

第三章

# 过程装备控制技术应用

## 过程检测技术

# 目 录

## CONTENTS

---

### ■ 3.1

---

测量基本知识

### ■ 3.4

---

温度测量

### ■ 3.7

---

液位测量

### ■ 3.2

---

误差

### ■ 3.5

---

流量测量

### ■ 3.3

---

压力测量

### ■ 3.6

---

转速和转矩测量



### 一. 压力概念及单位

压力定义：垂直而均匀作用在物体表面上的力。

基本公式：

$$P = \frac{F}{S}$$

式中： F——作用力；

S——作用面积；

P——压力。

国际单位制中压力的单位是帕斯卡。

## ■ 3.3 压力测量

工程中压力的单位有很多，如工程大气压、标准大气压、毫米汞柱、毫米水柱等等，因此使用时一定要正确的换算。


$$\begin{aligned} 1 \text{ 工程大气压 (at)} &= 1 \text{ kgf} / \text{cm}^2 \\ &= 98066.5 \text{ N} / \text{m}^2 \approx 98 \text{ kPa} \end{aligned}$$

$$1 \text{ 标准大气压 (atm)} = 1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ 毫米汞柱 (mmHg)} = 133.322 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ 毫米水柱 (mmH}_2\text{O)} = 9.80665 \text{ Pa}$$

### 二. 常用的压力测量仪表分类

1. 液柱式压力计——是将被测压力转化为液柱的高度来进行测量的一种仪表。
  2. 弹性式压力计——是利用测量弹性敏感元件在压力作用下产生的弹性变形的大小来测量压力的一种仪表。
  3. 电测式压力计——是将被测压力转化为电量进行测量的仪器。
- 

## ■ 3.3 压力测量

### 三. 弹簧管式压力计

弹性式压力计使用弹簧管弹性元件作为感受件。

原理：以弹性元件受压后产生的反作用力与被测压力平衡。弹性元件的变形是被测压力的函数，将压力的测量转换为对弹性元件变形的测量。



### ■ 3.3 压力测量

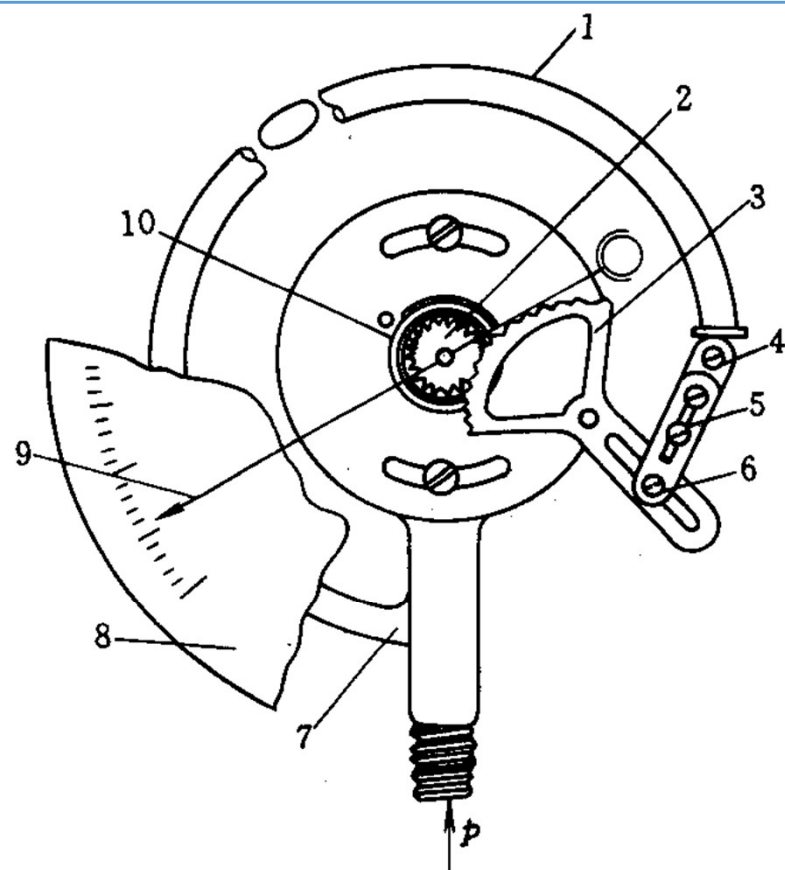


图 3-15 弹簧管压力计

1—弹簧管;2—小齿轮;3—扇形齿轮;  
4—拉杆;5—连杆调节螺钉;6—放大调节螺钉;  
7—接头;8—刻度标尺;9—指针;10—游丝



## ■ 3.3 压力测量


---

特点：

- 结构简单，使用方便，工作安全可靠；
- 无需反复保养，价格也比较便宜。
- 精度不太高，且需定期校验。

注：使用弹簧管压力计，要特别注意介质的化学性质。

如测量氨气时必须采用铜质材料，测量氧气时严禁沾有油脂。






### 四. 电阻应变式传感器

#### 1. 电阻应变式传感器概述

优点：

- (1) 结构简单、体积小、精度高；
  - (2) 线性度好，灵敏度高；
  - (3) 滞后和蠕变都较小，疲劳寿命高；
  - (4) 容易与二次仪表相匹配；
  - (5) 管理和保养方便。
- 

## ■ 3.3 压力测量

### 2. 工作原理

在弹性元件上粘贴电阻应变片，应变片随传感器弹性元件一起变形，应变片将弹性元件变形(应变)转换成电阻的变化，再通过仪表(电阻应变仪)转换为电压或电流，并加以放大，最后显示出压力值。



电阻应变传感器测量过程

## ■ 3.3 压力测量

### (1) 电阻应变片的结构及工作原理

电阻应变片是电阻式传感器，以自身电阻的变化反映机械应变变量。

#### ①结构：

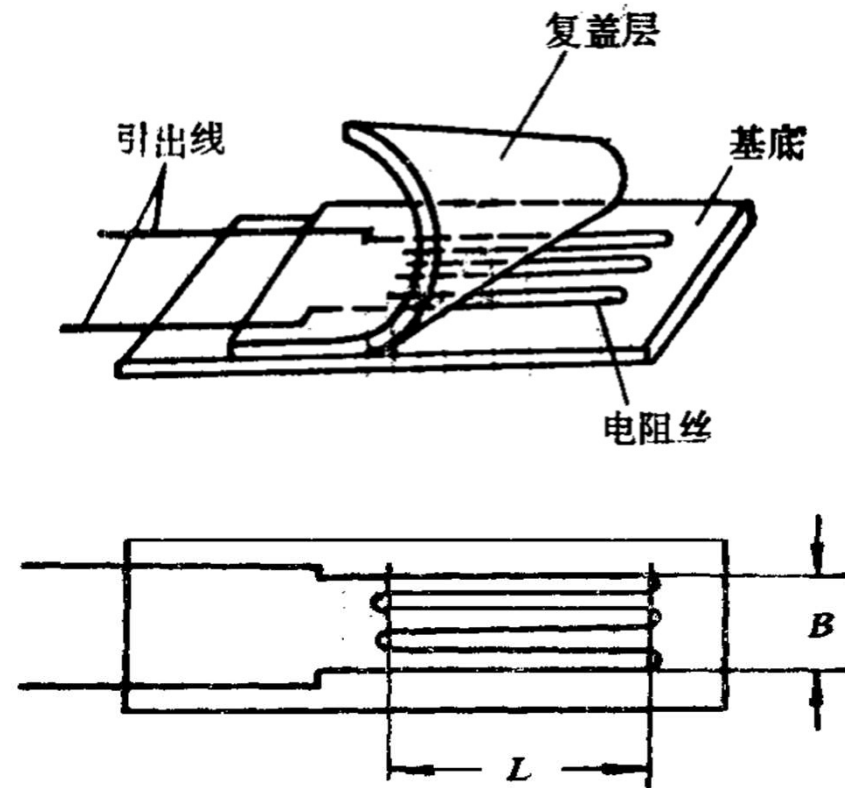
电阻金属丝(或箔栅)；

基底和覆盖层；

引出线。

$L$ 为丝栅长度

$B$ 为丝栅宽度。



## ■ 3.3 压力测量

②电阻应变片工作原理（应变效应）：

金属丝随自身变形而产生的电阻变化。

$$R = \frac{\rho \cdot l}{S}$$

式中：  $R$ ---电阻丝的电阻（ $\Omega$ ）；

$\rho$ ---电阻率（ $\Omega \cdot cm$ ）；

$l$ ---电阻丝长度（m）；

$S$ ---电阻丝截面积（ $mm^2$ ），  $S = \pi r^2$

$r$ ---电阻丝半径。

### ■ 3.3 压力测量

当电阻丝受拉伸变形时，其长度、截面积、电阻率会出现变化  $\Delta l$   $\Delta S$   $\Delta \rho$ ，电阻值也因此产生变化  $\Delta R$ ，

