



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

热工测量仪表

(第3版)

张 华 赵文柱 编著



冶金工业出版社

<http://www.cnmp.com.cn>

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

热工测量仪表

(第3版)

张 华 赵文柱 编著



北 京

冶 金 工 业 出 版 社

2006

内 容 提 要

本书详细阐述了温度、压力、流量、物位四大热工参数的测量物理基础、测量原理与方法、测量仪表组成与结构、仪表选型与安装、各种仪表的使用注意事项和误差分析等内容,并介绍了测量的基本概念、主要测量仪表的应用实例和科研成果。

本书为高等院校仪表、自动化、机械、热能、冶金、电气传动、计算机、化工、航天航空等相关专业的教材,也可供有关的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

热工测量仪表/张华,赵文柱编著.—3版.—北京:冶金工业出版社,2006.9

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

ISBN 7-5024-3992-7

I. 热… II. ①张… ②赵… III. 热工仪表—高等学校—教材 IV. TH81

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第076881号

出版人 曹胜利(北京沙滩嵩祝院北巷39号,邮编100009)

责任编辑 杨敏 宋良 美术编辑 李心

责任校对 符燕蓉 李文彦 责任印制 牛晓波

北京兴华印刷厂印刷;冶金工业出版社发行;各地新华书店经销

1985年6月第1版,1993年10月第2版,

2006年9月第3版,2006年9月第12次印刷

787mm×1092mm 1/16;22印张;589千字;340页;30701~33700册

38.00元

冶金工业出版社发行部 电话:(010)64044283 传真:(010)64027893

冶金书店 地址:北京东四西大街46号(100711) 电话:(010)65289081

(本社图书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)

前 言

仪器仪表用于实现信息的获取，是信息工业的源头。热工测量仪表是仪器仪表的一个重要分支，对保证生产正常连续运行，确保产品质量和产量，实现安全、高效生产具有重要的意义。科学技术的迅速发展，特别是计算机、激光、红外技术以及系统分析技术、信号处理技术的应用为热工测量仪表的发展开辟了许多新的领域。

全书共分五章，第一章绪论，介绍了测量仪表的基本概念、测量误差分析与不确定度的评定、测量仪器的基本性能指标等，主要强调对概念的理解以及和实际应用的联系；第二章温度测量仪表，不仅详细介绍了接触式和非接触式测量方法和仪表，而且还增加了光导纤维测温技术、集成温度传感器测温技术和测温仪表的应用介绍；第三章压力、差压测量仪表，介绍了弹性式、负荷式、电气式等压力检测仪表，压力变送器和压力表的选择与安装；第四章流量测量仪表，主要介绍节流式差压流量计与其他9种流量计的测量原理、基本结构、仪表特点和应用等内容；第五章物位测量仪表，介绍了静压式、浮力式、电气式等10种物位测量的方法与仪表。

本着加强基础、拓宽专业、培养学生的自学能力和知识更新能力的原则，教材的内容安排突出了以下几点：

(1) 既介绍各种传统的测量原理、方法与技术，使知识结构具有系统性、渐进性；又以较大篇幅介绍新技术、新方法和发展方向，如光纤、激光、超声、红外等技术在热工测量中的应用，以满足“先进性、创新性、适用性”的要求。

(2) 鉴于热工测量仪表具有涉及学科面广、内容多而零散、各表间相互联系不紧密、逻辑性差的特点，因此着重提取各种测量方法、技术中有共性和有规律性的内容，并在此基础上进行归纳总结和分析比较，使读者能够具有一个系统、完整的概念。

(3) 为加强实用性和突出对应用能力的培养，不仅增加了热工测量仪表的应用实例介绍和科研成果介绍，如熔融金属的温度测量、气流温度测量等，而且还增设了根据使用条件进行仪表选型、各种仪表的使用注意事项和误差分析等内容，重点说明解决问题的方法和过程，希望读者能在接受某些知识的同

