



普通高等教育“十三五”规划教材



光电信息科学与工程类专业规划教材

应用光学

赵存华 丁超亮 编著

中国工信出版集团



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

普通高等教育“十三五”规划教材
光电信息科学与工程类专业规划教材

应 用 光 学

赵存华 丁超亮 编著

電子工業出版社·

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书以“讲座式”形式编排应用光学课程内容，每一章为 1 个讲座，2 小时授课，全书共设计 31 个讲座。每一讲的内容详实、完整、大小适中。同时，在学期期中和期末，安排了两次课程设计，要求学生以论文的形式提交，对学生科研能力的训练起到了重要的作用。

本书包含了应用光学的基本知识和基本理论，如理想成像理论、目视光学仪器原理、平面镜棱镜系统、光阑、光度学基础、像差理论概述和常见光学仪器等。同时，增加了部分实用性较强、与新技术和新理论有密切关系的知识，如矩阵光学、梯度折射率光学和 ZEMAX 软件概述等。为学生后续课程的学习奠定了必要的基础。

本书可以作为普通高等学校光电信息类专业的教材或者参考书，也可以作为涉光类科学研究者或工程技术人员的自学参考书。

未经许可，不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有，侵权必究。

图书在版编目 (CIP) 数据

应用光学 / 赵存华, 丁超亮编著. —北京: 电子工业出版社, 2017.4

光电信息科学与工程类专业规划教材

ISBN 978-7-121-30958-8

I. ①应… II. ①赵… ②丁… 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 (2017) 第 029735 号

责任编辑: 韩同平 特约编辑: 邹凤麒 王 博 段丹辉

印 刷: 三河市双峰印刷装订有限公司

装 订: 三河市双峰印刷装订有限公司

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编: 100036

开 本: 787×1092 1/16 ·印张: 15.5 字数: 496 千字

版 次: 2017 年 4 月第 1 版

印 次: 2017 年 4 月第 1 次印刷

定 价: 45.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010) 88254888, 88258888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

本书咨询联系方式: 88254113。

前言

我曾经见到过一本美国的 *Lens Design* 教材，它以照相物镜的发展历史为主线，利用 38 章共 38 个讲座，每个讲座就着一个主题，以 2 小时报告的形式进行讲授。*Lens Design* 已经成为光学设计初学者的一本“宝典”。我深读此书，觉得它十分适合用作教材，它的授课形式很值得借鉴。于是，在我给大学本科生讲授“应用光学”数年之后，就有了一个冲动：将《应用光学》也写成报告形式的教材，以便更加有利于授课。事实上，国内有很多优秀的《应用光学》教材，经过几十年的使用，证明是经典的，也很值得借鉴。我对《应用光学》教材的改造，权作一种尝试，它的成功与否将会在后续的授课中来验证。

本教材包含了基础的《应用光学》知识和理论，如理想成像理论、高斯光学、眼视光学、目视光学仪器原理、平面镜棱镜系统、光栏、光度学基础、像差理论概述和常见光学仪器等。同时，增加了部分实用性较强、与新技术和新理论有密切关系的知识，如矩阵光学、梯度折射率光学和 ZEMAX 软件概述等。矩阵光学在激光传输理论、张量光学、离轴非对称光学系统设计中都有重要应用。梯度折射率材料虽然发展较早，但是未受到重视，对于我们熟知的大气层的梯度折射率理论，很少有在应用光学课程中体现。国内外近期研究发现，随着梯度折射率材料制造技术的改进，梯度折射率材料还可能全面替代非球面，在未来光学设计中有可能占据重要的地位。同时，梯度折射率理论，在眼视光学、激光晶体热效应分布等方面也有应用。ZEMAX 软件已经不仅仅是光学设计师的专有软件，对于从事光学工程的研究者或者工程师，它的使用已经是必不可少的工具之一。

本书在编写过程中尽量梳理各种理论之间的关系，尽量做到前后顺序的科学化，保证后面使用时前面要讲授过。同时，对于每一章，要力求一定的完整性，就着一个课题做深入的讲授，避免知识点成散状分布，使学生更能系统理解知识点之间的关联性，不容易混乱。内容安排不多不少，两个小时一个报告，讲授一章，教师可根据基本理论扩展讲授一些自己科研、现实生活或者经典文献中的光学现象，以便引起学生浓厚的学习兴趣。

为了与国际教学理念接轨，也便于学生养成研究的良好习惯，本书在第 17 章和第 33 章分别安排了期中课程设计和期末课程设计，让学生以写论文的形式提交作业。我们认为，严格的课程设计比课后作业会获得更好的教学效果。

全书共 33 章，除去两个课程设计，共 31 个讲座或报告，如果全讲授，需要 62 个学时。一般平均每学期 18 周，如果安排每周 4 学时，则共授课时 72 个学时，除去讲座余下的 10 个学时，可开设为实验课。部分学校安排《应用光学》课时为 54 学时，可以考虑舍去部分内容，比如传统《应用光学》教材中很少出现的第 10 章、第 31 章和第 32 章，或者略去部分内容。

本书第 1~8 章由丁超亮编写，第 9~33 章由赵存华编写，全书由赵存华统稿。贾红撰写了第 25 章中的部分内容，本书中的所有图表由孙梅霞和杜娟绘制，张相辉在本书的编写过程

中提出了十分有意义的建议。本书的成功出版得到了广泛的支持，包括学校院系领导的关心，同行老师的重要意见和建议，以及几届学生讲授中的互动，他们对本书质量的提高起到了重要的作用，在此一并感谢。另外，家人也十分支持我们的工作，忍受了我们全身心的投入，并且给予我们很大的帮助，在此表示深深的感谢。

