



信息工程系

教 案

课程名称： 传感器应用技术

教 师： 黄锦胜

总 学 时： 54

理论学时： 36

实训学时： 18

上课班级： 电子 241、电子 241、自主 241、三加 241

授课学期： 2025~2026 学年第 2 学期

第1章 传感技术基础知识

一、教学目标：

掌握传感器的定义、传感器工作原理、性能指标、误差

二、教学重点与难点：

- 1.传感器的定义、工作原理
- 2.传感器性能指标的概念及测试

三、教学方式：讲授法、演示

四、教学方法和手段

- 1.以课堂问答法和案例讨论法为主，以讲授法和指导法为辅；
- 2.使用电子教室多媒体手段进行教学。

五、教学课时：6 课时

六、作业：选择题、填空题、软件安装、仿真实验。（P10）

七、思政元素：围绕社会主义核心价值观、职业道德、社会责任感等方面，实现专业知识传授与价值引领的有机结合。结合国家传感器产业和传感器加工技术发展的现状，激发学生的爱国情怀和产业报国情怀。

八、教学过程及详细内容

一、传感器的概念

1、 传感器：把特定的被测信息（包括物理量、化学量、生物量等）按一定规律转换成某种可用信号输出的器件或装置。这里“可用信号”是指便于处理、传输的信号。当今电信号最易于处理和便于传输，因此，可以把传感器狭义地定义为：传感器（狭义定义）：能将外界非电信号转换成电信号输出的器件。当人类进入光子时代，光信息成为更便于快速、高效地处理与传输的可用信号时，传感器的概

念也可以变为：能把外界信息转换成光信号输出的器件。

2、 传感器技术：是涉及传感（检测）原理、传感器设计、传感器开发和应用的综合技术。传感技术的含义则更为广泛，它是传感器技术、敏感功能材料科学、细微加工技术等多学科技术相互交叉渗透而形成的一门新技术学科——传感器工程学。

3、 传感（检测）原理：是指传感器工作所依据的物理、化学和生物效应，并受相应的定律和法则所支配。如：物理基础的基本定律包括：守恒定律（能量、动量、电荷等），场的定律（包括动力场运动定律、电磁场的感应定律等，其作用与物体在空间的位置及分布有关。），物质定律（如虎克定律、欧姆定律、半导体材料的各种效应等，表示本身内在性质的定律），统计法则（它把微观系统与宏观系统联系起来的物理法则，它们常与传感器的工作状态有关）。

敏感材料：是传感技术发展的物质基础；此外，传感器的加工技术也是传感技术必不可少的组成部分，现代的微细加工技术、光学刻划技术、光学镀膜技术、扩散及各向异性腐蚀技术等新型加工方法的引入，使传感器的加工上了一个大台阶。

二、传感器的组成

传感器一般由三部分组成：敏感元件、转换元件、测量电路组成。其中，能把非电信息转换成电信号的转换元件，是传感器的核心。敏感元件是传感器预先将被测非电量变换为另一种易于变换成电量的非电量，然后再变换为电量，如弹性元件。因此，并非所有传感器都包含这两部分，对于物性型传感器，一般就只有转换元件；而结构型

传感器就包括敏感和转换元件两部分。测量电路，将转换元件输出的电量变成便于显示、记录、控制和处理的有用电信号的电路。传感器的测量电路，经常采用电桥电路、高阻抗输入电路、脉冲调宽电路、振荡电路等特殊电路。

三、传感器的分类

按基本效应分：物理型、化学型、生物型等。

按构成原理分：结构型、物性型。

按测量原理分：应变式、电容式、压电式、热电式等。

按能量关系分：能量转换型（自源型）、能量控制型（外源型）。

按输入量分：位移、温度、压力、流量、加速度等。

按输出量分：模拟式、数字式。

传感器，作为测量与控制系统的首要环节，必须具有快速、准确、可靠、经济实现信息转换的基本要求：

- 1、 足够的容量——工作范围或量程足够大、有一定的过载能力。
- 2、 与测量或控制系统匹配性好，转换灵敏度高。
- 3、 精度适当，且稳定性高。
- 4、 反应速度快、工作可靠性好。
- 5、 适用性和适应性强。对被测对象的状态影响小，不易受外界干扰的影响，使用安全。
- 6、 使用经济，成本低，寿命长，且易于使用、维修和校准。

四、传感器的发展趋势

1、开发新型传感器

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物性型传感器件，物性型传感器亦称固态传感器，它包括半导体、电解质和强磁性体三类。其中利用量子力学诸效应研制的高灵敏传感器，用来检测微弱信号，是传感器技术发展的新趋势，例如，利用核磁共振吸收效应的磁敏传感器，可将检测限扩展到地磁强度的 10^{-7} 次方，利用约瑟夫逊效应的热噪声温度传感器，可测量 10^{-6} 次方的超低温；以及由于光子滞后效应的利用，出现了响应速度极快的红外传感器。目前最先进的固态传感器，在一块芯片上可同时集成差压、静压、温度三个传感器，使差压传感器具有温度和压力补偿功能。

2、传感器的集成化和多功能化

所谓集成化，就是将敏感元件、信息处理或转换单元以及电源等部分利用半导体技术将其制做在同一芯片上；多功能化则意味着传感器具有多种参数的检测功能，如半导体温湿敏传感器、多功能气体传感器等。借助于半导体的蒸镀技术、扩散技术、光刻技术、精密加工及组装技术等，使得传感器的这种发展趋势得以实现。

3、传感器的智能化

传感器与微型计算机相结合就形成了智能传感器，它兼有检测和信息处理功能，同时还具有记忆、存储、解析、统计处理及自诊断、自校准、自适应等功能和远距离通讯。将传感器和计算机的这些功能集成于同一芯片，就形成智能传感器。

4、研究生物传感器和开发仿生传感器

大自然是生物传感器的优秀设计师。如狗的嗅觉（灵敏阈是人的
一百万倍）、鸟的视觉（视力是人的 8~50 倍）、蝙蝠、飞蛾、海豚
的听觉（主动型生物雷达——超声波传感器）、蛇的接近觉（分辨力
达 0.001 度的红外测温传感器）等。所以，这也是传感器的一个发展
方向。

5、传感器的图像化

现代的传感器已不再仅限于对于一点的测量，而开始研究一维、
二维甚至三维空间的测量问题。现已研制成功的二维图像传感器，有
MOS 型、CCD 型、CID 型全固体式摄像器件等。

五、传感器的特征指标

（一）传感器的静态特性

A、静态数学模型

静态模型是指在静态条件下（即输入量对时间 t 的各阶导数为零）得
到的数学模型。不考虑滞后及蠕变，传感器的静态模型可用一代数方
程表示：

$$Y = a_0 + a_1X + a_2X^2 + \dots + a_nX^n$$

式中： Y —输出量；

X —输入量；

a_0 —零位输出；

a_1 —传感器的灵敏度，常用 K 或 S 表示；

a_2, a_3, \dots, a_n —非线性项待定常数。

这种多项式方程可分为四种典型情况，见书。表示输出量与输入量之间的关系曲线称为特性曲线，图 1-1 表示了这四种典型曲线。其中，理想的模型为：

$$Y = a_1 X$$

后三种情况表示的是非线性情况，必须采取线性补偿措施。

B、静态特性指标：

1. 线性度：表征传感器曲线与拟合直线间最大偏差与满量程（F·S）

输出

值的百分比。

$$\delta_L = \pm \Delta_{\max} / Y_{F.S} \times 100\%$$

Δ_{\max} —校准曲线与拟合直线间最大偏差；

$Y_{F.S}$ —传感器满量程输出； $Y_{F.S} = Y_{\max} - Y_0$

拟合直线的方法不同，线性度的大小也不同。拟合直线的方法有：

- 1) 端基法（简单直观，未考虑数据分布、拟合精度低）；
- 2) 理论直线法（与测试值无关，简单、方便）；
- 3) 最小二乘法（拟合精度高，可得最佳拟合直线）；
- 4) 端点平移法（最佳直线法）：正、负偏差最小且相等，拟合精度最高；
- 5) 平均斜率法：精度比端基法高；
- 6) 平均选点法：我国专家提出，等等。

2. 灵敏度：在稳定工作状态时，输出变化量与引起此变化的输入量之比。

3. 精度：在规定条件的最大绝对误差相对传感器满量程输出的百分比。

表征测量结果的可靠程度，

$$A = \Delta A / Y_{F.S} \times 100\%$$

工程中，经常使用精度等级表征传感器的精度：0.05, 0.1, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 5.0etc。

4. 分辨率：在规定的测量范围内，所能检测出被测输入量的最小变化量。也可用该值相对满量程输入值之百分数表示。也称为最小检测量。

5. 迟滞：在相同工作条件下，传感器在正、反行程中输入-输出曲线的不重合程度。正、反行程的最大偏差与满量程之比。

原因：传感器机械结构、制造工艺上的缺陷；摩擦、轴承间隙、螺钉松动、元件损坏、积尘等。

6. 重复性：在相同的工作条件下，输入量按同一方向在全量程范围内连续多次所特性曲线的不一致性。数值上，是各测量值标准偏差最大值
两倍或三倍与满量程的百分比表示。

它反映测量结果偶然误差的大小。而不表示与真值的误差。

7. 零点漂移：在无输入时，传感器输出偏离零值的大小与满量程只比。

8. 温漂：温度变化时，传感器输出值的偏离程度。一般以温度每变化1度，输出最大偏差与满量程的百分数。

9. 阈值：使传感器输出产生可测变化量的最小输入量值。也称为死

区。

(二) 传感器的动态特性

动态特性：是指传感器对于随时间变化的输入量的响应特性。它是反映传感器的输出值真实再现变化的输入量的能力；因为传感器所检测的信号大多是时间的函数。

A. 动态数学模型：

动态模型一般是由常系数微分方程、传递函数的形式来表述的。

传递函数：输出的拉氏变换与输入的拉氏变换之比。

$$\begin{aligned} \text{常微分方程形式} \quad & (a_n D^n + a_{n-1} D^{n-1} + \dots + a_1 D + a_0) Y(t) \\ & = (b_m D^m + b_{m-1} D^{m-1} + \dots + b_1 D + b_0) X(t) \end{aligned}$$

$$\text{传递函数的形式} \quad W(S) = \frac{Y(S)}{X(S)} = \frac{b_m S^m + b_{m-1} S^{m-1} + \dots + b_1 S + b_0}{a_n S^n + a_{n-1} S^{n-1} + \dots + a_1 S + a_0}$$

绝大多数传感器动态模型，一般均可用零阶传感器、一阶传感器、二阶传感器三种形式来描述，习惯用传递函数的形式来表示。

1. 零阶传感器

$$\text{微分方程形式:} \quad y = b_0/a_0 = Kx$$

$$\text{传递函数形式:} \quad W(S) = \frac{Y(S)}{X(S)} = K; \quad K: \text{静态灵敏度。}$$

2. 一阶传感器：

$$\text{微分方程形式:} \quad a_1 dy/dt + a_0 y = b_0 x$$

$$\text{传递函数形式:} \quad W(S) = \frac{Y(S)}{X(S)} = \frac{K}{\tau s + 1}$$

其中， $K=b_0/a_0$ —静态灵敏度； $\tau=a_1/a_0$ —时间常数。

2. 二阶传感器：

微分方程形式： $a_2 d^2y/dt^2 + a_1 dy/dt + a_0 y = b_0 x$

$$W(S) = \frac{Y(S)}{X(S)} = \frac{K}{\frac{S^2}{\omega_0^2} + \frac{2\xi S}{\omega_0} + 1}$$

传递函数形式：

其中， $K=b_0/a_0$ —静态灵敏度； $\omega_0=(a_0/a_2)^{0.5}$ —固有频率；

$\xi = a_1/2(a_0 a_2)^{0.5}$ —阻尼比。

B 动态特性：

传感器的动态特性包括两部分：1) 输出量达到稳定状态后与理想输出量的差别；2) 当输入量发生跃变时，输出量由一个稳态到另一个稳态之间的过渡状态中的误差。工程上，常用输入“标准”信号函数的方法进行分析：正弦函数和阶跃函数。原因：任何周期函数都可以用傅立叶级数分解为各次谐波分量，并把它近似表示为这些正弦量之和。

(一) 零阶传感器

1. 频率响应特性：与频率无关，没有幅值和相位失真问题。
故可称为比例环节或无惯性环节。
2. 阶跃响应特性：阶跃响应与输入成正比。它具有理想的动态特性。

(二) 一阶传感器

1. 频率响应特性：频率传递函数为：

$$W(j\omega) = \frac{K}{j\omega\tau + 1}$$

设输入量为： $x = X \sin \omega t$

输出量为： $y = Y \sin(\omega t + \psi)$

幅频特性: $|W(j\omega)| = \frac{K}{\sqrt{1+\omega^2\tau^2}}$

相频特性: $\psi = \text{arctg}(-\omega\tau)$

由频率特性可知: 时间常数愈小, 频率响应特性愈好。

2. 阶跃响应特性:

阶跃响应指标:

(1) 时间常数 τ : 输出值上升到稳态值 63.2%所需的时间。

(2) 上升时间 T_r : 由 10%到 90%所需的时间。

(3) 响应时间 T_s : 输出值达到误差范围 $\pm \Delta\%$ 所经历的时间。

(4) 超调量 $\sigma\%$: 过渡过程中超过稳态值的最大值 ΔA (过冲) 与稳态值之比的百分数表示。

(5) 衰减率 ψ : 相邻两个波峰高度下降的百分数。

(6) 稳态误差 e_{ss} : 稳态输出值与目标值之差。

阶跃响应: $Y(t) = 1 - e^{-t/\tau}$

由上式可知: 一阶传感器的动态特性取绝于时间常数 τ 。 τ 越小, 响应越迅速。无超调量 $\sigma\%$ 和衰减率 ψ ; 当 $t > 5\tau$ 时, 输出已接近稳态值。

(三) 二阶传感器

1. 频率响应特性: 频率传递函数为:

$$W(j\omega) = \frac{K}{\left(\frac{j\omega}{\omega_0}\right)^2 + \frac{2\xi j\omega}{\omega_0} + 1}$$

幅频特性:

$$|W(j\omega)| = \frac{K}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2\right]^2 + 4\xi^2 \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2}}$$

相频特性:

$$\psi = -\arctg \frac{2\xi \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2}$$

由幅频特性和相频特性可知:

- 1) $\omega/\omega_0 \ll 1$ 时, 近似零阶环节; $A(\omega) \approx 1$, $\psi \approx 0$ 。
- 2) $\omega/\omega_0 \gg 1$ 时, $A(\omega) \approx 0$, $\psi \approx 180^\circ$; 即传感器无响应, 被测参数的频率远高于其固有频率。
- 3) $\omega/\omega_0 = 1$ 时, 且 $\xi \rightarrow 0$, 传感器出现谐振; $A(\omega) \approx \infty$; 输出信号的幅值和相位严重失真。
- 4) 阻尼比 ξ 对频率特性有很大影响: ξ 增大, 幅频特性的最大值减小。 $\xi > 0.707$, 谐振不会发生; $\xi = 0.707$, 幅频特性的平直段最宽。称为最佳阻尼。

2. 阶跃响应特性:

- 1) 欠阻尼 $\xi < 1$; 2) 过阻尼 $\xi > 1$; 3) 临界阻尼 $\xi = 1$; 三种情况。

固有频率越高, 响应曲线上升越快; 反之, 则越慢。欠阻尼时, 发生衰减振荡; $\xi \geq 1$, 不产生振荡, 无过冲; $\xi = 0$, 固有频率时, 形成等幅振荡。

第2章 电阻式与热电式传感器的应用

一、教学目标：

- 1.各种常见电阻式传感器、热电式传感器的工作原理
- 2.电阻式传感器、热电式传感器应用电路设计

二、教学重点与难点：

- 1.各种常见电阻式传感器、热电式传感器的工作原理
- 2.电阻式传感器、热电式传感器应用电路设计
- 3.基于电阻式传感器的称重电子秤系统设计
- 4.基于热电式传感器的温度测量设计

三、教学方式：讲授法、演示

四、教学方法和手段

- 1.以课堂问答法和案例讨论法为主，以讲授法和指导法为辅；
- 2.使用电子教室多媒体手段进行教学。

五、教学课时：9 课时

六、作业：选择题、填空题、实验。（P21）

七、思政元素：围绕社会主义核心价值观、职业道德、社会责任感等方面，实现专业知识传授与价值引领的有机结合。结合国家传感器产业和传感器加工技术发展的现状，激发学生的爱国情怀和产业报国情怀。

八、教学过程及详细内容：

电阻式传感器的种类繁多，应用广泛，其基本原理是将被测物理量的变化转换成电阻值的变化，再经相应的测量电路而最后显示被测量值的变化。电阻式传感器与相应的测量电路组成的测力、测压、称重、测位移、测加速度、测扭矩、测温度等测试系统。目前，已成为

