



面向“十二五”高等教育课程改革项目研究成果

# 工程测试技术

主编 赵燕

 北京理工大学出版社  
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

面向“十二五”高等教育课程改革项目研究成果

# 工程测试技术

主 编 赵 燕  
副主编 李喜梅  
参 编 容一鸣 汪小玲 陈 义  
主 审 张仲甫

 **北京理工大学出版社**  
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

## 内 容 简 介

本书是一本讲述工程测试基础理论及其应用技术的教科书。全书共分两部分。第一部分讲述工程测试技术的基础理论,共分7章,内容包括绪论、信号及信号分析、测试系统的基本特性、常用传感器、模拟信号处理、数字信号处理基础和记录及显示装置。第二部分讲述工程测试技术的应用,共分4章,每章一个专题,内容包括机械振动测试、多维切削力测试、旋转机械效率测试、机械结构的温度场测试。

本书可作为高等院校的大机械类各专业、测控技术与仪器、自动化等专业学生学习测试技术的教科书,也可作为相关科研和工程技术人员的参考用书。

版权专有 侵权必究

---

### 图书在版编目(CIP)数据

工程测试技术/赵燕主编. —北京:北京理工大学出版社,2010.8

ISBN 978-7-5644-3444-3

I. ①工… II. ①赵… III. ①工程测量-高等学校-教材 IV. ①TB22

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第141253号

---

出版发行/北京理工大学出版社

社 址/北京市海淀区中关村南大街5号

邮 编/100081

电 话/(010)68914775(办公室) 68944990(批销中心) 68911084(读者服务部)

网 址/http://www.bitpress.com.cn

经 销/全国各地新华书店

印 刷/北京友谊印刷有限公司

开 本/787毫米×1092毫米 1/16

印 张/17.25

字 数/387千字

责任编辑/陈莉华

版 次/2010年8月第1版 2010年8月第1次印刷

陈 竑

印 数/1~3000册

责任校对/张沁萍

定 价/33.00元

责任印制/边心超

---

图书出现印装质量问题,本社负责调换

# 出版说明

近年来，我国高等教育的改革和发展实现了历史性的跨越，培养了大量人才，为我国经济的发展作出了巨大的贡献，但从 IMD 国际竞争力指标体系中的分析数据来看，我国企业需要的工程技术人员特别是工程应用型技术人才严重不足，这也热切地呼唤着高等院校培养出更多具备全面的知识、能力和综合素质，面向生产、建设、管理、服务第一线的高级应用型专门人才。教育部在 2003 年启动了本科教学评估工作，并在 2007 年提出了本科教育、教学“质量工程”，鼓励和支持高等学校在教学理念等方面进行创新，形成有利于多样化人才成长的培养体系，满足国家对社会紧缺的创新型人才和应用型人才的需要。

北京理工大学出版社组织知名专家、学者，以培养应用型人才为主题进行深入的研讨，规划出版了这套“面向‘十二五’高等教育课程改革项目研究成果”系列教材。着力于培养能直接从事实际工作、解决具体问题、维持工作有效运行的高等应用型人才。

本套教材在规划过程中体现了如下基本原则和特点：

■ 学科体系完整，课程间相互衔接紧密。

本套教材根据工程实践需要，按教学体系要求进行整合编排。包括了机电类专业的基础课、专业基础课和部分专业课。除了考虑单门课程自身体系的完整，兼顾不同课程间的衔接。

■ 强调实用性和工程概念。

工程的概念体现在整套教材中，以工程实践要求为核心编写教材。

■ 减少了部分理论推导方面的内容。

强调概念和应用，减少了部分理论推导。在实验环节强调创新型的实验，减少验证型的实验。

■ 结合新技术和新工艺。

充分吸收新技术和新工艺的内容，反映国内外机械学科最新发展。

■ 注重培养学生职业能力。加强学生对 Autocad、UG、Pro/E、Mastercam 等

软件进行设计和仿真的能力。

■ 提供教学包，可在北京理工大学出版社网站 [www.bitpress.com.cn](http://www.bitpress.com.cn) 下载。

本套教材既严格遵照学科体系的知识构成和教材编写的一般规律，又针对本科人才培养目标及与之相适应的教学特点，精心设计写作体例，科学安排知识内容，表达了一批教育工作者和出版人“精心打造精品，教材服务教育”的理念。

