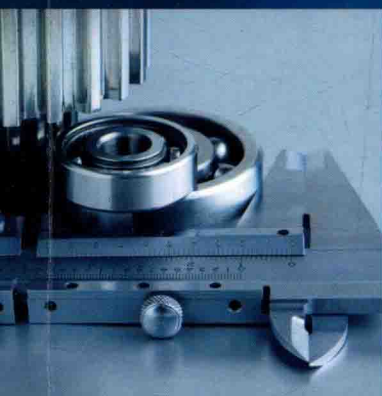




“十三五”国家重点出版物出版规划项目  
现代机械工程系列精品教材  
普通高等教育“十一五”国家级规划教材



# Measurement Technology in Mechanical Engineering

## 机械工程测试技术

第③版

陈花玲 ◎ 主编



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS

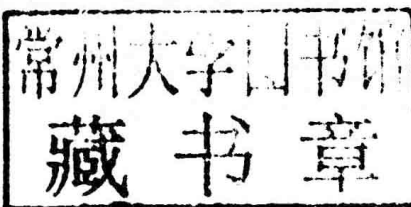
非外借

“十三五”国家重点出版物出版规划项目  
现代机械工程系列精品教材  
普通高等教育“十一五”国家级规划教材

# 机械工程测试技术

第3版

|     |     |     |     |     |  |
|-----|-----|-----|-----|-----|--|
| 主 编 | 陈花玲 |     |     |     |  |
| 副主编 | 张小栋 | 张 庆 |     |     |  |
| 参 编 | 张周锁 | 景敏卿 | 马松龄 | 张西宁 |  |
|     | 王 晶 | 李长勇 | 李 博 |     |  |



机械工业出版社

本书为“十三五”国家重点出版物出版规划项目——现代机械工程系  
列精品教材，普通高等教育“十一五”国家级规划教材。

全书共十章。首先介绍机械测试信号分析和测量系统的基本特性等测  
试技术基础知识；接着介绍机械工程中常见的参数式传感器及其应用和发  
电式传感器及其应用；然后对近年来在机械工程测试中应用比较广泛的光  
电检测技术、无损检测技术、计算机测试技术进行专门介绍；最后，从系  
统角度介绍了测试系统的设计方法，并介绍了机械工程中一些典型测试系  
统的设计实例。

本书可作为机械工程学科各专业本科生的教材，也可供相应专业工程  
技术人员参考。

## 图书在版编目（CIP）数据

机械工程测试技术/陈花玲主编. —3 版. —北京：机械工业出版  
社，2018.1

普通高等教育“十一五”国家级规划教材 “十三五”国家重点出版物  
出版规划项目 现代机械工程系系列精品教材

ISBN 978-7-111-58777-4

I. ①机… II. ①陈… III. ①机械工程-测试技术-高等学校-教材  
IV. ①TG806

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2017）第 317634 号

机械工业出版社（北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037）

策划编辑：刘小慧 责任编辑：刘小慧 安桂芳 王小东

责任校对：刘秀芝 封面设计：张 静

责任印制：张 博

三河市宏达印刷有限公司印刷

2018 年 4 月第 3 版第 1 次印刷

184mm×260mm·16.25 印张·357 千字

标准书号：ISBN 978-7-111-58777-4

定价：43.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务

服务咨询热线：010-88379833

读者购书热线：010-88379649

网络服务

机工官网：www.cmpbook.com

机工官博：weibo.com/cmp1952

教育服务网：www.cmpedu.com

金书网：www.golden-book.com

封面无防伪标均为盗版

# 第3版前言

工业 4.0 的崛起,促成了中国制造 2025 发展规划的实施。一些代表工业 4.0 的核心关键技术,如 3D 打印、机器人、物联网、云计算、大数据、虚拟现实和人工智能等都得到迅猛发展。而支撑这些关键技术发展的最基本、最活跃的专业基础理论知识都离不开测试技术,这不但表现在测试技术本身的各个组成要素——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,朝着智能化、网络化、微型化和高度集成化方向发展,而且表现在它与互联网、计算机技术和通信技术一起广泛地应用到工农业生产、国防建设、医疗卫生和人民生活的各个领域,促进了这些领域的变革与发展。

