



普通高等院校“十二五”规划教材

力学测试 技术基础

(第2版)

■ 张明 李训涛 苏小光 等编著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

013069680

TB301-33
17-2

内容简介

力学测试技术基础

(第2版)

张明 李训涛 苏小光 等编著



TB301-33
17-2

国防工业出版社

·北京·



北航

C1677816

082230610

内 容 简 介

本书为高等院校材料力学课程的实验教材。

本书分6章：第1章介绍了测试技术的概念、测量的概念、测试系统特性和实验应力分析方法；第2章从工程角度讨论了误差分析及处理方法，并讨论了测量不确定度的概念和评定方法；第3章详细分析了电阻应变测试的原理和方法，并介绍了多种应用应变测试原理的传感器；第4章论述了金属材料力学性能测试的有关实验标准和实验方法；第5章介绍了光弹性实验原理和方法；第6章讨论了实验技术方面的有关问题，并介绍了若干材料力学的典型实验。

本书可作为材料力学实验的配套教材，也可作为独立设课的材料力学实验课程的教材。

图书在版编目(CIP)数据

力学测试技术基础/张明, 李训涛, 苏小光编著. —2 版. —北京: 国防工业出版社, 2013.8

ISBN 978-7-118-08984-4

I. ①力… II. ①张… ②李… ③苏… III. ①材料力学-实验-高等学校-教材 IV. ①TB301-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 189604 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京奥鑫印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 12¼ 字数 330 千字

2013 年 8 月第 2 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 39.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010) 88540777

发行邮购: (010) 88540776

发行传真: (010) 88540755

发行业务: (010) 88540717

前 言

作为材料力学实验的配套教材,本书上一版出版已整整五年,尽管出版方一直催促希望能出新版,但总抽不出时间修订,又不想应付了事。这次终于下定决心,抽出近半年的时间对上一版作了修订,希望能不负众望。

这次修订,除改正了一些已发现的上一版的错误外,主要有以下几个方面。(1)新增了一些图片,尤其是实物图片,以便在学生动手实验前对研究对象有更直观的认识,也希望借此拉近理论与实践的距离。(2)更新了国标 GB/T 8170 的相关内容。(3)详细介绍了不确定度计量技术规范(JJF1059.1-2012)的主要内容,以适应计量技术与国际接轨的形势。(4)增加了应变片应用的一些工程实例,以及应变式传感器的应用实例。(5)新增了电阻应变式传感器的精度、校准与使用一节。

由于是修订,上一版的特色内容基本保留而不做大的改动。笔者认为,只要学时许可,应安排2学时时间学习本书第六章“实验技术”,使学生能够完整了解从实验设计、实验准备、实验测试过程到实验数据处理的全过程。这些内容很重要,也容易被忽视。

为方便读者使用,本书的实验部分,另有配套的《力学测试技术 实验指导书》。

本书可作为单独设课的“材料力学实验”教材,也可作为材料力学实验和实验力学的参考资料。原则上,本书适用于材料力学实验不少于20学时的教学。推荐讲课与实验学时各16学时。

参加本教材编写工作的有李训涛、苏小光、王妮、虞伟建和张明等。王妮同志为第3章增加了许多有特色的内容,熊小英同志负责了部分插图的绘图工作。教材的排版、整理和校对工作由张明同志负责。王妮、李训涛同志也参与了全部内容的审核。由于编者水平有限,编写时间仓促,书中错误在所难免,望读者不吝指正。

为方便出版电子版教材,也为方便教师做PPT时图片更美观,新版照片尽量采用彩照。需要时可直接与编者联系: zhangyiming@263.net。

编 者

2013年7月

目 录

第1章 力学测试技术概述	1
1.1 力学与测试技术	1
1.1.1 理论来源于试验研究	1
1.1.2 材料力学中的测试技术	2
1.1.3 力学以外的测试	2
1.1.4 测试技术的发展历史	3
1.1.5 力学测试技术与试验	3
1.2 测量的基本概念	4
1.2.1 测量的定义	4
1.2.2 测量的分类	4
1.2.3 关于测量方法	5
1.3 测试系统	6
1.3.1 测试系统的组成及基本要求	7
1.3.2 测试系统的静态特性	9
1.3.3 测试系统的动态特性	10
1.4 实验应力分析	11
1.4.1 实验应力分析概述	11
1.4.2 实验应力分析方法	11
复习题	12
第2章 误差分析和数据处理	13
2.1 误差的基本概念	13
2.1.1 真值	13
2.1.2 误差的定义	14
2.1.3 误差的表示方法	14
2.1.4 误差的来源	15
2.1.5 误差的分类	16
2.1.6 测量数据的精度	16
2.2 有效数字及数据运算	18
2.2.1 有效数字	18
2.2.2 数字舍入规则	18
2.2.3 数据运算规则	19

