

第 43 讲 光的衍射现象 单缝夫琅禾费衍射 光学仪器的分辨本领

教学要求:

了解菲涅耳衍射、夫琅和费衍射、惠更斯—菲涅耳原理；理解光的衍射现象；单缝的夫琅和费衍射；圆孔的夫琅和费衍射、瑞利准则、分辨律；理解光学仪器的分辨本领。

重点与难点:

重点：单缝的夫琅和费衍射。

难点：光的衍射现象。

15.1 光的衍射现象 惠更斯——菲涅耳原理

15.1.1 光的衍射现象及分类

在讨论第六章时就已知道：孔隙（或障碍物）的线度与波长的比值直接影响着衍射现象，当孔隙（或障碍物）的线度与波长的数量级接近时，才能观察到明显的衍射现象。对于光波，由于波长远小于一般孔隙（或障碍物）的线度，所以光的衍射现象通常不易观察到。而光的直线传播却给人们留下了深刻的印象。

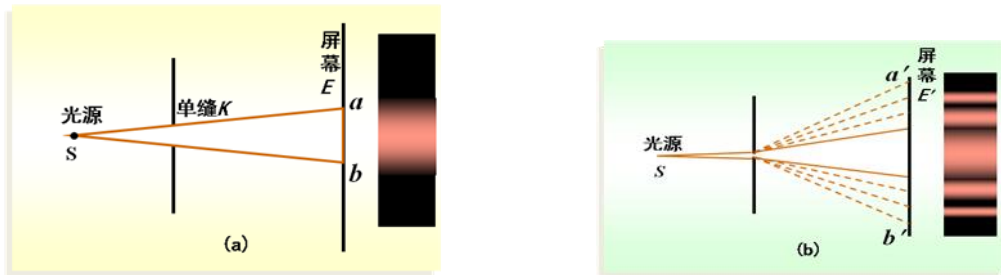


图 15-1 光的衍射现象实验

在实验室中，采用高亮度的激光或是普通的强点光源，同时屏幕的面积也足够大，则可以将光的衍射现象演示出来。如图 15-1 (a) 所示，E 为屏幕，K 是一个可调节的狭缝，S 为一单色点光源。实验发现，当 E，K，S 三者位置固定的情况下，光通过宽缝时，是沿直线传播的，如图(a)所示。若将缝的宽度减小到约 10^{-4} m 及更小时，缝后几何阴影区的光屏

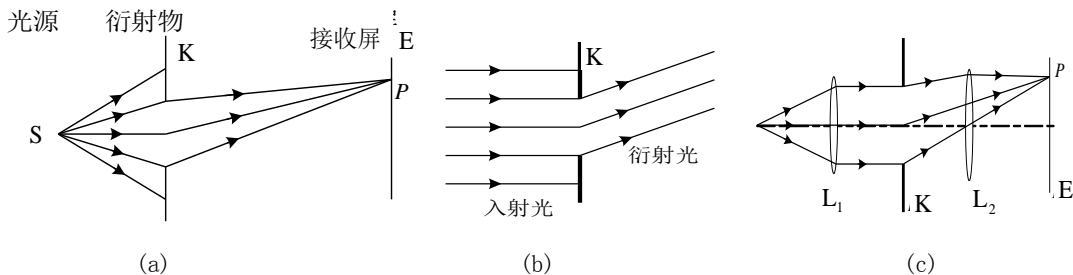


图 15-2 菲涅耳衍射和夫琅禾费衍射

上将出现衍射条纹，如图 (b) 所示，光斑的亮度也由原来的均匀分布变成一系列的明暗条纹（单色光源）或彩色条纹（白光光源），条纹的边缘也失去了明显的界限，变得模糊不清，这就是光的衍射现象。

衍射系统是由光源、衍射屏和接收屏组成，通常是三者相对位置的大小，把衍射现象分为两类。一类是光源、接收屏（或两者之一）与衍射物之间的距离有限远。这种衍射叫做**菲涅耳衍射**（或**近场衍射**），如图 15-2 (a) 所示。

另一类是光源、接收屏与衍射物的距离都是无限远。这种衍射称为**夫琅禾费衍射**（或**远场衍射**），如图 15-2 (b) 所示。在实验室中产生的夫琅禾费衍射通常利用两个会聚透镜来实现，如图 15-2 (c)。

