

电阻应变仪 在机器試驗中的应用

施 雄 茂 編 譯

高等教育出版社

近年来在工程技术中广泛应用电阻应变仪来研究机器、机构、建筑结构的工作。这本小册子介绍了利用电桥及电子管放大装置来研究力学上各种量如变形、应力和力、位移、线加速度及角加速度等变化规律的方法。书中对力学上各种量的测量方法都有原理说明、必要的公式推导及附图。

本书可供高等工业学校力学实验室人员、机械工程技术人员及有关的科学研究人员参考。

电阻应变仪在机器试验中的应用

施 雄 茂 編 譯

高等教育出版社出版 北京宣武門內承恩寺7号

(北京市书刊出版业营业许可出字第054号)

人民教育印刷厂印订 新华书店发行

统一书号 15010·784 开本 $787 \times 1092 \frac{1}{32}$ 印张 $1 \frac{2}{16}$ 插页 1

字数 23,000 印数 0001—5000 定价 (8) 半 0.17

1959年3月第1版 1959年3月第1次印刷

一、前言.....	1
二、基本关系.....	2
三、电桥线路.....	6
四、变形、应力和力的测量.....	7
五、试验的校验.....	18
六、位移(尺寸)的测量.....	22
七、线加速度的测量.....	24
八、角加速度的测量.....	28
九、试验的准备.....	33
参考书目.....	35

一、前言

近年来在工程技术中广泛地应用着电阻应变仪 (тензо-метр) 来研究机器、机构、以及建筑结构的工作。使用应变仪可以研究快速的或慢速的变化过程: 外力(拉力、压力、弯矩、扭矩等)、变形、位移、加速度、振动以及温度等的变化规律。接上磁电式示波器 (шлейфовый осциллограф) 后还可以同时记录几个变量随时间变化的规律。

应变仪所用的发送器称为电阻丝发送器 (проболочный датчик) (简称电阻丝或应变片), 它是将非电量的变化转换为电量变化的元件。如图 1 所示, 在薄薄的纸片 1 上粘着弯曲而细长的电阻 2 (直径约 0.02—0.04 公厘) [1]^①, 它的两端用铜箔 3 连接, 在电阻丝的上面复盖着干燥的薄纸 4。电阻丝用特制胶水粘贴在被测零件上后, 丝的长度和电阻值将随着零件的变形而改变。由于电阻值的变化和零件的变形间存在着直线关系, 通过电桥和电子放大装置后, 便可测出电阻丝微小的电阻变量 ΔR , 也就是零件的变形 (或外力) 的变化。

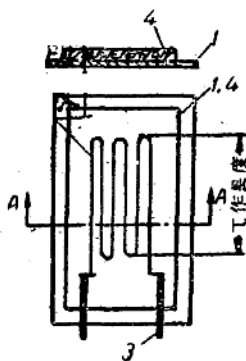


图 1.

① 方括弧内的数字系指参考书目的序号——编者注。

应用电阻絲发送器测量的主要优点是:

(1)电阻絲質量小,与相应的仪器配合使用后,可认为是沒有惯性的,因而不仅可用于静态测量,也宜于动态过程的测量。

(2)电阻絲尺寸小,粘貼簡便,因此特别适合于用一般测量仪器不易达到的地方,如机器的深处或狭窄的地方。

(3)测量的万能性。尤其对于結構形状复杂而无法对其强度和刚度进行理論計算的零件,使用应变仪测量最为方便。

(4)测量誤差約为1—2%,甚至更低些[2],这是用一般仪器进行动态测量时不易达到的。

(5)使用方便。

二、基本关系

在很多电气测量仪器中,电桥是重要的組成部分之一。电桥的主要作用是將电阻絲的电阻变化量(即零件相应的变形)轉換为电压的变化量。这样,被测量的机械量首先轉換为电阻的变化量,然后再通过电桥轉換为电压的变化量。