随着测试技术近年来的快速发展,作为该行业的高等教育工作者,我们有责任为机械工程领域的本科生传授机械工程领域中测试技术的最新发展。为此,我们对原来编写的《机械工程测试技术》教材进行再次修订。

在本次修订中,编者吸取了第 2 版和第 1 版教材的成功经验和不足教训,继续强化了教材内容的理论与实践相结合,尤其从系统设计的角度入手,进一步强化了测试系统设计思想及典型测试系统设计实例,其目的是强化学生对测试技术知识的深入学习和测试系统设计方法的掌握;此外,进一步增强了以计算机技术、光电技术和无损检测等为基础的现代测试技术的介绍,力求增新弃旧、优化组合,使本书成为一本紧跟时代发展的新教材。

本书具有以下特点:

1) 既强化了测试技术基础知识的讲解,又加重了测试系统的设计及实用测试技术的介绍。全书共十章,前五章属于测试技术基础知识,着重讲解绪论、机械测试信号分析、测量系统的基本特性、参数式传感器及其应用和发电式传感器及其应用等基础知识;后五章为测试系统设计及实用测试技术,重在介绍光电检测技术、无损检测技术、计算机测试技术、测试系统设计,以及典型测试系统设计实例等。

2) 为了强化系统思维,在分类介绍传感器的同时,辅之以相应调理电路的介绍。将参数式传感器和发电式传感器分别介绍,既详细阐述了它们各自的工作原理及其应用,又介绍了它们各自匹配的电桥、电荷放大器等典型调理电路,为学生迅速、准确地掌握两大类传感器的工作特点及其匹配调理电路的经典搭配,进而组建正确、合理的测量系统带来了方便。

3) 加强以计算机技术、光电技术、无损检测等为基础的现代测试技术的讲解。首先,将“计算机测试技术”作为一章,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,帮助学生或工程技术人员学会运用所学的测试技术知识设计或构建现代的测试系统;其次,专门设置了“光电检测技术”和“无损检测技术”两章,重在介绍诸如激光、光纤等先进光电检测技术,以及超声波、红外、工业CT等无损检测技术。

4) 强化了测试系统设计中的典型架构类型介绍、设计基本原则、设计步骤和典型放大、滤波电路,以及设计中所必需的抗干扰设计技术和精度设计技术。同时更新了最后一章“典型测试系统设计实例”,通过对一些典型工程实用测试系统的设计方法和设计过程的详细介绍,进一步从理论与实际两方面强化对学生的测试系统设计能力的培养。

本书建议教学学时数为40~60学时。测试基础知识为本科生教学必讲内容,测试系统设计及实用测试技术为选讲内容,教师可根据课程的学时数或具体情况来选取其中的部分章节内容,并应辅以相应的实验实践环节。

本书修订分工为:第1章由西安交通大学张小栋教授修订,第2章由西安交通大学张庆副教授修订,第3章由西安交通大学王晶副教授修订,第4章由西安交通大学张周锁教授修订,第5章由西安建筑科技大学马松龄副教授修订,第6章由西安交通大学陈花玲教授和李博副教授修订,第7章由新疆大学李长勇副教授修订,第8章由西安交通大学景敏卿教授修订,第9章由西安交通大学张西宁教授修订,第10章由马松龄副教授(10.1节)、张周锁教授(10.2节)、张小栋教授(10.3节)、陈花玲教授(10.4节)、张西宁教授(10.5节)和景敏卿教授(10.6节)共同修订。本书由陈花玲教授任主编,张小栋教授和张庆副教授任副主编,并负责全书的统稿及修改工作。

鉴于上述特点,本书得到机械工业出版社与西安交通大学的共同推荐与支持,决定再版第3版。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。

由于本书是在第2版和第1版基础上改编的,为此,本书编者对先后参与第1版、第2版教材编写的西安交通大学的厉彦忠、吴筱敏、王铭华、苗晓燕、徐光华、侯成刚、梁霖老师,以及西安理工大学的杨静老师、华南理工大学的康龙云老师表示衷心的感谢。

全体编者热切期望使用本书的读者提出宝贵意见,以便进一步提高本书质量。为此,我们将不胜感谢!

