

磁力摆

实验要求:

1. 预习阶段

(1) 认真阅读实验讲义。可查阅与实验相关的资料。

(2) 本学期预习考核方式为在线测验（进门测），不要求写预习报告。在线测验只能完成一次，如多次作答，后面提交的作答无效，请大家完成实验讲义的预习后再作答。请点击预习测试链接：<https://ks.wjx.top/vj/eU1t27v.aspx> 作答，或扫描下方二维码作答。



2. 实验阶段

(1) 维护良好的课堂秩序，在实验室内尽量保持安静，维护整洁的实验环境。

(2) 爱护实验设备，轻拿轻放。在听完老师讲解后才能动手操作。在动手前应仔细阅读实验注意事项和操作说明。

(3) 如实记录实验数据，当堂交给老师签字。**本实验要求书写实验报告。**

(4) 实验完成后，整理好实验设备后方可离开。离开前请扫描实验室内的二维码参加出门测。

实验原理：

本实验要求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；设计实验方案测量小磁针的磁矩和转动惯量；研究两个相同磁针的耦合运动规律。

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。

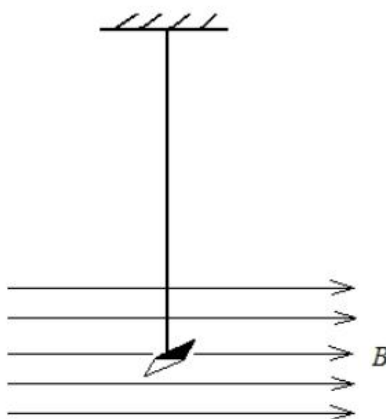


图 1 磁力摆

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

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

式中 m 是磁力摆的磁矩， J 是磁力摆的转动惯量， B 是磁力摆所处位置的磁感应强度。

由上式可得磁力摆一级近似的振动周期为

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

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。

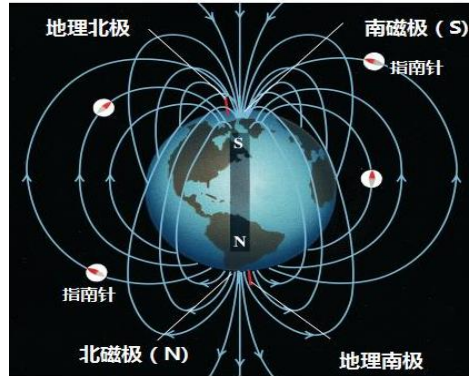


图2 地球磁偶极子场

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

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

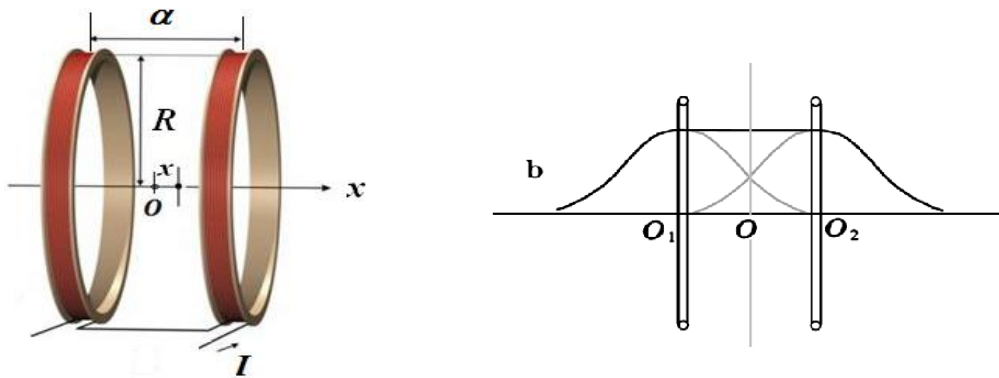


图3 亥姆霍兹线圈

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 $B = B_0 + B_1$ ；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 $B = B_0 - B_1$ 。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。

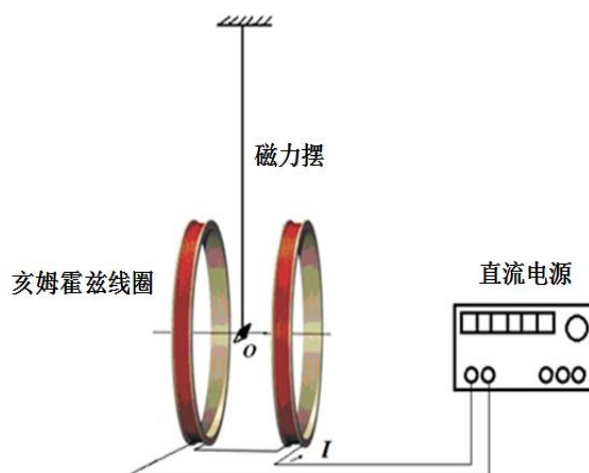


图 4 实验原理图

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。

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。

实验内容：

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。
2. 如何判断线圈附加磁场与局域磁场是反向还是同向。
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。

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，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。

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。
2. 测量磁针的转动惯量以及它的磁矩。

三、地磁场中耦合磁针运动的观察

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，磁针的运动形式将更加丰富。

将两个磁针沿着局域磁场的方向共线放置，使它们同相位运动，则磁针共同运动的圆频率为： ω 。将两个磁针沿着局部地磁场的方向共线放置，使它们反相位运动，则磁针共同运动的圆频率为： ω^* 。这两个频率都与单独一个磁针的圆频率 ω_0 不同。

1. 请比较 ω 、 ω^* 、 ω_0 三者的大小。

当两个磁针由静止释放，其中一个磁针的初始角位移为零，另一个磁针则有一个非零的初始角位移。此时会发生两种简振模式的叠加，两个磁针的振幅交替增减，能量互补，形成“拍”运动。此时的拍频由两个简正模式的频率只差决定，即拍频 $f = |\omega - \omega^*|/2\pi$ 。

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）

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。
2. 确定系数 α 和 β 的值。

已知两个磁针之间的耦合系数 $k' = \alpha \frac{M^2}{L^\beta} = \frac{1}{2} |\omega^2 - \omega^{*2}|$ ，其中 α 和 β 是常数，

M 是磁矩。由以上实验数据确定系数 α 和 β 的值。

注意事项：

1. 可通过交换电源连线正负端，改变线圈供电电流的方向。
2. 注意保护特斯拉计探针，使用特斯拉计时应清零，探针应处于线圈中心，且应调节与地磁场垂直，此时特斯拉计示数最大。
3. 实验过程中亥姆霍兹线圈的轴线与地磁场方向保持平行。
4. 实验过程中小磁针要保持和亥姆霍兹线圈中心相同的高度。
5. 亥姆霍兹线圈电流控制在 1.0A 以下。
6. 研究两磁针的耦合运动时，注意避免周围其它磁场的干扰。

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？
2. 说明两小磁针耦合运动“拍频”与哪些物理量有关？