

第4章 电阻应变式传感器

- 一、电阻应变式传感器的工作原理
- 二、电阻应变片的动态响应特性
- 三、应变片的材料及粘贴技术
- 四、信号解调电路
- 五、温度误差及其补偿
- 六、电阻应变式传感器

电阻应变式传感器是一种利用金属电阻应变片将应变转换成电阻变化的传感器。

被测量 \Rightarrow 应变(ε) \Rightarrow 电阻变化(ΔR)

工作原理：电阻应变效应

考虑一段金属导体 (l, ρ, A) , 如图1所示

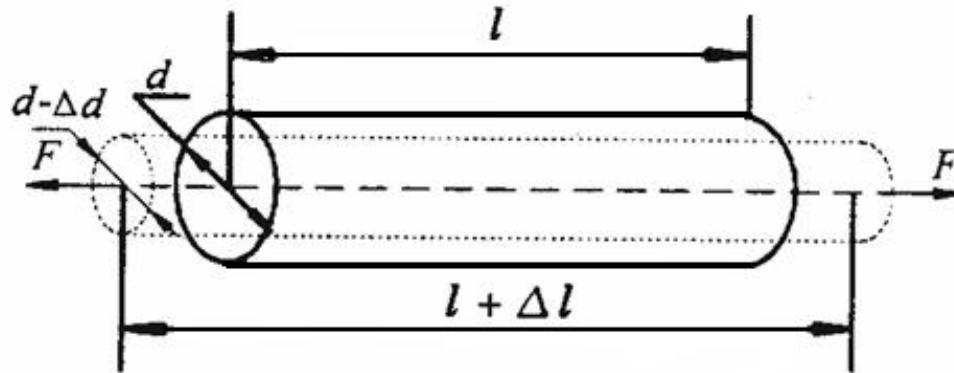


图1 金属电阻应变效应

未受力时，原始电阻为

$$R = \rho \frac{l}{A}$$

当受拉力F作用时，将伸长 Δl ，横截面积相应减小 ΔS ，电阻率 ρ 则因晶格变形等因素的影响而改变 $\Delta \rho$ ，故引起电阻变化 ΔR 。将上式全微分，并利用相对变化量表示，则有

$$\frac{dR}{R} = \frac{dl}{l} - \frac{dA}{A} + \frac{d\rho}{\rho}$$

式中， $\Delta l/l = \varepsilon$ ，为金属导体电阻丝的轴向应变，常用单位 $\mu\varepsilon$
($\mu\varepsilon = 1 \times 10^{-6}$ mm/mm)。

由于 $A = \pi d^2/4$ ，则 $\Delta A/A = 2\Delta d/d$ ，其中 $\Delta d/d$ 为横向(纵向)应变；且由材料力学知， $\Delta d/d = -\mu\varepsilon$ ，式中 μ 为金属材料的泊松比。可得

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

金属电阻应变片的应变灵敏度为

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

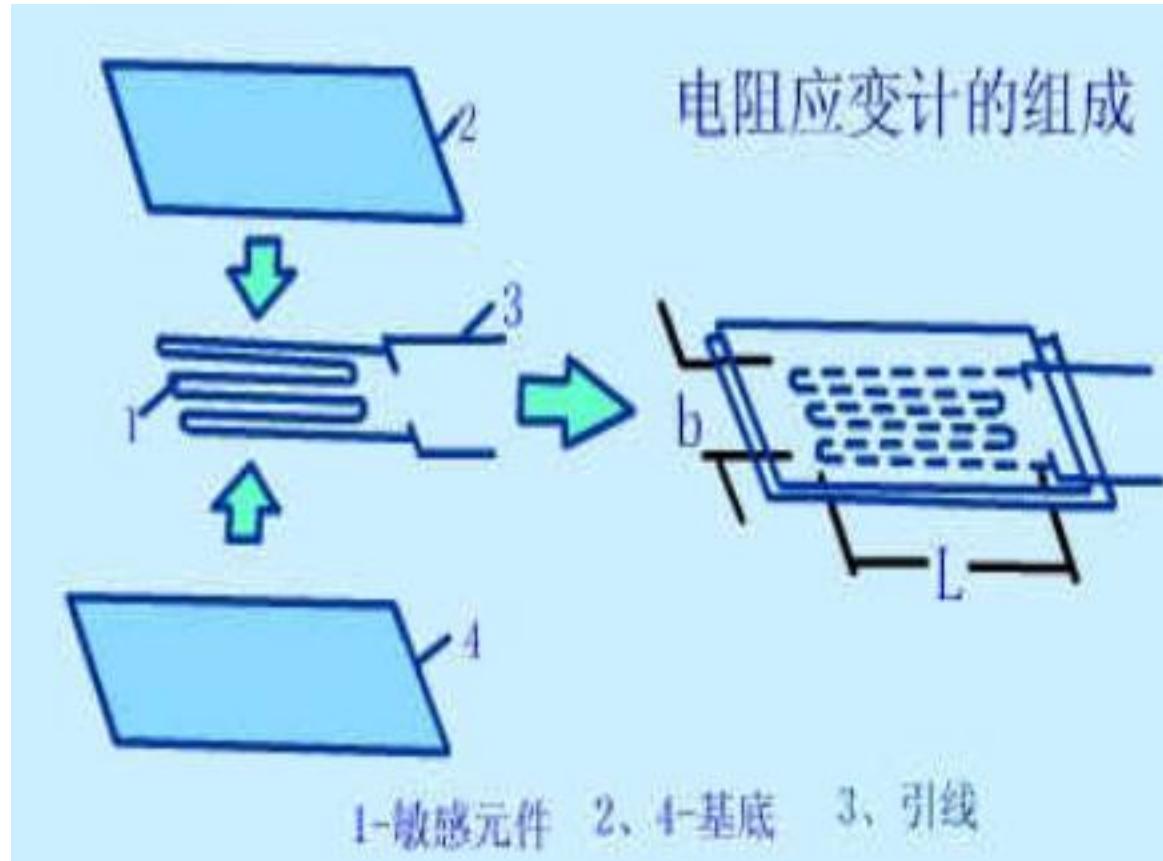
对于金属材料， $\Delta \rho / \rho$ 较小，可以略去；且 $\mu = 0.2 \sim 0.4$ ， $K \approx 1 + 2\mu = 1.4 \sim 1.8$ 则，实际测得 $K \approx 2.0$ ，说明 $(\Delta \rho / \rho) / \varepsilon$ 项对 K 还是有一定影响。

一般情况下，在应变极限内，金属材料电阻的相对变化与应变成正比

$$\Delta R / R = K \cdot \varepsilon$$

4.2 应变片的结构，类型及参数

金属电阻应变片的结构，如图所示，则敏感栅基底，盖片，引线和粘结剂组成。



1. 敏感栅

1) 丝式应变片, $\phi=0.012\sim0.05\text{mm}$ 金属细丝绕成栅状, 栅长 $l=0.2, 0.5, 1.0, 100, 200\text{mm}$ 等。

2) 箔式应变片, 由厚度为 $0.003\sim0.01\text{mm}$ 的金属箔片制成各种图形的敏感栅, 亦称应变花, 如图2-4所示。其优点

(1) 制造技术能保证敏感栅尺寸准确, 线条均匀和适应各种不同测量要求的形状, 其栅长可做到 0.2mm ;

(2) 敏感栅薄而宽, 与被测试件粘贴面积大, 黏结牢靠, 传递试件应变性能好;

(3) 散热条件好, 允许通过较大的工作电流, 从而提高了输出灵敏度;

(4) 横向效应小;

(5) 蠕变和机械滞后小, 疲劳寿命长。

电阻应变片

2. 基底和盖片

基底和盖片的作用是保持敏感栅和引线的几何形状和相对位置，并且有绝缘作用。一般为厚度 $0.02\sim0.05\text{mm}$ 的环氧树脂，酚醛树脂等胶基材料。对基底和盖片材料的性能要求：