由于夫琅和费衍射在实际应用和理论上都十分重要，而且这类衍射的分析与计算都比菲涅耳衍射简单，因此本节只讨论只讨论夫琅和费衍射。

15.1.2 惠更斯——菲涅耳原理

惠更斯原理指出：波阵面上的每一点都可以看成是发射子波的新波源，任何时刻子波的包迹即为新的波阵面。惠更斯原理可以定性解释衍射现象中的光的传播方向问题。但不能解释为什么会出现衍射条纹，更不能计算光波衍射现象图样中的条纹位置和强度分布，菲涅耳又补充指出：衍射时波场中各点的强度由各子波在该点的相干叠加决定。利用相干叠加原理发展了的惠更斯原理叫做惠更斯—菲涅耳原理：从同一波阵面上各点发出的子波，在传播过程中相遇时，也能相互叠加而产生干涉现象，空间各点波的强度，由各子波在该点的相干叠加所决定。

如图 15-3 所示， $d\vec{S}$ 是某波阵面 S 上的任一面元，菲涅耳认为，面元 $d\vec{S}$ 发出的子波，在波阵面前方某点 P 点引起的光振动的振幅与面元的大小成正比，与面元到 P 点的距离 r 成反比，并且随面元法向 \vec{e}_n 和 \vec{r} 的夹角 θ 增大而减小，当 $\theta \geq \frac{\pi}{2}$ ，振幅为零。计算整个波阵面上所有面元发出的子波在 P 点引起的光振动的总和，就可得到 P 点处的光强。

应用惠更斯—菲涅耳原理，原则上可解决一般衍射问题，但积分计算是相当复杂的，只能对少数简单情况求得解析解。在下一节中，将采用菲涅耳波带法来定性讨论单缝夫琅和费

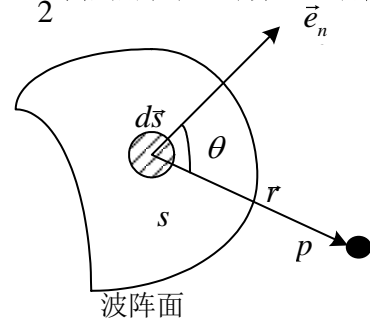


图 15-3 惠更斯—菲涅耳原理

衍射问题。

15.2 单缝夫琅禾费衍射

图 15-4 所示是单缝夫琅禾费衍射的实验装置，

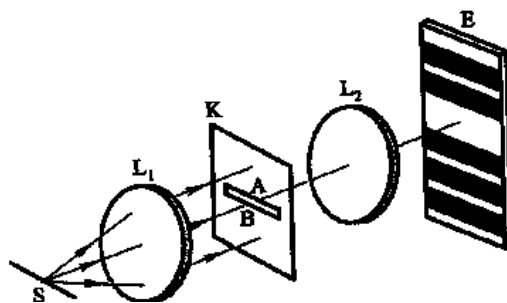


图 15-4 单缝夫琅禾费衍射的实验装置图

光源 S 处于凸透镜 L_1 主焦面上，从而经 L_1 发出的光为平行光，垂直射到单缝 K 上产生衍射，衍射光经凸透镜 L_2 会聚在焦平面处的屏幕 E 上，屏上将出现与缝平行的明暗相间的衍射条纹。

现在用菲涅耳波半波带法来分析产生明暗纹的条件。

1 平行衍射光的获得

设单缝 K 的宽度为 a (如图 15-5 所示的 AB 为单缝的截面，为方便理解，特将缝放大)，平行入射光垂直投射到缝 K 上，其波前与缝平面 AB 重合。按惠更斯原理，波前上的每一点都可看成发射球形子波的波源，而每个子波源都可以向前方各个方向发出无穷多束光线，统

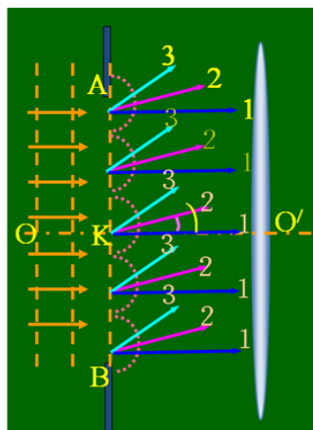


图 15-5 单缝衍射

称为衍射光，如图 15-5 中 A 点的 1, 2, 3... 光线都是衍射光线。每个子波源所发出的沿同一方向的平行光构成了一束平行衍射光。如光线系 1, 光线系 2, ... 等构成无穷多束平行衍射光。衍射后沿某一方向传播的光线与平面衍射屏法线之间的夹角 θ 称为**衍射角**。为方便起见，我们对衍射角的正负作如下规定：从法线到光线为逆时针绕向时， θ 取正值，反之取负值。在这样规定下，并考虑惠更斯-菲涅耳原理， $-\pi/2 < \theta < \pi/2$ 。每一束平行光经透镜 L_2 汇聚后，聚焦于 L_2 焦平面上的一点。对同一束平行光而言，它们来自同一波前上的各个子波，因此满足相干条件。每一束平行光都在光屏上进行相干叠加，其相干叠加后的振幅，则由他们的光程差决定，因而在屏幕上形成明暗条纹。

