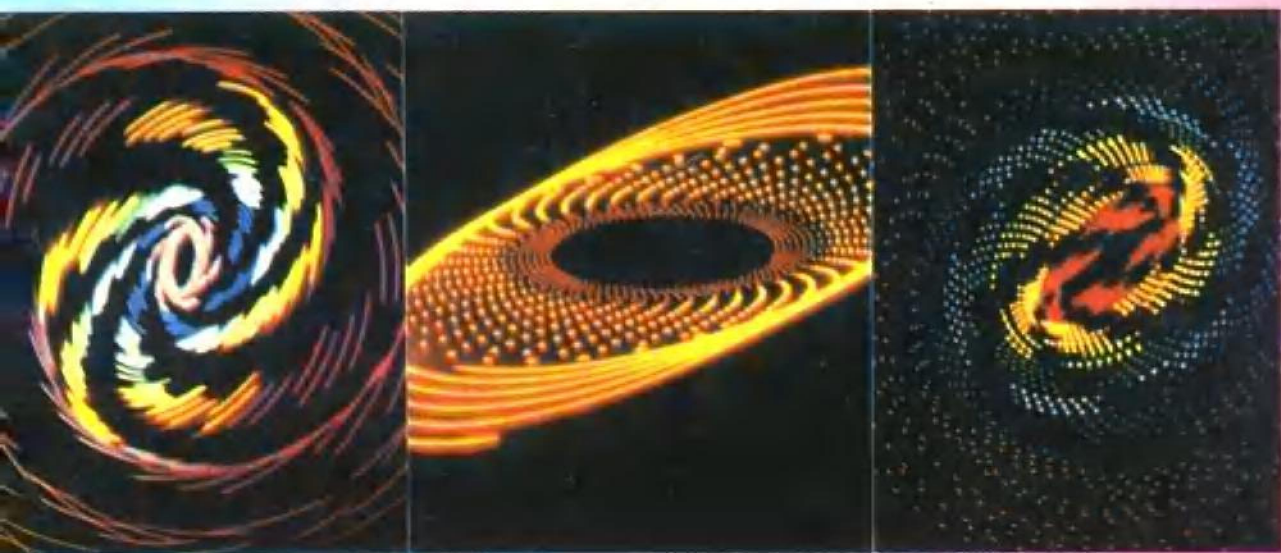


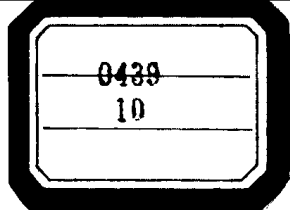
应用光学

周 焜 李继陶 陈祯培 编



YINCHU
SICUO

四川大学出版社



1702796

应用光学

周 焜 李继陶 陈祯培 编

771/181/08



四川大学出版社

1995年 成都



B1314838

(川)新登字014号

责任编辑:樊程方

封面设计:冯先洁

技术设计:樊程方

内 容 提 要

本书内容由四部分组成。第一部分为一至五章,论述几何光学的方法和理论;第二部分为第六章,论述光度学和色度学的基础知识;第三部分为第七章,论述像差理论和像差校正方法;第四部分为八至十二章,论述光学仪器系统。

全书对理论阐述和光学系统应用给予了同等重视。作为大学教材,本书在保证学科内容系统完整的基础上,注意了重点难点的安排,注意了学生知识面的拓展和分析问题解决问题能力的培养,注意了光学仪器新工艺、新材料的介绍,注意了习题安排的层次和实际应用。

本书除作为大学教材外,还可作为光学仪器研制生产和广大科研工作者的参考书。

应 用 光 学

周 焜 李继陶 陈祯培 编

四川大学出版社出版发行

(成都市望江路29号)

新华书店经销

成都市郫县犀浦印刷厂印刷

787×1092mm

16开本

19.5印张

400千字

1995年9月第1版

1995年9月第1次印刷

印数:0001—1 000册

ISBN 7-5614-1186-3/O·105

定价:21.60元

前 言

《应用光学》是大学教材,内容包括四个部分。第一部分几何光学,包括第一章至第五章,对几何光学成像理论进行了较完整的阐述。第五章应用了文献[1]中提出的渐晕光阑的概念,并保留了确定光学系统两种主要光阑常用的方法。第二部分为第六章,阐述光度学与色度学的基础知识,在光度学中除通常内容外,增加了面光源和长条形面光源产生的照度的计算。为适应社会的需要,在讲述色度学基础时,对“1931 CIE-XYZ 表色系统”根据文献[10]进行了较系统的推证。第三部分为第七章,即像差概论,为便于学生理解,将初级单色像差作为单独一节来讲授。第四部分光学仪器,即第八至第十二章。第八、九、十章讲授典型光学系统,即显微系统、望远系统和摄影投影系统,对这三类系统都给予了同等的重视,不侧重于某一种系统。按一般方式对望远系统进行了外形尺寸计算举例。在摄影系统中,对感光材料进行了较系统的介绍,并对彩色片成色原理进行了扼要的叙述。对相机结构、闪光灯等应用性知识也作了一定的介绍。为使学生对光学设计有入门的知识,第十一章介绍了光学系统初始结构计算的PW方法;为使学生对光学仪器生产、检验有一定的了解,第十二章介绍了光学材料和光学零件加工中的一些基本知识,最后叙述了光学系统的像质检验方法。本教材内容较为丰富,对光学成像的理论知识和光学系统的实际应用同时给予了足够的重视。

