

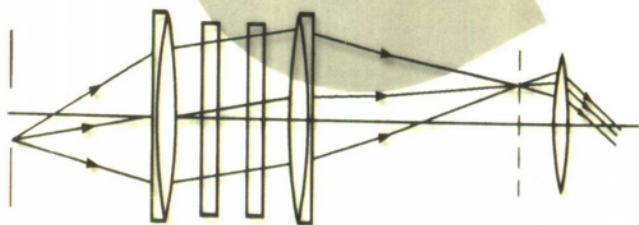
高等学校适用教材

JILIANG GUANGXUE

# 计量光学

李小亭 胡金敏 编著

中国计量出版社



高等学校适用教材

# 计 量 光 学

李小亭 胡金敏 编著

中国计量出版社

## 图书在版编目 (CIP) 数据

计量光学/李小亭, 胡金敏编著. —北京: 中国计量出版社, 2003  
高等学校适用教材  
ISBN 7-5026-1789-2

I. 计… II. ①李… ②胡… III. 光学计量—高等学校—教材  
IV. TB96

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 082785 号

## 内 容 提 要

本书共十四章, 包括应用光学、物理光学和激光技术三部分。应用光学以几何光学基本原理为基础, 讨论了平面光学系统、球面光学系统的成像规律, 各光学零件对光路的作用, 像差理论以及这些基本理论在望远系统、显微系统、投影系统、细分系统等光学仪器上的应用; 物理光学以光的干涉、衍射原理为基础, 详细讨论了它们在精密计量中的应用; 介绍了激光产生原理、特性、种类以及在精密测量中的应用。

中国计量出版社出版

北京和平里西街甲 2 号

邮政编码 100013

电话 (010) 64275360

E-mail jlfxb@263.net.cn

北京迪鑫印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

版权所有 不得翻印

\*

787 mm×960 mm 16 开本 印张 16.5 字数 276 千字

2003 年 10 月第 1 版 2003 年 10 月第 1 次印刷

\*

印数 1—3 000 定价: 25.00 元

# 质量技术监督高校教材

## 编 审 委 员 会

主 任 张玉宽

副主任 马纯良 孙秀媛

委 员 瞿兆宁 裴晓颖 黄 夏 何伟仁 李小亭  
张 艺 宋明顺 杨建华 吴宁光 史菊英  
赵玉禄 孙克强 周志明 张莉莉 王庆仁  
许吉彬 刘宝荣 韦录强 张万岭 孙振江  
陈小林 朱和平 李素琴 刘宝兰 刘文继  
张桂琴

# 出版前言

随着我国加入世界贸易组织，社会主义市场经济和质量技术监督事业的迅速发展，迫切需要大量的质量技术监督专业人才。质量技术监督高等专业教育在质量技术监督教育事业中占有重要地位，对提高在职人员的素质、改善队伍结构、培养新生力量具有重要意义。大力发展质量技术监督高等专业教育，将对质量技术监督事业产生深远的影响。

近年来，全国各地质量技术监督院校办学条件不断改善，招生规模不断扩大，教学质量和水平不断提高。与此同时，在质量技术监督教育中，高等教育所占比重不断增大。为了适应这种形势，加快质量技术监督院校教材建设的步伐，根据质量技术监督院校对专业教材的实际需求，我们组织全国质量技术监督及相关院校和单位编写了有关标准化、计量、质量等方面的系列专业基础课和专业课教材。

这套教材主要是根据质量技术监督高等专业教育的需要编写的。在目前情况下，存在多种形式的质量技术监督高等和中等专业教育，因此，在编写过程中从内容选取、结构设计、深浅程度等方面考虑了适用的多样性。质量技术监督普通中等专业教育、职业教育和人员技术培训等，可参考本套教材的基本内容，适当调整使用。

原国家质量技术监督局政策法规宣传教育司进行了本套教材的前期组编工作。参加教材审定工作的院校和单位有：中国计量学院、河北大学质量技术监督学院、四川省技术监督学校、山东省质量工程学校、广西计量学校、河南省质量工程学校、天津市渤海职业中等专业学校、吉林省技术监督职工中专学校、北京市

质量技术监督培训中心等。在教材的编写、审定等工作中，中国计量出版社、河北大学质量技术监督学院等单位做了很多具体、细致的工作。

这套教材的编写工作是在时间紧、难度大的情况下进行的，虽然经过多方面的努力，但仍可能存在很多不足之处，甚至于错误，我们拟在使用过程中听取各方面意见，于适当时机组织修订。

