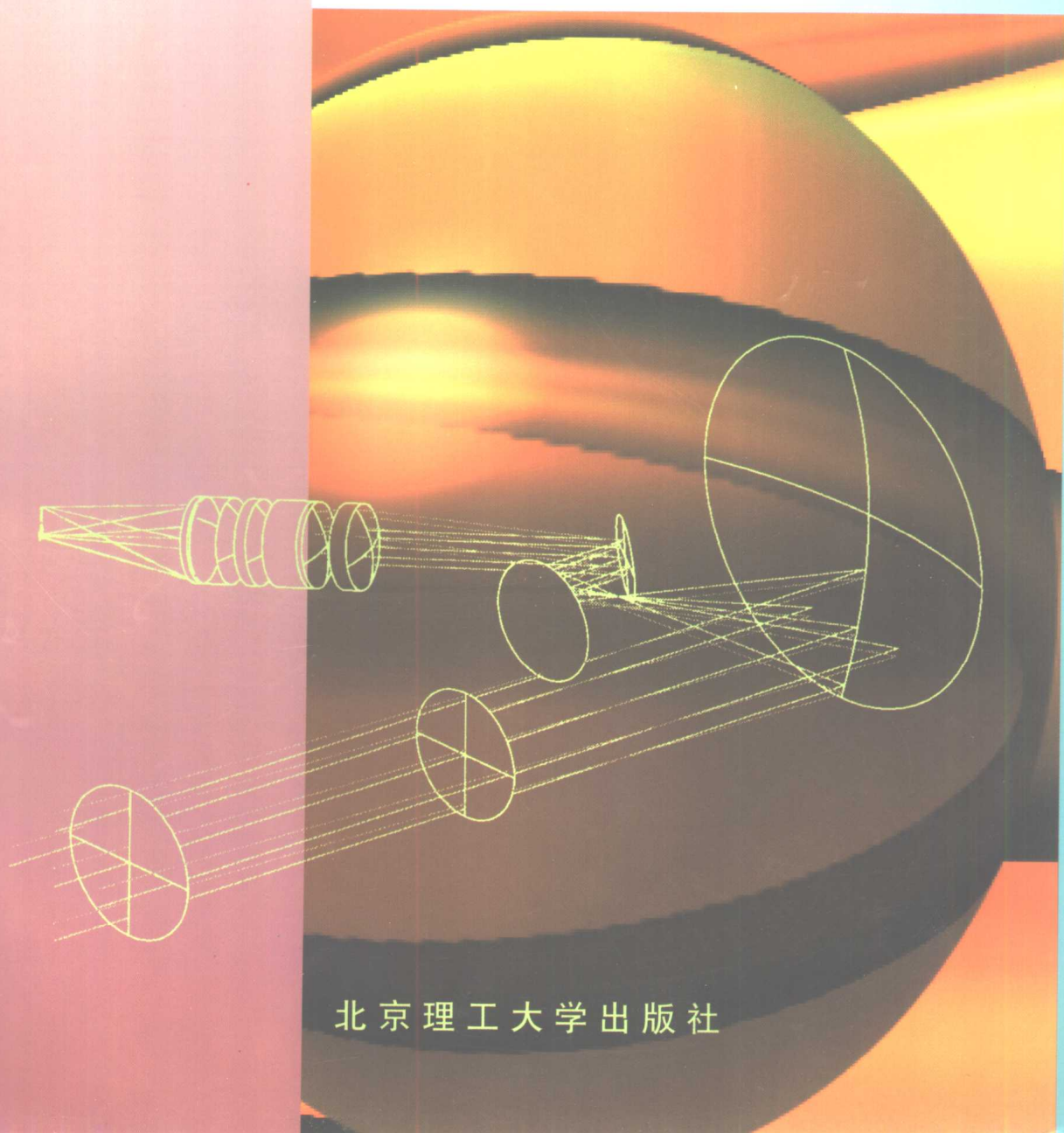


应用光学

安连生 主编



北京理工大学出版社

应用光学

安连生 李林 李全臣 编著

北京理工大学出版社

内 容 简 介

本书是光学工程类专业的技术基础课教材。主要介绍了几何光学、光学仪器原理和光学系统外形尺寸计算。它不但涵盖了传统光学仪器(如望远镜、显微镜、照相机、投影仪等)光学系统的理论与设计,而且还用相当篇幅介绍了近年来迅速发展光纤光学仪器、激光仪器、红外仪器等现代光学仪器的基本原理。本书融入了作者多年的教学经验和大量的实际科研成果,是大学本科生、工程技术人员非常适用的教材和技术参考书。

图书在版编目(CIP)数据

应用光学/安连生主编. —2版. —北京:北京理工大学出版社,2000.2

ISBN 7-81013-954-1

I. 应… I. 安… III. 应用光学 IV. O439

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 4 3 3 号

责任印制:刘景凤 责任校对:郑兴玉

北京理工大学出版社出版发行

(北京市海淀区白石桥路7号)

