
传感器原理 设计与应用

(第四版)

○ 刘迎春 叶湘滨 编著

○ 国防科技大学出版社

内容提要

本书全面而系统地论述了各种传感器的基本原理、基本特性、信号调节电路以及它们在物理量、化学量、生物量、电量等测量中的应用。

全书共 22 章。第一、二、三章为传感技术总论,介绍了传感器的基本概念、基本理论,传感器特性分析方法与标定方法;第四至第十章论述常见的、应用广泛的传感器,它们是电阻应变式、电容式、电感式、压电式、磁电式、热电式和光电式等传感器;第十一至二十二章介绍国内外近年来研制与开发的新型传感器,它们是智能、光纤、图像、气体、湿度、红外、固态压阻、微波、超导、液晶、生物和机器人等传感器,反映了当代传感器技术的新发展与新成就。

本书可作为检测技术与仪器、自动控制、自动化仪表等专业的教材,亦可作为有关专业科学研究与工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

传感器原理、设计与应用/刘迎春,叶湘滨编著.—4 版.—长沙:国防科技大学出版社, 2002.7

ISBN 7-81024-050-1

I. 传… II. ①刘… ②叶… III. 传感器—基本知识 IV. TP212

国防科技大学出版社出版发行

电话:(0731)4572640 邮政编码:410073

E-mail: gfkdcbs@public.cs.hn.cn

责任编辑:唐卫威 责任校对:徐 飞

新华书店总店北京发行所经销

国防科技大学印刷厂印装

*

开本:787×1092 1/16 印张:25.75 字数:592 千
2002 年 7 月第 4 版第 1 次印刷 印数:73101~83100 册

*

定价:32.00 元

第四版说明

本书第三版在用过四年之后，迎来了新世纪的曙光，它也应该以崭新的面貌与广大师生与读者见面。趁本书重印之际，我们对它的内容进行了调整与充实，以便使传感器的新发展、新技术与新成果尽快反映在教材中，从而满足教学与科研的需要。

下面对本书第四版作以下说明：

一、将传感器的标定一章并入第二章传感器的一般特性，改名为传感器的一般特性分析与标定，这样使本书结构更合理、更完美；

二、新增加生物传感器与机器人传感器两章，这样既反映了传感器技术的新发展，又使本书内容更丰富、更完善；

三、根据需要，对有关章节内容进行了部分修改与调整。

由于水平所限，书中疏漏不妥之处在所难免，欢迎广大读者批评指正。

作 者

2002年3月于长沙

前 言

传感器技术在当代科技领域中占有十分重要的地位。随着计算机技术的不断发展,信息处理技术也在不断发展完善。但作为提供信息的传感器,它的发展相对于计算机的信息处理功能来说就落后了。这使得自动检测技术受到影响,也直接影响到多种技术的进一步发展。基于上述原因,愈来愈多的科技工作者对传感器技术予以了高度的重视,促使传感器技术加速发展,以适应信息处理技术的需要。

在我国出版的有关传感器技术的书籍中,能较全面反映近年来传感器技术新成就的为数不多。作者编写本书的目的就是在于向广大读者提供一本全面介绍传感器技术的书籍。

本书是按照国防科技大学检测技术与仪器专业的《传感器原理与非电量测试》课程教学大纲的要求,集作者多年来教学科研之经验,参考国内外有关资料编写而成的。原书名为《传感器原理与非电量测试》,分上、下两册,曾油印使用多次,反应较好。现经修订充实,予以公开出版。考虑到原书上、下两册虽有联系,但亦相互独立,故分成两本书出版。本书即为原书上册。原书下册更名为《非电量电测技术》,不久也将出版。

本书对当前使用较多的几类传感器,如电位计式、应变式、电容式、电感式、压电式、磁电式、光敏式、霍尔式传感器的基本原理,静、动态特性,信号调节电路及其应用都作了较为详细的分析,还介绍了有关这些传感器的设计知识。对光纤、气敏、湿敏和智能等新型传感器也作了介绍。本书内容新颖、丰富、全面,具有一定的深度和广度。叙述简明,深入浅出。可作为高等院校仪器、仪表和测试专业本科生教材,亦可供有关专业的工程技术人员参考。

