



# 铁磁流体的静态响应与波脉冲

## ——第20届亚洲物理奥林匹克竞赛实验试题解答

惠王伟<sup>1</sup> 宋峰<sup>2</sup>

(1. 南开大学物理科学学院 300071; 2. 南开大学物理科学学院 300071)

铁磁流体是一种新型的功能材料,其既具有固体磁性材料的磁性,也具有液体的流动性,在施加外磁场时具有强烈响应。铁磁流体的特殊性质使得其在光学调制、传感器、生物医学等领域有着重要应用前景。第20届亚洲物理奥林匹克竞赛实验题目就是研究铁磁流体的静态响应与波脉冲。本文在大赛提供的答案的基础上对本题进行了重新解答。

### 1 铁磁流体的静态响应(10分)

#### A部分:静态测试(1.6分)

##### A.1

本题主要是分析铁磁流体在稳定悬浮时的受力情况。在测量距离 $z$ 时,为了减小测量误差,需要多次测量。测量结果为 $z=(0.061\pm 0.004)$  m。

##### A.2

铁磁流体稳定悬浮时,其所受重力、浮力和磁力达到平衡状态,根据题目中提供的公式可以得到

$$\Delta\rho g = \frac{-3\chi B_z^2 a^4 l^2}{8\mu_0 Z^3}$$

利用上面的公式就可以计算出铁磁流体与周围透明流体的密度差

$$\Delta\rho = (15 \pm 6) \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$$

#### A部分评述

本题主要是研究铁磁流体在磁场中稳定悬浮时的受力情况。在测量距离 $z$ 时,解题者需要考虑如何测量才能减小误差,提高测量数据的准确度。没有测量示意图,测量结果和不确定度误差较大都会被扣掉相应的分数。在计算密度差时,主要是通过分析铁磁流体稳定悬浮时的受力情况,再利用题目中的给定的公式,就可以计算出密度差。注意:解题者需要推导出密度差的计算公式,没有公式会被扣掉0.3分(满分0.8分)。

#### B部分:磁相互作用—磁流体的表面张力(1.2分)

##### B.1

本题主要研究铁磁流体的表面张力。解题的关键是要找到铁磁流体的临界状态(尖刺刚刚形成时的状态)。多次测量并计算可以得到距离 $Z_{crit}=(22\pm 1)\text{mm}$ ,尖刺间距为 $\lambda=(6\pm 1)\text{mm}$ 。

##### B.2

利用题目给定的公式 $\sigma = \frac{g\Delta\rho\lambda^2}{4\pi^2}$ ,可以求得表面张力 $\sigma=(1.3\pm 0.6)\times 10^{-2}\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$ 。

#### B部分评述

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。本题主要是研究铁磁流体的表面张力。题目中给出了尖刺开始形成时表面张力的计算公式,以及 $Z_{crit}$ 、 $\lambda$ 的定义,所以解题的关键就是找到铁磁流体的临近状态。在实验过程中,我们需要进行多次测量,以减小测量数据的误差,提高数据的准确度。此外,为了方便测量,要将玻璃瓶平躺放置。

