

# 材料力学实验绪论 及电测基本原理

# 一、绪论

## 关于力学学科的分类



## 关于力学学科的分类（续）

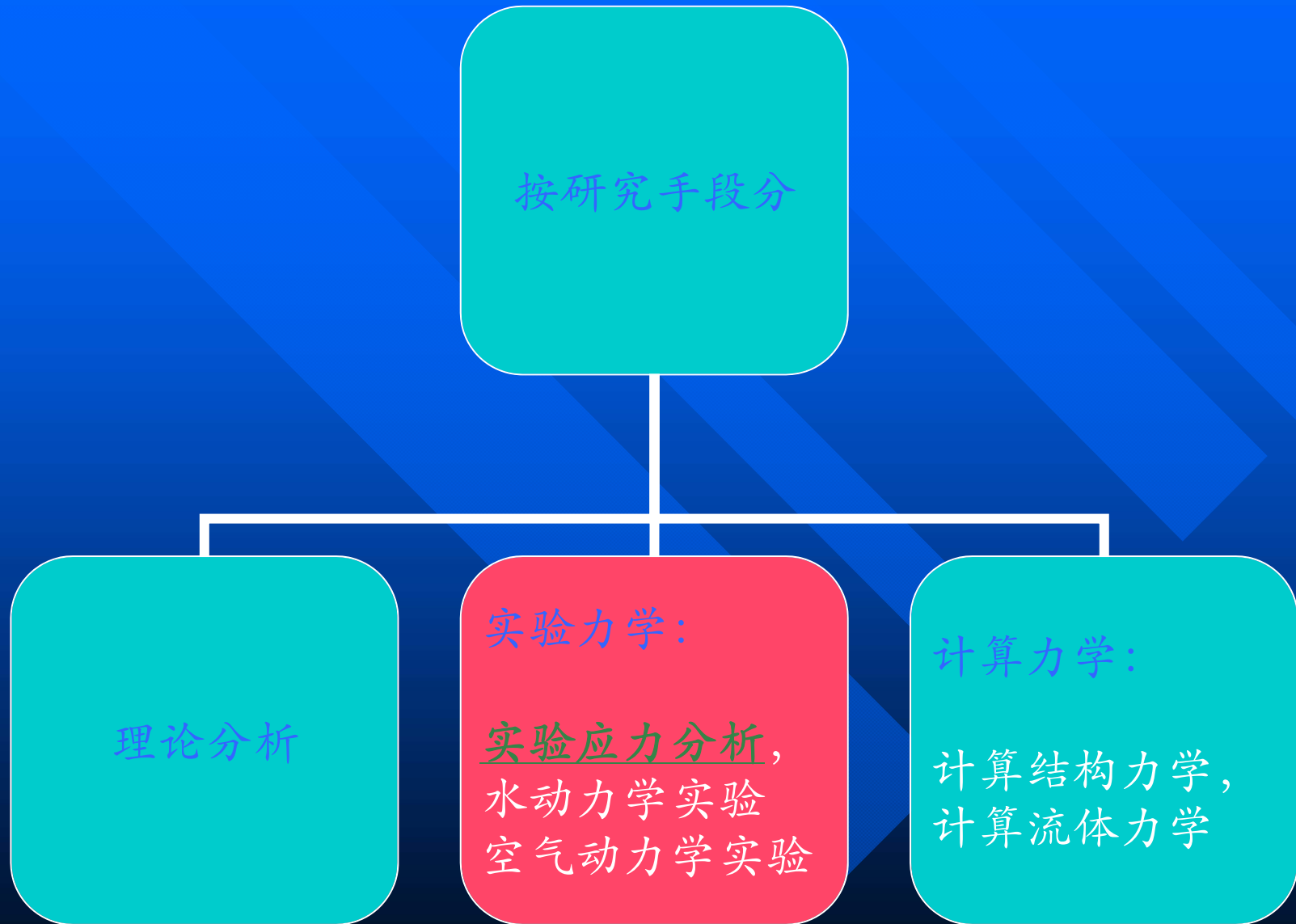
### 按研究对象分

**固体力学：**材料力学、结构力学、弹性力学、塑性力学、断裂力学等

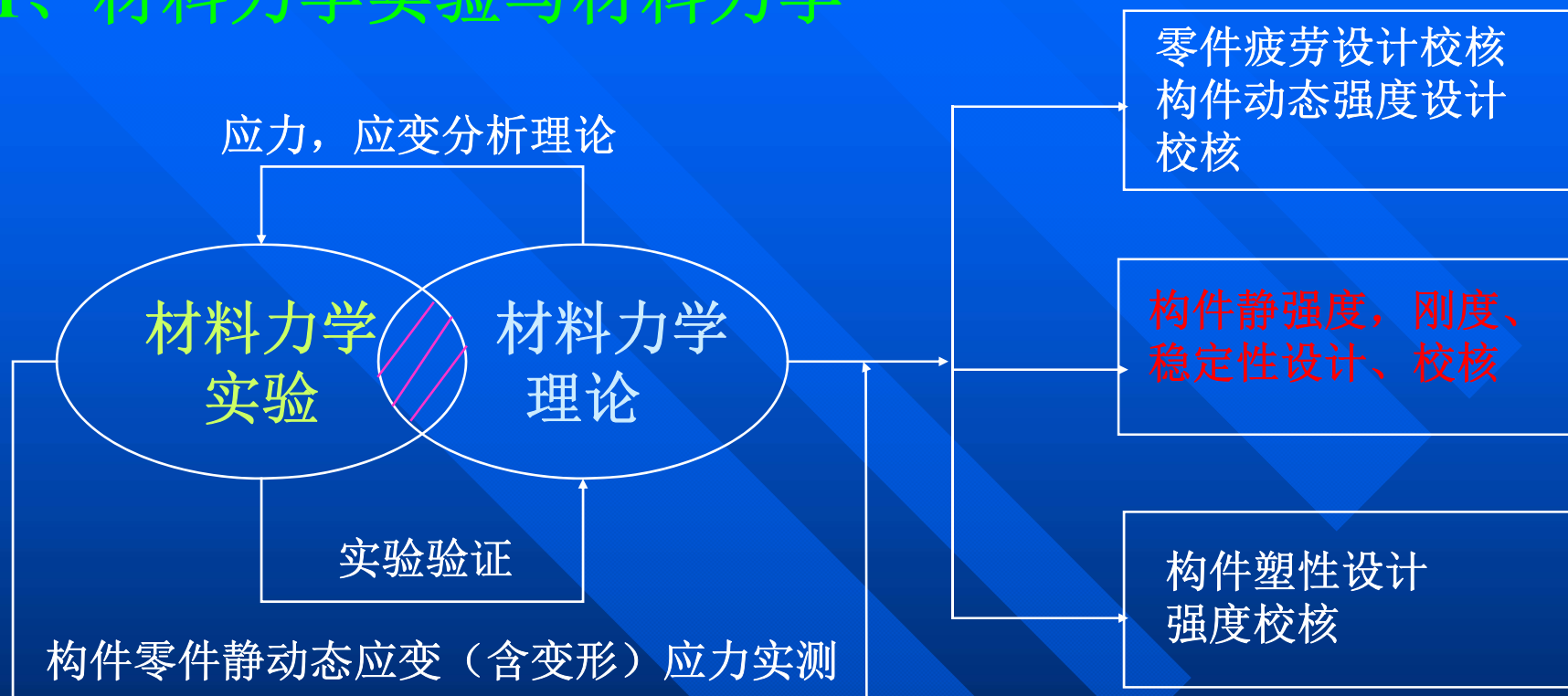
**流体力学：**水动力学、空气动力学、多相流体力学，渗流力学、非牛顿流体力学等

**工程力学：**理论力学、分析力学、振动理论、刚体动力学、陀螺力学、运动稳定性等

## 关于力学学科的分类（续）



## 1、材料力学实验与材料力学



工程材料(金属、非金属、高分子材料、复合材料)具有各种不同的使用性能(化学性能、物理性能、力学性能)。对于用于工程结构和机器零件的结构材料来说最重要的是力学性能。力学性能是指材料在外载或环境因素联合作用下所表现的行为,也就是材料抵抗外加载荷引起变形、失稳和断裂的能力。

研究材料力学性能的基本方法是按照国家标准(拉伸,压缩,弯曲,疲劳,冲击,振动,高温低温,高压低压,湿热环境等)、在规定的条件下进行试验。

## 2、材料力学实验的主要内容

### (1) 材料力学性能测定

a、为构件设计提供材料的力学性能指标和参数。

如  $\sigma_s(\sigma_p)$ 、 $\sigma_b$ 、 $E$ 、 $G$ 、 $\nu$ 、 $\sigma_{-1}$ 、 $A_k$  等；

b、材料材质复验；

c、评定材料的热处理工艺、焊接工艺；

d、构件失效分析；

e、研究新型材料，如合金材料、复合材料、纳米材料等

### (2) 验证理论

验证理论有三层意义

验证现有理论

验证新建立的理论

修正、发展理论

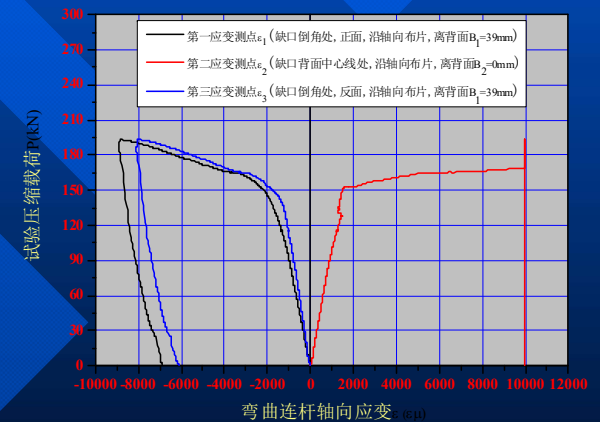
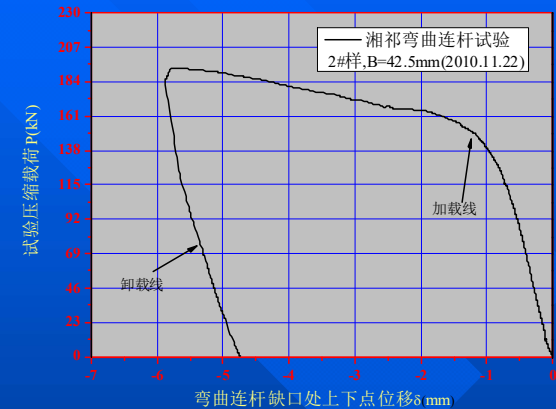
(3) 实验应力分析：直接采用实验的方法测定结构应力、应变。

