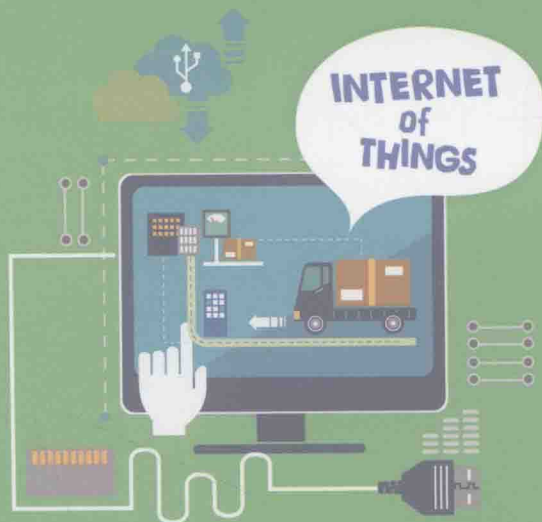


电子工程师



入门·实践·提高系列丛书



物联网与 穿戴式应用中的传感器 及其接口技术



◎林凌 李刚 编著

 中国工信出版集团



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

电子工程师入门·实践·提高系列丛书

物联网与穿戴式应用中的 传感器及其接口技术

林 凌 李 刚 编著

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

传感器在人类进入现代社会后已经到了无所不在的程度，如在物联网、穿戴式装置、机器人、汽车、飞机、高铁等领域均广泛应用。本书在介绍必要的传感器原理的基本知识和传感器技术的基础上，全方位地介绍最新型的、面向物联网与穿戴式应用的传感器及传感器接口电路，为电子工程师开拓视野、研发有竞争力的新产品提供集成化传感器及其接口电路的选择参考。

本书可作为从事物联网、穿戴式装置、机器人、自动化系统、仪器仪表等领域的工程技术人员的参考读物，对电子技术应用、计算机技术应用、机电一体化和仪器仪表等专业的学生也有很高的参考价值。

未经许可，不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有，侵权必究。

图书在版编目（CIP）数据

物联网与穿戴式应用中的传感器及其接口技术 / 林凌，李刚编著. —北京：电子工业出版社，2018.5
(电子工程师入门·实践·提高系列丛书)

ISBN 978-7-121-34100-7

I. ①物… II. ①林… ②李… III. ①传感器 IV. ①TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 081243 号

策划编辑：牛平月

责任编辑：张 京

印 刷：北京京科印刷有限公司

装 订：三河市良远印务有限公司

出版发行：电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本：787×1 092 1/16 印张：33.75 字数：864 千字

版 次：2018 年 5 月第 1 版

印 次：2018 年 5 月第 1 次印刷

定 价：118.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题，请向购买书店调换。若书店售缺，请与本社发行部联系，联系及邮购电话：(010) 88254888, 88258888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn，盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

本书咨询联系方式：(010) 88254454, niupy@phei.com.cn。

前 言

大到汽车、高铁、飞机、卫星，小到冰箱、空调、洗衣机，少则需要几个传感器，多则有成百上千个传感器。不仅这些工业产品中需要传感器，工业的生产过程中也需要各种各样的传感器参与，在现代农业、现代军事等领域，传感器的应用无处不在。现在最热门的物联网、穿戴式设备、机器人，传感器更是其中不可或缺的关键部件。

一方面，传感器的应用已经到了爆炸式发展的地步；另一方面，传感器及其技术本身的发展也令人眼花缭乱：传感器种类繁多、灵敏度越来越高、功能越来越强大、体积越来越小、功耗越来越低……

作者对上述传感器及其技术的发展有着刻骨铭心的感受，希望将最新型的传感器及其技术撷英荟萃，介绍给读者。虽然作者能力和水平有限，但希望尽最大的努力，为读者提供传感器及其技术的盛宴，为工程师在开发新产品时提供有价值的参考。

现代传感器集成了传感器所需的信号处理功能、高精度的数字化（模数转换）功能、一种以上的计算机通信接口等功能，参考电压、激励信号和电源稳压器等也常常集成在传感器中。

有些传感器已经有很悠久的历史，具备可靠性高、成本低廉等优势，依然在现代电子系统中发挥着重要的作用。因为有很多现代集成接口电路是专门为这一类传感器设计的，而且它们确实在“现代”社会中依然发挥作用。另外，它们与现代集成传感器和集成传感器接口电路不可分割。因此本书的前两章专门介绍“传统”的传感器和传感器接口电路。

正如万维网是计算机技术和通信技术融合发展的结晶，现代传感器技术也在融合计算机技术和通信技术，很多最“全”的集成传感器本身就是一块微处理器，也具有完整的网络接口，如蓝牙或 Zigbee，或者 WiFi。以最“全”的传感器为参照，很多单片机或嵌入式系统把除传感器以外的传感器接口所需的其他功能全部集成在内部，本书把这一类主要用于与传感器接口的单片机或嵌入式系统也作为重要内容予以介绍。

本书最后介绍用于穿戴式健康设备的传感器，即生理信息传感器或测量模拟前端。相信这部分内容会有很多读者感兴趣。

本书共分 5 章，乔文编写了第 1 章和第 5 章，李哲编写了第 2 章，王慧泉编写了第 3 章的 3.1 节，刘近贞编写了第 3 章的 3.2 节和 3.3 节，赵喆编写了第 3 章的 3.4 节和 3.5 节，周梅编写了第 3 章的 3.6~3.13 节，陈瑞娟编写了第 4 章。全书由李刚和林凌整理和统稿。

