

计量光学基础

[illegible]

机械工业出版社

计量技术丛书

计量光学基础

陕西机械学院 冯炳华 赵念念 编



机械工业出版社

内 容 简 介

本书着重讲述了几何光学和波动光学的基本理论,并在此基础上介绍了精密计量中常见的各种光学系统的基本原理,以及光的干涉和衍射在精密计量中的应用问题。

可供具有中等以上文化程度的计量技术和管理人员学习,也可作为大专以上院校有关专业的教材。

计量技术丛书

(第二分册)

计 量 光 学 基 础

陕西机械学院 冯炳华 赵念念 编

责任编辑: 贾克勤

封面设计: 田淑文

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南里一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

通县曙光印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经营

开本 $787 \times 1092^{1/16}$ ·印张 $12^{1/2}$ ·字数 298 千字

1987年11月北京第一版·(1987年11月北京第一次印刷)

印数 00,001—10,000·定价: 3.00元

统一书号: 15033·6560H

“计量技术”丛书编委会

主 编：柏永新

副主编：唐家驹 童 竞

编 委：（按姓氏笔划为序）：

冯炳华	任金铭	刘毓兰
许开君	许泽鹏	李 信
李大成	李斌之	李福利
陈素明	林霁栋	杨国珍
杨致忠	赵瑞生	赵念念
柏永新	高宗海	郭桂珊
夏道智	唐家驹	童 竞
傅庭和	穆志坚	

序 言

我国社会主义四个现代化建设事业的蓬勃发展，要求加快现代化计量科学技术的发展。同时，计量科学技术的进步又有力地促进我国各行业、企业进行的技术改造，使它们尽快地转到现代化技术和现代化管理的基础上来。因此，为了满足各行业、各部门对具有现代计量科学知识的人才的需要，加速人才培养，并提高现有企事业单位计量测试人员的技术水平，我们在陕西机械学院领导的鼓励和支持下，组织我院精密仪器工程系和自动控制系具有丰富教学实践经验的二十名教师，并聘请了陕西省计量局具有丰富工作经验的工程师编写了这套“计量技术”丛书。考虑到计量科学是一门基础性的应用科学，涉及的专业学科有十大类一百四十多项，其内容十分丰富，丛书不可能面面俱到，全面论述。按多数计量测试工作的实际需要，我们编写的丛书比较全面地论述了计量测试中所遇到的机械学，光学，电学和误差理论与数据处理等方面的基础知识，并对长度、温度、力学、电磁和理化等五个方面计量的各种原理、方法和应用技术进行了系统地阐述。这套丛书共包括以下九个分册：

1. 计量机械基础(第一分册)
2. 计量光学基础(第二分册)
3. 计量电学基础(第三分册)
4. 测量数据处理(第四分册)
5. 长度计量技术(第五分册)
6. 温度计量技术(第六分册)
7. 力学计量技术(第七分册)
8. 电磁计量技术(第八分册)
9. 理化计量技术(第九分册)

这套丛书是针对具有中等以上文化程度的在职计量技术和管理人员而编写的，可作为他们的自学和函授教材或有关培训班教材，也可作为大专院校有关专业的教材或参考书。

由于我们水平有限，丛书可能存在不少缺点和错误，我们衷心欢迎广大读者批评指正。

“计量技术”丛书编委会

1987.7

前 言

《计量光学基础》是“计量技术”丛书的第二分册。本书是针对具有中等以上文化程度的在职计量技术和管理人员学习有关光学知识而编写的，可作为他们的自学和函授教材，或有关培训班教材，也可作为大专以上院校有关专业的教材。

《计量光学基础》全书共八章，包括几何光学和波动光学两大部分。第一章到第六章为几何光学部分，第七、第八章为波动光学部分。其中第一章介绍了几何光学的基础；第二章和第三章分别讲述了共轴球面系统和平面系统的成像问题；第四章讲述了光学系统中的光阑；第五章扼要介绍了象差的基本知识；第六章叙述了人眼与目视光学仪器的基本原理；第七章和第八章分别讲述了光的干涉和光的衍射及其在精密计量中的应用问题。考虑到自学和函授的需要，每章之后附有小结和习题，全书之后附有习题答案，以便于读者学习。

