

计量职工中专试用教材

计量光学

蒋诚志 编



中国计量出版社

内 容 提 要

本书是计量职工中专几何量计量专业的专业基础课教材。全书共十三章，按内容可分为两大部分，应用光学及物理光学。其中第一至第十章主要介绍应用光学，有应用光学的基本理论、光学元件的种类、特性及各种光学元件成像规律等。对像差的光学现象、表示方法和像差对成像质量的影响以及对显微、望远、投影等典型光学系统、计量光栅光学系统、莫尔条纹形成和测量等原理和应用等作了介绍。第十一章至第十三章介绍了光波干涉原理及光的干涉、光的偏振在计量中的应用、激光衍射计量技术等内容；对几何量计量中的光学新技术也略作介绍。

本书可供计量职工中专、计量中专、函授中专等层次的中等专业学校作教材，也可供从事几何量计量专业初级以上计量人员和有关师生作参考用书。

计量职工中专试用教材

计 量 光 学

蒋诚志 编

责任编辑 陈 葵

✻

中国计量出版社出版

北京和平里 11 区 7 号

中国计量出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

✻

开本 787×1092/16 印张 20.5 字数 500 千字

1989 年 6 月第 1 版 1989 年 6 月第 1 次印刷

印数 1—10 000

ISBN 7-5026-0206-2/TB·179

定价 8.50 元

出版前言

国家技术监督局是国务院统一管理和组织协调全国技术监督工作的职能部门，负责管理全国标准化、计量、质量监督工作，并对质量管理进行宏观指导。

随着技术监督事业的迅速发展，当前迫切需要大量的各级、各类计量专门人才。举办各种形式的计量中等教育，对于提高在职计量人员的素质、改善计量队伍的结构，培养一批计量队伍的新生力量，都具有重要意义，并将对计量事业的发展产生深远影响。

近几年来，由于一批计量职工中专学校的创办，各种形式的计量中等教育如委托或联合办计量中专班、计量函授中专、计量职业高中、计量中专的专业证书培训等，也在各地陆续开展起来，但是缺少教材已成为计量中等教育迫切需要解决的重大问题。因此，我们根据国家技术监督局的决定，组织编写了一套计量职工中专教材，其中包括：几何量、热工、力学、电磁学计量四个专业的部分专业基础课和专业课试用教材，争取在1988年至1990年内出版齐。

本书是委托山东省标准计量职工中等专业学校组织编写的几何量计量专业的专业基础课教材。

计量事业教育基础十分薄弱，组织编写行业性教材还是第一次，基本条件和经验都不足，因此，这套教材的编写工作是在时间紧、难度大的情况下进行的，虽然经过多方面努力，但仍然存在很多不足之处，甚至于错误。我们拟在试用过程中听取各方面意见，于适当时机再次组织修改。

另处，这套教材主要是根据三年制全脱产的计量职工中等专业教育的需要编写的。在目前情况下，要对各种形式的计量中等教育都编出相应的教材难以做到。因此，在编写过程中，也一定程度地考虑了适用的多样性。其它形式的计量中等教育可参考本套教材的基本内容，适当调整使用。

在本教材的编写、审议过程中，得到了中国计量出版社、中国计量科学研究院、中国测试技术研究院、中国计量学院、中国计量测试学会，河北、四川、山东、吉林省标准计量局及有关的高等院校、省市计量部门、科研单位、大中型企业的大力支持，在此，谨表示衷心感谢。

国家技术监督局宣传教育司

1988. 8.

编 者 的 话

本教材是根据原国家计量局审定的职工中等专业学校几何量计量专业的教学大纲编写的。

计量光学是几何量计量专业的一门重要的专业基础课。它根据精密计量工程对光学基础理论的要求,把应用光学和物理光学的基本原理统一在这本教材中。它主要讨论光学系统的组成、光学元件的性质和作用、光学系统的成像理论、光学量仪中的各种典型光学系统以及光学原理在精密测试技术中的各种应用。

本书是计量职工中专教材。因此,在教材编写过程中,充分考虑了计量职工中专的教学需要以及职工中专学生的特点。力求简明易懂、循序渐进、学以致用、理论联系实际。内容的起点较低,但深度和广度不低。除重点突出光学基本理论以外,还叙述了激光、光栅、多普勒效应等计量光学中的新技术,以适应目前新的计量测试技术飞速发展的需要。同时也考虑到目前各校学生水平的参差不齐,要求也不同,书中增加一些参考内容,即目录中打“*”号章节,这些供使用本教材的学校根据课时和学生情况灵活掌握,机动地安排其教学内容。本书每章之末有小结和习题,按章编排。为了更好地巩固和加深概念、联系实际,书中编选了较多的例题和习题,但并不要求每题必做。本教材还可作为函授学校或计量部门短训班的参考教材,并可供中等以上文化程度的计量测试人员及中专以上院校师生、有关工程技术人员、科研工作者参考。