限于作者的水平,书中疏漏不妥之处在所难免,敬请广大读者批评指正。

华中理工大学卢文祥副教授对本书进行了仔细审阅,提出了不少宝贵意见,在此深表谢意。

作 者

1988年5月于长沙

目 录

第一章 传感器概论

1.1 传感器的组成与分类	(1)
1.1.1 传感器的定义	(1)
1.1.2 传感器的组成	(1)
1.1.3 传感器的分类	(1)
1.2 传感器在科技发展中的重要性	(2)
1.2.1 传感器的作用与地位	(2)
1.2.2 传感器技术是信息技术的基础与支柱	(2)
1.2.3 科学技术的发展与传感器技术的密切关系	(3)
1.3 传感器技术的发展动向	(3)
1.4 机电模拟及双向传感器的统一理论	(4)
1.4.1 变量的分类	(5)
1.4.2 机电模拟	(5)
1.4.3 双向传感器的统一理论	(8)

第二章 传感器的一般特性分析与标定

2.1 传感器的静态特性	(19)
2.1.1 线性度	(19)
2.1.2 灵敏度	(21)
2.1.3 迟滞 (迟环)	(21)
2.1.4 重复性	(22)
2.2 传感器的动态特性	(22)
2.2.1 动态参数测试的特殊问题	(22)
2.2.2 研究传感器动态特性的方法及其指标	(23)
2.2.3 传感器的数学模型	(24)
2.2.4 传递函数	(25)
2.2.5 频率响应函数	(26)
2.2.6 脉冲响应函数	(26)
2.3 传感器动态特性分析	(27)
2.3.1 传感器的频率响应	(27)

2.3.2	传感器的瞬态响应	(31)
2.4	传感器的无失真测试条件	(33)
2.5	传感器的标定	(34)
2.5.1	传感器的静态特性标定	(34)
2.5.2	传感器的动态特性标定	(35)
2.5.3	振动传感器的标定	(37)
2.5.4	压力传感器的标定	(38)

第三章 传感器中的弹性敏感元件

3.1	引言	(46)
3.2	弹性敏感元件的基本特性	(46)
3.2.1	弹性特性	(46)
3.2.2	弹性滞后	(47)
3.2.3	弹性后效	(47)
3.2.4	固有振动频率	(48)
3.3	弹性敏感元件的材料	(48)
3.4	弹性敏感元件的特性参数计算	(49)
3.4.1	弹性圆柱(实心或空心)	(49)
3.4.2	悬臂梁	(50)
3.4.3	扭转棒	(52)
3.4.4	圆形膜片和膜盒	(53)
3.4.5	弹簧管	(54)
3.4.6	波纹管	(56)
3.4.7	薄壁圆筒	(57)

第四章 电阻应变式传感器

4.1	电阻应变式传感器的工作原理	(59)
4.2	电阻应变片的工作原理	(59)
4.2.1	金属的应变效应	(59)
4.2.2	电阻应变片的结构和工作原理	(59)
4.2.3	电阻应变片的横向效应	(62)
4.3	电阻应变片的种类、材料和参数	(63)
4.3.1	电阻应变片的种类	(63)
4.3.2	电阻应变片的材料	(65)
4.3.3	应变片的主要参数	(66)
4.4	电阻应变片的动态响应特性	(67)

4.4.1	应变波的传播过程	(68)
4.4.2	应变计的可测频率的估算	(68)
4.5	粘合剂和应变片的粘贴技术	(70)
4.5.1	粘合剂	(70)
4.5.2	应变计粘贴工艺	(71)
4.6	电阻应变式传感器的温度误差及其补偿	(73)
4.6.1	温度误差及其产生原因	(73)
4.6.2	温度补偿方法	(74)
4.7	电阻应变式传感器的信号调节电路及电阻应变仪	(75)
4.7.1	测量电桥的工作原理	(75)
4.7.2	电阻应变仪	(79)
4.8	电阻应变式传感器	(80)
4.8.1	电阻应变式力传感器	(81)
4.8.2	应变式压力传感器	(87)
4.8.3	应变式加速度传感器	(89)

