



第4章 应变式传感器

- 基本描述——利用电阻应变片将应变转换为电阻变化的传感器
- 主要用途——测量力、力矩、压力、加速度、重量等
- 本章内容
 - 工作原理
 - 电阻应变片的特性
 - 测量电路
 - 应变式传感器的应用

应变式传感器的工作原理

- 定性：应变效应——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
- 定量：灵敏度 $k = \frac{\Delta R/R}{\Delta L/L}$

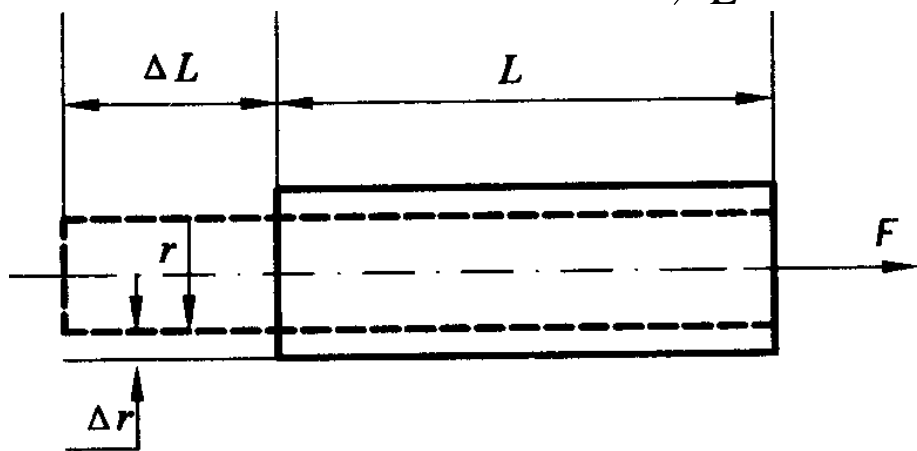


图 3 - 1 金属电阻丝应变效应

$$R = \rho \frac{L}{S} \xrightarrow[\text{???}]{\text{求R的全微分}} \frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta L}{L} - \frac{\Delta S}{S} + \frac{\Delta \rho}{\rho}$$

$$\frac{\Delta L}{L} = \varepsilon \quad \frac{\Delta S}{S} \approx \frac{2\Delta r}{r} = -2\mu \frac{\Delta L}{L} = -2\mu\varepsilon$$

$\mu ?$

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

灵敏度系数 $k = \frac{\Delta R/R}{\varepsilon} = 1 + 2\mu + \frac{\Delta \rho/\rho}{\varepsilon}$



