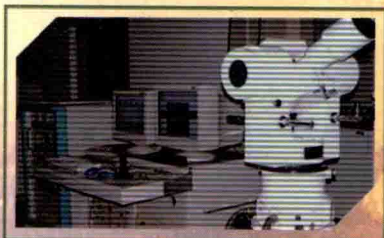


军事应用光学

Military Applied Optics

李海燕 胡云安 主编



国防工业出版社

National Defense Industry Press

军事应用光学

主编 李海燕 胡云安
编委 陆 斌 袁小虎 刘 亮

国防工业出版社

• 北京 •

内 容 简 介

本书系统全面地介绍了应用光学的基础理论及其在军事中的重要应用。全书内容共分为 12 章, 其中: 在几何光学基本原理、共轴球面光学系统、理想光学系统、平面镜棱镜系统、光阑、光学系统的像差这 6 章中, 介绍了应用光学的基本理论, 分析了球面光学系统、平面镜棱镜系统的成像性质, 讨论了光学系统中成像光束的选择和像差的基本理论; 在眼睛和目视光学系统、军用光学仪器、军用红外光学系统、微光夜视光学系统、军用光纤光学系统和军用激光光学系统这 6 章中, 较全面地介绍了应用光学在通信、侦察、成像、跟踪、制导、预警、对抗等各方面的军事应用技术。

本书在内容上重视基础理论体系的建立, 理论联系实际, 深入浅出, 图文并茂, 具有良好的可读性及参考价值。内容力求丰富翔实、新颖实用, 可全面反映应用光学技术的主要方面。

本书可作为高等学校光电类相关专业的教材或教学参考用书, 也可供从事光学技术方面的科技研发人员与工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

军事应用光学 / 李海燕, 胡云安主编. —北京: 国防工业出版社,
2015.8
ISBN 978-7-118-10321-2

I. ①军… II. ①李… ②胡… III. ①军事技术—应用光学
IV. ①E912

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 184578 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)

天利华印刷装订有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 16¼ 字数 385 千字

2015 年 8 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2500 册 定价 65.00 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

现代战争的角逐已进入到光、电、声、磁这些“无形”的战场，光电武器在战场上致胜的重要性日显突出。近几十年，红外技术、微光技术、光纤技术、激光技术的出现，使光学这门学科获得迅猛发展。现代光学技术在通信、侦察、成像、跟踪、制导、预警、对抗等各方面得到了广泛的军事应用。从战术武器到战略武器、从常规武器到原子核武器、从陆海空三军的兵器到“天军”的兵器，无一没有光学技术的应用。从陆战到海战、从空战到外层空间的天战，光学技术都得以大显身手。随着光学技术的迅猛发展，新一代战术、战略“光武器”正在产生，新的作战手段正在由幻想和神话变为现实。因此，研究和把握未来的战争，军用光学就自然成为每个军事教学、研究人员的重要学习课题之一。适时编写出版能较全面地反映应用光学的基础理论及其军事应用技术基本内容的《军事应用光学》教材，具有重要现实意义和极大的迫切性。

本书包括几何光学基本原理、共轴球面光学系统、理想光学系统、平面镜棱镜系统、光阑、光学系统的像差、眼睛和目视光学系统、军用光学仪器、军用红外光学系统、微光夜视光学系统、军用光纤光学系统和军用激光光学系统共 12 章节的内容。我们力求把最新的技术成果写入本书，但是，在科学技术高速发展的今天，光学技术几乎时刻都有新的进展，因此，紧紧跟踪光学技术的新发展，深入研究其对未来作战的影响，是我们长期的任务。

本书在编写过程中重点体现如下特色：内容具有较好的系统性、科学性与完整性，既重视建立基础理论体系，又突出光学技术在各军事领域的主要应用，强调理论密切联系实际；表述力求深入浅出，并以较多的图、表配合文字的阐述，做到图文并茂、通俗易懂；内容力求翔实，贴近实用。

