

工程光学

GONGCHENG GUANGXUE

主编
刘晨



国防工业出版社

National Defense Industry Press

内 容 简 介

本书系统地介绍了工程光学的基本原理、方法及应用。主要内容包括:几何光学的基本概念和基本定律、球面系统成像、理想光学系统成像、透镜、平面镜棱镜系统、光学系统中的光束限制、光度学基础、光学系统简介、光学系统设计基础、物理学理论基础、光的干涉、光的衍射和光的偏振与晶体光学基础。

本书可作为高等院校光信息科学与技术专业、光电信息工程专业和测控技术及仪器专业等本科生的教材,也可供相关专业和光学行业的技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

工程光学/刘晨主编. —北京:国防工业出版社,2012.8

ISBN 978-7-118-08125-1

I. ①工... II. ①刘... III. ①工程光学—高等学校—教材 IV. ①TB133

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 185949 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)

北京奥鑫印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787 × 1092 1/16 印张 19½ 字数 444 千字

2012 年 8 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—4000 册 定价 38.00 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

工程光学是在工程中应用的基础光学知识,其内容包括几何光学和物理光学两部分。几何光学和物理光学是两个相对独立的学科体系,编写本书的指导思想是系统地介绍并压缩这两部分内容,突出重点。

本书与以往工程光学教材所不同的是:将共轴球面光学系统和理想光学系统整合为光学系统成像,指出了两者之间的相互关系;将透镜单独列为一章,并对透镜进行了较为详细的介绍;将典型光学系统与现代光学系统整合为光学系统简介一章;将几何光学中的像差、像质评价和光学设计整合为光学系统设计基础一章,以达到理论的系统性和一致性。

本书共分 13 章:第 1 章介绍几何光学的基本概念和基本定律;第 2 章介绍球面系统成像;第 3 章介绍理想光学系统成像;第 4 章介绍透镜;第 5 章介绍平面镜棱镜系统;第 6 章介绍光学系统中的光束限制;第 7 章介绍光度学基础;第 8 章为光学系统简介;第 9 章介绍光学系统设计基础;第 10 章介绍物理光学基础理论;第 11 章介绍光的干涉;第 12 章介绍光的衍射;第 13 章介绍光的偏振与晶体光学基础。在每章的后面都附有该章需要掌握的知识,并选编了例题和习题。

本书由合肥工业大学刘晨任主编,并编写了第 3 章和第 4 章及第 12 章;第 1 章、第 2 章、第 6 章由武汉工程大学罗晔编写;第 5 章、第 11 章由安徽大学李桂华编写;第 7 章、第 8 章由南京林业大学华晋编写;第 9 章由长春理工大学万宏、赵振明编写;第 10 章和第 13 章由合肥工业大学雷丽巧编写。全书由刘晨统稿。

本书可作为高等院校光信息科学与技术专业、光电信息工程专业和测控技术与仪器专业等本科生的教材,也可供相关专业及光学行业的技术人员参考。

由于编者水平有限,书中不妥之处在所难免,敬请读者批评指正。

编 者
2012. 1

目 录

第 1 章 几何光学的基本概念和基本定律	1
1.1 几何光学的基本概念	1
1.2 几何光学的基本定律	2
1.3 光学系统	4
1.4 成像与理想成像	5
1.4.1 成像的概念	5
1.4.2 完善成像的条件	5
知识点	6
例题	6
习题	6
第 2 章 球面系统成像	7
2.1 实际光线的光路计算	7
2.1.1 光线的坐标和符号规则	7
2.1.2 实际光线的光路计算公式	8
2.2 近轴光线的光路计算和近轴光学的基本公式	9
2.2.1 近轴光线和近轴光学	10
2.2.2 近轴光线的光路计算公式	10
2.2.3 近轴光学的基本公式	10
2.3 共轴球面系统的成像	11
2.3.1 单个折射球面的放大率和拉赫不变量	11
2.3.2 球面反射镜	13
2.3.3 共轴球面系统的放大率和拉赫不变量	14
知识点	15
例题	15
习题	18
第 3 章 理想光学系统成像	19
3.1 理想光学系统简介	19
3.2 理想光学系统的基点、基面和焦距	19
3.2.1 焦点和焦平面	19
3.2.2 主点和主平面	20

