

# 传感器与检测技术

## 第3章 电阻式传感器

## 第3章 电阻式传感器

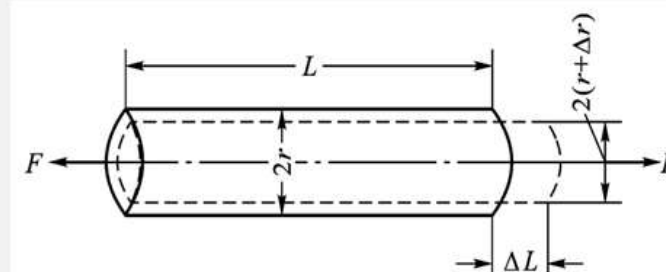
### 2. 工作原理

😊 金属电阻应变片的基本原理基于**电阻应变效应**：  
即导体在外力作用下产生机械形变时阻值发生变化。

◆ 一根长 $L$ ，截面积为 $S$ ，电阻率为 $\rho$ 的金属丝电阻

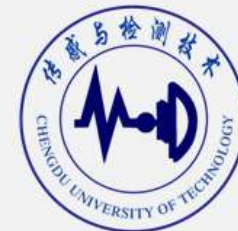
$$R = \frac{\rho L}{S}$$

❖ 当电阻丝受到轴向拉力 $F$ 作用时，金属丝几何尺寸变化引起电阻值的相对变化，与电阻率变化成正比



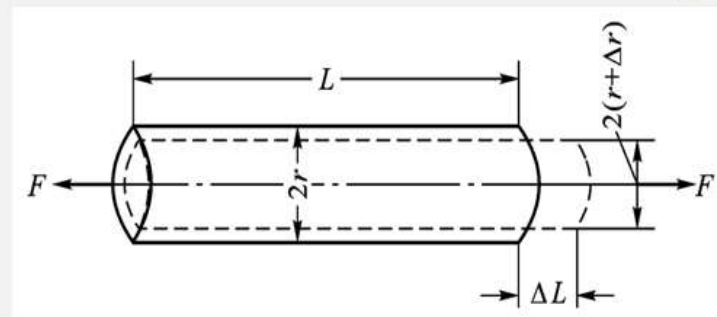
$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta l}{l} - \frac{\Delta S}{S} + \frac{\Delta \rho}{\rho}$$

# 第3章 电阻式传感器



## 2. 工作原理

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



- 轴向应变为:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$$

- 径向应变为:  
(截面积相对变化量)

$$\frac{\Delta S}{S} = \frac{2\Delta r}{r}$$

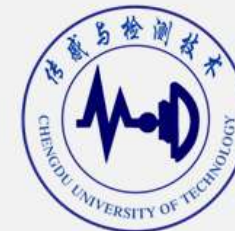


$$\frac{\Delta R}{R} = \varepsilon(1 + 2\mu) + \frac{\Delta \rho}{\rho}$$

- 横向变形系数:  
(泊松系数)

$$\mu_s = -\frac{\Delta r / r(\text{径向})}{\Delta l / l(\text{轴向})}$$

在弹性范围内金属丝受拉时，**轴向应变**和**径向应变**的关系，负号表示应变受力F方向相反



## 第3章 电阻式传感器

### 2. 工作原理

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

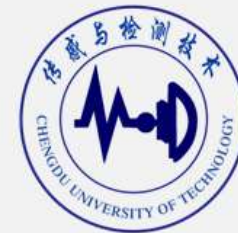
- 定义金属电阻丝的灵敏系数为 $k_0$ ；
- 即：单位应变能引起的金属丝电阻相对变化

$$k_0 = \frac{\Delta R / R}{\varepsilon} = 1 + 2\mu + \frac{\Delta \rho / \rho}{\varepsilon}$$

金属丝受力后主要引起两个方面的变化：

材料几何尺寸变化  $(1+2\mu)$  ；

材料电阻率的变化  $(\Delta \rho / \rho) / \varepsilon$



## 第3章 电阻式传感器

### 2. 工作原理

已知泊松系数  $\mu = 0.25 \sim 0.5$  (钢  $\mu = 0.285$ )

因为

$$k_0 = 1 + 2\mu + \frac{\Delta\rho / \rho}{\varepsilon}$$

$$(1 + 2\mu) \gg \frac{\Delta\rho / \rho}{\varepsilon}$$

所以近似:  $k_0 \approx 1 + 2\mu$ ,  $k_0 \approx 1.5 \sim 2$

☉ 金属丝灵敏系数 $k_0$ 主要由**材料的几何尺寸**变化引起的

应力 $\sigma = E\varepsilon$  (E 弹性模量)  $\sigma \propto \varepsilon$ ,  $\varepsilon \propto \Delta R / R$

$\sigma$  应力  $\rightarrow \varepsilon$  应变  $\rightarrow \Delta R / R$  电阻变化 (反映应力大小)

- 通过弹性元件可将位移、压力、振动等物理量通过**应力变化**, 并转换为**电阻的变化**进行测量, 这是应变式传感器测量应变的基本原理。

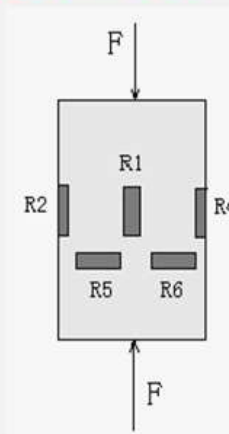
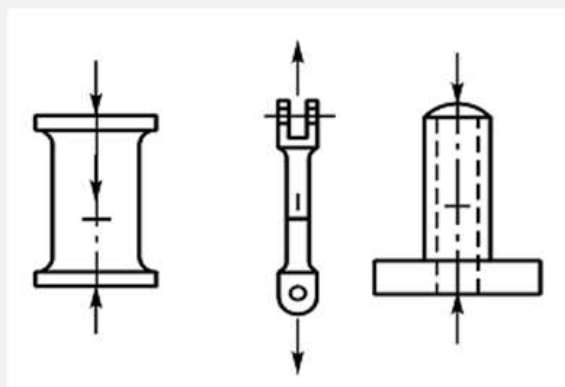


