

实验：组合光学

【引言】

满足相干条件的两束（或多束）光波相遇叠加，在叠加区域光强明暗形成稳定分布的现象称作光的干涉。光波的波振面受到阻碍时，光绕过障碍物偏离直线而进入几何阴影区传播的现象称作光的衍射。光的干涉和衍射现象是光具有波动性的有力证据，是光的波动的两个基本特征，并在科学研究和工程技术上有着广泛的应用。

光的频率相同、振动方向相同及相位差恒定是能产生干涉的必要条件，满足干涉条件的光波称为相干光波，一般通过分波前法和分振幅法可获得两个或多个相干光波。“牛顿环”是一种分振幅法等厚干涉现象，最早为牛顿所发现，但他由于过分偏爱他的微粒说，因而他始终无法正确解释这个实验现象。牛顿环干涉现象在光学加工中有着广泛应用，如测量透镜的曲率半径，光波的波长，利用产生等厚条纹的形状、数目、间距以及条纹移动情况，检验表面光洁度和平整度，还可以测量物体的微小长度，厚度，角度和位移等，而且测量准确度较高，可达 $0.01\text{ }\mu\text{m}$ 。

衍射使光强在空间重新分布，利用硅光电池等光电器件测量光强的相对分布是一种常用的光强分布测量方法。利用光遇到障碍物产生的衍射现象可以对一些物体尺寸进行准确测量，特别是激光技术普及应用以来，出现了许多以激光作光源进行衍射测量的方法，可以测量各种细丝直径、狭缝宽度、正交金属丝网间距以及透镜焦距等。研究光的衍射不仅有助于进一步加深对光的波动性的理解，同时还有助于进一步学习近代光学实验技术，如光谱分析、晶体结构分析、全息照相、光信息处理等。

衍射通常分为两类：一类是满足衍射屏离光源或接收屏的距离为有限远的衍射，称为菲涅耳衍射；另一类是满足衍射屏与光源和接收屏的距离都是无限远的衍射，也就是照射到衍射屏上的入射光和离开衍射屏的衍射光都是平行光的衍射，称为夫琅和费衍射。菲涅耳衍射解决具体问题时，计算较为复杂。而夫琅和费衍射的特点是，只用简单的计算就可以得出准确的结果，应用更为广泛。

本实验利用综合光学实验仪组合元器件，完成牛顿环等厚干涉和夫琅和费衍射实验，从中去理解光的波动性，体会其应用。

【开篇设问】

1. 干涉现象产生的条件？牛顿环的结构及产生条纹的原理，其干涉条纹形成在那一个面上（即定域在何处）？
2. 当用不同波长的光照射牛顿环时明暗环的间距有什么不同？
3. 实验中为什么测牛顿环直径而不测半径，如何用读数显微镜测牛顿环条纹直径，若十字叉丝点不是准确的通过圆环中心，测得的可能是弦长而不是直径，对结果有影响吗，为什么？
4. 衍射现象是怎样产生的？如何做才能观察到夫琅和费衍射条纹？
5. 单缝衍射缝宽改变时（增加或减小），衍射花样如何变化？
6. 单缝衍射实验中，如果入射的平行光不是垂直照射在狭缝平面，衍射条纹会有什么变化？

【实验目的】

1. 观察牛顿环等厚干涉现象。
2. 掌握牛顿环测平凸透镜曲率半径方法，从中了解其在光学加工中一些应用的原理。

3. 观察单缝夫琅和费衍射现象。
4. 掌握单缝衍射相对光强的一种测量方法，并利用单缝夫琅和费衍射测出单缝宽度，从中了解利用衍射测量物体尺寸的原理。

【实验原理】

一、牛顿环干涉

当一个曲率半径很大的平凸透镜的凸面放在另一块光学平板玻璃上即构成了牛顿环装置（图 1a）。这时，在透镜凸面和平板玻璃之间形成了一个空气间隙层，间隙层的厚度从中心接触点到边缘逐渐增加。若有一束单色光垂直地入射到平凸透镜上，则空气间隙层上下表面反射的两束光存在光程差，它们在平凸透镜的凸面上相遇时就会产生干涉现象，由于光程差取决于空气层的厚度，所以厚度相同

