

4 电阻应变测量原理及桥路连接实验

一、实验目的

- 1、了解电阻应变片测量应变的原理。
- 2、了解静态电阻应变仪的工作原理，掌握静态电阻应用仪的使用方法。
- 3、了解惠斯登电桥的工作原理，掌握应变片在测量电桥中的各种接线方案。

二、实验仪器及设备

1、材料力学多功能实验台

材料力学多功能实验台是进行材料力学电测实验的主要设备，功能全面，操作简单。在实验台上可进行纯弯曲梁正应力测定，弯扭组合受力分析，材料弹性模量、泊松比测定，偏心拉伸，压杆稳定，复合梁、叠梁正应力测定，悬臂梁、等强度梁挠度测定，电阻应变片灵敏系数标定等实验，实验台如图 2-20 所示。



图 2-20 材料力学多功能实验台结构示意图

2、静态电阻应变仪

XL2118 系列静态电阻应变仪具有本机自控和计算机外控两种工作模式，在本机自控工作模式下，能够同时测量应变（ $\mu\epsilon$ ）与拉压力（t/ kN / kg/ N）两种物理量。在计算机外控工作模式下，一台计算机可同时监控或控制 32 台同类型仪器，即可组

成多点测量系统。对学生不做实验而抄袭他人实验报告的情况进行有效的控制，同时可以降低教师的工作量。其操控面板说明见图 2-21，系统原理见图 2-22。



图 2-21 静态电阻应变仪（XL2118 系列）

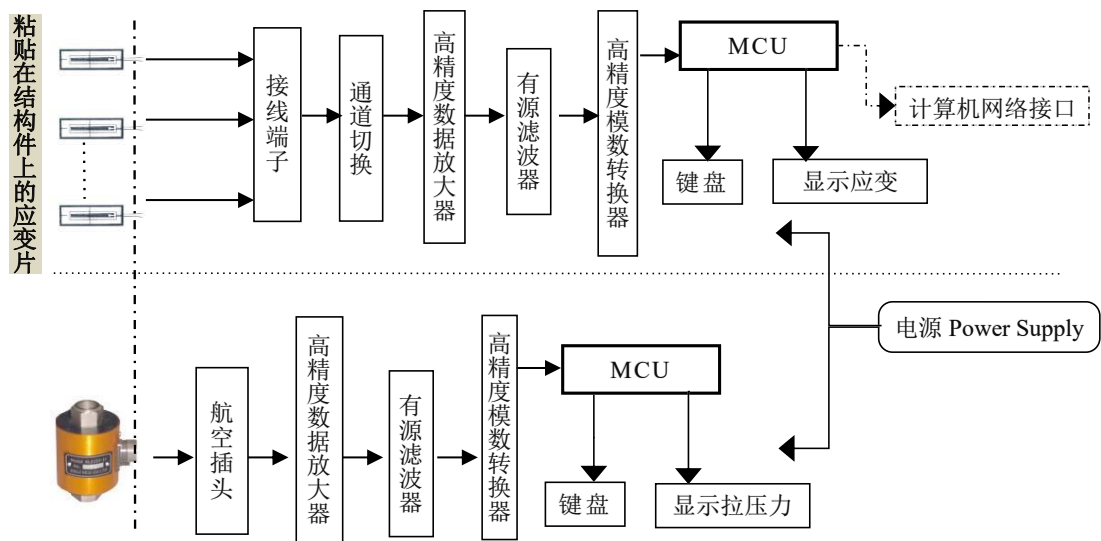


图 2-22 静态电阻应变仪系统原理

3、游标卡尺、钢直尺

三、实验原理及方法

（一）电阻应变片的结构

电阻应变片是一种结构简单、应用广泛的高精度力学量传感元件。

电阻应变片的结构如图 2-23 所示，主要由基底、敏感栅、覆盖层和引线四部分组成，其中敏感栅采用粘结剂粘在基底和盖层之间。

- （1）基底：用以保护和固定敏感栅，同时要具有良好的粘结性能和绝缘性能。
- （2）敏感栅：以合金丝或合金箔制成，是电阻应变片的主要组成部分。它能将被测构件表面的应变转换为电阻相对变化。由于它非常灵敏，故称为敏感栅。
- （3）覆盖层：用来保护敏感栅而覆盖在上面的绝缘层。

