



普通高等教育“十一五”国家级规划教材
普通高等教育机械工程专业规划教材

Measurement Technology in
Mechanical Engineering

第2版

机械工程测试技术

● 陈花玲、主编

806



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

本书为普通高等教育“十一五”国家级规划教材。

全书分为上、下两篇，共十章。上篇为测试基础，包括绪论、机械测试信号分析、测量装置的基本特性、参数式传感器、发电式传感器、信号的调理；下篇为测试系统设计及实用测试技术，包括测试系统设计、计算机测试系统、其他测试技术，以及典型测试系统设计实例。

本书可作为机械工程学科各专业本科生教材，亦可供相应专业工程技术人员参考使用。

图书在版编目 (CIP) 数据

机械工程测试技术/陈花玲主编. —2 版. —北京: 机械工业出版社, 2008.7

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

普通高等教育机械工程及自动化专业规划教材

ISBN 978-7-111-09685-6

I. 机... II. 陈... III. 机械工程—测试技术—高等学校—教材

IV. TC806

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 096783 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑: 刘小慧 版式设计: 霍永明 责任校对: 张晓蓉

封面设计: 张 静 责任印制: 洪汉军

北京振兴源印务有限公司印刷厂印刷

2009 年 1 月第 2 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 12.5 印张 · 301 千字

标准书号: ISBN 978-7-111-09685-6

定价: 24.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

销售服务热线电话: (010) 68326294

购书热线电话: (010) 88379639 88379641 88379643

编辑热线电话: (010) 88379711

封面无防伪标均为盗版

第2版前言

21 世纪是信息科学的时代,作为其三大支柱的测试与控制技术、计算机技术和通信技术得到了迅猛的发展。而测试技术是信息获取的来源,它的快速发展不但表现在组成该技术的各个要素——传感器、信号调理电路、信号处理以及显示与记录设备等不断地得到技术革新或更新换代,而且朝着智能化、微型化和高度集成化方向发展;同时,它与其他计算机技术和通信技术一道广泛地应用于工农业生产、国防建设、医疗卫生和人民生活的各个领域,其深度和广度甚至超出了人们的预期。

随着工程技术信息化的发展,测试技术与机械工程形成了紧密的结合,成为了机械工程领域不可或缺的组成部分。为此,我们于 2001 年编写了《机械工程测试技术》教材,为机械工程领域的本科生传授所需的测试技术和试验技术等基础知识。在本次教材修订中,我们吸取了第 1 版教材的成功经验和不足,力求增新弃旧、优化组合,使本教材尽可能反映测试技术的最新发展,满足机械工程领域人才培养的需求。

本次教材修订对第 1 版进行了较大的改动,具体工作集中在以下几个方面:

1) 进一步强化了教材内容中理论与实践的结合的理念,除了继续沿用上篇为基础篇、下篇为应用篇外,在介绍各种传感器技术时,力争在各个部分增加一小节专门介绍其应用。

2) 加强了测试技术新近发展成果的系统介绍。例如:在“计算机测试系统”一章比较详细地介绍了智能仪器和虚拟仪器,试图反映测试技术向自动化和智能化发展的新趋势;在“其他测试技术”一章加强了激光、光纤、超声波、工业 CT 检测技术等先进测试手段的介绍。

3) 强化测试系统的设计与应用能力。将“测试系统设计”单独作为一章,重点介绍测试系统设计的基本原则、设计步骤,以及设计中所必须的抗干扰设计技术和精度分配技术。同时增加最后一章“典型测试系统设计实例”,通过对一些典型工程实用测量系统的设计或介绍,进一步强化了对学生的测试系统设计能力的培养。

本教材建议的教学学时数为 40~60 学时。测试基础篇为本科生教学必讲内容,测试系统设计及实用测试技术篇为选讲内容,教师可根据课程的学时数或其他具体情况选取其中的部分章节内容讲授,并应辅以相应的实验实践环节。

本教材编写分工是:第 1 章由西安交通大学陈花玲教授编写,第 2 章由西安交通大学徐光华教授和梁霖博士共同编写,第 3 章由西安交通大学张周锁副教授编写,第 4 章由西安建筑科技大学马松龄副教授编写,第 5 章由西安理工大学杨静副教授编写,第 6 章由华南理工大学康龙云教授、西安交通大学张小栋副教授共同编写,第 7 章由西安交通大学张小栋副教授编写,第 8 章由西安交通大学侯成刚副教授编写,第 9 章由西安交通大学陈花玲教授、张小栋副教授共同编写,第 10 章由西安建筑科技大学马松龄副教授 (10.1),以及西安交通大学徐光华教授 (10.2 和 10.6 一部分)、张周锁副教授 (10.3)、张小栋副教授 (10.4)、陈花玲教授 (10.5) 和景敏卿教授 (10.6) 共同编写。全书由陈花玲教授任主编,徐光华教授和张小栋副教授为副主编,负责全书统稿及修改工作。

本教材已被列入西安交通大学“十一五”教材建设规划和普通高等教育“十一五”国家级教材规划,在此,编者对机械工业出版社与西安交通大学的大力支持与帮助表示衷心的感谢。

中国高校机械工程测试技术研究会副理事长、西北工业大学石秀华教授,自动检测分会(即原西北分会)副理事长、西安建筑科技大学谷立臣教授对本教材进行了认真、细致的审阅,从教材的编写提纲到最后的定稿无不浸含着他们的心血和汗水,在此一并表示衷心的感谢!

