



新工科暨卓越工程师教育培养计划光电信息科学与工程专业系列教材

本书配套
数字资源

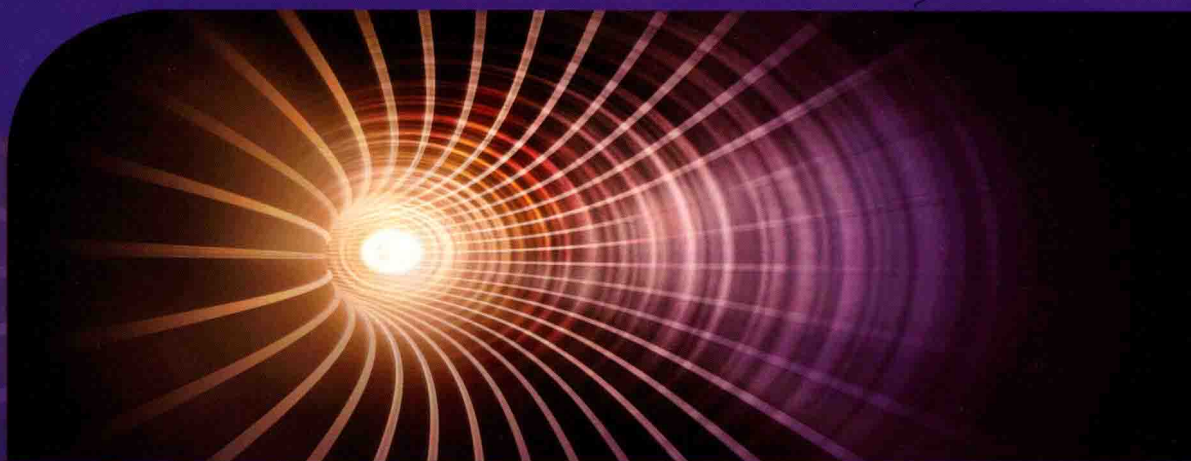
APPLIED OPTICS

应用光学

(第二版)

■ 主 编 / 王文生 刘冬梅

■ 副主编 / 向 阳 刘智颖 苗 华
陈 宇 赵会富 郑 阳



华中科技大学出版社
<http://www.hustp.com>



新工科暨卓越工程师教育培养计划光电信息科学与工程专业系列教材

APPLIED OPTICS

应用光学

(第二版)

■ 主 编 / 王文生 刘冬梅

■ 副主编 / 向 阳 刘智颖 苗 华
陈 宇 赵会富 郑 阳

内 容 提 要

本书结合作者的科研设计实例,注重理论联系实际、教学结合科研、特殊结合一般、经典结合现代,侧重于原理、应用和光学进展。编写过程中,参阅了大量中文、英文、德文、俄文文献,使本书的教学内容与国际接轨,吸取了国内外应用光学教材的精华。

全书共分为9章。第1章几何光学的基本概念及基本定律,第2章高斯光学系统,第3章平面系统,第4章光学系统的光束限制,第5章光能及其计算,第6章光路计算及像差,第7章典型光学系统,第8章现代光学系统,第9章光学系统的像质评价。其中,第6章精辟地论述了像差理论和像差校正的方法,第9章详细介绍了MTF的理论、测试和评价方法。本书涉及的像差理论和像质评价知识已足够读者用于光学系统设计。

本书对一些重要的专业术语、章节标题、图名、表名采用了中英双语标注,并在每章后给出该章的专业英语词汇,目的是使读者在学习应用光学的时候,也掌握国际通用的光学专业术语。书末给出10套考试真题供读者自测,并附有应用光学实验。

本书不仅适合作为光电信息科学与工程、测控技术与仪器、生物医学工程及相近专业的教材用书,而且可作为从事光学相关工作的技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

应用光学/王文生,刘冬梅主编. —2版. —武汉:华中科技大学出版社,2019.8
新工科暨卓越工程师教育培养计划光电信息科学与工程专业系列教材
ISBN 978-7-5680-5498-0

I. ①应… II. ①王… ②刘… III. ①应用光学-高等学校-教材 IV. ①O439

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 168762 号

应用光学(第二版)

王文生 刘冬梅 主编

Yingyong Guangxue

策划编辑:徐晓琦

责任编辑:陈元玉

封面设计:廖亚萍

责任监印:徐 露

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉)

电话:(027)81321913

武汉市东湖新技术开发区华工科技园

邮编:430223

录 排:华中科技大学惠友文印中心

印 刷:武汉科源印刷设计有限公司

开 本:787mm×1092mm 1/16

印 张:24.5

字 数:636千字

版 次:2019年8月第2版第1次印刷

定 价:55.00元



本书若有印装质量问题,请向出版社营销中心调换
全国免费服务热线:400-6679-118 竭诚为您服务
版权所有 侵权必究

作者简介

王文生, 长春理工大学二级教授, 博士生导师, 国家重点学科“光学工程”博士点现代光学设计和现代光学测试方向学科带头人, 国家精品课程、国家双语教学示范课程、国家精品共享课程“应用光学”负责人, 吉林省优秀教学团队“长春理工大学光学教学团队”负责人, 吉林省教学名师, 吉林省师德先进个人, 中国兵器工业总公司兵器实验场光测仪器检定站负责人。1970年毕业于长春光学精密机械学院(现长春理工大学), 1984—1986年德国斯图加特大学访问学者, 获德国 Ebert 基金会奖学金, 从事激光全息测试技术研究。1999年德国斯图加特大学高级访问学者, 获教育部资助, 从事光学相关目标探测技术研究。