**C部分: 光学表面特性: 无尖刺时(4.1分)**

**C.1**

测量螺纹杆旋转一圈时 $z$ 的变化示意图如图1所示, $z$ 的变化为 $(0.8 \pm 0.02)$  mm。

通过改变 $z$ ,可以测量出台像的长度 $b$ 的变化,并通过计算得到其他相应的数值。表1给出了测量得到的数据以及计算值( $\lg z, \lg R$ )。

利用表1中的数据,对 $\lg R$ 和 $\lg z$ 进行线性拟合,如图2所示。直线的斜率就是常数 $n$ , $n$ 的范围为6~7。

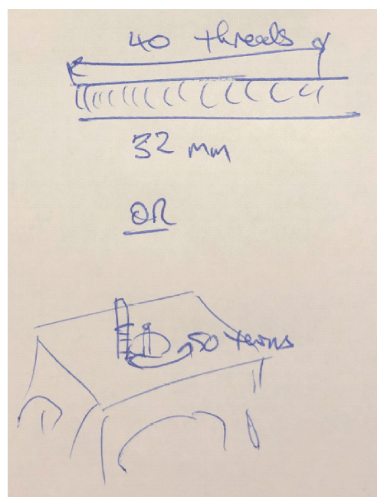


图1 C.1部分测量方法示意图

表1 光学法测量流体表面特性数据

turns	$b/\text{mm}$	$z/\text{mm}$	$M$	$R/\text{mm}$	$\lg z$	$\lg R$
31.50	19.00	37.20	0.95	1748.00	1.57	3.24
30.50	18.00	36.40	0.90	828.00	1.56	2.92
29.50	18.00	35.60	0.90	828.00	1.55	2.92
28.50	17.00	34.80	0.85	521.33	1.54	2.72
27.50	17.00	34.00	0.85	521.33	1.53	2.72
26.50	17.00	33.20	0.85	521.33	1.52	2.72
25.50	16.00	32.40	0.80	368.00	1.51	2.57
24.50	15.00	31.60	0.75	276.00	1.50	2.44
23.50	15.00	30.80	0.75	276.00	1.49	2.44
22.50	14.00	30.00	0.70	214.67	1.48	2.33
21.50	13.00	29.20	0.65	170.86	1.47	2.23
20.50	12.00	28.40	0.60	138.00	1.45	2.14
19.50	12.00	27.60	0.60	138.00	1.44	2.14
18.50	11.00	26.80	0.55	112.44	1.43	2.05
17.50	10.00	26.00	0.50	92.00	1.41	1.96
16.50	9.00	25.20	0.45	75.27	1.40	1.88
15.50	8.00	24.40	0.40	61.33	1.39	1.79
14.50	7.00	23.60	0.35	49.54	1.37	1.69
13.50	6.00	22.80	0.30	39.43	1.36	1.60
12.50	6.00	22.00	0.30	39.43	1.34	1.60
11.50	6.00	21.20	0.30	39.43	1.33	1.60
10.50	6.00	20.40	0.30	39.43	1.31	1.60
9.50	5.00	19.60	0.25	30.67	1.29	1.49
8.50	5.00	18.80	0.25	30.67	1.27	1.49

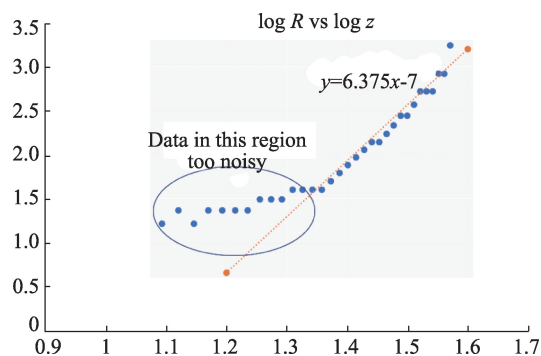


图2 lg R与lg z关系图

### C部分评述

由题意可知,当外加磁场处于临界值以下时,可以将流体的表面作为近似的球面镜,这样就可以利用光学的方法来测量流体表面的变形。C.1要求尽可能精确的测量螺纹杆旋转一圈 $z$ 的变化,这就需要测量螺纹杆旋转多圈时距离的变化,通过计算获得旋转一圈 $z$ 的变化,由于采用目视计数,需要进行多次测量,以减小测量误差。C.2中要想确定常数 $n$ ,关键是如何获得放大倍数 $M$ 。解题者可以通过测量台灯像的长度的变化确定 $M$ ,然后通过作图法对 $\lg R$ 和 $\lg z$ 进行线性拟合,由公式 $R = aZ^n$ 可知, $n$ 为直线的斜率。

### D部分:有尖刺时的表面特性:尖刺的形成和消失(3.1分)

#### D.1

通过移动磁铁,让玻璃瓶中形成尖刺,测量相关数据,再利用公式 $\sigma = \frac{g\Delta\rho\lambda^2}{4\pi^2}$ ,就可以计算得到表面张力 $\sigma = 2.3 \times 10^{-2} \text{N}\cdot\text{m}^{-1}$ 。

#### D.2

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螺纹杆旋转的圈数并计算距离。再将磁铁逐渐远离铁磁流体,测量每个尖刺消失时的距离。测量数据如表2所示。

#### D.3

根据D.2中的测量数据,绘制尖刺数量与距离 $z$ 之间的关系图,要求绘制出光滑的曲线,如图3所示。

表2 尖刺数量与磁铁距离

Spikes	Turns	$z$
1	0	0
3	3.5	2.8
4	4.16	3.328
6	6.33	5.064
8	7.82	6.256
10	11	8.8
10	2	7.2
8	5.66	4.272
6	6.5	3.6
5	7	3.2
4	9	1.6
3	11.82	-0.656
1	13.66	-2.128