由于本教材是在第1版基础上改编的,为此,本教材编者对参与第1版教材编写的西安交通大学的厉彦忠、吴晓敏、王铭华、苗晓燕老师表示衷心的感谢!

全体编者热切期望使用本教材的读者,能提出宝贵的意见,共同为提高该教材的质量而努力。为此,我们将不胜感谢!

编 者

第1版前言

“机械工程测试技术”课程是面向“机械工程及自动化”大专业，即涵盖现有的机械工程和能源与动力工程各专业本科生的一门工程技术课。它涉及机械工程领域中的非电量电测技术和其他测试技术等知识，是工业生产与科学研究必不可少的重要技术手段。

随着中国高等教育与世界接轨的发展趋势，原有的机械类和能动类两大专业势必会进一步合并，显然现有的机类教材是无法满足这个宽口径“机械工程及自动化”大专业的教学内容要求。与此同时，测试技术作为一种应用十分广泛的实用技术，一方面必须强调理论与实践相结合，即测试基础理论知识与实用测试技术相结合，只有这样，才能有助于测试技术知识的深入学习，才能有助于测试技术的快速发展；另一方面，随着相关学科技术的飞速发展，测试技术也在突飞猛进的发展，以计算机技术、光电技术等为基础的现代测试技术在整个测试技术领域占有越来越重要的地位。为此，有必要在现有相关教材的基础上，取长补短，求同存异，增新弃旧，优化组合，编写一本适应于大机类专业的“测试技术”主干课程教材。

本教材定名为《机械工程测试技术》，它具有以下特点：

1) 既重视了测试技术基础知识的讲解，又注重实用测试技术的介绍。全书分上下两篇，其中上篇为测试基础篇，它借助了原机械类教材的优势，着重讲解信号分析、测量装置基本特性、测量误差分析与处理、信号的获取与调理，以及计算机测试技术等；下篇为实用测试技术篇，它综合了原能动类教材的长处，重在介绍力、压力和位移、温度、振动和噪声、转速与功率、流量与流速等常见机械工程参数的实用测量技术。

2) 本教材不是原有两类教材的简单合并，而是力求创新、优化重组教材的教学内容和体系。其一将以往机械类教材的“传感器”和“信号调理”两部分章节重组为“信号获取与调理”一章，并放在了基础篇，以突出该两部分内容的关联性；其二是在基础篇增添了“计算机测试技术”一章，试图反映测试技术向自动化和智能化发展的新趋势以及计算机在测试技术中的应用与发展，并帮助学生或工程技术人员学会运用所学测试技术知识设计或构成现代的测试系统。

3) 机械工程中广泛应用的非电量电测技术为主干讲解内容，同时又根据机械工程及自动化一级学科相应专业的实际需要，兼顾了其他方法的测量技术，如流量与流速测量技术等；同时又在本教材的尾部增加了“其他测试技术”一章，重在介绍一些先进的测试技术或特种测试技术，诸如激光、CCD、光纤等典型的光测技术和红外、超声等无损检测技术，试图与前述的常规测量方法相得益彰。

4) 注重“测试技术”课程与其相关工程技术课程及专业选修课程的相互位置和关系，试图达到既保证本课程体系的完整性，又能尽量避免与其他相关主干课程（如“控制工程基础”、“数控技术”、“互换性与测量技术”等）发生冲突，同时又能更好地为后续专业选修课程（如“自动化元件”、“现代信号分析方法”、“机械故障诊断”、“振动与噪声控制技术”、“微机自动检测与控制”、“机械电子工程设计”等）的学习打下良好基础。

本教材建议的教学学时数为40~60学时。测试基础篇为本科生教学必讲内容,实用测试技术篇为选讲内容,教师可根据课程的学时数或其他具体情况选取其中一部分章节内容讲授,并应辅助以相应的实验实践环节。

全书共分十二章,其中,第一、九章由西安交通大学陈花玲教授编写,第二、三章由西安交通大学张周锁讲师编写,第四章由西安建筑科技大学马松龄副教授、西安交通大学王铭华讲师共同编写,第五章由西安理工大学杨静讲师编写,第六章由西安交通大学张小栋副教授、西安建筑科技大学马松龄副教授共同编写,第七章由西安交通大学张小栋副教授、吴筱敏副教授编写,第八章由西安交通大学厉彦忠教授编写,第十章由西安交通大学吴筱敏副教授编写,第十一章由西安交通大学王铭华讲师编写,第十二章由西安交通大学张小栋副教授编写,此外,西安交通大学苗晓燕讲师也参加了部分章节的初稿编写。全书由陈花玲教授担任主编,厉彦忠教授和张小栋副教授二人担任副主编,并共同负责全书统稿及修改工作。

鉴于本教材的上述特点,由机械工业出版社教材编辑室与西安交通大学机械工程学院共同策划与组织的“西部地区部分高校机械类主干课系列教材”编审委员会对本教材审定后,同意将本教材纳入该系列教材之中,并计划首批出版。在此,编者对机械工业出版社及该编审委员会的大力支持表示衷心的感谢。