编 者

## 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都得到了迅猛的发展。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,使本书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相结合的理念,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“计算机测试技术”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,以及设计中所必需的抗干扰设计技术和精度设计技术。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。

本书建议的教学学时数为40~60学时。测试基础篇为本科生教学的必讲内容,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



数或其他具体情况来选取其中的部分章节内容，并应辅以相应的实验实践环节。

本书的编写分工是：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节），以及西安交通大学徐光华教授（10.2节和10.6节一部分）、张周锁副教授（10.3节）、张小栋副教授（10.4节）、陈花玲教授（10.5节）和景敏卿教授（10.6节另一部分）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任副主编，并负责全书的统稿及修改工作。

本书已被列入西安交通大学“十一五”教材建设规划、普通高等教育“十一五”国家级教材规划和机械工业出版社机械精品教材。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、西北工业大学的石秀华教授，自动检测分会（即原西北分会）副理事长、西安建筑科技大学的谷立臣教授对本书进行了认真、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。

由于本书是在第1版基础上改编的，为此，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、王铭华和苗晓燕老师表示衷心的感谢！

全体编者热切期望使用本书的读者提出宝贵意见，以便进一步提高本书质量。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，显然现有的机械类教材无法满足这个宽口径的“机械工程及自动化”大专业的教学要求。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地发展，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械类专业的“测试技术”主干课程教材。

本书定名为《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) 本书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。其一是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，放在了基础篇，以突出这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建现代的测试系统。

3) 机械工程中广泛应用的非电量电测技术为主要讲解内容，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；在本书的尾部增加了“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，试图达到既保证本门课程体系的完整性，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。

本书建议的教学学时数为40~60学时。测试基础篇为本科生教学的必讲内容，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讲授，并应辅以相应的实验实践环节。

全书共十二章。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，西安交通大学的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。

由机械工业出版社教授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”编审委员会在对本书审定后，同意将本书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、西北工业大学的石秀华教授主审了本书，她从教材的编写提纲到最后的定稿都花费了大量心血和精力；分会秘书长、西安建筑科技大学谷立臣教授也一直关心本书的编写工作，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书的编写大纲，并提出了一些宝贵的意见和建议。在此一并表示衷心的感谢。

编者衷心地期望使用本书的教师、工程技术人员及学生能提出宝贵的反馈意见，以便进一步提高本书质量。为此，我们将不胜感谢！

编者  
2001年8月

# 目 录

第 3 版前言

第 2 版前言

第 1 版前言

|                     |    |
|---------------------|----|
| 1 绪论                | 1  |
| 1.1 课程的意义及目的        | 1  |
| 1.1.1 本课程的意义        | 1  |
| 1.1.2 本课程的目的        | 2  |
| 1.2 测试方法的分类与系统组成    | 4  |
| 1.2.1 测试方法的分类       | 4  |
| 1.2.2 测试系统的组成       | 5  |
| 1.3 测试技术的发展         | 6  |
| 1.3.1 传感器技术的发展      | 6  |
| 1.3.2 计算机测试技术的发展    | 8  |
| 1.4 本课程的研究内容        | 11 |
| 思考题与习题              | 11 |
| 2 机械测试信号分析          | 12 |
| 2.1 信号的表示与分类        | 12 |
| 2.1.1 信号的表示         | 12 |
| 2.1.2 信号的分类         | 13 |
| 2.2 信号的时域分析         | 14 |
| 2.2.1 时域信号特征参数      | 14 |
| 2.2.2 时域相关分析        | 15 |
| 2.3 信号的频谱分析         | 17 |
| 2.3.1 周期信号的频谱分析     | 18 |
| 2.3.2 非周期信号的频谱分析    | 22 |
| 2.3.3 随机信号的频谱分析     | 27 |
| 2.4 信号的时频分析         | 30 |
| 2.5 机械信号的测量误差与信号预处理 | 33 |
| 2.5.1 测量误差及其分类      | 33 |
| 2.5.2 信号的预处理        | 35 |
| 思考题与习题              | 36 |
| 3 测量系统的基本特性         | 38 |

