

物理实验



霍尔效应测量中的不等位热扩散电势差

李潮锐

(中山大学物理学院, 广东 广州 510275)

摘 要 尽管常规换向直流法可消除已知副效应干扰并得到霍尔电压,但它掩盖了存在未知附加电势的实验事实。将4次换向测量归纳为磁场与样品电流同相组合和反相组合,根据在磁场中样品电流和热扩散电流具有相似物理行为,必须考虑不等位热扩散电势差的影响。这一方案不仅更清晰地解释4次换向测量平均的物理原理,还通过同相测量平均和反相测量平均之差与和得到不等位热扩散电势差与确定且可重复的霍尔电压。实验事实及分析结果表明,引入不等位热扩散电势差才能完整描述霍尔测量中所有副效应的贡献。

关键词 霍尔效应;副效应;不等位电势;热扩散电流

DIFFERENCE FROM UNEQUAL POTENTIAL OF THERMAL DIFFUSION CURRENT IN THE MEASUREMENT ON HALL EFFECT

LI Chaorui

(School of Physics, Sun Yat-sen University, Guangzhou, Guangdong 510275)

Abstract Although the conventional DC method with reversal directions of magnetic field and sample current can eliminate the interference from the known side effects and then obtain the pure Hall voltage, it masks the fact of an unknown additional potential. The measurement on four cases of combination can be summarized into the parallel phase and opposite phase of magnetic field and sample current. Based on the similar behavior of sample current and thermal diffusion current in magnetic field, the unequal potential of thermal diffusion current must be considered. This scheme not only clearly explains the physical principle of full average on the four measurements, but also obtains the difference of unequal potential from thermal diffusion current and the repeatable Hall voltage with using the results of parallel phase average and the opposite phase average. The experimental facts and analysis results show that the contribution from all side effects in Hall measurement can be completely described by introducing the difference from unequal potential of thermal diffusion current.

Key words Hall effect; side effects; unequal potential; thermal diffusion current

霍尔效应是本科物理教学的重要内容^[1],霍尔器件(传感器)在实验技术上也有广泛应用^[2,3]。

霍尔效应通常采用对外磁场和样品电流分别换向测量平均的直流法^[4-6],或称换向直流法,以消除

收稿日期: 2022-08-30

基金项目: 国家自然科学基金(61975244);中山大学2022年度教学质量与教学改革工程项目(教务[2022]91号)。

通讯作者: 李潮锐,男,副教授,主要从事大学物理实验教学和凝聚态电磁特性研究工作, zdstlcr@mail.sysu.edu.cn。

引文格式: 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(1): 83-87.

Cite this article: LI C R. Difference from unequal potential of thermal diffusion current in the measurement on Hall effect[J]. Physics and Engineering, 2023, 33(1): 83-87. (in Chinese)

爱廷豪森效应、能斯特效应、里纪-勒杜克效应和(样品电流所致的)不等位电势差等多种副效应的干扰^[7-9]。如果将常规的4次换向分归纳为外磁场与样品电流同相组合和反相组合两种情形,根据已知副效应的物理规律^[10,11],那么两种组合分别独立测量平均都可以获得霍尔电压。然而,实验事实表明两种组合的独立平均值并不一致,只有采用4次换向测量平均才能得到唯一的霍尔电压,这意味着在霍尔测量中还存在其他因素(或物理效应)的影响。实验原理有两层含意,即实验物理原理和实验技术原理,它们也正是实验教学的首要任务。为了解释4次换向测量平均的实验原理,引入由(样品电流电极)焦耳热扩散电流所致的不等位热扩散电势差 U_D 。实验结果不仅说明了常规4次换向测量平均的物理原理,同时也得到不等位热扩散电势差。事实表明,在霍尔效应测量中样品电流和(由样品电流电极)焦耳热所产生的扩散电流(或简称为热扩散电流)有着相似的物理过程。

1 实验技术方法

北京大华 DH1799B-8 直流电源和吉时利(Keithley)2400 电流源分别提供稳恒励磁电流和直流样品电流,吉时利 2182 纳伏表测量样品响应输出电压。改造东方晨景变温霍尔效应测量用磁体,且适量减少励磁线圈匝数。在 DH1799B-8 励磁电流驱动下,该磁体可提供实验所需的稳恒磁场,且使用继电器实施励磁电流换向。东方晨景 SV-15 液氮恒温器提供样品变温环境,使用 pt100 传感器且由东方晨景 T290 温控仪测量样品温度。所有仪器(包括励磁电流换向继电器)通过 USB 或 GPIB 接口实现计算机测控分析,实验过程及结果可用于远程课堂教学或示教^[10]。使用范德堡法实施碲镉汞样品霍尔测量,采用自液氮温区至室温自然升温方法改变样品温度(单次测量全程约 160 分钟)。