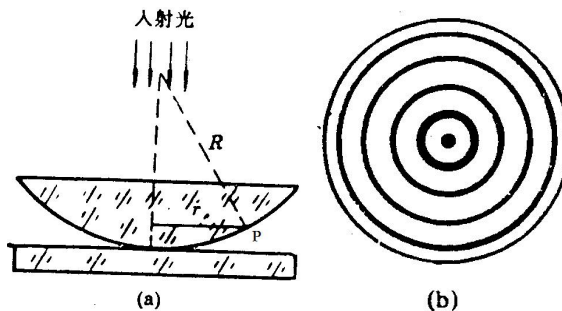


图 1 牛顿环

处呈现同一级干涉条纹，故此种干涉称为等厚干涉，干涉条纹为以接触点为中心的一系列明暗相间的同心圆环。如图 1b 所示。

$$\text{如图 1a, 在 } P \text{ 点处的两相干光的光程差为: } \delta_k = 2d_k + \frac{\lambda}{2} \quad (1)$$

式中 $\frac{\lambda}{2}$ 是因为光线在平面玻璃界面反射时所产生半波损失而带来的附加光程差。

$$\text{由干涉条件知, 当光程差满足: } \delta_k = 2d_k + \frac{\lambda}{2} = (2k+1)\frac{\lambda}{2} \quad k=0, 1, 2, 3, \dots \quad (2)$$

时，出现暗条纹，由此可见，接触点处 $d_0 = 0$ ，对应的是零级暗条纹。

$$\text{当光程差满足: } \delta_k = 2d_k + \frac{\lambda}{2} = k\lambda, \quad k=1, 2, 3, \dots \quad (3)$$

时出现明条纹，由于一般测量时均使用暗条纹，所以对亮条纹不再详述。

空气间隙层厚度 d_k 和透镜凸面曲率半径 R 及干涉环暗条纹的半径 r_k 之间有着简单的几何关系，即：

$$r_k^2 = R^2 - (R - d_k)^2 = 2Rd_k - d_k^2 \quad (4)$$

因为 $R \gg d_k$ ，所以 $d_k^2 \ll 2Rd_k$ ，略去 d_k^2 项，式 (2) 代入式 (4) 后，得出暗条纹的半径为：

$$r_k^2 = kR\lambda, \quad k=0, 1, 2, \dots \quad (5)$$

由式 (5) 可知，如果单色光源的波长 λ 已知，测出 k 级暗环的半径 r_k ，就可算出曲率半径 R ；反之，如果 R 已知，测出 r_k 后，就可计算出射单色光源的波长 λ 。但是实验中如果用 (5) 式时，往往难以测量，原因在于凸面和平面不可能是理想的点接触，接触压力会引起局部形变，使接触处成为一个圆面，干涉中心为一暗斑，而不是一个暗点；或者空气间隙层中有了尘埃，附

加了光程差，干涉环中心为一亮（或暗）斑，这些原因均无法确定环的几何中心，半径也就不能直接测量，且难以确切判定条纹的干涉级次 k ，即干涉条纹级次与你实际数的环数可能不一致，导致实验无法进行，因此需要有其它的做法，通常在离中心较远的地方，寻找两个有一定间隔，比较清晰的环条纹，测出它们的直径，数出相差的级次即相差环数来计算 R 或 λ 。

设 k 与 $(k+m)$ 是你数的环数，而与其相应的级次就是 $(k+n)$ 与 $(K+m+n)$ ， n 是环数与相应级次相差的值。

由 (5) 式得第 k 个暗环直径：

$$D_k^2 = 4(k+n)R\lambda$$

第 $k+m$ 个暗环直径：

$$D_{k+m}^2 = 4(k+m+n)R\lambda$$

两式相减得：

$$D_{k+m}^2 - D_k^2 = 4mR\lambda \quad (6)$$

即可算出 R 或 λ 。

二、夫琅和费单缝衍射

夫琅和费衍射是远场衍射，要求在实验中把光源及接收屏放在离衍射屏无穷远处，这显然办不到。不过人们设计了其它的方案：如图 2 将光源 S 放在透镜 L_1 的前焦点，其发出的光经透镜后光束成平行光，好像光源是在无穷远处，平行光照在单缝 AB 平面上，产生衍射后，会在无穷远处形成夫琅和费衍射条纹，此时，让该衍射光通过透镜 L_2 会聚，把接受屏放在透镜 L_2 后焦面上就可看到明暗相间的衍射条纹了，这就是所谓的焦面接收方案；根据光波的标量衍射理论，在满足夫琅和费近似的条件下，也可以不用透镜就能获得夫琅和费衍射，夫琅和费近似的条件是：光源离单缝距离非常远，设 L 为光源到单缝距离， a 为单缝宽，则

