

华中科技大学 实验报告

专业：电气及其自动化 班级：电气1908班 日期：2021年 月 日 成绩：

实验组别：26 第 次实验 指导老师：江中和

学生姓名：柯依娃 同组人姓名：

实验三 电流场的测量

一、 实验目的

- 学习使用霍尔探头测量磁场。
- 研究螺管线圈轴线上的磁场分布。
- 研究铁磁材料对磁场分布的影响。

二、 实验原理

- 霍尔效应原理测量磁场

如图1所示，给一垂直放置与磁场B中的矩形半导体薄片施加电流I，其会感应出一电压U（具体方向关系如图所示），且 $U \propto B$ ，这一现象称为霍尔效应。

在只加电流I不加磁场B时霍尔元件会有微量电压输出，称为失调电压，会给测量结果带来不良影响。在使用时必须消除失调电压。

图 1 霍尔效应

1. 霍尔效应原理测量磁场

如图 3.1 所示，给一垂直放置于磁场 B 中的矩形半导体薄片的 $1-1'$ 端子施加电流 I ，则在端子 $2-2'$ 间将呈现一电压 U ，该电压称为霍尔电压，它与磁感应强度 B 成正比，这一现象称为霍尔效应。霍尔效应可用洛伦兹力来说明，因为磁场使半导体薄片内移动的电荷发生偏转，结果在 $2-2'$ 两侧分别聚集了正、负电荷，形成电位差。根据这一原理可测量磁感应强度的大小。

霍尔元件往往采用半导体材料制成，由于材料的不均匀性和其它加工的原因都会给霍尔电压带来附加误差。具体表现为：在只加工作电流 I 不加磁场的情况下霍尔元件会有微量电压输出，这个电压常称失调电压。失调电压会给测量结果带来不良影响。因此，在使用霍尔元件时，必须消除失调电压。

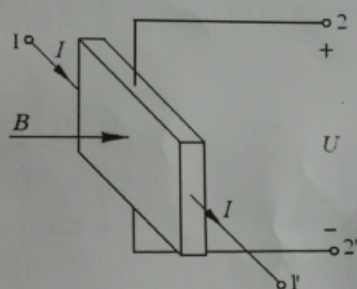


图 3.1 霍尔效应图

2. 空心螺线管线圈磁场分布

2. 空心螺线管线圈的磁场分布

被测螺管线圈为多层密绕线圈，为了估算空心时线圈轴线上的磁场强度，可用一单层线圈（或圆柱面电流）来近似（如图 3.2 所示）。该单层线圈与被测线圈有相同的总匝数 N ，具有相同的长度 L ，线圈的半径 R 与实际线圈的平均半径相等。

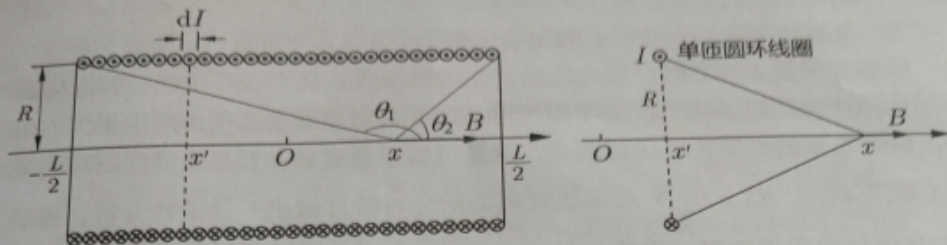


图 3.2 螺线管线圈磁场计算图

3.3 单匝圆环线圈在轴线上产生的磁场

为计算单层线圈轴线上的磁场,先考虑一个单匝线圈在轴线上产生的磁场。如图 3.3 所示,半径为 R 的单匝细圆环线圈位于 x' 处,通入电流 I , 在 x 轴上产生的磁感应强度为 (参见叶齐政、陈德智主编《电磁场教程》, 143 页, 例 5.1.2)

$$B = \frac{\mu_0 R^2 I}{2 [R^2 + (x - x')^2]^{3/2}} \quad (3.1)$$

在图 3.2 所示单层线圈 x' 处取长度微元 dx' , 携带电流为 $dI = \frac{NI}{L} dx'$ 。利用式 (3.1), 它在 x 轴上产生的磁感应强度为

$$dB = \frac{\mu_0 R^2 dI}{2 [R^2 + (x - x')^2]^{3/2}} = \frac{\mu_0 R^2 NI dx'}{2L [R^2 + (x - x')^2]^{3/2}} \quad (3.2)$$

