



北京市高等教育精品教材立项项目



普通高等教育“十五”国家级规划教材

清华大学“985”教材建设基金项目

$G_T(j\omega)$

T

测试技术基础

王伯雄 主编

清华大学出版社



北京市高等教育精品教材立项项目
普通高等教育“十五”国家级规划教材
清华大学“985”教材建设基金项目

测试技术基础

王伯雄 主编

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书是根据清华大学机械工程学院平台课《测试与检测技术基础》的教学大纲编写的一本有关测试技术的理论和应用的教材。全书分两大部分,共 11 章。第一部分共 7 章,主要介绍测试技术的理论基础,内容包括:测量的本质,信号理论和测试信号的分析与处理,测试系统的特性描述,信号的传感、调理与输出,虚拟测试系统。第二部分共 4 章,主要介绍振动(位移、速度、加速度)、力(压力)、温度和流量等常见物理量的测试方法与应用。

本书可作为高等院校机械、仪器、测控、自动化、信息等专业的教材,也可作为工程技术人员的专业参考书。

图书在版编目(CIP)数据

测试技术基础/王伯雄主编. —北京:清华大学出版社,2003

北京市高等教育精品教材立项项目. 普通高等教育“十五”国家级规划教材. 清华大学“985”教材建设基金项目

ISBN 7-302-06267-6

I. 测… II. 王… III. 测试技术—高等学校—教材 IV. TB4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 004180 号

出 版 者: 清华大学出版社(北京清华大学学研大厦,邮编 100084)

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

责任编辑:李艳青

版式设计:韩爱君

印 刷 者:北京牛山世兴印刷厂

发 行 者:新华书店总店北京发行所

开 本:787×960 1/16 印张:32.75 字数:675 千字

版 次:2003 年 4 月第 1 版 2003 年 4 月第 1 次印刷

书 号:ISBN 7-302-06267-6/TH·107

印 数:0001~4000

定 价:48.00 元



前言

工农业生产的发展和现代科学技术的进步极大地促进了测试技术的发展。一方面,对各种物理量的测量提出了越来越广泛的要求,同时对各种测试技术人员的需求也变得越来越迫切;另一方面,在高等教育领域,测试技术的教学已经得到越来越多的重视。十几年前,全国仅有少数高校开设测试技术这门课,而如今几乎绝大部分的工科院校均已将这门课作为本科生或研究生的一门必修的专业基础课。在此基础上涌现出了一批各种类型的教材、讲义和著作,对测试技术的普及和发展起到了进一步的推动作用。这从另一个侧面说明了测试技术的重要性。

清华大学是全国最早开设测试技术课程的高校之一。作为机类专业本科生必修的一门专业基础课,在长期的教学实践中,我们在教材和实验室建设等方面积累了一定的经验。近年来,在清华大学“211”工程和“985”项目的支持下,又对原有的测试技术课程体系进行了改革,更新教材内容,增设新的实验项目,并统筹了机类各专业测试技术课程的教学大纲。本书即是根据清华大学机械工程学院平台课“测试与检测技术基础”的新教学大纲进行编写的,旨在提供一本适合于本科生教学的有关测试技术的基础理论方面的教材。

全书分两大部分,共 11 章。第一部分共 7 章,主要介绍测试技术的理论基础。其中第 1 章为概述,介绍测试技术的发展、意义及涵盖的内容,同时也讲述了测量标准和国际单位制方面的内容。第 2 章介绍信号的理论、测试信号的分析与处理。第 3 章介绍测试系统特性描述的方法与理论。第 4 章、5 章、6 章分别介绍了测试信号的传感、调理和输出方面的理论及应用。近年来,虚拟仪器技术的发展为现代测试技术开辟了一个新的领域,本书第 7 章专门介绍了虚拟测试技术的概况。另外,微纳米技术及微型传感器技术的迅速发展给传感器领域带来了新的活力。微型传感器以其体积小、功耗低、功能强等诸多优点正受到人们越来越多的关注,因此在第 4 章“被测量的获取”中,专门介绍微型传感器方面的知识。第二部分共 4 章,介绍典型测试技术的应用,其中主要介绍了四种常见物理量的测试与检测:振动(位移、速度、加速度)、力(压力)、温度和流量。目的是在第一部分内容学习的基础上,使读者进一步掌握综合利用测试技能进行不同物理量测试的知识。在教学内容的安排上,这部分内容作为测试技术的应用,可根据不同的专业和教学对象来加以取舍。