编 者

2017 年初夏于北洋园

目 录

第 1 章 传统传感器	(1)
1.1 概述	(1)
1.2 电阻传感器	(1)
1.2.1 电位器式位移或角位移传感器	(1)
1.2.2 电阻应变片(丝)	(2)
1.2.3 压阻式传感器	(2)
1.2.4 热电阻传感器	(3)
1.2.5 热敏电阻传感器	(4)
1.3 电容传感器	(5)
1.4 光电传感器	(5)
1.4.1 光电效应	(6)
1.4.2 光敏电阻	(7)
1.4.3 光敏晶体管	(8)
1.5 超声传感器	(12)
1.6 图像传感器	(15)
1.6.1 CCD 传感器	(15)
1.6.2 CMOS 传感器	(19)
1.6.3 CCD 和 CMOS 传感器的主要参数	(22)
1.6.4 CCD 和 CMOS 传感器的对比分析	(23)
1.7 化学传感器	(24)
1.7.1 化学传感器的工作原理	(25)
1.7.2 化学传感器的主要类型	(25)
1.7.3 影响化学传感器性能的主要因素	(38)
1.8 生物传感器	(38)
第 2 章 传统传感器的接口电路	(40)
2.1 概述	(40)
2.2 热电阻的接口电路	(41)
2.3 电容传感器的接口电路	(43)
2.3.1 电容传感器桥式接口电路	(43)
2.3.2 电容传感器谐振式接口电路	(44)
2.3.3 电容传感器调频式接口电路	(44)
2.3.4 电容传感器运算式接口电路	(45)
2.3.5 电容传感器二极管双 T 形交流电桥接口电路	(46)

2.3.6	电容传感器脉冲宽度调制电路	(46)
2.4	电涡流式传感器的接口电路	(48)
2.5	电位器式传感器的接口电路	(49)
2.6	差动变压器式位移传感器的接口电路	(50)
2.7	压阻式压力传感器的接口电路	(53)
2.8	压电晶体传感器的接口电路	(54)
2.9	光电二极管(光电池)的接口电路	(55)
2.9.1	光电二极管(光电池)的工作特性	(55)
2.9.2	光电二极管的接口电路	(56)
2.10	阻抗性传感器的集成接口电路	(57)
2.10.1	电容数字转换器(CDC) AD7747	(57)
2.10.2	电容传感器的集成接口电路 AD7745	(61)
2.10.3	线性位移差分变压器(LVDT)的集成接口电路	(65)
2.10.4	压阻传感器集成接口电路 MAX1450	(69)
2.10.5	数字化可编程信号调理芯片 PGA309	(78)
2.11	化学传感器的集成接口电路	(79)
2.11.1	电化学可编程模拟前端(AFE) LMP91000	(80)
2.11.2	pH值传感器(离子电极)集成接口电路 LMP91200	(81)
2.11.3	NDIR气体传感器集成接口 2AFE LMP91050	(82)
2.11.4	电化学传感器接口电路 LMP91002	(83)
2.11.5	电化学传感器接口电路 AFE5809	(84)
2.12	电压输出型传感器的集成接口电路	(86)
2.12.1	高集成、多通道、低功耗 16位传感器接口电路 LMP90080	(87)
2.12.2	高精度模数转换器(ADC) ADS1113/4/5	(89)
2.12.3	低功耗 16位传感器模拟前端电路 LMP90079/78/77	(90)
2.12.4	传感器模拟前端 LMP90100/99/98/97	(92)
2.13	图像传感器的集成接口电路	(94)
2.13.1	CCD/CMOS传感器模拟前端 VSP5620/21/22	(94)
2.13.2	电荷耦合元件(CCD)模拟前端 VSP8133	(96)
2.14	温度传感器的集成接口电路	(99)
2.14.1	高精度热电偶至数字输出转换器 MAX31856	(99)
2.14.2	热敏电阻 RTD 至数字输出转换器 MAX31865	(100)
2.15	超声传感器的集成接口电路	(112)
2.15.1	完全集成的超声波感测模拟前端 TDC1000	(112)
2.15.2	面向液位感测、浓度感测应用的单通道超声波感测模拟前端 TDC1011	(113)
第3章	智能传感器	(116)
3.1	集成 MEMS 传感器	(116)
3.1.1	单轴加速度传感器 ADXL193	(116)
3.1.2	双轴加速计 ADXL202/ADXL210	(119)

