

第5章

磁电式传感器

本章知识点：

- 磁电感应式传感器的原理及应用
- 霍尔式传感器的原理及应用

基本要求：

- 掌握磁电感应式传感器的工作原理
- 掌握霍尔效应的基本原理
- 理解磁电式传感器的应用方法

能力培养目标：

通过本章的内容，对磁电式传感器进行系统学习，掌握磁电感应式传感器与霍尔式传感器的基本原理及工程应用方法，通过实际应用案例，培养知识的综合应用能力以及系统认知、设计与开发能力。

磁电式传感器是利用电磁感应原理，将被测非电量转换成线圈中的感应电势输出。它的工作不需要外加电源，可以直接从被测物体吸取机械能量并转换成电信号输出，是一种典型的发电型传感器。由于这种传感器输出功率较大，因而大大地简化了配用的二次仪表电路。另外，它的性能稳定，还可以针对使用对象做成不同的结构形式，如直接式或惯性式。这种传感器在各系统中都获得了较普遍的应用。磁电式传感器有磁电感应式传感器、霍尔式传感器等。

5.1 磁电感应式传感器

磁电感应式传感器简称感应式传感器，也称为电动式传感器，是利用电磁感应原理将被测量（如振动、位移、转速等）转换成感应电动势输出的一种传感器。它不需要辅助电源，就能够把被测对象的机械量转换成易于测量的电信号，是一种有源传感器。由于它输出功率大，且性能稳定，输出阻抗小，具有一定的工作带宽（10~1000Hz），所以得到普遍应用，适用于振动、转速、扭矩等测量，但这种传感器的尺寸和重量都较大。

5.1.1 磁电感应式传感器的原理

1. 磁电感应式传感器的工作原理及类型

磁电感应式传感器是以电磁感应原理为基础的。根据法拉第电磁感应定律可知，当运动导

体在磁场中切割磁力线或线圈所在磁场的磁通变化时, 导体中的磁通量 Φ 发生变化, 在导体中产生感应电动势 e , 如图 5-1 所示, 当导体形成闭合回路就会出现感应电流。导体中感应电动势 e 的大小与回路所包围的磁通量的变化率成正比。

$$e = \left| \frac{d\Phi}{dt} \right| = Bl \frac{dx}{dt} = Blv \quad (5-1)$$

式中 B ——线圈所在磁场的磁感应强度 (T);
 l ——每匝线圈的平均长度;
 v ——导体相对磁场的运动速度。

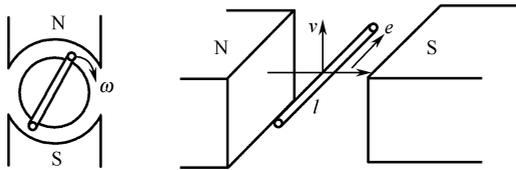


图 5-1 运动导体在磁场中产生感应电动势

若 N 匝线圈以角速度 ω 转动, 则感应电动势可写为

$$e = -NBS\omega \quad (5-2)$$

式中 S ——每匝线圈的平均截面积。

只要磁通量发生变化, 就有感应电动势产生, 可实现的方法很多, 主要有:

- (1) 线圈与磁场发生相对运动;
- (2) 磁路中磁阻变化;
- (3) 恒定磁场中线圈的面积变化。

当传感器的结构参数确定后, 其中 B 、 l 、 N 、 S 均为定值, 则感应电动势 e 与线圈相对于磁场的运动速度 v 或角速度 ω 成正比。所以, 可用磁电感应式传感器测量线速度和角速度, 对测得的速度进行积分或微分就可以求出位移和加速度。由上述工作原理可知, 磁电感应式传感器只适用于动态测量。

根据以上原理, 人们设计出两种磁电式传感器结构: 变磁通式和恒磁通式。

1) 变磁通式

变磁通式传感器又称为变磁阻磁电感应式传感器或变气隙磁电感应式传感器。这类传感器的线圈和磁铁固定, 利用铁磁性物质制成齿轮 (或凸轮) 与被测物体相连而运动。在运动中, 齿轮 (或凸轮) 不断改变磁路的磁阻, 从而改变线圈的磁通, 在线圈中产生感应电动势。这类传感器在结构上有开磁路和闭磁路两种, 一般用来测量旋转物体的角速度, 产生感应电动势的频率作为输出。

(1) 开磁路变磁通式传感器。图 5-2 所示为开磁路变磁通式磁电传感器结构图, 线圈、磁铁静止不动, 测量齿轮安装在被测旋转体上, 随被测旋转体一起转动。每转动一个齿, 齿的凹凸引起磁路磁阻变化一次, 磁通也就变化一次, 线圈中产生感应电势, 其变化频率等于被测转速与测量齿轮上齿数的乘积。

这种传感器结构简单, 但需在被测对象上加装齿轮, 使用不方便, 且因高速轴上加装齿轮会带来不平衡而不宜测量高转速。

(2) 闭磁路变磁通式传感器。如图 5-3 所示, 被测旋转体带动椭圆形测量轮在磁场气隙中等速转动, 使气隙平均长度周期性地变化, 因而磁路磁阻也周期性地变化, 磁通同样周期性地

变化, 在线圈中产生感应电动势, 其频率 f 与测量轮的转速 n (rad/m) 成正比, 即 $f=n/30$ 。在这种结构中, 也可以用齿轮代替椭圆形测量轮, 软铁制成内齿轮形式, 这时输出信号频率为 $f=nz/60$, 其中 z 为测量齿轮的齿数。

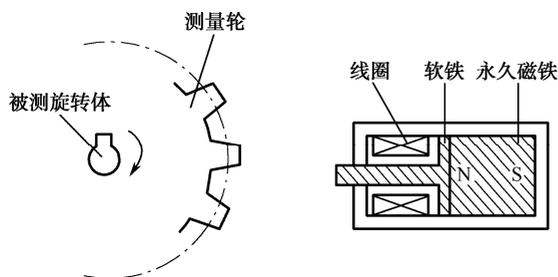


图 5-2 开磁路变磁通式磁电传感器结构图

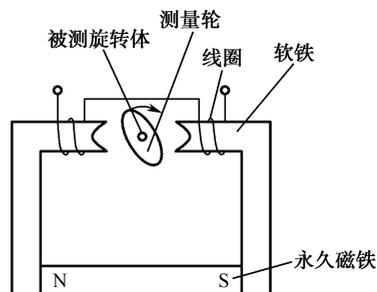


图 5-3 闭磁路变磁通式磁电传感器结构图

变磁通式传感器对环境条件要求不高, 能在 $-150\sim+90^{\circ}\text{C}$ 的温度下工作, 不影响测量精度, 也能在油、水雾、灰尘等条件下工作。但它的工作频率下限较高, 约为 50Hz , 上限可达 100kHz 。