本书为大学理科光学专业编写,也可作为理工科有关专业的本科及大专教材,亦可供光学工作者或对光学有兴趣的科技人员参考。

编写本教材时参考和引用了许多参考文献,并已在书末列出,特别是一些表格数据,多出自文献[1]和[2],在此,对各位作者深表谢意。

本书编写出版,得到四川联合大学光电系苏显渝教授、钟永碧副教授、李存智副教授和四川大学出版社樊程方同志的大力支持,承中国测试技术研究院段凯等同志绘制全书插图,全体编者对他们致以衷心的感谢!

本书由周焜、李继陶、陈祯培合作完成,并由周焜负责全书统稿。限于编者水平,不当之处,敬请读者指正。

周 焜 李继陶 陈祯培

1995年5月

目 录

前 言	(1)
第 一 章 几何光学基本原理	
§ 1.1 几何光学基本概念	(1)
§ 1.2 几何光学的基本定律	(3)
§ 1.3 费马原理与马吕斯定律	(7)
§ 1.4 成像的概念	(9)
§ 1.5 反射等光程面和折射等光程面	(11)
§ 1.6 微小线段理想成像条件	(13)
§ 1.7 正弦条件和赫谢尔条件	(14)
习 题	(15)
第 二 章 球面成像系统	
§ 2.1 球面折射的光路计算公式	(17)
§ 2.2 单个折射球面的成像放大率 拉赫不变量	(23)
§ 2.3 共轴球面系统	(26)
§ 2.4 球面反射镜	(31)
习 题	(32)
第 三 章 理想光学系统	
§ 3.1 理想光学系统及其成像理论	(34)
§ 3.2 共轴理想光学系统的基点和基面	(38)
§ 3.3 理想光学系统的物像关系	(43)
§ 3.4 节点和节平面	(50)
§ 3.5 共轴理想光学系统的组合	(51)
§ 3.6 透镜和薄透镜	(57)
§ 3.7 常用镜头的组合特性	(61)
§ 3.8 矩阵方法在近轴光学中的应用	(63)
习 题	(68)

第四章 平面镜棱镜系统

§ 4.1 平面反射镜	(69)
§ 4.2 反射棱镜	(72)
§ 4.3 反射棱镜的成像性质	(74)
§ 4.4 平行平板及等效空气平板	(81)
§ 4.5 折射棱镜和光楔	(85)
习 题	(89)

第五章 光学系统中光束的限制

§ 5.1 光学系统中的光阑及其作用	(91)
§ 5.2 孔径光阑和视场光阑的确定方法	(93)
§ 5.3 渐晕和渐晕光阑	(96)
§ 5.4 景 深	(98)
§ 5.5 远心光路	(100)
习 题	(103)

第六章 光度学和色度学基础

§ 6.1 光通量和发光强度	(104)
§ 6.2 光照度和光出射度	(109)
§ 6.3 光亮度	(111)
§ 6.4 面光源产生的照度	(114)
§ 6.5 亮度在光学系统中的传递和像面照度	(118)
§ 6.6 光学系统中光能损失的计算	(122)
§ 6.7 颜色现象	(123)
§ 6.8 颜色匹配	(126)
§ 6.9 CIE1931 标准色度系统	(131)
§ 6.10 主波长和颜色纯度	(140)
§ 6.11 CIE 标准照明体和标准光源	(142)
习 题	(147)

第七章 像差概论

§ 7.1 光线的光路计算	(148)
§ 7.2 轴上点单色像差——球差	(157)
§ 7.3 单色光轴外像差	(162)
§ 7.4 初级单色像差	(168)
§ 7.5 色 差	(173)
§ 7.6 像差综述	(180)

