电阻、电容式传感器

主讲教师：宋宏

詹舒越2019-4-6修订

- 传感与检测基础知识
- 多种传感器（电阻电容、压电、光电）的工作原理
- 多种检测技术（温度、压力、流量）的原理

内容提纲

- 电阻应变式传感器
- 应变电阻转换电路
- 应变片的种类及应用
- 电容式传感器及其特性
- 电容式传感器的应用
- 电容传感器测量电路
- 电容传感器的使用注意事项

工作原理

- 电阻应变式传感器：

基于电阻应变效应。在导体产生机械变形时，它的电阻值相应发生变化。

金属电阻丝应变片

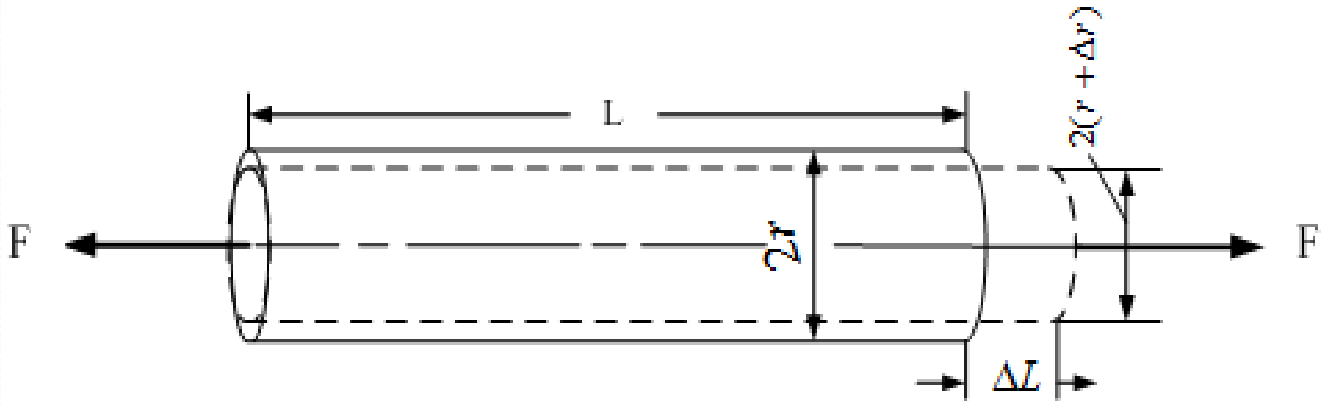


图 4-1 导体受力作用后几何尺寸发生变化

$$R=\rho\frac{l}{S},\qquad \frac{\Delta R}{R}=\frac{\Delta l}{l}-\frac{\Delta S}{S}+\frac{\Delta\rho}{\rho}$$

电阻率 ρ，长度 l，截面积 S

因应变而发生的电阻率相对变化——“电阻应变效应”.

金属电阻丝应变片

$\varepsilon = \Delta l / l$ 称为轴向应变，常用 $\mu\varepsilon$ 表示，$1\,\mu\varepsilon = 1 \times 10^{-6}$ mm/mm。电阻丝的径向应变与轴向应变的关系用材料的泊松比ν表示

$$-\frac{\Delta D}{D} = \nu \frac{\Delta l}{l}$$

负号表示径向应变与轴向应变方向相反。

因为$\Delta S / S = 2(\Delta D / D)$ 所以单位应变的阻值变化可以表示为

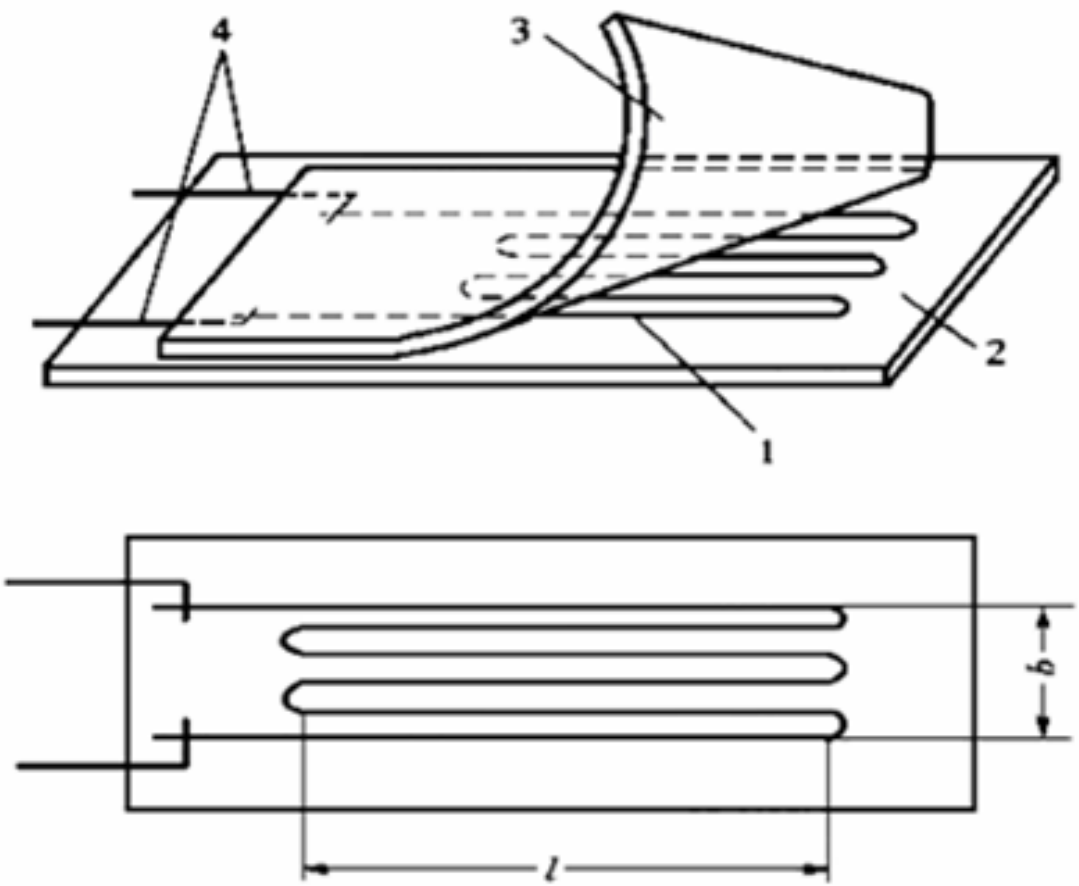
$$K = \frac{\Delta R}{R} \Big/ \frac{\Delta l}{l} = 1 + 2\nu + \frac{\Delta \rho}{\rho} \Big/ \varepsilon$$

（**1+2ν**）：几何尺寸变化，常数，约**1~2**之间；

$\frac{\Delta \rho}{\rho} \Big/ \varepsilon$ ：在拉伸极限内，电阻的相对变化与应变成正比，也是常数。

K 称为应变灵敏度。

金属电阻应变片结构



1. 敏感栅　2. 基底　3. 盖片　4. 引线

图 4-2　电阻应变片构造示意图

所选用的材料将直接影响应变片的性能。

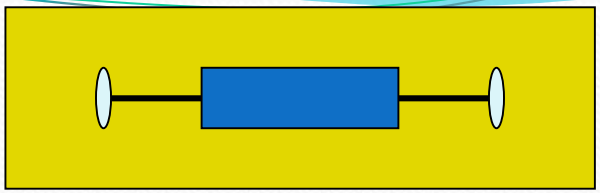
应用应变片测试原理

在外力作用下，被测对象产生微小机械变形，应变片电阻值也发生相应变化。当测得应变片电阻值变化量为 ΔR 时，便可得到被测对象的应变值，根据应力与应变的关系，有如下关系

$$E=\frac{\sigma}{\varepsilon}=\frac{[\mathrm{N/m^2}]}{[\mu\varepsilon]}$$

σ 为测试应力，ε 为应变，E 为被测对象的弹性模量，即在弹性范围内应力与应变成比例变化。

半导体应变片



半导体材料的压阻效应：单晶半导体材料在某一轴向受外力作用时，其电阻率ρ发生变化的现象。

电阻率变化与应力的关系：

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} = \sigma\pi = \pi E\varepsilon$$

式中：E为半导体材料的弹性模量；π为半导体材料的压阻系数。

$$K = 1 + 2\nu + \frac{\Delta\rho}{\rho}\Big/\varepsilon \approx \frac{\Delta\rho}{\rho}\Big/\varepsilon = \pi \mathrm{E}$$

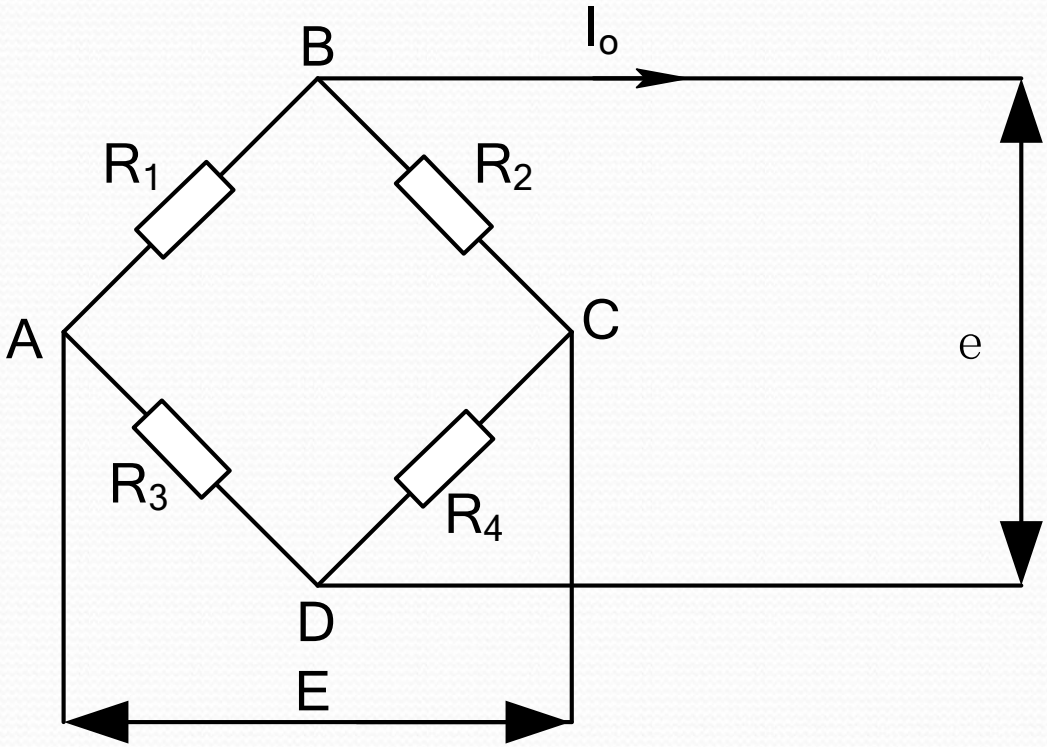
半导体应变片突出优点是灵敏度高，比金属丝式高50～80倍，尺寸小，横向效应小，动态响应好。容易集成加工，广泛应用于工业压力传感器，大部分是基于扩散硅半导体应变膜的压阻式压力传感器。但它有温度系数大，应变时非线性比较严重等缺点。 而且价格较高，金属应变片仍然在广泛应用。

