

传感器技术

主讲人： 吴琼水

武汉大学电子信息学院
光谱成像实验室

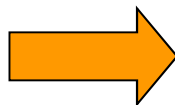
第2章

应变式传感器

思考： 如何设计一个电子称？



物理重量



指示表数值

思考：如何设计一个电子称？

武汉大学电子信息学院传感器技术课程组

制作人：
qswu
2016

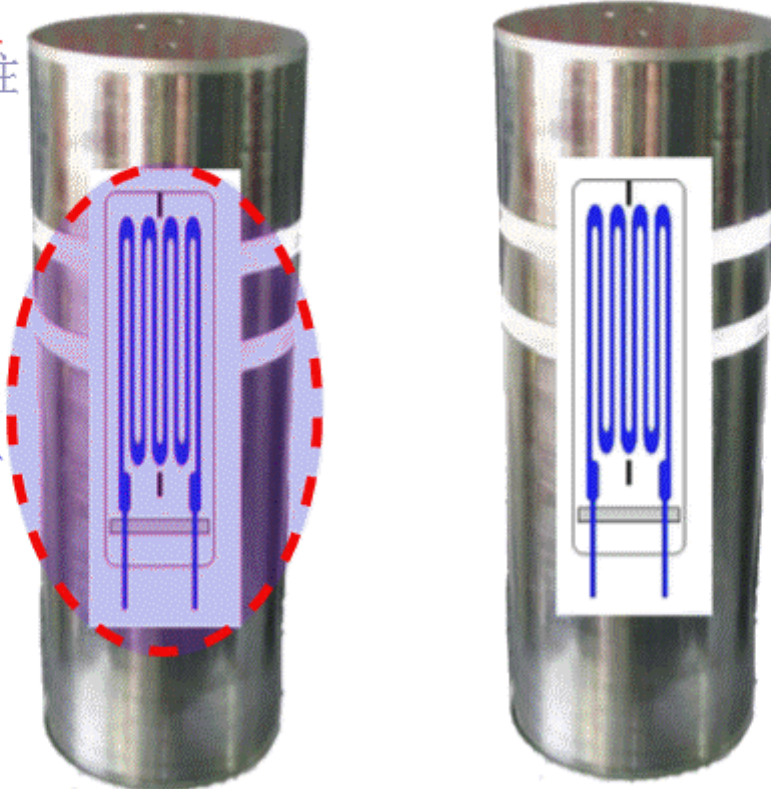


敏感元件

钢柱

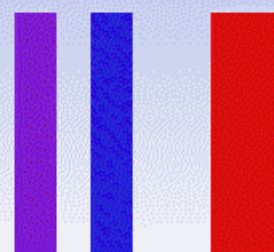
转换元件

金属应变片



金属应变丝

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



L S 电阻R

柱式力传感器示意图

力 \Rightarrow 应变 \Rightarrow 电信号

第2章 应变式传感器

传感器技术

应变式传感器的核心元件是电阻应变片，它可将试件上的应力变化转换成电阻变化。

应变效应

导体或半导体在受到外界力的作用时，产生机械变形，机械变形导致其阻值变化，这种因形变而使阻值发生变化的现象称为应变效应。

应变效应实验演示



取一根细电阻丝，两端接上一台3位半位数字式欧姆表（分辨率为1/2000），记下其初始阻值（图中为 10.01Ω ）。

当我们用力将该电阻丝拉长时，会发现其阻值略有增加（图中增加到为 10.05Ω ）。测量应力、应变、力的传感器就是利用类似的原理制作的。

应变式传感器日常常见应用





应变式传感器

应变式传感器作为测力的主要传感器，测力范围小到肌肉纤维，大到登月火箭，精确度可到 0.01—0.1%。

特点：

- ✓结构简单、精度高、测量范围广、体积小、特性好。
- ✓是目前测量力、力矩、压力、加速度等物理量应用最广泛的传感器之一。

第2章 应变式传感器

传感器技术

2.1 金属应变片式传感器

2.2 压阻式传感器

应用举例



2.1 金属应变片式传感器

以金属丝式应变片为例：

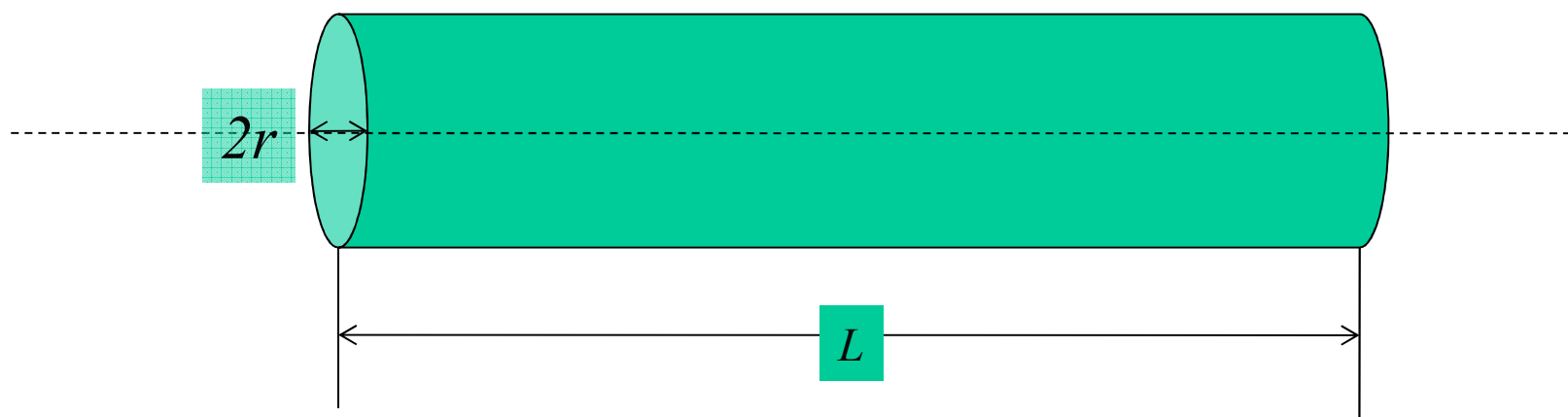
- 基本原理
- 基本测量电路
- 主要特性
- 温度误差及其补偿
- 常用应变式传感器





基本原理

对于一长为 L 、横截面积为 S 、电阻率为 ρ 的金属丝，



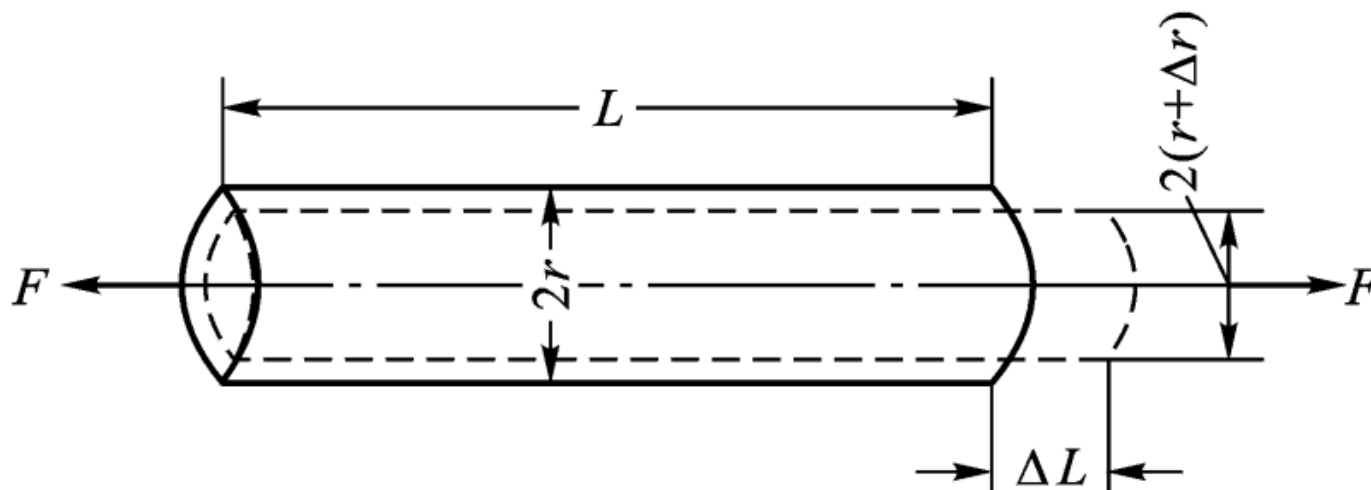
其电阻值 R 为：

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



基本原理

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



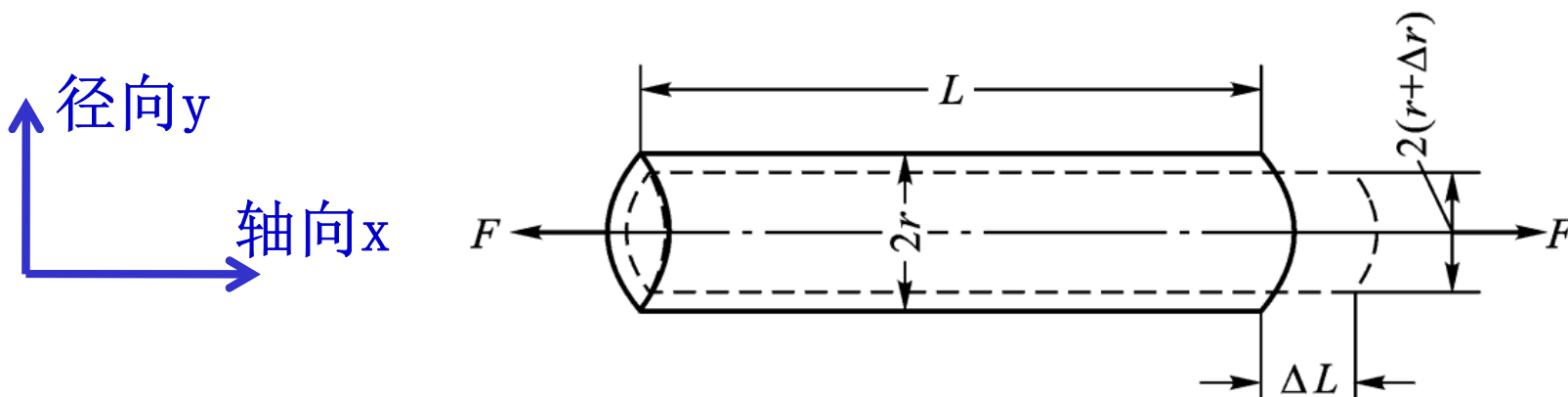
当电阻丝受到轴向拉力 F 作用时，金属丝几何尺寸变化引起电阻的相对变化.

全式微分，电阻值相对变化为：

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



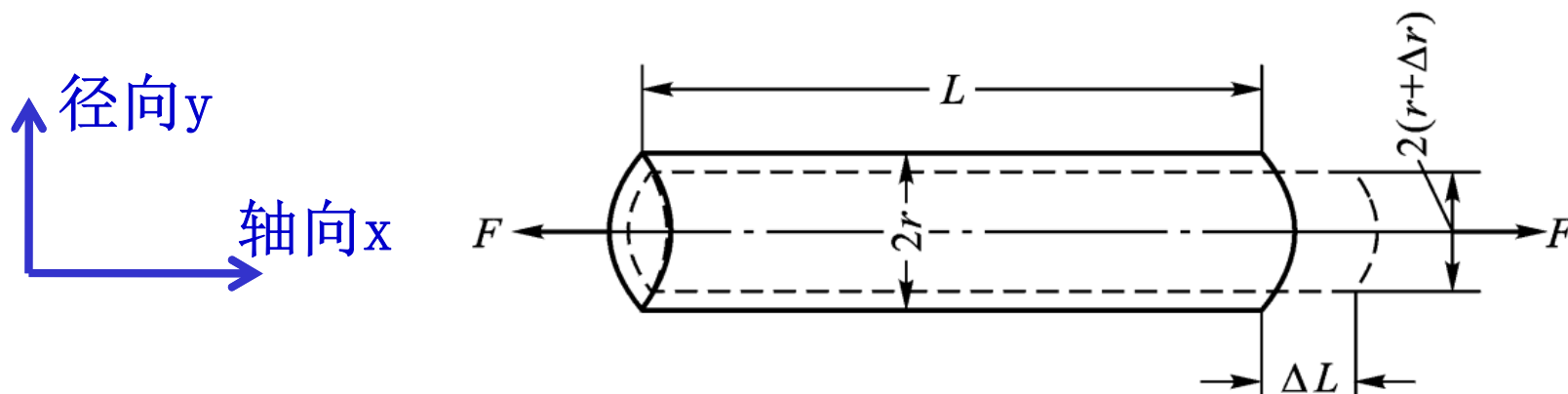
基本原理



$$\begin{aligned}\frac{\Delta R}{R} &= \frac{\Delta L}{L} - \frac{\Delta S}{S} + \frac{\Delta \rho}{\rho} \\ &= \frac{\Delta L}{L} - \frac{2\Delta r}{r} + \frac{\Delta \rho}{\rho}\end{aligned}$$



基本原理



$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta L}{L} - \frac{2\Delta r}{r} + \frac{\Delta \rho}{\rho}$$

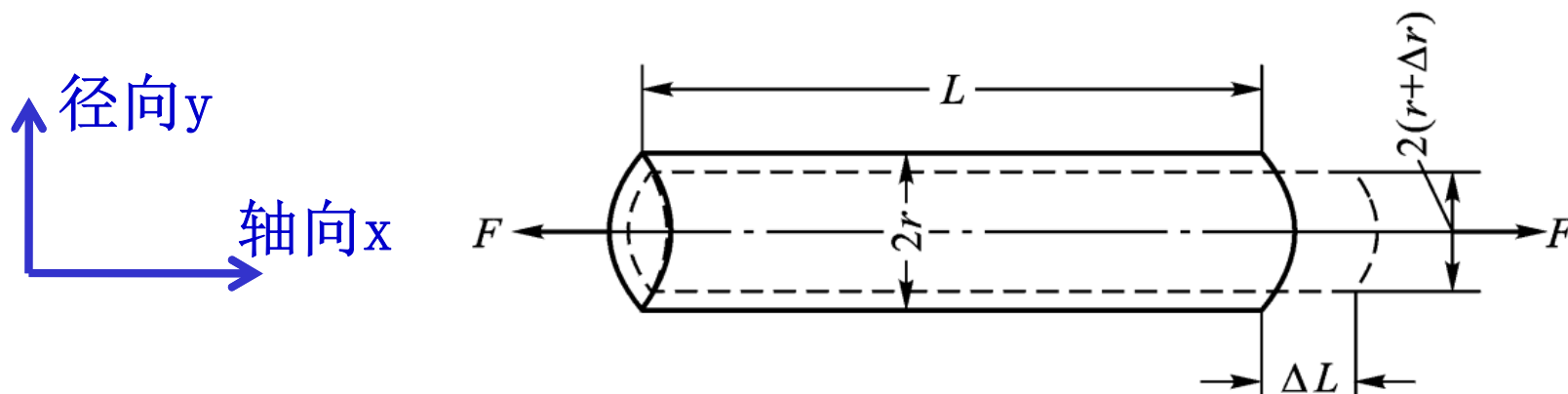
定义应变：

$$\varepsilon_x = \frac{\Delta L}{L}$$
$$\varepsilon_y = \frac{\Delta r}{r}$$

应变是表征物体受外力作用时产生相对变形大、小的无量纲物理量。



基本原理

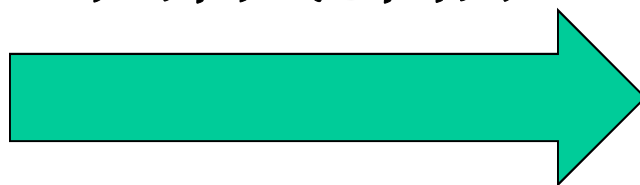


$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta L}{L} - \frac{2\Delta r}{r} + \frac{\Delta \rho}{\rho}$$

$$\varepsilon_x = \frac{\Delta L}{L}$$

$$\varepsilon_y = \frac{\Delta r}{r}$$

在弹性范围内

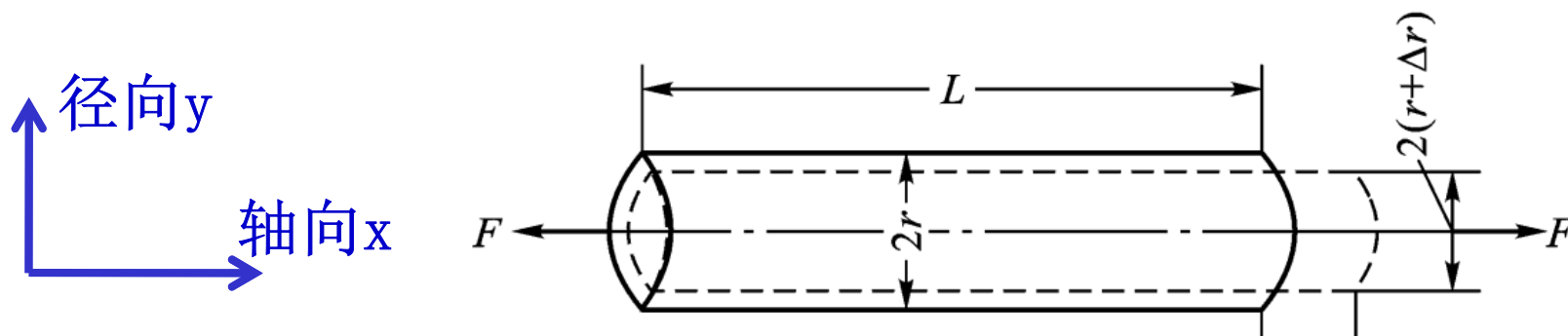


$$\varepsilon_r = \mu \varepsilon_x$$

μ 为金属材料的泊松系数。



基本原理



$$\frac{\Delta R}{R} = [(1 + 2\mu) + C(1 - 2\mu)] \cdot \varepsilon_x$$

R —— 无应变时的电阻值

ΔR —— 有应变时的电阻值变化大小

μ —— 金属材料的泊松比

C —— 金属材料的某个常数

ε_x —— 轴向应变大小

K_S —— 应变灵敏系数

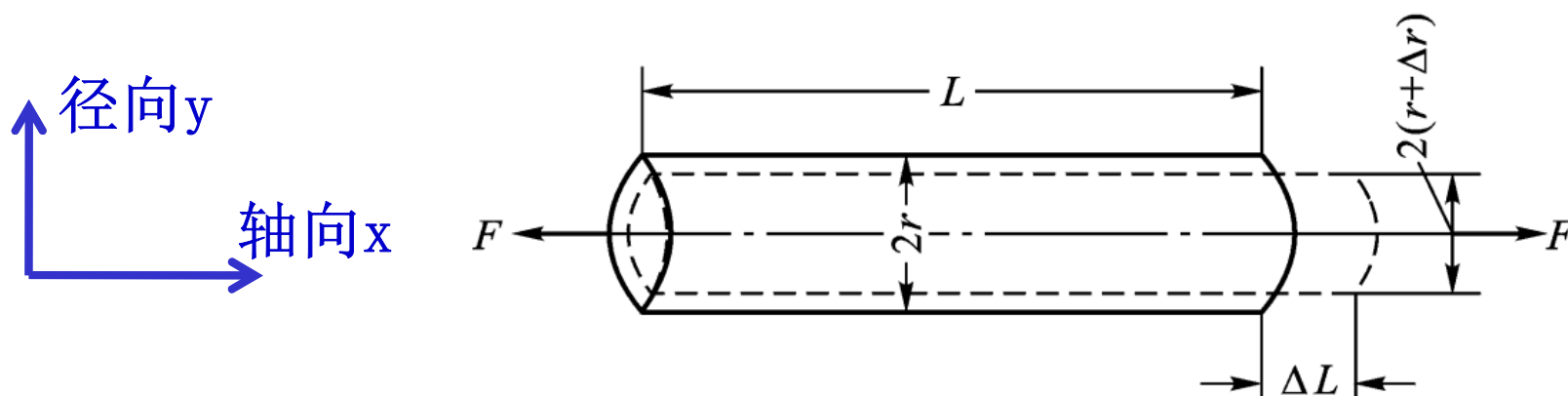
$$\varepsilon_x = \frac{\Delta L}{L}$$

$$K_S = [(1 + 2\mu) + C(1 - 2\mu)]$$

$$\frac{\Delta R}{R} = K_S \cdot \varepsilon_x$$



基本原理

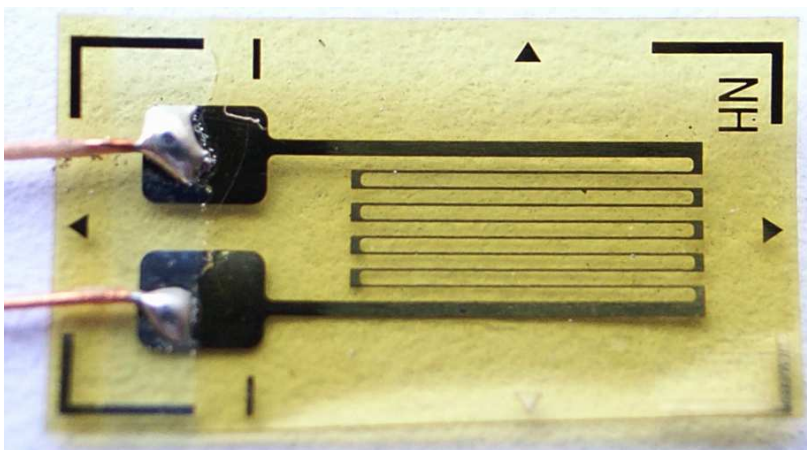


$$\frac{\Delta R}{R} = K_S \cdot \varepsilon_x$$

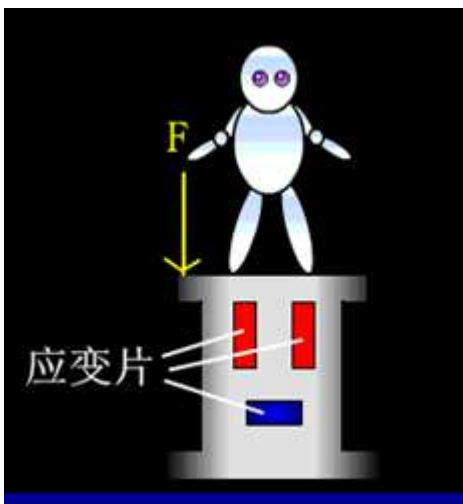
通过弹性元件可将位移、压力、振动等物理量将应力转换为应变进行测量，这是应变式传感器测量应变的基本原理。



基本原理



$$\frac{\Delta R}{R} = K_s \cdot \varepsilon_x$$

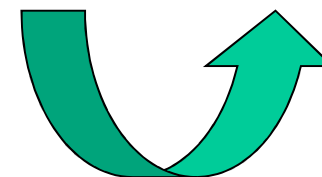




基本结构

金属电阻应变片主要有三种：

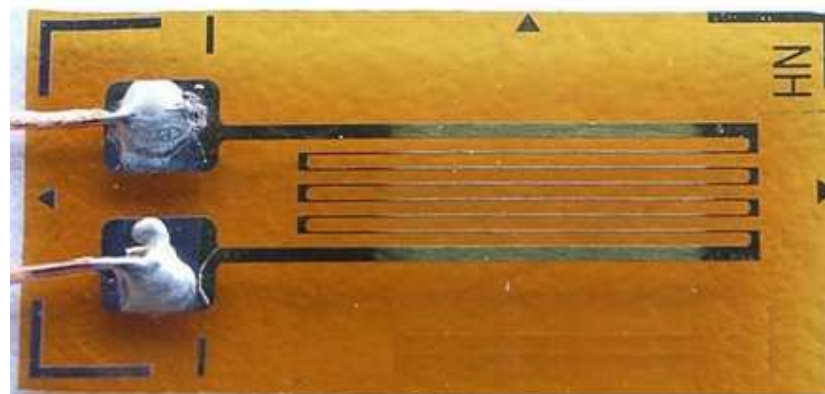
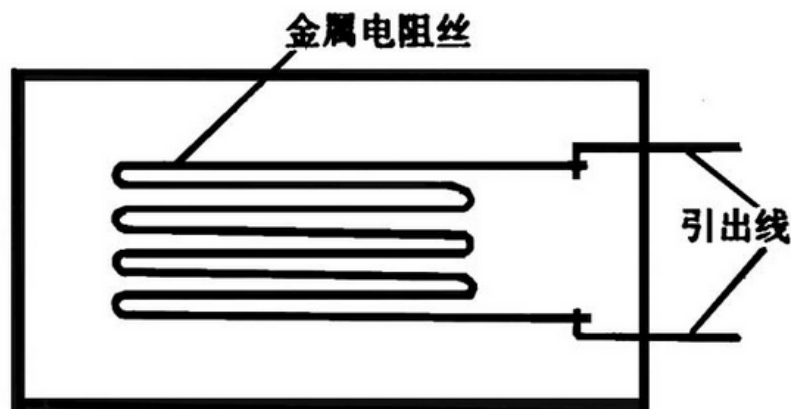
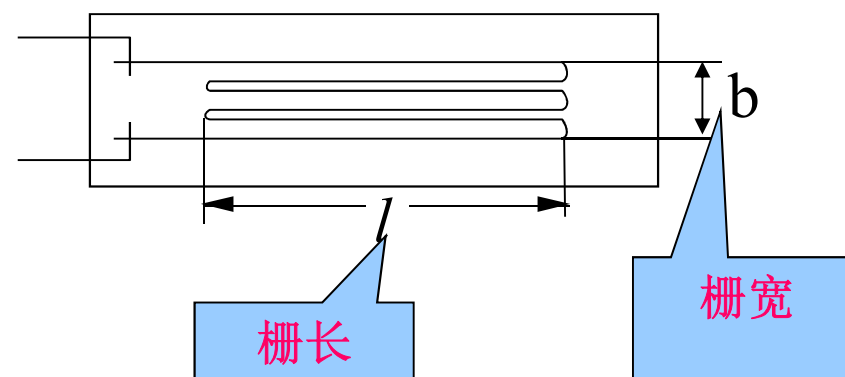
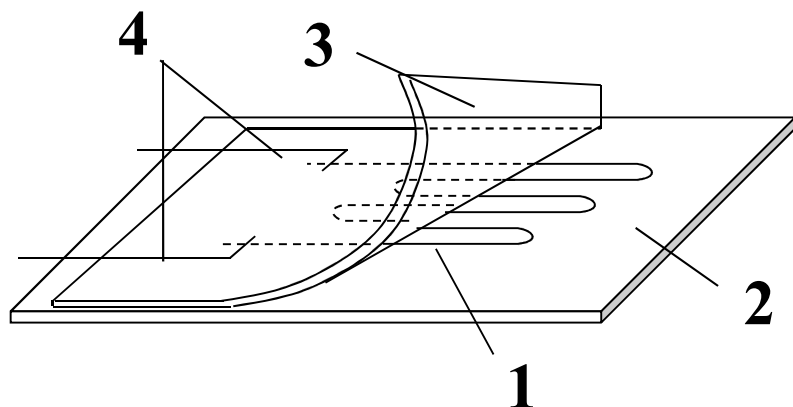
- 金属丝式
- 箔式
- 薄膜式





