



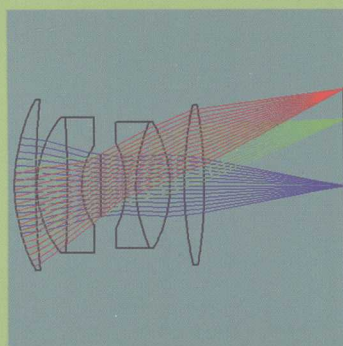
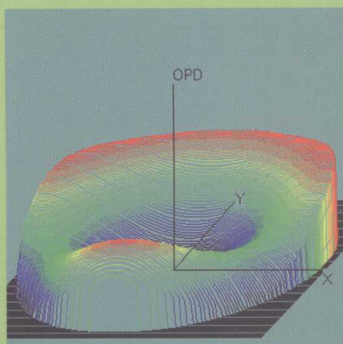
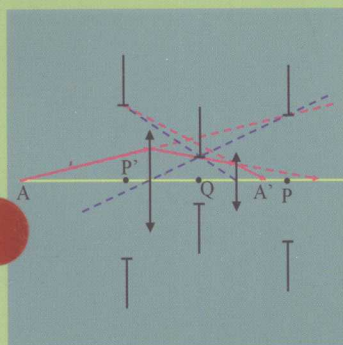
普通高等教育“十一五”国家级规划教材  
高等院校光电类专业系列规划教材

# Geometrical Optics, Aberrations and Optical Design

## 几何光学 · 像差 · 光学设计

(第三版)

李晓彤 岑兆丰 编著  
范世福 主审



ZHEJIANG UNIVERSITY PRESS

浙江大学出版社

全国百佳图书出版单位

014041223

0435-43  
01-3

普通高等教育“十一五”国家级规划教材  
高等院校光电类专业系列规划教材

Geometrical Optics, Aberrations and Optical Design

# 几何光学·像差·光学设计

(第三版)

李晓彤 岑兆丰 编著  
范世福 主审



0435-43

01-3

ZHEJIANG UNIVERSITY PRESS  
浙江大学出版社

01401553

图书在版编目(CIP)数据

几何光学·像差·光学设计 / 李晓彤, 岑兆丰编著.  
—杭州: 浙江大学出版社, 2014. 2  
ISBN 978-7-308-12265-8

I. ①几… II. ①李…②岑… III. ①几何光学②象  
差③光学系统—系统设计 IV. ①0435

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 288157 号

几何光学·像差·光学设计(第三版)

李晓彤 岑兆丰 编著

---

责任编辑 杜希武  
出版发行 浙江大学出版社  
(杭州市天目山路 148 号 邮政编码 310007)  
(网址: <http://www.zjupress.com>)  
排 版 浙江时代出版服务有限公司  
印 刷 德清县第二印刷厂  
开 本 787mm×1092mm 1/16  
印 张 23.75  
字 数 578 千  
版 次 2014 年 2 月第 3 版 2014 年 2 月第 10 次印刷  
书 号 ISBN 978-7-308-12265-8  
定 价 49.00 元