2 实验结果及分析

根据文献[11,12]所描述,样品电流(载流子)在正交磁场作用下形成霍尔电场,即为霍尔效应;由于载流子运动具有速度分布,到达两个电压测

量电极的能量不等而形成温差电场,此为爱廷豪森效应。样品电流电极可产生焦耳热,随之出现热扩散电流。与样品电流的霍尔效应和爱廷豪森效应相对应,(样品电流电极)焦耳热扩散电流将产生能斯特效应和里纪-勒杜克效应。样品电流在电压电极两端还可产生不等位电势差 U_1 ,它跟磁场方向无关,但与样品电流方向有关。表1列出了霍尔测量中上述已知物理效应。

表1 霍尔测量中已知物理效应

电流类型	洛伦兹力	温差电势	不等位
样品电流	霍尔效应	爱廷豪森效应	电势差
热扩散电流	能斯特效应	里纪-勒杜克效应	

用 U_H, U_E, U_N, U_R, U_1 分别代表霍尔效应、爱廷豪森效应、能斯特效应、里纪-勒杜克效应和不等位(样品电流)电势(差),图1直观地显示了磁场和样品电流4种换向情形所包含的已知物理效应及它们随样品电流方向和(或)磁场方向变化关系。由于霍尔电场和爱廷豪森电场无法分离,换向直流法对全部4种换向测量平均所得结果代表两者电势之和($U_H + U_E$)。通常认为,后者比前者小得多,可以忽略^[11]。因此,4次换向测量平均值即为霍尔电压 U_H ^[6]。

$-(U_H + U_E)$ $-(U_N + U_R)$ $+U_1 = U_3$ B与I反相	$+(U_H + U_E)$ $+(U_N + U_R)$ $+U_1 = U_1$ B与I同相
$+(U_H + U_E)$ $-(U_N + U_R)$ $-U_1 = U_2$ B与I同相	$-(U_H + U_E)$ $+(U_N + U_R)$ $-U_1 = U_4$ B与I反相

图1 磁场与样品电流不同组合及已知物理效应

实验自液氮温区至室温自然升温(动态变温),单次全程完成测量。具体步骤:

第1步,设置磁场和样品电流同相,延时约1.5秒,同步采集记录(+B, +I)情形样品温度和响应电压(T_1, U_1);

第2步,磁场和样品电流同时换向,延时约1.5秒,同步采集记录(-B, -I)情形样品温度和响应电压(T_2, U_2);

第3步,样品电流换向,延时约1.5秒,同步

采集记录 $(-B, +I)$ 情形样品温度和响应电压 (T_3, U_3) ;

第4步,磁场和样品电流同时换向,延时约1.5秒,同步采集记录 $(+B, -I)$ 情形样品温度和响应电压 (T_4, U_4) 。

考虑了换向实验条件稳定性(适量减少励磁线圈匝数的目的)和电场建立时间等因素,为确保测量准确性和实验数据可比性,由计算机控制步骤1~步骤4的采样延时基本相等。所用实验参数:稳恒磁场强度 $B = 286\text{mT}$ (励磁电流 1.6A),样品电流 1.0mA 。

根据外磁场和样品电流方向 $(+B, +I)$ 和 $(-B, -I)$ 为磁场与样品电流同相测量,而 $(-B, +I)$ 和 $(+B, -I)$ 则为磁场与样品电流反相测量。图2和图3分别显示了同相测量和反相测量的原始实验数据,以及它们随温度变化情况。