主要介绍应变电测法

**电测法特点：**只要是变形固体，不管结构形状、受力如何复杂，也不必准确了解边界条件。某些特殊条件下，用实验方法甚至能比理论计算更简便、迅速准确的提供结构应力、应变分析结果或结论。



**例1：**浙江富春江水电设备股份有限公司委托的湘祁弯曲连杆压缩试验,缺口壁厚分别为42.7mm;42.5mm;42.3mm. 试样厚度70.3mm;长度1220mm;宽度160mm.要求压缩失稳载荷大于162kN



湘祁弯曲连杆试验图

压缩载荷一位移(应变)曲线

例2：胜利埕北油田25A井，管桩及导管应力实测。  
载荷复杂多变，边界条件难于准确确定。

采油平台



导管架



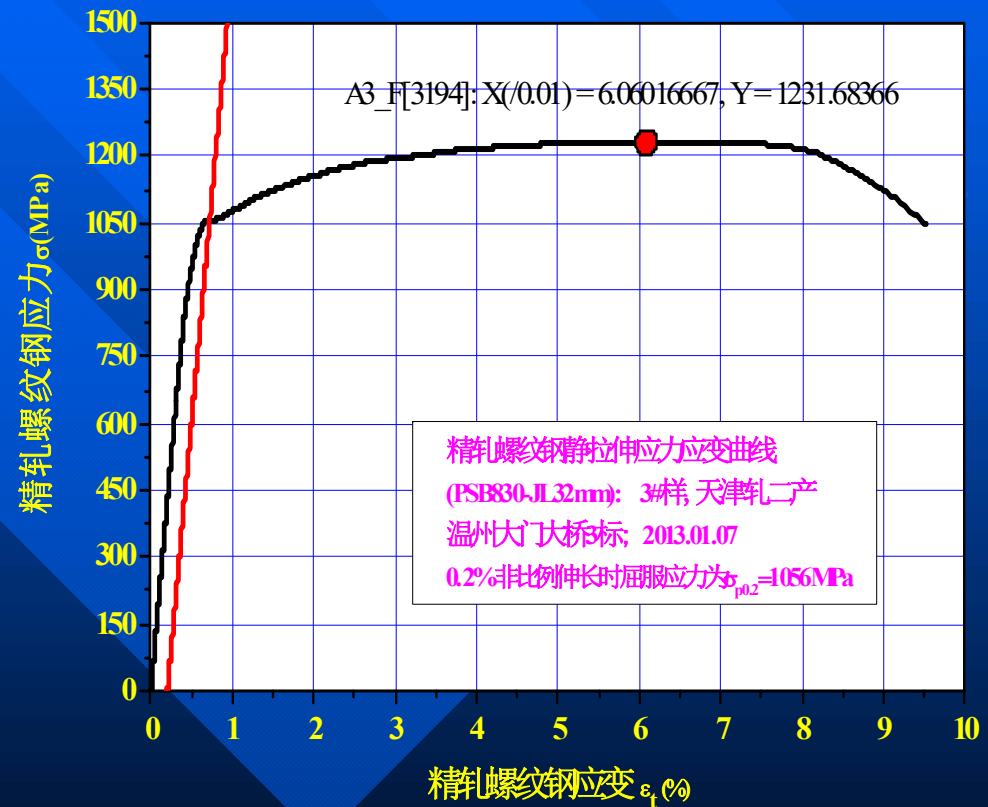
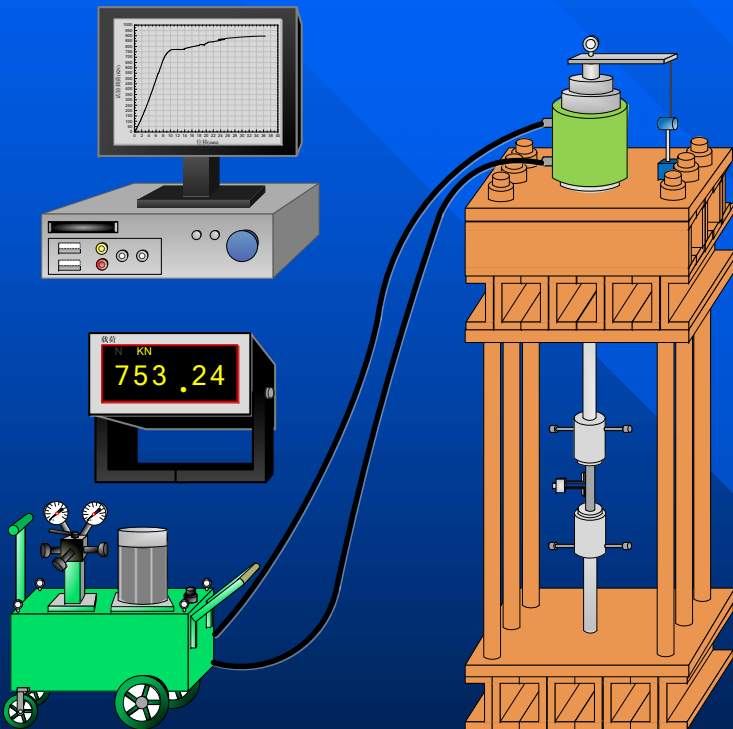
应变片及保护盒



管桩

## 例3：预应力筋材-精轧螺纹钢拉伸实验

设计特殊结构，利用测力传感器、应变传感器、位移传感器  
测量脆性材料完整拉伸应力应变曲线



精轧螺纹钢拉伸实验

## 3、材料力学实验的方法

- (1) 材料力学性能测定：执行国家标准GB/T
- (2) 应力分析实验：实验方法决定于实验目的，根据受力情况制定实验方案、加载方案，并使实验能够有序进行。
- (3) 要求：
  - ① 独立完成；
  - ② 性能实验结果表达：执行修约规定(新教材附录)；
  - ③ 表格形式的报告;附页加曲线图(粘贴计算结果)；
  - ④ 曲线图用origin7.5或excel绘图,并光滑曲线连接；
  - ⑤ 应力分析保留小数后一位。

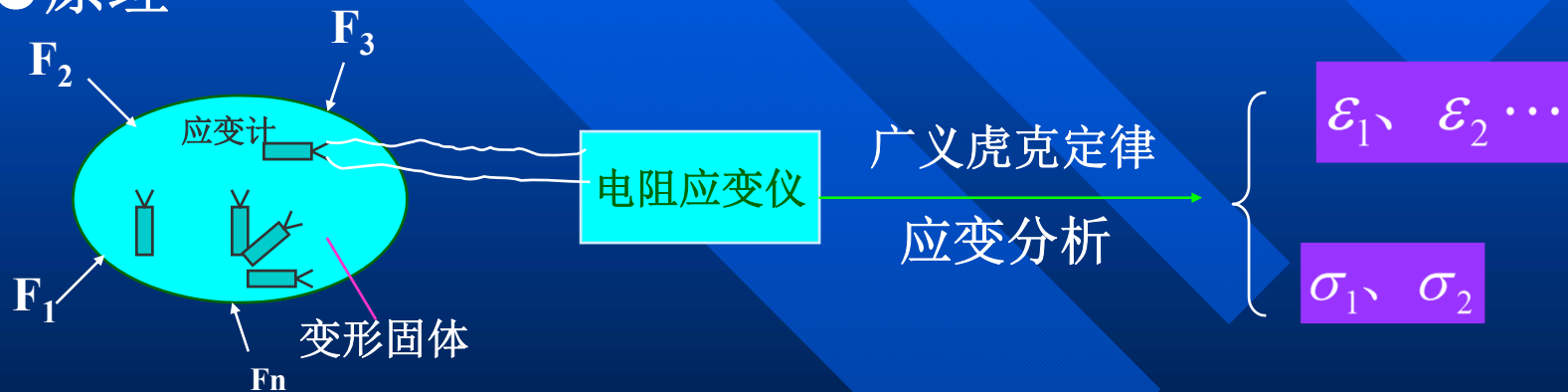


## 二、电测应力分析

### 应变电测原理

- 适用范围：结构构件金属、非金属材料表面应力测量；静、动态（含冲击）应变应力测量；高速旋转构件应力测量；结构高压液下、高低温条件下的应力测量...