---

版权所有 翻印必究 印装差错 负责调换

浙江大学出版社发行部联系方式 (0571)88925591; <http://zjdxcb.tmall.com>

## 前 言

本次修订是在2007版国家十一五规划教材的基础上的一次修改提升,强调基本理论和工程应用的融合统一仍然是本书编著的原则,更加突出2007版原书的时代特性、教材特性、工具书特性和开放性,同时尝试在工程技术类教材中加入一些历史文化要素,体现人文特性。具体表现为:(1)时代特性:随着几何光学和光学设计的发展,再次删减和压缩了基本不用或应用很少的内容,整合了经典的像差部分,突出了以现代新技术、新方法、新材料为代表的发展和变革的内容,并在部分理论性内容后面加入了一些应用性实例,让读者了解几何光学和光学设计的应用方向。(2)教材特性:本书定位仍然是一本高等院校光电信息科学与工程类专业的教材,根据本次编排整理了每一章的知识要点,编著者尤其强调内容上的融会贯通,帮助学习者掌握知识要点的前后联系,章后练习也充分考虑到基本知识的覆盖和课堂学时要求,知识范畴涵盖了本科生到研究生阶段部分相关的专业课的内容。(3)工具书特性:本书含有很多课堂教室之外的科研和工程技术方面的内容,融入了作者从事多年科研、教学工作的积累,以及平时工作中对一些问题的思考和探讨,当这些思考和探讨在作者长期的研究工作中逐步成熟并且写入本书后,可以作为从事研究与光学有关问题的其他专业人员的重要参考资料。(4)开放性:当继续学习、终身学习的理念深入人心,在现代社会学习已经成为一种生活方式,成为一种习惯和乐趣,读者往往需要与教材相关的更广层面上的资料。本书保留了原书中的主要专业词汇索引,并在多处强调读者的举一反三。希望本教材成为读者深入学习、研讨的开放的平台。(4)人文特性:对于本教材所涉及的原理、方法、光学元件和系统均查询历史渊源,增加脚注对有关科学家和工程师作一简介,从而引导读者在学习的过程中了解一点光学史及其在人类文明中的重要作用,怀着对历史和人物的尊重去开拓创新。

同原教材相同,本书内容仍由“几何光学”、“像差理论”和“光学设计”这三个相对独立而又相互联系的部分所构成。第一部分是“几何光学”,共六章,包括高斯光学的基本内容以及光束限制、光能计算等;第二部分是“像差理论”,将原来的六章整合为五章,从像差基本概念出发,逐级深入地讲述几何像差、波像差和光线追迹,可以满足不同层次的教学要求;第三部分是“光学设计”,共八章,包括典型光学系统原理、光学系统初始结构设计方法,特殊光学系统一章包括激光光学系统、傅立叶变换透镜、光谱分析光学系统、光电光学系统、梯度折射率透镜和

光导纤维等光学系统的原理与设计特点,特殊光学表面包含了非球面和二元光学、光栅、全息等衍射面的原理、计算方法和应用,像质评价和光学系统自动设计等内容中对光学设计软件进行了简要的介绍,可以帮助读者了解和选择要使用的软件,并且在应用中体会人与软件在现代光学设计中的关系,原书中的对加工、安装工艺性的保证以及光学工程制图、公差与标注等工程方面的内容仍然保留,有利于读者了解光学设计的完整过程,掌握现代光学设计新动态,拓宽知识面,并打下良好的工程基础。全书内容安排体现出本书理论联系实际,重视从数学、物理基础向工程技术的转化的学习思路。

本书参考书目中列出的均系光学或计算机科学方面相对完善、为大多数人所认同的著作,这仅属于知识的一个层面。读者一方面应从其相互联系中加以融会贯通、综合把握,使自己具有扎实的基础,另一方面还应注意批判地学习另一个知识层面,即发展并处于探索中的,表现为最新文献和实践经验形式的知识。只有这样,才能不断获得处于流动和发展状态的、具有生命力的新的智慧,使自己在总体素质上得到提高。

与原教材相同,王子余教授 1989 年著的《几何光学和光学设计》以及由周淑文副教授所编写的自编教材《特殊光学系统》是本书的最重要的源头,本书不仅包含了光学教研室新老教师多年来科研和教学经验的结晶,还得到其他所、室教师的支持和指导,特别是参考了广大同学的宝贵意见,在此谨表示衷心的感谢!

本书的作者长期从事光学设计和与之相关的软件设计工作,书中有部分内容是对这些年科研和教学工作的一些体会和总结,难免出现不够全面和考虑欠周的问题,欢迎读者参与有关问题的讨论。书中所有内容和技術上的欠妥和不当之处,以及不规范用字和一些标准,引用遗漏和不祥等问题,敬请各位读者批评指正。

