

张凤林 孙学珠 主编

工程光学



天津大学出版社

内 容 简 介

本书系统地介绍了工程光学的基本原理、方法和应用。主要内容包括几何光学原理、典型光组的设计与计算，象差的基本概念；光度与色度学基础；波动光学原理、光的干涉，衍射、偏振的理论与计算；激光基础及应用；傅里叶光学、光学图象检测及纤维光学等。在叙述中突出了基本理论及其应用。

本书可作为大专院校各类仪器仪表专业及精密计量与检测等专业的基础课教材；也可作为物理及光学专业的选修课教材。对有关专业的研究生也可作为基础教材。对于从事仪器仪表及精密计量与检验的工程技术人员也是一本有用的参考书。

工 程 光 学

张凤林 孙学珠 主编

※

天津大学出版社出版

(天津大学内)

河北省永清县印刷厂印刷

新华书店天津发行所发行

※

开本：787×1092毫米1/16

印张：28³/₄，字数：700千字

1988年9月第一版

1988年9月第一次印刷

印数：1—2700

ISBN 7-5618-0056-8

TB.2

定价：4.75元

前 言

光学理论与技术如同电子学及电子计算机技术一样，是现代科学技术发展必不可少的重要领域之一。特别是六十年代初激光问世以来，光学理论与技术发生了巨大的变化。许多新学科，诸如傅里叶光学、全息学、信息光学、纤维光学及非线性光学等的相继出现并迅速发展，标志着现代光学的形成。这些学科与工程技术结合，形成了一门理论性和实践性都很强的新学科——工程光学。

为适应科学技术的发展和培养人才的需要，针对仪器仪表及计量技术等专业对光学的教学要求，我们编写了这本《工程光学》。在内容选择上，既考虑光学理论的系统性和完整性，又努力反映光学的最新理论与技术。在叙述上，力求做到由浅入深，概念清楚，文字简练。为了使基本概念和理论与实际结合，给出了计算或应用实例。希望读者能通过本书的学习学会应用所学理论解决工程技术中的具体问题。

本书是根据编者在天津大学精仪系多年来为各专业本科生开设必修课程的讲义，并参考国内外有关教材和书籍编写而成的。全书共二十章，系统介绍了几何光学、光学系统的成像原理和象差基本概念，给出工程上常用光学系统的设计及计算方法；讨论了光度和色度的基本概念，基本理论及测量方法；简明地论述了波动光学的理论基础——光的电磁波理论，阐述了光的干涉、衍射和偏振的原理，给出了各种常用的典型干涉、衍射和偏振的系统，讨论了光的干涉、衍射和偏振的种类，提供了计算方法及应用实例；介绍了激光的产生和激光器工作原理、激光和激光器的技术特性及种类，以及激光的应用；对现代光学中一些重要的理论与技术，如傅里叶光学和纤维光学的原理及应用等，也作了系统的叙述。傅里叶光学是信息光学及光学计算机、光通讯等学科的理论基础，本书在论述傅里叶光学的原理过程中注意把衍射公式和傅里叶变换联系起来，以便用傅里叶变换公式及性质去解决常用的衍射问题。书中对现代光学技术在工程中的一些重要应用也作了介绍，例如在光学图象检测中常用的全息学及全息干涉计量、激光散斑技术，以及莫尔条纹技术等，本书系统地讨论了这些方法的原理与特点，给出一些典型检测光路。

为了便于学习使用，本书在内容安排、习题选择及表达方式等方面力求符合教学要求，可作为高等院校有关专业必修或选修课教材，也可作为研究生的基础教材，可供有关的工程技术人员参考。

本书由天津大学张凤林副教授和孙学珠副教授主编。参加编写的有孙学珠副教授（第一章至第五章），田大琴高级工程师（第八章至第十二章），田学飞讲师（第六、七章），赵学山讲师（第十三章至第十五章），张凤林副教授（第十六章至第二十章）。

本书由天津大学张以谟教授和南开大学程路教授主审，他们作了细致的审阅，并提出了宝贵的修改意见。编者在此一并致谢。

由于水平所限，经验不足，书中缺点和错误在所难免，衷心希望读者和专家们批评指正，以利改进。

编者 1988.1.5

目 录

第一章 几何光学基本定律和成象概念	(1)
§ 1-1 基本概念	(1)
§ 1-2 基本定律	(3)
§ 1-3 全反射及其应用	(6)
§ 1-4 成象概念	(7)
第二章 球面和球面系统	(11)
§ 2-1 光线经过单个球面的折射	(11)
§ 2-2 单个折射球面成象的放大率、拉赫不变量	(17)
§ 2-3 共轴球面系统	(20)
§ 2-4 球面反射镜	(26)
第三章 理想光学系统	(28)
§ 3-1 理想光学系统和共线成象	(28)
§ 3-2 理想光学系统的基点和基面	(28)
§ 3-3 理想光学系统的物象关系	(33)
§ 3-4 理想光学系统的放大率	(40)
§ 3-5 共轴光学系统的组合	(42)
§ 3-6 透镜和薄透镜	(52)
§ 3-7 实际光学系统基点位置和焦距的计算	(55)
第四章 平面镜棱镜系统	(59)
§ 4-1 平面镜成象	(59)
§ 4-2 双平面镜系统	(61)
§ 4-3 平行平板	(63)
§ 4-4 反射棱镜	(65)
§ 4-5 折射棱镜及光楔	(72)
第五章 光学系统中的光束限制	(76)
§ 5-1 光学系统中的光阑及其作用	(76)
§ 5-2 光学系统的孔径光阑、入射光瞳和出射光瞳	(78)
§ 5-3 光学系统中的视场光阑和渐晕光阑	(80)
§ 5-4 消杂光光阑	(85)
§ 5-5 光学系统的景深	(86)
§ 5-6 远心光路	(90)
第六章 光度学基础	(94)
§ 6-1 辐射量和光学量及其单位	(94)
§ 6-2 光传播过程中光度量的变化规律	(99)
§ 6-3 成象光学系统象面的光照度.....	(103)
§ 6-4 光通过光学系统时的能量损失.....	(105)