- 原理



- 特点

 $\varepsilon_1, \varepsilon_2 \dots$ 

各向同性及线弹性

 $\sigma_1, \sigma_2$

# 1、金属电阻丝的“应变效应”

$$R = \rho \cdot \frac{l}{A}, \quad \rho = \rho_o(1 + \alpha \cdot \Delta t)$$

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dl}{l} - \frac{dA}{A}, \quad \frac{dA}{A} = -2\nu\varepsilon, \quad \frac{dl}{l} = \varepsilon$$

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

$$\text{或 } \frac{dR}{R} \bigg/ \varepsilon = \frac{d\rho}{\rho} \bigg/ \varepsilon + (1 + 2\nu), \quad \text{令 } K_s = \frac{d\rho}{\rho} \bigg/ \varepsilon + (1 + 2\nu)$$

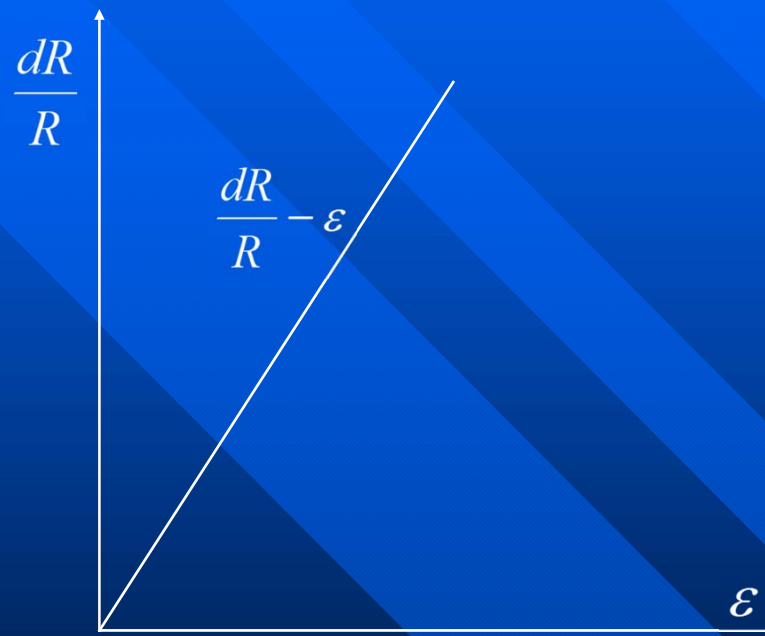
$$\text{则 } \frac{dR}{R} = K_s \cdot \varepsilon \quad (1)$$



(1) 式说明金属电阻丝受拉伸或压缩时，在比例极限内，电阻变化率与应变成正比。

比例系数 $K_s$ —称为金属电阻丝的灵敏系数

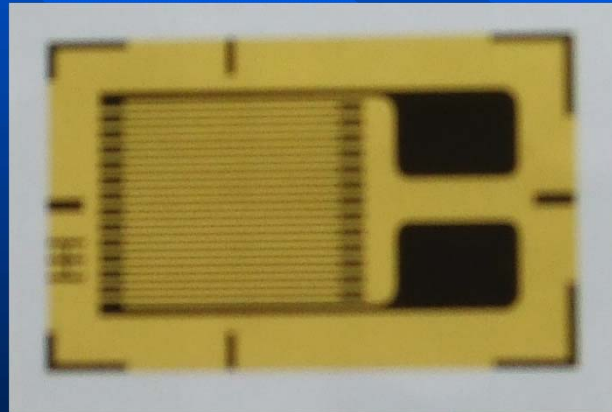
图为康铜丝的  $\frac{dR}{R} - \varepsilon$  曲线，镍铬丝在小应变条件下  $\frac{dR}{R} - \varepsilon$  关系亦为直线



## 2、电阻应变计的工作原理

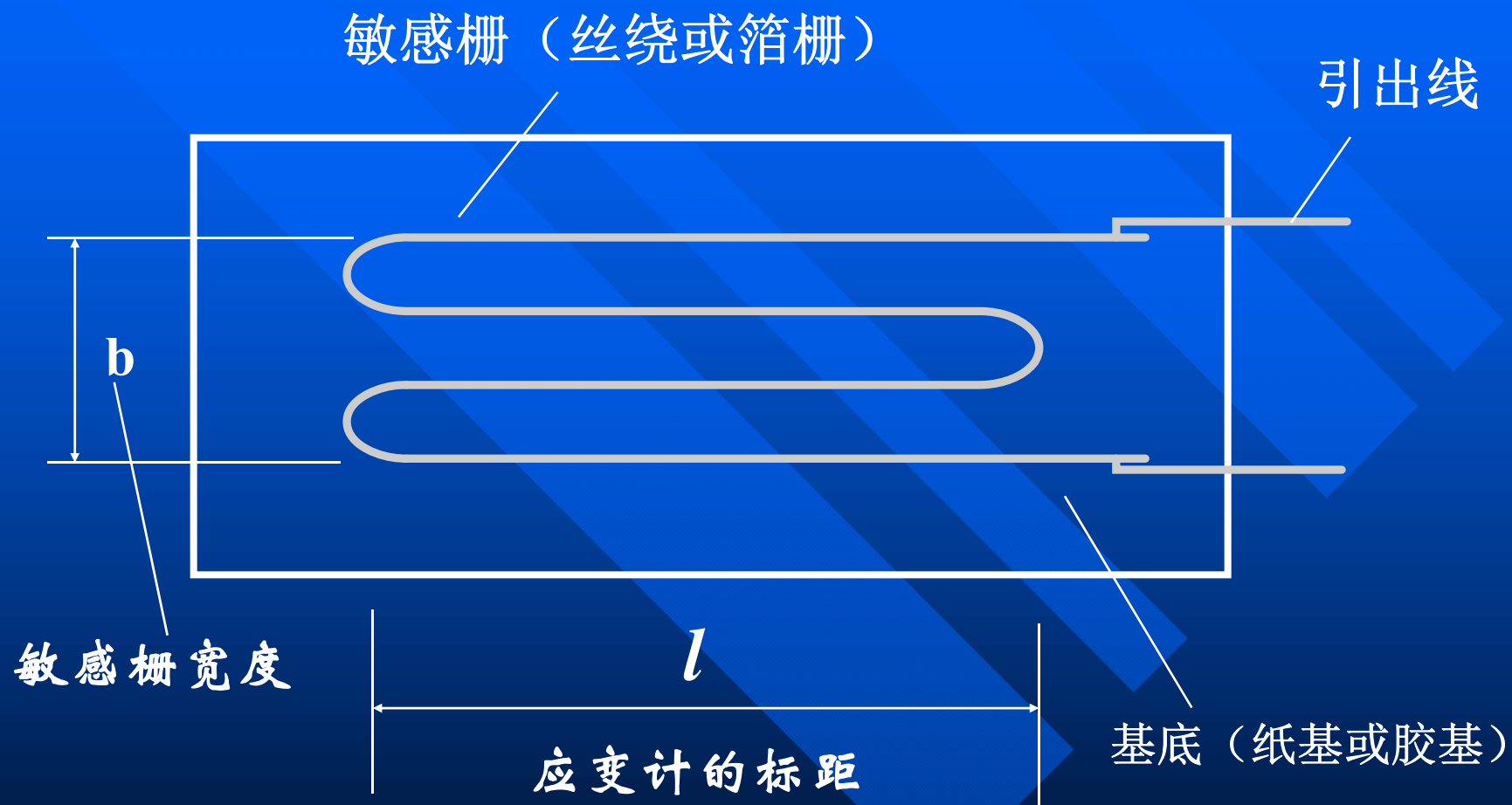
### (1) 电阻应变计（片）构造。

利用金属电阻丝应变效应制成用于构件应变测量的敏感元件称为电阻应变计（片）。康铜丝箔，镍铬丝箔是制作电阻应变计的常用材料



电阻应变片实图





## (2) 使用

用特制的胶水粘贴于构件表面，丝栅长度平行于待测应变方向。

## (3) 原理

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

$K$  一应变计灵敏系数，与 $K_s$ 有区别， $K$ 通过实验标定。

## (4) 主要技术指标

### a, 初始电阻值 $R$ ( $\Omega$ )

测量必须数据, 工程应变测量选 $R=120\ \Omega$ 。

### b, 应变计灵敏系数 $K$

由厂方提供, 测量必须数据。

### c, 应变计标距 $l$ (或敏感栅尺寸 $b \times l$ )

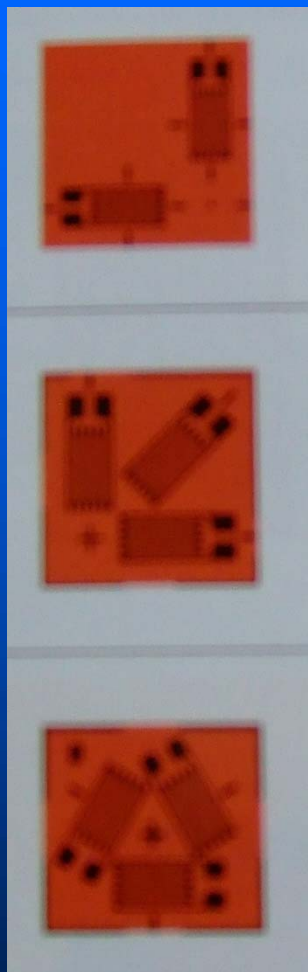
根据测试对象目的选择。

## (5) 应变计类型:

按构造分纸基浸胶丝绕式; 胶基箔式(常规测量); 半导体应变计(K大, 小载荷情况); 金属底基焊接式(高、中温及高压情况)等;