图2是电桥的示意图。其中 R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4 是电桥的桥臂电阻量; ΔR_1 是由于 R_1 的变形而产生的电阻变化量; U 是电桥的輸入电压, $U = \text{常数}$; U_0 是当电桥失去平衡时,测量对角1和3两端間的电位差。

設 R_1 和 R_2 通过电流 I_1 , R_3 和 R_4 通过电流 I_2 ,而輸入电桥的总电流为

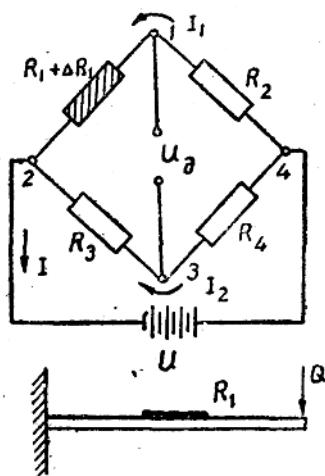


图 2.

$$I = I_1 + I_2.$$

当电桥平衡时, 则 $U_d = 0$; $U_{12} = U_{32}$, $U_{14} = U_{34}$ 。即 $I_1 R_1 = I_2 R_2$, $I_1 R_3 = I_2 R_4$ 。两式相除后得

$$\frac{I_1 R_1}{I_1 R_3} = \frac{I_2 R_2}{I_2 R_4}, \text{ 或 } R_1 R_4 = R_2 R_3. \quad (1)$$

在外力作用下, 由于零件相对变形 ε 的影响使电阻丝 R_1 的电阻值增加了 ΔR_1 , 从而电桥失去了平衡, 在 1 和 3 间出现了电位差 U_d 。 U_d 可用下式表示(3):

$$U_d = I_1 \Delta R_1 \left(1 - \frac{1 + \frac{\Delta R_1}{R_1}}{1 + \frac{R_2}{R_1} + \frac{\Delta R_1}{R_1}} \right), \quad (2)$$

在一般情况下, $\Delta R_1 \ll R_1$, 并且 $\frac{\Delta R_1}{R_1} < 1\% \ll 1$ (4), 因而

$\frac{\Delta R_1}{R_1}$ 可以忽略不計。

在实际应用中常使 $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$; 或 $R_1 = R_2 = R'$, $R_3 = R_4 = R''$, 但 $R' \neq R''$; 因而 $\frac{R_2}{R_4} = 1$ 。故 (3) 式可简化成下式:

$$U_0 \approx I_1 \Delta R_1 \left(1 - \frac{1+0}{1+1+0} \right) = \frac{1}{2} I_1 \Delta R_1. \quad (3)$$

在外力的作用下, 电阻絲的电阻相对变化量与相对变形間存在着下列关系 [3][4]:

$$\frac{\Delta R_1}{R_1} = sS; \quad (4)$$

$$\Delta R_1 = R_1 sS, \quad (4)'$$

式中 $s = \frac{\Delta l}{l}$ —— Δl 是电阻絲在长度方面的增值, l 是电阻絲的有效工作长度, s 也就是零件的相对变形;

S —— 电阻絲的拉伸灵敏度 (тензочувствительность), 它与电阻絲的波桑系数 μ , 以及变形时单位电阻 ρ 的变化有关, 其数值可由实验方法确定。通常使用的电阻絲的 $S = -1.6 - 3.5$ [2][4][5]。

将 (4)' 式中的 ΔR_1 值代入 (3) 式, 得

$$U_0 \approx \frac{1}{2} I_1 R_1 sS. \quad (5)$$

(5) 式反映了具有电阻絲电桥的工作特点, 并且由 (2) 式到 (5) 式可以得出下列結論:

(一) 电桥的输出电压 U_0 和电阻絲 (即零件) 的相对变形成正比关系。即 U_0 正比于 s , 而 s 正比于 P , 因而 U_0 正比于

P (P 为外力)。正是由于存在这种关系, 才使我們在工程技术試驗中广泛使用应变仪成为可能。

(二) 当电阻絲的变形很大时 (即 $\frac{\Delta R_1}{R_1}$ 很大时), 由 (2) 式可知, 由于 $\frac{\Delta R_1}{R_1}$ 不能略去, 在 U_o 和 ϵ 間将产生非綫性关系。

(三) 应用拉伸灵敏度 S 过大的电阻絲时, 电桥灵敏性将增大。但即使当变形 ϵ 不大时, 由 (4) 式可知, 也可以得到較大的 $\frac{\Delta R_1}{R_1}$ 值, 而使 U_o 和 ϵ 間失去綫性关系, 故 S 值不宜过大。

(四) 电桥的灵敏性与輸給工作电阻的电流 I_1 成正比关系。为了获得最大的电桥灵敏性, 必須使工作电阻絲通过最大允許的电流。

(五) 应用电阻值尽可能大的工作电阻絲, 不仅能提高电桥的灵敏性, 而且能改善 U_o 和 ϵ 間的非綫性关系。

(六) 当两个桥臂参加工作 (如图 3 所示), $R_1 = R_2$, 而 $\Delta R_1 = \Delta R_2$, 則輸出电压为

$$U_o = I_1 \Delta R_1, \quad (6)$$

或
$$U_o = I_1 R_1 S \epsilon. \quad (7)$$

比較 (5) 和 (7) 式可知当两个桥臂参加工作时电桥的灵敏

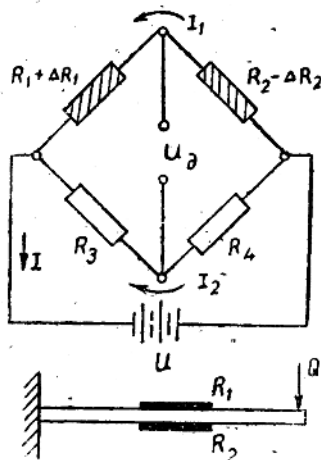


图 3.

性比一个桥臂参加工作时提高了一倍，并且保证了在弹性范围内任何数量变形时电桥输出电压 U_0 和变形 ε 间的线性关系。

同理，当电桥四个桥臂同时参加工作时（见图3），而 $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$ ，和 $\Delta R_1 = \Delta R_4 = -\Delta R_2 = -\Delta R_3$ ，则电桥的灵敏度将提高四倍。

（七）电桥的灵敏性和不工作桥臂的电阻 R_3 和 R_4 无关。

三、电桥线路

为了测量工作电阻丝的微小电阻变化所引起的微弱的电桥输出电压，应用了真空管放大器。如图4所示，它由下列部

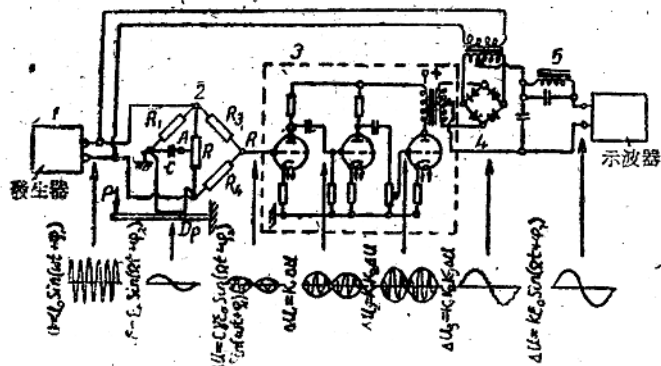


图 4.

