

GONG  
CHENG GUANG  
XUE

普通高等院校光电工程系列“十二五”规划教材

# 工程光学

韩军 刘钧 编著



國防工業出版社  
National Defense Industry Press

普通高等院校光电工程系列“十二五”规划教材

# 工程光学

韩军 刘钧 编著

国防工业出版社

·北京·

## 内 容 简 介

本书以信息光电科学与技术类专业工程训练要求为起点,系统地介绍了应用光学和波动光学的基本思想、理论基础、概念要点及其近代发展情况,凸显经典光学理论与现代光电技术的有机联系。

全书分为上、下两篇,共13章。上篇为应用光学,在光线模型的基础上,以光在介质中的成像规律及光学系统的设计与评价为主线,内容包括几何光学的基本定律与成像概念、球面和球面系统、理想光学系统、平面与平面系统、光学系统中的光束限制、光度学和色度学基础、光线的光路计算、像差理论、典型光学系统;下篇为波动光学,在光的电磁本质基础上,以光在介质中的传播规律为主线,内容包括波动光学通论、光的干涉理论及其应用、光的衍射理论及其应用、光在晶体中的传播以及光学的近代发展(包括激光、薄膜光学、信息光学、二元光学)。

本书既可作为高等学校以信息光电技术为主要专业特色的测控技术与仪器、光电信息科学与技术、应用物理等专业本科生的教材,也可供有关工程技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

工程光学 / 韩军等编著. —北京:国防工业出版社, 2012.2

普通高等院校光电工程系列“十二五”规划教材  
ISBN 978-7-118-07898-5

I. ①工… II. ①韩… 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(2012)第016547号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路23号 邮政编码100048)

北京奥鑫印刷厂印刷

新华书店经售

\*

开本 787×1092 1/16 印张 27¼ 字数 686千字

2012年2月第1版第1次印刷 印数1—4000册 定价49.00元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

# 前 言

本书系以作者 2007 年出版的《工程光学》为基础,经过修改、调整、充实内容,重新编写而成的。

“工程光学”是我国现行高等工程教育专业体系中以信息光电科学与技术为其专业特色各专业的专业基础课程。专业基础课程在学生工程创新能力培养体系中承担着先导性和示范性的作用,在学生知识体系中承担着沟通经典理论与现代应用的桥梁作用。为适应我国高等工程教育规模的快速扩展和实施建设创新型国家战略,学生工程创新能力培养得到高等学校普遍重视,开展了形式多样的教育教学改革和实验,取得了一批重要的教育教学成果。本次修订正是在充分借鉴近年来高等工程教育教学成果的基础上进行的。

本书以信息光电科学与技术类专业工程训练要求为起点,从经典光学理论的技术应用角度,系统地介绍了应用光学和波动光学的基本思想、理论基础、概念要点及其近代发展情况。在内容安排上,既包含有经典光学理论和光学系统,又涉及现代光学的发展及其应用,努力反映光学的现代面貌。通过本课程的学习可较全面掌握经典光学基本理论和实际应用技术,使学生在过程中掌握工程光学的基本理论、计算,学会分析、设计光学系统;使学生在掌握经典光学理论的基础上,对现代光学系统原理及特性有更进一步认识,为今后研究、开发信息光电系统打下基础。

全书分为上、下两篇,共 13 章。上篇为应用光学,共 9 章,在光线模型的基础上,以光在介质中的成像规律及光学系统设计与像质评价为主线,内容包括几何光学的基本定律与成像概念、球面和球面系统、理想光学系统、平面与平面系统、光学系统中的光束限制、光度学和色度学基础、光线的光路计算、像差、典型光学系统等方面的基本内容,建议讲授 48 ~ 64 学时;下篇为波动光学,共 4 章,在光的电磁本质基础上,以光在介质中的传播规律为主线,内容包括波动光学通论、光的干涉理论及其应用、光的衍射理论及其应用、光在晶体中的传播以及光学的近代发展(包括激光、薄膜光学、信息光学、二元光学)等方面的基本内容,建议讲授 48 ~ 64 学时。