习 题	(183)
第 八 章 眼睛及显微系统	
§ 8.1 人眼的构造及其光学特性	(185)
§ 8.2 放大镜	(193)
§ 8.3 显微镜系统及其光学特性	(196)
§ 8.4 显微镜物镜和目镜	(200)
§ 8.5 显微镜的照明系统	(204)
习 题	(207)
第 九 章 望远系统	
§ 9.1 望远系统概述	(208)
§ 9.2 望远物镜	(212)
§ 9.3 内调焦、准直和自准直望远镜	(215)
§ 9.4 转像系统和场镜	(219)
§ 9.5 望远系统的外形尺寸计算	(222)
§ 9.6 主观亮度	(229)
习 题	(232)
第 十 章 摄影及投影系统	
§ 10.1 照相机的基本结构及其作用	(233)
§ 10.2 摄影物镜的特性和种类	(239)
§ 10.3 摄影系统的技术特性和摄影闪光灯简介	(244)
§ 10.4 感光材料	(248)
§ 10.5 投影及放映系统	(254)
习 题	(258)
第十一章 光学系统初始结构计算	
§ 11.1 光学系统的基本像差参量	(260)
§ 11.2 双胶合透镜组的 $\bar{P}^\infty$ 、 $\bar{W}^\infty$ 、 $\bar{C}_I$ 和结构参数的关系	(267)
§ 11.3 单薄透镜的 $\bar{P}^\infty$ 、 $\bar{W}^\infty$ 、 $\bar{C}_I$ 和结构参数的关系	(271)
§ 11.4 用PW方法求解初始结构的实例	(274)
习 题	(281)
第十二章 光学材料、零件加工和像质检验	
§ 12.1 光学材料	(282)
§ 12.2 光学零件的技术要求和加工	(285)
§ 12.3 常用的像质检验方法	(288)

§ 12.4 光学传递函数.....	(292)
习题答案.....	(300)
参考文献.....	(304)

几何光学基本原理

撇开光的波动本性,仅以光的直线传播定律、独立传播定律以及光的反射和折射定律为基础,利用光线的概念研究光在各种介质中传播途径的学科,称为几何光学。以实际观察和实验而得到的几个基本定律,仅是光的传播规律在一定条件下的近似,故几何光学也有一定的近似性。如果研究对象的几何线度与光波波长相近,则由几何光学得出的结果与实际情况有显著的差别,因此必须用波动光学来研究。只有当研究对象的几何线度远大于光波波长时,几何光学和波动光学的结论才一致。几何光学是波动光学当波长趋于零的极限。在实际应用中,大多数光学零件的线度比光波波长大得多,所以,几何光学的理论仍是严密的、正确的,它在应用上比波动光学简单,是光学设计的理论基础。

§ 1.1 几何光学基本概念

一、光波、光源和光线

狭义上说,光波是可以引起人的视觉的电磁波。光波是横波,其振动方向和传播方向垂直,在真空中的传播速度 $c=3\times 10^8\text{m/s}$ 。光波波长极短,在真空中其波长范围大约介于 $400\sim 760\text{nm}$ 之间。不同波长会引起不同的颜色感觉,具有单一波长的光称为单色光,由若干波长混合而成的光称为复色光。太阳光由无限多种单色光混合而成,在可见光部分可以分解为红、橙、黄、绿、青、蓝、紫等七色光。

辐射光能的物体称为发光体或光源。几何光学中的光源包括本身发光的物体和本身不发光但被其它光照明的物体。当光源的几何线度比观察点到光源的距离小得多时,此光源称为点光源。

几何光学中代表光能量传播方向的几何线称为光线。这是一个抽象的概念,光是一种电磁波,光线方向代表光波能量的传播方向,在各向同性媒质中,光波波面(等位相面)的法线就是光线。此时,点光源发出的光线是以光源为球心的径向线,无限远处的光源发出的光线为平行线。利用点光源和光线的概念可以把复杂的能量传输和光学成像问题归结为简单的几何运算问题。

二、光 束

光波波面的法线束称为光束。光束分同心光束和像散光束等。光束所对应的波面为球面的光束称为同心光束。同心光束又分为发散同心光束、会聚同心光束和平行光束。由一点发出或光线反向延长通过一点的光束称为发散同心光束,如图1.1—1(a),(b)所示。会聚于一点或延长线会聚于一点的光线束称为会聚同心光束,如图1.1—1(c),(d)所示。曲率半径为无限大的球面光波所对应的光束称为平行光束,如图1.1—1(e)所示。

