

$$\begin{aligned}
 Z_1 &= r_1 + jX_1 = z_1 e^{j\varphi_1} \\
 Z_2 &= r_2 + jX_2 = z_2 e^{j\varphi_2} \\
 Z_3 &= r_3 + jX_3 = z_3 e^{j\varphi_3} \\
 Z_4 &= r_4 + jX_4 = z_4 e^{j\varphi_4}
 \end{aligned}
 \tag{2-27}$$

则交流平衡条件可以写为

$$\begin{cases}
 z_1 = z_3 \\
 z_2 = z_4 \\
 \varphi_1 + \varphi_4 = \varphi_2 + \varphi_3
 \end{cases}
 \tag{2-28}$$

交流电桥的平衡条件与直流电桥的不同,需要满足两个方程式,即不仅各桥臂复阻抗的模必须满足一定的比例关系,而且相对桥臂的幅角和必须相等。

考虑到电桥的起始平衡条件并略去分母中含  $\Delta Z_1$  项,得

$$\begin{cases}
 \dot{U}_\infty = \frac{1}{4} \dot{U} \frac{\Delta Z_1}{Z_1} \\
 Z_1 = \frac{R_1}{1 + j\omega R_1 C_1} \\
 \Delta Z_1 = \frac{\Delta R_1}{(1 + j\omega R_1 C_1)^2}
 \end{cases}
 \tag{2-29}$$

### 2.1.5 应变式传感器的应用

电阻应变丝、片,除直接用来测定试件的应变和应力外,还广泛用作传感元研制成各种应变式传感器,用来测定其他物理量,如力、压力、扭矩、加速度等。

#### 1. 应变式测力与称重传感器

应变式测力传感器由弹性体、应变计和外壳组成。弹性体是测力传感器的基础,应变计是传感器的核心。根据弹性体结构形式的不同可分为:柱式、轮辐式、梁式、环式等。

##### (1) 柱式传感器

柱式传感器是称重(或测力)传感器应用较普遍的一种形式。它分为圆筒形和柱形两种。图 2-20 画出了传感器的结构示意图,其结构是在圆筒或圆柱上按一定方式贴上应变计。圆筒或圆柱在外力  $F$  作用下产生的应变为

$$\epsilon = \frac{T}{E} = \frac{F}{AE}
 \tag{2-30}$$

一般将应变计对称地贴在应力均匀的圆柱表面的中间部分,如图 2-21(a)所示,并连接成图 2-21(b)所示的桥路; $T_1$ 和 $T_3$ , $T_2$ 和 $T_4$ 分别串联,放在相对臂内。当一方受拉时,则另一方受压。由此引起的电阻应变计阻值的变化大小相等、符号相反,从而减小弯矩的影响。横向粘贴的应变计作为温度补偿片。

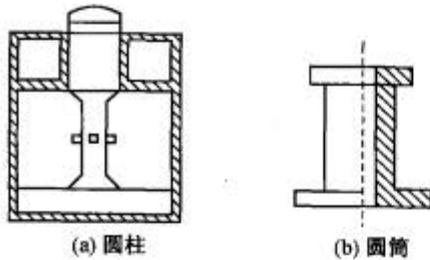


图 2-20 柱式传感器

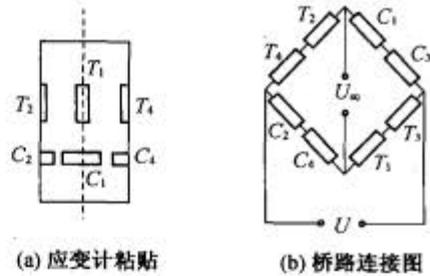


图 2-21 柱式传感器电路

横向粘贴的应变计既作为温度补偿,也起到提高灵敏度的作用。

柱式的不足是截面积随载荷改变所导致的非线性,但对此可以进行补偿。

筒式结构可使分散在端面的载荷集中到筒的表面上来,改善了应力线分布;在筒壁上还能开孔,如图 2-22(c)所示,形成许多条应力线,从而与载荷在端面的分布无关,并可减少偏心载荷、非均布载荷的影响,使引起的误差更小。

