

实 验 报 告

评分：

管理 系 20 级

学号 PB20151804

姓名 袁雨

日期 2021 年 5 月 27 日

一、实验题目：磁力摆

二、实验目的：

1. 通过对小磁针在地磁场中的运动特征研究，测量局域地磁场水平分量；
2. 设计实验方案测量小磁针的磁矩和转动惯量；
3. 研究两个相同磁针的耦合运动规律。

三、实验器材：

高灵敏度特斯拉计量程 0 —3000 mT，分辨率为 0.01 mT；亥姆霍兹线圈；磁力摆 2 个；直流电源；质量相同的配重螺帽两个（ $m = 0.62 \text{ g}$ ）；米尺和秒表。

四、实验原理：

（一）小磁针在外磁场中的运动

将一枚小磁针用一根柔软的细线悬挂起来，置于匀强磁场中，当小磁针偏离平衡位置的角位移 θ 很小时，它受到磁场的磁力矩作用，忽略阻尼因数的影响，小磁针将在其平衡位置附近作简谐振动，构成如图 1 所示的磁力摆。利用磁场中小磁针的运动特性可以确定小磁针的磁矩及局域地磁场的水平分量。

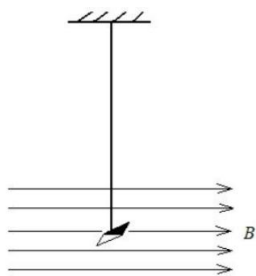


图 1 磁力摆

当磁力摆偏离平衡位置的角位移 θ 小于 5° 时，磁力摆的运动方程为：

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} = -\frac{MB}{J}\theta$$

（ M ：是磁力摆的磁矩， J ：磁力摆的转动惯量， B ：磁力摆所处位置的磁感应强度）

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{J}{MB}}$$

由上式可得磁力摆一级近似的振动周期为：

（二）局域地磁场和亥姆霍兹线圈磁场

地球是一个大磁体，地球本身及其周围空间存在着磁场，即地磁场，其主要部分是一个偶极场，地心磁偶极子轴线与地球表面的两个交点称为地磁极。

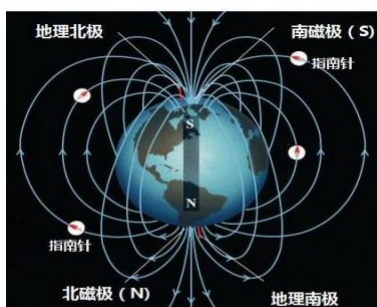


图 2 地球磁偶极子场

实 验 报 告

评分:

管理 系 20 级

学号 PB20151804

姓名 袁雨

日期 2021 年 5 月 27 日

亥姆霍兹线圈是一对彼此平行且连通的共轴圆形线圈组，每组 N 匝，两组线圈内的电流方向一致，大小均为 I ，线圈之间的距离 a 正好等于圆形线圈的平均半径 R 时，两线圈轴线中点附近近似于均匀磁场，如图 3 所示。两线圈轴线中点处的磁感应强度为

