

# 第 31 届 CPHOS 物理竞赛联考（复赛模拟赛） 实验试题

本文件于 2026 年 9 月 4 日 12:00 发布，最后更新于 2026 年 8 月 14 日 12:05。

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

阅卷

YYYY/MM/DD HH:MM - YYYY/MM/DD HH:MM    YYYY/MM/DD HH:MM - YYYY/MM/DD HH:MM

非正式成绩

成绩申诉

正式成绩

YYYY/MM/DD HH:MM    YYYY/MM/DD HH:MM - YYYY/MM/DD HH:MM    YYYY/MM/DD HH:MM

## 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](http://www.cphos.cn) 上发布。
5. 本次考试定位难度为决赛。

## A. 光信息处理（40 分）

光学信息处理是近代光学的一个重要分支，它借助傅里叶变换将光学成像过程理解为对光场空间频率的分解与合成。1873 年德国科学家阿贝提出的二次成像原理首次揭示了透镜成像的物理本质：成像过程分为两步——首先由物的衍射在透镜后焦面形成空间频谱，然后各频谱分量在像面干涉重建出物的像。这一洞见将通信理论中的频谱分析引入光学领域，为后来的空间滤波技术和光学信息处理奠定了理论基础。

4f 光学系统是实施空间滤波的标准实验装置，它由两个共焦放置的同焦距透镜组成，能够实现“空间域 → 频率域 → 空间域”的完整变换循环。下面我们先来简单介绍一下该系统。

标准的 4f 系统由两个焦距相等的透镜  $L_1$  和  $L_2$  组成，二者共焦放置——即  $L_1$  的后焦面与  $L_2$  的前焦面重合。系统包含三个关键平面，它们分别是物面、频谱面和像面。物面位于  $L_1$  的前焦面，用于放置待处理的样品（衍射屏或透明胶片）。频谱面（傅里叶面）位于  $L_1$  的后焦面（同时也是  $L_2$  的前焦面），此处呈现物的夫琅禾费衍射图样，即空间频谱；像面位于  $L_2$  的后焦面，此处呈现处理后的图像。

照明光路通常采用激光光源配合针孔滤波器和准直透镜，产生相干平行光照射样品。激光经扩束和空间滤波后，通过准直透镜形成均匀的平面波。

根据阿贝成像原理，4f 系统的成像过程本质上是两次连续的傅里叶变换。第一步是傅里叶正变换，用相干平行光照射物面，透射光经  $L_1$  在其后焦面（频谱面）上形成夫琅禾费衍射图样。设物的透射率函数为  $t(x, y)$ ，则频谱面上的复振幅分布为：

$$U(X, Y) = \iint t(x, y) e^{-2\pi i(f_x x + f_y y)} dx dy$$

其中  $(X, Y)$  为频谱面坐标，空间频率与坐标的关系为：

$$f_x = \frac{X}{\lambda f}, \quad f_y = \frac{Y}{\lambda f}$$

这一关系表明：频谱面上离轴越远的位置，对应越高的空间频率。低频分量（对应图像的平滑背景和大致轮廓）集中在光轴附近，高频分量（对应图像的细节、边缘和噪声）分布在远离光轴的外围区域。

第二步是傅里叶逆变换。频谱面的各衍射级次作为新的相干次波源，经  $L_2$  在像面发生干涉叠加，重建出物的像。若空间频率信息完整无缺，则像与物完全相似。

根据这一基础装置，我们可以轻易实现空间滤波这一操作。频谱面是实施空间滤波的关键位置。根据卷积定理，在频谱面上放置滤波器就相当于对物的频谱进行调制。容易证明有数学关系：

$$U_{\text{out}}(x, y) = \mathcal{F}^{-1}\{H(f_x, f_y) \cdot \mathcal{F}\{t(x, y)\}\}$$