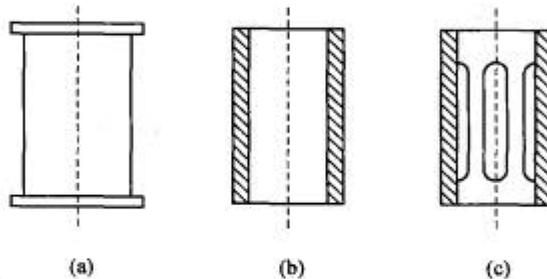


图 2-22 筒式传感器弹性体的不同剖面

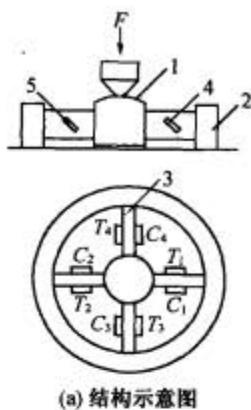
## (2) 轮辐式传感器

轮辐式传感器是一种剪切力传感器,其结构示意图如图 2-23 所示,由轮辐 1、轮圈 2、轮辐条 3、承压应变计 4 和拉伸应变计 5 等组成。轮辐条成对地连接在轮圈和轮辐之间,可为四根或八根(图中为四根)。采用钢球传递重力,因为圆球压头有自动定中心的功能。测量桥路如图 2-24 所示。当外力  $F$  作用在轮辐的上端面和轮圈下端面时,使矩形辐条产生平行四边形的变形,如图 2-25 所示。当两个轮辐条互相垂直时,其最大剪应力及剪应变分别为

$$\tau_{\max} = \frac{3F}{8bh}, \quad \nu_{\max} = \frac{3F}{8bhG}, \quad G = \frac{E}{2(1+\mu)} \quad (2-31)$$

式中: $b$  为轮辐宽度; $h$  为轮辐高度; $G$  为剪切模量; $E$  为杨氏模量; $\mu$  为泊松系数。

在传感器中实测的不是剪应变  $\nu$ ,而是在剪切力作用下,轮辐对角线方向的线应变。这时,将应变计在与辐条水平中心轴线成  $\pm 45^\circ$  的方向上粘贴。八片应变计分别贴在四根辐条的正反面,并组成全桥电路,以检测线应变。



(a) 结构示意图



(b) 外形

图 2-23 轮辐式传感器

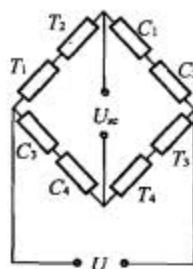
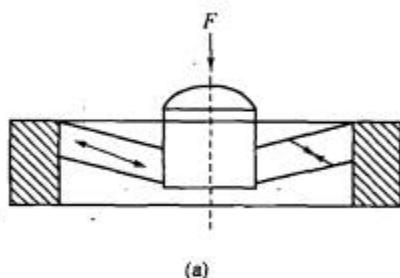
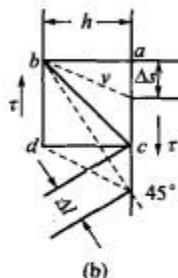


图 2-24 轮辐式传感器测量桥路



(a)



(b)

图 2-25 矩形辐条产生平行四边形的变形

在矩形条幅面上取一正方形面元,在剪切力作用下发生形变而成平行四边形,如图 2-25(b)所示。由图可得线应变为

$$\left(\frac{\Delta l}{bc}\right) = \epsilon = \frac{\Delta s}{h} \cos 45^\circ \sin 45^\circ = \frac{v_{\max}}{2} = \frac{3F}{16bhG} \quad (2-32)$$