内容提纲

- 电阻应变式传感器
- 应变电阻转换电路
- 应变片的种类及应用
- 电容式传感器及其特性
- 电容式传感器的应用
- 电容传感器测量电路
- 电容传感器的使用注意事项

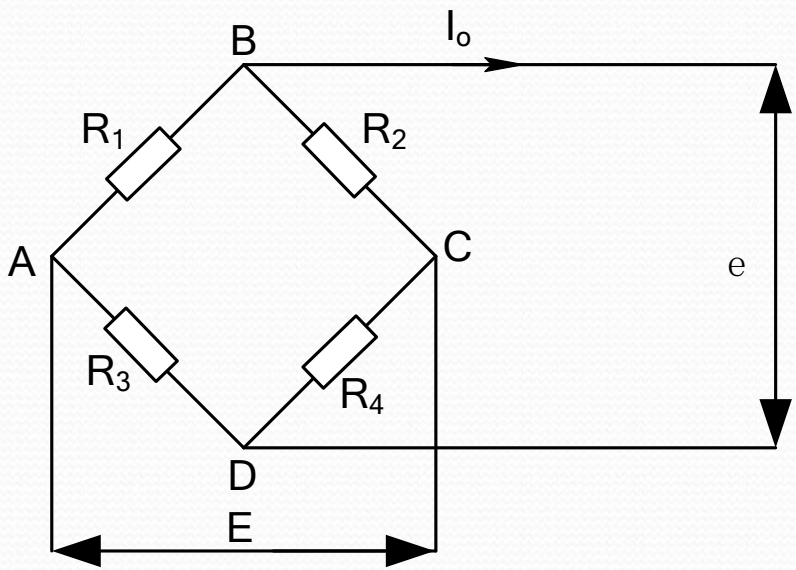
三、 电阻应变片的测量电路

1、直流电桥



图中E为电源电压，*R*1、*R*2、*R*3及*R*4为桥臂电阻，*e*为测量输出结果。

（1） 直流电桥平衡条件

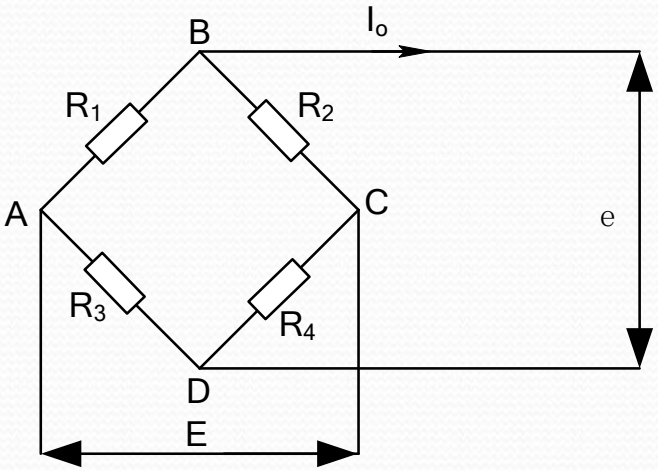


根据克希霍夫定律

电桥输出电压为：

$$e = E\left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_3}{R_3 + R_4}\right)$$

当电桥平衡时，$e = 0$，则有



$$R_1R_4=R_2R_3$$

或

$$\frac{R_1}{R_2}=\frac{R_3}{R_4}$$

上式为电桥**平衡条件**。这说明欲使电桥平衡，其相邻两臂电阻的比值应相等，或相对两臂电阻的乘积应相等。

定义桥臂比：

$$n=\frac{R_2}{R_1}=\frac{R_4}{R_3}$$

当仅R_1为应变片时，系统构成单臂电桥电路。工作时R_1有一增量ΔR_1，当为拉伸应变时，ΔR_1为正；压缩应变时，ΔR_1为负。以$R_1+\Delta R_1$代替R_1，则

$$e=E\frac{\left(R_1+\Delta R_1\right)R_4-R_2R_3}{\left(R_1+\Delta R_1+R_2\right)\left(R_3+R_4\right)}$$

$$=\frac{n\Delta R_1}{(1+n+\frac{\Delta R_1}{R_1})(1+n)R_1}E$$

如果忽略分母中的$\Delta R_1/R_1$，则得到电桥的输出电压e与ΔR_1或$\Delta R_1/R_1$的近似线性表达式

$$e' \approx \frac{n\Delta R_1}{(1+n)^2 R_1} E$$

电压灵敏度？

当$n = 1$时，即四个电阻在初始状态完全相等时，灵敏度最大，得到

$$e' \approx \frac{1}{4}\frac{\Delta R_1}{R_1} E$$

（2） 非线性误差及补偿

$$e=\frac{n\Delta R_1}{(1+n+\frac{\Delta R_1}{R_1})(1+n)R_1}E$$

非线性误差为：

$$\gamma=\frac{e-e'}{e}=\frac{\frac{\Delta R_1}{R_1}}{1+n+\frac{\Delta R_1}{R_1}}$$

如何降低非线性误差？

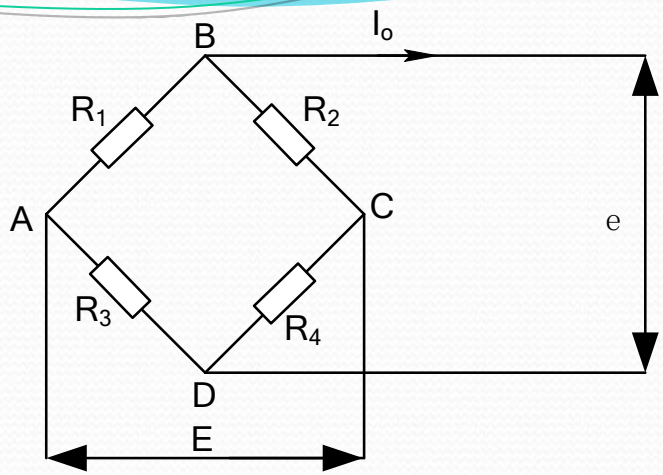
例：如果将120Ω的应变片贴在柱形弹性工件上，该工件的截面积A=0.5×$10^{-4}m^2$，弹性模量E=2×$10^{11}N/m^2$。

（1）若由5×10^4N的拉力引起应变片电阻变化为1.2Ω，求应变片灵敏度系数K；

（2）若将电阻应变片R1置于单臂测量电桥，电桥电源电压为直流3V，求电桥输出的电压及非线性误差。

$$\gamma = \frac{e - e'}{e} = \frac{\dfrac{\Delta R_1}{R_1}}{1 + n + \dfrac{\Delta R_1}{R_1}}$$

使用两个应变片，构成半桥电路



右图中R_1、R_2*都是应变片*

电桥输出电压为:

$$e = E\frac{\left(R_1+\Delta R_1\right)R_4-\left(R_2-\Delta R_2\right)R_3}{\left(R_1+\Delta R_1+R_2-\Delta R_2\right)\left(R_3+R_4\right)}$$

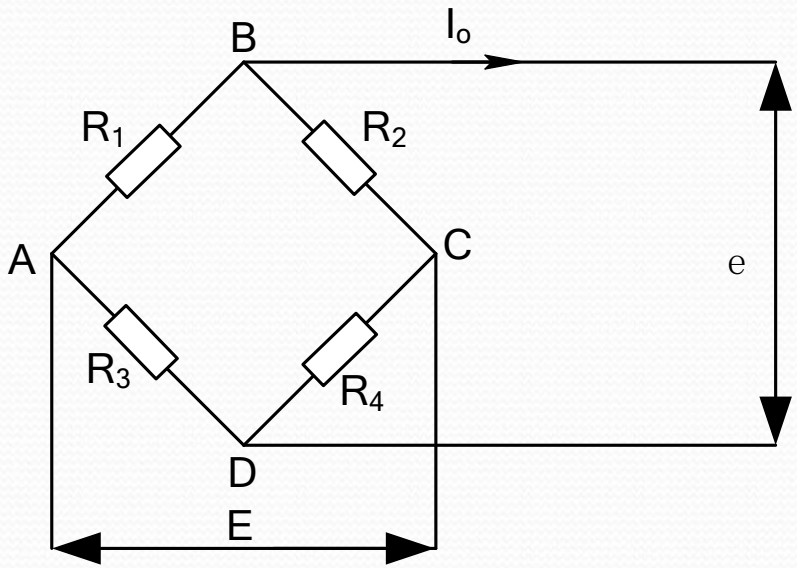
如果 $\Delta R_1 = \Delta R_2$， $R_1=R_2=R_3=R_4$ ⇒

$$e=\frac{1}{2}\frac{\Delta R_1}{R_1}E$$

思考题：利用半桥电路进行温度补偿的原理?

使用四个应变片，构成全桥电路

右图中R1、R2、R3、R4都是应变片，构成一个全桥电路



电桥输出电压为：

$$e = \frac{\Delta R_1}{R_1} E$$

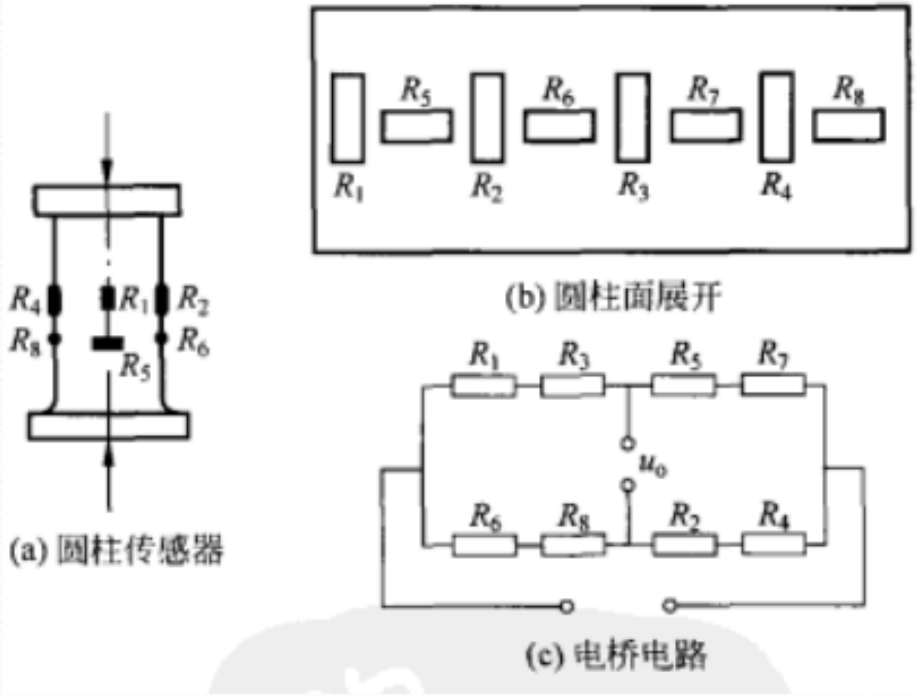
两个应变片可以是悬臂梁上下各一组，每组两个，两组拉伸和压缩符号相反，幅值相同。线性关系良好，灵敏度是半桥电桥的两倍

