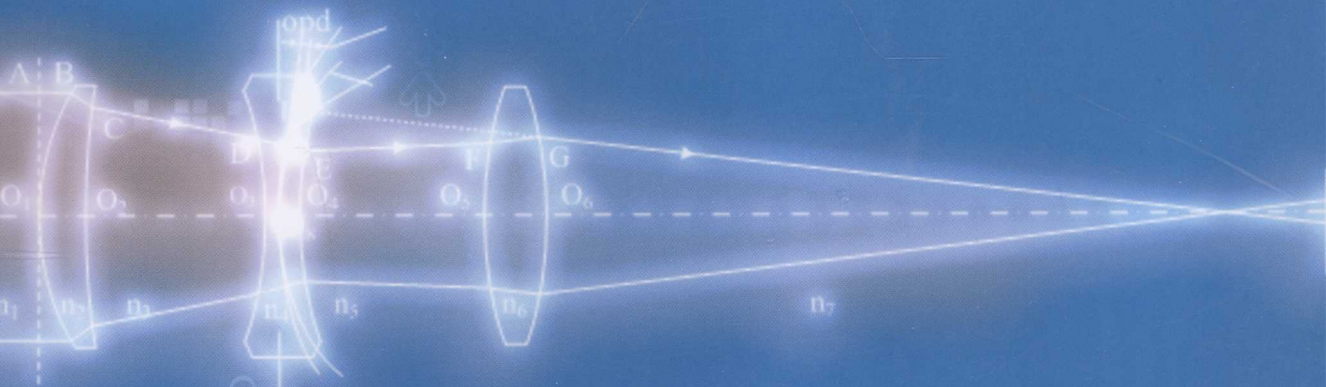


# 现代

XIANDAI  
GONGCHENG GUANGXUE

# 工程光学

主 编 李大海 曹益平  
副主编 张启灿 王琼华



OPTICS

OPTICS

OPTICS

OPTICS



科学出版社

# 现代工程光学

主 编 李大海 曹益平

副主编 张启灿 王琼华

科学出版社

北 京

## 内 容 简 介

本书以几何光学作为主要内容,共12章.第1~5章介绍了几何光学的基础理论;第6章介绍了光度学和色度学的基础知识;第7章介绍了光学系统的像差,包括几何像差、波像差、像差特性曲线及其计算方法;第8~10章概述了常见光学仪器的基本原理;第11章介绍了光学系统的初始结构计算;第12章扼要介绍了像质评价方法和检验等.几何光学的基础理论和像差概论是本书的重点.

本书可作为高等院校光电信息科学与工程、仪器仪表、测控技术及仪器、生物医学工程、电子科学与技术及其他相近专业的本科生和研究生教材,也可作为光学专业的选修课教材或参考书,以及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.

### 图书在版编目(CIP)数据

现代工程光学/李大海,曹益平主编. —北京:科学出版社,2013.9

ISBN 978-7-03-038493-5

I. ①现… II. ①李…②曹… III. ①工程光学 IV. ①TB133

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第203344号

责任编辑:李小锐 / 责任校对:邹慧卿  
责任印制:邝志强 / 封面设计:墨创文化

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

成都创新包装印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2013年9月第一版 开本:787×1092 1/16

2013年9月第一次印刷 印张:26

字数:57 900

定价:48.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

## 前 言

为了满足理论和工程实际相结合的需要,反映现代工程光学的发展和应用,结合国内现有的“应用光学”或“工程光学”教材,我们编写了本书,这也是与国际上光学工程学科发展相适应的需要.相比国内现有的同类教材,本书在内容上没有大的变化,主要包括几何光学、光度学与色度学、像差概论、常见光学仪器这四个部分,但更注重基础理论的掌握、实际应用以及各部分内容的内在联系.其不同之处是,引入了当今欧美发达国家对工程光学的处理方法.具体是:第一,本书采用了有别于现国内教材的符号法则和坐标系统来介绍工程光学的基础理论,它与当今流行的光学设计软件相一致,此外,采用了 *ynu* 近轴光线追迹方法而非小  $l$  公式光线追迹,它使近轴像点位置的追迹计算和共轴理想光学系统性质的分析更加简洁和更具可操作性,而且正反向光线追迹均易实现;第二,将光线和波前这两个概念置于同等重要的地位,从波像差和几何像差这两个角度讨论了光学系统的像差以及它们之间的内在联系,并更注重像差概念的理解和实际光线的行为,便于像差理论的掌握;第三,本书中有关 Cooke 物镜例题的近轴光线追迹和像差分析表格数据,都来自本书介绍的理论和公式,并由本书编写组编程计算完成,该 Cooke 物镜的绝大多数分析计算结果以及部分习题答案均得到了相应 Zemax 软件模型的验证,因此便于读者掌握工程光学的基础理论和光学设计软件;第四,本书引入了当前光学设计软件常用的像质评价方法,并在附录部分增加了工程光学的常用公式、专业术语中英文对照表及关键词索引,便于读者对国外文献的阅读和对国外相关软件的掌握.因此,本书不仅注重了工程光学的基础理论,而且能与当今应用软件配合学习使用.