电阻应变片的特性

- 种类及结构
- 弹性敏感元件及其基本特性
- 灵敏系数
- 横向效应
- 绝缘电阻和最大工作电流
- 应变片的温度误差及补偿

种类及结构

- 种类：常见的有丝式电阻应变片和箔式电阻应变片两种。

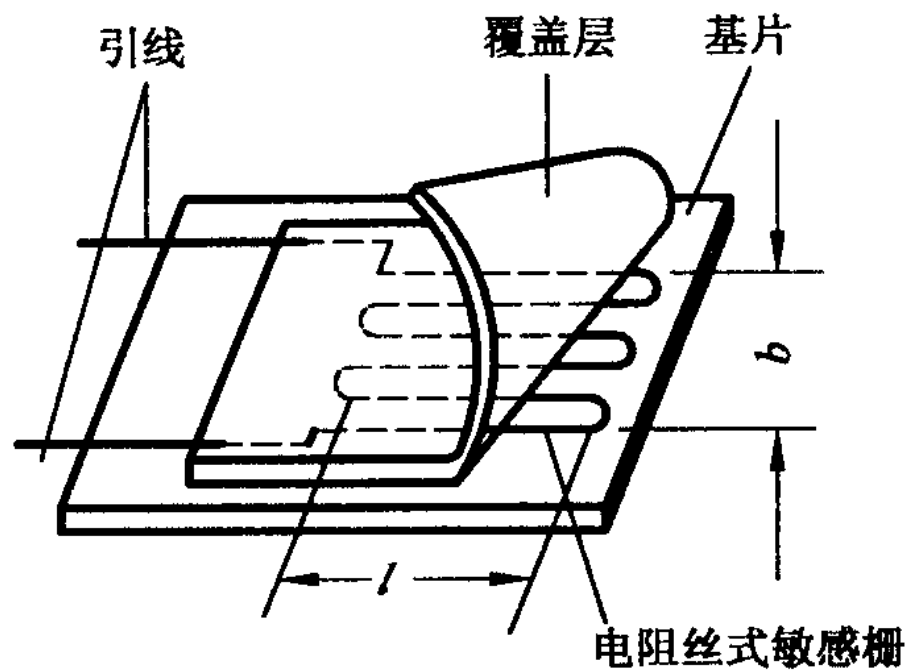


图 3 - 2 金属电阻应变片的结构

弹性敏感元件及其基本特性

- 几个概念——变形、弹性变形、弹性元件
- 基本特性——刚度、灵敏度
 - 刚度——弹性元件受外力作用下变形大小的量度。

$$C = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta F}{\Delta x}$$

- 灵敏度——单位力作用下弹性元件产生变形的大小。刚度的倒数。

$$S = \frac{1}{C} = \frac{dx}{dF}$$

灵敏系数

- 定义 $K=(\Delta R/R)/\varepsilon_t$ 为应变片的灵敏系数。它表示安装在被测试件上的应变在其轴向受到单向应力时，引起的电阻相对变化 $(\Delta R/R)$ 与其单向应力引起的试件表面轴向应变 (ε_t) 之比。
- **注：**应变片的灵敏系数并不等于其敏感栅整长应变丝的灵敏系数，这是因为在单向应力产生应变时，应变片的灵敏系数除受到敏感栅结构形状、成型工艺、粘结剂和基底性能的影响外，尤其受到栅端圆弧部分横向效应的影响。

