

第 28 届 CPHOS 物理竞赛联考

实验试题

本试题于 2025 年 10 月 10 日 18:00 发布，最后更新于 2025 年 10 月 7 日 12:16。

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

2025/10/11 12:00 - 2025/10/14 18:00

阅卷

2025/10/15 08:00 - 2025/10/18 20:00

非正式成绩

2025/10/19 08:00

成绩申诉

2025/10/19 09:00 - 2025/10/19 18:00

正式成绩

2025/10/20 20:00

考生须知

1. 实验试题共 **6** 页，实验答题卡共 **3** 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。

A. 橡皮筋上的球（30 分）

用一个橡皮筋把两个球连在一起，然后扭转橡皮筋并把这两个球放在桌面上。两个球会先向一个方向旋转，再向另一个方向旋转。下面我们将进行具体实验以解释这种现象，并探究这个类似“摆”的现象是如取决于相关参数的。

实验器材：两组大小不同的球（记作 A 球与 B 球），质量和直径分别为 A(45g, 2.32cm) 和 B(25g, 1.91cm)，橡皮筋若干，剪刀，502 胶水，刻度尺，拍摄装置。

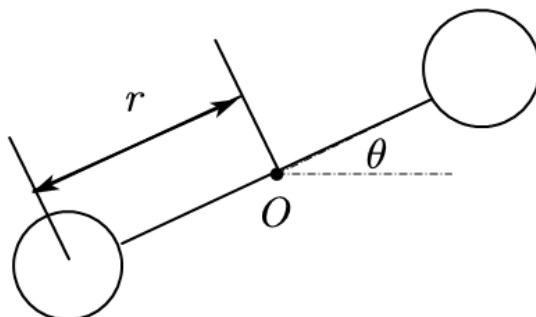


图 A.1 实验装置俯视图

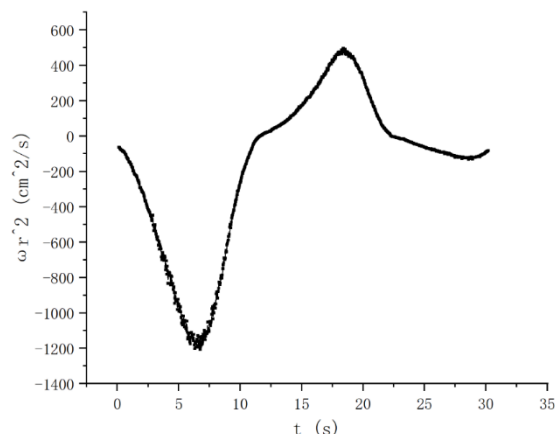


图 A.2 预实验示意图

1. 理论分析 (8 分)

记实验用球质量为 m ，半径为 R ，两球连线与初始位置转角 θ ，球心到橡皮筋中点的距离 r ，橡皮筋弹性系数 k ，原长 $2r_0$ ，同时由于橡皮筋的扭转，每个小球在角向受到大小为 $-G\theta r$ 的力。重力加速度为 g 。

假设小球与地面摩擦系数为 μ ，且在径向和角向均受到与速度成正比的阻力，比例系数分别为 $\gamma_1 m$ ， $\gamma_2 m$ 。

A.1.1 对单个小球，分别写出其径向和角向的动力学方程。

A.1.2 考虑单个小球单位质量的角动量 $h = L/m$ ，对其进行一组预实验，所得的 $h - t$ 图像如图 A.2 所示，分别写出 h 在较大和趋向于 0 时的随时间的变化趋势。

A.1.3 以下假设正确的有：

A. h 趋于 0 的行为是由于摩擦力方向发生了改变。

B. h 趋于 0 时， γ_2 一项的阻力可以忽略，且球到橡皮筋中点的距离 r 可以视为不变。

C. h 趋于 0 时，橡皮筋扭转一项 $-G\theta r$ 的力可以忽略

D. 球在角向的速度远远大于径向的速度，因此只用考虑角向的摩擦力。

A.1.4 假设在 $t = t_0$ 时 $h = 0$ ，对 1.1 的方程进行近似后，写出 μ 的表达式，用 $\left. \frac{dh}{dt} \right|_{t_0^+}$ ， $\left. \frac{dh}{dt} \right|_{t_0^-}$ ， $r(t_0)$