分构成：输出电桥工作电流的振荡发生器1，其振荡频率为被测测量频率的5至10倍以上；测量电桥2，其中可以有一个、两个或四个桥臂参加工作，当桥臂电阻改变时，电桥测量对角便

輸出其振幅和电阻变化相适应的調幅电压，而它的頻率和振蕩發生器的頻率一樣；和电桥輸出端相接的是交流放大器 3；在放大器后面是檢波器 4 和濾波器 5，电流經過它們后，得到与調幅电压曲綫的变化規律——即桥臂电阻变化規律相适应的电流。若与磁电式示波器相接，便可將变化規律記錄下来。

四、变形、应力和力的測量

知道了零件在外力作用下的相对变形 ϵ 或应力 σ 后，我們就不难按照零件的不同受力情况，根据材料力学中的公式用計算方法求得外力的大小或形状复杂的剖面强度；或者用校驗方法，比較出这些数值。

在实际工作中，零件往往同时几个不同性質的外力作用下工作（如拉力和弯矩，扭矩和弯矩等）因而产生了复合应力和复合变形。根据应变仪电阻絲在零件上的不同分布，就可以很方便且单独地求得零件在某一種外力的作用下，在某一剖面上所产生的变形或应力。

現在我們分別討論在不同性質的外力作用下，电阻絲的电阻变化量 ΔR 和零件相对变形間的关系。

（一）拉伸或压缩——图 5 表示电阻絲发送器的粘貼和接綫方法：

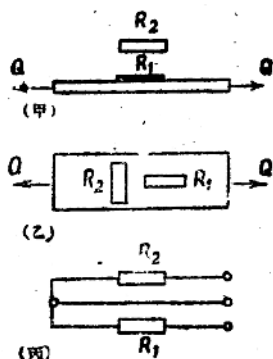


图 5.

第一种情况(图 5, 甲): R_1 贴在试件上, R_2 贴在补偿件上。试件受载时, R_2 不产生变形。

第二种情况(图 5, 乙): R_1 和 R_2 都贴在试件上。图 5 甲和乙的接线图是相同的。

第一种情况: 因为变形和温度的变化, R_1 的增量为 $\Delta R_{Q1} = S R_1 \epsilon_1 + \Delta R_{t1}$, 而 R_2 (仅受温度影响) 的增量为 $\Delta R_{Q2} = \Delta R_{t2}$ ① 因此电阻的计算增量为:

$$\Delta R = \Delta R_{Q1} - \Delta R_{Q2} = (S R_1 \epsilon_1 + \Delta R_{t1}) - \Delta R_{t2}.$$

$$\text{若 } \Delta R_{t1} = \Delta R_{t2} \text{ 时, 则 } \Delta R = S R_1 \epsilon_1. \quad (8)$$

由上可知, 当温度相同时, ΔR_{Q1} 仅仅与轴向变形 ϵ_1 有关。

第二种情况的电阻计算增量为 $\Delta R = \Delta R_{Q1} - \Delta R_{Q2} = (S_1 R_1 \epsilon_1 + \Delta R_{t1}) - (-S_2 R_2 \mu_2 \epsilon_2 + \Delta R_{t2})$ 。当 $\Delta R_{t1} = \Delta R_{t2}$, $R_1 = R_2 = R$, 及 $S_1 = S_2$ 时, 则 $\Delta R = S R \epsilon (1 + \mu)$ 。 (9)

由上式可知, 这里不仅避免了温度影响, 并且灵敏性比图 5, 甲要大 $(1 + \mu)$ 倍。

(二) 弯曲——如图 6 所示, 可以有两种粘贴方法:

第一种(图 6, 甲)是在试件上只贴一个电阻丝, 另一个则贴在补偿件上。而第二种(图 6, 乙)是两个电阻丝都参加工作。

当温度相同时, 第一种方法的电阻计算增量为

$$\Delta R = S_1 R_1 \epsilon_M - 0 = S_1 R_1 \epsilon_M. \quad (10)$$

① 由于温度的变化所引起的电阻变化量与三个因素有关:

- (1) 电阻丝材料的单位电阻的变化;
- (2) 电阻丝的线膨胀系数;
- (3) 被测零件的线膨胀系数。

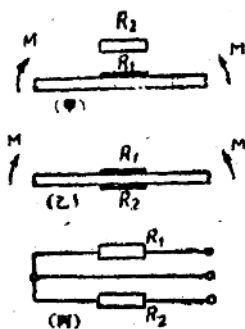


圖 6.