其他按测量应变范围、用途、使用温度分, 已不下数千种。

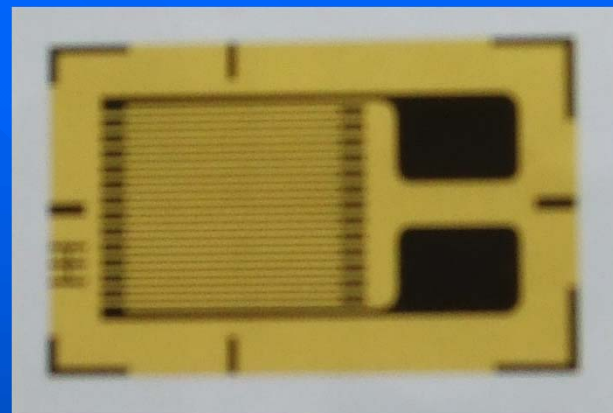
胶基箔式应变计（一）



应变花



圆膜应变计



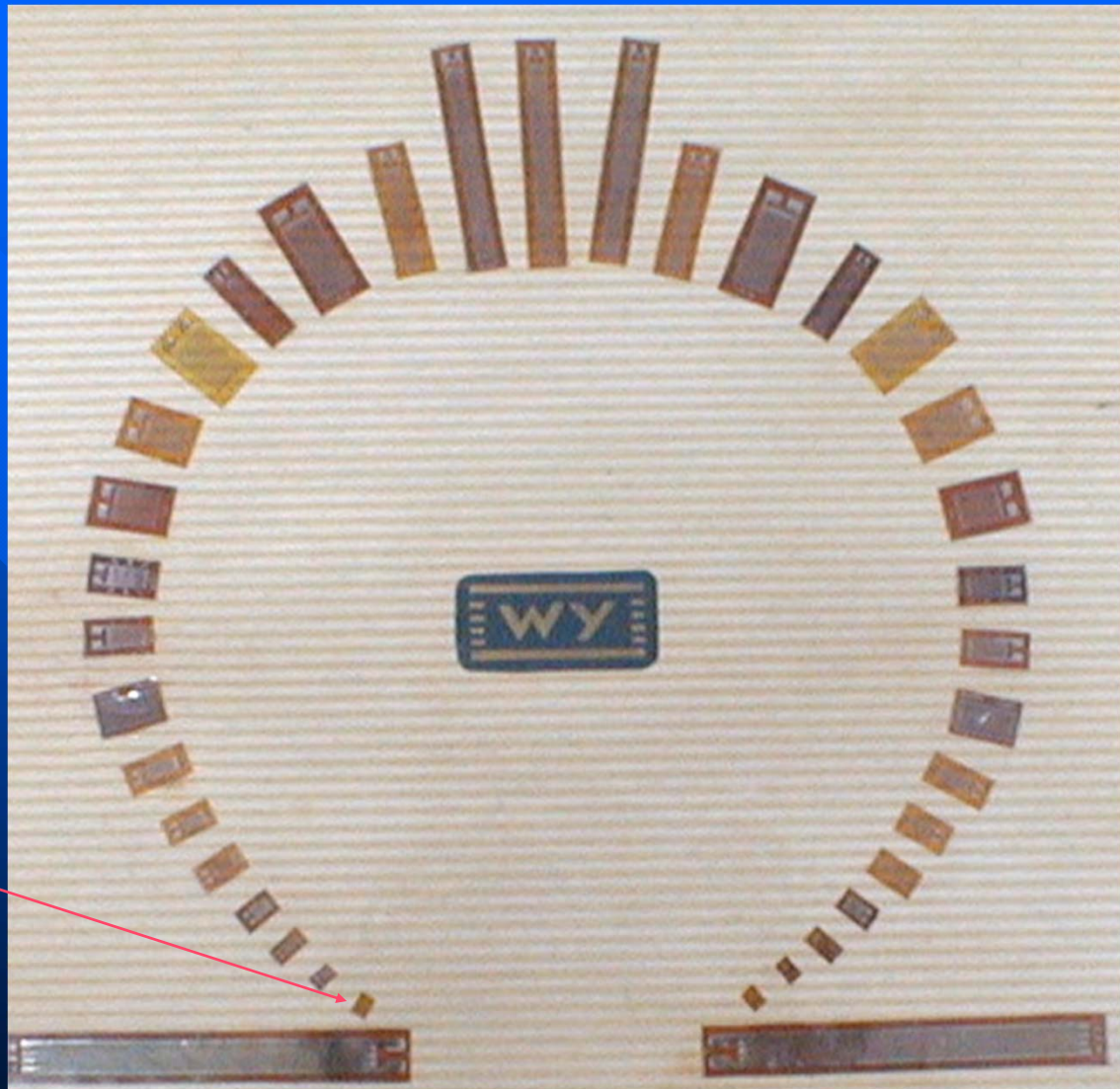
单轴应变计



测扭矩应变计

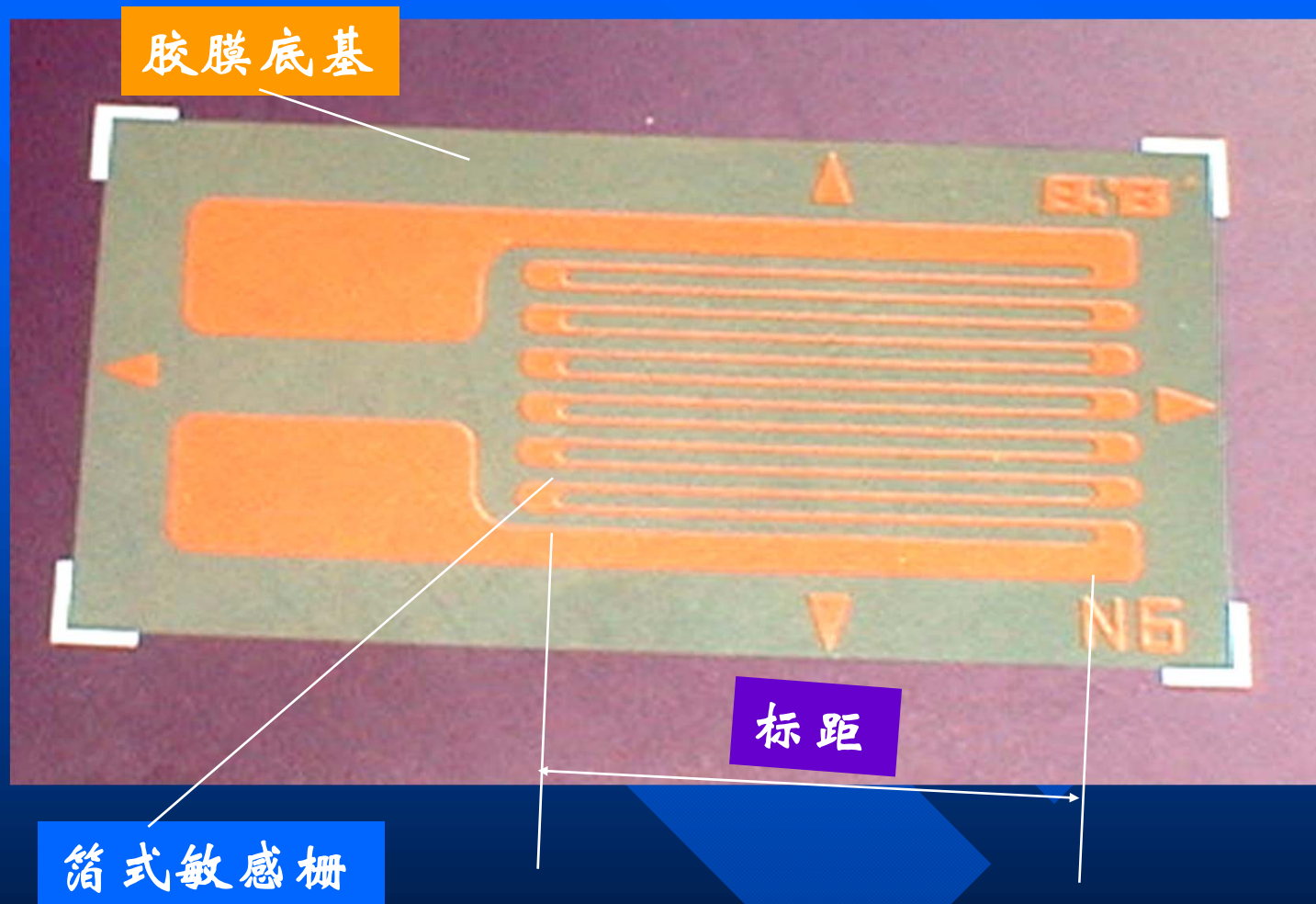
各种规格单轴应变（二）

标距0.5mm  
应变计





应变计单片放大



### 3、应变电桥及其输出

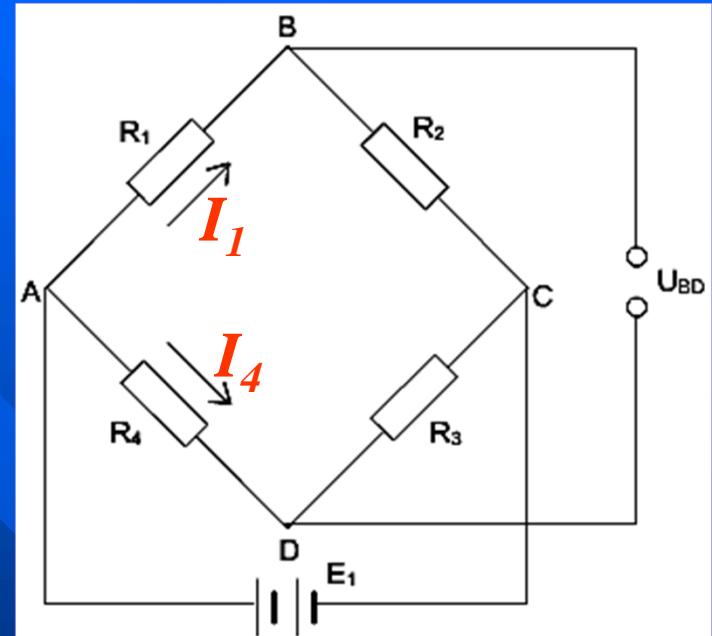
测量电阻变化一般用惠斯登电桥（即4臂电桥），电源 $E_1$ 称为桥压。电桥的输出：

$$U_{BD} = I_1 R_1 - I_4 R_4$$

$$E_1 = I_1 (R_1 + R_2) = I_4 (R_3 + R_4)$$

$$U_{BD} = E_1 \left[ \frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right]$$

$$= \left( \frac{R_1 \cdot R_3 - R_2 \cdot R_4}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} \right) \quad (2)$$