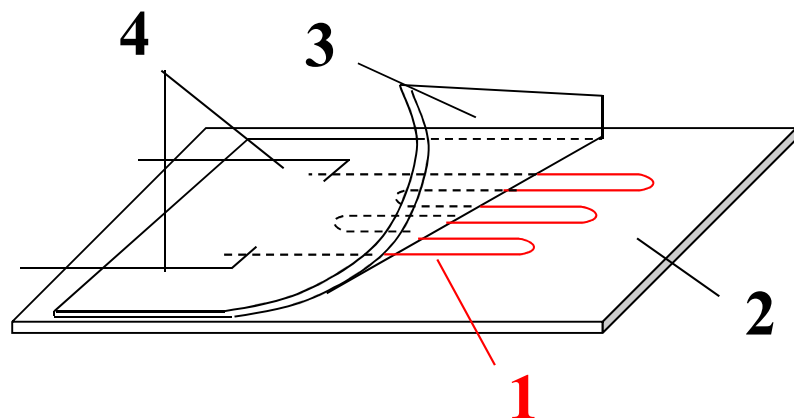
金属丝式

由敏感栅1、基底2、盖片3、引线4和粘结剂等组成。这些部分所选用的材料将直接影晌应变片的性能。因此，应根据使用条件和要求合理地加以选择。





金属丝式



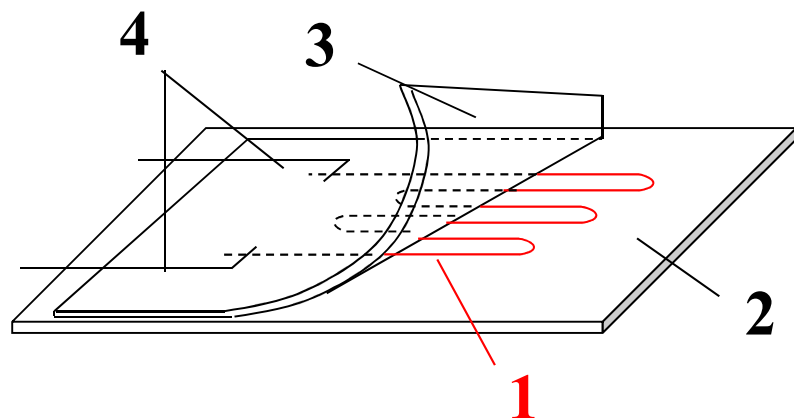
1-敏感栅

由金属细丝绕成栅形。电阻应变片的电阻值为**60Ω**、**120Ω**、**200Ω**等多种规格，以**120Ω**最为常用。

应变片栅长大小关系到所测应变的准确度，应变片测得的应变大小是应变片栅长和栅宽所在面积内的平均轴向应变量。



金属丝式



1-敏感栅

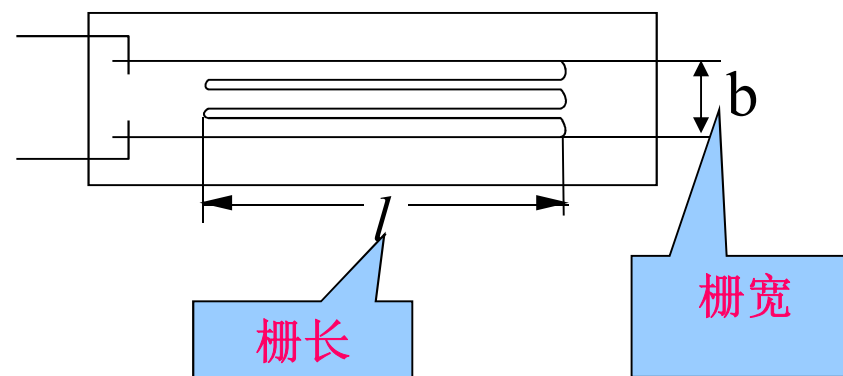
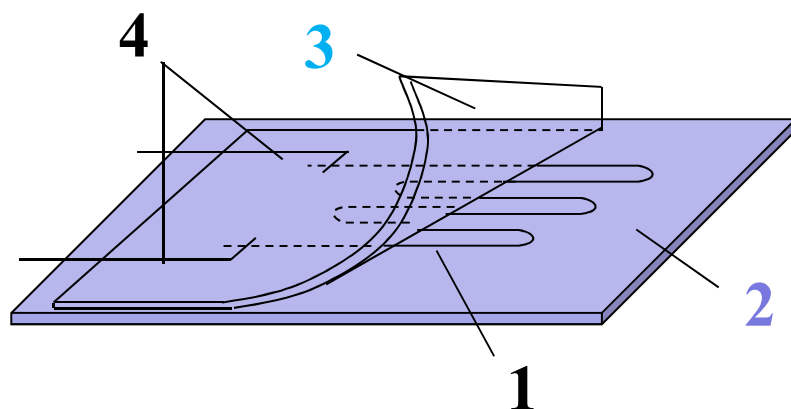
1
对敏感栅的材料的要求：

- ①应变灵敏系数大，并在所测应变范围内保持为常数；
- ②电阻率高而稳定，以便于制造小栅长的应变片；
- ③电阻温度系数要小；
- ④抗氧化能力高，耐腐蚀性能强；
- ⑤在工作温度范围内能保持足够的抗拉强度；
- ⑥加工性能良好,易于拉制成丝或轧压成箔材；
- ⑦易于焊接，对引线材料的热电势小。

对应变片要求必须根据实际使用情况，合理选择。



金属丝式



基底2和盖片3

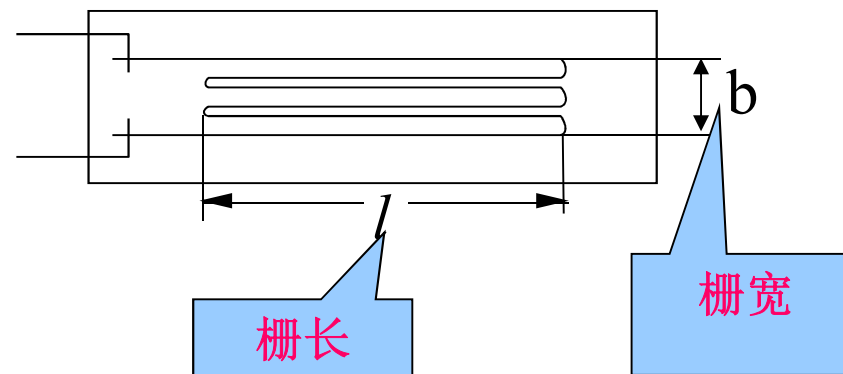
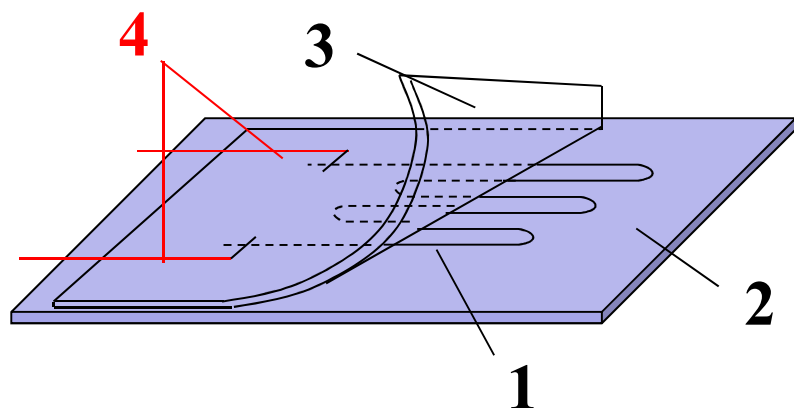
基底用于保持敏感栅、引线的几何形状和相对位置

盖片既保持敏感栅和引线的形状和相对位置，还可保护敏感栅。

基底的全长称为基底长，其宽度称为基底宽。



金属丝式



引线4

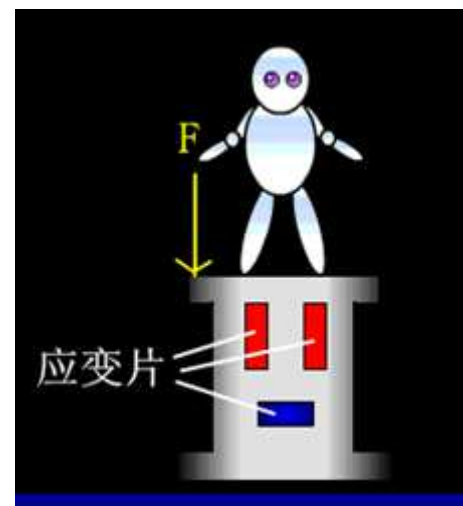
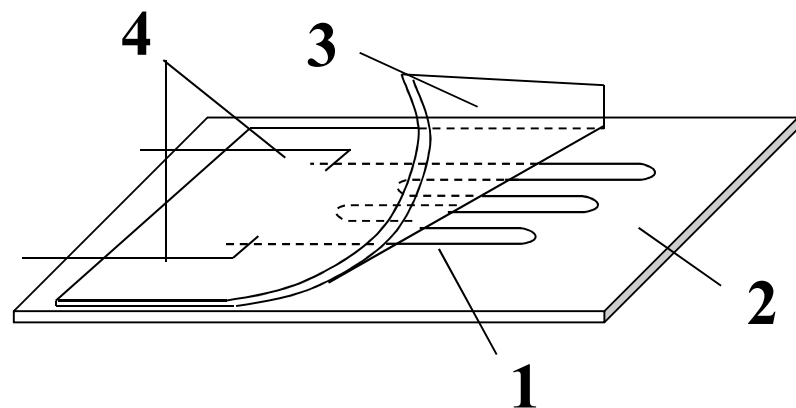
是从应变片的敏感栅中引出的细金属线。

对引线材料的性能要求：电阻率低、电阻温度系数小、抗氧化性能好、易于焊接。

大多数敏感栅材料都可制作引线。



金属丝式



粘结剂

1. 用于将敏感栅固定于基底上，并将盖片与基底粘贴在一起。
2. 使用金属应变片时，也需用粘结剂将应变片基底粘贴在构件表面某个方向和位置上。

常用的粘结剂分为**有机**和**无机**两大类。有机粘结剂用于低温、常温和中温。常用的有聚丙烯酸酯、酚醛树脂、有机硅树脂，聚酰亚胺等。无机粘结剂用于高温，常用的有磷酸盐、硅酸、硼酸盐等。



金属丝式

金属丝式应变片的安装：



打磨



清洁表面



点胶



按压



热风快速固化



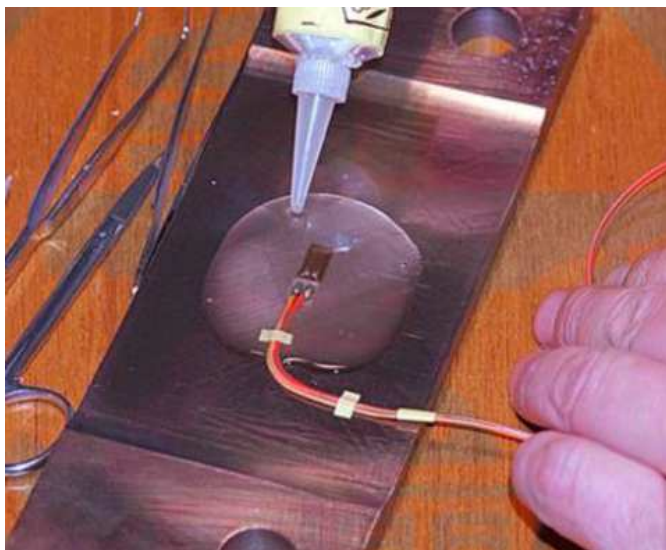
焊接导线

用万用表测量应变片绝缘电阻值，应大于20M Ω



金属丝式

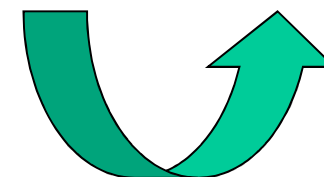
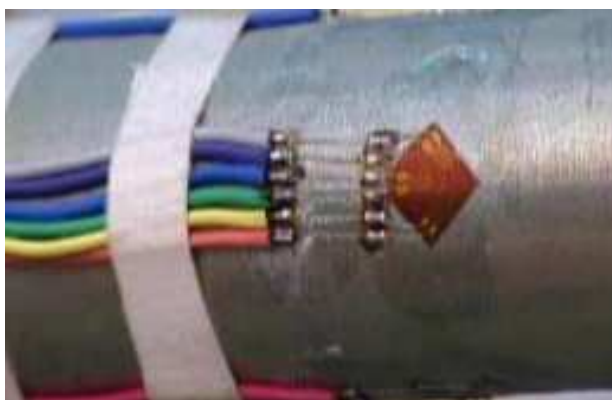
金属丝式应变片的安装:



单分子硅胶或石蜡密封

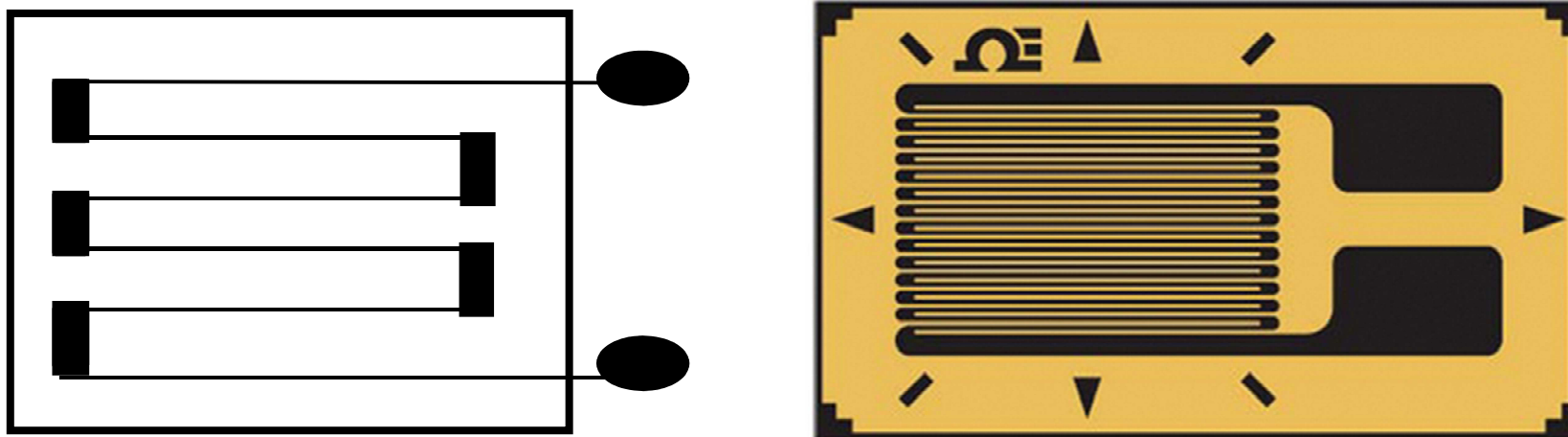


固化后测试



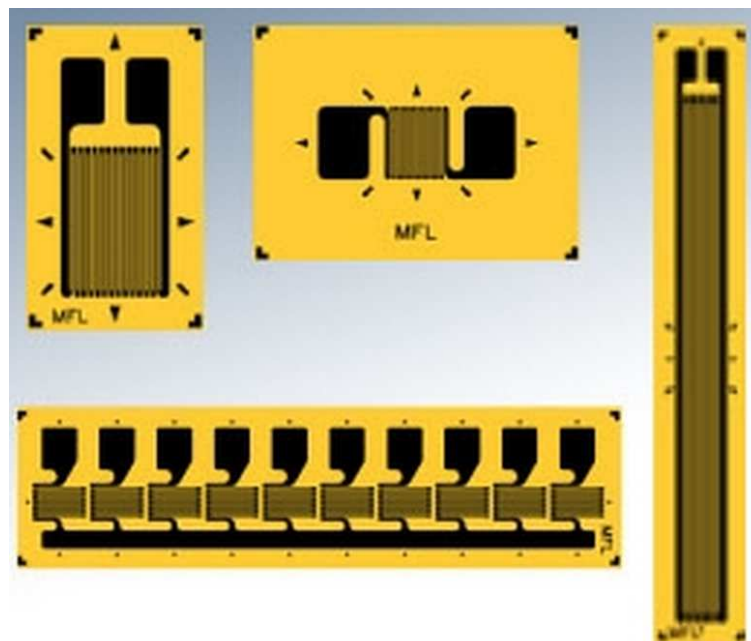
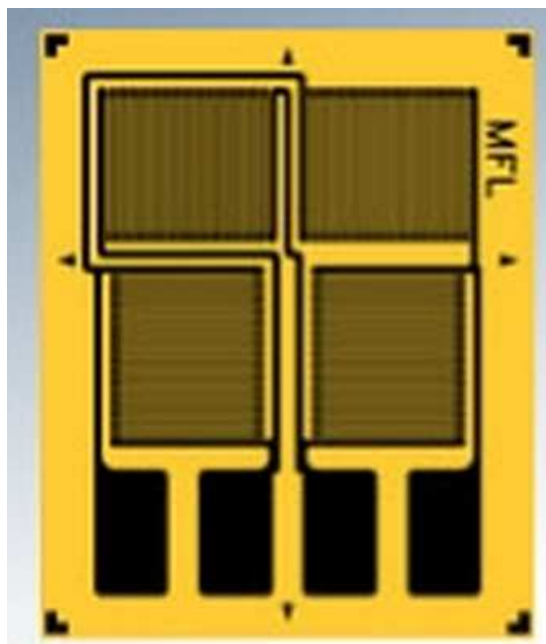
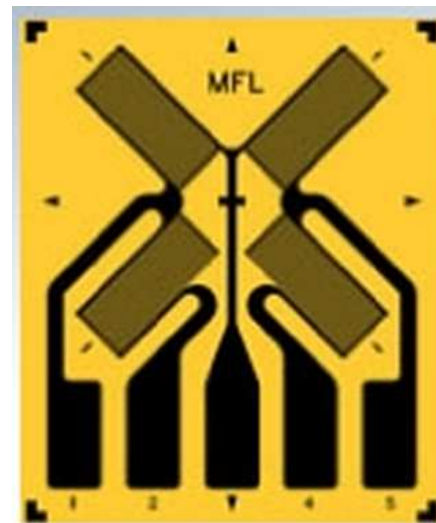
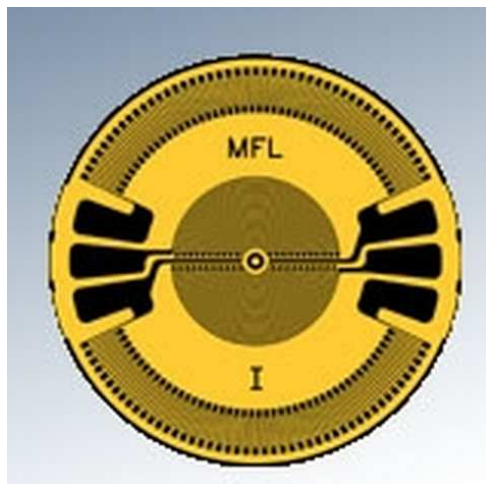


金属箔式应变片



利用光刻、腐蚀等工艺制成一种很薄的金属箔栅，厚度一般在**0.003~0.010 mm**，粘贴在基片上，上面再覆盖一层薄膜而制成。

金属箔式应变片





金属箔式应变片

金属箔式应变片和丝式应变片相比较，特点：

- ①金属箔栅很薄，因而它所感受的应力状态与试件表面的应力状态更为接近。其次，当箔材和丝材具有同样的截面积时，箔材与粘接层的接触面积比丝材大，使它能更好地和试件共同工作。第三，箔栅的端部较宽，横向效应较小，因而提高了应变测量的精度。
- ②箔材表面积大，散热条件好，故允许通过较大电流，因而可以输出较大信号，提高了测量灵敏度。
- ③箔栅的尺寸准确、均匀，且能制成任意形状，特别是为制造应变花和小标距应变片提供了条件，从而扩大了应变片的使用范围。
- ④便于成批生产。

缺点：电阻值分散性大，有的相差几十 Ω ，故需要作阻值调整；生产工序较为复杂，因引出线的焊点采用锡焊，因此不适于高温环境下测量。此外，价格较贵。

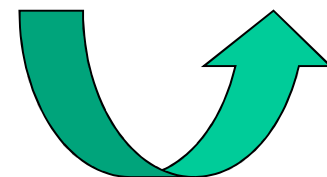




金属薄膜应变片

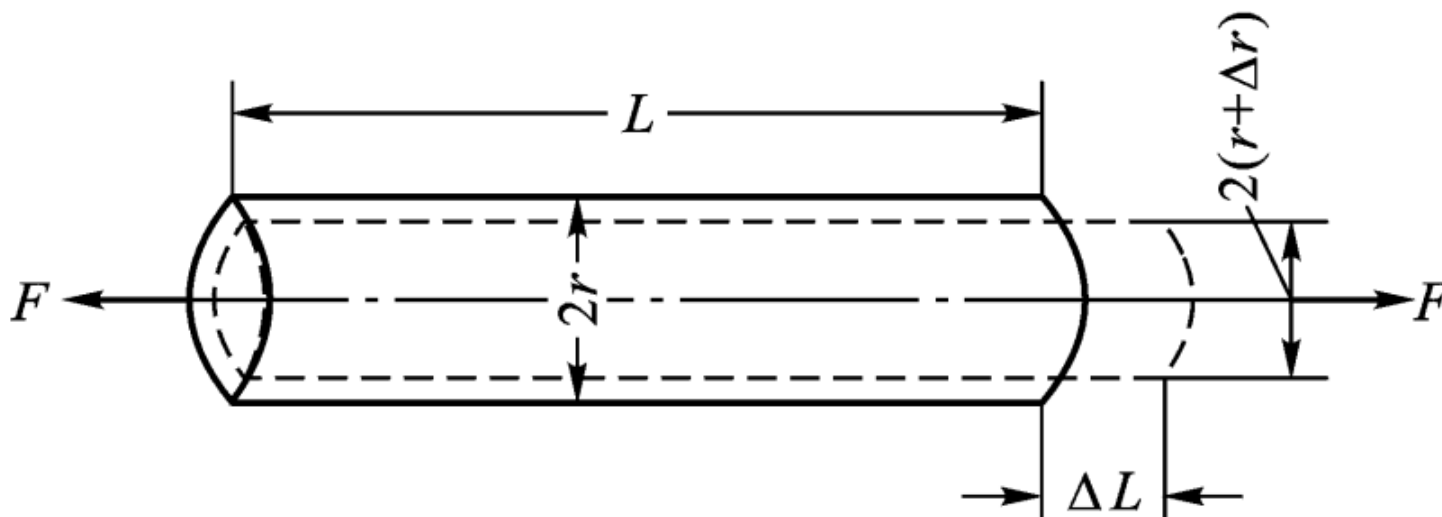
金属薄膜应变片是采用真空蒸镀或溅射式阴极扩散等方法，在薄的基底材料上制成一层金属电阻材料薄膜以形成应变片。

这种应变片有较高的灵敏度系数，允许电流密度大，工作温度范围较广。





基本测量电路



$$\frac{\Delta R}{R} = K_S \cdot \varepsilon$$



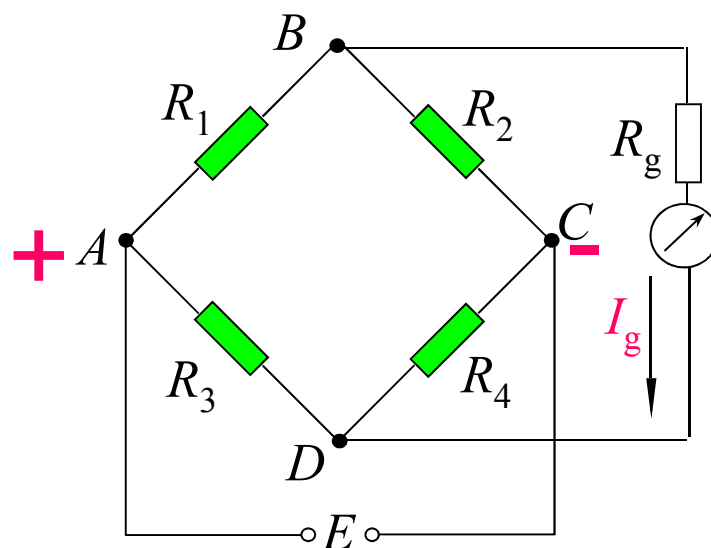
$$\varepsilon = \frac{\Delta R}{R \cdot K_S}$$

应变片将应变转换成电阻相对变化 $\Delta R/R$ ，要把电阻的变化转换成电压或电流的变化，才能用电测仪表进行测量。



基本测量电路

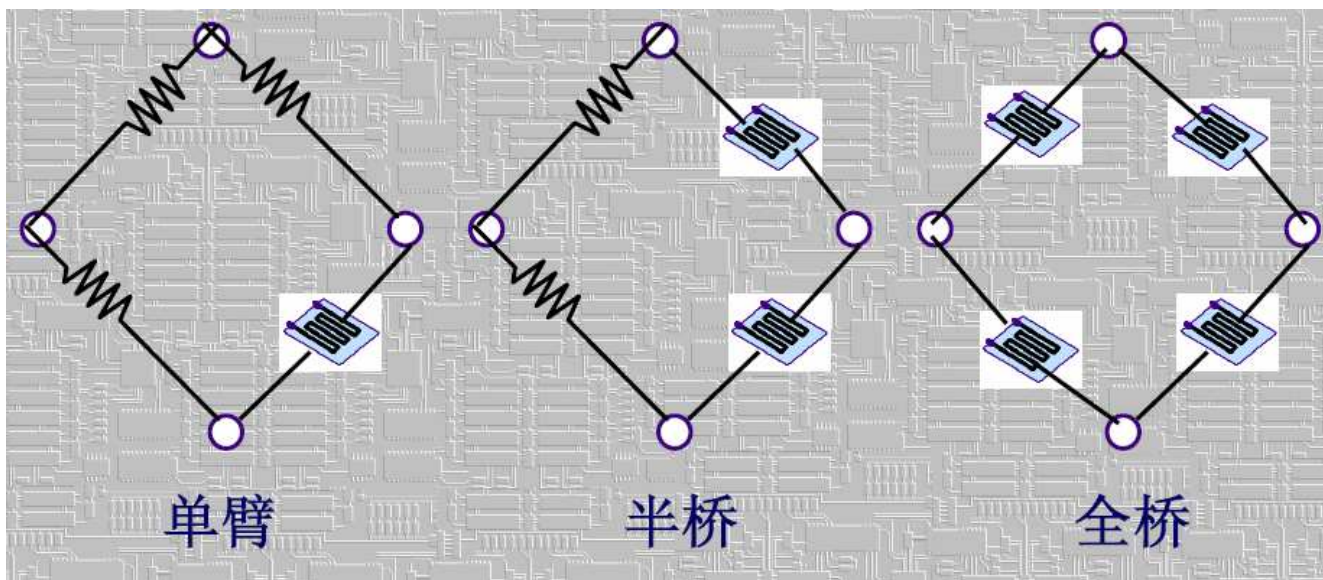
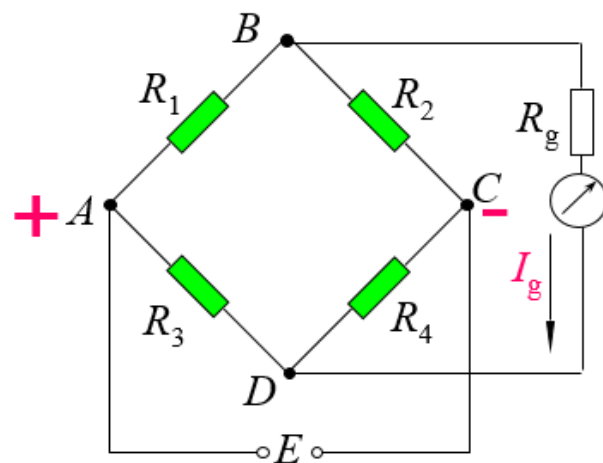
电阻应变片的测量线路多采用交流电桥(配交流放大器), 其原理和直流电桥相似。



电桥线路原理图



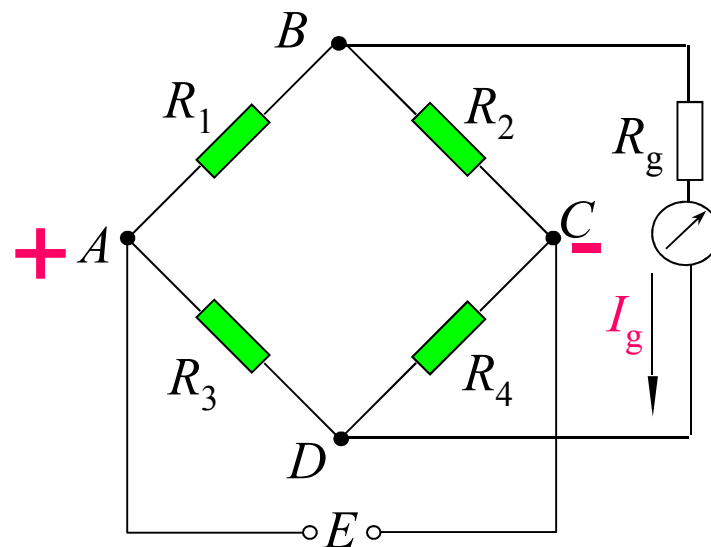
基本测量电路





基本测量电路

直流电桥，如图所示：



电桥线路原理图

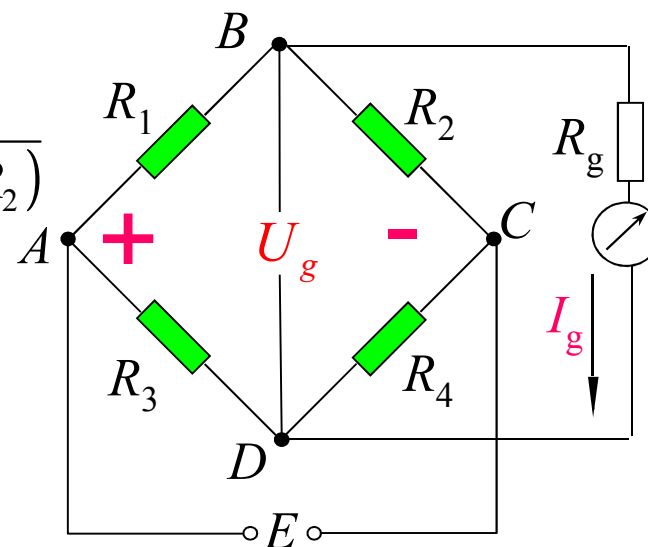


基本测量电路

当电源 E 为电势源，其内阻为零时，可求出检流计中流过的电流 I_g 与电桥各参数之间的关系为：

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

R_g 为负载电阻.