生产过程检测以及实现生产自动化不可缺少的手段之一。

电阻式传感器的种类主要有：电位器式传感器和应变式传感器。

本章主要介绍应变式传感器。它包括：金属应变片式传感器和压阻式传感器。

2.1 金属应变片式传感器

一、应变效应

金属应变片的工作原理是基于电阻应变效应，即在金属丝产生机械变形时，它的电阻值相应发生变化

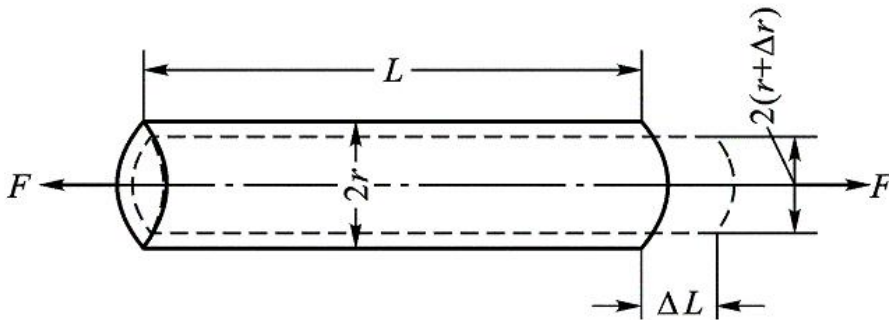


图 2-1 金属丝伸长后几何尺寸变化

由 $R = \rho \frac{L}{S}$ 两边取对数，微分后得

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dL}{L} - \frac{dS}{S}$$

式中： $\frac{dR}{R}$ — 电阻得相对变化； $\frac{d\rho}{\rho}$ — 电阻率的相对变化；

$\frac{dL}{L}$ — 长度相对变化，令 $\varepsilon = \frac{dL}{L}$ 金属丝的轴向应变（纵向）；

$\frac{dS}{S}$ — 截面积的相对变化, $\frac{dS}{S} = 2 \cdot \frac{dr}{r} = 2\varepsilon_r$, ε_r 即为径向应变 (横向)。

$$\varepsilon_r = -\mu\varepsilon$$

又由 $\frac{d\rho}{\rho} = C \frac{dV}{V} = C(1-2\mu)\varepsilon$

所以,

$$\frac{dR}{R} = C(1-2\mu)\varepsilon + \varepsilon + 2\mu\varepsilon = [(1+2\mu) + C(1-2\mu)] \cdot \varepsilon = K_s \varepsilon$$

K_s 称为应变灵敏度系数, 由两部分组成: 一为几何尺寸引起, 一为电阻率变化引起; 对特定的金属材料, 在一定应变范围内为一常数。

二、金属应变片

1. 结构与材料

结构组成: 敏感栅、基底、盖片、粘结剂、引线。

材料要求: 较大灵敏度系数且为常数; 高而稳定的电阻率; 电阻温度系数小; 机械强度高易于加工; 抗氧化耐腐蚀。常用材料: 铜镍合金、卡玛合金、伊文合金、铂和铂合金等。

2. 分类

包括: 金属丝式应变片、金属箔式应变片 (见下图)、金属薄膜式应变片。

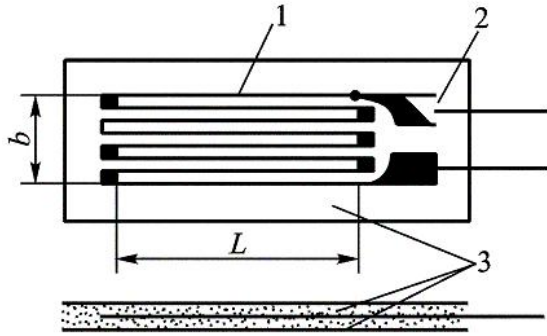


图 2-2 金属箔式应变片的基本结构

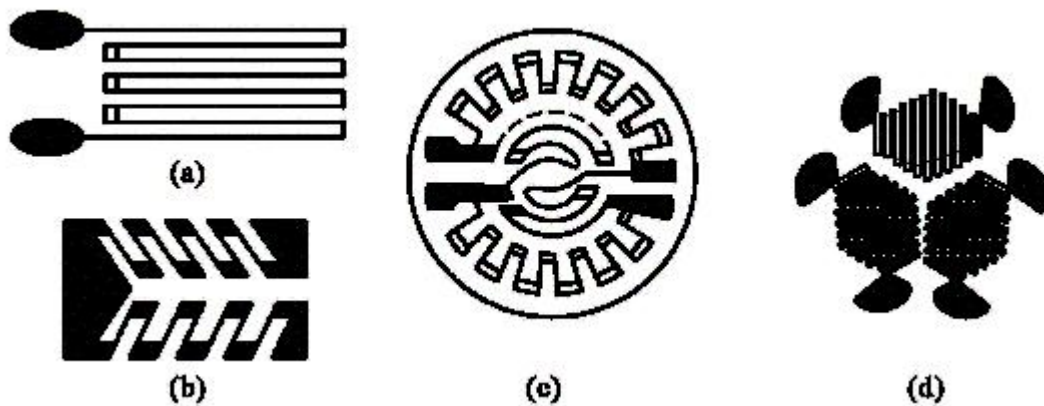


图 2-3 各式箔式应变花

三、主要特性

包括：灵敏度系数、横向效应、机械滞后，零漂及蠕变、温度效应、应变极限、疲劳寿命、动态响应特性等。

1. 灵敏度系数： $K = \frac{\Delta R}{R} / \varepsilon$ ，一般 $K < K_s$ 。主要原因：粘结剂与基底的传递应变失真、横向效应等。

2. 横向效应：敏感栅由轴向纵栅和圆弧横栅两部分组成。所以应变片既受到轴向应变又受到横向应变的影响，且其影响方向相反，这种现象为横向效应。一般，敏感栅愈窄、基长愈长，横向效应愈小，误差愈小。

3. 机械滞后：残余变形所致，使加载与卸载特性出现偏差。

4. 零点漂移和蠕变：温度效应、片内应力、粘结剂固化不充分、胶层间产生滑动等造成。
5. 动态特性：栅长愈短，动态特性愈好。

四、温度误差及补偿

在外界温度变化的条件下，由于敏感栅温度系数 α_t 及栅丝与试件膨胀系数 (β_g 及 β_e) 之差异性而产生虚假应变输出有时会产生与真实应变同数量级的误差。

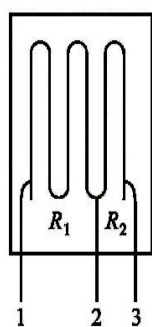
$$\left(\frac{\Delta R}{R}\right)_t = \alpha_t \Delta t + K(\beta_e - \beta_g) \Delta t$$

虚假应变：
$$\varepsilon_t = \frac{\alpha_t}{K} \Delta t + (\beta_e - \beta_g) \Delta t$$

必须采取补偿温度误差的措施。通常温度误差补偿方法有两类：

1. 自补偿法：单丝自补偿法、组合式自补偿法

5、2. 电路补偿法



6、

图 2-4 组合式自动补偿法

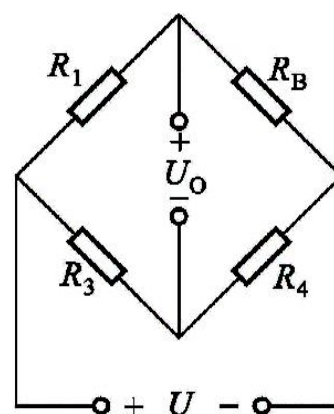
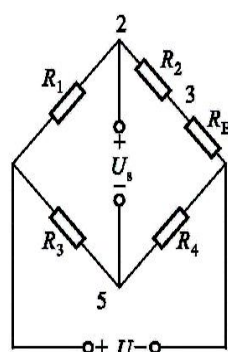
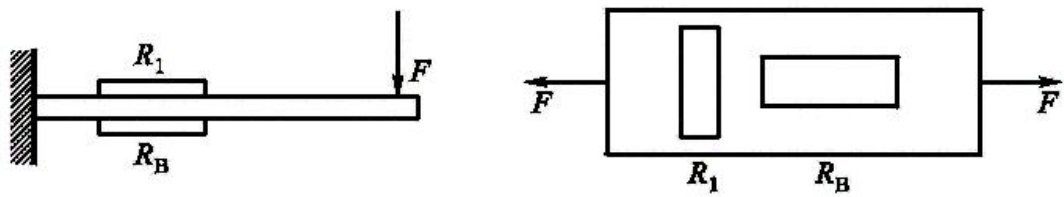


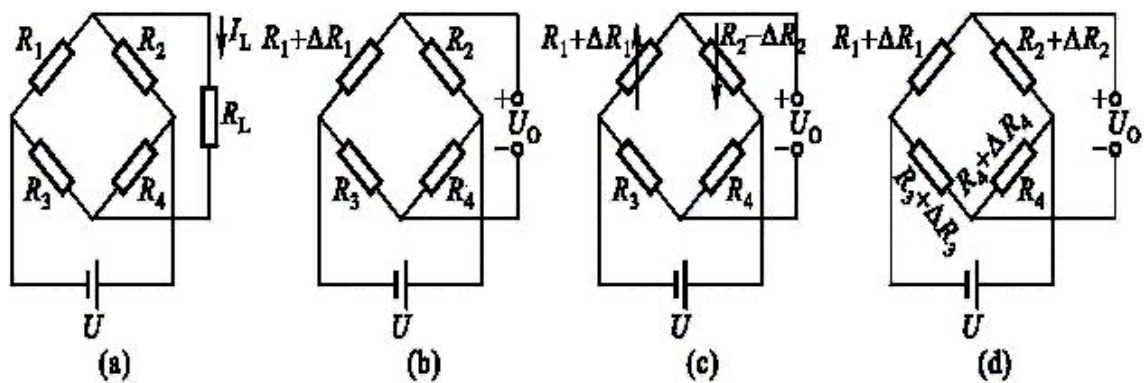
图 2-5 电桥补偿法



7、图 2-6 差动电桥补偿法

电路补偿法要求：(1)补偿电阻与应变电阻同一批号，具有相同的 α_t 、 β_e 和 K ，初始阻值相同；(2)粘结补偿片的材料与被测试件材料相同；(3)两片处于同一温度环境。

五、测量电路



(a) 当负载为无穷大时，

$$U_0 = E \frac{R_1 R_4 - R_2 R_3}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)}$$

(b) 为单臂电桥；(c) 为半桥电路；(d) 为全桥电路。

1. 等臂电桥： $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$

一般情况下，

$$U_0 = \frac{EK}{4} (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 - \varepsilon_3 + \varepsilon_4)$$

上式表明：

- ①当 $\Delta R_i \ll R$ 时，输出电压与应变呈线性关系；
- ②相邻桥臂，应变极性一致时，输出电压为两者之差；应变极性相反时，输出电压为两者之和；
- ③相对桥臂，应变极性一致时，输出电压为两者之和；应变极性相反时，输出电压为两者之差。

对于单臂电桥，输出为：
$$U_0 = \frac{E}{4} K \varepsilon$$

非线性误差，由下式决定，

$$U_0 = \frac{E}{4} K \varepsilon \left(1 + \frac{1}{2} K \varepsilon \right)^{-1}$$

所以， $\delta \approx \frac{1}{2} K \varepsilon$ ；当已知非线性误差时，由此式可计算出最大应变值。

2. 对称电桥：特性与等臂电桥相近。

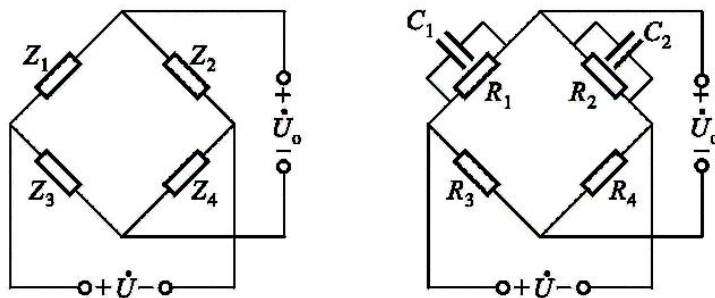
第一对称电桥： $R_1 = R_2 = R$ ， $R_3 = R_4 = R'$ ；特性与等臂电桥相同。

第二对称电桥： $R_1 = R_3 = R$ ， $R_2 = R_4 = R'$ ；分析方法相同，令 $k = \frac{R}{R'}$ ，

$$U_0 = \frac{E}{k+2+1/k} K \varepsilon$$

非线性误差为：
$$\delta = \frac{k}{1+k} K \varepsilon$$

3. 交流测量电桥：



六、应变式传感器

可用于测量应力、应变、压力、力、扭矩及加速度等。

应用特点：(1)应用和测量范围广。测力传感器： $10^{-2}\text{N}\sim 10^7\text{N}$ ；压力传感器： $10^3\sim 10^8\text{Pa}$ ；加速度传感器： 10^3 级 m/s^2 。

(2)分辨力、灵敏度高。

(3)结构轻小，对试件影响小。

(4)易商品化、使用方便、便于实现远距、自动测量。

2.2 压阻式传感器

由硅、锗等半导体材料制成。特点为：灵敏度高、动态响应好、精度高、横向效应小，易于微型化和集成化。

压阻效应是 1954 年发现，1958 年贝尔实验室研制出硅力敏电阻；70 年代后得到迅速发展。

一、压阻效应

沿半导体底某一轴向施加一定的载荷产生应变时，电阻率会发生明显的变化，这种现象称作压阻效应。

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + (1 + 2\mu)\varepsilon$$

对金属材料， $\frac{d\rho}{\rho}$ 较小，有时可忽略不计，故起作用的是应变效应；

对半导体材料， $\frac{d\rho}{\rho} = \pi_l \cdot E \cdot \varepsilon$ ； π_l 为压阻系数， E 为弹性模量。

由于 $\pi_l \cdot E$ 比 $(1+2\mu)$ 大几十到上百倍，故起作用的是压阻效应；
在弹性范围内，应力作用使半导体电阻发生变化，应力除去后，电阻又恢复到原来的数值，故压阻效应是可逆的。

二、压阻系数

1. 晶体晶向的作用

晶体是具有多面体形态的固体，沿不同的晶轴方向， π_l 、 E 的值是不同的。

对于半导体 Si: P[1 1 1]、N[1 0 0]晶向， $K = \pi_l \cdot E$ 最大；

对于半导体 Ge: P[1 1 1]、N[1 1 1] 晶向， $K = \pi_l \cdot E$ 最大。

2. 影响 π_l 的因素：

①杂质浓度，扩散电阻的杂质浓度愈高，压阻系数愈小；

②温度，一般温度愈高，压阻系数愈小。

三、固态压阻器件

1. 结构原理

利用固态扩散技术，在 N 型 Si 半导体底层上扩散 P 型杂质的导电层，形成扩散型半导体应变片。

当在任意晶向上，受到纵向和横向应力作用时，

$$\frac{\Delta R}{R} = \pi_l \sigma_l + \pi_t \sigma_t$$

式中： π_l 、 σ_l ——纵向应力、纵向压阻系数；

π_t 、 σ_t ——横向应力、横向压阻系数。

所以，径向电阻 R_r 和切向电阻 R_t 受到应力作用时：

$$\left(\frac{\Delta R}{R}\right)_r = \pi_l \sigma_r + \pi_t \sigma_t$$

$$\left(\frac{\Delta R}{R}\right)_t = \pi_t \sigma_t + \pi_r \sigma_r$$

2. 测量电桥及温度补偿

测量电桥仍采用金属应变片的测量桥路，为了减少温度影响，一般采用恒流源供电。所以，采用全桥测量时

$$U_0 = I \cdot \Delta R$$

温度补偿：①零点温度补偿，采用串并联电阻实现；

②灵敏度温度补偿，采用在电源回路中串联二极管的方法实现。

第3章 电感式与电容式传感器的应用

二、教学目标：

掌握电感式与电容式的定义、工作原理、性能指标、误差

二、教学重点与难点：

1. 常见电感式传感器、电容式传感器的工作原理
2. 电感式传感器、电容式传感器的应用及电路设计
3. 基于电感式传感器的位移测量设计
4. 基于电容式传感器的接近开关控制设计

三、教学方式：讲授法、演示

四、教学方法和手段

1. 以课堂问答法和案例讨论法为主，以讲授法和指导法为辅；
2. 使用电子教室多媒体手段进行教学。

五、教学课时:9 课时

六、作业：选择题、填空题、传感器实验。（P26）

七、思政元素：围绕社会主义核心价值观、职业道德、社会责任感等方面，实现专业知识传授与价值引领的有机结合。结合国家传感器产业和传感器加工技术发展的现状，激发学生的爱国情怀和产业报国情怀。

八、教学过程及详细内容：

电容器是电子技术中三大无源元件（电阻、电容、电感）之一。电容式传感器是将被测量(如尺寸、压力等)的变化转换成电容量变化的一种传感器。1920~1925年 Whiddington 就利用电容传感器成功测量了大气压下的 $9.3 \times 10^{-4} \text{Pa}$ 的压力变化， 10^{-8}cm 机械位移， $1/16000^\circ\text{C}$ 的温度变化， 10^{-10}N 的重量等。

