



CMB资助眼视光学专业教材

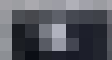
眼视光学应用光学

Applied Optics for Optometry

| 刘陇黔 张益珍 主编 |



四川大学出版社
SICHUAN UNIVERSITY PRESS



APPLIED OPTICS

眼視光学応用光学

Applied Optics for Ophthalmology

Volume 10 Number 1





CMB资助眼视光学专业教材

眼视光学应用光学

Applied Optics for Optometry

主编：刘陇黔 张益珍
编者：刘陇黔 张益珍 李宾中



四川大学出版社
SICHUAN UNIVERSITY PRESS

责任编辑:朱辅华
特约编辑:柯余洋
责任校对:许奕
封面设计:李金兰
责任印制:李平

图书在版编目(CIP)数据

眼视光学应用光学 / 刘陇黔, 张益珍主编. —成都:
四川大学出版社, 2011. 8
ISBN 978-7-5614-5444-2

I. ①眼… II. ①刘…②张… III. ①屈光学—高等学校—
教材 IV. ①R778

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 174355 号

书名 眼视光学应用光学

主 编 刘陇黔 张益珍
出 版 四川大学出版社
地 址 成都市一环路南一段 24 号 (610065)
发 行 四川大学出版社
书 号 ISBN 978-7-5614-5444-2
印 刷 郫县犀浦印刷厂
成品尺寸 185 mm×260 mm
印 张 9
字 数 201 千字
版 次 2011 年 9 月第 1 版
印 次 2011 年 9 月第 1 次印刷
定 价 18.00 元

◆读者邮购本书,请与本社发行科
联系。电话:85408408/85401670/
85408023 邮政编码:610065

◆本社图书如有印装质量问题,请
寄回出版社调换。

◆网址:www.scupress.com.cn

版权所有◆侵权必究

前 言

应用光学是眼视光学专业的重要基础课程。人眼不仅是重要的生物器官，同时也是典型的光学系统。现代光学是研究从微波、红外线、可见光、紫外线到X射线的宽广波段范围内的，关于电磁辐射的发生、传播、接收和显示，以及跟物质相互作用的科学。但从狭义的光学来说，光学是关于光和视见的科学，optics（光学）这个词，早期只用于跟眼睛和视见相联系的事物。人类最早对光的研究主要是试图了解“人怎么能看见周围的物体”这一问题，由此可见光学对眼视光学的重要性。视光学最早的起源也来自对眼睛的光学矫正。

作为视觉系统的眼睛，以可见光作为感觉模态，既有可见光通过眼睛的屈光系统在视网膜上的成像，同时也有光与视网膜感受器的光电转化过程。对眼睛屈光系统的检查、矫正是典型光学的应用。从传统的视光学检查仪器，如检影镜、眼底镜裂隙灯显微镜，到现代大量出现的眼视光学检查仪器设备，如光学相关断层扫描眼底成像、像差仪等都离不开光学。

本教材试图为眼视光学专业学生学习专业课程奠定相关光学基础。其内容包括：几何光学的基本原理、平面镜和棱镜系统、球面系统、理想光学系统、

※ 眼视光学应用光学

光度学和色度学基础知识、光学系统的光阑和景深、光学系统的像差和典型光学系统。通过对本教材的学习，可为生理光学、视光学器械学、眼镜光学、接触镜学等专业课程打下基础。

编 者

2010年12月30日

目 录

第一章 几何光学的基本原理	(1)
第一节 几何光学的基本概念和基本定律	(1)
一、发光点和光束	(1)
二、几何光学的基本定律	(3)
三、全反射	(4)
四、光的可逆性原理	(6)
第二节 光波和惠更斯原理	(6)
一、波面和波线	(6)
二、惠更斯原理	(6)
三、波的衍射	(7)
第三节 光程与费马原理	(7)
一、光程	(7)
二、费马原理	(8)
第四节 成 像	(9)
一、实像和虚像与实物和虚物	(10)
二、物与像的共轭性	(11)
三、物像之间的等光程性	(11)
习 题	(12)
第二章 平面镜和棱镜系统	(13)
第一节 平面镜系统	(13)
一、平面镜成像	(13)
二、双平面镜系统成像	(14)
第二节 平行平板系统	(15)
第三节 反射棱镜	(17)
第四节 折射棱镜	(21)
习 题	(23)
第三章 球面系统	(24)
第一节 单球面折射成像	(24)
一、单球面折射的光路基本公式	(24)

