

建筑玻璃 加工技术

JIANZHU BOLI
JIAGONG JISHU

玻璃镀膜工艺技术

Bóli Dumo Gongyi Jishu

■ 中国南玻集团工程玻璃事业部 编著



华南理工大学出版社

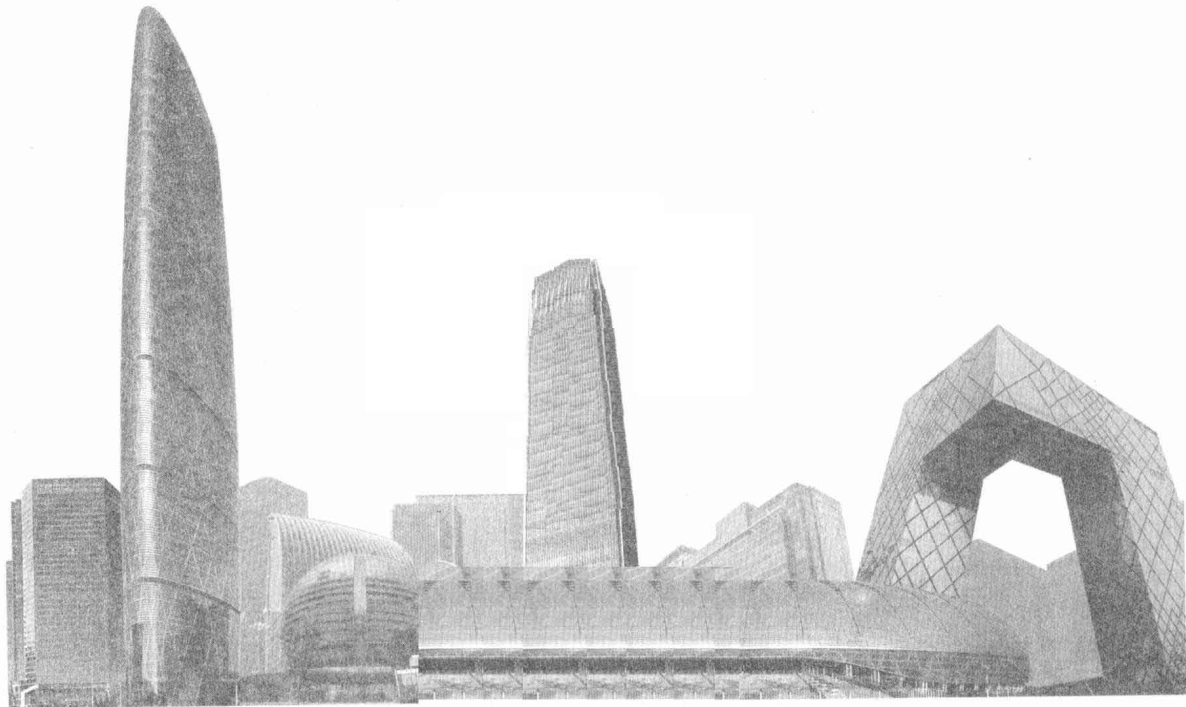
建筑玻璃 加工技术

JIANZHU BOLI
JIAGONG JISHU

玻璃镀膜工艺技术

Boli Dumo Gongyi Jishu

■ 中国南玻集团工程玻璃事业部 编著



华南理工大学出版社

· 广州 ·

图书在版编目(CIP)数据

玻璃镀膜工艺技术/中国南玻集团工程玻璃事业部编著. —广州: 华南理工大学出版社, 2010. 3

(建筑玻璃加工技术)

ISBN 978 - 7 - 5623 - 2966 - 4

I. 玻… II. 中… III. 建筑玻璃-镀膜 IV. TQ171.72

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 232452 号

总发行: 华南理工大学出版社 (广州五山华南理工大学 17 号楼 邮编 510640)

营销部电话: 020-87113487 87110964 87111048 (传真)

E-mail: scutc13@scut.edu.cn http: //www. [scutpress.com.cn](http://www.scutpress.com.cn)

