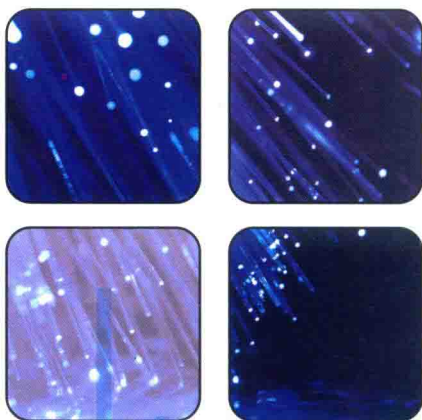




“十三五”普通高等教育本科规划教材
高等院校测控技术与仪器专业“互联网+”创新规划教材

工程光学 (第2版)

主编 王红敏



教材预览、申请样书



微信公众号: pup6book



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

“十三五”普通高等教育本科规划教材

高等院校测控技术与仪器专业“互联网+”创新规划教材

工程光学

(第2版)

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

本书第2版仍遵循注重基础、强化能力、突出重点和学以致用原则,既注重基础知识,又结合工程实际,列举了大量应用实例,力求实用性、知识性和通俗性相统一。

本书系统地介绍了几何光学和物理光学的理论及应用,全书共分12章,第1~9章为几何光学篇,主要介绍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、光纤和红外等现代光学系统;第10~12章为物理光学篇,介绍光的干涉、衍射和偏振等特性及应用。本教材注重实用性与先进性,力求深入浅出,通俗易懂,既阐述必要的基础知识,又力求理论联系实际,关键环节都选编了相关例题,每章都附有习题,以满足读者自学的需要。同时本书还加强了互联网思维,使学习形式多样化。

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,或作为自学用书。

图书在版编目(CIP)数据

工程光学/王红敏主编. —2版. —北京:北京大学出版社, 2018. 1

(高等院校测控技术与仪器专业“互联网+”创新规划教材)

ISBN 978-7-301-28978-5

I. ①工… II. ①王… 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 302487 号

- | | |
|-------|--|
| 书 名 | 工程光学 (第2版) |
| | GONGCHENG GUANGXUE |
| 著作责任者 | 王红敏 主编 |
| 责任编辑 | 刘晓东 童君鑫 |
| 标准书号 | ISBN 978-7-301-28978-5 |
| 出版发行 | 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 新浪微博:@北京大学出版社 |
| 电子信箱 | pup_6@163.com |
| 电 话 | 邮购部 62752015 发行部 62750672 编辑部 62750667 |
| 印 刷 者 | 河北涿县鑫华书刊印刷厂 |
| 经 销 者 | 新华书店 |
| | 787 毫米×1092 毫米 16 开本 17.25 印张 400 千字 |
| | 2009 年 9 月第 1 版 |
| | 2018 年 1 月第 2 版 2018 年 1 月第 1 次印刷 |
| 定 价 | 41.00 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 电子信箱:fd@pup.pku.edu.cn

图书如有印装质量问题,请与出版部联系,电话:010-62756370

前 言

“工程光学”课程是测控技术与仪器、测试计量和光电类专业本科生的专业基础课。本教材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，为适应科学技术和培养创新型应用人才需要而编写的。

本书蕴含了编者多年的教学经验、研究成果和科研实践，是一线教师多年教学和工程实践的总结。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章为几何光学篇，主要介绍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、光纤和红外等现代光学系统；第10~12章为物理光学篇，介绍光的干涉、衍射和偏振等特性及应用。本教材第2版编写过程中，依旧坚持注重基础、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，列举大量应用实例，力求实用性、知识性和通俗性，更加有利于读者较全面地掌握光学的基本理论和实际应用。

本书第2版在保留第1版特色的基础上，作了许多优化、改进和创新，其具体改进和特点包括：

(1) 根据教学实践并参考最近出版的相关教材的精华，对案例、习题进行了更新和补充，比如针对几何光学篇第2~5章、第7章等练习量较大的章节，补充增加了更多相关例题及详解，从不同角度以不同方法分析解答相关习题，最后进行总结。课后练习题也相应补充了作图及相关计算，加强了对作图和计算的练习，同时为体现知识的完整性和系统性，对部分章节的内容和顺序作了适当调整。

(2) 可读性、易读性进一步提高。语句反复推敲，字斟句酌，为了方便阅读和理解，尽可能使用较短的句子；同时邀请优秀的本科生参与试读教材，并充分听取他们的意见，力争使第2版的内容更加生动、深入浅出和言简意赅。