二、单球面近轴区域折射成像·····	(26)
三、单球面折射的光焦度和焦距·····	(27)
第二节 单折射球面近轴区域的放大率·····	(30)
一、横向放大率·····	(30)
二、纵向放大率·····	(31)
三、角放大率·····	(32)
四、物像方不变式·····	(32)
第三节 共轴球面系统·····	(32)
一、共轴球面系统的结构参量·····	(33)
二、共轴球面系统过渡公式·····	(33)
三、共轴球面系统的拉赫不变量·····	(34)
四、共轴球面系统的放大率·····	(34)
第四节 球面反射镜·····	(36)
一、反射镜的物像关系·····	(37)
二、放大率·····	(37)
习 题·····	(38)
第四章 理想光学系统 ·····	(39)
第一节 理想光学系统的性质·····	(39)
第二节 共轴理想光学系统的基点和基面·····	(40)
一、焦点和焦平面·····	(40)
二、主点和主平面·····	(40)
三、节点和节平面·····	(41)
第三节 理想光学系统的物像关系·····	(42)
一、图解法求物像关系·····	(42)
二、解析法求物像关系·····	(43)
第四节 理想光学系统的放大率·····	(44)
一、横向放大率·····	(44)
二、纵向放大率·····	(45)
三、角放大率·····	(46)
四、几对特殊共轭面的放大率·····	(47)
第五节 理想光学系统的光焦度·····	(49)
一、光束的聚散度·····	(49)
二、光焦度·····	(50)
第六节 理想光学系统的组合·····	(50)
一、组合光学系统的参数·····	(51)
二、组合光学系统的主点和焦点·····	(51)
三、组合光学系统的焦点位置公式和焦距公式·····	(52)
四、组合光学系统的主点位置公式·····	(53)

五、组合光学系统处于空气中的光焦度·····	(53)
第七节 透镜的基点和焦距·····	(54)
一、单折射球面的基点和焦距·····	(54)
二、透镜的焦距和基点位置·····	(55)
三、位于空气中的透镜的焦距和基点位置·····	(57)
第八节 厚透镜·····	(57)
一、双凸透镜·····	(58)
二、双凹透镜·····	(59)
三、平凸透镜·····	(59)
四、平凹透镜·····	(60)
五、正弯月形透镜·····	(60)
六、负弯月形透镜·····	(60)
七、等厚透镜·····	(62)
八、几种玻璃厚透镜的主点·····	(62)
第九节 薄透镜·····	(63)
一、薄透镜的基点和焦距·····	(63)
二、薄透镜成像公式·····	(64)
三、薄透镜组·····	(64)
习 题·····	(68)
第五章 光度学和色度学基础知识·····	(69)
第一节 光度学的基本概念·····	(69)
一、辐射通量·····	(69)
二、光通量·····	(71)
三、光照度·····	(72)
四、光亮度·····	(74)
第二节 光照度的计算·····	(75)
一、被直接照明的物面光照度·····	(75)
二、光学系统中像平面的光照度·····	(75)
第三节 光学系统中的光能损失计算·····	(77)
一、透射面的反射损失·····	(77)
二、光学材料的吸收损失·····	(78)
三、镀金属层反射面的吸收损失·····	(78)
第四节 色度学基本知识·····	(78)
一、光源的颜色特性和物体的光谱特性·····	(79)
二、颜色的分类和特性·····	(80)
三、颜色的匹配·····	(81)
四、格拉斯曼颜色混合定律·····	(83)
习 题·····	(84)