对上式积分得到整个单层线圈轴线上的磁感应强度为

$$B = \int_{-L/2}^{L/2} \frac{\mu_0 R^2 NI dx'}{2L [R^2 + (x - x')^2]^{3/2}} = \frac{\mu_0 NI}{2L} \left(\frac{L/2 - x}{\sqrt{R^2 + (L/2 - x)^2}} + \frac{L/2 + x}{\sqrt{R^2 + (L/2 + x)^2}} \right) \quad (3.3)$$

对照图 3.2 不难发现, 括号中的两项正好对应于两个张角的余弦 $\cos \theta_2$ 和 $\cos \theta_1$ 。

因此得到轴线上任意点 A 处的磁感应强度 B 为:

$$B = \frac{\mu_0 NI}{2L} (\cos \theta_2 - \cos \theta_1) \quad (3.4)$$

对于无限长螺线管线圈, $\theta_1 = \pi$, $\theta_2 = 0$, 代入式(3.4)得到 $B = \frac{\mu_0 NI}{L} = \mu_0 nI$, n 是单位长度的匝数。

为了便于测量螺线管轴线上的磁场分布, 使用中空胶木心以保证霍尔探头在沿着螺线管的 1111 轴线移动时不致偏离。由于胶木心的磁导率与空气相同,

将多层密绕线圈近似为单层线圈, 总匝数 N , 长度 L , 半径 R 。则轴线上任意点 A 处磁感应强度 B 为

其中 θ_1 与 θ_2 为 A 点相对于螺线管端部的两个张角。

3. 在螺线管中放入铁心后的磁场分析

螺线管中放入铁心后, 铁芯磁化会因分子电流产生附加磁场, 两磁场叠加使铁心线圈端部产生更大的磁场。可通过磁场在煤质交界面的边界条件, 以及相对磁导率的大小做出定性分析。

3. 在螺线管中放入铁心后的磁场分析

螺线管中放入铁心时，除电流所产生的磁场外，还存在一个铁心被磁化后分子电流产生的附加磁场，两个磁场叠加，使得铁心线圈在端部产生更大的磁场。铁心线圈的定量计算比较困难，但是可以根据磁场在媒质交界面的边界条件 ($B_{1n} = B_{2n}$, $H_{1t} = H_{2t}$) 及螺线管磁场的分布特性做出一些定性分析。螺线管中靠近轴线附近的磁场大致与轴线平行；铁心的磁导率很大（近似分析时可以认为是无穷大），但铁心内部的磁感应强度是有限值。根据这些特点，不难对图 3.4 中的 A—G 诸点的磁场特性做出分析，进一步可以得到铁心孔道内及铁心端部的磁场强度与磁感应强度的分布特性。

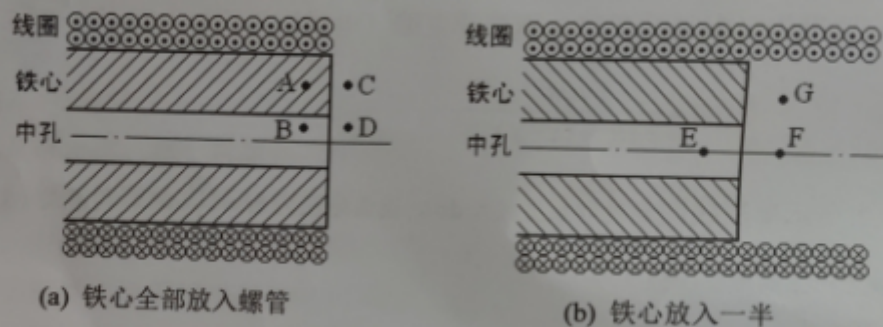


图 3.4 插入铁心后端部附近的磁场分析

4. 直流电流与工频交流电流产生的磁场

对于空心（胶木心）密绕线圈，同样大小的直流电流与工频交流电流产生磁场相同。在有铁心的情况下，铁心在交变磁场中内部产生感应的涡流会影响磁场分布。因此铁心线圈产生的直流磁场与交流磁场有明显不同。

