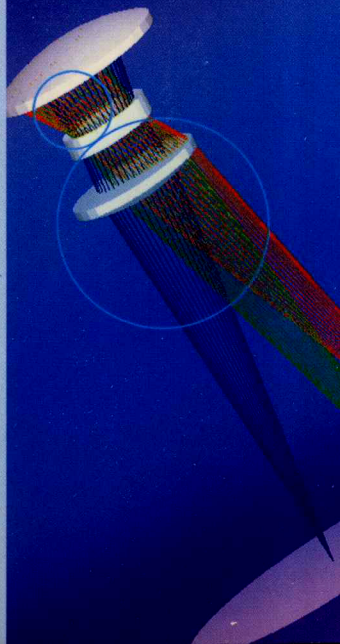
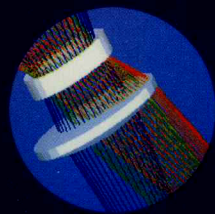




普通高等教育“十一·五”国家级规划教材

工程光学 (第二版)

李湘宁 贾宏志 编著
张荣福 郭汉明



科学出版社
www.sciencep.com

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

工程光学

(第二版)

李湘宁 贾宏志 编著
张荣福 郭汉明

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书系统地介绍了几何光学和波动光学的基础理论。全书共分 13 章,前 9 章以几何光学为基础,介绍几何光学的基本定律、球面系统和平面系统的成像规律、高斯光学的基本理论及像差的基本概念,并介绍典型和实用光学系统及部分现代光学系统的原理和特性;第 10 章至第 13 章以波动光学为基础,介绍光的电磁理论,光的干涉、衍射、偏振等波动性质及应用。这两部分内容构成了经典光学的完整体系。本书精心安排了有代表性的例题和习题,侧重对关键知识的理解和应用能力的训练,便于读者掌握。

本书可作为高等院校光学工程、测控、电子信息等相关专业的本科生和研究生的专业基础课教材,也可作为考研及有关工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

工程光学/李湘宁等编著. —2 版. —北京:科学出版社,2010

(普通高等教育“十一五”国家级规划教材)

ISBN 978-7-03-029169-1

I. ①工… II. ①李… III. ①工程光定-高等学校-教材 IV. ①TB133

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 195145 号

责任编辑:张 濮 / 责任校对:宋玲玲

责任印制:张克忠 / 封面设计:耕者设计工作室

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>

骏志印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2010 年 10 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2010 年 10 月第一次印刷 印张:19 3/4

印数:1—4 000 字数:460 000

定价:35.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

自从 20 世纪 60 年代初期激光出现以来,现代光学得到迅速发展,出现了许多新的学科分支。现代光学工程在认识世界、改造世界的实践中已取得了一系列变革性的进展,并对国防建设、国民经济、日常生活等诸多方面产生巨大的影响。随着现代光学成为 21 世纪的重要学科,人们也愈加重视光学工程的普及教育。

现代光学离不开作为基础理论的几何光学和波动光学。本书是光学工程的技术基础课教材,全书分为几何光学和波动光学两大部分。第 1 章至第 9 章为几何光学篇,系统地介绍几何光学的基本定律、光学系统基本成像元件的成像规律和高斯光学理论,介绍光学系统的光束限制及其应用、像差的基本概念,在这些基本理论的基础上介绍典型光学系统的工作原理、主要性能和特点,还适当介绍部分实用及现代光学系统的原理与应用。第 10 章至第 13 章为波动光学篇,介绍光的电磁理论,光的干涉、衍射、偏振等波动性质与应用。这两大部分内容构成了经典光学的完整体系。

本书在着重介绍基础光学理论的同时增加了现代光学的部分内容,目的是希望读者在掌握工程光学基本理论的同时也对现代光学的理论及现代光学系统的原理与应用有一定的了解,以拓宽知识面,更好地理解 and 认识日新月异的新成果和新技术,为今后的创新工作打下良好的基础。

本书从面向应用的角度,在几何光学和波动光学两大部分的内容比例安排上选择了侧重前者,两者比例为 2:1。这样的安排与目前很多学校的相关专业(如测控技术与仪器、电子信息、机电工程、医疗器械等)实际对“工程光学”课程的教学计划需求相一致,也照顾到了偏重应用光学的学习和参考需求。本书的参考学时为:几何光学 48 学时(3 学分),波动光学 32 学时(2 学分)。根据编者多年从事本科生、研究生教学及相关科研工作的实践经验,我们认为,对于工科学生,基本理论的掌握和实际应用应该是并重的。因此,对本针对工科学生的教材,在编写中尽量避免繁难的数学推导,强调物理概念的阐述,理论联系实际,注重实用性和先进性。在写作方法上力求深入浅出、循序渐进,尽可能地将抽象的概念形象化和通俗化,便于读者阅读和自学。

