



铁磁流体的静态响应与波脉冲

惠王伟 宋 峰

(南开大学物理科学学院 300071)

1. 铁磁流体的静态响应(10分)

引言:

铁磁流体是在液体中纳米颗粒 Fe_3O_4 悬浮液。它们能够表现出一系列有趣的特性,尤其是在施加磁场时具有强烈响应,这被称为超顺磁性。在本实验中,需要使用静态和动态测试方法以及一系列实验测量和估计技术,实验研究铁磁流体的某些特性。实验分为两部分,建议按顺序解答问题。

实验器材列表如下:

- 1) 小玻璃瓶,内部盛有透明溶液中的铁磁流体。严禁以任何理由打开瓶子!
- 2) 带密封盖的玻璃盒,内有铁磁流体。严禁以任何理由打开密封盖!
- 3) 凳子,用于挡光和固定支架
- 4) 金属管,用于调节磁铁位置(初始时,插入凳子中)
- 5) 可调节的木制底座,带尼龙螺栓,用于水平

调节

- 6) 装有存储卡的相机
- 7) 2块N52磁铁,其尺寸为 $14.2\text{ mm}\times 3.2\text{ mm}$
- 8) 1块N42磁铁,其尺寸为 $20.0\text{ mm}\times 5.0\text{ mm}$ (图中未显示)
- 9) 500毫米螺纹杆,用作灯杆
- 10) 垫圈和蝶形螺母,用于将杆固定在凳子上
- 11) 电池供电的灯,带有螺纹安装孔
- 12) 用于制作挡光板和遮光板的铝箔
- 13) 蓝丁胶,用于粘接各种组件
- 14) 绿色楔子
- 15) 透明的30厘米长的直尺
- 16) 4块透明网格条
- 17) 2块木制垫片
- 18) 纸卷尺

安全及其他重要注意事项说明:

本实验中,要使用强磁铁。磁铁吸在一起时,可能会挤压到你的手指,或者因碰撞而损坏。任何

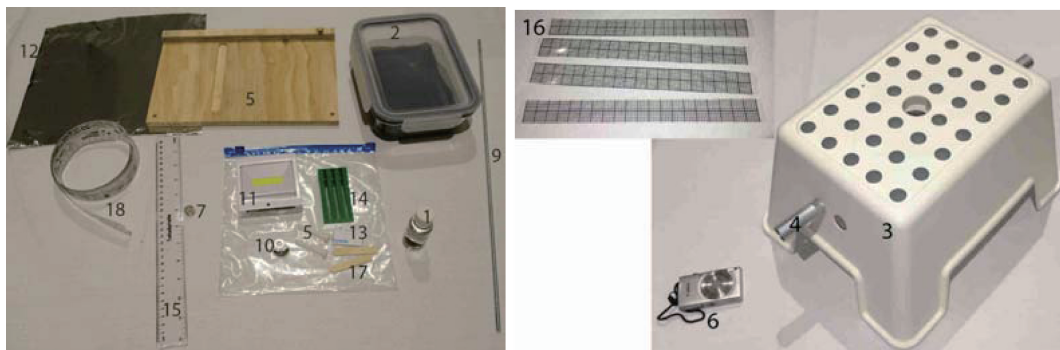


图1 实验器材

时候都要小心控制磁铁,避免将它们放得很近。磁铁一旦损坏,概不更换。

在实验过程中,任何时候都严禁打开装有铁磁流体的小玻璃瓶或带密封盖的玻璃盒。如果玻璃盒的侧面黏上了铁磁流体,将很难看清内部的现象。因此,非必要情况下,不要倾斜玻璃盒。

实验所提供的灯是由电池供电的。如果有必要的话,在实验过程中,你可以要求额外配一套电池用于给灯供电。

如果你将磁铁紧贴着铁磁流体放置约10秒钟以上,由于剩磁以及与周围流体的相互作用,将导致其特性有所改变,尽管你的实验仍然可以进行,但可能很难观察到正确的效应了。

放置磁铁时,要确保它们之间的距离足够远,这样它们就不会咬合在一起。它们放置的距离必须至少按图2所示。

A部分:静态测试(1.6分)