对  $R = \frac{\rho \cdot l}{S}$  微分后得到：

$$dR = \frac{\rho}{S} dl - \frac{\rho \cdot l}{S^2} dS + \frac{l}{S} d\rho$$

等式两边同除以  $R$ ：

$$\frac{dR}{R} = \frac{dl}{l} - \frac{dS}{S} + \frac{d\rho}{\rho}$$

### ■ 3.3 压力测量

$$\frac{dR}{R} = \frac{dl}{l} - \frac{dS}{S} + \frac{d\rho}{\rho}$$

由于:  $dS = 2\pi r dr$   $\frac{dS}{S} = 2\frac{dr}{r}$

所以:  $\frac{dR}{R} = \frac{dl}{l} - 2\frac{dr}{r} + \frac{d\rho}{\rho}$

令:  $\frac{dl}{l} = \varepsilon_x$  ——电阻丝的轴向应变

$$\frac{dr}{r} = \varepsilon_y \quad \text{——电阻丝的径向应变}$$

得:  $\frac{dR}{R} = \varepsilon_x - 2\varepsilon_y + \frac{d\rho}{\rho}$



## ■ 3.3 压力测量

---

$$\frac{dR}{R} = \varepsilon_x - 2\varepsilon_y + \frac{d\rho}{\rho}$$

当电阻丝沿轴向伸长时，则沿径向缩小，二者关系为：

$$\varepsilon_y = -\mu \varepsilon_x$$

式中：  $\mu$  ---电阻丝材料的泊松比。





## ■ 3.3 压力测量

---

$$\frac{dR}{R} = \varepsilon_x - 2\varepsilon_y + \frac{d\rho}{\rho}$$


$$\varepsilon_y = -\mu\varepsilon_x$$

$$= \varepsilon_x + 2\mu\varepsilon_x + \frac{d\rho}{\rho}$$

$$= (1 + 2\mu)\varepsilon_x + \frac{d\rho}{\rho}$$

$$\frac{dR}{R} = K_0 \cdot \varepsilon_x$$

式中：

$$K_0 = (1 + 2\mu) + \frac{d\rho}{\rho} / \varepsilon_x$$




### ■ 3.3 压力测量

$$K_0 = (1 + 2\mu) + \frac{d\rho}{\rho} / \varepsilon_x$$

$K_0$ ——电阻丝的灵敏系数，它受二个因素的影响：

1.  $(1 + 2\mu)$  表示电阻丝几何形状变形关系，为一常数，一般在1.6左右；

2.  $\frac{d\rho}{\rho} / \varepsilon_x$  称压阻系数。对大多数电阻丝材料，压阻系数也是常数。

结论：电阻丝的电阻变化率与应变的变化率呈线性关系。