第六章 光学系统的光阑和景深	(85)
第一节 光学系统的光阑	(85)
一、孔径光阑.....	(85)
二、视场光阑.....	(86)
三、渐晕光阑.....	(86)
四、消杂光光阑.....	(87)
五、光阑的位置.....	(87)
第二节 光学系统的景深和焦深	(87)
一、光学系统的景深.....	(87)
二、光学系统的焦深.....	(88)
第三节 远心光学系统	(89)
一、物方远心光学系统.....	(90)
二、像方远心光学系统.....	(90)
习 题.....	(91)
第七章 光学系统的像差	(92)
第一节 几何像差	(92)
一、球 差.....	(92)
二、彗 差.....	(94)
三、像 散.....	(96)
四、像面弯曲.....	(97)
五、畸 变.....	(97)
六、色 差.....	(98)
第二节 波前像差	(100)
一、波前像差及其与几何像差的关系.....	(100)
二、泽尼克多项式.....	(101)
第三节 像质评价	(102)
一、中心点亮度.....	(102)
二、分辨率.....	(102)
三、几何像差曲线.....	(103)
四、星点检验.....	(104)
五、瑞利判断.....	(105)
六、点列图.....	(105)
七、点扩散函数和光学传递函数.....	(106)
第四节 非球面成像	(107)
一、非球面的表示方法.....	(108)
二、非球面的光学性质.....	(109)
三、非球面光学应用的发展.....	(109)
习 题.....	(109)

第八章 典型的光学系统	(110)
第一节 光学仪器的照明系统	(110)
一、照明系统的类型	(110)
二、照明系统的聚光形式	(111)
第二节 放大镜	(111)
一、放大镜的放大率	(112)
二、放大镜的光束限制和视场	(113)
三、放大率和视场的关系	(113)
四、目 镜	(114)
第三节 显微镜	(118)
一、显微镜的成像原理	(118)
二、显微镜的分辨率	(119)
三、显微镜的有效放大率	(120)
第四节 望远镜	(120)
一、望远镜的光学原理	(120)
二、望远镜的放大率	(121)
三、望远镜的分类	(123)
四、常见光学望远镜的类型及其特点	(123)
第五节 摄影系统	(124)
一、摄影物镜	(124)
二、照相机	(127)
第六节 放(投)影系统	(129)
一、投影物镜	(130)
二、照明系统	(131)
习 题	(132)

第一章 几何光学的基本原理

几何光学是以光的直线传播性质为基础，研究光在透明介质中传播的光学。光的直线传播性质对于光的实际行为具有近似意义，以此作为基础的几何光学，只能应用于有限的范围和给出近似的结果。在研究的对象中，如果其几何尺寸远大于所用光波的波长，由几何光学可以获得与实际情况基本相符的结果。例如，对有一定大小的透镜和面镜，研究由它们成像的物距和像距的关系时，用几何光学获得的结果与实际情况相吻合。在研究的对象中，如果其几何尺寸可以与光波波长相比，例如，透镜和面镜的孔径非常小，或透镜和面镜虽有一定大小，但研究的问题是“像点”的细微结构时，由几何光学得到的结果与实际情况的差别很大，甚至有相反的结果。后一种情况只能用波动光学研究。用波动光学研究光的传播可以得到严格的解，几何光学只是波动光学在一定条件下的近似。由于几何光学在应用上很简便，而且在实际上并不需要严格的解，因此，几何光学仍为研究光学传播问题的有力工具，特别是眼视光学的应用光学，主要是以几何光学的基本原理为理论基础的。

第一节 几何光学的基本概念和基本定律

一、发光点和光束

在几何光学中，凡是发出光线的物体，无论是本身发光还是被照明而漫反射发光，都叫做光源，如太阳、月亮等。光源的几何尺寸与光的作用距离相比可以忽略时的光源叫做点光源或发光点，如图 1-1 所示。点光源或发光点可以看作一个几何点，没有线度和大小，只占空间位置。如体积超过太阳系的恒星，由于它到地球的距离比它自身的线度大得多，所以地球上的观察者就可以把恒星看作点光源或发光点。发光点有时又叫做物点。任何有一定大小的物体都可以看作由许多发光点（物点）或点光源组成。