## 第3章 电阻式传感器

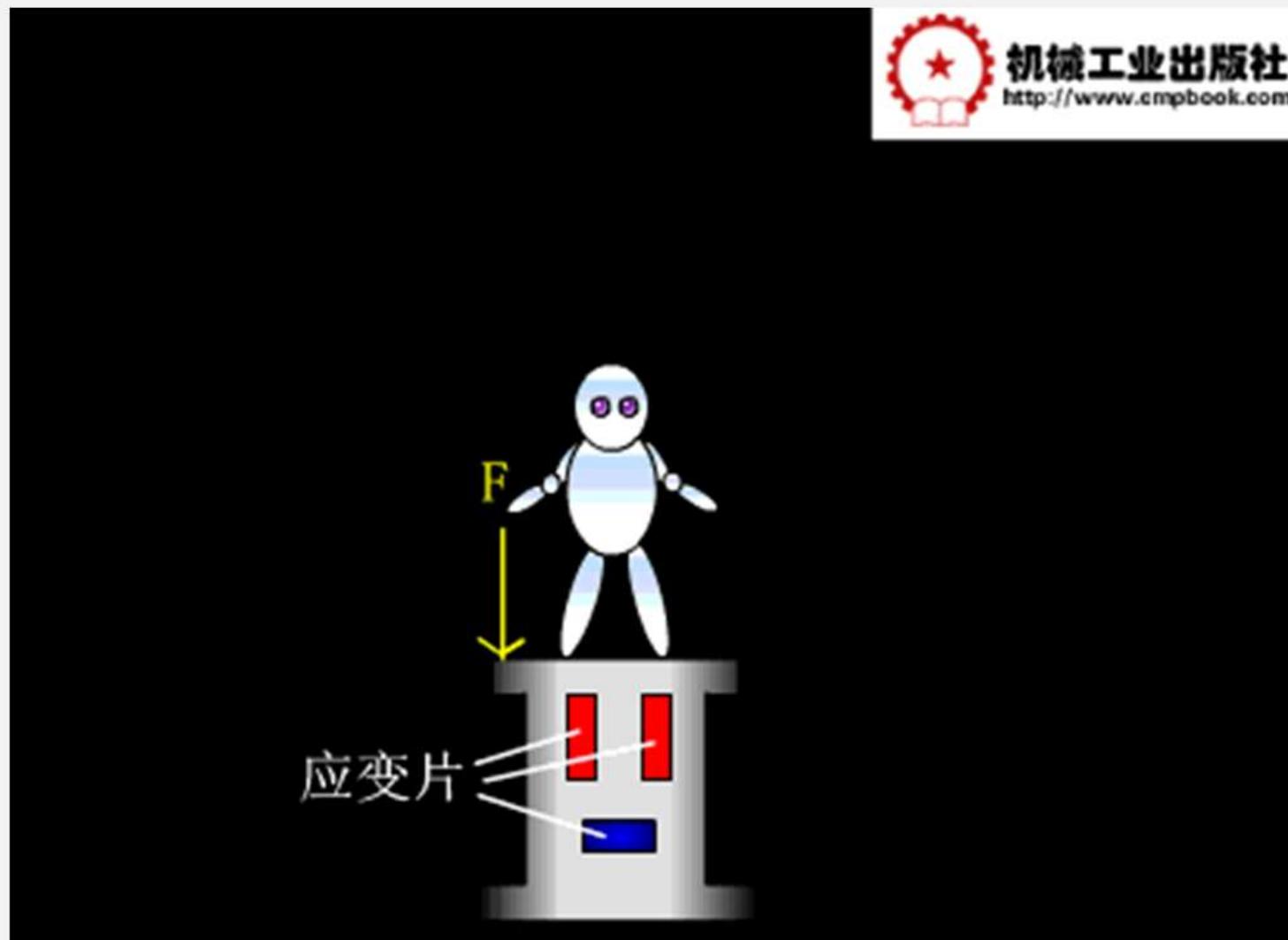
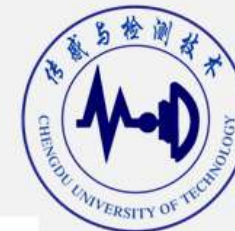
### 3.1 金属丝电阻应变片

#### 3. 弹性敏感元件

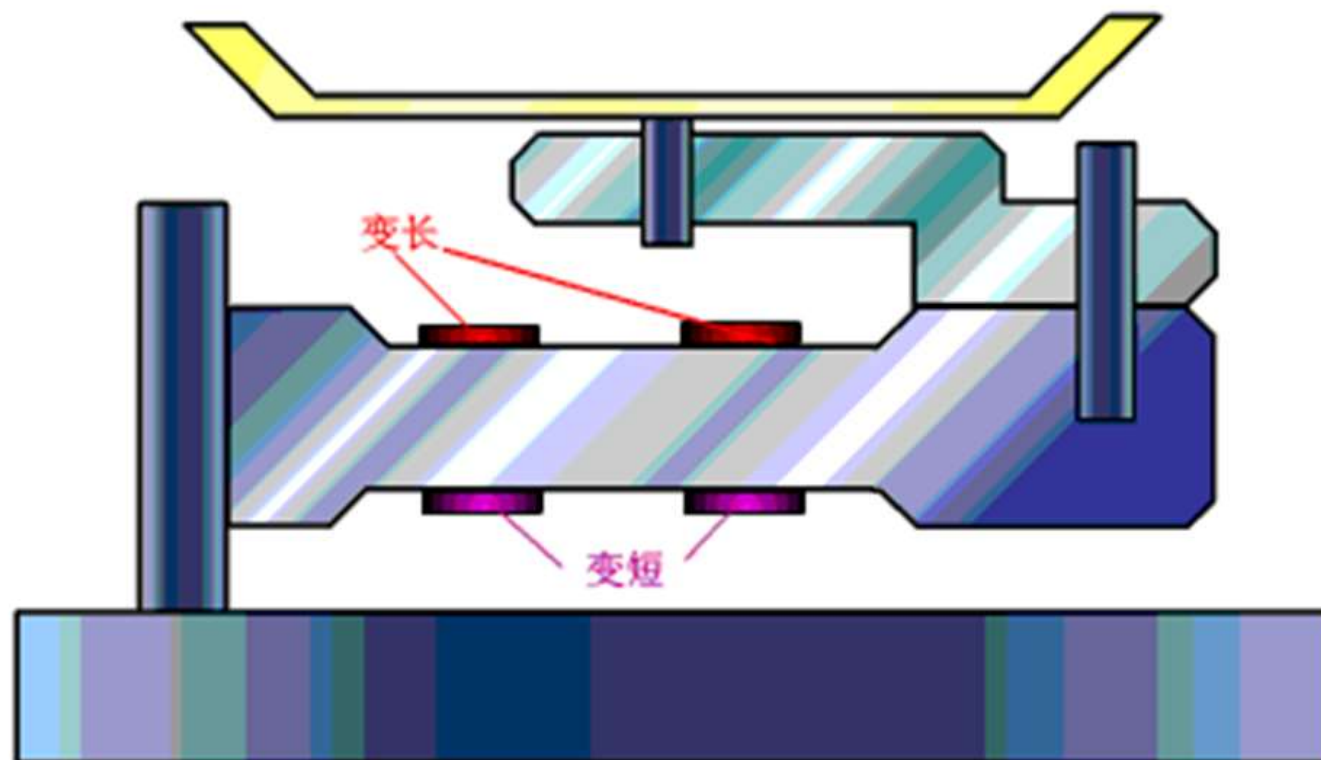
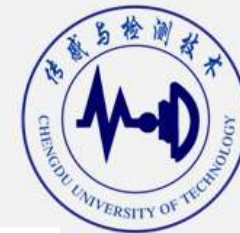
- 弹性元件在应变片测量技术中占有极其重要的地位，首先把**力、力矩或压力**变换成相应的**应变或位移**，然后传递给粘贴在弹性元件上的应变片，通过应变片将力、力矩或压力转换成相应的电阻值。
- 物体在外力作用下而改变原来尺寸或形状的现象称为**变形**，而当外力去掉后物体又能完全恢复其原来的尺寸和形状，这种变形称为**弹性变形**。具有弹性变形特性的物体称为**弹性元件**。