本书第一版自 2005 年出版以来受到了读者的认可,现在本书作为普通高等教育“十一五”国家级规划教材再版,我们将尽最大的努力使本书在相关教学和参考阅读中发挥更好的作用。这次再版除保留原来的工程光学基础内容外,增加了现代光学中应用较多的部分实用型光学系统的原理介绍,如变焦系统、变形系统、照明系统和菲涅耳透镜等,鉴于像差理论的复杂与抽象,在第 6 章像差概论中删减了部分抽象空洞的像差理论表述,增加了光学像差的图像以及像差曲线的描述,将像差这一抽象的概念形象化,使读者更容易理解。对第 7 章和第 13 章的内容进行了全面的改写,相对于第一版而言,补充了大量的偏振光学中的基本概念和分析方法,增加了光源的介绍,旨在增加教材的实用性和先进性,在理论结合实际方面进行了加强。同时,通过对教学过程的总结,新教材在阐述方法上进行了较广泛的修改,更加突出通俗易懂、循序渐进的阐述方式,注重知识点之间的关联,帮



助读者更系统性地深入理解和掌握工程光学的基本理论。

本书的主要章节都选编了例题,每章后面都有习题,并在最后给出了部分习题的参考答案。新版教材在此方面更作了加强,侧重对关键知识的理解和应用能力的训练,在分析题意及解题方法上,力求做到简单准确,期望能更好地帮助读者理解相关知识、解决实际问题。

本书由李湘宁、贾宏志、张荣福、郭汉明合作撰写。其中,李湘宁负责第1~6章、第8章、第9章的撰写,贾宏志负责第10~12章的撰写,张荣福负责第7章的撰写,郭汉明负责第13章的撰写,全书由李湘宁统稿。贺莉清教授和滕家炽教授为本书审稿,并为本书的撰写提出了许多建设性的意见。薛登攀、吴宇昊、于孟诚、王瑜、樊露青、俞诚等为教材的附图、例题及校对等做了大量的工作,本书的再版还借鉴了朱维涛和曹俊卿同志在第一版中所做的基础性工作,在此向他们一并表示感谢。本书在编写过程中,参阅了大量的参考文献,在此也向这些文献作者表示谢意。

最后,还要感谢科学出版社高教中心工科分社的编辑,感谢他们为本书的出版所做的具体指导和付出的辛勤劳动。

由于作者水平有限,时间仓促,书中难免存在疏漏之处,恳请读者批评指正。

编者

2010年8月

目 录

前言

第 1 章 几何光学的基本定律和物像概念

- 1.1 几何光学的基本定律..... 1
 - 1.1.1 几何光学的点、线、面 1
 - 1.1.2 几何光学的基本定律 1
 - 1.1.3 费马原理..... 4
- 1.2 光学系统的物像概念..... 5

习题 7

第 2 章 共轴球面光学系统 8

- 2.1 符号规则..... 8
 - 2.1.1 光路方向..... 8
 - 2.1.2 线量的正负号 8
 - 2.1.3 角度的正负号 9
 - 2.1.4 符号规则的意义 10
 - 2.1.5 光路图中的符号标注 10
- 2.2 物体经单个折射球面的成像 ... 10
 - 2.2.1 单球面成像的光路计算 10
 - 2.2.2 近轴区域的物像关系 13
 - 2.2.3 近轴区域的物像放大率 15
- 2.3 单个反射球面的成像 17
- 2.4 共轴球面系统的成像 18

习题..... 21

第 3 章 理想光学系统..... 23

- 3.1 理想光学系统的基本理论 23
- 3.2 理想光学系统的基点与基面 ... 24
 - 3.2.1 无限远的轴上物点与像方焦点 24
 - 3.2.2 无限远的轴上像点与物方焦点 25
 - 3.2.3 主平面 25
 - 3.2.4 光学系统的焦距 26
 - 3.2.5 理想光学系统的节点 27
- 3.3 理想光学系统的物像关系 27

- 3.3.1 作图法求像 27

- 3.3.2 解析法求像 30

3.4 理想光学系统的多光组成像 ... 35

- 3.4.1 多光组成像的一般过程 35
- 3.4.2 多光组系统的等效系统 37
- 3.4.3 双光组组合 40
- 3.4.4 双光组组合的应用实例 43