**国家质量监督检验检疫总局人事司**

**2003 年 4 月**

## 编者的话

本书为质量技术监督系列高校教材之一,可供高等专科学校、高等职业技术学院计量及测控类专业作为专业基础课教材,亦可供从事计量和光学工作及相关的技术人员参考。

该书的编写以突出重点、侧重实用、兼顾知识的前瞻性为原则,力图将理论知识的基础作用与实用性进行有机的统一。在编写过程中,考虑到学员的起点不一,对专业要求也有差异,因此,为了保证教材的完整性和理论深度,书中有一些内容进行了数学推导(主要为物理光学部分),标题前用\*号标示,以供参考。但总体力求简明易懂、循序渐进、理论联系实际。为了更好地理解和巩固基本知识,每章后面编写了一定数量的习题。该书建议教学时数为60学时,其中实验14学时(实验指导书另编)。

全书共十四章。分为应用光学、物理光学和激光技术三部分。应用光学以几何光学基本原理为基础,讨论了平面光学系统、球面光学系统的成像规律,各光学元件对光路的作用,像差理论以及这些基本理论在望远系统、显微系统、投影系统、细分系统等光学仪器上的应用。光学仪器的结构中必不可少的一部分是光源,就如何合适地选择光源进行了介绍;物理光学以光的干涉、衍射原理为基础,详细讨论了它们在精密计量中的应用;激光作为一种新型光源,其应用前景越来越广泛,为此,本书讨论了其产生原理、特性、种类以及在精密测量中的应用。

本书由河北大学李小亭同志(第一章至第十一章)和胡金敏同志(绪论、第十二章至第十四章)编写。全书由河北大学物理与科学技术学院的张连水教授、李晓苇教授主审。本教材编写过程中得到了中国计量出版社的大力支持,在此一并表示感谢。

由于时间仓促,加之作者水平有限,书中错误及不妥之处在所难免,恳请读者批评指正。

编 者

2003年6月

# 目 录

|                                |        |
|--------------------------------|--------|
| 绪 论 .....                      | ( 1 )  |
| 第 1 章 几何光学的基本理论 .....          | ( 3 )  |
| § 1—1 基本方法 .....               | ( 3 )  |
| § 1—2 基本定律 .....               | ( 4 )  |
| § 1—3 费马原理 .....               | ( 7 )  |
| § 1—4 全反射现象 .....              | ( 9 )  |
| § 1—5 物像的基本概念 .....            | ( 12 ) |
| § 1—6 光学材料 .....               | ( 15 ) |
| 习题 .....                       | ( 18 ) |
| 第 2 章 平面光学元件及其成像原理 .....       | ( 20 ) |
| § 2—1 平面反射镜 .....              | ( 20 ) |
| § 2—2 平行平面玻璃板 .....            | ( 25 ) |
| § 2—3 反射棱镜 .....               | ( 28 ) |
| § 2—4 折射棱镜与光楔 .....            | ( 34 ) |
| 习题 .....                       | ( 36 ) |
| 第 3 章 球面折射及成像特征 .....          | ( 38 ) |
| § 3—1 坐标选择和符号规则 .....          | ( 38 ) |
| § 3—2 单个球面折射成像光路计算公式 .....     | ( 40 ) |
| § 3—3 近轴区物点经单个折射球面成像光路计算 ..... | ( 42 ) |
| § 3—4 近轴区成像的放大率公式及传递不变量 .....  | ( 44 ) |
| § 3—5 平面物体以细光束经单个折射球面的成像 ..... | ( 46 ) |
| § 3—6 共轴球面系统 .....             | ( 48 ) |
| § 3—7 薄透镜 .....                | ( 49 ) |
| § 3—8 厚透镜成像 .....              | ( 56 ) |
| § 3—9 透镜组成像 .....              | ( 62 ) |
| 习题 .....                       | ( 65 ) |