本书由赵念念同志（第一章到第六章）和冯炳华同志（第七、第八章）共同编写。童竞副教授担任主审。

在编写过程中，童竞副教授进行了认真的审阅，提出了许多宝贵意见，同时还得到了有关同志的大力支持，在此一并表示感谢。

由于时间仓促，加之我们水平有限，缺少经验，书中难免有错误和不妥之处，恳请读者予以指正。

编 者

1987年1月

目 录

绪论

第一章 几何光学的基础	3
§ 1-1 光线、发光点、光束	3
§ 1-2 几何光学的基本定律	4
§ 1-3 两个重要的光的传播现象	5
§ 1-4 透镜和成象的基本概念	7
本章小结	9
习题	10
第二章 共轴球面系统	11
§ 2-1 符号规则	11
§ 2-2 单个折射球面的成象位置计算	12
§ 2-3 单个折射球面的横向放大率和拉赫不变量	19
§ 2-4 共轴球面系统	20
§ 2-5 理想光学系统的概念	24
§ 2-6 理想光学系统的主点(面)、焦点(面)及焦距	25
§ 2-7 用作图法求理想光学系统的象	28
§ 2-8 理想光学系统的物象关系	31
§ 2-9 薄透镜	33
本章小结	35
习题	36
第三章 平面系统	38
§ 3-1 物象的坐标关系	38
§ 3-2 平面反射镜	39
§ 3-3 平行平板	40
§ 3-4 反射棱镜	43
§ 3-5 折射棱镜与光楔	49
本章小结	51
习题	53
第四章 光学系统中的光阑	54
§ 4-1 光学系统中的光阑及其作用	54
§ 4-2 孔径光阑、入射光瞳和出射光瞳	54
§ 4-3 视场光阑、入射窗和出射窗	56
§ 4-4 景深、焦深与远心光路	58
本章小结	61
习题	62
第五章 象差概述	63

§ 5-1 轴向球差	63
§ 5-2 彗差	64
§ 5-3 象散和场曲	65
§ 5-4 畸变	66
§ 5-5 色差	67
本章小结	68
习题	68
第六章 人眼和目视光学仪器的基本原理	70
§ 6-1 人眼	70
§ 6-2 放大镜	73
§ 6-3 显微镜概述	75
§ 6-4 显微镜的光学性能	77
§ 6-5 显微物镜	81
§ 6-6 目镜	83
§ 6-7 显微镜的照明系统	86
§ 6-8 望远镜概述	89
§ 6-9 望远镜的光学性能	92
§ 6-10 透镜转象系统和场镜	93
§ 6-11 望远物镜	96
§ 6-12 平行光管和自准直望远镜	97
§ 6-13 投影仪概述	100
§ 6-14 投影系统	102
§ 6-15 投影仪的照明系统	103
本章小结	104
习题	108
第七章 光的干涉	109
§ 7-1 波与振动	109
§ 7-2 光波与电磁波	112
§ 7-3 波的叠加与干涉	114
§ 7-4 光的干涉现象及相干条件	117
§ 7-5 获取相干光的其它实验方法	119
§ 7-6 双光束干涉的光程差计算及条纹间距	121
§ 7-7 双光束干涉条纹的形状及分布规律	123
§ 7-8 双光束干涉的光强分布及条纹对比度	124
§ 7-9 影响条纹对比度的因素	125
§ 7-10 平行平板的干涉	130
§ 7-11 楔形平板的干涉	134
§ 7-12 平板干涉在精密测量中的应用	138
§ 7-13 迈克尔逊干涉仪	141
§ 7-14 接触式干涉比较仪	143
本章附录	144
本章小结	145

