

普通高等教育“十三五”规划教材

传感器技术与应用

主 编 罗锋华 程 豪 曾绍平

副主编 郝君君 吴丰华 赖武军 林 媚

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书主要介绍了工业和生活中常用的传感器的工作原理、基本结构、测量电路与实际应用等方面的知识,并介绍了在传感器中经常用到的弹性敏感元件的知识。

本书共分8章,主要内容包括:传感器的定义及组成、电阻式传感器、电容式传感器、电感式传感器、温度传感器、电动势式传感器、光电式传感器和数字式传感器。

本书可作为高等职业院校机电一体化、电气自动化等专业的教材,也可作为成人教育、职业培训的教材,还可作为企业生产技术管理人员及其他相关技术人员参考使用。

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

传感器技术与应用 / 罗锋华, 程豪, 曾绍平主编. —北京: 电子工业出版社, 2019.9

ISBN 978-7-121-36489-1

I. ①传… II. ①罗… ②程… ③曾… III. ①传感器—高等职业教育—教材 IV. ①TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 089254 号

责任编辑: 胡辛征 特约编辑: 田学清

印 刷:

装 订:

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: 9.5 字数: 188 千字

版 次: 2019 年 9 月第 1 版

印 次: 2019 年 9 月第 1 次印刷

定 价: 38.00 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: guonm@phei.com.cn, QQ34825072。

前 言

传感器技术作为现代信息技术三大支柱之一,是一种将各种外界信息转换成电信号的装置,可以获取传统仪表难以获取的信息,是自动检测技术中重要的一环,在工业生产、科学研究、日常生活等领域有着至关重要的作用。

本书作为高等职业院校机电类专业“传感器技术应用”课程教材,主要介绍了工业和生活中常用的传感器的工作原理、基本结构、测量电路与实际应用等方面的知识,并介绍了在传感器中经常用到的弹性敏感元件的知识。本书力图使学生掌握各种传感器的工作原理、结构类型、参数特性和测量电路等知识,以及了解各种传感器的实际应用。本书把工业生活中常见的电阻式、电容式、电感式、电动势式、光电式、数字式和温度传感器进行了详细分析讲解,有利于学生对知识的掌握。

本书共分 8 章。第 1 章讲述了传感器基础知识,以及弹性敏感元件的知识;第 2 章至第 8 章分类介绍了电阻式传感器、电容式传感器、电感式传感器、温度传感器、电动势式传感器、光电式传感器和数字式传感器用于测量力、压力、位移、加速度、温度、厚度、转速、磁场等物理量。着重介绍了各类传感器的工作原理和结构类型以及相应的测量电路,最后列举了每种传感器的实际应用。

本书由罗锋华、程豪、曾绍平担任主编,郝君君、吴丰华、赖武军、林媚担任副主编。罗锋华编写第 2 章、第 3 章和第 4 章,程豪编写第 5 章、第 6 章和第 7 章,郝君君编写第 8 章,吴丰华编写第 1 章,曾绍平、赖武军、林媚参与了本书部分内容的编写,在此一并表示感谢。

由于水平有限,书中难免存在错误和缺点,敬请广大读者批评指正。

编者

电子工业出版社版权所有
盗版必究

目 录

第 1 章 认识传感器.....	1
1.1 传感器的定义、组成及分类.....	1
1.1.1 传感器的定义.....	1
1.1.2 传感器的组成.....	2
1.1.3 传感器的分类.....	2
1.2 传感器的基本特性.....	3
1.3 传感器的敏感元件.....	8
1.3.1 弹性敏感材料的弹性特性.....	8
1.3.2 弹性敏感元件的变换原理.....	9
思考题与习题 1.....	16
第 2 章 电阻式传感器.....	18
2.1 电阻应变式传感器.....	18
2.1.1 电阻应变片的种类与结构.....	18
2.1.2 电阻应变片的工作原理.....	20
2.1.3 电阻应变式传感器的测量电路.....	22
2.1.4 电阻应变式传感器的应用.....	27
2.2 压阻式传感器.....	29
2.2.1 压阻式传感器的工作原理.....	29
2.2.2 压阻式传感器的应用.....	31
思考题与习题 2.....	31
第 3 章 电容式传感器.....	32
3.1 电容式传感器的原理与结构.....	32
3.1.1 电容式传感器的工作原理.....	32
3.1.2 电容式传感器的类型及结构.....	33
3.1.3 电容式传感器的特点.....	37



