

霍尔元件测磁场

1879年,美国物理学家霍尔在研究载流导体在磁场中受力时发现了一种电磁效应,在与电流垂直的方向若存在磁场,则在与电流和磁场都垂直的方向将建立一个电场,这种效应后来被称为霍尔效应。具有霍尔效应功能的元件称为霍尔元件。霍尔元件在测量中具有频率响应宽(从直流到微波)、可靠、无接触、体积小、灵敏度高、稳定性好、使用寿命长和成本低等优点。一般霍尔效应法用于测量磁场。常用的成品仪器是特斯拉计,而利用霍尔效应的传感器则有很多,如防盗报警传感器、位移传感器、接近传感器、角度传感器、计数传感器等。录像机中的主轴稳速控制、一些随身听中的计数器都使用了霍尔传感器。

【实验目的】

1. 掌握霍尔元件的工作特性。
2. 学习用霍尔效应法测量磁场的原理和方法。
3. 学习用霍尔元件测量长直螺线管内轴向磁场分布。

【实验仪器】

螺线管磁场测定实验组合仪、导线等。

【实验原理】

1. 霍尔效应法测量磁场原理

霍尔效应从本质上讲是运动的带电粒子在磁场中受洛仑兹力作用而引起的偏转。当带电粒子(电子或空穴)被约束在固体材料中,这种偏转就导致在垂直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。对于图 19.1 所示的半导体试样,若在 X 方向通以电流 I_s ,在 Z 方向加磁场 B ,则在 Y 方向,即试样 A、A' 电极两侧就开始聚积异号电荷,产生相应的附加电场——霍尔电场。电场的指向取决于试样的导电类型。显然,该电场会阻止载流子继续向侧面偏移,当载流子所受的横向电场力 eE_H 与洛仑兹力 $e\bar{v}B$ 相等时,样品两侧电荷的积累就达到平衡,故有:

$$eE_H = e\bar{v}B \quad (19.1)$$

其中 E_H 为霍尔电场, \bar{v} 是载流子在电流方向上的平均漂移速度。

设试样的宽为 b , 厚度为 d , 载流子浓度为 n , 则

$$I_s = n e \bar{v} b d \quad (19.2)$$

由 (19.1)、(19.2) 两式可得

$$V_H = E_H b = \frac{I}{n e} \frac{I_s B}{d} = R_H \frac{I_s B}{d} \quad (19.3)$$

即霍尔电压 V_H (A、A' 电极之间的电压) 与 $I_s B$ 乘积成正比与试样厚度 d 成反比。比例

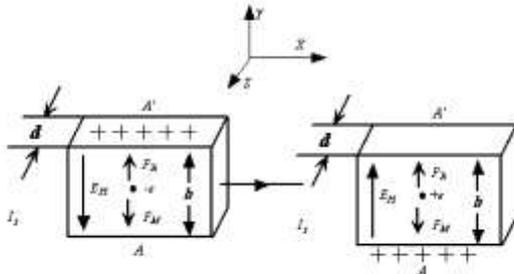


图 19.1 运动的带电粒子在磁场力作用下的偏转

系数 $R_H = \frac{1}{ne}$ 称为霍尔系数，它是反映材料的霍尔效应强弱的重要参数。

霍尔器件就是利用上述霍尔效应制成的电磁转换元件，对于成品的霍尔器件，其 R_H 和 d 已知，因此在实用上就将 (19.3) 式写成

$$V_H = S_H I_s B \tag{19.4}$$

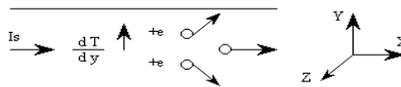
$$B = \frac{V_H}{S_H I_s} \tag{19.5}$$

其中 $S_H = \frac{R_H}{d}$ 称为霍尔器件的灵敏度 (其值由制造厂家给)，表示该器件在单位工作电流和单位磁感应强度下输出的霍尔电压。(19.4) 式中的单位取 I_s 为毫安、 B 为特斯拉、 V_H 为毫伏，则 S_H 的单位为毫伏/(毫安·特斯拉)。根据 (19.4) 式，因 S_H 已知，而 I_s 可由实验测出，所以只要测出 V_H 就可以求得未知磁感应强度 B 。但在实际情况中，由于存在其它因素而引起各种附加电压，所以会给霍尔电压的测量带来误差。

