

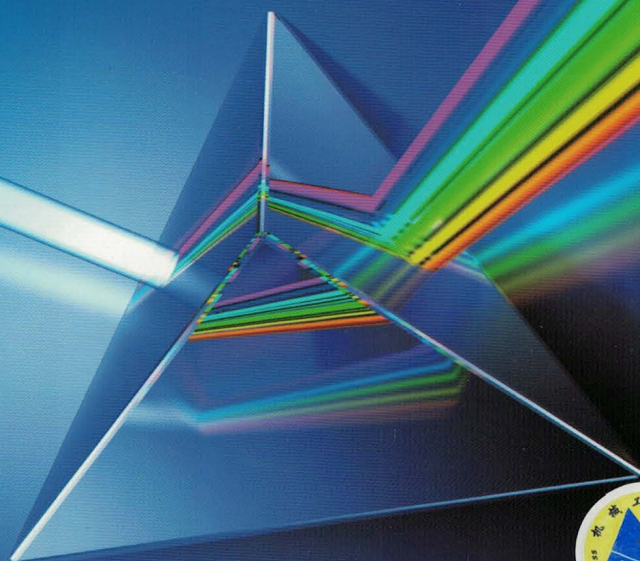


普通高等教育“十一五”国家级规划教材  
国家精品课程教材

# 工程光学基础教程

第2版

天津大学 郁道银 主编  
浙江大学 谈恒英



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育“十一五”国家级规划教材  
国家精品课程教材

# 工程光学基础教程

第 2 版

|      |     |    |
|------|-----|----|
| 天津大学 | 郁道银 | 主编 |
| 浙江大学 | 谈恒英 |    |
| 庄松林  | 梁铨廷 | 主审 |



机械工业出版社

本书是教育部审定的普通高等教育“十一五”国家级规划教材，是在《工程光学》第4版的基础上编写而成的少学时版本，书中内容既注重论述光学的基本原理和基本理论，又注重理论与工程实际相结合，并力求反映现代光学的发展和应用。本书侧重于光学物理现象的描述，尽量减少数学理论的推导。

本书分上、下两篇，上篇为几何光学与成像理论，下篇为物理光学。上篇分八章，主要介绍几何光学的基本定律与成像概念、理想光学系统、平面与平面系统、光学系统中的光阑与光束限制、光度学和色度学基础、光线的光路计算及像差理论、典型光学系统、光学系统的像质评价。下篇分四章，主要介绍光的电磁理论基础、光的干涉、光的衍射、光的偏振，还涵盖了近场光学、二元光学、光调制、光波导、液晶、光学信息处理和光学全息等现代光学的内容。

本书可作为光电信息科学与工程、测控技术及仪器、生物医学工程及其相近专业的教材。

(编辑邮箱: jinacmp@163.com)

## 图书在版编目 (CIP) 数据

工程光学基础教程/郁道银, 谈恒英主编. —2 版. —北京: 机械工业出版社, 2017. 7 (2018. 6 重印)

普通高等教育“十一五”国家级规划教材 国家精品课程教材  
ISBN 978-7-111-57573-3

I. ①工… II. ①郁… ②谈… III. ①工程光学-高等学校-教材 IV. ①TB133

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 182561 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 吉 玲 责任编辑: 吉 玲 王 康 王小东

责任校对: 肖 琳 封面设计: 路恩中

责任印制: 张 博

三河市国英印务有限公司印刷

2018 年 6 月第 2 版第 2 次印刷

184mm×260mm·25 印张·673 千字

标准书号: ISBN 978-7-111-57573-3

定价: 54.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

电话服务

服务咨询热线: 010-88379833

读者购书热线: 010-88379649

网络服务

机工官网: [www.cmpbook.com](http://www.cmpbook.com)

机工官博: [weibo.com/cmp1952](http://weibo.com/cmp1952)

教育服务网: [www.cmpedu.com](http://www.cmpedu.com)

金书网: [www.golden-book.com](http://www.golden-book.com)

封面无防伪标均为盗版

# 第2版 前言

本书是在第1版的基础上修订编写而成的，其指导思想仍然坚持既注重描述光学的基本原理和基础理论，又注重理论与工程实际的结合，并努力反映现代光学技术的发展和應用。

本书分为上、下两篇，上篇为几何光学与成像理论，下篇为物理光学。

上篇主要修订内容为：在第三章光学材料一节中，增加了光学塑料和光学晶体的特性。在第五章中增加了第十一节颜色测量。在第七章的第七节投影系统中增加了基于空间光调制器的现代投影光学系统，增加了第八节变焦距光学系统，在第九节现代光学系统中增加了近年来得到广泛应用的红外光学系统，并删除了傅里叶变换光学的相关内容。在第八章中增加了第六节其他像质评价方法，包括方均根统计评价方法、光程差曲线与光线差曲线评价光学系统成像质量的方法等。

下篇修订内容为：在第九章中对波函数的复数表示、复振幅、波的叠加原理等内容做了补充描述和讨论，对光的吸收、色散和散射现象做了补充描述，并增加了光在金属表面的反射和透射一节。在第十章中补充了白光干涉及其应用的相关内容，并增加了现代干涉技术及系统的应用例子。在第十一章中增加了二元光学应用的例子和阶梯光栅。在第十二章中增加了若干偏振器件的介绍，补充了液晶的双折射特性描述，并引入了径向偏振光的概念等。

本书由天津大学郁道银（上篇）和浙江大学谈恒英（下篇）主编，上海理工大学庄松林院士（上篇）和广州大学梁铨廷教授（下篇）主审。参加编写的有天津大学郁道银、谢洪波（第七章第九节、第八章）、田学飞、葛宝臻（第五章），清华大学毛文炜（第二、四章），武汉大学何平安（第一、三章），长春理工大学王文生（第六章、第七章第一节至第八节、第十节），浙江大学谈恒英（第九、十二章），清华大学何庆声、孙利群（第十一章、附录），上海理工大学曹俊卿（第十章）。

