

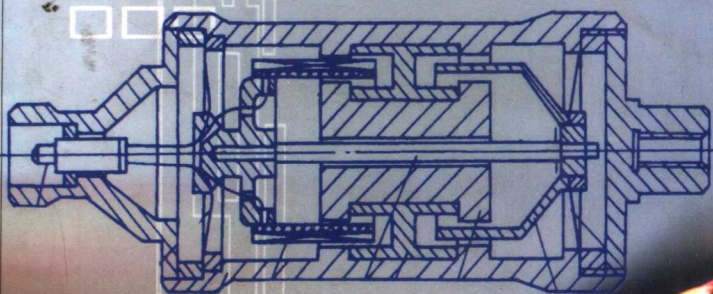


教育部人才培养模式改革和开放教育试点教材

传感器与测试技术

机械设计制造及其自动化专业系列教材

谭定忠 等编



中央广播电视大学出版社

教育部人才培养模式改革和开放教育试点教材
机械设计制造及其自动化专业系列教材

传感器与测试技术

谭定忠 等编

中央广播电视大学出版社

北京·2002

图书在版编目(CIP)数据

传感器与测试技术/谭定忠等编.—北京:中央广播电视大学出版社,
2002.7

教育部人才培养模式改革和开放教育试点教材.机械设计制造及其
自动化专业系列教材

ISBN 7-304-02232-9

I.传… II.谭… III.①传感器—电视大学—教材②测试技术—
电视大学—教材 IV.①TP212②TB4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 054517 号

版权所有,翻印必究。

教育部人才培养模式改革和开放教育试点教材
机械设计制造及其自动化专业系列教材
传感器与测试技术
谭定忠 等编

出版·发行/中央广播电视大学出版社

经销/新华书店北京发行所

印刷/北京云浩印刷有限责任公司

开本/787×1092 1/16 印张/20.75 字数/472千字

版本/2002年5月第1版 2002年7月第1次印刷

印数/0001—2000

社址/北京市复兴门内大街160号 邮编/100031

电话/66419791 68519502 (本书如有缺页或倒装,本社负责退换)

书号:ISBN 7-304-02232-9/TN·26

定价:27.00元

前 言

传感器技术是现代信息技术的三大基础技术之一。传感器是系统获取信息的第一道“门槛”，传感器的性能对系统的功能起决定性作用；系统的自动化程度越高，对传感器的依赖性就越大。许多国家都把传感器技术列为尖端技术，美、日等发达国家把传感器与测试技术列为当代最主要的核心技术之一，目前传感器已广泛地应用于电子与计算机应用，工业过程控制，汽车、家电，环境与安全监测以及军事等领域，并起着重大作用。

本书是根据中央广播电视大学开放教育试点机械设计制造及其自动化专业本科教学计划中的“传感器与测试技术”教学大纲编写而成。本教材共分10章，第1、2章介绍了传感器与测试技术的一般概念和一般特性；第3~9章分别介绍了电阻式传感器、电容式传感器、电感式传感器、磁电式传感器、压电式传感器、光电式传感器、超声波式传感器的工作原理、特性、结构形式、转换电路、误差分析及其补偿方法和应用实例；第10章介绍了传感器与测试系统的选用原则，测试过程中的干扰及抗干扰措施，机床和生产线中常见参量的测试方法，机器人技术中常用传感器的工作原理、结构、测试方法，以及汽车用传感器的工作原理、结构、性能、特点等。

为了满足开放教育的需要，本书力求详简得当，条理清晰，重点突出，便于自学。书中融会了作者多年的教学经验和科研成果。每章末附有大量的思考题与习题，在附录中编写了实验内容及实验指导。通过实验，可使学生对各种不同的传感器及其测量电路和组成有直观的感性认识，巩固所学理论知识，提高学生解决实际问题的能力。

本书由谭定忠等编写，第1、2、3、4章由杨清梅编写，第5、8章

及附录中的实验部分由孟浩编写，第6，10章由谭定忠编写，第7，9章由雷红旗编写，统稿工作由谭定忠完成。

本书由哈尔滨工程大学的谈振藩教授、哈尔滨理工大学的杨守成教授、清华大学的陈非凡副教授审阅，并由谈振藩教授担任主审，专家们仔细地审阅了本书，并提出了许多宝贵的修改意见；本书在编写过程中参考了国内外的有关教材、讲义、专著、论文，并得到了许多同志的帮助，在此一并表示诚挚的谢意。