邮政编码 100081 电话(010)68912824

各地新华书店经营

北京地质印刷厂印刷

*

787×1092毫米 16开本 16.25印张 367千字

2000年2月第2版 2000年2月第2次印刷

印数:2501—5000册 定价:23.00元

※图书印装有误,可随时与我社退换※

出版说明

在 21 世纪即将来临之际,根据兵器工业科技与经济发展对于人才素质和质的要求,兵器工业总公司教育局组织兵工专业教学指导委员会制定了《兵器工业总公司“九五”教材编写与出版规划》。在制定规划的过程中,我们力求贯彻国家教委关于“抓重点,出精品”的教材建设方针,根据面向 21 世纪军工专业课程体系 and 教学内容改革的总体思路,本着“提高质量,保证重点”的原则,精心遴选了在学校使用两遍以上,教学效果良好的部分讲义列入教材规划,兵工专业教学指导委员会的有关专家对于这些规划教材的编写大纲都进行了严格的审定。可以预计,这批“九五”规划教材的出版将促进兵工类专业教育质量的提高、教学改革的深化和兵器科学与技术的发展。

本教材由母国光教授主审。

殷切地希望广大读者和有关单位对本教材编审和出版中的缺点与不足给予批评指正。

1997 年 8 月 17 日

前 言

本教材是经光学仪器教学指导委员会审定大纲的九五规划教材。

应用光学是光学工程重要的技术基础。它的传统概念是指经典光学仪器(如望远镜、显微镜、照相机、投影仪等)中光学系统的理论与设计,它的内容主要是几何光学和波动光学。随着光学学科的飞速发展,如激光的出现及其广泛的应用,光纤通信和光电子成像技术的发展,光学与计算机技术的结合等都使光学仪器经历着由传统到现代的巨大转变。作为光学工程基础的应用光学其内涵也在扩展,它正逐步涵盖了某些现代光学的基础内容。为适应这种变化的需求,本书除了介绍高斯光学、光学仪器基本原理等传统内容外,还介绍了激光束光学,光纤光学,红外光学以及色度学等有关现代光学的基础内容。其它章节的内容和例题、习题也力图融进现代光电仪器的先进成果。

本书由北京理工大学安连生、李林、李全臣合作撰写。安连生负责第一、三、五、六、十一、十二、十三章的编写;李林负责第二、四、八、九、十章的编写;李全臣负责第七章的编写。全书由安连生主编。北京理工大学光电工程系技术光学教研室在应用光学教材建设上曾做过不少工作,老师们不断地把自己的科研成果融入教材,出版过若干个版本具有一定特色的应用光学教材。这些教材都是本书编写的基础,因此可以说本书凝聚了教研室同仁们多年的心血。

袁旭沧教授在本书的编写过程中给予了许多具体的指导和帮助,中国科学院院士母国光教授在百忙中抽出时间审校了本书,提出了很好的意见,在此一并表示深深的谢意。

江苏无锡湖光仪器厂王承蕊、陈世令两位高级工程师以他们的科研成果为本书提供了望远系统外形尺寸计算的很好的素材,这里也十分感谢他们辛勤的劳动。

由于作者水平所限,不妥之处在所难免,恳请读者不吝珠玉,予以批评指正。

作者于北京
1999. 9. 9

目 录

第一章 几何光学基本原理	(1)
§ 1-1 光波和光线	(1)
§ 1-2 几何光学基本定律	(3)
§ 1-3 折射率和光速	(4)
§ 1-4 光路可逆和全反射	(5)
§ 1-5 基本定律的向量形式	(7)
§ 1-6 光学系统类别和成像的概念	(8)
§ 1-7 理想像和理想光学系统	(11)
第二章 共轴球面系统的物像关系	(14)
§ 2-1 共轴球面系统中的光路计算公式	(14)
§ 2-2 符号规则	(15)
§ 2-3 球面近轴范围内的成像性质和近轴光路计算公式	(17)
§ 2-4 近轴光学的基本公式和它的实际意义	(19)
§ 2-5 共轴理想光学系统的基点——主平面和焦点	(22)
§ 2-6 单个折射球面的主平面和焦点	(24)
§ 2-7 共轴球面系统主平面和焦点	(25)
§ 2-8 用作图法求光学系统的理想像	(26)
§ 2-9 理想光学系统的物像关系式	(28)
§ 2-10 光学系统的放大率	(30)
§ 2-11 物像空间不变式	(32)
§ 2-12 物方焦距和像方焦距的关系	(33)
§ 2-13 节平面和节点	(35)
§ 2-14 无限远物体理想像高的计算公式	(36)
§ 2-15 理想光学系统的组合	(37)
§ 2-16 理想光学系统中的光路计算公式	(40)
§ 2-17 单透镜的主平面和焦点位置的计算公式	(42)
第三章 眼睛和目视光学系统	(49)
§ 3-1 人眼的光学特性	(49)
§ 3-2 放大镜和显微镜的工作原理	(52)
§ 3-3 望远镜的工作原理	(55)
§ 3-4 眼睛的缺陷和目视光学仪器的视度调节	(58)
§ 3-5 空间深度感觉和双眼立体视觉	(59)
§ 3-6 双眼观察仪器	(61)
第四章 平面镜棱镜系统	(66)
§ 4-1 平面镜棱镜系统在光学仪器中的应用	(66)
§ 4-2 平面镜的成像性质	(67)
§ 4-3 平面镜的旋转及其应用	(68)