3.2 电容式传感器的测量电路	38
3.3 电容式传感器的应用	41
思考题与习题 3	46
第 4 章 电感式传感器	47
4.1 自感式传感器	47
4.1.1 自感式传感器的工作原理和类型	47
4.1.2 自感式传感器的测量电路	51
4.1.3 自感式传感器的应用	54
4.2 差动变压器	55
4.2.1 差动变压器的结构与工作原理	56
4.2.2 差动变压器的测量电路	57
4.2.3 差动变压器的应用	59
4.3 电涡流传感器	61
4.3.1 电涡流传感器的工作原理	61
4.3.2 电涡流传感器的测量电路	62
4.3.3 电涡流转速传感器	64
思考题与习题 4	65
第 5 章 温度传感器	66
5.1 热电阻传感器	66
5.1.1 金属热电阻	66
5.1.2 半导体热敏电阻	69
5.1.3 热电阻传感器的应用	70
5.2 热电偶传感器	71
5.2.1 热电偶的工作原理	71
5.2.2 热电偶的基本定律	73
5.2.3 热电偶的分类与结构	75
5.2.4 热电偶的冷端补偿	77
5.2.5 热电偶的应用	79
思考题与习题 5	80
第 6 章 电动势式传感器	81
6.1 压电式传感器	81
6.1.1 压电式传感器的工作原理	81
6.1.2 压电式传感器的等效电路和测量电路	86

6.1.3 压电式传感器的应用	90
6.2 霍尔式传感器	92
6.2.1 霍尔式传感器的工作原理	93
6.2.2 霍尔式传感器的应用	95
6.3 磁电式传感器	97
6.3.1 磁电式传感器的工作原理	98
6.3.2 磁电式传感器的应用	100
思考题与习题 6	100
第 7 章 光电式传感器	102
7.1 光电元件	102
7.1.1 光电效应	102
7.1.2 常见的光电元件	104
7.2 光电式传感器的类型及应用	119
7.2.1 光电式传感器的类型	119
7.2.2 光电式传感器的应用	120
7.3 光纤传感器	124
7.3.1 光纤的简介及光纤传感器的分类	124
7.3.2 光纤传感器的应用	127
思考题与习题 7	129
第 8 章 数字式传感器	131
8.1 光电编码器	131
8.1.1 增量式编码器	131
8.1.2 绝对式编码器	132
8.2 光栅传感器	134
8.2.1 光栅的类型和结构	134
8.2.2 光栅传感器的工作原理	136
8.3 感应同步器	139
8.3.1 感应同步器的基本结构与工作原理	139
8.3.2 感应同步器的特点及应用	141
思考题与习题 8	143

第 1 章 认识传感器



1.1 传感器的定义、组成及分类

计算机技术、通信技术和传感器技术一起被称为现代信息技术的三大支柱，人们通常把计算机比喻成人的大脑，把通信线路比喻成人的神经，把传感器比喻成人的感觉器官。如果没有各种精确、可靠的传感器来检测需要被测量的原始数据并提供真实的信息，即使是性能很优越的计算机，也无法发挥其作用。

1.1.1 传感器的定义

从广义上来讲，传感器是一种能够感受外界信息，并按照一定规律将这些信息转换成可用输出信号的器件或装置。这一概念包含了以下 3 个方面的含义。

(1) 传感器是一种能够完成获取外界信息任务的装置。

(2) 传感器的输入量通常指非电量，如物理量、化学量和生物量等；输出量则指便于传输、转换、处理和显示的物理量，主要是电信号。例如：电阻式传感器的输入量可以是力、位移、速度、加速度等非电量信号；输出量则是电压信号。

(3) 传感器的输出量和输入量之间精确地保持一定的规律。

1.1.2 传感器的组成

传感器一般由敏感元件、转换元件和转换电路 3 部分组成，传感器组成框图如图 1.1 所示。

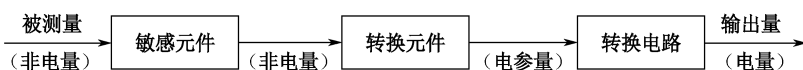


图 1.1 传感器组成框图

1. 敏感元件

敏感元件是传感器中能够直接感受被测量的部分，它先感受被测量，然后输出与被测量呈一定关系的某一物理量。例如，电阻应变式传感器中的弹性敏感元件将被测力的大小转换为应变，且力的大小与应变之间保持一定的函数关系。

2. 转换元件

转换元件是传感器中将敏感元件的输出量转换为便于传输和测量的电参量的部分，这里的电参量通常是指电阻、电容和电感等。例如，电阻应变式传感器中的电阻应变片将应变转换为电阻的变化。

3. 转换电路

转换电路可以将转换元件输出的电参量转换为便于测量的电压、电流、频率等电量。例如，电阻应变式传感器的测量电路直流电桥将电阻应变片的电阻变化转换为输出电压的变化。

值得注意的是，并不是所有的传感器都包含敏感元件和转换元件。如果敏感元件可以直接输出电参量，那么它就兼为转换元件，如热电偶；如果转换元件可以直接感受被测量，且输出的电量与之呈一定的关系，则此时的传感器就没有敏感元件，如压电元件。

1.1.3 传感器的分类

传感器的种类繁多，分类方法也不尽相同，常用的分类方法有以下 4 种。

1. 按被测物理量分类

传感器按被测物理量可分为力传感器、压力传感器、位移传感器、加速度传感器、温度传感器、湿度传感器、磁场传感器、光照度传感器等。这种分类方法表明了传感器的用途，便于使用者选用。例如，温度传感器用于检测温度。

2. 按工作原理分类

传感器按工作原理可分为电阻式传感器、电容式传感器、电感式传感器、压电式传感器、磁电式传感器等。这种分类方法表明了传感器的工作原理,有利于传感器的设计和应用。例如,电感式传感器就是将被测量转换为电感量的变化。

