

实验报告

磁力摆

少年班学院

马天开 PB21000030 (5 号)

2022 年 5 月 29 日

1 实验目的

理解小磁针在地磁场中运动的特征,掌握测量局部地磁场的方法。设计试验方案测量磁力摆的磁矩和转动惯量,掌握两小磁针耦合运动规律。

技能方面,掌握基本的电磁学实验技能和电学仪器的使用,锻炼运用刚体力学和电磁学知识,通过变形物理公式,培养数据处理能力。

2 实验器材

高灵敏度特斯拉计(量程: $0 - 300mT$, $\Delta = 0.01mT$)、Helmholtz 线圈、磁力摆两个、直流电源,质量相同的配重螺母两个、米尺、秒表。

高灵敏度特斯拉计精度: $0.01mT$, 米尺精度: $\Delta = 0.1cm$, 秒表精度: $\Delta = 0.01s$

3 实验原理

3.1 磁力摆的运动

当磁力摆偏离平衡位置角度小于 $\theta \leq 5^\circ$ 时,磁力摆的运动方程为:

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} = -\frac{mB}{J}\theta \quad (1)$$

其中, m 为磁力摆的磁矩, J 为磁力摆的转动惯量, B 为所在位置磁感应强度。

上面的方程是简谐运动方程,一般解的周期计算为:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{J}{mB}} \quad (2)$$

3.2 Helmholtz 线圈

Helmholtz 线圈是一对彼此平行且连通的共轴圆形线圈组,每组 N 匝,电流方向一致。当线圈之间的距离 a 恰好等于圆形线圈的半径 R 时,两线圈中点附近的磁场近似于均匀磁场,磁感应强度为:

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

3.3 两小磁针的耦合运动

当两个小磁针悬挂在相同高度,同向耦合和反向耦合时,震动周期之间存在如下关系:

$$\ln\left(\frac{1}{2}|\omega^2 + \omega^{*2}|\right) = -\beta \ln L + \ln(\alpha \cdot m^2) \quad (4)$$

4 实验方法

- Helmholtz 线圈参数的测量: 打开各仪器电源,首先将特斯拉计调零。打开电源,设置输出电压为 $U = 30V$,逐渐调整电流 I 的大小, ($I < 1A$),将特斯拉计测量端放置在垂直于磁感线的方向上。记录 $I - B$ 值的大小。(共 8 组)
- 测量局部地磁场水平分量的大小: 首先确定通入电流后线圈产生的磁场方向和地磁场方向平行,方法如下: 在未通电的情况下,悬挂一小磁针。此时小磁针所指方向为地磁场的水平分量方向。以此方向平行放置 Helmholtz 线圈,此时调整线圈中通入电流大小,若随着电流增大,摆动周期逐渐减小,说明线圈摆放方向与地磁场方向相同。相反的表现是: 随着电流增大,摆动周期先增大后减小(反映叠加磁场从变弱到变强)。控制电流大小 $I < 0.1A$,随着电流变化,记录磁针摆动周期的变化(100 次)。
- 测量转动惯量及磁矩: 调整电流大小 $I = 0.02A$,测量磁针摆动周期(100 次),并测量螺帽到悬线长度。
- 地磁场中耦合现象的观察: 将两个小磁针同高度悬挂,分别令他们同向耦合、反向耦合,记录他们的摆动周期(ω 和 ω^*)。同时和小磁针单独运动的周期对比,比较三者关系。
- 地磁场中耦合磁针运动的测量: 将两个小磁针同高度悬挂,分别测量同相位周期 ω 和反相位周期 ω^* ,记录两者随着磁针间水平距离 L 之间的变化。

5 实验数据

5.1 线圈参数的测量

($U = 30V$)

I/A	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
B/mT	0.47	0.91	1.37	1.83	2.29
I/A	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
B/mT	2.76	3.23	3.71	4.17	4.64

5.2 测量局部地磁场水平分量的大小

($U = 30V$)

I/A	$100T_1/s$	$100T_2/s$	$100T_3/s$
0.01	67.13	67.14	67.32
0.015	60.32	59.44	58.82
0.02	54.07	53.35	55.77
0.025	49.40	48.75	48.54
0.03	46.76	45.29	45.17
0.035	43.90	42.79	42.46
0.04	40.60	40.10	40.56
0.045	38.19	38.29	37.68

5.3 测量转动惯量及磁矩

($U = 30V, I = 0.02A$)

$100T/s$	74.00	73.54	73.42
d/cm	5.60	5.61	5.60

5.4 地磁场中耦合现象的观察

$100\omega_0/s$	107.28	107.03	107.23
$100\omega/s$	65.88	65.57	65.63
$100\omega^*/s$	102.48	104.75	103.46