本书的部分资料来自于 University of Arizona 的 John Greivenkamp 教授、Jose Sasain 教授和 James Burge 教授的笔记以及他们提供的资料,全体编者向他们致以衷心的感谢!

本书的编写完成,得到了四川大学苏显渝教授、周焜副教授、陈祯培教授、李继陶教授、陈文静教授的大力支持.四川大学赵悟翔博士编写了第 10 章.本书中的插图、计算、翻译、文字录入和稿件校对由研究生赵霁文、章辰、李萌阳、鄂可伟、陈盈锋、李洪、张充、吕虎、薄健康、刘曦、李水艳、陈志洁、代贞强、郭广饶等完成,全体编者向他们致以衷心的感谢!

本书得到了国家“211 工程”三期建设项目的资助,由李大海、曹益平主编,张启灿、王琼华合作编写完成.

工程光学历史悠久,内容丰富,由于编者水平有限,书中不妥之处在所难免,敬请读者指正.

编 者

2013 年 8 月

# 目 录

31	.....	透镜表面积	1.1.5
32	.....	五位置自准直的透镜表面积	1.1.5
32	.....	等大透镜的透镜表面积	1.1.5
36	.....	透镜	
38	.....	透镜光学系统	章 2 第
38	.....	透镜系统及其光学系统	1.8
<b>前言</b> ..... 1.8			
<b>第 1 章 几何光学基本原理</b> ..... 1			
10	1.1	几何光学的基本概念	1
13	1.1.1	光波、光线与波前	1
14	1.1.2	光束	2
14	1.2	几何光学的基本定律	3
15	1.2.1	基本定律	3
17	1.2.2	矢量形式的折射定律和反射定律	5
20	1.2.3	全反射及其应用	6
20	1.3	费马原理与马吕斯定理	8
23	1.3.1	费马原理	8
25	1.3.2	马吕斯-杜平定理	10
34	1.4	成像的概念	11
35	1.4.1	点物的理想成像条件	11
36	1.4.2	实物与虚物 实像与虚像	12
38	1.4.3	物空间与像空间 物与像的共轭性	13
40	1.5	反射等光程面和折射等光程面	13
40	1.5.1	反射等光程面	13
42	1.5.2	折射等光程面	15
46	1.6	微小线段理想成像条件	15
48	1.6.1	光学余弦条件	16
49	1.6.2	阿贝正弦条件	17
50	1.6.3	赫谢尔条件	17
50		习题	18
<b>第 2 章 球面成像系统</b> ..... 21			
50	2.1	球面折射的光路计算公式	21
51	2.1.1	单折射球面的光路计算公式	22
51	2.1.2	近轴区域的光路计算公式	24
51	2.2	单折射球面的成像放大率	25
53	2.3	共轴球面系统	27
55	2.3.1	过渡公式	27
54	2.3.2	$y$ 光线追迹	29
55	2.3.3	共轴球面系统的放大率	33

2.4	球面反射镜	34
2.4.1	球面反射镜的物像位置公式	35
2.4.2	球面反射镜的成像放大率	35
	习题	36
<b>第3章</b>	<b>理想光学系统</b>	<b>39</b>
3.1	理想光学系统及其成像理论	39
3.1.1	理想光学系统的成像特性	39
3.1.2	共轴理想光学系统的成像特性	40
3.2	共轴光学系统的基面和基点	43
3.2.1	焦点	43
3.2.2	主平面	44
3.2.3	焦距	45
3.2.4	共轴球面系统主平面和焦点位置的计算	45
3.3	理想光学系统的物像关系	50
3.3.1	图解法求像	50
3.3.2	解析法求像	52
3.3.3	光学系统两焦距之间的关系	53
3.3.4	光学系统的光焦度	54
3.3.5	放大率公式	54
3.4	节点和节平面	56
3.5	共轴理想光学系统的组合	58
3.5.1	两光组系统的焦距公式	59
3.5.2	两光组系统的一般公式	60
3.6	透镜与薄透镜	61
3.6.1	透镜的有效焦距与后焦距	61
3.6.2	薄透镜	63
3.7	Scheimpflug 条件	64
3.8	常用镜头的组合特性	65
3.8.1	摄远物镜	65
3.8.2	反摄远物镜	66
	习题	67
<b>第4章</b>	<b>平面镜棱镜系统</b>	<b>71</b>
4.1	平面反射镜	71
4.1.1	单平面镜的成像特性	71
4.1.2	双平面镜的成像特性	73
4.2	反射棱镜	74
4.2.1	反射棱镜的构成与作用	74
4.2.2	反射棱镜的分类	75