内容提纲

- 电阻应变式传感器
- 应变电阻转换电路
- 应变片的种类及应用
- 电容式传感器及其特性
- 电容式传感器的应用
- 电容传感器测量电路
- 电容传感器的使用注意事项

应变片的种类及应用

应变片结构简单、价格便宜、精度高、测量范围广，作为力传感器应用非常广泛。应变片种类很多，针对特定的弹性元件可以设计最优的粘贴方法。



圆柱（筒）式力传感器中实际粘贴的应变片的组合情况

应变片的种类及应用

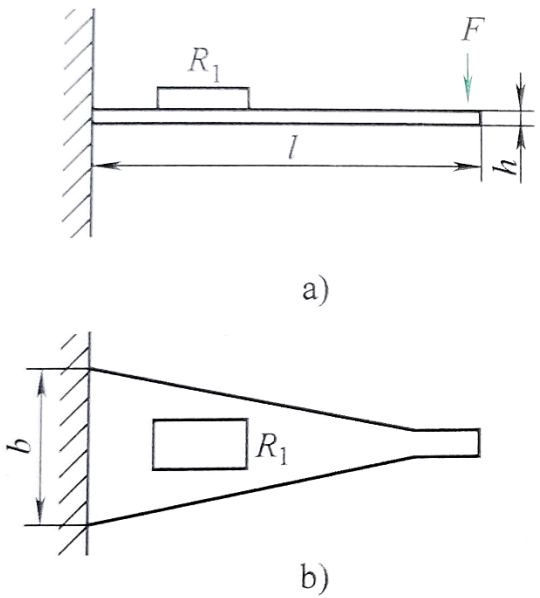


图 3-11　等强度梁式力传感器

a）正视图　b）俯视图

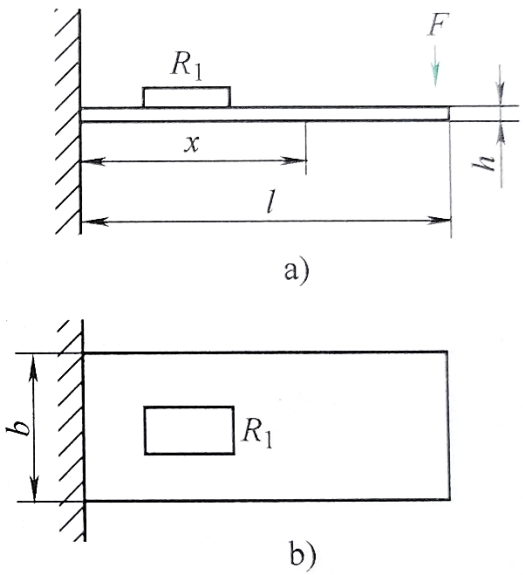


图 3-12　等截面梁式力传感器

a）正视图　b）俯视图

$$\varepsilon = \frac{6Fl}{bh^2E}$$

$$\varepsilon_x = \frac{6F(l-x)}{bh^2E} = \frac{6F(l-x)}{AhE}$$

应变片的种类及应用

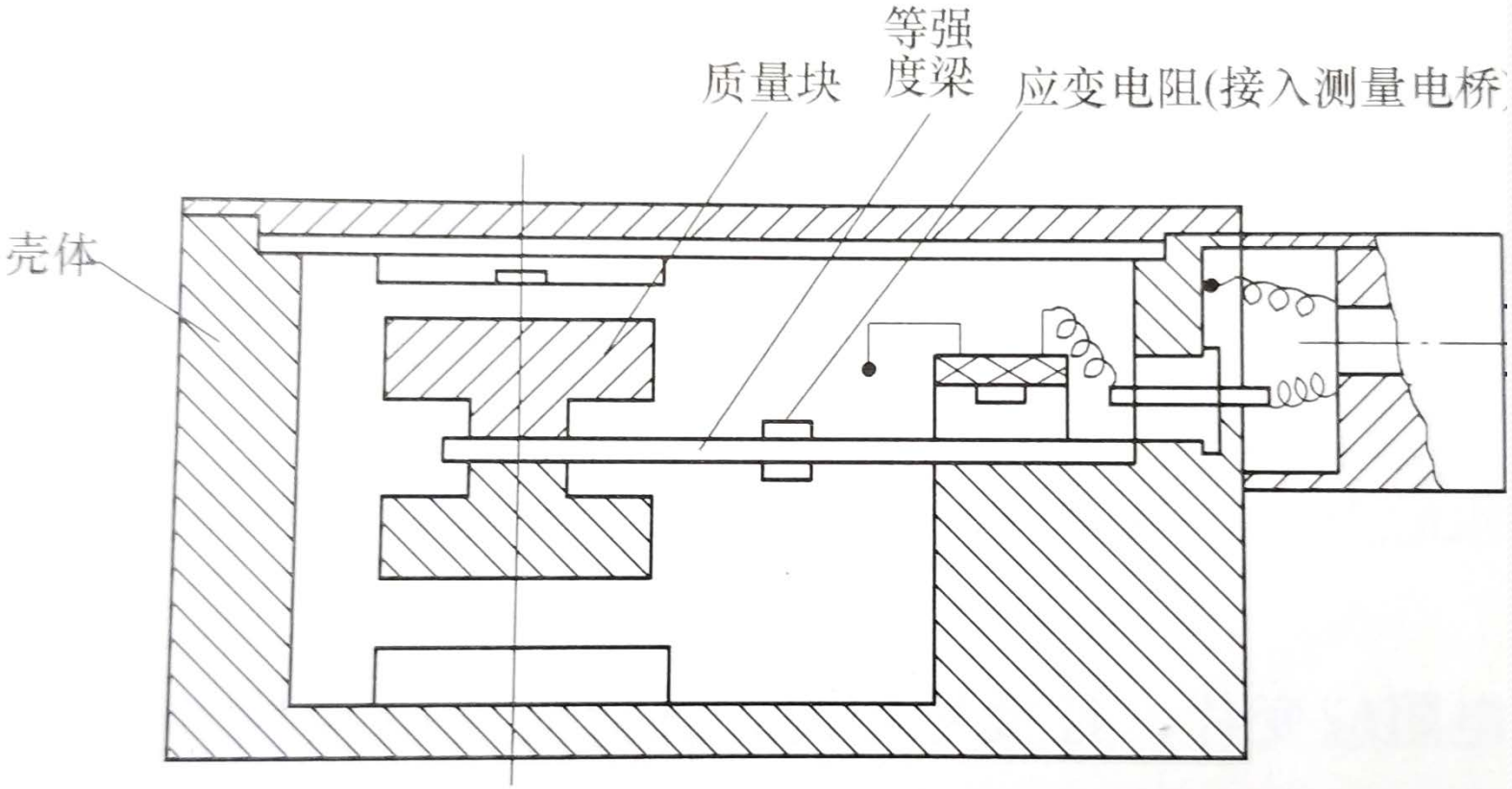


图 3-17　应变电阻式加速度传感器的结构

应变片的种类及应用

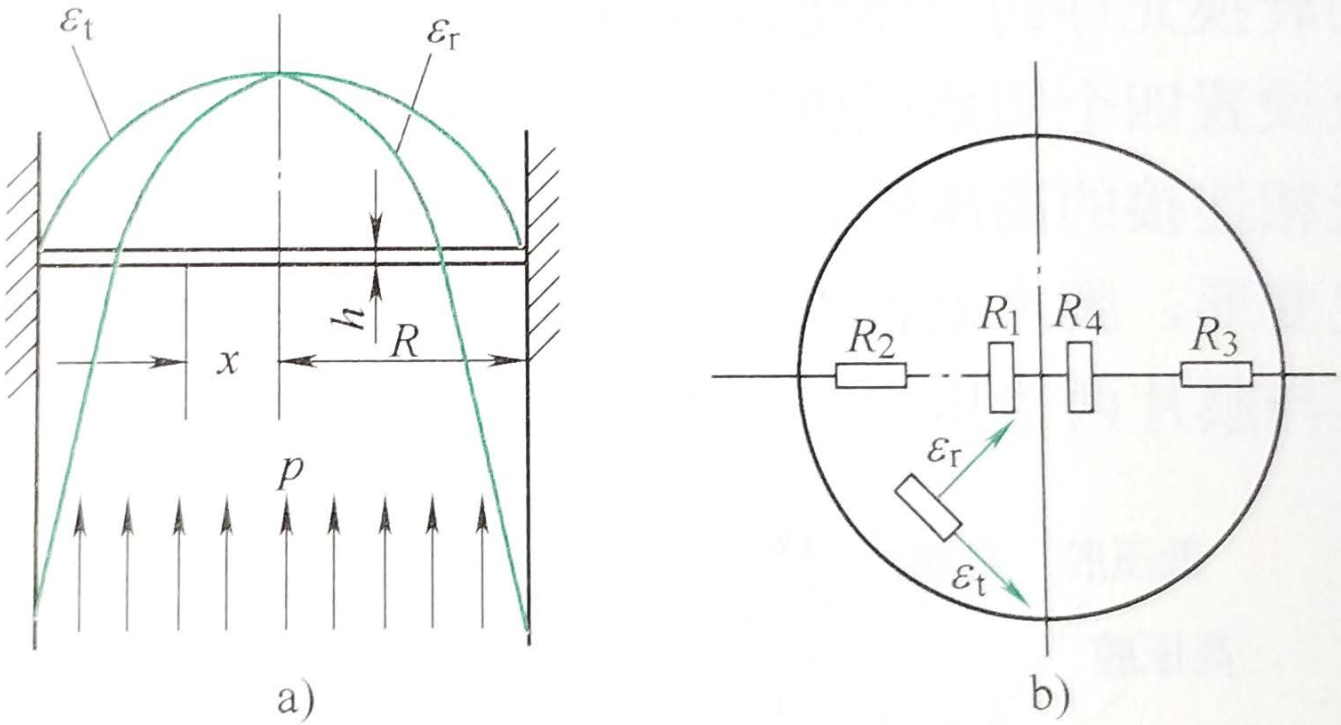


图 3-14　膜片式压力传感器

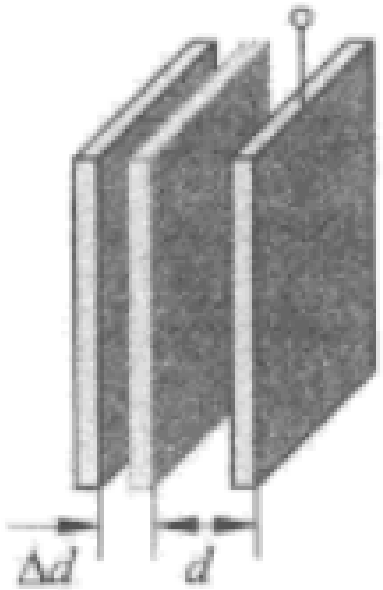
a）应力变化　b）应变片粘贴位置

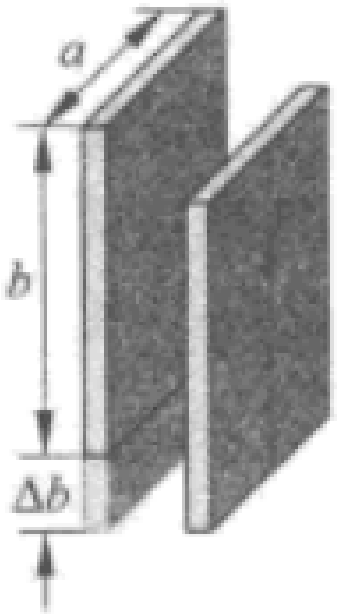
内容提纲

- 电阻应变式传感器
- 应变电阻转换电路
- 应变片的种类及应用
- 电容式传感器及其特性
- 电容式传感器的应用
- 电容传感器测量电路
- 电容传感器的使用注意事项