横向效应

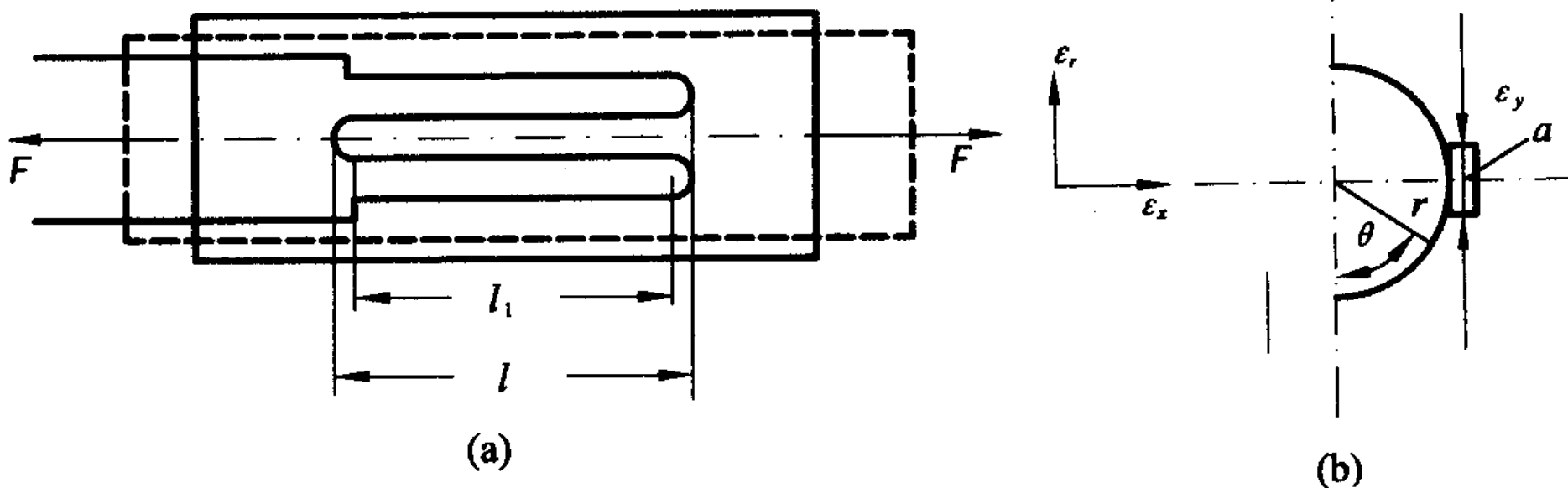


图 3 - 5 应变片轴向受力及横向效应

(a) 应变片及轴向受力图；(b) 应变片的横向效应图

结果：应变片的灵敏度比电阻丝的灵敏度要小

解决办法：1) 短路转弯段；2) 降低转弯段电阻值；3) 采用箔式应变片

绝缘电阻和最大工作电流

- 绝缘电阻——已粘贴的应变片的引线与被测件之间的电阻值 R_m 。
绝缘电阻越大越好。
- 最大工作电流——已安装的应变片允许通过敏感栅而不影响其工作特性的最大电流 I_{\max} 。工作电流大，敏感度高，但也会使应变片过热，应视材料选取不同的电流。

应变片的温度误差及补偿

- 应变片的温度误差——由于测量现场环境温度的改变而给测量带来的附加误差

- 电阻温度系数的影响——直接

$$R_t = R_0(1 + \alpha_0 t) \xrightarrow{\text{当温度变化}\Delta t\text{时}} \Delta R_\alpha = R_t - R_0 = R_0 \alpha_0 \Delta t$$

- 试件材料和电阻丝材料的线膨胀系数的影响——间接

设：电阻丝和试件温度0°C时的长度为 L_0 ，温度变化后的长度分别为：

$$\left. \begin{aligned} l_s &= l_0(1 + \beta_s \Delta t) \\ l_g &= l_0(1 + \beta_g \Delta t) \end{aligned} \right\} \Rightarrow \Delta L = l_g - l_s = (\beta_g - \beta_s) l_0 \Delta t$$

$$\varepsilon_\beta = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{l_g - l_s}{L_0} = (\beta_g - \beta_s) \Delta t$$

$$\Delta R_\beta = K_0 R_0 \varepsilon_\beta = K_0 R_0 (\beta_g - \beta_s) \Delta t$$

$$\frac{\Delta R_t}{R_0} = \frac{\Delta R_\alpha + \Delta R_\beta}{R_0} = \alpha_0 \Delta t + K_0 (\beta_g - \beta_s) \Delta t$$

$$\varepsilon_t = \frac{\Delta R_t / R_0}{K_0} = \left[\frac{\alpha_0}{K_0} + (\beta_g - \beta_s) \right] \Delta t$$

应变片的自补偿法

- 自补偿法-温度自补偿应变片

$$\varepsilon_t = \frac{\Delta R_0 / R_0}{K_0} = \left[\frac{\alpha_0}{K_0} + (\beta_g - \beta_s) \right] \Delta t$$

当被测试件的线膨胀系数 β_g 已知时，如果合理选择敏感栅材料，即其电阻温度系数 α_0 、灵敏系数 K_0 和线膨胀系数 β_s ，使式 $\alpha_0 / K_0 + (\beta_g - \beta_s) = 0$ 成立，则不论温度如何变化，均有 $\Delta R_t / R_0 = 0$ ，从而达到温度自补偿的目的。

