times 48.246 = ?$$

$$\text{解} \quad 2.7 \times 48.2 = 130.14$$

进行混合运算时, 中间运算结果的有效数字位数可以按上述运算规则所得结果多保留一位。

第二节 测量误差及其分类

一、测量误差的概念

测量就是用一定的仪器、通过一定的实验方法把被测量与标准量进行比较。目的是测知被测量值的真实大小。但由于测量仪器精确度的限制、实验方法的不完善、环境条件的变化及测量者的知识和技术水平等原因, 使仪器示值与被测量真值之间存在有差异, 这个差值称为测量误差。误差是不能根除的, 只能限制在某一范围内。

一般来说真值是无法直接得到的, 常用被测量的实际值或算术平均值来代替。

通常, 把上一级的计量标准器的量值作为实际值; 将一组测量值的算术平均值作为该量的直值。

二、测量误差的分类

根据测量误差的性质及其产生的原因,可分为系统误差、随机误差和粗大误差。

1. 系统误差: 在相同条件下多次重复测量同一个量时, 误差的大小和符号保持不变或按照一定规律(函数规律)变化, 这种误差称为系统误差。产生系统误差的原因有: 测量原理及方法不完善; 仪器零点调整不好; 测量环境变化; 测量者对仪器使用不当等。

系统误差的特点是按一定的规律变化, 一般可通过实验或分析的方法, 查明其变化的规律和产生的原因。因此, 系统误差是可以预知, 也是可以消除的, 或者在产生系统误差后引进相应的修正值, 对测量结果加以修正, 使其减少或消除。

2. 随机误差(偶然误差): 在相同条件下多次重复测量同一量时, 绝对值和符号以不可预定方式变化的误差分量, 这种误差称为随机误差。

随机误差产生的原因为许多独立的、微小的、偶然的因素总和所致, 如仪器仪表运动部件间的摩擦、接触电阻的变化等都是无规律的, 其所引起的误差是随机的。

随机误差的特点是既不能用实验方法消除, 也不能修正。但是, 可利用概率论的一些理论和统计学的方法, 找出误差的大小和出现次数的数学关系, 即找出误差的分布规律, 从随机误差的统计规律中了解其分布特性, 从而判断误差的极限范围, 评价随机误差的大小。

3. 粗大误差: 它是指明显地歪曲了测量结果, 其值超过规定条件下的预期值的误差, 又称疏失误差或粗差。

粗大误差产生的原因主要是操作者的粗枝大叶(如读数不正确、对错标记等)、测量条件的突然变化等。

粗大误差不是测量仪器本身固有的, 测量中应保证仪器的正常工作条件, 尽量避免出现这类误差, 含有粗大误差的测量值称为坏值必须剔除, 否则测量结果将不真实。坏值的剔除原则见下节。

必须指出, 上述三种性质的误差并非固定不变, 在一定条件下可以互相转化。例如, 在同一精确度等级的同类仪器仪表中, 每台的具体系统误差彼此不一, 对使用者来说它就具有随机性。由此可见, 系统误差与随机误差就其本质而言并无区别, 其区别仅在于误差在所指定的场合和条件下是服从统计规律, 还是服从函数规律。

三、误差的表达形式

1. 绝对误差: 被测量的量的测量结果与其真值之差值, 称为绝对误差 δ :

$$\delta = x - a \quad (1-2)$$

式中 x ——测量结果;

a ——被测量的真值。

绝对误差不能用来比较量程不同的同类仪器仪表, 也不能比较不同类仪器仪表。

2. 相对误差: 绝对误差与被测量的量的真值之比称为相对误差 δ_r , 其表达式为:

$$\delta_r = \frac{\delta}{a} \times 100\% \quad (1-3)$$

相对误差是无计量单位的纯数值。

同一台仪器在整个测量范围内, 相对误差一般不是常数, 而随被测量的大小而变化, 一般情况下, 在测量下限附近的相对误差较测量上限值 $2/3 \sim 4/5$ 附近的大, 仅此而言, 它不利于仪器仪表之间的比较。为此采用了引用误差的概念。