§ 4-4	棱镜和棱镜的展开	(69)
§ 4-5	屋脊面和屋脊棱镜	(73)
§ 4-6	平行平板的成像性质和棱镜的外形尺寸计算	(74)
§ 4-7	确定平面镜棱镜系统成像方向的方法	(77)
§ 4-8	棱镜转动定理	(80)
§ 4-9	共轴球面系统和平面镜棱镜系统的组合	(85)
§ 4-10	棱镜的偏差	(86)
第五章	光学系统中成像光束的选择	(90)
§ 5-1	光阑及其作用	(90)
§ 5-2	望远系统中成像光束的选择	(91)
§ 5-3	显微镜中的光束限制和远心光路	(96)
§ 5-4	场镜的特性及其应用	(99)
§ 5-5	空间物体成像的清晰深度——景深	(100)
第六章	辐射度学和光度学基础	(103)
§ 6-1	立体角的意义和它在光度学中的应用	(103)
§ 6-2	辐射度学中的基本量	(104)
§ 6-3	人眼的视见函数	(105)
§ 6-4	光度学中的基本量	(107)
§ 6-5	光照度公式和发光强度的余弦定律	(111)
§ 6-6	全扩散表面的光亮度	(113)
§ 6-7	光学系统中光束的光亮度	(114)
§ 6-8	像平面的光照度	(116)
§ 6-9	照相物镜像平面的光照度和光圈数	(118)
§ 6-10	人眼的主观光亮度	(119)
§ 6-11	通过望远镜观察时的主观光亮度	(120)
§ 6-12	光学系统中光能损失的计算	(122)
第七章	色度学基础	(127)
§ 7-1	颜色视觉	(127)
§ 7-2	颜色匹配	(129)
§ 7-3	CIE 标准色度系统	(130)
§ 7-4	CIE 标准照明体和标准光源	(138)
§ 7-5	颜色测量	(141)
§ 7-6	孟塞尔表色系统	(144)
第八章	光学系统成像质量评价	(146)
§ 8-1	概述	(146)
§ 8-2	介质的色散和光学系统的色差	(147)
§ 8-3	轴上像点的单色像差——球差	(149)
§ 8-4	轴外像点的单色像差	(150)
§ 8-5	几何像差的曲线表示	(154)
§ 8-6	用波像差评价光学系统的成像质量	(158)
§ 8-7	理想光学系统的分辨率	(160)
§ 8-8	各类光学系统分辨率的表示方法	(162)
§ 8-9	光学传递函数	(163)

§ 8-10 用光学传递函数评价系统的像质·····	(166)
第九章 望远镜和显微镜 ·····	(170)
§ 9-1 望远镜的光学性能和技术条件 ·····	(170)
§ 9-2 望远镜物镜 ·····	(175)
§ 9-3 望远镜目镜 ·····	(179)
§ 9-4 望远镜的外形尺寸计算 ·····	(183)
§ 9-5 显微镜概述和显微镜的光学性能 ·····	(192)
§ 9-6 显微镜的物镜和目镜 ·····	(194)
第十章 照相机和投影仪 ·····	(197)
§ 10-1 照相物镜的光学特性 ·····	(197)
§ 10-2 照相物镜的基本类型 ·····	(198)
§ 10-3 变焦距照相物镜 ·····	(202)
§ 10-4 取景系统和调焦系统 ·····	(204)
§ 10-5 投影仪的作用及其类别 ·····	(207)
§ 10-6 投影仪中的照明系统 ·····	(208)
§ 10-7 投影物镜 ·····	(210)
§ 10-8 投影系统中的光能计算 ·····	(212)
第十一章 光纤光学系统 ·····	(216)
§ 11-1 概述 ·····	(216)
§ 11-2 全反射光纤的光学性质 ·····	(216)
§ 11-3 全反射光纤的应用 ·····	(219)
§ 11-4 梯度折射率光纤 ·····	(221)
第十二章 激光光学系统 ·····	(226)
§ 12-1 概述 ·····	(226)
§ 12-2 激光束在均匀介质中的传播规律 ·····	(226)
§ 12-3 高斯光束的透镜变换 ·····	(230)
§ 12-4 激光谐振腔的计算 ·····	(233)
§ 12-5 激光扫描系统和 $f\theta$ 镜头 ·····	(235)
§ 12-6 光学信息处理系统和傅立叶变换镜头 ·····	(237)
第十三章 红外光学系统 ·····	(241)
§ 13-1 概述 ·····	(241)
§ 13-2 红外光学系统的功能和特点 ·····	(241)
§ 13-3 红外物镜 ·····	(242)
§ 13-4 辅助光学系统 ·····	(245)
§ 13-5 典型红外光学系统 ·····	(246)

第一章 几何光学基本原理

§ 1-1 光波和光线

光和人类的生产和生活有着十分密切的关系,植物的生长需要光,人的视觉要依靠光,人类一切活动几乎都离不开光。人们常说的“耳听为虚,眼见为实”,正反映了人对光的重要作用的认识。人类通过实践很早就积累了有关光的丰富的感性知识,很早就开始研究光。

人类对光的研究,可以分为两个方面:一方面是研究光的本性,并根据光的本性来研究各种光学现象,称为“物理光学”;另一方面是研究光的传播规律和传播现象,称为“几何光学”。

对于光的本性的研究,虽然很早就已开始,但进展较慢。对光的本性的科学假说,最初是牛顿在 1666 年提出的,他认为光是一种弹性粒子,称为“微粒说”。1678 年惠更斯认为光是在“以太”中传播的弹性波,提出了“波动说”。1873 年麦克斯韦根据电磁波的性质证明,光实际上是电磁波。从此人类对光的本性才有了比较正确的认识。1905 年爱因斯坦为了解释光电效应,提出了“光子”的假说,后来由于康普顿效应的发现而得到证实,这样使人类对光的认识更为全面。现代物理认为,光是一种具有波粒二象性的物质,即光既具有“波动性”又具有“粒子性”。只是在一定条件下,某一种性质显得更为突出。一般来说,除了研究光和物质作用的情况下必须考虑光的粒子性而外,可以把光作为电磁波看待,称为“光波”。