3. 按转换能量供给形式分类

传感器按转换能量供给形式可分为能量变换型(也称发电型)传感器和能量控制型(也称参量型)传感器两种。

能量变换型传感器在进行信号转换时不需要外部提供能量就可以将输入信号能量转换为另一种形式的能量输出,如压电式传感器、热电偶传感器等。

能量控制型传感器必须有外加电源才能正常工作,如电阻式传感器、电容式传感器、电感式传感器、光电式传感器等。

4. 按工作机理分类

传感器按工作机理可分为结构型传感器和物性型传感器两种。

结构型传感器的工作原理是,被测量变化时引起了传感器的结构发生改变,从而引起输出量变化。例如,电容式压力传感器就属于结构型传感器,当外加压力变化时,电容极板产生位移,结构改变而引起电容量变化,输出电压也相应发生变化。

物性型传感器是利用物质的物理或化学特性随被测参数变化而变化的原理制成的,一般没有可动结构,易于小型化,如各种半导体式传感器。



1.2 传感器的基本特性

传感器的基本特性是指传感器的输出量与输入量之间的关系。当传感器的输入量不随时间变化而变化或变化极其缓慢时,这一关系被称作静态特性;当传感器的输入量随时间变化而变化时,这一关系被称作动态特性。传感器动态特性的研究方法自动控制理论中被控对象的动态特性研究方法相似,本书不做介绍,下面仅介绍传感器静态特性的一些性能指标。

传感器的静态特性是指传感器的输入信号处于稳定状态时,其输出量与输入量之间呈现的关系,表示为

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \cdots + a_nx^n \quad (1.1)$$

式中, y ——传感器输出量;

x ——传感器输入量;

a_0 ——传感器的零位输出;

a_1 ——传感器的灵敏度;

$a_2, a_3, \dots, a_n$ ——非线性项系数。

衡量静态特性的主要性能指标有灵敏度、线性度、迟滞、精确度、稳定性和可靠性等。

1. 灵敏度

灵敏度 S 是指传感器在稳态下的输出变化量 Δy 与输入变化量 Δx 的比值, 即

$$S = \frac{\Delta y}{\Delta x} \approx \frac{dy}{dx} \quad (1.2)$$

从传感器静态特性曲线可以看出, 灵敏度表示曲线上相应点的斜率。对于线性传感器, 灵敏度为一个常数; 对于非线性传感器, 灵敏度则为一个变量, 随着输入量的变化而变化, 如图 1.2 所示。

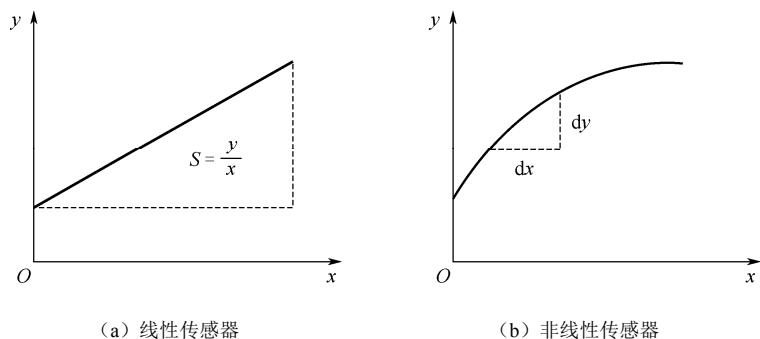


图 1.2 灵敏度的变化

灵敏度的单位取决于传感器输入、输出信号的单位。例如, 压力传感器灵敏度的单位可表示为 mV/Pa 。对于数字式仪表, 灵敏度用分辨力表示。所谓分辨力是指数字式仪表最后一位数字所代表的值。一般来说, 分辨力数值小于仪表的最大绝对误差。

在实际应用中, 一般希望传感器的灵敏度高一些, 而且在满量程范围内保持为恒定值, 即传感器的静态特性曲线为一条直线。

2. 线性度

线性度 γ_L , 又称非线性误差, 是指传感器实际特性曲线与其理论拟合直线之间的最大偏差 $\Delta_{L\max}$ 与其满量程输出量 y_{FS} 的百分比, 即

$$\gamma_L = \frac{\Delta_{L\max}}{y_{FS}} \times 100\% \quad (1.3)$$

理论拟合直线的选取方法不同,线性度的数值大小也就不同。传感器线性度示意图如图 1.3 所示,图中的拟合直线是一条将传感器的零点与对应于最大输入值的最大输出值点连接起来的直线,这条直线被称为端基直线,由此得到的线性度即为端基线性度。

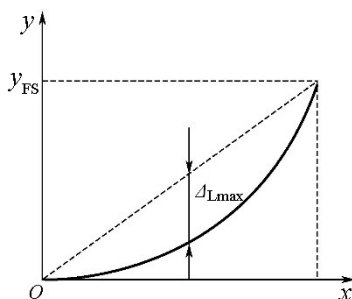


图 1.3 传感器线性度示意图

在实际应用中,人们总是希望线性度越小越好,即传感器的静态特性曲线要尽量接近拟合直线,这时传感器的刻度是均匀的,读数方便且不容易产生误差,容易标定。但实际上大部分的传感器总会存在一定的非线性误差,目前检测系统的非线性误差多通过计算机来进行修正。

