

# 电阻应变传感器

电阻应变传感器（Resistance Strain Sensor）是一种利用电阻应变片将被测非电量的应变转换为电阻变化的传感器。

任何非电量只要能转化为应变变量就可以利用电阻应变传感器测量，因而电阻应变传感器主要用于测力（重力、压力、扭力），亦可用于测量能转换为力的其他非电量，在非电量电测技术中应用十分广泛。

其主要特点如下。

- (1) 结构简单，使用方便，性能稳定、可靠。
- (2) 灵敏度高，频率响应特性好，适合于静态、动态测量。
- (3) 环境适应性好，应用领域广泛。

## 第一节 电阻应变片

电阻应变传感器由弹性元件（Elastomer）、电阻应变片和相应的测量电路组成。弹性元件用于感受被测量的变化，并将被测量的变化转换为弹性元件表面应变；电阻应变片粘贴在弹性元件上，将弹性元件的表面应变转换为应变片电阻值的变化；测量电路将应变片电阻值的变化转换为便于输出测量的电量，从而实现非电量的测量。

电阻应变片是应变测量的关键元件，为适应各种领域测量的需要，可供选择的电阻应变片的种类很多，但按其敏感栅材料及制作方法可分类如表 2-1 所示。

表 2-1 电阻应变片分类

大 类	细 分	
金属电阻应变片	金属丝应变片	
	金属箔应变片	
	金属薄膜应变片	
半导体电阻应变片	体型半导体应变片	P 型应变片 N 型应变片
	扩散型半导体应变片	P 型应变片 N 型应变片
	薄膜型半导体应变片	



## 一、金属电阻应变片

### 1. 金属丝电阻应变效应

金属导体在发生机械变形时，其阻值发生相应变化，即形成导体的电阻应变效应。由于

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

式中  $\rho$ ——电阻率 ( $\Omega \cdot \frac{\text{mm}^2}{\text{m}}$ );

$L$ ——导体长度 (m);

$S$ ——导体截面积 ( $\text{mm}^2$ )。

对式 (2-1) 微分得

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dL}{L} - \frac{dS}{S} \quad (2-2)$$

令导体截面半径为  $r$ ，则

$$S = \pi r^2 \quad dS = 2\pi r dr$$

$$\frac{dS}{S} = \frac{2\pi r dr}{\pi r^2} = \frac{2dr}{r} \quad (2-3)$$

令导体纵向 (轴向) 应变量为  $\varepsilon = dL/L$ ，横向 (径向) 应变量为  $\varepsilon_r = dr/r$ ，则有

$$\frac{dr}{r} = -\mu \frac{dL}{L} \quad (2-4)$$

式中  $\mu$  称为导体的泊松比，它表示导体横向应变与纵向应变成比例，式中“-”号表示两者变形方向相反。

将式 (2-3) 和式 (2-4) 代入式 (2-2)，则可得

$$\frac{dR}{R} = (1 + 2\mu) \frac{dL}{L} + \frac{d\rho}{\rho} \quad (2-5)$$

令金属丝应变灵敏系数为  $K_S = \frac{dR/R}{dL/L}$ ，其物理含义是单位纵向应变引起电阻的相对变化量。

由式 (2-5) 得

$$K_S = (1 + 2\mu) + \frac{d\rho/\rho}{dL/L} = (1 + 2\mu) + \frac{d\rho/\rho}{\varepsilon} \quad (2-6)$$

式中  $(1 + 2\mu)$  —— 决定于导体几何尺寸发生的变化;

$\frac{d\rho/\rho}{\varepsilon}$  —— 决定于导体导电性能发生的变化。

金属丝应变灵敏系数主要决定于金属导体的几何尺寸发生的变化，通常泊松比  $\mu$  的大小为 0.5 ~ 1，因而金属丝应变灵敏系数一般为 2 ~ 4。

当金属丝制作成敏感栅时，其应变灵敏系数不仅取决于金属导体材料本身的灵敏系数，而且与敏感栅的横向效应、黏结剂及粘贴工艺等诸多因素有关。因而实际的电阻应变片灵敏

系数  $K = \frac{\Delta R}{R} / \varepsilon$  总是略小于  $K_S$ ，电阻应变片产品上标注的灵敏系数即为该批应变片抽样检测所得到的灵敏系数的平均值。

## 2. 金属丝电阻应变片结构

金属丝电阻应变片的基本结构如图 2-1 所示。

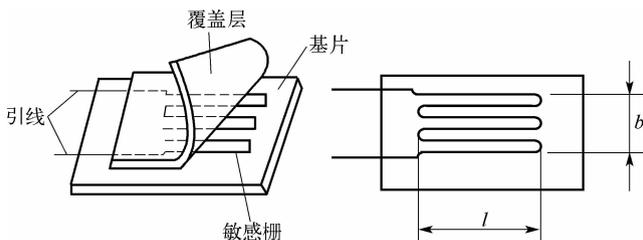


图 2-1 电阻应变片基本结构

图 2-1 中，敏感栅是电阻应变片的敏感元件，用于感受被测量的应变。敏感栅是由直径约为 0.025mm、高电阻率的合金（铜镍合金、镍铬合金、铂铬合金、铂钨合金等）电阻丝绕制而成的，栅长为  $l$ ，栅宽为  $b$ ，敏感栅静态电阻值有 60  $\Omega$ 、120  $\Omega$ 、200  $\Omega$  等多种规格。对敏感栅的大致要求如下。

- (1) 较大的应变灵敏系数，并在测量范围内保持为稳定。
- (2) 具有高而稳定的电阻率。
- (3) 抗氧化，耐腐蚀，且有足够的抗拉强度。
- (4) 加工性能好。

图 2-1 中基片和覆盖层用于固定敏感栅、引线的几何形状和相对位置。基片多采用黏结剂和有机树脂薄膜制成，厚度为 0.02 ~ 0.04 mm，它也是敏感栅与弹性元件间的绝缘层。覆盖层起保护敏感栅作用，也是由黏结剂和树脂薄膜制成的。覆盖层、敏感栅和基片由黏结剂黏结在一起，并用黏结剂牢牢地黏结在弹性元件上。

应变片的引线常用直径为 0.1 ~ 0.15 mm 的镀锡铜线，或用偏带形金属导线，引线与敏感栅焊接可靠，电阻率低，电阻温度系数小，抗氧化，耐腐蚀，且对外连接方便。

