浙江大学

物 理 实 验 报 告

实验名称： 等厚干涉

实验桌号： 16

指导教师： _____

班级： _____

姓名： _____

学号： _____ _____

实验日期： 2025 年 11 月 18 日　　**星期** 二 **下午**

（此处填实验选课系统内日期）

浙江大学物理实验教学中心

如有实验补做，补做日期：

情况说明：

一、预习报告（10 分）

（注：将已经写好的“物理实验预习报告”内容拷贝过来）

1. 实验综述（5 分）

（自述实验现象、实验原理和实验方法，包括必要的光路图、电路图、公式等。不超过 500 字。）

实验现象： 本实验主要观测两种等厚干涉现象。1. **牛顿环：**当一块大曲率半径的平凸透镜的凸面与一块光学平玻璃接触时，在两者之间形成一层厚度不均匀的空气薄膜。用单色光（如钠光灯）垂直照射时，会观察到一组以接触点为中心的、明暗相间的同心圆环条纹，中心为一暗斑。2. **劈尖：**当两块光学平玻璃一端接触，另一端用薄片垫起时，中间形成一个楔形的空气薄膜。用单色光垂直照射时，会观察到一组平行于接触棱边的、明暗相间的直线干涉条纹。

实验原理： 本实验属于**分振幅法**干涉。如图 1 所示，入射光在空气薄膜的上、下两个表面发生反射，形成两束相干光。这两束光的光程差（OPD）主要由空气膜厚度 e 决定。当下表面（空气 $\to$ 玻璃）为光疏介质到光密介质的反射，存在半波损失。因此，总光程差为：

$$\delta = 2e + \frac{\lambda}{2}$$

其中 e 是空气膜厚度，λ 是单色光波长。

- **暗条纹**（相消干涉）条件：$\delta = (2k+1)\frac{\lambda}{2} \quad (k = 1, 2, 3, \dots)$

$$2e_k = k\lambda \tag{1}$$

- **亮条纹**（相长干涉）条件：$\delta = k\lambda \quad (k = 1, 2, 3, \dots)$

$$2e_k = (k - \frac{1}{2})\lambda \tag{2}$$

实验中暗条纹更清晰，故我们主要测量暗条纹。

实验方法： 实验光路装置如图 2 所示，使用读数显微镜进行观测和测量。

1. 测量平凸透镜曲率半径 R（牛顿环）：由图 3 的几何关系，第 k 级暗环半径 r_k 处空气层厚度 e_k 满足 $e_k = \frac{r_k^2}{2R}$（当 $R \gg e_k$）。代入式 (1)：$2(\frac{r_k^2}{2R}) = k\lambda$，即 $r_k^2 = k\lambda R$。为消除测量中心 $k = 0$ 的困难和形变误差，我们采用“逐差法”，测量第 m 级和第 n 级暗环的直径 d_m 和 d_n：

$$d_m^2 = 4r_m^2 = 4m\lambda R$$

$$d_n^2 = 4r_n^2 = 4n\lambda R$$

两式相减，得到曲率半径 R 的计算公式：

$$R = \frac{d_m^2 - d_n^2}{4(m-n)\lambda} \tag{3}$$

2. 测量薄膜厚度 e（劈尖）：如图 4 所示，劈尖角 $\theta \approx \tan\theta = \frac{e}{L}$，其中 L 是劈尖长度，e 是待测薄片厚度。相邻暗纹对应的空气层厚度差为 $\Delta e = \lambda/2$。若相邻暗纹间距为 i，则 $\theta \approx \tan\theta = \frac{\lambda/2}{i}$。联立两式可得：$\frac{e}{L} = \frac{\lambda}{2i}$，即：

$$e = \frac{L\lambda}{2i} \tag{4}$$

实验中，为提高精度，我们测量 $S_{k+10} - S_k$（即 10 条条纹的间距）并取平均值 ΔS_{10}，此时 $i = \Delta S_{10}/10$。