策划编辑: 乔 丽 吴翠微

责任编辑: 吴翠微

印刷者: 惠州市海天印刷有限公司

开 本: 787mm × 1092mm 1/16 印张: 67 字数: 1673 千

版 次: 2010 年 3 月第 1 版 2010 年 3 月第 1 次印刷

定 价: 128.00 元 (全 4 册)

版权所有 盗版必究

序

中国南玻集团股份有限公司经过 25 年的不懈努力，从 50 万美元创业开始，发展成长为迄今资产过百亿、产品涵盖绿色可再生能源和节能环保产品的大型企业集团。其核心产业——玻璃深加工产业由一条钢化炉和一条镀膜线，发展到今天拥有 10 多条大型磁控溅射连续镀膜生产线及与之相配套的钢化、中空等深加工生产线。产品方面，由刚起步时提供简单钢化片和热反射镀膜单片，到现在提供单银、双银和三银低辐射中空系列产品。产品不断升级，产能不断扩大，广泛应用到国内外大型建设项目和民用建筑。

这些都是与南玻集团广大工程技术人员的艰苦努力和技术创新分不开的，为此，我们组织南玻集团工程玻璃事业部的专业技术人员编写了“建筑玻璃加工技术系列书”。本系列书总结了南玻集团工程玻璃事业部 20 多年来积累的玻璃深加工技术和经验，按照玻璃深加工工艺及专业分为《玻璃镀膜工艺技术》、《玻璃镀膜真空技术》、《安全玻璃加工技术》、《中空玻璃加工设备与技术》、《玻璃设备电气控制》等。内容涵盖有关建筑玻璃深加工方面的生产设备原理和生产工序工艺技术知识，其宗旨是希望能对建筑玻璃深加工从业人员专业技术水平的提高有所帮助，为国家的建筑节能事业作出更大的贡献。

本系列书的出版，也将给南玻集团的玻璃深加工从业人员提供很好的学习培训教材。借此系列书出版之际，谨向南玻集团参加编写此系列书的同事们表示深切的谢意。

吴国斌

2009 年 7 月

前 言

20 多年来, 在建筑玻璃镀膜行业, 镀膜技术、镀膜材料和镀膜产品得到突飞猛进的发展, 无论在学术上还是在实际应用中都取得了丰硕的成果, 并已成为当代建筑科学、能源科学、真空科学与技术 and 材料科学中最活跃的研究领域之一, 在高新技术产业中具有举足轻重的作用。镀膜技术、镀膜材料、节能科学相结合推动了建筑玻璃镀膜产品全方位的开发与应用。

本书介绍了薄膜的光学基础, 包含几何光学的基本定律、波动光学中的干涉原理及其应用、色度学基础; 介绍了建筑玻璃的节能性及其应用, 包括热量传递的基本概念, 玻璃的光、热性能指标及其常见名词解释, 节能玻璃的节能特性及其选用; 同时介绍了磁控溅射成膜技术的基本原理与方法, 建筑镀膜产品膜层结构的设计基础和工艺调试方法, 膜层设计软件的使用方法、在线光学检测系统的使用方法, 以及镀膜玻璃的国家标准等。

本书是一本玻璃镀膜工艺技术人员比较实用的参考书。

本书由中国南玻集团工程玻璃事业部组织编写, 参加编写的有陈可明(第一章)、许武毅和黄成德(第二章)、曾小绵((第三章、第四章的第三节和第五章)、崔平生(第四章的第一节和第二节)、北京奥博泰公司黄达权(第六章)。

由于经验不足, 水平有限, 不妥与疏漏之处, 敬请广大读者指正。

编 者

2009 年 7 月

《建筑玻璃加工技术》

编 委 会

顾 问 吴国斌

主 任 江少华

编 委 陈可明 白振中 陈海峰 左养利 梁 忠

执行编委 李文胜 叶光岱

《玻璃镀膜工艺技术》

主 编 陈可明

参 编 (按姓氏笔画排序)

许武毅 黄达权 黄成德 崔平生 曾小绵

《玻璃镀膜真空技术》

主 编 陈海峰

参 编 余洪书

《安全玻璃加工技术》

主 编 白振中

参 编 (按姓氏笔画排序)

李文胜 张会文

《中空玻璃加工设备与技术》

主 编 左养利

参 编 (按姓氏笔画排序)