优点：①温度稳定性好；②结构简单、适应性强；③动态响应好；④可以实现非接触测量，具有平均效应点；⑤机械损失小。

缺点是：①输出阻抗高，负载能力差；②寄生电容影响大；③输出特性非线性

应用领域包括：位移、压力、厚度、物位、温度、湿度、振动、转速、流量及成分分析等。

3.1 电容式传感器的工作原理

由物理学可知，两个平行金属极板组成的电容器，如果不考虑其边缘效应，其电容为：

$$C = \frac{\epsilon S}{d} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r S}{d}$$

式中： ϵ ——两个极板间介质的介电常数；

S ——两个极板相对有效面积；

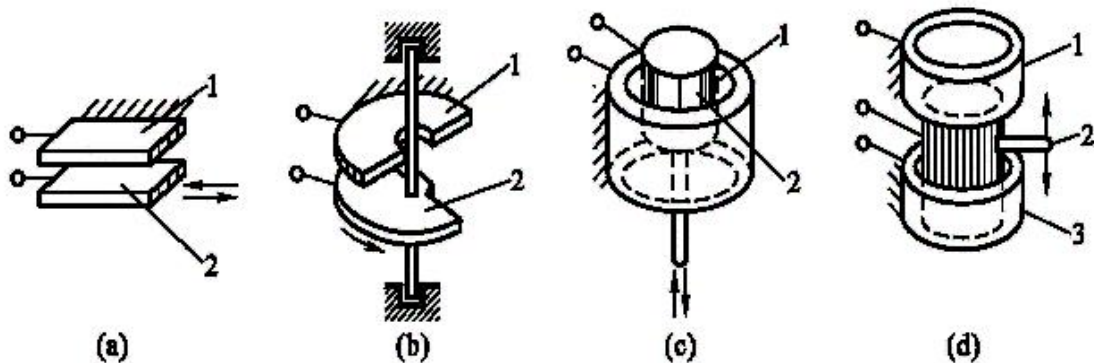
d ——两个极板间的距离。

由上式可知，改变电容 C 的方法有三种，其一为改变介质的介电常数 ϵ ；其二为改变形成电容的有效面积；其三为改变两个极板间的距离。而得到电参数的输出为电容值的增量 ΔC ，这就成了电容式传感器。

根据上述原理，在应用中电容式传感器可以有三种基本类型，即变极距(或称变间隙)型、变面积型和变介电常数型。

它们的电极形状有平板形、圆柱形和球平面形三种。

一、变面积型：



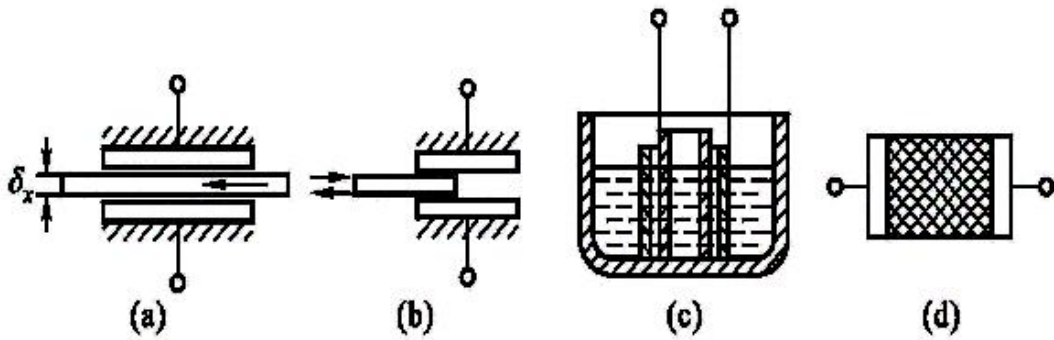
如上图所示，为变面积型电容传感器的四种形式。灵敏度表示为：

$$K = \frac{dC}{dS} = \frac{\epsilon}{d}$$

所以，变面积型传感器是线性的。增大初始电容 C_0 可以提高灵敏度 K ，这种传感器主要用于位移等参数的测量。

二、变介电常数型：

各种介质的介电常数 ϵ 不同，改变 ϵ ，就可以改变电容 C 。



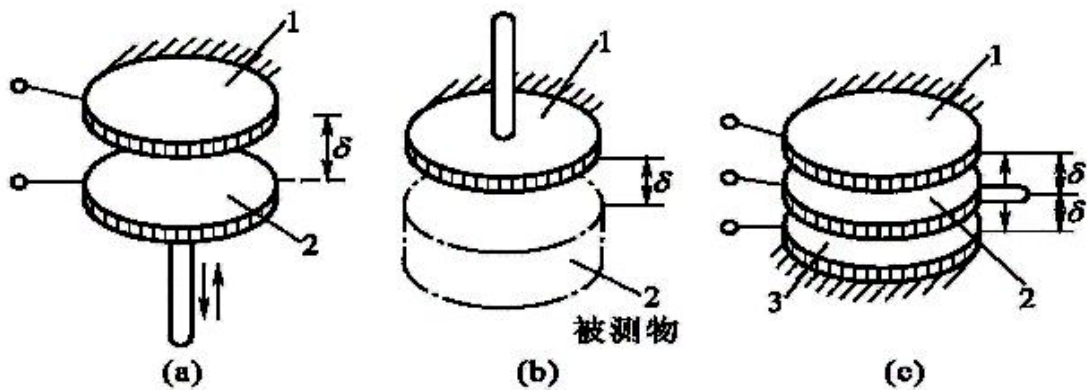
上图为变介电常数型电容传感器的四种形式，其灵敏度系数为：

$$K = \frac{dC}{dS} = \frac{S}{d}$$

所以，变面积型传感器是线性的。增大初始电容 C_0 可以提高灵敏度 K ，这种传感器主要用于物位测量、介电常数测量和测厚仪。

三、变间距型（常用形式）

假设极板间只有一种介质，如下图情况。



对单极式电容表达式为：
$$C = \frac{\epsilon S}{d}$$

其初始电容值为：
$$C_0 = \frac{\epsilon S}{d_0}$$

当极板距离有一个增量 Δd 时，则传感器电容为：

$$C = \frac{\epsilon S}{d_0 + \Delta d} = C_0 + \Delta C$$

所以，灵敏度 K 为

$$K = \frac{\Delta C}{\Delta d} = -\frac{C_0}{d_0} \left[1 - \frac{\Delta d}{d_0} + \left(\frac{\Delta d}{d_0} \right)^2 - \left(\frac{\Delta d}{d_0} \right)^3 + \dots \right]$$

非线性误差为：

$$\delta = \left(\frac{\Delta d}{d_0} \right) \times 100\%$$

只有当 $\Delta d/d_0$ 很小时才可认为是接近线性关系，这就意味着使用这种形式传感器时，被测量范围不应太大。提高灵敏度的措施为：(1)增大初始电容 C_0 ；(2)减小间距 d_0 。

为在比较大的范围内使用此种传感器，可适当的增大极板间的初始距离 d_0 ，以保证比值 $\Delta d/d_0$ 不致过大，但会带来灵敏度下降的缺点，同时也使电容传感器的初始值减小，寄生电容的干扰作用将增加。

常采用差动式电容传感器，此时电容传感器输出为：

$$\Delta C = C_1 - C_2 = 2C_0 \left[\frac{\Delta d}{d_0} + \left(\frac{\Delta d}{d_0} \right)^2 + \left(\frac{\Delta d}{d_0} \right)^3 + \dots \right]$$

灵敏度为：

$$K = 2 \frac{C_0}{d_0}$$

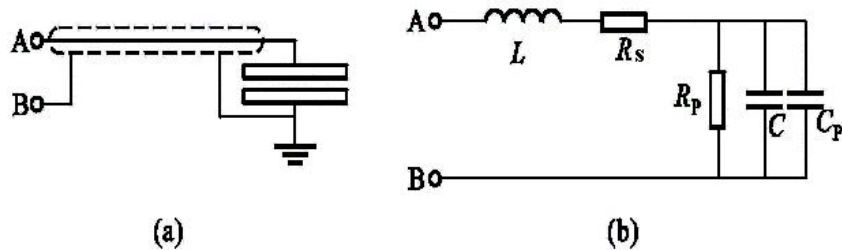
非线性误差为：

$$\delta = \left(\frac{\Delta d}{d_0} \right)^2 \times 100\%$$

变面积型和变介电常数型(测厚除外)电容传感器具有很好的线性。但它们的结论都是忽略了边缘效应得到的。实际上由于边缘效应仍存在非线性问题，且灵敏度下降，但比变极距型好得多。

3.2 电容式传感器的测量电路

一、等效电路



若忽略 R_P 和 C_P 的影响，则等效电容为：

$$C_E = \frac{C}{1 - \omega^2 LC} = \frac{C}{1 - (f/f_0)^2}$$

在这种情况下，实际电容的相对变化量为：

$$\frac{\Delta C_E}{C_E} = \frac{\Delta C / C}{1 - \omega^2 LC} = \frac{\Delta C / C}{1 - (f/f_0)^2}$$

上式表明，电容传感器标定和测量时必须在同样条件下进行。

二、测量电路

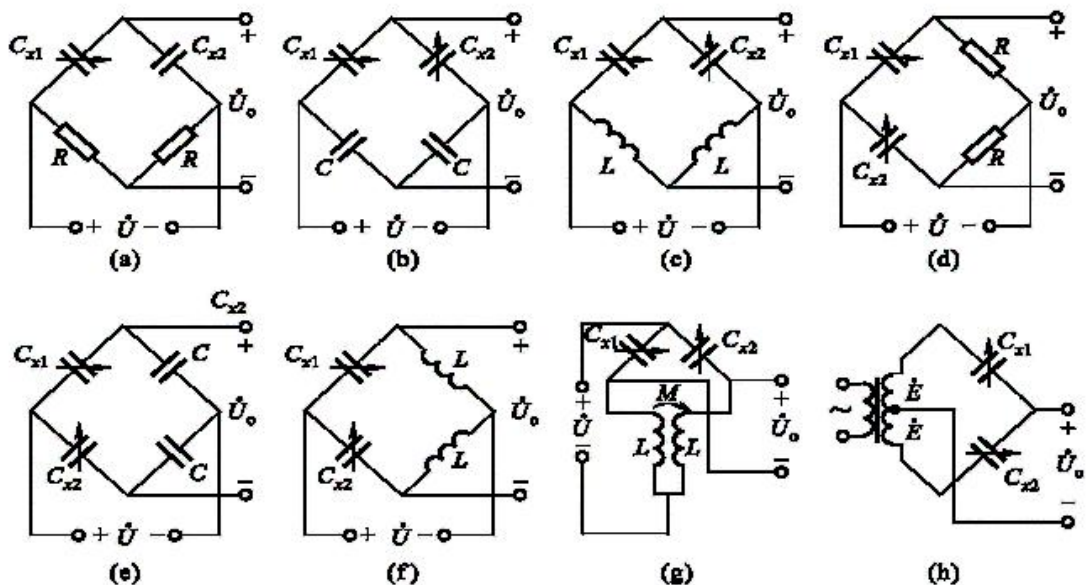
电容式传感器把被测量转换成电路参数 C_0 ，从而使信号能传输、放大、运算、处理、指示、记录、控制，得到所需的测量结果或控制某些设备工作。同时，还根据需要将电路参数 C 进一步转换成电压、电流、频率等电量参数。

目前这样的转换电路种类很多，一般归结为两大类型：调制型和脉冲型(或称为电容充放电器)。

调制型电路分为：调频电路和调幅电路；1. 交流激励法，2. 交流电桥电路

脉冲型电路，脉冲型转换电路的基本原理是利用电容的充放电。两种性能较好，较常用的电路为：双 T 型充放电网络，脉冲调宽型电路。

1. 交流电桥



上图为交流电桥的几种主要形式。

以单臂电桥为例，介绍其工作原理。

电桥输出为：

$$U_0 = \left(\frac{Z_1 + \Delta Z}{Z_1 + \Delta Z + Z_2} - \frac{Z_3}{Z_3 + Z_4} \right) \dot{E}$$

经变换后，有：

$$U_0 = \beta K \dot{E}$$

其中， β 为阻抗相对变化，

$$\beta = \frac{\Delta Z}{Z_1} = \frac{\Delta C}{C_1} \approx \frac{\Delta d}{d_1} ;$$

K 为桥臂系数，

$$K = \frac{Z_1 / Z_2}{(1 + Z_1 / Z_2)^2} = \frac{A}{(1 + A)^2} ;$$

由 $A = \frac{Z_1}{Z_2} = ae^{j\theta}$ ，所以，

$$K = \frac{A}{(1 + A)^2} = ke^{j\gamma} = f(a, \theta)$$

由上述函数关系，可得：

① $a=1$ 时， k 有最大值；

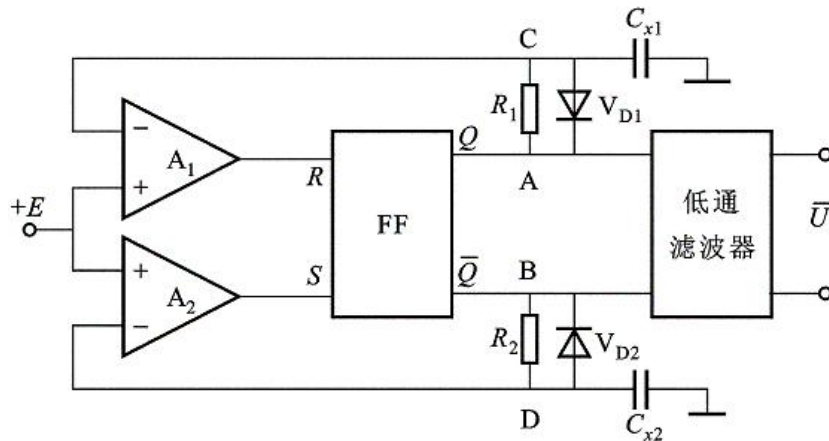
② $\theta=0$ 时， $k_m=0.25$ ； $\theta=\pm 90^\circ$ 时， $k_m=0.5$ ； $\theta=\pm 180^\circ$ 时， $k_m=\infty$ 。