2.2.4	测量结果数值的修约	20
2.3	随机误差	21
2.3.1	抽样、样本与多次重复测量	21
2.3.2	正态分布的概率计算	21
2.3.3	数学期望与方差的估计值	22
2.3.4	随机误差的特性	23
2.3.5	随机误差的正态分布规律	23
2.3.6	标准差的计算	24
2.3.7	算术平均值标准差的计算	25
2.3.8	置信水平和极限误差	26
2.4	系统误差	28
2.4.1	系统误差的分类	28
2.4.2	系统误差对测量结果的影响	29
2.4.3	系统误差出现的原因及消除	30
2.5	粗大误差	33
2.5.1	粗大误差产生的原因	33
2.5.2	判别粗大误差准则	33
2.6	误差的合成	34
2.6.1	系统误差的合成	35
2.6.2	随机误差的合成	35
2.6.3	误差的总合成	35
2.6.4	间接测量的误差合成	36
2.7	测量的不确定度	36
2.7.1	概述	36
2.7.2	测量不确定度的定义	37
2.7.3	测量不确定度与误差	37
2.7.4	测量不确定度的评定方法	38
2.7.5	不确定度的合成	41
2.7.6	扩展不确定度的确定	41
2.8	数据处理	42
2.8.1	数据处理方法	42
2.8.2	一元线性回归	43
	复习题	45
第3章	电阻应变测量原理及方法	47
3.1	概述	47
3.2	电阻应变片的工作原理、构造和分类	48
3.2.1	电阻应变片的工作原理	48
3.2.2	电阻应变片的构造	48

3.2.3	电阻应变片的分类	49
3.3	电阻应变片的工作特性及标定	52
3.3.1	电阻应变片的工作特性	52
3.3.2	电阻应变片工作特性的标定	55
3.4	电阻应变片的选择、安装和防护	57
3.4.1	电阻应变片的选择	57
3.4.2	电阻应变片的安装	58
3.4.3	电阻应变片的防护	59
3.5	半导体应变片	59
3.5.1	半导体应变片的结构及工作原理	59
3.5.2	半导体应变片的特点	60
3.5.3	半导体应变片的粘贴技术	60
3.6	电阻应变片的测量电路	61
3.6.1	直流电桥	61
3.6.2	电桥的平衡	63
3.6.3	测量电桥的基本特性	64
3.6.4	测量电桥的连接与测量灵敏度	64
3.7	电阻应变仪与应变测试系统	70
3.7.1	静态电阻应变仪	70
3.7.2	测量通道的切换	71
3.7.3	公共补偿接线方法	73
3.7.4	动态电阻应变仪	76
3.7.5	电阻应变测试系统	77
3.8	应变—应力换算关系	79
3.8.1	单向应力状态	79
3.8.2	广义胡克定律	79
3.8.3	已知主应力方向的二向应力状态	80
3.8.4	未知主应力方向的二向应力状态	81
3.8.5	不同形式应变花的主应变和主应力计算	81
3.9	测量电桥的应用	83
3.9.1	拉压应变的测定	83
3.9.2	弯曲应变的测定	84
3.9.3	弯曲切应力的测定	86
3.9.4	扭转切应力的测定	87
3.9.5	内力分量的测定	87
3.10	应变测量	90
3.10.1	应变的直接测量	90
3.10.2	应力的间接测量	91
3.10.3	静态应变测量	92