本书可作为光电信息科学与工程、测控技术与仪器、生物医学工程等专业的教材，也可作为物理或光学专业的选修教材或参考书，也可供相关工程技术人员参考。

希望广大读者对书中的不足之处给予指正。

编 者

# 第1版 前言

《工程光学基础教程》是普通高等教育“十一五”国家级规划教材。为适应 21 世纪高等学校教育教学改革的需要,使工程光学的教学内容和课程体系更适合于光电信息科学与工程、测控技术与仪器、生物医学工程等专业的教学要求,特编写《工程光学基础教程》一书。

《工程光学基础教程》一书是在《工程光学》第 2 版(机械工业出版社出版)基础上编写而成的,其指导思想仍然坚持既注重论述光学的基本原理和基本理论,又注重理论与工程实际相结合,并力求反映现代光学的发展和应用。在内容安排上,既包含传统的光学理论和光学系统,又简要介绍现代光学的理论及其应用,并侧重于光学物理现象的描述,尽量减少其数学理论的推导。

为满足不同学校与专业的教学计划安排,本书在内容上删减了原《工程光学》第 2 版中的相关章节。如上篇删减了“光学设计”一章,把“现代光学系统原理”一章简化为“典型光学系统”中的一节。下篇删减了“傅里叶光学”“导波光学基础”“光子学基础”三章,但把傅里叶光学、近场光学、二元光学和光波导等相关重要内容融入到光的衍射原理等章节中,使本书既涵盖较广的现代光学内容,又在篇幅上做较大压缩。

本书分为上、下两篇,上篇为几何光学与成像理论,下篇为物理光学。

上篇共分八章,主要介绍几何光学的基本定律和成像特性、理想光学系统的光学参数和成像关系、平面与平面镜成像、光学系统中的光阑与光束限制、光度学和色度学的基本原理、光学系统的光路计算和像差理论、典型光学系统的成像特性和设计要求、光学系统的成像质量评价和像差公差。此外,在典型光学系统一章中,还简要介绍了激光光学系统、傅里叶光学系统、扫描光学系统和光纤光学系统的光束传输和光学成像特性。

下篇共分四章,主要介绍光的电磁性质、光在各向同性介质界面上的传播规律、光波的叠加与分析、光波的干涉和典型干涉装置与应用、光波的衍射原理与应用(其中融入了傅里叶光学的基本理论与概念)、光的偏振及其在晶体中的传播等。此外,本篇还涵盖近场光学、二元光学、光调制、光波导、液晶、光学信息处理和光学全息等现代光学的相关内容。

本书由天津大学郁道银(上篇)和浙江大学谈恒英(下篇)主编,上海理工大学庄松林院士(上篇)和广州大学梁铨廷教授(下篇)主审。参加编写的有天津大学郁道银、谢洪波(第七章第八节、第八章)、田学飞(第五章),清华大学毛文炜(第二、四章),武汉大学何平安(第一、三章),长春理工大学王文生(第六章、第七章第一节至第七节、第九节),浙江大学谈恒英(第九、十二章),清华大学何庆声、孙利群(第十一章、附录),上海理工大学曹俊卿(第十章)。此外,天津大学陈晓冬参加了书稿的修改与整理工作。