八片应变计的连接方法如图 2-23、图 2-24 所示。当受外力作用时,使辐条对角线缩短方向粘贴的应变计 C 受压,对角线伸长方向粘贴的应变计 T 受拉。每对轮辐的受拉片和受拉片串联成一臂,受压片和受压片串联组成相邻臂。

这样有助于消除载荷偏心对输出的影响。加在轮辐和轮圈上的侧向力,若使一根轮辐受拉,其相对的一根则受压。由于两轮辐截面是相等的,其上应变计阻值变化大小相等、方向相反,每个臂的总阻值无变化,对输出无影响。全桥电路的输出为

$$U_{sc} = \frac{3KF(1+\mu)}{16bhG} \left(1 - \frac{l_j^2 + b_j^2}{6h^2}\right) U \quad (2-33)$$

式中:  $U$  为供桥电压;  $K$  为应变计灵敏度系数。

### (3) 悬臂梁式传感器

悬臂梁式传感器是一种低外形、高精度、抗偏、抗侧性能优越的称重测力传感器。采用弹性梁及电阻应变计作敏感转换元件,组成全桥电路。当垂直正压力或拉力作用在弹性梁上时,电阻应变计随金属弹性梁一起变形,其应变使电阻应变计的阻值变化,因而应变电桥

输出与拉力(或压力)成正比的电压信号。配以相应的应变仪、数字电压表或其他二次仪表,即可显示或记录重量(或力)。

悬臂梁有两种,一种为等截面梁,另一种为等强度梁。

等截面梁就是悬臂梁的横截面处处相等的梁,如图 2-26(a)所示。

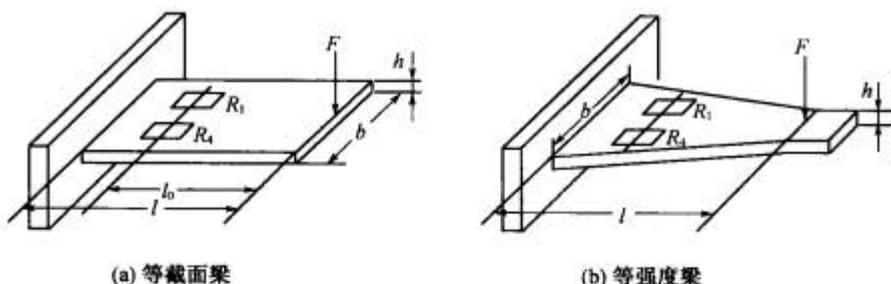


图 2-26 悬臂梁

当外力  $F$  作用在梁的自由端时,在固定端产生的应变最大,粘结应变计处的应变为

$$\epsilon = \frac{6Fl_0}{6h^2E} \quad (2-34)$$

因此,在距固定端较近的表面顺着梁的长度方向分别贴上  $R_1$ 、 $R_2$  和  $R_3$ 、 $R_4$  ( $R_2$ 、 $R_3$  在底部,图中未画出)四个电阻应变计。若  $R_1$ 、 $R_4$  受拉力,则  $R_2$ 、 $R_3$  将受到压力,两者应变相等,但极性相反。将它们组成差动全桥,则电桥的灵敏度为单臂工作时的 4 倍。

等强度梁的结构如图 2-26(b)所示,是一种特殊形式的悬臂梁。其特点是:沿梁长度方向的截面按一定规律变化,当集中力  $F$  作用在自由端时,距作用点任何距离截面上的应力相等。在自由端有力  $F$  作用时,在梁表面整个长度方向上产生大小相等的应变。应变大小可由下式:  $\epsilon = \frac{6Fl}{6h^2E}$  计算。这种梁的优点是在长度方向上粘贴应变计的要求不严格。

