



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

# 工程光学基础教程

天津大学 郁道银  
浙江大学 谈恒英 主编



 机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS

国家精品课程网址：

<http://202.113.13.85/webclass/gcgx>

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

# 工程光学基础教程

天津大学 郁道银 主编  
浙江大学 谈恒英

庄松林 梁铨廷 主审

机械工业出版社

本书是教育部审定的普通高等教育“十一五”国家级规划教材，是在原《工程光学（第2版）》的基础上编写而成的少学时版本，书中内容既注重论述光学的基本原理和基本理论，又注重理论与工程实际相结合，并力求反映现代光学的发展和应用。本书侧重于光学物理现象的描述，尽量减少数学理论的推导。

本书分上、下两篇，上篇为几何光学与成像理论，下篇为物理光学。上篇分8章，主要介绍几何光学的基本定律和成像特性、理想光学系统的光学参数和成像关系、平面与平面镜成像、光学系统中的光阑与光束限制、光度学和色度学的基本原理、光学系统的光路计算和像差理论、典型光学系统的成像特性和设计要求、光学系统的成像质量评价和像差公差。下篇分4章，主要介绍光的电磁性质、光在各向同性介质界面上的传播规律、光波的叠加与分析、光波的干涉和典型干涉装置与应用、光波的衍射原理与应用（其中融入了傅里叶光学的基本理论与概念）、光的偏振及其在晶体中的传播等，还涵盖了近场光学、二元光学、光调制、光波导、液晶、光学信息处理和光学全息等现代光学的内容。

本书可作为光电信息科学与工程、测控技术及仪器、生物医学工程及其相近专业的教材。

## 图书在版编目（CIP）数据

工程光学基础教程/郁道银，谈恒英主编. —北京：机械工业出版社，2007.4

普通高等教育“十一五”国家级规划教材  
ISBN 978-7-111-21292-8

I. 工… II. ①郁…②谈… III. 工程光学-高等学校-教材 IV. TB133

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2007）第 050410 号

机械工业出版社（北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037）  
策划编辑：韩雪清 责任编辑：卢若薇 版式设计：霍永明  
责任校对：申春香 封面设计：王伟光 责任印制：洪汉军  
北京京丰印刷厂印刷

2007 年 6 月第 1 版第 1 次印刷  
184mm×260mm·23 印张·568 千字  
标准书号：ISBN 978-7-111-21292-8  
定价：34.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换  
销售服务热线电话：(010)68326294  
购书热线电话：(010)88379639 88379641 88379643  
编辑热线电话：(010) 88379716  
封面无防伪标均为盗版

# 前 言

《工程光学基础教程》是普通高等教育“十一五”国家级规划教材。为适应 21 世纪高等学校教育教学改革的需要,使工程光学的教学内容和课程体系更适合于光电信息科学与工程、测控技术与仪器和生物医学工程等类专业的教学要求,特编写《工程光学基础教程》一书。

《工程光学基础教程》一书是在《工程光学》第 2 版(机械工业出版社出版)基础上编写而成的,其指导思想仍然坚持既注重论述光学的基本原理和基本理论,又注重理论与工程实际相结合,并力求反映现代光学的发展和应用。在内容安排上,既包含传统的光学理论和光学系统,又简要介绍现代光学的理论及其应用,并侧重于光学物理现象的描述,尽量减少其数学理论的推导。

为满足不同学校与专业的教学计划安排,本书在内容上删减了原《工程光学》(第 2 版)中的相关章节。如上篇删减了“光学设计”一章,把“现代光学系统原理”一章简化为“典型光学系统”中的一节。下篇删减了“傅里叶光学”、“导波光学基础”和“光子学基础”三章,但把傅里叶光学、近场光学、二元光学和光波导等相关重要内容融入到光的衍射原理等章节中,使本书既涵盖较广的现代光学内容,又在篇幅上作较大压缩。

本教材分为上、下两篇,上篇为几何光学与成像理论,下篇为物理光学。

上篇共分八章,主要介绍几何光学的基本定律和成像特性、理想光学系统的光学参数和成像关系、平面与平面镜成像、光学系统中的光阑与光束限制、光度学和色度学的基本原理、光学系统的光路计算和像差理论、典型光学系统的成像特性和设计要求、光学系统的成像质量评价和像差公差。此外,在典型光学系统一章中,还简要介绍了激光光学系统、傅里叶光学系统、扫描光学系统和光纤光学系统的光束传输和光学成像特性。

下篇共分四章,主要介绍光的电磁性质、光在各向同性介质界面上的传播规律、光波的叠加与分析、光波的干涉和典型干涉装置与应用、光波的衍射原理与应用(其中融入了傅里叶光学的基本理论与概念)、光的偏振及其在晶体中的传播等。此外,本篇还涵盖近场光学、二元光学、光调制、光波导、液晶、光学信息处理和光学全息等现代光学的相关内容。

本书由天津大学郁道银(上篇)和浙江大学谈恒英(下篇)主编,上海理工大学庄松林院士(上篇)和广州大学梁铨廷教授(下篇)主审。参加编写的有天津大学郁道银、谢洪波(第七章第八节、第八章)、田学飞(第五章),清华大学毛文炜(第二、四章),武汉大学何平安(第一、三章),长春理工大学王文生(第六章、第七章第一节至第七节、第九节),浙江大学谈恒英(第九、十二章),清华大学何庆声、孙立群(第十一章、附录),上海理工大学曹俊卿(第十章)。此外,天津大学陈晓冬参加了书稿的修改与整理工作。

