



中国机械工程学科教程配套系列教材
教育部高等学校机械类专业教学指导委员会规划教材

机械工程测试技术 (第2版)

韩建海 主 编
尚振东 刘春阳 黄艳 蔡海潮 副主编

教育部高等学校机械类专业教学指导委员会
中国机械工程学会

中国机械工程学科教程研究组 编

China Mechanical Engineering Curricula
中国机械工程学科教程
(2017年)

CMEC

清华大学出版社

清华大学出版社



中国机械工程学科教程配套系列教材
教育部高等学校机械类专业教学指导委员会规划教材

机械工程测试技术

(第2版)

韩建海 主编

尚振东 刘春阳 黄艳 蔡海潮



清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书主要介绍与机械工程相关的测试技术的基本概念、基础理论和应用技术。全书围绕测试系统的组成,讲述常用传感器的原理与应用、测试信号调理电路、信号分析与处理、测试系统的特性、计算机测试系统、机械工程中常见量的测试和机械设备故障诊断技术等内容。

本书以典型案例教学为主线,贯穿整个理论教学和实验教学的全过程,强化工程实际应用,突出学生能力培养,重点介绍如何根据具体测试任务制定和优化测试方案、恰当选择器件和部件、合理设计测试系统各模块、构建满足特定功能和技术指标的测试系统、正确处理测试数据等,力求体现先进性、实用性,注重反映当今测试技术发展的新成果和新动向。

本教材适用于普通高等院校机械类、近机械类各专业测试技术课程使用,同时可供有关工程技术人员参考。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

机械工程测试技术/韩建海主编.—2版.—北京:清华大学出版社,2018

(中国机械工程学科教程配套系列教材 教育部高等学校机械类专业教学指导委员会规划教材)

ISBN 978-7-302-49571-0

I. ①机… II. ①韩… 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(2018)第 029421 号

责任编辑:许 龙

封面设计:常雪影

责任校对:赵丽敏

责任印制:刘伟森

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

邮 编:100084

社 总 机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者:三河市国英印务有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:18

字 数:437 千字

版 次:2010 年 5 月第 1 版 2018 年 2 月第 2 版

印 次:2018 年 2 月第 1 次印刷

印 数:1~2500

定 价:49.80 元

产品编号:070671-01

中国机械工程学科教程配套系列教材暨教育部高等学校
机械类专业教学指导委员会规划教材

编 委 会

顾 问

李培根院士

主任委员

陈关龙 吴昌林

副主任委员

许明恒 于晓红 李郝林 李 旦 郭钟宁

编 委(按姓氏首字母排列)

韩建海 李理光 李尚平 潘柏松 芮执元
许映秋 袁军堂 张 慧 张有枕 左健民

秘 书

庄红权

丛书序言

PREFACE

我曾提出过高等工程教育边界再设计的想法,这个想法源于社会的反应。常听到工业界人士提出这样的话题:大学能否为他们进行人才的订单式培养。这种要求看似简单、直白,却反映了当前学校人才培养工作的一种尴尬:大学培养的人才还不是很适应企业的需求,或者说毕业生的知识结构还难以很快适应企业的工作。

当今世界,科技发展日新月异,业界需求千变万化。为了适应工业界和人才市场的这种需求,也即是适应科技发展的需求,工程教学应该适时地进行某些调整或变化。一个专业的知识体系、一门课程的教学内容都需要不断变化,此乃客观规律。我所主张的边界再设计即是这种调整或变化的体现。边界再设计的内涵之一即是课程体系及课程内容边界的再设计。

技术的快速进步,使得企业的工作内容有了很大变化。如从20世纪90年代以来,信息技术相继成为很多企业进一步发展的瓶颈,因此不少企业纷纷把信息化作为一项具有战略意义的工作。但是业界人士很快发现,在毕业生中很难找到这样的专门人才。计算机专业的学生并不熟悉企业信息化的内容、流程等,管理专业的学生不熟悉信息技术,工程专业的学生可能既不熟悉管理,也不熟悉信息技术。我们不难发现,制造业信息化其实就处在某些专业的边缘地带。那么对那些专业而言,其课程体系的边界是否要变?某些课程内容的边界是否有可能变?目前不少课程的内容不仅未跟上科学研究的发展,也未跟上技术的实际应用。极端情况甚至存在有些地方个别课程还在讲授已多年弃之不用的技术。若课程内容滞后于新技术的实际应用好多年,则是高等工程教育的落后甚至是悲哀。