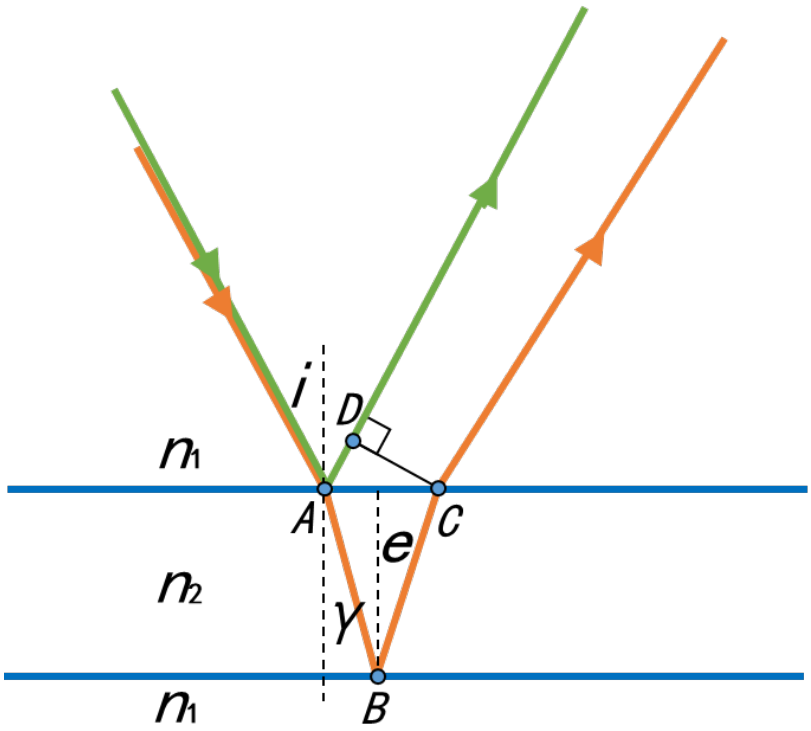


图 1: 牛顿环光程差（OPD）推导示意图。

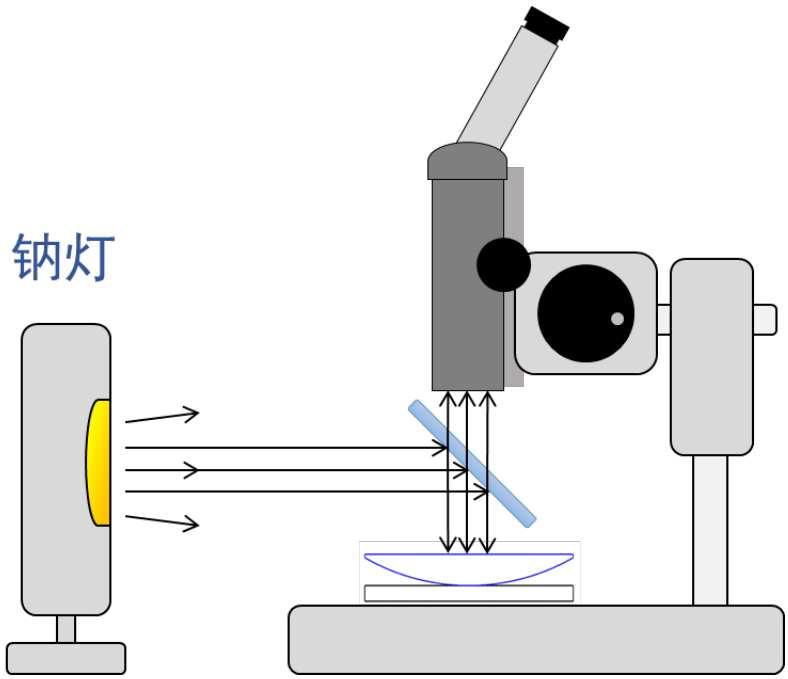


图 2: 读数显微镜测量等厚干涉的实验光路图。

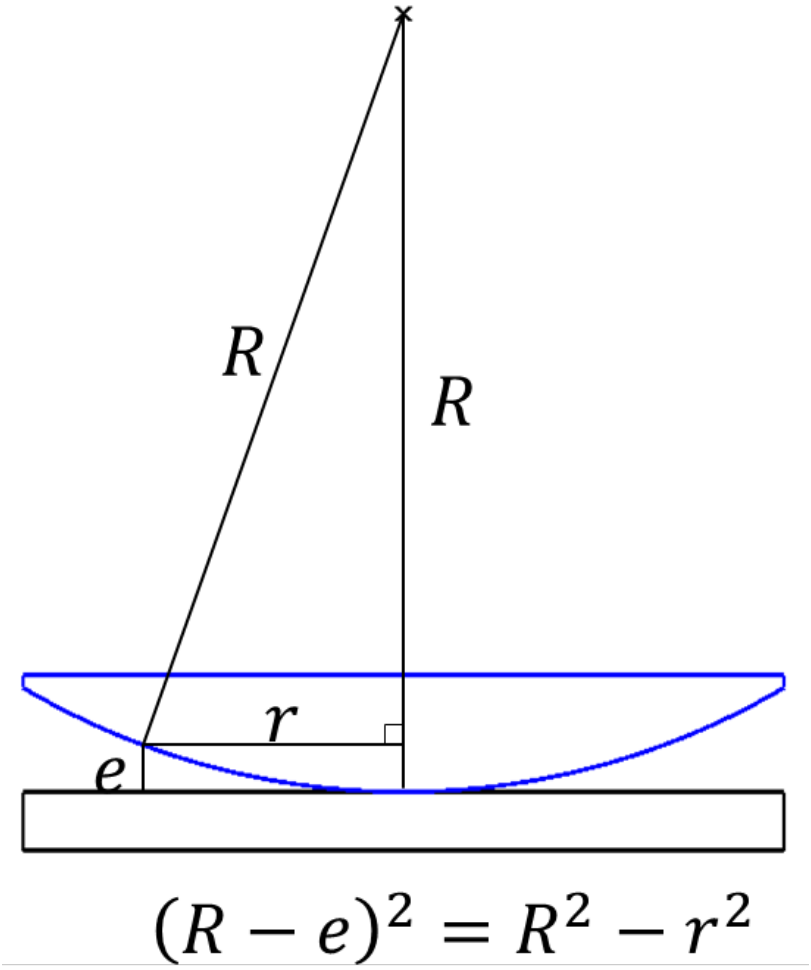


图 3: 平凸透镜曲率半径 R 与空气层厚度 e 的几何关系。