本书可作为光电信息科学与工程、测控技术与仪器、生物医学工程及其相近专业的教材,也可作为物理或光学专业的选修教材或参考书,也是从事光学工程、仪器科学与技术、生物医学工程等学科的工程技术人员参考书。

希望广大读者对书中的不足给予指正。

编 者

# 目 录

## 前言

## 上篇 几何光学与成像理论

<b>第一章 几何光学基本定律与成像</b>		<b>第五章 光度学和色度学基础</b>	74
<b>概念</b>	1	第一节 辐射量和光学量及其单位	74
第一节 几何光学的基本定律	1	第二节 光传播过程中光学量的变化	
第二节 成像的基本概念与完善成像		规律	77
条件	5	第三节 成像系统像面的光照度	81
第三节 光路计算与近轴光学系统	7	第四节 颜色的分类及颜色的表现	
第四节 球面光学成像系统	9	特征	84
习题	13	第五节 颜色混合及格拉斯曼颜色混合	
<b>第二章 理想光学系统</b>	15	定律	85
第一节 理想光学系统与共线成像		第六节 颜色匹配	86
理论	15	第七节 色度学中的几个概念	87
第二节 理想光学系统的基点与基面	17	第八节 颜色相加原理及光源色和物体色的	
第三节 理想光学系统的物像关系	21	三刺激值	90
第四节 理想光学系统的放大率	26	第九节 CIE 标准色度学系统	91
第五节 理想光学系统的组合	28	第十节 均匀颜色空间及色差公式	100
第六节 透镜	34	习题	103
习题	38	<b>第六章 光线的光路计算及像差</b>	
<b>第三章 平面与平面系统</b>	40	<b>理论</b>	104
第一节 平面镜成像	40	第一节 概述	104
第二节 平行平板	42	第二节 光线的光路计算	105
第三节 反射棱镜	44	第三节 轴上点的球差	110
第四节 折射棱镜与光楔	51	第四节 正弦差和彗差	114
第五节 光学材料	54	第五节 场曲和像散	117
习题	55	第六节 畸变	120
<b>第四章 光学系统中的光阑和光束限制</b>	58	第七节 色差	121
第一节 光阑	58	第八节 像差特征曲线与分析	124
第二节 照相系统中的光阑	61	第九节 波像差	127
第三节 望远镜系统中成像光束的选择	63	习题	128
第四节 显微镜系统中的光束限制与分析	66	<b>第七章 典型光学系统</b>	130
第五节 光学系统的景深	68	第一节 眼睛及其光学系统	130
习题	73	第二节 放大镜	135
		第三节 显微镜系统	137
		第四节 望远镜系统	142
		第五节 目镜	144

第六节 摄影系统 .....	146	亮度 .....	171
第七节 投影系统 .....	150	第二节 分辨率 .....	172
第八节 现代光学系统 .....	152	第三节 点列图 .....	174
第九节 光学系统的外形尺寸计算 .....	164	第四节 光学传递函数评价成像质量 .....	176
习题 .....	168	第五节 其他像质评价方法 .....	178
<b>第八章 光学系统的像质评价和</b>		第六节 光学系统的像差公差 .....	181
<b>像差公差</b> .....	171	<b>上篇习题部分参考答案</b> .....	184
第一节 瑞利 (Reyleigh) 判断和中心点		<b>上篇主要参考文献</b> .....	187
<b>下篇 物理光学</b>			
<b>第九章 光的电磁理论基础</b> .....	188	第六节 衍射光栅 .....	280
第一节 光的电磁性质 .....	188	第七节 菲涅耳衍射 .....	287
第二节 光在电介质分界面上的 反射和折射 .....	195	第八节 光学信息处理 .....	293
第三节 光的吸收、色散和散射 .....	208	第九节 全息术 .....	300
第四节 光波的叠加 .....	213	习题 .....	307
第五节 光波的傅里叶分析 .....	221	<b>第十二章 光的偏振</b> .....	311
习题 .....	225	第一节 偏振光概述 .....	311
<b>第十章 光的干涉</b> .....	227	第二节 晶体的双折射 .....	314
第一节 光波干涉的条件 .....	227	第三节 晶体偏振器件 .....	318
第二节 杨氏干涉实验 .....	228	第四节 偏振光和偏振器件的矩阵 表示 .....	324
第三节 干涉条纹的可见度 .....	232	第五节 偏振光的干涉 .....	329
第四节 平板的双光束干涉 .....	235	第六节 磁光、电光效应 .....	334
第五节 典型的双光束干涉系统及 其应用 .....	241	第七节 液晶 .....	341
第六节 平行平板的多光束干涉及 其应用 .....	245	习题 .....	346
习题 .....	256	<b>下篇附录</b> .....	348
<b>第十一章 光的衍射</b> .....	259	附录 A 矢量分析及场论的主要公式 .....	348
第一节 光波的标量衍射理论 .....	259	附录 B 二维傅里叶变换关系及其基本 定理 .....	349
第二节 典型孔径的夫琅和费衍射 .....	264	附录 C 几个常用函数的定义及傅里叶 变换 .....	350
第三节 夫琅和费衍射和傅里叶变换 .....	270	附录 D 卷积和相关 .....	352
第四节 光学成像系统的衍射和分辨 本领 .....	273	附录 E $\delta$ 函数 .....	354
第五节 多缝的夫琅和费衍射 .....	277	<b>下篇习题部分参考答案</b> .....	357
		<b>下篇主要参考文献</b> .....	361