全书共分十三章。第一章到第十章主要讲应用光学,其中第一章到第四章叙述应用光学的基本理论,包括光学元件的种类、特性和材料,各种光学元件的成像规律等。第五章为像差的基本概念,简明叙述各种像差的光学现象、表示方法、对成像质量的影响、以及减小或消除的主要方法。第六章到第九章叙述眼睛以及显微、望远、投影等典型光学系统的原理和应用特点。第十章为计量光栅光学系统,莫尔条纹的形成和测量应用原理。第十一章到第十三章主要讲物理光学。其中第十一章系统地叙述光波干涉原理,精密测量中的典型干涉仪光学系统,以及光的干涉、光的偏振在精密计量中的应用。第十二章简要叙述光的衍射原理,及激光衍射计量技术。第十三章为几何量计量中的光学新技术。主要讲述近代光学测试技术中的多普勒效应计量技术和激光干涉计量技术。

本教材的编写是在国家计量局教育处和山东省标准计量学校的直接主持和组织下进行的,他们对此做了大量的工作。全书由哈尔滨工业大学张善钟教授主审。1987年9月在济南召开了审稿会,全国有十七个单位参加,他们给本教材提出了许多宝贵的意见。此外,在教材编写过程中,还得到天津大学陈林才教授、罗南星副教授以及其他单位有关同志的帮助和支持。在此一并向他们表示感谢。

由于时间仓促和水平所限,书中难免有不妥甚至错误之处,望读者批评指正。

天津大学 蒋诚志

一九八八年二月

目 录

绪论	(1)
第一章 几何光学的基本原理	(5)
一、几何光学的几个基本概念	(5)
二、几何光学的基本定律	(6)
三、光的全反射	(10)
*四、费马原理	(16)
五、物像的基本概念	(19)
六、光学元件和材料	(22)
本章小结	(37)
习题	(39)
第二章 平面光学元件及其成像原理	(41)
一、平面反射镜	(41)
二、平行平面玻璃板	(45)
三、反射棱镜	(50)
四、折射棱镜与光楔	(59)
本章小结	(62)
习题	(64)
第三章 球面折射及其成像原理——近轴光学	(67)
一、坐标选取及符号规则	(67)
二、单个球面折射成像光路计算公式	(68)
三、近轴光成像单折射球面的光路计算	(71)
四、近轴区成像的放大率和传递不变量	(73)
*五、根据费马原理推导球面折射物像公式	(77)
六、球面反射镜	(78)
七、平面物体以细光束经单个折射球面的成像	(79)
八、薄透镜成像	(80)
九、厚透镜成像	(87)
十、透镜组成像	(96)
*十一、非球面的应用——菲涅尔透镜	(101)
本章小结	(103)
习题	(106)
第四章 光学系统中光束的限制	(110)
一、概述	(110)
二、光学系统的孔径光阑、入射光瞳和出射光瞳	(112)

三、光学系统的视场光阑、入射窗、出射窗	(114)
四、景深	(118)
五、远心光路	(119)
本章小结	(121)
习题	(122)
第五章 像差	(123)
一、球差	(123)
二、彗差	(127)
三、像散	(128)
四、场曲	(130)
五、畸变	(131)
六、位置色差和倍率色差	(132)
本章小结	(133)
习题	(134)
第六章 眼睛和放大镜	(135)
一、人眼的构造	(135)
二、眼睛的缺陷与光学量计的视度调节	(136)
三、眼睛的视角与光学仪器的视角放大率	(139)
四、眼睛的分辨本领、瞄准精度与估读精度	(140)
五、放大镜	(141)
六、光学系统的分类	(143)
本章小结	(144)
习题	(144)
第七章 显微光学系统	(145)
一、显微镜的工作原理	(145)
二、显微镜的放大率	(146)
三、显微镜的光束限制	(147)
四、显微镜的分辨本领	(149)
五、显微镜的瞄准精度及有效放大率	(152)
六、显微镜的景深	(153)
七、显微镜的物镜和目镜	(154)
八、显微镜的照明系统	(157)
九、显微系统典型光路	(159)
十、几种光学上的瞄准定位方法	(161)
本章小结	(165)
习题	(166)
第八章 自准直光学系统	(167)
一、望远镜系统的工作原理和特性	(167)
二、自准直(平行)光管及其工作原理	(172)

三、自准直光管的三种基本光路	(174)
四、平直度测量仪光路系统	(176)
五、光学比较仪光路系统	(177)
六、激光准直测量系统——激光准直仪	(178)
本章小结	(180)
习题	(181)
第九章 投影光学系统	(182)
一、投影系统的基本原理	(182)
二、投影仪的成像系统	(183)
三、投影仪的照明系统	(184)
四、投影仪的典型光路——各式投影仪	(186)
本章小结	(187)
习题	(187)
*第十章 计量光栅光学系统	(188)
一、计量光栅	(188)
二、莫尔条纹原理	(190)
三、莫尔条纹的形式和种类	(195)
四、光栅光学系统	(199)
五、莫尔条纹信号的计数和细分	(201)
六、应用举例：比较测量成像式光栅测量系统	(202)
本章小结	(204)
习题	(205)
第十一章 光的干涉原理和干涉计量	(206)
一、光波干涉原理	(206)
二、光的相干条件	(217)
三、双缝干涉的光程差计算	(222)
四、平行平板干涉	(224)
五、楔形平板干涉	(231)
六、平板干涉在测量中的应用	(235)
七、平行平板的多光束干涉	(242)
八、干涉滤色片	(250)
九、精密测量中的干涉仪	(252)
本章小结	(276)
习题	(280)
*第十二章 光的衍射及其在计量中的应用	(283)
一、光的衍射现象和衍射的分类	(283)
二、惠更斯-菲涅尔原理	(284)
三、夫琅和费圆孔衍射	(284)
四、夫琅和费单缝衍射	(286)