3.2.3	焦距	20
3.2.4	节点和节平面	21
3.3	理想光学系统的成像	22
3.3.1	图解法	22
3.3.2	解析法	25
3.3.3	理想光学系统物、像焦距之间的关系,光焦度和拉赫公式	27
3.3.4	理想光学系统的放大率及相互关系	29
3.4	由多个光组组成的理想光学系统的成像	32
3.4.1	牛顿公式或高斯公式 + 过渡公式法求解	32
3.4.2	组合法求解	33
	知识点	39
	例题	40
	习题	45
第4章	透镜	47
4.1	单个折射球面的基点和基面	47
4.2	单透镜(厚透镜)及薄透镜	49
4.3	非球面透镜	51
4.4	透镜的应用	52
4.4.1	透镜在日常生活中的应用	52
4.4.2	非球面透镜的应用	54
	知识点	55
	例题	55
	习题	56
第五章	平面镜棱镜系统	57
5.1	平面反射镜	57
5.1.1	单平面镜的成像	57
5.1.2	双面镜的成像	58
5.1.3	应用实例	58
5.2	平行平板	59
5.2.1	平行平板的成像	59
5.2.2	平行平板的等效	60
5.2.3	应用实例	61
5.3	反射棱镜	62
5.3.1	反射棱镜的类型	62
5.3.2	反射棱镜系统成像方向判断	64
5.3.3	反射棱镜的展开与等效	65
5.3.4	应用实例	66

5.4 折射棱镜和光楔	67
5.4.1 折射棱镜的偏向角	67
5.4.2 光楔	68
5.4.3 应用实例	69
知识点	70
例题	70
习题	72
第6章 光学系统中的光束限制	74
6.1 光阑及其作用	74
6.2 远心光路	76
6.3 场镜	78
6.4 景深	79
知识点	80
例题	80
习题	81
第7章 光度学基础	82
7.1 光度学的基本量及单位	82
7.2 光传播过程中光度量的变化规律	83
7.2.1 点光源在距离为 r 的表面上形成的光照度	83
7.2.2 面光源在距离为 r 的表面上形成的光照度	84
7.2.3 单一介质元光管内光亮度的传递	85
7.2.4 光束经界面反射和折射后的亮度	85
7.2.5 余弦辐射体	87
7.3 成像光学系统的像面光照度	88
7.3.1 轴上像点的光照度	88
7.3.2 轴外像点的光照度	89
7.3.3 光通过光学介质时的能量损失	90
7.4 光通过光学系统时的能量损失	91
知识点	92
例题	92
习题	92
第8章 光学系统简介	93
8.1 眼睛	93
8.1.1 眼睛的结构	93
8.1.2 眼睛的调节及校正	93
8.1.3 眼睛的辐射接收作用	95
8.1.4 眼睛的分辨率	95

8.1.5	眼睛的对准精度	96
8.2	放大镜	96
8.2.1	视觉放大率	96
8.2.2	光束限制和线视场	97
8.3	显微镜系统	98
8.3.1	显微镜的视觉放大率	98
8.3.2	显微镜的线视场	99
8.3.3	显微镜的出瞳直径	99
8.3.4	显微镜的分辨率和有效放大率	99
8.3.5	显微镜的照明方法	100
8.3.6	显微镜的物镜	101
8.3.7	显微镜的分辨率和有效放大率	102
8.4	望远镜	103
8.4.1	望远系统的结构及参数	103
8.4.2	望远系统的分辨率及工作放大率	104
8.4.3	望远镜的视场	104
8.5	摄影和投影系统	106
8.5.1	摄影物镜的光学特性	106
8.5.2	摄影物镜的景深	108
8.5.3	摄影物镜的类型	108
8.6	激光光学系统	110
8.6.1	高斯光束的特性	110
8.6.2	高斯光束的传播	110
8.6.3	高斯光束的透镜变换	112
8.6.4	高斯光束的聚焦和准直	115
8.7	光纤光学系统	116
8.7.1	阶跃型光纤的基本原理	116
8.7.2	阶跃型光纤束的传光、传像特性	118
	知识点	125
	例题	125
	习题	127
第9章	光学系统设计基础	129
9.1	波像差和几何像差	129
9.1.1	球差	132
9.1.2	彗差	134
9.1.3	像散和场曲	136
9.1.4	畸变	139