2) 恒磁通式

恒磁通磁电感应式传感器由永久磁铁 (磁钢)、线圈、金属骨架和壳体等组成, 如图 5-4 所示。磁路系统产生恒定的直流磁场, 磁路中的工作气隙是固定不变的, 因而气隙中的磁通也是恒定不变的。运动部件可以是线圈 (动圈式), 也可以是磁铁 (动铁式), 因此又分为动圈式和动铁式两种类型, 这里动圈、动铁都是相对于传感器壳体而言的, 工作原理完全相同。

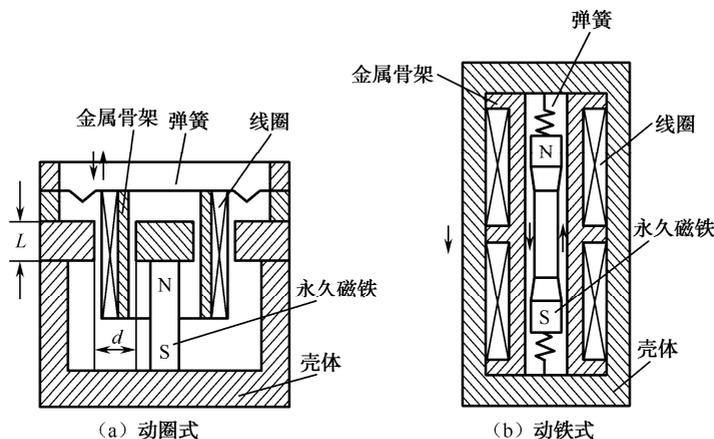


图 5-4 恒磁通式磁电传感器结构原理图

在动圈式中, 永久磁铁与传感器壳体固定, 线圈和金属骨架 (合称线圈组件) 用柔软弹簧支撑。在动铁式中, 线圈组件 (金属骨架和线圈) 与壳体固定, 永久磁铁用柔软弹簧支撑。两者的阻尼都是金属骨架和磁场发生相对运动而产生的电磁阻尼。当壳体随被测振动体一起振动时, 由于弹簧较软, 运动部件质量相对较大, 当振动频率足够高 (远大于传感器固有频率) 时, 运动部件惯性很大, 来不及随振动体一起振动, 近乎静止不动, 振动能量几乎全被弹簧吸收, 永久磁铁与线圈之间的相对运动速度接近于振动体振动速度, 磁铁与线圈的相对运动切割磁力线, 从而产生感应电势为

$$e = -B_0 l W v \quad (5-3)$$

式中 B_0 ——工作气隙磁感应强度;
 l ——每匝线圈平均长度;
 W ——线圈在工作气隙磁场中的匝数;
 v ——相对运动速度。

当传感器结构选定后, 其中 B 、 l 、 W 都是常数, 线圈的感应电动势仅与相对运动速度 v 有关, 传感器的灵敏度为

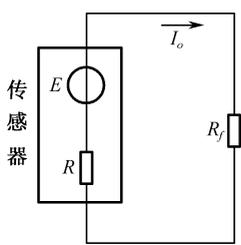
$$K = \frac{de}{dv} = BIN \quad (5-4)$$

不同结构的恒磁通磁感应式传感器的频率响应特性是有差异的, 但一般频率响应范围为几十赫兹到几百赫兹, 低的可到 10Hz 左右, 高的可达 2kHz 左右。

2. 磁电感应式传感器特性分析

磁电感应式传感器只适用于测量动态物理量, 因此这种传感器主要考虑其动态性能。磁电感应式传感器的主要技术指标有输出电流 I_o 、电流灵敏度 S_I 、输出电压 U_o , 以及电压灵敏度 S_U 。

如图 5-5 所示, 当测量电路接入磁电式传感器电路时, 磁电传感器的输出电流 I_o 为



$$I_o = \frac{E}{R + R_f} = \frac{B_0 l W v}{R + R_f} \quad (5-5)$$

式中 R_f ——测量电路输入电阻;
 R ——线圈等效电阻。

传感器的电流灵敏度为

$$S_I = \frac{I_o}{v} = \frac{B_0 l W}{R + R_f} \quad (5-6)$$

而传感器的输出电压和电压灵敏度分别为

$$U_o = I_o R_f = \frac{B_0 l W v R_f}{R + R_f} \quad (5-7)$$

$$S_U = \frac{U_o}{v} = \frac{B_0 l W R_f}{R + R_f} \quad (5-8)$$

当传感器的工作温度发生变化或受到外界磁场干扰、机械振动或冲击时, 其灵敏度将发生变化而产生测量误差。相对误差为

$$\gamma = \frac{dS_I}{S_I} = \frac{dB}{B} + \frac{dL}{L} - \frac{dR}{R} \quad (5-9)$$

为了提高灵敏度, 可以选用具有磁能积较大的永久磁铁, 尽量减小气隙长度, 以提高气隙磁通密度 B 、 l 和 N , 但它们受到体积和重量、内电阻及工作频率等因素的限制。

1) 非线性误差

根据公式可知, 输入 v 与输出 e 原理上是线性的, 但在实际情况下, 存在着非线性状况。磁电式传感器产生非线性误差的主要原因是: 由于传感器线圈内有电流 I 流过时, 将产生一定的交变磁通 Φ_i , 此交变磁通叠加在永久磁铁所产生的工作磁通上, 使恒定的气隙磁通变化。另外, 磁场中存在边沿效应, 磁场做不到绝对均匀, 尤其在边沿部分, 磁力线的弯曲现象比较明显。使用软铁, 减小工作气隙, 可以改进磁场, 使磁场均匀。传感器电流的磁效应如图 5-6 所示。

当传感器线圈相对于永久磁铁磁场的运动速度增大时,将产生较大的感应电势 e 和较大的电流 I ,由此而产生的附加磁场方向与原工作磁场方向相反,减弱了工作磁场的作用,从而使得传感器的灵敏度随着被测速度的增大而降低。当线圈的运动速度与图中所示方向相反时,感应电动势 e 、线圈感应电流反向,所产生的附加磁场方向与工作磁场同向,从而增大了传感器的灵敏度。其结果是线圈运动速度方向不同时,传感器的灵敏度具有不同的数值,使传感器输出基波能量降低,谐波能量增加,即这种非线性特性同时伴随着传感器输出的谐波失真。显然传感器灵敏度越高,线圈中电流越大,非线性越严重。