第七章 色度学基础	(108)
§ 7-1 概述	(108)
§ 7-2 颜色的分类及颜色的表现特征	(108)
§ 7-3 颜色混合及格拉斯曼颜色混合定律	(109)
§ 7-4 颜色匹配	(110)
§ 7-5 色度学中的几个概念	(112)
§ 7-6 颜色相加原理及光源色和物体色的三刺激值	(115)
§ 7-7 CIE标准色度学系统	(117)
§ 7-8 均匀颜色空间及色差公式	(132)
第八章 光线的光路计算及象差概论	(136)
§ 8-1 象差概述	(133)
§ 8-2 光线的光路计算	(137)
§ 8-3 轴上点球差	(145)
§ 8-4 正弦差及慧差	(147)
§ 8-5 象散和象面弯曲	(150)
§ 8-6 畸变	(151)
§ 8-7 色差	(153)
§ 8-8 波象差	(154)
§ 8-9 象差公差	(155)
第九章 眼睛及其光学特征	(157)
§ 9-1 眼睛的构造	(157)
§ 9-2 人眼的调节与适应	(158)
§ 9-3 人眼的成像原理及其分辨本领	(160)
§ 9-4 人眼的缺陷及目视光学仪器的视度调节	(163)
第十章 放大镜及显微镜系统	(165)
§ 10-1 放大镜及其放大率	(165)
§ 10-2 显微镜成像原理及其特性	(167)
§ 10-3 显微镜的光束限制及景深	(168)
§ 10-4 显微镜的分辨率和有效放大率	(172)
§ 10-5 显微物镜	(177)
§ 10-6 显微镜的照明系统	(179)
§ 10-7 显微系统的设计举例	(182)
第十一章 望远镜系统	(187)
§ 11-1 望远镜的成像原理及其光学特性	(187)
§ 11-2 伽利略望远镜和开卜勒望远镜	(189)
§ 11-3 望远物镜	(191)
§ 11-4 目镜	(193)
§ 11-5 透镜转象系统和场镜	(198)
§ 11-6 望远系统外形尺寸计算	(195)
第十二章 摄影及投影光学系统	(201)
§ 12-1 摄影系统的光学特性	(201)

§ 12-2	摄影物镜的类型	(204)
§ 12-3	放映和投影系统	(206)
第十三章	波动光学理论基础	(211)
§ 13-1	麦克斯韦方程组	(211)
§ 13-2	光的电磁性质	(213)
§ 13-3	光波的叠加	(215)
第十四章	光的干涉及典型干涉系统	(223)
§ 14-1	光的相干条件	(223)
§ 14-2	获得相干光的方法及双光束干涉的条纹形状	(223)
§ 14-3	干涉条纹的对比度	(229)
§ 14-4	平板干涉	(234)
§ 14-5	平板干涉的应用	(240)
§ 14-6	典型干涉系统	(245)
§ 14-7	平行平板的多光束干涉	(247)
§ 14-8	多光束干涉的应用举例	(252)
第十五章	光的衍射理论及其应用	(259)
§ 15-1	惠更斯—菲涅耳原理和基尔霍夫衍射公式	(259)
§ 15-2	菲涅耳波带法及圆孔和圆盘的菲涅耳衍射	(263)
§ 15-3	直边和狭缝的菲涅耳衍射	(270)
§ 15-4	夫琅和费矩孔和单缝衍射	(274)
§ 15-5	夫琅和费圆孔衍射和光学系统的分辨本领	(279)
§ 15-6	夫琅和费双缝衍射	(285)
§ 15-7	衍射光栅	(288)
§ 15-8	光栅光谱仪	(293)
§ 15-9	光的衍射的应用举例	(297)
第十六章	光的偏振及应用	(300)
§ 16-1	偏振光概述	(300)
§ 16-2	偏振光的产生	(302)
§ 16-3	马吕斯定律	(304)
§ 16-4	光的双折射	(305)
§ 16-5	偏振器件及波片	(308)
§ 16-6	圆偏振光、椭圆偏振光及偏振光的检验	(311)
§ 16-7	偏振光和偏振器件的矩阵表示	(313)
§ 16-8	偏振光的干涉及应用	(318)
第十七章	光的量子性与激光基础	(325)
§ 17-1	光的量子性	(325)
§ 17-2	玻尔的量子理论	(327)
§ 17-3	光与原子系统的相互作用——自发辐射、受激辐射和受激吸收	(329)
§ 17-4	粒子数反转与光放大	(330)
§ 17-5	激光器的工作原理	(332)
§ 17-6	影响激光频率的因素	(339)
§ 17-7	激光器的纵横模	(343)