平板电容式传感器工作原理

介电常数ϵ，覆盖面积A=ab，平板距离d





d、A或 ε 发生变化时，都会引起电容的变化。

1、改变极板面积的变面积式；

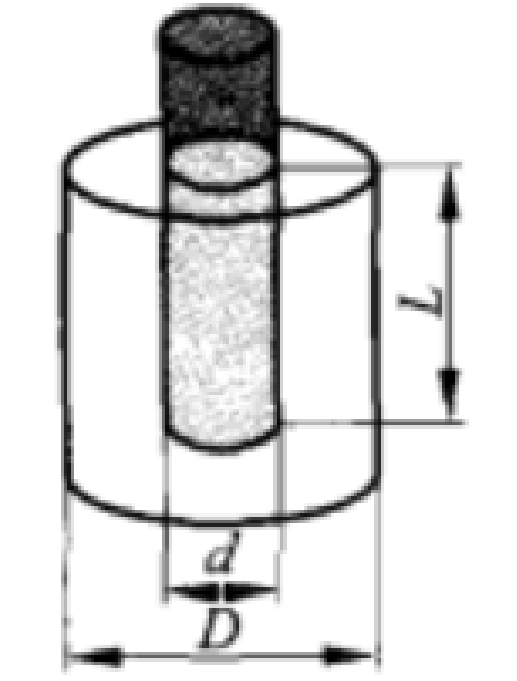
2、改变极板距离的变极距式；

3、改变介电常数的变介电常数式。

$$C=\varepsilon_0\varepsilon_r\frac{A}{d}=\varepsilon_0\varepsilon_r\frac{ab}{d}$$

圆筒电容式传感器工作原理

介电常数ϵ，覆盖高度L



L 或 ε 发生变化时，都会引起电容的变化。

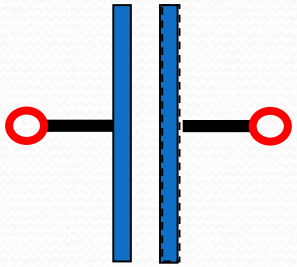
1、改变极板高度的变面积式；

2、改变介电常数的变介电常数式。

$$C=\frac{2\pi\varepsilon_0\varepsilon_r L}{\ln(D/d)}$$

电容式传感器的种类

一、变极距型电容传感器



$$C_0 = \frac{\varepsilon A}{d_0} \quad (\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r)$$

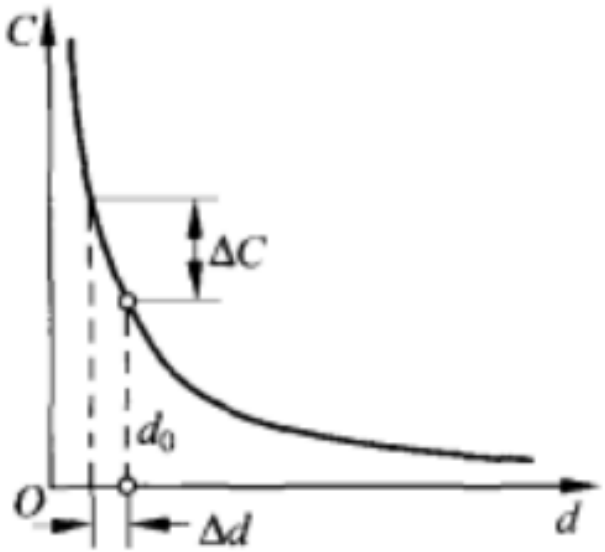
若d从$d_o \rightarrow d_o - \Delta d$, 电容量$C_o \rightarrow C_o + \Delta C$, 则有

$$\Delta C = \frac{\varepsilon A}{d_0 + \Delta d} - \frac{\varepsilon A}{d_0} = -\frac{\varepsilon A}{d_0}\frac{\Delta d}{d_0 + \Delta d} = -C_0 \frac{\Delta d}{d_0 + \Delta d} \approx -C_0 \frac{\Delta d}{d_0}$$

当 $\Delta d << d_0$ 时，变极距式电容传感器有近似线性关系。所以变极距型电容式感器一般用来测量微小变化的量。

- 电容器灵敏度：$k = \dfrac{\Delta C / C_0}{\Delta d} = \dfrac{1}{d_0}$

电容式传感器的种类



如图，变极距式传感器的输入输出是典型的双曲线非线性关系，在初始容量附近的微小范围，可以近似为线性关系，但在反复测试使用过程中，初始电容量难以保证不变。

结论：

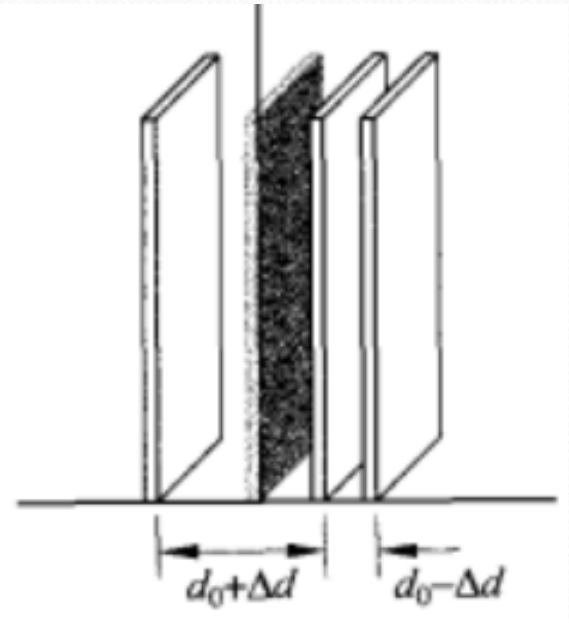
① 非线性随相对位移的增加而增加，为保证一定的线性度，应限制动极板的相对位移量。

$$\Delta d/d_o=0.02\sim0.1$$

③为改善非线性，可以采用差动式。

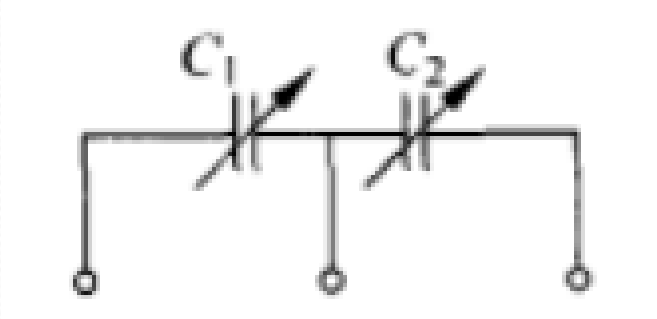
差动电容传感器

变极距电容传感器测量位移时，输入输出特性是非线性的双曲线，很难确定测量基准点。差动电容传感器是在两固定电极之间加可动中间极板。



固定极板和滑动极板

变极距电容形成两个电容C_1和C_2

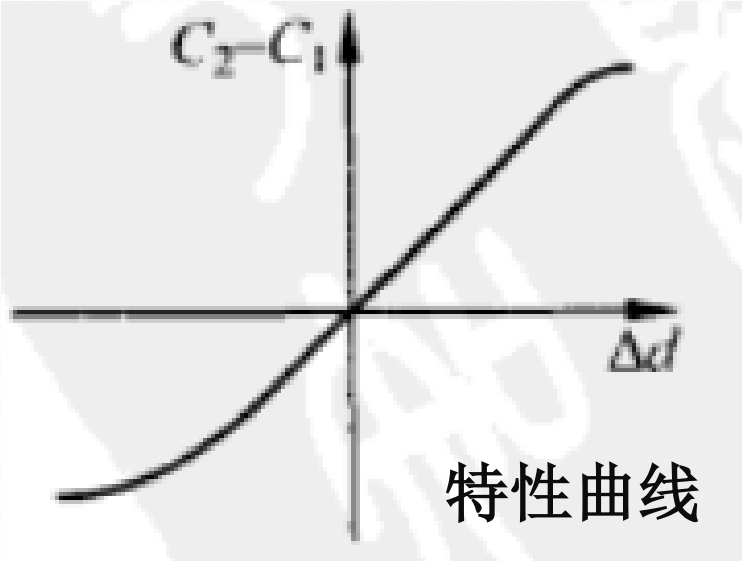


等效电路

差动电容传感器

两电容量的差与滑动极板离开中点的位移Δ*d*之间的关系如下图所示，图中可见特性曲线过零点并在零点附近呈现良好的线性关系。C_1和C_2有如下的关系

$$\frac{C_2}{C_1}=\frac{d_0+\Delta d}{d_0-\Delta d}$$



特性曲线

$$C_1=C_0\frac{1}{1+\Delta d/d_0}$$

$$C_2=C_0\frac{1}{1-\Delta d/d_0}$$

在$\Delta d/d_0 \ll 1$时，分别展开C_1和C_2的变化量，可得

差动电容传感器

$$C_2 = C_0\left[1+\frac{\Delta d}{d_0}+(\frac{\Delta d}{d_0})^2+(\frac{\Delta d}{d_0})^3+\ldots\right]$$

$$C_1 = C_0\left[1-\frac{\Delta d}{d_0}+(\frac{\Delta d}{d_0})^2-(\frac{\Delta d}{d_0})^3+\ldots\right]$$

$$\Delta C = C_2 - C_1 = C_0\left[2\frac{\Delta d}{d_0}+2(\frac{\Delta d}{d_0})^3+2(\frac{\Delta d}{d_0})^5+\ldots\right]$$

$$\frac{\Delta C}{C_0} = 2\frac{\Delta d}{d_0}\left[1+(\frac{\Delta d}{d_0})^2+(\frac{\Delta d}{d_0})^4+(\frac{\Delta d}{d_0})^6+\ldots\right]$$

忽略Δd的高次项（即非线性项），得

$$\frac{\Delta C}{C_0} \approx \frac{2\Delta d}{d_0}$$

思考题：如何分析评价非线性误差？

差动电容传感器

- 差动结构是Δd的偶次项相减后抵消，第一个非线性为三次项，这种误差影响已经相当小，所以差动结构的线性度更好
- 差动结构是灵敏度提高了一倍。电容 差动可以消除共模干扰和漂移、提高线性度和灵敏度，是实现电容精密测量的有效方法。