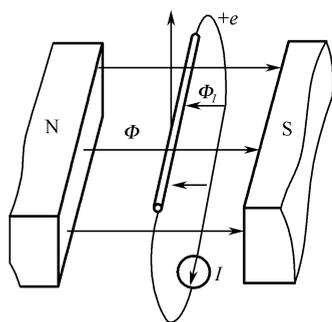


图 5-6 传感器电流的磁效应

通过在传感器中加入补偿线圈可以补偿上述附加磁场干扰,通过选择合适的补偿线圈参数,再通以经放大 K 倍后的电流,可以使其产生交变磁通与传感线圈本身所产生的交变磁通互相抵消,达到补偿的目的。

2) 温度误差

当传感器的工作环境温度发生变化或受到外界磁场干扰、机械振动与冲击时,都将引起 R 、 B 、 I 发生变化,从而使电流灵敏度发生变化,由此产生的相对误差为

$$\gamma = \frac{\Delta S_i}{S_i} = \frac{\Delta R}{R + R_L} - \frac{\Delta B}{B} - \frac{\Delta I}{I} \quad (5-10)$$

当环境温度变化较大时,误差数值比较大,必须进行温度补偿。补偿通常采用热磁分流器。热磁分流器由具有很大负温度系数的特殊磁性材料做成,在正常工作温度下可将空气隙磁通分流掉一小部分。当温度升高时,热磁分流器的磁导率显著下降,经它分流掉的磁通占总磁通的比例较正常工作温度下显著降低,从而保持空气隙的工作磁通不随温度变化,维持传感器灵敏度为常数。

3. 磁电感应式传感器的测量电路

磁电式传感器直接输出感应电势,且传感器通常具有较高的灵敏度,所以一般不需要高增益放大器。但磁电式传感器是速度传感器,若要获取被测位移或加速度信号,则需要配用积分或微分电路。一般测量电路方框图如图 5-7 所示。

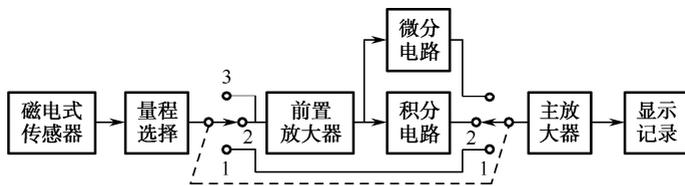


图 5-7 磁电式传感器测量电路方框图

选择开关 S 接位置“1”时,传感器输出信号直接经主放大器放大后显示或记录,得到振动速度信号。 S 接位置“2”时,经过积分电路处理,得到振动位移信号。 S 接位置“3”时,经过微分电路处理,得到振动加速度信号。

5.1.2 磁电感应式传感器的工程应用

磁电感应式传感器可用于振动速度、扭矩、流量等参数的测量。对应的有:

(1) 磁电感应式振动速度传感器(恒磁通动圈式)。

(2) 磁电感应式扭矩传感器（变磁通式）。

(3) 磁电感应式流量计（所测的流体应具有导电性，蒸馏水以及各种油类都不能使用）。

1. 磁电感应式振动速度传感器

如图 5-8 所示为动圈式恒磁通振动速度传感器的结构示意图，其结构主要特点是，钢制圆形外壳，里面用铝支架将圆柱形永久磁铁与外壳固定成一体，永久磁铁中间有一小孔，穿过小孔的心轴两端架起线圈和阻尼环，心轴两端通过圆形膜片支撑架空且与外壳相连。工作时传感器与被测物体刚性连接，当物体振动时，传感器外壳和永久磁铁随之振动，而架空的心轴、线圈和阻尼环因惯性而不随之振动。因而，磁路气隙中的工作线圈切割磁力线而产生正比于振动速度的感应电势，线圈的输出通过引线输出到测量电路。

振动传感器的输出特性曲线如图 5-9 所示，输出不从零开始，从电压 V_a 开始，在 $V > V_a$ 阶段必须克服静摩擦力，才能相对运动， $V > V_c$ 时，则表示惯性太大超过范围。

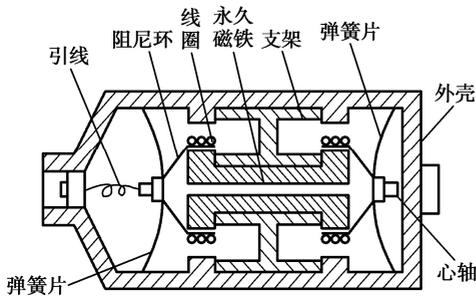


图 5-8 动圈式恒磁通振动速度传感器的结构示意图

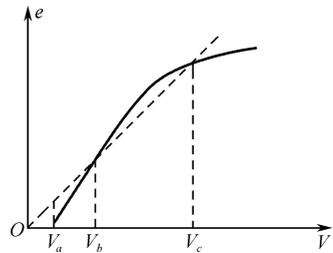


图 5-9 振动传感器输出特性曲线

该传感器测量的是振动速度参数，若在测量电路中接入积分电路，则输出电势与位移成正比；若在测量电路中接入微分电路，则其输出与加速度成正比。

2. 磁电感应式扭矩传感器

如图 5-10 所示是磁电感应式扭矩传感器工作原理图。在驱动源和负载之间的扭转轴的两侧安装有齿形圆盘。它们旁边装有相应的两个磁电传感器。传感器的检测元件部分由永久磁铁、感应线圈和铁芯组成。永久磁铁产生的磁力线与齿形圆盘交链。当齿形圆盘旋转时，圆盘齿凸凹引起磁路气隙的变化，于是磁通量也发生变化，在线圈中感应出交流电压，其频率在数值上等于圆盘上齿数与转数的乘积。