机械强度好，挠性好；粘贴性能好；电绝缘性好；热稳定性和搞温性好；无滞后和蠕变。

3. 引线

作用：连接敏感栅和外接导线。

一般采用 $\phi=0.05\sim0.1\text{mm}$ 的银铜线，铬镍线，卡马线，铁铅丝等，与敏感栅点焊焊接。

4.粘结剂

作用：将敏感栅固定于基片上，并将盖片与基底粘结在一起；使用时，用粘结剂将应变片粘贴在试件的某一方向和位置，以便感受试件的应变。

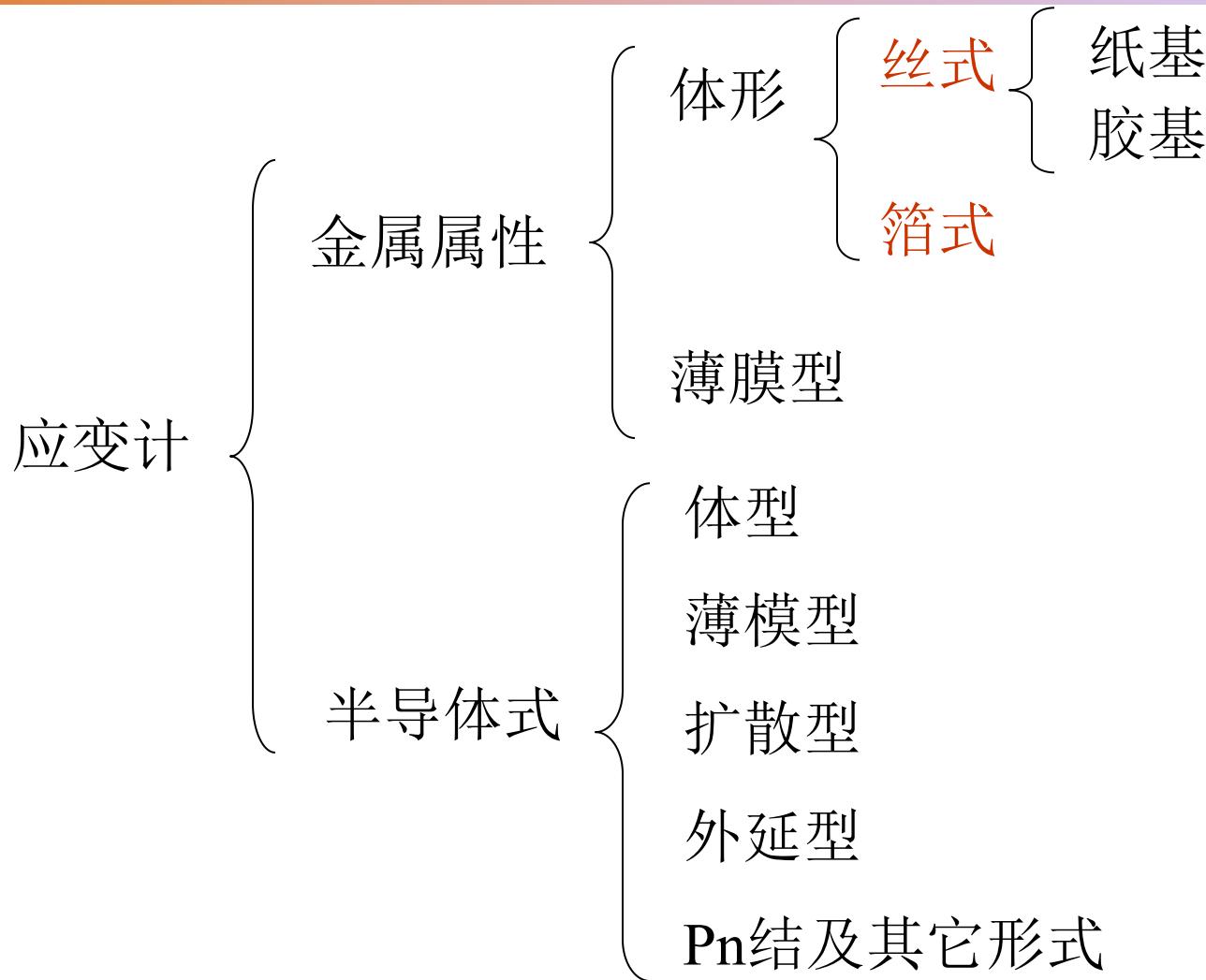
粘结剂材料：有机和无机两大类。

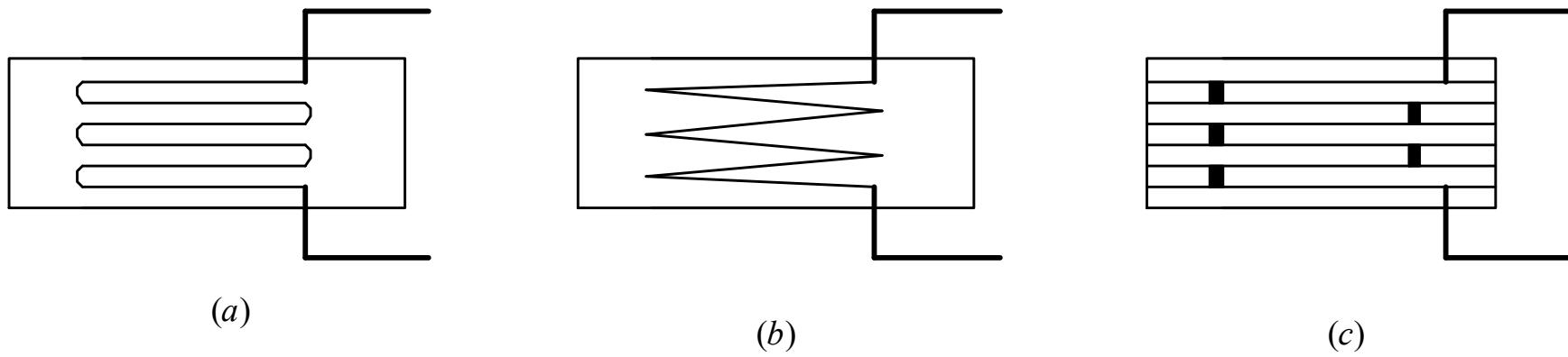
粘贴工艺：应变片静放于试件上，粘贴牢固可靠。

2 应变计的分类

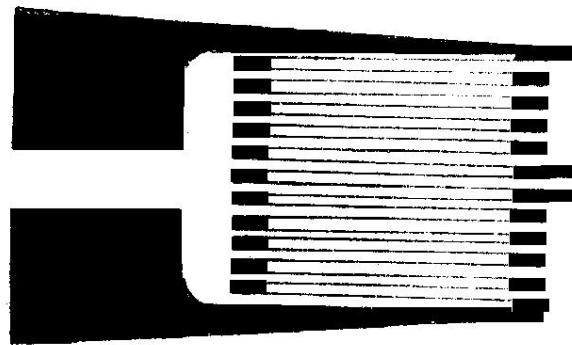
应变计有很多品种系列: 从尺寸上讲, 长的有几百mm , 短的仅0.2 mm; 由结构形式上看, 有单片、双片、应变花和各种特殊形状的图案; 就使用环境上说, 有高温、低温、水、核辐射、高压、磁场等; 而安装形式, 有粘贴、非粘贴、焊接、火焰喷涂等。

主要的分类方法是根据敏感元件材料的不同, 将应变计分为金属式和半导体式两大类。从敏感元件的形态又可进一步分类如下:

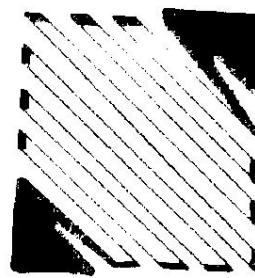




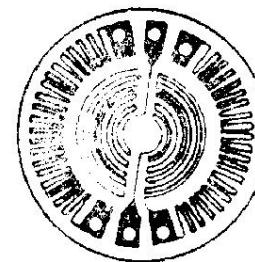
丝式



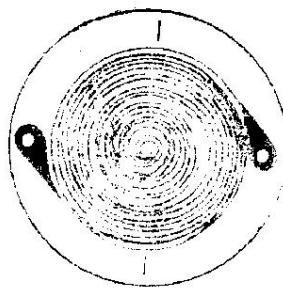
(a)



(b)



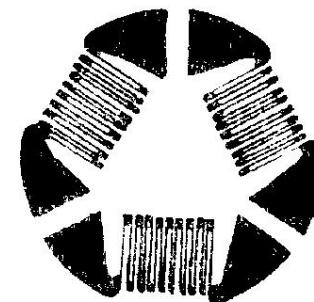
(c)



(d)



(e)



(f)

几种箔式应变计

箔式应变计的线栅是通过光刻、腐蚀等工艺制成很薄的金属薄栅（厚度一般在 $0.003\sim0.01\text{mm}$ ）。与丝式应变计相比有如下优点：

- (1) 工艺上能保证线栅的尺寸正确、线条均匀，大批量生产时，阻值离散程度小。
- (2) 可根据需要制成任意形状的箔式应变计和微型小基长（如基长为 0.1 mm ）的应变计。

- (3) 敏感栅截面积为矩形, 表面积大, 散热好, 在相同截面情况下能通过较大电流。
- (4) 厚度薄, 因此具有较好的可挠性, 它的扁平状箔栅有利于形变的传递。
- (5) 蠕变小, 疲劳寿命高。
- (6) 横向效应小。
- (7) 便于批量生产, 生产效率高。

4.2.3 金属应变片的参数

一、静态特性

1. 应变片的电阻值(R_0)

应变片不受外力作用情况下,于室温条件测定的电阻值(原始电阻值),已标准化.主要有 $60,120,350,600,1000\Omega$ 等各种规格。

2. 绝缘电阻

敏感栅与基底之间电阻值,一般应大于 $10^{10}\Omega$ 。

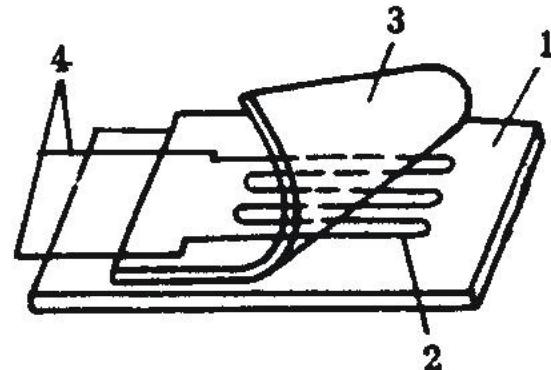
3. 允许电流

指不因电流产生的热量影响测量精度, 应变片允许通过的

最大电流。

静态测量时, 允许电流一般为 25 mA ;