电桥线路原理图

因而其输出电压 U_g 为:

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

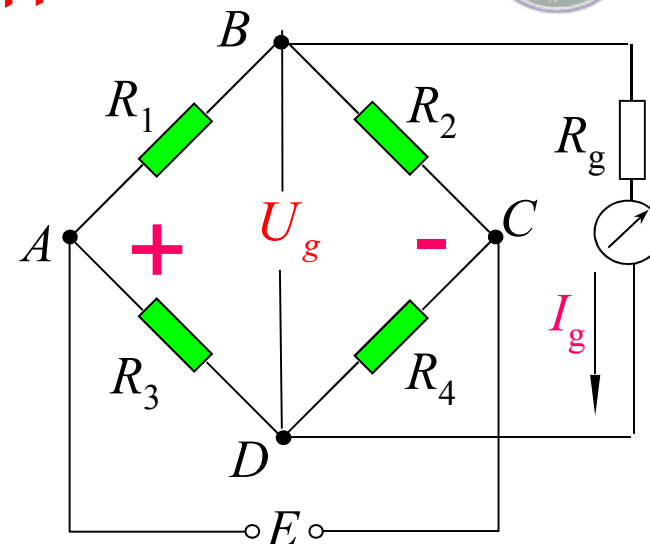


基本测量电路

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

当 $R_1 R_4 = R_2 R_3$ 时,

$I_g = 0$, $U_g = 0$, 即电桥处于平衡状态。



若电桥的负载电阻 R_g 为无穷大, 则B、D两点可视为开路, 上式可以化简为:

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



基本测量电路

设 R_1 为应变片的阻值，工作时 R_1 有一增量 ΔR ，当为拉伸应变时， ΔR 为正；压缩应变时， ΔR 为负。在上式中以 $R_1 + \Delta R$ 代替 R_1 ，则：

$$U_g = E \frac{(R_1 + \Delta R)R_4 - R_2R_3}{(R_1 + \Delta R + R_2)(R_3 + R_4)}$$

设电桥各臂均有相应的电阻增量 ΔR_1 、 ΔR_2 、 ΔR_3 、 ΔR_4 时，

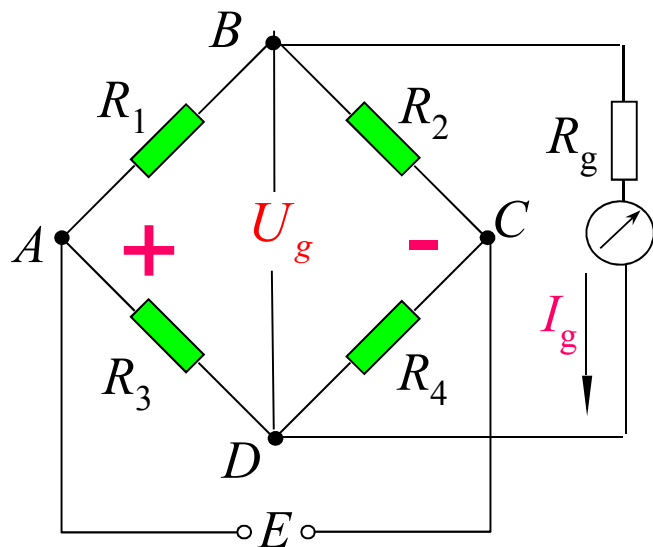
$$U_g = E \frac{(R_1 + \Delta R_1)(R_4 + \Delta R_4) - (R_2 + \Delta R_2)(R_3 + \Delta R_3)}{(R_1 + \Delta R_1 + R_2 + \Delta R_2)(R_3 + \Delta R_3 + R_4 + \Delta R_4)}$$

在实际使用时，一般多采用等臂电桥或对称电桥。

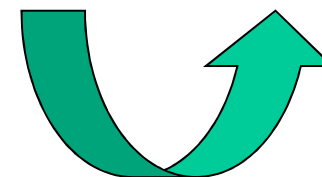


基本测量电路

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



1. 等臂电桥
2. 第一对称电桥
3. 第二对称电桥

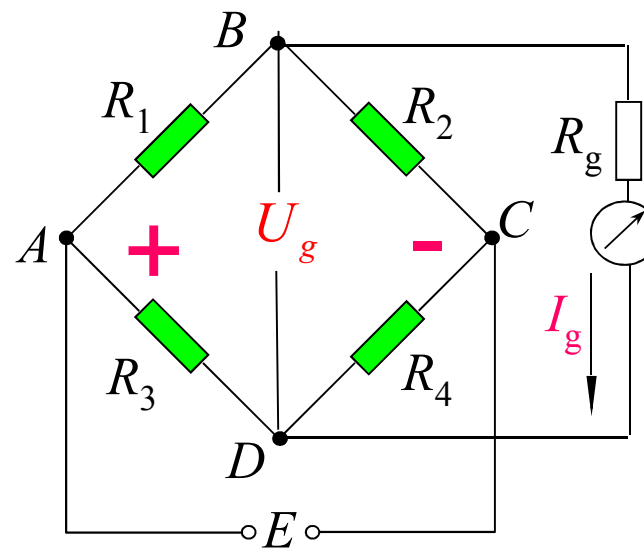




等臂电桥

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

当 $R_1=R_2=R_3=R_4=R$ 时，称为等臂电桥。



$$U_g = E \frac{R(\Delta R_1 - \Delta R_2 - \Delta R_3 + \Delta R_4) + \Delta R_1 \Delta R_4 - \Delta R_2 \Delta R_3}{(2R + \Delta R_1 + \Delta R_2)(2R + \Delta R_3 + \Delta R_4)}$$

一般情况下， ΔR_i ($i=1, 2, 3, 4$) 很小，即 $R \gg \Delta R_i$ ，略去上式中的高阶微量，并利用 $\frac{\Delta R}{R} = K \varepsilon_x$ 式得到：

$$U_g = \frac{E}{4} \left(\frac{\Delta R_1}{R} - \frac{\Delta R_2}{R} - \frac{\Delta R_3}{R} + \frac{\Delta R_4}{R} \right) = \frac{EK}{4} (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 - \varepsilon_3 + \varepsilon_4)$$



等臂电桥

$$U_g = \frac{E}{4} \left(\frac{\Delta R_1}{R} - \frac{\Delta R_2}{R} - \frac{\Delta R_3}{R} + \frac{\Delta R_4}{R} \right) = \frac{EK}{4} (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 - \varepsilon_3 + \varepsilon_4)$$

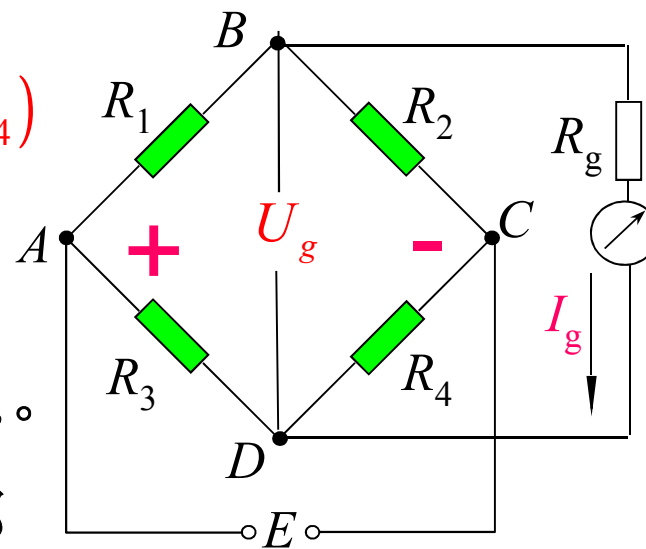
上式表明：

①当 $\Delta R_i \ll R$ 时，输出电压与应变呈线性关系。

②对臂符号相同，邻臂符号相反。如果将邻臂采用两个具有相反应变的应变片的话，可以提高测量的灵敏度。

利用上述特点可进行温度补偿和提高测量的灵敏度。

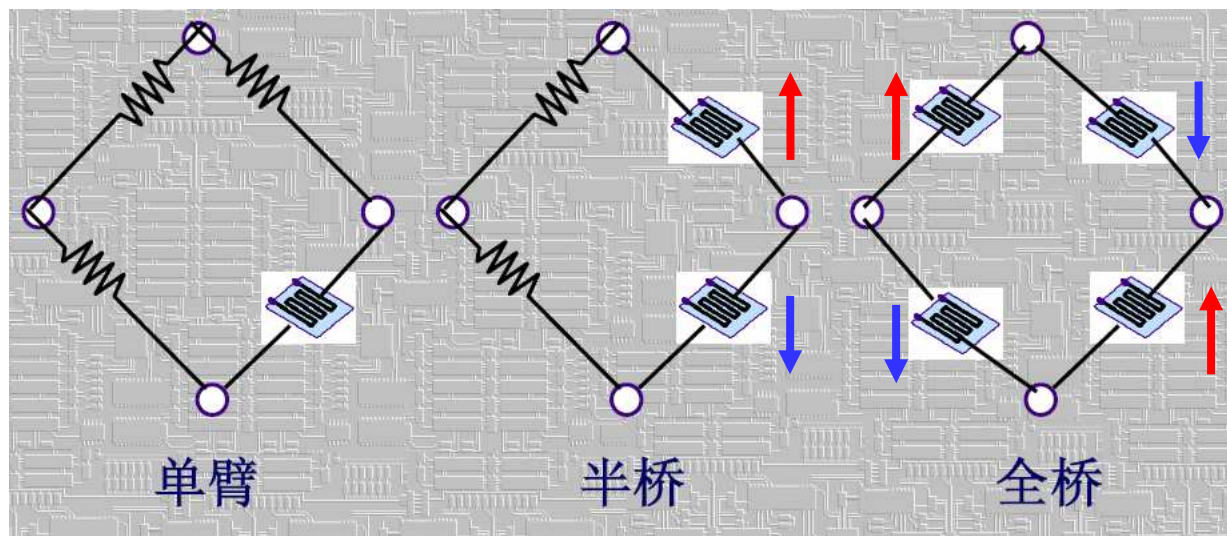
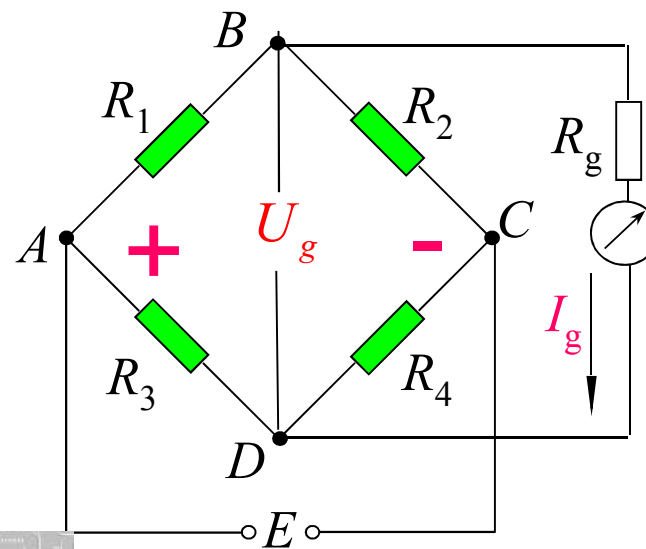
多个应变片放入桥路时，相同变化趋势的应变片放在对臂位置，相反变化趋势的应变片放在邻臂位置。





等臂电桥

$$U_g = \frac{E}{4} \left(\frac{\Delta R_1}{R} - \frac{\Delta R_2}{R} - \frac{\Delta R_3}{R} + \frac{\Delta R_4}{R} \right)$$
$$= \frac{EK}{4} (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 - \varepsilon_3 + \varepsilon_4)$$



$$U_g = \frac{1}{4} EK \varepsilon$$

$$U_g = \frac{1}{2} EK \varepsilon$$

$$U_g = EK \varepsilon$$

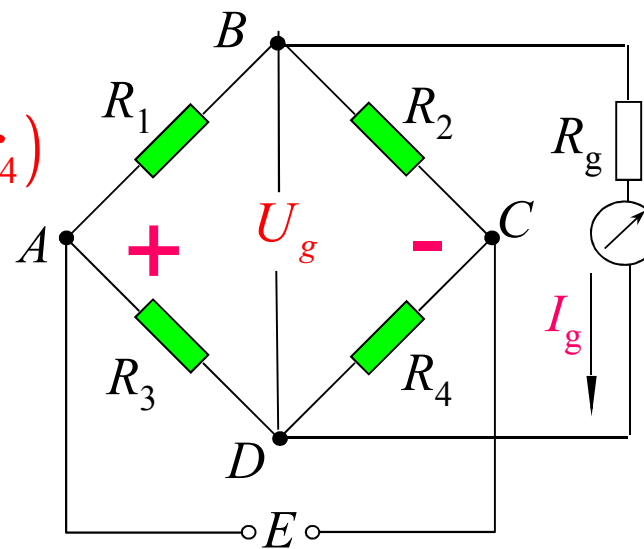


等臂电桥

$$U_g = \frac{E}{4} \left(\frac{\Delta R_1}{R} - \frac{\Delta R_2}{R} - \frac{\Delta R_3}{R} + \frac{\Delta R_4}{R} \right) = \frac{EK}{4} (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 - \varepsilon_3 + \varepsilon_4)$$

当仅桥臂 AB 单臂工作时，输出电压为

$$U_g = \frac{E}{4} \times \frac{\Delta R}{R} = \frac{E}{4} K \varepsilon$$



可知，当假定 $R \gg \Delta R$ 时，输出电压 U_g 与应变 ε 间呈线性关系。

若假定不成立，则按线性关系刻度的仪表用来测量必然带来非线性误差。



等臂电桥

当考虑单臂工作时，即 AB 桥臂变化 ΔR ，则：

$$U_g = \frac{E\Delta R}{4R + 2\Delta R} = \frac{E}{4} \frac{\Delta R}{R} \left(1 + \frac{1}{2} \frac{\Delta R}{R}\right)^{-1} = \frac{E}{4} K\varepsilon \left(1 + \frac{1}{2} K\varepsilon\right)^{-1}$$

由上式展开级数，得：

$$U_g = \frac{E}{4} K\varepsilon \left[1 - \frac{1}{2} K\varepsilon + \frac{1}{4} (K\varepsilon)^2 - \frac{1}{8} (K\varepsilon)^3 + \dots\right]$$

则电桥的相对非线性误差为：

$$\delta = \frac{\frac{E}{4} K\varepsilon - \frac{E}{4} K\varepsilon \left[1 - \frac{1}{2} K\varepsilon + \frac{1}{4} (K\varepsilon)^2 - \frac{1}{8} (K\varepsilon)^3 + \dots\right]}{\frac{E}{4} K\varepsilon} = \frac{1}{2} K\varepsilon + \frac{1}{4} (K\varepsilon)^2 - \frac{1}{8} (K\varepsilon)^3 + \dots$$

可见， $K\varepsilon$ 愈大， δ 愈大，通常 $K\varepsilon \ll 1$ 。

$$\delta \approx 1/2 \cdot K\varepsilon$$

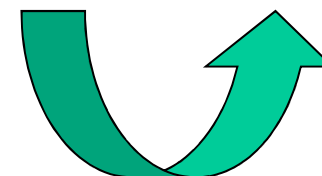


等臂电桥

例：设 $K=2$ ，要求非线性误差 $\delta < 1\%$ ，试求允许测量的最大应变值 ε_{\max} 。

$$\frac{1}{2} K \varepsilon_{\max} < 0.01$$

$$\varepsilon_{\max} < \frac{2 \times 0.01}{K} = \frac{2 \times 0.01}{2} = 0.01 = 10000 \mu\varepsilon$$

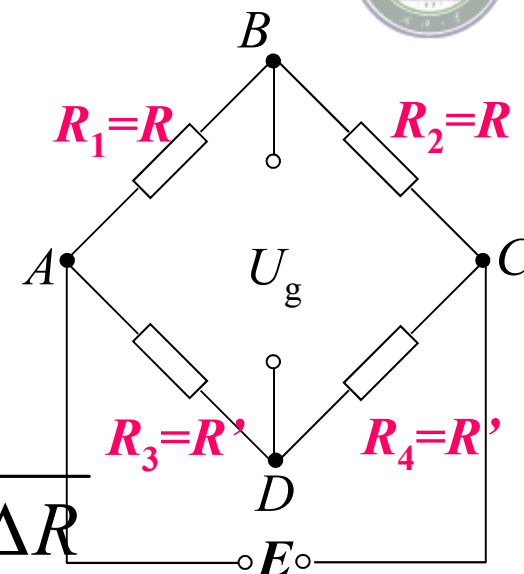




第一等臂电桥

若电桥桥臂两两相等，即 $R_1=R_2=R$ ， $R_3=R_4=R'$ ，则称它为第一对称电桥，如图，实质上它是半等臂电桥。设 R_1 有一增量 ΔR ，电桥的输出电压为：

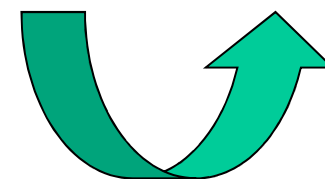
$$U_g = E \left[\frac{(R + \Delta R)R' - RR'}{(2R + \Delta R)(2R')} \right] = E \frac{\Delta R}{4R + 2\Delta R}$$
$$= \frac{E}{4} \times \frac{\Delta R}{R} \times \frac{1}{1 + \frac{1}{2} \frac{\Delta R}{R}}$$



第一对称电桥

上式表明：第一对称电桥的输出电压与等臂电桥相同，其非线性误差可由 $\delta \approx 1/2 \cdot K \varepsilon$ 式计算。若 $R \gg \Delta R$ ，上式仍可化简为：

$$U_g = \frac{E}{4} K \varepsilon \quad \text{这时输出电压与应变成正比。}$$





第二等臂电桥

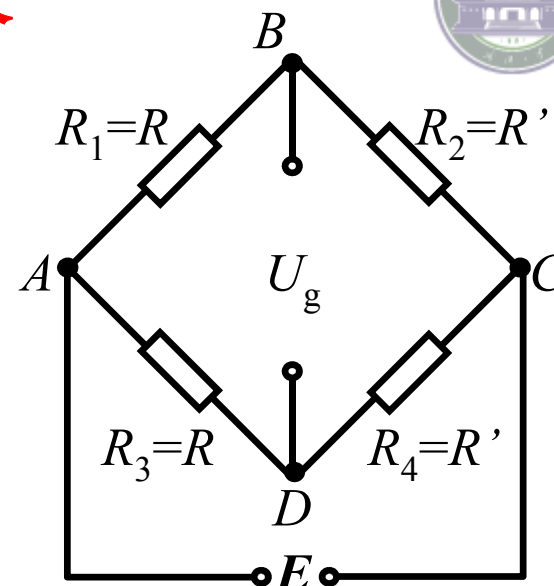
半等臂电桥的另一种形式为 $R_1=R_3=R$,
 $R_2=R_4=R'$, 称为第二对称电桥。若 R_1 有
一增量 ΔR , 则:

$$U_g = E \frac{(R + \Delta R)R' - RR'}{(R + \Delta R + R')(R + R')}$$



$$U_g = E \frac{\Delta R}{R} \frac{1}{k + 2 + 1/k} \frac{1}{1 + \frac{k}{1+k} \cdot \frac{\Delta R}{R}}$$

$$k = \frac{R}{R'}$$



第二对称电桥

当 $k>1(R>R')$ 时, $k/(1+k)>1/2$, 其非线性较等臂电桥大;
当 k 远小于1时, 其非线性可得到很好改善;
当 $k=1$ 时, 即为等臂电桥。

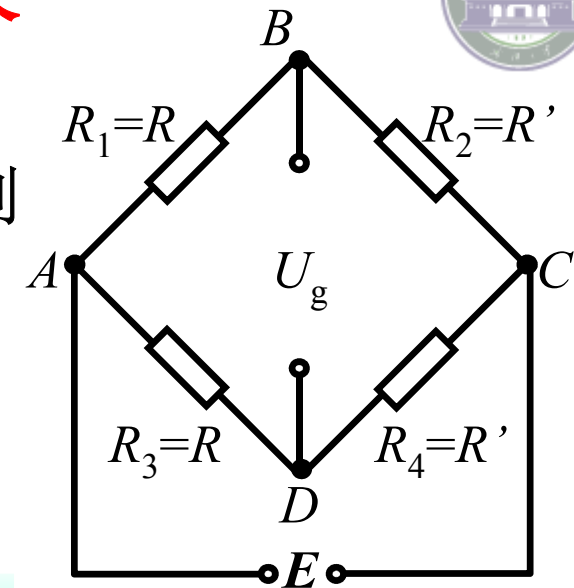
第二等臂电桥



若 $R \gg \Delta R$ ，忽略上式分母中 $\left(\frac{k}{1+k} \cdot \frac{\Delta R}{R}\right)$ 项，得到

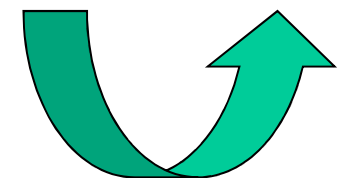
$$U_g = \frac{E}{k+2+1/k} \frac{\Delta R}{R} = \frac{E}{k+2+1/k} K\varepsilon$$

对比等臂电桥输出： $U_g = \frac{E}{4} \times \frac{\Delta R}{R} = \frac{E}{4} K\varepsilon$



第二对称电桥

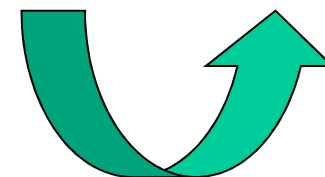
可见，在一定应变范围内，第二对称电桥的输出与应变呈线性关系，但比等臂电桥的输出电压小 $\frac{1}{4} \left(k+2+\frac{1}{k}\right)$ 倍。





金属应变片的主要特性

1. 灵敏度系数
2. 横向效应
3. 机械滞后
4. 零点漂移和蠕变
5. 应变极限
6. 动态特性





灵敏度系数

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

金属应变丝的电阻相对变化与它所感受的应变之间具有线性关系，用灵敏度系数 K_S 表示。

当金属丝做成应变片后，其电阻—应变特性与金属单丝情况不同。需用实验的方法进行重新标定。

实验表明，金属应变片的电阻相对变化与应变 ε 在很宽的范围内均为线性关系。

应变片的灵敏系数 K 恒小于线材的灵敏系数 K_S 。

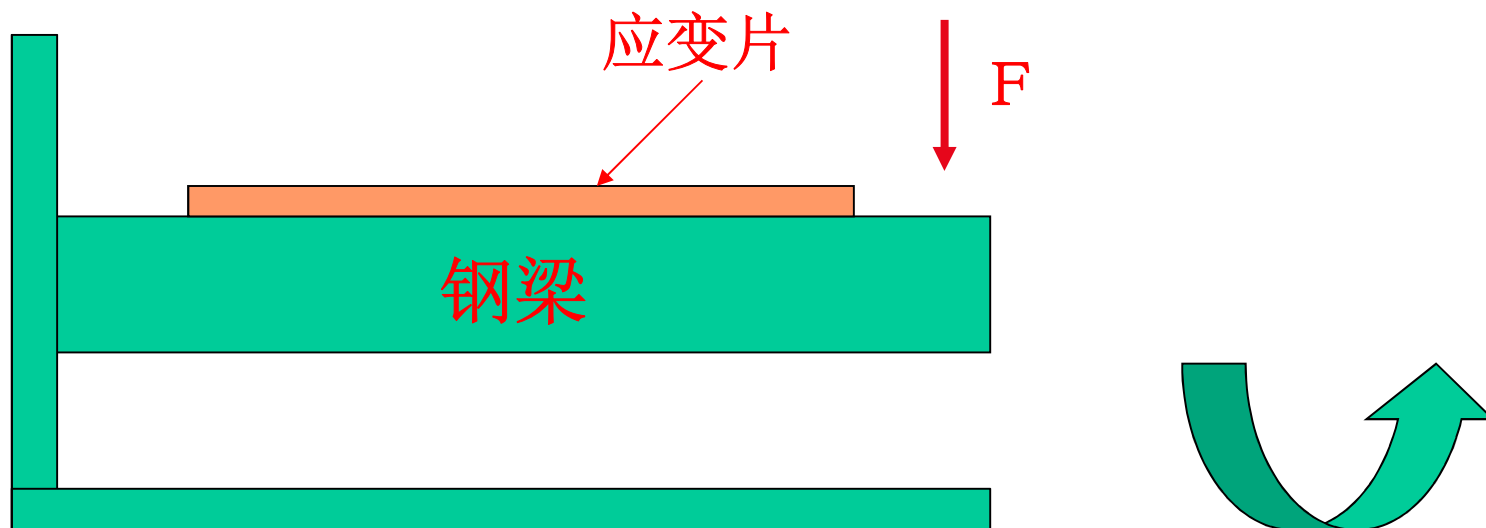


灵敏度系数

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

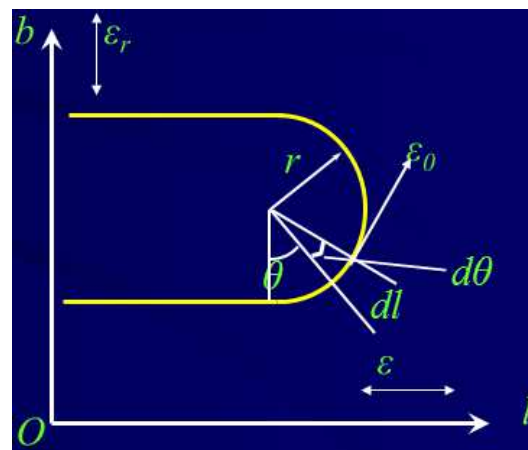
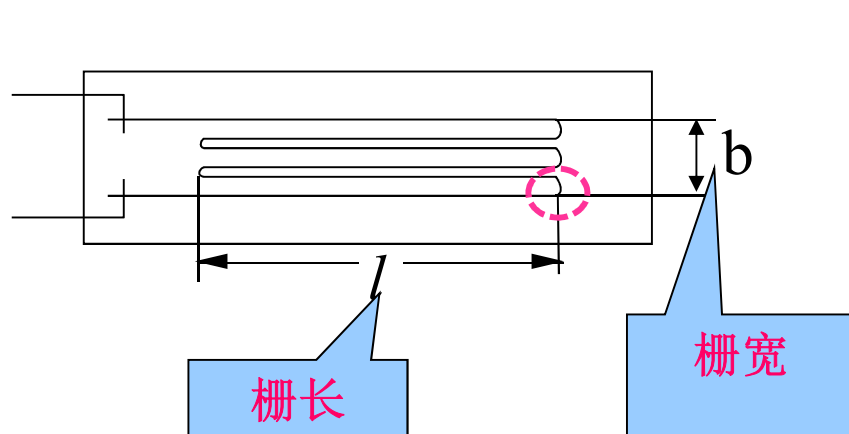
应变片的灵敏系数K恒小于线材的灵敏系数 K_S 。

主要原因： (1) 胶层传递变形失真
(2) 横向效应。





横向效应



金属丝式应变片由于敏感栅的两端为半圆弧形的横栅，测量应变时，构件的轴向应变 ε 使敏感栅电阻发生变化，而其横向应变 ε_r 也使敏感栅半圆弧部分的电阻发生变化。

应变片的这种既受轴向应变影响，又受横向应变影响而引起电阻变化的现象称为横向效应。

若敏感栅有 n 根纵栅，每根长为 l ，半径为 r ，在轴向应变 ε 作用下，全部纵栅的变形视为 ΔL_1 ：

$$\Delta L_1 = nl\varepsilon$$

半圆弧横栅同时受到 ε 和 ε_r 的作用，在任一微小段长度 $dl = r d\theta$ 上的应变 ε_θ 可由材料力学公式求得：

$$\varepsilon_\theta = \frac{1}{2}(\varepsilon + \varepsilon_r) + \frac{1}{2}(\varepsilon - \varepsilon_r)\cos 2\theta$$

