

第 2 章 电阻式传感器

电阻式传感器就是把被测量的变化转换成电阻的变化,然后通过测量电路输出需要的电压或电流等物理量的传感器。电阻式传感器的种类繁多,本章主要从电位器式电阻传感器、应变式电阻传感器、压阻式传感器等类型来介绍电阻式传感器。电阻式传感器可用于各种机械量的检测,它结构简单、性能稳定、成本低廉,因此在许多行业得到了广泛应用。

2.1 电位器式电阻传感器

在传感器中,电位器是一种把线位移或角位移转换成电阻或电压输出的传感元件。这种传感元件结构简单、尺寸小、精度高、输出信号功率大、性能稳定;但要求输入能量大,电刷与电阻元件之间容易磨损,故可靠性和寿命较差,动态特性不好,一般用于静态和缓变量的检测。电位器可以用来制作位移、压力、加速度、油量、高度等多种用途的传感器。电位器式电阻传感器的转换元件实际上为一个电位器。

由输入-输出特性关系上的不同,电位器式电阻传感器可分为线性电位器式传感器和非线性电位器式传感器两种;由结构形式上的不同,电位器式电阻传感器可分为线绕式电阻传感器和非线绕式电阻传感器。非线绕式电阻传感器有合成膜式、导电塑料式、光电式等多种传感器。

2.1.1 电位器式电阻传感器的工作原理

1. 线性电位器式传感器

线性电位器式传感器是指输入量与输出量的关系是线性关系,对应的输入-输出关系曲线是一条直线的电位器式传感器。当被测的位移发生变化时,通过电刷触点在电阻元件上产生移动,该触点与电阻元件间的电阻值就会发生变化,即可实现位移(被测量)与电阻之间的线性转换。线性电位器式传感器类似于滑动变阻器,位移从电刷触头(动触头)输入,位移的变化则引起电阻或电压的变化。

线性电位器式传感器又可分为直线位移式传感器和角位移式传感器,分别用来测直线位移和角位移,其原理图及实物图分别如图 2-1(a)、(b)所示。

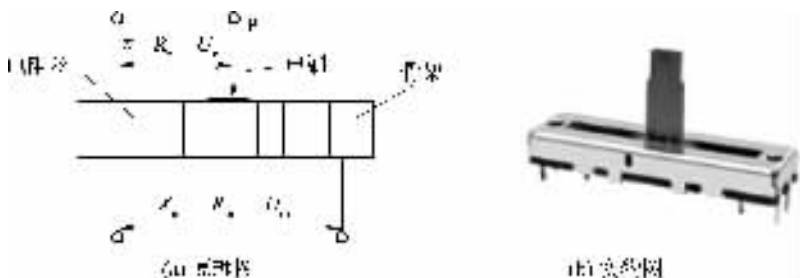


图 2-1 电位器式直线位移传感器

设 x_m 、 R_m 和 U_m 分别表示电位器的全长、总的电阻和总电压； x 、 R_x 和 U_x 分别表示电刷的位移量、位移量对应的电阻和电压。

根据电阻分压原理，有

$$U_x = \frac{R_x}{R_m} U_m = \frac{x}{x_m} U_m = \frac{U_m}{x_m} x = K_u x \quad (2-1)$$

$$R_x = \frac{R_m}{x_m} x = K_R x \quad (2-2)$$

式中， K_u 和 K_R 分别为电压灵敏度和电阻灵敏度，表示电刷单位位移所引起的输出电压和电阻的变化量， K_u 和 K_R 都是常数。

式(2-1)和式(2-2)都是正比例函数，分别表明通过该器件能把线位移 x 的变化转换成电压 U_x 和电阻 R_x 的线性变化输出。

角位移式电位器原理图及实物图如图 2-2 所示。假定 α_m 、 R_m 和 U_m 分别表示电位器的全长、总的电阻和总的电压； α 、 R_α 和 U_α 分别表示电刷的位移量、位移量对应的电阻和电压。

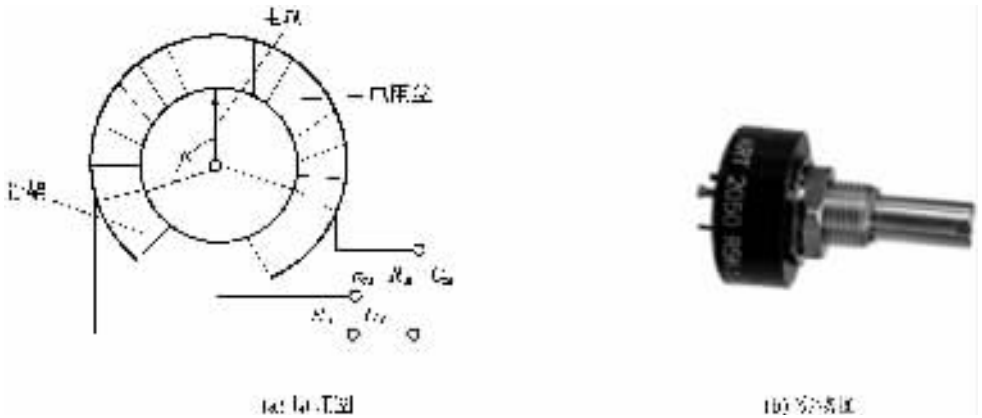


图 2-2 角位移式传感器

同理可得

$$U_\alpha = \frac{U_m}{\alpha_m} \alpha = K_u \alpha \quad (2-3)$$

$$R_\alpha = \frac{R_m}{\alpha_m} \alpha = K_R \alpha \quad (2-4)$$

同样 K_u 和 K_R 都是常数，式(2-3)和式(2-4)分别表明通过角位移传感器能把角位移 α 的变化转换成电压 U_α 和电阻 R_α 的线性变化输出。

线性线绕电位器的骨架截面应处处相等，并且由材料均匀的导线按相等的节距绕成。因此，对电位器的灵敏度应为

$$K_R = \frac{R_m}{x_m} = \frac{2(b+h)\rho}{Sa} \quad (2-5)$$

$$K_u = \frac{U_m}{x_m} = I \frac{2(b+h)\rho}{Sa} \quad (2-6)$$

式中， ρ 为导线电阻率； a 、 b 和 h 分别为绕线节距、骨架的长度和高度； S 为导线的截面积。

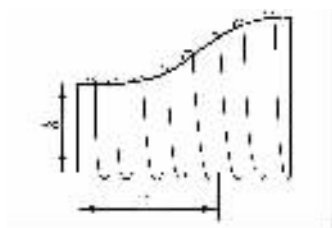
2. 非线性电位器

非线性电位器式传感器是指在空载时输出电压或电阻与输入量位移之间呈现某种非线性

性函数关系的一种电位器式传感器。它可以实现任意函数传感器,如指数函数和三角函数等,故能满足实际中的特殊需求。常用的非线性电位器式传感器有变骨架式传感器、变节距式传感器、分路电阻式传感器和电位给定式传感器四种。下面介绍变骨架式非线性电位传感器。

变骨架式电位器是在保持电阻丝参数不变的情况下,只改变骨架的高度 h 来实现非线性函数关系,其示意图如图 2-3 所示。

用微量 dU_x 、 dR_x 和 dx 分别表示电压、电阻和位移的微小变化量,利用微分法可得



电阻灵敏度为

$$K_R = \frac{dR_x}{dx} = \frac{2\rho(b+h)}{St} \quad (2-7) \quad \text{图 2-3 变骨架式非线性电位器}$$

电压灵敏度为

$$K_u = \frac{dU_x}{dx} = I \frac{2\rho(b+h)}{St} \quad (2-8)$$

骨架高度为

$$h = \frac{St}{2\rho} \left(\frac{dR_x}{dx} \right) - b \quad (2-9)$$

对于变骨架式电位器来说,只要骨架高度 h 满足式(2-9),就能实现所需要的函数关系。

2.1.2 电位器式电阻传感器的基本特性及误差

1. 负载特性及误差

前面介绍的是电位器在不接负载即空载情况下的特性,该特性称为理想特性。下面介绍的是电位器在接入负载情况下的特性,此时的特性称为负载特性。电位器接入负载电阻 R_L 时的电路如图 2-4 所示,则此电位器的输出电压为

$$U_L = I \frac{R_L R_x}{R_L + R_x} = U_m \frac{\frac{R_x}{R_m}}{1 + \frac{R_x}{R_m} \cdot \frac{R_m}{R_L} \left(1 - \frac{R_x}{R_m} \right)} \quad (2-10)$$

若令 $r = \frac{R_x}{R_m}$, $m = \frac{R_m}{R_L}$, 则得负载系数为

$$Y = \frac{U_L}{U_m} = \frac{r}{1 + rm(1-r)} \quad (2-11)$$

由式(2-11)可知,当 $m \neq 0$, 即 R_L 不是无穷大时, Y 与 r 为非线性关系。电位器的负载特性曲线可由如图 2-5 所示曲线来描述。

由图 2-5 可知,当 $m \neq 0$ 时,由负载特性曲线可知,负载输出电压比空载输出电压低,这种偏差即为负载误差。负载误差为

$$e_L = \frac{U_x - U_L}{U_x} \times 100\% = \left[1 - \frac{1}{1 + mr(1-r)} \right] \times 100\% \quad (2-12)$$

由于在起始位置和最大值位置时, $r(1-r) = 0$, 故无论 m 为何值,电刷在起始位置和最大位置时,负载误差都为零;当电刷处于行程中心位置时,负载误差最大。

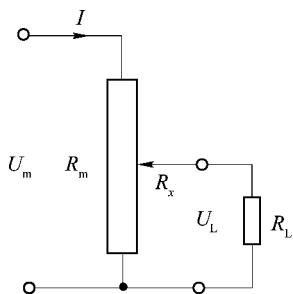


图 2-4 带负载的电位器电路

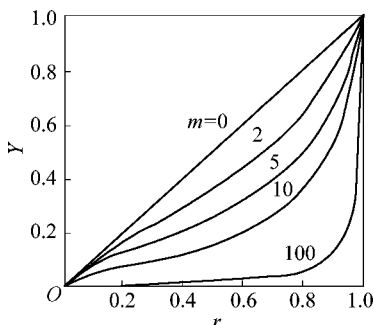


图 2-5 电位器的负载特性曲线

若要使负载误差在整个行程中保持在 1%~3% 范围以内,则必须使 $R_L > (10 \sim 20)R_m$ 。但有时负载不能满足这个条件,一般可以采取把电位器绕成非线性的、加入补偿可变电阻和限制电位器的工作区间等方法来减小负载误差。

