

面向 21 世纪 课程 教材
Textbook Series for 21st Century

光 学

游 璞 于国萍



高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS

内容提要

本书是教育部“高等教育面向 21 世纪教学内容和课程体系改革计划”的研究成果,是面向 21 世纪课程教材和普通高等教育“九五”规划教材。全书对传统教学内容进行了精选、整合和重构,将光学的近代发展纳入基础内容,将新观点、新技术、新方法和传统内容有机结合,既注重理论也重视应用,体现了物理教学“宽专业、厚基础、高科技”的原则,内容讲述由浅入深、循序渐进、体系完整、概念清晰。全书包括几何光学、光波场的描述、光的干涉、光的衍射、光的偏振、成像仪器与光谱仪、光源和光探测器、非线性光学等内容。

本书可作为物理类专业课程的教材,也可供有关专业的学生和教师参考。

图书在版编目(CIP)数据

光学 / 游璞, 于国萍. —北京: 高等教育出版社,
2003.7

ISBN 7-04-011842-4

I. 光... II. ①游...②于... III. 光学 IV. 043

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 025450 号

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街 4 号
邮政编码 100011
总 机 010-82028899

购书热线 010-64054588
免费咨询 800-810-0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>

经 销 新华书店北京发行所
印 刷 北京中科印刷有限公司

开 本 787×960 1/16
印 张 16.5
字 数 300 000

版 次 2003 年 7 月第 1 版
印 次 2003 年 7 月第 1 次印刷
定 价 17.60 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

前 言

当今世界,科学技术知识的增长和更新十分迅速,且学科之间不断交叉融合和渗透.光学也不例外,甚至是在更加日新月异迅猛地发展.光学与其他学科和技术相结合,开拓出一个又一个新的科研和应用领域,推动着整个科学技术和生产的迅速发展.

虽然光学的最基本的理论基础没有发生本质的变化,但光学与其他学科和技术结合,却引入了相应的新概念、新方法和数学手段,从而使光学变得更深刻、更丰富多彩和更充满活力.

我国的普通物理光学教材在基本知识、基本概念、基本规律和方法讲述上是具有特色的,而且多年来,在使教材现代化方面做了许多有益而可贵的探索,取得了丰硕的成果.

为了适应时代发展的要求,我们在多年从事光学教学和科研的基础上,编写了作为普通物理教材的《光学》.编写本书时,我们注意加强基础,扩大知识面,增加信息量,既重理论也重应用,更在如何使基础内容现代化上下功夫.同时致力于将书写“薄”,全书约 30 万字.

我们将光学的近代发展纳入基础内容中讲述,努力使新观点、新技术、新方法和光学课基本的传统内容有机结合.当然,纳入的只是和基础紧密联系而不需太多数理准备的前沿内容,或者只需一般了解类似科普式介绍的拓宽部分,以引导学生接触学科前沿发展领域,并加深对本课程的理解.增加新内容但不增加学时,我们删除、压缩了一些过时的、次要的或平行性的、或与其他课程重复的内容,对传统教学内容进行了精选、整合和重构.

几何光学的研究方法直观简便,学生在中学就有一定的基础,光学的许多基本知识基本概念也宜在此引入,故本书将它放在第一章.其中介绍了费马原理,物像之间的等光程性,理想光学系统成像的傍轴条件,单球面与薄透镜成像,光阑、入射光瞳、出射光瞳、景深、焦深、像差、齐明点等.对共轴球面系统我们只是说明:实际上目前广泛应用的是采用矩阵追迹方法,通过计算机一次完成共轴系统的计算,而不是大多数教材仍在介绍的逐次成像法,并且简单说明了矩阵方法的思路.在像差部分,我们注重实际应用,比较了代数分析方法(赛德耳像差理论)和矩阵追迹方法的特点,指出由于应用矩阵追迹方法和计算机运算,导致了

整个光学系统设计过程的现代化. 目前已有成熟的计算几何像差和波像差的软件, 按规定输入所需要的参数, 启动程序即可获得所要求的结果.