本书由李海燕、胡云安主编，内容共分 12 章。其中，第 1、3、4、5、6、8、9 章由李海燕执笔；第 2、7、10 章由胡云安执笔；第 11 章由袁小虎、刘亮执笔；第 12 章由陆斌执笔。

本书得到了海军航空工程学院赵国荣教授、任建存教授、何友金教授等许多专家教授的宝贵指导与热情鼓励，也得到了同行以及韦建明、耿宝亮等许多博士生、硕士生的积极关心与大力支持。吕俊伟教授和何友金教授在百忙之中对本书进行了详细的审阅和指导，在此表示衷心感谢。本书是在多方面地学习前辈与专家们已有的专著与教材的基础上编写而成的，从中所获得的教益匪浅，在此对原作者们深表谢意！

由于编者的水平有限，本书难免会存在许多缺点、不足，恳请有关专家、同行及读者给予批评指正，不吝赐教。

编著者

2015 年 1 月

第1章 几何光学基本原理

1.1 几何光学的基本概念	1
1.1.1 光波	1
1.1.2 光源	2
1.1.3 波面和光束	2
1.1.4 光线	3
1.2 几何光学基本定律	3
1.2.1 直线传播定律	3
1.2.2 独立传播定律	4
1.2.3 反射定律和折射定律	4
1.2.4 基本定律的推论	5
1.3 全反射	7
1.4 光学系统和成像的基本概念	9
1.4.1 光学系统的基本概念	9
1.4.2 成像的基本概念	11
1.5 本章小结	12
习题	12

第2章 共轴球面光学系统

2.1 光线经过单个折射球面的折射	14
2.1.1 符号规则	14
2.1.2 实际光路计算公式	15
2.1.3 近轴光路计算公式	16
2.2 共轴球面系统	21
2.3 球面反射镜与非球面反射镜	22
2.3.1 球面反射镜	22
2.3.2 非球面反射镜	22
2.4 透镜和薄透镜	24
2.4.1 光束通过透镜的传播	25
2.4.2 薄透镜物像关系式	25
2.5 本章小结	27
习题	27

第3章 理想光学系统

3.1 理想光学系统的概念	29
3.2 理想光学系统的基点和基面	32
3.2.1 主点和主平面	32
3.2.2 焦点与焦平面	32
3.2.3 节点和节平面	34
3.2.4 单个折射球面的主平面和焦点	34
3.3 理想光学系统成像	35
3.3.1 作图求像法	36
3.3.2 理想光学系统的物像关系式	39
3.3.3 理想光学系统的三种放大率	40
3.4 本章小结	43
习题	43

第4章 平面镜棱镜系统

4.1 平面反射镜	45
4.1.1 单个平面镜的成像性质	45
4.1.2 双平面镜的成像性质	46
4.2 平行平板	47
4.3 反射棱镜	48
4.3.1 反射棱镜的分类	48
4.3.2 棱镜的展开	50
4.4 折射棱镜	53
4.5 光楔	54
4.6 本章小结	56
习题	56

第5章 光阑

5.1 光学系统中的光阑及其作用	57
5.2 孔径光阑	58
5.2.1 孔径光阑	58
5.2.2 入射光瞳和物方孔径角	59
5.2.3 出射光瞳和像方孔径角	60
5.2.4 孔径光阑的确定方法	60
5.3 视场光阑	61
5.3.1 视场光阑	61
5.3.2 入射窗和物方视场角	61
5.3.3 出射窗和像方视场角	62
5.3.4 视场光阑的确定方法	62
5.4 光学系统的渐晕	62

5.5	光学系统的景深	63
5.5.1	空间物体在平面上所成的像	63
5.5.2	照相机的景深	64
5.6	本章小结	66
习题		66

第6章 光学系统的像差

6.1	球差	67
6.2	彗差	69
6.2.1	子午彗差	70
6.2.2	弧矢彗差	71
6.3	像散	72
6.4	场曲	74
6.5	畸变	75
6.6	色差	76
6.6.1	色差现象	76
6.6.2	轴向色差	77
6.6.3	垂轴色差	78
6.7	本章小结	78
习题		79