9.1.5	色差和光学材料选择	140
9.2	光学系统的像质评价	142
9.2.1	瑞利判据和中心点亮度	142
9.2.2	分辨率	143
9.2.3	光学传递函数	144
9.3	ZEMAX 计算机辅助光学设计	145
9.3.1	设计规格确认	146
9.3.2	初始结构选取	146
9.3.3	变量、约束、边界设定	149
9.3.4	建立评价函数	149
9.3.5	优化	150
9.3.6	像质评价	151
9.3.7	其他	152
知识点		152
例题		153
习题		155
第 10 章	物理光学理论基础	156
10.1	光的电磁理论基础	156
10.1.1	麦克斯韦方程	156
10.1.2	物质方程	156
10.1.3	电磁场的波动性	157
10.1.4	电磁波谱	158
10.1.5	光波场的辐射能	159
10.2	典型定态光波描述	160
10.2.1	平面电磁波	160
10.2.2	球面波和柱面波	162
10.2.3	定态光波	163
10.3	光在介质分界面上的反射和折射	164
10.3.1	反射定律和折射定律	164
10.3.2	菲涅耳公式	165
10.4	光在金属表面的反射和透射	173
10.4.1	金属中的光波	173
10.4.2	光波在金属表面的反射	175
10.5	光波的叠加和分析	176
10.5.1	波的独立传播和叠加原理	176
10.5.2	两束频率相同、振动方向平行的标量波的叠加	178
10.5.3	两束频率相同、振动方向垂直的标量波的叠加	180

10.5.4 不同频率两个平面单色波的叠加	183
知识点	185
例题	186
习题	191
第 11 章 光的干涉	194
11.1 光波干涉条件和杨氏干涉实验	194
11.1.1 光波干涉条件	194
11.1.2 杨氏干涉实验	195
11.2 干涉条纹的对比度	196
11.2.1 可见度的定义	196
11.2.2 相干光振幅比的影响	197
11.2.3 光源大小的影响	197
11.2.4 光源非单色性的影响	198
11.3 平板的双光束干涉	199
11.3.1 平行平板的等倾干涉	200
11.3.2 楔形平板的等厚干涉	202
11.3.3 双光束干涉应用实例	203
11.4 平板的多光束干涉	204
11.4.1 干涉场强度分布	204
11.4.2 干涉条纹的特征	205
11.4.3 应用实例	207
知识点	209
例题	210
习题	213
第 12 章 光的衍射	214
12.1 光衍射的基本理论	214
12.1.1 惠更斯—菲涅耳原理	214
12.1.2 菲涅耳—基尔霍夫衍射公式	215
12.1.3 菲涅耳—基尔霍夫衍射公式的近似	216
12.2 夫琅和费衍射	218
12.2.1 夫琅和费矩孔与单缝衍射	220
12.2.2 夫琅和费多缝衍射	223
12.2.3 夫琅和费圆孔衍射	226
12.3 菲涅耳衍射	231
12.3.1 圆孔和圆屏菲涅耳衍射	231
12.3.2 菲涅耳直边和狭缝衍射	237

12.4	衍射光栅	240
12.4.1	光栅	240
12.4.2	光栅方程	240
12.4.3	光栅的主要性能	241
	知识点	242
	例题	244
	习题	247
第13章	光的偏振与晶体光学基础	249
13.1	偏振光的概述与晶体双折射	249
13.1.1	光的偏振态	249
13.1.2	晶体双折射	251
13.2	平面波在晶体中的传播规律	252
13.2.1	晶体的介电张量	252
13.2.2	光在晶体中传播的解析描述法	254
13.2.3	光在晶体中传播的几何描述法	258
13.3	平面波在晶体界面的反射和折射	264
13.3.1	光在晶体界面上的双反射和双折射	264
13.3.2	光在单轴晶体传播方向的确定	265
13.4	晶体光学器件	267
13.4.1	偏振棱镜	267
13.4.2	光偏振态的改变——波片	270
13.4.3	相位补偿器	272
13.5	偏振光的产生和检验	273
13.5.1	线偏振光的产生——起偏器	273
13.5.2	圆偏振光和椭圆偏振光的产生	275
13.5.3	偏振光的检测	275
13.6	偏振光的矩阵表示	276
13.6.1	偏振光的矩阵表示法	276
13.6.2	正交偏振矩阵	277
13.6.3	偏振器件的矩阵表示方法	277
13.7	偏振光的干涉	279
13.7.1	平行偏振光的干涉	280
13.7.2	会聚偏振光的干涉	283
13.8	电光效应	285
13.8.1	泡克耳斯效应	285
13.8.2	克尔效应	288
13.8.3	电光效应的应用	289
13.9	旋光效应	290