五、夫琅和费双缝衍射	(289)
六、衍射光栅	(291)
七、衍射在精密计量中的应用	(295)
本章小结	(299)
习题	(300)
*第十三章 几何量计量中的光学新技术	(301)
一、多普勒效应计量技术	(301)
二、激光干涉计量技术	(311)
习题	(318)
参考文献	(319)

绪 论

光学，就是研究光的学科，它和几何学、天文学一样，是一门有悠久历史的学科。我们生活在充满阳光的世界里，植物的生长需要光；人的视觉要依靠光；一切光学仪器，尽管它们的作用不同，但也都离不开光。人类的生产和生产劳动都和光有着密切的联系，以致于人们很早就怀着极大的兴趣在研究它了。到目前为止，人类已经积累了很丰富的关于光的知识，并已将它广泛地应用在生产和日常生活中了。

人类对光的研究可以分为两个方面：一方面是研究光的本性，并根据光的本性来研究各种光学现象，称为“物理光学”；另一方面是研究光的传播规律和传播现象，称为“几何光学”，并用这些规律去研究光学仪器原理，亦称为应用光学。“计量光学”是几何量计量专业的光学基础课程，它就是着重讨论应用光学和物理光学的理论，以及它们在计量工程中的应用问题。

所谓计量工程，是指人类在和自然作斗争并改造自然的过程中，要用各种计量仪器来测量各种物体的物理量。例如测量物体的长度、角度及表面几何形状的几何量；测量硬度、质量、压力和重力加速度等参数的机械量；热工、电学、力学以及光度学等方面的计量。显然，所谓“计量”，就是对一些基本物理量的测试，标定和传递。

在计量仪器中，几何量计量仪器长期来占有统治的地位，因为许多物理量往往是通过观察其几何量的变化而定标的。例如温度的测量，可以用某一已知膨胀系数的材料，在规定的温度变化范围内由其长度变化而测得。

计量仪器的特点是特别重视一个“准”字，也就是说，计量仪器必须要能够保证一定的“精度”，否则这种仪器在实际运用中往往是没有意义或者达不到预期效果的。因此测量工具和计量仪器的发展过程，是随着生产的发展，对精度的不同要求而发展的。在18世纪后期至19世纪中期，机械加工的精度大约只有1 mm到0.1 mm，那时只要用钢板尺，或配以游标刻线就能顺利地解决机械加工中的测量问题。到本世纪初，机械加工的精度已达到0.01 mm，原有的钢板尺已不够用，人们就开始运用机械放大的办法提高测量中的分辨能力，设计了百分表、千分螺丝等工具，这也是“细分”基准量的初步尝试。

进入20世纪以后，加工精度提高很快，30年代达到了0.001 mm，即1 μm 级。50年代达到0.1 μm 级。60年代后最高加工精度达到0.01 μm 的已经是常见的了。这样，单用传统的机械办法就无法达到测量的精度要求。所以进入20世纪后，高精度的几何量计量仪器就显得越来越重要了。这时人们开始采用光学放大的方法。光学计量仪器由于它具有高的放大倍数，不接触被测物体和测量精度高等许多优点，所以从本世纪初，光学量仪就很快地发展起来，从读数显微镜、投影仪发展到光学计、测长仪、万能工具显微镜以及各种类型的干涉仪等等。到本世纪中期、后，光学的几何量计量仪器曾经牢固地统治着几何量计量技术的历史舞台。

光学计量仪器的发展受到多方面的影响，但更重要的基础是光学这一学科本身的发展。

回顾光学发展史，早在16世纪以前，人类就已从实践中提出了光的直线传播、光的反射和折射现象，并用简单透镜进行成像，发明了凹面镜、凸面镜、眼镜、暗箱等光学元件。

从17世纪到18世纪，可以称为光学发展史上转折点的几何光学时期。在这一时期，人们提出了几何光学理论，把光线作为几何直线，建立了光的传播、反射、折射和成像等一系列的定律，奠定了至今的几何光学的基础，并出现了望远镜、显微镜等各种光学仪器。对于从光的本性来说，光究竟是什么？它是怎样传播和运动的？在17世纪末期，科学家牛顿提出了微粒性学说，他认为：“光是一种微粒组成的粒子流”，这些微粒是从光源飞出来的，并且在均匀物质内作等速直线运动，如果这些微粒碰到反射面就会象弹性小球一样被弹回来。这一学说在当时较好地解释了光的直线传播、反射、折射等现象。