2. 几种附加电压产生的原因及其消除方法

(1) 不等势电压 V_0

如图 19.2 所示，由于器件的 A、A' 两电极的位置不在一个理想的等势面上，因此，即使不加磁场，只要有电流 I_s 通过，就有电压 $V_0 = I_s r$ 产生， r 为 A、A' 所在的两等势面之间的电阻，结果在测量 V_H 时，就叠加了 V_0 ，使得 V_H 值偏大 (当 V_0 与 V_H 同号) 或偏小 (当 V_0 与 V_H 异号)，显然， V_H 的符号取决于 I_s 和 B 两者的方向，而 V_0 只与 I_s 的方



向有关，因此可以通过改变 I_S 的方向予以消除。

(2) 厄廷豪森 (Eting hausen) 效应引起的附加电压 V_E

如图 19.3 所示，由于构成电流的载流子速度不同，若速度为 v 的载流子所受的洛仑兹力与霍尔电场的作用力刚好抵消，则速度大于或小于 v 的载流子在电场和磁场作用下，将各自朝对立面偏转，由于它们的动能不同转化到各极板的热能也不同，从而在 y 方向引起温差 $T_A - T'_A$ ，由此产生的温差电效应，在 A、A' 电极上引入附加电压 V_E ，且 $V_E \propto I_S B$ ，其符号与 I_S 和 B 的方向关系跟 V_H 是相同的，因此不能用改变 I_S 和 B 方向的方法予以消除，但其引入的误差很小，可以忽略。

(3) 能斯特 (Nernst) 效应引起的附加电压 V_N

如图 19.4 所示，因器件两端电流引线的接触电阻不等，通电后在接点两处将产生不同的焦耳热，导致在 x 方向有温度梯度，引起载流子沿梯度方向扩散而产生热扩散电流，热流 Q 在 z 方向磁场作用下，类似于霍尔效应在 y 方向产生一附加电场 E_N ，相应的电压 $V_N \propto QB$ ，而 V_N 的符号只与 B 的方向有关与 I_S 的方向无关，因此可通过改变 B 的方向予以消除。



图 19.4 热磁效应



图 19.5 Righi-Leuc 效

(4) 里吉-勒杜克 (Righi-Leduc) 效应引起的附加电压 V_{RL}

如图 19.5 所示，由于存在温度梯度 $T_A - T'_A$ ，热流电子的迁移率有不同，由此在 y 方向引入附加电压 $V_{RL} \propto QB$ ， V_{RL} 的符号只与 B 的方向有关，通过改变 B 的方向，亦能消除。

综上所述，实验中测得的 A、A' 之间的电压中，除 V_H 外还包含 V_0 、 V_N 、 V_{RL} 和 V_E 各电压的代数和，其中 V_0 、 V_N 和 V_{RL} 均可通过 I_S 和 B 的换向，即对称测量法(异号法)予以消除。设 I_S 和 B 的方向均为正向时，测得 A、A' 之间电压记为 V_1 ，即

当 $+I_S$ 、 $+B$ 时

$$V_1 = V_H + V_0 + V_N + V_{RL} + V_E \quad (19.6)$$

将 B 换向，而 I_S 的方向不变，测得的电压记为 V_2 ，此时 V_H 、 V_N 、 V_{RL} 均改号而 V_0 符号不变，即当 $+I_S$ 、 $-B$ 时

$$V_2 = -V_H + V_0 - V_N - V_{RL} - V_E \quad (19.7)$$

同理，按照上述分析

当 $-I_S$ 、 $-B$ 时

$$V_3 = V_H - V_o - V_N - V_{RL} + V_E \quad (19.8)$$

当 $-I_S$ 、 $+B$ 时

$$V_4 = -V_H - V_o + V_N + V_{RL} - V_E \quad (19.9)$$

求以上四式数据 V_1 、 V_2 、 V_3 和 V_4 的代数和，可得

$$V_H + V_E = \frac{V_1 - V_2 + V_3 - V_4}{4} \quad (19.10)$$

由于 V_E 符号与 I_S 和 B 两者方向关系和 V_H 是相同的，故无法消除，但在非大电流，强磁场下， $V_H \gg V_E$ ，因此 V_E 可略而不计，所以霍尔电压为

$$V_H = \frac{V_1 - V_2 + V_3 - V_4}{4} \quad (19.11)$$

3. 霍尔电压 V_H 的测量方法

通过以上的分析可以知道，在产生霍尔效应的同时，因伴随着多种附加电压的产生，以致实验测得的 A 、 A' 两电极之间的电压并不等于真实的 V_H 值，而是包含着各种副效应引起的附加电压，因此必须设法消除。采用电流和磁场换向的对称测量法，基本上能够把副效应的影响从测量结果中消除，具体的做法是保持 I_S 和 B （即 I_M ）的大小不变，在设定电流和磁场的正、反方向后，依次测量由下列四组不同方向的 I_S 和 B 组合的 A 、 A' 两点之间的电压 V_1 、 V_2 、 V_3 和 V_4 ，即：

| | | |
|--------|------|-------|
| $+I_S$ | $+B$ | V_1 |
| $+I_S$ | $-B$ | V_2 |
| $-I_S$ | $-B$ | V_3 |
| $-I_S$ | $+B$ | V_4 |

