



普通高等教育“十三五”规划教材

工程光学

Engineering Optics

陈颖等编著 张颖 审



国防工业出版社
National Defense Industry Press

普通高等教育“十三五”规划教材

工 程 光 学

陈 颖 韩 颖 编著
朱奇光 徐 伟
张 颖 审

国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

本书系统地介绍了工程光学的基本原理、方法和应用。全书共分为9章,前5章以几何光学为主,主要内容包括几何光学原理,典型光组的设计与计算,像差的基本概念及像质评价;第6章至第9章以波动光学为主,主要内容包括波动光学的基本原理,光的干涉,光的衍射,光的偏振理论及其应用等。以上两部分内容构成了经典光学的完整体系。

本书可作为高等院校测控技术与仪器、光学工程、电子信息、电子科学与技术、仪器仪表及精密计量与检测等专业的本科生及研究生专业基础课教材,也可以作为物理及光学专业的选修课教材,同时对于从事仪器仪表研发的工程技术人员也具有参考作用。

图书在版编目(CIP)数据

工程光学/陈颖等编著. —北京:国防工业出版社,
2016.6

ISBN 978-7-118-10896-5

I. ①工… II. ①陈… III. ①工程光学 IV. ①
TB133

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 116368 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路23号 邮政编码 100048)

腾飞印务有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 16 字数 368 千字

2016年6月第1版第1次印刷 印数 1—2500 册 定价 39.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

前 言

光学是普通物理学的一个重要组成部分,是研究光的本性、光的传播和光与物质相互作用的基础学科。光学理论与技术如同电子学及电子计算机技术一样,是现代科学技术发展必不可少的重要领域之一。特别是 20 世纪 60 年代初激光问世以来,光学理论与技术发生了巨大的变化。许多新学科,诸如傅里叶光学、全息学、信息光学、纤维光学及非线性光学等的相继出现并迅速发展,标志着现代光学的形成。这些学科与工程技术结合,形成了一门理论性与实践性都很强的新学科——工程光学,从而使光学的研究进入一个崭新的阶段,成为现代科学技术前沿阵地之一。

为适应科学技术的发展和培养人才的需要,针对仪器仪表及计量技术等专业对光学的教学要求,我们编写了《工程光学》教材。在内容选择上,既考虑光学理论的系统性和完整性,又努力反映光学的最新理论与技术。在叙述上,力求做到由浅入深,概念清楚,文字简练。为了使基本概念和理论与实际结合,给出了计算或应用实例。希望读者能通过本书的学习学会应用所学理论解决工程技术中的具体问题。

本书是根据编者在燕山大学多年来为测控技术与仪器专业本科生开设“工程光学”必修课程的讲义,并参考国内外有关教材和书籍编写而成的。本书系统地介绍了工程光学的基本原理、方法和应用。全书共分为 9 章,前 5 章以几何光学为主,主要内容包括几何光学的基本原理,球面系统,平面系统,典型光组的设计与计算,光束限制,像差的基本概念和分类,光学系统像质评价方法等;第 6 章至第 9 章以波动光学为主,主要内容包括波动光学的基本原理,光的干涉,光的衍射,光的偏振理论及其应用,给出了各种常用的典型干涉、衍射和偏振系统,讨论了光的干涉、衍射和偏振的种类,提供了计算方法及应用实例。以上两部分内容构成了经典光学的完整体系。

为了便于学习使用,本书在内容安排、习题选择及表达方式等方面力求符合教学要求和学时安排,可作为高等院校测控技术与仪器、光学工程、电子信息、电子科学与技术、仪器仪表及精密计量与检测等专业的本科生及研究生专业基础课教材,也可以作为物理及光学专业的选修课教材。同时对于从事仪器仪表研发的工程技术人员也是一本有用的参考书。

本书由燕山大学陈颖教授主编,并编写了第 1、2 章和第 7、8 章,韩颖副教授编写了第 4、5 章,朱奇光副教授编写了第 3、6 章,徐伟讲师编写了第 9 章。在此基础上,由陈颖教授进行了统稿。张颖教授对全书进行了仔细的审阅,并提出了宝贵的修改意见。刘腾、罗佩、韩洋洋、赵志勇、田亚宁、曹会莹、石佳、董晶和刘晓飞等在本书的编写过程中做出了大量的编辑和校对工作,在此深表感谢。

由于编者水平所限,经验不足,书中缺点和错误在所难免,衷心希望读者和专家们批评指正。

编者

2015 年 11 月

目 录

第 1 章 几何光学的基本定律及球面光学系统	1
1.1 几何光学的基本定律与成像的基本概念	1
1.2 光路计算与近轴光学系统	7
1.3 球面光学成像系统	10
1.4 理想光学系统	21
习题	36
第 2 章 平面系统	39
2.1 平面镜成像	39
2.2 平行平板	42
2.3 反射棱镜	44
2.4 折射棱镜	51
习题	54
第 3 章 典型光学系统及其光束限制	56
3.1 光阑	56
3.2 渐晕	60
3.3 眼睛	62
3.4 放大镜	66
3.5 显微镜及其光束限制	68
3.6 望远镜及其光束限制	70
3.7 光学系统的景深与远心光路	76
习题	81
第 4 章 像差理论及像质评价	84
4.1 球差	84
4.2 正弦差和彗差	86
4.3 场曲和像散	90
4.4 畸变	94
4.5 色差	96
4.6 像质评价	98
习题	104
第 5 章 辐射度学与光度学基础	105
5.1 基本辐射量	105
5.2 光度量	107

