



# 传感器原理与工程应用

## Principle & Application of Sensors

### 第2章 电阻应变式传感器·力及力矩测量

主讲：戴蓉

电话：13343589839

传感器课程学习群QQ：301931174

本课程为省级精品课，欢迎同学们登陆课程网站获取  
学习资料、讨论学习问题！

<http://wlxt.whut.edu.cn/new/cgqyl/course/index.asp>



# 本章内容

- 2.1 电阻应变片的工作原理
- 2.2 电阻应变片的结构、种类和材料
- 2.3 电阻应变片的主要参数
- 2.4 电阻应变片的选用
- 2.5 转换电路
- 2.6 电阻应变片的温度误差及其补偿
- 2.7 电阻应变仪
- 2.8 测力基本知识及测力传感器
- 2.9 力矩测量转速及力矩传感器



### 电阻应变效应演示



由观察到的实验现象，可以得出什么结论？

金属丝的电阻随着它所受的机械变形的大小而发生相应的变化，该现象称为金属的电阻应变效应。



## 2.1 电阻应变片的工作原理

### ——金属的电阻-应变效应

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

实验中，金属丝受拉时，由于 $l$ 变长、 $r$ 变小等因素，导致 $R$ 变大。

$$dR = \frac{\rho}{s} dl - \frac{\rho l}{s^2} ds + \frac{l}{s} d\rho$$



## Part A 电阻应变式传感器

$$\frac{dR}{R} = \frac{dl}{l} - \frac{ds}{s} + \frac{d\rho}{\rho}$$

$$\varepsilon_x = \frac{dl}{l}$$

——金属丝的轴向应变；

$$\varepsilon_x = \frac{F}{ES}$$

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

——金属丝的径向应变

$$\frac{dS}{S} = 2 \frac{dr}{r}$$

$$\varepsilon_y = -\mu \varepsilon_x ; \quad \mu \text{ ——泊松系数； (Poisson ratio)}$$



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

实验表明，在金属丝的弹性范围内，下述关系成立：

$$\frac{\Delta R}{R} = K_s \varepsilon_x \quad \text{———— 线性关系}$$

式中： $K_s$  —— 金属丝的灵敏系数。

$\varepsilon_x$  通常很小，常用  $10^{-6}$  表示之。例如，当  $\varepsilon_x$  为 0.000001 时，在工程中常表示为  $1 \times 10^{-6}$  或  $1 \mu\text{m}/\text{m}$ 。在应变测量中，也常将之称为 微应变 ( $\mu\varepsilon$ )。对金属材料而言，当它受力之后所产生的轴向应变最好不要大于  $1 \times 10^{-3}$ ，即  $1000 \mu\text{m}/\text{m}$ ，否则有可能超过材料的极限强度而导致断裂。

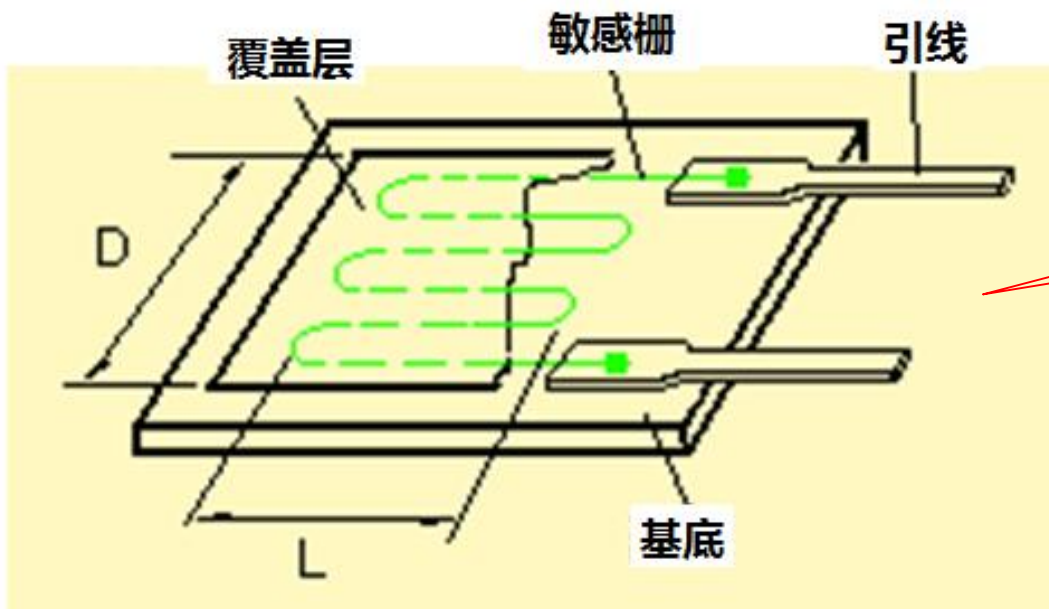




实际工程应用中，是否直接用金属丝作为传感器来测量应变/力呢？

## 2.2 电阻应变片的结构、种类和材料

### 2.2.1 应变片的基本结构



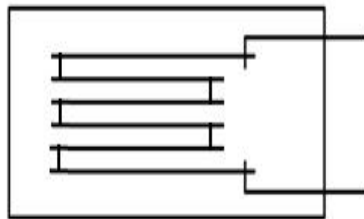
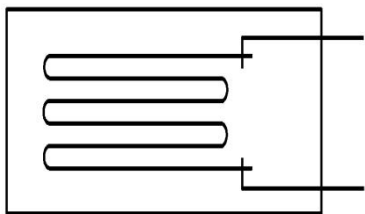
### 2.2.2 应变片的种类



## Part A 电阻应变式传感器

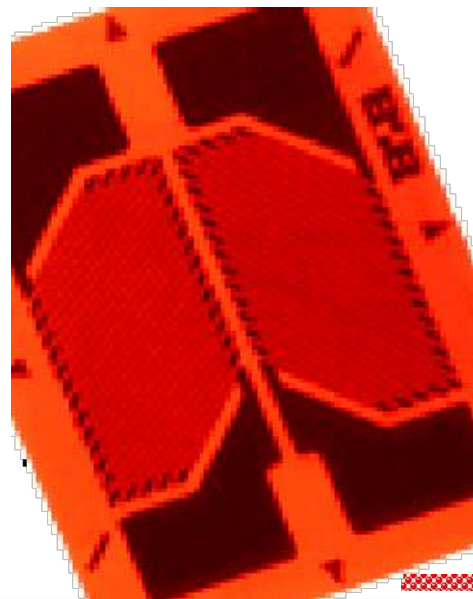
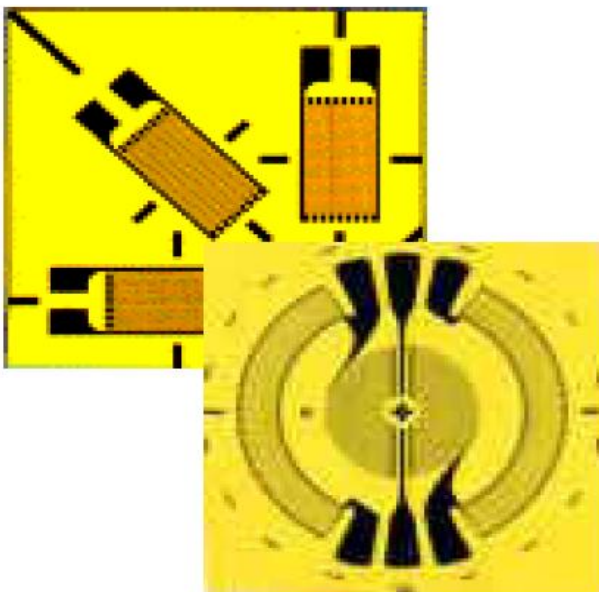
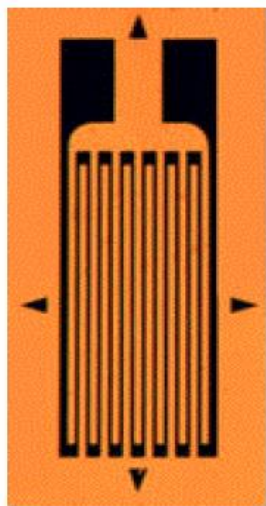
### 1. 金属丝式应变片 (*bonded metal-wire gage*)

直径在 $0.012 \sim 0.05\text{mm}$ 的金属丝:



### 2. 金属箔式应变片 (*bonded metal-foil gage*)

厚度在 $0.001 \sim 0.01\text{mm}$ 的金属箔;









- 箔式应变片中的箔栅是金属箔通过光刻、腐蚀等工艺制成的。箔的材料多为电阻率高、热稳定性好的铜镍合金。

### 箔式应变片的优点:

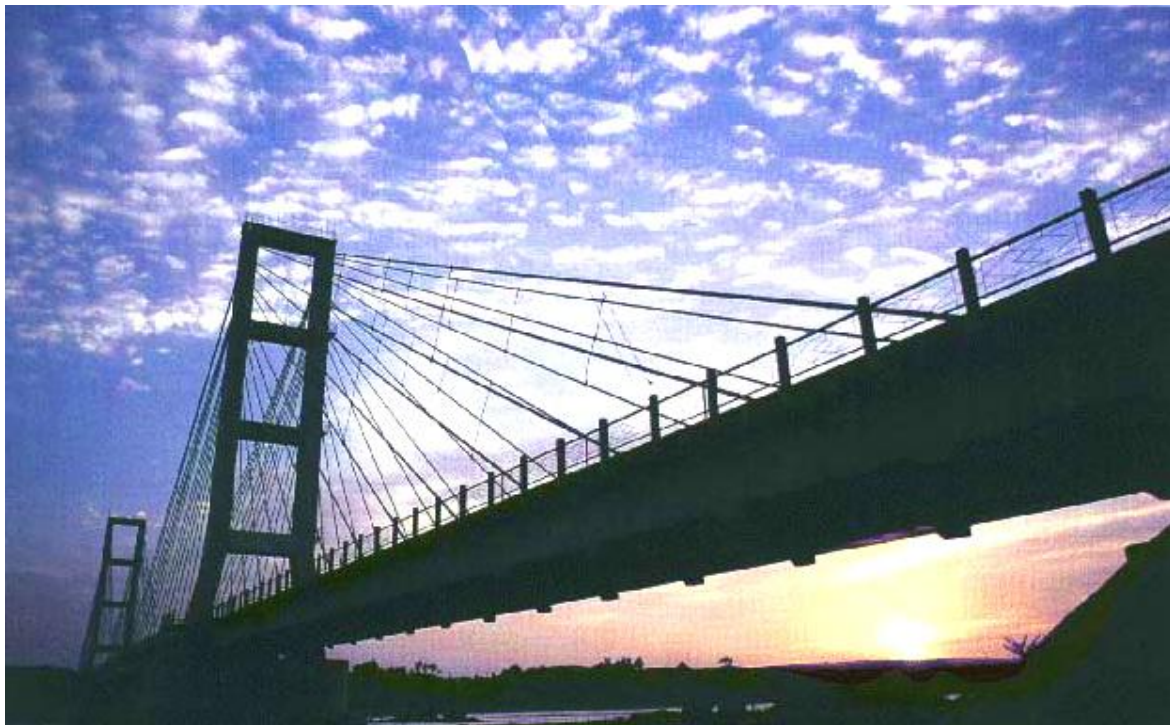
- 适合大批量生产；形状准确性好，可以制成任意形状满足测量要求；
- 敏感栅与基片的接触面积大，散热条件好，粘接性能好；
- 横向效应、蠕变、迟滞等误差小；
- 目前广泛用于各种应变式传感器中。

3. 金属薄膜式应变片 (*vacuum-deposited thin-metal-film gage, sputter- deposited thin-metal-film gage*)  
厚度在 $0.1\ \mu m$ 以下的金属箔；