第7章 眼睛和目视光学系统

7.1	人眼的光学特性	80
7.1.1	人眼的构造	80
7.1.2	标准眼	81
7.1.3	人眼的调节	84
7.1.4	人眼的分辨率	85
7.1.5	空间深度感觉和双眼立体感觉	86
7.2	放大镜和显微镜的工作原理	89
7.2.1	放大镜工作原理	89
7.2.2	显微镜工作原理	90
7.3	望远镜工作原理	92
7.4	眼睛的缺陷和目视光学仪器的视度调节	96
7.5	双眼观察仪器	99
7.6	本章小结	101
习题		101

第8章 军用光学仪器

8.1	观察仪器	102
8.1.1	军用望远镜	103
8.1.2	炮队镜	106

8.1.3	指挥镜	106
8.1.4	光电潜望镜	108
8.2	瞄准仪器	111
8.3	测距仪器	112
8.3.1	体视测距机光学系统	113
8.3.2	1m 体视测距机测距原理	115
8.3.3	双眼瞄准镜光学系统	116
8.4	测角仪器	117
8.4.1	方向盘	117
8.4.2	经 II 型经纬仪	117
8.5	本章小结	119
	习题	120

第9章 军用红外光学系统

9.1	红外技术的军事应用	121
9.2	红外光学系统概述	123
9.2.1	红外光学系统的功能与特点	123
9.2.2	红外光学系统的性能指标	123
9.3	红外物镜	124
9.3.1	反射式物镜	125
9.3.2	折反式物镜系统	128
9.3.3	透射式物镜	131
9.4	红外辅助光学系统	132
9.4.1	场镜	133
9.4.2	光锥	133
9.4.3	浸没透镜	134
9.4.4	中继光学系统	135
9.4.5	前置望远系统	136
9.5	光机扫描系统	137
9.5.1	两种基本扫描方式	137
9.5.2	光机扫描机构	138
9.5.3	光机扫描方案	138
9.6	典型军用红外光学系统	141
9.6.1	红外测温光学系统	141
9.6.2	红外跟踪光学系统	142
9.6.3	主动红外夜视系统	143
9.6.4	红外热像仪	145
9.6.5	红外前视仪	152
9.6.6	红外点源制导系统	154

9.6.7 红外成像制导系统	158
9.7 本章小结	161
习题	161

第10章 微光夜视光学系统

10.1 微光夜视技术的军事应用	162
10.1.1 微光夜视技术概述	162
10.1.2 微光夜视技术的军事应用	162
10.2 微光光学系统	163
10.2.1 微光光学系统对物镜的要求	163
10.2.2 微光光学系统中的物镜结构	164
10.2.3 微光光学系统对目镜的要求	167
10.3 直视微光夜视系统	167
10.3.1 直视微光夜视系统工作原理	168
10.3.2 微光夜视仪的光学性能	169
10.4 微光电视	170
10.4.1 基本组成	170
10.4.2 微光电视摄像机	171
10.4.3 微光摄像机的工作原理	171
10.4.4 微光电视的分类	172
10.4.5 微光电视的应用与特点	173
10.5 本章小结	174
习题	174

第11章 军用光纤光学系统

11.1 概述	175
11.1.1 光纤的结构	175
11.1.2 光纤的分类	176
11.1.3 光纤的特性	178
11.1.4 光缆	180
11.2 阶梯型光纤	182
11.2.1 阶梯型光纤光学性质	182
11.2.2 阶梯型光纤的应用	185
11.2.3 阶梯型光纤光学系统	189
11.3 梯度折射率光纤	192
11.3.1 非均匀介质中的光线微分方程式	193
11.3.2 梯度折射率光纤中的光线轨迹	194
11.3.3 梯度折射率光纤的特点和应用	196
11.4 典型军用光纤技术	197
11.4.1 光纤的军事应用	197