然后求上述四组数据 V_1 、 V_2 、 V_3 和 V_4 的代数和，可得

$$V_H = \frac{1}{4}(V_1 - V_2 + V_3 - V_4) \quad (19.12)$$

通过对称测量法求得的 V_H ，虽然还存在个别无法消除的副效应，但其引入的误差甚小，可以略而不计。

(19.5)、(19.12) 两式就是本实验用来测量磁感应强度的依据。用霍尔片测螺线管内磁场的实验装置如图 19.6 所示。

4. 载流长直螺线管内的磁感应强度

螺线管是由绕在圆柱面上的导线构成的，对于密绕的螺线管，可以看成是一列有共同轴线的圆形线圈的并排组合，因此一个载流长直螺线管轴线上某点的磁感应强度，可以从对各圆形电流在轴线上该点所产生的磁感应强度进行积分求和得到，对于一个有较长的螺线管，在距离两端口等远的中心点，磁感应强度为最大，且等于

$$B_0 = \mu_0 n I_M \quad (19.13)$$

其中 μ_0 为真空磁导率, n 为螺线管单位长度的线圈匝数, I_M 为线圈的励磁电流。

由图 19.6 所示的长直螺线管的磁力线分布可知, 其内腔中部磁感线是平行于轴线的直线系, 渐近两端口时, 这些直线变为从两端口离散的曲线, 说明其内部的磁场是均匀的, 仅在靠近两端口处, 才呈现明显的不均匀性, 根据理论计算, 长直密绕螺线管一端的磁感应强度为内腔中部磁感应强度的 $1/2$ 。

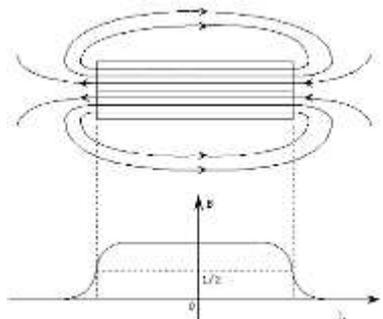


图 19.6 长直螺线管内磁场分布

【实验装置介绍】

LX-CF 型螺线管磁场测定实验组合仪由实验仪和测试仪两大部分组成。

(1) 实验仪

霍尔器件如图 19.7 所示, 它有两对电极, A 、 A' 电极用来测量霍尔电压 V_H , D 、 D' 电极为工作电流电极, 两对电极用四线扁平线经探杆引出, 分别接到实验仪的 I_S 换向开关和 V_H 输出开关处。

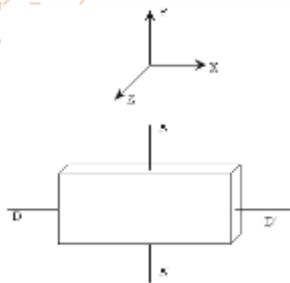


图 19.7 霍尔器件

实验仪如图 19.8 所示, 探杆固定在二维 (X 、 Y 方向) 调节支架上。其中 Y 方向调节支架通过旋钮 Y 调节探杆中心轴线与螺线管内孔轴线位置, 应使之重合。 X 方向调节支架通过旋钮 X 调节探杆的轴向位置。读数装置如图 19.9 所示。