5.3	光传播过程中光学量的变化规律	112
5.4	成像系统像面的光照度	117
	习题	121
第6章	光的电磁理论基础	123
6.1	光的电磁性质	123
6.2	光在界面上的反射和折射	126
6.3	光的吸收、色散和散射	134
6.4	光波的叠加	142
	习题	148
第7章	光的干涉	150
7.1	光波的干涉原理及相干条件	150
7.2	分波阵面法获得干涉——杨氏干涉	151
7.3	干涉条纹可见度的影响因素	154
7.4	平板的双光束干涉	158
7.5	平行平板的多光束干涉原理	163
7.6	平板干涉在测量中的应用	167
7.7	典型平板干涉测量系统的设计	171
7.8	光学薄膜	182
	习题	186
第8章	光的衍射	188
8.1	衍射的基本概念及惠更斯-菲涅尔原理	188
8.2	菲涅尔衍射	192
8.3	夫琅禾费衍射	196
8.4	衍射光栅	208
8.5	光学成像系统的分辨本领	211
	习题	216
第9章	光的偏振	218
9.1	偏振光概述	218
9.2	晶体的双折射	220
9.3	晶体偏振器件	227
9.4	偏振光干涉	232
9.5	磁光、电光效应	236
	习题	242
	习题参考答案	244
	参考文献	248

第 1 章 几何光学的基本定律及球面光学系统

研究光学离不开光学系统,其主要作用是传播光能和对研究的目标成像。在解释光学成像和设计光学系统时,通常采用几何光学的研究方法。所谓几何光学,就是在分析光学现象时,抛开光的波动本性,仅以光线为基础,用几何的方法研究光在介质中的传播规律和光学系统的成像特性。本章首先介绍几何光学的基本定律和物像的基本概念,进而对球面系统光学系统的成像特性进行分析。

1.1 几何光学的基本定律与成像的基本概念

1.1.1 几何光学的点、线、面

通常,能够辐射光能量的物体,称为发光体或光源。几何光学把光源和物体看作是由许多几何发光点组成,每个发光点向四周辐射光能量。通常将发光点发出的光抽象为许许多多携带能量并带有方向的几何线,即光线。光线的方向代表光的传播方向。发光点发出的光波向四周传播时,在某一时刻振动相位相同的点所构成的面称为波阵面,简称波面,也称波前。光的传播即为光波波阵面的传播。在各向同性介质中,波面上某点的法线即代表了该点处光的传播方向,即光沿着波面法线方向传播,因此,波面法线即为光线。与波面对应的所有光线的集合称为光束。光波在介质中沿着光线方向传播时,相位不断地改变,但在同一波面上所有点的相位是相同的。在各向同性介质中,光的传播方向总是和波面的法线方向重合。在许多实际情况中,人们经常考虑的只是光的传播方向问题,而不去考虑相位,这时波面就只是垂直于光线的几何平面或曲面。在这种极限情况下,实质上是把光线和波面都看做是抽象的数学概念。根据光波的特点,通常将波面分为平面波、球面波和任意球面波。平面波对应于平行光束,如图 1-1(a) 所示;球面波对应于同心光束,同心光束可分为发散光束和会聚光束,如图 1-1(b)、(c) 所示;而同心光束或平行光束经过实际光学系统后,由于像差的作用,将不再是同心光束,与之对应的光波则为非球面波。当光线既不相交于一点又不平行时,这种光束称为像散光束,如图 1-2 所示。