中国高校机械工程测试技术研究会自动检测分会(即原西北分会)理事长、西北工业大学石秀华教授为本教材主审,从教材的编写提纲到最后的定稿过程中无不浸含着她的心血和汗水;分会秘书长、西安建筑科技大学谷立臣教授也一直关心本教材的编写工作,曾为教材的撰写成稿提出了许多宝贵的改进意见。此外,清华大学严普强教授仔细地阅读了本教材的编写大纲,并提出一些宝贵的编写意见和建议。在此一并表示衷心的感谢。

本书编者衷心地期望使用本教材的教师、工程技术人员及学生在阅读本教材之后,能提出宝贵的反馈意见,共同为提高该教材的质量而努力。为此,我们将不胜感谢。

编者

2001年8月

目 录

第2版前言

第1版前言

上篇 测试基础

1 绪论	2	3.2 线性定常系统基本特性	32
1.1 课程的意义及目的	2	3.3 测量系统的静态特性	33
1.1.1 本课程的意义	2	3.4 测量系统的动态特性	36
1.1.2 本课程的目的	3	3.4.1 频率响应函数	36
1.2 测试方法的分类与系统组成	4	3.4.2 理想测量系统的特性	37
1.2.1 测试方法的分类	4	3.4.3 一阶测量系统的特性	38
1.2.2 测试系统的组成	4	3.4.4 二阶测量系统的特性	40
1.3 测试技术的发展	6	3.5 动态测量误差及补偿	41
1.3.1 传感器技术的发展	6	3.5.1 系统的动态测量误差	41
1.3.2 计算机测试技术的发展	7	3.5.2 动态测量误差的补偿方法	44
1.4 本课程的研究内容	9	思考题与习题	45
思考题与习题	10	4 参数式传感器及其应用	47
2 机械测试信号分析	11	4.1 电阻式传感器	47
2.1 信号的表示与分类	11	4.1.1 电阻应变式传感器	47
2.1.1 信号的表示	11	4.1.2 热电阻式传感器	50
2.1.2 信号的分类	11	4.1.3 电位计式电阻传感器	54
2.2 信号的时域分析	12	4.1.4 电阻式传感器的应用	54
2.2.1 时域信号特征参数	13	4.2 电容式传感器	57
2.2.2 时域相关分析	13	4.2.1 电容式传感器工作原理	57
2.3 信号的频谱分析	14	4.2.2 电容式传感器的应用	59
2.3.1 周期信号的频谱分析	14	4.3 电感式传感器	61
2.3.2 非周期信号的频谱分析	18	4.3.1 电感式传感器工作原理	61
2.3.3 随机信号的频谱分析	20	4.3.2 电感式传感器的应用	65
2.4 时频分析	22	思考题与习题	67
2.4.1 短时傅里叶变换	22	5 发电式传感器及其应用	68
2.4.2 小波变换	24	5.1 压电式传感器	68
2.5 机械信号的检验与预处理	27	5.1.1 压电式传感器基本原理	68
2.5.1 信号的检验	27	5.1.2 压电式传感器的应用	69
2.5.2 信号的预处理	28	5.2 磁电式传感器	71
思考题与习题	28	5.2.1 磁电式传感器基本工作原理	71
3 测量系统的基本特性	30	5.2.2 磁电式传感器的应用	72
3.1 测量系统的数学描述	30	5.3 光电式传感器	74
		5.3.1 光电式传感器基本工作原理	74

5.3.2 光电式传感器的应用	75	6.1.1 直流电桥	90
5.4 固态图像传感器	77	6.1.2 交流电桥	93
5.4.1 固态图像传感器基本原理	77	6.2 信号的调制和解调	94
5.4.2 固态图像传感器的工程应用	79	6.2.1 幅值调制和解调	95
5.5 霍尔传感器	80	6.2.2 频率调制和解调	96
5.5.1 霍尔传感器基本工作原理	80	6.3 信号的放大	98
5.5.2 霍尔传感器的应用	81	6.3.1 运算放大器	98
5.6 热电偶传感器	83	6.3.2 测量放大器	99
5.6.1 热电偶传感器原理	83	6.3.3 可编程增益放大器	99
5.6.2 热电偶的分类	84	6.3.4 隔离放大器	100
5.7 红外探测器	85	6.3.5 电荷放大器	100
5.7.1 红外探测器基本工作原理	85	6.4 信号的滤波	101
5.7.2 红外探测器的应用	87	6.4.1 滤波器的分类及幅频特性	101
思考题与习题	88	6.4.2 滤波器的特性参数	102
6 信号的调理	90	6.4.3 典型的滤波电路	103
6.1 电桥	90	思考题与习题	105