本套教材可作为高等教育应用型本科院校机电类相关专业的课程教学用书，也可以作为机电类技能培训用书。

北京理工大学出版社

# 前 言

在工程实践中，需要对各种物理现象和物理量进行观察与定量的数据分析，这就需要对各种物理量和物理现象进行测量与试验。进入 21 世纪，随着科学技术的发展，工程测试技术作为人们认识客观世界的一个重要手段也显得更加重要，使得工程测试技术成为从事科学研究与工程技术的人员必须掌握的专业技术基础知识。

本书作者有 20 多年的教学经验和在科研实践方面积累的工程应用案例，因此，本书在内容的编写上注意从应用角度出发，将这些经验体会、案例素材融入本书的内容中。在本书的下半部分中以每章一个专题的形式讲解典型的工程物理量的测试，便于读者学习和掌握测试技术的基本理论及测试方法。

全书共分两部分：工程测试技术基础和工程测试技术应用。第一部分完整地介绍了工程测试技术的基础理论，内容共分 7 章。其中第 1 章为绪论，介绍测量与试验的概念及相互关系，测试方法的分类与非电量测试系统的构成，测量与标定的关系，国际单位制及其基本单位，测试的输入与输出结果的表达；第 2 章介绍信号分析的知识，主要内容有信号的分类、信号的时域描述与频域描述方法、信号的频谱分析、相关分析及功率谱分析；第 3 章介绍测试系统特性的分析研究方法、不失真测试的条件；第 4~7 章分别介绍了信号测试系统所涉及的传感器、变换与调理器及记录与显示方面的知识。第二部分内容共分 4 章，每一章为一个专题，介绍了机械工程中几种常见物理量——机械振动、多维切削力、旋转机械功率与效率及机械结构的温度场的测试。内容上的这种安排，便于读者在完成第一部分基础理论内容学习的基础上，进一步拓展测试技术的工程应用能力。