# 电阻应变片在实际工程中该怎么应用？

## 典型应用之一：受力构件应变的测量

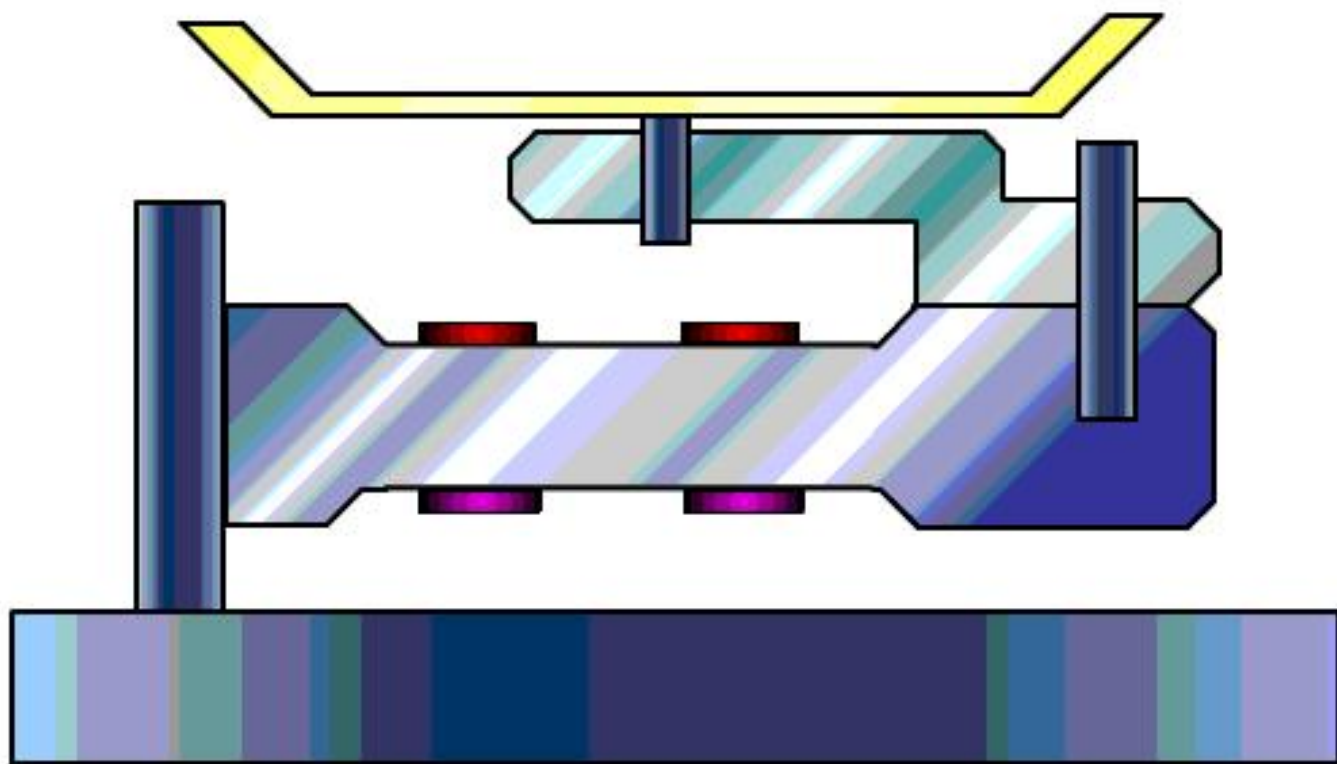


### 斜拉桥上的斜拉绳应变测试





### 典型应用之二：电阻应变式传感器

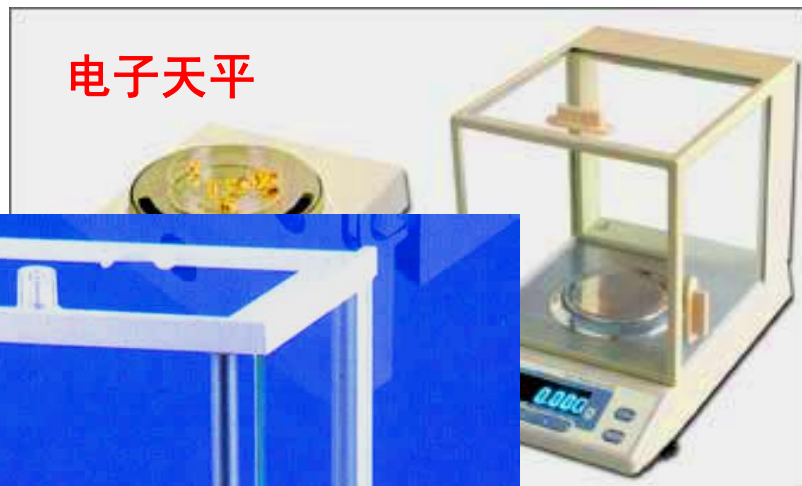






## 第2章 电阻应变式传感器. 力及力矩测量

### 应变片用于各种电子衡器

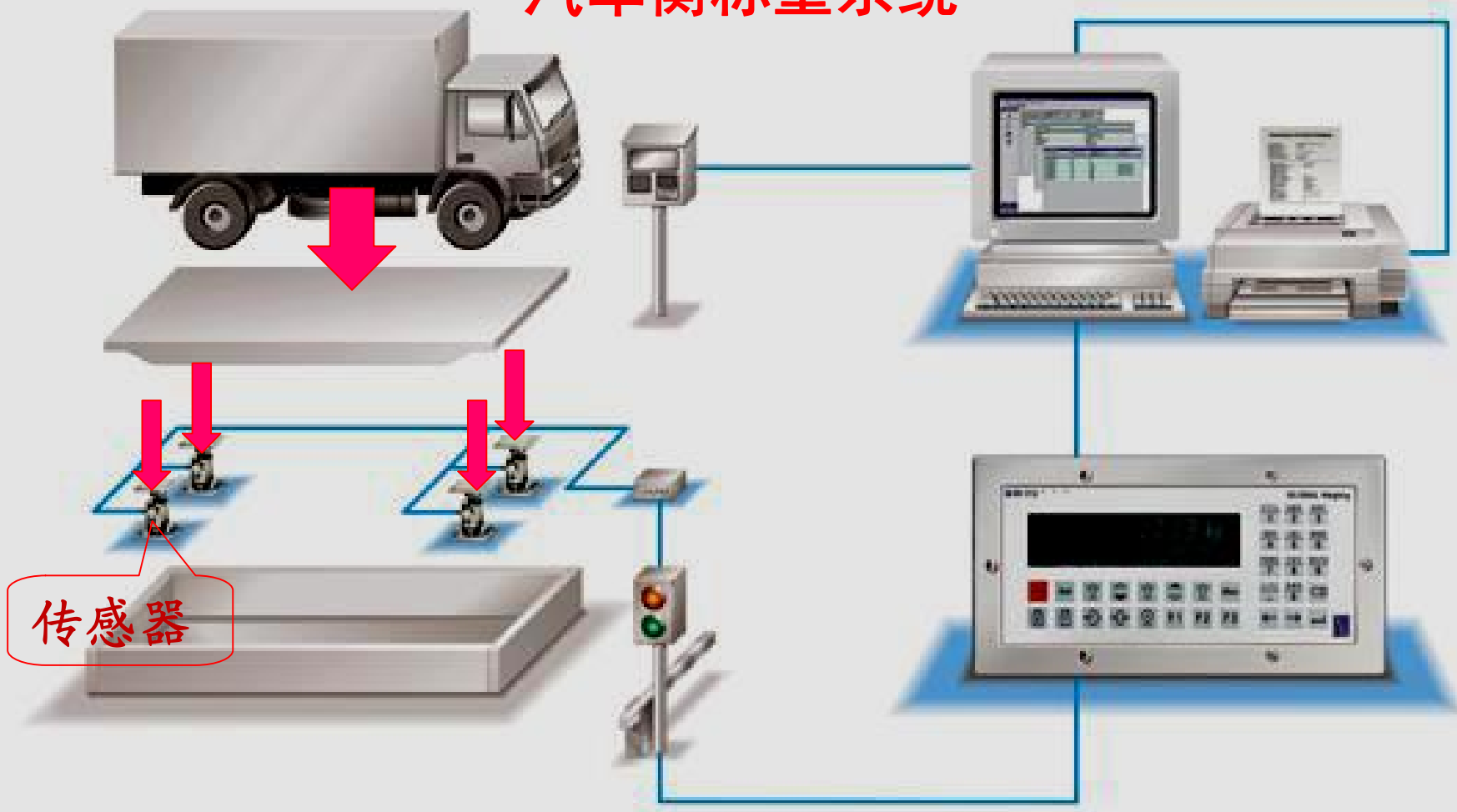


电子天平



## 第2章 电阻应变式传感器. 力及力矩测量

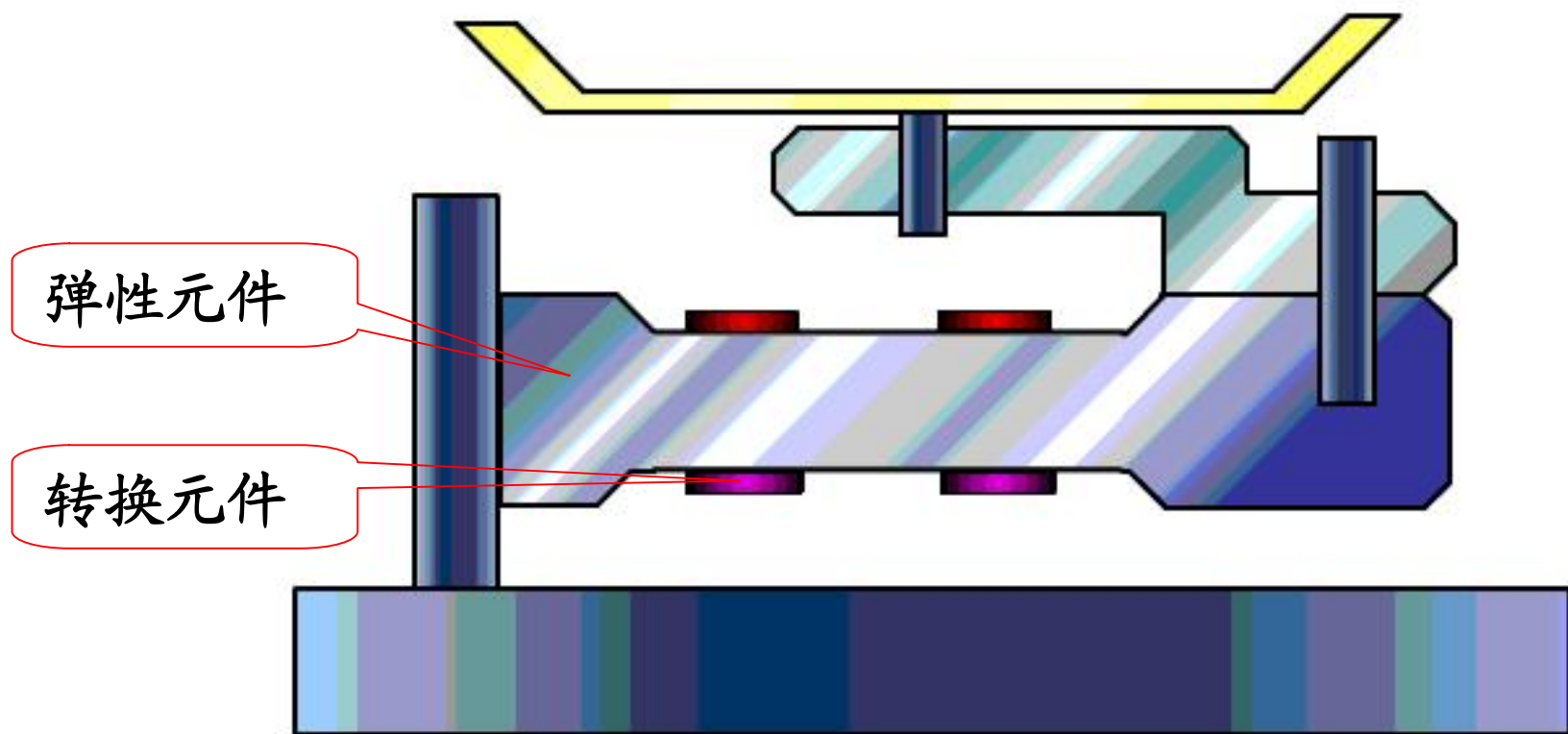
### 汽车衡称重系统





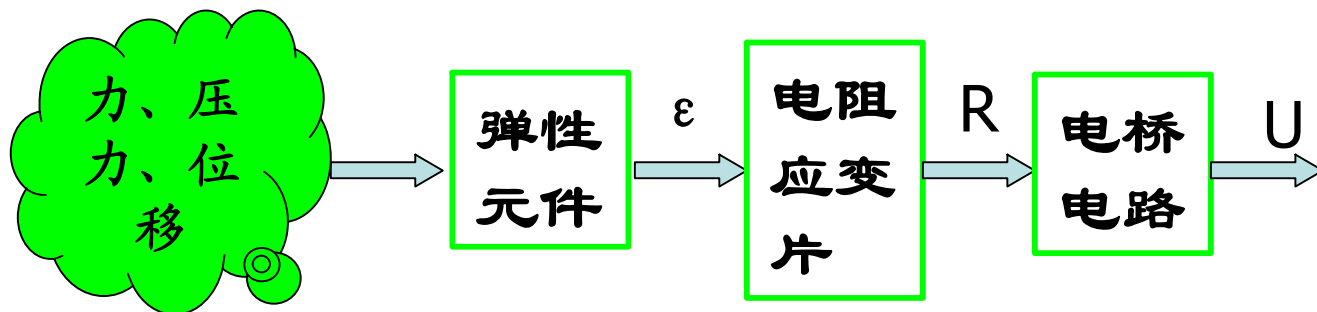


在电阻应变式传感器中，电阻应变片担任什么任务？





# 什么是电阻应变式传感器？



## 电阻应变片有哪些主要优点？

- ❖ 结构简单，使用方便
- ❖ 易于实现自动化、多点及远距离测量、遥测；
- ❖ 灵敏度高，测量速度快，适合静态、动态测量；



## 2.2.3 应变片的材料

### 1. 敏感栅材料

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。

常用材料有：康铜、镍铬合金、铁铬铝合金、铁镍铬合金、铂、铂钨合金等，如下表。



## Part A 电阻应变式传感器

材料名称	化学成分%	电阻率 $\rho / (\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m})$	电阻温度系数 $\alpha / (10^{-6}/^\circ\text{C})$	灵敏系数 $K_s$	线膨胀系数 $\beta / (10^{-6}/^\circ\text{C})$	最高使用温度 $^\circ\text{C}$
康铜	Cu55 Ni45	0.45~0.52	$\pm 20$	2.0	15	250(静态) 400(动态)
镍铬合金	Ni80 Cr20	1.0~1.1	110~130	2.1~2.3	14	450(静态) 800(动态)
卡玛合金 6J22	Ni74,Cr20 Al3,Fe3	1.24~1.42	$\pm 20$	2.4~2.6	13.3	450(静态) 800(动态)
伊文合金 6J23	Ni75,Cr20 Al3,Cu2	1.24~1.42	$\pm 20$	2.4~2.6	13.3	450(静态) 800(动态)
铁铬铝合金	Fe余量 Cr26,Al5.4	1.3~1.5	$\pm 30\sim 40$	2.6	14	550(静态) 1000(动态)
铂钨合金	Pt90.5~91.5 W8.5~9.5	0.74~0.76	139~192	3.0~3.2	9	800(静态) 1000(动态)
铂	Pt	0.09~0.11	3900	4.6	9	800(静态) 1000(动态)
铂铱合金	Pt80,Ir20	0.35	90	1.0	13	800(静态) 1000(动态)



## 2. 基底材料

### 基底的作用是什么？

- ❑ 基底用于保持敏感栅、引线的几何形状和相对位置，并将弹性元件的应变迅速、准确地传递给敏感栅；
- ❑ 基底的全长称为基底长，其宽度称为基底宽。
- ❑ 覆盖层既保持敏感栅和引线的形状和相对位置，还可保护敏感栅。
- ❑ 基底材料要求机械强度及挠性好、粘贴性能好、绝缘抗湿性能好
- ❑ 基底材料分纸基和胶基两大类。胶基由环氧树脂、酚醛树脂和聚酰亚胺等制成胶膜，厚度约0.03 ~ 0.05mm



### 3. 黏合剂材料

## 黏合剂很重要！它的作用是什么？

- ◆ 用于将敏感栅固定于基底上，并将盖片与基底粘贴在一起。
- ◆ 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，以便将构件受力后的表面应变传递给应变计的基底和敏感栅。
- ◆ 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。





## Part A 电阻应变式传感器

类型	主要成分	牌号	适于黏合的基底材料	最低固化条件	固化压力 /10 <sup>4</sup> Pa	使用温度/℃
硝化纤维素黏合剂	硝化纤维素溶剂	万能胶	纸	室温10小时或 60℃2小时	0.5~1	-50~80
氰基丙烯酸黏合剂	氰基丙烯酸酯	501, 502	纸、胶膜、玻 璃纤维布	室温1小时	粘合时指压	-100~80
聚酯树脂黏合剂	不饱和聚酯树脂、过氧化环己酮、苯酸钴干料		胶膜、玻璃纤 维布	室温24小时	0.3~0.5	-50~150
环氧树脂类黏合剂	环氧树脂、聚硫酚铜胺、固化剂	914	胶膜、玻璃纤 维布	室温2.5小时	粘合时指压	-60~80
	酚醛环氧、无机填料、固化剂	509	胶膜、玻璃纤 维布	200℃2小时	粘合时指压	-100~250
	环氧树脂、酚醛、甲苯二酚、石棉粉等	J06-2	胶膜、玻璃纤 维布	150℃3小时	2	-196~250
酚醛树脂类黏合剂	酚醛树脂、聚乙烯醇缩丁醛	JSF-2	胶膜、玻璃纤 维布	150℃1小时	1~2	-60~150
	酚醛树脂、聚乙烯醇缩甲乙醛	1720	胶膜、玻璃纤 维布	190℃3小时	—	-60~100
	酚醛树脂、有机硅	J-12	胶膜、玻璃纤 维布	200℃3小时	—	-60~350
聚酰亚胺黏合剂	聚酰亚胺	30-14	胶膜、玻璃纤 维布	280℃2小时	1~3	-150~250
磷酸盐黏合剂	磷酸二氢铝无机填料	GJ-14 LN-3	金属薄片、临 时基底	400℃1小时		550
		P106		400℃3小时		700
氧化物喷涂	二氧化二铝		金属薄片、临 时基底			800



## 4. 引线材料

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。

应用应变片及设计制作应变式传感器时，首先遇到的问题就是应变片的选取。如何选择应变片？首先应该明确任务要求，进行任务分解；然后查阅产品资料，找到满足要求的应变片。



## 2.3 电阻应变片的主要参数

### 1. 应变片电阻值 ( $R_0$ )

电阻应变片的电阻值为 $60\Omega$ 、 $120\Omega$ 、 $350\Omega$ 、 $500\Omega$ 和 $1000\Omega$ 等多种规格，以 $120\Omega$ 最为常用。

应变片的电阻值越大，允许的工作电压就大，传感器的输出电压也大，相应地应变片的尺寸也要增大，在条件许可的情况下，应尽量选用高阻值应变片。

2. 绝缘电阻：指敏感栅与基底间的电阻值，要求 $>10^{10}$ 欧姆；



### 3. 应变片的灵敏系数 ( $K$ ) (*gage factor*)

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。因此，须用实验方法对应变片的电阻—应变特性重新测定。实验表明，金属应变片的电阻相对变化与应变 $\varepsilon$ 在很宽的范围内均为线性关系。即

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

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

$K$ 为金属应变片的灵敏系数。注意， $K$ 是在试件受一维应力作用，应变片的轴向与主应力方向一致，且试件材料的泊松比为0.285的钢材时测得的。测量结果表明，应变片的灵敏系数 $K$ 恒小于线材的灵敏系数 $K_s$ 。原因：胶层传递变形失真，横向效应也是一个不可忽视的因素。

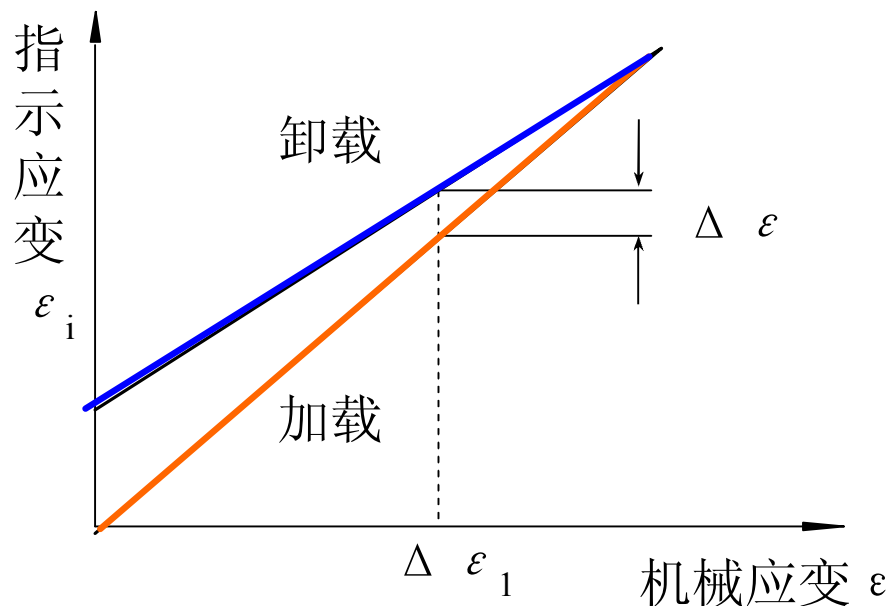


### 4. 机械滞后

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，其内部会产生残余变形，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，如果敏感栅受到不适当的变形或者粘结剂固化不充分。

机械滞后值还与应变片所承受的应变量有关，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。





### 5. 零漂和蠕变

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。

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。

**产生原因：**由于胶层之间发生“滑动”，使力传到敏感栅的应变量逐渐减少。

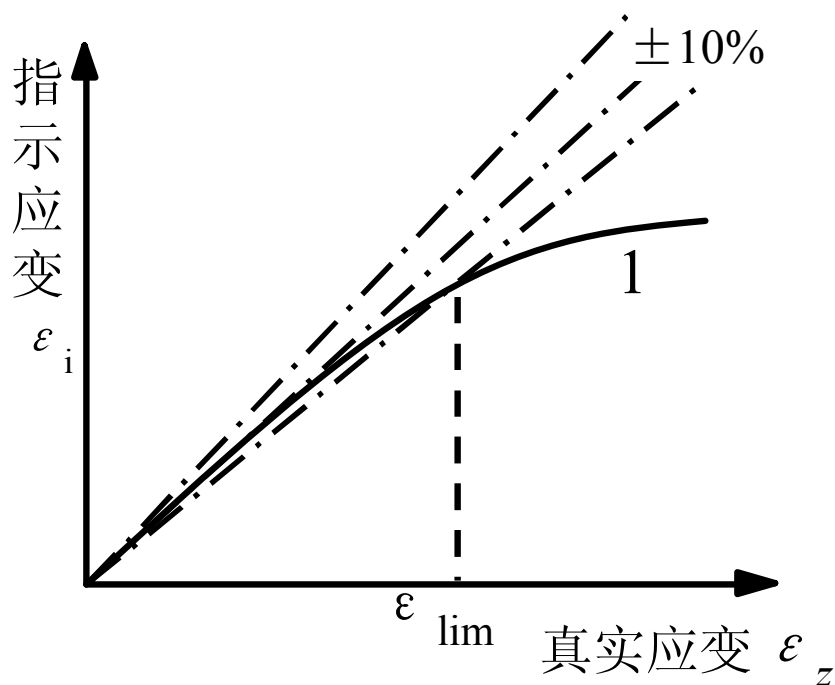
这是两项衡量应变片特性对时间稳定性的指标，在长时间测量中其意义更为突出。实际上，蠕变中包含零漂，它是一个特例。





### 6. 应变极限、疲劳寿命

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%）时的最大真实应变值。在图中，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（包括机械应力和热应力）时所引起的表面应变。



主要因素：粘结剂和基底材料传递变形的性能及应变片的安装质量。制造与安装应变片时，应选用抗剪强度较高的粘结剂和基底材料。基底和粘结剂的厚度不宜过大，并应经过适当的固化处理，才能获得较高的应变极限。

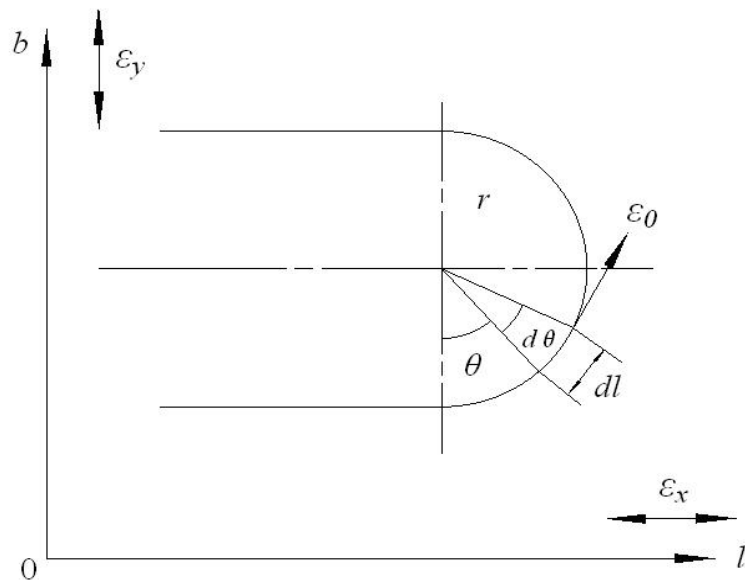


**疲劳寿命**指对已粘贴好的应变片，在恒定幅值的交变力作用下，可以连续工作而不产生疲劳损坏的循环次数。

7. 允许电流：静态25mA，动态：75 ~ 100mA；

### 8. 横向效应 (*transverse effect*)

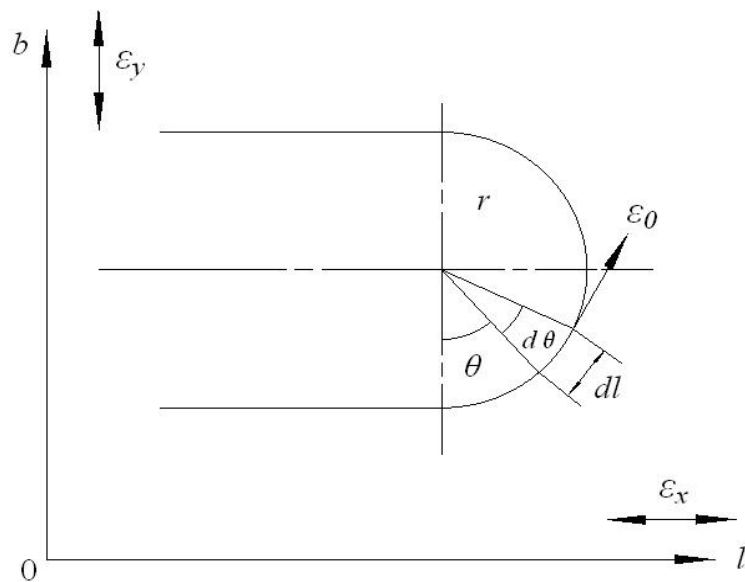
如图，若将应变片粘贴在单向拉伸试件上，这时各直线段上的金属丝只感受沿其轴向拉应变  $\varepsilon_x$ ，故其各微段电阻都将增加，但在圆弧段上，沿各微段轴向（即微段圆弧的切向）的应变却并非  $\varepsilon_x$ 。所产生的电阻变化与直线段上同长微段的不一样，在  $\theta = 90^\circ$  的微弧段处最为明显。由于单向拉伸时，除了沿轴向（水平方向）产生拉应变外，按泊松关系同时在垂直方向上产生负的压应变  $\varepsilon_y$  ( $= -\mu \varepsilon_x$ )，因此该段上的电阻不仅不增加，反而是减少的。





## Part A 电阻应变式传感器

而在圆弧的其他各微段上，其轴向感受的应变是由 $+\varepsilon_x$ 变化到 $-\varepsilon_y$ 的，因此圆弧段部分的电阻变化，显然将小于其同样长度沿轴向安放的金属丝的电阻变化。由此可见，将直的金属丝绕成敏感栅后，虽然长度相同，但应变状态不同，应变片敏感栅的电阻变化较直的金属丝小，因此灵敏系数有所降低，这种现象称为应变片的**横向效应**。



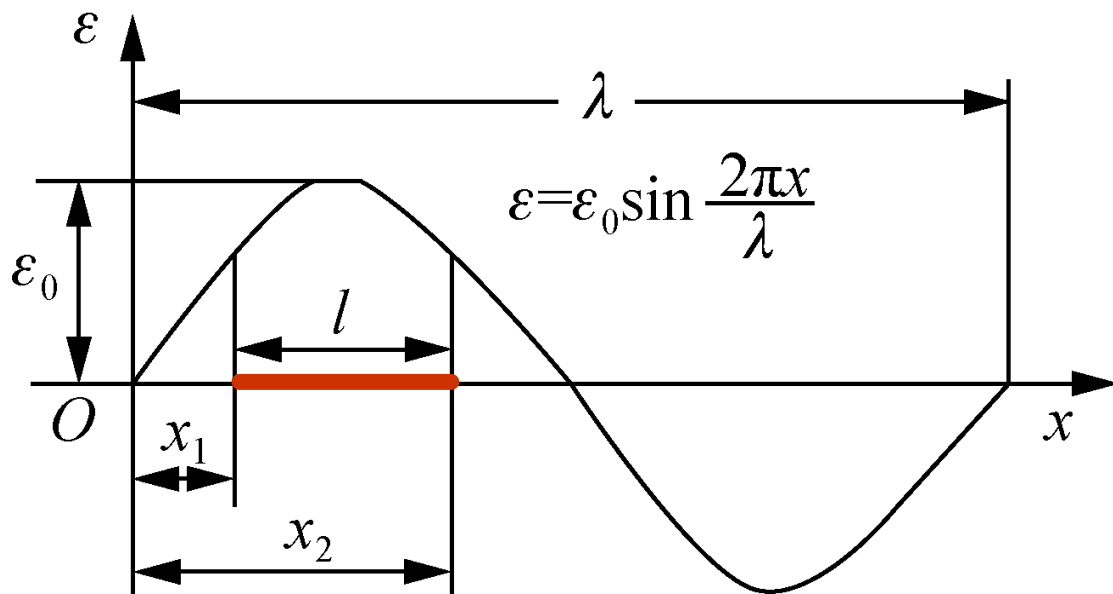
应变片的横向效应表明，当实际使用应变片的条件与标定灵敏度系数 $K$ 时的条件不同时，由于横向效应的影响，实际 $K$ 值要改变，由此可能产生较大测量误差。为了减小横向效应的影响，一般多采用箔式应变片。