11.4.2	光纤制导技术	199
11.4.3	光纤传感技术	201
11.4.4	军用光纤通信技术	203
11.4.5	光纤技术在武器系统中的其他应用	208
11.5	本章小结	208
习题		208

第12章 军用激光光学系统

12.1	概述	210
12.2	激光技术基础	211
12.2.1	光与物质的相互作用	211
12.2.2	激光器的构成	212
12.3	光学谐振腔	212
12.3.1	稳定腔及几何光学作图表示法	213
12.3.2	稳定腔的表达式	214
12.4	激光束在均匀介质中的传播规律	215
12.4.1	高斯光束的特性	215
12.4.2	高斯光束的传播	215
12.4.3	高斯光束透镜变换	217
12.4.4	激光谐振腔的计算	218
12.5	激光发射与接收光学系统	219
12.5.1	激光发射光学系统	220
12.5.2	激光接收光学系统	222
12.5.3	激光发射接收系统设计	222
12.6	军用激光技术与应用	224
12.6.1	激光测距技术	224
12.6.2	激光雷达	229
12.6.3	激光目标指示器	232
12.6.4	激光制导武器	235
12.6.5	激光武器	241
12.7	本章小结	247
习题		248
参考文献		249

应用光学是光学工程重要的技术基础，它的内容主要是几何光学，专门研究光学仪器原理。一切光学仪器尽管它们的用途不同，但都离不开光，因此首先必须解决这样一些问题：光究竟是什么？它有哪些基本特征和规律？如何应用这些规律来研究光学仪器？这些是本章所要解决的主要问题。

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。它撇开光的波动本性，仅以光线为基础，研究光在透明介质中的传播规律和传播现象，是一门重要的实用性分支学科。本章首先介绍几何光学中的一些基本概念，然后讨论几何光学的基本定律，学习两种重要的光传播现象——光路可逆和全反射现象，最后给出有关光学系统和成像的基本概念。

1.1 几何光学的基本概念

1.1.1 光波

现代物理认为，光是一种具有波、粒二象性的物质，即：光既具有“波动性”又具有“粒子性”。只是在一定条件下，某一种性质显得更为突出。一般来说，除了研究光和物质作用的情况下必须考虑光的粒子性之外，可以把光作为电磁波看待，称为“光波”。

从本质上说，光和一般无线电波并无区别，同属于电磁波谱的一部分。光波的波长比一般无线电波短得多，其波长范围约为 $10 \sim 10^6 \text{ nm}$ ，又可分为红外线、可见光和紫外线三部分。波长 $400 \sim 760 \text{ nm}$ 的光波能够为人眼所感觉，称为可见光。图 1.1 为从 γ 射线到无线电波的电磁波谱。

在可见光谱段范围内，不同波长的光引起不同颜色感觉。具有单一波长的光称为“单色光”。由不同波长的光波混合而成的光称为“复色光”，太阳光由无限多种单色光混合而成。

光在真空中以同一速度 c 传播 ($c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$)，在空气中也近似如此。光在不同介质中传播时，频率 ν 不变而波长 λ 变化。在水和玻璃等透明介质中，光的传播速度要比在真空中慢，且随着波长的不同而不同。光的频率和光速、波长之间的关系为 $\nu = c/\lambda$ 。