图 3.4 插入铁心后端部附近的磁场分析

4. 直流电流与工频交流电流产生的磁场

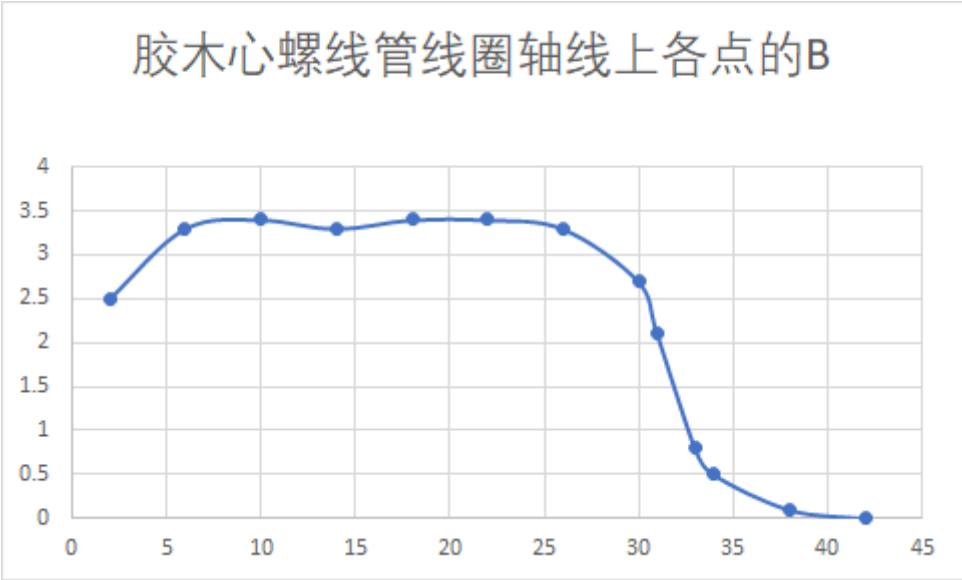
对于空（胶木）心密绕线圈，同样大小的直流电流与工频交流电流产生的磁场大小是相同的。在学习了准静态场的知识后将会知道，对于空气中的低频交流磁场，描述它的微分方程（以相量表示）与恒定磁场的微分方程具有相同的形式，因此必有相同的解答。高频时由于位移电流不能忽略，二者将呈现不同特点。

在有铁心的情况下，铁心在交变磁场中内部产生感应的涡流（也称“涡电流”），涡流的存在反过来影响磁场分布，因此铁心线圈产生的交流磁场与直流磁场有明显的不同。

三、实验内容与步骤

1. 在直流情况下，维持电流 $I=0.4A$ 不变，测量胶木心螺线管线圈轴线上各点的 B 。

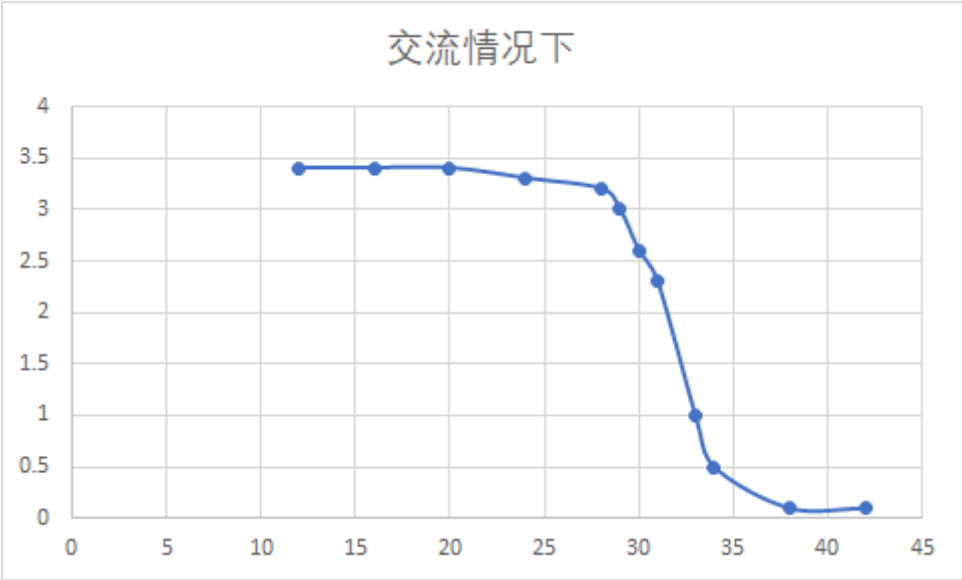
实验	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
位置/cm	30	26	22	18	14	10	6	2	42	38	34	31	33
B/GS	2.7	3.3	3.4	3.4	3.3	3.4	3.3	2.5	0	0.1	0.5	2.1	0.8