# 上篇 几何光学与成像理论

## 第一章 几何光学基本定律与成像概念

几何光学以光线的概念为基础，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。本章主要介绍几何光学的基本定律、成像的基本概念和完善成像条件、光学系统的光路计算、近轴光学系统和球面光学系统的成像。

### 第一节 几何光学的基本定律

#### 一、光波与光线

光就其本质而言是一种电磁波，只是光波波长比普通无线电波的波长要短。把电磁波按其波长或频率的顺序排列起来，形成电磁波谱，如图 1-1 所示。光波波长范围大致为  $1\text{mm} \sim 10\text{nm}$ ，其中波长在  $380 \sim 760\text{nm}$  之间的电磁波能为人眼所感知，称为可见光。波长大于  $760\text{nm}$  的光称为红外光，而波长小于  $400\text{nm}$  的光称为紫外光。光波在真空中的传播速度为  $c \approx 2.99792458 \times 10^8 \text{m/s}$ ，在介质中的传播速度都小于  $c$ ，且随波长的不同而不同。

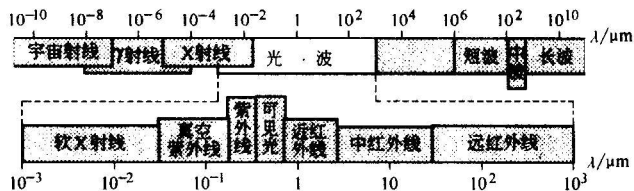


图 1-1 电磁波谱

可见光随波长的不同而引起人眼不同的颜色感觉。我们把具有单一波长的光称为单色光，而由不同单色光混合而成的光称为复色光。单色光是一种理想光源，现实中并不存在。激光是一种单色性很好的光源，可以近似看作单色光。太阳光是由无限多种单色光组成的。在可见光范围内，太阳光可分解为红、橙、黄、绿、青、蓝、紫等七种颜色的光。

通常，我们把能够辐射光能量的物体称为发光体或光源。发光体可看作是由许多发光点或点光源组成的，每个发光点向四周辐射光能量。为讨论问题的方便，在几何光学中，我们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，某一时刻其振动位相相同的点所构成的等相位面称为波阵面，简称波面，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，即光是沿着波面法线方向传播的。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。

通常，波面可分为平面波、球面波和任意曲面波。与平面波对应的光线束相互平行，称

为平行光束，如图 1-2a 所示。与球面波对应的光线束相交于球面波的球心，称为同心光束。同心光束可分为发散光束和会聚光束，如图 1-2b、c 所示。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，将不再是同心光束或平行光束，对应的光波则为非球面光波。图 1-2d 所示为非球面光波和对应的像散光束。

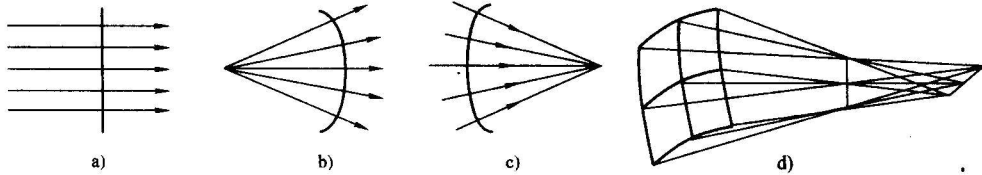


图 1-2 光束与波面的关系

a) 平行光束 b) 发散同心光束 c) 会聚同心光束 d) 像散光束

## 二、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如下四个基本定律，它们是研究光的传播现象、规律以及物体经过光学系统的成像特性的基础。

### (一) 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、日蚀和月蚀等现象都能很好地证明这一定律。“小孔成像”即是运用这一定律的很好例子，许多精密测量，如精密天文测量、大地测量、光学测量及相应的光学仪器都是以这一定律为基础的。

但这一定律是有局限性的。当光经过尺寸与波长接近或更小的小孔或狭缝时，将发生“衍射”现象，光将不再沿直线方向传播。光在非均匀介质中传播时，光线传播的路径为曲线，也不再是直线。

### (二) 光的独立传播定律

不同光源发出的光在空间某点相遇时，彼此互不影响，各光束独立传播，这就是光的独立传播定律。在各光束的同一交点上，光的强度是各光束强度的简单叠加，离开交会后，各光束仍按原来的方向传播。

光的独立传播定律没有考虑光的波动性质。当两束光是由光源上同一点发出、经过不同途径传播后在空间某点交会时，交会点处光的强度将不再是二束光强度的简单叠加，而是根据两束光所走路程的不同，有可能加强，也有可能减弱。这就是光的“干涉”现象。

### (三) 光的折射定律与反射定律

光的直线传播定律与光的独立传播定律概括的是光在同一均匀介质中的传播规律，而光的折射定律与反射定律则是研究光传播到两种均匀介质分界面上时的现象与规律。

当一束光投射到两种均匀介质的光滑分界表面上时，一部分光从光滑分界表面“反射”回到原介质中，这种现象称为光的反射，反射回原介质的光称为反射光；另一部分光将“透过”光滑表面，进入第二种介质，这种现象称为光的折射，透过光滑表面进入第二种介质的光称为折射光。与反射光和折射光相对应，原来投射到光滑表面发生折射和反射前的光称为入射光。