动态测量时, 允许电流可达 $75\sim 100\text{ mA}$ 。

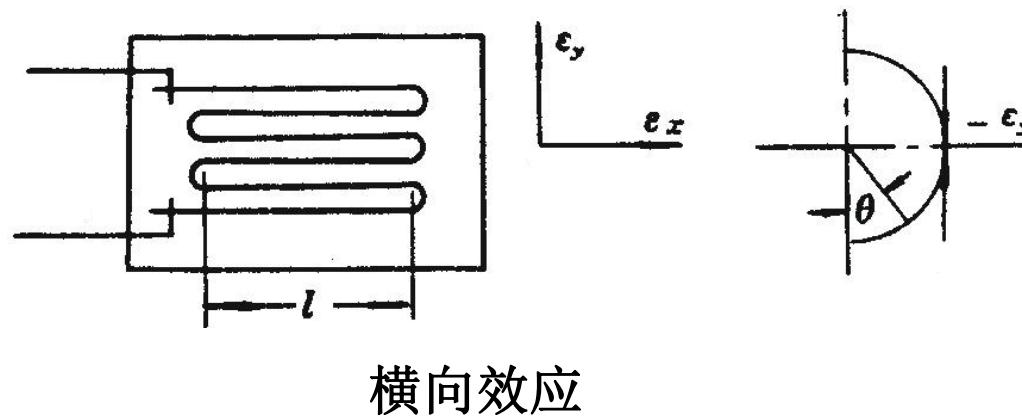


4. 灵敏系数(K)

电阻应变片的电阻 – 应变特性与金属丝时不同，须用实验法对电阻应变片的灵敏系数K重新测定。测定时将应变片安装于试件（泊松比 $\mu=0.285$ 的钢材）表面，在其轴线方向的单向应力作用下，且保证应变片轴向与主应力轴向一致的条件下，应变片的阻值相对变化与试件表面上安装应变片区域的轴向应变之比，即 $K=(\Delta R/R) / (\Delta l/l)$ ，而且一批产品只能进行抽样（5%）测定，取平均K值及允许公差值为应变片的灵敏系数，有时称“标称灵敏系数”。一般情况下 $K \approx 2.0$.

5.横向效应与横向灵敏系数

将金属丝绕成敏感栅构成应变片后，在轴向单向应力作用下，由于敏感栅“横栅段”（圆弧或直线）上的应变状态不同于敏感栅“直线段”上的应变，使应变片敏感栅的电阻变化较相同长度直线金属丝在单向应力作用下的电阻变化小，因此，灵敏系数有所降低，这种现象称为应变片的横向效应。如图所示。



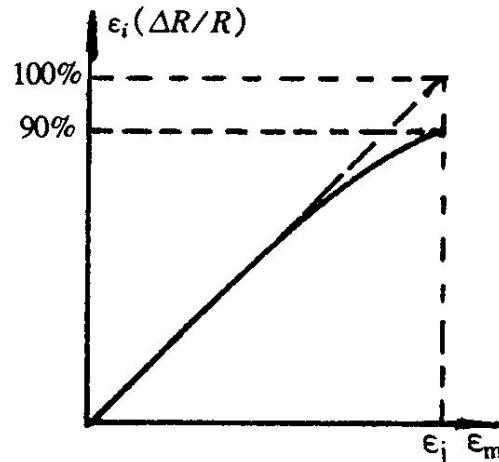
6. 机械滞后

应变片粘贴在试件上，应变片的指示应变 ε_i 与试件的机械应变 ε_m 之间应当是一确定的关系。但在实际应用时，在加载和卸载过程中，对于同一机械应变 ε_j ，应变片卸载时的指示应变高于加载时的指示应变，这种现象称为应变片的机械滞后，如图所示；其最大差值 $\Delta\varepsilon_m$ 称为应变片的机械滞后值。

应变片的机械滞后

7. 应变极限

对于已粘贴好的应变片，其应变极限是指在一定温度下，指示应变 ϵ_m 与受力试件的真实应变 ϵ_i 的相对误差达到规定值（一般为10%）时的真实应变 ϵ_j ，如图所示



应变极限

8. 零漂和蠕变

粘贴在试件上的应变片，温度保持恒定，在试件不受力（即无机械应变）的情况下，其电阻值（即指定应变）随时间变化的特性称为应变片的零漂；如果应变片承受恒定机械应变（ $1000\mu\varepsilon$ 内）长时间作用，其指示应变随时间变化的特性称为应变片的蠕变。

4.3 动态特性

应变测试中，应变片的指示应变是敏感栅覆盖面积下的轴向平均应变。

- 静态测试时，应变片能正确反映它所处受力试件内各点的应变；
- 动态测试时，应变是以应变波的形式沿应变片的敏感栅的长度方向传播，因而应变片反映的平均应变与瞬时应变有一定差异，产生动态误差。

(1)受力试件内的应变波为阶跃变化时，应变片对其响应如图2 (b) (理论响应) 和图2(c) (实际响应) 所示。

响应特性用上升时间 t_r 表示

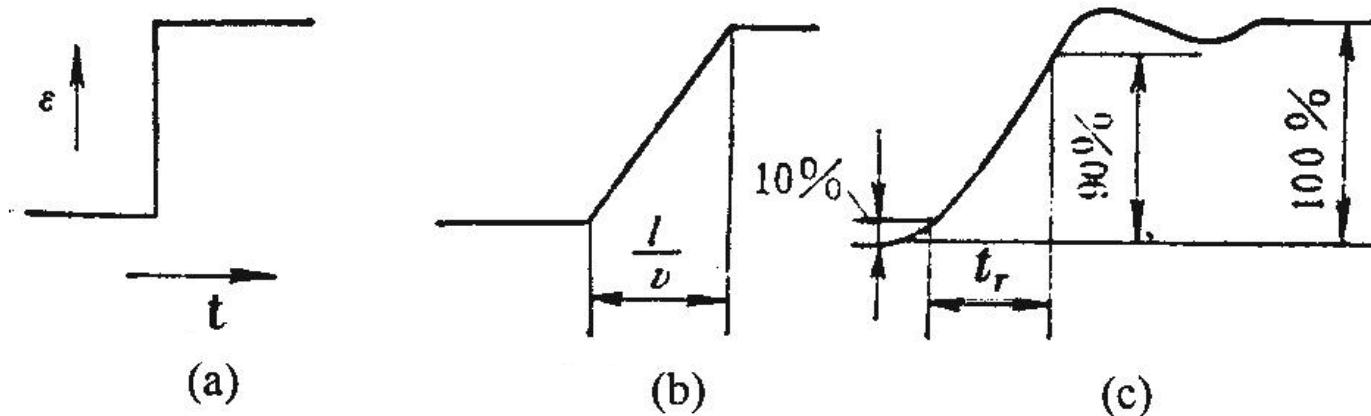
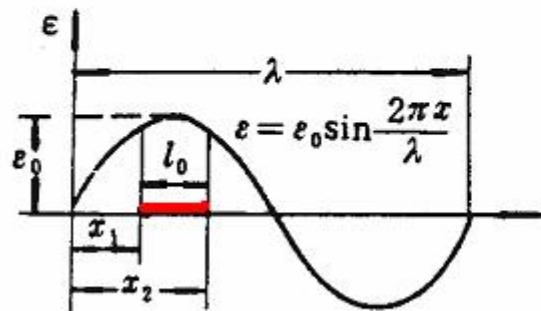
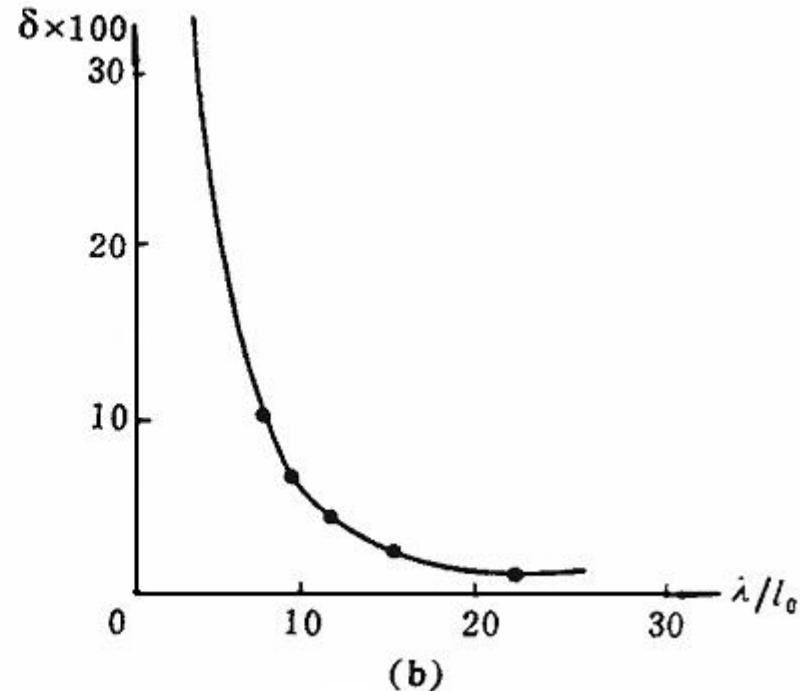


图2应变片对阶跃应变的响应特性

(2) 受力试件内的应变波为正弦变化时, 考虑应变波峰值处应变片(红色, 长度 l_0)的响应情况如图所示。



(a)



应变片对正弦应变波的响应特性与误差曲线

设沿试件内传播的应变波为 $\varepsilon = \varepsilon_0 \sin(2\pi x/\lambda)$

对应变波幅值 ε_0 , 应变片响应的应变 (平均应变) ε_p 为

$$\begin{aligned}\varepsilon_p &= \frac{\int_{x_1}^{x_2} \varepsilon_0 \sin(2\pi x/\lambda) dx}{x_2 - x_1} = -\frac{\lambda}{2\pi l_0} \varepsilon_0 [\cos(2\pi x_2/\lambda) - \cos(2\pi x_1/\lambda)] \\ &= \frac{\lambda}{\pi l_0} \varepsilon_t \sin(\pi l_0/\lambda)\end{aligned}$$