|                         |         |
|-------------------------|---------|
| <b>第 4 章 光学系统中光束的限制</b> | ( 68 )  |
| § 4—1 概述                | ( 68 )  |
| § 4—2 光学系统的孔径光阑、入瞳和出瞳   | ( 70 )  |
| § 4—3 光学系统的视场光阑和入射窗、出射窗 | ( 75 )  |
| § 4—4 远心光路              | ( 77 )  |
| 习题                      | ( 79 )  |
| <b>第 5 章 像差</b>         | ( 81 )  |
| § 5—1 概述                | ( 81 )  |
| § 5—2 球差                | ( 82 )  |
| § 5—3 正弦差及慧差            | ( 85 )  |
| § 5—4 像散与像面弯曲           | ( 91 )  |
| § 5—5 畸变                | ( 94 )  |
| § 5—6 色差                | ( 95 )  |
| 习题                      | ( 97 )  |
| <b>第 6 章 眼睛和放大镜</b>     | ( 98 )  |
| § 6—1 人眼的构造             | ( 98 )  |
| § 6—2 眼睛的缺陷及矫正          | ( 99 )  |
| § 6—3 人眼的分辨本领、瞄准精度与估读精度 | ( 101 ) |
| § 6—4 放大镜和视角放大率         | ( 102 ) |
| 习题                      | ( 104 ) |
| <b>第 7 章 望远系统</b>       | ( 105 ) |
| § 7—1 望远镜的一般特性          | ( 105 ) |
| § 7—2 自准直平行光管及其工作原理     | ( 107 ) |
| § 7—3 自准直平行光管的三种基本光路    | ( 109 ) |
| § 7—4 平直度检查仪光路系统        | ( 111 ) |
| 习题                      | ( 112 ) |
| <b>第 8 章 显微系统</b>       | ( 113 ) |
| § 8—1 显微镜光学系统           | ( 113 ) |
| § 8—2 显微镜的光束限制          | ( 115 ) |
| § 8—3 显微镜的分辨本领          | ( 116 ) |

|               |                                         |              |
|---------------|-----------------------------------------|--------------|
| § 8—4         | 显微镜的对准精度 .....                          | (118)        |
| § 8—5         | 显微镜的景深 .....                            | (119)        |
| § 8—6         | 显微镜的物镜和目镜 .....                         | (120)        |
| § 8—7         | 显微镜的照明系统 .....                          | (123)        |
| § 8—8         | 显微镜系统的典型光路——19JA 型万能工具显微镜<br>光路原理 ..... | (124)        |
| § 8—9         | 光学上的几种瞄准定位方法 .....                      | (125)        |
| 习题            | .....                                   | (130)        |
| <b>第 9 章</b>  | <b>投影光学系统 .....</b>                     | <b>(131)</b> |
| § 9—1         | 投影仪的基本原理 .....                          | (131)        |
| § 9—2         | 投影仪的典型光路——TTY 台式投影仪 .....               | (132)        |
| 习题            | .....                                   | (134)        |
| <b>第 10 章</b> | <b>细分系统 .....</b>                       | <b>(135)</b> |
| § 10—1        | 细分系统原理 .....                            | (135)        |
| § 10—2        | 莫尔条纹形成原理及其在细分系统中的作用 .....               | (139)        |
| 习题            | .....                                   | (142)        |
| <b>第 11 章</b> | <b>光源的类型及选择原则 .....</b>                 | <b>(143)</b> |
| § 11—1        | 光源的类型 .....                             | (143)        |
| § 11—2        | 光源的选择 .....                             | (144)        |
| 习题            | .....                                   | (146)        |
| <b>第 12 章</b> | <b>光的干涉原理及在精密测量中的应用 .....</b>           | <b>(147)</b> |
| § 12—1        | 光波干涉原理 .....                            | (147)        |
| § 12—2        | 光的相干条件 .....                            | (150)        |
| § 12—3        | 双缝干涉的光程差计算 .....                        | (151)        |
| § 12—4        | 影响干涉条纹可见度的因素 .....                      | (156)        |
| § 12—5        | 平行平板的干涉 .....                           | (160)        |
| § 12—6        | 楔形平板的干涉 .....                           | (165)        |
| § 12—7        | 平板干涉在测量中的应用 .....                       | (170)        |
| § 12—8        | 平行平板的多光束干涉 .....                        | (174)        |
| § 12—9        | 干涉滤色片 .....                             | (180)        |
| § 12—10       | 精密测量中的干涉仪 .....                         | (184)        |