3.5 实际光学系统的基点和基面 ... 45

- 3.5.1 实际系统的基点和基面 45
- 3.5.2 透镜的基点和基面 46

习题..... 50

第 4 章 平面系统..... 54

4.1 平面镜 55

- 4.1.1 单平面镜的成像特性 55
- 4.1.2 双面镜的成像特性 56

4.2 反射棱镜 58

- 4.2.1 反射棱镜的类型 58
- 4.2.2 棱镜系统成像的物像坐标变化 59
- 4.2.3 反射棱镜的等效作用与展开 ... 60

4.3 平行平板 62

- 4.3.1 平行平板的成像特性 62
- 4.3.2 平行平板对光线位移的计算 ... 63
- 4.3.3 平行平板的等效空气层 65

- 4.3.4 共轴球面系统和平面棱镜系统的组合 67

4.4 折射棱镜和光楔 68

- 4.4.1 折射棱镜 68
- 4.4.2 光楔 70

习题..... 71

第 5 章 光学系统的光束限制..... 74

5.1 概述 74

5.2 孔径光阑 76

- 5.2.1 孔径光阑的判断 76



5.2.2 入射光瞳和出射光瞳	78	7.3 色度学基础	123
5.3 视场光阑	79	7.3.1 颜色匹配实验	124
5.3.1 视场范围的计算	80	7.3.2 CIE 标准色度系统	124
5.3.2 渐晕及其相关计算	81	7.3.3 CIE 色度计算	128
5.3.3 入射窗和出射窗	83	7.3.4 均匀颜色空间与色差计算	130
5.4 渐晕光阑与场镜	83	7.3.5 光源	133
5.4.1 渐晕光阑	83	习题	137
5.4.2 场镜	85	第 8 章 实用光学系统	138
5.5 景深和焦深	86	8.1 人眼光学系统	138
5.5.1 景深	86	8.1.1 眼睛的结构	138
5.5.2 焦深	88	8.1.2 眼睛的调节和适应	139
5.5.3 远心光路	89	8.1.3 眼睛的视力缺陷与校正	141
习题	91	8.1.4 人眼的分辨力和对准精度	142
第 6 章 像差概论	93	8.1.5 双眼立体视觉	144
6.1 轴上点球差	93	8.2 放大镜	145
6.1.1 球差的概念和形成	93	8.2.1 视觉放大率	145
6.1.2 单个折射球面的齐明点	95	8.2.2 光束限制和线视场	147
6.1.3 单透镜的球差	96	8.2.3 放大镜用做目镜	148
6.2 彗差	97	8.3 显微镜系统	148
6.2.1 彗差的概念和形成	97	8.3.1 显微镜工作原理与视觉放大率	148
6.2.2 孔径光阑对彗差的影响	100	8.3.2 显微镜的光束限制	150
6.3 细光束像散	100	8.3.3 显微镜的分辨力和有效放大率	151
6.4 细光束场曲	102	8.3.4 显微镜的应用举例	154
6.5 畸变	104	8.4 望远镜系统	157
6.6 色差	107	8.4.1 望远系统的视觉放大率	157
6.6.1 位置色差	108	8.4.2 望远系统的分辨力和有效放大率	159
6.6.2 倍率色差	111	8.4.3 望远镜的光束限制	159
习题	112	8.4.4 望远镜的转向系统	162
第 7 章 光度学与色度学	114	8.5 摄影系统	163
7.1 视敏函数与颜色视觉	114	8.5.1 摄影物镜的光学特性	163
7.1.1 视敏函数	114	8.5.2 摄影物镜的景深	166
7.1.2 颜色视觉	115	8.5.3 变焦距物镜	166
7.2 光度学中的量及其基本规律	117	8.6 投影系统	168
7.2.1 光通量	117	8.6.1 光学性能	168
7.2.2 发光强度	117	8.6.2 光度特性	168
7.2.3 光照度	118	8.6.3 投影物镜的结构形式	169
7.2.4 光亮度	119		
7.2.5 光度学中的基本规律	120		

8.6.4 变形物镜	169	10.4.3 菲涅耳公式	216
8.7 照明系统	171	10.4.4 菲涅耳公式的讨论	218
习题	173	10.4.5 全反射与倏逝波	221
第9章 现代光学系统	176	习题	223
9.1 光纤光学系统	176	第11章 光的干涉	225
9.1.1 阶跃型光纤	176	11.1 光波干涉条件和杨氏干涉实验	225
9.1.2 梯度折射率光纤	179	11.1.1 光波干涉条件	225
9.1.3 光纤的典型应用	181	11.1.2 杨氏干涉实验	226
9.2 激光光学系统	183	11.2 干涉条纹的可见度	228
9.2.1 激光束的结构	184	11.2.1 双光束干涉时干涉条纹的可见度	228
9.2.2 激光束的传播特性	184	11.2.2 光源的非单色性对干涉条纹可见度的影响	229
9.2.3 激光聚焦系统和激光扩束系统	188	11.2.3 光源大小对干涉条纹可见度的影响	231
9.3 红外光学系统	189	11.3 平板的双光束干涉	233
9.3.1 红外光学系统的功用与特点	190	11.3.1 干涉条纹的分类	233
9.3.2 几种典型的红外光学系统	191	11.3.2 等倾干涉	234
9.4 菲涅耳透镜	198	11.3.3 等厚干涉	237
习题	202	11.4 平板干涉的应用	241
第10章 光的电磁理论基础	203	11.4.1 迈克耳孙干涉仪	241
10.1 光波的特性	203	11.4.2 泰曼-格林干涉仪和波面干涉技术	244
10.1.1 麦克斯韦方程组	203	11.4.3 马赫-曾德尔干涉仪	245
10.1.2 物质方程	205	11.5 平行平板的多光束干涉及其应用	245
10.1.3 电磁波动方程	205	11.5.1 平行平板多光束干涉的原理	246
10.2 几种简单的光波场	207	11.5.2 法布里-珀罗干涉仪	249
10.2.1 简谐平面波	207	11.5.3 干涉滤光片	251
10.2.2 球面波和柱面波	210	11.6 光学薄膜	251
10.2.3 电磁场的能量和能流	210	11.6.1 单层膜	251
10.3 光波的叠加	211	11.6.2 多层膜	253
10.3.1 波的叠加原理	211	习题	255
10.3.2 同频率、同振动方向单色光波的叠加	212	第12章 光的衍射	257
10.3.3 频率相同、振动方向相互垂直的光波的叠加	213	12.1 光波的标量衍射理论	257
10.3.4 不同频率单色光波的叠加	213	12.1.1 衍射的基本概念	257
10.4 光在两种介质分界面上的反射和折射	215	12.1.2 惠更斯-菲涅耳原理	258
10.4.1 电磁场的边界条件	215		
10.4.2 反射定律和折射定律	215		



