



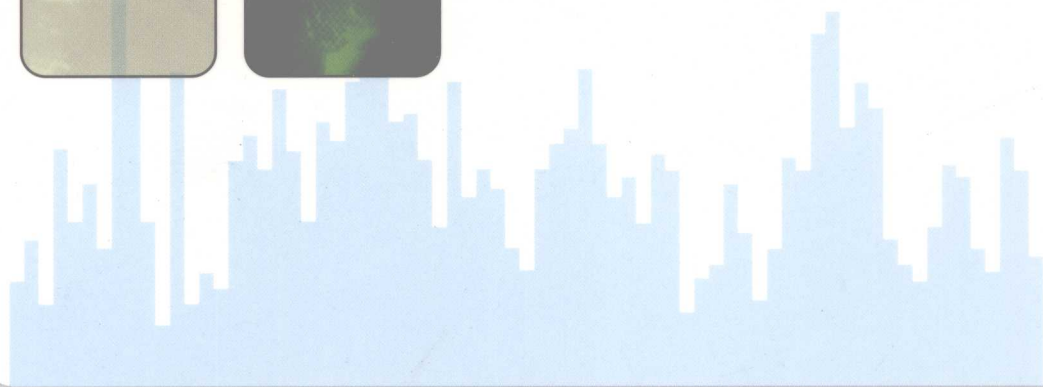
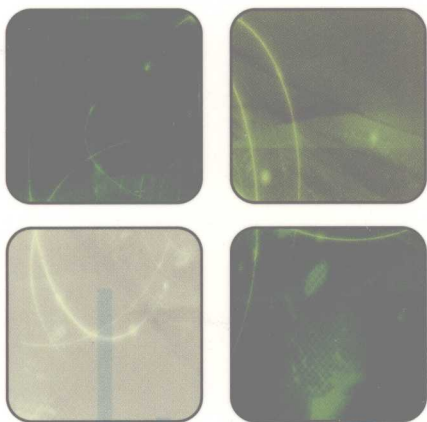
全国高等院校测控技术与仪器专业**创新型**人才培养规划教材

# 工程光学

赠送电子课件

observe and control

主 编 王红敏



北京大学出版社  
PEKING UNIVERSITY PRESS

全国高等院校测控技术与仪器专业创新型人才培养规划教材

# 工程光学

主 编 王红敏

副主编 张发玉 吴清收 郑国兴



北京大学出版社  
PEKING UNIVERSITY PRESS

## 内 容 简 介

本书系统地介绍了几何光学和物理光学的理论知识及其应用。全书共分12章,第1~9章属于几何光学,主要介绍了几何光学的基本定律,高斯光学理论及基本光学元件的成像特性,光学系统的光束限制及应用,像差的基本概念、成因及校正,典型光学系统的工作原理,激光、光纤和红外等现代应用光学系统;第10~12章属于物理光学,介绍了光的干涉、衍射和偏振等特性及应用。本书注重实用性与先进性,力求深入浅出,通俗易懂,不仅注意必要的理论基础,而且紧密结合工程实际,列举了大量应用实例,关键环节都选编了相关例题,每章都附有习题及部分参考答案,以满足读者自学的需要。

本书可作为高等院校仪器仪表类、光学工程、测控及电子信息等专业基础课教材,也可供其他相关专业学生和从事光电技术、仪器仪表技术、精密计量及检测技术等专业的工程技术人员及科技工作者参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

工程光学/王红敏主编. —北京:北京大学出版社,2009.9  
(全国高等院校测控技术与仪器专业创新型人才培养规划教材)  
ISBN 978-7-301-15629-2

I. 工… II. 王… III. 工程光学—高等学校—教材 IV. TB133

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第137360号

书 名: 工程光学

著作责任者: 王红敏 主编

责任编辑: 童君鑫

标准书号: ISBN 978-7-301-15629-2/TH·0152

出版者: 北京大学出版社

地 址: 北京市海淀区成府路205号 100871

网 址: <http://www.pup.cn> <http://www.pup6.com>

电 话: 邮购部 62752015 发行部 62750672 编辑部 62750667 出版部 62754962

电子邮箱: [pup\\_6@163.com](mailto:pup_6@163.com)

印刷者: 涿州星河印刷有限公司

发 行 者: 北京大学出版社

经 销 者: 新华书店

787毫米×1092毫米 16开本 16.5印张 377千字

2009年9月第1版 2009年9月第1次印刷

定 价: 28.00元

---

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

举报电话: 010-62752024

电子邮箱: [fd@pup.pku.edu.cn](mailto:fd@pup.pku.edu.cn)

# 前 言

工程光学课程是测控技术与仪器、精密计量和光电类专业本科生的专业基础课。本书是根据全国本科院校仪器仪表类专业的教学内容和课程体系改革要求，为适应科学技术的发展和培养创新型应用人才的需要而编写的。

本书是在编者多年教学和科研实践的基础上编写而成的，全书共分12章，内容涉及几何光学和物理光学两部分内容。第1~9章为几何光学，主要介绍了几何光学的基本定律，高斯光学理论及基本光学元件的成像特性，光学系统的光束限制及应用，像差的基本概念、成因及校正，典型光学系统的工作原理，激光、光纤和红外等现代应用光学系统；第10~12章为物理光学，介绍了光的干涉、衍射和偏振等特性及应用。本书在编写过程中，注重坚持基础理论、强化能力、突出重点、学以致用原则，既注重阐述必要的基础知识，又力求理论联系实际，紧密结合工程实际，列举了大量应用实例，集实用性、知识性和通俗性于一体，有利于读者较全面地掌握光学的基本理论和实际应用，努力反映光学领域的新发展，并注重培养学生解决实际问题的能力。

本书具有以下特点：

(1) 精选教学内容，不仅强调工程的科学分析，同时注重工程实践能力的培养，使科学理论与工程实践有机结合，依据教学大纲的基本要求，强调基础知识在工程实际中的应用，从而提高学生的动手能力和创新精神；

