



“十三五”普通高等教育本科规划教材

传感器技术及应用教程（第二版）

马林联 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



“十三五”普通高等教育本科规划教材

传感器技术及 应用教程（第二版）

编著 马林联
主审 张开智



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书为“十三五”普通高等教育本科规划教材。本书以被测物理量为研究对象,采用“模块+项目”的编排方式,每个模块由若干个项目组成,每个项目以一个具体的项目为主线,介绍常见物理量的检测方法、传感器的基本原理、常用传感器的参数、选用原则和应用电路,并介绍了每个电路的调试步骤与方法。本书内容包括认识传感器、温度传感器的应用、压力传感器的应用、流量传感器的应用、物位传感器的应用、位移传感器的应用、光电传感器的应用、气体与湿度传感器的应用、速度传感器的应用。

本书内容丰富、体系新颖、实用性突出、涵盖面广、语言精练、概念清晰、结构严谨、重点明确;书中适当插入了一些传感器的实物照片,增强了直观性和真实性,每个模块末均附有思考与练习便于教学使用。

本书可作为应用型本科、高职高专院校机电一体化技术、电气自动化技术、应用电子技术、楼宇智能化技术、自动化及仪表技术等专业的教材和教学参考书,也适用于成人教育和职业培训的同类专业,还可供相关领域的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

传感器技术及应用教程/马林联编著. —2版. —北京:中国电力出版社, 2016. 8

“十三五”普通高等教育本科规划教材

ISBN 978-7-5123-8874-1

I. ①传… II. ①马… 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 (2016) 第 024665 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 http: //www. cepp. sgcc. com. cn)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2013 年 8 月第一版

2016 年 8 月第二版 2016 年 8 月北京第二次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 15.5 印张 374 千字

定价 32.00 元



敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

前言

本书是为满足教育部对普通高等教育教学改革的要求而编写的，全书采用项目化的编写模式，内容体现了岗位需求，既是理论教材，也是一本实用性较强的实践教材。

传感器技术是一门融合众多学科的技术，但对于一般的技术人员来说，重点在于传感器的应用，即如何通过检测电路将被测物理量转换成电压、电流或频率信号，供后续电路处理。传感器及其检测电路则为传感器应用中的核心技术，应用传感器则要重点解决传感器的选型和调试技术，本书正是为解决这些问题而编写的。

在本书的编写过程中，编者与多家企业进行了紧密合作，并紧扣教育部课程改革的要求，体现了以下特点：

(1) 在总体内容的安排上，采用“模块+项目”的模式，将同一被测物理量放在一个模块中，每一个项目介绍一种不同传感器的应用。

(2) 在每个项目中，以传感器应用为主线，结合传感器的原理、技术参数及选用原则，并通过具体的电路来加深对以上内容的理解。

(3) 在每个项目的内容组织上，既保留传统的理论知识，又突出了传感器的应用电路。

(4) 对于每个教学项目，从传感器的参数入手，设计出具体应用电路，分析了电路的工作原理，并对电路的制作与调试做了阐述；通过各项目学习，可以提高动手能力及分析问题、解决问题的能力，培养职业能力，实现“教、学、做”一体化。

本书由马林联老师编著。在本书的编写过程中，得到了传感器生产企业技术人员的大力支持，同时还参考了许多教材、文献及网络资料，在此深表感谢。

本书由贵州理工学院张开智主审，并提出了许多宝贵的意见和建议，在此表示衷心的感谢。

由于编者水平有限，加之时间仓促，不足之处在所难免，敬请读者批评指正。希望本书能对从事和学习传感器的广大读者有所帮助，欢迎您将建议和意见通过 E-mail 与编者交流 (E-mail: mll.2006@163.com)，以便及时进行修改。

编者

2016年6月

目 录

前言

模块一 认识传感器	1
项目一 传感器的基本知识	1
思考与练习	13
模块二 温度传感器的应用	14
项目一 热电阻温度传感器在温度测量中的应用	19
项目二 热敏电阻温度传感器在温度测量中的应用	24
项目三 热电偶温度传感器在温度测量中的应用	28
思考与练习	41
模块三 压力传感器的应用	43
项目一 电阻应变式压力传感器在数显电子秤中的应用	47
项目二 压电式压力传感器的应用	53
项目三 变隙式差动电感压力传感器在压力测量中的应用	57
思考与练习	70
模块四 流量传感器的应用	71
项目一 差压式流量传感器在流量测量中的应用	77
项目二 电磁流量传感器的应用	80
项目三 超声波流量传感器的应用	86
思考与练习	95
模块五 物位传感器的应用	97
项目一 电容式物位传感器的应用	102
项目二 微波物位传感器的应用	108
项目三 超声波物位传感器的应用	113
思考与练习	123
模块六 位移传感器的应用	124
项目一 接近式位移传感器在 MPS 系统中的应用	129
项目二 电位器式位移传感器的应用	139
项目三 光栅位移传感器在数控机床中的应用	144
思考与练习	158
模块七 光电传感器的应用	159
项目一 光敏电阻传感器在路灯自动亮灭电路中的应用	169
项目二 光敏二极管传感器在路灯控制器中的应用	172
项目三 热释电红外光传感器在公共照明中的应用	176