本书是一个新的尝试和探索，一定有很多不当之处，欢迎读者不吝珠玉，给予批评指正。作者的联系方式为：zhao.cun.hua@163.com。

编著者

目 录

第1章 什么是光	(1)	4.1 共轴球面系统的光路计算公式	(20)
1.1 光是什么	(1)	4.1.1 光路计算公式	(20)
1.1.1 微粒说与波动说	(1)	4.1.2 转面公式	(21)
1.1.2 电磁波谱	(2)	4.2 符号规则	(22)
1.1.3 可见光	(3)	4.2.1 线量的符号规则	(22)
1.1.4 视见函数	(4)	4.2.2 角量的符号规则	(23)
1.2 光的传播	(5)	4.2.3 反射处理	(23)
1.2.1 光线和光束	(5)	4.2.4 有限远成像	(24)
1.2.2 光速	(5)	4.3 计算实例	(24)
习题	(6)	4.3.1 单透镜成像	(24)
第2章 几何光学基本定律	(7)	4.3.2 圆柱形光纤焦点位置	(25)
2.1 光的直线传播定律	(7)	习题	(26)
2.1.1 光的直线传播	(7)	第5章 近轴光学	(27)
2.1.2 直线传播的破坏	(7)	5.1 近轴成像理想	(27)
2.2 光的独立传播定律	(7)	5.2 近轴光学基本公式	(28)
2.3 光的反射定律	(8)	5.2.1 投射高及其符号规则	(28)
2.4 光的折射定律	(8)	5.2.2 另一个近轴光路计算公式	(28)
2.5 光路可逆	(9)	5.2.3 近轴光学基本公式的推导	(29)
2.6 Snell 定律	(9)	5.3 近轴物像关系	(30)
2.6.1 折射率	(9)	5.3.1 物高、像高及其符号规则	(30)
2.6.2 Snell 定律的形式	(10)	5.3.2 垂轴放大率 β	(30)
2.6.3 Snell 定律的讨论	(10)	5.3.3 垂轴放大率的讨论	(31)
2.7 全反射	(11)	5.4 近轴光学的作用	(31)
2.7.1 全反射现象	(11)	习题	(32)
2.7.2 全反射的应用	(12)	第6章 作图法求理想光学系统的物像关系	(33)
习题	(13)	6.1 主点和主平面	(33)
第3章 理想光学系统	(14)	6.2 焦点和焦平面	(33)
3.1 成像的概念	(14)	6.2.1 像方焦点和像方焦平面	(33)
3.2 理想像	(15)	6.2.2 物方焦点和物方焦平面	(34)
3.2.1 什么是理想像	(15)	6.2.3 焦距	(34)
3.2.2 理想像的违背	(15)	6.3 作图法	(35)
3.3 理想光学系统	(16)	6.3.1 常用两条作图光线	(35)
3.3.1 光学系统	(16)	6.3.2 实例分析	(35)
3.3.2 理想光学系统的成像特性	(17)	6.3.3 课堂作图训练	(37)
3.3.3 共轴理想光学系统	(18)	习题	(37)
习题	(19)	第7章 高斯光学	(38)
第4章 共轴球面系统的光路计算	(20)		

7.1 牛顿公式.....	(38)	10.3.1 单透镜.....	(62)
7.2 高斯公式.....	(39)	10.3.2 两个理想光学系统的组合.....	(62)
7.3 两套公式对比与例题.....	(40)	10.4 矩阵光学例题.....	(63)
7.3.1 两套公式对比.....	(40)	习题.....	(64)
7.3.2 例题.....	(41)	第 11 章 人眼的光学特性	(65)
7.4 拉格朗日不变量.....	(41)	11.1 人眼的结构.....	(65)
7.5 物方焦距和像方焦距的关系.....	(42)	11.2 人眼的最小分辨角.....	(66)
习题.....	(43)	11.3 人眼的调节.....	(67)
第 8 章 基点和基面	(44)	11.3.1 瞳孔调节.....	(67)
8.1 单折射球面的基点和基面.....	(44)	11.3.2 视度调节.....	(67)
8.1.1 主点和主平面.....	(44)	11.4 人眼的缺陷及其校正.....	(68)
8.1.2 焦点和焦平面.....	(45)	11.4.1 近视眼.....	(69)
8.1.3 单反射面的基点和基面.....	(45)	11.4.2 远视眼.....	(70)
8.2 共轴球面光学系统的基点和基面.....	(45)	11.4.3 眼镜片的制作.....	(71)
8.3 光学系统的三种放大率.....	(46)	习题.....	(71)
8.3.1 垂轴放大率 β	(46)	第 12 章 传统光学系统的原理	(72)
8.3.2 轴向放大率 α	(46)	12.1 目视光学系统的要求.....	(72)
8.3.3 角放大率 γ	(47)	12.2 放大镜的原理.....	(73)
8.3.4 三种放大率的关系.....	(47)	12.3 显微镜的原理.....	(73)
8.4 节点和节平面.....	(47)	12.4 望远镜的原理.....	(75)
8.5 无限远共轭的理想像高与理想物高.....	(49)	12.5 光学仪器的视度调节.....	(78)
8.5.1 无限远共轭的理想像高.....	(49)	习题.....	(78)
8.5.2 无限远共轭的理想物高.....	(50)	第 13 章 平面镜棱镜的应用	(79)
习题.....	(50)	13.1 平面镜成像性质.....	(79)
第 9 章 理想光学系统的组合	(51)	13.1.1 平面镜成镜像.....	(79)
9.1 两个理想光学系统的组合.....	(51)	13.1.2 平面镜的旋转.....	(80)
9.1.1 主点和焦点位置.....	(51)	13.1.3 双平面镜.....	(80)
9.1.2 组合焦距.....	(52)	13.2 棱镜及类型.....	(81)
9.1.3 光焦度.....	(53)	13.3 平面镜棱镜的作用.....	(82)
9.1.4 实例.....	(55)	13.4 最小偏向角.....	(83)
9.2 单透镜计算.....	(55)	13.5 光楔.....	(84)
9.2.1 单透镜的焦距.....	(55)	习题.....	(85)
9.2.2 主面位置.....	(56)	第 14 章 棱镜的展开	(86)
9.2.3 薄透镜.....	(57)	14.1 棱镜展开的要求.....	(86)
9.2.4 常见透镜的主面.....	(57)	14.2 直角棱镜的展开.....	(87)
习题.....	(58)	14.3 五角棱镜的展开.....	(88)
第 10 章 矩阵光学基础	(59)	14.4 靴形棱镜的展开.....	(88)
10.1 光线的矩阵描述.....	(59)	14.5 平行平板的成像性质.....	(89)
10.2 物像关系矩阵.....	(60)	14.5.1 平行平板的成像特性.....	(89)
10.2.1 物像关系矩阵的形成.....	(60)	14.5.2 等效空气层.....	(90)
10.2.2 基点和基面.....	(61)	14.5.3 非近轴等效空气层.....	(90)
10.3 两元系统.....	(62)	习题.....	(92)