课程体系的边界在哪里?某一门课程内容的边界又在哪里?这些实际上是业界或人才市场对高等工程教育提出的我们必须面对的问题。因此可以说,真正驱动工程教育边界再设计的是业界或人才市场,当然更重要的是大学如何主动响应业界的驱动。

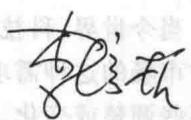
当然,教育理想和社会需求是有矛盾的,对通才和专才的需求是有矛盾的。高等学校既不能丧失教育理想、丧失自己应有的价值观,又不能无视社会需求。明智的学校或教师都应该而且能够通过合适的边界再设计找到适合自己的平衡点。

我认为,长期以来,我们的高等教育其实是“以教师为中心”的。几乎所有的教育活动都是由教师设计或制定的。然而,更好的教育应该是“以学生

为中心”的,即充分挖掘、启发学生的潜能。尽管教材的编写完全是由教师完成的,但是真正好的教材需要教师在编写时常怀“以学生为中心”的教育理念。如此,方得以产生真正的“精品教材”。

教育部高等学校机械设计制造及其自动化专业教学指导分委员会、中国机械工程学会与清华大学出版社合作编写、出版了《中国机械工程学科教程》,规划机械专业乃至相关课程的内容。但是“教程”绝不应该成为教师们编写教材的束缚。从适应科技和教育发展的需求而言,这项工作应该不是一时的,而是长期的,不是静止的,而是动态的。《中国机械工程学科教程》只是提供一个平台。我很高兴地看到,已经有多位教授努力地进行了探索,推出了新的、有创新思维的教材。希望有志于此的人们更多地利用这个平台,持续、有效地展开专业的、课程的边界再设计,使得我们的教学内容总能跟上技术的发展,使得我们培养的人才更能为社会所认可,为业界所欢迎。

是以有序。



2009年7月

第2版前言

FOREWORD

作为“《中国机械工程学科教程配套系列教材》编审委员会”的立项项目,本书第1版于2010年5月由清华大学出版社出版,至今已经七年多了。七年间多所高校经使用后反映该书工程实际案例丰富,教学内容符合学生能力培养要求,契合“中国机械工程学科教程研究组”构造的机械工程本科专业教育的知识体系和框架,为普通院校机械类、近机械类各专业培养应用型高级人才做出了应有的贡献。

然而,七年时间我国科学技术得到了飞速发展,一大批标志性科技成果不断涌现:“天宫一号”和“天宫二号”相继飞天,“萤火一号”实现火星探测,“蛟龙号”载人深潜7062m,“嫦娥三号”月球软着陆,“实践十号”微重力科学试验卫星上天,500m口径球面射电望远镜建成,等等。包括测试技术在内的各领域学科为这些成果的取得做出了重要贡献,同时,以这些成果取得为标志的科学技术的发展也必然带动包括测试技术在内的各领域学科的发展。

另一方面,我国发布的《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020年)》和《中国制造2025》对智能机器人和智能制造提出了新要求。“互联网+”、在线开放课程等新的教育理念和教学形态不断涌现,一大批重大的教学研究成果和先进的教育技术手段不断产生。这些新要求、新理念、新模式、新成果和新手段需要反映在测试技术教材中。

当然,本书在使用过程中也发现了一些错漏和不当之处,需要修改和完善。

因此,在坚持《中国机械工程学科教程》中提出的专业教育知识体系和框架基础上,继续面向普通院校机械类、近机械类各专业应用型高级人才的培养,仍然采用测试知识边界再设计的方法,反映我国科学技术的新发展、新要求、新理念、新模式、新成果和新手段,重新修订出版了第2版教材。

除了修改第1版教材中的错漏和不当之处外,第2版教材主要做了以下修改:删除了霍尔式传感器外的半导体传感器,增加智能传感器一节;中间调理电路增加了无源滤波器一节;计算机测试系统增加了机器学习一节;机械故障诊断增加了超声波检测相关内容;部分章节的课后习题进行了大范围的调整;其他章节有关内容也进行了局部调整。