由于作者水平有限，加之对远程开放教育经验较少，书中难免出现错误和疏漏之处，敬请读者批评指正。

编 者

2002年6月

目 录

第1章 绪 论	(1)
1.1 传感器与测试技术概述	(1)
1.1.1 测试技术在机械工业中的作用	(1)
1.1.2 测试工作的任务	(2)
1.1.3 测试系统构成	(3)
1.2 传感器的定义、组成、分类及要求	(5)
1.2.1 传感器的概念	(5)
1.2.2 传感器的定义及组成	(5)
1.2.3 传感器的分类	(6)
1.2.4 对传感器的一般要求	(8)
1.3 传感器与测试技术的地位、应用及发展趋势	(8)
1.3.1 传感器与测试技术的地位与应用	(8)
1.3.2 传感器发展的新趋势	(10)
本章小结	(11)
思考题	(11)
作业题	(11)
第2章 传感器的一般特性	(13)
2.1 传感器的静特性	(13)
2.1.1 测量范围和量程	(14)
2.1.2 线性度	(14)
2.1.3 迟 滞	(16)
2.1.4 重复性	(17)
2.1.5 灵敏度与灵敏度误差	(17)
2.1.6 分辨力与阈值	(18)

2.1.7	稳定性	(18)
2.1.8	漂移	(18)
2.1.9	精密度	(18)
2.1.10	静态误差(精度)	(18)
2.1.11	误差表达	(19)
2.2	传感器的动态特性	(19)
2.2.1	动态特性的一般模型	(20)
2.2.2	传感器对任意输入信号的时域响应与脉冲响应函数	(22)
2.2.3	传感器的频率响应特性	(24)
2.2.4	传感器典型环节的动态响应	(25)
2.2.5	传感器的无失真检测条件	(28)
2.2.6	传感器的动态性能指标	(29)
2.2.7	频响函数测定	(30)
2.3	传感器的标定与校准	(31)
2.3.1	传感器的标定	(31)
2.3.2	传感器的静态标定	(32)
2.3.3	传感器的动态标定	(33)
2.4	提高传感器性能的方法	(35)
2.4.1	非线性校正	(35)
2.4.2	温度补偿	(39)
2.4.3	零位法、微差法	(41)
2.4.4	闭环技术	(42)
2.4.5	平均技术	(43)
2.4.6	差动技术	(43)
2.4.7	集成化与智能化	(44)
2.4.8	采用屏蔽、隔离与抑制干扰措施	(44)
2.5	负载效应	(44)
2.5.1	电路系统的负载效应	(45)
2.5.2	广义负载效应	(47)
	本章小结	(51)
	思考题	(51)
	作业题	(51)

第3章 电阻式传感器	(53)
3.1 应变式电阻传感器	(53)
3.1.1 金属丝的电阻应变效应	(53)
3.1.2 应变片结构与类型	(55)
3.1.3 电阻应变片主要特性	(56)
3.1.4 转换电路	(60)
3.1.5 应变片选择与粘贴工艺	(64)
3.1.6 电阻应变式传感器的应用	(66)
3.2 压阻式传感器	(67)
3.2.1 压阻效应	(68)
3.2.2 结构与特性	(69)
3.2.3 固态压阻传感器的测量电路	(71)
3.2.4 温度补偿	(73)
3.2.5 应用	(74)
3.3 热电阻式传感器	(75)
3.3.1 工作原理	(75)
3.3.2 热电阻类型及特点	(76)
3.3.3 热电阻式传感器的测量电路及应用	(77)
3.4 电位计式传感器	(78)
3.4.1 工作原理	(78)
3.4.2 类型	(79)
3.4.3 测量电路及应用	(79)
本章小结	(80)
思考题	(80)
作业题	(81)
第4章 电容式传感器	(82)
4.1 电容式传感器工作原理及特性	(82)
4.1.1 工作原理	(82)
4.1.2 类型	(82)
4.1.3 主要性能	(87)
4.2 电容式传感器设计及应用	(89)
4.2.1 电容式传感器的特点	(89)
4.2.2 误差分析及补偿	(91)
4.2.3 转换电路	(94)