12.1.3 两种典型的衍射	259	13.1 偏振光的描述	278
12.2 菲涅耳衍射	260	13.1.1 光波的偏振态	278
12.2.1 菲涅耳半波带法	261	13.1.2 偏振度	279
12.2.2 菲涅耳波带片	262	13.1.3 偏振态的表示法	280
12.3 夫琅禾费衍射	263	13.2 各向异性介质中的光波传播特性	282
12.3.1 矩孔衍射	264	13.2.1 晶体的光学各向异性	282
12.3.2 单缝衍射	265	13.2.2 平面波在晶体中的传播	283
12.3.3 单缝衍射因子的特点	265	13.2.3 平面波在晶体界面上的双反射和双折射	287
12.3.4 多缝衍射	266	13.3 偏振器件	289
12.3.5 圆孔衍射	268	13.3.1 偏振器	289
12.4 光学成像系统的衍射和分辨本领	270	13.3.2 波片	291
12.4.1 望远镜的分辨率	271	13.3.3 偏振器件的数学描述	292
12.4.2 照相物镜的分辨率	271	13.4 偏振光的干涉	295
12.4.3 显微镜的分辨率	271	习题	297
12.5 衍射光栅	272	简明习题答案	298
12.5.1 衍射光栅概述	272	参考文献	303
12.5.2 几种典型衍射光栅	274	附录	305
习题	276		
第13章 光的偏振	278		

第 1 章 几何光学的基本定律和物像概念

光学是研究光的本性、光的传播、光与物质的相互作用以及光的实际应用的科学。近代物理学的观点认为,光具有波粒二象性。然而,除了在研究光的发射和吸收等与物质相互作用的情况下需要考虑光的粒子性并运用量子理论之外,光主要以波动的形式存在着。光的本质是电磁波,波谱范围通常从远红外到真空紫外,而其中的可见光波段仅仅处在 $0.4\sim 0.76\mu\text{m}$ 。当光的外观表现为波动性时,光以波的方式传播,遵循波动理论。

研究光的传播离不开光学系统,光学系统的主要作用是传输光能和对研究的目标成像,用波动光学理论能够很精确地讨论光经过光学系统的传播规律和成像问题,但具有相当的复杂性。通常在解释光学成像和设计光学系统时,采用几何光学的研究方法。所谓几何光学,就是把光的概念和几何学中的点、线、面有机联系起来,利用简便和实用的几何学方法来研究光的传播以及目标经过光学系统后的成像规律。几何光学撇开了光的波动本性,以某种近似来研究光的传播,这种方法对于所研究对象的尺寸远大于光的波长的场合是成立的。在工程应用中,大多数光学系统的结构尺寸都远大于波长,用几何光学得出的结果与宏观现象非常吻合,因此,在这些情况下应用几何光学来研究光学系统足够精确。尽管用几何光学对光的研究只是真实情况的某种近似,但由于研究和解决问题的方法较波动光学简单得多,这一理论才得以广泛应用和不断发展。本书的前 9 章内容就是以几何光学为基础来讨论光的传播规律和光学系统的成像特性的。

1.1 几何光学的基本定律

1.1.1 几何光学的点、线、面

几何光学把光源和物体看成几何发光点,经过光学系统所成的像也为几何点。当光源或物体有一定大小时,可以看成几何发光点的集合,物体表面或像表面上的每一点都代表着该点附近的小面元,这些点的集合就代表了整个物面或像面。

在波动光学中,光波沿着波面的法线方向传播。几何光学将光波的传播抽象成几何线一样的光线,这些光线相当于波面的法线,它代表了光的传播方向。一个点光源发出的光波由一束光线(法线束)表示,根据光波的特点,平面波对应于平行光束,球面波对应于同心光束,像散波对应于像散光束,各类光束及对应的波面如图 1-1 所示。