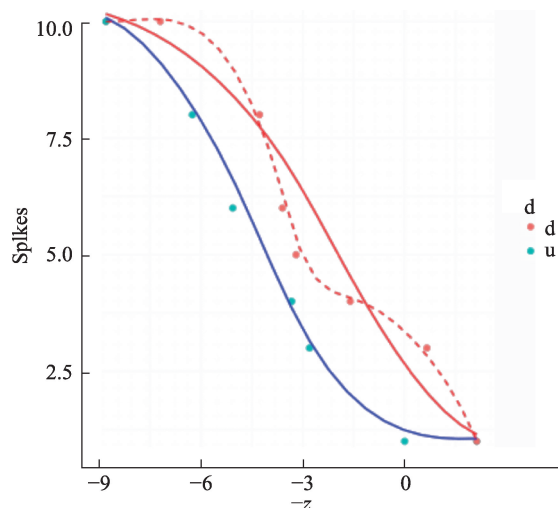


图3 尖刺数量与距离的关系图

#### D.4

流体的表面能和磁能与距离的关系示意图如图4所示。

流体的磁能随着磁铁的靠近会按幂指数规律下降,在尖刺形成时,磁能有轻微的释放,因此在尖刺的形成处应该有小的跳变,表面能的变化要缓慢一些,其在尖刺形成处跳变更加明显。由于铁磁流体与磁铁相互吸引,当距离减小时,大部分磁能用于提升磁铁,所以总能量是随着距离的减小而下降的。

### D部分评述

D部分主要研究的是铁磁流体表面有尖刺时的

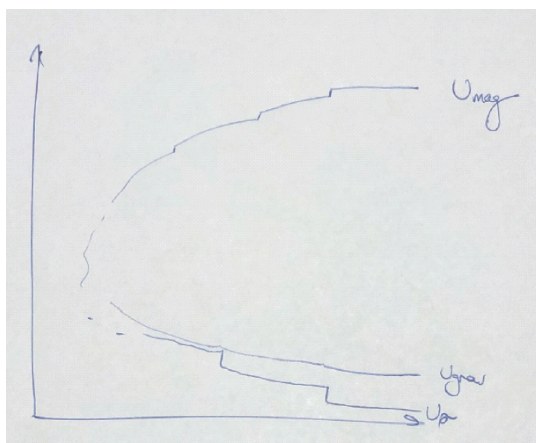


图4 表面能和磁能与距离的关系

特性,研究尖刺形成和消失的过程。在实验过程中,要按照题意测量尖刺形成和消失两个过程。D.3画图时,要根据测量数据绘制两条光滑的曲线,并标注磁铁运动方向。D.4考察了对磁流体能量变化的分析能力,示意图只需要定性的表示表面能和磁能与距离的关系,但要注意在尖刺形成时,表面能和磁能的变化。

## 2 铁磁流体的波脉冲(10分)

### A部分:平面波脉冲(1.3分)

#### A.1

A部分采用光从侧面直接照射铁磁流体的照明方式,实验装置示意图如图5所示,其中F为装有铁磁流体的玻璃盒,W为底座,L为台灯。

#### A.2

测量波脉冲速度关键帧如图6所示。透明网格条每格的长度为17.0/13.4 cm,视频的拍摄速度为25帧/每秒。通过分析视频得到数据如表3所示。计算可以得到波脉冲速度为  $v = (0.26 \pm 0.02) \text{m/s}$ 。

### A部分评述

本题主要研究的是平面波脉冲的产生及其特性。本题的关键是如何能够清晰的观察到波脉冲,这就需要解题者通过练习,能够产生一致性较好的波脉冲,并设计最佳的照明方案,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)