(2) 略去了复杂的数学推导，强调基本概念的阐述，注重实用性与先进性，力求深入浅出，通俗易懂，以方便读者学习，关键环节都选编了相关例题，每章都附有习题及部分参考答案，以满足读者自学的需要；

(3) 立足基本理论，面向应用技术，以“必需、够用”为尺度，以掌握概念、强化应用为重点，加强了理论知识和工程实际应用的统一；

(4) 力求基础知识、科技新成果及发展新动向相结合，以光学基本理论、光学系统成像特性及光学理论在现代光学系统中的典型应用为主线；

(5) 本书略去光度学、色度学等内容，如有需要，可参阅其他相关教材进行补充。

本书可作为高等院校仪器仪表类、光学工程、测控及电子信息等专业基础课教材，也可供其他相关专业学生和从事光电技术、仪器仪表技术、精密计量及检测技术等专业的工程技术人员及科技工作者参考。

本书由山东理工大学王红敏任主编，河南科技大学张发玉、山东科技大学吴清收、武汉大学郑国兴任副主编。编写分工如下：王红敏编写第1、2、5、6、7、8章及全书各章首案例，吴清收编写第3、4章，郑国兴编写第9章，张发玉编写第10、11、12章。全书由王红敏统稿和定稿。

在编写过程中，本书参考了大量有关文献及各相关网站的有关内容，在此一并表示衷心感谢。

由于编者水平所限，书中疏漏和不妥之处在所难免，恳请广大读者批评指正。

编 者

2009年6月

# 目 录

|                                   |    |
|-----------------------------------|----|
| <b>第 1 章 几何光学的基本定律和物像概念</b> ..... | 1  |
| 1.1 概述 .....                      | 2  |
| 1.2 几何光学的基本定律 .....               | 4  |
| 1.2.1 基本定律概述 .....                | 4  |
| 1.2.2 光路的可逆性 .....                | 6  |
| 1.2.3 费马原理 .....                  | 6  |
| 1.2.4 马吕斯定律 .....                 | 7  |
| 1.3 成像的基本概念与完善成像条件 .....          | 8  |
| 1.3.1 光学系统与物像概念 .....             | 8  |
| 1.3.2 完善成像条件 .....                | 8  |
| 1.3.3 物像的虚实 .....                 | 9  |
| 1.3.4 物像的相对性 .....                | 10 |
| 习题 .....                          | 10 |
| <b>第 2 章 共轴球面光学系统</b> .....       | 11 |
| 2.1 基本概念与符号规则 .....               | 13 |
| 2.2 单个折射球面成像 .....                | 14 |
| 2.2.1 单折射球面成像的光路计算 .....          | 14 |
| 2.2.2 近轴区成像的物像关系 .....            | 16 |
| 2.2.3 近轴区成像的放大率和传递不变量 .....       | 16 |
| 2.3 单个反射球面成像 .....                | 20 |
| 2.4 共轴球面光学系统成像 .....              | 21 |
| 习题 .....                          | 23 |
| <b>第 3 章 理想光学系统</b> .....         | 24 |
| 3.1 理想光学系统理论 .....                | 25 |
| 3.1.1 理想光学系统理论的内容 .....           | 25 |
| 3.1.2 共轴理想光学系统理论 .....            | 26 |
| 3.2 理想光学系统的基点和基面 .....            | 27 |
| 3.2.1 无限远轴上物点和其对应的像点 $F'$ .....   | 27 |
| 3.2.2 无限远轴上像点对应的物点 $F$ .....      | 28 |
| 3.2.3 物方主平面与像方主平面 .....           | 29 |
| 3.3 理想光学系统的物像关系 .....             | 29 |
| 3.3.1 图解法求像 .....                 | 29 |
| 3.3.2 解析法求像 .....                 | 30 |
| 3.3.3 理想光学系统两焦距之间的关系 .....        | 32 |
| 3.3.4 举例 .....                    | 32 |
| 3.4 理想光学系统的放大率 .....              | 33 |
| 3.4.1 垂轴放大率 .....                 | 33 |
| 3.4.2 轴向放大率 .....                 | 34 |
| 3.4.3 角放大率 .....                  | 34 |
| 3.4.4 光学系统的节点 .....               | 34 |
| 3.4.5 用平行光管测定焦距的依据 .....          | 36 |
| 3.4.6 举例 .....                    | 36 |
| 3.5 理想光学系统的组合 .....               | 37 |
| 3.5.1 图解法求像 .....                 | 37 |
| 3.5.2 解析法求像 .....                 | 37 |
| 3.5.3 理想光学系统的光焦度 .....            | 41 |
| 3.5.4 举例 .....                    | 41 |
| 3.6 透镜 .....                      | 42 |
| 3.6.1 透镜的分类 .....                 | 42 |
| 3.6.2 透镜的焦距和基点位置 .....            | 43 |
| 3.6.3 举例 .....                    | 44 |
| 习题 .....                          | 46 |
| <b>第 4 章 平面与平面系统</b> .....        | 48 |
| 4.1 平面镜成像 .....                   | 50 |
| 4.1.1 单平面镜 .....                  | 50 |
| 4.1.2 双平面镜成像 .....                | 51 |
| 4.2 平行平板 .....                    | 52 |
| 4.2.1 平行平板的成像特性 .....             | 52 |
| 4.2.2 近轴区平行平板的成像 .....            | 53 |
| 4.3 反射棱镜 .....                    | 53 |

