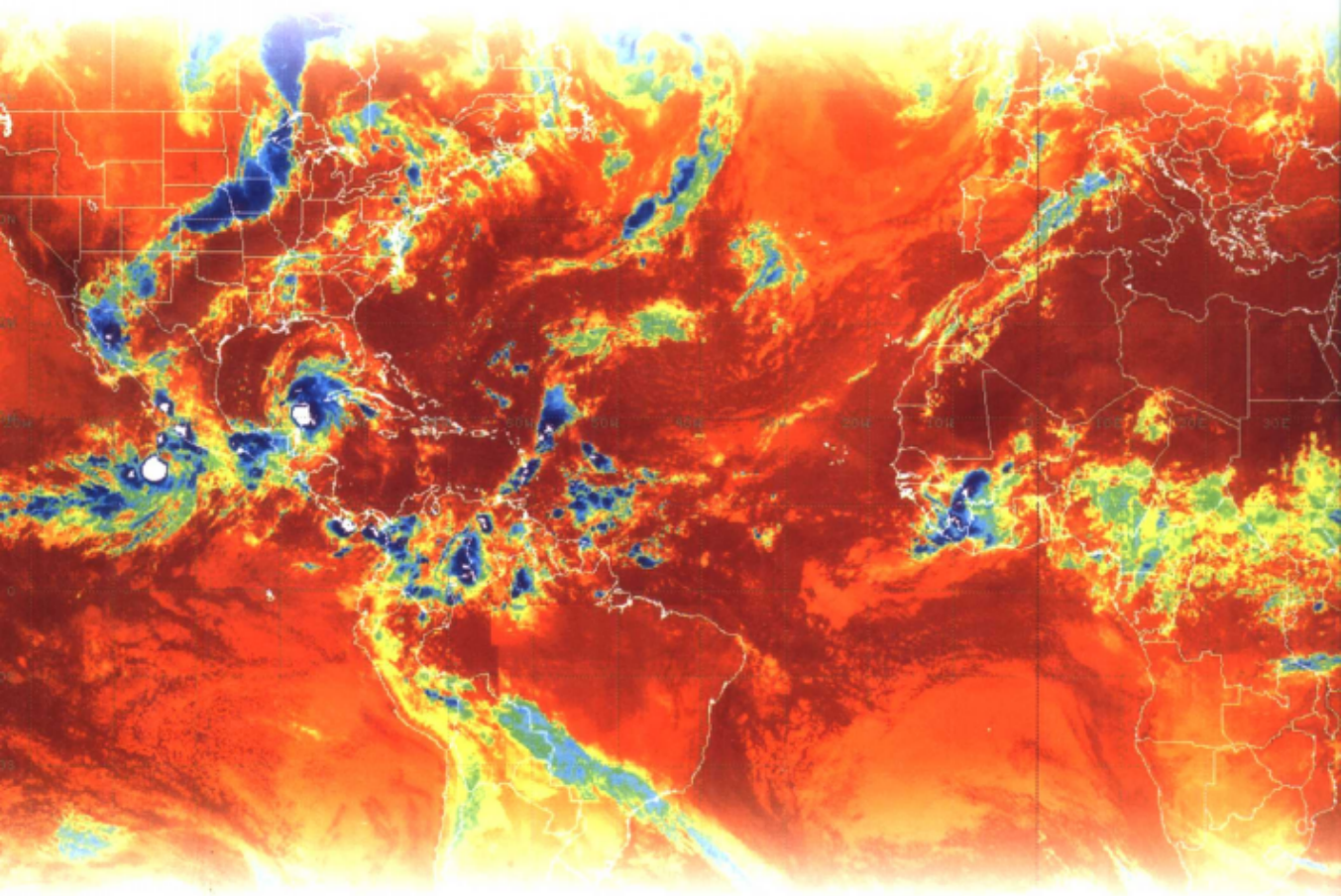


兵工十五规划教材

红外光学系统

HONGWAIGUANGXUEXITONG

冯克成 付跃刚 张生徽 编著



兵器工业出版社

责任编辑：张小洁
封面设计：李 晖

HONGWAIGUANGXUEXITONG

红外光学系统

ISBN 7-80172-650-2



9 787801 726506 >

ISBN 7-80172-650-2

定价：14.00元

兵工十五规划教材

红外光学系统

冯克成 付跃刚 张先徽 编著

兵器工业出版社

内 容 简 介

本书是红外技术专业系列教材之一,包括“几何光学”“像差理论”“红外物镜”“典型红外装置中光学系统设计”等四个组成部分。书中在较详细地论述光学系统的设计基础,各种光线的光路计算,初级像差理论等主要基础知识,基本原理的基础上,着重分析和介绍红外光学物镜的分类、特点及设计,并结合当前典型红外仪器及装置中光学系统的作用、组成和应用进行具体设计和计算。使读者初步具备设计红外光学物镜的方法和能力,本书适合红外技术、光电子技术、电子科学与技术、应用物理等专业的教材,同时也可供从事光电成像技术、空间光学和应用光学技术的科学技术工作者参阅。

