



全国高等院校仪器仪表及自动化类“十二五”规划教材

# 传感器原理 与工程应用

◎ 戴蓉 刘波峰 主编



每章均以“引例”开篇，并配以相应的实物照片

正文设置“特别提示”“例题”“应用示例”“引例分析”

结合工程应用，提高读者的实践应用能力和创新思维能力



电子工业出版社  
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

全国高等院校仪器仪表及自动化类“十二五”规划教材

# 传感器原理与工程应用

戴 蓉	刘波峰	主 编
	赵 燕	副主编
陈国良	陈 霞	参 编
	谭保华	主 审
	谭跃刚	

电子工业出版社  
Publishing House of Electronics Industry  
北京·BEIJING

## 内 容 简 介

本书系统地阐述传感器的工作原理、基本结构、特性参数、转换电路、设计和选用知识以及传感器在工程量检测中的应用技术。全书共9章,除第9章外,每一章都分为A、B两部分,两部分在内容组织上循序渐进、从基础到应用逐步展开,启发学生对知识的探究热情和创新思路,方便不同层次对象使用。

本书各章主要内容:第1章介绍传感器的基本概念和传感器的基本特性;第2~7章详细介绍电阻应变式、电容式、电感式、压电式、光电式、热电式传感器,以及这些传感器在力、力矩、压力、位移、加速度、温度等常见工程量感测中的应用技术;第8章介绍集成化智能传感器的基本知识以及几种典型集成化智能传感器;第9章介绍传感器的静态及动特性态标定知识。

本书取材新颖、内容丰富、广深兼顾。每章都提供了较多的应用实例,并附有课后习题,以帮助读者巩固所学知识。

本书可作为高等院校测控技术与仪器、自动化、电子信息工程、机电一体化等专业的教材,也可作为其他相近专业高年级本科生和硕士研究生的学习参考书,还可作为从事仪器仪表及测控技术行业的工程技术人员参考书。

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

传感器原理与工程应用/戴蓉,刘波峰主编. —北京:电子工业出版社,2013.1  
(全国高等院校仪器仪表及自动化类“十二五”规划教材)

ISBN 978-7-121-18946-3

I. ①传… II. ①戴… ②刘… III. ①传感器—高等学校—教材 IV. ①TP212

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第271085号

策划编辑:郭穗娟(gousj@phei.com.cn)

责任编辑:刘 凡

印 刷:涿州市京南印刷厂

装 订:涿州市京南印刷厂

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:787×1092 1/16 印张:20 字数:462千字

印 次:2013年1月第1次印刷

印 数:3000册 定价:39.80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。

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

服务热线:(010)88258888。

《全国高等院校仪器仪表及自动化类“十二五”规划教材》  
编委会名单

主任：许贤泽

副主任：谭跃刚

	刘波峰	郝晓剑	杨述斌	付 华
委 员：	赵 燕	黄安贻	郭斯羽	武洪涛
	靳 鸿	陶晓杰	杨书仪	李志华
	秦 斌	王 欣	李德俊	孙士平
	冯先成	白福忠	张国强	王后能
	张雪飞	谭保华	郑红霞	

# 前 言

传感器作为信息获取的工具，在当今信息时代的重要性越来越为人们所认识。传感器技术是现代信息技术的支柱，是自动测控系统工作的重要保障。随着科学技术的发展，现代工业生产自动化程度的提高，以及人类对智能、舒适生活环境的追求，各领域对传感器的依赖性会越来越大。因此，传感器与传感器技术的研究、发展和应用已成为国内外重点发展的高新技术领域，传感器技术也成为新技术革命的关键因素。掌握和应用传感器原理与技术，是相关工程技术人员必须具备的基本技能与素养。因此在高等院校的仪器科学与技术、机电工程、电信工程、自动化等学科专业都开设了传感器类课程。

本书在编写过程中，根据传感器理论及其技术的特点和专业基础课程的性质，遵循由浅入深、循序渐进的认知规律，打破国内同类教材的编写风格，将每章内容分为 A、B 两部分（除第 9 章外）。A 部分按工作原理分类讲述传感器的工作原理、基本结构、特性参数、转换电路等基本知识，B 部分结合传感器的工程应用对象讨论传感器应用中的共性技术、不同传感器的应用特点及系统构成原理，培养读者的实践应用能力和创新思维能力，为其日后从事测控技术及相关领域的工作奠定坚实的基础。同时，注重在内容上充分反映国内外传感器的最新发展和新型器件的应用。

本书一改传统的平铺直叙的写作方式，每章均用“引例”开篇，并配以相应的实物照片，图文并茂。在正文中用“特别提示”、“例题”、“应用示例”、“引例分析”等栏目对关键问题、重点内容、易混淆的概念进行提示和强化，并配合一定量的习题帮助读者更好地掌握每章的内容。此外，穿插于每章正文中的“阅读资料”栏目提供了传感器的发展历史、发展趋势、新产品等简介，使读者得以拓展知识面和掌握传感器的发展全貌。本书适合研究型、应用型等不同层次的高等教育要求，对工程技术人员也具有使用和参考价值。