随着实践和认识的不断深化，牛顿这种微粒性学说已无法解释如干涉、衍射等许多光学现象，至19世纪中叶，由于无线电技术的发展，随着对电磁波性质的深入研究，人们才证实了光实际上是一种电磁波，从本质上讲，光和一般的无线电波并无区别，所不同的只是光波的波长比无线电波短。从而建立了光的电磁波理论，奠定了物理光学的理论基础，使人们在认识光的本性方面迈出了一大步。同时，在计量技术领域，应用干涉理论，研制出各种干涉仪器，解决了用光波长作为长度基准的各种干涉测长问题。这一时期可谓光学发展史上的波动光学时期。

从19世纪末到20世纪初，光学研究深入到光是如何发生的；光和物质相互作用时的微观机理。如光照射金属表面时，电子从表面逸出的光电效应现象等，人们发现仅仅把光看成是一种波动——电磁波是有片面性的。各种科学实验又启发人们进一步去认识光的本性——量子性。1905年，科学家爱因斯坦建立了光量子（光子）理论，指出光是由光源发出的一粒一粒的粒子流，这种粒子叫做光子或光量子，它不同于牛顿“微粒说”中的粒子。光子具有一定的能量，每个光子的能量和光的频率成正比地联系着，即

$$\varepsilon = h\nu = h\frac{c}{\lambda}$$

式中： ε ——光子的能量；

c ——光速；

λ ——波长；

ν ——频率；

h ——普朗克常数。

从而证实了这种光子既具有粒子的性质，同时还具有电磁波的波动性质，粒子性和波动性同时在光子身上体现出来，故称光的波粒二象性。例如光的干涉、衍射和偏振等现象就表明了光的波动性，而光电效应、黑体辐射等现象则表现出光的量子性（粒子性）。量子理论把光的波粒二象性辩证地统一起来。

随着对光的本质认识的深入，光学对科学技术和国民经济的发展起着越来越重要的推动作用。至本世纪60年代，特别是新型光源——激光器的出现，使光学理论和光学应用技术进入了一个蓬勃发展的现代光学时期。由于激光具有极好的单色性、方向性和高功率密度等重要特点，引起了各方面的重视并迅速得到广泛应用。目前它已广泛应用于打孔、切割、导向、测距、医疗、通讯和精密测试等方面，同时激光全息摄影、全息显微术、全息干涉计量

等也获得越来越广泛的应用。

此外，光导纤维已发展成为一种新型光学元件，为创造内窥光学系统（传光，传像）和光通讯创造了条件，它已成为某些新型光学系统和某些特殊激光器的组成部分，在通讯系统中代替了传统的电缆。

将数学中的傅里叶变换和通讯中的线性系统理论引入光学，形成了“傅里叶光学”，它不仅使人们用新的理论来分析和综合光学现象，而且由此引入的空间滤波和频谱的概念，已成为光学信息处理，像质评价，成像理论以及相干光学计算机的基础。

60年代“薄膜光学”的发展，为解决分光 and 光谱滤波提供了理论和器件。

传统光学观察技术和其他新技术的结合扩展到红外光波段，使红外光技术成功地应用于夜视、导弹制导、环境污染监测、地质资源考察及遥感遥测技术等。

由于电磁理论、材料科学、集成技术和电子技术的飞速发展，在集成电路的启示下，形成了“集成光学”这一门新兴的边缘学科。集成光学是研究集成光学理论及其制造的科学。目前集成光路和光导纤维组成的光缆，正应用于光通讯、显示系统、信息处理和文字图像扫描等。

总之，现代光学的发展方兴未艾，令人欢欣鼓舞，它已成为人们认识自然、改造自然、提高劳动生产率的越来越强有力的武器。

在计量测试领域，由于现代光学技术的发展，使长度计量仪器和测试技术更加突飞猛进。同时，在近代工业技术的迅速发展，对计量测试要求高精度、高效率 and 自动化，并向着三维性、相关性、实时性发展。传统的普通光学方法已不能适应。为此，以激光为中心的精密计量技术，以及激光与光电、计算机技术的结合，为新的测试技术开辟了新的途径。在这方面发展的新方法主要有：全息法、莫尔法、散斑法、光扫描法、光衍射法、实时干涉法、外差法、光学多普勒法、光导纤维法、信息处理法、数字图像测试法、傅里叶频谱分析法等等。人们将会看到一场新的技术革命正在形成。

