

第 19 届 CPHOS 物理竞赛联考

实验试题

本试题于 2024 年 3 月 8 日 8:00 发布，最后更新于 2024 年 3 月 7 日 16:48。

CPHOS 物理竞赛联考是开放性公益性的考试，有意向参与的教师和学生可以关注“CPHOS”微信公众号进行报名，报名后方可参与联考。请使用“CPHOS 物理竞赛联考”微信小程序完成答题卡上传、阅卷、成绩查询等操作。联系方式见试题末尾。

答题卡上传

2024/03/08 16:00 - 2024/03/11 10:00

阅卷

2024/03/12 12:00 - 2024/03/16 18:00

非正式成绩

2024/03/16 20:00

成绩申诉

2024/03/16 20:00 - 2024/03/17 18:00

正式成绩

2024/03/17 22:00

考生须知

- 实验试题共 **9** 页，实验答题卡共 **3** 页，答题时间 **60** 分钟，试题满分 **80** 分。
- 请在答题卡的指定答题区域内答题，试题和草稿纸上的内容将不会作为评分参考，不可申请答题卡加页。
- 若发现试题存在问题，请向领队（教练）反映，由其转达至相关微信群聊。
- 试题答案及相关分析均会在官方网站 www.cphos.cn 上发布。

A. 磁滞回线（35 分）

1. 基本原理

将物体放在外磁场 H 中，物体会被磁化，内部产生磁场。记材料内部磁化强度为 M ，磁感应强度为 B ，则可定义磁化率、相对磁导率如下：

$$\chi_m = \frac{M}{H}$$

$$\mu_r = \frac{B}{\mu_0 H}$$

按照磁化率的不同，材料可大致分为三类：抗磁性（ $\chi_m < 0$ ， $10^{-5} \sim 10^{-6}$ 量级）、顺磁性（ $\chi_m < 0$ ， $10^{-2} \sim 10^{-4}$ 量级）、铁磁性（ $\chi_m \gg 1$ ）。不同温度下，磁化率会有不同。

A.1（4 分）

A.1.1 请分别选择三类材料的磁化率绝对值随温度变化的特性，并说明实际应用于电磁铁、变压器的是哪一种材料。（2pts）

- A. 随温度线性增大
- B. 几乎不随温度变化
- C. 随温度升高而减小

除了磁导率高以外，铁磁材料还具有特殊的磁化规律。对一个处于磁中性状态（ $H =$

0, $B = 0$) 的铁磁材料加上由小变大的磁场 H 进行磁化时, 磁感应强度 B 随 H 的变化曲线称为起始磁化曲线, 它大致分为三个阶段:

- ①可逆磁化阶段, 当 H 很小的时候, B 随 H 变化可逆, 见图 30-1 中 OA 段, 若减小 H , B 会沿 AO 返回至原点;
- ②不可逆磁化阶段, 见图 30-1 中 AS 段, 若减小 H , B 不会沿 SA 返回 (比如当磁场从 D 点的 H , 减小到 $H - \Delta H$, 再从 $H - \Delta H$ 增大到 H_D , $B - H$ 轨迹会是图中点线所示的回线样式);
- ③饱和磁化阶段, 见图 30-1 中 SC 段, 在 S 点材料已经被磁化至饱和状态, 继续增大 H , 磁化强度 M 不再增大, 由于 $B = \mu_0(M + H)$, B 会随 H 线性增大, 但增量极小。图中 H_s 和 B_s 表示 M 刚刚达到饱和值时的 H 和 B 的值, 分别称为饱和磁场强度和饱和磁感应强度。