### 9. 动态响应特性

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 $0.2\mu\text{s}$ )，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。

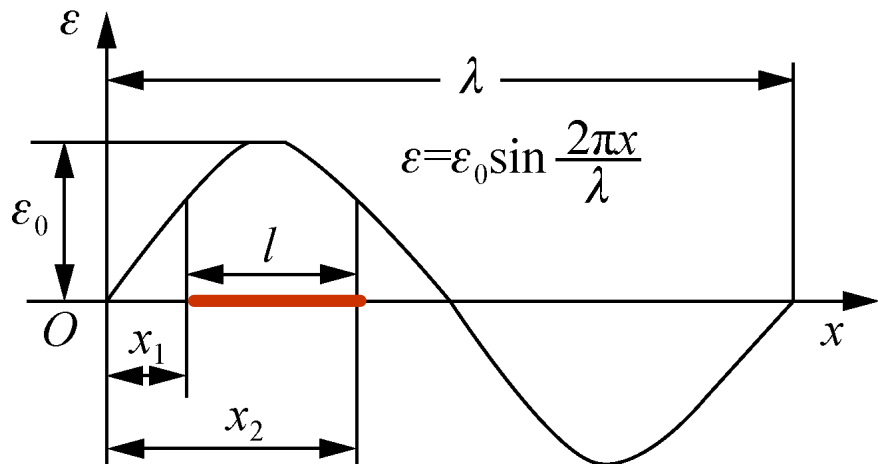




设应变波的波长为 $\lambda$ ，应变片的基长为 $l$ ，其两端的坐标为，

$$x_1 = \lambda/4 - l/2$$

$$x_2 = \lambda/4 + l/2$$



应变片在其基长内测得的平均应变最大值为：

$$\varepsilon_p = \frac{\int_{x_1}^{x_2} \varepsilon_0 \sin \frac{2\pi}{\lambda} x dx}{x_2 - x_1} = \frac{\lambda \varepsilon_0}{2\pi l} \left( \cos \frac{2\pi}{\lambda} x_2 - \cos \frac{2\pi}{\lambda} x_1 \right) = \frac{\lambda \varepsilon_0}{\pi l} \sin \frac{\pi l}{\lambda}$$

故应变波幅测量误差为

$$\delta = \left| \frac{\varepsilon_p - \varepsilon_0}{\varepsilon_0} \right| = \left| \frac{\lambda}{\pi l} \sin \frac{\pi l}{\lambda} - 1 \right|$$

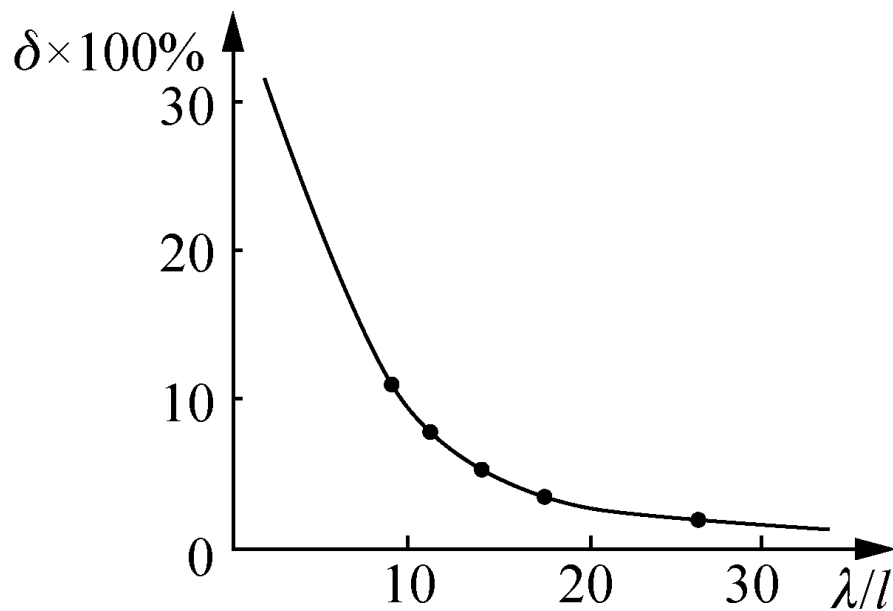


$$\delta = \left| \frac{\varepsilon_P - \varepsilon_0}{\varepsilon_0} \right| = \left| \frac{\lambda}{\pi l} \sin \frac{\pi l}{\lambda} - 1 \right|$$

由上式可见，相对误差  $\delta$  的大小只决定于  $\frac{l}{\lambda}$  的比值，表中给出了为1/10和1/20时  $\delta$  的数值。

误差  $\delta$  的计算结果

$\frac{l}{\lambda}$	$\delta$ (%)
1/10	1.62
1/20	0.42







由表可知，应变片栅长与正弦应变波的波长之比愈小，相对误差  $\delta$  愈小。当选中的应变片栅长为应变波长的（1/10-1/20）时， $\delta$  将小于2%。

因为

$$\lambda = \frac{v}{f}$$

式中  $v$ ——应变波在试件中的传播速度；  
 $f$ ——应变片的可测频率。

取  $\frac{l}{\lambda} = \frac{1}{10}$

，则

$$f = 0.1 \frac{v}{l}$$

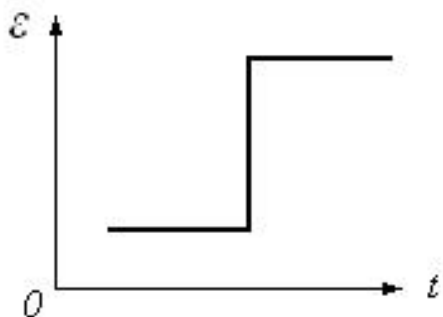
若已知应变波在某材料内传播速度  $v$ ，由上式可计算出栅长为  $L$  的应变片粘贴在某种材料上的可测动态应变最高频率。



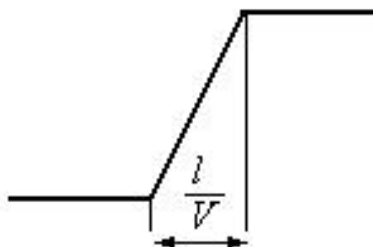
下表为钢材,  $v=5000\text{m/s}$ ,  $\frac{\lambda}{l}=20$ 的计算结果

基长 $l_0$ (mm)	1	2	3	5	10	15	20
最高工作频率 (KHz)	250	125	83.3	50	25	16.6	12.5

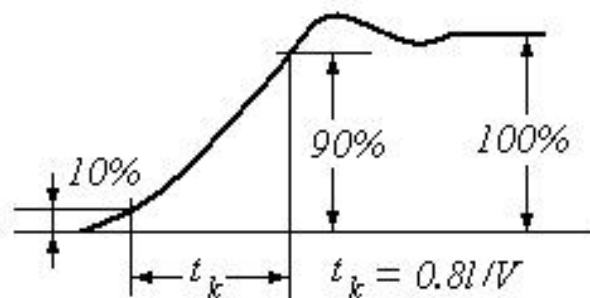
## 对阶跃输入应变的响应



(a) 阶跃输入信号



(b) 理论输出信号



(c) 实际输出信号

$$t_k = 0.8l/v, \text{ 可测最高频率 } f = 0.35/t_k = 0.35v/0.8l = 0.44v/l$$



## 2.4 电阻应变片的应用

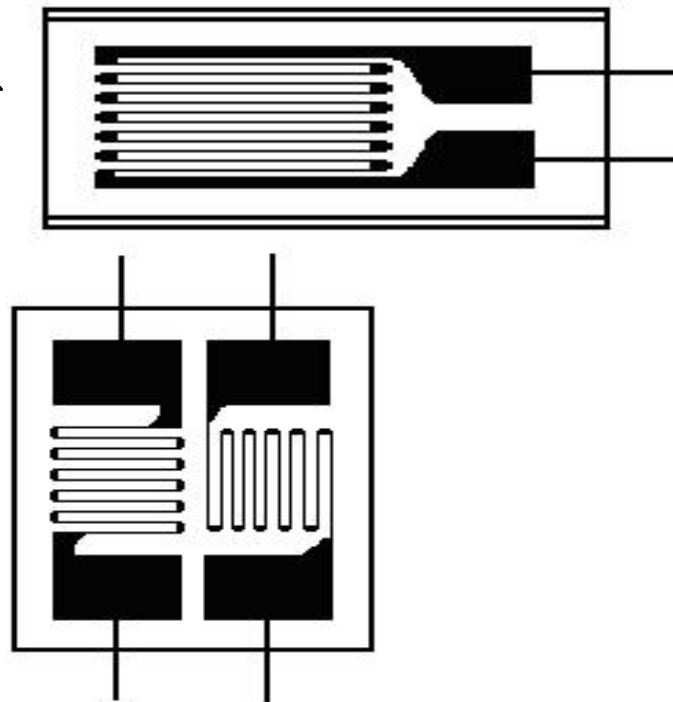
### 2.4.1 应变片的选择

#### 1. 应变片类型的选择

根据应变测量的目的，被测试件的材料和应力状态、测量精度选择应变片的形式。

◆对于测试点主应力方向已知的一维应力测量，选用单轴丝式或箔式应变片；

◆对于平面应变场主应力方向已知的二维应变测量，可以使用直角应变花，并使其中一条应变栅与主应力方向一致



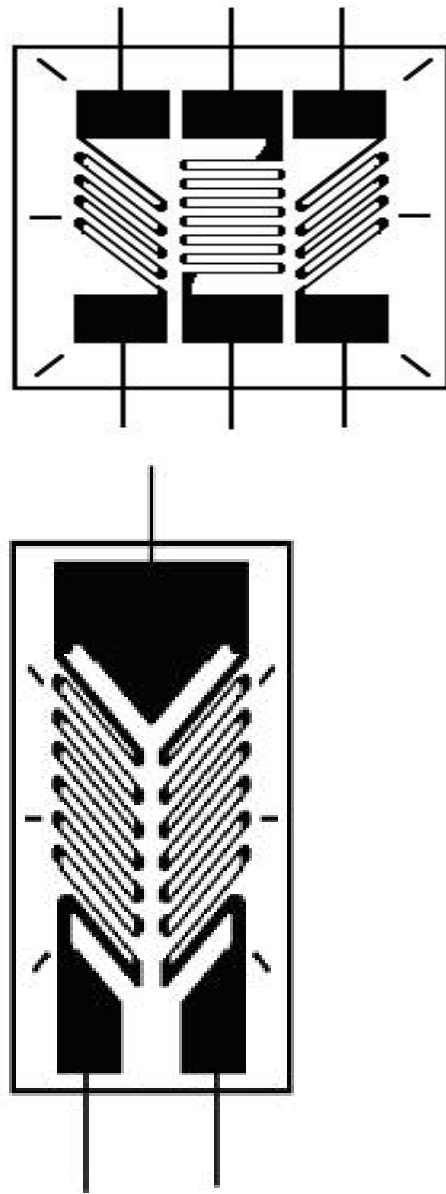


◆如果应力方向未知就必须使用三栅或四栅的应变花

◆对于应变式传感器，应变片的形式主要取决于弹性元件。对柱式、梁式、环式等弹性元件，它们工作时受拉/压应力或弯曲应力，所以应变片均采用单轴应变片；对于轮辐式等利用剪应力测量的弹性元件，一般使用双轴45°应变片。

### 2. 材料的选择

根据使用温度、时间、最大应变量、精度等要求选择。





国家标准中规定的常温应变片使用温度为 $-30 \sim +600^{\circ}\text{C}$ ，常温应变片一般采用康铜制造；由于基底材料和粘接剂的限制，目前 $200 \sim 250^{\circ}\text{C}$ 的中温箔式电阻应变片一般都使用卡玛合金制作；工作温度大于 $350^{\circ}\text{C}$ 的高温应变片需订做，常用金属基底，使用时用点焊将应变片焊接在试件上。

### 3. 阻值的选择

依据测量电路或仪器选定应变片的标称阻值。如配用电阻应变仪，常选用 $120\Omega$ 阻值。







测量时为提高灵敏度，常用较高的供桥电压，由于 $350\Omega$ ， $500\Omega$ 等大阻值应变片具有通过电流小、自热引起的温升低、持续工作时间长、动态测量信噪比高等优点，应用越来越广

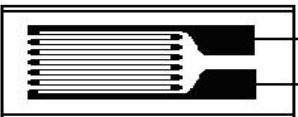

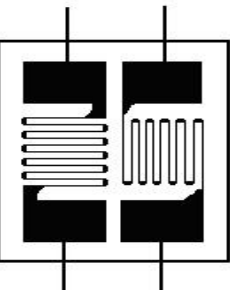
### 4. 尺寸的选择

按照试件表面粗糙度、应力分布状态、粘贴面积大小、应变波频率等选择尺寸。若被测试件材质均匀、应力梯度大，则选用栅长小的应变片；对材质不均匀而强度不等的材料（如混凝土），或应力分布变化比较缓慢的构件，应选用栅长大的应变片；对于冲击载荷或高频动荷作用下的应变测量，还要考虑应变片的动态响应特性。一般来说，应变片栅长越小，测量频率越高，越能正确反映出被测量点的真实应变。





## Part A 电阻应变式传感器

型号与名称	特点和用途	栅长×栅宽 /mm×mm	标称阻 值/ $\Omega$	基底尺寸 /mm×mm
SZ-5、10纸基应变片 SZ-100纸基应变片	用于金属、混凝土 上应力分析	5×3 100×5	120	10×6
BH120-02AA箔式应变片 BH120-05AA箔式应变片 BH120-1AA箔式应变片 BH120-3AA箔式应变片 BH120-5AA箔式应变片	环氧基底，用于应 力分析 	0.2×1.6 0.5×0.8 1.0×1.0 3.0×5.6 5.0×5.8	120	2.4×3.0 2.4×2.4 3.2×2.6 6.8×3.6 9.0×4.0
BH350-1AA箔式应变片 BH350-2AA箔式应变片 BH350-3AA箔式应变片	环氧基底，用于传 感器 	×4.8 ×2.4 ×3.0	350	4.0×6.4 6.0×3.6 7.6×4.4
BH350-1HA箔式应变花 BH350-2HA箔式应变花 BH350-3HA箔式应变花	环氧基底，用于传 感器， $\pm 45^\circ$	×2.8 ×3.1 ×2.3	350	7.6×5.8 8.8×6.8 9.4×10.2
BH350-2BH箔式应变花 BH350-3BH箔式应变花	环氧基底，用于传 感器， $0^\circ / 90^\circ$	×2. 3.0×3.		7.6×6.1 9.2×7.2
BX120-02AA 箔式应变片 BX120-05AA 箔式应变片 BX120-1AA 箔式应变片	酚醛-缩醛基底，用 于应力分析	0.2×1. 0.5×0. 1.0×1.		2.4×2.4 2.4×2.4 3.2×2.6



## 2.4.2 应变片的使用

1. 去污：采用手持砂轮工具除去构件表面的油污、漆、锈斑等，并用细纱布交叉打磨出细纹以增加粘贴力，用浸有酒精或丙酮的纱布片或脱脂棉球擦洗。





2. 画线、贴片：在应变片的表面和处理过的粘贴表面上，画出表示贴片方向的十字线；然后涂一层均匀的粘贴胶，用镊子将应变片放上去，并调好位置，然后盖上塑料薄膜，用手指揉和滚压，排出下面的气泡。





### 3. 测量：

从分开的端子处，预先用万用表测量应变片的电阻，发现端子折断和坏的应变片。





### 4. 焊接:

将引线和端子用烙铁焊接起来，注意不要把端子扯断。

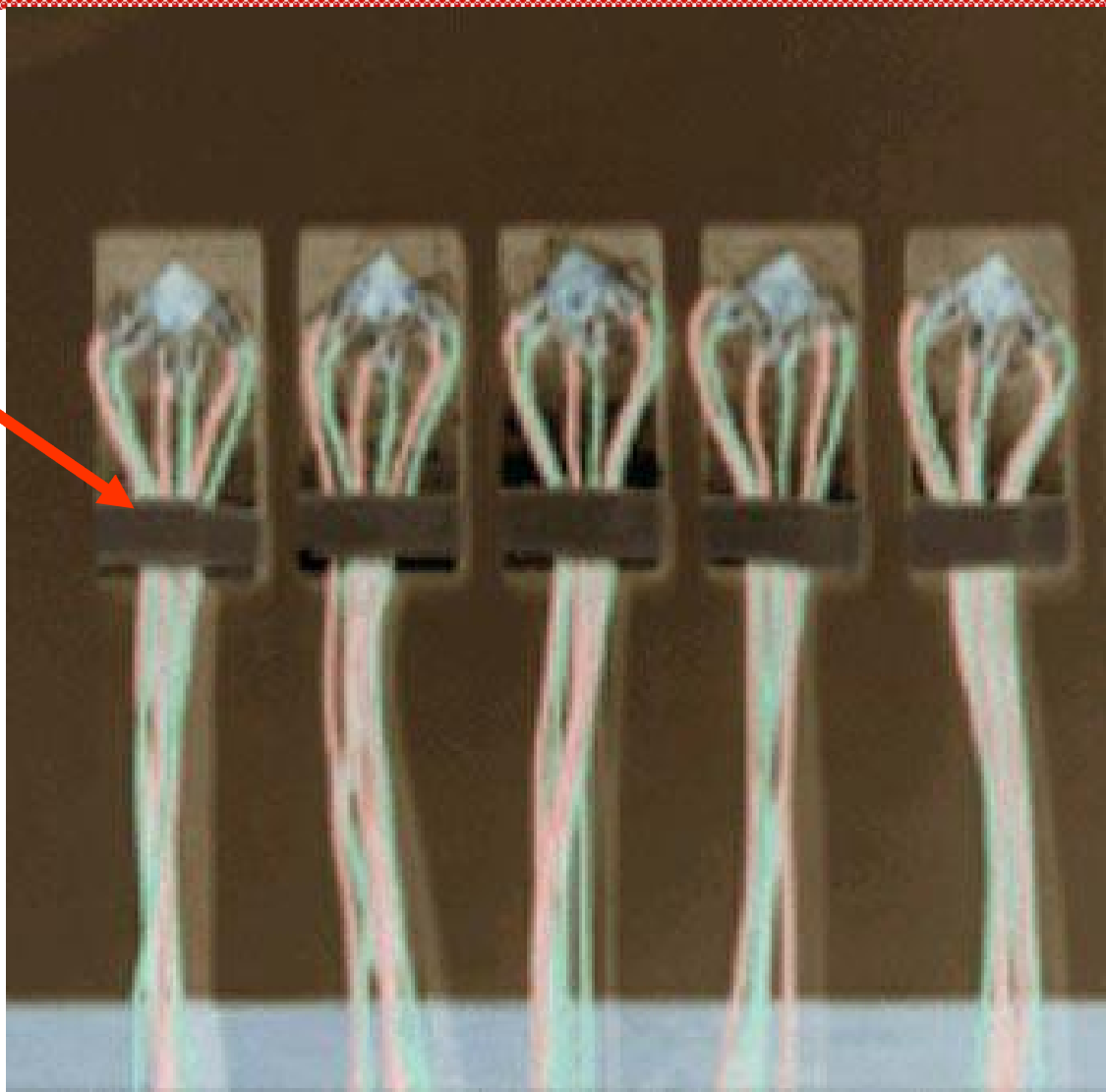






### 5. 固定:

焊接后用胶布将  
引线和被测对象  
固定在一起，防  
止损坏引线和应  
变片。







## 2.5 转换电路

# 传感器组成中，转换电路（测量电路）的功能是什么？

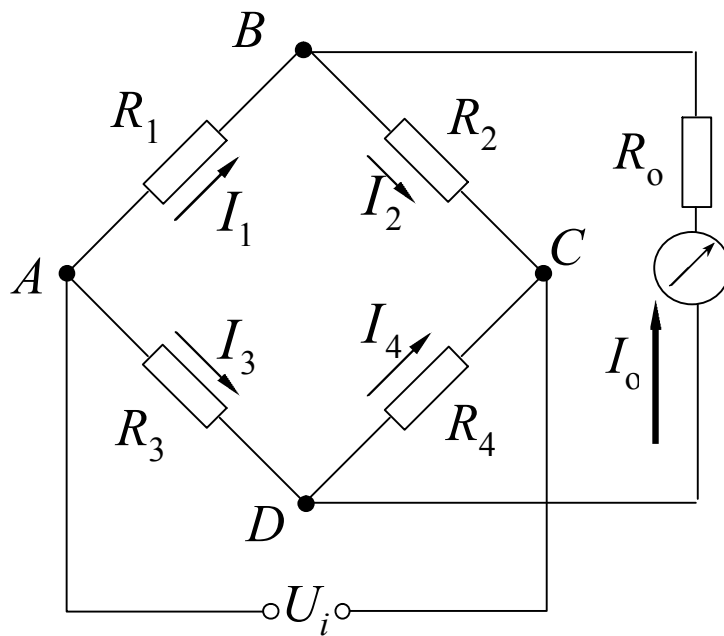
应变片将应变的变化转换成电阻相对变化 $\Delta R/R$ ，要把电阻的变化转换成电压或电流的变化，才能用电测仪表进行测量。电阻应变片的测量线路多采用交流电桥(配交流放大器)，其原理和直流电桥相似。直流电桥比较简单，因此首先分析直流电桥。