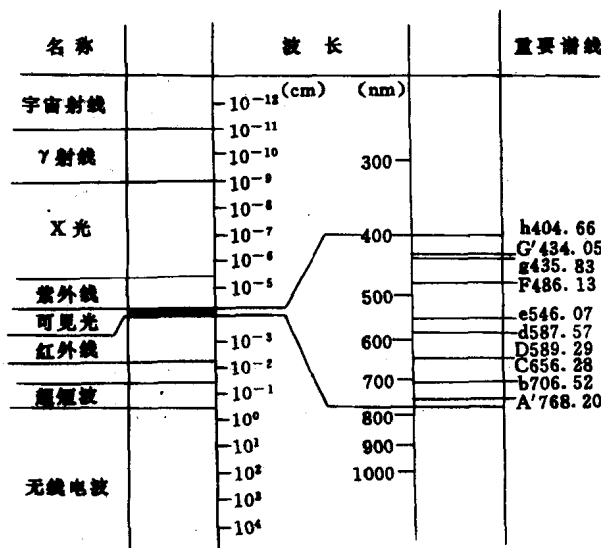


图 1-1

光波和一般无线电波不同处,只是光波的波长比无线电波短,图 1-1 中表示了电磁波按波长分类的情况,波长在 $400 \sim 760\text{nm}$ ($1\text{nm} = 10^{-9}\text{m} = 10\text{\AA}$) 的电磁波能够为人眼所感觉,称为“可见光”,超出这个范围人眼就感觉不到。不同波长的光产生不同的颜色感觉。同一波长的光,具有相同的颜色,称为“单色光”。由不同波长的光波混合而成的光称为“复色光”,不同颜色的

光对应的波长范围如图 1-2 所示。白光是由各种波长光混合而成的一种复色光。

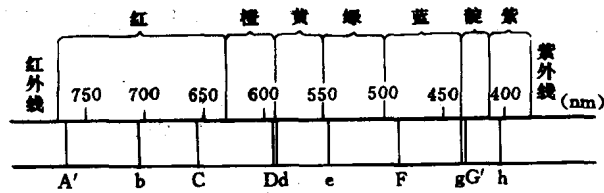


图 1-2

不同波长的电磁波,在真空中具有完全相同的传播速度; $c \approx 3 \times 10^{10} \text{cm/s}$ 。因此不同波长的电磁波的频率不同,因为频率和光速、波长之间存在以下关系

$$v = \frac{c}{\lambda}$$

在透明介质中,如水、玻璃等,光的波长和光速同时改变,但频率不变。

某一瞬间波动传播所到达的曲面称为“波面”。在均匀介质中,波动在各方向的传播速度相同,因此一个位于均匀介质中的点光源所发出的电磁波的波面,应该是以光源为中心的同心球面,如图 1-3 所示。

光既是电磁波,研究光的传播问题,应该是一个波动传播问题。但是,几何光学中研究光的传播,并不把光看作是电磁波,而把光看作是“能够传输能量的几何线”。这样的几何线叫做“光线”。光源发光就是向四周发出无数条几何线,沿着每一条几何线向外发散能量。如图 1-4 所示。

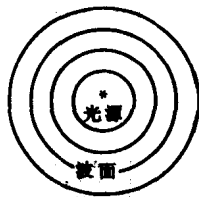


图 1-3

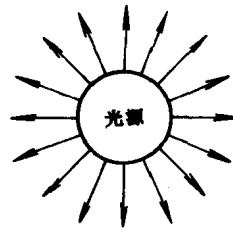


图 1-4

“光线”这一概念是人们直接从无数客观光学现象中抽象出来的。利用光线的概念可以说明自然界中许多光的传播现象,例如我们常见的影的形成、日蚀、月蚀、小孔成像等等。这些现象都可以用把光看作“光线”的概念来解释。目前使用的光学仪器,绝大多数是应用几何光学原理——把光看作“光线”——设计出来的。

几何光学研究光的传播,也就是研究这些光线的传播。研究的方法是,首先找出光线的传播规律——几何光学的基本定律,然后根据这些基本定律研究光的传播现象。在研究过程中,光线和几何线具有完全相同的性质,所不同的只是光线具有方向——即能量传播的方向。因此,就光线的几何性质来说,光线就是“具有方向的几何线”。这样,几何光学中研究光的传播问题,就变成了一个几何问题,这就是所以称为“几何光学”的理由。

如前所述,位于均匀介质中的点光源所发射的光波的波面,是以发光点为球心的球面,同时按照几何光学的观点,点光源发光就是由发光点 A 向四周发出无数条几何线,如图 1-5 所

示,显然光线垂直于波面,换句话说,“光线就是波面的法线”,反之,“波面就是所有光线的垂直曲面”。这就是波面和光线之间的对应关系。相交于同一点或者由同一点发出的一束光线称为“同心光束”,对应的波面形状为球面,如图 1-6(a)所示。不聚交于一点的光束称为“像散光束”,对应的波面为非球面,如图 1-6(b)所示。平行光束对应的波面为平面,如图 1-6(c)所示。