下篇 测试系统设计及实用测试技术

7 测试系统设计	108	8.3.3 智能仪器的软件功能	127
7.1 测试系统设计的基本原则	108	8.3.4 智能仪器的自动测量功能	128
7.2 测试系统设计的一般步骤	108	8.3.5 计算机测试系统设计举例	130
7.3 测试系统抗干扰设计	110	8.4 虚拟仪器	132
7.3.1 干扰因素	110	8.4.1 虚拟仪器的概念	132
7.3.2 干扰的传播途径	110	8.4.2 虚拟仪器的体系结构	133
7.3.3 抗干扰技术	111	8.4.3 虚拟仪器的开发环境	135
7.4 测试系统精度分配	112	8.4.4 虚拟仪器设计举例	137
7.4.1 表征测量结果质量的指标	112	思考题与习题	138
7.4.2 不确定度的评定	112	9 其他测试技术	139
7.4.3 直接测量结果的误差估计	114	9.1 激光测量技术	139
7.4.4 间接测量结果的误差估计	114	9.1.1 激光测长仪	139
7.4.5 误差分配与测量方案的选择	115	9.1.2 激光干涉测振仪	140
思考题与习题	116	9.1.3 激光测速仪	140
8 计算机测试技术	117	9.2 光纤传感器测量技术	141
8.1 概述	117	9.2.1 光纤传感器基本原理	141
8.2 数据采集技术	118	9.2.2 光纤传感器的应用	143
8.2.1 模拟信号的数字化处理	118	9.3 超声波检测技术	144
8.2.2 数据的采集与保持	119	9.3.1 超声波简介	144
8.2.3 模数转换技术	121	9.3.2 超声波测距技术	145
8.2.4 A/D 通道方案的确定	122	9.3.3 超声波无损检测技术	146
8.3 智能仪器系统	125	9.4 工业 CT 检测技术	147
8.3.1 概述	125	9.4.1 CT 成像技术介绍	147
8.3.2 智能仪器的硬件结构	126	9.4.2 理论基础	148

9.4.3 工业 CT 检测系统的组成	148	10.4.1 测试任务	163
9.4.4 工业 CT 检测系统的应用	150	10.4.2 测试方案	164
思考题与习题	150	10.4.3 光纤位移传感器设计	164
10 典型测试系统设计实例	151	10.4.4 后续测量系统的设计	166
10.1 塔式起重机结构强度测试	151	10.4.5 测试系统分析	167
10.1.1 测试任务	151	10.5 缝纫机噪声源测试分析	167
10.1.2 测试方案	152	10.5.1 测试任务	167
10.1.3 数据处理与结果分析	154	10.5.2 噪声测量基础	167
10.1.4 测试系统分析	154	10.5.3 缝纫机噪声源测试方案	168
10.2 无心磨削的工件棱圆度精密检测	155	10.5.4 缝纫机噪声与振动测量仪器及 方法	169
10.2.1 测试任务	155	10.5.5 缝纫机噪声与振动测量结果及 分析	170
10.2.2 测试方案	155	10.5.6 缝纫机噪声测试系统分析	173
10.2.3 传感器选择	156	10.6 旋转机械故障监测诊断网络化系统	174
10.2.4 信号处理方法的选择	157	10.6.1 设计任务	174
10.2.5 测试系统的设计与分析	158	10.6.2 网络化监测诊断系统方案	175
10.3 高速机车轴温测试系统	158	10.6.3 CPCI 采集监测单元	175
10.3.1 测试任务	158	10.6.4 网络数据库	179
10.3.2 测试方案的选择	159	10.6.5 网络化监测诊断软件平台	180
10.3.3 测试系统的硬件和软件设计	161	思考题与习题	184
10.3.4 测试系统的可靠性与抗干扰 设计	162	参考文献	185
10.3.5 测试系统的应用效果	163	读者信息反馈表	
10.4 润滑油膜厚度检测	163		

上 篇

51

测试基础

1 绪 论

1.1 课程的意义及目的

1.1.1 本课程的意义

测量与测试是两个密切关联的技术术语。测量是以确定被测物属性量值为目的的全部操作；测试则是具有试验性质的测量，或者可理解为测量和试验的结合。测试技术是指测试过程中所涉及的测试理论、测试方法、测试设备等。广义来看，测试属于信息科学的范畴。测试是人们从客观事物中提取有用信息，从而达到认识事物、掌握事物发展规律的目的。本课程的主要研究对象是测试技术。但是，由于测试与测量紧密相关，故在实际使用中并未严格区分测试与测量。

科学研究离不开实验研究，实验研究历来是科学研究的重要手段之一，也是一种最基本的研究手段，即使是在计算机仿真计算盛行的今天仍不失其重要性，而实验研究必然离不开对被研究对象特性参数的测量。因此，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。事实上，在科学技术领域内，许多新的发现与发明往往是以测试技术的发展为基础的。因而可以认为，精确的测试是科学研究的根基。

测试是工程技术领域中一个重要的技术，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。在生产活动中，新的工艺与设备的开发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、设备的安全与经济运行都是不可缺少的先决条件。在广泛应用的自动控制技术中，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制造与实际运行工作中，测量工作内容已占首位，测量系统的成本已达到装备系统总成本的 50% ~ 70%，它是保证现代工程装备系统实际性能指标和正常工作的重要手段，是其先进性能及实用水平的重要标志。例如：为了对工件进行精密机械加工，需要在加工过程中对各种参数，如位移量、角度、圆度、孔径等直接相关参量，以及振动、温度、刀具磨损等间接相关参量进行实时监测，并由计算机进行分析处理，然后由计算机实时地对执行机构给出进给量、进给速度等控制调节指令，才能保证预期高质量要求，否则得到的将是次品或废品。据有关资料统计：大型发电机组需要 3000 只传感器及其配套监测仪表；大型石油化工厂需要 6000 只传感器及其配套监测仪表；一个钢铁厂需要 20000 只传感器及其配套监测仪器；一个电站需要 5000 只传感器及其配套监测仪器；一架飞机需要 3600 只传感器及其配套监测仪器；一辆汽车需要 30 ~ 100 只传感器及其配套监测仪器，等等。由此可见，测试技术在工程技术领域中占有非常重要的地位。随着机械设备向大容量、多参数方向的日益发展，以及其自动化水平的日益提高，机械工程中各重要参量的测点数量会越来越多，且测量准确性、可靠性的要求也越来越高。

