第 2 章　电阻式传感器原理与应用

电阻式传感器的基本原理是将被测非电量的变化转变成电阻值的变化，通过测量电阻值达到测量非电量的目的。按其工作原理可分为变阻器式(电位器式)、电阻应变式、压阻式和热电阻式传感器。利用电阻式传感器可以测量形变、压力、力、位移、加速度和温度等非电量。本章介绍电阻应变片和压阻式传感器的原理和应用，热电阻式传感器在温度检测部分介绍。

2.1　应变式传感器

电阻应变式传感器具有悠久的历史。由于它具有结构简单、体积小、使用方便、性能稳定、可靠、灵敏度高、动态响应快、适合静态及动态测量、测量精度高等诸多优点，因此是目前应用最广泛的传感器之一。电阻应变式传感器由弹性元件和电阻应变片构成。当弹性元件感受被测物理量时，其表面产生应变，粘贴在弹性元件表面的电阻应变片的电阻值将随着弹性元件的应变而相应变化。通过测量电阻应变片的电阻值变化，可以用来测量位移、加速度、力、力矩、压力等各种参数。

2.1.1　金属电阻应变片的工作原理

1. 金属的应变效应

电阻应变片的工作原理是基于金属的应变效应。金属丝的电阻随着它所受的机械形变(拉伸或压缩) 的大小而发生相应变化的现象称为金属的电阻应变效应。

现有如图 2.1.1 所示的一根金属电阻丝，其电阻值设为 R，电阻率为 ρ，截面积为 S，长度为 l，则电阻值的表达式为

$$R = \rho \frac{l}{S} \tag{2.1.1}$$

当电阻丝受到拉力作用时将沿轴线伸长，伸长量设为 Δl，横截面积相应减小 ΔS，电阻率的变化设为 $\Delta\rho$，则电阻的相对变化量为

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta\rho}{\rho} + \frac{\Delta l}{l} - \frac{\Delta S}{S} \tag{2.1.2}$$

对于半径为 r 的圆导体，$S = \pi r^2$，$\Delta S/S = 2\Delta r/r$。又由材料力学可知，在弹性范围内，$\Delta l/l = \varepsilon$，$\Delta r/r = -\mu\varepsilon$，$\Delta\rho/\rho = \lambda\sigma = \lambda E\varepsilon$，代入式(2.1.2) 可得

$$\frac{\Delta R}{R} = (1 + 2\mu + \lambda E)\varepsilon \tag{2.1.3}$$

式中，ε 为导体的纵向应变，其数值一般很小，常以微应变度量；μ 为电阻丝材料的泊松比，一般金属 μ 为 0.3～0.5；λ 为压阻系数，与材质有关；σ 为应力值；E 为材料的弹性模量。$(1+2\mu)\varepsilon$ 表示由于几何尺寸变化而引起的电阻的相对变化量，$\lambda E\varepsilon$ 表示由于材料电阻率的变化而引起电阻的相对变化量，不同属性的导体，这两项所占的比例相差很大。

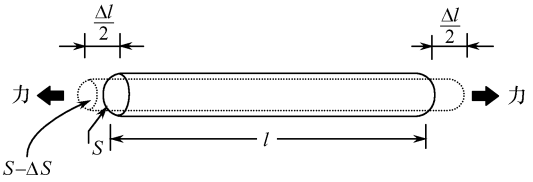


图 2.1.1　金属电阻丝应变效应

通常把单位应变所引起的电阻值相对变化称为电阻丝的灵敏系数，并用 K_0 表示，则

$$K_0 = \frac{\frac{\Delta R}{R}}{\varepsilon} = 1 + 2\mu + \lambda E \tag{2.1.4}$$

K_0 与金属材料和电阻丝形状有关。显然，K_0 越大，单位纵向应变所引起的电阻值相对变化越大，说明应变片越灵敏。大量实验证明，在电阻丝拉伸极限内，电阻的相对变化与应变成正比，即 K_0 为常数。因此，式(2.1.3) 可表示为

$$\frac{\Delta R}{R} = K_0 \varepsilon \tag{2.1.5}$$

2. 应变片的结构与种类

金属电阻应变片分为丝式应变片、箔式应变片和薄膜应变片 3 种。

金属电阻应变片的基本结构大体相同，使用最早的是电阻丝应变片，如图 2.1.2 所示。将直径约为 0.025mm 的高电阻率的电阻应变丝弯曲成栅状电阻体 2，粘贴在绝缘基片 1 和覆盖层 3 之间，由引线 4 与外部电路相连。这样构成的应变片再通过黏结剂与感受被测物理量的弹性体黏结。

对于金属电阻应变片，材料电阻率随应变产生的变化很小，可忽略，由式(2.1.3) 可得

$$\frac{\Delta R}{R} \approx (1 + 2\mu)\varepsilon = K_0 \varepsilon \tag{2.1.6}$$

由此可见，应变片电阻的相对变化与应变片纵向应变成正比，并且对同一电阻材料，$K_0 = 1 + 2\mu$ 是常数。一般用于制造电阻丝应变片的金属丝其灵敏系数多在 1.7 ～ 3.6。

箔式电阻应变片是利用照相制板或光刻腐蚀技术，将电阻箔材(厚为 1 ～ 10μm) 做在绝缘基底上，制成各种形状的应变片，如图 2.1.3 所示。它具有尺寸准确，线条均匀，适应不同的测量要求，传递试件应变性能好，横向效应小，散热性能好，允许通过的电流较大，易于批量生产等诸多优点，因此得到了广泛应用，现已基本取代了金属丝电阻应变片。

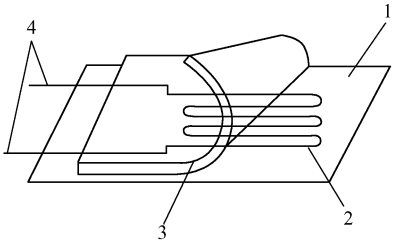


图 2.1.2　金属电阻丝应变片的基本结构

1— 基片　2— 电阻丝　3— 覆盖层　4— 引出线

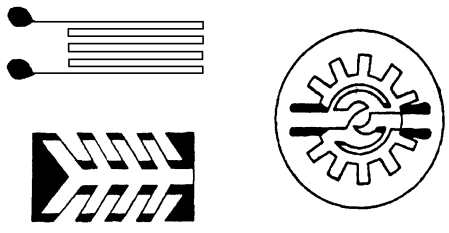


图 2.1.3　箔式电阻应变片

薄膜应变片是采用真空蒸镀、沉积或溅射的方法，将金属材料在绝缘基底上制成一定形状的厚度在 0.1μm 以下的薄膜而形成敏感栅，最后再加上保护层。它的优点是灵敏系数高，允许电流密度大，工作范围广，易实现工业化生产，是一种很有前途的新型应变片。

电阻应变片必须被粘贴在试件或弹性元件上才能工作。黏结剂和粘贴技术对测量结果有着直接的影响，因此，黏结剂的选择、粘贴技术、应变片的保护等必须认真做好。

2.1.2 电阻应变片的特性

在实际应用中，选用应变片时，要考虑应变片的性能参数，主要有：应变片的电阻值、灵敏度、允许电流和应变极限等。用于动态测量时，还应当考虑应变片本身的动态响应特性。市售金属电阻应变片的电阻值已趋于标准化，主要规格有 60Ω，120Ω，350Ω，600Ω 和 1000Ω 等，其中 120Ω 的用得最多。

1. 应变片的灵敏系数

将电阻应变丝做成电阻应变片后，其电阻的应变特性与金属单丝时是不同的，因此必须通过实验重新测定。此实验必须按规定的统一标准进行。实验证明，$\Delta R/R$ 与 ε 的关系在很大范围内仍然有很好的线性关系，即

$$\frac{\Delta R}{R} = K\varepsilon \quad 或 \quad K = \frac{\frac{\Delta R}{R}}{\varepsilon} \tag{2.1.7}$$

