

高等学校试用教材

工程光学基础

合肥工业大学 徐家骅 主编

GAODENG XUE
XIAO JIAO CAI

机械工业出版社

本书是高等学校精密仪器专业教材，主要讲述应用光学和物理光学。
内容包括：基本原理、成像理论、光束限制、象差概述、典型系统和光能传递；干涉、衍射、偏振的光学现象和应用；现代光学简介。

本书也可作为仪器仪表类、机械类有关专业教材，同时可供其他专业师生、科研和生产单位从事研究设计以及计量测试等工作的工程技术人员参考。

工程光学基础

合肥工业大学 徐家骅 主编

*

责任编辑：贡克勤

*

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)

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{16}$ · 印张 $23\frac{3}{4}$ · 字数 585 千字

1981年7月北京第一版

1988年6月北京第二版·1988年6月北京第五次印刷

印数 11,951—14,650 · 定价：3.95 元

*

ISBN 7-111-00054-4/TH · 10 (课)

前 言

本书是根据高等学校仪器仪表类专业教材编审委员会精密仪器专业教材编审小组 1983 年 10 月制订的教学计划以及 1984 年 4 月审定的《工程光学基础》教学大纲编写的。

本书主要讲述应用光学和物理光学。内容包括：几何光学的基本原理、成像理论、光束限制、象差概述、典型光学系统、系统的光能传递，以及干涉、衍射、偏振的光学现象和应用，还介绍了现代光学的有关内容。

本书是在原教材《计量工程光学》基础上修订的，同时注意到全书的精炼和教材的特点，各章内容均重新编写。应用光学以基础内容为主，删去了不必要的例证和陈旧内容，补充和加强了典型光学系统和整体设计内容；适当加强了物理光学，增加了偏振一章和现代光学简介。

本课程是高等学校精密仪器专业必修课之一，它是实践性较强的一门专业基础课，在进行教学时必须布置一定数量习题，开出必要的实验和计算机进行光路计算。

本书由合肥工业大学徐家骅副教授主编，北京机械工业管理学院齐恕安副教授主审。负责各章编写的有徐家骅（第四、五、六、七章和绪论）、天津大学虞启璠副教授（第一、二、三、八章）、上海交通大学包学诚副教授（第九、十二、十三章）、合肥工业大学李国纯副教授（第十、十一章）。

在本书的编审过程中，合肥工业大学俞志豪同志完成了全书图稿的绘制工作，河北工学院田大滋同志参加了全书文字和图稿的校对工作。此外，还得到兄弟院校的同行人陈骏、张登臣、李易平、冯炳华、刘泊，以及江苏省机械工业厅仪表处林道翔、陈向荣，靖江测绘仪器厂夏扣章、吴宗一、汪宏祥等同志的积极热情支持和帮助，提出了许多宝贵意见，在此深表感谢！