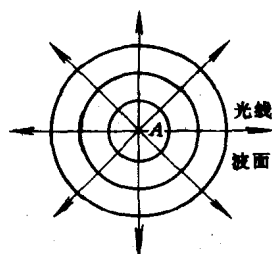


图 1-5

本书就是按照几何光学的原理来研究光的各种传播现象,并应用这些规律和现象来设计和制造光学仪器。对于某些不能利用几何光学研究的 optical 现象,我们可以根据光线的位置,按上述波面和光线的对应关系,找出相应的波面,然后再用把光看作波动的物理光学方法进行研究。

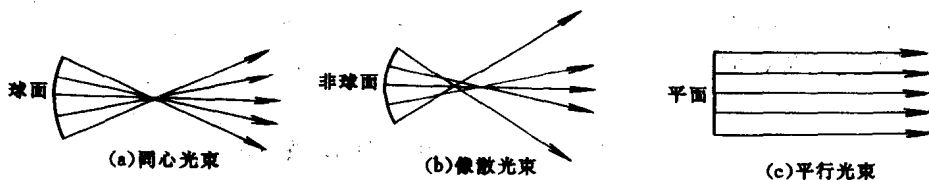


图 1-6

§ 1-2 几何光学基本定律

几何光学把光看作是具有方向的几何线——“光线”,从而进行光的传播问题的研究。因此,我们必须首先找出这些光线的传播规律。自然界中光的传播现象虽说是千变万化,但是,如果用几何光学的观点仔细分析,实际上可以归纳为以下两种情况:

1. 光线在均匀透明介质中传播的规律——直线传播定律:光线在均匀透明介质中按直线传播;

2. 光线在两种均匀介质分界面上的传播规律——反射定律和折射定律。

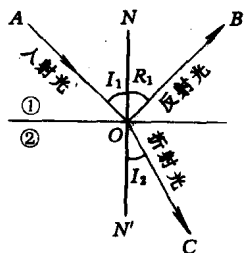


图 1-7

若一束光线投射在两种介质的分界面上,如图 1-7 所示,其中一部分光线在分界面上反射到原来的介质,称为“反射光线”;另一部分光线透过分界面进入第二种介质,并改变原来方向,称为“折射光线”。反射和折射光线的传播规律,就是反射和折射定律。

为了便于表述这些定律,我们首先引入以下几个名词。

入射光线 AO 和介质分界面的法线 ON 间的夹角 $\angle AON = I_1$,称为“入射角”;反射光线 OB 和法线 ON 间的夹角 $\angle BON = R_1$,称为“反射角”;折射光线 OC 和法线之间的夹角 $\angle CON' = I_2$,称为“折射角”;入射光线和法线构成的平面称为“入射面”。

反射和折射定律可分别表述如下:

反射定律:

1. 反射光线位于入射面内;
2. 反射角等于入射角

$$I_1 = R_1 \quad (1-1)$$

折射定律:

1. 折射光线位于入射面内;
2. 入射角和折射角正弦之比,对两种一定的介质来说,是一个和入射角无关的常数

$$\frac{\sin I_1}{\sin I_2} = n_{1,2} \quad (1-2)$$

$n_{1,2}$ 称为第二种介质对第一种介质的折射率。

至于光在不均匀介质中传播的规律,可以把不均匀介质看作是由无限多的均匀介质组合而成的。光线在不均匀介质中的传播,可以看作是一个连续的折射。随着介质性质不同,光线传播曲线的形状各异。它的传播规律,同样可以用折射定律来说明。由此可见,直线传播定律、反射定律和折射定律,能够说明自然界中光线的各种传播现象。它们是几何光学中仅有的物理定律。因此称为几何光学的基本定律。几何光学的全部内容,就是在这三个定律的基础上用数学方法研究光的传播问题。

§ 1-3 折射率和光速

假定一束平行光线投射在两介质的分界面 P 上。如图 1-8 所示。所有的光线具有相同的入射角 I_1 ,通过平面 P 折射后,按折射定律,所有折射光线显然具有相同的折射角 I_2 。因此,仍为一平行光束。和平行光束相垂直的入射波面和折射波面,应该是两个平面。

假定某一瞬间波面的位置为 OQ ,经过时间 t 以后,光波传播所到达的波面位置为 $O'Q'$ 。设光在两介质内的传播速度分别为 v_1 和 v_2 ,由图可得

$$QQ' = v_1 \cdot t; \quad OO' = v_2 \cdot t$$

由于波面 OQ 垂直于光线 AO ,分界面 P 垂直于法线 ON 。因此, $\angle QQO' = \angle AON = I_1$,同理 $\angle O'Q'O = \angle A'ON' = I_2$,根据 $\triangle OQQ'$ 和 $\triangle OQ'O'$ 得

$$\sin I_1 = \frac{QQ'}{OQ'}; \quad \sin I_2 = \frac{OO'}{OQ'}$$

由以上二式相除消去 OQ' 得

$$\frac{\sin I_1}{\sin I_2} = \frac{QQ'}{OO'} = n_{1,2}$$

将前面 $QQ' = v_1 \cdot t$; $OO' = v_2 \cdot t$ 的关系代入上式,并消去 t ,得到

$$\frac{\sin I_1}{\sin I_2} = \frac{v_1}{v_2} = n_{1,2} \quad (1-3)$$

由此可见:第二种介质对第一种介质的折射率 $n_{1,2}$ 等于第一种介质的光速 v_1 和第二种介质的光速 v_2 之比。这也就是折射率和光速之间的关系。对于一定的介质,光速显然不变。因此,两种一定的介质对应的折射率应为不变的常数。实际上也就证明了折射定律的成立。