#### B.1

i. 实验装置示意图如图7所示

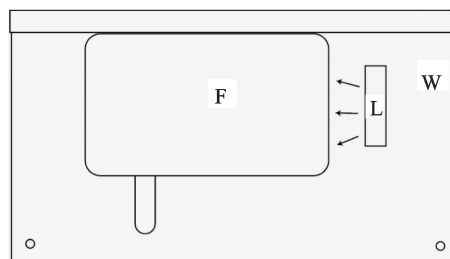


图5 A部分实验装置示意图

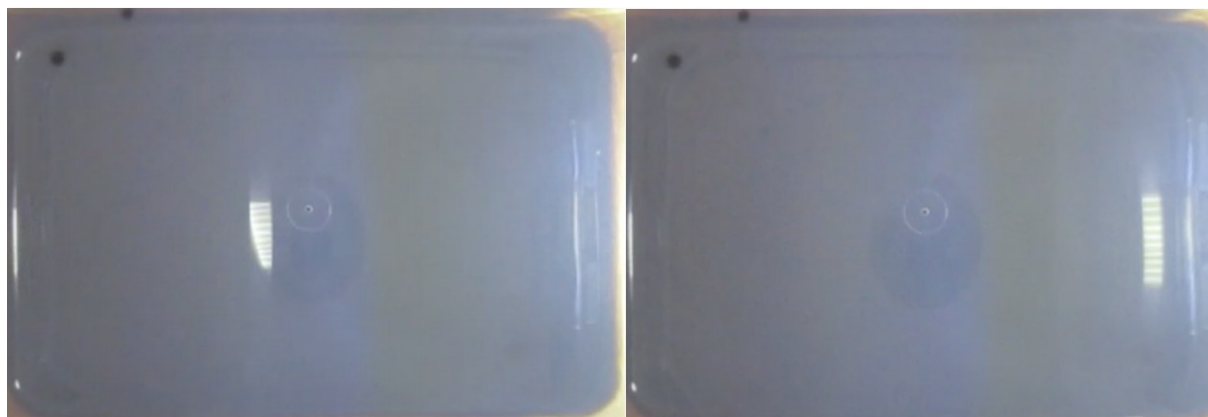


图6 波脉冲速度测量的关键帧

表3 波脉冲速度测量数据

Frames	Distance (graticule squares)	Distance (m)	Speed (m/s)
8	6.5	0.83	0.26
7	6.0	0.76	0.27
9	6.8	0.85	0.24

ii.由图7可知,流体深度呈线性变化,流体深度为  $d = y \tan \theta$ , 因为  $\tan \theta = \frac{h}{l} = 0.103 \pm 0.006$ , 所以  $d = 0.103y$

B.2

容器内产生的一个平面波脉冲示意图如图8所示,A位置为脉冲传播最快的区域,B位置为传播最慢的区域。

B.3

i.对于一个平面波脉冲,其在  $t=0$  时处于  $x=0$  位置,且  $x = vt$ , 已知  $v(d) = \kappa \sqrt{d}$ , 可以得出  $x = \kappa \sqrt{d} t$ 。由B.1可知  $d = 0.103y$ , 所以  $x = \kappa \sqrt{0.103y} t$ 。

ii.当传播方向与X方向的变化最大,以及深度最小非线性效应明显时,这种近似的有效性最低。这两种情况都发生在  $y$  很小的时候。图9中,用字母V标出的区域就是满足这一近似条件最合理的地方。

B.4

当脉冲是弯曲的时,漫反射照明更为合适,实验装置示意图如图10所示,其中F为装有铁磁流体的玻璃盒,W为底座,L为台灯。

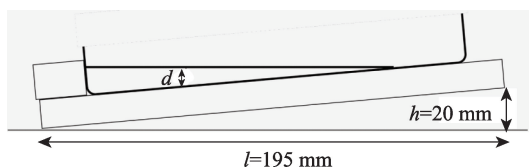


图7 B.1部分实验装置示意图

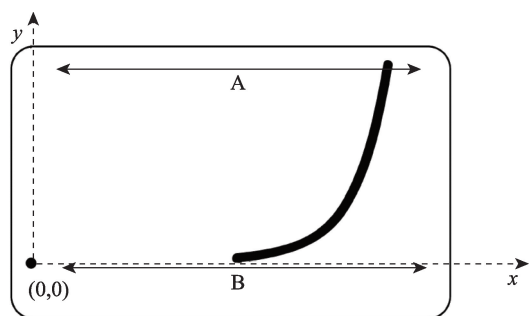


图8 平面波脉冲传播示意图

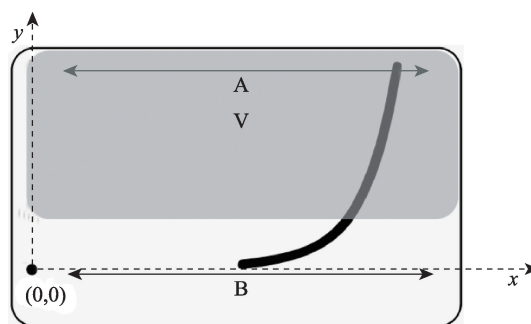


图9 满足近似条件区域示意图

图11为视频关键帧示意图。脉冲产生后第8帧视频(脉冲传播到  $t = 8/25$  s时)的测量数据如表4所示,其中  $x_0$  是脉冲前沿在  $y=0$  的处的  $x$  坐标,  $x_0 = 4.5$  gr sq.

