

应用光学

胡玉禧 安连生 编著

中国科学技术大学出版社

205044

应 用 光 学

胡玉禧 安连生 编著



中国科学技术大学出版社

1996·合肥

应 用 光 学

胡玉禧 安连生 编著

*

中国科学技术大学出版社出版发行

(安徽省合肥市金寨路 96 号, 230026)

中国科学技术大学印刷厂印刷

全国新华书店经销

*

开本: 850×1168/32 印张: 11.25 字数: 289 千

1996 年 9 月第 1 版 1996 年 9 月第 1 次印刷

印数 1-3000 册

ISBN 7-312-00795-3/O · 176 定价: 10.00 元

前 言

根据面向 21 世纪的教学内容和课程体系改革要求,为适应科学技术的发展和培养人才的需要,我们重新编写了本教材。

本教材共分十一章,前五章论述高斯光学理论及基本光学零件的成像特性,并从实用出发介绍像质评价和光能计算方法;第六到第十章讨论典型光学系统,除经典的目视和摄影、投影光学系统外,增添了激光、光纤和红外等现代应用光学系统;最后一章对光学系统计算机辅助设计的原理和方法作了简要介绍。本教材不仅注意了必要的理论基础,保持内容的系统性和完整性,又努力反映了技术光学领域的新发展,并注意培养学生解决实际问题的能力。

本教材由中国科学技术大学和北京理工大学教师共同编著。具体分工是中国科学技术大学胡玉禧负责第一、二、三、四、五、七、八、九、十一章;北京理工大学安连生负责第六、十章。

在教材编写过程中,曾得到不少同志的帮助,谨致谢意。由于我们水平有限,书中错误和缺点在所难免,恳请读者指正。

编者

1996 年 2 月

目 次

前 言	(I)
第一章 几何光学基本原理和成像概念	(1)
第一节 光波和光线	(1)
第二节 光线的传播规律	(5)
第三节 马吕斯定律和费马原理	(6)
第四节 光路可逆和全反射	(14)
第五节 光学系统及成像的基本概念	(16)
第六节 理想像和理想光学系统	(19)
第二章 高斯光学	(26)
第一节 实际光路计算	(26)
第二节 近轴光路计算	(32)
第三节 近轴区成像性质和物像关系	(34)
第四节 基面、基点和焦距	(38)
第五节 由基面、基点求理想像	(44)
第六节 光学系统主面和焦点位置确定	(56)
第三章 平面零件成像	(68)
第一节 平行平板	(68)
第二节 折射棱镜和光楔	(71)
第三节 平面反射镜	(77)
第四节 反射棱镜	(81)
第五节 平面镜棱镜系统成像方向的判断	(93)
第四章 光阑和光能计算	(96)
第一节 孔径光阑	(96)
第二节 视场光阑	(103)

第三节	像平面的光照度·····	(107)
第四节	光学系统中光能损失的计算·····	(121)
第五节	景深和焦深·····	(125)
第五章	光学系统成像质量评价·····	(129)
第一节	几何像差和点列图·····	(129)
第二节	波像差和瑞利判断·····	(147)
第三节	分辨率和星点检验·····	(150)
第四节	光学传递函数·····	(155)
第六章	目视光学系统·····	(163)
第一节	人眼的光学特性·····	(163)
第二节	放大镜和显微镜·····	(169)
第三节	望远镜·····	(175)
第四节	物镜和目镜·····	(181)
第五节	倒像系统·····	(196)
第六节	视度调节·····	(199)
第七节	外形尺寸计算·····	(201)
第七章	摄影和投影光学系统·····	(218)
第一节	摄影系统的光学参数·····	(218)
第二节	摄影物镜基本类型·····	(224)
第三节	取景和调焦·····	(231)
第四节	投影物镜·····	(235)
第五节	照明系统·····	(239)
第八章	激光光学系统·····	(247)
第一节	激光束传输特性·····	(247)
第二节	激光束的透镜变换·····	(252)
第三节	激光聚焦镜头和激光扩束望远镜·····	(255)
第四节	激光扫描系统和 $f\theta$ 镜头·····	(263)
第五节	光学信息处理系统和傅里叶变换镜头·····	(267)
第六节	激光谐振腔的计算·····	(272)