本书在编写过程中,参阅了大量国内外的有关教材、专著和文献,结合作者多年的教学经验和体会,力求将最新的、代表当今最先进技术的内容引进本书中。在内容和章节的安排上,力求做到内容的连贯性和系统性。

本书由清华大学王伯雄教授主编,参加编写的有清华大学陈非凡副教授(第6章),清华大学罗秀芝高级工程师(第2章中数字信号处理部分内容),其余各章节均由王伯雄编写。全书由清华大学周兆英教授担任主审。本书内容的录入与整理由清华大学陈华成、朱从锋、刘振江完成。另外,在本书的编写过程中,清华大学吴正毅教授提出了许多宝贵的意见和建议。对此一并向他们表示作者的深深谢意。

由于作者水平有限,书中缺点和错误在所难免,恳请广大读者批评指正。

作 者

2003年2月于清华园



目录

第一部分 测试技术的理论基础

1 绪论	3
1.1 测试技术的发展与研究的内容	3
1.2 测量的本质和基本前提	6
1.3 标准及其单位	6
1.3.1 国际单位制及其基本单位	7
1.3.2 国际单位制的导出单位	8
1.3.3 单位的十进制倍数和小数	10
2 测试信号分析与处理	11
2.1 信号与测试系统	11
2.2 信号描述	12
2.2.1 信号的定义	13
2.2.2 信号的分类	14
2.2.3 信号的时域和频域描述方法	19
2.2.4 周期信号的频域描述	20
2.2.5 周期信号的功率	31
2.2.6 非周期信号的频域描述	34
2.2.7 随机信号描述	66
2.3 数字信号处理	87
2.3.1 离散傅里叶变换	88
2.3.2 离散傅里叶变换的性质	94
2.3.3 采样定理	95
2.3.4 泄漏与加窗处理	97

2.3.5	栅栏效应·····	102
2.3.6	快速傅里叶变换·····	103
2.3.7	Zoom-FFT·····	114
3	测试系统特性分析 ·····	117
3.1	概述·····	117
3.2	测量误差·····	118
3.3	测试系统的静态特性·····	119
3.4	测试系统的动态特性·····	122
3.4.1	线性系统的数学描述·····	122
3.4.2	用传递函数或频率响应函数描述系统的传递特性·····	124
3.5	测试系统实现精确测量的条件·····	149
3.6	测试系统的负载效应·····	152
3.6.1	负载效应·····	152
3.6.2	一阶系统的互联·····	154
3.6.3	二阶系统的互联·····	156
4	被测量的获取 ·····	161
4.1	被测量获取的基本概念·····	161
4.2	传感器的分类·····	162
4.3	电阻式传感器·····	165
4.3.1	工作原理·····	165
4.3.2	滑动触点式变阻器·····	165
4.3.3	应变式传感器·····	168
4.4	电阻式温度计·····	176
4.5	热敏电阻·····	178
4.6	电感式传感器·····	180
4.6.1	自感式·····	180
4.6.2	互感式·····	190
4.6.3	磁弹性测力传感器·····	195
4.6.4	压磁式互感传感器·····	197
4.7	电容式传感器·····	198
4.7.1	间隙变化型·····	199
4.7.2	面积变化型·····	200

4.7.3 介质变化型	203
4.8 压电传感器	208
4.8.1 压电效应	208
4.8.2 压电传感器工作原理及测量电路	212
4.8.3 压电传感器的应用	217
4.9 磁电式传感器	226
4.9.1 动圈式和动铁式传感器	226
4.9.2 磁阻式传感器	229
4.9.3 涡流-磁电式相对加速度传感器	229
4.10 光电传感器	231
4.10.1 外光电效应	231
4.10.2 内光电效应	234
4.10.3 光生伏打效应	240
4.10.4 光电器件的应用	242
4.11 气敏传感器	244
4.12 红外辐射检测	247
4.12.1 红外辐射	247
4.12.2 红外探测器	249
4.12.3 红外检测应用	250
4.13 固态图像传感器	254
4.14 霍尔传感器	260
4.14.1 作用原理	260
4.14.2 霍尔效应的应用	262
4.15 微型传感器	265
4.15.1 MEMS 技术与微型传感器	265
4.15.2 压阻式微型传感器	267
4.15.3 电容式微型传感器	273
4.15.4 电感式微型传感器	277
4.15.5 热敏电阻式微型传感器	278
4.15.6 隧道效应式传感器	279
5 测试信号的转换与调理	283
5.1 电桥	283
5.1.1 直流电桥	283