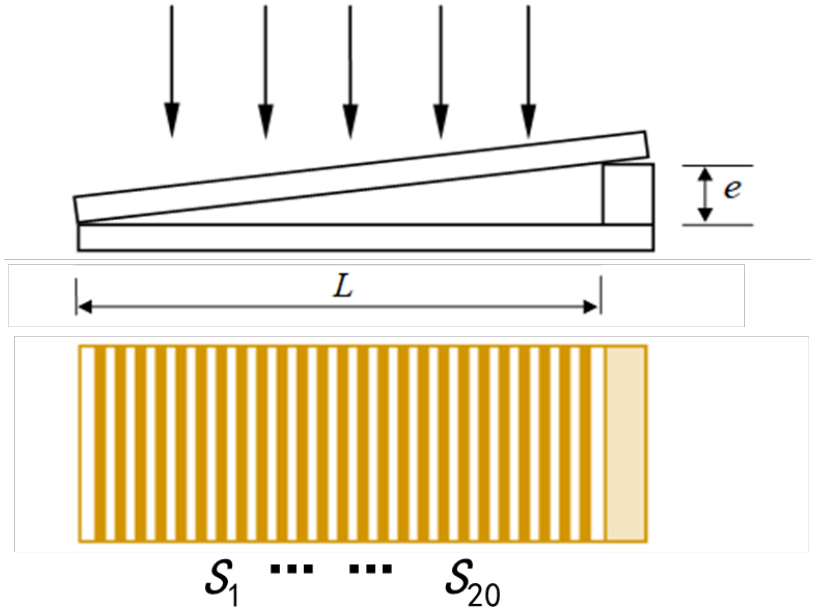


图 4: 劈尖法测量薄膜厚度 e 原理示意图。

2. 实验重点（3 分）

（简述本实验的学习重点，不超过 100 字。）

(1) **理解原理**：深刻理解分振幅法产生等厚干涉的原理，特别是光程差公式 $\delta = 2e + \lambda/2$ 中半波损失 $\lambda/2$ 的来源。