§ 17-8	激光技术	(347)
§ 17-9	激光器的种类及用途	(351)
第十八章	傅里叶光学	(357)
§ 18-1	概述	(357)
§ 18-2	单色光波的复振幅分布与空间频率	(357)
§ 18-3	菲涅耳衍射、夫琅和费衍射和傅里叶变换	(363)
§ 18-4	透镜的傅里叶变换性质	(365)
§ 18-5	点扩展函数与光学传递函数	(374)
第十九章	光学图象检测	(384)
§ 19-1	全息照相原理	(384)
§ 19-2	全息照相的主要类型	(388)
§ 19-3	全息图的基本性质	(392)
§ 19-4	全息干涉检测	(394)
§ 19-5	激光散斑	(399)
§ 19-6	激光散斑的应用	(404)
§ 19-7	莫尔条纹	(409)
§ 19-8	莫尔条纹的应用	(412)
第二十章	纤维光学基础	(417)
§ 20-1	概述	(417)
§ 20-2	光学纤维的结构和分类	(417)
§ 20-3	光学纤维的光学特性	(420)
§ 20-4	光学纤维的波导性质	(435)
§ 20-5	光学纤维的应用	(443)

第一章 几何光学的基本定律和成象概念

所谓几何光学，就是在分析光学现象时，撇开光的波动本性，仅以光线为基础，研究光在透明介质中传播成象问题的学科。它是建立在由实际观察和直接实验所得到的几个基本定律基础之上的。下面给出几何光学的基本概念和基本定律。

§ 1-1 基本概念

一、光波

人们对光的本性的认识是逐步发展的，直到1871年麦克斯韦 (J.C.Maxwell) 提出电磁场学说以后，人们才认识到光实际上是一种电磁波。从本质上讲，光和一般无线电波并无区别。一个发光体就是电磁波的发射源，电磁波按波长分类的情况，如表1-1所示。

光的波长通常用 λ 表示。波长为 $4 \times 10^{-7} \sim 7.6 \times 10^{-7}$ 米范围内的电磁波能为人眼所感受，故称为可见光。在可见光的范围内，不同波长的光引起不同颜色的感觉，人们对不同波长可见光感受的颜色表示在表1-2中，

表 1-1

电磁波名称	波 长(米)
宇宙射线	10^{-14} 10^{-13}
γ 射线	10^{-12} 10^{-11}
X 光	10^{-10} 10^{-9}
紫 外 线	10^{-8} 10^{-7}
可 见 光	10^{-6}

表 (1-1) 续

电磁波名称	波 长(米)
红 外 线	10^{-5}
毫 米 波	10^{-4}
厘 米 波	10^{-3}
无 线 电 波	10^{-2}
	10^{-1}
	10^0
	10^1
	10^2

表1-2

区域名称	波 长 范 围(米)	颜 色 或 光 谱 名 称
紫 外 区	$1 \times 10^{-7} \sim 2 \times 10^{-7}$ $2 \times 10^{-7} \sim 3 \times 10^{-7}$ $3 \times 10^{-7} \sim 3.8 \times 10^{-7}$	真 空 紫 外 远 紫 外 近 紫 外
可 见 光 区	$3.8 \times 10^{-7} \sim 4.5 \times 10^{-7}$ $4.5 \times 10^{-7} \sim 4.8 \times 10^{-7}$ $4.8 \times 10^{-7} \sim 5.5 \times 10^{-7}$ $5.5 \times 10^{-7} \sim 6 \times 10^{-7}$ $6 \times 10^{-7} \sim 6.4 \times 10^{-7}$ $6.4 \times 10^{-7} \sim 7.8 \times 10^{-7}$	紫 兰 绿 黄 橙 红
红 外 区	$7.8 \times 10^{-7} \sim 15 \times 10^{-7}$ $15 \times 10^{-7} \sim 100 \times 10^{-7}$ $100 \times 10^{-7} \sim 10000 \times 10^{-7}$	近 红 外 中 红 外 远 红 外

具有单一波长的光称为单色光。几种单色光混合而成的光称为复色光。太阳光就是由红、橙、黄、绿、兰、紫等各种颜色的光混合而成的。

光在真空中的传播速度为 $c \approx 3 \times 10^8$ 米/秒，在空气中也近似如此。而在其它透明介质（水、玻璃等）中，光的传播速度相对要慢一些。

二、光源与发光点

在物理学中，把能够辐射光能的物体，称为发光体或光源。当光源的大小和其辐射光能作用的距离相比可以忽略时，此光源可认为是一个点光源或称为发光点。例如，星体相对于地球的观察者来说，就可认为是发光点。然而，在几何光学中，无论本身发光的物体还是被照明的物体，统称为发光体。在讨论光的传播时，常用发光体上某些特定的几何点来代表这个发光体。这些特定的几何点被认为是发光点或称为点光源。在讨论物体成象问题时，就是讨论这些发光点的成象问题。因此，几何光学中，认为发光点是一个既无体积又无大小容有能量的几何点。

三、光线

从物理学的观点来看，当光能通过由两个光孔限制的细长空间（称为光管）时，如图1-1所示，如果此光管的横截面积与其长度相比可以忽略不计，则称此光管为“物理光线”。

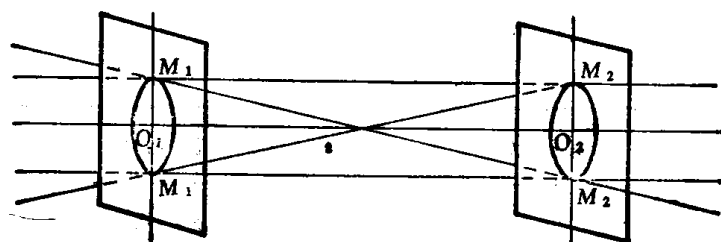


图 1-1

但在几何光学中，认为光线是无直径无体积能够传输能量的几何线，它代表着光的传播方向。

显然，几何光学中的发光点和光线的概念是一种简化了的抽象的概念。因为在一个没有体积的点或线中，不可能容有能量。但是利用这种近似的概念，可以把十分复杂的光能量传输和光学成象问题归结为简单的几何运算。这对指导光学系统设计具有重要作用。