3.10.4	动态应力/应变测量	94
3.11	电阻应变式传感器	94
3.11.1	概述	94
3.11.2	测力(称重)传感器	95
3.11.3	扭矩传感器	104
3.11.4	压力传感器	106
3.11.5	多分力传感器	108
3.11.6	位移传感器	108
3.11.7	加速度传感器	110
3.12	电阻应变式传感器的精度、校准与使用	111
3.12.1	电阻应变式传感器的精度	111
3.12.2	电阻应变式传感器的校准	111
3.12.3	电阻应变式传感器的灵敏系数修正	112
3.12.4	电阻应变式传感器的接线方式	113
	复习题	113
第4章	金属材料力学性能及测试原理	117
4.1	概述	117
4.1.1	工程应力和工程应变	117
4.1.2	材料的弹性常数	118
4.1.3	测试设备	119
4.2	金属材料拉伸时的力学性能	120
4.2.1	试样与原始标距	120
4.2.2	拉伸图与应力—应变图	121
4.2.3	拉伸曲线的特点与材料力学定义	121
4.2.4	力学性能指标及国标定义	124
4.2.5	应变引伸计及其标定	126
4.2.6	材料强度指标的测定	127
4.2.7	材料的塑性指标及其测定	131
4.2.8	材料弹性常数的测定	132
4.2.9	金属材料拉伸断口分析	133
4.3	金属材料压缩时的力学性能	134
4.3.1	试验机及测量工具	135
4.3.2	压缩力学性能指标及国标定义	135
4.3.3	压缩试样	136
4.3.4	试验条件	136
4.3.5	材料压缩强度指标的测定	136
4.3.6	压缩弹性模量 E_c 的测定	138
4.3.7	压缩试验的断口分析	139

4.4 金属材料扭转时的力学性能	140
4.4.1 扭转试样	140
4.4.2 试验条件	140
4.4.3 扭转力学性能及测定	140
4.4.4 扭转破坏断口形式	142
复习题	143
第5章 光弹性测试原理及方法	144
5.1 概述	144
5.2 光学基础知识	144
5.2.1 光波	144
5.2.2 自然光和平面偏振光	145
5.2.3 光波的干涉	145
5.2.4 双折射	146
5.2.5 圆偏振光	147
5.3 平面应力—光学定律	148
5.4 平面偏振光通过受力模型后的光弹性效应	149
5.4.1 平面偏振光装置简介	149
5.4.2 平面偏振光通过受力模型后的光弹性效应	149
5.5 圆偏振光通过受力模型后的光弹性效应	151
5.5.1 圆偏振光场光强方程式	151
5.5.2 整数级与半整数级等差线	153
5.6 白光下的等差线—等色线	154
5.7 等差线条纹级数的确定	155
5.7.1 整数级等差线	155
5.7.2 非整数级等差线	156
5.8 等倾线的观测	157
5.8.1 等倾线的观测方法	157
5.8.2 等倾线的特征	158
5.9 平面光弹性应力计算	159
5.9.1 边界应力	160
5.9.2 内部应力测定	160
5.9.3 应力集中系数的确定	163
5.10 光弹性贴片法	163
5.10.1 光弹性贴片法的基本原理	163
5.10.2 主应变的分离	164
复习题	165
第6章 实验技术	166
6.1 实验设计	166

6.1.1	实验目的	166
6.1.2	实验设计应该遵循的原则	166
6.1.3	实验设计的辅助手段	168
6.1.4	材料力学实验设计实例	168
6.2	实验准备	170
6.2.1	实验对象(试样)准备	170
6.2.2	实验仪器准备	171
6.2.3	实验过程准备(预调)	172
6.3	实验测试过程	172
6.3.1	实验过程控制	172
6.3.2	实验数据的记录	173
6.3.3	异常及其处理	173
6.3.4	实验的重复及终止	173
6.4	实验数据处理	174
6.4.1	数据整理及数据变换	174
6.4.2	统计分析及回归分析	174
6.4.3	误差及不确定度分析	174
6.5	实验结果分析	175
6.5.1	实验现象及原因分析	175
6.5.2	实验结论	175
6.5.3	实验报告	175
6.6	材料力学典型实验	176
6.6.1	纯弯曲梁正应力分布规律实验	177
6.6.2	压杆稳定实验	177
6.6.3	薄壁圆管弯扭组合变形实验	179
6.6.4	开口薄壁梁弯曲中心及内力分量测定实验	180
6.6.5	对径受压圆环设计实验	182
6.6.6	开口与闭口薄壁管受扭对比实验	182
6.6.7	光弹性测试实验	183
	复习题	185
	参考文献	186

第1章 力学测试技术概述

1.1 力学与测试技术

测试是具有试验性质的测量，也可以理解为测量和试验的综合。测量是为了确定被测对象的量值而进行的操作过程，而试验则是对未知事物探索性认识的实验过程。

1.1.1 理论来源于试验研究

在科学研究的领域中，测试是人类认识客观事物最直接的手段，是科学研究的基本方法。科学研究的根本目的在于探索自然规律、掌握自然规律、让自然规律为我所用、征服自然。科学探索需要测试技术，用准确而简明的定量关系和数学语言来表述科学规律。检验科学理论和规律的正确性同样也需要测试技术。可以认为精确的测试是科学研究的根基。