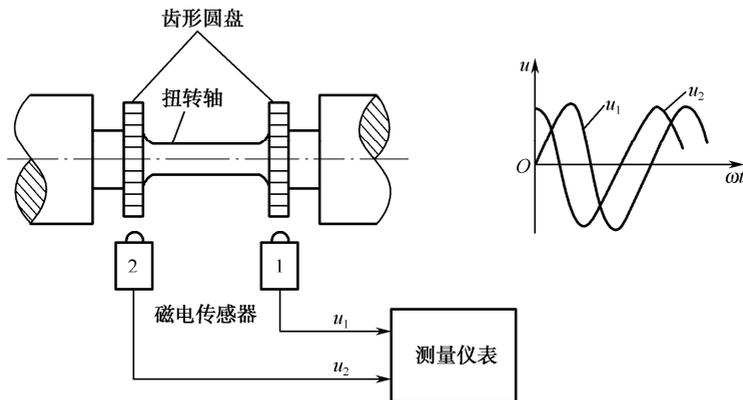


图 5-10 磁电感应式扭矩传感器工作原理图

3. 磁电感应式流量计

如图 5-11 所示为磁电感应式流量计原理图, 在绝缘导管上、下方放置永久磁铁, 只要被测流体是导电的, 当其在导管中流动时, 水平方向的两个电极就产生感应电势。感应电势与流体平均流速成正比, 也与单位时间内通过导管横截面的流体体积(即流量)成正比。感应电势经放大后输出, 由此可测出导管内流体的流量。磁电感应式流量计结构图如图 5-12 所示。

如图 5-13 所示是 LUCMC 型智能磁电式旋涡流量计(以下简称磁电流量计), 它是采用先进的超低功耗单片机技术制造的新型流量计, 可以现场显示测量管道中液体的瞬时流量和累计总量。远传型同时具有多种信号输出方式: 容积脉冲输出、基于 Modbus 协议的 485 数字信号输出、4~20mA 标准信号输出。隔爆型可以直接安装在可燃、易爆场所。流量计具有精度高、测量范围宽、寿命长、操作维护简单、功耗低等特点。

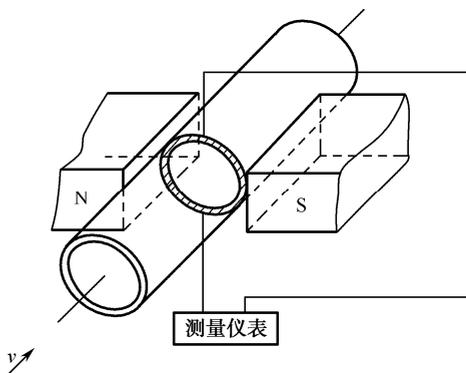


图 5-11 磁电感应式流量计原理图

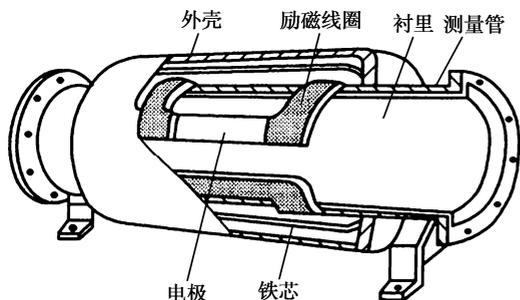


图 5-12 磁电感应式流量计结构图



图 5-13 LUCMC 型智能磁电式旋涡流量计

该流量计适用于对不锈钢 1Cr18Ni9Ti、2Cr13 及刚玉(Al_2O_3)等不起腐蚀作用, 且无纤维、大颗粒等杂质的液体, 可以广泛应用于食品、医药、石油化工、冶金、造纸等行业。

5.2 霍尔式传感器



霍尔式传感器是一种基于霍尔效应的传感器。1879 年美国物理学家霍尔首先在金属材料中发现了霍尔效应, 但是由于金属材料的霍尔效应太弱而没有得到应用。随着半导体技术的发展, 开始用半导体材料制作霍尔元件, 由于其霍尔效应显著而得到应用和发展。霍尔传感器属于磁敏元件, 磁敏元件也是基于磁电转换原理, 是一种当交变磁场经过载流导体时产生输出电压脉冲的传感器。脉冲的幅度是由激励磁场的场强决定的。因此, 霍尔传感器不需要外界电源供电。

霍尔传感器具有结构简单, 体积小, 无触点, 可靠性高, 使用寿命长, 动态特性好, 易于集成电路化和微型化等特点。随着半导体技术的发展, 磁敏元件得到应用和发展, 广泛用于自

动控制、信息传递、电磁场、生物医学等方面的电磁、压力、加速度、振动测量。

5.2.1 霍尔式传感器的原理

1. 霍尔效应

置于磁场中的静止载流导体，当流过的电流方向与磁场方向不一致时，载流导体上平行于电流和磁场方向上的两个面之间产生电动势，这种现象称为霍尔效应，该电动势称为霍尔电动势。

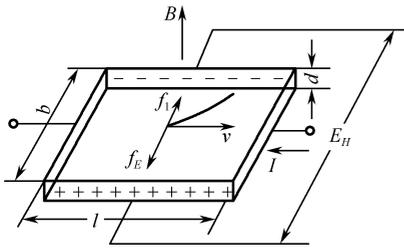


图 5-14 霍尔效应原理图

如图 5-14 所示，将半导体薄片置于磁场 B 中，在薄片控制电极通以电流 I ，方向如图所示，半导体薄片中的电流使金属中自由电子在电场作用下做定向运动。此时，每个电子受洛伦兹力 f_l 的作用。

$$f_l = eBv \quad (5-11)$$

在洛伦兹力的作用下电子产生漂移，结果使金属导电板内侧面面积累电子，而外侧面面积累正电荷，从而形成了附加内电场 E_H ，称为霍尔电场。

$$E_H = \frac{U_H}{b} \quad (5-12)$$

式中， U_H 为电位差，即霍尔电动势。

霍尔电场的出现，使定向运动的电子除了受洛伦兹力作用外，还受到霍尔电场力的作用，其力的大小为 eE_H ，此力阻止电荷继续积累。随着内、外侧面面积累电荷的增加，霍尔电场增大，电子受到霍尔电场力也增大，电子所受洛伦兹力与霍尔电场作用力大小相等、方向相反时，即

$$eE_H = eBv \quad (5-13)$$

$$E_H = vB \quad (5-14)$$

此时，电荷不再向两侧面积累，达到平衡状态。

若金属导电板单位体积电子数为 n ，电子定向运动平均速度为 v ，则激励电流

$$I = nevbd \quad (5-15)$$

即

$$v = \frac{I}{nebd} \quad (5-16)$$

代入式 (5-14)，得到

$$E_H = \frac{IB}{nebd} \quad (5-17)$$

代入式 (5-12)，得到

$$U_H = \frac{IB}{ned} \quad (5-18)$$

式中，令 $R_H = 1/(ne)$ ，称为霍尔常数，其大小取决于导体载流子密度，则

$$U_H = \frac{R_H IB}{d} = K_H IB \quad (5-19)$$

式中， $K_H = R_H / d$ ，称为霍尔片的灵敏度。

如果磁场与薄片法线方向有 α 角，则

$$U_H = K_H IB \cos \alpha \quad (5-20)$$

可见, 霍尔电势正比于激励电流及磁感应强度, 其灵敏度与霍尔系数 R_H 成正比, 与霍尔片厚度 d 成反比。为了提高灵敏度, 霍尔元件常制成薄片形状。薄膜型霍尔元件厚度只有 $1\mu\text{m}$ 左右。