5.1.2	交流电桥	287
5.1.3	变压器式电桥	290
5.1.4	电桥使用中应注意的问题	291
5.2	调制与解调	294
5.2.1	幅值调制与解调	295
5.2.2	频率调制与解调	306
5.3	滤波	312
5.3.1	概述	312
5.3.2	滤波器的一般特性	316
5.3.3	滤波器类型	320
5.3.4	滤波器的综合运用	330
5.3.5	其他种类的滤波	339
5.4	模拟/数字转换器	340
5.4.1	量化	340
5.4.2	A/D转换器	341
5.4.3	抗混滤波器	346
5.4.4	数字/模拟(D/A)转换器	347
6	信号的输出	351
6.1	概述	351
6.2	信号输出的形式及分类	352
6.3	显示和指示类信号输出	353
6.3.1	模拟指示	353
6.3.2	数码显示	356
6.3.3	图视显示	362
6.4	记录类信号输出	373
6.4.1	硬拷贝记录	374
6.4.2	模拟记录	378
6.4.3	数字记录	387
7	虚拟测试系统	391
7.1	概述	391
7.2	虚拟仪器的构成	393
7.2.1	虚拟仪器的硬件模块	393

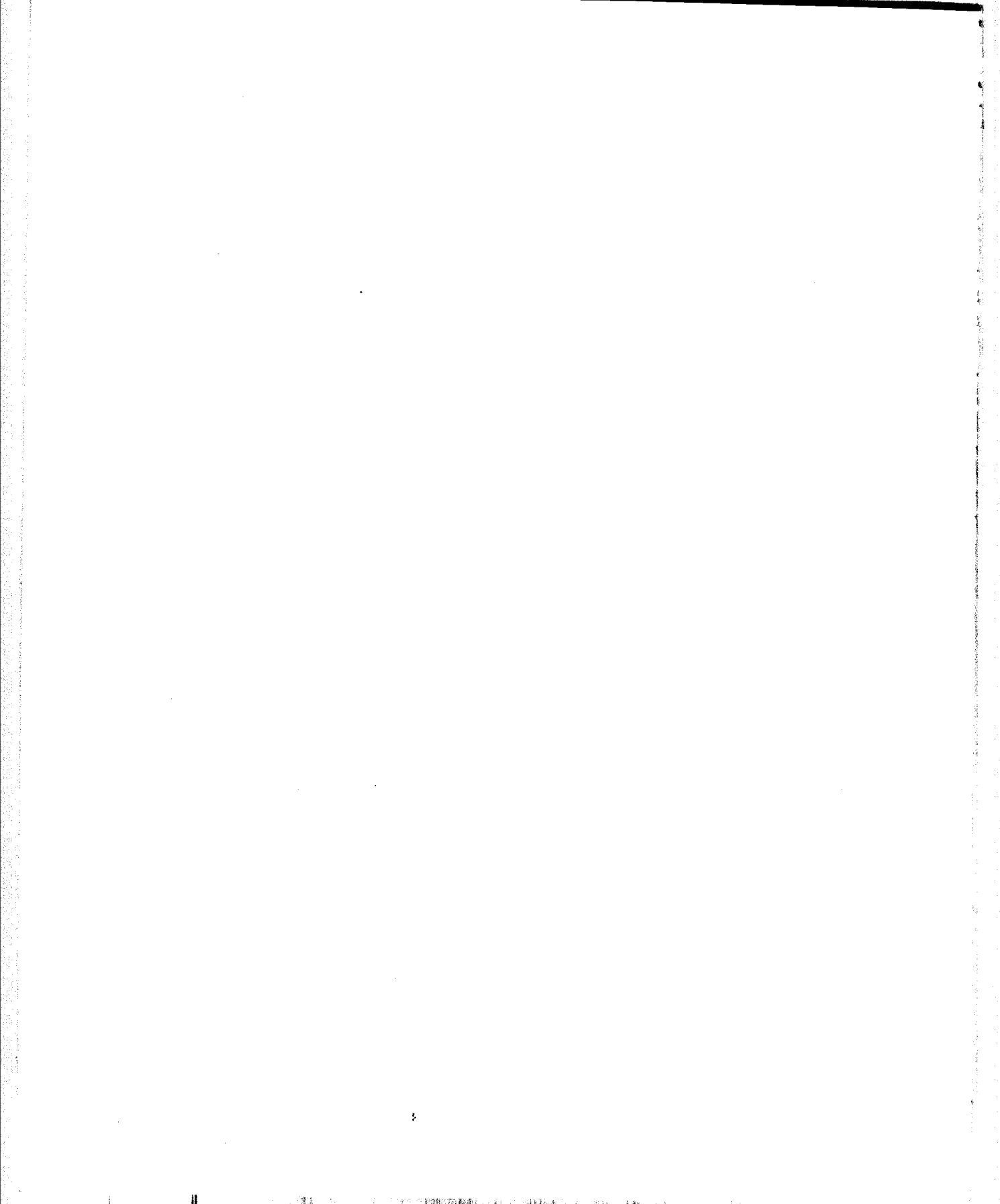
7.2.2 虚拟仪器的软件模块·····	395
7.3 虚拟测试系统的应用·····	399