### 2.5.1 恒压源直流电桥



如图所示。电源 $E$ 为恒压源，其内阻为零。根据电路学中的克希霍夫定律，列出电路方程：

$$\begin{cases} I_2 = I_1 + I_0 \\ I_3 = I_4 + I_0 \\ I_3 R_3 + I_4 R_4 = U_i \\ I_3 R_3 + I_0 R_0 - I_1 R_1 = 0 \\ I_4 R_4 - I_2 R_2 - I_0 R_0 = 0 \end{cases}$$



恒压电桥电路原理图



联立求解上述方程，求出检流计中流过的电流 $I_0$ 为：

$$I_0 = \frac{U_i (R_1 R_4 - R_2 R_3)}{R_0 (R_1 + R_2) (R_3 + R_4) + R_1 R_2 (R_3 + R_4) + R_3 R_4 (R_1 + R_2)}$$

式中  $R_0$  为负载电阻，因而其输出电压 $U_0$ 为：

$$U_0 = I_0 R_0 = \frac{U_i (R_1 R_4 - R_2 R_3)}{(R_1 + R_2) (R_3 + R_4) + \frac{1}{R_0} [R_1 R_2 (R_3 + R_4) + R_3 R_4 (R_1 + R_2)]}$$

当 $R_1 R_4 = R_2 R_3$ 时， $I_0 = 0$ ， $U_0 = 0$ ，即电桥处于平衡状态。

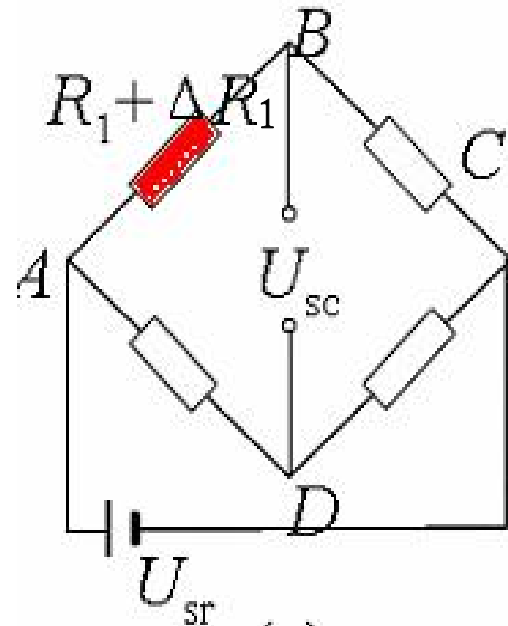
若电桥的负载电阻 $R_0$ 为无穷大，则B、D两点可视为开路，上式可以化简为：



$$U_o = U_i \frac{R_1 R_4 - R_2 R_3}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} \quad (2-12)$$

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

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





整理得:

$$U_0 = \frac{\frac{R_4}{R_3} \frac{\Delta R_1}{R_1}}{\left(1 + \frac{\Delta R_1}{R_1} + \frac{R_2}{R_1}\right) \left(1 + \frac{R_4}{R_3}\right)} U_i \quad (2-13)$$

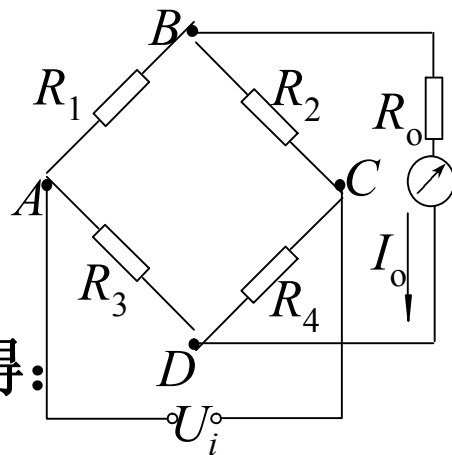
定义桥臂比:

$$n = \frac{R_2}{R_1} = \frac{R_4}{R_3}$$

由于  $\Delta R_1 \ll R_1$ , 略去(2-13)分母中的  $\Delta R_1 / R_1$  得:

$$U_0 = \frac{n}{(1+n)^2} \frac{\Delta R_1}{R_1} U_i \quad (2-14)$$

=K







定义电桥灵敏度:

$$K_U = \frac{U_0}{\frac{\Delta R_1}{R_1}} = \frac{n}{(1+n)^2} U_i \quad (2-15)$$

当 $dK_U/dn=0$ 时,  $dK_U$ 最大, 此时 $n=1$ ; 即 $R_2=R_1$ ,  $R_4=R_3$

当 $n=1$ 时, 电桥为等臂电桥, 其输出电压为:

$$U_0 = \frac{1}{4} \frac{\Delta R_1}{R_1} U_i = \frac{1}{4} K \varepsilon U_i \quad (2-16)$$

在 $\Delta R_1 \ll R_1$ 的前提下, 桥路输出电压与应变成正比!  $U_i$ 的大小由什么决定呢?



### 单臂直流电桥的非线性误差

如果不略去 (2-13) 式中分母的  $\Delta R_1 / R_1$  项, 则电桥实际输出值为  $U_0'$ , 非线性误差为:

$$\gamma = \frac{U_0 - U_0'}{U_0} = \frac{\frac{\Delta R_1}{R_1}}{\left(1 + n + \frac{\Delta R_1}{R_1}\right)}$$

当  $n=1$  时,

$$\gamma = \frac{\frac{\Delta R_1}{2R_1}}{\left(1 + \frac{\Delta R_1}{2R_1}\right)} = \frac{\Delta R_1}{2R_1} \left(1 - \frac{\Delta R_1}{2R_1} + \left(\frac{\Delta R_1}{2R_1}\right)^2 - \left(\frac{\Delta R_1}{2R_1}\right)^3 + \dots\right) \approx \frac{\Delta R_1}{2R_1}$$

非线性误差与  $\Delta R_1 / R_1$  成正比。如何减小或消除非线性误差呢?



### 差动电桥

两臂差动电桥的输出电压为：

$$U_0 = U_i \left[ \frac{R_1 + \Delta R_1}{R_1 + \Delta R_1 + R_2 + \Delta R_2} - \frac{R_3}{R_3 + R_4} \right]$$

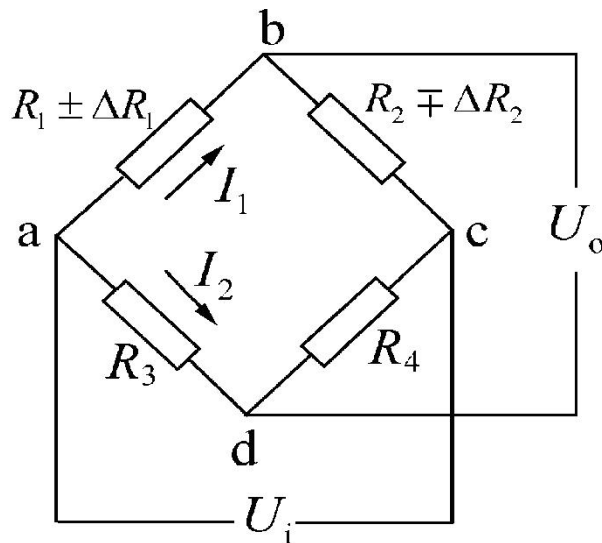
设初始时为  $R_1=R_2=R_3=R_4=R$ ；则上式为

$$U_0 = \frac{U_i}{2} \frac{\Delta R_1 - \Delta R_2}{2R + \Delta R_1 + \Delta R_2}$$

若工作时应变片一片受拉、一片受压，即  $\Delta R_1 = -\Delta R_2 = \Delta R$ ，则

$$U_0 = \frac{U_i}{2} \frac{\Delta R}{R} = \frac{U_i}{2} K \varepsilon$$

可见，这时输出电压  $U_0$  与  $\Delta R/R$  间成严格的线性关系，且电桥灵敏度比单臂电桥提高一倍。





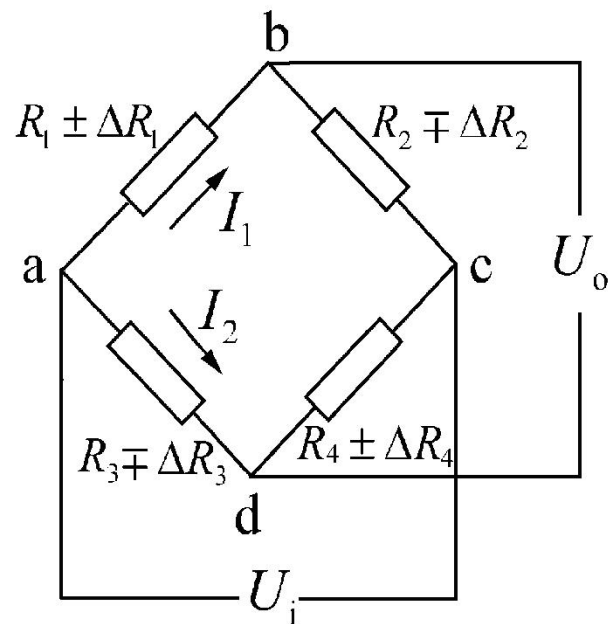
## Part A 电阻应变式传感器

若采用四臂差动电桥（**全桥**），如图，  
并设初始时 $R_1=R_2=R_3=R_4=R$ ；工作时各个  
桥臂中电阻应变片电阻的变化为： $\Delta R_1$ 、  
 $\Delta R_2$ 、 $\Delta R_3$ 、 $\Delta R_4$ ；则电桥输出为：

$$U_o = \frac{U_i}{4} \left[ \frac{\Delta R_1}{R} - \frac{\Delta R_2}{R} - \frac{\Delta R_3}{R} + \frac{\Delta R_4}{R} \right] \left[ 1 + \frac{1}{2} \left( \frac{\Delta R_1}{R} + \frac{\Delta R_2}{R} + \frac{\Delta R_3}{R} + \frac{\Delta R_4}{R} \right) \right]$$

若 $\Delta R_1 = \Delta R_4 = -\Delta R_2 = -\Delta R_3 = \Delta R$ ，则有

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



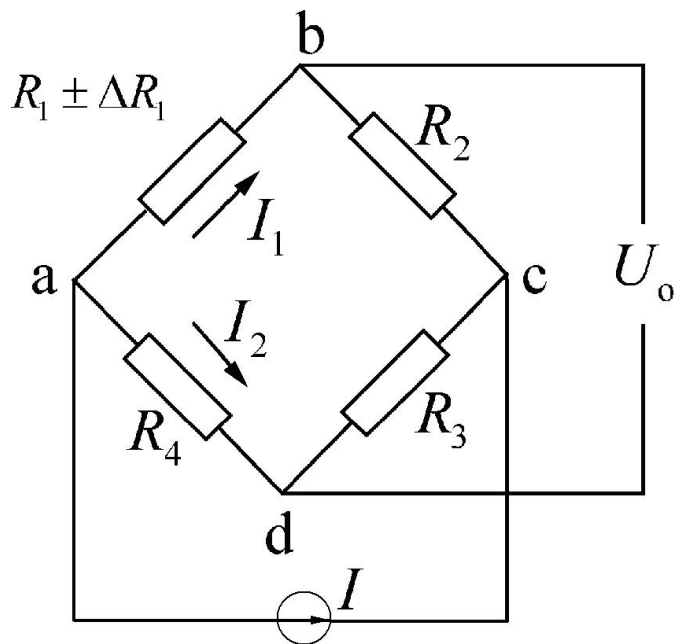


## 2.5.2 恒流源电桥

设供电电流为  $I$ ，当  $\Delta R_1 = 0$  时，且负载电阻很大，通过各臂的电流为

$$I_1 = \frac{R_3 + R_4}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4} I$$

$$I_2 = \frac{R_1 + R_2}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4} I$$



输出电压为：  $U_0 = I_1 R_1 - I_2 R_3 = \frac{R_1 R_4 - R_2 R_3}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4} I$

若电桥初始处于平衡状态，且  $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$ ；当  $R_1$  变为  $R + \Delta R$  时，电桥输出电压为

$$U_0 = \frac{R \Delta R}{4R + \Delta R} I = \frac{1}{4} I \frac{\Delta R}{1 + \frac{\Delta R}{4R}}$$

非线性误差比恒压源电桥减小 1/2





### 2.5.3 交流电桥

■ 交流载波放大器具有灵敏度高、稳定性好、外界干扰和电源影响小及造价低等优点，但存在工作频率上限较低、长导线时分布电容影响大等缺点。

■ 直流放大器工作频带宽，能解决分布电容问题，但它需配用精密稳定电源供桥，造价较高。

近年来随着电子技术的发展，在数字应变仪、超动态应变仪中已逐渐采用直流放大形式的测量线路。

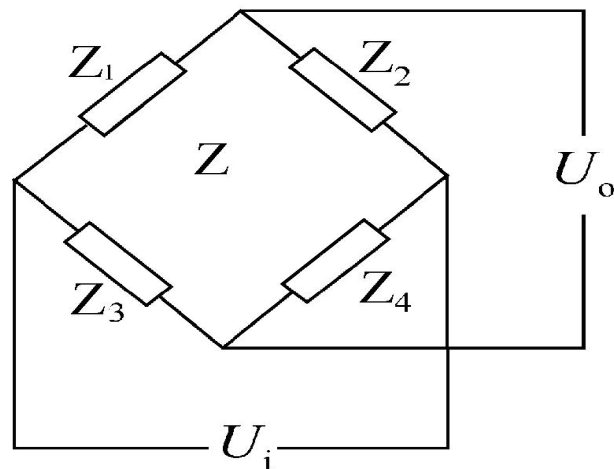
#### 1. 交流电桥的平衡条件

交流电桥电路如图所示，输出电压为

$$\dot{U}_0 = \frac{Z_1 Z_4 - Z_2 Z_3}{(Z_1 + Z_2)(Z_3 + Z_4)} \dot{U}_i$$

平衡条件为：

$$Z_1 Z_4 = Z_2 Z_3$$





设各臂阻抗为：

$$\begin{aligned}z_1 &= r_1 + jx_1 = Z_1 e^{j\varphi_1} \\z_2 &= r_2 + jx_2 = Z_2 e^{j\varphi_2} \\z_3 &= r_3 + jx_3 = Z_3 e^{j\varphi_3} \\z_4 &= r_4 + jx_4 = Z_4 e^{j\varphi_4}\end{aligned}$$

式中， $r_i$ 、 $x_i$ 为相应各桥臂的电阻和电抗， $Z_i$ 和 $\phi_i$ 为复阻抗的模和幅角。

故交流电桥的平衡条件为：

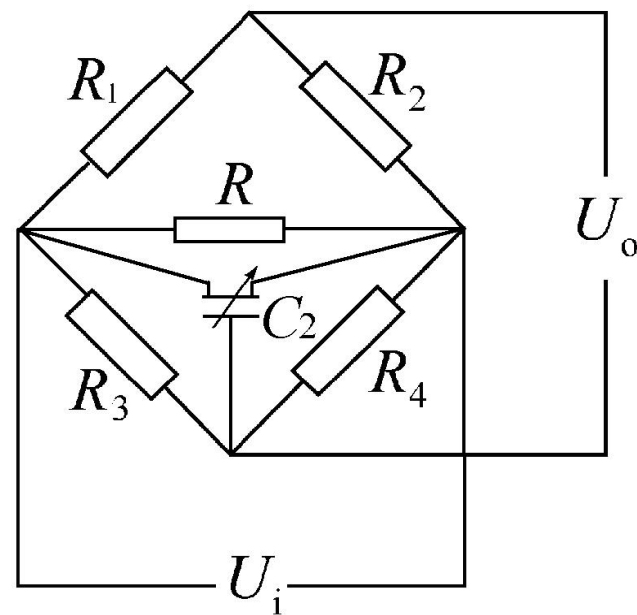
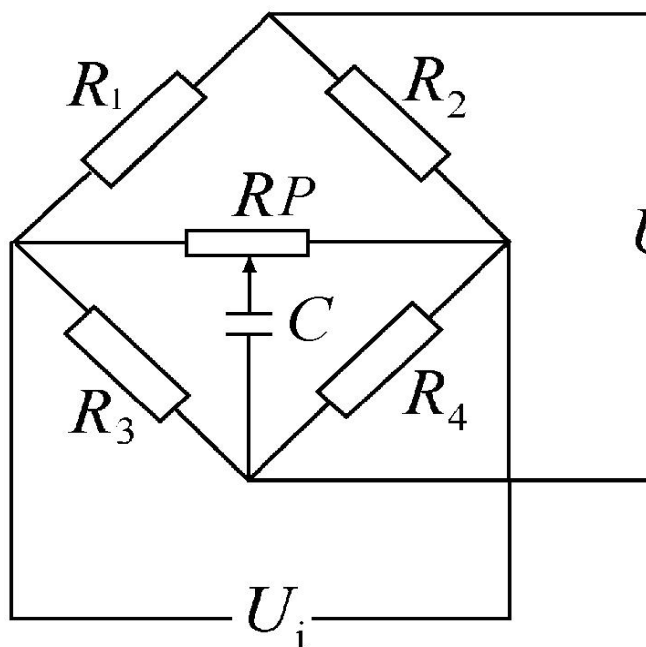
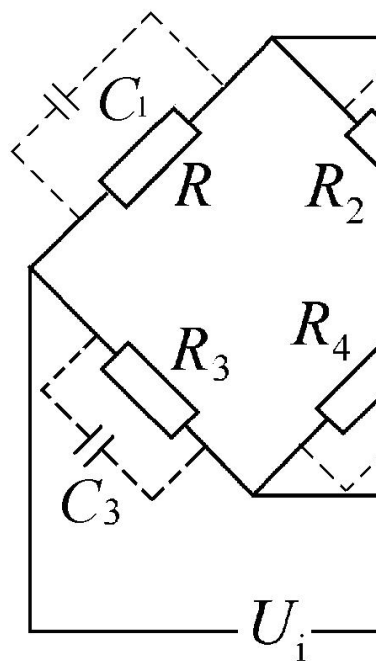
$$\begin{cases} Z_1 Z_4 = Z_2 Z_3 \\ \varphi_1 + \varphi_4 = \varphi_2 + \varphi_3 \end{cases}$$

上式表明，交流电桥平衡要满足两个条件，即相对两臂复阻抗的模之积相等，并且其幅角之和相等。所以交流电桥的平衡比直流电桥的平衡要复杂得多。



### 2. 交流电桥的平衡调节

对于纯电阻交流电桥，由于应变片连接导线的分布电容，相当于在应变片上并联了一个电容，如图，所以在调节平衡时，除使用电阻平衡装置外，还要使用电容平衡装置，





# 电阻应变片在使用中主要需考虑减小或消除的误差是什么？

## 2.6 电阻应变片的温度误差及其补偿

### 1. 温度误差及其产生原因

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。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。



## Part A 电阻应变式传感器

设环境引起的构件温度变化为  $\Delta t$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) 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  $\alpha$ , 则应变片产生的电阻相对变化为

$$\left(\frac{\Delta R}{R}\right)_{t1} = \alpha \Delta t$$

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

$$\left(\frac{\Delta R}{R}\right)_{t2} = K(\beta_g - \beta_s)\Delta t$$

$\beta_g$ ——试件材料线膨胀系数;  $\beta_s$ ——敏感栅材料线膨胀系数。

$K$ ——应变片灵敏系数。



温度变化形成的总电阻相对变化:

$$\left(\frac{\Delta R}{R}\right)_t = \left(\frac{\Delta R}{R}\right)_{t1} + \left(\frac{\Delta R}{R}\right)_{t2} = \alpha \Delta t + K(\beta_g - \beta_s) \Delta t$$

相应的虚假应变为

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

上式为应变片粘贴在试件表面上, 当试件不受外力作用, 在温度变化  $\Delta t$  时, 应变片的温度效应。用应变形式表现出来, 称之为热输出。

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  $(\alpha, \beta_s)$  有关, 而且与被测试件材料的线膨胀系数  $(\beta_g)$  有关。





## 2. 温度误差补偿方法

### (1) 自补偿法

#### 1) 单丝自补偿

通过材料选择，使

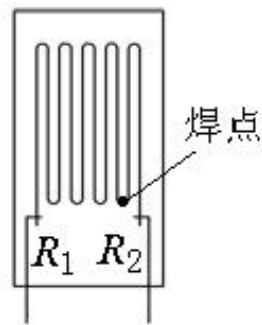
$$\alpha + K(\beta_g - \beta_s) = 0$$

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。

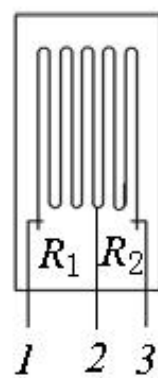


### 2) 双丝组合式自补偿

如图 (a), 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, 以达到一定的温度范围内在一定材料的试件上实现



(a)



(b)

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

$$\Delta R_{1t} = -\Delta R_{2t}, \text{ 该方法补偿效果可达 } \pm 0.45 \mu \varepsilon / ^\circ\text{C}.$$