(4) 引线：从敏感栅引出的金属导线，通常在制造应变片时已和敏感栅连接好。

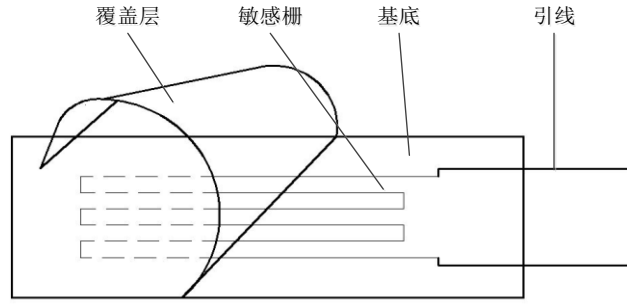


图 2-23 电阻应变片的结构

(二) 电阻应变片工作原理

在自然界中，绝大多数物体都有电阻，不同材料的物体导电能力也不同。物体电阻的大小与物体的材料性能和几何形状有关，电阻应变计正是利用了导体电阻的这一特点。

电阻应变计的最主要组成部分是敏感栅。敏感栅可以看成为一根电阻丝，其材料性能和几何形状的改变会引起栅丝电阻值的变化。设一根金属电阻丝，其材料的电阻率为 ρ ，原始长度为 L 。不失一般性，假设其横截面是直径为 D 的圆形，横截面积记为 A ，即 $A=\pi D^2/4$ ，初始时该电阻丝的电阻值为 R ，则

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (2-)$$

在外力作用下，电阻丝会产生变形。假设电阻丝沿轴向伸长，其横向尺寸会相应缩小，横截面的半径减少导致横截面积发生变化。其相对变化为：

$$\frac{dA}{A} = 2 \frac{dD}{D} = -2\mu \frac{dL}{L} \quad (2-)$$

式中： μ 为金属丝材料的泊松比， $\frac{dL}{L}$ 为金属导线长度的相对变化，用应变表示，即：

$$\frac{dL}{L} = \varepsilon \quad (2-)$$

在电阻丝伸长的过程中所产生的电阻值的变化为：

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dL}{L} - \frac{dA}{A} = \frac{d\rho}{\rho} + (1+2\mu)\varepsilon \quad (2-)$$

式中，右侧第一项是由金属丝变形后电阻率发生变化所引起的；后一项是由金属丝变形后几何尺寸发生变化所引起的。

在常温下，许多金属材料在一定的应变范围内，电阻丝的相对电阻变化与其轴向应变成正比，即：

$$\frac{dR}{R} = K_s \varepsilon \quad (2-)$$

式中： K_s 为单根金属丝的灵敏系数。上式表明金属丝的电阻变化率与它的轴向应变成线性关系。根据这一规律，采用能够较好地在变形过程中产生电阻变化的材料，制造将应变信号转换为电信号的电阻应变片。

（三）电阻应变测量原理

电阻应变测量由电阻应变片、电阻应变仪及采集软件组成，其工作原理如下：将电阻应变片固定在被测的构件上，当构件变形时，电阻应变片的电阻发生相应的变化。通过电阻应变仪中的电桥，将此电阻值的变化转换为电压或电流的增量，加以放大，最后换算成应变值输出，通过与应变仪配套的软件采集、分析数据。其工作过程如下所示：

应变→电阻变化→电压（或电流）变化→放大→记录→数据处理

如果是动态测量，由应变仪输出与应变成正比的电信号，输入记录器显示。

构件的应变值一般均很小，所以应变片电阻变化率也很小，需用专门仪器进行测量，测量应变片的电阻变化率的仪器称为电阻应变仪，其测量电路为应变电桥，也称为惠斯顿电桥，它是以应变片作为其部分或全部桥臂的四臂电桥，可将应变片电阻值的微小变化转化成输出电压的变化。在此，仅以直流电压电桥为例进行说明。

1、电桥的输出电压

电阻应变仪中的应变电桥如图 2-24 所示，以应变片或电阻元件作为电桥桥臂。可取 R_1 为应变片、 R_1 和 R_2 为应变片或 $R_1 \sim R_4$ 均为应变片等几种形式。A、C 和 B、D 分别为电桥的输入端和输出端。

根据电学原理，当输入端 AC 加有电压 U_1 时，电桥的输出电压为：

$$U_o = \frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} U_1 \quad (2-)$$