第九章 纤维光学系统	(275)
第一节 阶梯型光纤.....	(275)
第二节 光纤导光和传像.....	(280)
第三节 梯度折射率光纤.....	(290)
第四节 自聚焦透镜.....	(297)
第十章 红外光学系统	(303)
第一节 概述.....	(303)
第二节 红外光学系统的功能和特点.....	(304)
第三节 红外物镜.....	(305)
第四节 辅助光学系统.....	(310)
第五节 典型红外光学系统.....	(314)
第十一章 光学系统计算机辅助设计	(318)
第一节 光路计算向量公式.....	(318)
第二节 像差自动平衡的基本原理.....	(328)
第三节 光学传递函数计算.....	(335)
第四节 计算机绘图在光学设计中的应用.....	(343)

第一章 几何光学基本原理和成像概念

撇开光的波动本性,仅以光线为基础,研究光在透明介质中传播问题的学科,称为几何光学.本章首先引入几何光学中的光线概念,然后讨论光线的传播规律,即几何光学的基本定律和两种重要的光传播现象,最后给出有关理想光学系统和理想像的基本概念.

第一节 光波和光线

一、光 波

现代物理学认为,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.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之外,其它情况下都把光作为电磁波看待,称为“光波”.

图 1.1 表示了电磁波按波长分类的情况.光波的波长比一般无线电波短得多,其波长范围约为 $10 \sim 10^3 \text{ nm}$ ($1 \text{ nm} = 10^{-6} \text{ mm} = 10^{-3} \mu\text{m} = 10 \text{ \AA}$). 波长在 $400 \sim 760 \text{ nm}$ 的光波能够为人眼所感觉,称为“可见光”,超出这个范围

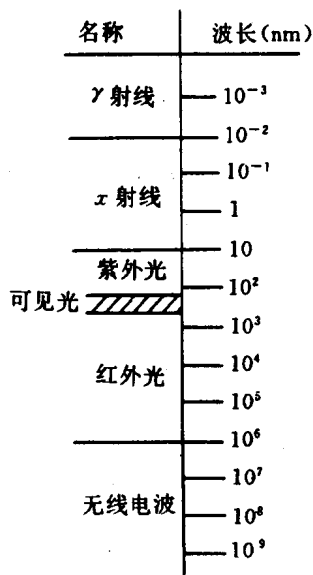


图 1.1

人眼就感觉不到。在可见光波段内,不同波长的光产生不同的颜色感觉,具有单一颜色的光称为“单色光”。将几种单色光混合得到的光称为“复色光”。用红、橙、黄、绿、蓝、靛、紫七种单色光按一定比例混合即可得到白光。不同颜色的光对应的波长范围及表示符号如图1.2所示。

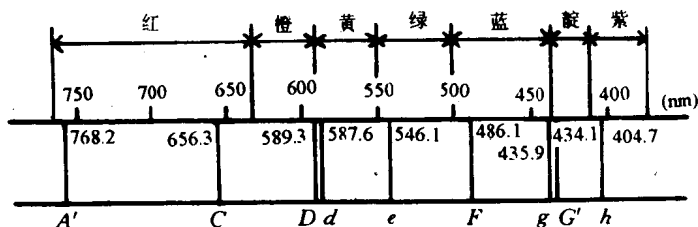


图 1.2

不同波长的光波在真空中具有完全相同的速度,其值为: $c \approx 3 \times 10^8 \text{m/s}$ 。在空气中也近似此值。在水、玻璃等透明介质中,光的传播速度比在真空中为慢,且速度随波长不同而改变。

二、发光体与发光点

凡能辐射光能的物体统称为“发光体”或“光源”。一切自身发光(例如太阳、恒星、灯等等)或受到光照射而发光的物体均可视为发光体。

当发光体的大小与其辐射光能的作用距离相比可以忽略时,则此发光体可视为“发光点”或“点光源”。例如,对于地球上的观察者来说,体积超过太阳但距离遥远的恒星,仍可以认为是发光点。