第五章 电容式传感器

5.1	电容式传感器的工作原理及结构形式	(90)
5.1.1	变间隙的电容式传感器	(91)
5.1.2	变面积的电容式传感器	(95)
5.1.3	变介电常数的电容式传感器	(95)
5.2	电容式传感器的等效电路	(96)
5.3	电容式传感器的信号调节电路	(98)
5.3.1	运算放大器式电路	(98)
5.3.2	电桥电路	(98)
5.3.3	调频电路	(99)
5.3.4	谐振电路	(100)
5.3.5	二极管 T 型网络	(100)
5.3.6	脉冲宽度调制电路	(101)
5.4	影响电容传感器精度的因素及提高精度的措施	(103)
5.4.1	温度对结构尺寸的影响	(103)
5.4.2	温度对介质介电常数的影响	(103)
5.4.3	漏电阻的影响	(103)
5.4.4	边缘效应与寄生参量的影响	(103)
5.4.5	增加原始电容值, 减少寄生电容和漏电的影响	(104)
5.5	电容传感器的应用	(104)
5.5.1	膜片电极式压力传感器	(105)

5.5.2	电容式加速度传感器	(106)
5.5.3	电容式应变计	(107)
5.5.4	荷重传感器	(107)
5.5.5	振动、位移测量仪	(107)
5.5.6	电容测厚仪	(108)

第六章 电感式传感器

6.1	变磁阻式传感器	(109)
6.1.1	工作原理	(109)
6.1.2	等效电路	(110)
6.1.3	输出特性分析	(113)
6.1.4	传感器的信号调节电路	(115)
6.1.5	影响传感器精度的因素分析	(116)
6.1.6	电感式传感器的应用	(117)
6.2	差动变压器	(117)
6.2.1	螺管形差动变压器	(118)
6.2.2	差动变压的信号调节电路	(123)
6.2.3	差动变压器的应用	(126)
6.3	涡流式传感器	(126)
6.3.1	高频反射式涡流传感器	(126)
6.3.2	低频透射式涡流传感器	(129)
6.3.3	涡流式传感器的应用	(130)

第七章 压电式传感器

7.1	压电式传感器的工作原理	(132)
7.1.1	压电效应	(132)
7.1.2	压电常数和表面电荷的计算	(134)
7.2	压电材料	(136)
7.2.1	压电晶体	(136)
7.2.2	压电陶瓷	(136)
7.3	压电式传感器的等效电路	(139)
7.4	压电式传感器的信号调节电路	(140)
7.4.1	电压放大器(阻抗变换器)	(141)
7.4.2	电荷放大器	(144)
7.5	压电式加速度传感器	(145)
7.5.1	工作原理	(145)

7.5.2 灵敏度	(146)
7.5.3 频率特性	(146)
7.5.4 压电式加速度传感器的结构	(148)
7.6 压电式测力传感器	(149)

第八章 磁电式传感器

8.1 磁电式传感器的工作原理	(151)
8.2 动圈式磁电传感器	(151)
8.2.1 动圈式磁电传感器工作原理	(151)
8.2.2 动圈式磁电传感器结构	(152)
8.2.3 信号调节电路和记录仪器	(152)
8.3 磁阻式磁电传感器	(153)
8.4 磁电式传感器的频率响应特性	(154)

第九章 热电式传感器

9.1 热电偶	(156)
9.1.1 热电偶的基本原理	(156)
9.1.2 热电偶的类型及结构	(164)
9.1.3 热电势的测量及热电偶的标定	(168)
9.1.4 热电偶的传热误差和动态误差	(173)
9.2 热电阻	(176)
9.2.1 金属热电阻	(176)
9.2.2 半导体热敏电阻	(180)
9.3 晶体管和集成温度传感器	(183)
9.3.1 工作原理	(183)
9.3.2 集成温度传感器的典型应用	(185)
附录1 铂铑 ₁₀ -铂热电偶分度表	(188)
附录2 镍铬-镍硅(镍铝)热电偶分度表	(190)
附录3 镍铬-考铜热电偶分度表	(193)
附录4 铂铑 ₃₀ -铂铑 ₆ 热电偶分度表	(195)
附录5 铂热电阻分度表($R_0 = 46\Omega$)	(199)
附录6 铂热电阻分度表($R_0 = 100\Omega$)	(201)
附录7 铜热电阻分度表($R_0 = 50\Omega$)	(203)
附录8 铜热电阻分度表($R_0 = 100\Omega$)	(204)