在安排教学时，对第二部分内容可根据不同的专业和教学对象来加以取舍。本书每章末尾均附有习题，供读者练习使用。

本书由武汉理工大学赵燕教授主编并统稿，武汉理工大学华夏学院李喜梅担任副主编，容一鸣、汪小玲、陈义参加编写。

武汉理工大学张仲甫教授仔细审阅了全部书稿，提出了许多建设性意见和宝贵的建议，在此向他表示诚挚的谢意！

书中编写的部分内容参考了相关企业的最新产品资料和兄弟院校同行作者的有关文献，在此对书中所列参考文献、引用的相关教材与资料的作者、译者和单位表示衷心感谢！

由于编者水平有限，书中难免存在不足、欠妥及差错之处，恳请同行及广大读者批评指正。

编 者

# 目 录

## 第一部分 工程测试技术的基础理论

<b>第 1 章 绪论</b> .....	(3)
1.1 测试的含义和作用 .....	(3)
1.2 测量的基本方法 .....	(5)
1.3 非电量电测法测试系统 .....	(7)
1.4 测量的实质及测量与标定的关系 .....	(9)
1.5 国际单位制及其基本单位 .....	(9)
1.6 测试的输入与输出结果的表达 .....	(12)
习题 .....	(12)
<b>第 2 章 信号及信号分析</b> .....	(14)
2.1 信号的分类 .....	(14)
2.2 测试信号的描述方法 .....	(18)
2.3 确定性信号的时域分析 .....	(19)
2.4 确定性信号的频谱分析——周期信号 .....	(20)
2.5 确定性信号的频谱分析——非周期信号 .....	(26)
2.6 傅里叶变换的主要性质 .....	(29)
2.7 几种典型信号的频谱 .....	(31)
2.8 随机信号的分析与处理 .....	(37)
小结 .....	(54)
习题 .....	(55)
<b>第 3 章 测试系统的基本特性</b> .....	(57)
3.1 测试系统的主要性质 .....	(57)
3.2 测试系统的静态特性 .....	(59)
3.3 测试系统动态特性的数学描述 .....	(61)
3.4 实现动态测试不失真的条件 .....	(67)
3.5 测试系统的动态特性 .....	(69)
3.6 测试系统静态、动态特性的测定 .....	(75)
3.7 组成测试系统应考虑的因素 .....	(80)
小结 .....	(83)
习题 .....	(83)
<b>第 4 章 常用传感器</b> .....	(86)
4.1 概述 .....	(86)

4.2	电阻传感器	(89)
4.3	电容传感器	(93)
4.4	电感传感器	(97)
4.5	磁电传感器	(105)
4.6	压电传感器	(108)
4.7	霍尔传感器	(114)
	小结	(117)
	习题	(117)
<b>第5章</b>	<b>模拟信号处理</b>	<b>(120)</b>
5.1	电桥	(121)
5.2	调制与解调	(125)
5.3	滤波器	(137)
	小结	(147)
	习题	(148)
<b>第6章</b>	<b>数字信号处理基础</b>	<b>(151)</b>
6.1	数字信号处理的实现方法	(152)
6.2	模/数(A/D)变换及数/模(D/A)变换	(153)
6.3	采样、混叠和采样定理	(156)
6.4	频率混叠和采样定理	(160)
6.5	截断、泄漏和窗函数	(162)
6.6	数字信号滤波	(165)
	小结	(167)
	习题	(168)
<b>第7章</b>	<b>记录及显示装置</b>	<b>(169)</b>
7.1	光线示波器	(170)
7.2	数字存储示波器	(177)
7.3	无纸记录仪	(179)
7.4	光盘刻录机	(180)
7.5	数字显示系统	(181)
	小结	(184)
	习题	(185)

## 第二部分 工程测试技术的应用

<b>第8章</b>	<b>机械振动测试与分析</b>	<b>(189)</b>
8.1	机械振动的基本知识	(189)
8.2	振动的激励	(197)
8.3	测振传感器(拾振器)	(201)
8.4	振动信号分析仪器	(204)
8.5	机械阻抗的测试	(205)



---

小结 .....	(213)
习题 .....	(213)
<b>第9章 多维切削力测定 .....</b>	<b>(215)</b>
9.1 切削力的合力与分力 .....	(215)
9.2 切削测力仪的工作原理 .....	(216)
9.3 多维切削力测量方法 .....	(221)
9.4 切削实验 .....	(225)
9.5 计算机辅助多维切削力测试 .....	(226)
<b>第10章 机械工程中温度的测量 .....</b>	<b>(228)</b>
10.1 温度的测量方法 .....	(228)
10.2 电阻式温度传感器 .....	(230)
10.3 热电偶 .....	(231)
10.4 数字温度传感器 .....	(241)
10.5 机床的温度和热变形测试 .....	(245)
<b>第11章 机械结构的功率与效率测试 .....</b>	<b>(250)</b>
11.1 扭矩的测量 .....	(250)
11.2 转速的测量 .....	(255)
11.3 机械功效测试台的设计 .....	(257)
<b>参考文献 .....</b>	<b>(264)</b>

An abstract graphic consisting of numerous thin, curved lines that originate from a single point on the left side and fan out towards the right, creating a sense of motion and depth. The lines are light gray and set against a textured, light gray background.

