

霍尔元件副效应测量探索与实践

宋连鹏^{*}, 周丽, 孙瑜

海军大连舰艇学院基础部, 辽宁 大连 116018

DOI: 10.61369/RTED.2025070033

摘 要 : 霍尔法测磁场实验的副效应是实验过程中需要解决的核心问题, 通常采用“对称交换测量法”直接消除各个副效应, 以减小对霍尔电压测量的影响, 由于各个副效应值大小始终未被测量, 因此副效应对测量的影响程度不清, 导致“对称交换测量法”对实验结果精度提升的实际效果不明。本文通过对副效应产生原因的分析, 运用“对称交换测量法”, 结合科学的算法, 探索测量出各个副效应值以及霍尔电压值, 并通过各个副效应值与霍尔电压值的比较, 全面的评定各副效应对霍尔电压测量的影响程度, 为大学物理实验教学以及与霍尔元件测磁场的相关研究提供有益的参考。

关 键 词 : 副效应; 对称交换测量法; 霍尔电压

Exploration and Practice of Measuring Secondary Effects of Hall Elements

Song Lianpeng^{*}, Zhou Li, Sun Yu

PLA Dalian Naval Academy, Dalian, Liaoning 116018

Abstract : Secondary effects in the Hall effect experiment for magnetic field measurement are a core issue to be addressed during the experiment. The "symmetric exchange measurement method" is usually adopted to directly eliminate various secondary effects, thereby reducing their impact on Hall voltage measurement. However, since the magnitudes of individual secondary effects are never measured, the extent of their influence on the measurement remains unclear, and the actual effect of the "symmetric exchange measurement method" in improving the accuracy of experimental results is uncertain. By analyzing the causes of secondary effects, this paper uses the "symmetric exchange measurement method" combined with scientific algorithms to explore and measure the values of each secondary effect and the Hall voltage. Through comparing the values of each secondary effect with the Hall voltage, it comprehensively evaluates the degree of influence of each secondary effect on Hall voltage measurement, providing useful references for university physics experiment teaching and related research on magnetic field measurement using Hall elements.

Keywords : secondary effects; symmetric exchange measurement method; hall voltage

引言

霍尔元件是一种基于霍尔效应的半导体磁电器件, 能精准感应磁场变化并转化为电信号, 在实验技术上有着广泛的应用, 如工业自动化和汽车电子等领域^[1]。基于霍尔元件的霍尔法测磁场实验中存在的副效应严重的影响实验测量的精度, 通过测量各副效应的值, 可以分析各副效应对测量的影响程度^[2]。

一、霍尔元件副效应

(一) 霍尔效应

霍尔效应是运动的载流子(电子或空穴)在磁场中受洛伦兹力作用引起的现象。载流子发生的偏转引起在垂直电流和磁场的方向上产生正负电荷的积累, 从而形成附加的横向电场^[3]。同时电荷产生的电场会阻止载流子继续向侧面偏移, 当电场增大到能够使电场力和洛伦兹力相等时, 电荷的运动就达到了平衡^[4]。对于宽度为 b , 厚度为 d 均匀半导体则有

$$U_H = K_H I_S B \quad (1)$$

其中系数 $K_H = \frac{1}{ned}$ 称为霍尔元件的灵敏度。

(二) 霍尔效应中的副效应

在实际工作中在电流的垂直方向上除了霍尔电压外, 还伴随着其他若干副效应^[5]。

1. 不等位电势差 U_0

由于工艺的限制, 造成很难把引出的两个电压电极做在同一等势面上, 因此两电极间就有电势差 U_0 , 称为不等位电势差。 U_0 的方向与电流方向有关, 与磁场方向无关^[6]。

2. 爱廷豪森效应 U_E

平衡后速率为 v 载流子径直通过霍尔元件, 而速率小于或大

于 v 的载流子由于所受的洛伦兹力不同而分别向相反的两侧偏转，如图1所示，从而导致霍尔元件出现一侧快载流子多，温度高；另一侧慢载流子多，温度低，产生温差电动势 U_E 。 U_E 方向与霍尔电流的方向和磁场的方向有关。