本书可作为光电信息科学与工程、测控技术与仪器、生物医学工程及其相近专业的教材,也可作为物理或光学专业的选修教材或参考书,也可供相关工程技术人员参考。

希望广大读者对书中的不足给予指正。

编 者

# 目 录

## 第 2 版前言

## 第 1 版前言

## 上篇 几何光学与成像理论

### 第一章 几何光学基本定律与成像

#### 概念 ..... 2

#### 第一节 几何光学的基本定律和原理 ..... 2

#### 第二节 成像的基本概念与完善成像条件 ..... 6

#### 第三节 光路计算与近轴光学系统 ..... 8

#### 第四节 球面光学成像系统 ..... 10

#### 习题 ..... 14

### 第二章 理想光学系统 ..... 16

#### 第一节 理想光学系统与共线成像理论 ..... 16

#### 第二节 理想光学系统的基点与基面 ..... 18

#### 第三节 理想光学系统的物像关系 ..... 21

#### 第四节 理想光学系统的放大率 ..... 25

#### 第五节 理想光学系统的组合 ..... 28

#### 第六节 透镜 ..... 34

#### 习题 ..... 36

### 第三章 平面与平面系统 ..... 38

#### 第一节 平面镜成像 ..... 38

#### 第二节 平行平板 ..... 40

#### 第三节 反射棱镜 ..... 42

#### 第四节 折射棱镜与光楔 ..... 48

#### 第五节 光学材料 ..... 51

#### 习题 ..... 54

### 第四章 光学系统中的光阑与光束

#### 限制 ..... 57

#### 第一节 光阑 ..... 57

#### 第二节 照相系统中的光阑 ..... 60

#### 第三节 望远镜系统中成像光束的选择 ..... 62

#### 第四节 显微镜系统中的光束限制与分析 ..... 64

#### 第五节 光学系统的景深 ..... 66

#### 第六节 数码照相机镜头的景深 ..... 69

#### 习题 ..... 71

### 第五章 光度学和色度学基础 ..... 74

#### 第一节 辐射量和光学量及其单位 ..... 74

#### 第二节 光传播过程中光学量的变化规律 ... 77

#### 第三节 成像系统像面的光照度 ..... 80

#### 第四节 颜色的分类及颜色的表观特征 ..... 83

#### 第五节 颜色混合及格拉斯曼颜色混合

#### 定律 ..... 84

#### 第六节 颜色匹配 ..... 85

#### 第七节 色度学中的几个概念 ..... 86

#### 第八节 颜色相加原理及光源色和物体色的

#### 三刺激值 ..... 89

#### 第九节 CIE 标准色度学系统 ..... 90

#### 第十节 均匀颜色空间及色差公式 ..... 98

#### 第十一节 颜色测量 ..... 100

#### 习题 ..... 102

### 第六章 光线的光路计算及像差理论 ... 103

#### 第一节 概述 ..... 103

#### 第二节 光线的光路计算 ..... 104

#### 第三节 轴上点的球差 ..... 109

#### 第四节 正弦差和彗差 ..... 112

#### 第五节 场曲和像散 ..... 116

#### 第六节 畸变 ..... 118

#### 第七节 色差 ..... 120

#### 第八节 像差特征曲线与分析 ..... 123

#### 第九节 波像差 ..... 126

#### 习题 ..... 127

### 第七章 典型光学系统 ..... 131

#### 第一节 眼睛及其光学系统 ..... 131

#### 第二节 放大镜 ..... 136

#### 第三节 显微镜系统 ..... 138

#### 第四节 望远镜系统 ..... 143

#### 第五节 目镜 ..... 146

#### 第六节 摄影系统 ..... 148

#### 第七节 投影系统 ..... 153

#### 第八节 变焦距光学系统 ..... 157

|            |                        |     |
|------------|------------------------|-----|
| 第九节        | 现代光学系统 .....           | 163 |
| 第十节        | 光学系统的外形尺寸计算 .....      | 179 |
| 习题         | .....                  | 183 |
| <b>第八章</b> | <b>光学系统的像质评价</b> ..... | 186 |
| 第一节        | 瑞利判断与波前图 .....         | 186 |
| 第二节        | 中心点亮度与能量包容图 .....      | 187 |
| 第三节        | 分辨率与点扩散函数 .....        | 188 |

|                         |                    |     |
|-------------------------|--------------------|-----|
| 第四节                     | 星点检测法与点列图 .....    | 190 |
| 第五节                     | 光学传递函数评价成像质量 ..... | 192 |
| 第六节                     | 其他像质评价方法 .....     | 193 |
| 第七节                     | 光学系统的像差公差 .....    | 197 |
| 习题                      | .....              | 199 |
| <b>上篇习题部分参考答案</b> ..... |                    | 200 |
| <b>上篇主要参考文献</b> .....   |                    | 204 |

## 下篇 物理光学

|             |                       |     |
|-------------|-----------------------|-----|
| <b>第九章</b>  | <b>光的电磁理论基础</b> ..... | 206 |
| 第一节         | 光的电磁波性质 .....         | 206 |
| 第二节         | 光在电介质分界面上的反射和折射 ..... | 214 |
| 第三节         | 光在金属表面的反射和透射 .....    | 226 |
| 第四节         | 光的吸收、色散和散射 .....      | 229 |
| 第五节         | 光波的叠加 .....           | 235 |
| 第六节         | 光波的傅里叶分析 .....        | 242 |
| 习题          | .....                 | 246 |
| <b>第十章</b>  | <b>光的干涉</b> .....     | 249 |
| 第一节         | 光波干涉的条件 .....         | 249 |
| 第二节         | 杨氏干涉实验 .....          | 250 |
| 第三节         | 干涉条纹的可见度 .....        | 254 |
| 第四节         | 平板的双光束干涉 .....        | 257 |
| 第五节         | 典型的双光束干涉系统及其应用 .....  | 262 |
| 第六节         | 平行平板的多光束干涉及其应用 .....  | 267 |
| 习题          | .....                 | 279 |
| <b>第十一章</b> | <b>光的衍射</b> .....     | 281 |
| 第一节         | 光波的标量衍射理论 .....       | 282 |
| 第二节         | 菲涅耳衍射 .....           | 286 |
| 第三节         | 典型孔径的夫琅和费衍射 .....     | 293 |
| 第四节         | 夫琅和费衍射和傅里叶变换 .....    | 299 |
| 第五节         | 光学成像系统的衍射和分辨本领 .....  | 303 |

|                         |                       |     |
|-------------------------|-----------------------|-----|
| 第六节                     | 多缝的夫琅和费衍射 .....       | 306 |
| 第七节                     | 衍射光栅 .....            | 309 |
| 第八节                     | 光学信息处理 .....          | 317 |
| 第九节                     | 全息术 .....             | 324 |
| 习题                      | .....                 | 330 |
| <b>第十二章</b>             | <b>光的偏振</b> .....     | 334 |
| 第一节                     | 偏振光概述 .....           | 334 |
| 第二节                     | 晶体的双折射 .....          | 338 |
| 第三节                     | 晶体偏振器件 .....          | 343 |
| 第四节                     | 偏振光和偏振器件的矩阵表示 .....   | 349 |
| 第五节                     | 偏振光的干涉 .....          | 354 |
| 第六节                     | 磁光、电光效应 .....         | 360 |
| 第七节                     | 液晶 .....              | 366 |
| 习题                      | .....                 | 372 |
| <b>下篇附录</b> .....       |                       | 375 |
| 附录 A                    | 矢量分析及场论的主要公式 .....    | 375 |
| 附录 B                    | 二维傅里叶变换关系及其基本定理 ..... | 376 |
| 附录 C                    | 几个常用函数的定义及傅里叶变换 ..... | 377 |
| 附录 D                    | 卷积和相关 .....           | 379 |
| 附录 E                    | $\delta$ 函数 .....     | 380 |
| 附录 F                    | 贝塞尔函数 .....           | 382 |
| 附录 G                    | 矩阵 .....              | 385 |
| <b>下篇习题部分参考答案</b> ..... |                       | 387 |
| <b>下篇主要参考文献</b> .....   |                       | 391 |

# 上 篇

## 几何光学与成像理论

- 第一章 几何光学基本定律与成像概念
- 第二章 理想光学系统
- 第三章 平面与平面系统
- 第四章 光学系统中的光阑与光束限制
- 第五章 光度学和色度学基础
- 第六章 光线的光路计算及像差理论
- 第七章 典型光学系统
- 第八章 光学系统的像质评价

# 第一章

## 几何光学基本定律与成像概念

几何光学是以光线作为基础概念，用几何的方法研究光在介质中的传播规律和光学系统的成像特性的一门学科。本章首先介绍几何光学的基本概念和基本定律，建立光学系统成像的基本概念和完善成像条件，然后讨论光学系统的光路计算、近轴光学系统和球面光学系统的成像。

### 第一节 几何光学的基本定律和原理

#### 一、光波与光线

光就其本质而言是一种电磁波，光波的频率比普通无线电波的频率高，光波的波长比普通无线电波的波长短。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 所示。光波波长范围大致为  $1\text{mm} \sim 10\text{nm}$ ，其中波长在  $380 \sim 760\text{nm}$  的电磁波能为人眼所感知，称为可见光。波长大于  $760\text{nm}$  的光称为红外光，而波长小于  $400\text{nm}$  的光称为紫外光。光波在真空中的传播速度为  $c \approx 2.99792458 \times 10^8 \text{m/s}$ ，在介质中的传播速度都小于  $c$ ，且随波长的不同而不同。