(3) 进行了立体化教材建设。除了本教材之外，我们还编著出版了《工程光学学习辅导与习题详解》，此书是根据工程光学课程特点而撰写的学习辅导用书，书中对教材中的重点、难点内容作条理性归纳和总结，并通过大量典型例题和课后习题选解与分析，加强对考核知识点的理解，书末附有11套仿真模拟试卷及参考答案，旨在给该课程的学习者以指导和参考，也力求为准备报考同类专业研究生的学习者答疑解惑，后期根据读者反馈，《工程光学学习辅导与习题详解》也将很快修订更新。

(4) 为了使学习形式多样化，方便读者在线学习，本书将一些有助于理解课程内容的图片、动画和视频添加到云端，读者可以通过移动端随时查看。

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，或作为自学用书。

本书由山东理工大学王红敏担任主编，河南科技大学张发玉、山东科技大学吴清收、武汉大学郑国兴担任副主编。编写分工如下：王红敏编写第 1、2、5、6、7、8 章及全书各章章首案例，吴清收编写第 3、4 章，王红敏做部分补充，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。

本书在编写过程中，参考了大量国内外有关文献及各相关专业网站，在此对这些文献的作者一并表示感谢。在《工程光学（第 2 版）》即将出版之际，还要感谢所有第 1 版的读者，谢谢你们对本书的厚爱；当然还要特别感谢北京大学出版社对作者的信任，以及出版社编辑为出版本教材提供的所有帮助；最后还要真诚感谢那些最可爱的学生们，尤其是山东理工大学测控 15 级的荆建蒙、张帅、张鲁进、李伟同学，感谢你们提供的修改建议。希望本教材能为教“工程光学”的老师提供足够的便利和参考，为学“工程光学”的同学提供有效的帮助和指导，敬请各位老师、同学及其他读者，把此版“工程光学”的优点告诉大家，缺点告诉作者。

鉴于编者水平所限，书中错误和不妥之处在所难免，殷切希望同行、专家和相关读者批评指正。

编 者

2017.11

目 录

第 1 章 几何光学的基本定律和物像概念

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

第 2 章 共轴球面光学系统

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

第 3 章 理想光学系统

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	33
3.4.3 角放大率	33
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	42
3.6 透镜	46
3.6.1 透镜的分类	46
3.6.2 透镜的焦距和基点位置	47
3.6.3 举例	48
习题	51

第 4 章 平面与平面系统

4.1 平面镜成像	55
4.1.1 单平面镜	55
4.1.2 双平面镜成像	56

4.2 平行平板	57	5.5.2 像方远心光路	86
4.2.1 平行平板的成像特性	57	习题	87
4.2.2 近轴区平行平板的成像	58	第6章 像差概论	89
4.2.3 举例	58	6.1 球差	91
4.3 反射棱镜	59	6.1.1 球差的定义及光学现象	91
4.3.1 反射棱镜的概念及分类	59	6.1.2 单折射球面的齐明点	91
4.3.2 棱镜系统的成像方向 判断	62	6.1.3 单透镜的球差与校正	92
4.3.3 反射棱镜的等效作用与 展开	63	6.2 彗差	93
4.3.4 举例	63	6.2.1 彗差的形成及光学现象	93
4.4 折射棱镜与光楔	64	6.2.2 彗差的量度	95
4.4.1 折射棱镜的偏转	64	6.2.3 彗差的校正	95
4.4.2 光楔及其应用	64	6.3 像散和场曲	97
4.4.3 棱镜的色散	65	6.3.1 细光束像散和场曲的 产生及量度	97
4.4.4 光学材料	65	6.3.2 像散和场曲的校正	100
4.4.5 举例	66	6.4 畸变	102
习题	66	6.4.1 畸变的产生和量度	102
第5章 光学系统的光束限制	69	6.4.2 畸变的种类	102
5.1 孔径光阑、入瞳和出瞳	71	6.4.3 畸变的校正	102
5.1.1 孔径光阑	71	6.5 色差	104
5.1.2 入瞳和出瞳	72	6.5.1 位置色差	104
5.1.3 孔径光阑、入瞳和出瞳的 判定方法	73	6.5.2 倍率色差	105
5.2 视场光阑、入窗和出窗	74	6.6 像差综述	106
5.2.1 视场光阑	74	习题	108
5.2.2 入窗和出窗	75	第7章 眼睛及目视光学系统	109
5.2.3 视场光阑、入窗和出窗的 判定方法	75	7.1 眼睛及其光学系统	110
5.3 渐晕光阑及场镜的应用	76	7.1.1 眼睛的结构	110
5.3.1 渐晕及渐晕光阑	76	7.1.2 眼睛的调节	111
5.3.2 场镜的应用	79	7.1.3 眼睛的缺陷与校正	112
5.4 光学系统的景深和焦深	81	7.1.4 眼睛的视角	114
5.4.1 光学系统的空间像	81	7.1.5 眼睛的分辨率	114
5.4.2 光学系统的景深	82	7.1.6 眼睛的瞄准精度	115
5.4.3 照相机景深举例	83	7.1.7 双目立体视觉	116
5.4.4 光学系统的焦深	84	7.2 放大镜	117
5.5 远心光路	84	7.2.1 放大镜的视觉放大率	118
5.5.1 物方远心光路	84	7.2.2 放大镜的光束限制和 线视场	119
		7.3 显微镜系统	121