2 衍射条纹分布

如图 15-6 所示, AB 为单缝的截面, 显然, 沿入射方向传播的光线系①, 其衍射角 $\theta = 0$, 其中每条光线的光程都相等, 因而叠加结果相互加强, 这样, 在正对狭缝中心的 O' 点处将是一条明纹的中心, 这条明纹叫做中央明纹。

我们再考虑衍射角为 θ 方向的光线[图 15-6 (a) 中光线②], 经透镜 L 后会聚于屏幕上 P

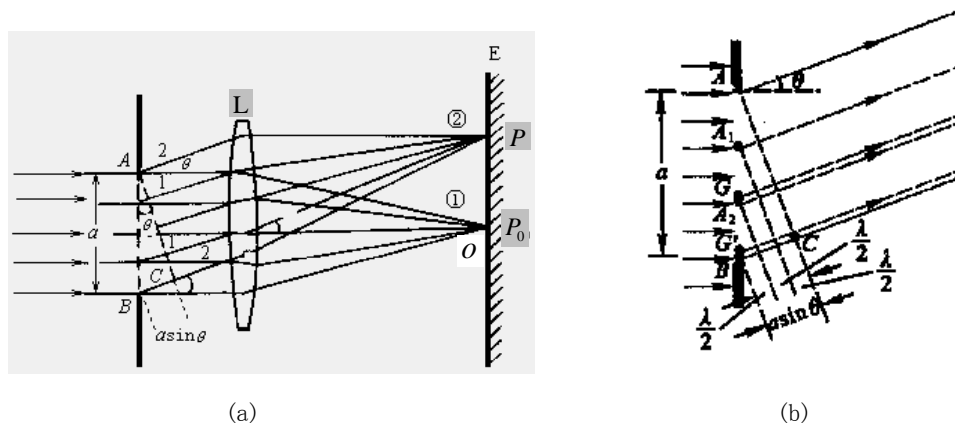


图 15-6 单缝夫琅禾费衍射条纹的计算

点。显然, 由单缝 AB 上各点发出的衍射光到达点 P 的光程各不相同。其光程差可作这样的分析：过 A 作平面 AC 与衍射光线②垂直, 由透镜的等光程性可知, AC 面上各点到点 P 的光程都相等, 即从面 AB 发出的各光线在点 P 的相位差, 就对应于从 AB 面到 AC 面的光程差。由图 15-6 (a) 可知, 单缝的两边缘 A 和 B 发出的光线沿 θ 方向到 P 点的光程差最大, 即为 $\Delta = BC = a \sin \theta$, 其它各衍射光间的光程差连续变化, 衍射角 θ 不同, 最大光程差 BC 也不相同, P 点的位置也不相同。由菲涅耳半波带法分析可知, 屏幕上不同点强度分布, 正是取决于这最大光程差。

3 菲涅耳半波带法

为分析各光线在点 P 叠加的结果, 菲涅耳提出了**波带法**: 作一些平行于 AC 的平面, 使两相邻平面之间的距离等于入射光的半波长, 即 $\frac{\lambda}{2}$ 。假定这些平面将单缝处的波阵面 AB 分成 AA_1 、 A_1A_2 、 A_2B 等整数个面积相等的半波带 [图 15-6 (b) 恰好为三个]。半波带在 P 点引起的光振动的特点:

(1) 由于各个半波带的面积相等, 所以各个半波带在 P 点所引起的光振幅接近相等。

(2) 两相邻的半波带上, 任何两个对应点 (如 A_1A_2 带上的 G 点与 A_2B 上的 G' 点) 所发出的光线达到 AC 面上时光程差为 $\frac{\lambda}{2}$, 即位相差为 π (这即是**将这种波带称为半波带的原因**), 可知在 P 点它们的位相差为 π 。所以任何两个相邻半波带所发出的光线在 P 点引起的光振动将完全互相抵消。

由此可知

$$\text{当} \quad BC = a \sin \theta = \pm 2k \frac{\lambda}{2} \quad k = 1, 2, 3, \dots$$

即 BC 是半波长的偶数倍时, 对应于 θ 方向, 单缝可分成偶数个半波带, 则所有相邻半波带发出的光在 P 点成对地互相干涉抵消, 因而 P 点为暗纹。

$$\text{当} \quad BC = a \sin \theta = \pm (2k + 1) \frac{\lambda}{2} \quad k = 1, 2, 3, \dots$$