全书共 9 章，第 1、7 章由武汉理工大学赵燕编写，第 2、9 章由武汉理工大学戴蓉编写，第 3 章由武汉理工大学陈霞编写，第 4、8 章由湖南大学刘波峰编写，第 5 章由武汉理工大学陈国良编写，第 6 章由湖北工业大学谭保华编写。全书由戴蓉和赵燕统稿。

本书承蒙武汉理工大学博士生导师谭跃刚教授主审，谭教授提出了很多宝贵意见和建议，在此表示诚挚的谢意！

本书在编写过程中参考并引用了同行和传感器生产企业的一些文献资料，在此对所引用的文献资料的作者表示衷心感谢！

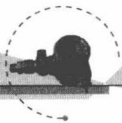
传感器种类多，技术发展快，应用领域广。编者的学识水平有限，书中难免有疏漏、失误之处，恳请读者给予批评指正。

编 者

2012 年 5 月

# 目 录

<b>第 1 章 初识传感器</b> .....	1
A 部分 传感器的基本概念 .....	2
1.1 传感器在自动测量中的作用 .....	3
1.2 传感器的定义与组成 .....	4
1.3 传感器的分类 .....	5
1.4 传感器的发展趋势 .....	7
B 部分 传感器的基本特性 .....	10
1.5 传感器的静态特性 .....	10
1.6 传感器的动态特性 .....	14
1.7 传感器的技术性能指标及选用原则 .....	26
1.8 改善传感器性能的技术途径 .....	28
思考与练习 .....	30
<b>第 2 章 电阻应变式传感器·力及力矩测量</b> .....	31
A 部分 电阻应变式传感器 .....	32
2.1 电阻应变片的工作原理 .....	32
2.2 电阻应变片的结构、种类和材料 .....	33
2.3 电阻应变片的主要参数 .....	37
2.4 电阻应变片的选用 .....	40
2.5 转换电路 .....	42
2.6 电阻应变片的温度误差及其补偿 .....	46
2.7 电阻应变仪 .....	48
B 部分 力及力矩测量传感器 .....	49
2.8 测力基本知识及测力传感器 .....	49
2.9 力矩测量基本知识及力矩传感器 .....	59
思考与练习 .....	62
<b>第 3 章 电容式传感器·压力测量</b> .....	64
A 部分 电容式传感器 .....	65
3.1 电容式传感器的工作原理和特性 .....	65
3.2 电容式传感器的特点及设计要点 .....	72
3.3 电容式传感器的等效电路 .....	75
3.4 电容式传感器的测量电路 .....	76
3.5 容栅式传感器 .....	81
B 部分 压力测量 .....	82
3.6 压力的概念及压力表的分类 .....	82
3.7 电气式压力计 .....	84
3.8 压力仪表的使用 .....	97
思考与练习 .....	98



<b>第4章 电感式传感器·线位移及尺寸测量</b> .....	102
A部分 电感式传感器 .....	103
4.1 自感式传感器.....	103
4.2 差动变压器式传感器.....	114
4.3 涡流传感器.....	122
4.4 感应同步器.....	127
B部分 线位移及尺寸测量传感器 .....	132
4.5 线位移及尺寸测量基本知识 .....	132
4.6 电感式位移传感器 .....	133
4.7 其他线位移及尺寸测量传感器 .....	135
思考与练习 .....	143
<b>第5章 压电式传感器·加速度测量</b> .....	145
A部分 压电式传感器 .....	146
5.1 压电效应与压电方程.....	146
5.2 压电材料及其主要特性.....	149
5.3 压电元件的常用结构形式.....	155
5.4 压电式传感器的等效电路与测量电路.....	157
B部分 加速度测量 .....	164
5.5 加速度测量基本知识 .....	164
5.6 压电式加速度传感器设计 .....	166
5.7 其他加速度传感器 .....	175
思考与练习 .....	178
<b>第6章 光电式传感器·转速测量及接近开关</b> .....	180
A部分 光电式传感器 .....	181
6.1 光电效应.....	181
6.2 常用光电转换器件.....	183
6.3 固态图像传感器.....	193
6.4 光栅传感器.....	197
6.5 光学编码器.....	202
B部分 转速测量及接近开关 .....	206
6.6 转速测量基本知识及转速传感器 .....	206
6.7 接近开关的基本知识及其传感器 .....	211
思考与练习 .....	218
<b>第7章 温度传感器</b> .....	220
A部分 接触式测温传感器 .....	221
7.1 概述.....	221
7.2 热电偶.....	223
7.3 热电阻.....	236
7.4 热敏电阻.....	239
7.5 新型温度传感器.....	241
B部分 辐射测温方法及辐射温度计 .....	248
7.6 辐射测温的基本定律 .....	248
7.7 辐射式温度计 .....	250
思考与练习 .....	257