第 15 章 平面镜棱镜系统成像方向	(93)	习题.....	(117)
15.1 屋脊棱镜.....	(93)	第 19 章 远心光路、场镜和景深	(118)
15.2 角隅棱镜.....	(94)	19.1 远心光路.....	(118)
15.3 平面镜棱镜成像方向.....	(95)	19.1.1 物方远心光路.....	(118)
15.3.1 坐标镜像法.....	(96)	19.1.2 像方远心光路.....	(119)
15.3.2 画线法.....	(96)	19.2 场镜.....	(119)
15.3.3 法则法.....	(97)	19.3 景深.....	(120)
习题.....	(98)	19.3.1 景深概念.....	(120)
第 16 章 棱镜转动定理	(99)	19.3.2 景深计算.....	(120)
16.1 棱镜转动定理.....	(99)	19.3.3 景深的基准物平面.....	(122)
16.1.1 棱镜转动定理的表达式.....	(99)	习题.....	(123)
16.1.2 常见的棱镜转动.....	(100)	第 20 章 光度学基本量 I	(124)
16.2 转动矩阵.....	(101)	20.1 立体角.....	(124)
16.2.1 转动矩阵的形式.....	(101)	20.1.1 立体角的概念.....	(124)
16.2.2 作用矩阵.....	(101)	20.1.2 立体角的计算.....	(124)
16.3 光轴偏与像倾斜.....	(102)	20.2 光通量.....	(125)
16.3.1 光轴偏与像倾斜的求解.....	(102)	20.2.1 辐射通量.....	(125)
16.3.2 特征方向和特征平面.....	(103)	20.2.2 光通量.....	(126)
16.4 棱镜的偏差.....	(103)	20.2.3 光视效能.....	(126)
16.4.1 光学平行差.....	(103)	20.3 发光强度.....	(127)
16.4.2 屋脊棱镜的双像差.....	(104)	20.4 光出射度.....	(128)
习题.....	(105)	习题.....	(128)
第 17 章 期中课程设计	(106)	第 21 章 光度学基本量 II	(129)
17.1 期中课程设计要求.....	(106)	21.1 光照度.....	(129)
17.2 双分离望远物镜的参数.....	(107)	21.1.1 光照度的定义.....	(129)
17.3 作图法.....	(107)	21.1.2 光照度公式.....	(130)
17.4 光路计算公式.....	(107)	21.2 光亮度.....	(131)
17.5 近轴光学.....	(108)	21.3 光学系统中的光亮度传递.....	(132)
17.6 矩阵光学.....	(108)	21.3.1 同种介质中光亮度的传递.....	(132)
17.7 高斯光学.....	(109)	21.3.2 折射时光亮度的传递.....	(132)
17.8 棱镜外形尺寸.....	(110)	习题.....	(134)
第 18 章 光阑与光束选择	(111)	第 22 章 光学系统像平面照度	(135)
18.1 为什么用光阑.....	(111)	22.1 朗伯辐射体.....	(135)
18.2 光阑分类.....	(112)	22.1.1 朗伯辐射体.....	(135)
18.2.1 孔径光阑.....	(112)	22.1.2 发光面的光通量.....	(136)
18.2.2 视场光阑.....	(112)	22.1.3 全扩散表面.....	(136)
18.2.3 渐晕光阑.....	(113)	22.2 光学系统像平面照度.....	(137)
18.2.4 消杂光光阑.....	(113)	22.2.1 像平面轴上点光照度.....	(137)
18.3 望远系统中成像光束的选择.....	(114)	22.2.2 像平面轴外点光照度.....	(137)
18.3.1 孔径光阑.....	(114)	22.3 照相物镜像平面照度.....	(138)
18.3.2 视场光阑.....	(115)	22.3.1 照相物镜的像平面照度.....	(138)
18.4 显微系统中成像光束的选择.....	(115)	22.3.2 曝光量.....	(139)