应变波幅值测量的相对误差

$$e = \frac{\varepsilon_p - \varepsilon_t}{\varepsilon_t} = \frac{\lambda}{\pi l_0} \sin(\pi l_0/\lambda) - 1$$

当 $n = \lambda/l_0 = 10 \sim 20$ 时, $\delta = 1.6\% \sim 0.4\%$

$\delta < 2\%$ 时, 应变片的响应频率

$$f = \left(\frac{1}{10} \sim \frac{1}{20} \right) \frac{v}{l_0}$$

4.5 温度误差及其补偿

1. 温度误差

(1) 环境温度变化 Δt , 由于敏感栅材料的电阻温度系数所引起的应变片电阻的相对变化 $\Delta R_{t\alpha} / R$

$$R_t = R(1 + \alpha \Delta t) = R + R\alpha \Delta t = R + \Delta R_{t\alpha}$$

$$\Delta R_{t\alpha} / R = \alpha \Delta t$$

折合成附加应变

$$\varepsilon_{t\alpha} = \frac{\Delta R_{t\alpha} / R}{K} = \alpha \Delta t / K$$

(2) 环境温度变化 Δt , 由于敏感栅材料与试件材料线膨胀系数不同, 应变片产生附加拉伸(或压缩)变形, 引起应变片电阻的相对变化, $\Delta R_{t\beta} / R$

- 敏感栅 $l_{ts} = l(1 + \beta_s \Delta t) = l + l \beta_s \Delta t = l + \Delta l_{ts}$

- 试件 $l_{tm} = l(1 + \beta_m \Delta t) = l + l \beta_m \Delta t = l + \Delta l_{tm}$

- 附加变形 (设 $\beta_m > \beta_s$) :

$$\Delta l_{t\beta} = \Delta l_{tm} - \Delta l_{ts} = l(\beta_m - \beta_s) \Delta t$$

- 附加应变: $\varepsilon_{t\beta} = \Delta l_{t\beta} / l = (\beta_m - \beta_s) \Delta t$

◆ 折合成电阻变化

$$\Delta R_{t\beta} / R = K \varepsilon_{t\beta} = K(\beta_m - \beta_s) \Delta t$$

综合考虑以上两种情况：

◆ 总附加电阻变化

$$\frac{\Delta R_t}{R} = \frac{\Delta R_{t\alpha}}{R} + \frac{\Delta R_{t\beta}}{R} = [\alpha + K(\beta_m - \beta_s)]\Delta t$$

◆ 总附加应变

$$\varepsilon_t = \varepsilon_{t\alpha} + \varepsilon_{t\beta} = \alpha\Delta t / K + (\beta_m - \beta_s)\Delta t$$

2. 温度补偿

1) 应变片温度自补偿（选择式自补偿应变片）

(1) 单丝自补偿应变片

补偿条件: $\varepsilon_t = \alpha \Delta t / K + (\beta_m - \beta_s) \Delta t = 0$

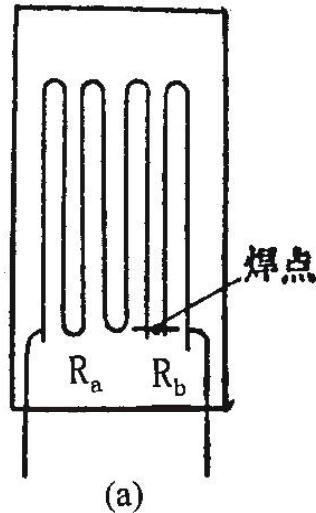
即

$$\alpha = -K(\beta_m - \beta_s)$$

此时温度变化所引起的附加应变 ε_t 得到自动补偿（消除）

(2) 双金属敏感栅应变片（组合式自动补偿应变片）

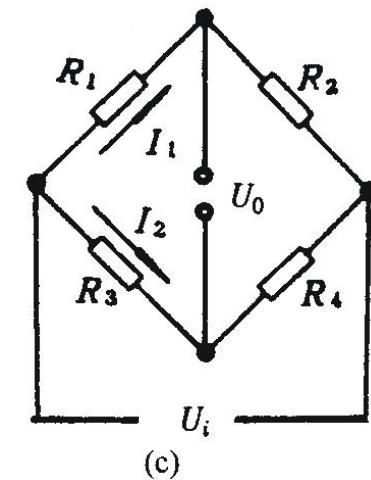
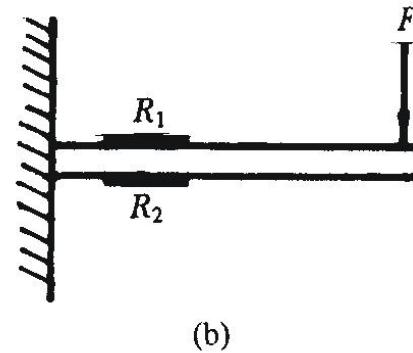
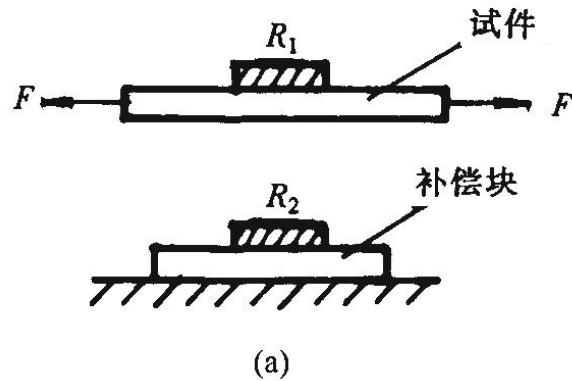
两段敏感栅 R_a 和 R_b 电阻温度系数相反，串联连接，如图 (a) 所示。当 $\Delta R_{at}=\Delta R_{bt}$ 时，可实现温度补偿通过调节两种敏感栅的长度比以便在一定受力试件材料上于一定温度范围内获得较好的温度自补偿。



双金属线补偿法

2) 电路补偿法

(1) 差动电桥线路补偿, 如图所示



电路补偿法

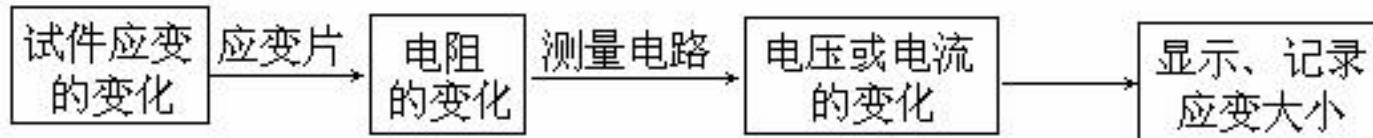
(2) 热敏电阻电路补偿, 如图所示

热敏电阻温度补偿法

当温度升高应变片的灵敏度下降时, 负温度系数热敏电阻 R 也下降, 使电桥的输入电压升高, 提高电桥的输出电压。选择分流电阻 R , 可以使应变片灵敏度下降对电桥输出影响得到很好的补偿。