当 $U_o = 0$ 时，电桥处于平衡状态。因此，电桥的平衡条件为 $R_1 R_3 = R_2 R_4$ 。当处于平衡的电桥中各桥臂的电阻值分别有 ΔR_1 、 ΔR_2 、 ΔR_3 和 ΔR_4 的变化时，可近似地求得电桥的输出电压为：

$$U_o \approx \frac{U_1}{4} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \quad (2-)$$

由此可见，应变电桥有一个重要的性质：应变电桥的输出电压与相邻两桥臂的电阻变化率之差、相对两桥臂电阻变化率之和成正比。对于平衡电桥，如果相邻两桥臂的电阻变化率大小相等、符号相同，或相对两桥臂的电阻变化率大小相等、符号相反，则电桥将不会改变其平衡状态，即保持 $U_o = 0$ 。因此，在静态电阻应变仪中，惠斯登电桥的四个桥臂上的电阻值取为相同的数值。

如果电桥的四个桥臂均接入相同的应变片，则有

$$U_o = \frac{KU_1}{4} (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4) \quad (2-)$$

式中， $\varepsilon_1 \sim \varepsilon_4$ 分别为接入电桥四个桥臂的应变片的应变值。

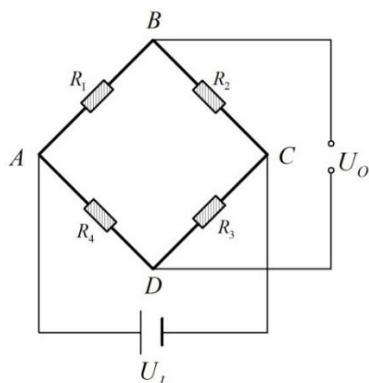


图 2-24 惠斯登电桥

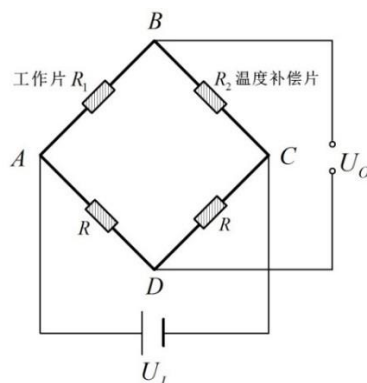


图 2-25 半桥单臂温度补偿接线方案

2、温度补偿

测量过程中，贴有应变片的构件总是处在某一温度场中。若构件所处的测量环境温度发生变化，应变片相应地产生温度应变 ε_t 。由于构件在未承载且无约束状态下温度应变 ε_t 仍然存在，因此当构件承受载荷时，温度应变 ε_t 就会与由载荷作用下产生的应变叠加在一起输出，使得测量到的输出应变包含由温度变化引起的温度应变 ε_t ，必然对测量结果产生影响。温度的变化对电桥的输出电压影响很大，严重时，每升温 1°C ，电阻应变片中可产生几十微应变。

剔除温度效应的措施，称为温度补偿。根据电桥的性质，用一个应变片作为温度补偿片，将它粘贴在一块与被测构件材料相同但不受力的试件上，将此试件和被测构件放在一起，使它们处于同一温度场中。粘贴在被测构件上的应变片称为工作片。在连接电桥时，使工作片与温度补偿片处于相邻的桥臂，如图 2-25 所示。因为

工作片和温度补偿片的温度始终相同，所以它们因温度变化所引起的电阻值的变化也相同，又因为它们处于电桥相邻的两臂，所以并不产生电桥的输出电压，从而使得温度效应的影响被消除。

必须注意，工作片和温度补偿片的电阻值、灵敏系数以及电阻温度系数应相同，分别粘贴在构件上和不受力的试件上，以保证它们因温度变化所引起的应变片电阻值的变化相同。

（四）应变片的布置和在电桥中的接线方案

应变片测量的是构件表面某点的拉应变或压应变。在有些情况下，该应变可能与多种内力因素有关。有时，只需测量出与某种内力所对应的应变，即将其它内力所对应的应变从总应变中剔除。这就需要合理地选择应变片的位置和方向，并把应变片合理地接入电桥，就能利用电桥的性质，从比较复杂的组合应变中测量出指定的应变。