2. 阶梯特性及误差

当电刷在多匝导线上移动时,电位器的阻值和输出电压不是连续变化的,而是阶跃式变化的。电刷每移动过一匝线圈,电阻就突然增加一匝阻值,输出电压就产生一次阶跃,其阶跃电压值为

$$\Delta U = \frac{U_{\max}}{n} \tag{2-13}$$

线绕式线性电位器的理想输出特性曲线如图 2-6 所示。在理想情况下,特性曲线各个阶梯的大小完全相同,穿过每个阶梯中点的直线即为理论特性曲线,阶梯曲线围绕它上下波动从而产生一定的偏差,这种偏差就是阶梯误差。

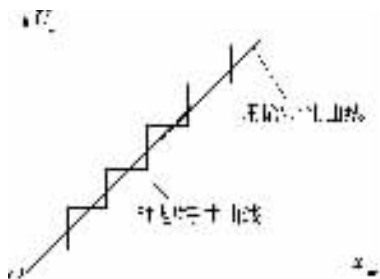


图 2-6 理想阶梯特性曲线图

电位器的阶梯误差通常用理想特性曲线对理论特性曲线最大偏差值与最大输出电压值之比的百分数表示,即

$$e_1 = \frac{\pm \left(\frac{1}{2} \times \frac{U_m}{n} \right)}{U_m} \times 100\% = \pm \frac{1}{2n} \times 100\% \tag{2-14}$$

阶梯误差的大小是由线绕电位器自身的工作原理所决定的,是一种原理性误差。它决定了电位可能达到的最高精度。为减小阶梯误差,设计时需增加线圈匝数,减小导线直径或增加骨架长度。

由于变骨架式非线性线绕式电位器的骨架是变化的,故它的阶梯误差也是变化的,最大阶梯误差在特性曲线斜率最大处。

3. 工艺误差

电位器式传感器除了具有负载误差和阶梯误差之外,还具有工艺误差。工艺误差产生的原因很多,像电阻丝的电阻率和直径不均匀,骨架偏离规定的结构尺寸,绕线张力不恒定,节距不均匀,电阻丝与电刷的接触程度不够等都可能产生工艺误差。在所有的误差当中,工艺误差所占的比例最大。在实际应用中,应设法减小此种误差。

2.1.3 电位器式电阻传感器的结构与材料

1. 线绕式电位器

常用的线绕式电位器通常由电阻丝、电刷及骨架构成。

1) 电阻丝

线绕式电位器对电阻丝的要求是电阻系数大,电阻温度系数小,强度高,延展性好,焊接性好,耐磨耐腐蚀。常用的材料有铜镍合金类、锰铜合金类、铂铱合金类、镍铬铁合金类等。

2) 电刷

电刷是由具有弹性的金属薄片或金属丝制成,末端弯曲形成弧形。制作电刷的材料要与电阻丝材料配合选择,通常是使电刷材料的硬度与电阻丝材料的硬度相近或稍高些,而且要保证电刷触点具有良好的抗氧化能力、接触电势要小。常用的电刷触头材料有银、铂铱、铂铈等金属或合金。电刷和导线材料的匹配表如表 2-1 所示。

表 2-1 电刷和导线材料的匹配表

电刷材料	导线材料
铈、铂铈 40%铜-钯 金-银 金	镍 80%、铬 20%
10%金、13%铜 30%银、47%钯	银-钯
金 金-银	55%铜、45%镍
银含 2%~5%的石墨 铜含 10%的石墨 40%镍、60%银	镍铬 康铜 锰铜

3) 骨架

制作骨架的材料要求形状稳定,与导线具有相近的膨胀系数,电气绝缘好,有足够的强度和刚度,散热性好,耐潮湿,易加工。常用的材料有陶瓷、酚醛树脂、夹布胶木以及经绝缘处理的镁、铝等金属。常采用的形式有矩形、环形、柱形等。骨架厚度一般要大于导线直径的四倍。

2. 非线绕式电位器

1) 合成膜电位器

合成膜电位器是把电阻液喷涂在绝缘骨架表面上形成电阻膜而制成的电位器。电阻液由石墨、炭黑和树脂等材料配制而成,经烘干聚合后,在骨架上形成电阻膜。其优点是分辨

率高、阻值范围广、耐磨性好、工艺简单、成本较低等；主要缺点是接触电阻大、噪声大、抗潮性差等。常用的碳膜电位器如图 2-7 所示，焊片 1 和焊片 3 两端的电阻值是电位器的标称阻值，焊片 2 是转动的活动臂引出端。



图 2-7 碳膜电位器

2) 金属膜电位器

金属膜电位器是在玻璃或胶木基体上，用高温蒸镀或电镀方法，涂覆一层金属膜或金属复合膜而制成的电位器。常用的金属膜有铂铜、铂锗、铑锗等；复合膜有镍铬合金膜加氧化钛膜等。其优点是温度系数小，可在高温环境下工作；缺点是耐磨性差、功率小、阻值不高。如图 2-8 所示为一种用于音响调音、多媒体等的金属膜电位器。



图 2-8 金属膜电位器

3) 导电塑料电位器

导电塑料电位器是由塑料粉及导电材料粉(合金、石墨、炭黑等)压制而成的电位器。其优点是耐磨性较好、寿命较长、电刷允许的接触压力较大，适用于振动、冲击等恶劣条件下的工作，且阻值范围大，能承受较大的功率；缺点是受温度影响较大、接触电阻大等。如图 2-9 所示为一种导电塑料电位器。



图 2-9 导电塑料电位器

4) 光电电位器

光电电位器是一种非接触式电位器，它用光束代替一般电位器上的活动触点——电刷。如图 2-10 所示为光电电位器的原理结构图。光电电位器主要由电阻体、光电导层、导电电极等组成。光电电位器是通过光束把电阻体和导电电极连通，负载上有电压输出，照射部位不同，输出的电压也不同。光电电位器最大的优点是它属于非接触型电位器，不存在磨损问题，从而有效地提高了电位器的精度、可靠性及使用寿命。这些优点也是其他电位器无法比拟的，因而光电电位器得到了广泛应用。光电电位器的缺点则是阻值范围不大，温度系数较大，结构较复杂，体积和重量较大。

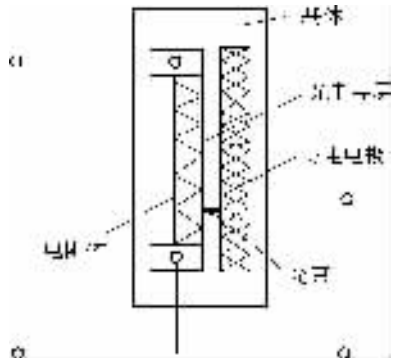


图 2-10 光电电位器原理图

2.1.4 电位器式位移传感器

利用电位器来制作电位器式位移传感器时，通常还需要一些机械量传递环节，用来改变量程或被测位移的方向。常用的传递环节有杠杆、滚轮皮带、齿轮齿条、弹簧测杆等。一种 YHD 型电位器式位移传感器如图 2-11 所示。电位器式位移传感器适用于几毫米到几十毫米的位移测量，精度一般为 0.5%~1.0%。

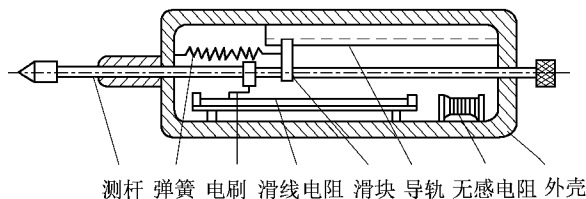


图 2-11 YHD 型电位器式位移传感器

2.2 应变式电阻传感器

应变式电阻传感器由在弹性元件上黏贴电阻应变片构成,其具有精度高、测量范围广、性能稳定、结构简单、重量轻、环境适应性强、种类多、价格便宜等诸多优点,广泛用于力、压力、加速度、重量等参数的测量。但应变式电阻传感器线性度较差、信号微弱、抗干扰能力差,不能用于高温环境下的测量。

2.2.1 应变效应和应变式电阻传感器的工作原理

应变效应是指导体或半导体材料在受到外力(拉力或压力)的作用时,将产生机械变形,进而导致其电阻值的变化。当电阻率 ρ 、长度 l 和面积 S 一定时,物体的电阻与其电阻率、长度和横截面积之间的关系,可以表示为

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (2-15)$$

当电阻丝在外力 F 的作用下被拉伸(或压缩)时, ρ 、 l 和 S 发生了变化,利用微分法可得

$$dR = \frac{\rho}{S} dl - \frac{\rho l}{S^2} dS + \frac{l}{S} d\rho \quad (2-16)$$

用相对变化可表示为

$$\frac{dR}{R} = \frac{dl}{l} - \frac{dS}{S} + \frac{d\rho}{\rho} \quad (2-17)$$

若电阻丝截面是圆形的, r 为其半径,利用微分法可得

$$dS = 2\pi r dr \quad (2-18)$$

相对变化为

$$\frac{dS}{S} = 2 \frac{dr}{r} \quad (2-19)$$

令电阻丝的轴向(纵向)应变为

$$\epsilon_1 = \frac{dl}{l} \quad (2-20)$$

径向(横向)应变为

$$\epsilon_r = \frac{dr}{r} \quad (2-21)$$

由泊松定律 $\epsilon_r = -\mu\epsilon_1$, μ 为金属材料的泊松系数,可得

$$\frac{dR}{R} = (1 + 2\mu)\epsilon_1 + \frac{d\rho}{\rho} \quad (2-22)$$

$$\frac{\frac{dR}{R}}{\epsilon_1} = 1 + 2\mu + \frac{\frac{d\rho}{\rho}}{\epsilon_1} = K_s \quad (2-23)$$

$$\frac{dR}{R} = K_s \epsilon_1 \quad (2-24)$$

式中, K_s 为电阻丝的灵敏度系数, 表示单位应变所引起的电阻相对变化。

对于确定的电阻丝, 则 $1 + 2\mu$ 是常数, $\frac{d\rho}{\rho}$ 也是常数, 故 K_s 是常数。式(2-24)表明电阻值的相对变化与电阻丝的轴向应变成正比。