我们将成像仪器(放大镜、显微镜和望远镜)与光谱仪合在一起, 单独写成第六章, 放在第五章“光的衍射”之后. 本章集中介绍仪器的基本原理和主要性能, 如视角放大率和正常放大率、色散率、分辨率和自由光谱范围等等, 既节省了篇幅, 又便于比较各类仪器的性能特点; 既介绍了空间分光的色散光谱仪(如法布里-珀罗干涉仪、光栅光谱仪等), 又介绍了调制分光的傅里叶变换光谱仪. 既介绍了单通道测量, 又提及了当今发展起来的光多通道分析仪(OMA).

在介绍了传统的显微镜的最小可分辨距离不能小于照明光波的半个波长以后, 紧接着介绍了1981年以后显微技术的发展, 扫描隧道显微镜和近场光学显微镜的研制大大地突破了以上的分辨极限. 介绍它们所需要的有关隐失波的知识, 则在第三章1.6节(全反射与隐失波)、第五章5.2节(超高频衍射产生的隐失波)中做了铺垫.

在望远镜部分, 结合望远镜的发展史介绍了现代大型望远镜采用的自适应光学和主动光学技术简况.

所有涉及光的现象和实验都必须有光源和探测器, 我们将光源和光探测器列为第九章. 首先介绍辐射度量和光度量, 并将同步辐射光源、黑体辐射、激光等都纳入本章. 引入光量子概念时, 不再详细介绍爱因斯坦光电效应(中学已学过)及康普顿散射(与后继课程重复), 而在第三章§4“光的散射”中, 作为拓宽延伸部分写进了拉曼散射、布里渊散射和康普顿散射, 只介绍现象不讨论机理.

与其他课程不同, 光学课本身所需要的基础理论或要使用的数学方法往往都是在后继课程中学习(例如电动力学、原子物理与量子力学、数学物理方法等). 为此, 我们不追求理论的高深和数学的繁难, 而尽可能系统、准确地介绍光的基础知识及其应用. 本书以经典波动光学为主体, 但我们不是从麦克斯韦方程组出发去求解有关问题, 而是直接用波的叠加原理来处理干涉、衍射、偏振、双折射等内容. 在衍射中直接利用惠更斯-菲涅耳原理进行分析, 根据具体情况进行不同的近似处理, 使物理概念更清晰, 并结合现代光学, 将傅里叶变换方法及频谱概念引入并融于其中.

本书是教育部“高等教育面向21世纪教学内容和课程体系改革计划”的研究成果, 是为了培养21世纪物理学方面的高科技人才而编写的. 这些高科技人才既要保持理科基础雄厚的优势, 又要加强应用方面的基本训练; 不仅成为物理学基础性人才, 更多地面向国民经济主战场, 成为肩负科技开发将科学知识转化为生产力的应用性人才.

对本书的编写, 我们力求做到由浅入深, 循序渐进, 体系完整, 主线清晰, 概念明确, 条理清楚. 但由于编者水平所限, 错误和欠妥之处在所难免, 敬请读者

指正。

在本书的编写过程中,南京大学的柯善哲教授、高文琦教授、易明教授、马光群教授,武汉大学的熊贵光教授,仔细地审阅了全稿,提出了非常宝贵的建议和修改意见。北京大学的钟锡华教授在编写本书的指导思想、总体结构和内容取舍等方面,与编者进行了多次讨论,并给予了热情的支持。这些都使编者受益匪浅,我们在此,谨向他们表示由衷的感谢。

游 璞 于国萍

2003 年于珞珈山

目 录

引 言	(1)
第一章 几何光学	(3)
§ 1 几何光学的基本定律和费马原理	(3)
1.1 基本定律	(3)
1.2 费马(Fermat)原理	(4)
§ 2 成像的基本概念	(7)
2.1 物和像	(7)
2.2 理想光学系统 物像之间的共轭性	(8)
2.3 物像之间的等光程性	(8)
§ 3 傍轴条件下的单球面折射成像	(9)
3.1 傍轴条件	(9)
3.2 符号规则	(10)
3.3 傍轴球面折射的物像关系式	(10)
3.4 放大率	(13)
§ 4 薄透镜的成像公式和放大率	(14)
§ 5 共轴球面系统	(16)
§ 6 光学系统中的光阑	(16)
6.1 孔径光阑 入射光瞳和出射光瞳	(17)
6.2 视场光阑 入射窗和出射窗	(18)
6.3 光阑与景深	(18)
6.4 相对孔径和 f 数	(19)
§ 7 像差	(20)
7.1 几何像差 波像差	(20)
7.2 球差	(21)
7.3 彗差	(22)
7.4 像散	(23)
7.5 像场弯曲(场曲)	(23)
7.6 畸变	(24)
7.7 色差	(24)
7.8 齐明点(不晕点) 油浸物镜	(25)
习题与思考题	(26)