13.9.1 晶体的旋光效应	290
13.9.2 磁致旋光效应	291
知识点	293
例题	293
习题	297
参考文献	299

第 1 章 几何光学的基本概念和基本定律

几何光学是以光线为基础,以几何方法研究光在介质中传播规律和光学系统成像规律的光学理论。本章首先介绍几何光学中的一些基本概念,然后阐述几何光学的理论基础——四大基本定律,最后给出成像的基本概念和完善成像条件。

1.1 几何光学的基本概念

1. 光波

光就其本质而言是一种电磁波,其波长范围为 $10\text{nm} \sim 10^6\text{nm}$ 。波长在 $400\text{nm} \sim 760\text{nm}$ 的光波能够被人眼感知,称为可见光。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。

不同波长的光波在真空中具有相同的传播速度, $c = 3 \times 10^8\text{m/s}$ 。光波在介质中的速度比在真空中要慢,且随波长的不同而不同。

2. 光源和发光点

凡能辐射光能的物体统称为发光体或光源。在几何光学中,一切自身发光或受到光照而反射光的物体均视为发光体。

发光体可看作由许多发光点或点光源组成。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。

3. 光波面

发光体向四周辐射光波,在某一时刻光振动相位相同的各点所构成的曲面,或者说某一瞬间波动传播所到达的曲面称为波面。

波面按形状可以分为规则波面(如球面、平面)和不规则波面(任意曲面)。在各向同性均匀介质中,点光源所发出光波的波面是以发光点为中心的一系列同心球面,这种波称为球面波。在距离发光点无限远处,波面形状可视为平面,这种波称为平面波。偏离以上规则波面的任意曲面为不规则波面。

4. 光线和光束

在几何光学中研究光的传播时,其物理模型为光线而不是光波。光线是自光源发出携带能量且具有方向的几何线。光线与光波之间有着对应关系:光线就是波面的法线,也就是说,波面就是所有光线的垂直曲面。

光线的集合称为光束。常见的光束有如下三种:

(1) 同心光束:相交于同一点或由同一点发出的一束光线(图 1-1(a)),它所对应的波面为球面;

(2) 平面光束:没有交点而且相互平行的一组光线(图 1-1(b)),它所对应的波面为平面;

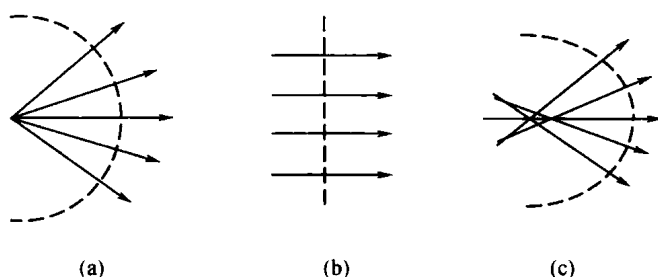


图 1-1 常见的光束与波面

(3) 像散光束: 不聚交在一点的光束(图 1-1(c)), 其所对应的波面为非球面。

1.2 几何光学的基本定律

几何光学中, 将光的传播规律总结为光的直线传播定律、光的独立传播定律、光的反射定律和折射定律, 这四大基本定律构成了几何光学的理论基础。

1. 光的直线传播定律

在各向同性均匀介质中光沿着直线传播, 这就是光的直线传播定律。自然界中的很多现象都可以用这一理论解释, 如影子的形成、日食和月食、小孔成像等。但应当注意, 这一原理有其局限性, 当光经过狭缝和小孔时可能因衍射而出现偏离直线传播的现象, 而在非均匀介质中光线会因折射而发生弯曲。