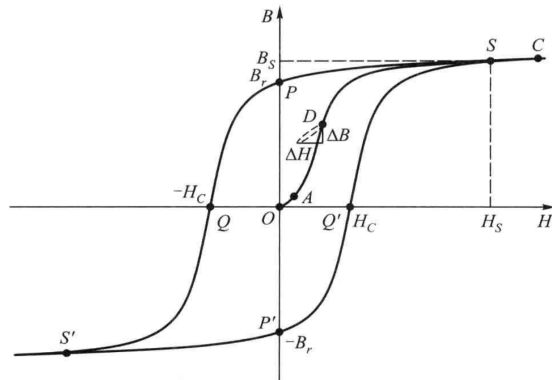


图 A.1 铁磁材料的起始磁化曲线和饱和磁化曲线示意图

如果将铁磁材料磁化到饱和状态 (图 1 中 S 点) 后再减小磁场 H , 那么磁感应强度 B 会随 H 减小而减小, 但不沿起始磁化曲线 SAO 减小, 而会沿着 SP 这条更缓慢的曲线减小。当 H 减小至 0 时, B 并不为零, 此时的 B 值称为剩余磁感应强度 B_r 。只有加上一个反向磁场 H , B 才变为 0, H 称为矫顽力 H_c 。当反向磁场达到 $-H_s$, 铁磁材料达到反饱和磁化状态 S' 。而若 H 从反向饱和值 $-H_s$ 变到 0, 再增大至正向饱和值 H_s 时, B 会沿曲线 $S'PQS$ 返回至正向饱和值 B_s 。曲线 $S'PQS$ 与 $SPQS$ 以原点 O 为中心对称, 它们形成的闭合曲线 $S'PQSPQS$ 叫做饱和磁滞回线。饱和磁滞回线反映了磁化场由 H_s 变到 $-H_s$ 再变回到 H_s 往复一周的变化过程中, B 随 H 的往复变化情况。

A.1.2 在对材料进行准静态的磁化时, 损耗来源于磁滞损耗。在交流动态磁化时, 除了磁滞损耗以外, 还会有涡流损耗和剩余损耗。试定性解释以下现象: 一般金属 (包括合金) 所组成的金属磁性材料在高频下的涡流损耗高于金属氧化物在相同外场下的涡流损耗。(2pts)

2. 搭建实验电路

在本部分中, 考虑定量地测量样品的动态磁滞回线以及一些性能参数。可能用到的实验元件及其参数如下:

- a. 绕有三组密绕线圈的环形磁芯 ($N_1 = N_2 = N_3 = 150$, $l = 0.130\text{m}$, $S = 1.24 \times 10^{-4}\text{m}^2$), 符号 M
- b. 可调万用电源 2 个 (频率为 f , 电压振幅为 U_1 , $f = 0$ 时视作稳定直流电源), 符号 E
- c. 可调电阻箱 2 个: 阻值范围 $0 \sim 99.9\Omega$, 符号 R_1 ; 阻值范围 $0 \sim 99999.9\Omega$, 符号 R_2
- d. 可调电容箱 1 个, 容值范围 $0 \sim 999.9\mu\text{F}$, 符号 C
- e. 双通道模拟示波器一个, 通道记为 CH1、CH2
- f. 滑动变阻器一个, 最大阻值 50Ω , 符号 R_p
- g. 数字电流表, 量程固定为 20A , 符号 A

h. 电感 1 个, 大小为 10mH , 符号 L

i. 单刀单掷开关 2 个, 符号 S

j. 导线足量

画图作答时, 请在所选用元件旁标注元件符号。以上元件不一定需要全部使用; 若元件 X 被使用了多次, 请用脚标 $X_1, X_2 \dots$ 加以区分。

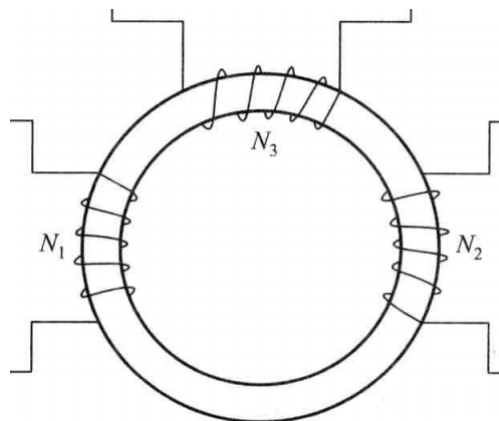


图 A.2 电路图

A.2 (18 分)