霍尔元件激励极间电阻 $R = \rho l / (bd)$, ρ 为材料电阻率, 而有

$$R = U / I = El / I = vl / (\mu nevbd) \quad (5-21)$$

式中, μ 为载流子迁移率, $\mu = v / E$, 即单位电场强度作用下载流子的平均速度。

解得

$$R_H = \mu\rho \quad (5-22)$$

因此要霍尔效应强, 则希望有较大的霍尔系数 R_H , 要求霍尔片材料有较大的电阻率和载流子迁移率。一般金属材料载流子迁移率很高, 但电阻率很小, 而绝缘材料电阻率极高, 但载流子迁移率极低, 故只有半导体材料才适于制造霍尔片。

目前常用的霍尔元件材料有锗、硅、砷化镓、锑化铟等半导体材料。其中 N 型锗容易加工制造, 其霍尔系数、温度性能和线性度都较好。N 型硅的线性度最好, 其霍尔系数、温度性能同 N 型锗。锑化铟对温度最敏感, 尤其在低温范围内温度系数大, 但在室温时其霍尔系数较大。砷化镓的霍尔系数较小, 温度系数也较小, 输出特性线性度好。

2. 霍尔元件的基本结构

霍尔元件的结构简单, 由霍尔片、四根引线和壳体组成, 如图 5-15 (a) 所示。霍尔片是一块矩形半导体单晶薄片, 引出四根引线: 1、1' 两根引线加激励电压或电流, 称激励电极(控制电极); 2、2' 引线为霍尔输出引线, 称霍尔电极。霍尔元件的壳体是用非导磁金属、陶瓷或环氧树脂封装的。在电路中, 霍尔元件一般可用图 5-15 (b) 所示的符号表示。

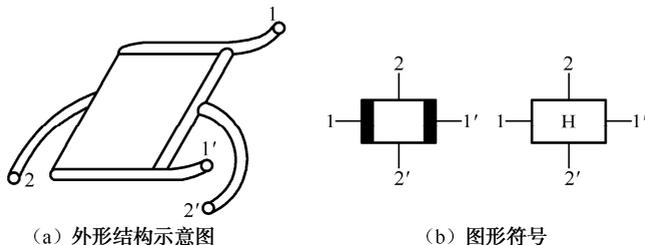


图 5-15 霍尔元件的基本结构

3. 霍尔元件的基本特性

1) 额定激励电流和最大允许激励电流

当霍尔元件自身温升 10°C 时所流过的激励电流称为额定激励电流。以元件允许最大温升为限制所对应的激励电流称为最大允许激励电流。因霍尔电动势随激励电流增加而线性增加, 所以使用中希望选用尽可能大的激励电流, 因而需要知道元件的最大允许激励电流。改善霍尔元件的散热条件, 可以使激励电流增加。

2) 输入电阻和输出电阻

激励电极间的电阻值称为输入电阻。霍尔电极输出电势对电路外部来说相当于一个电压源, 其电源内阻即为输出电阻。以上电阻值是在磁感应强度为零, 且环境温度在 $20\pm 5^\circ\text{C}$ 时所确定的。

3) 不等位电动势和不等位电阻

当霍尔元件的激励电流为 I 时, 若元件所处位置磁感应强度为零, 则它的霍尔电势应该为零, 但实际并不为零。这时测得的空载霍尔电势称为不等位电势, 如图 5-16 所示。

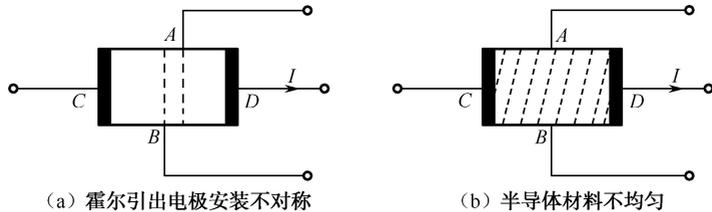


图 5-16 不等位电势示意图

产生这一现象的原因有:

- (1) 霍尔电极安装位置不对称或不在同一等电位面上。
- (2) 半导体材料不均匀造成了电阻率不均匀或几何尺寸不均匀。
- (3) 激励电极接触不良造成激励电流不均匀分布等, 会造成等位面倾斜。

不等位电势也可用不等位电阻表示, 即

$$r_0 = \frac{U_0}{I} \quad (5-23)$$

式中, U_0 为不等位电势; r_0 为不等位电阻; I 为激励电流。不等位电势就是激励电流流经不等位电阻 r_0 时所产生的电压。

4) 寄生直流电动势

在外加磁场为零、霍尔元件用交流激励时, 霍尔电极输出除了交流不等位电势外, 还有一直流电势, 称为寄生直流电动势。其产生的原因有:

- (1) 激励电极和霍尔电极接触不良, 形成非欧姆接触, 造成整流效果。
- (2) 两个霍尔电极大小不对称, 则两个电极点的热容不同、散热状态不同而形成极间温差电势。

(3) 寄生直流电势一般在 1mV 以下, 它是影响霍尔片温漂的原因之一。

所以, 元件在制作和安装时, 尽量使电极欧姆接触, 并注意散热均匀。

5) 霍尔电势温度系数

在一定磁感应强度和激励电流下, 温度每变化 1°C 时, 霍尔电势变化的百分率称为霍尔电势温度系数, 它同时也是霍尔元件灵敏度的温度系数。

4. 霍尔元件不等位电势补偿

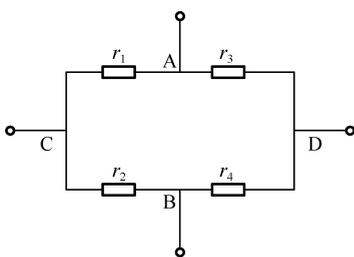


图 5-17 霍尔元件的等效电路

不等位电势与霍尔电势具有相同的数量级, 有时甚至超过霍尔电势, 而实用中要消除不等位电势是极其困难的, 因而必须采用补偿的方法。分析不等位电势时, 可以把霍尔元件等效为一个电桥, 用分析电桥平衡来补偿不等位电势。