本书第 1 ~ 9 章由西安工业大学刘钧教授编写,第 11 章、12 章、13 章由西安工业大学韩军教授编写,第 10 章由路绍军博士改编,全书由韩军教授统稿。

本次修订过程中要感谢笔者的同事段存丽副教授、郭荣礼博士等人,他们校对了本书的部分文稿,参与了习题选配工作。也要感谢选用 2007 年出版的《工程光学》的读者,他们在使用过程中提出了许多宝贵的意见。

编者

2012 - 1 - 10

# 目 录

## 上篇 几何光学

<b>第1章 几何光学的基本定律与成像概念</b> .....	1
1.1 基本概念 .....	1
1.2 几何光学的基本定律 .....	2
1.2.1 几何光学的基本定律 .....	2
1.2.2 全反射 .....	3
1.2.3 光路的可逆性原理 .....	3
1.3 费马原理 .....	4
1.4 物、像的基本概念与完善成像条件.....	6
1.4.1 光学系统的基本概念 .....	6
1.4.2 物和像的概念 .....	6
1.4.3 完善成像条件 .....	7
习题.....	9
<b>第2章 球面和球面系统</b> .....	10
2.1 光线经单个折射球面的折射.....	10
2.1.1 符号规则.....	10
2.1.2 光线经单个折射球面的实际光路的计算公式.....	11
2.1.3 光线经单个折射球面近轴光路的计算公式.....	12
2.2 单个折射球面成像放大率及拉赫不变量.....	13
2.2.1 垂轴放大率 .....	13
2.2.2 轴向放大率 .....	13
2.2.3 角放大率.....	14
2.2.4 三个放大率之间的关系 .....	15
2.2.5 拉赫不变量 $J$ .....	15
2.3 共轴球面系统.....	15
2.3.1 转面公式.....	15
2.3.2 共轴球面系统的拉赫公式.....	16
2.3.3 共轴球面系统的放大率公式.....	17
2.4 球面反射镜.....	17
2.4.1 反射球面镜的物像位置公式.....	17
2.4.2 反射球面镜的成像放大率 .....	17
2.4.3 反射球面镜的拉赫不变量 .....	18

习题 .....	18
<b>第3章 理想光学系统 .....</b>	<b>19</b>
3.1 理想光学系统的基本特性 .....	19
3.2 理想光学系统的基点和基面 .....	20
3.3 理想光学系统的物像关系式 .....	21
3.3.1 牛顿公式 .....	21
3.3.2 高斯公式 .....	22
3.4 理想光学系统两焦距之间的关系及拉赫公式 .....	22
3.4.1 理想光学系统两焦距之间的关系 .....	22
3.4.2 理想光学系统的拉赫公式 .....	23
3.5 理想光学系统的放大率 .....	23
3.5.1 垂轴放大率 .....	23
3.5.2 轴向放大率 .....	24
3.5.3 角放大率 .....	25
3.5.4 三放大率之间的关系 .....	25
3.6 光学系统的节点和节平面 .....	25
3.7 光学系统的图解求像 .....	27
3.8 光学系统的光焦度 .....	29
3.9 理想光学系统的组合 .....	30
3.9.1 双光组组合 .....	30
3.9.2 多光组组合 .....	32
3.10 望远镜系统 .....	34
3.11 透镜与薄透镜 .....	36
3.11.1 单个折射球面的基点和基面 .....	36
3.11.2 透镜的基点和基面 .....	37
3.11.3 薄透镜 .....	40
3.11.4 实际的光学系统基本量的计算 .....	41
习题 .....	42
<b>第4章 平面与平面系统 .....</b>	<b>43</b>
4.1 平面反射镜 .....	43
4.1.1 单平面镜成像 .....	43
4.1.2 双平面镜 .....	44
4.2 平行平板 .....	45
4.3 反射棱镜 .....	47
4.3.1 反射棱镜的分类 .....	47
4.3.2 反射棱镜的展开 .....	50
4.3.3 反射棱镜成像方向的判定 .....	51
4.4 折射棱镜 .....	51
4.5 光楔 .....	53
习题 .....	54