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  $O$  点发生折反射。其中，反射光线为  $OB$ ，折射光线为  $OC$ ， $NN$  为界面上入射点  $O$  的法线。入射光线、反射光线



和折射光线与法线的夹角  $I$ 、 $I''$ 、 $I'$  分别称之为入射角、反射角和折射角，它们均以锐角度量，由光线转向法线，顺时针方向形成的角度为正，逆时针方向形成的角度为负。

反射定律归结为：①反射光线位于由入射光线和法线所决定的平面内；②反射光线和入射光线位于法线的两侧，且反射角与入射角绝对值相等，符号相反，即

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

折射定律归结为：①折射光线位于由入射光线和法线所决定的平面内；②折射角的正弦与入射角的正弦之比与入射角大小无关，仅由两种介质的性质决定。对于一定波长的光线而言，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

$$\frac{\sin I'}{\sin I} = \frac{n}{n'}$$

通常表示为

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

折射率是表征透明介质光学性质的重要参数。我们知道，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，且都比真空中的光速小。介质的折射率就是用来描述介质中的光速相对于真空中的光速减慢程度的物理量，即

$$n = \frac{c}{v} \quad (1-3)$$

这就是折射率的定义。因为真空中的折射率为 1，因此我们把介质相对于真空的折射率称为绝对折射率。在标准条件（大气压强  $p = 101275\text{Pa} = 760\text{mmHg}$ ，温度  $t = 293\text{K} = 20^\circ\text{C}$ ）下，空气的折射率  $n = 1.000273$ ，与真空的折射率非常接近。因此，为方便起见，常把介质相对于空气的相对折射率作为该介质的绝对折射率，简称折射率。

在式 (1-2) 中，若令  $n' = -n$ ，则有  $I' = -I$ ，即折射定律转化为反射定律。这一结论有很重要的意义。后面我们将看到，许多由折射定律得出的结论，只要令  $n' = -n$ ，就可以得出相应反射定律的结论。

#### (四) 光的全反射现象

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被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。下面我们就来研究在什么条件下会产生全反射现象。

通常，我们把分界面两边折射率高的介质称为光密介质，而把折射率低的介质称为光疏介质。由式 (1-3) 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时，因为  $n' < n$ ，所以由式 (1-2) 可知  $I' > I$ ，即折射光线相对于入射光线而言，更偏离法线方向，如图 1-4 所示。当光线入射角  $I$  增大到某一程度时，折射角  $I'$  达到  $90^\circ$ ，折射光线沿分界

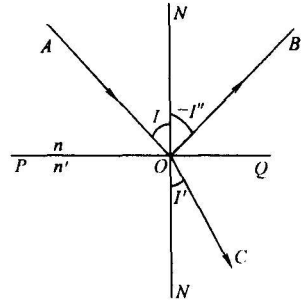


图 1-3 光的反射与折射

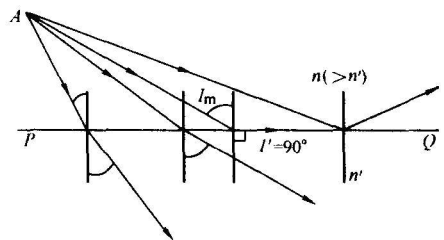


图 1-4 光的全反射现象

面掠射出去, 这时的入射角称为临界角, 记为  $I_m$ 。由折射定律公式 (1-2) 得

$$\sin I_m = n' \sin I' / n = n' \sin 90^\circ / n = n' / n \quad (1-4)$$

若入射角继续增大, 使  $I > I_m$ , 即  $\sin I > n' / n$ , 由式 (1-4) 可知,  $\sin I' > 1$ 。显然, 这是不可能的。这表明入射角大于临界角的那些光线没有折射光线进入第二种介质, 而是全部反射回第一种介质, 即发生了全反射现象。

由上述分析可知, 发生全反射的条件是: ①光线从光密介质向光疏介质入射; ②入射角大于临界角。

全反射现象在工程实际中有着广泛的应用。在光学仪器中, 常常利用各种全反射棱镜代替平面反射镜, 以减少反射时的光能损失, 图 1-5 所示是一种最常用的全反射等腰直角棱镜。从理论上讲, 全反射棱镜可以将入射光全部反射, 而镀有反射膜层的平面反射镜只能反射 90% 左右的人射光能。

目前, 广泛应用于光纤通信和各种光纤传感器的光学纤维 (简称光纤), 其传光利用的最基本的原理就是全反射原理。图 1-6 所示为光纤的基本结构和光纤传光的基本原理。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。光线从光纤的一端以入射角  $I_1$  耦合进入光纤纤芯, 投射到纤芯与包层的分界面上。在此分界面上, 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。可见, 只要满足一定条件, 光就能在光纤内以全反射的形式传输很远的距离。将许多根光纤按序排列形成光纤束, 即光缆, 可用于传递图像和光能, 如在医用内窥镜系统中, 用一根光缆 (无需按序排列) 将光传入体内用于照明, 而用另一根光缆将光学系统所成图像传递出来, 供人眼观察 (光纤光学系统在第七章第八节中详述)。