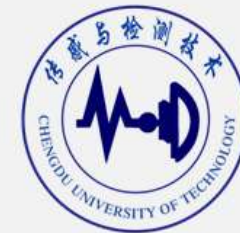
## 第3章 电阻式传感器



## 第3章 电阻式传感器







## 第3章 电阻式传感器

### 3.1 金属丝电阻应变片

### 3. 弹性敏感元件

#### a) 刚度

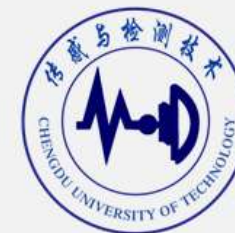
- 刚度是弹性元件受外力作用下变形大小的量度，其定义是弹性元件单位变形下所需要的力，用  $C$  表示，其数学表达式为

$$C = \lim \frac{\Delta F}{\Delta x} = \frac{dF}{dx}$$

式中:

$F$  —— 作用在弹性元件上的外力，单位为牛顿 (N) ；

$x$  —— 弹性元件所产生的变形，单位为毫米 (mm) 。



## 第3章 电阻式传感器

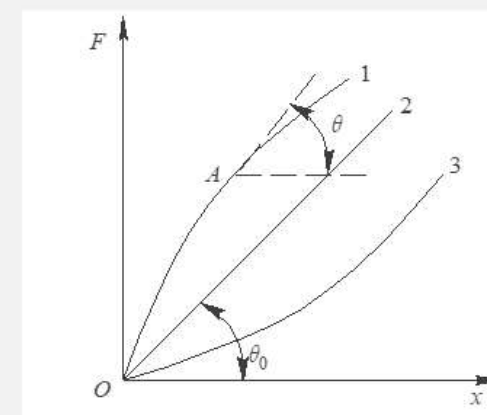
### 3.1 金属丝电阻应变片

### 3. 弹性敏感元件

#### b) 灵敏度

- 通常用**刚度的倒数**来表示弹性元件的特性，称为弹性元件的灵敏度，一般用 $S$ 表示，其表达式为

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



弹性特性曲线

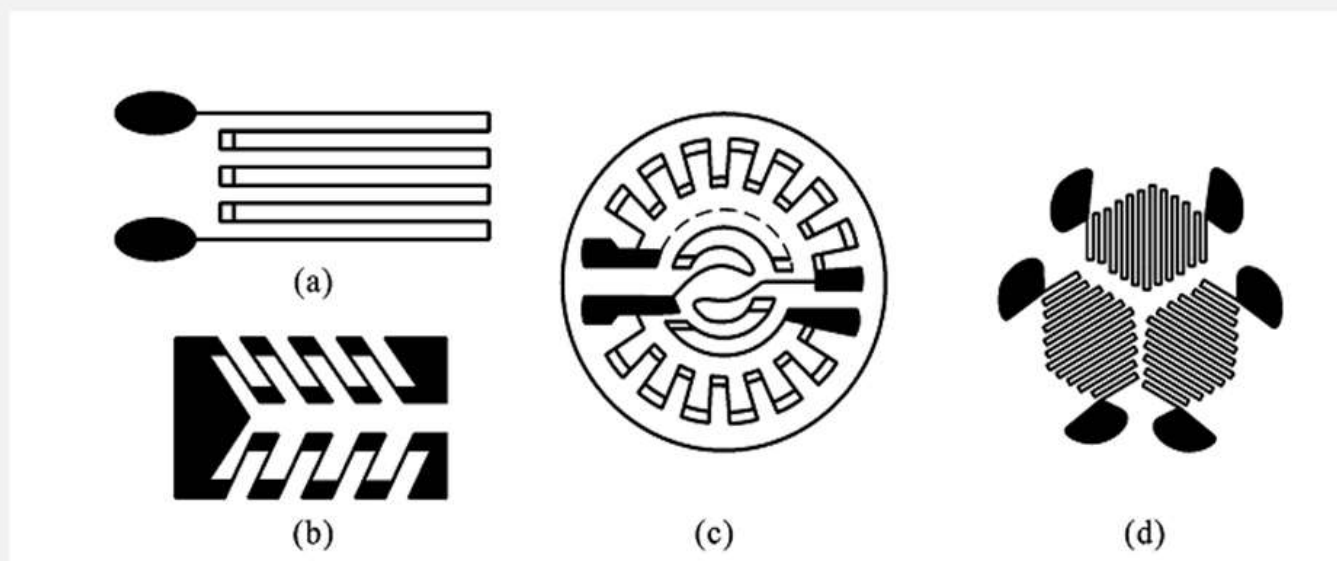
- 从上式可以看出，**灵敏度是单位力作用下弹性元件产生变形的大小**，灵敏度大，表明弹性元件软，变形大。如果弹性特性是线性的，则灵敏度为一常数，若弹性特性是非线性的，则灵敏度为一变量，即表示此弹性元件在弹性变形范围内，各处由单位力产生的变形大小是不同的。