本书第2版仍然由河南科技大学教师编写。第1章由韩建海执笔,第4章和第7章由尚振东执笔,第3章和第6章由刘春阳执笔,第2章由黄艳执

笔,第5章和第8章由蔡海潮执笔。全书由韩建海担任主编,负责统稿,尚振东、刘春阳、黄艳和蔡海潮担任副主编,协助统稿。

本书第2版在编写过程中参阅了同行专家学者和一些院校的教材、资料和文献,在此向文献作者致以诚挚的谢意。由于编者水平有限,书中难免存在错误和不足之处,敬请广大读者不吝指正。

编者

2017年6月

前言

FOREWORD

教育部高等学校机械设计制造及其自动化专业教学指导分委员会于2007年会同中国机械工程学会、清华大学出版社组成“中国机械工程学科教程研究组”。研究组构造了机械工程本科专业教育的知识体系和框架,建立了良好的课程知识体系,出版了《中国机械工程学科教程》。

本书采用测试知识边界再设计的方法,根据机械类、近机械类专业“测试技术”教材大纲编写,体现了《中国机械工程学科教程》中的思想,是“中国机械工程学科教程配套系列教材编审委员会”的立项项目。

本书定位为面向普通院校机械类、近机械类各专业测试技术课程的教材。按照应用型高级人才的培养目标和强化工程实际应用能力培养的要求,本书更加注重测试技术的系统应用,从工程应用角度审视信号测试的整体问题。随着测试技术的发展,许多测试器件都已商品化,而无需重新设计。因此,尽量删减元器件的内部工作原理,而将测试方案的制定和优化、器件的选择和应用等内容作为重点进行讲解。

本书以学生能力培养为目标,组织安排相关的教学内容,以典型工程实际案例教学为主线,贯穿整个理论教学和实验教学的全过程。在内容的编排上遵循由浅入深、由具体到抽象、循序渐进的规律。按传感器、调理电路、信号分析与处理、测试系统特性等顺序安排内容,依次对测试系统各组成部分的原理、功能、应用等做了介绍,重点放在原理和应用,然后针对机械工程中常见的被测量的测试方法进行讲解,使教材的整体章节系统与工程实际中的测试系统紧密地结合起来。在内容的具体编写上,立足于测试技术理论知识和工程实际应用的恰当结合,强化工程实际应用,内容全面、丰富,重点突出,层次清楚,既注重基础理论,又强调知识的综合应用,力求体现先进性、实用性,注意反映当今测试技术发展的新成就和新动向。

全书共分8章。首先从我们身边的测试技术谈起,介绍了测试系统的基本概念、基础理论和应用技术,然后围绕着测试系统的组成,讲述了常用传感器的原理与应用、测试信号调理电路、信号分析与处理、计算机测试系统、测试系统的特性、测试系统的干扰及其抑制、机械工程中常见量的测试等内容,每章均附有习题。

本书由河南科技大学的教师编写。第1章由韩建海执笔,第2、5章和8.3节、8.4节由郭爱芳执笔,第4章和第6章由尚振东执笔,第3章由王恒迪执笔,第7章由韩红彪执笔,8.1节、8.2节由蔡海潮执笔,马伟在大纲制

定、内容安排、实验教学等方面做了大量工作。全书由韩建海、马伟担任主编,负责统稿,尚振东、郭爱芳、王恒迪和韩红彪担任副主编,协助统稿。

全书由清华大学的王伯雄教授主审。王教授对书稿的编写提出了不少宝贵的意见和建议,在此表示衷心的感谢。

本书在编写过程中参阅了同行专家学者和一些院校的教材、资料和文献,在此向文献作者致以诚挚的谢意。由于编者水平有限,书中难免存在不足之处和错误,敬请广大读者不吝指正。

目 录

CONTENTS

第1章 绪论	1
1.1 测试技术概述	1
1.2 测试系统的组成	3
1.3 测试技术的发展趋势	4
1.4 本书主要内容和学习要求	7
习题与思考题	8
第2章 传感器	9
2.1 传感器概述	9
2.1.1 传感器的组成与分类	9
2.1.2 传感器的选择	11
2.2 能量控制型传感器	12
2.2.1 电阻式传感器	12
2.2.2 电容式传感器	19
2.2.3 电感式传感器	24
2.3 能量转换型传感器	30
2.3.1 压电式传感器	30
2.3.2 磁电式传感器	34
2.3.3 热电偶传感器	36
2.3.4 霍尔传感器	38
2.4 光电传感器	40
2.4.1 光电器件	40
2.4.2 光纤传感器	42
2.4.3 光栅传感器	44
2.4.4 电荷耦合器件	48
2.4.5 红外传感器	48
2.5 智能传感器	49
2.5.1 智能传感器的组成与功能	50
2.5.2 智能传感器的应用	50