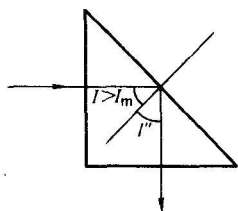


图 1-5 全反射等腰直角棱镜

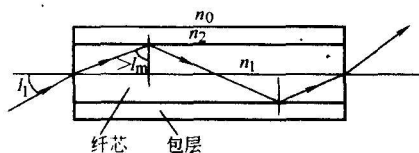


图 1-6 光纤的全反射传光原理

### (五) 光路的可逆性原理

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, 折射光线必定沿着  $OA$  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原理。

### 三、费马原理

费马原理用“光程”的概念对光的传播规律作了更简明的概括。

所谓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

$$s = nl \quad (1-5)$$

将式 (1-3) 及  $l = vt$  代入上式, 有

$$s = ct \quad (1-6)$$

由此可见,光在某种介质中的光程等于同一时间内光在真空中所走过的几何路程。

费马原理指出,光从一点传播到另一点,其间无论经过多少次折射和反射,其光程为极值。也就是说,光是沿着光程为极值(极大、极小或常量)的路径传播的。因此,费马原理也叫光程极端定律。

我们知道,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,由于折射率  $n$  是空间位置的函数,因此光线将不再沿直线方向传播,其轨迹是一空间曲线,如图 1-7 所示。此时,光线从  $A$  点传播至  $B$  点,其光程由以下曲线积分来确定

$$s = \int_A^B n dl \quad (1-7)$$

根据费马原理,此光程应具有极值,即式 (1-7) 表示的一次变分为零,即

$$\delta s = \delta \int_A^B n dl = 0 \quad (1-8)$$

这就是费马原理的数学表示。

费马原理是描述光线传播的基本规律,无论是光的直线传播定律,还是光的反射定律与折射定律,均可以由费马原理直接导出。比如,对于均匀介质,由两点间的直线距离为最短这一公理,即可以证明光的直线传播定律。至于光的反射定律和折射定律的导出,留待读者在习题中证明。

#### 四、马吕斯定律

在各向同性的均匀介质中,光线为光波的法线,光束对应着波面的法线束。马吕斯定律描述了光经过任意多次折、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、反射后,无论折、反射面形如何,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的任意一个均可以视为几何光学的基本定律,而把另外两个作为其基本定律的推论。

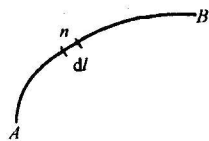


图 1-7 非均匀介质中的光线与光程

## 第二节 成像的基本概念与完善成像条件

### 一、光学系统与成像概念

光学系统的主要作用之一是对物体成像。一个被照明的物体(或自发光物体)总可以看成是由无数多个发光点或物点组成的,每个物点发出一个球面波,与之对应的是一束以物点为中心的同心光束。如果该球面波经过光学系统后仍为一球面波,那么对应的光束仍为同心光束,则称该同心光束的中心为物点经过光学系统所成的完善像点。物体上每个点经过光学系统后所成完善像点的集合就是该物体经过光学系统后的完善像。通常,我们把物体所在的空称为物空间,把像所在的空称为像空间。物像空间的范围均为  $(-\infty, +\infty)$ 。

光学系统通常是由若干个光学元件(如透镜、棱镜、反射镜和分划板等)组成,而每个光学元件都是由表面为球面、平面或非球面,其间具有一定折射率的介质构成的。如果组成

光学系统的各个光学元件的表面曲率中心都在同一直线上，则称该光学系统为共轴光学系统，该直线称为光轴。光学系统中大部分为共轴光学系统，非共轴光学系统较少使用。

## 二、完善成像条件

图 1-8 所示为一共轴光学系统，由  $O_1$ 、 $O_2$ 、 $\dots$ 、 $O_k$  等  $k$  个光学面组成。轴上物点  $A_1$  发出一球面波  $W$  (与之对应的是以  $A_1$  为中心的同心光束)，经过光学系统后仍为一球面波  $W'$ ，对应的是以球心  $A'_k$  为中心的同心光束， $A'_k$  即为物点  $A_1$  的完善像点。

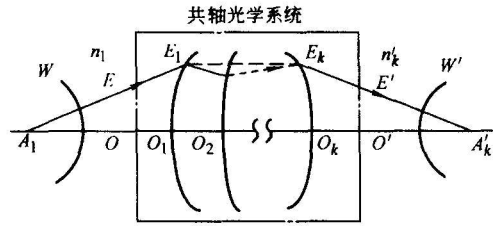


图 1-8 共轴光学系统及其完善成像

光学系统成完善像应满足的条件为：入射

波面为球面波时，出射波面也为球面波。由于球面波对应同心光束，所以完善成像条件也可以表述为：入射光为同心光束时，出射光亦为同心光束。根据马吕斯定律，入射波面与出射波面对应点间的光程相等，则完善成像条件用光程的概念可以表述为：物点  $A_1$  及其像点  $A'_k$  之间任意二条光路的光程相等，即

$$n_1 A_1 O + n_1 O O_1 + n_2 O_1 O_2 + \dots + n'_k O_k O' + n'_k O' A'_k =$$

$$n_1 A_1 E + n_1 E E_1 + n_2 E_1 E_2 + \dots + n'_k E_k E' + n'_k E' A'_k = \text{常数}$$