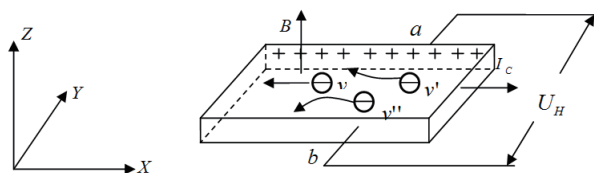


图1 电子运动平均速度（图中 $v' < v$ ； $v'' > v$ ）

3. 能斯特效应 U_N

霍尔元件两个电流电极焊点的接触电阻不同，据帕尔贴效应，一个极吸热温度升高；另一个极放热温度降低，在两极间引起温差电流（称为热扩散电流）^[7]。加入磁场后，热扩散电流如同霍尔电流一样在磁场作用下发生偏转，产生能斯特效应 U_N 。 U_N 的方向与磁场方向有关，与电流方向无关^[8]。

4. 里纪—勒杜克效应 U_{RL}

上述热扩散电流的载流子的迁移率也不尽相同，类似于爱廷豪森效应，产生里纪—勒杜克效应 U_{RL} 。 U_{RL} 的方向与磁场方向有关，与霍尔电流方向无关^[9]。

二、霍尔元件副效应测量方法

（一）对称交换测量法

副效应总是伴随着霍尔效应同时出现，实际测量的电压值是 U_H 、 U_0 、 U_E 、 U_N 、 U_{RL} 的代数和。当前实验中测量霍尔电压采用的主要方法为“对称交换测量法”：

在设定的初始状态下，即

$$+I_S + B: U_1 = +U_H + U_0 + U_E + U_N + U_{RL} \quad (2)$$

仅仅改变霍尔电流方向，即

$$-I_S + B: U_2 = -U_H - U_0 - U_E + U_N + U_{RL} \quad (3)$$

同时改变霍尔电流方向和磁场方向，即

$$-I_S - B: U_3 = +U_H - U_0 + U_E - U_N - U_{RL} \quad (4)$$

仅仅改变磁场方向，即

$$+I_S - B: U_4 = -U_H + U_0 - U_E - U_N - U_{RL} \quad (5)$$

通过加减混合运算，可以合理有效的消除某些副效应的影响^[10]。

（二）副效应的获得

“对称交换测量法”运用数学算法消除副效应，同样，也可以消除霍尔电压，实现对副效应值的测量。

1. 不等位电势值

不等位电势具有独立的变化规律，因此可以直接运用“对称交换法”获得，即

$$U_0 = \frac{(U_1 - U_2) - (U_3 - U_4)}{4} \quad (6)$$

2. 爱廷豪森效应值

霍尔电压和爱廷豪森效应具有相同的变化规律，因此“对称

交换测量法”获得他们的和。即

$$U_H + U_E = \frac{(U_1 - U_2) + (U_3 - U_4)}{4} \quad (7)$$

爱廷豪森效应是由于载流子浓度分布不均匀引起的，虽然浓度分布受到霍尔电流和磁场的同时影响，但由于载流子的速度满足正态分布规律，速度快的载流子和速度慢的载流子出现的概率是相同的，爱廷豪森效应受磁场的影响较小，可以近似为恒量，而霍尔电压则与磁场成线性关系，因此通过不同磁场条件下的爱廷豪森效应 U_E 与霍尔电压 U_H 的和，以磁感应强度为自变量作线性拟合，截距即为爱廷豪森效应值。

3. 能斯特效应值和里纪—勒杜克效应值

能斯特效应 U_N 方向和里纪—勒杜克效应 U_{RL} 方向具有相同的变化规律，可以直接获得他们的和，即

$$U_N + U_{RL} = \frac{(U_1 + U_2) - (U_3 + U_4)}{4} \quad (8)$$

三、副效应测量及分析

采用DH4512B螺线管磁场测定仪进行实验，线圈半径为21mm，线圈匝数为1800匝，有效长度181mm，在轴线的中心附近可视为匀强场^[6]，霍尔元件置于螺线管轴线中心处。