时掌握相应的学习方法。

(4) 为方便学生自学,在叙述上力求通俗易懂、深入浅出和突出重点,尽量避免繁琐的公式推导。在介绍概念的同时尽量说明相关知识的来龙去脉,并附有基础知识的介绍。

(5) 将整个教学内容分为五部分,每个模块相对独立,具有很强的灵活性、针对性、适应性和层次性,便于体系的更新和不同读者的取舍。

全书由张华和赵文柱编写,张华统稿。

本书的编写工作,得到了东北大学教务处和信息工程学院领导和同事的大力支持,谨表诚挚的谢意。

由于水平所限,书中不妥、错漏之处,恳请批评指正。

编 者

2006年2月

于东北大学

目 录

1 绪论	1
1.1 测量的基本知识	1
1.1.1 测量的概念	1
1.1.2 测量与检测的联系与区别	1
1.1.3 测量的意义	1
1.1.4 测量的构成要素	2
1.2 测量方法	2
1.2.1 直接测量法	2
1.2.2 间接测量法	2
1.2.3 组合测量法	2
1.3 测量分类	3
1.3.1 静态测量和动态测量	3
1.3.2 等精度测量和不等精度测量	3
1.3.3 电量测量和非电量测量	3
1.3.4 工程测量与精密测量	4
1.4 测量误差与测量不确定度	4
1.4.1 测量误差	4
1.4.2 测量不确定度的评定与表示方法	9
1.5 测量系统	15
1.5.1 测量系统的组成	15
1.5.2 测量系统的基本特性	16
1.6 测量技术的发展状况	26
1.6.1 传感器向着集成化、微型化和智能化的方向发展	26
1.6.2 不断拓展测量范围, 努力提高测量准确度和可靠性	27
1.6.3 测量原理和测量手段的重大突破	27
思考题	27
2 温度测量仪表	28
2.1 概述	28
2.1.1 温度和温标	28
2.1.2 温度测量仪表的分类	31
2.2 温度测量的物理基础	34
2.2.1 导热换热	34

2.2.2	对流换热	37
2.2.3	辐射换热	38
2.3	膨胀式温度计	50
2.3.1	概述	50
2.3.2	玻璃液体温度计	51
2.3.3	固体膨胀式温度计	56
2.3.4	压力式温度计	58
2.4	电阻式温度计	59
2.4.1	概述	59
2.4.2	金属热电阻温度计	61
2.4.3	半导体电阻温度计	68
2.4.4	热电阻温度计的使用和误差分析	70
2.5	热电偶温度计	70
2.5.1	热电偶测温原理	71
2.5.2	热电偶的基本定律及其应用	73
2.5.3	热电偶的冷端温度处理	76
2.5.4	热电偶的材料和种类	80
2.5.5	热电偶的结构	86
2.5.6	热电偶的实用测温电路	88
2.5.7	热电偶测温误差分析	90
2.5.8	热电偶的检定和分度	92
2.5.9	热电偶的选择、使用和安装	93
2.6	辐射温度计	95
2.6.1	概述	95
2.6.2	亮度温度计	100
2.6.3	比色温度计	113
2.6.4	全辐射温度计	116
2.6.5	测真温的辐射温度计	122
2.6.6	辐射测温的干扰分析	124
2.7	光纤温度计	125
2.7.1	概述	125
2.7.2	光纤辐射温度计	128
2.7.3	非功能型光纤温度计	132
2.7.4	功能型光纤温度计	137
2.7.5	分布式光纤测温系统	139
2.8	集成温度传感器测温技术	140
2.8.1	模拟集成温度传感器	140
2.8.2	模拟集成温度控制器	142
2.8.3	智能温度传感器	143