**编著者**

2012 年 12 月 15 日于求是园

# 目 录

## 第一部分 几何光学

<b>第 1 章 几何光学的基本概念和基本定律</b> .....	(3)
1.1 发光点、光线和光束 .....	(3)
1.2 光线传播的基本定律、全反射 .....	(4)
1.3 费马原理 .....	(7)
1.4 物、像的基本概念和完善成像条件 .....	(9)
1.5 几何光学基本定律回顾:归纳和演绎 .....	(11)
<b>第 2 章 球面和球面系统</b> .....	(13)
2.1 概念与符号规则 .....	(13)
2.2 单个折射球面成像 .....	(14)
2.3 反射球面 .....	(18)
2.4 共轴球面系统 .....	(19)
<b>第 3 章 平面和平面系统</b> .....	(23)
3.1 平面镜和双平面镜 .....	(23)
3.2 平行平板 .....	(25)
3.3 反射棱镜 .....	(27)
3.4 折射棱镜 .....	(32)
3.5 光的色散 .....	(34)
3.6 光学材料 .....	(36)
<b>第 4 章 理想光学系统</b> .....	(41)
4.1 理想光学系统及其原始定义 .....	(41)
4.2 理想光学系统的基点和基面,焦距 .....	(42)
4.3 物像位置和放大率、焦距和光焦度、节点 .....	(43)
4.4 理想光学系统的作图方法 .....	(48)
4.5 光学系统的组合 .....	(50)
4.6 望远镜系统 .....	(54)
4.7 透镜的理想模型 .....	(56)
4.8 焦距测量 .....	(60)
4.9 应用举例 .....	(61)

<b>第 5 章 光学系统中光束的限制</b> .....	(66)
5.1 概述 .....	(66)
5.2 光学系统的孔径光阑、入射光瞳和出射光瞳 .....	(67)
5.3 光学系统的视场光阑、入射窗和出射窗,渐晕光阑 .....	(69)
5.4 平面上空间像的不清晰度,景深 .....	(71)
5.5 远心光学系统 .....	(73)
5.6 光学系统物面与瞳面的转化、光瞳匹配 .....	(74)
5.7 应用举例 .....	(75)
<b>第 6 章 光能及其传播计算</b> .....	(78)
6.1 辐射量与光学量 .....	(78)
6.2 光学量基本概念 .....	(81)
6.3 光学量经光学系统的传输 .....	(87)
6.4 成像光学系统像面的照度 .....	(90)
6.5 应用举例 .....	(92)

## 第二部分 像差理论

<b>第 7 章 几何像差</b> .....	(97)
7.1 球差 .....	(97)
7.2 单个折射球面的球差特征 .....	(100)
7.3 轴外像差概述 .....	(103)
7.4 正弦条件与等晕条件 .....	(105)
7.5 彗差 .....	(107)
7.6 像散和像面弯曲 .....	(109)
7.7 畸变 .....	(111)
7.8 位置色差 .....	(112)
7.9 倍率色差 .....	(114)
7.10 应用举例 .....	(115)
<b>第 8 章 初级像差及其特征</b> .....	(117)
8.1 初级像差及其与孔径、视场的关系 .....	(117)
8.2 薄透镜与薄系统的初级球差和初级彗差 .....	(125)
8.3 薄透镜与薄系统的初级色差 .....	(128)
8.4 二级光谱 .....	(132)
8.5 光学系统消像差谱线的选择 .....	(134)
8.6 平行平板的初级球差与初级色差 .....	(135)
8.7 匹兹凡和及其校正方法 .....	(137)
<b>第 9 章 像差综述</b> .....	(139)
9.1 像差计算综述 .....	(139)

9.2	平行平板的初级像差系数	(141)
9.3	对称光学系统的像差特性	(142)
9.4	初级像差和光阑位置的关系	(143)
9.5	光阑像差及其与物面像差的关系	(144)
9.6	初级像差系数与物面位置的关系	(145)
<b>第 10 章</b>	<b>波像差</b>	<b>(148)</b>
10.1	波像差概念	(148)
10.2	波像差与几何像差的关系	(151)
10.3	参考点移动产生的波像差、焦深	(154)
10.4	波像差的一般表示式	(154)
10.5	复色光的波像差	(158)
10.6	光学系统的像差容限	(158)
<b>第 11 章</b>	<b>光线追迹</b>	<b>(162)</b>
11.1	近轴光线追迹	(163)
11.2	子午光线追迹	(165)
11.3	沿轴外点主光线的细光束像点的计算	(168)
11.4	共轴球面系统空间光线追迹	(172)
11.5	空间光线经非共轴面时的光线追迹	(176)
11.6	光程和光程差的计算	(177)

