



高等院校“光电名师堂”系列教材

应用光学

Applied Optics

主 编 王文生

副主编 刘冬梅

向 阳

刘智颖

苗 华

陈方涵



华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>

应用光学

Applied Optics

主 编 王文生

副主编 刘冬梅 向 阳 刘智颖
苗 华 陈方涵

华中科技大学出版社

中国·武汉

内 容 提 要

本书内容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,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。

书中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同时,也掌握国际通用的光学专业术语。书末给出6套考试真题供读者自测,并附有应用光学实验。

本书不仅适合光电信息工程、测控技术与仪器、生物医学工程及相近专业的教材用书,亦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 主编. —武汉:华中科技大学出版社,2010.9
ISBN 978-7-5609-6180-4

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

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 080781 号

应用光学

王文生 主编

策划编辑:徐晓琦

责任编辑:田 密

封面设计:潘 群

责任校对:朱 霞

责任监印:周治超

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉)

武昌喻家山 邮编:430074 电话:(027)87557437

录 排:华中科技大学惠友文印中心

印 刷:武汉中远印务有限公司

开 本:787mm×1092mm 1/16

印 张:21.25

字 数:551千字

版 次:2010年9月第1版第1次印刷

定 价:37.00元



华中出版

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

高等院校“光电名师堂”系列教材

编委会

顾问

郁道银 天津大学教授
光电信息科学与工程专业教学指导分委员会主任委员

主任

金伟其 北京理工大学教授
光电信息科学与工程专业教学指导分委员会副主任委员
杨坤涛 华中科技大学教授
光电信息科学与工程专业教学指导分委员会副主任委员

编委(以姓氏拼音为序)

白廷柱 北京理工大学教授
邸旭 长春理工大学教授
光电信息科学与工程专业教学指导分委员会委员
胡先志 武汉邮电科学研究院教授
刘德明 华中科技大学教授
刘继芳 西安电子科技大学教授
刘劲松 华中科技大学教授
石顺祥 西安电子科技大学教授
王文生 长春理工大学教授
阎吉祥 北京理工大学教授
竺子民 华中科技大学教授

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”博士点现代光学测试方向带头人, 国家精品课程“应用光学”负责人, 国家双语教学示范课程“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, 1984—1986年德国斯图加特(Stuttgart)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, 获国家教育部资助, 从事光学相关目标探测技术研究。

王文生教授在国内外学术期刊(《光学学报》、《仪器仪表学报》、《兵工学报》、《光子学报》、《半导体光电》、《国际光学工程学会-SPIE》等)上发表学术论文 100 余篇, 其中 60 余篇进入 EI 索引和 ISTMI 索引; 独著或合著教材 4 本。

在“九五”、“十五”、“十一五”期间从事总装备部预研局、国防科工委等科研项目 10 项, 其中担任课题负责人 9 项; 目前负责总装备部预研局、国防科工委的科研项目 3 项, 负责企业科研 1 项。获国家实用新型专利 1 项——“半导体激光治疗仪用激光器保持装置及鼻腔动脉照射头”(2005 年批准), 国家发明专利 1 项——“一种光学非球面检测准万能补偿镜”(2007 年批准)。



前 言

应用光学是一门理论与实践结合紧密的,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的更新提出了更高的要求。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用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化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,例如,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、刘智影博士编写,第 6、第 7、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。

本书不仅适合作光电信息工程、测控技术与仪器、生物医学工程及相近专业的教材用书,亦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