在几何光学中,不考虑发光点所包含的物理概念(如光能密度等),认为发光点是一个既无大小,也无体积而只有位置的发光几何点。

任何被成像的物体(发光体)均由无数个发光点组成。在研究光的传播与物体成像问题时,通常选择物体上某些特定的点来进

行讨论。

三、波 面

发光体向四周辐射光波,在某一瞬时,光振动位相相同各点所构成的曲面,或者说,某一瞬间光波所到达的位置称为“波阵面”,简称“波面”。

波面按形状可以分为球面、平面(以上为规则波面)和任意曲面(不规则波面)。在各向同性的均匀介质中,发光点所发出的光波波面,是以发光点为中心的一些同心球面,这种波称为“球面波”。对有一定大小的实际发光体,在光的传播距离比光源线度大得多的情况下,它所发出的光波也可近似视为球面波。在距发光点无限远处,波面形状可视为平面,这种波称为“平面波”。偏离上述规则波面的任意曲面为不规则波面,亦称变形波面。

四、光 线

光既然是电磁波,研究光的传播问题,应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但没有截面大小,只有位置和方向的几何线。这样的几何线叫做“光线”。发光体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。根据物理光学观点,在各向同性介质中,辐射能量是沿着波面的法线方向传播的。因此,物理光学中的波面法线就相当于几何光学中的光线。换句话说,光线必定垂直于波面,如图 1.3 所示。

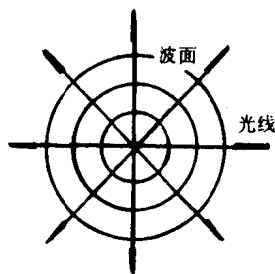


图 1.3

五、光 束

无限多条光线的集合称“光束”。常见的光束有图 1.4 所示三种类型：

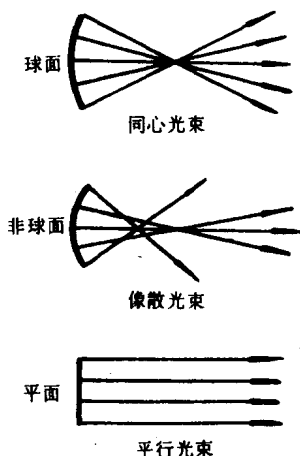


图 1.4

同心光束——相交于同一点或由同一点发出的一束光线。其对应的波面形状为球面。

像散光束——不聚交于同一点或不是由同一点发出的光束。对应的波面形状为非球面。

平行光束——没有聚交点而互相平行的光线束。对应的波面为平面。

上述各概念中，光线是几何光学中最基本最感兴趣的一个概念。但是，光线并不是一个物理实体，它只是一种数学工具，只是人们直接从无数客观

光学现象中抽象出来的一个概念。由于在自然界中的许多光的传播现象，例如我们常见的影子的形成、日蚀、月蚀、小孔成像等等，都可以用把光看作光线的概念来解释，所以，光线始终被用在几何光学中。

几何光学研究光的传播，也就是研究光线的传播。光线是一些具有方向的几何线，因此，几何光学中研究光的传播问题，就变成了一个简单的几何问题，这就是“几何光学”名称的由来。同时也说明了在研究光的传播问题上，为什么几何光学比物理光学简单容易得多。

以光线代替光波后，光波本身的衍射特性被忽略。从而使以光线表示的光的传播特性具有近似性。但是，绝大多数光学系统的通

光口径比波长大得很多很多,衍射现象并不能察觉.而且,几何光学使光传播问题的研究大为简化.因此,以光线作为基本概念的光学理论具有很重要的实用价值.目前使用的光学仪器,绝大多数都是按几何光学原理设计出来的.随着科学技术发展,新的成像方法不断涌现,但很多方法远不如几何光学方法成熟,几何光学理论至今仍然是最重要的成像理论.

第二节 光线的传播规律

——几何光学的基本定律

一、直线传播定律

在各向同性的均匀透明介质中,光是沿着直线传播的.这就是光的直线传播定律.这个定律可以解释很多自然现象,例如上节提到的日蚀、月蚀、小孔成像等.很多仪器的设计原理也是以此定律为基础.但是应该注意,光的直线传播定律只在一定的条件下才成立,这就是光必须在各向同性的均匀介质中传播,且在行进途中不遇到小孔、狭缝和不透明的小屏障等阻挡.光在传播途中若遇到小孔、狭缝等,则根据波动光学的原理将发生衍射现象而偏离直线.光若在不均匀介质中传播,光的轨迹将是任意曲线.