3. 迟滞

迟滞是指传感器在正(输入量从小到大)、反(输入量从大到小)行程中特性曲线不重合的现象,如图 1.4 所示。

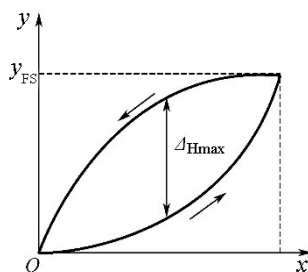


图 1.4 传感器迟滞

迟滞 γ_H 可以用传感器正、反行程输出值间的最大差值 Δ_{Hmax} 与其满量程输出 y_{FS} 的百分比来表示,即

$$\gamma_H = \pm \frac{\Delta_{Hmax}}{y_{FS}} \times 100\% \quad (1.4)$$

造成迟滞的原因有很多,如轴承摩擦、间隙变大、螺钉松动、电路元件老化、工作点漂移等。迟滞会导致传感器的分辨力变差或造成测量盲区,因此,一般希望传感器的迟滞越小越好。

4. 精确度

精确度是反映测量系统中系统误差和随机误差的综合评定指标。精确度包含两个指标：精密度和准确度。

1) 精密度

精密度表明测量系统指示值的分散程度。精密度反映了随机误差的大小，精密度高表示随机误差小。

2) 准确度

准确度表明测量系统的指示值偏离真值的程度。准确度反映了系统误差的大小，准确度高表示系统误差小。

以上两个指标合起来就是精确度，精确度常用测量仪表的基本误差来表示，测量系统的精确度高说明其精密度和准确度都高。

图 1.5 所示为射击例子，通过这个例子可以对准确度、精密度及精确度 3 个概念有更好的理解。图 1.5 (a) 中靶点分散但接近靶心，表示准确度高而精密度低；图 1.5 (b) 中靶点集中但偏离靶心，表示精密度高而准确度低；图 1.5 (c) 中靶点集中而且都在靶心，表示准确度和精密度都高，即它的精确度高。

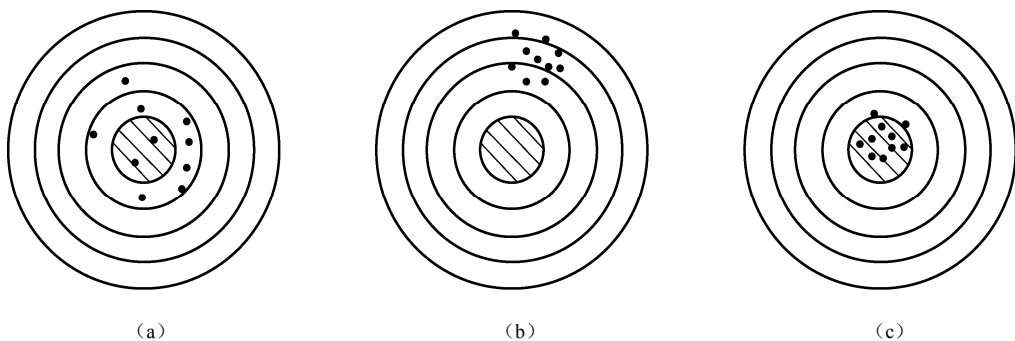


图 1.5 射击例子

5. 稳定性

传感器的稳定性常用稳定度和影响系数来表示。

1) 稳定度

稳定度是指在规定工作条件和规定时间内，传感器性能保持不变，即读数不变的能力。传感器在工作中，其内部随机变动的产生因素有很多，如发生周期性变动、工作点漂移或机械部分的摩擦等都会使输出产生变化。

稳定度一般用传感器输出量的变化和观测时间的长短之比来表示。例如，某传感器输出电压每小时变化 1.5mV ，则其稳定度为 1.5mV/h 。

2) 影响系数

影响系数是表示由于外界环境变化引起传感器输出变化的量。一般传感器都有给定的标准工作条件,如环境温度为 20°C 、相对湿度为60%、大气压力为 101.33kPa 、电源电压为 220V 等。而实际工作时的条件通常会偏离其标准工作条件,这时传感器的输出就会发生变化。

影响系数常用输出的变化量与影响因素的变化量的比值表示,如某压力表的温度影响系数为 $200\text{Pa}/^{\circ}\text{C}$,即表示环境温度每变化 1°C ,压力表的示值变化 200Pa 。

6. 可靠性

可靠性是指传感器或检测系统在规定的工作条件和规定的时间内保持正常工作性能的能力。它是一种综合性的质量指标,包含可靠度、平均无故障工作时间、平均修复时间和失效率。

1) 可靠度

可靠度可以用传感器在规定的使用条件和工作周期内达到规定性能的概率来表示。

2) 平均无故障工作时间 (MTBF)

平均无故障工作时间是指相邻两次故障期间传感器正常工作时间的平均值。

3) 平均修复时间 (MTTR)