(2) **掌握方法**：学会使用牛顿环测量平凸透镜曲率半径 R（见式 (3)）和使用劈尖法测量薄膜厚度 e（见式 (4)）的实验方法。

(3) **仪器使用**：熟练掌握读数显微镜的使用，包括正确调焦、消除视差，以及在测量中始终单向转动鼓轮以**消除回程差**。

3. 实验难点（2 分）

（简述本实验的实现难点，不超过 100 字。）

(1) **调节视差**：正确调节读数显微镜的目镜和物镜，使十字叉丝平面与干涉条纹平面严格重合，达到“消除视差”的状态，这是精确瞄准的基础。

(2) **寻找条纹**：在视场中找到清晰、对比度良好的干涉条纹（特别是牛顿环中心），需要耐心调节半反半透镜的姿态和显微镜的焦距。

(3) **精确读数**：在消除回程差的前提下，精确地将十字叉丝的竖线对准暗条纹的中心进行读数。

二、原始数据（20 分）

（将有老师签名的“自备数据记录草稿纸”的扫描或手机拍摄图粘贴在下方，完整保留姓名，学号，教师签字和日期。）

原始数据如图5所示。

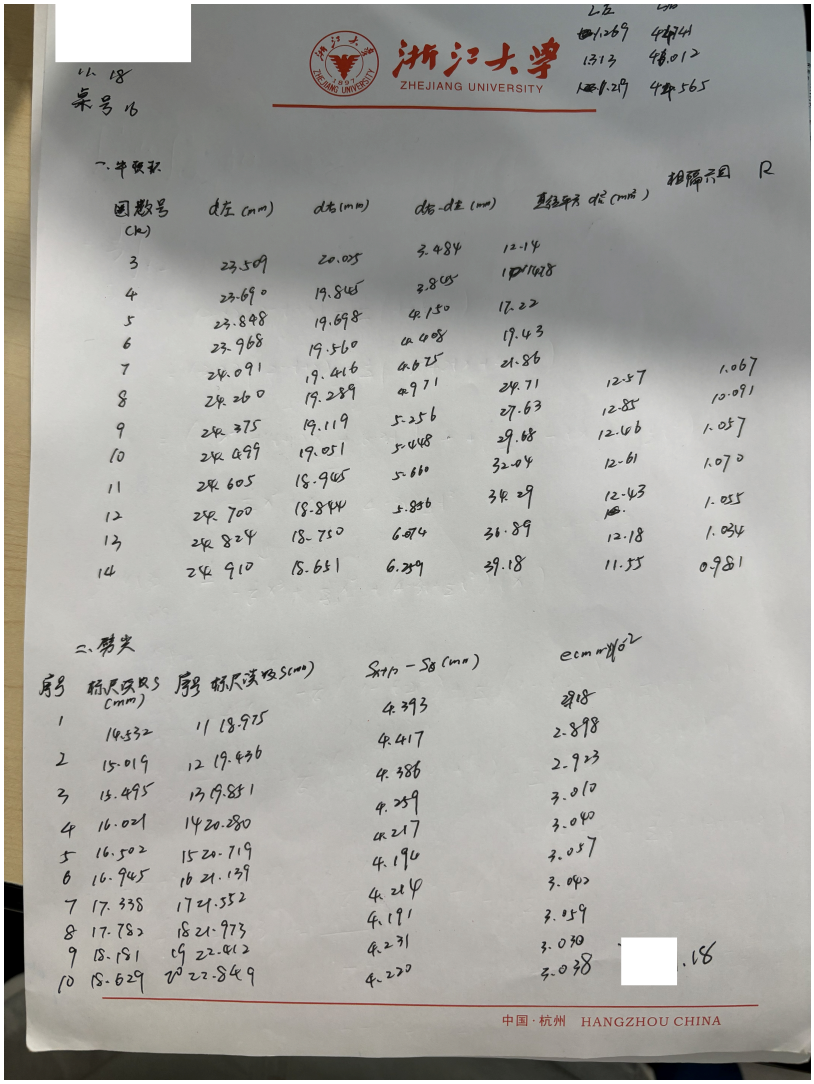


图 5: 原始数据记录

三、结果与分析（60 分）

1. 数据处理与结果（30 分）

（列出数据表格、选择适合的数据处理方法、写出测量或计算结果。）

(1) 牛顿环测量曲率半径 R

已知钠光波长 $\lambda = 589.3$ nm。

表 1: 牛顿环法测量曲率半径 R 原始数据

圈数号 (k)	d (mm)	d (mm)	$d - d$ (mm)	d_k^2 (mm^2)	相隔 6 圈直径平方数之差	R (m)
14	24.910	18.651	6.259	39.18	11.55	0.9801
13	24.824	18.750	6.074	36.89	12.18	1.034
12	24.700	18.844	5.856	34.29	12.43	1.055
11	24.605	18.945	5.660	32.04	12.61	1.070
10	24.499	19.051	5.448	29.68	12.46	1.057
9	24.375	19.119	5.256	27.63	12.85	1.091
8	24.260	19.289	4.971	24.71	12.57	1.067
7	24.091	19.416	4.675	21.86		
6	23.968	19.560	4.408	19.43		
5	23.848	19.698	4.150	17.22		
4	23.690	19.845	3.845	14.78		
3	23.509	20.025	3.484	12.14		

计算与不确定度分析：

根据表格中计算的 7 组 R 值，进行如下分析：

- **平均值 $\bar{R}$：**