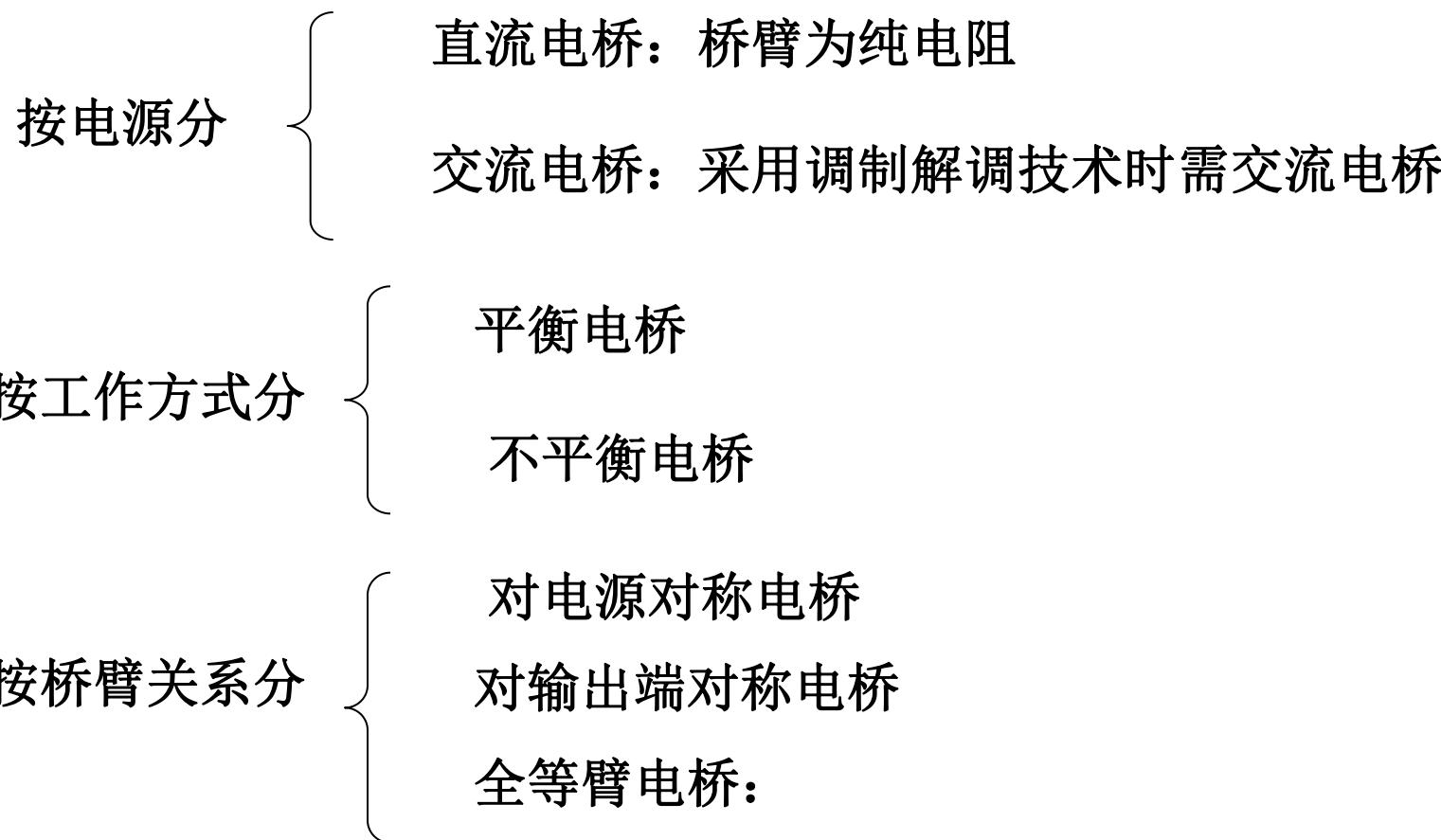
4.4 测量电路

电阻应变式传感器的测量电路常采用电桥电路。



应变片可以把应变的变化转换为电阻的变化，为显示与记录应变的大小，还要把电阻的变化再转换为电压或电流的变化，完成上述作用的电路称为电阻应变式传感器的信号调节电路，一般采用测量电桥。

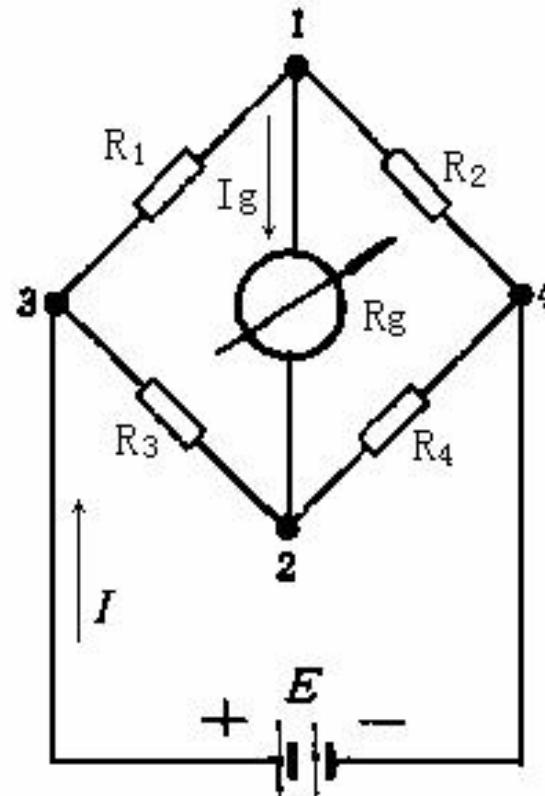
应变电桥的分类



一、平衡电桥

*计算 I_g

*指出电桥平衡条件



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

平衡电桥的工作原理

$$(R_2 + \Delta R_2)R_3 = (R_1 + \Delta R_1)R_4$$

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

在测量前和测量时需要作两次平衡，故多用于静态应变仪中。

缺点：若应变为动态量，则电阻变化较快，此时只能采取不平衡电桥法。

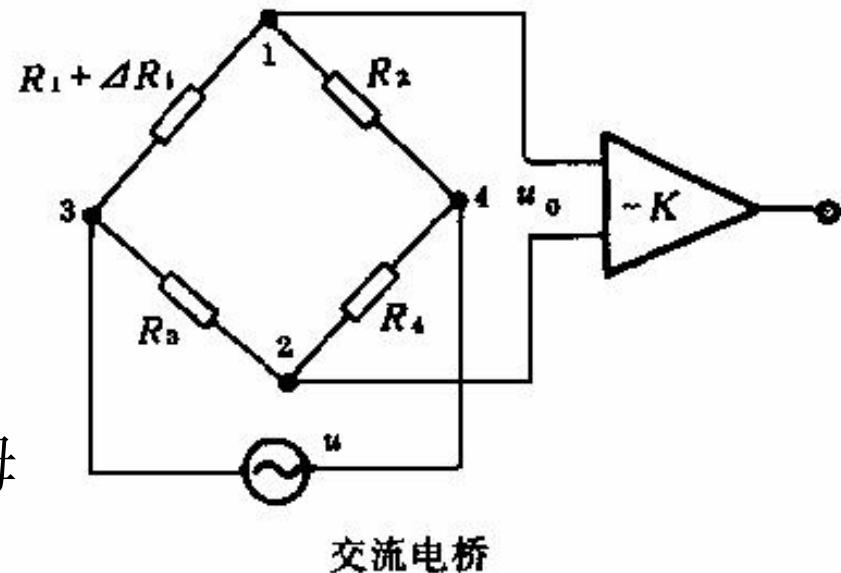
二、不平衡电桥

$$U_0 = U_1 - U_2 = \frac{R_1 + \Delta R_1}{R_1 + \Delta R_1 + R_2} U - \frac{R_3}{R_3 + R_4} U = \frac{\Delta R_1 \cdot R_4}{(R_1 + \Delta R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} U$$

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

设 $n = R_2 / R_1$ ，并考虑电桥初始平衡条件 $R_2 / R_1 = R_4 / R_3$ ，略去分母中的微小项 $\Delta R_1 / R_1$ ，则有

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



电桥的电压灵敏度为

$$S_u = \frac{U_0}{\Delta R_1} = U \frac{n}{(1+n)^2}$$

由上式可知：

- (1) **S_u**正比于电桥供电电压，但电桥电压的提高受应变片的允许温升及电桥电阻的温度误差的限制，所以一般供桥电压为1—3V。
- (2) **S_u**是桥臂电阻比值**n**的函数，和电桥各臂的初始比值有关。

思考题：求最大灵敏度。

三、电桥电路的非线性误差及其补偿

实际的非线性特性曲线与理想的线性特性曲线的偏差称为绝对非线性误差。

造成非线性误差的原因主要是：当应变片的阻值变化 ΔR 过大，而使 $\Delta R / R$ 不可忽略时， $U=f(\varepsilon, R)$ 是非线性的。

以 $R_1 = R_2$ 、 $R_3 = R_4$ 的对称情况为例求非线性误差 r 。

理想情况下：

$$U'_{\circ} = \frac{1}{4} U \frac{\Delta R_1}{R_1}$$

$$\begin{aligned}\gamma &= \frac{U_0 - U'_{\circ}}{U'_{\circ}} = \frac{U_0}{U'_{\circ}} - 1 \\ &= \frac{1}{\left(1 + \frac{1}{2} \frac{\Delta R_1}{R_1}\right)} - 1 \\ &\approx 1 - \frac{1}{2} \frac{\Delta R_1}{R_1} - 1 = -\frac{1}{2} \frac{\Delta R_1}{R_1}\end{aligned}$$

不平衡电桥的输出: $U_o = U_i \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} - \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right) = U_i \frac{R_2 R_3 - R_1 R_4}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)}$

考虑一般情况, 四臂都可引入电阻增量,

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

(当 $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$)

(当 $\Delta R_i \ll R$)

$$\begin{aligned} &= U_i \frac{R(\Delta R_1 - \Delta R_2 - \Delta R_3 + \Delta R_4) + \Delta R_1 \Delta R_4 - \Delta R_2 \Delta R_3}{(2R + \Delta R_1 + \Delta R_2)(2R + \Delta R_3 + \Delta R_4)} \\ &= \frac{U_i}{4} \left(\frac{\Delta R_1}{R} - \frac{\Delta R_2}{R} - \frac{\Delta R_3}{R} + \frac{\Delta R_4}{R} \right) \\ &= \frac{U_i}{4} K(\varepsilon_1 - \varepsilon_2 - \varepsilon_3 + \varepsilon_4) \end{aligned}$$

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

物理意义：当电阻变化量远小于电阻大小时，输出电压与应变成线性关系。

(1) 单臂工作电桥，设 $\Delta R_1 = \Delta R, \quad \Delta R_2 = \Delta R_3 = \Delta R_4 = 0$ ，则

$$U_o = \frac{U_i}{4} K \varepsilon$$

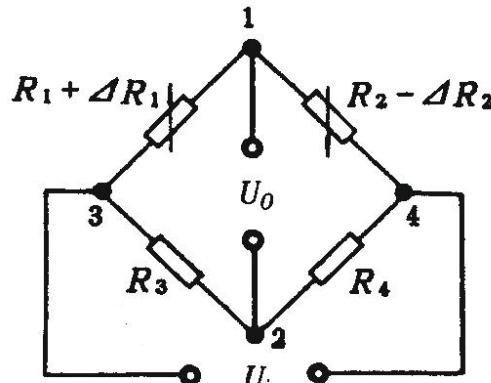
(2) 差动电桥

◆ 半桥差动: $\Delta R_1 = -\Delta R_2 = \Delta R$, $\Delta R_3 = \Delta R_4 = 0$, 如图 (a) 所示,