图 5-17 所示为霍尔元件的等效电路, 其中 A、B 为霍尔电极, C、D 为激励电极, 电极分布电阻分别用 r_1 、 r_2 、 r_3 、 r_4 表示, 把它们看作电桥的四个桥臂。理想情况下, 电极 A、B 处于同一等

位面上, $r_1=r_2=r_3=r_4$, 电桥平衡, 不等位电势 U_0 为 0。实际上, 由于 A、B 电极不在同一等位面上, 此四个电阻阻值不相等, 电桥不平衡, 不等位电势不等于零。此时可根据 A、B 两电极电位的高低, 判断应在某一桥臂上并联一定的电阻, 使电桥达到平衡, 从而使不等位电势为零。

几种补偿线路如图 5-18 所示。图 5-18 (a)、(b) 为常见的补偿电路, 图 5-18 (b)、(c) 相当于在等效电桥的两个桥臂上同时并联电阻, 图 5-18 (d) 用于交流供电的情况。

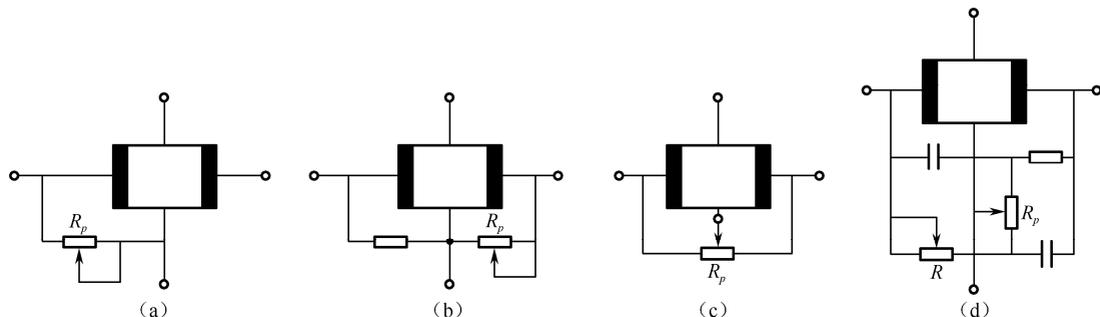


图 5-18 不等位电势补偿电路

5. 霍尔元件温度补偿

霍尔元件是采用半导体材料制成的, 因此它们的许多参数都具有较大的温度系数。当温度变化时, 霍尔元件的载流子浓度、迁移率、电阻率及霍尔系数都将发生变化, 从而使霍尔元件产生温度误差。

为了减小霍尔元件的温度误差, 除选用温度系数小的元件或采用恒温措施外, 还可以通过电路来进行补偿。

由 $U_H = K_H IB$ 可看出: 采用恒流源供电是个有效措施, 可以使霍尔电势稳定。但也只能是减小由于输入电阻随温度变化所引起的激励电流 I 的变化的影响。

霍尔元件的灵敏系数 K_H 也是温度的函数, 它随温度变化将引起霍尔电势的变化。霍尔元件的灵敏度系数与温度的关系可写成:

$$K_H = K_{H_0} (1 + \alpha \Delta T) \quad (5-24)$$

式中 K_{H_0} —— 温度 T_0 时的 K_H 值;

$\Delta T = T - T_0$ —— 温度变化量;

α —— 霍尔元件灵敏度的温度系数。

大多数霍尔元件的灵敏度温度系数 α 是正值, 它们的霍尔电势随温度升高而增加 $\alpha \Delta T$ 倍。如果同时让激励电流 I 相应地减小, 并能保持 $K_H I$ 乘积不变, 也就抵消了灵敏系数 K_H 增加的影响。

图 5-19 就是按此思路设计的一个既简单, 补偿效果又较好的补偿电路。电路中 I_s 为恒流源, 分流电阻 R_p 与霍尔元件的激励电极相并联。当霍尔元件的输入电阻随温度升高而增加时, 旁路分流电阻 R_p 自动地增大分流, 减小了霍尔元件的激励电流 I_H , 从而达到补偿的目的。

温度补偿电路中, 设初始温度为 T_0 , 霍尔元件输入电阻为 R_0 , 灵敏系数为 K_{H_0} , 分流电阻为 R_p , 根据分流概念得

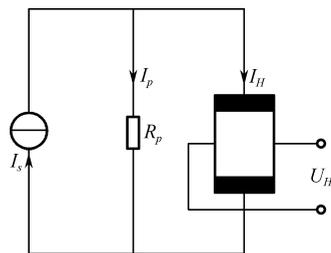


图 5-19 恒流温度补偿电路

$$I_{H_0} = \frac{R_{p_0} I_s}{R_{p_0} + R_{i_0}} \quad (5-25)$$

当温度升至 T 时，电路中各参数变为

$$R_i = R_{i_0} (1 + \beta \Delta T) \quad (5-26)$$

$$R_p = R_{p_0} (1 + \delta \Delta T) \quad (5-27)$$

式中 β ——霍尔元件输入电阻温度系数；

δ ——分流电阻温度系数。

$$I_H = \frac{R_p I_s}{R_p + R_i} = \frac{R_{p_0} (1 + \delta \Delta T) I_s}{R_{p_0} (1 + \delta \Delta T) + R_{i_0} (1 + \beta \Delta T)} \quad (5-28)$$

虽然温度升高了 ΔT ，为使霍尔电势不变，补偿电路必须满足温升前、后的霍尔电势不变，即 $U_{H_0} = U_H$ ，则

$$K_{H_0} I_{H_0} B = K_H I_H B \quad (5-29)$$

有

$$K_{H_0} I_{H_0} = K_H I_H \quad (5-30)$$

将式 (5-24)、式 (5-25)、式 (5-28) 代入上式，经整理并略去 $\alpha\beta (\Delta T)^2$ 高次项后得

$$R_{p_0} = \frac{(\beta - \delta - \alpha) R_{i_0}}{\alpha} \quad (5-31)$$

当霍尔元件选定后，它的输入电阻 R_{i_0} 和温度系数 β 及霍尔电势灵敏度温度系数 α 是确定值。由上式即可计算出分流电阻 R_{p_0} 及所需的温度系数值。