第十章 光电式传感器

10.1	光电管	(205)
10.2	光电倍增管	(206)
10.3	光敏电阻	(207)
10.3.1	光敏电阻的工作原理	(207)
10.3.2	光敏电阻的结构	(207)
10.3.3	光敏电阻的主要参数	(207)
10.3.4	光敏电阻的基本特性	(208)
10.4	光敏二极管和光敏晶体管	(210)
10.4.1	工作原理	(210)
10.4.2	基本特性	(211)
10.5	光电池	(213)
10.5.1	工作原理	(213)
10.5.2	基本特性	(214)
10.6	光电式传感器的应用	(215)
10.6.1	模拟式光电传感器的应用	(216)
10.6.2	脉冲式光电传感器的应用	(217)

第十一章 智能式传感器

11.1	概述	(219)
11.2	智能式传感器的构成	(219)
11.3	压阻式压力传感器智能化	(220)
11.3.1	智能式压阻压力传感器硬件结构	(220)
11.3.2	智能式压阻压力传感器的软件设计	(221)
11.3.3	非线性与温度误差的修正	(221)
11.3.4	实验结果与结论	(223)
11.4	智能式传感器的发展方向与途径	(223)
11.4.1	集成智能式传感器	(223)
11.4.2	我国研究与开发智能式传感器的途径	(224)

第十二章 光导纤维传感器

12.1	概论	(225)
12.1.1	光纤传感技术的形成及其特点	(225)
12.1.2	光纤传感器的光源	(225)

12.1.3	光纤传感器的光探测器	(225)
12.1.4	光纤传感器的分类	(225)
12.2	光导纤维以及光在其中的传输	(226)
12.2.1	光导纤维及其传光原理	(226)
12.2.2	光在普通光导纤维内的传输	(227)
12.2.3	光在特殊光导纤维内的传输	(228)
12.3	光调制技术	(229)
12.3.1	相位调制与干涉测量	(230)
12.3.2	频率调制	(231)
12.4	光纤位移传感器	(232)
12.4.1	光纤开关与定位装置	(232)
12.4.2	传光型光纤位移传感器	(235)
12.4.3	受抑全内反射光纤位移传感器	(237)
12.4.4	光纤微弯位移传感器	(239)
12.4.5	光纤干涉型位移传感器	(241)
12.5	光纤速度、加速度传感器	(241)
12.5.1	光纤激光渡越速度计	(242)
12.5.2	利用马赫-泽德干涉仪的光纤加速度计	(242)
12.5.3	倾斜镜式光纤加速度计	(243)
12.6	光纤振动传感器	(245)
12.6.1	相位调制光纤振动传感器	(246)
12.6.2	利用光弹效应的光纤振动传感器	(248)
12.7	光纤温度传感器	(250)
12.7.1	相位调制型光纤温度传感器	(250)
12.7.2	热辐射光纤温度传感器	(253)
12.7.3	传光型光纤温度传感器	(255)
12.8	光纤流量、流速传感器	(257)
12.8.1	光纤旋涡流量计	(257)
12.8.2	光纤激光多普勒测速计	(259)
12.9	光纤压力传感器	(260)
12.9.1	利用马赫-泽德干涉仪制作的光纤压力传感器	(260)
12.9.2	偏振型光纤压力传感器	(262)

第十三章 固态图像传感器

13.1	引言	(265)
13.2	固态图像传感器的敏感器件	(266)
13.2.1	电荷耦合器件 (CCD)	(266)

13.2.2	电荷注入器件 (CID)	(270)
13.2.3	电荷链式器件 (BBD)	(271)
13.2.4	MOS 式光电变换器件	(271)
13.3	固态图像传感器	(272)
13.3.1	固态图像传感器的分类	(272)
13.3.2	线型固态图像传感器	(272)
13.3.3	面型固态图像传感器	(274)
13.3.4	固态图像传感器主要特性	(281)
13.3.5	固态图像传感器的应用	(285)