在“九五”、“十五”、“十一五”、“十二五”期间负责原总装备部预研局、中国兵器工业总公司等的科研项目 11 项。获国家实用新型专利 1 项、国家发明专利 1 项、国防发明专利 7 项, 获 3 个国防科技进步奖。独立编著《干涉测试技术》(兵器工业出版社, 1992)一书, 获中国兵器工业总公司优秀教材奖(1995); 主编“高等院校光电名师堂”系列教材《应用光学》(华中科技大学出版社, 2010)一书, 获中国兵器工业总公司优秀教材一等奖、吉林省普通高等学校优秀教材一等奖(2011)、第一届教育部兵器类专业教学指导委员会优秀教材一等奖; 著有《现代光学测试技术》(机械工业出版社, 2013)和《现代光学系统设计》(国防工业出版社, 2016, 获兵工高校教材工作研究会优秀教材一等奖)等书。参编《工程光学》等 3 本书。

在国内外学术期刊如《optics communications》、《光学学报》、《仪器仪表学报》、《兵工学报》、《光子学报》、《红外与激光工程》、《测试技术学报》等上发表学术论文 160 余篇, 其中 110 余篇进入 EI、SCI 和 ISTP 检索。指导的硕士研究生、博士研究生、博士后 108 人, 其中工程硕士 16 人。

第二版前言

为适应应用光学领域日新月异的发展,长春理工大学编写的教材《应用光学》经过 8 年的本科教学后再进行第二版的编写。

(1) 对第一版教材中的全部章节内容进行重新核定。修改了第一版中的缺陷,增加并删减了部分内容,增加了例题的比重,更新了全部模拟试题。

(2) 每章增添了“教学要求及学习要点”。对每一章的主要知识点(如需要掌握的概念、原理、法则、公式、重点、难点等)进行了整合介绍,以便于学生对知识的掌握与理解。

(3) 改变了例题的讲解方式。教材中所有的例题在解答之前均增加题意分析部分,以加强学生分析问题、解决问题的能力,促进理论与实际的有机结合。

(4) 书中加入了二维码扫描(含知识拓展、教学要求及学习要点、重要知识点的视频等)。

第一版第 6 章的“非球面的光路计算及其像差”和“放大镜”等内容放入了“知识拓展”中。在第 7 章中增加了检查眼睛缺陷的眼底相机、人眼的时间分辨率和人眼的对比度分辨率等内容;在“显微镜”一节中增加了视觉放大率概念,增加了射电望远镜、LCD 投影仪、DMD 投影仪、光学补偿变焦物镜和带有棱镜转像系统的望远镜等内容。在第 8 章增加了飞秒激光、红外微光图像融合系统、紫外光学系统、机器视觉光学系统、仿生光学系统和照明光学系统等内容。在第 9 章中删除了主观质量因子 SQF 的内容,增加了角空间频率及其计算的内容。

修订及增加内容比例大于 40%。

书中第 1~5 章由刘冬梅教授、刘智颖教授编写,第 6、7、9 章由王文生教授、陈宇副教授和苗华副教授编写,第 8 章由向阳教授、王文生教授、刘智颖教授、陈宇副教授和赵会富副教授编写,苗华副教授和郑阳讲师负责全书习题的收集与编写。全书由王文生教授和刘冬梅教授统稿。

书中列举了长春理工大学光电工程学院的许多科研实例,引用了姜淑华、陈方函、张肃、尚吉杨、张宇、任延俊、张晔、刘东月、宋姗姗、林丽娜、张鸿佳、朱海宇、于远航、闫静、王冕、朗琪、邹新、王晶晶、齐明、金爱华等研究生的论文,在此表示感谢。

本书添加的二维码内容是其特色之一,它丰富了本书的内容。本书的二维码由华中科技大学出版社协助完成,在此对出版社同志的辛勤努力深表谢意。

虽然本书作者精心编写,但疏漏之处不可避免,诚望读者指正。

编者

2019 年 1 月 5 日于长春理工大学光电工程学院“应用光学”教研室

第一版前言

“应用光学”是一门理论与实践结合紧密,适用于测控技术与仪器、光学工程及相近专业的本科专业基础课。应用光学的迅速发展对教材内容提出了更高的要求。作为“高等院校光电名师堂”系列教材中的一本,本书融合了作者几十年的理论研究成果与教学实践经验,具有如下几个特点。

(1) 在内容编排上遵循先进性和实用性原则,侧重于基础理论、结合应用,知识讲解深入浅出、通俗易懂。

(2) 本书所涉及的各典型光学系统、像差、像质评价等均结合了作者的科研设计实例,使理论联系实际、教学结合科研、特殊结合一般、经典结合现代。书中所有的设计实例均由光学界广泛应用的光学设计软件 ZEMAX 设计而成,有很强的代表性和实用性。

(3) 本书对一些重要的专业术语、章节标题、图名、表名采用了中英双语标注,并在每章后给出该章的专业英语词汇,目的是使读者在学习应用光学知识的同时,也掌握国际通用的光学专业术语,以利于未来阅读光学专业文献。