二〇〇九年八月二十八日 于长春

目 录

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	(1)
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	(16)
习题	(19)
本章术语	(19)
第 2 章 高斯光学系统	(21)
2.1 高斯光学系统概述	(21)
2.2 单个折射面的光路计算及近轴区成像的物像关系	(22)
2.3 反射镜及共轴球面系统成像	(31)
2.4 高斯光学系统的基点和基面	(36)
2.5 高斯光学系统的物像关系	(42)
2.6 多光组组成的理想光学系统成像	(46)
2.7 双光组光学系统的组合	(49)
2.8 透镜	(56)
2.9 多光组光学系统的组合	(64)
习题	(69)
本章术语	(71)
第 3 章 平面系统	(73)
3.1 平面反射镜的旋转及应用	(73)
3.2 平行平板成像	(77)
3.3 反射棱镜	(80)
3.4 反射棱镜及棱镜系统成像坐标的判定及应用	(89)
3.5 折射棱镜	(93)
习题	(97)
本章术语	(100)
第 4 章 光学系统的光束限制	(101)
4.1 光阑的定义及分类	(101)
4.2 孔径光阑	(103)
4.3 视场光阑与渐晕	(110)
4.4 光学系统的景深及远心光路	(117)
4.5 典型系统的光束限制	(123)
习题	(126)
本章术语	(127)
第 5 章 光能及其计算	(129)
5.1 光度学的基本术语	(129)

5.2	光度学中的两个基本定律	(140)
5.3	光束光亮度的传递	(143)
5.4	光学成像系统的像面照度	(145)
5.5	光学材料及色散	(147)
5.6	光学系统的光能损失	(154)
	习题	(159)
	本章术语	(159)
第 6 章	光路计算及像差	(161)
6.1	像差概述	(161)
6.2	光线的光路计算	(162)
6.3	初级单色像差的一般表达式	(167)
6.4	初级单色像差	(169)
6.5	具有初级单色像差的物点像的结构	(174)
6.6	初级色差	(177)
6.7	像差级数展开与高级像差	(181)
6.8	像差校正	(183)
6.9	典型光学元件的像差	(188)
6.10	像差特征曲线与分析	(191)
6.11	波像差	(194)
6.12	非球面的光路计算及其像差	(199)
	习题	(201)
	本章术语	(203)
第 7 章	典型光学系统	(206)
7.1	眼睛及其光学系统	(206)
7.2	放大镜	(212)
7.3	显微镜	(214)
7.4	望远镜	(220)
7.5	目镜	(224)
7.6	摄影系统	(226)
7.7	投影系统	(232)
7.8	变焦距光学系统	(234)
7.9	光学系统的外形尺寸计算	(241)
	习题	(246)
	本章术语	(248)
第 8 章	现代光学系统	(251)
8.1	激光光学系统	(251)
8.2	傅里叶变换光学系统	(262)
8.3	自聚焦光纤光学系统	(269)
8.4	激光扫描光学系统	(273)
8.5	红外和微光光学系统	(277)

8.6 光电光学系统	(284)
习题	(288)
本章术语	(288)
第 9 章 光学系统的像质评价	(290)
9.1 斯特里尔准则	(290)
9.2 瑞利准则	(291)
9.3 点列图	(292)
9.4 光学传递函数	(293)
习题	(298)
本章术语	(298)
附录 A 实验指导书	(300)
[实验一] 透镜焦距的测量	(300)
[实验二] 望远系统特性参数的测量	(302)
[实验三] 显微系统特性参数的测量	(304)
[实验四] 几何像差的现象及规律	(306)
[实验五] 色散实验	(308)
附录 B 部分习题参考答案	(311)
附录 C 模拟试题	(315)
模拟试题一	(315)
模拟试题二	(316)
模拟试题三	(318)
模拟试题四	(319)
模拟试题五(双语教学模拟试题)	(321)
参考文献	(323)

