

基于霍尔效应实验中霍尔元件的优化与创新研究

沈家豪

(大连科技学院交通与电气工程学院, 辽宁 大连 116052)

摘要 本研究旨在设计并改进一个霍尔效应实验仪, 其是一种测量磁场的仪器。该设计在原有的霍尔效应实验仪的基础上, 对霍尔元件与霍尔效应传感器 A3144E 通过相关的程序设计与烧录, 辅以相关电路图, 在原有的 HLS-II 型霍尔效应测试仪和实验仪的基础上改进出一个利用 12V 电源连接降压模块与 ARDUINO+A3144E 组合的霍尔效应实验仪, 对基于霍尔效应实验中的霍尔元件进行优化与创新研究。

关键词 霍尔效应实验仪; 霍尔效应电势差; 霍尔元件; 霍尔效应传感器

基金项目: 2024 年大连科技学院大学生创新创业训练项目 (项目编号: 121)。

中图分类号: TM933

文献标识码: A

文章编号: 2097-3365(2024)03-0011-03

德国物理学家霍尔在 1879 年首次观察到一种现象, 即当电流在磁场中流动且与磁场方向成直角时, 由于洛伦兹力的作用, 带电粒子在电流方向和磁场方向之外的方向上会产生一个横向的电势差, 这便是霍尔电势差, 简称霍尔效应。在现代化工业生产中, 自动检测和控制在需求日益增长, 霍尔元件作为敏感部件, 其应用范围正逐步扩大。深入探索这一原理, 对于未来的技术进步具有积极的意义。本研究在理论上可提高相关基本参数测量值的精确性^[1]。

1 实验目的

1. 了解霍尔效应测量磁场中参数的基本原理以及产生霍尔效应的条件, 测量室温下改进后的霍尔元件的基本参数。

2. 绘制霍尔元件的霍尔电压 U_H 与工作电流 I_S 的关系曲线, 并利用作图法求 B 。利用霍尔效应测定蹄形电磁铁的励磁特性 $B-I_M$ 曲线, 测量蹄形电磁铁气隙中磁感应强度 B 大小分布, 作 $B-x$ 图像。

2 实验仪器

HLS-II 型霍尔效应实验仪、测试仪、霍尔元件、P、N 型半导体薄片、双极换向开关、蹄形电磁铁等、ARDUINO 开发板、霍尔效应传感器 A3144E 模块、稳压降压模块、面包板、二维舵机云台、12V 电源等。

3 实验原理

3.1 霍尔效应

霍尔效应原理: 当带电粒子定向移动形成的电流通过置于磁场中的导体时, 会受到洛伦兹力的作用,

导致带电粒子在导体内部发生偏转^[2], 这种现象即为霍尔效应。在导体中, 当电流与磁场垂直时, 会在导体垂直于电流和磁场方向的两个端面之间产生一个电势差, 即霍尔电势差。

磁场 B 位于 z 的方向, 与之垂直的半导体薄片上沿着 x 方向通以交流电流 I_S (工作电流), 假设载流子为电子 (N 型半导体), 它沿着与电流 I_S 相反的 x 负方向运动。由于洛伦兹力 f_L 的作用, 电子即向着位于 y 轴负方向的 N 侧偏转, 而使得 N 侧形成电子积累, 而相对的 M 侧形成正电荷积累。同时, 运动的电子还受到由于两侧积累的异种电荷形成的反向电场力 f_E 的作用。随着电荷积累量的增加, f_E 增大, 当两力大小相等方向相反时, $f_E = -f_L$, 电荷积累达到动态平衡。此时在 M 、 N 两端面之间建立的电场称为霍尔电场 E_H , 相应的电势差称为霍尔电压 U_H 。

设电子以均匀速度 \bar{v} 向 x 轴负方向运动, 在磁场 B 作用下所受洛伦兹力 $f_L = -e\bar{v}B$, 同时电场作用于电子的力 $f_E = eE_H = eU_H/l$ 。

当达到动态平衡时:
$$\begin{cases} f_E = -f_L \\ eU_H/l = e\bar{v}B \end{cases} \text{ 得:}$$

$$U_H = B\bar{v}l \quad (1)$$

设霍尔元件宽度为 l , 厚度为 d , 载流子浓度为 n , 则霍尔元件的工作电流为:

$$I_S = ne\bar{v}ld \quad (2)$$

由式 (1)、(2) 得:

$$U_H = E_H l = \frac{1}{ne} \frac{I_S}{d} = R_H \frac{I_S B}{d} \quad (3)$$

即霍尔电压 U_H 与 $I_S B$ 乘积成正比, 与霍尔元件的厚度成反比, 比例系数 $R_H=1/ne$ 称为霍尔系数, 它是反映材料霍尔效应强弱的重要参数。当霍尔元件的厚度确定时, 设

$$K_H=R_H/d=1/ned \quad (4)$$

将式(4)代入(3)得:

$$U_H=K_H I_S B \quad (5)$$

式中: K_H 是霍尔元件的灵敏度, 表示在单位磁感应强度和工作电流下的霍尔元件产生的霍尔电势差大小, 其单位是 $mV \cdot mA^{-1} \cdot T^{-1}$ 。