### 第三部分 光学设计

<b>第 12 章</b>	<b>典型光学系统</b>	<b>(183)</b>
12.1	眼睛	(184)
12.2	放大镜	(190)
12.3	显微镜与照明系统	(191)
12.4	望远镜系统	(203)
12.5	摄影光学系统	(215)
12.6	放映系统	(226)
<b>第 13 章</b>	<b>光学系统初始结构设计</b>	<b>(231)</b>
13.1	简单物镜初始结构设计的计算法	(231)
13.2	基本像差参量与 $P$ 、 $W$ 方法	(234)
13.3	单个薄透镜和双胶合透镜组的基本像差参量	(236)
13.4	$P$ 、 $W$ 方法计算实例	(240)
13.5	初始结构设计的查资料法	(241)
13.6	初始结构设计的经验法	(244)
13.7	初始结构设计方法的比较与选择	(246)



<b>第 14 章 特殊光学系统</b> .....	(249)
14.1 激光光学系统 .....	(249)
14.2 线性成像透镜( $f \cdot \theta$ 透镜) .....	(254)
14.3 傅里叶变换透镜 .....	(256)
14.4 光谱分析光学系统 .....	(260)
14.5 光电光学系统 .....	(264)
14.6 梯度折射率透镜 .....	(270)
14.7 光学纤维 .....	(275)
<b>第 15 章 特殊光学表面及其应用</b> .....	(282)
15.1 非球面的数学表示 .....	(283)
15.2 非球面的光路计算及其关键路径 .....	(284)
15.3 旋转对称非球面的初级像差及在光学系统中的应用 .....	(286)
15.4 特殊连续非球面在光学系统中的应用 .....	(288)
15.5 面形为有限间断的非球面应用简介 .....	(289)
15.6 衍射光学元件的一般表示 .....	(291)
15.7 衍射光学元件的光路计算 .....	(292)
15.8 衍射光学元件在光学系统中的应用 .....	(294)
<b>第 16 章 光学系统质量评价</b> .....	(297)
16.1 斯特列尔(Strehl)判断 .....	(298)
16.2 瑞利判断 .....	(299)
16.3 分辨率 .....	(300)
16.4 点列图 .....	(301)
16.5 光学传递函数 .....	(302)
16.6 非成像系统质量评价 .....	(306)
<b>第 17 章 光学系统优化设计</b> .....	(311)
17.1 概述 .....	(311)
17.2 评价函数及其构成 .....	(312)
17.3 阻尼最小二乘法 .....	(314)
17.4 边界条件的处理 .....	(317)
17.5 光学设计时对光学零件加工、装配工艺性的保证 .....	(318)
17.6 多组元光学系统优化设计 .....	(321)
17.7 光学设计过程小结 .....	(327)
<b>第 18 章 常用光学设计软件简介</b> .....	(328)
18.1 目前常用设计软件的主要功能 .....	(329)
18.2 几个软件各自的特点 .....	(330)
18.3 其他相关软件 .....	(332)
18.4 光学设计者和软件 .....	(333)

---

第 19 章 光学工程制图和技术要求 .....	(335)
19.1 光学系统图 .....	(335)
19.2 光学工程图中的特殊符号标记 .....	(337)
19.3 胶合件图 .....	(339)
19.4 光学零件图 .....	(341)
附录 双胶合透镜 $P\infty 0$ 的算法 .....	(351)
参考文献 .....	(354)
索 引 .....	(356)
后 记 .....	(368)

## 第一部分 几何光学

在工农业、国防、科学技术等人类生活的各个领域,使用着种类繁多的光学仪器。尽管其中的光学系统千差万别,但其基本功能则是共同的,即传输光信息,包括光能、光谱、光的波动信息或对所研究的目标成像。因此,研究光的传播和光学成像的规律对于设计光学仪器具有本质的意义。

从本质上讲,光是电磁波,它的传播规律符合波动理论,这已为光的干涉、衍射和偏振等诸多现象所证明。按照波动理论,光的传播就是波面的传播。但用波面的观点来讨论光经透镜或光学系统时的传播规律和成像问题将会造成计算和处理上的很大困难,尽管目前已有针对光波传播的计算手段,但在解决实际的光学技术问题时仍然不够简便快捷。