4.2.3	屋脊棱镜	76
4.3	反射棱镜的成像性质	77
4.3.1	反射棱镜的视场角	77
4.3.2	反射棱镜成像方向的确定	78
4.3.3	反射棱镜的展开	80
4.4	平行平板及等效空气平板	83
4.4.1	平面折射	83
4.4.2	平行板	84
4.4.3	等效空气平板	85
4.5	折射棱镜和光楔	88
4.5.1	折射棱镜	88
4.5.2	光楔	90
	习题	92
<b>第5章 光学系统中光束的限制</b>		96
5.1	孔径光阑及其确定方法	96
5.1.1	孔径光阑	96
5.1.2	孔径光阑的确定方法	97
5.2	主光线与边光线 视场光阑	98
5.2.1	主光线与边光线	98
5.2.2	视场光阑	99
5.3	渐晕与渐晕光阑	101
5.3.1	通过渐晕光阑产生渐晕	101
5.3.2	入射窗和物平面不重合产生渐晕	102
5.4	消杂光光阑	104
5.5	光学不变量	105
5.5.1	光学不变量的定义	105
5.5.2	拉格朗日-赫姆霍兹不变量	106
5.5.3	望远系统的角放大率	107
5.5.4	无穷远处物体的像高	107
5.5.5	确定任意光线的的数据	108
5.6	景深	109
5.6.1	景深	109
5.6.2	超聚焦距离	110
5.6.3	景深与 $F$ 数的关系	111
5.7	远心光路	111
5.7.1	物方远心光路	112
5.7.2	像方远心光路	113
5.7.3	远心系统的像	113

习题	114
<b>第 6 章 光度学与色度学基础</b>	<b>116</b>
6.1 光通量与发光强度	116
6.1.1 光通量	116
6.1.2 发光强度	119
6.2 光照度与光出射度	121
6.2.1 光照度	121
6.2.2 光出射度	122
6.3 光亮度	123
6.3.1 光亮度的定义	123
6.3.2 余弦辐射体	124
6.3.3 余弦辐射体的光通量、光出射度与亮度之间的关系	125
6.4 面光源产生的照度	126
6.4.1 余弦辐射面在远处产生的照度	126
6.4.2 面光源产生的照度	127
6.4.3 交换定律	129
6.5 亮度在光学系统的传递与像面照度	129
6.5.1 亮度在均匀介质中的传递	129
6.5.2 亮度在两透明介质分界面上的传递	130
6.5.3 小视场大孔径光学系统的亮度传递与像面照度	132
6.6 照明光学系统中光能损失的计算	133
6.6.1 常用的照明系统	133
6.6.2 光能计算	137
6.7 颜色现象	138
6.7.1 颜色现象的生理物理基础	139
6.7.2 光源色与物体色	139
6.7.3 颜色的特征与分类	139
6.7.4 颜色混合	140
6.8 颜色匹配	142
6.8.1 颜色匹配实验	142
6.8.2 颜色匹配方程	143
6.8.3 三刺激值	143
6.8.4 色品坐标及色品图	146
6.9 CIE1931 标准色度系统	147
6.9.1 CIE1931- <i>RGB</i> 表色系统	147
6.9.2 CIE1931- <i>XYZ</i> 表色系统	149
6.9.3 CIE1931- <i>XYZ</i> 色品图 (色度图)	153
6.9.4 光源色和物体色的三刺激值	156