在这部分实验中,你将通过测量铁磁流体对磁场的静态响应来研究其特性。

磁相互作用:施加在铁磁流体上的力。小玻璃瓶含有一定体积的铁磁流体,周围包围有未知的流体,铁磁流体与该流体不相溶。铁磁流体的密度为

$1.21 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$,磁化率 χ 为2.64。铁磁流体在外磁场 B 的作用下,其单位体积的感应偶极矩为

$$m = \frac{\chi B}{\mu_0}$$

圆柱形磁体轴线上的磁感应强度约为

$$B_z = \frac{B_r}{2} \left(\frac{Z+l}{\sqrt{(Z+l)^2 + a^2}} - \frac{Z}{\sqrt{Z^2 + a^2}} \right)$$

其中, Z 是距磁铁表面的距离, l 是磁铁的厚度, a 是半径, B_r 是剩磁。所谓剩磁,是铁磁材料的一种特性,取决于制作磁铁的材料;对于大磁铁(由N42制成), $B_r = 1.3 \text{ T}$,小磁铁(由N52制成), $B_r = 1.4 \text{ T}$ 。

作用在单位体积铁磁流体 Z 方向(沿磁铁磁化方向)上的力可以认为是:

$$\frac{f}{V} = \frac{\chi B_z}{2\mu_0} \frac{dB_z}{dZ}$$

由于计算很繁琐,因此可以在该部分中使用偶极近似法来估算铁磁流体上的力。在偶极近似下,在 Z 方向上的单位体积受力为:

$$\frac{f}{V} = \frac{-3\chi B_z^2 a^4 l^2}{8\mu_0 Z^7}$$

旋转金属管,使穿过金属管的螺纹杆的平面朝下。旋转金属管时确保螺纹杆杆不要碰到凳子。使

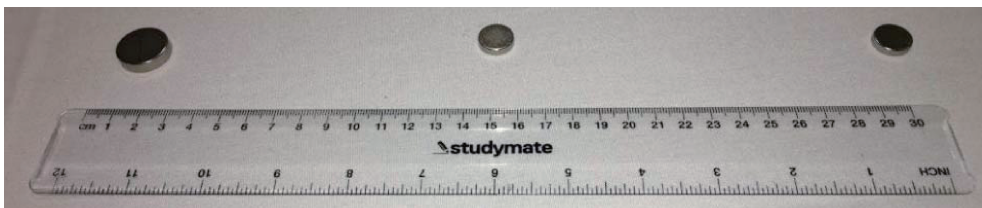


图2 在不使用磁铁时磁铁的相距距离



图3 A部分中磁铁的位置

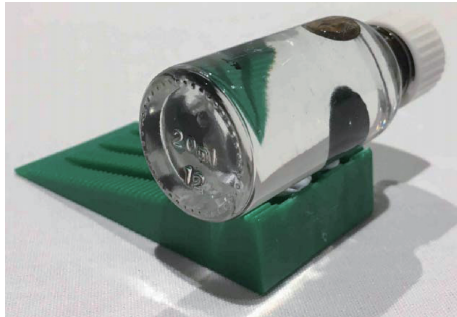


图4 A部分玻璃瓶安装图

用蓝丁胶将小瓶子侧向粘贴到楔子厚边缘的顶部。

A.1(0.8分)

改变大磁铁的位置,使得铁磁流体能够刚好悬浮在透明的未知液体中,在答题纸上记录下距离 Z 及其不确定度。可能要实现完美的悬浮会很困难,因此,如果你无法使铁磁流体稳定地悬浮,则测量出距离及其不确定性的最佳估读值。在答题纸上画出测量距离的示意图,说明你是如何测量的。

注意:有时铁磁流体会“分裂”成二团,一团磁形,另一团漂浮在液体中。这通常是因为瓶子里有少量的空气引起的。你可以用磁铁来调整铁磁流体的位置,将其移动到瓶中干净的地方。

A.2(0.8分)

利用距离的测量结果和其他必要的测量数据,计算铁磁流体与周围透明流体的密度差,包括其不确定性。

译注:A部分主要研究的是铁磁流体在磁场中的受力情况。本题的关键是分析铁磁流体稳定悬浮时,浮力、重力、磁力之间的关系。注意:在测量距离 Z 时,要多次改变位置,重复测量。

B部分:磁相互作用—磁流体的表面张力

铁磁流体在重力势能、表面能(与表面张力相关)和磁能3种能量的影响下运动。

使用其中一个磁铁,观察将磁铁非常靠近瓶子时会发生什么现象。当在重力、表面张力、磁场作用下,产生的波的有效频率变为虚数时,由于正常的磁场不稳定性,铁磁流体中就会出现尖刺。其色散关系为

