

第 2 章 应变式电阻传感器

应变式电阻传感器具有悠久的历史，是应用最广泛的传感器之一。它是将电阻应变片粘贴到各种弹性敏感元件上，将被测量（如位移、力、力矩、压力、加速度、质量等）的变化量转换成与之有一定关系的电阻值的变化，再利用一定的电路将电阻值的变化转换成为电压或电流的变化，从而实现对上述被测量进行测量的目的。

应变式电阻传感器具有以下几方面的优点：

- ① 结构简单，尺寸小，质量小，使用方便，性能稳定可靠；
- ② 分辨力高，能测出极微小的应变，如 $1\sim 2\mu$ 应变 ($1\mu=1\times 10^{-6}$)；
- ③ 灵敏度高，测量范围大，测量速度快，适合静、动态测量；
- ④ 易于实现测试过程自动化和多点同步测量、远距测量和遥测；
- ⑤ 价格便宜，品种多样，工艺较成熟，便于选择和使用，可以测量多种物理量。

因此，它在航空航天、机械、电力、化工、建筑、医学、汽车工业等多种领域有很广泛的应用。

应变式电阻传感器的缺点如下：

- ① 具有非线性，输出信号微弱，抗干扰能力较差，因此信号线需要采取屏蔽措施；
- ② 只能测量一点或应变栅范围内的平均应变，不能显示应力场中应力梯度的变化；
- ③ 不能用于过高温度场合下的测量。

应变式电阻传感器主要分为两大类：金属应变式和半导体应变式传感器。金属应变式电阻传感器又分为丝式和箔式两种。

2.1 电阻应变片

应变式电阻传感器的核心元件是电阻应变片，也称应变计，它可以将试件上的应力变化转换为电阻的变化。

实际应用时，用黏结剂将应变片牢固地粘贴在被测试件的表面上，当试件受力变形时，应变片的敏感栅也随之发生形变，因而引起应变片电阻值的变化，该变化通过测量电路转换为电压或电流信号输出。

2.1.1 应变效应

1856 年英国物理学家 W. Thomson 发现了金属材料的应变效应，即一根金属导线在其拉

长时电阻增大,在受压缩变短时电阻减小。这个规律被称为金属材料的电阻应变效应。

导体或半导体的阻值随其机械应变而变化的道理很简单:因为导体和半导体的电阻与电阻率及其几何尺寸(长度和截面积)等参数有关,当导体或半导体受到外力作用时,这些参数都会发生变化,所以会引起电阻的变化。通过测量阻值的变化,就可以确定外界作用力的大小。

1937年,美国科学家 E. Simmons 和 A. Rug 制成了世界上第一片纸基丝绕电阻应变计。1940年,研制发明了第一代应变式电阻传感器。经过60多年的努力,应变式电阻传感器技术日趋完善,测量精度和使用可靠性日趋提高。现在它已经应用到了几乎所有称量领域和各种测力领域。

2.1.2 电阻应变片的工作原理

电阻应变片的工作原理基于三个基本的转换环节:力→应变→电阻变化。

下面来定量分析金属丝的应变效应。设有一根长度为 L 、横截面积为 A 、电阻率为 ρ 的金属丝,其电阻值 R 为

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (2-1)$$

如果对金属丝长度方向(轴向)作用均匀应力 F ,则 ρ 、 L 、 A 的变化($d\rho$ 、 dL 、 dA)将引起金属丝电阻 R 的微小变化 dR ,且 dR 可通过对上式的全微分求得

$$dR = \frac{\rho}{A} dL + \frac{L}{A} d\rho - \frac{\rho L}{A^2} dA \quad (2-2)$$