|                           |    |
|---------------------------|----|
| 3.1 测量系统的静态特性             | 38 |
| 3.2 一般测量系统的动态特性           | 41 |
| 3.2.1 线性定常系统及其基本特性        | 41 |
| 3.2.2 测量系统频率响应函数          | 43 |
| 3.3 典型测量系统的动态特性           | 44 |
| 3.3.1 理想测量系统的动态特性         | 44 |
| 3.3.2 一阶测量系统的动态特性         | 46 |
| 3.3.3 二阶测量系统的动态特性         | 47 |
| 3.4 动态测量误差及补偿             | 49 |
| 3.4.1 测量系统的动态测量误差         | 49 |
| 3.4.2 动态测量误差的补偿方法         | 52 |
| 思考题与习题                    | 54 |
| 4 参数式传感器及其应用              | 55 |
| 4.1 电阻式传感器                | 55 |
| 4.1.1 电阻应变式传感器            | 56 |
| 4.1.2 热电阻式传感器             | 60 |
| 4.1.3 电阻式传感器的直流电桥调<br>理技术 | 62 |
| 4.1.4 电阻式传感器的应用           | 66 |
| 4.2 电感式传感器                | 68 |
| 4.2.1 电感式传感器工作原理          | 68 |
| 4.2.2 交流信号的调理技术           | 71 |
| 4.2.3 电感式传感器的应用           | 76 |
| 4.3 电容式传感器                | 79 |
| 4.3.1 电容式传感器工作原理          | 79 |
| 4.3.2 电容式传感器的应用           | 82 |
| 4.4 电涡流传感器                | 84 |
| 4.4.1 电涡流传感器工作原理          | 84 |
| 4.4.2 电涡流传感器的信号调理         | 86 |
| 4.4.3 电涡流传感器的应用           | 87 |
| 思考题与习题                    | 90 |
| 5 发电式传感器及其应用              | 91 |
| 5.1 压电式传感器                | 91 |
| 5.1.1 压电效应与压电材料           | 91 |