$$B_I = \left(\frac{4}{5}\right)^{3/2} \frac{\mu_0 I}{R} = kI$$

场，如图 3 所示。两线圈轴线中点处的磁感应强度为

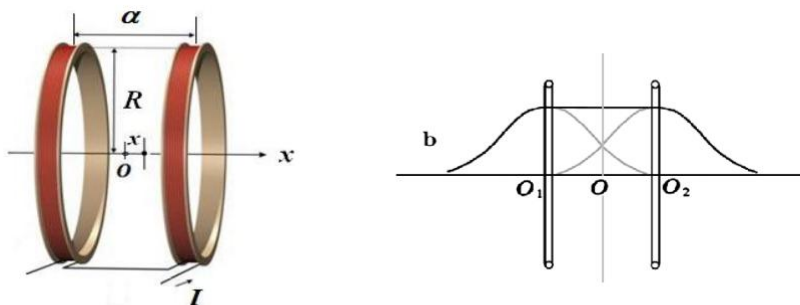


图 3 亥姆霍兹线圈

将小磁针置于局域地磁场和亥姆霍兹线圈共同磁场中，如图 4 所示，磁力摆所处位置的磁感应强度由局域磁场水平分量 B_0 和亥姆霍兹线圈磁场 B_I 叠加而成。当亥姆霍兹线圈磁场与地磁场水平方向一致时，位于轴线上的磁场水平分量 $B = B_0 + B_I$ ；当亥姆霍兹线圈磁场与地磁场水平方向相反时，位于轴线上的磁场水平分量 $B = B_0 - B_I$ 。根据磁力摆在磁场中的运动特性，可以确定局域地磁场的水平分量、小磁针磁矩及其转动惯量。

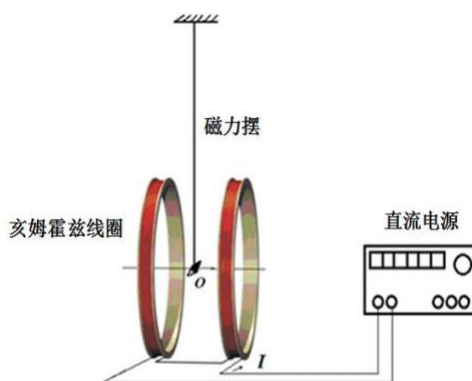


图 4 实验原理图

在地磁场中放置两枚相同的磁针，并使它们沿着地磁场方向处于一条直线上。当相邻磁针的磁场不可忽略时，它们构成一个耦合振动系统。由于耦合的存在，磁针的运动形式更加丰富，将产生“拍”的现象。

五、测量记录与数据处理

(一) 测量磁针处局域磁场水平分量的大小

1. 测量磁场大小与线圈电流的关系

I/A	0.100	0.200	0.300	0.400	0.500	0.600	0.700	0.800
B/mT	3.37	3.82	4.30	4.80	5.29	5.78	6.27	6.76

实 验 报 告

评分:

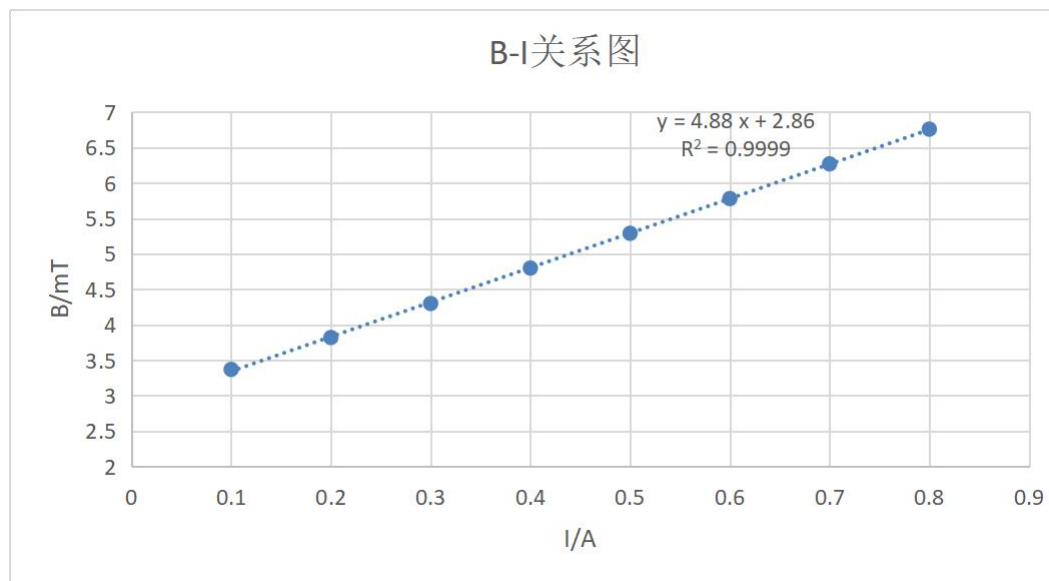
管理 系 20 级

学号 PB20151804

姓名 袁雨

日期 2021 年 5 月 27 日

作图如下:



得 $B_0 = 4.88I$ ，忽略截距，因其存在是开始没有置零。

2. 如何判断线圈附加磁场与局域磁场是反向还是同向？

法一：当 $I=0.8A$ 时，测得 $B_1=-6.76mT$ ；

将亥姆霍兹线圈电流断开，测得 $B_2=-2.84mT$ ，绝对值比原始值小；

将亥姆霍兹线圈电流反接，测得 $B_3=+1.06mT$ 。

可知测量时附加磁场与局域磁场是同向的。

法二：当线圈附加磁场与局域磁场同向时，磁针摆动频率增加，且线圈电流越大频率越高；

反向时，磁针摆动频率减小，随着线圈电流的增大，起初频率随电流增大而减小，随后磁针指向翻转，翻转后随着电流增加，频率增大。

3. 选取适当的测量范围，测量不同电流下磁针的振动周期。通过作图给出局域磁场水平分量的值。

要使 $\frac{\Delta T}{NT} < 0.5\%$ ， $\Delta T = 0.2s$ ，则 $NT > 40s$ 。

I/A	0.010	0.015	0.020	0.025	0.030	0.035	0.040	0.045
周期数 N	80	80	80	80	80	80	100	100
总 时 间 t/s	66.92	57.42	53.53	48.71	44.04	41.06	49.96	47.75
振动周期 T/s	0.84	0.72	0.67	0.61	0.55	0.51	0.50	0.48
$\frac{1}{T^2}/s^{-2}$	1.43	1.94	2.23	2.70	3.30	3.80	4.01	4.39

作图如下:

实 验 报 告

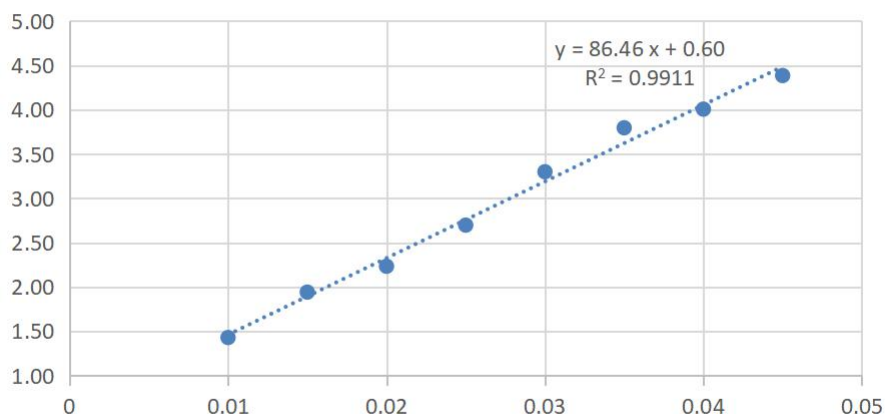
评分:

管理 系 20 级

学号 PB20151804

姓名 袁雨

日期 2021 年 5 月 27 日



$$\text{得 } \frac{1}{T^2} = 86.46I + 0.60$$

$$\text{当 } \frac{1}{T^2} = 0 \text{ 时, 得 } I = -0.0069A$$

联立实验 1, 得局域磁场水平分量得值为 $B = 4.88 \times |I| = 4.88 \times 0.0069 = 0.034mT$

(二) 测量磁针的磁矩以及转动惯量

1. 设计实验方案, 用以测量磁针的转动惯量以及磁铁的磁矩。方案需包含必要的公式, 配重螺帽可视为质点。

①实验方案: 实验时在磁针的两端对称地挂上配重(螺帽), 改变磁针的转动惯量。

$$\text{未悬挂螺帽时: } T_1 = 2\pi\sqrt{\frac{J}{MB}}$$

$$\text{悬挂螺帽时: } T_2 = 2\pi\sqrt{\frac{J+J'}{MB}} \quad (J \text{ 为小磁针关于转轴的转动惯量, } J' \text{ 为螺帽关于转轴的转动惯量})$$