或简写为

$$(A_1 A'_k) = \text{常数}$$

## 三、物、像的虚实

根据物像方同心光束的会聚与发散情况，物、像有虚实之分。由实际光线相交所形成的点为实物点或实像点，而由光线的延长线相交所形成的点为虚物点或虚像点，如图 1-9 所示。图 a 为实物成实像，图 b 为实物成虚像，图 c 为虚物成实像，图 d 为虚物成虚像的情况。需要说明的是，虚物不能人为设定，它是前一光学系统所成的实像被当前系统所截而得。实像不仅能为人眼所观察，而且还能用屏幕、胶片或光电成像器件（如 CCD、CMOS 等）记录，而虚像只能为人眼所观察，不能被记录。由图中可以看出，实物、虚像对应发散同心光束，虚物、实像对应会聚同心光束。因此，几个光学系统组合在一起时，前一系统形成的虚像应看成是当前系统的实物。

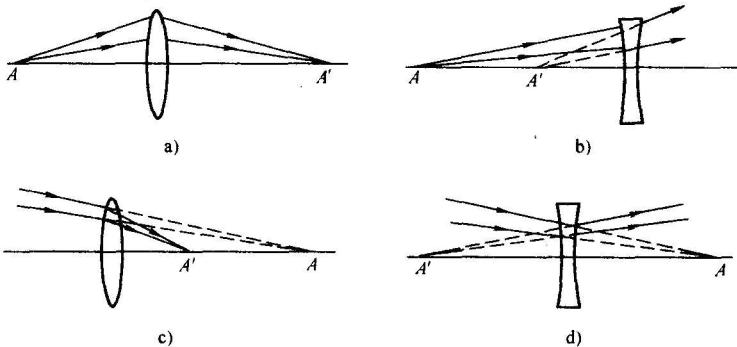


图 1-9 物、像的虚实

### 第三节 光路计算与近轴光学系统

大多数光学系统都是由折、反射球面或平面组成的共轴球面光学系统。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。可见，折射球面系统具有普遍意义。物体经过光学系统的成像，实际上是物体各点发出的光线束经过光学系统逐面折、反射的结果。因此，我们首先讨论光线经过单个折射球面折射的光路计算问题，然后再逐面过渡到整个光学系统。

#### 一、基本概念与符号规则

如图 1-10 所示，折射球面  $OE$  是折射率为  $n$  和  $n'$  两种介质的分界面， $C$  为球心， $OC$  为球面曲率半径，以  $r$  表示。通过球心  $C$  的直线即为光轴，光轴与球面的交点  $O$  称为球面顶点。我们把通过物点和光轴的截面称为子午面。显然，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  $U = \angle OAE$ 。

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，像方光线  $EA'$  的位

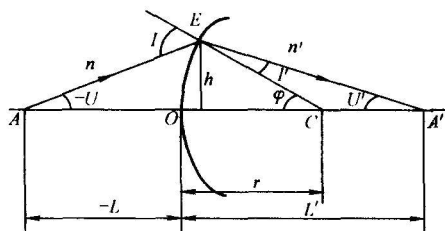


图 1-10 光线经过单个折射球面的折射

置由像方截距  $L' = OA'$  和像方孔径角  $U' = \angle OA'E$  确定。通常，在几何光学与光学设计领域，像方参量符号与其对应的物方参量符号用相同的字母表示，并用撇号“'”加以区别。为了确定光线与光轴的交点在顶点的左边还是右边、光线在光轴的上方还是下方、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，即我们通常所说的如下符号规则：

1) 沿轴线段（如  $L$ 、 $L'$  和  $r$ ）：规定光线的传播方向自左至右为正方向，以折射面顶点  $O$  为原点，由顶点到光线与光轴交点（ $A$ 、 $A'$ ）（或顶点到球心（ $C$ ））的方向和光线传播方向相同时取正，相反时取负。因此，图中  $L$  为负， $L'$ 、 $r$  为正。

2) 垂轴线段（如光线矢高  $h$ ）：以光轴为基准，在光轴上方为正，在光轴下方为负。

3) 光线与光轴的夹角（如  $U$ 、 $U'$ ）：用由光轴转向光线所形成的锐角度量，顺时针为正，逆时针为负。因此，图中  $U$  为负， $U'$  为正。

4) 光线与法线的夹角（如  $I$ 、 $I'$  和  $I''$ ）：由光线以锐角方向转向法线，顺时针为正，逆时针为负。

5) 光轴与法线的夹角（如  $\varphi$ ）：由光轴以锐角方向转向法线，顺时针为正，逆时针为负。

6) 相邻两折射面间隔（用  $d$  表示）：由前一面的顶点到后一面的顶点，顺光线方向为正，逆光线方向为负。在折射系统中， $d$  恒为正值。

这里，符号及符号规则开始是约定俗成、人为规定的，但现在已成为国家标准（参见 GB/T 1224—1999），必须严格遵守。只有这样，才能使在某种情况下推导的公式具有普遍性，也只有遵守这些符号规则，才能在工程实际中与同行进行交流。图 1-10 中各量均为几

何量,用绝对值表示。因此,凡是负值的量,图中相应量的符号前均加负号。

## 二、实际光线的光路计算

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 1-10 所示,在  $\triangle AEC$  中,应用正弦定律,有