组合式自补偿应变片的另一种形式是用两种同符号温度系数的合金丝串接成敏感栅, 在串接处焊出引线并接入电桥, 如图 (b)。适当调节  $R_1$  与  $R_2$  的长度比和外接电阻  $R_B$  的值, 使之满足条件

$$\frac{\Delta R_{1t}}{R_1} = \frac{\Delta R_{2t}}{R_2 + R_B}$$

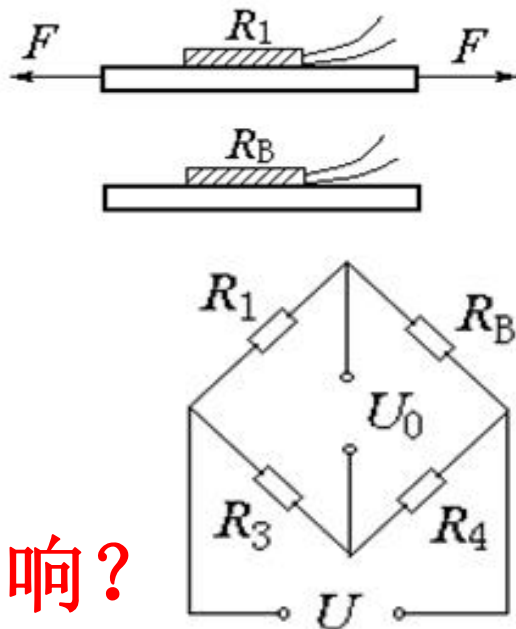
即可满足温度自补偿要求



### (2) 桥路补偿法

#### ◆ 温度补偿应变片

如图，工作应变片  $R_1$  安装在被测试件上，另选一个特性与  $R_1$  相同的补偿片  $R_B$ ，安装在材料与试件相同的补偿件上，温度与试件相同，但不承受应变。



此时如何利用电桥电路消除温度的影响？

桥路输出电压表达式是什么？消除温度误差了吗？

$$U_0 = \frac{U_i}{2} \frac{\Delta R_1 - \Delta R_2}{2R + \Delta R_1 + \Delta R_2}$$

只考虑测量时：

$$U_0 = \frac{1}{4} \frac{\Delta R_1}{R_1} U_i$$

考虑温度变化对桥路输出电压影响时：

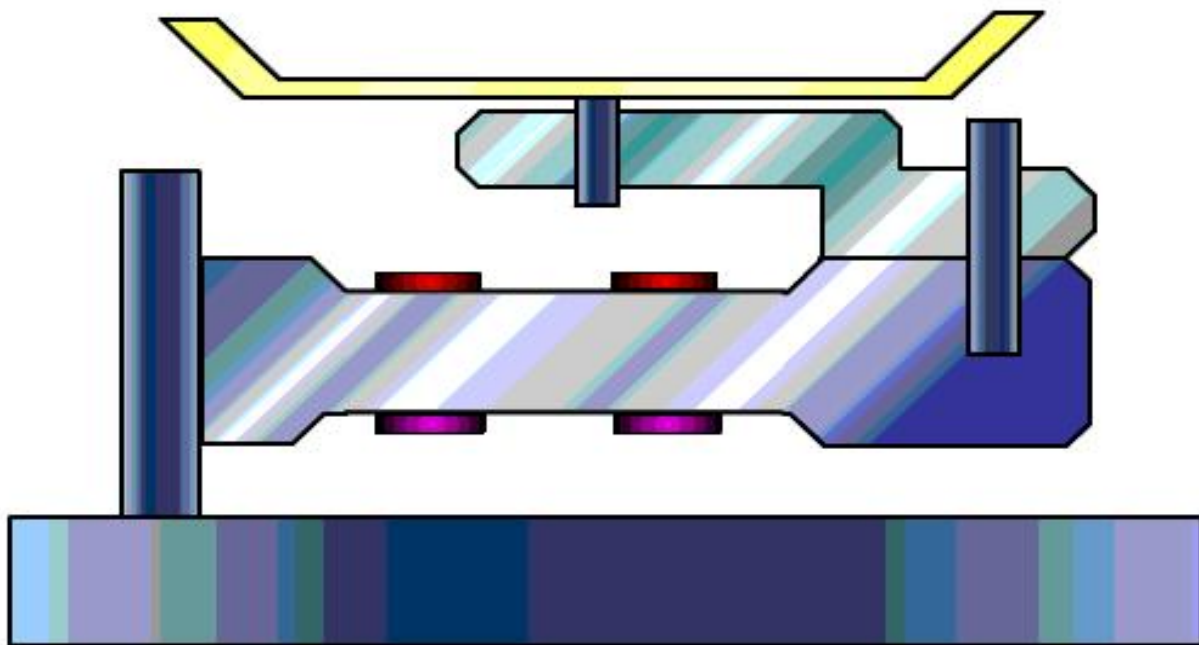
$$U_{0t} = 0$$



## 有更好的方法吗？

在有些应用中，可以通过巧妙地安装多个应变片以达到温度补偿和提高测量灵敏度的双重目的。

四片应变片应该如何接入电桥？此时桥路的输出电压是多少？温度误差消除了吗？





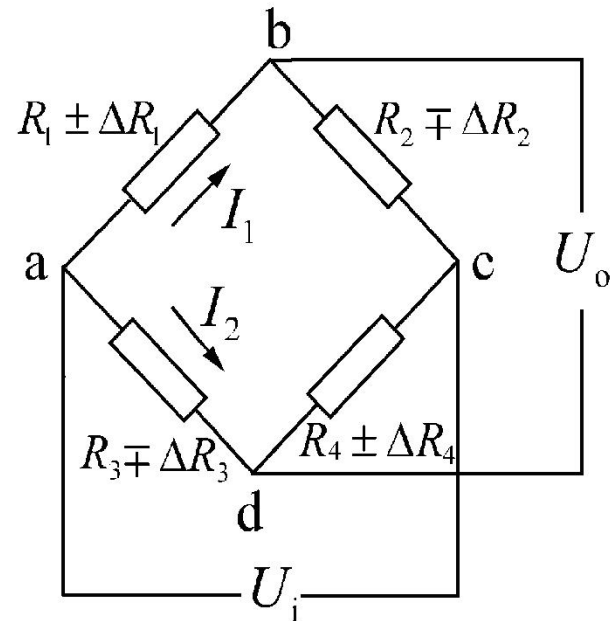
## Part A 电阻应变式传感器

如图，初始时 $R_1=R_2=R_3=R_4=R$ ；工作时各个桥臂中电阻应变片电阻的变化为： $\Delta R_1$ 、 $\Delta R_2$ 、 $\Delta R_3$ 、 $\Delta R_4$ ；则电桥输出为：

$$U_o = \frac{U_i}{4} \left[ \frac{\Delta R_1}{R} - \frac{\Delta R_2}{R} - \frac{\Delta R_3}{R} + \frac{\Delta R_4}{R} \right] \left[ 1 + \frac{1}{2} \left( \frac{\Delta R_1}{R} + \frac{\Delta R_2}{R} + \frac{\Delta R_3}{R} + \frac{\Delta R_4}{R} \right) \right]$$

若 $\Delta R_1 = \Delta R_4 = -\Delta R_2 = -\Delta R_3 = \Delta R$ ，则有

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



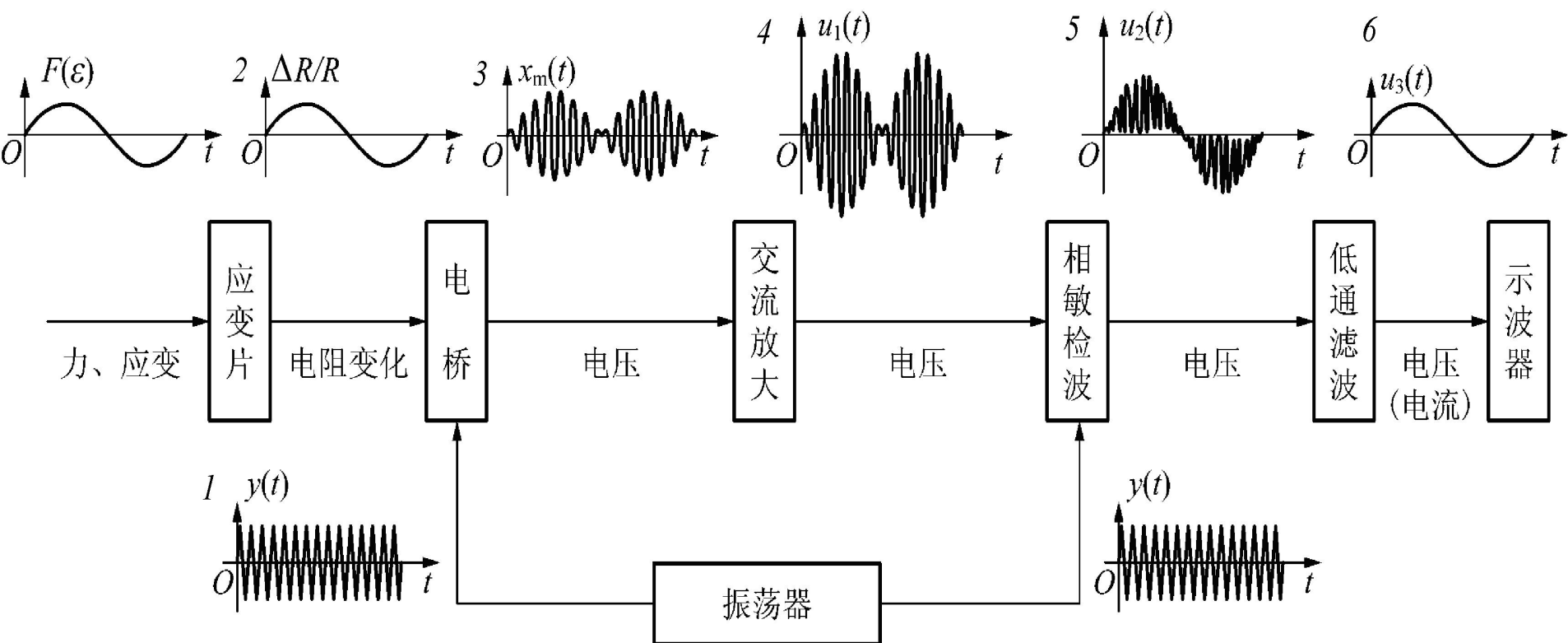
消除了温度误差

消除了非线性误差

增大了灵敏度



## 2.7 电阻应变仪



为何要用相敏检波器？振荡器的频率有何要求？





## 2.8 测力基本知识及测力传感器

### 2.8.1 力的测量方法

#### (1) 利用动力效应测力

力的动力效应使物体产生加速度，由牛顿第二定律可知：当物体质量确定后，该物体所受力和产生的加速度之间有确定对应关系，因此只需要测出物体的加速度，就可间接测得力。

#### (2) 利用静力效应测力

由胡克定律可知：弹性物体在力的作用下产生变形时，若在弹性范围内，物体所产生的变形量与所受力值成正比，如果通过一定手段测出物体的弹性变形量，就可间接确定物体所受力的值，电阻应变式测力传感器就属于此类。另外也可利用与内部应力相对应参量的物理效应来确定力值，如利用压电效应、压磁效应的测力传感器。在机械工程中，大部分测力方法都是基于静力效应。



## 2.8.2 电阻应变式力传感器

利用电阻应变片制作的测力仪广泛应用于静态和动态测量中，是目前数量最多、种类最全的测力装置，量程范围为 $10^{-2} \sim 10^7 \text{N}$ 。

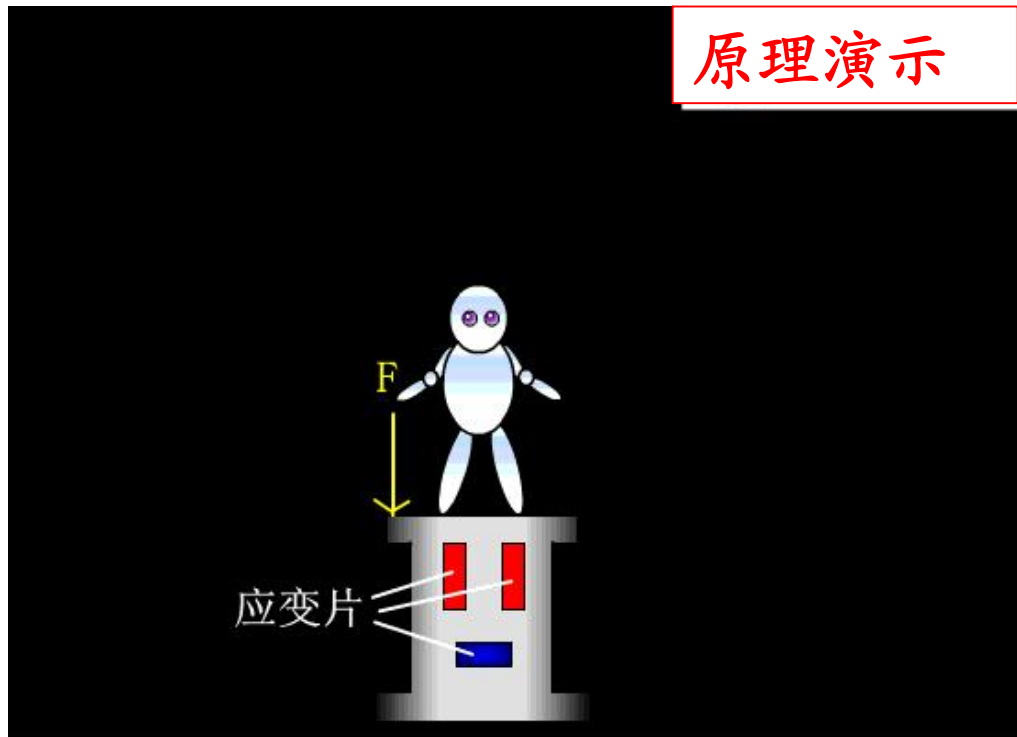
各类电阻应变式测力传感器的工作原理相同：利用弹性元件将被测力转换成应变，粘贴在弹性元件上的应变片将应变转换为电阻变化，再由电桥电路转换为电压，经放大处理后显示被测力的大小。

测力传感器的优劣除常规的灵敏度、精度、稳定性指标外，还包括过载能力、抗侧向能力大小等特殊要求。设计高精度测力传感器的指导思想是追求良好的自然线性；提高传感器的输出灵敏度；使传感器的抗侧向能力高，结构简单并易于密封，加工容易等。



#### 1. 柱式力传感器

柱式力传感器的弹性元件分实心 and 空心两种，如图。其特点是结构简单，可承受较大载荷，最大可达  $10^7\text{N}$ ，在测  $10^3\sim 10^5\text{N}$  载荷时，为提高变换灵敏度和抗横向干扰，一般采用空心圆柱结构。



根据材料力学，柱沿轴向的应变为

$$\varepsilon_x = \frac{F}{ES}$$

应变的大小取决于  $S$ 、 $E$ 、 $F$ ，与轴长度无关。

横向（周向）应变为  $\varepsilon_y = -\mu\varepsilon_x$



圆柱的直径的计算：根据材料极限应力  $[\sigma_b]$  来计算

即：  $F/S \leq [\sigma_b]$  ；  $S = \pi d^2/4$

得：

$$d \geq \sqrt{\frac{4}{\pi} \frac{F}{[\sigma_b]}}$$

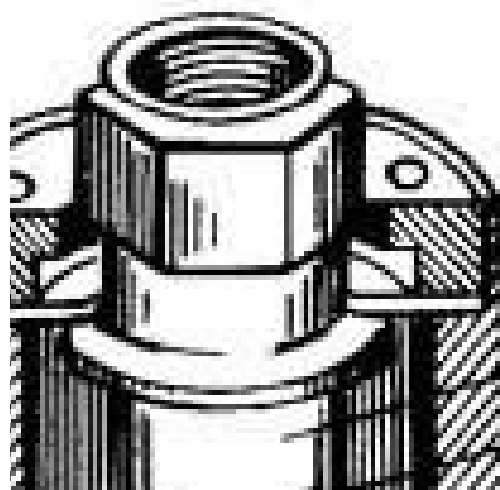
对空心圆柱体，得：

$$D \geq \sqrt{\frac{4}{\pi} \frac{F}{[\sigma_b]} + d^2}$$

外径 内径

高度：  $H \geq 2D + l$  或  $H \geq D - d + l$

应变片长度

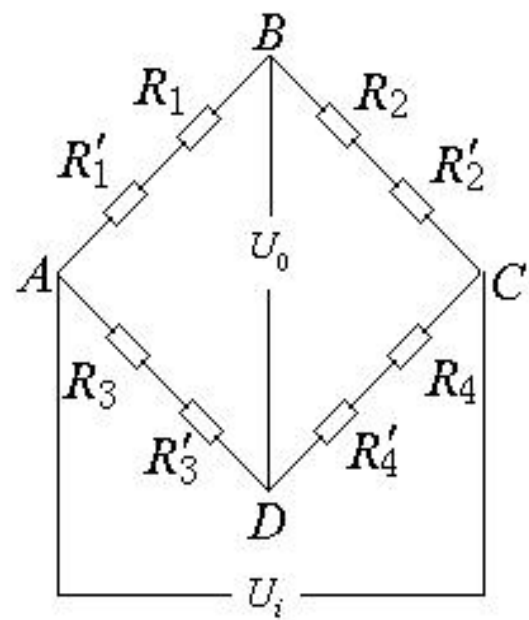
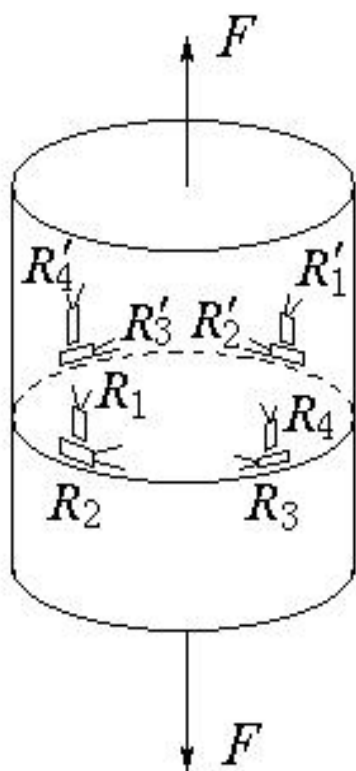


弹性元件  
电阻应变计

测力范围 (t)	0.2~1, 1.5~7, 10~20, 30~50,	工作温度	-10℃~55℃
桥路电阻	350 Ω	重复性误差	<1%
非线性误差	<±0.5%F.S	温度零点变化	0.04%F.S/℃
灵敏度	1~1.5mV/V	激励电压	<10V
允许过载能力	120%F.S	绝缘电阻	≥2000 M Ω
迟滞误差	<0.5%F.S		



## Part B 力及力矩测量传感器



$$\begin{aligned}\varepsilon_1 &= \varepsilon'_1 = \varepsilon_4 = \varepsilon'_4 = \varepsilon + \varepsilon_t \\ \varepsilon_2 &= \varepsilon'_2 = \varepsilon_3 = \varepsilon'_3 = -\mu\varepsilon + \varepsilon_t\end{aligned}$$

$$U_o = \frac{U_i K}{4} \frac{4(1+\mu)\varepsilon}{[1+2(1-\mu)\varepsilon+2\varepsilon_t]} \approx (1+\mu)K\varepsilon U_i$$