## 第3章 电阻式传感器

### 3.1 金属丝电阻应变片

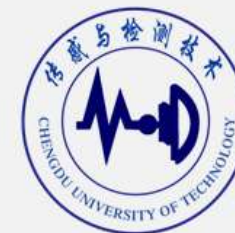
#### 4. 应变片种类

#### 各种形式的金属式电阻应变片



金属式电阻应变片常见的有丝式、箔式、薄膜型

## 第3章 电阻式传感器



### 4. 应变片种类

- 按材料分为

金属式： { 体型 — 丝式、箔式  
                  薄膜型

半导体式： 体型、薄膜型、扩散型、外延型、PN结型

- 按结构分：单片、双片、特殊形状

- 按使用环境：高温、低温、高压、磁场、水下



## 第3章 电阻式传感器

### 4. 应变片种类

**金属丝式** —— 敏感栅用0.025mm金属丝（康铜、贵金属）；

**金属箔式** —— 通过照相**制版**，**光刻腐蚀**工艺作成金属薄栅，

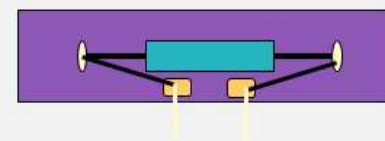
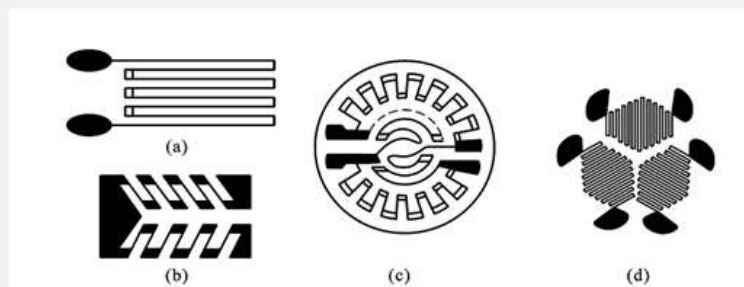
厚度在0.003 ~ 0.01mm，敏感栅截面为矩形，

可通过大电流，工艺适于批量生产；

**金属薄膜型**——采用真空技术，在基片上**蒸镀金属薄膜**，

厚度为纳米级。

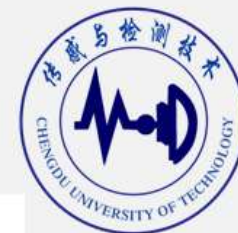
- **半导体式**：体型、薄膜型、扩散型、外延型、PN结型



体型半导体电阻应变片

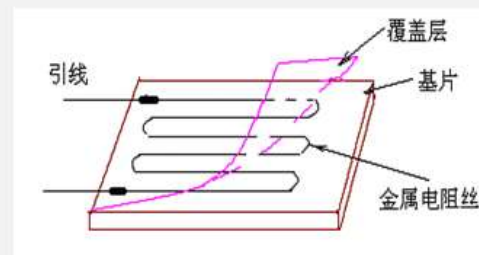


## 第3章 电阻式传感器



### 3.1 金属丝电阻应变片

#### 5. 主要特性



#### (1) 应变片灵敏系数 $k$

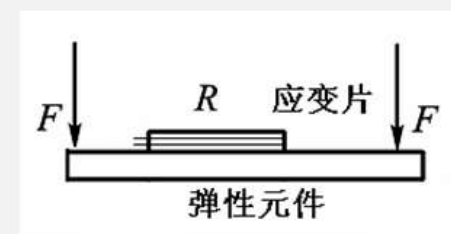
- $k_0$  表征金属丝的灵敏系数，但金属丝做成应变片后，电阻应变特征与单根金属丝不同。
- 实际的灵敏系数包括基片、粘合剂、敏感栅的横向效应等因素。做成应变片以后灵敏系数  $k_0$  不同，必须重新标定。
- 通常采用实验的方法，按统一的标准，如受单向力拉力或压力，试件材料为钢，泊松系数  $\mu=0.285$ ；
- 取成品的 5% 进行测定，取平均值做产品的灵敏系数，称标称灵敏系数  $k$ ，即产品出厂时标注的灵敏系数。
- 实验表明，应变片灵敏系数小于电阻丝灵敏系数，即  $k < k_0$  如果实际应用与标定条件不同时， $k$  误差较大需要修正。

## 第3章 电阻式传感器

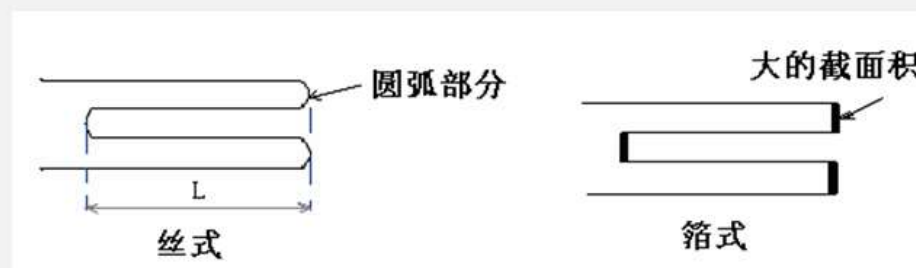
### (2) 横向效应

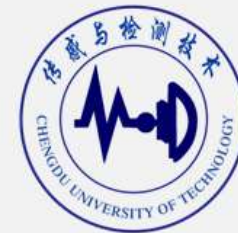
- 直线电阻丝绕成敏感栅后，虽然长度相同，但圆弧部分应变状态不同，圆弧段电阻的变化小于沿轴向摆放的电阻丝电阻变化。
- 实际应变变化  $\varepsilon = \Delta L/L$  比拉直了看要小，可见直线的电阻丝作成敏感栅后，虽然长度相同，但应变不同。