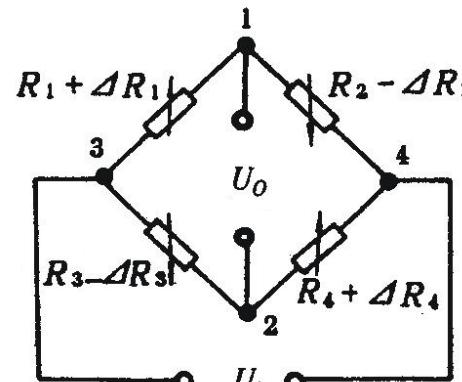
$$U_o = \frac{U_i}{2} \frac{\Delta R}{R} = \frac{U_i}{2} K\varepsilon$$

◆ 全桥差动: $\Delta R_1 = -\Delta R_2 = -\Delta R_3 = \Delta R_4 = \Delta R$, 如图 (b) 所示,

$$U_o = U_i \frac{\Delta R}{R} = U_i K\varepsilon$$



(a)



(b)

差动电桥电路

四、恒流源电桥

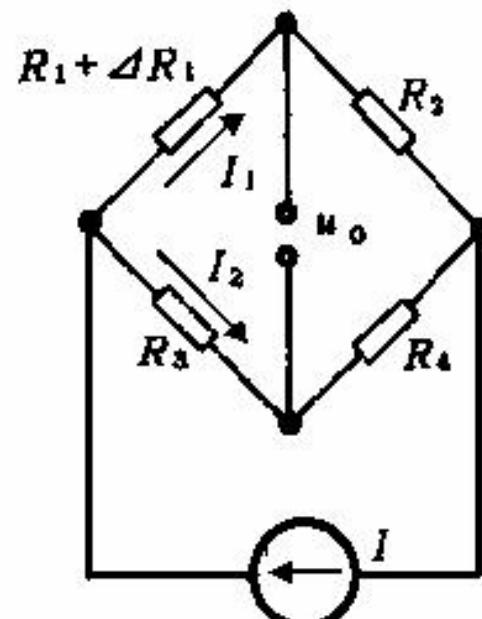
优点：能够减小非线性误差。

区别

{

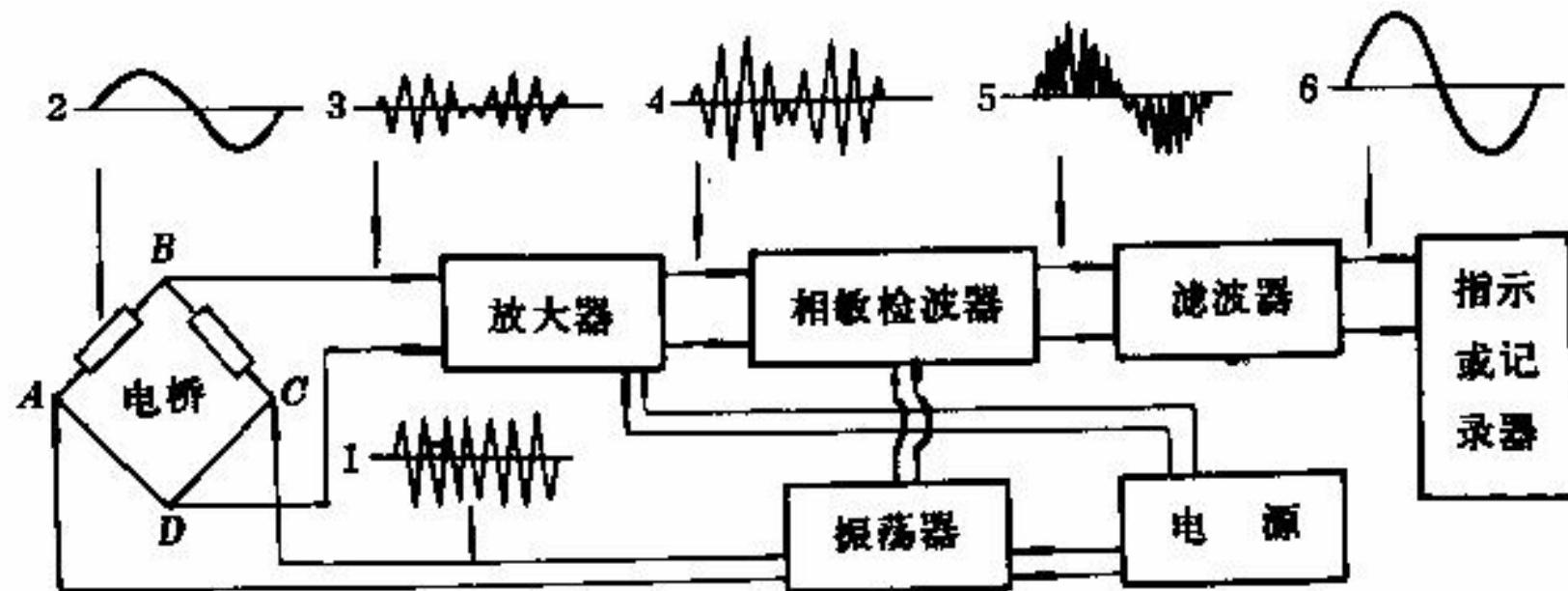
恒压源：两端电压恒定

恒流源：总电流恒定



恒流源电桥

4.6 电阻应变仪 如图所示

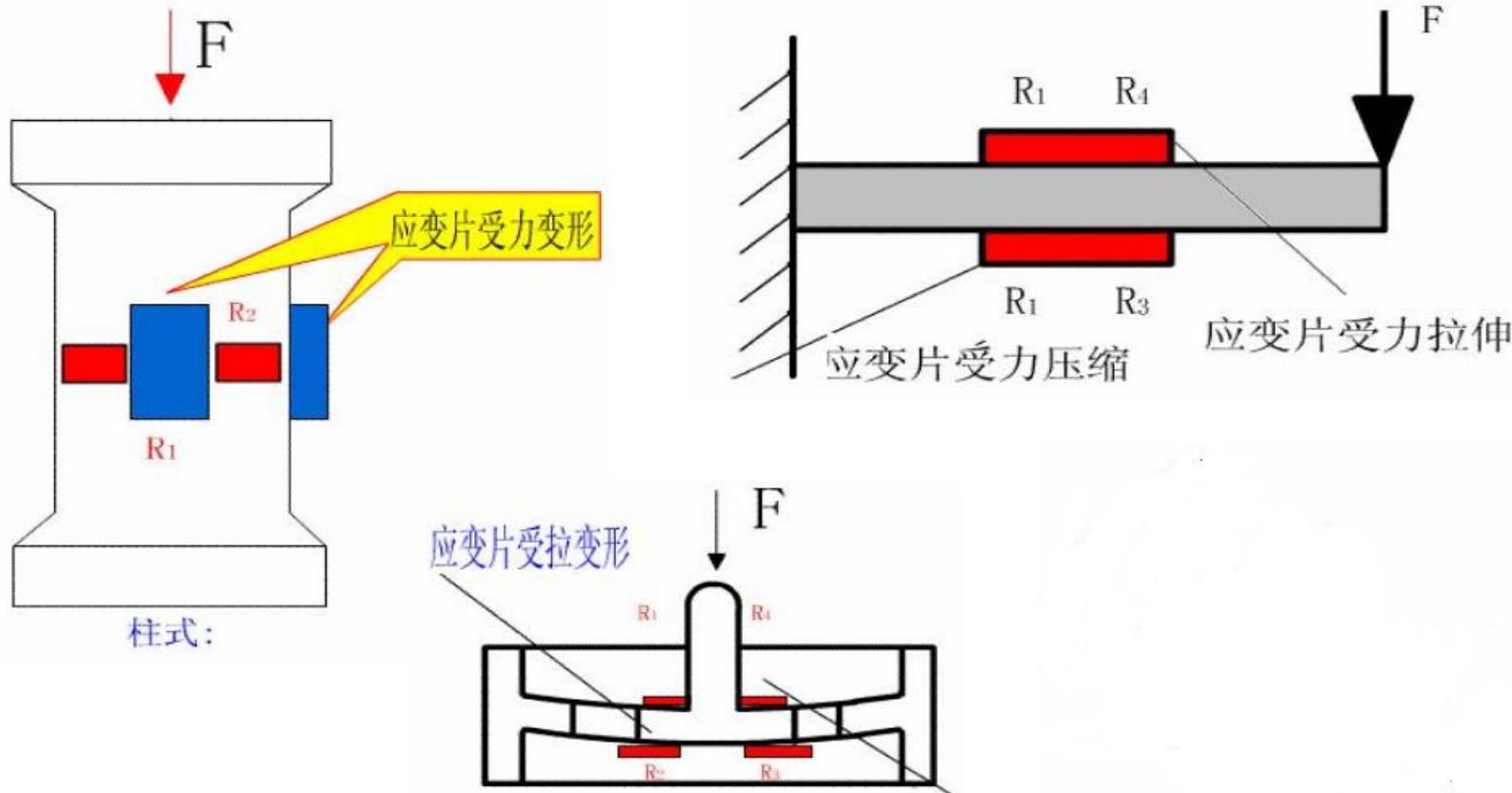