可见光随波长的不同而引起人眼不同的颜色感觉。我们把具有单一波长的光称为单色光，而把由不同单色光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。激光是一种单色性很好的光源，可以近似

看作单色光。太阳光是由无限多种单色光组成的。在可见光范围内，太阳光可分解为红、橙、黄、绿、青、蓝、紫这七种颜色的光。

通常，我们把能够辐射光能量的物体称为发光体或光源。发光体可看作是由许多发光点或点光源组成，每个发光点向四周辐射光能量。为讨论问题方便，在几何光学中，我们通常将发光点发出的光抽象为许许多多携带能量并带有方向的几何线，即光线。光线的方向代表光的传播方向。发光点发出的光波向四周传播时，某一时刻其振动位相相同的点所构成的等相位面称为波阵面，简称波面。光的传播即为光波波阵面的传播。在各向同性介质中，波面上某点的法线即代表了该点处光的传播方向，即光是沿着波面法线方向传播的。因此，波面法线即为光线。与波面对应的所有光线的集合称为光束。

通常，波面可分为平面波、球面波和任意曲面波。与平面波对应的光线束相互平行，称为平行光束。与球面波对应的光线束相交于球面波的球心，称为同心光束。同心光束可分为会聚光束和发散光束，如图 1-2a、b、c 所示。同心光束或平行光束经过实际光学系统后，

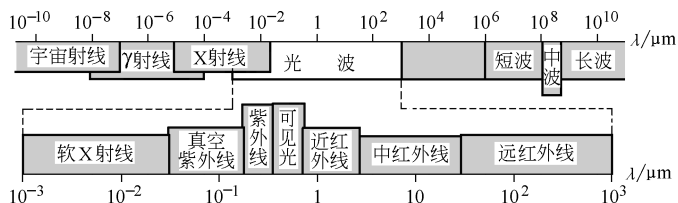


图 1-1 电磁波谱

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 1-2d 所示为非球面光波和对应的像散光束。

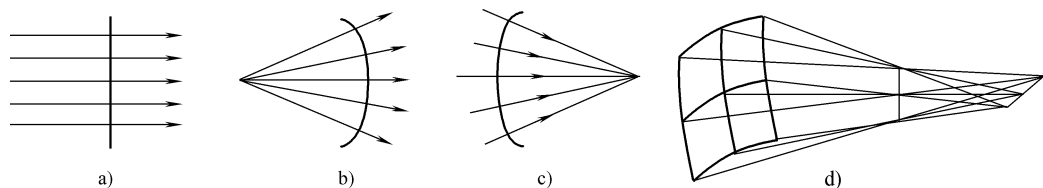


图 1-2 光束与波面的关系

a) 平行光束 b) 发散同心光束 c) 会聚同心光束 d) 像散光束

## 二、几何光学的基本定律

几何光学把研究光经过介质的传播问题归结为如下几个定律、现象、原理,其中“直线传播”“独立传播”“折射”与“反射”定律被称为四个基本定律,它们是研究光的传播现象、规律以及物体经过光学系统成像特性的基础。

### (一) 光的直线传播定律

几何光学认为,在各向同性的均匀介质中,光是沿着直线方向传播的。这就是光的直线传播定律。影子的形成、日蚀和月蚀等现象都能很好地证明这一定律。“小孔成像”即是运用这一定律的很好例子,许多精密测量,如精密天文测量、大地测量、光学测量及相应光学仪器都是以这一定律为基础的。

但这一定律是有局限性的。当光经过小孔或狭缝时,将发生“衍射”现象,光将不再沿直线方向传播。另外,光经过各向异性的晶体介质时,将产生“双折射”现象;在非均匀介质中传播时,光线传播的路径为曲线,也不再是直线。

### (二) 光的独立传播定律

不同光源发出的光在空间某点相遇时,彼此互不影响,各光束独立传播,这就是光的独立传播定律。在各光束的同一交会点上,光的强度是各光束强度的简单叠加,离开交会点后,各光束仍按原来的方向传播。

光的独立传播定律没有考虑光的波动性质。当两束光由光源上同一点发出、经过不同途径传播后在空间某点交会时,交会点处光的强度将不再是两束光强度的简单叠加,而是根据两束光所经过路程的不同,有可能加强,也有可能减弱。这就是光的“干涉”现象。

### (三) 光的折射定律与反射定律

光的直线传播定律与光的独立传播定律概括的是光在同一均匀介质中的传播规律,而光的折射定律与反射定律则是研究光传播到两种均匀介质分界面上时的现象与规律。

当一束光投射到两种均匀介质的光滑分界表面上时,一部分光从光滑分界表面回到原介质中,这种现象称为光的反射,反射回原介质的光称为反射光;另一部分光将“透过”光滑表面,进入第二种介质,这种现象称为光的折射,透过光滑表面进入第二种介质的光称为折射光。与反射光和折射光相对应,原来投射到光滑表面发生折射和反射前的光称为入射光。

如图 1-3 所示,入射光线  $AO$  入射到两种介质的分界面  $PQ$  上,在  $O$  点发生折反射。其中,反射光线为  $OB$ ,折射光线为  $OC$ ,  $NN'$  为界面上入射点  $O$  的法线。入射光线、反射光线和折射光线与法线的夹角  $I$ 、 $I''$ 、 $I'$  分别称之为入射角、反射角和折射角,它们均以锐角度量,由光线转向法线,顺时针方向形成的角度为正,逆时针方向为负。