电容式传感器的种类

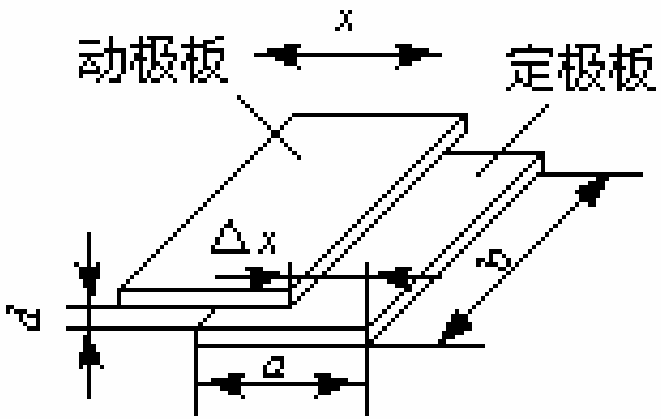
二、变面积型电容传感器

- 改变极板间覆盖面积的电容式传感器
- 常用的有角位移型和线位移型两种。

➢ 直线位移型电容式传感器

当平板两边a、b中的一边随被测量变化而变化时，输入输出特性具有良好的线性关系：

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{ab}{d} \qquad \Delta C = -C_0 \frac{\Delta x}{a}$$



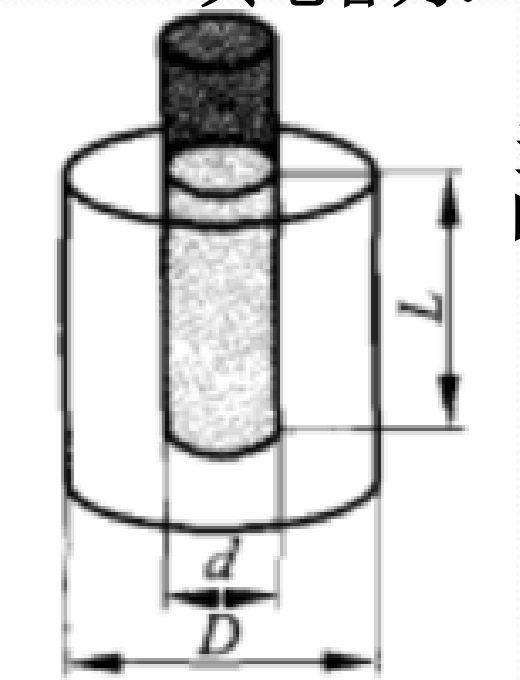
直线位移型电容式传感器

电容式传感器的种类

二、变面积型电容传感器

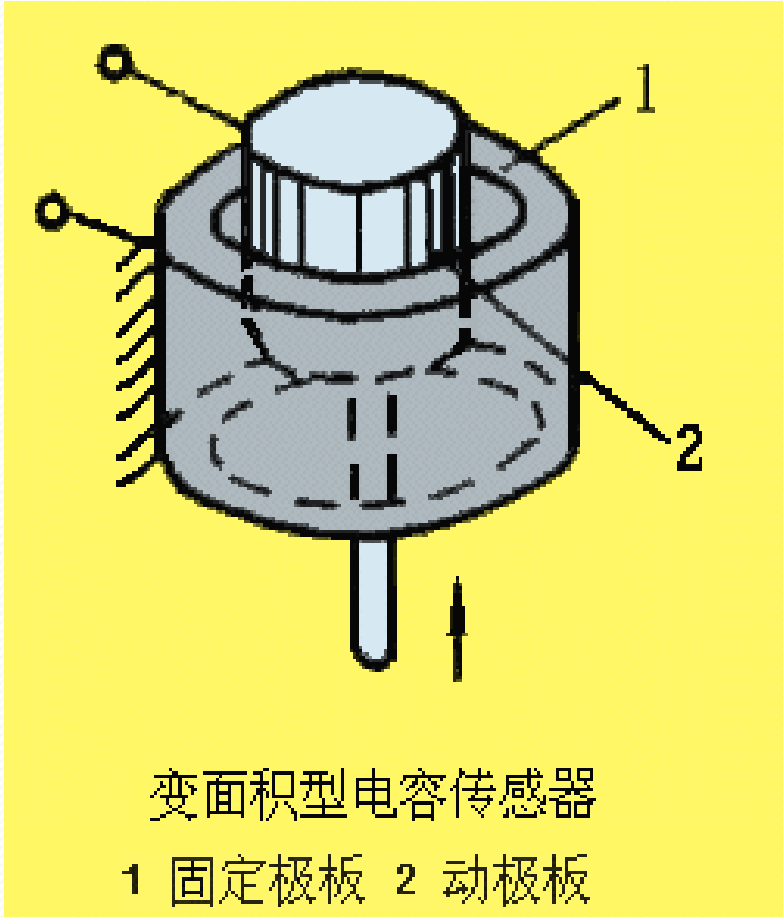
➢ 线位移型电容式传感器

- 对于圆柱线位移型电容式传感器，当覆盖长度L变化时，电容量也随之变化
- 其电容为：$$C=\frac{2\pi\varepsilon_0\varepsilon_r L}{\ln(D/d)}$$



当两筒相对移动ΔL时，电容量变化为：

$$\Delta C=-C_0\frac{\Delta L}{L}$$



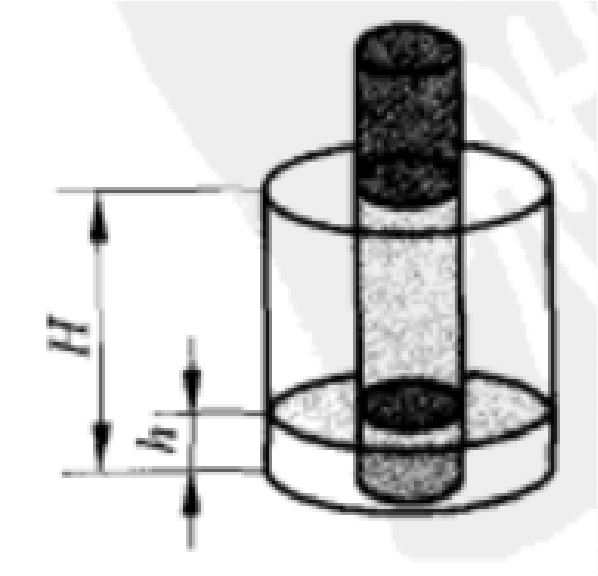
变面积型电容传感器

1 固定极板 2 动极板

电容式传感器的种类

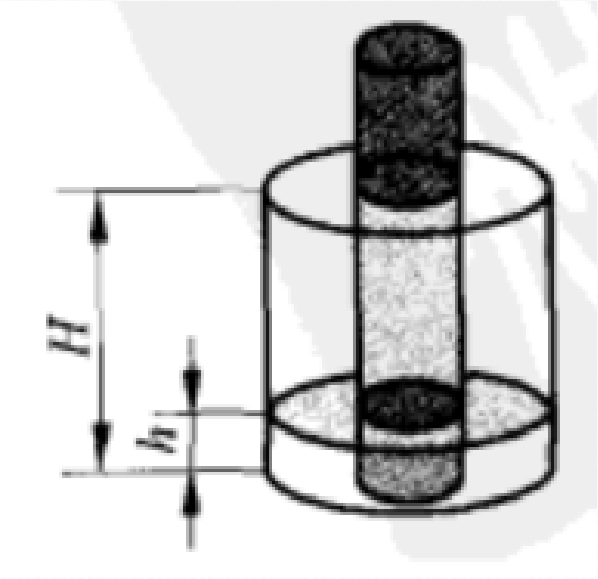
三、变介电常数型电容传感器

- 这种传感器大多用于测量电介质的厚度、位移、液位。
- 可根据极板间介质的介电常数随温度、湿度、容量改变而改变来测量温度、湿度、容量等



电容式传感器的种类

三、变介电常数型电容传感器



总高H，电极底部高度h的范围内为介电常数ε_r的电介质。相当于两个电容并联：

$$C=\frac{2\pi\varepsilon_0(H-h)}{ln(D/d)}+\frac{2\pi\varepsilon_0\varepsilon_r h}{ln(D/d)}$$

$$C_0=\frac{2\pi\varepsilon_0 H}{ln(D/d)} \Rightarrow \Delta C=C-C_0=\frac{2\pi h\varepsilon_0(\varepsilon_r-1)}{ln(D/d)}$$

电容式液位传感器就是利用这个关系测量介质液面高度h

电容式传感器的种类

三、变介电常数型电容传感器

$$C_1 = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_1 A}{d_1} \qquad C_2 = \frac{\varepsilon_0 A}{d_0}$$

$$C = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_1 A}{\varepsilon_1 d_0 + d_1}$$

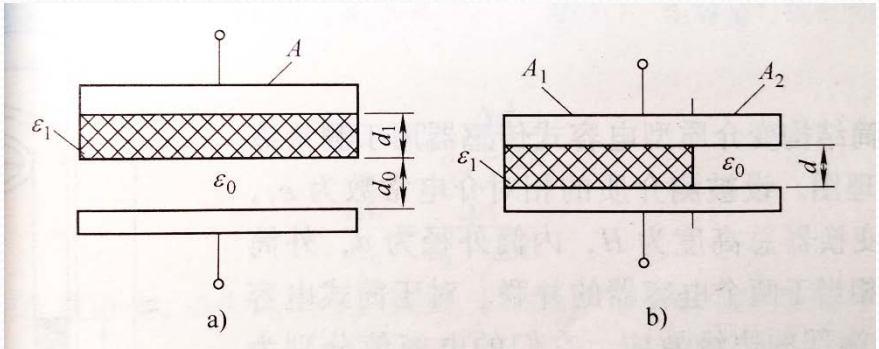


图 5-5　平板结构变介质型电容式传感器原理图

a）串联型　b）并联型

$$C_0 = \frac{\varepsilon_0 A}{d_0 + d_1} \Rightarrow \Delta C = C - C_0 = C_0 \frac{\varepsilon_1 - 1}{\varepsilon_1 \frac{d_0}{d_1} + 1}$$

电容增量与所加介质的介电常数ε_1为非线性关系（串联型）。

内容提纲

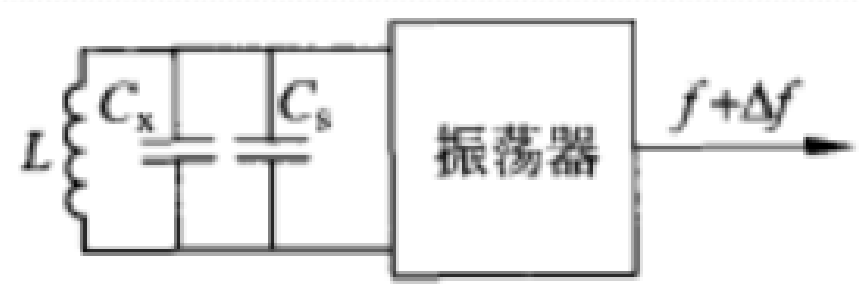
- 电阻应变式传感器
- 应变电阻转换电路
- 应变片的种类及应用
- 电容式传感器及其特性
- 电容式传感器的应用
- 电容传感器测量电路
- 电容传感器的使用注意事项