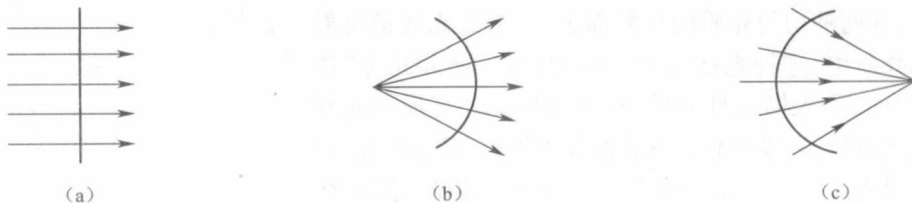


图 1-1 波面与光束

(a) 平面波与平行光束; (b) 球面波与发散光束; (c) 球面波与会聚光束。

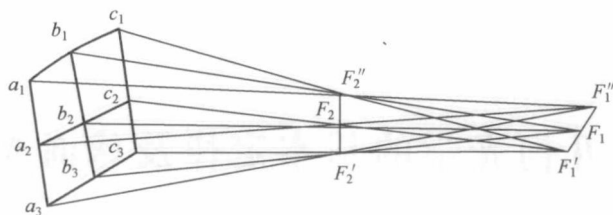


图 1-2 像散光束

1.1.2 几何光学的基本定律

几何光学把研究光经过介质的传播问题归结为几个基本定律,其决定了光线在通常情况下的传播方式,可以作为研究光学系统成像规律以及进行光学系统设计的理论依据。

1.1.2.1 光的直线传播定律

几何光学认为,在各向同性的均匀介质中,光是沿着直线方向传播的,这就是光的直线传播定律。影子的形成、日食、月食等现象都能很好地证明这一定律,“小孔成像”正是利用了光的直线传播定律。许多精密测量,如精密天文测量、大地测量、光学测量及相应光学仪器都是以这一定律为基础的。与此同时,值得注意的是,光的直线传播定律忽略了光波的衍射。

1.1.2.2 光的独立传播定律

不同光源发出的光在空间某点相遇时,各光线的传播不会受其他光线的影响,这就是光的独立传播定律。光束交会点上的强度是各光束强度的简单叠加,离开交会点后,各光束仍按各自原来的方向传播。

这一定律忽略了光波的干涉,即当两束光从光源的同一点发出,经不同传播路径在空间某点交会时,交会点处的光强可能不再是各光束光强简单的叠加,而是根据两束光所走过的光程不同,可能加强,也可能减弱。

1.1.2.3 光的折射、反射和全反射

光的直线传播定律与光的独立传播定律概括了光在同一均匀介质中传播的规律。而光的折射定律、反射定律以及全反射规律则是研究光传播到两种均匀介质分界面时的现象和规律。

当一束光线由折射率为 n 的介质射向折射率为 n' 的介质时,在两种均匀介质的分界面上,一部分光线被反射回原来介质中,这种光被称为反射光;另一部分光将“透过”分界面,进入第二种介质,称为折射光。与反射光和折射光相对应,原投射到光滑表面发生折射和反射之前的光叫入射光。反射光和折射光的传播方向遵循反射定律和折射定律。

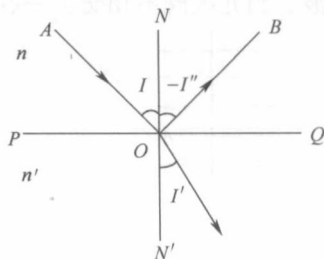


图 1-3 光线的折射和反射

如图 1-3 所示,入射光线 AO 入射到两种介质的分界

面 PQ 上,在 O 点发生反射和折射。其中反射光线为 OB ,折射光线为 OC , NN' 为界面上 O 点处的法线。入射光线、折射光线和反射光线与法线的夹角 I 、 I' 、 I'' 分别称为入射角、折射角和反射角,它们均以锐角度量,由光线转向法线,顺时针方向旋转形成的角度为正,反之为负。

1. 反射定律

反射定律指出入射光线、界面入射点的法线和反射光线三者共面,反射光和入射光位于法线两侧,且入射角 I 与反射角 I'' 的绝对值相等。即

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

反射定律表明,反射光与入射光对称于法线两侧。

2. 折射定律

折射定律指出入射光线、界面入射点的法线和折射光线三者共面,入射角 I 和折射角 I' 之间满足下列关系式

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

对于任意两种介质分界面上的折射, $n \sin I$ 或 $n' \sin I'$ 为一常数,称为光学不变量。折射角的正弦与入射角的正弦之比与入射角的大小无关,仅由两种介质的性质决定。对于一定波长的入射光而言,在一定温度和压力下,该比值为一常数,等于入射光所在介质的折射率 n 与折射光所在介质的折射率 n' 之比,即

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

折射定律表明,光线折射后将发生偏转。当光从低折射率的介质射向高折射率的介质时,光线向靠近法线的方向偏转,即折射角小于入射角,反之则偏离法线。

折射率是表征透明介质光学性质的重要参数。各种波长的光在真空中的传播速度均为 c ,而在不同介质中的传播速度 v 各不相同,都比在真空中的速度慢。介质的折射率正是用来描述介质中光速减慢程度的物理量,即

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

在式(1-2)中,若令 $n' = -n$,则有 $I' = -I$,此时折射定律可转化为反射定律。因此,可将反射定律看作折射定律的一个特例。根据这一特点,后面我们将看到,许多由折射定律得出的结论,只要令 $n' = -n$,就可以得出对应的反射定律的结论。

在图 1-3 中,若光线在折射率为 n' 的介质中沿 CO 方向入射,由折射定律可知,折射光线必沿 OA 方向出射。同样,如果光线在折射率为 n 的介质中沿 BO 方向入射,则由反射定律可知,反射光线也一定沿 OA 方向出射;由此可见,光线的传播是可逆的,这就是光路的可逆性。利用这一特性,不但可以确定物体经光学系统所成的像,也可以反过来确定其目标的位置。在光学系统的计算和设计中,经常利用光路的可逆性计算和设计光学系统,提高计算精度。