## 3. 金属丝电阻应变片基本特性

### 1) 横向效应

直线金属丝受纵向拉伸力时，丝上各段所感受的纵向应力（Stress）应变是相同的，因而每段的伸长也是相同的，金属丝总电阻的增加等于各段电阻增加的总和。将金属丝绕制成敏感栅后，在同样的拉伸力作用下，沿拉伸力方向的直线段仍感受纵向拉应变而伸长；但弯曲的圆弧段在感受纵向拉应变的同时，也感受与纵向拉应变相反的横向压应变，称之为横向效应，且弯曲半径越大，横向效应越严重，致使电阻的增加值减小，应变片灵敏系数降低。



## 2) 机械滞后

在恒温下, 应变片受力后, 其内部会产生不可逆的残余变形, 致使应变电阻在加载和卸载时, 出现一定的差值, 此差值称为机械滞后 (Hysteresis), 也将引起应变片灵敏系数下降。

## 3) 蠕变

应变片受恒定力作用时, 应变电阻值随时间而变化, 这是因为应力在粘胶层中传递时出现滑动现象, 胶层越厚、滑动越严重, 这种现象称为蠕变, 蠕变结果也将引起灵敏系数下降。因而在应变片制作及往弹性元件上粘贴时, 不但要选用同型号优质黏结剂, 而且黏结层要薄而均匀。

## 4) 温漂

应变片材料的电阻一般都受温度影响, 温度变化引起应变片电阻值变化的现象称为温漂, 这种由于物质内部热激发所引起的热输出, 通常是导致灵敏度下降的主要因素, 因而在应变测量中都要采取相应的温度补偿措施。

## 4. 金属箔应变片

这类应变片的敏感栅是用  $0.001 \sim 0.01 \text{ mm}$  厚的金属箔通过光刻技术制作成的, 可以很方便地制作成各种形状的应变片, 常称其为应变花, 如图 2-2 所示。

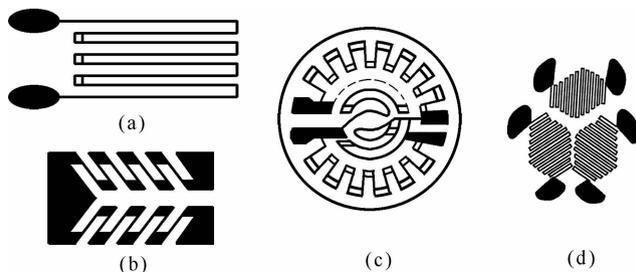


图 2-2 箔式应变片

箔式应变片横栅较宽, 因而横向效应较丝式应变片小。由于箔栅的厚度远比丝栅小, 因而有较好的散热性能, 允许通过较大的工作电流 ( $100 \sim 300 \text{ mA}$ ), 耐压高, 输出功率大; 同时因栅薄, 柔性好, 便于粘贴到弯曲的弹性元件表面上; 且粘贴面积大, 能很好地跟随弹性元件的表面形变, 因而应力传递性能好, 蠕变和机械滞后较小。在应变测量中, 箔式应变片已逐渐取代丝式应变片而占有主要位置。

## 5. 金属薄膜应变片

这类应变片的敏感栅是用真空蒸镀或溅射的方法将金属材料淀积在绝缘基片上, 然后用刻蚀技术制成各种形状的栅, 其厚度比箔栅还要薄, 一般在  $0.1 \mu\text{m}$  以下, 其灵敏系数比箔式应变片还要高, 且传递性能好, 是一种很有前途的新型金属应变片。

## 二、半导体电阻应变片

金属电阻应变片工作性能稳定、精度高、应用广泛, 至今还在不断改进和开发新型应变片, 以适应工程应用的需要, 但其主要缺点是灵敏系数小, 一般为  $2 \sim 4$ 。为了改善这一不



足, 20 世纪 60 年代后期, 相继开发出多种类型的半导体电阻应变片, 其灵敏度可达金属应变片的 50~80 倍, 且尺寸小、横向效应小、蠕变及机械滞后小, 更适用于动态测量。

### 1. 半导体应变片的压阻效应

沿着半导体某晶向施加一定的压力而使其产生应变时, 其电阻率将随应力改变而变化, 这种现象称为半导体的压阻效应。不同类型的半导体, 其压阻效应不同; 同一类型的半导体, 受力方向不同, 压阻效应也不同。

半导体应变片的纵向压阻效应可由式 (2-5) 改写为

$$\begin{aligned} \frac{\Delta R}{R} &= (1 + 2\mu) \frac{\Delta L}{L} + \frac{\Delta \rho}{\rho} \\ &= (1 + 2\mu + \pi E) \varepsilon \end{aligned} \quad (2-7)$$

式中  $\pi$ ——半导体晶体纵向压阻系数;

$E$ ——半导体晶体弹性模量。

式中  $1 + 2\mu$  是由纵向应力而引起应变片几何形状的变化, 金属电阻应变灵敏系数主要由此项决定;  $\pi E$  是因纵向应力所引起的压阻效应, 半导体电阻应变灵敏系数主要由  $\pi E$  决定, 其大小一般可达 100 以上, 故  $1 + 2\mu$  可以忽略不计, 此时

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho} = \pi E \varepsilon \quad (2-8)$$

其应变灵敏系数为

$$K_B = \frac{\Delta R}{R} / \frac{\Delta L}{L} = \frac{\Delta \rho}{\rho} / \varepsilon = \pi E \quad (2-9)$$

由式 (2-9) 可知, 半导体应变片的应变灵敏系数正比于半导体纵向压阻系数和弹性模量。

用于制作半导体应变片的材料有硅、锗、铋化铟、磷化镓等, 但目前一般用硅和锗的杂质半导体。

图 2-3 所示为半导体晶向示意图, 硅和锗在不同晶向下具有不同的压阻效系数和弹性模量, 如表 2-2 所示。

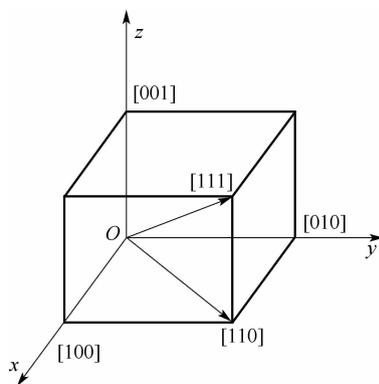


图 2-3 半导体晶向示意图

表 2-2 硅和锗半导体晶向参数

参 数		材 料		硅 ( $\rho = 10 \Omega \cdot \text{cm}$ )		锗 ( $\rho = 6 \Omega \cdot \text{cm}$ )	
				N	P	N	P
纵向压阻系数 $\pi$ $/10^{-7} \text{cm}^2 \cdot \text{N}^{-1}$	[100]			-102	+65	-3	+6
	[110]			-63	+71	-72	+47.5
	[111]			-8	+93	-93	+65