通常把一种介质对另一种介质的折射率称为“相对折射率”,而把介质对真空的折射率称为“绝对折射率”。由于光在空气中的传播速度和真空中的传播速度相差极小,通常把空气的绝对折射率取作 1,而把介质对空气的折射率作为“绝对折射率”。

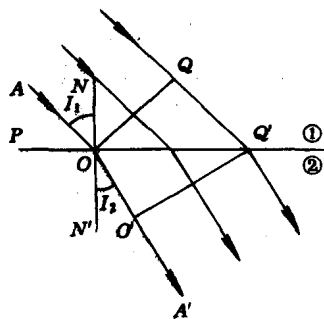


图 1-8

光在真空中的速度为 c 。根据上面得到的公式(1-3), 第一种和第二种介质的绝对折射率 n_1 和 n_2 用以下公式表示

$$n_1 = \frac{c}{v_1}; \quad n_2 = \frac{c}{v_2}$$

二式相除得

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{\frac{c}{v_2}}{\frac{c}{v_1}} = \frac{v_1}{v_2}$$

根据前面相对折射率的公式(1-3), $n_{1,2} = \frac{v_1}{v_2}$, 得

$$n_{1,2} = \frac{n_2}{n_1} \quad (1-4)$$

上式表明, 第二种介质对于第一种介质的相对折射率等于第二种介质的绝对折射率和第一种介质的绝对折射率之比。

将以上关系代入折射定律

$$\frac{\sin I_1}{\sin I_2} = n_{1,2} = \frac{n_2}{n_1}$$

上式可改写成对称形式

$$n_1 \sin I_1 = n_2 \sin I_2 \quad (1-5)$$

以上公式是用绝对折射率表示的折射定律。由于公式两边的形式对第一种和第二种介质来说完全相同。因此, 我们既可以把 I_1 看作入射角, 把 I_2 看作折射角; 也可以反过来把 I_2 看作入射角, 把 I_1 看作折射角。在这样两种不同的情况下, 公式形式完全相同。因此, 上式既可以用于光线由第一种介质进入第二种介质, 也可以用于光线由第二种介质进入第一种介质。这样比起前面用相对折射率表示的折射定律就要方便得多。因此, 今后都是用绝对折射率来表示折射定律。

§ 1-4 光路可逆和全反射

上面介绍了光线传播的基本定律, 下面应用这些定律来研究两种重要的光的传播现象——光路可逆和全反射。

一、光路可逆

假定某一条光线, 沿着一定的路线, 由 A 传播到 B 。如果在 B 点沿着出射光线, 按照相反的方向投射一条光线, 则此反向光线, 仍沿着此同一条路线, 由 B 传播到 A 。光线传播的这种性质, 叫做“光路可逆定理”。根据该定理, 当研究光线传播时, 即可以按实际光线进行的方向来研究它的传播路线; 也可以按与实际光线相反的方向进行研究, 二者的结果是完全相同的。

下面利用基本定律, 证明上述定理。

根据直线传播定律, 在均匀介质中光线按直线传播。两点间只能作一条直线, 不论由 A 到 B , 或者由 B 到 A , 光线必须沿着此同一直线传播, 光路可逆定理显然成立。

至于反射和折射的情形, 根据反射定律和折射定律的公式(1-1)和(1-5)

$$I_1 = R_1; \quad n_1 \sin I_1 = n_2 \sin I_2$$

在以上二式中,左右两边分别表示入射光线和反射光线,以及入射光线和折射光线几何位置之间的关系,并且等式两边形式完全对称。交换等式两边,得

$$R_1 = I_1; \quad n_2 \sin I_2 = n_1 \sin I_1$$

如果把 R_1 看作入射角, I_1 便成了反射角; I_2 作为入射角, I_1 便成了折射角。这就相当于把原来的反射光线和折射光线的位置作为入射光线的位置。根据以上公式,新的反射光线和折射光线的位置就是原来的入射光线的位置,如图 1-9 和图 1-10 所示。

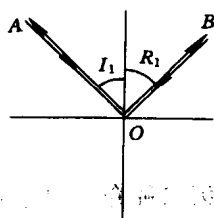


图 1-9

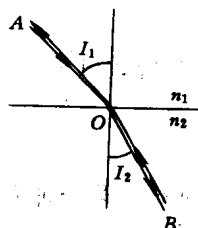


图 1-10

无论光线在均匀介质中传播,或者在两介质分界面上进行反射和折射,光路可逆定理都成立。因此,无论光线经过任意次反射、折射,也不管它通过什么样的介质,上述定理永远普遍成立。

二、全反射

在一般情况下,投射在二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到原来的介质,另一条光线经分界面折射进入另一种介质,随着光线入射角的增大,反射光线的强度逐渐增强,而折射光线的强度则逐渐减弱。

