



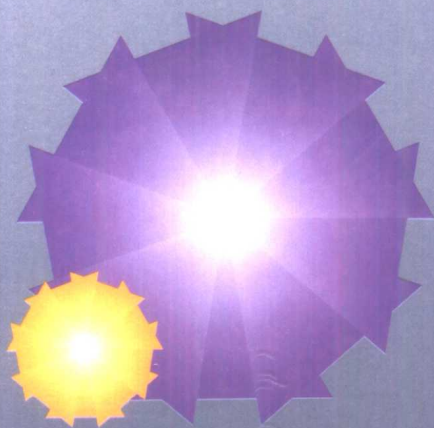
普通高等教育“九五”国家级重点教材

3

普通高等教育机电类规划教材

工程光学

天津大学 郁道银 主编
浙江大学 谈恒英



机
械
工

133

机械工业出版社

普通高等教育“九五”国家级重点教材
普通高等教育机电类规划教材

工 程 光 学

天津大学 郁道银 主 编
浙江大学 谈恒英



机械工业出版社

本书为“九五”国家级重点教材,系统地介绍了工程光学的基本原理、方法及其应用,其主要内容包括几何光学与成像理论(上篇)和物理光学(下篇)。

上篇共分九章,系统地介绍了几何光学的基本定律与成像理论、理想光学系统、平面光学系统、光学系统中的光束限制、光度学与色度学基础、光线的光路计算与像差理论、典型光学系统、现代光学系统、光学系统的像质评价与像差公差。

下篇共分七章,系统地介绍了光的电磁性质、光波的叠加与分析、光的干涉、光的衍射与傅里叶光学、光的偏振和晶体光学基础、光的量子性与激光、光纤与导波光学以及近年来最新发展的二元光学、光调制、半导体激光和光子学概念等。

本书可作为高等学校仪器仪表类、光电信息工程、测控技术及仪器和其它相近专业的教材,亦可作为物理和光学专业的选修课教材或参考书,也是从事光学和光电技术、仪器仪表技术和精密计量及检测技术的工程技术人员的一本有用的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

工程光学/郁益银,谈恒英主编.—北京:机械工业出版社,1999.4(2000.1重印)
普通高等教育机电类规划教材
ISBN 7-111-06864-5

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(1999)第74737号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)
责任编辑:韩雪清 版式设计:冉晓华 责任校对:刘志文
封面设计:姚毅 责任印制:路琳
北京市密云县印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行
2000年1月第1版第2次印刷
787mm×1092mm¹/₁₆·27印张·660千字
2 001—4 000册
定价:36.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换
本社购书热线电话(010)68993821、68326677-2527

前 言

本书是根据国家教育部确定的国家级重点教材和原机械部确定的部级重点教材精神,并根据拓宽专业口径的原则而编写的。

本教材充分体现了高等学校教学改革对教学内容和课程体系改革的需要,在注重论述光学基本原理的同时,紧密结合工程实际,列举了大量的实际应用例子,有利于读者较全面地掌握光学基本理论和实际应用。在内容安排上,既包含有传统的光学理论和光学系统,又涉及现代光学的发展及其应用,努力反映光学的现代面貌。为了配合教学改革的要求,本教材拟配备多媒体教学光盘,以达到更新教学手段,增加课堂信息量,提高教学质量的目的。

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。

上篇共分九章,系统地介绍了几何光学的基本定律与成像理论、理想光学系统的光学参数与成像特性、平面与平面镜成像系统、光学系统中的成像光束限制、光度学和色度学的基本原理、光学系统的光线光路计算和像差基本理论、典型光学系统和现代光学系统的成像特性和设计要求、光学系统的像质评价和像差公差。与以往教材不同的是增加了现代光学系统原理一章,简要地介绍了激光光学系统、傅里叶变换光学系统、扫描光学系统、阶跃型光纤光学系统、梯度折射率光纤光学系统和光电光学系统的光学成像特性及其应用。这些新型的光学系统与经典光学系统相比,其光学成像特性与设计要求等方面均有较大差异,且近年来在光电仪器和光电系统中经常应用。