|            |                     |           |            |                     |            |
|------------|---------------------|-----------|------------|---------------------|------------|
| 4.3.1      | 反射棱镜的概念及分类          | 53        | 6.2.1      | 彗差的形成及光学现象          | 84         |
| 4.3.2      | 棱镜系统的成像方向<br>判断     | 56        | 6.2.2      | 彗差的量度               | 86         |
| 4.3.3      | 反射棱镜的等效作用与<br>展开    | 56        | 6.2.3      | 彗差的校正               | 86         |
| 4.4        | 折射棱镜与光楔             | 57        | 6.3        | 像散和场曲               | 88         |
| 4.4.1      | 折射棱镜的偏转             | 57        | 6.3.1      | 细光束像散和场曲的<br>产生及量度  | 88         |
| 4.4.2      | 光楔及其应用              | 57        | 6.3.2      | 像散和场曲的校正            | 91         |
| 4.4.3      | 棱镜的色散               | 58        | 6.4        | 畸变                  | 93         |
| 4.4.4      | 光学材料                | 59        | 6.4.1      | 畸变的产生和量度            | 93         |
| 4.4.5      | 举例                  | 59        | 6.4.2      | 畸变的种类               | 93         |
| 习题         |                     | 59        | 6.4.3      | 畸变的校正               | 93         |
| <b>第5章</b> | <b>光学系统的光束限制</b>    | <b>61</b> | 6.5        | 色差                  | 95         |
| 5.1        | 孔径光阑、入瞳和出瞳          | 63        | 6.5.1      | 位置色差                | 95         |
| 5.1.1      | 孔径光阑                | 63        | 6.5.2      | 倍率色差                | 96         |
| 5.1.2      | 入瞳和出瞳               | 64        | 6.6        | 像差综述                | 97         |
| 5.1.3      | 孔径光阑、入瞳和出瞳的<br>判定方法 | 65        | 习题         |                     | 99         |
| 5.2        | 视场光阑、入窗和出窗          | 66        | <b>第7章</b> | <b>眼睛及目视光学系统</b>    | <b>100</b> |
| 5.2.1      | 视场光阑                | 66        | 7.1        | 眼睛及其光学系统            | 101        |
| 5.2.2      | 入窗和出窗               | 67        | 7.1.1      | 眼睛的结构               | 101        |
| 5.2.3      | 视场光阑、入窗和出窗的<br>判定方法 | 67        | 7.1.2      | 眼睛的调节               | 102        |
| 5.3        | 渐晕光阑及场镜的应用          | 68        | 7.1.3      | 眼睛的缺陷与校正            | 103        |
| 5.3.1      | 渐晕及渐晕光阑             | 68        | 7.1.4      | 眼睛的视角               | 105        |
| 5.3.2      | 场镜的应用               | 71        | 7.1.5      | 眼睛的分辨率              | 105        |
| 5.4        | 光学系统的景深和焦深          | 73        | 7.1.6      | 眼睛的瞄准精度             | 106        |
| 5.4.1      | 光学系统的空间像            | 73        | 7.1.7      | 双目立体视觉              | 107        |
| 5.4.2      | 光学系统的景深             | 73        | 7.2        | 放大镜                 | 108        |
| 5.4.3      | 照相机景深举例             | 75        | 7.2.1      | 放大镜的视觉放大率           | 109        |
| 5.4.4      | 光学系统的焦深             | 75        | 7.2.2      | 放大镜的光束限制和<br>线视场    | 110        |
| 5.5        | 远心光路                | 76        | 7.3        | 显微镜系统               | 112        |
| 5.5.1      | 物方远心光路              | 76        | 7.3.1      | 显微镜的视觉放大率           | 112        |
| 5.5.2      | 像方远心光路              | 77        | 7.3.2      | 显微镜的光束限制和<br>线视场    | 113        |
| 习题         |                     | 78        | 7.3.3      | 显微镜的分辨率和有效<br>放大率   | 115        |
| <b>第6章</b> | <b>像差概论</b>         | <b>80</b> | 7.3.4      | 显微镜的景深              | 118        |
| 6.1        | 球差                  | 82        | 7.3.5      | 显微镜的照明方法            | 119        |
| 6.1.1      | 球差的定义及光学现象          | 82        | 7.3.6      | 显微镜的物镜              | 121        |
| 6.1.2      | 单折射球面的齐明点           | 82        | 7.4        | 望远镜系统               | 121        |
| 6.1.3      | 单透镜的球差与校正           | 83        | 7.4.1      | 望远镜的视觉放大率           | 122        |
| 6.2        | 彗差                  | 84        | 7.4.2      | 望远镜系统的分辨率和<br>工作放大率 | 123        |