(4) 为了提高学生对知识的消理解及融会贯通的能力,书中提供了一定数量的例题及习题,例题讲解详细、清晰,使初学者更易接纳和掌握理论。

(5) 书中列出许多光学名人的肖像及其代表作,例如,阿贝(Abbe)及其世界上第一台显微镜,开普勒(Kepler)及其世界上第一台天文望远镜,哈勃(Hubble)及其世界上第一台太空望远镜,目的不仅是缅怀光学前辈,也想用前辈的研究精神激励我们前进。书中给出的许多图片,如日食、海市蜃楼、哈勃望远镜拍摄的“美丽的太空”、杨利伟拍摄的“美丽的地球”等,生动地说明了光学定律和光学进展。

(6) 作者参阅了大量的英文原版教材、德文教材和俄文教材,借鉴了美国亚利桑那大学的光学系列教材,参考了国内许多专家编著的相关著作,使本书的教学内容与国际接轨,吸取了国内外应用光学教材的精华。

全书共分为 9 章:第 1 章几何光学的基本概念及基本定律,第 2 章高斯光学系统,第 3 章平面系统,第 4 章光学系统的光束限制,第 5 章光能及其计算,第 6 章光路计算及像差,第 7 章典型光学系统,第 8 章现代光学系统,第 9 章光学系统的像质评价。其中第 1 章至第 5 章由刘冬梅副教授、刘智颖博士编写,第 6 章、第 7 章、第 9 章由王文生教授、苗华博士、陈方涵博士编写,第 8 章由向阳教授、苗华博士编写。全书由王文生教授统稿。此外,董冰同志对本书的绘图工作付出了艰苦的努力,陈宇博士、霍富荣老师对本书的校正给予了大力的支持。

本书不仅适合作为光电信息科学与工程、测控技术与仪器、生物医学工程及相近专业的教材用书,而且可作为从事光学相关工作的技术人员的参考书。

编写教材需要科学严谨的态度、广泛渊博的知识。虽然作者进行了不懈的努力,但书中欠妥或错误之处在所难免,恳请读者批评指正。

编者

2009 年 8 月 28 日 于长春

第 1 章 几何光学的基本概念及基本定律	(1)
1.1 几何光学的几个常用基本概念	(2)
1.2 几何光学的传播定律和现象	(6)
1.3 光学系统与完善成像	(19)
习题	(22)
本章术语	(22)
第 2 章 高斯光学系统	(24)
2.1 高斯光学系统概述	(24)
2.2 单个折射面的光路计算及近轴区成像的物像关系	(25)
2.3 反射镜及共轴球面系统成像	(35)
2.4 高斯光学系统的基点和基面	(40)
2.5 高斯光学系统的物像关系	(46)
2.6 多光组组成的高斯光学系统成像	(51)
2.7 双光组光学系统的组合	(53)
2.8 透镜	(60)
2.9 多光组光学系统的组合	(67)
习题	(72)
本章术语	(74)
第 3 章 平面系统	(76)
3.1 平面反射镜的旋转及应用	(76)
3.2 平行平板成像	(80)
3.3 反射棱镜	(83)
3.4 反射棱镜及棱镜系统成像坐标的判定及应用	(93)
3.5 折射棱镜	(97)
习题	(103)
本章术语	(105)
第 4 章 光学系统的光束限制	(107)
4.1 光阑的定义及分类	(107)
4.2 孔径光阑	(108)
4.3 视场光阑与渐晕	(115)
4.4 光学系统的景深及远心光路	(121)
4.5 典型系统的光束限制	(128)

习题	(131)
本章术语	(132)
第5章 光能及其计算	(133)
5.1 光度学的基本术语	(133)
5.2 光度学中的两个基本定律	(143)
5.3 光束光亮度的传递	(147)
5.4 光学成像系统的像面照度	(149)
5.5 光学材料及色散	(152)
5.6 光学系统的光能损失	(159)
习题	(163)
本章术语	(164)
第6章 光路计算及像差	(165)
6.1 像差概述	(165)
6.2 光线的光路计算	(167)
6.3 初级单色像差的一般表达式	(171)
6.4 初级单色像差	(173)
6.5 具有初级单色像差的物点像的结构	(178)
6.6 初级色差	(181)
6.7 像差级数展开与高级像差	(185)
6.8 像差校正	(188)
6.9 典型光学元件的像差	(193)
6.10 像差特征曲线与分析	(196)
6.11 波像差	(199)
习题	(204)
本章术语	(206)
第7章 典型光学系统	(209)
7.1 眼睛及其光学系统	(209)
7.2 显微镜	(216)
7.3 望远镜	(223)
7.4 目镜	(227)
7.5 摄影系统	(229)
7.6 投影系统	(235)
7.7 变焦距光学系统	(240)
7.8 光学系统的外形尺寸计算	(249)
习题	(255)
本章术语	(257)
第8章 现代光学系统	(260)
8.1 激光光学系统	(260)
8.2 傅里叶变换光学系统	(272)
8.3 自聚焦光纤光学系统	(280)

8.4 激光扫描光学系统	(284)
8.5 红外和微光光学系统	(288)
8.6 光电光学系统	(299)
8.7 紫外告警光学系统	(303)
8.8 机器视觉光学系统	(310)
8.9 LED 照明光学系统设计	(323)
8.10 仿生复眼光学系统	(333)
习题	(337)
本章术语	(338)
第 9 章 光学系统的像质评价	(341)
9.1 斯特里尔准则	(341)
9.2 瑞利准则	(342)
9.3 点列图	(343)
9.4 光学传递函数	(344)
习题	(349)
本章术语	(349)
附录 A 实验指导书	(351)
[实验一] 透镜焦距的测量	(351)
[实验二] 望远系统特性参数的测量	(353)
[实验三] 显微系统特性参数的测量	(355)
[实验四] 几何像差的现象及规律	(357)
[实验五] 远心系统及物(像)高测量	(359)
[实验六] 自组摄影光学系统	(361)
附录 B 部分习题参考答案	(363)
附录 C 模拟试题	(367)
模拟试题一	(367)
模拟试题二	(368)
模拟试题三	(369)
模拟试题四	(370)
模拟试题五	(371)
模拟试题六	(372)
模拟试题七	(373)
模拟试题八	(374)
模拟试题九	(375)
模拟试题十	(376)
参考文献	(378)