😊 圆弧部分使灵敏系数  $k_0$  下降，这种现象称为**横向效应**。敏感栅纵向栅越窄、基长越长，横向栅越宽、越短时，横向效应越小。



- 为减小横向效应产生的测量误差，一般多采用**箔式应变片**，圆弧部分尺寸较大。





## 第3章 电阻式传感器

### (3) 应变片温度误差及补偿

#### 1) 应变片温度误差

- 应变片安装在自由膨胀的试件上，**没有外力作用下**，如果环境温度变化，应变片的电阻也会变化，这种变化叠加在测量结果中称**应变片温度误差**。

- 已知金属丝阻值与温度关系为

$$R_t = R_0 (1 + \alpha_t \Delta T) = R_0 + R_0 \alpha_t \Delta T$$

式中： $R_0$ 是温度为 $t_0$ 时的金属丝电阻值； $\alpha_t$ 是应变片电阻温度系数。

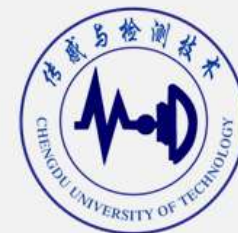
- 应变片温度误差来源有两个主要因素：

- ☞ (1) 环境温度变化 $\Delta t$ 时，应变片的电阻随温度变化，表示为：

$$\Delta R_{t1} = R_t - R_0 = R_0 \alpha_t \Delta T$$



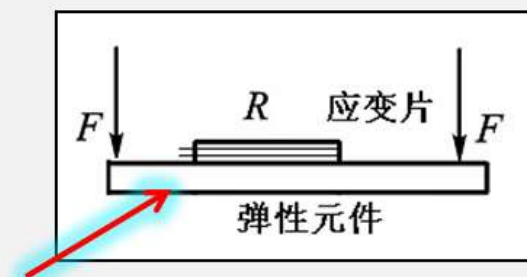
## 第3章 电阻式传感器



### (3) 应变片温度误差及补偿

👉 (2) 因试件随温度变化使应变片电阻产生附加形变造成的电阻变化

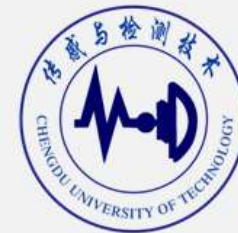
$$\Delta R_{t2} = R_0 k (\beta_g - \beta_s) \Delta T$$



👉 温度变化 $\Delta t$ 时引起总的电阻变化为 $\Delta R_t$

$$\Delta R_t = \Delta R_{t1} + \Delta R_{t2} = R_0 \alpha_t \Delta T + R_0 k (\beta_g - \beta_s) \Delta T$$

式中： $k$ 为应变片灵敏系数； $\alpha_t$ 电阻温度系数； $\beta_g$ 试件膨胀系数， $\beta_s$ 电阻丝膨胀系数。



## 第3章 电阻式传感器

### (3) 应变片温度误差及补偿

#### 2) 应变片温度补偿

➤ 温度补偿方法有：线路补偿、自补偿、辅助测量补偿、热敏电阻补偿、计算机补偿等。

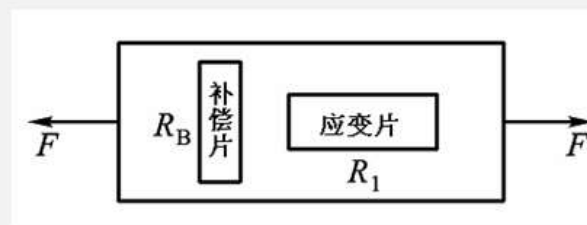
- **自补偿法**，具有温度补偿作用的应变片  $R_B$  称为**补偿片**，用特制的温度补偿片进行补偿。**当温度变化时产生的附加应变相互抵消**，补偿片制作的原理是使  $\varepsilon_t = 0$ 。

$$\varepsilon_t = \frac{\alpha_t \Delta t}{k} + (\beta_g - \beta_s) \Delta t$$



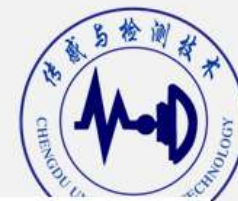
$$\alpha_t = -k(\beta_g - \beta_s)$$

被测材料  $\beta_g$  给定，制作中改变栅丝的合金成分，控制温度系数  $\alpha_t$ ，使  $\beta_s$ 、 $\beta_g$  抵消。





## 第3章 电阻式传感器



### (3) 应变片温度误差及补偿

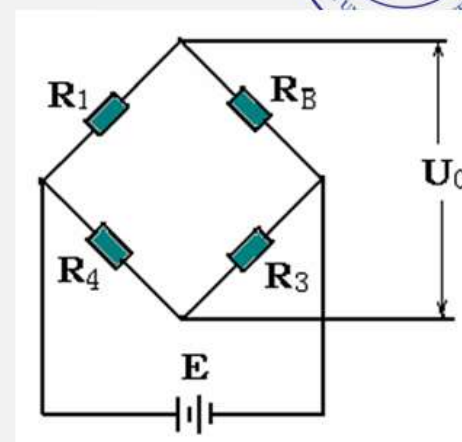
- 线路补偿 (电桥补偿)**：被测试件位置上安装一个补偿片处于相同的温度场；等臂电桥输出  $U_0$  与桥臂参数的关系为

$$U_0 = A(R_1 R_3 - R_B R_4)$$

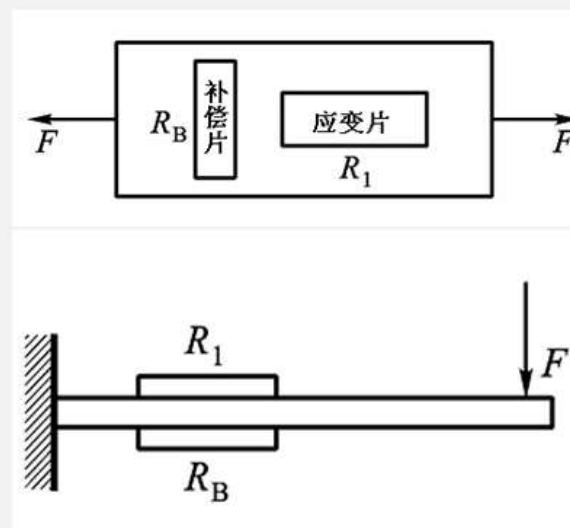
- 如果  $R_1 R_3 = R_B R_4$ ，电桥平衡时输出为零；
- 若  $R_1$ 、 $R_B$  **温度系数** 相同，当**无应变**而温度变化时  $\Delta R_1 = \Delta R_B$ ，电桥为平衡状态；
- 当**有应变**时， $R_1$  有增量  $\Delta R_1$ ， $\Delta R_1 = R_1 k_0 \varepsilon$   
补偿片无变化， $\Delta R_B = 0$ ；