第二部分 典型测试技术的应用

8 力及其导出量的测量 ·····	403
8.1 概述·····	403
8.2 基本测力方法·····	404
8.3 测力传感器·····	407
8.3.1 弹性力传感器·····	407
8.3.2 应变片力传感器·····	409
8.3.3 电感式力传感器·····	411
8.3.4 电容式力传感器·····	412
8.3.5 磁弹性力传感器·····	412
8.3.6 压电力传感器·····	413
8.3.7 振弦式力传感器·····	414
8.4 转矩测量·····	415
8.4.1 应变片转矩传感器·····	415
8.4.2 电感式转矩传感器·····	416
8.4.3 振弦式转矩传感器·····	417
9 振动测量 ·····	419
9.1 概述·····	419
9.2 机械振动的电测法及测试系统的构成·····	420
9.3 单自由度系统的受迫振动·····	422
9.3.1 作用在系统质量块上的力引起的受迫振动·····	422
9.3.2 由系统的基础运动引起的受迫振动·····	424
9.4 测振传感器·····	426
9.4.1 磁电式速度传感器·····	427
9.4.2 涡流位移传感器·····	427
9.4.3 电感式振动传感器·····	428
9.4.4 电阻式振动传感器·····	429

9.4.5	电容式加速度传感器	430
9.4.6	压电加速度传感器	431
9.4.7	磁致伸缩式振动传感器	431
9.4.8	激光速度传感器	432
9.5	激振器	433
9.5.1	力锤	433
9.5.2	机械惯性式激振器	435
9.5.3	电动力式激振器	435
9.5.4	液压式激振台	438
9.6	测振仪器的校准	439
9.6.1	绝对校准法	439
9.6.2	相对校准法	441
10	温度的测量	443
10.1	温标的定义	443
10.2	温标的复制	445
10.2.1	水的冰点	445
10.2.2	水的三态点	445
10.2.3	水的沸点	446
10.3	温度传感器	447
10.3.1	接触式温度计	447
10.3.2	辐射式温度计	466
11	流量的测量	475
11.1	流体的特征	475
11.2	不同的流量测量方法及仪器	477
11.2.1	节流式流量计	477
11.2.2	可变面积式流量计(转子流量计)	484
11.2.3	涡轮式流量计	486
11.2.4	磁流量计	488
11.2.5	椭圆轮流量计	489
11.2.6	旋转活塞式气体流量计	491

11.2.7	叶轮流量计.....	492
11.2.8	涡流式流量计(卡尔曼涡街,涡频流量计)	492
11.2.9	流速的测量.....	494
11.2.10	超声波流量测量	504
11.2.11	哥氏力质量流量测量法	508
参考文献.....		510