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。

3. 全反射

光线入射到两种介质的分界面时,通常都会发生折射与反射。但在一定条件下,入射

到介质上的光会全部反射回原来的介质中,而没有折射光产生,这种现象称为光的全反射现象。下面我们就来研究产生全反射的条件。

通常,把分界面两边折射率较高的介质称为光密介质,而把折射率较低的介质称为光疏介质。由式(1-4)可知,光在光密介质中的传播速度较慢,而在光疏介质中的传播速度较快。当光从光密介质向光疏介质传播,即 $n > n'$ 时,则由式(1-2)可得 $I' > I$,即折射角大于入射角,折射光线相对于入射光线而言更加偏离法线,如图 1-4 所示。当入射角逐渐增大到某一角度 I_c 时,光线的折射角增大至 90° ,光线经界面掠射,这时的入射角为临界入射角。

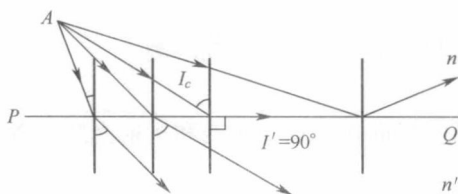


图 1-4 全反射现象

$$\sin I_c = n' \sin I' / n = n' \sin 90^\circ / n = n' / n \quad (1-5)$$

$$I_c = \arcsin \frac{n'}{n} \quad (1-6)$$

若继续增大入射角,折射光线将大于 90° 是不可能的。因此,折射光线消失,所有光线将反射回原来的介质中,即发生了全发射。

由上述可知,发生全反射的条件可归结为:

- (1) 光线由光密介质射向光疏介质;
- (2) 入射角大于临界角。

全发射现象在工程实际中有着广泛的应用,下面以光纤的传光过程为例来说明全反射原理在光通信中的应用。

目前,光纤广泛应用于光通信和光传感中,其传光最基本的原理就是全反射原理。图 1-5 所示为光纤的基本结构,单根光纤由内层折射率较高的纤芯和外层折射率较低的包层组成, n_0, n_1, n_2 分别为空气、纤芯和包层的折射率。光线从光纤的一端以入射角 I_1 耦合到光纤的纤芯中,投射到纤芯与包层的分界面上,入射角大于临界角的那些光线在纤芯内连续发生全反射,直至传到光纤的另一端面出射。此时,全反射发生在光纤中包层和纤芯的界面处,于是有

$$n_1 \sin I_1 = n_2 \sin I_2 \quad (1-7)$$

$$n_1 \sin I_c = n_2 \sin 90^\circ \quad (1-8)$$

$$I_c + I_1 = 90^\circ \quad (1-9)$$

$$n_0 \cdot \sin I_0 = n_1 \sin I_1 = n_1 \cos I_c = (n_1^2 - n_2^2)^{1/2} \quad (1-10)$$

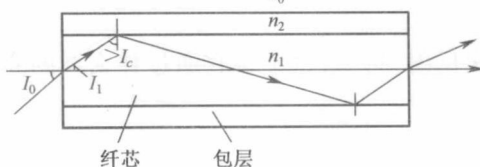


图 1-5 全反射光纤

光纤细且柔软,将许多根光纤按需排列形成光纤束,即光缆,用以传递图像和光能。在通信系统中光纤也替代了传统的电缆广泛应用于现代光通信中。

1.1.2.4 费马原理

费马原理用“光程”的概念对光的传播定律做了更简明的概括,涵盖了光的直线传播、反射定律,具有更普遍的意义。光本质上是一种电磁波,只是光波波长比普通无线电波的波长要短。波长在 380~780nm 之间的电磁波能为人眼所感知,称为可见光;波长大于 780nm 的为红外光;波长小于 380nm 的为紫外光。光波在真空中的传播速度 $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$,在介质中的传播速度小于 c ,且随波长的不同而不同。根据物理学,光程是指光在介质中传播的几何路程 l 与所在介质的折射率 n 的乘积 s ,即

$$s = nl \quad (1-11)$$

将式(1-4)及 $l=vt$ 代入上式,有

$$s = ct \quad (1-12)$$

由此可见,光在介质中的光程等于同一时间内光在真空中所走的几何路程。前面已经知道,在均匀介质中光是沿直线方向传播的。但是在非均匀介质中,光线将不再沿直线传播,若光的传播过程中经历了 k 个介质,走过的路径分别为 $l_1, l_2, \dots, l_k$,则光线的光程为

$$s = \sum_{i=1}^k n_i l_i \quad (1-13)$$

若折射率 n 是空间的位置函数,其轨迹是一空间的曲线,如图 1-6 所示。此时,光从 A 点传播至 B 点,其光程由以下曲线积分来确定:

$$s = \int_A^B n dl \quad (1-14)$$

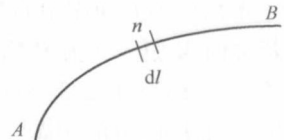


图 1-6 非均匀介质中的光线与光程

费马原理指出,光从一点传播到另一点,其间无论经历多少次折射和反射,其光程仍为极值,即光沿光程为极大值、极小值或常量值的路径传播。因此,费马原理也叫光程极值定律。其数学表示的一阶变分为零,即

$$\delta s = \delta \int_A^B n dl = 0 \quad (1-15)$$

其中,光程取极大值还是极小值,要取决于折射表面的曲率及两点之间的位置,大多数情况下是取极小值。费马本人最初提出的也是最短光程。

费马原理是描述光线传播的基本定律,可以用来证明光的直线传播、光的折射定律和反射定律。根据两点间直线距离最短这一几何定理,从费马原理可以直接推出光在均匀介质(或真空)中沿直线传播。下面利用费马原理对折射定律进行证明。

设两种均匀介质的分界面是平面,其折射率分别为 n_1 和 n_2 。光线通过第一种介质中指定的 A 点后经过界面到达第二种介质中指定的 B 点。为了确定实际光线的路径,通过 A, B 两点作平面垂直于界面,如图 1-7 所示, OO' 是这个平面与界面的交线。接下来通过费马原理来证明折射定律。

首先根据费马原理,可以确定折射点 C 必在交线 OO' 上,这是因为如果有另一点 C'

位于线外,则对应于 C' ,必可在 OO' 线上找到它的垂足 C'' 。由于 $AC' > AC''$, $C'B > C''B$ 故光程 $s_{AC'B}$ 总是大于光程 $s_{AC''B}$ 而非极小值。这就证明了入射面和折射面在同一平面内。

其次,确定 C 点在 OO' 上的位置。在图 1-7 中,作 x, y 坐标轴。指定点 A, B 的坐标分别为 (x_1, y_1) 和 (x_2, y_2) , 未知点 C 的坐标为 $(x, 0)$, C 点在 A', B' 之间时的光程必小于 C 点在 $A'B'$ 以外的相应光程,即 $x_1 < x < x_2$ 。于是光程 s_{ACB} 等于

$$n_1 AC + n_2 CB = n_1 \sqrt{(x - x_1)^2 + y_1^2} + n_2 \sqrt{(x_2 - x)^2 + y_2^2} \quad (1-16)$$

根据费马原理,这个光程应取最小值,即上式对 x 的一阶导数应该等于零:

$$\begin{aligned} \frac{ds_{ACB}}{dx} &= \frac{n_1(x - x_1)}{\sqrt{(x - x_1)^2 + y_1^2}} - \frac{n_2(x_2 - x)}{\sqrt{(x_2 - x)^2 + y_2^2}} = \frac{n_1 A'C}{AC} - \frac{n_2 CB'}{CB} \\ &= n_1 \sin i_1 - n_2 \sin i_2 = 0 \end{aligned} \quad (1-17)$$

由此可得

$$n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2 \quad (1-18)$$

以上即为折射定律。不难发现,光通过两种不同介质的分界面时,所遵从的折射定律也是费马原理的必然结果。同理也可导出反射定律。

光在均匀介质中沿直线传播,在介质分界面上的反射和折射都是最短光程的例子。但若镜面 M 是一个旋转椭球面,如图 1-8(a)所示,通过一个焦点 P 的入射光线被椭球面上任一点 $A_i (i=1, 2, 3, \dots)$ 反射后总是通过另一点 P' , 并且 $PA_i + A_i P' = \text{常量}$ 。因此,所有通过 P 和 P' 两点的实际光线是光程为恒定值的例子。在图 1-8(b)的情况中,光在镜面 M 上反射时,只有 $PA_1 P'$ 是实际光线所经过的路程,其他方向的入射线如果通过 P 点就不能够在反射后通过 P' 点,因为从图中(A_2 在椭球面上)可得