4.2.4 电容式传感器应用	(98)
本章小结	(100)
思考题	(101)
作业题	(101)
第5章 电感式传感器	(102)
5.1 自感式传感器	(102)
5.1.1 工作原理	(103)
5.1.2 结构形式及特性	(103)
5.1.3 电感传感器的转换电路	(108)
5.1.4 电感传感器的误差分析	(109)
5.1.5 电感传感器应用举例	(110)
5.2 差动变压器	(112)
5.2.1 工作原理	(112)
5.2.2 结构形式及特性	(114)
5.2.3 差动变压器的转换电路	(116)
5.2.4 差动变压器的误差分析	(117)
5.2.5 差动变压器应用举例	(118)
5.3 涡流式传感器	(119)
5.3.1 工作原理	(119)
5.3.2 高频反射式涡流传感器的结构特点	(122)
5.3.3 涡流式传感器的转换电路	(123)
5.3.4 涡流传感器的应用	(125)
5.4 压磁式传感器	(127)
5.4.1 压磁效应	(127)
5.4.2 工作原理	(128)
5.4.3 结构举例	(128)
5.4.4 压磁式传感器的转换电路	(129)
5.4.5 压磁元件	(129)
5.4.6 压磁传感器的应用	(130)
5.5 感应同步器	(130)
5.5.1 感应同步器的结构	(131)
5.5.2 感应同步器的工作原理	(132)
5.5.3 输出信号的处理方式	(133)
5.5.4 感应同步器的设计	(134)

5.5.5	感应同步器的误差	(135)
5.5.6	感应同步器的应用	(136)
	本章小结	(137)
	思考题	(138)
	作业题	(138)
第6章	磁电式传感器	(140)
6.1	磁电感应式传感器	(140)
6.1.1	工作原理	(140)
6.1.2	类型	(141)
6.1.3	应用	(143)
6.2	霍尔传感器	(145)
6.2.1	工作原理	(145)
6.2.2	结构及其特性分析	(146)
6.2.3	霍尔元件的驱动电路	(148)
6.2.4	霍尔元件的误差分析及补偿	(149)
6.2.5	霍尔传感器的应用	(151)
6.3	磁栅式传感器	(153)
6.3.1	工作原理	(153)
6.3.2	信号处理方法	(156)
6.3.3	磁栅传感器误差分析、特点及应用	(157)
	本章小结	(158)
	思考题	(158)
	作业题	(158)
第7章	压电式传感器	(161)
7.1	工作原理	(161)
7.1.1	压电效应	(161)
7.1.2	压电效应的数学模型	(163)
7.1.3	表面电荷计算	(164)
7.1.4	压电式传感器的等效电路	(165)
7.1.5	压电式传感器的常用结构形式	(167)
7.2	压电材料	(167)
7.2.1	压电材料的主要特性参数	(167)
7.2.2	压电材料的分类及特性	(167)

7.3 压电式传感器的应用设计及特性	(170)
7.3.1 压电式传感器的信号变换电路	(170)
7.3.2 压电式传感器的误差	(173)
7.3.3 压电式加速度传感器	(175)
7.3.4 压电式力传感器	(177)
7.3.5 压电式压力传感器	(179)
7.4 高分子压电材料	(179)
本章小结	(181)
思考题	(182)
作业题	(182)
第8章 光电式传感器	(184)
8.1 光电效应与光电器件	(184)
8.1.1 光电效应	(184)
8.1.2 光电器件的基本特性	(185)
8.1.3 光电器件	(186)
8.1.4 光源	(192)
8.1.5 光电传感器的应用	(192)
8.2 光纤传感器	(194)
8.2.1 光纤的结构和传输原理	(194)
8.2.2 光纤的主要参数	(195)
8.2.3 光纤的种类	(196)
8.2.4 常用的光纤传感器	(196)
8.3 码盘式传感器	(200)
8.3.1 码盘与码制	(200)
8.3.2 光电式编码器	(202)
8.3.3 双盘编码器	(203)
8.3.4 码盘式传感器的应用	(203)
8.4 光栅式传感器	(203)
8.4.1 光栅	(203)
8.4.2 莫尔条纹	(204)
8.4.3 光栅传感器的结构和原理	(205)
8.4.4 光栅传感器的设计要点	(208)
8.4.5 光栅传感器的应用	(209)
8.5 激光式传感器	(209)