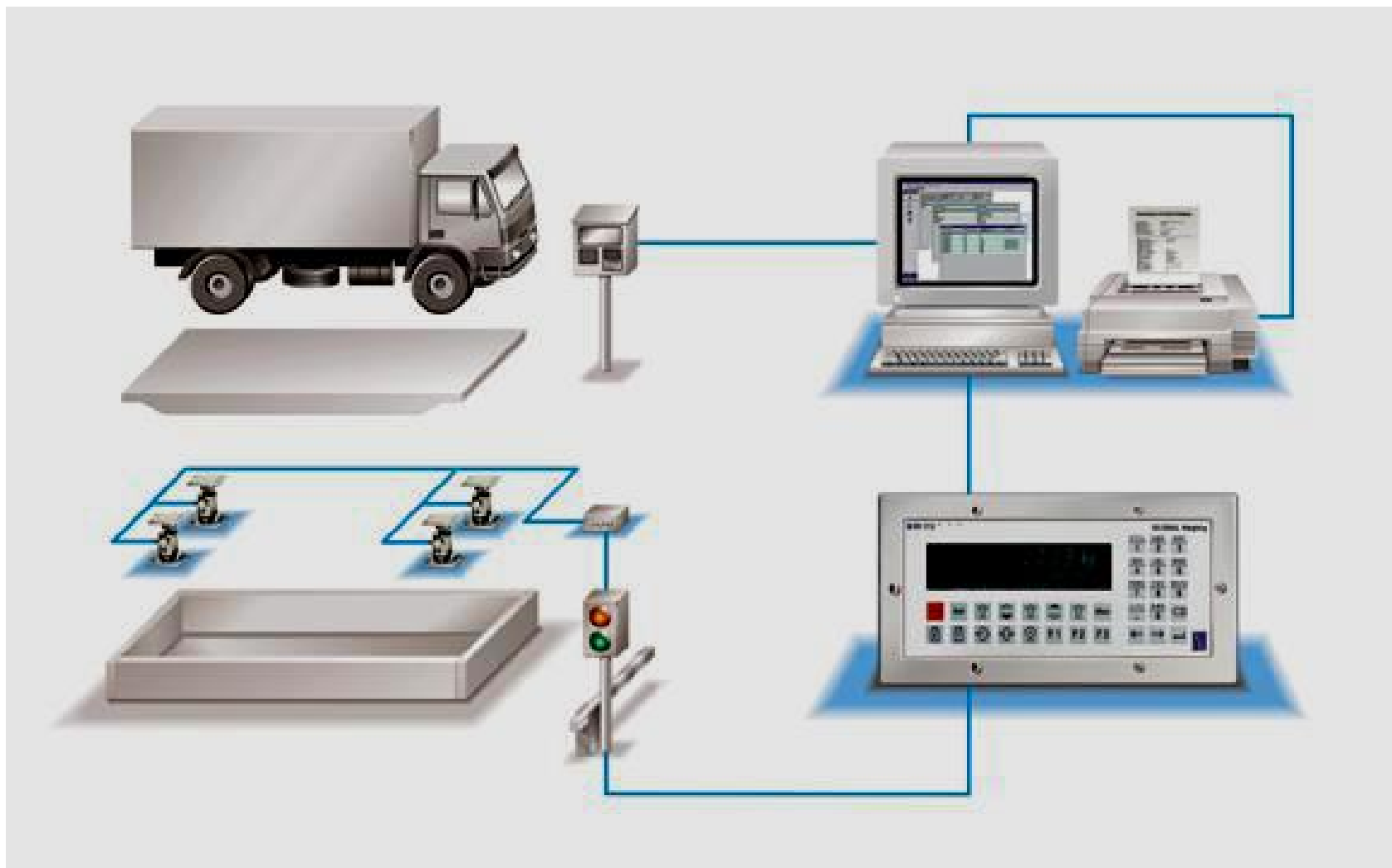


## 应变式荷重传感器外形及受力位置





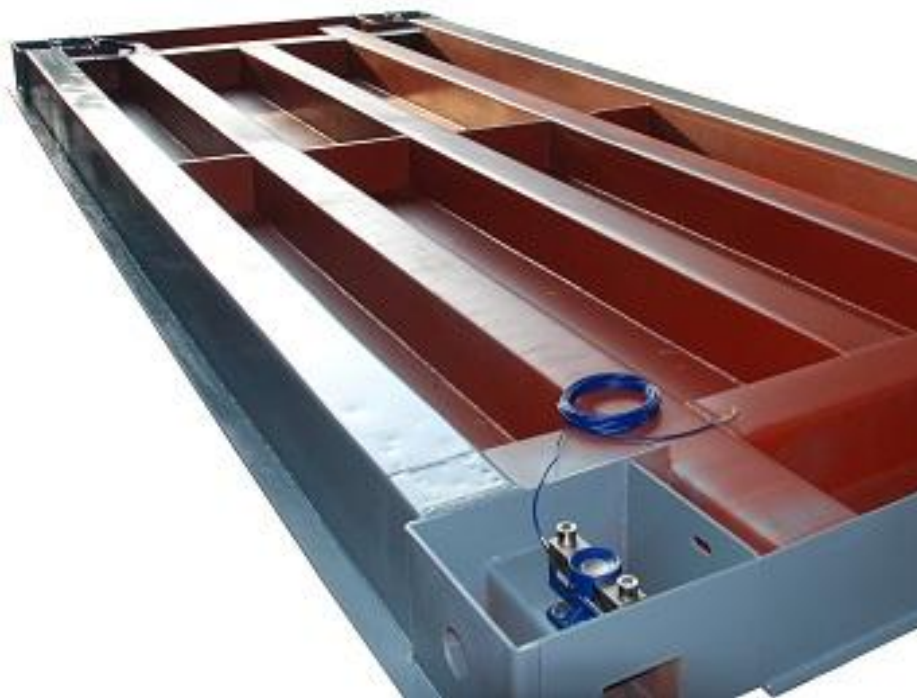
## 电子汽车衡

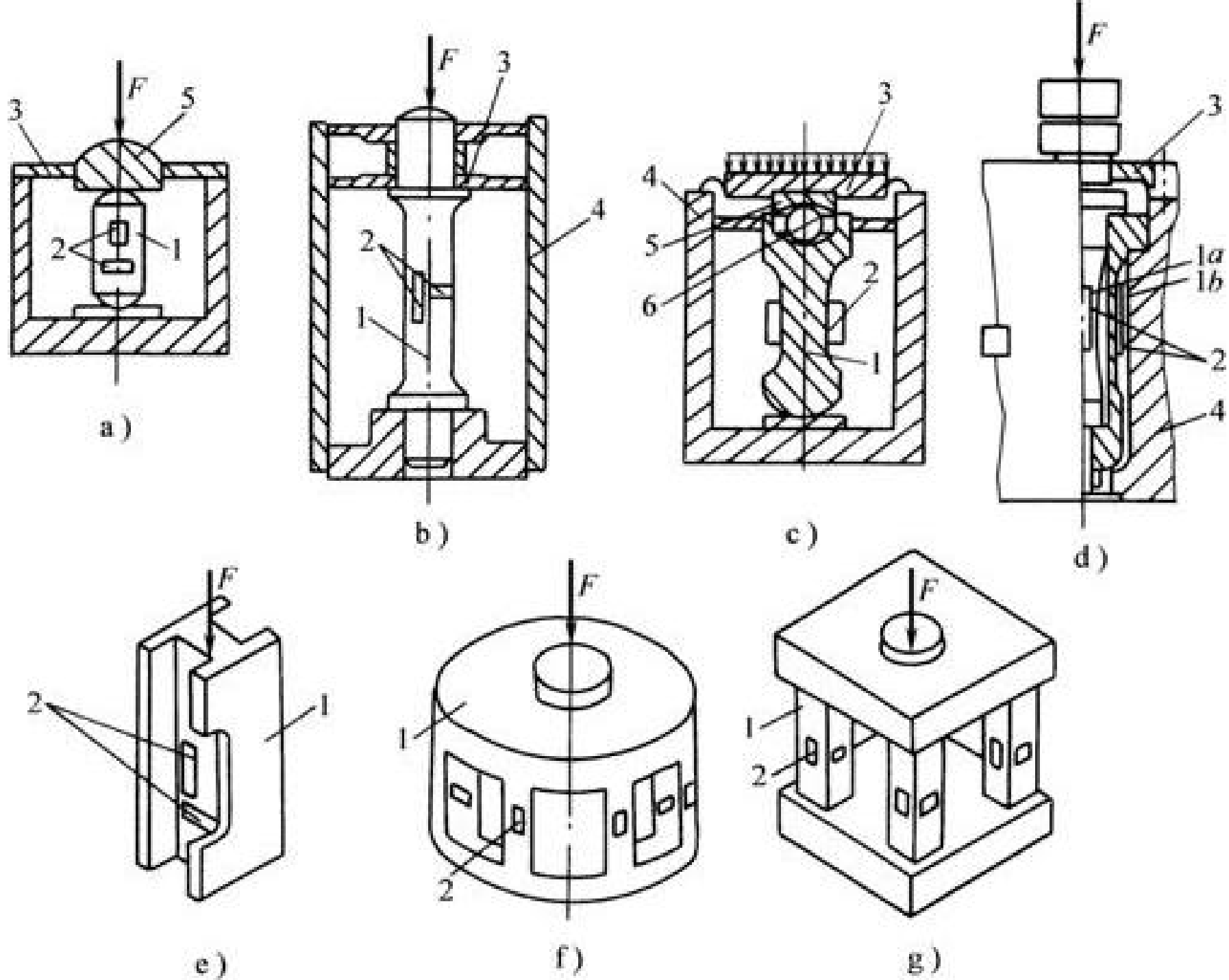






## 电子汽车衡结构组成





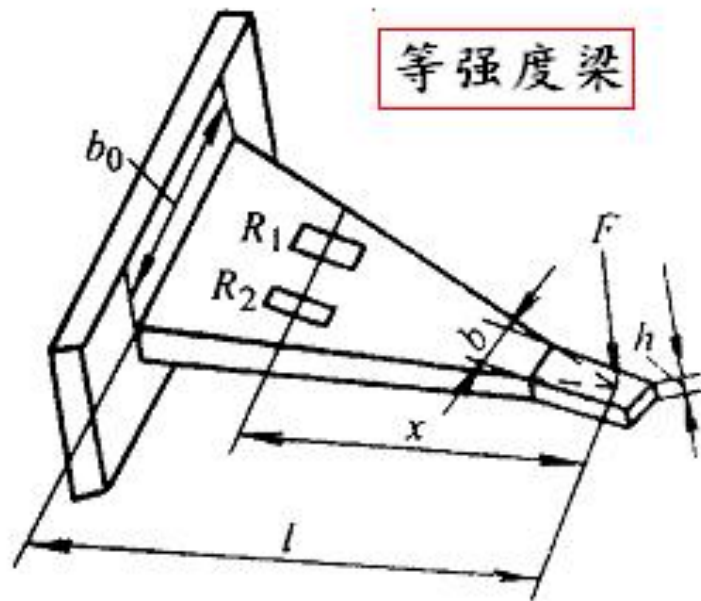


## 2. 梁式力传感器

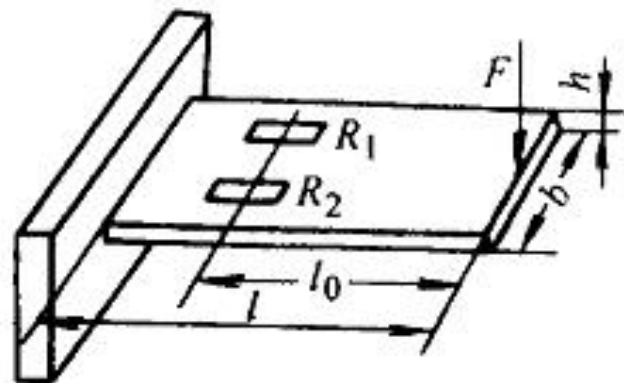
悬臂梁式:

等强度梁:  $\varepsilon = 6lF/Eb_0h^2$

等截面梁:  $\varepsilon = 6Fl_0/Ebh^2$



等强度梁



等截面梁





双孔平行梁： 载荷可以施加在任何位置，都可以简化为作用于梁端部的力F及一个力偶M

$$\varepsilon_1 = -\varepsilon_3 = \frac{6(Fl_2 + M)}{Ebh^2}$$

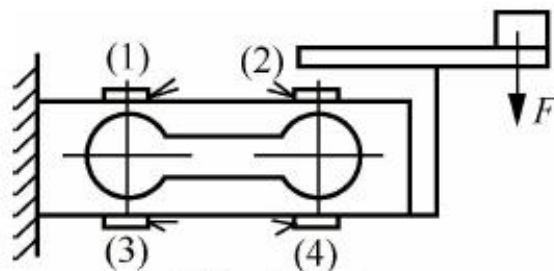
$$\varepsilon_2 = -\varepsilon_4 = \frac{6(Fl_1 + M)}{Ebh^2}$$

差动电桥输出：

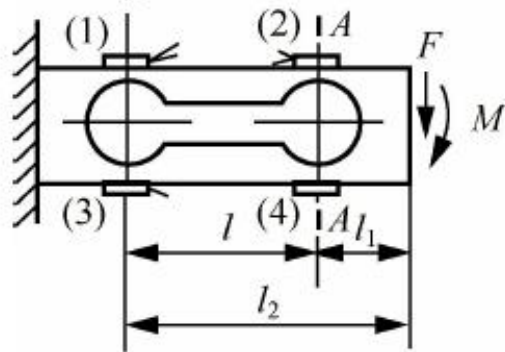
$$U_0 = \frac{U_i K}{4} (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 - \varepsilon_3 + \varepsilon_4)$$

$$= \frac{3U_i K l}{Ebh^2} F$$

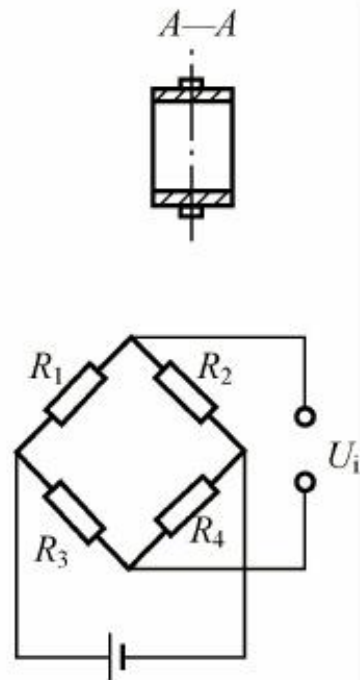
可见载荷的位置不影响输出



(a) 结构原理图



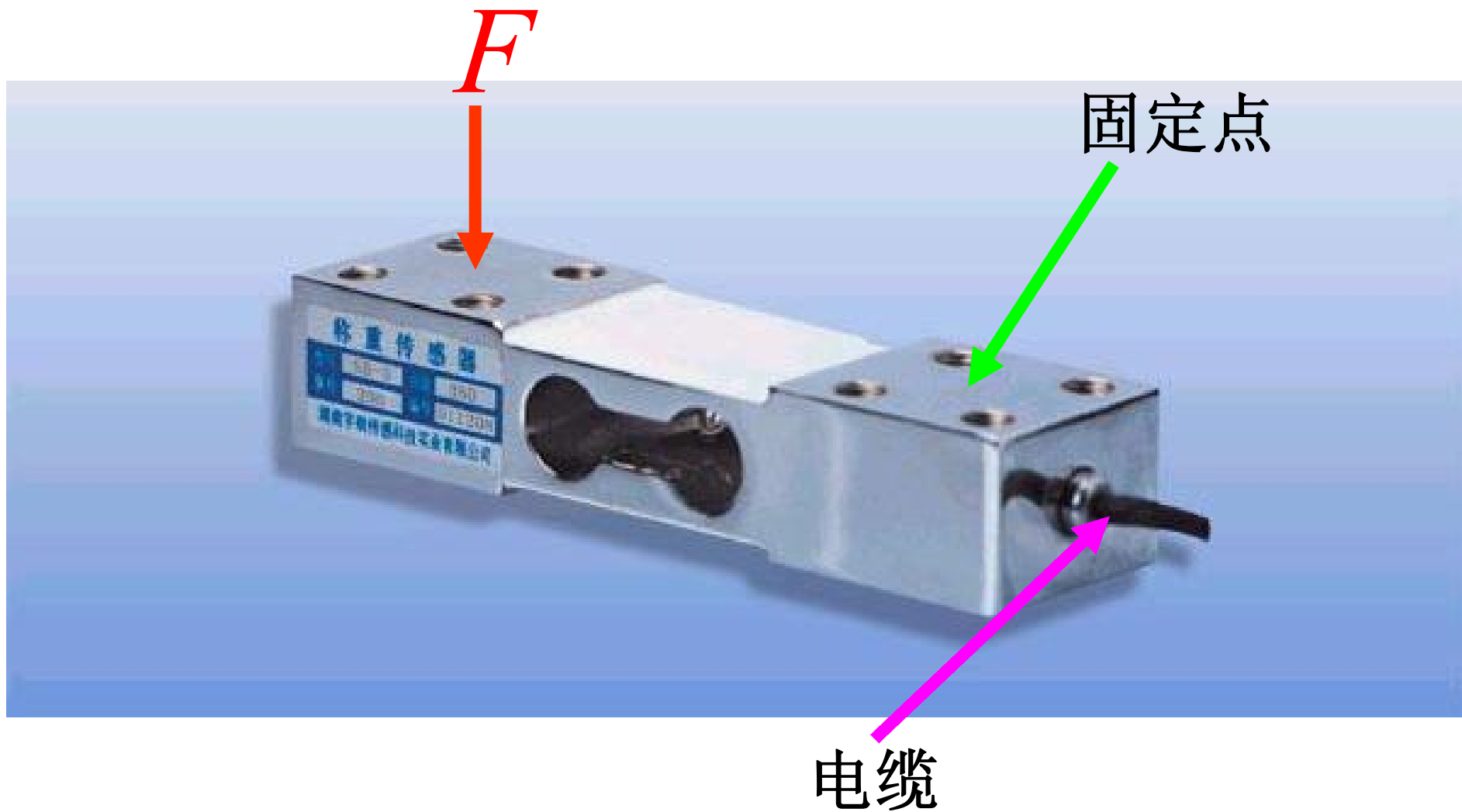
(b) 受力简化图



(c) 电桥电路图



## 双孔平行梁称重传感器实物图





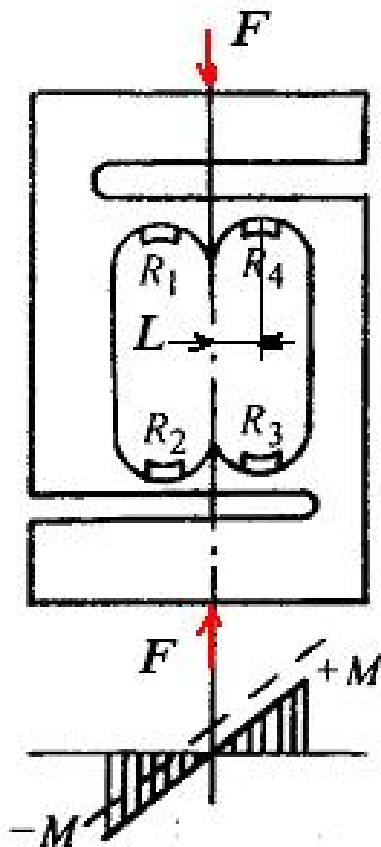
## S型双孔梁

差动电桥输出:

$$U_0 = \frac{U_i K}{4EW} FL$$

$$W = \frac{bh^2}{6}$$

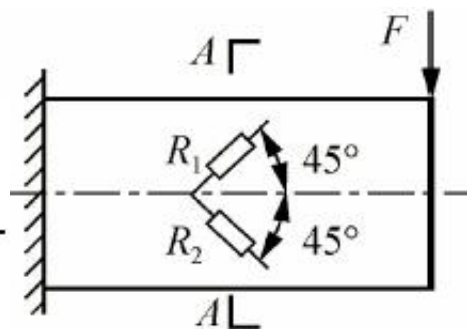
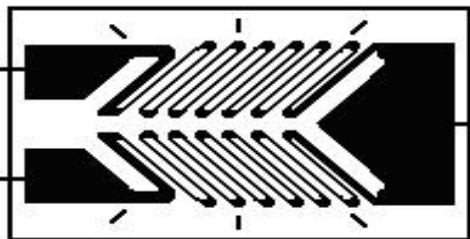
——抗弯断面系数



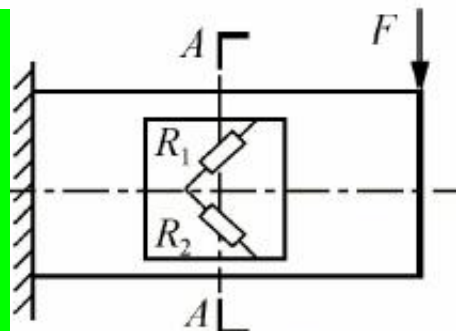
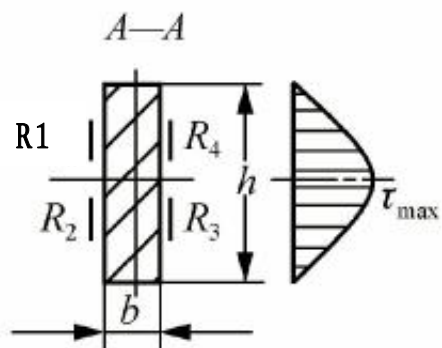


### 3. 剪切式力传感器

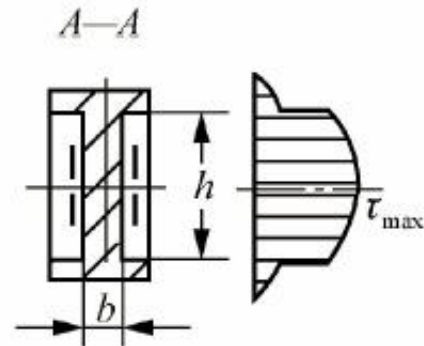
应变片安装在大处的主应传感器的输出传感器高。



(a) 矩形截面梁



(b) 工字形截面梁



梁长度的中间截面弯矩为零，中性层处是最大剪应变所在处，为此将电阻应变片安装在该截面的中性层上，栅丝与中性层成45°方向，即最大正应变方向。

四片应变片接成全桥电路后，电桥输出指示的应变与外力的关系为：

矩形截面梁：
$$\varepsilon = \frac{3}{bhG} F$$

工字形截面梁：
$$\varepsilon = \frac{2}{bhG} F$$

$$G = \frac{E}{2(1+\mu)}$$
 —— 剪切弹性模量



## 应变式力传感器





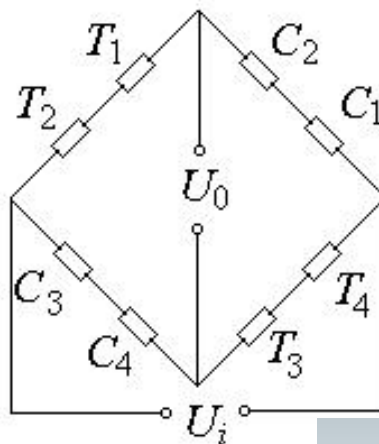
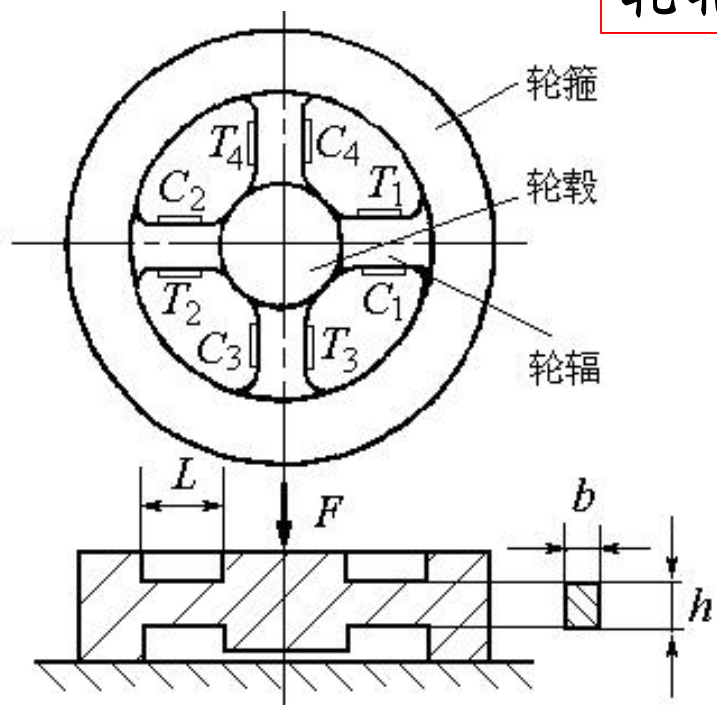
## 吊钩秤