为了满足 R_{p_0} 及 δ 两个条件，分流电阻可取温度系数不同的两种电阻的串、并联组合，这样虽然麻烦但效果很好。

通常情况下，分流电阻的温度系数 δ 值远小于霍尔元件的输入电阻的温度系数，可以忽略不计，上式变为

$$R_{p_0} = \frac{(\beta - \alpha) R_{i_0}}{\alpha} \quad (5-32)$$

通常又有 $\beta \gg \alpha$ ，简化为

$$R_{p_0} = \frac{\beta R_{i_0}}{\alpha} \quad (5-33)$$

5.2.2 霍尔式传感器的工程应用

1. 霍尔式位移传感器

如图 5-20 给出了一些霍尔式位移传感器的工作原理图。图 5-20 (b) 是磁场强度相同的两块永久磁铁，同极性相对地放置，霍尔元件处在两块磁铁的中间。由于磁铁中间的磁感应强度 $B=0$ ，因此霍尔元件输出的霍尔电势 U_H 也等于零，此时位移 $\Delta x=0$ 。若霍尔元件在两磁铁中产生相对位移，霍尔元件感受到的磁感应强度也随之改变，这时 U_H 不为零，其量值大小反映出霍尔元件与磁铁之间相对位置的变化量。这种结构的传感器，其动态范围可达 5mm，分辨率为 0.001mm。

图 5-20 (c) 是一个由两个结构相同的磁路组成的霍尔式位移传感器，为了获得较好的线

性分布,在磁极端面装有极靴,霍尔元件调整好初始位置时,可以使霍尔电势 $U_H = 0$ 。这种传感器灵敏度很高,惯性小、频响快、工作可靠、寿命长,但它所能检测的位移量较小,适合于微位移量及振动的测量等领域。以微位移检测为基础,可以构成压力、应力、应变、机械振动、加速度、重量、称重等霍尔传感器。

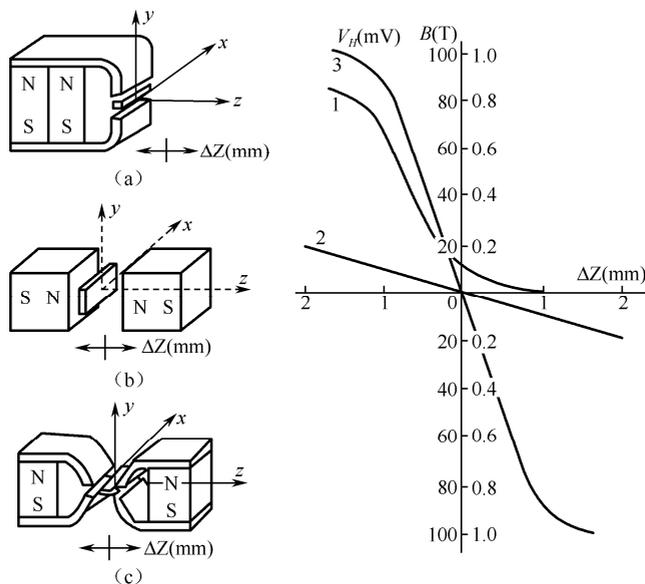


图 5-20 三种梯度磁场的磁系统及相应位移传感器的输出特性曲线

2. 霍尔式压力传感器

如图 5-21 所示为霍尔式压力传感器结构原理图,利用管的弯曲变化或扭转变形测量压力的弹性敏感元件,称为波登管,又称弹簧管。波登管的一端固定,一端活动,其截面形状为椭圆形或扁平形。非圆形截面的管子在其内压力的作用下逐渐胀成圆形,波登管在压力作用下将产生位移并带动霍尔元件在磁场中移动,由霍尔电势 U_H 即可获知被测压力 p 的大小。最常用的波登管为 C 型,此外还有螺旋型、C 型组合、麻花型等类型(见图 5-22)。波登管的材料采用铜基或铁基合金。它与其他压力敏感元件相比灵敏度小些,常用于测量较大的压力,往往与其他弹性元件组合使用。1852 年 E.波登取得波登管的专利权。至今波登管仍在许多仪器中广泛应用,特别是用于压力和力的测量方面。

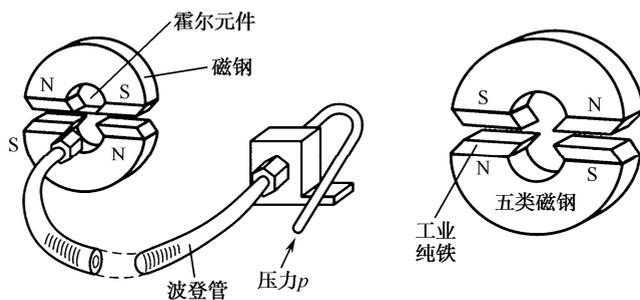


图 5-21 霍尔式压力传感器结构原理图

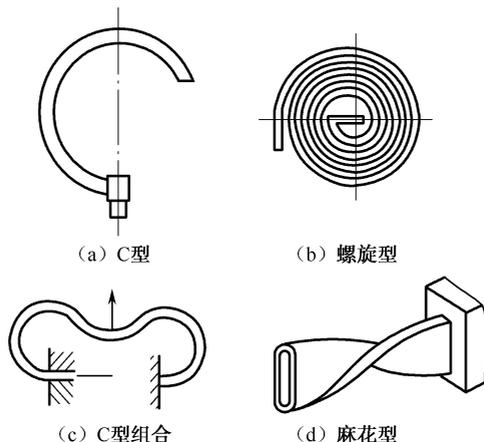


图 5-22 波登管常见类型

3. 霍尔式振动传感器

如图 5-23 所示为霍尔式振动传感器结构原理图，霍尔元件在磁场中按被测振动频率往复运动，输出霍尔电势反映了被测振动的频率和幅值。

如图 5-24 所示为 KH4600 低频振动传感器，该传感器的工作原理是导体做切割磁力线的运动，它会产生一个与其运动速度成正比的电动势，弹簧片、线圈骨架和线圈组成了一个惯性系统，在其固有频率以上时，线圈相对空间没有运动，而传感器刚性固定在机壳上，所以磁铁与机壳的振动是完全一样的，这样就相当于磁铁在线圈内运动，因而在线圈内产生与振动信号成比例的电压信号。