每个圆弧形横栅的变形量 Δl 为：

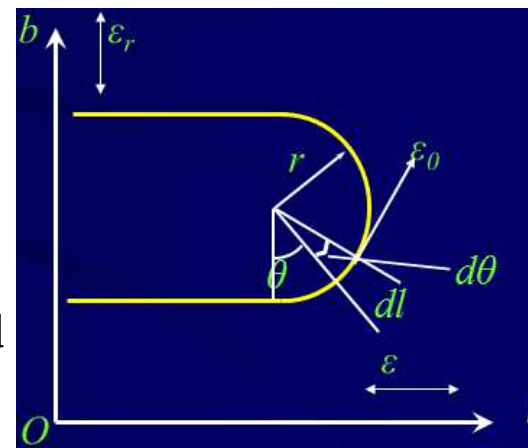
$$\Delta l = \int_0^{\pi r} \varepsilon_\theta dl = \int_0^\pi \varepsilon_\theta r d\theta = \frac{\pi r}{2}(\varepsilon + \varepsilon_r)$$

纵栅为 n 根的应变片共有 $n-1$ 个半圆弧横栅，全部横栅的变形量为：

$$\Delta L_2 = \frac{(n-1)\pi r}{2}(\varepsilon + \varepsilon_r)$$

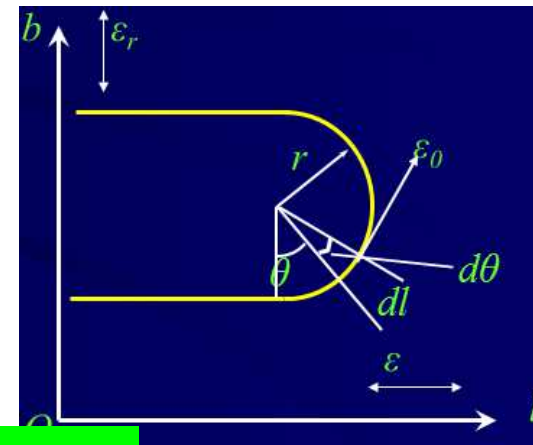
应变片敏感栅的总变形为：

$$\Delta L = \Delta L_1 + \Delta L_2 = \frac{2nl + (n-1)\pi r}{2}\varepsilon + \frac{(n-1)\pi r}{2}\varepsilon_r$$



$$\Delta L = \Delta L_1 + \Delta L_2 = \frac{2nl + (n-1)\pi r}{2} \varepsilon + \frac{(n-1)\pi r}{2} \varepsilon_r$$

敏感栅栅丝的总长为 L ，敏感栅的灵敏系数为 K_S ，则电阻相对变化为：



$$\frac{\Delta R}{R} = K_S \frac{\Delta L}{L} = \frac{2nl + (n-1)\pi r}{2L} K_S \varepsilon + \frac{(n-1)\pi r}{2L} K_S \varepsilon_r$$

令：

$$K_y = \frac{(n-1)\pi r}{2L} K_S$$

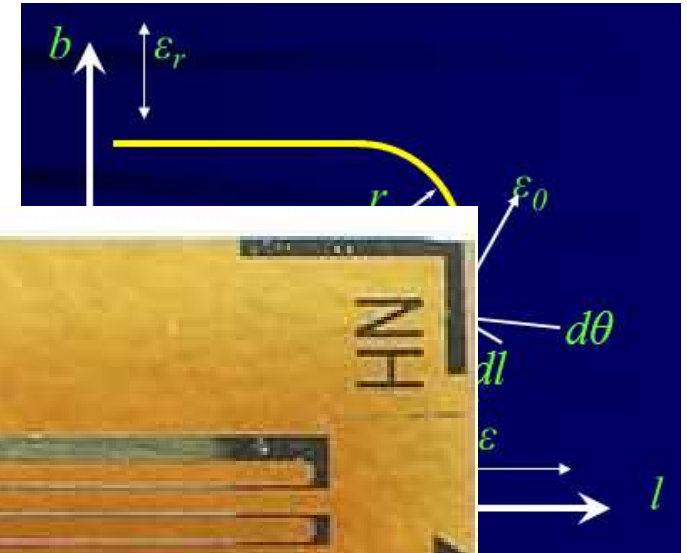
$$K_x = \frac{2nl + (n-1)\pi r}{2L} K_S$$

则：

$$\frac{\Delta R}{R} = K_x \varepsilon + K_y \varepsilon_r$$

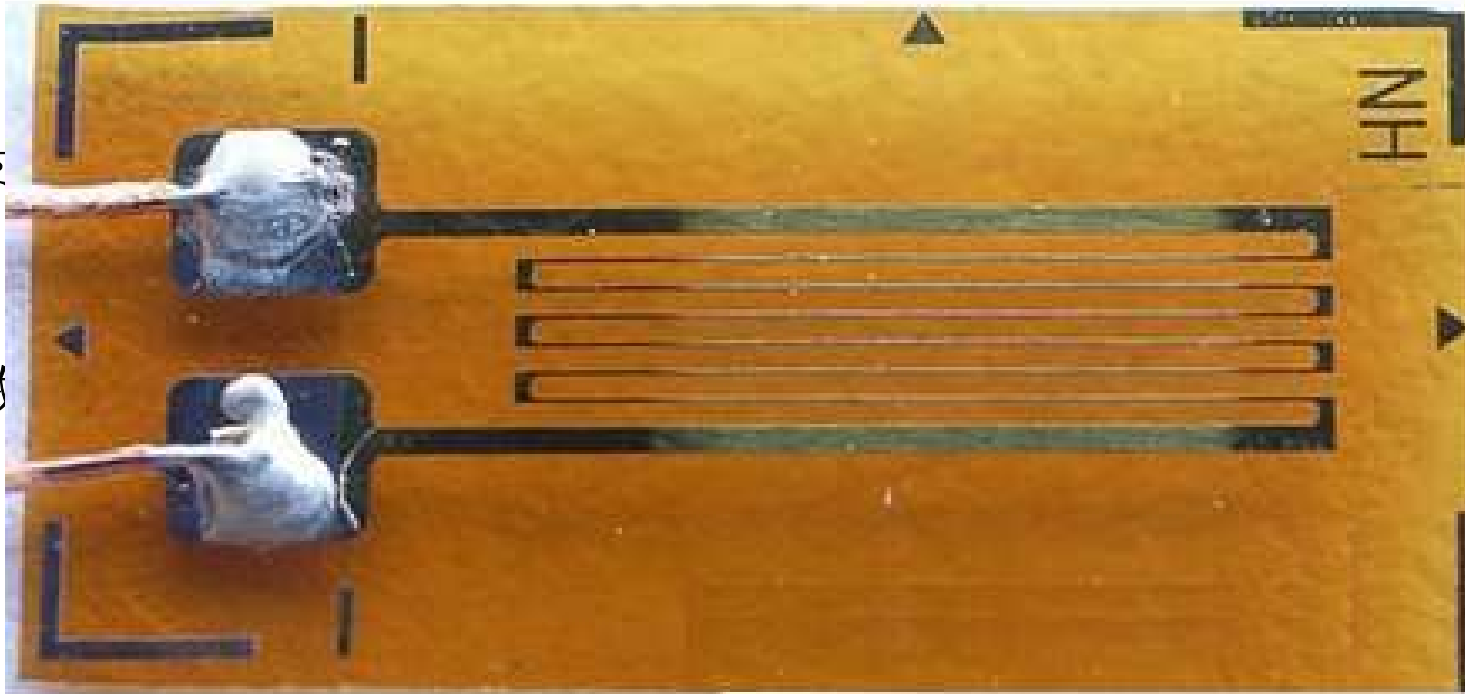
可见，敏感栅电阻的相对变化分别是 ε 和 ε_r 作用的结果。

当 $\varepsilon_r=0$ 时，可得轴向灵敏度系数： $K = \frac{\Delta R}{R}$

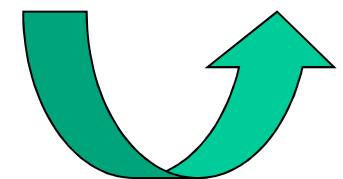


当 $\varepsilon=0$ 时

横向灵敏



可见， r 愈小、 l 愈大，则 H 愈小。即敏感栅越窄、基长越长的应变片，其横向效应引起的误差越小。





机械滞后

应变片粘贴在被测试件上，当温度恒定时，其加载特性与卸载特性不重合，即为**机械滞后**。

产生原因：应变片在承受机械应变后的残余变形，使敏感栅电阻发生少量不可逆变化；在制造或粘贴应变片时，敏感栅受到的不适当的变形或粘结剂固化不充分等。

机械滞后值还与应变片所承受的应变量大有关，加载时的机械应变愈大，卸载时的滞后也愈大。所以，通常在实验之前应将试件预先加、卸载若干次，以减少因机械滞后所产生的**实验误差**





零点漂移和蠕变

对于粘贴好的应变片，当温度恒定时，不承受应变时，其电阻值随时间增加而变化的特性，称为应变片的零点漂移。

产生的原因：

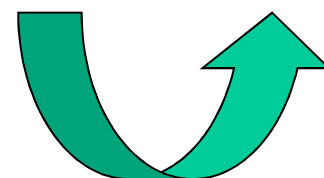
- 敏感栅通电后的温度效应；
- 应变片的内应力逐渐变化；
- 粘结剂固化不充分等。



零点漂移和蠕变

如果在一定温度下，使应变片承受恒定的机械应变，其电阻值随时间增加而变化的特性称为蠕变。一般蠕变的方向与原应变量的方向相反。

产生的原因：由于胶层之间发生“滑动”，使力传到敏感栅的应变逐渐减少。



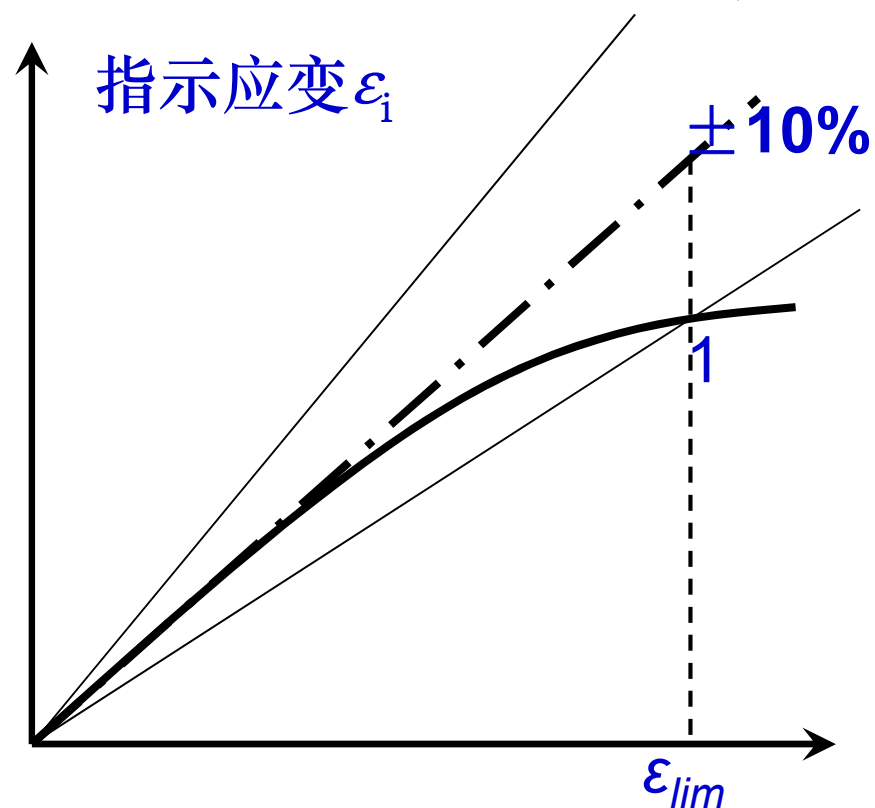


应变极限

在一定温度下，应变片的指示应变对测试值的真实应变的相对误差不超过规定范围（一般为10%）时的值
最大真实应变值。

真实应变是由于工作温度变化或承受机械载荷，在被测试件内产生应力时所引起的表面应变。

$$\delta = \frac{|\varepsilon_z - \varepsilon_i|}{\varepsilon_z} \times 100\%$$



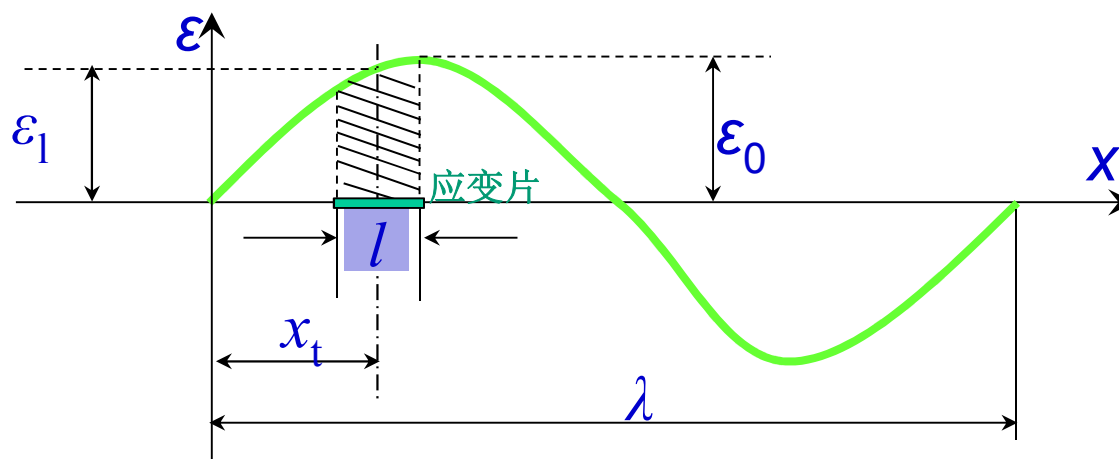
应变片的应变极限



动态特性

当被测应变值随时间变化的频率很高时，需考虑应变片的动态特性。因应变片基底和粘贴胶层很薄，构件的应变波传到应变片的时间很短（估计约 $0.2 \mu s$ ），故只需考虑应变沿应变片**轴向传播时**的动态响应。

设一频率为 f 的正弦应变波在构件中以速度 v 沿应变片栅长方向传播，在某一瞬时 t ，应变量沿构件分布如图所示：

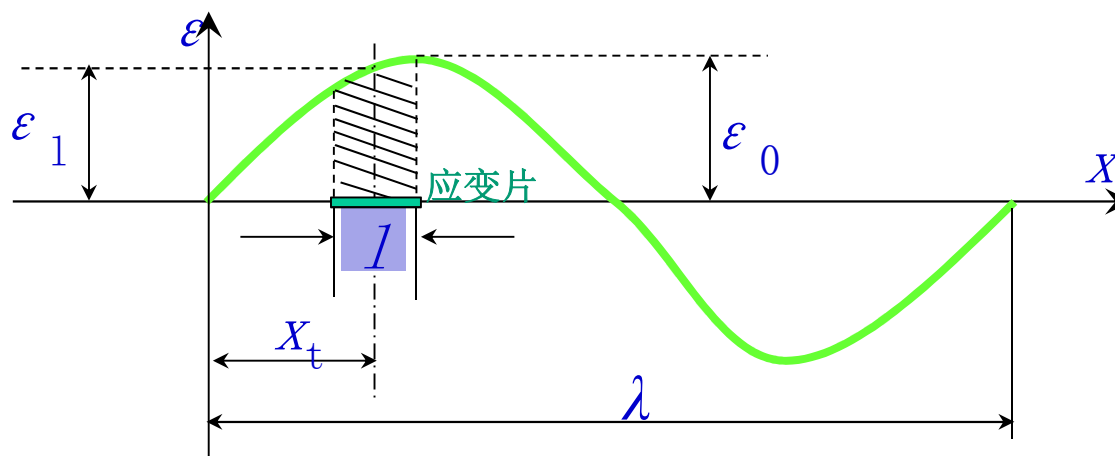


应变片对应变波的动态响应

动态特性



$$v = f \lambda$$



应变片对应变波的动态响应

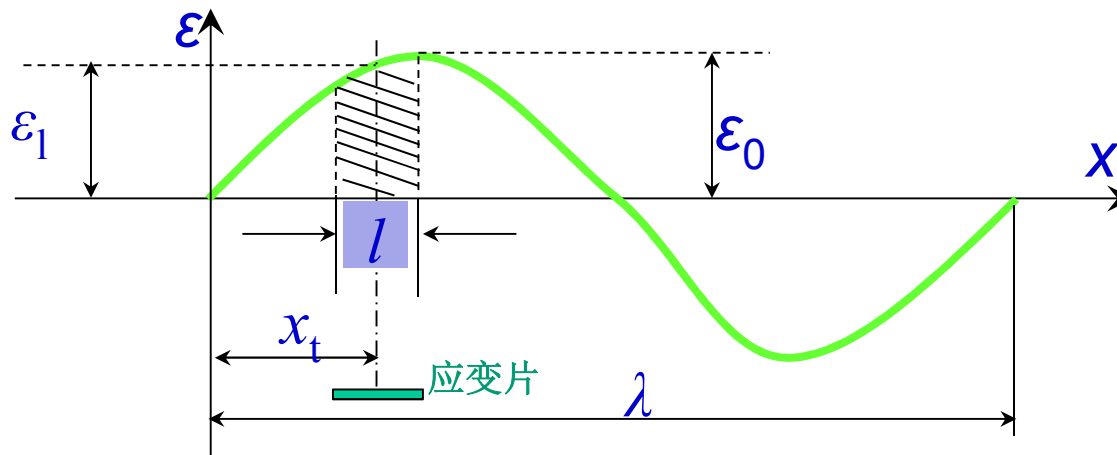
瞬时 t 时应变波沿构件分布为：

$$\varepsilon(x) = \varepsilon_0 \sin \omega t = \varepsilon_0 \sin \frac{2\pi}{\lambda} x \quad (2-12)$$

应变片中点的应变为

$$\varepsilon_t = \varepsilon_0 \sin \frac{2\pi}{\lambda} x_t$$

应变片测得的应变为栅长 l 范围内的平均应变 ε_m ，而不是 x_t 点的应变，其数值等于 l 范围内应变波曲线下的面积除以 l 。



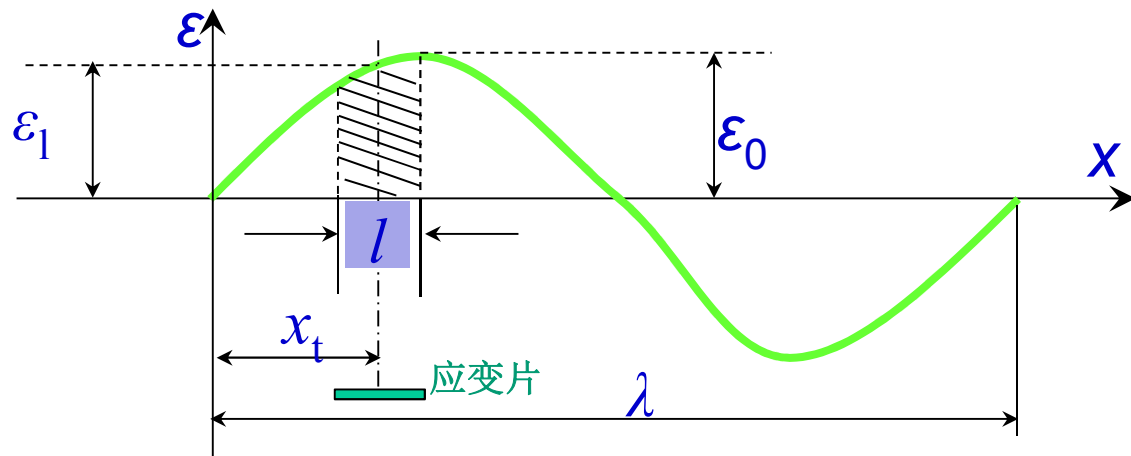
即：

$$\varepsilon_m = \frac{1}{l} \int_{x_t - \frac{l}{2}}^{x_t + \frac{l}{2}} \varepsilon_0 \sin \frac{2\pi}{\lambda} x dx = \varepsilon_0 \sin \frac{2\pi}{\lambda} x_t \cdot \frac{\sin \frac{\pi l}{\lambda}}{\frac{\pi l}{\lambda}}$$

平均应变 ε_m 与中点应变 ε_t 相对误差 δ 为：

$$\delta = \frac{\varepsilon_t - \varepsilon_m}{\varepsilon_t} = 1 - \frac{\varepsilon_m}{\varepsilon_t} = 1 - \frac{\sin \frac{\pi l}{\lambda}}{\frac{\pi l}{\lambda}} \quad (2-13)$$

可见，相对误差 δ 的大小只决定于 l/λ 的比值。



平均应变 ε_m 与中点应变 ε_t 相对误差 δ 为：

$$\delta = \frac{\varepsilon_t - \varepsilon_m}{\varepsilon_t} = 1 - \frac{\sin \frac{\pi l}{\lambda}}{\frac{\pi l}{\lambda}}$$

下表给出了 l/λ 为 $1/10$ 和 $1/20$ 时 δ 的数值：

误差 δ 的计算结果

l / λ	δ (%)
$1/10$	1.62
$1/20$	0.52

可见，应变片栅长与正弦应变波的波长之比愈小，相对误差 δ 愈小。

一般比值为 $1/10 \sim 1/20$ 时， δ 将小于 2%。

若已知应变波在某材料内传播速度 v ，由上式可算出栅长为 l 的应变片粘贴在某种材料上的可测动态应变最高频率。



温度误差及其补偿

用作测量应变的金属应变片，希望其阻值仅随应变变化，而不受其它因素的影响。

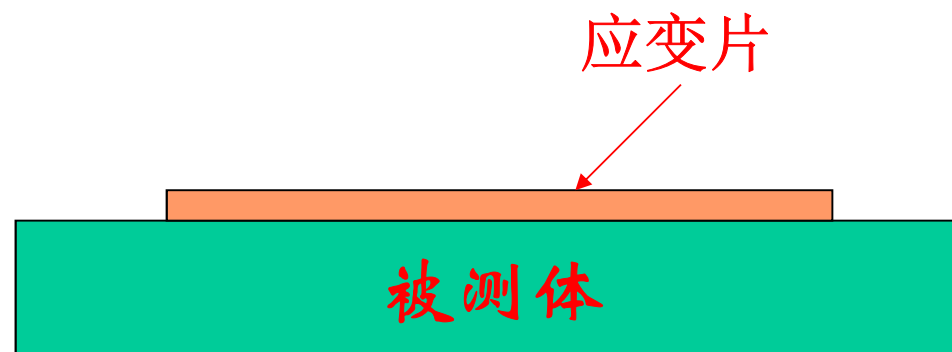
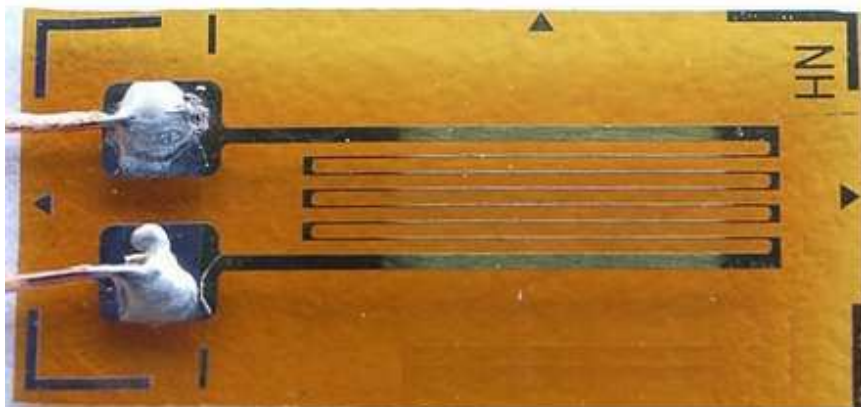
实际上应变片的阻值受环境温度(包括被测试件的温度)影响很大。由于环境温度变化引起的电阻变化与试件应变所造成的电阻变化几乎有相同的数量级，从而产生很大的测量误差，称为应变片的温度误差，又称热输出。



温度误差及其补偿

因环境温度改变而引起电阻变化的两个主要因素：

- 应变片的电阻丝(敏感栅)具有一定温度系数；
- 电阻丝材料与测试材料的线膨胀系数不同。





温度误差及其补偿

设环境引起的构件温度变化为 Δt ($^{\circ}\text{C}$) 时, 粘贴在试件表面的应变片敏感栅材料的电阻温度系数为 α_t , 则应变片产生的电阻相对变化为:

$$\left(\frac{\Delta R}{R} \right)_1 = \alpha_t \Delta t$$

由于敏感栅材料和被测构件材料两者线膨胀系数不同, 当 Δt 存在时, 引起应变片的附加应变, 相应的电阻相对变化为:

$$\left(\frac{\Delta R}{R} \right)_2 = K (\beta_e - \beta_g) \Delta t$$

K ——应变片灵敏系数;

β_e ——试件材料线膨胀系数;

β_g ——敏感栅材料线膨胀系数。



温度误差及其补偿

温度变化 Δt 形成的总电阻相对变化:

$$\left(\frac{\Delta R}{R}\right)_t = \left(\frac{\Delta R}{R}\right)_1 + \left(\frac{\Delta R}{R}\right)_2 = \alpha_t \Delta t + K(\beta_e - \beta_g) \Delta t \quad (2-18)$$

相应的虚假应变为:

$$\varepsilon_t = \left(\frac{\Delta R}{R}\right)_t / K = \frac{\alpha_t}{K} \Delta t + (\beta_e - \beta_g) \Delta t$$

K ——应变片灵敏系数;

β_e ——**试件**材料线膨胀系数;

β_g ——**敏感栅**材料线膨胀系数。

可见, 应变片热输出的大小不仅与应变计敏感栅材料的性能 (α_t, β_g) 有关, 而且与被测试件材料的线膨胀系数 (β_e) 有关。



温度误差及其补偿

虚假应变:

$$\varepsilon_t = \frac{\alpha_t}{K} \Delta t + (\beta_e - \beta_g) \Delta t$$

K ——应变片灵敏系数;

β_e ——试件材料线膨胀系数;

β_g ——敏感栅材料线膨胀系数。

Δt ——温度变化

α_t ——敏感栅材料电阻温度系数

温度补偿方法:

1. 单丝自补偿应变片
2. 双丝组合式自补偿应变片
3. 电路补偿法



温度误差及其补偿

$$\varepsilon_t = \frac{\alpha_t}{K} \Delta t + (\beta_e - \beta_g) \Delta t$$

K ——应变片灵敏系数；

β_e ——试件材料线膨胀系数；

β_g ——敏感栅材料线膨胀系数。

Δt ——温度变化

α_t ——敏感栅材料电阻温度系数

1. 单丝自补偿应变片

由上式知，若使应变片在温度变化 Δt 时的热输出值为零，必须使：

$$\alpha_t + K(\beta_e - \beta_g) = 0$$

即：

$$\alpha_t = K(\beta_g - \beta_e)$$

单丝自补偿应变片的优点是结构简单，制造和使用都比较方便，但它必须在具有一定线膨胀系数材料的试件上使用，否则不能达到温度自补偿的目的。



温度误差及其补偿

$$\varepsilon_t = \frac{\alpha_t}{K} \Delta t + (\beta_e - \beta_g) \Delta t$$

K ——应变片灵敏系数；

β_e ——试件材料线膨胀系数；

β_g ——敏感栅材料线膨胀系数。

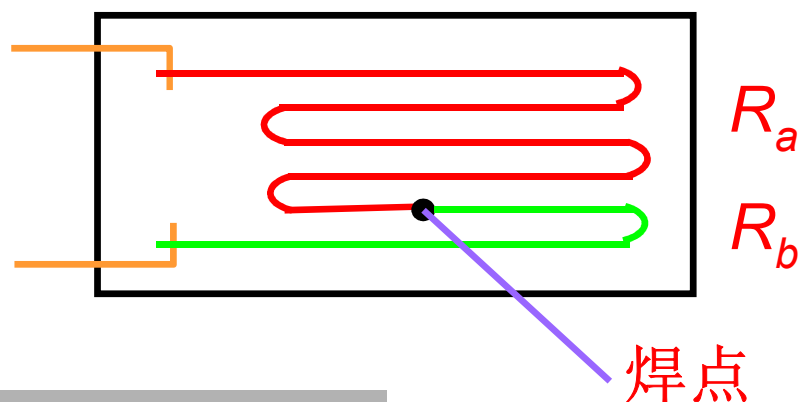
Δt ——温度变化

α_t ——敏感栅材料电阻温度系数

2. 双丝组合式自补偿应变片

由两种不同电阻温度系数（一种为正值，一种为负值）的材料串联组成敏感栅，以达到一定温度范围内在一定材料的试件上实现温度补偿。

这种应变片的自补偿条件要求粘贴在某种试件上的两段敏感栅，随温度变化而产生的电阻增量大小相等，符号相反，即：



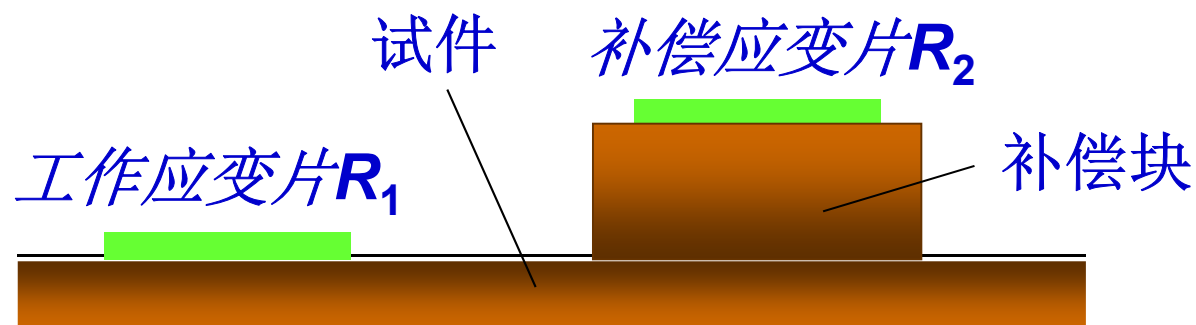
$$(\Delta R_a) t = - (\Delta R_b) t$$



温度误差及其补偿

3. 电路补偿法

测量应变时，使用两个应变片，一片贴在被测试件的表面，称为**工作应变片 R_1** 。另一片贴在与被测试件材料相同的补偿块上，称为**补偿应变片 R_2** 。在工作过程中补偿块不承受应变，仅随温度发生变形。