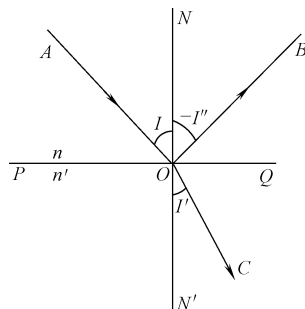


图 1-3 光的反射与折射

反射定律归结为：①反射光线位于由入射光线和法线所决定的平面内；②反射光线和入射光线位于法线的两侧，且反射角与入射角绝对值相等，符号相反，即

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

折射定律归结为：①折射光线位于由入射光线和法线所决定的平面内；②折射角的正弦与入射角的正弦之比与入射角大小无关，仅由两种介质的性质决定。对于一定波长的光线而言，在一定温度和压力下，该比值为一常数，等于入射光所在介质的折射率  $n$  与折射光所在介质的折射率  $n'$  之比，即

$$\frac{\sin I'}{\sin I} = \frac{n}{n'}$$

通常表示为

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

折射率是表征透明介质光学性质的重要参数。我们知道，各种波长的光在真空中的传播速度均为  $c$ ，而在不同介质中的传播速度  $v$  各不相同，且都比真空中的光速小。介质的折射率就是用来描述介质中的光速相对于真空中的光速减慢程度的物理量，即

$$n = \frac{c}{v} \quad (1-3)$$

这就是折射率的定义。显然，真空的折射率为 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（大气压强  $P = 101275\text{Pa} = 760\text{mmHg}$ ，温度  $t = 293\text{K} = 20^\circ\text{C}$ ）下，空气的折射率  $n = 1.000273$ ，与真空的折射率非常接近。因此，为方便起见，常把介质相对于空气的相对折射率作为该介质的绝对折射率，简称折射率。

在式(1-2)中，若令  $n' = -n$ ，则有  $I' = -I$ ，即折射定律转化为反射定律。这一结论有很重要的意义。后面我们将看到，许多由折射定律得出的结论，只要令  $n' = -n$ ，就可以得出相应反射定律的结论。

#### （四）光的全反射现象

光线入射到两种介质的分界面时，通常都会发生折射与反射。但在一定条件下，入射到介质上的光会被全部反射回原来的介质中，而没有折射光产生，这种现象称为光的全反射现象。下面我们就来研究在什么条件下会产生全反射现象。

通常，我们把分界面两边折射率高的介质称为光密介质，而把折射率低的介质称为光疏介质。由式(1-3)可知，光在光密介质中的传播速度较慢，而在光疏介质中的传播速度较快。当光从光密介质向光疏介质传播时，因为  $n' < n$ ，则  $I' > I$ ，折射光线相对于入射光线而言，更偏离法线方向，如图 1-4 所示。当光线入射角  $I$  增大到某一程度时，折射角  $I'$  达到  $90^\circ$ ，折射光线沿界面掠射出去，这时入射角称为临界角，记为  $I_m$ 。由折射定律公式(1-2)得

$$\sin I_m = n' \sin I' / n = n' \sin 90^\circ / n = n' / n \quad (1-4)$$

若入射角继续增大，使  $I > I_m$ ，即  $\sin I > n' / n$ ，由式(1-4)可知， $\sin I' > 1$ 。显然，这是不可能的。这表明入射角大于临界角的那些光线没有折射进入第二种介质，而是全部反射回第一种介质，即发生了全反射现象。

由上述分析可知，发生全反射的条件是：①光线从光密介质向光疏介质入射；②入射角大于临界角。

全反射现象在工程实际中有着广泛的应用。在光学仪器中，常

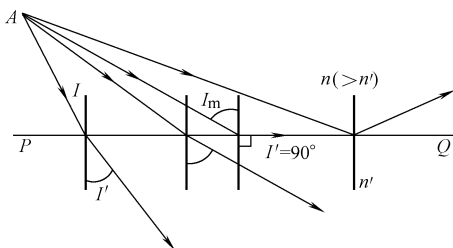


图 1-4 光的全反射现象

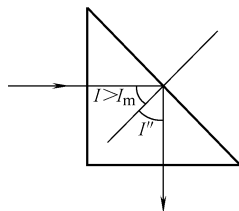


图 1-5 全反射直角棱镜

常利用各种全反射棱镜代替平面反射镜,以减少反射时的光能损失,图 1-5 所示是一种最常用的等腰直角棱镜。从理论上讲,全反射棱镜可以将入射光全部反射,而镀有反射膜层的平面反射镜只能反射 90%左右的入射光能。

目前,广泛应用于光纤通信和各种光纤传感器的光学纤维(简称光纤),其最基本的原理就是利用全反射原理传光。图 1-6 所示为光纤的基本结构和全反射传光原理。单根光纤由内层折射率较高的纤芯和外层折射率较低的包层组成。光线从光纤的一端以入射角  $I_1$  耦合进入光纤纤芯,投射到纤芯与包层的分界面上。在此分界面上,入射角大于临界角的那些光线在纤芯内连续发生全反射,直至传到光纤的另一端面出射。可见,只要满足一定条件,光就能在光纤内以全反射的形式传输很远的距离。将许多根光纤按序排列形成光纤束,即光缆,可用于传递图像和光能,如在医用内窥镜系统中,用一根光缆将光传入体内用于照明,而用另一根光缆将光学系统所成图像传递出来,供人眼观察(光纤光学系统在第八章中详述)。

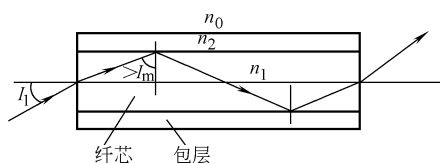


图 1-6 光纤的基本结构和全反射传光原理

### (五) 光路的可逆性原理

在图 1-3 中,若光线在折射率为  $n'$  的介质中沿  $CO$  方向入射,由折射定律可知,折射光线必定沿着  $OA$  方向出射。同样,如果光线在折射率为  $n$  的介质中沿  $BO$  方向入射,则由反射定律可知,反射光线也一定沿  $OA$  方向出射。由此可见,光线的传播是可逆的。这就是光路的可逆性原理。