和重力加速度 g 表达。（提示：利用你在 1.3 中的选择）

2. 实验设计与数据处理 (22 分)

我们初始把两球沿橡皮筋方向单项旋转，积累比较大的扭转角。测量过程是利用手机在桌面的正上方拍摄，并使用 tracker 追踪小球位置，达成测量两球连线长度和转角的目的。建立标尺与坐标系后，可以得到小球坐标与时间的关系（以逆时针方向为正）：

$$x_1(t), y_1(t), x_2(t), y_2(t)$$

我们希望从中获取球绕中心转动角速度 ω 和球距中心距离 r 。

对于部分 h 在趋于 0 时的数据，初步处理后的部分数据如下表所示，手机帧率为 30 帧/s：

表 A.1 球 A 运动数据表

帧数	$\omega(\text{rad/s})$	$r(\text{cm})$	$h(\text{cm}^2/\text{s})$
1	-5.0763	1.4825	
2	-4.2325	1.4500	
3	-3.0926	1.4301	
4	-1.8756	1.4102	
5	-0.7497	1.3978	
6	0.2295	1.3872	

7	0.8158	1.3993	
8	1.3626	1.4034	
9	1.8681	1.4205	
10	2.4598	1.4237	

表 A.2 球 B 运动数据表

帧数	$\omega(\text{rad/s})$	$r(\text{cm})$	$h(\text{cm}^2/\text{s})$
1	4.5428	1.1382	5.8853
2	3.5887	1.1202	4.5034
3	2.4789	1.0884	2.9367
4	1.4103	1.0604	1.5859
5	0.1118	1.0462	0.1224
6	-0.4533	1.0483	-0.4981
7	-0.8481	1.0493	-0.9339
8	-1.3006	1.0532	-1.4428
9	-1.6776	1.0566	-1.8729
10	-2.0377	1.0732	-2.3467

A.2.1 认为在 $|\omega| < 1\text{rad/s}$ 时, r 随 $|\omega|$ 线性变化, 利用线性拟合确定球 A 与球 B 的 $r(t_0)$ 。

(保留四位有效数字)

A.2.2 填写表 A.1 中球 A 中的 h 一栏, 再利用表 2 在图上作出球 B 的 $h - \text{帧数}$ 曲线。

A.2.3 利用表 A.1 和表 A.2 的数据分别计算两球的 $\left.\frac{dh}{dt}\right|_{t_0^+}$ 和 $\left.\frac{dh}{dt}\right|_{t_0^-}$ 及不确定度, 给出球与桌面的

摩擦系数 μ , 并计算不确定度。(认为 $r(t_0)$ 精度很高, 无需考虑其不确定度)。

A.2.4 所测得的 $h - t$ 曲线中, 在 h 到达最大时会出现如右图所示的周期性振荡, 说明出现这种现象的原因。

A.2.5 以下关于误差分析与改进的说法, 正确的有:

A.手机拍摄帧率明显不足, 提升到 60 帧能有效提高精度。

B.使用胶水固定橡皮筋时, 橡皮筋劲度系数和扭转系数明显增大。

C.使用 tracker 对球中心进行标点时存在精度误差, 换用大球可以减小这一误差。

D.橡皮筋与小球并非理想连接, 存在额外阻力, 使得测出的摩擦系数偏大。



B. 平板法测定不良导体的热导率 (25 分)

测固体材料热导率的方法大体有两类: 一类是稳态法, 另一类是非稳态法。由于样品的性质、形状、测试温度范围、加热方式以及测定传递热量的方法各不相同又有许多不同的具体方法。本实验就是一种经典的稳态法。

本实验的基本原理图如右所示。发热盘负责提供热量输入并在样品内部产生稳定的温度梯度, 然后热量经过样品传递到散热盘上。通过测量散热盘的热容以及温度随时间的变化关系就可以反解出单位时间内传递热量的数值, 进而解出样品的热导率。本实验认为发热盘和散热盘的热导率足够大, 故可以使二者视为处处等温的。

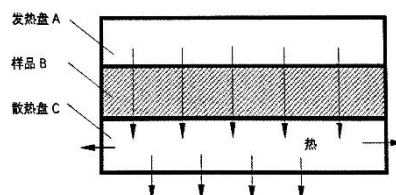


图 B.1 平板法实验原理简图

1. 理论分析 (5 分)