<b>第 5 章 光学系统中的光束限制</b> .....	55
5.1 光阑及其作用 .....	55
5.2 孔径光阑、入射光瞳和出射光瞳 .....	56
5.3 视场光阑、入射窗和出射窗 .....	57
5.4 光学系统的景深 .....	59
5.5 远心光路 .....	63
习题 .....	64
<b>第 6 章 光度学和色度学基础</b> .....	65
6.1 光度学的基础知识 .....	65
6.1.1 光通量 .....	65
6.1.2 发光强度 .....	67
6.1.3 光照度和光出射度 .....	68
6.1.4 光亮度 .....	70
6.2 光传播过程中光学量的变化规律 .....	71
6.2.1 在同一介质的元光管中光通量和光亮度的传递 .....	71
6.2.2 光束经界面反射和折射后的光通量和光亮度的传递 .....	72
6.2.3 成像系统像面的光照度 .....	73
6.3 光通过光学系统时的能量损失 .....	75
6.4 色度学的基础 .....	77
6.4.1 颜色的视觉 .....	77
6.4.2 颜色匹配实验和颜色的表示方法 .....	79
6.4.3 CIE 标准照明体和标准光源 .....	86
习题 .....	87
<b>第 7 章 光线的光路计算</b> .....	88
7.1 概述 .....	88
7.2 光线的光路计算 .....	88
7.2.1 子午面内的光线光路计算 .....	89
7.2.2 轴上点远轴光线的光路计算 .....	90
7.2.3 轴外点子午面内远轴光线的光路计算 .....	91
7.2.4 光线经过平面时的光路计算 .....	92
7.2.5 沿轴外点主光线细光束的光路计算 .....	94
习题 .....	95
<b>第 8 章 光学系统的像差</b> .....	96
8.1 轴上点的球差 .....	96
8.1.1 球差概述 .....	96
8.1.2 光学系统的球差分布公式 .....	98
8.1.3 单个折射球面的球差分布系数,不晕点 .....	101
8.1.4 单个折射球面产生的球差正负和物体位置的关系 .....	102
8.1.5 初级球差 .....	104
8.1.6 薄透镜和薄透镜系统的初级球差 .....	105

8.1.7	平行平板的球差 .....	107
8.2	正弦差和彗差 .....	108
8.2.1	正弦条件和赫歇尔条件 .....	108
8.2.2	等晕成像和等晕条件 .....	110
8.2.3	正弦差的分布 .....	113
8.2.4	薄透镜和薄透镜系统的初级正弦差 .....	114
8.2.5	彗差概述 .....	115
8.2.6	光学系统结构形式对彗差的影响 .....	117
8.3	像散与像面弯曲(场曲) .....	119
8.3.1	像散 .....	119
8.3.2	像面弯曲(场曲)和轴外球差 .....	120
8.4	畸变 .....	124
8.5	色差 .....	125
8.5.1	位置色差、色球差和二级光谱 .....	126
8.5.2	倍率色差 .....	128
	习题 .....	129
<b>第9章</b>	<b>典型光学系统</b> .....	<b>131</b>
9.1	眼睛的构造及光学特性 .....	131
9.1.1	眼睛的构造 .....	131
9.1.2	眼睛的调节和适应 .....	132
9.1.3	眼睛的缺陷和校正 .....	133
9.1.4	眼睛的分辨率和瞄准精度 .....	134
9.1.5	双目立体视觉 .....	135
9.2	放大镜 .....	137
9.2.1	放大镜的放大率 .....	137
9.2.2	放大镜的光束限制和视场 .....	138
9.3	显微镜系统 .....	139
9.3.1	显微镜的基本原理 .....	139
9.3.2	显微镜的放大率 .....	139
9.3.3	显微镜的结构 .....	140
9.3.4	显微镜的光束限制 .....	141
9.3.5	显微镜的景深 .....	143
9.3.6	显微镜的分辨率和有效放大率 .....	145
9.3.7	显微物镜 .....	145
9.3.8	显微镜的照明系统 .....	148
9.4	望远镜系统 .....	149
9.4.1	望远镜的一般特性 .....	149
9.4.2	望远镜系统的结构形式 .....	150
9.4.3	望远镜系统的视觉放大率 .....	150
9.4.4	望远镜系统的分辨率和工作放大率 .....	151



9.4.5	望远镜系统的主观亮度 .....	151
9.4.6	望远镜的光束限制 .....	153
9.4.7	望远物镜 .....	155
9.4.8	目镜 .....	159
9.5	摄影系统 .....	164
9.5.1	摄影系统的光学特性 .....	164
9.5.2	摄影镜头 .....	169
9.5.3	放映和投影镜头 .....	176
9.5.4	放映和投影系统的照明 .....	181
9.6	光学系统的外形尺寸计算 .....	183
9.6.1	转像系统和场镜 .....	184
9.6.2	带有对称透镜转像系统的望远镜 .....	185
	习题 .....	187