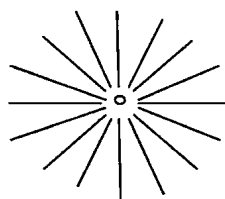


图 1-1 点光源

在几何光学中表示光传播方向的几何直线叫做光线，如图 1-2 所示。光线和点光源（发光点）一样，都是为了使用上的方便而引入的一个理想模型。

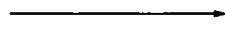


图 1-2 光线

有一定关系的一些光线的集合称为光束。所有光线交于一点的光束称为同心光束或

单心光束。光束的交点叫做光束的心。

物体或光源上发出同心光束的一点称为物点或发光点。光线实际发自某一点，则该点就是实物点或实发光点。如果某点并不发出光线，而是许多光线的延长线的交点，则该点就是虚物点或虚发光点。

实发光点为心的光束为发散光束，如图 1-3(a) 所示。虚发光点为心的光束为会聚光束，如图 1-3(b) 所示。心在无穷远处的光束为平行光束，如图 1-3(c) 所示。物体上的每一点都发出一个同心光束。由不相交于一点的有一定关系的光线集合叫做像散光束，如图 1-3(d) 所示。

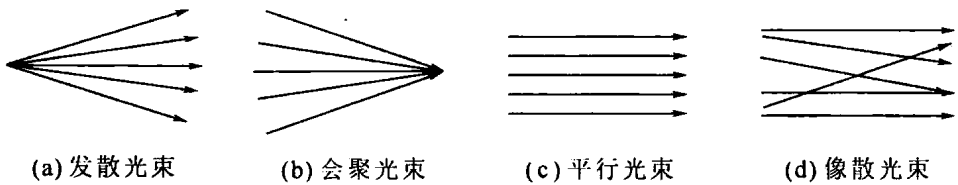


图 1-3 光束

自一物点发出的同心光束经光学系统后，其出射光束仍为同心光束时，出射光束的心叫做光学系统对该物点所成的像。出射光线的心是光线的真实交点，叫做实像点，如图 1-4(a、b) 所示。出射光线的心是光线反向延长线的交点，叫做虚像点，如图 1-4(c、d) 所示。实像点为心的光束是会聚光束，如图 1-4(a、b) 所示。虚像点为心的光束是发散光束，如图 1-4(c、d) 所示。心在无限远的光束是平行光束，如图 1-3(c) 所示。