3.1.3	双轴加速度传感器 ADXL206	(125)
3.1.4	数字加速度计 ADXL312	(126)
3.1.5	3 轴加速计 ADXL343	(127)
3.1.6	低噪声、低漂移、低功耗 3 轴 MEMS 加速度计 ADXL356/ADXL357	(129)
3.1.7	低功耗、3 轴、 ± 200 g 数字输出 MEMS ADXL372	(130)
3.1.8	角速率传感器 ADXRS450	(132)
3.1.9	高性能角速率传感器 ADXRS646	(133)
3.1.10	角速率传感器 ADXRS800	(135)
3.1.11	侧翻检测层内陀螺仪 ADXRS910	(136)
3.1.12	角速度传感器 ADIS16120	(137)
3.1.13	惯性传感器 ADIS16448	(140)
3.1.14	ADXL203 型双轴加速度传感器	(162)
3.1.15	四自由度集成惯性测量传感器 ADIS16300	(165)
3.1.16	集成 3 轴角速度传感器 MAX21000	(168)
3.1.17	振动传感器 ADIS16000/ADIS16229	(178)
3.1.18	可编程数字陀螺仪 ADIS16266	(183)
3.1.19	集成三轴加速度计 ADXL377	(195)
3.1.20	集成惯性传感器 ADIS16445	(199)
3.1.21	集成惯性传感器 ADIS16375	(201)
3.2	集成温度传感器	(203)
3.2.1	集成温度传感器 TMP05	(203)
3.2.2	温度传感器 AD7416/AD7417/AD7418	(206)
3.2.3	集成温度传感器 MAX6632	(216)
3.2.4	集成温度传感器 ADT75	(219)
3.2.5	集成温度传感器 ADT7310	(221)
3.2.6	高精度数字温度传感器 ADT7320	(236)
3.3	集成温湿度传感器	(252)
3.3.1	16 位数字 I ² C 温度传感器 ADT7420	(252)
3.3.2	16 位 175°C 数字 SPI 温度传感器 ADT7312	(253)
3.3.3	$\pm 0.5^\circ\text{C}$ 精度的 16 位数字 SPI 温度传感器 ADT7311	(254)
3.3.4	数字相对湿度和温度传感器 Si7015	(255)
3.3.5	湿度和温度传感器 Si701x/2x	(256)
3.3.6	具有温度传感器的低功耗、高精度数字湿度传感器 HDC1010	(259)
3.3.7	具有双线制接口的 11 位至 14 位数字温度传感器 LM73-Q1	(259)
3.3.8	汽车类远程温度传感器监视器 TMP421/2/3-Q1	(261)
3.3.9	9 通道高精度温度传感器 TMP468	(263)
3.3.10	汽车用电阻可编程温度开关 TMP708-Q1	(265)
3.3.11	汽车用电阻可编程温度开关 TMP709-Q1	(267)
3.3.12	集成数字温度传感器 TMP75C-Q1	(268)

3.3.13	高精度双引脚温度传感器 LMT01-Q1	(269)
3.3.14	具有温度传感器的低功耗、高精度数字湿度传感器 HDC1080	(271)
3.4	集成光电传感器	(272)
3.4.1	光度测量前端 ADPD103	(272)
3.4.2	集成一个输出和 SPI 的光度测量前端 ADPD105/ADPD106/ADPD107	(273)
3.4.3	带环境光抑制功能的光度测量系统 ADPD142RG/ADPD142RI	(276)
3.4.4	集成环境光抑制功能和两个 LED 的光学模块 ADPD144RI	(277)
3.4.5	集成环境光抑制功能和三个 LED 的光学模块 ADPD174GGI	(278)
3.4.6	集成环境光抑制功能和三个 LED 的光学模块 ADPD175GGI	(279)
3.4.7	手势和近距光度传感器 ADUX1020	(280)
3.4.8	集成化的光电传感器 OPT101	(281)
3.4.9	采用密封封装的集成光电二极管和放大器 OPT301	(283)
3.4.10	环境光传感器 OPT3001	(284)
3.4.11	光数字传感器 OPT3002	(285)
3.4.12	超薄环境光传感器 OPT3006	(286)
3.4.13	可编程彩色光/频转换器 T/CS230	(288)
3.4.14	集成光强度传感器 TSL2560 和 TSL2561	(292)
3.4.15	集成色彩传感器 MAX44006/MAX44008	(296)
3.4.16	接近光及环境光感应器 Si1120	(310)
3.4.17	光电传感器 Si1141/2/3	(320)
3.4.18	用于烟雾检测应用的高灵敏度光传感器 MAX30105	(321)
3.4.19	环境光和红外接近检测传感器 MAX44000	(323)
3.4.20	低功耗环境光传感器 MAX44009	(324)
3.5	特定应用光学传感器	(325)
3.5.1	3D 飞行时间 (ToF) 传感器	(325)
3.5.2	集成指纹传感器 FCD4B14	(327)
3.6	集成传声器前置放大器 ADAU1301 的数字传声器	(331)
3.7	集成气压计模块 MS5534	(335)
3.8	集成液位传感器 LM1042	(341)
3.9	地球位置与时间传感——全球定位系统	(344)
3.9.1	GPS 的发展、原理与组成	(344)
3.9.2	GPS 接收机的内部功能	(347)
3.9.3	GPS 接收器件 MAX2742	(347)
3.9.4	GPS-41SMD 接收器模块	(350)
3.9.5	北斗卫星导航系统 MXTOS2-200	(353)
3.10	集成霍尔传感器	(355)
3.10.1	集成式 AMR 角度传感器和信号调理器 ADA4571	(355)
3.10.2	集成式 AMR 角度传感器和信号调理器 ADA4571-2	(356)
3.10.3	数字锁存霍尔效应传感器 DRV5013	(358)