当 $R_1 R_3 = R_2 R_4$  或  $R_1/R_2 = R_4/R_3$  时  $U_{BD} = 0$ 。称为电桥的平衡条件。



实测时，随着构件的受力变形 $R_1 \sim R_4$ 发生变化为  
 $R_1 \rightarrow R_1 + \Delta R_1$ ,  $R_2 \rightarrow R_2 + \Delta R_2$ ,  
 $R_3 \rightarrow R_3 + \Delta R_3$ ,  $R_4 \rightarrow R_4 + \Delta R_4$  代入 (2) 式

$$\Delta U_{BD} + U_{BD} = E_1 \left[ \frac{(R_1 + \Delta R_1)(R_3 + \Delta R_3) - (R_2 + \Delta R_2)(R_4 + \Delta R_4)}{(R_1 + R_2 + \Delta R_1 + \Delta R_2)(R_3 + R_4 + \Delta R_3 + \Delta R_4)} \right]$$

略去分子当中的高阶微量，分母当中的 $\Delta R$ 项，经整理得

$$\Delta U_{BD} = \frac{E_1}{4} \left( \frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) = \frac{E_1}{4} K (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4) \quad (3)$$

可见  $\Delta U \propto \sum_i \frac{\Delta R_i}{R_i}$  或  $\Delta U \propto \sum \varepsilon_i$