电容式传感器测量电路

振荡电路

将电容传感器作为RC振荡电路或LC振荡电路中的电容元件。此时固定电阻或固定电感，因为电容随被测量变化，振荡电路的振荡频率则随电容值变化。

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L(C_x + C_s)}}$$



*LC*振荡电路原理图

$$f_0' = \frac{1}{2\pi\sqrt{L(C_0 \pm \Delta C_X)}} = f_0 \mp \Delta f$$

$$\Delta f \approx -\frac{f_0}{2\sqrt{(C_x + C_s)}}\Delta C_x$$

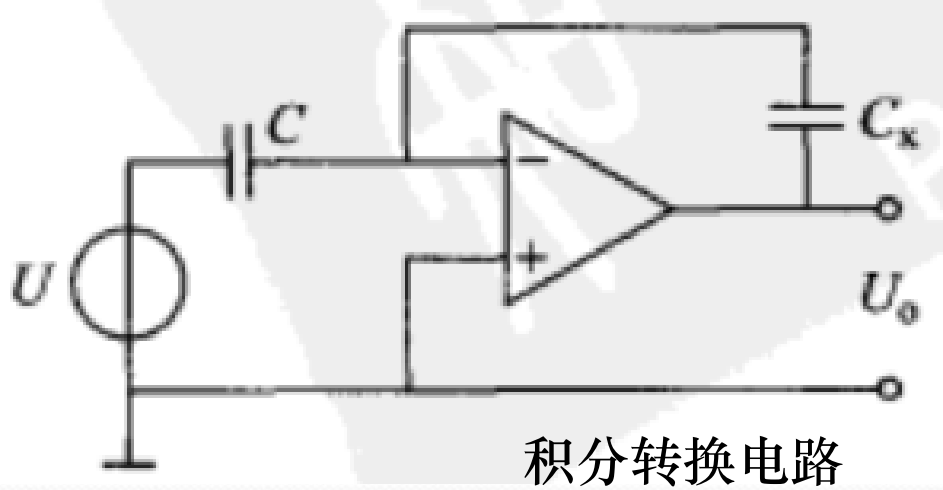
电容式传感器测量电路

运算放大电路

图中C_x是传感器电容，C是固定电容，则运算放大器的输出电压信号

$$\dot{U}_0 = -\frac{C}{C_x}\dot{U} \qquad C_x = \varepsilon\frac{A}{d}$$

$$\dot{U}_0 = -\frac{\dot{U}C}{\varepsilon A}d$$



积分转换电路

适合于变极距式电容位移传感器的信号转换。

为什么?

电容式传感器测量电路

单个电容测量：

- 振荡电路
- 运算放大器

差动电容测量：

- 变压器式交流电桥
- 二极管双T型交流电桥
- 脉冲宽度调制电路
- ……

电容式传感器测量电路

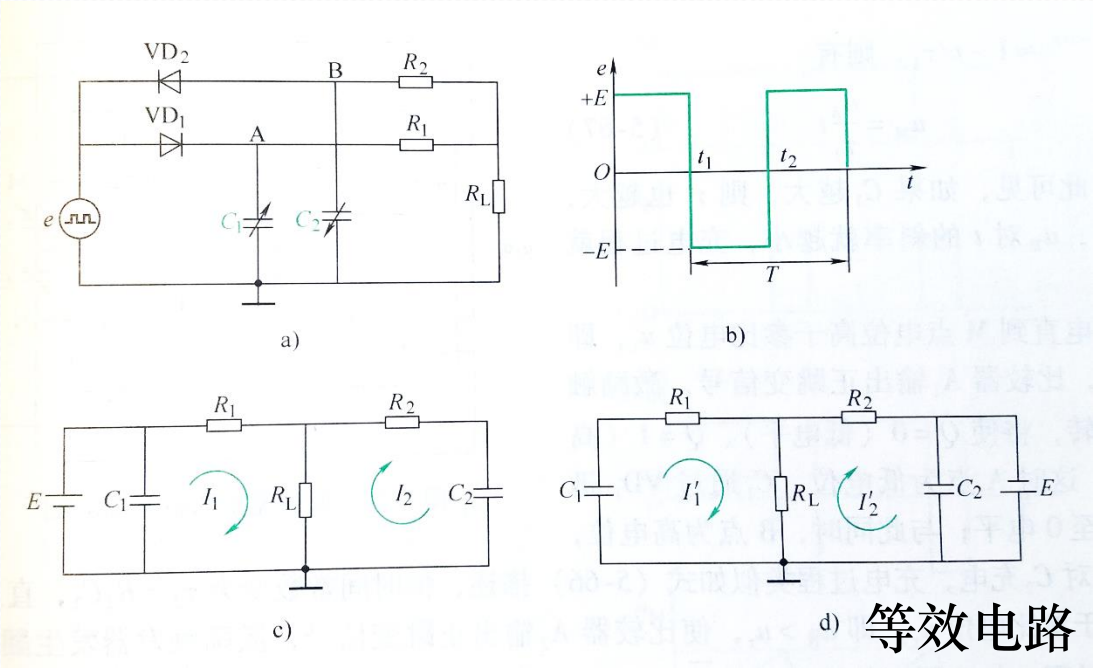
二极管双T型交流电桥

$R_1 = R_2 = R$，当$C_1 \neq C_2$时，

$$U_0 = I_L R_L = \frac{1}{T}\int_0^T \left[I_1(t) - I_2(t)\right] dt R_L$$

$$\approx \frac{R(R+2R_L)}{(R+2R_L)^2} R_L E f (C_1 - C_2)$$

$$= KEf(C_1 - C_2)$$

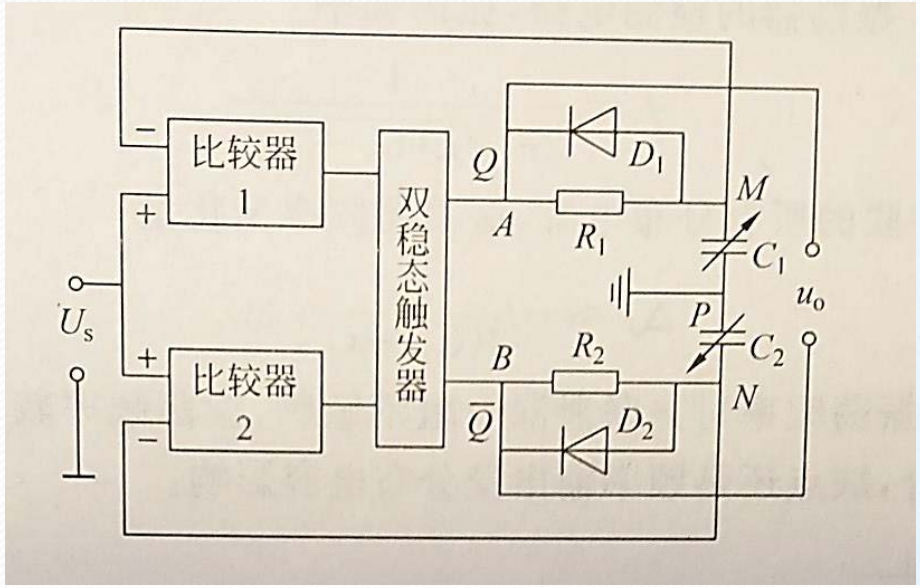


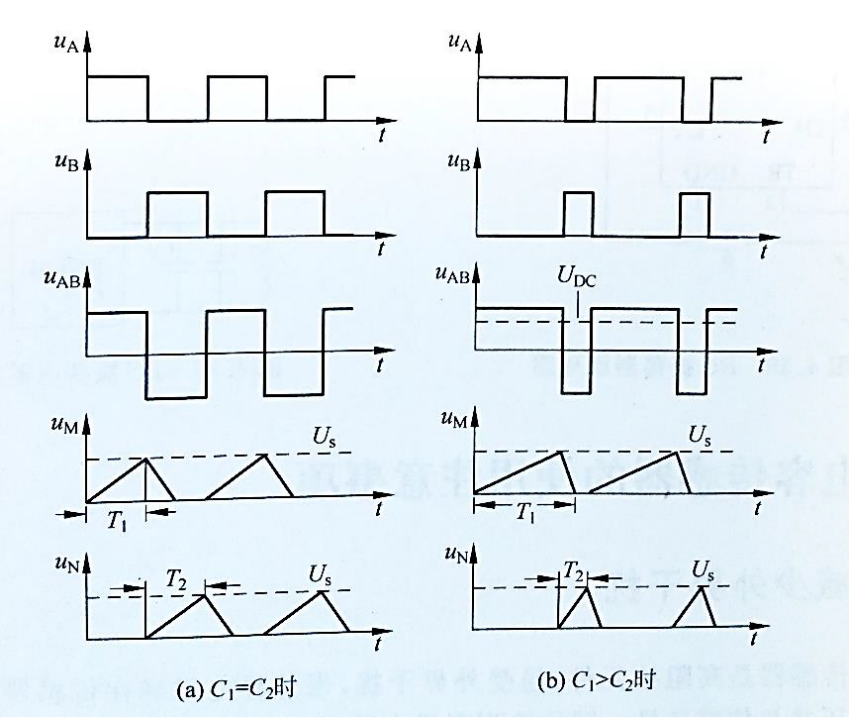
等效电路

线路简单，不需附加相敏检波和整流电路，直接得到较高的直流电压输出（f很高）。

电容式传感器测量电路

脉冲宽度调制电路





(a) $C_1=C_2$时　　(b) $C_1>C_2$时

$$u_0=(u_{AB})_{DC}=u_A-u_B=\frac{T_1}{T_1+T_2}u_{Am}-\frac{T_2}{T_1+T_2}u_{Bm}=\frac{R_1C_1u_{Am}-R_2C_2u_{Bm}}{R_1C_1+R_2C_2}$$

$R_1=R_2$，设$u_{Am}=u_{Bm}=u_m$ ⇒ $$u_0=(u_{AB})_{DC}=\frac{C_1-C_2}{C_1+C_2}u_m$$

