

## 磁活性流体的静态响应 (10 分)

### 引言

铁磁流体是悬浮在载体溶液中的纳米颗粒磁铁 ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ )。它们表现出一系列有趣的特性,尤其是在被施加磁场时表现出强烈响应-它们有时被描述为超顺磁体。在本实验中,你将使用静态和动态测试方法,并使用一系列实验测量和评估方法,实证研究铁磁流体的一些特性。实验分为两大部分,但建议按顺序解决问题。

### 设备清单



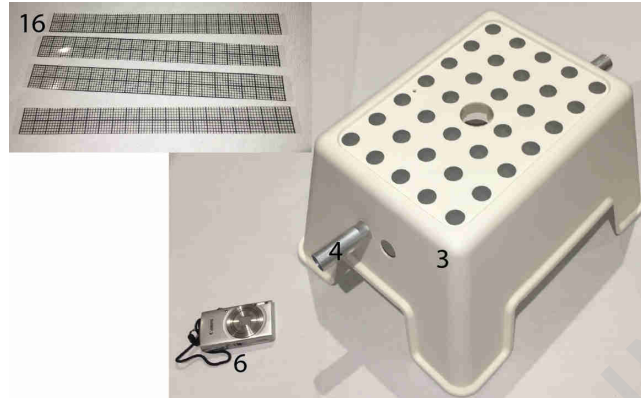
## Experiment



Asian  
Physics  
Olympiad  
Adelaide 2019

# Q1-2

chinese (China)



1. 小玻璃瓶装置于透明溶液中的铁磁流体。不得打开瓶子!
2. 带密封盖的玻璃盒，装有铁磁流体。不得打开盒盖!
3. 凳子（可用于挡光与支撑）
4. 金属管，上有用于调节磁铁的位置的螺纹杆（已插入凳子）
5. 可调式木质底座，带尼龙螺栓，用于水平调节
6. 带存储卡的相机
7. 2×N52 磁铁, 14.2 mm × 3.2 mm
8. 1×N42 磁铁, 20.0 mm × 5.0 mm (图中未显示)
9. 500mm 长带螺纹的杆，用作台灯的支杆
10. 垫圈和翼形螺母，用于将支杆连接到凳子上
11. 用电池供电的小台灯，带螺纹安装孔
12. 铝箔，用于导光或遮光
13. 橡皮泥 (Blutack)，用于粘接器件
14. 绿色楔子
15. 透明的 30 厘米标尺
16. 透明网格条，4 个
17. 木制垫片，2 个
18. 纸卷尺



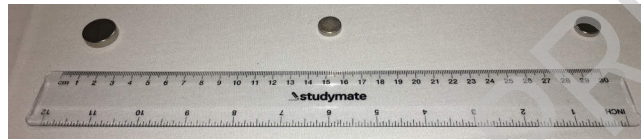
### 安全事项和重要说明

本实验需使用强磁铁。磁铁吸在一起可能夹伤你的手指，磁铁也可能因撞击而损坏。任何时间都要小心操作磁铁，不用磁铁时把它们隔远。**磁铁损坏不能更换！**

实验中用到两个密封的装有液体的容器。在实验过程中，任何时候都不要打开小玻璃瓶或带密封盖的玻璃盒。**铁磁流体粘在玻璃盒壁上将很难看清内部的现象，因此，如无必要不要倾斜！**

小台灯是用电池的。如果需要，可要求一个额外的电池。

**如果将磁铁靠近铁磁流体超过 10 秒，会因为残余磁化以及与周围流体的相互作用，使得流体表现有所不同。虽然你的实验仍然可以进行，但可能更难以看到正确的效应。**



当你存放磁铁时，请确保它们相距足够远，以免它们咬合在一起。它们相隔距离必须至少是上图所示那么远。

### Part A: 静态测试 (1.6 分)

这一部分通过测量铁磁流体对磁场的静态响应研究铁磁流体的性质。

#### 磁相互作用：对铁磁流体施加力

小玻璃瓶包含一团铁磁流体，它被未知的流体包围，且互不相溶。铁磁流体具有密度  $1.21 \times 10^3 \text{ kg m}^{-3}$ ，磁化率  $\chi = 2.64$ 。

铁磁流体对磁场  $\mathbf{B}$  有响应，单位体积产生感应磁矩  $m = \frac{\chi B}{\mu_0}$ 。

圆柱形磁铁轴上的磁场大约是

$$B_z = \frac{B_r}{2} \left( \frac{z+l}{\sqrt{(z+l)^2 + a^2}} - \frac{z}{\sqrt{z^2 + a^2}} \right), \quad (1)$$