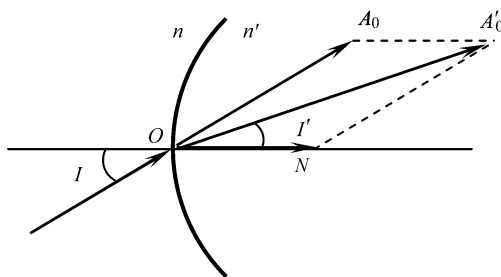


图 1-7 折射定律的矢量表示

### (六) 矢量形式的折反射定律

对于任意方向的光线,或遇到复杂界面时,应用矢量形式的折反射定律来进行分析会更方便。

设  $A_0$ 、 $A'_0$  和  $N$  分别为沿入射光线、折射光线和法线的单位矢量,如图 1-7 所示。根据折射定律式(1-2),应有

$$n'(A'_0 \times N) = n(A_0 \times N)$$

展开,并记  $A = nA_0$ ,  $A' = n'A'_0$ , 则

$$A' \times N = A \times N$$

或写为

$$(A' - A) \times N = 0 \quad (1-5)$$

$(A' - A)$  与  $N$  都不可能为零,故两矢量必定平行,即有

$$A' - A = pN \quad (\text{式中 } p \text{ 为待定常数})$$

两边同时与  $N$  作点积,有

$$p = N \cdot A' - N \cdot A = n' \cos I' - n \cos I \quad (1-6)$$

当  $n' > n$  时,  $p > 0$ , 则  $A' - A$  与  $N$  同向; 当  $n' < n$  时,  $p < 0$ , 则  $A' - A$  与  $N$  反向。

一般情况下,已知两介质的折射率  $n$ 、 $n'$  和光线的入射角  $I$ ,  $p$  可化为

$$p = \sqrt{n'^2 - n^2 + n^2 \cos^2 I} - n \cos I \quad (1-7)$$

$$A' = A + pN \quad (1-8)$$

这就是矢量形式的折射定律。如果已知  $A$  和  $N$ , 即可由此式求得折射矢量  $A'$ 。

令  $n' = -n$ , 有

$$p = n' \cos I' - n \cos I = -2n \cos I = -2(\mathbf{N} \cdot \mathbf{A}) \quad (1-9)$$

将其代入矢量形式的折射定律式(1-8), 得矢量形式的反射定律

$$\mathbf{A}'' = \mathbf{A} - 2\mathbf{N}(\mathbf{N} \cdot \mathbf{A}) \quad (1-10)$$

矢量形式折反射定律多用在空间光线的光路计算和非球面、非共轴系统的光路计算中。

### 三、费马原理

费马原理用“光程”的概念对光的传播规律做了更简明的概括。

所谓光程是指光在介质中传播的几何路程  $l$  与所在介质的折射率  $n$  的乘积  $s$ , 即

$$s = nl \quad (1-11)$$

将式(1-3)及  $l = vt$  代入式(1-11), 有

$$s = ct \quad (1-12)$$

由此可见, 光在某种介质中的光程等于同一时间内光在真空中所走过的几何路程。

费马原理指出, 光从一点传播到另一点, 其间无论经过多少次折射和反射, 其光程为极值。也就是说, 光是沿着光程为极值(极大、极小或常量)的路径传播的。因此, 费马原理也叫光程极端定律。

我们知道, 在均匀介质中光是沿直线方向传播的。但是, 在非均匀介质中, 由于折射率  $n$  是空间位置的函数, 光线将不再沿直线方向传播, 其轨迹是一空间曲线, 如图 1-8 所示。此时, 光线从  $A$  点传播至  $B$  点, 其光程由以下曲线积分来确定

$$s = \int_A^B n dl \quad (1-13)$$

根据费马原理, 此光程应具有极值, 即式(1-13)表示的一次变分为零, 即

$$\delta s = \delta \int_A^B n dl = 0 \quad (1-14)$$

这就是费马原理的数学表示。

费马原理是描述光线传播的基本规律, 无论是光的直线传播定律, 还是光的反射定律与折射定律, 均可以由费马原理直接导出。比如, 对于均匀介质, 由两点间的直线距离为最短这一公理, 即可以证明光的直线传播定律。至于光的反射定律和折射定律的证明, 留待读者在习题中自己推导。

### 四、马吕斯定律

在各向同性的均匀介质中, 光线为光波的法线, 光束对应着波面的法线束。马吕斯定律描述了光经过任意多次折、反射后, 光束与波面、光线与光程之间的关系。

马吕斯定律指出, 光线束在各向同性的均匀介质中传播时, 始终保持着与波面的正交性, 并且入射波面与出射波面对应点之间的光程均为定值。这种正交性表明, 垂直于波面的光线束经过任意多次折、反射后, 无论折、反射面形如何, 出射光束仍垂直于出射波面。

折/反射定律、费马原理和马吕斯定律三者中的任意一个, 均可以视为几何光学的一个基本定律, 而把另外两个作为该基本定律的推论。

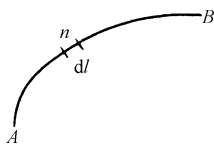


图 1-8 非均匀介质中的光线与光程

## 第二节 成像的基本概念与完善成像条件

### 一、光学系统与成像概念

光学系统的主要作用之一是对物体成像。一个被照明的物体(或自发光物体)总可以

看成是由无数多个发光点或物点组成的，每个物点发出一个球面波，与之对应的是一束以物点为中心的同心光束。如果该球面波经过光学系统后仍为一球面波，那么对应的光束仍为同心光束，则称该同心光束的中心为物点经过光学系统所成的完善像点。物体上每个点经过光学系统后所成完善像的集合就是该物体经过光学系统后的完善像。通常，我们把物体所在的空间称为物空间，把像所在的空间称为像空间。物像空间的范围均为  $(-\infty, +\infty)$ 。

光学系统通常是由若干个光学元件（如透镜、棱镜、反射镜和分划板等）组成，而每个光学元件都是由表面为球面、平面或非球面的、具有一定折射率的介质构成。如果组成光学系统的各个光学元件的表面曲率中心都在同一直线上，则称该光学系统为共轴光学系统，该直线称为光轴。光学系统中大部分为共轴光学系统，非共轴光学系统较少使用。

## 二、完善成像条件

图 1-9 所示为一共轴光学系统，由  $O_1$ 、 $O_2$ 、 $\dots$ 、 $O_k$  等  $k$  个面组成。轴上物点  $A_1$  发出一球面波  $W$ （与之对应的是以  $A_1$  为中心的同心光束），经过光学系统后仍为一球面波  $W'$ ，对应的是以球心  $A'_k$  为中心的同心光束， $A'_k$  即为物点  $A_1$  的完善像点。