应变片在电桥中的接线方案常有以下四种形式：

1、半桥单臂

如图 2-26（a）所示，将一个工作片和一个温度补偿片分别接入两个相邻桥臂，另两个桥臂接固定电阻。如果工作片的应变为 ε ，则电桥的输出电压为：

$$U_o = \frac{KU_1}{4} \varepsilon \quad (2-)$$

2、半桥双臂

如图 2-26（b）所示，将两个工作片接入电桥的两个相邻桥臂，另两个桥臂接固定电阻，两个工作片同时互为温度补偿片。如果工作片的应变分别为 ε_1 和 ε_2 ，则电桥的输出电压为：

$$U_o = \frac{KU_1}{4} (\varepsilon_1 - \varepsilon_2) \quad (2-)$$

若 $\varepsilon_1 = -\varepsilon_2 = \varepsilon$ ，则电桥的输出电压为：

$$U_o = \frac{KU_1}{2} \varepsilon \quad (2-)$$

即为半桥单臂接线方案的两倍。

3、全桥对臂

如图 2-26（c）所示，将两个工作片接入电桥的两个相对桥臂，另两个桥臂接温

度补偿片，如果工作片的应变分别为 ε_1 和 ε_3 ，则电桥的输出电压为：

$$U_O = \frac{KU_1}{4}(\varepsilon_1 + \varepsilon_3) \quad (2-)$$

若 $\varepsilon_1 = \varepsilon_3 = \varepsilon$ ，则电桥的输出电压为：

$$U_O = \frac{KU_1}{2}\varepsilon \quad (2-)$$

即为半桥单臂接线方案的两倍。

4、全桥四臂

如图 2-26 (d) 所示，电桥的四个桥臂全部接入工作片，如果工作片的应变分别为 ε_1 、 ε_2 、 ε_3 和 ε_4 ，则电桥的输出电压为：

$$U_O = \frac{KU_1}{4}(\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4) \quad (2-)$$

若 $\varepsilon_1 = -\varepsilon_2 = \varepsilon_3 = -\varepsilon_4 = \varepsilon$ ，则电桥的输出电压为：

$$U_O = KU_1\varepsilon \quad (2-)$$

即为半桥单臂接线方案的四倍。

必须注意，接入同一电桥各桥臂的应变片（工作片或温度补偿片）的电阻值、灵敏系数和电阻温度系数均应相同。

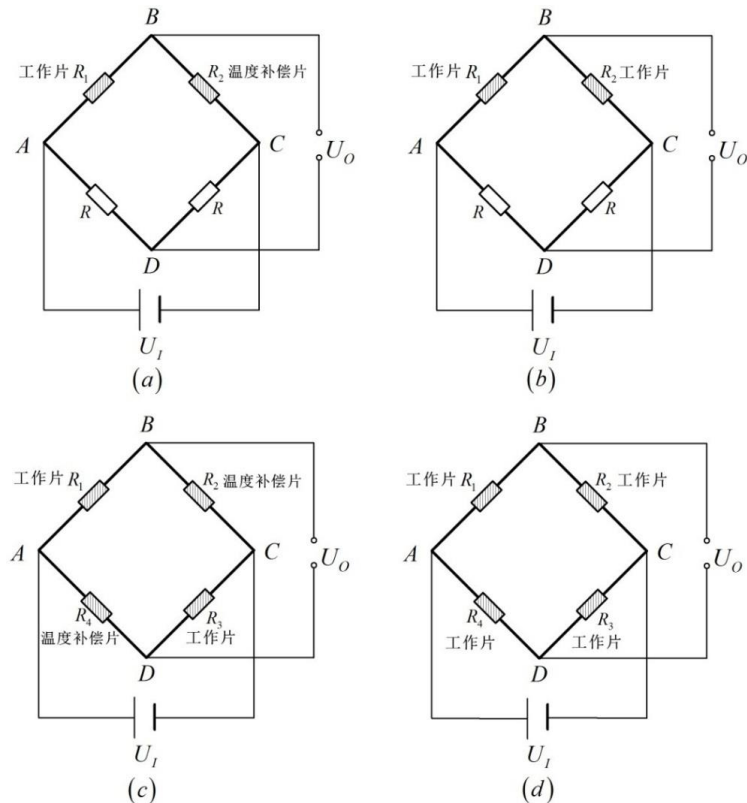


图 2-26 应变片在电桥中四种接线方案

由以上分析可知，应变仪读数 ε_d 具有对臂相加、邻臂相减的特性。根据此特性，采用不同的桥路布置方法，一方面可达到提高测量精度的目的，另一方面也实现在复合抗力中只测量某一种内力素，消除另一种或几种内力素的作用。