其中  $H(f_x, f_y)$  是滤波器的透射率函数。这一操作在空间域等效于物的透射率函数与滤波器脉冲响应函数的卷积。选择不同的滤波器可以有选择地增强、抑制或提取图像的特定空间频率成分，实现对图像信息的改造。常见的滤波器包括低通（只允许低频通过）、高通（阻挡低频）、带通或方向滤波。下面简述原理。

低通滤波允许低频分量通过而阻挡高频分量，在频谱面上通常使用可变光阑（圆孔光阑）实现。实验中对一维光栅只保留 0 级（零频）时，像面呈现均匀光场——因为零频只代表图像的平均亮度，不含任何空间结构信息。保留 0 级和  $\pm 1$  级时，恢复出余弦条纹，但边缘模糊——因缺少更高频分量，方波边界的陡峭度无法还原。

高通滤波阻挡零级（直流分量）而让高频通过，通常使用不透明挡片遮挡频谱面中心实现。对一维光栅挡去 0 级后，像面呈现原条纹。而挡去  $\pm 1$  级后，出现倍频条纹。这些现象表明：缺少零频后，像的强度分布不再反映物的平均透射率，而是呈现干涉调制的结果。

还有一种特殊调制—— $\theta$  调制。该技术利用白光照明和色散效应实现伪彩色编码。将样品不同区域刻上取向不同的光栅，白光经光栅衍射后，不同方向的衍射光在频谱面分离。在频谱面不同方向放置不同颜色的滤光片，各区域便被赋予相应颜色，在像面合成彩色图像。这一技术展示了光学信息处理在信息编码和解码方面的独特优势。

下面介绍衍射屏特征对夫琅禾费衍射图样的影响。这些图样与其空间结构一一对应，验证了傅里叶变换的正确性。

首先是周期性结构的离散频谱。如一维光栅的频谱为等间距排布在一条直线上的分立光点，光栅常数越小，光点间距越大。

其次是单元重复结构。多缝的频谱是单缝衍射因子与多光束干涉因子的乘积。双孔衍射图样为单孔衍射花样叠加纵向干涉条纹，这一现象可由位移-相移定律解释：亦即两孔干涉因子在频谱面引入正弦调制。

最后是复杂图案的频谱卷积。某样品叠加了二维网格后其频谱为原频谱与二维光栅频谱的卷积，表现为等距排布的二维光点阵列，每个光点处携带着完整的“光”字衍射像。

下面介绍实验的基础操作步骤。首先是光路调节与共轴校准：

1. 激光准直：首先将激光束调至与光学平台平行，使光束沿导轨方向传播。这一步实际操作中可使用可变光阑辅助：在光路近端和远端分别放置光阑，调节激光器二维旋钮使光束始终穿过两个光阑中心。
2. 空间滤波与扩束：激光经显微物镜扩束后，调节针孔滤波器使光斑均匀柔和。针孔应位于扩束光的焦点处，通过三维微调使通过针孔后的光斑最亮、最均匀。
3. 准直检验：扩束后的光束经准直透镜后，在白屏上前后移动观察光斑大小——若光斑直径不随距离变化，则为准平行光。
4. 共焦定位：用卷尺大致标定物面到  $L_1$ 、 $L_1$  到  $L_2$ 、 $L_2$  到像面各为焦距  $f$  的距离。精细调节时可在频谱面放置白屏，移动  $L_1$  使衍射图样最清晰；再在像面放置白屏，移动  $L_2$  使像最清晰。

光路共轴调节完成后，即可进行频谱面的定位与 CCD 观测。频谱面位于  $L_1$  的后焦面，可用毛玻璃或白屏在此位置接收衍射图样。对于精细频谱（如密光栅），需要高分辨率 CCD 采集，注意调节 CCD 增益和曝光时间，避免中心亮点饱和而外围弱光点不可见。

对于需要滤波的实验，滤波器应紧贴频谱面放置，确保其对频谱的调制准确。可调光阑用于低通滤波时，应由大逐渐缩小，观察像的变化直至达到预期效果。狭缝用于方向滤波时，应旋转至与欲保留的频谱点阵方向对齐。