总之,测试技术已广泛地应用于工农业生产、科学研究、国防建设、交通运输、医疗卫生、环境保护和人民生活的各个方面,并在其中发挥着越来越重要的作用,成为国民经济发展和科技进步的一项必不可少的重要基础技术。使用先进的测试技术已成为经济高度发展和科技现代化的重要标志之一。

根据被测对象、测试方法和测试参数的不同,测试的种类是很多的。因此,各行各业都有自己的测试任务与测试技术问题,机械工程测量只是其中的一种。机械工业担负着装备国民经济各个部门的任务。在改革开放的过程中,机械工业面临着更新产品、革新生产技术、改善经营管理、提高产品质量、提高经济效益和参与国际市场竞争的挑战,而机械工程测试技术将是机械工业应对上述挑战的基础技术之一。

1.1.2 本课程的目的

为了说明本课程的目的,这里给出一个在工业生产中常见的测试技术的应用问题。某工厂批量生产中等尺寸大小的三种不同类型的产品 A、B 和 C,每次成批生产中只能生产一种产品。但是在生产过程的某一步必须由操作员进行质量检验,图 1-1 是产品质量检查传送带。如果正在生产 A 产品,检验只需要 5s,对 B 产品进行检验需要近 1min,而对 C 产品进行检验则需要几分钟,因此,针对每一种产品,生产系统必须留出合理的时间让检验员完成每种产品的检验,这就要求精确测量传送带的速度以便对其进行控制。

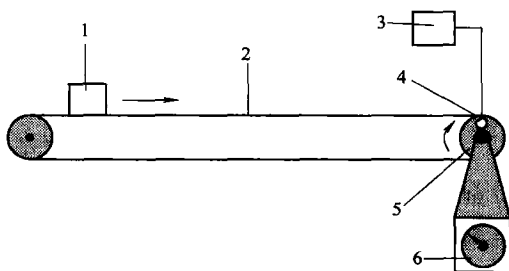


图 1-1 产品质量检查传送带

1—待检产品 2—传送带 3—带速显示
4—速度传感器 5—驱动电动机 6—速度控制

为了实现速度量的测量,必须解决如下问题:

(1) 传感器的选择 仅依赖于电动机速度控制并不能得到精确的带速控制。这是因为随着传送带上产品重量的不同,电动机的负载也不同。尽管速度控制设定在同一位置上,但是带速可能对不同的产品时快时慢。因此需要使用传感器对其实施有效的测量。可选用的传感器有:交流旋转发电机、直流旋转发电机、带 LED 和光电检测器的转轴编码器、磁簧开关传感器、霍尔效应传感器、变磁阻传感器等。

(2) 显示方式的选择 为了掌握带速的变化,必须实时显示带速。可选用的模拟显示方法有:动圈式仪表、示波器等。

(3) 后续测量系统的设计 根据上述选择的传感器与显示仪表,往往还需要设计连接两者的测量电路。例如:如果上述传感器选用交流旋转发电机,而显示方式选用动圈式仪表,这就需要设计将交流信号转换为直流信号的转换电路;又由于交流旋转发电机有时会产生过量的电噪声,在转化电路后还需要接入一个噪声滤波器。

(4) 系统的效能分析 根据上述选择的各个环节进行技术经济分析。

由上面介绍可以看出,学习本课程的目的就是要使学生掌握测试工程中所涉及的相关理论与技术,达到能够针对具体测试任务分析测试对象的技术要求,然后根据其技术要求设计及选择测试系统各个环节,最后对所选择的测试系统还需要进行技术经济分析,使设计及选择的系统不仅能满足测量性能要求,也要经济实惠。

1.2 测试方法的分类与系统组成

根据信号的物理性质,可以将其分为非电信号和电信号。例如,随时间变化的力、位移、速度、加速度、温度、应力等属于非电信号;而随时间变化的电流、电压则属于电信号。在测试过程中,常常将被测的非电量通过相应的传感器变化为电信号,以便于传输、调理(放大、滤波)、分析处理和显示记录等,称其为非电量电测技术。因此,本课程主要以非电量电测技术为主进行介绍,在此基础上也介绍一些其他相关的测试技术。

1.2.1 测试方法的分类

测试方法是指在实施测试中所涉及的理论运算方法和实际操作方法。测试方法可按多种原则分类。

1. 按是否直接测定被测量的原则分类

按照获得测量参数结果的方法不同,通常可把测量方法分为直接测量法和间接测量法。

直接测量法是指被测量直接与测量单位进行比较,或者用预先标定好的测量仪器或测试设备进行测量,而不需要对所获取数值进行运算的测量方法。比如:用直尺测量长度,用水银温度计测量温度,用万用表测量电压、电流、电阻值等。