第十四章 气体传感器

14.1	概述	(289)
14.1.1	气体传感器及气体检测方法	(289)
14.1.2	气体传感器的分类	(289)
14.2	半导体气体传感器	(291)
14.2.1	半导体气体传感器及其分类	(291)
14.2.2	主要特性及其改善	(291)
14.2.3	表面控制型电阻式传感器	(294)
14.2.4	体控制型电阻式传感器	(297)
14.2.5	非电阻式半导体气体传感器	(298)
14.2.6	半导体气体传感器的应用	(300)
14.3	红外吸收式气敏传感器	(303)
14.4	接触燃烧式气敏传感器	(304)
14.5	热导率变化式气体传感器	(306)
14.6	湿式气敏传感器	(306)

第十五章 湿度传感器

15.1	湿度及湿度传感器	(308)
15.1.1	湿度及其表示方法	(308)
15.1.2	湿度传感器及其特性参数	(308)
15.1.3	湿度传感器的分类	(310)
15.2	电解质系湿度传感器	(310)
15.2.1	无机电解质湿度传感器	(310)
15.2.2	高分子电解质湿度传感器	(313)
15.3	半导体及陶瓷湿敏传感器	(315)
15.3.1	涂覆膜型	(315)

15.3.2	烧结体型	(316)
15.3.3	薄膜型	(318)
15.4	有机物及高分子聚合物湿度传感器	(319)
15.4.1	胀缩性有机物湿敏元件	(319)
15.4.2	高分子聚合物薄膜湿敏元件	(320)
15.5	湿度传感器的应用及发展动向	(321)

第十六章 红外传感器

16.1	红外辐射的基本知识	(323)
16.1.1	红外辐射	(323)
16.1.2	红外辐射术语	(324)
16.1.3	红外辐射源	(325)
16.2	红外传感器	(327)
16.2.1	常见红外传感器	(327)
16.2.2	红外传感器的性能参数	(329)
16.2.3	红外传感器使用中应注意的问题	(330)
16.3	红外测温	(331)
16.3.1	红外测温的特点	(331)
16.3.2	红外测温原理	(331)
16.4	红外成像	(332)
16.4.1	红外成像原理	(332)
16.4.2	红外成像仪	(333)
16.5	红外分析仪	(334)
16.6	红外无损检测	(335)
16.6.1	焊接缺陷的无损检测	(335)
16.6.2	铸件内部缺陷探测	(336)
16.6.3	疲劳裂纹探测	(336)

第十七章 固态压阻式传感器

17.1	半导体的压阻效应	(338)
17.1.1	压阻效应	(338)
17.1.2	压阻系数	(339)
17.2	固态压阻式压力传感器	(341)
17.3	固态压阻式加速度传感器	(342)
17.4	固态压阻式传感器的输出特性及补偿方法	(342)
17.4.1	电桥平衡失调与零位温漂补偿	(342)

17.4.2 灵敏度温度系数补偿	(343)
17.4.3 非线性及其补偿	(345)

第十八章 微波传感器

18.1 微波的基本知识简介	(346)
18.1.1 微波的性质与特点	(346)
18.1.2 微波振荡器与微波天线	(346)
18.2 微波传感器及其分类	(347)
18.2.1 反射式微波传感器	(347)
18.2.2 遮断式微波传感器	(347)
18.2.3 微波传感器的特点与存在的问题	(347)
18.3 微波传感器的应用	(347)
18.3.1 微波湿度(水分)传感器	(347)
18.3.2 微波液位计	(348)
18.3.3 微波物位计	(348)
18.3.4 微波测厚仪	(348)
18.3.5 微波温度传感器	(349)

第十九章 超导传感器

19.1 超导光传感器	(351)
19.1.1 超导可见光传感器	(351)
19.1.2 超导红外传感器	(351)
19.2 超导微波传感器	(352)
19.3 超导磁场传感器	(352)