<b>第 8 章 集成化智能传感器</b> .....	258
A 部分 集成化智能传感器概述 .....	259
8.1 集成化智能传感器的结构、功能与特点 .....	259
8.2 智能传感器的实现 .....	262
B 部分 典型集成化智能传感器 .....	265
8.3 集成化智能温度传感器 .....	265
8.4 集成化智能湿度传感器 .....	275
8.5 集成压力传感器 .....	280
8.6 其他典型集成化智能传感器 .....	285
思考与练习 .....	292
<b>第 9 章 传感器的标定</b> .....	293
9.1 传感器静态特性的标定 .....	294
9.2 传感器动态特性的标定 .....	295
9.3 常用的标定设备 .....	297
9.4 传感器标定举例 .....	304
思考与练习 .....	307
<b>参考文献</b> .....	308



# 第 1 章

## 初识传感器

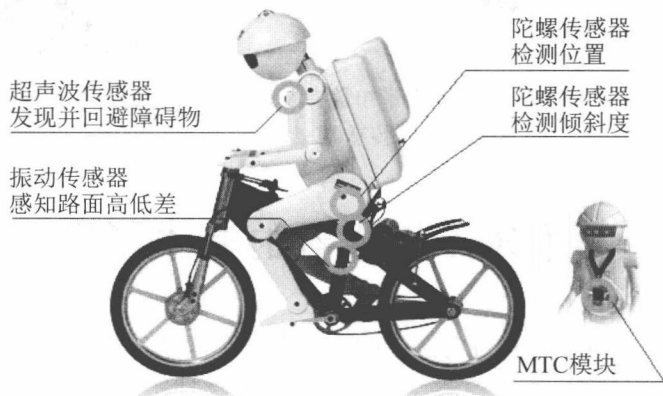
### 【教学要求】

通过本章学习，掌握传感器的作用和构成，掌握传感器的基本特性、技术指标及其选用原则等知识，了解传感器的发展动向及应用领域。

### 【引例】

什么是传感器？最原始最天然的传感器之一就是生物体的感官。在人体这个目前世界上最完美的“自动控制系统”之中，其“五官传感器”——眼、耳、鼻、舌和皮肤分别具有视、听、嗅、味、触觉的“感知”功能。人的大脑神经中枢通过“五官传感器”的神经末梢接受外界的信息，经过大脑的思维活动（信息处理），做出相应的动作或行为。人类要想获得更为丰富的信息，需要对研究对象、生产过程及产品研发中的各种物理现象和物理量进行观察与测量，这时依靠人的五官感知外界信息的能力就显得非常有限了，例如人眼就不是“千里目”。因此，各种类型的传感器就应运而生。

例图 1-1 所示是一款会骑自行车的小顽童机器人。别看个子小，它可是拥有许多独门绝活儿：可以超慢速直行、自动躲避障碍物、向后倒退、停而不倒……是什么技术让它能做到这些事情呢？原来在它身上安装了可保证在停止时不摔倒的陀螺传感器、能发现并回避障碍物的超声波传感器和感知路面高低差的振动传感器等。



例图 1-1 骑自行车的小顽童机器人

小顽童机器人通过陀螺传感器测量水平方向的角速度和左右（摔倒）方向的角速度，计算出当前位置和倾斜度，就可在停止时利用放置于胸部的惯性轮的惯



性力从而避免摔倒。陀螺传感器能敏锐地捕捉细微姿势变化，因此就算行走在独木桥上，它也能通过安装在眼睛位置的摄像头从图像中识别轨道的细微差别，从而能慢慢地直行。

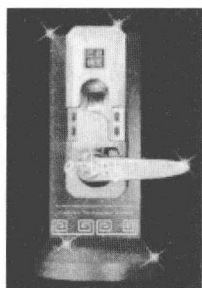
当碰到凹凸不平的路面时，小顽童机器人的振动传感器将通过车身的振动来检测路面情况，帮助自行车慢速通过，这一技术也被用于实现笔记本电脑的硬盘保护功能。

当发现前方有障碍物时，安装在小顽童机器人胸部的第二副眼睛——超声波传感器能够发现并回避障碍物：右眼发出 40kHz 的超声波，左眼则捕捉这一反射波，通过其时间差来计算与障碍物之间的距离。该技术被广泛应用于汽车的倒车雷达等领域。

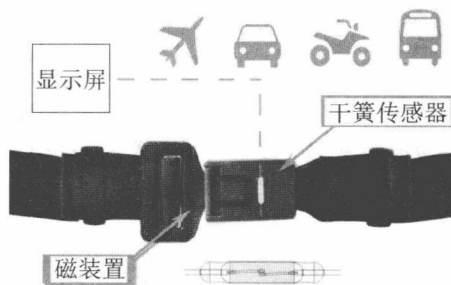
装在小顽童机器人胸前的 MTC 模块是利用双向无线通信技术的认证系统。携带内置 MTC 模块的无线钥匙，就可以自动验证个人身份，那么只要靠近小顽童机器人，“门”就会自动打开。在不久的将来，这种技术将成为安全管理标准模式。