即 BC 是半波长的奇数倍时, 亦即单缝可分成奇数个半波带, 由于相互干涉抵消的结果, 还剩下一个半波带发出的光未被抵消, 所以 P 出现明纹。

综上所述, 可得如下结论:

$$a \sin \theta = \left. \begin{array}{l} 0 \quad \text{(中央明纹)} \\ \pm (2k + 1) \frac{\lambda}{2} \quad (k = 1, 2, \dots) \quad \text{(明纹)} \\ a \sin \theta = \pm k \lambda \quad (k = 1, 2, 3, \dots) \quad \text{(暗纹)} \end{array} \right\} \quad (15-1)$$

$\theta = 0$ 称为中央亮纹, $k=1, 2, \dots$ 分别称为第一, 二, \dots 级明纹 (或暗纹)。式 (15-1) 中的正、负号表示条纹对称分布于中央明纹的两侧。

对于任意衍射角 θ 来说, AB 一般不能恰巧分成整数个半波带, 即 BC 不等于 $\frac{\lambda}{2}$ 的整数倍, 此时衍射光束经透镜聚焦后, 形成屏幕上亮度介于最明和最暗之间的中间区域。

4 衍射条纹特征

(1) 明纹与暗纹的位置

设透镜焦距为 f ，由透镜成像性质（经过光心的光线不改变方向）（如图 15-7）

$x_k = f \tan \theta_k$ ，当 θ_k 很小时

$$x_k = f \tan \theta_k \approx f \sin \theta_k = \begin{cases} fk \frac{\lambda}{a} & \text{(暗纹)} \\ f(2k+1) \frac{\lambda}{2a} & \text{(明纹)} \end{cases}$$

(2) 明纹宽度

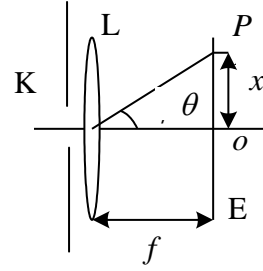


图 15-7 单缝衍射条纹特征的分析

与第 1 级极小对应的衍射角 θ_1 为**中央明纹的半角宽度**

$$\theta_1 = \arcsin \frac{\lambda}{a} \quad (15-2)$$

中央明纹宽度（两个第一级暗纹间距离）

$$l_0 = 2x_1 = 2f \tan \theta_1 \quad (15-3)$$

当 θ_1 很小时 $\theta_1 \approx \frac{\lambda}{a} \quad l_0 = 2f \tan \theta_1 \approx 2f \sin \theta_1 = \frac{2\lambda f}{a}$

其它明纹宽度（相邻暗纹之距）

$$l = x_{k+1} - x_k = f \tan \theta_{k+1} - f \tan \theta_k$$

衍射角较小时 $l \approx \frac{\lambda f}{a}$

即中央明纹为较小级数明纹宽度的 2 倍。

4 单缝衍射明纹的光强分布

在单缝中，光强分布并不是均匀的。这是由于 k 越大， AB 上波阵面分成的波带数就越多，所以，每个半波带的面积就越小，未被抵消的一个半波带在 P 点引起的光强就越弱，各级明纹随着级次的增加而亮纹减弱，中央明纹的光强占总光强的绝大部分，如图 15-8 所示。综述上述的讨论可知，单缝衍射各级条纹的位置和宽度都与缝宽成反比，与入射光波长成正比。这表示缝愈窄，条纹位置离中心愈远，条纹排列愈疏，衍射图象愈清晰，观察愈清楚，测量愈准确。相反，缝愈宽，衍射图象愈差。当缝宽大到一

定的程度时，较高级次的条纹因亮度很小，明暗模糊不清，形成很暗的背景，其它级次较低的条纹完全并入衍射角很小的中央明纹附近，形成单一的明纹，这就

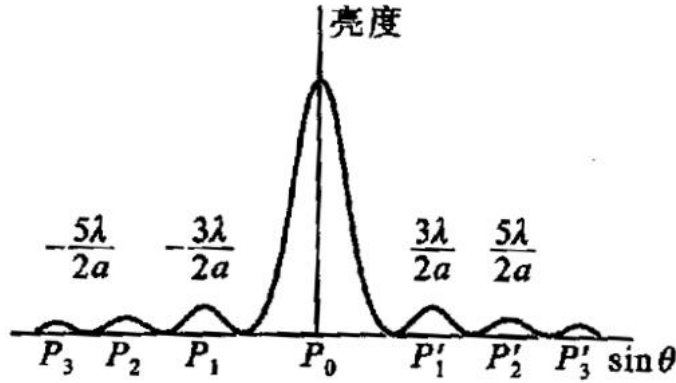


图 15-8 单缝夫琅禾费衍射条纹光强的分布

是几何光学中所说的单缝的像，此时衍射现象消失，归结为直线传播的几何光学，这表明几何光学是波动光学的极限情况。若用复色光入射，例如用白光入射，由于各不同波长的单色光的衍射明纹位置不同，除中央明纹中心仍为白色外，其它各级明纹按由紫到红的顺序向两侧对称排列成彩色条纹，在较高的衍射级内，还会出现前一级光谱区与后一级光谱区重叠的现象。