2.9 温度测量仪表的应用	146
2.9.1 熔融金属的温度测量	146
2.9.2 气流温度测量	149
2.9.3 接触式测温插入深度的研究	151
2.9.4 基于 MAX1668 的多通道温度巡回检测系统	152
思考题	153
3 压力、压差测量仪表	155
3.1 概述	155
3.1.1 压力、压差测量的意义	155
3.1.2 基本概念	155
3.1.3 压力测量仪表的分类	157
3.2 液柱式压力计	158
3.2.1 U形管压力计	158
3.2.2 单管压力计	159
3.2.3 斜管压力计	159
3.3 弹性压力计	160
3.3.1 基本原理	160
3.3.2 弹性元件	160
3.3.3 单圈弹簧管压力计	162
3.4 负荷式压力计	164
3.4.1 活塞式压力计	164
3.4.2 浮球式压力计	166
3.5 电气式压力检测仪表	166
3.5.1 压电式压力计	166
3.5.2 电阻式压力计	170
3.5.3 振频式压力计	179
3.6 其他压力检测仪表	181
3.6.1 压磁式压力计	181
3.6.2 真空计	182
3.6.3 压力分布测量系统	182
3.7 压力变送器	183
3.7.1 电容式压力变送器	183
3.7.2 霍尔式压力变送器	186
3.8 压力表的选择、安装与校准	187
3.8.1 压力表的选择	187
3.8.2 压力表的安装	189
3.8.3 压力检测仪表的校准	191
思考题	192

4 流量测量仪表	194
4.1 概述	194
4.1.1 流量的定义及表示方法	194
4.1.2 流量计分类和主要参数	195
4.1.3 流量测量的理论基础	198
4.2 节流式差压流量计	203
4.2.1 概述	203
4.2.2 标准节流装置的结构	204
4.2.3 标准节流装置的测量原理和流量公式	211
4.2.4 标准节流装置的适用条件	214
4.2.5 流量公式有关参数的确定	217
4.2.6 节流装置流量测量不确定度的估算	219
4.2.7 标准节流装置的设计计算	221
4.2.8 节流式差压流量计的选用和安装	222
4.2.9 非标准节流装置	225
4.3 皮托管和均压管流量计	227
4.3.1 工作原理	227
4.3.2 皮托管	228
4.3.3 均速管流量计	229
4.4 浮子流量计	230
4.4.1 结构原理和流量公式	230
4.4.2 刻度换算	232
4.4.3 工作特性	234
4.4.4 浮子流量计的种类	235
4.4.5 浮子流量计的特点	236
4.4.6 浮子流量计的选用和安装	236
4.5 靶式流量计	237
4.5.1 工作原理	237
4.5.2 刻度换算	238
4.5.3 工作特性及测量误差	239
4.5.4 靶式流量计的特点	241
4.5.5 靶式流量计的选用与安装	241
4.6 涡轮流量计	241
4.6.1 涡轮流量计结构	242
4.6.2 工作原理和流量方程	243
4.6.3 涡轮流量计的特点和使用	244
4.6.4 家用自来水表简介	245
4.7 电磁流量计	246

4.7.1	工作原理	246
4.7.2	电磁流量计的结构	248
4.7.3	电磁流量计的特点和选用	251
4.7.4	电磁流量计的安装和使用	252
4.8	涡街流量计	254
4.8.1	工作原理	254
4.8.2	涡街流量计的结构	255
4.8.3	涡街流量计的特点及安装	259
4.9	超声波流量计	260
4.9.1	超声波检测的物理基础	260
4.9.2	超声波流量计的分类和特点	265
4.9.3	速度差法超声波流量计	265
4.9.4	多普勒超声波流量计	272
4.10	容积式流量计	275
4.10.1	概述	275
4.10.2	转子型容积式流量计	277
4.10.3	刮板型容积式流量计	280
4.10.4	容积式流量计的误差分析	281
4.10.5	容积式流量计的选择与安装	283
4.11	质量流量计	284
4.11.1	概述	284
4.11.2	直接式质量流量计	284
4.11.3	间接式质量流量计	292
	思考题	293
5	物位测量仪表	295
5.1	概述	295
5.1.1	物位测量的意义	295
5.1.2	基本概念	295
5.1.3	物位测量仪表的分类	295
5.1.4	物位测量存在的主要问题	297
5.2	直读式液位计	299
5.3	静压式物位测量仪表	299
5.3.1	压力计式物位计	299
5.3.2	差压式液位计	300
5.3.3	吹气式液位计	302
5.3.4	量程迁移	302
5.4	浮力式物位测量仪表	304
5.4.1	浮子式液位计	304