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

其中, σ 是铁磁流体在透明流体界面处的表面张力, ρ_1 是铁磁流体的密度, ρ_2 是透明液体的密度, $\Delta\rho = \rho_1 - \rho_2$, M_0 是铁磁流体中的磁化强度, k 为波数。

当 $\omega^2 = 0$ 且 $\frac{\partial \omega^2}{\partial k} = 0$ 时,表面张力可以根据密度差和流体表面开始出现不稳定性时的有效波长得到。关系式为



图5 B部分的磁铁和螺纹杆的位置

$$\sigma = \frac{g\Delta\rho\lambda^2}{4\pi^2}$$

其中, λ 是磁化强度处于不稳定的临界状态时,相邻尖刺中心之间的距离。

旋转金属管,以更改螺纹杆的方向,同时调整螺纹杆位置,使得磁铁正对着凳子上方的孔,并位于孔的下面,这样就可以升高和降低磁铁。

B.1(0.6分)

测量玻璃瓶中铁磁流体不稳定性刚开始出现时(尖刺刚刚开始形成时)的距离 Z_{crit} 。利用网格条或其他方法测量观察到的铁磁流体中的尖刺的间距 λ (如图6所示)。计算 Z_{crit} 和 λ 的不确定度。

重要提示:如果铁磁流体被磁铁牢牢吸附在玻璃壁上,它会轻轻粘附在上面,这样会使得测量更加困难。如果发生这种情况,你可以使用磁铁将铁磁流体吸走,在玻璃瓶的其他地方进行测量。

B.2(0.6分)

计算铁磁流体在透明流体中的表面张力系数及其不确定度。

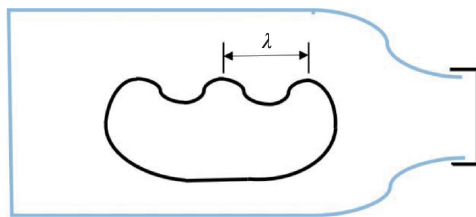


图6 尖刺示意图

译注:B部分主要研究的是铁磁流体的表面张力。实验的关键是要找到铁磁流体的临界状态(尖刺刚刚行程时的状态),为了能够方便观察,提高测量数据的准确性,要合理选择玻璃瓶的摆放方式。

C部分:光学表面特性:无尖刺时(4.1分)

当外加磁场处于临界值以下时,为平衡磁能和重力势能,流体表面会变形。在这一部分中,我们将磁铁与流体保持足够的距离,使流体中的磁场近似于一个偶极场。

将流体的表面作为近似球面镜,就可以用光学方法测量流体表面的变形,变形中心的有效曲率半径遵循幂定律

$$R = \alpha Z^n$$

其中, α 是取决于材料的常数, Z 是磁铁到未受扰动的流体表面的距离。

C.1(0.6分)

使用你的装置,尽可能精确地测量螺纹杆旋转一圈时 Z 的变化及其不确定度。记录测量数据,并绘制示意图,来说明你的测量方法。

将装有铁磁流体的玻璃盒放置在凳子上,让凳子的中心孔位于玻璃盒的中心的下方,在实验过程中,任何时候都不要打开玻璃盒子的密封盖。把小磁铁放在螺纹杆上面。

将灯杆安装在灯杆上,并利用垫圈和蝶形螺母将灯杆固定到凳子上的孔中(如图7所示)。

C.2(3.5分)

利用球面镜的曲率半径 R 和图像放大倍数 M 之间的关系

$$R = \frac{2lM}{1-M}$$

其中 l 是物距,测量数据,并作图以确定上述关系中的常数 n 及其不确定度。

译注:C部分主要研究的是铁磁流体在未形成尖刺时的光学表面特性,将变形的流体的表面作为近似球面镜。注意,C.1中不仅是测量螺纹杆旋转一圈时 Z 的变化,而且要合理的设计实验方案,减少测量误差。C.2的关键是如何获得放大倍数 M 以及