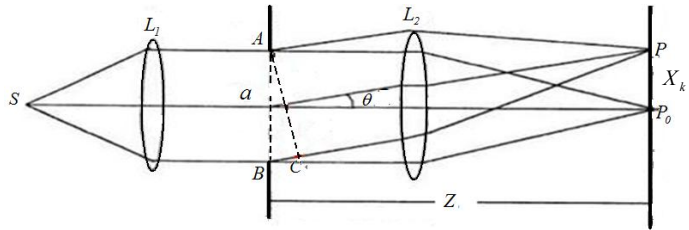


图2 单缝衍射示意图

$L \gg \frac{(a/2)^2}{\lambda}$ ，即光源发出的光可近似看成平行光；接受屏离单缝非常远，即 $Z \gg \frac{(a/2)^2}{\lambda}$ ，设 Z 为接受屏到单缝距离，这就是所谓远场接受方案。

惠更斯—菲涅耳原理告诉我们：波在传播的过程中，从同一波阵面上的各点发出的次波是相干波，经传播而在空间某点相遇时，产生相干叠加。如图 2 所示，计算单缝所在处波阵面上各点发出的子波在 P 点引起光振动的总和，就可以得到 P 点的光强度。可见，干涉和衍射都是光波相干叠加的表现，本质上并无区别，一般来讲，干涉指有限多（分离的）光束的相干叠加，衍射指波面上（连续的）无穷多子波发出光波的相干叠加。

根据惠更斯—菲涅耳原理可以推出，当入射光波长为 λ ，单缝宽度为 a 时，单缝夫琅和费衍射的光强分布为：

$$I = I_0 \frac{\sin^2 u}{u^2} \quad u = \frac{\pi a \sin \theta}{\lambda} \quad (\text{式子推导可参考物理教科书}) \quad (7)$$

式中 I_0 为中央明纹中心处的光强度， u 为单缝边缘光线与中心光线的相位差。

根据上面的光强公式，可得单缝衍射的特征如下：

(1) 中央明纹, 在 $\theta=0$ 处, $u=0$, $\frac{\sin^2 u}{u^2}=1$, $I=I_0$, 对应最大光强, 也称为中央主极大, 此即中央明纹中心的光强。

(2) 暗纹, 当 $u=k\pi, k=\pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$ 时: $\sin u=0$ 即 $I=0$, 对应暗纹。由于 $u=\frac{\pi a \sin \theta}{\lambda}$, 可得暗纹中心出现条件:

$$a \sin \theta = k\lambda, k=\pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots \quad (8)$$

因为夫琅和费衍射时, θ 角很小, 即 $\theta \approx \sin \theta$, 由 (8) 式可知任何两相邻暗条纹间的衍射角的差值是 $\Delta\theta = \pm \frac{\lambda}{a}$, 即暗条纹是以 P_0 点为中心等间隔左右对称分布的。

(3) 次级明纹, 在两相邻暗纹间存在次级明纹, 它们的宽度是中央亮条纹宽度的一半。这些亮条纹的光强最大值称为次极大。由 $\frac{d}{d\alpha}(\frac{\sin u}{u})^2 = 0$, 可得其角位置依次是:

$$\theta = \pm 1.43 \frac{\lambda}{a}, \theta = \pm 2.46 \frac{\lambda}{a}, \theta = \pm 3.47 \frac{\lambda}{a}, \dots$$

把上述的值代入光强公式 (1) 中, 可求得各级次明纹中心的强度为

$$I = 0.047I_0, I = 0.016I_0, I = 0.008I_0, \dots$$

从上面可以看出, 次级大接近相邻两暗纹的中点, 朝主极大方向偏一点, 各次级明纹的光强随着级次 k 的增大而迅速减小, 第一次级大的光强还不到主极大光强的 5%, 单缝衍射图样的相对光强分布如上图 3 所示。

中央明纹宽度由 $k=\pm 1$ 的两个暗条纹的衍射角所确定, 由式 (8) 可得中央明纹的角宽度为 $\Delta\theta = \frac{2\lambda}{a}$ 。由于中央明纹集中了绝大部分光能, 它的角宽度可以体现衍射效应的强弱, 由上式可以看出, 当光波长的波长一定时, 缝宽 a 愈小, $\Delta\theta$ 愈大, 即对光束限制越大, 衍射场越弥散, 在屏上相邻条纹的间隔也愈大, 衍射效果愈显著。反之, a 愈大, $\Delta\theta$ 愈小, 条纹向中央明纹靠拢; a 无限大, $\Delta\theta \rightarrow 0$, 衍射现象消失, 光线沿直线传播。

可利用 (8) 式 $a \sin \theta = k\lambda$ 测量单缝宽度 a , 由于缝到屏距离大, 在近轴情况下衍射角很小, 有 $\theta \approx \sin \theta \approx \frac{X_k}{Z}$,

$$\text{则:} \quad a = \frac{k\lambda}{\theta} = \frac{Zk\lambda}{X_k} \quad (9)$$