为了获得较高的霍尔电压, 选择具有较大霍尔系数 R_H 的材料是至关重要的。霍尔系数, 也称为霍尔迁移率, 是衡量材料对霍尔效应敏感程度的物理量。在众多材料中, 那些具有较高迁移率和适中的电阻率的半导体材料, 被认为是制造霍尔元件的理想选择。半导体的迁移率高意味着电子在材料中的移动速度快, 这有助于提高霍尔电压的灵敏度。因此, 选择合适的半导体材料并进行精确的工艺控制, 是制造出高性能霍尔元件的关键。当磁感应强度和元件平面法线成一角度时, 作用在元件上的有效磁场是其法线方向的分量 $B \cos \theta$, 此时

$$U_H=K_H I_S B \cos \theta \quad (6)$$

所以一般调整元件两平面方位, 使 U_H 达到最大, 即 $\theta=0^\circ$, $U_H=K_H I_S B \cos \theta=K_H I_S B$ 。

由式(6)可知, 当 I_S 和 B 两者之一改变方向时, 霍尔电压的方向改变; 若两者同时改变, 则 U_H 方向不变。

3.2 ARDUINO+ 霍尔效应传感器 A3144E 模块

1. 霍尔传感器 A3144E 原理: 该模块是检测磁场强度的传感器模块。它的工作原理是通过测量磁场对一个磁性材料中电子自旋的影响来测量磁场强度。当磁场通过磁性材料时, 它会影响材料中电子自旋的方向, 这称为磁化。通过测量磁化程度, 可推断出磁场强度。当电流恒定电流流经霍尔半导体时, 会在其垂直方向形成一种电势差, 即霍尔电压。这种电压会随着磁场强度的增减而相应改变。通常情况下, 霍尔电压的数值较低, 大致在几毫伏的量级。但是经过集成电路中的放大器放大后, 就能产生足够强的信号输出。

2. A3144E 主要功能为: 当线性霍尔传感器的标记面处于 S 磁极时, 该传感器会输出一个模拟信号, 这个信号的电平在一定区间内与外部施加的磁场强度成正比, 这个区间被称为线性磁场范围。然而, 一旦外部磁场超出这个线性范围, 信号输出与磁场之间的关

系就不再保持线性, 而是随着磁场的增加, 输出电压会逐渐趋向于一个饱和值。这个饱和值有对应的最低和最高电压限制, 也就是说输出的电压会在一定范围内的最小值和最大值之间变化, 当磁场强度达到一定程度时, 输出电压会分别达到这两个极限值。即元件注入一个 5V 电压, 初始输出为 2.5V, 当 S 极慢慢靠近的时候电压会从 2.5V 慢慢上升至饱和状态将停止; 而当 N 极慢慢靠近的时候电压会从 2.5V 慢慢下降至 0V, 该种霍尔传感器称为线性霍尔元件。

3. A3144E 霍尔效应传感器模块: A3144E 霍尔效应传感器模块体积小、响应快、灵敏度高、温度性能好、精确度高, 因此可通过与 ARDUINO 开发板组合实现对霍尔元件的改进^[3]。

4. ARDUINO 开发板优点: 该开发板具有体积紧凑、成本效益高、能源消耗低的特点, 且开发周期较短等优点。它配备了多种现成的接口, 能够与多种类型的传感器相结合, 以侦测和监测周围环境。通过这些传感器收集的数据, 设备能够对马达、照明等硬件进行智能控制, 以实现与用户或环境的互动功能。

5. 二维舵机云台: 二维舵机云台是一种利用电动机来实现云台在水平和垂直方向上旋转与抬升的精密设备, 它在多个领域内发挥着至关重要的作用, 尤其是在航拍摄影以及安防监控等领域中。该设备能够轻松地实现云台在水平面内的左右旋转以及垂直方向的上下移动, 从而为摄影师或监测人员提供极大的操作灵活性。该装置通常都会装备先进的自动平衡系统, 能够实时地检测并调整云台的位置, 确保在移动过程中始终保持稳定。因此, 二维舵机云台对于该实验能够提供可靠而精准的支持。

4 实验内容及步骤

4.1 实验内容 (在实验记录时工作电流 I_S 一律替换为霍尔电流 I_H)

1. 利用霍尔效应测定蹄形电磁铁的励磁特性 $B-I_M$ 曲线。

2. 测量 $U_H \sim I_H$ 曲线, 并求出直线斜率 k , 利用作图法并根据公式 $B = \frac{U_H}{K_H \cdot I_H}$ 求 B 。