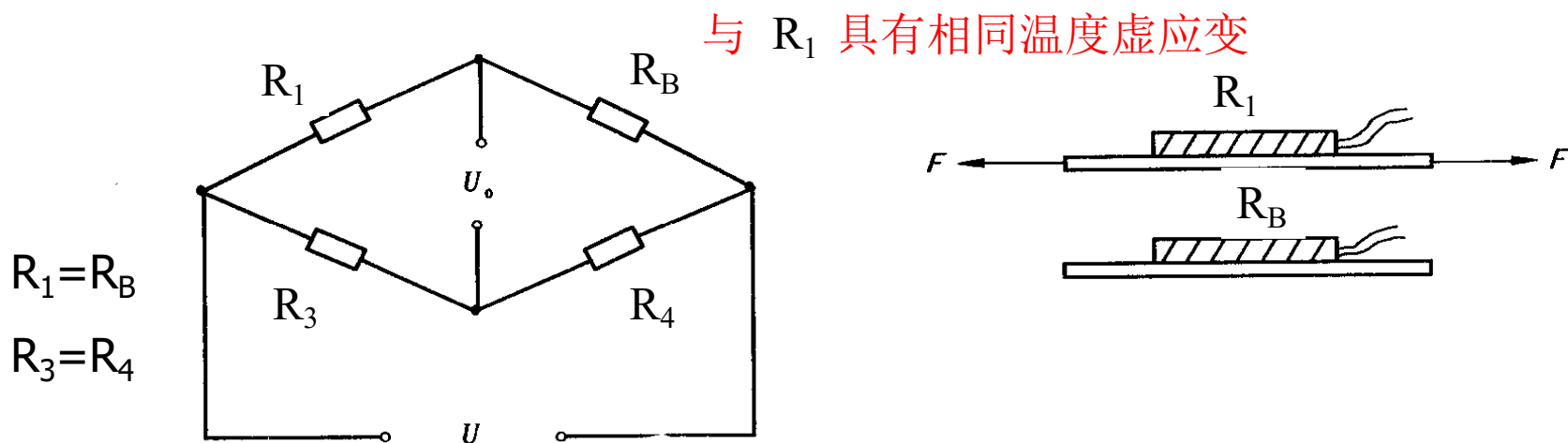
电阻应变片的温度补偿方法

■ 线路补偿法

初始状态 $U_0 = A (R_1 R_4 - R_B R_3) = 0$? ? ?

温度变化后 $U_0 = A [(R_1 + \Delta R_{1t}) R_4 - (R_B + \Delta R_{Bt}) R_3] = 0$

承受应变后 $U_0 = A [(R_1 + \Delta R_{1t} + \Delta R_1) R_4 - (R_B + \Delta R_{Bt}) R_3] = A \Delta R_1 R_4 = A R_1 R_4 K \epsilon$



R_1 —工作应变片； R_B —补偿应变片

图 3 - 4 电桥补偿法

电阻应变片的测量电路（直流电桥、交流电桥）

■ 直流电桥

- 直流电桥平衡条件 $\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}$
- 电压灵敏度

$$U_o = E \left(\frac{R_1 + \Delta R_1}{R_1 + \Delta R_1 + R_2} - \frac{R_3}{R_3 + R_4} \right) = E \frac{\frac{R_4}{R_3} \cdot \frac{\Delta R_1}{R_1}}{\left(1 + \frac{\Delta R_1}{R_1} + \frac{R_2}{R_1}\right) \left(1 + \frac{R_4}{R_3}\right)}$$

令 $\frac{R_2}{R_1} = \frac{R_4}{R_3} = n$ 又 $\frac{\Delta R_1}{R_1}$ 很小，故

$$U_o = E \cdot \frac{n}{(1+n)^2} \cdot \frac{\Delta R_1}{R_1}$$

电桥电路灵敏度为： $K_U = \frac{U_o}{\frac{\Delta R_1}{R_1}} = E \frac{n}{(1+n)^2}$

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

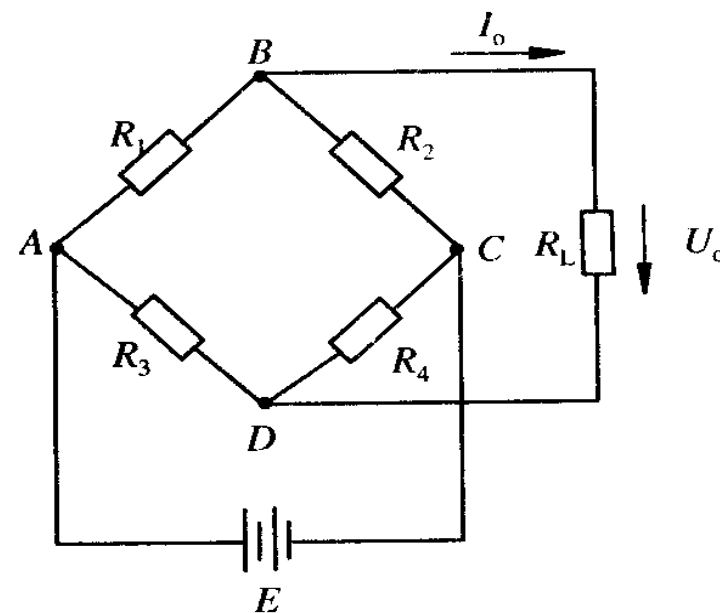


图 3 - 9 直流电桥
(单臂电桥)

■ 关于电压灵敏度的几点说明:

- 电桥电压灵敏度正比于电桥供电电压, 供电电压越高, 电桥电压灵敏度越高, 但供电电压的提高受到应变片允许功耗的限制, 所以要作适当选择;
- 电桥电压灵敏度是桥臂电阻比值n的函数, 恰当地选择桥臂比n的值, 保证电桥具有较高的电压灵敏度

要使灵敏度最大

$$\frac{\partial K_U}{\partial n} = 0 \implies n = 1 \quad ???$$

$$\text{此时 } U_o = \frac{E}{4} \cdot \frac{\Delta R_1}{R_1}$$

$$K_U = \frac{E}{4}$$

■ 非线性误差及其补偿方法

$$U'_0 = E \frac{n \frac{\Delta R_1}{R_1}}{(1 + n + \frac{\Delta R_1}{R_1})(1 + n)}$$

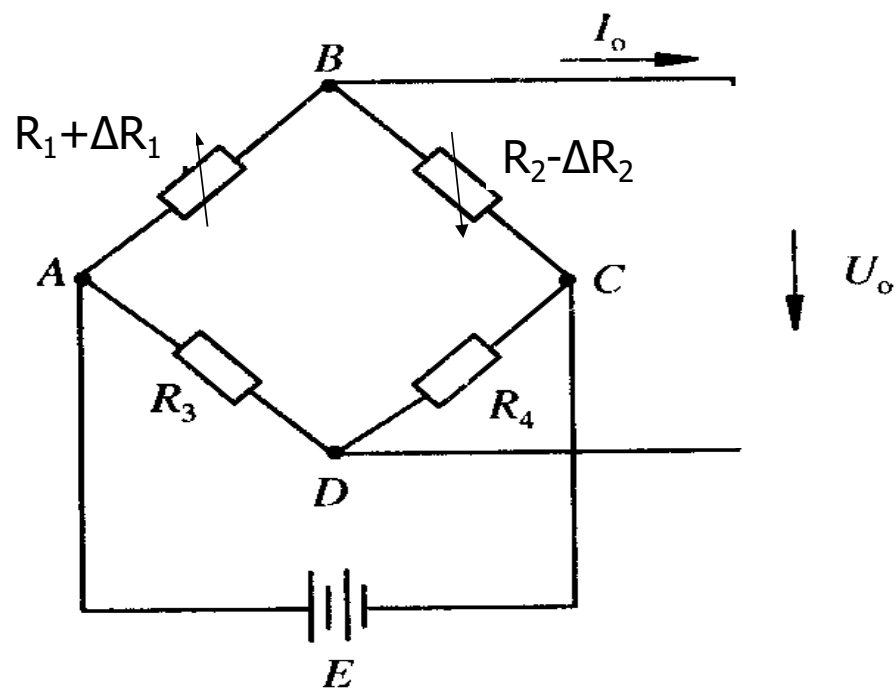
$$\gamma_L = \frac{U_0 - U'_0}{U_0} = \frac{\frac{\Delta R_1}{R_1}}{2 + \frac{\Delta R_1}{R_1}}, \quad n = 1$$

