**实　验　报　告** 评分：

2020 级 11 系 3 班 姓名 黄瑞轩 日期 2021年6月6日 № PB20111686

**实验题目：**磁力摆

**实验目的：**利用磁力摆测地磁场大小；测量磁力摆的磁矩和转动惯量；探究地磁场中耦合磁针的运动。

**实验器材：**磁力摆、高斯计、电源、螺母（配重）、秒表、亥姆霍兹线圈、尺子。

**实验原理：**

磁力摆原理：将一枚小磁针用一根细线悬挂起来，置于匀强磁场*B*中，当小磁针偏离平衡位置的角位移*θ*很小时，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。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

 (1)

式中*m*是磁力摆的磁矩，*J*是磁力摆的转动惯量。由上式可得磁力摆一级近似的振动周期为

  (2)

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。

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2所示。两线圈轴线中点处的磁感应强度为

 (3)

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3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*1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1 磁力摆示意图 | 图2 亥姆霍兹线圈示意图 | 图3 实验装置示意图 |

地磁场中小磁针的耦合运动原理：

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。由机械振动的知识，可以得到耦合运动的一般结论：

 (4)

当产生拍现象时，初始条件为*t*＝0，*θ*1＝*θ*，*θ*2＝0，＝0，＝0，此时运动方程的解为

 (5)

两磁针的角位移图像如图4。

当进行同相运动时，初始条件为*t*＝0，*θ*1＝*θ*2，＝0，＝0，此时运动方程的解为

 (6)

两磁针的角位移图像如图5。

当进行反相运动时，初始条件为*t*＝0，*θ*1＝－*θ*2，＝0，＝0，此时运动方程的解为

 (7)

两磁针的角位移图像如图6。

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  |  |
| 图4 拍现象下小磁针的*θ*-*t*曲线 | 图5 同相运动下小磁针的*θ*-*t*曲线 | 图6 反相运动下小磁针的*θ*-*t*曲线 |

**实验方案设计**

**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，得到中的*k*值。

方案简述：使电源供应0.1 A～0.8 A的电流，步长为0.1 A，共8个数据，作图得到*k*值。

2、判断线圈附加磁场与局域磁场是反向还是同向。

方案简述：交换电源的正负极输出接口，观察高斯计测得磁场的变化。若数值变大，则原来附加磁场与局域磁场反向；若数值变小，则原来附加磁场与局域磁场同向。

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

方案简述：振动周期平方的倒数*T*2与所在磁场磁感应强度成正比，因此可用作图法得到所加磁场与的函数关系，由截距可确定地磁场的大小。

根据不确定度要求，根据统计分析，实验人员开启或停止秒表的反应时间为0.1s左右，所以实验人员测量时间的精度近似为。则至少应满足，测量的总时间最好在40秒以上。

**二、测量磁针的磁矩以及转动惯量**

由上面的测量，我们可以计算出*J*/*M*的值，因此只要再计算出*J*或*M*，就可求得另一个。

方案简述：将小磁针放在地磁场中，测量周期*T*；再在小磁针两端各安放一个质量的无磁性螺母，此时可以计算出的值，其中，因此可解*J*与*M*。

**三、地磁场中耦合磁针运动的观察**

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、比较*ω*、*ω*\*、*ω*0三者的大小。

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。

**四、地磁场中耦合磁针运动的测量**

已知两个磁针之间的耦合系数，其中和是常数，*M*是磁矩。

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、确定系数和的值。

方案简述：用对数坐标，在SI下采用作图法得到各待求参数。

**实验数据与分析**

**一、测量磁针处局域磁场水平分量的大小**

为得到*B*＝*kI*中的*k*值，实验数据如表1所示。

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 电流*I*/A | 0.1 | 0.2 | 0.3 | 0.4 | 0.5 | 0.6 | 0.7 | 0.8 |
| 磁感应强度*B*/mT | 0.4871 | 0.9672 | 1.4524 | 1.9375 | 2.4237 | 2.9095 | 3.3979 | 3.8844 |

表1

用Origin作图如图7所示。



图7

于是得到

 (8)

选取适当的测量范围测量不同电流下磁针的振动周期*T*，数据如表2所示。根据可计算出一次振幅周期，列在表2中；根据可计算出每个电流对应的磁感应强度值，也列在表2中。

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 电流*I*/A | 0.010 | 0.015 | 0.020 | 0.025 | 0.030 | 0.035 | 0.040 | 0.045 |
| 磁感应强度*B*/mT | 0.048562 | 0.072843 | 0.097124 | 0.121405 | 0.145686 | 0.169967 | 0.194248 | 0.218529 |
| 振动总时间*t*/s | 55″88 | 48″64 | 54″19 | 54″60 | 50″55 | 47″61 | 53″24 | 50″52 |
| 振动总次数*N* | 80 | 81 | 100 | 110 | 110 | 110 | 130 | 130 |
| 振动周期*T*/s | 0.6985 | 0.6005 | 0.5419 | 0.4964 | 0.4595 | 0.4328 | 0.4095 | 0.3886 |
| *T*2的倒数/s-2 | 2.0496 | 2.7732 | 3.4053 | 4.0588 | 4.7353 | 5.3381 | 5.9623 | 6.6216 |