除等截面梁和等强度梁传感器外,还有剪切梁式传感器,两端固定梁传感器等等。图 2-27为几种梁式传感器外形。

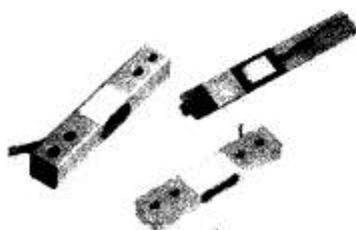


图 2-27 几种梁式传感器外形

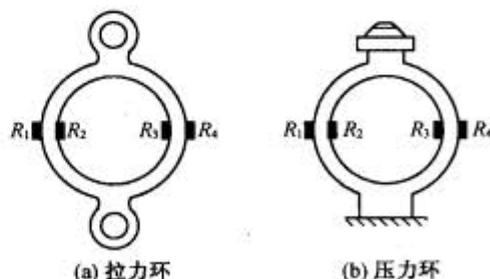


图 2-28 圆环式传感器弹性元件结构

悬臂梁式传感器一般可测 0.5 kg 以下的载荷,最小可测几十克。悬臂梁式传感器也可达到很大的量程,如钢制工字悬臂梁结构传感器量程为 0.2~30 t,精度可达 0.02% FS。悬臂梁式传感器具有结构简单,应变计容易粘贴,灵敏度高等特点。

#### (4) 环式传感器

圆环式传感器弹性元件的结构,如图2-28所示。环式常用于测几十千克以上的大载荷,与柱式相比,它的特点是应力分布变化大,且有正有负,便于接成差动电桥。

## 2. 应变式压力传感器

应变式压力传感器由电阻应变计、弹性元件、外壳及补偿电阻组成。一般用于测量较大的压力。它广泛用于测量管道内部压力,内燃机燃气的压力,压差和喷射压力,发动机和导弹试验中的脉动压力,以及各种领域中的流体压力等。

### (1) 筒式压力传感器

筒式压力传感器的弹性元件如图2-29所示,一端盲孔,另一端有法兰与被测系统连接。当应变管内腔与被测压力相通时,圆筒部分周向应变为

$$\epsilon = \frac{p(2-\mu)}{E\left(\frac{D^2}{d^2}-1\right)} \quad (2-35)$$

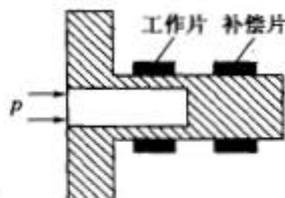


图 2-29 筒式压力传感器的弹性元件

式中:  $p$  为被测压力;  $D$  为圆筒外径;  $d$  为圆筒内径。在薄壁筒上贴有两片应变计作为工作片,实心部分贴有两片应变计作为温度补偿片。

### (2) 膜片式压力传感器

该类传感器的弹性敏感元件为一周边固定的圆形金属平膜片,如图2-30(a)所示。当膜片一面受压力  $p$  作用时,膜片的另一面(应变计粘贴面)上的径向应变  $\epsilon_r$  和切向应变  $\epsilon_t$  为

$$\begin{cases} \epsilon_r = \frac{3p}{8Eh^2}(1-\mu^2)(R^2-3x^2) \\ \epsilon_t = \frac{3p}{8Eh^2}(1-\mu^2)(R^2-x^2) \end{cases} \quad (2-36)$$

式中:  $R$  为平膜片工作部分半径;  $h$  为平膜片厚度;  $E$  为膜片的弹性模量;  $\mu$  为膜片的泊松系数;  $x$  为任意点离圆心的径向距离。

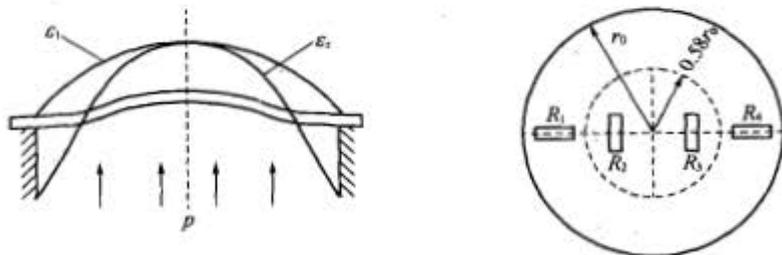


图 2-30 膜片受力时的应变分布和应变计粘贴

在膜片中心即  $x=0$  处,  $\epsilon_r$  和  $\epsilon_t$  均达到正的最大值,即

$$\epsilon_{r\max} = \epsilon_{t\max} = \frac{3p(1-\mu^2)}{8Eh^2}R^2 \quad (2-37)$$

