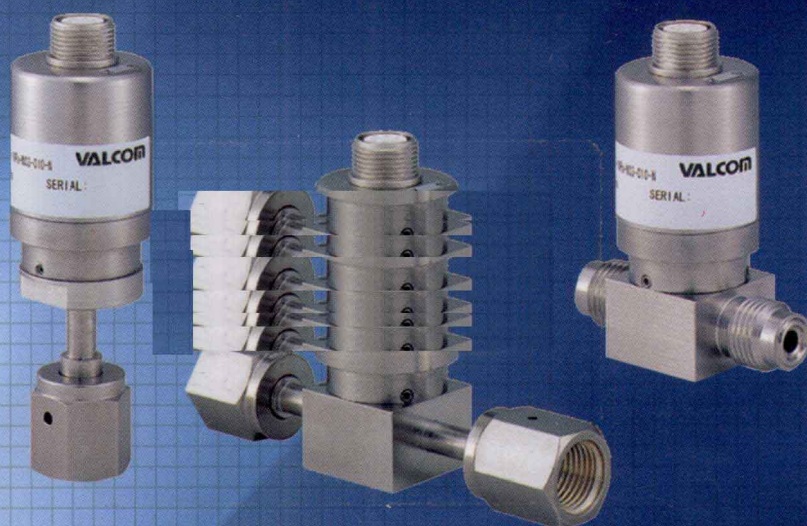


机电专业新技术普及丛书

传感器实用技术

CHUANGANQI SHIYONG JISHU

王建 崔书华 邱鹏 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

机电专业新技术普及丛书

传感器实用技术

主 编	王 建	崔书华	邱 鹏	
副主编	崔东伟	李 伟	张 宏	
	程军芳	侯玉勇		
参 编	王春晖	李华雄	焦立卓	邱兴起
	孙英娟	平燕娜	刘新玉	
主 审	朱彦奇			
参 审	宋永昌			

机械工业出版社



丛书编委会



主 任：王 建

副主任：楼一光 雷云涛 李 伟 王小涓

委 员：张 宏 王智广 李 明 王 灿 伊洪彬 徐洪亮
施利春 杜艳丽 李华雄 焦立卓 吴长有 李红波
何宏伟 张 桦

前言

FOREWORD

随着经济全球化进程的不断加快,发达国家的制造能力加速向发展中国家转移,我国已成为全球的加工制造基地,但却凸显了我国高技能型人才严重短缺的现实问题,特别是对掌握数控加工技术以及自动化新技术人才的需要越来越多,而很多工人受条件限制,无法到学校接受系统的数控加工技术以及自动化新技术的职业教育;对于离开校园数年、有一定工作经验的人员,也需要进行“充电”,以适应新技术发展的需要。

为解决上述矛盾,本丛书编委会组织一批学术水平高、经验丰富、实践能力强,身处企业、行业一线的专家在充分调研的基础上,结合企业实际需要,共同研究培训目标,编写了这套《机电专业新技术普及丛书》。

本套丛书的编写特色有:

1. 坚持以“以技能为核心,面向青年工人的继续充电、继续提高”为培养方针,把企业和技术工人急需的高新技术进行普及和推广,加快高技能人才的培养,更好地满足企业的用人需求。

2. 更注重实际工作能力和动手技能的培养,内容贴近生产岗位,注重实用,力图实现培训的“短、平、快”,使学员经过培训后能立即胜任本岗位的工作。

3. 在内容上充分体现一个“新”字,即充分反映新知识、新技术、新工艺和新设备,紧跟科技发展的潮流,具有先进性和前瞻性。

4. 以解决实际问题为切入点,尽量采用以图代文、以表代文的编写形式,最大限度降低学习难度,提高读者的学习兴趣。

本套丛书涉及数控技术和电气技术两大领域,是面向有志于学习数控加工、机电一体化以及自动控制实用技术,并从事过相关工作的技术工人的培训用书。适合有一定经验的工人进行自学或转岗培训。

我们希望这套丛书能成为读者的良师益友,能为读者提供有益的帮助!