第 1 章

几何光学的基本概念及基本定律

Basic Concepts and Laws of Geometrical Optics

光学是物理学众多学科中最古老的学科之一,早在公元前 400 多年,中国就记录了世界上最早的光学知识。近代光学史始于 17 世纪初,是从开普勒光学研究开始,以望远镜(telescope)和显微镜(microscope)的发明为转折而发展起来的。光学是研究从微波、红外线、可见光、紫外线直到 X 射线的宽广波段范围内的关于电磁辐射的发生、传播、接收和显示,以及跟物质相互作用的科学。光学不仅是物理学中一门重要的基础学科,同时它也是一门应用性很强的学科,目前光学的研究对象早已不限于可见光部分,而是应用于日益宽广的电磁波段,它与很多其他学科如无线电物理、原子和原子核物理等之间相互交叠与渗透,其间的界线越来越模糊。

我们通常把光学分为几何光学(geometrical optics)、物理光学(physical optics)和量子光学(quantum optics)。几何光学是以光线为基础,研究光的传播规律和成像规律的一个重要的分支,而这种传播可以用很简单的几何关系来描述,这就是几何光学得名的原因。在几何光学中把物体看做由几何点组成,把它所发出的光束看做是无数几何光线的集合,光线的方向代表能量的传播方向,在此假设下根据光线的传播(propagate)规律,研究物体被透镜或其他光学元件成像的过程,以及设计光学仪器的光学系统等方面都显得十分方便和实用。但实际上,光线的概念与光的波动性是相违背的,因为无论是从光的衍射现象来看,还是从能量的观点来看,这种几何光线都不可能存在,所以几何光学只是波动光学的近似,是光波的波长趋近于零时的情况。当光学元件尺寸远大于波长时,用几何光学得出的结果与实际情况非常接近,因此在这种情况下应用几何光学来研究光学系统具有足够的精度。尽管采用几何光学的理论对光的研究只是真实情况的一种近似,但作此近似后,几何光学就可以不涉及光的物理本性,而能以其简便、直观的方式解决光学仪器中的光学技术问题,从而使这一理论得以广泛地应用和不断地不断发展。

光学仪器按用途可分为光学计量仪器、物理光学仪器、测绘仪器、光学测试仪器、天文光学仪器、军用光学仪器、医用光学仪器等十大类。光学仪器虽然种类繁多,功能各不相同,设计方法也差异很大,但从传递信息的角度来看,其总的功能不过是人类视觉器官的延伸,如高速摄影仪器的功能是扩大人眼对时间频率(每秒多少次)的分辨能力,望远镜、显微镜的功能是在广度和深度上扩大人眼对空间频率的分辨能力,摄影仪器的功能是扩大人眼储存信息的能力,光谱仪器的功能是扩大人眼对光谱线的分辨能力和微量分析能力。光学仪器主要是通过光学系

统来获取信息,光学系统是光学仪器的重要组成部分,通过对应用光学知识的学习,能具备基本的光学仪器设计能力。

1.1

几何光学的几个常用基本概念

Conventional Basic Concepts of Geometrical Optics

1. 发光点和发光体(point source and illuminant body)

从物理学的观点来看,凡是能够辐射光能的物体统称为发光体(或称为光源)。发光体是光的辐射体,一切自身发光(如恒星、灯等)或受到光照射而发光的物体均可视为发光体。发光体既有人造的,也有天然的。自然发光体是自然界中存在的,在不同程度上产生辐射的光源,如太阳、行星等。人造发光体是人为地将各种形式的能量(热能、电能、化学能)转换成光辐射的器件,其中利用电能产生光辐射的器件称为电光源,它是最主要的人造发光体。电光源又分为热辐射光源和光辐射光源两大类。它们具有不同的光谱特性,可供使用时选择。实验室或光学仪器中常用的光源主要有白炽灯、氢灯(可见光谱区主要光谱线为 0.434 1 μm、0.486 1 μm、0.656 3 μm)、汞灯(可见光谱区主要光谱线为 0.404 7 μm、0.546 1 μm、0.643 8 μm等)、氦灯(可见光谱区主要光谱线为 0.706 5 μm、0.587 6 μm)、钠灯(可见光谱区主要光谱线为 0.589 0 μm)和各种激光器等。几种常见的气体放电光源的主要参数如表 1-1 所示。

表 1-1 几种常见的气体放电光源的主要参数

Table 1-1 main parameters of conventional gas light source

型 号	功率 /W	电源电压 /V	几何尺寸/mm		寿命 /h	用 途
			长 L	外径 D		
氢灯 GP10H	10	220	202	130	20	折射仪、干涉仪等定标
氦灯 GP10He	10	220	127	95	100	折射仪、干涉仪等定标
汞灯 GP50HgCdZn	50	220	155	28	—	分光仪等定标