2.2.2 电阻应变片的种类、材料及黏贴

1. 电阻应变片的种类、结构与材料

电阻应变片是应变式传感器的转换元件。它主要由电阻敏感栅、覆盖层、黏合剂、引出线等部分组成。传感器弹性体的应变是通过覆盖层传递到电阻敏感栅上的, 而覆盖层是由基底和面胶组成。基底起到敏感栅和弹性体间的绝缘作用, 而面胶则起到保护敏感栅的作用, 敏感栅和基底通过黏合剂黏结。电阻敏感栅是将被测量的变化转换成电阻的变化。

电阻敏感栅是电阻应变片的核心元件, 它的材料选择对应变片性能好坏起着决定性作用。这就要求敏感栅材料要有较高的敏感系数、较高且稳定的电阻率、较小的温度系数、较高的机械强度等。常用来制作电阻应变片敏感栅的合金材料有铜镍合金(康铜)、镍铬合金及其改良性合金、铁铬铝合金、镍铬铁合金、铂及铂合金等。

根据敏感栅的制作方法, 电阻金属应变片有丝式、箔式和薄膜式三种形式。丝式应变片的电阻丝直径在 $0.015 \sim 0.03$ mm 之间, 常用直径为 0.025 mm。箔式应变片的敏感元件由很薄的金属箔片用光刻、腐蚀等技术制作而成。箔的厚度一般在 $0.002 \sim 0.005$ mm 之间, 其材料为镍铬合金。与丝式应变片相比, 金属箔式应变片具有散热性能好、允许电流大、灵敏度高、寿命长、易加工、生产效率高等优点。

薄膜式应变片是采用特殊工艺将金属敏感材料直接镀制于弹性基片上制成的。相对于金属黏贴式应变片而言, 薄膜应变片的应变传递性能得到了极大的改善, 并且具有应变灵敏系数高、稳定性好、使用寿命长、成本低等优点, 是一种很有发展前途的新型应变片。

2. 电阻应变片的黏贴

电阻应变片应用时用黏合剂黏贴到弹性元件表面上, 黏合剂的性能及黏结工艺的质量直接影响着应变片的工作特性, 因此必须合理选择黏合剂, 遵循正确的黏结工艺, 保证黏贴质量, 这与电阻应变片的测量精度有着极为重要的关系。

此外黏贴时还要考虑到应变片的工作条件, 如温度、相对湿度、稳定性要求、黏贴时间长短的要求以及贴片固化时加热加压的可能性等。

2.2.3 电阻应变片的主要特性

1. 横向效应

将直的电阻丝绕成敏感栅后, 虽然长度不变, 应变状态相同, 但在圆弧处, 除受纵向的应变 ϵ_l 外, 还存在横向的应变 ϵ_r , 造成电阻的减小, 因而其灵敏系数较整个电阻丝的灵敏系数小, 这

种现象称为应变片的横向效应。如图 2-12 所示为应变片轴向受力及横向效应示意图。

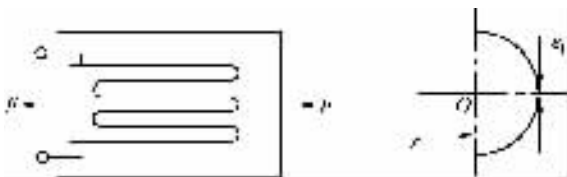


图 2-12 应变片轴向受力及横向效应

2. 机械滞后、零漂和蠕变

应变片安装在弹性元件上以后,在加载和卸载过程中,对同一机械应变变量,两个过程的特性曲线并不重合,卸载时的指示应变高于加载时的指示应变,这种现象称为应变片的机械滞后。产生机械滞后的主要原因是敏感栅、基底和黏合剂在承受机械应变之后留下的残余变形所致。

已黏贴在弹性元件上的应变片,在温度保持恒定,弹性元件上没有机械应变的情况下,应变片的指示会随着时间增长而逐渐变化,这就是应变片的零点漂移,简称零漂。

已黏贴的应变片,温度保持恒定,在承受某一恒定的机械应变长时间作用下,应变片的指示会随时间的变化而变化,这种现象称为蠕变。一般来说,蠕变的方向与原来应变变量变化的方向相反。应变片工作时,零漂和蠕变是同时存在的。

3. 温度效应

当环境温度变化时,会引起电阻的相对变化,产生虚假应变,这种现象称为温度效应。若要消除此项误差,则要采取温度补偿措施。

2.2.4 电阻应变片的温度误差及补偿

电阻应变片由于温度效应引起的误差称为温度误差。产生温度误差的原因有电阻丝的电率随温度发生变化;电阻丝和试件的线膨胀系数不同使其产生附加形变。温度误差给测量结果的精确度产生很大的影响,在实际测量中要采取措施进行温度补偿。

1. 自补偿法

自补偿法就是利用自身具有温度补偿作用的应变片进行补偿以减小误差的方法。常用的有单丝自补偿法和双丝自补偿法。单丝自补偿法是在桥路的某一个桥臂中串入一个电阻温度系数较小的电阻。它的温度效应正好抵消电阻丝的温度效应。要求串入补偿电阻的材料要具有电阻率和温度系数高的材料。通常采用铜丝、铜箔、镍箔等。这种自补偿应变片容易加工且成本低,缺点是只适用特定材料,温度补偿范围也较窄。而双丝自补偿法的敏感栅由两种不同温度系数的电阻丝 R_1 和 R_2 组成,可通过调节这两种电阻丝的长度来控制应变片的补偿温度。如图 2-13 所示为双丝自补偿示意图。

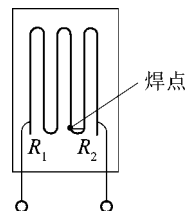


图 2-13 双丝自补偿

2. 线路补偿法

常用电桥补偿法电路如图 2-14 所示。工作应变片 R_1 安装在被测试件上。补偿应变片 R_B 安装在补偿块上,与被测试件温度相同,但不承受应变。 R_1 和 R_B 接入电桥相邻两臂,因

两电阻片的电阻随温度变化量相等,故输出电压 U_o 不受温度变化影响。

在某些情况下,可通过改变应变片的黏贴位置,实现温度补偿,同时还可提高应变片的灵敏系数,差动电桥补偿法的示意图如图 2-15 所示。

测量时可将 R_B 贴在被测试件的下面,接入电桥电路中。由于在外力 F 的作用下, R_B 与 R_1 的变化值大小相等符号相反,电桥的输出电压增加一倍。此时 R_B 既起到了温度补偿作用,又提高了灵敏度,同时也可补偿非线性误差。

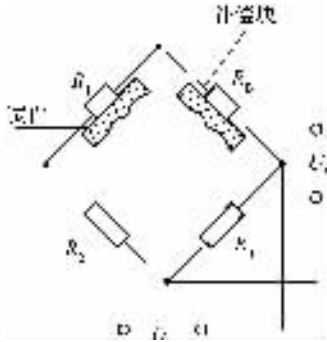


图 2-14 电桥补偿法

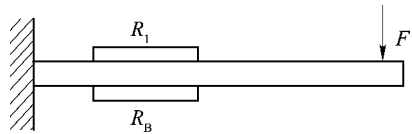


图 2-15 差动电桥补偿法

2.2.5 测量电路

1. 直流电桥

1) 直流电桥平衡条件

直流电桥电路如图 2-16 所示。

当 $R_1 \rightarrow \infty$ 时,电桥输出电压为

$$U_o = \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_3}{R_3 + R_4} \right) U = \frac{R_1 R_4 - R_2 R_3}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} U \quad (2-25)$$

当 $U_o = 0$, 即 $R_1 R_4 = R_2 R_3$ 或 $\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}$ 时,电桥平衡。欲使电桥平衡,其相邻两臂电阻的比值应相等,或相对两臂电阻的乘积应相等。

2) 电压灵敏度

应变片工作时,其电阻值变化很小,电桥相应输出电压也很小,一般需要加入放大器进行放大。由于放大器的输入阻抗比电桥电路输出阻抗高很多,所以此时仍视电桥为开路情况。电路如图 2-17 所示。

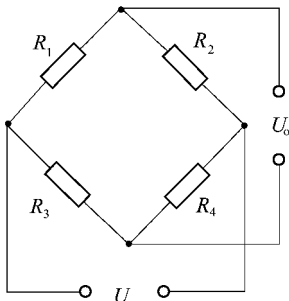


图 2-16 直流电桥电路

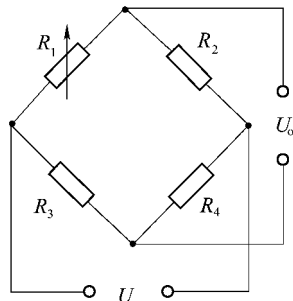


图 2-17 电桥电路

当受应变时,若应变片电阻变化为 ΔR_1 ,其他桥臂固定不变,电桥输出电压 $U_o \neq 0$,则电桥不平衡。输出电压为

$$U_o = \frac{\frac{R_4}{R_3} \cdot \frac{\Delta R_1}{R_1}}{\left(1 + \frac{\Delta R_1}{R_1} + \frac{R_2}{R_1}\right) \left(1 + \frac{R_4}{R_3}\right)} U \quad (2-26)$$

令桥臂比 $n = \frac{R_2}{R_1}$,由于 $\Delta R_1 \ll R_1$,且 $\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}$,则

$$U_o = \frac{n}{(1+n)^2} \cdot \frac{\Delta R_1}{R_1} U \quad (2-27)$$

电桥电压灵敏度定义为电桥输出电压与被测电阻对变化量之比,可表示为

$$K_u = \frac{U_o}{\frac{\Delta R_1}{R_1}} = \frac{n}{(1+n)^2} U \quad (2-28)$$

由式(2-28)可知,电桥电压灵敏度正比于电桥供电电压,供电电压越高,电桥电压灵敏度就越高,但供电电压的提高受到应变片允许功耗的限制,所以要作适当选择。电桥电压灵敏度是桥臂电阻比值 n 的函数,恰当选择桥臂比 n 的值,可以保证电桥具有较高的电压灵敏度。