思考题	147
习题	148
第八章 光的衍射	150
§ 8-1 光的衍射现象	150
§ 8-2 惠更斯-菲涅尔原理	151
§ 8-3 菲涅尔圆孔(盘)衍射	153
§ 8-4 夫琅和费单缝衍射	159
§ 8-5 夫琅和费双缝衍射	165
§ 8-6 光栅衍射	169
§ 8-7 夫琅和费圆孔衍射	175
本章附录	179
附录一 用菲涅尔公式推导夫琅和费单缝衍射的光强公式	179
附录二 用菲涅尔公式推导夫琅和费双缝衍射的光强公式	181
附录三 用菲涅尔公式推导夫琅和费多缝衍射的光强公式	182
附录四 用菲涅尔公式推导夫琅和费圆孔衍射的光强公式	184
本章小结	186
思考题	188
习题	189
本书习题参考答案	191
主要参考文献	192

绪 论

光学是物理学的一个重要组成部分,是研究光的本性、光的传播和光与物质的相互作用的基本学科。

光和人类的生活、生产有着密切的关系,对光的本性的认识,人类经历了一个不断发展,不断深化的曲折过程。

我们的祖先很早就开始对光进行了研究。早在战国时代,墨子在他的著作《墨经》中已经有了关于光的直线传播和影的形成原理的比较完整的叙述,这是有关光的知识的最早记载,它比西方国家最早的光学著作要早一百多年。在秦代,我国就出现了金属反射镜;在晋代,我们的祖先已经知道利用透镜聚焦日光取火;在宋代,沈括在他的《梦溪笔谈》中记载了丰富的几何光学知识。这些成就要比西方国家早十几个世纪。

人类对于光的研究可以分为两个方面。一方面是研究光的本性。简单地说,就是研究光究竟是什么?另一方面是研究光传播的规律和各种传播现象,并根据它们来制作各种光学仪器服务于人类的生产和生活。前者为物理光学的研究对象,后者为几何光学的研究对象。

对于光的本性的最早的科学假设是在17世纪出现的两种完全对立的观点。一种是以牛顿为代表的微粒说,一种是由惠更斯提出,后来由托玛士·杨和菲涅尔进一步补充的波动说。微粒说认为光是从光源飞出来的微粒流,由于惯性作用,光在真空中或均匀的介质中以匀速直线运动。牛顿利用他的微粒说虽然解释了光的反射和折射定律,但在解释牛顿环现象和衍射现象时却遇到了困难。波动说认为光是在“以太”中传播的一种弹性机械波。利用波动说不仅成功地解释了反射和折射定律,还能解释光的干涉现象和衍射现象。但是由于波动说假设光的传播介质是一种特殊的物质——“以太”,这样在解释有关光的传播速度等问题时,虽然波动说给“以太”附加了许多令人难以想象的条件,但仍不能自圆其说;同时由于惠更斯的波动说还没有摆脱几何光学的观念,因而对波动过程的特性没有给予足够的说明。例如,他没有能指出光现象的周期性,而坚持微粒说的牛顿本人却把牛顿环现象认为是光的周期性的表现。微粒说和波动说这两种观点进行了长期的争论,直到1873年麦克斯韦根据电磁波的性质指出光也是一种电磁波,并在1888年被赫兹的实验证实之后,人类对于光的本性才有了一个比较正确的认识。1905年爱因斯坦为了解释光电效应,提出了光量子的假设,此后由康普顿得到证实,使人类对于光的认识更加全面。

今天,人们已经认识到,光是一种既具有波动性又具有粒子性的物质,只是在一定条件下某一种性质显得更为突出而已。

从本世纪50年代起,特别是激光问世以后,由于光学与许多科学技术领域的紧密结合,相互渗透,使光学以空前的规模和速度飞速发展。它已成为现代物理学和现代科学技术前沿阵地的重要组成部分,同时又派生了许多崭新的分支学科——傅里叶光学、薄膜光学、纤维光学、红外技术、光学全息、集成光学、光计算机等等。所有这一切展现了光学发展的光辉前景。