图书在版编目(CIP)数据

红外光学系统/冯克成,付跃刚,张先徽编著. —北京:兵器工业出版社,2006.5
ISBN 7-80172-650-2

I. 红... II. ①冯... ②付... ③张... III. 红外系统:光学系统—高等学校—教材 IV. TN211

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第029436号

出版发行:兵器工业出版社
发行电话:010-68962596, 68962591
邮 编:100089
社 址:北京市海淀区车道沟10号
经 销:各地新华书店
印 刷:北京市登峰印刷厂
版 次:2006年5月第1版第1次印刷
印 数:1-3000

责任编辑:张小洁
封面设计:李 晖
责任校对:全 静
责任印制:赵春云
开 本:787×1092 1/16
印 张:9
字 数:219千字
定 价:14.00元

(版权所有 翻印必究 印装有误 负责调换)

前 言

现代科技的发展,使传统的光学技术和领域在 20 世纪末焕发出青春。沐浴着 21 世纪的曙光,光学技术不仅成为信息科学中的信息载体和主体,而且融合了光电子、微电子、计算机和信息管理技术,形成光机电一体化的综合性高新技术。光机电一体化开始成为现代制造业的基础和核心。逐渐成为国民经济和国防工业中不可缺少的一个重要方面。

红外技术是一种现代高科技,是当前光电子技术中非常重要的一个领域,不仅涉及到民用生产的各个部门,而且由于红外技术使用不可见光线为载体,所以在军事情报的探测、收集,目标的侦察、监视,武器的制导,公安、边防对文物走私和识别,遥感技术对地球资源的普查,和空间光学对宇宙的探测发现等都有着特殊的重要意义。

红外光学系统是红外技术中很重要的一门课程,全书分为四章:

第一章介绍了光学设计的基本概念、基本原理及一些具体应用;

第二章介绍了各种光线的光路计算方法及初级像差的分类、基本概念和计算方法,同时给出各种不同光学仪器对像差的要求;

第三章详细介绍了红外物镜的分类、特点及具体的设计方法;

第四章结合当前的民用、军用中实际的红外仪器和装置中的光学系统进行分析,并给出具体的设计方法和计算方法。

通过对本课程的学习使同学们掌握必要的光学设计基础知识,同时掌握各种红外物镜的设计方法和计算方法。

本教材授课的参考学时为 32 ~ 40 学时。

目 录

第一章 光学系统设计基础	(1)
1.1 几何光学的基本定律	(1)
1.1.1 基本概念	(1)
1.1.2 几何光学的基本定律	(2)
1.1.3 费马原理和马吕斯定律	(4)
1.1.4 光学成像的基本概念	(5)
1.2 共轴球面系统成像的几何理论	(7)
1.2.1 几何光学的符号规则	(7)
1.2.2 单个球面折射的光路计算公式	(8)
1.2.3 球面的近轴成像	(9)
1.2.4 共轴球面系统和球面反射镜	(11)
1.3 理想光学系统成像的几何理论	(14)
1.3.1 理想光学系统的基点和基面	(14)
1.3.2 理想光学系统的物像位置关系	(16)
1.3.3 理想光学系统的放大率	(17)
1.3.4 光学系统的光焦度	(19)
1.4 光学系统的组合	(20)
1.4.1 两个光组的组合	(21)
1.4.2 共轴多光组的组合	(24)
1.4.3 透镜与薄透镜	(29)
1.5 近轴光学中的矩阵方法	(35)
1.5.1 近轴光线的矩阵表示	(35)
1.5.2 单个折射面的物像矩阵	(37)
1.5.3 用高斯常数表示的基点位置和焦距	(37)
1.5.4 薄透镜系统的矩阵运算	(39)
习题	(42)
第二章 光学系统的像差及光线的光路计算	(43)
2.1 光线的光路计算	(43)
2.1.1 近轴子午光线的光路计算	(44)
2.1.2 非近轴子午光线的光路计算	(47)

2.1.3 轴外点主光线细光束的光路计算	(53)
2.2 轴上点球差	(56)
2.2.1 球差的定义及量度	(56)
2.2.2 初级球差表达式及计算	(57)
2.2.3 高级球差的计算	(59)
2.2.4 折射球面的齐明点及其应用	(60)
2.3 正弦差与慧差	(62)
2.3.1 等晕条件, 正弦条件	(62)
2.3.2 正弦差的定义及量度	(63)
2.3.3 慧差的定义及量度	(64)
2.3.4 初级正弦差, 初级慧差的表达式	(66)
2.4 像散与像面弯曲(场曲)	(67)
2.4.1 像散的定義与量度	(67)
2.4.2 像面弯曲的定义及量度	(68)
2.4.3 初级场曲与初级像散的表达式	(70)
2.5 畸变	(72)
2.5.1 畸变的定义及量度	(72)
2.5.2 初级畸变的表达式	(74)
2.6 色差	(76)
2.6.1 光学材料的色散及其有关物理量	(76)
2.6.2 光学系统消像差谱线的选择	(76)
2.6.3 位置色差的定义和量度	(77)
2.6.4 倍率色差的定义和量度	(79)
2.6.5 初级色差的表达式	(81)
2.6.6 薄透镜系统的初级色差及具体应用	(82)
习题	(89)