力学的发展从未离开过测试。众所周知，牛顿力学的重要开拓者伽利略（图 1.1）曾在比萨斜塔（图 1.2）上做了大量探索性试验，以研究力学的一些基本规律。

事实上，伽利略也研究过材料强度问题。图 1.3 所示是伽利略研究材料强度时试验装置的示意图。由于设备的简陋，当时的试验尚谈不上精确测试，但其测试结果已能为理论的建立指明方向。

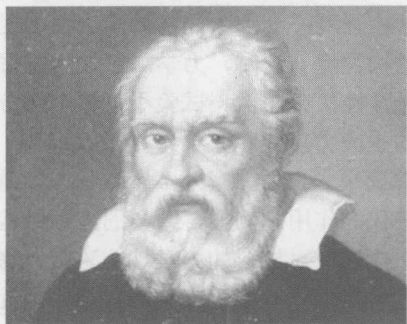


图 1.1 伽利略

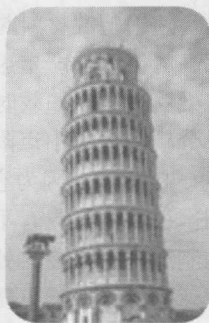


图 1.2 比萨斜塔

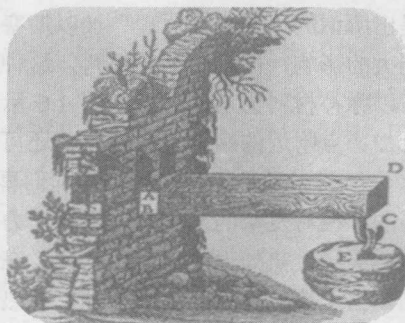


图 1.3 伽利略的木梁试验装置

为了提高测试精度，伽利略不仅研制了多种试验装置，还对其试验装置做了许多改进，使试验精度大大提高。对试验装置的改进，可以是试验原理的改进、试验方法的改进，或者是试验装备的改进。图 1.4 所示即是伽利略改进后的天文望远镜，由于这一改进，使天文观测精度达到了极高的水平。

在力学史上不难发现有许多作理论物理研究而成绩卓著的科学家，他们可能并未亲自参与大量的试验研究，如牛顿、爱因斯坦等。但事实上他们的理论仍来源于试验研究。以牛顿建立万有引力定律来说，伽利略、开普勒、哈雷等已为牛顿的万有引力理论做了大量精密的测试和理论研究。尤其是开普勒在其多年的天体观察测试中总结的天体运动三大定律（图 1.5），即：每个行星都沿着椭圆轨道绕太阳转动，太阳处在椭圆的一个焦点上；从太阳指向行星直线在相等的时间内扫过的面积相同；行星周期的平方与它的半长轴的立方成正比。该定律为牛顿的万有引力定律公式的导出起到了至关重要的作用，同时也为万有引力定律的验证提供了重要的试验依据。



图 1.4 伽利略的天文望远镜

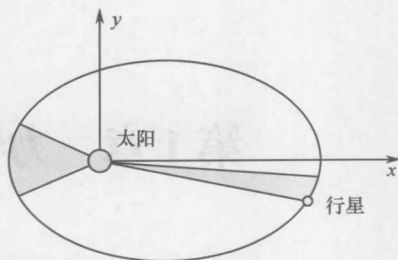


图 1.5 开普勒行星运动定律

1.1.2 材料力学中的测试技术

力学测试技术的发展与材料力学理论的发展是紧密相连的。材料力学的理论，就是在总结了大量力学试验结果的基础上逐渐形成的。试验的结果同时也是材料力学理论正确与否的试金石。

由于现实世界的复杂性，任何一种理论都会引入许多假设条件以保证其理论的相对正确性，材料力学也不例外。这些假设条件包括理想材料假设（材料是均匀、连续的，且各向同性的）、理想约束假设（各种约束均为理想约束：铰支座不考虑摩擦力、支座不变形；固定支座在受力时不会产生线位移和角位移；支撑面均为刚体等）、理想结构假设（等截面棱柱形理想直杆、对称弯曲问题等）、理想加载假设（约束以理想方式对结构施加载荷、集中力、集中力偶、压杆的加载无偏心等）。这些假设大多数也应用于有限单元法计算。在满足大部分假设条件时，理论计算的结果通常有较高的精度。然而实际的工程结构却往往与这些假设相去甚远，因而用实验方法来验证计算的有效性常常是唯一的选择。