2. 取出胶木心，使用霍尔探头定性观测线圈内部截面上磁感应强度沿径向的分布规律。

3. 在交流情况下，维持 $I=0.4A$ ，重复实验1。

实验	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
位置/cm	42	38	34	33	31	30	29	28	24	20	16	12	33
B/GS	0.1	0.1	0.5	1.0	2.3	2.6	3.0	3.2	3.3	3.4	3.4	3.4	1.0

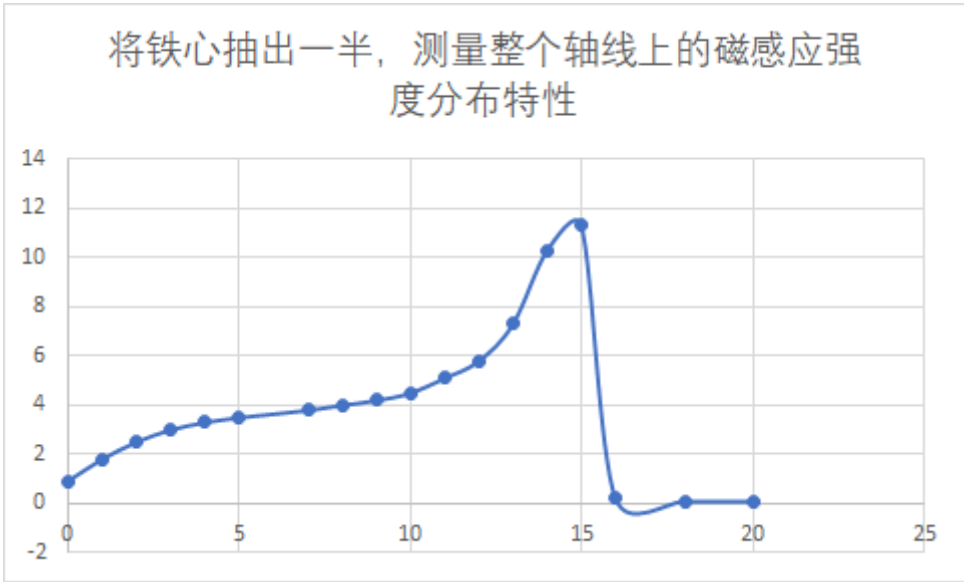


4. 断开电源，放入铁心。重复实验1。

实验	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
位置	42	38	34	41	40	39	37	36	35	30
B/GS	0.8	2.8	0.1	1.0	1.4	1.9	4.6	7.2	2.8	0.1

