

授课教材：传感器技术基础与应用实训

授课内容：5.2.1 霍尔式传感器的工作原理



# 项目单元 5 霍尔式传感器 ——转速检测仪的设计



PPT: 项目单元 5

## 5.1 项目描述

在工业、农业生产和工程实践中,经常会遇到需要测量转速的场合,如在发动机、电动机、卷扬机、机床主轴等旋转设备的试验、运转和控制中,常需要测量和显示其转速。测量转速的方法分为模拟式和数字式两种。模拟式将测量发动机作为检测元件,得到的信号是模拟量。数字式通常采用光电编码器、圆光栅、霍尔元件等作为检测元件,得到的信号是脉冲信号。随着微型计算机的广泛应用和单片机技术的日新月异,特别是高性能单片机的出现,测量转速普遍采用以单片机为核心的数字式测量方法。本项目就是结合霍尔式传感器,设计一个以霍尔式传感器为敏感元件的测量转速的仪器。

### 5.1.1 任务要求

- (1) 以霍尔式传感器为敏感元件。
- (2) 对于不同转速能够有区别明显的不同提示。
- (3) 当转速到达或高于一定阈值时。能够发出声光警报。
- (4) 鼓励采用单片机作为控制单元,可酌情加分。
- (5) 最终上交调试成功的实验系统——转速检测仪。
- (6) 要求有每个步骤的文字材料,包括原理图、使用说明、元件清单、进程表、调试过程描述等。

### 5.1.2 任务分析

本项目所用的传感器为霍尔式传感器,本项目单元主要讲述霍尔式传感器的各项知识,具体如下。

- (1) 理解霍尔式传感器的工作原理。
- (2) 了解霍尔式传感器的设计要点。
- (3) 了解霍尔式传感器的结构。
- (4) 掌握霍尔式传感器的测量电路。
- (5) 掌握霍尔式传感器的主要特性。
- (6) 掌握霍尔式传感器的误差补偿。
- (7) 了解霍尔集成电路。



(8) 掌握霍尔式传感器的各种应用。

## 5.2 相关知识

早在 1879 年, 美国霍普金斯大学 24 岁的研究生霍尔在研究磁场中导体的受力性质时发现了霍尔效应。随后, 人们在半导体中也发现了霍尔效应, 并且半导体的霍尔效应比金属导体强得多。从本质上讲, 霍尔效应是电流的一种磁效应。霍尔式传感器的工作基础就是霍尔效应。霍尔式传感器是一种磁传感器。用霍尔式传感器可以检测磁场及其变化, 也可在各种与磁场有关的场合中使用。

### 5.2.1 霍尔式传感器的工作原理及结构形式

#### 1. 霍尔效应

将金属或半导体薄片置于磁场中, 磁场方向垂直于金属或半导体薄片, 当有电流流过半导体薄片时, 在垂直于电流和磁场的方向上将会产生电势, 这种现象称为霍尔效应, 所产生的电势称为霍尔电势, 半导体薄片称为霍尔元件。从本质上讲, 霍尔效应是运动的带电粒子在磁场中受洛伦兹力的作用而偏转引起的。由于带电粒子(电子或空穴)被约束在薄片内, 所以这种偏转将导致在垂直于电流和磁场的方向上产生正负电荷的聚积, 从而形成附加的横向电场。横向电场将阻止带电粒子继续偏移, 当带电粒子所受的横向电场力与洛伦兹力相等时, 半导体薄片两侧的电荷达到平衡, 从而产生霍尔电势。

如图 5.1 所示, 设霍尔元件为 N 型半导体薄片(霍尔片), 其长度为  $L$ , 宽度为  $b$ , 厚度为  $d$ , 将霍尔元件置于磁感应强度为  $B$  的磁场中, 磁场方向垂直于半导体薄片。沿着长度方向通以控制电流  $I$ , 则半导体中的电流是载流子电子在电场作用下沿与电流  $I$  的相反方向以平均速度  $v$  运动形成的, 图 5.1 中的  $v$  表示电子在控制电流作用下的平均运动速度, 由磁场理论可知, 每个运动的电子在磁场中都要受到磁场的洛伦兹力  $F_B$ , 在  $F_B$  的作用下, 自由电子受力向一侧偏转, 使自由电子向霍尔元件的一侧积聚, 同时, 在板面另一侧会出现相同数量的正电荷。从而在半导体内部沿宽度的方向形成由正电荷指向负电荷的横向电场(霍尔电场)。设电场强度为  $E$ ,  $U_H$  为霍尔片两侧板面间的电位差(霍尔电压), 霍尔电场的出现使定向运动的载流子电子在受到洛伦兹力  $F_B$  的同时, 还受与洛伦兹力方向相反的电场力  $F_E$ 。由于  $F_E$  的方向与洛伦兹力  $F_B$  的方向相反, 故  $F_E$  将阻碍电荷的积聚。随着前后积累的电荷的增加和霍尔电场的增强, 电子所受到的电场力也会变大。当作用于电子的  $F_B$  与  $F_E$  相等时, 电子达到动态平衡, 此时的霍尔电压为

