

第 17 届 CPHOS 物理竞赛联考（复赛模拟赛）

实验试题

本试题于 2023 年 8 月 31 日 18:00 发布，最后更新于 2023 年 8 月 31 日 19:37。

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

2023/9/1 12:00 - 2023/9/4 18:00

阅卷

2023/9/5 08:00 - 2023/9/10 18:00

非正式成绩

2023/9/11 08:00

成绩申诉

2023/9/11 09:00 - 2023/9/11 16:00

正式成绩

2023/9/11 20:00

考生须知

1. 实验试题共 7 页，实验答题卡共 2 页，答题时间 60 分钟，试题满分 80 分。
2. 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。
3. 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。
4. 试题答案及相关分析均会在官方网站 www.cphos.cn 上发布。

CPHOS

A. 磁机械振荡器（40 分）

本实验通过测量并分析磁机械振荡器的振动模式，验证理论公式（牛顿第二定律和磁矩的磁场方程）在小振动情况下与实验测量的一致性。该实验的预备工作包括对所用材料的长，宽，厚，质量以及杨氏模量的测量。在正式实验中，通过对振动的视频拍摄和频谱分析，得到磁耦合模式下两个自由度振动的简正频率（分别对应磁致振动和钢片本身弹性所导致的振动）。

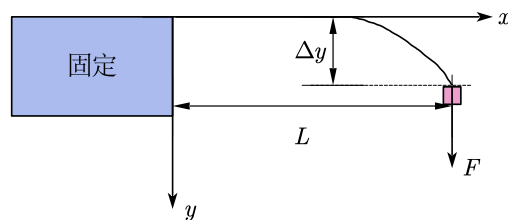
实验仪器：底座（及用于固定的配重），支架，钢片（不同规格若干），读数显微镜，游标卡尺，钢板尺，磁铁（规格完全相同，数量不限），手机（摄影和数据采集功能），个人电脑（用于分析和处理图像）

实验目的：使用悬臂法测量钢片的杨氏模量，并研究磁机械振荡器的振动特性。

实验内容：

1. 悬臂法测量杨氏模量

悬臂法测量杨氏模量的原理图如图 a.1 所示。钢片长度为 L ，宽度为 a ，厚度为 b 。钢片左端刚连接于固定台面上。初始钢片保持水平，且内部无应力。此时对钢片右端施加竖直向下的力 F ，使得钢片右端下降 Δy 。



图a.1 悬臂法测杨氏模量

理论分析可知，到钢片上下两平面距离均为 $\frac{b}{2}$ 的平面为中性面。中性面上方受拉伸，下方受压缩。钢片形变产生的沿长度方向的压强可以用 $p = E\varepsilon$ 计算，其中 E 为杨氏模量， $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$ 为应变，即长度变化量和原长之比。

A.1（28分）

A.1.1 证明该钢片在某点处由于形变产生的回复力矩大小为 $M = \frac{1}{12}ab^3E\kappa$ ，式中 κ 为钢片在该点处的曲率（即曲率半径的倒数）。

已知钢尺形变较小时有 $\kappa = \frac{d^2y}{dx^2}$ ，边界条件可取为 $y(0) = 0, y'(0) = 0, y(L) = \Delta y$ 。

A.1.2 给出钢片杨氏模量 E 的表达式，用 $a, b, L, \Delta y, F$ 表示。

对钢片长度的测量数据如表a.1所示，另外测得钢片厚度 $b = 0.300 \pm 0.002 \text{ mm}$ ，宽度 $a = 2.000 \pm 0.005 \text{ cm}$ 。

表a.1 钢片长度的测量数据

测量次数 <i>i</i>	1	2	3	4	5
测量值 $L_i(\text{cm})$	10.02	9.98	10.02	9.97	10.01

A.1.3 写出测量各量所用的仪器，简述使用读数显微镜的注意事项。

A.1.4 根据表a.1计算钢片长度及其标准不确定度。

已知重力加速度 $g = 9.8015 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 。测量得到20个磁铁的总质量 $20m = 16.3 \pm 0.02 \text{ g}$ 。在逐次加减重物的过程中，上图中端点位移量 Δy 随着所加磁铁块数的变化关系如表a.2所示。