|               |                  |            |               |                  |            |
|---------------|------------------|------------|---------------|------------------|------------|
| 7.4.3         | 望远镜的视场           | 124        | 10.2.1        | 平行平板产生的等倾干涉      | 174        |
| 7.5           | 目镜               | 127        | 10.2.2        | 楔形平板产生的等厚干涉      | 176        |
| 7.5.1         | 目镜的主要光学参数        | 127        | 10.2.3        | 典型分振幅干涉仪及其应用     | 178        |
| 7.5.2         | 目镜类型             | 127        | 10.2.4        | 干涉技术的其他应用        | 183        |
| 7.5.3         | 光学仪器中目镜的视度调节     | 129        | 10.3          | 平行平板的多光束干涉及其应用   | 185        |
| 习题            |                  | 130        | 10.3.1        | 平行平板多光束干涉        | 185        |
| <b>第 8 章</b>  | <b>摄影系统和投影系统</b> | <b>132</b> | 10.3.2        | 法布里-帕罗干涉仪        | 188        |
| 8.1           | 摄影系统             | 133        | 习题            |                  | 190        |
| 8.1.1         | 摄影物镜的光学特性        | 133        | <b>第 11 章</b> | <b>光的衍射</b>      | <b>192</b> |
| 8.1.2         | 摄影物镜的光束限制        | 136        | 11.1          | 光的衍射现象及其标量理论     | 194        |
| 8.1.3         | 摄影物镜的分辨率         | 136        | 11.1.1        | 光的衍射现象           | 194        |
| 8.1.4         | 摄影物镜的景深          | 137        | 11.1.2        | 光波的标量衍射理论        | 195        |
| 8.1.5         | 摄影物镜的类型          | 137        | 11.2          | 菲涅尔衍射            | 198        |
| 8.2           | 投影系统             | 145        | 11.2.1        | 菲涅尔波带法           | 198        |
| 8.2.1         | 投影物镜的光学特性        | 145        | 11.2.2        | 菲涅尔圆孔和圆屏衍射       | 200        |
| 8.2.2         | 投影物镜的结构形式        | 146        | 11.3          | 夫琅和费衍射           | 202        |
| 8.2.3         | 投影系统的照明          | 147        | 11.3.1        | 夫琅和费衍射系统和衍射公式的意义 | 202        |
| 习题            |                  | 147        | 11.3.2        | 夫琅和费矩孔衍射         | 204        |
| <b>第 9 章</b>  | <b>现代光学系统</b>    | <b>149</b> | 11.3.3        | 夫琅和费单缝衍射         | 206        |
| 9.1           | 激光光学系统           | 150        | 11.3.4        | 夫琅和费圆孔衍射         | 208        |
| 9.1.1         | 高斯光束的特性          | 151        | 11.3.5        | 夫琅和费多缝衍射         | 210        |
| 9.1.2         | 高斯光束的透镜变换        | 152        | 11.4          | 光学成像系统的衍射和分辨率    | 213        |
| 9.2           | 光纤光学系统           | 155        | 11.4.1        | 光学成像系统的衍射        | 213        |
| 9.2.1         | 阶跃型光纤            | 155        | 11.4.2        | 光学成像系统的分辨率       | 214        |
| 9.2.2         | 梯度折射率光纤          | 157        | 11.5          | 衍射光栅             | 216        |
| 9.3           | 红外光学系统           | 158        | 11.5.1        | 光栅概述             | 216        |
| 9.3.1         | 红外光学系统的特点        | 158        | 11.5.2        | 光栅的分光性能          | 216        |
| 9.3.2         | 典型红外光学系统         | 159        | 11.5.3        | 闪耀光栅             | 219        |
| 习题            |                  | 160        | 11.5.4        | 阶梯光栅             | 220        |
| <b>第 10 章</b> | <b>光的干涉</b>      | <b>162</b> | 11.5.5        | 计量光栅             | 222        |
| 10.1          | 光波干涉的条件及杨氏干涉实验   | 163        | 11.6          | 衍射技术在工程中的应用      | 223        |
| 10.1.1        | 光波干涉的条件          | 163        | 11.6.1        | 微孔直径测量           | 223        |
| 10.1.2        | 杨氏干涉实验           | 165        | 11.6.2        | 细狭缝宽(细丝直径)测量     | 224        |
| 10.1.3        | 干涉条纹的可见度         | 168        |               |                  |            |
| 10.1.4        | 双缝干涉的应用          | 173        |               |                  |            |
| 10.2          | 平板的双光束干涉及典型应用    | 174        |               |                  |            |

|                    |            |                 |            |
|--------------------|------------|-----------------|------------|
| 习题                 | 225        | 12.2.4 补偿器      | 239        |
| <b>第 12 章 光的偏振</b> | <b>227</b> | 12.3 圆偏振光和椭圆偏振光 | 240        |
| 12.1 偏振光概述         | 228        | 12.4 偏振光的干涉     | 243        |
| 12.1.1 光的横波性       | 228        | 12.4.1 平行偏振光干涉  | 243        |
| 12.1.2 偏振光的产生方法    | 230        | 12.4.2 会聚偏振光干涉  | 246        |
| 12.1.3 马吕斯定律       | 234        | 12.4.3 偏振光的应用   | 247        |
| 12.2 晶体偏振器件        | 235        | 习题              | 249        |
| 12.2.1 偏振起偏棱镜      | 235        | <b>参考答案</b>     | <b>250</b> |
| 12.2.2 偏振分束棱镜      | 237        | <b>参考文献</b>     | <b>254</b> |
| 12.2.3 波片          | 238        |                 |            |



# 第 1 章

## 几何光学的基本定律和物像概念



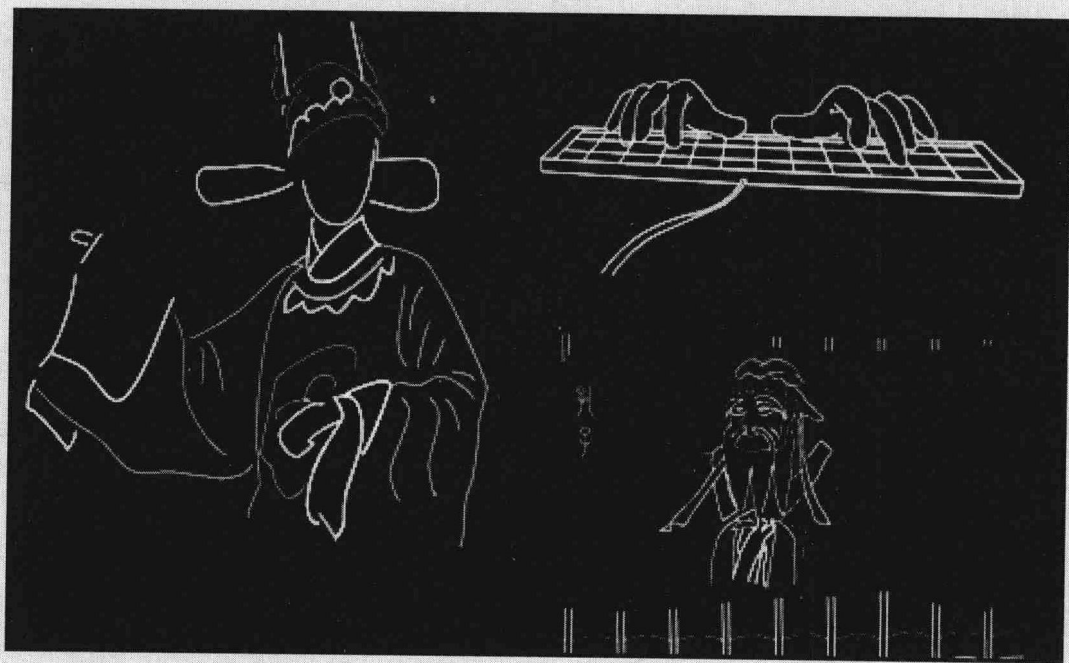
### 本章教学要点

| 知识要点           | 掌握程度                              | 相关知识                       |
|----------------|-----------------------------------|----------------------------|
| 几何光学的基本定律      | 掌握几何光学的基本定律及应用, 利用费马原理证明光的反射和折射定律 | 光的本质, 光学研究的内容, 光的传播规律和传播现象 |
| 成像的基本概念与完善成像条件 | 理解成像的基本概念、完善成像条件、物像的虚实及相对性        | 光学系统的成像规律                  |