所以，提高电桥灵敏度的方法为：

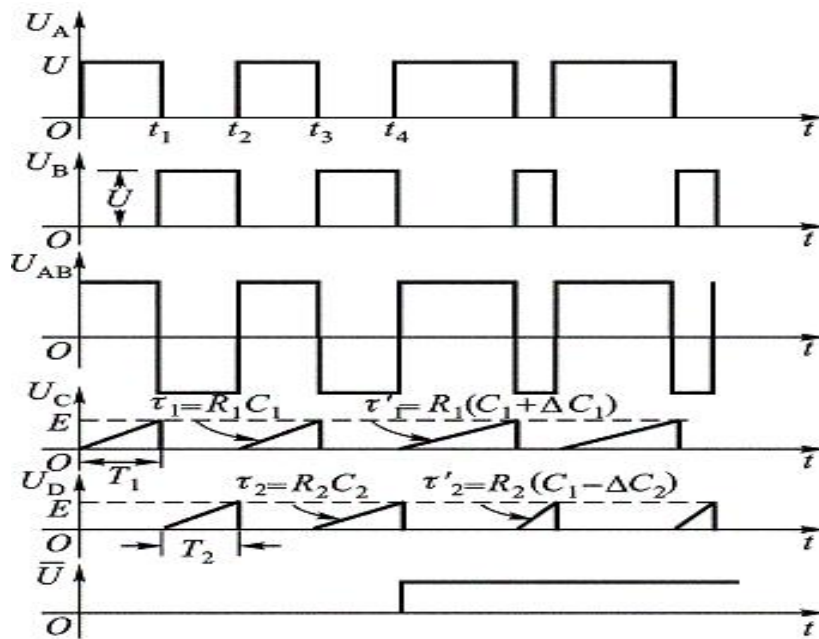
$|Z_1|=|Z_2|$ ，且使两桥臂阻抗幅角差 θ 尽量大。

实际电桥输出一般偏小，而且无法判别输入信号的极性。

2. 脉冲宽度调制电路



如图所示， C_{x1} 和 C_{x2} 构成差动电容传感器。工作过程中，各点的电位变化如以下波形：



令 $R_1 = R_2$ ，则电路输出为：

$$\bar{U} = \frac{C_{x1} - C_{x2}}{C_{x1} + C_{x2}} U_1$$

U_1 为触发器输出高电平，当电容为变间距电容传感器时，

$$\bar{U} = \frac{\Delta d_0}{d_0} U_1$$

所以，该测量电路具有线性输出。

3.3 误差分析

1. 温度的影响

从选材、结构、加工工艺等方面可以有效的减小温度误差，同时保证绝缘材料具有高的绝缘性能。

2. 边缘效应及其消除

边缘效应不仅使电容传感器的灵敏度降低而且产生非线性，因此应尽量消除或减小它。消除边缘效应的方法：

增加原始电容值

加装等位环

3. 寄生与分布电容的影响及消除

寄生电容是电容极板与周围物体产生的电容。它改变电容传感器的电容量且本身极不稳定，影响传感器的灵敏度，而它的变化则为虚假信号影响仪器的精度，必须消除和减小它。

消除和减小寄生电容可采用如下方法：

增加原始电容值可减小寄生电容的影响。

- 注意传感器的接地和屏蔽。

将传感器与电子线路的前置级(集成化)装在一个壳体内，省去传感器至前置级的电缆。

采用"驱动电线"技术(也称"双层屏蔽等位传输"技术)。

采用运算放大器法

整体屏蔽法。防止和减小外界干扰

防止和减小外界干扰的措施：

屏蔽和接地。

增加原始电容值以降低容抗。

导线和导线要离得远，以减小导线间分布电容的静电感应。导线要尽可能短，最好成直角排列，必须平行排列时可采用同轴屏蔽线。

尽可能一点接地，避免多点接地。地线要用粗的良导体或宽印刷线。

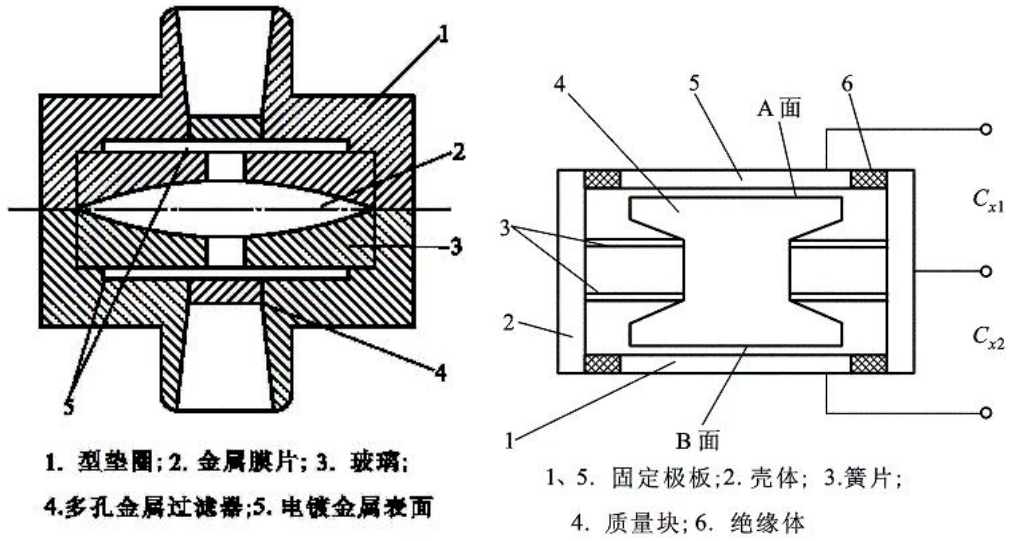
尽量采用差动式电容传感电路，可减小非线性误差，提高传感器灵敏度，减小寄生电容的影响和干扰。

3.4 电容传感器的应用

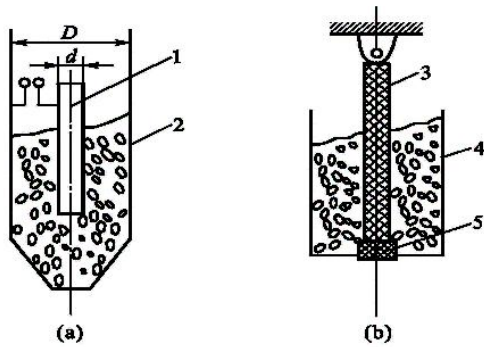
电容传感器可用来测量直线位移、角位移，振动振幅(可测至 $0.05 \mu\text{m}$ 的微小振幅)，尤其适合测量高频振动振幅、精密轴系回转精度、加速度等机械量，还可用来测量压力、差压力、液位、料面、粮食中的水分含量、非金属材料的涂层、油膜厚度、测量电介质的湿度、密度、厚度等等。在自动检测和控制系统中也常常用来作为位置信号发生器。

当测量金属表面状况、距离尺寸、振动振幅时，往往采用单电极式变极距型电容传感器，这时被测物是电容器的一个电极，另一个电

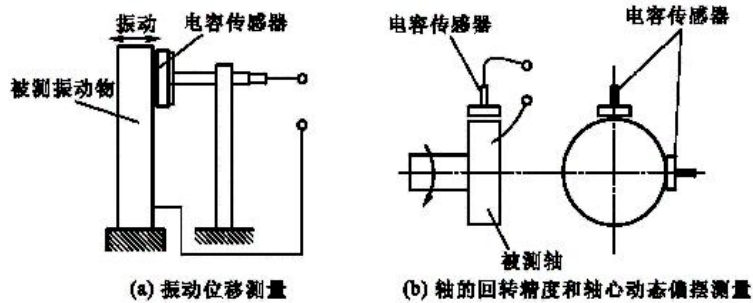
极则在传感器内。



上图分别为差动式电容压力传感器和电容式加速度传感器的结构示意图



1. 电极棒 2、4. 容器壁; 3. 钢丝绳内电极; 5. 绝缘材料



上图为电容式料位传感器和电容式振动位移传感器应用示意图。

电感式传感器

电感式传感器是利用线圈自感或互感的变化来实现测量的一种装置。可以用来测量位移、振动、压力、流量、重量、力矩、应变等多种物理量。

电感式传感器可分为自感式、互感式两种，在被测量转换成线圈自感或互感的变化时，一般要利用磁场作为媒介或利用铁磁体的某些现象。这类传感器的主要特征是具有线圈绕组。

4.1 自感式传感器

自感传感器的常见形式有气隙型和螺管型。

一、气隙型电感传感器

电感值与以下几个参数有关：与线圈匝数 N 平方成正比；与空气隙有效截面积 S 成正比；与空气隙长度 l_δ 所反比。

$$L = \frac{N^2 \mu_0 S}{l_\delta}$$

所以，自感式传感器又可分为变间距式、变面积式两类。

• 特性分析：

1. 变间距式：

$$L + \Delta L = \frac{N^2 \mu_0 S}{l_\delta - \Delta l_\delta + l / \mu_r}$$

由于 $\left| \frac{\Delta l_\delta}{l_\delta} \cdot \frac{1}{1 + (l / l_\delta \mu_r)} \right| \ll 1$ ，则有

$$\frac{\Delta L}{L} = \frac{\Delta l_\delta}{l_\delta} \cdot \frac{1}{1+(l/l_\delta\mu_r)} \cdot \left[1 + \frac{\Delta l_\delta}{l_\delta} \cdot \frac{1}{1+(l/l_\delta\mu_r)} + \left(\frac{\Delta l_\delta}{l_\delta} \cdot \frac{1}{1+(l/l_\delta\mu_r)} \right)^2 + \dots \right]$$

$$K = \frac{\Delta L}{\Delta l_\delta} = \frac{L}{l_\delta} \cdot \frac{1}{1+(l/l_\delta\mu_r)}$$

所以，灵敏度为：

$$\delta = \frac{\Delta l_\delta}{l_\delta} \cdot \frac{1}{1+(l/l_\delta\mu_r)}$$

非线性误差为：

若采用差动形式：

$$K = \frac{\Delta L}{\Delta l_\delta} = 2 \frac{L}{l_\delta} \cdot \frac{1}{1+(l/l_\delta\mu_r)}$$

灵敏度为：

$$\delta = \left(\frac{\Delta l_\delta}{l_\delta} \cdot \frac{1}{1+(l/l_\delta\mu_r)} \right)^2$$

非线性误差为：

所以，差动形式的灵敏度提高一倍，非线性误差有很大降低。

2. 变面积型

$$L = \frac{N^2 \mu_0}{l_\delta + l/\mu_r} S = K' \cdot S$$

其中， $K' = \frac{N^2 \mu_0}{l_\delta + l/\mu_r}$ 为一常数。可见变面积式在忽略气隙边缘效应条件下，呈线性。

从提高灵敏度的角度看，初始空气隙 l_δ 距离应尽量小。其结果是被测量的范围也变小。同时，灵敏度的非线性也将增加。如采用增大空气隙等效截面积和增加线圈匝数的方法来提高灵敏度，则必将增大传感器的几何尺寸和重量。这些矛盾在设计传感器时应适当考虑。与变面积型自感传感器相比，气隙型的灵敏度较高。但其非线性严重，自由行程小，制造装配困难。因此近年来这种类型的使用逐渐减少。差动式传感器其灵敏度与单极式比较。其灵敏度提高一倍，非线性大大减小。

二、螺管型电感传感器

从结构形式上，可分为：单线圈和差动两类。带有铁芯的螺管电感为：

$$L + \Delta L = 4\pi^2 N^2 [lr^2 + (\mu_r - 1)(l_c + \Delta l_c)r_c^2] / (l^2 \times 10^7)$$

式中， r 、 r_c 为螺管、铁芯的半径； l 、 l_c 为螺管、铁芯的长度； Δl_c 位移量。

所以，传感器灵敏度为：

$$K = \frac{4\pi^2 N^2}{l^2} (\mu_r - 1) r_c^2 \times 10^{-7}$$

采用差动形式，灵敏度可提高一倍。

提高灵敏度的途径：①使线圈与铁芯尺寸比值 l/l_c 和 r/r_c 趋于1；

②铁芯的材料选用导磁率 μ_r 大的材料。

三种自感式传感器的比较：

①变间距式，灵敏度最高，且随间距增大而减小；非线性误差大；

量程有限且较小，一般在气隙的1/5以下，装配较困难。

②变面积式，灵敏度较前者小，理论上为常数，线性度好，量程较大，使用较广泛。

③螺管型，量程大，灵敏度低，结构简单，便于制作、装配，应用广泛。

自感式传感器有如下几个特点：

①灵敏度比较好，目前可测0.1 μm 的直线位移，输出信号比较大、信噪比较好；

②测量范围比较小，适用于测量较小位移；

③存在非线性；

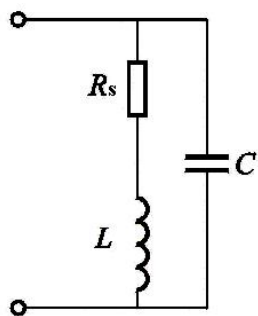
④消耗功率较大，尤其是单极式电感传感器，这是由于它有较大的电磁吸力的缘故；

⑤工艺要求不高，加工容易。

三、测量电路

1. 等效电路

自感式传感器从电路角度来看并非纯电感，它既有线圈的铜耗，又有铁芯的涡流及磁滞损耗，这可用折合的有功电阻抗 R_s 表示。此外，无功阻抗除电感之外还包括绕组间分布电容。这部分电容用集总参数 C 表示，一个电感线圈的完整等效电路可用下图表示



当 $Q = \frac{\omega L}{R_s} \gg 1$ 时，等效阻抗为：

$$Z_p = \frac{R_s}{(1 - \omega^2 LC)^2} + j \frac{\omega L}{(1 - \omega^2 LC)}$$

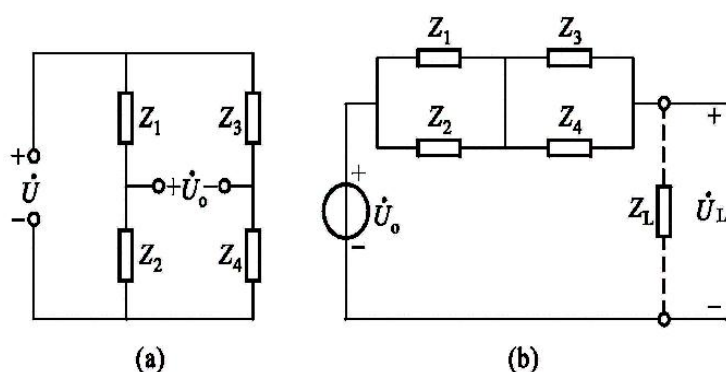
则电感的相对变化为：

$$\frac{dL_p}{L_p} = \frac{1}{1 - \omega^2 LC} \cdot \frac{dL}{L}$$

上式表明，并联电容后，传感器的灵敏度提高了。

2. 测量电路

自感式传感器实现了把被测量的变化转变为电感量的变化。为了测出电感量的变化，同时也为了送入下级电路进行放大和处理。就要用转换电路把电感变化转换成电压(或电流)变化。把传感器电感接入不同的转换电路后，原则上可将电感变化转换成电压(或电流)的幅值、频率、相位的变化，它们分别称为调幅、调频、调相电路。交流测量电桥的一般形式如图所示：



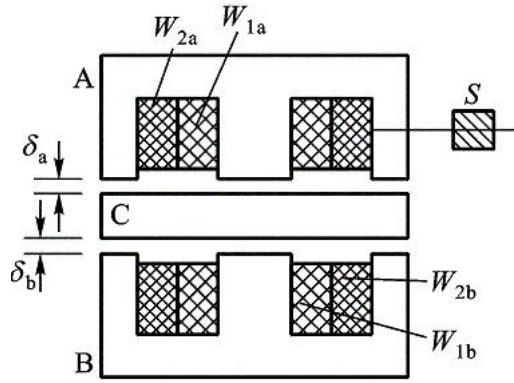
(a) 电阻平衡臂电桥，(b)变压器电桥。电桥的测量原理同前所述。

当电感线圈的品质因数 $Q = \frac{\omega L}{R_s}$ 很高时， $U_{sc} = \frac{\dot{E}}{2} \frac{\Delta L}{L}$ ；

当电感线圈的品质因数 $Q = \frac{\omega L}{R_s}$ 很低时， $U_{sc} = \frac{\dot{E}}{2} \frac{\Delta R_s}{R_s}$ 。

4.2 差动变压器

变压器式传感器是将非电量转换为线圈间互感 M 的一种磁电机构，很象变压器的工作原理，因此常称变压器式传感器。这种传感器多采用差动形式。下图所示为典型结构原理。其中：A、B 为两个山字形固定铁芯，在其窗中各绕有两个线圈，W1a 及 W1b 为一次绕组，W2a 及 W2b 为二次绕组；C 为衔铁。



一、结构原理及等效电路

等效电路见教材图 4-15 所示。

初级线圈的电流为： $\dot{I}_1 = \dot{e}_1 / (R_1 + j\omega L_1)$ ，则输出为：

$$\dot{e}_2 = \dot{e}_{21} - \dot{e}_{22} = -j\omega(M_1 - M_2) \cdot \frac{\dot{e}_1}{R_1 + j\omega L_1}$$

$$e_2 = \frac{\omega(M_1 - M_2)e_1}{\sqrt{R_1^2 + (\omega L_1)^2}}$$

则，幅值为：

输出阻抗为： $\dot{Z} = (R_{21} + R_{22}) + j\omega(L_{21} + L_{22})$

互感量的变化与衔铁的位移 x 有关，此时，幅值可表示为 x 的函数：

$$e_2 = K_1 x (1 - K_2 x^2)$$

所以，非线性误差： $\delta = K_2 x^2$ ， $K_2 = \frac{1}{x_0(x_0 + 2d + b)}$ ；

灵敏度系数： $K_1 = \frac{16\pi^3 f N_1 N_2 (b + 2d + x_0) x_0}{10^7 \cdot m l_A \ln(r_0 / r_1)} \cdot \frac{e_1}{\sqrt{R_1^2 + (\omega L_1)^2}}$

当 $R_1 \ll \omega L_1$ 时， $K_1 = \frac{N_2}{N_1} \cdot A$ ， A 为系数。所以，匝数比 $\frac{N_2}{N_1}$ 增大， K_1 增大。