1.1.2 几何光学的基本定律

几何光学的基本定律决定了光线在通常情况下的传播方式,它是研究光学系统成像规律以及进行光学系统设计的理论依据。

1. 光的直线传播定律

在各向同性的均匀介质中,光沿着直线传播,这就是光的直线传播定律。根据这一定

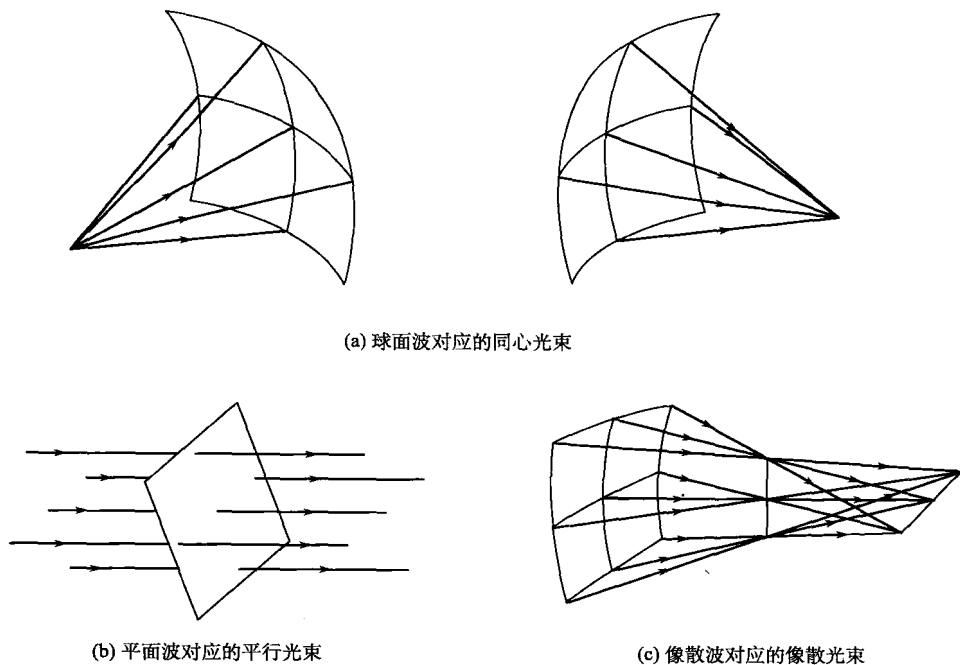


图 1-1 光束的分类

律,光在均匀介质和空气中走的都是直线。这一定律忽略了光作为电磁波的衍射特性。用光的直线传播定律可以解释日食、月食等自然现象,也可以解释光照射物体时为什么会出影子等类似问题,小孔成像正是利用了光的直线传播定律。

2. 光的独立传播定律

当两束或多束光在空间相遇时,各光线的传播不会受其他光线的影响,这就是光的独立传播定律。按照这一定律,光束相交处的光强是一种简单的叠加,这点忽略了光作为电磁波的相干特性。应用这一定律在分析光线的传播时,不必考虑光线之间的相互影响。

3. 光的折射定律和反射定律

当一束光线由折射率为 n 的介质射向折射率为 n' 的介质时,在两种透明介质的分界面上,一部分光线被反射,另一部分光线被折射,如图 1-2 所示。反射光线和折射光线的传播方向遵循反射定律和折射定律。

1) 反射定律

反射定律指出,入射光线、光线在界面入射点处的界面法线以及反射光线三者共面,入射光线与反射光线分居于法线的两侧,且入射角 I 与反射角 I'' 的绝对值相等,即

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

入射角与反射角的符号是这样确定的:由光线以锐角转向法线,顺时针为正,逆时针为负。反射定律表明,入射光线与反

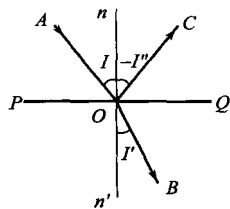


图 1-2 光线的折射与反射

射光线对称于法线,负号表示两者的传播方向相反。

2) 折射定律

折射定律指出,入射光线、光线在界面入射点处的界面法线以及折射光线三者共面,入射角 I 与折射角 I' 之间满足下列关系式

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

折射定律说明,光线折射后将发生偏转,当光线从低折射率介质射向高折射率介质(如从空气射向玻璃)时,光线向靠近法线的方向偏转(折射角小于入射角),反之则偏离法线(折射角大于入射角)。

在折射定律式(1-2)中,若令 $n' = -n$,则得到反射定律式(1-1),因此,可以将反射定律看做折射定律的一个特例。根据这一特点,在遇到光线反射时,只要令 $n' = -n$,则所有对折射光线传播的计算也适用于反射光线。

根据以上几何光学的基本定律,可以得出光线的传播具有可逆性。如图 1-3 所示,光线遵循几何光学的基本定律从 A 点沿一定路径(图中实线)传播到 A' 点。若此时从 A' 点沿到达光线的反方向射出一条光线(图中虚线),那么按照光的直线传播定律和折射定律,很容易判断得出,光线将沿同一路径的反方向到达 A 点,光线的这种传播特性称为光路的可逆性。利用这一特性,不但可以正向计算光线的传播,也可以逆向计算光线的传播。在光学系统的计算和设计中,沿光线的正向传播可以确定物体经光学系统所成的像,沿光线的反向传播可以由像来确定物体。光路的可逆性可以让设计者从计算的方便性以及有利于提高计算精度来考虑选择计算的方向。

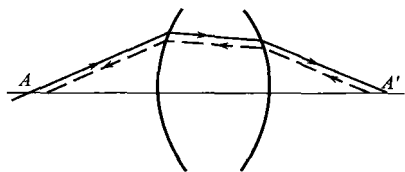


图 1-3 光路的可逆性

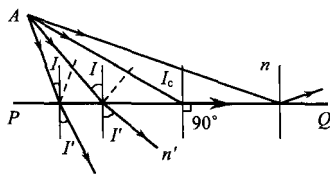


图 1-4 光线的全反射

3) 全反射

按照折射定律,当光线从光密介质射向光疏介质时,即 $n > n'$,折射角大于入射角,当入射角逐渐增大达到某一角度 I_c 时,光线的折射角首先达到 90° ,这时光线经界面掠射出去。继续增大入射角,折射光线消失,所有的光线将反射回原介质中,这种现象称为全反射,如图 1-4 所示。 I_c 称为全反射的临界角,由折射定律可得