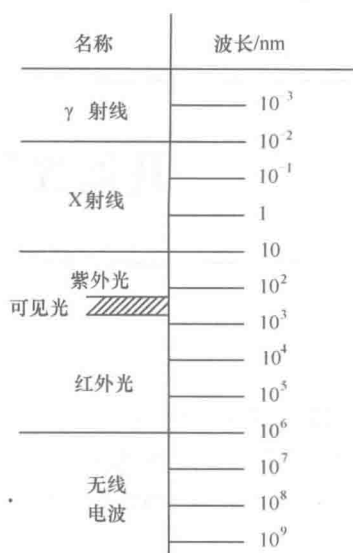


图 1.1 电磁波谱

1.1.2 光源

从物理学的观点来看，所有能辐射光能的物体都称为“发光体”或“光源”。当光源的大小与辐射光能的作用距离相比可以忽略时，可认为是“发光点”或“点光源”。

在几何光学中，一切自身发光或受到光照射而发光的物体均可视为光源。任何被成像的物体（光源）均由无数个发光点组成。在研究光的传播与物体成像问题时，通常选择物体上某些特定的点来进行讨论，且不考虑发光点所包含的物理概念（如光能密度等），认为发光点是一个既无大小也无体积而只有位置的发光几何点。

1.1.3 波面和光束

光波是电磁波，任何光源可看作波源，光的传播正是这种电磁波的传播。光波向周围传播，在某一瞬时，振动位相相同的各点所构成的曲面称为“波面”。波面可分为平面、球面或任意曲面。在各向同性的均匀介质中，点光源所发出的光波波面，是以光源为中心的一些同心球面，这种波称为“球面波”。对有一定大小的实际发光体，在光的传播距离比光源线度大得多的情况下，它所发出的光波也可以近似为球面波。在距发光点无限远处，波面形状可视为平面，这种波称为“平面波”。偏离上述规则的波面的称为“任意曲面波”。

波面对应的法线（光线）束称为“光束”，常见的光束有三种类型，如图 1.2 所示。

同心光束——相交于一点或由同一点发出的一束光线，其对应的波面形状为球面。

像散光束——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。

平行光束——没有聚交点而相互平行的光线束，对应的波面为平面波。

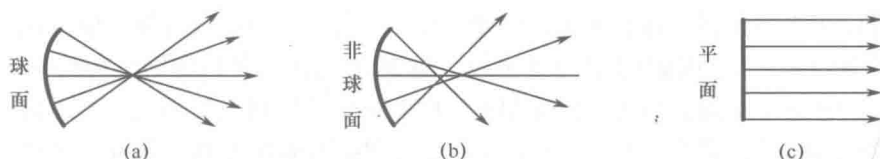


图 1.2 波束形状

(a) 同心光束; (b) 像散光束; (c) 平行光束。

1.1.4 光线

几何光学中研究光的传播，并不把光看作是电磁波，而把光看作是能够传播能量但没有截面大小只有位置和方向的几何线，这样的几何线称为“光线”。光源发光就是向四周发出无数条几何线，沿着每一条几何线向外发散能量。根据物理光学观点，在各向同性均匀介质中，辐射能量是沿着波面的法线方向传播的。因此，物理光学中的波面法线就相当于几何光学中的光线。换句话说，光线必定与波面垂直，如图 1.3 所示。

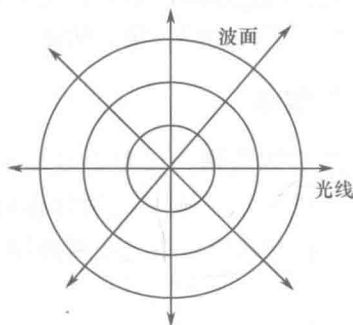


图 1.3 波面与光线的关系

在本节介绍的几个基本概念中，光线是几何光学最基本、最感兴趣的一个概念。但是，光线并不是一个物理实体，它只是一种数学工具，是人们直接从无数客观光学现象中抽象出来的。几何光学研究光的传播，也就是研究光线的传播。研究的方法是：首先找出光线的传播规律——几何光学的基本定律，然后根据这些基本定律研究光的传播现象。在研究过程中，光线和几何线具有完全相同的性质，所不同的只是光线具有方向——能量传播的方向。因此，就光线的几何性质来说，光线是“具有方向的几何线”。这样，几何光学中研究光的传播问题，就变成了一个几何问题，这就是所以称为“几何光学”的理由。