B.1.1 样品热导率为 κ , 其形状为底面直径为 d_B , 高为 h_B 的圆柱体。请证明当上下两盘温度分别为 T_A 与 T_C 时样品向散热盘 C 的导热功率 P 大小约为:

$$P = \kappa \frac{(T_A - T_C)}{h_B} \cdot \frac{\pi d_B^2}{4}$$

B.1.2 接上问，已知散热盘的质量为 m ，比热容为 c ，其形状为底面直径为 d_C ，高为 h_C 的圆柱体。现在将散热盘单独放置在空气中进行散热。如果测出其在温度为 T_C 附近时温度变化率的大小为 $k(k > 0)$ ，请证明导热率 κ 可以写为：

$$\kappa = kmc \cdot \frac{4h_B}{(T_A - T_C)\pi d_B^2} \cdot \frac{d_C + 4h_C}{2d_C + 4h_C}$$

B.1.3 实验中所使用的热电偶测温元件一般由热电偶，补偿导线，补偿电路以及显示器构成，它们都具有不同的温度。请简述补偿导线的作用。

2. 实验设计与数据处理（20 分）

本实验中测温使用的是铜—康铜热电偶，其输出电压与待测温度的关系如下表。

表 B.1 铜—康铜热电偶分度表

温度 (°C)	热电势 ε (mV)									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
40	1.611	1.653	1.695	1.738	1.780	1.822	1.865	1.907	1.950	1.992
50	2.035	2.078	2.121	2.164	2.207	2.250	2.294	2.337	2.380	2.424
60	2.467	2.511	2.555	2.599	2.643	2.687	2.731	2.775	2.819	2.864

B.2.1 单次测量得到温度稳定时加热盘与散热盘输出的温差电动势分别为 $\varepsilon_A = 2.464mV$ ， $\varepsilon_C = 1.690mV$ 。请给出待测量 T_A, T_C 的测量结果，要求写出计算步骤但无需写出不确定度。

B.2.2 以下是对基础几何参数的测量，请根据测量结果判断使用的测量仪器，然后直接给出测量结果及其不确定度。注意计算不确定度时要考虑仪器的允差。

表 B.2 几何参量数据测量表

i	1	2	3	4	5	6
d_{Bi}/mm	128.98	128.92	128.94	129.04	129.00	128.92
h_{Bi}/mm	8.16	8.14	8.14	8.14	8.16	8.18
d_{Ci}/mm	129.62	129.60	129.66	129.66	129.68	129.60
h_{Ci}/mm	8.18	8.16	8.14	8.14	8.14	8.18

B.2.3 简述散热盘在温度 T_C 附近时温度变化率的大小 k 该如何测量，给出测量步骤，待测物理量以及数据处理方法。本部分额外提供一个秒表。

以下是散热盘单独放置在空气中进行散热时热电偶输出电压随时间的变化关系。

表 B.3 散热盘温度随时间变化关系数据测量表

t/s	0	20	40	60	80	100	120	140	160
$\varepsilon(t)/mV$	1.781	1.755	1.734	1.716	1.693	1.673	1.657	1.636	1.619
$T_C/^\circ C$									

B.2.4 认为在表 B.3 中温度区间内 k 近似为常数，请完成表 3 并利用作图法给出 k 的值，然后利用前述公式计算样品热导率。你无需计算不确定度。已知散热盘的质量和比热容为 $m = 899.9g, c = 385J/(kg \cdot ^\circ C)$ 。

B.2.5 简述此实验与闪光法测量不良导体热导率在原理以及实验条件方面的不同，并说明此实验的优势。

C. 声速的测量 (25 分)

测量声速的方法很多,包括众所周知的驻波法和相位法。本题将探讨另外两种测量声速的方法:气体参量法与声光效应法。

1. 气体参量法测量空气中声速 (10 分)

采用理想气体近似,并认为空气经历绝热过程,可以导出空气中声速与气体状态参量的关系式。考虑到水蒸气的影响,校准后的公式为:

$$c_a(m/s) = 331.45 \left(1 + \frac{\theta}{T_0}\right)^{\frac{1}{2}} \left(1 + c \cdot \frac{p_w}{p}\right)^{\frac{1}{2}}$$