例 15-1 (1) 在夫琅禾费单缝衍射实验中，用单色光垂直入射缝面，已知光的波长 $\lambda = 500\text{nm}$ ，第一级暗纹对应的衍射角 $\theta_1 = 30^\circ$ ，问缝宽如何？中央明纹的宽度如何？对应该衍射角，单缝被分成多少个半波带？(2) 如果所用单缝的宽度 $a' = 0.50\text{mm}$ ，在焦距 $f = 1.0\text{m}$ 的透镜焦平面上观察衍射条纹，求中央明纹和其它各级明纹的宽度。

解 (1) 由式 (14-18) 的暗纹公式，对第一级暗纹应有 $a \sin \theta_1 = \lambda$

由 $\theta_1 = 30^\circ$ ，可以求得缝宽

$$a = \frac{\lambda}{\sin \theta_1} = \frac{500}{\sin 30^\circ} = 1000(\text{nm}) = 10^{-6}(\text{m})$$

中央明纹宽度 $l_0 = 2x_1 = 2f \cdot \tan \theta_1 = 2 \times 1.0 \times \frac{\sqrt{3}}{3} = 1.155(\text{m})$

此时，对于一般屏幕而言，将完全被中央明纹占据。

若用近似式计算 $l_0 = \frac{2\lambda f}{a} = \frac{2 \times 500 \times 10^{-9} \times 1.0}{10^{-6}} = 1.0(\text{m})$ 误差为 15%。

制造这样窄的单缝在工艺上是相当困难的，而且由于缝太窄，通过单缝的光强太弱，观察起来也十分困难，常用的单缝要宽得多。

$$\text{单缝被分成的半波带数} = 2 \times \frac{a \sin \theta_1}{\lambda} = 2 \times \frac{10^{-6} \times \sin 30^\circ}{500 \times 10^{-9}} = 2$$

(2) 中央明纹宽度

由于
$$\sin \theta_1 = \frac{\lambda}{a'} = \frac{500 \times 10^{-9}}{0.5 \times 10^{-3}} = 10^{-3}$$

所以
$$l_0 = \frac{2\lambda f}{a'} = \frac{2 \times 500 \times 10^{-9} \times 1.0}{0.5 \times 10^{-3}} = 2 \times 10^{-3} (\text{m}) = 2.0 \text{mm}$$

其它各级明纹宽度
$$l = l_0 / 2 = 1.0 \text{mm}$$

例 15-2 如图 15-9，设一监视雷达位于路边 $d = 15\text{m}$ 处，雷达波的波长为 30mm ，射束与公路成 15° 角，天线宽度 $a = 0.20\text{m}$ 。试求：该雷达监视范围内公路长 s 值。

解 将雷达波束看成是单缝衍射的零级明纹由 $a \sin \theta = \lambda$

$$\sin \theta = \frac{\lambda}{a} = \frac{30 \times 10^{-3}}{0.2} = 0.15, \quad \theta \approx 8.63^\circ$$

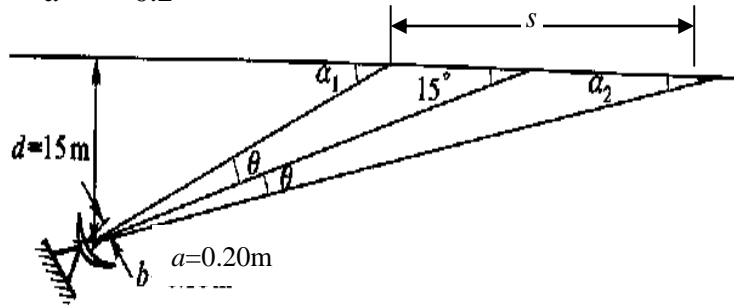


图 15-9 例 15-2 图

$$\alpha_1 = 15^\circ + \theta = 23.63^\circ; \quad \alpha_2 = 15^\circ - \theta = 6.37^\circ$$

$$s = d(\cot \alpha_2 - \cot \alpha_1) = 15(\cot 6.37^\circ - \cot 23.63^\circ) \approx 100(\text{m})$$

例 15-3 用波长为 λ 的单色光照射狭缝，得到单缝的夫琅禾费衍射图样，第 3 级暗纹位于屏上的 P 处，问：(1) 若将狭缝宽度缩小一半，那么 P 处是明纹还是暗纹？(2) 若用波长为 1.5λ 的单色光照射狭缝，P 处是明纹还是暗纹？