第二十章 液晶传感器

20.1 液晶及其性质	(353)
20.1.1 液晶的概念	(353)
20.1.2 液晶的分类与性质	(353)
20.2 液晶传感器	(353)
20.2.1 液晶电磁场传感器	(353)
20.2.2 液晶电压传感器	(354)
20.2.3 液晶超声波传感器	(354)
20.2.4 液晶温度传感器	(354)

第二十一章 生物传感器

21.1 概述	(355)
21.2 生物传感器原理、特点与分类	(355)
21.2.1 生物传感器的基本原理	(355)
21.2.2 生物敏感膜	(356)
21.2.3 生物传感器的特点	(356)
21.2.4 生物传感器的分类	(356)
21.3 生物反应基本知识	(357)
21.3.1 酶反应	(357)
21.3.2 酶作用机理	(358)
21.3.3 微生物反应	(360)
21.3.4 免疫学反应	(361)
21.3.5 生物学反应中的物理量变化	(362)
21.4 生物活性材料固定化技术	(362)
21.5 酶传感器	(363)
21.6 微生物传感器	(366)
21.6.1 呼吸机能型微生物传感器	(366)
21.6.2 代谢机能型微生物传感器	(367)
21.7 免疫传感器	(368)
21.8 生物组织传感器	(369)
21.9 半导体生物传感器	(370)
21.9.1 酶光敏二极管	(370)
21.9.2 酶 FET	(371)
21.10 生物传感器应用与未来	(372)

第二十二章 机器人传感器

22.1 概述	(373)
22.1.1 机器人与传感器	(373)
22.1.2 机器人传感器的分类	(373)
22.2 触觉传感器	(374)
22.2.1 触觉	(375)
22.2.2 压觉	(377)
22.2.3 力觉	(378)
22.2.4 滑觉	(383)
22.3 接近觉传感器	(385)

22.4 视觉传感器.....	(387)
22.4.1 机器人视觉	(387)
22.4.1 视觉传感器	(388)
22.5 听觉、嗅觉、味觉及其他传感器.....	(390)
参考文献.....	(392)

第一章 传感器概论

1.1 传感器的组成与分类

1.1.1 传感器的定义

传感器是能感受规定的被测量并按照一定规律转换成可用输出信号的器件或装置。通常由敏感元件和转换元件组成。其中，敏感元件是指传感器中能直接感受被测量的部分，转换元件指传感器中能将敏感元件输出转换为适于传输和测量的电信号部分。

有些国家和有些学科领域，将传感器称为变换器、检测器或探测器等。应该说明，并不是所有的传感器都能明显分清敏感元件与转换元件两个部分，而是二者合为一体。例如半导体气体、湿度传感器等，它们一般都是将感受的被测量直接转换为电信号，没有中间转换环节。

传感器输出信号有很多形式，如电压、电流、频率、脉冲等，输出信号的形式由传感器的原理确定。

1.1.2 传感器的组成

一般讲传感器由敏感元件和转换元件组成。但是由于传感器输出信号一般都很微弱，需要有信号调节与转换电路将其放大或转换为容易传输、处理、记录和显示的形式。随着半导体器件与集成技术在传感器中的应用，传感器的信号调节与转换电路可能安装在传感器的壳体里或与敏感元件一起集成在同一芯片上。因此，信号调节与转换电路以及所需电源都应作为传感器组成的一部分。如图 1-1 所示。

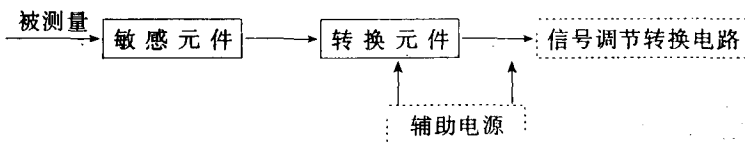


图 1-1 传感器组成方块图

常见的信号调节与转换电路有放大器、电桥、振荡器、电荷放大器等，它们分别与相应的传感器相配合。

1.1.3 传感器的分类

传感器的种类繁多，不胜枚举。因此，传感器分类方法很多，表 1-1 给出了常见的分类方法。