

第 38 讲 光的传播规律 光在球面上的反射成像

教学要求:

自学

重点与难点:

重点: 自学。

难点: 自学。

13.1 光的传播规律

13.1.1 几何光学三定律

几何光学是以三个实验定律为基础建立起来的,它是各种光学仪器设计的理论基础。这三个定律为:**光的直线传播定律**、**光的反射定律**和**折射定律**。

光的直线传播定律 光在均匀介质中沿直线传播。
光的反射定律和折射定律

如图 13-1 所示设透明介质 1 和 2 的分界面是平面,当一束光入射到分界面上,一般情形下分解成两束光线:反射光线和折射光线。过入射点作界面的法线,入射线与该法线组成的平面称为入射面。

i 、 i' 、 γ 分别是入射角、反射角和折射角。实验表明:

1. 反射光线和折射光线都在入射面内。

2. 反射角等于入射角 $i' = i$ (13-1)

3. 入射角 i 与折射角 γ 的关系为 $\frac{\sin i}{\sin \gamma} = \frac{n_2}{n_1} = n_{21}$

或 $n_1 \sin i = n_2 \sin \gamma$ (13-2)

n_{21} 称为第二种介质相对于第一种介质的折射率。 n_1 或 n_2 为介质相对于真空的折射率,

$n = c/v$, c 和 v 分别为光在真空中和介质中的速度。

介质折射率与光的波长有关,几种透明介质对钠黄光($\lambda = 589.3\text{nm}$)的折射率如表 13-1 所示。两种介质相比,把折射率较大的介质称为**光密介质**,折射率较小的介质称为**光疏介质**。

表 13-1 几种常见介质的折射率

物质	折射率	物质	折射率
空气	1.00029	加拿大树胶	1.53

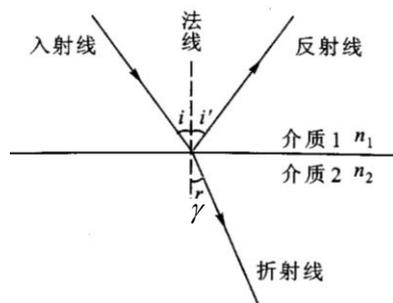


图 13-1 光的反射和折射

二氧化碳	1.00045	水晶	1.54
水	1.333	各种玻璃	1.5~2.0
乙醚	1.36	金刚石	2.417
甘油	1.47		

13.1.2 光路可逆原理

从几何光学的基本原理可以知道,如果图 13-1 中光线逆着反射线的方向入射,则它的反射线将逆着原来的入射线方向传播;再如光线逆着折射线方向由介质 2 入射,则其在介质 1 中折射线必将逆着原来的入射线方向传播.这表明当光线的方向反转时,光将循同一路径而逆向传播,这称为**光路的可逆原理**。

13.1.3 全反射

当光从光密介质(n_1)入射到光疏介质($n_2, n_1 > n_2$)的界面上,折射角大于入射角,当入射角 i 达到和超过**全反射临界角** $i_c = \arcsin(n_2/n_1)$ 时,光线就不再折射而全部被反射,这种现象称为**光的全反射**。

例 13-1 全反射的应用很广,光导纤维就是利用全反射规律使光线沿着弯曲路径传播光的元件[图 13-2(a)].设光学纤维玻璃芯和外套的折射率分别为 n_1 和 n_2 , 且 $n_1 > n_2$, 处于光学玻璃横端面外的介质的折射率为 n_0 . 试证明:能使光线在光学纤维中发生全反射的最大孔径角 i_0 为 $n_0 \sin i_0 = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$, 其中 $n_0 \sin i_0$ 称为光学玻璃的**数值孔径**。

证 如图 13-2(b),按折射定律有 $n_0 \sin i_0 = n_1 \sin \gamma = n_1 \cos i_1 = n_1 \sqrt{1 - \sin^2 i_1}$