光学在工业、农业、国防、科学研究、文化教育、医药卫生等各个方面都有着极为重要的

应用。光学仪器已成为应用最广泛的工具。人们利用显微镜来观察线度很小的物体；利用望远镜来观察远距离的目标；利用高速摄影机来拍摄炮弹穿透钢板时的瞬时变化；利用光的干涉来测定精密零件的表面粗糙度，进行各种干涉测长、测角；利用光谱仪来研究物质内部的成份等等。在计量工程中使用的众多计量仪器中，应用光学原理和度量学原理设计制造的各种光学计量仪器占有相当大的比例。目前一些精度较高的计量仪器几乎都是由光学系统、机械结构和电器电子设备这三部分组成的，而其中光学系统的优劣往往对整台仪器的性能具有十分重要的影响。因此，作为计量专业的工作者，必须要掌握有关光学的基本理论及其在工程中的应用。

第一章 几何光学的基础

光和人类的生产和生活有着极为密切的联系，人类通过实践早已开始对光进行研究，并积累了有关光的丰富知识，今天人类仍在继续对光进行深入的研究。

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，这方面的内容称为物理光学；另一方面是研究光线的传播规律和成像问题，以及利用这些规律设计制造各种光学仪器，这方面的内容称为几何光学。

§ 1-1 光线、发光点、光束

人类通过对光的长期研究逐步认识到光也是一种电磁波。光的传播实质上是一个波动的传播问题，但是在几何光学中并不把光看作是电磁波，而是把光看作能够传输能量的几何线，这样的几何线就称之为光线。光线表示了光的传播方向。如果我们回忆一下物理学中所讲的光是沿着其波面的法线方向传播的话，那么几何光学中的光线就是波动光学中的波面的法线。

各种各样的光源，无论是自然界中的太阳，还是人造的电灯、日光灯等等，它们都可以向外发出无数条光线，光源所发出的光能量就是沿着每条光线传送出去的。这种能够向外辐射光能的物体称之为发光体。在讨论光的传播时常常选择发光体上的一些特定的几何点来代表这个发光体，这些特定的几何点在几何光学中称之为发光点。发光点是一个既无体积又无大小的几何点，但这样的几何点具有能量，可以向外发出光线。

在研究光学成像问题时，对于任何被成像的物体，无论是其本身发光的物体或被照明的物体，都认为是由发光点组成的。研究物体的成像问题也就是研究这些点的成像问题。

从一个发光点可以发出无数条光线，具有一定关系的无数光线的集合称之为光束。

光束可以分为同心光束和非同心光束。

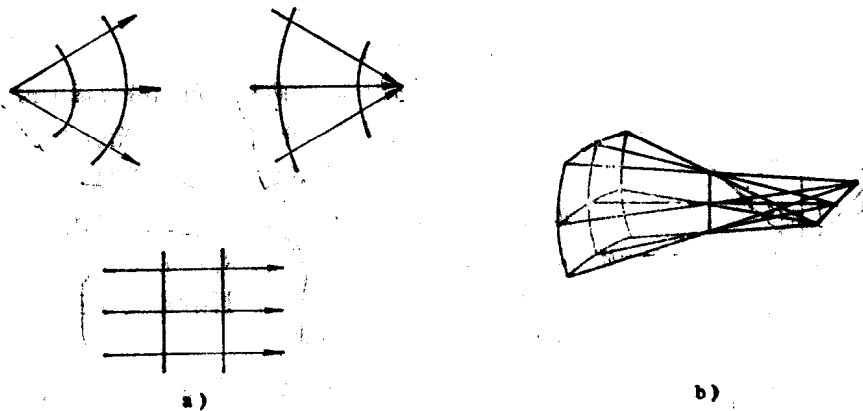


图 1-1

由一点发出或会聚于一点的光束称之为同心光束。如图 1-1a 所示。平行光束也可以认为是一种同心光束，即各光线是从无穷远一点发出或会聚于无穷远一点。

所谓非同心光束就是光束中的所有光线既不相交于一点，彼此也不平行的光束，如图 1-1b 所示。由于实际光学系统总是存在有缺陷（象差），故使得同心光束经过光学系统后会变成非同心光束。