电阻相对变化量为

$$\frac{dR}{R} = \frac{dL}{L} + \frac{d\rho}{\rho} - \frac{dA}{A} \quad (2-3)$$

金属丝受力前后几何尺寸的变化如图2-1所示。若电阻丝是圆形的,则 $A = \pi r^2$,对 r 微分得 $dA = 2\pi r dr$,则

$$\frac{dA}{A} = \frac{2\pi r dr}{\pi r^2} = 2 \frac{dr}{r} \quad (2-4)$$

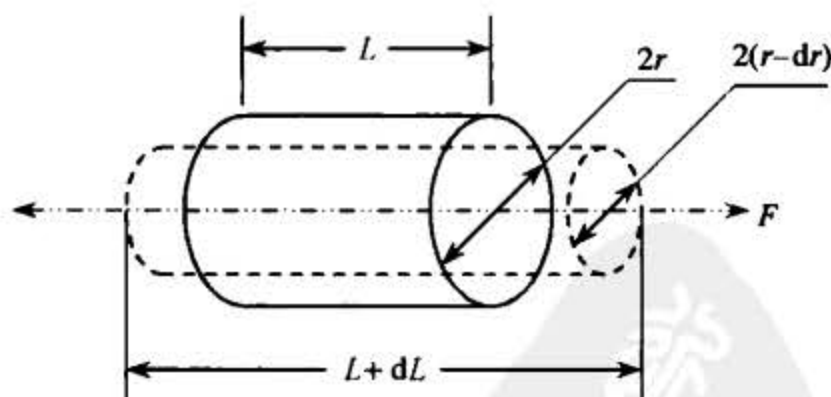


图 2-1 金属丝的应变效应

令 $\frac{dL}{L} = \epsilon_x$, 为金属丝的轴向应变; $\frac{dr}{r} = \epsilon_y$, 为金属丝的径向应变。由材料力学的知识可知,在弹性范围内,金属丝受拉力时,沿轴向伸长,沿径向缩短,轴向应变和径向应变的关系为

$$\epsilon_y = -\mu \epsilon_x \quad (2-5)$$

式中： μ 为金属材料的泊松系数。

将 (2-4) 式和 (2-5) 式代入 (2-3) 式得

$$\frac{dR}{R} = (1 + 2\mu)\epsilon_x + \frac{d\rho}{\rho} \quad (2-6)$$

$$\text{或} \quad \frac{dR/R}{\epsilon_x} = (1 + 2\mu) + \frac{d\rho/\rho}{\epsilon_x} \quad (2-7)$$

$$\text{令} \quad K_S = \frac{dR/R}{\epsilon_x} = (1 + 2\mu) + \frac{d\rho/\rho}{\epsilon_x} \quad (2-8)$$

K_S 称为金属丝的灵敏系数，它表示金属丝发生单位轴向应变所引起的电阻的相对变化。

由 (2-6) 式可知，因应变导致的金属电阻值的变化由两项组成：第一项 $(1 + 2\mu)$ 表示由于受力后材料几何尺寸改变而引起的电阻变化，另一项表示单位轴向应变引起的电阻率的变化。对于确定的金属电阻丝材料来说， $(1 + 2\mu)$ 项是常数，其数值在 1~2 之间，实验证明 $\frac{d\rho/\rho}{\epsilon_x}$ 也是一个常数，所以有

$$\frac{dR}{R} = K_S \epsilon_x, \text{ 或 } K_S = \frac{\frac{dR}{R}}{\epsilon_x} \quad (2-9)$$

上式表示金属丝的电阻相对变化与轴向应变成正比关系。

根据应力和应变的关系，应力 $\sigma = E\epsilon$ ，即 $\sigma \propto \epsilon$ ，而由 (2-9) 式知： $\epsilon \propto \frac{dR}{R}$ ，所以 $\sigma \propto \frac{dR}{R}$ ，即应力正比于电阻值的相对变化。这就是电阻应变片的工作原理。