四、波面与光束

按照光的波动理论，认为光波就是电磁波。电磁波是横波，即波动的振动方向垂直于波动的传播方向，振动位相相同的各点在某一瞬时所构成的曲面称为波面，波面可分为平面波，球面波或任意曲面波。

在各向同性的介质中，光能是沿着波面法线方向传播的。故可以认为光波波面的法线就是几何光学中的光线。与波面对应的法线束称为光束。平面波对应于平行光束；球面波对应于会聚或发散光束，如图1-2a, b所示。会聚和发散光束又称为同心光束。当光线既不相交于一点又不平行时，这种光束称为象散光束，如图1-2c所示。

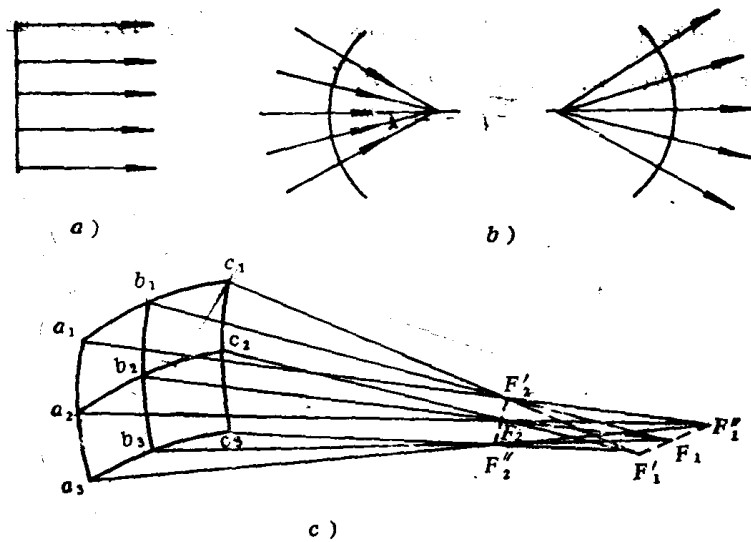


图 1-2

§1-2 基本定律

几何光学以下面四个基本定律为基础。

一、光的直线传播定律

在各向同性的均匀介质中,光是沿着直线传播的。这就是光的直线传播定律。它可以很好地解释影子的形成、日蚀、月蚀等现象。一切精密的天文测量、大地测量和其它测量也都是以此定律为基础的。但并不是在任何情况下光都是直线传播的。实验表明,当在光路中放置一个不透明的障碍物,特别是当光通过小孔或狭缝时,光的传播将偏离直线,而发生衍射现象。因此,光的直线传播定律只有光在均匀介质中无阻拦地传播时才成立。

二、光的独立传播定律

从不同光源发出的光线,以不同的方向通过空间某点时,各光线独立传播着,彼此互不影响,这就是光的独立传播定律。因此,当几束光线会聚于空间某点时,其作用是简单地叠加,各光束仍按各自的方向向前传播。这一定律只是对由不同发光点发出来的光线而言,如果由同一个发光点发出的光线以不同的途径到达空间某点时,这些光线的合成作用不是简单地叠加,而有可能发生光的干涉现象。

三、反射定律和折射定律

当一束光投射到两种透明介质的光滑分界面上时,光能被分成两部分,一部分被分界面反射回原来的介质,称为反射光线。另一部分则通过界面折射入另一介质中,称为折射光线。反射和折射光线的传播分别遵循反射定律和折射定律。

(一) 反射定律

在图1-3中,设 PQ 为一光滑的反射界面,入射光线和分界面上入射点的法线 ON 的夹角 $\angle AON$ 称为入射角,以 I 表示,反射光线 OB 和法线 ON 的夹角 $\angle BON$ 称为反射角,以 I' 表示。反射定律可归纳为:

1. 入射光线、反射光线和分界面上入射点处的法线三者在同一平面内。
2. 入射角和反射角的绝对值相等而符号相反,即入射光线和反射光线位于法线的两

侧。

角度符号规定以锐角来度量。由光线转向法线，顺时针方向为正，逆时针为负。图 1-3 中， I 角为正， I'' 角为负，则反射定律可表示为

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

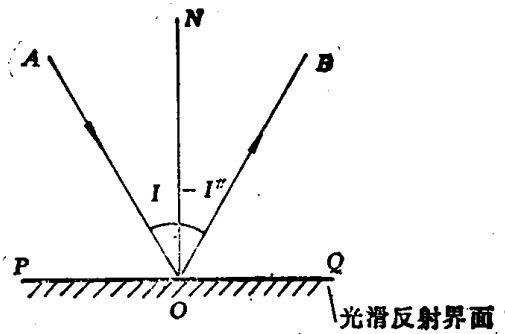


图 1-3

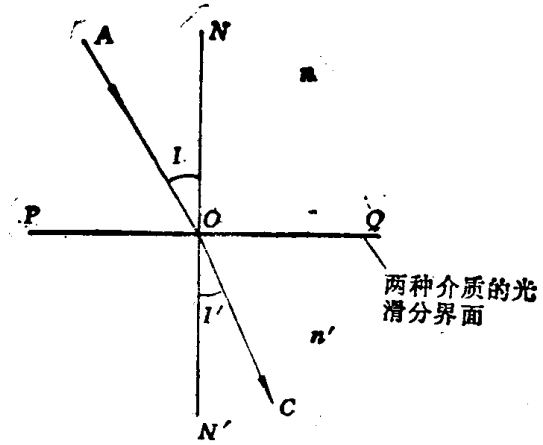


图 1-4

(二) 折射定律

如图 1-4 所示， PQ 为两种介质 n 和 n' 的分界面， AO 为入射光线， OC 为对应的折射光线， NN' 为分界面上入射点 O 处的法线， $\angle AON$ 为入射角，以 I 表示， $\angle CON'$ 为折射角，以 I' 表示。折射定律可归纳为：

1. 入射光线，折射光线和分界面上入射点处的法线三者在同一平面内。
2. 入射角的正弦与折射角的正弦之比与入射角的大小无关，只与两种介质的折射率有关。设 n 和 n' 为两种介质的折射率，折射定律可表示为

$$\frac{\sin I}{\sin I'} = \frac{n'}{n} \quad \text{或} \quad n \sin I = n' \sin I' \quad (1-2)$$

对于任意两种介质分界面上的折射， $n \sin I$ 或 $n' \sin I'$ 为一常数，称为光学不变量。

上式中，若令 $n' = -n$ ，则得 $I' = -I$ ，即为反射定律的表达式。这说明反射定律可以看成是折射定律在 $n' = -n$ 时的一种特殊情况。

当光线自 B 点 (图 1-3) 或 C 点 (图 1-4) 投射到分界面上的 O 点时，由反射定律和折射定律可知，反射光线或折射光线必沿 OA 方向射出，这就是“光路的可逆性”。

折射率是绝对折射率的简称。若光在某介质中的传播速度为 v ，并以 c 表示光在真空中的速度，则该介质的折射率 n 为

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

真空的绝对折射率为 1。空气的绝对折射率在标准压力 760 毫米汞柱，温度 20°C 时为 1.00028，所以认为空气的折射率也为 1。

在不同介质中，折射率高的介质光的传播速度低，称为光密介质。折射率低的介质光的传播速度大，称为光疏介质。

四、矢量形式的反射定律和折射定律

如果介质的分界面在空间分布很复杂，为了解决任一条光线经过反射或折射后的传播方向，用矢量形式的反射定律和折射定律计算比较方便。下面给出矢量形式的折射定律和反射定律。

图1-5中， \mathbf{A}^0 和 \mathbf{A}'^0 分别表示入射光线和折射光线的单位矢量，其方向与光线传播方向相同。即指向右方为正，指向左方为负。 n 和 n' 分别表示折射面两边介质的折射率。 \mathbf{N}^0 为折射面投射点处法线的单位矢量，其方向为顺着入射光线方向为正。

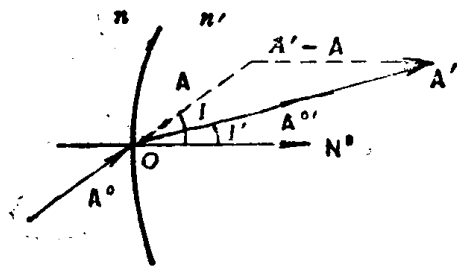


图 1-5

折射定律可表示为

$$n(\mathbf{A}^0 \times \mathbf{N}^0) = n'(\mathbf{A}'^0 \times \mathbf{N}^0) \quad (1-3)$$

若把入射光线矢量 \mathbf{A} 和折射光线矢量 \mathbf{A}' 的大小各取为 n 和 n' ，即 $\mathbf{A} = n\mathbf{A}^0$ ， $\mathbf{A}' = n'\mathbf{A}'^0$ ，则上式可写为

$$\mathbf{A} \times \mathbf{N}^0 = \mathbf{A}' \times \mathbf{N}^0$$

或

$$(\mathbf{A}' - \mathbf{A}) \times \mathbf{N}^0 = 0$$

此式说明，矢量 $(\mathbf{A}' - \mathbf{A})$ 和 \mathbf{N}^0 的方向相同，故可写为

$$\mathbf{A}' - \mathbf{A} = \Gamma \mathbf{N}^0 \quad (1-4)$$

式中 Γ 称为偏向常数。

用 \mathbf{N}^0 对上式作点积，可得

$$\Gamma = \mathbf{N}^0 \cdot \mathbf{A}' - \mathbf{N}^0 \cdot \mathbf{A} = n' \cos I' - n \cos I \quad (1-5)$$

又有

$$\begin{aligned} n' \cos I' &= \sqrt{n'^2 - n'^2 \sin^2 I'} \\ &= \sqrt{n'^2 - n^2 + n^2 \cos^2 I} \\ &= \sqrt{n'^2 - n^2 + (\mathbf{N}^0 \cdot \mathbf{A})^2} \end{aligned}$$

由此可得

$$\Gamma = \sqrt{n'^2 - n^2 + (\mathbf{N}^0 \cdot \mathbf{A})^2} - \mathbf{N}^0 \cdot \mathbf{A} \quad (1-6)$$

