

工 程 电 磁 场

大 论 文

(pdf 版)

霍尔效应及其应用

一、问题背景

在我们生活、自然界、或工业、军事等领域都会存在着电磁场，许多物理现象都可以利用电磁场去分析。

在电子设计中，我们经常会遇到测量电流的情况，当然可以通过 *INA282* 等芯片将电流信号转换为电压信号，利用单片机去测量，但利用**霍尔电流传感器**去测量也是一种方法。

霍尔电流传感器是一种利用**霍尔效应**原理所制成的测量元器件。霍尔效应是一种电磁效应，这一现象是美国物理学家霍尔于1879年在读研究生期间在做研究载流子导体在磁场中受力作用实验时发现的。

当电流垂直于外磁场通过导体时在导体的垂直于磁场和电流方向的两个端面之间会出现电势差，这一现象就是**霍尔效应**，这个电势差也被称为**霍尔电势差**。

本文对**霍尔效应**和**霍尔电流传感器**工作原理进行分析，借此巩固课上所学电磁场理论知识。

二、霍尔效应

首先介绍一下霍尔效应。下图为霍尔效应原理图。

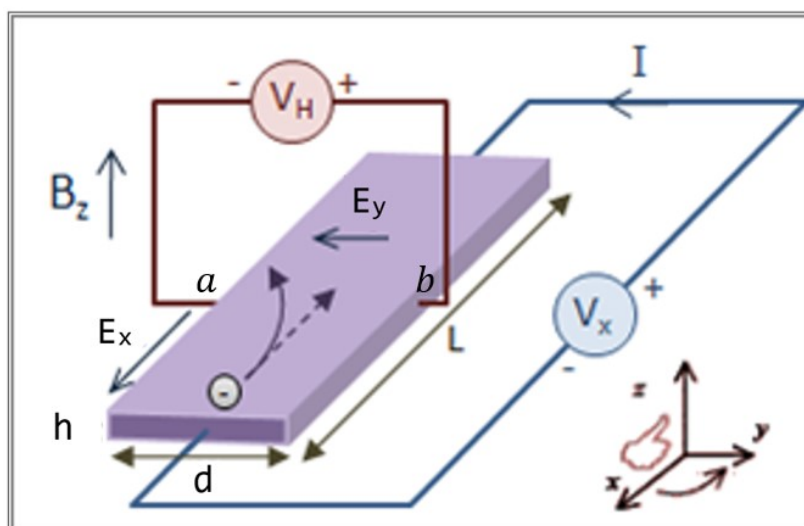


图 1 霍尔效应

在 x 方向上通以大小为 I 的电流，在 z 方向上施以磁感应强度为 B_z 的磁场，则将使导体内的载流子在洛伦兹力的作用下，向 y 轴方向，即垂直于电流和磁场的侧面偏转，并使该侧面由于电荷积累而带电，同时因电中性的要求在它对立的侧面积累相反的电荷。这样，在两侧面之间便出现了电场。它使随后的载流子运动在受到洛伦兹力的同时，又受到了和它相反的电场力作用。最后，当电场力与洛伦兹力平衡时，载流子的积累运动就达到了动态平衡状态。这时在两侧之间建立的电场就称作霍尔电场。

我们假设载流子为电子，电荷量为 e ，则电子运动方向为 x 轴负方向。单个电子所受到的洛伦兹力

$$\vec{F}_B = e \vec{v} \times \vec{B} = evB \vec{e}_y$$

其中 \vec{v} 的方向为 x 轴负方向， \vec{B} 方向为 z 轴正方向，且 $e < 0$ ，因此 \vec{F}_B 方向为 y 轴负方向，即导体左侧聚集负电荷，右侧聚集正电荷，因此会形成由右至左的电场，设电场强度大小为 E ，则电子受电场力

$$\vec{F}_E = e \vec{E} = -eE \vec{e}_y$$

当电子受力平衡时，可得：

$$\vec{F}_B + \vec{F}_E = 0$$

即

$$e \vec{v} \times \vec{B} + e \vec{E} = 0$$

解得

$$\vec{E} = -\vec{v} \times \vec{B}$$

由于电流密度

$$\vec{J} = \rho \vec{v}$$

所以电流大小

$$I = \int_S \vec{J} \cdot d\vec{S} = JS = \rho v dh$$

因此

$$v = \frac{I}{\rho dh}$$

求得***b***与***a***之间的电势差***U_{ba}***，即：

$$U_{ba} = V_H = \int_l \vec{E} \cdot d\vec{l} = \int_b^a vB \cdot dy = -vBd = -\frac{IB}{\rho h}$$