一个实际的光源总有一定的大小,当光源的大小和其辐射能的作用距离相比可忽略不计时,此发光体可视为点光源(或发光点)。例如,宇宙中体积十分庞大但是距离遥远的恒星,对于地球上的观察者来说就是一个点光源。在几何光学中点光源被认为是一个既无体积又无大小,但是能量密度为无限大的几何点。由于任何物体都可以看做由无数的点光源所组成,每一个点光源都独立地通过系统进行成像,物体的像就是所有点光源像的叠加,故在探讨光学系统对物体进行成像的问题时,通常以点作为基本成像元素来进行讨论与分析。

2. 光波(wave)

光是一种具有波粒二象性的物质,即光既具有波动性又具有粒子性,只是在一定的条件下,某一种性质显得更为突出。一般说来,除了研究光和物质相互作用的情况下必须考虑光的粒子性外,都可以把光作为电磁波看待,故而称之为光波。光波是一定波长范围内的电磁波,在整个电磁波谱中,能引起人眼视觉刺激的只有一小部分,称为可见光,通常可见光的范围取为 $\lambda=380\sim780\text{ nm}$,超出这个范围人眼就感觉不到。波长大于 780 nm 的光称为红外光(IR),波长小于 380 nm 的光称为紫外光(UV),电磁辐射波的范围及可见光谱的分布图如图 1-1 所示。

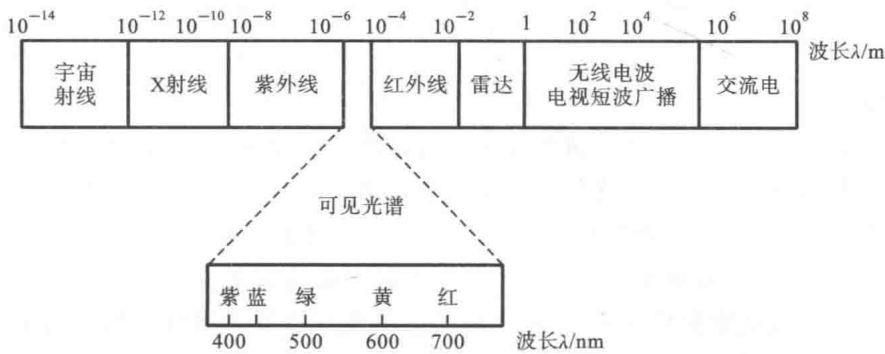


图 1-1 电磁波辐射范围及可见光谱分布图

Figure 1-1 emitting range of electromagnetic wave and visible spectrum distribution

由图 1-1 可见,波长最短的是宇宙射线,其波长只有 $10^{-15} \sim 10^{-14}$ m;波长最长的是交流电,波长可达 10^8 m;可见光谱仅占电磁辐射很小的一部分,可见光谱与颜色的关系如表 1-2 所示。

表 1-2 光谱颜色、波长及频率范围表

Table 1-2 wavelength,color and frequency of spectrum

颜 色	波 长	频 率
红色	625~780 nm	480~385 MHz
橙色	590~625 nm	510~480 MHz
黄色	565~590 nm	530~510 MHz
绿色	500~565 nm	600~530 MHz
青色	485~500 nm	620~600 MHz
蓝色	440~485 nm	680~620 MHz
紫色	380~440 nm	790~680 MHz

在可见光谱范围内,不同波长对人眼将引起不同的颜色感觉,可分解为红、橙、黄、绿、青、蓝、紫 7 种颜色的光。我们称具有单一波长的光为单色光,几种单色光混合而成的光为复色光。

3. 光的传播速度(speed of light)

由波动光学的相关理论可知,光波在真空中的传播速度为 $c \approx 3 \times 10^8$ m/s,不同波长的电磁波有不同的频率,频率 ν 、波长 λ 与速度 c 三者之间的关系为

$$\lambda \nu = c \tag{1-1}$$

当光波在其他透明介质(如水、玻璃)中传播时,其波长和速度都将发生改变,但频率不变,对人眼引起的颜色感觉也不发生改变。

4. 波面(wave front)

由光源发出的电磁波可看做以波面的形式传播,在某一瞬时,其振动相位相同的各点所构成的曲面称为波面(等相位面)。波面按形状可分为球面、平面和任意曲面。若光所处的介质为各向同性的均匀介质,电磁波面向各方向的传播速度相同,则有限远处发光点发出的是以发光点为中心的同心球面,称为球面波,无限远处发光点发出的是平面波。对于具有一定大小的

实际发光体,当光的传播距离比光源线度大得多的情况下,它所发出的光波也可近似视为球面波。

5. 光线(ray)

光线这一概念是人们直接从无数客观光学现象中抽象出来的,发光体向周围发出的带有辐射能量的几何线条称为光线。几何光学中认为光线是没有直径、没有体积,但携带能量并具有方向性的几何线,其方向代表光能的传播方向。显然,几何光学中发光点和光线的概念是简化了的抽象概念,在自然界中不能存在。物理学上的观点认为在各向同性的均匀介质中,辐射能量是沿着波面的法线方向传播的,因此物理学中的波面法线方向就相当于几何光学中光线的传播方向,如图 1-2 所示。

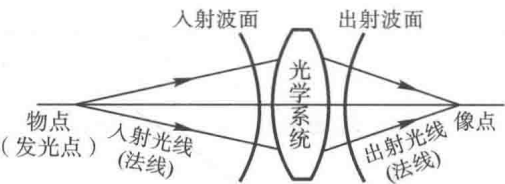


图 1-2 光线与波面法线的关系

Figure 1-2 relationship between ray and normal of wave front

光的传播方向可以用一个箭头来加以表示,这条带箭头的直线就成为一条光线。光学中引入发光点和光线的概念就是为了把本来十分复杂的光学成像和光能传播问题归结为光线的传播问题,从而可以利用简单的数学方法来方便地描述和解决问题。