当 U 值确定后, n 取何值时才能使 K_u 最高。利用数学的方法可知,在 $\frac{dK_u}{dn} = 0$ 处,存在最大值,即

$$\frac{dK_u}{dn} = \frac{1-n}{(1+n)^3} = 0 \quad (2-29)$$

求得

$$n = 1$$

即当 $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$ 时,电桥电压灵敏度最大,最大值为

$$K_u = \frac{U}{4} \quad (2-30)$$

由此可见,当电源电压 U 和电阻相对变化量 $\frac{\Delta R_1}{R_1}$ 一定时,电桥的输出电压及其灵敏度也是定值,且与各桥臂电阻阻值大小无关。

3) 非线性误差及其补偿方法

为了减小和克服非线性误差,常采用差动电桥示意图。如图 2-18 所示为半差动电桥示意图。若 $\Delta R_1 = \Delta R_2$, $R_1 = R_2$, $R_3 = R_4$,该电桥输出电压为

$$U_o = \frac{U}{2} \cdot \frac{\Delta R_1}{R_1} \quad (2-31)$$

$$K_u = \frac{U}{2} \quad (2-32)$$

若将电桥四臂接入四片应变片,即两个受拉应变,两个受压应变,将两个应变符号相同的接入相对桥臂上,构成全差动电桥,其示意图如图 2-19 所示。

此时有

$$U_o = \frac{\Delta R_1}{R_1} U \quad (2-33)$$

$$K_u = U \quad (2-34)$$

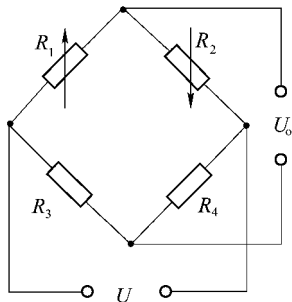


图 2-18 半差动电桥

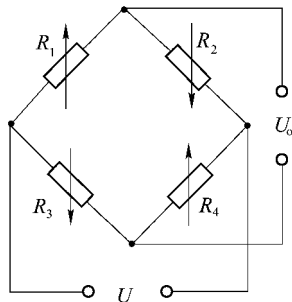


图 2-19 全差动电桥

2. 交流电桥

1) 交流电桥的平衡条件

由于供桥电源为交流电源,引线分布电容(C_1 和 C_2)使得两桥臂应变片呈现复阻抗特性,其示意图如图 2-20 所示。

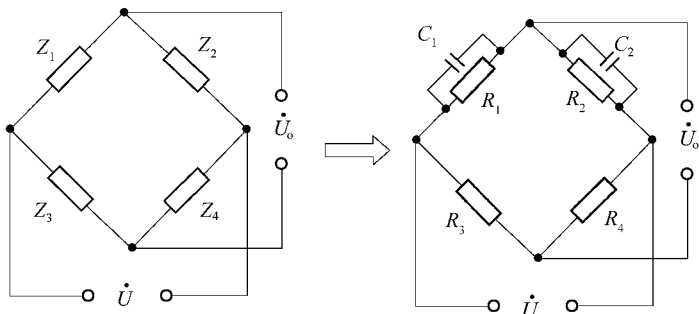


图 2-20 交流电桥

由交流电路分析可得

$$\dot{U}_o = \dot{U} \frac{Z_1 Z_4 - Z_2 Z_3}{(Z_1 + Z_2)(Z_3 + Z_4)} \quad (2-35)$$

要满足电桥平衡条件,即 $\dot{U}_o = 0$, 则有 $Z_1 Z_4 = Z_2 Z_3$ 。由

$$\begin{cases} Z_1 = \frac{R_1}{1 + j\omega R_1 C_1} \\ Z_2 = \frac{R_2}{1 + j\omega R_2 C_2} \\ Z_3 = R_3 \\ Z_4 = R_4 \end{cases} \quad (2-36)$$

代入电桥平衡条件表达式,可得

$$\frac{R_1}{1 + j\omega R_1 C_1} R_4 = \frac{R_2}{1 + j\omega R_2 C_2} R_3 \quad (2-37)$$

经整理得

$$\frac{R_3}{R_1} + j\omega R_3 C_1 = \frac{R_4}{R_2} + j\omega R_4 C_2 \quad (2-38)$$

其实部、虚部应分别相等,并整理可得交流电桥的平衡条件为

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{R_4}{R_3}, \quad \frac{R_4}{R_3} = \frac{C_1}{C_2} \quad (2-39)$$

2) 交流电桥平衡调节

由于分布电容的存在,交流信号的频率会影响电桥的平衡,故在使用之前,要对电桥进行平衡调节。常见交流电桥平衡调节电路如图 2-21 所示。

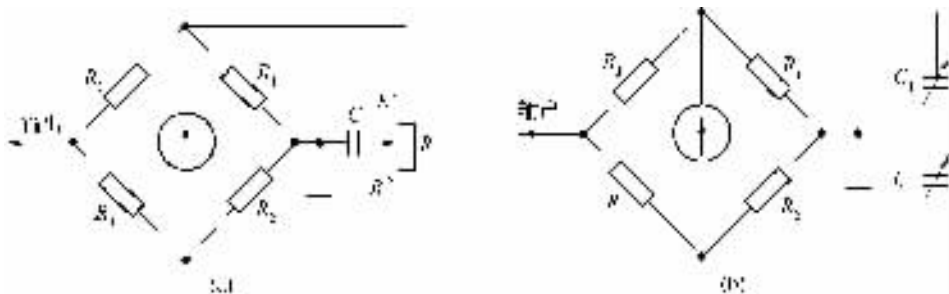


图 2-21 交流电桥平衡调节电路

2.2.6 应变式测力传感器

应变式传感器由弹性元件、应变片、附件(补偿元件、保护罩等)等组成,主要用作各种电子称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。测力传感器的弹性元件有柱式、筒式、环式、悬臂式等。

1. 柱(筒)式传感器

柱(筒)式传感器的应变片一般对称地贴在应力均匀的圆柱表面的中间部分,可对称地黏贴多片,构成差动式,这样能提高灵敏度,横向黏贴的应变片同时可作为温度补偿。如图 2-22 所示为柱(筒)式传感器原理图。

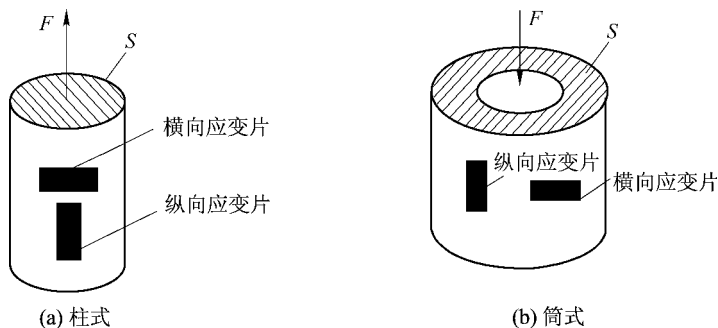


图 2-22 柱(筒)式传感器原理图

2. 悬臂式传感器

悬臂式传感器是一种高精度、抗偏、抗侧性能优越的称重测力传感器。其具有结构简单、应变片容易黏贴、灵敏度高等特点。如图 2-23 所示为悬臂式传感器示意图。这种传感器采用弹性梁及电阻应变片作为敏感转换元件,组成全桥电路。当有垂直正压力或拉力作用在弹性梁上时,电阻应变片随金属弹性梁一起变形,其应变使电阻应变片的阻值变化,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,即可显示或记录能量。悬臂式传感器又有等截面梁式和等强度梁式两种。

等截面梁就是悬臂梁的横截面处处相等的梁,当外力 F 作用在梁的自由端时,在固定端产生的应变最大。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 四个电阻应变片,且 R_3 、 R_4 位于等截面梁的背面与 R_1 、 R_2 相对的位置上。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四倍。

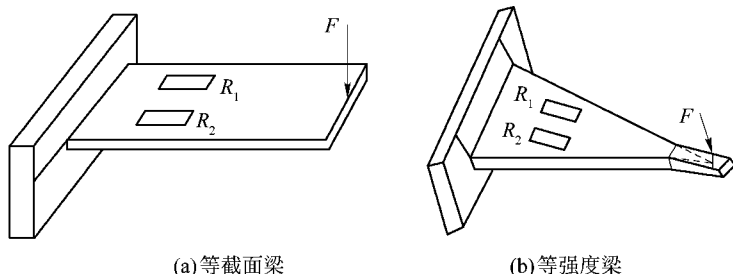


图 2-23 悬臂式传感器

等强度梁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。这种梁的优点是在长度方向上黏贴应变片的要求不严格。

悬臂梁式传感器一般可测 0.5 kg 以下的载荷,最小可测几十克重。这种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的量程为 0.2~30 t,精度可达 0.02% FS。

2.3 压阻式传感器

压阻式传感器由半导体材料制成,其灵敏系数大,比金属电阻应变片的灵敏系数大数十倍,横向效应和机械滞后极小,分辨率高,频率响应高,体积小。它主要用于测量压力、加速度、载荷等参数。由于半导体材料对温度很敏感,故压阻式传感器的温度误差较大,必须要有温度补偿。

2.3.1 压阻式传感器的工作原理

固体受到作用力后,电阻率就要发生变化,进而引起电阻的变化,这种效应称为压阻效应。半导体材料的压阻效应特别强。对于半导体应变片,有

$$\frac{\Delta R}{R} = (1 + 2\mu)\epsilon_1 + \frac{\Delta\rho}{\rho} \quad (2-40)$$

其中,由材料几何尺寸变化而引起电阻的变化很小,可忽略不计,故 $(1 + 2\mu) \approx 0$, 而 $\frac{\Delta\rho}{\rho}$ 很大。

也就是说,半导体材料电阻的变化主要是由半导体材料电阻率的变化造成的,则

$$\frac{\Delta R}{R} \approx \frac{\Delta\rho}{\rho} \quad (2-41)$$

又因为式(2-41)为半导体电阻率相对变化量,所以有

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} = \pi_1 E \frac{\Delta l}{l} \quad (2-42)$$

式中, π_1 为半导体材料的压阻系数, 它与半导体的材料种类、应力方向、杂质浓度及环境温度有关, E 为半导体材料的弹性模量。因此有

$$\frac{\Delta R}{R} \approx \frac{\Delta \rho}{\rho} = \pi_1 E \frac{\Delta l}{l} = \pi_1 E \epsilon_1 \quad (2-43)$$