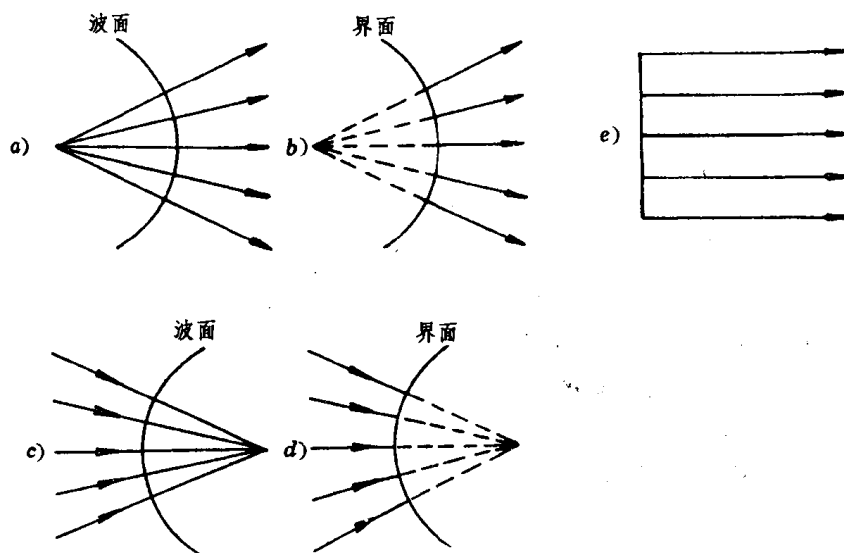


图1.1—1

与非球面波面元对应的细光束称为像散光束,其特征是诸光线彼此不平行又不相交于一点,而是会聚成两条相互垂直的短线。非球面波面元在不同方位有不同的曲率,如图

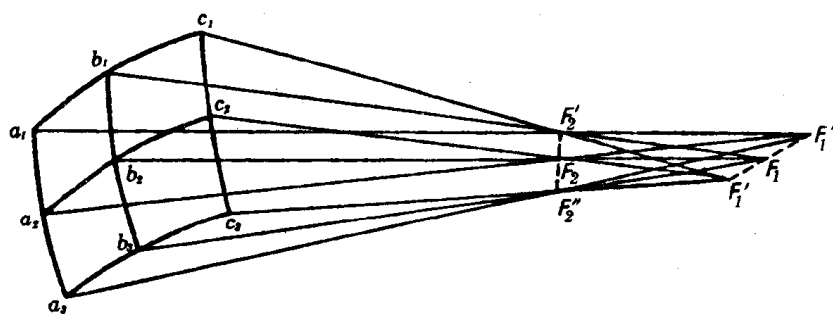


图1.1—2

1.1—2 所示, $a_1a_3c_3c_1$ 为一非球面波面元,由微分几何可知,通过波面元上某点 b_2 、必有一条互相垂直的截线,一条 $a_2b_2c_2$ 曲率半径最大,另一条 $b_1b_2b_3$ 曲率半径最小,其曲率中心分

别是 F_2, F_1 . 截线 $a_1b_1c_1$ 和 $a_3b_3c_3$ 靠近 $a_2b_2c_2$, 它们有相同的曲率半径, 处于 $a_1b_1c_1$ 和 $a_3b_3c_3$ 之间的所有截线的曲率中心组成元线段 $F_2'F_2F_2''$; 截线 $a_1a_2a_3$ 和 $c_1c_2c_3$ 靠近 $b_1b_2b_3$, 它们之间的所有截线的曲率中心组成元线段 $F_1'F_1F_1''$, 它与元线段 $F_2'F_2F_2''$ 相互垂直, 且都垂直于波面元上 b_2 点的法线 $b_2F_1F_2$. 这两条元线段称为像散光束的焦线, F_1 和 F_2 称为像散光束的交点, 两者之间的距离称为像散差. 像散差越小, 光束越接近同心光束, 相应的波面越接近球面。

§ 1.2 几何光学的基本定律

一、基本定律

从光线的概念出发, 几何光学把光的传播现象归纳为四个基本定律。

1. 光的直线传播定律

在各向均匀介质中, 光是沿着直线传播的, 这就是光的直线传播定律。这里要注意均匀介质和不受阻碍两个前提条件。

2. 光的独立传播定律

从不同光源发出的光线以不同的方向通过空间某点时, 各光线的传播不受其它光线的影响, 称为光的独立传播定律。几束光会聚于空间某点时, 其作用是强度在该点的叠加, 当然必须是来自不同光源的光束, 否则有干涉现象发生。

3. 光的折射定律和反射定律

当一束光投射到两种介质的分界面上, 如图1.2—1所示, 将有一部分光被反射, 另一部分光被折射, 两者分别遵守反射定律和折射定律。

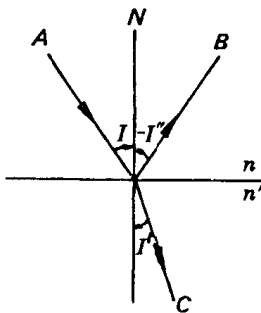


图1.2—1

(1) 反射定律 入射光线、反射光线和投射点法线三者共面, 且入射光线和反射光线对称于法线, 入射角和反射角绝对值相等, 即

$$I = -I' \quad (1.2-1)$$

式中, 角度以锐角来量度, 其符号是由光线转向法线顺时针为正, 逆时针为负。

(2) 折射定律 入射光线、折射光线和投射点的法线共面, 且入射角和折射角正弦之比, 对一定的波长为常量, 即

$$n \sin I = n' \sin I' \quad (1.2-2)$$

式中, n 和 n' 为两种透明介质的折射率; I 和 I' 为入射角和折射角, 以锐角量度, 其符号是由光线转向法线, 顺时针为正、逆

时针为负。

(3) 反射定律是折射定律的一种特例 在公式(1.2—2)中, 若令 $n' = -n$, 得 $I' = -I$, 即为反射定律, 表明反射定律是折射定律的一种特例。这是几何光学中一项有重要意义