以梁受集中力作用时加力点附近的应力分析为例，材料力学因为无法研究而采取了回避策略，提出所谓的“圣维南原理”加以搪塞。尽管使用塑性材料时，结构强度不会因为局部的高应力而受到大的影响，但对于脆性材料，这种局部高应力可能严重影响结构强度。这时，力学测试技术正好可以弥补材料力学的不足。图 1.6 示出了梁受集中力加载时的光弹性研究图像。试验不仅可全面分析加力点附近的应力集中现象，还可定量分析应力集中点附近的主应力方向和大小（见第 5 章）。

材料力学是机械设计工程师们喜爱的一门学科，因为它计算简单、方便、有效。但对于许多重要的、相对复杂的工程问题而言，力学测试技术同样具有不可替代的作用。例如，大量的工程结构材料需经过热处理才被使用，或者在结构制造过程中被热处理。热处理对材料的力学性能有极大影响。由于热处理工艺的复杂性，经热处理后的材料性能只能通过材料试验才能较准确地获得，因此对于使用特定工艺进行热处理的材料，其力学性能应该进行专门的力学性能测试，以获得可靠的设计依据。

即便是使用“万能”的有限元方法计算设计的复杂结构（图 1.7），其计算结果的可靠性也值得商榷。通过对模型的应力和变形测试来保证设计的正确性，是大多数大型工程普遍采用的方法。力学测试技术作为理论计算的重要补充手段，可为理论计算提供实验验证，研究被理论计算忽略的或无法处理的重要内容，提供更为直接的和真实的试验方法和试验结果，用较少的时间成本和经济成本，实现最完善的结构设计。

1.1.3 力学以外的测试

在工程技术领域中，工程研究、产品开发、生产监控、质量控制和性能试验等都离不开测试技术。测试技术是各种基于计算机的自动化生产流水线、自动化检测线中不可缺少的重要组成部分，对仓库系统、物料流动系统、机器运行状态、机器人的活动空间等进行有效的监测也需要测试技术。

总之，测试技术已广泛应用于航空、航天、国防、地球物理、生物、医学等国民经济的各个领域，并且起着越来越重要的作用。图 1.8 所示为汽车在制动试验台上作制动性能测试的实例。

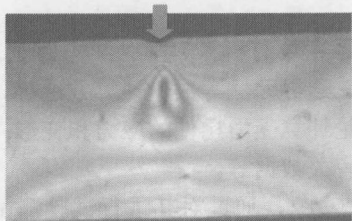


图 1.6 梁受集中力加载时的
光弹图像

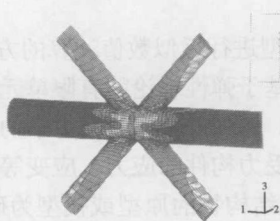


图 1.7 用有限元分析的
结构受力



图 1.8 汽车在制动试验台上作制
动性能测试

随着材料科学、微电子技术和计算机技术的发展，测试技术也在迅速发展。测试内容和范围与日俱增，测试对象愈趋复杂，对测试速度和测试精度的要求不断提高。智能传感器和计算机技术的发展和运用，使测试技术正朝着自动化、智能化和网络化的方向发展，朝着测量、控制、分析、显示的自动测试系统发展。

1.1.4 测试技术的发展历史

测试技术的发展，即是仪器仪表科学的发展，大致经历了三个重要的时期。

1. 手工艺时期

20 世纪以前，搞科学研究的人多数是个体脑力劳动者，理论研究常常需要试验配合，大多数科学家是自己设计试验，自己动手制作测试仪器。工业生产上使用的仪表大多数属于机械指示式的仪表，主要作为主机的配套设备来使用。因此，这个时期的仪器仪表功能较简单，用途专一，仪器仪表间的互相联系很少。

2. 仪器工程时期

随着电子技术的发展，特别是随着晶体管、集成电路的应用，以及光电、压电、热电等效应的广泛应用，出现了大量的电测仪表和自动记录仪表，在科学研究和生产上逐步形成了由测量点到记录仪表的完整的测试系统。各种物理量通过传感器（常称为一次仪表）被转换为容易处理的电量，再由各种电测仪表（常称为二次仪表）、自动记录仪表、自动显示仪表、自动调节仪表等组合而成自动测试系统，以实现对被测对象的连续监测和控制等目标。

