

浙江大学实验报告

专业： 电子信息工程

姓名： 邢毅诚

学号： 3190105197

日期： 2021-6-5

地点： 东三-401

课程名称： 工程电磁场与波实验报告

指导老师： 姚缨英

成绩：

实验名称： 环形载流线圈的场分布与自感

实验类型： 验证实验

同组学生姓名： 常俊杰

一、 实验目的

- (1) 了解环形载流线圈的磁场计算方式
- (2) 了解高斯计的基本使用方法
- (3) 掌握环形载流线圈的计算方式的基本原理

二、 实验内容

- (1) 测量磁通球轴线上磁感应强度 B 的分布
 - 感应电势法测磁感应强度 $B(I = 1A, f = 5KHz)$
 - 使用霍尔效应法测磁感应强度 B
- (2) 磁通球自感系数 L 的分析 ($I = 0.5A, f = 5KHz$)，观察磁通球的电压，电流间的相位关系

三、 实验器材

- (1) 球形载流线圈（磁通球）实验装置
- (2) 球形载流线圈（磁通球）
- (3) 磁通球激磁电源（附交流毫伏表）
- (4) 探测线圈
- (5) 高斯计（5070 型）
- (6) 20MHz 模拟示波器

四、 实验原理

1. 实验 1-测量磁通球轴线上磁感应强度 B 的分布

磁通球平面图如下图所示：

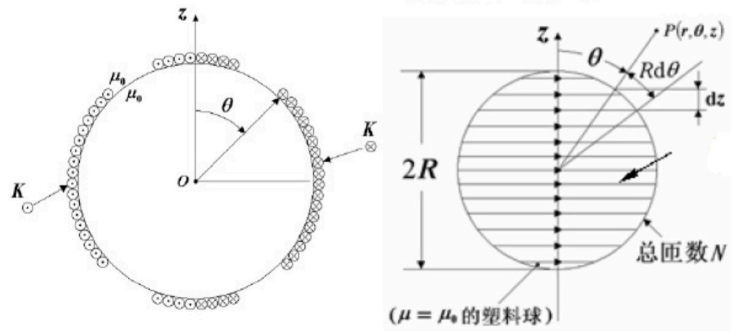


图 1: 磁通球平面图

对于通有正弦电流 i 的球形线圈，我们可以将其等效为流经球表面的面电流分布，其中可以计算得到面电流密度与电流的关系为：

$$\vec{K} \cdot d\theta = \frac{N}{2R} \cdot d\theta \cdot R \sin\theta \quad (1)$$

进而可以解得：

$$\vec{K} = \frac{N}{2R} i \cdot \sin\theta \cdot \vec{e}_\theta \quad (2)$$

因此，我们可以确定对应的边值问题：

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{泛定方程:} \\ \nabla^2 \varphi_{m1}(r, \theta) = 0 \quad (r < R) \\ \nabla^2 \varphi_{m2}(r, \theta) = 0 \quad (r > R) \\ \text{BC:} \\ \begin{cases} H_{t1} - H_{t2} = H_{\theta 1} - H_{\theta 2} = K_n = \frac{N}{2R} i \sin\theta & (r = R) \\ B_{n1} = B_{n2} \rightarrow \mu_0 H_{r1} = \mu_0 H_{r2} & (r = R) \\ \varphi_{m1}|_{r=0} = 0 \\ H_2|_{r \rightarrow \infty} = -\nabla \varphi_{m2}|_{r \rightarrow \infty} = 0 \end{cases} \end{array} \right.$$

最后解得各个位置的磁场如下所示，当位于球内时 ($r < R$):

$$\vec{H}_1 = \frac{Ni}{3R} (\cos\theta \vec{e}_r - \sin\theta \vec{e}_\theta) \quad (3)$$

当位于球外时 ($r > R$):

$$\vec{H}_2 = \frac{Ni}{6R} \left(\frac{R}{r}\right)^3 (2\cos\theta \vec{e}_r + \sin\theta \vec{e}_\theta) \quad (4)$$

由于在本次实验中，我们需要分别使用感应电势法以及霍尔效应法测磁感应强度，因此，我们还需要推导与其相关的表达式：

- 感应电势法测磁感应强度

将一较小的探测线圈放置在由交变电流产生的磁场中，根据法拉第电磁感应定律，我们可以由线圈中的感应电动势测量出当前位置的磁场，具体方式如下所示：

根据法拉第电磁感应定律，我们可以得到：

$$\epsilon = -\frac{d\Phi}{dt} \quad (5)$$

由于线圈较小，可以认为线圈中的磁场是均匀的，因此可以得到下式：

$$E = \omega\Phi = 2\pi f N_1 \phi = 2\pi f S N_1 B \quad (6)$$

进而解得：

$$B = \frac{E}{2\pi f S N_1} \quad (7)$$

其中，探测线圈的等效截面积 S 为：

$$S = \frac{\pi}{3}(R_1^2 + R_1 R_2 + R_2^2) \quad (8)$$

其中 R_1, R_2 为圆环的半径

- 霍尔效应法测磁感应强度

使用高斯计根据霍尔效应的原理测量磁感应电动势，具体公式如下：

$$V_h = \frac{R_h}{d} L B f \left(\frac{l}{b}\right) \quad (9)$$

在本次使用的实验设备中，高斯计已经将数值转化完成，因此并不需要我们进行计算，但需要注意的是，在正弦交流激励的时变磁场中，霍尔效应高斯计的磁感应强度平均值读数与由感应电动势法测量并计算得出的磁感应强度的有效值之间的关系为：

$$B_1 = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} B \approx 0.9B \quad (10)$$