$$U_H = R_H \frac{IB}{d} \quad (5-1)$$

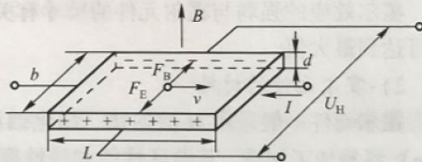


图 5.1 霍尔效应原理图

式中,  $I$  为控制电流, 单位为 A;

$B$  为磁感应强度, 单位为 T;

$d$  为霍尔元件的厚度, 单位为 m;

比例系数  $R_H$  为霍尔系数, 单位为  $\text{m}^3\text{C}^{-1}$ , 它是反映材料的霍尔效应强弱的重要参数。

考虑到霍尔元件厚度  $d$  的影响, 引进了一个重要参数  $K_H$ :

$$K_H = \frac{R_H}{d}$$

则式 (5-1) 可写为

$$U_H = K_H IB \quad (5-2)$$

$K_H$  称为霍尔元件的灵敏度。

若磁感应强度  $B$  不垂直于霍尔元件, 而是与其法线成某一角度  $\theta$ , 则实际上作用于霍尔元件上的有效磁感应强度是其法线方向 (与半导体薄片垂直的方向) 的分量, 即  $B\cos\theta$ , 这时的霍尔电势为

$$U_H = K_H IB\cos\theta \quad (5-3)$$

由上式可知, 霍尔电势的大小正比于控制电流  $I$  和磁感应强度  $B$ ,  $U_H$  的方向与  $I$  和  $B$  的方向有关, 当  $I$  或  $B$  的方向改变时, 霍尔电势的方向也随之改变。但当  $I$  和  $B$  同时改变时,  $U_H$  的方向不变。如果所施加的磁场为交变磁场, 则霍尔电势为同频率的交变电势。

## 2. 霍尔式传感器的设计要点

### 1) 霍尔元件尺寸

霍尔效应的强弱与霍尔元件的尺寸有关。相关经验表明: 当取  $L/b \approx 2$  时, 霍尔电势可达到最大值。

### 2) 霍尔元件的材料

霍尔元件一般采用 N 型的锗、锑化铟和砷化铟等半导体单晶材料。其中, N 型锗 (Ge) 容易加工制造, 其温度性能和线性度都较好。N 型硅 (Si) 的线性度最好, 其霍尔系数、温度性能同 N 型锗相近。锑化铟 (InSb) 对温度最敏感, 其受温度的影响较大, 在低温范围内的温度系数大。砷化铟 (InAs) 的霍尔系数较小, 其输出信号没有锑化铟大, 但是其受温度的影响比锑化铟要小, 而且其线性度也较好, 因此, 采用砷化铟作为霍尔元件的材料受到了广泛关注。一般情况下, 在高精度测量中, 大多采用 N 型锗和砷化铟元件; 当作为敏感元件时, 一般采用锑化铟元件。虽然砷化铟和锑化铟的霍尔常数小, 但可用化学方法控制霍尔元件的厚度 (一般可达 0.01mm), 使其达到很小的值, 所以其输出仍然很大。

## 3. 霍尔式传感器的结构

霍尔式传感器的结构很简单, 它由霍尔片、引线和壳体组成, 霍尔片通常被制作成长方形薄片, 国产霍尔片的尺寸一般为  $b=2\text{mm}$ ,  $L=4\text{mm}$ ,  $d=0.1\text{mm}$ 。它的长度方向的两端焊有 a、b 两根引线, 通常用红色导线, 其焊接处称为控制电极; 在它两个侧端



的中间以点的形式对称地焊有 c、d 两根霍尔输出引线，通常用绿色导线，其焊接处称为霍尔电极。霍尔电极的安装要求为：①沿长度方向受力要小；②电极两侧要对称，要置于正中间的位置，这些条件对霍尔片的性能的影响很大。激励电极（控制电极）安装在垂直于 y 轴两侧的平面上，安装时要使  $b/L=2/4$ 。垂直于 z 轴的两个平面应为光滑的表面，因为工作磁场被垂直地安装在此平面上。霍尔元件一般用非磁性金属、陶瓷或环氧树脂封装。电路中的霍尔元件（霍尔元件示意图如图 5.2 所示）可用两种符号表示，如图 5.2 (c) 所示。