令霍尔系数***R_H*** = $-\frac{1}{\rho}$ （由于***ρ*** < 0, 故此处存在负号），霍尔片

灵敏度***K_H*** = $\frac{R_H}{h}$ ，则***V_H*** = ***K_HIB***，当电流 *I* 恒定时，对于某一确定霍

尔片，两侧电势差***V_H*** ∝ *B*。

补充：

为了巩固课上所学知识，现对导体内**电场**及**电势**分布分析如

下：

当达到平衡时，导体内电场可分解为两个方向。如图 1 所示，分别为 x 方向和 y 方向。

1) x 方向

对于 x 方向的电场，是由运动的电荷，即电子以恒定速度 v 向 x 轴负方向运动而产生的，为**恒定电场**，且为无源无旋场。

由欧姆定律得其电场强度为

$$\vec{E}_1 = \frac{1}{\sigma} \vec{j} = \frac{1}{\sigma} \frac{I}{dh} \vec{e}_x$$

2) y 方向

对于 y 方向的电场，是由导体两侧聚集的静止电荷产生的，为**静电场**，且为有散无旋场。

其电场强度为

$$\vec{E}_2 = -\vec{v} \times \vec{B} = -\frac{K_H IB}{d} \vec{e}_y$$

综上所述，导体内总电场

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 = \frac{I}{\sigma hd} \vec{e}_x - \frac{K_H IB}{d} \vec{e}_y$$

由 $E = -\nabla\varphi$ 可求电势 φ ：

$$\varphi = \int E_x dx = \frac{Ix}{\sigma hd} + C(y, z)$$

$$\varphi = \int E_y dy = -\frac{K_H IB y}{d} + C(x, z)$$

$$\varphi = \int E_z dz = C(x, y)$$

因此

$$\varphi = \frac{Ix}{\sigma hd} - \frac{K_H I B y}{d} + C$$

导体内总电场方向斜向左下方，电子受电场力方向为右上方，受磁场力方向为水平向左，即y轴负方向，合力为正上方，即x轴负方向，但电子不会一直加速运动，因为它会不断的与不动的粒子发生频发的碰撞（这便是形成电阻的微观本质）受到不动的粒子对它运动的阻碍作用，电子做的是平均速率不变的运动。