下篇共分七章,详细地阐述了光的电磁性质、光在各向同性介质界面上的传播规律和光波的叠加与分析、光波的干涉和典型干涉装置与应用、光波的衍射和傅里叶光学的基本原理、光的偏振及其在晶体中的传播、光的量子性和激光、光纤和导波光学。除了传统内容之外,进一步充实了傅里叶光学、全息术、光学信息处理、光学传递函数和晶体光学的内容。考虑到现代光学的发展及其应用,增加了二元光学、光调制、半导体激光、导波光学和光子学方面的基本概念。

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)和广州师范学院梁铨廷教授(下篇)主审。参加编写的有天津大学郁道银(八、九章)、田学飞(五章),清华大学毛文炜(二、四章),武汉测绘科学大学何平安(一、三章),长春光机学院王文生(六、七章),浙江大学谈恒英(十、十四章),清华大学何庆声(十二、十三章、附录),上海理工大学曹俊卿(十一章),南京理工大学赵琦(十五、十六章)。本书上篇由郁道银定稿,下篇由谈恒英定稿。此外,天津大学的张以谟教授、胡鸿章教授审阅了本书,并提出了许多宝贵意见,毛义和于为为本书的绘图及校对工作付出了辛劳,在此一并致谢。

本书可作为高等学校仪器仪表类、测控技术及仪器、光电信息工程和其它相近专业的教材,亦可作为物理和光学专业的选修课教材或参考书,也是从事光学和光电技术、仪器仪表技术和精密计量及检测技术的工程技术人员的参考书。

由于作者水平有限,衷心希望广大读者对书中的不足之处给予批评指正。

编 者

1998年11月

目 录

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	1	第二节 光传播过程中光学量的变化	
第一节 几何光学的基本定律	1	规律	67
第二节 成像的基本概念与完善成像		第三节 成像系统像面的光照度	70
条件	5	第四节 颜色的分类及颜色的表现特征 ..	74
第三节 光路计算与近轴光学系统	6	第五节 颜色混合及格拉斯曼颜色混合	
第四节 球面光学成像系统	8	定律	74
习题	12	第六节 颜色匹配	75
第二章 理想光学系统	14	第七节 色度学中的几个概念	77
第一节 理想光学系统与共线成像		第八节 颜色相加原理及光源色和物体色的	
理论	14	三刺激值	79
第二节 理想光学系统的基点与基面	16	第九节 CIE 标准色度学系统	80
第三节 理想光学系统的物像关系	19	第十节 均匀颜色空间及色差公式	89
第四节 理想光学系统的放大率	24	习题	91
第五节 理想光学系统的组合	26	第六章 光线的光路计算及像差理论	93
第六节 透镜	32	第一节 概述	93
习题	36	第二节 光线的光路计算	94
第三章 平面与平面系统	37	第三节 轴上点球差	99
第一节 平面镜成像	37	第四节 正弦差和彗差	103
第二节 平行平板	39	第五节 像散和场曲	106
第三节 反射棱镜	40	第六节 畸变	108
第四节 折射棱镜与光楔	46	第七节 色差	109
第五节 光学材料	49	第八节 波像差	112
习题	50	习题	113
第四章 光学系统中的光束限制	52	第七章 典型光学系统	114
第一节 照相系统和光阑	52	第一节 眼睛及其光学系统	114
第二节 望远镜系统中成像光束的选择 ..	54	第二节 放大镜	118
第三节 显微镜系统中的光束限制与		第三节 显微镜系统	120
分析	56	第四节 望远镜系统	125
第四节 光学系统的景深	58	第五节 目镜	128
习题	63	第六节 摄影系统	129
第五章 光度学和色度学基础	64	第七节 投影系统	133
第一节 辐射量和光学量及其单位	64	第八节 光学系统的外形尺寸计算	135

习题	140
第八章 现代光学系统	142
第一节 激光光学系统	142
第二节 傅里叶(Fourier)变换光学 系统	148
第三节 扫描光学系统	150
第四节 阶跃型光纤光学系统	153
第五节 梯度折射率光纤光学 系统	160
第六节 光电光学系统	165
习题	168