**第一部分**

---

**工程测试技术的  
基础理论**



# 第1章

## 绪论

### 1.1 测试的含义和作用

在社会发展的历史长河中，人类创造并发展了对各种物理量的测量方法，还学会了用试验的方法来探索未知的问题。例如，根据司马迁的《史记·夏本纪》记载，大禹治水时已发明了原始测量工具和技术，即所谓“左规矩，右准绳”，“行山表木，定高山大川”。“规矩”和“准绳”，相当于今天的测量工具，如铅垂线、角尺、圆规之类。“行山表木”（《尚书·益稷》作“随山刊木”，“刊”就是刻尺度作为测量的标桩），就是原始的水准测量。

社会的进步和现代科技的发展不断向测试技术提出新的测试要求，使得测量的范围不断扩大，测量工具和测量技术也不断丰富和完善，从而推动了测试技术的发展。与此同时，各学科领域的新成就也被应用于测试方法和仪器设备中。因此，测试技术总是从其他相关的学科中吸取营养而得到发展。

测试是人们认识客观事物的一种常用方法。测试技术泛指测量和试验两个方面的技术。对生产、生活和科学研究活动中的各种物理量的确定构成了测量的全部内涵。

测量的过程或行为就是进行一个被测量与一个预定标准之间的定量的比较，从而获得被测量的数值结果。被测量表示被观察和被量化的特定物理参数，这个物理参数称为测量过程的输入量。如图 1.1 所示，为了确定一个工件轴的长度（一个被测量），通常采用标准长度的米尺（一个预定标准）对其进行测量，通过被测量与预定标准之间的定量比较，从而得到此工件轴的实际长度值（被测量的数值结果）。

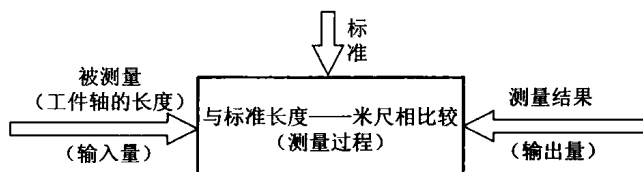


图 1.1 测量过程

比较的标准必须与被测量具有相同的特征，这些标准通常是被法定的或被承认的机构或组织规定和确认，如国际标准化组织（ISO）或中国国家标准化管理委员会（SAC）。

“米”(m)便是一个明确规定的长度计量标准。

机械测量的范畴中除了长度、质量、时间等基本量之外,还包括温度、应力、应变、流体、声学以及与力(力矩、压力)和运动(如位移、速度、加速度)有关的参数等。不可避免的是,对机械量的测量,也要涉及电气方面,因为将一个机械的被测量转换或传感为一个相应的电气量常常是很方便或必要的。

试验是对被研究的对象或系统进行实验性研究的过程。通常是将研究对象或系统置于某种特定的或人为构建的工况环境条件下,通过试验数据来探讨被研究对象的性能的过程。图 1.2 所示为汽车正面碰撞试验。假人身上的重要部位安装了多个力传感器和加速度传感器(图 1.2 中只示出了胸部的力传感器),这些传感器可以测出车辆碰撞时人体重要部位所受的力和加速度,这些数据可以作为评价汽车碰撞安全性能的依据之一。壁障就是人为构建的汽车碰撞试验的工况环境。

显然,通过试验得到的试验数据可以成为研究被测对象的重要依据(如通过假人身上的加速度和力值来评价该车的碰撞安全性,如果超标,则表示应改进该车的设计),而试验必须通过对被测对象的一些特征量进行测量。测量的重要性在于它提供了系统所要求的和实际所取得的结果之间的一种比较。因此,测试过程是借助专门设备,通过合适的实验方法和必要的数据处理,从研究对象中获得有关信息的认识过程。所以,测试科学属于信息科学范畴,又称信息探测工程学。

