

新世纪高等院校精品教材

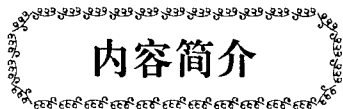
几何光学·像差·光学设计

李晓彤 岑兆丰 编著



TD001516799

浙江大学出版社



内容简介

本书包括“几何光学”、“像差理论”和“光学设计”三个重要组成部分,在介绍几何光学基本理论的基础上,力求反映近些年来以信息技术为代表的新兴技术产业的发展给传统光学带来的变革,以及对几何光学和光学设计的应用范围的拓展。其中第一部分主要是高斯光学的基本理论及光束限制、光能计算等,第二部分系统描述了像差概念及其计算,第三部分包括光学系统初始结构的设计、从经典到近现代特殊光学系统等多种系统的原理和设计特点、非球面的应用,还包括像质评价、光学自动设计以及光学设计中对加工、装配工艺的要求、光学工程制图等内容,使读者了解光学设计的完整过程,掌握现代光学设计新动态。本书既是一本高等院校工科光学有关专业的教材,又是一本光学工程技术人员的专业工具书,同时还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。

前 言

本书的前身为李晓彤在 1997 年编著的《几何光学和光学设计》，与前书相比本书在内容上做了不少修改和增补。修改和增补的原则是在重视理论基础的前提下更加强调其应用和工程性。在新增内容中力求能够反应这些年以信息技术为代表的新兴技术产业的发展给传统光学带来的变革，以及对几何光学和光学设计的应用范围的拓展。本书既是一本高等院校工科光学有关专业的教材，又是一本光学工程技术人员的专业工具书，同时还可以作为从事与光学相关问题研究的其他专业人员的重要参考资料。由于内容的增加，篇幅上比第一版也有一定的扩充。在编写内容中融入了更多的作者从事多年科研、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，使本书在注重针对性的同时又具有开放性。

本书由“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”，共七章，包括高斯光学的基本内容以及光束限制、光能计算、光线光路计算等，第二部分是“像差理论”，共六章，该部分系统地讲述了像差、初级像差和波像差的基本概念和计算；第三部分是“光学设计”，共七章，包括基于初级像差理论的光学系统初始结构设计方法，典型光学系统原理、典型光学镜头的设计计算方法，以及包含激光光学系统、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的特殊光学系统的原理与设计特点，针对近年来非球面技术的广泛运用，书中还加入了非球面在光学系统中的应用一章，像质评价和光学系统自动设计等内容，在这部分还专门安排了光学设计中对加工、安装工艺性的保证，光学工程制图、公差与标注等工程方面的内容。这样的修改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。

本书具有以下几个特点，即：(1)各部分内容相对独立又相互联系，融会贯通，(2)语言精炼，突出了应用光学的基本概念和理论，加强了基础；(3)具有开放性；(4)更加重视了将书中的知识点从数学、物理基础向工程技术的转化，努力将基础理论与实际应用相结合，并对如何使用经典的几何光学理论、概念去解释和分析一些新技术领域中的光学问题做了探讨，(5)书中尽可能采用国内外比较统一的符号规则、标注方法和坐标系。

应当指出，本书参考文献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。

本书的历史应回溯到由王子余教授 1989 年所著的《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》，所以本书也是光学教研室新老教师多年来科研和教学经验的结晶。本书在编写中得到了谈恒英和卢世标等有关教师的指导和支持，并提出了许多有益的意见和建议，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。书中所有内容和技术上的欠妥和不当之处,敬请各位读者批评指正。

编者

2003年9月于浙江大学玉泉校区

目 录

第一篇 几何光学

第 1 章 几何光学的基本概念和基本定律	(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	(3)
§ 1.3 费马原理	(6)
§ 1.4 物、像的基本概念和完善成像条件	(7)
第 2 章 球面和球面系统	(10)
§ 2.1 概念与符号规则	(10)
§ 2.2 轴上物点经单个折射球面成像	(11)
§ 2.3 物平面以细光束经折射球面成像	(13)
§ 2.4 反射球面	(14)
§ 2.5 共轴球面系统	(15)
第 3 章 平面和平面系统	(19)
§ 3.1 平面镜	(19)
§ 3.2 双平面镜	(20)
§ 3.3 平行平板	(21)
§ 3.4 反射棱镜	(22)
§ 3.5 折射棱镜	(27)
§ 3.6 光的色散	(29)
§ 3.7 光学材料	(30)
第 4 章 理想光学系统	(35)
§ 4.1 理想光学系统及其原始定义	(35)
§ 4.2 理想光学系统的基点和基面, 焦距	(35)
§ 4.3 物像位置和放大率、焦距和光焦度、节点	(36)
§ 4.4 光学系统的图解求像	(41)
§ 4.5 光学系统的组合	(42)
§ 4.6 望远镜系统	(45)
§ 4.7 透镜	(47)
一、薄透镜	(47)
二、厚透镜	(49)