思考与练习·····	187
模块八 气体与湿度传感器的应用 ·····	188
项目一 气体传感器在有害气体检测中的应用·····	196
项目二 电阻型湿度传感器在简易湿度显示仪中的应用·····	200
思考与练习·····	209
模块九 速度传感器的应用 ·····	210
项目一 霍尔开关传感器在数字转速表中的应用·····	216
项目二 对射式光电传感器在转速表中的应用·····	220
项目三 磁电传感器在转速测量表中的应用·····	225
思考与练习·····	238
参考文献 ·····	239

模块一 认识传感器

◎ 技术要点

能根据误差选择合适精度的测量仪表。

◎ 知识要点

了解什么是传感器，掌握传感器的作用和基本构成。

了解传感器的分类、主要特性和发展趋势。

熟悉测量误差的基本概念和相关计算。

◎ 模块学习目标

本模块主要学习传感器的概念、测量及误差等知识。通过本模块的学习，应明白传感器在现代测控系统中的地位、作用，知道传感器的定义，了解其发展趋势；掌握与测量有关的名词、测量的分类、误差的表示形式及根据测量精度要求来选择仪表。

在本模块的学习前，读者应复习电路基本理论、电子技术相关的知识，通过学习能制作简单的电路，以锻炼自己的动手和解决问题的能力。

项目一 传感器的基本知识

技术要点

理解传感器的静态特性指标。

掌握传感器的定义及组成。

知识要点

传感器的定义、组成。

传感器的静态特性指标。

1. 传感器的定义与作用

什么是传感器？传感器是指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。表 1-1 中列出了部分传感器的输入量、输出量及其转换原理。从表 1-1 可以看出，传感器就是利用物理效应、化学效应、生物效应，把被测的物理量、化学量、生物量等非电量转换成电量的器件或装置，如图 1-1 所示。

表 1-1 传感器的输入量、输出量及其转换原理

输入量				转换原理	输出量
物理量	机械量	几何学量	长度、位移、应变、厚度、角度、角位移	物理定律或物理效应	电量 (电压或电流)
		运动学量	速度、角速度、加速度、角加速度、振动、频率、时间		
		力学量	力、力矩、应力、质量、荷重		
	流体量		压力、真空度、流速、流量、液位、黏度		
	温度		温度、热量、比热容		
	湿度		湿度、露点、水分		
	电量		电流、电压、功率、电场、电荷、电阻、电感、电容、电磁波		
	磁场		磁通、磁场强度、磁感应强度		
	光		光度、照度、色、紫外线、红外光、可见光、光位移		
	放射线		X、 α 、 β 、 γ 射线		
化学量			气体、液体、固体分析、pH、浓度	化学效应	
生物量			酶、微生物、免疫抗原、抗体	生物效应	

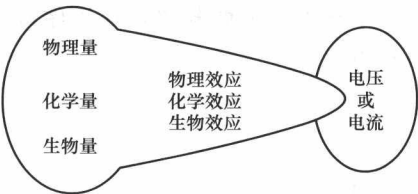


图 1-1 传感器将物理量转换为电学量

人对外界的感受有触觉、视觉、听觉、嗅觉和味觉。在科学技术领域，对自然界的各种物质信息都需要通过传感器进行采集。如图 1-2 所示，人们把计算机比作人的大脑，把传感器比作人的五种感觉器官，执行器比作人的四肢，尽管传感器与人的感觉器官相比还有许多不完善的地方，但在诸如高温、高湿、深井、高空等环境及高精度、高可靠性、远距离、超细微等方面是人的感官所不能代替的。因此，传感器的作用可包括信息的收集、信息数据的交换及控制信息的采集三个方面。

2. 传感器的应用领域

传感器是任何一个自动控制系统必不可少的环节，如图 1-3 所示。如今，传感器的应用领域已涉及科研、各类制造业、农业、汽车、智能建筑、家用电器、安全防范、机器人、人体医学、环境保护、航空航天、遥感技术、军事等各个方面，人们已经离不开各种各样的传感器了。