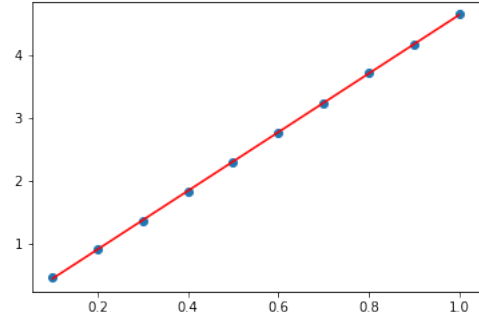
5.5 地磁场中耦合磁针运动的测量

L/cm	$100\omega/s$	$100\omega^*/s$
23.5	80.19	92.46
25.0	83.70	97.34
26.5	84.03	98.39
28.0	91.93	102.60
29.5	93.23	103.46
31.0	94.00	105.27

6 数据处理

6.1 线圈参数的测量

对 $I - B$ 进行线性拟合, 得到:



$$\begin{cases} B = 4.65 \cdot I - 0.02 \\ S_{\kappa} = \kappa \cdot \sqrt{\frac{1}{R^2} - 1} = 1.471 \times 10^{-2} \end{cases} \quad (5)$$

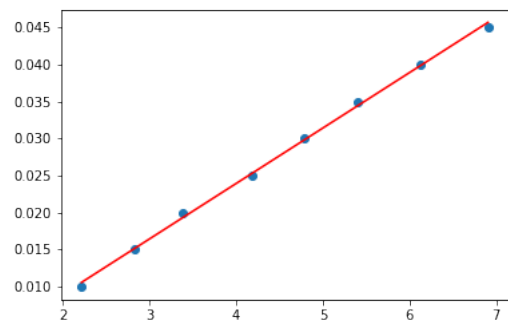
$$\begin{cases} u_{A\kappa} = S_{\kappa} \times t_p = 0.15mT/A \\ \therefore \kappa = 4.65 \pm 0.15mT/A \end{cases} \quad (6)$$

6.2 测量局部地磁场水平分量的大小

利用公式 2, 并计算到地磁场, 得到:

$$I = \frac{1}{\kappa} \left(\frac{2\pi J}{m} \cdot \frac{1}{T^2} - B_0 \right) \quad (7)$$

对 $\frac{1}{T^2} - I$ 进行线性拟合, 得到:



$$\begin{cases} B_0 = \kappa \cdot b = 27.98mT \\ U_{B_0}/B_0 = \sqrt{(U_{\kappa}/\kappa)^2 + (U_b/b)^2} = 0.23mT \end{cases} \quad (8)$$

$$\therefore B_0 = 27.98 \pm 0.23mT \quad (9)$$

6.3 测量转动惯量及磁矩

对公式 2，考虑到转动惯量的变化，符合以下两个公式：

$$\begin{cases} J_0 = \left(\frac{T_0}{2\pi}\right)^2 \cdot mB \\ J_0 + \frac{1}{2}m_0d^2 = \left(\frac{T}{2\pi}\right)^2 \cdot mB \end{cases} \quad (10)$$

因此有，

$$m = \frac{2\pi^2 m_0 d^2}{(T^2 - T_0^2) \cdot B} \quad (11)$$

同时，计算不确定度为：

$$(U_m/m)^2 = (U_{m_0}/m_0)^2 + (U_d/d)^2 + 2(U_T/T)^2 + 2(U_{T_0}/T_0)^2 + (U_B/B)^2 \quad (12)$$

计算得到：

$$\begin{aligned} m &= 1.75 \pm 0.14 A \cdot m^2 \\ J_0 &= 1.19 \pm 0.05 kg \cdot m^2 \end{aligned} \quad (13)$$

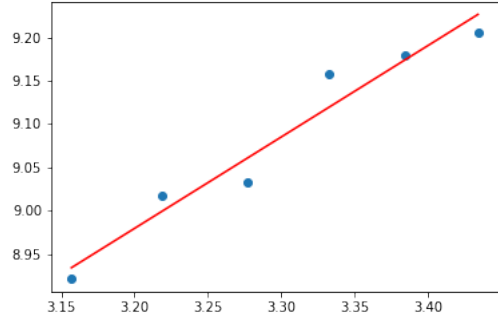
6.4 地磁场中耦合现象的观察

根据测量结果：

$$\omega < \omega^* < \omega_0 \quad (14)$$

6.5 地磁场中耦合磁针运动的测量

对 $\ln L - \ln\left(\frac{1}{2}|\omega^2 + \omega^{*2}|\right)$ 进行线性拟合，得到：



因此计算出 $\beta = -1.057, \alpha = 88.037$

7 实验结论

7.1 结果

见数据处理部分。

7.2 思考题

- 如何利用作图法或最小二乘法求得局部地磁场的水平分量？
附加磁场的强度，随电流增强成线性变化，因此测算周期零点的周期，便可得到地磁场的水平分量
- 如何说明两小磁针耦合运动“拍频”与那些物理量有关？
与外加磁场、距离、小磁针的磁矩相关。