第九章 光学系统的像质评价和像差 公差	169
第一节 瑞利(Reyleigh)判断和中心点亮度	169
第二节 分辨率	170
第三节 点列图	170
第四节 光学传递函数评价成像质量	171
第五节 光学系统的像差公差	172
上篇习题参考答案	176
上篇主要参考文献	178

下篇 物理光学

第十章 光的电磁理论基础	179
第一节 光的电磁性质	179
第二节 光在电介质分界面上的反射和 折射	187
第三节 光在金属表面的反射和透射	198
第四节 光波的叠加	201
第五节 光波的傅里叶分析	209
习题	213
第十一章 光的干涉和干涉系统	217
第一节 光波干涉的条件	217
第二节 杨氏干涉实验	218
第三节 干涉条纹的可见度	220
第四节 平板的双光束干涉	223
第五节 典型的双光束干涉系统及其 应用	228
第六节 平行平板的多光束干涉及其 应用	234
习题	243
第十二章 光的衍射	247
第一节 光波的标量衍射理论	247
第二节 典型孔径的夫琅和费衍射	252
第三节 夫琅和费衍射与傅里叶 变换	258
第四节 光学成像系统的衍射和 分辨本领	262
第五节 多缝的夫琅和费衍射	264
第六节 衍射光栅	267
第七节 二元光学元件	273

第八节 菲涅耳衍射	277
习题	283
第十三章 傅里叶光学	287
第一节 平面波的复振幅分布和空间 频率	287
第二节 透镜的傅里叶变换性质和 成像性质	289
第三节 相干成像系统分析及相干传递 函数	293
第四节 非相干成像系统分析及光学传递 函数	298
第五节 阿贝成像理论与波特实验	302
第六节 光学信息处理	306
第七节 全息术	313
习题	319
第十四章 光的偏振和晶体光学基础	322
第一节 偏振光概述	322
第二节 光在晶体中的传播	324
第三节 晶体光学性质的几何表示	329
第四节 光波在晶体表面的折射和 反射	335
第五节 晶体偏振器件	337
第六节 偏振的矩阵表示	340
第七节 偏振光的变换和测定	345
第八节 偏振光的干涉	348
第九节 磁光、电光和声光效应	354
习题	368
第十五章 导波光学基础	371

第一节	光在光导纤维中的传播	371	第三节	激光的基本原理	394
第二节	光在平板光波导中的传播	377	第四节	激光器的类型	401
第三节	导波光学的应用	383	第五节	半导体激光器	404
习题	.....	386	第六节	光子学简介	409
第十六章	光的量子性和激光基础	387	习题	.....	410
第一节	光的量子性	387	附录	.....	411
第二节	光的自发发射、受激发射与 受激吸收	391	下篇习题参考答案	.....	419
			下篇主要参考文献	.....	423

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

几何光学主要是以光线为基础、用几何的方法来研究光在介质中的传播规律及光学系统的成像特性。本章主要介绍几何光学的基本定律、成像的概念和完善成像的条件、光路计算和近轴光学系统以及球面成像系统。

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。波长在 $400 \sim 760\text{nm}$ 之间的电磁波能为人眼所感知,称为可见光;波长大于 760nm 的为红外光;波长小于 400nm 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。

可见光随波长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。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、紫七种颜色的光。

通常,能够辐射光能量的物体,称为发光体或光源。发光体可看作由许多发光点或点光源组成,每个发光点向四周辐射光能量。在几何光学中,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,某时刻其振动位相相同的点所构成的面称为波阵面,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。

通常,波面可分为平面波、球面波和任意曲面波。与平面波对应的光束称为平行光束,与球面波对应的光束

称为同心光束,而同心光束可分为会聚光束和发散光束,如图 1-1 所示。同心光束经实际光学系统后,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光波。