续表

参 数		材 料	硅 ( $\rho = 10 \Omega \cdot \text{cm}$ )		锗 ( $\rho = 6 \Omega \cdot \text{cm}$ )	
			N	P	N	P
弹性模量 $E$ $/10^{-7} \text{N} \cdot \text{cm}^{-2}$	[100]	1.30		1.01		
	[110]	1.67		1.38		
	[111]	1.87		1.55		
应变灵敏系数 $K_B$	[100]	-132	+10	-2	+5	
	[110]	-104	+123	-97	+65	
	[111]	-13	+177	-147	+103	

由表 2-2 可知, 对于半导体硅, P 型 [111] 晶向和 N 型 [100] 晶向, 其电阻应变灵敏系数最大; 对于半导体锗, 无论是 P 型还是 N 型, 在 [111] 晶向可得到最大灵敏系数。从表 2-2 中还可看出, 半导体不同晶向灵敏系数的符号有正、有负, 一般由掺杂决定, P 型半导体为正, N 型半导体为负, 而金属应变灵敏系数均为正值。

## 2. 半导体应变片基本结构

半导体应变片由基片、敏感栅和电极引线等部分组成, 如图 2-4 所示。敏感栅由硅或锗条构成, 内引线是连接敏感栅和电极的金线, 基片是绝缘胶膜, 带状电极引线一般由康铜箔制成。

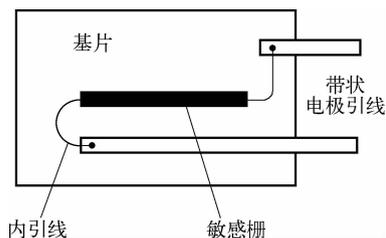


图 2-4 半导体应变片结构

半导体应变片根据其敏感栅形成的方法不同, 可分为体型、扩散型和薄膜型 3 种。体型半导体应变片的敏感栅是根据晶体切片制成的; 扩散型和薄膜型的敏感栅分别是利用扩散技术、真空蒸渡或溅射技术制成的极薄的导电膜片。

半导体电阻应变片的主要缺点是温度稳定性差, 测量较大应变时非线性严重, 在应用时要采取相应的温度补偿和非线性校正措施。

## 第二节

## 电阻应变传感器测量电路

在非电量检测中, 由机械应变所引起的电阻值变化量很小, 难以直接用测阻表作精确测量, 故通常采用电桥将电阻变化转换成电压或电流后放大测量。

测量电桥根据供桥电源不同可分为直流电桥和交流电桥, 应变电桥各桥臂是电阻, 故采用直流电桥, 如图 2-5 所示。

在实际应变测量时, 测量电桥输出都应接高输入电阻放大器, 故可把电桥看成开路工作状态, 此时按电路理论分析, 可得到图 2-5 所示电桥的输出表达式为

$$U_o = \left( \frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right) U_i = \frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} U_i \quad (2-10)$$

电桥投入测量之前, 应将电桥调平衡, 以消除电桥因不平衡而产生的零漂。调零方法是在电桥输出端  $A$  和  $C$  之间接一检流计, 调桥臂电阻使检流计指示为 0, 即电桥输出电流  $I_o = 0$ , 输出电压  $U_o = 0$ , 电桥达到平衡状态。由式(2-10)可知, 电桥的平衡条件为  $R_1 R_3 = R_2 R_4$ 。

应变测量电桥有 3 种接法, 即单臂桥、半桥和全桥, 下面分别叙述 3 种测量电桥的工作特性。

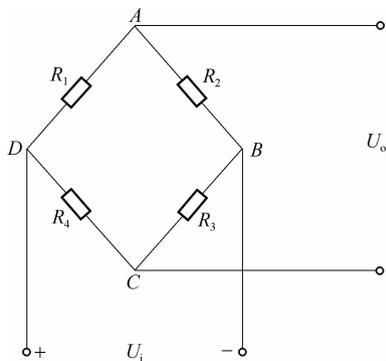


图 2-5 直流电桥

### 一、单臂桥

应变片单臂测量电桥如图 2-6 所示, 桥臂  $AD$  为工作臂, 接应变片;  $R_1$  为应变片静态电阻,  $\Delta R$  为工作时应变片电阻的变化量。  $\Delta R$  可以是正值, 称之为正应变, 此时应变片承受拉应变, 图中符号箭头向上标示为正应变; 当  $\Delta R$  为负值时, 称之为负应变, 此时应变片承受压应变。单臂桥只有一个桥臂接应变片, 其他桥臂均接性能参数稳定的标准电阻, 为了便于分析, 一般都取  $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$ , 称之为等臂桥。

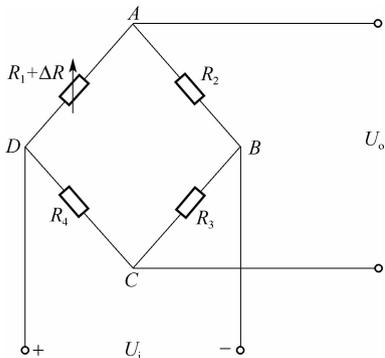


图 2-6 单臂桥

由式(2-10)可得单臂桥电压输出表达式为

$$\begin{aligned} U_o &= \left( \frac{R_1 + \Delta R}{R_1 + \Delta R + R_2} - \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right) U_i \\ &= \left( \frac{R_1 + \Delta R}{2R + \Delta R} - \frac{1}{2} \right) U_i = \frac{\Delta R}{2(2R + \Delta R)} U_i \\ &= \frac{\Delta R/R}{4 + 2 \frac{\Delta R}{R}} U_i = \frac{K\varepsilon}{4 + 2K\varepsilon} U_i \quad (2-11) \end{aligned}$$

单臂电桥的灵敏度为

$$S_u = \frac{U_o}{\Delta R/R} = \frac{U_i}{4 + 2 \frac{\Delta R}{R}} \quad (2-12)$$