6.9.5	CIE 1964 补充标准色度学系统	157
6.10	主波长与颜色纯度	157
6.10.1	主波长	157
6.10.2	颜色纯度	158
6.11	CIE 标准照明体与标准光源	159
6.11.1	光源的光谱功率分布与色温	159
6.11.2	CIE 标准照明体与标准光源	161
	习题	164
<b>第 7 章</b>	<b>像差概论</b>	<b>167</b>
7.1	像差基本概念	167
7.2	波像差与垂轴像差	168
7.2.1	哈密顿特征函数	168
7.2.2	波前像差与垂轴像差的关系	170
7.3	旋转对称光学系统的光路计算	172
7.3.1	归一化坐标系统	172
7.3.2	光线的光路计算类型	174
7.3.3	光线的光路计算公式	176
7.3.4	初始数据	182
7.4	旋转对称光学系统的像差	185
7.4.1	像差曲线及点列图	185
7.4.2	波像差系数及波像差图	188
7.4.3	波像差的计算	191
7.4.4	瑞利标准	192
7.5	单色像差	196
7.5.1	畸变	196
7.5.2	球差	198
7.5.3	场曲(像面弯曲)	203
7.5.4	像散	205
7.5.5	彗差	215
7.6	色差	221
7.6.1	光学材料	221
7.6.2	位置色差	225
7.6.3	倍率色差	228
7.7	赛德尔初级像差——Seidel 像差	230
7.7.1	赛德尔初级单色像差系数	230
7.7.2	不晕面	235
7.7.3	单薄透镜的赛德尔初级球差系数	236
7.7.4	初级色差系数	239

7.7.5	初级波像差与几何像差	245
	习题	251
<b>第8章</b>	<b>眼睛及显微系统</b>	<b>255</b>
8.1	人眼的构造及其光学特性	255
8.1.1	眼睛的构造	255
8.1.2	人眼的光学特性	257
8.2	放大镜	263
8.2.1	放大镜的视角放大率	263
8.2.2	放大镜的光束限制	265
8.3	显微镜系统及其光学特性	266
8.3.1	显微镜工作原理	266
8.3.2	显微镜的光束限制	267
8.3.3	显微镜的分辨率	268
8.3.4	显微镜的有效放大率	269
8.4	显微镜物镜与目镜	270
8.4.1	显微物镜的特性及类型	270
8.4.2	目镜的特性和类型	272
8.5	显微镜的照明系统	274
8.5.1	照明方式	274
8.5.2	聚光镜	276
	习题	277
<b>第9章</b>	<b>望远系统</b>	<b>278</b>
9.1	望远系统概述	278
9.1.1	望远系统的原理与基本类型	278
9.1.2	望远系统的光束限制	279
9.1.3	望远系统的主要光学性能参数	280
9.2	望远物镜	282
9.2.1	望远物镜的特性和分类	282
9.2.2	折射式望远物镜	283
9.2.3	反射式望远物镜与折反射式望远物镜	284
9.3	内调焦、准直与自准直望远镜	286
9.3.1	内调焦望远镜	286
9.3.2	准直、自准直望远镜	288
9.4	转像系统与场镜	290
9.4.1	棱镜式转像系统	290
9.4.2	单透镜转像系统	291
9.4.3	双组透镜转像系统	292
9.4.4	场镜	293

9.5	望远系统的外形尺寸计算	293
9.5.1	简单开普勒望远系统	294
9.5.2	双透镜转像望远系统	295
9.5.3	带有棱镜转像系统的望远系统	298
9.6	主观亮度	300
9.6.1	人眼的主观亮度	300
9.6.2	通过望远镜观察时的主观亮度	301
	习题	303
<b>第 10 章</b>	<b>摄影及投影系统</b>	<b>304</b>
10.1	照相机的基本结构及其作用	304
10.1.1	主体、镜头及取景器	304
10.1.2	测距器及对焦器	307
10.1.3	快门及其他部件	309
10.2	数码照相机简介	310
10.2.1	数码相机的主要电子部件	310
10.2.2	自动对焦及快门	312
10.2.3	测光系统及曝光模式	312
10.2.4	存储设备及显示屏	313
10.3	摄影物镜的特性和种类	314
10.3.1	摄影物镜的光学特性	314
10.3.2	摄影物镜的种类	315
10.4	摄影系统的技术特性与摄影闪光灯简介	321
10.4.1	摄影系统的技术特性	321
10.4.2	摄影闪光灯	323
10.5	感光材料	325
10.5.1	感光材料的种类	326
10.5.2	感光材料的基本结构与感光成色机理	327
10.5.3	感光材料的感光特性	329
10.6	光电传感器	332
10.6.1	CCD 与 CMOS 图像传感器	332
10.6.2	CCD 与 CMOS 图像传感器的技术特性	333
10.7	投影系统及放映系统	336
10.7.1	投影与放映物镜	336
10.7.2	放映与投影系统的照明	338
	习题	339
<b>第 11 章</b>	<b>光学系统初始结构计算</b>	<b>341</b>
11.1	光学系统的基本像差参量	341
11.1.1	$P$ 、 $W$ 形式的初级像差系数	341