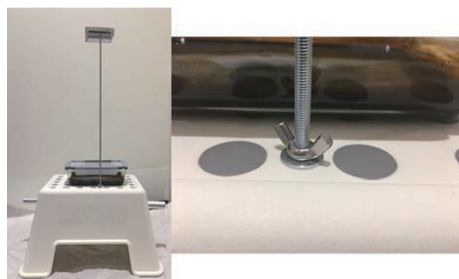


图7 C部分实验装置图

如何通过作图确定常数 n 。

D部分:有尖刺时的表面特性:尖刺的形成和消失(3.1分)

在较强外磁场作用下,流体表面会发生不稳定性,并形成前面玻璃瓶中观察到的尖刺。

D.1(0.5分)

将一个小磁铁和一个大磁铁叠放在一起,如图8所示,根据不稳定性理论给定的关系 $\sigma = \frac{g\Delta\rho\lambda^2}{4\pi^2}$,计算铁磁流体在空气界面处的表面张力。

D.2(1.0分)

磁铁从距离表面足够远(没有明显尖刺)开始,逐渐向流体靠近,测量在形成每个尖刺时的距离。再将磁铁逐渐远离铁磁流体,测量每个尖刺消失时的距离,并计算测量数据的不确定度。

D.3(1.0分)

绘制尖刺数量与距离 Z 之间的关系图。根据数据,绘出相应的光滑曲线,图上要清晰标明磁铁移动的方向。

D.4(0.6分)

当改变磁铁与流体表面的距离时,流体的重力势能、磁能和表面能也会随之改变。定性画出流体



图8 叠放在一起的小磁铁和大磁铁

的表面能和磁能与距离的关系图,并根据上一张图,标记出相应的临界点,注意关系图中要画出总体的变化趋势。

译注:D部分主要研究的是铁磁流体在形成尖刺时的表面特性。注意,因为磁铁有靠近和远离两个过程,在D.3中要绘制两条曲线,并注意测量数据的点的数量。注意分析在尖刺形成过程中,表面能和磁能的变化。

2. 铁磁流体的波脉冲(10分)

本实验将研究铁磁流体中波脉冲的主要特性。由于重力、表面张力、磁力的相互作用,流体会产生表面波脉冲。所谓波脉冲,没有单一的波长或频率。已知在没有外磁场的情况下,脉冲的传播速度为

$$v(d) = \kappa \sqrt{d}$$

其中, d 是流体的深度, κ 是比例常数。这个关系式适用于振幅较小的情况。当振幅较大时,由于脉冲的作用,流体深度发生变化,从而引起传播速度的变化,产生非线性效应。当产生的非线性效应不显著时,波脉冲基本可以保持其前沿轮廓。然而,当非线性效应显著时,脉冲传播时可以改变它们的轮廓,并常常在主脉冲的前面或后面产生波纹。

A部分:平面波脉冲(1.3分)

为了在铁磁流体中产生平面波,把玻璃盒放在木制底座上,玻璃盒的长边沿着底座边缘的档条,如图9(a)所示,档条可以使玻璃盒只沿一个方向移动。放置时要确保底座平整和水平。用手将玻璃盒子快速推动2厘米,可以产生波脉冲。为了确保

产生波脉冲的一致性,可以用蓝丁胶或木垫片标记盒子的起始位置和终止位置。建议多练习几次,使产生的波脉冲的一致性更好。

将凳子放在玻璃盒和底座的上面,如图9(b)所示,用灯来提供照明,以便能够清晰的观察流体中的波脉冲。确保可以产生平面波脉冲,并且眼睛可以通过凳子中央的孔观察到它们。一旦你观察到平面波脉冲,把相机放在孔上,并录制一个脉冲视频。请注意,可能需要调整照明和脉冲幅度,以便能录制出清晰的视频。可以用蓝丁胶将灯固定在合适的位置和使用铝箔挡光或者导光来调整照明。

在调整照明时,重要的是要考虑如何减少来自光源的光线直接进入相机,以及如何减少玻璃盒盖的反射。提醒:出于安全考虑,禁止将玻璃盒的盖子取下。针对不同的情况,有两种照明方案可以选择,一种是在凳子内产生照向各个方向的漫射光,另外一种是用光照射玻璃盒的侧面。

有关如何制作和播放视频,请参见附录A中的照相机说明。请注意,相机的默认自动设置即适合于制作实验所需视频,如果你难以清楚地记录观察到的效果,则需要调整照明,以便能够更清晰的观察波脉冲。

A.1(0.3分)