§ 4 8 实际光学系统的焦距和基点位置的计算,焦距的测定 (51)

第 5 章 光学系统中光束的限制 (57)

§ 5.1 概述 (57)

§ 5.2 光学系统的孔径光阑、入射光瞳和出射光瞳 (58)

§ 5.3 光学系统的视场光阑、入射窗和出射窗,渐晕光阑 (59)

§ 5.4 平面上空间像的不清晰度,景深 (61)

§ 5.5 远心光学系统 (62)

第 6 章 光能及其计算 (65)

§ 6.1 辐射能通量、光通量 (65)

§ 6.2 发光强度、光照度、光出射度和光亮度 (67)

一、发光强度 (67)

二、光照度 (68)

三、光出射度 (69)

四、光源和光束的光亮度 (69)

§ 6.3 光学系统光能损失的计算 (72)

§ 6 4 通过光学系统的光通量,像的照度 (75)

第 7 章 光线的光路计算 (78)

§ 7 1 近轴光线的计算 (78)

§ 7 2 子午光线的光路计算 (80)

§ 7 3 沿轴外点主光线的细光束像点的计算 (83)

§ 7.4 共轴球面系统空间光线的光路计算 (86)

§ 7 5 空间光线经非共轴面时的光路计算 (89)

第二篇 像差理论

第 8 章 球差 (93)

§ 8 1 球差、带球差 (93)

§ 8 2 单个折射球面的球差和球差分布公式 (95)

§ 8 3 折射球面产生球差正负的判断及物距对球差的影响 (97)

§ 8 4 初级球差 (98)

§ 8 5 薄透镜和薄透镜系统的初级球差 (99)

§ 8 6 平行平板的球差 (101)

第 9 章 正弦差 (104)

§ 9 1 正弦条件与赫歇尔条件 (104)

§ 9 2 等晕成像和等晕条件 (105)

§ 9 3 正弦差的分布 (108)

§ 9 4 薄透镜和薄透镜系统的初级正弦差 (109)

第 10 章 轴外像差 (112)

§ 10.1	轴外像差概述	(112)
§ 10.2	初级轴外像差的一般表示式	(113)
§ 10.3	彗差与初级彗差	(116)
§ 10.4	仅具初级彗差时的光束结构	(119)
§ 10.5	像散和像面弯曲及其初级量	(120)
§ 10.6	具有初级像散和像面弯曲时的光束结构	(123)
§ 10.7	匹兹凡和及其校正方法	(124)
	一、薄透镜和薄透镜分析	(124)
	二、厚透镜	(124)
§ 10.8	畸变和初级畸变	(125)
第 11 章	色差	(129)
§ 11.1	位置色差	(129)
§ 11.2	初级位置色差	(130)
§ 11.3	平行平板的位置色差	(132)
§ 11.4	薄透镜和薄透镜系统的初级位置色差	(132)
§ 11.5	二级光谱	(134)
§ 11.6	倍率色差	(136)
§ 11.7	初级倍率色差	(136)
§ 11.8	薄透镜系统的初级倍率色差	(138)
§ 11.9	光学系统消像差谱线的选择	(140)
第 12 章	像差综述	(142)
§ 12.1	像差计算综述	(142)
§ 12.2	像差特性曲线	(144)
§ 12.3	平行平板的初级像差系数	(145)
§ 12.4	对称光学系统的像差特性	(145)
§ 12.5	初级像差和光阑位置的关系	(146)
§ 12.6	光阑像差及其与物面像差的关系	(147)
§ 12.7	初级像差系数与物面位置的关系	(148)
第 13 章	波像差	(151)
§ 13.1	轴上点的波像差及其与球差的关系	(151)
§ 13.2	轴外点的波像差及其与垂轴像差的关系	(154)
§ 13.3	波像差的一般表示式	(156)
§ 13.4	参考点移动产生的波像差、焦深	(157)
§ 13.5	色差的波像差表示	(158)
§ 13.6	球色差、几何色差与波色差的关系	(159)
§ 13.7	光学系统的像差容限	(160)