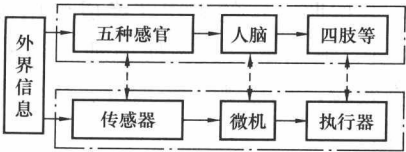


图 1-2 人机对应关系

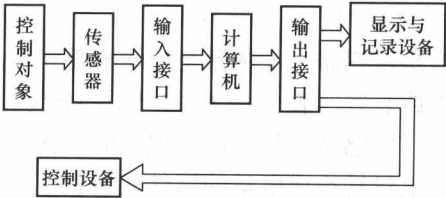


图 1-3 微机化检测与控制系统的基本组成

(1) 在工业生产过程的测量与控制方面的应用。在工业生产过程中，必须对温度、压力、流量、液位和气体成分等参数进行检测，从而实现对工作状态的监控，诊断生产设备的

各种情况,使生产系统处于最佳状态,从而保证产品质量,提高效益。目前传感器与微机、通信技术等的结合渗透,使工业监测自动化更具有准确、高效等优点。如果没有传感器,则现代工业生产程度将会大大降低。

(2) 传感器在汽车电控系统中的应用。随着人们生活水平的提高,汽车已逐渐走进千家万户。汽车的安全舒适、低污染、高燃率越来越受到社会重视而传感器在汽车中相当于感官和触角。只有它才能准确地采集汽车工作状态的信息,提高自动化程度。汽车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。普通汽车上大约装有 10~20 个传感器,而高级豪华车有的使用传感器多达 300 个。因此,传感器作为汽车电控系统的关键部件,将直接影响到汽车技术性能的发挥。

(3) 在现代医学领域的应用。社会的飞速发展,需要人们快速、准确地获取相关信息。医学传感器作为拾取生命体征信息的五官,它的作用日益显著,并得到广泛应用。例如,在图像处理、临床化学检验、生命体征参数的监护监测、呼吸、神经、心血管疾病的诊断与治疗等方面,使用传感器十分普及。传感器在现代医学仪器设备中已无所不在。

(4) 在环境监测方面的应用。近年来,环境污染问题日益严重。人们迫切希望拥有一种能对污染物进行连续、快速、在线监测的仪器,传感器满足了人们的要求。目前,已有相当一部分生物传感器应用于环境监测中。如大气环境监测,二氧化硫是酸雨雾形成的主要原因,传统的检测方法很复杂,现在将亚细胞类脂类固定在醋酸纤维膜上,和氧电极制成安培型生物传感器,可对酸雨酸雾样品溶液进行检测,大大简化了检测方法。

(5) 在军事方面的应用。传感器技术在军用电子系统的运用促进了武器、作战指挥、控制、监视和通信方面的智能化。传感器在远方战场监视系统、防空系统、雷达系统、导弹系统等方面,都有广泛的应用,是提高军事战斗力的重要因素。

(6) 在家用电器方面的应用。20 世纪 80 年代以来,随着以微电子为中心的技术革命的兴起,家用电器正向自动化、智能化、节能、无环境污染的方向发展。自动化和智能化的中心就是研制由微型计算机和各种传感器组成的控制系统,如一台空调器采用微型计算机控制配合传感器技术,可以实现压缩机的启动、停机、风扇摇头、风门调节、换气等,从而对温度、湿度和空气浊度进行控制。随着人们对家用电器方便、舒适、安全、节能要求的提高,传感器将越来越得到显著应用。

(7) 在学科研究方面的应用。科学技术的不断发展,产生了许多新的学科领域,无论从宏观的宇宙,还是到微观的粒子世界,许多未知的现象和规律要获取大量人类感官无法获得的信息,没有相应的传感器是不可能的。

(8) 在智能建筑领域中的应用。智能建筑是未来建筑的一种必然趋势,它涵盖智能自动化、信息化、生态化等多方面的内容,具有微型集成化、高精度与数字化和智能化特征的智能传感器将在智能建筑中占有重要的地位。

3. 传感器的组成和分类

(1) 传感器的组成。从功能上讲,传感器通常由敏感元件、转换元件及转换电路组成,如图 1-4 所示。

敏感元件是指传感器中能直接感受(或响应)被



图 1-4 传感器的组成

测量的部分。在完成非电量到电量的变换时,并非所有的非电量都能利用现有手段直接转换成电量,往往是先变换为另一种易于变成电量的非电量,然后再转换成电量。如传感器中各类型的弹性元件常被称为弹性敏感元件。

转换元件是指能将感受到的非电量直接转换成电量的器件或元件。如光电池将光的变化量转换为电动势,应变片将应变转换为电阻量等。

转换电路是指将无源型传感器输出的电参数量转换成电量。常用的转换电路有电桥电路、脉冲调宽电路、谐振电路等,它们将电阻、电容、电感等电参量转换成电压、电流或频率。

实际上,有些传感器的敏感元件可以直接把被测非电量转换成电量输出,如压电晶体、光电池、热电偶等,通常称它们为有源型传感器。

辅助电源为无源传感器的转换电路提供电能。

(2) 传感器的分类。传感器几种常用的分类方法:

1) 按输入量(被测对象)分类。输入量即被测对象,按此方法分类,传感器可分为物理量传感器、化学量传感器和生物量传感器三大类。例如,物理量传感器又可分为温度传感器、压力传感器、位移传感器等。这种分类方法给使用者提供了方便。