此外，小顽童机器人还装备有导航系统，可以按照预先设置好的路线行驶。这是利用陀螺传感器精确测定前进方向，并通过通信模块与控制计算机进行数据交换来实现的。

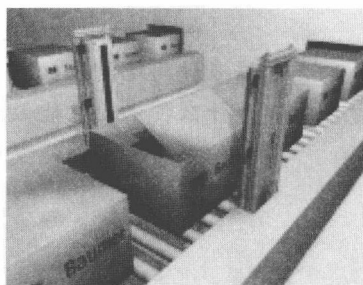
除了小顽童机器人身上的几种传感器的应用，例图 1-2~例图 1-4 是我们在日常生活与生产实际中常见的几种传感器在不同设备中的应用。本书将向读者展示各种传感器在不同领域的的神奇应用。



例图 1-2 指纹锁  
(指纹传感器)



例图 1-3 安全带扣紧装置  
(干簧管——磁传感器)



例图 1-4 安全光幕视觉系统  
(光电传感器)

## A 部分 传感器的基本概念

为了对被测对象所包含的信息进行定性的了解和定量的掌握，必须采取一系列检测技术措施来完成，这些措施的理论称为检测原理，其技术的物理实现就是检测装置或检测系统。一个完整的检测系统或检测装置通常是由传感器、测量电路和显示记录装置等几部分组成，分别完成信息获取、转换、显示和处理等功能。而传感器是自动检测系统的第一级装置，也是其核心部件。

## 1.1 传感器在自动测量中的作用

将人的行为动作控制与计算机自动控制过程作一比较，计算机相当于人的大脑，而传感器则相当于人的五官部分（“电五官”），如图 1.1 所示。因此，传感器是实现自动检测和自动控制的首要环节和关键器件。

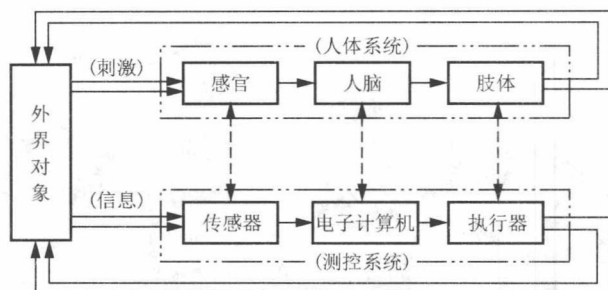


图 1.1 人体与自动化测控系统的对应关系

图 1.2 展示的是大型桥梁的安全状况实时监测系统。通过光纤光栅传感器可以将温度、称重、斜拉索的索力、应变、线型、位移等多种反应桥梁安全状态的信号检测出来，通过数据层、信息层处理分析，可得到有巨大商业价值的应用层面。没有传感器，就无法获取数据和信息层，也就无法掌握桥梁安全状态。

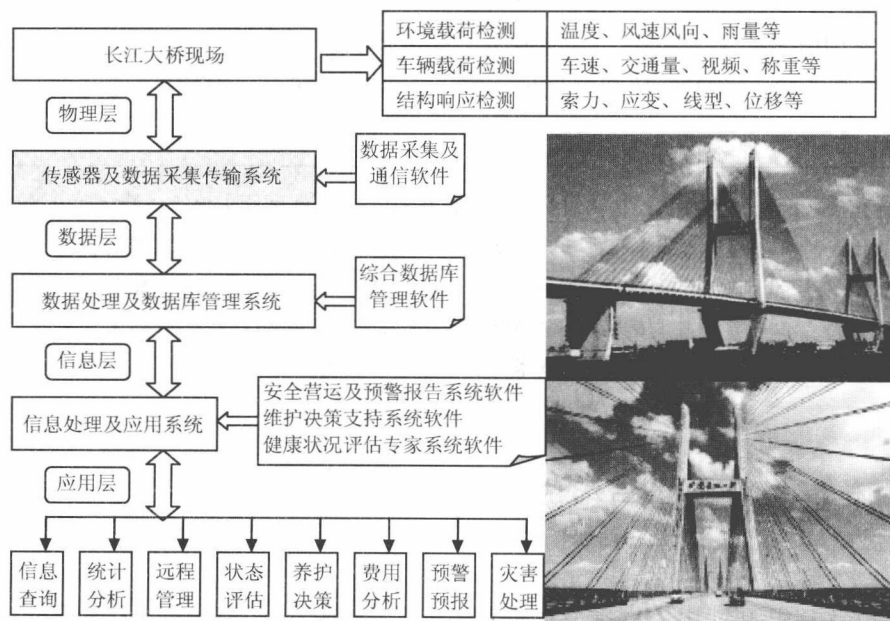
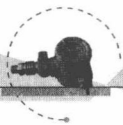


图 1.2 长江大桥安全检测系统

传感器除了广泛应用在航空航天、军事国防、海洋开发以及工业自动化等尖端科学与工程领域，同时也向着与人们生活密切相关的领域渗透。一辆中级轿车上装有 50 多个传感器，高级豪华轿车则需要 100 多个，这些传感器主要分布在发动机控制系统、底盘控制系统和车身控制系统和导航系统中，包括压力传感器、位置和转速传感器、加速度传感器、