## 导入案例

我们生活在光现象中，光的应用无处不在，仅激光产品就数不胜数，激光应用的领域主要有工业、商业、医疗、科研、信息和军事等领域。工业应用主要有材料加工和测量控制；商业应用主要有印刷、制版、条码判读、激光唱盘、视盘读写、激光全息和娱乐等；医疗应用主要用于治疗和诊断；科研应用主要有光谱学应用和基础应用(如激光核聚变研究)；信息应用主要有计算机光盘读写和光纤通信等；军事应用主要有遥感、模拟、制导、测距、瞄准、激光致盲和激光武器等。例如激光动漫是新型激光显示技术的一种表现形式，将激光与动漫艺术完美结合，通过激光介质演绎动漫，带给我们高科技的艺术享受，如图所示。激光动漫包括：激光漫画、激光动画广告、激光动漫艺术创意、激光舞台动漫艺术、激光水幕与喷泉动漫、激光夜景动漫、激光迷宫等，广泛应用于游乐、娱乐和信息广告业(科教与天文馆；博物馆和展览馆；剧场和电影院；城市主题公园和游乐园；庆典晚会与产品形象宣传；城市广场和高层建筑；歌厅与酒吧等)。



## 1.1 概 述

人们对光的研究可以分为两方面：一方面是物理光学，研究光的本性，并根据光的本性来研究各种光学现象；另一方面是几何光学，也称为应用光学，研究光的传播规律和传播现象，并用这些规律去研究光学仪器的原理。

光的本质是电磁波，其波谱范围通常从远红外到真空紫外，而可见光的波段大约在380~760nm之间，超出这个范围人眼则感觉不到，如图1.1所示。在可见光波段内，不

同波长的光产生不同的颜色感觉，具有单一颜色的光称为单色光，将几种单色光混合得到的光称为复色光，白光由红、橙、黄、绿、青、蓝、紫七色光组成，如太阳光。不同颜色的光对应不同的波长，但它们在真空中具有完全相同的速度  $c(c \approx 3 \times 10^8 \text{ m/s})$ 。因光传播速度和材料的折射率有关，所以光传播速度在空气中可近似认为等于光速，而在水、玻璃等透明介质中，要比在真空中慢，且速度随波长而变。

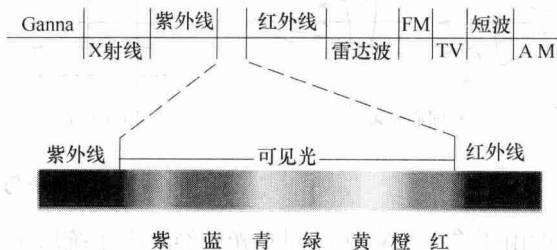


图 1.1 电磁波谱

几何光学是人们在观察和解释光的传播、成像以及制造光学仪器过程中所积累的经验 and 智慧的结晶，完全不考虑光的波动特性，仅以光的直线传播性质为基础，所以几何光学是波动光学在一定条件下的近似。采用几何学的方法，研究光在透明介质中的传播和成像规律，是研究光的传播现象及其应用的有效方法之一。

几何光学要求它所研究的对象的几何尺寸必须远大于光的波长，一般光学仪器都能符合这一条件，光学仪器中的绝大多数光学问题，用几何光学都可以得到合理、正确的结果。而且几何光学在描述和处理光的传播和成像时，可以用几何作图和公式计算来设计光学系统，这种方法简洁明了，数据合理可靠，所以几何光学的理论得到广泛应用和不断发展。

几何光学的几个基本概念介绍如下。

### 1. 发光体与发光点

凡能辐射光能的物体统称为发光体或光源，一切自身发光或受到光照射而发光的物体均可视为发光体。当发光体的大小与辐射光能的作用距离相比可以忽略时，则此发光体可视为发光点或点光源，在几何光学中，认为发光点是一个既无大小又无体积的几何点。任何被成像的物体都是发光体，均由无数个发光点组成。

### 2. 波面

发光体向四周辐射光波，某一时刻光振动位相相同的点所构成的面称为波振面，简称波面，波面可以是平面波、球面波或任意曲面波，光的传播即光波波面的传播。

### 3. 光线

由物理光学可知，在各向同性的均匀介质中，辐射能量是沿波面的法线方向传播的，因此，物理光学中的波面法线即相当于几何光学中的光线，即光线垂直于波面。几何光学把光线看做是无直径、无体积，携带光能只有位置和方向的几何线，代表光的传播方向。

### 4. 光束

无限多条光线的集合称为光束，常见的光束有同心光束、平行光束、像散光束，如图 1.2 所示。

同心光束是指相交于同一点或由同一点发出的一束光线，分为会聚光束和发散光束，其对应的波面形状为球面；平行光束是指没有聚交点而互相平行的光线束，对应的波面形状为平面；像散光束是指不聚交于同一点或不是由同一点发出的光束，对应的波面形状为非球

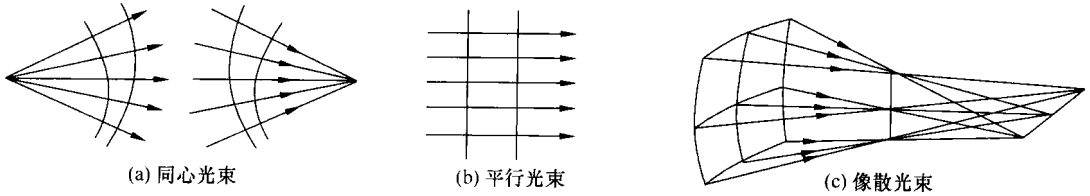


图 1.2 光束与波面

面，即由于像差的存在，同心光束经光学系统后不再是同心光束，对应的波面为非球面波。

几何光学研究光的传播也就是研究光线的传播，光线是一些具有方向的几何线，几何光学使光传播问题大为简化，因此以光线作为基本概念的几何光学理论具有很重要的实用价值，至今仍是重要的成像理论。