表a.2 端点位移量 Δy 与所加磁铁块数的变化关系

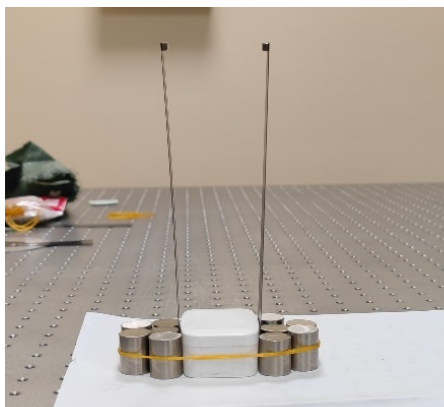
磁铁块数 <i>n</i>	加磁铁时位移量 $x'(\text{mm})$	减磁铁时位移量 $x''(\text{mm})$
0	41.942	42.117
2	40.661	40.940
4	39.410	39.398
6	38.235	38.385
8	37.030	37.230
10	35.780	36.052
12	34.768	34.945
14	33.645	33.570
16	32.480	32.480

A.1.5 简述测量过程中将加减磁铁的位移量各测一遍的目的。

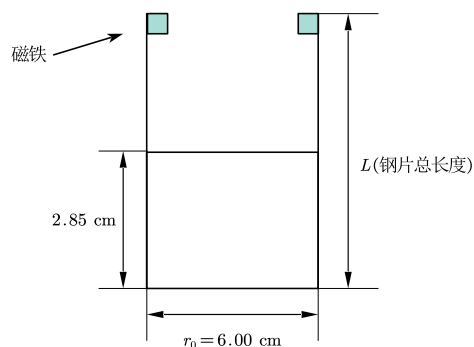
A.1.6 请使用线性回归法给出钢片的杨氏模量值及其标准不确定度。

提示:线性拟合 $y = kx + b$ 中斜率的不确定度 σ_k 可以用 $\sigma_k = \sqrt{\frac{1}{n-2} \frac{1-r^2}{k^2}}$ 计算, 其中 r 为相关系数, n 为数据点个数。

2. 磁机械振荡器



图a.2 实物图



图a.3 模型参数图

磁机械振荡器的结构如图a.2所示, 由固定在底座上的两块磁性钢板和若干磁铁块所组成, 振荡器各参数如图a.3所示。理论推导可知两个简正模的振动频率分别为 $\omega_{1,2} =$

$$\sqrt{\frac{|b \pm c|}{a}}, \text{ 其中系数 } a = 2M, b = 2K + \frac{(1-12\beta^2)\mu_0\mu^2}{2\pi r_0^3}, c = \frac{(1+24\beta^2)\mu_0\mu^2}{2\pi r_0^3}.$$

M 为动能项系数, 在忽略磁铁质量情况下可以估计为 $M = \frac{1}{6}mL^2$ (L 为钢片的长度); K 为势能项系数, 可以估计为

$$K = \frac{1}{24}EV, \text{ (} E \text{ 为钢片的杨氏模量, } V \text{ 为钢片体积); } \mu \text{ 为磁矩, 与磁铁的个数成正比, } \beta \text{ 为}$$

耦合系数, 不考虑磁铁大小的情况下近似值可以估计为 2。

已知: 单个磁铁磁矩 μ 的大小约为 $1.5 \times 10^4 \text{ A} \cdot \text{m}^2$, 实验中使用的钢片宽度均为 2.000 cm, 长度、厚度和质量的关系由表a.3所给出。

表a.3 钢片质量与长度、厚度的关系

钢片厚度 \ 钢片长度	0.200 mm	0.300 mm	0.400 mm
150.0 mm	4.36 g	6.78 g	9.27 g
200.0 mm	6.03 g	9.01 g	12.33 g