$$\frac{dR}{R} = K_0 \cdot \varepsilon_x$$

## ■ 3.3 压力测量

其他影响因素：

1. 基底材料； 2. 粘贴剂； 3. 电阻片横向效应。

综合表达：

$$\frac{dR}{R} = K \cdot \varepsilon_x$$

式中：K——电阻应变片的灵敏系数，由应变片制造厂抽样实验给出。

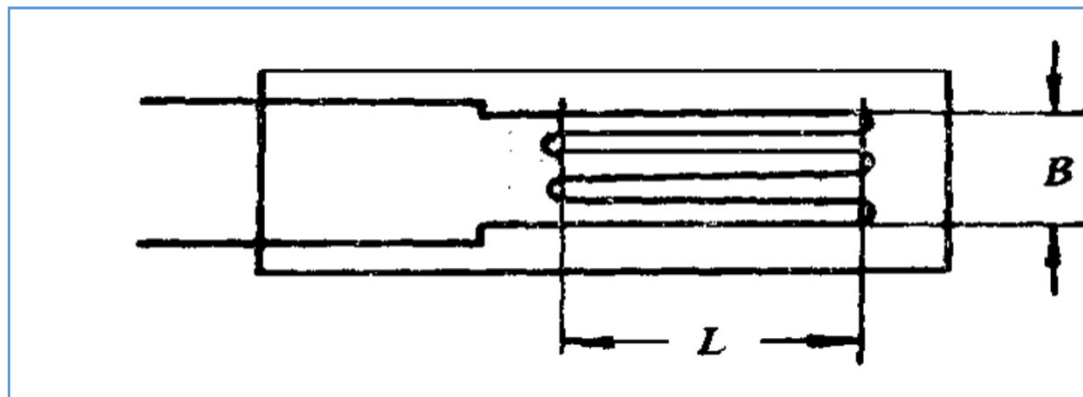
K=1.7—3.6 之间。

### (2) 电阻应变片的分类

#### ① 按敏感栅的形式分

**丝绕式应变片** 用 $0.012\sim 0.05\text{mm}$ 电阻丝绕制而成，端部为圆弧形。

特点：1. 应变片横向效应较大；  
2. 绕制方法简单。



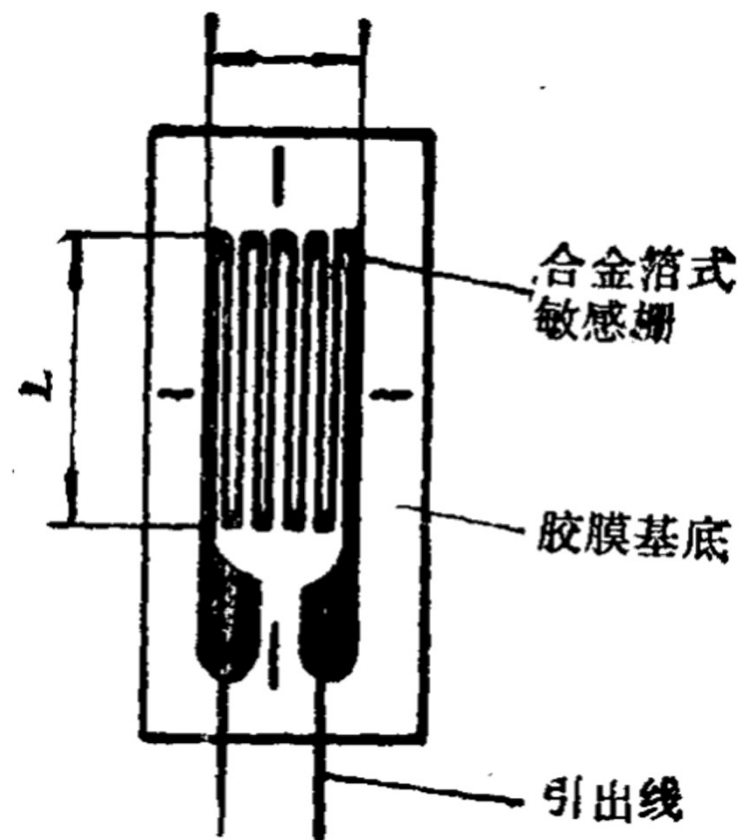
### ■ 3.3 压力测量

#### 箔式应变片

由0.02—0.05mm厚的箔材，以树脂胶膜、纸浸胶等材料为基底，再用光刻腐蚀工艺在箔材上形成敏感栅，焊上引线，加上覆盖层而成。

特点：

1. 制造精度及生产效率高；
2. 横向效应小；
3. 箔片散热及附着面大，有利于应变片的工作。



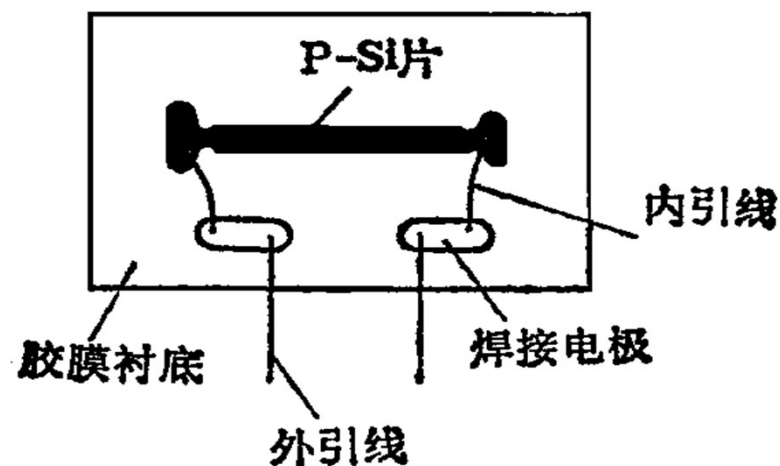
## ■ 3.3 压力测量

### 半导体应变片

由半导体材料单晶硅制成敏感栅。在承受轴向应变时，敏感栅的压阻系数大，因而灵敏系数较大，可达100以上，能测量微小的应变。

特点：1. 横向效应和机械滞后小。

2. 温度稳定性较差，须采取温度补偿措施。






## ■ 3.3 压力测量

---

### ②按使用工作温度分

- 低温应变片 工作温度：低于 $-30^{\circ}\text{C}$
  - 常温应变片 工作温度： $-30^{\circ}\text{C}$ 至 $60^{\circ}\text{C}$ 。
  - 中温应变片 工作温度： $60^{\circ}\text{C}$ 至 $250^{\circ}\text{C}$
  - 高温应变片 工作温度：大于 $250^{\circ}\text{C}$
- 

## ■ 3.3 压力测量

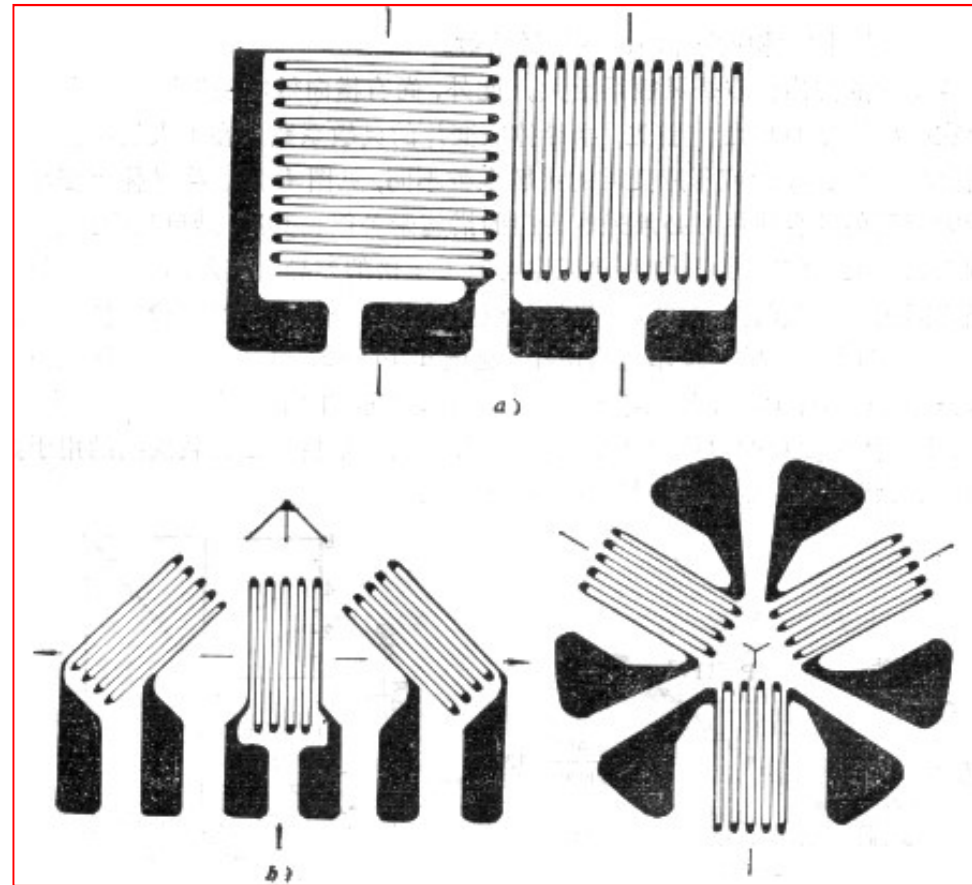
③按敏感栅的结构形状分

- 单轴应变片

用于测量长度 $L$ 方向的应变。

- 应变花(多轴)

由两个或两个以上的单轴敏感栅相交成一定角度置于公共基底而成。





## ■ 3.3 压力测量

---

应变片的使用：

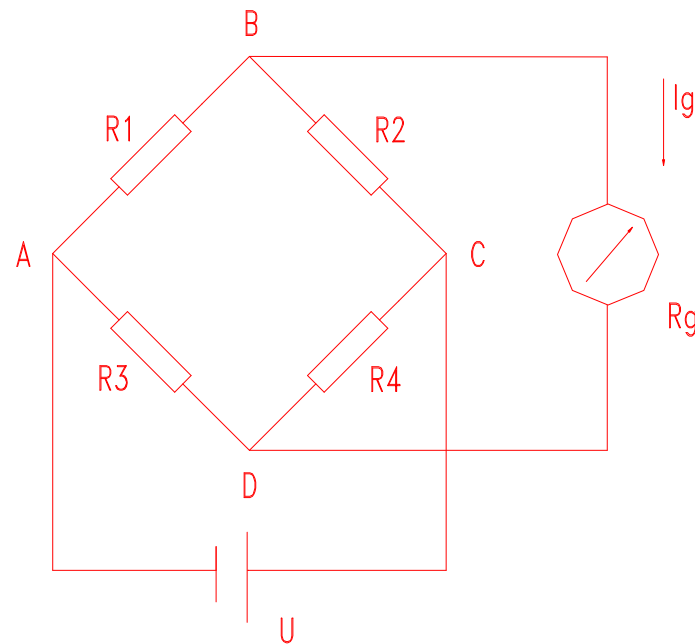
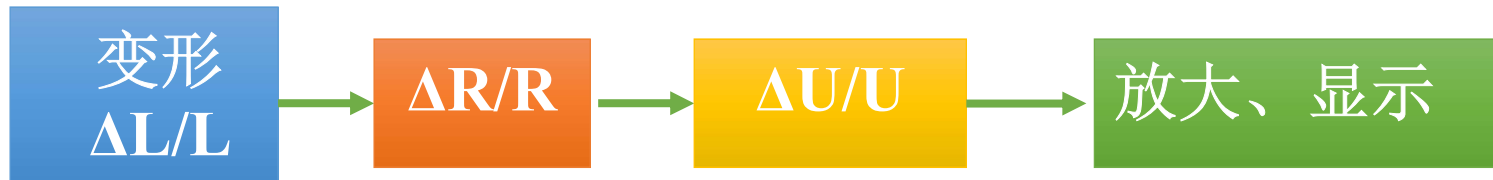
1. 若是单向应力并已知主应力方向，选用单轴应变片，使应变片的长度方向与主应力方向一致。
2. 若两向应力且主应力方向已知，则可选用互成 $90^\circ$ 的应变花，使敏感栅长度方向与主应力方向一致。
3. 若未知主应力方向时，则选用三轴或四轴应变花，测量后通过整理计算求出主应力大小及方向。