## 1.2 几何光学的基本定律

几何光学的基本定律是研究光的传播现象和规律，以及光线经过光学系统成像特性的基础。

### 1.2.1 基本定律概述

#### 1. 光的直线传播定律

在各向同性的均匀介质中，光是沿直线传播的，这就是光的直线传播定律。影子的形成、日食、月食等现象都很好地印证了该定律，小孔成像正是利用了光的直线传播定律。但应注意，光的直线传播定律是在不考虑光的波动性质的情况下才成立的，当光经过尺寸与波长接近或更小的小孔或狭缝时，将会发生衍射现象，光将不再沿直线传播。另外，当光在非均匀介质中传播时，光线传播的路径为曲线，而不是直线，如海市蜃楼现象。

#### 2. 光的独立传播定律

从不同发光体发出的多束光线在空间相遇时，彼此互不影响，各光线独立传播，称为光的独立传播定律。按照这一定律，光束相交处光强是简单的叠加。光的独立传播定律仅对不同发光体发出的光是非相干光才是准确的，如果两束光由同一光源发出，经不同的路径传播后在空间某点交会时，交会点的光强将不再是简单的叠加，而是根据两光束所走过的光程不同，可能加强，也可能减弱，即可能成为相干光而发生干涉现象。

#### 3. 光的反射和折射定律

光的直线传播定律和光的独立传播定律是光在同一均匀介质中的传播规律，而光的反射定律和折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。

如图 1.3 所示，当一束光  $AO$  投射到两种透明介质的分界面上时，将有一部分光被反射，另一部分光被折射，两者分别遵守反射定律和折射定律。图中分

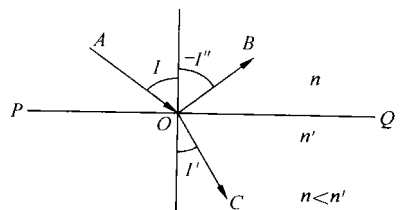


图 1.3 光的反射与折射

界面  $PQ$  处,  $I$ 、 $I'$ 、 $I''$  分别为入射角、折射角和反射角, 它们均以锐角度量, 其符号规定为: 由光线转向法线, 顺时针为正, 逆时针为负。

1) 反射定律

反射定律可归结为:

- (1) 反射光线位于入射光线和法线所决定的平面。
- (2) 反射光线和入射光线位于法线两侧, 且绝对值相等, 符号相反, 即

$$I'' = -I \tag{1-1}$$

式中, 负号表示二者的传播方向相反。

2) 折射定律

折射定律可归结为:

- (1) 折射光线位于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的大小无关, 仅取决于两种介质的性质。用公式表示为

$$n' \sin I' = n \sin I \tag{1-2}$$

式中,  $n$ 、 $n'$  为介质的绝对折射率,  $n=c/v$ ,  $n'=c/v'$ , 真空中  $n=1$ 。若令  $n'=-n$ , 则可由折射定律转化为反射定律, 因此反射定律可以看做折射定律的一个特例。

3) 光的全反射

按照光的反射和折射定律, 当光线入射到两种介质的分界面时, 一般都会发生反射和折射。但当光线从光密介质射向光疏介质, 即  $n > n'$  时, 折射角将大于入射角。当入射角逐渐增大, 到达某一角度  $I_m$  时, 光线的折射角达到  $90^\circ$ , 光线沿界面掠射而出, 继续增大入射角, 则折射光线消失, 所有光线全都发生反射, 回到原光密介质, 这种现象称为全反射。  $I_m$  称为全反射的临界角, 如图 1.4 所示。

由此可见, 光线发生全反射的条件为: ① 光线从光密介质射向光疏介质; ② 入射角大于临界角。

全反射具有很重要的应用, 如全反射棱镜、光导纤维、分划板照明、 $360^\circ$  平面光束仪等。图 1.5 和图 1.6 分别为全反射在直角棱镜和光导纤维中的应用。

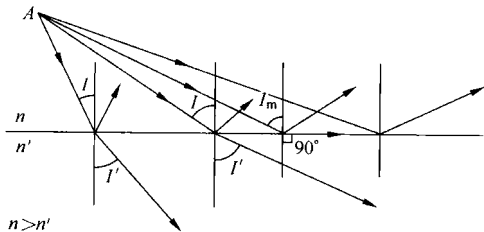


图 1.4 光的全反射

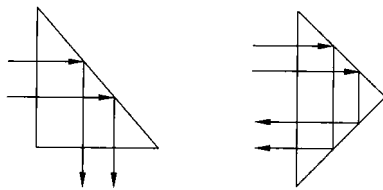


图 1.5 直角棱镜中的全反射

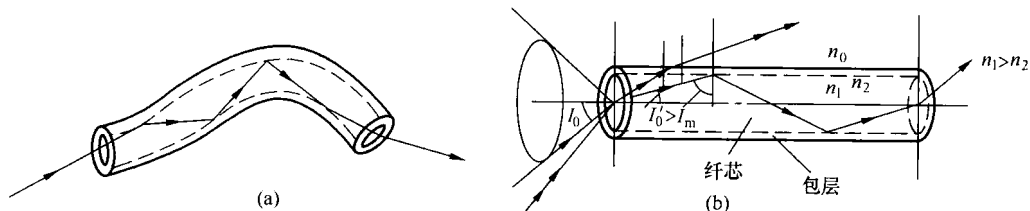


图 1.6 光导纤维中的全反射

### 1.2.2 光路的可逆性

如图 1.3 所示, 如果光线沿  $BO$  入射, 则按照光的直线传播定律和反射定律, 光线将沿  $OA$  出射; 同样, 如果光线沿  $CO$  入射, 则按照光的直线传播定律和折射定律, 光线也沿  $OA$  出射。由此可见, 光线的传播是可逆的, 且无论是在均匀介质中光线直线传播, 还是在两种均匀介质界面上发生反射和折射时, 光路的可逆性现象都同样存在。