$$PA'_2 + A'_2 P' > PA_2 + A_2 P' = PA_1 + A_1 P' \quad (1-19)$$

所以在这个例子中,实际光程是最短的。在图 1-8(c)的情况中光被镜面 M 反射,实际光程 $s_{PA_1 P'}$ 取最大值,因为从图可见

$$PA'_3 + A'_3 P' < PA_3 + A_3 P' = PA_1 + A_1 P' \quad (1-20)$$

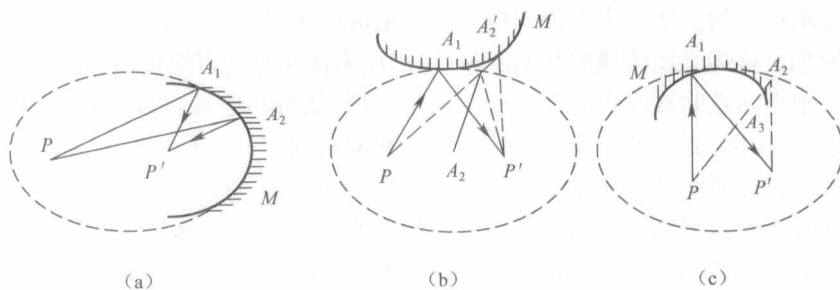


图 1-8 光在椭球面上的反射

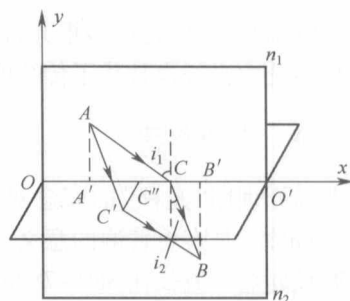


图 1-7 利用费马原理证明折射定律

1.1.2.5 马吕斯定律

在各向同性的均匀介质中,光线为光波的法线,光束则为波面的法线束。马吕斯定律描述了光经过任意多次折射、反射后,光束与波面、光线与光程之间的关系。

马吕斯定律指出,光线束在各向同性的均匀介质中传播时,始终保持着与波面的正交性,并且入射波面与出射波面对应点之间的光程均为定值。这种正交性表明,垂直于波面的光线束经过任意多次折射和反射后,无论折、反射面如何,出射光束仍垂直于出射波面。

折射与反射定律、费马原理和马吕斯定律三者中任意一个均可视为几何光学的基本定律,而把另外两个视作其基本定律的推论。

1.1.3 光学系统的物像概念

光学系统的主要功能之一就是对目标物体成像,因此首先要了解光学系统的物像概念。光学系统对目标物体成像,目标发出的光线在射入光学系统之前都称为物方光线,物方光线的会聚点称为物,经过光学系统作用之后的光线称为像方光线,像方光线的会聚点称为像。物方光线实际相交的点为实物点;物方光线延长后才能相交的点为虚物点。同理,像方光线实际相交的点为实像点,延长后相交的点为虚像点。

任何具有一定面积或体积的物体,都可视为无数发光点的集合,每一个物点对应一个像点,物体上各点所对应的像点的集合就构成了该物体通过光学系统所成的像。此时,物所在的区域即为物空间,像所在的区域称为像空间。而光学系统第一个曲面以前的区域则为实物空间,第一个曲面以后的区域为虚物空间。同理,像空间也可做同样的划分。总之,物空间和像空间都是可以无限扩展的。

1.2 光路计算与近轴光学系统

大多数光学系统都是由折、反射球面或平面光学零件按照一定的方式组合,对物体发出的光逐面折射和反射,按照需要传播光线和对物体成像。平面可以看成是曲率半径 $r \rightarrow \infty$ 的特例,反射则是折射在 $n' = -n$ 时的特例。因此,单个折射球面折射的光路计算是理解光学系统成像规律的基础,由此过渡到整个光学系统。

1.2.1 基本概念和符号规则

光线的计算总是依照光路的正方向设定符号规则,光路的方向即为光线行走的方向。通常规定光线从左到右传播为光路正向,反之取负。一般情况下总是将物体放在光学系统的左面,但在实际分析中若需要对光线作逆向计算,常采用翻转 180° 的做法。

如图 1-9 所示,折射球面 OE 是折射率为 n 和 n' 两种介质的分界面, C 为球面中心, OC 为球面曲率半径,用 r 表示。通过球心 C 的直线即为光轴,光轴与球面的交点 O 称为顶点。将通过物点和光轴的截面称作子午面。不难发现,轴上物点 A 的子午面有无数多个,而轴外物点的子午面只有一个,在子午面内,光线的位置由以下两个参量确定:

物方截距:顶点 O 到光线与光轴的交点 A 的距离,用 L 表示,即 $L = OA$ 。

物方孔径角:入射光线与光轴的夹角,用 U 表示、即 $U = \angle OAE$ 。

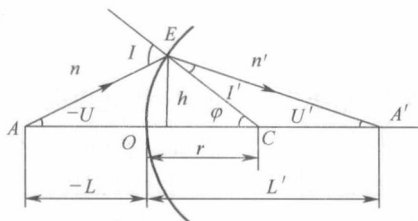


图 1-9 光线经过单个折射球面的折射

轴上点 A 发出的光线 AE 经过折射面 OE 折射后,与光轴相交于 A' 点。同样,光线 EA' 的位置由像方截距 $L' = OA'$ 和像方孔径角 $U' = \angle OA'E$ 确定。通常,像方参量符号与对应物方参量符号用相同的字母表示,并加“'”以示区别。图 1-9 中各量均用绝对值表示,凡是负值的量,图中量的符号前均加负号。为了确定光线与光轴的交点在顶点的左边还是右边、光线在光轴的上边还是下边、折射球面是凸的还是凹的,还必须对各符号参量的正负作出规定,具体表述如下:

1. 长度量的正负号

对于这些长度量,符号的规则采用直角坐标系的规则,将原点设为球面顶点,横轴与光轴重合,规定所有沿轴光的长度量自左至右为正方向,相反时取负;所有垂轴线段量自下向上为正方向,相反时取负。因此,图中 L 为负, L' 、 r 为正, h 为正。