补偿应变片粘贴示意图



3. 电路补偿法

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

试件 补偿应变片 R_2

工作应变片 R_1 补偿块

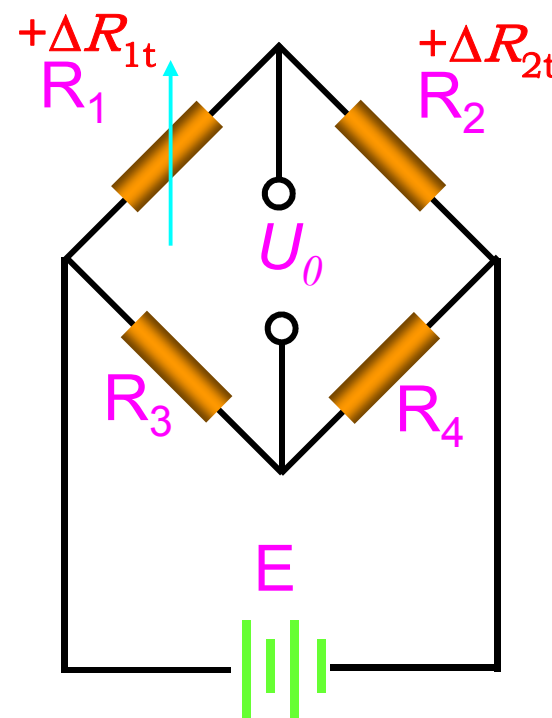
把 R_1 与 R_2 接入电桥相邻臂上，
当被测试件不承受应变时， R_1 和 R_2 处于同一温度场，调整电桥参数，可使电桥输出电压为零，即：

$$U_0 = A(R_1 R_4 - R_2 R_3) = 0$$

选择 $R_1 = R_2 = R$ 及 $R_3 = R_4 = r$ 。

当温度升高或降低 Δt 时，若 $\Delta R_{1t} = \Delta R_{2t}$ ，即两个应变片的热输出相等，则电桥的输出电压为：

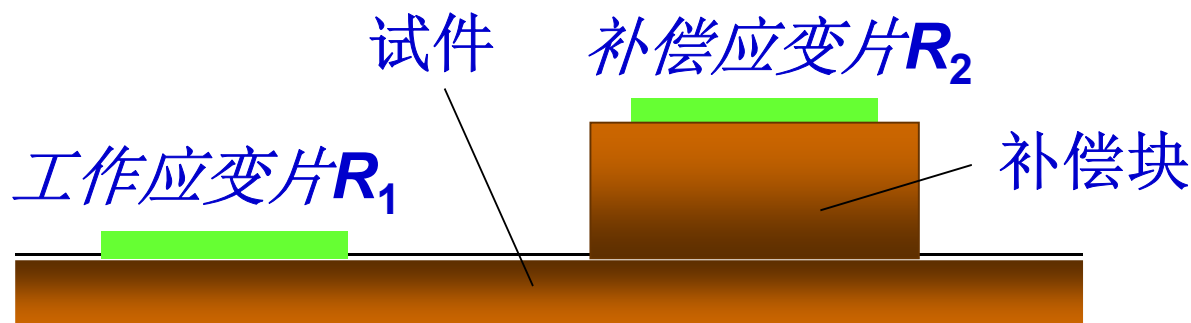
$$\begin{aligned} U_0 &= A[(R_1 + \Delta R_{1t})R_4 - (R_2 + \Delta R_{2t})R_3] \\ &= A[(R + \Delta R_{1t})r - (R + \Delta R_{2t})r] \\ &= A[Rr + r\Delta R_{1t} - Rr - r\Delta R_{2t}] \\ &= Ar(\Delta R_{1t} - \Delta R_{2t}) = 0 \end{aligned}$$



桥路补偿法



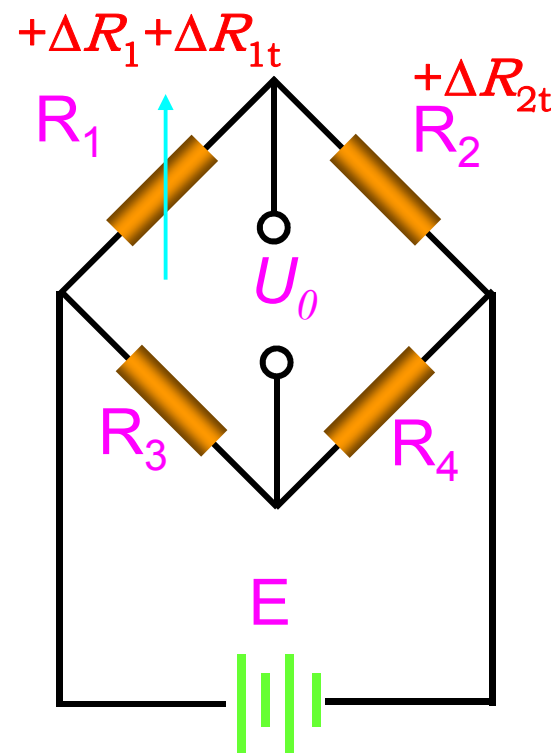
3. 电路补偿法



若被测试件受应变作用时，工作片 R_1 感受应变，阻值变化 ΔR_1 ；补偿片 R_2 不承受应变，阻值不变。此时电桥输出电压为：

$$\begin{aligned} U_0 &= A[(R_1 + \Delta R_{1t} + \Delta R_1)R_4 - (R_2 + \Delta R_{2t})R_3] \\ &= Ar\Delta R_1 = ArRK\varepsilon \end{aligned}$$

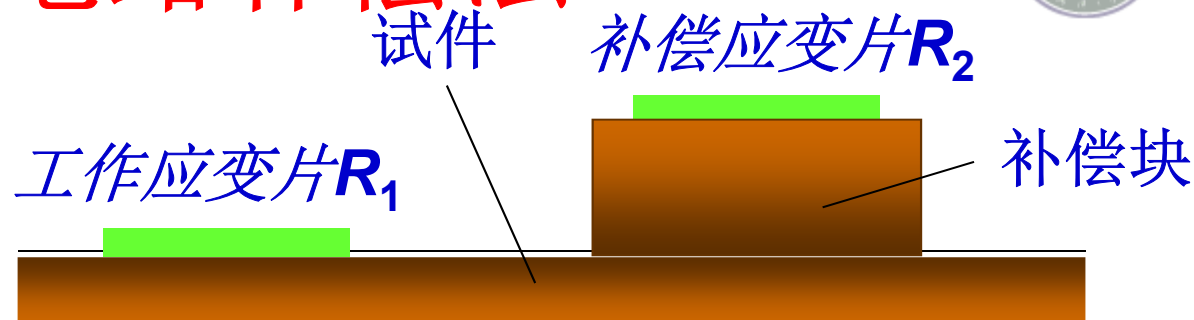
由上式可知，电桥输出电压 U_0 只与应变 ε 有关，与温度无关。



桥路补偿法



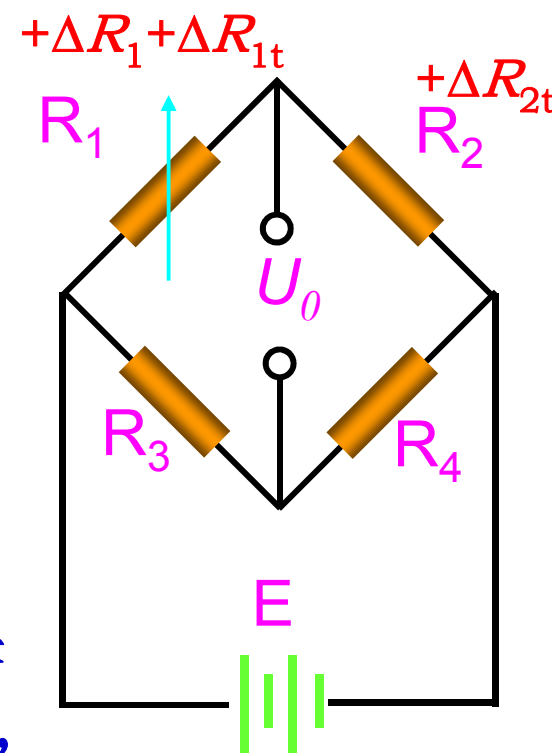
3. 电路补偿法



电桥补偿法如果要达到全补偿，需满足下列三个条件：

- ① R_1 和 R_2 须属于同一批号的，即它们的电阻温度系数 α 、线膨胀系数 β 、应变灵敏系数 K 都相同，两片的初始电阻值也要求相同；
- ② 用于粘贴补偿片的构件和粘贴工作片的试件二者材料必须相同，即要求两者线膨胀系数相等；
- ③ 两应变片处于同一温度环境中。

此方法简单易行，能在较大温度范围内进行补偿。缺点是条件不易满足，尤其是条件③。在某些测试条件下，温度场梯度较大， R_1 和 R_2 很难处于相同温度点。

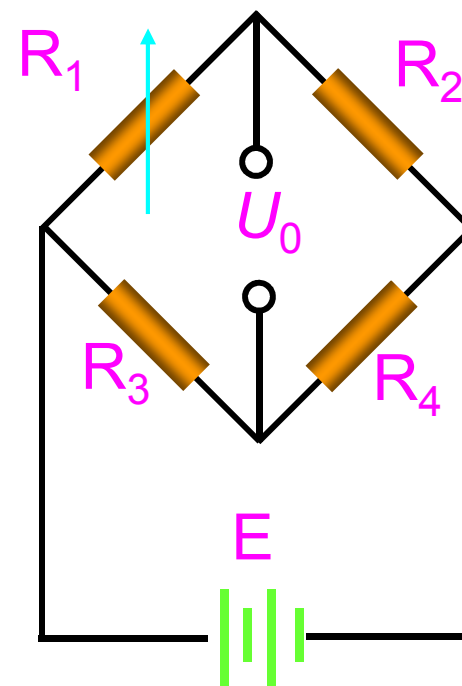
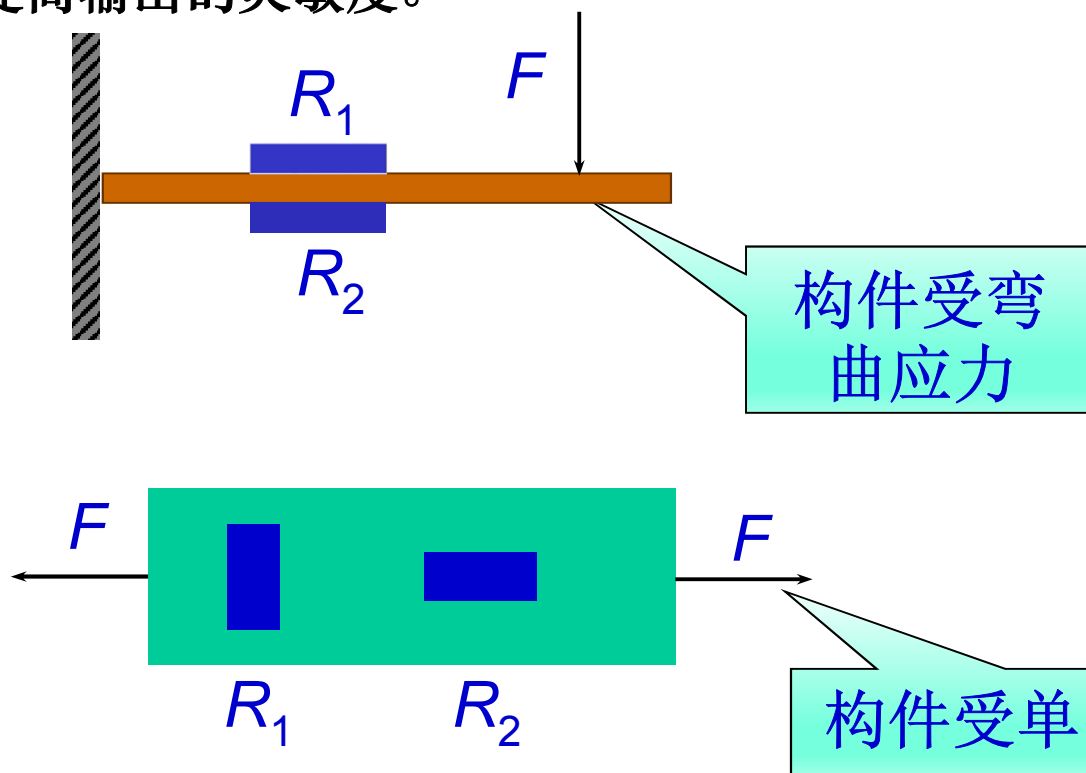


桥路补偿法



3. 电路补偿法

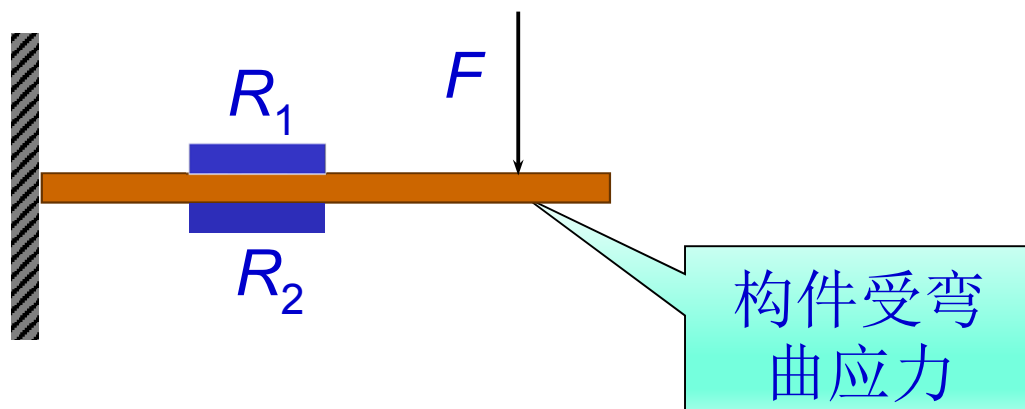
根据被测试件承受应变的情况，可以不另加专门的补偿块，而是将补偿片贴在被测试件上，这样既能起到温度补偿作用，又能提高输出的灵敏度。



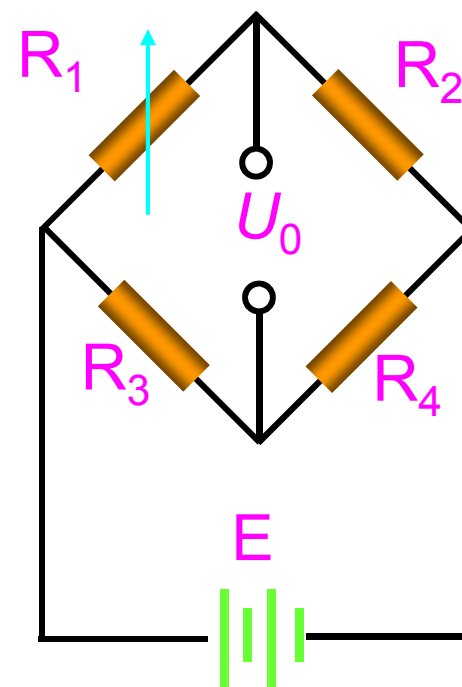
桥路补偿法



3. 电路补偿法



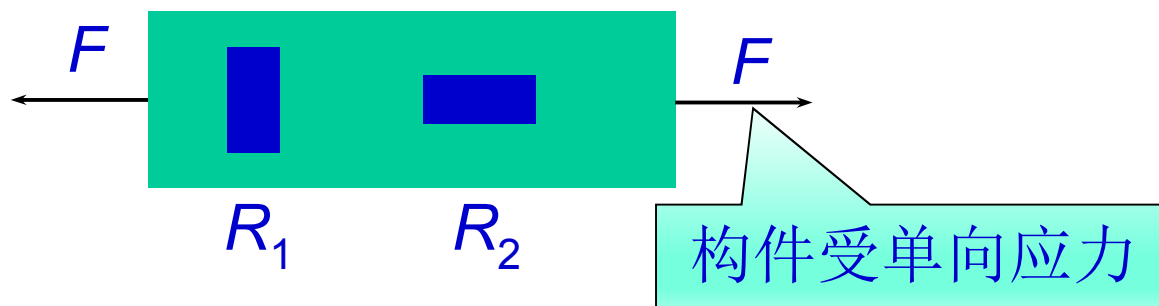
梁受弯曲应变时，应变片 R_1 和 R_2 的变形方向相反，上面受拉，下面受压，应变绝对值相等，符号相反，将它们接入电桥的相邻臂后，可使输出电压增加一倍。当温度变化时，应变片 R_1 和 R_2 阻值变化的符号相同，大小相等，电桥不产生输出，达到了补偿的目的。



桥路补偿法

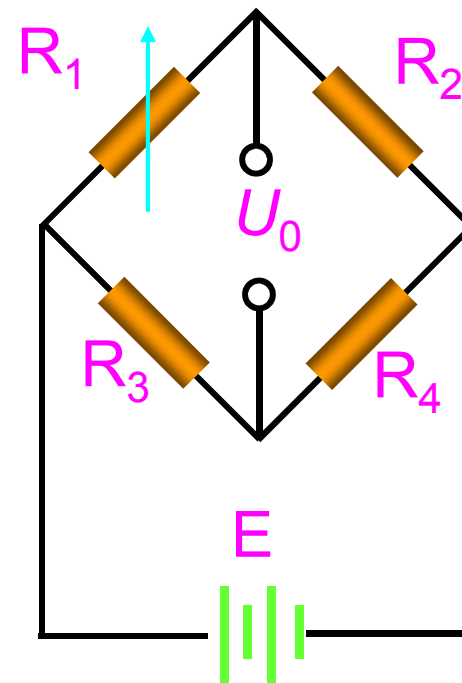


3. 电路补偿法

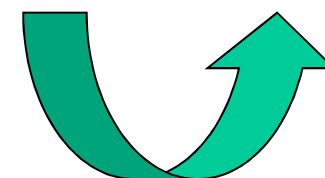


构件受单向应力时，将工作应变片 R_2 的轴线顺着应变方向，补偿应变片 R_1 的轴线和应变方向垂直， R_1 和 R_2 接入电桥相邻臂，其输出为：

$$U_0 = AR_1R_2K(1 + \mu)\varepsilon$$



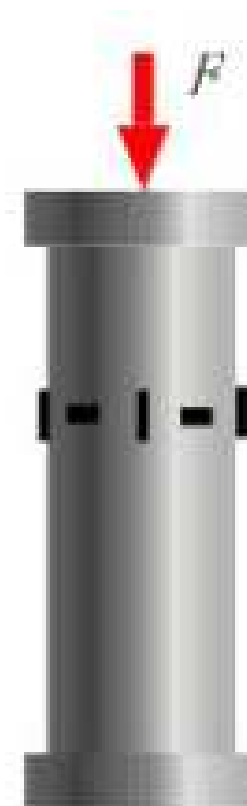
桥路补偿法





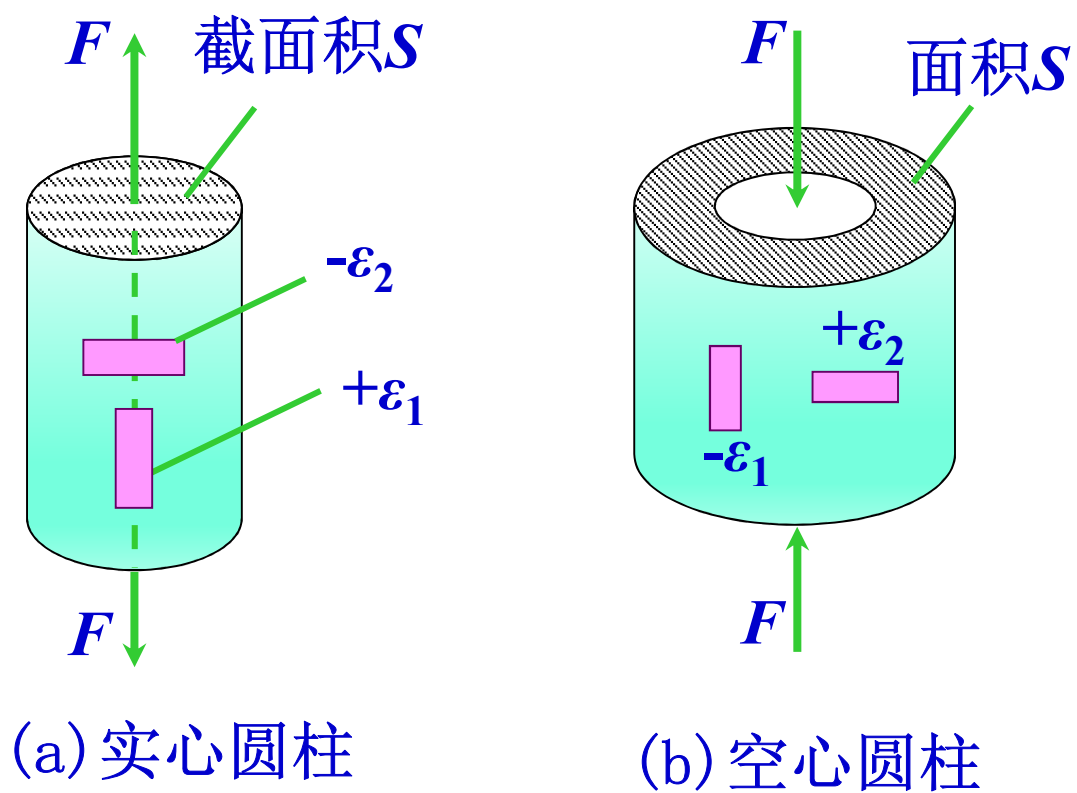
常用应变式传感器

(一) 柱式力传感器





柱式力传感器



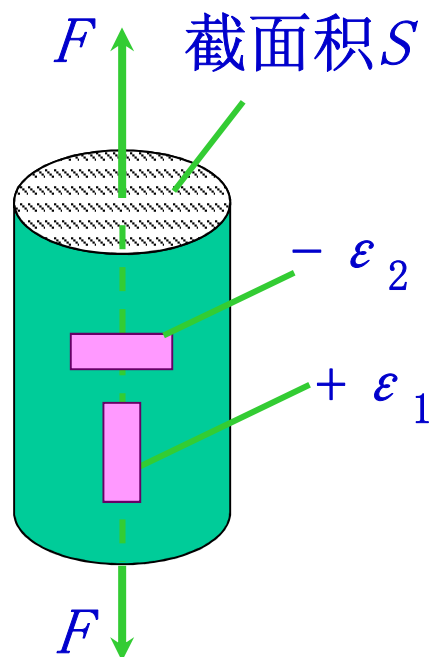
柱式力传感器

轴向布置一个或几个应变片，在圆周方向布置同样数目的应变片，后者取符号相反的应变，以构成差动对。由于应变片沿圆周方向分布，所以**非轴向**载荷分量被补偿。



柱式力传感器

➤ 在圆筒（柱）上按一定方式粘贴应变片，圆柱（筒）在外力F作用下产生形变，从而应变片产生形变：



(a) 实心圆柱

轴向应变：

$$\varepsilon_1 = \frac{\Delta l}{l} = \frac{\sigma}{E} = \frac{F}{SE}$$

圆周方向应变：

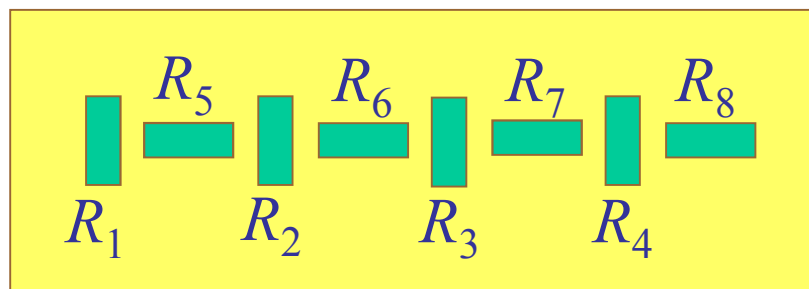
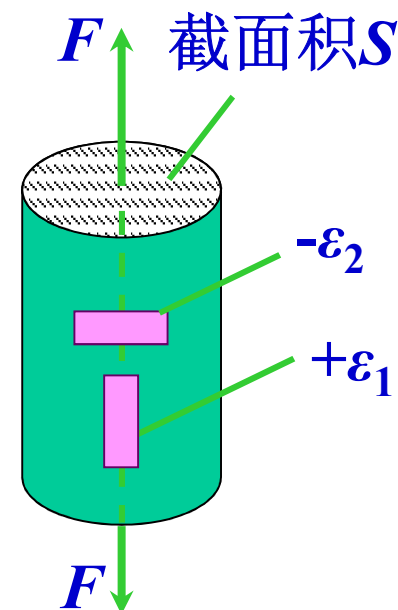
$$\varepsilon_2 = -\mu\varepsilon_1 = -\mu \frac{F}{SE}$$

式中：L为弹性元件的长度，
S为弹性元件的横截面积
F外力； σ 为应力， $\sigma = F/S$ ；
E为弹性模量

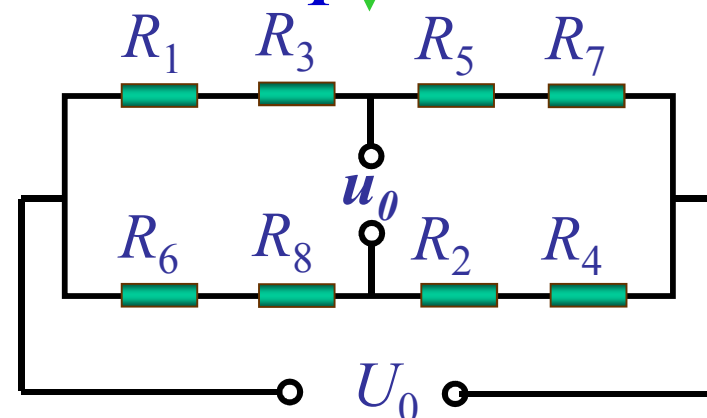


柱式力传感器

弹性元件上应变片的粘贴和电桥连接，应尽可能消除偏心和弯矩的影响，一般将应变片对称地贴在应力均匀的圆柱表面中部，构成**差动对**，且处于**对臂**位置，以减小弯矩的影响。横向粘贴的应变片具有**温度补偿作用**。