2.6 项目设计实例	53
习题与思考题	55
项目设计	56
第3章 信号转换与调理	58
3.1 信号放大与转换	58
3.1.1 信号放大	58
3.1.2 信号转换	63
3.2 测量电桥	74
3.2.1 直流电桥	74
3.2.2 交流电桥	77
3.3 调制与解调	79
3.3.1 调幅及其解调	79
3.3.2 调频及其解调	83
3.4 滤波器	85
3.4.1 滤波器的分类	86
3.4.2 滤波器的特性	87
3.4.3 RC无源滤波器	89
3.4.4 RC有源滤波器	90
3.4.5 恒带宽滤波器与数字滤波器简介	94
3.4.6 应用 MATLAB 设计和分析滤波器	95
3.5 项目设计实例	97
习题与思考题	101
项目设计	102
第4章 测试信号分析与处理	103
4.1 概述	103
4.1.1 信号的概念和分类	103
4.1.2 信号分析	104
4.2 信号的时域分析	105
4.2.1 信号的运算	105
4.2.2 信号的波形变换	105
4.2.3 信号的时域统计参数	106
4.2.4 相关分析	108
4.3 信号的频域分析	113
4.3.1 周期信号及其频谱	113
4.3.2 非周期信号及其频谱	119
4.3.3 功率谱分析	126
4.4 数字信号分析与处理	128

4.4.1	采样与采样定理	129
4.4.2	离散傅里叶变换及其快速算法	130
4.4.3	FFT 应用中的若干问题	131
4.5	现代信号分析方法简介	135
4.6	项目设计实例	135
	习题与思考题	136
	项目设计	137
第 5 章	测试系统特性分析	139
5.1	测试系统概述	139
5.1.1	线性系统及其主要性质	139
5.1.2	测量误差	141
5.2	测试系统的标定	142
5.3	测试系统的静态特性	143
5.3.1	测试系统的静态数学模型	144
5.3.2	测试系统的静态特性参数	145
5.4	测试系统的动态特性	148
5.4.1	测试系统的动态数学模型	148
5.4.2	测试系统动态特性参数的测量	154
5.4.3	实现不失真测量的条件	158
5.4.4	负载效应	159
5.5	测试系统的抗干扰设计	161
5.5.1	电磁干扰	161
5.5.2	屏蔽、接地与隔离设计	162
5.5.3	电源干扰的抑制	164
5.6	项目设计实例	165
	习题与思考题	166
	项目设计	167
第 6 章	计算机测试系统	168
6.1	计算机测试系统的组成	168
6.2	微处理器及其选择	171
6.3	嵌入式计算机测试系统	173
6.3.1	微处理器	173
6.3.2	数据采集系统	176
6.3.3	软件设计	179
6.4	虚拟仪器测试系统	180
6.4.1	虚拟仪器概述	181
6.4.2	信号调理器和数据采集卡	181

6.4.3	软件开发平台	184
6.4.4	LabVIEW 中的信号分析与处理工具箱	186
6.4.5	LabVIEW 在滤波器设计和分析中的应用	190
6.5	常用数据处理算法	194
6.5.1	概述	194
6.5.2	常用数据处理算法	194
6.6	机器学习方法	200
6.7	设计项目	204
	习题与思考题	204
	项目设计	205
第7章	机械工程中常见量的测量	206
7.1	力、扭矩测量	206
7.1.1	拉压力传感器	206
7.1.2	压力传感器	210
7.1.3	扭矩传感器	213
7.1.4	力、应力和压力测试系统的标定	218
7.2	位置、位移等的测量	220
7.2.1	限位开关	220
7.2.2	接近开关	220
7.2.3	物位传感器	221
7.2.4	位移传感器	222
7.3	温度测量	229
7.3.1	温度测量方法	229
7.3.2	温度传感器分类	230
7.3.3	常见温度传感器	231
7.3.4	温度传感器的选择	233
7.3.5	温度传感器的应用	233
7.3.6	温度测量系统的标定	234
7.4	振动量的测量	235
7.4.1	概述	235
7.4.2	振动测量方法	236
7.4.3	振动量的测量系统	238
7.4.4	常见的振动传感器	240
7.4.5	加速度传感器的选择	244
7.4.6	振动测量的应用	245
7.5	项目设计实例	246
	习题与思考题	247
	项目设计	248