物点发出的同心光束经光学系统后的出射光束为像散光束时，不能得到点像，而是一个弥散圆，如图 1-4(e) 所示。

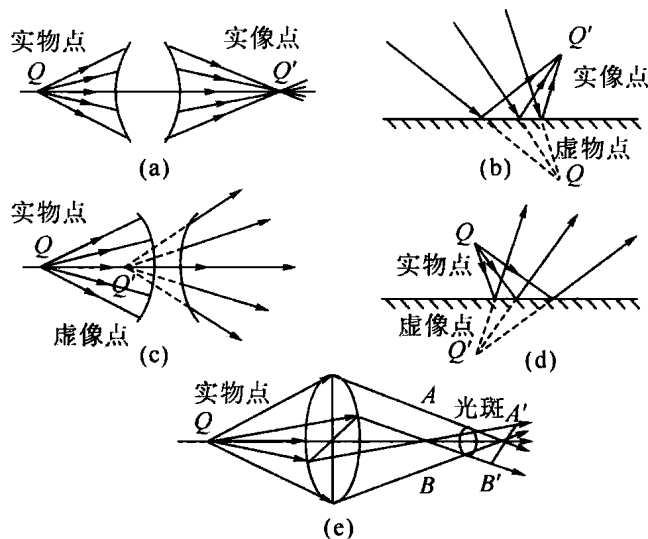


图 1-4 物点和像点

光束聚散的程度叫做光束的聚散度。用观察者到光源距离 l 的倒数表示，如图 1-5 所示。为了比较光束在折射率不同的介质中的聚散度，使用介质折射率 n 来权

衡，即光束的聚散度 V 定义为

$$V = \frac{n}{l} \quad (1-1)$$

V 值由 l 的正负决定， $V > 0$ ，会聚光束； $V < 0$ ，发散光束； $V = 0$ ，平行光束。

在国际单位制中， l 的单位为 m ， V 的单位为 m^{-1} 。

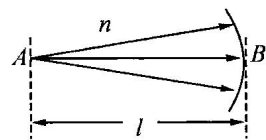


图 1-5 光束聚散度

二、几何光学的基本定律

几何光的理论基础是由实际观察和直接实验得到的几个基本定律：光的直线传播定律、光的独立传播定律及光的反射和折射定律。

1. 光的直线传播定律

如图 1-6 所示，在均匀光学介质中，光沿直线传播，即在均匀光学介质中，光线为一直线。用点光源照明不透明物体时生成物体的阴影，如太阳照射人、房子等形成人、房子的影子等。根据光的直线传播定律容易解释日食、月食等现象。光只有在均匀介质中才沿着直线传播。在非均匀介质中，光线将发生弯曲。例如，来自太阳的光线穿过地球大气层时，由于地球大气密度不均匀，光线发生弯曲（图 1-7）。所以当太阳实际落到地平线之下时，我们仍能看见它。

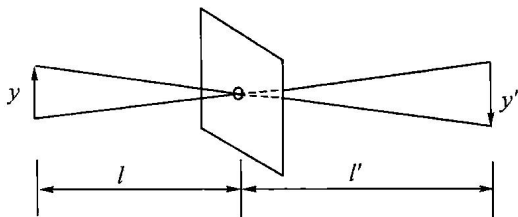


图 1-6 光的直线传播

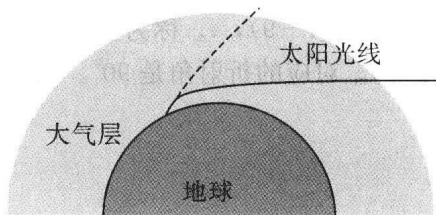


图 1-7 太阳光在大气中的传播

2. 光的独立传播定律

来自不同方向或不同物体发出的光线相交，每一光线仍按原来的传播方向传播，各光线互不影响，这就是光的独立传播定律。

3. 光的反射定律和折射定律

当光线从一种介质进入另一种介质时，光线在两种介质的分界面上被分为反射光线和折射光线（图 1-8）。对于这两条光线的行进方向，可分别用反射定律和折射定律来描述。

入射光线和反射光线位于分界面 B 点的法线两侧，且三者位于同一平面（入射面）内。反射线与法线间的夹角 i'' （反射角）等于入射线与法线间的夹角 i （入射角），这个结论称为光的反射定律。

入射光线和折射光线位于分界面 B 点的法线两侧，且三者位于同一平面（入射面）内，入射角 i 的正弦与折射角 i' 的正弦之比是一个取决于两介质的光学性质的常数，而

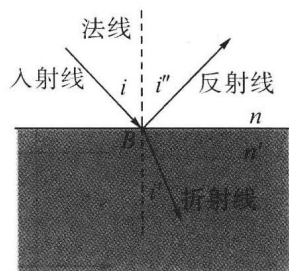


图 1-8 光的折射和反射

与角 i 和角 i' 无关, 这个结论称为光的折射定律, 又称为 Snell 定律。即:

$$\frac{\sin i}{\sin i'} = \frac{n'}{n} \quad \text{或} \quad n \sin i = n' \sin i' \quad (1-2)$$

式中 n 为第一种介质的绝对折射率, n' 为第二种介质的绝对折射率。

$$n = \frac{c}{v_1}, \quad n' = \frac{c}{v_2}$$

其中 c 为光在真空中的速度, v_1 和 v_2 分别为光在第一种介质和第二种介质中的速度。两种介质相比较, 折射率较大的介质叫做光密介质, 折射率较小的介质叫做光疏介质。