CONTENTS

Chapter 1 Basic Concepts and Laws of Geometrical Optics	(1)
1.1 Conventional Basic Concepts of Geometrical Optics	(1)
1.2 Propagating Principle and Phenomenon of Geometrical Optics	(6)
1.3 Optical System and Perfect Imaging	(16)
Exercises	(19)
Terminology	(19)
Chapter 2 Gaussian Optical System	(21)
2.1 Gaussian Optical System Survey	(21)
2.2 Ray Tracing of Single Refracting Surface and Relationship between Object and Image in Paraxial Region Imaging	(22)
2.3 Imaging of Mirror and Coaxial Spherical System	(31)
2.4 Cardinal Points and Cardinal Planes of Gaussian Optical System	(36)
2.5 Relationship between The Object and Image in Gaussian Optical System	(42)
2.6 Imaging of Ideal Optical System Composed of Multi-elements	(46)
2.7 Combination of Two Optical Systems	(49)
2.8 Lens	(56)
2.9 Combination of Multi-optical System	(64)
Exercises	(69)
Terminology	(71)
Chapter 3 Plane Surface System	(73)
3.1 Rotation and Application of Plane Mirror	(73)
3.2 Imaging of Parallel Plate	(77)
3.3 Reflective Prism	(80)
3.4 Application and Determination of Imaging Coordinate of Reflective Prism and System	(89)
3.5 Refractive Prism	(93)
Exercises	(97)
Terminology	(100)
Chapter 4 Beam Limiting in Optical System	(101)
4.1 Definition and Classification of Stop	(101)
4.2 Aperture Stop	(103)
4.3 Field Stop and Vignetting	(110)
4.4 Depth of Field in Optical System and Telecentric System	(117)
4.5 Beam Limiting of Typical System	(123)
Exercises	(126)
Terminology	(127)

Chapter 5 Optical Energy and Calculation	(129)
5.1 Basic Nomenclature of Photometry	(129)
5.2 Two Basic Laws in Photometry	(140)
5.3 Transmission of Luminous Luminance	(143)
5.4 Image Plane Illuminance of Imaging System	(145)
5.5 Optical Material and Dispersion	(147)
5.6 Energy Loss of Optical System	(154)
Exercises	(159)
Terminology	(159)
Chapter 6 Ray Tracing and Aberration	(161)
6.1 Abstract of Aberration	(161)
6.2 Ray Tracing	(162)
6.3 General Expressions of Primary Monochromatic Aberration	(167)
6.4 Primary Monochromatic Aberration	(169)
6.5 Structure of The Image Point with Monochromatic Aberration	(174)
6.6 Primary Chromatic Aberration	(177)
6.7 Series Expansion of Aberration and High Order Aberration	(181)
6.8 Aberration Correction	(183)
6.9 Aberration of Typical Optical Element	(188)
6.10 Characteristic Curve of Aberration and Analysis	(191)
6.11 Wavefront Aberration	(194)
6.12 Ray Tracing of Aspherical Surface and Its Aberration	(199)
Exercises	(201)
Terminology	(203)
Chapter 7 Typical Optical System	(206)
7.1 Eye and Its Optical System	(206)
7.2 Magnifier	(212)
7.3 Microscope	(214)
7.4 Telescope	(220)
7.5 Eyepiece	(224)
7.6 Photographic Optical System	(226)
7.7 Projector	(232)
7.8 Zoom Lens	(234)
7.9 Size Calculation of Optical System	(241)
Exercises	(246)
Terminology	(248)
Chapter 8 Modern Optical System	(251)
8.1 Laser Optical System	(251)
8.2 Fourier Transform Optical System	(262)
8.3 Self-focusing Fiber Optical System	(269)

8.4 Laser Scanning Optical System	(273)
8.5 Infrared and Low-light-level Optical System	(277)
8.6 Photoelectric Optical System	(284)
Exercises	(288)
Terminology	(288)
Chapter 9 Image Quality Evaluation of Optical System	(290)
9.1 Strehl Criterion	(290)
9.2 Rayleigh Criterion	(291)
9.3 Spot Diagram	(292)
9.4 Optical Transfer Function	(293)
Exercises	(298)
Terminology	(298)
Appendix A Experiment Instruction	(300)
Experiment 1 Measurement of the focal length of a lens	(300)
Experiment 2 Measurement of Characteristic Parameters of Telescope	(302)
Experiment 3 Measurement of Characteristic Parameters of Microscope	(304)
Experiment 4 The Phenomenon of geometrical aberration and Its Law	(306)
Experiment 5 Experiment of Dispersion	(308)
Appendix B Reference answer of Exercises	(311)
Appendix C Simulation Test	(315)
Simulation Test 1	(315)
Simulation Test 2	(316)
Simulation Test 3	(318)
Simulation Test 4	(319)
Simulation Test 5(Simulation Test of Chinese-English Teaching)	(321)
参考文献	(323)