第三篇 光学设计

第 14 章 典型光学系统	(165)
§ 14.1 眼睛	(165)
一、眼睛的构造、标准眼和简约眼	(165)
二、眼睛的调节和适应	(166)
三、眼睛的分辨率和瞄准精度	(167)
四、眼睛的立体视觉	(168)
§ 14.2 放大镜	(169)
§ 14.3 显微镜	(170)
一、显微镜概述	(170)
二、显微镜中的孔径光阑和视场光阑	(172)
三、显微镜的景深	(172)
四、显微镜的分辨率和有效放大率	(173)
五、显微镜的物镜	(174)
六、显微镜的目镜	(177)
七、显微镜的照明系统	(178)
§ 14.4 望远镜系统	(180)
一、望远镜系统的一般特性	(180)
二、望远镜的主观亮度	(181)
三、望远镜的光束限制	(182)
四、望远镜系统的物镜	(183)
五、望远镜的目镜	(186)
六、正像望远镜中的转像系统和场镜	(187)
七、望远镜系统的外形尺寸计算	(188)
§ 14.5 摄影光学系统	(190)
一、摄影物镜的性能参数	(191)
二、摄影物镜中的光束限制	(191)
三、摄影物镜的景深	(192)
四、摄影物镜的几何焦深	(193)
五、摄影物镜的分辨率	(193)
六、摄影物镜	(194)
§ 14.6 放映系统	(198)
一、透射放映时幕上的照度	(198)
二、放映系统中的聚光镜	(199)
三、放映物镜	(199)
第 15 章 光学系统初始结构设计	(202)
§ 15.1 简单物镜结构设计	(202)
一、双胶合物镜	(202)

二、双分离物镜	(205)
§ 15.2 P、W 形式的初级像差系数和基本像差参量	(207)
§ 15.3 单个薄透镜和双胶合透镜组的基本像差参量	(210)
§ 15.4 P、W 方法计算实例	(213)
§ 15.5 简单目镜设计	(214)
§ 15.6 匹兹凡型放映物镜设计	(216)
§ 15.7 双高斯型摄影物镜的设计	(217)
§ 15.8 像差校正的一些常用方法	(220)
第 16 章 特殊光学系统	(224)
§ 16.1 激光光学系统	(224)
一、高斯光束的基本性质	(224)
二、高斯光束通过薄透镜时的变换和激光扩束望远镜	(225)
§ 16.2 线性成像透镜(透镜)	(228)
§ 16.3 傅里叶变换透镜	(230)
§ 16.4 光谱分析光学系统	(233)
一、一般光谱分析系统的原理与设计	(233)
二、成像光谱仪	(235)
§ 16.5 光电光学系统	(237)
一、红外光学系统	(237)
二、液晶投影系统	(239)
§ 16.6 梯度折射率透镜	(242)
§ 16.7 光学纤维	(246)
第 17 章 非球面在光学系统中的应用	(252)
§ 17.1 一般旋转对称非球面的数学表示	(252)
§ 17.2 非球面的光路计算及其关键路径	(253)
一、求光线与非球面交点的算法	(253)
二、光线经非球面时的光路计算	(254)
§ 17.3 旋转对称偶次非球面的初级像差贡献	(255)
§ 17.4 旋转对称光学系统中非球面的应用	(256)
§ 17.5 非球面参与像差平衡的基本方法	(256)
§ 17.6 特殊连续非球面在光学系统中的应用	(257)
§ 17.7 面形为有限间断的非球面应用简介	(257)
第 18 章 像质评价	(260)
§ 18.1 斯特列尔(Strehl)判断	(260)
§ 18.2 瑞利判断	(261)
§ 18.3 分辨率	(262)
§ 18.4 点列图	(263)
§ 18.5 光学传递函数	(263)
第 19 章 光学系统优化设计	(268)