二、独立传播定律

从不同发光体发出的互相独立的光线,以不同方向相交于空间介质中的某一点时,彼此互不影响,各光线独立传播.这就是光的独立传播定律.

利用几个探照灯在夜空中搜寻、交会飞机是这一定律的有说服力的例证.在几束光的交点处,光能量相加,通过交点后,各光束仍按各自原来的方向及能量分布向前传播.

光的独立传播定律的意义在于,当考虑某一光线的传播时,可

不考虑其它光线对它的影响,从而使得对光线传播情况的研究大为简化.

应该指出,光的独立传播定律仅对不同发光体发出的光即非相干光才是准确的.如果由同一光源发出而后再被分开的两束光,经过不同的路径相交于某点,这样的两束光当满足一定条件时,可能成为相干光而发生干涉现象,则独立传播定律不适用.

三、 反射定律和折射定律

这是研究光在两种均匀透明介质分界面上的传播规律的定律.一般说,光在两种均匀介质分界面处将产生复杂的现象:在光滑分界面(指表面任何不规则度大约 $\leq$ 波长数量级)上,将产生规则的反射和折射;而在粗糙分界面处将产生漫反射和漫折射.反射和折射定律指的是在光滑界面上的光传播规律.

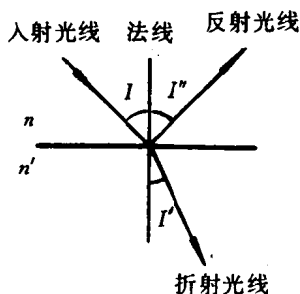


图 1.5

若一束光投射到两种介质分界面上,如图 1.5 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,并改变原来的方向,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,首先引入以下几个名词.

入射光线和界面法线间的夹角 I 称入射角;反射光线和界面法线间夹角 I'' 称反射角;折射光线和界面法线间夹角 I' 称折射角;入射光线和界面法线构成的平面称入射面.

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, 即

$$I'' = I \quad (1.1)$$

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, 是一个与入射角无关的常数. 它等于折射光线所在介质折射率 n' 与入射光线所在介质折射率 n 之比

$$\frac{\sin I}{\sin I'} = \frac{n'}{n} \quad (1.2)$$

n, n' 为介质的绝对折射率, 指真空中光速 c 与介质中光速 v (或 v') 之比, 即

$$\left. \begin{aligned} n &= \frac{c}{v} \\ n' &= \frac{c}{v'} \end{aligned} \right\} \quad (1.3)$$

由于光线是具有方向的几何线, 可以用向量来表示, 因此, 折射定律和反射定律也可用向量公式表示.

如图 1.6a 所示, 入射光线的方向用单位向量 Q 表示, 折射光

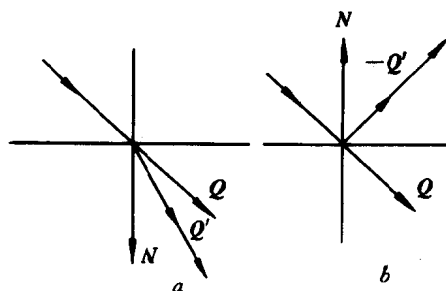


图 1.6

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:

$$n\mathbf{Q} \times \mathbf{N} = n'\mathbf{Q}' \times \mathbf{N}$$

或者

$$(n\mathbf{Q} - n'\mathbf{Q}') \times \mathbf{N} = 0 \quad (1.4)$$

由于 $|\mathbf{Q} \times \mathbf{N}| = \sin I$, $|\mathbf{Q}' \times \mathbf{N}| = \sin I'$, 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 $\mathbf{Q}$ 、 $\mathbf{Q}'$ 、 $\mathbf{N}$ 三个向量共面。

对于反射的情形, 用 $-\mathbf{Q}'$ 向量代表反射光线方向的单位向量, 见图 1. 6b. 根据反射定律, $\mathbf{Q}$ 、 $-\mathbf{Q}'$ 、 $\mathbf{N}$ 向量之间应满足下列关系:

$$\mathbf{Q} \times \mathbf{N} = -\mathbf{Q}' \times \mathbf{N} \quad (1.5)$$

这就是反射定律的向量公式. 如果把 $n' = -n$ 代入公式 (1.4), 就可以得到公式 (1.5). 因此, 可以把反射定律看作是折射定律在 $n' = -n$ 时的特例。