第 1 章 几何光学的基本概念及基本定律

Chapter 1 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,而这种传播可以用几个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发展。

光学仪器与一般的仪表仪器最主要的区别在于,光学仪器取得信息的主要渠道是通过光学系统,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

一个光的辐射体,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 $0.434\ 1\ \mu\text{m}$ 、 $0.486\ 1\ \mu\text{m}$ 、 $0.656\ 3\ \mu\text{m}$)、汞灯(可见光谱区主要光谱线为 $0.404\ 7\ \mu\text{m}$ 、 $0.546\ 1\ \mu\text{m}$ 、 $0.643\ 8\ \mu\text{m}$ 等)、氦灯(可见光谱区主要光谱线为 $0.706\ 5\ \mu\text{m}$ 、 $0.587\ 6\ \mu\text{m}$)、钠灯(可见光谱区主要光谱线为 $0.589\ 0\ \mu\text{m}$)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(light 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 $780\ \text{nm}$ 的光称为红外光(IR),波长小于 $380\ \text{nm}$ 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

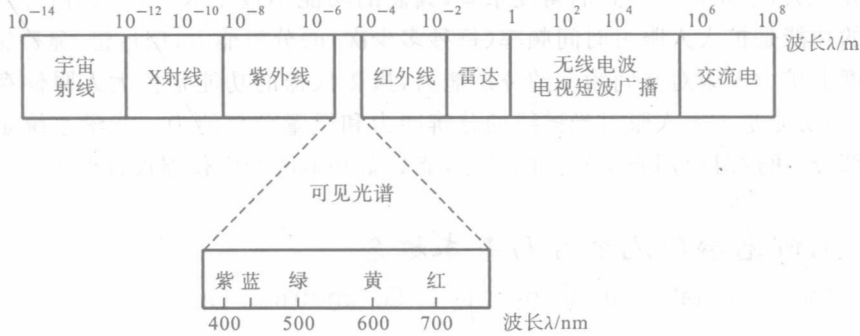


图 1-1 电磁波辐射范围及可见光谱分布图

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

所示。

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	565~570 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)

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、波长与速度三者之间的关系为

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

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。

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

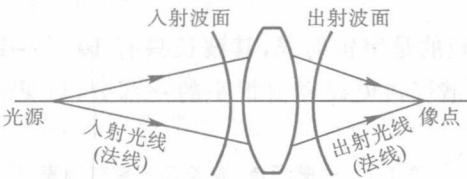


图 1-2 光线与波面法线的关系

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

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。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 index of refraction 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
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 $\tilde{n} = 1.44 + 5.23i$ 。

除了绝对折射率外还有相对折射率,即光从一种介质射入另外一种介质发生折射时,第二

种介质相对于第一种介质的折射率之比,即

$$n_{21} = \frac{n'}{n} \quad (1-3)$$

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。常见的光束有同心光束、像散光束及平行光束。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。

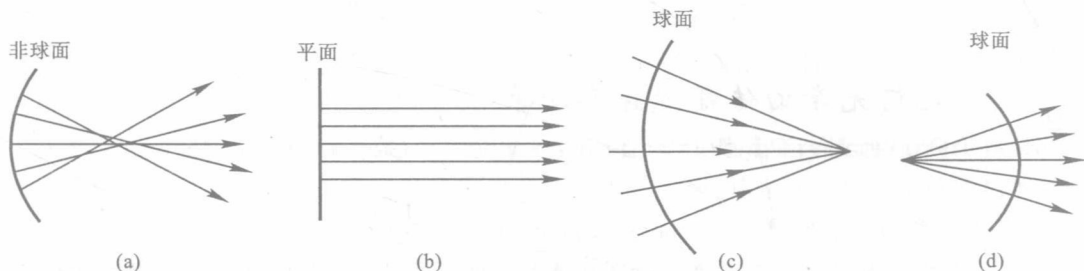


图 1-3 光束

(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,故光程又称为光的折合路程。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

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

如果介质为各向同性均匀介质,则折射率是个定值,此时光程为

$$s = nl \quad (1-5)$$

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