（五）实验方法

实验采用纯弯曲梁进行，梁上应变片分布如图 2-27 所示。

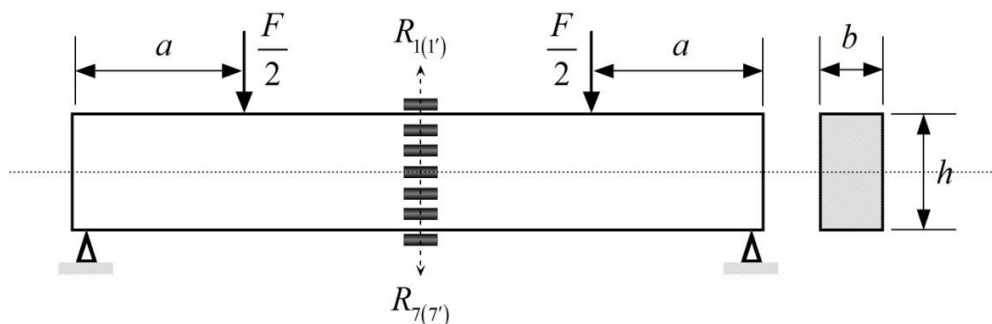


图 2-27 纯弯曲梁尺寸及应变片位置示意图

实验采用半桥单臂、半桥双臂和全桥对臂、全桥四臂四种方式分别测量，根据实验原理中所述实验方法选择合适位置的应变片接入电桥。加载采用增量法，即每次增加等量的载荷 ΔF ，测出各方案对应的应变增量 $\Delta\varepsilon_i$ ，然后分别取应变增量的平均值 $\overline{\Delta\varepsilon_i}$ 进行分析。

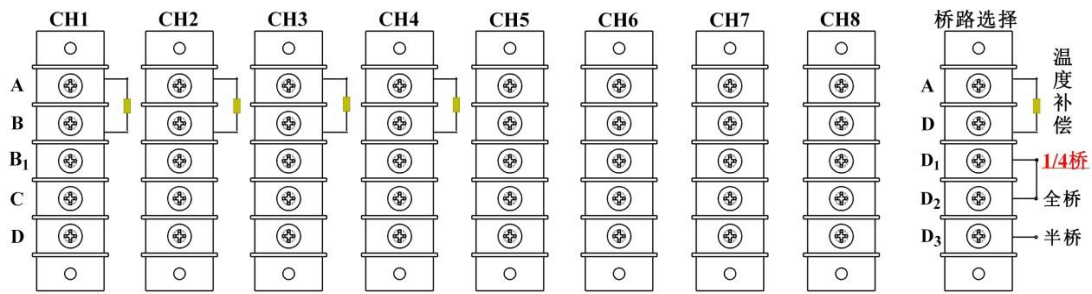
测量出的应变读数 ε_d 与待测应变 ε 之比称为桥臂系数，通常以 S 来表示。以半桥单臂接线方案所测应变增量的平均值 $\overline{\Delta\varepsilon_i}$ 为标准，此时其桥臂系数 $S=1$ ，然后分别计算其他各电桥测量方案的桥臂系数。

四、实验步骤

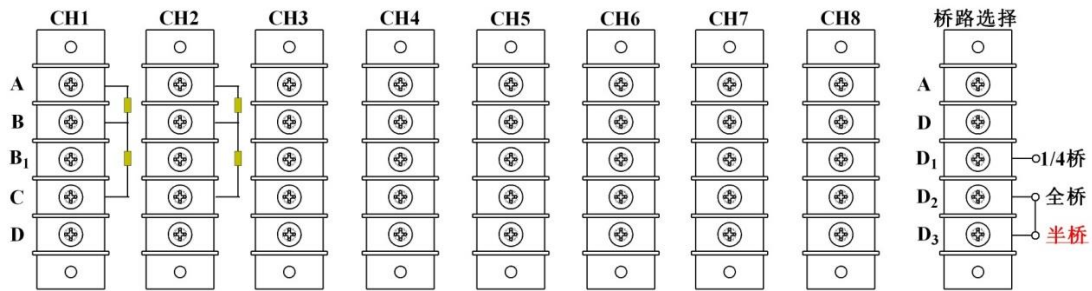
（一）实验步骤

- 1、测量构件尺寸，将数据记录于表 2-5 中。
- 2、按实验要求进行组桥，将相应的应变片导线接入电阻应变仪（桥路连接方式如图 2-28 所示），检查整个测试系统是否处于正常工作状态。
- 3、实验加载，加载至 500N 时，将电阻应变仪应变读数清零（或记录电阻应变仪读数），然后加载，每增加 1000N，记录一次应变数值，直至加载至 4500N，将各点应变仪的读数记录于表 2-6 中。
- 4、重复步骤 2、3，测量其它桥路连接方式的值。
- 5、实验完成后，卸掉载荷，关闭仪器电源，整理好所用仪器设备，清理实验现