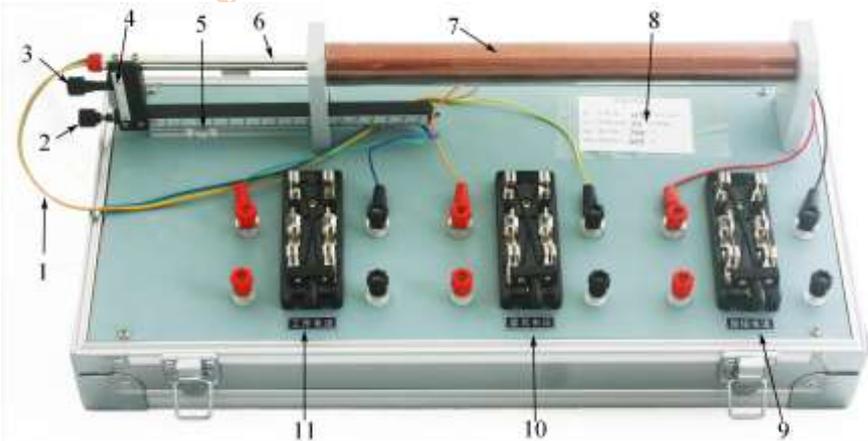
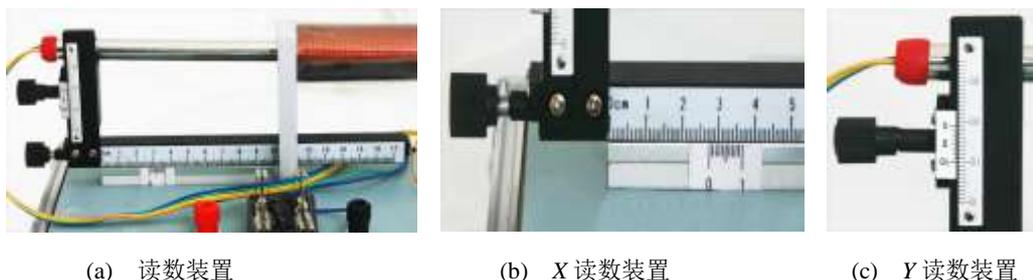


图 19.8 TH-S 型螺线管磁场测定实验仪

1. 四线扁平线 2. 轴向调节 X 旋钮 3. 纵向调节 Y 旋钮 4. 纵向调节 Y 读数装置
5. 轴向 X 读数装置 6. 探杆 7. 螺线管 8. 仪器 N 、 S_H 参数 9. 励磁电流 I_M 换向开关及接线柱
10. 霍尔电势换向开关及接线柱 11. 霍尔片工作电流 I_M 换向开关及接线柱



(a) 读数装置

(b) X 读数装置

(c) Y 读数装置

图 19.9

仪器出厂前探杆中心轴线与螺线管内孔轴线已按要求进行了调整，因此，实验中，Y 旋钮无需调节。如要想使霍尔探头从螺线管的右端移至左端，为调节顺手，应先调节 X 旋钮，使调节支架 X 的测距尺读数 X 从 0.0→16.0 cm，反之，要使探头从螺线管左端移至右端，应先调节 X，读数从 16.0 cm→0.0。

(2) 测试仪（如图 19.10 所示）



图 19.10 测试仪面板

1. 霍尔片工作电流 I_S 输出 2. 数字电流表 3. 工作电流 I_S 调节 4. 霍尔电压 V_H 输入 5. 数字电压表 6. 励磁电流 I_M 输出 7. 数字电流表 8. 励磁电流 I_M 调节

测试仪上的几个主要装置：

(a) “工作电流(mA)” I_S

霍尔器件工作电流源，输出电流 0~10mA，通过 I_S 调节旋钮连续调节。

(b) “励磁电流(mA)” I_M

螺线管励磁电流源，输出电流 0~1A。通过 I_M 调节旋钮连续调节。

(c) “霍尔电压(mV)” V_H

数字毫伏表，供测量霍尔电压用。

【实验内容】

1. 实验步骤

- (1) 熟悉 TH-S 型螺线管磁场测定实验组合仪。
- (3) 按电路图 19.11 连接好电路。

测试仪的“ I_S 调节”和“ I_M 调节”旋钮均置零位（即逆时针旋到底）；测试仪的“工作电流 I_S ”接实验仪的“工作电流”，“励磁电流”接“励磁电流”，并将 I_S 及 I_M 换向开关掷向任一侧。实验仪的“霍尔电压”接测试仪的“霍尔电压”，“霍尔电压”开关应始终保持闭合状态（**特别提示：决不允许将测试仪的“励磁电流”接到实验仪“工作电流”或“霍尔电压”处，否则，一旦通电，霍尔元件将被损坏。**）。