画出你的实验装置示意图,在示意图中,需要特别标出灯的位置和光的照射方向。

A.2 (0.8分)

从录制的视频中进行测量,计算铁磁流体中的波脉冲的速度。在进行测量时,绘制出视频关键帧的示意图,示意图要显示重要的特征,并标记所有所进行的测量。

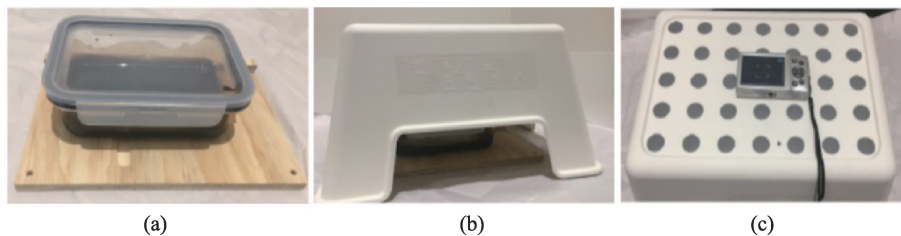


图9 A部分所需装置的照片,(a)木制底座上装有铁磁流体的玻璃盒,(b)放在底座和玻璃盒上方的凳子,(c)凳子上的相机

A.3 (0.2分)

计算测量不确定度,并给出计算公式。

译注:A部分主要研究的是平面脉冲波的产生及其特性。实验的关键是选择合适的照明方式,以便能清楚的观察到平面波脉冲,通过分析视频中波脉冲的位置和视频拍摄速度就可以得出平面波的速度。

B 部分:深部变化的流体中的波脉冲 (3.4分)

将尼龙螺栓拧入木底座边缘的孔中,如图10所示。通过调整螺栓可以调整流体深度,玻璃盒中的液体深度与距下缘的距离成线性关系(y 方向),深度在垂直方向上保持不变(x 方向)。我们选择 $y=0$ 时,液体的深度 $d=0$,液体的表面为 xy 平面。

因为铁磁流体深度的变化会导致波速的变化,如果在玻璃盒的一端产生一个平面波脉冲,其在传播时会变得弯曲。将装有铁磁流体的玻璃盒在木质底座上放置好,以便你能很好的测量脉冲速度随铁磁流体深度的变化。

B.1(0.3分)

i. 放置好实验装置后,画一个实验装置示意图,并在图上标出所有长度测量值及其不确定度,这些对于你确定流体的深度 d 与 y 的关系式非常重要。

ii. 写出 $d(y)$ 的表达式。

B.2(0.3分)

在你的容器中产生平面波脉冲,并定性地画出你观察到的1个脉冲。用字母A在图上标出脉冲传播最快的区域,用字母B在图上标出传播最慢的区域。

注意:你需要通过调整灯的位置,以便能清楚

地观察脉冲。为了调整照明,你可以使用蓝丁胶将灯固定在适当的位置,并利用铝箔进行遮挡、反射,从而进一步引导光线。

作为一级近似,我们假设最初沿 x 方向传播的波脉冲将保持在 x 方向传播。注意: (x,y) 是 t 时刻脉冲上各点的坐标。

B.3(0.3分)

i. 对于一个平面波脉冲,其在 $t=0$ 时处于 $x=0$ 位置,求出 x,y 与 t 之间的关系式。

ii. 在步骤B.2中的图中,用字母V标出玻璃盒中铁磁流体满足这一近似条件最合理的地方。

B.4(1.2分)

画出你的实验装置示意图,并在图上标出灯的位置和光的照射方向。

测量用于计算 κ 的数据,并将数据填入答题纸的表格中。计算数据的不确定度。在测量时,画出视频的关键帧的示意图,显示重要特征,并标记所有所做的测量。

B.5(1.3分)

i. 利用测量数据作图,计算 κ 的值,图中需要包含每个数据的误差棒。给出你用来计算 v 和 d ,以及不确定度 Δv 和 Δd 的详细公式。将用于作图的其他计算值记录在B.4的表格中。

ii. 从B.3部分得到描述波脉冲 x,y 与 t 之间的关系。根据你的数据,给出 x,y 与 t 需要满足的条件。

译注:B部分主要研究的是平面波脉冲在深度变化的流体中的传播特性。实验中通过调节尼龙螺栓就可以形成深度沿 y 方向变化的流体。实验的关键是通过分析平面波脉冲在传播过程中由于深度不同