第二章 光波场的描述	(29)
§ 1 简谐波的数学描述	(29)
1.1 一维平面简谐波	(29)
1.2 三维平面简谐波	(31)
1.3 球面波 傍轴近似和远场近似	(33)
§ 2 波动方程和叠加原理	(35)
§ 3 傅里叶(Fourier)分析	(36)
3.1 傅里叶级数	(37)
3.2 傅里叶积分	(38)
§ 4 光波是电磁波	(40)
§ 5 光的偏振态	(43)
5.1 光的偏振态	(43)
5.2 两个频率相同、振动方向互相垂直的简谐波的叠加	(44)
习题与思考题	(46)
第三章 光通过各向同性介质及其界面所发生的现象	(49)
§ 1 光在各向同性介质界面上的反射和折射	(49)
1.1 菲涅耳反射折射公式	(50)
1.2 振幅反射(透射)比 相位跃变(相移)	(51)
1.3 反射率和透射率	(54)
1.4 布儒斯特(Brewster)定律	(56)
1.5 反射光与折射光的偏振态	(57)
*1.6 全反射与隐失波(近场光学)	(58)
*1.7 受抑全反射(光子隧道效应)	(60)
§ 2 光的吸收	(61)
§ 3 光的色散	(62)
3.1 正常色散和反常色散	(62)
3.2 群速度	(63)
§ 4 光的散射	(65)
4.1 非纯净介质中的光散射	(65)
4.2 纯净介质中的分子散射	(66)
*4.3 拉曼(Raman)散射	(67)
*4.4 布里渊(Brillouin)散射	(67)
*4.5 康普顿(Compton)散射	(68)
习题与思考题	(69)
第四章 光的干涉	(71)
§ 1 相干光	(71)
1.1 相干条件和相干叠加	(71)

1.2 非相干叠加	(72)
1.3 相干光的获得	(73)
§ 2 杨氏(Young)实验	(74)
2.1 实验装置与光强分布	(74)
2.2 干涉条纹的形状和间距	(76)
2.3 干涉条纹的可见度	(77)
2.4 光源宽度对条纹可见度的影响 空间相干性	(79)
2.5 光源的非单色性对可见度的影响 时间相干性	(79)
§ 3 薄膜干涉	(81)
3.1 干涉条纹的定域	(81)
3.2 等倾干涉	(82)
3.3 等厚干涉	(84)
3.4 透射光的干涉条纹	(86)
§ 4 迈克耳孙(Michelson)干涉仪	(86)
§ 5 法布里-珀罗(Fabry - Perot)干涉仪	(88)
* § 6 激光谐振腔的选模原理	(90)
§ 7 光学薄膜	(92)
7.1 单层增透膜和增反膜	(92)
7.2 多层介质高反射膜	(94)
7.3 干涉滤光片	(95)
习题与思考题	(96)
第五章 光的衍射	(100)
§ 1 光的衍射现象	(100)
§ 2 惠更斯-菲涅耳(Huygens - Fresnel)原理	(101)
§ 3 衍射现象分类	(103)
3.1 初步近似(傍轴近似)	(104)
3.2 菲涅耳(Fresnel)衍射	(105)
3.3 夫琅禾费(Fraunhofer)衍射	(105)
§ 4 夫琅禾费衍射实现屏函数的傅里叶变换	(107)
§ 5 夫琅禾费正弦光栅衍射	(109)
5.1 正弦光栅的衍射特性	(109)
* 5.2 超高频衍射产生的隐失波	(111)
§ 6 夫琅禾费单缝、矩形孔和圆孔衍射	(112)
6.1 实验装置和现象	(112)
6.2 单缝衍射的光强分布公式	(112)
6.3 振幅矢量图解法	(115)
6.4 单缝衍射图样的主要特征	(116)