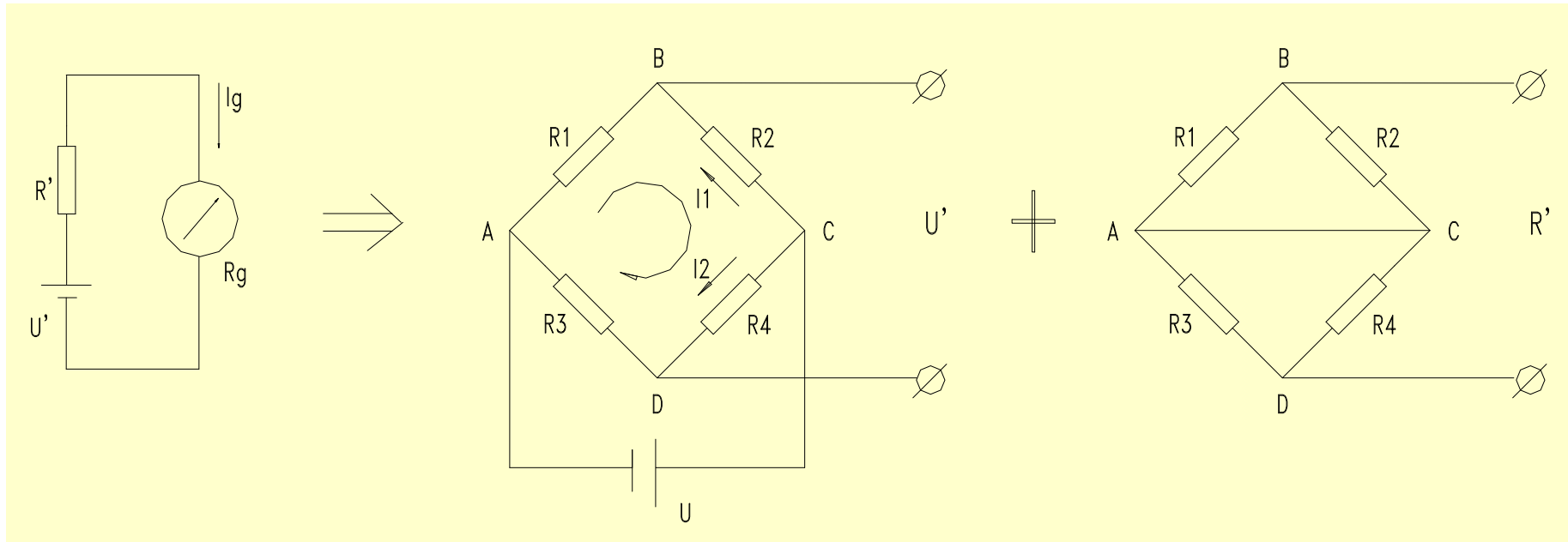
## ■ 3.3 压力测量

### 3. 电桥工作原理



利用戴维南定理进行化简：

### ■ 3.3 压力测量

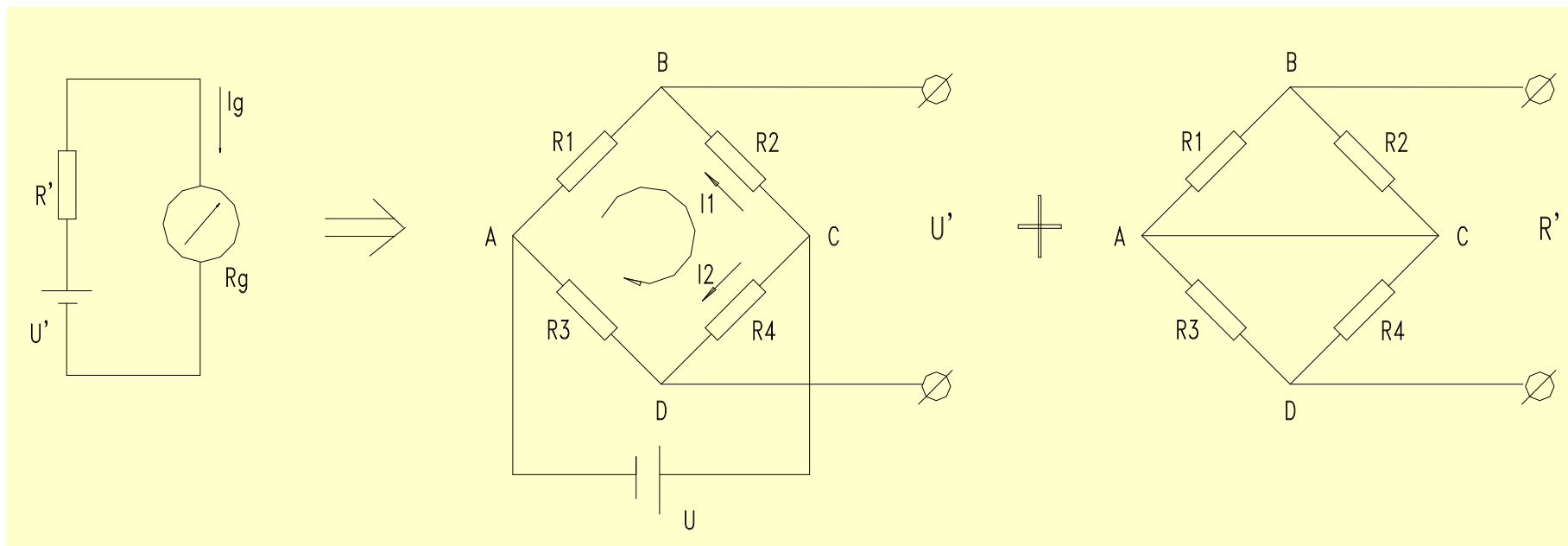


$$U' = I_2 R_4 - I_1 R_2$$

$$= \frac{U}{R_3 + R_4} \cdot R_4 - \frac{U}{R_1 + R_2} \cdot R_2$$

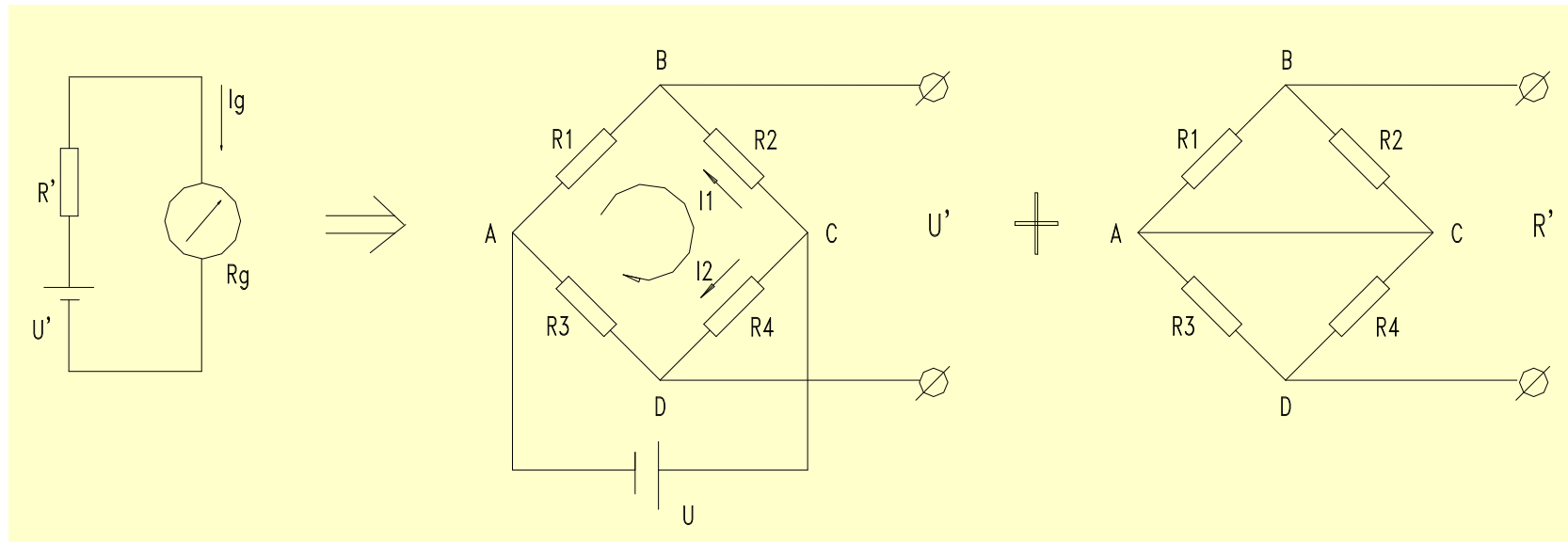
$$= U \cdot \frac{R_1 \cdot R_4 - R_2 \cdot R_3}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)}$$

### ■ 3.3 压力测量



$$R' = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} + \frac{R_3 \cdot R_4}{R_3 + R_4}$$