式中，K 称为电阻应变片的灵敏系数。

实验表明，应变片的灵敏系数 K 恒小于电阻丝的灵敏系数 K_0，究其原因，主要是在应变片中存在着所谓的横向效应。应变片的灵敏系数 K 是通过抽样测定得到的，产品包装上标明的“标称灵敏系数”是出厂时测定的该批产品的平均灵敏系数值。

2. 横向效应

应变片的敏感栅除了有纵向丝栅外，还有圆弧形或直线形的横栅。横栅既对应变片轴线方向的应变敏感，又对垂直于轴线方向的横向应变敏感。当电阻应变片粘贴在一维拉力状态下的试件上时，应变片的纵向丝栅因发生纵向拉应变 ε_x，使其电阻值增加，而应变片的横栅因同时感受纵向拉应变 ε_x 和横向压应变 ε_y 使其电阻值减小，因此，应变片的横栅部分将纵向丝栅部分的电阻变化抵消了一部分，从而降低了整个电阻应变片的灵敏度。这就是应变片的横向效应。

横向效应给测量带来了误差，其大小与敏感栅的构造及尺寸有关。敏感栅的纵栅越窄、越长，而横栅越宽、越短，则横向效应的影响越小。

3. 温度误差及其补偿

应变片由于温度变化所引起的电阻变化与试件（弹性元件）应变所造成的电阻变化几乎有相同的数量级，如果不采取必要的措施克服温度的影响，测量精度将无法保证。下面分析产生温度误差的原因及补偿方法。

(1) 温度误差

由于测量现场环境温度改变而给测量带来的附加误差，称为应变片的温度误差。产生温度误差的主要因素有以下两点。

① 电阻温度系数的影响。敏感栅的电阻丝阻值随温度变化的关系可用下式表示

$$R_T = R_0(1+\alpha\Delta T) \tag{2.1.8}$$

式中，R_T 是温度为 T（℃）时的电阻值；R_0 是温度为 T_0（℃）时的电阻值；Δt 为温度变化值，$\Delta T = T - T_0$；α 为敏感栅材料的电阻温度系数。

当温度变化 ΔT 时，电阻丝电阻的变化值为

$$\Delta R_{T\alpha} = R_T - R_0 = R_0\alpha\Delta T \tag{2.1.9}$$

② 试件材料和电阻丝材料的线膨胀系数的影响。当试件与电阻丝材料的线膨胀系数相同时，不论环境温度如何变化，电阻丝的变形仍和自由状态一样，不会产生附加变形。

当试件与电阻丝材料的线膨胀系数不同时，由于环境温度的变化，电阻丝会产生附加变形，从而产生附加电阻。

设粘贴在试件上的应变丝的长度为 l_0，应变丝和试件的线膨胀系数分别为 β_s 和 β_g，当温度变化 ΔT 时，应变丝受热膨胀至 l_{T1}，而应变丝 l_0 下的试件伸长为 l_{T2}，则应变丝和试件的膨胀量分别为

$$\Delta l_{T1} = l_{T1} - l_0 = l_0\beta_s\Delta T \tag{2.1.10}$$

$$\Delta l_{T2} = l_{T2} - l_0 = l_0\beta_g\Delta T \tag{2.1.11}$$

由于应变丝和试件是黏结在一起的，若 $\beta_s < \beta_g$，则应变丝被迫从 Δl_{T1} 拉长至 Δl_{T2}，从而使应变丝产生附加变形 $\Delta l_{T\beta}$、附加应变 $\varepsilon_{T\beta}$ 和附加电阻变化 $\Delta R_{T\beta}$，其表达式分别为

$$\Delta l_{T\beta} = \Delta l_{T2} - \Delta l_{T1} = l_0(\beta_g - \beta_s)\Delta T \tag{2.1.12}$$

$$\varepsilon_{T\beta} = \frac{\Delta l_{T\beta}}{l_0} = (\beta_g - \beta_s)\Delta T \tag{2.1.13}$$

$$\Delta R_{T\beta} = R_0 K_0 \varepsilon_{T\beta} = R_0 K_0(\beta_g - \beta_s)\Delta T \tag{2.1.14}$$

由式(2.1.9) 和式(2.1.14)，可得由于温度变化而引起的总电阻变化为

$$\Delta R_T = \Delta R_{T\alpha} + \Delta R_{T\beta} = R_0\alpha\Delta T + R_0 K_0(\beta_g - \beta_s)\Delta T \tag{2.1.15}$$

总附加虚假应变量为

$$\varepsilon_T = \frac{\Delta R_T/R_0}{K_0} = \frac{\alpha\Delta T}{K_0} + (\beta_g - \beta_s)\Delta T \tag{2.1.16}$$

由式(2.1.16) 可知，由于温度变化而引起的附加电阻给测量带来误差。该误差除与环境温度有关外，还与应变片本身的性能参数(K_0，α，β_s) 及试件的线膨胀系数 β_g 有关。

(2) 温度补偿方法

电阻应变片的温度补偿方法通常有电桥补偿和应变片自补偿两大类。

① 电桥补偿法，也称补偿片法，其原理如图 2.1.4 所示。电桥输出电压 U_o 与桥臂参数的关系为

$$U_o = A(R_1R_4 - R_BR_3) \tag{2.1.17}$$

式中，A 为由桥臂电阻和电源电压决定的常数。

由式(2.1.17) 可知，当 R_3 和 R_4 为常数时，R_1 和 R_B 对电桥输出电压 U_o 的作用方向相反。利用这一基本关系可实现对温度的补偿。

测量应变时，工作应变片 R_1 粘贴在被测试件表面，补偿应变片 R_B 粘贴在与被测试件材料完全相同的补偿块上，置于试件附近，且仅工作应变片承受应变。

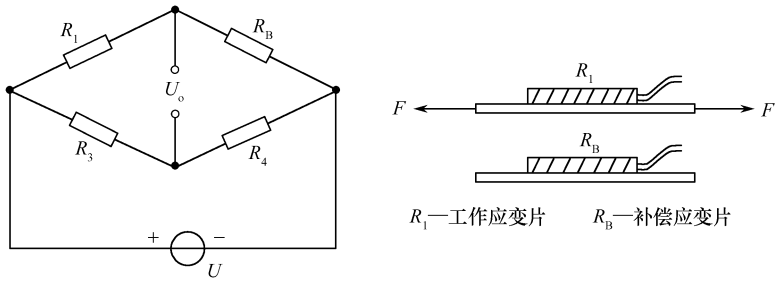


图 2.1.4　电桥补偿法

当被测试件不承受应变时，R_1 和 R_B 处于同一环境温度为 T(℃) 的温度场中，调整电桥参数使之达到平衡，则有

$$U_o = A(R_1R_4 - R_BR_3) = 0 \tag{2.1.18}$$

工程上，一般按 $R_1 = R_B = R_3 = R_4$ 选取桥臂电阻。

当温度升高或降低 ΔT 时，两个应变片因温度变化而引起的电阻变化量相同，电桥仍处于平衡状态，即

$$U_o = A[(R_1 + \Delta R_{1T})R_4 - (R_B + \Delta R_{BT})R_3] = 0 \tag{2.1.19}$$