## 1. 实验原理与分析（20 分）

**A.1.1** 简述 4f 光学信息处理系统中样品、空间频谱面以及最终像面分别位于什么位置。（2 分）

**A.1.2** 设入射平行相干光波长为  $\lambda$ ， $L_1$  焦距为  $f$ ，频谱面坐标为  $(X, Y)$ 。写出空间频率  $f_x$ 、 $f_y$  与  $(X, Y)$  的关系，并据此说明频谱面上离轴越远的光点对应的是较高还是较低的空间频率。（3 分）

**A.1.3** 以下关于夫琅禾费衍射和空间频谱的说法，正确的是\_\_\_\_\_（多选）（2 分）

- A. 透镜后焦面上的复振幅与物透射率函数的二维傅里叶变换对应
- B. 物体尺寸越小，频谱主斑通常越宽
- C. 周期结构的频谱通常表现为离散级次
- D. 只保留零级谱一定能恢复物体细节

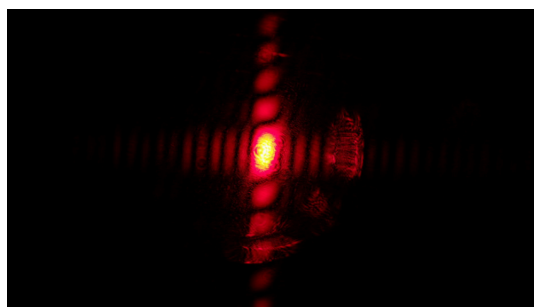


图 1: 矩孔衍射频谱示意图

**A.1.4** 上图为矩孔对应的频谱图像。请简要描述其特征并结合材料简述频谱如图所示的原因。（3 分）



图 2: 四种物孔的衍射频谱图样

**A.1.5** 某同学在测定多种物孔的频谱后，因忘记给图片重命名而无法分辨频谱照片与物孔的对应关系。请结合材料给出正确的配对方式并简要说明理由。（4 分）

- A. 单方孔    B. 双方孔    C. 单圆孔    D. 双圆孔

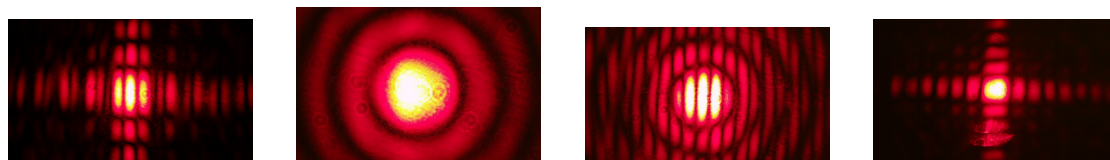


图 3: 某同学测得的四种频谱照片（图片 1-4）

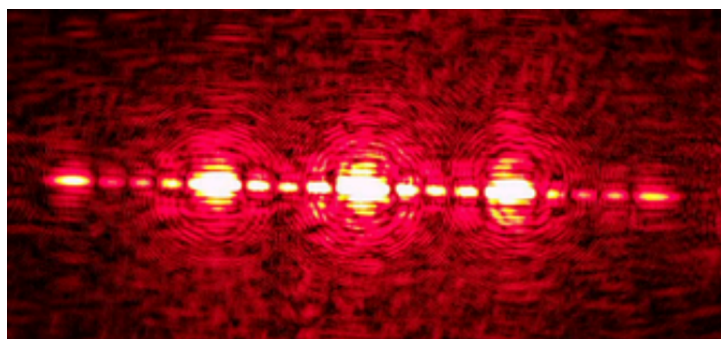


图 4: 多缝衍射频谱图样

**A.1.6** 某同学在测定某种多缝的频谱后，因忘记给图片重命名而无法分辨上图所示频谱照片对应的是几条缝的物屏。请结合材料给出正确的物屏缝数并简要说明理由。（3 分）

**A.1.7** 进行空间滤波实验时，若用一小孔只让零级附近的低频分量通过，像会发生什么变化？请从空间频率成分的角度解释其原因。（3 分）

**2. 空间频谱识别与滤波现象（8 分）**

**A.2.1** 将下列频谱操作与像面现象配对。（4 分）

频谱操作

像面现象

- |                    |                   |
|--------------------|-------------------|
| 1. 仅通过 0 级         | A. 均匀光场           |
| 2. 通过 0、 $\pm 1$ 级 | B. 边缘或明暗突变增强      |
| 3. 挡去 0 级          | C. 出现原周期但边缘较模糊    |
| 4. 挡去 $\pm 1$ 级    | D. 基频缺失，二倍频成为主要条纹 |

请写出 1–4 操作分别对应的字母，并说明理由。