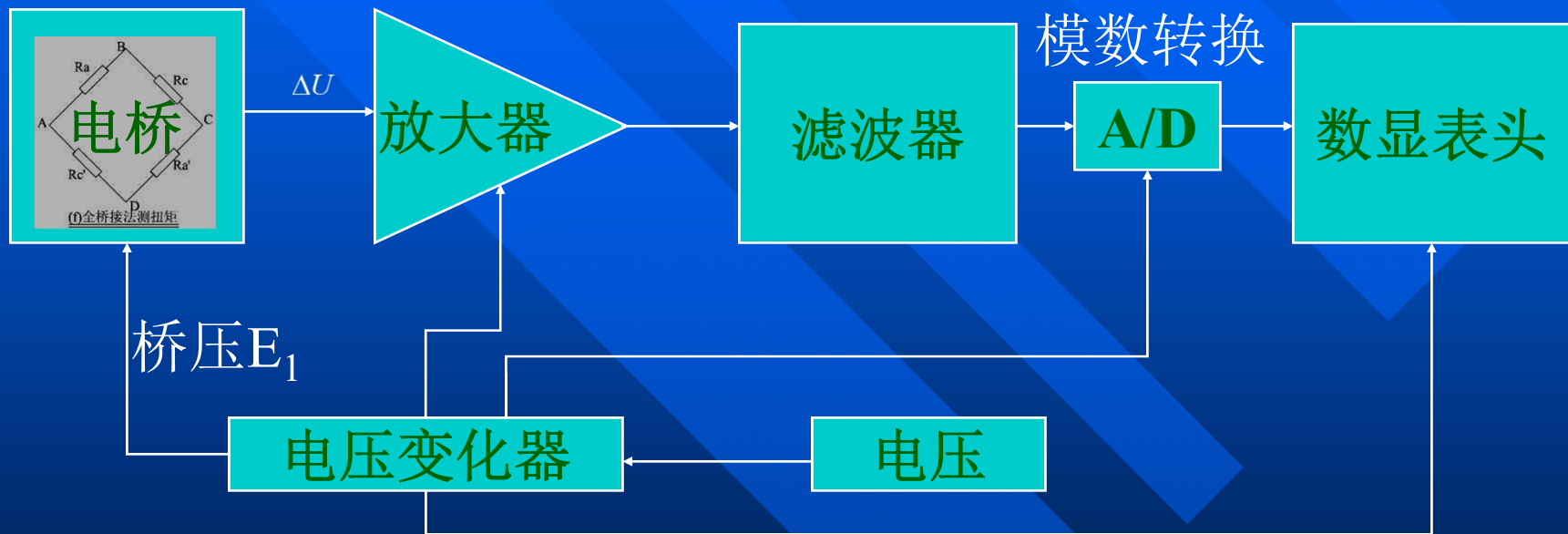
说明电桥输出电压的变化与四个桥臂电阻变化的总和成正比或与测点应变总和成正比。

其次，对角桥臂电阻变化率或应变相加，邻臂的电阻变化率或应变相减。这种规律称为电桥输出的加减特性。

(3) 式简化结果产生的误差不会超过5‰，根据其原理可以制成专门用于测量的电阻应变仪。

## 4、数字电阻应变仪

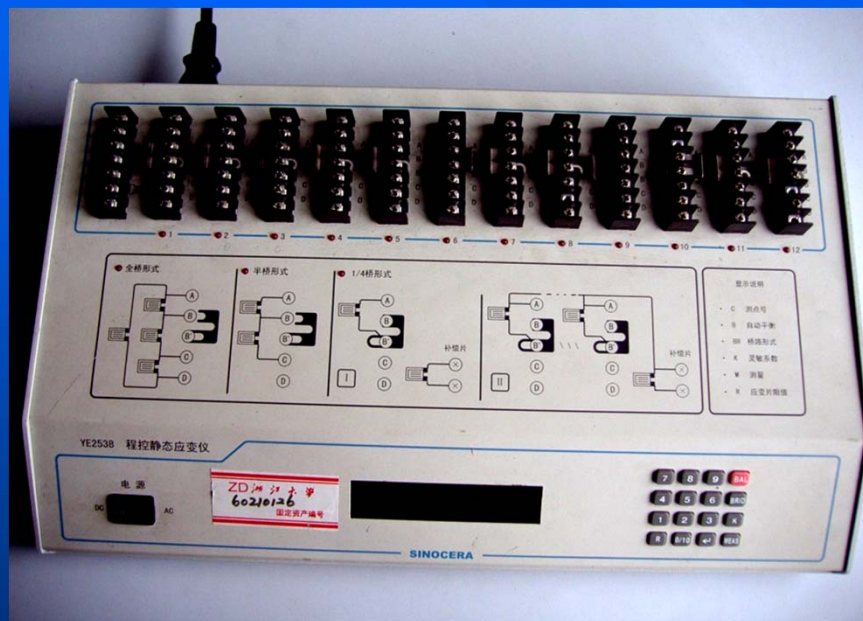
### (1) 电原理框图



## (2) 应变仪面板结构及其使用方法

## 材料力学实验

### YE2538程控应变仪照片



### uT7116Y 静态应变仪照片





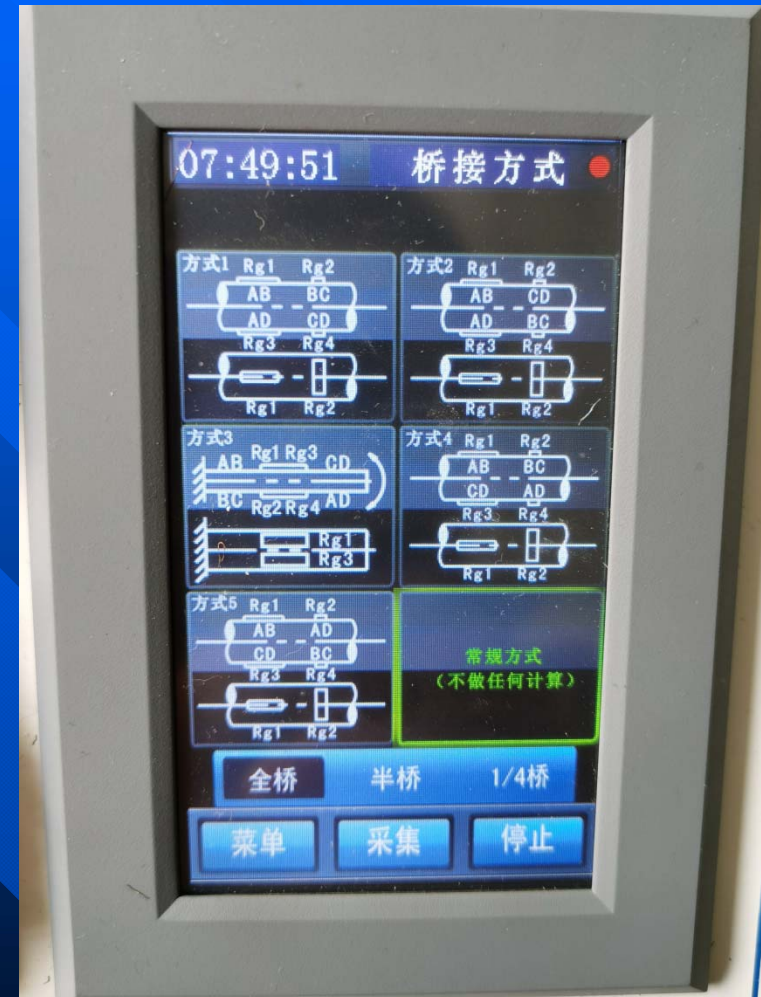
## YE2538A应变仪补偿片



补偿1 补偿2

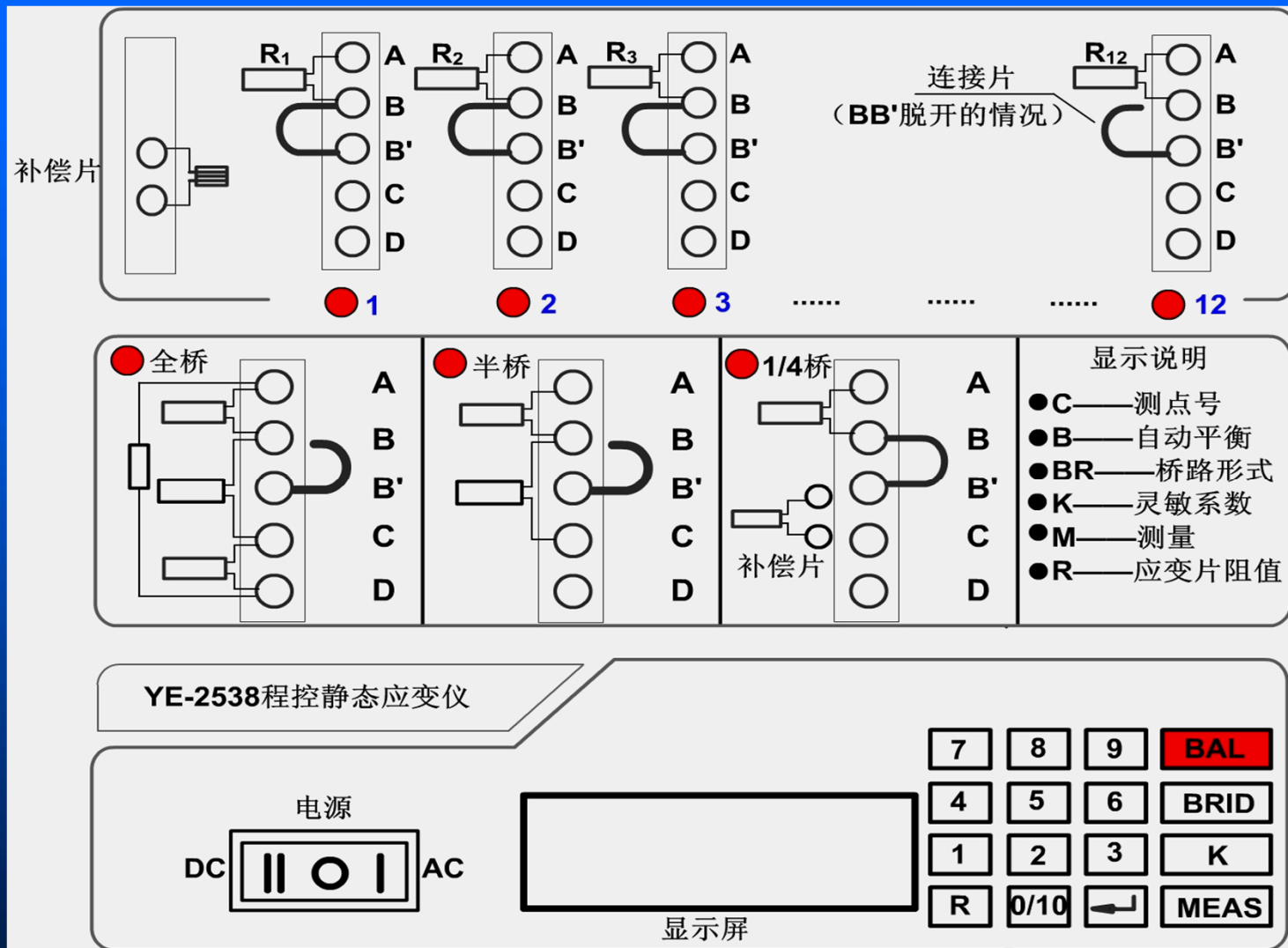
使用哪一个补偿片，  
相应的指示灯会亮

## uT7116Y 静态应变仪接桥



# YE2538程控应变仪面板结构图

## 材料力学实验



YE2538A使用方法和YE2538大致相同，区别是此应变仪接两个补偿片。对于多点测量，一般只用一个补偿片。在设置时，先按桥路键“BRID”，然后选择“2”就可以设置成“补偿1”，那么，就要将补偿片接在“补偿1”的两个接线柱上。所使用的各个通道都要这样设置，这样就可以实现公共补偿。

## 操作说明

0~10:	测点选择及参数设置
R/限值:	应变片阻值及测力点限值设置
K/校正系数:	应变片灵敏系数及测力点校正系数设置
BRID:	桥路形式设置 (0、1、2、3)
↵:	设置确认及返回待命状态
BAL :	对选择点进行初读数法平衡 (状态灯亮)
MEAS:	对选择点进行测量 (状态灯亮)

## ●使用方法

### (1) 组桥

a、**1/4桥接法**（多点应变测量），桥路**bR-1**（2538A的BRID-2，所有测量片均接AB，连接片连于BB'。共用一枚补偿片。

b、**半桥接法** AB,BC接应变片，桥路**bR-2**（2538A的BR--1），

$$\varepsilon_r = \varepsilon_{R_1} - \varepsilon_{R_2}$$

c、**全桥接法** 四个桥臂均接应变片，多用于传感器电路，桥路**bR-4**（2538A的BRID-0）。

$$\varepsilon_r = \varepsilon_{R_1} - \varepsilon_{R_2} + \varepsilon_{R_3} - \varepsilon_{R_4}$$

### (2) K, R设定

### (3) 平衡、测量

(有关详细的使用方法由实验室多媒体室介绍，或见网上资料)



仪器 1 的特点是各通道可以独立选择不同的测量桥路形式、使用不同  $K$  的应变计和不同  $R$  的应变计。

## 5、有关应变电测法的若干问题

### (1) 温度补偿

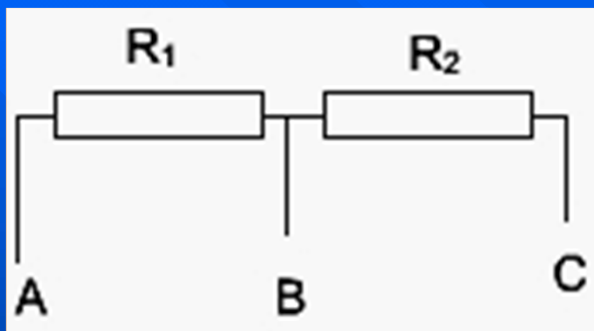
(a)  $R = \rho_l l / A$  中  $\rho_l = \rho_0 (1 + \alpha \cdot \Delta T)$  温度变化会产生电阻变化  $\Delta R_l'$

(b) 应变计线膨胀系数  $\beta_s$  与被测工件线膨胀系数  $\beta_g$  不同，温度变化会产生  $\Delta R_l''$  附加电阻变化

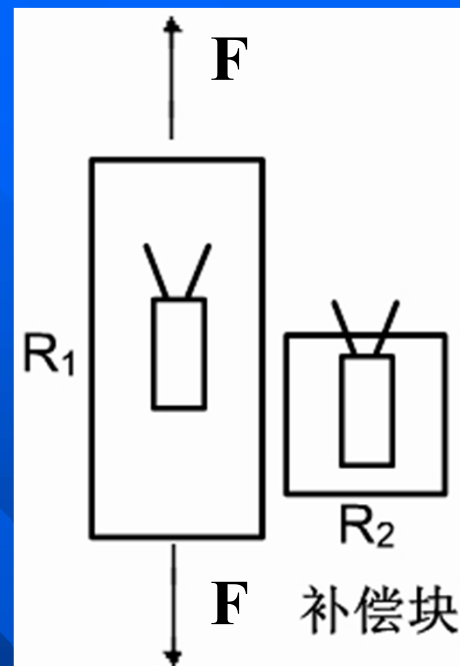
$\Delta R_l = \Delta R_l' + \Delta R_l''$ , 产生  $\varepsilon_l = \frac{\Delta R_l}{R} / K$  , 必须设法消除

## ● 温度补偿方法

### a、补偿块补偿法



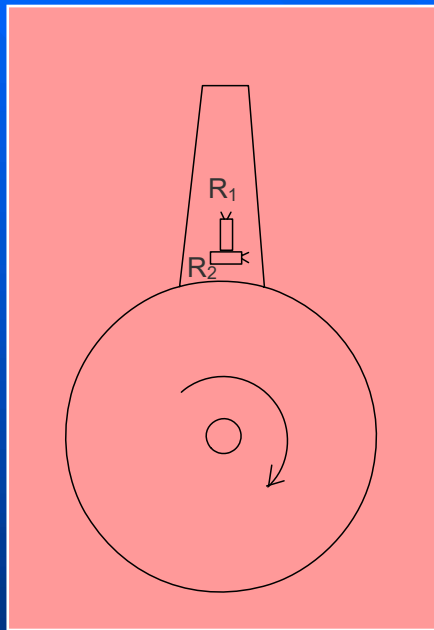
$$\varepsilon_r = (\varepsilon_F + \varepsilon_t) - \varepsilon_t = \varepsilon_F$$



(补偿块必须与被测工件同材料且置于被测工件旁)