本书由王建、崔书华、邱鹏任主编,崔东伟、李伟、张宏、程军芳、侯玉勇任副主编,王春晖、李华雄、焦立卓、邱兴起、孙英娟、平燕娜、刘新玉参加编写。全书由朱彦奇任主审,宋永昌参审。

由于时间和水平有限,书中难免存在不足之处,敬请广大读者批评指正。

编者

目 录

CONTENT

	前言
1	第一章 传感器基础知识
1	第一节 传感器的定义、组成及分类
2	第二节 传感器的基本特性
8	第二章 应变式传感器
8	第一节 应变式传感器理论
12	第二节 应变式传感器的测量电路
21	第三章 电感式传感器
21	第一节 可变磁阻式传感器
25	第二节 电涡流式传感器
27	第三节 差动变压器式传感器
28	第四节 电感式传感器的应用
31	第四章 电容式传感器
31	第一节 电容式传感器的工作原理及结构
32	第二节 电容式传感器的测量电路
35	第三节 电容式传感器的应用
38	第五章 光电式传感器
38	第一节 光电效应的分类
39	第二节 光电器件的类型
47	第三节 光电式传感器的应用

52	第六章 波传感器
52	第一节 声波传感器
57	第二节 红外传感器
60	第三节 核辐射传感器
66	第七章 半导体传感器
66	第一节 气敏传感器
71	第二节 湿敏传感器
76	第三节 色敏传感器
79	第八章 数字式传感器
79	第一节 光栅传感器
84	第二节 编码器
89	第三节 感应同步器
95	第四节 旋转变压器
98	第九章 热电式传感器
98	第一节 热电偶温度传感器
103	第二节 电阻式温度传感器
106	第三节 温度传感器的应用
107	第四节 热电开关
112	第十章 霍尔式传感器
112	第一节 霍尔效应及霍尔元件
117	第二节 霍尔传感器的应用
121	第十一章 压电式传感器
121	第一节 压电效应
123	第二节 压电材料
124	第三节 压电式传感器的测量电路
126	第四节 压电式传感器的应用
129	第十二章 光纤传感器

129	第一节 光纤的结构及传光原理
131	第二节 光纤传感器的工作原理
133	第三节 光纤传感器的应用
138	第十三章 激光传感器
138	第一节 激光传感器的工作原理
140	第二节 激光传感器的应用
142	第十四章 生物传感技术
142	第一节 生物分子传感器
144	第二节 酶传感器
145	第三节 微生物传感器
149	第四节 免疫传感器
155	第五节 生物电子学传感器
157	第六节 仿生传感器
164	第七节 生物传感技术的应用
168	参考文献

第一章

传感器基础知识

第一节 传感器的定义、组成及分类

一、传感器的定义

传感器有时也称为换能器、转换器或探测器。它是一种把被测物理量或化学量转换成与之有确定对应关系的有用输出信号（一般为变量）的装置。传感器输出的信号有多种形式，如电压、电流、频率、脉冲等，以满足信息的传输、处理、记录、显示和控制等要求。

二、传感器的组成

通常情况下，传感器由敏感元件和转换元件组成，其组成框图如图 1-1 所示。其中，敏感元件是指传感器中能直接感受或响应被测量的部分；转换元件是指传感器中能将敏感元件感受或响应的被测量转换成适于传输或测量功能电信号的部分。由于传感器的输出信号一般都很微弱，需要有信号调理与转换电路，进行放大运算调制等，此外信号调节电路及传感器的工作必须有辅助的电源，因此信号调节与转换以及所需的电源都应作为传感器组成的一部分。随着半导体器件与集成技术在传感器中的应用，传感器的信号调节转换电路与敏感元件一起集成在同一芯片上，它安装在传感器的壳体里。

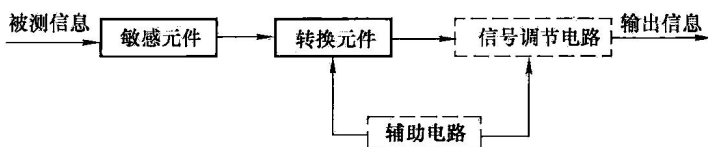


图 1-1 传感器组成框图

三、传感器的分类

传感器的原理各种各样，其种类繁多，分类方法见表 1-1。

表 1-1 分类方法

分 类	测 定 量
机械	长度、厚度、位移、液位、速度、加速度、旋转角、旋转数、质量、重量、力、压力、真空度、力矩、旋转力、风速、流速、流量、振动
音响	声压、噪声
频率	频率、时间
电气	电流、电压、电位、功率、电荷、阻抗、电阻、电容、电感、电磁波

(续)

分 类	测 定 量
磁性	磁通、磁场
温度	温度、热量、比热容
光	照度、光度、彩色、紫外线、红外线、光位移
射线	辐照量、剂量
湿度	湿度、水分
化学	纯度、浓度、成分、pH 值、粘度、密度、比重、气·液·固体分析
生理	心音、血压、血流、脉电波、血流冲击、血液氧饱和度、血液气体分压、气液量、速度、体温、心理波、脑电波、肌肉电波、网膜电波、心磁波
信息	模拟量、数字量、运算、传递、相关值