3.10.4	超灵敏双通道正交霍尔效应双极开关 A1230	(360)
3.10.5	连续型比例式线性霍尔效应传感器 A1301 和 A1302	(362)
3.10.6	带开路漏极脉宽调制输出的高精度线性霍尔效应传感器 A1356	(364)
3.10.7	带三态输出微功率 3 V 线性霍尔效应传感器系列 A139x	(365)
3.10.8	单元件齿状检测速度传感器 ATS601	(367)
3.10.9	动态自行校准峰值侦测差分霍尔效应齿轮齿传感器 ATS616	(369)
3.10.10	动态自行校准差分霍尔效应齿轮齿传感器 ATS617	(370)
3.10.11	具有 TPOS 功能的可编程霍尔效应开关 ATS128	(372)
3.10.12	带持续校准的三线式真零速差分峰值侦测传感器 A1468	(373)
3.10.13	双线真零速高精度传感器 A1688	(375)
3.10.14	凸轮轴传感器 ATS601	(376)
3.10.15	双输出差分速度和方向传感器 ATS605	(378)
3.10.16	真零速齿轮齿传感器 ATS667	(379)
3.11	集成胎压监控传感器 MPXY8300	(381)
3.12	时间/速度传感器	(384)
3.12.1	集成模拟前端的时间数字转换器 MAX35101	(384)
3.12.2	带有 AFE、RTC 和闪存的低功耗时间数字转换器 MAX35103	(386)
3.13	LDC 电感数字转换器 LDC1000	(388)
第 4 章	智能传感器接口电路与混合信号微处理器	(391)
4.1	高精度模数转换器	(392)
4.1.1	16 位数据采集系统 MAX1358B	(393)
4.1.2	2、3 通道隔离式 Σ - Δ 型 ADE7912/ADE7913	(394)
4.1.3	14 位、500 MSPS 4 通道模数转换器 AD9694	(395)
4.1.4	16 位、1 MSPS、集成数据采集子系统 ADAQ7980/ADAQ7988	(397)
4.1.5	用于电源控制和保护应用的模拟前端 ADS131E04	(399)
4.1.6	16 位数据采集系统 MAX11359A	(400)
4.1.7	具微微安培输入的缓冲型 18 位 8 通道 ADC LTC2358-18	(402)
4.1.8	18 位、1 MSPS、8 通道差分输入 ADC LTC2335-18	(404)
4.1.9	低噪声、高速 24 位逐次逼近型寄存器 (SAR) ADC LTC2380-24	(405)
4.1.10	具可配置数字滤波器的 32 位过采样 ADC LTC2500-32	(406)
4.2	旋变数字转换器	(408)
4.2.1	12 位 R/D 转换器 AD2S1205	(408)
4.2.2	分辨率可变的 10 位至 16 位 R/D 转换器 AD2S1210	(409)
4.2.3	12 位 R/D 转换器 AD2S1200	(410)
4.2.4	分辨率可变的旋变数字转换器 AD2S83	(411)
4.2.5	14 位双通道自整角机/旋变数字转换器 AD2S44	(412)
4.2.6	旋变数字转换器 AD2S80A/AD2S81A/AD2S82A	(413)
4.2.7	14 位自整角机数字转换器 SDC1740	(414)
4.3	无源传感器集成接口电路	(415)

4.3.1	低成本、高精度传感器信号调理器 MAX1452	(415)
4.3.2	带有过压保护的高精度信号调理器 MAX1454	(417)
4.3.3	MAX1455 低成本、汽车传感器信号调理器	(418)
4.3.4	电容传感器的集成接口电路 AD7745	(420)
4.3.5	12 位阻抗转换器网络分析仪 AD5934	(424)
4.3.6	单电极电容数字转换器 AD7147A	(425)
4.3.7	双通道电容数字转换器 AD7156	(426)
4.3.8	12 位电容数字转换器 AD7152/AD7153	(427)
4.3.9	24 位电容数字转换器 AD7747	(428)
4.3.10	超低功耗双通道电容数字转换器 AD7150	(429)
4.3.11	适用于闭环磁通门传感器的信号调节 IC DRV401-Q1	(429)
4.3.12	LVDT 传感器信号调节器 PGA970	(431)
4.3.13	车用超声信号处理与换能器驱动 IC PGA460	(433)
4.3.14	可编程低功耗电化学模拟前端 LMP91000	(434)
4.4	混合信号微处理器	(436)
4.4.1	低功耗、低噪声、多路传感器信号处理器 MAX1464	(436)
4.4.2	6 电流通道和 1 电压通道电能计量 IC ADE7816	(437)
4.4.3	单相电能计量 IC ADE7116/7156/7166/7169/7566/7569	(439)
4.4.4	单相有功和视在功率计量 IC ADE7763	(442)
4.4.5	带有 10 位 ADC 的微控制器 MAXQ7670	(443)
4.4.6	基于 16 位 RISC 微控制器的超声测距系统 MAXQ7667	(445)
4.4.7	带有 12 位 ADC 的微控制器 MAXQ7670A	(447)
4.4.8	无 RTC 时间数字转换器 MAX35102	(449)
4.4.9	集成电源管理和 128 KB 闪存的超低功耗 ARM ADuCM3027/3029	(450)
4.4.10	集成电源管理的超低功耗 ARM ADuCM4050	(453)
4.5	无线片上系统	(456)
4.5.1	第二代 2.4 GHz SoC CC2530	(456)
4.5.2	Texas Instruments 公司的 CC2531	(459)
4.5.3	具有 USB 的 SimpleLink 蓝牙智能无线 MCU CC2540	(463)
4.5.4	Texas Instruments 公司的 CC2541-Q1	(466)
4.5.5	针对蓝牙智能应用的 SimpleLink 超低功耗无线 MCU CC2640	(469)
4.5.6	SimpleLink™ Bluetooth® 低功耗无线 MCU CC2640R2F	(473)
4.5.7	Nordic Semiconductor 公司的 nRF24LE1	(476)
4.5.8	微芯科技公司的 rPIC12F675	(481)
4.5.9	芯科实验室有限公司的 Si102x 和 Si103x	(484)
4.5.10	赛普拉斯半导体公司的 PSoC 4XX8_BLE	(487)
第 5 章	穿戴式装置中的人体信息传感模拟前端	(493)
5.1	生物电位测量模拟前端	(494)
5.1.1	生物电位测量模拟前端 ADS1294/6/8/4R/6R/8R	(494)