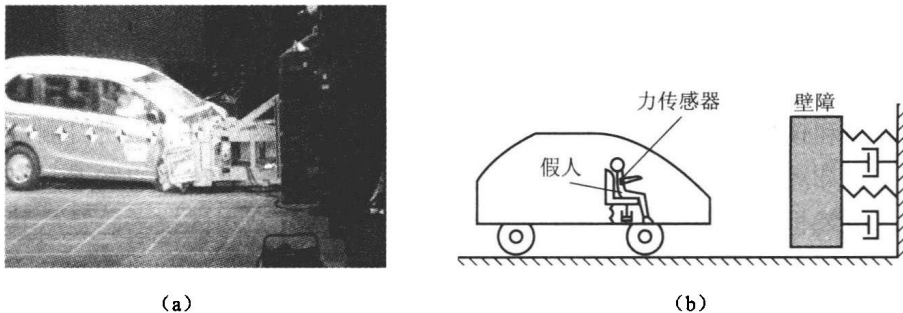


图 1.2 汽车正面碰撞试验中的试验与测量  
(a) 汽车正面碰撞试验实景; (b) 汽车正面碰撞试验示意图

综上所述,人类从事的社会生产、经济交往和科学研究活动总是与测试技术息息相关。首先,测试是人类认识客观世界的手段之一,是科学研究的基本方法。科学的基本目的在于客观地描述自然界。科学定律是定量的定律,科学探索离不开测试技术,用定量关系和数学语言来表达科学规律和理论也需要测试技术,验证科学理论和规律的正确性同样需要测试技术。事实上,科学技术领域内,许多新的科学发现与技术发明往往是以测试技术的发展为基础的,可以认为,测试技术能达到的水平,在很大程度上决定了科学技术发展水平。

同时,测试也是工程技术领域中的一项重要技术。工程研究、产品开发、生产监督、质量控制和性能试验等都离不开测试技术。在自动化生产过程中常常需要用多种测试手段来获取多种信息,来监督生产过程和机器的工作状态并达到优化控制的目的。

在广泛应用的自动控制中,测试装置已成为控制系统的重要组成部分。在各种现代装备系统的设计制造与运行工作中,测试工作内容已嵌入系统的各部分,并占据关键地位。测试技术已经成为现代装备系统日常监护、故障诊断和有效安全运行的不可缺少的重要手段。

## 1.2 测量的基本方法

由于被测信号和测试系统的多样性和复杂性，产生了各种类型的测试方法，以及多种类型的测试系统。

### 1.2.1 测量的基本方法

#### 1. 直接比较法

直接比较法就是通过直接将被测物理量与标准比较来进行测量的方法。图 1.1 中对工件轴的长度的测量，可采用钢卷尺作为测量标准。将工件轴的长度与这个标准做比较，就可得到轴的长度是多少米，因为所使用的标准——钢卷尺上的“米”数便等于该轴的长度。这就是通过直接比较确定长度的测量方法。而所使用的标准——钢卷尺则称为二次标准，而原始长度标准则与光速有关。

#### 2. 间接比较法

间接比较法必须使用某种形式的测量系统。如图 1.2 所示，为了检测汽车碰撞后假人的受力大小，可以用力传感器并后接放大和变换电路，将力转换为一个模拟电量输出，该模拟量的输出可通过记录设备最终表示成记录纸上的位移形式，该记录纸上的“位移”的变化规律与假人受到的碰撞冲击力变化规律一致。此方法表明，通过记录纸上的“位移”的间接测量得到了假人的受力值。间接法是应用最广泛的测量方法。

又如图 1.3 所示的中国杆秤，是通过杠杆来完成质量（旧称重量）的间接测量的。

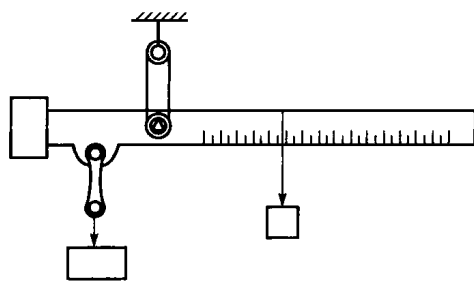


图 1.3 间接比较测量法

### 1.2.2 非电测量法

在机械工程测试中，要测试的信号往往是非电量，如位移、速度、加速度、外力、质量、力矩、功率、压力、流量、温度等。为了测试工作的方便，往往需要把被测试的机械量信号转换成其他形式的信号来处理。根据被测信号在第一级测量设备被转换后得到的信号的类型（是机械量、光学量……还是电量），可以把测试方法分成机械测量法、光测法、气测法、液测法等非电测量法和电测法等。