3. 仪器科学时期

近年来，各种新理论、新技术、新材料、新器材和新工艺的不断出现，尤其是微型计算机、微处理器的广泛应用，使仪器仪表及相关的测试技术得到飞速发展。在仪器仪表的设计、制造和使用过程中，已涉及众多的知识领域和先进技术（包括物理学、化学、精密机械设计、电子技术、微机技术、信息处理技术、数据通信技术、自动控制技术等），而科学技术的发展对测试技术也提出了更高的要求。迫切需要研制和设计出智能化、多功能化、数字化、集成化、微型或小型化的智能仪器仪表、智能测试系统，以满足更快速、更准确、更灵敏、更可靠、更高效的测试要求。数字化、智能化、网络化已是当代测试技术的重要标志。

1.1.5 力学测试技术与试验

力学测试技术仅仅是测试技术的一个方面，是用各种不同的试验方法和手段来测量材料的力学性能、受力构件和工程结构的应力、应变、力、力矩、位移等力学量参数，以解决工程结构中的强度、刚度、稳定性的设计或计算问题。力学测试技术也为一些力学量传感器的设计与制造提供了必

要的理论及试验依据。

在解决工程结构强度、刚度、稳定性计算等问题时有两种方法，一种是理论分析的方法，另一种是试验应力分析的方法。

理论分析的方法是通过建立数学模型进行近似数值计算的方法，主要有材料力学、结构力学、复合材料力学、疲劳断裂力学等，以及基于弹性理论的有限单元法、边界元法等数值计算方法等。其中，数值计算方法离不开计算机技术。例如，使用材料力学的理论计算受力构件的应力和变形；使用有限单元法，借助计算机求解复杂受力构件的应力、应变等的有关数据等。

试验应力分析的方法是以零构件或结构物的原型或模型为研究对象，通过对其进行试验测试来揭示其力学性能或力学量的变化规律。试验应力分析是试验力学的重要组成部分，其试验结果为力学理论的建立、研究、发展和应用提供了重要依据。试验应力分析包括试验理论和试验方法。试验应力分析方法有电测法、光测法、声测法等许多测试方法，是测试技术的一部分，称为力学测试技术。

力学测试技术的任务是：在研究力学测试原理的基础上，通过一系列专门设计的相关试验和材料力学试验，帮助掌握测试原理和实验技能，提高试验技术水平，培养具有解决工程实际问题能力的科研人员和高级工程技术人员。

力学测试技术是一门具有综合性、边缘性学科性质的课程，也是一门实践性很强的课程。它涉及的知识面较广，除必须具备应力分析理论、误差分析和数据处理等方面的知识外，还必须掌握电学、光学等方面的知识。本书主要讨论与材料力学相关的力学测试技术，但其大部分测试原理和方法也适用于更广范围的力学量测试。

1.2 测量的基本概念

1.2.1 测量的定义

测量是通过实验手段获得被测对象的量值的一个操作过程。

测量的目的是要得到被测对象的量值。对于不同的对象、或相同对象不同性质的量、或相同性质但精度要求不同的量，得到其量值的方法往往不同。可以用测量工具、或者用测试仪表，也可以用复杂的自动测试系统来确定被测量的量值，而不同工具或不同仪表使用的测量方法或测量原理可能完全不同。

1.2.2 测量的分类

测量的分类方法很多，一般按测量结果的精度要求分类，可将测量分为工程测量与精密测量。或者按取得测量结果的方法分类，可将测量分为直接测量与间接测量。也可按取得测量结果的条件或状态分类，将测量分为等精度测量与不等精度测量、静态测量与动态测量等。

1. 工程测量与精密测量

根据测量结果的精度要求，测量可分为工程测量与精密测量。

工程测量有两种情况，一种为测量结果中不考虑测量误差的测量。通常对于这类工程测量的设备和仪器的灵敏度、精度以及测量环境的要求都不高，只要给出比较稳定的测得值就能满足测量要求。另一种为不需要精细考虑测量误差的测量。用于这种测量的设备和仪器，在产品检定书或铭牌上标注有测量误差的极限值，该标注的测量误差极限值即为测得值的误差。在一般生产现场和科学研究试验中所进行的测量，多为工程测量。

精密测量指测量结果中包含精细估计测量误差的测量。用于这类测量的设备和仪器应具有一定的精度和灵敏度，并且应进行重复多次测量，得到一套测量数据；测量数据按误差理论进行分析、处理、计算，得到最佳的测量结果，最终给出的测量结果中包含经过精细估计的测量误差。进行精密测量的条件（环境）比工程测量的要求严格，一般都在符合测量条件的实验室内进行，所以又称为实验室测量。