898	11.1.2	薄透镜系统初级像差的 $P$ 、 $W$ 表示式	342
898	11.1.3	像差参量 $P$ 、 $W$ 的归化	344
798	11.1.4	薄透镜组的基本像差参量	347
808	11.1.5	用 $\bar{P}$ 、 $\bar{W}$ 、 $\bar{C}_I$ 表示的初级像差系数	348
008	11.2	双胶合透镜组的 $\bar{P}^\infty$ 、 $\bar{W}^\infty$ 、 $\bar{C}_I$ 与结构参数的关系	348
008	11.3	单薄透镜的 $\bar{P}^\infty$ 、 $\bar{W}^\infty$ 、 $\bar{C}_I$ 与结构参数的关系	353
108	11.4	用 $PW$ 方法求解初始结构的实例	355
808		习题	361
	<b>第 12 章</b>	<b>像质评价、零件的技术要求与检验</b>	<b>362</b>
108	12.1	像质评价	362
108	12.1.1	波像差的均方根值	362
708	12.1.2	斯特列尔比——中心点亮度	363
908	12.1.3	点列图	364
018	12.1.4	点扩展函数	364
018	12.1.5	调制传递函数 (MTF)	365
818	12.1.6	包围能量比	368
818	12.2	光学系统的像差公差	369
818	12.2.1	望远物镜与显微物镜的像差公差	369
118	12.2.2	望远目镜与显微目镜的像差公差	370
118	12.2.3	照相物镜的像差公差	372
818	12.3	光学零件的加工与技术要求	372
128	12.4	常用的像质检验方法	375
128	12.4.1	分辨率检验法	375
828	12.4.2	星点检验法	377
		主要参考文献	379
		主要公式	380
		中英文对照表	383
		部分习题答案	390
		关键词索引	396

## 第 1 章 几何光学基本原理

16 世纪中叶,光具有波动性被提出.惠更斯(C. Huygens, 1690 年)和非涅耳(A. Fresnel, 1818 年)创立了光的波动说,该原理对衍射现象进行了解释.1882 年,基尔霍夫(G. R. Kirchhoff)提出的标量衍射理论为惠更斯-菲涅耳原理提供了完善的数学基础.1801 年,杨氏(T. Young)双缝干涉实验证实了光的波动性.1864 年,麦克斯韦(J. C. Maxwell)的电磁理论指出光是一种电磁波,但是它不能解释光电效应.1905 年,爱因斯坦(A. Einstein)提出了光的粒子说.随着量子理论的发展,光的发射、吸收和光电效应等现象均得到了圆满的解释.事实上,许多实际光学问题并不需要很复杂的抽象的理论进行解释.经典的电磁理论可以看成量子理论的近似,能成功地解释光的反射、折射、偏振、衍射和干涉现象.同样,光波的标量理论是电磁理论的近似,也能处理光的干涉和衍射问题.

若进一步仅以光的直线传播定律、独立传播定律以及光的反射和折射定律为基础,利用光线的概念研究光在各种介质中传播途径的学科,就是广为熟知的几何光学.几何光学以实际观察和实验而得到的基本定律为基础而建立,是光的传播规律在一定条件下的近似,故几何光学有一定的近似性.显然,如果研究对象的几何线度与光波波长相近,则由几何光学得出的结果与实际情况有显著的差别,因此必须用波动光学来进行研究.只有当研究对象的几何线度远大于光波波长时,几何光学和波动光学的结论才一致.几何光学是波动光学当波长趋于零时的极限.在实际应用中,大多数光学零件的线度比光波波长大很多,所以几何光学的理论仍是严密的、正确的.它在应用上比波动光学简单,是光学设计和像差分析的理论基础.