5.4.2 浮筒式物位测量仪表	308
5.4.3 杠杆浮球式液位计	310
5.5 电气式物位测量仪表	310
5.5.1 电容式物位测量仪表	310
5.5.2 电导式物位测量仪表	315
5.5.3 电感式液位计	317
5.6 超声波物位测量仪表	318
5.6.1 概述	318
5.6.2 定点式超声物位计	318
5.6.3 连续式超声物位计	320
5.7 激光式物位测量仪表	323
5.7.1 激光液位计	324
5.7.2 激光料位计	324
5.8 核辐射式物位计	325
5.8.1 概述	325
5.8.2 基本原理	325
5.8.3 基本结构	325
5.8.4 γ 射线物位计的几种类型	326
5.8.5 核辐射式物位计的特点	327
5.9 机械式物位测量仪表	328
5.9.1 重锤式料位计	328
5.9.2 旋翼式料位开关	328
5.9.3 音叉式料位计	329
5.10 微波式物位测量仪表	329
5.10.1 概述	329
5.10.2 位式微波物位计	330
5.10.3 反射式微波液位计	331
5.10.4 测时间反射式微波物位计	332
5.11 热电式液位计	332
思考题	333
附 录	334
附录 A 标准化热电偶分度表	334
附录 B 主要热电偶的参考函数	338
参考文献	340

1 绪 论

1.1 测量的基本知识

1.1.1 测量的概念

测量 (measurement) 是人类认识自然界中客观事物, 并用数量概念描述客观事物, 进而达到逐步掌握事物的本质和揭示自然界规律的一种手段, 即对客观事物取得数量概念的一种认识过程。在这一过程中, 人们借助于专门工具, 通过试验和对试验数据的分析计算, 求得被测量的值, 获得对于客观事物的定量的概念和内在规律的认识。因此可以说, 测量就是为取得未知参数值而做的, 包括测量的误差分析和数据处理等计算工作在内的全部工作。该工作可以通过手动的或自动的方式来进行。

从计量学的角度讲, 测量就是利用实验手段, 把待测量与已知的同性质的标准量进行直接或间接的比较, 将已知量作为计量单位, 确定两者的比值, 从而得到被测量量值的过程。其目的是获得被测对象的确定量值, 关键是进行比较。

1.1.2 测量与检测的联系与区别

检测主要包括检验和测量两方面的含义。检验是分辨出被测量的取值范围, 以此来对被测量进行诸如是否合格等判别。测量是指将被测未知量与同性质的标准量进行比较, 确定被测量对标准量的倍数, 并用数字表示这个倍数的过程。

1.1.3 测量的意义

伟大的化学家、计量学家门德列耶夫说过: “科学是从测量开始的, 没有测量就没有科学, 至少是没有精确的科学、真正的科学”。我国“两弹一星”元勋王大珩院士也说过: “仪器是认识世界的工具; 科学是用斗量禾的学问。用斗去量禾就对事物有了深入的了解、精确的了解, 就形成科学”。

信息产业将在 21 世纪成为世界发达国家的首要产业。信息产业的要素包括信息的获取、存储、处理、传输和利用, 而信息的获取正是靠仪器仪表来实现的。如果获取的信息是错误的或不准确的, 那么后面的存储、处理、传输都是毫无意义的, 所以, 仪器仪表制造业是信息产业的龙头。