现代光学技术的发展，不仅推动了计量测试技术的快速发展，也影响着计量制度的改革，使长度基准的建立日趋完善，复现和传递的精度不断提高。例如，长度单位“米”是国际单位制的七个基本单位之一。在长度计量发展过程中，国际上已经三次定义。1875年用铂铱合金制成的X形米尺两端的双刻线的中间距离，在0℃时的长度定义为“1m”。1889年第一届国际计量大会上决定选用已经制成的31支铂铱合金米尺中的No.6作为国际米原器，保存在巴黎国际计量局，其余作为米的副原器，分发各会员国，这是米的实物基准。显然，这种米尺有：容易变形；复制、保存困难；传递精度低等缺点。其复现准确度为 $\pm 1.1 \times 10^{-7}$ 。随着光学技术的发展，1895年至1906年，迈克尔逊、法布里和珀罗等科学家先后制成米的干涉比较仪，并进行了米原器和光波波长的比较测量。于是科学家们研究了各种稳定的可见光波长，以求将它们作为长度基准。经过长时期的研究，1960年第十一届国际计量大会上，第二次规定了“米”定义。即，米的长度等于氪-86 (^{86}Kr) 原子的 $2p_{1/2}$ 和 $5d_{5/2}$ 能级之间跃迁，在真空中辐射波长的 ($\lambda = 0.605\,780\,2\,\mu\text{m}$) 1 650 763.73 倍。即 1 650 763.73 个波长的长度为 1 m。这个新定义有两个优点：一是实现了以光的波长作为长度的基准尺子，将复现准确度提高到 $\pm 4 \times 10^{-9}$ 。二是采用了自然基准。在自然界中氪-86 原子永远不会消失，因而只要符合规定条件，就可随时复现出“米”的基准量值。但是由于受到光源单色性的限制，光源强度低，一般在测量 500 mm 以上量块时，干涉带就已不清楚，所以传递大尺寸还

有困难(最大到800 mm)。这一新的米定义建立后不久就出现了激光技术,由于激光具有单色性好能量集中等独特优点,其性能远远超过氩-26。1972年美国国家标准局测定了甲烷稳频的氦氖(He-Ne)激光频率,并得出了真空中光速值为 $c = 299\,792\,458\text{ m/s}$,其准确度比从前提高了两个数量级。这样,一旦光速 c 作为物理常数确定后,人们就可通过高精度的时间标准(准确度已达到 10^{-14} 量级)来测量长度,使长度测量变成光的行进时间的测量。这不但可以大大提高长度计量的准确度,而且可以实现长度单位和时间单位的统一。于是1983年第十七届国际计量大会根据各国计量科学研究的结果,正式决定用激光波长作为长度基准,将“米”定义更改为:“一米是光在真空中于 $1/299\,792\,458$ 秒的时间间隔内行程的长度”,即 $1/c$ 秒时间内的行进距离。为在实际工作中复现这一定义,米定义咨询委员会推荐了几种已经得到成果的激光波长作为基准波长,使其复现准确度高达 $\pm 2 \times 10^{-10}$ 。同时,由于激光是受激发射,输出功率大、光电信号信噪比高、谱线宽度窄,因此可以在长距离内获得衬度很高的干涉条纹。

至此,我们看到了在机械工业的几何量计量中,光学理论、光学技术占有十分重要的地位。近代光学对计量工程的影响是那么深刻,以致于随着它的进一步发展,将引起技术上的革命。应用光学和物理光学是现代光学的基础之一,因此要求我们通过本课程的学习,掌握以几何光学的成像理论,物理光学的光波干涉理论为主要内容的光学基本原理,并联系光学计量仪器,掌握它们的典型光学系统,以及它们在计量测试技术中的应用。在这个基础上,还应该了解近代光学计量技术,激光,光栅莫尔条纹,多普勒技术等计量仪器中的应用。

在我国,长度计量是发展比较早也比较完善的一个专业,近年来计量测试技术有了更快的发展。在长度计量仪器方面,我国已经制成一系列光学计量仪器,如万能工具显微镜、投影仪、光学计、测角仪、测长机、干涉显微镜等等,并能成批生产和供应。在“米”的新定义的研究方面,研制成功甲烷饱和吸收和碘饱和吸收的氦氖激光器,经国际计量局比对后,达到国际上的先进水平。新的计量测试技术和测试仪器的研究也取得了大量成果:如激光干涉比长仪,它应用激光干涉原理进行线纹尺的自动检验;激光量块干涉仪,利用白光定位,进行双光路量块长度的绝对测量,性能达到世界先进水平;激光丝杠动态检查仪,它应用激光光源,立体棱镜定位,圆光栅分度,电子设备自动记录,可以进行丝杠的高精度动态检测。此外,还有双频激光干涉仪,激光两坐标测量仪,光栅分度头,光栅数显自准直仪,光栅式齿轮单面啮合检查仪,光电显微镜等等,这些成就标志着我国计量科学技术已经进入一个新的阶段。在此,我们也可以看到它们无一不是光学基本理论在这方面的成功应用。这里还应当指出,近代光学计量仪器,由于生产发展的要求,几乎没有例外的都是光、机、电的结合体,因此要求我们在学好“计量光学”的同时,还得注意和其他课程的联系,才能更有效地掌握各种近代光学计量仪器的原理和应用技术。计量光学是几何量专业一门重要的技术基础课,欲深入掌握几何量专业的学习内容,首先应学习好本门课程。

第一章 几何光学的基本原理

一、几何光学的几个基本概念

几何光学是把光的概念和几何学中的点、线、面有机联系起来，从而把要研究的光的传播问题变成一个几何问题，它是讨论和解决实际问题的一种简便手段。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

从物理学的观点看，辐射光能的物体称为发光体，或称光源。当光源的大小与其辐射光能的作用距离相比可以忽略时，此光源可认为是点光源，或称发光点。例如，对于地球上的观察者来说，太阳或其它星体都可认为是发光点。但是在几何光学中，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，以后我们要讨论的成像问题就是这些发光点的成像问题。