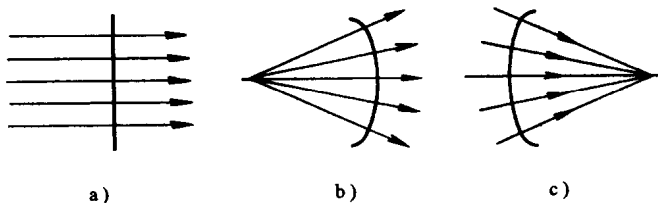


图 1-1 波面与光束

- a) 平面光波与平行光束 b) 球面光波与发散光束
c) 球面光波与会聚光束

二、几何光学基本定律

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,它是我们研究各种光的传播现象和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,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。但这一定律是有局限性的,当光经过小孔或狭缝时,将不再沿直线方向传播,发生“衍射”现象。

(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。在各光束的同一交会点上,光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。这一定律的局限性在于没有考虑光的波动性质,当两束光是由光源上同一点发出、经不同途径传播后在空间某点交会时,交会点处的光强有可能不再是各光束光强度的简单叠加,而是根据两束光所走过的光程不同,可能加强,也可能减弱,这种现象称为光的干涉现象。

(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了光在同一均匀介质中传播的规律,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时的现象和规律。

当一束光投射到两种均匀介质的光滑分界面上时,一部分光被光滑表面“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现象,透过光滑表面的这部分光称为折射光。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。

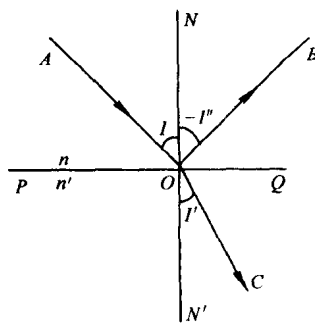


图 1-2 光的反射与折射现象

如图 1-2 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 O 点处的法线。入射光线、反射光线和折射光线与法线的夹角 I 、 I'' 和 I' 分别称为入射角、反射角和折射角,它们均以锐角度量,由光线转向法线,顺时针方向旋转形成的角度为正,反之为负。

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,且反射角与入射角的绝对值相等,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的大小无关,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—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

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

通常写为

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

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,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

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

这就是折射率的定义。由于真空的折射率为 1,因此介质相对于真空的折射率称为介质的绝对折射率。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,空气的折射率为 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 $I' = -I$,即折射定律可转化为反射定律。这一结论是很有意义的。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) 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,我们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(1-3)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 $n' < n$,则 $I' > I$,折射光线相对入射光线而言,更偏离法线方向,如图 1-3 所示。当入射角 I 增大到某一程度时,折射角 I' 达到 90° ,折射光线沿界面掠射出去,这时的入射角称为临界角,记为 I_m 。

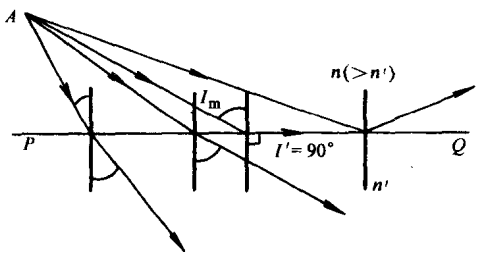


图 1-3 光的全反射现象

由折射定律公式(1-3)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不能折射进入第二种介质,而全部反射回第一种介质,即发生了全反射现象。

发生全反射的条件可归结为:① 光线从光密介质射向光疏介质;② 入射角大于临界角。

光学仪器中,常常根据全反射原理制成转折光路的各种全反射棱镜,代替平面反射镜,以减少反射时的光能损失,图 1-4 所示为一种最常用的等腰直角棱镜。从理论上说,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,广泛应用于光通信的光学纤维(简称光纤)和各种光纤传感器,其最基本的原理就是利用全反射原理传光。图 1-5 表示了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,只要满足一定的条件,光就能在光

纤内以全反射的形式传输很远的距离。将许多单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,用一根光缆将光能传入体内用于照明,而用另外一根光缆将光学系统所成图像传递出来,供人眼观察(光纤光学系统在第八章中详述)。