第二节 传感器的基本特性

在测试过程中，要求传感器能感受到被测量的变化，并将其不失真地转换成容易测量的量。被测量一般有两种形式：一种是稳定的，即不随时间变化或变化极其缓慢，称为表态信号；另一种随时间变化而变化，称为动态信号。由于输入量的状态不同，传感器所呈现出来的输入—输出特性也不同，因此，传感器的基本特性一般用静态特性和动态特性来描述。

一、传感器的静态特性

传感器的静态特性是指被测量的值处于稳定状态时的输出与输入之间的关系。衡量静态特性的重要指标是线性度、迟滞、灵敏度、重复性、漂移等。

1. 灵敏度

灵敏度是衡量传感器静态特性的一个重要指标。其定义为输出量增量 Δy 与引起输出量增量 Δy 的相应输入量增量 Δx 之比。用 S 表示灵敏度，即

$$S = \Delta y / \Delta x \quad (1-1)$$

它表示单位输入量的变化所引起传感器输出量的变化，很显然，灵敏度 S 值越大，表示传感器越灵敏。

线性传感器的灵敏度就是它的静态特性的斜率，其灵敏度 S 在整个测量范围内为常量，如图 1-2a 所示；而非线性传感器的灵敏度为一变量，用 $S = dy/dx$ 表示，实际上就是输入与输出特性曲线上某点的斜率，且灵敏度随输入量的变化而变化，如图 1-2b 所示。

从灵敏度的定义可知，传感器的灵敏度通常是一个有量纲的量，因此表述某一传感器灵敏度，必须说明它的量纲。

2. 线性度

传感器的线性度是指传感器的输出与输入之间数量关系的线性程度。输出与输入关系可分为线性特性和非线性特性。从传感器的性能看，希望具有线性关系，即理想的输入与输出关系。但是，实际遇到的传感器大多为非线性的，如图 1-3 所示。

在实际使用中，为了标定和数据处理方便，希望得到线性关系，因此引入各种非线性环节，如采用非线性补偿电路或计算机软件进行线性化处理，从而使传感器的输出和输入关

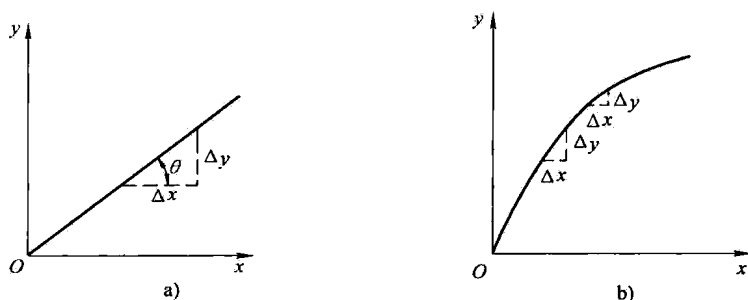


图 1-2 传感器的灵敏度

a) 线性传感器的灵敏度 b) 非线性传感器的灵敏度

系为线性或接近线性,但如果传感器非线性的程度不高,输入量变化范围较小时,可用一条直线(切线或割线)近似地代表实际曲线的一段,使传感器输入与输出特性线性化,所采用的直线称为拟合直线。

传感器的线性度是指在全量程范围内实际特性曲线与拟合直线之间的最大偏差值 $\Delta L_{\max}$ 与满量程输出值 Y_{FS} 之比。线性度也称为非线性误差,用 γ_L 表示,即

$$\gamma_L = \pm \frac{\Delta L_{\max}}{Y_{FS}} \times 100\% \quad (1-2)$$

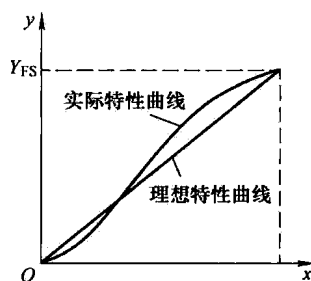


图 1-3 传感器线性度

式中 $\Delta L_{\max}$ ——最大非线性绝对误差;

Y_{FS} ——满量程输出值。

选取拟合直线的方法很多,图 1-4 所示为几种直线的拟合方法。即使是同类传感器,拟合直线不同,其线性度也是不同的。通常采用最小二乘法求取拟合直线,应用此方法拟合的直线与实际曲线的所有点的平方和为最小,其非线性误差较小。