由于编者水平有限，书中缺点和错误在所难免，敬请读者批评指正。

编 者

一九八六、十一

目 录

绪论	1	第六章 象差概述	90
第一章 几何光学的基本定律	2	§ 6-1 轴上点球差	90
§ 1-1 基本方法	2	§ 6-2 正弦差及彗差	95
§ 1-2 基本定律	3	§ 6-3 象散与象面弯曲	99
§ 1-3 物象概念	6	§ 6-4 畸变	102
§ 1-4 光学材料	8	§ 6-5 色差	103
习题	10	§ 6-6 象差容限	106
第二章 球面成像理论	11	习题	108
§ 2-1 符号规则	11	第七章 典型光学系统	109
§ 2-2 单个折射球面的光路计算公式	13	§ 7-1 眼睛	109
§ 2-3 近轴区物点经单个折射球面成像	15	§ 7-2 显微系统	111
§ 2-4 近轴区成像的放大率公式及传递 不变量	16	§ 7-3 照明系统	127
§ 2-5 共轴球面系统	19	§ 7-4 望远系统	136
习题	24	§ 7-5 照相和投影系统	148
第三章 理想光组理论	26	§ 7-6 光学系统外形尺寸设计实例	163
§ 3-1 共线成像理论	26	习题	173
§ 3-2 理想光组的基点、基面及 图解求象	27	第八章 光源与光度学	175
§ 3-3 理想光组的解析法求象	30	§ 8-1 光源的类型	177
§ 3-4 节点	37	§ 8-2 光度学的基本知识	183
§ 3-5 共轴光组的组合	39	§ 8-3 光束经介质后的亮度	187
§ 3-6 透镜与薄透镜	46	§ 8-4 光能在介质分界面上及介质中的 损失	188
习题	52	§ 8-5 光学系统光能损失的计算	191
第四章 平面成像理论	55	§ 8-6 象面照度	192
§ 4-1 平面反射镜	55	§ 8-7 接收器	194
§ 4-2 反射棱镜	58	习题	198
§ 4-3 平行平板	69	第九章 波动光学基础	200
§ 4-4 折射棱镜与光楔	73	§ 9-1 波的数学表示方法	200
习题	76	§ 9-2 波的叠加	204
第五章 实际光组中光束的限制	77	§ 9-3 光的电磁理论的物理意义	211
§ 5-1 孔径光阑、入瞳、出瞳	77	§ 9-4 菲涅耳公式	214
§ 5-2 视场光阑、入窗、出窗	81	习题	219
§ 5-3 平面上所成空间象的不清晰度、成 象空间的深度	84	第十章 光的干涉和干涉仪	221
§ 5-4 远心光路	88	§ 10-1 几个光的干涉实验	221
习题	89	§ 10-2 双光束干涉条纹的形状	224
		§ 10-3 双光束干涉条纹的光强度分布	226
		§ 10-4 对比度及其影响因素	227

§ 10-5 平行平板的干涉	234	§ 12-1 自然光和偏振光	327
§ 10-6 楔形平板的干涉	237	§ 12-2 双折射	329
§ 10-7 多光束干涉和干涉滤光片	242	§ 12-3 椭圆偏振光、圆偏振光和波片	335
§ 10-8 光学薄膜	249	§ 12-4 偏振的矩阵表示	339
§ 10-9 干涉仪	258	§ 12-5 偏振光的干涉	342
§ 10-10 干涉光学系统光路分析及元件 选择	269	§ 12-6 偏振面的旋转——旋光现象	345
习题	277	§ 12-7 电光效应	347
第十一章 光的衍射	279	§ 12-8 磁光效应	350
§ 11-1 惠更斯—菲涅耳原理	280	§ 12-9 声光效应	352
§ 11-2 菲涅耳衍射	281	习题	354
§ 11-3 夫琅和费单缝衍射	292	第十三章 现代光学简介	356
§ 11-4 夫琅和费双缝衍射	297	§ 13-1 激光与激光器	356
§ 11-5 衍射光栅和光栅光谱仪	300	§ 13-2 傅里叶光学的基本原理	360
§ 11-6 矩孔和圆孔的夫琅和费衍射	316	§ 13-3 全息技术基础	364
§ 11-7 光的衍射在工程技术中的应用	320	§ 13-4 相干光的散斑效应	368
习题	325	§ 13-5 纤维光学及其应用	371
第十二章 光的偏振	327	习题	374

绪 论

在科学技术发展的过程中，哥白尼、伽里略、牛顿等主要研究物质的宏观低速运动的规律，而普朗克和爱因斯坦则主要研究微观高速运动规律。

微观物理学的发展，尤其和电子学的结合，导致了信息光学的发展和激光技术的出现，使得光学与许多科技领域发生了密切的联系。麦克斯韦的电磁理论指出光是电磁波，但直到激光器的出现，提供了光频波段的相干电磁波振荡源，光的电子学性质才得到了广泛的研究和应用，可以说，现今光学和电子学之间的鸿沟已不复存在。正是这样，用于通信系统的傅里叶变换被引入光学系统成像理论，这几乎成为近代信息光学重大发展的起点。同样，由于激光是一种准单色相干电磁波，在它经过介质时要引起介质极化，也只有激光才使得介质极化与光波的关系中的高次项的作用显现出来，使得研究介质极化的非线性光学效应以及如何利用这些效应的非线性光学得到发展。激光的传输往往要以波导方式进行，光学纤维作为光波导的一种，它远比空腔、透镜等波导优越，故以研究这种波导的光学特性及其他性质的纤维光学应运而生。总之，近几十年来，光学有了很大发展，出现了很多新学科、新分支、新技术，真是琳琅满目，数不胜数，展现了广阔的发展前景。