间接测量法是指被测量的数值不能直接由测试设备来获取,而是通过所测量到的数值同被测量间的某种函数关系经运算而获得的被测值的测量方法。例如:对一台汽车发动机的输出功率进行测量时,总是先测出发动机转速 n 及输出扭矩 M ,再由关系式 $N_e = Mn$ 计算其功率值。

2. 按传感器是否与被测物接触分类

按照传感器是否与被测物体有机械接触的原则可以将测量方法分为接触测量法与非接触测量法。接触测量法往往比较简单,比如测量振动时常用带磁铁座的加速度计直接放在所测位置进行测量;而非接触测量法可以避免传感器对被测对象的机械作用及对其特性的影响,也可避免传感器受到磨损。例如,同样是测量振动,也可采用非接触式的电涡流传感器测量振动位移,由于没有接触,传感器对试件的特性不产生影响。

3. 按被测量值是否随时间变化分类

在讨论测量问题时,有时会遇到“静态测量”和“动态测量”两个术语。其中“静态”和“动态”是指被测量值是否随时间而变化,而不是指被测物体是否处于机械静止或运动中。当被测量值可以认为是恒定的,这种测量被称为静态测量;而当被测量值是随时间变化的,这种测量被认为是动态测量。在进行静态测量和动态测量时,两者对测量装置特性的要求和测得数据的处理是有很大差别的,工作中必须密切注意。本课程主要介绍动态测量技术。

1.2.2 测试系统的组成

在机械工程实际中,常有两类测试系统,即状态检测中的测试系统和自动控制中的测试系统。

1. 状态检测中的测试系统

状态检测中的测试系统将测量结果以人体感官可以感知的形式,如指针的偏转、数码管的显示等输出。操作者根据输出量的变化作出判断,或者停机检修、或者对生产过程或设备运行情况进行调整,使其运行于预期的状态。

状态检测中的测试系统的基本组成可用图 1-2 表示。一般来说,测试系统包括传感器、信号调理、信号处理、显示与记录等四个典型环节。有时测试工作所希望获取的信息并没有直接载于可检测的信号中,这时测试系统就需要选用合适的方式激励被测对象,使其产生既能充分表征其有关信息又便于检测的信息。

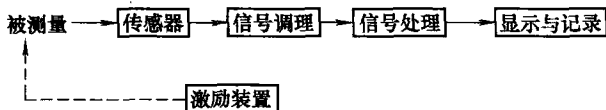


图 1-2 测试系统框图

在测试系统中,传感器的作用是:当接受被测量的直接作用后,能按一定规律将被测量转换成同种或别种量值输出,其输出通常是电信号。例如,金属电阻应变片是将机械应变值的变化转换成电阻值的变化,电容式传感器测量位移时是将位移量的变化转换成电容量的变化等等。

传感器输出的电信号种类很多,输出功率又太小。一般不能将这种电信号直接输入到后续的信号处理电路或输出元件中去。信号调理环节的主要作用就是对信号进行转换、放大和滤波,即把来自传感器的信号转换成更适合于进一步传输和处理的信号。例如,将幅值放大、将阻抗的变化转换成电压的变化等等。这时的信号转换,在多数情况下是电信号之间的转换。从种类来看,将各种电信号转换为电压、电流、频率等少数几种便于测量的电信号,输出功率至少应达到毫瓦级。

信号处理环节接受来自信号调理环节的信号,并进行各种运算、滤波、分析,将结果输出至显示、记录或控制系统。例如,为了对机械故障进行诊断,常常需要对测量的振动时域信号进行傅里叶变换,使时域信号变成频率域信号,然后通过对其频谱特性分析判断其故障原因。

信号显示与记录环节以观察者易于识别的形式来显示测量的结果,或者将测量结果存储,供必要时使用。

图 1-2 中激励装置环节是在系统的特性参数难于检测出来时,人为地对系统增加的激励环节,并非所有的测试系统均有之。

上述工程测试系统所包含的传感器、信号调理电路、信号处理电路、数据显示与记录设备等四个环节是大多数测试系统的组成,当然并非所有测试系统均包含所有四个环节。在某些情况下,信号调理和信号处理电路可能简化去掉;当测量系统构成自动控制系统的一个组成单元时,有可能显示、记录设备也被简化去掉,只有传感器是必不可少的。

2. 自动控制中的测试系统

自动控制中的测试系统是将测量结果转化为控制计算机可以接收的信号,输入到控制计算机,由控制计算机作出判断,并通过执行机构对生产过程或设备运行状态进行调节,使其运行于预期的状态。所以状态检测系统可以是开环的,而自动控制系统必然是闭环的,而且测量系统必然是此闭环系统的必要组成环节,如图1-3所示。