**电桥输出为  $U_0 \propto R_1 R_3 k_0 \varepsilon$**

可见此时电桥的输出电压与温度无关



$R_1$ —应变片， $R_B$ —补偿片



## 填空题 1分

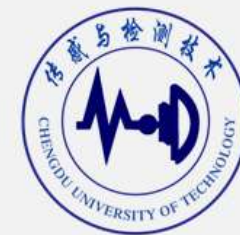
金属可以用于制作电阻式传感器，是基于 [填空1] 效应。

## 多选题 2分

金属丝电阻应变片的阻值和哪些参数有关？

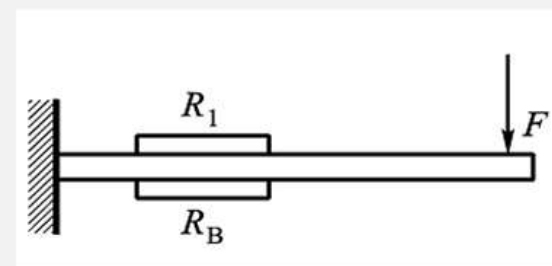
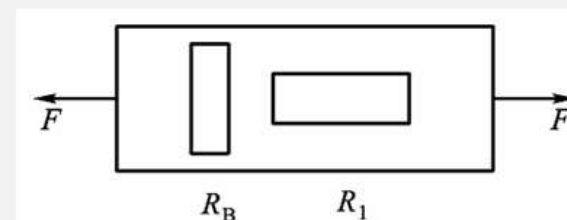
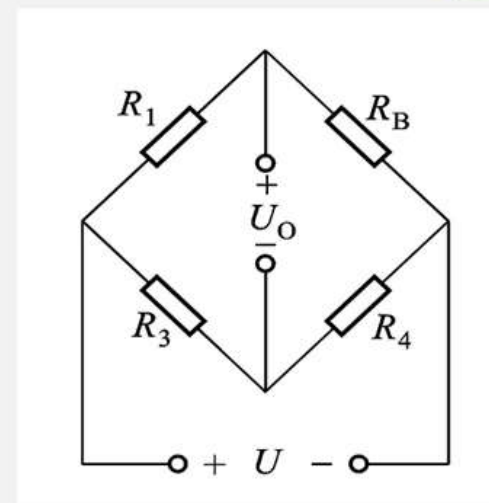
- ☒ A 金属丝的长度
- ☒ B 金属丝的粗细
- ☒ C 金属丝材料的电阻率
- ☒ D 金属丝应变片使用的环境温度

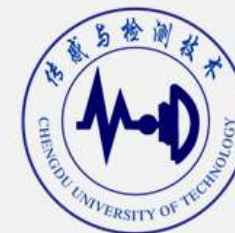
## 第3章 电阻式传感器



### 3.2 电阻应变片测量电路

- 一般应变片阻值变化很小  
若  $k_0 = 2$ , 应变片电阻  $R = 120\Omega$ ,  
 $\varepsilon_s = 1000\mu\varepsilon$  时  
电阻变化仅  $0.24\Omega$ 。
- 要检测如此微小电阻的变化必须经过放大电路放大输出。
- 放大器前通常采用  
**直流电桥或交流电桥。**





## 第3章 电阻式传感器

### (1) 直流电桥

#### ① 直流电桥的平衡条件

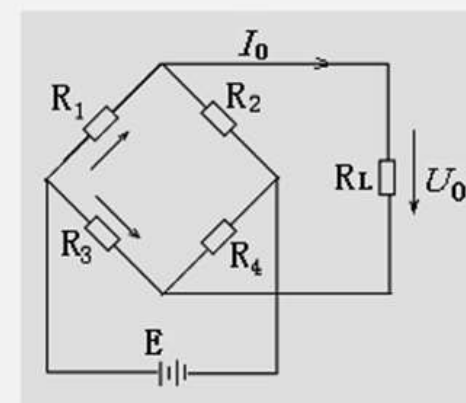
- 当负载  $R_L \rightarrow \infty$  (放大器的输入阻抗比桥路阻抗大的多, 可视为开路) 电桥输出电压为:

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

电桥平衡时:  $I_0 = 0$  ,  $U_0 = 0$

$$R_1 R_4 = R_2 R_3$$

$$R_1 / R_2 = R_3 / R_4$$

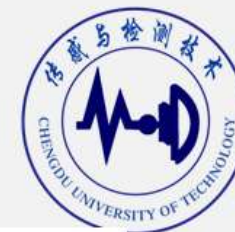


$E$  直流供电  
 $R_1$ - $R_4$ 桥臂电阻

➤ 要满足电桥平衡条件, 必须有**对比积相等** or **邻臂比相等**



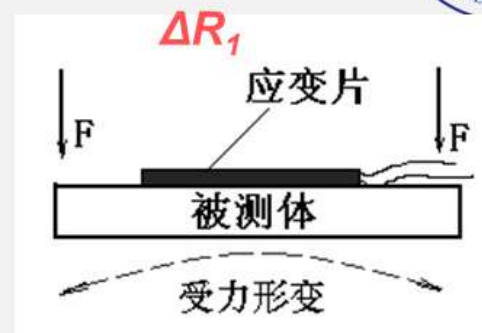
## 第3章 电阻式传感器



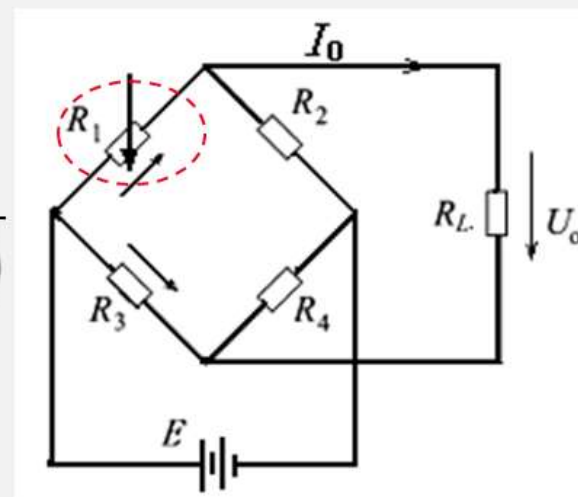
### (1) 直流电桥

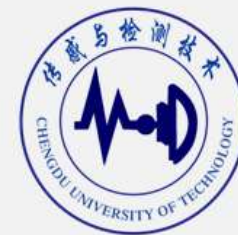
#### ② 电桥电压灵敏度

- 设 $R_1$ 为应变片，应变时 $R_1$ 变化量为 $\Delta R_1$ ，
- 应变片阻值变化电桥失衡，不平衡输出电压为



$$U_0 = E \left( \frac{R_1 + \Delta R_1}{R_1 + \Delta R_1 + R_2} - \frac{R_3}{R_3 + R_4} \right)$$
$$= E \frac{(R_4 / R_3)(\Delta R_1 / R_1)}{(1 + \Delta R_1 / R_1 + R_2 / R_1)(1 + R_4 / R_3)}$$