若此时被测试件有应变 ε 的作用，则工作应变片电阻 R_1 又有新的增量 $\Delta R_1 = R_1K\varepsilon$，而补偿片因不承受应变，故不产生新的增量，此时电桥的输出电压为

$$U_o = AR_1R_4K\varepsilon \tag{2.1.20}$$

由式(2.1.20) 可知，电桥输出电压 U_o 仅与被测试件的应变 ε 有关，而与环境温度无关。

电桥补偿法的优点是简单、方便，在常温下补偿效果较好，其缺点是在温度变化梯度较大的条件下，很难做到工作片与补偿片处于温度完全一致的情况，因而影响补偿效果。

② 应变片的自补偿法。粘贴在被测部位上的是一种特殊应变片，当温度变化时，产生的附加应变为零或相互抵消，这种应变片称为温度自补偿应变片。利用这种应变片实现温度补偿的方法称为应变片自补偿法。下面介绍两种自补偿应变片。

● 选择式自补偿应变片

由式(2.1.16) 可知，实现温度补偿的条件为

$$\varepsilon_T = \frac{\alpha\Delta T}{K_0} + (\beta_g - \beta_s)\Delta T = 0$$

当被测试件的线膨胀系数 β_g 已知时，通过选择敏感栅材料，使下式成立

$$\alpha = -K_0(\beta_g - \beta_s) \tag{2.1.21}$$

即可达到温度自补偿的目的。

● 双金属敏感栅自补偿应变片

这种应变片也称组合式自补偿应变片。它是利用两种电阻丝材料的电阻温度系数不同(一个为正，一个为负) 的特性，将二者串联组成敏感栅，如图 2.1.5 所示。若两段敏感栅 R_1 和 R_2 由于温度变化而产生的电阻变化为 ΔR_{1T} 和 ΔR_{2T}，其大小相等而符号相反，则可在一定的温度

范围内和一定的试件材料上实现温度补偿。两段敏感栅的电阻 R_1 与 R_2 的大小可按下式选择

$$\frac{R_1}{R_2}=-\frac{\Delta R_{2T}/R_2}{\Delta R_{1T}/R_1}=-\frac{\alpha_2+K_2(\beta_g-\beta_2)}{\alpha_1+K_1(\beta_g-\beta_1)} \tag{2.1.22}$$

这种补偿效果比前者好，在工作温度范围内通常可达到每摄氏度 $\pm 0.14\times10^{-6}\varepsilon$。

③ 热敏电阻补偿法。如图 2.1.6 所示，图中的热敏电阻 R_t 处在与应变片相同的温度条件下，当电桥的灵敏度随温度升高而下降时，热敏电阻 R_t 的阻值也下降，使电桥的输入电压随温度升高而增加，从而提高电桥的输出，补偿因应变片温度变化引起的输出下降。适当选择分流电阻 R_5 的值，可以得到良好的补偿。

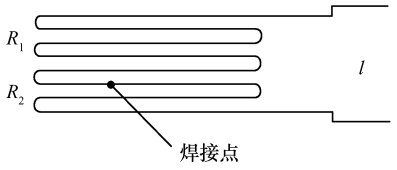


图 2.1.5　双金属丝栅法

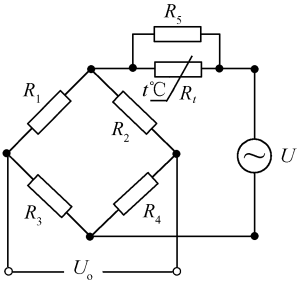


图 2.1.6　热敏电阻补偿法

2.1.3　电阻应变片的测量电路

应变片可以将应变转换为电阻的变化，为了显示与记录应变的大小，还要把电阻的变化再转换为电压或电流的变化，因此，需要有专用的测量电路，通常采用直流电桥和交流电桥。为方便起见，下面仅对直流不平衡电桥进行介绍。

1. 电桥电路的工作原理

由于应变片电桥电路的输出信号一般比较微弱，所以目前大部分电阻应变式传感器的电桥输出端与直流放大器相连，如图 2.1.7 所示。

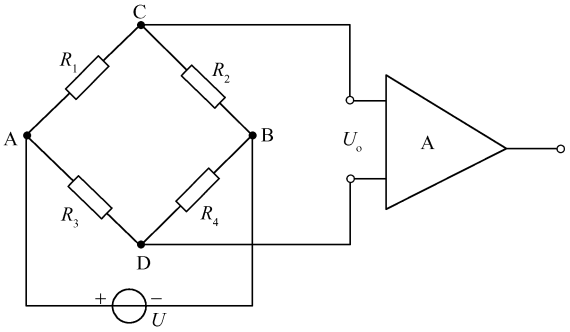


图 2.1.7　直流电桥

设电桥各臂的电阻分别为 R_1，R_2，R_3 和 R_4，它们可以全部或部分是应变片。由于直流放大器的输入电阻比电桥电阻大得多，因此可将电桥输出端看成开路，这种电桥称为“电压输出桥”，输出电压 U_o 为

$$U_o=U\frac{R_1R_4-R_2R_3}{(R_1+R_2)(R_3+R_4)} \tag{2.1.23}$$

当 $R_1R_4 = R_2R_3$ 时，电桥处于平衡状态，输出电压 $U_o = 0$。若电桥各臂均有相应的电阻增量 ΔR_1，ΔR_2，ΔR_3 和 ΔR_4，则由式(2.1.23)得

$$U_o = U\frac{(R_1+\Delta R_1)(R_4+\Delta R_4)-(R_2+\Delta R_2)(R_3+\Delta R_3)}{(R_1+\Delta R_1+R_2+\Delta R_2)(R_3+\Delta R_3+R_4+\Delta R_4)} \tag{2.1.24}$$

实际使用中往往采用等臂电桥，即 $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$。此时式(2.1.24)可写为

$$U_o = U\frac{R(\Delta R_1-\Delta R_2-\Delta R_3+\Delta R_4)+\Delta R_1\Delta R_4-\Delta R_2\Delta R_3}{(2R+\Delta R_1+\Delta R_2)(2R+\Delta R_3+\Delta R_4)} \tag{2.1.25}$$

当 $\Delta R_i \ll R(i=1,2,3,4)$ 时，略去上式中的高阶微小量，则

$$U_o = \frac{U}{4}\left(\frac{\Delta R_1}{R}-\frac{\Delta R_2}{R}-\frac{\Delta R_3}{R}+\frac{\Delta R_4}{R}\right) \tag{2.1.26}$$

利用式(2.1.7)，式(2.1.26)可写为

$$U_o = \frac{UK}{4}(\varepsilon_1-\varepsilon_2-\varepsilon_3+\varepsilon_4) \tag{2.1.27}$$

式(2.1.27)表明：

① $\Delta R_i \ll R$ 时，电桥的输出电压与应变成线性关系。

② 若相邻两桥臂的应变极性一致，即同为拉应变或压应变时，输出电压为两者之差；若相邻两桥臂的应变极性不同，则输出电压为两者之和。

③ 若相对两桥臂应变的极性一致，输出电压为两者之和，反之则为两者之差。

④ 电桥供电电压 U 越高，输出电压 U_o 越大。但是，当 U 大时，电阻应变片通过的电流也大，若超过电阻应变片所允许通过的最大工作电流，传感器就会出现蠕变和零漂。

⑤ 增大电阻应变片的灵敏系数 K，可提高电桥的输出电压。

合理地利用上述特性，可以进行温度补偿和提高传感器的测量灵敏度。如安装敏感元件及接成电桥时，应当使得应变 ε_1，ε_4 与 ε_2，ε_3 的符号相反，这样便可增大电桥的输出电压。

2. 非线性误差及其补偿

式(2.1.27)的线性关系是在应变片的参数变化很小，即 $\Delta R_i \ll R$ 的情况下得出的。若应变片所承受的应变太大，则上述假设不成立，电桥的输出电压与应变之间成非线性关系。在这种情况下，用按线性关系刻度的仪表进行测量必然带来非线性误差。