按照近代物理的观点,光具有波粒二象性。如果只考虑光的粒子性,把光源或物体看成是由许多几何点组成,并把由这种点发出的光抽象成像几何线一样的光线,那么,只要按照光线的传播来研究这种点经光学系统的成像,解决问题的方法就会变得非常简便和实用。实际上,由波动方程在波长趋于零的缓变波近似下便可导出几何光学。因此,几何光学所研究的只是一种对真实情况的近似处理方法。尽管如此,按此方法所解决的有关光学系统的成像、有关光能传播的计算和设计等方面的光学技术问题,在大多数场合下与实际情况相符。所以,几何光学有很大的实用意义,是研究光学仪器理论必不可少的基础。这也是几何光学这门古老的学问在现代仍然焕发出生命力的原因。

按照几何光学的观点,被成像的物体是一几何点时,如果光学系统是理想的,其像也是一个几何点。这显然与实际情况不符。由于物点发出的波面受光学系统有限孔径的限制,实际的像是一个具有一定能量分布的衍射图样,其中心亮斑已具有一定大小。这样,当两个物点靠近到一定程度时,两个像就会重叠到使人难以分辨出是两个点。这就是光学仪器的分辨率问题,它是无法由几何光学来解决的。这类问题就不能完全依靠几何光学,而必须同时应用光的波动理论才能获得完满的解决。当我们将几何光学与波动理论相结合,方能理解为什么仪器的功能会受到限制,同时也可能找到拓展新光学仪器领域的途径。

因此,主要依靠几何光学中建立起来的一套理论和方法,并结合波动光学的理论,才能成功地解决各种光学系统的有关计算和设计问题。作为一个光学工作者,学习和掌握好几何光学将是非常重要的。



# 第 1 章

## 几何光学的基本概念和基本定律

本章作为全书的开始,给出了本教材的基础知识,揭示了几何光学是对光传播特性的近似描述方法。本章内容大多以简单描述的方式介绍性地给出了各项基本概念,推导和计算很少,但是这些简单概念贯穿于本教材始终,需很好地掌握。

### 本章知识要点

1. 发光点、波面、光线、光束
2. 光的直线传播定律、光的独立传播定律、反射定律和折射定律及其矢量形式
3. 全反射及临界角
4. 光程与极端光程定律(费马原理)
5. 光轴、顶点、共轴光学系统和非共轴光学系统
6. 实物(像)点、虚物(像)点、实物(像)空间、虚物(像)空间
7. 完善成像条件

### 1.1 发光点、光线和光束

**发光点(luminous point)**是本身发光或被其它光源(light source)照明后发光的几何点。它既无大小又无体积,但能辐射能量。它向四周发出如几何线那样的**光线(Ray)**,携带着光能向外传播。

为什么要首先讨论发光点呢?因为物体总可看成是由点组成的,故通常讨论光学系统对物体成像时,以点作为基本成像元素。讨论物点的成像,便可全面了解物体的成像情况。然而,几何光学的这种发光点和光线的概念是简化了的抽象概念,实际上并不存在。一个实际的光源总有一定大小,才能容有能量。但从物理意义来说,一个光源只要其大小与作用距离相比可忽略不计就可认为是**点光源(point light source)**,例如宇宙中的星体对地球上的观察者来说就是一个点光源。同样,由于光的衍射影响,要从光源发出的光能中分离出光线来也是不可能的。在此,引入这种发光点和光线的概念是为了把复杂的光学成像和光能传播问题简化,从而可利用简单的数学方法方便地描述和解决之。

按照光的波动理论,由光源上一点发出的电磁波被看做是以波面的形式向四周推进,若光所处的介质为各向同性的均匀介质,则波面向各方向的传播速度相同,不同时刻的波面为一系列以发光点为中心的**球面波(spherical wave)**,光能就是沿着波面的法线方向传播的。这里,几何光学中的光线即波动光学中波面的法线,因此我们将波面的法线束称为**光束**

(light beam)。无限远处发光点发出的是平面波(plane wave),对应于平行光束;有限远处发光点发出的是球面波,对应于同心的发散光束和会聚光束,它们统称为同心光束。同心光束经透镜或未精心设计过的光学系统以后会失去同心性,此时所对应的波面可能是轴对称或非轴对称的非球面。