其中 $p_w = p_s \cdot H$ 为水蒸气的分压强, p_s 为当前温度下水蒸气的饱和蒸气压, H 为相对湿度, p 为大气压强, θ 为摄氏室温, $T_0 = 273.15K$, c 为一已知常数。

C.1.1 设空气、水蒸气的定体、定压摩尔热容和摩尔质量分别为 $c_{v,a}$, $c_{v,w}$, $c_{p,a}$, $c_{p,w}$, μ_a , μ_w , 试写出常数 c 的表达式。

C.1.2 写出用于测量相对湿度的仪器的名称,并简述其测量原理。

实验中测得 $\theta = 21.5^\circ\text{C}$, $H = 21\%$, $p = 1.020 \times 10^5 \text{Pa}$, 它们各自的极限误差为 $e_\theta = 1.0^\circ\text{C}$, $e_H = 8\%$, $e_p = 100 \text{Pa}$ 。查表得: $p_s = 2565 \text{Pa}$ 。

C.1.3 已知 $c = 0.3192$, 试代入题给公式算出空气中声速 c_a 的值及其极限误差。(不考虑 p_s 的误差)

C.1.4 为提高测量精度,需对温度和大气压的测量值进行修正。请基于温度计和气压计的工作原理,分别阐述一种可能导致系统误差的原因,并给出修正方法。

2. 声光效应法测量水中声速 (15 分)

超声波作为一种纵波,在介质中传播时会使介质密度产生周期性变化,从而引起介质折射率的周期性变化。当一束光射入该介质时,会因此发生衍射,这就是声光效应。在特定条件下,激光束入射声场时会产生 Ramann-Nath 衍射,此时的声场相当于一个相位型光栅,如右图所示。

在本实验中,我们利用超声波发生器输出高频振荡信号驱动压电换能器,在一个盛有水的玻璃水槽中形成超声光栅。令激光正入射,测量各级衍射角即可测量水中声速。

已知实验用激光波长为 $\lambda = 632.8 \text{nm}$, 入射光束直径为 D , 声光相互作用范围(可认为近似等于换能器直径)为 l , 超声波波长为 Λ 。

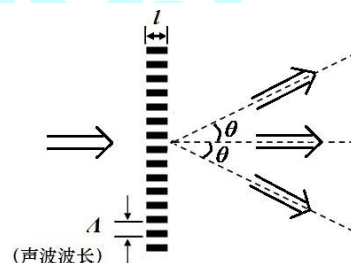


图 C.1 声光效应法原理简图

C.2.1 写出光栅方程,用激光波长 λ , 超声波波长 Λ , 衍射级次 k , 衍射角 θ_k 表达。

C.2.2 由于 l 非零,超声光栅实为一个三维体光栅,此时发生的衍射被称为布拉格衍射,而不是 Ramann-Nath 衍射。试导出发生 Ramann-Nath 衍射的条件,即超声光栅近似为面光栅的条件,用 Λ , λ , l 表达。你可以使用小角度近似。

由于衍射角很小,我们使用一张与题述光学系统共轴的光屏,将测量衍射角转化为测量屏上衍射斑的水平位置。测量结果如下表所示。

表 C.1 各衍射斑水平位置测量数据表

级次	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4
x_k/mm	-77.3	-58.0	-39.0	-19.2	0.00	19.3	38.9	58.4	78.0

C.2.3 为了能够在光屏上观察到清晰、分立的衍射光斑,试导出 D 与 Λ 之间需满足的关系。

C.2.4 已知实验光路已搭建、调节完毕,超声波发生器与压电换能器均正常工作,但是光屏上能够观察到的衍射光斑数目却很少,请写出两种可能的原因。

C.2.5 利用表 1 中的数据计算水中声速 c_w 的值及其不确定度。已知光屏与光栅之间的距离为

$L = (479.1 \pm 1.0) \text{cm}$, 超声波频率为 $f_c = 9.644 \text{MHz}$ 。

C.2.6 设 $D = 4.0 \text{mm}$, $l = 25.0 \text{mm}$, 利用你的计算结果验证 Ramann-Nath 衍射条件以及 2.3 中关系式成立。

版权信息

命题人

周 骋 许瀚文 周冠宇

审题人

周冠宇

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