若要求在玻璃芯和外套之间发生全反射,则有 $\sin i_1 \geq \frac{n_2}{n_1}$

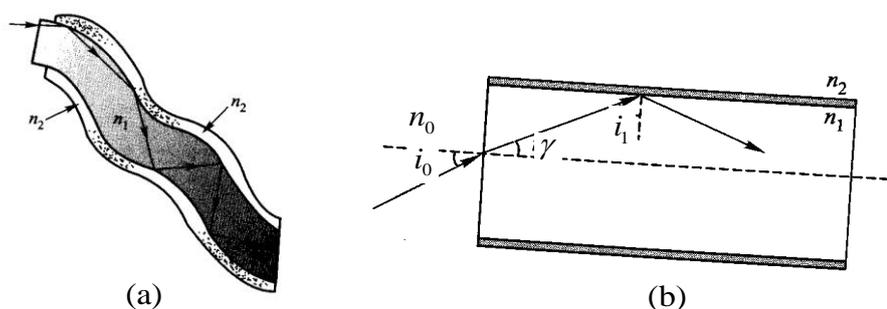


图 13-2 光导纤维

故 i_0 需满足

$$n_0 \sin i_0 \leq n_1 \sqrt{1 - \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2}$$

即 i_0 满足的最大值为

$$n_0 \sin i_0 = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

光导纤维已发展成一门新的学科分支—**纤维光学**，光导纤维可应用于医疗上的内窥镜、光导通讯等领域。

13.2 实物 虚物 实像 虚像

本节介绍在讨论光学系统成像时的一些常用概念。

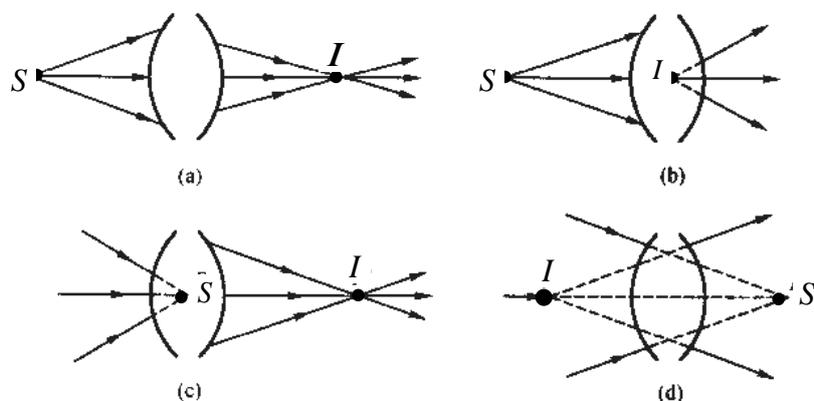


图 13-3 实物、虚物 实像、虚像

球心在同一条直线上的若干反射面和折射面组成的光学系统，称为**共轴球面系统**，或称**共轴光具组**，各球面球心的连线称为**光轴**。平面是球面半径趋于无穷大时的极限情况。

有一定关系的一些光线的集合称为**光束**，自一点发出的光束、会聚于一点的光束、或者光束的延长线相交于一点的光束，皆称为**同心光束**。在几何光学中，把对光学系统入射的同心光束的顶点，称为**物点**；把经过光学系统后出射的同心光束的顶点，称为**像点**。如图

13-3 物点是 S ，像点是 I ，光学系统使物点 S 成像于点 I 。

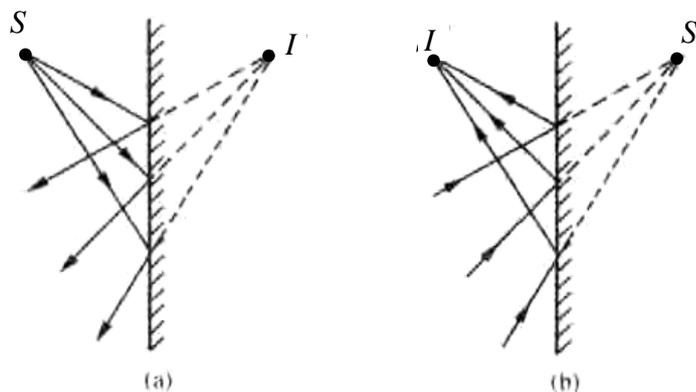


图 13-4 平面镜成像特性

若出射的同心光束是会聚的，则 I 称为**实像点** [图 13-3(a)、(c)]；若出射的同心光束是发散的，则 I 称为**虚像点** [图 13-3(b)、(d)]。若入射的同心光束是发散的，则点 S 称为**实物点** [图 13-3(a)、(b)]；若入射的同心光束是会聚的，则点 S 称为**虚物点** [图 13-3(c)、(d)]。