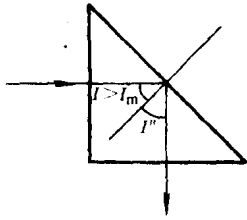


图 1-4 全反射棱镜

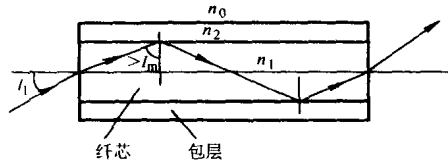


图 1-5 光纤的全反射传光原理

(五) 光路的可逆性

在图 1-2 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。

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。

光程是指光在介质中传播的几何路程 l 与该介质折射率 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。

费马原理是这样表述的:光从一点传播到另一点,其间无论经过多少次折射或反射,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。所以费马原理又叫极端光程定律。

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,光线将不再沿直线方向传播,其轨迹是一空间曲线,如图 1-6 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,根据费马原理,此光程应具有极值,即式(1-5)表示的一次变分为零,即

$$\delta s = \delta \int_A^B n dl = 0 \quad (1-7)$$

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的公理,可以立即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,留待习题中大家证明。

四、马吕斯定律

在各向同性的均匀介质中,光线为波面的法线,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、光线与光程的关系。

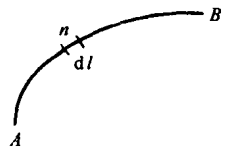


图 1-6 非均匀介质中的光线与光程

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、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三个基本定律之一,而把另两个作为其基本定律的推论。

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间称为物空间,把像所在的空间称为像空间。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、反射镜等)组成,而每个光学元件都是由表面为球面、平面或非球面组成的具有一定折射率的介质构成。如果组成光学系统的各个光学元件的表面曲率中心同在同一条直线上,则该光学系统称为共轴光学系统,该直线叫作光轴。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 1-7 所示为一共轴光学系统,由 O_1 、 O_2 、 \dots 、 O_k 等 k 个面组成。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。

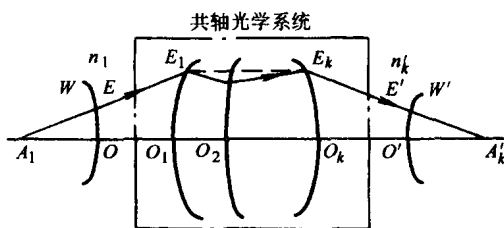


图 1-7 共轴光学系统及其完善成像

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。由于球面波与同心光束对应,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,则完善成像条件还可以表述为:物点 A_1 及其像点 A'_k 之间任意二条光路的光程相等,即

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

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

或写为

$$(AA'_k) = \text{常数}$$

三、物、像的虚实

根据同心光束的会聚和发散,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 1-8 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。这里需要说明的是,虚物不能人为设定,它是前一系统所成的实像被当前系统所截而得。实像能用屏幕或胶片记录,而虚像只能为人眼所观察,而不能被记录。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。

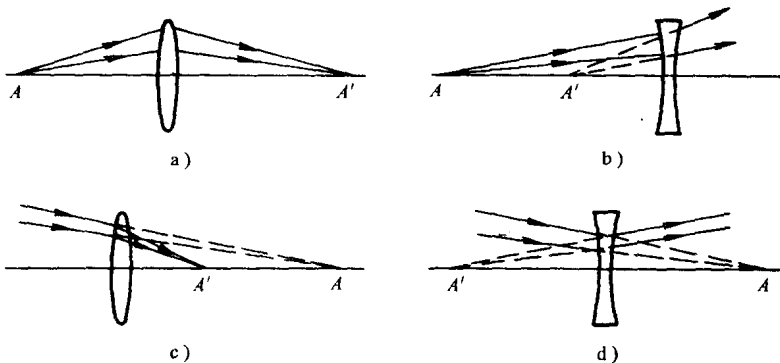


图 1-8 物、像的虚实

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。平面可以看成是球面半径 $r \rightarrow \infty$ 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 1-9 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,以 r 来表示。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。我们把通过物点和光轴的截面叫做子午面,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却只有一个。在子午面内,光线的位置由以下两个参量确定:

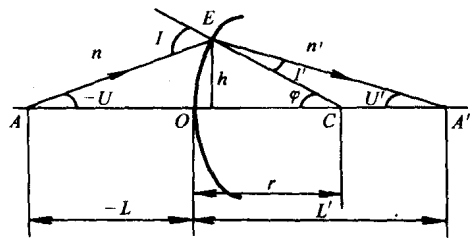


图 1-9 光线经过单个折射球面的折射

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,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相同,并加“'”以示区别。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,即我们通常所说的如下符号规则:

(1) 沿轴线段(如 L 、 L' 和 r):规定光线的方向自左向右,以折射面顶点 O 为原点,由顶点到光线与光轴交点或球心的方向和光线传播方向相同,其值为正,反之为负。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,在光轴以上为正,在光轴以下为负。

(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。

(4) 光线与法线的夹角(如入射角 I 、折射角 I' 、反射角 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 φ):由光轴以锐角方向转向法线,顺时针为正,逆时针为负。

(6) 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。

这里,符号规则是人为规定的,但一经规定,必须严格遵守。只有如此,才能使某一情况下推导的公式具有普遍性。图中各量均用绝对值表示,因此,凡是负值的量,图中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 1-9 所示,在三角形 AEC 中,应用正弦定律,有

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

于是

$$\sin I = (L-r) \frac{\sin U}{r} \quad (1-8)$$

在 E 点应用折射定律,有

$$\sin I' = \frac{n}{n'} \sin I \quad (1-9)$$

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

$$U' = U + I - I' \quad (1-10)$$

在三角形 $A'EC$ 中应用正弦定律

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

于是得像方截距

$$L' = r \left(1 + \frac{\sin I'}{\sin U'} \right) \quad (1-11)$$

公式(1-8)至式(1-11)即为子午面内实际光线的光路计算公式。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所有光线经折射后,均会聚于 A' 点。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 1-10 所示。即同心光束经折射后,出射光束不再是同心光束,这表明,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”。

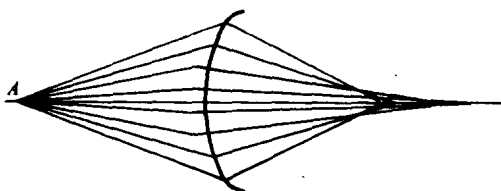


图 1-10 轴上点成像的不完善性

三、近轴光线的光路计算

当孔径角 U 很小时, l 、 l' 和 u 都很小, 这时, 光线在光轴附近很小的区域内, 这个区域叫做近轴区, 近轴区内的光线叫做近轴光线。由于近轴光线的有关角度量都很小, 在公式(1-8) ~ 式(1-11) 中, 将角度的正弦值用其相应弧度值来代替, 并用相应小写字母表示, 则有

$$i = \frac{l - r}{r}u \quad (1-12)$$

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

$$u' = u + i - i' \quad (1-14)$$

$$l' = r \left(l + \frac{i'}{u'} \right) \quad (1-15)$$

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。

在近轴区内, 有

$$l'u' = lu = h \quad (1-16)$$

据此, 将式(1-12) 和式(1-15) 中的 i 和 i' 代入式(1-13), 得

$$n' \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{l'} \right) = n \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{l} \right) = Q \quad (1-17)$$

$$n'u' - nu = (n' - n) \frac{h}{r} \quad (1-18)$$

$$\frac{n'}{l'} - \frac{n}{l} = \frac{n' - n}{r} \quad (1-19)$$

式(1-17) 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, 随共轭点的位置而异。式(1-18) 表示了物、像方孔径角的相互关系。这两式在以后均有重要应用。

式(1-19) 表明了物、像位置关系, 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' , 就可求出与之共轭的物体位置 l 。

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, 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予以讨论。

一、单个折射面成像

(一) 垂轴放大率 β

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 1-11 所示, 令 $AB = y$, $A'B' = y'$, 则定义垂轴放大率 β 为像的大小与物体的大小之比, 即

$$\beta = \frac{y'}{y}$$

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

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

利用式(1-17), 得

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

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, β 为常数, 故像与物相似。

根据 β 的定义及式(1-21), 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, 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 α