解： 利用半波带法直接求解，与暗纹对应的半波带数为偶数 $2k$ ($k=1, 2, \dots$ 为暗纹级数)；与中央明纹除外的明纹对应的半波带数为奇数 $2k+1$ ($k=1, 2, \dots$ 为明纹级数)。

根据已知条件，在屏上 P 处出现第 3 级暗纹，所以对于 P 位置，狭缝处的波面可划分为 6 个半波带。

(1) 缝宽减小到一半，对于 P 位置，狭缝处波面可分为 3 个半波带，则在 P 处出现第 1 级明纹。

(2) 改用波长为 1.5λ 的单色光照射, 则狭缝处波面可划分的半波带数变为原来的一点五分之一, 对于 P 位置, 半波带数变为 4 个, 所以在 P 处将出现第 2 级暗纹。

课堂训练: 波长 $\lambda=600\text{nm}$ 的单色光垂直入射到缝宽 $a=0.2\text{mm}$ 的单缝上, 缝后用焦距 $f=50\text{cm}$ 的会聚透镜将衍射光会聚于屏幕上. 求: (1) 中央明条纹的角宽度、线宽度; (2) 第 1 级明条纹的位置以及单缝处波面可分为几个半波带? (3) 第 1 级明条纹宽度.

解 (1) 第 1 级暗条纹对应的衍射角 θ_0 为
$$\sin \theta_0 = \frac{\lambda}{a} = \frac{6 \times 10^{-7}}{2 \times 10^{-4}} = 3 \times 10^{-3}$$

因 $\sin \theta_0$ 很小, 可知中央明条纹的角宽度为 $2\theta_0 \approx 2 \sin \theta_0 = 6 \times 10^{-3} \text{ rad}$

第 1 级暗条纹到中央明条纹中心 O 的距离为

$$x_1 = f \tan \theta_0 \approx f \theta_0 = 0.5 \times 3 \times 10^{-3} = 1.5 \times 10^{-3} \text{ m} = 1.5 \text{ mm}$$

中央明条纹的线宽度为: $\Delta x_0 = 2x_1 = 2 \times 1.5 = 3 \text{ mm}$

(2) 第 1 级明条纹对应的衍射角 θ 满足
$$\sin \theta = (k + \frac{1}{2}) \frac{\lambda}{a} = \frac{3 \times 6 \times 10^{-7}}{2 \times 2 \times 10^{-4}} = 4.5 \times 10^{-3}$$

第 1 级明条纹中心到中央明条纹中心的距离为

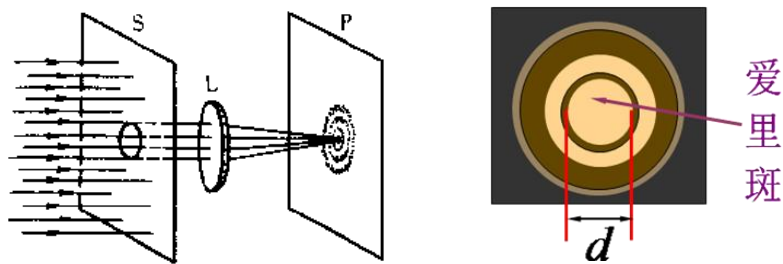
$$x = f \tan \theta \approx f \sin \theta = 0.5 \times 4.5 \times 10^{-3} = 2.25 \times 10^{-3} \text{ m} = 2.25 \text{ mm}$$

15.3 圆孔的夫琅禾费衍射 光学仪器的分辨本领

15.3.1 圆孔的夫琅禾费衍射

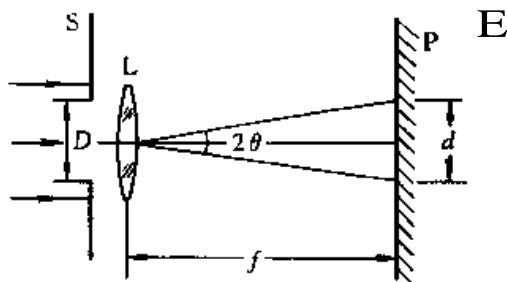
在单缝夫琅禾费衍射的实验装置中, 若用小圆孔代替狭缝, 在位于透镜焦平面所在的屏幕上, 也将出现环形衍射条纹, 如图 15-10 (a) 所示, 中央是一个较亮的圆斑, 它集中了全部衍射光强的 84%, 称为中央亮斑或**爱里斑**。外围是一组同心的暗环和明环, 如图 15-10 (b) 所示, 爱里斑由第一暗环所围, 明纹强度随级次增大而迅速下降, d 是爱里斑的直径, 其半径对透镜光心的张角 θ 称为爱里斑的半角宽度。