光路可逆现象具有重要意义, 根据这一特性, 不但可以确定物体经光学系统后所成像的位置, 而且也可以反过来由像来确定物体的位置, 在光学系统的设计计算中, 经常利用光路的可逆性, 给解决实际问题带来极大方便。

### 1.2.3 费马原理

费马原理指出, 光从一点传播到另一点, 期间无论经过多少次反射或折射, 其光程为极值(极大、极小或常量)。或者说, 光是沿着光程为极值的路径传播的。

光程  $s$  是指光在介质中传播的几何路程  $l$  与该介质折射率  $n$  的乘积, 即

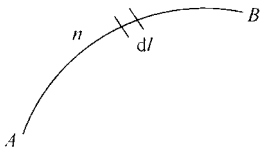
$$s = nl \quad (1-3)$$

利用  $n = c/v$  和  $l = vt$ , 有

$$s = ct \quad (1-4)$$

可见, 光在某种介质中的光程等于同一时间光在真空中所走过的几何路程。

光在均匀介质中是沿直线传播的, 但在非均匀介质中, 因折射率  $n$  是空间位置的函数, 故光线将不再沿直线传播, 其轨迹是一空间曲线, 如图 1.7 所示, 光从  $A$  点传播到  $B$  点, 其光程由曲线积分来确定, 即



$$s = \int_A^B n dl \quad (1-5)$$

根据费马原理, 此光程为极值, 所以式(1-5)可表示为

图 1.7 光在非均匀介质中的传播

$$\delta s = \delta \int_A^B n dl = 0 \quad (1-6)$$

图 1.8 所示为非均匀介质中光程为稳定值和极大值的情况。

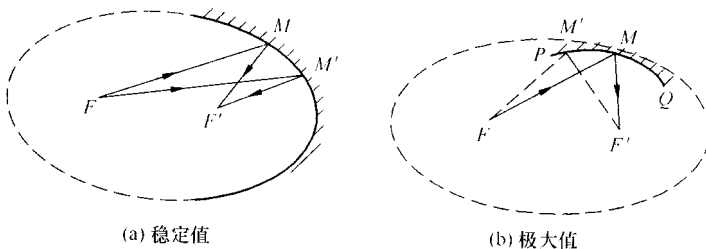


图 1.8 光在非均匀介质中的传播实例

由费马原理可以证明几何光学的基本定律, 如光的直线传播定律: 在均匀介质中, 折射率为常数, 所以要求光程为极值即要求几何路程为极值, 因两点之间直线最短, 对应的光程为极小值, 所以均匀介质中光线沿直线传播。

**例 1.1** 用费马原理证明光的反射定律。

**证明** 如图 1.9(a) 所示, 设点  $A$ 、 $B$  均位于  $xOz$  面上,  $A(x_1, 0, z_1)$  为点光源,  $B(x_2, 0, z_2)$  为接收器, 点  $P(x, y, 0)$  为光线在界面  $xOy$  面上的入射点, 则光线  $APB$  的光程为

$$s = n\sqrt{(x-x_1)^2 + y^2 + z_1^2} + n'\sqrt{(x_2-x)^2 + y^2 + z_2^2}$$

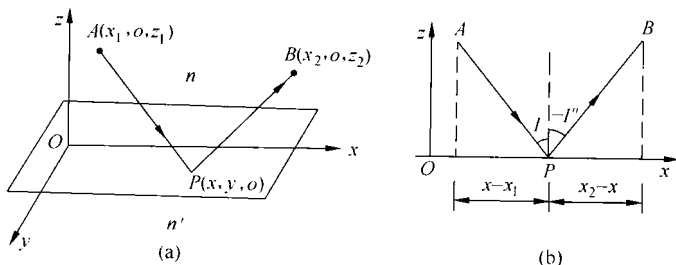


图 1.9 费马原理证明反射定律

由费马原理, 光程极值条件为

$$\frac{ds}{dx} = 0, \quad \frac{ds}{dy} = 0$$

由  $\frac{ds}{dy} = n\left(\frac{2y}{\sqrt{(x-x_1)^2 + y^2 + z_1^2}} + \frac{2y}{\sqrt{(x_2-x)^2 + y^2 + z_2^2}}\right) = 0$ , 得  $y=0$ ,  $P$  点位于  $Ox$  轴上, 即入射光线、法线及反射光线在垂直反射面的平面内, 满足反射光线、入射光线和法线共面。

由  $\frac{ds}{dx} = n\left(\frac{2(x-x_1)}{\sqrt{(x-x_1)^2 + y^2 + z_1^2}} + \frac{-2(x_2-x)}{\sqrt{(x_2-x)^2 + y^2 + z_2^2}}\right) = 0$  及图 1.9(b) 按符号规定标示的入射角  $I$ 、反射角  $I'$ , 可知

$$\frac{x-x_1}{\sqrt{(x-x_1)^2 + y^2 + z_1^2}} = \sin I$$

$$\frac{x_2-x}{\sqrt{(x_2-x)^2 + y^2 + z_2^2}} = \sin(-I')$$

所以, 得  $\sin I = -\sin I'$ , 即  $I = -I'$ 。

即满足反射光线和入射光线位于法线两侧, 且绝对值相等, 符号相反。

同样, 利用费马原理可以证明光线的折射定律。

费马原理的意义在于它从光程的概念出发概括了光传播的规律, 是几何光学的理论基础。利用费马原理不仅可以直接推导几何光学的基本定律, 而且能用来研究近轴光学系统的成像规律、光学系统的像差等。光学系统的成像光线等光程是完善成像的物理条件。