(二) 光 线

在夜晚的暗处，如果打开手电筒，就可以看到一道光柱。当光柱的截面积和其长度相比可以略去不计时，从物理学的观点来说，这条细而长的光柱就称之为光线。几何光学将这种概念加以抽象，认为光线是一条无直径、无体积、携带光能的几何线，它代表光的传播方向。

从能量的观点来看，几何光学所论述的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。利用这些概念，不仅能将本质上十分复杂的光能传播和成像概念归结为简单的数学(或作图)问题，而且在实用上能达到令人满意的结果。

从物理光学的观点来看，光是一种电磁波，光从光源向外传播的现象是振动在周围空间的传播，光的振动方向垂直于传播方向。在传播途径中，具有相同振动相位的点所形成的曲面称为波面，辐射能是沿着波面法线方向传播的。几何光学所定义的光线实质上就是物理学中所说的光波波面的法线。

(三) 同 心 光 束

自一点发出或会聚于一点的光束称为同心光束，显线。同心光束的波面是一个球面波。

如果波面是平面，则波面上每一点的法线都平行，这时候的光束称为平行光束。显然平行光束是同心光束的一种特殊情况，它的会聚点位于无限远处。

光线、同心光束和平行光束概念如图 1—1 和图 1—2 所示。

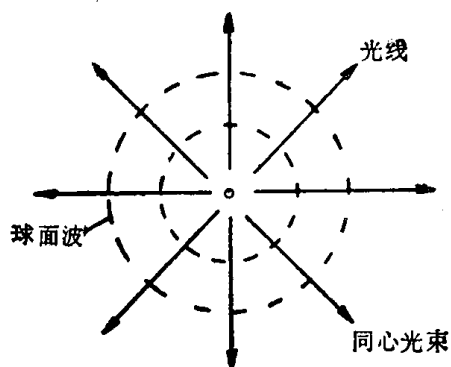


图 1—1 点光源发出的同心光束

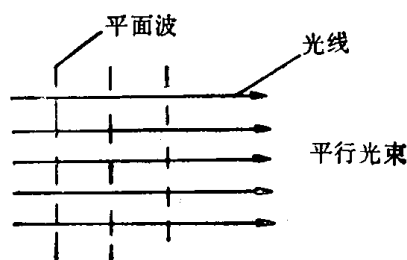


图 1—2 平行光束

三、几何光学的基本定律

在自然界中，光的传播现象按几何光学理论可以归纳为四个基本定律：光的直线传播定律，光的独立传播定律，光的反射定律和折射定律。现分述如下：

(一) 光的直线传播定律

“在各向同性的均匀介质中，光是沿直线传播的”。这就是光的直线传播定律。

这是一个常见的普遍规律，光照射物体背后出现影子，以及针孔成像、日蚀、月蚀等现象都表明光线沿直线传播的基本事实。一切精密的天文测量，大地测量和其他许多测量都是以此定律为基础。

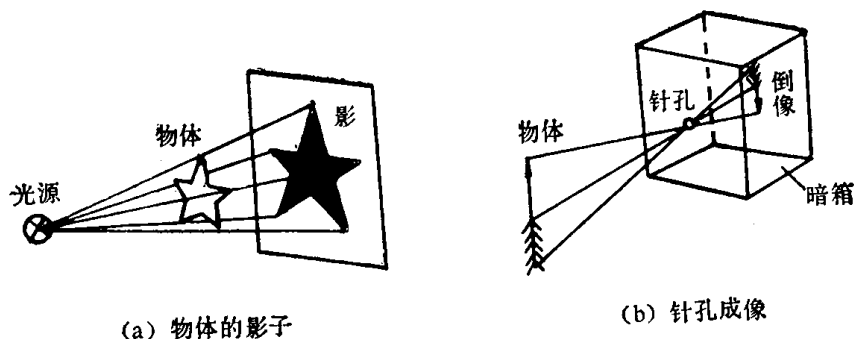


图 1—3 光的直线传播

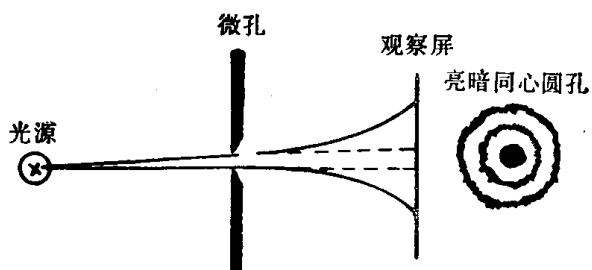


图 1—4 光的衍射

但是，实验表明，当光在传播过程中遇到很细小的不透明屏障或通过微孔时，光将偏离直线。这是物理光学中所讲述的光的衍射现象。图 1—3 和图 1—4 所示为光的直线传播和遇到微孔时偏离直线的衍射现象。

(二) 光的独立传播定律

从不同的光源发出的光线以不同的方向通过空间某点时，彼此互不影响，各光线的传播不受其他光线的影响，称为光的独立传播定律。因此，当两束光线会聚于空间某点时，其作

用是简单的相加。例如，夜晚当两个探照灯发出的光束在空中交叉后，依然保持原来的方向和亮度向前传播。当两光束共同对准某一目标时，则被照明的亮度是这两束光亮度之和。利用光的独立传播定律，可使我们研究某一光线传播情况时大为简化，因为这时可以不必考虑其他光线的影响。