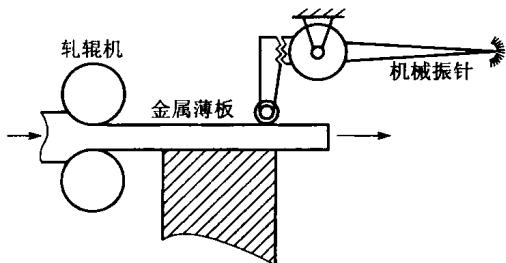


图 1.4 钢板厚度的机械测量法

#### 1. 机械测量法

如图 1.4 所示，钢板的厚度通过齿轮齿条机构转变成机械指针的角位移，指针的位移仍为机械量，因此属于机械测量法。又如百分表测位移、天平砝码称重（质量）等都属于机械测量法。

#### 2. 光测法

图 1.5 所示为工件表面粗糙度的光测法。它

是利用光切测量法（光干涉测量法），即利用平面光对被测物体表面的二维轮廓投影成像，再通过三维重建而获得被测物体的外形轮廓信息。其基本原理类似于对被测物体进行外轮廓断层扫描。狭缝光源发出的光线照射后，通过物镜发出一束光带并以倾斜  $45^\circ$  方向照射在被测量的表面上。被测表面的微观形状，被光亮的具有平直边缘的狭缝亮带照射后，表面的波峰在  $S$  点产生反射，波谷在  $S'$  点产生反射，通过观测显微镜的物镜，它们各自成像在分划板的  $a$  和  $a'$ 。在目镜中观察到的即为具有与被测表面一样的齿状亮带，通过目镜的分划板与测微器测出  $a$  点至  $a'$  点之间的距离  $N$ ，被测表面的微观不平度  $h$  即为

$$h = N/V \cos 45^\circ \quad (1-1)$$

式中， $N$  为物镜放大倍数。

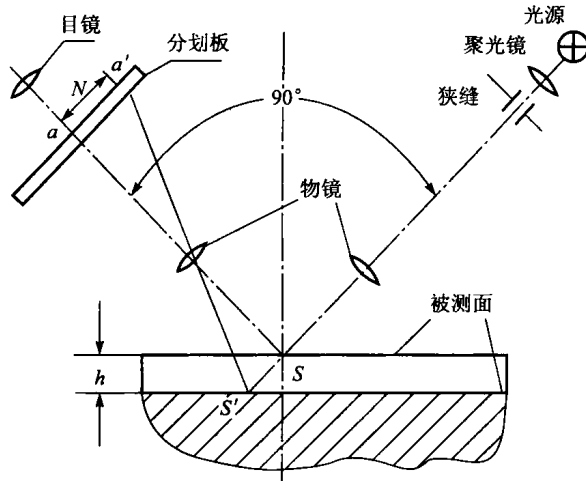


图 1.5 表面粗糙度的光切测量法

该测量法中的传感器——光学镜片，将光信号转变为了光信号，故属于光测法。光测法的特点是精度高、稳定性好，但对环境条件要求高。一般来说，光测法宜于在实验室条件下进行，或作为对其他仪器标定使用。