2.1.3 电阻应变片的分类

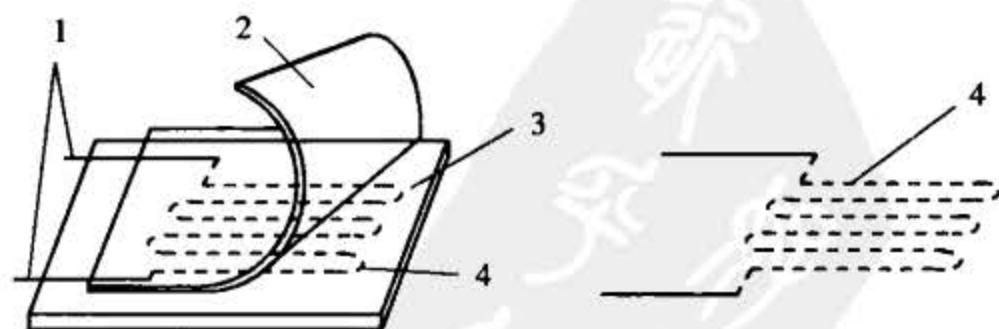
根据应变片的质地，电阻应变片主要分为金属电阻应变片和半导体应变片两大类。

1. 金属电阻应变片

金属电阻应变片的结构形式有丝式、箔式和薄膜式三种。

(1) 金属丝式应变片

金属丝式应变片主要由金属丝栅（敏感栅）、绝缘基片及覆盖片等组成。制作时，将金属电阻丝（一般是合金，电阻率较高，直径约 0.02mm）粘贴在基片上，上面覆盖一层薄膜，使它们变成一个整体，如图 2-2 所示。



1—引线；2—覆盖片；3—基片；4—敏感栅

图 2-2 金属丝式应变片的结构

各部分所选用的材料将直接影晌应变片的性能。因此，应根据使用条件和要求合理

地进行选择。

① 敏感栅：敏感栅由金属细丝绕成栅形。应变片阻值常用的有 60Ω 、 120Ω 、 200Ω 、 320Ω 、 350Ω 、 500Ω 、 1000Ω 等多种规格，其中 120Ω 最为常用。应变片栅长的大小关系到所测应变的准确度，应变片测得的应变大小是应变片栅长和栅宽所在面积内的平均轴向应变。

敏感栅的材料对应变片的性能影响很大。所选材料要求：应变灵敏系数大，在所测应变范围内能保持为常数；电阻率高且稳定，以便于制造小栅长的应变片；电阻温度系数要小；抗氧化能力高，耐腐蚀性能强；在工作温度范围内能保持足够的抗拉强度；加工性能良好，易于拉制成丝（或轧压成箔材）；易于焊接，对引线材料的热电势小。

常用敏感栅材料的主要性能见表 2-1。

表 2-1 常用敏感栅材料的主要性能

材料名称	主要成分		灵敏系数 K_s	电阻率 ($\mu\Omega \cdot m$)	电阻温度系数 ($^{\circ}C^{-1}$)	线膨胀系 数 ($^{\circ}C^{-1}$)	最高工作 温度 ($^{\circ}C$)
	元素	含量					
康铜	Cu, Ni	55% 45%	1.9~2.1	$0.45 \times 10^{-6} \sim 0.52 \times 10^{-6}$	$\pm 20 \times 10^{-6}$	15×10^{-6}	250 (静态) 400 (动态)
镍铬合金	Ni Cr	80% 20%	2.1~2.3	$1.0 \times 10^{-6} \sim 1.1 \times 10^{-6}$	$110 \times 10^{-6} \sim 130 \times 10^{-6}$	14×10^{-6}	450 (静态) 800 (动态)
卡玛合金 (6J-22)	Ni Cr Al Cr	74% 20% 3% 3%	2.4~2.6	$1.24 \times 10^{-6} \sim 1.42 \times 10^{-6}$	$\pm 20 \times 10^{-6}$	13.3×10^{-6}	400 (静态) 800 (动态)
伊文合金 (6J-23)	Ni Cr Al Cr	75% 20% 3% 2%					
镍铬铁合金	Ni Cr Mo Fe	36% 8% 0.5% 55.5%	3.2	1.0×10^{-6}	175×10^{-6}	7.2×10^{-6}	230 (动态)
铁铬铝 合金	Cr Al V Fe	25% 5% 2.6% 67.4%	2.6~2.8	$1.3 \times 10^{-6} \sim 1.5 \times 10^{-6}$	$\pm 30 \times 10^{-6} \sim 40 \times 10^{-6}$	11×10^{-6}	800 (静态) 1000 (动态)
铂	Pt	100%	4.6	0.1×10^{-6}	3000×10^{-6}	8.9×10^{-6}	同上
铂合金	Pt Ir	80% 20%	4.0	0.35×10^{-6}	590×10^{-6}	13×10^{-6}	同上
铂钨	Pt W	92% 8%	3.2	0.74×10^{-6}	192×10^{-6}	9×10^{-6}	800 (静态)