### 1.1 几何光学的基本概念

#### 1.1.1 光波、光线与波前

狭义上说,光波是可以引起人的视觉的电磁波.光波是横波,其振动方向和传播方向垂直.在真空中的传播速度  $c=2.997\ 924\ 58 \times 10^8 \text{ m/s}$ ,在介质中的传播速度小于  $c$ ,且随波长的不同而不同.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 1.1.1 所示.电磁波谱的波长范围分布很宽,短波段  $\gamma$  射线的波长可达到  $0.1 \text{ \AA}$  ( $1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m}$ ),而电磁波谱位于长波段的无线电波波长可达数英里 ( $1 \text{ mi} = 1.609\ 344 \text{ km}$ ).电磁波谱中的长波端电磁辐射主要表现为波动性,而短波端主要表现为粒子性.因此,在电磁波谱中间的光波段将体现出粒子性和波动性,被称为波粒二象性.光波波长极短,可见光在真空中的波长范围介于  $380 \sim 760 \text{ nm}$ .波长大于  $760 \text{ nm}$  的光称为红外光,而波长小于

380nm 的光称为紫外光. 不同波长会引起不同的颜色感觉, 具有单一波长的光称为单色光, 由若干波长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, 激光可以被近似看成单色光. 太阳光由无限多种单色光混合而成, 在可见光部分可以分解为红、橙、黄、绿、青、蓝、紫七色光.

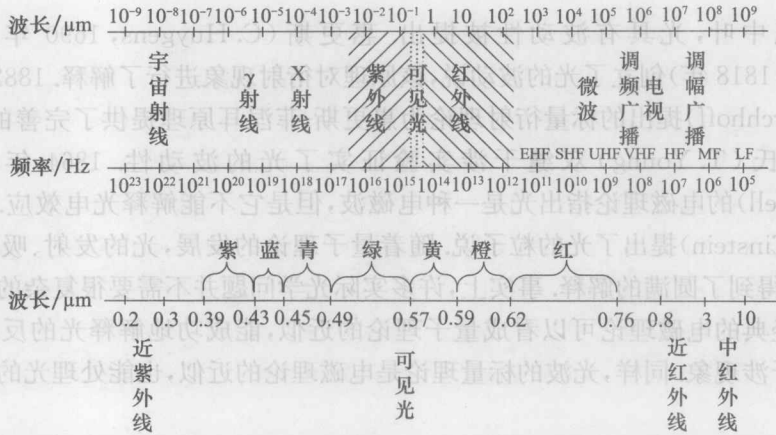


图 1.1.1 电磁波谱

辐射光能的物体称为发光体或光源. 几何光学中的光源包括本身发光的物体和本身不发光但被其他光照明的物体, 并假设发光体是由许多发光点或点光源组成, 且发出的光不相互作用. 发光点所发出的光子在空间中沿某方向传播而形成的轨迹是物理意义上的光线, 如果衍射效应被忽略, 它就被抽象为几何光线. 简言之, 几何光学中的光线就是携带能量并带有方向的几何线. 在各向同性均匀介质中, 发光点发出的光波而形成的光程为常数的面(等位相面)与光线垂直, 若忽略衍射效应, 该物理波前就被称为几何波前. 几何波前除了在衍射现象明显的边界处与物理波前有差异外, 其他性质是一致的. 如果不特别指出, 本书中的波前均指几何波前, 光线与几何波前垂直.

利用几何光线的概念我们可以确定像的位置、几何像差和与波前畸变相关的光瞳函数, 而利用波前的概念可以通过物理光学中对光瞳函数的衍射积分来评价光学系统的成像质量, 如点扩展函数(PSF)、调制传递函数(MTF)和包围能量比等.

在折射率为常数的各向同性介质中, 物点发出的光线沿直线传播, 相应的波前是球心位于物点的球面波. 无限远处的光源发出的光线为平行线. 当光源的几何线度比观察到光源的距离小很多时, 我们也把该光源称为点光源.

### 1.1.2 光束

光波波前的法线束称为光束, 分为同心光束和非同心光束. 光束所对应的波前为球面的光束称为同心光束. 同心光束又分为发散同心光束、会聚同心光束和平行光束. 由一点发出或光线反向延长通过一点的光束称为发散同心光束, 如图 1.1.2(a)和(b)所示. 会聚于一点或延长线会聚于一点的光线束称为会聚同心光束, 如图 1.1.2(c)和(d)所示. 当某

一点光源足够远时,对应球面波的曲率半径可被看成无限大,波前变成了平面波,光线彼此平行,所对应的光束称为平行光束,如图 1.1.2(e)所示.但来自两个不同点光源的光线一般不平行.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 1.1.2(f)所示的非球面波前对应的光束为像散光束.