对于平面镜也有实像和虚像之分，如图 13-4(a)所示是平面镜实物成虚像，而图 13-4(b)中是平面镜虚物成实像。

注意 实像既可以用屏幕接受，又可用眼睛来观察，而虚像不能用屏幕接受，只可用眼睛观察。

13.3 光在球面上的反射成像

如图 13-5 所示， AOB 表示球面的一部分，这部分球面的中心点 O 称为**顶点**，球面的球心 C 称为**曲率中心**，球面半径称为**曲率半径**，以 r 表示。连接顶点和曲率中心的直线 CO 称为**主光轴**，从轴上的一物点 S 发出光线经球面反射后相交于主光轴上 I 点， I 点为物点 S 的像，从顶点 O 到物点 S 的距离称为**物距**，以 p 表示，从顶点 O 到像点 I 的距离称为**像距**，以 p' 表示。

1 正负号法则

研究球面反射、折射以及薄透镜等成像问题，在应用物像公式时，对于不同的情况，需要考虑各量的正负号。读者应注意，各种不同教材或参考书所规定的法则不尽相同。本书作如下的规定，对球面反射和折射以及薄透镜均适用。

以球面顶点为分界点，入射光线方向自左向右为正向，则当物点、像点、焦点和曲率中心在顶点右侧时，物距、像距、焦距和曲率半径均为正；反之在左侧则为负。比如图 13-5 中， p 、 p' 、 r 均为负值。

2 球面反射的物像公式

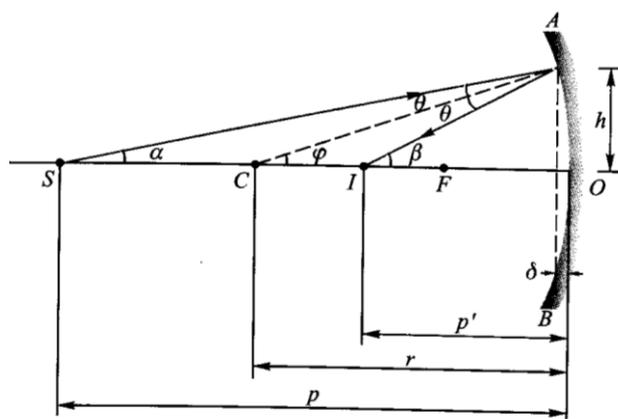


图 13-5 球面反射镜

从图 13-5 可以看出

从两式消去 θ , 得

$$\alpha + \beta = 2\varphi \quad (13-3)$$

又

$$\tan \alpha = \frac{h}{(-p-\delta)}, \quad \tan \beta = \frac{h}{(-p'-\delta)}, \quad \tan \varphi = \frac{h}{(-r-\delta)}$$

对于靠近主光轴附近的**近轴光线**(以后我们讨论的都是近轴光线,不再加以说明), α 、 β 及 δ 都很小, 有

$$\alpha \approx \frac{h}{-p}, \quad \beta \approx \frac{h}{-p'}, \quad \varphi \approx \frac{h}{-r}$$

代入式 (13-3) 得

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{2}{r} \quad (13-4)$$

3 焦点 焦距 焦平面

当 $p \rightarrow \infty$ 时, $p' = \frac{r}{2}$, 即平行主光轴的光束经球面反射后, 将在光轴上会聚成一点, 如图 13-6(a) 所示, 该像点称为反射球面的**焦点**, 以 F 表示, 从顶点 O 到焦点 F 的距离称为**焦距**, 以 f 表示, 即