无论是工程测量还是精密测量，为保证结果的准确度和可靠性，应该定期对测量所使用的仪器设备进行校准（也称标定），但对不同仪器设备要求的标定周期并不相同。

2. 直接测量与间接测量

根据取得测量结果的方法，测量可分为直接测量与间接测量。

直接测量有两种获取被测量量值的方法，一种是将被测量与标准量直接进行比较而获得被测量的测量，另一种是用经过标准量标定的器具、仪器对被测量直接进行测量而获得被测量的测量。

例 1.1：用天平称物体的质量，属第一种直接测量的方法。

例 1.2：用卡尺测量工件尺寸，属第二种直接测量的方法。

间接测量是指通过获得与被测量有函数关系的其他测量值，根据函数关系确定被测量的量值的测量方法。

例 1.3：测量圆面积 A ，首先测量圆直径 d ，然后通过 $A = \frac{\pi}{4}d^2$ 求得圆面积 A 。

3. 等精度测量与不等精度测量

根据取得测量结果的条件，测量可分为等精度测量与不等精度测量。

等精度测量是在相同测量精度条件下（包括相同的测量仪器设备、相同的测量环境、相同的测量人员），对某一被测量进行重复测量，取得测量数据的测量。对等精度测量所得的每个数据，其可信程度是相同的。除特别说明外，本书讨论的测量问题都属于等精度测量问题。

如果测量条件有一项或多项有所改变，则进行的重复测量即为不等精度测量。不等精度测量所得的测量数据，其可信程度是不同的，一般需采取特殊的处理方法处理测量结果。

4. 静态测量与动态测量

根据被测对象状态，测量可分为静态测量与动态测量。

静态测量是对静态量或准静态量的测量。静态量指在测量过程中固定不变的量，准静态量指在测量过程中随时间缓慢变化的量。静态测量不需要考虑时间因素对测量结果的影响。

动态测量是对动态量的测量。动态量指在测量过程中随时间变化的量。动态量有周期变化和非周期变化等特征。

静态测量和动态测量是相对的，在一定条件下会发生变化。由于条件的变化，静态量也会发生变化；通过特定的处理，动态测量也可转化为静态测量（如使用特定频率的频闪光源使频闪频率等于周期性动态变化对象的频率，就可实现准静态光学测量）。

本书主要讨论静态测量的问题，动态测量的问题可以查阅有关书籍。

1.2.3 关于测量方法

为减小测量误差，人们研究了许多提高测量精度的方法。其中，偏差测量法、零位测量法与微差测量法是常用的几种测量方法。

1. 偏差测量法

偏差测量法是根据仪表指针位移（即偏差）确定被测量量值的一种测量方法。它以直接方式实现被测量与标准量的比较，测量过程简单、快捷、直观，但测量结果难以实现高精度。这种测量方法在工程测量中得到广泛应用。

2. 零位测量法

零位测量法是调整一个或几个与被测量有已知平衡关系的量（标准量或已校准过的量），通过平衡确定被测量量值的一种测量方法。零位测量法又称为补偿测量法或平衡测量法。这种测量方法的测量过程比较复杂、费时，但能获得比较高的测量精度。

例如，用惠斯通电桥测量高精度电阻的方法就属于零位测量法；用机械天平称量物体的质量的方法也属于零位测量法；使用高灵敏表头测量各种微小量值的零读数法也属于零位测量法。

图 1.9 所示即为一精密测量用天平。左侧的旋钮用于加载微克或毫克量级的砝码，阻尼器（中间锅状圆筒物体）用于保证测量过程中指针的稳定性。为了防止空气流动影响测量精度，测量对象和主要测量部件均被置于密闭的室内（图 1.9 中箱体为玻璃密闭室，仅在放、取样品时打开箱门）。

3. 微差测量法

微差测量法是将被测量与同它只有微小差别的已知同种量（标准量）相比较，通过测量这两个量值间的差值以确定被测量的一种测量方法。这种测量方法具有响应快、测量精度高等优点，特别适用于在线控制参数的测量。

机械测量中的塞规（图 1.10），应变电测中使用的应变引伸计，均属于微差测量工具。前者通常成对使用，其尺寸已经过精密测量，并保证使用过程中的稳定性，用于工业生产性测量。后者使用前需进行校准，其校准工具即为微差测量的量值基准，其测量范围仅限基准量的 $\pm 2\text{mm}$ 以内甚至更小。