当  $\Delta R \ll R$  时, 由式(2-11)和式(2-12)可得

$$U_o = \frac{1}{4} K\varepsilon U_i \quad S_u = \frac{1}{4} U_i$$

由以上分析可知, 单臂桥不但输出电压小, 灵敏度低, 且具有一定的非线性。



## 二、半桥

应变片半桥即为双臂桥，如图 2-7 所示，此时有两个相邻桥臂接应变片，且一个正应变、一个负应变，此时  $\Delta R_1 = \Delta R$ ， $\Delta R_2 = -\Delta R$ ，即接  $R_1$  的桥臂为拉应变，接  $R_2$  的桥臂为压应变。

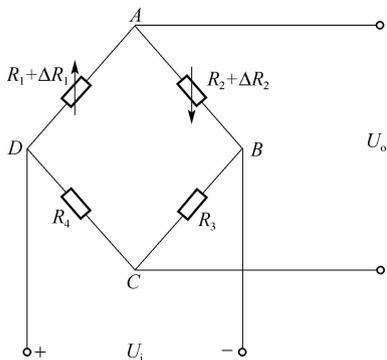


图 2-7 半桥

在等臂桥下， $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$ ，由式(2-10)可得半桥输出表达式为

$$\begin{aligned} U_o &= \left( \frac{R_1 + \Delta R_1}{R_1 + \Delta R_1 + R_2 + \Delta R_2} - \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right) U_i \\ &= \left( \frac{R + \Delta R}{2R} - \frac{1}{2} \right) U_i = \frac{\Delta R}{2R} U_i \\ &= \frac{1}{2} K \varepsilon U_i \end{aligned} \quad (2-13)$$

半桥的灵敏度为

$$S_u = \frac{U_o}{\Delta R/R} = \frac{1}{2} U_i \quad (2-14)$$

可见半桥的输出电压和灵敏度都比单臂桥大一倍，且非线性得到改善。

## 三、全桥

应变片全桥 (Entire Bridge) 是指 4 个桥臂都接有应变片，如图 2-8 所示，此时相邻桥臂所接的应变片承受相反应变，相对桥臂所接的应变片承受相同应变，即  $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$ 、 $\Delta R_1 = \Delta R_3 = \Delta R$ ， $\Delta R_2 = \Delta R_4 = -\Delta R$ 。

由式(2-11)可得全桥输出表达式为

$$\begin{aligned} U_o &= \left( \frac{R_1 + \Delta R_1}{R_1 + \Delta R_1 + R_2 + \Delta R_2} - \frac{R_4 + \Delta R_4}{R_3 + \Delta R_3 + R_4 + \Delta R_4} \right) U_i \\ &= \left( \frac{R + \Delta R}{2R} - \frac{R - \Delta R}{2R} \right) U_i = \frac{\Delta R}{R} U_i \\ &= K \varepsilon U_i \end{aligned} \quad (2-15)$$

全桥的灵敏度为

$$S_u = \frac{U_o}{\Delta R/R} = U_i \quad (2-16)$$

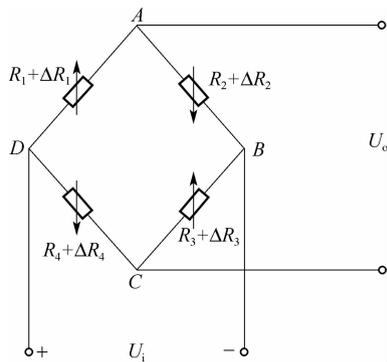


图 2-8 全桥

可见全桥不但有很好的线性输出，而且全桥的输出电压和灵敏度比半桥还要大一倍，显然应尽量采用全桥。

## 四、应变测量电桥性能的提高

测量电桥工作性能对应变测量的精度影响很大，为了实现高精度测量，必须改善测量电



桥的工作性能,如提高灵敏度、改善非线性及进行温度补偿等。

### 1. 灵敏度的提高

各种测量电桥的灵敏度都与电桥供电电压有关,供桥电压越高,电桥灵敏度越高。但供桥电压的提高将引起应变片温度上升,应变测量桥温度误差增大,因而应变测量电桥的供桥电压一般为  $1 \sim 3 \text{ V}$ 。

提高灵敏度的有效方法是采用差动电桥,即半桥和全桥。由式(2-11)可知,差动全桥输出电压与各桥臂电阻的关系为

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

当上式中  $\Delta R_i \ll R_i$  时,为分析方便,忽略分母中的  $\Delta R_i$  项和分子中的  $\Delta R_i$  高次项;且电桥已调平衡,即  $R_1 R_3 = R_2 R_4$ ,此时差动电桥输出电压可改写为

$$U_o = \frac{R_1 R_2}{(R_1 + R_2)^2} \left( \frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) U_i$$

若采用等臂桥,  $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$  则有

$$U_o = \frac{U_i}{4R} (\Delta R_1 - \Delta R_2 + \Delta R_3 - \Delta R_4) \quad (2-17)$$

式(2-17)表示出差动桥输出电压的加减特性,即当相邻桥臂电阻的变化量极性相反时,其变化量相减等于相加,使输出电压增加;而当相邻桥臂电阻的变化量极性相同时,其变化量相减而相互抵消,使输出电压减小。

### 2. 非线性误差及其补偿

由式(2-17)可知,差动桥输出表达式中不含非线性项,因而采用差动桥是改善非线性的有效方法。

当采用单臂桥时,由式(2-11)得单臂桥电压非线性输出为

$$\begin{aligned} U_o &= \frac{K\varepsilon}{4 + 2K\varepsilon} U_i = \frac{K\varepsilon}{4 \left( 1 + \frac{1}{2} K\varepsilon \right)} U_i \\ &= \frac{U_i}{4} K\varepsilon \left( 1 + \frac{1}{2} K\varepsilon \right)^{-1} \end{aligned} \quad (2-18)$$

按二项式定理展开为级数得

$$U_o = \frac{U_i}{4} K\varepsilon \left[ 1 - \frac{1}{2} K\varepsilon + \frac{1}{4} (K\varepsilon)^2 - \frac{1}{8} (K\varepsilon)^3 + \dots \right]$$

由此式得单臂桥非线性误差为

$$\delta = \frac{1}{2} K\varepsilon - \frac{1}{4} (K\varepsilon)^2 + \frac{1}{8} (K\varepsilon)^3 - \dots \quad (2-19)$$