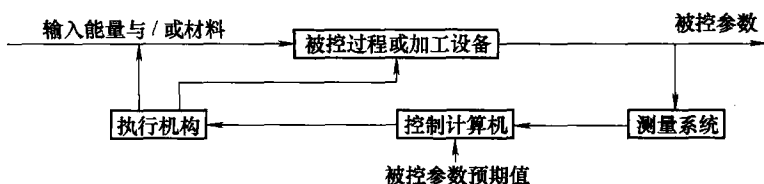


图 1-3 测量系统在自动控制系统中的位置

1.3 测试技术的发展

测试技术与科学研究、工程实践密切相关。测试技术的发展可促进科学技术水平的提高，科学技术水平的提高反过来又促进测试技术的发展，两者相辅相成推动社会生产力不断前进。近年来随着科学技术的飞速发展，使得测试技术的发展也非常迅速，其发展主要表现在两个方面：一是传感器技术自身的发展，二是计算机测试技术的发展。

1.3.1 传感器技术的发展

如前所述，传感器是测试系统中必不可少的一个重要环节，因而可认为它是生产自动化、科学测试、监测诊断等系统中的一个基础环节。由于它的重要性，20 世纪 80 年代以来，国际上出现了“传感器热”。例如：日本把传感器技术列为 80 年代十大技术之首，美国把传感器技术列为 90 年代 22 项关键技术之一等等。因此，当今传感器技术得到了飞速的发展，其中以下三方面的发展最为引人注目。

1. 物性型传感器大量涌现

物性型传感器是依靠敏感材料本身的物性随被测量的变化来实现信号的变换。因此这类传感器的开发实质上是新材料的开发。目前发展最迅速的新材料是半导体、陶瓷、光导纤维、磁性材料，以及智能材料，如形状记忆合金、具有自增殖功能的生物体材料等。这些材料的开发，不仅使可测量的量增多，使力、热、光、磁、湿度、气体、离子等方面的一些参量的测量成为现实，也使集成化、小型化和高性能传感器的出现成为可能。此外，当前控制材料性能的技术已取得长足的进步，这种技术一旦实现，将会完全改变原有敏感元件设计的概念：从根据材料特性来设计敏感元件，转变成按照传感要求来合成所需的材料。

总之，传感器正经历着从以机构型为主转向以物性型为主的过程。

2. 集成、智能化传感器的开发

随着微电子学、微细加工技术和集成化工艺等方面的发展，出现了多种集成化传感器。这类传感器，或是同一功能的多个敏感元件排列成线型、面型的阵列型传感器；或是多种不同功能的敏感元件集成一体，成为可同时进行多种参量测量的传感器；或是传感器与放大、运算、温度补偿等电路集成一体，使传感器具有部分智能，成为智能化传感器。

3. 化学传感器的开发

近几十年来，工农业生产、环境监测、医疗卫生和日常生活等领域，广泛应用化学传感器。化学传感器把化学量转换成电量。大部分化学传感器是在被测气体或溶液分子与敏感元件接触或被其吸附之后才开始感知的，而后产生相应的电流和电位。目前市场上供应的化学传感器以气体传感器、湿度传感器、离子传感器和生物化学传感器为主。预计在未来一段时

间内, 化学传感器将会蓬勃发展, 并将出现一些智能化化学传感器。

随着传感器的技术进步, 会出现传感器集成和融合。传感器将从具有单纯判断功能发展到具有学习功能, 最终发展到具有创造力。在新的世纪里, 面貌一新的传感器将发挥更大的作用。

1.3.2 计算机测试技术的发展

传统的测试系统是由传感器或某些仪表获得信号, 再由专门的测试仪器对信号进行分析处理而获得有用和有限的信息。随着计算机技术的发展, 测试系统中也越来越多地融入了计算机技术。出现了以计算机为中心的自动测试系统。这种系统既能实现对信号的检测, 又能对所获得信号进行分析处理以求得有用信息, 因而称其为计算机测试技术。

1. 一般计算机测试系统

图 1-4 是计算机测试系统的基本形式。它能完成对多点、多种随时间变化参量的快速、实时测量, 并能进行数据处理与信号分析, 由测得的信号求出与研究对象有关的信息或给出其状态的判别。它与图 1-2 所示的测试系统的最大区别是将图 1-2 中的信号处理部分用图 1-4 中的计算机和数据采集卡两部分来完成。计算机是整个测试系统的神经中枢, 它使整个测量系统成为一个智能化的有机整体, 在软件引导下按预定的程序自动进行信号的采集与储存, 自动进行数据的运算分析与处理, 指令其以适当形式输出、显示或记录测量结果。为了实现计算机测量, 数据采集卡是必需的环节, 它用来将信号的模拟量由 A/D 转换器转换为幅值离散化的数字量; 另一方面, 它可由衰减器和增益可控放大器进行量程自动切换, 可由多路切换开关完成对多点多通道信号的分时采样, 时间连续信号经过采样后变为离散的时间序列, 以供计算机进行数值处理与分析。