至于光在不均匀介质中传播的规律, 我们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. 由上讨论可见, 直线传播定律、独立传播定律、反射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, 就是在这些定律的基础上用数学方法研究光的传播问题。

第三节 马吕斯定律和费马原理

马吕斯定律是表述光线传播规律的另一种形式. 其内容如下:

与某一曲面垂直的一束光线, 经过任意次折射、反射后, 必定与另一曲面垂直, 而且位在这两个曲面之间的所有光线的光程相等。

该定律首先肯定了和光束垂直的曲面, 即波面永远连续存在,

而且这些曲面按照等光程的规律传播。

根据光的波动性质,马吕斯定律的成立显然不成问题.因为光既是电磁波,波面当然是连续存在的.按照波面的定义,任意两个波面之间,所有光线的传播时间相同.又根据光程定义,光程 L 是几何路程 S 和介质折射率 n 的乘积,即

$$L = S \cdot n = S \cdot \frac{c}{v} = t \cdot c \quad (1.6)$$

所以,只要光线的传播时间 t 相同,它们的光程也就相同.因此,任意两波面之间必然是等光程。

马吕斯定律指出了由已知波面寻求未知波面的途径.例如有一波面 W ,一束光线 $A_1I_1, A_2I_2, \dots, A_kI_k$ 垂直于 W 波面,如图 1.7 所示.为了找出这些光线通过介质分界面 P 后的折射光线位置,可首先利用马吕斯定律找出折射后的波面.有了新波面,就可确定折射光线位置.假定折射面 P 两边的折射率分别为 n 和 n' .设光

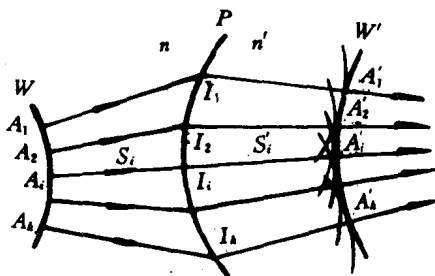


图 1.7

束中任一条光线 A_iI_i 由 W 到 P 的距离为 S_i ,则光程为 nS_i . 假定由折射点 I_i 到新波面的距离为 S'_i ,则光程等于 $n'S'_i$. 两波面之间的光程为 $L = nS_i + n'S'_i$. 对任一条光线, L, n, n', S_i 均为已知,满足上面的光程表示式便可求得 S'_i . 以 S'_i 为半径,以 I_i 为圆心作圆弧. 每一条光线都重复以上步骤,即可作出一系列圆弧. 然后,作所

有圆弧的包络线 W' . W' 显然符合等光程条件. 根据马吕斯定律, 它就是我们要找的新的波面. 作各折射点 I_i 和相应的圆弧和包络面的切点 A'_i 的连线 $I_i A'_i$. $I_i A'_i$ 显然垂直于波面 W' . 所以, 它就是我们要找的折射光线.

费马原理是光线传播规律的又一种形式. 该原理为: 实际光线沿着光程为极值的路线传播, 或者说, 光沿光程为极小、极大或常量的路径传播.

为了证明费马原理的正确, 下面由费马原理导出直线传播定律, 折射定律和反射定律.

在均匀介质中, 折射率为常数, 要求光程为极值, 也就是要求几何路程为极值. 两点之间直线最短, 对应的光程为极小值, 所以, 均匀介质中光线按直线传播.

假定 A, B 两点分别位在折射率为 n 和 n' 的两种介质内, 此两介质的分界面为平面 P , 如图 1.8 所示. 光线由 A 点发出, 经过平面 P 折射传播到 B . 下面根据费马原理确定实际光线的传播路线.

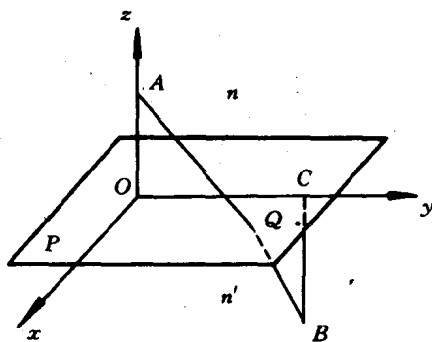


图 1.8

为了表示实际光线的位置, 需要建立一定的坐标系. 为了推导