距离传感器、陀螺仪和车速传感器、方向盘转角传感器等。其中加速度传感器、振动传感器、速度传感器是汽车运动测量中的三种主要传感器。图 1.3 所示是汽车中应用的主要传感器示意。

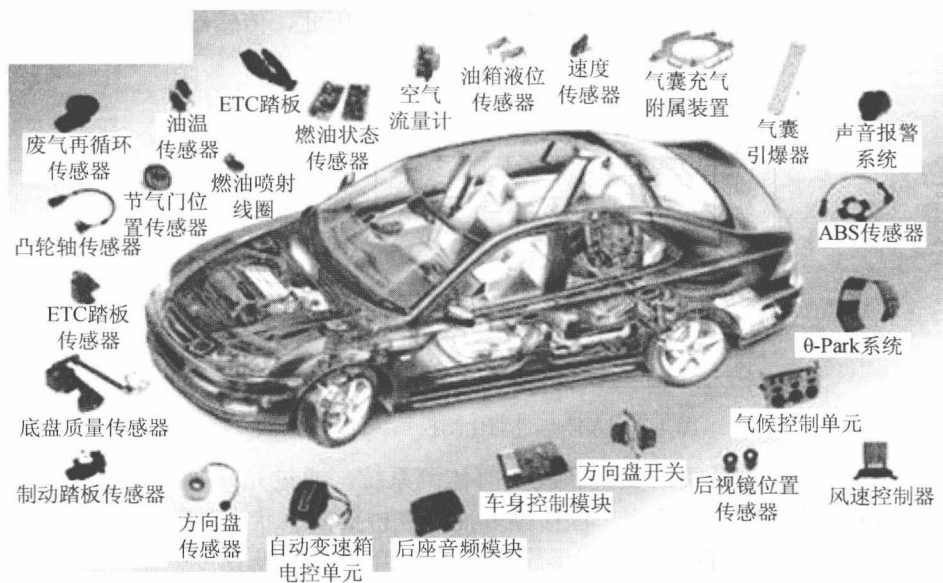


图 1.3 汽车中应用的主要传感器

此外，家用电器、生物工程、医疗卫生、环境保护、安全防范、网络家居等领域，传感器的应用也非常广泛，新型的传感器层出不穷，方便和丰富着我们的生活。

### 【阅读资料】

作为一种代替人的感官的工具，传感器的历史比近代科学的出现还要古老。古埃及人在七千多年以前，就使用一种悬挂式的双盘秤作为测重的工具来称麦子，一直沿用到现在。在中国，秤的出现也很早。春秋中晚期，楚国已经制造了小型的衡器—木衡·铜环权，用来称黄金货币。利用液体膨胀特性的温度测量方法在 16 世纪就已经出现。以电学的基本原理为基础的传感器是在近代电磁学发展的基础上产生的，这种类型的传感器在电子技术、计算机技术和自动控制技术发展的推动下得到了飞速发展。

## 1.2 传感器的定义与组成

### 1.2.1 传感器的定义

根据中华人民共和国国家标准 GB7665—1987，传感器（Transducer/Sensor）的定义是“能感受规定的被测量并按照一定的规律转换成可用输出信号的器件或装置”。其定义包含以下几个方面的意思。

- (1) 传感器是测量装置，能完成检测任务；
- (2) 它的输入量是某一被测量，可能是物理量，也可能是化学量、生物量等；
- (3) 它的输出量是某种物理量，这种量要便于传输、转换、处理、显示等，这种量可以是气、光、电量，但主要是电量（原因在下面论述）；

(4) 输入与输出有对应关系，且应有一定的精确度。

由于测控系统中的信号种类极其繁多，为了对各种类型的信号进行检测，传感器就必须尽量将被测信号转变为简单和易于处理与传输的二次信号。这样的要求只有电信号能够满足。因为电信号能较容易地利用电子仪器和计算机进行放大、反馈、滤波、微分、存储、远距离操作等处理。因此传感器作为一种功能模块又可狭义地定义为“将外界的输入信号变换为电信号的一类元件”。

### 【特别提示】

传感器的定义和内涵是随着科技的发展而演绎的。目前，信息领域处在由电信息时代向光信息时代迈进的进程中，由于光信号比电信号具有更快的传输速度和更大的传输容量及更好的抗干扰性，因此，在光信息时代，传感器的定义也许会发展为将外界的输入信号变换为光信号的一类元件。