|                                     |              |
|-------------------------------------|--------------|
| 习题 .....                            | (191)        |
| <b>第 13 章 光的衍射原理及其在计量中的应用 .....</b> | <b>(193)</b> |
| § 13—1 光的衍射现象及衍射原理 .....            | (193)        |
| § 13—2 菲涅尔圆孔衍射 .....                | (196)        |
| § 13—3 夫琅和费单缝衍射 .....               | (204)        |
| § 13—4 夫琅和费圆孔衍射 .....               | (209)        |
| § 13—5 夫琅和费双缝衍射 .....               | (215)        |
| § 13—6 光栅衍射 .....                   | (218)        |
| § 13—7 光的衍射在精密计量中的应用 .....          | (225)        |
| 习题 .....                            | (228)        |
| <b>第 14 章 激光技术简介 .....</b>          | <b>(230)</b> |
| § 14—1 激光的基本原理 .....                | (230)        |
| § 14—2 激光器的基础知识 .....               | (234)        |
| § 14—3 激光在测量中的应用 .....              | (243)        |
| 习题 .....                            | (248)        |
| 主要参考文献 .....                        | (249)        |
| 部分习题参考答案 .....                      | (250)        |

# 绪 论

光与人类的生活、生产发展紧密相连，所以，人们很早就开始了对光的认识，以至形成了一门独立的学科——光学。它是研究光的发生、传播，光的本性以及与其他物质相互作用的科学。人类对光学的研究可分为两大分支：一个分支是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，这部分内容称为几何光学或应用光学；另一分支是研究光的本性，称为物理光学。

光学是一门古老的科学，其发展源远流长。纵观光学发展的漫长历史，可将其概括为以下几个阶段。

萌芽时期：光学的起源应追溯到远古时期。早在我国春秋战国时期，墨翟所著的《墨经》中关于光的直线传播原理和光在镜面上的反射等现象，比欧洲等其他国家要早 100 多年。从这期间到 15 世纪末和 16 世纪初，除了对光的直线传播、反射和折射的现象有所认识之外，在光的反射和透镜的应用方面，逐渐有些成就。如人们借助于对人眼构造的认识，发明了凸透镜，对凹面镜、凸面镜的成像规律有了创造性的阐述。公元 1299 年，发明了眼镜，并在这一时期相继出现了暗箱、幻灯等光学元件。

几何光学时期：这一时期(17~18 世纪)可以称为光学发展史上的转折点。在这时期建立了光的反射定律、折射定律，奠定了几何光学发展的基础。同时为了扩大人眼的观察能力，出现了光学仪器，第一架望远镜、显微镜就此诞生，它们的发明为天文学、航海业、生物学的发展提供了强有力的工具。

此外，从 17 世纪开始，对光的本性有了初步的认识，观察到衍射现象，在对白光能够产生色散现象以及牛顿圈现象的基础上，1704 年，牛顿提出了光的微粒流理论。他认为光是从光源发出来，在均匀介质内由于惯性而作匀速直线运动，并以此解释光的反射和折射理论。但在解释牛顿圈和衍射现象时，却遇到了困难。以惠更斯为代表的科学家认为光是在“以太”中传播的波。所谓“以太”是一种假想的弹性物质，充满整个宇宙空间。他的理论成功地解释了光的反射和折射现象。但他仍旧没有摆脱几何光学的观念，没有指出光现象的周期性，因此不能说明光的干涉和衍射等有关光的

波动本性的现象。这一时期可以说是几何光学向波动光学过渡的时期。

波粒二象性形成时期：19 世纪，初步发展起来的波动光学体系已经形成。托马斯·杨最先用双缝干涉做出了干涉实验，菲涅尔补充了惠更斯原理，以此原理很好地解释了光的衍射现象。1865 年麦克斯韦提出了著名的电磁场理论，并预言了电磁波的存在。这个理论在 1888 年被赫兹的实验所证实。这些使得光的波动说深入人心。19 世纪末到 20 世纪初，为了解释光电效应等现象，爱因斯坦提出了光量子理论，使得光的粒子性又被证实。至此，为了将这两个有关光的本性的概念统一，认为光具有波动性和粒子性，即具有波粒二象性。

当然，随着科学技术的不断发展，一方面，对光的本性认识并没有完结；另一方面，光学的应用越来越广泛，特别是 20 世纪 60 年代激光问世以来，它已成为现代物理学和现代科学技术前沿科学的重要组成部分。并由此形成了许多分支学科——薄膜光学、集成光学、纤维光学、红外技术、光计算机等等。这些学科的发展，充分展示了光学发展的光辉前景。