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, 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 α 来表示轴向放大率, 即

$$\alpha = \frac{dl'}{dl} \quad (1-22)$$

对于单个折射球面, 将式(1-19) 两边微分, 得

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

于是得轴向放大率

$$\alpha = \frac{dl'}{dl} = \frac{nl'^2}{n'l^2} \quad (1-23)$$

这就是轴向放大率的计算公式, 它与垂轴放大率的关系为

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

由此可得出两个结论: ① 折射球面的轴向放大率恒为正, 当物点沿轴向移动时, 其像点沿光轴同方向移动; ② 轴向放大率与垂轴放大率不等, 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 γ

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 之比值, 用 γ 来表示, 即

$$\gamma = \frac{u'}{u} \quad (1-25)$$

利用 $l'u' = lu$, 得

$$r = \frac{l}{l'} = \frac{n}{n'} \frac{1}{\beta} \quad (1-26)$$

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三者之间不是孤立的, 而是密切联系的, 即

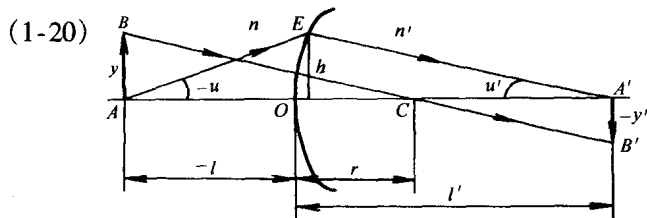


图 1-11 近轴区有限大小的物体经过单个折射球面的成像

$$\alpha\gamma = \frac{n'}{n}\beta^2 \frac{n}{n'\beta} = \beta \quad (1-27)$$

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

$$nuy = n'u'y' = J \quad (1-28)$$

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 与物体所在介质的折射率 n 的乘积为一常数 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。

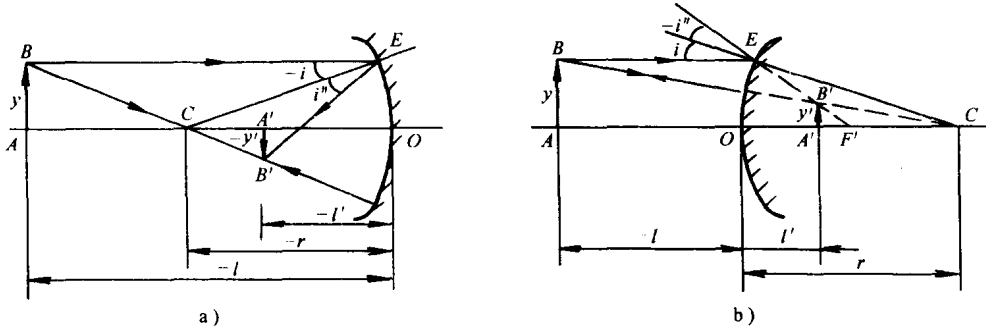


图 1-12 球面镜成像

a) 凹透镜成像 b) 凸透镜成像

二、球面反射镜成像

我们知道,由折射定律得出的结论,只要令 $n' = -n$,就可得到满足反射定律的结论。下面利用这一结论,讨论球面反射镜(简称球面镜)的成像特性。

1. 物像位置公式 在式(1-19)中令 $n' = -n$,则得球面镜的物像位置公式为

$$\frac{1}{l'} + \frac{1}{l} = \frac{2}{r} \quad (1-29)$$

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 1-12 所示。

2. 成像放大率 将 $n' = -n$ 分别代入式(1-21)、(1-23)和式(1-26),得

$$\left. \begin{aligned} \beta &= \frac{y'}{y} = -\frac{l'}{l} \\ \alpha &= \frac{dl'}{dl} = -\frac{l'^2}{l^2} = -\beta^2 \\ \gamma &= \frac{u'}{u} = -1/\beta \end{aligned} \right\} \quad (1-30)$$

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

$$J = uy = -u'y' \quad (1-31)$$

当物点位于球面镜球心,即 $l = r$ 时, $l' = r$,且

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

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光路反射,仍会聚于球心。因此,球面镜对于其球心为等光程面。