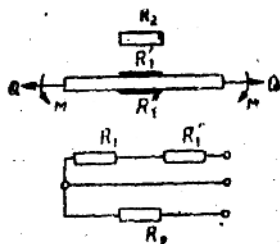


圖 7.

而第二种方法的电阻计算增量为

$$\Delta R = S_1 R_1 \varepsilon_{M1} - S_2 R_2 \varepsilon_{M2}.$$

当 $\varepsilon_{M1} = -\varepsilon_{M2}$, $S_1 = S_2$ 和 $R_1 = R_2$ 时,

$$\Delta R = 2S_1 R_1 \varepsilon_{M1}. \quad (11)$$

由公式(10)和(11)可知, 第二种方法的灵敏性较第一种方法的大一倍, 而且一般可以完全避免温度的影响。因此只要粘贴位置允许, 应尽量采用第二种方法。

(三)当拉伸和弯曲时, 要测量拉伸, 则如图7所示: 电阻丝 R_1' 和 R_1'' 分别贴在试件的上表面和下表面, 而 R_2 贴在补偿件上。当温度相同时, 电阻计算增量为

$$\Delta R = \Delta R_1' + \Delta R_1'';$$

$$\text{而 } \Delta R_1' = S' R_1' (\varepsilon_Q + \varepsilon_M); \Delta R_1'' = S'' R_1'' (\varepsilon_Q - \varepsilon_M).$$

其中 ε_Q —— 拉伸下的相对变形;

ε_M —— 弯曲下表面层的相对变形。

$$\text{因此 } \Delta R = S' R_1' \varepsilon_Q + S'' R_1'' \varepsilon_Q.$$

当 $S' = S''$, $R_1' = R_1''$ 时, 得:

$$\Delta R = S_1 R_1 \varepsilon_Q = S_1 R_2 \varepsilon_Q, \quad (12)$$

其中 $R'_1 + R''_1 = R_1 = R_2$.

(四) 当弯曲和拉伸(或压缩)时, 要测量弯曲, 则如图 8 所示, 在离开试件一端相等距离的上下表面上, 分别贴上电阻丝。因为 R_1 和 R_2 在拉伸下电阻改变了相等的数值, 而在弯曲的作用下, R_1 的电阻增大, R_2 的电阻减小, 因而电阻计算增量为 $\Delta R = \Delta R_1 - \Delta R_2 = S_1 \varepsilon_1 R_1 - S_2 \varepsilon_2 R_2$,

$$\Delta R = S_1 R_1 (\varepsilon_Q + \varepsilon_M) - S_2 R_2 (\varepsilon_Q - \varepsilon_M).$$

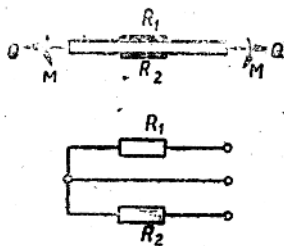


图 8.

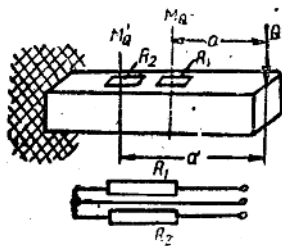


图 9.