人类的知识许多是依靠测量得到的。在科学技术领域内, 许多新的发现、新的发明往往是以测量技术的发展为基础的, 测量技术的发展推动着科学技术的前进。在生产活动中, 新工艺、新设备的产生, 也依赖于测量技术的发展水平。而且, 可靠的测量技术对于生产过程自动化、设备的安全以及经济运行都是不可少的先决条件。无论是在科学实验中还是在生产过程中, 一旦离开了测量, 必然会给工作带来巨大的盲目性。只有通过可靠的测量, 然后正确地判断测量结果的意义, 才有可能进一步解决自然科学和工程技术上提出的问题。

1.1.4 测量的构成要素

一个完整的测量包含六个要素，它们分别是：

(1) 测量对象与被测量；(2) 测量环境；(3) 测量方法；(4) 测量单位；(5) 测量资源，包括测量仪器与辅助设施、测量人员等；(6) 数据处理和测量结果。

例如，用玻璃液体温度计测量室温。在该测量中，测量对象是房间，被测量是温度，测量环境是常温常压，测量方法是直接测量，测量单位是 $^{\circ}\text{C}$ （摄氏度），测量资源包括玻璃液体温度计和测量人员，经误差分析和数据处理后，获得测量结果并表示为 $t = (20.1 \pm 0.02)^{\circ}\text{C}$ 。

1.2 测量方法

测量方法就是实现被测量与标准量比较的方法，通常有以下三种方法。

1.2.1 直接测量法

使被测量直接与选用的标准量进行比较，或者用预先标定好的测量仪器进行测量，从而直接求得被测量数值的测量方法，称为直接测量法。例如，用水银温度计测量介质温度，用压力表测量容器内介质压力等，都属于直接测量法。

1.2.2 间接测量法

通过直接测量与被测量有某种确定函数关系的其他各个变量，然后将所测得的数值代入该确定函数关系进行计算，从而求得被测量数值的方法，称为间接测量法。例如，用差压式流量计测量标准节流件两侧的压差，进而求得被测对象的流量。

该方法测量过程复杂费时，一般应用在以下情况：

- (1) 直接测量不方便；
- (2) 间接测量比直接测量的结果更为准确；
- (3) 不能进行直接测量的场合。

1.2.3 组合测量法

在测量两个或两个以上相关的未知量时，通过改变测量条件使各个未知量以不同的组合形式出现，根据直接测量或间接测量所获得的数据，通过解联立方程组以求得未知量的数值，这类测量称为组合测量法。例如，用铂电阻温度计测量介质温度时，其电阻值 R 在 $0 \sim 850^{\circ}\text{C}$ 时与温度 t 的关系是

$$R_t = R_0(1 + At + Bt^2) \quad (1-1)$$

式中 R_t 、 R_0 ——温度分别为 $t^{\circ}\text{C}$ 和 0°C 时铂电阻的电阻值， Ω ；

A 、 B ——常数。

为了确定常数 A 和 B ，首先至少需要测得铂电阻在两个不同温度下的电阻值 R_t ，然后建立联立方程，通过求解确定 A 和 B 的数值。

组合测量法在实验室和其他一些特殊场合的测量中使用较多。例如，建立测压管的方向特性、总压特性和速度特性曲线的经验关系式等。

注意：间接测量法和组合测量法的区别。

间接测量法的直接测量量和被测量之间具有确定的一个函数关系，通过直接测量量即可唯

一确定被测量；而组合测量法被测量和直接测量量或间接测量量之间不是单一的一个函数关系，需要求解根据测量结果所建立的方程组来获得被测量。

1.3 测量分类

在测量活动中，为满足对各种被测对象的不同测量要求，依据不同的测量条件有着不同的测量方法。对测量方法可以从不同角度进行分类，除根据测量结果的获得方式或测量方法，把测量分为直接测量、间接测量和组合测量（如 1.2 节所述）三种外，常见的分类方法有以下几种。