$$I_c = \arcsin\left(\frac{n'}{n}\right) \quad (1-3)$$

光线发生全反射必须同时具备两个条件:①光线由光密介质射向光疏介质,即 $n > n'$;②光线的入射角大于临界角 I_c 。

全反射具有很重要的应用,下面列举两种全反射的应用实例。

(1)全反射棱镜 图 1-5 所示为光学系统中的

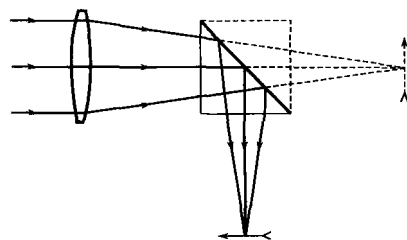


图 1-5 全反射棱镜

一直角棱镜,光线从棱镜的一个界面入射,折射后射向棱镜的斜面,在该斜面上满足全反射的两个条件而发生全反射,再经棱镜的另一个面出射,该直角棱镜使垂直入射的光线传播方向改变了 90° 。利用全反射棱镜来反射光线较之用普通平面反射镜有更高的反射率(一般认为全反射的反射率为1),并且反射面在玻璃内部受到保护不易被空气中的化学成分腐蚀。

(2)全反射光纤 图 1-6 所示为一光纤的截面,在一个折射率较高的玻璃纤维外包裹



图 1-6 全反射光纤

着一层较低折射率的介质,光线经光纤的一端射入,在玻璃纤维的边界处受到全反射,连续不断的全反射使光线从纤维的一端传播到另一端。

光纤细且柔软,许许多多的光纤组成的光纤束能做内窥镜探入人体内部,用于传播照明光、图像和光信号。在通信系统中,光纤也替代了传统的电缆广泛应用于现代通信。

1.1.3 费马原理

费马原理与几何光学的基本定律一样,也是描述光线传播规律的基本理论。它以光程的观点描述了光传播的规律,涵盖了光的直线传播和光的折射、反射规律,具有更普遍的意义。

根据物理学,光在介质中走过的几何路程与该介质折射率的乘积定义为光程。设介质的折射率为 n ,光在介质中走过的几何路程为 l ,则光程 s 表示为

$$s = nl$$

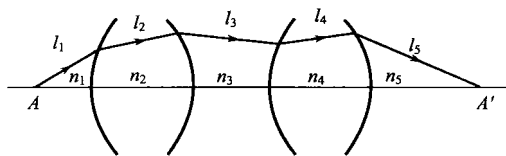


图 1-7 光线路径与光程

在图 1-7 中,如果光线从 A 点传播到 A' 点,经过了 k 个介质,走过的路径各为 l_1, l_2, \dots, l_k ,则光线经历的光程为

$$s = \sum_{i=1}^k n_i l_i$$

若光线经历的介质变化是连续的,则光程可用积分表示

$$s = \int_A^B n \cdot dl$$

费马原理指出,光从一点传播到另一点将沿极值光程路径传播。极值路径包括光程为极大值、极小值或常量值,其数学形式表示为光程的一阶变分为 0,即

$$\delta s = \delta \int_A^B n \cdot dl = 0 \tag{1-4}$$

至于光程走的是极大值还是极小值,这要取决于折射表面的曲率及两点之间的位置,大多数情况下是极小值。费马原理可以用来证明光的直线传播定律和光的折射、反射定律。例如,在均匀介质中,两点间以直线距离为最短,故按照费马原理,光线应当走直线,光的直线传播定律即可得到证明。费马原理同时也能说明光在非均匀的介质中走的是曲线,如图 1-8 所示。

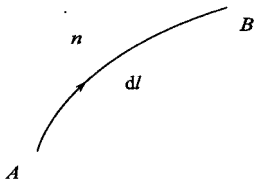


图 1-8 光在非均匀介质中的曲线传播路径

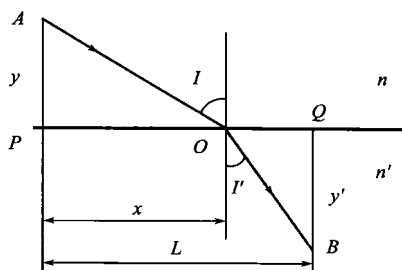


图 1-9 用费马原理证明折射定律

【例 1-1】 用费马原理证明光的折射定律。

证明 光线在两透明介质表面的折射情况如图 1-9 所示,从 A 点和 B 点分别作界面的垂线 AP、BQ,并令其长度分别为 y 和 y',则 A 点到 B 点的光程为

$$AOB = n \cdot AO + n' \cdot OB = n\sqrt{x^2 + y^2} + n'\sqrt{(L-x)^2 + y'^2}$$

光程为极值的条件为

$$\frac{d(AOB)}{dx} = \frac{n \cdot 2x}{\sqrt{x^2 + y^2}} + \frac{-n' \cdot 2(L-x)}{\sqrt{(L-x)^2 + y'^2}} = 0$$