平均修复时间是指排除故障所花费时间的平均值。

4) 失效率

失效率是指在规定的条件下工作到某个时刻后,传感器在单位时间内发生失效的概率,对可修复性的产品,又称故障率。

失效率是时间的函数,失效率变化曲线如图1.6所示,一般分为3个阶段:早期失效期、偶然失效期及衰老失效期。

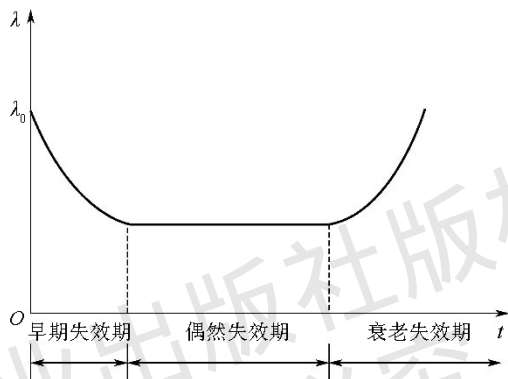


图 1.6 失效率变化曲线

1.3 传感器的敏感元件

在外力的作用下物体的尺寸或形状发生改变,这种现象被称为变形,如果去掉外力后物体能完全恢复其原来的尺寸和形状,则把这种变形称为弹性变形,具有这种弹性变形特性的物体被称为弹性元件。

弹性元件在传感器技术中占有极其重要的地位。它可以把力、力矩或压力转换为相应的应变或位移,然后配合各种形式的转换元件,将应变或位移转换为相应的电参量。

根据在传感器中的作用,可以把弹性元件分为两种类型,即弹性敏感元件和弹性支承。弹性敏感元件用来感受力、力矩、压力等被测参量,并将被测参量转换为应变或位移,也就是通过它把被测参量由一种物理状态转换为另一种所需的物理状态,可以直接起到测量物理量的作用。

1.3.1 弹性敏感材料的弹性特性

作用在弹性敏感元件上的外力与由该外力引起的相应变形(应变、位移或转角)之间的关系被称为弹性敏感元件的弹性特性。弹性特性具体可由刚度和灵敏度来表示。

1. 刚度

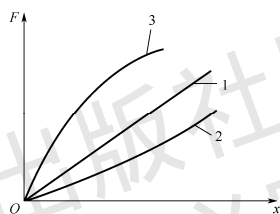
刚度是表征弹性敏感元件在外力作用下抵抗变形的能力,其数学表达式为

$$k = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta F}{\Delta x} = \frac{dF}{dx} \quad (1.5)$$

式中, F ——作用在弹性敏感元件上的外力;

x ——弹性敏感元件产生的应变。

若刚度 k 是常数,则元件的弹性特性是线性的;否则,元件的弹性特性是非线性的,如图 1.7 所示。



1—线性; 2, 3—非线性

图 1.7 弹性特性

2. 灵敏度

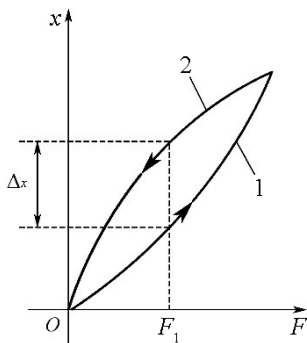
灵敏度是刚度的倒数，可表示为

$$K = \frac{dx}{dF} \quad (1.6)$$

从式(1.6)可知，灵敏度是单位力产生应变的大小。与刚度相似，如果灵敏度为常数，则元件的弹性特性是线性的；如果灵敏度为一个变化的量，则元件的弹性特性是非线性的。

3. 弹性滞后

在弹性变形范围内，弹性敏感元件的弹性特性的加载曲线（即正向行程）与卸载曲线（即反向行程）不重合的现象被称为弹性滞后现象，如图1.8所示。



1—正向行程曲线；2—反向行程曲线

图 1.8 弹性滞后

4. 弹性后效

当在弹性敏感元件上施加的载荷变化后，其不是立即完成相应的变形，而是在一定时间间隔中逐渐完成变形，这种现象被称为弹性后效。由于弹性后效的存在，弹性敏感元件的变形不能迅速地随作用力的变化而变化，从而会引起测量误差。