A.2.1 假设 N_1, N_2, N_3 分别对应于交流励磁回路、电磁感应回路、直流励磁回路, 其作用分别是提供交流磁场、测量磁感应强度、提供直流偏置磁场。试在答题纸上三个方框中分别画出三个回路的电路图, 可以利用 $a \sim j$ 中列出的元件, 电源需注明 AC/DC , 其余元件无需标明具体数值。(7pts)

A.2.2 如果你使用了电感 L , 请说明其具体作用。(2pts)

A.2.3 关于测量动态磁滞回线时双踪示波器的使用, 以下设置正确的是: (2pts)

- a. 电源、CH1、CH2 必须要共地; 二者均选择 AC 耦合; 采用 Y-T 模式, CH1、CH2 同步显示
- b. 电源、CH1、CH2 不需要共地; 二者均选择 AC 耦合; 采用 Y-T 模式, CH1、CH2 同步显示
- c. 电源、CH1、CH2 必须要共地; 二者均选择 DC 耦合; 采用 Y-T 模式, CH1、CH2 同步显示
- d. 电源、CH1、CH2 不需要共地; 二者均选择 DC 耦合; 采用 Y-T 模式, CH1、CH2 同步显示
- e. 电源、CH1、CH2 必须要共地; 二者均选择 AC 耦合; 采用 X-Y 模式显示
- f. 电源、CH1、CH2 不需要共地; 二者均选择 AC 耦合; 采用 X-Y 模式显示
- g. 电源、CH1、CH2 必须要共地; 二者均选择 DC 耦合; 采用 X-Y 模式显示
- h. 电源、CH1、CH2 不需要共地; 二者均选择 DC 耦合; 采用 X-Y 模式显示

A.2.4 诚如前述, 样品加上磁场 H 后产生的磁感应强度 B 不仅与 H 有关, 同时也与磁化历史有关。如果希望研究样品的起始磁化性质, 在进行正式定量测量前需要进行什么预处理? 并给出具体做法。(2pts)

正确连接好仪器, 并完成样品的预处理后, 进行预实验。设置 $R_1 = 2\Omega, C = 10.0\mu\text{F}, f = 100\text{Hz}$ 。分别在 $R_2 = 50\text{k}\Omega, 5\text{k}\Omega, 1\text{k}\Omega$ 下, 粗测得磁滞回线形状如下。