当考虑电桥单臂工作时，即 R_1 桥臂变化 ΔR，由式(2.1.26)得理想的线性关系为

$$U_o' = \frac{U}{4}\cdot\frac{\Delta R}{R} \tag{2.1.28}$$

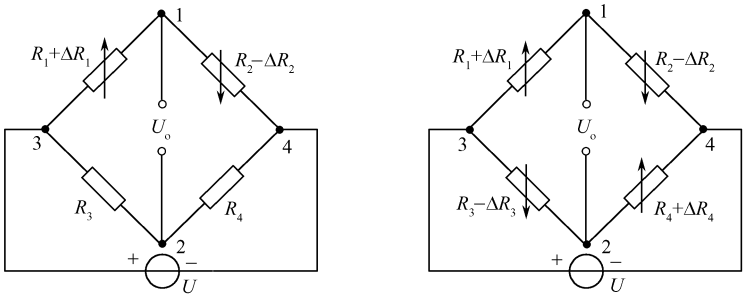
而由式(2.1.25)得电桥的实际输出电压为

$$U_o = U\frac{\Delta R}{4R+2\Delta R} = \frac{U}{4}\cdot\frac{\Delta R}{R}\left(1+\frac{1}{2}\cdot\frac{\Delta R}{R}\right)^{-1} \tag{2.1.29}$$

则电桥的相对非线性误差为

$$\begin{aligned}\gamma_L &= \frac{U_o}{U_o'}-1 = \left(1+\frac{1}{2}\cdot\frac{\Delta R}{R}\right)^{-1}-1\\ &\approx 1-\frac{1}{2}\cdot\frac{\Delta R}{R}-1 = -\frac{1}{2}\cdot\frac{\Delta R}{R} = -\frac{1}{2}K\varepsilon\end{aligned} \tag{2.1.30}$$

由上式可知，K_ε 越大，γ_L 也越大。为了消除非线性误差，在实际应用中，常采用半桥差动或全桥差动电路，如图 2.1.8 所示，以改善非线性误差和提高输出灵敏度。



(a) 半桥差动电路　　(b) 全桥差动电路

图 2.1.8　差动电桥

图 2.1.8(a) 为半桥差动电路，在传感器中经常使用这种接法。粘贴应变片时，使两个应变片一个受拉，一个受压，应变符号相反，工作时将两个应变片接入电桥的相邻两臂。设电桥在初始时是平衡的，且为等臂电桥，考虑到 $|\Delta R_1|=|-\Delta R_2|=\Delta R$，则由式(2.1.25) 得半桥差动电路的输出电压为

$$U_o=\frac{1}{2}U\frac{\Delta R}{R} \tag{2.1.31}$$

由上式可见，半桥差动电路不仅能消除非线性误差，而且还使电桥的输出灵敏度比单臂工作时提高了一倍，同时还能起温度补偿作用。

如果按图 2.1.8(b) 所示构成全桥差动电路，同样考虑到 $|\Delta R_1|=|-\Delta R_2|=|-\Delta R_3|=|\Delta R_4|=\Delta R$，则由式(2.1.25) 得全桥差动电路的输出电压为

$$U_o=U\frac{\Delta R}{R} \tag{2.1.32}$$

可见，全桥的电压灵敏度是单臂工作时的灵敏度的 4 倍，非线性误差也得以消除，同时还具有温度补偿的作用，该电路也得到了广泛的应用。

2.1.4　电阻应变式传感器的应用

金属应变片除了测量试件应力、应变外，还制造成多种应变式传感器用来测量力、扭矩、位移、压力、加速度等其他物理量。

应变式传感器由弹性元件和粘贴于其上的应变片构成。弹性元件将获得与被测量成正比的应变，再通过应变片转换为电阻的变化后输出。下面介绍其典型应用。

1. 应变式力传感器

被测量为荷重或力的应变式传感器，统称为应变式力传感器，是工业测量中用得较多的一种传感器，传感器量程从几克到几百吨，主要用作各种电子秤与材料试验机的测力元件、发动机的推力测试、水坝坝体承载状况监测等。

应变式力传感器要求有较高的灵敏度和稳定性，当传感器受到侧向作用力或力的作用点发生轻微变化时，不应对输出有明显的影响。

应变式力传感器的弹性元件有柱式、悬臂式、环式、框式等数种。

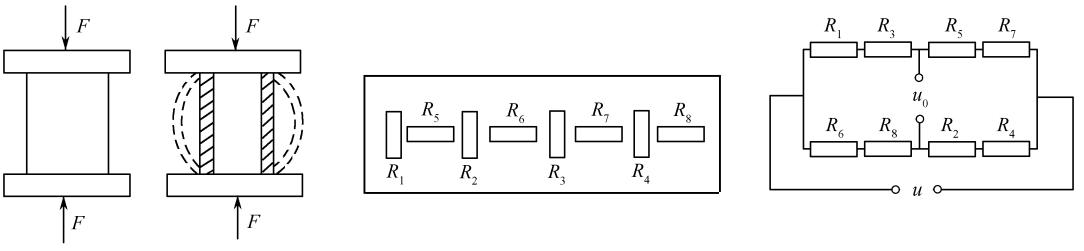
(1) 柱(筒)式力传感器

圆柱式力传感器的弹性元件分为实心和空心两种,如图 2.1.9 所示。实心圆柱可以承受较大的负荷,在弹性范围内,应力与应变成正比关系,即

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} = \frac{\sigma}{E} = \frac{F}{SE} \tag{2.1.33}$$

式中,F 为作用在弹性元件上的集中力;S 为圆柱的横截面积;E 为弹性元件的弹性模量。

空心圆筒多用于小集中力的测量。应变片粘贴在弹性体外臂应力分布均匀的中间部分,对称地粘贴多片,电桥接线时应尽量减小载荷偏心和弯矩的影响,贴片在圆柱面上的位置及其在桥路中的连接如图 2.1.9(c),(d) 所示,R_1 和 R_3 串接,R_2 和 R_4 串接,并置于桥路对臂上以减小弯矩影响,横向贴片做温度补偿用。



(a) 实心圆柱　(b) 空心圆筒　(c) 圆柱面展开图　(d) 桥路连接图

图 2.1.9　圆柱(筒)式力传感器的应变弹性体结构图

(2) 梁式力传感器

① 等截面悬臂梁应变式力传感器,其结构如图 2.1.10 所示,弹性元件为一端固定的悬臂梁,力作用在自由端。在梁固定端附近的上、下表面顺着 l 的方向各粘贴两片电阻应变片。此时,若 R_1 和 R_4 受拉,则 R_2 和 R_3 受压,两者发生极性相反的等量应变,4 个电阻应变片组成如图 2.1.13 所示的全桥测量电路。粘贴应变片处的应变为

$$\varepsilon = \frac{6lF}{bh^2E} \tag{2.1.34}$$

由梁式弹性元件制作的力传感器适于测量 5000 N 以下的载荷,最小可测零点几牛顿的力。这种传感器具有结构简单、加工容易、应变片容易粘贴、灵敏度高等特点。

② 等强度悬臂梁应变式力传感器,应变片在悬臂梁上的粘贴位置如图 2.1.11 所示,应变片的组桥方式与 ① 相同。当在自由端加上作用力时,在梁上各处产生的应变大小相等。因此,应变片沿纵向的粘贴位置误差为零,但上、下片对应位置要求仍然严格。梁上各点的应变为