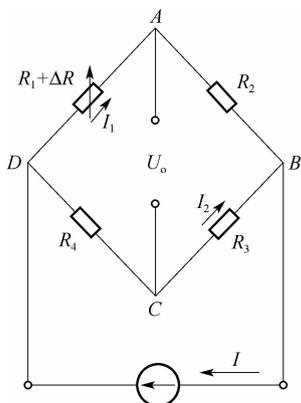


图 2-9 恒流源电桥

可见  $K\varepsilon$  越大,  $\delta$  越大; 但由于  $\varepsilon \ll 1$ , 即  $K\varepsilon < 1$ , 故可认为单臂桥非线性误差约为

$$\delta = \frac{1}{2}K\varepsilon \quad (2-20)$$

显然, 当采用单臂桥时, 为了改善测量桥的非线性, 以减小非线性误差, 必须采取相应的措施。下面推荐两种方法。

### 1) 采用恒流源电桥

产生非线性误差原因之一是在测量时通过桥臂的电流不恒定, 当采用恒流源供电时, 单臂测量桥电路如图 2-9 所示, 此时按分流定律可得各桥臂电流为

$$I_1 = \frac{R_3 + R_4}{R_1 + \Delta R + R_2 + R_3 + R_4} I$$

$$I_2 = \frac{R_1 + \Delta R + R_2}{R_1 + \Delta R + R_2 + R_3 + R_4} I$$

若  $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$  时, 电桥输出电压表达式为

$$\begin{aligned} U_o &= I_1(R_1 + \Delta R) - I_2 R_4 \\ &= \frac{R \cdot \Delta R}{4R + \Delta R} I = \frac{1}{4} I \Delta R \frac{1}{1 + \frac{\Delta R}{4R}} \\ &= \frac{1}{4} \Delta R \frac{1}{1 + \frac{1}{4} K\varepsilon} \\ &= \frac{1}{4} \Delta R \left(1 + \frac{1}{4} K\varepsilon\right)^{-1} \end{aligned} \quad (2-21)$$

此时单臂桥非线性误差约为

$$\delta = \frac{1}{4} K\varepsilon \quad (2-22)$$

比较式 (2-20) 和式 (2-22) 可得: 恒流源单臂桥非线性误差比恒压源单臂桥减少了 1/2。半导体电阻应变测量电桥都采用恒流源供电。

### 2) 有源单臂测量电桥

某些有源单臂桥也可以改善测量电桥的非线性, 如图 2-10 所示。

根据运放的零输入特性可得该电桥输出电压表达式为

$$\begin{aligned} U_o &= \left(1 + \frac{R + \Delta R}{R}\right) \frac{R}{R + R} U_i - \frac{R + \Delta R}{R} U_i \\ &= -\frac{\Delta R}{2R} U_i \\ &= -\frac{1}{2} K\varepsilon U_i \end{aligned} \quad (2-23)$$

显然式 (2-23) 是一个线性表达式, 且输出电压比一般单臂桥增加一倍, 即灵敏度提高一倍。同时由运放输出, 使得测量桥输出电阻减小, 带负载能力增强。

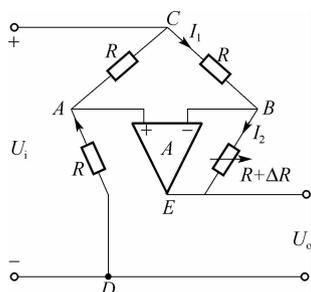


图 2-10 有源单臂桥

### 3. 电桥的温度补偿

金属电阻应变片和半导体电阻应变片，都对温度变化十分敏感，因而温度变化将引起电桥测量误差，通常采取温度补偿（Temperature Compensation）的方法有下述 3 种。

#### 1) 桥路补偿

利用差动电桥输出电压的加减特性，可实现温度自补偿。当采用差动桥时，由式(2-18)可知：由于差动桥各桥臂应变片处于同一温度场下，即温度变化引起各桥臂电阻的变化量大小相等、极性相同，使相邻桥臂电阻变化量相减为 0，因而差动桥具有温度自补偿功能。因而，首先应考虑选用差动半桥或全桥。

当采用单臂桥时，应使单臂桥对温度场呈现差动输出状态。即在单臂桥工作臂的相邻臂接入相同型号的应变片，此应变片不受应力的影响，但与工作臂上的应变片处于同一温度场中，称其为补偿片，如图 2-11 所示。

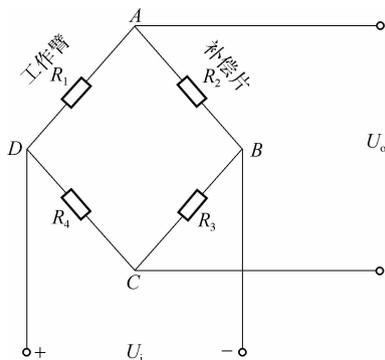


图 2-11 单臂桥温度补偿法

图中  $R_1$  为工作臂应变片， $R_2$  为温度补偿片，当温度变化时其电阻变化量  $\Delta R_1$  和  $\Delta R_2$  大小相等、极性相同，在等臂桥状态下，此时单臂桥因温度变化引起的输出电压由式(2-17)得

$$U_o = \frac{U_1}{4R}(\Delta R_1 - \Delta R_2) = 0$$

可见，两桥臂因温度变化引起的电阻变化量在输出电压表达式中相减为零，因而亦具有温度自补偿功能。

#### 2) 应变片自补偿

采用具有温度自补偿（Self-compensated）的应变片，可以使温度变化时应变片电阻基本不变。如选用温度系数小的材料作应变片，或选择温度系数一正一负的两种材料制成互补型组合应变片，如双金属互补型金属电阻应变片、P-N 互补型半导体电阻应变片。

#### 3) 外补偿

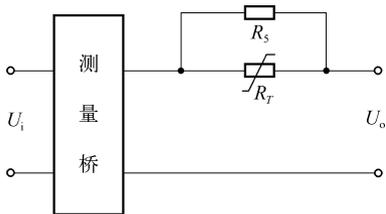


图 2-12 外补偿

如在电路输出端接入热敏电阻  $R_T$ ，如图 2-12 所示。图中热敏电阻  $R_T$  与测量桥应变片处于同一个温度场中，当温度上升使测量桥输出电压下降时，热敏电阻  $R_T$  的阻值也相应减小，以保证输出电压  $U_o$  不受温度变化的影响。