6.5 矩形孔衍射	(118)
6.6 夫琅禾费圆孔衍射	(118)
6.7 瑞利(Rayleigh)判据	(119)
§ 7 夫琅禾费多缝衍射	(121)
7.1 多缝衍射光强分布公式	(121)
7.2 多缝衍射图样的主要特征	(122)
7.3 衍射光栅的分光原理	(124)
7.4 闪耀光栅	(125)
§ 8 菲涅耳圆孔和圆屏衍射	(126)
8.1 点光源菲涅耳圆孔衍射	(126)
8.2 菲涅耳波带片	(129)
8.3 点光源菲涅耳圆屏衍射	(130)
§ 9 巴比涅(Babinet)原理	(130)
习题与思考题	(132)
第六章 成像仪器与光谱仪	(136)
§ 1 放大镜	(136)
1.1 人眼的视角和最小可分辨角	(136)
1.2 放大镜的视角放大率	(137)
§ 2 显微镜	(138)
2.1 显微镜的放大原理	(138)
2.2 显微镜的分辨本领	(138)
*2.3 扫描探针显微术(SPM)	(140)
§ 3 望远镜	(141)
3.1 望远镜的放大率和分辨本领	(141)
3.2 光学发射望远镜(激光扩束器)	(143)
*3.3 自适应光学与主动光学	(144)
*3.4 太空望远镜	(145)
§ 4 光谱仪器分类和基本性能	(146)
4.1 光谱仪器分类	(146)
4.2 色散光谱仪的基本性能参量	(147)
§ 5 棱镜、光栅和 F-P 干涉仪的分光性能	(149)
5.1 棱镜光谱仪	(149)
5.2 光栅光谱仪	(150)
5.3 法布里-珀罗干涉仪	(151)
* § 6 傅里叶变换光谱仪	(151)
6.1 基本原理	(152)
6.2 傅里叶变换光谱仪的特点	(154)

习题与思考题	(154)
第七章 空间频率滤波与全息术	(156)
§ 1 阿贝 (Abbe) 成像原理	(156)
1.1 阿贝成像原理	(156)
1.2 阿贝 - 波特实验	(157)
§ 2 空间频率滤波	(158)
§ 3 全息术	(159)
3.1 全息术概论	(159)
3.2 全息照相的基本原理	(161)
* 3.3 激光记录和白光再现的全息图	(162)
3.4 傅里叶变换全息图	(163)
3.5 全息术的应用	(163)
习题与思考题	(165)
第八章 光在各向异性介质中的传播	(166)
§ 1 双折射	(166)
1.1 双折射现象	(166)
1.2 晶体的光轴、主截面和主平面	(166)
1.3 马吕斯 (Malus) 定律	(167)
1.4 单轴晶体中点光源的波面	(168)
1.5 用惠更斯作图法确定晶体中 o 光和 e 光的传播方向	(169)
* 1.6 单轴晶体的法线速度与射线速度	(170)
§ 2 产生线偏振光的元件	(172)
2.1 利用二向色性制成偏振片	(172)
2.2 偏振棱镜	(174)
§ 3 用波片 (相位延迟片) 改变光的偏振态	(175)
3.1 波片	(175)
3.2 补偿器	(178)
§ 4 偏振态的检测	(179)
§ 5 偏振光的干涉	(180)
5.1 平行偏振光的干涉	(180)
* 5.2 会聚偏振光的干涉	(182)
* § 6 应力双折射和电光效应	(183)
6.1 应力双折射	(183)
6.2 电光效应	(184)
§ 7 旋光现象及其应用	(188)
7.1 旋光现象及其实验规律	(188)
7.2 菲涅耳对旋光现象的解释	(189)