使用手机拍摄两钢板振动时端点位移随时间的变化关系, 利用傅里叶分析的方法即可在电脑端直接得到对应的简正频率。

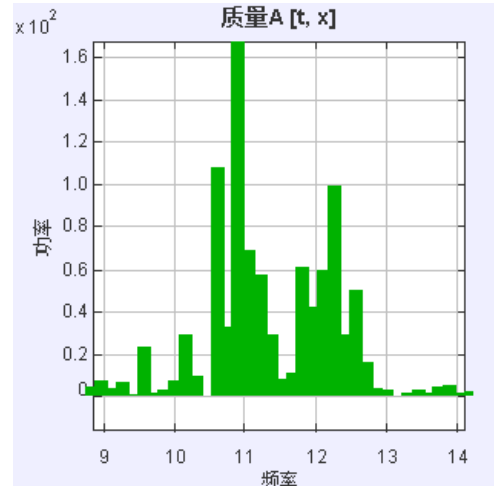
A.2 (12 分)

A.2.1 其中一次测量中得到的结果如图a.4所示(单位: 标准频率单位), 写出对应的两个简正频率。

A.2.2 另一次测量得到结果如图a.5所示, 在图中没有出现两个明显的主峰, 而是出现了许多组峰值, 请给出对此现象的几种合理解释。



图a.4 某次测量的频谱图



图a.5 另一次测量的频谱图

处理实验数据之后得到如下结果

表a.4 不同磁铁个数与钢板尺寸下的振动频率

（未填写部分表示未测量，内部值为低频模式频率，单位：标准频率单位）

钢板厚度和长度 磁铁个数	0.300 mm 150.0 mm	0.400 mm 150.0 mm	0.300 mm 200.0 mm	0.400 mm 200.0 mm
2	12.4		7.22	5.28
4	11.0	7.63	6.42	4.40
6	9.80	6.20	5.55	3.70
8	8.80	5.90	4.98	
10	8.00		4.25	

A.2.3 注意到未测量的数据点集中在磁铁块数较少和较多两个方面，试分析两种情况下测量数据分别有何困难。

A.2.4 请利用题中所给的数据计算 $\frac{(1-12\beta^2)\mu_0\mu^2}{2\pi r_0^3}$ 以及 $2K$ 的值，并指出在频率计算中哪一项占据主导地位。

A.2.5 请根据上问从以下几个选项中选出正确的选项，并利用表a.4中的数据进行验证：

- 系统的简正频率与磁铁个数近似成线性关系
- 系统的简正频率与磁铁个数的二次方近似成线性关系
- 系统的简正频率与钢板长度成线性关系
- 系统的简正频率与钢板长度成反比例关系

B. 酒精溶液折射率的测量（40 分）

光的直线传播、光的反射和折射三个实验定律构成几何光学的基础，是各种光学仪器设计的理论依据。折射率作为反映介质光学性质的物理量，其大小不仅取决于介质的种类，也与入射光的波长有关。折射率较大的介质称为光密介质，折射率较小的介质称为光疏介质，空气折射率 $n_0 \approx 1$ 。本题我们主要研究酒精溶液折射率的测量。

实验仪器：分光计一台，钠灯一台，三棱镜两个（其中两个侧面为光面，一个侧面为毛面，顶角 $A = 60^\circ 00'$ ，折射率相同），毛玻璃一块，不同浓度的酒精溶液，坐标纸。

实验目的：利用分光计测量不同浓度酒精溶液的折射率，并研究折射率同酒精浓度的关系。

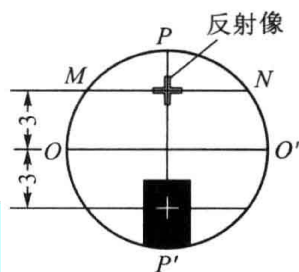
实验内容：

1. 分光计的基本调节

B.1（5 分）

B.1.1 简述调节分光计的基本要求。

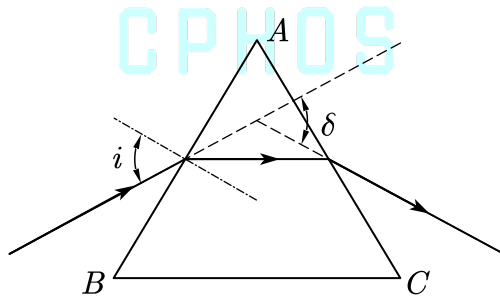
B.1.2 如图b.1，在调节望远镜时，如果随着平面镜转动，目镜中“十”字像的运动轨迹与 MN 线不平行，应当如何调整。