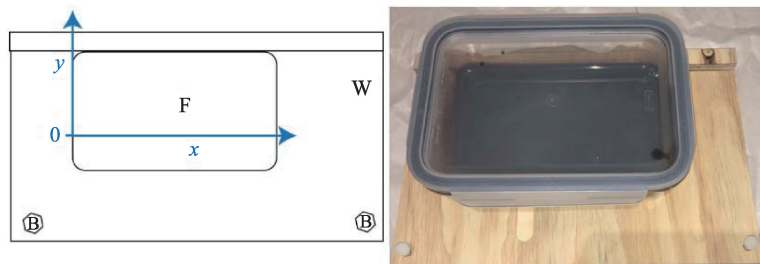


图10 铁磁流体深度变化实验装置及其示意图

而产生的变形,得出流体深度对传播速度的影响。

C部分:波和磁效应(1.8分)

注意:如果磁铁碰撞在一起很可能会破碎,破碎的磁铁很危险。注意:不会因为磁铁破碎,而给你更换新的磁铁。

正如你在问题1中观察到的现象,在外磁场存在的情况下,铁磁流体会移动到磁场最强的区域。你在这一部分的目的是定性研究波的磁效应。

设置铁磁流体容器,使铁磁流体的深度相同,就像生成平面脉冲时一样。接下来,在玻璃盒的下面放置两个小磁铁,如图11所示。磁铁放置时,应该使其两极对齐,当沿着底座的轨道槽推动磁铁使其侧边靠近时,它们会相互排斥,并且当玻璃盒放好后,让2块磁铁在不相互排斥的情况下尽可能的靠近。

一种安全的放置磁铁的方法是先把一个磁铁放在轨道槽里,然后把带有铁磁流体的玻璃盒放在轨道之上,然后你可以用轨道上的木垫片来放置第二块磁铁。先将第二个磁铁放在玻璃盒旁边,然后用木垫片沿着轨道槽推动到合适的位置。

可以用下面3种方法生成波脉冲:

- 1) 通过快速地将大的N42磁铁从铁磁流体附近抽离。
- 2) 滑动木质底座上的玻璃盒。
- 3) 滑动放有玻璃盒的木质底座。

C.1 (1.8分)

定性画出你观察到的上述三种方法产生的波脉冲的示意图,示意图要能够清楚的显示铁磁流体下的磁铁如何影响脉冲的波前。辨别你观察到的所有类型的波动现象。标记相应的数字,用于标明那种效应导致了观察到的脉冲传播的哪种特征。

1. 反射;2 折射;3 多普勒效应;4 拍;5 衍射;6 干涉(a驻波;b来自两个狭缝或波源;c来自衍射光栅;d其他)。

译注:C部分主要是定性的研究三种方法产生的平面波脉冲在外磁场下的传播特性。本实验用到的磁铁较多,注意不要将磁铁放置的太近,防止损坏磁铁,损坏的磁铁是不给更换的。

D部分:强磁场中铁磁流体的内部特性(3.5分)

这一部分你的目的是定量的研究磁铁对铁磁流体中脉冲传播的影响。

放置装有铁磁流体的玻璃盒,使铁磁流体具有恒定的深度,就像你之前产生平面波脉冲时一样。

用大的N42磁铁产生波脉冲,与C.1部分一样。调整照明,以便能清晰的观察产生的波脉冲。

D.1(0.2分)