表2

用Origin作图像如图8所示。



图8

由于实验前在地磁场中对高斯计做了调零处理，因此截距为负，测得地磁场为

 (9)

**二、测量磁针的磁矩以及转动惯量**

无配重时（情形1）与有配重时（情形2）的振动数据如表3所示。根据可计算出一次振幅周期，列在表3中。

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | 情形1 | 情形2 |
| 振动总时间*t*/s | 55″21 | 52″24 |
| 振动总次数*N* | 45 | 33 |
| 振动周期*T*/s | 1.2269 | 1.5830 |

表3

我们已求得，并测量得到。

在情形1中，有

 (10)

在情形2中，有

 (11)

联立上述两式求得

 (12)

 (13)

**三、地磁场中耦合磁针运动的观察**

实验记录数据如表4所示。根据可计算出一次振幅周期，列在表4中；利用可计算角频率，也列在表4中。

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
|  | 拍 | 拍 | 同相运动 | 反相运动 |
| 距离*L*/cm | 21.51 | 16.81 | 16.81 | 16.81 |
| 摆动总时间*t*/s | 44″14 | 46″94 | 50″11 | 56″53 |
| 摆动次数*N* | 11 | 22 | 80 | 66 |
| 摆动周期*T*/s | 4.013 | 2.134 | 0.626 | 0.857 |
| 角频率*ω*/s-1 | 1.566 | 2.944 | 10.04 | 7.332 |

表4

记同相运动时磁针共同运动的圆频率为*ω*；反相运动时磁针共同运动的圆频率为*ω*\*；单独一个磁针的圆频率为*ω*0。由表3情形1可计算出

 (14)

于是*ω*、*ω*\*、*ω*0三者的大小关系为

 (15)

由表4第1、2组数据可看出，当*L*减小时，拍频增大。

**四、地磁场中耦合磁针运动的测量**

记录数据如表5所示。

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 间距*L*/cm | 23.52 | 29.02 | 19.03 | 27.53 | 32.04 | 20.05 |
| 正相运动总时间*t*1/s | 41″31 | 41″57 | 42″58 | 42″94 | 52″39 | 44″68 |
| 正相运动总次数*N*1 | 47 | 43 | 60 | 44 | 52 | 60 |
| 反相运动总时间*t*2/s | 44″01 | 41″60 | 41″17 | 42″85 | 46″46 | 44″87 |
| 反相运动总次数*N*2 | 43 | 37 | 44 | 37 | 40 | 46 |

表5

根据可计算出一次振幅周期，利用可计算角频率，利用可计算耦合系数，均列在表6中；此外，用于计算的对数值均已先转化为国际单位。

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 间距*L*/cm | 23.52 | 29.02 | 19.03 | 27.53 | 32.04 | 20.05 |
| 正相运动周期*T*1/s | 0.8789 | 0.9667 | 0.7097 | 0.9759 | 1.008 | 0.7447 |
| 正相运动角频率*ω*/s-1 | 7.149 | 6.499 | 8.854 | 6.438 | 6.236 | 8.438 |
| 反相运动周期*T*2/s | 1.023 | 1.124 | 0.9357 | 1.158 | 1.162 | 0.9754 |
| 反相运动角频率*ω*\*/s-1 | 6.139 | 5.588 | 6.715 | 5.425 | 5.410 | 6.441 |
| 耦合系数*k*′/s-2 | 6.708 | 5.505 | 16.65 | 6.008 | 4.815 | 14.85 |
| 耦合系数的对数ln *k*′ | 1.903 | 1.706 | 2.812 | 1.793 | 1.572 | 2.698 |
| 间距的对数ln *L* | －1.447 | －1.237 | －1.659 | －1.290 | －1.138 | －1.607 |

表6

对取对数可得

 (16)

利用Origin作图像，如图9所示。

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| 图9 | 图10 |

图9得到的拟合方程为

 (17)

而显然从左到右第3个数据点偏差过大，舍去后得到图10，其拟合方程为

 (18)

已知，故。对比原方程有，解得

 (19)

**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？

我们已知磁力摆的周期公式，因此可以得到，因此*B*和成线性关系。由于在实验前对高斯计进行了调零，所以此方程应当变形为。

通过实验可以得到一系列数据点，因此可以通过最小二乘法来获得拟合直线，最小二乘法的计算公式如下：

拟合直线公式设为，*x*的平均值设为，*y*的平均值设为，则



由此公式即可求出拟合直线。事实上，利用Origin等软件，可以方便地自动生成最小二乘拟合直线。

1. 说明两小磁针耦合运动“拍频”与哪些物理量有关？

拍频的定义为，因此应与有关。由电磁学的知识可以推知简正频率





其中*m*为小磁针质量、*J*为小磁针转动惯量、*B*0为所处磁场（地磁场）磁感应强度、*l*为两小磁针之间的距离、是描述小磁针阻尼性质的辅助物理量。拍频就与上述物理量有关。