1.3.2 弹性敏感元件的变换原理

下面介绍几种常见的弹性敏感元件及其将力或压力转换为应变或位移的原理。

1. 弹性圆柱

柱式弹性元件的结构简单，可以承受很大的载荷，根据其截面形状可分为圆筒形与圆柱形两种。弹性圆柱如图 1.9 所示。

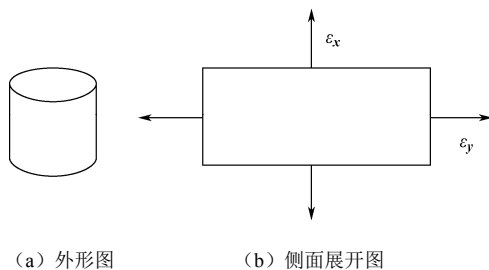


图 1.9 弹性圆柱

在外力的作用下，柱式弹性元件产生变形，从而产生应变。在受到轴向拉或压的作用力 F 时，在与轴线成 90° 的侧面上产生轴向应力和横向应力，其轴向应力和应变分别为

$$\sigma_x = \frac{F}{S} \quad (1.7)$$

$$\varepsilon_x = \frac{F}{SE} \quad (1.8)$$

其横向应力和应变分别为

$$\sigma_y = -\mu \frac{F}{S} \quad (1.9)$$

$$\varepsilon_y = -\mu \frac{F}{SE} \quad (1.10)$$

式中， F ——沿轴向的作用力；

E ——材料的弹性模量；

μ ——材料的泊松系数，一般为 $0 \sim 0.5$ ；

S ——圆柱的横截面积。

由式 (1.7)、式 (1.8)、式 (1.9) 和式 (1.10) 可知，圆柱的应变大小决定于圆柱的结构、横截面积、材料性质和圆柱所承受的力，与圆柱的长度无关。

对于空心的圆柱弹性敏感元件，上述表达式也适用，而且空心的弹性元件在某些方面要优于实心元件。但是当空心圆柱的壁太薄时，受压力作用后将产生较明显的变形从而影响精度。

2. 悬臂梁

悬臂梁可分为等截面悬臂梁和等强度悬臂梁，分别如图 1.10 和图 1.11 所示。悬臂梁是一种一端固定而另一端自由的弹性敏感元件，其特点是结构简单、加工方便，在较小力的测量中应用较多。

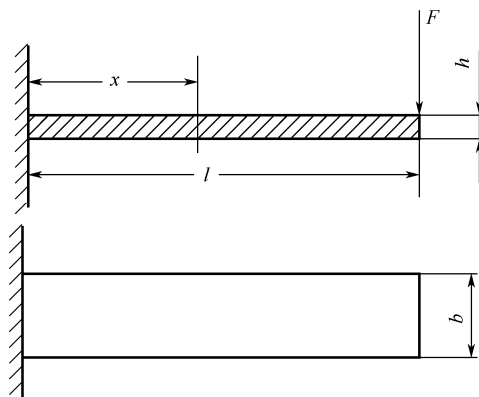


图 1.10 等截面悬臂梁

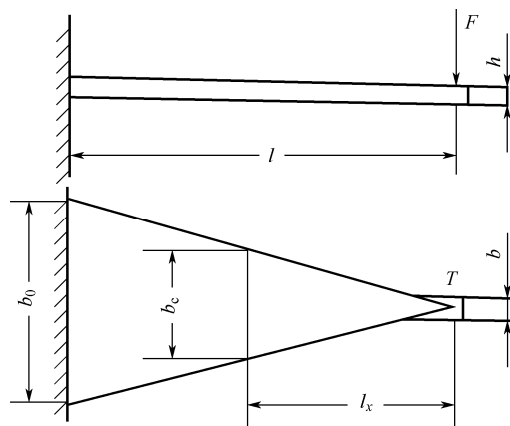


图 1.11 等强度悬臂梁

1) 等截面悬臂梁

截面为矩形的悬臂梁称为等截面悬臂梁。等截面悬臂梁所受作用力 F 与某一位置处的应变关系可按下列式计算：

$$\varepsilon_x = \frac{6F(l-x)}{ESh} \quad (1.11)$$

式中， ε_x ——到固定端距离为 x 处的应变值；

l ——梁的长度；

x ——某一位置到固定端的距离；

E ——梁的材料的弹性模量；

S ——梁的截面积；

h ——梁的厚度。

由式 (1.11) 可知，随着位置 x 的变化，在梁上产生的应变也是变化的。

2) 等强度悬臂梁

等截面悬臂梁的不同部位受力所产生的应变是不相等的,这对其在电阻应变式传感器中的应用,即应变片粘贴的位置提出了较高的要求。而在等强度悬臂梁自由端加上作用力时,梁上各处产生的应变大小相等。当作用力 F 加在梁的两斜边的交汇点处时,等强度梁各点的应变值为

$$\varepsilon = \frac{6l}{Ebh} \times F \quad (1.12)$$

式中, ε ——梁上各点的应变值;

l ——梁的长度;

b ——应变处梁的宽度;

E ——梁的材料的弹性模量;

h ——梁的厚度。

3. 薄壁圆筒

薄壁圆筒与弹簧管等弹性元件可将气体的压力转换为应变。薄壁圆筒的壁厚一般都小于圆筒直径的 $1/20$,内腔中被测压力相同时,内壁均匀受压,薄壁无弯曲变形,只是均匀地向外扩张。因此,筒壁的任意一块都将在轴向和圆周方向产生拉伸应力,薄壁圆筒受力分析如图 1.12 所示,其拉伸应力值分别为

$$\sigma_x = \frac{r_0}{2h} p \quad (1.13)$$

$$\sigma_r = \frac{r_0}{h} p \quad (1.14)$$

式中, σ_x ——轴向的拉伸应力;