当 $R_1 \gg \omega L_1$ 时， $K_1 = B \cdot f$ 。所以，在低频时，激励电源的频率升高， K_1 增大。

二、误差分析

1. 激励电源的影响

幅值和频率都会直接影响输出，必须适当选择合适的值。

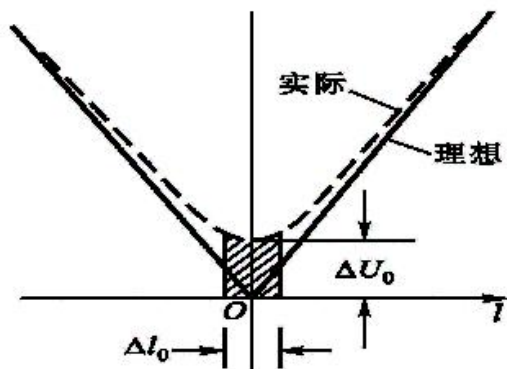
2. 温度的影响：

温度变化，引起线圈磁场发生变化，从而产生温漂（品质因数 Q 低时，影响更为严重。

解决方法：①采用恒流源供电；②提高线圈的品质因数；③采用差动电桥。

3. 零点残余电压

差动变压器在初始状态下，衔铁处于中间位置，零点存在零点残余电压，如图所示。影响：①造成零点附近的不灵敏区；②影响电路的正确工作。



1) 产生原因：

①基波分量：次级绕组两线圈的电气参数、几何尺寸不对称，使得感生电势的幅值、相位不相等，无论如何调整，都无法消除。

②高次谐波：主要是三次谐波，由磁性材料磁化曲线的非线性造成。

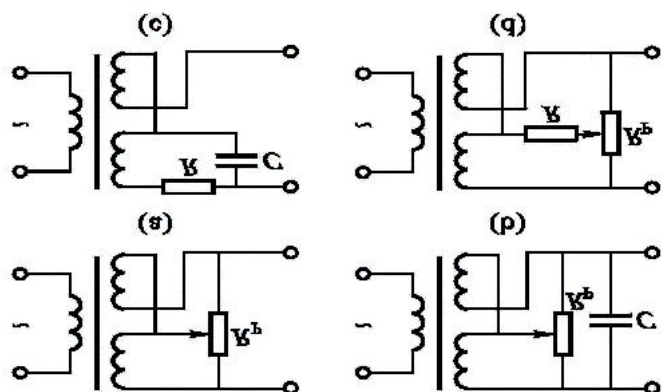
2) 减小的方法：

①尽可能保证次级线圈的几何尺寸、电气参数和磁路的对称性。提高

磁性能的均匀性和稳定性，工作点选择在磁化曲线的线性段。

②选用合适的测量线路，如采用相敏检波电路。

③采用补偿线路： 如下图



主要有，调相位式补偿电路、电位器式补偿电路、R、L 补偿电路。

原则，串联电阻可减小零位输出的基波分量；并联电阻、电容可减小零位输出的谐波分量；反馈支路可减小基波和谐波分量。

三、测量电路

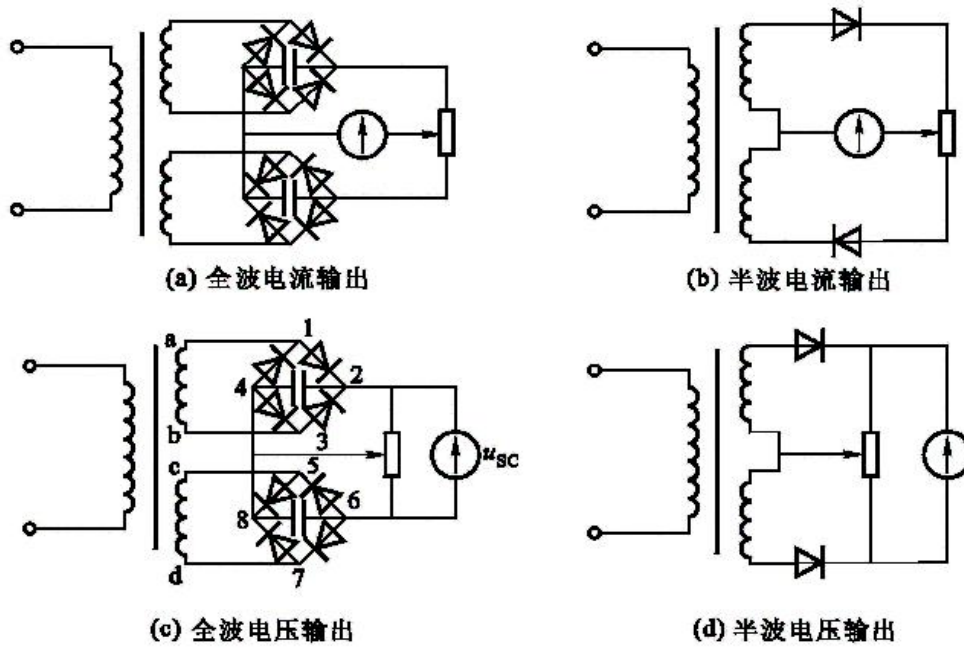
差动变压器随衔铁的位移输出一个调幅波，因而用电压表来测量存在

下述问题：①总有零位电压输出，因而零位附近的小位移测量困难。

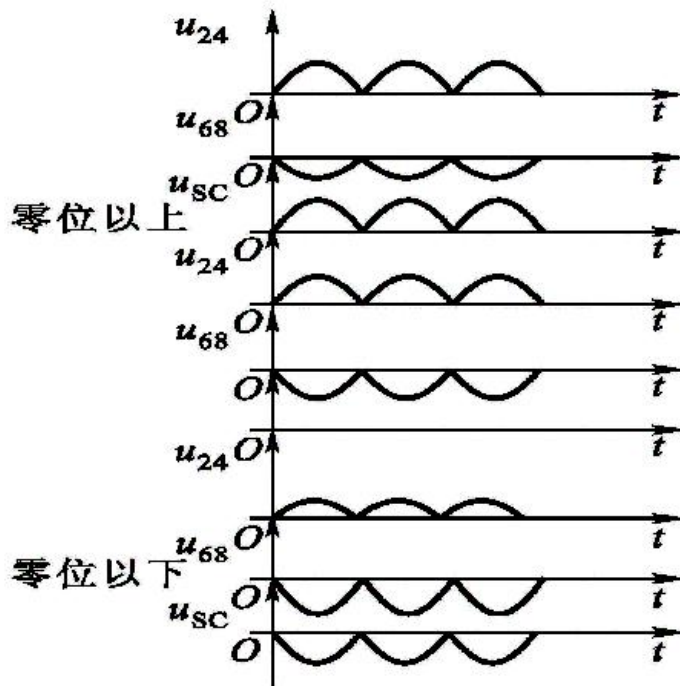
②交流电压表无法判别衔铁移动方向，为此常采用必要的测量电路来解决。常用测量电路为：相敏检波电路、差动整流电路

1. 差动整流电路

差动整流电路分为全波和半波电路，如图所示：



以图 (c) 为例，波形变化为：



2. 相敏检测电路

电路图见教材图 4-30 所示。图中， $R_1 = R_2 = R$ ， $C_1 = C_2 = C$ ； e_r 与 e 保持同相和反相，且 $e_r \gg e$ ，工作过程中：

- 1) 在平衡位置上， $e = 0$ ，只有 e_r 起作用。

e_r 正半周时，A 为“+”，B 为“-”； D_1 、 D_2 导通； R_1 、 R_2 上流过

的电流相等方向相反； $U_{CD} = 0$ ；

e_r 负半周时，A 为“—”，B 为“+”； D_3 、 D_4 导通； R_1 、 R_2 上流过的电流相等方向相反； $U_{CD} = 0$ 。

2) 铁芯上移， $e \neq 0$ ，设 e_r 与 e 同相。

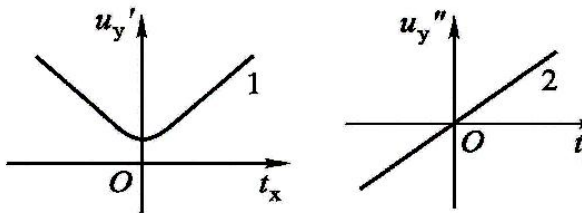
e_r 正半周时，A 为“+”，B 为“—”； D_1 、 D_2 导通； D_1 回路电压 $e_r + \frac{1}{2}e$ ，

D_2 回路电压 $e_r - \frac{1}{2}e$ ； $U_{CD} > 0$ ；

e_r 负半周时，A 为“—”，B 为“+”； D_3 、 D_4 导通； D_3 回路电压 $e_r - \frac{1}{2}e$ ，

D_4 回路电压 $e_r + \frac{1}{2}e$ ； $U_{CD} > 0$ 。

3) 铁芯下移，同理可得， $U_{CD} < 0$ 。所以，输出波形为，



1. 有残余电压；

2. 无残余电压

4.3 电涡流式传感器

一、工作原理

金属导体置于变化着的磁场中，导体内就会产生感应电流，称之为电涡流或涡流。这种现象称为涡流效应。涡流式传感器就是在这种涡流效应的基础上建立起来的。

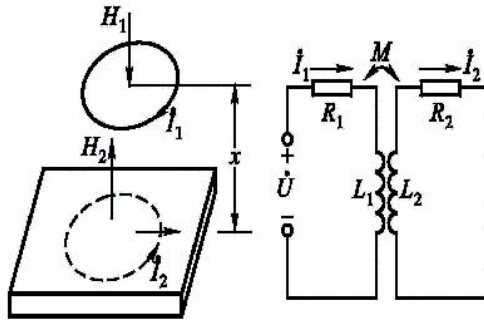
涡流产生磁场 H_2 ，从而使原线圈的电感、阻抗和品质因数发生变化。

分类：高频反射式和低频透射式两类。

特点：结构简单、灵敏度高、适用性强，易于非接触测量。

用途：可测量振动、位移、温度、转速、厚度、无损探伤。

工作原理及等效电路见下图所示：



由基尔霍夫定律可得：

$$\begin{cases} R_1 I_1 + j\omega L_1 I_1 - j\omega M I_2 = E \\ -j\omega M I_1 + R_2 I_2 + j\omega L_2 I_2 = 0 \end{cases}$$

所以，线圈的等效电感、等效电阻为：

$$L = L_1 - L_2 \frac{\omega^2 M^2}{R_2^2 + \omega^2 L_2^2}; \quad R = R_1 + R_2 \frac{\omega^2 M^2}{R_2^2 + \omega^2 L_2^2}$$

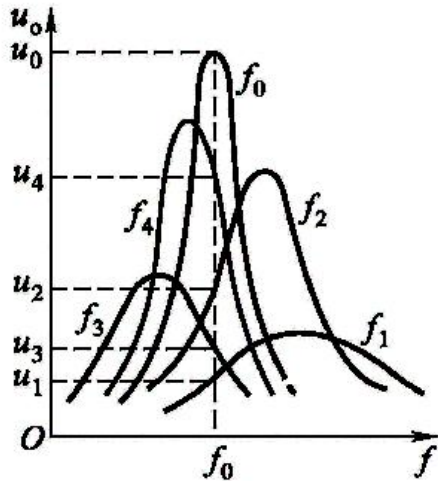
二、特性分析

影响 M 的因素：位移 x，导体材料，线圈几何尺寸、电源等。

当导体材料，为非磁性材料时， L_1 不变， L 下降， R 上升， Q 值下降；

当导体材料，为磁性材料时， L_1 增大（静磁效应，有效磁导率升高）， L 增大， R 上升， Q 值下降。

测量时，常并联一电容，形成谐振回路，此时，输出曲线为：

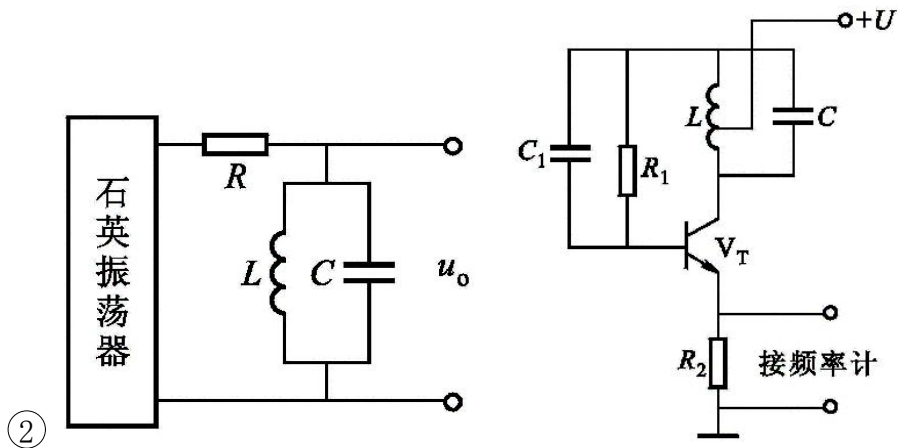


•导体是传感器的一部分：电导率、磁导率和形状对灵敏度都有影响。电导率大，灵敏度高，线性好；磁导率高，灵敏度小；面积减小，灵敏度下降。

三、测量电路

由涡流式传感器的工作原理可知，被测量数变化可以转换成传感器线圈的品质因素 Q 、等效阻抗 Z 和等效电感 L 的变化。转换电路的任务是把这些种参数转换为电压或电流输出。总的来说，利用 Q 值的转换电路使用较少，这里不作讨论。利用 z 的转换电路一般用桥路，它属于调幅电路。利用 L 的转换电路一般用谐振电路，根据输出是电压幅值还是电压频率，谐振电路又分为调幅和调频两种。

谐振电路的调幅、调频电路见下图：



涡流式传感器的特点是结构简单、易于进行非接触连续测量，灵敏度较高，适用性强，因此得到了广泛的应用。

第 4 章 压电式与磁电式传感器的应用

重点与难点：

- 压电式传感器、磁电式传感器的工作原理
- 压电式传感器、霍尔传感器应用电路设计

本章内容：

- 1、基于压电式传感器的玻璃破碎报警器设计
- 2、基于霍尔传感器的自行车转速测量设计

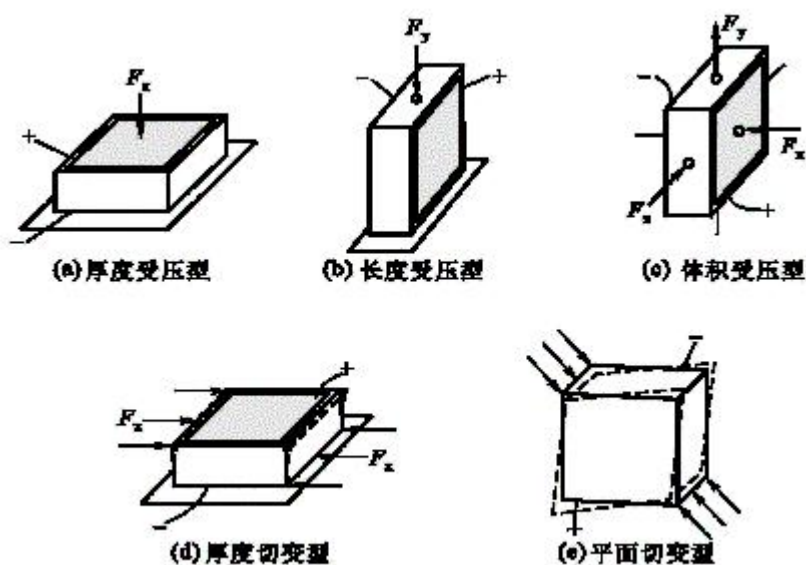
教学过程及详细内容

压电式传感器是一种有源的双向机电传感器。它的工作原理是基于压电材料的压电效应。石英晶体的压电效应早在 1680 年即已发现，1948 年制作出第一个石英传感器。

5.1 压电效应

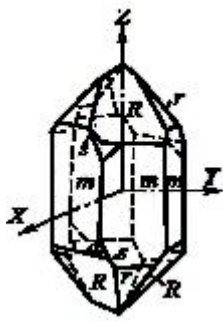
某些晶体或多晶陶瓷，当沿着一定方向受到外力作用时，内部就产生极化现象，同时在某两个表面上产生符号相反的电荷；当外力去掉后，又恢复到不带电状态；当作用力方向改变时，电荷的极性也随着改变；晶体受力所产生的电荷量与外力的大小成正比。上述现象称为正压电效应。反之，如对晶体施加一定变电场，晶体本身将产生机械变形，外电场撤离，变形也随着消失，称为逆压电效应。

压电式传感器大都是利用压电材料的压电效应制成的。在电声和超声工程中也有利用逆压电效应制作的传感器。压电转换元件受力变形的状态可分为下图所示的几种基本形式。

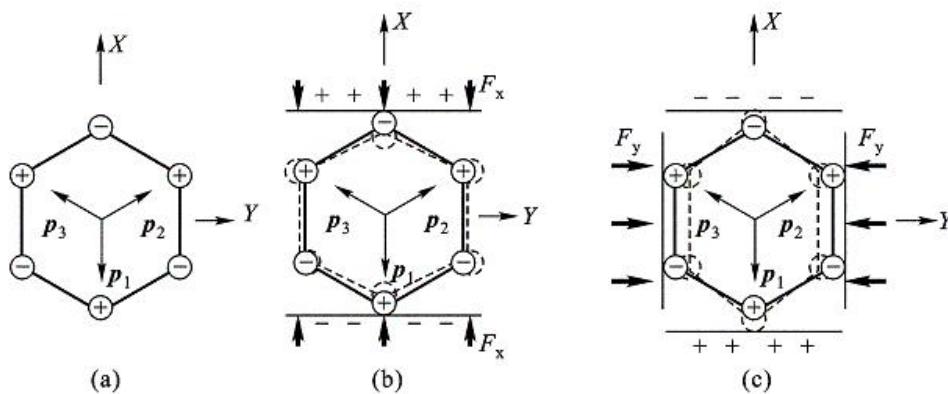


一、石英晶体的压电效应

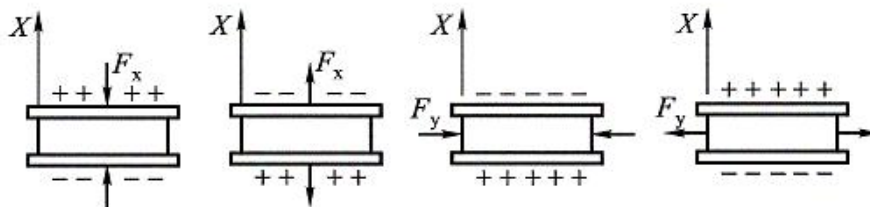
石英晶体是正六棱柱体（六面体），如图所示。Z 轴是晶体的对称轴，称为光轴；X 轴压电效应最显著，电轴；Y 轴（机械轴，力轴），加力产生的变形最大。