|                                 |     |                                 |     |
|---------------------------------|-----|---------------------------------|-----|
| 5.1.2 压电元件及其等效电路 .....          | 92  | 7.1.1 超声波检测技术简介 .....           | 139 |
| 5.1.3 压电传感器的调理电路 .....          | 93  | 7.1.2 超声波无损检测原理 .....           | 140 |
| 5.1.4 压电式传感器的应用 .....           | 95  | 7.1.3 超声波无损检测的应用 .....          | 142 |
| 5.2 磁电式传感器 .....                | 98  | 7.2 工业 CT 检测技术 .....            | 143 |
| 5.2.1 磁电式传感器基本原理及测<br>量电路 ..... | 98  | 7.2.1 工业 CT 成像技术简介 .....        | 143 |
| 5.2.2 磁电式传感器的应用 .....           | 99  | 7.2.2 工业 CT 工作原理 .....          | 144 |
| 5.3 霍尔传感器 .....                 | 101 | 7.2.3 工业 CT 检测系统的应用 .....       | 145 |
| 5.3.1 霍尔效应和霍尔传感器 .....          | 101 | 7.3 磁粉检测技术 .....                | 146 |
| 5.3.2 霍尔元件的测量电路和误差<br>补偿 .....  | 102 | 7.3.1 磁粉检测技术简介 .....            | 146 |
| 5.3.3 霍尔传感器的应用 .....            | 104 | 7.3.2 磁粉检测技术原理 .....            | 147 |
| 5.4 热电偶传感器 .....                | 105 | 7.3.3 磁粉检测技术的应用 .....           | 148 |
| 5.4.1 热电偶工作原理 .....             | 106 | 7.4 渗透检测技术 .....                | 149 |
| 5.4.2 热电偶基本定律 .....             | 107 | 7.4.1 渗透检测技术简介 .....            | 149 |
| 5.4.3 热电偶冷端温度补偿 .....           | 108 | 7.4.2 渗透检测技术原理 .....            | 150 |
| 5.4.4 热电势的测量 .....              | 109 | 7.4.3 渗透检测技术的应用 .....           | 150 |
| 5.4.5 热电偶的分类及应用 .....           | 110 | 7.5 其他技术在无损检测中的应用 .....         | 151 |
| 5.5 红外探测器 .....                 | 111 | 7.5.1 电涡流传感器在无损检测中<br>的应用 ..... | 151 |
| 5.5.1 红外探测器基本工作原理 .....         | 112 | 7.5.2 霍尔传感器在无损检测中的<br>应用 .....  | 152 |
| 5.5.2 红外线探测器的应用 .....           | 113 | 7.5.3 红外技术在无损检测中的<br>应用 .....   | 153 |
| 思考题与习题 .....                    | 115 | 思考题与习题 .....                    | 154 |
| 6 光电检测技术 .....                  | 117 | 8 计算机测试技术 .....                 | 155 |
| 6.1 光电检测器的工作原理与性能<br>比较 .....   | 117 | 8.1 数据采集技术 .....                | 156 |
| 6.1.1 常用光电检测器的工作原理 .....        | 118 | 8.1.1 模拟信号的数字化处理 .....          | 156 |
| 6.1.2 光电检测器性能比较 .....           | 121 | 8.1.2 数据的采集与保持 .....            | 158 |
| 6.2 典型光电检测方法及应用 .....           | 122 | 8.1.3 A-D 转换器类型及性能指标 .....      | 160 |
| 6.2.1 光源及其特性 .....              | 123 | 8.1.4 A-D 通道方案的确定 .....         | 161 |
| 6.2.2 非相干光电检测方法及应用 .....        | 124 | 8.2 智能仪器 .....                  | 164 |
| 6.2.3 相干光电检测方法及应用 .....         | 129 | 8.2.1 智能仪器的硬件结构 .....           | 164 |
| 6.3 固态图像传感器及其应用 .....           | 131 | 8.2.2 智能仪器的软件功能 .....           | 166 |
| 6.3.1 固态图像传感器测量原理 .....         | 131 | 8.2.3 智能仪器的自动测量功能 .....         | 167 |
| 6.3.2 固态图像传感器的应用 .....          | 133 | 8.2.4 智能传感器 .....               | 169 |
| 6.4 光纤传感器测量技术 .....             | 135 | 8.3 虚拟仪器 .....                  | 170 |
| 6.4.1 光纤传感器基本原理 .....           | 135 | 8.3.1 虚拟仪器的概念 .....             | 170 |
| 6.4.2 光纤传感器的应用 .....            | 137 | 8.3.2 虚拟仪器的体系结构 .....           | 171 |
| 思考题与习题 .....                    | 138 | 8.3.3 虚拟仪器软件的开发环境 .....         | 173 |
| 7 无损检测技术 .....                  | 139 | 8.3.4 虚拟仪器设计举例 .....            | 175 |
| 7.1 超声波检测技术 .....               | 139 | 8.4 计算机测试系统设计举例 .....           | 176 |
|                                 |     | 思考题与习题 .....                    | 179 |

|                                |     |                           |     |
|--------------------------------|-----|---------------------------|-----|
| 9 测试系统设计 .....                 | 180 | 10.2 温度测量案例 .....         | 209 |
| 9.1 测试系统设计的基本原则 .....          | 180 | 10.2.1 温度测量方法简介 .....     | 209 |
| 9.1.1 测试系统基本架构 .....           | 180 | 10.2.2 高速机车轴温测试系统 .....   | 210 |
| 9.1.2 测试系统设计的基本原则及<br>步骤 ..... | 183 | 10.3 位移测量案例 .....         | 215 |
| 9.2 测试系统的精度设计 .....            | 186 | 10.3.1 位移测量方法简介 .....     | 215 |
| 9.2.1 测试系统的误差传递 .....          | 186 | 10.3.2 润滑油膜厚度光纤测试系统 ..... | 216 |
| 9.2.2 测试系统的误差分配与校核 .....       | 188 | 10.4 噪声测量案例 .....         | 221 |
| 9.3 信号的放大与滤波环节设计 .....         | 189 | 10.4.1 噪声测量方法简介 .....     | 221 |
| 9.3.1 信号放大环节设计 .....           | 190 | 10.4.2 汽车悬架减振器异响声分析 ..... | 226 |
| 9.3.2 信号滤波环节设计 .....           | 191 | 10.5 结构模态分析案例 .....       | 230 |
| 9.4 测试系统的抗干扰设计 .....           | 195 | 10.5.1 模态分析方法简介 .....     | 230 |
| 9.4.1 干扰因素及传播途径 .....          | 195 | 10.5.2 机床模态分析实例 .....     | 234 |
| 9.4.2 常用抗干扰技术 .....            | 196 | 10.6 旋转机械的网络化监测诊断 .....   | 237 |
| 思考题与习题 .....                   | 199 | 10.6.1 设计任务 .....         | 237 |
| 10 典型测试系统设计实例 .....            | 201 | 10.6.2 网络化监测诊断系统方案 .....  | 237 |
| 10.1 应变测量案例 .....              | 201 | 10.6.3 传感器组 .....         | 238 |
| 10.1.1 应变测量方法简介 .....          | 201 | 10.6.4 CPCI 采集监测单元 .....  | 240 |
| 10.1.2 塔式起重机结构强度测试 .....       | 206 | 10.6.5 网络数据库 .....        | 242 |
|                                |     | 10.6.6 网络化监测诊断软件平台 .....  | 242 |
|                                |     | 参考文献 .....                | 245 |