通过测量配重前后小磁针的振动周期与其他物理量的关系可以计算出磁针的转动惯量及磁矩。

2. 测量磁针的转动惯量以及它的磁矩。

两个螺帽的质量均为 $m=0.62g$;

螺帽质心到悬线的距离分别为 $x_1=3.09cm, x_2=3.09cm$

是否悬挂螺帽	未悬挂螺帽	悬挂螺帽
周期数 n	50	50
总时间 t/s	61.26	76.89
振动周期 T/s	1.225	1.538

实 验 报 告

评分:

管理 系 20 级

学号 PB20151804

姓名 袁雨

日期 2021 年 5 月 27 日

未悬挂螺帽时: $T_1 = 2\pi\sqrt{\frac{J}{MB}} = 1.225s$

悬挂螺帽时: $T_2 = 2\pi\sqrt{\frac{J + m_1x_1^2 + m_2x_2^2}{MB}} = 1.538s$

联立解得:

$$J = \frac{m(x_1^2 + x_2^2)T_1^2}{T_2^2 - T_1^2} = \frac{2 \times 0.62 \times 10^{-3} \times (3.09 \times 10^{-2})^2 \times (1.225)^2}{(1.538)^2 - (1.225)^2} = 2.0 \times 10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

$$M = \frac{4\pi^2 J}{T_1^2 B} = 1.5 \text{ A} \cdot \text{m}^2$$

(三) 地磁场中耦合磁针运动的观察

1. 请比较 ω 、 ω^* 、 ω_0 三者的大小

答: $\omega > \omega^* > \omega_0$ 。

2. 改变两个磁针之间的距离 L , 观察拍频随 L 的增加如何变化? (变大、变小、不变)

答: 变小。

(四) 地磁场中耦合磁针运动的测量

1. 改变两个磁针之间的距离 L , 测量 ω 、 ω^* 随 L 的变化情况。

L/cm	19.10	22.10	27.70	29.80	22.60	37.60
60T/s	51.10	54.96	62.99	66.01	68.60	71.57
60T*/s	62.96	66.85	71.66	71.98	72.66	75.96
T/s	0.8517	0.9160	1.050	1.100	1.143	1.193
T*/s	1.049	1.114	1.194	1.200	1.211	1.266
$\omega / (\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})$	7.378	6.859	5.985	5.711	5.496	5.267
$\omega^* / (\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})$	5.988	5.639	5.261	5.237	5.188	4.963

随着 L 的增大, ω 变小, ω^* 变小。

2. 确定系数 α 和 β 的值。

L/m	0.1910	0.2210	0.2770	0.2980	0.2260	0.3760
$\omega / (\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})$	7.378	6.859	5.985	5.711	5.496	5.267
$\omega^* / (\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})$	5.988	5.639	5.261	5.237	5.188	4.963
$k' = \frac{1}{2} \omega^2 - \omega^{*2} $	9.287	7.624	4.072	2.593	1.721	1.557

实验报告

评分:

管理系 20 级

学号 PB20151804

姓名 袁雨

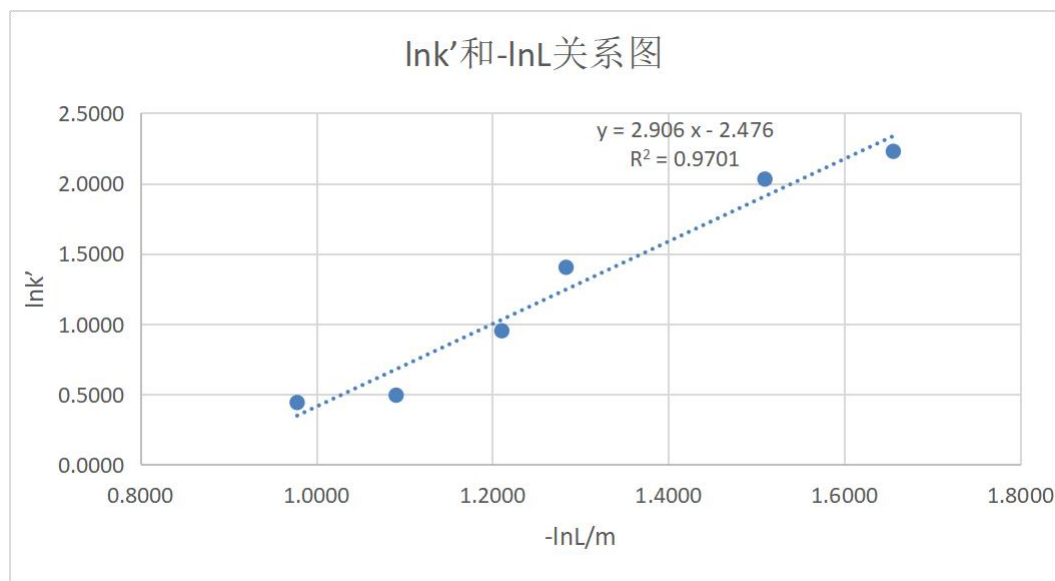
日期 2021 年 5 月 27 日

$\ln k'$	2.229	2.031	1.404	0.9528	0.5432	0.4429
$-\ln L$	1.656	1.510	1.284	1.211	1.091	0.9782

已知两个磁针之间的耦合系数 $k' = \alpha \frac{M^2}{L^\beta} = \frac{1}{2} |\omega^2 - \omega'^2|$

等式两边取对数得: $\ln k' = \ln(\alpha M^2) - \beta \ln L$

作图如下:



由最小二乘法得 $\ln k' = 2.906 \ln L - 2.476$

则有: $\beta = 2.906$

$\ln(\alpha M^2) = -2.476, M = 1.5 A \cdot m^2$

$\alpha = 0.037$

六、结果分析与讨论

最终由最小二乘法得出的 $\ln k'$ 和 $-\ln L$ 的解析式 R^2 与 1 并不十分接近, 分析可能的误差来源如下:

- ① 刻度尺、秒表等仪器本身不够精密带来的仪器误差;
- ② 测量时间时人的反应时间等人为估计误差;
- ③ 空气阻力的影响;
- ④ 特斯拉计与磁场未能完全垂直; 未能保证地磁场与线圈磁场严格在同一条直线上等;
- ⑤ 两个磁针同相位或反相位运动时, 释放时的旋转角度不同或未同时释放, 导致形成“拍”运动;
- ⑥ 附近磁场的影响, 导致外磁场不均匀等;

七、思考题

1. 如何利用作图法或最小二乘法求得局域地磁场的水平分量?

答: 以线圈电流 I 为横坐标, $1/T^2$ 为纵坐标作图, 外推计算 $1/T^2$ 为零时的电流, 带入之前求得的

实 验 报 告

评分:

管理系 20 级

学号 PB20151804

姓名 袁雨

日期 2021 年 5 月 27 日

$B = k|I|$ ，因为此时的线圈磁场完全抵消轴线方向的外部磁场，由此可以计算局域磁场水平分量的大小。

2. 说明两小磁针耦合运动“拍频”与哪些物理量有关？

答：拍频 $f = |\omega - \omega^*| / 2\pi$ ，与

- ①小磁针所处局域磁场的大小
- ②小磁针的转动惯量
- ③小磁针的磁矩
- ④两磁针的距离等有关。