*7.3 圆二色性	(190)
7.4 法拉第磁致旋光效应	(192)
*7.5 液晶的旋光显示	(193)
习题与思考题	(194)
第九章 光源和光探测器	(199)
§ 1 辐射度量和光度量	(199)
1.1 辐射度量	(199)
1.2 光度量	(201)
§ 2 光源	(202)
§ 3 黑体辐射	(204)
3.1 热辐射的基尔霍夫定律	(204)
3.2 黑体的辐射谱	(205)
3.3 斯特藩-玻耳兹曼定律和维恩位移定律	(206)
3.4 黑体辐射的经典理论遇到困难	(207)
3.5 热辐射的量子理论——普朗克黑体辐射公式	(207)
*3.6 辐射测温	(208)
§ 4 光量子 光的波粒二象性	(209)
4.1 光量子	(209)
4.2 光的波粒二象性	(210)
§ 5 光的辐射过程	(211)
§ 6 激光器	(212)
6.1 光的自发辐射、受激辐射和受激吸收	(212)
6.2 产生激光的条件	(214)
*6.3 激光模式和高斯光束	(216)
*6.4 调 Q 激光器	(220)
*6.5 锁模激光器	(221)
* § 7 光探测器	(222)
习题与思考题	(224)
*第十章 非线性光学	(225)
§ 1 概述	(225)
§ 2 光频率转换	(225)
2.1 非线性电极化效应	(226)
2.2 二次谐波产生(SHG)	(227)
2.3 光学混频 参量放大及振荡	(228)
§ 3 自聚焦 自相位调制	(229)
3.1 非线性折射率和自聚焦	(229)
3.2 自相位调制和自加宽效应	(230)

3.3 扫频脉冲通过色散介质的特性	(231)
3.4 光纤中的光孤子	(231)
参考答案	(233)
汉英名词索引	(240)
参考文献	(248)

引 言

光学是研究光的本性、光的产生与控制、光的传输与检测、光与物质的相互作用以及它的各种应用的科学。

整个光学的发展,可以粗略分为三个比较大的历史阶段:经典光学阶段、近代光学阶段和现代光学阶段。

经典光学历史阶段最长,20 世纪以前都属于此阶段。在这一阶段对光的本性的探索存在着光的微粒性和光的波动性两种互相排斥的不同观点,并经历了此长彼消的历史过程。初期,牛顿的光的微粒说比惠更斯的光的波动说占优势。19 世纪初,杨氏和菲涅耳等人对干涉和衍射现象的成功解释为波动说的成功奠定了基础。19 世纪 60 年代,麦克斯韦总结出一组描述电磁场变化规律的方程组,预言了存在着传播速度等于光速的电磁波。1888 年,赫兹用实验证实了电磁波的存在并证明了它具有与光一样的传播特性,其速度等于光速,这使人们认识到光是一种电磁波,光的波动理论变成电磁理论的一个部分,光的波动本性可由麦克斯韦方程组完美地描述,它成功地解释了有关光的传播的一系列现象(反射、折射、干涉、衍射、偏振、双折射等)。这是光的波动说的全盛时期。

但在这一时期,又发现了一些用麦克斯韦电磁理论无法解释的现象,其中最著名的是黑体辐射、光电效应以及原子的线状光谱等。为了解释这些现象,1900 年普朗克提出了量子化假设,爱因斯坦进一步提出光(量)子理论。20 世纪初开始,光学研究进入到第二个大的历史阶段:近代光学阶段。

近代光学以光量子(光子)假说、光子统计学与量子电动力学理论为标志。人们认识到:一方面,在与光的传播特性有关的一系列现象中,光的波动性表现明显;另一方面,在光与物质相互作用过程中(如光的发射、吸收、散射、色散、各种光谱学效应、光电效应、磁光效应等),光又充分表现出粒子特性。人们必须放弃认为光只具有经典的波动本性的片面观点,而认识到光同时具有波动和微粒两重属性,20 世纪 20 年代末、30 年代初创立的量子电动力学理论能够对光场的波动——粒子二象性给出严格合理的表述。但它所采用的数学过程相当复杂,往往得不到简单的解析结果。只要限制在一定的近似条件下,由它可以派生出一些大为简单适用的专门性理论,如光子统计理论、激光理论中经常采用的主方程理论等等。量子电动力学将经典波动光学视为它的一个特殊情况,即光子数目很大很密集的情况。

在近代光学发展阶段,经典的波动光学绝不因为量子电动力学的发展而被取代或受到排斥,它们仍然不断地发展、革新.特别是它与其他学科结合,不论在理论方法还是应用领域都有许多重大突破和进展.

从1935年荷兰光学家泽尼克(F. Zernike)提出相衬原理时开始,接着是1948年全息术的提出,1955年光学传递函数理论的建立,特别是1960年激光的问世则促使光学学科迅速进入现代光学阶段.