习题	(140)	26.1 球差	(162)
第 23 章 主观光亮度与光能损失	(141)	26.2 场曲和彗差	(163)
23.1 主观光亮度	(141)	26.2.1 子午面内场曲和彗差	(163)
23.1.1 人眼直接观察时的主观 光亮度	(141)	26.2.2 弧矢面内场曲和彗差	(164)
23.1.2 望远镜观察发光点的主观 光亮度	(142)	26.2.3 像散	(164)
23.1.3 望远镜观察发光面的主观 光亮度	(143)	26.3 畸变	(165)
23.2 光学系统中光能损失	(143)	26.4 色差	(165)
23.2.1 反射损失	(143)	26.4.1 色散与玻璃图	(165)
23.2.2 吸收损失	(144)	26.4.2 轴向色差	(166)
23.2.3 光学系统的透过率	(144)	26.4.3 垂轴色差	(167)
23.2.4 透过率计算实例	(145)	26.5 像差分类	(168)
习题	(146)	26.6 像差曲线	(168)
第 24 章 两种视觉 体视与色觉	(147)	习题	(169)
24.1 体视	(147)	第 27 章 设计评价 II 综合方法	(170)
24.1.1 空间深度感觉	(147)	27.1 斯特列尔比	(170)
24.1.2 双目立体视觉	(148)	27.2 光线扇形图	(171)
24.1.3 双目观察仪器	(149)	27.3 点列图	(171)
24.2 色觉	(150)	27.4 能量环	(172)
24.2.1 颜色色觉	(150)	27.5 波像差	(173)
24.2.2 格拉斯曼定律	(150)	27.6 调制传递函数	(174)
24.2.3 颜色匹配	(151)	27.6.1 MTF 曲线	(174)
24.3 色度学	(151)	27.6.2 MTF 在像质评价中的应用	(176)
24.3.1 色度学基础	(151)	习题	(176)
24.3.2 CIE 标准色度学系统	(152)	第 28 章 望远镜和显微镜	(177)
24.3.3 光源的颜色特性	(155)	28.1 望远镜的技术要求	(177)
习题	(155)	28.2 望远镜的物镜	(178)
第 25 章 像质评价	(156)	28.2.1 望远物镜技术参数	(178)
25.1 光学系统的要求	(156)	28.2.2 望远物镜类型	(179)
25.2 后评价方法	(157)	28.3 显微镜的技术要求	(180)
25.2.1 一阶特性测量评价	(157)	28.4 显微镜的物镜	(181)
25.2.2 像质评价之分辨率	(158)	28.5 目镜	(182)
25.2.3 像质评价之星点检验	(158)	28.5.1 目镜技术参数	(182)
25.3 理想光学系统的分辨率	(159)	28.5.2 目镜类型	(183)
25.3.1 瑞利判据	(159)	习题	(184)
25.3.2 望远镜分辨率	(160)	第 29 章 照相机和投影仪	(185)
25.3.3 照相物镜分辨率	(160)	29.1 照相物镜	(185)
25.3.4 显微镜分辨率	(161)	29.1.1 照相物镜的技术要求	(185)
习题	(161)	29.1.2 照相物镜的类型	(187)
第 26 章 设计评价 I 塞德像差	(162)	29.2 照相机取景系统	(189)
		29.3 投影仪照明系统	(191)
		29.4 投影物镜	(192)
		29.4.1 投影物镜的技术要求	(192)

29.4.2 投影物镜的类型	(193)	31.4.2 光线方程的解	(206)
习题	(193)	31.4.3 GRIN 成像特性	(207)
第 30 章 新型光学系统	(194)	习题	(209)
30.1 红外光学系统	(194)	第 32 章 ZEMAX 软件概述	(210)
30.1.1 概述	(194)	32.1 数据输入	(210)
30.1.2 红外物镜	(196)	32.1.1 ZEMAX 软件交互界面	(210)
30.1.3 红外光学系统的应用	(196)	32.1.2 输入镜头参数	(211)
30.2 激光光学系统	(197)	32.1.3 通用对话框	(212)
30.2.1 激光束特性	(197)	32.1.4 视场数据对话框	(213)
30.2.2 激光光学系统	(198)	32.1.5 波长数据对话框	(215)
30.3 数码影像光学系统	(199)	32.1.6 玻璃库对话框	(216)
30.3.1 光电感光器件与摄像物镜	(199)	32.2 查看输入结果	(216)
30.3.2 数码影像系统	(200)	32.2.1 镜头结构参数	(216)
习题	(200)	32.2.2 轮廓图	(216)
第 31 章 梯度折射率成像	(201)	32.2.3 查看一阶特性	(217)
31.1 大气折射率	(201)	32.3 分析输入结果	(218)
31.2 梯度折射率材料分类	(202)	习题	(219)
31.2.1 径向梯度折射率材料	(202)	第 33 章 期末课程设计	(220)
31.2.2 轴向梯度折射率材料	(202)	33.1 期末课程设计要求	(220)
31.2.3 球向梯度折射率材料	(203)	33.2 周视瞄准镜结构	(220)
31.2.4 层状梯度折射率材料	(203)	33.3 周视瞄准镜计算	(221)
31.3 梯度折射率的光线方程	(203)	33.3.1 一阶特性参数计算	(221)
31.3.1 程函方程	(203)	33.3.2 外形尺寸计算	(222)
31.3.2 光线方程	(204)	33.3.3 成像方向与棱镜转动	(225)
31.3.3 费马原理	(204)	33.3.4 光能计算	(226)
31.3.4 光学方向余弦	(204)	附录 A 中英文术语	(227)
31.4 GRIN 透镜成像	(205)	附录 B 习题参考答案	(232)
31.4.1 GRIN 光线方程	(205)	参考文献	(237)

第1章 什么是光

我们置身于一个五彩缤纷的世界，白白的雪，火红的花，绿绿的小草。我们有感受这个五彩世界的器官——眼睛，通过眼睛我们看到了这个五颜六色的世界。那我们到底是如何用眼睛看到这个世界的呢？眼睛有视网膜，眼睛通过视网膜感受到了光的存在，然后通过视网膜上的神经系统传递到了大脑里，经过大脑的分析，我们就看到了物体。那么光到底是怎样一种物质，撞击了视网膜才使我们看到了光的呢？有关光是什么这个话题，科学家已经争论了几百年。

1.1 光是什么

1.1.1 微粒说与波动说

1666 年大科学家牛顿 (Isaac Newton) 认为光 (light) 是一种弹性小粒子，前进的光其实是一种粒子流，这种学说称为“微粒说”。微粒说能够很好地解释光的反射现象，即弹性粒子碰到反射镜时，根据牛顿力学会弹性的反射回来，并满足入射角等于反射角，如图 1.1 所示，这很好地解释了光的反射现象。由于牛顿是大科学家，所以在之后的一百多年里，大多数科学家都支持牛顿的微粒说。