式中 Z 是单缝到接受屏即硅光电池之间的距离, X_k 为不同级次暗条纹相对中央主极大之间的距离

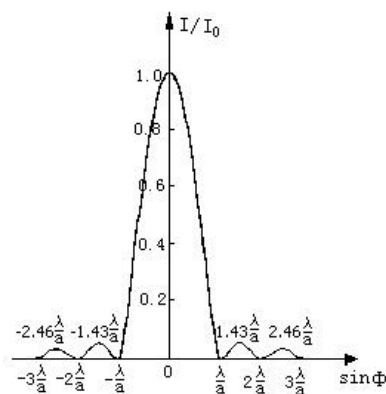


图 3 单缝衍射相对光强分

【仪器简介】 简要介绍仪器的结构, 测量原理和实验方法。详细介绍放在视频;

半导体激光器、单缝、导轨 (1 米长)、一维光强测量装置、光电探头、白屏、若干滑座、WJF 数字式检流计、牛顿环装置、钠光灯、改进型读数显微镜。

【实验内容】

一、测量牛顿环曲率半径

利用改进型读数显微镜测量牛顿环曲率半径，图 4 是实验装置图。

1. 调节光路

(1) 借助室内灯光，用眼睛直接观察牛顿环装置，调节装置上的螺钉，使牛顿环条纹成同心圆环，并位于装置中心，这是为什么？注意调节螺钉应松紧适当，这又是为什么？

(2) 在导轨上安上改进型读数显微镜，牛顿环安装在一维光强装置上，放上导轨，钠光灯置读数显微镜前端一侧，调节同轴等高，轻轻旋转 45° 平面反射玻璃片，使钠光灯发出的黄色光，经 45° 玻璃片反射后，垂直入射到牛顿环元件上，并能通过读数显微镜看到钠黄光，想想为什么？

2. 改进型读数显微镜应进行以下几步调节

(1) 调节读数显微镜上的目镜使十字叉丝清晰；

(2) 聚焦：缓慢沿导轨前后移动牛顿环装置，直至其目镜中看到清晰的牛顿环条纹，对着目镜晃晃眼睛，看看叉丝与牛顿环条纹有无视差。

(3) 缓慢旋转牛顿环支架即一维光强测量装置上的鼓轮，轻微调节读数显微镜支架上的微调螺钉，直至其目镜中看到牛顿环图像居中，在测量时要保证且其中竖直叉丝与牛顿环移动方向垂直，你能说说理由吗？

3. 测量干涉条纹直径

测量时，一般在离牛顿环中心较远的地方选择两个清晰的环测量，两环环数差 m 也要适中，下面说一方案供参考：转动一维光强测量装置上鼓轮，移动牛顿环，同时在目镜中观察，使十字叉丝由牛顿环中央缓缓向一侧移动至第 22 暗环，然后自 22 暗环起回头单方向转动鼓轮，移动牛顿环，使读数显微镜依次测出第 20 暗环和第 10 暗环的直径的左位置、右位置，则第 20 暗环和第 10 暗环的直径为： $D_{20} = |d_{20左} - d_{20右}|$ ， $D_{10} = |d_{10左} - d_{10右}|$ ，共测 3 组，取平均值，代入 (6) 式计算 R 。

二、测量单缝夫琅和费衍射相对光强分布以及单缝宽度

本实验用激光器作光源，由于激光器发散角小，可以认为是近似平行光照射在单缝上；其次，按夫琅和费近似条件，适当调节单缝宽度及单缝距接收屏距离，使缝宽相对于缝到接收屏的距离足够小，大致满足衍射光是平行光的要求，这样可无需透镜，用远场接收的方案进行实验，图 5 是实验装置图。

1. 调节光路

调整仪器同轴等高；将导轨上的激光器、单缝、放在一维光强测量装置上的光电探头尽可能调至同轴等高，使激光能垂直照射在单缝平面上，为观察夫琅和费衍射，接收屏与单缝之间的距离尽量大些（为什么？）。