当讲光的干涉章节时，还将分析两束光发生相互干涉的现象需要有一定的条件。在一般情况下，不易满足这些条件，因而可以假定光线是独立传播的。

(三) 光的反射定律

当光线从一种介质投射到另一种介质上时，在两种介质的光滑分界面上，一部分光被反射回到原来的介质中的现象，称为光的反射现象。反射光线的方向由光的反射定律决定。如图 1—5 所示，设 PQ 为一光滑的反射界面，入射光线 AO 和法线 ON 夹角 AON 称为入射角，以 i_1 表示；反射光线 OB 和法线 ON 夹角 BON 称为反射角，以 i_1'' 表示。反射定律可归纳为

“入射光线、反射光线和分界面投射点处的法线三者在同一平面内；入射光线和反射光线分居法线的两侧；入射角等于反射角”。

反射定律公式可表示为

$$i_1 = -i_1'' \quad (1-1)$$

式中，负号说明反射光线与入射光线分居法线两侧。

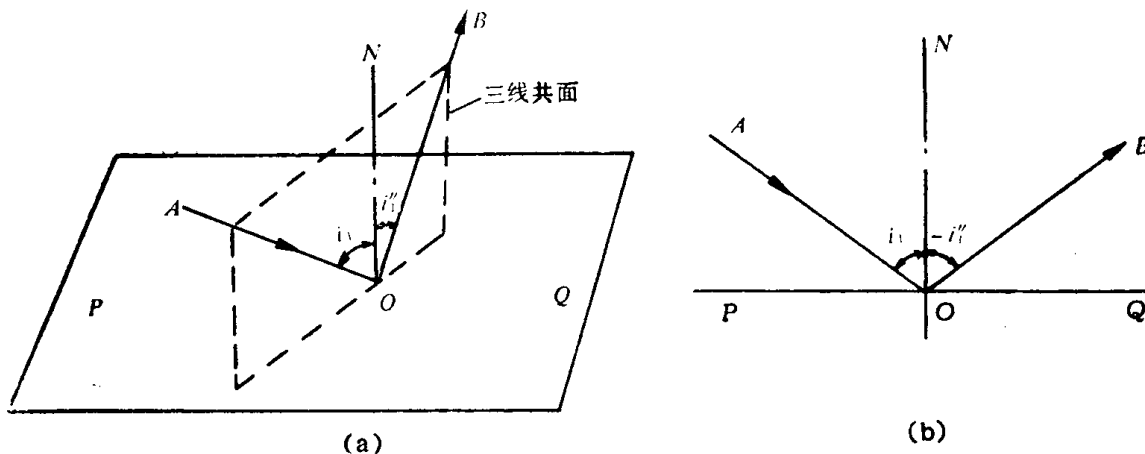


图 1—5 光的反射

(四) 光的折射定律

当光线从一种透明介质进入另一种透明介质时，一部分光按反射定律从两介质的光滑分界面上被反射回原来的介质，另一部分光则通过界面射入第二种介质，它不是按原来的方向传播，而是在分界面处突然改变方向，这种现象称为光的折射。进入第二种透明介质的那条光线称为折射光线。折射光线的行进方向由光的折射定律决定。如图 1—6 所示， PQ 为两种介质 n_1 和 n_2 的分界面， AO 为入射光线， OC 为对应的折射光线， NN' 为分界面上 O 点处的法线， $\angle AON$ 为入射角，以 i_1 表示； $\angle CON'$ 为折射角，以 i_2 表示。折射定律可归纳为

“入射光线、折射光线和分界面投射点处的法线三者在同一平面内；折射光线和入射光线分居法线的两侧；入射角的正弦与折射角的正弦之比值，对于所给定的两种介质来说是一个常数”。