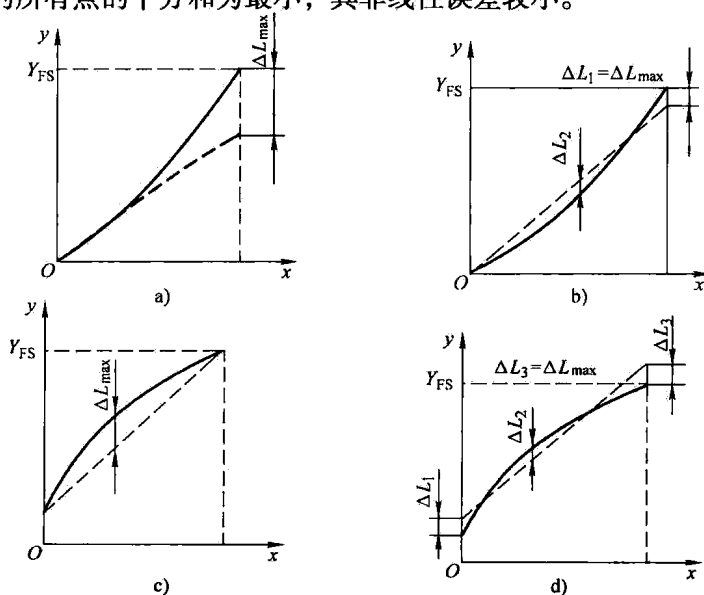


图 1-4 几种直线的拟合方法

a) 理论拟合 b) 过零旋转拟合 c) 端点连线拟合 d) 端点平移拟合

3. 迟滞

传感器的输入量由小到大（正行程）及输入量由大到小（反行程）变化期间其输入与输出特性曲线不重合的现象称为迟滞，如图 1-5 所示。也就是说，对于同一大小的输入信号，传感器的正反行程输出信号大小不相等，这个差值称为迟滞差值。传感器在全量程范围内最大的迟滞差值 $\Delta H_{\max}$ 与满量程输出值 Y_{FS} 之比称为迟滞误差，用 γ_H 表示，即

$$\gamma_H = \frac{\Delta H_{\max}}{Y_{FS}} \times 100\% \quad (1-3)$$

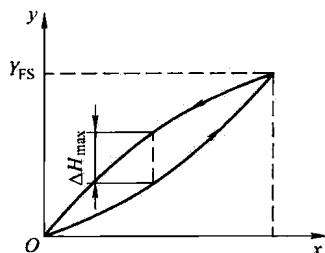


图 1-5 传感器的迟滞特性

产生这种现象的主要原因是由于传感器敏感元件材料的性质和机械零部件的缺陷所造成的，例如弹性敏感元件弹性滞后、运动部件摩擦、传动机构的间隙、紧固件松动等。

迟滞误差又称为回差或变差。

4. 重复性

重复性是指传感器在输入量按同一方向作全量程连续多次变化时，所得特性曲线不一致的程度，如图 1-6 所示。重复性误差属于随机误差，常用标准差 σ 计算，也可用正反行程中最大重复差值 $\Delta R_{\max}$ 计算，即

$$\gamma_R = \pm \frac{(2 \sim 3)\sigma}{Y_{FS}} \times 100\% \quad (1-4)$$

$$\text{或} \quad \gamma_R = \pm \frac{\Delta R_{\max}}{Y_{FS}} \times 100\% \quad (1-5)$$

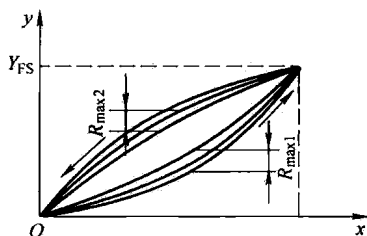


图 1-6 传感器的重复性

5. 漂移

传感器的漂移是指在输入量不变的情况下，传感器输出量随时间发生变化，此现象称为漂移。产生漂移的原因有两个：一是传感器自身结构参数；二是周围环境（如温度、湿度等）。最常见的漂移是温度漂移，即周围环境温度变化而引起输出量的变化，温度漂移主要表现为温度零点漂移和温度灵敏漂移。

温度漂移通常用传感器工作环境温度偏离标准环境温度（一般为 20°C ，即 t_{20} ）时输出值的变化量 $(y_t - y_{t_{20}})$ 与温度变化量 Δt 之比，用 ξ 来表示，即

$$\xi = \frac{y_t - y_{t_{20}}}{\Delta t} \quad (1-6)$$

式中 Δt ——工作环境温度 t 偏离标准环境温度 t_{20} 之差，即 $\Delta t = t - t_{20}$ ；

y_t ——传感器在环境温度 t 时的输出；

$y_{t_{20}}$ ——传感器在环境温度 t_{20} 时的输出。

二、传感器的动态特性

传感器的动态特性是指其输出对随时间变化的输入量的响应特性。一个动态特性好的传感器，其输出量将再现输入量的变化规律，即具有相同的时间函数。在动态的输入信号情况下，输出信号一般来说不会与输入信号具有完全相同的时间函数，这种输出与输入间的差异就是所谓的动态误差。