## 下篇 波动光学

<b>第10章</b>	<b>波动光学通论 .....</b>	<b>188</b>
10.1	波的概念与光的电磁理论基础 .....	188
10.1.1	波的概念 .....	188
10.1.2	光的电磁理论基础 .....	189
10.2	波的数学描述 .....	195
10.2.1	波的实数表示与时空周期性 .....	195
10.2.2	波的复数表示与复振幅 .....	202
10.2.3	波的矢量表示 .....	205
10.3	波的叠加 .....	206
10.3.1	波的独立传播原理与叠加原理 .....	206
10.3.2	同频率简谐波叠加的一般分析及干涉概念 .....	207
10.3.3	两列同频率、同向振动的平面波的叠加 .....	208
10.3.4	两列同频率、同向振动、反向传播的平面波的叠加——光驻波 .....	211
10.3.5	两列同频率、振动方向互相垂直、同向传播的平面波的 叠加——椭圆偏振光的形成及特征 .....	213
10.3.6	两列频率相近、同向振动、同向传播的平面波的叠加——光学拍 .....	217
10.4	光的偏振态 .....	219
10.4.1	完全偏振光——线偏振光,圆偏振光,椭圆偏振光 .....	220
10.4.2	非偏振光——自然光 .....	221
10.4.3	部分偏振光及偏振度 .....	222
10.4.4	偏振片及其光强响应 .....	223
10.5	波的傅里叶分析及时空域中的反比关系 .....	226
10.5.1	傅里叶分析 .....	226
10.5.2	波在空域和时域中的反比关系 .....	229

10.6	光在两种各向同性介质界面的反射与折射	231
10.6.1	电磁场的连续条件与反射和折射定律	232
10.6.2	反射与折射时光的振幅比菲涅耳公式	233
10.6.3	反射与折射时光的能流比与光强比	236
10.6.4	反射光与折射光的相位变化	239
10.6.5	反射光与折射光的偏振态	242
10.6.6	全反射与倏逝波	244
	习题	248
<b>第11章</b>	<b>光的干涉理论及其应用</b>	<b>250</b>
11.1	双光束干涉的一般理论	250
11.1.1	产生光波干涉的条件	250
11.1.2	双光束干涉的一般理论	252
11.2	分波面双光束干涉装置与杨氏实验	257
11.2.1	分波面双光束干涉	258
11.2.2	分波面双光束干涉的其他实验装置	260
11.2.3	干涉条纹清晰程度的影响因素	264
11.3	分振幅双光束干涉	269
11.3.1	平板分振幅干涉	270
11.3.2	等倾干涉	271
11.3.3	等厚干涉	274
11.4	双光束干涉仪	279
11.4.1	迈克尔逊干涉仪	279
11.4.2	斐索干涉仪	283
11.4.3	马赫-曾德尔干涉仪	284
11.4.4	赛格纳克干涉仪	285
11.5	平行平板的多光束干涉	287
11.5.1	多束光干涉的光强分布	288
11.5.2	多光束干涉仪	292
11.5.3	多光束干涉的应用	295
11.6	薄膜光学简介	297
11.6.1	单层光学膜	298
11.6.2	多层光学膜	301
	习题	304
<b>第12章</b>	<b>光的衍射</b>	<b>307</b>
12.1	衍射的基本原理及分类	307
12.1.1	衍射现象概述	307
12.1.2	惠更斯-菲涅耳原理及平面屏衍射理论	308
12.1.3	衍射问题的近似处理及分类	312
12.2	菲涅耳衍射	315
12.2.1	菲涅耳衍射的分析方法	315