由理论计算可知, 爱里斑的半角宽度 θ 与圆孔的直径 D , 入射光波长 λ 的关系为 [图 15-10 (c)]。式中 f 为透镜的焦距。由上式可知, 圆孔的直径 D 越小, 或 λ 越大, 则衍射现象越明显。



(a) 圆孔夫琅禾费衍射的实验装置图

(b) 圆孔夫琅禾费衍射图样



(c) 爱里斑对透镜光心距离与圆孔直径、单色光波长的关系

15-10 爱里斑与圆孔衍射

$$\theta \approx \sin \theta = 1.22 \frac{\lambda}{D} = \frac{d}{f} \quad (15-4)$$

15.3.2 光学仪器的分辨本领

光学仪器观察细小物体时，不仅需要有一定的放大能力，还要有足够的分辨本领，才能把微小物体放大到清晰可见的程度。

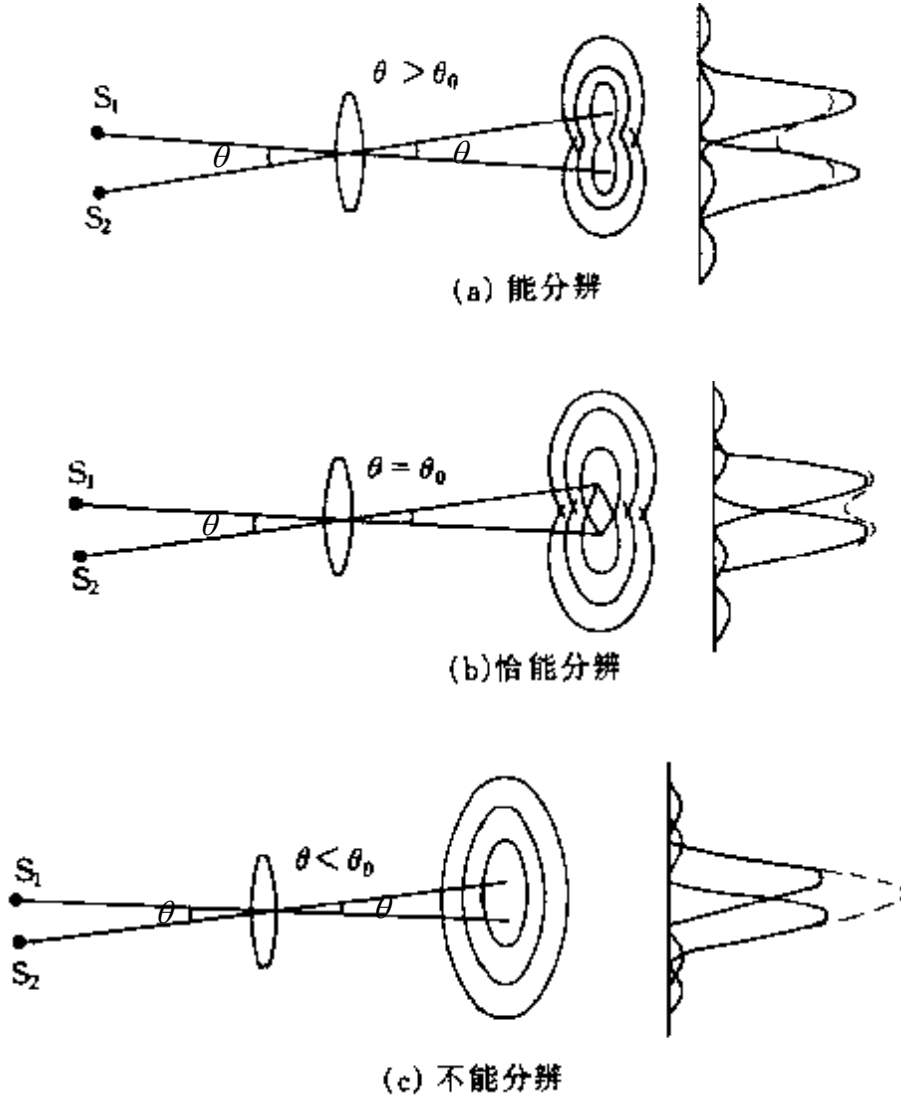
从几何光学的角度，物体通过光学仪器成像时，每一物点都有一个对应的像点，只要适当选择透镜的焦距和物距，总可以得到足够大的放大倍数，物体的任何细节总可分辨，即**理想光学系统的分辨本领可以达到无限大**。然而，从波动光学的观点，光学仪器中的透镜、光阑都相当于一个透光的小圆孔。因此，我们在屏上见到的像是圆孔的衍射图样，粗略地说，物点的像并不是一个几何点，而是前述的环形衍射条纹，其主要部分是爱里斑。如果两个物点距离很近，其相对应的两个爱里斑很可能部分重叠而不易分辨，以至被看成是一个像点。由此，光的衍射限制了光学仪器的分辨本领。