### ■ 3.3 压力测量



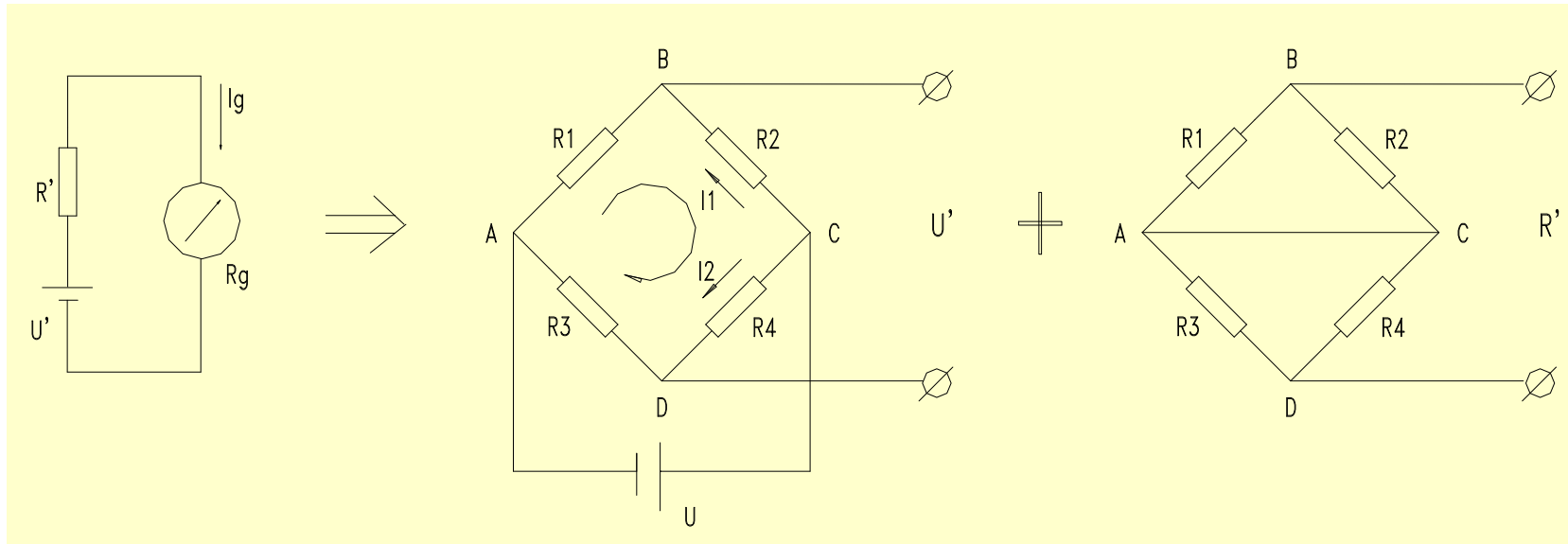
$$I_g = \frac{U'}{R_g + R'} = \frac{U(R_1 R_4 - R_2 R_3)}{R_g(R_1 + R_2)(R_3 + R_4) + R_1 R_2(R_3 + R_4) + R_3 R_4(R_1 + R_2)}$$

若:  $I_g = 0$  , 则  $R_1 \cdot R_4 - R_2 \cdot R_3 = 0$

电桥平衡条件:

$$R_1 \cdot R_4 = R_2 \cdot R_3$$

### ■ 3.3 压力测量



电桥输出电压：

$$U_g = I_g \cdot R_g$$
$$= \frac{U(R_1 R_4 - R_2 R_3)}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4) + \frac{1}{R_g} [R_1 R_2 (R_3 + R_4) + R_3 R_4 (R_1 + R_2)]}$$

### ■ 3.3 压力测量

当电流表内阻 $R_g$ 很大时，就相当于电桥的开路电压  $U_0$

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

若电桥的四个桥臂中只有 $R_1$ 的阻值发生了变化产生  $\Delta R_1$ ，其余三个桥臂电阻的阻值不变，并设：

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

$$\Delta U_1 = U \cdot \frac{(R_1 + \Delta R_1)R_4 - R_2 R_3}{(R_1 + \Delta R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} = U \cdot \frac{\Delta R_1}{4R + 2\Delta R_1}$$

### ■ 3.3 压力测量

$$\Delta U_1 = U \cdot \frac{(R_1 + \Delta R_1)R_4 - R_2R_3}{(R_1 + \Delta R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} = U \cdot \frac{\Delta R_1}{4R + 2\Delta R_1}$$

由于  $R \gg \Delta R_1$  , 略去  $2\Delta R_1$  项, 即:

$$\Delta U_1 = \frac{U}{4} \frac{\Delta R_1}{R} = \frac{U}{4} K \cdot \varepsilon_1$$

### ■ 3.3 压力测量

当R2, R3, R4分别发生变化时, 有:

$$\Delta U_2 = -\frac{U}{4} \frac{\Delta R_2}{R} = -\frac{U}{4} K \cdot \varepsilon_2$$

$$\Delta U_3 = -\frac{U}{4} \frac{\Delta R_3}{R} = -\frac{U}{4} K \cdot \varepsilon_3$$

$$\Delta U_4 = \frac{U}{4} \frac{\Delta R_4}{R} = \frac{U}{4} K \cdot \varepsilon_4$$



### ■ 3.3 压力测量

当 $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$ ,  $R_4$ 同时发生变化时, 则:

$$R_1 + \Delta R_1, R_2 + \Delta R_2, R_3 + \Delta R_3, R_4 + \Delta R_4$$

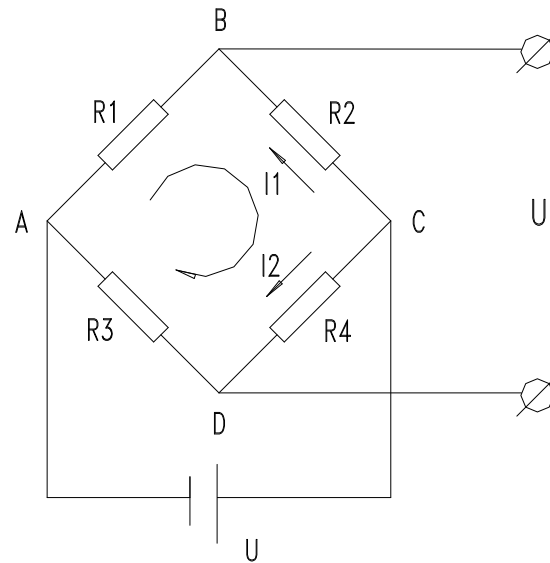
电桥的输出电压:

$$\Delta U = \Delta U_1 + \Delta U_2 + \Delta U_3 + \Delta U_4$$

$$= \frac{U}{4} \left( \frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} - \frac{\Delta R_3}{R_3} + \frac{\Delta R_4}{R_4} \right)$$

$$= \frac{U}{4} K (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 - \varepsilon_3 + \varepsilon_4)$$

### ■ 3.3 压力测量



$$\Delta U = \frac{U}{4} \left( \frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} - \frac{\Delta R_3}{R_3} + \frac{\Delta R_4}{R_4} \right)$$

结论：

电桥中相对桥臂的电阻变化率对总的输出电压来说是相加的，相邻桥臂电阻变化率是相减的。

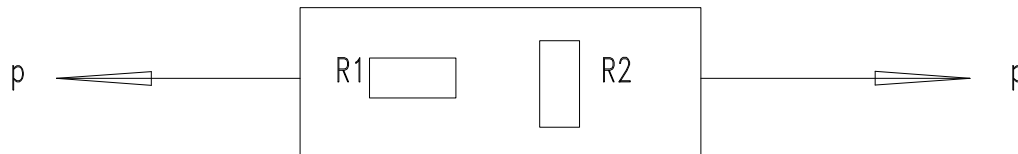
## ■ 3.3 压力测量

### 4. 应变片的桥路接法：

#### (1) 半桥测量：

电桥中的两个桥臂接入电阻应变片，另两个桥臂接入固定电阻。

例1：测量一受力杆的应力：



$$\Delta U = \frac{U}{4} \left( \frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} - \frac{\Delta R_3}{R_3} + \frac{\Delta R_4}{R_4} \right)$$

$$\Delta R_3 = \Delta R_4 = 0$$

### ■ 3.3 压力测量

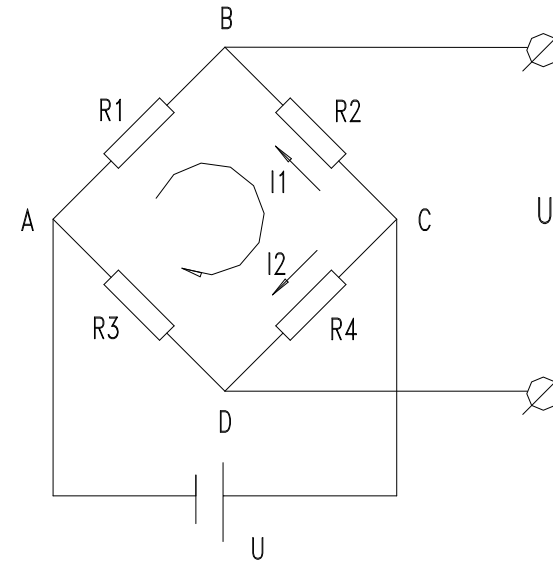
$$\Delta U = \frac{U}{4} \left( \frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} \right)$$