X 轴和 Y 轴受力后，石英晶体压电效应示意图如下图所示，

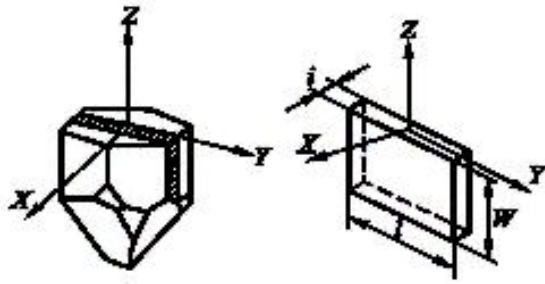


石英晶体受力方向与电荷极性的关系，如下所示：



但由于压电晶体的各向异性，并不是所有的压电晶体都能在这几种变形状态下产生压电效应。例如石英晶体就没有体积变形压电效应。但它具有良好的厚度变形和长度变形压电效应，即在 X 轴和 Y 轴受力时，才会产生压电效应，被称为纵向、横向压电效应；当沿 X 轴方向施加切向应力时，将在垂直于 Y 轴的表面上产生电荷，称为切向压电效应。

假设在石英晶体上切下一片平行六面体——晶体切片。



1. 当 X 轴方向受力时，垂直 X 轴平面上产生的电荷为：

$$q_x = d_{11} F_x$$

则极间电压为：

$$U_x = \frac{q_x}{C_x} = d_{11} \cdot \frac{F_x}{C_x}$$

当在垂直 X 轴平面上，外加电场 E_x 时，

$$\frac{\Delta l}{l} = d_{11} \cdot \frac{U_x}{t} = d_{11} E_x$$

2. Y 轴方向受力时，垂直 X 轴平面上产生的电荷为： $q_{xy} = -d_{11} \frac{l}{t} F_y$

逆压电效应： $\frac{\Delta l}{l} = -d_{11} E_x$

所以，有如下结论：

- ①无论正和逆压电效应，其作用力(或应变)与电荷（电场强度）之间成线性关系；
- ②晶体在哪个方向有正压电效应，则在此方向上一定存在逆压电效应；
- ③石英晶体不是在任何方向上都存在正压电效应。

二、压电陶瓷的压电效应

压电陶瓷是一种人工制造的多晶铁电体，1847 年就发现了钛酸钡这种陶瓷材料具有压电特性。

压电陶瓷首先需经过极化处理，其过程如下图所示：



此时，压电陶瓷受力后，变具有压电特性，但原理与晶体不同：

压电陶瓷受压变形后，内部极化强度变小，表面吸附的一部分自由电荷被释放，出现放电现象；外力撤消后，有恢复原状——正压电效应。

压电陶瓷在外电场作用下，会产生变形——逆压电效应。

• 为什么压电陶瓷对外不显电性？

压电陶瓷的剩余极化强度，总是以电偶极矩的形式表现，故在陶瓷的一端出现正束缚电荷，另一端出现负束缚电荷。由于束缚电荷的作用，在陶瓷表面吸附了一层来自外界的自由电荷，其数量与束缚电荷相等，它们起着屏蔽和抵消片内极化强度对外的作用，所以，无法用电压表测出极化强度。

5.2 压电材料

选用合适的压电材料是设计高性能传感器的关键。一般应考虑以下几个方面：

①转换性能：具有较高的耦合系数或具有较大的压电常数；

②机械性能：压电元件作为受力元件，希望它的机械强度高、机械刚

度大。以期获得宽的线性范围和高的固有振动频率；

③电性能：希望具有高的电阻率和大的介电常数，以期望减弱外部分布电容的影响并获得良好的低频特性；

④温度和湿度稳定性要好：具有较高的居里点、以期望得到宽的工作温度范围；

⑤时间稳定性：压电特性不随时间蜕变。

主要有两种材料：一种是压电晶体，如石英晶体；一种是压电陶瓷，如钛酸钡，锆钛酸铅等。

5.3 测量电路

一、等效电路

压电式传感器对被测量的变化是通过其压电元件产生电荷量的大小来反映的，因此它相当于一个电荷源。

而压电元件电极表面聚集电荷时，它又相当于一个以压电材料为电介质的电容器，其电容量为：

$$C_a = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 S}{t}$$

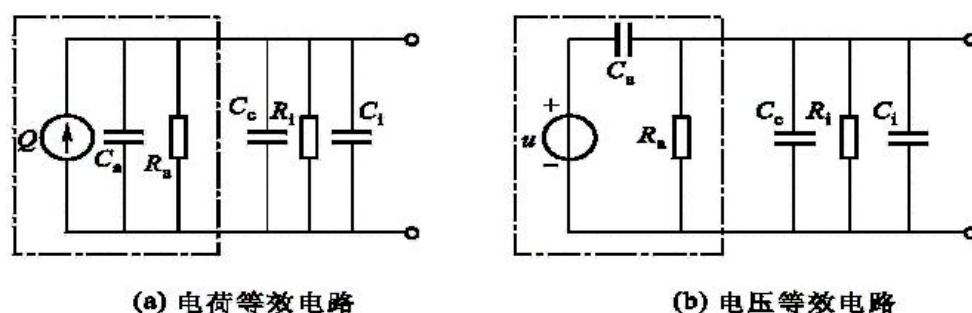
式中：s--极板面积； ϵ_r --压电材料相对介电常数；

ϵ_0 --真空介电常数； t --压电元件厚度

当压电元件受外力作用时，两表面产生等量的正、负电荷 Q，压电元件的开路电压(认为其负载电阻为无穷大)U 为

$$U_a = \frac{q}{C_a}$$

这样，可以把压电元件等效为一个电荷源 Q 和一个电容器 C_a 的等效电路，如图中的虚线方框；同时也等效为一个电压源 U 和一个电容器 C_a 串联的等效电路，如图 6-8 的虚线方框所示。其中 R_a 为压电元件的漏电阻。



二、测量电路

根据压电元件的工作原理及上节所述两种等效电路，与压电元件配套的测量电路的前置放大器也有两种形式：

电压放大器：其输出电压与输入电压(压电元件的输出电压)成正比。

电荷放大器：其输出电压与输入电荷成正比。

1. 电压放大器：

电压放大器的作用是将压电式传感器的高输出阻抗经放大器变换为低阻抗输出，并将微弱的电压信号进行适当放大。因此也把这种测量电路称为阻抗变换器。等效电路如上图。

等效电阻：
$$R = \frac{R_a R_i}{R_a + R_i};$$

等效电容：
$$C = C_c + C_i$$

所以，当压电元件受到作用力 F 为：
$$F = F_m \sin \omega t$$

则，
$$U_a = \frac{d_{33} F_m}{C_a} \sin \omega t$$

放大器输入电压为：
$$\dot{U} = d_{33}\dot{F} \cdot \frac{j\omega R}{1 + j\omega R(C + C_a)}$$

幅值为：
$$U_{im} = \frac{d_{33}F_m\omega R}{\sqrt{1 + \omega^2 R^2 (C + C_a)^2}}$$

相位差为：
$$\phi = \frac{\pi}{2} - \text{tg}^{-1}[\omega R(C + C_c + C_i)]$$

当 $\omega\tau \gg 1$ 时，输出幅值与频率无关：

$$U_{im} = \frac{d_{33}F_m}{C + C_c + C_i}$$

- 当测量回路的时间常数满足一定条件时，压电传感器具有相当好的高频响应特性。
- 在低频时，若测量回路的时间常数不大，则灵敏度会下降。

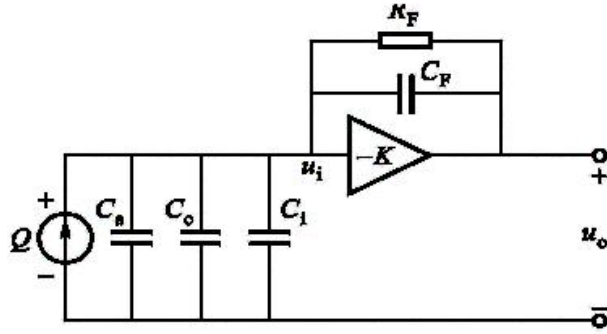
$$K_u = \frac{U_{im}}{F_m} = \frac{d_{33}}{\sqrt{\left(\frac{1}{\omega R}\right)^2 + (C + C_c + C_i)^2}}$$

扩大工作频带低频下限的方法：

- ① 增大回路电容， τ 增大，但灵敏度下降；
- ② 增大输入电阻 R_i ， τ 增大，低频相应变好。

2. 电荷放大器

由于电压放大器使所配接的压电式传感器的电压灵敏度将随电缆分布电容及传感器自身电容的变化而变化，而且电缆的更换得引起重新标定的麻烦，为此又发展了便于远距离测量的电荷放大器，目前它已被公认是一种较好的冲击测量放大器。



电荷放大器的输出为:

$$U_{sc} = \frac{-j\omega q A_0}{\left[\frac{1}{R_a} + (1 + A_0) \frac{1}{R_F} \right] + j\omega [C_a + C_c + (1 + A_0) C_F]}$$

当 A_0 足够大时, 输出为:

$$U_{sc} \approx -\frac{q}{C_F}$$

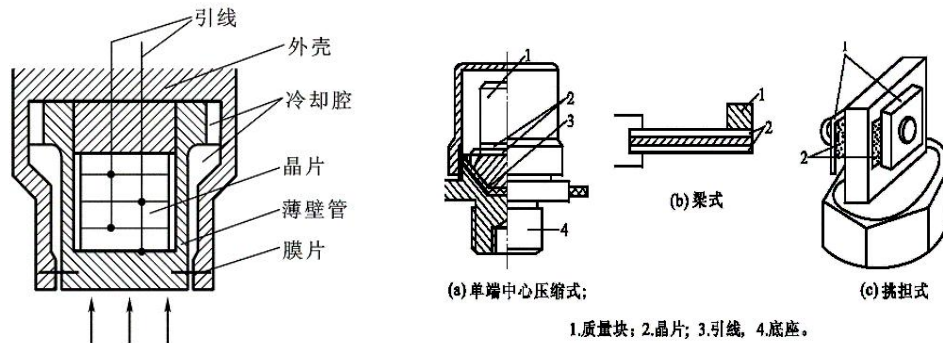
计算证明, 对 A_0 的要求并不很高, 实际器件很容易达到。

电荷放大器也存在下限截止频率, 如-3dB 的截止频率为:

$$f_L = \frac{1}{2\pi R_F C_F}$$

5. 4 压电传感器的应用

压电元件是一种典型的力敏感元件。可用来测量最终能转换为力的多种物理量。在检测技术中, 常用来测量力和加速度, 如下图。



8、 • 影响压电式传感器精度的因素分析

9、 1. 非线性：压电传感器的幅值线性度是指被测物理量(如力、压力、加速度等)的增加，其灵敏度的变化程度。

10、 2. 横向灵敏度：压电加速度传感器的横向灵敏度是指当加速度传感器感受到与其主轴向(轴向灵敏度方向)垂直的单位加速度振动时的灵敏度，一般用它与主轴向灵敏度的百分比来表示，称为横向灵敏度比。

3. 环境温度的影响：环境温度的变化对压电材料的压电常数和介电常数的影响都很大，它将使传感器灵敏度发生变化，压电材料不同，温度影响的程度也不同。当温度低于 400°C 时，其压电常数和介电常数都很稳定。

4. 湿度的影响：环境湿度对压电式传感器性能的影响也很大。如果传感器长期在高湿度环境下工作，其绝缘电阻将会减小，低频响应变坏。

5. 电缆噪声：为了减小这种噪声。可使用特制的低噪声电缆，同时将电缆固紧，以免产生相对运动。

6. 接地回路噪声：在测试系统中接有多种测量仪器，如果各仪器与传感器分别接地，各接地点又有电位差，这便在测量系统中产生噪声。

防止这种噪声的有效办法是整个测量系统在一点接地。而且选择指示器的输入端为接地点。

影响压电式传感器精度除以上分析的几个因素外，还存在有声场效应、磁场效应及射频场效应、基座应变效应等因素。

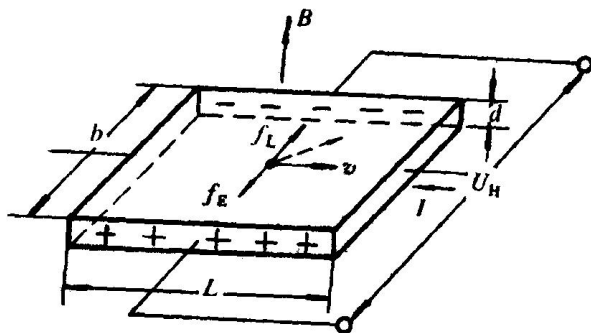
7.1 磁敏传感器

磁敏传感器是基于磁电转换的传感器，主要原理有霍尔效应和磁阻效应。

一、霍尔式传感器

(一) 霍尔效应

将一载流导体置于磁场中，磁场方向与电流方向正交，则在与两者垂直的方向上产生横向电势——霍尔电势，这一现象称为霍尔效应。如图所示：



霍尔效应原理图

对于 N 型半导体材料，载流子为电子。在如图的磁场下，受到洛仑兹力作用（方向如图），有：

$$f_L = evB$$

同时，电场作用于电子的电场力为：

$$f_E = eE_H = e \frac{U_H}{b}$$

当二力平衡时，达到动态平衡，有

$$vB = \frac{U_H}{b}$$

又因为， $I = -nevbd$ ；所以，

$$U_H = -IB / ned$$

当霍尔元件为 P 型半导体材料时，

$$U_H = IB / ped$$

其中，n、p 为单位体积中的载流子数。

(二) 霍尔系数与灵敏度

1. 霍尔系数：

$$R_H = \frac{1}{ne}$$

再由 $\rho = \frac{1}{ne\mu}$ ，可得： $R_H = \rho\mu$ 。由于电子的迁移率 μ 大于空穴，所以，霍尔元件多采用 N 型半导体材料。

2. 灵敏度：

$$K_H = -R_H / d$$

所以， $U_H = K_H \cdot IB$

- 金属不宜做霍尔元件；电子密度高， K_H 和 R_H 小。
- 材料电阻率 ρ 高、迁移率 μ 大，则霍尔效应强。
- d 减小，灵敏度高；但不能过小，否则使元件输出电阻增加。