### 1.2.2 传感器的组成

传感器一般由敏感元件、转换元件、信号转换电路三部分组成，如图 1.4 所示。

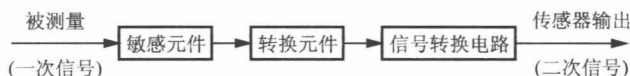


图 1.4 传感器的组成框图

(1) 敏感元件：直接感受被测量，并输出与被测量成确定关系的某一物理量的元件。

(2) 转换元件：以敏感元件的输出为输入，把输入转换成电路参数（如电阻  $R$ ，电感  $L$ ，电容  $C$ ）或电流、电压等电量。

(3) 信号转换电路：将转换元件输出的电路参数接入信号调理电路并将其转换成电量输出。

实际上，有些传感器很简单，仅由一个敏感元件（兼作转换元件）组成，它感受被测量时直接输出电量，如热电偶。

有些传感器由敏感元件和转换元件组成，没有信号转换电路。

有些传感器，转换元件不止一个，要经过若干次转换。

包含有信号转换电路的传感器一般称为变换器。因此，在不同的技术领域，传感器又可分为检测器、变换器、换能器等。

## 1.3 传感器的分类

传感器一般是根据物理学、化学、生物学等特性、规律和效应设计而成的。由某一原理设计的传感器可以同时测量多种非电量，而有时一种非电量又可用几种不同的传感器测量，因此传感器的分类方法有很多，一般可按如下几种方法分类。

### 1) 按输入物理量分类

按输入物理量的性质进行分类，如速度传感器、温度传感器、位移传感器等，见表 1-1。这种分类方法是按输入物理量命名的。其优点是比较明确地表达了传感器的用途，便于使用者选用。但是这种分类方法是将原理互不相同的传感器归为一类，很难找出每种传感器在转换机理上有什么共性和差异。

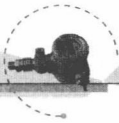


表 1-1 按输入物理量来分类

被测量类别	被 测 量
热工量	温度、热量、比热；压力、压差、真空度；流量、流速、风速
机械量	位移（线位移、角位移），尺寸、形状；力、力矩、应力；重量、质量；转速、线速度；振动幅度、频率、加速度、噪声
物性和成分量	气体化学成分、液体化学成分；酸碱度（pH 值）、盐度、浓度、黏度；密度
状态量	颜色、透明度、磨损量、材料内部裂缝或缺陷、气体泄漏、表面质量

### 2) 按工作原理分类

这种分类方法是将物理、生物和化学等学科的原理、规律和效应作为分类依据，如压电式、热电式、电阻式、光电式、电感式等，见表 1-2。

这种分类方法的优点是对于传感器的工作原理比较清楚，类别少，利于对传感器进行深入分析和研究。

表 1-2 按传感器的原理来分类

序 号	工 作 原 理	序 号	工 作 原 理	序 号	工 作 原 理
1	电阻式	5	磁电式	9	红外式
2	电感式	6	热电式	10	超声式
3	电容式	7	光电式	11	微波式
4	压电式	8	光导纤维式	12	谐振式

### 3) 按物理现象分类

这种分类方法将传感器分为结构型传感器和物性型传感器。所谓结构型传感器是以结构（如形状、尺寸等）为基础，利用某些物理规律来感受（敏感）被测量，并将其转换为电信号从而实现测量的。如电容式压力传感器，必须有按规定参数设计制成的电容元件，在被测压力的作用下电容极板间隙发生变化，从而导致电容值变化，由此实现对压力的测量。早期的传感器都是结构性传感器，一般具有较大的体积、复杂的结构，必须依靠精密设计制作的结构以保证其工作性能。随着新材料、新工艺的发展，结构性传感器在精度、稳定性方面有了很大提高，目前仍在许多传感器应用领域占有很大比例。

物性型传感器是指利用某些功能材料本身所具有的物理特性及效应感应（敏感）被测量，并转换成可用电信号的传感器。如由石英晶体材料制成的压电式压力传感器，就是利用石英晶体材料本身具有的正压电效应而实现对压力测量的。物性型传感器是伴随着半导体材料、陶瓷材料、高分子聚合材料等新材料的发展迅速发展起来的，它具有结构简单、体积小、重量轻、反应灵敏、易于集成化、微型化等优点。

### 4) 按能量的关系分类

根据能量的观点分类，可将传感器分为有源传感器（也称为能量转换型）和无源传感器（也称为能量控制型）。有源传感器直接将非电能量转换为电能量，转换时无须外电源供电，如压电式传感器、热电偶式传感器、磁电感应式传感器。至于无源传感器或称为能量控制型传感器，它本身不是一个换能器，被测非电量仅对传感器中能量起控制或调节作用。所以，它们必须有辅助电源，这类传感器有电阻式、电容式、电感式等。

### 5) 按输出的信号的性质分类

按传感器的输出量为模拟量或数字量,分为模拟式传感器和数字式传感器。数字式传感器便于与计算机连接,且抗干扰能力强,是目前传感器发展的趋势之一。

## 1.4 传感器的发展趋势

传感器未来的发展,突出表现在以下几个方面:一是开发新原理、新材料、新工艺的新型传感器;二是实现传感器的微型化、集成化、多功能化、高精度和智能化;三是多种传感器的集成融合,以及传感器与其他学科的交叉融合,实现无线网络化。

### 1.4.1 新原理、新材料、新工艺的开发利用

传感器的工作原理是基于各种物理、化学或生物效应和定律的,人们由此进一步探索具有新效应的敏感功能材料,并以此研制出具有新原理的新型传感器,这是发展高性能、多功能、低成本和小型化传感器的重要途径。