6. 折射率 n (refractive index n)

折射率是表征透明光学介质光学性质的一个重要参量,它表示光在介质中传播时介质对光的一种特性,它与介质的电磁性质密切相关。折射率有绝对折射率及相对折射率之分,我们通常所说的折射率指的是介质的绝对折射率(简称折射率),用 n 来表示,定义为光从真空射入介质发生折射时,入射角 I 与折射角 I' 的正弦之比,即 $n = \frac{\sin I}{\sin I'}$ 。利用惠更斯原理不难证明介质折射率是一个与介质中的波速成反比的量,故后来又把折射率定义为真空中的光速 c (或波长 λ_0)与介质中的光速 v (或波长 λ)之比,即

$$n = c/v = \lambda_0/\lambda \tag{1-2}$$

可见折射率描述的是光在介质中传播速度减慢程度的一个量值。部分常见的介质材料折射率如表 1-3 所示。

表 1-3 部分常见介质材料折射率列表

Table 1-3 refractive index n of conventional medium

介质名称	折 射 率	介质名称	折 射 率
真空	1.000 0	红宝石	1.770 0
空气	1.000 3	钻石	2.417 0
液态二氧化碳	1.200 0	氯化钾	1.490 0
水	1.333 3	二碘甲烷	1.741 0
冰	1.309 0	液态石蜡	1.480 0

续表

介质名称	折 射 率	介质名称	折 射 率
乙醇	1.361 8	冕牌玻璃 K9	1.516 3
萤石	1.434 0	火石玻璃 F3	1.616 4
杉木油	1.515 0	丁香油	1.533 0
甘油	1.460 0	碘苯	1.616 0

在透明介质中,真空(或空气)的折射率是最小的,其他介质的折射率都大于 1。但是值得注意的是,并不是所有物质的折射率都遵循这一规律,像金属这类导电介质折射率的描述就与透明介质有很大的不同,由于这类介质一般为良导体,内部含有大量的自由电子,电导率很大,故其折射率是个复数,即 $\tilde{n}=n(1+i\kappa)$,式中 κ 为衰减系数,例如,金属铝(Al)的折射率 $\tilde{n}=1.44+5.23i$ 。

相对折射率是指光从一种介质(折射率为 n)射入另外一种介质(折射率为 n')发生折射时,第二种介质相对于第一种介质的折射率之比,即

$$n_{21} = \frac{n'}{n} \tag{1-3}$$

当前一种介质是空气(或真空)时,相对介质折射率刚好等于第二种介质折射率。

7. 光束(light beam)

波面法线即为光线,而与波面对应的所有光线的集合称为光束。常见的光束有像散光束、平行光束及同心光束。不聚交于同一点或不是由同一点发出的光束称为像散光束,其所对应的波面形状为非球面,如图 1-3(a)所示;没有会聚点而互相平行的光束称为平行光束,其所对应的波面形状为平面,如图 1-3(b)所示;相交于同一点或者由同一点发出的一束光线称为同心光束,其所对应的波面形状为球面,而同心光束又分为发散光束和会聚光束,分别如图 1-3(c)、(d)所示。同心光束或平行光束经过实际光学系统后可能会失去同心性,从而形成像散光束。由于会聚光束的所有光线实际相交于一点,故可以在接收屏上接收到亮点,而发散光束虽不能在屏上会聚成亮点,但却能被人眼直接观察。

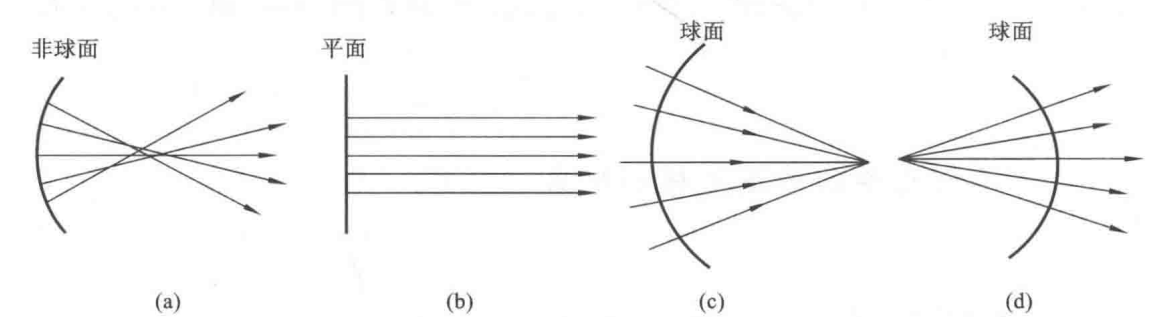


图 1-3 光束

(a) 像散光束;(b) 平行光束;(c) 会聚光束;(d) 发散光束

Figure 1-3 light beam

(a) astigmatic beam;(b) parallel beam;(c) convergent beam;(d) divergent beam

8. 光程(optical path length)