2. 角度量的正负号

光线与光轴的夹角(如 U 和 U')从光轴以锐角方向转向光线,顺时针为正,逆时针为负;光线与法线的夹角(如 I 和 I')是从光线以锐角方向转向法线,顺时针为正,逆时针为负。光轴与法线的夹角(如 φ)是从光轴以锐角方向转向法线,顺时针为正,逆时针为负。图 1-9 中, U' 、 I 和 I' 为正, U 为负。

1.2.2 实际光线的光路计算

所谓光路计算,就是在已知光学系统参数的情况下,对给定的物体做成像计算。计算光线经过单个折射面的光路,就是已知球面曲率半径 r 、介质折射率 n 和 n' 及光线物方坐标 L 和 U ,求像方光线坐标 L' 和 U' 。如图 1-9 所示,在三角形 $\triangle AEC$ 中,应用正弦定理可得

$$\frac{\sin I}{-L + r} = \frac{\sin(-U)}{r}$$

于是

$$\sin I = (L - r) \frac{\sin U}{r} \quad (1-21)$$

在光线的入射点 E 处应用折射定律,有

$$\sin I' = \frac{n}{n'} \sin I \quad (1-22)$$

由图 1-9 可知, $\varphi = U + I = U' + I'$, 由此得到像方孔径角 U' 为

$$U' = U + I - I' \quad (1-23)$$

在 $\triangle CEA'$ 中再次应用正弦定律,有

$$\frac{\sin I'}{L' - r} = \frac{\sin U'}{r}$$

于是可得像方截距为

$$L' = r \left(1 + \frac{\sin I'}{\sin U'} \right) \quad (1-24)$$

式(1-21)~式(1-24)即为子午面内实际光线经过单个折射球面成像时的光路计算式。给出一组 L 和 U , 就可以计算出一组对应的 L' 和 U' 。由共轴球面系统乃至整个系统的对称性可知, 物点以孔径角 U 入射的整个圆锥面光束, 都将以同样的方式成像, 交光轴于同一像方截距 L' 。另一方面, 当 L 一定时, L' 是 U 的函数, 因此, 以不同孔径角 U 发出的光线, 经过折射, 将得到不同的像方截距 L' , 如图 1-10 所示。即同心光束经折射后, 出射光束不再是同心光束, 称之为不完善成像。轴上点不完善成像, 其像差称为球差。球差是球面光学系统成像的固有缺陷。

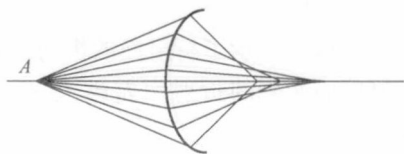


图 1-10 轴上点不完善成像

1.2.3 近轴光线的光路计算

若将物点入射光的孔径角(或高度)限制在一个很小的范围内, 使得与光线有关的所有角度近似满足 $\sin I \approx i$, 而符合此条件的区域称为光学系统的近轴区域, 近轴区域内的光线称为近轴光线。在近轴区域里, 光学系统具有较为简单的物像关系, 下面将重点分析近轴光路。为了加以区别, 近轴区域内描述物和像的所有参量都用相应的小写字母表示。在式(1-21)~式(1-24)中, 将角度正弦值用其相应的弧度值来代替, 可得

$$i = \frac{(l - r)}{r} u \quad (1-25)$$

$$i' = \frac{n}{n'} i \quad (1-26)$$

$$u' = u + i - i' \quad (1-27)$$

$$l' = r \left(1 + \frac{i'}{u'} \right) \quad (1-28)$$

在近轴区内, 对一给定的 l 值, 不论 u 为何值, i' 均为定值。这表明, 轴上物点在近轴区内以细光束成像是完善的, 这个像通常称为高斯像。通过高斯像点且垂直于光轴的平面称为高斯像面, 其位置由 l' 决定。这样一对构成物像关系的点称为共轭点。

从图 1-9 可以看出, 在近轴区域内有

$$l' u' = l u = h \quad (1-29)$$

据此, 消去近轴成像式(1-25)~式(1-28)中的 i 和 i' , 并利用式(1-29)可进一步推导如下计算式

$$n' \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{l'} \right) = n \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{l} \right) = Q \quad (1-30)$$

$$n' u' - n u = (n' - n) \frac{h}{r} \quad (1-31)$$

$$\frac{n'}{l'} - \frac{n}{l} = \frac{n' - n}{r} \quad (1-32)$$

式(1-30)~式(1-32)是近轴物像计算的三种不同表示形式,方便在不同场合下应用。式(1-30)中的 Q 称为阿贝不变量。该式表明,对于单个折射球面,物空间与像空间的阿贝不变量 Q 相等,随共轭点的位置而变。式(1-31)表示了物、像方孔径角之间的关系。式(1-32)表明了物像位置关系,在折射面已知的情况下,已知物体位置 l ,可求出其共轭像的位置 l' ;反之已知像的位置 l' ,就可求出与之共轭物体的位置 l 。