折射定律的公式可表示为

$$n_{21} = \frac{\sin i_1}{\sin i_2} \quad (1-2)$$

常数 n_{21} 称为第二种介质对于第一种介质的相对折射率。

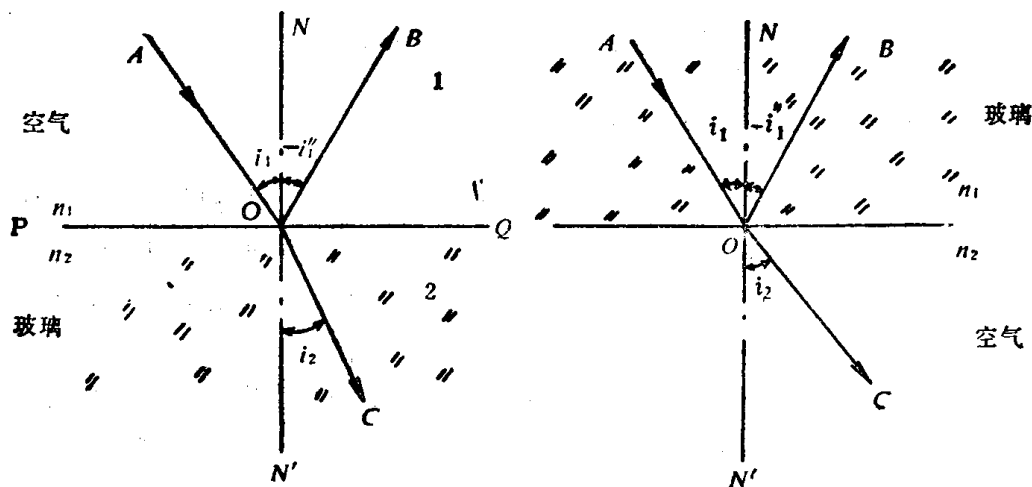


图 1—6 光的折射

某种介质对真空的折射率称为该种介质的绝对折射率，简称折射率。通常所称某种介质的折射率，在不作特殊说明时，都是指它的绝对折射率。表 1—1 是几种介质的折射率。

表 1—1 几种介质的折射率

介 质	真 空	空 气	水	酒 精	甘 油	有 机 玻 璃
折 射 率	1	1.000 3	1.33	1.36	1.46	1.49
介 质	石英（水晶）	光学玻璃	金 刚 石	加拿大树胶		
折 射 率	1.544 2	1.5~1.75	2.417	1.549		

由表 1—1 可见，空气和真空的折射率很接近，即任何介质对空气的相对折射率和对真空的绝对折射率两者之间的差别极小，在一般情况下二者近似视为相等。即认为空气的折射率为 1。

图 1—7 所示为光通过三种介质的光路。如果将公式 (1—2) 用于第二和第三种介质，则有

$$\frac{\sin i_2}{\sin i_3} = n_{32}$$

将此式和式 (1—2) 相乘，得

$$\frac{\sin i_1}{\sin i_2} \times \frac{\sin i_2}{\sin i_3} = n_{21} \times n_{32}$$

则

$$\frac{\sin i_1}{\sin i_3} = n_{21} \times n_{32} = n_{31} \quad (1-3)$$

设上式中第一种介质为真空 ($n_1 = 1$), 则第二和第三种介质相对于真空的折射率 n_{21} 和 n_{31} 即为绝对折射率, 以 n_2 和 n_3 表示。则由式 (1-3) 可得

$$n_{32} = \frac{n_3}{n_2} \quad (1-4)$$

即介质 3 对于介质 2 的相对折射率等于介质 3 和介质 2 的绝对折射率之比。因此式 (1-2) 可写成

$$n_{21} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{\sin i_1}{\sin i_2} \quad (1-5)$$

或写成

$$n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2 \quad (1-6)$$

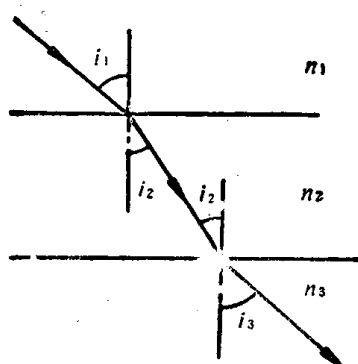


图 1-7 光通过三种介质

通常在讨论某一界面的光线折射时, 设: $n_1 = n$, $n_2 = n'$, $i_1 = i$, $i_2 = i'$, 则式 (1-6) 写成

$$n \sin i = n' \sin i' \quad (1-7)$$

这就是折射定律常用的数学表达式。

应当指出, 介质的折射率 n 是光在真空中的传播速度 c 与光在该介质中的传播速度 v 之比, 即

$$n = \frac{c}{v} \quad (1-8)$$

此外, 同一介质的折射率随入射光的不同波长 (光色) 而改变, 对于气体还与温度、气压等有关。介质折射率的数值可用实验方法测定。光学系统中应用的光学玻璃种类很多, 在玻璃牌号目录表中都给出各自对一些特定光波长的折射率值。

比较式 (1-8) 和式 (1-7) 可见, 介质的折射率越大, 对光线的折射能力就越大, 光传播得越慢, 这种介质相对称之为光密介质。反之, 介质的折射率越小, 对光线的折射能力也越小, 光传播得越快, 则相对称为光疏介质。

分析式 (1-1) 和式 (1-7), 在折射定律的表达式 (1-7) 中如果令 $n' = -n$, 则得 $i = -i'$, 这就是式 (1-1) 所表示的反射定律。因此, 反射定律可以看作是折射定律的一种特殊情况。

以上是人们从实践中总结出来的几何光学的四条基本定律, 是本课程讨论光线传播和光学成像问题的基础。

当然, 上述关于光的反射和折射理论, 是光在介质的理想的光滑分界面上的传播规律。实际上任何光学零件表面, 不可能磨得绝对光滑, 不可避免的要遗留下一些细道子和细砂眼等磨光不良现象, 光线经过这种界面要发生散射。另外, 作为光学零件材料的玻璃不可能完全均匀, 难免要存在一些气泡、条纹和内应力等, 这也会使光线不能完全按上述规律传播。所有这些现象都会对光学成像产生不良影响。因此, 作为光学零件用的光学玻璃质量要求很高, 光学零件加工时表面抛光的要求很严。