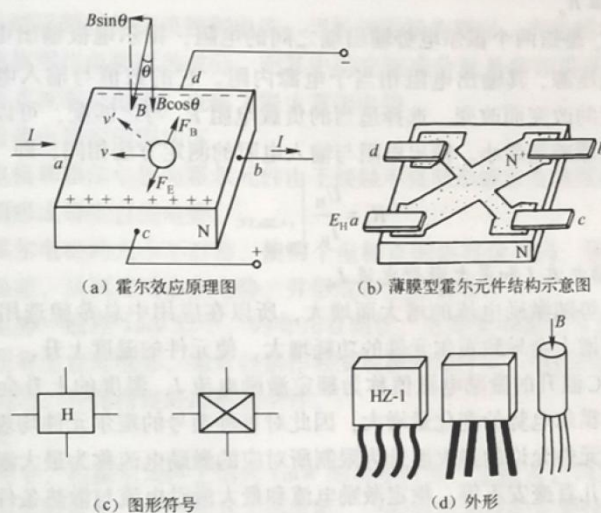


图 5.2 霍尔元件示意图

#### 4. 霍尔元件的基本测量电路

霍尔元件的基本测量电路如图 5.3 所示，由电源  $U_E$  通过调节电阻  $R_W$  来提供控制电流  $I$ ，通过调节电阻  $R_W$  可以调节电流  $I$  的大小， $U_E$  可以是直流电源，也可以是交流电源， $R_L$  是霍尔输出电压  $U_H$  的负载电阻，霍尔电压  $U_H$  一般为毫伏数量级，因而在实际应用时要后接差动放大器。所以负载电阻  $R_L$  通常是放大电路的输入电阻或表头内阻。

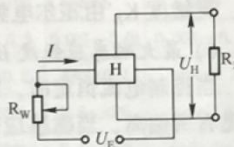


图 5.3 霍尔元件的基本测量电路

由于建立霍尔效应所需的时间很短，一般约为  $10^{-14} \sim 10^{-12}$  s，因此，其频率响应很高。当控制电流采用交流电时，频率可以很高（几千兆赫兹）。

有时为了增加霍尔式传感器的灵敏度，可将多片霍尔元件串联或并联使用。

#### 5. 霍尔元件的主要特性

##### 1) 输入电阻 $R_i$

输入电阻  $R_i$  是指霍尔元件两激励电流端的直流电阻。不同型号的霍尔元件，其阻

值不同,一般为几十欧姆到几百欧姆。输入电阻  $R_i$  受温度影响,温度升高,输入电阻将变小,从而使控制电流  $I$  变大,使霍尔电势变大。为了减小温度对输入电阻的影响,常采用恒流源作为激励源。输入电阻的测定通常是在磁感应强度为零且温度为室温 ( $20\pm 5^\circ\text{C}$ ) 的条件下进行的,可以用欧姆表直接测量:

$$R_i = \frac{U_E}{I} \bigg|_{\substack{t=20\pm 5^\circ\text{C} \\ B=0}} \quad (5-4)$$

## 2) 输出电阻 $R_o$ 。

输出电阻  $R_o$  是指两个霍尔电势输出端之间的电阻,霍尔电极输出电势对外电路来说相当于一个电压源,其输出电阻相当于电源内阻。它的数值与输入电阻为同一数量级。它也随温度的改变而改变。选择适当的负载电阻  $R_L$  与之匹配,可以使由温度引起的霍尔电势的温漂减至最小。输出电阻与输入电阻的测定方法相同,即

$$R_o = \frac{U_H}{I_H} \bigg|_{\substack{t=20\pm 5^\circ\text{C} \\ B=0}} \quad (5-5)$$

## 3) 额定激励电流 $I$ 和最大激励电流 $I_M$

由于霍尔电势随激励电流的增大而增大,所以在应用中总希望选用较大的激励电流。但激励电流增大会导致霍尔元件的功耗增大,使元件的温度上升,一般能使霍尔元件自身产生  $100^\circ\text{C}$  温升的激励电流值称为额定激励电流  $I$ ,温度的上升会使霍尔电势的温漂增大,引起霍尔电势的变化量增大,因此对每种型号的霍尔元件均规定了相应的最大激励电流。以元件允许的最大温升为限制所对应的激励电流称为最大激励电流,它的数值从几毫安至几百毫安不等。额定激励电流和最大激励电流与散热条件相关,改善霍尔元件的散热条件可以增大额定激励电流和最大激励电流。

## 4) 额定功耗 $P$ 。

额定功耗  $P$  为环境温度为  $25^\circ\text{C}$  时,允许通过霍尔元件的电流和电压的乘积。

## 5) 灵敏度 $K_H$

灵敏度  $K_H$  由霍尔电势公式可得:  $K_H = U_H / (IB \cos \theta)$ , 数值约为  $10\text{mV}/(\text{mA} \cdot \text{T})$ 。