## 第3章 电阻式传感器

### ② 电桥电压灵敏度

对于 
$$U_0 = E \frac{(R_4 / R_3)(\Delta R_1 / R_1)}{(1 + \Delta R_1 / R_1 + R_2 / R_1)(1 + R_4 / R_3)}$$

• 考虑平衡条件  $R_2 / R_1 = R_4 / R_3$

• 设桥臂比  $n = R_2 / R_1$

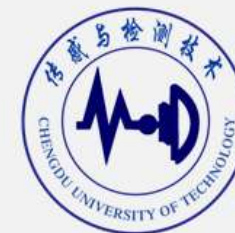
$$U_0 = E \frac{n(\Delta R_1 / R_1)}{(1 + \Delta R_1 / R_1 + n)(1 + n)}$$

• 由于  $\Delta R_1 \ll R_1$ ，忽略分母中  $\Delta R_1 / R_1$

• 电桥输出电压可近似为

$$U_0 \approx E \cdot \frac{n}{(1+n)^2} \cdot \frac{\Delta R_1}{R_1}$$

👉 电桥输出的**电压灵敏度**为 
$$K_u = \frac{n}{(1+n)^2} \cdot E$$



## 第3章 电阻式传感器

### ☺ 电桥电压灵敏度讨论:

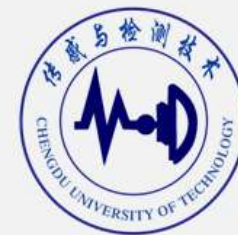
$$U_0 = K_u \cdot \frac{\Delta R}{R_1}$$

$$K_u = \frac{n}{(1+n)^2} \cdot E$$

1. 电桥的电压灵敏度  $K_u$  越大, 电桥输出电压越大,  
 $K_u$  与电桥电源  $E$  成正比, 但电源受应变片允许功耗限制;
2.  $K_u$  是桥臂比  $n$  的函数, 恰当选择桥臂比可提高电压灵敏度;  
 $\frac{dK_u}{dn} = \frac{1-n^2}{(1+n)^4} = 0$  显然  $n=1$ 、 $R_1=R_2$ 、 $R_3=R_4$  时  $K_u$  有最大值。
3. 单臂工作片的电桥输出电压及电压灵敏度分别为

$$U_0 = \frac{E}{4} \cdot \frac{\Delta R_1}{R}$$

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



## 第3章 电阻式传感器

### ③ 非线性误差补偿

前面计算中设  $\Delta R_1 \ll R_1$ ，忽略了分母中  $\Delta R_1 / R_1$

实际输出值为

$$U_0' = E \frac{(\Delta R_1 / R_1)n}{(1+n+\Delta R_1 / R_1)(1+n)}$$

非线性误差

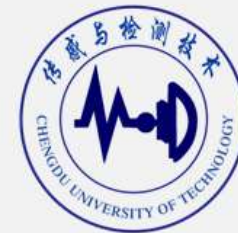
$$\gamma_L = \frac{U_0 - U_0'}{U_0} = \frac{\Delta R_1 / R_1}{1+n+\Delta R_1 / R_1}$$

等臂电桥  $n=1$  时

$$\gamma_L = \frac{1}{1+\frac{\Delta R_1 / R_1}{2}} \cdot \frac{\Delta R_1 / R_1}{2}$$

将分母按幂级数展开，略去高阶量近似得到单桥非线性误差  $\gamma_L \approx \frac{\Delta R_1}{2R_1}$





## 第3章 电阻式传感器

### ③ 非线性误差补偿

由式  $\gamma_L = \Delta R_1 / 2R_1$  可见, 非线性误差与  $\Delta R_1 / R_1$  成正比

- 对金属电阻丝应变片, 因灵敏系数  $k_0$  主要由几何尺寸引起的,  $\Delta R$  非常小, 电桥非线性误差可以忽略。
- 对于半导体应变片, 灵敏度系数  $k_0$  主要由电阻率变化引起的, 应变时电阻率  $\Delta R / R$  变化很大, 非线性误差不能忽略。

例: 金属应变片

$$k_0 = 2 \quad \varepsilon \approx 0.005 \quad \Delta R / R = k\varepsilon = 0.01 \quad \gamma_L = 0.5\%$$

半导体应变片

$$k_0 = 130 \quad \varepsilon = 0.001 \quad \Delta R / R = 0.13 \quad \gamma_L = 6\%$$



## 第3章 电阻式传感器

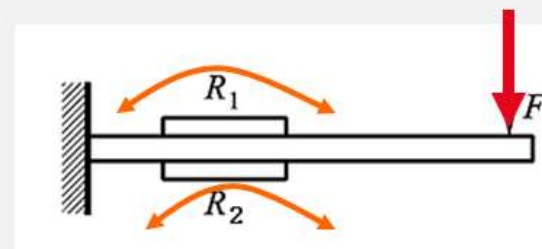
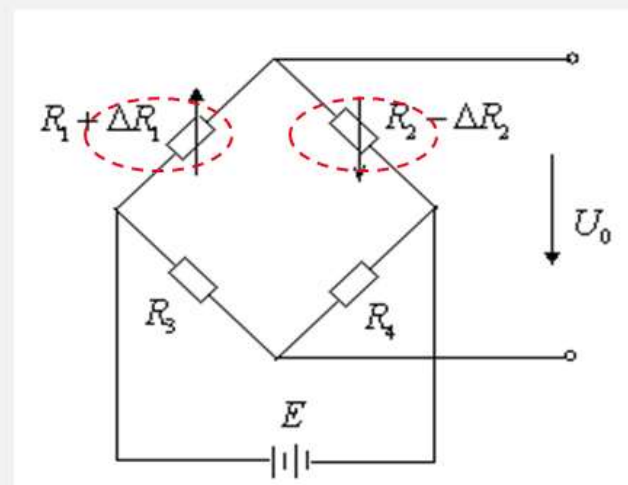
### (1) 直流电桥