影响传感器的动态特性主要是传感器的固有因素,如温度传感器的热惯性等,不同的传感器,其固有因素的表现形式和作用程度不同。另外,动态特性还与传感器输入量的变化形式有关。也就是说,在研究传感器动态特性时,通常是根据不同输入变化规律来考察传感器的动态响应的。传感器的输入量随时间变化的规律是各种各样的,下面对传感器动态特性的分析,同自动控制系统分析一样,通常从时域和频域两方面采用瞬态响应法和频率响应法来分析。

1. 瞬态响应法

研究传感器的动态特性时,在时域中对传感器的响应和过渡过程进行分析的方法,称为时域分析法,这时传感器对所加激励信号的响应称为瞬态响应。常用激励信号有阶跃函数、斜坡函数、脉冲函数等。下面以最典型、最简单、最容易实现的阶跃信号作为标准输入信号来分析评价传感器的动态性能指标。

给静止的传感器输入一个单位阶跃函数信号,即

$$u(t) = \begin{cases} 1 & t \leq 0 \\ 0 & t > 0 \end{cases} \quad (1-7)$$

其输出特性为阶跃响应特性或瞬态响应特性。瞬态响应特性曲线如图 1-7 所示。

(1) 最大超调量 M_p 最大超调量就是响应曲线偏离阶跃曲线的最大值,常用百分数表示。当稳态值为 K 时,则最大百分比超调量

$$M_p = \frac{y(t_p) - y(\infty)}{y(\infty)} \times 100\%。$$

最大超调量反映传感器的相对稳定性。

(2) 延滞时间 t_d t_d 是阶跃响应达到稳态值 50% 时所需要的时间。

(3) 上升时间 t_r 根据控制理论,它有以下几种定义方法:

- 1) 响应曲线从稳态值的 10% 上升到 90% 时所需的时间。
- 2) 响应曲线从稳态值的 5% 上升到 95% 时所需的时间。
- 3) 响应曲线从零上升到第一次到达稳态值时所需的时间。

对有振荡的传感器常用第三种描述方法,对无振荡的传感器常用第一种描述方法。

(4) 峰值时间 t_p 响应曲线从零上升到第一个峰值时所需的时间。

(5) 响应时间 t_s 响应曲线衰减到稳态值之差不超过 $\pm 5\%$ 或 $\pm 2\%$ 时所需要的时间。有时又称为过渡过程时间。

2. 频率响应法

频率响应法是从传感器的频率特性出发研究传感器的动态特性。传感器对正弦波输入信号的响应特性称为频率响应特性。对传感器动态特性的理论研究,通常是先建立传感器的数学模型,通过拉氏变换找出传递函数表达式,再根据输入条件得到相应的频率特性。大部分传感器可简化为单自由度一阶或二阶系统,其传递函数可分别简化为

$$H(j\omega) = \frac{1}{\tau(j\omega) + 1} \quad (1-8)$$

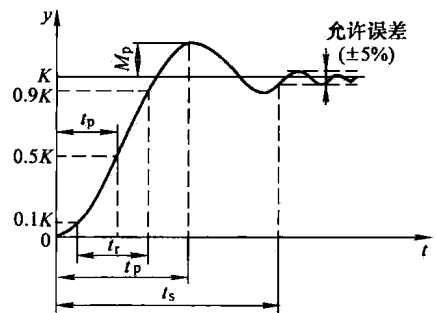


图 1-7 瞬态响应特性曲线

$$H(j\omega) = \frac{1}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2 + 2j\xi \frac{\omega}{\omega_n} + 1}$$

(1-9)

因此，人们可以方便地应用自动控制原理中的分析方法和结论，研究传感器的频率特性时，主要是用幅频特性。传感器频率响应特性指标主要有以下几个：

(1) 频带 传感器增益保持在一定值内的频率范围称为传感器的频带或通频带，对应 有上、下截止频率。

(2) 时间常数 τ 用时间常数 τ 来表征一阶传感器的动态特性。其中 τ 越小，频带越宽。

(3) 固有频率 ω_n 二阶传感器的固有频率。它表征了其动态特性。

对于一阶传感器，减小 τ 可改善传感器的频率特性。对于二阶传感器，为了减小动态误差和扩大频率响应范围，一般是提高传感器固有频率 ω_n 。而固有频率 ω_n 与传感器运动部件的质量 m 和弹性敏感元件的刚度 k 有关，即 $\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}$ 。增大刚度 k 和减小质量 m ，可提高固有频率 ω_n ，但刚度增加后会使传感器灵敏度降低。所以在实际应用中，应综合考虑各种因素来确定传感器的特征参数。