3. 引用误差: 被测量的绝对误差与量程 B 的比值称引用误差 γ , 其表达式为:

$$\gamma = \frac{\delta}{B} \times 100\% \quad (1-4)$$

工程中常用最大引用误差 $\gamma_{\max}$ 来确定仪器仪表的精确度等级, 精确度等级标明仪表的最大引用误差不会超过的界限。一般说来, A 级精确度等级仪表, 其最大引用误差不会超过 $A\%$ 。如 0.5 级的电表, 其最大引用误差不会超过 0.5%。

引用误差是相对误差的一种表达形式, 仅是对表达式的分子、分母规定了特定值。用相对误差、引用误差, 就可比较数量级不同的被测量的测量值、测量方法及测量装置的精度。在选用仪表时应注意相对误差、引用误差的概念, 并正确地使用仪表。

例 1 现存 0.5 级、0~300℃ 和 1.0 级、0~100℃ 的两支温度计, 若欲测 100℃ 以下的温度, 选用哪支较合适?

解 用 0.5 级的表测量, 相对误差最大值 $\delta_{R1} = \frac{300 \times 0.5\%}{100} = 1.5\%$; 用 1 级的表测量, 相对误差最大值 $\delta_{R2} = \frac{100 \times 1.0\%}{100} = 1\%$ 。由计算看出, 选用 1.0 级的表较合适。因此, 选用仪表时要精度等级和量程兼顾。

例 2 两个长度测量值, 其中 $l_1 = 2.647 \pm 0.005 \text{ mm}$, $l_2 = 45618 \pm 1 \text{ m}$ 。就绝对误差而言, l_2 较 l_1 的绝对误差大的多; 从相对误差看, $\delta_{R1} = \pm \frac{0.005}{2.647} \times 100\% = \pm 0.2\%$, $\delta_{R2} = \pm \frac{1}{45618} \times 100\% = \pm 0.002\%$, 后者较前者的精度高许多。

四、测量精度

测量精度是计量测试常用术语之一, 它是指测量结果与真实值接近的程度。它与误差大小相对应。测量结果越接近真值, 误差越小, 测量精度越高。

精度有三项指标:

(1) 精密度: 说明在相同工作条件下, 对同一被测量进行多次测量时, 其测量结果的不一致程度, 不一致程度越小, 说明测量越精密, 它反映随机误差的影响程度。

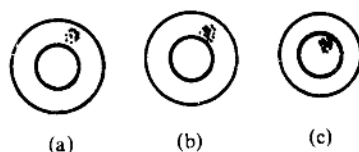


图 1-1 精密度、正确度和精确度的关系

(2) 正确度: 说明仪表示值有规律偏离真值大小的程度。正确度反映系统误差影响的程度。

(3) 精确度 (准确度): 它表示测量结果与真值的一致程度, 反映了系统误差和随机误差综合影响程度。

精密度、正确度和精确度三者之间的关系见图 1-1。a) 的精密度好, 但正确度差; b) 的正确度好, 但精密度差; c) 的精确度好。

在计量工作中常用到不确定度这个术语，不确定度是表征被计量的真值所处的量值范围的评定，它表示计量结果附近的一个范围，而被计量的真值以一定概率落于其中。

计量结果的不确定度一般包含多个分量，按其数值评定方法这些分量可分作两类：

A 类：用统计方法计算的那些分量；

B 类：用其它方法计算的那些分量；

根据 1980 年国际计量局召开的国际会议向国际计量委员会的建议书 INC-1 (1980)，计量结果的不确定度以标准偏差 σ (或方差 σ^2) 表征，对特殊用途，可将 σ 乘以某一因子 (置信因子) 来表示。

第三节 随机误差

随机误差是指在实际测量条件下，对同一量值进行多次重复测量时，得到一系列不同的测量值 (称为测量列)，每个测量值都存在误差，这些误差的绝对值和符号的变化没有规律可循，即前一个误差出现后，不能预知下一个误差的大小和方向。没有一定的规律系指一次测量而言，但就误差的总体而论，却具有统计规律性。