2. 实验 2-测量磁通球的阻抗

磁通球的电感计算方式如下所示：

首先，根据磁场分布，我们可以计算出对应的磁通量：

$$\phi = \int_S B \cdot ds = \mu_0 H_1 [\pi(R \sin \theta)^2] \quad (11)$$

根据此，我们便可以计算出其磁通链

$$d\Phi = \phi \cdot \left(\frac{N}{2R} \sin\theta\right) R d\theta \quad (12)$$

继而可以解得：

$$L = \frac{\Phi}{i} = \frac{\int d\Phi}{i} = \frac{2}{9} \pi N^2 \mu_0 R \quad (13)$$

在本次实验中，我们需要使用示波器测量其实际电感，具体测量公式为：

$$L = \frac{U_L}{\omega I} = \frac{U_{Lm}}{\omega I_m} \quad (14)$$

其中，电流 I_m 的测量方式为在磁通球旁边串联一个电阻，测量电阻的电压，进而可以得到所需要的电流。

五、 实验内容

1. 实验 1-测量磁通球轴线上磁感应强度 B 的分布

- 感应电势法测磁感应强度 B

打开磁通球开关，调节磁通球档位至交流档位，调节通过磁通球的电流为 1A，并设定频率为 5KHz，调节测量杆至所需位置，测量得到实验数据如下所示：

序号	坐标 r/cm	测得 $E/10^{-3}V$	测得 B_0/Gs	计算所得 $H/A \cdot m^{-1}$	计算所得 B/Gs
1	-5	73.0	11.74	873.3	10.97
2	-4	73.4	11.80	873.3	10.97
3	-3	72.1	11.59	873.3	10.97
4	-2	71.5	11.49	873.3	10.97
5	-1	71.2	11.45	873.3	10.97
6	0	71.0	11.41	873.3	10.97
7	1	71.2	11.45	873.3	10.97
8	2	72.0	11.57	873.3	10.97
9	3	73.0	11.74	873.3	10.97
10	4	74.1	11.91	873.3	10.97
11	5	66.0	10.61	873.3	10.97

表 1: 感应电势法

比较理论结果以及测量结果，可以发现二者数值大致相同，而在边界时，测量得到的磁场变化较大且与理论值相差较大，猜测可能是由于边界所造成的影响。

- 霍尔效应法测磁感应强度 B

打开磁通球开关，分别调节磁通球档位至交流档 (设定电流 $I = 1A$, $f = 5KHz$) 和直流档 (设定电流 $I = 1A$)。打开高斯计，将其设定于对应档位，并进行调零，分别测量得到特定位置的磁感应强度。

同时，由于在正弦交流激励的时变磁场中，霍尔效应高斯计的磁感应强度平均值读数与由感应电动势法测量并计算所得出的磁感应强度的有效值之间的关系为：

$$B_{av} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} B \approx 0.9B \quad (15)$$

因此，需要进一步进行计算，测得结果如下所示：

序号	坐标 $(r, \theta)(cm, rad)$	测得 B_{av}/Gs	测得 B/Gs	计算所得 B/Gs
1	交流北极	9.0	10	10.97
2	交流赤道	4.1	4.89	5.49
3	直流北极	7.8	7.8	10.97
4	直流赤道	3.4	3.4	5.49

表 2: 霍尔效应法

2. 实验 2-测量磁通球阻抗

将磁通球上通过 $I = 0.5A$, $f=5KHz$ 的交流电流，并将其与一个 0.5Ω 的负载电阻相连，使用示波器分别测量二者的电压，进而便可以测得对应的电感，示波器测得波形如下图所示：

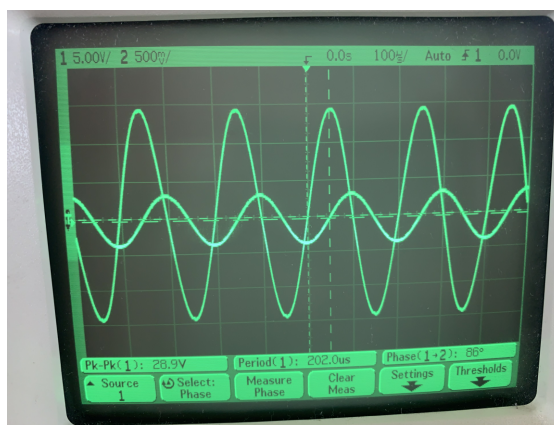


图 2: 示波器测量波形

测得数据如下表所示：

测量参数	测量数据
频率	4.95KHz
0.5Ω 电压	720mV
线圈电压 +0.5 电压	28.9V
相位差	86°

表 3: 电感测量

计算得到： $I_m = \frac{0.72}{0.5} = 1.44A$

因此，可以计算出测量电感为：

$$L = \frac{U_{Lm}}{\omega I_m} = \frac{28.9}{2\pi \cdot 4.95 \times 10^3 \cdot 1.44} = 6.45 \times 10^{-4} H \quad (16)$$

而电感的实际计算值为：

$$L = \frac{2}{9} \pi N^2 \mu_0 R = 7.53 \times 10^{-4} H \quad (17)$$

存在一定误差，原因可能是示波器的波形不准以及线圈老化以及线圈本身便存在电阻（由二者波形的相位差为 86 度便可知线圈并不是由纯电感构成的）等一系列的原因造成的。