2) 按转换原理分类。从传感器的转换原理来说,通常分为结构型、物性型和复合型三大类。

① 结构型传感器是利用机械构件(如金属膜片等)在动力场或电磁场的作用下产生变形或位移,将外界被测参数转换成相应的电阻、电感、电容等物理量,它是利用物理学运动定律或电磁定律实现转换的。

② 物性型传感器是利用材料的固态物理特性及其各种物理、化学效应(即物质定律,如胡克定律、欧姆定律等)实现非电量的转换。它是以半导体、电介质、铁电体等作为敏感材料的固态器件,例如,电阻式、电感式、电容式、压电式、光电式、热敏、气敏、湿敏、磁敏等。

③ 复合型传感器是由结构型传感器和物性型传感器组合而成的,兼有两者的特征。

这种分类方法清楚地指明了传感器的原理,便于学习和研究。

3) 按输出信号的形式分类。按输出信号的形式,传感器可分为开关式、模拟式和数字式。

4) 按输入和输出的特性分类。按输入和输出特性,传感器可分为线性和非线性两类。

5) 按能量转换的方式分类。按转换元件的能量转换方式,传感器可分为有源型和无源型两类。有源型也称能量转换型或发电型,它把非电量直接变成电压量、电流量、电荷量等,如磁电式、压电式、光电池、热电偶等。无源型也称能量控制型或参数型,它把非电量变成电阻、电容、电感等量。

按上述后三种分类方法进行分类便于选择测量电路。

4. 传感器的静态特性

静态特性表示传感器在被测各量值处于稳定状态时的输入与输出的关系。它主要包括灵敏度、分辨力(或分辨率)、测量范围和量程及误差特性。

(1) 灵敏度。灵敏度是指稳态时传感器输出量 y 和输入量 x 之比,或输出量 y 的增量 Δy 和相应输入量 x 的增量 Δx 之比。

$$k = \frac{y}{x} = \frac{\Delta y}{\Delta x} \quad (1-1)$$

线性传感器的灵敏度 k 为常数；非线性传感器的灵敏度 k 是随输入量变化的量。

(2) 分辨力。传感器在规定的测量范围内能够检测出的被测量的最小变化量称为分辨力。它往往受噪声的限制，所以噪声电平的大小是决定传感器分辨力的关键因素。

实际中，分辨力可用传感器的输出值表示：模拟式传感器以最小刻度的一半所代表的输入量表示；数字式传感器则以末位显示一个字所代表的输入量表示。注意不要与分辨率混淆。分辨力是与被测量有相同量纲的绝对值，而分辨率则是分辨力与量程的比值。

(3) 测量范围和量程。在允许误差范围内，传感器能够测量的下限值 ($y_{\min}$) 到上限值 ($y_{\max}$) 之间的范围称为测量范围，表示为 $y_{\min} \sim y_{\max}$ ；上限值与下限值的差称为量程，表示为 $y_{F.S} = y_{\max} - y_{\min}$ 。如某温度计的测量范围是 $20 \sim 100^{\circ}\text{C}$ ，量程则为 80°C 。

(4) 误差特性。传感器的误差特性包括线性度、迟滞、重复性、零漂和温漂等。

1) 线性度。线性度即非线性误差，是传感器的校准曲线与理论拟合直线之间的最大偏差 ($\Delta L_{\max}$) 与满量程值 ($y_{F.S}$) 的百分比，即

$$\gamma_L = \pm \frac{\Delta L_{\max}}{y_{F.S}} \times 100\% \quad (1-2)$$

2) 迟滞。迟滞是指在相同工作条件下，传感器正行程特性与反行程特性的不一致的程度，如图 1-5 所示。其数值为对应同一输入量的正行程和反行程输出值间的最大偏差 $\Delta H_{\max}$ ，与满量程输出值的百分比。用 γ_H 表示为

$$\gamma_H = \pm \frac{\Delta H_{\max}}{y_{F.S}} \times 100\% \quad (1-3)$$

3) 重复性。如图 1-6 所示，重复性是指在同一工作条件下，输入量按同一方向在全测量范围内连续变化多次所得特性曲线的不一致性。在数值上用各测量值正、反行程标准偏差最大值 σ 的两倍或三倍与满量程的百分比表示。记作 γ_K ，即