光学系统成完善像应满足的条件为：入射波面为球面波时，出射波面也为球面波。由于球面波对应同心光束，所以完善成像条件也可以表述为：入射光为同心光束时，出射光束亦为同心光束。根据马吕斯定律，入射波面与出射波面对应点间的光程相等，则完善成像条件用光程的概念可以表述为：物点  $A_1$  及其像点  $A'_k$  之间任意两条光路的光程相等，即等光程原理

$$\begin{aligned} n_1 A_1 O + n_1 O O_1 + n_2 O_1 O_2 + \dots + n'_k O_k O' + n'_k O' A'_k \\ = n_1 A_1 E + n_1 E E_1 + n_2 E_1 E_2 + \dots + n'_k E_k E' + n'_k E' A'_k = \text{常数} \end{aligned}$$

或简写为

$$(A_1 A'_k) = \text{常数}$$

通常，满足等光程原理的单个折、反射面一般都是非球面。

## 三、物、像的虚实

根据物、像方同心光束的会聚与发散情况，物、像有虚实之分。由实际光线相交所形成的点为实物点或实像点，而由光线的延长线相交所形成的点为虚物点或虚像点，如图 1-10

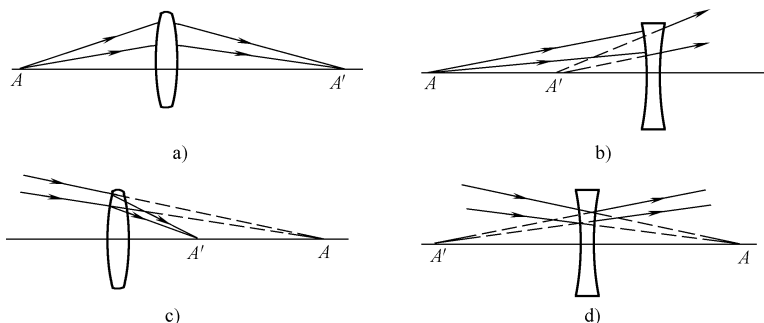


图 1-10 物、像的虚实

所示。图 a 为实物成实像，图 b 为实物成虚像，图 c 为虚物成实像，图 d 为虚物成虚像的情况。需要说明的是，虚物不能人为设定，它是前一光学系统所成的实像被当前系统所截而得。实像不仅能为人眼所观察，而且还能用屏幕、胶片或光电成像器件（如数码相机中的 CCD、CMOS 等）记录，而虚像只能为人眼所观察，不能被记录。由图中可以看出，实物、虚像对应发散同心光束，虚物、实像对应会聚同心光束。因此，几个光学系统组合在一起时，前一系统形成的虚像应看成是当前系统的实物。

### 第三节 光路计算与近轴光学系统

大多数光学系统都是由折、反射球面或平面组成的共轴球面光学系统。平面可以看成是曲率半径  $r \rightarrow \infty$  的特例，反射则是折射在  $n' = -n$  时的特例。可见，折射球面系统具有普遍意义。物体经过光学系统的成像，实际上是物体各点发出的光线束经过光学系统逐面折、反射的结果。因此，我们首先讨论光线经过单个折射球面折射的光路计算问题，然后再逐面过渡到整个光学系统。

#### 一、基本概念与符号规则

如图 1-11 所示，折射球面  $OE$  是折射率为  $n$  和  $n'$  两种介质的分界面， $C$  为球心， $OC$  为球面曲率半径，以  $r$  表示。通过球心  $C$  的直线即为光轴，光轴与球面的交点  $O$  称为球面顶点。我们把通过物点和光轴的截面称为子午面。显然，轴上物点  $A$  的子午面有无数多个，而轴外物点的子午面只有一个。在子午面内，光线的位置由以下两个参量确定：

物方截距：顶点  $O$  到光线与光轴的交点  $A$  的距离，用  $L$  表示，即  $L = OA$ 。

物方孔径角：入射光线与光轴的夹角，用  $U$  表示，即  $U = \angle OAE$ 。

轴上点  $A$  发出的光线  $AE$  经过折射面  $OE$  折射后，与光轴相交于  $A'$  点。同样，像方光线  $EA'$  的位置由像方截距  $L' = OA'$  和像方孔径角  $U' = \angle OA'E$  确定。通常，在几何光学与光学设计领域，像方参量符号与其对应的物方参量符号用相同的字母表示，并用撇号“'”加以区别。为了确定光线与光轴的交点在顶点的左边还是右边、光线在光轴的上边还是下边、折射球面是凸的还是凹的，还必须对各符号参量的正负做出规定，即我们通常所说的如下符号规则。

1) 沿轴线段（如  $L$ 、 $L'$  和  $r$ ）：规定光线的传播方向自左至右为正方向，以折射面顶点  $O$  为原点，由顶点到光线与光轴交点（ $A$ 、 $A'$ ）或球心（ $C$ ）的方向和光线传播方向相同时取正，相反时取负。因此，图中  $L$  为负， $L'$ 、 $r$  为正。

2) 垂轴线段（如光线矢高  $h$ ）：以光轴为基准，在光轴以上为正，在光轴以下为负。

3) 光线与光轴的夹角（如  $U$ 、 $U'$ ）：用由光轴转向光线所形成的锐角度量，顺时针为正，逆时针为负。

4) 光线与法线的夹角（如  $I$ 、 $I'$  和  $I''$ ）：由光线以锐角方向转向法线，顺时针为正，逆时针为负。

5) 光轴与法线的夹角（如  $\varphi$ ）：由光轴以锐角方向转向法线，顺时针为正，逆时针为负。

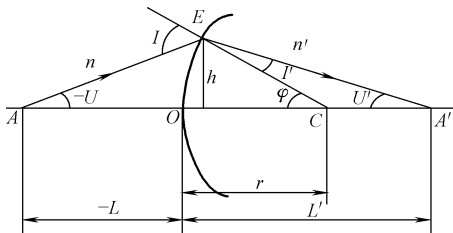


图 1-11 光线经过单个折射球面的折射

6) 相邻两折射面间隔 (用  $d$  表示): 由前一面的顶点到后一面的顶点, 顺光线方向为正, 逆光线方向为负。在折射系统中,  $d$  恒为正值。

这里, 符号及符号规则开始时是约定俗成、人为规定的, 但现在已成为国家标准 (参见 GB/T 1224—1999), 必须严格遵守。只有这样, 才能使在某种情况下推导的公式具有普遍性, 也只有遵守这些符号规则, 才能在工程实际中与同行进行交流。图 1-11 中各量均为几何量, 用绝对值表示。因此, 凡是负值的量, 图中相应量的符号前均加负号。