三、传感器的作用和发展方向

1. 传感器的作用

随着科学技术的发展，在信息系统中起到“感官”作用的传感器属于信息技术的前沿尖端产品，它是信息采集系统的首要部件，是实现现代化测量和自动控制（包括遥感、遥测、遥控）的主要环节。

传感器的主要用途见表 1-2。

表 1-2 传感器的主要用途

主要用途	详细说明
生产过程的测量与控制	在生产过程中，对温度、压力、流量、位移、液体和气体成分等参量进行检测，从而实现对工作状态的控制
安全报警与环境保护	利用传感器可对高温、放射性污染以及粉尘弥漫等恶劣工作条件下的过程参量进行远距离测量与控制，并可实现安全生产。可用于温控、防火、防盗等方面的报警系统。在环境保护方面可用于对大气与水质污染的监测、放射性和噪声的测量等
自动化设备和机器人	传感器可提供各种反馈信息，尤其是传感器与计算机的结合，使自动化设备的自动化程度有了很大提高。在现代机器人中大量使用了传感器，其中包括力、转矩、位移、超声波、转速和射线等许多传感器
交通运输和资源探测	传感器可用于对交通工具、道路和桥梁的管理，以保证提高运输的效率与防止事故的发生，还可用于陆地与海底资源探测以及空间环境、气象等方面的测量
医疗卫生和家用电器	利用传感器可实现对病患者的自动检测与监护，可用于微量元素的测定、食品卫生检疫等，尤其是作为离子敏感器件的各种生物电极，已成为生物工程理论研究的重要测试装置

近年来，由于科学技术和经济的发展及生态平衡的需要，传感器的应用领域还在不断扩大。

2. 传感器的发展方向

(1) 高精度 为了提高测控精度，必须使传感器的精度尽可能高，例如对于火箭发动机燃烧室的压力测量，希望测试精度能优于 0.1%，对超精加工“在线”检测精度高于

0.1 μm ，因此需要研制出高精度的传感器，以满足测量的需要。目前我国已研制出精度优于0.05%的传感器。

(2) 小型化 很多测控场合要求传感器具有尽可能小的尺寸。例如：生物医学工程颅压的测量，风洞中压力场分布的测量等。压阻式传感器的出现，使压力传感器在小型化方面取得了重大进展。目前，我国已有外径为2.78mm的压阻式压力传感器。

(3) 集成化 集成化传感器有两种类型：一种是将传感器与放大器、温度补偿电路等集成在同一块芯片上，既可以减小体积，又能够增加抗干扰能力；另一种是将同一类传感器集成在同一块芯片上，构成二维陈列式传感器，或称为面型固态图像传感器，它可以测量物体的表面状况。

(4) 数字化 为了实现传感器与计算机直接联机，致力于数字式传感器的研究是很重要的。

(5) 智能化 智能传感器是传感器与微型计算机结合的产物，它兼有检测与信息处理功能。与传统传感器相比，它有很多特点，它的出现是传感器技术发展中的一次飞跃。国外已经有商品化的智能传感器，我国也开始了智能传感器的研究工作。

第二章

应变式传感器

第一节 应变式传感器理论

电阻应变式传感器是利用电阻应变片将被测物理量的变化转换为电阻变化的传感器，传感器由在弹性元件粘贴电阻应变敏感元件构成。当被测物理量作用在弹性元件上时，弹性元件的变形引起应变敏感元件电阻值变化，通过转换电路转变为电量输出，电量变化大小反映了被测物理量的大小。由于电阻应变式传感器具有结构简单、体积小、使用方便、动态响应快、测量精确高等优点，因而被广泛应用于航天、机械、电力、化工、建筑、纺织、医学等领域，成为目前应用最广泛的传感器之一。