同心光束对应于波动光学中的波面形状是球面波。球面具有一个曲率中心，所以顾名思义取名为同心光束。

非同心光束对应于波动光学中的非球面波。

§ 1-2 几何光学的基本定律

一、光的直线传播定律

光在各向同性的透明介质中沿直线传播。

根据这个定律可以很好地解释影子的形成、日蚀、月蚀等大量的宏观现象。在大多数情况下，它是精确的。但是在有些情况下这个定律将遭到破坏。例如当在光路中放入直径可以与波长相比的小孔时，便发生显著的衍射现象，这时光已不再沿直线传播。这种衍射现象在几何光学中不予考虑，因为在一般情况下，普通光学仪器的孔径都较大，不会遇到明显的衍射现象。

二、光的独立传播定律

在各向同性的透明介质中，不同方向的光线在某一点相交时，它们互不影响，彼此独立地向前传播，其结果只是使相交处更亮一些。比如几个探照灯的光柱在空间相交时，彼此互不影响，各自独立地继续向前传播，仅仅使得相交处更明亮一些。

这一定律对于从不同的发光点射出来的光线来说是正确的。但是当相交的两束光是从同一个发光点射出，只是通过不同路径在空间相交时，虽然它们仍然继续向前传播，但在相交处由于两束光的互相作用也有可能使相交处的光强度不一定增加而是互相抵消从而变暗，这就是所谓的光的干涉现象。

三、光的反射定律和折射定律

光的直线传播定律和独立传播定律研究的是光在同一种介质中的传播规律。当光射到两种不同介质的分界面时，将发生反射现象和折射现象。

如图 1-2 所示，一束在 a 介质中传播的光束，当它射到 a, b 两种介质的分界面 MM 上时，一部分光被界面反射回 a 介质，一部分光折入 b 介质。

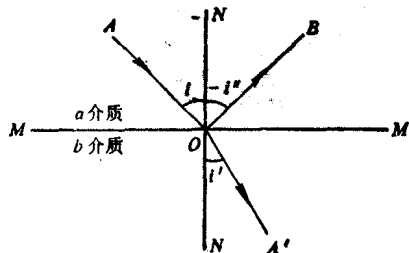


图 1-2

AO 称为入射光线， OB 称为反射光线， OA' 称为折射光线， NN 称为过入射点 O 的法线。入射光线与法线之间的夹角称为入射角，用 i 表示。反射光线与法线之间的夹角称为反射角，用 i' 表示。折射光线与法线之间的夹角称为折射角，用 i'' 表示。

反射光线和折射光线的方向可以分别由反射定律和折射定律来表述。

1. 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, 且反射光线和入射光线分居法线的两侧。

(2) 反射角 i'' 和入射角 i 的绝对值相等, 符号相反。

在几何光学中, 我们规定角度都以锐角来量度。对于由光线和法线所构成的角度来说, 从光线转向法线, 顺时针方向转成的角度为正, 逆时针转成的角度为负。在图1-2中 i 角为正, i'' 角为负。负的量在字母前加“-”号表示。