应该指出，近代的光学发展是由于激光的出现，促进了学科间的相互渗透、结合，以及某些传统光学的发展和扩充。传统光学中的基础内容是不能忽视的，只有掌握好基础内容，才有可能更好地掌握近代光学的内容。应用光学和波动光学仍是近代光学的基础，因而本书仍以应用光学和波动光学作为主要内容，从仪器专业的工程要求入手，着重介绍高斯光学理论、典型系统结构原理和整体设计，干涉、衍射、偏振的光学现象、原理和它们的应用。同时也以一定的篇幅介绍光学发展的概貌，如激光和激光器、傅里叶光学、纤维光学的原理及应用等，这也是本书起名《工程光学基础》的原因。

当今，在工程光学领域内，新技术不断涌现，应用范围日趋扩大，工程光学基础更是有关科技人员所必须了解和掌握的基本学科之一。对本书内容的深入掌握，不仅可使读者明了工程技术上常见的光学问题，也为学习近代光学理论打下良好的基础。

第一章 几何光学的基本定律

§ 1-1 基本方法

把光的概念和几何学中的点、线、面有机地联系起来，就形成了几何光学的几个基本概念。它是讨论和解决实际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的基础上的。

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略去不计时，就称它为发光点，例如太阳、星体等相对于地球上的观察者来说，都可以认为是发光点。然而，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。任何被成象的物体（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。以后我们将要讨论这种发光点的成象问题。

二、光线

当光束的截面积和其长度相比可略去不计时，从物理的观点来说，这种细而长的光束就称之为光线。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使问题的处理大为简化。利用这些概念，不仅能将本质上十分复杂的光能传播和成象概念归结成简单的数学（或作图）问题，而且实用上也能达到令人满意的结果。

物理光学谈及，光是一种电磁波，其振动方向垂直于传播方向。在传播途径中，具有相同振动位相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光学中的波面法线。

三、光束

一个位于均匀介质中的点光源，它所发出的光波波面是以发光点为球心的球波面。显然，波面的法线束就是几何光学中的光线束（简称为光束）。这种发自一点或会聚于一点的

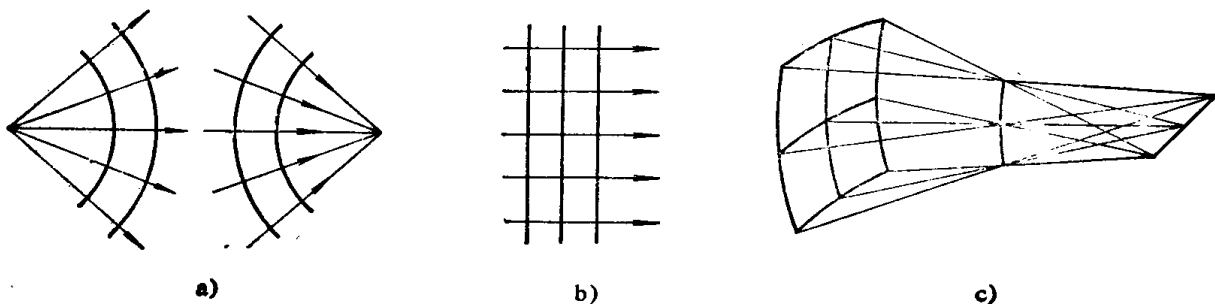


图 1-1

a) 同心光束 b) 平行光束 c) 象散光束

光束称之为同心光束（见图1-1 a）。若波面是一平面波，则波面的法线彼此平行，与这种平面波所对应的光束称为平行光束（见图1-1 b）。当光线既不相交于一点，而又不平行时，这种光束称为象散光束（见图1-1 c），其对应的波面为一曲面。

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。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。实际的做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，上述成像问题就可得到解决。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

在各向同性的均匀透明介质中，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（如日蚀、月蚀、半影、本影等等）的总结。一切最精密的天文测量、大地测量和其它许多测量中，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小孔时，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，彼此不发生影响，对其中的某一光线而言，犹如没有其它光线存在那样来传播，在光线的相交点上，其作用是相加的。这就是光的独立传播定律。