第三章 红外光学系统物镜的设计

3.1 红外光学系统的概述	(91)
3.1.1 典型红外系统的构成	(91)
3.1.2 红外光学系统的功用和特点	(92)
3.1.3 红外光学系统的性能参数及设计原则	(93)
3.2 折射式物镜——单透镜	(97)
3.2.1 薄透镜的初级球差与结构参数的关系	(97)
3.2.2 物体位于无限远时初级像差的表达式	(99)
3.2.3 物体在有限远时的初级像差表达式	(102)
3.2.4 几种特殊形状的单薄透镜初级像差表达式	(103)
3.2.5 红外物镜——单薄透镜的应用实例	(105)
3.2.6 单薄透镜中心厚度的确定	(108)

3.3 反射式物镜——单反射镜	(109)
3.3.1 球面反射镜	(109)
3.3.2 非球面反射镜	(110)
3.3.3 轴对称非球面的初级像差	(112)
3.4 反射式物镜——双反射镜系统	(114)
3.4.1 双反射镜系统的概述	(114)
3.4.2 双反射镜系统的设计	(116)
3.4.3 双反射镜系统主次镜面型的确定	(119)
习题	(122)
第四章 典型红外装置光学系统的设计	(124)
4.1 概述	(124)
4.2 透射式红外测温仪光学系统的设计	(125)
4.3 反射式红外测温仪光学系统的设计	(129)
习题	(132)
参考文献	(133)

第一章 光学系统设计基础

本章重点讲述几何光学的基本定律和成像的概念、球面和共轴球面系统、理想光学系统以及平面镜和透镜等。

1.1 几何光学的基本定律

1.1.1 基本概念

一、电磁波谱

任何高于绝对零度的物体都要发射电磁辐射，而且实验和理论都证明了光是特定波长的电磁波。电磁波谱的范围很广，从频率比 10^3 Hz 更低的无线电波扩展至比 10^{24} Hz 更高的 γ 射线，其大至分布如图 1-1 所示。在 $0.38 \sim 0.78 \mu\text{m}$ 的波长范围内的电磁辐射能被人眼感知，称为可见光，在此范围之外的电磁波，人眼就感受不到了。

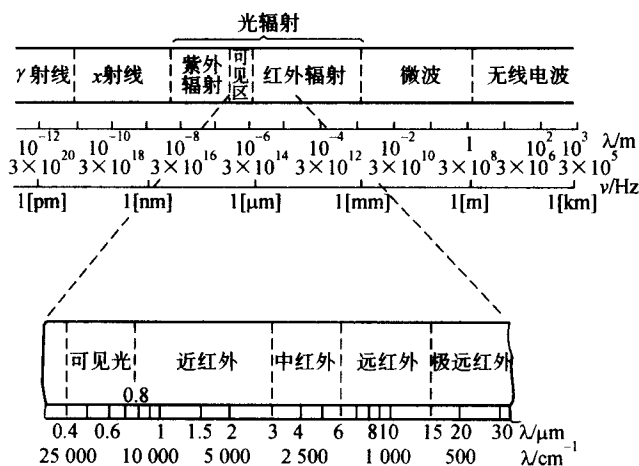


图 1-1 电磁波谱

光和任何其他波长的电磁波一样，在真空中都以光的速度 c 传播， $c = 299\,792\,458 \text{ m/s} \approx 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ 。在空气中的速度也近似于该值。在其他透明介质中光传播的速度随波长不同而变化。

二、光线与波面

在几何光学中可用一条表示光的传播方向的几何线来代表光，并称这条线为光线。任何

光源所发生的光波，在某一时刻其振动位相相同的各点所构成的曲面称为波面。波面为平面的称为平面波，波面为球面的称为球面波。波面也可任意曲面。在各向同性的介质中，光沿着波面的方向传播，因此可认为波面的法线就是几何光学中的光线。换言之，光线就是波面的法线。反之，波面就是所有光线的垂直曲面。