1.2 几何光学基本定律

几何光学把研究光经过介质的传播问题归结为四个基本定律，即：直线传播定律、独立传播定律、反射定律和折射定律。

1.2.1 直线传播定律

在各向同性的均匀透明介质中，光是沿着直线传播的，这是光的直线传播定律。这

个定律可以用来解释很多自然现象，例如，日食、月食、小孔成像等。但应该注意，光的直线传播定律只在一定的条件下才成立，这就是光必须在各向同性的均匀介质中传播，且在行进途中不遇到小孔、狭缝和不透明的屏障等阻挡。如果光在不均匀介质中传播，光的轨迹将是任意曲线而非直线；如果光在各向异性的晶体中传播，根据物理光学的知识，光会发生双折射现象；如果光在传播中遇到小孔、狭缝等，则根据波动光学的原理，将发生衍射现象而偏离直线。

1.2.2 独立传播定律

从不同光源发出的光线，以不同方向相交于空间介质中的某一点时，彼此互不影响，各光线独立传播，这就是光的独立传播定律。利用几个探照灯在夜空中搜索、交会飞机是这一定律的典型例证。光的独立传播定律的意义在于，当考虑某一光线的传播时，可不考虑其他光线对它的影响，从而使得对光线传播情况的研究大为简化。但是应该注意，光的独立传播定律仅对不同发光体发出的光即非相干光才是准确的。如果由同一光源发出后又被分开的两束光，经过不同的路径相交于某点，这样的两束光当满足一定条件时，可能成为相干光而发生干涉现象，独立传播定律不适用。

1.2.3 反射定律和折射定律

一般说，光在两种均匀介质分界面将产生复杂的现象：在光滑分界面（表面任何不规则度 $\leq$ 波长数量级）上，将产生规则的反射和折射；而在粗糙分界面处将产生漫反射和漫折射。反射定律和折射定律是指光在两种均匀透明介质光滑分界面上的传播规律。

若一束光投射到两种介质分界面上，如图 1.4 所示，其中：一部分光线在分界面上反射到原来的介质，称为“反射光线”；另一部分光线透过分界面进入第二种介质，并改变原来的方向，称为“折射光线”。反射光线和折射光线的传播规律是反射定律和折射定律。

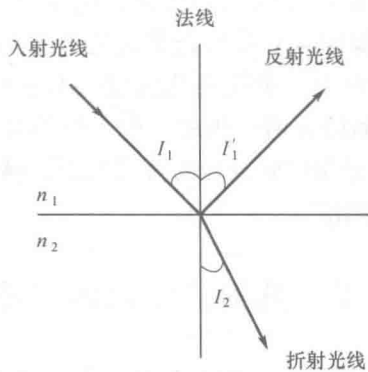


图 1.4 光的反射定律与折射定律示意图

入射光线和界面法线间的夹角 I_1 称为“入射角”；反射光线和界面法线间的夹角 I_1' 称为“反射角”；折射光线和界面法线间夹角 I_2 称为“折射角”。

反射定律：

(1) 反射光线必与入射光线和界面投射点处的法线共面。

(2) 入射角和反射角绝对值相等但符号相反, 即入射光线与反射光线位于法线两侧, 即

$$I'_1 = I_1 \quad (1.1)$$

折射定律:

(1) 折射光线与入射光线和界面投射点处法线共面。

(2) 入射角和折射角正弦之比, 对两种一定的介质来说, 是一个与入射角无关的常数, 它等于折射光线所在介质折射率 n_2 与入射光线所在介质折射率 n_1 之比, 即

$$\frac{\sin I_1}{\sin I_2} = \frac{n_2}{n_1} \quad (1.2)$$

或写为

$$n_1 \sin I_1 = n_2 \sin I_2 \quad (1.3)$$

式中: n_1 和 n_2 为介质的绝对折射率, 可表示为真空中光速 c 和介质中光速 v_1 (v_2) 之比, 即

$$\begin{cases} n_1 = \frac{c}{v_1} \\ n_2 = \frac{c}{v_2} \end{cases} \quad (1.4)$$