- 当电阻的相对变化较大时，非线性化误差将很严重。

如，当 $\frac{\Delta R_1}{R_1} = 10\%$ ， $\gamma_L = 4.8\%$

- 由于U'与 $\Delta R/R$ 是非线性关系，故测量中不可避免会存在非线性误差，为消除非线性误差，常采用以下两种电路：
 - 半桥
 - 全桥

半桥电路



半桥差动电路

在试件上安装两个工作应变片，一个受拉应变，一个受压应变，接入电桥相邻桥臂，称为半桥差动电路，该电桥输出电压为

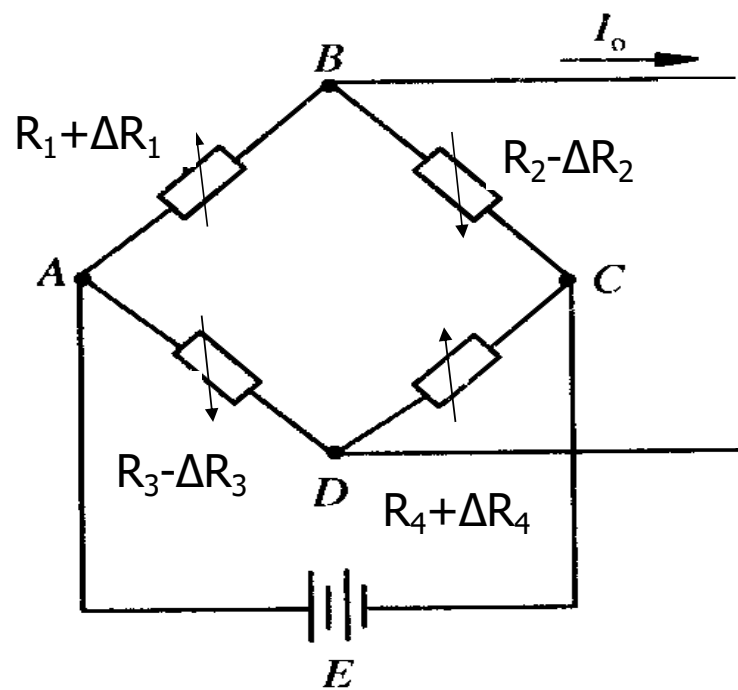
$$U_o = E \left(\frac{\Delta R_1 + R_1}{\Delta R_1 + R_1 + R_2 - \Delta R_2} - \frac{R_3}{R_3 + R_4} \right)$$

若 $\Delta R_1 = \Delta R_2$, $R_1 = R_2$, $R_3 = R_4$, 则得

$$U_o = \frac{E}{2} \cdot \frac{\Delta R_1}{R_1} \quad K_U = \frac{E}{2}$$

U_o 与 $(\Delta R_1/R_1)$ 呈线性关系，差动电桥无非线性误差，而且电桥电压灵敏度 $K_U = E/2$ ，比单臂工作时提高一倍，同时还具有温度补偿作用。

全桥电路



全桥差动电路

在试件上安装四个工作应变片，两个受拉应变，两个受压应变，将两个应变符号相同的接入相对桥臂上，构成全桥差动电路，

若 $\Delta R_1 = \Delta R_2 = \Delta R_3 = \Delta R_4$ ，且 $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$ ，则

$$U_o = E \cdot \frac{\Delta R_1}{R_1}$$

$$K_U = E$$

此时全桥差动电路不仅没有非线性误差，而且电压灵敏度是单片的 4 倍，同时仍具有温度补偿作用。

交流电桥

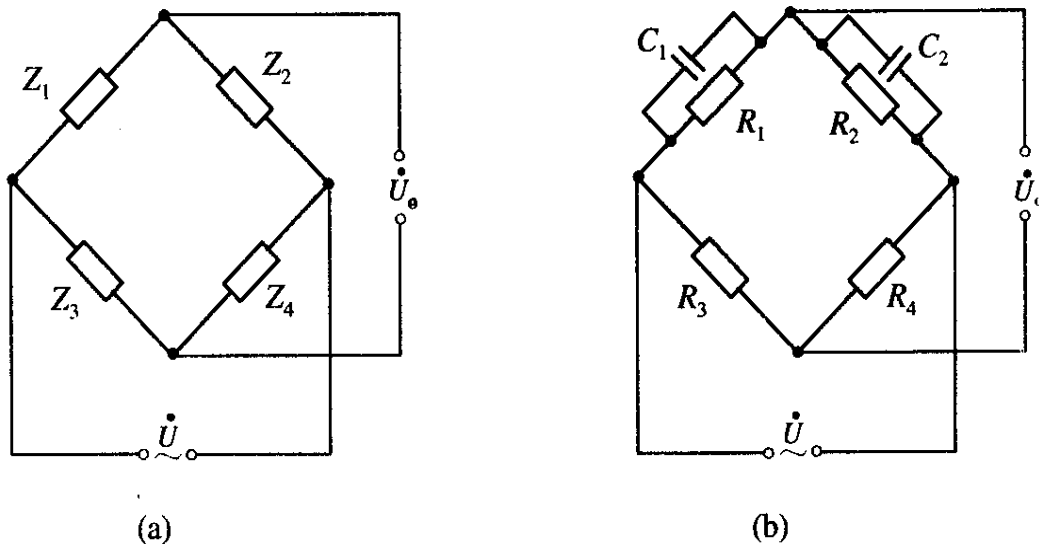


图 3 - 11 交流电桥

供桥电压：交流
优点：消除零漂

$$Z_1 = \frac{R_1}{1 + j\omega R_1 C_1} \quad Z_2 = \frac{R_2}{1 + j\omega R_2 C_2}$$

$$Z_3 = R_3 \quad Z_4 = R_4$$

平衡条件： $Z_1 Z_4 = Z_2 Z_3$

$$\text{即 } \frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4} \text{ 和 } \frac{R_1}{R_2} = \frac{C_2}{C_1} \quad ???$$