第 8 章 机械设备故障诊断技术	249
8.1 概述	249
8.1.1 机械故障诊断的内容	250
8.1.2 机械故障诊断技术	251
8.2 声发射诊断技术	254
8.2.1 声发射技术	254
8.2.2 声发射信号的处理方法	254
8.2.3 声发射检测仪器	257
8.3 超声波诊断技术	258
8.3.1 超声波概述	258
8.3.2 超声检测技术	260
8.3.3 超声波检测仪器	261
8.4 滚动轴承的故障诊断	261
8.4.1 滚动轴承故障的检测方法	261
8.4.2 滚动轴承故障的振动诊断	262
8.4.3 滚动轴承故障的声发射诊断	265
8.5 项目设计实例	267
习题与思考题	269
项目设计	270
参考文献	271

1. 生活中的测试技术

测试技术并不神秘, 在我们生活中, 就会得到许多应用测试技术的实例。例如: 电子血压计对人体血压和心跳的检测, 全自动洗衣机中衣服的重量和位置的测量, 指纹门锁中对人手指纹的检测, 电子体温计对人体温度的检测, 电脑精密电阻测试中的温度测试, 数码相机中的自动对焦, 自动门的人体检测, 超市中商品的条形码扫描, 汽车中的燃料量和速度测试等。不难想象, 相信随着科学技术的发展和人们对物质文化生活质量需求的增长, 运用测试技术的机电产品, 将在我们的日常生活中扮演更加重要的角色。

2. 计量、测量、试验和测试

为了准确理解测试技术的概念, 需要明确以下几个密切相关的基本概念。

计量 (metrology) 是实现单位统一、量值准确可靠的活动, (JJF-1901-2011) 通用计量术语及定义 2.4.21。测量 (measurement) 是指以确定被测对象的量值为目的所进行的实验过程。一个完整的测量过程必定涉及被测对象、计量单位、测量方法和测量结果的表达。试验 (test) 是对未知事物探索认识的测量。测试 (measurement and test) 是测量和试验的综合。

工程测试可分为静态测试和动态测试。静态测试是指不随时间变化的物理量的测量。

第 1 章

绪 论

能力培养目标

1. 理解测试与测试技术的概念;
2. 掌握测试系统的组成和测试技术的发展趋势;
3. 了解本课程的主要内容与学习方法。

测试技术属于信息科学范畴,是信息技术三大支柱(测试控制技术、计算机技术和通信技术)之一。测试技术是用来检测和处理各种信息的一门综合技术,在科学研究、工业生产、医疗卫生、文化教育等各个领域都起着相当重要的作用。

本章主要介绍测试技术的基本概念,包括测试技术和测试系统;介绍了测试技术的应用和发展趋势、测试系统的组成;同时简要介绍了本书的主要内容、编写特点和学习要求。

1.1 测试技术概述

1. 生活中的测试技术

测试技术并不神秘,在我们生活中,就会遇到许多应用测试技术的实例。例如:电子血压计中人体血压和心跳的测量、全自动洗衣机中衣服的重量和水位的测量、指纹门锁中对人手指纹的检测、电子体温计对人体温度的检测、电冰箱和电饭煲中的温度测试、数码相机中的自动对焦、自动门的人体检测、超市中商品的条形码扫描、汽车中的燃料量和速度测试等,不胜枚举。相信随着科学技术的发展和人们对物质文化生活需求的增长,运用测试技术的机电产品,将在我们的日常生活中扮演更加重要的角色。

2. 计量、测量、试验和测试

为了准确理解测试技术的概念,需要先搞清楚下面几个密切关联的基本概念。

计量(metrology)是实现单位统一、量值准确可靠的活动(JJF—1001—2011 通用计量术语及定义 4.2)。测量(measurement)是指以确定被测对象的量值为目的而进行的实验过程。一个完整的测量过程必定涉及被测对象、计量单位、测量方法和测量误差四要素。试验(test)是对未知事物探索认识的过程。测试(measurement and test)是测量和试验的综合。