1660 年，胡克 (Robert Hooke) 发表了光波动理论。1678 年，荷兰物理学家惠更斯 (Christiaan Huygens) 结合当时普遍流行的“以太”(ether) 说，即在宇宙空间中充满稀薄的物质以太来传递相互作用，提出了光的“波动说”，如图 1.2 所示。由于当时牛顿力学的极大成功，机械动力学已经基本完善，机械波的理论也比较成熟，用所谓的以太媒介来传递光这种“机械波”似乎也合情合理。光的波动说得到了少数科学家的支持，如瑞士数学家欧拉 (Leonhard Euler)。但是毕竟由于惠更斯的影响力远远不及牛顿，所以在其后的一百多年里，波动说仅限于小范围内存在，绝大多数科学家都认为光是一种微粒。

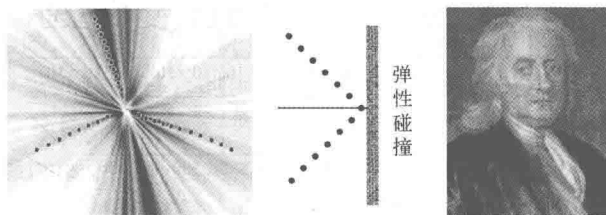


图 1.1 牛顿的微粒说

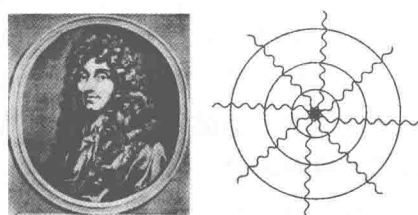


图 1.2 惠更斯的波动说

直到 1799 年，托马斯·杨 (Thomas Young) 做了著名的双缝干涉实验，有力地支持了光的波动说。杨氏的双缝干涉实验犹如一颗重磅炸弹，使大多数都相信光的微粒说的科学家们糊涂了，有少部分科学家转而支持了波动说，而大部分科学家都持观望态度。1815 年，法国工程师菲涅耳 (Augustin Fresnel) 向法国科学院提交了一篇有关光的衍射的论文，得到了法国科学家阿拉果 (Jean Arago) 的支持，但是仍然遭到了大多数科学家的反对，如著名的泊松 (Poisson)。为了澄清光的本质是什么，1818 年，法国科学院发起了一项征文比赛，谁可以设计实验并通过数学理论阐明光的现象，将获得一大笔奖励。菲涅耳完善了惠更斯原理，利用独创的菲涅耳波带法，完美地解释了光的衍射现象，并与实验相吻合。至此，光的波动说逐渐占

据了上风。1865 年，著名的英国科学家麦克斯韦（James Clerk Maxwell）总结了光的电磁理论，发现电磁波在真空中的速度与实测的光速接近，预言了光是一种电磁波。1888 年，德国科学家赫兹（Heinrich Rudolf Hertz）通过实验验证了麦克斯韦的预言。从此之后，光的波动说占据了主流，微粒说逐渐被抛弃。

还是德国科学家赫兹，1887 年，他发现了光电效应。1905 年爱因斯坦（Albert Einstein）引入了光量子假说，即光能量是一份一份的，称作光量子，完美地解释了光电效应现象。光量子的引入，又使光的微粒说死灰复燃。1923 年，美国科学家康普顿（Arthur Holly Compton）发现并解释了康普顿效应。在康普顿效应中，光是被看作粒子的，光子与电子的作用，看作为一种碰撞，在碰撞过程中能量和动量是守恒的。康普顿效应的发现，有利地支持了光的微粒说。

到底光是什么呢？是粒子还是波？我们看图 1.3，假定用一束光照射一个小孔，在小孔后面的屏幕上观察衍射图样。我们逐步降低入射光的能量，以至于入射光的能量接近一个光子的能量 $h\nu$ ，用探测器在观察屏上仅仅探测到了一个被轰击的亮点，光表现为粒子性。继续放光子进入小孔，当放入的光子足够多，大量光子累加统计的结果就形成了光的衍射条纹，而衍射现象是波的特性。这个实验证明，光在微弱时表现为粒子性，光的波动性实际上是大量光子统计的结果。综上所述，光具有波粒二象性。

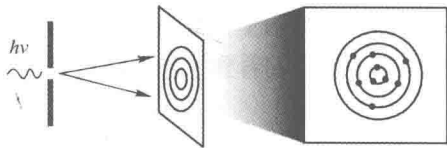


图 1.3 光的波粒二象性

1.1.2 电磁波谱

1865 年，麦克斯韦总结了电磁学理论，提出了麦克斯韦方程组。从方程组出发可以推导出电磁波传播方程。在传播方程中，真空中电磁波的速率为

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \tag{1.1}$$

其中 ϵ_0 是真空中电容率，又叫做介电常数， μ_0 是真空中磁导率。在真空中， $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12}$ 法/米， $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ 亨/米。所以，真空中电磁波的传播速率为

$$\nu = 299799600 \text{ m/s}$$

这与当时最新测量获得的光速，即 1850 年傅科测得的 $\nu = 298000 \text{ km/s}$ 非常接近。所以麦克斯韦预言，光是一种电磁波。也就是说，光仅仅是电磁波谱的一小部分，它只是被眼睛所能感受到的电磁波部分，又称为可见光，或者称作光波。图 1.4 所示为电磁波谱，可以看到，可见光部分所占的区域很小。