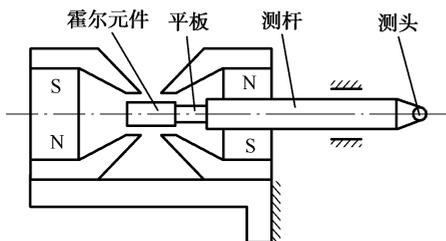


图 5-23 霍尔式振动传感器结构原理图



图 5-24 KH4600 低频振动传感器

KH4600 低频振动传感器主要用于测量水轮发电机组、低速转动机器、工程建筑和桥梁等的振动。这种传感器测量的振动是相对于自由空间的绝对振动。它的输出电压信号与振动幅值成正比。这种传感器直接安装在机器的外部，故使用维护极为方便。

4. 霍尔式转速传感器

图 5-25 所示为霍尔式转速传感器结构原理图，被测轴旋转时，磁路的磁阻发生周期性变化，使霍尔元件输出信号的频率与转速成正比，测量其频率即可通过公式 $n=60f/z$ (r/min) 获得被测转速，该转速传感器可用于出租车计价器等装置。

如图 5-26 所示，Hal-12 霍尔式转速传感器是一种采用霍尔原理的转速传感器。它的感应对象为磁钢。当被测体上嵌入磁钢，随着被测物体转动时，传感器输出与旋转频率相关的脉冲信

号,达到测速或位移检测的发讯目的。由于安装使用方便,通用性好,它已被广泛应用于各种领域。

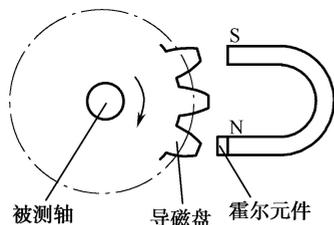


图 5-25 霍尔式转速传感器结构原理图



图 5-26 Hal-12 霍尔式转速传感器

如图 5-27 所示,为利用霍尔式转速传感器测量汽车速度的案例。当齿对准霍尔元件时,磁力线集中穿过霍尔元件,可产生较大的霍尔电动势,放大、整形后输出高电平;反之,当齿轮的空挡对准霍尔元件时,输出为低电平。通过检测汽车行驶中的车轮转动的快慢,从而间接地测量汽车运动的速度。

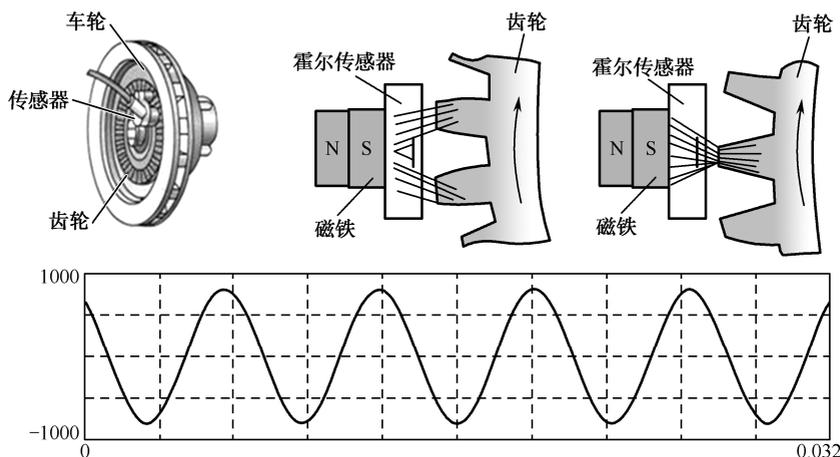


图 5-27 汽车速度测量案例

5. 霍尔式电流传感器

霍尔式电流传感器结构原理图如图 5-28 所示,当被测导线中有电流时,在导线周围产生磁场,钳形导磁铁芯起着集中磁力线的作用,变成一个暂时性的磁铁。电流越大,霍尔元件处的磁场就越强,输出的霍尔电势就越大。

如图 5-29 所示为 JK400T14~JK800T14 ($\phi 30$) 系列直测式霍尔电流传感器,它是一种先进的能隔离主回路与控制回路,能检测 400~800A,直流~20kHz 交流电流值的模块化产品,副边输出能真实反映原边电流的波形,孔径为 $\phi 30\text{mm}$,耗电 $\leq 20\text{mA}$,响应时间 $\leq 10\mu\text{s}$ 。其原边与副边高度绝缘,可以同时测量交流直流脉动电流,具有良好的温度特性 ($< 0.04\% / ^\circ\text{C}$),输入过负荷能力为额定值的 10 倍,性价比高,全封闭,可在恶劣环境中使用。

该产品采用薄形化设计,尺寸小、重量轻,具有电源极性反接保护,采用 SMT 表面安装技术,配合标准输入、输出的真有效值 AC/DC 电压转换器,可与微机连接,主要功能是对 1200V 及以下电压等级的直流、交流、脉冲和不规则电流的测量、控制与保护,广泛应用于电力系统

的微机监测、交流变频调速器、新型逆变器、整流器、焊接设备、安全电源、铁路信号监控、数控机床、铁路电车、无轨电车、工业自动化控制等许多领域。

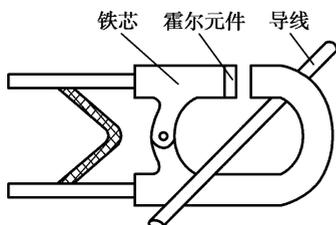


图 5-28 霍尔式电流传感器结构原理图



图 5-29 直测式霍尔电流传感器

习题

- 5-1 简述变磁通式和恒磁通式磁电传感器的工作原理。
- 5-2 磁电式传感器的误差及其补偿方法是什么？
- 5-3 磁电式传感器测量扭矩的工作原理是什么？
- 5-4 什么是霍尔效应？霍尔电势与哪些因素有关？如何提高霍尔传感器的灵敏度？
- 5-5 简述霍尔电势产生的原理。
- 5-6 磁电式传感器与电感式传感器有哪些不同？磁电式传感器主要用于测量哪些物理参数？
- 5-7 霍尔元件能够测量哪些物理参数？霍尔元件的不等位电势的概念是什么？温度补偿的方法有哪几种？
- 5-8 简述霍尔效应及构成以及霍尔传感器可能的应用场合。
- 5-9 试证明霍尔式位移传感器的输出电压 U_H 与位移 Δx 成正比关系。
- 5-10 为什么说磁电感应式传感器是一种有源传感器？