新型传感器的发展离不开新工艺的采用。目前种类繁多、应用广泛的集成传感器就是利用集成电路工艺将半导体敏感元件、测量处理电路集成在一个芯片上制成的性价比高、使用方便的小型化传感器。而利用集成电路技术工艺和微机械加工方法,可将基于各种物理效应的机电敏感元器件和处理电路集成在一个芯片上,从而制成微机电系统(Micro-Electro-Mechanical Systems, MEMS)传感器。这种传感器敏感结构的尺寸可达到微米、亚微米级,并可以批量生产,具有体积小、质量轻、响应快、灵敏度高、成本低等优势。国外已形成 MEMS 产业,如 MEMS 加速度计、压力传感器已广泛应用于汽车工业。

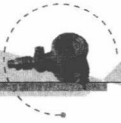
### 1.4.2 微型化、智能化、多功能传感器

#### 1. 微型化(Micro)

微型化传感器的特征之一就是体积小。集成电路技术、微机械加工技术等新技术新工艺的发展为传感器的集成和微型化提供了可能。采用微机械加工技术制作的敏感元件的尺寸一般为微米级,利用各向异性腐蚀、牺牲层技术和 LIGA 工艺(即光刻、电铸和注塑),可以制造出层与层之间有很大差别的三维微结构,包括可活动的膜片、悬臂梁、桥以及凹槽、孔隙、锥体等。采用敏感结构和检测电路的单芯片集成技术,能够避免多芯片组装时引脚引线引入的寄生效应,改善了器件的性能,提高了抗干扰能力。微电子和微机械加工技术制造出来的微型传感器由于采用了系统级封装方式,与传统传感器相比,具有体积小、质量轻、成本低、功耗小、可靠性高、适于批量化生产、易于集成和实现智能化的特点。

例如,典型的加速度传感器包括了质量块、弹性元件、转换元件、测量电路等部分。图 1.5 所示的压电式加速度传感器体积大、功耗高、稳定性较差,而采用 MEMS 技术制造出来的微加速度传感器尺寸仅为  $3\text{mm}\times 3\text{mm}\times 1\text{mm}$ ,如图 1.6 所示。在如此微小的芯片上不仅有传感器,而且包括了信号处理电路。这样的单轴、双轴、三轴加速度计被广泛用于电子消费产品,如智能手机、游戏机,以及汽车安全气囊、ABS 制动系统和车轮动态稳定控制系统。

图 1.7 所示是电容式微加速度传感器的硅微机械结构显微照片及工作原理示意。它实际上是一种差动变极距型电容式传感器。利用硅微机械加工技术在硅片上制作出质量块、弹性元件、电容极板等传感器基本构件。为了增大输出,制作了多组电极群,形成若干个变极距型差动电容器并联的形式。根据结构原理图可知,中间是电容器的动极板,它与质量块连接并一起固定在弹性元件上。上、下两块为固定极板。当  $x$  方向有加速度时(单轴),由于质量块惯性的作用使动极板相对上、下定极板产生相对位移,引起极板间距的变化,因而电容器



的电容量改变，通过集成在芯片中的放大处理电路，最终输出与加速度成线性关系的电信号。

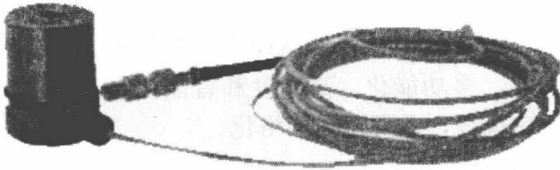


图 1.5 压电式加速度传感器

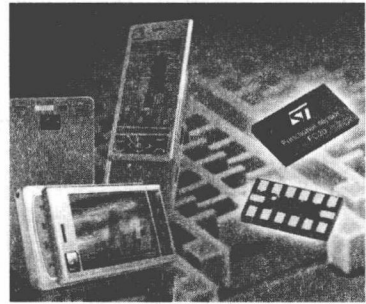


图 1.6 微加速度传感器

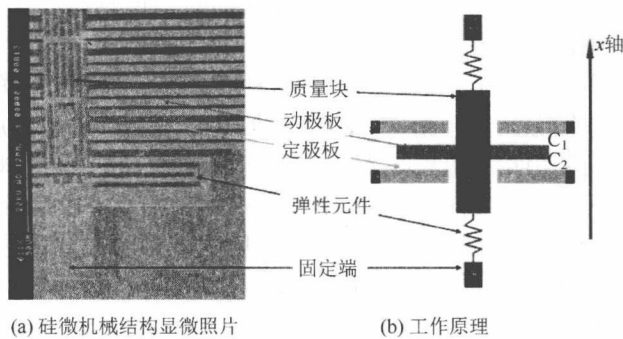


图 1.7 电容式微加速度传感器的硅微机械结构显微照片及工作原理示意

## 2. 智能化 (Smart)

智能化传感器 (Smart Sensor) 是 20 世纪 80 年代末出现的另外一种涉及多种学科的新型传感器系统。此类传感器系统一经问世即刻受到科研界的普遍重视，尤其在探测器应用领域，如分布式实时探测、网络探测和多信号探测方面颇受欢迎，产生的影响较大。