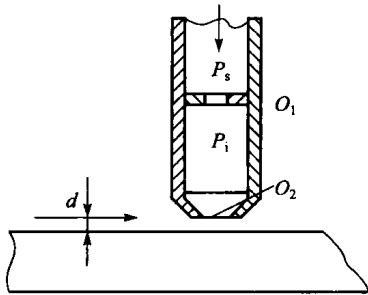


图 1.6 尺寸  $d$  的气压测量法

### 3. 气测法（液测法）

图 1.6 所示是气动比较仪的工作原理。中间压力  $p_1$  取决于气源压力  $p_s$  以及喷孔  $O_1$  和  $O_2$  之间的压降。喷孔  $O_2$  的有效尺寸随距离  $d$  而变化。当  $d$  变化时，压力  $p_1$  也会发生变化，这一变化可以用于尺寸  $d$  的测量。这种测量法称为气压测量法。

气压测量法、液压测量法对环境条件要求不高，但由于其可压缩性和响应较迟缓，只适宜做静态测试。

### 4. 电测法

图 1.7 所示是 YDS-78 型压电力传感器应用在车床切削力测试中的例子。压电传感器安装在车削刀具的下端。当工件 4 旋转，车刀 3 开始切削工件时，垂直方向的车削力  $F_y$  作用于刀具上，并通过刀具传递到压电式动态力传感器 1 上，压电式动态力传感器将力转换为电信号输出，由此完成对车削力  $F_y$  的测量。这种将非电量  $F_y$  通过压电式动态力传感器变换

为电信号进行测量的方法称为非电量电测法。

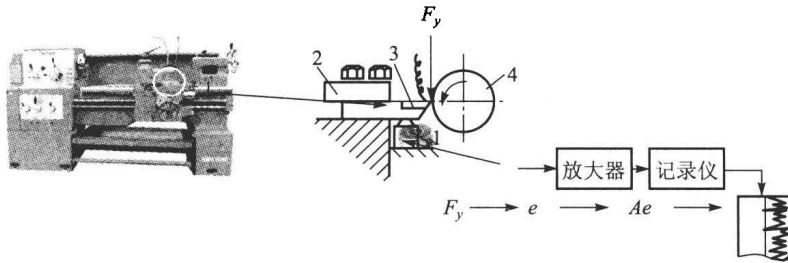


图 1.7 动态切削力的电测法

1—压电式动态力传感器；2—夹具；3—车刀；4—工件

目前，机械工程中最普遍使用的测量方法是非电量电测法。这种测量方法精度高、灵敏度高，特别适于动态测试。电测法可以将不同的被测机械量信号转换成电信号，便于用统一的后继仪器进行处理和计算机分析。同时，利用电测法还便于进行远距离测量和控制，甚至可以进行无线遥控测量。可以说，电测法是现代测试技术发展的特点之一。

### 1.3 非电量电测法测试系统

在实际工程测量中，由于绝大多数被测物理量都是非电量，构建非电量电测系统就非常必要。

以图 1.2 所示的碰撞力测试过程为例，可以将测试过程中的测量设备按功能划分为 3 部分（见图 1.8）：激励装置（也称试验装置）、测量装置、标定装置（图 1.8 中未标出）。测量装置又分为 3 个级次。