12.2.2	圆孔、圆屏及某些环扇形孔径的衍射 .....	318
12.2.3	菲涅耳波带片 .....	322
12.3	矩孔和单缝的夫琅和费衍射 .....	326
12.3.1	夫琅和费衍射装置 .....	326
12.3.2	夫琅和费衍射公式的意义 .....	326
12.3.3	矩孔衍射 .....	329
12.3.4	单缝衍射 .....	331
12.4	圆孔夫琅和费衍射与光学仪器分辨率 .....	333
12.4.1	夫琅和费圆孔衍射 .....	333
12.4.2	光学成像系统的衍射和分辨本领 .....	335
12.5	夫琅和费双缝和多缝衍射 .....	340
12.5.1	双缝衍射光强的计算 .....	340
12.5.2	多缝的干涉和衍射 .....	342
12.6	衍射光栅与光栅光谱仪 .....	345
12.6.1	平面衍射光栅 .....	345
12.6.2	闪耀光栅 .....	348
12.6.3	光栅光谱仪 .....	351
12.7	夫琅和费衍射的一般性质及其他孔径的衍射 .....	352
12.7.1	夫琅和费衍射的一般性质 .....	352
12.7.2	某些其他孔径的夫琅和费衍射 .....	353
12.8	全息技术 .....	354
12.8.1	全息原理和全息图种类 .....	354
12.8.2	全息技术应用举例 .....	357
12.9	傅里叶光学 .....	359
12.9.1	概述 .....	359
12.9.2	薄透镜的傅里叶变换性质 .....	359
12.9.3	光学傅里叶变换 .....	361
12.9.4	光信息处理及其应用 .....	363
12.10	二元光学 .....	364
12.10.1	概述 .....	364
12.10.2	二元光学的特点 .....	365
12.10.3	二元光学器件的制作 .....	366
12.10.4	二元光学的应用 .....	366
12.11	近场光学 .....	368
12.11.1	概述 .....	368
12.11.2	近场光学原理 .....	369
12.11.3	近场光学应用举例 .....	370
	习题 .....	370
<b>第13章</b>	<b>光在晶体中的传播</b> .....	<b>372</b>
13.1	平面光波在晶体中的传播特性 .....	372

13.1.1	晶体双折射	372
13.1.2	平面光波在晶体中的传播特性	374
13.1.3	单轴晶体中的波面——惠更斯假设	384
13.1.4	平面波在单轴晶体内的传播——惠更斯作图法	385
13.1.5	单轴晶体中的光路计算	387
13.2	晶体光学器件 偏振光的检验	388
13.2.1	晶体光学器件	388
13.2.2	偏振光的检验	397
13.3	偏振光的干涉	400
13.3.1	平行偏振光的干涉	400
13.3.2	会聚偏振光的干涉	403
13.4	偏振态及其变换的矩阵描述	405
13.4.1	偏振态的表示——琼斯矢量	406
13.4.2	正交偏振	407
13.4.3	偏振器件的表示——琼斯矩阵	408
13.4.4	利用琼斯矢量和琼斯矩阵的运算	411
13.5	晶体的磁光、电光和声光效应	412
13.5.1	旋光和磁光效应	412
13.5.2	电光效应	416
13.5.3	声光效应	421
13.6	偏振光仪器	425
13.6.1	旋光仪	425
13.6.2	椭圆仪	426
	习题	428

# 上篇 几何光学

## 第 1 章 几何光学的基本定律与成像概念

人们在制造光学仪器和解释一些光学现象的过程中,总结出了适于光学工程技术应用的几何光学理论。几何光学把光在均匀介质中的传播用几何上的直线来表示,即认为光是能够传播能量的几何线“光线”,几何光学就是以光线来研究光在介质中传播的理论。

### 1.1 基本概念

#### 1. 光波

光是一种电磁波,其振动方向和光的传播方向垂直,为横波。

从本质上讲,光和一般的无线电波并无区别,只是波长不同而已。波长在 400nm ~ 760nm 范围内的电磁波能为人眼所感知,称为“可见光”。超出这个范围的电磁波,人眼就感受不到了。电磁波按波长分类的情况如图 1-1 所示。