现代光学以量子光学、激光理论与技术、非线性光学以及现代光学信息处理技术与光电子技术等为标志,它们多是综合性很强的交叉学科.在现代光学阶段,人们更深刻地认识到光的基本属性是波粒二象性,量子电动力学全面地反映了光的波粒二象性,并经受了一系列精确实验的检验,仍是现代光学的理论基础.

现代光学技术与信息科学技术、生命科学技术、纳米技术紧密相关.例如用激光束捕捉与冷却原子(获1997年诺贝尔奖),激光冷却技术已实现 $0.18\text{ }\mu\text{K}$ 低温,证实了凝聚物质的存在和宏观量子规律的存在;用腔场量子电动力学技术控制原子状态和光子的统计性质;光场压缩态在量子通信和量子计算等领域有着广泛的应用前景.目前超短脉冲激光的脉冲持续时间已从飞秒($1\text{ fs} = 10^{-15}\text{ s}$)进入阿秒($1\text{ as} = 10^{-18}\text{ s}$)量级,几十或几百fs左右的飞秒激光器均有商品出售,这使人们可以在飞秒级时间分辨率下研究物理、化学、生物学、光电子学等学科中各类瞬态动力学过程,也使人们得以用很低的脉冲能量获得极高的峰值光强.在许多情况下,超快和超强根本性地改变了激光与物质相互作用的机制,通过光物理与化学、生命科学、医学和材料科学的相互合作及学科之间的渗透和交叉,超短脉冲激光必将推动人类科学和技术的进步.

如上所述,可以看出,光学这一学科的生命力十分旺盛而且顽强,它对现代物理学和整个科学技术的发展都有着重大的贡献.

第一章 几何光学

考虑光的传播问题时,光学有两大分支:几何光学与波动光学.几何光学又称**光线光学**,它不考虑光的波动性以及光与物质的相互作用,只是以光线的概念为基础,根据以实验事实建立的几个基本定律,通过三角计算、矩阵运算或几何作图法来讨论物体经光学系统的成像规律.

由于不考虑光的波动性,所以几何光学有一定的适用条件.这个条件是,在光的传播方向上障碍物(如狭缝、小孔、透镜的口径等)的几何尺寸 D ,必须远大于光波的波长 λ ,即 $D \gg \lambda$,或 $\lambda/D \rightarrow 0$.绝大部分光学元件(如透镜、棱镜等)和光学仪器成像系统都能满足上述条件,并且几何光学方法直观简便,能得出很好的结果,所以它仍是研究成像问题的简单而有用的方法.

§ 1 几何光学的基本定律和费马原理

1.1 基本定律

几何光学中,用一条条表示光能传播方向的几何线来代表光,并称之为**光线**.借助于光线的概念,几何光学的基本实验定律可表述如下:

1. 光的直线传播定律:光在均匀透明介质中沿直线传播.
2. 光的独立传播定律:来自不同方向的光线在空间相遇后,各自保持自己的传播方向继续传播.
3. 反射定律:当光射至两种介质的光滑分界面上时,反射光线、入射光线及界面的法线处在同一平面内,反射光线和入射光线位于法线的两侧,而且反射角等于入射角,如图 1-1,即

$$i' = i \quad (1.1)$$

4. 折射定律:折射光线、入射光线和法线处在同一平面内,入射光线和折射光线位于法线的两侧,入射角的正弦与折射角的正弦之比与入射角的大小无关,而与两种介质的折射率有关.设 n_1 和 n_2 为两种介质的折射率(图 1-2),则有

$$n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2 \quad (1.2)$$

(1.2)式通常称为斯涅耳(Snell)公式.

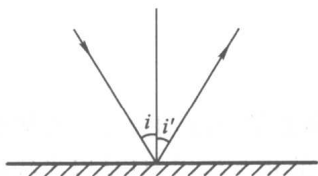


图 1-1 光的反射

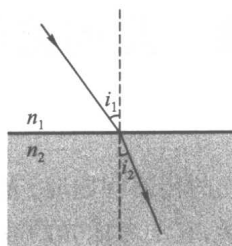


图 1-2 光的折射

从上述定律不难看出,如果光线逆着反射线方向入射,则这时的反射线将逆着原来的入射线方向传播;如果光线逆着折射线方向由介质 2 入射,则射入介质 1 的折射线也将逆着原来的入射线方向传播.也就是说,将光线的方向反转时,它将逆着原来的路径传播,这称为光路的可逆性原理.