电容式传感器测量电路

脉冲宽度调制电路

$$u_0 = (u_{AB})_{DC} = \frac{C_1 - C_2}{C_1 + C_2} \mathrm{u_m}$$

对于变极距型

$$u_0 = \frac{d_2 - d_1}{d_2 + d_1} u_m = \pm \frac{\Delta d}{d_0} u_m$$

对于变面积型

$$u_0 = \pm \frac{\Delta A}{A_0} u_m$$

电容式传感器的特性

优点：

- 结构简单、适应性强
- 温度稳定性好
- 耐辐射
- 动态响应好
- 可以实现非接触测量，具有平均效应点

缺点：

- 输出阻抗高，负载能力差
- 寄生电容影响大——掌握寄生电容的定义；
- 输出特性非线性 ——针对变极距型来说；

电容式传感器的特性

减少环境温度湿度变化的影响

温度变化会使得传感器极板电极材料的几何尺寸、相对位置和某些电介质的介电常数发生变化，进而改变传感器电容量，产生温度偏差。

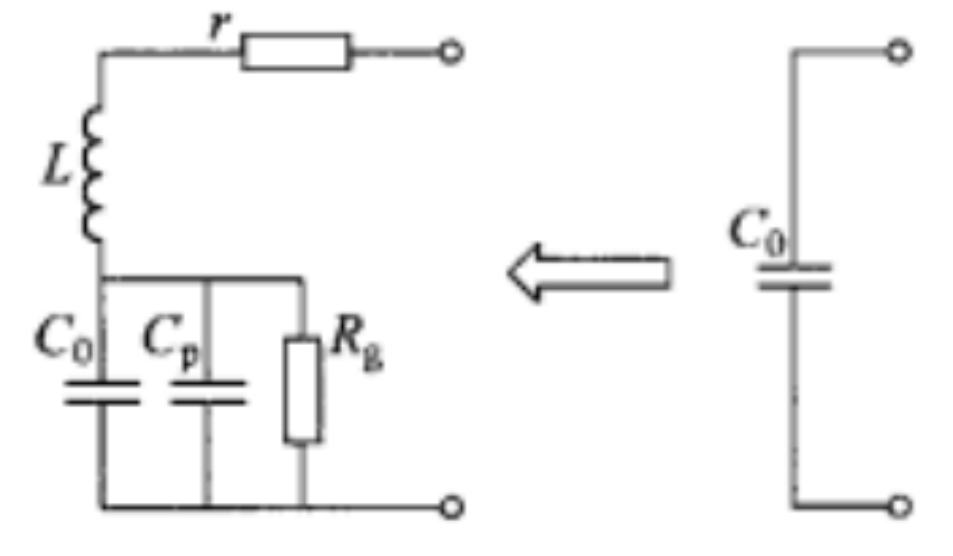
湿度也会影响某些电介质的介电常数和绝缘电阻值，造成偏差。

因此，必须从选材、结构、加工工艺等方面减少温湿度的影响。

电容式传感器的特性

漏电阻、激励频率和材料的绝缘性

如图，L为电容器及引线电感；r为导线、极板间和金属支座等损耗电阻；C_0为电容传感器本身的电容；C_p为寄生电容，克服其影响是提高电容传感器实用性能的关键之一； R_g 为低频损耗并联电阻，它包含极板间漏电和介质损耗。这些参量因工作条件不同而不同。



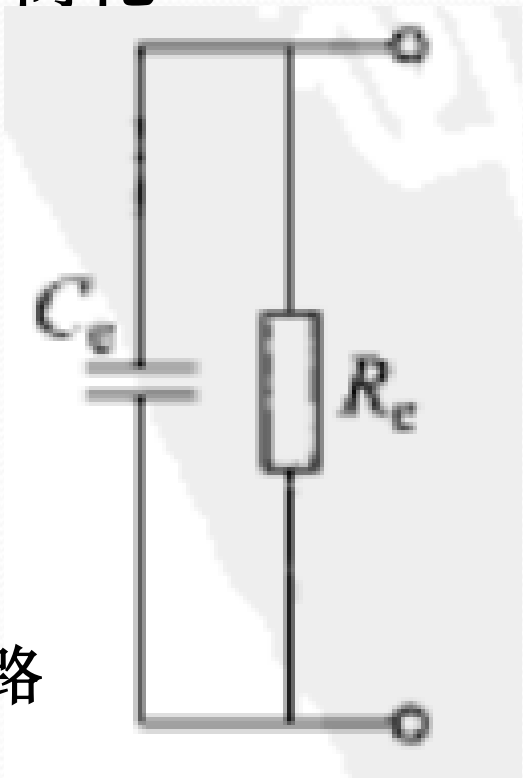
电容式传感器的特性

漏电阻、激励频率和材料的绝缘性

在低频工作时，传感器的电容阻抗很大，L和r的影响可以忽略，因此等效电路可以进行简化。

$C_e = C_0 + C_p$，$R_e = R_g$

R_e为等效漏电阻



低频等效电路

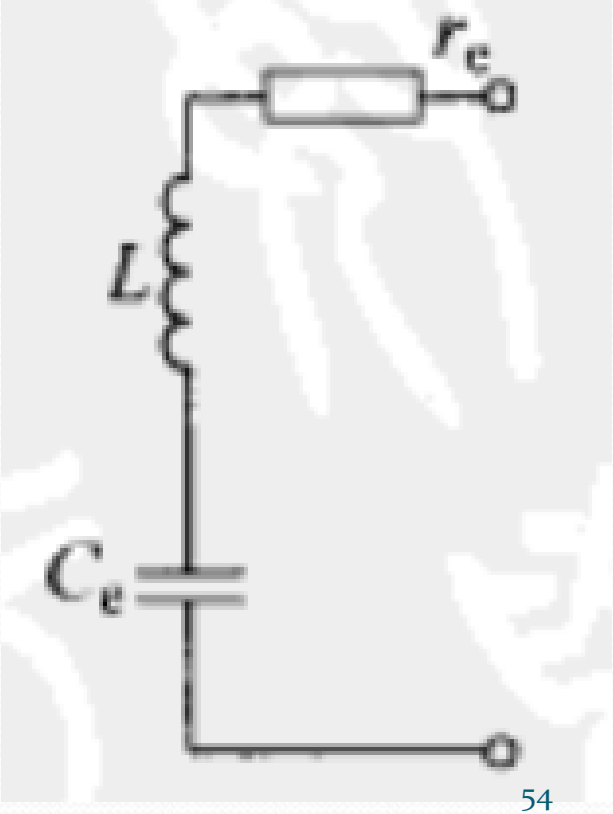
电容式传感器的特性

漏电阻、激励频率和材料的绝缘性

在高频工作时，电容阻抗变小，L和r的影响不可忽略，此时等效电路也可以进行简化。

$C_e = C_0 + C_p$，$r_e = r$

R_e为等效漏电阻此时引线的电感很小，只有在10MHz以上的高频时才考虑其影响



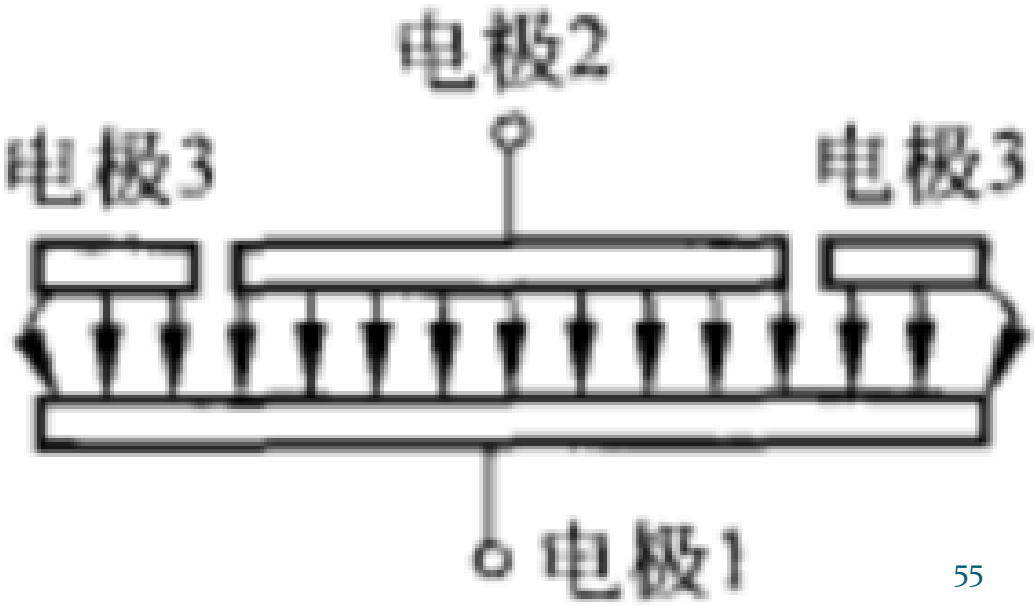
高频等效电路

电容式传感器的特性

减少边缘效应

平行极板的边缘效应不仅使传感器的灵敏度降低而且产生非线性，适当减小极板间距、增大极板面积，可以减小边缘效应的影响。

- 将极板做薄，使之与极距相比很小
- 在结构上增设等位环来消除边缘效应（如图所示）

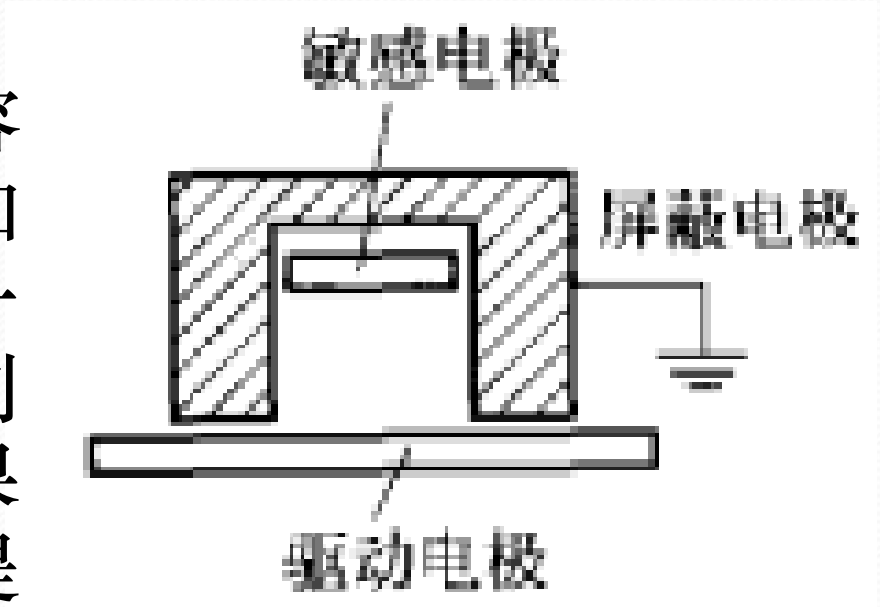


电容式传感器的特性

屏蔽电极

屏蔽电极接地，起到对敏感电极的电场保护作用，使其与外界电场隔离开，并有效避免驱动电极所产生的边缘电场的不确定性。

在如图所示的在保护环的电容传感器中，主电极板以外添加的环状电极也可以理解成是一种屏蔽电极，它的作用是控制绝缘电场、减少会对测量结果造成不良影响的寄生电容、提高抗外界电场干扰的能力。



带屏蔽电极的电容器

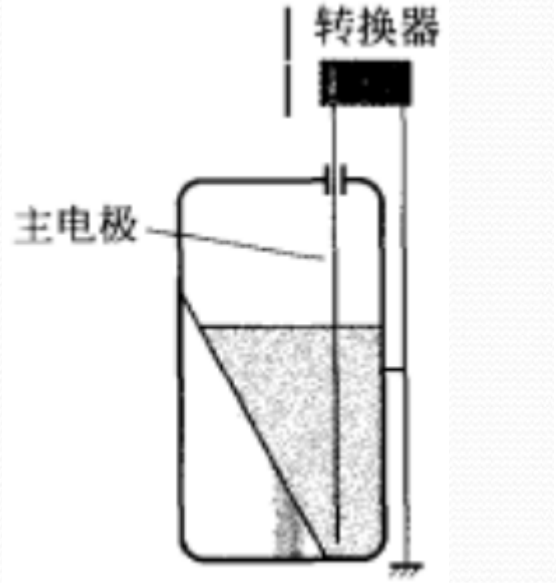
内容提纲

- 电阻应变式传感器
- 应变电阻转换电路
- 应变片的种类及应用
- 电容式传感器及其特性
- 电容式传感器的应用
- 电容传感器测量电路
- 电容传感器的使用注意事项