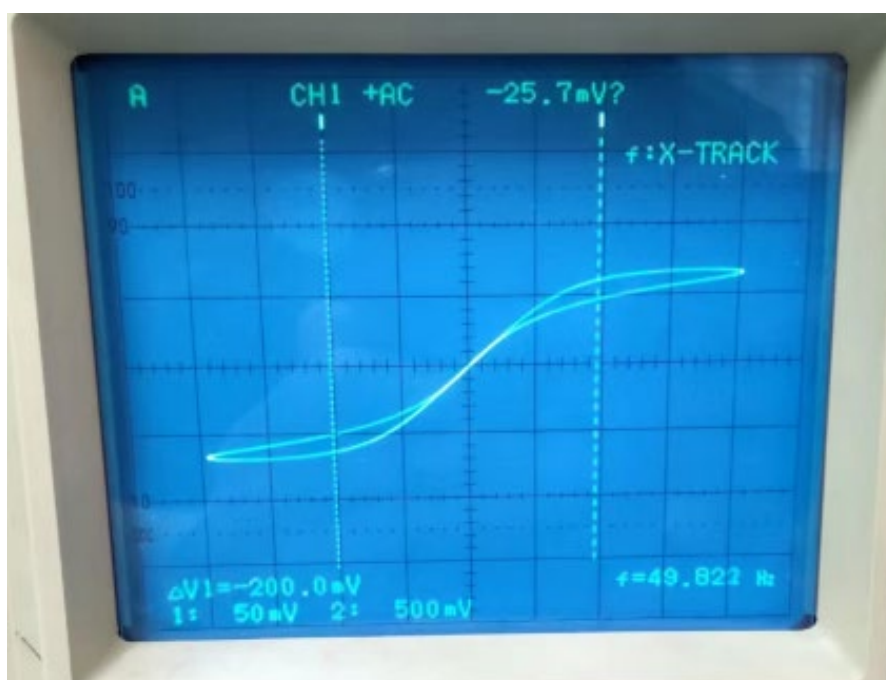


图 A.3

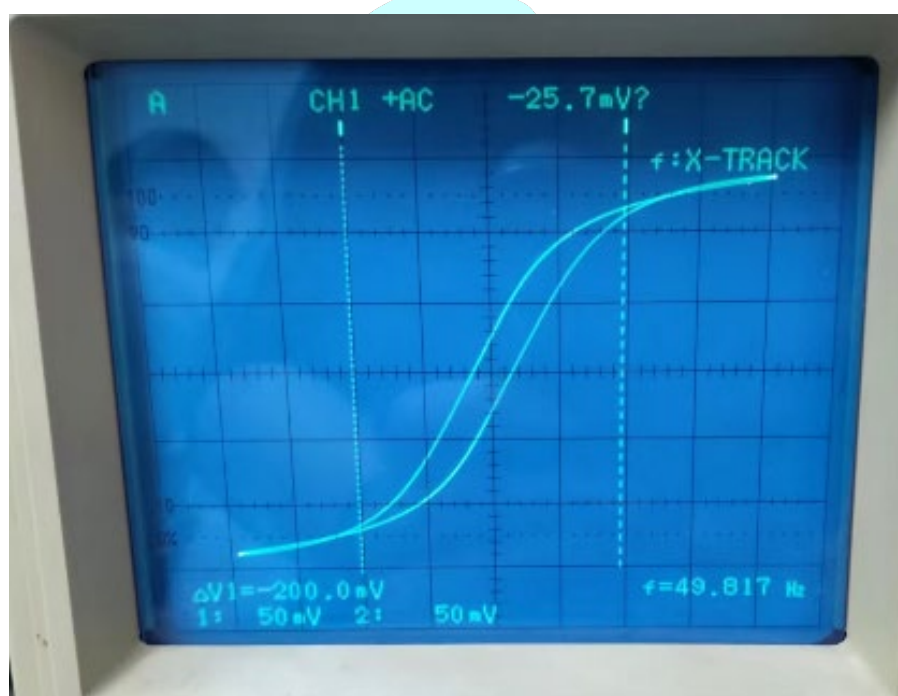


图 A.4

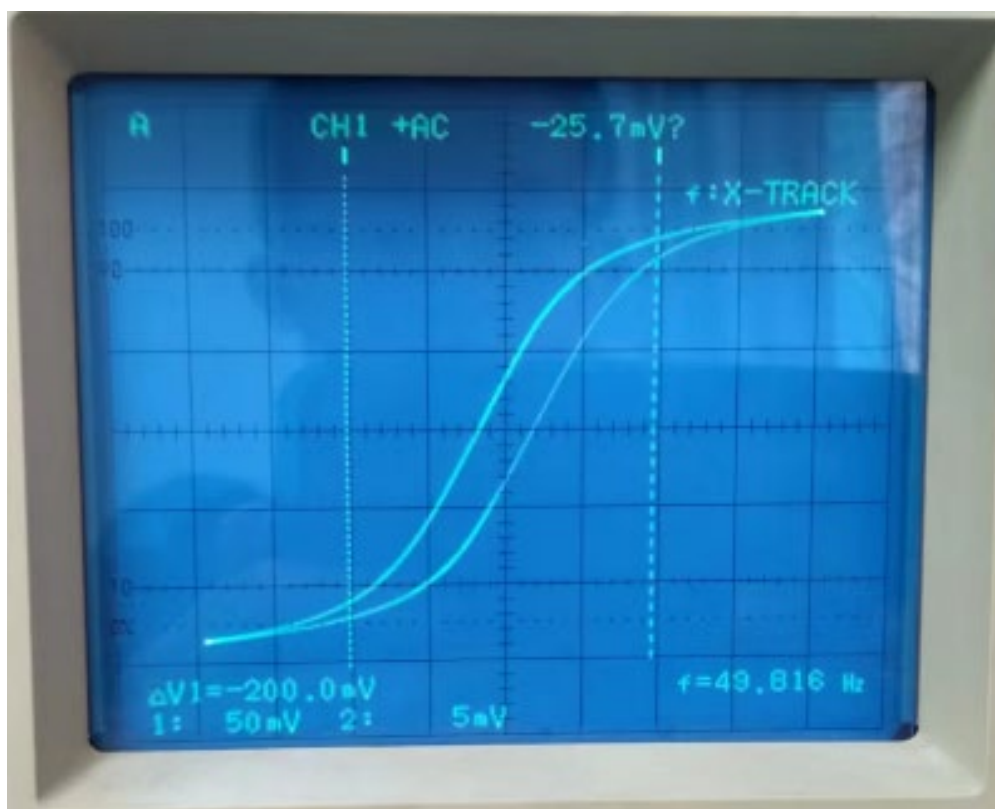


图 A.5

A.2.5 请分别写出图 A.3、A.4、A.5 对应的参数 R_{2A} 、 R_{2B} 、 R_{2C} 。(3pts)

A.2.6 什么参数下测得的磁滞回线更接近真实曲线?根据预实验的结果,正式测量时参数 R_2 、 C 、 f 间应注意满足什么条件? (2pts)

3.测量动态磁化曲线

在本部分中,正式对样品进行测量。所取参数为 $R_1 = 2\Omega$, $C = 10.0\mu\text{F}$, $f = 100\text{Hz}$, $R_2 = 50\text{k}\Omega$ 下,测得磁滞回线的一支如下表。实验中,我们将使用光标刻度线来测量待测电压。所谓的光标刻度线是示波器屏幕上的两条平行的可移动虚线,由旋钮控制;X、Y 方向各有一组,一共 4 条。扭动旋钮可以改变虚线位置,而示波器可以直接显示出两条线的间距所代表的电压。示波器的仪器误差与线宽都会带来结果的误差。其中仪器误差可以表示为

$$\sigma = 0.3\% \times \text{量程} + 2\% \times \text{读数}$$

线宽是指屏幕上所显示的荧光曲线总是有一定宽度的,实验者调控光标旋钮的旋转又是离散的,因而无法保证光标恰好对准真正的磁滞回线曲线。此效应引发的误差被称作线宽误差。本次实验中,X、Y 方向的偏转因数分别为 100mV/DIV 、 5mV/DIV 。光标平移分度分别为 0.5mV 、 0.05mV 。调整示波器的辉度与聚焦,最佳实验曲线在 X、Y 方向的线宽约是该方向光标平移分度的 3 倍。

数据点	U_H/mV	$H/(\text{A} \cdot \text{m}^{-1})$	U_B/mV	B/mT
1 (正向饱和)	279.0		14.30	
2	260.0		14.15	
3	200.0		13.85	
4	119.0		13.00	

5	78.0		11.90	
6	40.0		10.15	
7（剩磁点）	0.0		4.70	
8（矫顽力点）	-26.0		0.0	
9	-62.0		-7.60	
10	-87.0		-10.10	
11	-120.0		-12.10	
12	-162.0		-13.10	
13（反向饱和点）	-235.0		-14.40	