（一）数据记录

取霍尔电流 $I_S = 2\text{mA}$ ，改变励磁电流 I_M ，按照（2）~（5式）要求设置霍尔电流和励磁电流的方向，依次测出电压值如表1所示

表1 不同励磁电流下电压

I_M (A)	U_1 (mV)	U_2 (mV)	U_3 (mV)	U_4 (mV)
0.1	0.23	-0.37	0.44	-0.37
0.2	0.69	-0.73	0.90	-0.73
0.3	1.10	-1.15	1.61	-1.15
0.4	1.52	-1.56	1.73	-1.55
0.5	1.93	-1.99	2.14	-1.99

（二）数据处理

1. 不等位电势 U_0

将不同励磁电流测得电压代入（6）式，得到不同条件下的不等位电势值如表2所示

表2 不同励磁电流下不等位电势

I_M (A)	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
U_0 (mV)	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05

2. 爱廷豪森效应 U_E

根据毕奥—萨伐尔定律，长度为 $2l$ ，半径为 R 的长直螺线管内轴线上中心点处的磁感应强度为

$$B = \frac{\mu_0 I n l}{\sqrt{R^2 + l^2}} \quad (9)$$

其中 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{H/m}$ 为真空磁导率； $n = N/2l$ 为单位长度的匝数。根据励磁电流计算得到不同条件下的磁感应强度值，如表3所示。

将不同励磁电流测得电压代入（7）式，得到不同磁场下的爱廷豪森效应与霍尔电压的和如表3所示

表3不同励磁电流下爱廷豪森效应与霍尔电压的和

I_M (A)	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
B (m)	1.22	2.43	3.65	4.86	6.08
U_H+U_E (mV)	0.36	0.76	1.18	1.59	2.01

以磁感应强度为自变量,爱廷豪森效应 U_E 和霍尔电压 U_H 的和为因变量,运用 Excel 进行线性拟合,结果如图2所示

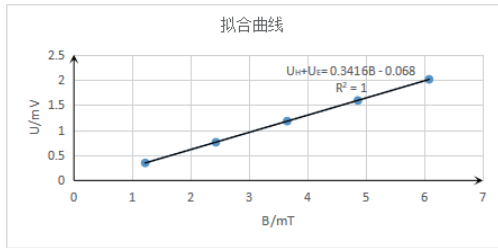


图2 U_H+U_E 与 I_M 线性拟合图

由结果可知,在霍尔电流 $I_S=2\text{mA}$ 时,爱廷豪森效应 $U_E=-0.007\text{mV}$,决定系数 $R^2=1^{[7]}$ 。得出在霍尔电流 $I_S=2\text{mA}$ 时,不同磁场条件下的霍尔电压值,如表4所示。

表4不同励磁电流下爱廷豪森效应和霍尔电压

I_M (A)	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
U_E (mV)	-0.07	-0.07	-0.07	-0.07	-0.07
U_H (mV)	0.43	0.83	1.25	1.66	2.08

3. 能斯特效应 U_N 和里纪-勒杜克效应 U_{RL}

将不同励磁电流测得电压代入(8)式,得到不同条件下的能斯特效应和里纪-勒杜克效应的和,如表5所示

表5不同励磁电流下能斯特效应与里纪-勒杜克效应的和

I_M (A)	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
U_N+U_{RL} (mV)	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05

(三) 结果分析

将不同电流条件下测得的副效应值与霍尔电压理论真值作比,结果如表6所示。

表6不同励磁电流下副效应与霍尔电压值之比

I_M (A)	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
U_0	11.6%	6.0%	4.0%	3.0%	2.4%
U_E	16.3%	8.4%	5.6%	4.2%	3.4%
U_N+U_{RL}	11.6%	6.0%	4.0%	3.0%	2.4%
总副效应	39.5%	20.4%	13.6%	10.2%	8.2%

可见,副效应对霍尔电压测量的影响程度随磁场的增强而减弱。这一结论源于对不等位电势差、爱廷豪森效应、能斯特效应及里纪-勒杜克效应的定量分析。从实验数据来看,当励磁电流