2. 光的独立传播定律

来自不同光源的光线在空间某处相遇时彼此互不影响, 各个光束独立传播, 这就是光的独立传播定律。这一定律告诉我们, 当考虑某一光束的传播问题时, 可以不考虑其他光线对它的影响, 从而简化问题。但应当指出, 光的独立传播定律仅适用于不同光源发出的光线。对于同一光源发出而后被分开的两束光, 在相遇时可能产生干涉, 此时独立传播定律不成立。

3. 光的反射定律和折射定律

当一束光照在两种介质的分界面上时, 一部分光线被反射回原来的介质, 称为反射光线, 另一部分光线透过分界面进入第二种介质, 称为折射光线, 如图 1-2 所示。反射定律

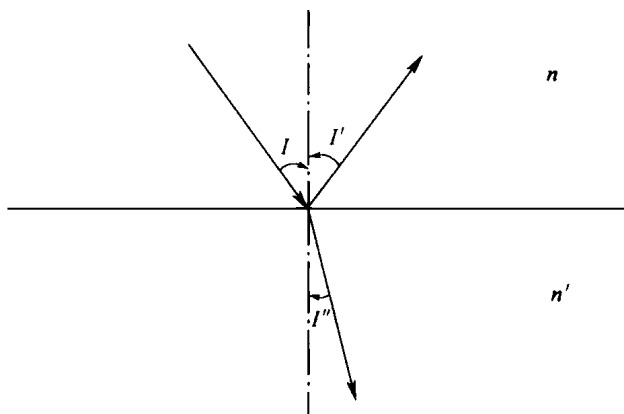


图 1-2 光的反射和折射

和折射定律给出了反射光线和折射光线的传播规律。为了表述这些定律,首先定义一些物理量:

- (1) 入射角:入射光线和界面法线之间的夹角,以 I 表示。
- (2) 反射角:反射光线和界面法线之间的夹角,以 I' 表示。
- (3) 折射角:折射光线和界面法线之间的夹角,以 I'' 表示。
- (4) 入射面:入射光线和界面法线构成的平面。

反射定律:①反射光线位于入射面内;②反射光线与入射光线分居法线两侧;③反射角等于入射角。根据符号规则,即

$$I = -I' \tag{1-1}$$

折射定律:①折射光线位于入射面内;②入射角和折射角的正弦比为常数,该常数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。该常数与入射角无关,仅由两种介质的性质决定,即

$$\frac{\sin I}{\sin I''} = \frac{n'}{n} \tag{1-2}$$

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速度均为 c ,而在不同介质中的速度 v 各不相同。介质折射率的定义为

$$n = \frac{c}{v} \tag{1-3}$$

由上式可以看出,介质折射率描述光在介质中速度减慢的程度。

4. 基本定律的一些推论

1) 反射定律和折射定律的统一

在折射定律中,若令 $n = -n'$,则有 $I = -I'$,即折射定律转化为反射定律。因此,可以把反射看作折射在 $n = -n'$ 时的一种特殊情况。这一结论对于研究系统成像很有意义。

2) 光路可逆

一条光线沿着一定的路线从空间 A 点传播到 B 点,如果在 B 点沿着出射光线相反的方向投射一条光线,则此反向光线必沿同一条路线通过 A 点,光线传播的这种现象称为光路可逆。利用光的直线传播定律以及反射定律和折射定律很容易证明这一点。

光路可逆具有重要实践意义,在研究光线传播规律或进行光学设计时,根据这一现象可以按照实际光线走向进行计算和研究,也可以按照实际光线相反方向(即反向光路)来计算和研究,其结果是完全相同的。这对解决实际问题提供了极大的方便,特别是对透镜设计而言。

3) 全反射

当光投射到两介质分界面时,通常一部分光能被反射回原来的介质,而另一部分光能折射进入第二种介质。当光从光密介质(折射率高的介质)入射到光疏介质(折射率低的介质)界面时,光全部反射回原介质,这种现象称为全反射。