(a) 圆柱面展开图



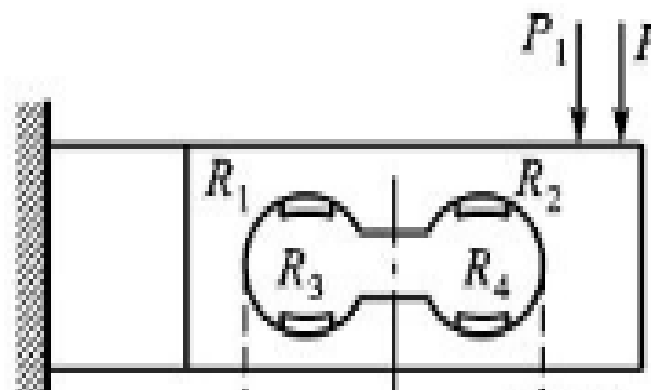
(b) 桥路连接

柱式力传感器应变片的粘贴与桥路连接



常用应变式传感器

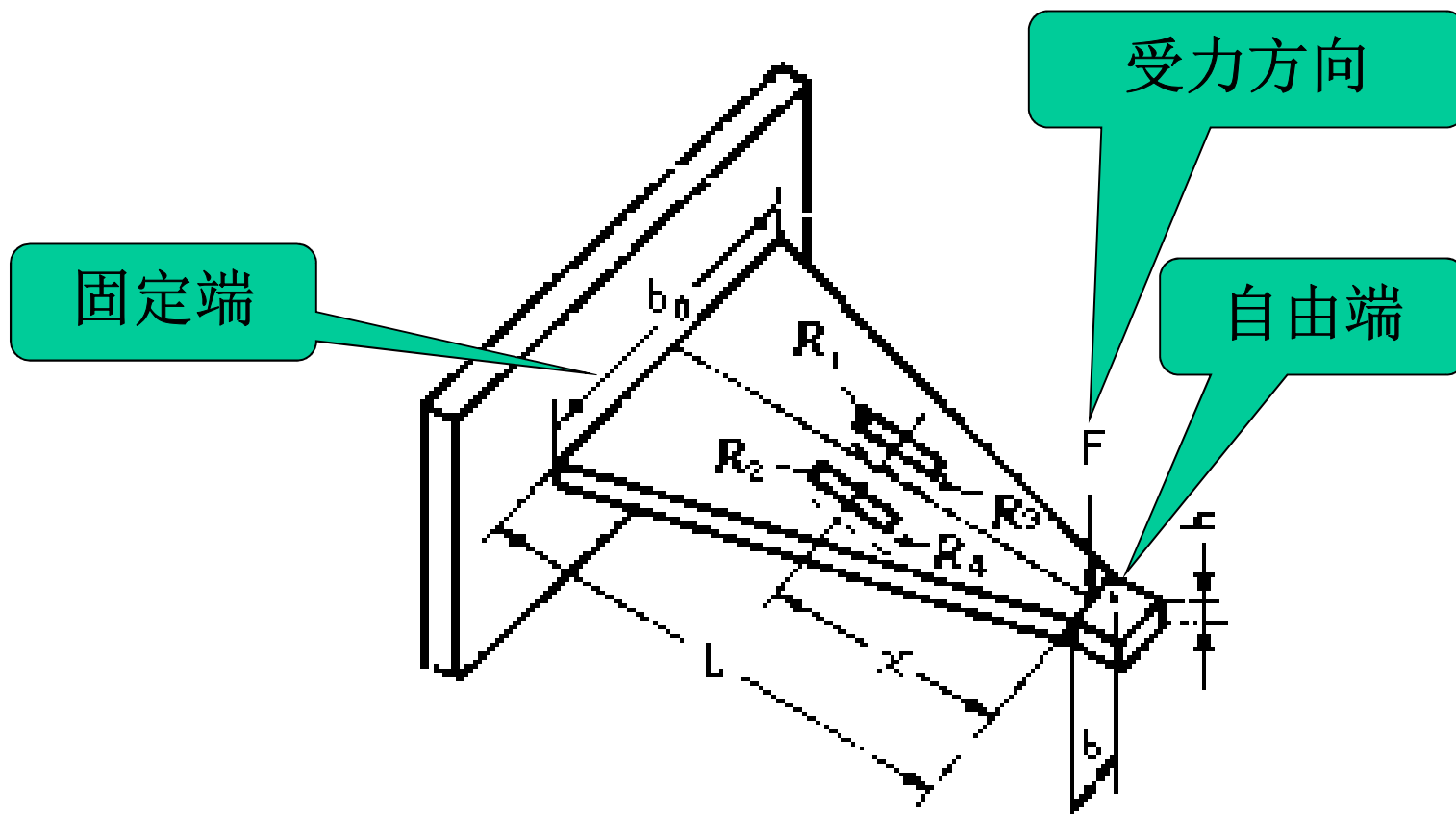
(二) 梁式力传感器





(二) 梁式力传感器

(1) 等强度梁式力传感器

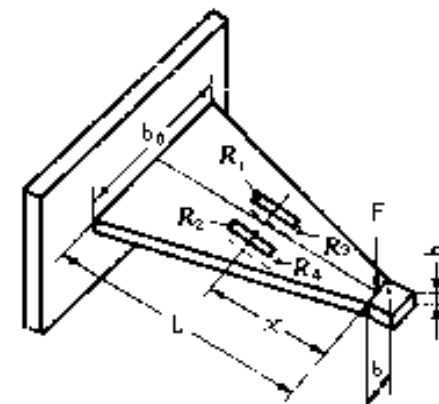


若使梁各横截面上的最大正应力都相等，并均达到材料的许用应力，则称为等强度梁。



(二) 梁式力传感器

(1) 等强度梁式力传感器





(二) 梁式力传感器

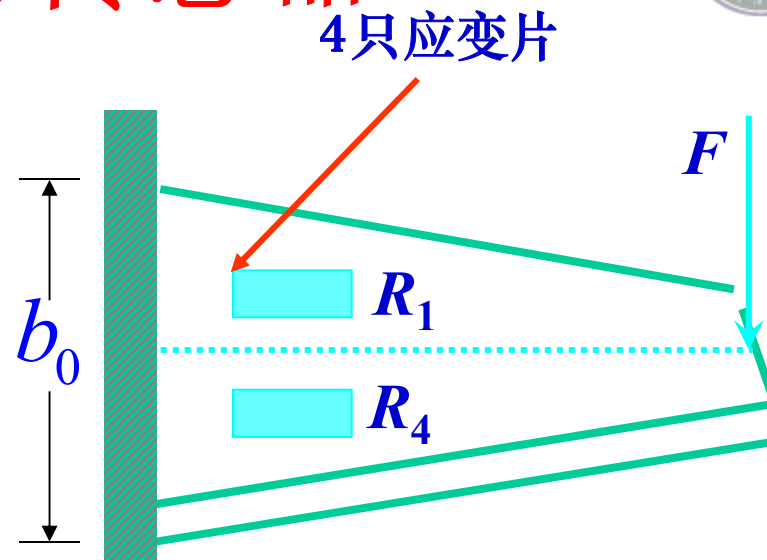
(1) 等强度梁式力传感器

一端固定，一端自由，厚度为 h ，长度 l ，固定端宽度为 b_0 ，力 F 作用在三角形顶点。其表面应变为：

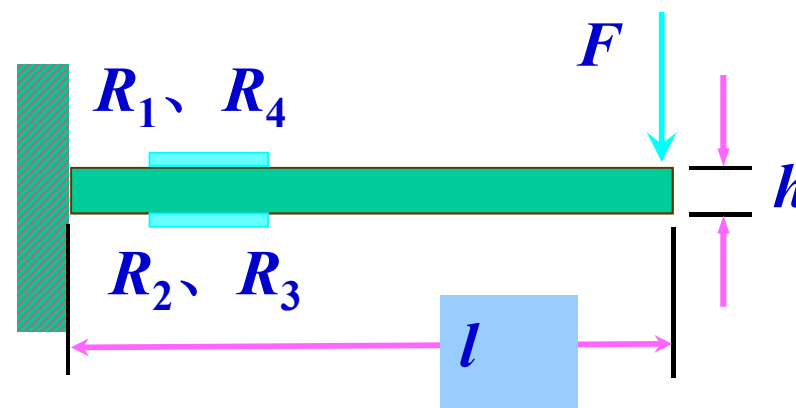
$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} = \frac{6Fl}{b_0 h^2 E}$$

E 为弹性模量(杨氏模量)

此位置上下两侧分别粘有4只应变片， R_1 、 R_4 同侧； R_3 、 R_2 同侧，这两侧的应变方向刚好相反，且大小相等，可构成全差动电桥。



(a) 等强度悬臂梁

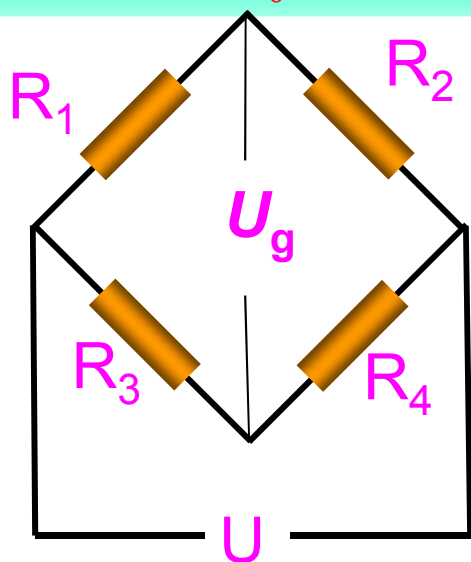




(1) 等强度梁式力传感器

E为弹性模量(杨氏模量)

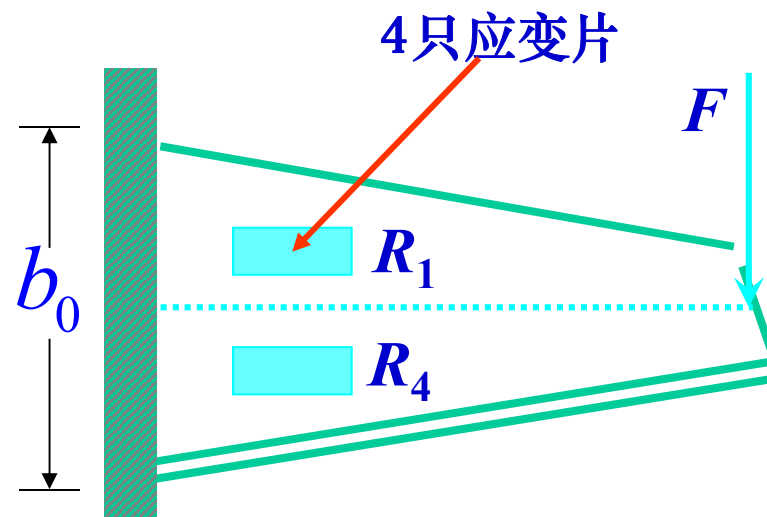
$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} = \frac{6Fl}{b_0 h^2 E}$$



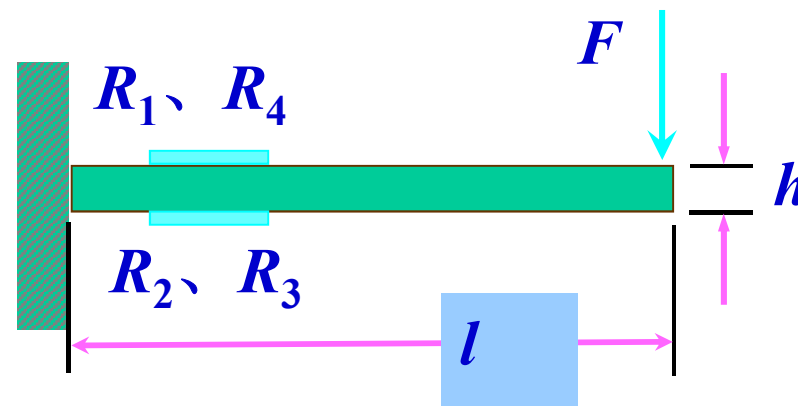
$$U_g = \frac{UK}{4}(\varepsilon_1 - \varepsilon_2 - \varepsilon_3 + \varepsilon_4)$$

$$\therefore \varepsilon_1 = \varepsilon_4 = -\varepsilon_2 = -\varepsilon_3$$

$$\therefore U_g = UK\varepsilon = UK \frac{6Fl}{b_0 h^2 E}$$



(a) 等强度悬臂梁



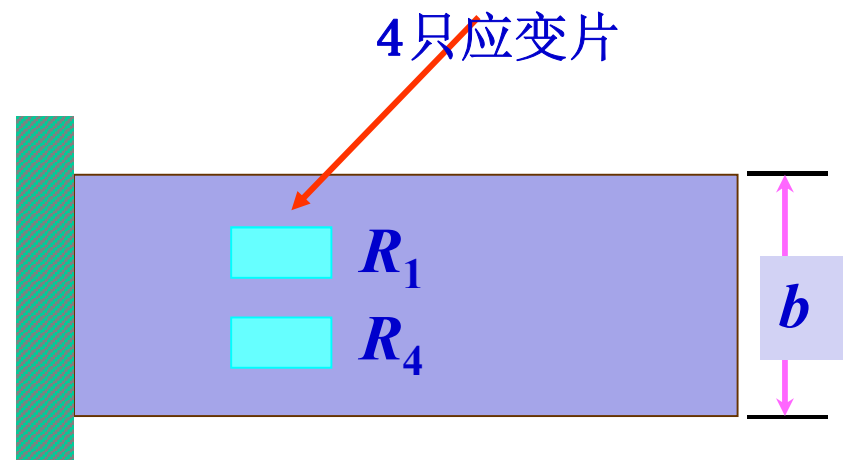


(二) 梁式力传感器

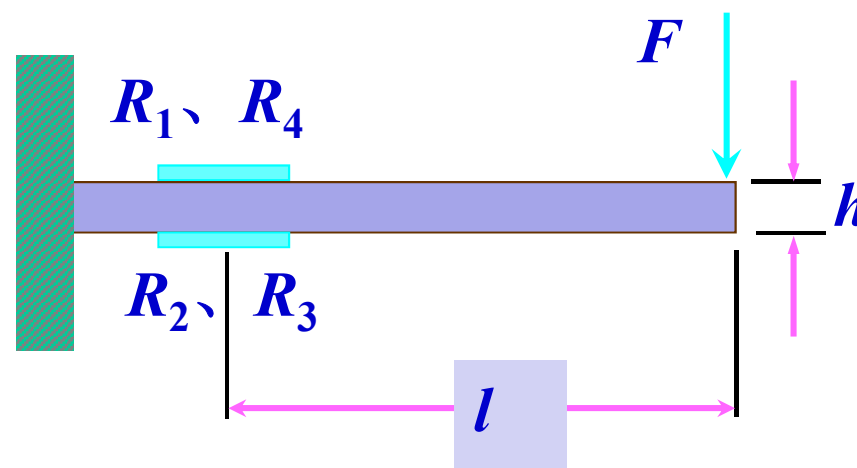
(2) 等截面梁

一端固定，一端自由，厚度为 h ，宽度为 b ，悬臂外端到应变片中心的距离为 l 。其应变为：

$$\varepsilon = \frac{24Fl}{bh^2E}$$



(b) 等截面悬臂梁

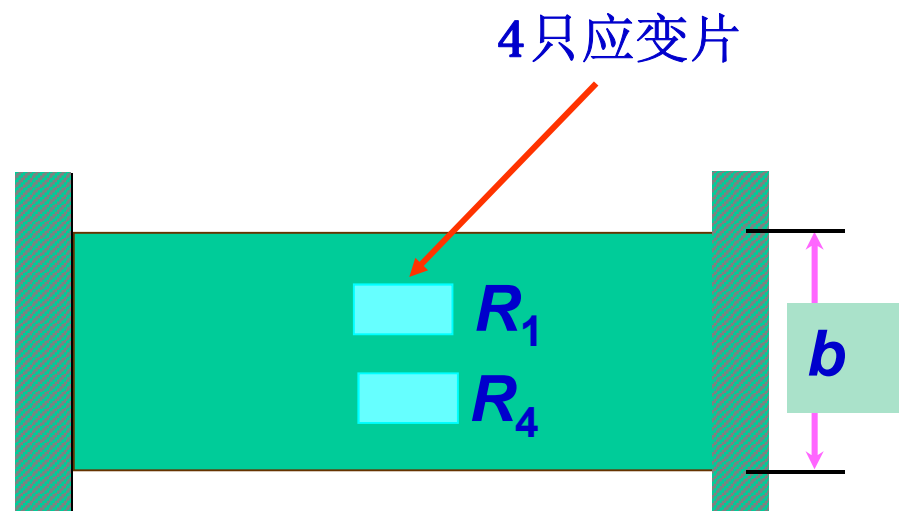




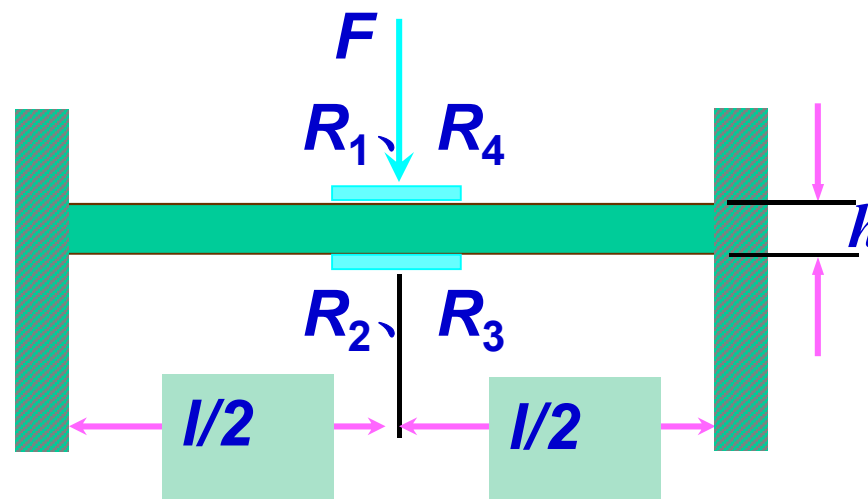
(二) 梁式力传感器

(3) 固定梁

$$\varepsilon = \frac{3Fl}{bh^2 E}$$

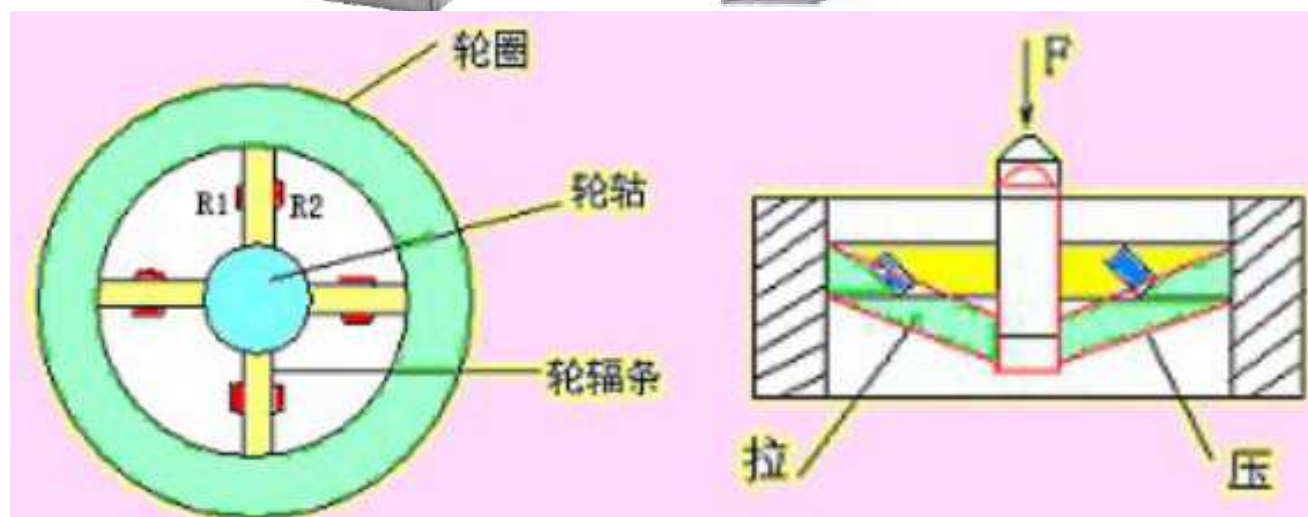


(c) 双端固定梁





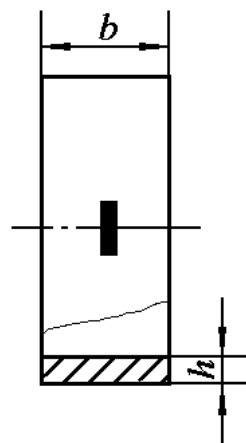
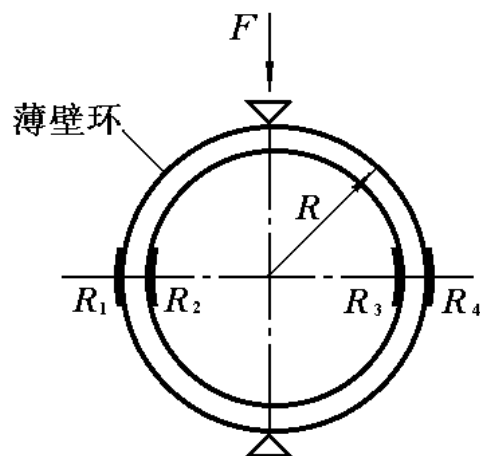
(三) 轮辐式力传感器



具有大的抗载能力，可承受大的偏心度和侧向力。

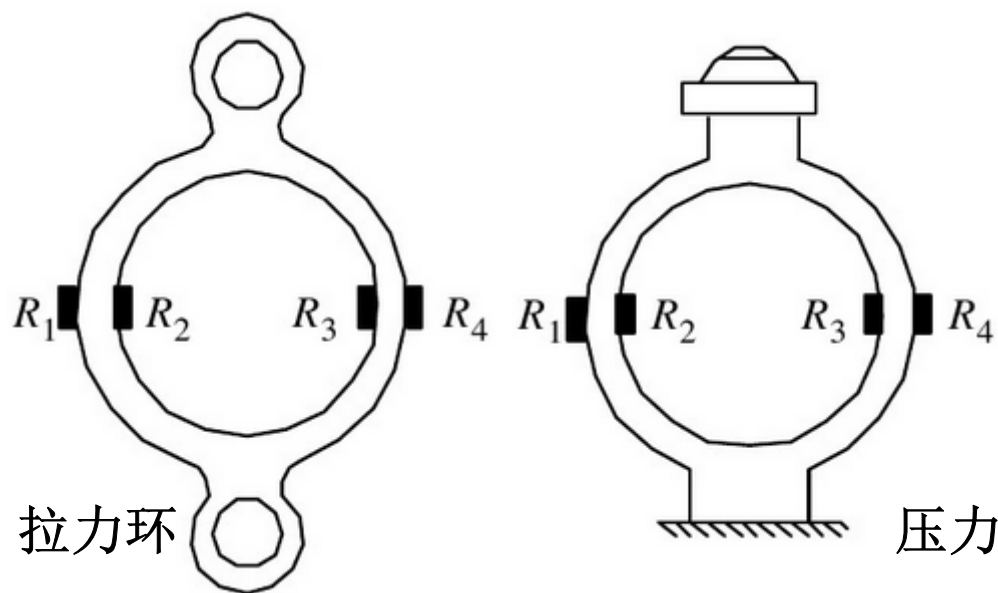


(四)薄壁圆环式力传感器



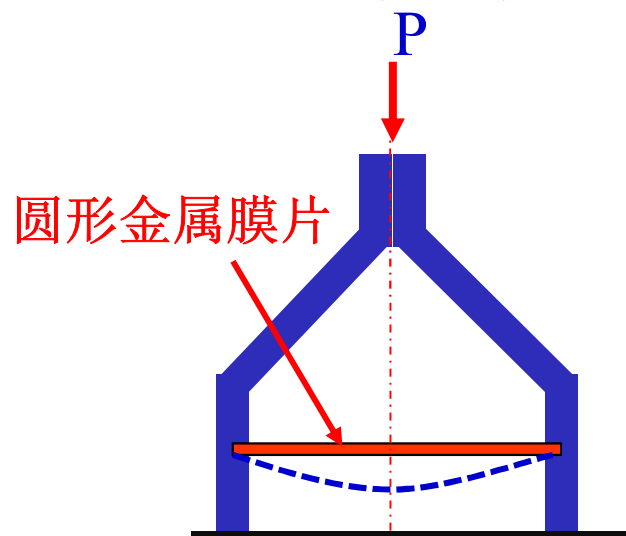
在外力作用下，各点的应力差别较大

$$\varepsilon = \pm \frac{3F[R - (h/2)]}{bh^2 E} \left(1 - \frac{2}{\pi} \right)$$





(五) 膜片式压力传感器

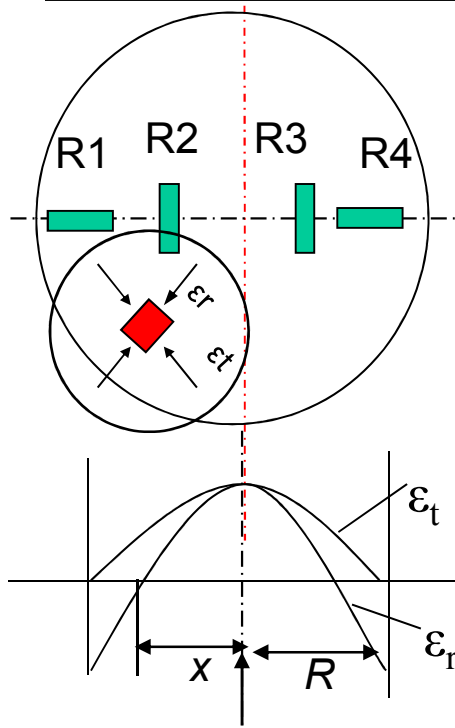


$$\varepsilon_r = -\frac{3P}{8h^2 \cdot E} (1 - \mu^2) (r^2 - 3x^2)$$

$$\varepsilon_t = \frac{3P}{8h^2 \cdot E} (1 - \mu^2) (r^2 - x^2)$$

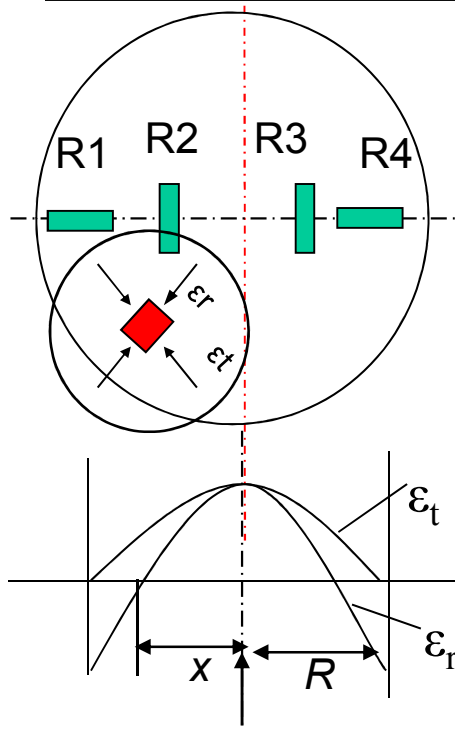
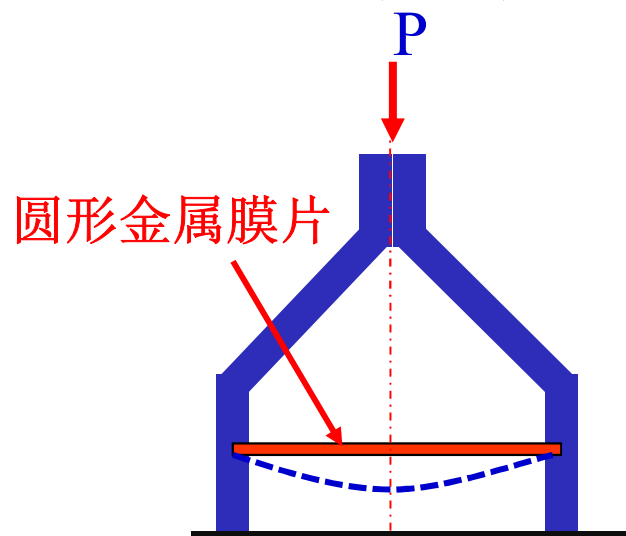
式中：

- r —— 膜片半径
- h —— 膜片厚度
- E —— 膜片弹性模量
- μ —— 膜片泊松比
- x —— 任意点离圆心距离





(五) 膜片式压力传感器



$$\varepsilon_r = -\frac{3P}{8h^2 \cdot E} (1 - \mu^2) (r^2 - 3x^2)$$

$$\varepsilon_t = \frac{3P}{8h^2 \cdot E} (1 - \mu^2) (r^2 - x^2)$$

在膜片边缘 ($x=r$) 处:

$$\varepsilon_t = 0; \varepsilon_r = -\frac{3P}{4h^2} \frac{1 - \mu^2}{E} r^2$$

在膜片中心 ($x=0$) 处:

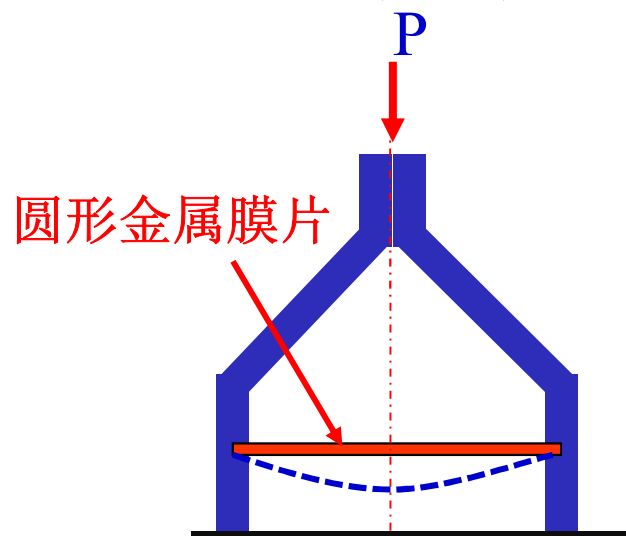
$$\varepsilon_r = \varepsilon_t = \frac{3P}{8h^2} \frac{1 - \mu^2}{E} r^2$$

$x = r / \sqrt{3} \approx 0.58r$ 处:

$$\varepsilon_r = 0$$



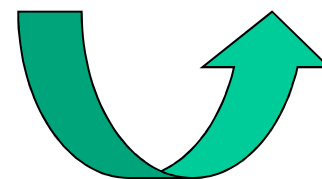
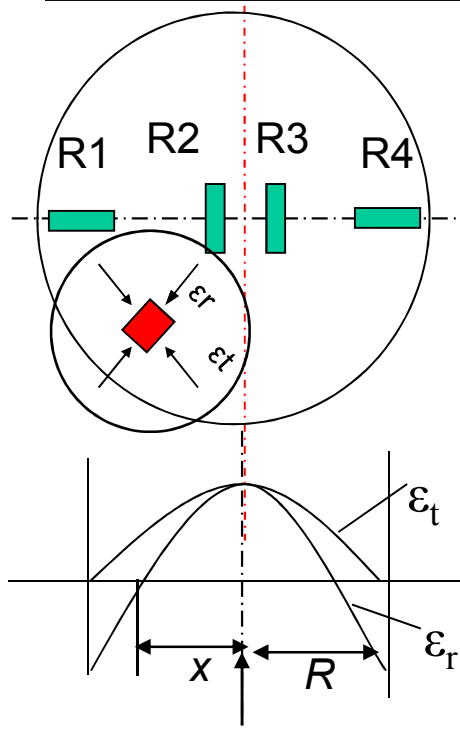
(五) 膜片式压力传感器



可见：

- 1) 切向应变均为正。
- 2) 径向应变有正有负，**0.58r**处为0

一般粘帖方法：两个贴在正的最大区域（**R2、R3**）两个贴在负的最大区域（**R1、R4**）。





压阻式传感器

压阻式传感器

是利用硅的压阻效应和微电子技术制成的，是一种新的物性型传感器。



微型硅应变压力传感器



压阻式传感器

压阻式应变片的基本工作原理

压阻效应

单晶硅材料在受到应力作用后，其电阻率发生明显变化，这种现象被称为压阻效应。

电阻相对变化量：

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

对金属材料： $\therefore \frac{d\rho}{\rho}$ 较小

$$\therefore \frac{dR}{R} = (1 + 2\mu)\varepsilon$$

对半导体材料：

$$\therefore d\rho/\rho = \pi\sigma = \pi E\varepsilon$$

$$\frac{dR}{R} = \pi\sigma + (1 + 2\mu)\varepsilon = (\pi E + 1 + 2\mu)\varepsilon$$

π ——压阻系数； E ——弹性模量； σ ——应力； ε ——应变。



压阻式传感器

对半导体材料: $\frac{dR}{R} = \pi\sigma + (1 + 2\mu)\varepsilon = (\pi E + 1 + 2\mu)\varepsilon$

π ——压阻系数; E ——弹性模量; σ ——应力; ε ——应变。

由于 πE 一般都比 $(1 + 2\mu)$ 大几十倍甚至上百倍, 因此引起半导体材料电阻相对变化的主要原因是压阻效应, 所以上式可近似写成:

$$\frac{dR}{R} = \pi E \varepsilon$$

上式表明压阻传感器的工作原理是基于压阻效应。



压阻式传感器

对半导体材料:

$$\frac{dR}{R} = \pi E \varepsilon$$

对金属材料:

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

硅的压阻效应不同于金属应变计（见电阻应变计），前者电阻随压力的变化主要取决于**电阻率**的变化，后者电阻的变化则主要取决于**几何尺寸的变化**（应变），而且前者的灵敏度比后者大**50~100**倍。



压阻式传感器

压阻式传感器有许多优点：

- ①频率响应高(有的产品固有频率高达**1.5兆赫**),适于动态测量;
- ②体积小（例如有的产品外径可达**0.25毫米**），适于微型化;
- ③精度高，可达**0.1~0.01%**;
- ④灵敏高,比金属应变计高出很多倍，有些场合可不加放大器;
- ⑤无活动部件，可靠性高，能工作于振动、冲击、腐蚀、强干扰等恶劣环境。

压阻式传感器的缺点：

- 温度影响较大（有时需进行温度补偿）
- 工艺较复杂
- 造价高



压阻式传感器

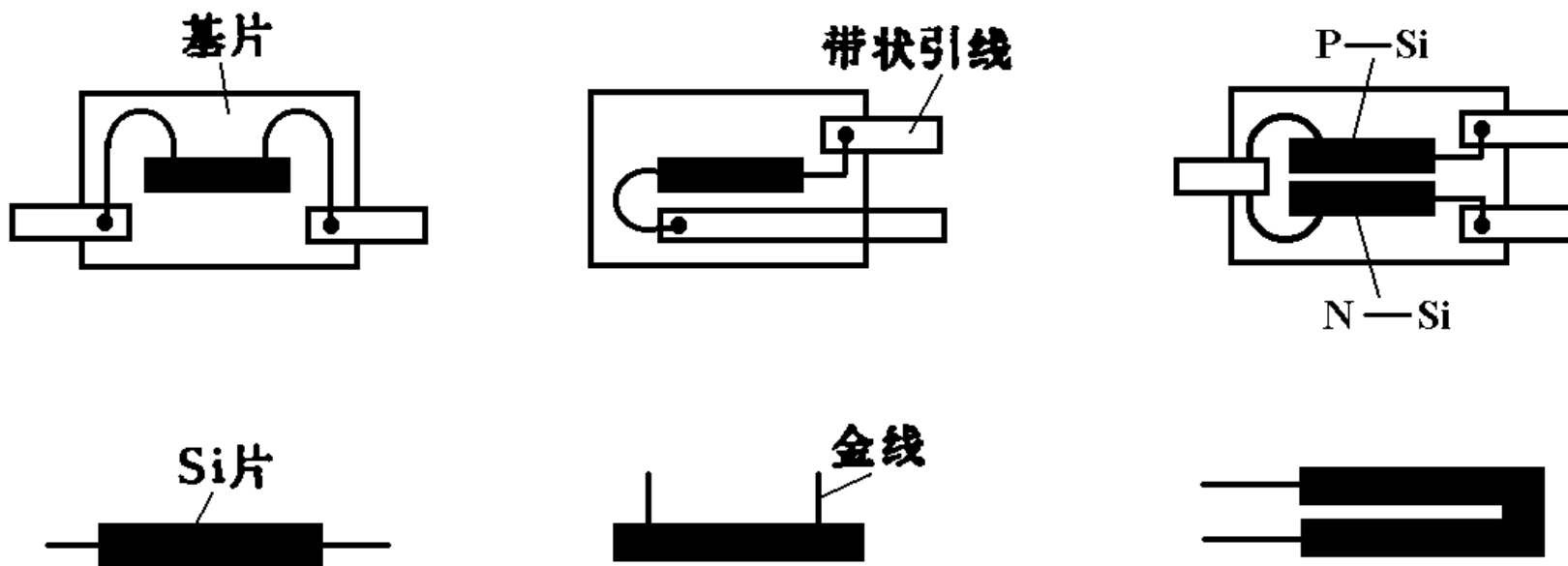
压阻式传感器类型：

- ◆ **粘贴型压阻式传感器** (传感元件是用半导体材料的体电阻制成的粘贴式应变片，半导体应变片)
- ◆ **扩散型压阻式传感器** (传感元件是利用集成电路工艺，在半导体材料的基片上制成的扩散电阻。固态压阻传感器)



压阻式传感器

◆ 粘贴型压阻式传感器



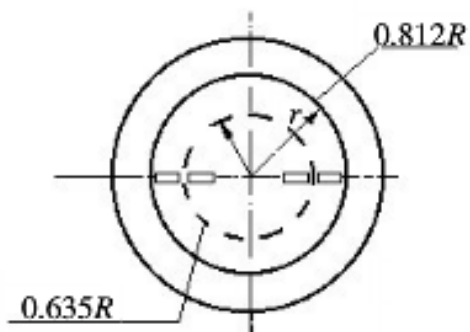
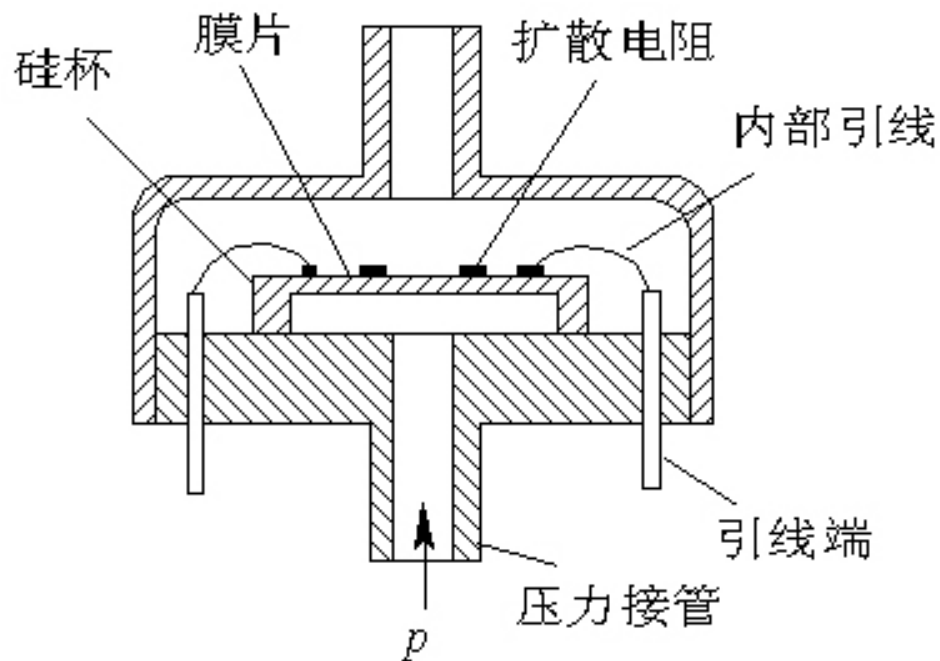
主要优点

- 灵敏系数比金属电阻应变片的灵敏系数大数十倍
- 横向效应和机械滞后极小
- 温度稳定性和线性度比金属电阻应变片差得多



压阻式传感器

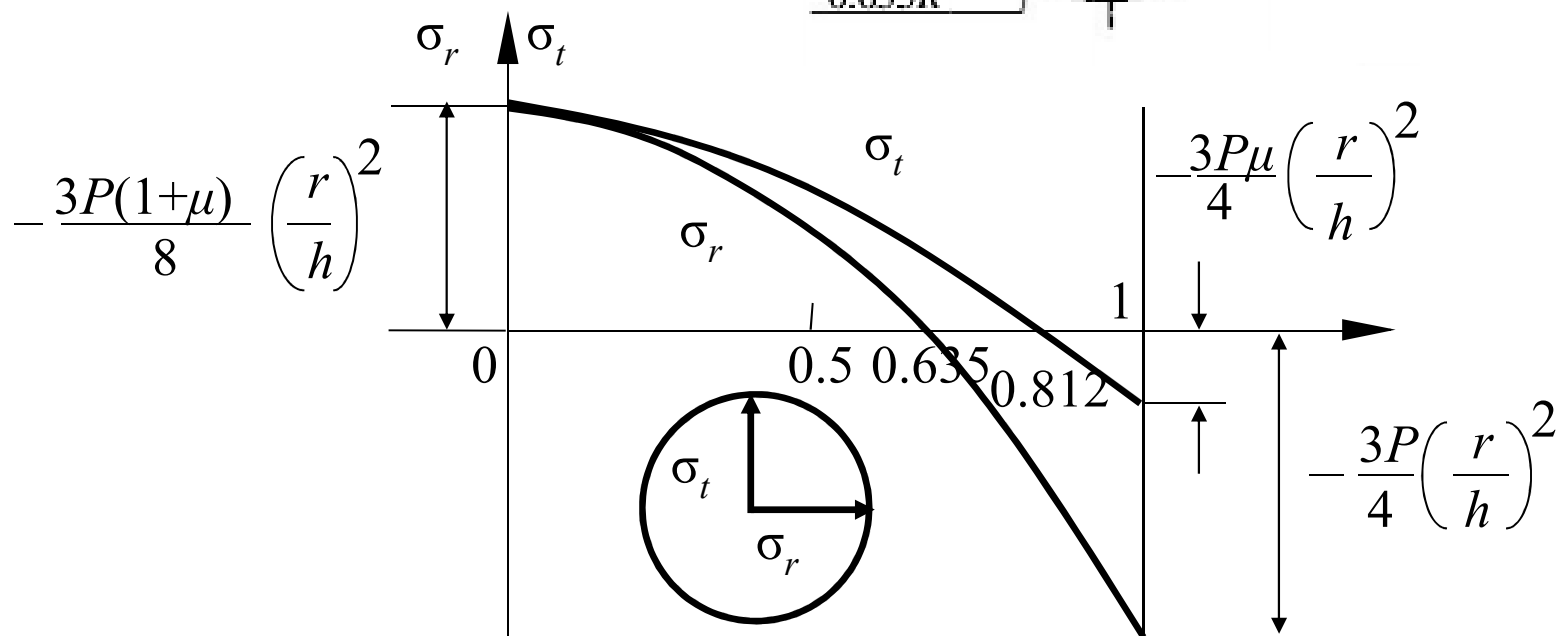
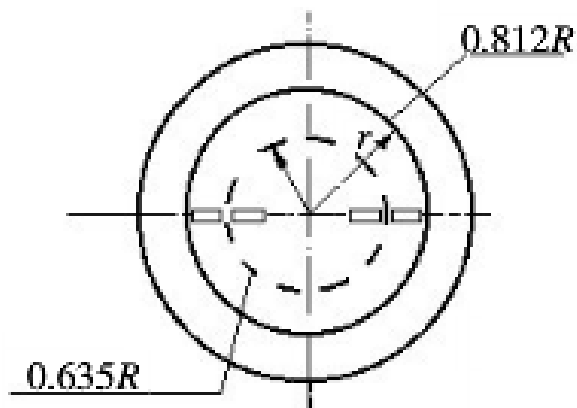
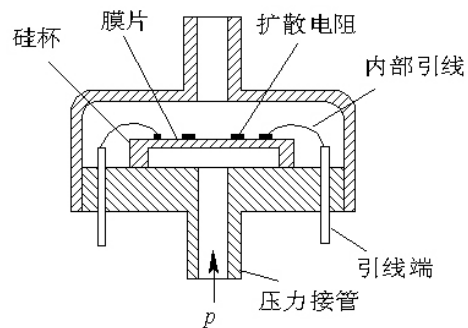
◆ 扩散型压阻式传感器



- ✓ 为固定边缘,硅膜片的周边较厚,呈杯形,也称为硅杯。
- ✓ 硅膜片上的四个扩散电阻接成电桥。
- ✓ 硅边的内腔与被测压力 p 相连,杯外与大气相通,测量表压;若杯外与另一压力源相接,则可测压差。

主要用于气、液体压力测量

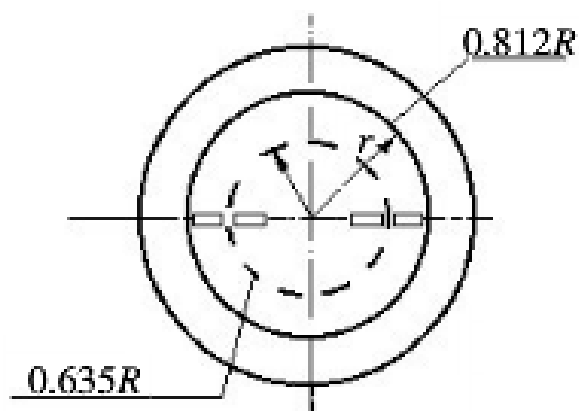
压阻式传感器



平膜片的应力分布图



压阻式传感器



由于在 $0.635r$ 半径之内 σ_r 为正值，在 $0.635r$ 半径之外 σ_r 负值，内、外电阻值的变化率应为

$$\left(\frac{\Delta R}{R}\right)_i = \frac{1}{2} \pi_{44} \bar{\sigma}_{ri} \quad \left(\frac{\Delta R}{R}\right)_o = -\frac{1}{2} \pi_{44} \bar{\sigma}_{ro}$$

式中 $\bar{\sigma}_{ri}$ 、 $\bar{\sigma}_{ro}$ ——内、外电阻所受径向应力的平均值

$\left(\frac{\Delta R}{R}\right)_i$ 、 $\left(\frac{\Delta R}{R}\right)_o$ ——内外电阻的相对变化。

设计时，适当安排电阻的位置，可以使得 $\bar{\sigma}_{ri} = -\bar{\sigma}_{ro}$ ，于是有

$$\left(\frac{\Delta R}{R}\right)_i = -\left(\frac{\Delta R}{R}\right)_o$$

即可组成差动电桥。



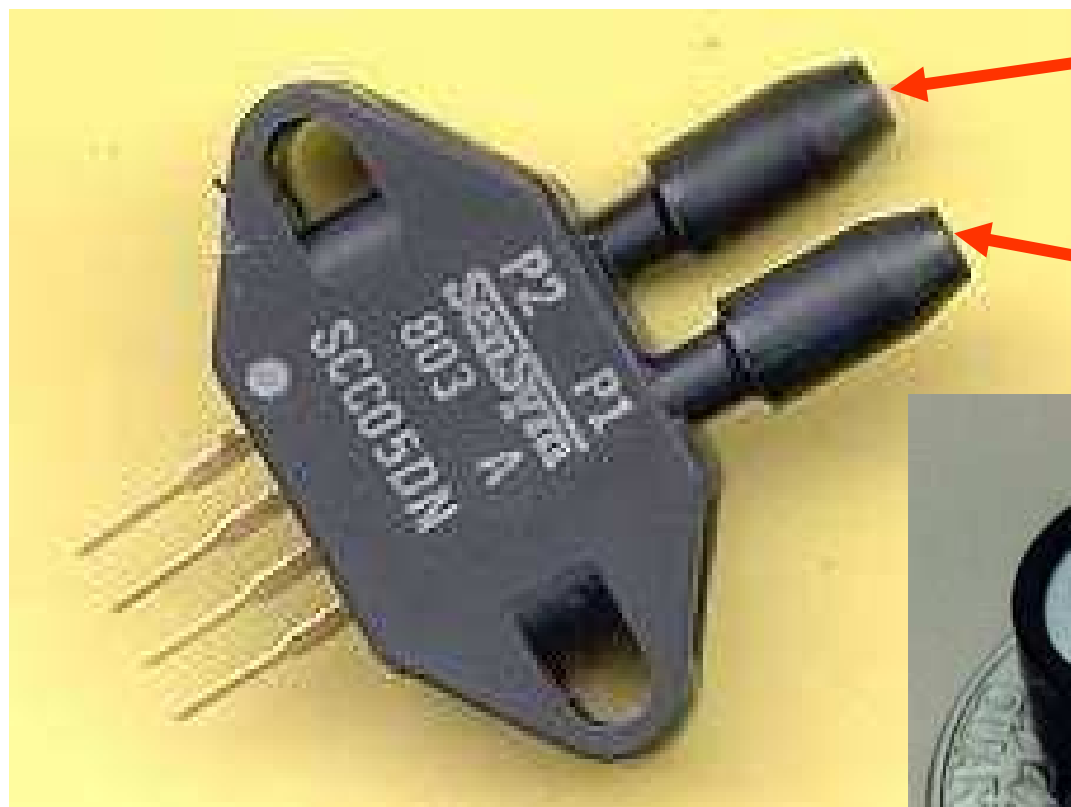
扩散型压阻式传感器





扩散型压阻式传感器

小型压阻式固态压力传感器



低压进气口

高压进气口

绝对压力传感器



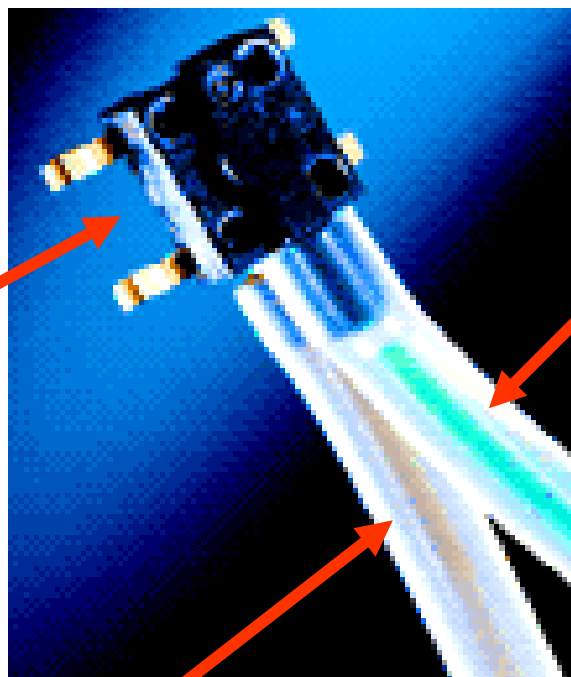


扩散型压阻式传感器

小型压阻式固态压力传感器

呼吸监视仪、透析和注射泵设备中用的压力传感器

固态压力
传感器



p_1 进气管

p_2 进气管



测量电路

为了减少温度影响，压阻器件一般采用恒流源供电。

假设电桥中两个支路的电阻相等，即 $R_{ABC}=R_{ADC}=2(R+\Delta R_T)$ ，故有： $I_{ABC}=I_{ADC}=\frac{1}{2}I$

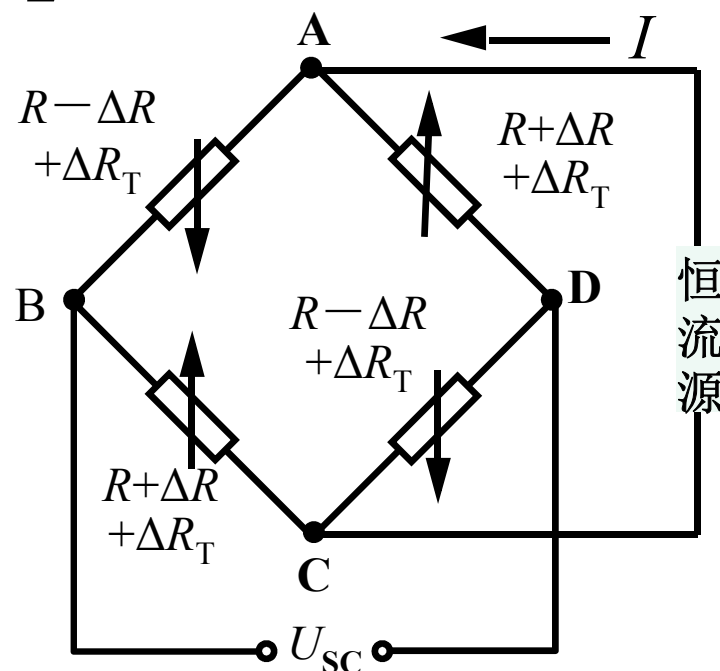
因此，电桥输出为：

$$U_{SC} = U_{BD} = \frac{1}{2}I(R + \Delta R + \Delta R_T) - \frac{1}{2}I(R - \Delta R + \Delta R_T)$$

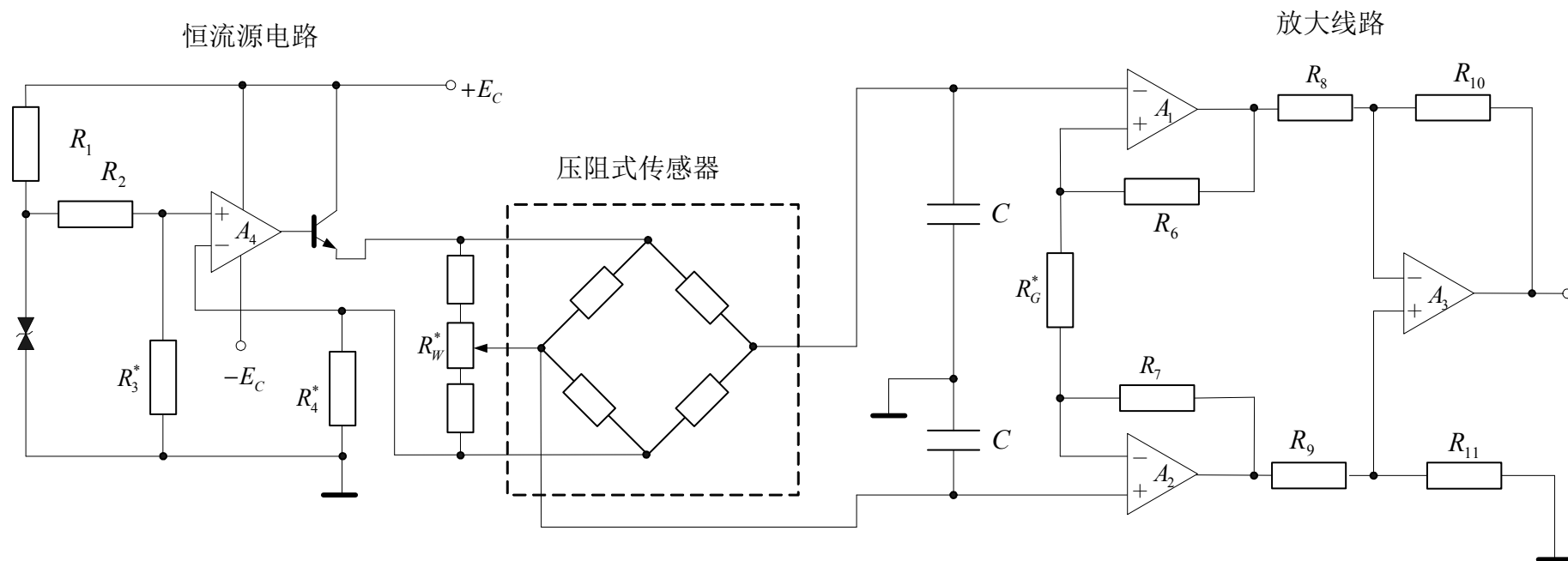
整理得：

$$U_{SC} = I\Delta R$$

可见，电桥输出与电阻变化成正比，即与被测量成正比，与恒流源电流成正比，即与恒流源电流大小和精度有关。但与温度无关，因此不受温度的影响。但是，压阻器件本身受到温度影响后，要产生零点温度漂移和灵敏度温度漂移，因此必须采取温度补偿措施。