的推论。

(4)光路的可逆性 由图1.2—1可知,当光线从B点或C点投射到分界面O点时,由反射定律和折射定律可知,反射光线或折射光线必沿OA方向射出,这就是光路的可逆性。根据光的可逆性,当研究光线传播时,我们可以按实际光线进行的方向来研究它的传播路线,也可按与实际光线相反的方向进行研究,二者结果是完全相同的。

二、矢量形式的折射定律和反射定律

折射定律和反射定律的内容包括两部分。其一是说明入射光线、法线、折射光线和反射光线位于同一平面内;其二是说明入射角、折射角和反射角之间的数量关系。这种形式的折射定律和反射定律对于今后研究一些复杂的光线传播问题(如介质的分界面在空间的分布形式很复杂)很不方便。由于光线是几何线,可以使用矢量表示,因此折射定律和反射定律可以用一个矢量公式把它包括的两部分内容同时表示出来。在直角坐标系中,任一矢量A可表示成

$$A = A_x i + A_y j + A_z k$$

式中; i, j, k 为坐标 x, y, z 方向的单位矢量; A_x, A_y, A_z 为矢量A在相应坐标轴上的投影值。

1. 矢量形式的折射定律

如图1.2—2所示,以 a 和 a' 分别表示入射光线和折射光线的单位矢量, n 和 n' 分别表示折射面两边的介质的折射率。矢量 a 和 a' 指向右为正方向,反之为负。 N 为投射面投射点法线的单位矢量,顺着光线传播方向为正,反之为负。折射定律可表示为

$$n(a \times N) = n'(a' \times N) \quad (1.2-3)$$

令

$$A = na \quad A' = n'a'$$

即把入射光线矢量A和折射光线矢量A'的长度取为 n 和 n' ,于是(1.2-3)式可写成

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

或

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

即矢量 $(A' - A)$ 和 N 的方向是一致的,故可写成

$$A' - A = \Gamma N \quad (1.2-4)$$

式中, Γ 称为偏向常数。用 N 对上式两边作点乘可得

$$\Gamma = N \cdot A' - N \cdot A = n' \cos I' - n \cos I \quad (1.2-5)$$

又

$$\begin{aligned} n' \cos I' &= n' \sqrt{1 - \sin^2 I'} = \sqrt{n'^2 - (n' \sin I')^2} \\ &= \sqrt{n'^2 - n^2 \sin^2 I} = \sqrt{n'^2 - n^2 (1 - \cos^2 I)} \end{aligned}$$

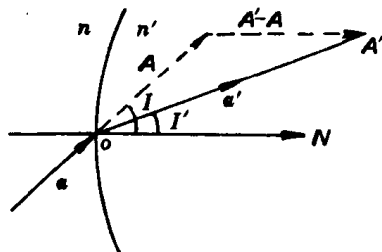


图1.2—2

$$= \sqrt{n'^2 - n^2 + (N \cdot A)^2}$$

由此可得

$$\Gamma = \sqrt{n'^2 - n^2 + (N \cdot A)^2} - N \cdot A \quad (1.2-6)$$

求得 Γ 值之后,便可由(1.2-3)式求得折射光线的方向

$$A' = A + \Gamma N \quad (1.2-7)$$

这就是矢量形式的折射定律。

2. 矢量形式的反射定律

我们知道,在折射定律中若令 $n' = -n$,可得 $I' = -I$ 的反射定律。现将此用于矢量形式的折射定律,由(1.2-5)式所表示的偏向常数为

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

所以,由(1.2-7)式可得反射定律

$$A'' = A - 2N(N \cdot A) \quad (1.2-8)$$

三、全反射及其应用

1. 光的全反射

在一般情况下,投射到两介质分界面上的每一条光线,都分成两条:一条光线从分界面反射回原来的介质;另一条光线经分界面折射入另一介质。随着入射角的增大,反射光线的强度逐渐增强(几何光学不能说明光的强度问题,应由电磁理论来解释),而折射光线的强度逐渐减弱。

如图1.2-3所示,介质 n 内的发光点 A 向各个方向发出光线,投射到介质 n 和 n' 的分界面上,每条光线都分成一条折射光线和一条反射光线。若 $n > n'$,则由折射定律 $n \sin I = n' \sin I'$ 得到 $I' > I$,当入射角 I 增大时,折射角 I' 也相应增大。同时,反射光线的强度也随之增大,而折射光线的强度则逐渐减小。当入射角增大到 I_0 时,折射角 $I' = 90^\circ$,这时折射光线掠过两介质的分界面,并且强度趋近于零。当入射角 $I > I_0$ 时,折射光线不复存在,入射光线全部反射,这样的现象称为全反射。折射角 $I' = 90^\circ$ 所对应的入射角 I_0 称为临界角,按折射定律 $n \sin I_0 = n' \sin 90^\circ = n'$ 得到