A.3（13 分）

A.3.1 请补全上表，并在坐标纸上画出磁滞回线。（10pts）

A.3.2 写出样品的矫顽力与剩磁，并计算不确定度。（3pts）

B. 声光衍射（45 分）

实验背景：大家熟知的光栅衍射实验用的都是玻璃制成的光栅，然而水波也可以形成光栅，既可以是透射光栅，又可以是反射光栅。利用声信号激起水波从而形成光栅，以测量各种物理量，这便是声光衍射技术的应用。本实验旨在讨论声光衍射技术的两个典型应用：测声速和测表面张力系数。

Part 1.透射式：超声光栅测声速

实验仪器：超声光栅（压电陶瓷片与超声池）、超声光栅仪（可以调节并读出频率）、分光计、测微目镜、高压汞灯（ $\lambda_{\text{yellow}} = 578.0\text{nm}$, $\lambda_{\text{green}} = 546.1\text{nm}$ ）

实验目的：利用超声光栅测量超声波在水中的传播速度



图 B.1：超声光栅实物图

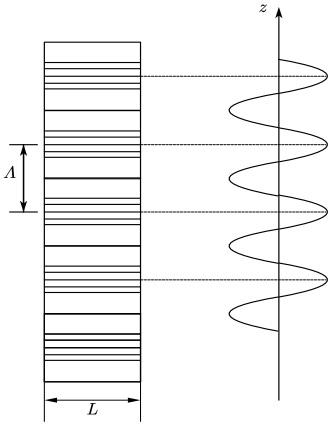


图 B.2：超声光栅原理图

实验内容：

1.理论准备

如图 2，在水中一束超声波沿z方向传播，在壁的反射下形成驻波，由于声波是弹性纵波，会使介质密度在时间和空间上发生疏密相间的周期性变化，相应的，折射率也发生周期性变化，即：

$$n = n_0 + \Delta n \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{\Lambda} z\right) \tag{1}$$

考虑到光通过液体的这段时间中，波形的变化可忽略，故可视为：

$$n = n_0 - \Delta n \sin\left(\frac{2\pi}{\Lambda} z\right) \quad (2)$$

液体压缩区折射率高，液体稀疏区折射率低，从而载有超声波的液体可视为一个相位光栅，光栅常量等于超声波波长。

B.1 (7 分)

B.1.1 设超声波波长为 Λ ，写出光栅方程。（ k 级衍射角为 θ_k ，光波长为 λ ）

B.1.2 由于超声池有一定的宽度 L ，超声光栅实际上是一个三维体光栅，但在一定的条件下，我们可以把它近似看作面光栅。作为体光栅时的衍射称为布拉格衍射，作为面光栅时的衍射称为拉曼-奈斯衍射，本题考虑的情况是拉曼-奈斯衍射。下面的图 B.3 可以帮助我们理解何时面光栅近似是有效的。请利用图 B.3，导出拉曼-奈斯衍射条件。（可以使用小角近似，用 Λ ， λ ， L 表示）

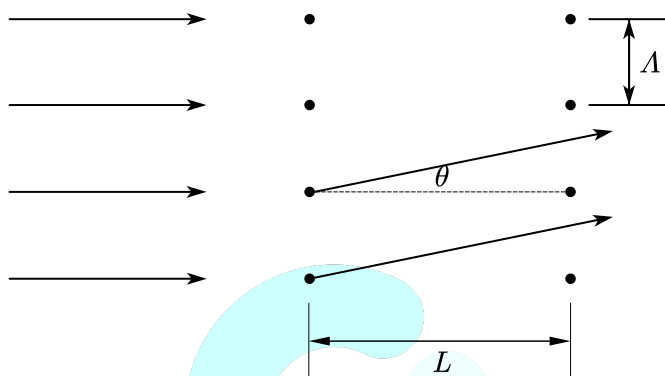


图 B.3：拉曼-奈斯衍射示意图

B.1.3 设望远镜物镜焦距为 f ，超声波频率为 f_s （可调且可从超声光栅仪频率窗上读出），由测微目镜代替望远镜目镜测得衍射条纹间距为 x ，试导出声波在水中的传播速度 v_s 的表达式。