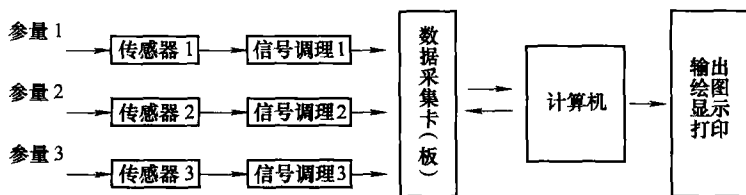


图 1-4 计算机测试系统的基本形式

测试系统除了上述基本型外, 对于功能复杂的测试系统, 往往具有各种各样的分析功能模块, 整个测试系统是由一些具有一定功能的模块相互连接而成的。由于各模块千差万别, 组成系统时相互间接口是一项非常重要与复杂的任务, 近年来随着计算机技术和仪器控制技术, 特别是仪器和计算机及其他控制设备之间连接的规范化, 形成了标准通用接口。标准通用接口型测试系统是由模块 (如台式仪器或插件板) 组合而成, 所有模块的对外接口都按规定标准设计。组成系统时, 若模块是台式仪器, 用标准的无源电缆将各模块接插连接起来就构成系统。若模块为插件板, 只要将各插件板插入标准机箱即可。组成这类系统非常方便, 例如 GPIB 系统、VXI 系统就属于这类系统, 详见 8.4.2 节。

2. 网络化测试系统

如前所述可知, 测试系统一般由数据采集、数据分析、数据表示三部分组成。当将这三个位于不同地理位置的部分由网络连起来从而完成测试任务的时候, 就可以形成网络化测试

系统,如图 1-5 所示。在网络化测试系统中,被测对象可通过测试现场的数据采集设备,将测得的数据或信息通过网络传输给异地的计算机去分析处理,分析后的结果又可被执行机构查询使用,使数据采集、传输、处理分析成为一体,甚至实现实时采集、实时监控等。

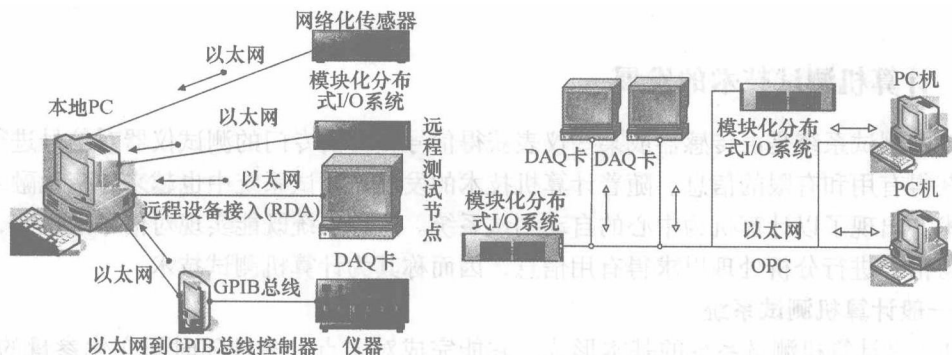


图 1-5 网络化测试系统

网络仪器的最大特点就是可以实现资源共享，使一台仪器为更多的用户所使用，降低了测试系统的成本。对于有危险的、环境恶劣的数据采集工作可实行远程采集，将采集的数据放在服务器中供用户使用。重要的数据实行多机备份，能够提高系统的可靠性。另外，网络可以使测试人员不受时间和空间的限制，随时随地获取所需的信息。同时网络化测试系统还可以实现测试设备的远距离测试与诊断，这样可以提高测试效率，减少测试人员的工作量。而且，网络化仪器还非常便于修改和扩展。

网络已成为现代测量非常重要的技术基础。网络化测试系统可以实现跨地域、跨时间的测量,实现测量的高度自动化、智能化,缩短研究时间,测量人们不易、不能接触的测量点,因此是一种颇具发展前景的测试技术。

3. 嵌入式测量系统

嵌入式系统有时称为嵌入式计算机系统，是和现实的物理世界相结合的，控制着某些特定的硬件的专用计算机系统。图 1-6 是嵌入式系统的一般结构，它包括硬件和软件两部分。硬件包括嵌入式处理器/控制器/数字信号处理器、存储器及外设器件、输入输出端口、图形控制器等；软件部分包括应用软件和嵌入式操作系统。应用软件控制着系统的运作和行为；嵌入式操作系统控制着应用程序与硬件的交互作用。

嵌入式系统必须具备以下四个特性：执行特定功能；以微处理器及其外围为核心；严格的时序与高稳定性；全自动操作循环。它特别强调“量身定做”的原则，也就是说，基于某一种特殊用途，针对这项用途开发出特定的系统，即所谓定制化，因此当把一个具体测试对象与嵌入式系统结合起来，就构成了一个嵌入式测量系统。

嵌入式系统和具体应用是紧密

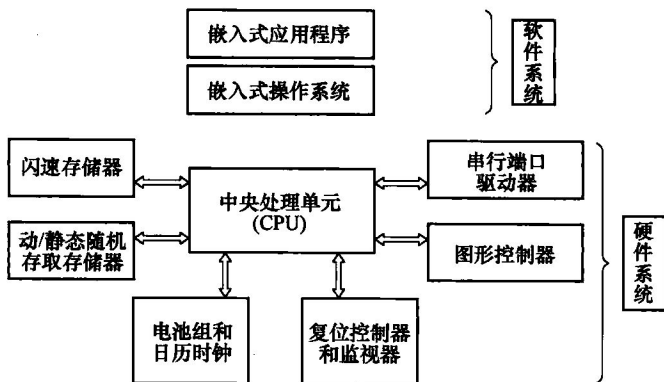


图 1-6 嵌入式系统的一般结构