智能化传感器是指那些装有微处理器的，不但能够执行信息处理和信息存储，而且还能够进行逻辑思考和结论判断的传感器系统。这一类传感器就像微型机与传感器的综合体一样，其主要组成部分包括主传感器、辅助传感器及微型机的硬件设备。如智能化压力传感器的主传感器为压力传感器，用来探测压力参数；辅助传感器为温度传感器和环境压力传感器，用来测定温度和环境压力以实现测量结果的校正。而其硬件系统除了能够对传感器的弱输出信号进行放大、处理和存储外，还执行与计算机之间的通信联络。

通常情况下，一个通用的检测仪器只能用来探测一种物理量，其中的信号调节是由那些与主探测部件相连接着的模拟电路来完成的。但智能化传感器却能够实现所有的功能，而且精度更高、价格更便宜、处理质量也更好。与传统的传感器相比，智能化传感器具有以下优点：

(1) 智能化传感器不但能够对信息进行处理、分析和调节，能够对所测的数值及其误差进行补偿，而且还能够进行逻辑思考和结论判断，能够借助于一览表对非线性信号进行线性化处理，借助于软件滤波器滤波数字信号。此外，还能够利用软件实现非线性补偿或其他更复杂的环境补偿，以改进测量精度。

(2) 智能化传感器具有自诊断和自校准功能，可以用来检测工作环境。当工作环境临近



极限条件时，它将发出告警信号，并根据分析器的输入信号给出相关的诊断信息。当智能化传感器由于某些内部故障而不能正常工作时，它能够借助其内部检测链路找出异常现象或确定发生故障的部件。

(3) 智能化传感器能够完成多传感器多参数混合测量，从而进一步拓宽了探测与应用领域，而微处理器的介入使得智能化传感器能够更加方便地对多种信号进行实时处理。此外，智能化传感器灵活的配置功能既能够使相同类型的传感器实现最佳的工作性能，也能够使它们适合于各不相同的工作环境。

(4) 智能化传感器既能够很方便地实时处理所探测到的大量数据，也可以根据需要将它们存储起来。存储大量信息的目的主要是以备事后查询，这一类信息包括设备的历史信息以及有关探测分析结果的索引等。

(5) 智能化传感器备有一个数字式通信接口，通过此接口可以直接与其所属计算机进行通信联络和交换信息。此外，智能化传感器的信息管理程序也非常简单方便，例如，可以对探测系统进行远距离控制或者在锁定方式下工作，也可以将所测的数据发送给远程用户等。

目前，智能化传感器技术正处于蓬勃发展时期。但智能化传感器多用于压力、力、振动冲击加速度、流量、温湿度的测量。在今后的发展中，智能化传感器无疑将会进一步扩展到化学、电磁、光学和核物理等研究领域。可以预见，新兴的智能化传感器将在各个领域发挥越来越大的作用。

### 3. 多功能 (Multi-function)

通常情况下一个传感器只能用来探测一种物理量，但在许多应用领域中，为了能够完整地准确地反映客观事物和环境，往往需要同时测量大量的物理量。由若干种敏感元件组成的多功能传感器则是一种体积小而多种功能兼备的新一代探测系统，它可以借助于敏感元件中不同的物理结构或化学物质及其各不相同的表征方式，用单独一个传感器系统来同时实现多种传感器的功能。随着传感器技术和微机技术的飞速发展，目前已经可以生产出来将若干种敏感元件综合安装在同一种材料或单独一块芯片上的一体化多功能传感器。

概括来讲，多功能传感器系统主要的执行规则和结构模式如下。

(1) 多功能传感器系统由若干种功能各不相同的敏感元件组成，可以用来同时测量多种参数。例如，可以将一个温度探测器和一个湿度探测器配置在一起（即将热敏元件和湿敏元件分别配置在同一个传感器载体上）制造成一种新的传感器，那么，这种新的传感器就能够同时测量温度和湿度。

(2) 将若干种不同的敏感元件精巧地制作在单独的一块硅片中，从而构成一种高度综合化和小型化的多功能传感器。由于这些敏感元件是被综合安装在同一块硅片中的，它们无论何时都工作在同一种条件下，所以很容易对系统误差进行补偿和校正。

(3) 借助于同一个传感器的不同效应可以获得不同的信息。以线圈为例，它所表现出来的电容和电感是各不相同的。

(4) 在不同的激励条件下，同一个敏感元件将表现出不同的特征。而在电压、电流或温度等激励条件均不相同的情况下，由若干种敏感元件组成的一个多功能传感器的特征将会是千差万别的。

#### 1.4.3 无线传感器网络

无线传感器网络的主要组成部分就是一个一个的传感器节点。这些节点的体积都非常小巧，可以感受温度的高低、湿度的变化、压力的增减、噪声的升降。每一个节点都是一个可以进