其中  $z$  是到磁铁表面的距离， $l$  是它的厚度， $a$  是它的半径， $B_r$  是剩磁的磁感应强度，这个剩磁强度取决于磁铁材料。对于大磁铁 (由 N42 制成的)  $B_r = 1.3 \text{ T}$ ，对于小磁铁 (由 N52 制成的)  $B_r = 1.4 \text{ T}$ 。

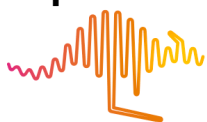
作用于单位体积铁磁流体上的沿  $z$  方向 (沿着磁体的磁化方向) 上的力取为

$$\frac{f}{V} = \frac{\chi B_z}{2\mu_0} \frac{dB_z}{dz}. \quad (2)$$

用整体磁场来计算太繁琐。在这个部分你可以使用偶极近似来计算铁磁流体上的力。在这个近似下沿  $z$  方向单位体积上的力是

$$\frac{f}{V} = -\frac{3\chi B_r^2 a^4 l^2}{8\mu_0 z^7} \quad (3)$$

## Experiment



Asian  
Physics  
Olympiad  
Adelaide 2019

# Q1-4

chinese (China)

使穿过凳子的铝管上的螺纹杆的平的端面朝下。你可以旋转铝管以实现这一点-注意旋转铝管时螺纹杆不要碰到其它地方。

用橡皮泥将玻璃瓶侧向粘到楔子厚边缘的顶部。



Part A 中磁铁（大）固定在螺纹杆上的方式



Part A 中瓶子的固定方式

**A.1** 找到大磁铁的位置，使得铁磁流体正好能悬浮在清澈的未知流体中，并在答题纸上记录距离  $z$  以及它的不确定度。实现完美平衡可能很困难，因此只能尽量使铁磁流体稳定悬浮，然后估算距离及其不确定度。  
在答题纸上画出你是如何测量距离的示意图。  
注意有时铁磁流体看上去分成两团，一团磁性，一团飘浮。这通常是因为瓶中有少量空气。你可以利用磁铁将磁性团移到瓶中一处干净的地方，再提升它。 0.8pt

**A.2** 使用测出的距离和其他任何需要的测量值，计算铁磁流体密度和周围透明流体密度之间的差异，包括其不确定度。 0.8pt

**Part B: 磁相互作用：铁磁流体的表面张力 (1.2 分)**

铁磁流体在三个能量的影响下移动：重力势能，表面张力相关的表面能，以及磁能。

使用其中一个磁铁，观察当磁铁非常靠近瓶子时的现象。铁磁流体中会出现尖刺。这是由于垂直磁场引起不稳定性，当重力-表面张力-磁场作用下产生的波的有效频率变为虚数时发生的。色散关系是

$$\omega^2 = \frac{gk\Delta\rho}{\rho_1 + \rho_2} + \frac{\sigma k^3}{\rho_1 + \rho_2} - \frac{k^2\mu_0 M_0^2}{1 + (1 + \chi)^{-1}}, \quad (4)$$

其中  $\sigma$  是铁磁流体-清澈流体界面处铁磁流体的表面张力系数， $\rho_1$  是铁磁流体的密度， $\rho_2$  是清澈流体的密度， $\Delta\rho = \rho_1 - \rho_2$ ， $M_0$  是铁磁流体的磁化强度， $k$  是波数。

当  $\omega^2 = 0$  和  $\frac{\partial\omega^2}{\partial k} = 0$  时，可得到表面张力系数与密度差以及流体表面受到扰动即将出现不稳定性时的有效波长之间的关系，其关系式为

$$\sigma = \frac{g\Delta\rho\lambda^2}{4\pi^2}, \quad (5)$$

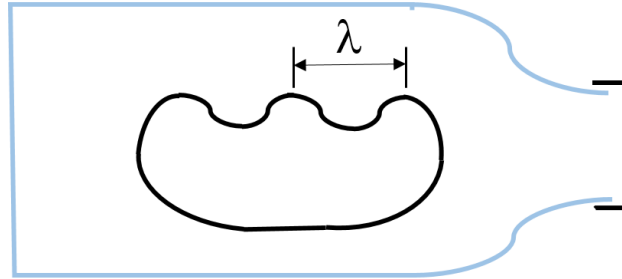
其中  $\lambda$  是当磁化强度达到不稳定临界时，相邻两个尖刺的中心之间的距离。