② 基片和覆盖片：基片用于保持敏感栅、引线的几何形状和相对位置；覆盖片既要保持敏感栅、引线的形状和相对位置，还要保护敏感栅。基底的全长称为基长，其宽度称为基宽。

③ 黏结剂：黏结剂用于将敏感栅固定于基片上，并将覆盖片与基片粘贴在一起。在使用金属应变片时，也需用黏结剂将应变片基片粘贴在构件表面某个方向和位置上，以便将构件受力后的表面应变传递给应变计的基片和敏感栅。

常用的黏结剂分为有机和无机两大类。有机黏结剂用于低温、常温和中温，常用的有聚丙烯酸酯、酚醛树脂、有机硅树脂、聚酰亚胺等。无机黏结剂用于高温，常用的有磷酸盐、硅酸、硼酸盐等。

(2) 金属箔式应变片

金属箔式应变片是利用光刻、腐蚀等工艺先制成一种很薄的金属箔栅，厚度一般在 $0.003\sim 0.010\text{mm}$ ，粘贴在基片上，如图 2-3 所示，上面再覆盖一层薄膜制成。

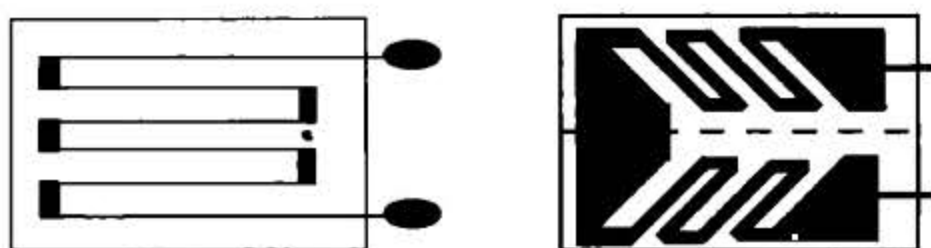


图 2-3 金属箔式应变片

金属箔式应变片和丝式应变片相比，具有以下优点。

① 金属箔栅很薄，因而它所感受的应力状态与试件表面的应力状态更为接近；若箔材和丝材具有同样的截面积，箔材与粘接层的接触面积比丝材大，因而它能更好地和试件共同工作；箔栅的端部较宽，横向效应较小，因而提高了应变测量的精度。

② 箔材表面积大，散热条件好，故允许通过较大电流，因而可以输出较大信号，提高了测量灵敏度。

③ 箔栅的尺寸准确、均匀，且能制成任意形状，扩大了应变片的使用范围。

④ 便于成批生产。

金属箔式应变片的缺点是电阻值分散性大，有的相差几十欧，故需要作阻值调整。再者生产工序较为复杂，因为引出线的焊点采用锡焊，所以不适于高温环境下工作。此外其价格也较贵。

(3) 金属薄膜应变片

金属薄膜应变片是采用真空蒸镀或溅射式阴极扩散等方法，在薄的基底材料上制成一层金属电阻材料薄膜以形成应变片。这种应变片有较高的灵敏度系数，允许电流密度大，工作温度范围较广。