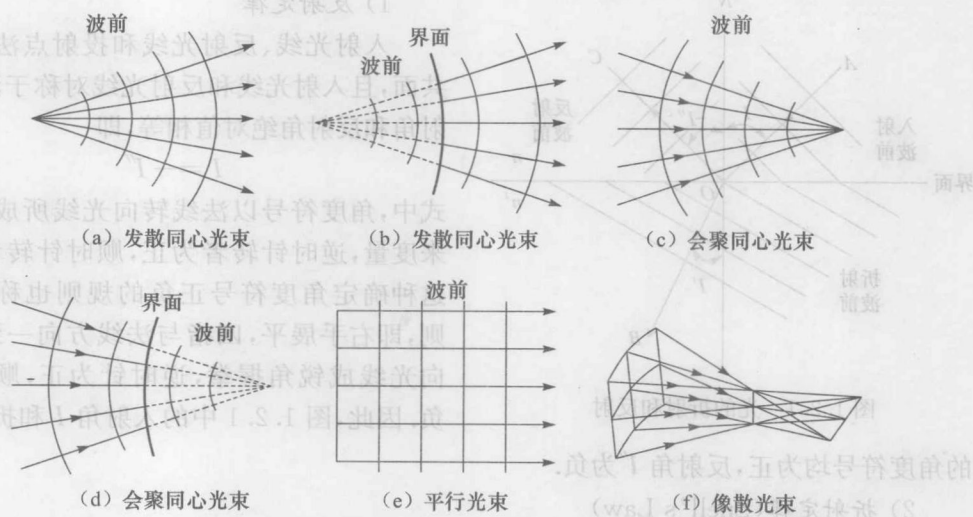


图 1.1.2 光线与波前

## 1.2 几何光学的基本定律

### 1.2.1 基本定律

从光线的概念出发,几何光学把光的传播现象归纳为四个基本定律.

#### 1. 光的直线传播定律

在各向均匀同性介质中,光是沿着直线传播的,这就是光的直线传播定律.这里要注意,各向均匀同性介质和不受阻碍两个前提条件.

#### 2. 光的独立传播定律

从不同光源发出的光线以不同的方向通过空间某点时,各光线的传播不受其他光线的影 响,称为光的独立传播定律.几束光会聚于空间某点时,其作用是强度在该点的叠加,当然必须是来自不同光源的光束,否则有干涉现象发生.

### 3. 光的折射定律与反射定律

当一束光投射到两种介质的分界面上,如图 1.2.1 所示,将有一部分光被反射,另一部分光被折射,光线与波前垂直,两者分别遵守反射定律和折射定律.

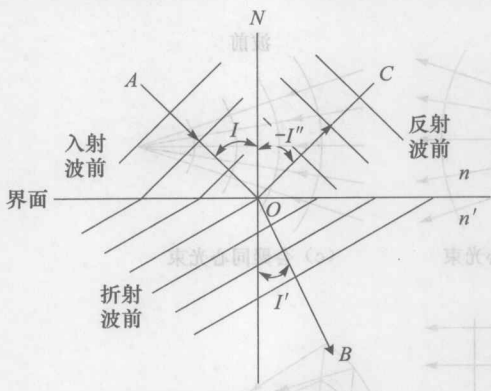


图 1.2.1 光的折射和反射

#### 1) 反射定律

入射光线、反射光线和投射点法线三者共面,且入射光线和反射光线对称于法线,入射角和反射角绝对值相等,即

$$I = -I'' \quad (1.2.1)$$

式中,角度符号以法线转向光线所成的锐角来度量,逆时针转者为正,顺时针转者为负.这种确定角度符号正负的规则也称右手规则,即右手展平,四指与法线方向一致,再转向光线成锐角握拳,逆时针为正,顺时针为负.因此,图 1.2.1 中的入射角  $I$  和折射角  $I'$

的角度符号均为正,反射角  $I''$  为负.

#### 2) 折射定律(Snell's Law)

入射光线、折射光线和投射点的法线共面,且入射角和折射角正弦之比,对一定的波长为常量,即

$$n \sin I = n' \sin I' \quad (1.2.2)$$

式中,  $n$  和  $n'$  为两种透明介质的折射率,是表征透明介质光学性质的重要参数.光在真空中传播速度与介质中传播速度的比值就是该介质的折射率,表示为

$$n = \frac{c}{v} \quad (1.2.3)$$

该式也表明,介质中光的传播速度和波长均以折射率大小为倍数减小,原因在于光波频率保持不变.因此,不同波长的光在相同介质中的传播速度  $v$  各不相同,波长越长的光,传播速度就越快.普通玻璃中光的传播速度大约是真空中光速的  $2/3$ .

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.在标准条件下(大气压强  $p = 101\,275\text{Pa} = 760\text{mmHg}$ , 温度  $t = 293\text{K} = 20^\circ\text{C}$ ),空气的折射率  $n = 1.000\,273$ ,与真空的折射率非常接近.因此,为方便起见,常将介质对空气的相对折射率作为该介质的绝对折射率,简称折射率.