一、应变片的种类、材料及粘贴

1. 金属电阻应变片的种类

金属电阻应变片品种繁多、形式多样，常见的有丝式电阻应变片和箔式电阻应变片。

金属电阻应变片由敏感栅、基片、覆盖层和引线等部分组成，如图 2-1 所示。敏感栅是应变片的核心部分，它粘贴在绝缘基片上，其上再粘贴起保护作用的覆盖层，两端焊接引出导线。金属电阻应变片的敏感栅有丝式和箔式两种形式，如图 2-2 所示。丝式金属电阻应变片的敏感栅由直径为 $0.01 \sim 0.05\text{mm}$ 的电阻丝平行排列而成。箔式金属电阻应变片是利用光刻、腐蚀等工艺制成的一种很薄的金属箔栅，其厚度一般为 $0.003 \sim 0.01\text{mm}$ ，可制成各种形状的敏感栅（即应变花），其优点是表面积和截面积之比大，散热性能好，允许通过的电流较大，可制成各种所需的形状，便于批量生产。覆盖层与基片将敏感栅紧密地粘贴在中间，对敏感栅起几何形状固定和绝缘、保护作用，基片要将被测体的应变准确地传递到敏感栅上，因此它很薄，一般为 $0.03 \sim 0.06\text{mm}$ ，使它与被测体及敏感栅能牢固地粘合在一起，此外它还应有良好的绝缘性能、抗潮性能和耐热性能。基片和覆盖层的材料有胶膜、纸、玻璃纤维布等。