$$\gamma_K = \pm \frac{c\sigma}{y_{F.S}} \times 100\% \quad (1-4)$$

式中 c ——置信因数，取 2 或 3。置信因数取 2 时，置信概率为 95%；置信因数取 3 时，置信概率为 99.73%。

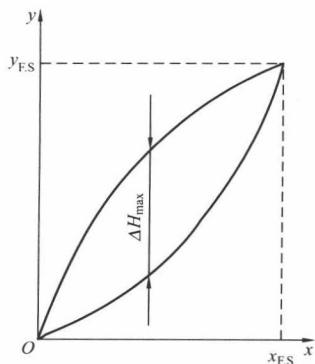


图 1-5 传感器的迟滞特性

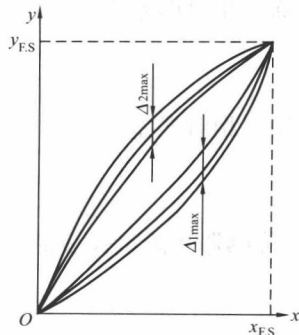


图 1-6 传感器的重复性

4) 零漂和温漂。传感器无输入 (或某一输入值不变) 时, 每隔一定时间, 其输出值偏离原示值的最大偏差与满量程的百分比, 即为零漂。温度每升高 1°C , 传感器输出值的最大偏差与满量程的百分比, 称为温漂。

5. 传感器的测量误差与准确度

(1) 误差的类型。按误差的性质分类如下:

1) 系统误差。在相同测量条件下多次测量同一物理量, 其误差大小和符号保持恒定或按某一确定规律变化, 此类误差称为系统误差。系统误差表征测量的准确度。

2) 随机误差。在相同测量条件下多次测量同一物理量, 其误差没有固定的大小和符号, 呈无规律的随机性, 此类误差称为随机误差。通常用精密度表征随机误差的大小。

3) 粗大误差。明显偏离约定真值的误差称为粗大误差。它主要是由于测量人员的失误所致, 如测错、读错或记错等。含有粗大误差的数值称为坏值, 应予以剔除。在测量中, 若误差大于极限误差 C_s , 即为粗大误差。

(2) 按被测量与时间的关系分类。

1) 静态误差。被测量不随时间变化时测得的误差称为静态误差。

2) 动态误差。被测量在随时间变化过程中测得的误差称为动态误差。动态误差是由于检测系统对输入信号响应滞后, 或对输入信号中不同频率成分产生不同的衰减和延迟所造成的。动态误差值等于动态测量和静态测量所得误差的差值。

(3) 误差的表示方法。

1) 绝对误差。

$$\Delta = A_x - A_0 \quad (1-5)$$

当 $A_x > A_0$ 时, 为正误差; 反之, 为负误差。

修正值 C

$$C = -\Delta$$

绝对误差和修正值的量纲必须与示值量纲相同。

绝对误差可表示测量值偏离实际值的程度, 但不能表示测量的准确程度。

2) 相对误差。

① 实际相对误差为

$$\gamma_A = \frac{\Delta}{A_0} \times 100\% \quad (1-6)$$

② 示值 (标称) 相对误差为

$$\gamma_x = \frac{\Delta}{A_x} \times 100\% \quad (1-7)$$

③ 满度 (引用) 相对误差为

$$\gamma_n = \frac{\Delta}{A_{F.S}} \times 100\% \quad (1-8)$$

(4) 准确度。传感器和测量仪表的误差是以准确度表示的。准确度常用最大引用误差来定义, 即

$$S = \frac{|\Delta_{\max}|}{A_{F.S}} \times 100 \quad (1-9)$$

它表示传感器的最大相对误差为 $\pm S\%$ 。

仪表引起的最大测量相对误差为

$$\gamma_x = \pm \frac{SA_{F.S}}{A_x} \% \quad (1-10)$$

如压力传感器的准确度等级分别为 0.05、0.1、0.2、0.3、0.5、1.0、1.5、2.0 等；我国电工仪表的准确度等级分别为 0.1、0.2、0.5、1.0、1.5、2.5、5.0。

某 0.1 级压力传感器的量程为 100MPa，测量 50MPa 压力时，传感器引起的最大相对误差为 $\pm 0.2\%$ 。

【例 1-1】 有一台测温仪表，测量范围为 $-200 \sim +800^\circ\text{C}$ ，准确度为 0.5 级。现用它测量 500°C 的温度，求仪表引起的绝对误差和相对误差。

解：由 $S = \frac{|\Delta_{\max}|}{A_{F.S}} \times 100$ 可得仪表引起的绝对误差为

$$\Delta_{\max} = \pm \frac{A_{F.S} \times S}{100} = \pm \frac{[800 - (-200)] \times 0.5}{100} = \pm 5^\circ\text{C}$$