§ 19.1 概述	(268)
§ 19.2 评价函数及其构成	(269)
§ 19.3 阻尼最小二乘法	(270)
一、最小二乘法	(270)
二、阻尼最小二乘法	(271)
三、权因子的选择	(272)
四、阻尼因子的选择	(273)
五、变量的选择	(273)
§ 19.4 边界条件的处理	(273)
§ 19.5 光学设计时对光学零件加工、装配工艺性的保证	(274)
一、光学零件的外径余量	(274)
二、光学零件的中心和边缘最小厚度	(275)
三、靠样板	(276)
四、其他要注意的问题	(276)
§ 19.6 光学设计过程小结	(277)
第 20 章 光学工程制图和技术要求	(279)
§ 20.1 光学系统图	(279)
§ 20.2 光学工程图中的特殊符号标记	(281)
§ 20.3 胶合件图	(284)
§ 20.4 光学零件图	(285)
一、球面光学零件图	(286)
二、对材料的要求	(287)
三、对零件的要求	(287)
四、光学零件图的其他技术要求	(288)
五、平面光学零件图	(290)
六、非球面光学零件图	(292)
附表 1	(294)
附表 2	(295)
附表 3	(296)
附录	(297)
参考文献	(299)

第一篇

几何光学

在工农业、国防、科学技术以及人类生活的各个领域内,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,即传输光能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。

当然,从本质上讲,光是电磁波,它按波动理论传播,这已为光的干涉、衍射和偏振等诸多现象所证明。按照这种理论,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,在解决实际的光学技术问题时应用不便。

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,问题就会变得非常简便和实用。这种撇开光的波动本性,仅以光的粒子性为基础来研究光的传播和成像问题的光学学科分支称为几何光学。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、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。

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的大小。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。

因此,主要依靠几何光学建立起来的一套理论和方法,必要时辅以波动光学的理论,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

§ 1.1 发光点、光线和光束

发光点是本身发光或被其他光源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,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的大小,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时就可认为是点光源,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作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列以发光点为中心的球面波,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。无限远处发光点发出的是平面波,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: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,各路光好像其他光线不存在似地独立传播。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蚀、月蚀等现象,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,还要向其他方向衍射光能,并有:

$$\sin\alpha = \frac{K\lambda}{D} \tag{1-1}$$

式中, λ 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。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, 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, 按折射定律传播, 两种透明介质的光滑分界面为折射界面。

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, 另一部分光能在该点折射, OB 为折射光线。入射光线与法线的夹角 I 称为入射角, 反射光线与法线的夹角 I'' 称为反射角, 折射光线与法线的夹角称为折射角。

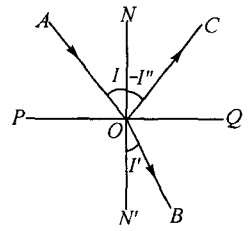


图 1-1

三、光的反射定律. 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

$$I'' = -I \tag{1-2}$$

四、光的折射定律. 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

$$n' \sin I' = n \sin I \tag{1-3}$$

式中, n 和 n' 分别是入射和折射介质的折射率, 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

$$n = \frac{c}{v} \tag{1-4}$$

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 C 下, 对于波长为 $0.5893\mu\text{m}$ 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。

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 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。

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, 折射率较小的称为光疏介

质。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° , 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, 由式(1-3)可知:

$$\sin I_m = \frac{n'}{n} \tag{1-5}$$

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, 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。

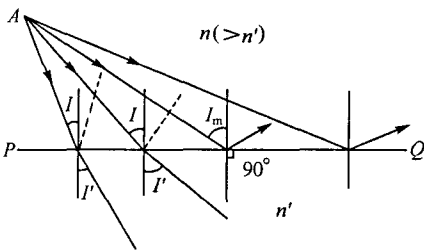


图 1-2

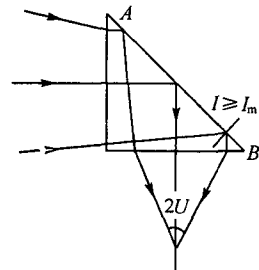


图 1-3

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皮所构成, 进入光纤的光束在芯子材料和包皮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。



图 1-4

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。

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:

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

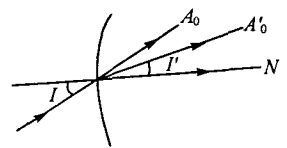


图 1-5

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。

一般情况下,在已知两介质折射率和光线的入射角求折射角时, 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

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 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,即