应变仪组成方框图

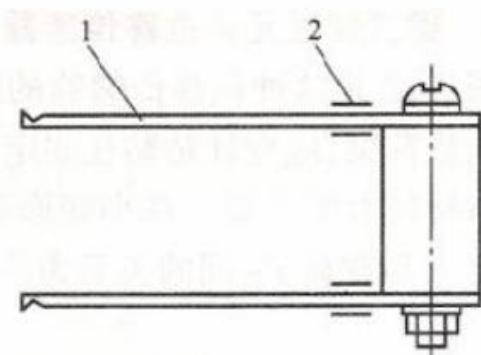
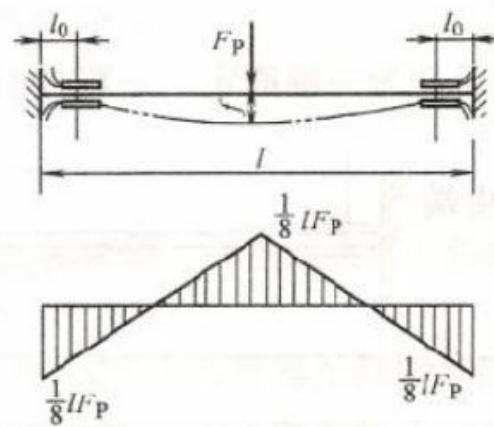
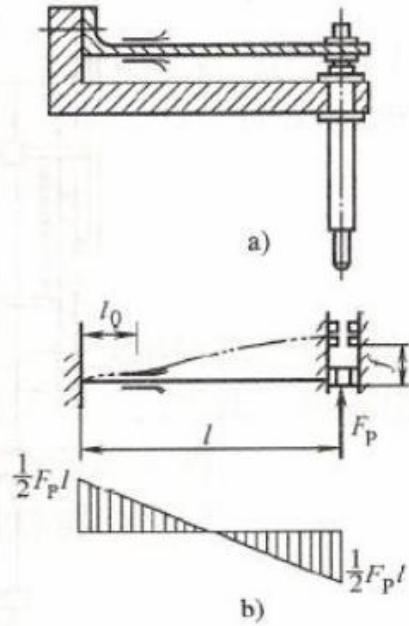
- 1—供桥电源波形（载波） 2—被测信号波形（调制波） 3—电桥输出波形（已调波）
4—放大后波形 5—相敏检波器解调后波形 6—经滤波器后波形

4.6 电阻应变式传感器应用举例

测力传感器

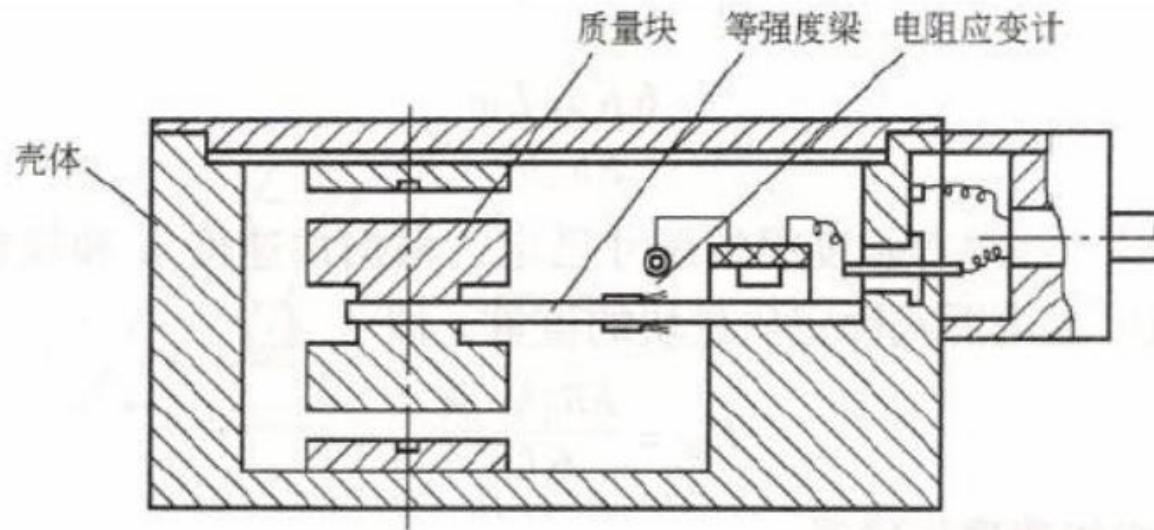


位移传感器

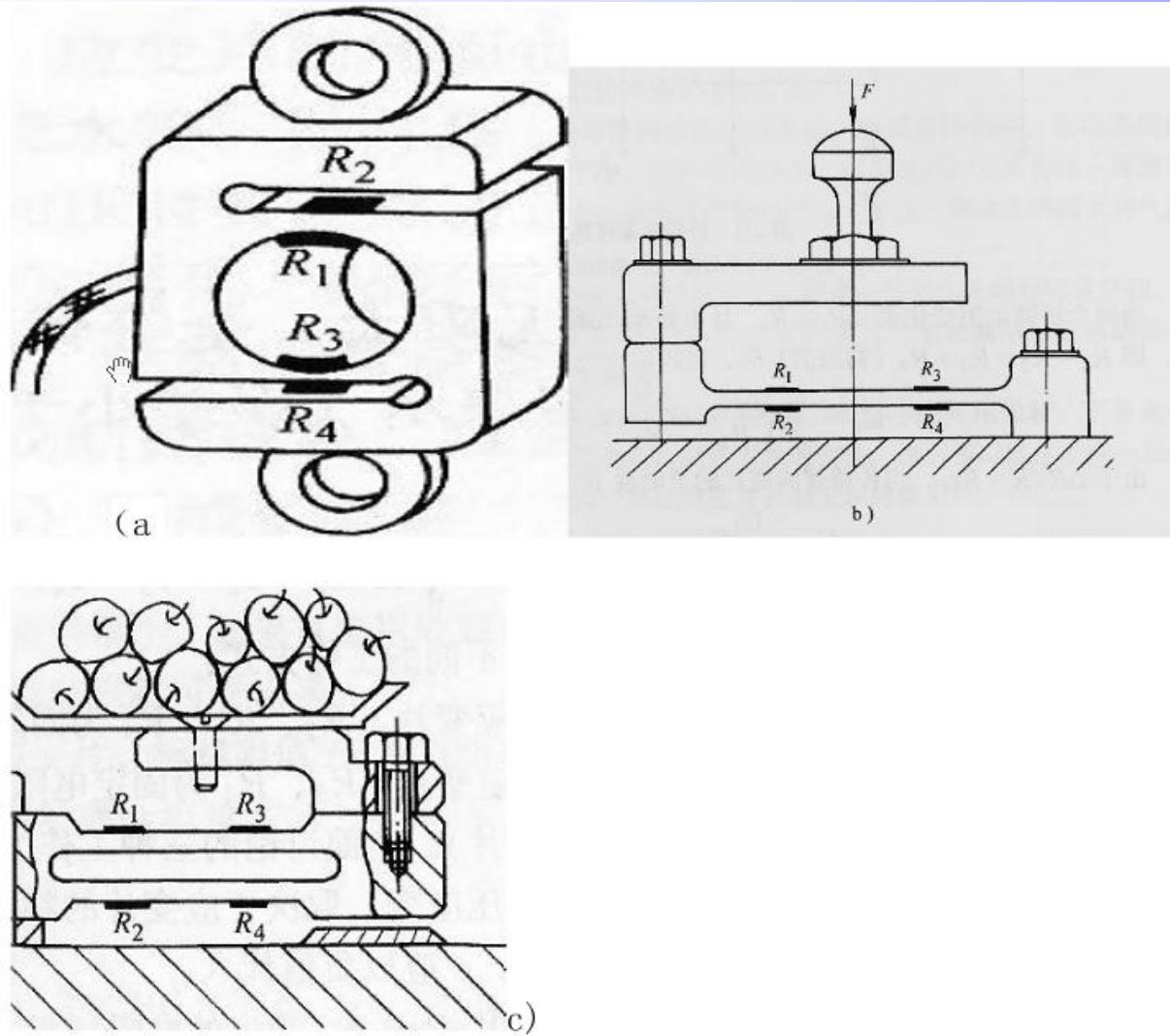


加速度计

应变式加速度传感器结构图

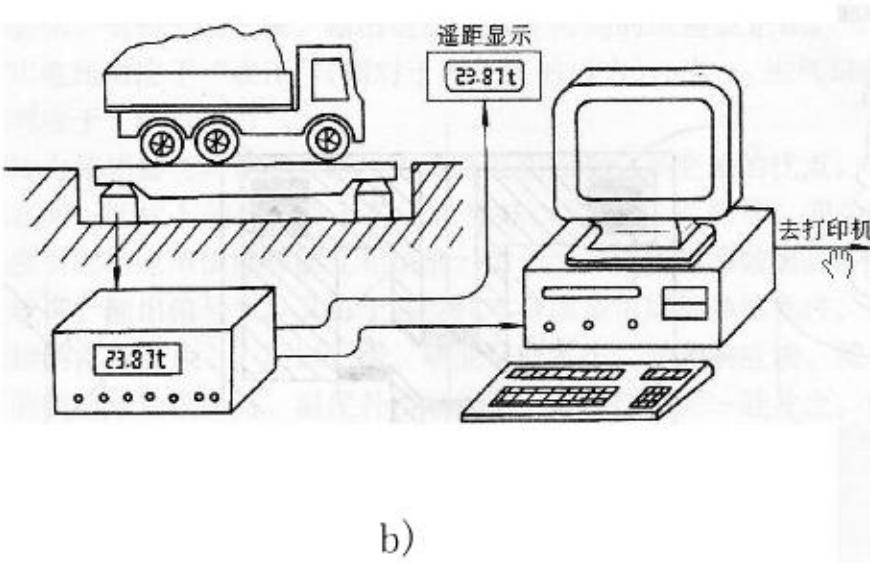


在低频（10--60Hz）振动测量中得到广泛的应用，
但不适用于频率较高的振动和冲击。



应变式测力传感器的几种形式

a) 环式 b)、c) 悬臂梁式



b)