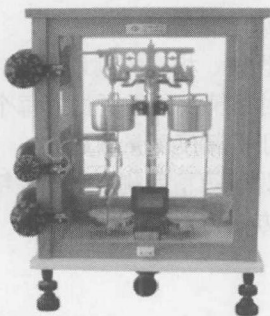


图 1.9 精密测量天平

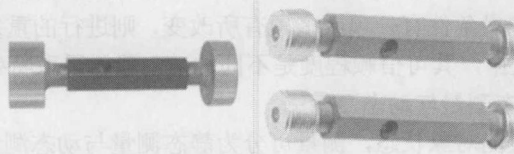


图 1.10 光滑塞规（左）和螺纹塞规（右）

在大多数测试系统中，精度和量程是一对矛盾，往往很难同时满足大量程和高精度的要求。在工业生产测量中广泛使用微差测量法，因为它大大降低了对测试系统精度的要求。从本质上讲，用天平称量物体的质量也可认为是微差测量法。

1.3 测试系统

通过一定的测试或控制手段，获取某些被测对象的重要信息的完整系统称为测试系统。狭义的测试系统等同于测量系统，而广义的测试系统应包括基本的控制功能。

现代的生产与生活离不开测量与控制。高新技术、尖端科技更离不开测控。当今的信息时代以计算机的广泛应用为主要标志，而计算机的发展首先归功于微电子技术的发展。一块半导体芯片上能集成成千上万个元件和逻辑单元取决于超精细工艺制作出的图案，这不仅依赖于光刻的精确重复定位，还依赖于定位系统的精密测量与控制。航空航天飞行器的发射与飞行，都需要靠精密测量与控制保证它们轨道的准确性。

1.3.1 测试系统的组成及基本要求

1. 测试系统的组成

一个完整的测试系统包括以下三个部分（图 1.11）

（1）传感级。直接感受被测量，并将其转换成与被测量有一定函数关系（通常为线性关系）的另一种物理量（通常为电量），以便处理或传输。

（2）中间级。将接收到的传感级信号进行变换、放大或转换，输出满足特定要求的信号。可以是模拟信号，也可以是开关量信号或纯数字信号。

（3）终端级。显示或控制中间级信号。一般是一个显示器或是一个控制器，也可能是两者的组合。终端级常包含基本的控制功能、数据记录和数据处理功能。显示器有指示式、数字式和屏幕式几种。大型的测试系统常使用综合显示系统，将多种不同类型的测试数据、状态或图形显示在一个统一的屏幕上。



图 1.11 测试系统的组成

传感级的基本元件为传感器。传感器作为非电量的敏感元件，其功能是探测被测对象的变化并将之转换成易于测量和控制的电信号。但是，传感器的输出信号一般很微弱，而且常伴随着各种噪声，需要通过测量电路将它放大，剔除噪声，选取有用信号，按照测量与控制功能的要求，进行所需的演算、处理与转换，输出能控制执行机构动作的信号。完成这一功能的电路称为测控电路。在整个测试系统中，测控电路是最灵活的部分，起着十分关键的作用，它具有放大、转换、传输，以及适应各种使用要求的功能。一旦传感器确定后，整个测试系统，乃至整个机器和生产系统的性能在很大程度上取决于测控电路。

2. 测试系统的基本要求

测试系统实际上包括物理量（即被测对象）的测量与控制两部分。对整个测试系统的要求而言，可概括为精度高、响应快和转换灵活。当然也可能有其他方面的要求，例如系统的可靠性和性能价格比等。

1) 精度高

对于测试系统通常要求具有较高的测试精度。首先要求传感器能准确地反映（即检测到）被测对象的状态与参数。这是获得高精度测试结果的基础，也是实现精确控制的前提条件。同时，测控电路应具备如下性能。

（1）低噪声与高抗干扰能力。传感器输出信号的变化往往是很微小的。在精密测量中，要精确测得被测参数的微小变化，必须采用低噪声元器件，精心设计电路，合理布置元器件、走线和接地，采用适当的隔离与屏蔽等，以保证测控电路的噪声降到最低，抗干扰能力最强。必要时，对信号进行调制，合理安排电路的通频带，对抑制干扰也是十分重要的。此外，对于高增益放大电路，采用高共模抑制比的差动输入放大电路，将有效地抑制共模干扰及工频干扰。

（2）低漂移，高稳定性。由半导体材料特性决定，半导体器件和集成电路的所有参数严格意义上讲都是温度的函数，如运算放大器的失调电压和失调电流、二极管与三极管的漏电流，都会随温度变化而变化。电路工作中元器件流过的电流产生的热量、外界环境温度的变化等都会引起输出信号的漂移。另外，仪器工作环境的相对湿度对传感器及工作电路的工作稳定性也有较大影响。此外，电路长期工作、频繁开关机、元器件老化、开关与接插件的弹性疲劳和氧化造成接触电阻的变化等，