王 健 莫际朗 魏华金

《玻璃设备电气控制》

主 编 梁 忠

参 编 (按姓氏笔画排序)

李元生 张学强 张文东 韩全寿

集团简介

中国南玻集团股份有限公司成立于1984年，为中外合资企业。1992年2月，公司A、B股同时在深交所上市，成为中国最早的上市公司之一。经过25年的发展，集团目前拥有下属企业33家，总资产100余亿元，员工近万人，是中国玻璃行业最具竞争力和影响力的大型企业。

南玻集团主营业务为：玻璃原材料（石英砂）开采、高档浮法玻璃原片、工程及建筑玻璃、精细玻璃、光伏科技绿色能源产品（高纯硅材料、太阳能超白玻璃、晶体硅太阳能电池、薄膜太阳能电池及其组件）等产品的研制、开发、生产经营及设备技术的咨询和服务，以及投资控股、兴办实业等。

从优质砂矿基地和现代化的浮法玻璃生产基地，到先进的工程玻璃制造基地，南玻集团拥有从硅砂—玻璃原片—玻璃深加工完整的传统玻璃产业链；集团同时在东莞麻涌建立了以太阳能超白玻璃、太阳能电池为主要产品的绿色能源产业园；在湖北宜昌建立了高纯多晶硅生产基地，形成了从多晶硅—硅片—电池片—太阳能电池的太阳能产业链。

南玻集团在国内建有完整的产销网络体系，并在中国香港、澳大利亚、中东等地设有子公司，产品远销美国、日本等多个国家，是国内玻璃行业中产品门类最全、技术含量最高、品牌最响并完成了全国性产业布局的龙头企业，也是中国最大的工程及建筑玻璃供应商。

工程玻璃事业部

工程玻璃是南玻集团最重要的品牌支柱产业之一。工程玻璃事业部总部位于深圳蛇口，在深圳、东莞、天津、成都、吴江等地设有大型生产基地，在国内近50个大中型城市布有销售网点，在中国香港、澳大利亚、中东等地设有子公司，在日本、美国、俄罗斯设有销售办事机构，产品远销世界各地。

南玻集团工程玻璃产品涵盖全部种类的玻璃，产品包括：低辐射镀膜玻璃（Low-E玻璃）、热反射镀膜玻璃、中空玻璃、夹层玻璃、图案夹层玻璃、彩釉玻璃、热弯玻璃、钢化玻璃、弯钢化玻璃、防火玻璃及由上述玻璃构成的各种复合玻璃产品。

目 录

第一章 薄膜技术的光学基础	(1)
第一节 几何光学基本定律	(1)
第二节 波动光学	(6)
第三节 色度学基础	(28)
第二章 建筑玻璃的节能性及其应用	(47)
第一节 热量传递的三种基本方式	(47)
第二节 透过玻璃传递的热能	(50)
第三节 常用节能玻璃的制造	(54)
第四节 国内外 Low-E 玻璃概况及应用	(58)
第五节 常用建筑玻璃的节能特性及其使用建议	(74)
第六节 玻璃节能效果的模拟计算对比	(76)
第七节 建筑玻璃的选择	(78)
附：镀膜玻璃常见术语解释	(83)
第三章 磁控溅射技术在热反射镀膜玻璃中的应用	(89)
第一节 磁控溅射概述	(89)
第二节 热反射镀膜玻璃概述	(94)
第三节 热反射镀膜产品的膜层设计及膜层设计软件在工艺调试中的应用	(95)
第四节 热反射镀膜玻璃产品的工艺控制	(102)
第五节 热反射镀膜产品的检验指标和质量控制	(106)
第六节 热反射镀膜产品生产中常见问题及其解决方法	(109)
第四章 磁控溅射技术在低辐射玻璃中的应用	(112)
第一节 单银低辐射玻璃	(112)
第二节 双银低辐射玻璃	(125)
第三节 低辐射玻璃工艺控制的实操经验	(137)
第五章 模拟设计软件在工艺调试中的应用	(156)
第一节 软件功能介绍	(157)
第二节 主菜单操作技术要点	(201)
第三节 参数拟合设置	(205)
第四节 软件的实例使用指南	(211)