反射定律可表示为

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

2. 折射定律

(1) 折射光线在由入射光线和法线所决定的平面内, 且折射光线和入射光线分居法线的两侧。

(2) 入射角的正弦和折射角的正弦之比是一个与两角度大小无关, 仅与两介质的性质有关的一个常数。

折射定律可表示为

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

$$\text{或} \quad n \sin i = n' \sin i' \quad (1-3)$$

式中 n ——入射光线所处的介质的折射率,

n' ——折射光线所处的介质的折射率。

折射率是表示介质性质的一个重要参数。

如果某一单色光在真空中的速度为 c , 在某种介质中的速度为 v , 则定义 c 和 v 的比值为该介质的绝对折射率(简称折射率), 记作 n 。

$$n = \frac{c}{v} \quad (1-4)$$

需要指出的是不同波长的光在同一介质中的传播速度是不同的, 因此同一介质对不同波长的光的折射率也是不同的。因而在说某一介质的折射率的时候, 必须同时指明是对哪一波长的光而言的。在一般情况下, 如果不特别说明, 那么所给出的折射率都是对黄绿光而言。

折射率的大小表明了介质的折光能力的大小。 n 值大表明折光能力大, n 值小表示折光能力小。

折射率一般可由实验测量出来。在有关手册中也可查出各种光学材料对不同波长光的折射率的数值。

§ 1-3 两个重要的光的传播现象

上面介绍了光线传播的基本定律, 在这一节里将应用这些定律来研究两个重要的光的传播现象——光路可逆现象和全反射现象。

一、光路可逆现象

假设有一条光线从 A 沿一定的路径传播到 B , 如果从 B 按相反的方向发出一条光线, 则这条光线仍按原路径传播到 A 。光线传播的这种特性称为光路可逆原理。

根据这个原理,在研究物象关系时可以从已知物体的位置和大小找出象的位置和大小,也可以从已知象的位置和大小找出物体的位置和大小。

根据光的直线传播定律可以很好地证明光在各向同性的透明介质中传播时的光路可逆现象。因为在 A 、 B 两点间只能作一条直线,这样不论光线是从 A 点传播到 B 点,还是从 B 点传播到 A 点,都只能沿着同一直线传播。

对于光到达不同介质的界面时的反射和折射情况中的光路可逆现象,可以从反射定律和折射定律的表达式对称性得证。

下面以反射情况为例来说明。

当从 A 点发出的入射角为 i 的一条光线射向两种介质的分界面时,根据反射定律,反射光线以 $-i''$ 的反射角从界面反射到达 B 点,它们遵循 $i = -i''$ 。如果从 B 点发出一条入射角为 $-i''$ 的光线射向两种介质的分界面,按照反射定律,新的反射光线将必然以与前一种情况的入射角相等的角度 i 从界面反射到达 A ,如图1-3所示。

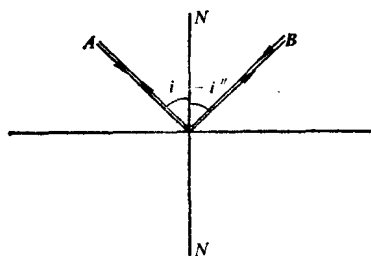


图 1-3

对于折射情况请读者自己分析。

二、光的全反射现象

从上一节几何光学的基本定律可知,当一条光线到达两种介质的分界面时会发生两种现象,一部分光被界面反射回原介质,一部分光折入另一种介质。一般情况下,这两种现象是同时存在的,但是在某些特殊的条件下,到达界面的光线将只发生反射现象,不发生折射现象。我们把入射光线到达界面后不发生折射全部都被界面反射回来的这种现象称为光的全反射现象。

那么这些特殊的条件是什么呢?下面分两种情况叙述。

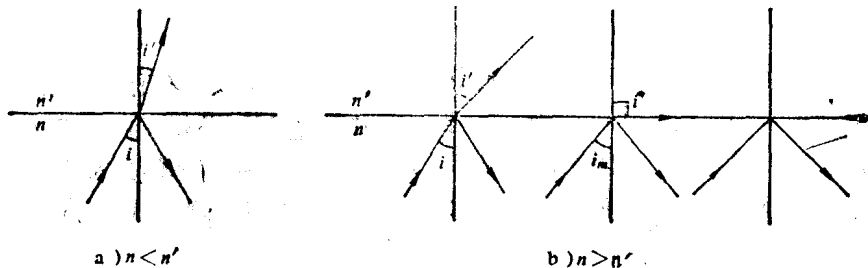


图 1-4

在第一种情况里, $n < n'$,见图1-4 a。根据折射定律,当入射角 i 增大时,折射角 i' 随之增大,但是由于 $n < n'$,所以始终有 $i' < i$,也就是说不论入射角 i 增大到多大,始终都有折射现象发生。