## 轮辐式剪切力传感器

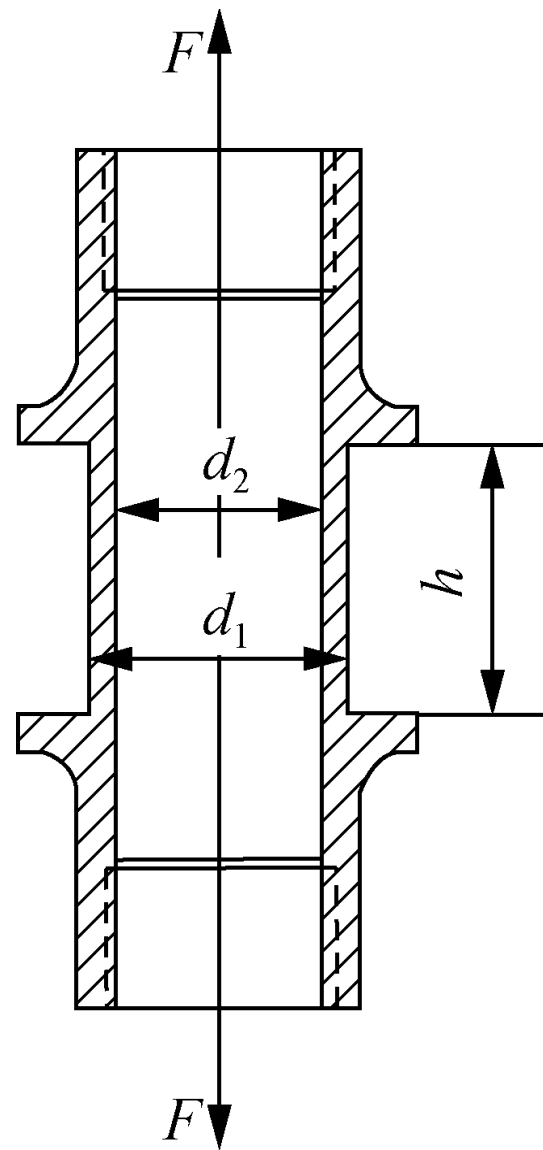




【例】以国产BLR-1型拉力传感器为例，设计一个满量程为9.8 kN的拉力传感器。传感器弹性元件形状如图，材料选用40CrNiMo，材料的强度极限  $\sigma_b=1100$  MPa，比例极限  $\sigma_p=800$  MPa，材料弹性模量  $E=210$  GPa，泊松系数  $\mu=0.29$ 。

解：1) 设计思路

常规柱式应变力传感器的测量灵敏度应达到1~3 mV/V，设计时以此为依据计算弹性元件的相关参数，再对弹性元件进行强度校核，直至同时满足测量灵敏度和使用强度要求。



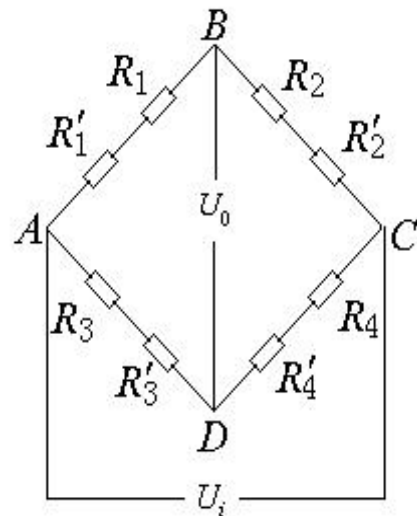
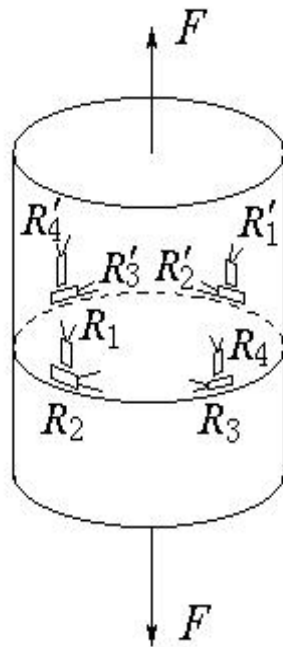


采用恒压源电桥电路，布片及电桥如图2.16所示，电桥的输出表达式为

$$U_o = (1 + \mu) K \varepsilon U_i$$

即

$$\frac{U_o}{U_i} = (1 + \mu) K \varepsilon = (1 \sim 3) \text{ mV/V}$$



取应变片灵敏系数  $K=2$ ， $U_o/U_i = 2 \text{ mV/V}$ ，代入上式计算得最大应变值为

$$\varepsilon = \frac{2 \times 10^{-3}}{(1 + 0.29) \times 2} = 7.75 \times 10^{-4}$$

$$\text{取 } [\varepsilon]_{\max} = 8 \times 10^{-4}$$



## 2) 弹性元件内、外径的计算

根据拉伸时轴向应变、力 $F$ 、面积 $S$ 之间的关系： $S = \frac{F}{E\varepsilon}$

代入已知参数，计算弹性元件截面积为

$$S = \frac{F}{E[\varepsilon]_{\max}} = \frac{9.8 \times 10^3}{210 \times 10^9 \times 8 \times 10^{-4}} \text{ m}^2 = 0.583 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

弹性元件的外径 $d_1$ 不能选择得太小，否则会由于力的偏心造成很大的误差。这里选用外径为 $d_1=1.5 \text{ cm}$ 的空心管，面积计算公式为

$$S = \frac{\pi(d_1^2 - d_2^2)}{4}$$

则内径 $d_2$ 为  $d_2 = \sqrt{d_1^2 - \frac{4}{\pi}S} = 1.23 \text{ cm}$ ，保留一位小数 $d_2=1.3 \text{ cm}$ 。



这样空心管壁厚  $t=0.1\text{ cm}$ 。

### 3) 柱高 $h$ 及其他尺寸的确定

为了防止弹性元件受压时出现失稳现象，柱高  $h$  应当选得小些，但又必须使应变片能够反映截面应变的平均值，这里选用弹性元件工作段的长度为： $h=2d_1=3\text{cm}$ 。

由于壁很薄，还必须检验是否会出现局部失稳。薄壁管的失稳临界应力计算如下：

$$\begin{aligned}\sigma_{\text{bm}} &= \frac{Et}{\frac{1}{2}(d_1 + d_2)\sqrt{3(1-\mu^2)}} \\ &= \frac{210 \times 10^9 \times 0.1 \times 10^{-2}}{\frac{1}{2}(1.5 + 1.3) \times 10^{-2} \sqrt{3(1-0.29^2)}} \text{ Pa} = 9049 \text{ MPa}\end{aligned}$$



校核在超过满量程150%情况下，弹性元件截面中的应力大小如下：

$$\sigma = \frac{1.5F}{S} = \frac{1.5 \times 9.8 \times 10^3}{\frac{\pi}{4}(1.5^2 - 1.3^2) \times 10^{-4}} \text{ Pa} = 334 \text{ MPa}$$

计算表明，受力超过满量程150%时的应力还远远小于材料的比例极限和临界应力，这表明该弹性元件不会出现弹性失稳。另外弹性元件两端有螺纹孔，以便连接拉力螺栓，螺孔设计为M14，查阅手册可知它的许用载荷远远大于9.8 kN。

#### 4) 输出量的计算

根据弹性元件设计尺寸计算满量程下的轴向应变为

$$\varepsilon = \frac{F}{SE} = \frac{9.8 \times 10^3}{\frac{\pi}{4}(1.5^2 - 1.3^2) \times 10^{-4} \times 210 \times 10^9} = 1061 \times 10^{-6}$$





对应电桥单位激励电压下的输出为

$$\frac{U_o}{U_i} = (1 + \mu) K \varepsilon = 1.29 \times 2 \times 1061 \times 10^{-6} \text{ V/V} = 2.74 \text{ mV/V}$$

故知设计满足灵敏度和强度要求。

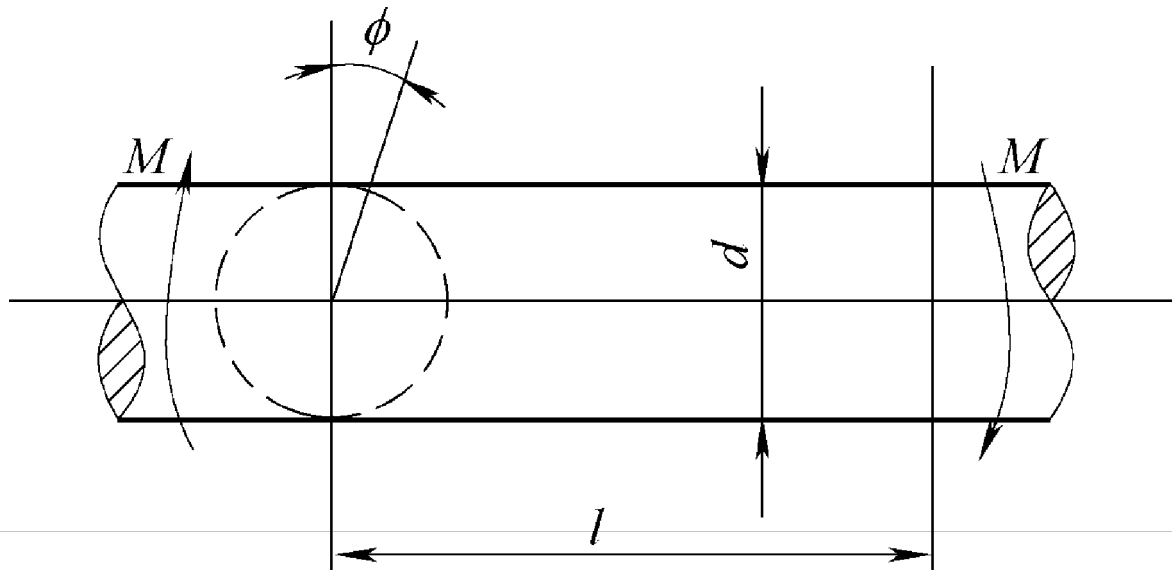


## 2.9 力矩测量基本知识及力矩传感器

### 2.9.1 力矩的测量方法

力矩是力和力臂的乘积。在力矩作用下机械零部件会发生转动或一定程度的扭曲变形，因此力矩也称为转矩或扭转矩。力矩的法定计量单位为“牛顿米”（ $\text{N} \cdot \text{m}$ ）。

在测量扭矩的诸多方法中，最常用的是通过弹性轴在传递力矩时产生的变形、应变、应力来测量扭矩。常用的弹性轴如图所示。





把弹性轴联接在驱动源和负载之间，弹性轴就会产生扭转。  
在材料的弹性极限内弹性轴的扭转角与扭矩成线性关系：

$$\varphi = \frac{32l}{\pi G d^4} M$$

式中， $\varphi$  为弹性轴的扭转角（rad）； $l$  为弹性轴的测量长度（m）； $d$  为弹性轴的直径（m）； $M$  为扭矩（N·m）； $G$  为弹性轴材料的切变模量（Pa）。

✓ 按弹性轴变形测量时：

$$M = \frac{\pi G d^4}{32l} \varphi$$



✓按弹性轴应力测量时：

$$M = \frac{\pi d^3}{16} \sigma$$

$\sigma$  ——转轴外表面的剪切应力。

✓按弹性轴应变测量时：

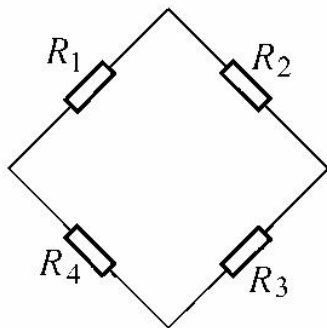
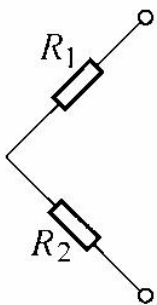
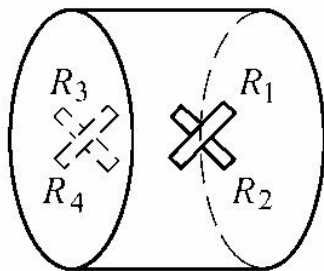
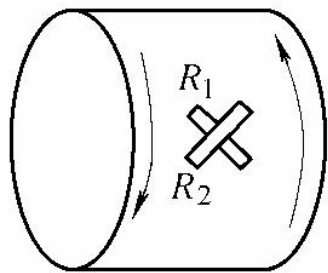
$$M = \frac{\pi G d^3}{8} \varepsilon_{45^\circ} = \frac{\pi G d^3}{8} \varepsilon_{135^\circ}$$

式中， $\varepsilon_{45^\circ}$ 、 $\varepsilon_{135^\circ}$  为转轴外表面上与轴线成 $45^\circ$  角或 $135^\circ$  角的主应变。



## 2.9.2 电阻应变式扭距传感器

电阻应变式扭矩仪测量精度高达 $\pm (0.2 \sim 0.5) \%$ ，线性度可达 $0.05 \%$ ，重复性达 $0.03 \%$ ，测量范围为 $5 \sim 50000 \text{ N} \cdot \text{m}$ ，在扭矩测量中应用较广泛。但它的安装要求高，且易受温度影响，在高转速时测量误差较大。





当测量小转矩时，考虑到抗弯曲强度、临界转速、应变片尺寸及粘贴工艺等因素，多采用**空心轴**：

$$\varepsilon_{45^\circ} = -\varepsilon_{135^\circ} = \frac{8M}{\pi D^3 G} \frac{1}{1 - \left(\frac{d}{D}\right)^4}$$

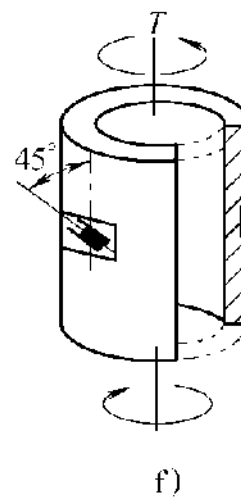
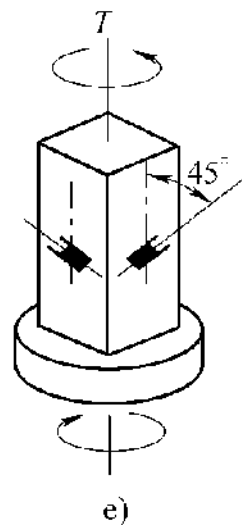
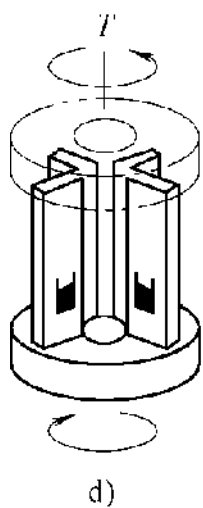
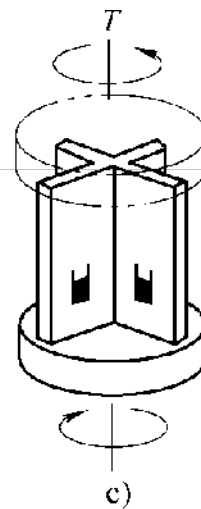
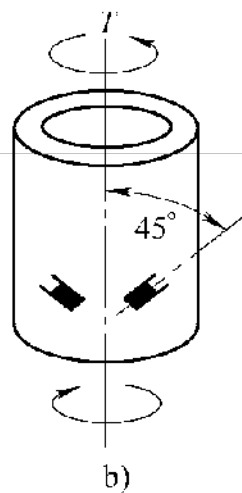
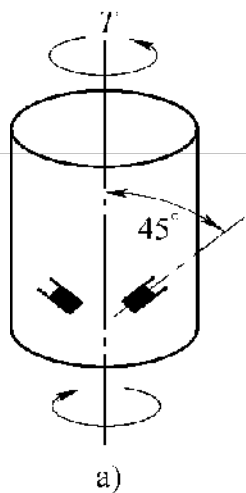
大量程转矩测量时一般采用实心方形截面弹性轴。对于**正方形轴**，应变与转矩的关系为