介质 n 中的发光点 A 向各个方向发出光线,入射到介质 n 和 n' 的分界面上($n > n'$)。根据折射定律, $I'' > I$ 。如图 1-3 所示,随着入射角 I 不断增大,相应的折射角 I'' 也不断增大。当入射角增大到 I_m 时,折射角 $I'' = 90^\circ$ 。这时,折射光线掠过两介质的分界面,且强

度趋于零。当入射角大于 I_m 时, 折射光线不再存在, 入射光线全部反射。折射角 $I'' = 90^\circ$ 所对应的入射角称为全反射临界角, 用 I_m 表示。根据折射定律, 可得

$$\sin I_m = \frac{n'}{n} \tag{1-4}$$

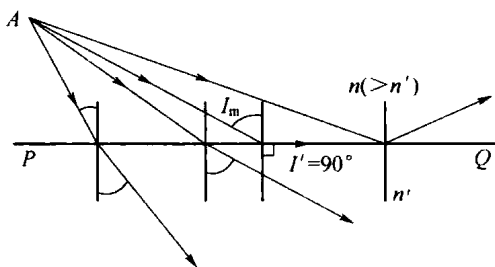


图 1-3 光的全反射

全反射现象在光学仪器和光学技术中有着广泛而重要的应用, 主要应用于反射棱镜和光学纤维。此外, 折射率测量和分划板刻线的照明等也都应用了全反射原理。

1.3 光学系统

光学系统通常由若干光学元件按照一定方式组合而成, 图 1-4 为开普勒望远系统。组成成像光学系统的光学元件基本上有以下几类:

- (1) 透镜: 单透镜按其形状和作用可以分为两类, 即会聚透镜, 特点是中心厚边缘薄, 对光束起会聚作用; 发散透镜, 特点是中心薄边缘厚, 对光束起发散作用。
- (2) 反射镜: 按形状可以分为平面反射镜和球面反射镜。而球面反射镜又分为凹面镜和凸面镜。
- (3) 棱镜: 在成像光学系统中一般采用反射棱镜和折射棱镜。
- (4) 平行平板: 两个相互平行的平面所构成的折射零件。

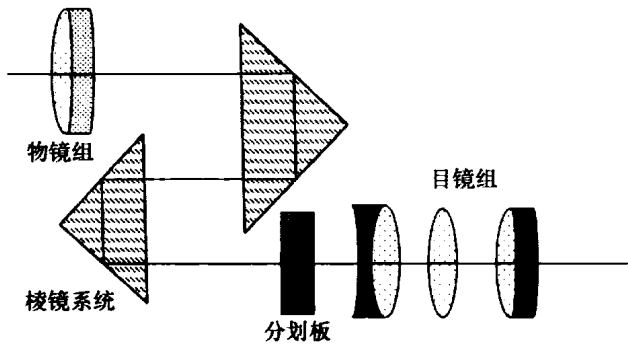


图 1-4 开普勒望远系统结构图

光学元件由一些折射面包围着一一定折射率的介质或一些反射表面组成。这些表面可以是平面(可看作半径无穷大的球面)、球面, 也可以是非球面。光学元件均由球面构成的系统称为球面系统; 如果光学系统中含有非球面则称为非球面系统。各表面曲率中心

在同一直线上的光学系统称为共轴光学系统,该直线称为光轴;各表面曲率中心不在同一直线上的光学系统称为非共轴光学系统。实际上,光学系统绝大部分属共轴球面光学系统,非共轴光学系统和非球面光学系统只在少数仪器中使用。因此,在几何光学中主要研究共轴球面光学系统。

1.4 成像与理想成像

1.4.1 成像的概念

光学系统可以分为成像光学系统和非成像光学系统。成像光学系统的主要作用是对物体成像,以扩展人眼的功能。那么,什么是成像?