#### 1.2.4 马吕斯定律

马吕斯定律是指在各向同性的均匀介质中, 与某一曲面垂直的一束光线, 经过任意次折射、反射后, 必定与另一曲面垂直, 而且位于这两个曲面之间的所有光线的光程相等。

马吕斯定律是表述光线传播规律的另一种形式, 该定律描述了光束与波面, 光线与光程的关系。

马吕斯定律强调, 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, 并且入射波面和出射波面对应点之间的光程均为定值。

几何光学的基本定律、费马原理和马吕斯定律, 都能说明光线传播的基本规律, 都可以作为几何光学的基础, 只要三者中任意一个已知, 都可导出其余的两个。

## 1.3 成像的基本概念与完善成像条件

### 1.3.1 光学系统与物像概念

光学系统通常由若干个光学元件按一定方式组合而成。图 1.10 为一光学瞄准镜的光学系统图。它由两组透镜(物镜和目镜)、一组棱镜、一个平面反射镜和一个分划板组成。

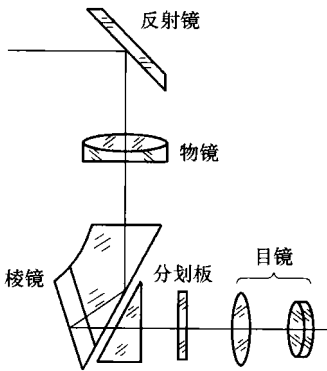


图 1.10 光学瞄准镜的光学系统图

所有的光学元件都是由一定折射率的介质构成, 这些介质的表面可以是平面、球面, 也可以是非球面。如果组成光学系统的各个光学元件的表面曲率中心都在一条直线上, 则该光学系统称为共轴光学系统, 该直线称为光轴。

光学系统的主要作用之一是对物体成像。无论是发光的物体, 还是被照明的物体, 都可以看做是由无数多个发光点(物点)组成的, 每个物点发射球面波, 与之相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之后仍为球面波, 则对应的光束也为同心光束, 那么称该同心光束的中心是物点经光学系统所成的完善像点, 物体上每个点经光学系统后所成完善像点的集合就是该物体经光学系统后的完善像。

通常, 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。物像空间的范围为 $(-\infty, +\infty)$ 。

根据光的可逆性, 如果将像点看做物, 使光线沿反方向射入光学系统, 则它一定将成像在原来的物点上。这样一对相应的点称为共轭点。同理, 具有上述对应关系的一一对应的光线称为共轭光线, 一一对应的平面称为共轭面, 物空间和像空间一一对应。

### 1.3.2 完善成像条件

如图 1.11 所示, 一共轴光学系统由  $O_1$ 、 $O_2$ 、 $\dots$ 、 $O_k$  等  $k$  个光学面组成, 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, 经过光学系统后为另一球面波  $W'$ , 对应的是以  $A'_k$  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



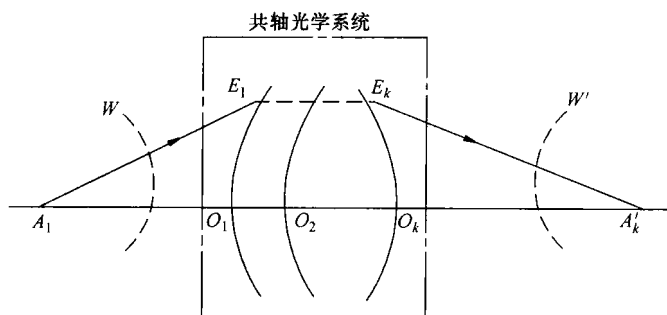


图 1.11 共轴光学系统及其完善成像

于球面对应同心光束，所以完善成像条件也可以表述为入射光为同心光束时，出射光也为同心光束。完善成像条件也可以用光程的概念表述为物点  $A_1$  和像点  $A'_k$  之间任意两条光路的光程相等，简写为  $(A_1 A'_k) = \text{常数}$ 。

### 1.3.3 物像的虚实

在几何光学中，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，由这样的点构成的物称为实物或实像，而由光线的延长线相交所成的点为虚物点或虚像点，由这样的点构成的物称为虚物或虚像，如图 1.12 所示，分别表示了物体成像的四种不同情况。

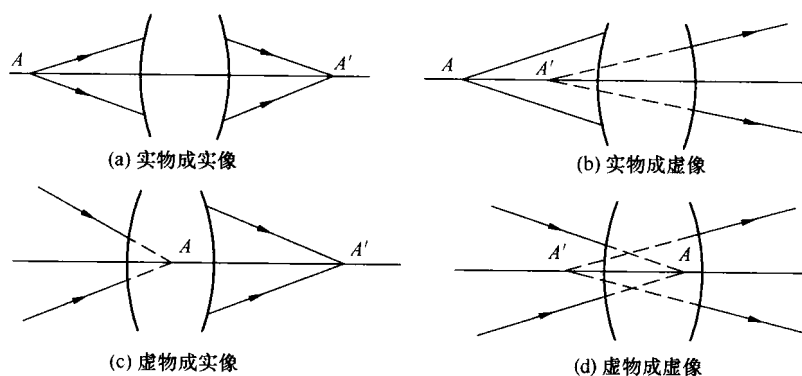


图 1.12 光学系统的几种物像关系

实物可以是自身发光的物体，如灯、蜡烛等，也可以是本身不能发光而由其他光源照明后使光线发生漫反射的物体，如月亮、人体和景物等。此外，实物可以是一个真实物体，也可以是前一光组所成的像。虚物不能人为设定，一般是前一光学系统的像被当前系统所截而成。

实像是实际出射光线相交而成，因此实像可由各种各样的光能接收器(照相底片、屏幕、光电探测器等)所接收，如电影放映机将胶片上的人和物成像在银幕上，工具显微镜把工件成实像在分划板上等。虚像是出射光线的延长线相交而成，因此它不能显示在屏幕上，如平面反射镜所成的像，因此虚像能被眼睛观察，而不能被屏幕、照相底片等接收，