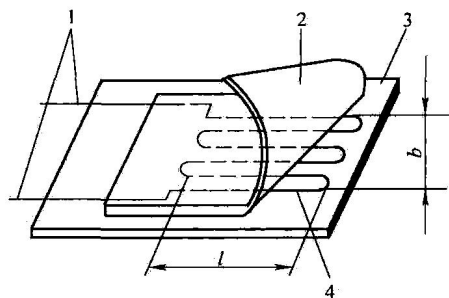


图 2-1 金属电阻应变片的结构

1—引线 2—覆盖层
3—基片 4—电阻丝式敏感栅

2. 金属电阻应变片的材料

对电阻丝材料应有如下要求：

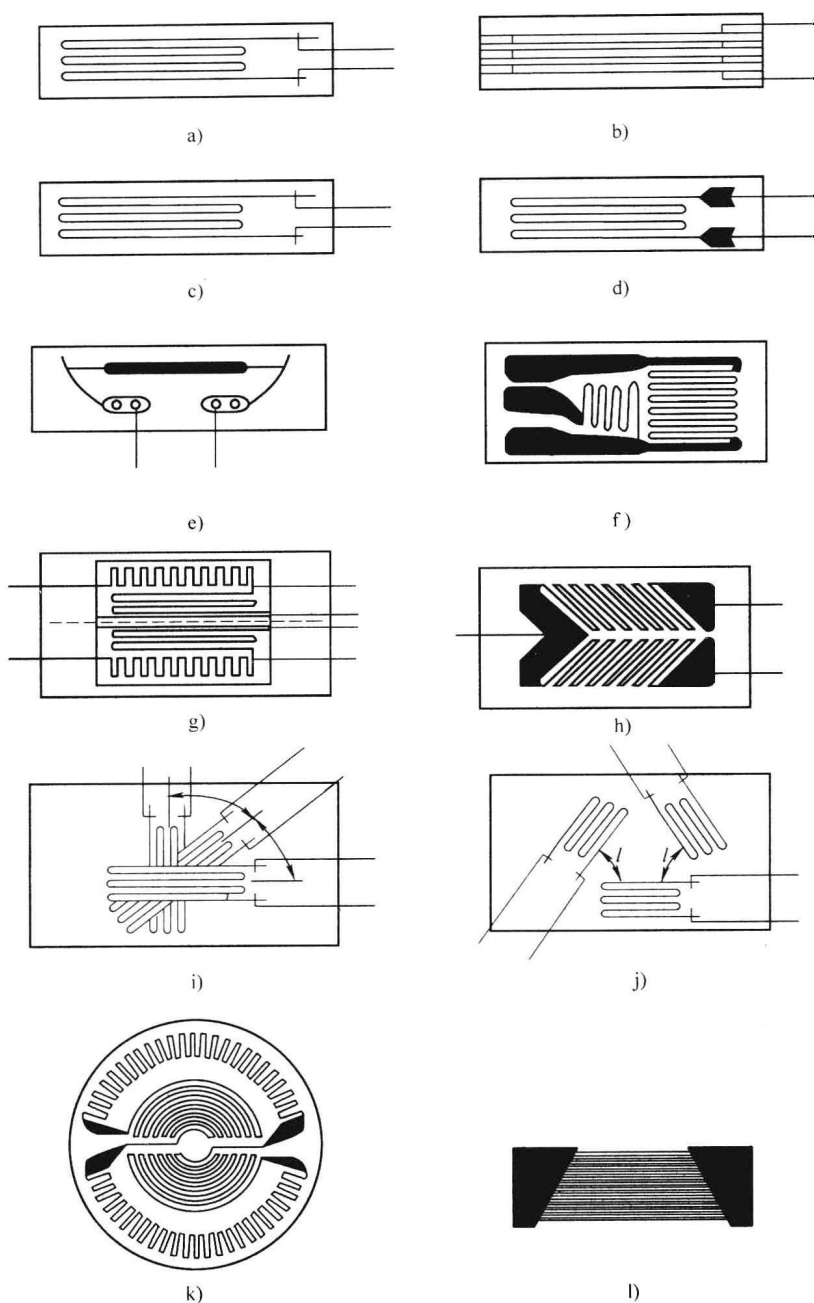


图 2-2 常用应变片的形式

- 1) 灵敏系数大，且在相当大的应变范围内保持常数。
- 2) ρ 值大，即在同样长度、同样横截面积的电阻丝中具有较大的电阻值。
- 3) 电阻温度系数小，否则因环境温度变化也会改变其电阻值。
- 4) 与铜线的可焊性好，与其他金属的接触电动势小。
- 5) 机械强度高，具有优良的机械加工性能。

常用金属电阻丝材料的性能见表 2-1。

表 2-1 常用金属电阻丝材料的性能

材料	成分		灵敏系数 K_0	电阻率/ $(\mu\Omega \cdot \text{mm})$ (20℃)	电阻温度系数 $\times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ (0~100℃)	最高使用 温度/ $^\circ\text{C}$	对铜的热电动 势($\mu\text{V}/^\circ\text{C}$)	线膨胀系数 $\times 10^{-6}/^\circ\text{C}$
	元素	%						
康铜	Ni	45	1.9~2.1	0.45~0.25	± 20	300 400	43	15
	Cu	55						
镍铬合金	Ni	80	2.1~2.3	0.9~1.1	110~130	450 800	3.8	14
	Cr	20						
镍铬铝合金 (6J22, 卡马合金)	Ni	74	2.4~2.6	1.24~1.42	± 20	450 800	3	
	Cr	20						
	Al	3						
	Fe	3						
镍铬铝合金 (6J23)	Ni	75	2.4~2.6	1.24~1.42	± 20	450 800	3	
	Cr	20						
	Al	3						
	Cu	2						
铁镍铝合金	Fe	70	2.8	1.3~1.5	30~40	450 1000	2~3	14
	Cr	25						
	Al	5						
铂	Pt	100	4~6	0.09~0.11	3900	700 1000	7.6	8.9
铂钨合金	Pt	92	3.5	0.68	227	800 1000	6.1	8.3~9.2
	W	8						

康铜是目前应用最广泛的应变丝材料，这是由于它有很多优点：灵敏系数稳定性好，不但在弹性变形范围内能保持为常数，进入塑性变形范围内也基本上能保持为常数；康铜的电阻温度系数较小且稳定，当采用合适的热处理工艺时，可使电阻温度系数在 $\pm 50 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 的范围内；康铜的加工性能好，易于焊接，因而国内多以康铜作为应变丝材料。

3. 金属电阻应变片的粘贴

应变片是用粘结剂粘贴到被测件上的。粘结剂形成的胶层必须准确迅速地将被测件应变传递到敏感栅上。选择粘结剂时必须考虑应变片材料 and 被测件材料的性能，不仅要求粘结力强，粘结后力学性能可靠，而且粘合层要有足够大的剪切弹性模量，良好的电绝缘性，蠕变和滞后小，耐湿，耐油，耐老化，动态应力测量时耐疲劳等。还要考虑到应变片的工作条件，如温度、相对湿度、稳定性要求以及贴片固化时加热加压的可能性等。

常用的粘结剂类型有硝化纤维素型、氰基丙烯酸型、聚酯树脂型、环氧树脂型和酚醛树脂型等。

粘贴工艺包括被测件粘贴表面处理、贴片位置确定、涂底胶、贴片、干燥固化、贴片质量检查、引线的焊接与固定以及防护与屏蔽等。粘结剂的性能及应变片的粘贴质量直接影响应变片的工作特性，如零漂、蠕变、滞后、灵敏系数、线性以及它们受温度变化影响的程度。可见，选择粘结剂和正确的粘贴工艺与应变片的测量精度有着极重要的关系。

二、应变式传感器的工作原理

电阻应变片的工作原理是基于应变效应，即导体或半导体材料在外界力的作用下产生机械变形时，其电阻值相应发生变化，这种现象称为“应变效应”。