由 $\gamma_x = \pm \frac{SA_{F.S}}{A_x} \% = \pm \frac{\Delta_{\max}}{A_x} \times 100\%$ 可得仪表引起的相对误差为

$$\gamma_x = \pm \frac{5}{500} \times 100\% = \pm 1\%$$

6. 精密度、准确度和精确度

反映测量结果与真实值接近程度的量，称为精确度（也称精度）。它与误差大小相对应，测量的精度越高，其测量误差就越小。精度应包括精密度和准确度两层含义。

(1) 精密度。测量中所测得数值重现性的程度，称为精密度。它反映随机误差的影响程度，精密度高就表示随机误差小。

(2) 准确度。测量值与真值的偏移程度，称为准确度。它反映系统误差的影响精度，准确度高就表示系统误差小。

(3) 精确度（精度），它反映测量中所有系统误差和随机误差综合的影响程度。

在一组测量中，精密度高的准确度不一定高，准确度高的精密度也不一定高，但精确度高，则精密度和准确度都高。

为了说明精密度与准确度的区别，可用下述打靶子例子来说明，如图 1-7 所示。

图 1-7 (a) 中表示精密度和准确度都很好，则精确度高；图 1-7 (b) 表示精密度很好，但准确度却不高；图 1-7 (c) 表示精密度与准确度都不好。

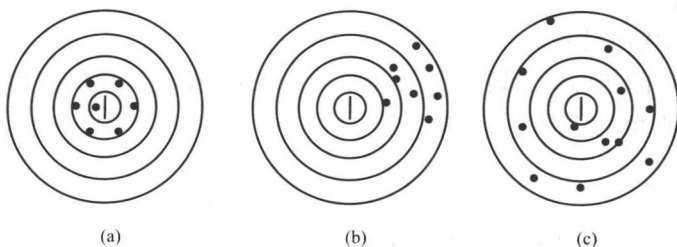


图 1-7 精密度、准确度和精确度的关系

(a) 精确度和准确度都很好；(b) 精密度很好，准确度不高；(c) 精密度与准确度都不好

7. 传感器中的弹性敏感元件

能将力、力矩、压力、温度等物理量转换成位移、转角或应变的弹性元件,称为弹性敏感元件。因此,位移传感器与弹性敏感元件(或构件本身)组合,可构成力、压力、加速度、转矩、液位、流量等传感器。

(1) 应力。截面积为 S 的物体受到外力 F 的作用并处于平衡状态时,在物体单位截面积上引起的内力称为应力,记作 σ ,其值为

$$\sigma = \frac{F}{S} \quad (1-11)$$

如图 1-8 (a) 所示,物体两端受拉力或压力作用时,物体处于拉伸或压缩状态,其应力称为正(向)应力。处于拉伸状态的应力为正值,压缩状态的应力为负值。如图 1-8 (b) 所示,物体一端固定,另一端受平行于端面的力作用时,内部任意截面积上产生大小相等、方向相反的应力,称为切(向)应力。图示方向的应力为正值;反之,为负值。

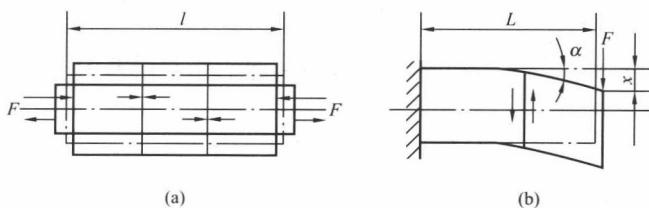


图 1-8 应变种类示意图

(a) 拉、压应力; (b) 切(向)应力

(2) 应变。应变是物体受外力作用时产生的相对变形,是一个无量纲的物理量。设物体原长度为 l ,受力后产生 Δl 的变形,若 $\Delta l > 0$,则表示物体被拉伸;若 $\Delta l < 0$,则表示物体被压缩。其应变 ϵ 定义为

$$\epsilon = \frac{\Delta l}{l} \quad (1-12)$$

式中, ϵ 称为纵向应变。由于其量值非常小,常用微应变 ($\mu\epsilon$) 作为单位, $1\mu\epsilon = 10^{-6}\epsilon$ 。当物体纵向发生变形时,其横向发生相反变形,称为横向应变。为了区别,将前者记作 ϵ_l ,后者记作 ϵ_r 。

$$\epsilon_r = \frac{\Delta r}{r} = -\mu \epsilon_l \quad (1-13)$$

式中 μ ——泊松比;

r ——物体的横向尺寸。

由切应力所产生的变形称为切应变。如图 1-8 (b) 所示,力 F 使角点产生位移 x ,切应变 γ 可通过近视直角三角形求出,即

$$\gamma \approx \tan \alpha = \frac{x}{L} \quad (1-14)$$

式中 L ——固定端至力作用点之间的距离。

(3) 胡克定律与弹性模量。当应力未超过某一限值时,应力与应变成正比,其数学表达式为

$$\sigma = E\epsilon \quad (1-15)$$

$$\tau = G\gamma \quad (1-16)$$

式中 E ——弹性模量, N/m^2 ;

G ——剪切模量;

τ ——切应力。

(4) 弹性敏感元件的特性。弹性敏感元件的基本特性是说明弹性元件受力(或力矩、压力)与其相应的位移(线位移, 角位移)之间的关系, 其主要性能有刚度、灵敏度、固有振动频率等。