**A.2.2** 关于  $\theta$  调制，判断下列说法正误，并说明理由。（4 分）

1. 不同方向的光栅可把不同区域信息编码到不同频谱方向。
2. 白光照明时不同波长的衍射角完全相同。
3. 在频谱面选择特定方向和颜色的光，可使像面相应区域显色。
4.  $\theta$  调制不需要频谱面操作。

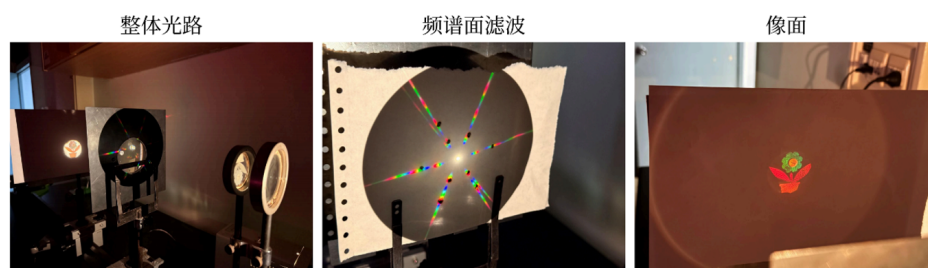


图 5:  $\theta$  调制的简单光路示意图（供参考）

**3. 简单数据处理（12 分）**

利用焦距为 15 cm 的透镜和波长为 632.8 nm 的激光器来测量某一维光栅的光栅常数，测得的频谱面上各级亮点坐标如下表所示。

表 1: 一维光栅各级衍射光点坐标

| 级次 $n$        | -3    | -2    | -1    | 0    | +1   | +2   | +3   |
|---------------|-------|-------|-------|------|------|------|------|
| $X/\text{mm}$ | -4.72 | -3.18 | -1.62 | 0.03 | 1.64 | 3.19 | 4.77 |

**A.3.1** 写出光栅周期  $d$  与  $\lambda$ 、 $f$ 、 $\Delta X$  的关系式，并说明从表中数据获取  $\Delta X$  的方法。（3 分）

**A.3.2** 对表中数据利用最小二乘法作线性拟合  $X = kn + b$ ，求出斜率  $k$  和截距  $b$ ，并说明  $k$  的物理意义。（4 分）

**A.3.3** 利用上述关系式与拟合结果，计算该一维光栅的光栅常数  $d$  的大小，并给出光栅线密度  $N = 1/d$ 。（3 分）

**A.3.4** 在忽略透镜焦距和激光器波长误差的条件下，给出光栅常数的不确定度（即仅考虑最小二乘拟合引入的误差）。（2 分）

## B. 弦上驻波的探究与弦线密度的测定（40 分）

**背景材料：**绷紧的弦被激振器驱动时，振动以入射波的形式沿弦传播，入射波在弦的另一端（悬挂端）反射形成反射波，入射波与反射波在弦上叠加。当驱动频率满足一定条件

时，两列波的叠加使弦上各点的振幅分布稳定下来，形成驻波：弦上出现振幅最大的波腹与始终保持不动的波节。

**装置说明：**一根弦的一端固定在电动激振器的刀口上，另一端跨过轻质定滑轮，下端悬挂质量为  $M$  的砝码，弦因此受张力  $T = Mg$ 。激振器由信号发生器驱动，其振动频率  $f$  连续可调，刀口振幅始终保持很小。弦的有效振动长度为激振器刀口与滑轮顶点之间的水平距离  $L$ 。当地重力加速度  $g = 9.80 \text{ m/s}^2$ ，视为精确值；弦的线密度  $\mu$  未知，为待测量。