一、频率直方图

为了研究分析随机误差的分布规律，我们先来观察分析一组实验测得的数据。

在同一条件 (仪器、设备、环境、观测者) 下对某量 x 进行多次重复测量，各测值均不含系统误差和粗大误差。设 x 的真值为 x_0 ，则各测值 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 的误差为：

$$\delta_i = x_i - x_0 \quad (1-5)$$

现将误差范围分作 N 个区间，令 $N=7$ ，小区间为等间隔的 $\Delta\delta(\Delta x)$ ，落在各小区间的误差个数分别为 $n_1, n_2, \dots, n_7$ ，则 n_j/n 称为出现在第 j 个小区间的误差频率，若以随机误差为横坐标，以真值 x_0 作横坐标的零点，以随机误差的频率 n_j/n 为纵坐标，根据表 1-6 实验测得值画出它们的关系曲线即得到频率直方图。如图 1-2 所示。

表 1-6 随机误差实验数据

分 区 号	出现次数 n_j	频率 n_j / n (%)
1	1	1.1
2	3	3.3
3	2	2.4
4	3	3.8
5	2	2.6
6	5	5.5
7	2	2.2

可以看出，随机误差出现在真值附近的次数最多，离真值越远，出现的次数越少。

频率直方图粗略地反映了随机误差的分布规律, 其形状与划分的间隔大小有关, 对于不同的间隔 $\Delta\delta_i$ 值, 频率 n_i/n 值也不同, 间隔越大, n_i/n 值越大, 这样同一组实验数据的频率直方图将不同。

当测量次数 $n \rightarrow \infty$ 时, 令 $\Delta\delta_i \rightarrow d\delta$, $n_i \rightarrow dn$ 则由概率密度的定义可知, 随机误差的概率密度 $f(\delta)$ 为:

$$f(\delta) = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n_i}{n} \cdot \frac{1}{\Delta\delta} = \frac{1}{n} \frac{dn}{d\delta} \quad (1-6)$$

此时, 随机误差的梯形曲线将变为一条光滑的连续曲线, 如图 1-3 所示。这条曲线即为随机误差概率分布密度曲线, 它从本质上反映了随机误差的统计规律。

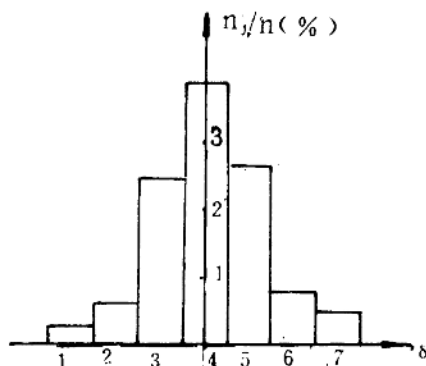


图 1-2 随机误差频率直方图

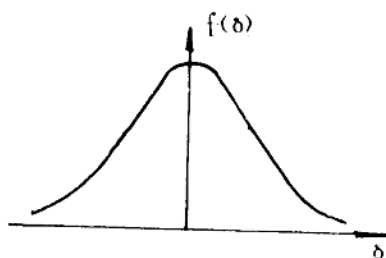


图 1-3 随机误差的概率密度曲线

二、正态分布

上述的实验数据中不包含系统误差和粗大误差, 是等精度独立测量的结果。所谓等精度测量指的是在相同条件下进行的一组测量, 在这种测量中, 系统误差已通过修正加以消除, 粗大误差也已剔除, 测量列中仅有随机误差存在。因随机误差是大量的、微小的、独立的及随机的因素综合影响而产生的, 根据概率论的中心极限定理可知; 随机误差概率分布密度曲线是正态分布曲线。其数学表达式为:

$$f(\delta) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\delta^2}{2\sigma^2}} \quad (1-7)$$

式中 σ ——标准偏差 (均方根误差);

通过上述实验和对正态分布曲线的分析可知, 随机误差有如下特性:

1. 对称性: 绝对值相等的正误差和负误差出现的可能性相同。
2. 单峰性: 绝对值小的误差比绝对值大的误差出现的可能性大。
3. 抵偿性: 在相同条件下, 当测量次数 $n \rightarrow \infty$ 时, 全体误差的代数和为零,

即 $\lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^n \delta_i = 0$, 换言之正误差与负误差相互抵消。

4. 有界性: 在一定测量条件下, 随机误差的绝对值不会超过一定界限。