$$\sin I_0 = \frac{n'}{n} \quad (1.2-9)$$

只有当光线由折射率高的(光密)介质射向折射率低的(光疏)介质时,才可能发生全反射。

2. 全反射的应用

全反射现象广泛应用于光学仪器中,利用全反射原理可以做成全反射棱镜,用它来代替镀反射膜的反射镜,能减少光能损失。这是因为,一般镀膜反射镜不可能使光能全部反

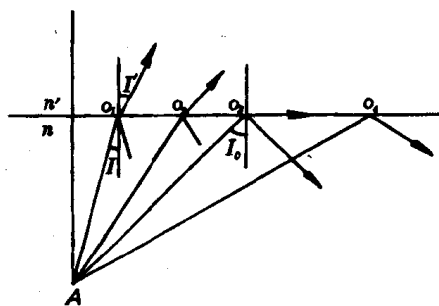


图1.2-3

射,如镀银反射镜大约有10%的光能被吸收,此外反射膜也容易变质和损伤。利用全反射棱镜必须满足入射角大于临界角的条件,否则仍需镀反射膜。玻璃的折射率不同,由玻璃到空气的临界角也不同。当玻璃折射率由1.5增至1.70时,相应的临界角也由41.8°减至36.03°。

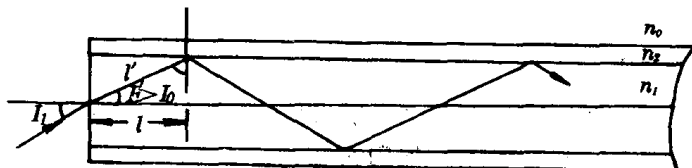


图1.2—4

传光和传像的光学纤维也利用了全反射原理。对一条光纤而言,将低折射率的玻璃包在高折射率的玻璃芯的外面,如图1.2—4所示,由于芯子的折射率 n_1 大于包皮的折射率 n_2 ,芯子的入射角大于临界角的光线将在界面上发生全反射。设 I_0 为临界角, n_0 为空气的折射率,则 $n_0 \sin I_1 = n_1 \sin I_1'$,由全反射定律(1.2—9)式和图1.2—4得

$$\sin I_0 = \frac{n_2}{n_1} = \sin(90^\circ - I_1') = \cos I_1'$$

保证全反射发生的条件为

$$n_0 \sin I_1 = n_1 \sin I_1' = n_1 \sqrt{1 - \cos^2 I_1'} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (1.2-10)$$

当在光纤端面上的入射角小于 I_1 时,光线在光纤内部才能不断地发生全反射,而从光纤的另一端射出。

设光纤的直径为 D ,总长度为 L ,光线在光纤中每反射一次,沿轴线通过的长度为 $2l$,由图1.2—4得

$$2l = \frac{D \cos I_1'}{\sin I_1'} = \frac{D \sqrt{n_1^2 - n_0^2 \sin^2 I_1}}{n_1 \sin I_1'} = \frac{D \sqrt{n_1^2 - n_0^2 \sin^2 I_1}}{n_0 \sin I_1}$$

光线通过长度为 L 的光纤发生的反射次数

$$N = \frac{L}{2l} = \frac{L n_0 \sin I_1}{D \sqrt{n_1^2 - n_0^2 \sin^2 I_1}} \quad (1.2-11)$$

若光纤长 $L=0.5\text{m}$,直径 $D=0.05\text{mm}$,芯子折射率 $n_1=1.70$,入射角 $I_1=30^\circ$,则由(1.2—11)式算得光线在其中反射的次数 $N=3\,077$ 次,说明全反射过程中光能的损失是近于零的。

若光线在光纤中反射一次通过的折线长度为 $2l'$,则由图1.2—4可知

$$2l' = \frac{2l}{\cos I_1'} = \frac{D}{\sin I_1'} = \frac{n_1 D}{n_0 \sin I_1}$$

光线通过长度为 L 的光纤所走过的折线总长度 L' 为

$$L' = N \cdot 2l' = \frac{L n_0 \sin I_1}{D \sqrt{n_1^2 - n_0^2 \sin^2 I_1}} \cdot \frac{n_1 D}{n_0 \sin I_1} = \frac{n_1 L}{\sqrt{n_1^2 - n_0^2 \sin^2 I_1}} \quad (1.2-12)$$

§ 1.3 费马原理与马吕斯定律

一、费马原理

费马原理是1657年法国数学家费马提出的,从光程的角度出发来阐述光的传播规律。几何光学的基本定律,如光的直线传播、折射和反射定律等均可包含在内。

给定两点 A 和 B 以及连接它们的曲线 C ,我们可以把两点间的几何路程 l 定义为位于两点之间的曲线长度,即 $l = \int_{A \rightarrow B} dl$,式中积分沿曲线 C 从 A 到 B 进行。光程 L 被定义为折