1.3.1 静态测量和动态测量

根据被测对象在测量过程中所处的状态，可以把测量分为静态测量和动态测量。

1.3.1.1 静态测量

静态测量是指在测量过程中被测量可以认为是固定不变的，因此不需要考虑时间因素对测量的影响。人们在日常测量中所接触的绝大多数是静态测量。对于静态测量，被测量和测量误差可以当做一种随机变量来处理。

1.3.1.2 动态测量

动态测量是指被测量在测量期间随时间（或其他影响量）发生变化。如弹道轨迹的测量、环境噪声的测量等。对这类被测量的测量，需要当做一种随机过程的问题来处理。

相对于静态测量，动态测量更为困难。这是因为被测量本身的变化规律复杂，测量系统的动态特性对测量的准确度有很大影响。实际上，绝对不随时间而变化的量是不存在的，通常把那些变化速度相对于测量速度十分缓慢的量的测量，简化为静态测量。

1.3.2 等精度测量和不等精度测量

根据测量条件是否发生变化，可以把对某测量对象进行的多次测量分为等精度测量与不等精度测量。

1.3.2.1 等精度测量

等精度测量是指在测量过程中，测量仪表、测量方法、测量条件和操作人员等都保持不变。因此，对同一被测量进行的多次测量结果，可认为具有相同的信赖程度，应按同等原则对待。

1.3.2.2 不等精度测量

不等精度测量是指测量过程中测量仪表、测量方法、测量条件或操作人员等中某一因素或某几个因素发生变化，使得测量结果的信赖程度不同。对不等精度测量的数据应按不等精度原则进行处理。

1.3.3 电量测量和非电量测量

根据被测量的属性，可以把测量分为电量测量和非电量测量。

1.3.3.1 电量测量

电量测量是指电子学中有关量的测量，具体包括：

- (1) 表征电磁能的量，如电流、电压、功率、电场强度、噪声等；
- (2) 表征信号特征的量，如频率、相位、波形参数等；
- (3) 表征元件和电路参数的量，如电阻、电容、电感、介电常数等；

(4) 表征网络特性的量, 如带宽、增益、带内波动、带外衰减等。

1.3.3.2 非电量测量

非电量测量是指非电子学中量的测量。如温度、湿度、压力、气体浓度、机械力、材料光折射率等非电学参数的测量。随着科学技术的发展与学科间的相互渗透, 特别是为了自动测量的需要, 有些非电量都设法通过适当的传感器转换为属于电量的电信号来进行测量。因此, 对于非电量测量的领域, 也需要了解一些基本电量测量的知识。

1.3.4 工程测量与精密测量

根据对测量结果的要求不同, 可以把测量分为工程测量与精密测量。

1.3.4.1 工程测量

工程测量是指对测量误差要求不高的测量。用于这种测量的设备和仪表的灵敏度和准确度比较低, 对测量环境没有严格要求。因此, 对测量结果只需给出测量值。

1.3.4.2 精密测量

精密测量是指对测量误差要求比较高的测量。用于这种测量的设备和仪表应具有一定的灵敏度和准确度, 其示值误差的大小一般需经计量检定或校准。在相同条件下对同一个被测量进行多次测量, 其测得的数据一般不会完全一致。因此, 对于这种测量往往需要基于测量误差的理论和方法, 合理地估计其测量结果, 包括最佳估计值及其分散性大小。有的场合, 还需要根据约定的规范对测量仪表在额定工作条件和工作范围内的准确度指标是否合格做出合理判定。精密测量一般是在符合一定测量条件的实验室内进行, 其测量的环境和其他条件均要比工程测量严格, 所以又称为实验室测量。