当应力变化引起

$Z_1 = Z_0 + \Delta Z$, $Z_2 = Z_0 - \Delta Z$ 变化时电桥输出为

$$\dot{U}_o = \dot{U} \cdot \left(\frac{Z_0 + \Delta Z}{2Z_0} - \frac{1}{2} \right) = \frac{1}{2} \dot{U} \cdot \frac{\Delta Z}{Z_0}$$

应变式传感器的应用 (1)

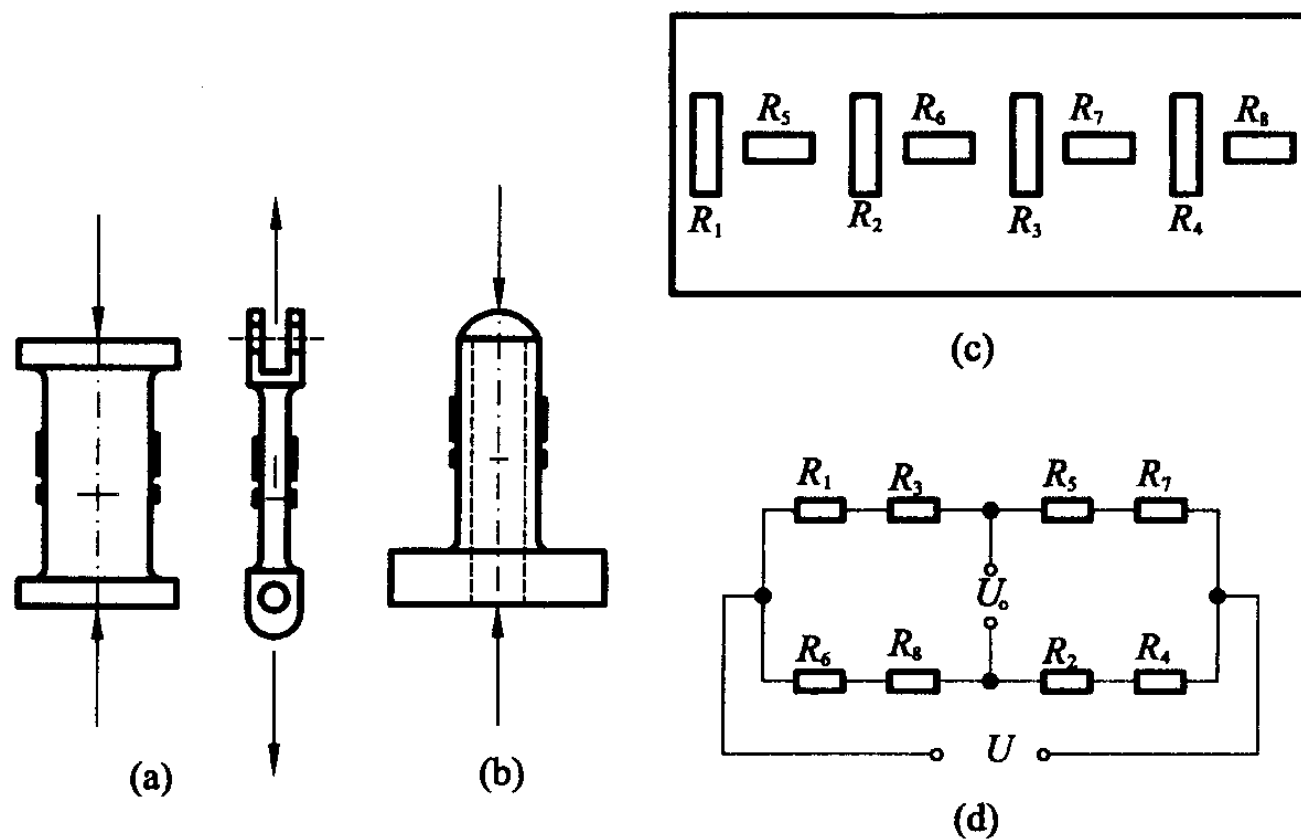


图 3 - 13 圆柱(筒)式力传感器

(a) 柱形; (b) 筒形; (c) 圆柱面展开图; (d) 桥路连线图

应变式传感器的应用 (2)