## b、工作片补偿法

不允许单独设置补偿块的构件应变测量用工作片补偿法

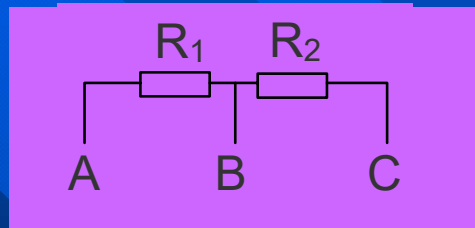


$$\varepsilon_r = \varepsilon_{R_1} - \varepsilon_{R_2}$$

$$= (\varepsilon_F + \varepsilon_t) - (-\mu\varepsilon_F + \varepsilon_t)$$

$$= \varepsilon_F (1 + \mu)$$

泊松比 $\mu$ 必需已知



$$\varepsilon_F = \varepsilon_r / (1 + \mu)$$

## c、补偿应变片必需接于测量应变片的邻臂

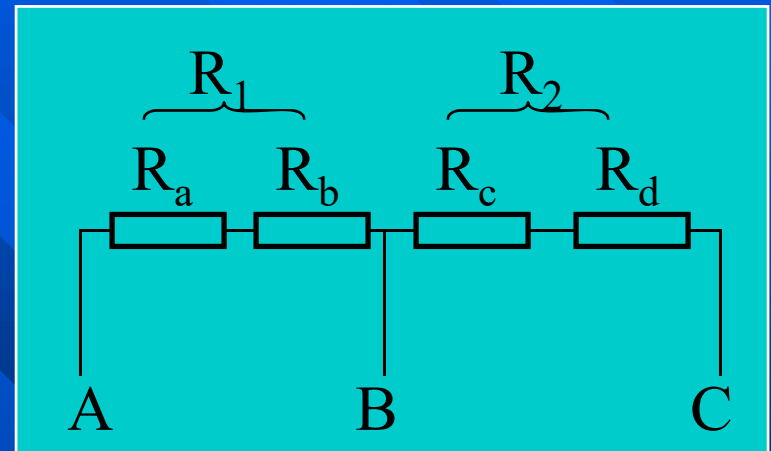
## (2) 应变计的串连及其应用

$$R_1 = R_a + R_b = 2R$$

$$R_2 = R_c + R_d = 2R$$

$$\begin{aligned}\Delta U &= \frac{E_1}{4} \left[ \frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} \right] \\ &= \frac{E_1}{4} \left[ \frac{\Delta R_a + \Delta R_b}{2R} - \frac{\Delta R_c + \Delta R_d}{2R} \right] \\ &= \frac{E_1}{4} \left[ \frac{1}{2} \left( \frac{\Delta R_a}{R} + \frac{\Delta R_b}{R} \right) - \frac{1}{2} \left( \frac{\Delta R_c}{R} + \frac{\Delta R_d}{R} \right) \right] \\ &= \frac{KE_1}{4} \left[ \frac{1}{2} (\varepsilon_a + \varepsilon_b) - \frac{1}{2} (\varepsilon_c + \varepsilon_d) \right]\end{aligned}$$

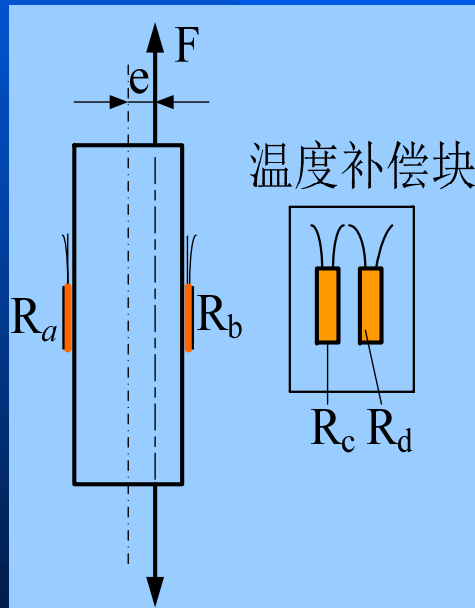
串连使得2枚应变片所测的应变自动取平均



## ● 应变计串联的用途

(a) 偏心受拉压构件测轴向应变

(b) 测材料弹性模量时用串连半桥 测量电路



$$\varepsilon_r = \varepsilon_{R_1} - \varepsilon_{R_2}$$

$$= \frac{1}{2} [(\varepsilon_F + \varepsilon_w + \varepsilon_t) + (\varepsilon_F - \varepsilon_w + \varepsilon_t)] - \frac{1}{2} (\varepsilon_t + \varepsilon_t)$$

$$= \varepsilon_F$$

## (3) 静态多点应变测量

当测点较多，希望加一次载荷能同时读下所有测点应变时，可利用1/4桥接法，事先把所有测点接到应变仪的AB桥臂上，共用一枚补偿片接于公共补偿桥臂上，利用测点**转换**按键同时读出各个测点的应变。

## (4) 静态应变测量适用范围

加载分级，测点切换，不能自动连续测量。

## 6、应变片式传感器及其设计概要(综合拓展)

不同结构形式的弹性元件+应变片

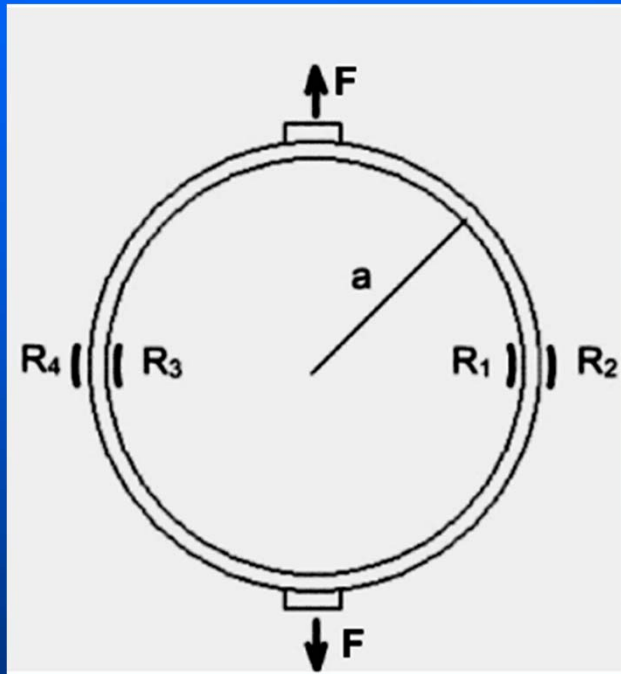
组成不同用途的应变式传感器。可用于测拉力、压力，弯矩、扭矩、加速度、位移（或变形）、倾角等。

弹性元件材料的要求： $(\varepsilon=\sigma/E)$

- 高比例极限材料。
- 低弹性模量的材料。
- 应变片贴于应变的敏感区，并利用全桥应变测量的加减特性使输出灵敏度最大。



## 例：圆环式小负载拉压力传感器



变形形式—弯曲

$$M_{\max} = 0.1817Fa$$

$$W = \frac{1}{6}bt^2$$

设计参数

负荷

$$P_{\max} = \pm 2kN,$$

尺寸

$$a = 11mm$$

材料  $\sigma_{p0.2} = 900MPa$  ,  $E = 210GPa$



## 设计步骤:

(1) 选定材料

(2) 选定应变片: 取宽=8mm,  $l \times b = 3 \times 2$

(3) 强度估计  $\sigma \leq [\sigma] = \frac{1}{2.5} \sigma_{p0.2} = 360 MPa$

t取3mm时

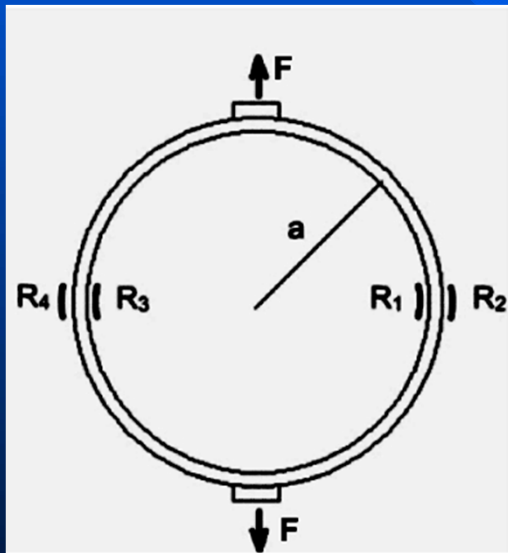
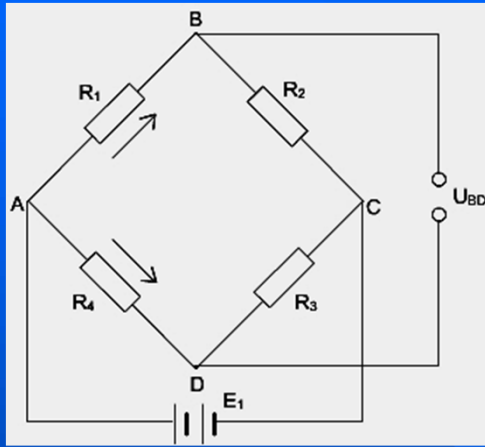
$$\sigma_{\max} = \frac{0.1817 \times 2000 \times 11}{1/6 \times 8 \times 3^2} = 333 MPa < [\sigma]$$

(4) 估计输出

单片应变  $\varepsilon = \sigma / E = 1665 \times 10^{-6}$

组桥方式

全桥接法  $\varepsilon_r = 4\varepsilon = 6660 \times 10^{-6}$



(5) 输出灵敏度，设 $E_1=5V$ ， $K=2.0$

$$\Delta U = \frac{E_1}{4} \cdot K \varepsilon_r = \frac{1}{4} \times 5000mv \times 2 \times 6660 \times 10^{-6} = 16.65mV$$