5.1.2	极低功耗单通道生物电位测量模拟前端 MAX30003	(496)
5.1.3	全集成单导联 ECG 模拟前端 AD8232	(498)
5.1.4	低功耗 5 电极心电图模拟前端 ADAS1000/-1/-2	(501)
5.1.5	低功耗 3 电极心电图模拟前端 ADAS1000-3/ADAS1000-4	(505)
5.2	血氧饱和度与心率测量模拟前端	(510)
5.2.1	脉搏血氧饱和度和心率测量模拟前端 MAX30101	(510)
5.2.2	用于健身的高灵敏度脉搏血氧饱和度和心率传感器 MAX30102	(512)
5.2.3	低成本极小体积的脉搏血氧饱和度和心率传感器 AFE4403	(513)
5.2.4	极小体积的心率与 SpO ₂ 测量模拟前端 AFE4404	(515)
5.2.5	具有 FIFO 的极小体积心率与 SpO ₂ 测量模拟前端 AFE4405	(517)
5.2.6	脉搏血氧饱和度测量模拟前端 AFE4490	(518)
5.3	体温传感器	(521)
5.3.1	体温传感器 MAX30205	(521)
5.3.2	红外线测温器 MLX90614	(522)
5.4	体重计和人体成分测量模拟前端 AFE4300	(523)

第 1 章

传统传感器

1.1 概述

传感器 (transducer/sensor) 是一种检测装置, 能感受到被测量的信息, 并能将感受到的信息按一定规律变换成为电信号或其他所需形式的信息输出, 以满足信息传输、处理、存储、显示、记录和控制等的要求。

传感器的特点包括: 微型化、数字化、智能化、多功能化、系统化、网络化。它是实现自动检测和自动控制的首要环节。传感器的存在和发展, 让物体有了触觉、味觉和嗅觉等感官, 让物体慢慢变得活了起来。通常根据其基本感知功能分为热敏元件、光敏元件、气敏元件、力敏元件、磁敏元件、湿敏元件、声敏元件、放射线敏感元件、色敏元件和味敏元件十大类。

1.2 电阻传感器

电阻传感器是将被测量 (如位移、形变、力、加速度、湿度、温度等) 这些物理量转换成电阻值的一种器件, 主要有电阻应变式传感器、压阻式传感器、热电阻传感器、热敏电阻传感器、气敏传感器、湿敏传感器等。电阻传感器成本低, 应用极为广泛。

1.2.1 电位器式位移或角位移传感器

电位器式传感器通常用于位移、液位、角度的测量。被测量通过一定的机械传动部件与电位器的旋转轴 (或滑动臂) 相连, 被测量变化时带动滑动臂移动, 使电位器中心至两个固定端的电阻发生差动变化。

通过分压电路或桥电路可将电位器电阻的变化转换为电压的变化输出, 再经 A/D 转换后, 可以准确测量被测物理量。

图 1-1 给出了电位器式位移或角位移传感器示意图。如果在某个位置 (位移或角位移) 使得电位器的分压比为 β , 滑动端至另一端的分压比则为 $(1-\beta)$ 。因

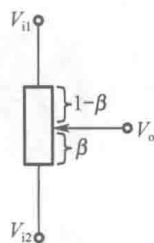


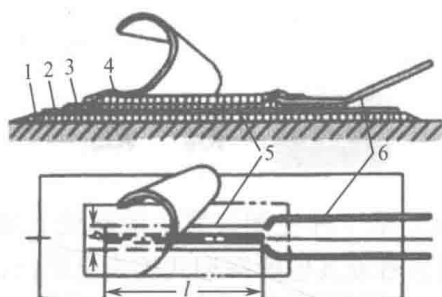
图 1-1 电位器式位移或角位移传感器

而，传感器的输出为

$$V_o = (V_{i1} - V_{i2})\beta + V_{i2}$$

1.2.2 电阻应变片（丝）

传感器中的电阻应变片具有金属的应变效应，即在外力作用下产生机械形变，从而使电阻值随之发生相应的变化。电阻应变片的结构如图 1-2 所示。电阻应变片主要有金属和半导体两类，金属应变片有金属丝式、箔式、薄膜式之分。半导体应变片具有灵敏度高（通常是丝式、箔式的几十倍）、横向效应小等优点。