对于两种介质界面的折射, $n_1 \sin I_1$ 或 $n_2 \sin I_2$ 为一常数, 称为光学不变量。对于不同的介质, 它有不同的数值。

反射、折射定律对于平面, 对于球面或任意光滑曲面都是成立的。

1.2.4 基本定律的推论

(1) 在式 (1.3) 中, 若令 $n_2 = -n_1$, 则 $I_2 = -I_1$, 即为反射定律。这表明, 反射定律可以看作是折射定律的一种特例。因此, 由折射定律推导出的适合于折射情况的公式, 只要令 $n_2 = -n_1$, 便可导出相应的反射情况的公式。这在几何光学里是有重要意义的一项推论。

(2) 光路的可逆性。假定某一条光线, 沿着一定的路线, 由 A 传播到 B 。如果在 B 点沿着出射光线, 按照相反的方向投射一条光线, 则此反向光线仍沿着此同一条路线, 由 B 传播到 A 。光线传播的这种性质, 称为“光路的可逆性”。

光路可逆现象, 不论在均匀介质中光直线传播时, 还是在两种均匀介质界面上发生折射与反射时都同样存在。推而广之, 光线经过一个复杂的系统, 无论经过多少次反射和折射, 不管它经过的是均匀折射率介质还是非均匀折射率介质, 光路的可逆性永远成立。

根据光路的可逆性, 当研究光线传播规律、进行光学系统设计时, 既可以按实际光线进行的方向来研究和计算它的传播路线, 也可以按与实际光线相反的方向 (所谓“反向光路”) 来进行研究和计算, 二者的结果是完全相同的, 为解决实际问题提供了极大方便, 这点对于透镜设计尤其重要。

至于光在不均匀介质中传播的规律, 可以把不均匀介质看作是由无限多的均匀介质

组合而成的。光线在不均匀介质中的传播，可以看作是一个连续的折射。随着介质性质不同，光线传播曲线的形状各异。它的传播规律，同样可以用折射定律来说明。由此可见，直线传播定律、独立传播定律、反射定律和折射定律，能够说明自然界中光线的各种传播现象，它们是几何光学中仅有的物理定律，称为几何光学基本定律。几何光学的全部内容，就是在这些定律的基础上用数学的方法研究光的传播问题。

下面我们根据几何光学的基本定律研究折射率和光速的关系。

假设一束平行光线投射在两介质的分界面 P 上，如图 1.5 所示。所有的光线具有相同的入射角 I_1 ，通过平面 P 折射后，按折射定律，所有折射光线显然具有相同的折射角 I_2 ，因此仍为一平行光束。和平行光束相垂直的入射波面和折射波面，应该是两个平面。

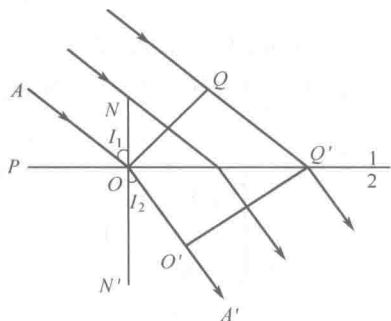


图 1.5 折射率与光速的关系

假定某一瞬间波面到达位置为 OQ ，经过时间 t 后，光波传播所到达的波面位置为 $O'Q'$ 。设光在两介质内的传播速度分别为 v_1 和 v_2 ，由图 1.5 可得 $QQ' = v_1 \cdot t$ ， $OO' = v_2 \cdot t$ 。