灵敏度 $3.33mV/V$ ， 合适

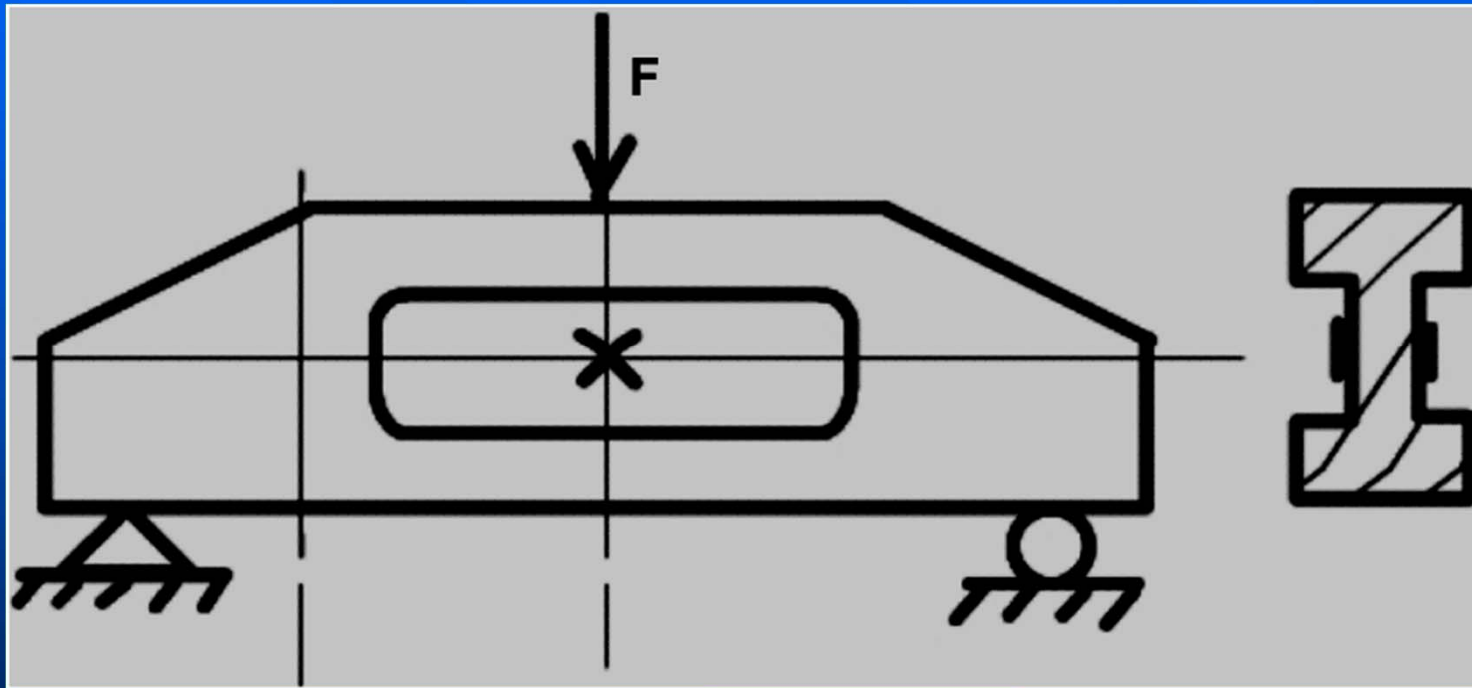
若要求能分辨 $1N$ 力，则最小输出为 $8.3\mu V$ ，相当于 $3\mu\varepsilon/N$ 有足够精度。

(6) 标定：做 $F-\varepsilon$ 曲线，用线性回归求斜率，其斜率即为标定系数 $C$  ( $N/\mu\varepsilon$ )

(实际标定时会和设计有微小差别，应用时以实际标定为准)

## ●其他形式的传感器（一）

### 梁式 大负荷载荷传感器（100kN以上）



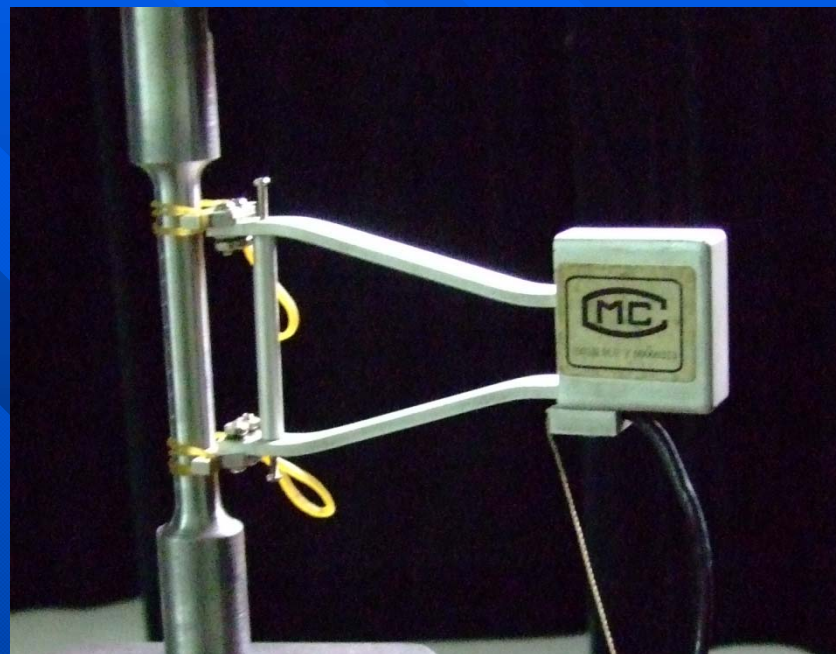
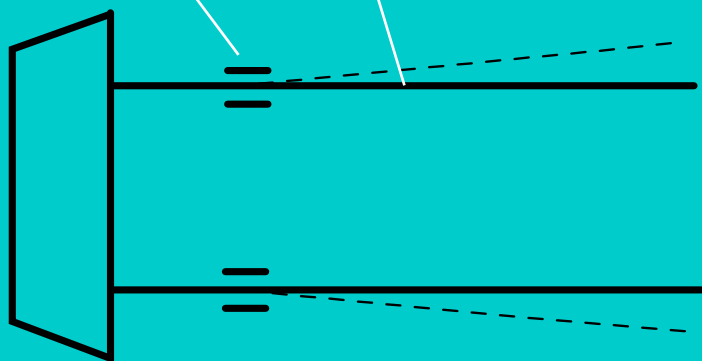
原理：在比例极限内梁中性层上的最大切应力产生的 $45^\circ$ 方向主应变与载荷成正比

## ●其他形式的传感器（二）

悬臂梁式

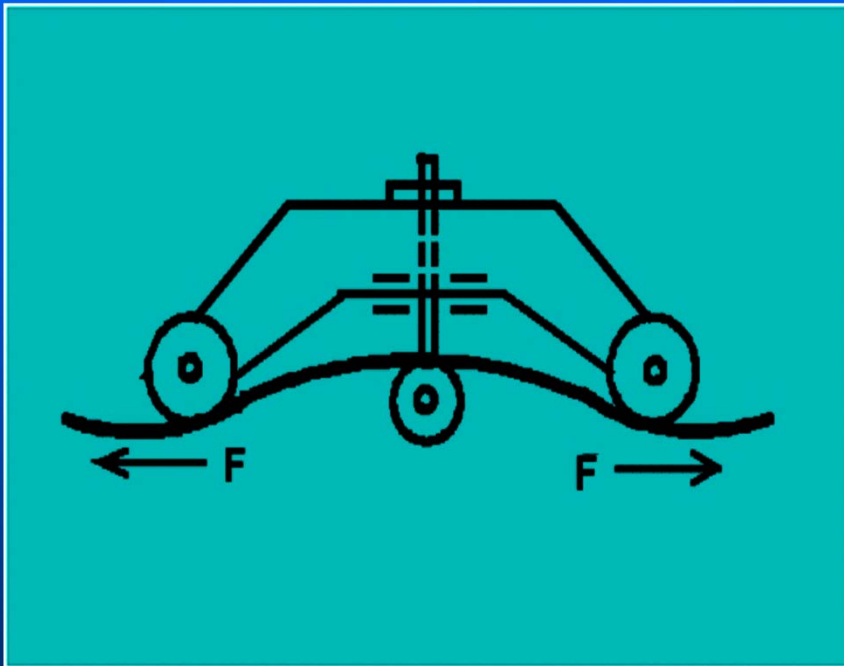
测变形或位移

应变计



## ●其他形式的传感器（三）

### 测钢丝绳张力

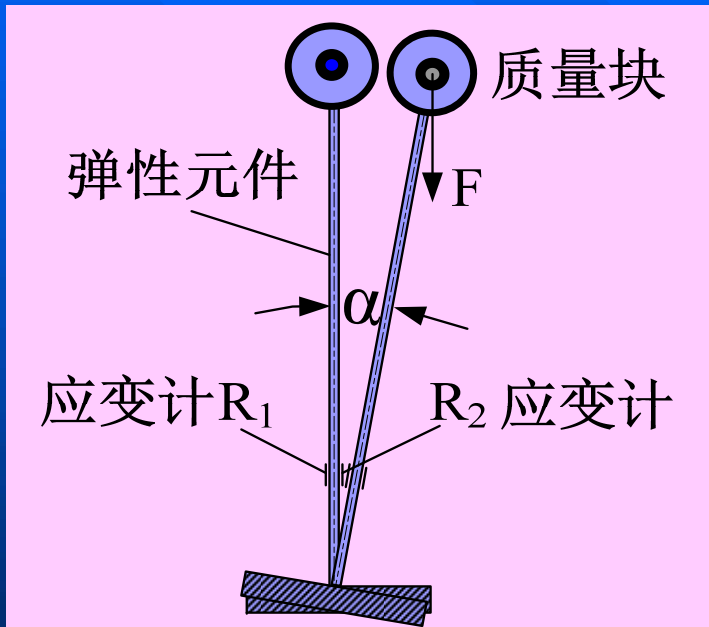


### 穿心式测轴力



## ●其他形式的传感器（四）

### 测倾角



### 轮辐式测力传感器测力





# 实验室安全

- 实验课是培养学生能力的重要课程，同时也是培养学生之间协作能力、意志力、职业规范的课程；
- 实验课所有同学必须遵守实验室和学校的各项规章制度，不得擅自行动；
- 实验中要精力集中，操作设备仪器时要注意确认，动作要轻，不可盲目和蛮干。
- 注意各种电缆、导线和电源，严防触电事故发生。

THE END