$$\bar{R} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} R_i = \frac{1}{7}(0.9801 + 1.034 + \cdots + 1.067) = 1.0506 \text{ m}$$

- **A 类不确定度 $u_A(R)$：**计算 A 类不确定度

$$u_A(R) = \sqrt{\frac{\sum(R_i - \bar{R})^2}{n(n-1)}} = \sqrt{\frac{0.00758}{7 \times 6}} = 0.0134 \text{ m}$$

- **最终结果：**不确定度 $u_A(R)$ 保留一位有效数字为 0.01 m，$\bar{R}$ 修约到相应小数位 1.05 m。

$$R = \bar{R} \pm u_A(R) = (1.05 \pm 0.01) \text{ m}$$

(2) 劈尖法测量薄膜厚度 e

表 2: 劈尖长度 L 测量数据

测量次数	劈尖棱边读数 L (mm)	薄膜边缘读数 L (mm)	劈尖长度 $L = L - L$ (mm)
1	1.269	44.741	43.472
2	1.313	45.012	43.699
3	1.219	44.565	43.346
		平均值 $\bar{L}$ (mm)	43.505

L 的不确定度分析：

$$u_A(L) = \sqrt{\frac{\sum(L_i - \bar{L})^2}{n(n-1)}} = \sqrt{\frac{0.06399}{3 \times 2}} \approx 0.103 \text{ mm}$$

取 $u(L) \approx u_A(L) = 0.10$ mm。

表 3: 劈尖法测量薄膜厚度 e 原始数据

标尺读数 S_x (mm)	标尺读数 S_{x+10} (mm)	$S_{x+10} - S_x$ (mm)	e ($\times 10^{-2}$ mm)
$S_1 = 14.532$	$S_{11} = 18.925$	4.393	2.918
$S_2 = 15.019$	$S_{12} = 19.436$	4.417	2.898
$S_3 = 15.495$	$S_{13} = 19.881$	4.386	2.923
$S_4 = 16.021$	$S_{14} = 20.280$	4.259	3.010
$S_5 = 16.502$	$S_{15} = 20.719$	4.217	3.040
$S_6 = 16.945$	$S_{16} = 21.139$	4.194	3.057
$S_7 = 17.338$	$S_{17} = 21.552$	4.214	3.042
$S_8 = 17.782$	$S_{18} = 21.973$	4.191	3.059
$S_9 = 18.181$	$S_{19} = 22.412$	4.231	3.030
$S_{10} = 18.629$	$S_{20} = 22.849$	4.220	3.038