若 $S_1 = S_2$, $R_1 = R_2$

则
$$\Delta R = 2S_1 R_1 \varepsilon_M. \quad (13)$$

(五) 剪切力的测量根据茹拉夫斯基 (Журавский) 的理

论, 剪切力 $Q = \frac{dM}{dx}$, 若电阻丝贴成如图 9 所示情况, 则

$$dM = M'_0 - M_Q; \quad dx = a' - a.$$

$$\text{因为 } \sigma = \frac{M_Q}{W} = \varepsilon E,$$

$$M'_0 = \varepsilon' E W; \quad M_Q = \varepsilon E W,$$

所以
$$Q = \frac{M'_0 - M_Q}{a' - a} = \frac{\varepsilon' - \varepsilon}{a' - a} E W. \quad (14)$$

将电阻丝接在电桥的相邻两臂中,便可立刻求得 $(\varepsilon' - \varepsilon)$ 值。数值 α , α' , E 和 W 都已知。当 $S_1 = S_2$, $R_1 = R_2$, 和 R_1 、 R_2 的温度相同时, 温度误差得以免除, 因而按(14)式可求得 Q 值。

(六) 扭转的测量——当圆形剖面轴扭转时, 在倾斜于轴绕 45° 的轴表面上, 存在着最大的拉伸和压缩正应力 σ , 它们相应于变形 ε_1 和 ε_2 (见图10), 而其数值等于轴的垂直剖面内

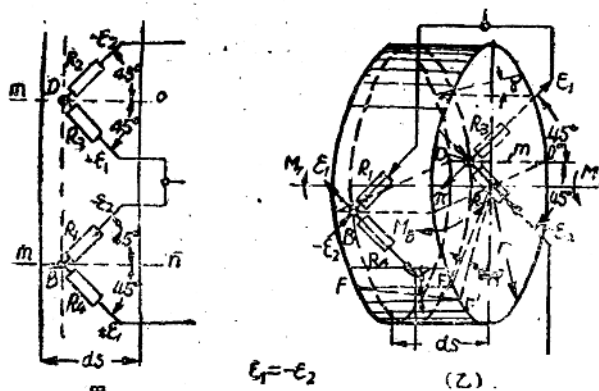


图 10.

的剪应力 τ (6)。当电阻丝发送器正确地倾斜于轴心 45° 方向粘贴在轴上, 并且其几何中心与轴向剖面的内接长方形顶部相重合时, 电阻丝将仅仅受扭转的影响, 而免除了可能与扭转同时存在的弯曲、拉伸等影响。因而在纯扭转时的电阻计算增值将为:

$$\Delta R = [SR_1(\varepsilon_2 - \varepsilon_M + \varepsilon_Q) + SR_2(\varepsilon_2 + \varepsilon_M + \varepsilon_Q)] - [SR_3(-\varepsilon_1 - \varepsilon_M + \varepsilon_Q) + SR_4(-\varepsilon_1 + \varepsilon_M + \varepsilon_Q)].$$

当 $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$ 时:

$$\begin{aligned}\Delta R &= SR(2\varepsilon_2 + 2\varepsilon_3) - SR(-2\varepsilon_1 + 2\varepsilon_4) \\ &= 4SR\varepsilon_1.\end{aligned}\quad (15)$$

由材料力学知道: 扭转时 $\tau = \sigma = \varepsilon_1 E$, (16)

其中 σ 是与轴心倾斜 45° 方向的轴表面的正应力, 而

$$\tau = \frac{M_k}{W_p} = \frac{2M_k}{\pi r^3}.\quad (17)$$

将(16)式代入(17)式得

$$M_k = \frac{\varepsilon_1 E \pi r^3}{2}.\quad (18)$$

由(18)式可知, ε_1 为已知时, 便很容易求得扭矩 M_k 了。

为了正确地找正电阻丝的粘贴位置, 可以用纸片做一个样板, 如图 11 所示。先在轴上贴好样板, 然后按样板上位置

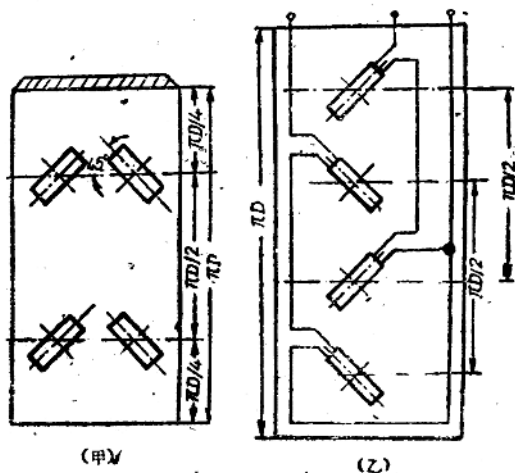


图 11.