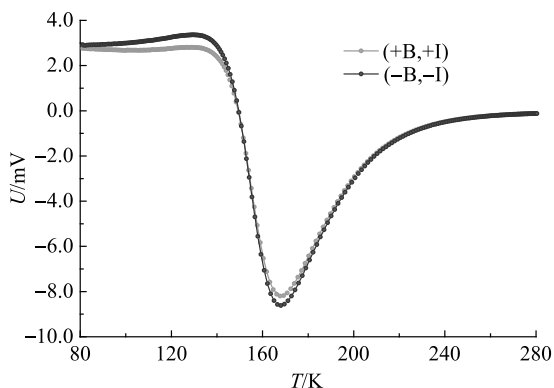


图2 同相组合实验数据及其平均值随温度变化

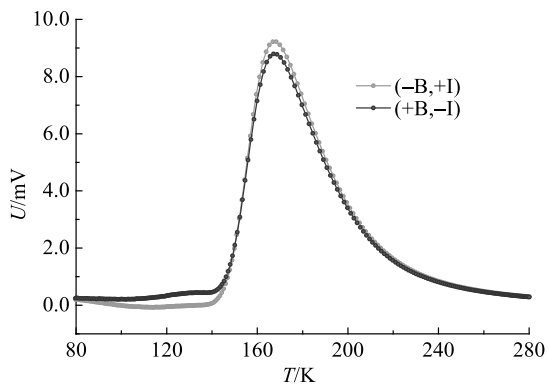


图3 反相组合实验数据及其平均值随温度变化

如果根据文献[11]得到图1所示的物理效应是准确的,那么由 $(+B, +I)$ 和 $(-B, -I)$ 同相测量 U_1 和 U_2 之和与差值,可得到 $(U_H + U_E)$ 与 $(U_N + U_R + U_1)$;而由两次反相测量结果 U_3 和 U_4

则可得到 $(U_H + U_E)$ 与 $(U_N + U_R - U_1)$ 。

由图2和图3实验数据,可得到图4所示同相测量差值 $(U_N + U_R + U_1)$ 和反相测量差值 $(U_N + U_R - U_1)$ 。显然,进而可得 $(U_N + U_R)$ 和 U_1 。图5显示了(a)同相测量平均值 $(U_H + U_E)$ 和(b)反相测量平均值 $(U_H + U_E)$,其中反相结果做了负号处理。

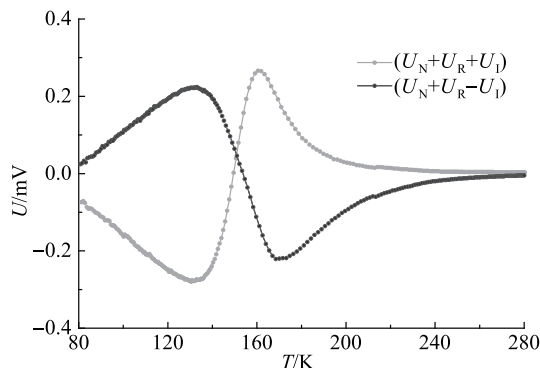


图4 不同组合测量结果之差值

如果图1所示的物理规律是全面的,那么 $(+B, +I)$ 和 $(-B, -I)$ 同相测量平均或 $(-B, +I)$ 和 $(+B, -I)$ 反相测量平均都可代表 $(U_H + U_E)$,且两者的结果应该是一致的。然而,图5结果显示(a)同相测量平均与(b)反相测量平均明显不等值。

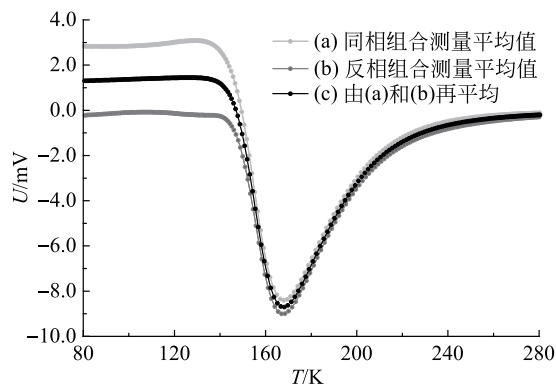


图5 组合测量平均值及其再平均结果

事实上,同相测量平均和反相测量平均值的再平均,也就是4次换向测量平均值,即为消除了图1中所有副效应的(纯)霍尔电压(准确地说,是 $(U_H + U_E)$),如图5(c)所示。上述实验结果表明,图1所示已知物理效应不能准确描述霍尔效应测量中所存在的全部物理过程。同时也意味着,在图1所示物理规律与4次换向测量平均必要性之

间存在一个起“调和”作用而被忽略的副效应。

如表 1 所示,在霍尔测量中样品电流可产生霍尔效应和爱廷豪森效应,而(样品电流电极)焦耳热扩散电流则存在对应的能斯特效应和里纪-勒杜克效应^[12]。既然样品电流在电压电极两端可产生不等位电势差 U_1 ,那么热扩散电流也可能存在不等位热扩散电势差 U_D 。热扩散电流源于样品电流电极焦耳热,因此不等位热扩散电势差与磁场方向和样品电流方向都无关。表 2 列出了在霍尔测量中样品电流和热扩散电流所产生的全部物理过程,也清晰地显示了两者的物理行为。