## 1.2 光线传播的基本定律、全反射

几何光学通过上述简化,把光能的传播和光学成像问题归结为光线的传播问题,光线的传播遵循以下四个基本定律。

一、光的直线传播定律:早在公元前400年前后,中国古代科学家墨子<sup>①</sup>便进行了小孔成像实验,并描述了光的直线传播现象:“景。光之人,煦若射,下者之人也高;高者之人也下。足蔽下光,故成景于上;首蔽上光,故成景于下。在远近有端,与于光,故景库内也。”

现在关于光的直线传播定律是这样表述的:在各向同性的均匀介质中,光在两点之间沿直线传播,即在这种介质中,光线都是直线。

二、光的独立传播定律:以不同途径传播的光同时在空间某点通过时,彼此互不影响,各路光好像其它光线不存在似的独立传播。而在各路光相遇处,其光强度是简单地相加,总是增强的。

光的直线传播定律和光的独立传播定律只在不考虑光的波动性质时才是正确的。据此可以很好地解释日食、月食等现象,很多光学仪器的应用也都以此为基础。但是,这两个定律并不是在所有场合下都是正确的。当光传经小孔时,光的衍射(diffraction)现象将明显地表现出来,通过小孔的光除了按原来的直线方向继续传播外,还要向其它方向衍射光能,并有:

$$\sin \alpha = \frac{K\lambda}{D} \quad (1-1)$$

式中, $\lambda$ 是波长, $D$ 是小孔直径, $K$ 是衍射级数。仅当波长为零时,才不存在衍射现象。即几何光学忽略了光的波动性质,是波长近似为零的一种特殊情况。根据经典力学是量子力学当德布罗意<sup>②</sup>波长趋于零时的近似,也可以说,波动光学是量子化的几何光学。波动光学还告诉我们,从光源上同一点发出的光经不同途径传播后再相遇于某点时,其合成作用应是电矢量的相加,而不是简单的光强度的相加,其光强度可能加强,也可能是减弱的。这就是光的干涉(interference)现象。

以上是光在同一介质中的传播规律。当光传播到两种介质的光滑分界面时,依界面的性质不同,光线或返回原介质,或进入另一介质。前者称为光的反射(reflection),按反射定律传播,一般抛光的金属镜面为反射界面;后者称为光的折射(refraction),按折射定律传播,

<sup>①</sup> 墨翟(前468—前376),中国古代(春秋末战国初期)思想家、科学家、社会活动家,墨家创始人,有《墨经》传世,对物理学多个分支均有研究与贡献。

<sup>②</sup> 德布罗意(Louis Victor de Broglie 1892—1987),法国物理学家,波动力学的创始人,量子力学的奠基人之一,巴黎大学教授,因发现电子的波动性获得1929年诺贝尔物理学奖。

两种透明介质的光滑界面为折射界面。

如图 1-1 所示,光线  $AO$  入射于界面  $PQ$  上的  $O$  点,  $NON'$  为界面上入射点处的法线,一部分光能在该点反射,由  $OC$  方向射出,  $OC$  为反射光线 (reflection ray), 另一部分光能在该点折射,  $OB$  为折射光线 (refraction ray)。入射光线与法线的夹角  $I$  称为入射角 (incident angle), 反射光线与法线的夹角  $I''$  称为反射角 (reflection angle), 折射光线与法线的夹角  $I'$  称为折射角 (refraction angle)。

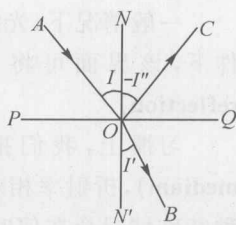


图 1-1

三、光的反射定律 (reflection law): 光的反射定律最早见于古希腊数学家、哲学家欧几里得<sup>①</sup>的《光学》, 现在我们表述为: 反射光线与入射光线和法线在同一平面内; 入射光线和反射光线分别位于法线的两侧, 与法线夹角相同, 即

$$I'' = -I \quad (1-2)$$

四、光的折射定律 (snell's refraction law): 折射光线与入射光线和法线在同一平面内; 折射角与入射角的正弦之比与入射角的大小无关, 仅由两介质的性质决定, 当温度、压力和光线的波长一定时, 其比值为—常数, 等于前一介质与后—介质的折射率之比, 即