图中  $R_5$  为分流电阻， $R_5$  的选择应使得：当温度上升时， $R_T$  使输出电压上升的速率等于应变片使电桥输出电压下降的速率，从而获得最佳的温度补偿。

### 4. 电桥的零位调整

电桥投入测量之前要进行零位调整，以消除因各桥臂电阻不匹配引起的零位输出。直流电桥的零位调整两种基本方法简介如下。



### 1) 电阻串联法

串联法是指在桥臂电阻之间串入调零电阻以实现零位调整的方法,如图 2-13 所示。在两桥臂之间串入调整电阻  $R_W$ , 实际调零时, 先以电位器代替  $R_W$ , 调零后再以固定电阻  $R_W$  代替电位器。

### 2) 电阻并联法

在桥路中并入适当的电阻, 也可以实现零位调整, 如图 2-14 所示。此时调零能力主要由电阻  $R_5$  决定,  $R_5$  越小调零能力越强, 但引入的测量误差也越大, 因而只能在测量精度允许的情况下, 选得小一些, 且  $R_W$  通常可取与  $R_5$  相同的数值, 调零电阻值的最终确定要通过实际调零操作后作出。

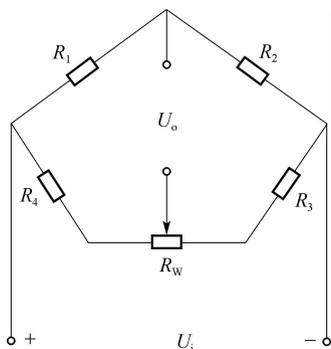


图 2-13 串联调零法

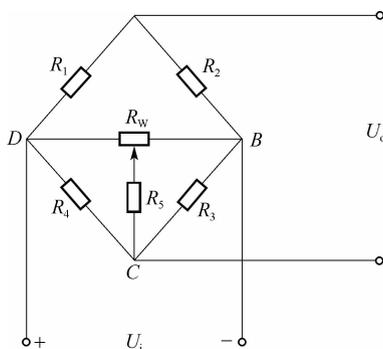


图 2-14 并联调零法

应变电桥输出电压很小, 一般应接放大器, 为避免直流放大器引入零漂, 常采用交流放大器, 此时应变电桥需采用交流供电电源, 考虑交流激励引起电桥引线分布电容的影响, 相当于各桥臂电阻上并了一个电容, 此时应按交流正弦 (电源为正弦) 阻抗电桥分析和调零。

## 第三节

## 电阻应变传感器的应用

电阻应变片除了可直接粘贴到被测的机械构件上进行应力应变测量外, 还可以和弹性元件一起构成各种应变式传感器, 用来测量力、扭矩、加速度及压力等非电量。

### 一、应变式力传感器

电阻应变传感器主要用于载荷力的测量, 称之为应变式力传感器 (Weighing Sensor), 其测力范围可以是几克到几百吨, 精度可高达  $0.05\% F \cdot S$ 。应变式力传感器根据所用的弹性元件不同, 主要有柱式力传感器、环式力传感器和悬臂梁式传感器。

#### 1. 柱式力传感器

柱式力传感器是指用来感受力的弹性元件是实心或空心圆柱, 如图 2-15 所示, 应变片粘贴在圆柱的表面上, 轴向粘贴的应变片与切向粘贴的个数相等, 以便接成差动测量电桥。

当柱体受拉 (如图 2-15 (a) 所示) 或压 (如图 2-15 (b) 所示) 力时, 由于作用

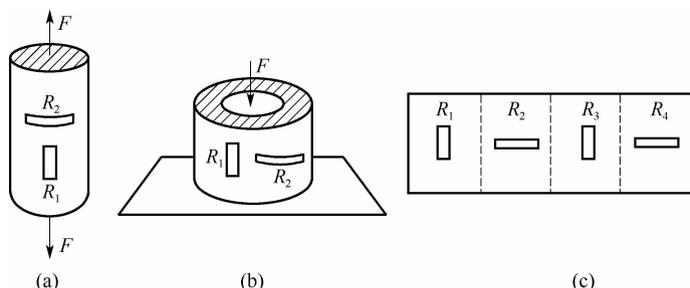


图 2-15 柱式力传感器

(a) 实心柱; (b) 空心柱; (c) 柱面展开

力不可能正好通过柱体的中心轴线, 因而柱体除受拉或压力外, 还受横向力和弯曲力, 要恰当地布置应变片, 以尽量减少横向及弯曲的影响。应变片受拉压力所产生的应变分析如下。

(1) 与轴向任意角  $\alpha$  方向的应变为

$$\varepsilon_{\alpha} = \frac{\varepsilon}{2} [(1 - \mu) + (1 + \mu) \cos 2\alpha]$$

式中  $\varepsilon$ ——沿轴向的应变;

$\mu$ ——弹性元件的泊松比。

(2) 轴向应变 ( $\alpha = 0$ ) 为

$$\varepsilon_{\alpha=0} = \frac{\varepsilon}{2} [(1 - \mu) + (1 + \mu) \cos 0] = \varepsilon = \frac{F}{SE} \quad (2-24)$$

式中  $F$ ——载荷力 (N);

$S$ ——弹性元件的横截面积 ( $\text{m}^2$ );

$E$ ——弹性元件的弹性模量 ( $\text{N}/\text{m}^2$ )。

(3) 切向应变 ( $\alpha = 90^\circ$ ) 为

$$\varepsilon_{\alpha=90^\circ} = \frac{\varepsilon}{2} [(1 - \mu) + (1 + \mu) \cos 180^\circ] = -\mu\varepsilon = -\mu \frac{F}{SE} = \varepsilon_t$$

## 2. 环式力传感器

为了适应工程测量的需要, 有时采用图 2-16 所示的环式力传感器, 其弹性元件是圆形或扁形吊环, 环上粘贴的应变片应便于接成差动测量电桥, 即承受拉应变的应变片数等于承受压应变的应变片数。

在图 2-16 所示的力  $F$  的作用下, 应变片  $R_1$  和  $R_3$  承受压应变, 作用力  $F$  越大, 其阻值越小; 应变片  $R_2$  和