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

于是

$$\sin I = (L-r) \frac{\sin U}{r} \quad (1-9)$$

在  $E$  点应用折射定律,有

$$\sin I' = \frac{n}{n'} \sin I \quad (1-10)$$

由图 1-10 可知,  $\varphi = U + I = U' + I'$ , 由此得像方孔径角  $U'$  为

$$U' = U + I - I' \quad (1-11)$$

在  $\triangle A'EC$  中应用正弦定律,有

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

于是,得像方截距

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

式 (1-9) ~ 式 (1-12) 即为子午面内实际光线经过单个折射球面时的光路计算公式。给出一组  $L$  和  $U$ , 就可以计算出一组相应的  $L'$  和  $U'$ 。由于折射面乃至整个系统具有轴对称性,故以  $A$  为顶点、 $2U$  为顶角的圆锥面上的光线经折射后,均会聚于点  $A'$ 。另一方面,由上述公式组可知,当  $L$  一定时,  $L'$  是  $U$  的函数,因此,同一物点发出的不同孔径的光线,经过折射后具有不同的  $L'$  值,如图 1-11 所示。这说明,同心光束经折射后,出射光束不再是同心光束。因此,单个折射球面对轴上物点成像是完善的。这种现象称为“球差”。球差是球面光学系统成像的固有缺陷。

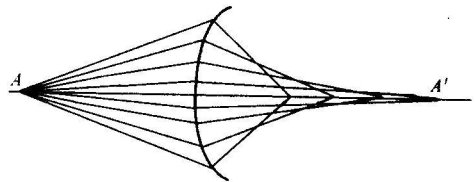


图 1-11 轴上点成像的不完善性

## 三、近轴光线的光路计算

当孔径角  $U$  很小时,  $I$ 、 $I'$  和  $U'$  都很小。这时,光线在光轴附近很小的区域内,这个区域称为近轴区,近轴区内的光线称为近轴光线。由于近轴光线的有关角度量都很小,在式 (1-9) ~ 式 (1-12) 中,将角度的正弦值用其相应的弧度值来代替,并用相应小写字母表示各量,则有

$$i = \frac{l-r}{r} u \quad (1-13)$$

$$i' = \frac{n}{n'} i \quad (1-14)$$

$$u' = u + i - i' \quad (1-15)$$

$$l' = r \left( 1 + \frac{i'}{u'} \right) \quad (1-16)$$

由这组公式可知,在近轴区内,对一给定的  $l$  值,不论  $u$  为何值,  $l'$  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。

根据图 1-10 可知,在近轴区内,有

$$l'u' = lu = h \quad (1-17)$$

据此,将式 (1-13) 和式 (1-16) 中的  $i$  和  $i'$  代入式 (1-14), 得

$$n' \left( \frac{1}{r} - \frac{1}{l'} \right) = n \left( \frac{1}{r} - \frac{1}{l} \right) = Q \quad (1-18)$$

$$n'u' - nu = (n' - n) \frac{h}{r} \quad (1-19)$$

$$\frac{n'}{l'} - \frac{n}{l} = \frac{n' - n}{r} \quad (1-20)$$

式 (1-18) 中的  $Q$  称为阿贝不变量。该式表明,对于单个折射面,物空间与像空间的阿贝不变量  $Q$  相等,仅随共轭点的位置而变。式 (1-19) 表示了物、像方孔径角的相互关系。这两式在像差理论中有重要应用。

式 (1-20) 表明了单个折射球面的物、像位置关系,已知物体位置  $l$ , 即可求出其共轭像的位置  $l'$ 。反之亦然。

## 第四节 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成像情况,主要涉及物像位置关系。当讨论有限大小的物体经过折射球面乃至球面光学系统成像时,除了物像位置关系外,还涉及像的放大与缩小、像的正倒与虚实等成像特性。以下我们均在近轴区内予以讨论。

### 一、单个折射面成像

#### (一) 垂轴放大率

在近轴区内,垂直于光轴的平面物体可以用子午面内的垂轴小线段  $AB$  表示,经过球面折射后所成像  $A'B'$  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  $BC$  相当于轴外物点  $B$  的光轴(称为辅轴)。如图 1-12 所示,令  $AB = y$ ,  $A'B' = y'$ , 则定义垂轴放大率  $\beta$  为像的大小与物体的大小之比,即

$$\beta = \frac{y'}{y} \quad (1-21)$$

由于  $\triangle ABC$  相似于  $\triangle A'B'C$ , 则有

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

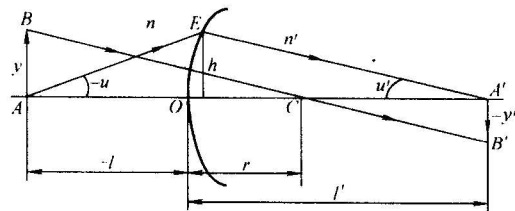


图 1-12 近轴区有限大小的物体经过单个折射球面的成像

利用式 (1-18), 得

$$\beta = \frac{y'}{y} = \frac{nl'}{n'l} \quad (1-22)$$

由此可见, 垂轴放大率仅取决于共轭面的位置。在一对共轭面上,  $\beta$  为常数, 故像与物是相似的。

根据  $\beta$  的定义及式 (1-22), 可以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, 表示成正像; 反之,  $y'$  与  $y$  异号, 表示成倒像。
- 2) 若  $\beta > 0$ , 即  $l'$  和  $l$  同号, 物像虚实相反; 反之,  $l'$  和  $l$  异号, 表示物像虚实相同。
- 3) 若  $|\beta| > 1$ , 则  $|y'| > |y|$ , 成放大的像; 反之,  $|y'| < |y|$ , 成缩小的像。