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

或

$$n' \sin I' = n \sin I \quad (1-3)$$

式中,  $n$  和  $n'$  分别是入射和折射介质的折射率 (refractive index), 是介质的绝对折射率。我们知道, 光在不同介质中的传播速度各不相同, 在真空中光速最快, 以  $c$  表示。介质的折射率便是描述光在该介质中的传播速度  $v$  减慢程度的一个物理量, 即

$$n = \frac{c}{v} \quad (1-4)$$

真空的折射率为 1。空气的折射率在标准大气压 760mmHg 和标准温度  $20^{\circ}\text{C}$  下, 对于波长为  $5893\text{\AA}$  的钠光为 1.000272, 与真空的折射率相差甚微。所以常以介质相对于空气的相对折射率作为该介质的折射率。

光的折射定律由荷兰数学家、光学家斯涅耳<sup>②</sup>记录在他的手稿中, 惠更斯等整理他的遗物时发现并公开, 所以又叫斯涅耳定律。笛卡儿<sup>③</sup>将其表述为今天的形式, 论述于《屈光学》一书中。

在图 1-1 中, 若令  $CO$  和  $BO$  为入射光线, 则根据反射定律和折射定律, 光线必由  $OA$  方向射出, 这说明光的传播是可逆的, 此即光路的可逆性。

在公式 (1-3) 中, 若假定  $n' = -n$ , 则可得  $I' = -I$ , 此即反射定律。所以反射定律可认为是折射定律在  $n' = -n$  时的特殊情况, 也可认为空气中的反射界面是折射率分别为 1 和 -1

<sup>①</sup> 欧几里得 (Ευκλειδης, 前 330—前 275), 古希腊数学家、哲学家, 几何学的奠基人, 著有《几何原本》、《光学》。

<sup>②</sup> 斯涅耳 (Willebrord Snell Van Roijen 1591—1626), 荷兰数学家、物理学家, 曾任莱顿大学数学教授。

<sup>③</sup> 笛卡儿 (René Descartes 1596—1650), 法国数学家、哲学家、物理学家, 西方现代哲学思想的奠基人, 创立了直角坐标系。

的两种介质的光滑分界面。

一般情况下,光线射至透明介质的分界面时将同时发生反射和折射现象。但在特定条件下,该界面可将入射光能全部反射回去而无折射发生,这就是光的**全反射 (total reflection)**。

习惯上,我们把界面两边折射率相对较大的介质称为**光密介质 (optically denser medium)**,折射率相对较小的介质称为**光疏介质 (optically thinner medium)**。那么,全反射这种特殊情况会在何时发生呢?当光线由光密介质向光疏介质传播时,因  $n' < n$ , 则  $I' > I$ , 当  $I$  增大时,折射光线远离法线,如图 1-2 所示。此时逐渐增大入射角  $I$  到某一值时,折射角  $I'$  达  $90^\circ$ ,使折射光线沿界面掠射而出。若入射角继续增大,则有  $\sin I' > 1$ ,显然这是不可能的。实验表明,这些光线不能折射入另一介质,而将按反射定律在界面上被全部反射回原介质。对应于  $\sin I' = 1$  的入射角  $I_m$  称为**临界角 (critical angle)**,由式(1-3)可知:

$$\sin I_m = \frac{n'}{n} \quad (1-5)$$

当光线由光疏介质向光密介质传播时,由公式(1-3)可知,不会发生全反射。

全反射现象在光学仪器中有着重要的应用,例如,为了转折光路可以使用全反射棱镜,如图 1-3 所示等腰直角棱镜就是最常用的一种,只要光束孔径角  $2U$  在一定范围内,所有光线在斜面  $AB$  上的入射角都大于临界角,因而可以在该面上发生全反射。