此外, 测量根据传感器的测量原理可分为: 电磁法、光学法、超声法、微波法、电化学法等。根据敏感元件是否与被测介质接触, 可分为接触式测量与非接触式测量。根据测量的比较方法, 可分为偏差法、零位法和微差法。根据被测参数的不同, 可分为热工测量(通常指温度、压力、流量和物位)、成分测量和机械量测量。

1.4 测量误差与测量不确定度

1.4.1 测量误差

1.4.1.1 基本概念

A 误差 (error) 的定义

测量是一个变换、放大、比较、显示、读数等环节的综合过程。由于测量系统(仪表)不可能绝对准确, 测量原理的局限、测量方法的不尽完善、环境因素和外界干扰的存在以及测量过程可能会影响被测对象的原有状态等, 也使得测量结果不能准确地反映被测量的真值而存在一定的偏差, 这个偏差就是测量误差。它等于测量结果减去被测量的真值, 即

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

式中, Δx 为测量误差; x 为测量结果; μ 为真值。

误差只与测量结果有关, 不论采用何种仪表, 只要测量结果相同, 其误差是一样的。误差有恒定的符号, 非正即负, 如 -1 , $+2$ 。而不应该写成 ± 2 的形式, 因为它表示被测量值不能确定的范围, 不是真正的误差值。

B 真值 (true value)

式(1-2)只有在真值已知的前提下才能应用, 而实际上很多情况真值都是未知的, 通常

用以下3种方法确定真值。

a 理论真值

通常把对一个量严格定义的理论值叫做理论真值,如三角形三内角和为 180° ,垂直度为 90° 等。如果一个被测量存在理论真值,式(1-2)中的 μ 应该由它来表示。由于理论真值在实际工作中难以获得,常用约定真值或相对真值来代替。

b 约定真值

约定真值是对于给定不确定度所赋予的(或约定采用的)特定量的值。获得约定真值的方法通常有以下几种:

(1) 由计量基准、标准复现而赋予该特定量的值;

(2) 采用权威组织推荐的值。例如,由常数委员会(CODATA)推荐的真空光速、阿伏伽德罗常数等;

(3) 用某量的多次测量结果的算术平均值来确定该量的约定真值。

c 相对真值

对一般测量,如果高一级测量仪表的误差小于等于低一级测量仪表误差的 $1/3$;对于精密测量,如果高一级测量仪表的误差小于等于低一级测量仪表误差的 $1/10$,则可认为前者所测结果是后者的相对真值。

1.4.1.2 误差的分类

根据测量误差的性质和出现的特点不同,一般可将测量误差分为三类,即系统误差、随机误差和粗大误差。

A 系统误差

系统误差(systematic error)定义为:在重复性条件下,对同一被测量进行无限多次测量所得结果的平均值与被测量的真值之差。其特征是在相同条件下,多次测量同一量值时,该误差的绝对值和符号保持不变,或者在条件改变时,误差按某一确定规律变化。前者称为恒值系统误差,后者称为变值系统误差。在变值系统误差中,又可按误差变化规律的不同分为线性系统误差、周期性系统误差和按复杂规律变化的系统误差。例如,用天平计量物体质量时,砝码的质量偏差;刻线尺的温度变化引起的示值误差等都是系统误差。

在实际估计测量器具示值的系统误差时,常常用适当次数的重复测量的算术平均值减去约定真值来表示,又称其为测量器具的偏移(bias)。

由于系统误差具有一定的规律性,因此可以根据其产生原因,采取一定的技术措施,设法消除或减小。也可以采用在相同条件下对已知约定真值的标准器具进行多次重复测量的办法,或者通过多次变化条件下的重复测量的办法,设法找出其系统误差变化的规律后,再对测量结果进行修正。修真值 C 的表达式如下

$$C = \mu - x \quad (1-3)$$

可见,修真值 C 与误差的数值相等,但符号相反。系统误差的补偿与修正一直是误差理论与数据处理所关注的热点问题。

B 随机误差

随机误差(random error)又称为偶然误差,定义为:测得值与在重复性条件下对同一被测量进行无限多次测量所得结果的平均值之差。其特征是在相同测量条件下,多次测量同一量值时,绝对值和符号以不可预定的方式变化。