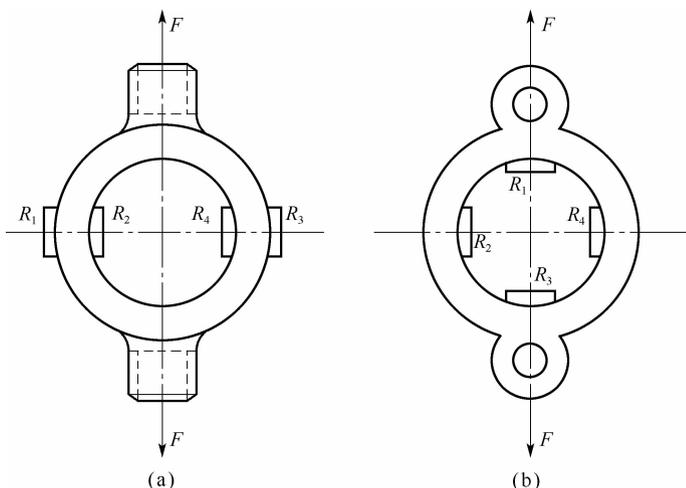


图 2-16 环式力传感器

(a) 圆形吊环; (b) 扁环形吊环



$R_4$  承受拉应变, 即作用力  $F$  越大, 其阻值越大, 按照应变测量桥的接桥原则, 可以接成差动半桥或全桥。

环式弹性元件上的轴向应变可按下式计算

$$\varepsilon = \frac{1.08Fr}{Ebh^2} \quad (2-25)$$

式中  $F$ ——载荷力 (N);

$E$ ——弹性模量 ( $\text{N}/\text{m}^2$ );

$r$ ——圆环的平均半径 (m);

$h$ ——圆环平面的径向厚度 (m), 且  $h \ll r$ ;

$b$ ——圆环平面法线方向的厚度 (m)。

在相同的情况下, 环式弹性元件比柱式弹性元件抗载偏心能力强, 且测力范围大, 但制作较复杂, 常用于检测 500 N 以上的载荷。

### 3. 悬臂梁式力传感器

悬臂梁式力传感器的弹性元件是一个悬臂梁, 载荷加在梁的自由端, 应变片沿梁的长度方向上下粘贴, 悬臂梁分等强度梁和等截面梁, 其应变特性是不相同的。

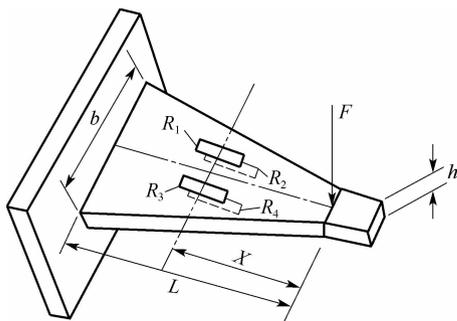


图 2-17 等强度梁

#### 1) 等强度梁

等强度梁 (Equal-strength Beam) 应变传感器如图 2-17 所示。

等强度梁是指沿梁的长度方向强度相等。悬臂梁多采用矩形截面, 保持截面厚度  $h$  不变, 只改变截面的宽度  $b_x$ , 此时梁上沿长度方向各点  $X$  的应变值为

$$\varepsilon = \frac{6FX}{b_x h^2 E} \quad (2-26)$$

式中  $h$ ——悬臂梁截面厚度;

$b_x$ ——悬臂梁长度  $X$  处截面宽度。

由于  $\frac{X}{b_x}$  为常数, 因而等强度梁各截面上的应力实际上与  $X$  无关, 即沿  $L$  方向任意截面上的应变值相等, 应变片沿  $L$  方向的粘贴位置误差对测量结果不产生影响。

#### 2) 等截面梁

等截面梁是指沿悬臂梁长度  $L$  方向各点横截面积都相等的梁, 即式 (2-26) 中  $b_x$  恒等于  $b$ , 因而此时沿长度方向各点  $X$  的应变值为

$$\varepsilon = \frac{6FX}{bh^2 E} \quad (2-27)$$

显然各点上的应力与  $X$  有关,  $X$  越大, 应力应变就越大, 即沿  $L$  方向的粘贴位置误差直接影响测量结果。

三种应变式力传感器相比, 悬臂梁式力传感器具有最高的灵敏度, 适用于小载荷力的精

确测量，最小可测几十克重的载荷。

从工程应用的角度考虑，在分析应变式力传感器时，至少应明白下面 3 个问题。

(1) 根据测力现场需要，选择合适的弹性元件。

(2) 根据所选的弹性元件正确地布片，尽量使应变片保持与拉压力平行或垂直，使应变片承受最大拉应变或压应变。

(3) 根据应变片的布片正确地连接测量电桥，尽量选择差动测量电桥。当接差动测量电桥时，应变片应遵循接桥原则，即相邻桥臂所接的应变片承受相反应变，相对桥臂所接的应变片承受相同应变，以使差动测量电桥输出电压具有“加减特性”。

## 二、应变式压力传感器

电阻应变传感器也适用于对压力的测量，配以合适的弹性元件，可实现几十 Pa（帕斯卡）至  $10^{11}$  Pa 大范围测量，测量精度可达  $0.1\% F \cdot S$ 。应变式压力传感器（Strain Type Pressure Sensor）有多种弹性元件，但主要用于气体和液体压力的测量，下面仅举两例。

### 1. 圆筒式压力传感器

圆筒式压力传感器的弹性元件是一个薄壁圆筒，如图 2-18 所示。

当气体或液体进入圆筒内对薄壁产生压力  $P$  时，薄壁产生变形，粘贴在薄壁上的应变片产生相应的应变，应变片  $R_1$  所承受的沿圆周线方向的切向应变值为

$$\varepsilon_t = \frac{PD}{dE} (1 - 0.5\mu) \quad (2-28)$$

式中  $d$ ——圆筒的壁厚， $d = D_0 - D$ 。

显然应变值与壁厚成反比。圆筒上端实心部位处贴的应变片  $R_2$  是温度补偿片，温度补偿片  $R_2$  与应变片  $R_1$  处于同一温度场中，但不受流体压力  $P$  的影响。这种传感器可用于较大压力的测量，测量范围为  $10^6 \sim 10^8$  Pa。