由于波面 OQ 垂直于直线 AO ，分界面 P 垂直法线 ON 。因此， $\angle QOQ' = \angle AON = I_1$ ；同理， $\angle O'Q'O = \angle A'ON' = I_2$ 。根据 $\triangle OQQ'$ 和 $\triangle OQ'O'$ ，得

$$\sin I_1 = \frac{QQ'}{OQ'} \quad \sin I_2 = \frac{OO'}{OQ'}$$

由以上二式相除消去 OQ' ，得

$$\frac{\sin I_1}{\sin I_2} = \frac{QQ'}{OO'}$$

将 $QQ' = v_1 \cdot t$ ， $OO' = v_2 \cdot t$ 的关系代入上式，并消去 t 得到

$$\frac{\sin I_1}{\sin I_2} = \frac{v_1}{v_2}$$

结合折射定律可得

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1} \quad (1.5)$$

由此可知：第二种介质对第一种介质的折射率之比等于第一种介质的光速 v_1 和第二种介质的光速 v_2 之比，这就是折射率与光速之间的关系。对于一定的介质，光速显然不变。因此，两种一定的介质对应的折射率应为不变的常数，实际上也就证明了折射

定律的成立。

通常把一种介质对另一种介质的折射率称为“相对折射率”，而把介质对真空的折射率称为“绝对折射率”。由于光在空气中的传播速度和真空中的传播速度相差极小，通常把空气的绝对折射率取1，而把介质对空气的折射率作为“绝对折射率”。

由 $QQ' = v_1 \cdot t$, $OO' = v_2 \cdot t$ 和式 (1.5) 可得

$$\frac{QQ'}{OO'} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

或写为

$$n_1 \cdot QQ' = n_2 \cdot OO'$$

由以上关系可以看到，在两个波面之间的两条光线，虽然它们各自走过的几何路线不同，但是它们的几何路程和所在介质折射率的乘积是相等的。把几何路程和折射率的乘积称为“光程”，即

$$S = n \cdot L \quad (1.6)$$

式中： L 为几何路程； n 为折射率； S 为光程。

根据折射率与光速的关系，可得

$$S = n \cdot L = \frac{c}{v} \cdot L$$

几何路程 L 和该介质中的光速 v 之比即为光的传播时间 t ，因此有

$$S = t \cdot c \quad (1.7)$$

由式 (1.7) 可知，光在介质中传播的光程等于相同时间内光在真空中传播的几何路程。按照波面的定义，任何两个波面之间所有光线的传播时间显然相同，因此，任意两波面之间的所有光线尽管走过的几何路程不同，但光程都是相同的，这就是波面与光程之间的关系，也可以看作是波面的传播规律。由已知波面的位置，根据波面间光程相等的关系，即可找到新的波面位置。由于光线是波面的法线，有了波面就能确定对应的光线位置。在今后研究光的传播问题时，大多数情形是根据光线的折射、反射定律来研究，有时候也可以根据波面之间光程相等的关系来研究，二者的结论完全相同。

1.3 全 反 射

在一般情况下，投射在两种介质分界面上的每一条光线，都分成两条：一条光线从分界面反射回到原来的介质；另一条光线经分界面折射进入另一种介质。随着光线入射角的增大，反射光线的强度增强，而折射光线的强度则逐渐减弱。

由图 1.6 可以看出：当入射角 I_1 增大时，相应的折射角也增大；同时，反射光的强度随之增加，而折射光的强度逐渐减小。当入射角增大到 I_0 时，折射角 $I_2 = 90^\circ$ 。这时，折射光线掠过两介质的分界面，并且强度趋近于零。当入射角 $I_1 > I_0$ 时，折射光线不再存在，入射光线全部反射，这样的现象称为全反射。折射角 $I_2 = 90^\circ$ 对应的入射角 I_0 称为全反射临界角。

由上述分析看出，发生全反射必须满足两个条件：光线从折射率高的介质（光密介质）射向折射率低的介质（光疏介质），并且入射角大于全反射临界角。