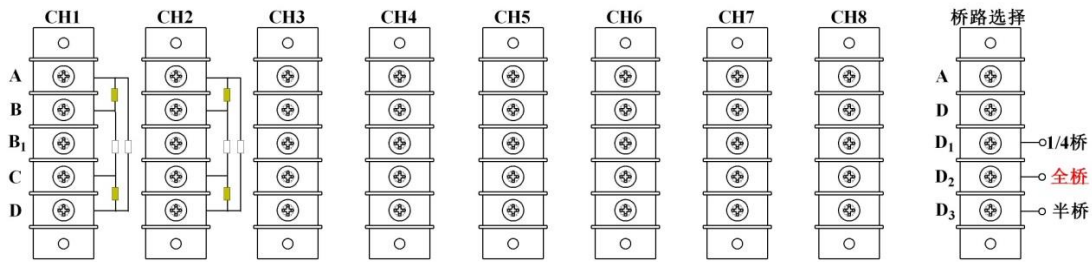
场，将所用仪器设备复原，实验数据交指导教师检查签字。



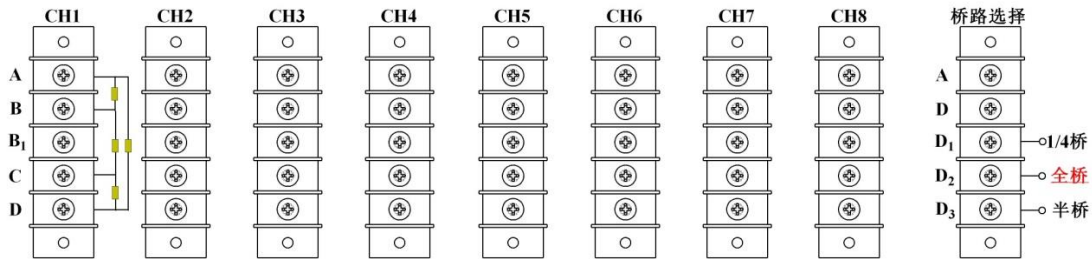
(a) 半桥单臂温度补偿接线方案



(b) 半桥双臂接线方案



(c) 全桥对臂接线方案



(d) 全桥四臂接线方案

图 2-28 不同桥路连接方式示意图

(二) 注意事项

- 1、测试仪未开机前，一定不要进行加载，以免损坏仪器。
- 2、实验前一定要设计好实验方案。
- 3、加载过程中一定要缓慢加载，不可快速进行加载，以免超过预定加载载荷值，造成测试数据不准确或损坏试件；该实验最大载荷为 4500N。

- 4、实验结束后，一定要先将载荷卸掉，并将应变片导线从电阻应变仪上拆下。
- 5、确认载荷完全卸掉后，关闭仪器电源，整理实验台面。

五、实验数据记录

表 2-5 原始参数记录表

梁宽 $b(\text{mm})$	梁高 $h(\text{mm})$	惯性矩 $I(\text{mm}^4)$	E (GPa)	测点至中心轴的距离 (mm)						
				y_1	y_2	y_3	y_4	y_5	y_6	y_7

表 2-6 实验数据记录表

$F \text{ (N)}$	ΔF	方案 1		方案 2		方案 3		方案 4	
		应变	增量	应变	增量	应变	增量	应变	增量
500	1000								
1500									
2500	1000								
3500	1000								
4500	1000								
增量平均值 $\overline{\Delta \varepsilon_i}$									
计算桥臂系数 S									

六、实验数据分析

- 1、计算各接桥方案的桥臂系数 S ，分析其结论。
- 2、根据各方案的桥臂系数，讨论不同组桥方案的优缺点及如何在工程实测中合理选择组桥方案。

七、思考题

- 1、除了上述四种测量方式外，是否还有其它的桥路连接方式。
- 2、导致电测法误差的主要因素有哪些？