将上式化简,并注意到 $\sin I = \frac{x}{\sqrt{x^2 + y^2}}$, $\sin I' = \frac{L-x}{\sqrt{(L-x)^2 + y'^2}}$,代入上式并整理得

$$n \sin I = n' \sin I'$$

即得到证明。读者可以自己证明光的反射定律。

1.2 光学系统的物像概念

光学系统是由光学元件按照某种方式组合并能够对光进行传播和控制的系统。光学系统的主要功能之一是对目标物体成像。要掌握光学系统的成像规律就必须首先理解物和像的概念。

光学系统对目标物体成像,目标发出的光线在射入光学系统之前都称为物方光线,物方光线的会聚点(不管是实际会聚还是虚线延长后的会聚)称为物,经过光学系统作用之后的光线则称为像方光线,像方光线的会聚点(不管是实际会聚还是延长后的会聚)称为像。物体有实物和虚物之分,像也有实像和虚像之分。对于作用于该光线的光学系统而言,光线能够实际相交的点为实点,光线延长后才能相交的点为虚点。因此,物方光线实际相交的点为实物点,物方光线延长后相交的点为虚物点。同样,像方光线实际相交的点为实像点,延长后相交的点为虚像点。客观存在的物体由于能实际发光(可以自身发光,也可以是受照后发光),都被看做物方光线的会聚点,因此都是实物;而虚物一般不会独立存在,往往产生于前一光学系统所成的实像,这一实像相对于下一成像系统成为虚物,见例 1-2。实像因为有实际光线相交,故可以用接收屏得到其图像,如照相底片、电影银幕等。而虚像得不到实际光线相交则无法用屏接收,但虚像可以用眼睛观察,例如,人眼可

以看见反射镜所成的虚像,也可以看见望远镜所成的虚像。图 1-10 所示分别为物体成像的四种不同情况。

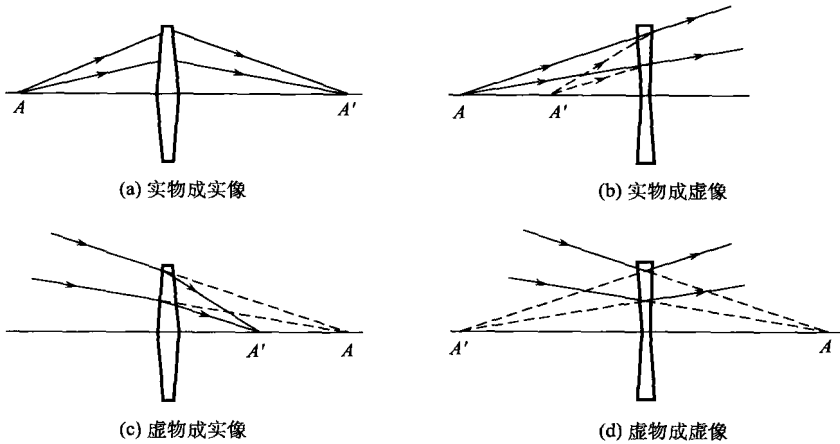


图 1-10 光学系统的几种物像关系

光学系统在对物体成像过程中划分了物空间和像空间。它们可以是相同的介质,也可以是不同的介质。在光学系统作用于光线之前,物方光线不会发生折射或反射,其任意延长线都认为是在物方空间,对应的是物方介质。当光学系统作用于光线之后,光线发生了折射或反射,作用后的光线的任意延长线都认为是在像方空间,对应的是像方介质。虽然每个空间的介质在形式上是以界面分隔的,但光线的延长也相当于延伸了空间。因此,如图 1-10(c)所示,虚物虽然延伸到了系统的右方,但所处的介质依然是系统物方(系统左侧)的介质;同样,如图 1-10(b)所示,虚像延长到了系统的左方,但所处的介质是系统像方(系统右侧)的介质,在进行光线计算时,使用的折射率应与其所处的介质对应。

光学系统的物和像具有相对性,它们都是相对于特定成像系统而言的。如果一个物体依次经过几个系统成像,则前一个系统所成的像便成为下一系统的物,如此不断成像后得到最终的像。因此,物和像的概念并不是绝对的。对于连续成像的系统,物与像的角色在具体情况下发生变化,计算时应取相应空间介质的折射率。下面通过例题说明光学系统的物像关系。

【例 1-2】 光学系统由图 1-11 中四个子系统 I、II、III 和 IV 组成,对 A 物体成像。根据图中的成像光线,说明各子系统的物、像关系。

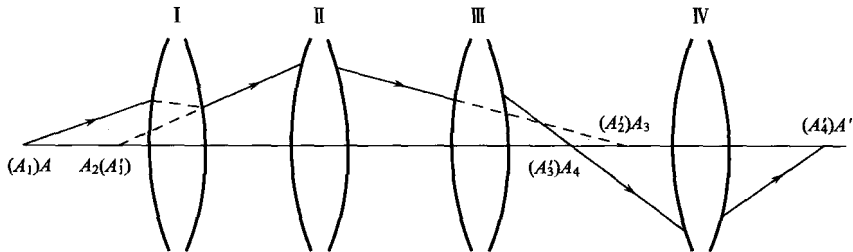
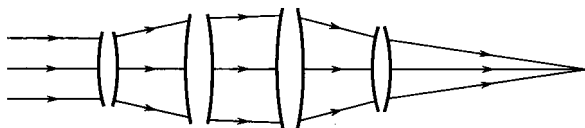