求得 Γ 值后，便可由式(1-4)求出折射光线方向，

即

$$\mathbf{A}' = \mathbf{A} + \Gamma \mathbf{N}^0 \quad (1-7)$$

这就是矢量形式的折射定律。

如同在 $n' = -n$ 的条件下可以由折射定律直接得出反射定律一样，矢量形式的反射定律也可在相同的条件下由矢量形式的折射定律导出。只要对偏向常数 Γ 作一简单的处理，使之适合于反射情况即可。由折射定律表示式(1-3)，当 $n' = -n$ 时， $I' = -I$ ，则式(1-5)可写为

$$\begin{aligned} \Gamma &= -n \cos(-I') - n \cos I \\ &= -2n \cos I = -2(\mathbf{N}^0 \cdot \mathbf{A}) \end{aligned}$$

这就是适合于反射情况的偏向常数的 Γ 表达式，将其代入矢量形式折射定律的表达式

(1-4), 即可得到矢量形式的反射定律

$$A' = A - 2N^0(N^0 \cdot A) \quad (1-8)$$

§1-3 全反射及其应用

当光线射至两透明介质的光滑分界面而发生折射时, 必然会伴随有部分光线的反射。在一定条件下, 该界面可以将入射光线全部反射回原介质而无折射光通过, 这就是光的全反射(或称完全内反射)现象。

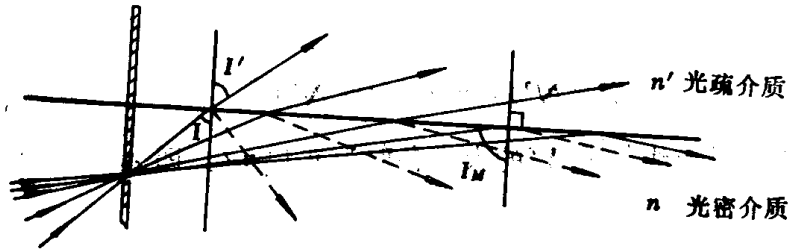


图 1-6

设光线由光密介质进入光疏介质时, 如图1-6所示。因为 $n > n'$, 根据折射定律, 折射角 I' 大于入射角 I 。若逐渐增大入射角 I 到某一数值时, 可使折射光线沿分界面掠射而出, 即折射角 $I' = 90^\circ$, 此时相应的入射角用 I_M 表示, 可由下式决定

$$\sin I_M = \frac{n'}{n} \sin 90^\circ = \frac{n'}{n} \quad (1-9)$$

这一入射角 I_M 称为临界角。若继续增大入射角, 使 $I > I_M$, 则按式(1-9), $\sin I$ 将大于 1, 显然是不可能的, 这时, 折射定律已失去意义。实验证明, 此时光线不再发生折射, 而是按反射定律完全反射回原介质, 即产生了全反射现象。

综上所述, 全反射现象只有在下列条件下, 即光线由光密介质(折射率高的介质)射向光疏介质(折射率低的介质), 且入射角大于临界角时才能发生。

全反射优越于一切镜面反射。因为镜面的金属镀层对光有吸收作用, 而全反射在理论上可使入射光的全部能量反射回原来介质。因而全反射在光学仪器中有着重要的应用。

例如, 为了转折光路, 常利用全反射棱镜代替平面镜, 如图1-7所示。

传光和传象用的光学纤维也是应用全反射原理设计的。对一条光纤而言, 将低折射率的材料包在高折射率材料芯的外面, 如图1-8所示。由于芯子的折射率 n_1 大于包皮的折射率 n_2 ,

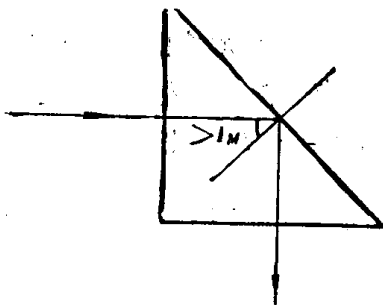


图 1-7

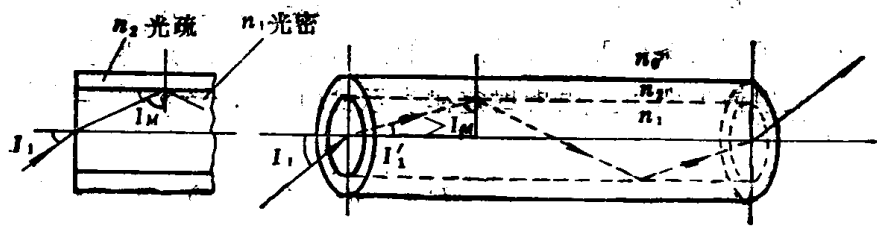


图 -3

则芯子内入射角大于临界角的光线，将在分界面上不断地发生全反射。设 I_M 为临界角， n_0 为空气的折射率，则由折射定律可得

$$n_0 \sin I_1 = n_1 \sin I'_1$$

因 $n_0 = 1$ ，则

$$\sin I_1 = n_1 \sin I'_1$$

又由式(1-9)可得

$$\sin I_M = \frac{n_2}{n_1} = \sin(90^\circ - I'_1) = \cos I'_1$$

则保证发生全反射的条件为

$$\sin I_1 = n_1 \sin I'_1 = n_1 \sqrt{1 - \cos^2 I'_1} = n_1 \sqrt{1 - \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2}$$