$$\varepsilon = \frac{6lF}{b_0h^2E} \tag{2.1.35}$$

③ 双端固定梁应变式力传感器,如图 2.1.12 所示,梁的两端都固定,中间加载荷,应变片粘贴在中间位置,并按图 2.1.13 组成全桥。

双端固定梁的应变为

$$\varepsilon = \frac{3lF}{4bh^2E} \tag{2.1.36}$$

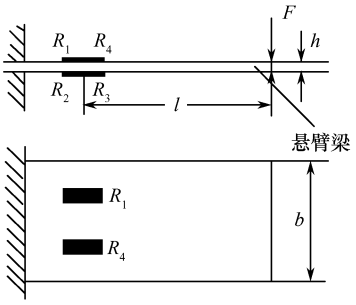


图 2.1.10　等截面梁应变式力传感器原理图

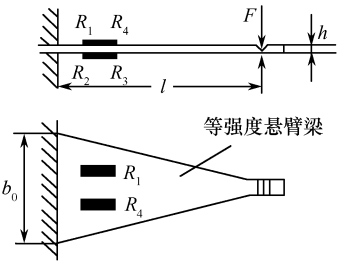


图 2.1.11　等强度梁应变式力传感器原理图

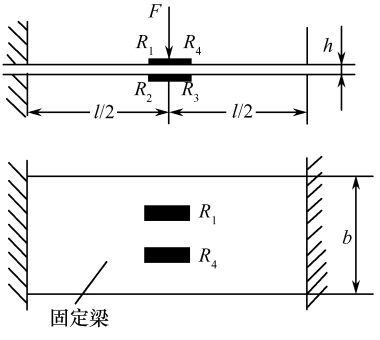


图 2.1.12　双端固定梁应变式力传感器原理图

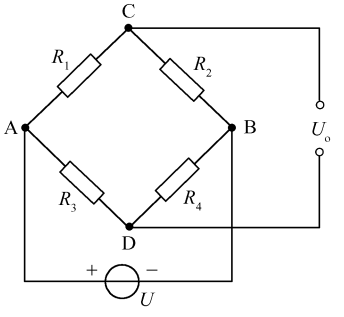


图 2.1.13　全桥电路

(3) 薄壁圆环式力传感器

圆环式弹性元件的结构如图 2.1.14 所示,其特点是在外力作用下,各点的应力差别较大。应变片按图示位置粘贴,并按图 2.1.13 组成全桥。贴片处的应变值为

$$\varepsilon = \pm \frac{3F\left[R - \frac{h}{2}\right]}{bh^2E}\left(1 - \frac{2}{\pi}\right) \tag{2.1.37}$$

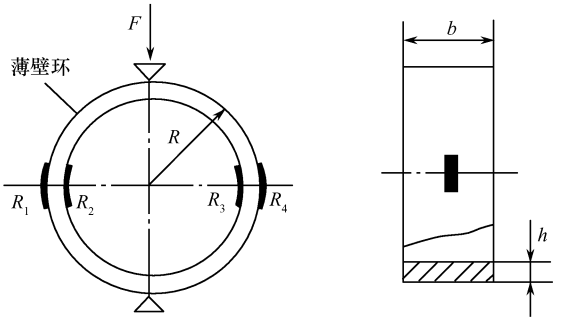


图 2.1.14　薄壁圆环式应变式力传感器原理图

2. 应变式压力传感器

应变式压力传感器主要用于液体、气体动态和静态压力的测量,如内燃机管道和动力设备管道的进气口、出气口的压力测量,以及发动机喷口的压力,枪、炮管内部压力的测量等。这类传感器主要采用膜片式、筒式、组合式的弹性元件。

(1) 膜片式压力传感器

图 2.1.15 是膜片式压力传感器的结构及应力分布图，应变片贴在膜片内壁，在压力 P 的作用下，膜片产生径向应变 ε_r 和切向应变 ε_t，表达式分别为

$$\varepsilon_r = \frac{3P(1-\mu^2)(R^2-3x^2)}{8h^2E} \tag{2.1.38}$$

$$\varepsilon_t = \frac{3P(1-\mu^2)(R^2-x^2)}{8h^2E} \tag{2.1.39}$$

式中，P 为膜片上均匀分布的压力(Pa)；R 和 h 为膜片的半径和厚度(m)；x 为离圆心的径向距离(m)。

由应力分布图可知，膜片弹性元件承受压力 P 时，其应变变化曲线的特点为：当 $x=0$ 时，$\varepsilon_{rmax}=\varepsilon_{tmax}$；当 $x=R$ 时，$\varepsilon_t=0$，$\varepsilon_r=-2\varepsilon_{rmax}$。

根据以上特点，一般在平膜片圆心处切向粘贴 R_2 和 R_3 两个应变片，在边缘处沿径向粘贴 R_1 和 R_4 两个应变片，接成全桥测量电路，以提高灵敏度和进行温度补偿。

(2) 筒式压力传感器

当被测压力较大时，多采用筒式压力传感器，如图 2.1.16 所示。圆柱体内有一盲孔，一端有法兰盘与被测系统连接。被测压力 P 进入应变筒的腔内，使筒发生变形。圆筒外表面上的环向应变(沿着圆周线)为

$$\varepsilon = \frac{P(2-\mu)}{E(n^2-1)} \tag{2.1.40}$$

式中，$n=D_0/D$。

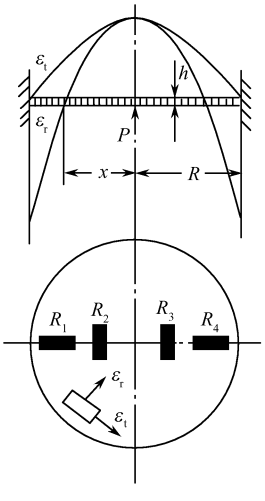


图 2.1.15　膜片式压力传感器

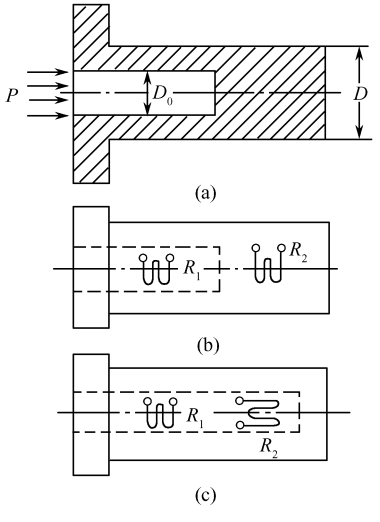


图 2.1.16　筒式压力传感器

对于薄壁筒，可用下式计算

$$\varepsilon = \frac{PD}{2hE}(1-0.5\mu) \tag{2.1.41}$$

式中，$h=(D-D_0)/2$。

图 2.1.16 (b) 中在盲孔的外端部有一个实心部分，制作传感器时，在筒壁和端部沿圆周方向各粘贴一片应变片，端部在筒内有压力时不产生变形，只做温度补偿用。图 2.1.16 (c) 中没有端部，则 R_1 和 R_2 垂直粘贴，一沿圆周，一沿筒长，沿筒长方向的 R_2 用作温度补偿。

这类传感器可用来测量机床液压系统的压力($10^6 \sim 10^7$Pa)，也可用来测量枪、炮的膛内压力(10^8Pa)，其动态特性和灵敏度主要由材料的 E 值和尺寸决定。

(3) 组合式压力传感器

组合式压力传感器的压力敏感元件为膜片或膜盒、波纹管、弹簧管等，应变片粘贴在悬臂梁上。利用弹性元件先将压力转换成力，然后再转换成应变，从而使应变片电阻发生变化，如图 2.1.17 所示。通常取悬臂梁的刚度比压力敏感元件的刚度高得多，以抑制后者的不稳定性和滞后等对测量的影响。这种传感器通常用于测量小压力，其缺点是固有频率低，不适于测量瞬态过程。