Part B 的磁铁和螺纹杆

改变螺纹杆的方向（最简单的办法是旋转铝管并调节螺纹杆的位置），使得磁铁正对着凳子上方的孔，并位于孔口的下方，从而可以升高和降低磁铁。





- B.1** 使用玻璃瓶，测量不稳定刚刚开始出现时（尖刺刚刚开始形成）的距离  $z_{\text{crit}}$ 。使用网格条或其他方法，测量铁磁流体中尖刺的间距  $\lambda$ ，并记录下来。估算两个测量结果的不确定度。  
**重要提示：**如果用磁铁将液体牢固地吸在玻璃壁上，它会粘在上面，使测量变得困难。如果发生这种情况，可以用磁铁将液体从粘着的区域吸走，并使用瓶子的其它地方进行测量。 0.6pt

- B.2** 求出铁磁流体在透明流体中的表面张力系数及其不确定度。 0.6pt

### Part C: 光学表面的特征：无尖刺状态 (4.1 分)

当施加的磁场低于临界值时，流体表面会产生变形，以近似平衡磁和重力势能。在下面部分中，我们将磁铁与流体相距足够远，使流体中的磁场非常接近磁偶极场。

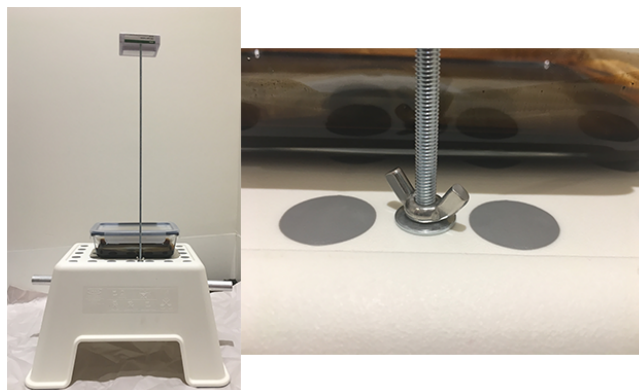
将流体表面看作为近似球面镜，就可以用光学方法测量其表面变形。变形表面中心的有效半径遵循幂律， $R = \alpha z^n$ ，其中  $\alpha$  是与材料有关的常量， $z$  是磁铁与未受干扰处的流体表面的距离。

首先，我们需要校准带磁铁的螺纹杆。

- C.1** 使用你的设备，尽可能精确地确定拧一圈螺纹杆时  $z$  的变化，并评估其不确定度。记录你使用的测量值并绘制你的实验装置示意图。 0.6pt

将铁磁流体玻璃盒放在凳子上，使凳子中心的孔位于玻璃盒中心的下方。**注意在实验过程中不得打开塑料盒的密封盖。**将两个小的磁铁中的一个放在螺纹杆上面。

将小台灯穿在长杆上，并使用垫圈和蝶形螺母将长杆固定到凳子上的孔中（见图）。



## Experiment



Asian  
Physics  
Olympiad  
Adelaide 2019

# Q1-7

chinese (China)

- C.2 利用球面镜的曲率半径  $R$  和球面镜放大倍数  $M$  的关系  $R = \frac{2lM}{1-M}$ ，其中  $l$  是物距，测量并绘出合适的图确定上述关系中的常数  $n$ 。评估答案的不确定度。 3.5pt

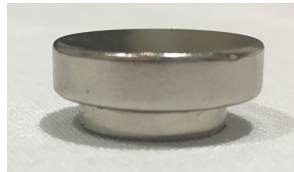
DELEGATION PRINT



## Part D: 尖刺表面的特征：尖刺形成和消失 (3.1 分)

在较强的磁场下，表面将经历不稳定性并且形成尖刺，与玻璃瓶中所观察到的类似。

- D.1** 使用叠在一起的小的磁铁和大的磁铁，以及由不稳定性理论给出的  $\sigma = \frac{g\rho\lambda^2}{4\pi^2}$ ，确定铁磁流体在空气界面处的表面张力系数。 0.5pt



- D.2** 将磁铁放在距离表面足够远的地方，开始明显没有尖刺。使磁铁逐渐接近流体，记录每个尖刺形成时的距离读数。再逐渐使磁铁远离，读取每个尖刺消失时的距离读数。评估测量数据的不确定度。 1.0pt

- D.3** 绘制尖刺数量相对磁铁距离  $z$  的关系图。根据数据点画出平滑曲线 (curves)，并在曲线上标明磁铁的移动方向。 1.0pt

- D.4** 当磁铁与流体表面的距离发生变化时，流体的重力势能、磁能和表面能量会发生变化。把表面能和磁势能看作是磁铁与流体表面的距离的函数，定性地画出来。根据之前绘制的图，标出全部临界点，并明确大体趋势。你不需要使用整个范围的数据，足以显示出想法即可。 0.6pt