几何光学认为光程 S 相当于光在同一时间内在真空中所走过的几何路程,故光程又称光

的折合路程。如图 1-4(a)所示,光在某种介质中由 A 点传播到 B 点,其传播的几何路径是一条曲线,设该介质的折射率是一个与位置相关的函数 $n(l)$, dl 为曲线上微量的几何距离,则有

$$\Delta t = \int_A^B \frac{dl}{v}$$

式中, Δt 为光从 A 点传播到 B 点所使用的时间; v 为光在介质中的传播速度。又因为 $n(l) = c/v$, c 为真空中的传播速度,则有

$$\Delta t = \frac{1}{c} \int_A^B n(l) dl$$

根据光程的定义,光程为

$$s = c \cdot \Delta t = c \cdot \frac{1}{c} \int_A^B n(l) dl = \int_A^B n(l) dl \tag{1-4}$$

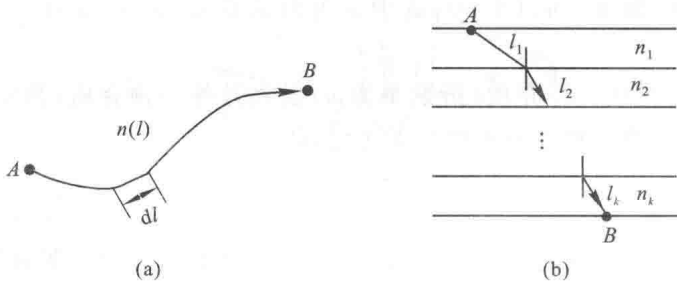


图 1-4 光程
Figure 1-4 optical path length

如果介质为各向同性(各向同性是指物质的物理、化学等方面的性质不会因方向的不同而有所变化的特性,即某一物质在不同的方向所测得的性能数值完全相同)均匀介质,则折射率是一个定值,此时光程为

$$s = nl \tag{1-5}$$

即各向同性均匀介质中的光程是指光在介质中传播的几何路程与所在介质折射率的乘积。

若光线从 A 点传播到 B 点,先后经过了 k 种各向同性均匀介质,介质折射率分别为 $n_1, n_2, n_3, \dots, n_k$, 在各介质中走过的路径分别为 $l_1, l_2, \dots, l_k$, 如图 1-4(b)所示,则所经历的光程为

$$s = n_1 l_1 + n_2 l_2 + \dots + n_k l_k = \sum_{i=1}^{i=k} n_i l_i \tag{1-6}$$

1.2

几何光的传播定律和现象
Propagating Principle and Phenomenon of Geometrical Optics

1. 几何光学的基本定律(basic laws of geometrical optics)
- 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及进行光学系统设计的理论依据。光的传播规律可以归纳为四条基本定律,即直线传播定律、独立传播定律、反射定律和折射定律。
- 1) 光的直线传播定律(law of rectilinear propagation)
- 在各向同性(isotropic)的均匀(homogeneous)介质中光沿着直线传播,即为直线传播定律。该定律能够很好地解释影子的形成、日食(solar eclipse)、小孔成像(pinhole imaging)等现

象,一切精密的天文测量、大地测量和其他测量也都是以此为基础的。

图 1-5 中分别给出了日食的原理以及于 2009 年 7 月 22 日拍摄的现象。其中,图 1-5(a)为日食形成原理;图 1-5(b)为潍坊城区拍摄的日偏食全过程;图 1-5(c)为观察到的日全食。

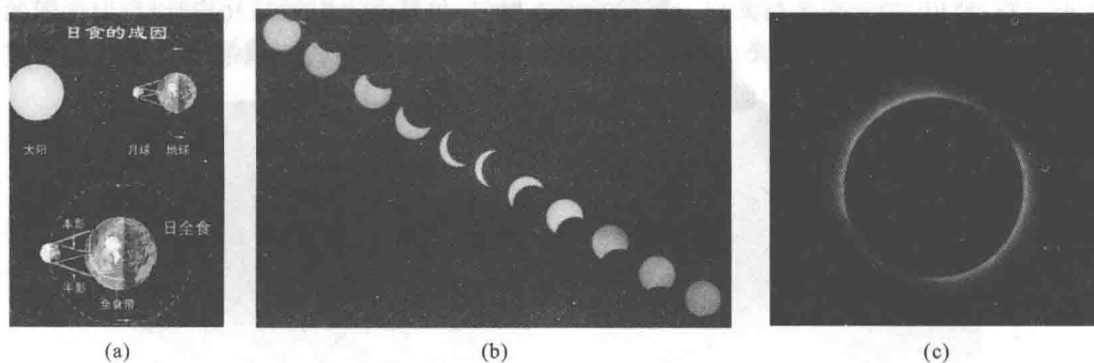


图 1-5 日食^①

Figure 1-5 solar eclipse

针孔相机(pinhole camera)是最典型的直线传播的实例,如图 1-6 所示,根据成像的定义,一个物点发出的光线必须交汇在同一个像点或其附近才能够成像,针孔就是以物理的方法约束了发自物点的光线,使通过小孔的光线落在同一个像点附近。随着针孔尺寸的逐渐增大,约束光线的能力越来越差,成像的效果也将逐步降低,最终经小孔所成的影像将完全消失,看到的只能是一个被照亮了的屏幕;反之,若逐渐减小针孔的尺寸,波动光学中的衍射效应将越来越强,当针孔尺寸小到与光波长量级相当时,衍射效应将显现得极为明显,成像的质量也将下降。