第五节	软件的实际操作及实例应用	(222)
第六节	软件数据采集功能简介	(231)
第七节	软件计算量的相关背景信息介绍	(235)
第六章	建筑镀膜生产线的在线检测系统	(241)
第一节	系统简介	(241)
第二节	系统安装	(245)
第三节	网络分布与设置	(245)
第四节	测量软件操作	(247)
第五节	数据管理与查询	(286)
第六节	更换仪器灯	(292)
第七节	反射标准板的标定与更换	(293)
第八节	注意事项	(294)
附录 I	阳光控制镀膜玻璃	(295)
附录 II	低辐射镀膜玻璃	(304)
参考文献	(311)

第一章 薄膜技术的光学基础

第一节 几何光学基本定律

肉眼能感觉到的光称为可见光，它来自各种自然光源和人造光源。光实质是电磁波，可见光的电磁波波长在 380 ~ 760 nm 之间。从人们的直观感受来看，光是直线传播的。在物体尺度较大的条件下，撇开光的波动本质而用几何学方法研究光在透明介质中传播规律的理论体系，称为几何光学。几何光学是以光现象的基本实验定律为基础，用几何学的方法研究光的传播规律。光的直线传播定律、反射定律和折射定律是几何光学的基本定律。

一、光的直线传播定律

在各向同性的均匀透明介质中，光线沿直线传播。人影、小孔成像、木工观察平面直不直时都是该现象的验证。

二、光的独立传播定律

不同的光源发出的光线在空间某点相遇时，彼此互不影响。在光线的交会点上，光的强度是各光束的简单叠加，离开交会点后，各个光束仍按原方向传播。

三、光的反射定律

1. 光的反射

当光线投射到两种介质的分界面上时，一部分光线改变了传播方向，返回第一介质里继续传播（图 1-1），这种现象称为光的反射。

自然界的反射分为漫反射（不规则反射）和镜面反射（规则反射）。

当介质的分界面（反射面）粗糙、凹凸不平时，即使入射光线是平行的，反射光线并不平行，这种反射称为漫反射（不规则反射）。

当介质的分界面（反射面）光滑平整时，入射光是平行的，反射光仍然平行地反射，称为镜面反射（规则反射）。

2. 反射定律

(1) 反射光线在入射光线与法线所决定的平面内，反射光线与入射光线分居在法线两侧（图 1-1）；

(2) 反射角 i_2 等于入射角 i_1 ：

$$i_1 = i_2$$

(1-1)

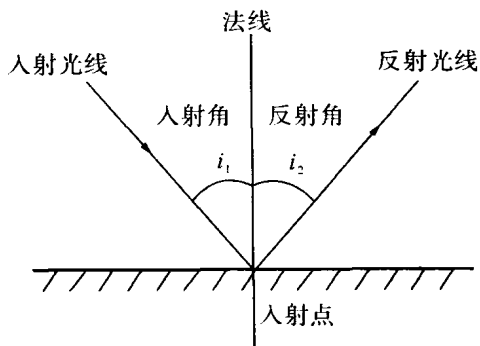


图 1-1 光的反射示意图

四、光的折射定律

1. 光的折射

光线到达两个介质的界面时，一部分光线在界面上反射，另一部分光线改变传播方向，进入到另一种介质里继续传播（图 1-2），这种现象称为光的折射。

光的折射是普遍存在的物理现象，如插入水中的筷子，浸入水中的部分与空气中的部分有弯折现象；观察位于池底的物体有变浅现象。

2. 折射定律

(1) 折射光线在入射光线和法线所决定的平面内，折射光线和入射光线分居法线两侧（图 1-2）；

(2) 光的折射角与入射角满足如下关系：

$$\frac{\sin i}{\sin i'} = \text{常数} \quad (1-2)$$

3. 折射率

光在真空中的传播速度 $c = 3 \times 10^8 \text{ km/s}$ ，光在其他介质里传播速度要下降，如：在水中， $v_{\text{水}} = \frac{3}{4}c$ ；玻璃