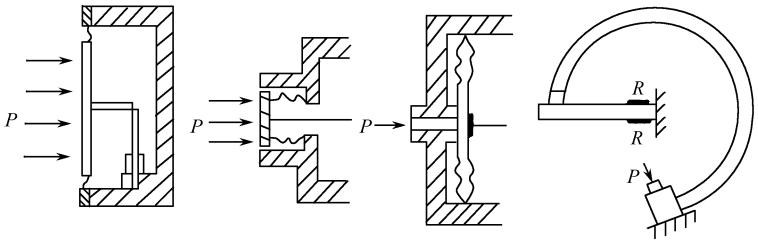


图 2.1.17　组合式压力传感器

3. 应变式容器内液体重量(或液位) 传感器

图 2.1.18 是插入式测量容器内液体重量的传感器示意图。该传感器有一根传压杆，上端安装腰形筒微压传感器，下端安装感压膜，在三者空腔内充满传压介质并密封。传压介质的压力和被测溶液的压力作用在感压膜的内、外侧，由于空腔内传压介质的高度比被测溶液的高度高，因而腰形筒微压传感器处于负压状态。为了提高测量的灵敏度，共安装了两只性能完全相同的微压传感器。

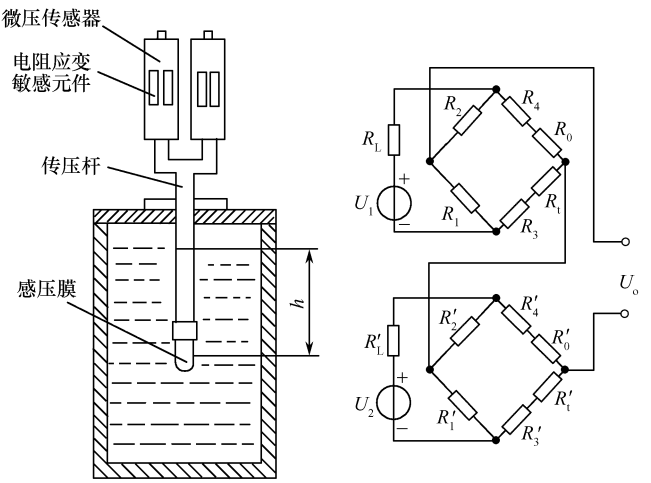


图 2.1.18　插入式液体重量(或液位) 传感器

当容器中的溶液多时，感压膜感受的压力就大。将两只微压传感器的电桥接成如图 2.1.18 所示的正向串接的双电桥电路，则输出电压为两个电桥输出电压之和，即

$$U_o = U_{1o} + U_{2o} = (A_1 + A_2)\rho gh \tag{2.1.42}$$

式中，A_1，A_2 为传感器的传输系数；g 为重力加速度(m/s^2)；ρ 为被测溶液的密度(kg/m^3)。

如果被测溶液的密度不变，当容器中溶液的液位 h 变化时，则输出电压也变化，这样就成为液位传感器。

又由于 ρgh 表征着感压膜上面液体的压强，则对于等截面的柱形容器，有

$$\rho gh = \frac{G}{S} \tag{2.1.43}$$

式中，G 为容器内感压膜上面溶液的重量(N)；S 为柱形容器的截面积(m^2)。

将式(2.1.42) 与式(2.1.43) 联立，得到容器内感压膜上面溶液重量与电桥输出电压之间的关系式为

$$U_o = \frac{(A_1 + A_2)G}{S} \tag{2.1.44}$$

式(2.1.44) 表明，电桥的输出电压与柱形容器内感压膜上面溶液的重量成线性关系，因此，可以利用插入式传感器测量容器内存储的溶液重量。

4. 应变式加速度传感器

应变式加速度传感器主要用于物体加速度的测量。其基本工作原理是：物体运动的加速度 a 与作用在它上面的力 F 成正比，与物体的质量 m 成反比，即 $a = F / m$ 。

图 2.1.19 所示为应变片式加速度传感器的结构示意图，图中 1 是等强度梁，自由端安装质量块 2，另一端固定在壳体 3 上。等强度梁上粘贴 4 个电阻应变片 4，并组成全桥测量电路。为了调节振动系统阻尼系数，在壳体内充满了硅油。

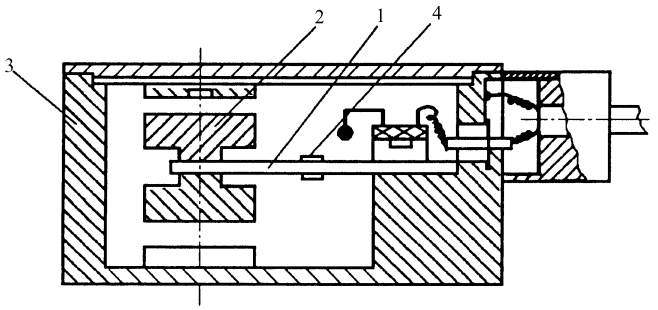


图 2.1.19　应变式加速度传感器结构示意图

1— 等强度梁　2— 质量块　3— 壳体　4— 电阻应变片

测量时，将传感器壳体与被测对象刚性连接，当被测物体以加速度 a 运动时，质量块受到一个与加速度方向相反的惯性力作用，使悬臂梁变形，该变形被粘贴在其上的应变片感受到并随之产生应变，从而使应变片的电阻发生变化，桥路输出不平衡电压，即可得出加速度 a 值的大小。

这种传感器在低频(10 ～ 60Hz) 振动测量中得到广泛的应用，但不适用于频率较高的振动和冲击。

5. 应变式扭矩传感器

扭矩与力矩一样，是用作用力 F 与作用距离 l 的乘积表示的，公式为

$$M = Fl \tag{2.1.45}$$

式中，M 为扭矩(N·m)；F 为作用力(N)；l 为作用距离(m)。

扭矩是各类工作机械传动轴的基本载荷形式。在设计机械传动系统的各零部件时，必须满足强度或刚度的要求。另外在确定原动机时，为了合理选择容量，也需要测量扭矩，特别是运行过程中传动轴上所受的扭矩。因此，转轴上扭矩的测量具有重要意义。

测量扭矩的方法是把转轴上的扭矩转化为与其有一定函数关系的物理量，然后再转化成相应的电量。

转轴上受扭矩作用后，在其表面产生剪切应变，这一应变可用电阻应变片测量。应变片可以粘贴在需测扭矩的传动轴上，也可贴在另外专用的传动轴上，制成一个应变式扭矩传感器。

由材料力学理论分析可知，轴体在扭矩 M 作用下，表面沿着与轴线成 45° 和 135° 斜角方向产生主应力，如图 2.1.20 所示。这一应力所对应的主应变分别为

$$\varepsilon_1 = -\varepsilon_3 = \left(\frac{1+\mu}{E}\right)\frac{M}{W} = KM \tag{2.1.46}$$