设介质 n_1 内的发光点 A 向各方向发出光线,投射在介质 n_1 和 n_2 的分界面上,如图 1-11 所示,每条光线都分成一条折射光线和一条反射光线。假定

$$n_1 > n_2$$

根据折射定律: $n_1 \sin I_1 = n_2 \sin I_2$, 得到

$$\sin I_2 > \sin I_1$$

当入射角 I_1 增大时,相应的折射角 I_2 也增大,同时反射光线的强度随之加大,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 $I_2 = 90^\circ$ 。这时折射光线掠过二介质的分界面,并且强度趋近于零。当入射角 $I_1 > I_0$ 时,折射光线不再存在,入射光线全部反射。这样的现象称为“全反射”。折射角 $I_2 = 90^\circ$ 对应的入射角 I_0 称为“临界角”,或“全反射角”。按照折射定律

$$n_1 \sin I_0 = n_2 \sin 90^\circ = n_2$$

得到

$$\sin I_0 = \frac{n_2}{n_1} \quad (1-6)$$

只有当光线由折射率高的介质射向折射率低的介质时,才有可能产生全反射,例如由玻璃到空气,或者由水到空气。由折射率低的介质射向折射率高的介质时,折射角小于入射角,显然

不会有全反射产生。

全反射现象广泛地应用于光学仪器中。利用全反射原理构成的反射棱镜如图 1-12(a) 所示。用它来代替镀反光膜的反射镜,能够减少光能损失。因为一般镀反光膜的反射镜不能使光线全部反射,大约有百分之十的光线将被吸收,而且反光膜容易变质和损伤。利用棱镜全反射必须满足以下条件,即全部光线在反射面上的入射角都必须大于临界角 I_0 。如果有的光线入射角小于临界角,则反射面上仍需要镀反光膜。

玻璃的折射率不同,由玻璃到空气对应的临界角也不同。不同折射率对应的临界角数值如表 1-1 所示。

表 1-1

n	1.5	1.52	1.54	1.56	1.58	1.60	1.62	1.64	1.66
I_0	41°48'	41°8'	40°30'	39°52'	39°16'	38°41'	38°7'	37°34'	37°3'

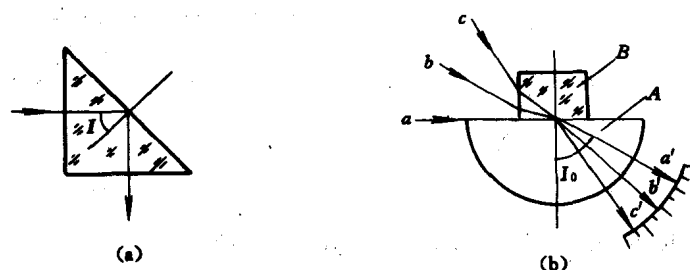


图 1-12

全反射现象的另一个重要应用是利用它测量介质的折射率。如图 1-12(b) 所示,图中 A 是用一种折射率已知的介质做成的,设其折射率为 n_A ; B 乃是需要测量折射率的介质,其折射率用 n_B 表示。假定 $n_A > n_B$,从各方向射来的光线 $a, b, c, \dots$ 经过二介质的分界面折射后,对应的最大折射角显然和掠过分界面的 a 光线的折射角相同,其值等于全反射角 I_0 。全部折射光线的折射角均小于 I_0 ,超出 I_0 便没有折射光线存在。因此,可以找到一个亮暗的分界线。利用测角装置,测出 I_0 角的大小,根据公式(1-6)

$$\sin I_0 = \frac{n_B}{n_A}$$

或

$$n_B = n_A \sin I_0$$

将已知的 n_A 值和测得的 I_0 角代入上式,即可求得 n_B 。

常用的阿贝折射计和普氏折射计就是利用测量临界角 I_0 的原理构成的,近年来新出现的一种指纹检查仪也应用了全反射的原理。

§ 1-5 基本定律的向量形式

前面说过,光线是具有方向的几何线,当然可以用向量表示,基本定律的两部分内容也可

以用一个向量公式全部表示出来。

如图 1-13 所示,入射光线的方向用单位向量 Q 表示,折射光线的方向用单位向量 Q' 表示,法线方向用单位向量 N 表示,则折射定律可以用下列向量公式表示

$$nQ \times N = n'Q' \times N$$

或者

$$(nQ - n'Q') \times N = 0 \quad (1-7)$$

由于 $|Q \times N| = \sin I$, $|Q' \times N| = \sin I'$, 因此,上述向量公式既代表了入射角 I 和折射角 I' 之间的数量关系 $n \sin I = n' \sin I'$, 同时也表示 Q 、 Q' 、 N 三个向量共面。

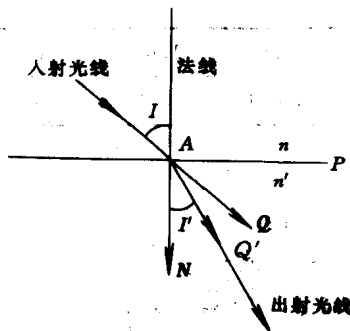


图 1-13

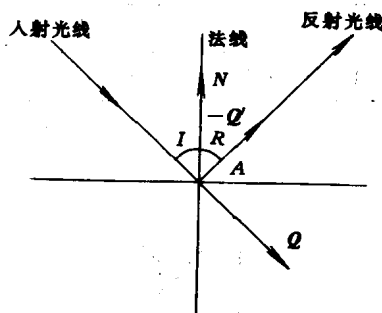


图 1-14

对均匀介质的情形,相当于 $n' = n$, 代入公式(1-7)得

$$Q = Q'$$

这就是均匀介质中的直线传播定律。

对于反射的情形,如果用 Q 、 $-Q'$ 、 N 这三个向量分别代表入射光线、反射光线和法线方向的单位向量,如图 1-14 所示。根据反射定律,它们之间应满足下列关系

$$Q \times N = -Q' \times N \quad (1-8)$$

这就是反射定律的向量公式。如果把 $n' = -n$ 代入公式(1-7),就可以得到公式(1-8)。因此,可以把公式(1-7)看作是基本定律的普遍形式,把直线传播定律和反射定律看作 $n' = n$ 和 $n' = -n$ 的特例,不过折射光线与 Q' 同向,反射光线与 Q' 反向。