中， $v_{\text{玻}} = \frac{2}{3}c$ ，等等。

这种引起光的传播速度发生变化的现象，反映出介质的一种光学特性，称作介质的绝对折射率，简称折射率（ n ）。

$$n = \frac{c}{v} \quad (1-3)$$

其中， $c > v$ ， $n > 1$ 。

不同的介质有不同的折射率，真空折射率为 1，在标准压力下，20℃时空气折射率为 1.00028，即空气的折射率 $n \approx 1$ ；水 $n = 1.33$ ；玻璃 $n = 1.50 \sim 2.0$ 。由于光在介质中的传播速度是随光的波长而改变的，因此折射率也是波长的函数。

折射定律可表示成： $\frac{\sin i}{\sin i'} = \frac{n_2}{n_1}$ ，即

$$n_1 \cdot \sin i = n_2 \cdot \sin i' \quad (1-4)$$

4. 光的全反射

光的传播速度大的介质，也即折射率小的介质称为光疏媒质。光的传播速度小的介质，也即折射率大的介质称为光密媒质。如水相对于空气是光密媒质，相对于玻璃则是光疏媒质。

当光线从光密媒质进入光疏媒质时，折射角将大于入射角，随着入射角的增大，折射角也增大。若折射角为 90°时，折射光线沿界面折射，入射角再增大，折射光线将变成反射光线，遵循反射定律。此时，全部光线均返回光密媒质，无折射，这种现象称为全反射。

对应于折射角为 90°时的入射角 A 称为临界角（图 1-3）。

根据折射定律，介质的临界角对于真空或空气有：

$$n_1 \cdot \sin A = n_2 \cdot \sin 90^\circ$$

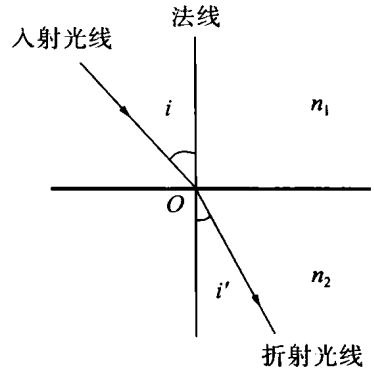


图 1-2 光的折射示意图

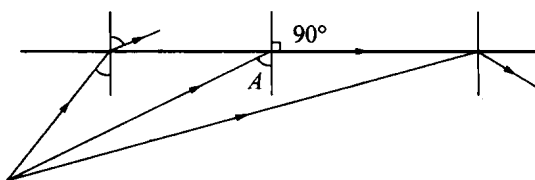


图 1-3 全反射示意图

设 $n_1 = n$, $n_2 = 1$, 则

$$\sin A = \frac{1}{n} \quad (1-5)$$

全反射的两个条件:

- (1) 光线从光密媒质到光疏媒质;
- (2) 入射角大于临界角。

全反射是自然界中常见的现象,如玻璃中的气泡特别明亮是全反射的结果;近视眼镜片的涡旋现象,就是因为射入镜片的光线在周边发生折射和全反射的结果。

如光线从玻璃介质射向玻璃与空气的界面时, $n_1 = 1.5$, $n_2 = 1$, 临界角 $A = 42^\circ$ 。

利用全反射镜来改变光线方向,比起一般的平面镜来,能量损失要小得多。如图 1-4 所示, ABC 为等腰直角三角形棱镜的主截面。当光线垂直入射到 AB 面上时,反射损失最小(对玻璃来说约 4%),并按原方向进入棱镜射到 AC 面上,此时入射角等于 45° ,比玻璃到空气的临界角大,因而产生全反射,反射光强度几乎没有损失。由于反射角也是 45° ,光线就偏折了 90° ,以垂直于 BC 面的方向射出棱镜。因为是垂直入射,反射损失很小,因此在光学仪器中经常用它作为把光线转向 90° 的光学元件。