1.2 费马(Fermat)原理

1657 年,法国数学家费马(Fermat)用光程的概念把几何光学的基本定律归结为一个统一的基本原理.下面先引入光程的概念.

1. 光程

在均匀介质中,光程 $[l]$ 表示光在该介质中走过的几何路程 l 与介质折射率 n 的乘积,即

$$[l] = nl \quad (1.3a)$$

因为 $n = c/v$,于是得

$$\frac{[l]}{c} = \frac{l}{v}$$

上式左端表示光在真空中通过光程 $[l]$ 所需的时间,而右端则表示光在介质中通过真实路程 l 所需的时间.由此可见,光程表示光在通过介质中真实路程 l 所需的时间内,在真空中所能传播的路程.借助光程的概念,可将光在各种介质中所走过的路程折算为在真空中的路程,这样便于比较光在不同介质中传播所需时间的长短.

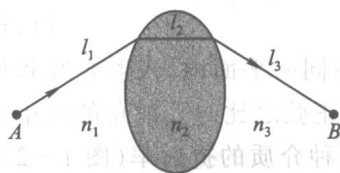


图 1-3 光程

如果光线从 A 点出发,中间经过 N 种不同的均匀介质而到达 B 点(图 1-3),则总光程 $[l]$ 为

$$[l] = \sum_{i=1}^N n_i l_i \quad (1.3b)$$

正如前面提到的对障碍物的几何尺寸的限制一样,公式(1.3b)中的每一个 l_i 都必须远大于波长 λ .若 A 点到 B 点之间介质的折射率 n 是缓慢连续改变的,以致折射率随空间的变化率 $\frac{dn}{dl}$ 在波长量级内近似可看成常量,则光程为

$$[l] = \int_A^B n dl \quad (1.3c)$$

2. 费马原理

费马原理指出:光线在 A 、 B 两点之间传播的实际路径,与其他可能的邻近的路程相比,其光程为极值.简言之,光沿光程为极值(极大、极小或常量)的路径传播.

若用严格的数学语言来表述,就是:在光线的实际路径上光程的变分为零,即

$$\delta[l] = \delta \int_A^B n dl = 0 \quad (1.4)$$

根据费马原理,若取光程为极小值,则可推导出光的直线传播定律,反射定律和折射定律.

例 1.1 根据费马原理导出光的折射定律.

设 P 平面是两个均匀介质的分界面,两侧介质的折射率分别为 n_1 和 n_2 .如图1-4所示,为了要确定从 A 点出发经 P 平面折射后到达 B 点的实际光线的路径,通过 A 、 B 两点作垂直于 P 平面的平面,它们的交线取作 x 轴, z 轴在 P 平面内. A 点的坐标为 $(x_1, y_1, 0)$, B 点的坐标为 $(x_2, y_2, 0)$,实际光线在界面上的折射点 C 的坐标为 $(x, 0, z)$,由 A 点到 B 点的光程为

$$\begin{aligned} l &= n_1 \cdot AC + n_2 \cdot CB \\ &= n_1 \sqrt{(x-x_1)^2 + y_1^2 + z^2} + n_2 \sqrt{(x-x_2)^2 + y_2^2 + z^2} \end{aligned}$$

根据费马原理,光程 l 应取极值,即有

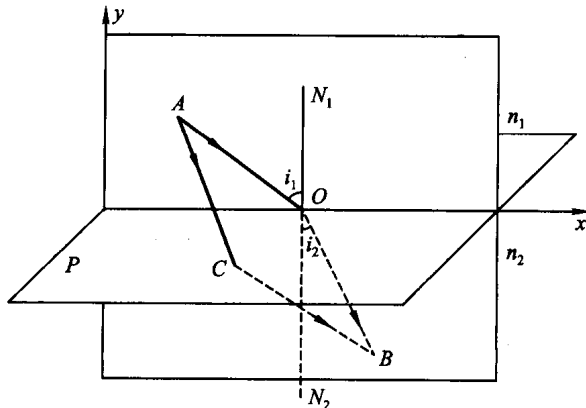


图 1-4 由费马原理导出折射定律