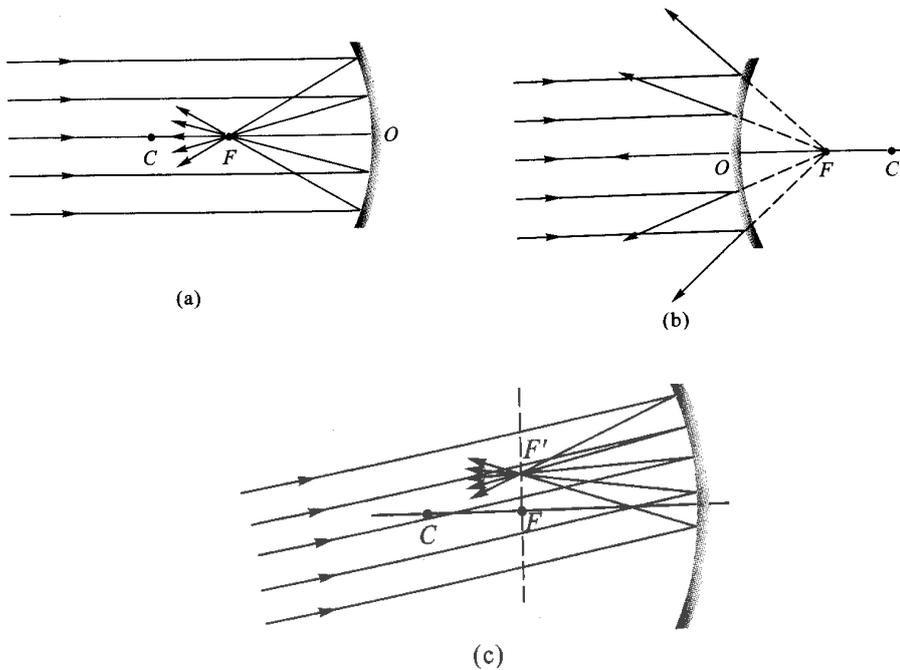


图 13-6 焦点和焦平面

$$f = \frac{r}{2} \quad (13-5)$$

于是式 (13-4) 可写成

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{1}{f} \quad (13-6)$$

式 (13-4) 和式 (3-6) 都称为在近轴光线条件下球面反射的**物像公式**。

如果入射光与主光轴成很小的角度，光线将会聚在垂直于主光轴且通过焦点的一个平面上的 F' 点，如图 13-6 (c) 所示，这个平面称为**焦平面**。

注意 式 (13-4) 和式 (3-6) 虽是用凹面镜导出，但也适用于凸面镜，不过需注意正负号法则。对凹面镜 $r < 0, f < 0$ ，对凸面镜， $r > 0, f > 0$ 。凸面镜的焦点如图 13-6 (b) 所示，这焦点为**虚焦点**。