三、全反射

一般情况下, 反射和折射是同时发生的。当介质一定时, 随着入射角的增大, 反射光线越来越强, 折射光线逐渐减弱。当光从光密介质射向光疏介质时 ($n > n'$), 其折射角总是大于入射角 ($i' > i$)。当入射角达到某一角度 i_m 时, 折射角等于 90° , 有一条很弱的光线沿界面传播, 反射光线很强。若入射角大于 i_m , 就不再有折射光线, 入射光线全部返回原来的介质中, 这种现象称为

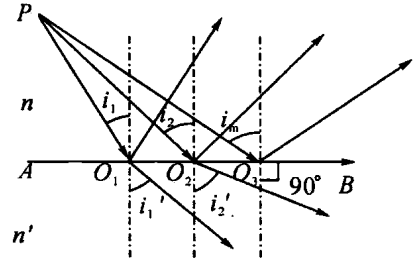


图 1-9 全反射

全反射 (图 1-9), i_m 称为全反射的临界角。临界角 i_m 是能产生全反射的最小入射角, 临界角 i_m 对应的折射角是 90° 。根据折射定律可得到计算临界角的公式为

$$n \sin i_m = n' \sin 90^\circ \quad (1-3)$$

$$\sin i_m = \frac{n'}{n}$$

$$i_m = \sin^{-1} \frac{n'}{n} \quad (1-4)$$

不同的介质, 其临界角的大小不同。例如, 水对空气的临界角为 48.5° , 普通玻璃对空气的临界角为 42° 。

全反射的应用比较广泛。例如, 应用全反射棱镜 (图 1-10) 可以改变光的传播方向而不损失光的能量。导光纤维 (图 1-11) 就是利用全反射原理传播原处的图像, 如图 1-12 所示。

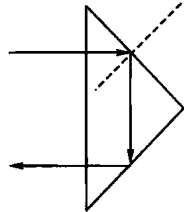


图 1-10 全反射棱镜

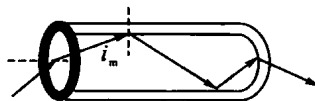


图 1-11 光在光纤的传播

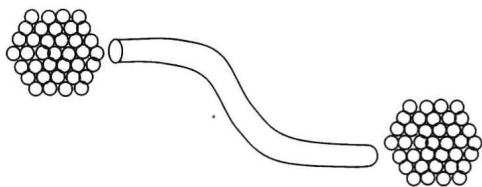


图 1-12 光纤镜导光原理

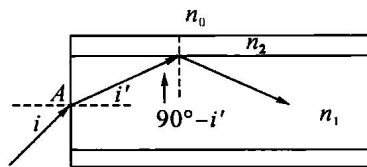


图 1-13 光纤中的全反射

在图 1-13 中, 设导光纤维的内芯和外层的折射率分别为 n_1 和 n_2 , 入射光线从折射率为 n_0 的介质射向导光纤维的 A 端, 经折射后射向内芯壁。当光线在壁上的人射角 $90^\circ - i'$ 大于由 n_1 和 n_2 决定的临界角 i_m 时就产生全反射。设光线在内芯壁刚好产生全反射时, 从介质 n_0 中的入射光线的入射角为 i_0 , 此时在内芯的折射角为 i'_0 , 只有折射角 i' 小于 i'_0 或 i 小于 i_0 角的光线才能在内芯产生全反射, 从而把光线从一端传到另一端。

$$n_1 \sin i_m = n_2 \sin 90^\circ \quad (1-3)$$

$$n_0 \sin i_0 = n_1 \sin i'_0 \quad (1-4)$$

$$i_m = 90^\circ - i'_0$$

由 (1-3) 得

$$n_1 \sin(90^\circ - i'_0) = n_2$$

$$n_1 \cos i'_0 = n_2$$

$$\cos i'_0 = \frac{n_2}{n_1}$$

由 (1-4) 得

$$n_0 \sin i_0 = n_1 \sqrt{1 - \cos^2 i'_0} = n_1 \sqrt{1 - \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