随机误差产生于实验条件的偶然性微小变化,如温度波动、噪声干扰、电磁场微变、电源

电压的随机起伏、地面振动等。由于每个因素出现与否，以及这些因素所造成的误差大小，人们都难以预料和控制。所以，随机误差的大小和方向均随机不定，不可预见，不可修正。

虽然一次测量的随机误差没有规律，不可预见，也不能用实验的方法加以消除。但是，经过大量的重复测量可以发现，它是遵循某种统计规律的。因此，可以用概率统计的方法处理含有随机误差的数据，对随机误差的总体大小及分布做出估计，并采取适当措施减小随机误差对测量结果的影响。

C 粗大误差

粗大误差 (gross error) 又称为疏忽误差、过失误差，是指明显超出统计规律预期值的误差。其产生原因主要是某些偶尔突发性的异常因素或疏忽，如测量方法不当或错误，测量操作疏忽和失误 (如未按规程操作、读错读数或单位、记录或计算错误等)，测量条件的突然较大幅度变化 (如电源电压突然增高或降低、雷电干扰、机械冲击和振动等) 等。由于该误差很大，明显歪曲了测量结果，故应按照一定的准则进行判别，将含有粗大误差的测量数据 (称为坏值或异常值) 予以剔除。

D 误差间的转换

系统误差和随机误差的定义是科学严谨的，不能混淆的。但在测量实践中，由于误差划分的人为性和条件性，使得它们并不是一成不变的，在一定条件下可以相互转化。也就是说一个具体误差究竟属于哪一类，应根据所考察的实际问题和具体条件，经分析和实验后确定。如一块电表，它的刻度误差在制造时可能是随机的，但用此电表来校准一批其他电表时，该电表的刻度误差就会造成被校准的这一批电表的系统误差。又如，由于电表刻度不准，用它来测量某电源的电压时势必带来系统误差，但如果采用很多块电表测此电压，由于每一块电表的刻度误差有大有小，有正有负，就使得这些测量误差具有随机性。

1.4.1.3 测量准确度、正确度和精密度

测量准确度 (accuracy) 表示测量结果与被测量真值之间的一致程度。在我国工程领域中俗称精度。测量准确度是反映测量质量好坏的重要标志之一。就误差分析而言，准确度反映了测量结果中系统误差和随机误差的综合影响程度，误差大，则准确度低；误差小，则准确度高。当只考虑系统误差的影响程度时，称为正确度 (correctness)；只考虑随机误差的影响程度时，称为精密度 (precision)。

准确度、正确度和精密度三者之间既有区别，又有联系。对于一个具体的测量，正确度高的未必精密，精密度高的也未必正确，但准确度高的，则正确度和精密度都高，故一切测量要力求准确，也宜分清准确度中正确度与精密度何者为主，以便采取不同的提高准确度的措施。可用射击打靶的例子来描述准确度、正确度和精密度三者之间的关系，如图 1-1 所示。

图 1-1(a) 中：弹着点全部在靶上，但分散。相当于系统误差小而随机误差大，即精密度低，正确度高。

图 1-1(b) 中：弹着点集中，但偏向一方，命中率不高。相当于系统误差大而随机误差小，即精密度高，正确度低。

图 1-1(c) 中：弹着点集中靶心。相当于系统误差与随机误差均小，即精密度、正确度都高，从而准确度亦高。

1.4.1.4 误差的来源

为了减小测量误差，提高测量准确度，就必须了解误差来源。而误差来源是多方面的，在测量过程中，几乎所有因素都将引入测量误差。在分析和计算测量误差时，不可能、也没有必要将所有因素及其引入的误差逐一计算。因此，要着重分析引起测量误差的主要因素。