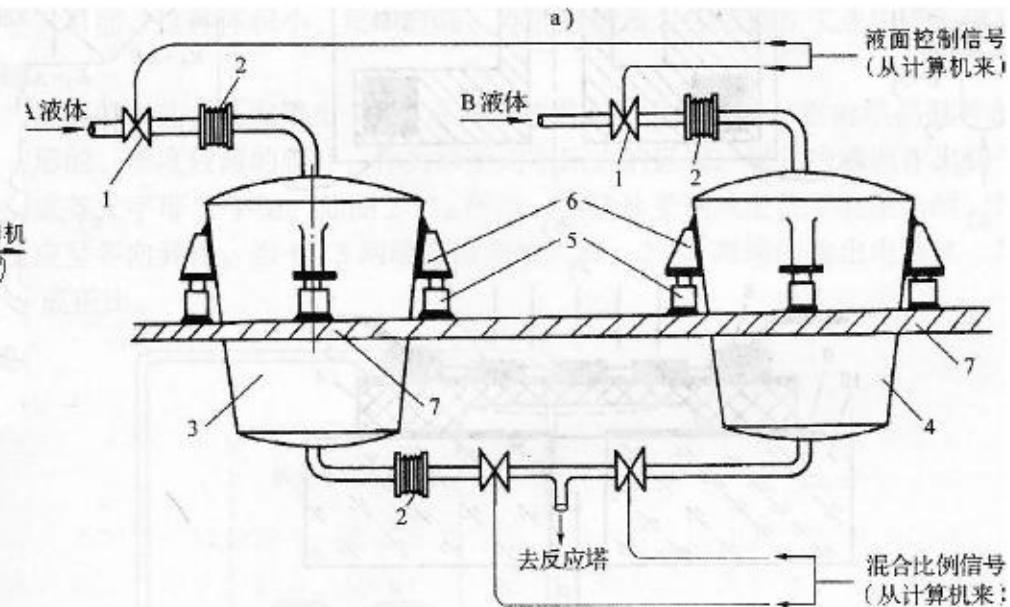
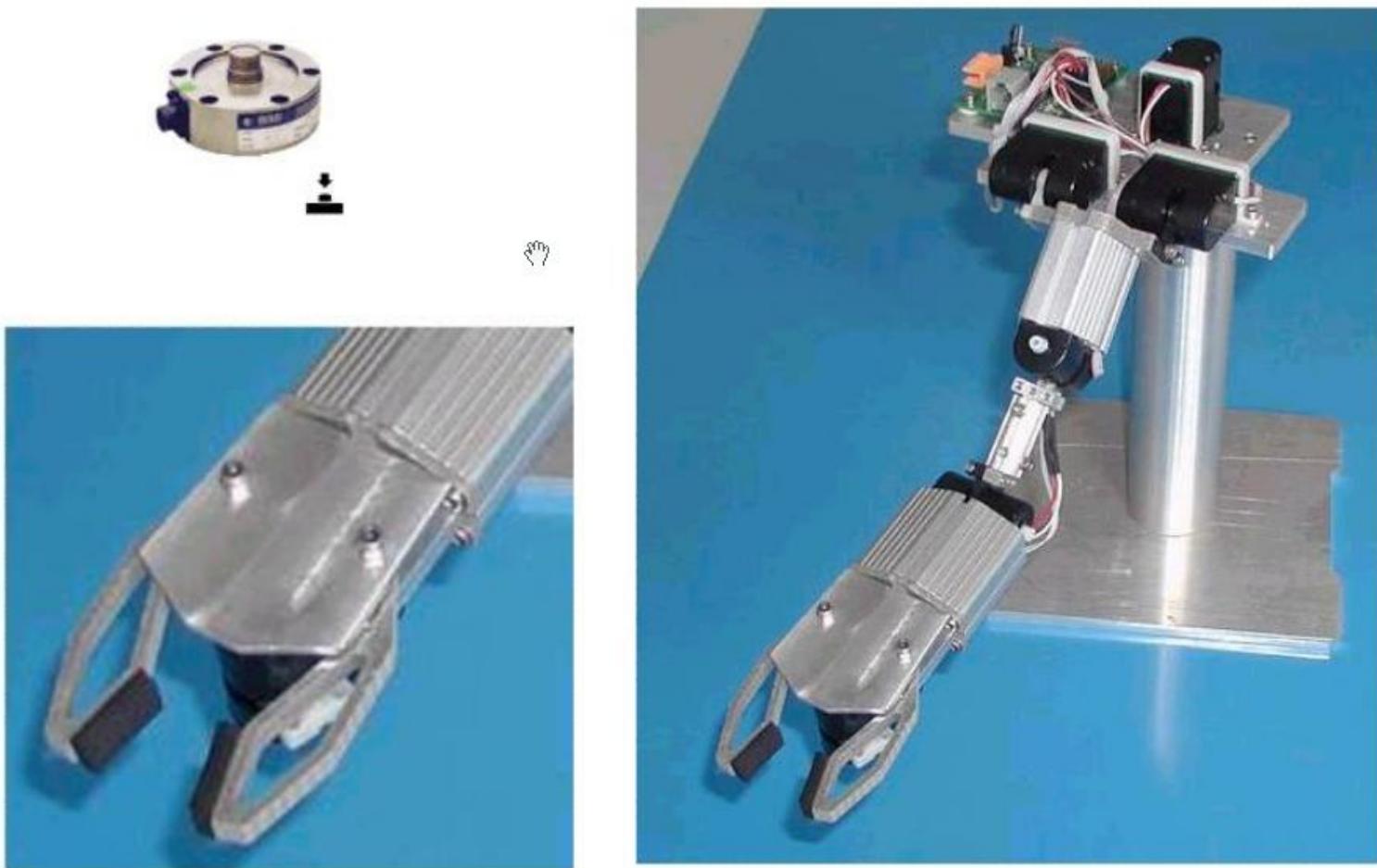


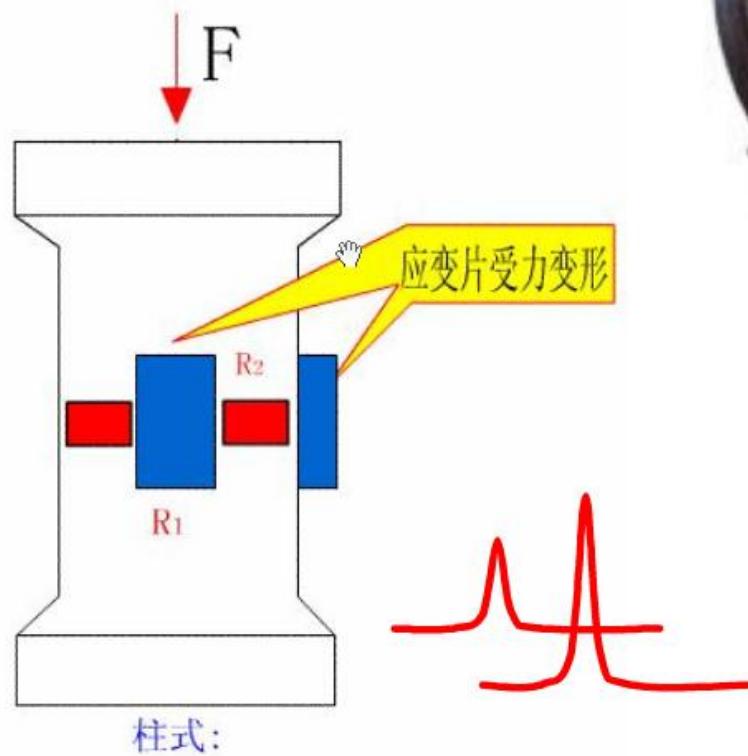
图 荷重传感器的应用

a) 汽车衡 b) 液罐称

案例：机器人握力测量



案例：冲床生产记数和生产过程监测

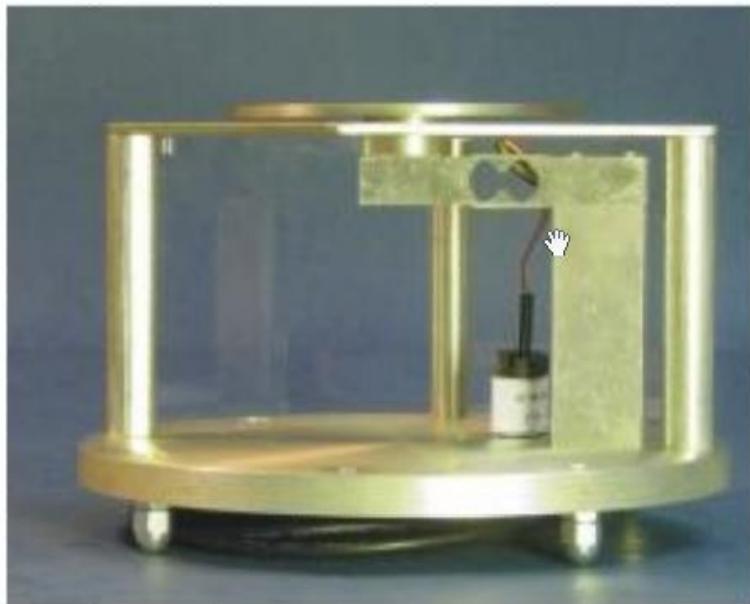


案例：电子称



原理

将物品重量通过悬臂梁转化结构变形再通过应变片转化为电量输出。



电阻应变传感器测量系统在数控车床切削力测量中的应用，

王德杰，重型机械科技，No.4, 2006