电容式传感器的应用——工业液位计

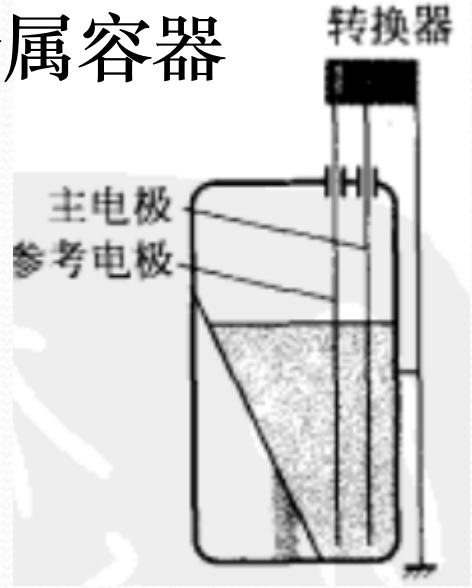
根据液体是否导电以及是否是金属容器，电容式液位计有如下四种：

- 非导电性液体、金属容器
- 导电性液体、金属容器
- 非导电性液体、树脂容器
- 非导电性液体、介电常数有变化，金属容器



导电/非导电液体，金属容器

非导电液体，树脂容器

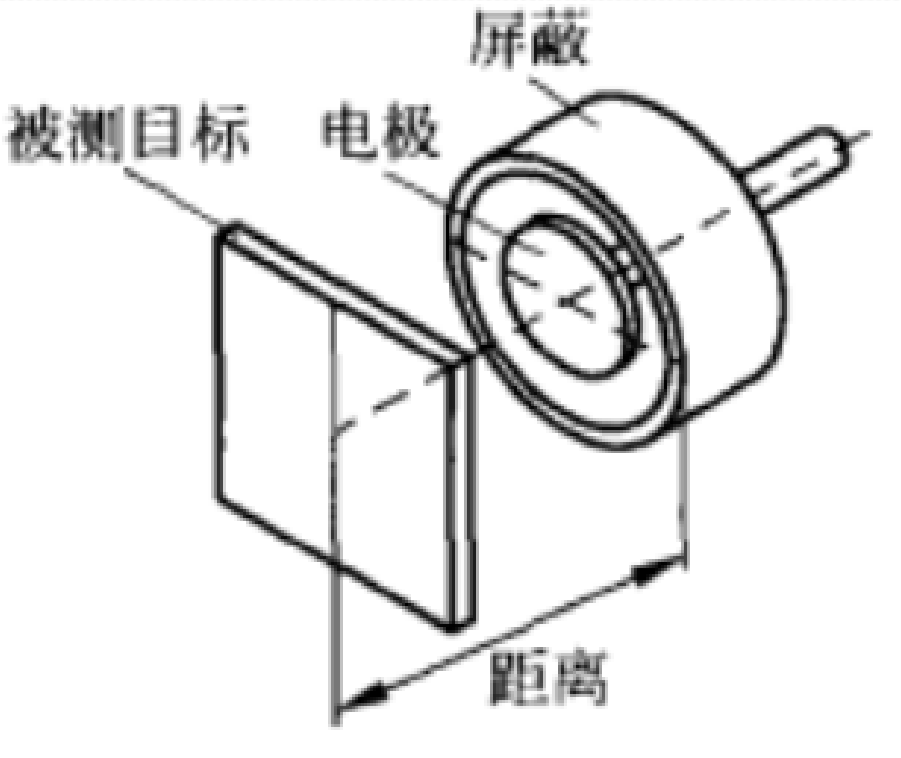


非导电液体，金属容器，介电常数有变化

电容式传感器的应用

电容式接近传感器

常见的电容式接近传感器探头上 的敏感电极对呈同心圆形状，中央电极足发射电极，中间的圆环是保护环，也称驱动电极，最外层有屏蔽电极。驱动电极与发射电极等电位但不短路。



电容位移传感器探头和被测物

电容式传感器的应用

电容式接近传感器

当被测目标是非接地导体时，可以理解为被测物对地有电容。

➢被测物对地电容比探头与被测物之间的电容大得多时，浮地影响不大；

➢被测物对地电容很小时，浮地影响较大，需要里新标定接近传感器的开关响应距离。

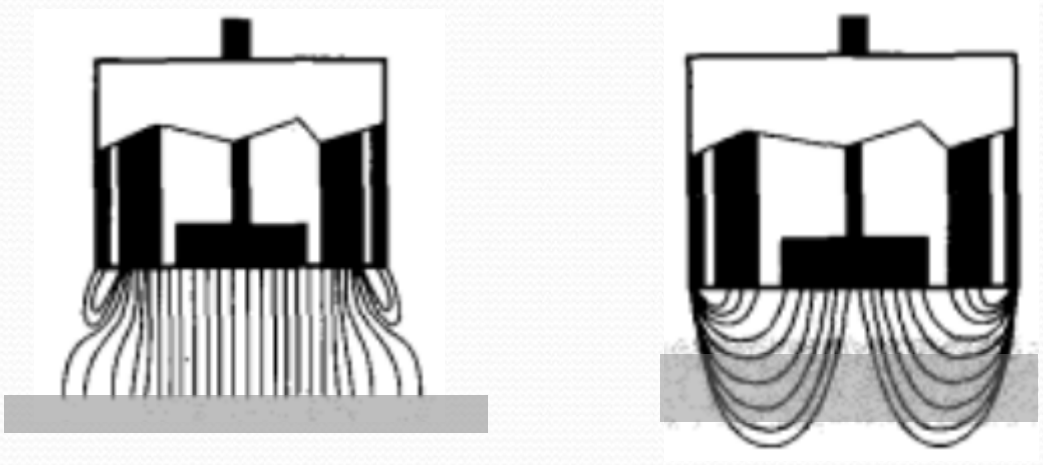
电容式接近传感器的接地

电容式传感器的应用

电容式接近传感器

➢被测目标是接地导体时（如下面左图），接收电极为被测导体，被测物接近时，电容值变小。

➢被测目标是绝缘体时（如下面右图），传感器会具有更大的探测距离。绝缘材料的介电常数不同，开关响应距离也会发生变化。

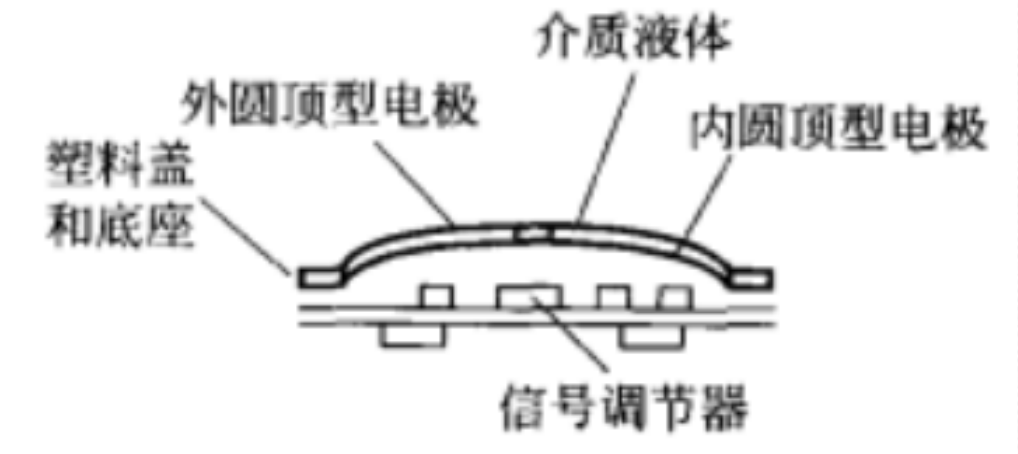


发射接收式电容位移传感器

电容式传感器的应用

电容式倾斜仪

当传感器呈水平时，空气泡处在中心位置;当传感器倾斜时，玻璃容器内的液体介质分布发生变化，上下电极组合得到的四个电容器的电容发生变化。倾斜角度传感器的分辨率可以达到0. 01°,倾斜范围20°。



电容式倾斜仪结构

电容式传感器的应用

差动电容式加速度传感器

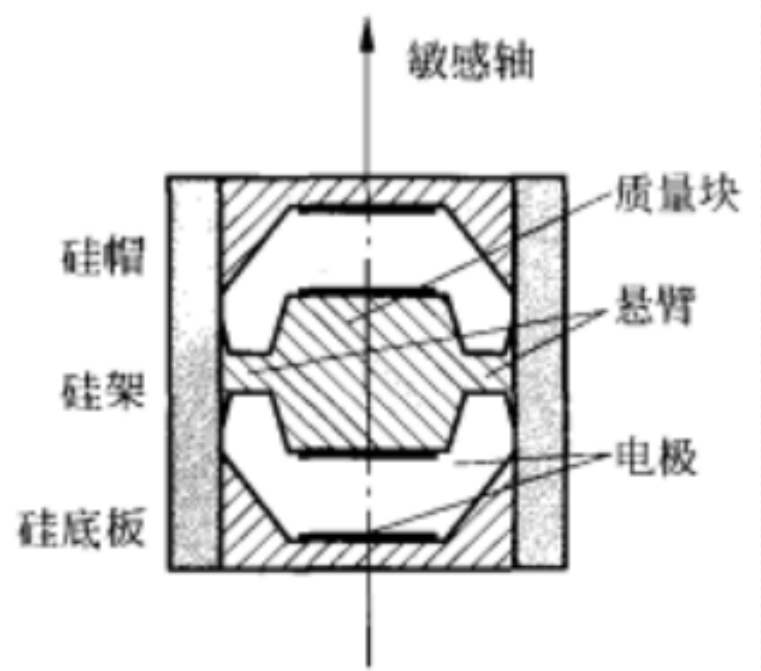
➢加速度传感器是以弹簧牛顿质量系统的检测方法为基础，通过位移检测来实现的

➢当传感器框体固定在被测物上，当敏感轴方向上有加速度时，由于惯性作用，质量块与框体之间发生 相对位移，这个位移量通过差动电容值线性输出

$$\frac{\Delta C}{C_0} \approx \frac{2\Delta d}{d_0}$$

$$s = \Delta d = \frac{1}{2}at^2$$

$$\frac{\Delta C}{C_0} \approx \frac{2\Delta d}{d_0} = \frac{at^2}{d_0}$$



差动电容式加速度传感器原理

内容提纲

- 电阻应变式传感器
- 应变电阻转换电路
- 应变片的种类及应用
- 电容式传感器及其特性
- 电容式传感器的应用
- 电容传感器测量电路
- 电容传感器的使用注意事项

电容式传感器的使用注意事项

减少外界干扰

- 屏蔽和接地
- 增加传感器电容量，降低容抗
- 导线之间尽量远，走线要短，若必须平行可采用同轴屏蔽电缆
- 尽可能一点接地，避免多点接地
- 尽可能采用差动电容结构

减少寄生电容

- 尽量增加传感器初始电容值
- 注意接地和屏蔽，缩短引线电缆，尽量将测量电路与传感器防止在一起，装在传感器屏蔽盒里
- 使用驱动电缆技术