测量电路

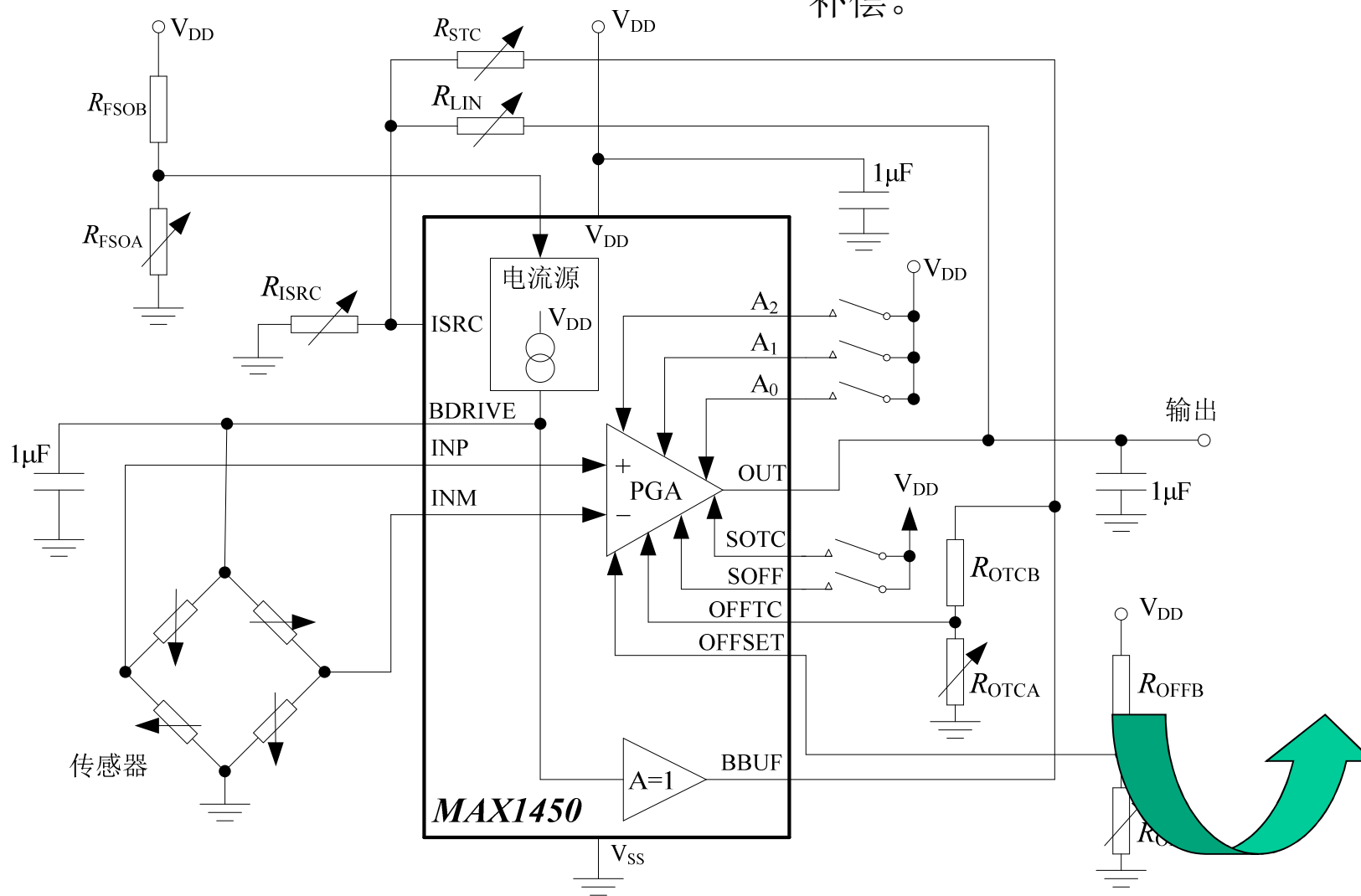




测量电路

压阻传感器专用处理芯片MAX1450

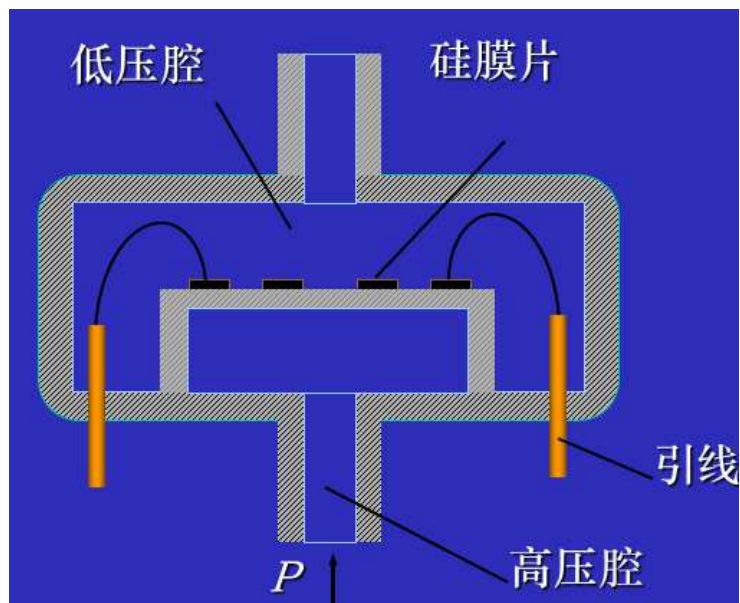
MAX1450传感器信号调理器用于优化压阻式传感器的校准和温度补偿。



应用举例



压阻式压力传感器



固态压力传感器

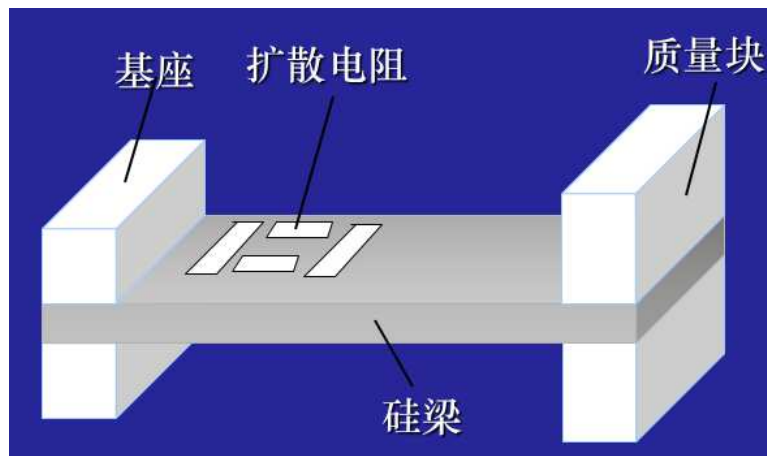


呼吸、透析和注射泵设备
中用的压力传感器

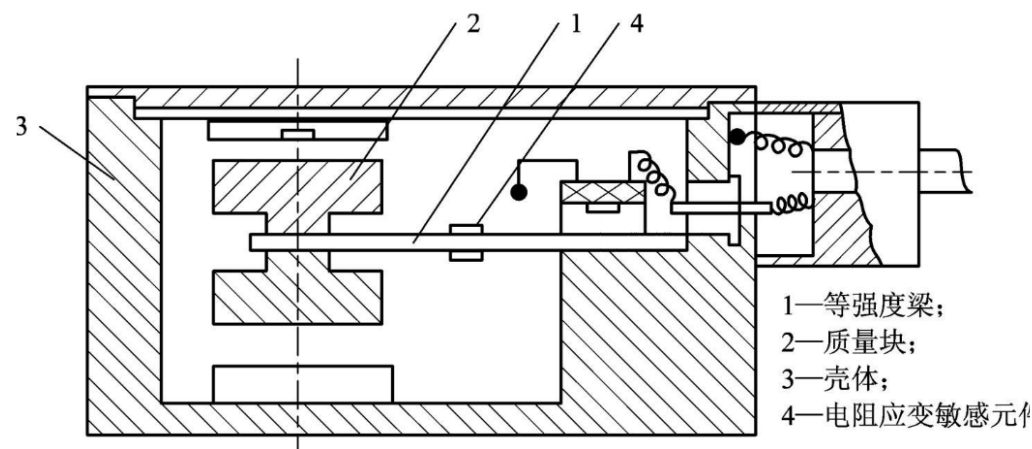




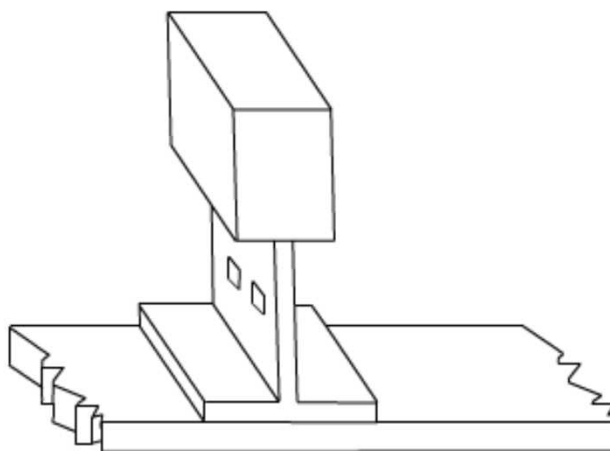
应变式加速度传感器



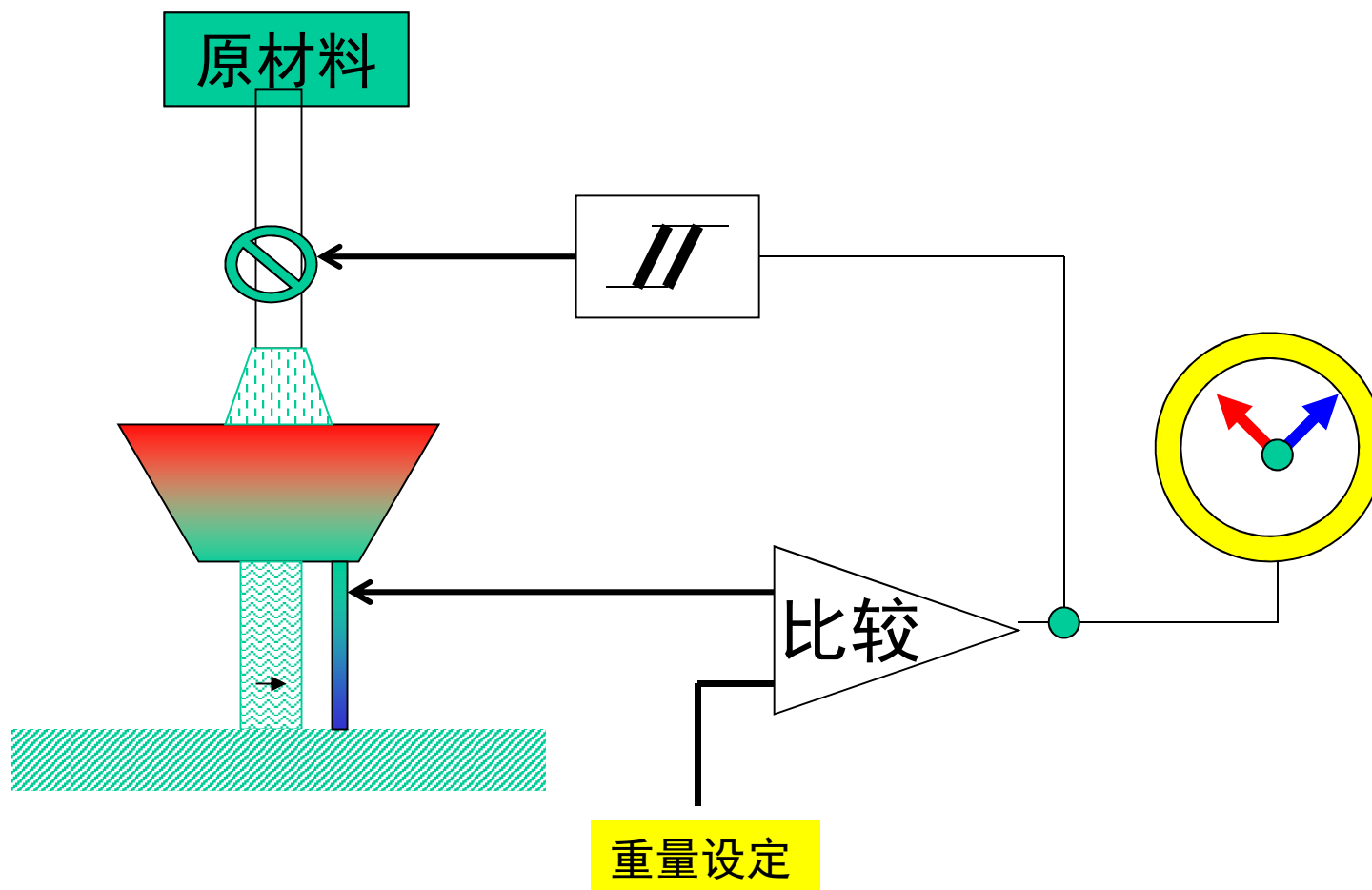
压阻式加速度传感器



金属丝应变式加速度传感器

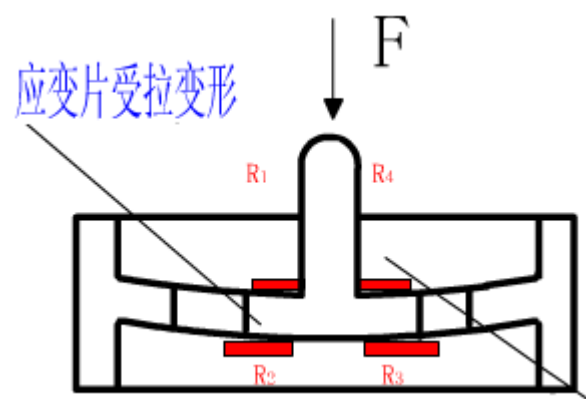
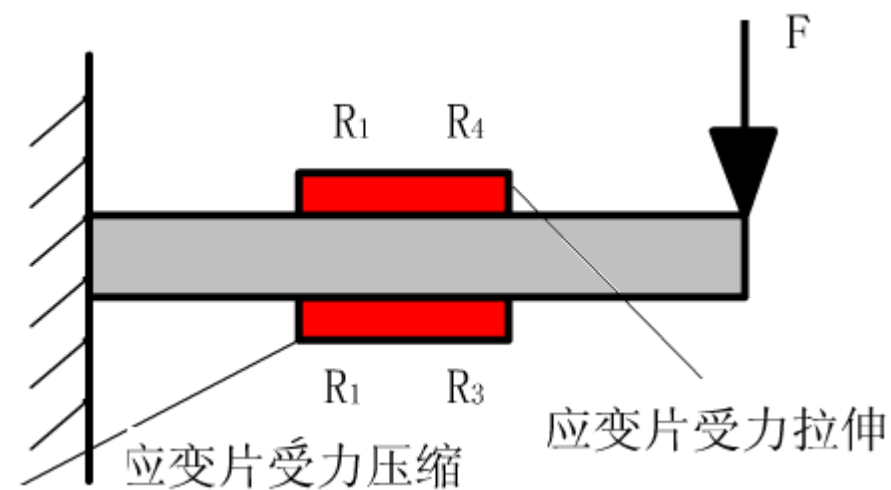
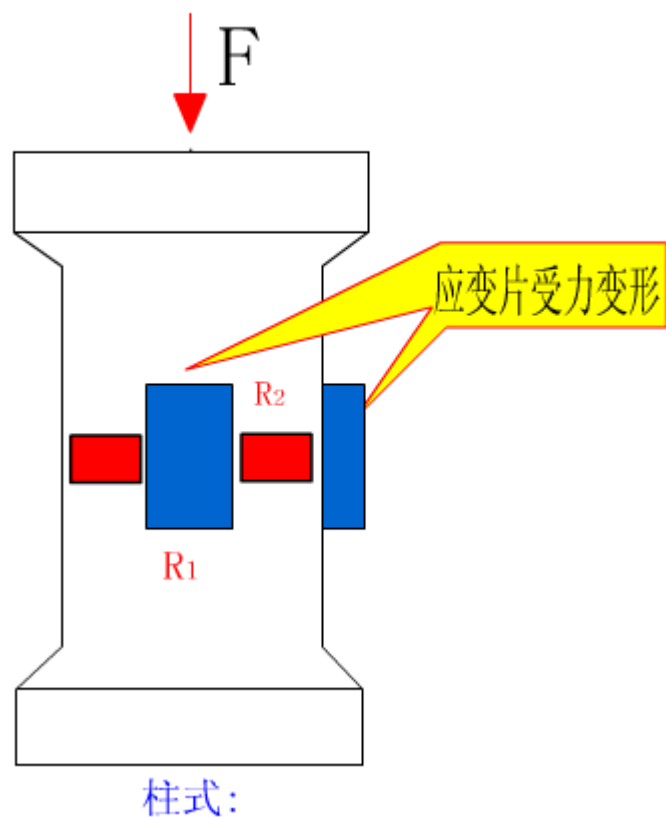


重量的自动检测--配料设备

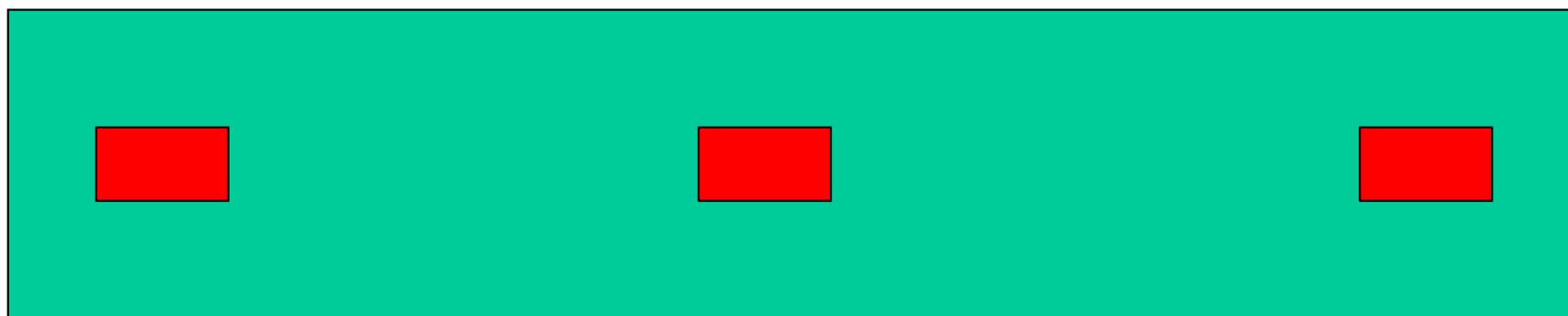
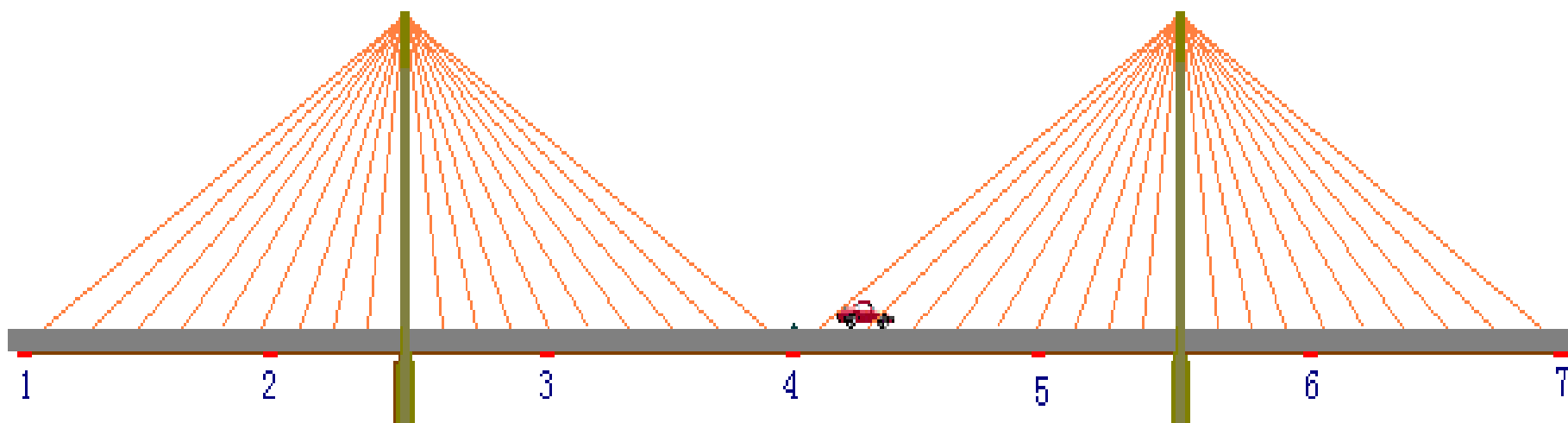




测力



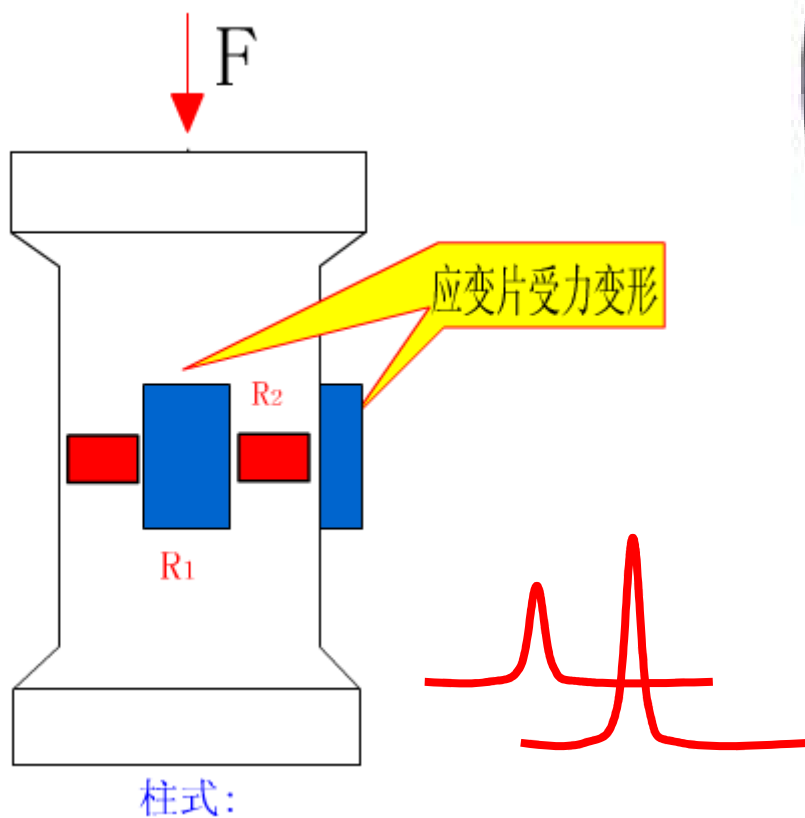
桥梁固有频率测量



电子称



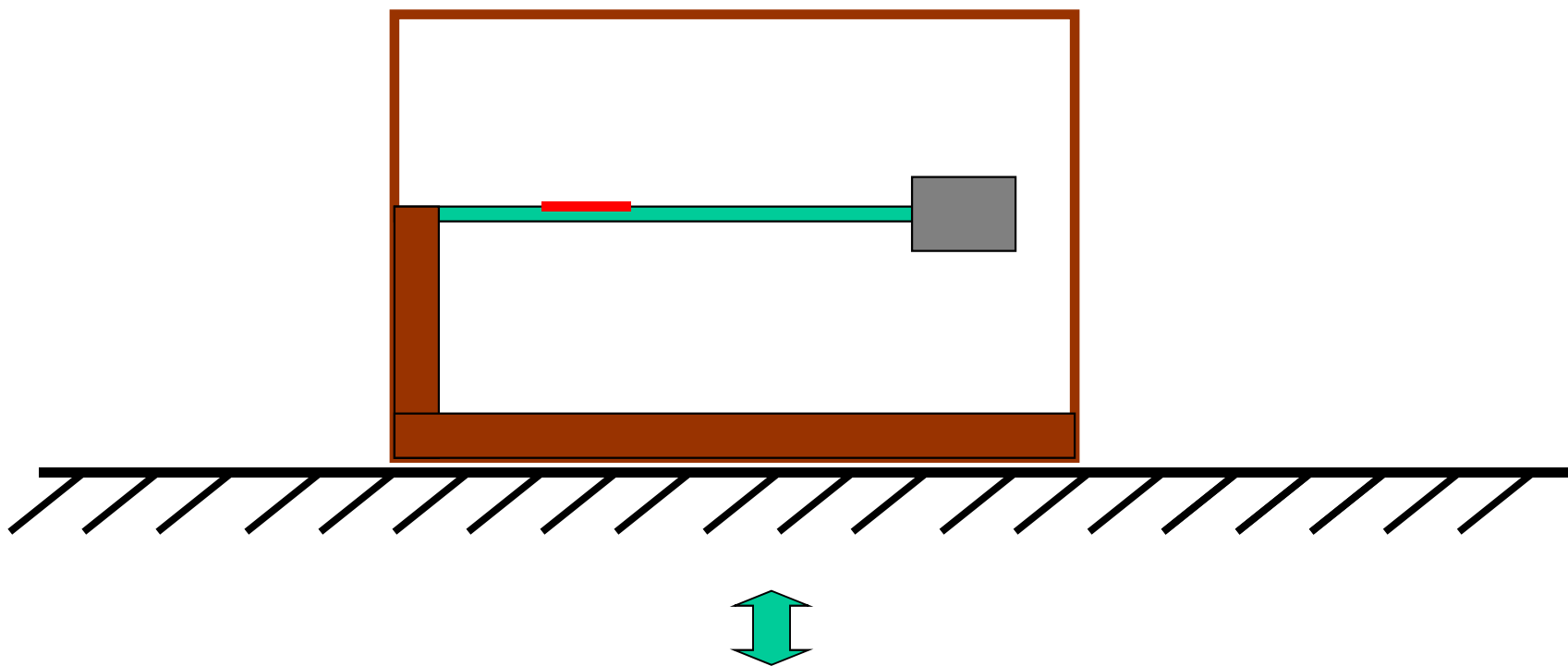
冲床生产记数和生产过程监测





振动式地音入侵探测器

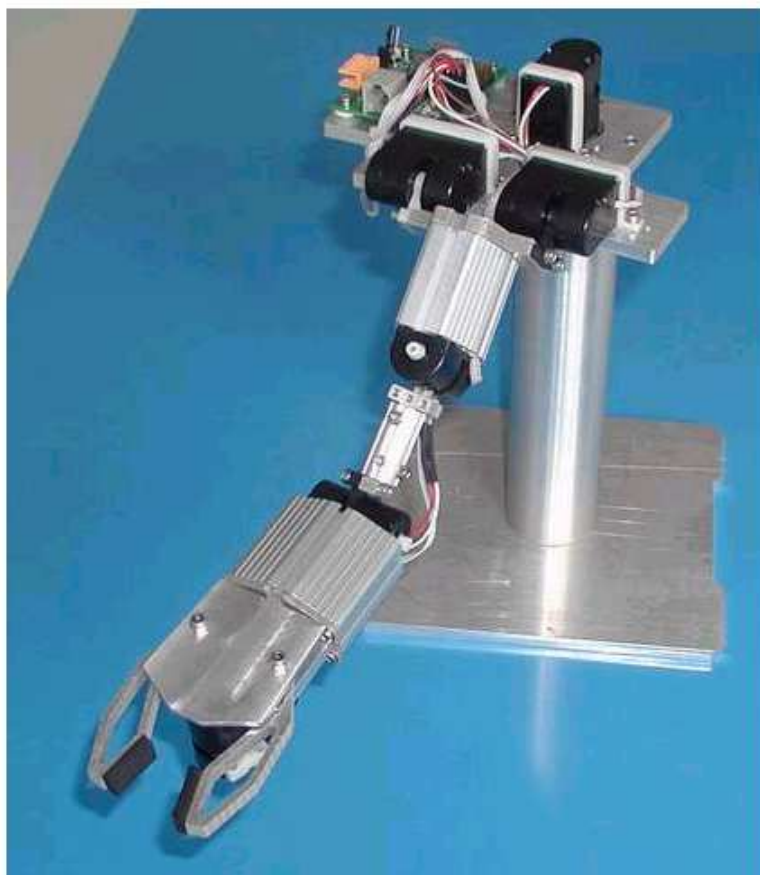
适合于金库、仓库、古建筑的防范，挖墙、打洞、爆破等破坏行为均可及时发现。



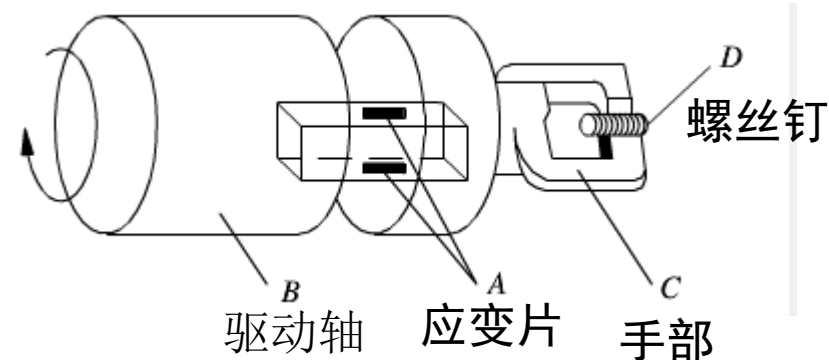
应变式数显扭矩扳手



机器人握力测量



机器人拧螺丝-力矩传感器



可用于汽车、摩托车、飞机、内燃机、机械制造和家用电器等领域，准确控制紧固螺纹的装配扭矩。

材料应变的测量



斜拉桥上的斜拉绳应变测试





本章要点

- ◆ 电阻式传感器的基本原理，转换电路。
- ◆ 了解不同电阻式传感器的结构、性能，使用场合；
- ◆ 如何通过电阻式传感器测量力、压力、位移、
- ◆ 应变、加速度等非电量参数；
- ◆ 电桥：直流单臂、半桥、全桥比较；
- ◆ 应用测量电路