B.5

将B.4中的测量数据作图,如图12所示,将  $y > 2$  的数据进行线性拟合,并转换为国际单位,得到斜率为  $0.280$  m。由B.3可知  $\kappa^2 t^2 \tan \theta = 0.280$  m, 计算

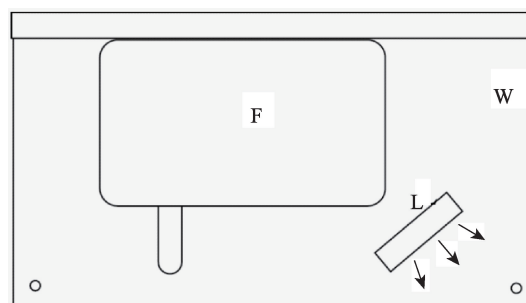


图10 B.4实验装置示意图

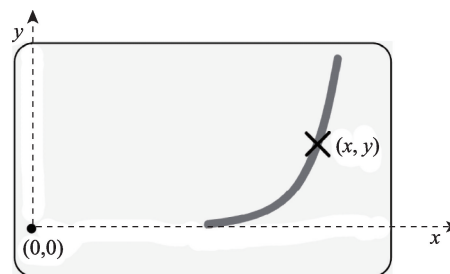


图11 波脉冲前沿测量数据关键帧示意图

表4 波脉冲前沿测量数据

$x$ (gr sq)	$y$ (gr sq)	$(x - x_0)^2$ (gr sq) <sup>2</sup>	$\Delta[(x - x_0)^2]$
5.0	0.2	0.25	0.02
6.0	0.3	2.25	0.15
7.0	0.6	6.3	0.4
7.8	1.4	10.9	0.6
8.5	2.2	16.0	0.8
8.7	2.8	17.6	0.8
9.0	4.0	20.3	0.9
9.3	5.0	23.0	1.0
9.8	6.0	28.1	1.1
10.0	8.0	30.3	1.2
9.9	7.0	29.2	1.2

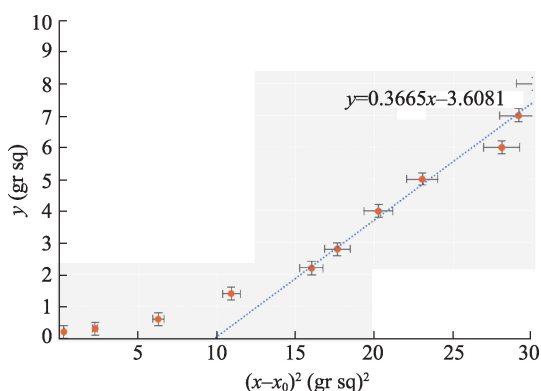


图12 波脉冲前沿测量数据图

可以得到  $\kappa = (5.9 \pm 0.5) \text{m}^{0.5} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

### B部分评述

本题主要研究平面波脉冲在深度变化的流体中的传播特性,考察解题者对实验现象的分析能力。流体深度的变化会导致波脉冲传播速度的变化,从而导致波脉冲的变形,通过对关键视频帧中波脉冲的分析,可以获得所需的测量数据。本题题目步步推进,需要解题者认真读题,从题目中总结出给定的实验条件和提示性信息,梳理结题思路。

### C部分:波和磁效应(1.8分)

#### C.1

利用三种方法产生的波脉冲示意图如图13所示。

实验图中,  $t_1 < t_2 < t_3$ , 滑动玻璃盒产生的波脉冲的特征包括小磁铁干扰产生的折射、波前相遇产生的干涉和末端产生的反射。活动木质底座产生的波脉冲的特征包括折射、反射和衍射。磁的方法产生的波脉冲的特征包括侧壁和末端产生的反射、经过磁铁时的衍射和波的干涉。

### C部分评述

本题主要是定性的研究不同方法产生的平面波脉冲在外磁场下的传播特性,主要考察解题者对实验现象的分析能力。解题的关键是分析那种效应导致了波脉冲前的变化,尤其是在穿过磁铁位置时波脉冲的变化。