计量光学的任务就是利用光学的基本理论，设计和研究各种测试用的计量仪器。而计量仪器的特点是要求“准”，即必须保证仪器有足够高的准确度。如人们利用显微镜来观察细小的物体，用望远镜来观测远距离的目标，用光的干涉原理以光波波长为基准进行各种干涉测长、测角以及精密工件表面粗糙度测量，利用光谱仪来研究物质内部的组成等，这些都大大提高了测量准确度。可以说，在计量工程中使用的准确度较高的计量仪器，几乎都是光、机、电的组合。而其中光学系统的优劣往往对整台设备的性能具有重要的影响。因此，计量光学作为一门重要的测控技术与仪器专业的基础课，必须认真学好。在学习中，要求我们除了学好计量光学基本理论的同时，很重要的一点就是必须与实际测量相结合，并注意与其他课程的联系。这样才能真正掌握现代光学计量仪器的原理和应用，并在实际工作中不断改进和创新。

# 第 1 章

## 几何光学的基本理论

### § 1—1 基本方法

把光的概念和几何中的点、线、面有机地联系起来，就形成了几何光学的几个基本概念。它是讨论和解决问题的一种简便的手段。现代光学的一部分就是建立在这些概念基础上的。

#### 一、发光点

从物理的观点来看，光源是一个光的辐射体。当光源的大小和其辐射能的作用距离相比可以忽略不计时，就称之为发光点。在几何光学中，发光点被认为是一个既无体积又无大小的几何点。任何被成像的物体(包括本身发光或由外界照明而发光的物体)都是由无数个这样的发光点所组成的。以后我们将要讨论的成像问题就是这种发光点的成像问题。

#### 二、光线

在几何光学中可用一条表示光的传播方向的几何光线来代表光，并称之为光线。光线是一条携带能量的几何线。

这种发光点和光线在实际上是不存在的，因为它们的能量密度为无限大，但是，发光点和光线概念的几何化可使我们处理问题大为简化。使我们用简单的数学方法和图解法解决十分复杂的光能传播成像问题。

#### 三、光束

一个点光源，它在均匀介质中所发出光的光波波面是以其为球心的球面波，其波面法线就是几何光学中的光束。

发自一点或会聚一点的光束称之为同心光束，如图 1—1(a)。若波面为一平面波，则波面法线均为平行线，与这种平面波所对应的光束为平行光

束,如图 1—1(b)。当光线既不相交于一点,也不平行时,这种光束为像散光束,它的波面为一曲面,如图 1—1(c)。

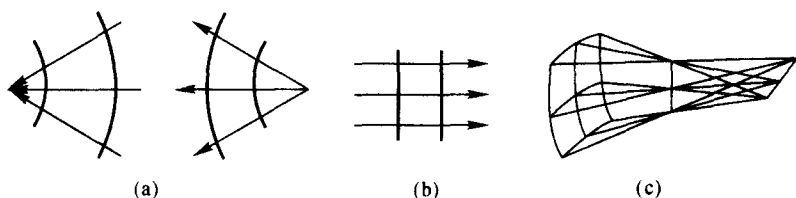


图 1—1

几何光学主要研究光的传播规律和成像原理。为此,首先应该搞清楚每一条光线的传播途径,这种途径称为光路。可是,一个点光源发出的光线为无数条,不可能对每一条光线都求出其光路。实际的作法是从光束中取出一个适当的截面,求出其上几条光线的光路,成像问题就可以得到解决。通常称这种截面为光束截面。

## § 1—2 基本定律

几何光学中以下面几个基本定律为基础。

### 一、光的直线传播定律

在各向同性的均匀介质中,光线按直线传播,这就是光的直线传播定律,这一定律是大量宏观现象(例如日蚀、月蚀、半影、本影等等)的总结。一切最精密的天文测量、大地测量和其他许多测量中,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,光将偏离直线,这就是物理光学中所描述的衍射现象。