在第二种情况里, $n > n'$,见图1-4 b。根据折射定律,当入射角 i 增大时,折射角 i' 也随之增大,并且由于 $n > n'$,所以始终有 $i' > i$ 。这样,当 i 增大到某一数值 i_m 时,折射角 i' 就会等于 90° ,这时折射光线掠过两介质的分界面。如果再增大入射角 i ,按照折射定律将有 $\sin i' > 1$,这显然是不可能的,也就是说,此时折射定律将失去意义,入射光线全部都被界面反射而不发生折射,这就是光的全反射现象。

从上面两种情况的讨论可以看出,产生全反射的条件:

(1) 光线必须是由折射率大的介质射向折射率小的介质, 即 $n > n'$ 。

(2) 入射光线的入射角必须大于 i_m 。 i_m 是折射角 $i' = 90^\circ$ 时所对应的入射角, 称 i_m 为全反射的临界角。

把 $i' = 90^\circ$ 代入折射定律, 则可得全反射的临界角 i_m 的计算公式

$$\begin{aligned} n \sin i_m &= n' \sin 90^\circ \\ \sin i_m &= \frac{n'}{n} \end{aligned} \quad (1-4)$$

或

$$i_m = \arcsin \frac{n'}{n} \quad (1-5)$$

全反射现象在光学仪器中有着很广泛地应用。例如用全反射棱镜来代替平面反射镜可以减小光能损失, 并能改善光学零件的加工和长期使用。利用光的全反射原理可以测量介质的折射率。近代发展起来的光学纤维也是利用光的全反射原理制成的一种传送光能或光学图象的装置, 如图 1-5 所示。

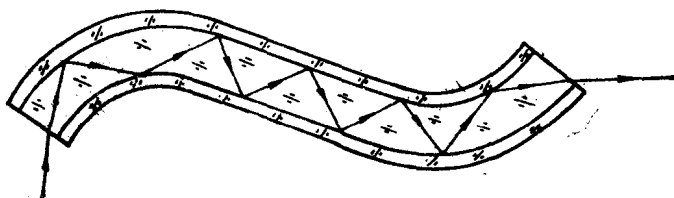


图 1-5

§ 1-4 透镜和成像的基本概念

光学系统是由一系列光学零件组成的, 其中透镜是最常用的, 是最基本的光学零件。透镜是由两个表面都是球面或一个表面是球面, 另一个表面是平面的光学材料做成的。

透镜根据形状的不同可以分成两大类。一类称为凸透镜, 它的特点是中心厚边缘薄; 另一类称为凹透镜, 它的特点是中心薄边缘厚。按凸透镜和凹透镜的截面形状的不同又可分为如图 1-6 所示的六种透镜: 图a为双凸透镜, 图b为平凸透镜, 图c为正弯月形透镜, 图d为双凹透镜, 图e为平凹透镜, 图f为负弯月形透镜。