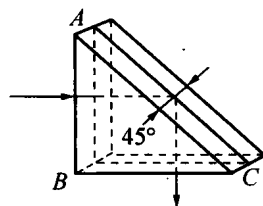


图 1-4 全反射镜改变光线方向

全反射的应用很广。近年来发展很快的光学纤维,就是利用全反射规律而使光线在弯曲的光纤内传播的光学元件。一般使用的光学纤维是由直径约几微米的多根或单根玻璃纤维组成的,每根纤维分内外两层,由内层折射率较高(折射率为 1.8 左右)的纤芯和外层折射率较低(折射率为 1.4 左右)的包层组成。这样当光由内层射到两层纤维之间的界面时,入射角小于临界角的那些光线,根据折射定律逸出纤维;而入射角大于临界角的光线,由于全反射,在两层界面上经历多次反射而传到光纤另一端(图 1-5)。

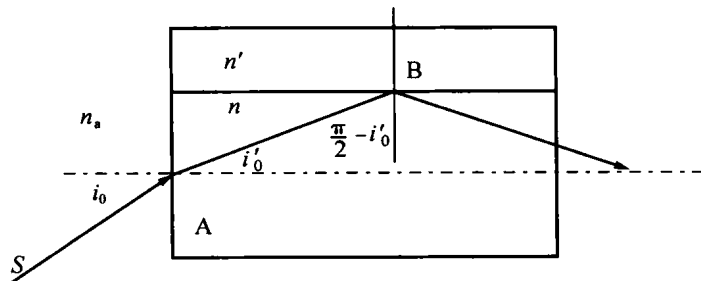


图 1-5 全反射在光学纤维中应用的示意图

当 $\frac{\pi}{2} - i'_0$ 大于临界角时, 就发生全发射。

根据折射定律, $n_a \sin i_0 = n \sin i'_0$

可以得到: $i_0 = \arcsin \left(\frac{1}{n_a} \sqrt{n^2 - n'^2} \right)$

当入射角 $i < i_0$ 时, 光线在光纤内全反射传送; 当入射角 $i > i_0$ 时, 光线将透过内壁进入包层, 逸出纤维。

$n_a \sin i_0$ 被称为光纤的数值孔径。 i_0 越大, 可以进入光纤的光能就越多, 也就是光纤能够传送的光能越多。

生活中可见到许多全反射的现象, 图 1-6 中的海市蜃楼即光的全反射实例。



图 1-6 海市蜃楼

五、费马原理与折射定律

1. 光程

设光在均匀介质中经过的几何路程 l , 所用的传播时间为

$$t = \frac{l}{v} = \frac{l}{c/n} = \frac{nl}{c} \quad (1-6)$$

式中, n 为介质折射率, c 为真空中的光速, v 为光在介质中的传播速度, 我们定义介质折射率与光经过的几何路程的乘积为光程, 并记作 L , 则光程可表示为

$$L = nl = ct \quad (1-7)$$

上式表明光在某种介质中经过一段几何路程 l 所对应的光程, 等于在相同的时间内光在真空中经过的几何路程。

若光线从 A 出发, 中间经过 N 种不同的均匀介质而到达 B 点, 则总光程 L 为

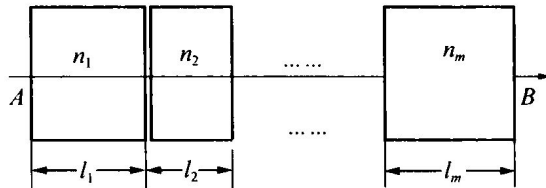


图 1-7 光经过多种介质的情形

$$L = n_1 l_1 + n_2 l_2 + \cdots + n_m l_m = \sum n_i l_i \quad (1-8)$$

如果介质的折射率连续变化, 则上述求和变为积分

$$L = \int_A^B n dl \quad (1-9)$$

同频率的两束光波, 分别在两种不同的介质中传播, 在相同的传播时间内, 两光波所传播的几何路程不同。即 $\Delta t = \frac{l_1}{v_1} = \frac{l_2}{v_2} = \frac{l_1}{\frac{c}{n_1}} = \frac{l_2}{\frac{c}{n_2}}$ 。

即 $n_1 l_1 = n_2 l_2$ (1-10)

由上式可见：光在不同的介质中，在相同的时间内传播的几何路程不同，但光程相同。可以这样理解：光程就是光在介质中通过真实路程所需时间内，在真空中所能传播的距离。借助光程，可将光在各种介质中走过的路程折算为在真空中的路程，便于比较光在不同介质中传播所需时间长短。