式(2-43)说明, 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。

由此可见, 当半导体应变片受到外界应力的作用时, 其电阻(率)的变化与受到应力的的大小成正比, 这就是压阻传感器的工作原理。

半导体应变片的灵敏度系数 K 为

$$K = \frac{\frac{\Delta R}{R}}{\epsilon_1} = \pi_1 E \quad (2-44)$$

另外, 半导体的应变灵敏度系数还与掺杂浓度有关, 它随杂质的增加而减小。

2.3.2 压阻式传感器的温度误差及补偿

压阻式传感器在受到温度影响后, 要产生零位漂移和灵敏度漂移, 故会产生温度误差。零位漂移是指在没有应压力的作用时, 由于半导体材料温度系数大, 阻值则会随温度的变化而变化, 以致输出不为零的现象。温度越高, 电阻越小, 零位漂移越明显。灵敏度漂移是指由于压阻系数随温度变化而变化, 以致灵敏度发生变化的现象。温度上升, 压阻系数会减小, 灵敏度则会降低, 反之灵敏度升高。

零位漂移通常采用串、并联电阻的方法进行补偿, 其电路示意图如图 2-24 所示。

当温度变化时, R_Δ 阻值变化, 导致 B 点电位变化, 为了抵消 B 点电位的变化, 在 R_3 上并联电阻 R_B , 实现补偿作用, 从而消除零位漂移。

在电源回路中串联二极管的作用是补偿灵敏度漂移。温度升高, 则二极管管压降减小, 使输出变大, 以补偿灵敏度的下降。所串二极管的个数, 要根据实际情况来确定。

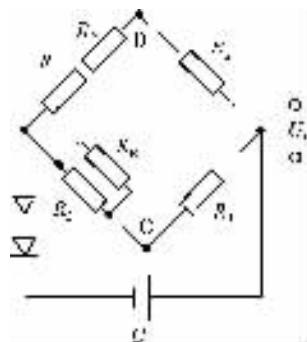


图 2-24 补偿电路

2.3.3 压阻式传感器的应用

1. 压阻式压力传感器

压阻式压力传感器原理结构图如图 2-25 所示。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。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。四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, 电压与膜片两边的压力差成正比。

四个电阻的位置配置要按膜片上径向应力和切向应力的分布情况确定。其优点是体积小, 结构比较简单, 动态响应也好, 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。压阻式压力传感器的测量准确度受到非线性和

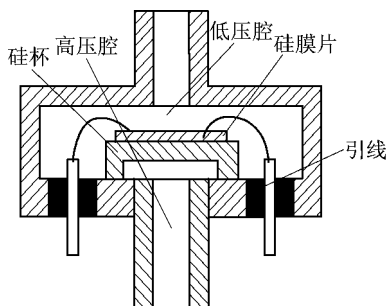


图 2-25 压阻式压力传感器

温度的影响,使用时要对其进行非线性和温度补偿。

2. 压阻式加速度传感器

压阻式加速度传感器采用硅悬臂梁结构。在硅悬臂梁的自由端装有敏感质量块,在梁的根部黏贴四个相同的电阻应变片,其结构示意图如图 2-26 所示。

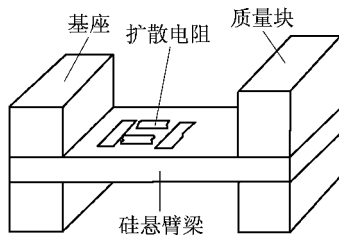


图 2-26 压阻式加速度传感器

当悬臂梁自由端的质量块受到外界加速度作用时,加速度转变为惯性力,使悬臂梁受到弯矩作用,产生应力。这时硅梁上四根电阻条的阻值发生变化,使电桥产生不平衡,从而输出与外界的加速度成正比的电压值。

本章小结

电阻式传感器就是把被测量的变化转换成电阻的变化,然后通过测量电路输出需要的电压或电流等物理量的传感器。本章主要从电位器式电阻传感器、应变式电阻传感器、压阻式传感器等类型来介绍电阻式传感器。

1. 电位器是一种把线位移或角位移转换成电阻或电压输出的传感元件。电位器式电阻传感器可分为线性电位器式传感器和非线性电位器式传感器两种;从结构形式上的不同,电位器式电阻传感器可分为线绕式和非线绕式。非线绕式传感器有合成膜式、导电塑料式、光电式等。

2. 线性电位器式传感器是指输入量与输出量的关系是线性关系,对应的输入-输出关系曲线是一条直线的传感器。线性电位器式传感器又可分为直线位移式和角位移式,分别用来测直线位移和角位移。非线性电位器是指在空载时输出电压或电阻与输入量位移之间呈现某种非线性函数关系的一种电位器。常用的非线性电位器有变骨架式传感器、变节距式传感器、分路电阻式传感器和电位给定式传感器四种。变骨架式电位器是在保持电阻丝参数不变的情况下,只改变骨架的高度 h 来实现非线性函数关系的。

3. 电刷在起始位置和最大位置时,负载误差都为零,当电刷处于行程中心位置时,负载误差最大。一般可以采取把电位器绕成非线性的、加入补偿可变电阻和限制电位器的工作区间等方法来减小负载误差。阶梯误差的大小是由线绕电位器自身的工作原理所决定的,是一种原理性误差。为减小阶梯误差,设计时需增加线圈匝数,减小导线直径或增加骨架长度。电位器式传感器除了负载误差和阶梯误差之外,还具有工艺误差。在所有的误差当中,工艺误差所占的比例最大。在实际应用中,应设法减小此种误差。

4. 常用的线绕式电位器通常由电阻丝、电刷及骨架构成。线绕式电位器对电阻丝的要

求是电阻系数大,电阻温度系数小,强度高,延展性好,焊接性好,耐磨耐腐蚀。电刷是由具有弹性的金属薄片或金属丝制成,末端弯曲形成弧形。制作电刷的材料要与电阻丝材料配合选择,制作骨架的材料要求形状稳定。

5. 应变式电阻传感器是由弹性元件上黏贴电阻应变片构成的。它利用了导体或半导体的应变效应。应变效应是指导体或半导体材料在受到外界力(拉力或压力)作用时,将产生机械变形,进而导致其电阻值的变化。对于确定的电阻丝,电阻值的相对变化与电阻丝的轴向应变成正比。

习 题 2

2.1 试简述金属电阻应变片与半导体材料的电阻应变效应的区别。

2.2 采用阻值 $R=120\ \Omega$ 、灵敏度系数 $K=2.0$ 的金属电阻应变片与阻值 $R=120\ \Omega$ 的固定电阻组成电桥,供桥电压为 $10\ \text{V}$ 。当应变片应变为 1000 时,若要使输出电压大于 $10\ \text{mV}$,应采用何种工作方式?(设输出阻抗为无穷大)

2.3 试简述直流测量电桥和交流测量电桥的区别。

2.4 试简述电位器式位移传感器的工作原理。

2.5 采用阻值为 $120\ \Omega$ 、灵敏度系数 $K=2.0$ 的金属电阻应变片和阻值为 $120\ \Omega$ 的固定电阻组成电桥,供桥电压为 $4\ \text{V}$,并假定负载电阻无穷大。当应变片上的应变分别为 1 和 1000 时,试求单臂、双臂和全桥工作时的输出电压,并比较三种情况下的灵敏度。

2.6 在等强度梁测力系统(见图 2-23b)中, R_1 为电阻应变片,灵敏度系数为 $K=2.0$,未受应变时, $R_1=120\ \Omega$ 。当试件受力 F 时,应变片承受平均应变 $\epsilon=800\ \mu\text{m}/\text{m}$,试求:

(1)应变片电阻变化量和相对变化量。

(2)若要减小非线性误差,应采取何种措施?

2.7 试简述电阻应变片式测力传感器的工作原理。

2.8 在一受拉力的钢件上,黏贴一电阻应变片 R ,此应变片所能感受出的电阻最小相对变化量 $\left(\frac{\Delta R}{R}\right)_{\min}=1\times 10^{-7}$ 。若电阻应变片的灵敏度系数 $K=2$,问可测出的最小应变 ϵ_{\min} 为多少?(钢件的弹性模量 $E=2\times 10^7\ \text{N}/\text{cm}^2$)

2.9 在半导体应变片电桥电路中,其中一个桥臂为边导体应变片,其余桥臂为固定电阻,该应变片受到 $\epsilon=4300\mu$ 应变作用。若该电桥 $n=\frac{R_2}{R_1}=1$,则该应变片的灵敏度为多少?

2.10 试简述电阻应变片实现温度补偿的方法。

2.11 试简述压阻式压力及加速度传感器的工作原理。

第 8 章 霍尔传感器

霍尔传感器是一种利用霍尔元件将一些被测物理量如电流、磁场、位移、压力等,转换成电压信号输出的传感器,其基本原理是基于霍尔效应。虽然霍尔传感器的转换效率较低,易受温度影响,但它结构简单、体积小、频率响应宽、输出动态范围大、可靠性高、易集成、可用于非接触测量,因此霍尔传感器在测量技术、自动化技术等方面都得到了广泛的应用。

8.1 霍尔传感器的工作原理

8.1.1 霍尔效应

如图 8-1 所示,一块长度为 L 、宽度为 b 、厚度为 d 的半导体薄片,当它被置于磁感应强度为 B 的磁场中,如果在它相对的两边通以控制电流 I ,且磁场方向与电流方向正交,则在半导体的另外两边将会产生一个大小与控制电流 I 和磁感应强度 B 的乘积成正比的电势 U_H ,即 $U_H = K_H IB$,其中 K_H 为霍尔元件的灵敏度。这一现象就是霍尔效应,该电势称为霍尔电势,半导体薄片就是霍尔元件。霍尔元件本身输出的霍尔电势非常小,一般为毫伏量级,在实际使用时必须加差分放大器进行放大以便于后级电路的信号处理。