# 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，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，故在本书中并未严格区分测试与测量。

测试是科学研究的一个基本方法。科学研究除了理论研究之外，试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，而试验研究必然离不开对被研究对象特性参数的测量。事实上，在科学技术领域内，许多新的发现与发明往往是通过测试直接获得的，或者是以测试技术为基础的。因此，测试是人类认识客观世界的重要手段，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试技术的发展水平，而且可靠的测试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，测试工作内容已占首位，测试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测试分析,并由计算机进行分析处理,实现实时在线监测,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器;大型石油化工厂需要 6000 只传感器及其配套监测仪器;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。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,且测试准确性、可靠性的要求也会越来越高。

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社会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,机械工程测试技术只是其中的一种。机械工业担负着装备国民经济各个部门的任务,随着社会的发展和技术的进步,机械工业面临着更新产品、革新生产技术、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重要基础技术之一。

### 1.1.2 本课程的目的

为了说明本课程的目的,这里给出在工业生产中常见的两个典型应用测试技术问题。

#### 问题一:生产线上传送带的速度检验

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,成批生产中每次只能生产一种产品。但是在生产过程中必须由操作员对每个产品进行质量检验,图 1-1 所示为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,这就要求实时测量传送带的速度,以便对其进行控制。

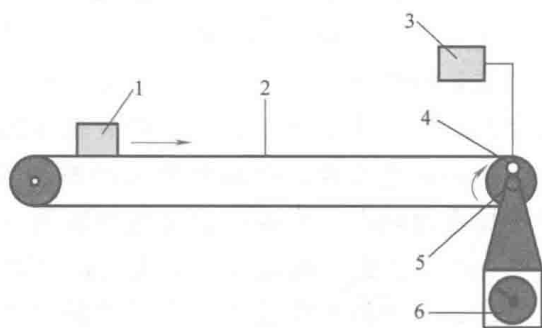


图 1-1 产品质量检查传送带

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

为了实现速度量的实时测量,必须解决以下问题:

(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,但是负载不同可能导致带速时快时慢。因此,需要使用传感器对带速进行有效的测量。可选用的测量速度的传感器有: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、霍尔效应传感器和变磁阻传感器等。

(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气噪声干扰,在转换电路后还需要接入一个噪声滤波器等。

(4) 系统的效能分析 根据上述选择的各个环节,需要进行技术经济分析。分析比较采用不同传感器、显示方式及其配套的后续测量系统的技术性能、实用性、经济性等,从而确定最佳的测试系统。

## 问题二:薄钢板生产中的厚度控制

薄钢板生产中的工序之一是让高热的金属板在两轧辊之间通过,通过调整轧辊之间的距离减小钢板的厚度并提高其机械性能。显然,要生产高质量的钢板,必须精确控制轧辊之间的距离,使其厚度符合要求。在轧钢厂实际生产中,钢板一般要通过若干对轧辊后才能达到它的厚度要求,但为了便于分析,本例中只讨论其中一对轧辊,如图1-2所示。

在这个问题中,检测钢板厚度的变化是非常重要的,一般通过比较钢板实际厚度与设定厚度值,将其差值转变为误差信号,再通过适当的信号调制和接口技术,反馈信号控制可动轧辊的位置作动器,来实现钢板厚度控制。

为了实现钢板厚度(线位移)的精确实时测量,同样必须解决以下问题:

(1) 传感器的选择 由于轧钢生产线中的高温和粉尘等因素,测量钢板厚度的传感器工作环境恶劣,因此,除了考虑传感器必须满足测量精度要求之外,还需要

考虑在传感器周围采取一些保护和隔热措施,且需要考虑便于经常更换的问题。可选的线性位移传感器有:线性电位差计、线性可变差动变压器(LVDT)、可变面积电容器等。

(2) 显示方式的选择 要保证来自厚度位移传感器信息的实时采集分析,可考虑选用动圈式仪表、伺服绘图记录仪、紫外线或热力阵列记录仪、坐标绘图仪或者数据采集系统等。

(3) 后续测量系统的设计 若传感器选择电容传感器,就必须把它连接到交流电桥的一个桥臂上。当钢板厚度为所设定值时,电桥处于平衡状态输出为零;当钢板厚度大于或者小于设定值时,电桥就有输出,输出信号的相位取决于实际厚度的值是大于还是

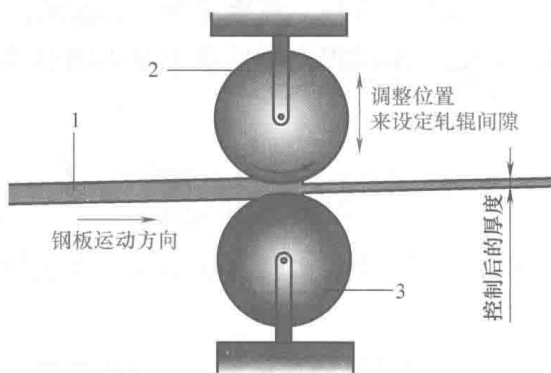


图 1-2 薄钢板生产过程示意图

1—钢板 2—可动轧辊 3—固定轧辊

小于设定值，据此可确定可动轧辊的移动方向，以获得所需钢板的厚度。在交流电桥输出端接上相敏检波器，便可以获得与电容量变化成比例的直流信号，其极性由电容传感器输出变化的方向决定。

(4) 系统的效能分析 同样，对可能选择的各种传感器及其后续测量系统进行深入的技术经济分析。例如，采用电容位移传感器检测钢板厚度具有精度高，响应快，灵敏度高，并能在恶劣的环境下工作的优势，特别适合于钢板厚度的检测。

由上面介绍可以看出，学习本课程的目的就是要使学习者掌握机械工程测试技术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或选择测试系统各个环节，最后对所设计或选择的测试系统各环节进行组合形成测试系统，还需要对其进行技术经济分析，使设计或选择的系统各环节及其组合系统不仅能满足测试性能要求，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，可以将其分为非电量信号和电量信号。例如，随时间变化的力、位移、速度、加速度、温度、应力等属于非电量信号；而随时间变化的电流、电压则属于电量信号。在测试过程中，常常将被测的非电量信号通过相应的传感器转换为电量信号，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。例如，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。而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与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，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,也可以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,传感器对试件的动力学特性不产生附加影响。

### 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,如物体的几何尺寸,这种测量被称为静态测量;而当被测量值是随时间变化的,如切削温度,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做出判断,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 1-3 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动态变化又便于检测的信息。

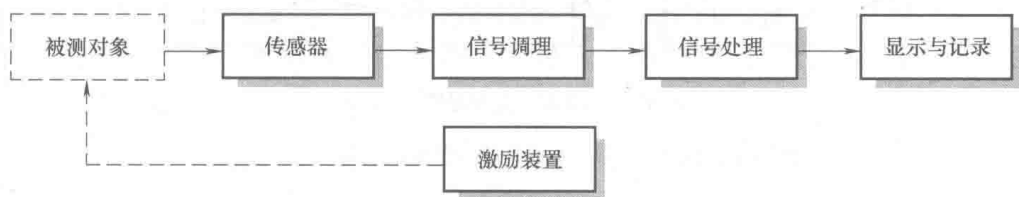


图 1-3 测试系统框图

在测试系统中,传感器的作用是:当接收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,其输出通常是电量信号。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。

传感器输出的电量信号种类很多,输出功率又太小。一般不能将这种电量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这个电量信号进行转换、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。这时的信号转换,在多数情况下是电量信号之间的转换。从种类来看,将各种电量信号转换为电压、电流、