2. 费马原理

费马在 1657 年首先提出：光在 P_1 、 P_2 两点间传播时，总是沿光程为极值的路程传播（图 1-8），极值的含义为极小值、极大值、恒定值。

其数学表达式如下：

$$\delta(P_1 P_2) = \delta \left[\int_{P_1}^{P_2} n ds \right] = 0 \quad (1-11)$$

费马原理是几何光学的基本原理，用以描绘光在空间两定点间的传播规律。由费马原理可以推导出几何光学的全部基本实验定律，可以确定光线的传播方向、路径。

3. 折射定律是费马原理的必然结果

设两均匀介质的分界面是平面，它们的折射率分别为 n_1 和 n_2 。光线通过第一介质中指定的 A 点后经过界面而达到第二介质中指定的 B 点。为了要确定实际光线的路径，通过 A 、 B 两点作平面垂直于界面， OO' 是它们的交线（图 1-9），则实际光线在界面上的折射点 C 就可用费马原理来确定。

首先根据费马原理，可以确定折射点 C 必在交线 OO' 上。这是因为，如果有另一点 C' 位于线外，则对应于 C' ，必可在 OO' 线上找到它的垂足 C'' 。由于 $AC' > AC''$ ， $C'B > C''B$ ，故光程（ $AC'B$ ）总是大于光程（ $AC''B$ ），而非极小值。这就证明了入射面和折射面必在同一平面内。

在图中，作 x 、 y 坐标轴。指定点 A 、 B 的坐标分别为 (x_1, y_1) 和 (x_2, y_2) ，未知点 C 的坐标为 $(x, 0)$ 。则

$$n_1 \overline{AC} + n_2 \overline{CB} = n_1 \sqrt{(x - x_1)^2 + y_1^2} + n_2 \sqrt{(x_2 - x)^2 + y_2^2}$$

其次再来确定 C 点在 OO' 上的位置。 C 点在 A' 、 B' 之间时，光程必小于 C 点在 $A'B'$ 以外的相应光程，即 $x_1 < x < x_2$ 。于是光程（ ACB ）等于

$$\begin{aligned} \frac{d(ABC)}{dx} &= \frac{n_1 (x - x_1)}{\sqrt{(x - x_1)^2 + y_1^2}} - \frac{n_2 (x_2 - x)}{\sqrt{(x_2 - x)^2 + y_2^2}} \\ &= \frac{n_1 \overline{A'C}}{AC} - \frac{n_2 \overline{C'B}}{CB} \\ &= (n_1 \sin i_1 - n_2 \sin i_2) \end{aligned}$$

根据费马原理，此时光程应取最小值，即上式对 x 的一阶导数应该等于零。由此得

$$n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2$$

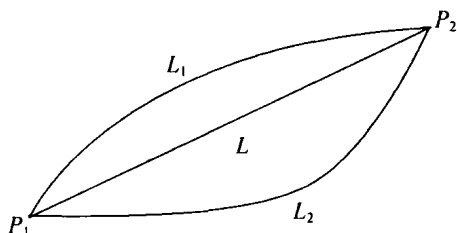


图 1-8 费马原理示意图

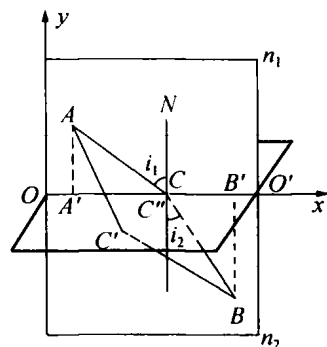


图 1-9

这就是折射定律。

六、光路可逆原理

在反射和折射定律中，光线如果沿反射（或折射）方向入射时，则相应的反射（或折射）光将沿原来入射光的方向反射（或折射）出去，即光路是可逆的。

第二节 波动光学

一、光的电磁理论

19世纪70年代，麦克斯韦发展了电磁理论，从而导致电磁波的发现。电磁波在不同介质的界面上发生反射和折射现象，在传播中出现干涉、衍射和偏振现象，而根据当时已有的知识，光波也具有完全相似的干涉、衍射和偏振等现象，它们之间有什么联系呢？电磁波在真空中的速度