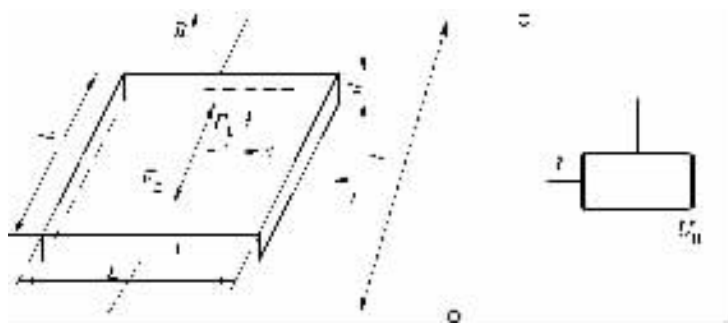


图 8-1 霍尔效应的原理图及霍尔元件符号

8.1.2 基本原理

霍尔效应是半导体中的自由电荷受到磁场中的洛伦兹力作用而产生的。基于霍尔效应原理工作的半导体器件称为霍尔元件。

设霍尔元件为 N 型半导体,当它通以电流 I 时,半导体中的自由电荷即载流子电子受到磁场中洛伦兹力 F_L 的作用,其大小为

$$F_L = -evB \tag{8-1}$$

式中, v 为电子速度; e 为电子电量; B 为垂直于霍尔元件表面的磁感应强度。

洛伦兹力 F_L 使电子向垂直于 B 和自由电子运动方向偏移,其方向符合右手螺旋定律,即电子有向某一端积聚的现象,使半导体一端面产生负电荷积聚,另一端面则产生正电荷积

聚。由于电荷积聚,产生静电场,该静电场被称为霍尔电场。霍尔静电场对电子的作用力 F_E 与洛仑兹力 F_L 的方向相反,将阻止电子继续偏转,其大小为

$$F_E = -eE_H = -e \frac{U_H}{b} \quad (8-2)$$

式中, E_H 为霍尔电场; e 为电子电量。

当静电场作用于运动电子上的 F_E 与洛仑兹力 F_L 相等时,电子积累达到动态平衡,即

$$-evB = -e \frac{U_H}{b} \quad (8-3)$$

此时,霍尔电场的强度为

$$E_H = vB \quad (8-4)$$

霍尔电势 U_H 为

$$U_H = bvB \quad (8-5)$$

流过霍尔元件的电流 I 为

$$I = \frac{dQ}{dt} = bdnv(-e) \quad (8-6)$$

式中, bd 为与电流方向垂直的截面积; n 为单位体积内的自由电子数。

将式(8-6)代入式(8-5),可得霍尔电势 U_H 为

$$U_H = -\frac{IB}{ned} \quad (8-7)$$

在式(8-7)中,若取

$$R_H = -\frac{1}{ne} \quad (8-8)$$

则式(8-7)将化简为

$$U_H = R_H \frac{BI}{d} \quad (8-9)$$

式中, R_H 为霍尔传感器的霍尔系数。

由此可知,霍尔系数由半导体材料的性质来决定,它决定霍尔电势的大小。

设

$$K_H = \frac{R_H}{d} \quad (8-10)$$

式中, K_H 为霍尔元件的灵敏度,单位为 $\text{mV}/(\text{mA} \cdot \text{T})$ 。 K_H 表示一个霍尔元件在单位控制电流和单位磁感应强度时产生的霍尔电压的大小,它不仅取决于载流体材料,而且取决于它本身的几何尺寸,则式(8-9)霍尔电势 U_H 可化简为

$$U_H = K_H IB \quad (8-11)$$

由于材料电阻率 ρ 与载流子浓度和迁移率 μ 有关,可得到载流体的电阻率 ρ 与霍尔系数 R_H 和载流子迁移率 μ 之间的关系为

$$\rho = \frac{R_H}{\mu} \quad (8-12)$$

于是得到

$$R_H = \rho\mu \quad (8-13)$$

霍尔电势 U_H 为

$$U_H = \frac{R_H}{d} IB = \frac{\rho\mu}{d} IB \quad (8-14)$$

由此可见,若想得到较强的霍尔电势,则半导体材料的电阻率必须要高,且迁移率也要大。虽然金属导体的载流子迁移率很大,但其电阻率低;绝缘体的电阻率很高,但其载流子迁移率低。因此最佳的霍尔传感器的材料只有半导体材料。一些霍尔元件材料的特性如表 8-1 所示。

霍尔电势除了与材料的载流子迁移率和电阻率有关外,同时还与霍尔元件的几何尺寸有关。一般要求霍尔元件的灵敏度越大越好。霍尔元件的厚度 d 与 K_H 成反比。因此,霍尔元件的厚度越小,它的灵敏度就越高,但厚度太小,会使元件的输入、输出电阻增加。

表 8-1 霍尔元件的材料特性

材料	迁移率/ $\text{cm}^2 \cdot (\text{V} \cdot \text{s})^{-1}$		禁带宽度/eV	霍尔系数温度特性/ $(\% \cdot ^\circ\text{C}^{-1})$
	电子	空穴		
Ge1	3600	1800	0.60	0.01
Ge2	3600	1800	0.80	0.01
Si	1500	425	1.11	0.11
InAs	28000	200	0.36	-0.1
InSb	75000	750	0.18	-2.0
GaAs	10000	450	1.40	0.02

8.1.3 霍尔元件的主要参数

1. 额定功耗 P_0

额定功耗 P_0 是指在环境温度为 25°C 时,允许通过霍尔元件的电流 I 和电压 U_{CC} 的乘积,单位为 mW 。当供给霍尔元件的电压确定后,根据额定功耗就可以知道额定控制电流 I 。

2. 输入电阻 R_i 和输出电阻 R_o

输入电阻 R_i 是指控制电极之间的电阻值,输出电阻 R_o 指霍尔元件输出电极间的电阻值,单位都为 Ω 。输入、输出电阻都可以在无磁场($B=0$)时,用欧姆表来测量。

3. 不平衡电势 U_0

不平衡电势(或不等电势) U_0 。是指霍尔元件在额定控制电流 I 作用下,不外加磁场时,霍尔电极间的空载霍尔电势,单位为 mV 。不平衡电势和额定控制电流 I 之比为不平衡电阻 R_0 。

4. 霍尔电势温度系数 α

霍尔电势温度系数 α 是指在一定的磁感应强度 B 和控制电流 I 下,温度变化 1°C 时,霍尔电势变化的百分率。

5. 内阻温度系数 β

内阻温度系数 β 是指霍尔元件在没有磁场且在工作温度范围内,温度变化 1°C 时,输入电阻 R_i 与输出电阻 R_o 变化的百分率,一般取不同温度时的平均值。

6. 灵敏度 K_H

霍尔元件的灵敏度 K_H 是指霍尔元件在单位磁感应强度和单位控制电流作用下,所能输出的霍尔电势的大小。

8.1.4 霍尔元件的基本测量电路

如图 8-2 所示为霍尔元件的基本测量电路。控制电流 I 由电源 U_{CC} 供给,电位器 R_P 用来

调节控制电流 I 的大小。霍尔元件的输出接负载电阻 R_L , R_L 可以是放大器的输入电阻或测量仪表的内阻。由于霍尔元件必须在磁场与控制电流作用下,才会产生霍尔电势 U_H ,故在测量中,可以把 I 和 B 的乘积 IB 作为输入信号,则霍尔元件的输出电势分别正比于 IB 、 I 或 B 。

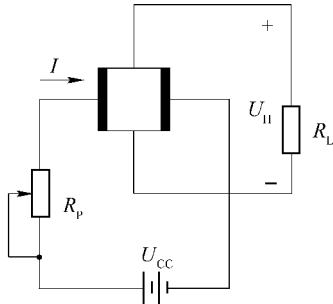


图 8-2 霍尔元件的基本测量电路

当输入霍尔元件的控制电流一定时,输出的霍尔电势与磁感应强度 B 成正比,用此可以做成霍尔开关。敏感磁场变化时,输出一个电平信号起按键开关作用。如果保持霍尔元件的激励电流不变,而元件随被测位移量在一个均匀梯度磁场中移动,那么此时输出的霍尔电势与元件在磁场中所处位置有关,即与输入位移成线性关系。

当霍尔元件作线性测量时,最好选用灵敏度低、不平衡电势小、稳定性和线性度优良的霍尔元件。而当霍尔元件作开关使用时,要选择灵敏度高的霍尔元件。

8.2 集成霍尔传感器

目前霍尔传感器已从分立元件发展到了集成电路的阶段,正越来越多地受到人们的重视,应用日益广泛。集成霍尔传感器是利用硅集成电路工艺将霍尔元件和测量线路集成在一起的一种传感器。集成霍尔传感器与分立元件相比,它具有可靠性高、体积小、重量轻、功耗低等优点。

集成霍尔传感器的输出是经过处理的霍尔输出信号。按照输出信号的形式,可以分为开关型集成霍尔传感器和线性集成霍尔传感器两种类型。

8.2.1 开关型集成霍尔传感器

开关型集成霍尔传感器是利用霍尔效应与集成电路技术结合而成的一种磁敏传感器,它能感知所有与磁信息有关的物理量,并以开关信号的形式输出。开关型集成霍尔传感器具有使用寿命长、无触点磨损、无火花干扰、无抖动转换、温度特性好、工作频率高、能适应恶劣环境等优点。

1. 开关型集成霍尔传感器的结构

开关型集成霍尔传感器是采用硅材料,利用硅平面工艺制造的。虽然硅材料并不是制作霍尔元件的理想材料,但对于开关型集成霍尔传感器来说,由于 N 型硅的外延层材料非常薄,可以提高霍尔电势 U_H 。如果应用硅平面工艺技术将差分放大器、施密特触发器及霍尔元件集成在一起,就可以大大提高传感器的灵敏度。

开关型集成霍尔传感器的内部结构图如图 8-3 所示。开关型集成霍尔传感器主要由稳压电路、霍尔元件、放大器、整形电路和开路输出五个部分组成。其中稳压电路可使传感器在较宽的电源电压范围内工作；开路输出可使传感器方便与各种逻辑电路连接。