式中，E 为轴的弹性模量；μ 为轴的泊松比；ε_1，ε_3 为与主应力 σ_1，σ_3 对应的主应变；W 为轴的扭转断面系数。

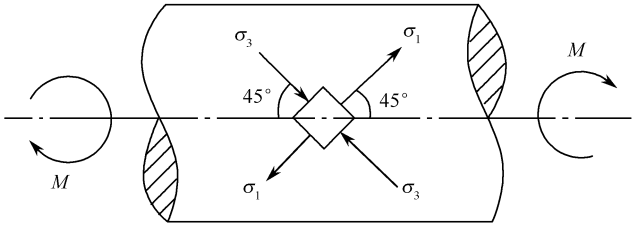


图 2.1.20　轴表面应力应变示意图

如果在主应变 ε_1，ε_3 方向上贴以应变片，测出主应变即可间接测出轴上所受的扭矩 M。

图 2.1.21 所示为一种应变式扭矩传感器。一般圆轴多是受拉、弯、扭的联合作用，为了测扭矩，要设法消除弯和拉的影响。在转轴的适当部位按图 2.1.22 粘贴 4 片应变片，进行全桥连接。若能保证应变片粘贴位置准确、应变片特性匹配，则这种装置具有良好的温度补偿和消除弯曲应力、轴向应力影响的功能。4 个应变片必须准确与转轴线成 45° 粘贴，而且应变片 1 和 3，2 和 4 都必须在直径方向上相对粘贴。采用特殊形式的应变花可以简化粘贴并易于获得准确的位置。集流环是将转动中轴体上的电信号与固定测量电路装置相联系的专用部件。4 个集流环中的两个用于接入激励电压，两个用于输出信号。集流环按工作原理分有电刷－滑环式、水银式和感应式几种。集流环的转动部分和固定部分的接触器电阻应当变化很小，如果接触电阻不稳定，则这种变化会作为较大的噪声信号被记录下来，产生测量误差。为了避免集流环带来的弊端，国内已研制出遥测应变仪，它是在应变电桥后，将电桥输出电压通过压控振荡器转换为矩形波频率变化的信号，从而将应变信号载于脉冲波上，这一频率调制信号经发射片耦合到固定的接收片上，实现信号的无接触传输。接收的信号经鉴频电路将频率调制信号复原为与原应变信号成比例的电压信号，然后再记录、显示。

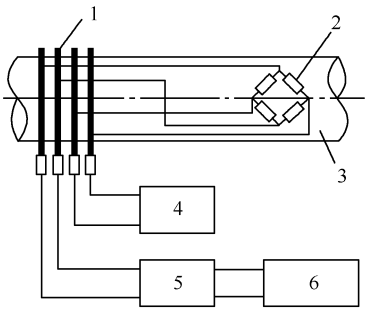


图 2.1.21　电阻应变式扭矩传感器

1— 集流环　2— 应变片　3— 回转轴

4— 振荡器　5— 放大器　6— 显示记录器

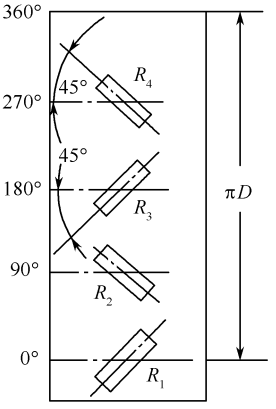


图 2.1.22　应变式粘贴方法

图 2.1.23 所示为一带滑环的扭矩传感器。在测量轴上贴有与轴成 45° 角的应变片。轴一端支撑于壳体上，通过滚珠轴承来减小因摩擦产生的测量误差。轴上装有风扇，起散热作用。应变片电路与静止壳体的连接是经滑环和可移动电刷组来完成的。

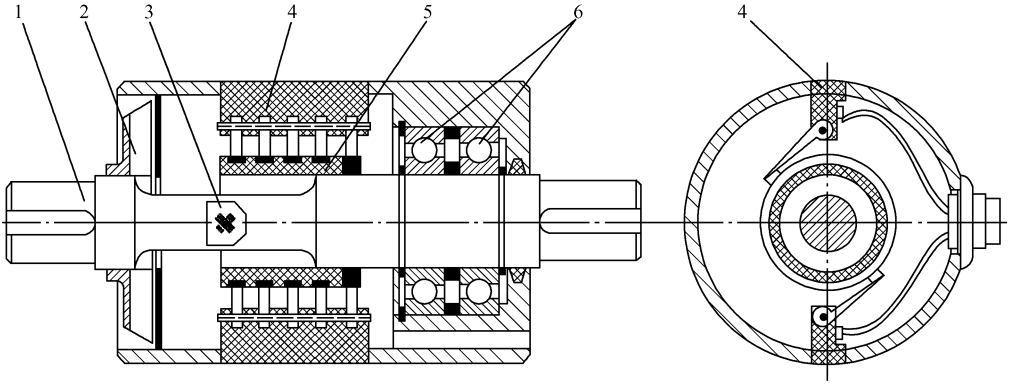


图 2.1.23　滑环式扭矩传感器

1— 测量轴　2— 风扇　3— 应变片　4— 电刷组　5— 滑环组　6— 轴承

6. 应变式张力传感器

将应变片粘贴于悬臂梁上，可用来检测张力。图 2.1.24 为纱线张力检测装置，检测辊 4 通过连杆 5 与悬臂梁 2 的自由端相连，连杆 5 同阻尼器 6 的活塞相连，纱线 7 通过导线辊 3 与检测辊 4 接触。当纱线张力变化时，悬臂梁随之变形，使应变片 1 的阻值发生变化，通过电桥可将其转换为电压的变化。

必须指出的是，电阻应变片测出的是弹性元件上某处的应变，而不是该处的应力、力或位移。只有通过换算或标定，才能得到相应的应力、力或位移量。有关换算关系可查阅相关资料。

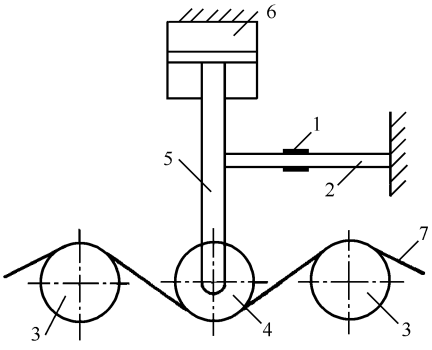


图 2.1.24　纱线张力检测装置

1— 应变片　2— 悬臂梁　3— 导线辊　4— 检测辊

5— 连杆　6— 阻尼器　7— 纱线

2.2 压阻式传感器

金属电阻应变片性能稳定、精度较高，至今还在不断地改进和发展，并在一些高精度应变式传感器中得到了广泛的应用。这类应变片的主要缺点是应变灵敏系数较小。而 20 世纪 50 年代中期出现的半导体应变片可以改善这一不足，其灵敏系数比金属电阻应变片约高 50 倍，主要有体型半导体应变片和扩散型半导体应变片。用半导体应变片制作的传感器称为压阻式传感器，其工作原理是基于半导体材料的压阻效应。

2.2.1 半导体的压阻效应

半导体的压阻效应是指单晶半导体材料在沿某一轴向受外力作用时，其电阻率发生很大变化的现象。不同类型的半导体，施加载荷的方向不同，压阻效应也不一样。目前使用最多的是单晶硅半导体。

一个长为 l，横截面积为 S，电阻率为 ρ 的均匀条形半导体材料，其电阻值为

$$R = \rho \frac{l}{S} \tag{2.2.1}$$

当该均匀条材受到一个沿着长度方向的纵向应力时，由于几何形状及内部结构发生变化，会引起其电阻值变化。用与 2.1 节分析金属电阻丝应变效应相同的方法可以得到

$$\frac{\Delta R}{R} = (1+2\mu)\varepsilon + \frac{\Delta \rho}{\rho} \tag{2.2.2}$$

式中，ε 为纵向应变；μ 为泊松比，$\mu = \dfrac{\mathrm{d}S/S}{\mathrm{d}l/l}$；$\Delta\rho/\rho$ 为半导体材料的电阻率相对变化，其值与条形半导体材料纵向所受的应力 σ 之比为一常数，即

$$\frac{\Delta \rho}{\rho} = \pi_l \sigma \quad 或 \quad \frac{\Delta \rho}{\rho} = \pi_l E \varepsilon \tag{2.2.3}$$