### D部分:强磁场中铁磁流体的内部特性(3.5分)

#### D.1

用磁的方法在铁磁流体中产生的波脉冲示意图如图14所示。

#### D.2

照明方式和A部分一样,如图5所示,采用直接照明的方式。传播速度的测量与A.2、A.3类似,示意图如图15所示。两次测量 $y$ 的位置,利用时间差计算速度。

将小磁铁放进木质底座的轨道槽后,可以通过玻璃盒的侧面观察并测量小磁体上方磁流体凸起

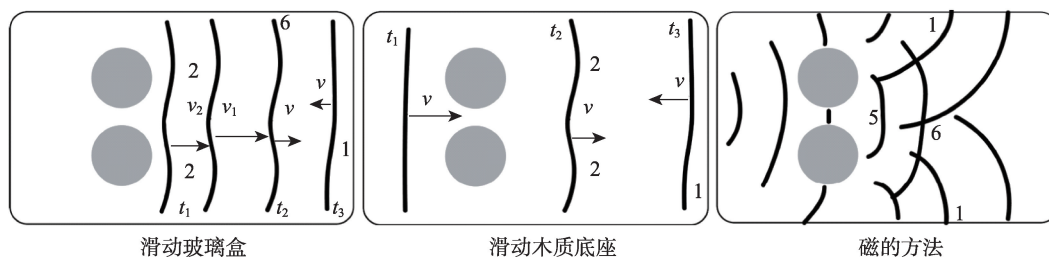


图13 波脉冲示意图

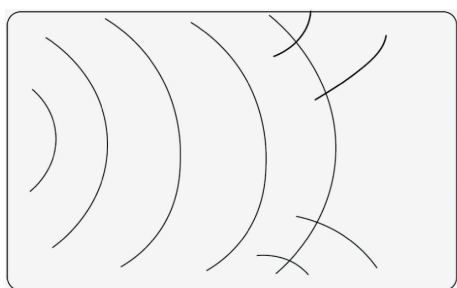


图14 D.1部分产生的波脉冲示意图

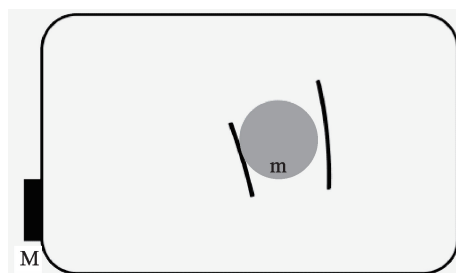


图18 D.5关键帧示意图

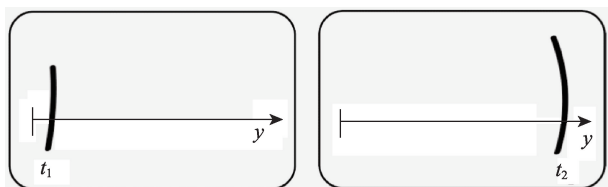


图15 速度测量关键帧示意图



图16 放入小磁铁后波脉冲传播示意图

的尺寸。

### D.3

观察到的波脉冲示意图如图16所示,图中黑色表示磁铁x上观察到的脉冲,蓝色代表脉冲经过该距离后的预期位置。

### D.4

示意图如图17所示,照明方式采用漫反射照明。

### D.5

视频关键帧的示意图如图18所示。在8个视

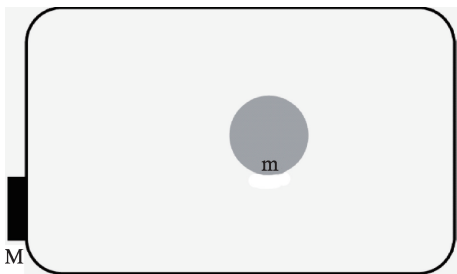


图17 D.4装置示意图

频帧的时间内,波前传播了0.8 gr sq,波脉冲大约用2帧的时间穿过流体凸起的区域,由此可以计算出波脉冲在小磁铁上方凸起处的速度约为0.35 m/s。

### D.6

当铁磁流体经过磁铁上方时,其深度增加了。通过玻璃盒的侧面可以估测流体凸起处的深度约为9 mm,无磁铁处的深度约4 mm。由  $v(d) = \kappa \sqrt{d}$  可知,波脉冲在流体凸起处的速度是无凸起处的1.5倍,速度为  $v = 1.5 \times 0.26 \text{ m/s} = 0.39 \text{ m/s}$ ,与测量结果基本符合。