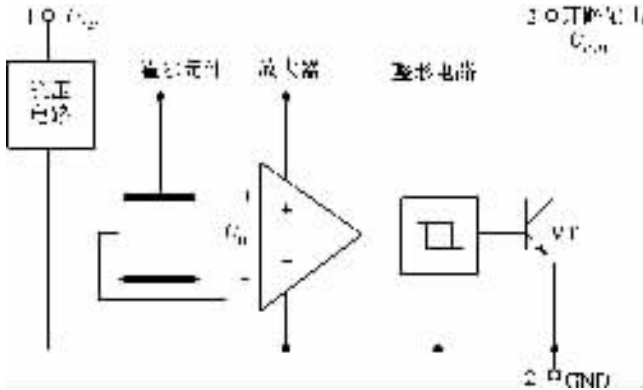


图 8-3 开关型集成霍尔传感器内部结构图

开关型集成霍尔传感器的外形及典型应用电路如图 8-4 所示。

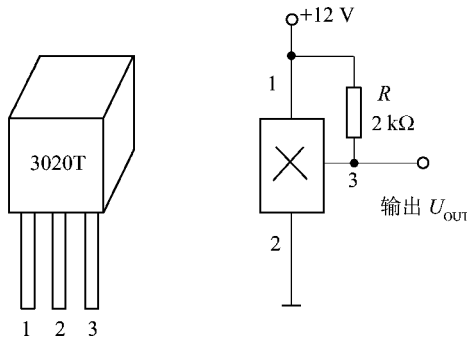


图 8-4 开关型集成霍尔传感器的外形及应用电路

2. 开关型霍尔集成传感器的工作原理

开关型集成霍尔传感器是把霍尔元件的输出经过处理后输出一个高电平或低电平的数字信号。其原理及工作过程可简述如下：当传感器上有磁场作用时，根据霍尔效应原理，霍尔元件将输出霍尔电势 U_H ，该电势 U_H 再经放大器进行放大后，送到施密特整形电路。当放大后的 U_H 电压大于“开启”阈值时，施密特整形电路翻转，输出高电平，使半导体管 VT 导通，且具有吸收电流的负载能力，此时称这种状态为开状态。当磁场减弱时，霍尔元件输出的电压 U_H 很小，即使经放大器放大后，其输出值还小于施密特整形电路的“关闭”阈值，施密特整形电路会再次翻转，输出低电平，使半导体管 VT 截止，这种状态称为关状态。由此可见，一次磁场强度的变化就使传感器完成了一次开关动作。开关型集成霍尔传感器的输出只有低电平和高电平两种状态。

3. 开关型集成霍尔传感器的工作特性

开关型集成霍尔传感器的工作特性曲线如图 8-5 所示。由工作特性曲线可以看出，工作过程中有一定的磁滞 B_H ，这对提高开关动作的可靠性非常有利。图 8-5 中的 B_{OP} 为工作点“开”的磁感应强度， B_{KP} 为释放点“关”的磁感应强度。

开关型集成霍尔传感器的工作特性曲线反映了外加磁场与传感器输出电平的关系。当外加磁感应强度高于 B_{OP} 时,输出由高电平变低电平,传感器处于开状态。当外加磁感应强度低于 B_{KP} 时,输出由低电平变为高电平,传感器处于关状态。

开关型集成霍尔传感器中包含一种双稳态型传感器,这种霍尔传感器也被称为锁键型传感器,如 UGN3075,它的工作特性曲线如图 8-6 所示。当外加磁感应强度超过工作点 B_{OP} 时,其输出为导通状态。而当磁场撤消后,输出仍保持不变,必须施加反向磁场并使之超过释放点 B_{KP} 时,其输出才为关断状态。

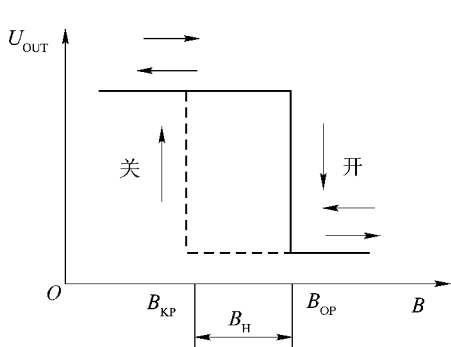


图 8-5 开关型集成霍尔传感器的工作特性曲线

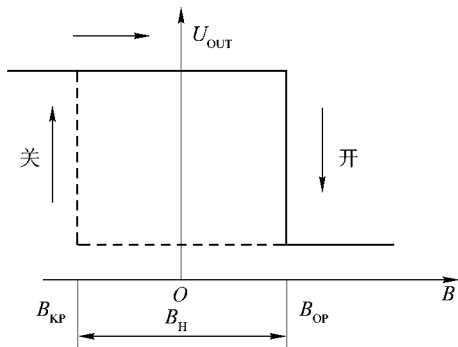


图 8-6 双稳态开关型集成霍尔传感器的工作特性曲线

4. 开关型集成霍尔传感器的接口电路

在图 8-3 中,开关型集成霍尔传感器的输出半导体管 VT 是发射极接地而集电极开路的电路结构。这样的电路结构很容易与半导体管及一般的逻辑电路相耦合。如图 8-7 所示为一般负载的接口电路。

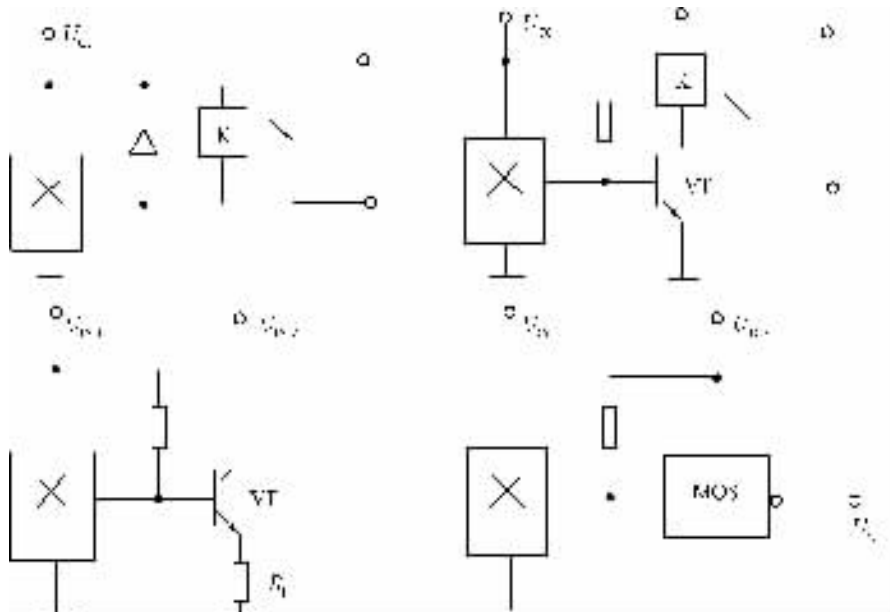


图 8-7 开关型集成霍尔传感器的接口电路

8.2.2 线性集成霍尔传感器

1. 线性集成霍尔传感器的结构及工作原理

线性集成霍尔传感器一般由霍尔元件和放大器组成。当外加磁场时,霍尔元件产生与磁场成线性比例变化的霍尔电压,再经放大器放大后输出。线性集成霍尔传感器的输出电压与外加磁场强度成线性比例关系。在实际电路设计中,为了提高传感器的性能,一般在电路中还设置稳压、电流放大输出级、失调调整、线性度调整等电路。

线性集成霍尔传感器有单端输出和双端输出两种。单端输出的线性集成霍尔传感器是一个三引脚器件,其电路结构及外形如图 8-8 所示。其输出电压对外加磁场的微小变化能迅速做出线性响应,通常将输出电压用电容连接到外接放大器,并将输出电压放大到较高的水平,如典型产品 SL3501T。SL3501T 由稳压器、霍尔电势发生器和信号放大器组成。

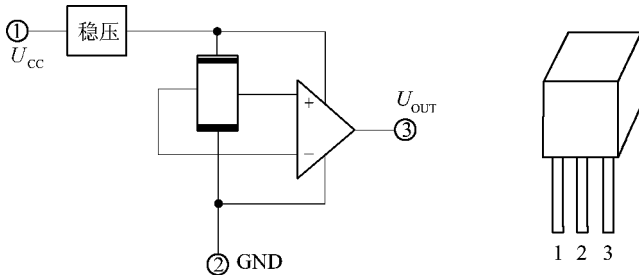


图 8-8 单端输出传感器的电路结构及外形

SL3501T 型线性集成霍尔传感器的检测连接图如图 8-9 所示。当用永久磁铁的 N 极靠近霍尔传感器时,其输出端电压将增大;若用 S 极靠近,则输出端电压将减小。该传感器输出电压的最大变化量取决于永久磁铁剩磁的强弱。在检测电路连接正确的情况下,用永久磁铁的任何一个磁极靠近霍尔传感器,若传感器的输出电压没有任何变化或变化极小,则表明霍尔传感器已经损坏。

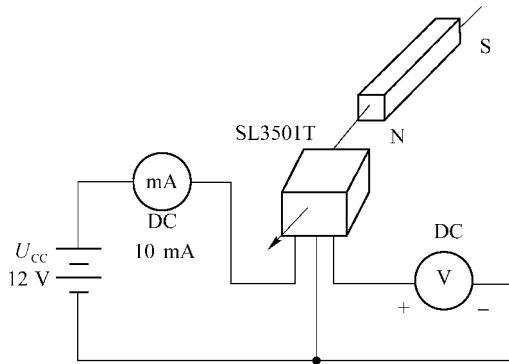


图 8-9 SL3501T 型线性集成霍尔传感器的检测连接图

双端输出的线性集成霍尔传感器是一个八引脚双列直插封装器件,其电路结构如图 8-10 所示。它可提供差动射极跟随输出,还可提供输出调零,其典型的产品为 SL3501M。