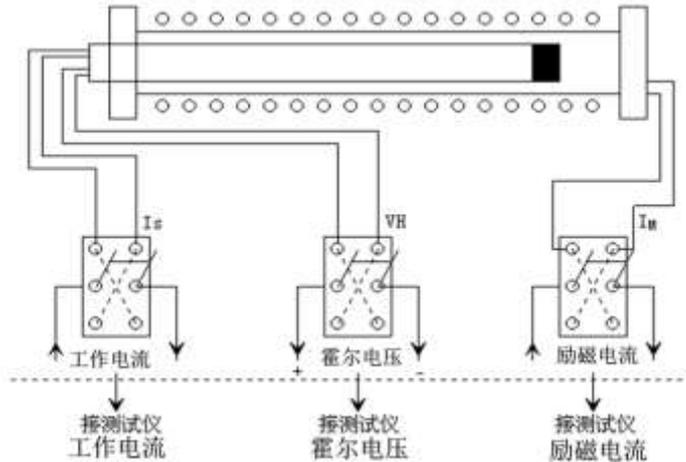


图 19.11 电路图

- (4) 经老师检查后方可接通电源，调节 $I_S=8.00\text{mA}$ ， $I_M=0.800\text{A}$ 。在测试过程中保持不变。
- (5) 调节旋钮 X ，将霍尔片分别置于 0.0cm ， 0.5cm ， 1.0cm ， 1.5cm ， 2.0cm ， \dots ， 14.0cm ， 14.5cm ， 15.0cm ， 15.5cm ， 16.0cm ，等处，按表 19.2 所示 I_S 和 B 不同实验条件情况，分别测出相应的 V_1 、 V_2 、 V_3 和 V_4 值，将数据填入表 19.2 中。
- (6) 记录仪器面板上螺线管匝数 N 及霍尔元件的灵敏度 S_H 等数值。

2. 数据处理

- (1) 由公式 (19.11) 计算出 V_H ，由 V_H 计算出 B ，填入表格 19.1 中。
- (2) 用坐标纸作出 $B-L$ 曲线，由此曲线得到 $L=8.00\text{cm}$ 处的 B 值。
- (3) 将螺线管中心 $L=8.00\text{cm}$ 的 B 值与理论值进行比较，并求出百分差。

表 19.1

| L (cm) | V_1 (mV) | V_2 (mV) | V_3 (mV) | V_4 (mV) | V_H (mV) | B (KGS) |
|-------------|---------------|---------------|---------------|---------------|------------|-----------|
| | $+I_S$ 、 $+B$ | $+I_S$ 、 $-B$ | $-I_S$ 、 $-B$ | $-I_S$ 、 $+B$ | | |
| 0.0 | | | | | | |
| 0.5 | | | | | | |
| 1.0 | | | | | | |

| | | | | | | |
|------|--|--|--|--|--|--|
| 1.5 | | | | | | |
| 2.0 | | | | | | |
| 2.5 | | | | | | |
| 3.0 | | | | | | |
| ... | | | | | | |
| ... | | | | | | |
| 13.0 | | | | | | |
| 13.5 | | | | | | |
| 14.0 | | | | | | |
| 14.5 | | | | | | |
| 15.0 | | | | | | |
| 15.5 | | | | | | |
| 16.0 | | | | | | |

【注意事项】

1. 开机（或关机）前应将 I_S 、 I_M 调节旋钮逆时针方向旋到底，使其输出电流趋于最小状态，然后再开机（或关机）。
2. 决不允许将测试仪的“励磁电流”接到实验仪“工作电流”或“霍尔电压”处，否则，一旦通电，霍尔元件将遭致损坏。
3. 连接电路和拆除电路前，先关闭电源，以免损坏仪器。

【思考题】

1. 如何测量霍尔元件的灵敏度？
2. 试分析霍尔效应仪测量磁场的误差来源。

【应用提示】

霍尔元件除用于磁场测量以外在定量测量和定性判断等还有着十分广泛的应用。如磁控开关、报警器、录像机转速测量、录音机磁带计数等等。

特斯拉计(高斯计)

数字特斯拉计采用先进的单片机技术，使用灵活，方便，用于测量形状各异的磁体表面磁场，如环形、柱形、方块、多极磁钢，配备进口探头，可测量扬声器音圈间隙磁场及电机间隙磁场，直接用数字显示磁场强度如图 19.12 所示。图 19.13 为便携式高斯计，用其可快速、可靠和容易地量测环绕在电线、家电和工业设备的电磁场辐射等级。携带方便，并可准确量测低至 50Hz/60Hz 电磁场辐射的不同频宽。



图 19.12



图 19.13

霍尔旋转传感器（霍尔流量计）：

若将磁体安置在旋转轴上，将其和霍尔开关电路构成旋转传感器。霍尔电路通电后，磁体每经过霍尔电路一次，便输出一个电压脉冲。由此，可对转动物体实施转数、转速、角度、角速度等物理量的检测。在转轴上固定一个叶轮和磁体，用气体、液体去推动叶轮转动，便可构成流速、流量传感器。在车轮转轴上装上磁体，在靠近磁体的位置上装上霍尔开关电路，可制成车速表、里程表等等。图 19.14 为一种实用的霍尔流量计。



(a) 实物图



(b) 原理图

图 19.14 霍尔流量计