相对折射率定义为在第一种介质中光的传播速度与在第二种介质中光的传播速度之比,即

$$n_2^1 = \frac{v_1}{v_2} = \frac{c/v_2}{c/v_1} = \frac{n_2}{n_1} \quad (1.2.4)$$

#### 3) 反射定律是折射定律的一种特例

在式(1.2.2)中,若令  $n' = -n$ ,得  $I' = -I$ ,即为反射定律,表明反射定律是折射定律



的一种特例. 这是几何光学中一项有重要意义的推论.

#### 4) 光路的可逆性

由图 1.2.1 可知, 当光线从 B 点或 C 点投射到分界面 O 点时, 由反射定律和折射定律可知, 反射光线或折射光线必沿 OA 方向射出, 这就是光路的可逆性. 根据光的可逆性, 当研究光线传播时, 我们可以按实际光线进行的方向来研究它的传播路线, 也可按与实际光线相反的方向进行研究, 二者结果是完全相同的.

### 1.2.2 矢量形式的折射定律和反射定律

折射定律和反射定律的内容说明入射光线、法线、折射光线和反射光线位于同一平面内, 以及入射角、折射角和反射角之间的数量关系. 当介质的分界面在空间的分布形式很复杂时, 这种形式的折射定律和反射定律对于今后研究一些复杂的光线传播问题很不方便. 由于光线是几何线, 可以使用矢量形式表示. 因此, 折射定律和反射定律可以用一个矢量公式把它包括的两部分内容同时表示出来. 在直角坐标系中, 任一矢量  $\mathbf{A}$  可表示成

$$\mathbf{A} = A_x \mathbf{i} + A_y \mathbf{j} + A_z \mathbf{k} \quad (1.2.5)$$

式中,  $\mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k}$  为坐标  $x, y, z$  方向的单位矢量;  $A_x, A_y, A_z$  为矢量  $\mathbf{A}$  在相应坐标轴上的投影值.

#### 1. 矢量形式的折射定律

如图 1.2.2 所示, 以  $\mathbf{a}$  和  $\mathbf{a}'$  分别表示入射光线和折射光线的单位矢量,  $n$  和  $n'$  分别表示折射面两边介质的折射率. 矢量  $\mathbf{a}$  和  $\mathbf{a}'$  指向右为正方向, 反之为负.  $\mathbf{N}$  为光线入射点法线的单位矢量, 顺着光线传播方向为正, 反之为负. 折

$$n(\mathbf{a} \times \mathbf{N}) = n'(\mathbf{a}' \times \mathbf{N}) \quad (1.2.6)$$

射定律可表示为

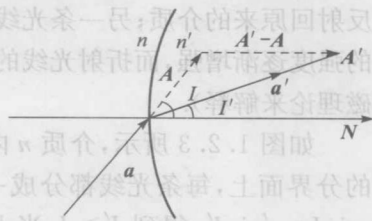


图 1.2.2 光的矢量折射定律

即把入射光线矢量  $\mathbf{A}$  和折射光线矢量  $\mathbf{A}'$  的长度取为  $n$  和  $n'$ , 于是式(1.2.6)可写成

$$\mathbf{A} \times \mathbf{N} = \mathbf{A}' \times \mathbf{N} \quad \text{或} \quad (\mathbf{A}' - \mathbf{A}) \times \mathbf{N} = 0 \quad (1.2.7)$$

即矢量  $(\mathbf{A}' - \mathbf{A})$  和  $\mathbf{N}$  的方向保持一致, 故可写成

$$\mathbf{A}' - \mathbf{A} = \Gamma \mathbf{N} \quad (1.2.8)$$

式中,  $\Gamma$  称为偏向常数. 用  $\mathbf{N}$  对式(1.2.7)两边作点乘可得

$$\Gamma = \mathbf{N} \cdot \mathbf{A}' - \mathbf{N} \cdot \mathbf{A} = n' \cos I' - n \cos I \quad (1.2.8)$$

又

$$\begin{aligned} n' \cos I' &= n' \sqrt{1 - \sin^2 I'} = \sqrt{n'^2 - (n' \sin I')^2} \\ &= \sqrt{n'^2 - n^2 \sin^2 I} = \sqrt{n'^2 - n^2 (1 - \cos^2 I)} \\ &= \sqrt{n'^2 - n^2 + (\mathbf{N} \cdot \mathbf{A})^2} \end{aligned}$$