#### ③ 非线性误差补偿

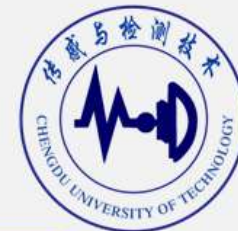
- 实际电路中非线性误差总是存在的，为减小非线性误差，常采用**差动电桥**。
- 在试件上安装两个工作片，分别接在电桥的相邻两个臂，当有作用力 $F$ 时一个受拉、一个受压。

#### ➤ 电桥的输出电压为

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



## 第3章 电阻式传感器



### (1) 直流电桥

👉 按等臂电桥:

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

$$R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$$

$$\Delta R_1 = \Delta R_2 = \Delta R$$

□ 半桥电路电压输出和电压灵敏度分别为

$$U_0 = \frac{E}{2} \cdot \frac{\Delta R}{R}$$

$$K_u = \frac{E}{2}$$

☺ 半桥电路讨论:

1. 输出电压 $U_0$ 与 $\Delta R/R$ 呈线性关系, 无非线性误差;
2. 半桥电路(两工作片)电压灵敏度 $K_u$ 是单臂电桥的两倍;
3. 同时电路具有温度补偿作用。

## 第3章 电阻式传感器

### (1) 直流电桥

- 将电桥四个桥臂按照**对臂同性、邻臂异性**原则连接四个应变片  
并且有： $\Delta R_1 = \Delta R_2 = \Delta R_3 = \Delta R_4$

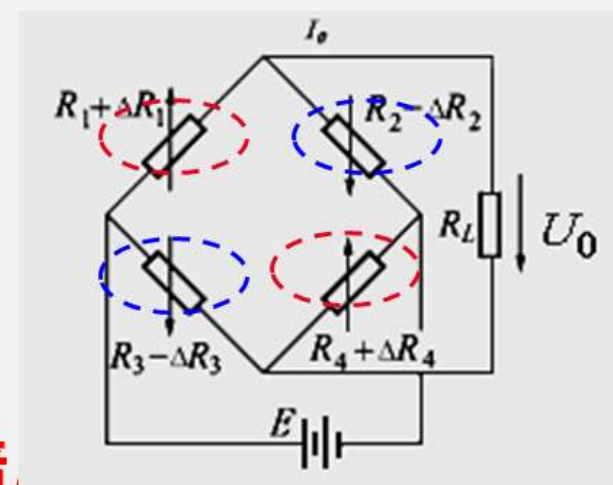
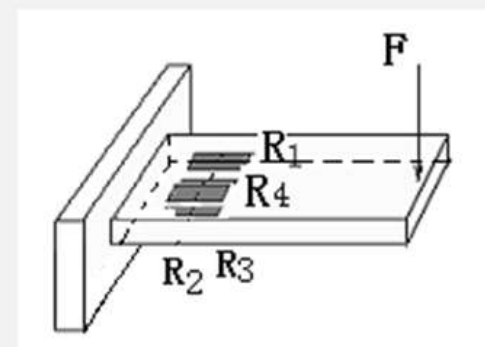
$$U_0 = E \left( \frac{R_1 + \Delta R_1}{R_1 + \Delta R_1 + R_2 - \Delta R_2} - \frac{R_3 - \Delta R_3}{R_3 - \Delta R_3 + R_4 + \Delta R_4} \right)$$

- 全桥电路的电压输出和电压灵敏度分别为

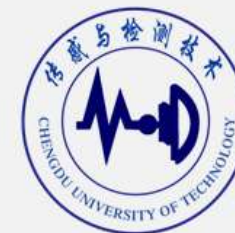
$$U_0 = E \cdot \frac{\Delta R_1}{R_1}$$

$$K_u = E$$

- ☺ 全桥输出电压灵敏度是单桥的4倍，  
没有非线性误差。



## 第3章 电阻式传感器

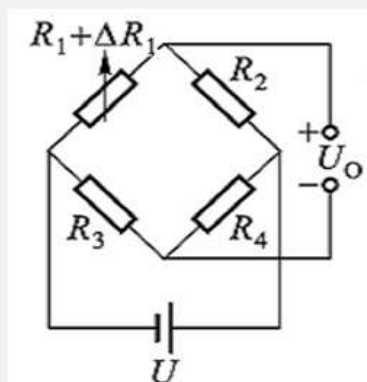


### (1) 直流电桥

□ 直流电桥输出电压  $U_0 = K_u \cdot \frac{\Delta R}{R}$

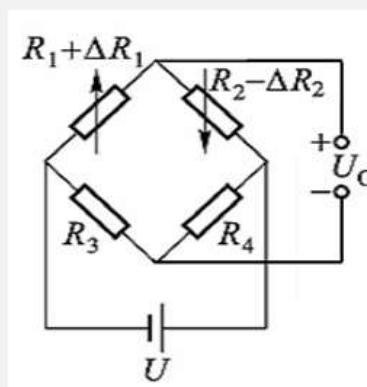


单桥



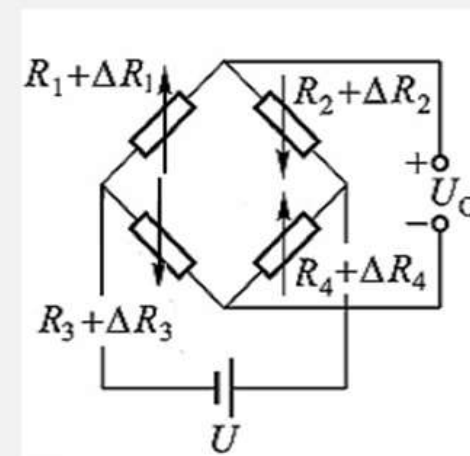
$$K_u = \frac{E}{4}$$

半桥



$$K_u = \frac{E}{2}$$

全桥



$$K_u = E$$



## 主观题 4分

一个应变片的电阻 $R=100\Omega$ ，灵敏系数 $k=2$ ，用于应变为 $800\mu\text{m}/\text{m}$ 的传感元件，请计算：

(1)  $\Delta R=?$  (2分)

(2) 若电源电压为 $5\text{V}$ ，计算此时的输出电压 $U_o=?$  (2分)