8.5.1	激光的产生原理及特点	(209)
8.5.2	激光器	(210)
8.5.3	激光干涉传感器	(211)
8.5.4	激光衍射传感器	(212)
8.5.5	激光扫描传感器	(212)
8.6	CCD, PSD 传感器	(213)
8.6.1	CCD 图像传感器的原理	(213)
8.6.2	CCD 图像传感器的应用	(215)
8.6.3	PSD 的工作原理	(215)
8.6.4	一维 PSD 信号调理电路	(217)
8.6.5	PSD 在测距系统中的应用	(218)
	本章小结	(219)
	思考题	(219)
	作业题	(220)
第 9 章	超声波传感器	(221)
9.1	超声波的物理性质	(221)
9.1.1	概 述	(221)
9.1.2	超声波及波型	(222)
9.1.3	声 速	(222)
9.1.4	波的叠加、干涉及驻波	(223)
9.1.5	超声波的反射、折射及波型转换	(224)
9.1.6	声波和衰减	(227)
9.1.7	多普勒效应	(228)
9.2	超声波换能器	(229)
9.2.1	概 述	(229)
9.2.2	压电型超声波换能器	(229)
9.2.3	磁致伸缩型超声波换能器	(231)
9.2.4	电磁型超声波换能器	(232)
9.2.5	有振动板的超声波换能器	(232)
9.2.6	弹性表面波换能器	(232)
9.3	超声波探伤法	(232)
9.3.1	概 述	(232)
9.3.2	共振法	(232)
9.3.3	穿透法	(233)

9.3.4	脉冲反射法	(234)
9.3.5	直接接触法与液浸法	(236)
9.4	超声波厚度与液位检测	(236)
9.4.1	超声波测厚原理	(236)
9.4.2	超声测量液位	(237)
本章小结	(239)
思考题	(239)
作业题	(240)
第 10 章	传感器与测试技术在机电系统中的典型应用	(242)
10.1	传感器的选择原则与设计测试系统应考虑的因素	(242)
10.1.1	传感器的选用原则	(242)
10.1.2	设计测试系统应考虑的因素	(243)
10.2	测试过程中的抗干扰技术	(245)
10.2.1	概 述	(245)
10.2.2	干扰及其防护	(245)
10.2.3	电磁干扰的噪声源和噪声耦合方式	(246)
10.2.4	抗干扰技术	(247)
10.3	传感器与测试技术在机床和生产线中的应用	(250)
10.3.1	切削力的测量	(250)
10.3.2	扭矩的测量	(254)
10.3.3	角位移测量	(257)
10.3.4	速度测量	(259)
10.3.5	接近开关	(259)
10.3.6	温度的测量	(262)
10.4	传感器与测试技术在机器人技术中的应用	(266)
10.4.1	概 述	(266)
10.4.2	机器人触觉传感器	(267)
10.4.3	机器人视觉传感器	(272)
10.4.4	机器人听觉传感器	(275)
10.5	传感器与测试技术在汽车中的应用	(280)
10.5.1	概 述	(280)
10.5.2	汽车用传感器的设计与选用原则	(281)
10.5.3	汽车发动机控制用传感器	(282)
10.5.4	曲轴转角及转速传感器	(283)

10.5.5	速度传感器	(286)
10.5.6	空气流量传感器	(286)
10.5.7	温度、压力及爆燃传感器	(288)
10.5.8	液位传感器	(292)
	本章小结	(294)
	思考题	(294)
	作业题	(295)
附录 1	CSY 系列传感系统实验仪使用说明	(298)
附录 2	实验内容及实验指导	(300)
	实验一 应变片传感器及其桥路性能研究	(300)
	实验二 涡流传感器的静态标定	(302)
	实验三 差动变压器式电感传感器位移测量	(303)
	实验四 电容式传感器特性	(305)
	实验五 光栅传感器位移测量	(306)
附录 3	中央广播电视大学《传感器与测试技术》课程教学大纲	(308)
	参考文献	(313)