表 2 霍尔测量中的物理效应

电流类型	洛伦兹力	温差电势	不等位
样品电流	霍尔效应	爱廷豪森效应	电势差
热扩散电流	能斯特效应	里纪-勒杜克效应	热扩散电势差

根据上述分析,在图 1 所示物理效应基础上,还需考虑不等位热扩散电势差 U_D 对霍尔测量的影响,如图 6 所示。不等位热扩散电势差 U_D 使 4 次换向测量附加同一方向平移量,它并不改变图 4 和图 5(c)所示分析结果。显然,由图 5(a)同相测量平均值与(b)反相测量平均值之差可得到 U_D ,结果如图 7 所示。

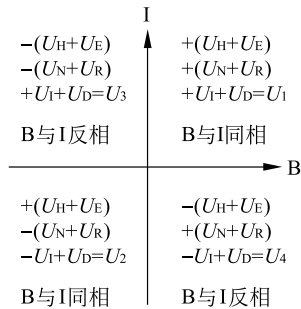


图 6 所有物理效应及对不同组合测量的贡献

在霍尔测量中,霍尔效应、爱廷豪森效应和不等位电势差源于样品电流,与其对应的能斯特效应、里纪-勒杜克效应和不等位热扩散电势差则来自(样品电流电极)焦耳热扩散电流。上述分析表明,引入不等位热扩散电势差 U_D 不仅意味着样品电流和热扩散电流在霍尔测量中具有相似物理行

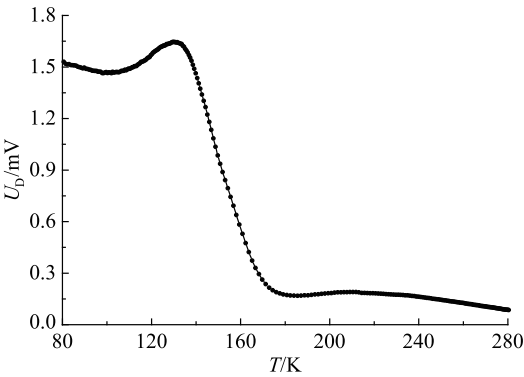


图 7 不等位热扩散电势差

为,还解释了 4 次换向测量平均的实验原理。

过去在霍尔测量中已观测到存在未知的附加电势实验事实,且认为是电压电极焦耳热引起的温差电势,并对实验结果做了初步分析。事实上,在霍尔测量中响应电压一般比较弱(毫伏级),而为满足测量准确性要求仪器输入阻抗高于 10M 甚至 G 欧姆量级,由此推算电流为纳安甚至皮安量级。它在(欧姆接触)电压电极上产生焦耳热必然是非常微弱(几乎为零),因而难以在电压电极两端出现可测量的温差电势。文献[13]观测分析了附加电势随样品电流变化情况。其实验结果只能(间接)说明附加电势与样品电流(焦耳热)的关联,而无法证明在电压电极两端存在温差电势。

值得一提的是,对温差或热电流(扩散)现象定量分析都必须考虑被测对象与环境热交换情况,绝热或者完全热交换可能将得到不完全相同的实验结果^[12]。在霍尔测量中,由(样品电流电极)焦耳热扩散电流所致的能斯特效应、里纪-勒杜克效应和不等位热扩散电势差都受到热交换影响,重复观测未必能得到相同实验结果。通过磁场和样品电流换向可消除这些副效应的干扰,4 次换向测量平均值也不再包含热扩散电流的贡献。当然,换向测量也清除了不等位电势差。采用直流法的缺点是无法分离爱廷豪森效应和霍尔效应。尽管爱廷豪森效应也受热交换影响,但考虑到爱廷豪森效应比霍尔效应弱得多(良好热交换时更弱),忽略了爱廷豪森电势而得到确定且可重复的霍尔电压。

3 结论

将霍尔测量常用的磁场和样品电流 4 次换向

直流法归纳为磁场与电流同相或反相组合测量两种情形。若仅考虑如图 1 所示的已知物理效应,那么不管是同相测量平均还是反相测量平均都可独立获得霍尔电压,且两者应该一致。然而,实验事实表明,同相测量平均值与反相测量平均值两者之间存在明显差异。引入由(样品电流电极)焦耳热扩散电流所产生的不等位热扩散电势差 U_D ,可完整描述霍尔测量测量中伴随的所有副效应。 U_D 与磁场方向和样品电流方向都无关,它只是 4 次换向测量响应电压的附加平移量。引入 U_D 不破坏原常规分析方法,还更清晰地解释了只有完成 4 次换向测量平均才能得到准确霍尔电压的实验原理。这一方案既解决了同相测量平均值与反相测量平均值的差异问题,又可从差异中得到不等位热扩散电势差 U_D 。最重要的是,实验事实及其分析结果说明样品电流和热扩散电流在霍尔测量中有着相似的物理过程。