射率函数与相应的几何路程的乘积,即

$$L = \int_{A \rightarrow B} n(x, y, z) dl \quad (1.3-1)$$

式中, $n(x, y, z)$ 是折射率函数,积分仍沿曲线 C 由 A 到 B 。在均匀介质这种简单情形中,光程正好等于介质的折射率常数乘几何路程。它在数值上等于光在介质中传播路程 l 所需的时间内,光在真空中传播的距离。费马原理说,光线从一点传播到另一点的光程为稳定值(极小、极大或恒定值)。当光线通过不同介质的界面或非均匀介质时,要确定光程长度,将有许多独立变数。为了表述光线从一点传播到另一点所走的真实路线的光线长度与它邻近的各个可能路径的光程长度相比为稳定值(极小、极大或恒定值)的费马原理,可用变分原理表述为

$$\delta L = \delta \int_{A \rightarrow B} n(x, y, z) dl = 0 \quad (1.3-2)$$

光程 L 是路径 l 的函数,而 l 本身又是空间坐标 (x, y, z) 的函数,所以 L 是函数的函数,在数学中叫泛函。这种泛函的微分称为变分,粗浅一点理解,也可当微分来处理。

应当指出,费马原理要求光程为稳定值,它可以是极小值(这是经常遇到的情况)、极大值或恒定值。而且这种比较应当是只在光线的极近邻域内进行。先研究一下光程为极小的情况。如图1.3—1所示, A, B 两点位于平面反射镜 MM 的同一侧,当光线从 A 发出传播到 B 时,可有两种方式,一是直接从 A 到 B ,一是由反射镜单次反射之后经由路线 AOB 由 A 到 B 。如果费马原理要求是绝对的极小值,那么 AOB 路线将被禁止,但实际情况并不如此。在包含着如像 APB 这样一些路线的邻域内,

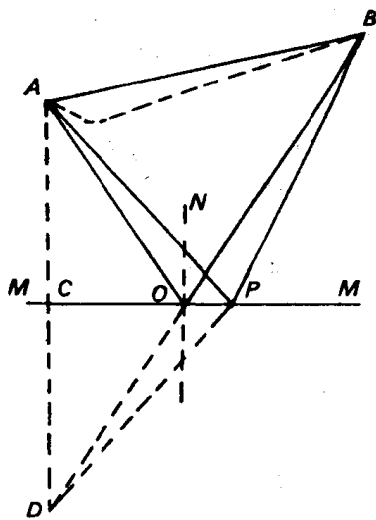


图1.3—1

AOB 同样是极小值。所以惯常说“某一路线的极近邻域”将意味着这些路线位于所考虑的路线附近并且和它相似。例如 APB 位于 AOB 附近并且与它相似, 两条光线都受到平面镜的一次反射。实际光线的路径在其极近邻域内光程取极小值。

下面再研究光线在传播过程中光程为极大和恒定值的例子。如图 1.3—2(a) 所示, 考虑一凹球面镜反射。O 是顶点, C 为球心, OC 是光轴。设 A、B 是光轴等距离的两点, AB 连线通过球面曲率中心 C 并与光轴垂直。显然, 从 A 发出的光线将沿着路线 AOB 。如果 P 表示反射镜上的另外一点, 则对某一路线 APB , 入射角和反射角不能相等, 因此 APB 不表示光线。易于证明 APB 的长度的确

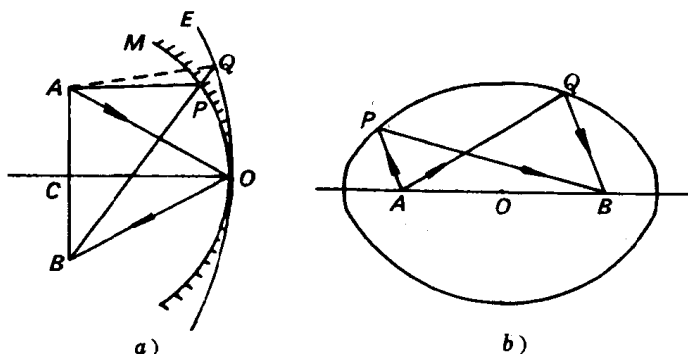


图 1.3—2

小于 AOB 的长度。为此, 通过 O 点构造一个椭圆 E, 它的焦点为 A 和 B。因椭圆在 O 点的曲率半径大于 OC, 所以椭圆必在圆的外面。延长 BP 交椭圆于 Q, 连接 A 和 Q。显然, $AP + PB < AQ + QB$, 即 $AP + PB < AO + OB$, 也就是说, 实际光线的光程长于邻近光路的光程。

为了说明在光的传播过程中光程为恒定值的情况, 研究图 1.3—2(b) 所示的椭圆反射器。从焦点 A 发出的光线经椭圆内表面上任一点 P 反射到另一焦点 B, 由于椭圆的性质, 两个焦点至椭圆上任意点的两个向径之和为常数。因此, 有 $AP + PB = AQ + QB = \text{常数}$, 即光程为恒定值。