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$$

式中， ϵ_0 为真空中的介电常数， μ_0 为真空磁导率。在实验误差范围内， c 与已测得的光速相等。于是麦克斯韦得出这样的结论：光是某一波段的电磁波， c 就是光在真空中的传播速度。

介质中电磁波的速度为

$$u = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r \mu_r}}$$

式中， ϵ_r 为介质中的介电常数， μ_r 为介质磁导率。由式（1-3）可知，折射率

$$n = \frac{c}{u}$$

则

$$n = \sqrt{\epsilon_r \mu_r}$$

电场强度 E 和磁场强度 H 都垂直速度 u ，电磁波是横波。维纳实验证明，对人的眼睛或感光仪器起作用的是电场强度 E ，所以光波中的振动矢量是指电场强度 E 。

电磁波中能为人眼所感受的波长在 $3900 \sim 7600 \text{ \AA}$ 之间，对应的频率范围为 $4.1 \times 10^{14} \sim 7.5 \times 10^{14} \text{ Hz}$ 。

人眼的视网膜或物理仪器所检测到的光的强弱都是由能流密度（单位时间内通过与波的传播方向垂直的单位面积的能量）的大小来决定的。任何波动所传递的能流密度与振幅的平方成正比，所以，光的强度或光照度（即平均能流密度 \bar{I} ）为

$$\bar{I} \propto E^2$$

在波动光学中，主要是讨论光波所到之处的相对光照度。因而通常只需计算光波在各处的振幅的平方值，而不需要计算各处的光照度的绝对值。

二、波动的独立性、叠加性及简谐波的表达式

(一) 机械波的独立性和叠加性

在机械振动和机械波中，从几个振源发出的波相遇于同一区域时，只要振动不十分强烈，就可以保持自己的特性（频率、振幅和振动方向等），按照自己原来的传播方向继续前进，彼此不受影响。这就是波动独立性的表现。

在相遇区域内，介质中一点的合位移是各波单独传播时在该点所引起的位移的矢量和，因此，可以简单地、没有任何畸变地把各波的分位移按照矢量加法叠加起来，这就是波动的叠加性。这种叠加性是以独立性为条件的，是最简单的叠加。

通常情况下，波动方程是线性微分方程，简谐波的表达式就是它的一个解。如果有两个独立的函数都能满足同一个给定的微分方程，那么这两个函数的和也必然是这个微分方程的解。这就是两个具有独立性的波的叠加的数学意义。

(二) 光波的描述

1. 光波的几何描述

波动是振动在空间的传播，波动所存在的空间称为波场。波场中每点的物理状态随时间作周期性变化，而在每一瞬间波场中各点物理状态的空间分布也呈现一定的周期性，通常把某一时刻振动相位相同的各点轨迹称为波面，把能量传播的路径称为波线。在各向同性的介质中，波线与波面处处正交。

2. 光波的数学描述

任一理想的单色光场可用下述的波动表达式描述：

$$E(r, t) = A(r) \cos[\omega t - \varphi(r)]$$

式中， r 为距离， t 为时间， ω 为圆频率。 $A(r)$ 给出了光场中的振幅分布， $\varphi(r)$ 是各点相位比原点落后的值，它确定了光场中相位的相对分布。只要给定光场的振幅分布和相位分布，则该频率的单色光场就完全确定了。

上式的复数表达式可写为：

$$E(\bar{r}, t) = A(r) e^{-i[\omega t - \varphi(r)]} = A(\bar{r}) \cos[\omega t - \varphi(r)] - iA(r) \sin[\omega t - \varphi(r)]$$

其实部就是单色光场的波动表达式：

$$E(r, t) = A(r) e^{i\varphi(r)} e^{-i\omega t} = E(r) e^{-i\omega t}$$

$E(r)$ 称为复振幅，包含了我们感兴趣的信息。其模量 $A(r)$ 代表振幅在空间的分布，其幅角 $\varphi(r)$ 代表相位的空间分布。只要给定光场的复振幅，则该频率的单色光场就完全确定了。

$$E(r, t) = A \cos(\omega t - kr + \varphi_0)$$

对于单色平面波

$$E(r) = A e^{i(kr - \varphi_0)}$$