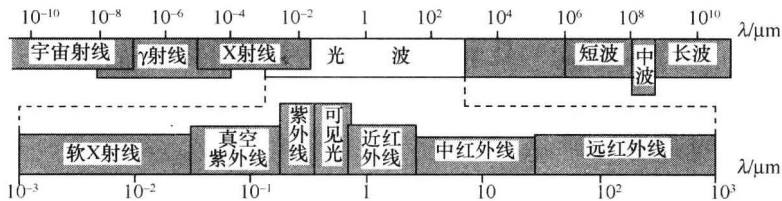


图 1-1 电磁波谱

光和其他电磁波一样,在真空中以同一速度  $c$  传播,  $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ 。在空气中光速也近似为此值。而在水、玻璃等透明介质中,光的传播速度比在真空中慢,且速度随波长不同而改变,其速度、波长和频率的关系如下:

$$v = \lambda \cdot \nu$$

#### 2. 发光点

本身发光或被其他光源照明后发光的物体称为发光体(或光源)。当发光体(光源)的大小和其辐射距离相比可以忽略不计时,该发光体就可认为是发光点或点光源。在几何光学中,发光点被抽象为一个既无体积又无大小的几何点,任何被成像的物体都是由无数个这样的发光点所组成的。

#### 3. 光线

在几何光学中,光线被抽象为既无直径又无体积而有方向的几何线,其方向代表光能的传播方向。

几何光学研究光的传播,也就是研究光线的传播。利用光线的概念,可以把复杂的能量传输和光学成像问题归结为简单的几何运算问题。目前使用的光学仪器,绝大多数是应用几何光学原理(即把光看作“光线”)设计出来的。

#### 4. 波面

光波是电磁波,任何光源都可看作波源,光的传播正是电磁波的传播。光波向周围传播,在某一瞬时,其振动相同的各点所构成的曲面称为波面。波面可分为平面波、球面波或任意曲面波。

在各向同性的介质中,光沿着波面法线方向传播,所以可以认为光波波面法线就是几何光学中的光线。

#### 5. 光束

与波面对应的法线(光线)集合称为“光束”。对应于波面为球面的光束称为同心光束,它发自一点或会聚于一点(图1-2(a));与平面波对应的光束称为平行光束,无穷远处发光点发出的是平行光束(图1-2(b));对于波面为非球面的曲面,它所对应的光束称为像散光束(图1-2(c))。

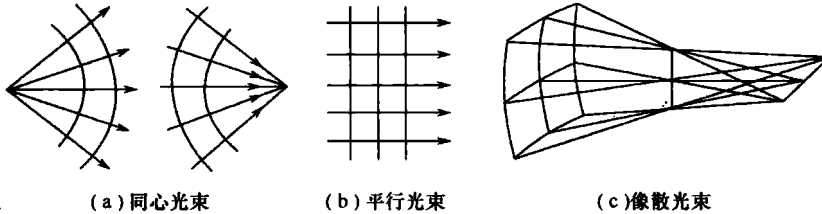


图1-2 光束与波面的关系

## 1.2 几何光学的基本定律

### 1.2.1 几何光学的基本定律

从光线的观点出发,几何光学可以归纳为四个基本定律。

#### 1. 光的直线传播定律

在各向同性的均匀介质中,光线是沿着直线传播的,这就是光的直线传播定律。这是一种常见的普遍规律,可以用来很好地解释影子的形成、日蚀、月蚀等现象。即使最精密的天文测量、大地测量和其他许多测量,也都把这一定律看成是精确的。但是,当光在传播过程中遇到很小的不透明屏障或通过细孔时,光的传播将偏离直线,这就是物理光学中所描述的光的衍射现象。可见,光的直线传播定律只有光在均匀介质中无阻拦地传播时才成立。

#### 2. 光的独立传播定律

当多束光线通过空间某一点时,各光线传播不受其他光线的影晌,称为光的独立传播定律。当两束光会聚在空间某点时,其作用为简单的相加。利用这条定律,可以使我们对光线传播情况的研究大为简化,因为在研究某一光线传播时,可以不考虑其他光线对它的影响。

光的独立传播定律只对不同发光点发出来的光线来说是正确的,即对非相干光来说是正确的。而对于相干光,由于光的干涉作用,独立传播定律就不再适用。

### 3. 光的反射定律和折射定律

如图 1-3 所示,当一束光投射到两种透明介质的光滑分界面上时,将有一部分光能反射回原来的介质,这部分光线称为反射光线;另一部分光能则通过分界面射入第二种介质中,这部分光线称为折射光线。光线的反射和折射分别遵循光的反射定律和折射定律。