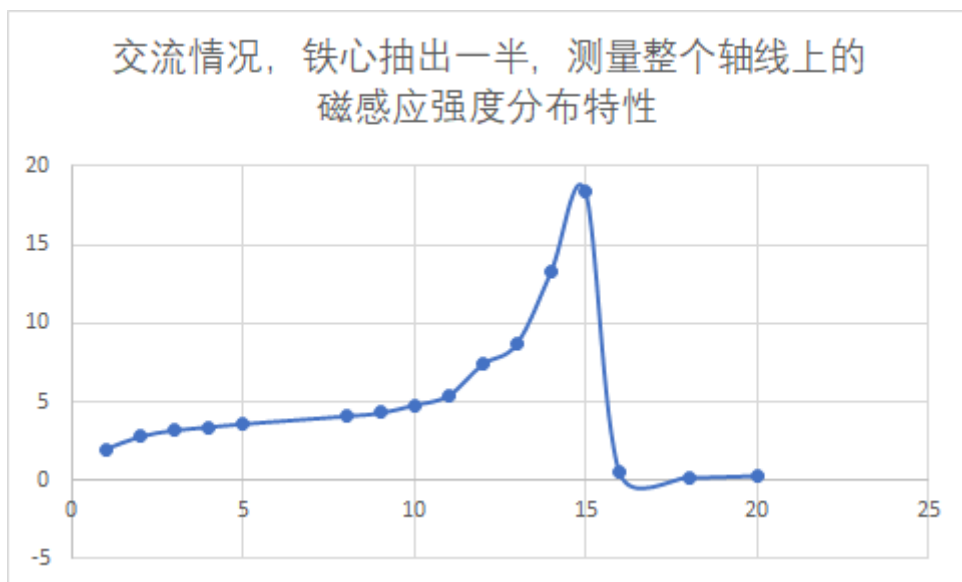
5. 霍尔片垂直磁场时霍尔效应最大。在铁心端部取一点，改变霍尔探头的取向，观察磁场读数变化。由此可确定磁力线的方向。
6. 将铁心抽出一半，测量整个轴线上的磁感应强度分布特性。

实验	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	14	15	16	17	18	19
位置	20	18	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	5	4	3	2	1	0
B/GS	0.1	0.1	0.2	11.3	10.3	7.3	5.8	5.1	4.5	4.2	4.0	3.8	3.5	3.3	3.0	2.5	1.8	0.9



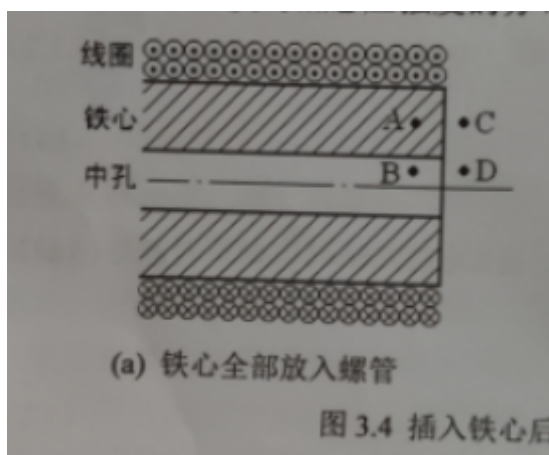
7. 在交流情况下重复实验6。

实验	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
位置	20	18	16	15	14	13	12	11	10	9	8	5	4	3	2	1	0
B/GS	0.3	0.2	0.5	18.4	13.3	8.7	7.4	5.4	4.8	4.3	4.1	3.6	3.4	3.2	2.8	2.0	1.1



四、思考题

1. 试用磁场两种物质分界面的边界条件，对图 3.4(a)中 A、B、C、D 四点磁场强度 H 和磁感应强度 B 的分布特点进行分析，并结合测量结果说明铁心端部磁场的分布特性。
2. 试定性描绘铁心端部的磁力线分布。能否使用霍尔探头进行验证？



$$B_A \approx B_C \quad (1)$$

$$B_B \approx B_D$$

$$H_A \approx H_B$$

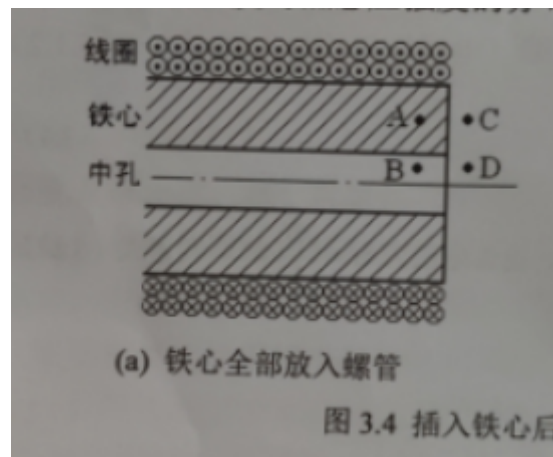
$$\mu_{\text{铁}} \gg 1$$

$$B_A \gg B_B$$

则

$$B_A \approx B_C \gg B_B \approx B_D$$

$$H_C \gg H_A \approx H_B \approx H_D$$



不太能，因为霍尔探头无法伸入铁心内部