$$i_0 = \sin^{-1} \frac{\sqrt{n_1^2 - n_2^2}}{n_0}$$

$n_0 = 1$ 时

$$i_0 = \sin^{-1} \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

凡是入射角 i 小于 i_0 的入射光线都将通过接连不断的全反射从一端传到另一端。入射角 i 大于 i_0 的光线将透过内壁进入外层, 不能传递。

例 1 如图 1-14 所示, 假设有一半径为 r 的圆形荷叶浮在池塘的水面上, 荷心之下有一条小鱼。若观察者在水面外任何位置均看不见此小鱼。求这条小鱼最深的位置。

$$(n_{\text{水}} = \frac{4}{3})$$

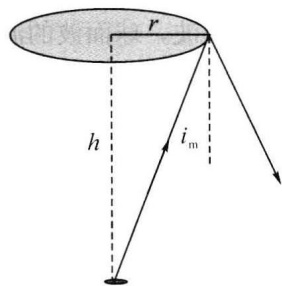


图 1-14 例 1 题图

解: 设小鱼到水面荷心的距离为 h 。如果从小鱼处向荷叶边缘射出的光线刚好被水面全反射, 则入射角小于临界角 i_m 的入射光线被荷叶阻挡, 而大于 i_m 的入射光线将被全反射, 因此, 水面上任何位置都看不见小鱼。

$$i_m = \sin^{-1} \frac{n'}{n} = \sin^{-1} \frac{3}{4} = 49^\circ$$

$$\tan i_m = \tan 49^\circ = \frac{r}{h}$$

$$h = \frac{r}{\tan 49^\circ} = 0.87r$$

这条小鱼最深的位置在距荷叶中心下面的 $0.87r$ 处。

四、光的可逆性原理

从几何光学的基本定律可以看出，如果光线逆着反射线方向入射，这时的反射线将逆着原来的入射线方向传播 [图 1-15(a)]；如果光线逆着折射线由介质 2 射入介质 1，折射光线也将逆着原来入射线方向传播 [图 1-15(b)]。就是说，当光线的传播方向逆转时，它将逆着同一路径传播，这个普遍性的结论叫做光的可逆性原理或光路可逆定律 (图 1-15)。光的可逆性原理在几何光学的应用中有很大的帮助。

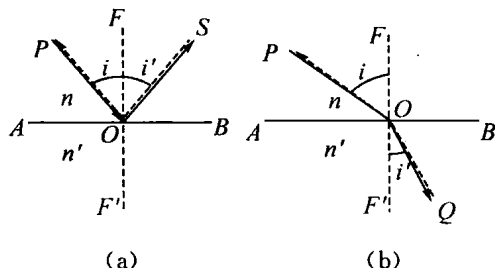


图 1-15 光的可逆性

第二节 光波和惠更斯原理

一、波面和波线

光是一种电磁波，光振动可以用电磁波中电场强度矢量的变化来表示。在某一时刻，光振动相位相同的点连成的面叫波面。波面为球面的波叫做球面波，波面为平面的波叫做平面波。表示波的传播方向的线叫做波线。在各向同性的介质中波线和波面垂直。单心光束对应着球面波，球面波的波线是以波源为中心沿半径方向的直线，如图 1-16(a) 所示。平行光束对应着平面波，平面波的波线是与波面垂直的一组平行线，如图 1-16(b) 所示。像散光束对应着非球面的高次曲面波。

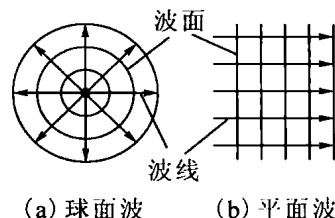


图 1-16 波面和波线

二、惠更斯原理

波的起源是波源的振动，波动的传播是介质中各质点之间的相互作用，介质中任一质点振动都可以引起邻近各质点的振动。因而，波动中的任一振动质点都可以看成新的波源，只要知道了某时刻波面的位置，就可以用几何作图的方法求出下一时刻波到达的位置，从而确定波传播的方向。这个原理叫做惠更斯 (Huygens) 原理。

惠更斯原理指出：波面上每一点都可以看作新的波源，从这些点发出子波，这些子