第1章 绪论

测试

主要内容

1. 介绍测试技术在机械工业中的作用，测试工作的任务，测试的一些基本概念及测试系统的各组成部分；

2. 介绍传感器的概念、定义、组成、各种分类方法及对传感器的一般要求；

3. 介绍传感器与测试技术的地位、应用及传感器技术的发展趋势。

学习重点与教学要求

1. 了解测试技术在机械工业中的作用，测试工作的任务及测试系统的组成；

2. 理解传感器的组成、分类方法，对传感器的一般要求；

3. 掌握传感器的定义，了解测试、信息、信号这些概念；

4. 了解传感器与测试技术的地位、应用及传感器技术的发展趋势。

1.1 传感器与测试技术概述

1.1.1 测试技术在机械工业中的作用

测试 (Measurement and test) 是具有试验性质的测量。试验是对迄今未知事物的探索性认识过程，测量是为确定被测对象的量值而进行的实验过程。因此，测试技术包含测量和试验两方面，凡需要考查事物的状态、变化和特征等，并要对它进行定量的描述时，都离不开测试工作。

人类对客观世界的认识和改造活动总是以测试工作为基础的。测试是人类认识自然、掌握自然规律的实践途径之一，是科学研究中获得感性材料、接受自然信息的途径，是形成、发展和检验自然科学理论的实践基础。人类早期在从事生产活动时，就已经对长度（距离）、面积、时间和重量等进行测量，其最初的计量单位或是和自身生理特点相联系（如长度），或是和自然环境相联系（如时间）。秦始皇在建立统一的中央政权以后，立即建立统一的度量衡制度，这说明恰当的测试工作对发展生产和社会交往的重要作用。在测试技术发展史中，应该着重提一下伽利略的功绩。伽利略不满意古代思想家对宇宙进行哲理性的定性描述，他主张观测和实验，对自然界的现象和运动规律进行定量的描述。他开创了实验科学，

从而开创了近代意义的自然科学。

工程技术中的研究对象往往十分复杂,有些问题至今还难以进行完善的理论分析和计算,必须依靠实验研究来解决实际问题。通过测试工作积累原始数据,是工程设计和研究中很艰巨的、很重要的一项工作。

机械工业负有装备国民经济各部门的任务。现代机械工业的发展,面临着新兴科学技术发展的挑战,宇航、高能物理、红外、激光以及智能机器的发展,对机械工业部门提出了一系列新课题。例如,一些特殊的机械装置如宇航飞行器、原子锅炉、激光器等,都要求在给定的时间域内工作绝对可靠,元件具有高精度、高性能,这就要求机械制造部门必须提供优良的机械设备。

另一方面,随着机械加工精度的提高和生产过程自动化的发展,现代机械加工过程已从单机自动化和自动生产线发展到柔性制造系统(FMS),并朝着无人化工厂方向发展。生产中除了加工后的自动测量外,还应包括在线测试,即从备料到产品入库、包装等流程的全过程,以及设备管理、故障诊断和安全监控等。因此,先进的测试技术已成为生产系统不可缺少的一个组成部分。

随着集成电路与计算机技术的发展,机械与电子相结合,形成所谓机电一体化系统。机电一体化(Mechatronics)系统是在机械结构的主功能、动力功能、信息处理功能和控制功能上引进了电子技术,是将机械装置和电子设备以及软件等有机地结合起来构成的系统的总称。

机电一体化技术的兴起与发展,使机械产品的结构与功能产生了质的飞跃。机械产品由以往取代、延伸与放大人的体力劳动的作用,跃变到取代、延伸与加强人的部分脑力劳动的作用。与此同时,机械产品的制造过程发生了飞跃。制造过程不仅包含物质流与能量流,而且包含了信息流。制造过程正在走向柔性化、集成化、智能化。柔性制造系统与计算机集成制造系统(CIMS)的出现与发展,正是这一趋势的体现,而这一切的关键问题,就在于信息的获取、传输、存储、分析、处理和利用。