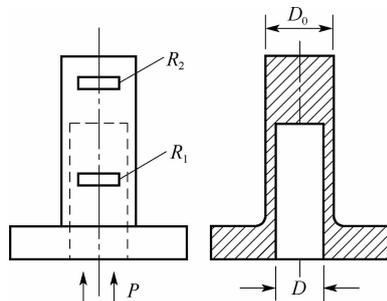


图 2-18 圆筒式压力传感器

### 2. 膜片式压力传感器

膜片式压力传感器如图 2-19 所示，当流体进入膜盒后，对膜片产生一定的压力，此压力使膜片上的应变片承受相应的应变。图中  $R_1$  和  $R_3$  承受拉应变，即径向应变  $\varepsilon_r$ ， $R_2$  和  $R_4$  承受压应变，即切向应变  $\varepsilon_t$ ，4 个应变片可接成差动全桥测量电路，从而获得较高的灵敏度。

当压力  $P$  均匀地作用于膜片上时，膜片上各点的径向应变和切向应变可由下式确定。

$$\varepsilon_r = \frac{3P}{8h^2E} (1 - \mu^2) (r^2 - 3X^2) \quad (2-29)$$

$$\varepsilon_t = \frac{3P}{8h^2E} (1 - \mu^2) (r^2 - X^2) \quad (2-30)$$

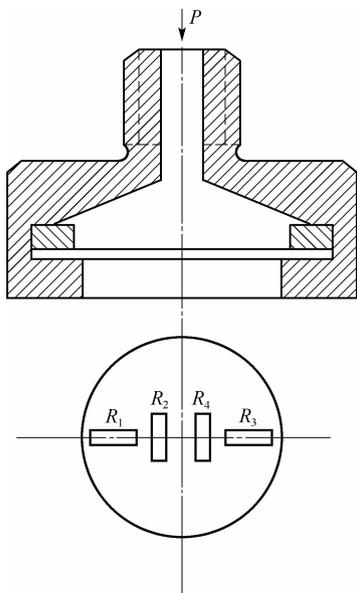


图 2-19 膜片式压力传感器

式中  $P$ ——流体压力 ( $\text{N/m}^2$ );

$\mu$ ——泊松比;

$E$ ——弹性模量 ( $\text{N/m}^2$ );

$h$ ——膜片 (薄板) 厚度 (m);

$r$ ——膜片 (薄板) 有效圆半径 (m);

$X$ ——应变片离圆心的径向距离 (m)。

显然径向应变  $\varepsilon_r$  膜片圆边缘最大, 即当  $X = r$  时, 有

$$\varepsilon_r = -\frac{3Pr^2}{4h^2E} (1 - \mu^2) \quad \varepsilon_t = 0$$

切向应变  $\varepsilon_t$  膜片圆中心处最大, 即当  $X = 0$  时, 有

$$\varepsilon_t = \frac{3Pr^2}{8h^2E} (1 - \mu^2)$$

当  $X = \frac{r}{\sqrt{3}}$  时,  $\varepsilon_r = 0$ , 有

$$\varepsilon_t = \frac{Pr^2}{4h^2E} (1 - \mu^2)$$

因而一般在膜片圆片中心处沿切向贴两片  $R_2$  和  $R_4$ , 在膜片圆边缘处沿径向贴两片  $R_1$  和  $R_3$ , 以获得最大的切向应变和径向应变。

### 三、应变式加速度传感器

应变式加速度传感器 (Acceleration Transducer) 是通过悬臂梁和质量块构成的惯性系统, 将振动加速度转换为力后作用于应变片上, 其基本结构如图 2-20 所示。

当测量振动体加速度时, 根据被测加速度  $a$  的方向, 把传感器固定在被测部位。当被测部位加速度  $a$  沿图示方向变化时, 悬臂梁随质量块上下振动而产生弯曲变形, 致使梁上的应变片  $R_1$  和  $R_2$  产生大小相等极性相反的应变。若悬臂梁为等截面梁, 梁宽为  $b$ , 梁厚为  $h$ , 应变片离自由端的距离为  $X$ , 则振动使应变片上产生的应变如式(2-27)所示。此时  $F = ma$ , 且测量加速度时, 为了获得较高的灵敏度, 应变片尽量靠近悬臂梁的固定端, 则有

$$\varepsilon = \frac{6mL}{Ebh^2} a \quad (2-31)$$

式中  $m$ ——质量块的质量;

$a$ ——振动加速度,  $F = ma$ ;

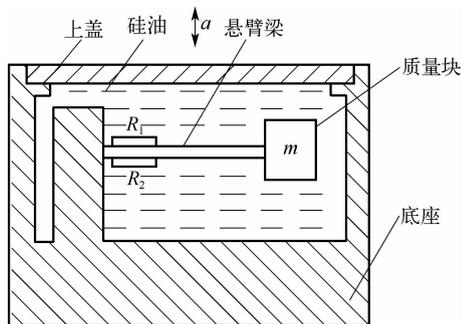


图 2-20 应变式加速度传感器



$L$ ——悬臂梁的长度。

显然当梁的结构确定之后,  $6mL/Ebh^2$  是一个常数, 此时应变  $\varepsilon$  与加速度  $a$  成正比。微振动加速度传感器, 多采用半导体应变加速度传感器, 此时的悬臂梁采用硅梁, 即用硅单晶作梁, 在硅单晶薄片上形成扩散电阻, 即 N 型硅应变片。这种加速度传感器不但体积小, 而且灵敏度高, 目前用于生物医学工程上的微型加速度传感器, 其尺寸可以小到  $2\text{ mm} \times 3\text{ mm} \times 0.6\text{ mm}$ , 重量为  $0.02\text{ g}$ , 量程范围为  $0.01 \sim 50\text{ g}$ 。



### 思考与练习题

1. 何谓金属丝应变  $\varepsilon$  ( $\mu\varepsilon$ ) 及应变灵敏系数  $K$ ? 如何用数学式来描述?
2. 何谓半导体应变片的应变(压阻)效应? 如何用数学式来描述半导体应变片的应变灵敏系数  $K$ ?
3. 请对 3 种应变片测量电桥的输出电压及其灵敏度进行比较。
4. 简述常用的单臂测量电桥减小非线性的常用方法。
5. 简述常用的应变测量电桥温度补偿的主要方法。
6. 差动测量电桥应变片的接桥原则是什么?
7. 为什么说差动测量电桥具有温度自补偿特性?
8. 何谓差动测量电桥的“加减特性”?
9. 简述各类实用应变传感器中应变片的分布与接桥。
10. 举例说明电阻应变传感器的实际应用。