下面以透镜为例，说明光学仪器的分辨能力与哪些因素有关。

在图 15-11(a) 中，两点光源 S_1 和 S_2 相距较远，两个爱里斑中心的距离大于爱里斑的半径 ($d/2$)，这时，两衍射图样中心虽然部分重叠，但重叠部分的光强比爱里斑中心处的光强

要小，因此，两物点是能够分辨的。

在图 15-11 (c)中，两点光源 S_1 和 S_2 相距很近，两个爱里斑中心的距离小于爱里斑的半径，这时，两衍射图样重叠而混为一体，两物点不能被分辨。



15-11 光学仪器的分辨本领

在图 15-11 (b)中，两点光源 S_1 和 S_2 的距离使两个爱里斑中心的距离等于每一个爱里斑的半径，即 S_1 的爱里斑中心正好与 S_2 的爱里斑的边缘（即第一暗环的中心）相重叠， S_2 的爱里斑中心也正好与 S_1 的爱里斑的边缘相重叠，这时两衍射图样重叠部分中心的光强约为单个衍射图样的中央最大光强的 80%。通常把这种情形作为两物点刚好能被人眼或光学仪器所分辨的临界情形。这一判断能否分辨的准则叫**瑞利判据**。即两爱里斑的中心的角距离为爱里斑的半角距离 θ 时，两物点恰能分辨。在这一临界情况下物点 S_1 和 S_2 对透镜光心的张角 θ_0 叫做**最小分辨角**。

注意 瑞利判据中的两点光源是不相干的且光强是相等的。

从图 15-11 (b) 可知, 仪器的最小分辨角应等于爱里斑的角半径

$$\theta_0 = \theta = \arcsin(1.22 \frac{\lambda}{D})$$

当 θ_0 很小时,
$$\theta_0 = \theta = 1.22 \frac{\lambda}{D} \quad (15-5)$$

在光学中, 光学仪器最小分辨角的倒数称为这仪器的分辨本领(或分辨率) R , 当 θ_0 很

小时
$$R = \frac{1}{\theta_0} = \frac{D}{1.22\lambda} \quad (15-6)$$

显然, 光学仪器的分辨率越大越好。式(15-6)表明, 分辨率的大小与仪器的孔径 D 成正比, 与波长 λ 成反比。瑞利准则为设计光学仪器提出了理论指导, 如天文望远镜可用大口径的物镜来提高分辨率, 目前我国国家天文台计划在贵州南部的喀斯特洼地建设口径达 500m 的射电望远镜; 对于电子显微镜则用波长短的射线来提高分辨率, 目前用几十万伏高压产生的电子波, 波长约为 10^{-3} nm , 做成的电子显微镜可以对分子、原子的结构进行观察。

例 15-4 通常人眼瞳孔直径约为 3mm, 在可见光中, 人眼最敏感的波长为 550nm 的黄绿光,

(1) 人眼的最小分辨角多大? (2) 若教室黑板上写有一等号 “=”, 两条线的间距为 2mm, 则等号距离人多远处, 人眼恰能分辨出该符号, 而不致因衍射效应, 将其看成是减号 “-”?

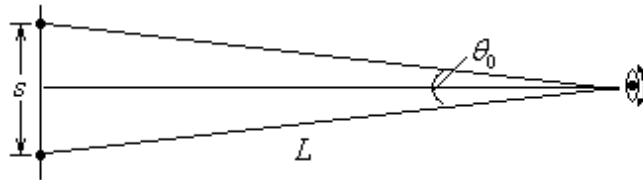


图 15-12 例 15-4 图

解 (1) 人眼的最小分辨角

$$\theta_0 = 1.22 \frac{\lambda}{D} = 1.22 \times \frac{550 \times 10^{-9}}{3 \times 10^{-3}} = 2.24 \times 10^{-4} (\text{rad})$$

(2) 设等号间距为 s , 距离人眼为 L (如图 15-12 所示)。等号对人眼的张角为 $\theta = s/L$, 当 L 太大时导致它对观察者眼睛的张角小于最小分辨角 θ_0 , 二横线不可分辨, 就可能将 “=” 看成 “-” 号, 所

以欲能分辨, 应有
$$\theta = s/L \geq \theta_0,$$

即

$$L \leq \frac{s}{\theta_0} = \frac{2.0 \times 10^{-3}}{2.24 \times 10^{-4}} = 8.9(\text{m})$$

人眼恰能分辨出该符号时，

$$L = 8.9\text{m}$$

作业：4、7、11