1) 刚度。刚度是弹性敏感元件在外力作用下变形大小的量度, 一般用 K 来表示。设 F 为作用在弹性敏感元件的外力, x 为弹性敏感元件产生的变形, 则有

$$K = \frac{\Delta F}{\Delta x} \quad (1-17)$$

如图 1-9 (i) 所示, 弹性特性曲线上某点 A 的刚度为该点切线与水平线夹角 θ 的正切值, 即

$$K = \tan\theta = \frac{\Delta F}{\Delta x} \quad (1-18)$$

2) 灵敏度。灵敏度就是弹性敏感元件在单位力作用下产生变形的大小, 一般用 k 表示, 即

$$k = \frac{\Delta x}{\Delta F} \quad (1-19)$$

可见, 灵敏度与刚度互为倒数。

3) 固有振动频率。弹性敏感元件的动态特性与它的固有频率有很大关系。其固有振动角频率为

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{K}{m}} \quad (1-20)$$

式中 K ——刚度;

m ——弹性敏感元件的质量。

在实际选用弹性敏感元件时, 常常遇到线性度、灵敏度、固有振动频率之间相互矛盾、相互制约的问题, 因此必须根据测量的对象和要求加以综合考虑。

(5) 弹性敏感元件的材料。常用弹性敏感元件的材料性能见表 1-2。

表 1-2 常用弹性敏感元件的材料性能表

名称	弹性模量		线膨胀系数 β ($\times 10^{-6}/^\circ\text{C}$)	屈服限 σ_s ($\times 10^8 \text{ N/m}^2$)	强度限 σ_b ($\times 10^8 \text{ N/m}^2$)	重度 γ ($\times 10^4 \text{ N/m}^3$)	材料说明
	$E(\times 10^{11})$	$G(\times 10^9)$					
45 钢	2.0	—	—	3.6	6.1	7.8	若淬火 $830\sim 850^\circ\text{C}$, 回火 500°C , 强度可达 $(9.5\sim 10.5)\times 10^8 \text{ N/m}^2$
40Cr	2.18	—	11	8.0	10	—	用于一般传感器
35CrMnSiA	2.0	—	11	13	16.5	—	用于高精度传感器
60Si2MnA	2.0	8.7	11.5	14	16	—	用于小厚度平面弹性元件, 疲劳限很高
50CrVA	2.1	8.3	11.3	11	13	—	用于重要弹性元件, 温度 $\leq 400^\circ\text{C}$

续表

名称	弹性模量		线膨胀系数 β ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	屈服限 σ_s ($\times 10^8 \text{ N/m}^2$)	强度限 σ_b ($\times 10^8 \text{ N/m}^2$)	重度 γ ($\times 10^4 \text{ N/m}^3$)	材料说明
	$E (\times 10^{11})$	$G (\times 10^9)$					
1Cr18Ni9	2.0	8.0	16.6	2.0	5.5	7.85	弹性稳定性好, 适于 380~480℃
40CrNiMoA	2.1	—	11.7	10~11.3	11.2~12.5	—	
30CrMnSiA	2.1	—	11	9.0	11	—	
65Si2MnA	2.0	—	11	17	19	—	
铍青铜	1.31	5.0	16.6	—	12.5	8.23	
硬铝	0.72	2.7	23	3.4	5.2	2.8	

(6) 弹性敏感元件的类型。

1) 变换力的弹性敏感元件。变换力的弹性敏感元件形式如图 1-9 所示。

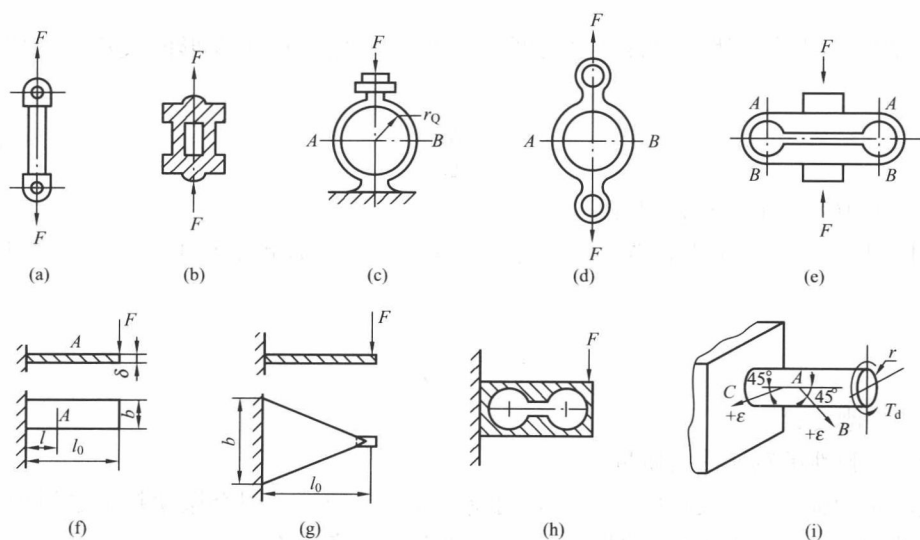


图 1-9 变换力的弹性敏感元件

(a) 实心轴; (b) 空心轴; (c)、(d) 等截面圆环; (e) 变形的圆环;
(f) 等截面悬梁; (g) 等强度悬臂梁; (h) 变形的悬臂梁; (i) 扭转轴