式中，π_l 为半导体材料的压阻系数，它与半导体材料种类及应力方向与晶轴方向之间的夹角有关；E 为半导体材料的弹性模量，与晶向有关。

将式(2.2.3) 代入式(2.2.2) 得

$$\frac{\Delta R}{R} = (1+2\mu+\pi_l E)\varepsilon \tag{2.2.4}$$

式中，$(1+2\mu)$ 项是由材料几何形状变化引起的，而 $\pi_l E$ 项为压阻效应的影响，随电阻率而变化。实验表明，对半导体材料而言，$\pi_l E \gg (1+2\mu)$，故 $(1+2\mu)$ 项可以忽略，这时有

$$\frac{\Delta R}{R} = \pi_l E \varepsilon = \pi_l \sigma \tag{2.2.5}$$

可见，半导体材料的电阻值变化主要是由电阻率变化引起的，而电阻率 ρ 的变化是由应变引起的。因此，半导体单晶的应变灵敏系数可表示为

$$K = \frac{\Delta R/R}{\varepsilon} = \pi_l E \tag{2.2.6}$$

半导体的应变灵敏系数还与掺杂浓度有关，它随杂质的增加而减小。

2.2.2 体型半导体电阻应变片

1. 结构形式及特点

体型半导体电阻应变片是从单晶硅或锗上切下薄片制成的应变片，结构形式见图 2.2.1。

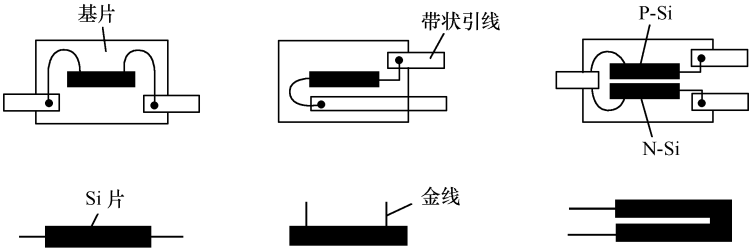


图 2.2.1 体型半导体应变片的结构形式

半导体应变片的主要优点是灵敏系数比金属电阻应变片的灵敏系数大数十倍。通常不需要放大器就可以直接输入显示器或记录仪，可简化测试系统；另外它的横向效应和机械滞后极小。但是，半导体应变片的温度稳定性和线性度比金属电阻应变片差得多，很难用它制作高精度的传感器，只能作为其他类型传感器的辅助元件。近年来，由于半导体材料和制作技术的提高，半导体应变片的温度稳定性和线性度都得到了改善。

2. 测量电路

在半导体应变片组成的传感器中，均由 4 个应变片组成全桥电路，将 4 个应变片粘贴在弹性元件上，其中 2 个应变片在工作时受拉，而另外 2 个则受压，从而使电桥输出的灵敏度达到最大。电桥的供电电源可采用恒流源，也可以采用恒压源，因此，桥路输出的电压与应变片阻值变化的关系有所不同。

对于恒压源来说，考虑到环境温度变化的影响，其关系为

$$U_{\circ} = \frac{U\Delta R}{R + \Delta R_T} \tag{2.2.7}$$

式中，$U_{\circ}$ 为电桥输出电压；U 为电桥供电电压；R 为应变片阻值；ΔR 为应变片阻值变化；ΔR_T 为应变片由于环境温度变化而引起的阻值变化。

式(2.2.7)说明，电桥输出电压与 $\Delta R/R$ 成正比，同时也说明采用恒压源供电时，桥路输出电压受环境温度的影响。

若电桥采用电流为 I 的恒流源供电，则桥路输出电压为

$$U_{\circ} = I \cdot \Delta R \tag{2.2.8}$$

式(2.2.8)说明，电桥输出电压与 ΔR 成正比，且环境温度的变化对其没有影响。

由于半导体应变片是采用粘贴的方法安装在弹性元件上的，存在着零点漂移和蠕变，用它制成的传感器的长期稳定性差。

2.2.3 扩散型压阻式压力传感器

为了克服半导体应变片粘贴造成的缺点，采用 N 型单晶硅为传感器的弹性元件，在它上

面直接蒸镀半导体电阻应变薄膜，制成扩散型压阻式传感器。扩散型压阻式传感器的原理与半导体应变片传感器相同，不同之处是前者直接在硅弹性元件上扩散出敏感栅，后者是用黏结剂粘贴在弹性元件上。

图 2.2.2(a) 是扩散型压阻式压力传感器的简单结构图，其核心部分是一块圆形硅膜片，在膜片上，利用扩散工艺设置有 4 个阻值相等的电阻，用导线将其构成平衡电桥。膜片的四周用圆环(硅环) 固定，如图 2.2.2(b) 所示。膜片的两边有两个压力腔，一个是与被测系统相连接的高压腔，另一个是低压腔，一般与大气相通。

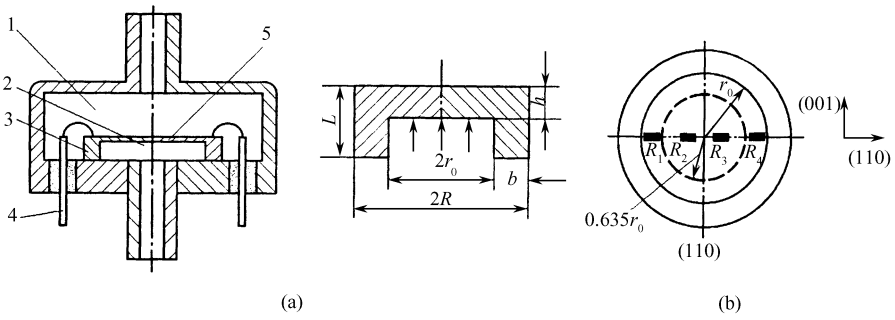


图 2.2.2　压阻式压力传感器结构简图

1— 低压腔　2— 高压腔　3— 硅杯　4— 引线　5— 硅膜片

当膜片两边存在压力差时，膜片产生变形，膜片上各点产生应力。4 个电阻在应力作用下，阻值发生变化，电桥失去平衡，输出相应的电压。该电压与膜片两边的压力差成正比。这样，测得不平衡电桥的输出电压，就测出了膜片受到的压力差的大小。

4 个电阻的配置位置按膜片上径向应力 σ_r 和切向应力 σ_t 的分布情况确定。当 $r = 0.635\ r_0$ 时，$\sigma_r = 0$；$r < 0.635\ r_0$ 时，$\sigma_r > 0$，为拉应力；$r > 0.635\ r_0$ 时，$\sigma_r < 0$，为压应力。当 $r = 0.812\ r_0$ 时，$\sigma_t = 0$，仅有 σ_r 存在，且 $\sigma_r < 0$。

受均匀压力的圆形硅膜片上各点的径向应力 σ_r 和切向应力 σ_t 可分别用下式计算

$$\left.\begin{aligned}\sigma_r &= \frac{3P}{8h^2}[(1+\mu)r_0^2 - (3+\mu)r^2] \\ \sigma_t &= \frac{3P}{8h^2}[(1+\mu)r_0^2 - (1+3\mu)r^2]\end{aligned}\right\} \tag{2.2.9}$$

式中，P 为压力；r_0，r，h 为硅膜片的有效半径、计算点半径、厚度；μ 为硅材料的泊松比，$\mu = 0.35$。设计时，适当安排电阻的位置，可以组成差动电桥。

扩散型压阻式压力传感器的主要优点是体积小，结构比较简单，动态响应好，灵敏度高，能测出十几帕的微压，长期稳定性好，滞后和蠕变小，频率响应高，便于生产，成本低。因此，它是一种目前比较理想的、发展较为迅速的压力传感器。

这种传感器的测量准确度受到非线性和温度的影响。现在出现的智能压阻式压力传感器，利用微处理器对非线性和温度进行补偿，利用大规模集成电路技术，将传感器与计算机集成在同一片硅片上，兼有信号检测、处理、记忆等功能，从而大大提高传感器的稳定性和测量准确度。