我知道这种分析受力的方式比较麻烦，且没必要，可直接通过静电场力与磁场力抵消后只剩恒定电场产生的力来分析，但我想通过此种方式巩固所学知识，也可作为一种验证。

三、霍尔电流传感器

霍尔元件作为传感器使用时必须对其输出霍尔电压进行检测，霍尔电流传感器常用的检测方式有直测式和磁平衡式两种。

1) 直测式电流传感器（开环）

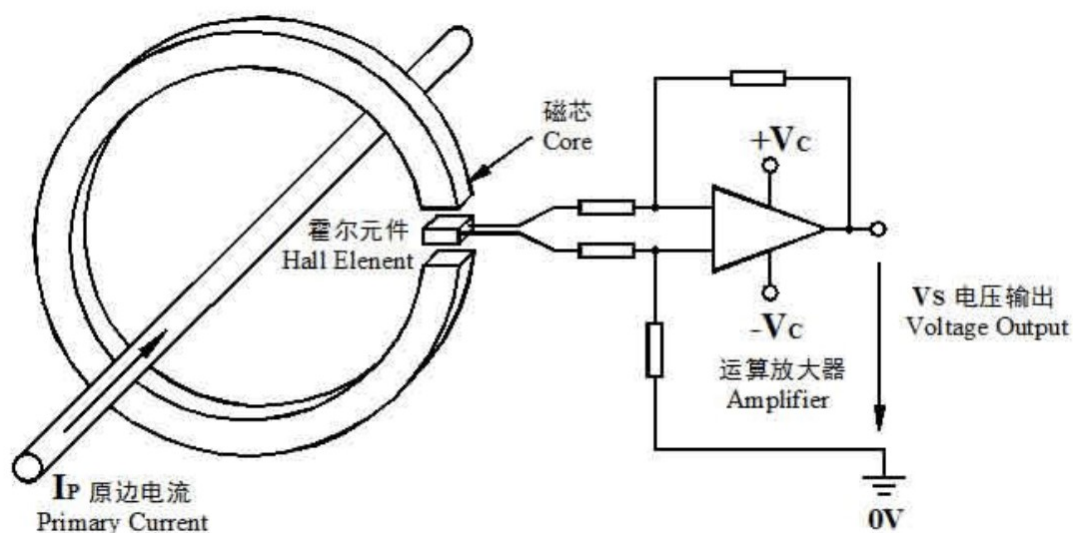


图 2 直测式电流传感器原理图

当电流通过一根长导线时，在导线周围将产生磁场，设导线中

电流为 I_P ，磁芯半径为 r ，则根据安培环路定律，即磁场旋度方程的积分形式

$$\oint_l \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \sum I$$

得：

$$2\pi r B_P = \mu_0 I_P$$

所以

$$B_P = \frac{\mu_0 I_P}{2\pi r}$$

由于霍尔元件 $V_H = K_H I_0 B_P$ ，因此，可得霍尔元件两侧电压 V_H 与待测电流 I_P 之间的关系：

$$V_H = \frac{\mu_0 K_H I_0 I_P}{2\pi r}$$

即

$$I_P = \frac{2\pi r V_H}{\mu_0 K_H I_0} \propto V_H$$

在忽略环境等其他影响因素时，可以认为待测电流 I_P 正比于霍尔电压 V_H 。但得到的霍尔电压一般仅数毫伏至数百毫伏，为了便于检测必须先经放大电路将电压进行放大，放大后可以直接输出，从而可求出电流 I_P 的值。

在实际应用时，可测量一些实际的数据标定该传感器，即得到 I_P 和 V_H 的关系。

2) 磁平衡式电流传感器（闭环）

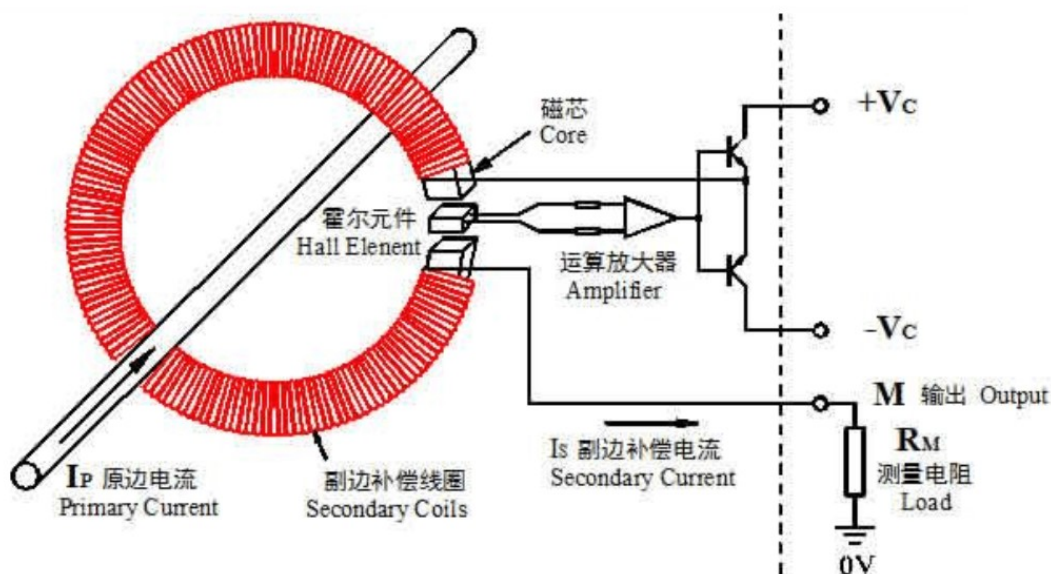


图3 磁平衡式电流传感器原理图

磁平衡式霍尔电流传感器是一种负反馈自动补偿式的电流传感器。其工作原理如下：

当主回路有电流，即原边电流 I_P 通过时，会产生磁场 B_P ，产生的磁场被磁环聚集并通过霍尔元件，霍尔元件会产生电势差 V_H ，产生的电压信号经放大电路放大后驱动功率管并使其导通，从而获得副边补偿电流 I_S 。 I_S 通过 N 匝线圈，会产生一个与磁场 B_P 反向的磁场 B_S ，根据安培环路定律得：

$$2\pi r B_S = \mu_0 N I_S$$

所以

$$B_S = \frac{\mu_0 N I_S}{2\pi r}$$

在起始阶段，功率管输出电压为 0， $I_S = 0$ ， $B_S = 0$ ，但合磁场 $B \neq 0$ ，即霍尔元件输出电压不为零，导致功率管是导通的。随着功

率管导通，输出电压增大，导致 I_S 不断增大，从而 B_S 不断增大，合磁场 B 不断减小，直到 $B_S = B_P$ 时，合磁场 $B = 0$ ，此时霍尔元件输出电压 $V_H = 0$ ，功率管截止，电流 I_S 不再发生变化，系统达到平衡，这时霍尔元件就处于零磁通检测状态。此时测量电阻两端的电压即可反映待测电流 I_P 的大小。