2) 变换压力的弹性敏感元件。变换压力的弹性敏感元件如图 1-10 所示。

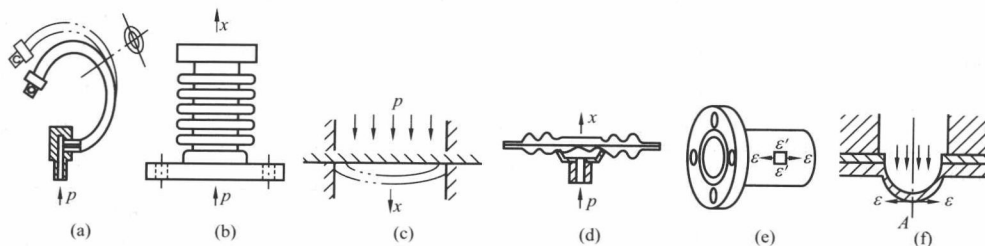


图 1-10 变换压力的弹性敏感元件

(a) 弹簧管; (b) 波纹管; (c) 等截面积薄板; (d) 膜盒; (e) 薄壁圆筒; (f) 薄壁半球

弹簧管又称波登管,是弯成C形的各种空心管,它将压力变为自由端的位移。波纹管直径一般为12~160mm,将压力变成轴向位移,测量范围为 $10^2 \sim 10^7$ Pa。等截面积薄板又称为平膜片,是周边固定的圆薄板,它把应力变为薄板的位移或应变。膜盒是有两片波纹膜片压合而成,比平膜片灵敏度高,用于小压力测量。薄壁圆筒和薄壁半球灵敏度低,但坚固,常用于特殊环境。



知识链接

1. 传感器典型接口电路

(1) 放大电路。传感器输出信号一般比较微弱,因此在大多数情况下需要使用放大电路。放大电路主要将传感器输出的微弱的直流信号或交流信号放大到合适的程度。放大电路一般采用运算放大器构成。

1) 反相放大器。图1-11所示为反相放大器的基本电路。输入电压加到运算放大器的反相输入端,输出电压经 R_f 反馈到反相输入端。输出电压为

$$U_o = -U_i \frac{R_f}{R_1} \quad (1-21)$$

反相放大器的放大倍数取决于 R_f 与 R_1 的比值,负号表示输出电压与输入电压反相。该放大电路应用广泛。

2) 同相放大器。图1-12所示为同相放大器的基本电路。输入电压加到运算放大器的同相输入端,输出电压 R_f 反馈到反相输入端。输出电压为

$$U_o = U_i \left(1 + \frac{R_f}{R_1} \right) \quad (1-22)$$

同相放大器的放大倍数取决于 R_f 与 R_1 的比值,输出电压与输入电压同相。

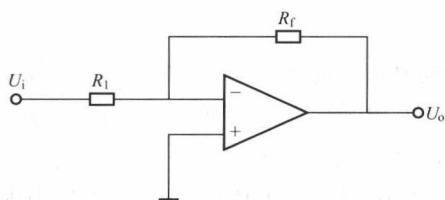


图 1-11 反相放大器的基本电路

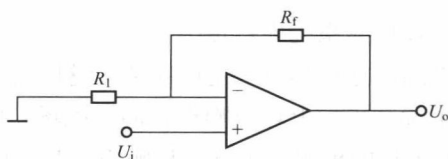


图 1-12 同相放大器的基本电路

3) 差动放大器。图1-13所示为差动放大器的基本电路。两个输入信号分别加到运算放大器的同相输入端和反相输入端,输出电压经 R_f 反馈到反相输入端。

若 $R_1=R_2$, $R_3=R_f$, 则输出电压为

$$U_o = \frac{R_f}{R_1} (U_2 - U_1) \quad (1-23)$$

差动放大器的优点是抑制共模信号的能力和抗干扰能力强。

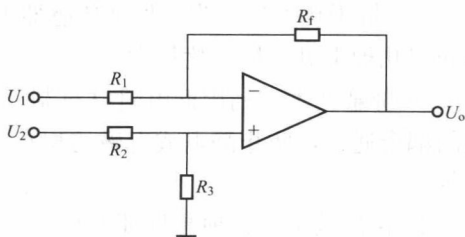


图 1-13 差动放大器的基本电路

(2) 阻抗匹配器。传感器输出阻抗都比较高,比一般电压放大电路的输入阻抗要大得