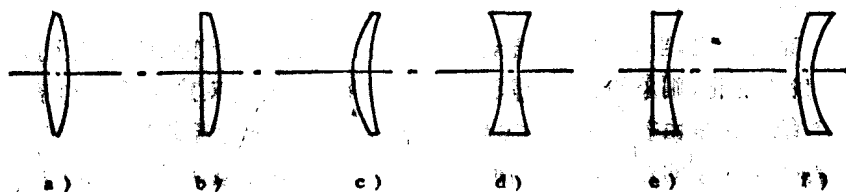


图 1-6

在一般情况下, 凸透镜对入射光线具有会聚作用, 通常又称凸透镜为会聚透镜; 而凹透镜对入射光线具有发散作用, 通常又称凹透镜为发散透镜。

通过透镜两个球面的曲率中心 C_1 、 C_2 的直线叫做透镜的光轴, 如图 1-7 所示。光轴与球面的交点称为顶点, 记作 O 。

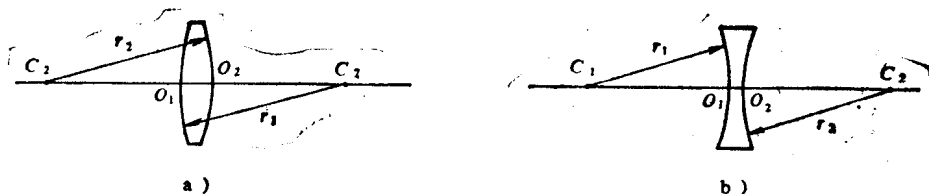


图 1-7

当用若干个透镜和其它光学零件组成光学系统时，绝大多数情况都是把各光学零件轴对称地排列在同一直线上，即各透镜的光轴在同一直线上，这样的光学系统称为共轴光学系统。这条公共的直线通常叫做光学系统的光轴。

物体经光学系统成像时，通过光学系统之前的实际光线的出发点称为实物点，由这样的点构成的物称为实物，如图 1-8 所示之 AB 。通过光学系统之前的实际光线的延长线的交点称为虚物点，由这样的点构成的物称为虚物，如图 1-9 所示之 AB 。

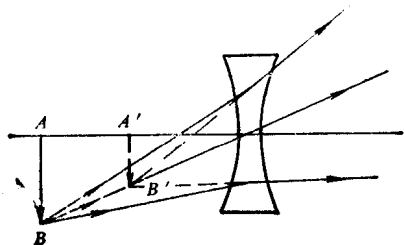


图 1-8

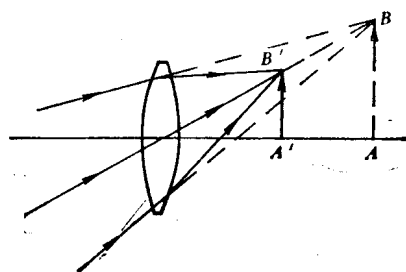


图 1-9

物既然有虚实之分，则象显然也应有虚实之分。

通过光学系统之后的实际光线的交点称为实象点，由这样的点构成的象称为实象，如图 1-9 所示之 $A'B'$ 。通过光学系统之后的实际光线的反向延长线的交点称为虚象点，由这样的点构成的象称为虚象，如图 1-8 所示之 $A'B'$ 。

实象可以用一个屏接收，而虚象可以被眼睛所接收。

如果一个物体经过光学系统之后所成的象的方向与物的方向一致，则称之为正立的象，反之称之为倒象。如果一个物体经过光学系统之后所成的象的尺寸比物体大就称之为放大的象，反之称之为缩小的象。

对一个光学系统来说，当物体的位置确定之后，就可以在一个相应的位置上成一个清晰的象。若物的位置发生变化，则象的位置也随之变化，物和象的这种对应关系在光学上称为共轭。

一个光学系统往往是由若干个光学零件组成的，物体经光学系统的成像过程也就是物体经各个光学零件依次成像的过程，这样前一个光学零件所成的象对后一个光学零件来说就是它的物。例如我们在影剧院里看电影，电影胶片 AB 经放映机的镜头成像在银幕上，银幕上的画面 $A'B'$ 经过人眼在眼睛的视网膜上成一个实象 $A''B''$ 。对放映机镜头来说， $A'B'$ 是与 AB 共轭的象，而对人眼来说， $A'B'$ 又是与 $A''B''$ 共轭的物，如图 1-10 所示。

在光学上把物体（包括虚物）所在的空间称为物空间，象（包括虚象）所在的空间称为象空间。