B.1.4 试解释为什么要用测微目镜代替望远镜目镜。

B.1.5 依据驻波理论，相邻波腹间和相邻波节间的距离都等于半波长，试解释为什么超声光栅的光栅常量等于超声波的波长。

2. 测量条纹间距，计算声速

打开汞灯，将分光计调节至工作状态，然后将超声光栅（已盛水）置于载物台上（有固定架），转动载物台，使光线正入射。

B.2 (10 分)

B.2.1 写出分光计调节到工作状态的要求。

B.2.2 说明在望远镜目镜中看到何种现象表明光线正入射。

B.2.3 在望远镜目镜中观察衍射条纹，若此时衍射条纹级数稀少或只有 0 级，试说明此时应如何调节使得级数增多（调好后一般应能看到 3 级及以上的条纹）。

B.2.4 用测微目镜替代望远镜目镜，调整其位置使得看清谱线，测量数据如表 1 所示，请据此计算水中的声速 v_s 及其不确定度。（作为简化，你可以将黄光和绿光的声速结果取算术平均值）

表 B.1：超声光栅实验数据表（室温 $T_0 = 20^\circ\text{C}$ ，物镜焦距 $f = 170\text{mm}$ ，频率 $f_s = 11.21\text{MHz}$ ）

级次	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
位置(黄光)	/	2.479	3.199	3.942	4.700	5.429	/

/mm							
位置(绿光)	/	2.552	3.250	3.942	4.649	5.352	/
/mm							

(附注: ± 3 级谱线可见但太暗, 难以定位, 故没有进行测量)

B.2.5 实验时还有一条蓝紫色的光, 但观察发现此光谱线位置有较大视差, 因此测量声速时没有选用蓝紫光的数据, 试解释为什么蓝紫光视差较大。(写出一条可能的原因即可)

Part 2 反射式: 声光衍射测表面张力系数

实验仪器: 低频信号发生器, 表面波激发器, 水槽, 水, 氦氖激光器 ($\lambda=632.8\text{nm}$), 卷尺, 钢尺, 读数显微镜。

实验目的: 测量室温下水的表面张力系数。

实验内容:

1. 理论准备:

实验装置示意图如图 4 所示, 低频信号发生器与表面波激发器相连, 带动水面形成驻波, 已知表面波的色散关系:

$$\omega^2 = \frac{\sigma k^3}{\rho} \quad (3)$$

其中 ω 为表面波角频率, σ 为表面张力系数, k 为表面波波数, ρ 为液体密度。

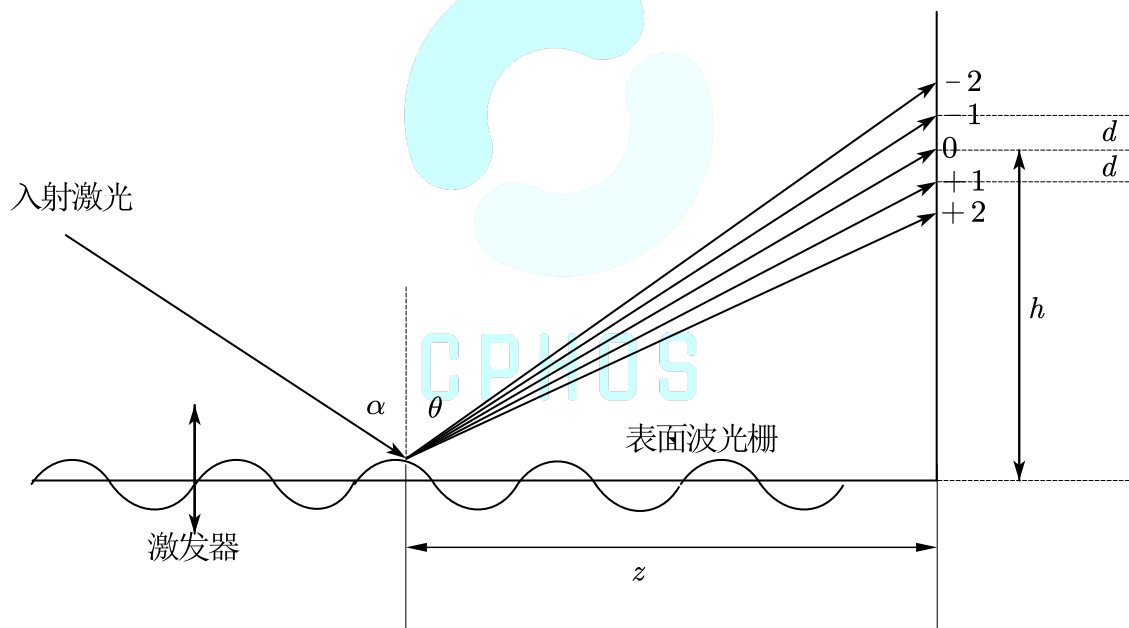


图 B.4: 声光衍射测表面张力系数示意图

B.3 (7 分)

B.3.1 请根据图 B.4, 写出第 k 级衍射光的光栅方程。(水波波长为 Λ)

B.3.2 写出 Λ 的表达式, 用 λ , z , h , d 表示。

B.3.3 估计信号发生器带动激发器的频率数量级 (写成 10^nHz 或 $10^n \sim 10^{n+1}\text{Hz}$), 已知 $z \sim 10^0\text{m}$, $h \sim 10^{-1}\text{m}$, $\sigma \sim 10^{-1}\text{N/m}$, $\rho \sim 10^3\text{kg/m}^3$ 。简述若高于此量级或低于此量级, 分别会有什么影响。

B.3.4 此实验应尽量避免在火炉、空调等温度改变大的设施附近进行, 请简述原因。

2. 测量并处理数据

实验测量数据如下表:

表 B.2: 不同频率下条纹间距数据表

$f(\text{Hz})$	60	70	80	90	100	110
$d(\text{mm})$	1.961	2.205	2.421	2.579	2.740	2.961
$f(\text{Hz})$	120	130	140	150	160	
$d(\text{mm})$	3.132	3.340	3.541	3.720	3.863	

表 B.3: 其它实验参数数据表

$z(\text{m})$	$h(\text{cm})$	$\rho(\text{kg/m}^3)$
1.0801	7.27	1000

B.4 (17 分)

B.4.1 自选合适的变量 X 和 Y , 列表作图验证色散关系的幂次。

B.4.2 自选合适的变量 X 和 Y , 列表拟合求出表面张力系数 σ 及其不确定度 σ_σ (本问不考虑 z 和 h 的不确定度对 σ_σ 的贡献)。

B.4.3 请指出哪一个物理量的测量误差是表面张力系数误差的主要来源。

3.重力波修正

液体表面的波并不仅仅是由表面张力引起的, 还有重力波的成分。考虑重力波后, 色散关系变为:

$$\omega^2 = \frac{\sigma k^3}{\rho} + gk \tag{4}$$

B.5 (4 分)

B.5.1 若计算时未考虑重力波修正, 请指出测得的表面张力系数会偏大还是偏小。

B.5.2 当表面波波长远小于 Λ_c 时可忽略重力波, 请由 (4) 式导出临界波长 Λ_c 的表达式, 并结合前面的数据说明重力波在本次实验中是否可以忽略。

版权信息

命题人

肖亦铖 龚炳瑞

审题人

王天齐 胡仕豪 任宇桐 吴翔宇

联系方式



微信公众号
CPHOS



官方网站
www.cphos.cn



CPHOS 论坛

邮箱

service@cphos.cn

微信小程序

CPHOS 物理竞赛联考