## 二、实际光线的光路计算

计算光线经过单个折射面的光路, 就是已知球面曲率半径  $r$ 、介质折射率  $n$  和  $n'$  及光线物方坐标  $L$  和  $U$ , 求像方光线坐标  $L'$  和  $U'$ 。如图 1-11 所示, 在  $\triangle AEC$  中, 应用正弦定律, 有

$$\frac{\sin I}{-L+r} = \frac{\sin(-U)}{r}$$

于是

$$\sin I = (L-r) \frac{\sin U}{r} \quad (1-15)$$

在  $E$  点应用折射定律, 有

$$\sin I' = \frac{n}{n'} \sin I \quad (1-16)$$

由图 1-11 可知,  $\varphi = U+I = U'+I'$ , 由此得像方孔径角  $U'$  为

$$U' = U+I-I' \quad (1-17)$$

在  $\triangle A'EC$  中应用正弦定律

$$\frac{\sin I'}{L'-r} = \frac{\sin U'}{r}$$

于是, 得像方截距

$$L' = r \left( 1 + \frac{\sin I'}{\sin U'} \right) \quad (1-18)$$

式(1-15)~式(1-18)即为子午面内实际光线经过单个折射球面时的光路计算公式。给出一组  $L$  和  $U$ , 就可以计算出一组相应的  $L'$  和  $U'$ 。由于折射面乃至整个系统具有轴对称性, 故以  $A$  为顶点、 $2U$  为顶角的圆锥面上的光线经折射后, 均会聚于点  $A'$ 。另一方面, 由上述公式组可知, 当  $L$  一定时,  $L'$  是  $U$  的函数, 因此, 同一物点发出的不同孔径的光线, 经过折射后具有不同的  $L'$  值, 如图 1-12 所示。这说明, 同心光束经折射后, 出射光束不再是同心光束。因此, 单个折射球面对轴上物点成像是不良的。这种现象称为“球差”。球差是球面光学系统成像的固有缺陷。

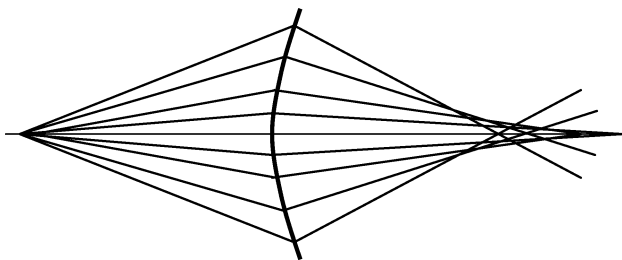


图 1-12 轴上点成像的不完善性

## 三、近轴光线的光路计算

当孔径角  $U$  很小时,  $I$ 、 $I'$  和  $U'$  都很小。这时, 光线在光轴附近很小的区域内, 这个区

域称为近轴区, 近轴区内的光线称为近轴光线。由于近轴光线的有关角度量都很小, 在式(1-15)~式(1-18)中, 将角度的正弦值用其相应的弧度值来代替, 并用相应小写字母表示, 则有

$$i = \frac{l-r}{r}u \quad (1-19)$$

$$i' = \frac{n}{n'}i \quad (1-20)$$

$$u' = u + i - i' \quad (1-21)$$

$$l' = r \left( 1 + \frac{i'}{u'} \right) \quad (1-22)$$

由这组公式可知, 在近轴区内, 对一给定的  $l$  值, 不论  $u$  为何值,  $l'$  均为定值。这表明, 轴上物点在近轴区内以细光束成像是完善的, 这个像通常称为高斯像。通过高斯像点且垂直于光轴的平面称为高斯像面, 其位置由  $l'$  决定。这样一对构成物像关系的点称为共轭点。

在近轴区内, 有

$$l'u' = lu = h \quad (1-23)$$

据此, 将式(1-19)和式(1-22)中的  $i$  和  $i'$  代入式(1-20), 得

$$n' \left( \frac{1}{r} - \frac{1}{l'} \right) = n \left( \frac{1}{r} - \frac{1}{l} \right) = Q \quad (1-24)$$

$$n'u' - nu = (n' - n) \frac{h}{r} \quad (1-25)$$

$$\frac{n'}{l'} - \frac{n}{l} = \frac{n' - n}{r} \quad (1-26)$$

式(1-24)中的  $Q$  称为阿贝不变量。该式表明, 对于单个折射面, 物空间与像空间的阿贝不变量  $Q$  相等, 仅随共轭点的位置而变。式(1-25)表示了物、像方孔径角的相互关系。这两式在像差理论中有重要应用。式(1-26)表明了单个折射球面的物、像位置关系, 已知物体位置  $l$ , 即可求出其共轭像的位置  $l'$ 。反之亦然。

## 第四节 球面光学成像系统

上节讨论了轴上点经过单个折射球面的成像情况, 主要涉及物像位置关系。当讨论有限大小的物体经过折射球面乃至球面光学系统成像时, 除了物像位置关系外, 还涉及像的放大与缩小、像的正倒与虚实等成像特性。以下我们均在近轴区内予以讨论。

### 一、单个折射面成像

#### (一) 垂轴放大率

在近轴区内, 垂直于光轴的平面物体可以用子午面内的垂轴小线段  $AB$  表示, 经过球面折射后所成像  $A'B'$  垂直于光轴  $AOA'$ 。由轴外物点  $B$  发出的通过球心  $C$  的光线  $BC$  必定通过  $B'$  点, 因为  $BC$  相当于轴外物点  $B$  的光轴 (称为辅轴)。如图 1-13 所示, 令  $AB = y$ ,  $A'B' = y'$ , 则定义垂轴放大率  $\beta$  为像的大小与物体的大小之比, 即

$$\beta = \frac{y'}{y} \quad (1-27)$$