注：1—粘合层；2—基底；3—粘合层；4—盖片；5—敏感栅；6—引线。

图 1-2 电阻应变片的结构

电阻应变式称重传感器原理：弹性体（弹性元件，敏感梁）在外力作用下产生弹性变形，使粘贴在它表面的电阻应变片（转换元件）也随之产生变形，电阻应变片变形后，它的阻值将发生变化（增大或减小），再经相应的测量电路把这一电阻变化转换为电信号（电压或电流），从而完成了将外力变换为电信号的过程。

1.2.3 压阻式传感器

压阻式传感器（见图 1-3）是根据半导体材料的压阻效应在半导体材料的基片上扩散电阻而制成的器件。其基片可直接作为测量传感元件，扩散电阻在基片内接成电桥形式（见图 1-4 和图 1-5）。当基片受到外力作用而产生形变时，各电阻值将发生变化，电桥就会产生相应的不平衡输出。

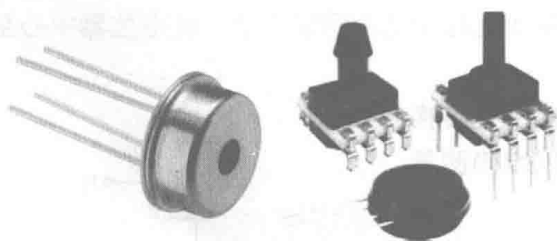


图 1-3 几种压阻式传感器

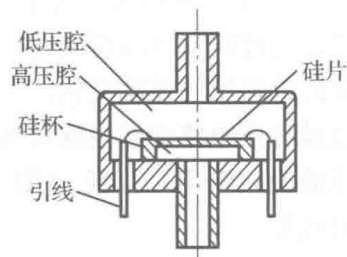


图 1-4 压阻式传感器的结构

用作压阻式传感器的基片（或称膜片）（见图 1-5）主要为硅片和锗片，硅片为敏感材

料的硅压阻式传感器越来越受到人们的重视，尤其是以测量压力和速度的固态压阻式传感器应用最为普遍。

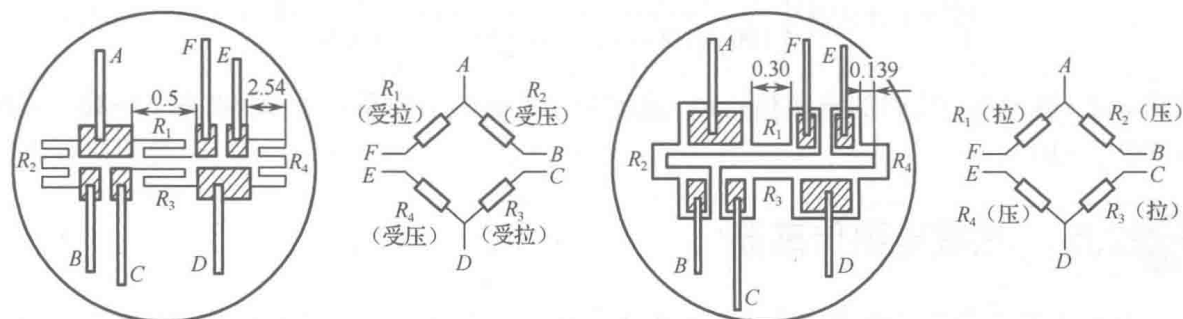


图 1-5 两种微型压力传感器的基片

1.2.4 热电阻传感器

热电阻传感器主要利用电阻值随温度变化而变化这一特性来测量温度及与温度有关的参数（见表 1-1），适用于对温度检测精度要求比较高的场合。较为普遍的热电阻材料有铂、铜、镍等，它们具有电阻温度系数大、线性好、性能稳定、使用温度范围宽、加工容易等特点，用于测量 $-200\sim+500^{\circ}\text{C}$ 范围内的温度。

表 1-1 热电阻传感器的种类和测温范围

种 类	测温范围	特 性
铜电阻传感器	$-50\sim+150^{\circ}\text{C}$	精度中等，价格低
铂电阻传感器	$-200\sim+600^{\circ}\text{C}$	精度高，价格高
热敏电阻传感器	$-200\sim+0^{\circ}\text{C}$ $-50\sim+30^{\circ}\text{C}$ $0\sim+700^{\circ}\text{C}$	灵敏度高，精度低，价格最低

热电阻传感器是一种用于测量温度的传统传感器。测量电阻的依据是欧姆定律，因而需要恒流源或恒压源作为驱动信号才能进行测量。

热电阻传感器分类如下。

(1) NTC 热电阻传感器：该类传感器为负温度系数传感器，即传感器阻值随温度的升高而减小。

(2) PTC 热电阻传感器：该类传感器为正温度系数传感器，即传感器阻值随温度的升高而增大。

热电阻材料一般有两类：贵金属和非贵金属。用于测温的主要有铂热电阻（贵金属）和镍、铜热电阻（非贵金属）。它们都具有制成热电阻的必要特性：稳定性好、精度高、电阻率较高、温度系数大和易于制作等。金属铂电阻的性能十分稳定，在 $0\sim+630^{\circ}\text{C}$ 之间，铂电阻与温度呈如下关系：

$$\begin{cases} R_t = R_0(1 + AT + BT'^2) \\ T = T' + 0.045 \left(\frac{T'}{100} \right) \left(\frac{T'}{100 - 1} \right) \times \left(\frac{T'}{419.58} - 1 \right) \left(\frac{T'}{460.74} - 1 \right) \end{cases} \quad (1-1)$$