图 1: 弦上驻波实验装置示意图

### 1. 理论分析（12 分）

**B.1.1** 设弦的线密度为  $\mu$ ，张力为  $T$ 。取弦上一小段微元，推导横波沿弦传播的速度公式，给出  $v$  的表达式。（4 分）

**B.1.2** 实验中，激振器刀口与滑轮顶点近似均可视为固定端（节点）。求弦上形成稳定驻波时，频率必须满足的条件，并说明此时弦长与波长的关系。（3 分）

**B.1.3** 激振器保持小振幅对驻波形成有何作用？（2 分）

**B.1.4** 弦振动中不可避免地存在阻尼（弦内摩擦、空气阻力、端点能量损耗等）。定性说明：为什么共振时振幅很大，而频率稍偏离共振时振幅迅速衰减？共振峰的锐度（品质因数  $Q$ ）由什么决定？若  $Q$  较小，对频率测量有何影响？（3 分）

### 2. 实验测量与数据处理（21 分）

**B.2.1** 简述调节出某一确定阶数  $n$  的驻波的完整操作步骤。（3 分）

**B.2.2** 给出三条判断“标准驻波”（而非过渡的、不稳定的振动形态）的依据。（3 分）

**B.2.3** 方法一（固定张力、变频寻峰）：固定  $M = 200.0 \text{ g}$ ， $L = 1.000 \text{ m}$ 。缓慢调节频率  $f$ ，使弦上出现  $n$  段（ $n$  个半波、 $n$  个波腹）的稳定驻波，记录频率如下表。（10 分）

表 1: 不同阶数  $n$  对应的驻波频率  $f$

| $n$           | 1    | 2    | 3    | 4     | 5     |
|---------------|------|------|------|-------|-------|
| $f/\text{Hz}$ | 31.3 | 62.6 | 94.0 | 125.4 | 156.7 |

(1) 在答题卡坐标纸上作出  $f-n$  图，并通过直线拟合求斜率  $k$ 。

(2) 由斜率求波速  $v$  与线密度  $\mu_1$ 。

**B.2.4** 方法二（固定频率、变张力寻峰）：固定  $f = 60.0 \text{ Hz}$ ， $L = 1.000 \text{ m}$ 。改变悬挂质量  $M$ ，使弦上出现  $n$  段驻波，记录质量如下表。（5 分）

表 2: 不同阶数  $n$  对应的驻波质量  $M$

| $n$          | 1   | 2   | 3    | 4    |
|--------------|-----|-----|------|------|
| $M/\text{g}$ | 736 | 183 | 81.8 | 46.1 |

用最小二乘法自行寻找变量拟合斜率，进而求线密度  $\mu_2$ 。

### 3. 误差分析与物理延伸（7 分）

**B.3.1** 实验中要求砝码保持静止、弦保持水平，原因是什么？若滑轮存在摩擦，弦振动段的实际张力相对  $Mg$  可能如何偏离？请结合增、减砝码调节过程说明，并分析对测得线密度  $\mu$  的影响、误差性质及减小方法。（5 分）

**B.3.2** 本实验中，误差最大的一项来源于哪里？（2 分）

## 版权信息

命题人  
许瀚文 周 骋  
审题人  
周冠宇 余哲浩

## 联系方式



微信公众号  
CPHOS



官方网站  
[www.cphos.cn](http://www.cphos.cn)



CPHOS 论坛

邮箱  
[service@cphos.cn](mailto:service@cphos.cn)  
微信小程序  
CPHOS 物理竞赛联考