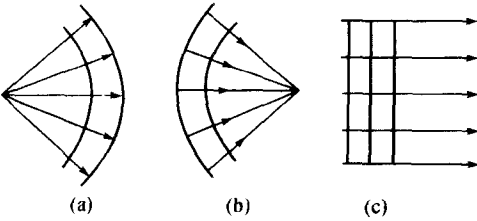


图 1-2 光波的波面

(a) 发散球面波；(b) 会聚球面波；(c) 平面波

三、光束

与波面对应的法线（光线）的集合就是光束。球面波对应于会聚光束或发散光束，平面波对应于平行光束，如图 1-2 所示。一般说来，球面波通过实际光学系统后，总要发生变形，不再是球面波了，相应的光束也不再是同心光束。由不相交于一点的有一定关系的一些光线的集合，称为像散光束。

1.1.2 几何光学的基本定律

一、光的直线传播定律

在均匀透明的介质中，光沿直线传播。即在均匀介质中，光线为一直线。

二、光的独立传播定律

自不同方向或由不同物体发生的光线在空间某一点相交时，彼此互不影响，各光线独立传播。

三、光的反射定律和折射定律

当光线由一介质进入另一介质时，光线在两个介质的分界面上被分为反射光线和折射光线。对于此二光线的行进方向，可分别由反射定律和折射定律来表达。如图 1-3 所示。

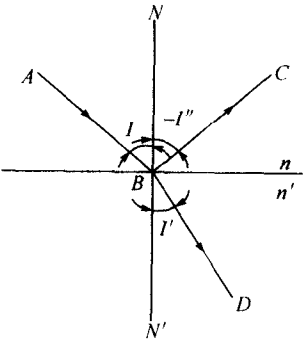


图 1-3 光线经过两种均匀介质分界面的传播规律

反射定律 入射光线 AB 入射到两种不同介质的理想光滑分界面的 B 点，入射光线 AB 和法线 NN' 所构成的平面称为入射面，而二者之间的夹角 I 称为入射角。反射光线 BC 和法线 NN' 之间的夹角 I'' 称为反射角。角 I 和 I'' 以锐角来量度，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。图中 I 为正， I'' 为负。反射定律可表述为：反射光线在入射面内，并和入射光线分别在法线的两侧；入射角和反射角大小相等符号相反。因此，可表示为

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

折射定律 在图 1-3 中，入射光线 AB 在 B 点发生折射， BD 为折射光线。折射光线 BD 和法线 NN' 的夹角 I' 称为折射角。入射角和折射角的符号法则也是从光线转向法线，按锐角来量度，顺时针旋转为正，反之为负。折射定律可表述为：折射光线在入射面内，并且和入射光线分别在法线的两侧；对于单色光而言，入射角的正弦与折射角的正弦之比与入射角的大小无关，而与两种介质的性质有关。对一定波长的光线，在一定的温度和压力条件下，该比值为一常数，等于折射光线所在介质的折射率 n' 与入射光线所在介质折射率 n 之比。折射定律可表示为

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

或写成

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

在式(1-3)中,若令 $n' = -n$, 得 $I' = -I$, 即为反射定律。

应当指出,上述四个基本定律是在入射光不太强的情况下总结出来的。对于在极强的激光束的照射下,例如,激光的输出功率为 $10 \sim 100 \text{ MW}$, 把它聚焦为 10^{12} W/cm^2 的功率密度是不困难的。介质的折射率将随入射光强发生变化。光束之间要产生相互作用,不再保持彼此独立,出现所谓的“非线性光学”效应。

四、折射率

一定波长的单色光在真空的传播速度 c 与它在给定介质中传播速度 v 之比,定义为该介质对指定波长的光的绝对折射率。如图1-4所示。假设有一束平行光投射到两个介质的平面分界面上,所有光线的入射角为 I_1 , 折射角为 I_2 , 折射光线也相互平行。 OQ 为入射平面波, $O'Q'$ 为折射后的平面波, 设光在两介质中的速度分别为 v_1 和 v_2 , 则有

$$QQ' = v_1 t, \quad OO' = v_2 t$$

$$\text{但知, } \sin I_1 = \frac{QQ'}{OQ}, \quad \sin I_2 = \frac{OO'}{OQ'}$$

$$\text{由此} \quad \frac{\sin I_1}{\sin I_2} = \frac{QQ'}{OO'} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

式中: n_1 ——光在介质1中的折射率;

n_2 ——光在介质2中的折射率。

如果令

$$n_{21} = \frac{v_1}{v_2} \quad (1-4)$$

称为第2介质对第1介质的相对折射率,则 n_{21} 等于光波在第1介质与第2介质中传播相速度之比。

如果光线从真空射到某种介质,它在真空中的速度为 c , 在介质中的传播速度为 v , 则该种介质的绝对折射率为

$$n = \frac{c}{v} \quad (1-5)$$

由于光在空气中传播的速度近似于在真空中传播的速度。因此,通常所说的介质的折射率实际上是该介质对空气的相对折射率。由式(1-5)可知,介质的折射是由真空传播到介质时,在该介质中速度减少的量度。如图1-4所示,第1和第2介质的绝对折射率分别为