方法一：直接利用 e 列表数据求平均

- **平均值 $\bar{e}$：**

$$\bar{e} = \frac{1}{10}\sum_{i=1}^{10} e_i = \frac{30.015}{10} = 3.0015 \times 10^{-2} \text{ mm}$$

- **A 类不确定度 $u_A(e)$：**

$$u_A(e) = \sqrt{\frac{\sum(e_i - \bar{e})^2}{n(n-1)}} = \sqrt{\frac{0.03557}{10 \times 9}} \approx 0.0199 \times 10^{-2} \text{ mm}$$

取 $u_A(e) \approx 0.02 \times 10^{-2}$ mm。

- **结果：** $e = (3.00 \pm 0.02) \times 10^{-2}$ mm。

方法二：利用物理公式与误差传递

- **条纹间距 ΔS 分析：**

$$\bar{\Delta S} = \frac{1}{10}\sum_{i=1}^{10} \Delta S_i = \frac{42.722}{10} = 4.2722 \text{ mm}$$

$$u_A(\Delta S) = \sqrt{\frac{\sum(\Delta S_i - \bar{\Delta S})^2}{n(n-1)}} = \sqrt{\frac{0.0722}{10 \times 9}} = 0.0283 \text{ mm} \approx 0.03 \text{ mm}$$

- **厚度 $\bar{e}$ 计算：** (使用 $\lambda = 589.3 \times 10^{-6}$ mm)

$$\bar{e} = \frac{5\bar{L}\lambda}{\bar{\Delta S}} = \frac{5 \times 43.505 \times (589.3 \times 10^{-6})}{4.2722} \approx 3.000 \times 10^{-2} \text{ mm}$$

- **合成不确定度 $u_C(e)$**：根据误差传递公式 $\frac{u_C(e)}{\bar{e}} = \sqrt{(\frac{u(L)}{L})^2 + (\frac{u(\Delta S)}{\Delta S})^2}$

$$\frac{u_C(e)}{\bar{e}} = \sqrt{(\frac{0.10}{43.505})^2 + (\frac{0.03}{4.2722})^2} \approx 0.0074$$

$$u_C(e) = \bar{e} \times 0.0074 = (3.000 \times 10^{-2}) \times 0.0074 \approx 0.022 \times 10^{-2} \text{ mm}$$

- **结果**： $e = (3.00 \pm 0.02) \times 10^{-2}$ mm。

2. 误差分析（20 分）

（运用测量误差、相对误差或不确定度等分析实验结果，写出完整的结果表达式，并分析误差原因。）
根据实验结果（R 的相对不确定度约 1%，e 的相对不确定度约 0.7%），主要的误差来源分析如下：

(1) **条纹中心的判断误差（随机误差的主要来源）**：等厚干涉条纹（尤其是牛顿环的高级次条纹）虽然理论上是明暗相间的线，但实际上具有一定的宽度。肉眼在读数显微镜下判断十字叉丝是否“严格对准”暗条纹中心时，存在不可避免的主观判断误差。这是造成测量数据（ΔS 和 d_k）分散性的主要原因。

(2) **仪器误差（系统误差）**：

- **回程差（空程差）**：读数显微镜的螺杆与螺母之间可能存在微小的间隙。如果在测量过程中未能严格遵守“单向旋转”的原则（例如在对准过头后回调），就会引入回程差，导致读数偏差。
- **视差**：如果观察者的眼睛没有严格正对目镜中心，十字叉丝的像平面与干涉条纹的像平面可能不完全重合，头部移动时会产生视差，影响读数准确性。