式中, R_t = 温度为 $t^\circ\text{C}$ 时的电阻值; R_0 = 温度为 0°C 时的电阻值; $A = 0.397\ 497\ 3 \times 10^{-2}$; $B = -0.589\ 73 \times 10^{-6}$ 。

1.2.5 热敏电阻传感器

与热电阻不同的是热敏电阻主要采用半导体材料制成, 具有灵敏度高、价格低廉的优点; 缺点是一致性和稳定性差。

按温度特性不同, 半导体热敏电阻 (见图 1-6) 可分为两类, 随温度上升电阻增加的为正温度系数热敏电阻, 反之为负温度系数热敏电阻。

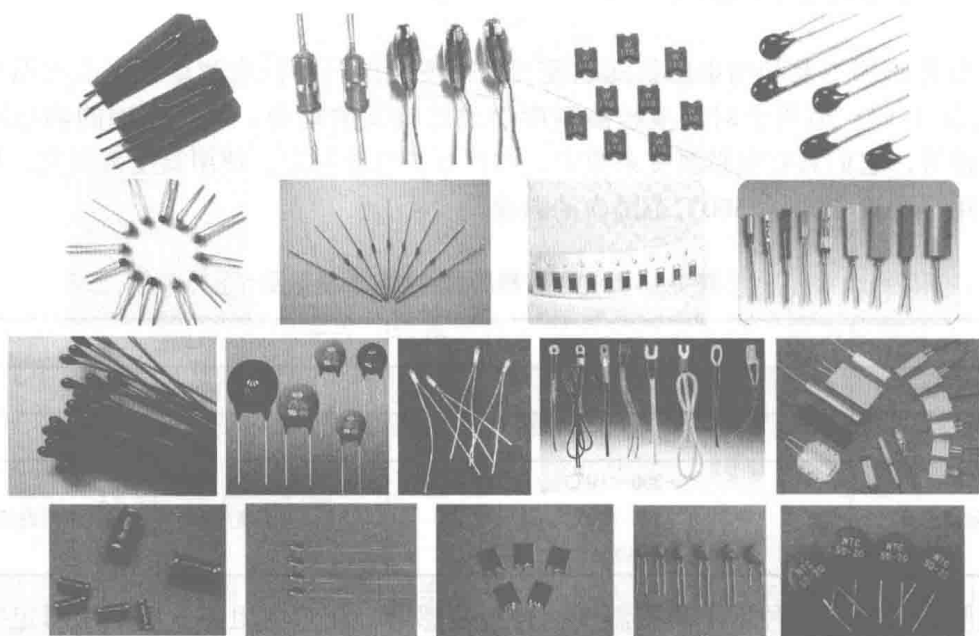


图 1-6 半导体热敏电阻

(1) 正温度系数热敏电阻的工作原理。

此种热敏电阻以钛酸钡 (BaTiO_3) 为基本材料, 再掺入适量的稀土元素, 利用陶瓷工艺高温烧结而成。纯钛酸钡是一种绝缘材料, 但掺入适量的稀土元素如镧 (La) 和铌 (Nb) 等以后, 变成了半导体材料, 被称为半导体化钛酸钡。它是一种多晶体材料, 晶粒之间存在晶粒界面, 对于导电电子而言, 晶粒界面相当于一个位垒。当温度低时, 由于半导体化钛酸钡内电场的作用, 导电电子可以很容易地越过位垒, 所以电阻值较小; 当温度升高到居里点温度 (临界温度, 此元件的“温度控制点”, 一般钛酸钡的居里点温度为 120°C) 时, 内电场受到破坏, 不能帮助导电电子越过位垒, 所以表现为电阻值急剧增加。这种元件在未达居里点前电阻随温度变化非常缓慢, 具有恒温、调温和自动控温的功能, 只发热, 不发红, 无明火, 不易燃烧, 电压交、直流 $3 \sim 440\ \text{V}$ 均可, 使用寿命长, 非常适用于电动机

等电器装置的过热探测。

(2) 负温度系数热敏电阻的工作原理。

负温度系数热敏电阻以氧化锰、氧化钴、氧化镍、氧化铜和氧化铝等金属氧化物为主要原料,采用陶瓷工艺制成。这些金属氧化物材料都具有半导体性质,类似于锗、硅晶体材料,体内的载流子(电子和空穴)数目少,电阻值较高;温度升高,导体内载流子数目增加,电阻值降低。负温度系数热敏电阻类型很多,使用时区分低温(-60~300℃)、中温(300~600℃)、高温(>600℃)三种,有灵敏度高、稳定性好、响应快、寿命长、价格低等优点,广泛应用于需要定点测温的温度自动控制电路,如冰箱、空调、温室等的温控系统。

热敏电阻与简单的放大电路结合,就可检测千分之一摄氏度的温度变化,所以和电子仪表组成测温计,能完成高精度的温度测量。普通用途热敏电阻的工作温度为-55~+315℃,特殊低温热敏电阻的工作温度低于-55℃,可达-273℃。