$$n_1 = \frac{c}{v_1}, \quad n_2 = \frac{c}{v_2} \quad (1-6)$$

这样,折射定律可表示为

$$\frac{\sin I_1}{\sin I_2} = \frac{n_2}{n_1} = n_{21} \quad (1-7)$$

对于给定的媒质,光学参数 ($N = n - j\kappa$) 随辐射频率(或波长)变化的现象,称为色散现象。通常把材料的折射率 n 随波长 λ 的变化率,即

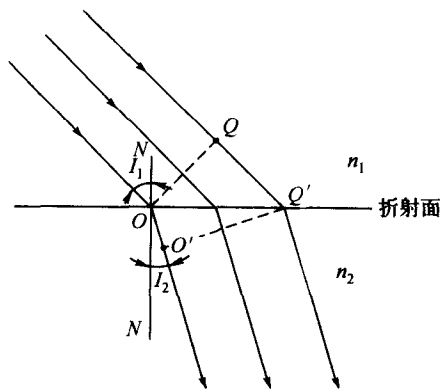


图1-4 平行光在两种介质分界面上的折射

$$v = \frac{n_2 - n_1}{\lambda_2 - \lambda_1} = \frac{\Delta n}{\Delta \lambda}$$

或

$$v = \frac{dn}{d\lambda} = \frac{df(\lambda)}{d\lambda} \quad (1-8)$$

就称为它的色散。式 $N = n - j\kappa$ 中 N 为复折射率, κ 为消光系数。表示折射率 n 与波长 λ 关系的曲线称为色散曲线。习惯上常用几个具有不同谱线代号的波长来标明材料的折射率, 表 1-1 列出了某些典型玻璃的折射率^①在光学仪器设计中, 光学材料的折射率通常都是对钠黄光 (D 线: $\lambda = 589.3 \text{ nm}$) 而言的。

表 1-1 常用无色光学玻璃的折射率^[1]

谱线代号	—	h	g	F	e	D	C	A'	—	—
光 色	(紫外)	蓝	青	青绿	绿	黄	橙红	红	(红外)	(红外)
波长/nm	365.0	404.7	435.8	486.1	546.1	589.3	656.3	766.5	863.0	950.8
冕玻璃 (k_g)	1.535 82	1.529 82	1.526 26	1.521 95	1.518 29	1.516 30	1.513 89	1.511 04	1.509 18	1.507 78
钡冕玻璃 (BaK_7)	1.594 17	1.586 20	1.581 54	1.575 97	1.571 30	1.568 80	1.565 82	1.562 38	1.560 23	1.558 66
重冕玻璃 (ZK_6)	1.638 62	1.630 49	1.625 73	1.619 99	1.615 19	1.612 60	1.609 49	1.605 92	1.602 68	1.602 06
轻火石玻璃 (QF_3)	1.611 97	1.599 68	1.592 80	1.584 81	1.578 32	1.574 90	1.570 89	1.566 38	1.563 66	1.561 72
钡火石玻璃 (BaF_1)	1.573 71	1.565 53	1.560 80	1.555 18	1.550 50	1.548 00	1.545 02	1.541 60	1.539 46	1.537 91
重火石玻璃 (ZF_1)	1.700 22	1.682 29	1.672 45	1.661 19	1.652 18	1.647 50	1.642 07	1.636 09	1.632 54	1.630 07

五、全反射

产生全反射的条件: 入射光由光密介质进入光疏介质; 入射角必须大于一定的角度, 按折射定律, 当折射角 $I' = 90^\circ$, 有

$$\sin I_c = \frac{n'}{n} \sin 90^\circ = \frac{n'}{n}$$

式中入射角 I_c 称为临界角, 此时折射光线沿分界面掠射。若入射角 I 大于临界角 I_c , 折射定律已不适用。实验证明, 此时光线不发生折射, 而按反射定律把光线完全反射回原介质中去。

1.1.3 费马原理和马吕斯定律

一、费马原理

费马 (Fermat) 原理是从光程的角度来阐述光的传播规律。

光程 $[l]$ 是指光在介质中经过的几何路程 l 与该介质折射率 n 的乘积。即

$$[l] = nl \quad (1-9)$$

因为 $n = c/v$, 于是得

$$\frac{[l]}{c} = \frac{l}{v} = t$$

式中: t ——光在介质中通过路程 l 所用的时间。上式表示光在真空中通过某种介质的光程 $[l]$ 所需要的时间, 等于在介质中通过真实路程 l 所需要的时间。由此可知, 光在某种介质