## D部分评述

本题要求定量的研究磁铁对铁磁流体中脉冲传播的影响。本题中用到的波脉冲产生方法和传播速度测量方法与前几题相似。本题的关键是分析小磁铁的放入对波脉冲传播速度的影响。小磁铁会导致其上方的磁流体产生凸起,从而导致磁流体深度的变化,深度变化又会引起传播速度的变化。因为要定量分析,所以需要对小磁铁上方磁流体的凸起的直径和高度进行测量。

## 试题评述

本次竞赛试题主要是研究铁磁流体的相关性,铁磁流体对于读者来说可能比较陌生,但在实验过程中我们会发现,题目中提供了大量的提示性信息和公式,测量的物理量也多为距离、时间等熟悉的物理量,主要考察解题者的基本实验操作能力和实验现象的分析能力。竞赛题目分为两部分,分别为铁磁流体的静态相应和波脉冲,需要利用静态

和动态的测试方法研究铁磁流体的特性。试题内容既包含观察实验现象、画装置示意图、画实验现象草图等定性的实验内容,也包含定量分析的内容。本试题实验内容较多,要求解题者在实验过程中,仔细阅读题目,快速提取有用的信息,并按照题目要求合理的设计实验方案,尽量减小实验误差,提高测量数据的准确度。

### 试题背景

铁磁流体是一种新型的磁性材料,是由直径为纳米量级的磁性固体颗粒、基载液体以及分散剂三者混合而成的一种稳定的胶状液体。它既是一种流体,也是一种磁性物质,所以其既遵循流体力学规律,行为也受磁场的控制。铁磁流体只有在外加磁场时才表现出磁性。本次实验竞赛试题利用静态和动态的实验测试方法,通过分析铁磁流体在外界磁场下的静态响应和波脉冲来研究铁磁流体特性。下面是铁磁流体的特性介绍。

**稳定性:**铁磁流体具有胶体稳定性和组成成分的稳定性。胶体状态的稳定性就是指固相磁性颗粒的沉淀和集聚问题,而保持颗粒悬浮的弥散状态的驱动力是颗粒的Brown运动<sup>①</sup>。微小的磁性固体颗粒在基载液中做无序的Brown运动,以及分散剂的加入,使得磁性颗粒能够稳定的悬浮在基载液中,不沉淀和集聚。当铁磁流体处于强外磁场时,其表面会发生变形,表面能、重力势能和磁能发生变化,具有界面的不稳定性。这种变形只在外界磁场高于临界磁场时才会发生。由于铁磁流体具有很高的磁化系数,所以一块小磁铁就可以使外接磁场达到临界磁场。

**磁化特性:**铁磁流体最重要的物理性质是它的磁化性能,其磁化性能源于磁流体中的磁性粒子。铁磁流体可以算作超顺磁材料,但其磁化机理与顺磁性物质不一样。铁磁流体有两种磁化机理,一种是固体微粒内的磁畴旋转,另外一种是在微粒在外磁

场下自身旋转,而且铁磁流体在被磁化后再退磁,一般情况下没有剩磁和矫顽力,没有磁滞现象<sup>①</sup>。

**粘度:**铁磁流体的粘度比其基载液体粘度要大,主要取决于固体粒子所占的体积分数和其粒度,固体粒子和基液之间的摩擦是粘度增大的原因<sup>①</sup>。粘度会受到外磁场和温度的影响,且外磁场对铁磁流体的粘度的影响具有方向性。

**光学性质:**铁磁流体一般是不透明的,如果只取一层极薄的铁磁流体薄膜,这层薄膜是透光的。磁流体在外界磁场的作用下,固体颗粒会沿着磁场方向做定向排列,形成丰富的微观结构,这些微观结构对光产生不同的影响,使其具有特殊的光学性质,而且这些光学性质可以通过磁场来控制。

### 参考文献

① 池长青. 铁磁流体力学[M]. 北京航空航天大学出版社, 1993.

\*\*\*\*\*

欢迎读者朋友参与“物理奥赛”系列专题的有奖竞答活动,并在答案公布前将您的解答发送至 aosai@ihep.ac.cn 邮箱。对于参与并答对每期题目的前20名读者,编辑部将赠阅1年《现代物理知识》杂志。