二、马吕斯定律

前面我们把光线定义为波面的法线束, 而按费马原理光线被定义为线积分 $\int n dl$ 具有稳定值的曲线。在这种表述下, 几何光学可以完全沿着变分法的轨道来发展。变分法的分析方法十分重要, 因为分析常常揭露出物理学不同学科之间的类似。例如, 几何光学和质点力学有密切的相似。

研究均匀介质中的一束光线, 如果它们具有一个共同的交点, 例如当它们发自一个点源时, 我们就说它们形成一个同心光锥。这种光锥构成一个法线束, 因为同心球面与此光束的各条光线都是正交的。1808 年马吕斯证明, 直线光线的同心光束经曲面折射或反射后, 所产生的光束(一般不再是同心光束)将仍旧构成一法线束。1916 年杜平等人推广马吕斯的结果, 后人称为马吕斯—杜平定律: 一法直线束经任意次折射或反射后仍然是一法线束。如图 1.3—3 所示, 设有二均匀介质以曲面 Σ 为界, 折射率分别为 n_1 和 n_2 , 并设在介质 1 中有一束法直线束的光线在界面 Σ 上受到折射。 S_1 为第一介质区域中的某一正交波面, A_1 和 P 是介质 1 中某一光线与波面 S_1 和界面 Σ 的交点。如果把 A_1 移到波面 S_1 上另一

点 B_1 , 则 P 点移到另一点 Q . 如果过 Q 的折射光线上取一点 B_2 , 使得 B_1 到 B_2 的光程等于 A_1 到 A_2 的光程. B_1 点在波面 S_1 上取所有可能位置时, B_2 点将描绘出一曲面 S_2 . 马吕斯—杜平定律告诉我们, QB_2 垂直于曲面 S_2 .

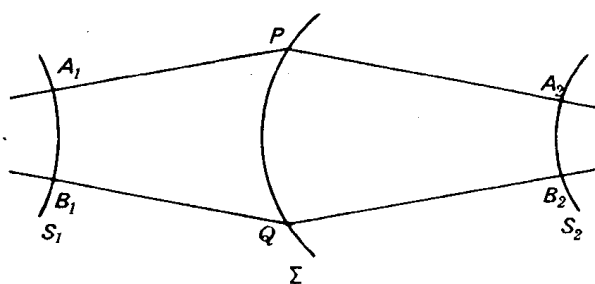


图1.3—3

由于 A_1 至 A_2 的光程等于 B_1 到 B_2 的光程, 所以光线束中的光线的任何两个正交曲面(波面)之间, 所有光线的光程都相等. 这一结果在多次折射和反射情况下仍然成立, 并且也适用于折射率连续改变的介质中的光线, 称为等光程原理.

折射及反射定律、费马原理、马吕斯定律三者中任一个均可作为几何光学的基本定律, 其余两个可视为推论, 三者之间可以互相推导出来.

§ 1.4 成像的概念

光学系统通常是由一个或多个光学元件组成, 而每个光学元件都是由球面、平面或非球面包围一定折射率的介质而组成. 组成光学系统的各光学元件表面的曲率中心在同一直线上的光学系统称为共轴光学系统, 该直线称为光轴. 相应地, 也有非共轴光学系统, 如棱镜光谱仪系统. 我们着重讨论共轴光学系统.

一、点物的理想成像条件

在未经光学系统变换之前, 入射同心光束的会聚点称为物点. 若这个会聚点是入射光线本身的真实交点, 则称为实物点, 如图1.4—1(a)中的 A 点; 若会聚点是入射光线延长线的交点, 则称为虚物点, 如图1.4—1(b)中的 A 点. 入射光束经光学系

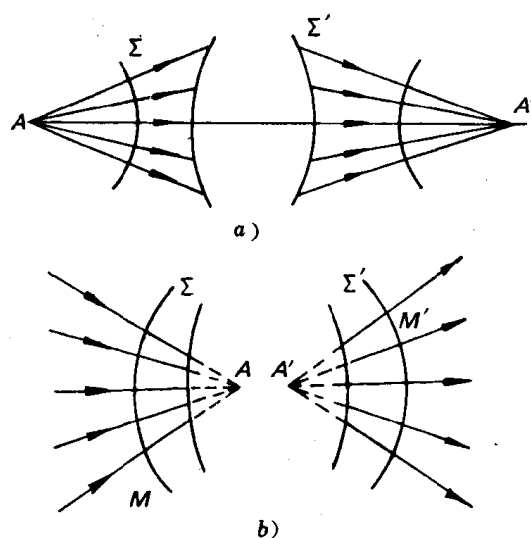


图1.4—1

统变换之后出射的同心光束的会聚点称为像点. 若这个会聚点是出射光线本身的真实交点, 则称为实像点, 如图1.4—1(a)中的 A' 点; 若是出射光线延长线的交点, 则称为虚像点,