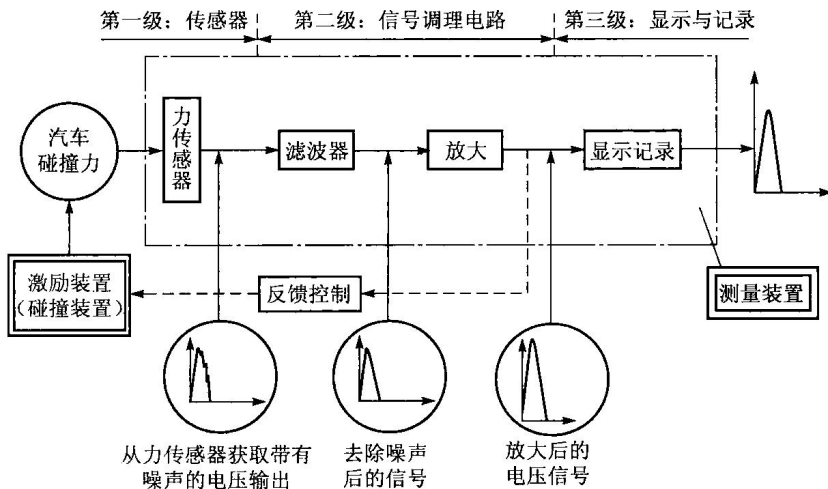


图 1.8 碰撞力测试系统框图

通常，将测量装置、标定装置和激励装置组成的用于非电量测试的系统称为非电量电测系统，如图 1.9 所示。值得注意的是，在不需要进行试验的场合，非电量电测系统就只需测量装置和标定装置构成。下面给出测量装置、标定装置和激励装置的定义。



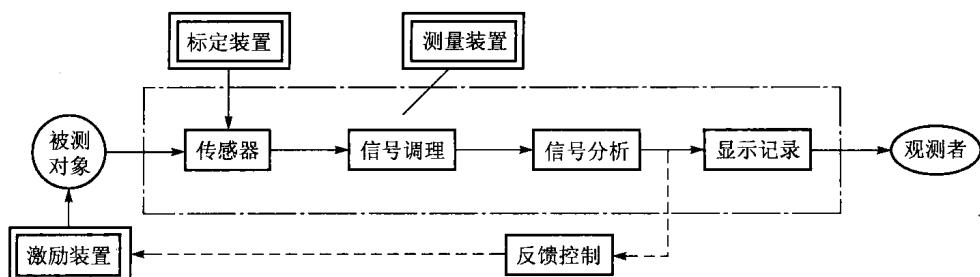


图 1.9 非电量电测法的测试系统框图

### 1. 测量装置

测量装置是各种测量仪器和辅助装置的总称。测量装置包括传感器，信号调理与信号分析仪器，显示、记录仪器 3 部分，这 3 部分又称 3 级，简单介绍如下。

(1) 第一级：检测 - 传感器级或敏感元件 - 传感器级。

测试系统的第一级的主要功能是检测或敏感被测量，并把非电量信号转换成电信号，以便送入后续的仪器进行处理（第 4 章专题讨论传感器）。在理想情况下，该级只对输入信号敏感，有选择性，对其他的任何可能输入则不敏感。如图 1.7 中的压电式力传感器，它只对力敏感，对加速度不敏感；如果是一个水银温度计，则它只对温度敏感，对其他的物理量不敏感。

(2) 第二级：中间级称为信号调理级。

测试系统的第二级的目的一般是调整所传感的信号，最通常的功能就是将信号的幅值或能量增加到一定的程度用来驱动最后的终端装置。此外，还必须将它设计成用于在第一和第二级以及第二和第三级之间具有适当的匹配特性。

通常，该级还执行一种或多种的基本操作，如根据需要做选择性滤波来去除噪声、积分、微分或遥测（第 5 章和第 6 章专题讨论信号调理及处理）。

(3) 第三级：终端级或显示 - 记录级。

第三级将信息以一种可理解的形式提供给人的一种感官或一个控制器（第 7 章专题讨论显示、记录仪器）。

### 2. 标定装置

标定装置是用以确定测量装置的输入与输出之间的数量刻度关系的装置。在图 1.2 所示的例子中，通过间接测量得到了碰撞力最终的输出——记录纸上的“位移”。记录纸上的“位移”的变化规律与汽车碰撞力变化规律一致，这表明可以通过记录纸上的“位移”定性确定碰撞力的变化规律。但要定量地确定“位移”与碰撞力的关系（多少毫米“位移”代表多大的碰撞力？），就必须对测量系统进行标定（类似于在温度计上制作刻度），以便确定这个“标定系数”。标定所使用的装置称为标定装置。

### 3. 激励装置

激励装置是根据测试内容的需要，使被测对象处于人为的工作状态，产生表征其特征（信息）的信号。图 1.2 所示的汽车碰撞试验中的碰撞壁障、汽车的牵引加速设备等都是激励装置。