σ_r ——圆周方向的拉伸应力;

p ——筒内气体压力;

r_0 ——圆筒的内半径;

h ——圆筒的壁厚。

轴向的拉伸应力 σ_x 与圆周方向的拉伸应力 σ_r 相互垂直,应用胡克定律,可求得这种弹性敏感元件应变—压力关系式为

$$\varepsilon_x = \frac{r_0}{2Eh} (1 - 2\mu) p \quad (1.15)$$

$$\varepsilon_r = \frac{r_0}{2Eh} (2 - \mu) p \quad (1.16)$$

由式 (1.15)、式 (1.16) 可知,该应变与圆筒的长度无关,而与圆筒的内半径 r_0 、

圆筒的壁厚 h 和弹性模量 E 有关，且轴向的应变与圆周方向的应变不相等。

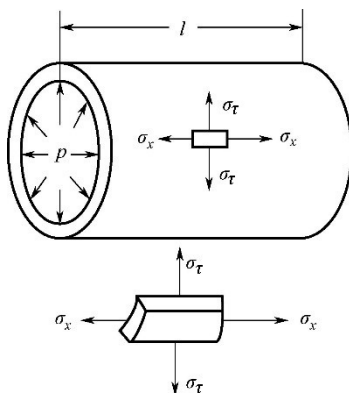


图 1.12 薄壁圆筒受力分析

4. 弹簧管

弹簧管的截面为椭圆形、卵形或更复杂的形状。它主要用于流体压力的测量，可以将压力转换为弹簧管端部的位移。弹簧管大多是弯曲成 C 形的空心管，管的一端开口，为固定端；另一端封闭，为自由端。C 形弹簧管的结构与截面示意图如图 1.13 所示。弹簧管的自由端连在管接头上，压力 p 通过管接头导入弹簧管的内腔，在管内压力作用下，管截面将趋于变成圆形，从而使 C 形管趋向于伸直，于是管的自由端产生位移，该位移的大小可以反映管内压力的大小。为了减小应力，可将其制成螺旋形弹簧管，如图 1.14 所示。

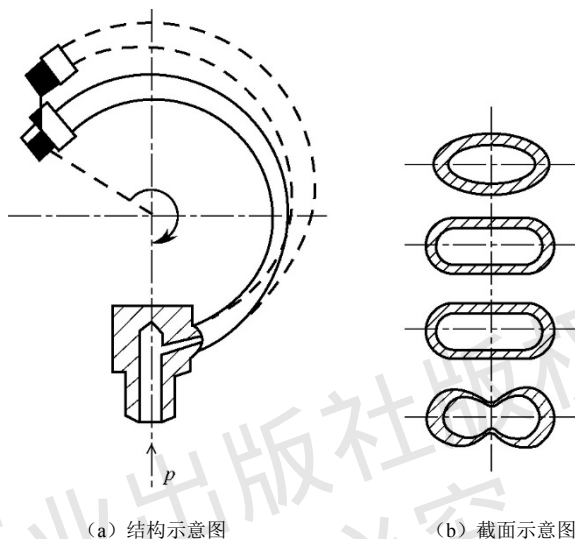


图 1.13 C 形弹簧管的结构与截面示意图

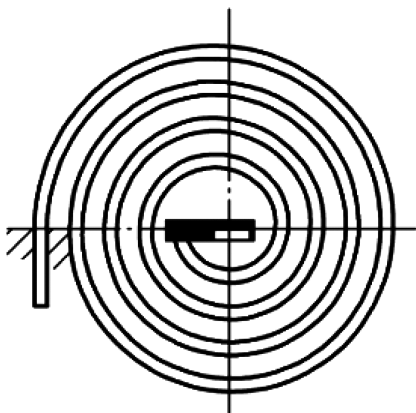


图 1.14 螺旋形弹簧管

椭圆形截面的薄壁弹簧管的管壁厚与短半轴之比应为 $0.7 \sim 0.8$ 。在一定范围内，其自由端位移 d 和所受压力 p 之间呈线性关系；当压力超过某一压力值 p_h 时，特性曲线将偏离直线而上翘。特性曲线如图 1.15 所示。

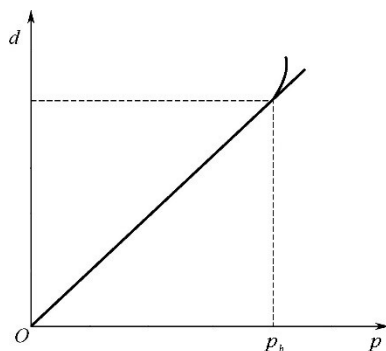


图 1.15 特性曲线

5. 膜片

圆形膜片分为平膜片和波纹膜片两种，在所受压力相同的情况下，波纹膜片产生的挠度（位移）较大。

1) 平膜片

圆形平膜片在压力作用下，中心挠度（位移）最大，且当膜片中心的最大挠度远小于膜片的厚度时，膜片的中心挠度正比于压力。当膜片中心的最大挠度大于或等于膜片的厚度时，膜片的中心挠度与压力呈非线性关系，为了减小非线性，要使位移量比膜片的厚度小得多。