定性画出用磁的方法在铁磁流体中产生波脉冲的示意图。

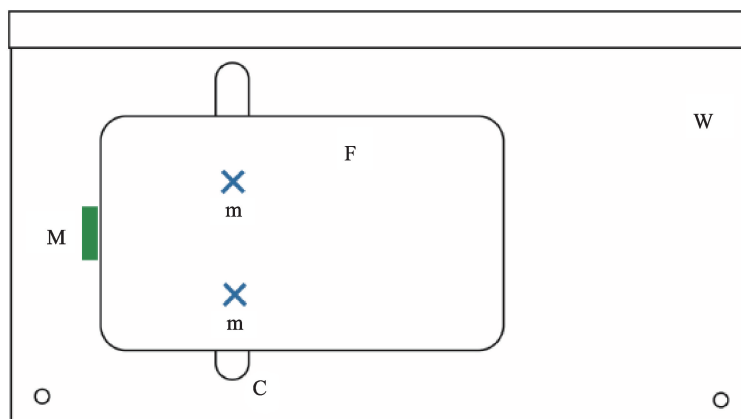


图11 用磁铁产生脉冲的示意图

图中显示了在快速移大磁铁之前,大磁铁M的放置位置,其中F是装有铁磁流体的玻璃盒,m是小磁铁,W是木制底座,C是轨道槽。

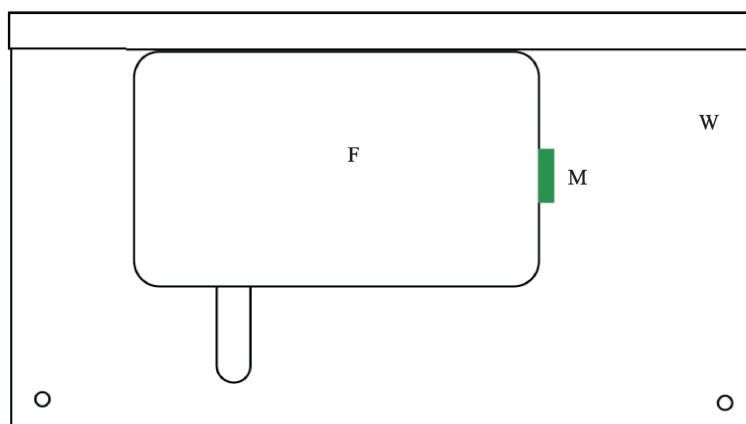


图12 产生波脉冲的磁铁放置示意图

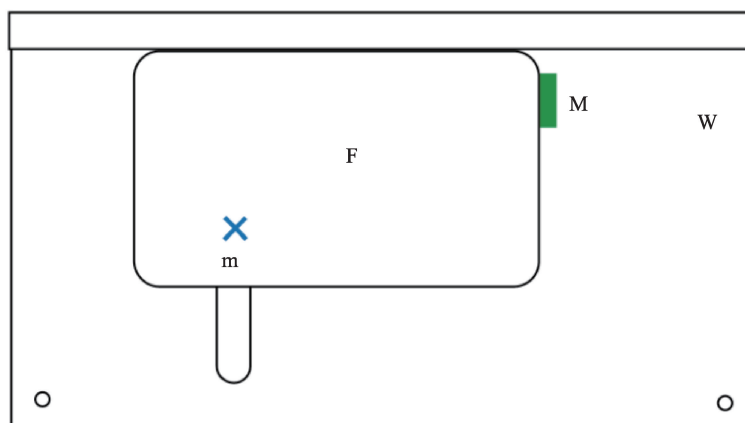


图13 装置示意图(x表示小磁铁的位置,M为大磁铁)

D.2(0.8)

确定脉冲的速度及其不确定度。画出实验装置示意图,图中要清楚地标出灯的位置和光的传播方向,记录下你使用的所有数据和公式。在进行测量时,为视频的关键帧绘制示意图,显示其重要的特征,并标记所有进行的测量。

现在把一个小磁铁放进木质底座的轨道槽里,然后把玻璃盒放在磁铁上面。它的位置可以用木垫片调整。

用磁的方法产生波脉冲,首先将大磁铁放置在上图中标记的位置,然后快速远离,观察脉冲在铁磁流体中的传播,包括小磁铁上方的强磁场区域。

D.3(0.4分)

定性地画出你观察到的波脉冲示意图,图中要清楚地显示铁磁流体下的磁铁如何影响波前。

D.4(0.3分)

画出示意图,用于确定铁磁流体下的磁铁对波

脉冲传播时间的影响,图中要清楚地标出磁铁的位置和灯的位置。

D.5(1.0分)

测量1个波脉冲通过小磁铁区域的时间及不确定度。绘制出视频关键帧的示意图,示意图要显示重要的特征,并标记所有进行的测量。

D.6(0.8分)

当铁磁流体经过磁铁上方时,其深度增加了,这是否可以解释波脉冲速度的变化?通过计算来证明你的回答。

译注:D部分主要是定量的研究磁铁对铁磁流体中脉冲传播的影响。本题需要根据前面提到的流体深度与波脉冲速度的关系以及磁铁对铁磁流体深度的影响,定量的分析磁铁对铁磁流体中脉冲传播的影响。

(第20届亚洲物理奥林匹克竞赛实验试题)