$$\sin I_1 = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

由此式可知，当入射光线在纤维端面上的入射角小于上式之 I_1 值时，光线在光学纤维内部才能发生全反射，使光线由光学纤维的另一端射出。

§1-4 成象概念

在光学仪器中的光学系统，其作用是把物体成象以供人眼观察，或用干板及用光电器件

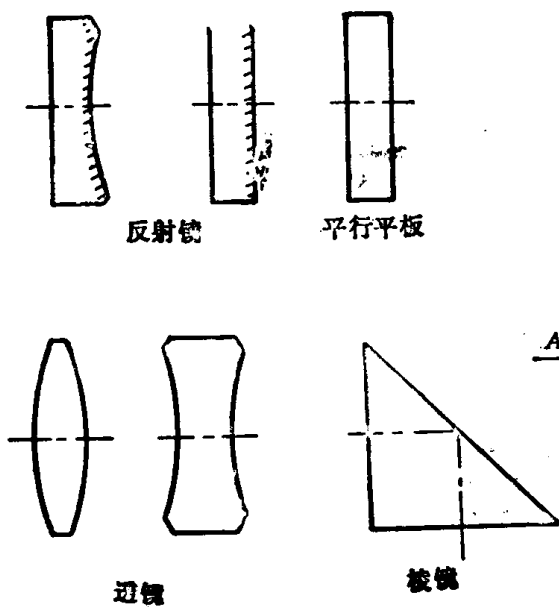


图 1-9

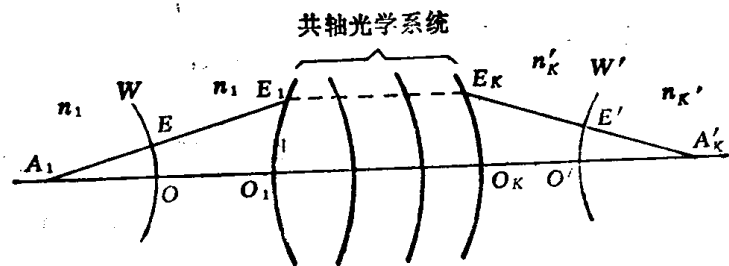


图 1-10

接受。

光学系统是由一系列光学零件组成的。常见的光学零件有透镜、棱镜、平行平板和反射镜等，如图1-9所示。这些光学零件是由球面、平面或非球面形成的具有一定折射率的透明体。这里把各表面的曲率中心均在一条直线上的光学系统，称为共轴光学系统。这一直线称为光轴。实际光学系统绝大部分都是属于共轴系统。

设由 O_1, O_2, \dots, O_K 表示有 K 个表面组成的光学系统,如图1-10所示。由发光点 A_1 发出一球面波,即以 A_1 为中心的同心光束, A_1 称为物点。若经光学系统后仍为一球面波,即以 A'_1 为中心的同心光束,则 A'_1 称为物点 A_1 的完善象点,因此,光学系统成完善象的条件是入射为球面波时,出射也是球面波。

如果发光体 AB 上的每一点发出的球面波,通过光学系统后的对应波面仍为球面波,并成象为 $A'B'$,则 $A'B'$ 称为物体 AB 的完善象,如图1-11所示。

若作为物或象点是由实际光线直接相交而成的,则称此物或象为实物点或实象点。图1-12所示即为实物成实象的情况。

若作为物点或象点是由光线的延长线相交而成的,则称为虚物点或虚象点,图1-13所示即为实物成虚象的情况。

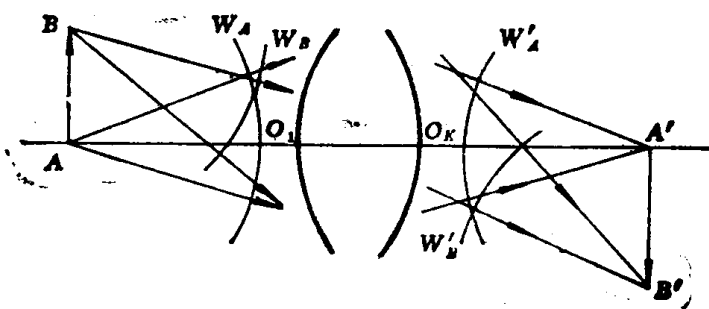


图 1-11

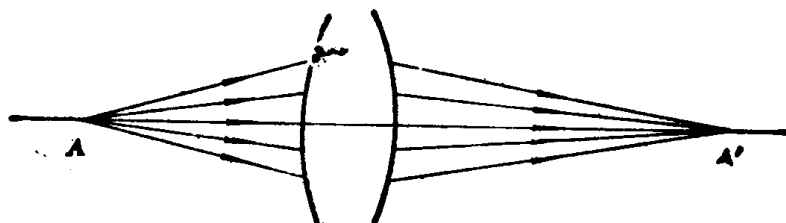


图 1-12

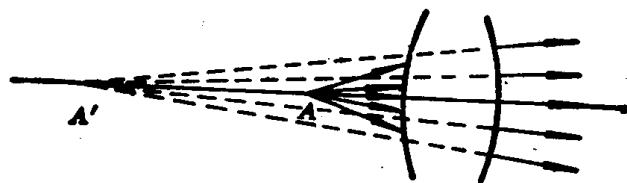


图 1-13

在图1-14中, A_2 是反射镜 M 的虚物点, A'_2 为 A_2 经反射镜 M 所成的实象点。虚物不能人为设置,它是由前面的光学系统形成的。光学系统由若干部分组成时,前一部分对物所成的象就是后继部分的物。