1.1.2 测试工作的任务

测试工作是为了获取有关研究对象的状态、运动和特征等方面的信息。信息(Information)一般理解为消息、情报或知识。例如,语言文字是社会信息;商品情报是经济信息;遗传密码是生物信息等。然而,从物理学观点出发,信息是物质所固有的,是其客观存在或运动状态的特征。传输信息的载体称为信号(Signal),信息蕴涵于信号之中。例如,古代烽火,人们观察到的是光信号,它蕴涵的信息是“敌人来进攻了”。有些信息是可以直接检测的,而另外一些信息却不容易直接检测。例如弹簧在外力作用下发生变形,其变形量是可以直接检测的;根据外力和变形,弹簧刚度也是容易计算的。但是对于一个回转圆盘的不平衡量的大小及其分布的信息却不易直接检测。然而,这种不平衡状态在回转时将使支承受附加动态力,用传感器检测支承的动载荷或振动信号,对它进行加工、处理就可以获得圆盘不平

衡量的大小和角度位置的信息。又例如机械系统的动态特性（如机床动态特性）只有通过对外界激励和系统响应的测试才能求得。

研究对象的信息量是非常丰富的。测试工作总是根据一定的目的和要求，获取有限的、观察者感兴趣的某些特定的信息。例如研究一个简单的单自由度的质量-弹簧系统的微小自由振动，如果我们对该系统的固有频率和阻尼比感兴趣，我们可以通过施加一定的激励而观察质量块的运动，这时我们并不去研究弹簧的微观表现。当我们要研究弹簧的疲劳问题时，有关材料的性质和缺陷（如微裂纹）的信息就是非常重要的了。测试工作总是要用最简捷的方法获得和研究任务相联系的、最有用的、表征特性的有关信息，而不是企图获得该事物的全部信息。

信号是信息的载体。信息总是通过某些物理量的形式表现出来，这些物理量就是信号。例如上述振动系统可以通过质量块的位移-时间关系来描述，质量块位移的时间历程（信号）就包含了该系统固有频率和阻尼比的信息。从信息的获取、变换、加工、传输、显示和记录等方面来看，以电量形式表示的电信号最为方便。所以本书中所指的信号，一般是指随时间变化的电信号。

信号中虽然携带着信息，但是信号中既含有我们所需的信息，也常常含有大量我们不感兴趣的其他信息，后者统称为干扰。相应地对信号也有“有用”信号和“干扰”信号的提法，但这是相对的。在一种场合中，我们认为是干扰的信号，在另一种场合中却可能是有用的。例如齿轮噪声对工作环境是一种“污染”，但是齿轮噪声是齿轮副传动缺陷的一种表现，因此可以用来评价齿轮副的运行情况并用作故障诊断。测试工作者的一个任务就是要从复杂的信号中提取有用的信息。

为了保存、传输、读取或反馈有用信息，我们常常把信号作必要的变换。以语言为例，语言本身是人们表达思想的一种载体，用声波形式和约定的方式（词汇、语法等）来表达。为了便于保存和传输，人们把声波信号变换成电信号。为了传输和抗干扰，还将电信号变换为高频电磁波。在接收时，先要恢复原来的电信号，然后再用此电信号激励一个发声系统，才能获得相应的声波。这类复杂的变换无非是要达到一个目的，即把信息从信源点尽可能地真实地传输到另一个接收点。整个过程要求既不失真，也不受干扰。严格地说，是要在外界严重干扰的情况下，能够提取和辨识出信号中所包含的有用信息。

1.1.3 测试系统构成

测试系统由一些不同功能的环节组成，这些环节保证了由获取信号到提供观测的最必要的信号流程功能。图 1-1 是一测试系统最基本的组成结构方框图。

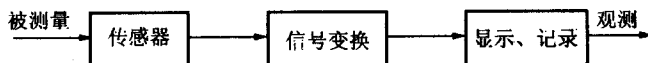


图 1-1 测试系统组成原理方框图