§ 1-6 光学系统类别和成像的概念

人们在研究光的各种传播现象的基础上,设计和制造了各种各样的光学仪器,为生产和生活服务。例如利用显微镜帮助我们观察细小的物体,利用望远镜观察远距离的物体等。在所有光学仪器中,都是应用不同形状的曲面和不同的介质(玻璃、晶体等)做成各种光学零件——反射镜、透镜和棱镜,如图 1-15 所示。把它们按一定方式组合起来,使由物体发出的光线,经过这些光学零件的折射、反射以后,按照我们的需要改变光线的传播方向,随后射出光学系统,从而满足一定的使用要求。这样的光学零件的组合称为“光学系统”,图 1-16 是一个军用观察望远镜的光学系统图,它是由两个透镜组(物镜和目镜)和两个棱镜构成的。

绝大部分透镜系统都有一条对称轴线,这样的系统称为“共轴系统”,例如图 1-16 中的物镜组、目镜组都属于共轴系统。系统的对称轴称为“光轴”。没有对称轴的光学系统称为“非共

轴系统”。

在各种不同形式的曲面中,目前能够比较方便地进行大量生产的只限于球面和平面(平面可以看作是半径为无限大的球面)。因此,绝大多数光学系统中的光学零件均由球面构成。这样的光学系统称为“球面系统”。如果光学系统中包含有非球面,则称为“非球面系统”。在球面系统中,如果所有球心均位于同一直线上,由于球面对于通过球心的任意一条直线都对称,因此

该直线就是整个系统的对称轴线,也就是系统的光轴。这样的系统称为“共轴球面系统”。目前被广泛采用的光学系统,大多数由共轴球面系统和平面镜、棱镜系统组合而成。图 1-16 中军用观察望远镜的光学系统就是由两个属于共轴球面系统的透镜组(物镜组和目镜组)和两个全反射棱镜组成的。今后我们主要研究的也就是共轴球面系统和平面镜、棱镜系统。

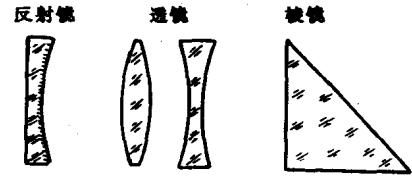


图 1-15

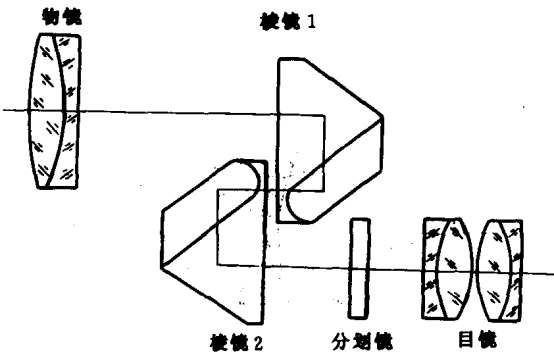


图 1-16

同的形状,如图 1-17(b)所示。

下面根据光线和波面的传播规律,来研究光束通过透镜的传播情况。

实际上共轴球面光学系统都是由不同形状的透镜构成的。因此,单个透镜是共轴球面系统的基本组元。例如图 1-16 中望远镜的物镜组和目镜组就是分别由两片透镜和四片透镜组成的。

透镜根据形状不同可以分成两大类:第一类称为会聚透镜或正透镜。它的特点是中心厚边缘薄。这类透镜又有各种不同的形状,如图 1-17(a)所示;第二类称为发散透镜或负透镜。这类透镜的特点是中心薄边缘厚。它也有各种不同的形状,如图 1-17(b)所示。

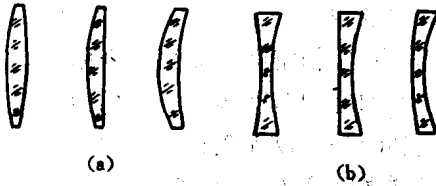


图 1-17

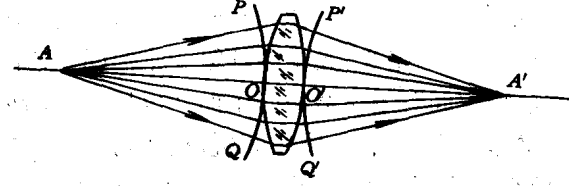


图 1-18

首先看会聚透镜。如图 1-18,由 A 点发出的同心光束,它的波面 PQ 是以 A 为球心的球面。当光束通过透镜时,由于玻璃的折射率比空气大,根据折射率和光速的关系,光在玻璃中的传播速度比空气中的速度小,而会聚透镜中心的厚度比边缘大,因此光束的中心部分传播得慢,而边缘部分传播得快。图 1-18 的情形,中心的光线由 O 传播到 O' 时;边缘的光线已经由 P、Q 分别传播到 P'、Q',出射波面便由左向右弯曲,整个光束便折向光轴,称为“会聚”。如果透镜表面选用恰当的曲面形状,则出射波面有可能仍为一球面。对应的出射光线都相交于一点 A',该相交点显然就是出射球面波的球心。我们称 A' 为 A 点通过透镜所成的“像点”,而把 A