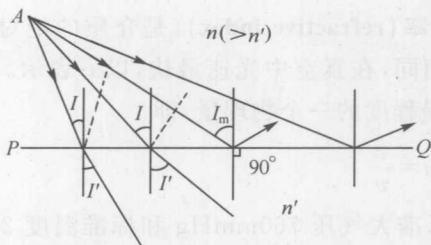


图 1-2

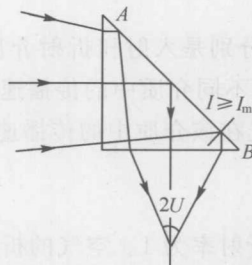


图 1-3

有一种光学纤维是利用全反射原理来传输光的。单根光纤由内外两层透明介质,即高折射率玻璃的芯子和低折射率玻璃的包层所构成,进入光纤的光束在芯子材料和包层材料的分界面上入射角大于临界角的光线连续全反射,直至传到光纤的另一端,如图 1-4 所示。

以上形式的折(反)射定律在计算平面光路时是可行的,但要求知任何一条光线经界面折(反)射以后的方向,特别是当界面在空间分布复杂,或光线是三维空间的空间光线时,应用矢量形式的折射定律和反射定律来计算更为方便。



图 1-4

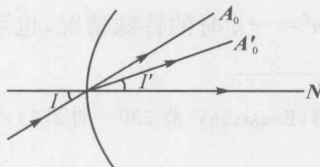


图 1-5

如图 1-5 所示,  $A_0$  和  $A'_0$  分别是沿入射光线和折射光线的单位矢量,  $N$  是沿法线的单位矢量。法线矢量的方向是从入射介质到折射介质。按此,式(1-3)可写为:



$$n'(A'_0 \times N) = n(A_0 \times N)$$

展开,并将长度为  $n'$  的折射光线矢量和长度为  $n$  的入射光线矢量分别记为  $A'$  和  $A$ ,得

$$A' \times N = A \times N$$

或

$$(A' - A) \times N = 0$$

$(A' - A)$  与  $N$  都不可能为零,因此,此两矢量必定是互相平行的,故上式可表示为

$$A' - A = PN \quad (P \text{ 为待定常数})$$

上式两边同与  $N$  作标积,得

$$P = N \cdot A' - N \cdot A = n' \cos I' - n \cos I$$

当  $n' > n$  时,  $P > 0$ , 矢量  $A' - A$  与  $N$  正向平行;反之,当  $n' < n$  时,  $P < 0$ , 两矢量为反向平行。请读者自行画出这两种情况下的矢量关系图。

一般的,在已知两介质折射率和光线的人射角求折射角时,  $P$  可化为

$$P = \sqrt{n'^2 - n^2 + n^2 \cos^2 I} - n \cos I \quad (1-6)$$

$$A' = A + PN \quad (1-7)$$

这就是矢量形式的折射定律,应用它就可由已知的人射光线矢量  $A$  和法线矢量  $N$  求得折射光线矢量  $A'$ 。

矢量形式的反射定律,可以在  $n' = -n$  的情况下直接由式(1-7)得到,只是其中的  $P$  可以更为简化。可得

$$P = n' \cos I' - n \cos I = -2n \cos I = -2(N \cdot A)$$

将其代入式(1-7)可得矢量形式的反射定律

$$A'' = A - 2N(N \cdot A) \quad (1-8)$$

### 1.3 费马原理

法国业余数学家费马<sup>①</sup>由于提出了光线传播的费马原理而成为现代几何光学的奠基人。费马原理从光程的观点来描述光传播的规律,它具有更普遍的意义。

所谓光程(optical path)  $s$ ,是光在介质中所经过的几何路程  $l$  与该介质折射率  $n$  的乘积:

$$s = nl \quad (1-9)$$

由于  $n = c/v$ ,  $l = vt$

$$s = ct \quad (1-10)$$

故光程相当于光在介质中走过  $l$  这段路程的时间  $t$  内,在真空中所走过的几何路程。光程的概念在以后将有重要的应用。

**费马原理(Fermat's principle):**光从一点到另一点是沿光程为极值的路径传播的。即,光沿光程为极小、极大或常量的路径传播。该原理又称极端光程定律。

不失一般性,设光在非均匀介质中传播,则所走的路径不是直线,如图 1-6 所示。此时从  $A$  点到  $B$  点的总光程为

<sup>①</sup> 费马(Pierre de Fermat 1601—1665),法国业余数学家、律师、公务员,对解析几何、微积分、概率论、数论和光学均有重大贡献。