实象可以由屏幕和感光乳胶来接受和记录,虚象则不能,但虚象能为眼睛所感受。

物体(包括实物和虚物)所在的空间称为物空间。象(包括实象和虚象)所在的空间称为象空间,两个空间是无限扩展的,不是被某个折射面或一个光学系统左右两边机械分开的。

设计一个对有限大小的物体成完善象的光学系统是非常困难的。但是对一个特定的点成完善象只需用单个折射面或反射面便可实现，这样的面应该是该特定点的等光程面。如图 1-15 所示，物点 A 被反射面成象于 A' 点。设 M 点为反射面上任一点，则从 A 点到 A' 点的光程可表示为

$$(AA') = AM + MA'$$

如果反射面为等光程面，则

$$AM + MA' = \text{常数}$$

由解析几何可知，由一动点至二定点的距离之和为常数者，则动点的轨迹是以二定点为焦点的椭圆。

将此椭圆绕轴 AA' 旋转 360° 得一椭球，该椭球面即为 A 和 A' 的等光程面。 A 和 A' 点与椭球面的两个焦点重合，并且可以互换，即如果 A' 点为物点，则 A 点为其象点。此时， A' 点即为物点 A 的完善象点。

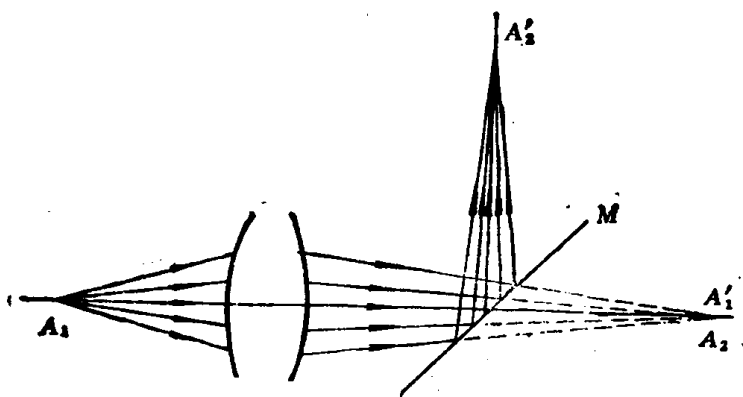


图 1-14

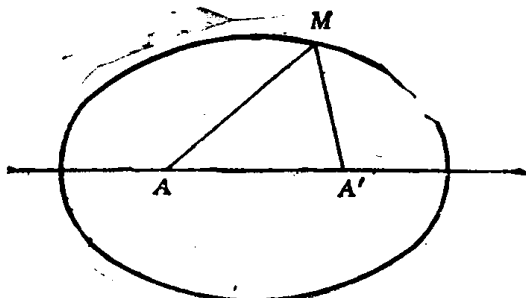


图 1-15

又如图 1-16 所示，无限远物点 A 被反射面成象于有限距离的 A' 点，此时入射波面为平面波 W ，光程为

$$(GA') = GM + MA'$$

如果反射镜面对 A 和 A' 是等光程面，则光程 (GA') 应为常数。由解析几何可知，一动点距一定点和一定直线的距离相等者，动点的轨迹为抛物线，图中 \overline{W} 是定直线， A' 为定点， M 为动点，因 $MA' = MG$ 故

$$(GA') = (G\overline{C}) = \text{平行直线 } W \text{ 和 } \overline{W} \text{ 间的距离} = \text{常数。}$$

由此可知，此时的等光程面是以 A' 为焦点， O 点为顶点的抛物线绕轴旋转而成的抛物面。平行于轴 $A'O$ 入射的平行光束经此抛物面反射镜反射后必会聚于焦点 A' 上，或者自焦点 A' 发出的同心光束，经反射后必平行地射出。

从以上两例可以看出，等光程面实际上都是非球面。由于制造困难，并且当它们对有限大小的物体成象时，轴外点并不满足等光程条件，因而也不能达到完善成象。所以，实际的光

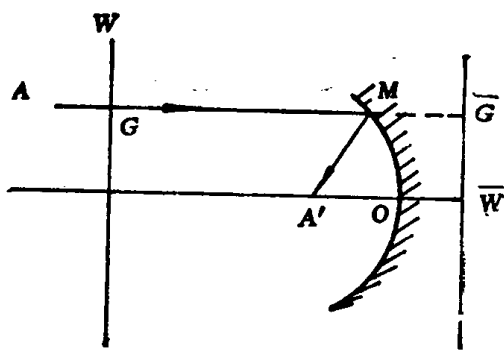


图 1-16

学系统，绝大部分是由一系列球面组成的球面系统。虽然球面不是等光程面，成象是不完善的。但只要满足一定的条件，它们可以对光轴附近的小物体近似地成完善象。

习 题

1. 举例说明光的直线传播、光的独立传播、折射定律和反射定律。并用实验方法证明它们。
2. 有一折射率 $n = 1.54$ 的等腰直角棱镜，放在空气中，求光线与该棱镜直角边法线成怎样的角度时，光线沿斜边射出？
3. 当我们向水池里看时，为什么感觉的深度要比实际深度浅？（水的折射率 $n = 1.33$ ）
4. 折射率为 $n_1 = 1.5$, $n_1' = n_2 = 1.6$, $n_2' = 1$ 的三种介质，被两平行分界面分开。试求当光线在第二种介质中发生全反射时，光线在第一分界面上的入射角 I_1 。
5. 有一折射率 $n = 1.64$ 的等腰直角棱镜，在空气中，当光线入射到棱镜的一个直角边的入射角 $I_1 = 10^\circ$ 时，求光线经另一直角边射出时的出射角。
6. 弯曲的光学纤维可以将光线由一端传到另一端，这是否和光在均匀介质中直线传播定律相矛盾？