由材力知道,

$$\varepsilon_2 = -\mu \varepsilon_1$$

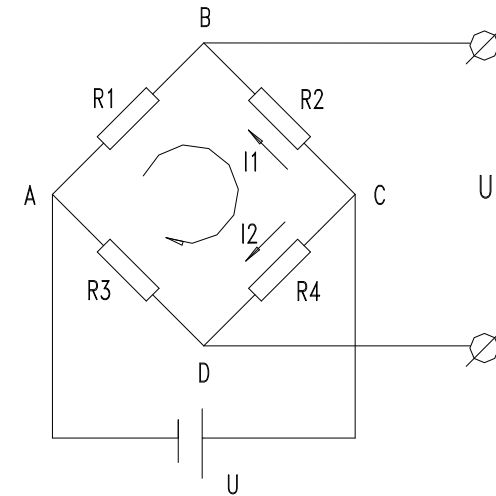
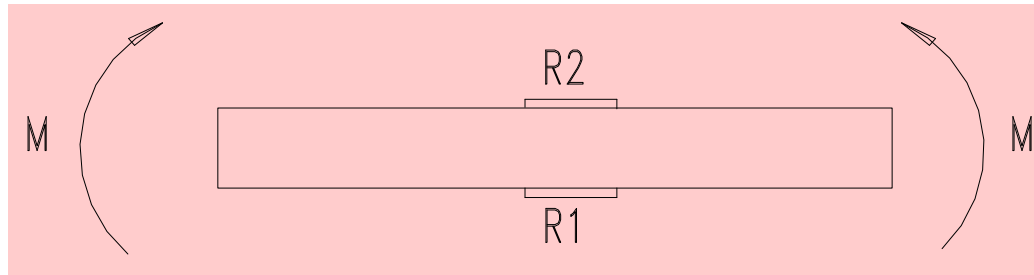
$$\frac{\Delta R_2}{R_2} = -\mu \frac{\Delta R_1}{R_1}$$

$$\Delta U = \frac{U}{4} \left( \frac{\Delta R_1}{R_1} + \mu \frac{\Delta R_1}{R_1} \right) = \frac{U}{4} (1 + \mu) \frac{\Delta R_1}{R_1}$$



## ■ 3.3 压力测量

例2. 测量弯矩:



$$\Delta U = \frac{U}{4} \left( \frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} \right)$$

$$\frac{\Delta R_2}{R_2} = -\frac{\Delta R_1}{R_1}$$

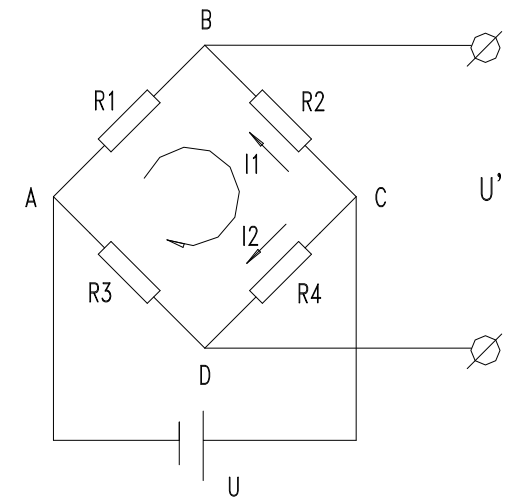
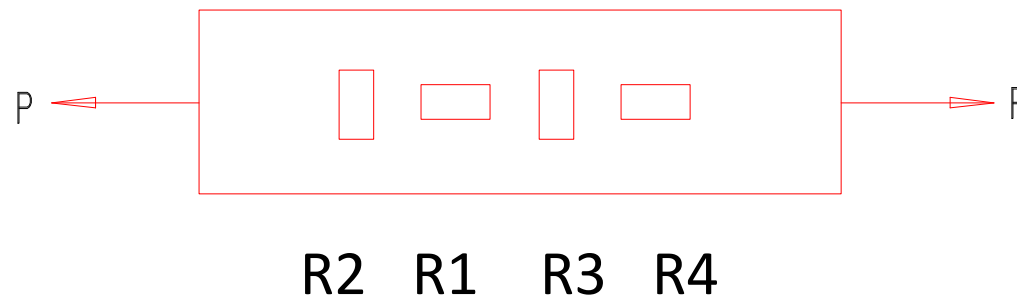
$$\Delta U = \frac{U}{4} \cdot 2 \frac{\Delta R_1}{R_1} = \frac{U}{2} \cdot \frac{\Delta R_1}{R_1}$$

## ■ 3.3 压力测量

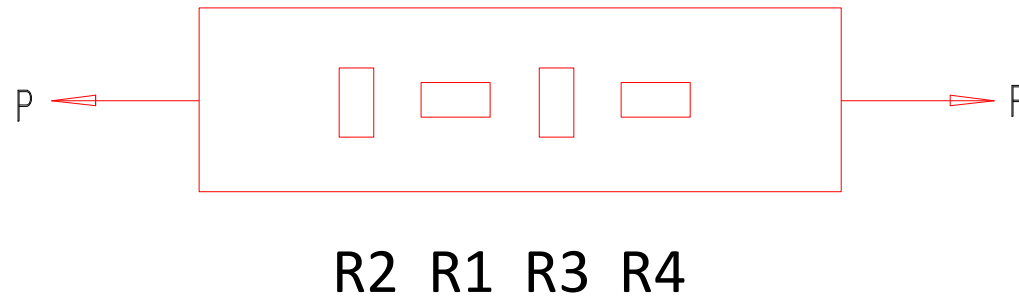
(2) 全桥测量：

测量电桥的四个桥臂都参与测量工作。

例3. 测量拉力：



### ■ 3.3 压力测量



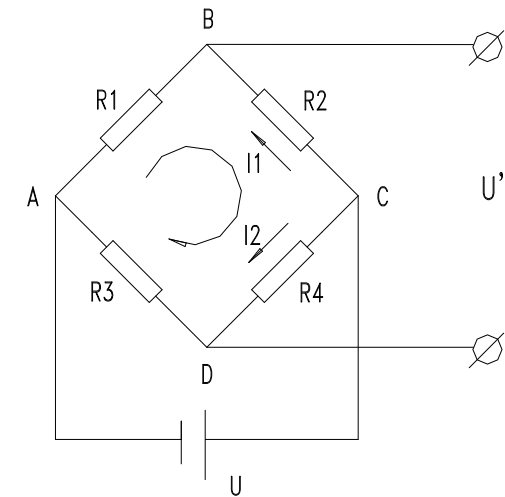
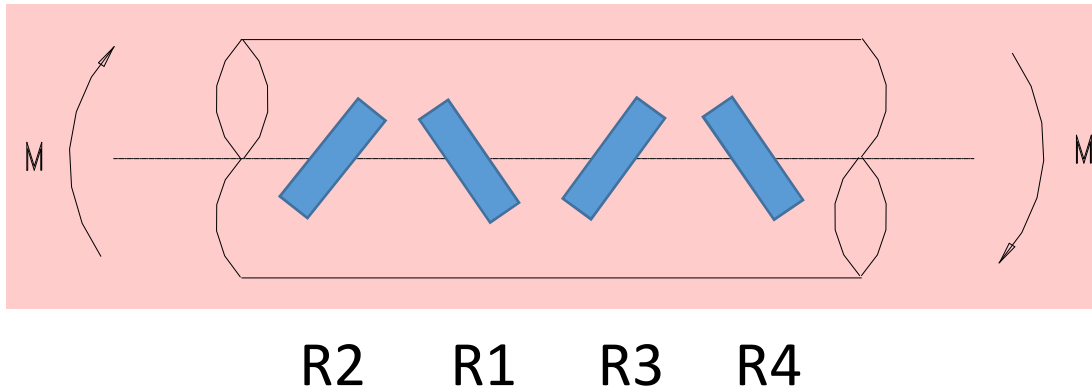
$$\Delta U = \frac{U}{4} \left( \frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} - \frac{\Delta R_3}{R_3} + \frac{\Delta R_4}{R_4} \right)$$

$$\frac{\Delta R_1}{R_1} = \frac{\Delta R_4}{R_4} \quad \frac{\Delta R_2}{R_2} = -\mu \frac{\Delta R_1}{R_1} \quad \frac{\Delta R_3}{R_3} = -\mu \frac{\Delta R_4}{R_4}$$

$$\Delta U = \frac{U}{2} (1 + \mu) \frac{\Delta R_1}{R_1}$$

### ■ 3.3 压力测量

例4. 测量扭矩:



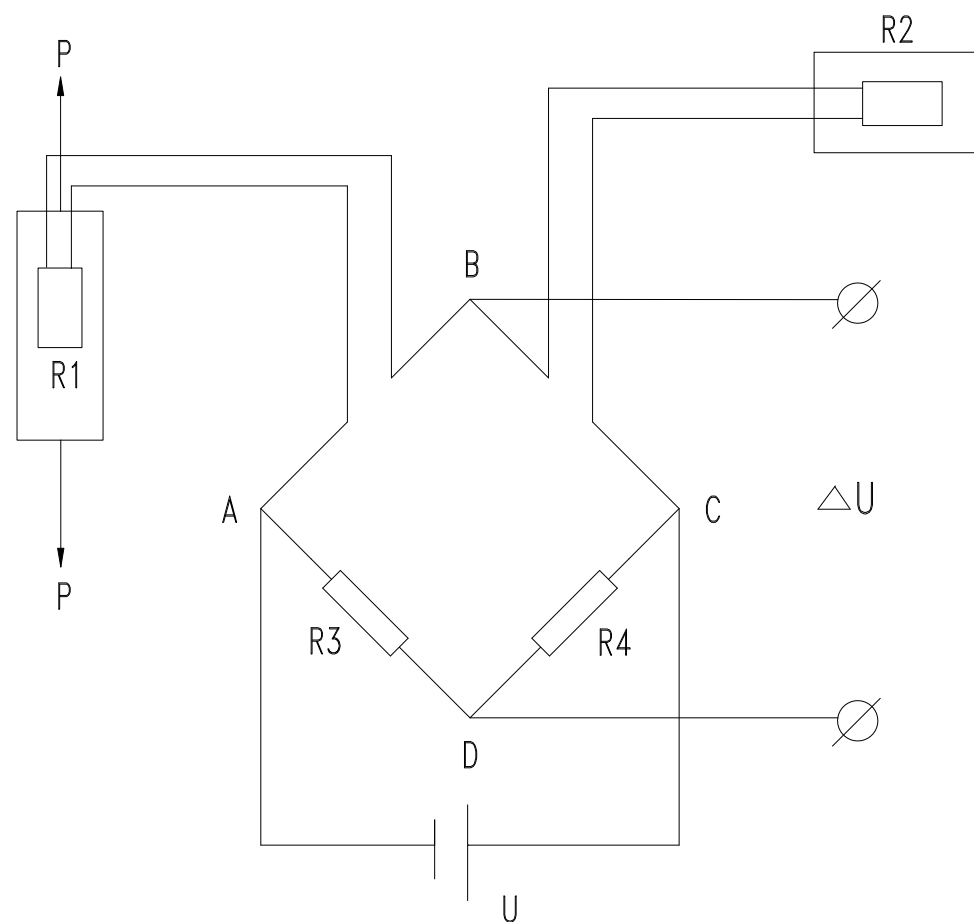
$$\Delta U = \frac{U}{4} \left( \frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} - \frac{\Delta R_3}{R_3} + \frac{\Delta R_4}{R_4} \right)$$