从0.1A增至0.5A(对应磁感应强度从1.22mT增至6.08mT)时,不等位电势差的影响占比从11.6%降至2.4%,爱廷豪森效应从16.3%降至3.4%,能斯特效应与里纪-勒杜克效应的总和从11.6%降至2.4%,总副效应影响则从39.5%降至8.2%。这种变化趋势与各副效应的物理本质密切相关:不等位电势差由电极工艺偏差导致,其大小不受磁场影响,因此在霍尔电压随磁场增强而增大时,其相对占比自然降低;爱廷豪森效应由载流子速度分布差异引发,虽与磁场相关,但因载流子速度满足正态分布,其绝对值基本恒定(实验中 U_E 始终为 -0.07mV),故随霍尔电压增大,相对影响减弱;能斯特效应和里纪-勒杜克效应源于热扩散电流,其值同样不受磁场变化影响(实验中 U_N+U_{RL} 始终为 0.05mV),相对影响也随霍尔电压的增大而降低。值得注意的是,“对称交换测量法”在此过程中发挥了关键作用,它不仅能有效消除爱廷豪森效应外的其他副效应,还通过四组电压测量值的代数运算,实现了对各副效应值的独立提取——如不等位电势差通过 $(U_1-U_2-U_3+U_4)/4$ 直接计算,爱廷豪森效应通过线性拟合 U_H+U_E 与磁感应强度的关系得到截距,能斯特效应与里纪-勒杜克效应的总和通过 $(U_1+U_2-U_3-U_4)/4$ 获取。这一研究不仅验证了磁场增强对降低副效应相对影响的实际效果,还为霍尔法测磁场实验提供了量化参考:在低磁场条件下,需特别注意副效应的修正(如初始状态下总影响接近40%),而在高磁场条件下,测量精度可显著提升;同时,该方法也为大学物理实验教学提供了新思路,即通过量化分析让学生直观理解副效应的影响规律,而非仅依赖“对称交换法”被动消除误差。不过,当前研究仍存在待完善之处,即能斯特效应与里纪-勒杜克效应尚未实现独立测量,这为后续探索热扩散电流相关副效应的分离方法指明了方向。

四、结束语

“对称交换测量法”不仅能有效地消除了爱廷豪森效应以外的副效应的影响,同时还可以有效的测量出各副效应的值,进而可以定量分析各副效应对霍尔电压的影响程度,但与热扩散电流有关的能斯特效应和里纪-勒杜克效应还没有实现独立的测定,有待进一步研究。

参考文献

- [1] 单锋,刘莉莉,刘嘉,等.探讨大学物理实验教学中的课程思政教学案例——以霍尔效应实验为例[J].大学物理实验,2024,37(02):116-120.DOI:10.14139/j.cnki.cn22-1228.2024.02.024.
- [2] 韩广兵,高成勇,孙尚倩,等.基于探索能力培养的大学物理实验层次设计及实践——以霍尔效应实验为例[J/OL].物理与工程,1-8.http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.4483.O3.20250321.1055.002.html.
- [3] 凌丰姿,刘致远,许磊,等.霍尔效应实验自动测量方法探究[J].大学物理实验,2025,38(01):34-38.DOI:10.14139/j.cnki.cn22-1228.2025.01.007.
- [4] 姜勇勇.利用自制“霍尔效应”实验教具促进核心素养教学[J].中小学实验与装备,2025,35(01):41-45.
- [5] 吴广国,满娜,朱睿,等.霍尔效应及转速测量应用的实验教学模式探索[J].实验教学与仪器,2025,42(01):9-12.DOI:10.19935/j.cnki.1004-2326.2025.01.004.
- [6] 汪焱,金芳洲.对霍尔效应实验中副效应的研究及其消除方法探讨[J].广西物理,2024,45(04):23-26.
- [7] 史新伟,贾建峰,朱开兰,等.基于Unity 3D的霍尔效应实验虚拟仿真平台设计与实现[J].物理通报,2022,(01):124-128+131.
- [8] 李潮锐.霍尔效应测量中的不等位热扩散电势差[J].物理与工程,2023,33(01):83-87.
- [9] 侯美娜,安利民.霍尔效应误差分析及霍尔应用[J].大学物理实验,2019,32(05):79-83.DOI:10.14139/j.cnki.cn22-1228.2019.05.020.
- [10] 魏奶萍.霍尔效应测量螺线管磁场的研究[J].大学物理实验,2020,33(3):38-40.