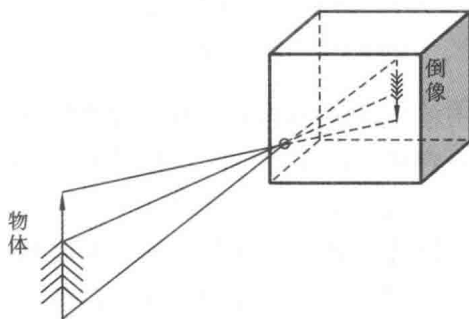


图 1-6 针孔相机的成像原理

Figure 1-6 imaging principle of pinhole camera

但是光并不是在所有的场合都是沿直线传播的,直线传播定律忽略了电磁波的衍射(diffraction),一旦光在传播过程中遇到小孔、狭缝等阻挡物体,则势必将发生衍射现象而偏离直线传播;此外,若光在非均匀介质中传播,光同样将偏离直线传播,其轨迹可能是任意形状的曲线。

2) 光的独立传播定律(law of independent propagation)

从不同光源发出的光束以不同的方向通过空间某点时,彼此互不干涉(interference),光束独立传播的现象称为光的独立传播定律。在各光束叠加处,其光强度只是简单的相加,即

$$I = I_1 + I_2 + \cdots + I_k \quad (1-7)$$

式中, I 为叠加位置处的光强度; $I_1, I_2, \cdots, I_k$ 分别为不同光束的光强度。

与直线传播定律相类似,独立传播定律也是在不考虑光的波动性时才是正确的。从上可见,几何光学忽略了光的波动性质,是波长近似为零的一种特殊情况表征。

3) 光的反射定律(law of reflection)

反射定律是指,当一束光投射到两种均匀介质的光滑分界表面上时,入射光线、反射光线和投射点法线三者在同一平面内,入射光线与反射光线分居法线的两侧,且入射角和反射角绝

^① 图片来自 <http://www.google.com>。

对值相等而符号相反,其数学表示形式为

$$I = -I''$$

(1-8)

如图 1-7 所示。若两不同介质的分界面是粗糙的,因分界表面凹凸不平,表面各点处的法线方向并不一致,所以,当一束平行光以一定的角度入射时,虽然各入射光线互相平行,但反射光线将向不同的方向反射,其反射光不再是平行光束,即发生漫反射现象(或漫射现象),但是对于粗糙表面上任一微小的反射面而言,反射定律依然成立,如图 1-8 所示。

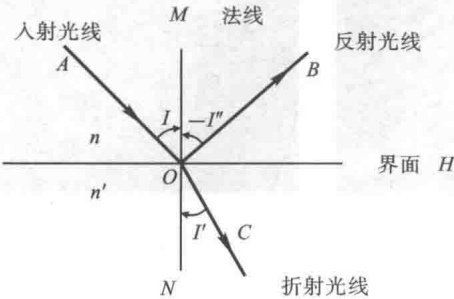


图 1-7 反射定律及折射定律
Figure 1-7 law of reflection and refraction

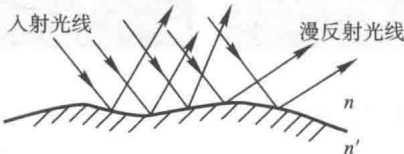


图 1-8 漫反射
Figure 1-8 diffuse reflection

很多物体,如植物、墙壁、衣服等,其表面粗看起来似乎是平滑的,但用放大镜仔细观察,就会看到其表面凹凸不平,所以本来是平行的太阳光被这些表面反射后,将射向不同的方向。

4) 光的折射定律(law of refraction)

折射定律是 1621 年由斯涅尔提出的,故又称斯涅尔定律(Snell’s law)。该定律指出入射光线、折射光线和投射点法线三者在同一平面内,入射角 I 的正弦与折射角 I' 的正弦之比与入射角的大小无关,仅由两介质的性质决定,在一定的温度和压力下,对一定波长的光线而言,该比值为一常数,为后一介质的折射率 n' 与前一介质的折射率 n 之比,即

$$\frac{\sin I}{\sin I'} = \frac{n'}{n} = n_{21} \quad \text{或} \quad n \sin I = n' \sin I'$$

(1-9)

式中, n 、 n' 分别是入射光所在介质和折射光所在介质的绝对折射率; n_{21} 是相对介质折射率。当前一种介质是空气(或真空)时,相对介质折射率刚好等于第二种介质折射率。

在式(1-9)中,若令 $n' = -n$,则有 $I' = -I$,此时折射定律就转化为反射定律,这表明反射定律是折射定律的一种特殊情况,凡是由折射定律推导出的适用于折射情况的公式,只要令 $n' = -n$ 便可应用于反射的情况,这在处理反射系统时有重要的应用。

折射定律不仅适用于均匀介质,同样适用于非均匀介质,当光在非均匀介质中传播时,可以把非均匀介质近似看做由无限多的均匀薄介质组合而成,在每一层薄介质中折射定律仍然适用,故光线在非均匀介质中的传播可以近似看做一个连续折射的过程,从而能够分析出光线传播的具体轨迹路径。随着介质性质的不同,光线传播的曲线将形状各异,如图 1-4(a) 所示。

图 1-9 所示为海面上或沙漠上经常会出现的一种特殊的光学现象——海市蜃楼,海市蜃楼现象出现的原因与介质折射率的非均匀分布及全反射现象有着密切的关联。在夏季,沙漠中的沙土被晒得灼热,因沙土的比热较小,温度上升极快,沙土附近的下层空气温度会上升至很高,而上层空气的温度仍然很低,这样就形成了气温的反常分布,接近沙土的下层热空气密度相对较小而上层冷空气的密度相对较大,这样空气折射率将呈现非均匀分布,即自下而上空气折射率逐渐增大。当远处较高物体反射出来的光,从上而下射入空气层中时将被不断地折