3. 使用电压源时，

$$U_H = -\frac{b}{L} \mu EB$$

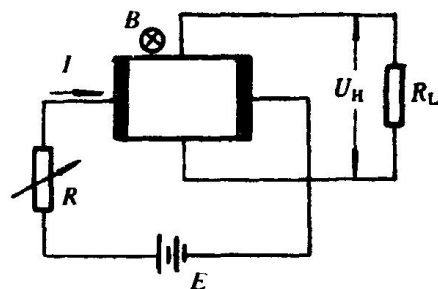
所以，适当选择材料的迁移率，及霍尔元件的宽长比，可改变霍尔电

势的大小。

(三) 材料及测量电路

常用测量有：N型的锗（Ge）、铟化镓（InSb）、砷化镓（InAs）。

符号及测量电路见下图：



(四) 误差分析与补偿

1. 几何尺寸及焊点大小对性能的影响：

实验证明，长宽比对霍尔电势有影响，

$$U_H = K_H IB \cdot f_H(L/b)$$

式中， $f_H(L/b)$ ——元件的形状系数。一般 $L/b > 2$ ，形状系数为1。

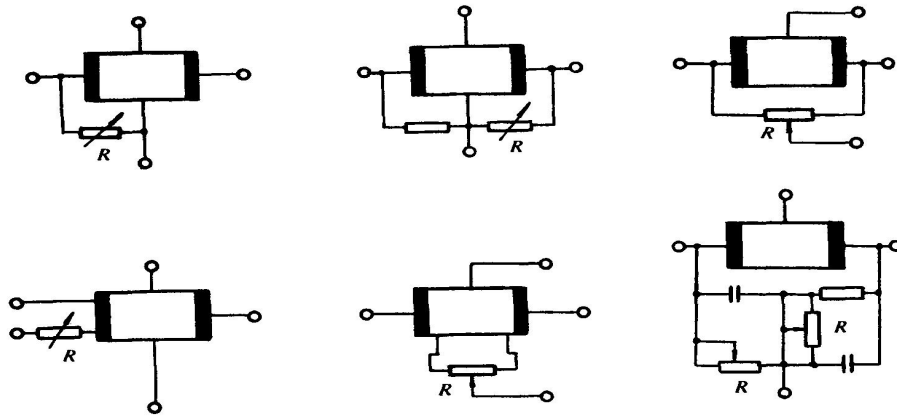
焊点大小对性能也有影响，一般要求电极宽度为 l ： $l/L < 0.1$ 。

2. 不等位电势及补偿：

当磁感应强度为零时元件通以电流，霍尔电极上有电势存在——不等位电势；即产生零位误差。

原因：两个霍尔电极的位置不在同一等位面上。

常用的补偿方法如下图的几种形式：



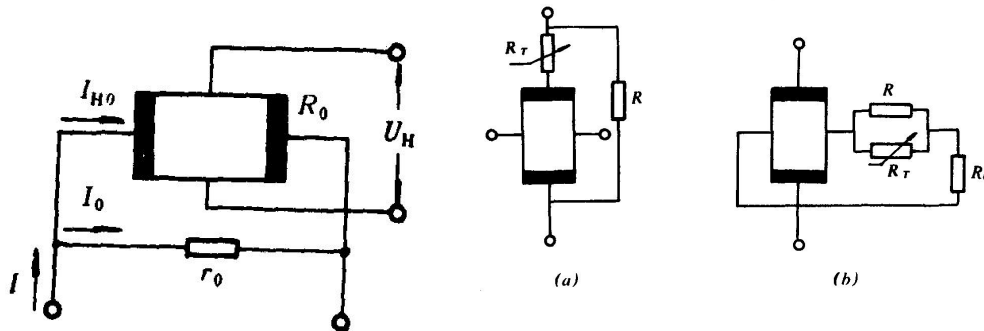
3. 温度误差及补偿

霍尔元件对温度变化十分敏感。其中半导体材料的电阻率、迁移率和载流子浓度都随温度变化而变化。

处理方法：选用温度系数小的元件（InSb）；

采用恒温措施；采用恒流源供电（减小元件内阻随温度的变化，控制电流的变化），但不能完全解决问题。

采用补偿电路：主要有并联电阻、热敏电阻的补偿



（五）应用

三大类：1.测定恒定和交变的磁场强度，如高斯计；

2. 测量交、直流电压、电流；

3. 做乘法器、功率计等。

此外，可测位移、压力、流量等物理量。如位移（压力）传感器

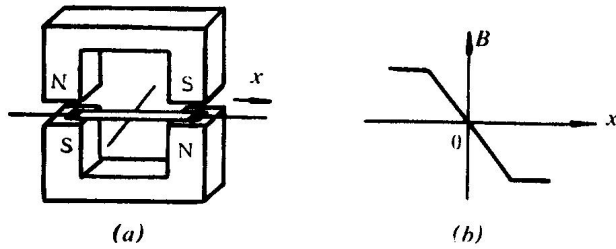


图 7-17 霍尔式位移传感器的磁路结构示意图

二、其它磁敏传感器

包括：磁敏电阻、磁敏二极管、磁敏三极管、磁敏 MOS 器件等。

(一) 磁敏电阻：

1. 磁阻效应：将一载流导体置于磁场中，其阻值会随磁场而变化，即磁阻效应。它是伴随霍尔效应同时发生的一种物理效应。

当温度恒定时，弱磁场范围内，磁阻与磁感应强度的关系为：

$$\rho_B = \rho_0 (1 + 0.273 \mu^2 B^2)$$

则，电阻率的相对变化为：

$$\frac{\Delta \rho}{\rho_0} = 0.273 \mu^2 B^2 = k (\mu B)^2$$

当磁场一定时，迁移率高的材料磁阻效应明显，如 InSb、InAs 适合作磁敏电阻。

2. 磁敏电阻的形状：

磁阻除与材料有关外，还与几何形状有关。常见的磁阻采用圆盘形，中心和边缘处为电极——科比诺圆盘。考虑到形状的影响：

$$\frac{\Delta \rho}{\rho_0} = k (\mu B)^2 [1 - f(L/b)]$$

3. 应用

应用广泛，可制成探头，探测各种磁场变化。

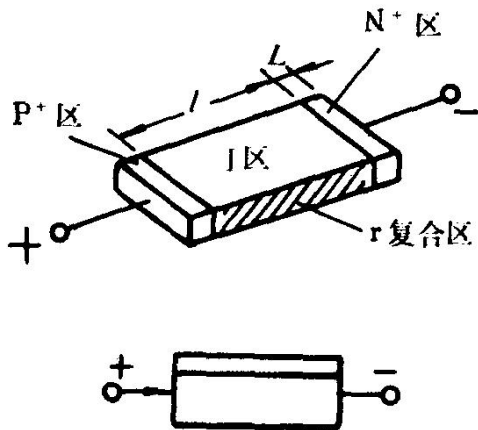
材料方面：位移检测器，角度检测、功率计、安培计，还可以用以制作交流放大器、振荡器等。

(二) 磁敏二极管

1. 结构原理：

这种二极管的结构是 $P^+ - I - N^+$ 型。在高阻半导体芯片（本征型 I）两端，分别制作 P、N 两个电极形成。

P、N 区为掺杂区；本征区 I 区较长，同时对两个侧面进行处理，一侧打光，一侧打毛形成复合区（r 区）。如图所示：



2. 工作工程：

(1) 正向偏压时，①无磁场作用，载流子运动如图（a）所示，产生电流，电子和空穴在 I 区的复合很少；

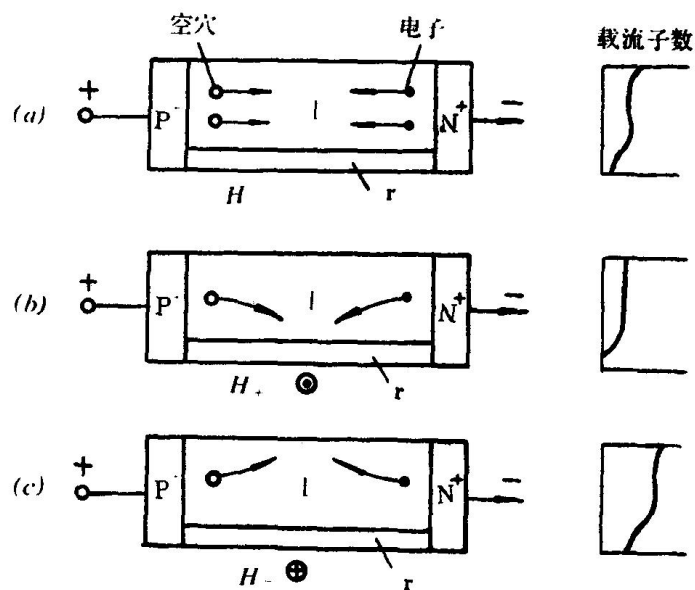
②有正向磁场作用，如图（b）所示，由于受到洛伦兹力的作用，载流子偏转向 r 区，产生复合；载流子密度下降；电阻增加，电流减小；PI 结和 PN 结电压下降；载流子注入下降；I 区电阻进一步增加；最终达到稳定状态。

③有负向磁场作用，如图（c）所示，由于受到洛伦兹力的作用，载流子偏转向光滑面，复合较少；载流子密度上升；电阻变

小，电流增加；PI 结和 PN 结电压上升；载流子注入增加；I 区电阻进一步减小；最终达到稳定状态。

(2) 负向偏压时，仅有微小电流流过，几乎与磁场无关。

由此可见，复合面与光滑面复合率差别越大，灵敏度越高。



• 特点：

- (1) 灵敏度高。比霍尔元件高几百到上千倍，且线路简单，成本低，适合测弱磁场；
- (2) 具有正反磁灵敏度。故可用作无触点开关；
- (3) 在较小电流下，灵敏度仍很高；
- (4) 灵敏度与磁场关系呈线性范围窄，这一点不如霍尔元件。

3. 温度补偿及提高灵敏度的措施：

常用温度补偿电路有三种：

- (1) 互补式：选用特性相近的两只管子，按磁场相反方法组合，并串接在电路中。可以进行温度补偿，还能提高磁灵敏度。

(2) 差分电路：采用电桥的差动形式，进行温度补偿，还能提高磁灵敏度。

(3) 全桥电路：对四只管子的特性一致要求较高，实现困难。

• 提高灵敏度的措施：

上述方法可以提高灵敏度；此外，提高偏压，可以提高磁灵敏度；（但电流不宜过大，功耗大，易发热，温漂严重）也可以采用交流偏压和脉冲电压源，提高灵敏度，又减小功耗和温漂；选用硅磁敏二极管好于锗磁敏二极管。

• 应用：

检测微弱磁场变化（交、直流），漏磁探伤、地磁探测仪等；

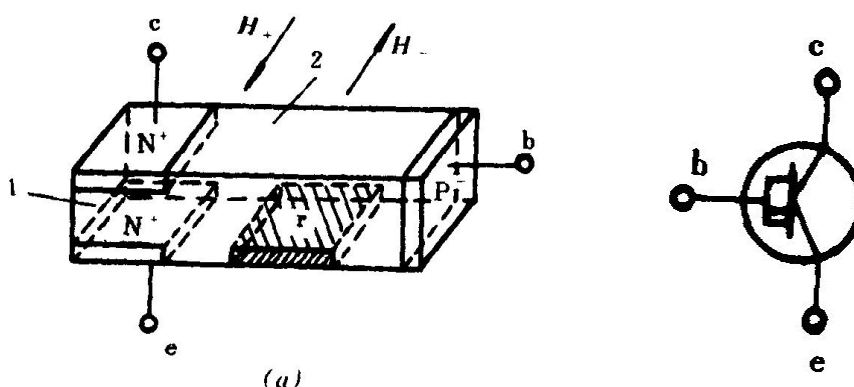
箱位电流计，对高压线进行不断线，无接触电流测量；

无触点开关，无触点电位计等。

（三）磁敏三极管

1. 结构原理：

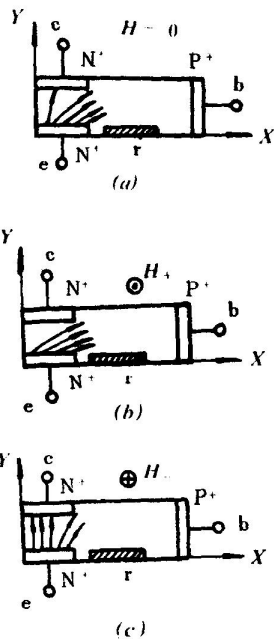
结构形式与符号，见图所示：



在弱 P 型本征半导体上，分别制作三个结，并在长基区侧制成复合区。

2. 工作过程：如图所示，在无磁场、正向磁场、反向磁场下，载流

子的流动状态。



3. 温度补偿及应用

基本特性同磁敏二极管，但灵敏度要高许多。它受温度影响较大，需补偿：

- (1) 用温度系数相反的一般三极管来补偿；
- (2) 使用磁敏二极管来补偿；
- (3) 使用差分电路来补偿。

应用同磁敏二极管。

第 5 章 光电式传感器的应用

重点与难点：

- 光电式传感器的原理及其应用

本章内容：

- 1、基于光电式传感器的烟雾报警器设计

2、基于光电式传感器的电机转速测量设计

教学过程及详细内容

光敏传感器

一、光电效应

由光的粒子学说可知，光可以认为是由具有一定能量的粒子所组成，而每个光子所具有的能量 E 与其频率大小成正比。

$$E = h\gamma$$

光照射在物体上就可看成是一连串的具有能量为 E 的粒子轰击在物体上。所谓光电效应即是由于物体吸收了能量为 E 的光后产生的电效应。从传感器的角度看光电效应可分为二大类型。

1. 外光电效应

指在光的照射下，材料中的电子逸出表面的现象。光电管和光电倍增管均属这一类。它们的光电发射极，即光阳极就是用具有这种特性的材料制造的。

$$h\gamma = \frac{1}{2}mv_0^2 + A_0$$

A_0 ——逸出功； v_0 ——电子逸出速度。

所以，由上式可知：

存在红限频率：小于红限频率，光强再大也不会产生光电子发射。

②入射光谱成分不变，光强越强，光电流越大。

③光电子逸出后，有初始动能；且光频越高，光电流越强。

2. 内光电效应

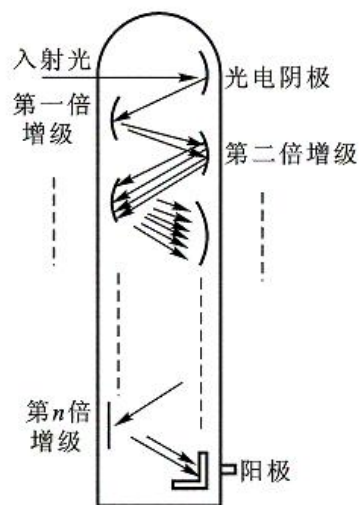
指在光的照射下，材料的电阻率发生改变或产生光生电动势的现象。可分为两种形式：光电导效应和光生伏特效应

(1) 光电导效应：在光线作用下，半导体产生电子—空穴对，电导率会发生显著变化，这种现象称为光电导效应。光敏电阻即属此类。

(2) 光生伏特效应：利用光势垒效应，即在光的照射下，物体内部产生一定方向的电势。常见器件有：光电池、光敏二极管、光敏三极管等。

二、光电倍增管

1. 构造原理：光电倍增管如图所示。



光照后，阴极发射电子。由于电场作用，做加速运动，达到第一倍增极后，打击出更多的二次电子，……。假设一个电子打出 σ 个二次电子，则：

$$I_a = \sigma^n I_0$$

由于 I_0 受光通量 ϕ 控制， σ 受电压 U 控制；所以，阳极电流受电压和

光通量控制。

特性：

（（（1）光电特性

表示当光电管的阳极电压一定时，阳极电流 I 与入射在阴极上光通量 Φ 之间的关系。光通量 Φ 较小时，线性好；光通量 Φ 较大时，产生饱和。由于灵敏度非常高，不允许强光照射，所以常用于微弱信号的测量。

（2）伏安特性

当入射光的频谱及光通量一定时，阳极与阴极之间的电压同光电流的关系叫伏安特性。由上升部分和饱和部分组成。

（3）光谱特性

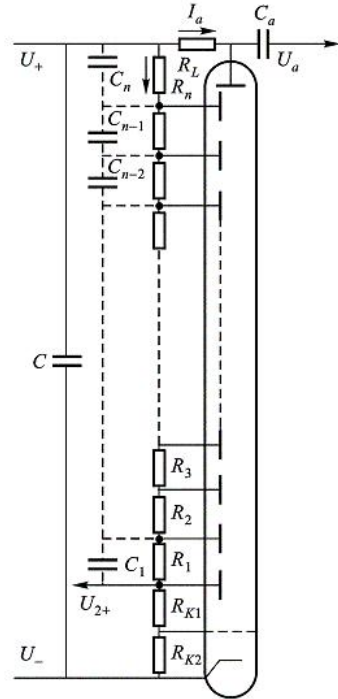
由于光阴极对光谱有选择性，因此光电管对光谱也有选择性。保持光通量和阳极电压不变，阳极电流与光波长之间的关系叫光电管的光谱特性。光电管尚有温度特性、疲劳特性、惯性特性、暗电流和衰老特性等，使用时应根据产品说明书和有关手册合理选用。

（4）暗电流

来源：光电阴极和光电倍增极的热电阻发射；温度越高，暗电流越大。

光电倍增极的漏电流。

测量电路：如图所示。



负载 R_L 的确定采用微变等效法或图解法进行；

一般， $R_1 = R_2 = \dots = R_n$ 。

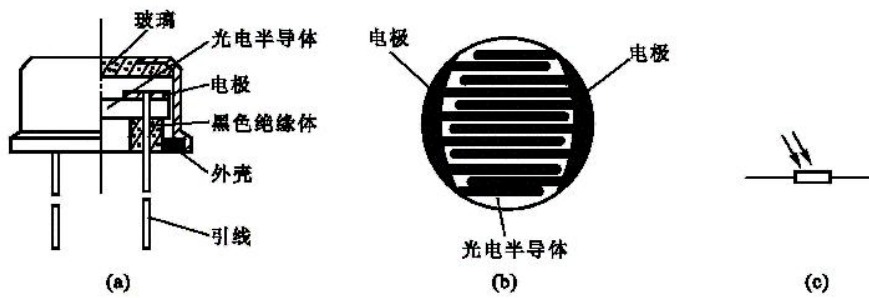
三、光敏电阻

又称光导管，是一种均质半导体光电器件。光敏电阻是用具有内光电效应的光导材料制成的，为纯电阻元件，其阻值随光照增强而减小。

光敏电阻优点：灵敏度高，体积小、重量轻，光谱响应范围宽，机械强度高、耐冲击和振动，寿命长。

缺点：使用时需要有外部电源，同时当有电流通过它时，会产生热的问题。

结构原理



为了提高光敏电阻的灵敏度，应尽量：①减小电极间的距离，增大灵敏面积；②采用光敏电阻薄膜上蒸镀金属形成梳状电极。常用材料有：硫化镉（CdS）和硒化镉（CdSe）。

主要参数和基本特性

- (1) 主要参数：暗电阻、暗电流、亮电阻、亮电流、光电流。
亮电阻与暗电阻之差越大，性能越好。
- (2) 光照特性：光照曲线呈非线性，不宜作为材料元件。
- (3) 光谱特性：应将光源和元件的光谱特性结合考虑。
- (4) 伏安特性：电压、电流都不能超过额定值。
- (5) 频率特性：频率特性较差。
- (6) 稳定性：经老化处理后，达到稳定值，寿命几乎无限长。
- (7) 温度特性：温度升高，灵敏度下降。常进行降温处理，以提高灵敏度。

负载与电源的确定：

- (1) 负载的确定：一般 $R_L = R_G$ ， R_G 为热敏电阻的阻值。
- (2) 电源的确定：应满足最大耗散功率，即 $E \leq \sqrt{4P_{\max} R_L}$ 。