由几何光学的观点来看,如图 1-5 所示,发光点 A 发出了许多光线,将一块透镜放在适当的位置,则点 A 发出的一部分光线就射入透镜。如果射入透镜的光线在透镜的折射作用下仍会聚交于一点 A' ,则称 A' 为 A 的像, A 称为 A' 的物, A 和 A' 之间的这种物像对应关系称为共轭,物点 A 和像点 A' 之间沿光轴的距离 AA' 称为共轭距。

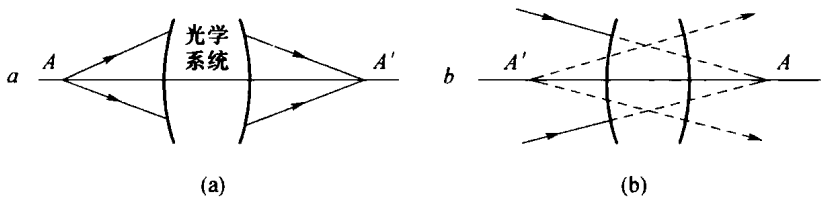


图 1-5 物点经光学系统之后的像点

物和像皆有虚实之分,由实际光线相交形成的点称为实物点或实像点,如图 1-5 (a) 所示。由这样的点所构成的物和像称为实物和实像。实像能用屏幕、底片和光电探测器(如 CCD、CMOS 等)来接收和记录。由实际光线的延长线相交所形成的点称为虚物点和虚像点,如图 1-5 (b) 所示。由这样的虚点所构成的物和像称为虚物和虚像。虚像不能在屏幕、底片和光电探测器上接收或记录,只能为人眼所感受。

物和像是相对的,可以相互转化的。如一个物体经多个光学系统成像,那么前面光学系统所成的像即为后一个光学系统的物。

物所在的空间称为物空间,像所在的空间称为像空间,它们的范围都为 $(-\infty, +\infty)$,若规定光线自左向右行进,那么整个光学系统第一面左方的空间为实物空间,右方的空间为虚物空间;整个光学系统最后一面右方的空间为实像空间,左方的空间为虚像空间。但是,在进行光学计算时,物方折射率应按实际入射光线所在介质的折射率来计算,像方折射率应按实际出射光线所在介质的折射率来计算,而不管是实物还是虚物,是实像还是虚像。

1.4.2 完善成像的条件

一个物点发出的全部光线通过光学系统以后仍相交于一点,即每一个物点对应着唯一的像点,这就是完善成像(“点物”对应于“点像”)。也就是说,入射光为同心光束时,

出射光也为同心光束。

由波面与光线的关系可知,球面波对应于同心光束。因此,光学系统成完善像的条件还可以表述为:入射波面为球面波时,出射波面也为球面波。

【知识点】

本章主要介绍了几何光学的基本概念和基本定律,另外还对成像的基本概念和完善成像条件进行了描述,它是整个几何光学的理论基础。

- (1) 掌握光波、光源、光线、波面与光束的定义。
- (2) 掌握光的直线传播定律、光的独立传播定律、光的反射定律和折射定律。
- (3) 掌握全反射概念和产生条件。
- (4) 掌握成像的基本概念、物像虚实的判断方法和完善成像条件。

【例题】

例 1-1 一束光由水 ($n = 1.33$) 进入玻璃 ($n' = 1.52$), 若以 45° 角入射, 求其折射角。

解: 根据折射定律 $\frac{\sin I}{\sin I'} = \frac{n'}{n}$, 其中 $n = 1.33, n' = 1.52, I = 45^\circ$; 则

$$\sin I' = \frac{n \times \sin I}{n'} = \frac{1.33 \times \sin 45^\circ}{1.52} = 0.6187$$
$$I' = \arcsin 0.6187 = 38.2^\circ$$

例 1-2 游泳者在水中向上仰望, 能否感觉到整个水面都是亮的?

解: 由于水的折射率大于空气的折射率, 所以当光线由水进入空气时, 由光密介质进入光疏介质, 可能发生全反射。因此, 游泳者在水中仰望天空, 不能感觉到整个水面是明亮的, 而只能看到一个明亮的圆, 其大小与游泳者所在的水深有关。

【习题】

1. 证明光线通过平行平板时出射光线与入射光线永远平行。
2. 池边一个人观察池底一石头, 水深 1m。若视线与水面法线的角度为 60° , 水的折射率为 1.33。试问石块像的视觉深度为多少?
3. 物体通过透镜成一虚像, 用屏幕是否可以接收到这个像? 如果用人眼观察, 是否可以看到这个像?
4. 一物体经针孔相机在屏上成一 60mm 大小的像, 若将屏拉远 50mm, 则像的大小变为 70mm, 求屏到针孔的初始距离。