### (二) 轴向放大率

轴向放大率表示光轴上一对共轭点沿轴向的移动量之间的关系, 它定义为物点沿光轴作微小移动  $dl$  时, 所引起的像点移动量  $dl'$  与物点移动量  $dl$  之比, 用  $\alpha$  表示轴向放大率, 即

$$\alpha = \frac{dl'}{dl} \quad (1-23)$$

对于单个折射球面, 将式 (1-20) 两边微分, 得

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

于是得轴向放大率

$$\alpha = \frac{dl'}{dl} = \frac{nl'^2}{n'l^2} \quad (1-24)$$

这就是轴向放大率的计算公式, 它与垂轴放大率的关系为

$$\alpha = \frac{n'}{n}\beta^2 \quad (1-25)$$

由此可以得出如下两个结论: ① 折射球面的轴向放大率恒为正。因此, 当物点沿轴向移动时, 其像点沿光轴同向移动; ② 轴向放大率与垂轴放大率不等。因此, 空间物体成像时要变形。比如, 一个正方体成像后, 将不再是正方体。

### (三) 角放大率

在近轴区内, 角放大率定义为一对共轭光线与光轴的夹角  $u'$  与  $u$  之比, 用  $\gamma$  表示, 即

$$\gamma = \frac{u'}{u} \quad (1-26)$$

利用  $l'u' = lu$ , 得

$$\gamma = \frac{l}{l'} = \frac{n}{n'} \frac{1}{\beta} \quad (1-27)$$

角放大率表示折射球面将光束变宽或变细的能力。上式表明, 角放大率只与共轭点的位置有关, 而与光线的孔径角无关。

垂轴放大率、轴向放大率与角放大率之间是密切联系的, 三者之间的关系为

$$\alpha\gamma = \frac{n'}{n}\beta^2 \frac{n}{n'\beta} = \beta \quad (1-28)$$



由  $\beta = \frac{y'}{y} = \frac{nl'}{n'l} = \frac{nu}{n'u'}$ , 得

$$nuy = n'u'y' = J \quad (1-29)$$

该式表明, 实际光学系统在近轴区成像时, 在物像共轭面内, 物体大小  $y$ 、成像光束的孔径角  $u$  和物体所在介质的折射率  $n$  的乘积为一常数, 该常数  $J$  称为拉格朗日-赫姆霍兹不变量, 简称拉赫不变量。拉赫不变量是表征光学系统性能的一个重要参数。

## 二、球面反射镜成像

前面我们已经指出, 反射是折射的特例。因此, 令  $n' = -n$ , 即可由单个折射球面的成像结论, 导出球面反射镜 (简称球面镜) 的成像特性。

### (一) 物像位置关系

将  $n' = -n$  代入式 (1-20) 中, 则得球面镜的物像位置关系如下:

$$\frac{1}{l'} + \frac{1}{l} = \frac{2}{r} \quad (1-30)$$

通常, 球面镜分为凸面镜 ( $r > 0$ ) 和凹面镜 ( $r < 0$ ), 其物像关系如图 1-13 所示。

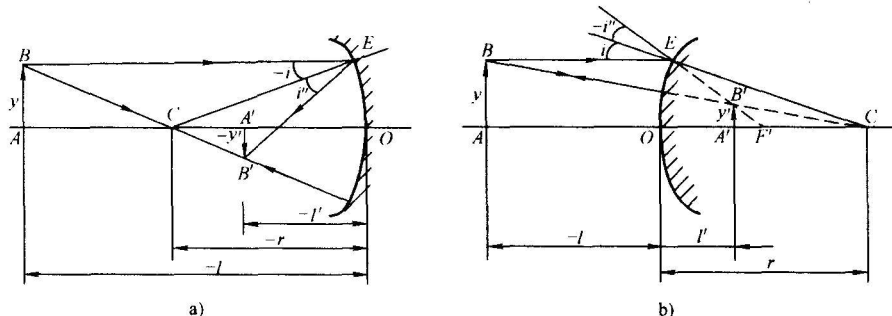


图 1-13 球面镜的成像

a) 凹面镜成像 b) 凸面镜成像

### (二) 成像放大率

将  $n' = -n$  分别代入式 (1-22)、式 (1-24) 和式 (1-27), 得

$$\left. \begin{aligned} \beta &= \frac{y'}{y} = -\frac{l'}{l} \\ \alpha &= \frac{dl'}{dl} = -\frac{l'^2}{l^2} = -\beta^2 \\ \gamma &= \frac{u'}{u} = -\frac{1}{\beta} \end{aligned} \right\} \quad (1-31)$$

由此可见, 球面反射镜的轴向放大率  $\alpha < 0$ , 这表明, 当物体沿光轴移动时, 像总是以相反的方向移动。

球面镜的拉赫不变量为

$$J = uy = -u'y' \quad (1-32)$$

当物点位于球面镜球心, 即  $l = r$  时,  $l' = r$ , 且

$$\beta = \alpha = -1, \quad \gamma = 1$$

可见, 此时球面镜成倒像。由于反射光线与入射光线的孔径角相等, 即通过球心的光线沿原