### 二、光的独立传播定律

不同的光线以不同的方向通过空间某一点时,彼此互不发生影响,各自独立传播,在该点的作用是相加的,这就是光的独立传播定律。

光的独立传播定律对非相干光束来说是正确的。对于相干光,由于光的干涉,独立传播定律就不复适用。

### 三、光的反射定律和折射定律

当光线由一介质进入另一介质时,光线在两个介质的分界面上被分为反射光线和折射光线,对于这两条光线的性质可分别由反射定律和折射定

律来表述。如图 1—2 所示。

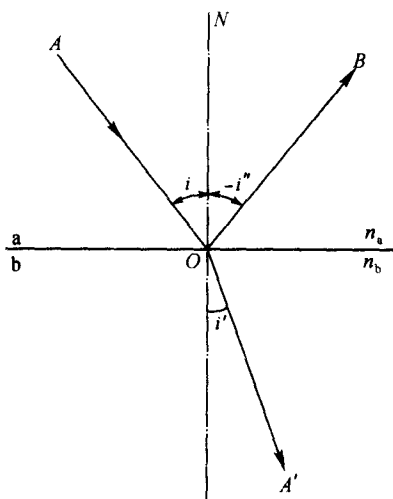


图 1—2

### (一) 折射定律

1. 折射光线位于入射光线和法线所决定平面内，折射光线和入射光线分居在法线两侧。

2. 入射角的正弦和折射角的正弦之比为一恒量，与两角度大小无关，仅决定于两介质的性质。即：

$$\frac{\sin i}{\sin i'} = n_{ba} \quad (1-1)$$

式中： $n_{ba}$ 称为介质 b 对介质 a 的相对折射率。如果介质 a 为真空，则介质 b 对真空的相对折射率称为绝对折射率，以  $n_b$  表示，介质的绝对折射率是：

$$n_b = \frac{c}{v_b} \quad (1-2)$$

式中： $c$ ——光在真空中的速度；

$v_b$ ——光在介质 b 中的速度。

同样可以写出两个介质的相对折射率与光在两个介质内速度的关系为：

$$n_{ba} = \frac{v_a}{v_b} \quad (1-3)$$

将式(1—3)加以变换，可得：

$$n_{ba} = \frac{v_a}{v_b} = \frac{v_a/c}{v_b/c} = \frac{c/v_b}{c/v_a} = \frac{n_b}{n_a} \quad (1-4)$$

由式(1-4)可知,两介质的相对折射率等于两介质绝对折射率之比。将式(1-4)代入式(1-1)得:

$$n_b \sin i' = n_a \sin i$$

通常,设  $n_a = n, n_b = n'$ , 上式写成:

$$n \sin i = n' \sin i' \quad (1-5)$$

这就是折射定律的数学表达式。

通常,将在空气中测得的折射率表示该介质的绝对折射率,认为空气的折射率为 1。

## (二) 反射定律

1. 反射光线在由入射光线和法线所决定的平面内。

2. 反射角等于入射角,  $i'' = -i$ 。式中的负号说明反射光线与入射光线分居法线两侧。

实际上,反射定律可看成是折射定律在  $n' = -n$  时的一种特殊情况,此时,由式(1-5)可得  $i'' = -i$ 。

上述四个定律是几何光学的基本定律。是我们讨论光线传播和成像的基础。我们可以从这四个定律中推出光的可逆性原理。如图 1-3 所示,假如有 A 和 B 两点,从 A 点发出一条光线,沿一定的路线射到 B 点,那么,若从 B 点按反方向发出一条光线,此反向光线必沿同一路径,由 B 点射到 A 点,光线的这种传播特性称为光路可逆性原理。

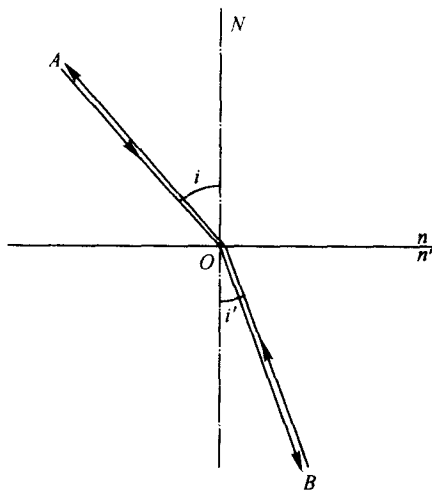


图 1-3

这个原理由折射定律很容易证明。光路可逆性原理使我们在今后考虑物像关系时大为方便。利用这个原理,可以从已知物体的位置寻找像的位