若待测电流 I_P 发生变化，磁芯内便会存在磁场，霍尔元件就有信号输出，经放大器放大后，立即有相应的电流流过副边补偿线圈对其进行补偿。下面对如下两种情况进行分析：

- 若待测电流 I_P 增大，则磁场 B_P 增大，霍尔元件中通过向下的磁场，两侧感应出的电压经放大后会使功率管导通，三极管会存在向下的电流，两个三极管中间的电压会增大，导致电流 I_S 增大，磁场 B_S 增大，直到 $B_S = B_P$ ，系统重新达到平衡。
- 若待测电流 I_P 减小，则磁场 B_P 减小，霍尔元件中通过向上的磁场，两侧感应出的电压经放大后会使功率管导通，三极管会存在向上的电流，两个三极管中间的电压会减小，导致电流 I_S 减小，磁场 B_S 减小，直到 $B_S = B_P$ ，系统重新达到平衡。

由此可见，此负反馈系统可以很好的维持零磁通状态，可以较好的测出待测电流的大小。

补充：

为了巩固交变电磁场的知识，这里分析当待测电流 I_P 发生变化瞬间，霍尔元件中电场以及磁场的情况。

由于负反馈系统中存在三极管等非线性元件，且受环境因素影响，所以实际电场与磁场变化的表达式较为复杂，这里就不再进行定量分析，而是简单的进行定性分析。

对于交变电磁场，首先给出麦克斯韦方程组：

积分形式：	微分形式：
$\oint_l \vec{H} \cdot d\vec{l} = \int_s \left(\vec{J} + \frac{\partial}{\partial t} \vec{D} \right) \cdot d\vec{S}$	$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial}{\partial t} \vec{D}$
$\oint_l \vec{E} \cdot d\vec{l} = - \int_s \frac{\partial}{\partial t} \vec{B} \cdot d\vec{S}$	$\nabla \times \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$
$\oint_s \vec{D} \cdot d\vec{S} = q$	$\nabla \cdot \vec{D} = \rho$
$\oint_s \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0$	$\nabla \cdot \vec{B} = 0$

由第二方程可知，场发生变化时，会感应出电场，且产生的电场为有旋场，因此霍尔元件中除了原有的电场外，还会存在由于电磁感应产生的有旋电场。

当磁场变化时，霍尔元件感应出的电压会发生变化，因此气馁电场也会发生变化，由第一方程可知，不仅传导电流会产生磁场，变化的电场也会产生磁场，所以霍尔元件中的磁场除了电流 I_P 和 I_S 产生的，还会有霍尔元件内部的电流 I_0 产生的和y轴方向变化的电场所产生的。

由于变化的电场和磁场可以相互产生，故感应出的电场线与磁场线是相互较链，自行闭合的，从而在空间中形成电磁波。也就是说，在待测电流 I_P 发生变化的瞬间，系统会释放电磁波。

四、心得体会

通过电磁场课程的学习，让我对场的概念有了一个全新的认识。首先，在第一章，复习了有关矢量的运算，最重要的是学习了散度、旋度以及梯度的概念，以及亥姆霍兹定理，为后续章节奠定了基础。在后面几章分别学习了静电场、恒定磁场、恒定电场、交变磁场的分析方法。对于一个场，在学习过程中需要确定其散度方程、旋度方程以及边界条件，为了方便分析，均引入了势的概念，电场中的电位，磁场中的标量磁位以及矢量磁位，课上没有对矢量磁位详细介绍，我课下简单了解了一下。另外对于每一种场，还需要去研究它的能量。我认为电磁场这门课程令我学会了很多东西，据我了解，在我们后续课程电机学中会涉及到电磁场的知识，这也算是为我们以后的课程奠定了基础。

通过对此篇论文的写作，我认为自己进一步巩固了课上所学知识，本文涉及到了静电场、恒定磁场、恒定电场、交变磁场的部分知识，可以算是课上内容的一个应用。

五、对老师教学的建议

首先，我认为老师的教学方式已经非常通俗易懂了，课时安排的也恰到好处。

根据我在上课时的体验，对老师提一个建议。希望老师可以多讲一些例题，有些知识点不通过例题是很难理解的，如果课上没有时间，老师可以多找一些可以巩固知识点的题目发给我们，让我们

课下看看，我在学第二章的时候有些东西确实感觉有些难理解，由于我们教材上的课后题没有详解解题过程，只能在网上去找其他教材的一些题目去学习。我们之前学大学物理的时候就有一本练习册，感觉那种方式挺好。

总之，就是希望老师可以多留一些题，可以不强制去完成，让有兴趣有能力的人去看看。