而在膜片边缘,即  $x=R$  处,  $\epsilon_t=0$ , 而  $\epsilon_r$  达到负的最大值(最小值),即

$$\epsilon_{r\min} = -\frac{3p(1-\mu^2)}{4Eh^2}R^2 \quad (2-38)$$

### (3) 组合式压力传感器

如图 2-31 所示,组合式压力传感器通常用于测量小压力。波纹膜片、膜盒、波纹管等弹性敏感元件感受压力后,推动推杆使梁变形。电阻应变计粘贴于梁的根部感受应变。因为悬臂梁刚性较大,所以这种组合可以克服稳定性较差,滞后较大的缺点。

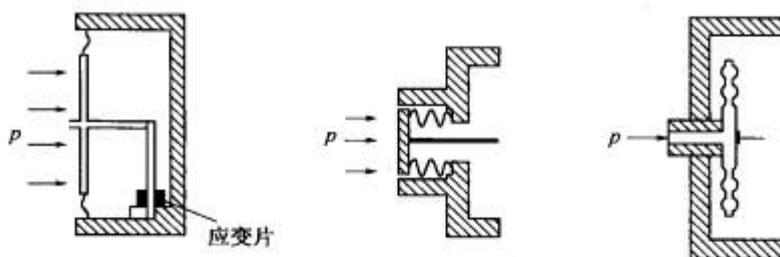


图 2-31 组合式压力传感器

### 3. 应变式加速度传感器

应变式加速度传感器如图 2-32 所示。在一悬臂梁的自由端固定一质量块。当壳体与待测物一起作加速运动时,梁在质量块惯性力的作用下发生形变,使粘贴于其上的应变计阻值变化。检测阻值的变化可求得待测物的加速度。若梁的上下各贴两片应变计,组成全桥,则灵敏度是原来的 2 倍。

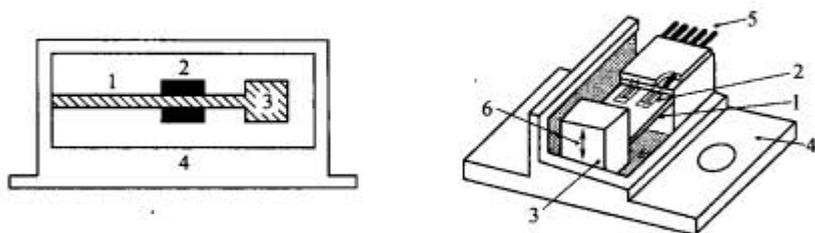


图 2-32 应变式加速度传感器

1—悬臂梁;2—应变计;3—质量块;4—壳体;5—电引线;6—运动方向

## 2.2 压阻式传感器

### 2.2.1 半导体应变计

半导体应变片的工作原理是基于半导体晶体材料的电阻率随作用应力而变化的所谓“压阻效应”。所有材料在某种程度上都呈现压阻效应,但半导体材料的这种效应特别显著,能直接反映出微小的应变。半导体压阻效应现象可解释为:由应变引起能带变形,从而使能带中的载流子迁移率及浓度也相应地发生相对变化,因此导致电阻率变化,进而引起电阻变化。

半导体应变计应用较普遍的有体型、薄膜型、扩散型、外延型等。

体型半导体应变计是将晶片按一定取向切片、研磨、再切割成细条,粘贴于基片上制作而成。几种体型半导体应变计示意图如图 2-33 所示。