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

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·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

$$s = \int_A^B ds = \int_a^B n \cdot dl$$

根据费马原理, s 应为极值,即

$$\delta s = \delta \int_A^B n \cdot dl = 0 \quad (1-11)$$

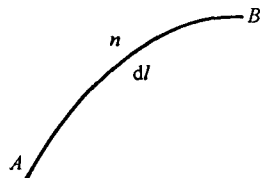


图 1-6

这就是费马原理的数学表达式。它的证明读者可参阅参考文献[1](书后)。

费马原理是描述光线传播规律的最基本的定律。前述光的直线传播、反射和折射定律均可由费马原理导出。对于均匀介质,根据两点间直线为最短的几何公理,应用费马原理可直接解释光沿直线传播的必然性。同样根据该几何公理,由图 1-7 也可得到反射定律。

折射的情况如图 1-8,分别从 A 、 B 点作界面的垂线 AP 、 BQ ,并令其长度分别为 y_1 和 y_2 ,则点 A 到点 B 的光程为

$$(AOB) = n \cdot AO + n' \cdot OB = n \sqrt{x^2 + y_1^2} + n' \sqrt{(L-x)^2 + y_2^2}$$

光程为极值的条件为

$$\frac{d(AOB)}{dx} = 0$$

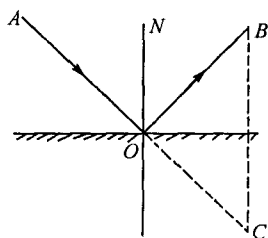


图 1-7

对上面的光程公式求导并化简即可得折射定律:

$$n \sin I - n' \sin I' = 0$$

可见,在以平面为界面的情况下,光线是按光程为极小值的路径传播的。但按费马原理,光也可能按光程为极大值或常量的路径传播。当以曲面为界面时,随曲面的性质和曲率的不同,实际光程可能是极小、极大或常量。例如图 1-9 所示的以 F 和 F' 为焦点的椭球反射面,根据椭球面的性质可知,由 F 点发出的所有光线经该面反射后必聚焦于 F' 点,且光程为常量,即

$$FF' = FM + MF' = \text{const}$$

这样的面,对 F 和 F' 点来说,谓之等光程面。

图中还给出了两个均与椭球面相切于 M 点而曲率不等的反射面 PQ 和 ST ,前者曲率大于椭球面,后者曲率小于椭球面。 FM 和 MF' 也是这两个面的入射光线和反射光线。显然,光程(FMF')对 PQ 面为极大值,而对 ST 面为极小值。

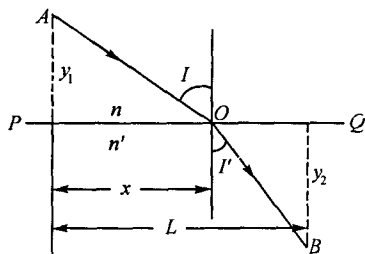


图 1-8

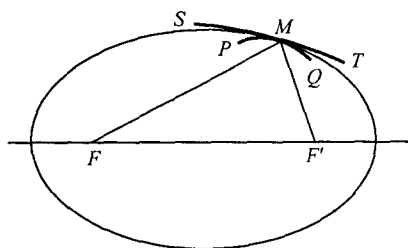


图 1-9

§ 1.4 物、像的基本概念和完善成像条件

光学仪器中的光学系统由一系列折射和反射表面组成,这些表面中,主要是折射球面,也可以有平面和非球面。各表面曲率中心均在同一直线上的光学系统称为共轴光学系统,这条直线就叫光轴。实际光学系统绝大部分属共轴光学系统,非共轴系统只在少数仪器中使用。

如图 1-10 所示,若以 A 为顶点的入射光束经光学系统的一系列表面折射或反射后,变为以 A' 为顶点的出射光束,我们就称 A 为物点, A' 为物点 A 经该系统所成的像点。图中的物、像点由实际光线相交而成,是实物成实像的情况。若物像点由光线的延长线相交而成,则称为虚的。图 1-11 中, A 是虚物点, A' 是虚像点,是虚物成虚像的情况。需指出,虚物不能人为设置,也不能独立存在,它只能被前面另一系统给出。实像能用屏幕或感光乳胶来接收和记录,虚像则不能,但可为眼睛所感受。

物所在的空间称为物空间;像所在的空间称为像空间。它们都可以在从 $-\infty$ 到 $+\infty$ 的整个空间内。

一个发光点或实物点,总是发出同心光束,与球面波相对应。一个像点,情况应该也是由与球面波对应的同心光束汇交而成,这种像点称完善像点。因为光学系统入射波面与出射波面之间的光程是相等的,故要能够将物点 A 完善成像于 A' ,必须实现 A 与 A' 之间的等光程。所以,等光程是完善成像的物理条件。