正确的孔粘贴电阻丝。

(七)当拉伸、弯曲、扭转时，求拉伸——两个电阻丝发送器 R'_1 和 R'_1'' ($R'_1 = R'_1'' = \frac{1}{2}R_2$) 如图 12 所示位置粘贴在沿试件轴线的上下表面上。 R_2 贴在不受载的补偿件上。

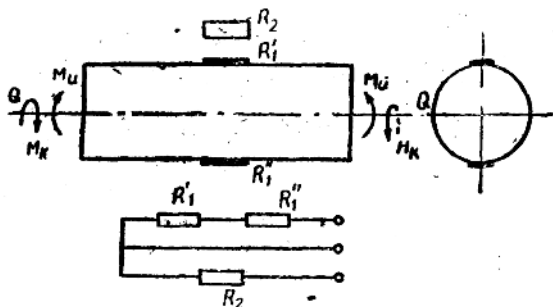


图 12.

电阻增值的计算方法和图 7 所示情况一样，这里不再另述。

(八)双向受力状态时应力的测量——我们假定电阻丝发送器对于横向变形是不灵敏的，这样的假定对结果的正确性的影响是微小的。以下分两种情况讨论。

第一种情况——已知主应力 σ_1 和 σ_2 的方向。这时，工作电阻丝 D_p 可沿着主应力方向粘贴，而补偿电阻丝 D_k 贴在单独的不受载的补偿件上，二者的温度情况一样 (图 13)。用分别测量的方法决定 σ_1 和 σ_2 方向的变形，从而用材料力学公式或用校验比较的方法 (详见下节) 可决定主应力 σ_1 和 σ_2 的大小。

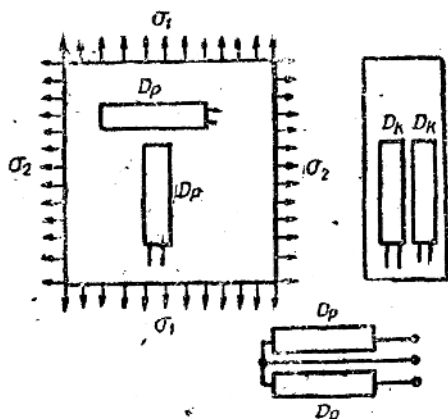


图 13.

第二种情况——主变形的方向不知道。这时，工作电阻丝粘贴成图14所示形式：直角三角形(图14, 甲)、 Δ 形(图14, 乙)以及扇形(图14, 丙)，而补偿电阻丝与第一种情况一样，贴在单独的补偿件上。分别地测量各个工作电阻丝轴向的变形。根据各个方向的变形量用图解法或解析法便可决定主变形 ϵ_1 和 ϵ_2 的方向及大小，以及求得相应的主应力值。图解法——

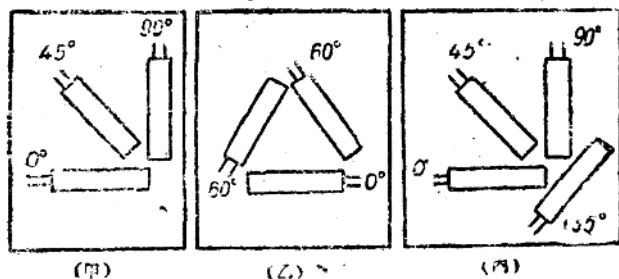


图 14.