图b.1 望远镜目镜分划板

2. 三棱镜折射率的测量

本部分我们采用最小偏向角法对三棱镜的折射率进行测量。如图b.2，我们通过调节入射角 i 的大小使得光线的偏折角 δ 取到极小值 δ_{\min} ，即可测得三棱镜的折射率。



图b.2 最小偏向角法光路图

B.2（15 分）

B.2.1 直接写出三棱镜折射率 n_g 的表达式，用最小偏向角 δ_{\min} 和三棱镜顶角 A 表示。

B.2.2 请根据表b.1的实验数据，计算三棱镜的折射率 n_g 。

表b.1 三棱镜折射率的测量

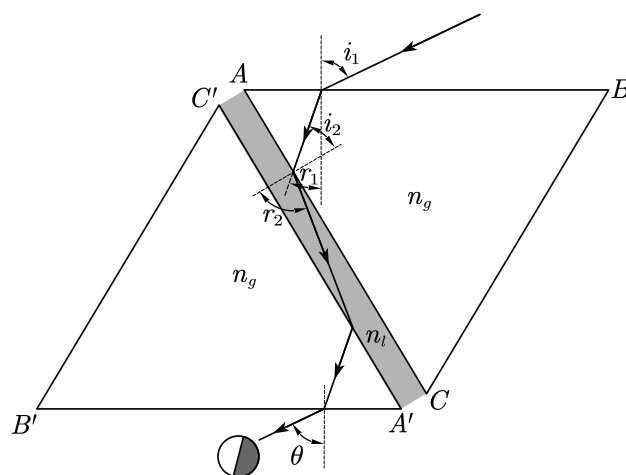
	左游标读数 φ_L	右游标读数 φ_R
入射光线	$63^\circ 14'$	$243^\circ 17'$
出射光线	$116^\circ 38'$	$296^\circ 40'$

B.2.3 利用已有仪器，只用一个三棱镜，再设计一个测量三棱镜折射率 n_g 的实验方案，画

出光路图，简述实验原理及实验步骤，并给出三棱镜折射率 n_g 的计算公式。

3. 酒精溶液折射率的测量

本部分我们采用下图光路对酒精溶液折射率进行测量。



图b.3 测量酒精溶液折射率光路

如图b.3所示，两折射率为 n_g 的三棱镜间夹有折射率 n_l 的待测液体。入射光经过毛玻璃散射，以不同入射角 i_1 入射右上方的三棱镜。只有玻璃-液体分界面的入射角 i_2 不大于全反射临界角的光线才能进入液体，并从左下方三棱镜出射，从而在出射光线一侧形成明暗分界线。

B.3（20 分）

B.3.1 直接写出液体折射率 n_l 的表达式，用三棱镜顶角 A ，明暗分界线与三棱镜法线的夹角 θ 以及三棱镜折射率 n_g 表示。（如图b.3所示， θ 以明暗分界线在法线左侧为正。）

B.3.2 部分实验数据如表b.2所示。数据组 1 代表纯水，数据组 5 代表无水乙醇，数据组 1-5 酒精溶液浓度等间距增加。请完成表格，并在坐标纸上画出酒精溶液折射率随浓度的变化曲线，简述折射率随浓度的变化关系。（本部分 θ 均为正值。）

表b.2 不同浓度酒精溶液折射率的测量数据

溶液浓度	明暗分界线方向		法线方向		θ	n_l
	左游标 φ_L	右游标 φ_R	左游标 φ_L	右游标 φ_R		
1	23°17'	203°18'	35°17'	215°19'		
2	24°41'	204°43'	34°02'	214°04'		
3	17°23'	197°23'	26°02'	206°04'		
4	19°53'	199°54'	28°56'	208°58'		
5	24°15'	204°17'	33°36'	213°38'		

B.3.3 简述酒精溶液折射率测量的主要误差来源。

B.3.4 如果只有一个三棱镜，其他仪器不变，试设计测量液体折射率的实验方案，画出光路图，简述实验原理，并给出液体折射率 n_l 的计算公式。

版权信息

命题人

杨 旻 胡宸源

审题人

王天齐 胡仕豪 黄子橙 陆颖熙

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



CPHOS