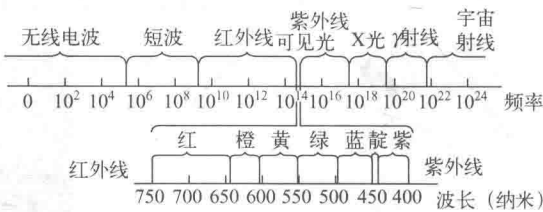


图 1.4 电磁波谱

在电磁波谱里，可见光大约在 380~760nm 之间，按波长从长到短依次分别呈现红、橙、黄、绿、蓝、靛、紫等七种颜色。这七种色光的大致范围如表 1.1 所示，其实这种分界并不完全准确，因为两种色光之间的界限本身就不明显，过渡是一种渐进的过程。比如，橙色和黄色之间会呈现橙黄色，根本无法找到一个确切的分界线。

在可见光范围内，每一种频率（或者波长）对应一种颜色。只有一种颜色的光称作单色光，由两种以上颜色的光混合而成的光称作复色光。显然白光是一种复色光。

在红色光以外的毗邻区域叫做红外线（Infrared ray）。红外线又可以分为近红外线（波长 0.76~3μm）、中波红外线（MWIR, 3~6μm）、长波红外线（LWIR, 6~20μm）和远红外线

(20~1000μm)。我们家用的遥控器通常都使用红外线，如电视机、空调等，还有一些工业遥控设备通常也使用红外线。夜视仪是一种可以在漆黑的夜间观看或测试的仪器，通常分为像增强器型和热像仪型两种，它们是利用夜间的背景辐射或者物体自身热耗散来工作的，利用自身辐射的红外热像仪就是使用的红外波段。虽然红外线的研究已经不在光波范围内，但是红外线相关的研究方向通常仍然归于光学范畴。在红外线区域有一个频率在 0.1~10THz (1THz=10¹²Hz) 的波段，称作太赫兹，由于这个波段的电磁波具有很多新奇的特性，所以近些年来的研究异常火热。

红外线的外面是短波和无线电波，收音机和电视接收机使用的波段在短波范围内。收音机使用的波段通常为 0.3~300MHz，其中应用最广泛的是调幅广播 (AM)，频率为 503~1060kHz；和调频广播 (FM)，频率为 87.5~108MHz。电视接收机使用最多的波段为 0.03~3000MHz，其中电视机中的频率符号与对应频率的关系如表 1.2 所示。

表 1.1 七种色光波长范围

色光	波长范围/nm
红	640~760
橙	600~640
黄	550~600
绿	480~550
蓝	450~480
靛	430~450
紫	380~430

表 1.2 电视机中的频率符号与对应频率的关系

符号意义	频段范围	符号意义	频段范围
极低频 ELF	3~30Hz	高频 HF	3~30MHz
超低频 SLF	30~300Hz	甚高频 VHF	30~300MHz
特低频 ULF	300~3000Hz	特高频 UHF	300~3000MHz
甚低频 VLF	3~30kHz	超高频 SHF	3~30GHz
低频 LF	30~300kHz	极高频 EHF	30~300GHz
中频 MF	0.3~3MHz		

在紫色光以外的毗邻区域称作紫外线 (Ultraviolet ray, UV ray)。紫外线的波长在 1~380nm 之间，其中 6~200nm 的紫外线几乎被所有物质强烈吸收，称为“真空紫外光”，因为它们只有在真空中才能获得。太阳是天然的紫外光源，大气的臭氧层可以吸收所有波长短于 290nm 的紫外线。到达地面的太阳光中的紫外线对人眼的伤害很大，长期曝露于强烈日光下，很容易患白内障等眼科疾病。比如，我国眼科专家对沈阳、北京和广州三地的白内障发病率进行调查发现：白内障的发病率是，沈阳 1.74%，北京 2.4%，广州 32.1%，这显然与广州的太阳光光照较强有关。一般南方日光光照长并且较强，而北方日光光照短并且较弱。所以，为了保护眼睛，在强烈的日光照射下，最好戴上带边的凉帽和吸收紫外线的太阳眼镜，俗称墨镜。

紫外线也有它的用武之地，紫外线有强烈的杀菌作用。实验表明，波长为 254nm 的紫外线最易被微生物吸收，使之产生变异和死亡。工程师用石英玻璃制成各种各样的紫外线灯管，用于紫外线消毒，如饭店消毒柜或者医院病房消毒灯。现在一些大型的医院病房都安装有紫外线灯管，每天定时消毒一次，效果很好，能充分杀死传染病病毒，如大肠杆菌、痢疾杆菌、伤寒沙门氏菌等，只需要用紫外线照射 5 秒钟，可杀死 100% 的病菌。枯草杆菌芽胞照射 30 秒紫外线，也可以 100% 杀死。另外，紫外线还可以用来治疗皮癣、皮炎等皮肤病，效果极佳。

紫外线的外面就是 X 射线、γ 射线和宇宙射线，波长更短，但基本上都是核辐射，对生物体危害极大。由于大气的保护，在地球表面这些辐射很微弱，可以忽略不计。其中 X 射线对人体具有很强的穿透能力，所以被用来制造 X 透射光机，用于医学诊断。

1.1.3 可见光

可见光 (Visible light) 是波长约为 380~760nm 之间的波段范围，由于人眼对此波段的光

线敏感，可以引起视网膜的感光，传递到大脑后，经过的大脑处理可以分辨出光线的颜色及与光线相关的物体。地球上的生物，由于生活环境不同，它们所对应的对自己眼睛的“可见光”波段未必相同，如深海的鱼类、白天活动的动物以及晚上活动的动物，它们眼睛感光的波段会有很大的差异。

在人眼敏感的可见光波段内，由于自然进化的结果，人眼对不同波长会感觉到不同的颜色，传统的分为红、橙、黄、绿、蓝、靛、紫等七种颜色，每一种颜色的大概范围如表 1.1 所示。事实上，各种色光之间的界线无法完全区分开来，而是一个渐变的过程。