几何光学中将式(1-32)等号右面的表达式定义为折射面的光焦度,用 ϕ 表示,即

$$\phi = \frac{n' - n}{r} \quad (1-33)$$

光焦度表示了折射面的折射能力。式(1-33)表明,折射球面的曲率半径越小,或者折射球面两侧的折射率差越大,折射能力就强。在式(1-32)中,分别令物距和像距为 ∞ ,有

$$\frac{n'}{l'} - \frac{n}{\infty} = \phi, \frac{n'}{\infty} - \frac{n}{l} = \phi$$

在几何光学中,定义一个无限远的轴上物点($l = \infty$)所对应的物距为折射面的像方焦距;用 f' 表示;定义一个无限远的轴上像点($l' = \infty$)所对应的物距为折射面的物方焦距,用 f 表示。于是,上述式可表示为

$$\phi = \frac{n'}{f'} = -\frac{n}{f} \quad (1-34)$$

单个折射球面可以看作是一个最简单的成像系统,由式(1-34)可以得出成像系统物方焦距之间的关系为

$$\frac{f'}{f} = -\frac{n'}{n} \quad (1-35)$$

1.3 球面光学成像系统

上节讨论了轴上点经过单个折射球面的基本成像情况,主要涉及物像位置关系。当讨论有限大物体经过折射球面乃至整个球面光学系统成像时,除了物像位置关系外,还将涉及像的放大与缩小、正倒与虚实等成像特性。下面均在近轴区讨论。

1.3.1 单个折射球面

单个折射球面成像是光学系统成像的基本过程。光学系统对物体成像,像相对于物的比例统称为放大率。一般情况下,一个光学系统的放大率与物体的位置有关。在近轴区域内,光学系统对每一物体的位置有唯一的放大率。放大率有三种:描述物和像垂轴比例关系的垂轴放大率 β 、描述物和像沿轴比例关系的轴向放大率 α ,以及描述物方孔径角和像方孔径角比例关系的角放大率 γ 。

1.3.1.1 垂轴放大率

在近轴区域内,垂直于光轴的平面物体可以用子午面内的垂轴线段 AB 表示,经过球

面折射后所成的像 $A'B'$, 垂直于光轴 AOA' 。由轴外物点 B 发出的通过球心 C 的光线 BC 必定通过 B' 点, 因为 BC 相当于轴外点 B 的光轴 (称为辅轴)。如图 1-11 所示, 设物体的大小 $AB=y$, 像的大小 $A'B'=y'$, 则 y' 和 y 之比定义为垂轴放大率, 用 β 表示, 即

$$\beta = \frac{y'}{y} \quad (1-36)$$

图 1-11 中, $\triangle ABC$ 和 $\triangle A'B'C$ 相似, 有

$$-\frac{y'}{y} = \frac{l' - r}{r - l}$$

利用式 (1-30), 可得

$$\beta = \frac{y'}{y} = \frac{nl'}{n'l} \quad (1-37)$$

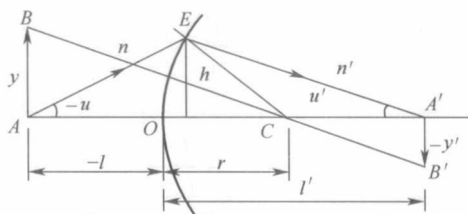


图 1-11 物像的垂轴放大率和角放大率

由此可见, 在光学系统参数确定后, 近轴区域的垂轴放大率仅取决于共轭面的位置, 而与物体的大小无关。在一对共轭面上, β 为常数, 故像与物是相似的。

根据 β 的定义及式 (1-37), 还可确定物体的成像特性, 即像的正倒、虚实、放大与缩小:

- (1) 若 $\beta > 0$, 即 y' 与 y 同号, 表示成正立像; 反之, y' 与 y 异号, 表示成倒立像。
- (2) 若 $\beta > 0$, 即 l' 和 l 同号, 物像虚实相反; 反之, l' 和 l 异号, 物像虚实相同。
- (3) 若 $|\beta| > 1$, 则 $|y'| > |y|$, 成放大的像; 反之, $|y'| < |y|$, 成缩小的像。

1.3.1.2 轴向放大率

轴向放大率表示光轴上一对共轭点沿轴向移动量之间的关系, 当物体在给定位置有一微量位移 dl , 像点也随之有一微量位移 dl' 。定义像点位移量 dl' 与物点位移量 dl 之比为系统的轴向放大率, 用 α 表示, 即

$$\alpha = \frac{dl'}{dl} \quad (1-38)$$

对于单个折射球面, 将式 (1-32) 两边微分, 即

$$-\frac{n' dl'}{l'^2} + \frac{ndl}{l^2} = 0$$

于是轴向放大率为

$$\alpha = \frac{dl'}{dl} = \frac{nl'^2}{n'l^2} \quad (1-39)$$

将上式两边均乘以 n/n' , 并比较式 (1-37) 可得