$$\Delta U = U \cdot \frac{\Delta R}{R}$$



## ■ 3.3 压力测量

### 5. 温度补偿



## ■ 3.3 压力测量

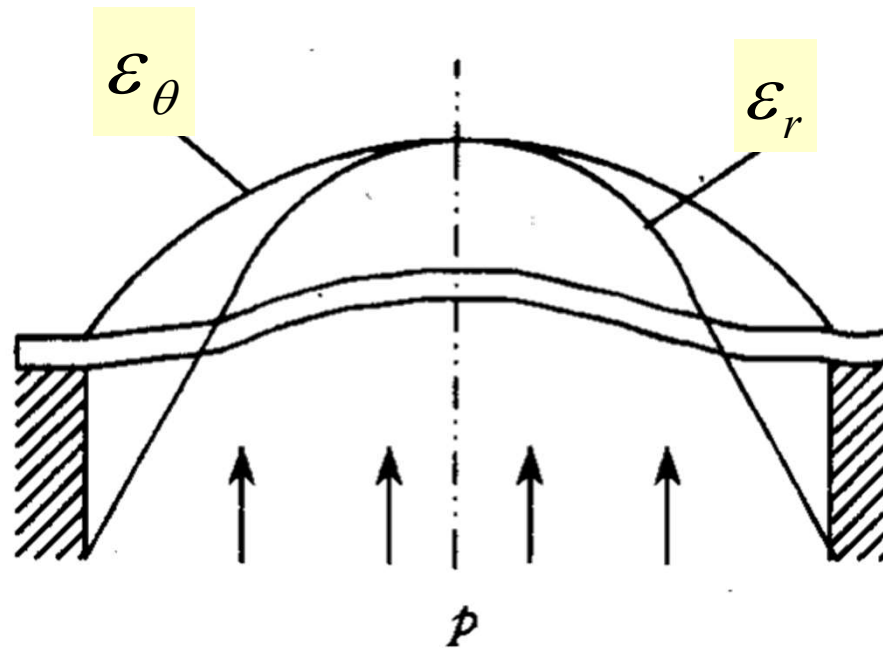
### 6. 压力传感器举例

#### 圆膜片式压力传感器：

边缘固定圆形膜片，当压力作用于某一面时，可引起膜片中央部分或凸或凹的变形。

$\varepsilon_{\theta}$  一环向应变

$\varepsilon_r$  一径向应变



### ■ 3.3 压力测量

设膜片上一点距膜片中心距离为  $r$

$$\varepsilon_r = p \cdot \frac{3}{8\delta^2 E} (1 - \mu^2) (r_0^2 - 3r^2)$$

$$\varepsilon_\theta = p \cdot \frac{3}{8\delta^2 E} (1 - \mu^2) (r_0^2 - r^2)$$

式中：

$\varepsilon_\theta$  — 环向应变

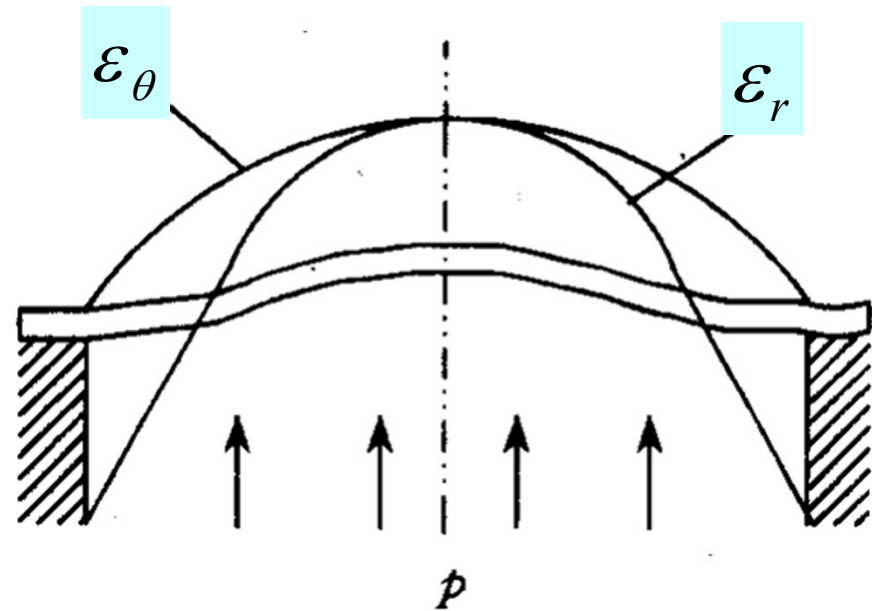
$\varepsilon_r$  — 径向应变

$\delta$  — 膜片厚度

$E$  — 膜片弹性模量

$\mu$  — 泊桑比

$r_0$  — 膜片自由变形部分的半径



### ■ 3.3 压力测量

$$\varepsilon_r = p \cdot \frac{3}{8\delta^2 E} (1 - \mu^2) (r_0^2 - 3r^2)$$

在膜片中心  $r=0$  处,

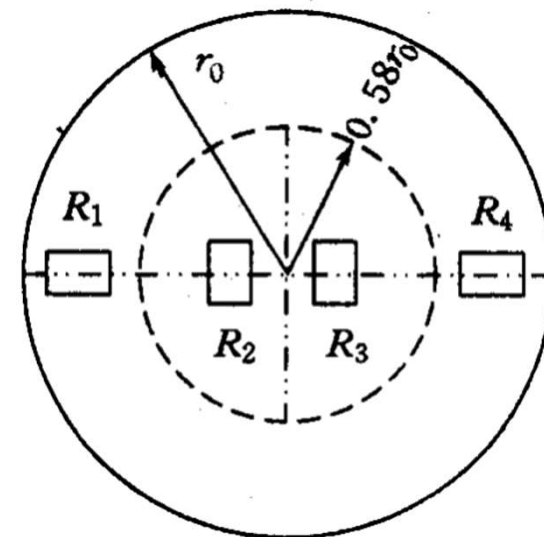
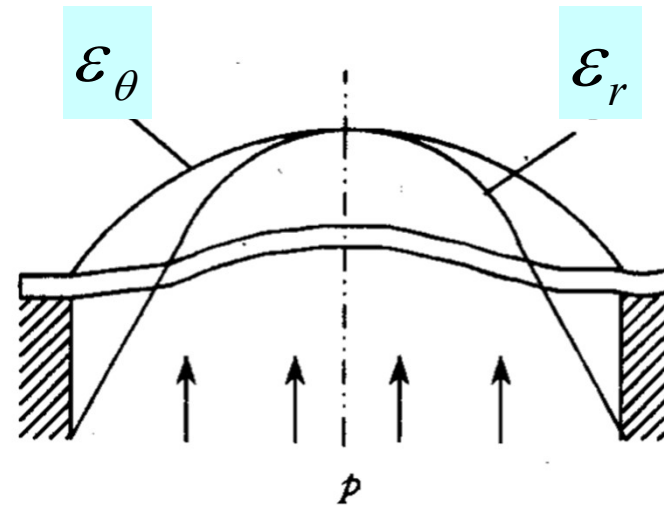
$\varepsilon_r$   $\varepsilon_\theta$  达到最大值:

$$\varepsilon_r = \varepsilon_\theta = p \frac{3}{8\delta^2 E} \cdot (1 - \mu^2) \cdot r_0^2$$

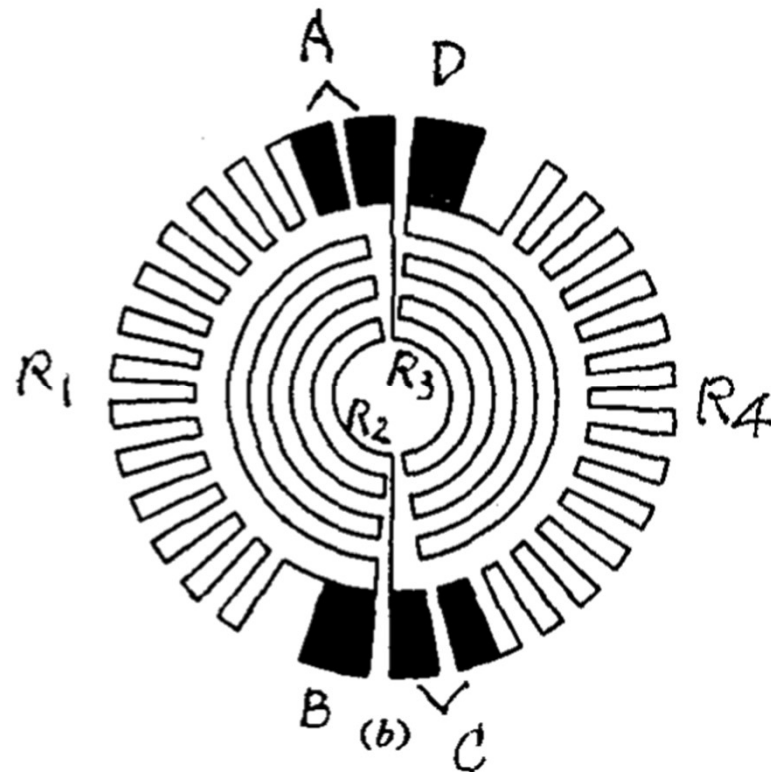
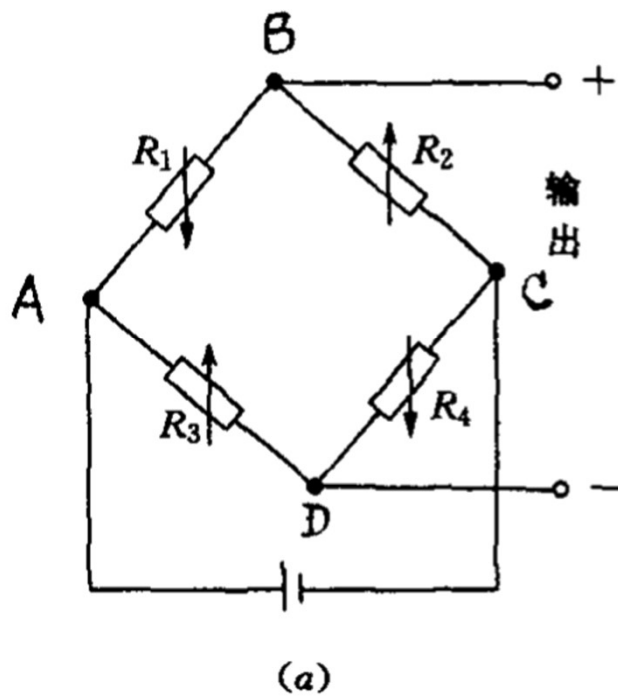
当  $r=0.577r_0$  处:  $\varepsilon_r=0$

应变片的布置:

$$\varepsilon_\theta = p \cdot \frac{3}{8\delta^2 E} (1 - \mu^2) (r_0^2 - r^2)$$



### ■ 3.3 压力测量






## ■ 3.3 压力测量

---

### 扩散硅传感器：

利用半导体的压阻效应和微机械加工技术，在单晶硅片的特定晶向上，用光刻、扩散等半导体工艺制做一惠斯登电桥，形成敏感膜片，当受到外力作用时产生微应变，电阻率发生变化，使桥臂电阻发生变化。

传感器的输出电压信号，还需经过计算机温度补偿、激光调阻、信号放大、标定等工艺。





## ■ 3.3 压力测量

---

### 陶瓷传感器：

陶瓷传感器是干式传感器，压力直接作用在坚固的陶瓷膜片上，基板电极和膜片电极可以检测出与压力相关的电容变化，测量范围取决于陶瓷膜片的厚度。

抗过压能力可达正常压力的40倍。高纯度99.9%陶瓷，具有与哈氏合金相同的抗化学腐蚀能力。





## ■ 3.3 压力测量

---

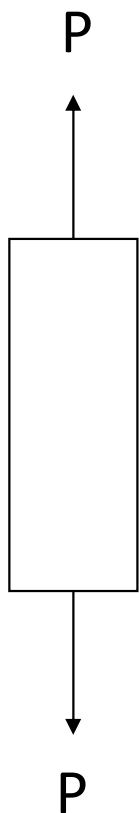
### 7. 压力传感器的选用：

- (1) **类型**：被测介质、环境温度、振动、电磁干扰；
- (2) **量程**： $1/3 \text{ 量程} < \text{被测压力} < 2/3 \text{ 量程}$ ；
- (3) **精度**：在满足实际需要的情况下, 尽量选择廉价的产品。





### 作业



一、构件受载荷 $P$ 的作用如图示，已知构件截面： $\Phi 20\text{mm}$ ，为测量载荷 $P$ 在构件上贴四个应变片，构成全桥测量。

求：1. 画出应变片在构件上的贴片示意图；

2. 画出应变片的连接线路图；

3. 已知供桥电压 $U=5\text{V}$ ，测出电桥输出电压 $\Delta U=10\text{mV}$ ， $E=2\times 10^5\text{ MPa}$ ，灵敏度系数 $K=2$ ，

求 $P=?$

P125 题8、9、13



**本章结束**