德国科学家夫琅禾费（Joseph von Fraunhofer）在研究太阳光光谱时，把太阳光光谱中在可见光区域内，某些明显的线型用英文字母命名，称为夫琅禾费波长，列于表 1.3。

表 1.3 夫琅禾费波长

波长/nm	标识	光谱线
404.6	h	Hg（紫外）
435.8	G	Hg（蓝）
480.0	F'	Cd（蓝）
486.1	F	H（蓝）
546.1	e	Hg（绿）
587.6	d	He（黄）
589.3	D	Na（黄）
643.8	C'	Cd（红）
656.3	C	H（红）
706.5	r	He（红）

1.1.4 视见函数

人的眼睛对可见光波段每一个波长的敏感度是不一样的，人眼对中间 555nm 的黄绿光最敏感，波长向两边扩展时，人眼的敏感度会迅速降低。如果定义人眼对 555nm 的敏感度为 1 的话，那么其他光线的敏感度称为视见函数（vision function），用 $V(\lambda)$ 表示，所以 $V(555\text{nm})=1$ ， $V(\lambda)\leq 1$ ，如图 1.5 所示，视见函数的公认的数值其实是大量人员统计的结果，如果考虑到个体的差异，所有人的视见函数都或多或少有些差别。

按照公认的统计的视见函数见表 1.4，可以查得：

$V(F=486.1\text{nm})=0.1811$ ， $V(d=587.6\text{nm})=0.7841$ ， $V(C=656.3\text{nm})=0.0716$

表 1.4 人眼的视见函数统计值

光的颜色	波长/nm	视见函数	光的颜色	波长/nm	视见函数
紫	400	0.0004	橙	600	0.531
	410	0.0012		610	0.503
	420	0.0040		620	0.381
	430	0.0116		630	0.265
蓝	440	0.023		640	0.175
	450	0.033		650	0.107
青	460	0.060	红	660	0.061
	470	0.090		670	0.034
	480	0.139		680	0.017
	490	0.208		690	0.0082
绿	500	0.323		700	0.0041
	510	0.503		710	0.0021
	520	0.710		720	0.0010
	530	0.862		730	0.0005
黄	540	0.954		740	0.00025
	550	1.000		750	0.00012
	560	0.995		760	0.0006
	570	0.952		770	0.0006
	580	0.870		780	0.00015
	590	0.757			

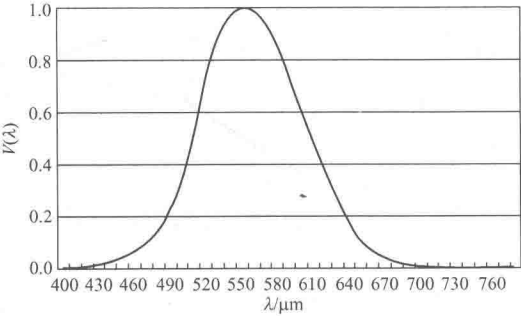


图 1.5 视见函数

由于 d 光处于可见光中心处不远，F 光和 C 光位于可见光区域的两端不远，并且这三种色光容易获得，所以在进行光学设计时，通常把 d 光作为可见光的中心波长，把 F 光和 C 光作为可见光区域的两边范围。

1.2 光的传播

1.2.1 光线和光束

光在透明介质中向前传播的速度称为光速 (velocity of light)。光是一种电磁波, 又称为光波, 所以光在真空中的速度与电磁波在真空中的传播速度一样。在同种透明介质中, 光是沿直线向前传播的, 把光波传播时抽象的能传递能量的几何线称为光线。在应用光学 (或几何光学) 中, 把具有电场和磁场振动的光波抽象成直线, 是因为光波的波长 $\lambda \sim 1\mu\text{m} \ll 1\text{m}$, 光波的振幅也极小, 所以在宏观领域根本看不到光波的振动现象, 抽象成直线并不影响解决实际问题。光波向前传播, 一束光线 (ray) 的集合称为光束 (beam)。一束光向前传播时始终保持相对位置不变, 即所有光线平行, 这种光束称为平行光束。如果一束光是从某一点光源发出来的, 向四面八方传播, 该光束称为发散光束。如果一束光会聚于空间某一点, 称该光束为会聚光束。发散光束和会聚光束又统称为同心光束。如果一束光向前传播时, 即不是平行光束也不是同心光束, 那么称为像散光束, 像散光束包含有像差在里面, 第 26 章就是专门研究像差的。平行光束、同心光束和像散光束示于图 1.6 中。

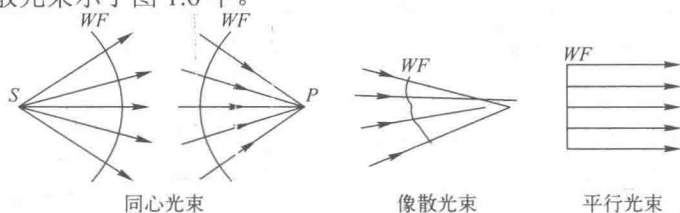


图 1.6 光束类型

在图 1.6 中, 每一条带箭头的线就是光线, 光线的集合就是光束。如果做每条光线的垂线, 垂线相连在一起, 获得的连线具有相同的相位, 称为等相位面或者波前。波前的英文单词为 wave front, 所以等相位面或波前在图 1.6 中标为 WF 面。由图中可以看出, 平行光束的波前仍然为平面, 同心光束的波前则为球心在光源或会聚点处的球面, 像散光束的波前为一个复杂的曲面。

镜头 (lens) 系统又称为光学系统 (optical system), 在理想成像时其波前要么是平面, 要么是球面。如图 1.7 所示, 图(a)为平行光会聚于像方焦点处, 图(b)为有限远物点成像于有限远像点, 图(c)为物方焦点发出的光线平行于光轴射出。图中, A 为物点、 A' 为像点、 F 为物方焦点、 F' 为像方焦点。物方空间中的任意波前 WF_1 经过光学系统之后, 在像方空间产生波前 WF_2 。由费马原理, WF_1 到 WF_2 对应点之间的光程相等。