四、光电池

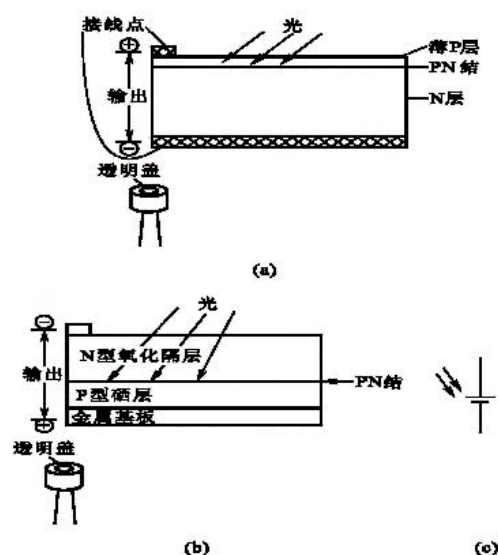
光电池是基于光生伏特效应制成的，是自发电式有源器件。它有较大面积的PN结，当光照射在PN结上时，在结的两端出现电动势。

结构原理

当受到光照后，PN结吸收光子；若能量超过禁带宽度，产生电子空穴对，在内电场作用下，形成电动势。

常用光电池有：硒光电池、硅光电池、砷化镓光电池。

构造与符号，见下图：



2. 基本特性

(1) 光照特性：光生电势、光电流与照度的关系。开路电压与照度有非线性关系，短路电流与照度成线性关系。

(2) 光谱特性：

(3) 频率特性：

(4) 温度特性：应采用恒温措施和补偿措施。

3. 转换效率与最佳负载匹配

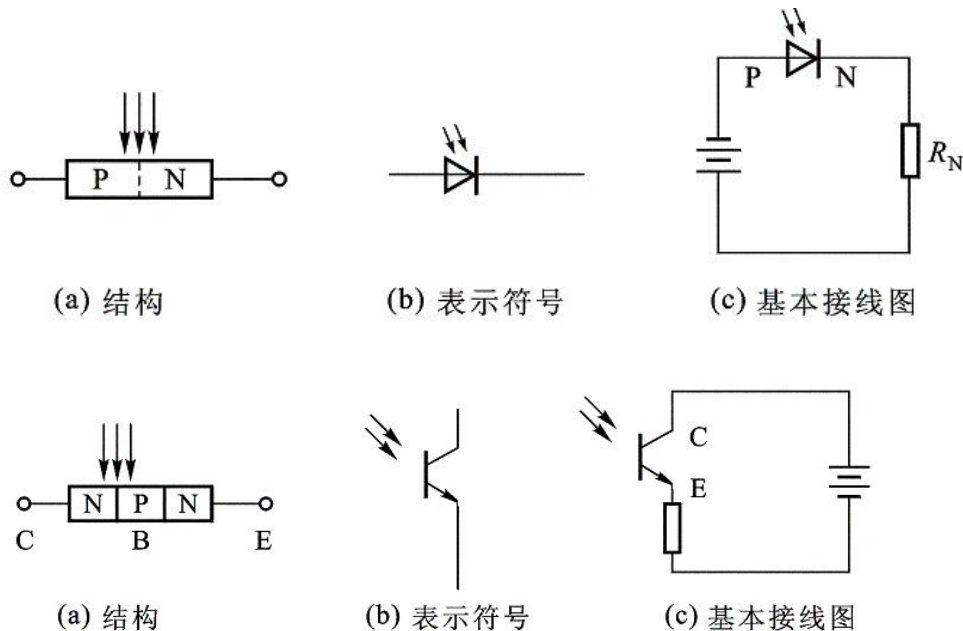
转换效率：最大输出功率与输入光功率的比值。只有在最佳负载下，

才有最大输出功率。

最佳负载的确定，采用图解法。不同的照度，有不同的最佳负载，所以，光电池的最佳负载线不只一条。

五、光敏二极管与光敏三极管

当二极管和三极管的 PN 结接受到光照射时，通过 PN 结的电流将增大。光敏二极管和光敏三极管则必须使 PN 结能受到最大的光照射。结构如图所示：



用途：红外遥控器、光纤通讯、火灾报警、光电耦合器、光电开关、光电读出装置等。

基本特性：光谱特性、伏安特性、光照特性、频率特性、温度特性等。

负载电阻的确定：采用图解法。

六、光电传感器的应用：

光电传感器按其接收状态可分为模拟和脉冲式光电传感器两大类。

模拟式光电传感器

模拟式光电传感器的工作原理是基于光电元件的光电特性，其光通量是随被测量而变，光电流就成为被测量的函数，故称为光电传感器的函数运用状态。它的形式有吸收式、反射式、遮光式和辐射式。

脉冲式光电传感器

脉冲式光电传感器的作用方式是光电元件的输出仅有两种稳定状态，即"通"与"断"的开关状态，所以也称为光电元件的开关运用状态。

常用器件：光电耦合器、光电继电器。

7.4 电荷耦合器件

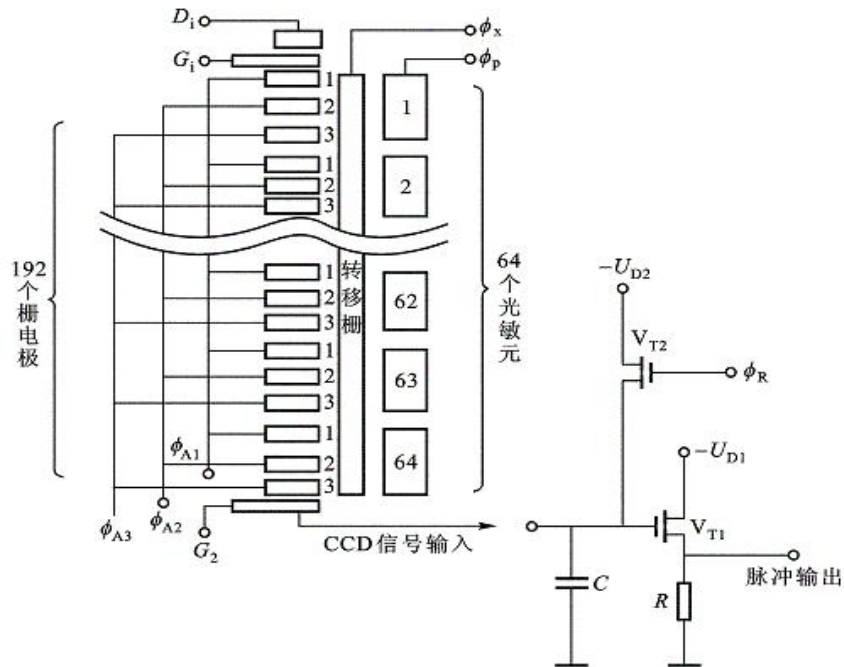
电荷耦合器件(CCD)是典型的固体图象传感器，它是 1970 年贝尔实验室的 W·S·Boyle 和 G·E·Smith 发明的，它与光敏二极管阵列集成为一体，构成具有自扫描功能的 CCD 图象传感器。它不仅作为高质量固体化的摄像器件成功地应用于广播电视、可视电话和无线电传真，而且在生产过程自动检测和控制等领域已显示出广阔的前景和巨大的潜力。

一、CCD 的工作原理

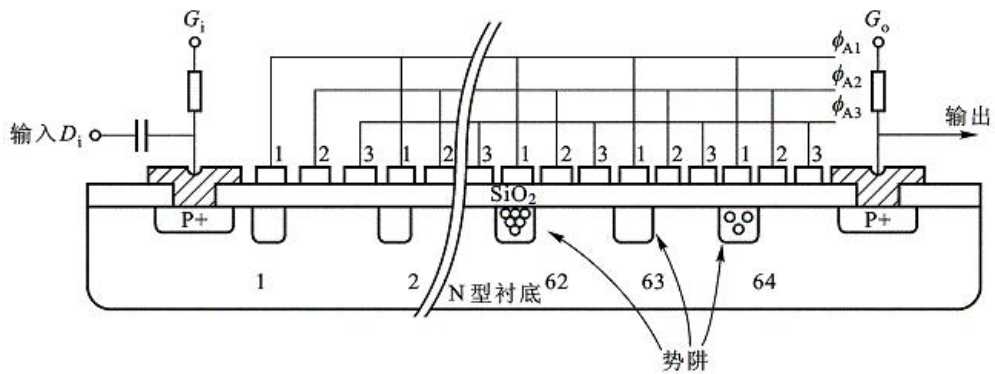
CCD 是一种半导体器件，在 N 型或 P 型硅衬底上生长一层很薄的 SiO₂，再在 SiO₂ 薄层上依次序沉积金属电极，这种规则排列的 MOS 电容阵列再加上两端的输入及输出二极管就构成了 CCD 芯片。CCD 可以把光信号转换成电脉冲信号。每一个脉冲只反映一个光敏元的受光情况，脉冲幅度的高低反映该光敏元受光的强弱，输出脉冲的顺序

可以反映光敏元的位置，这就起到图象传感器的作用。

线阵 64 位 CCD 结构示意图



信息电荷的转移原理图

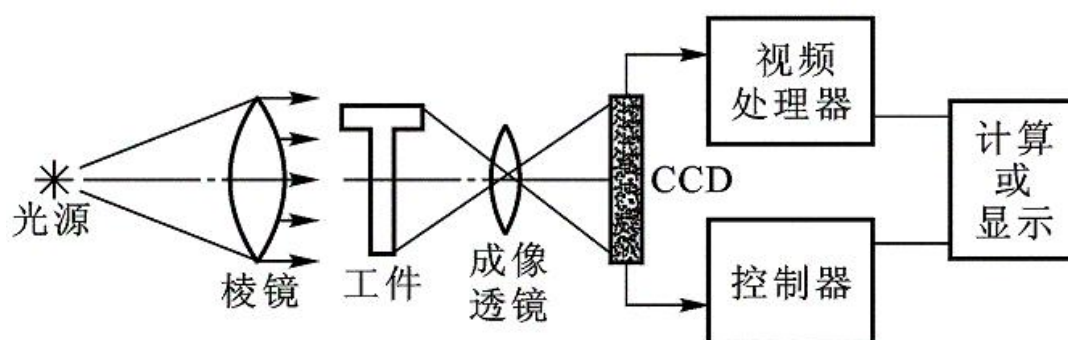


二、CCD 应用举例

尺寸自动检测

通常，快速自动检测工件尺寸的系统有一个测量台，在其上装有光学系统、图象传感器、和微处理机等。被测工件成像在 CCD 图象传感器的光敏阵列上，产生工件轮廓的光学边缘。时钟和扫描脉冲电

路对每个光敏元顺次询问，视频输出馈送到脉冲计数器，并把时钟选送入脉冲计数器，启动阵列扫描的扫描脉冲也用来把计数器复位到零。复位之后，计数器计算和显示由视频脉冲选通的总时钟脉冲数。显示数 N 就是工件成象覆盖的光敏元数目，根据该数目来计算工件尺寸。



第 6 章 半导体式传感器的应用

重点与难点：

- 气敏传感器、湿敏传感器等半导体传感器的工作原理
- 气敏传感器、湿敏传感器等半导体应用电路设计

本章内容：

- 1、基于气敏传感器的有毒气体报警器设计
- 2、基于湿敏传感器的镜面水汽清除器设计

教学过程及详细内容

7.1 基于气敏传感器的有毒气体报警器设计

7.1.1 半导体气敏传感器

7.1.2 任务描述

- 7.1.3 任务分析
- 7.1.4 任务实施
- 7.1.5 结果分析
- 7.1.6 任务单
- 7.1.7 考核标准
- 7.2 基于湿敏传感器的镜面水汽清除器设计
 - 7.2.1 湿敏传感器
 - 7.2.2 任务描述
 - 7.2.3 任务分析
 - 7.2.4 任务实施
 - 7.2.5 结果分析
 - 7.2.6 任务单
 - 7.2.7 考核标准
- 习题与思考

第 7 章 辐射与波式传感器的应用

重点与难点：

- 辐射传感器的工作原理及应用
- 波式传感器的工作原理及应用

本章内容：

- 1、热释电红外传感器的防盗报警电路设计
- 2、基于超声波传感器的测距电路设计

教学过程及详细内容

红外辐射本质上是一种热辐射。任何物体，只要它的温度高于绝对零度（ -273°C ），就会向外部空间以红外线的方式辐射能量，一个物体向外辐射的能量大部分是通过红外线辐射这种形式来实现的。物体的温度越高，辐射出来的红外线越多，辐射的能量就越强。

另一方面，红外线被物体吸收后可以转化成热能。

红外线作为电磁波的一种形式，红外辐射和所有的电磁波一样，是以波的形式在空间直线传播的，具有电磁波的一般特性，如反射、折射、散射、干涉和吸收等。

红外线在真空中传播的速度等于波的频率与波长的乘积。

红外辐射和所有电磁波一样，是以波的形式在空间直线传播的。它在大气中传播时，大气层对不同波长红外线存在不同吸收带，红外线气体分析器就是利用该特性工作的，空气中对称的双原子气体，如 N_2 、 O_2 、 H_2 等不吸收红外线。而红外线在通过大气层时，有三个波段透过率高，它们是 $2\sim 2.6\ \mu\text{m}$ 、 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 和 $8\sim 14\ \mu\text{m}$ ，统称它们为 i° 大气窗口 $i\pm$ 。这三个波段对红外探测技术特别重要，因此红外探测器一般都工作在这三个波段（大气窗口）之内。

热释电效应

热释电效应：由于温度变化而产生电荷的现象

在外加电场作用下，电介质中的带电粒子（电子、原子核等）将受到电场力的作用，正电荷趋向阴极、负电荷趋向阳极，结果电介质的一个表面带正电，相对表面带负电，这就是 i° 电极化 $i\pm$ 。

电压去除后，大多数电介质的极化状态消失，但铁电体会保持。

3. 红外测温仪

一、超声波的波型

纵波- $j^a j^a$ 质点振动方向与波的传播方向一致的波，称为纵波。它能在固体、液体和气体中传播；

横波 $j^a j^a$ 质点振动方向垂直于传播方向的波，称为横波。它只能在固体中传播；

表面波 $j^a j^a$ 质点的振动介于纵波与横波之间，沿着表面传播，振幅随深度增加而迅速衰减的波，称为表面波。表面波质点振动的轨迹是椭圆形（其长轴垂直于传播方向，短轴平行于传播方向）。表面波只能沿着固体的表面传播。

二、超声波的反射和折射

三、超声波的衰减

声波在介质中传播时，随着传播距离的增加，能量逐渐衰减。其声压和声强的衰减规律满足以下函数关系：

8.2.2 超声波传感器

利用超声波在超声场中的物理特性和各种效应而研制的装置可称为超声波换能器、探测器或传感器。超声波探头按其工作原理可分为压电式、磁致伸缩式、电磁式等，而以压电式最为常用。

压电式超声波传感器是利用压电材料的压电效应原理来工作的。

压电式超声波发生器是利用逆压电效应的原理将高频电振

动转换成高频机械振动，从而产生超声波。当外加交变电压的频率等于压电材料的固有频率时会产生共振，此时产生的超声波最强。（ i° 电致伸缩 $i \pm$ ）

压电式超声波接收器是利用正压电效应原理进行工作的。当超声波作用到压电晶片上时引起晶片伸缩，在晶片的两个表面上便产生极性相反的电荷，这些电荷被转换成电压经放大后送到测量电路，最后记录或显示出来。

8.2.2 超声波传感器

8.2.2 超声波传感器

8.2.2 超声波传感器

超声波测量流体流量是利用超声波在流体中传输时，在静止流体和流动流体中的传播速度不同的特点，从而求得流体的流速和流量。

时差法测流量

相位差法测流量

频率差法测流量

二、超声波探伤

穿透法探伤：

穿透法探伤是根据超声波穿透工件后能量的变化情况来判断工件内部质量。

反射法探伤：

反射法探伤是根据超声波在工件中反射情况的不同来探测工

件内部是否有缺陷。它又分为一次脉冲反射法和多次脉冲反射法两种。

1、穿透法探伤

优点：指示简单，适用于自动探伤；可避免盲区，适宜探测薄板。

缺点：探测灵敏度较低，不能发现小缺陷；根据能量的变化可判断有无缺陷，但不能定位；对两探头的相对位置要求较高。

2、一次脉冲反射法

3、多次脉冲反射法

第 8 章 现代传感技术

重点与难点：

- 各种现代传感技术及其应用

本章内容：

- 1、智能传感器及应用
- 2、多传感器融合技术及应用
- 3、网络化虚拟仪器技术及应用

教学过程及详细内容

- 一、智能传感器的概念
- 二、智能传感器的基本结构
- 三、智能传感器的功能
- 四、智能传感器的特点

五、智能传感器的实现

- (一) 模糊传感器概述、基本功能
- (二) MEMS 与微加工
- (三) 网络传感器的概念、类型
- (四) 多传感器数据融合系统及特点
- (五) 虚拟仪器
- (六) 网络化虚拟仪器