#### 1) 反射定律

入射光线、反射光线和投射点处界面法线三者共面,且入射光线和反射光线对称于法线,入射角和反射角绝对值相等,即

$$I = -I''$$

我们规定角度符号以锐角来量度,由光线转向法线,顺时针方向旋转形成的角度为正,反之为负。

#### 2) 折射定律

入射光线、折射光线和投射点法线三者共面,且入射角和折射角的正弦之比与入射角的大小无关,仅由两种介质的性质决定。对于一定波长的光线而言,在一定压力和温度条件下,入射角和折射角的正弦之比等于后一种介质与前一种介质的折射率之比,即

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

式中: $n$  和  $n'$  分别是入射和折射介质的折射率。

上式中,若令  $n' = -n$ ,即得  $I' = -I$ ,此即反射定律的形式。这说明,反射定律可以看作是折射定律的特殊情况。这在几何光学中是有重要意义的一项推论。

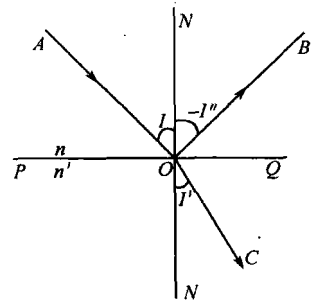


图 1-3 光的反射和折射

### 1.2.2 全反射

全反射是光线传播的另一重要现象。一般情况下,光线射至透明介质的分界面时,将同时发生反射和折射现象。但在特定条件下,界面可将入射光线全部反射回去,而无折射现象,这就是光的全反射。

如图 1-4 所示,当光线由光密介质(折射率高的介质)进入光疏介质(折射率低的介质)时, $n' < n$ ,入射角增大到某一值  $I_m$  时,折射角  $I'$  达到  $90^\circ$ ,按折射定律,有

$$\sin I_m = \frac{n'}{n} \sin I' = \frac{n'}{n} \sin 90^\circ = \frac{n'}{n}$$

此入射角  $I_m$  称为临界角。当入射角大于临界角时,光线便全部反射回原来的介质,这种现象就是所谓的全反射现象。

全反射现象在光学仪器中有广泛的应用。例如用全反射棱镜代替平面反射镜可以减少光能的反射损失(图 1-5)。因为全反射棱镜在理论上可以反射全部的人射光能,而平面反射镜不能使光线全部反射,大约有 10% 的光线将被吸收,并且,平面镜上所镀的反射膜还容易变质和损伤。光纤也是利用全反射原理来传输光的(图 1-6)。光纤由高折射率的芯子和低折射率的包层构成,使得入射角大于临界角的光线能连续发生全反射,直至传输到光纤的另一端,从而保证能量损失非常小。

### 1.2.3 光路的可逆性原理

如图 1-3 所示,若光线在折射率为  $n'$  的介质中沿  $CO$  方向入射,则由折射定律可知,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。