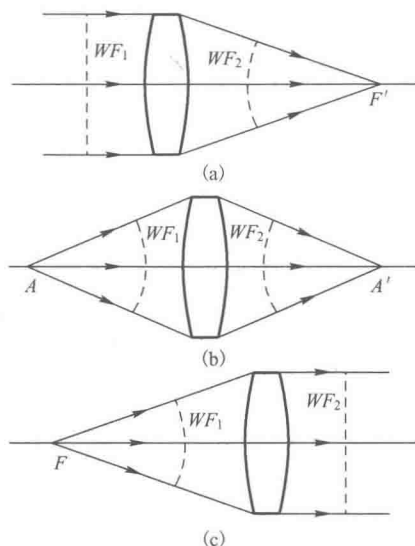


图 1.7 镜头成像时等相位面

1.2.2 光速

光波在透明均匀介质中是沿直线传播的, 沿直线向前传播的速度称为光速, 通常用英文字

母 v 表示，因为在英语中速度是 velocity。光在不同的透明介质中其光速是不同的，并且与光波的频率（或波长）有关系。既然光波就是一种电磁波，那么它应该满足电磁波的传播规律。如果光波在某种透明介质中的电容率（capacitivity）为 ε ，磁导率（magnetoconductivity）为 μ ，不加下标零以示与真空相区别。依据电磁波理论，该介质中的光速为

$$v = 1/\sqrt{\varepsilon\mu} \quad (1.1)$$

定义相对电容率为某种介质的电容率与真空中的电容率之比，记作 ε_r ，则

$$\varepsilon_r = \varepsilon/\varepsilon_0 \quad (1.2)$$

定义相对磁导率为某种介质的磁导率与真空中的磁导率之比，记作 μ_r ，则

$$\mu_r = \mu/\mu_0 \quad (1.3)$$

由式（1.2）、式（1.3）和式（1.4）可得

$$v = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon\mu}} = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}} \cdot \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_r\mu_r}} = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_r\mu_r}} \quad (1.4)$$

习题

- 1-1 简述光的微粒说和波动说，哪些科学家支持哪一种学说？
- 1-2 可见光频率在什么量级？波长在什么范围？
- 1-3 什么是红外线和紫外线？举出一些它们常见的应用。
- 1-4 哪个波长的视见函数最大？在设计可见光光学系统时，常用的三种波长是哪三种？
- 1-5 简述什么是光的波前？

第2章 几何光学基本定律

作为电磁波的光波向前直线传播时,在空间场域必然会有能量的波动。还好,光波的波长通常都在 $0.38\mu\text{m}\sim 0.76\mu\text{m}$ 之间,能量的横向扰动在宏观世界里基本上可以忽略不计。我们把从电磁波角度研究光波的学科称为物理光学;把光波抽向为携带能量的几何直线来研究光学现象的学科称为几何光学,也叫做应用光学。光波在均匀透明介质中沿直线传播,那么当两束光波在空间相遇呢?抑或当光波遭遇到交界面时又会发生什么现象呢?这就是这一章所要讨论的问题,即几何光学的基本定律。几何光学的基本定律说明了光波传播的状况,包括同种介质传播(光的直线传播定律),非同种介质交界面传播(光的反射定律和光的折射定律),以及光波在空间相交时的传播(光的独立传播定律)。最后,介绍了与几何光学基本定律密切相关的两种现象:光路可逆和全反射。

2.1 光的直线传播定律

2.1.1 光的直线传播

在均匀透明介质中,光波向前传播时,在不遭遇任何障碍物的时候,会沿着原来的方向直线向前传播。光的直线传播定律由于直接来源于现实生活中的观察,所以很早就为人们所掌握。如图 2.1 所示,为著名的小孔成像现象,在中国的古文经典《墨经》中就曾记载。

在“绝对透明”的物体中光波向前传播没有能量吸收损失。除了超真空外,透明物体要么内部存在缺陷(如杂质、气泡、内应力),要么透明度不够,所以光波在其中传播时总会或多或少地存在能量损失。所以,绝对的均匀透明介质是极难找到的。

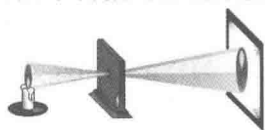


图 2.1 小孔成像

2.1.2 直线传播的破坏

当光线遇到障碍物时会发生光的衍射现象,从而偏离光线的直线传播。当光线在各向异性或非均匀的介质中传播时,可能发生双折射或走曲线,如图 2.2 所示。光在双折射晶体中传播时,会发生光线的分裂,分裂为 o 光和 e 光,出现两条光线在双折射晶体内传播。再如,光在梯度折射率材料中,行进的光线是一条平滑的曲线。另外,光线在两种介质的交界面上,会发生反射和折射,都会破坏光线的直线传播。另外,若物质吸引力足够强,比如恒星、黑洞,则可以影响光的直线传播,甚至如黑洞可以把光完全吸入其中。

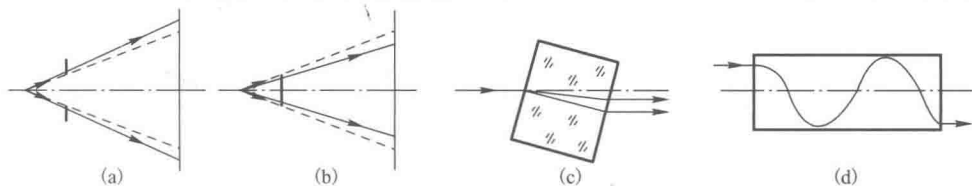


图 2.2 破坏光的直线传播

2.2 光的独立传播定律

光是电磁波,所以光在空间区域相交时应该符合电磁波传播特性,在相交空间具有可入