## 6) 最大磁感应强度 $B_M$

当控制电流恒定时,霍尔元件的开路输出随磁场强度的增加并不完全呈线性关系,而是有所偏离,当磁感应强度超过  $B_M$  时,霍尔电势的非线性误差将明显增大,  $B_M$  的数值一般为零点几特斯拉。

当磁场为交变磁场,电流为直流电流时,由于交变磁场在导体内产生电涡流而输出附加霍尔电势,因此霍尔元件只能在频率为几千赫兹的交变磁场内工作。

## 7) 霍尔电势温度系数

霍尔电势温度系数是指在霍尔元件正常工作时,温度每变化  $10^\circ\text{C}$  时霍尔电势变化的百分比。它与霍尔元件的材料有关,一般为  $0.1\%/^\circ\text{C}$ 。在要求较高的场合,应选择低温漂的霍尔元件。

## 8) 不等位电势和不等位电阻

向霍尔元件通以额定的激励电流,且外加磁场为零,则它的霍尔电势应为零,但实



际上其霍尔电势并不为零。这时霍尔电势的开路电压称为不等位电势，不等位电势也称为零位电势，产生这一现象的原因如下。

① 霍尔电极的安装位置不对称或不在同一等电位面上。

② 电阻分布不均匀，这主要是由半导体材料不均匀造成电阻率不均匀或是由几何尺寸不均匀所造成的。

③ 激励电极接触不良造成激励电流分布不均匀等。

#### 9) 寄生直流电势

向霍尔元件通以额定的交流控制电流，当外加磁场为零时，产生的零位电势中有直流零位电势和交流零位电势两种成分，而其中的交流成分就是前面讲述的不等位电势，而直流成分就是直流零位电势，也称为寄生直流电势。

产生寄生直流电势的原因如下。

(1) 控制电极和霍尔电极与霍尔元件由于接触不良而形成非欧姆接触，造成整流效果，由整流作用形成寄生直流电势。

(2) 两个霍尔电极的大小不对称，使两个电极点的热容量不同，散热状态也不同，形成两极间的温差，从而出现温差电势，并形成寄生直流电势。

寄生直流电势一般在 1mV 以下，约有几百微伏，它是影响霍尔片温漂的主要原因之一。为了补偿寄生直流电势，通常在制作和安装霍尔元件时，电极的焊接要达到欧姆接触，使散热均匀，并保持良好的散热条件。

#### 10) 热电阻

在开路情况下，在霍尔元件上输入 1mW 的功率时会产生温升，因为该温升的大小在一定条件下与电阻有关，所以称其为热电阻。一些霍尔元件的主要技术参数如表 5.1 所示。

表 5.1 一些霍尔元件的主要技术参数

参数名称	符号	单位	HZ-1 型	HZ-2 型	HZ-3 型	HZ-4 型	HZ-1 型	HZ-2 型
			Ge (111)	Ge (111)	Ge (111)	Ge (110)	InSb	InSb
电阻率	$\rho$	$\Omega \cdot \text{cm}$	0.8~1.2	0.8~1.2	0.8~1.2	0.4~0.5	0.003~0.01	0.003~0.05
几何尺寸	$l \times b$	$\text{mm}^3$	8×4×0.2	4×2×0.2	8×4×0.2	8×4×0.2	6×3×0.2	8×4×0.2
输入电阻	$R_i$	$\Omega$	110±20%	110±20%	110±20%	45±20%	0.8±20%	0.8±20%
输出电阻	$R_o$	$\Omega$	110±20%	110±20%	110±20%	40±20%	0.5±20%	0.5±20%
灵敏度	$K_H$	$\text{mV}/(\text{mA} \cdot \text{T})$	>12	>12	>12	>4	1.8±20%	1.8±20%
不等位电阻	$r_0$	$\Omega$	<0.07	<0.05	<0.07	<0.02	<0.005	<0.005
寄生直流电势	$U_0$	$\mu\text{V}$	<150	<200	<150	<100		
额定控制电流	$I_c$	$\text{mA}$	20	15	25	50	250	300
霍尔电势温度系数	$\alpha$	$1/^\circ\text{C}$	0.04%	0.04%	0.04%	0.03%	-1.5%	-1.5%
内阻温度系数	$\beta$	$1/^\circ\text{C}$	0.5%	0.5%	0.5%	0.3%	-0.5%	-0.5%
热阻	$R_Q$	$^\circ\text{C}/\text{mW}$	0.4	0.25	0.2	0.1		
工作温度	$T$	$^\circ\text{C}$	-40~45	-40~45	-40~45	-40~45	0~40	0~40