图 1-11 多光组系统的成像与物像关系

解 光学系统将物点 A 最终成像于 A' , 因此, (A, A') 分别是整个系统的物和像, 而 (A_1, A'_1) 、 (A_2, A'_2) 、 (A_3, A'_3) 和 (A_4, A'_4) 分别是子系统 I、II、III 和 IV 的物和像。其中, A_1 是系统 I 的实物, 也是整个系统的实物 A ; A'_1 是子系统 I 的虚像, 又是系统 II 的实物 A_2 ; 系统 II 的实像 A'_2 , 又是系统 III 的虚物 A_3 ; 系统 III 的实像 A'_3 , 又是系统 IV 的实物 A_4 ; 最后, A'_4 是系统 IV 的实像, 也是整个系统的实像 A' 。

习 题

- 1-1 举例说明在光传播中符合几何光学各基本定律的现象和应用。
- 1-2 一条光线入射在两个介质的分界面上, 设入射角(入射光线与入射点法线的夹角)为 30° , 求下列情况下的折射角(折射光线与入射点法线的夹角)是多少?
- (1) 光线从空气射向玻璃($n_{\text{玻璃}}=1.5$);
 - (2) 光线从水($n_{\text{水}}=1.33$)中射向空气;
 - (3) 光线从水中射向玻璃。
- 1-3 光线由水中射向空气, 求在界面处发生全反射时的临界角。当光线由玻璃内部射向空气时, 临界角又为多少? ($n_{\text{水}}=1.333, n_{\text{玻璃}}=1.52$)
- 1-4 一根没有外包层的光纤的折射率为 1.3, 一束光线以入射角 u_1 从光纤的一端射入, 利用全反射通过光纤, 求光线能够通过光纤的最大入射角 $u_{1\text{max}}$ 。在实际应用中, 为了保护光纤, 在光纤的外径处加一包层, 设光纤的内芯折射率为 1.7, 外包层的折射率为 1.52, 那么此时光线的最大入射角 $u_{2\text{max}}$ 为多少?
- 1-5 在习题 1-4 中, 若光纤的长度为 2m, 直径为 $20\mu\text{m}$, 设光纤为直的, 那么以最大入射角入射的光线从光纤的另一端射出时, 经历了多少次反射?
- 1-6 利用费马原理验证反射定律。
- 1-7 证明光线通过两表面平行的玻璃平板, 出射光线与入射光线的方向永远平行。
- 1-8 一个等边三角棱镜, 假定入射光线和出射光线相对棱镜对称, 出射光线对入射光线的偏转角为 40° , 求棱镜的折射率。
- 1-9 如图题 1-9 所示, 一个四光组组合的成像系统, 根据光线的传播方向分析各光组的物像情况。



图题 1-9

第2章 共轴球面光学系统

光学系统由一系列光学元件按照一定的方式组合而成,而光学元件由折射面或(和)反射面按照一定形状构成,它们对物体发出的光线进行折射和反射,按照需要传播光线和对物体成像。常用的光学元件有透镜、反射镜、棱镜和平行平板等,它们的界面绝大多数都采用球面形状(平面可看做半径为无穷大的球面)。如果光学系统中的所有界面均由球面构成,则该光学系统称为球面系统。在球面光学系统中,如果所有的球心都位于同一条直线上,这类光学系统则称为共轴球面系统,连接各球面球心的直线称为系统的光轴,它是整个系统的对称轴。大多数光学系统都采用这种结构。

共轴球面系统是理解光学系统成像规律的基础,系统对物体的成像过程是各个透镜对光线作用的过程。因此,对球面系统成像过程的讨论具有普遍意义,本章将对此详细介绍,首先讨论物体经单个折射球面的成像,再逐步过渡到整个共轴球面系统的成像。

2.1 符号规则

在描述光学系统成像过程中,为了说明物和像的虚、实、正、倒等状况,并能正确理解

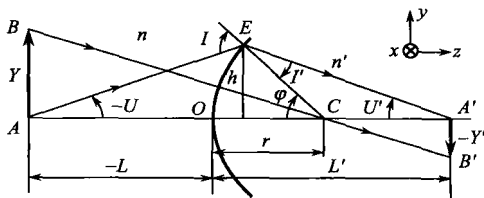


图 2-1 符号规则及其标注

光路中光线的角度所代表的方向、反映折射球面或反射球面的凹凸以及球心的相对位置等,几何光学采用了代数参量的描述方式并进行相应的解析计算,通过正负号来区分各种不同状况。为此,需要在光路的解析计算中建立坐标及符号规则,如图 2-1 所示。

2.1.1 光路方向

光路方向即为光线行走的方向,光线计算总是依照光路的正向设定符号规则。通常规定,光线从左到右传播定为光路正向,反之取负。因此,在一般情况下,总是将物体放在光学系统的左面,使物体从左到右传播光线或经过系统成像。如果在实际分析中需要对光线进行逆向计算,例如在投影系统中常需要由像计算物,即光线从右到左传播,这时,符号规则将随光线的方向而改变。但在实际中,对逆向光路计算常采用翻转 180° 的做法,始终让光线从左到右传播。这时,将像放在光学系统的左面,光学系统的最后一面变为第一面,而第一面变为最后一面,从左到右由像计算到物,最后将计算结果再翻转 180° ,得到最终的实际结果。

2.1.2 线量的正负号

图 2-1 所示为物体经单个折射球面成像的光路图。通过球心的一条直线称为光轴,光轴与折射球面的交点 O 称为顶点,图中垂直于光轴的物体 AB 经单个球面所成的像为