在压力均匀分布的情况下，圆形平膜片应力分布如图 1.16 所示，图中的 σ_r 和 σ_t 分别为圆形平膜片各点对应的纵向应力和横向应力（切向应力）。

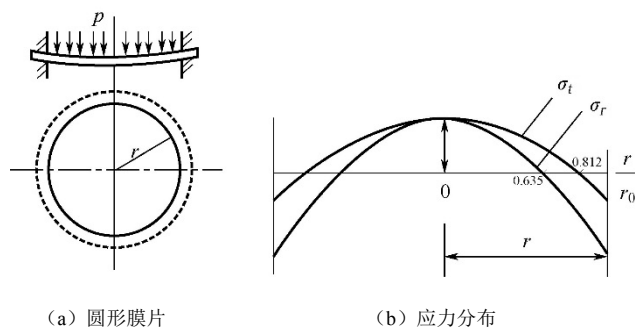


图 1.16 圆形平膜片应力分布

由图 1.16 (b) 中圆形平膜片的应力分布曲线可得出以下结论:

在圆膜的中心处 ($r=0$), 具有最大的正应力 (拉应力), 且 $\sigma_r = \sigma_t$ 。

在圆膜的边缘处 ($r=r_0$), 纵向应力 σ_r 为最大的负应力 (压应力)。

当 $r=0.635r_0$ 时, 纵向应力 $\sigma_r=0$ 。

当 $r>0.635r_0$ 时, 纵向应力 $\sigma_r<0$, 为负应力 (压应力)。

当 $r=0.812r_0$ 时, 横向应力 $\sigma_t=0$, 但纵向应力 $\sigma_r<0$ 。

当 $r<0.635r_0$ 时, 纵向应力 $\sigma_r>0$, 为正应力 (拉应力)。

2) 波纹膜片

波纹膜片是一种压有环状同心波纹的圆形薄板, 一般用于测量压力 (或压差), 为了增加膜片中心的位移, 通常可把两个膜片焊在一起制成膜盒, 其位移为单个膜片的两倍, 如果需要得到更大的位移, 可把数个膜盒串联成膜盒组。

波纹膜片的波纹形状有很多种, 通常采用正弦形、梯形和锯齿形, 对应的轴向截面如图 1.17 所示, 为了便于与其他零件相连, 在膜片中央留有一个光滑部分, 有时还在中心焊上一块金属片, 作为膜片的硬芯。

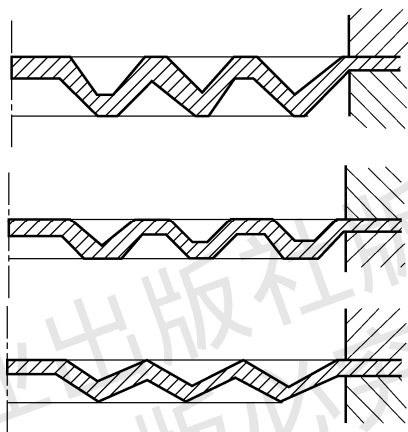


图 1.17 膜片的轴向截面

在一定的压力作用下，正弦形波纹膜片产生的挠度最大；锯齿形波纹膜片产生的挠度最小，但它的特性曲线比较接近于直线；梯形波纹膜片的特性曲线介于上述二者之间。锯齿形波纹、梯形波纹及正弦形波纹膜片与压力的关系，如图 1.18 所示。

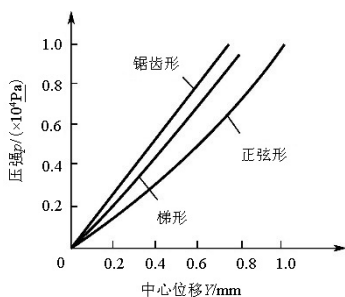


图 1.18 波纹形状与膜片特性的关系

6. 波纹管

波纹管是一种表面上有许多同心环状波形皱纹的薄壁圆管，其外形如图 1.19 所示。在流体压力或轴向力的作用下将会伸长或缩短；在横向力作用下，波纹管将在平面内弯曲。金属波纹管容易产生轴向变形，灵敏度非常好，在变形量允许的情况下，压力或轴向力的变化与伸缩量是成比例的，因此利用它可把压力或轴向力转换为位移。

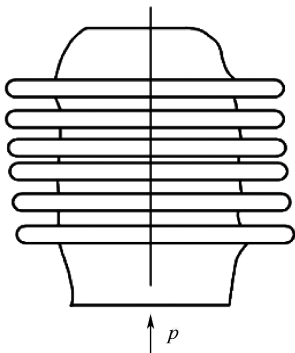


图 1.19 波纹管外形

思考题与习题 1

1. 传感器由哪几部分组成？各部分的作用是什么？

2. 传感器的静态特性和动态特性的含义是什么？
3. 传感器的静态特性指标有哪些？它们的含义分别是什么？
4. 什么是弹性敏感元件的弹性特性？弹性特性指标有哪些？
5. 常见的弹性敏感元件有哪些？其中哪些是转换力的？哪些是转换压力的？
6. 等截面悬臂梁和等强度悬臂梁的区别是什么？
7. 使用弹簧管测量压力的工作原理是什么？

电子工业出版社版权所有
盗版必究