7.3.1 显微镜的视觉放大率	121	9.3 红外光学系统	168
7.3.2 显微镜的光束限制和 线视场	122	9.3.1 红外光学系统的特点	168
7.3.3 显微镜的分辨率和 有效放大率	125	9.3.2 典型红外光学系统	169
7.3.4 显微镜的景深	127	习题	170
7.3.5 显微镜的照明方法	128	第 10 章 光的干涉	172
7.3.6 显微镜的物镜	130	10.1 光波干涉的条件及 杨氏干涉实验	173
7.4 望远镜系统	131	10.1.1 光波干涉的条件	173
7.4.1 望远镜的视觉放大率	131	10.1.2 杨氏干涉实验	175
7.4.2 望远镜系统的分辨率和 工作放大率	132	10.1.3 干涉条纹的可见度	178
7.4.3 望远镜的视场	134	10.1.4 双缝干涉的应用	183
7.5 目镜	137	10.2 平板的双光束干涉及 典型应用	184
7.5.1 目镜的主要光学参数	137	10.2.1 平行平板产生的 等倾干涉	184
7.5.2 目镜类型	138	10.2.2 楔形平板产生的 等厚干涉	186
7.5.3 光学仪器中目镜的 视度调节	140	10.2.3 典型分振幅干涉仪及其 应用	188
习题	140	10.2.4 干涉技术的其他应用	193
第 8 章 摄影系统和投影系统	142	10.3 平行平板的多光束干涉及其 应用	195
8.1 摄影系统	143	10.3.1 平行平板多光束干涉	195
8.1.1 摄影物镜的光学特性	143	10.3.2 法布里-帕罗干涉仪	198
8.1.2 摄影物镜的光束限制	146	习题	200
8.1.3 摄影物镜的分辨率	146	第 11 章 光的衍射	202
8.1.4 摄影物镜的景深	147	11.1 光的衍射现象及其标量理论	204
8.1.5 摄影物镜的类型	147	11.1.1 光的衍射现象	204
8.2 投影系统	155	11.1.2 光波的标量衍射理论	205
8.2.1 投影物镜的光学特性	155	11.2 菲涅尔衍射	208
8.2.2 投影物镜的结构形式	156	11.2.1 菲涅尔波带法	208
8.2.3 投影系统的照明	157	11.2.2 菲涅尔圆孔和圆屏衍射	210
习题	157	11.3 夫琅和费衍射	212
第 9 章 现代光学系统	159	11.3.1 夫琅和费衍射系统和 衍射公式的意义	212
9.1 激光光学系统	160	11.3.2 夫琅和费矩孔衍射	214
9.1.1 高斯光束的特性	161	11.3.3 夫琅和费单缝衍射	216
9.1.2 高斯光束的透镜变换	162	11.3.4 夫琅和费圆孔衍射	218
9.2 光纤光学系统	165	11.3.5 夫琅和费多缝衍射	220
9.2.1 阶跃型光纤	165		
9.2.2 梯度折射率光纤	167		

11.4 光学成像系统的衍射和分辨率.....	223	12.1.1 光的横波性.....	238
11.4.1 光学成像系统的衍射.....	223	12.1.2 偏振光的产生方法.....	240
11.4.2 光学成像系统的 分辨率.....	224	12.1.3 马吕斯定律.....	244
11.5 衍射光栅.....	226	12.2 晶体偏振器件.....	245
11.5.1 衍射光栅概述.....	226	12.2.1 偏振起偏棱镜.....	245
11.5.2 光栅的分光性能.....	226	12.2.2 偏振分束棱镜.....	247
11.5.3 闪耀光栅.....	229	12.2.3 波片.....	248
11.5.4 阶梯光栅.....	230	12.2.4 补偿器.....	249
11.5.5 计量光栅.....	232	12.3 圆偏振光和椭圆偏振光.....	250
11.6 衍射技术在工程中的应用.....	233	12.4 偏振光的干涉.....	253
11.6.1 微孔直径测量.....	233	12.4.1 平行偏振光干涉.....	253
11.6.2 细狭缝宽(细丝直径) 测量.....	234	12.4.2 会聚偏振光干涉.....	256
习题.....	235	12.4.3 偏振光的应用.....	257
		习题.....	259
第 12 章 光的偏振	237	参考答案	260
12.1 偏振光概述.....	238	参考文献	264