① 主要的红外透光单晶的性质、碲硒碲化合物玻璃的性质、红外区棱镜材料, 以及优选的红外光学材料见附录 6~9。

中的光程，就等于光在同一时间内在真空中所走过的路程。借助光程这个概念，可将光在各种介质中所通过的路程折算为真空中的路程，因此光程又可称为光的“折合路程”。

若光线通过 m 层均匀介质，则光线由许多折射线组成，其光程为

$$[L] = \sum_{i=1}^m n_i l_i \quad (1-10)$$

式中： n_i ——第 i 层介质的折射率；

l_i ——第 i 层介质的光路长度。

若光线通过连续变化的非均匀介质，即折射率 n 逐点连续变化，光由 A 点传到 B 点，则光程为

$$[L] = \int_A^B n dl \quad (1-11)$$

费马原理可表述为：光线由 A 点传到 B 点，经过任意多次折射或反射，其光程为极值（极大值或极小值，或恒定值），即光程的一次变分为零。

$$\delta[L] = \delta \int_A^B n dl = 0$$

费马原理又称为极值光程定律。

二、马吕斯定律

马吕斯（Malus）定理：垂直于波面的光线束（法线集合）经过任意多次反射和折射以后，无论折射面和反射面的形状如何，出射光束仍垂直于出射波面，保持光束仍为法线集合的性质。并且入射波面与出射波面对应点之间的光程均为定值。

折射（及反射）定律、费马原理、马吕斯定律三者中任意一个均可作为几何光学的基本定律，其余两个可视为其推论。三者之间可以互相推导。

1.1.4 光学成像的基本概念

一、物和像 物空间和像空间

如图 1-5 所示，括号表示一个光学系统， A 为入射同心光束的中心。此光束通过系统后形成中心在 A' 的同心光束，称此中心 A' 点为 A 点的像。在图 1-5 (a) 和 (c) 中，出射光束会聚到 A' ，我们称出射同心光束的中心 A' 为 A 点的实像。将一观察屏置于 A' 处，将看到屏上形成一个亮点。在图 1-5 (b) 和 (d) 中，出射同心光束是发散光束，各条光线的反向延长线交于 A' 点，称出射发散同心光束的中心 A' 为 A 点的虚像。虚像不能在屏上显示出来，但可以通过眼睛观察到。

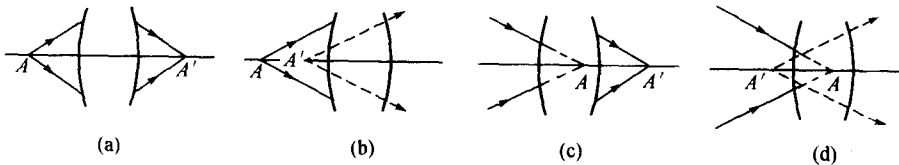


图 1-5 同心光束通过光学系统后形成点像

在图 1-5 (a) 和 (b) 中，入射到系统上的同心光束是发散的，相应的发散光束的中心称为实物点。在图 1-5 (c) 和 (d) 中，入射到光学系统上的同心光束是会聚的，而且

在尚未会聚于中心 A 点时就与光学系统相遇改变了方向，所以会聚点 A 不是实际光线的交点，而是入射光线延长线的交点，称入射会聚同心光束的中心 A 为系统的虚物点。

物点（包括实物点和虚物点）所有可能位置组成的空间称为物空间（物方）；像点（包括实像点和虚像点）所有可能位置组成的空间称为像空间（像方）。应当指出，物空间不仅仅是光学系统前的那部分空间，它还可能延拓到光学系统之后；同样地，像空间不仅仅是光学系统后面的那部分空间，它还可能延拓到光学系统之前。有时还可能出现二者重叠的情形。因此，要区分一个点究竟是属于物空间还是像空间，主要根据它是入射光束的中心还是出射光束的中心，而不能看它是在系统之前还是之后。

二、理想光学系统 物像之间的共轭性

为了估计和比较实际光学系统成像质量是否符合完善成像条件，需要建立一个模型。若一个光学系统能在任意大的空间范围内，使任意宽的光束成完善的像，即任何同心光束通过系统后仍能保持为同心光束，则该系统称为理想光学系统。它具有以下性质：

1. 物空间中每一点对应于像空间中的相应的点，且只对应一点。这两个对应点称为物像空间的共轭点；

2. 物空间中的每一条直线对应于像空间的相应的直线，而且只对应一条。这两条对应直线称为物像空间的共轭线；

3. 物空间的任意一点位于一条直线上，那么在像空间内的共轭点必在该直线的共轭线上。

由理想光学系统的性质直接可以推论：物空间中任一平面对应于像空间中有一共轭平面。物空间中每一同心光束在像空间中均有一共轭同心光束与之相对应。以后会讲到。除平面反射镜外任何实际的光学系统都不可能完全达到理想成像的要求。但是共轴球面系统在近轴的条件下，可近似地看作是理想光学系统。