3. 测量蹄形电磁铁气隙中磁感应强度 B 的大小及分布, 作 $B-x$ 的图像。

4.2 实验步骤

1. 首先熟悉实验装置各部分功能, 弄清楚原有基础仪器以及改进的 ARDUINO+ 霍尔效应传感器 A3144E

模块之间各接线柱间的对应关系,正确接好各连接线。

2. 将各换向开关置于空档位置,各旋钮均逆时针旋到底,打开电源,预热 5min~10min,使得仪器内部处于稳定状态。

3. 通过调节 X, Y 方向以及二维舵机云台的角度,将霍尔元件平稳放置于蹄形电磁铁气隙中心。固定 $I_H=5.00mA$, 按要求依次改变励磁电流 I_M , 通过改变三个换向开关的方向测出对应的 U_H 值。

4. 固定 $I_M=0.500A$, 按要求依次改变工作电流 I_S , 通过改变三个换向开关的方向测出对应的 U_H 值。

5. 固定 $I_H=5.00mA$ 和 $I_M=0.500A$, 调节 X 位移螺丝 (Y 位移及二维舵机云台的位置不变,保持位于气隙中心) 改变元件在气隙中的水平位置,通过改变换向开关的方向,记录样品在不同位置处对应的 U_H 值。

5 数据记录与处理

求拟合直线斜率可借用最小二乘法公式:

$$\begin{cases} \hat{b} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i - n\bar{x}\bar{y}}{\sum_{i=1}^n x_i^2 - n\bar{x}^2}, \\ \hat{a} = \bar{y} - \hat{b}\bar{x}. \end{cases}$$

其中 b 是线性回归方程的斜率, a 为截距。代入数据,计算得直线斜率 k 。因此,根据公式 $B = \frac{U_H}{K_H \cdot I_H}$, 可计算出磁感应强度。

6 实验结论

1. 由实验数据绘制出的拟合直线可知:蹄形电磁铁的励磁特性 $B-I_M$ 呈线性关系,霍尔电压与霍尔电流的 U_H-I_H 的图像呈线性关系。

2. 根据所得蹄形电磁铁气隙中磁感应强度 B 大小分布的 $B-x$ 图像,我们可知蹄形电磁铁中间部分为均匀磁场,磁感应强度 B 和位置都未发生变化。说明蹄形电磁铁中间地段是匀强磁场,两边由于边缘效应^[4] 会有其它的影响,因此不均匀。

7 霍尔效应的应用及发展前景

7.1 测量载流子浓度及用霍尔效应测量磁场

依据霍尔效应的定量关系,通过外加磁场中测量的霍尔电压,可以鉴定载流子的符号和浓度。在工业化生产制造、军事和国防以及科研等众多领域,例如在粒子加速器、核聚变实验、同位素分离技术、地质勘探、地震预测以及磁性材料的研究中,磁场测量是一项常见的技术。^[5]

7.2 磁流体发电技术

依赖于等离子体在磁场中的运动,类似于传统导体切割磁感线的方式。在这种发电装置中,高温的导电液体以高速流动进入装有磁极的通道,由洛伦兹力在电极间产生电压,从而连续产生电能。等离子体在高温下离子化,当高速穿越磁场时,不同极性的带电粒子在洛伦兹力的影响下会向不同电极偏转,形成电势差,向外提供电能。

7.3 在电磁无损检测领域

霍尔效应方法因其安全性、可靠性和实用性而得到广泛应用,且不受速度影响。这种方法常用于设备故障分析和材料缺陷探测。探伤过程中,首先用永磁体磁化金属管道,确保磁感线均匀分布。若无损伤,则管道完整,无漏磁现象;若存在损伤,则管道破裂,出现漏磁。然后,通过霍尔传感器探头在管道表面移动,连接的电路会记录下任何波形变化,以此来判断管道是否有损伤。

7.4 在制作霍尔效应传感器领域

霍尔效应开关是一种利用霍尔电压的变化来控制开关状态的设备。它们在工业自动化和控制系统中用于检测和调节电流,以及控制小型电动机的启停。霍尔效应线性传感器能够输出一个与检测到的磁场强度成正比的信号。这意味着,当磁场强度增加时,传感器的输出电压或电流也会相应增加,形成一个线性关系。用于精确测量位置、位移和速度。在机器人技术和自动化设备中,这些传感器对于精确控制运动部件至关重要。

参考文献:

- [1] 罗浩,向泽英,谢英英,等.霍尔效应法测磁场实验误差研究[J].大学物理实验,2015(04):99-102.
- [2] 刘雪梅.利用霍尔效应实验仪测量磁场分布的一种方法[J].重庆文理学院学报(自然科学版),2012(02):45-47,50.
- [3] 李雅丽,宋国华,施建珍,等.霍尔效应实验装置的研究与改进[J].重庆工学院学报,2006,20(05):130-132.
- [4] 江铭波,阎旭东,徐国旺.霍尔效应及霍尔元件在物理量测量中的应用[J].湖北工业大学学报,2011,26(02):142-144.
- [5] 王本菊.霍尔效应及其应用[J].中国校外教育,2011(06):76-77.