1

绪 论

1.1 测试技术的发展与研究的内容

知识的获取往往从测量开始。人类在其自身的社会发展中创造并发展了测量学,人类早期的测量活动涉及对长度(距离)、时间、面积和重量等量的测量。随着社会的进步和科学的发展,测量活动的范围不断扩大,测量的工具和手段不断精细和复杂化,从而也不断地丰富和完善了测量的理论。早在公元前 3 000 年,古埃及人出于对工程和生产的需要便已建立了长度的统一标准——埃尔,他们将当时统治埃及的法老的肘关节到中指指尖的长度加上他手中一根棕榈枝长的总长度定义为“1 埃尔”,并将该长度标准用黑色花岗岩来实现而作为原始标准。埃及人在建造众多的祠庙和金字塔的浩大工程中正是使用了这一长度标准。秦始皇在统一六国后便立即建立了统一的度量衡制度,并对破坏这一制度的人科以严厉的刑罚。这些都说明了测量对促进当时生产发展和社会进步的重要性。今天,测量已渗透到人类活动的每个领域。从日常生活的三表(水、电、煤气表)、每日的天气预报、医院中的病人监护设施、汽车中的各种指示仪表,直至宇宙飞船的姿态控制装置、飞机的导航仪表,测量无处不在。科学技术的飞速发展给测量学这一古老的学科注入了新的活力,现代电子技术、尤其是信息技术的发展更推动了测量学科的迅猛发展。因此测量学是一门多学科交叉的边缘学科。毫不夸张地说,任何一门学科都可以在测量学科中找到它的踪迹。反过来说,测量学科的发展也进一步促进了其他学科的发展。

英国物理学家开尔文勋爵(William Thompson, 温度单位 K 即以他的名字来命名)说过:“凡存在之物,必以一定的量存在。”他又说:“我经常说,当你能测量你所谈及的事物并将它用数字表达时,你对它便是有所了解的;而当你不能测量它,不能将它用数字表达时,你的知识是贫瘠的且不能令人满意的。”开尔文勋爵的这两句话指出了测量的广博性,也指出了测量的内涵及科学性。的确,凡是要定量地描述事物的特征和性质的地方,都离不

开测量。

人类处在一个广大的物质世界中,面对着众多的测量对象和测量任务,被测的量千差万别、种类各异。但根据被测的物理量随时间变化的特性,可将它们总体地分成静态量和动态量。所谓静态量是指那些静止的或缓慢变化的物理量,因此对这类物理量的测量称之为静态测量;相反,动态量是指随时间快速变化的物理量,对它们的测量相应地称之为动态测量。本书主要研究对动态量的测量,亦即动态测量的理论、方法及应用。测试的例子比比皆是:为了保证加工零件的质量,要对机床主轴的振动特性进行监测和分析;飞机在飞行时依靠众多的仪表来测量和指示航向、速度、加速度、里程等一系列数据,从而确保飞机始终位于正确的航程中;轧钢过程中对轧制的带钢厚度及宽度尺寸的连续自动检测;旋转机械因轴承摩擦发热而造成的部件热变形的检测……。需要指出的是,静态与动态测量是相对的,有时可以相互转化。在纸张生产中对纸张厚度的检查可采用厚度检验仪对生产线上的纸张作分段抽样检测,也可以采用传感器(涡流或光电式传感器)对纸张作连续检测,此时原本抽样检查的静态测量便变成了连续过程的动态测量。由于动态测量对纸张尺寸的检测是连续的,因此能更全面、有效地控制整个纸张的生产质量。当然,不能由此简单地评价静态与动态测量方法的优劣性,静态和动态测量方法是两种不同的方法,采用哪一种方法取决于被测对象的性质和对测量的要求。对每一种方法来说,相应地都有它自己的测量理论、测量手段和专门的仪器。测量的复杂程度完全取决于被测量本身的特征及测量所要达到的要求(精度、稳定性等)。

一个测量或测试系统大体上可用图 1.1 所示的原理方框图来描述。

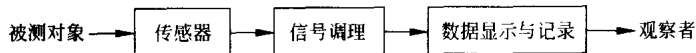


图 1.1 测试系统原理框图

传感器是测试系统中的第一个环节,用于从被测对象获取有用的信息,并将其转换为适合于测量的变量或信号。如采用弹簧秤测量物体受力时,其中的弹簧便是一个传感器或者敏感元件,它将物体所受的力转换成弹簧的变形——位移量。又如在测量物体的温度变化时,可采用水银温度计作传感器,将热量或温度的变化转换为汞柱亦即位移的变化。同样可采用热敏电阻来测温,此时温度的变化便被转换为电参数——电阻率的变化。再如在测量物体振动时,可以采用磁电式传感器,将物体振动的位移或振动速度通过电磁感应原理转换成电压变化量。由此可见,对于不同的被测物理量要采用不同的传感器,这些传感器的作用原理所依据的物理效应也是千差万别的。对于一个测量任务来说,第一步是能够(有效地)从被测对象取得能用于测量的信息,因此传感器在整个测量系统中的作用十分重要。

信号调理部分是对从传感器所输出的信号作进一步的加工和处理,包括对信号的转