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。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 1.0 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)。

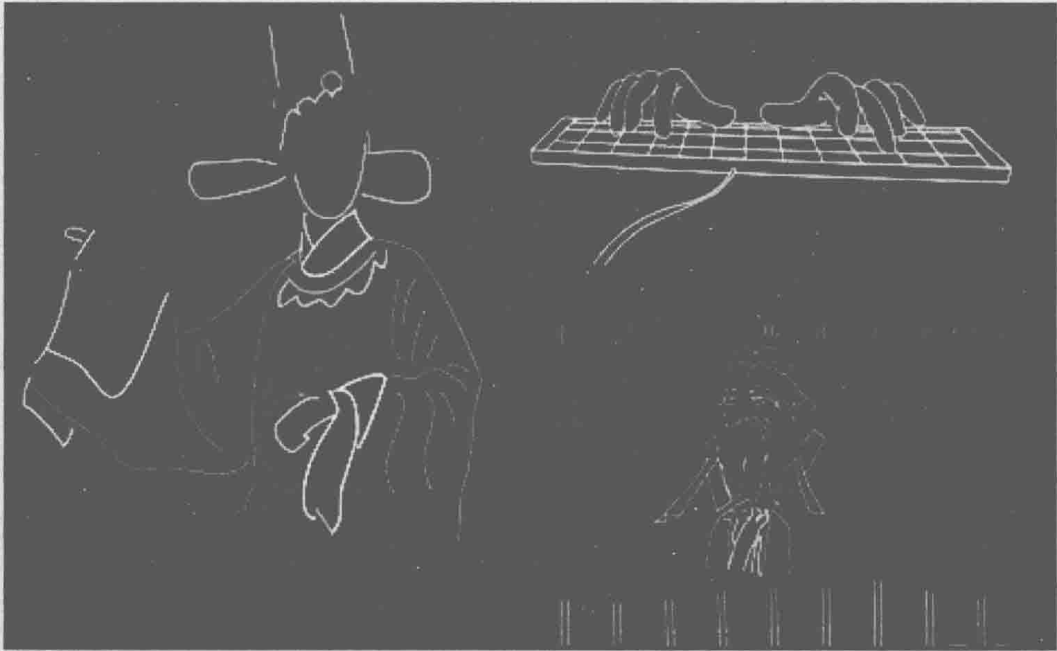


图 1.0 导入案例图



【光学大家-王大珩】

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，而可见光通常是指波长范围为 380nm~760nm 的电磁波，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。

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(包括自身发光和受到光照射而发光的物体)都被认为是发光体,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。几何光学把光线看作是无直径、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

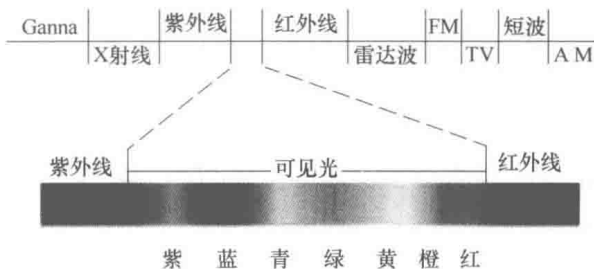


图 1.1 电磁波谱

【电磁波谱】

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。

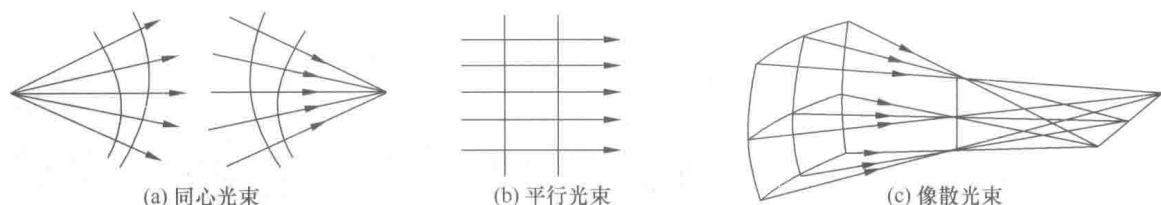


图 1.2 光束与波面

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 【小孔成像】

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。

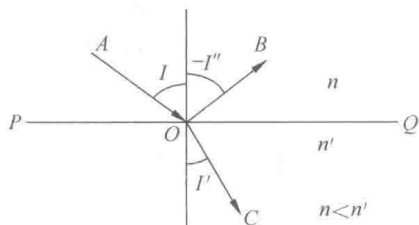


图 1.3 光的反射与折射

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

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

反射定律可归结如下:

(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

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

式中, 负号表示二者的旋转方向相反。

2) 折射定律

折射定律可归结如下:

(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

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

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作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° , 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° 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。

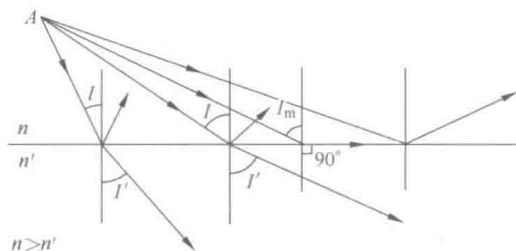


图 1.4 光的全反射

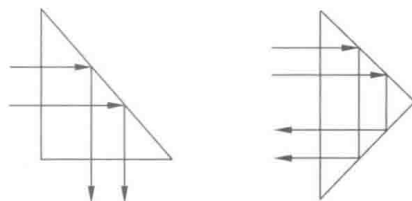
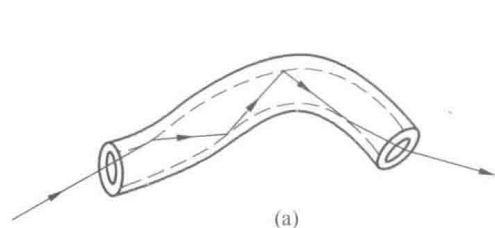
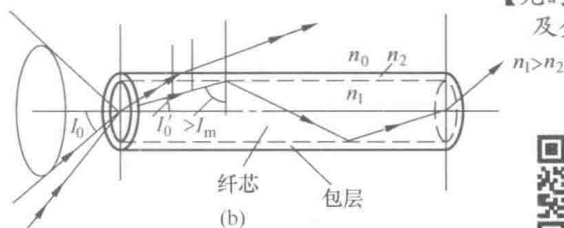


图 1.5 直角棱镜中的全反射



(a)



(b)

图 1.6 光导纤维中的全反射

【光的反射与折射及全反射】



【光纤结构】

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

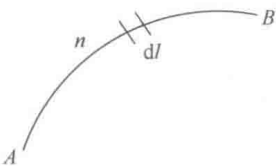
$$s = nl \tag{1-3}$$

利用 $n = c/v$ 和 $l = vt$, 有

$$s = ct \tag{1-4}$$

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



$$s = \int_A^B n dl \tag{1-5}$$

根据费马原理, 此光程为极值, 所以式(1-5)可表示为

$$\delta s = \delta \int_A^B n dl = 0 \tag{1-6}$$

图 1.7 光在非均匀介质中的传播

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。

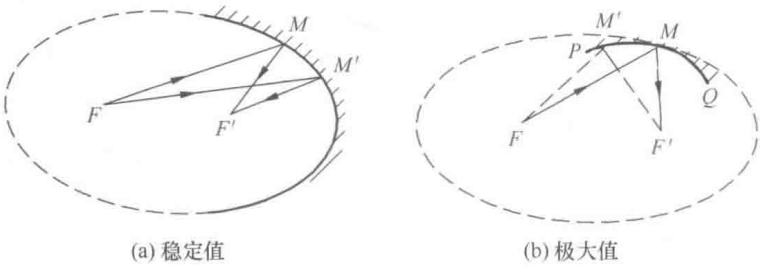


图 1.8 光在非均匀介质中的传播实例

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

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

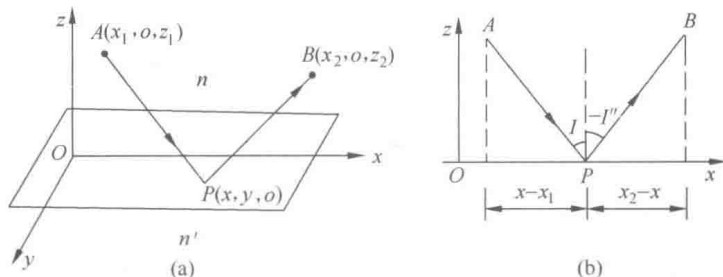


图 1.9 费马原理证明反射定律

由费马原理, 光程极值条件为

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

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