(3) **实验装置与方法误差**：

- **透镜与平玻璃的接触形变**：牛顿环实验中，透镜与平玻璃接触点在重力或夹具压力下可能发生微小的弹性形变，这会改变接触点附近的空气层厚度分布。虽然使用了“逐差法”消除了零点级次不确定的影响，但形变仍可能对小半径处的条纹产生微小影响。
- **劈尖长度 L 的测量误差**：劈尖的棱边（两玻璃接触处）并不是一条理想的几何直线，薄膜边缘的位置也可能因切割不整齐而难以精确界定，这导致 L 的测量具有较大的不确定性（相对误差较大）。
- **玻璃表面的平整度**：实验假设光学表面是理想平面，但实际上表面可能存在微小的缺陷或清洁度问题（灰尘），导致条纹局部畸变。

3. 实验探讨（10 分）

（对实验内容、现象和过程的小结，不超过 100 字。）
本实验利用等厚干涉原理成功测量了微小长度量。实验中采用“逐差法”处理牛顿环数据，有效消除了接触点形变及干涉级次不确定带来的系统误差。操作时严格遵守读数显微镜单向旋转原则，成功消除了回程差的影响。实验结果表明，细致调节仪器消除视差、保证光学表面清洁以及精确读数是减小误差、提高测量精度的关键。

四、思考题（10 分）

（解答教材或讲义或老师布置的思考题，请先写题干，再作答。）

1. 如何消除读数显微镜引起的空程差？

读数显微镜的螺距传动机构在螺母和螺杆之间难免存在微小的间隙。当反向转动鼓轮时，螺杆不会立即随之反向移动，而是会空转一小段距离才能带动螺杆，这就是空程差（或回程差）。

消除方法：在整个测量过程中，必须严格遵守**“单向旋转”**的原则。例如，规定鼓轮始终只向一个方向（如顺时针）旋转来逼近目标。如果在瞄准时不幸转过头了，决不能直接反转鼓轮退回，而必须倒退一段较大的距离（远大于空程差），然后再重新单向趋近目标进行瞄准和读数。

2. 为什么随着牛顿圈半径增大，条纹越来越密？

根据牛顿环暗纹半径公式 $r_k^2 = kR\lambda$，对 k 微分可得：

$$2r_k dr_k = R\lambda dk \implies \frac{dr_k}{dk} = \frac{R\lambda}{2r_k}$$

条纹间距 $\Delta r \approx \frac{dr_k}{dk}$ 与半径 r_k 成反比。随着级次 k 增大，半径 r_k 增大，因此条纹间距 Δr 减小。

物理意义：离接触点越远，透镜表面越陡峭（空气层厚度 e 增加得越快）。满足相邻级次干涉条件所需的水平距离（即条纹间距）因此变得越小，所以条纹看起来越来越密。

3. 在透射光中是否也可以观测干涉条纹？

可以。牛顿环不仅在反射光中产生，在透射光中也能产生。在透射光中，干涉条纹是由通过空气薄膜透射的两束光（一束直接透射，另一束在薄膜内部反射两次后透射）发生干涉形成的。由于两次反射（光疏 $\rightarrow$ 光密，光密 $\rightarrow$ 光疏）带来的相位变化，透射光的干涉条件与反射光正好相反（互补）。因此，透射光中的牛顿环中心是**亮斑**，且其亮暗条纹的位置与反射光中的互补（即反射光中的暗纹处，在透射光中对应为亮纹）。不过，由于两束透射光的振幅差异较大，透射干涉条纹的对比度（清晰度）远不如反射光条纹好。

注意事项：

1. 用 PDF 格式上传“实验报告”，文件名：学生姓名 + 学号 + 实验名称 + 周次。
2. “实验报告”必须递交在“学在浙大”本课程内对应实验项目的“作业”模块内。
3. “实验报告”成绩必须在“浙江大学物理实验教学中心网站”-“选课系统”内查询。
4. 教学评价必须在“浙江大学物理实验教学中心网站”-“选课系统”内进行，学生必须进行教学评价，才能看到实验报告成绩，教学评价须在本次实验结束后 3 天内进行。

浙江大学物理实验教学中心制