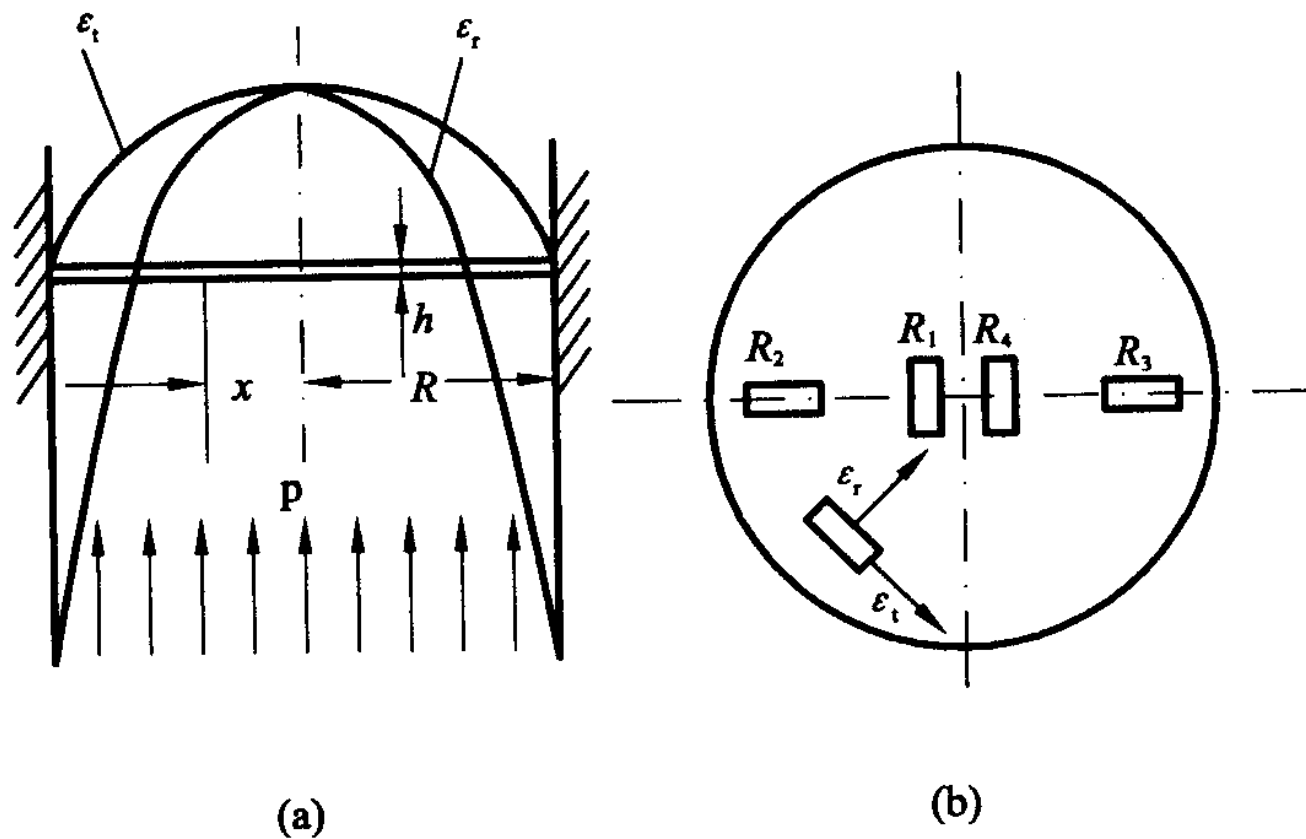


图 3 - 15 膜片式压力传感器
(a) 应变变化图；(b) 应变片粘贴