上述这种几何关系称为共线关系，或称共线成像。

设 (x, y, z) 是物空间一点 A 的直角坐标系的坐标， (x', y', z') 是像空间一点 A' 的坐标。在共线成像的情况下，物像空间的坐标，用以下的关系式表示：

$$\begin{cases} x' = \frac{a_1x + b_1y + c_1z + d_1}{ax + by + cz + d} \\ y' = \frac{a_2x + b_2y + c_2z + d_2}{ax + by + cz + d} \\ z' = \frac{a_3x + b_3y + c_3z + d_3}{ax + by + cz + d} \end{cases}$$

式中： a, b, c, d 为常数。给定一组 x, y, z ，可求得相应的 x', y', z' ；反之亦然：

$$\begin{cases} x = \frac{a'_1x' + b'_1y' + c'_1z' + d'_1}{a'x' + b'y' + c'z' + d'} \\ y = \frac{a'_2x' + b'_2y' + c'_2z' + d'_2}{a'x' + b'y' + c'z' + d'} \\ z = \frac{a'_3x' + b'_3y' + c'_3z' + d'_3}{a'x' + b'y' + c'z' + d'} \end{cases}$$

式中： a', b', c', d' 是常数。对于第一个表达式的右方必须是 x, y, z 两线性函数之

商, 才能使 x', y', z' 与 x, y, z 有对应关系。还有就是等式右边的分母必须为同一线性函数 $F = ax + by + cz + d$, 否则像方的平面

$$A'x' + B'y' + C'z' + D' = 0$$

就不再和物方的平面

$$Ax + By + Cz + D = 0$$

相对应。

当 $F = ax + by + cz + d = 0$ 时, $x' = y' = z' = \infty$, 平面 $F = 0$ 称为物方焦平面。它上面各点 A 的像 A' 位于无穷远。从物方焦平面上一点 A 发出的两条光线和像方的两条平行光线相对应。

当 $F' = a'x' + b'y' + c'z' + d' = 0$ 时, $x = y = z = \infty$, 平面 $F' = 0$ 称为像方焦平面。物方平行的光线和像方交于 F' 上某点的共轭光线相对应。在特殊情况下, 这两个焦平面都可能位于无穷远处。这时, 变换就称为望远的。

三、物像之间的等光程性

理想光学系统成像时, 有一个重要的性质, 即从物点 A 到像点 A' 的各条光线的光程相等, 称为物像之间的等光程性。

用费马原理很容易证明物像之间的等光程性。在图 1-5 (a) 中, 物点 A 发出的同心光束, 通过理想光学系统后成为中心在像点 A' 的同心光束。在同心光束中, 连续分布着无穷多条实际光线的路径。根据费马原理, 这些光线的光程应取极大值或极小值, 或恒定值。对于这些连续分布的实际光线, 它们的光程都取极大值或极小值是不可能的, 唯一的可能性就是光线的光程取恒定值, 即它们的光程都相等。

1.2 共轴球面系统成像的几何理论

绝大部分光学系统是由球面和平面 (折射面和反射面) 组成的, 各球面球心在一条直线上, 形成该系统的对称轴, 即光轴。这样的系统称为共轴球面系统。

把入射光束的中心光线称为主光线。由主光线和光轴决定的平面, 称为子午面, 而把通过主光线和子午面垂直的平面, 称为弧矢面。

1.2.1 几何光学的符号规则

如图 1-6 所示, 以单个折射球面 OE 作为折射率 n 和 n' 的分界面。 C 为球心, r 为球面的曲率半径。 AA' 为光轴, 它通过球心 C 和球面顶点 O 。由球面顶点 O 到入射光线 AE 与光轴的交点 A 的距离 OA , 称为物方截距, 以 L 表示, 入射光线与光轴的夹角 $\angle EAO$, 称为物方孔径角, 以 U 表示。用 L 和 U 表示入射光线的位置。类似地, 以 $L' = OA'$, $U' = \angle EA'O$ 分别表示像方截距和像方孔径角。

为了准确地描述在成像过程中所遇到的各种物理量, 特对有关的线段和角度的符号做以下规定:

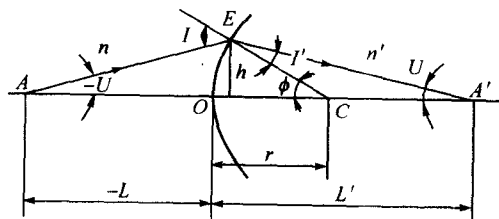


图 1-6 符号规则

沿轴线段：首先，规定光线传播方向为自左向右。其次，凡沿轴线段都是由所规定的起点到光线与光轴的交点，与光线传播方向相同，其值为正，反之为负。例如，对单个折射面而言， L 、 L' 为由球面顶点算起到光线与光轴的交点； r 为由球面顶点算起到球心。