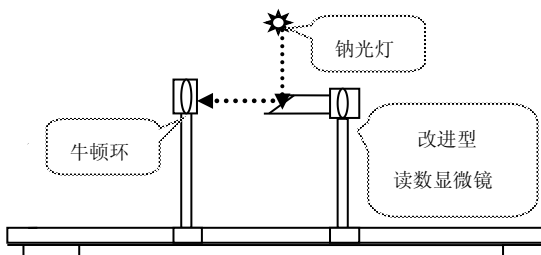


图 4 牛顿环干涉光路图

2. 观察单缝衍射现象

改变单缝宽度，观察衍射条纹的变化，观察各级明条纹的光强变化。

3. 测量衍射条纹的相对光强

(1) 本实验用硅光电池作为光电探测器件测量光的强度，把光信号变成电信号，再接入测量电路以测量光电信号。



图 5 衍射光强测试系统

(2) 测量时，缝宽建议 0.1mm — 0.2mm ，接收屏与单缝之间的距离 70cm 以上为好，注意导轨长度只有 1 米。旋转一维光强装置上的鼓轮，横向移动光电探头，从一侧衍射条纹开始测起，记下此时鼓轮读数，读取检流计读数，同方向转动鼓轮，中途不要改变转动方向。每移动适当间隔（本次实验间隔定为 0.3mm ），读取一次检流计读数，一直测到另一侧的对称处，表格自拟。

4. 单缝宽度 a 的测量

由导轨自带的标尺，测出缝到接受屏也就是硅光电池表面的距离 Z ，在所测得的光强分布图上求 k 级暗纹 X_k 的大小，带入 (9) 式就可求得缝宽 a 大小，另外，用单缝上自带的测微计测出缝宽，以便与衍射办法测的缝宽做比较。

注意事项：

1. 不要用手触摸镜片。
2. 在做实验时，转动鼓轮，中途不要改变转动方向，避免空程误差。
3. 操作动作要温柔，防止实验装置振动引起条纹变化。
4. 眼睛不得直视激光！不要随意玩弄激光器，以免产生伤害！

【结果分析】数据处理和结果表述。

一、测量牛顿环曲率半径

1. 自己设计表格，记录数据。钠光波长 $=589.3\text{nm}$ 。
2. 计算牛顿环曲率半径 R 。
3. 计算曲率半径 R 的标准不确定度，分析误差原因。

二、测量单缝夫琅和费衍射相对光强分布以及单缝宽度：

1. 自己设计表格，记录数据。激光波长 $=635\text{nm}$ 。
2. 将所测得的 I 值做归一化处理，即将所测的数据对中央主极大取相对比值 I/I_0 （称为相对光强），在直角坐标纸上描出 $I/I_0 \sim X$ 曲线。（ X 为测量点到中央极大值点的距离）
3. 由图中找出各次极大的位置与相对光强，分别与理论值进行比较。
4. 单缝宽度的测量，从所描出的分布曲线上，确定 $K=\pm 1, \pm 2, \pm 3$ 时的暗纹位置 X_k ，将

X_s 值与 Z 值代入公式 (9) 中, 计算单缝宽度 a , 与用单缝上自带的测微计测的缝宽对比, 分析误差原因。

【拓展内容】

1. 如何用牛顿环来测定液体的折射率?
2. 你可以利用夫琅和费衍射原理去设计测量其它微小量吗? 举例说明。

【附录】

WJF 数字式检流计使用方法简介:

WJF 数字式检流计是一种检测微小电流的仪器, 如图 6 所示, 使用方法如下:

1. 开启电源开关, 使仪器预热 10 分钟;
2. 量程开关置于“1”档, 衰减旋钮置于校准位置 (顺时针转到头), 调节调零旋钮使数据显示为-0.00;

3. 选择适当量程, 接上光电探头, 即可测量光电流大小。



图 6

改进型读数显微镜简介:

改进型读数显微镜如图 7 所示, 是一种前端带有, 45° 平面反射玻璃片, 后端带有螺杆式测微目镜的显微镜, 各部分如下。

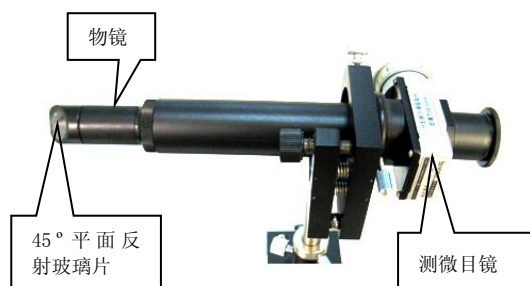
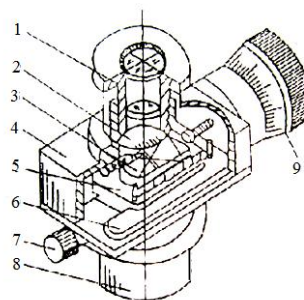


图 7



测微目镜

1. 目镜
2. 主尺
3. 叉丝双线板
4. 壳体
5. 滑板
6. 底板
7. 锁紧螺丝
8. 接头套筒
9. 测微目镜读数鼓轮