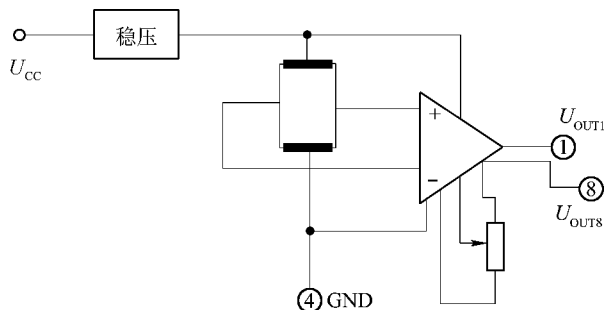


图 8-10 双端输出的电路结构

2. 线性集成霍尔传感器的主要技术特性

线性集成霍尔传感器的输出特性曲线如图 8-11 所示,技术参数如表 8-2 所示。

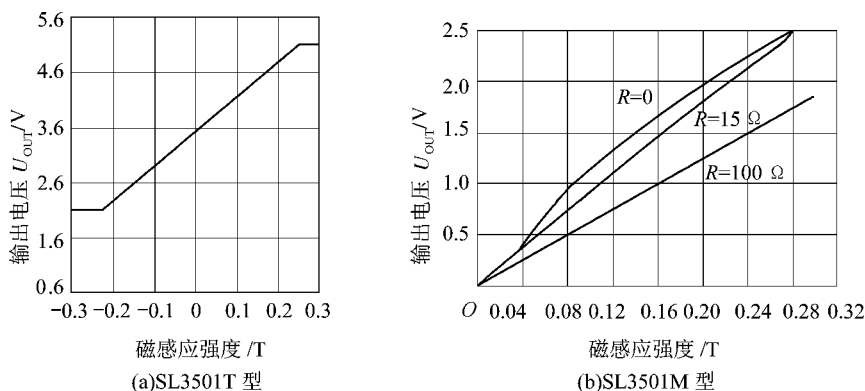


图 8-11 线性集成霍尔传感器的输出特性曲线

表 8-2 霍尔线性集成传感器的技术参数

型号	电源电压/V	输出电压/V	灵敏度/ $\text{mV}(\text{mA} \cdot \text{T})^{-1}$	工作温度/ $^{\circ}\text{C}$	国外同类产品
SL3501T	8~12	2.5~5	3500~7000	0~70	UGN-3501T
SL3501M	8~16	3.6	700~1400	0~70	UGN-3501M

开关型集成霍尔传感器的输出只有低电平和高电平两种状态,而霍尔线性集成传感器的输出却是对外加磁场的线性感应。因此,线性集成霍尔传感器可广泛用于位置、力、重量、厚度、速度、磁场、电流等的测量或控制。

8.3 霍尔传感器的应用

8.3.1 霍尔式位移传感器

霍尔式位移传感器的结构如图 8-12(a)所示。在极性相反、磁场强度相同的两个磁钢的气隙间放置一个霍尔元件,并保持霍尔元件的控制电流恒定,霍尔电势 U_H 与外磁感应强度成正比;当霍尔元件沿 x 方向移动时,若磁场在一定范围内沿 x 方向的变化梯度 $\frac{dB}{dx}$ 为常数

(即均匀梯度的磁场中),如图 8-12(b)所示,则输出的霍尔电势变化为

$$\frac{dU_H}{dx} = R_H \frac{I dB}{d dx} = K \quad (8-15)$$

式中, K 为位移传感器的输出灵敏度。

对式(8-15)进行积分后,可得

$$U_H = Kx \quad (8-16)$$

由式(8-16)可知,霍尔电势与位移量成线性关系。电势的极性表明了元件位移的方向。磁场梯度越大,灵敏度越高,磁场梯度越均匀,输出线性度就越好。当 $x=0$ 时,则元件置于磁场中心位置, $U_H=0$ 。为了获得均匀的磁场梯度,往往将磁钢的磁极片设计成一种特殊形状,如图 8-12(c)所示。霍尔式位移传感器可用于测量 $\pm 0.5 \text{ mm}$ 的小位移,其特点是惯性小、响应速度快、无触点测量。特别适用于微位移、机械振动等的测量。利用这一原理可以测量相关的非电量,如力、加速度、液位、压差等。若霍尔元件在均匀磁场内转动,则会产生与转角的正弦函数成比例的霍尔电压,可用于测量角位移。

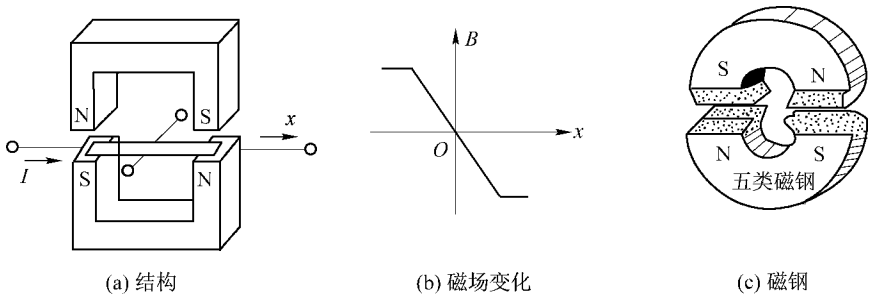


图 8-12 霍尔式位移传感器原理示意图

8.3.2 霍尔式压力传感器

由前面可知,任何非电量只要能转换成位移量的变化,均可利用霍尔式位移传感器的原理转换成霍尔电势。而霍尔式压力传感器就是一种将非电量转换成位移量的传感器,其原理示意图如图 8-13 所示。霍尔压力传感器的工作原理是先用弹性元件将被测压力变换成位移,由于霍尔元件固定在弹性元件的自由端上,故弹性元件产生位移时会带动霍尔元件使它在线性变化的磁场中移动,从而输出霍尔电势。弹性元件可以是波登管也可以是膜盒,图 8-13 中弹性元件波登管一端固定,另一端为自由端,安装在霍尔元件之中。当输入压力增加时,波登管伸长,使霍尔元件在均匀梯度磁场中产生相应的位移,输出与压力成正比的霍尔电势。

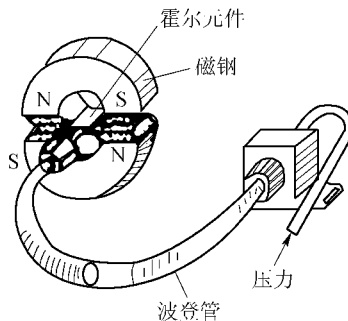


图 8-13 霍尔式压力传感器原理示意图

8.3.3 霍尔电子点火器

霍尔电子点火器中的霍尔传感器磁路示意图如图 8-14 所示。将霍尔元件固定在汽车分电器的白金座上,在分火点上装上一个隔磁罩,隔磁罩竖的一边根据汽车发动机的缸数开出相同间距的缺口,当缺口对准霍尔元件时,磁通通过霍尔元件而成闭合回路,所以电路导通,此时霍尔电路输出低电平($\leq 0.4\text{ V}$),如图 8-14(a)所示;当隔磁罩竖边的缺口没有对准挡在霍尔元件时,就不能形成一个闭合回路,则电路截止,霍尔电路输出高电平,如图 8-14 (b)所示。

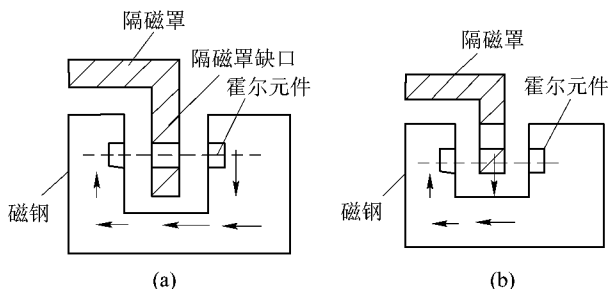


图 8-14 霍尔电子点火器磁路示意图

如图 8-15 所示为霍尔电子点火器原理图。其原理为:当霍尔传感器输出低电平时,三极管 BG_1 截止,而 BG_2 、 BG_3 导通,点火线圈的初级线圈会有一恒定电流通过。当霍尔传感器输出高电平时, BG_1 导通, BG_2 、 BG_3 截止,点火器的初级电流截断,此时储存在点火线圈中的能量,由次级线圈以高压放电形式输出,也就是汽车的放电点火过程。

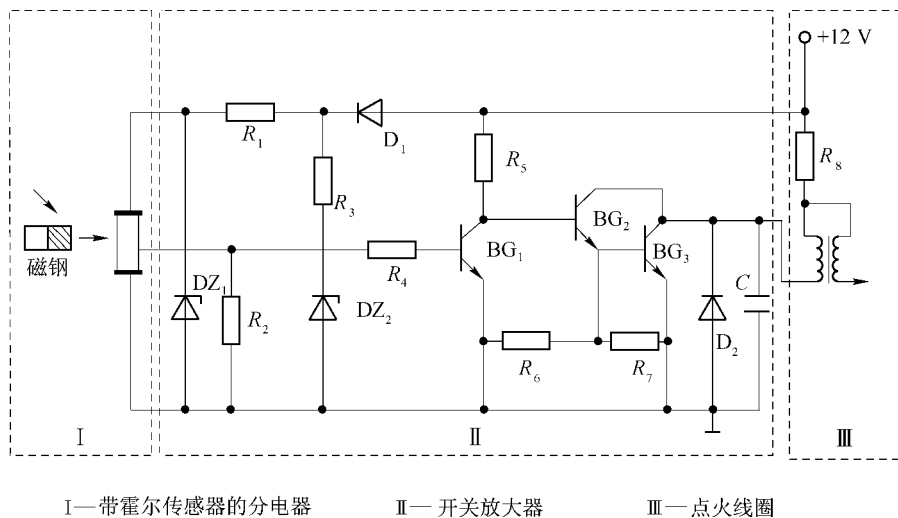


图 8-15 霍尔电子点火器原理图

本章小结

1. 本章共分为三部分,第一部分讲述了霍尔传感器的基础知识,详细介绍了霍尔效应、霍尔传感器的工作原理、霍尔元件的主要技术参数以及霍尔元件的基本测量电路。为了正确使用霍尔传感器必须遵循一系列技术参数,在选用传感器时要根据具体使用条件来正确选择。

2. 本章的第二部分主要讲了集成霍尔传感器,并详细介绍了开关型霍尔集成传感器和线性集成霍尔传感器的结构、工作原理、工作特性以及接口电路。

3. 本章第三部分详细讲了霍尔传感器的几种应用电路。为了更好地应用霍尔传感器,应当了解其发展动向,以便及时掌握和使用各种类型的传感器。

习 题 8

8.1 简述霍尔效应的原理,并说明其应用。

8.2 一个霍尔元件在一定的电流控制下,其霍尔电势与哪些因素有关?

8.3 若一个霍尔器件的灵敏度 $K_H = 4 \text{ mV}/(\text{mA} \cdot \text{T})$,控制电流 $I = 3 \text{ mA}$,将它置于 $1 \text{ T} \sim 5 \text{ T}$ 变化的磁场中,它输出的霍尔电势范围多大? 设计一个 20 倍的比例放大器来放大该霍尔电势。

8.4 为什么说某些半导体材料是制造霍尔元件的最佳材料?

8.5 集成霍尔传感器分为哪些类型,各有什么特点?

8.6 根据图 8-15 霍尔电子点火器原理,试设计一个用运算放大器和晶体管组成的混合型霍尔电子点火器,并简述其工作原理。