4 横向放大率

一般说来，垂直于主光轴的物和像有不同的长度和正倒，设物的长度 h_o ，像的长度 h_i ，

如图 13-7 所示，规定垂直线段 h_o 、 h_i 在轴上方为正，下方为负。定义 $m = \frac{h_i}{h_o}$ 为**横向放大率**，

结合本节 1 的符号规则，有

$$m = \frac{h_i}{h_o} = -\frac{p'}{p} \quad (13-7)$$

$m > 0$ 表示像是正立的， $m < 0$ 表示像是倒立的； $|m| > 1$ 表示放大， $|m| < 1$ 表示缩小。

5 作图法

作图法可以直观地了解系统成像的位置、大小和虚实情况。作图时可选择下列三条特殊光线。

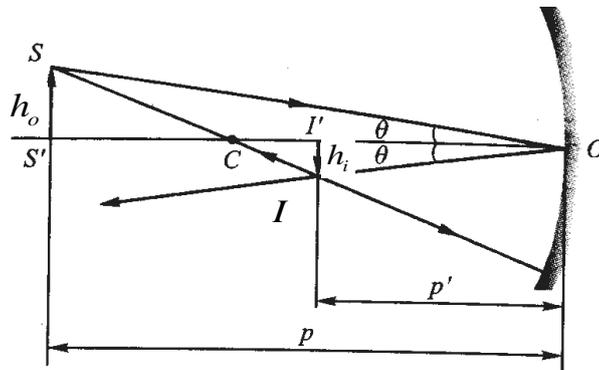


图 13-7 像的横向放大率

(1) 平行于主光轴的光线

它的反射线必通过焦点(凹球面) 或其反射线的延长线通过焦点(凸球面)。

(2) 通过曲率中心的光线

它的反射线和入射线是同一条直线而方向相反。

(3) 通过焦点的光线或入射光的延长线通过焦点的光线

它的反射线平行于主光轴。

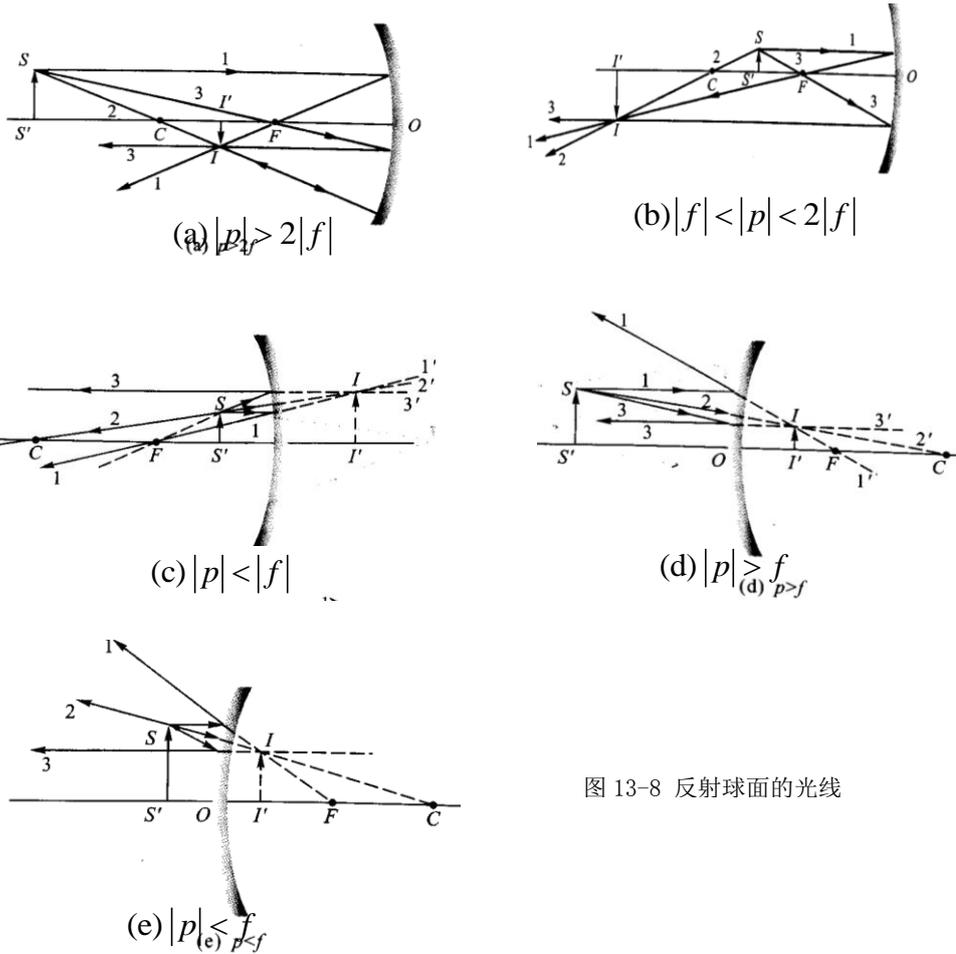


图 13-8 反射球面的光线

作图时任意选取两条光线就可以得到物像关系。图 13-8 画出了不同位置的物体经球面反射时的光路图，并注明了三条特殊光线。从图中可以看出，凸面镜对实物总是成虚像，而且是正立的、缩小的。对于凹面镜，像一般是倒立的实像，只有当 $|p| < |f|$ 时，才成正立的虚像。

凹面镜

物体		像			
位置 (p)	类型(虚、实)	位置	类型(虚、实)	方位(倒立、正立)	放大缩小

$(-\infty, 2f)$					
$2f$					
$(2f, f)$					
f					
$(f, 0)$					
$(0, \infty)$					

凸面镜

物体		像			
位置 (p)	类型 (虚、实)	位置	类型 (虚、实)	方位 (倒立、正立)	放大缩小
$(-\infty, 0)$					
$(0, f)$					
f					
$(f, 2f)$					
$2f$					
$(2f, \infty)$					

例 13-2 一个实物放在曲率半径为 r 的凸面镜前的什么地方能得到: (a) 放大率为 4 倍的实像; (b) 放大率为 4 倍的虚像。

解 (a) 由题意可知 $-\frac{p'}{p} = -4$, 即 $p' = 4p$, 代入物像关系式

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{2}{r} \quad \text{得} \quad p = \frac{5}{8}r = -\frac{5}{8}|r|$$

(b) 由题意可知 $-\frac{p'}{p} = 4$, 即 $p' = -4p$, 代入物像关系式

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{2}{r} \quad \text{得} \quad p = \frac{3}{8}r = -\frac{3}{8}|r|$$