垂轴线段：以光轴为准，由光轴向上为正，由光轴向下为负。

光线与光轴的夹角 U 和 U' ，通常由光轴转向光线所成锐角来度量，顺时针者为正，逆时针者为负。如图 1-6 所示。

光线与法线间的夹角，入射角 I 和折（反）射角 I' (I'') 规定由光线转向法线所成的锐角来度量，顺时针者为正，逆时针者为负。

光轴与法线的夹角 Φ ，由光轴转向法线（球面曲率半径），顺时针者为正，逆时针者为负。

应该指出，几何图形上各量一律标注其绝对值，使各个几何量永远为正。

1.2.2 单个球面折射的光路计算公式

一、实际光线的光路计算公式

如图 1-6 所示，对 $\triangle AEC$ 应用正弦定理

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

由此得到入射角 I 的公式

$$\sin I = \frac{L-r}{r} \sin U \quad (1-12)$$

由折射定律可求得折射角 I'

$$\sin I' = \frac{n}{n'} \sin I \quad (1-13)$$

由图 1-6，应用外角定理得到

$$\Phi = U + I = U' + I'$$

所以像方孔径角为

$$U' = U + I - I' \quad (1-14)$$

对 $\triangle A'EC$ 应用正弦定理得到

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

求得像方截距

$$L' = r + r \frac{\sin I'}{\sin U'} \quad (1-15)$$

利用公式 (1-12) ~ (1-15) 逐步进行计算，即可由已知的 L 、 U 、 r 、 n 、 n' 在子午面内求出折射光线的坐标 L' 和 U' 。

由上述四个公式可知， L' 是 L 和 U 的函数，对于给定的 L ， L' 是 U 的函数。由此，对于不同的 U 值将有不同的 L' 值。所以轴上一点以有限孔径角的光束经过单个折射面成像时，一般是不完善的。

二、近轴光线的光路计算公式

在图 1-6 中，如果物方孔径角的数值很小，其相应的 I 、 I' 和 U' 也非常小，此时有

$\sin I \approx I, \sin U \approx U$ 等等。在这种情况下以相应的小写字母 u, i, i' 和 u' 表示。这种光线在光轴附近的区域内, 因此称为近轴光线, 并把该区域称为近轴区。而把前面所描述的实际光线称为远轴光线。

只要将角度的正弦用弧度代替, 并把相应的大写字母变成小写字母, 即可由式 (1-12) ~ (1-15) 得到近轴光线的光路计算公式

$$\begin{cases} i = \frac{l-r}{r}u \end{cases} \quad (1-16)$$

$$\begin{cases} i' = \frac{n}{n'}i \end{cases} \quad (1-17)$$

$$\begin{cases} u' = u + i - i' \end{cases} \quad (1-18)$$

$$\begin{cases} l' = r + r \frac{i'}{u} \end{cases} \quad (1-19)$$

应该指出: 当 l 和 u 已知时, 可由近轴公式求得折射后近轴光线的 l' 和 u' 值。由上式可见, 当 u 角改变 m 倍时, i, i', u' 也相应改变 m 倍, 而 i'/u' 的比值保持不变, 因此, l' 不随 u 角而改变。这就是表明, 轴上物点以近轴光线成像时, 像是完善的, 称为理想像或高斯像。通过高斯像点, 垂直于光轴的像面称为高斯像面。

还应该指出: 近轴区并没有明确的界限, 而由设计要求的相对误差的大小而确定的。如 $\frac{\sin u' - u'}{\sin u} = 0.001$, 此时近轴区范围对应的 u, i, u', i' 均不超过 5° 。

1.2.3 球面的近轴成像

一、近轴区的物像位置关系

将式 (1-16) 和 (1-19) 中的 u 和 u' 代入式 (1-18), 并注意到

$$lu = l'u' = h \quad (1-20)$$

可得
$$n\left(\frac{1}{r} - \frac{1}{l}\right) = n'\left(\frac{1}{r} - \frac{1}{l'}\right) = Q \quad (1-21)$$

$$n'u' - nu = \frac{n' - n}{r}h \quad (1-22)$$

$$\frac{n'}{l'} - \frac{n}{l} = \frac{n' - n}{r} \quad (1-23)$$

式 (1-21) 表示成不变量的形式, 称为阿贝 (Abel) 不变量, 以 Q 表示, 其单位应为 mm^{-1} , 但一般不给出单位, 在计算中予以考虑。该式在像差理论中有重要用途。

式 (1-22) 和 (1-23) 分别给出 u 和 u' , l 和 l' 的关系。

二、近轴区成像放大率和拉-亥不变量

1. 垂轴放大率 β

如图 1-7 所示, 用垂轴小线段表示垂轴小

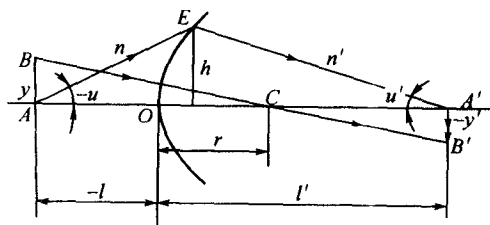


图 1-7 物像的大小关系