$$\varepsilon_{45^\circ} = -\varepsilon_{135^\circ} = 2.4 \frac{M}{a^3 G}$$



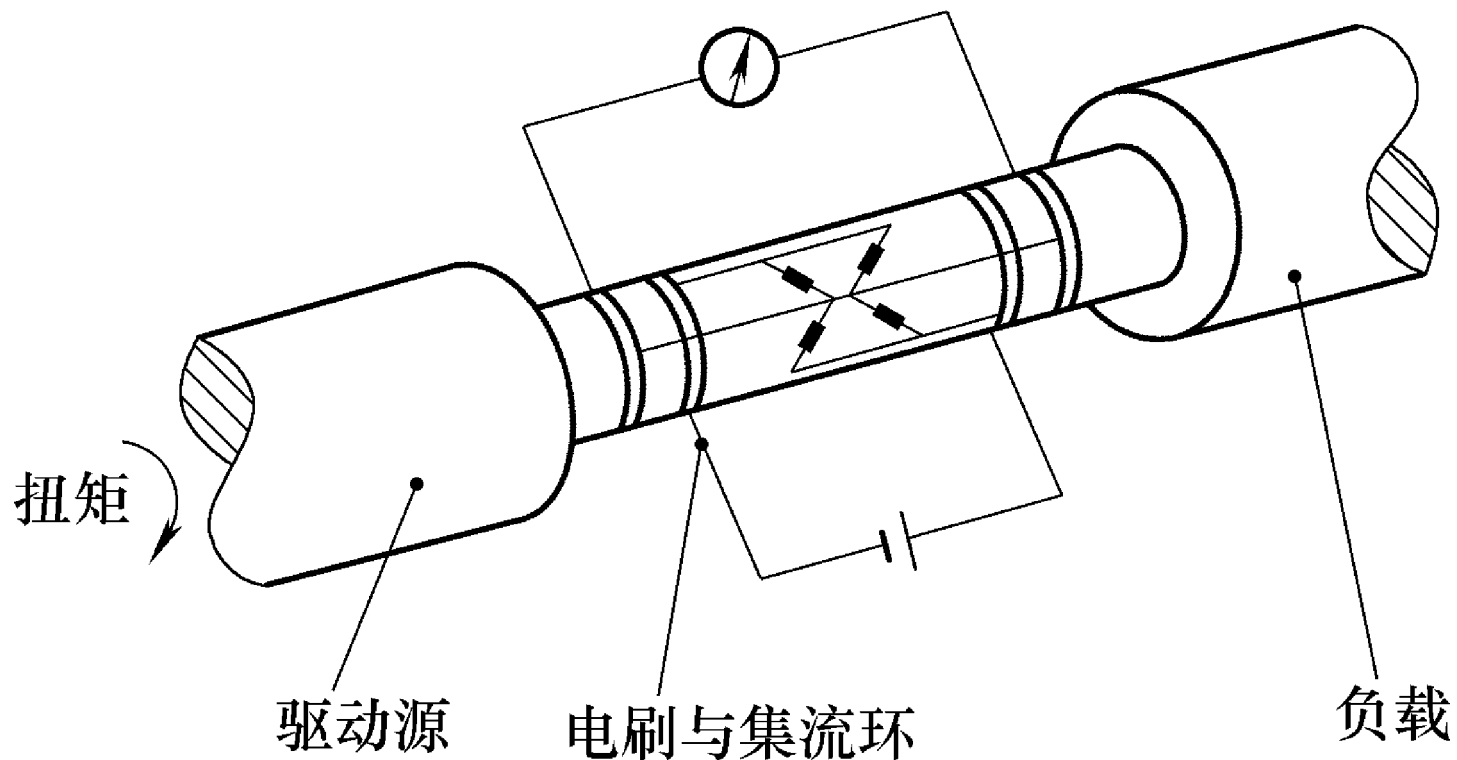


## Part B 力及力矩测量传感器



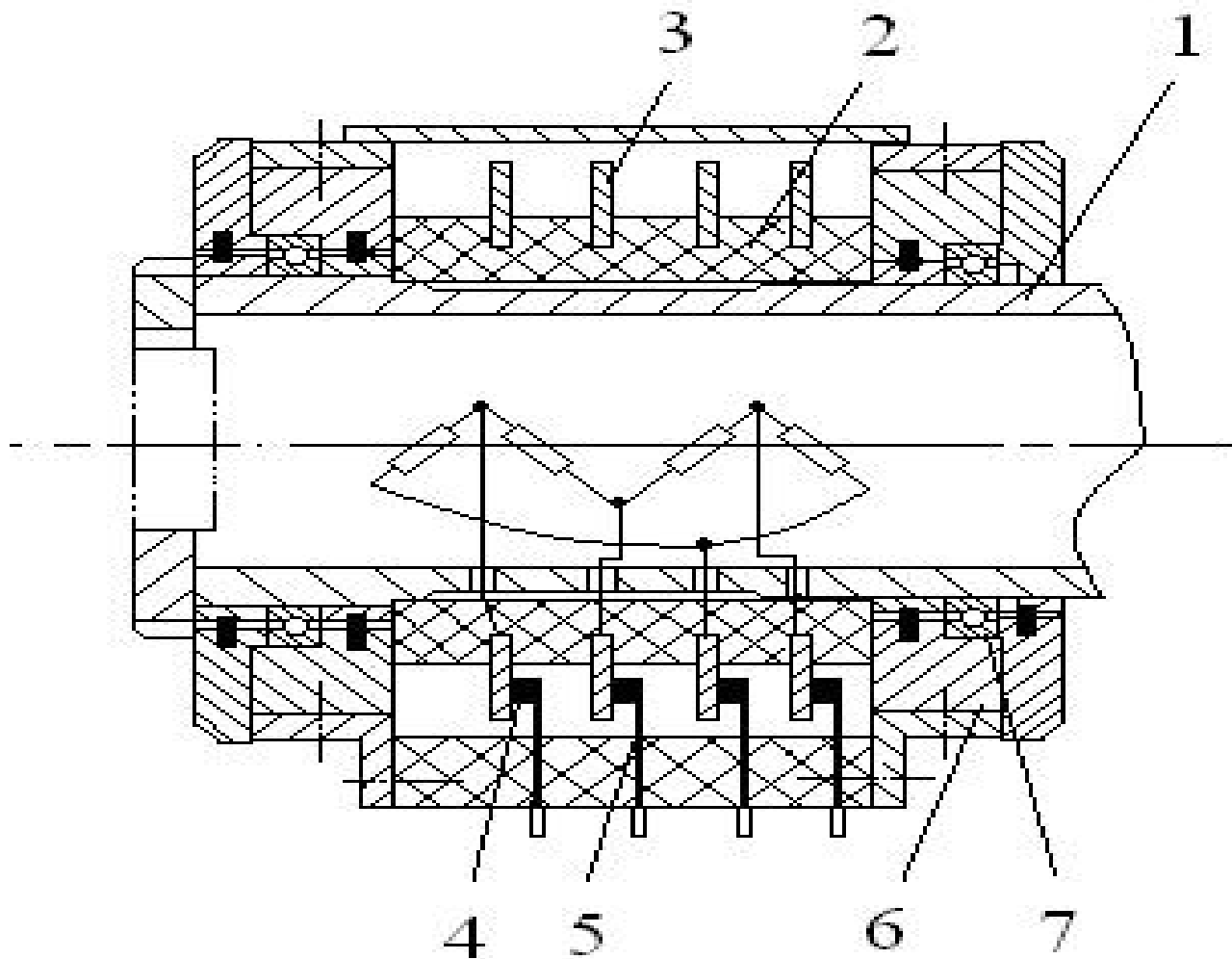


## 应变式扭矩仪工作原理图





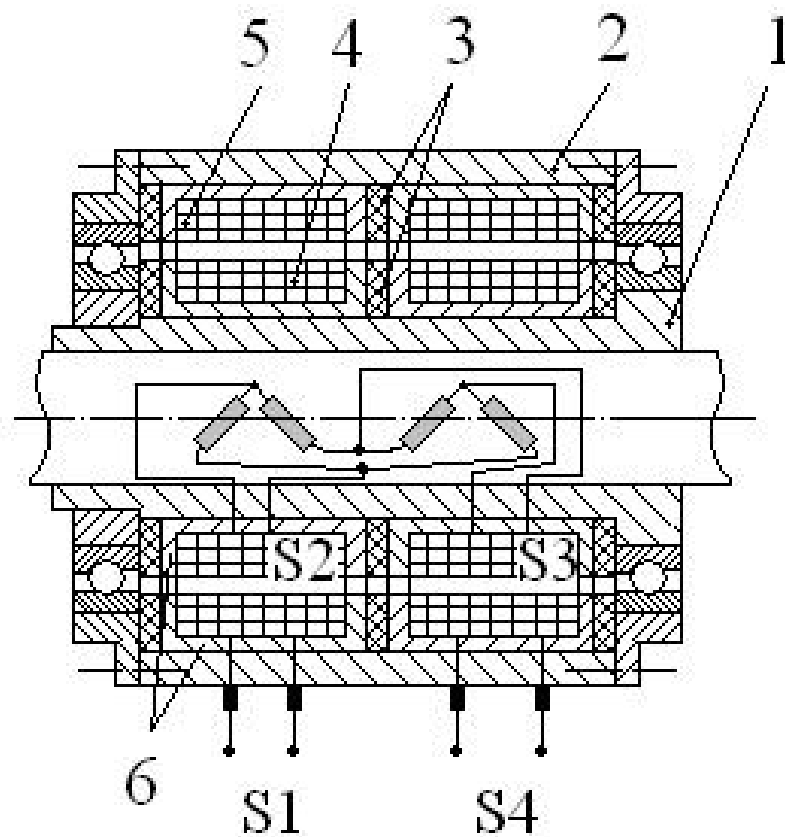
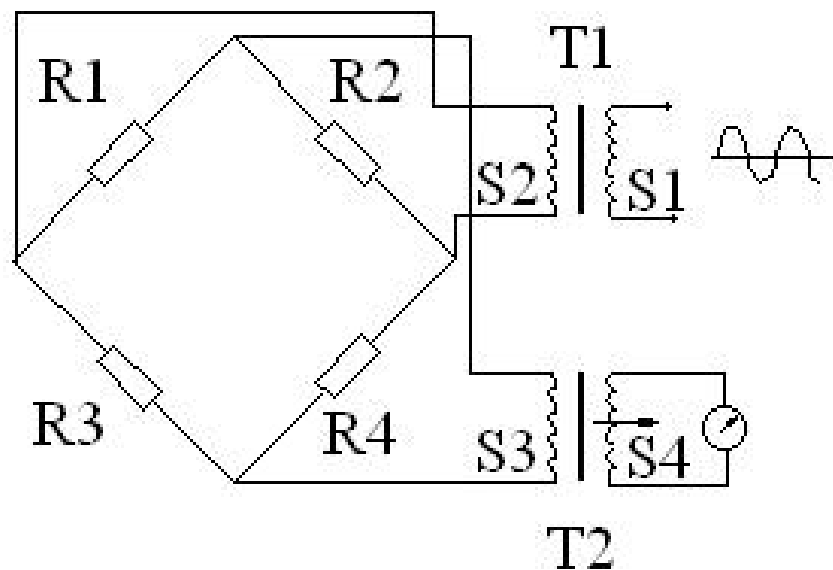
## 电刷—滑环集流装置



1-套筒；2绝缘环；3-滑环；4-电刷；5-簧片；6-外壳；7-轴承



## 感应式集流装置

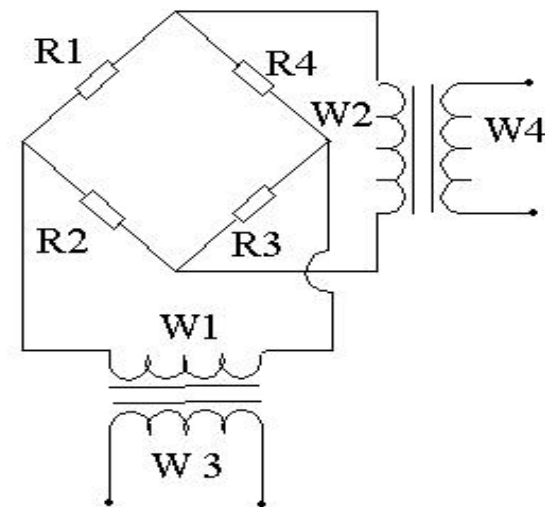
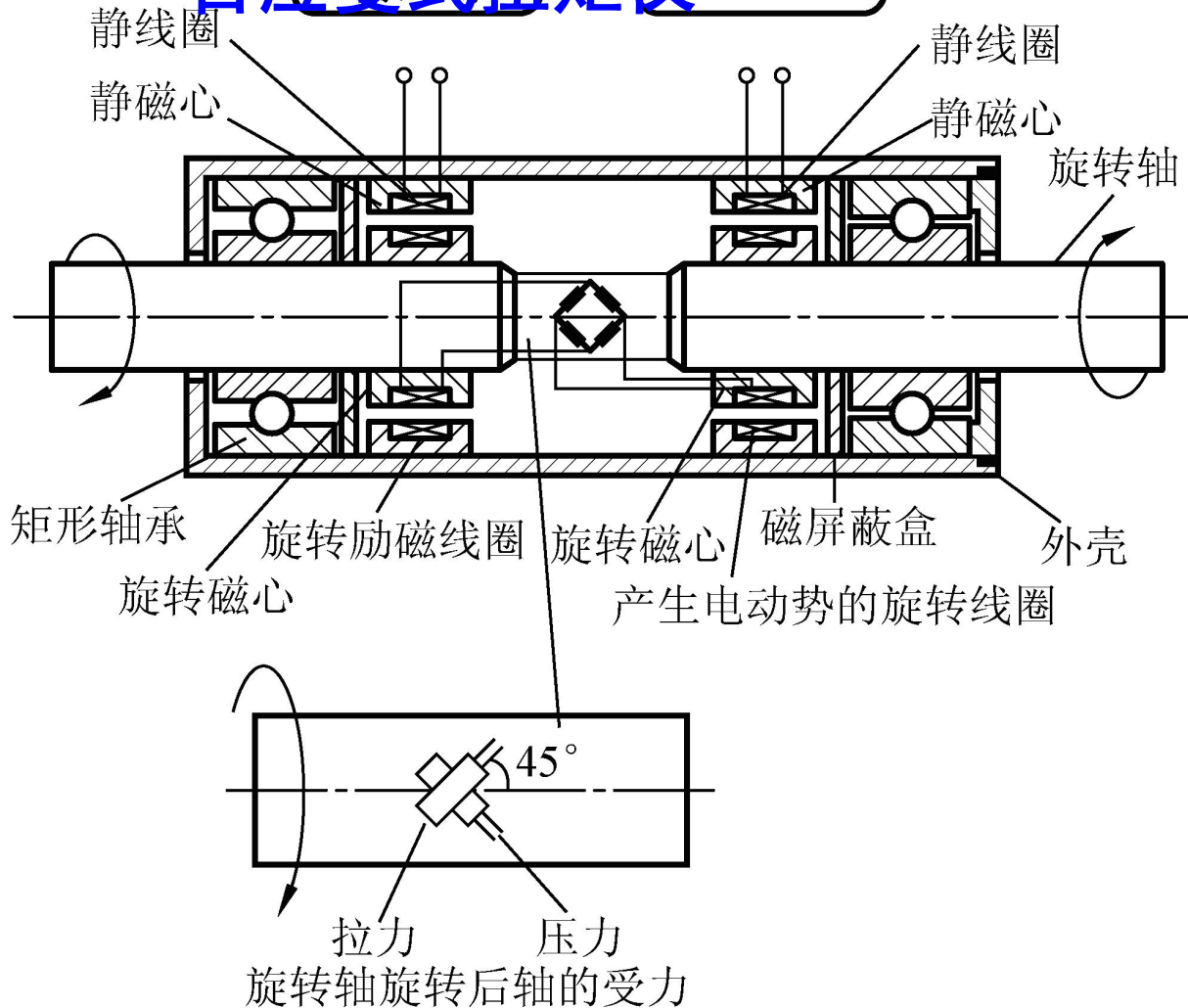




## 电感耦

### 转矩传感器 输出端 励磁输入端

## 应变式扭矩仪

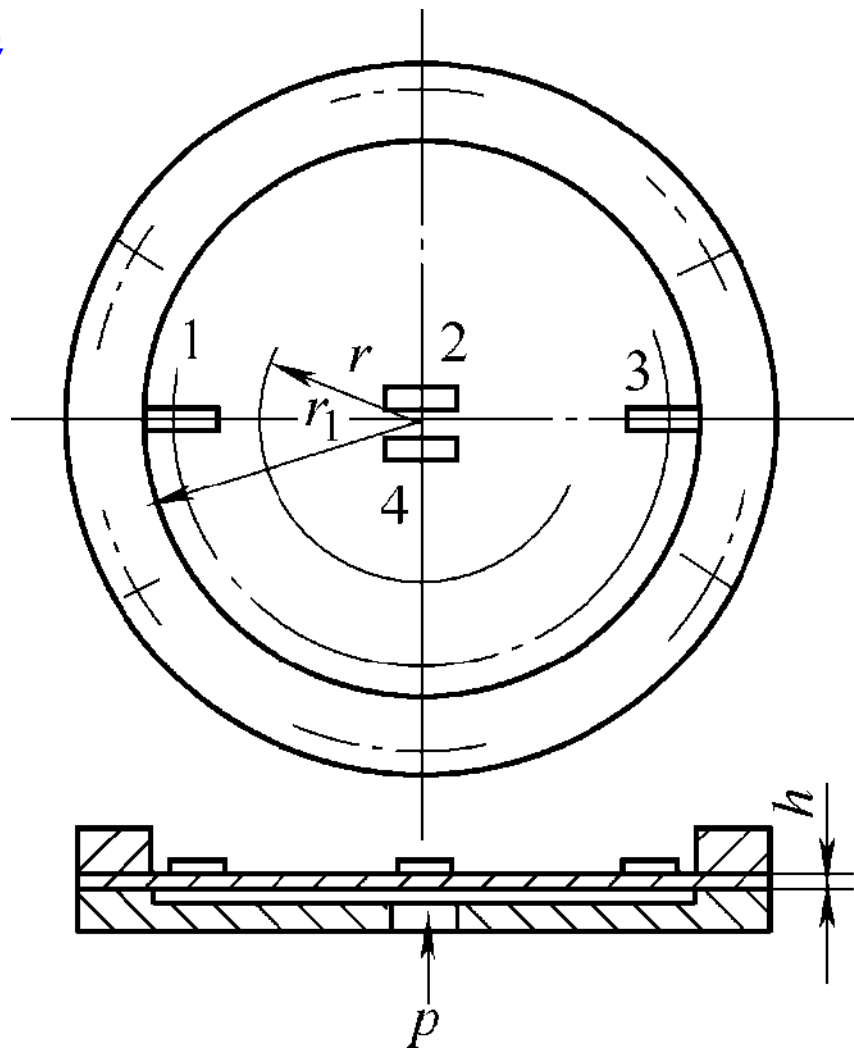
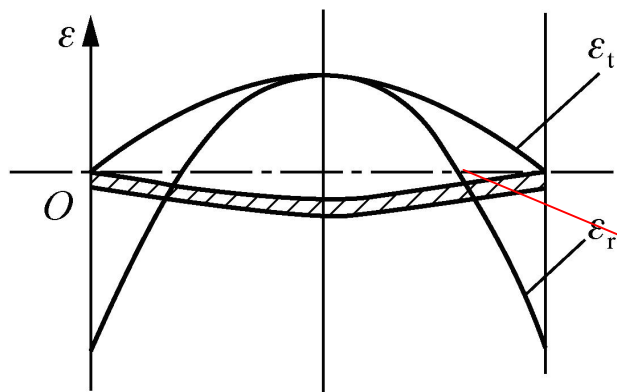
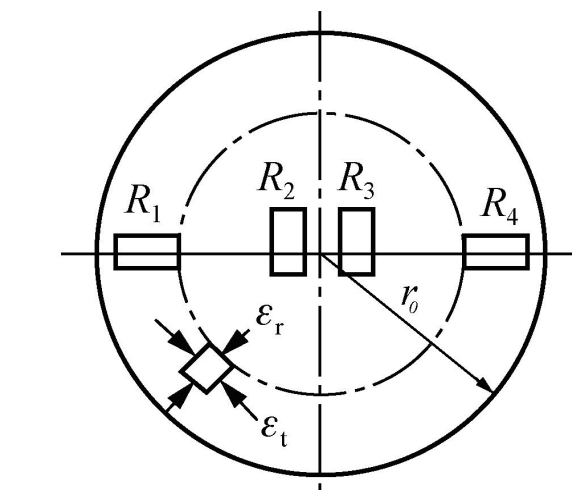


电桥及应变信号传输理图



# 电阻应变式压力传感器

## (1) 膜片式压力传感器



$$r = 0.635r_0$$





## (2) 筒式压力传感器

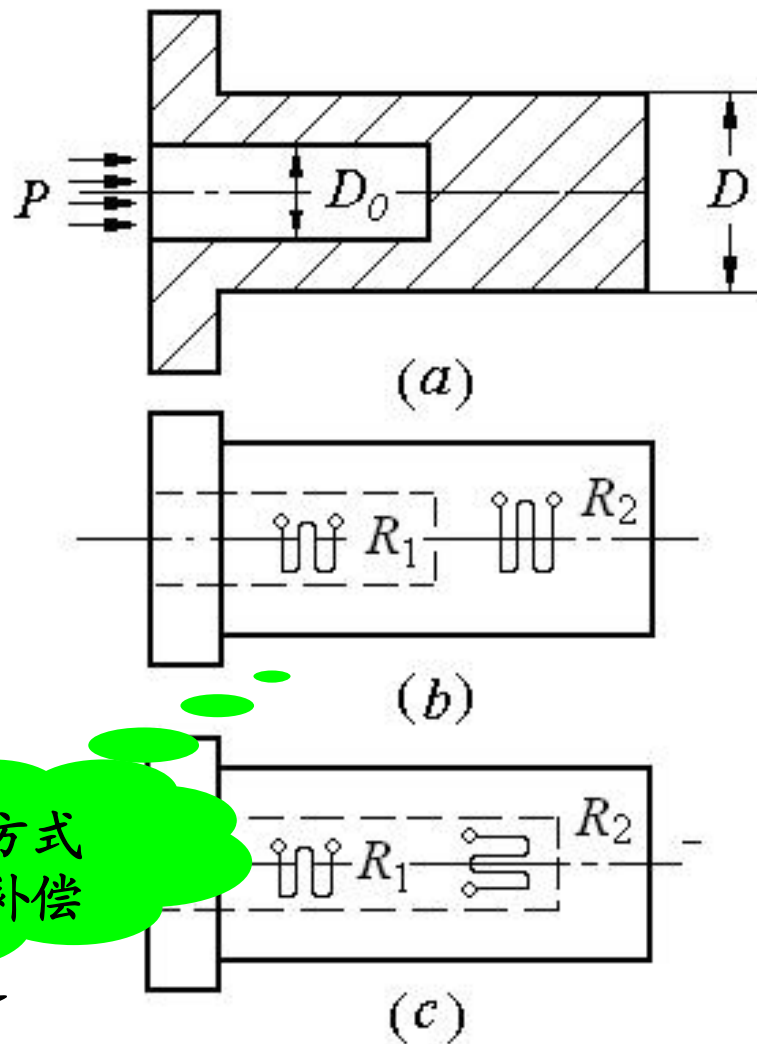
如图 (a), 当内腔与被测压力场相通时, 圆筒部分外表面上的切向应变 (沿着圆周线) 为

$$\varepsilon_D = \frac{p(2-\mu)}{E(n^2-1)}, n = D_0/D$$

若筒壁较薄时, 可用下式计算应变

$$\varepsilon = \frac{pD}{\beta E} (1 - 0.5\mu)$$

式中,  $\beta$ ——筒的外径与内径之差,  $\beta = D_0 - D$ 。





- 掌握电阻应变片的工作原理、结构、基本参数、温度误差及补偿方法；

- 了解电阻应变片的材料、种类及选用知识；
- 了解电阻应变仪的基本构成；
- 掌握应变电桥相关计算；
- 了解力及力矩的测量方法及传感器；
- 掌握应变式测力/称重传感器的分类及设计；
- 了解应变式传感器的其它应用。



教材P63页： 2-22、2-23



- 课程总成绩=**60%**考试成绩+**40%**平时成绩
- 平时成绩=**50%**作业+**25%**专题报告+**25%**互动
- 互动指**R.Q.A**（阅读.提问.解答）活动，在课程**QQ**群中以课外文献阅读、专题等方式发起讨论，在课程学习期间每位同学**至少参加两次R.Q.A**活动，就相关内容**累计**至少提出三个问题，至少解答别人提出的三个问题，与别人重复的提问或解答不算哦。提问一次最高可积**2**分，答题一次最高可积**5**分，注意附上你的学号哦。