参 考 文 献

- [1] 何艳,邓磊,罗志娟,等. 挖掘霍尔效应中的科学精神与科学方法[J]. 物理与工程, 2021, 31(5): 64-67.
HE Y, DENG L, LUO Z J, et al. Exploring the scientific spirit and method in mining Hall effect[J]. Physics and Engineering, 2021, 31(5): 64-67. (in Chinese)
- [2] 石明吉,李波波,杨雪冰,等. 基于霍尔效应的三线摆周期测量装置的研制[J]. 物理与工程, 2018, 28(6): 95-99.
SHI M J, LI B B, YANG X B, et al. Development of a measuring device of the three-wire pendulum period based on Holzer effect[J]. Physics and Engineering, 2018, 28(6): 95-99. (in Chinese)
- [3] 杨植宗,刘敏,潘昱豪,等. 基于霍尔效应直流电表的设计与制作[J]. 物理与工程, 2014, 24(1): 39-41.
YANG Z Z, LIU M, PAN Y H, et al. Design and manufacture of dc electric meter based on Hall effect[J]. Physics and Engineering, 2014, 24(1): 39-41. (in Chinese)
- [4] 翟文生. 碲镉汞材料的 P、N 型和其霍尔系数的正负[J]. 红外与激光工程, 1996, 25(5): 52-55.
ZHAI W H. Study on the type of MCT and the sign of its Hall coefficient[J]. Infrared and Laser Engineering, 1996, 25(5): 52-55. (in Chinese)
- [5] 刘德全,王宇航. 利用导电橡胶改进薄膜霍尔效应实验装置[J]. 物理实验, 2007, 27(11): 45-47.
LIU D Q, WANG Y H. Using conductive rubber to improve film Hall effect device[J]. Physics Experimentation, 2007, 27(11): 45-47. (in Chinese)
- [6] 李潮锐. 变温霍尔效应简易测量方法[J]. 物理实验, 2018, 38(6): 26-28.
LI C R. Simple method for measuring variable temperature Hall effect[J]. Physics Experimentation, 2018, 38(6): 26-28. (in Chinese)
- [7] 黄响麟,何琛娟,廖红波,等. 变温霍尔效应中副效应的研究[J]. 大学物理, 2011, 30(3): 48-51, 65.
HUANG X L, HE C J, LIAO H B, et al. Investigation on side effects of the Hall effect at different temperature[J]. College Physics, 2011, 30(3): 48-51, 65. (in Chinese)
- [8] 杨晓阳,林杏潮,李向阳,等. 碲镉汞霍尔测试副效应及其与组分的关系[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(4): 457-460.
YANG X Y, LIN X C, LI X Y, et al. Vice-effect on Hall measurements in $Hg_{1-x}Cd_xTe$ samples and relations with the composition of Cd[J]. Infrared and Laser Engineering, 2007, 36(4): 457-460. (in Chinese)
- [9] 刘昶丁,柳纪虎. 霍尔效应中的副效应及其消除方法[J]. 物理实验, 1987, 7(2): 1-2.
LIU C D, LIU J H. Side effects in Hall effect and its eliminating method[J]. Physical Experiments, 1987, 7(2): 1-2. (in Chinese)
- [10] 李潮锐. 基于虚拟仪器技术的远程物理实验及示教[J]. 物理实验, 2018, 38(5): 37-39, 43.
LI C R. Remote experiments for physics teaching via internet with virtual instrument technology[J]. Physics Experimentation, 2018, 38(5): 37-39, 43. (in Chinese)
- [11] 吕斯骅,段家祗,张朝晖. 新编基础物理实验[M]. 2 版. 北京:高等教育出版社, 2013: 197-204.
- [12] E. H. 普特来. 霍尔效应及有关现象[M]. 傅德中,译. 上海:上海科学技术出版社, 1964: 22-30.
- [13] 许磊,方立青,肖杉,等. 霍尔效应副效应研究及地磁场水平分量测量[J]. 大学物理, 2019, 38(8): 30-38.
XU L, FANG L Q, XIAO S, et al. Research on the associated effects in Hall effect and the measurement of the horizontal component of the geomagnetic field[J]. College Physics, 2019, 38(8): 30-38. (in Chinese)