1.3 电容传感器

电容传感器是将被测量(如尺寸、压力等)的变化转换成电容量变化的一种传感器。它的敏感部分就是具有可变参数的电容器。最常用的是由两个平行电极组成、极间以空气为介质的电容器。忽略边缘效应,平板电容器的电容为

$$C = \epsilon A / \delta \quad (1-2)$$

式中, ϵ 为极间介质的介电常数; A 为两电极互相覆盖的有效面积; δ 为两电极之间的距离。

δ 、 A 、 ϵ 三个参数中任何一个变化都将引起电容量变化,并可用于测量。因此,电容传感器可分为极距变化型、面积变化型、介质变化型三类。极距变化型电容传感器一般用于测量微小的线位移或由力、压力、振动等引起的极距变化。面积变化型电容传感器一般用于测量角位移或较大的线位移。介质变化型电容传感器常用于物位测量和各种介质的温度、密度、湿度的测量。20世纪70年代末以来,随着集成电路技术的发展,出现了与微型测量仪表封装在一起的电容传感器。这种新型传感器能使分布电容的影响大为减小,使其固有的缺点得到克服。电容传感器是一种用途极广,很有发展潜力的传感器。

1.4 光电传感器

光电传感器(photoelectric transducer)是基于光电效应的传感器,在受到可见光照射后即产生光电效应,将光信号转换成电信号输出。它除了能测量光强之外,还能利用光线的透射、遮挡、反射、干涉等测量多种物理量,如尺寸、位移、速度、温度等,因而是一种应用极广泛的重要敏感器件。光电测量时不与被测对象直接接触,光束的质量又近似为零,在测量中不存在摩擦,对被测对象几乎不施加压力。因此在许多应用场合,光电传感器比其他传感器有明显的优越性。其缺点是光学器件和电子器件价格较贵,并且对测量的环境条件要求较高。

光电传感器有光电管、光电倍增管、光敏电阻、光电二极管和光电三极管、光电池、

半导体色敏传感器、光电闸流晶体管、热释电传感器、光电耦合器件等光电元件。另外，光电传感器还可分为模拟式光电传感器和脉冲式光电传感器两类。

1.4.1 光电效应

光电效应是光照射到某些物质上，使该物质的导电特性发生变化的一种物理现象，可分为外光电效应、内光电效应和光生伏特效应三类。外光电效应是指，在光线作用下物体内的电子逸出物体表面向外发射的物理现象。光子是以量子化“粒子”的形式对可见光波段内电磁波的描述。光子具有能量 $h\nu$ ， h 为普朗克常数， ν 为光频。光子通量则相应于光强。外光电效应由爱因斯坦光电效应方程描述：

$$E_k = h\nu - W$$

式中， E_k 表示电子获得的能量； h 表示普朗克常数； ν 表示入射光的频率； W 表示电子逸出功。

当光子能量等于或大于逸出功时才能产生外光电效应。因此每一种物体都有一个对应于光电效应的光频阈值，称为红限频率。对于红限频率以上的入射光，外生光电流与光强成正比。内光电效应又分为光电导效应和光生伏特效应两类。光电导效应是指，半导体材料在光照下禁带中的电子受到能量不低于禁带宽度的光子的激发而跃迁到导带，从而增加电导率的现象。能量对应于禁带宽度的光子的波长称为光电导效应的临界波长。光生伏特效应是指光线作用能使半导体材料产生一定方向电动势的现象。光生伏特效应又可分为势垒效应（结光电效应）和侧向光电效应。势垒效应的机理是在金属和半导体的接触区（或在 PN 结）中，电子受光子的激发脱离势垒（或禁带）的束缚而产生电子空穴对，在阻挡层内电场的作用下电子移向 N 区外侧，空穴移向 P 区外侧，形成光生电动势。侧向光电效应是当光电器件敏感面受光照不均匀时，受光激发而产生的电子空穴对的浓度也不均匀，电子向未被照射部分扩散，引起光照部分带正电、无光照部分带负电的一种现象。

1. 外光电效应

当金属表面在特定的光辐照作用下，金属会吸收光子并发射电子，发射出来的电子叫作光电子。光的波长小于某一临界值（相等于光的频率高于某一临界值）时方能发射电子，其临界值即极限频率和极限波长，临界值取决于金属材料。发射电子的能量取决于光的波长而非光的强度，这一点无法用光的波动性解释。还有一点与光的波动性相矛盾，即光电效应的瞬时性，按波动性理论，如果入射光较弱，照射的时间要长一些，金属中的电子才能积累足够的能量，飞出金属表面。可事实是，只要光的频率高于金属的极限频率，光的亮度无论强弱，电子的产生几乎都是瞬时的，不超过 10^{-9} 秒。正确的解释是光必定是由与波长有关的严格规定的能量单位（光子或光量子）所组成的。这种解释为爱因斯坦所提出。光电效应由德国物理学家赫兹于 1887 年发现，对发展量子理论及波粒二象性起到了根本性的作用。

在以爱因斯坦方式量化分析光电效应时使用以下方程：

光子能量 = 移出一个电子所需的能量 + 被发射的电子的动能

代数形式：

$$hf = \varphi + E_m \quad (1-3)$$

$$\varphi = hf_0 \quad (1-4)$$

$$E_m = mv^2/2 \quad (1-5)$$