2. 半导体应变片

半导体应变片是利用半导体材料的压阻效应而制成的一种纯电阻性元件。

(1) 压阻效应

对一块半导体材料的某一轴向施加一定的载荷而产生应力时，它的电阻率会发生变化，这种物理现象称为半导体的压阻效应。实际上，任何材料都不同程度地呈现压阻效应，但半导体材料的这种效应特别强。电阻应变效应的分析公式也适用于半导体电阻材料，故仍可用 (2-6) 式来表示，只是因半导体应变片受力后的电阻变化和电阻率变化都较大，故记作 ΔR

和 $\Delta\rho$, 即当半导体应变片受轴向力作用时, 其电阻相对变化为

$$\frac{\Delta R}{R} = (1 + 2\mu)\epsilon_x + \frac{\Delta\rho}{\rho} \quad (2-10)$$

式中: $\frac{\Delta\rho}{\rho}$ 为半导体应变片的电阻率的相对变化, 与半导体敏感条在轴向所受的应力之比为—常数, 即

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} = \pi_l \sigma = \pi_l E \epsilon_x \quad (2-11)$$

式中: π_l 称为半导体材料的压阻系数。

将 (2-11) 式代入 (2-10) 式得

$$\frac{\Delta R}{R} = (1 + 2\mu + \pi_l E)\epsilon_x \quad (2-12)$$

对于金属材料来说, 电阻率的相对变化比较小, 但对于半导体材料, $\frac{\Delta\rho}{\rho} \gg (1 + 2\mu)\epsilon_x$, 即因机械变形引起的电阻变化可以忽略, 电阻的变化率主要是由 $\frac{\Delta\rho}{\rho}$ 引起的。因而半导体应变片的灵敏系数可表示为

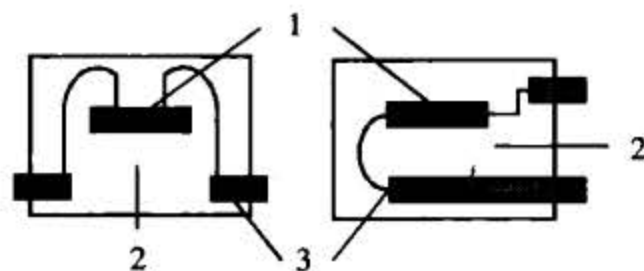
$$K_B = \frac{\frac{\Delta R}{R}}{\epsilon_x} = \pi_l E \quad (2-13)$$

(2) 半导体应变片的类型

① 体型半导体应变片: 体型半导体应变片是将半导体材料硅或锗的晶体按一定方向切割成的片状小条, 经腐蚀压焊粘贴在基片上而成的应变片, 其结构如图 2-4 所示。

② 薄膜型半导体应变片: 这种应变片是利用真空沉积技术将半导体材料沉积在带有绝缘层的试件上而制成的。

③ 扩散型半导体应变片: 将 P 型杂质扩散到 N 型硅单晶基底上, 形成一层极薄的 P 型导电层, 再通过超声波和热压焊法接上引出线就形成了扩散型半导体应变片。



1—半导体条; 2—基片; 3—引出电极
图 2-4 体型半导体应变片的结构

(3) 半导体应变片的特点

半导体应变片具有以下优点。

① 灵敏度高。半导体应变片的灵敏度比金属电阻应变片的灵敏度高 50~100 倍, 不用放大器放大就可电压表或示波器等简单仪器记录测量结果。

② 体积小, 耗电省。

③ 由于具有正、负两种符号的应力效应 (即在拉伸时 P 型硅应变片的灵敏度系数为正值, 而 N 型硅应变片的灵敏度系数为负值。压缩时结果恰好相反), 可以用有正负两种符号应力效应的半导体应变片组成同一应力方向的电桥两臂, 以提高灵敏度。

④ 机械滞后小, 可测量静态应变、低频应变等。

半导体应变片的缺点是温度系数大, 应变时非线性较严重, 要正确使用, 必须采取措施, 消除非线性误差和温度误差。