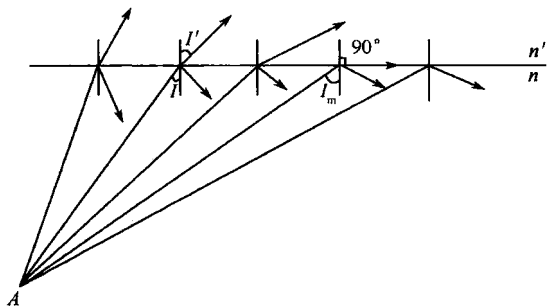


图 1-4 光的全反射现象

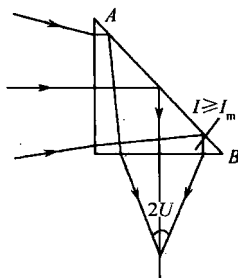


图 1-5 全反射直角棱镜

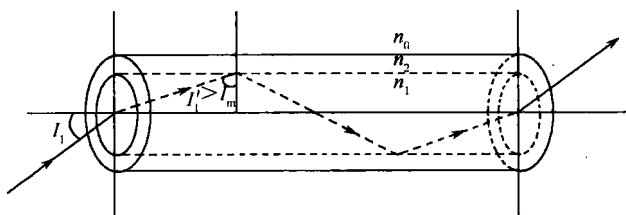


图 1-6 光纤的全反射传光原理

### 1.3 费马原理

几何光学的基本定律描述了光线的传播规律。费马原理从光程的角度来阐述光的传播规律,更简明,也更具普遍意义。

设光在均匀介质中的传播速度为  $v$ ,若把  $\Delta t$  时间间隔内光在该介质中所走过的几何路程表示为  $s$ ,则有

$$s = v \cdot \Delta t$$

再把这段时间间隔内光在真空中所走过的路程记为  $L$ ,则有

$$L = c \cdot \Delta t = \frac{c}{v} v \Delta t = ns$$

式中: $c$  为真空中的光速; $n$  为介质的折射率。

可见,光在介质中所走过的几何路程与介质的折射率  $n$  的乘积  $ns$ ,具有鲜明的物理意义,其值等于光在相同的时间间隔内在真空中所走过的路程。我们把光在介质中经过的几何路程  $s$  和该介质的折射率  $n$  的乘积定义为光程,用字母  $L$  表示。

我们知道,在均匀介质中光是沿直线方向传播的。设光在非均匀介质中传播,即介质的折射率  $n$  是位置的函数,则光在该介质中经过的几何路程不是直线而是一条空间曲线,如图 1-7 所示,这时,从  $A$  点到  $B$  点的总光程可用曲线积分来表示,即

$$L = \int_A^B n(s) ds$$



式中:  $s$  为路径的坐标参量;  $n(s)$  为路径  $AB$  上  $s$  点处的折射率。

费马原理指出: 光线从  $A$  点到  $B$  点, 是沿着光程为极值(极大、极小或恒值)的路径传播的。其数学表达式为

$$\delta L = \delta \int_A^B n(s) ds = 0$$

即光程的一次变分为零。费马原理又称为“极值光程定律”。

费马原理的意义在于它概括了光的传播规律, 是几何光学的理论基础。光在均匀介质中的直线传播及在平面界面上的反射和折射, 都是光程最短的例子。前文所述的光的直线传播、反射和折射定律均可由费马原理导出。对于均匀介质, 根据两点间直线为最短的几何公理, 应用费马原理可直接解释光沿直线传播的必然性。同样根据该几何公理, 由图 1-8 也可得到反射定律。

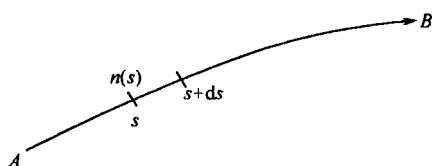


图 1-7 非均匀介质中的光线与光程

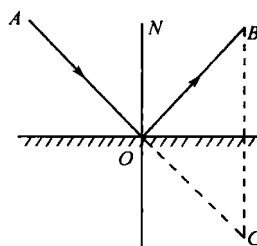


图 1-8 利用费马原理证明反射定律

折射的情况如图 1-9 所示。从  $A$ 、 $B$  点分别作界面的垂线  $AP$ 、 $BQ$ , 并令其长度分别为  $y_1$  和  $y_2$ 。则  $A$  点到  $B$  点的光程为

$$(AOB) = n \cdot AO + n' \cdot OB = n \sqrt{x^2 + y_1^2} + n' \sqrt{(L-x)^2 + y_2^2}$$

光程的极值条件为

$$\frac{d(AOB)}{dx} = 0$$

由上面的光程公式求导并化简即可得折射定律:

$$\begin{aligned} n \sin I - n' \sin I' &= 0 \\ \Rightarrow n \sin I &= n' \sin I' \end{aligned}$$

可见, 在以平面为界面的情况下, 光线是按光程为极小值的路径传播的。但按费马原理, 光也可能按光程为极大值或常量的路径传播。当以曲面为界面时, 随曲面的性质和曲率的不同, 实际光程可能是极小、极大或常量。如图 1-10 所示的以  $F$  和  $F'$  为焦点的椭球反射面, 由椭球面的性质可知, 由  $F$  点发出的所有光线经该面反射后必聚焦于  $F'$  点。而且光程为常量, 即

$$(FF') = FM + MF' = \text{常数}$$

这样的面, 对  $F$  和  $F'$  点来说, 为等光程面。

图 1-10 中还给出了两个均与椭球面相切于  $M$  点而曲率不等的反射面  $PQ$  和  $ST$ , 前者曲率大于椭球面, 后者曲率小于椭球面。  $FM$  和  $MF'$  也是这两个面的入射光线和反射光线。显然, 光程  $(FMF')$  对  $PQ$  面为极大值, 而对  $ST$  面为极小值。