工程测试可分为静态测试和动态测试。静态测试是指不随时间变化的物理量的测量,

例如抽样测量辊压后钢板厚度的尺寸。动态测试是指随时间变化的物理量的测量,例如数控辊压机中,为保证生产出厚度合格的钢板,作为调整滚轮间距的依据,对加工出的钢板进行的实时连续测量。

本书主要是关于如何用技术的手段实现动态测试,涉及测试原理、测试方法、测试系统、测试数据处理等。

3. 测试技术

测试技术(measurement and test technique)是测量和试验技术的统称,是关于将被测量转换为可检测、传输、处理、显示或记录的量再与标准量比较的技术。

人类认识和改造客观世界是以测试为基础的,进入以知识经济为特征的信息时代后,测试控制技术、计算机技术与通信技术一起构成了现代信息的三大基础。它广泛应用于“农、轻、重、海、陆、空、吃、穿、用”,是国民经济的倍增器,是科学研究的先行官,是军事上的战斗力,是现代社会的物化法官。测试技术的水平在相当程度上影响着科学技术发展的速度和深度。许多新的发明制造都与测试技术的创新分不开。科学技术上的某些突破,也是以某一测试方法的突破为基础的。在现代科学研究和新产品设计中,为了掌握事物的规律性,人们需测试许多有关参数,用以检验是否符合预期要求和事物的客观规律。

我们的祖先很早就设计出计时仪器——日晷。17世纪开普勒发明的望远镜可观测到数亿天体。利用现代航天、遥感、遥测技术,处在数万米高空的测试设备,能够识别地面 1m^2 的平面轮廓;扫描隧道电子显微镜的分辨力达 0.1nm 。这些强有力的观测工具在为人类揭开物质世界奥秘的同时,也对电子技术、材料科学的发展做出了突出贡献。

机械工程领域中的科学实验、产品开发、生产监督、质量控制等,都离不开测试技术。作为自动化或控制系统中的一个环节,在各种自动控制系统中,测试环节起着系统感官的作用。工业自动化生产过程中,为了保证正常、高效的生产,对生产过程自动化的程度提出了越来越高的要求,无论是产品的性能、品质参数还是加工过程中的在线测量,以及产品的包装等。例如数控机床中为了精确控制主轴转速,需要对机床主轴转速进行测试。机器人为了获得手臂末端在作业空间中的位置、姿态和手腕作用力等信息,需要对各个关节的位移、速度和手腕受力进行实时的测试。自动生产线上常需应用测试技术对零件进行分类和计数。图1.1为机械工程中几种典型的测试技术应用例子。

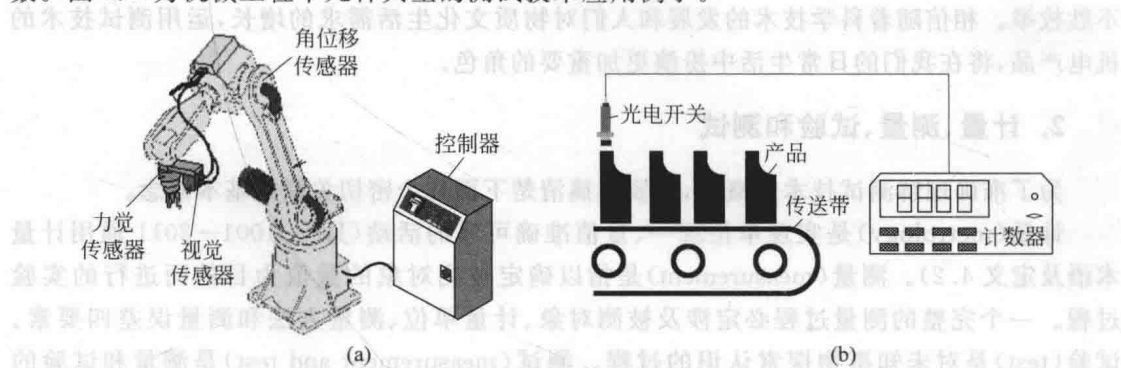


图 1.1 机械工程中几种典型的测试技术应用例子

(a) 机器人中的力、角度等的测试; (b) 自动生产线上的零件计数器; (c) 齿轮故障测试系统