利用此定律，使人们对光线传播情况的考虑大为简化。因为在考虑某一光线传播时，可以不考虑其它光线对它的影响。

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

三、折射和反射定律

当一束光射到二种透明介质的光滑分界面时，光就被分成二部分。如图1-2所示，一部分光在分界面上被反射回原来介质，称为反射光线。一部分光折入另一介质，称为折射光线。反射光线和折射光线的传播规律遵循反射定律和折射定律。入射光线 AO 和分界面上入射点的法线 ON 之间的夹角 $\angle AON$ 称为入射角，用字母 i 表示；反射光线 OB 和法线 ON 之间的夹角 $\angle BON$ 称之为反射角，用字母 i'' 表示；折射光线 OA' 和法线 OM 之间的夹角 $\angle AOM$ 称之为折射角，用字母 i' 表示。折射定律和反射定律分述如下：

（一）折射定律

折射定律的内容是：

（1）折射光线位于由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。

（2）入射角的正弦和折射角的正弦之比与二角度的大小无关，仅决定于两个介质的性

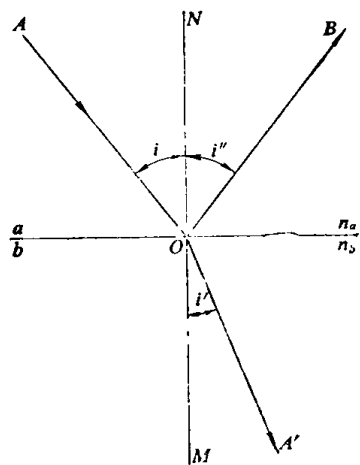


图 1-2

质, 为一恒量 n_{ab} 。即

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

n_{ab} 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。

同样可以写出二个介质的相对折射率与光在该二介质内速度的关系为

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

将式(1-3)加以变换, 可得

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

由式(1-4)可知, 二介质的相对折射率等于二介质绝对折射率之比, 将式(1-4)代入式(1-1), 并设 $n_a = n$, $n_b = n'$, 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。

真空的绝对折射率为 1, 而空气的绝对折射率在标准压力 101 324.72 Pa, 温度 20°C 时为 1.000 28。这就是说, 介质的绝对折射率与其对空气的相对折射率相比较, 差之甚微, 因此目前常用在空气中测得的折射率表示该介质的绝对折射率, 空气的折射率则认为是 1。

(二) 反射定律

反射定律描述如下 (见图 1-2):

(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 i'' 和入射角 i 的绝对值相同, 可表示为 $i'' = -i$ 。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)即可得:

$$i'' = -i$$

上述四个定律是几何光学的基本定律, 也是本课程讨论光线传播和光学成像问题的基础。利用上述定律, 可得出光线传播的一个重要原理, 即光路可逆性原理, 其内容如图 1-3 所示。假如有 A 和 B 二点, 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。利用这个原理, 我们可以从已知物体的位置寻找象的位置。反之, 也可从已知象的位置寻找物体的位置。

全反射是光线传播的另一个重要现象, 它是光线折射在某些特殊情况下产生的, 如图 1-4 所示。由 A 点发出一光束射向介质的分界面, 设入射介质的折射率 n 大于折射介质的折射率 n' 。由折射定律 $n \sin i = n' \sin i'$ 可知, i' 大于 i ; 若增大入射角 i , 则折射角 i' 也相应增大; 当入射角 i 增大到某一数值 i_m 时, 折射角 i' 为 90° 。此时, 折射光线将沿二介质的分

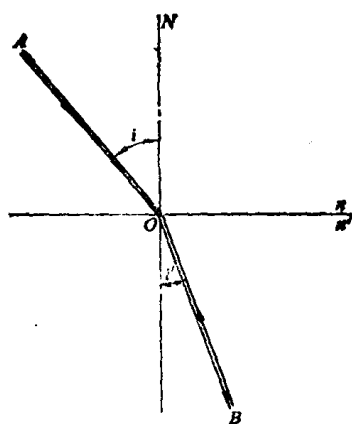


图 1-3

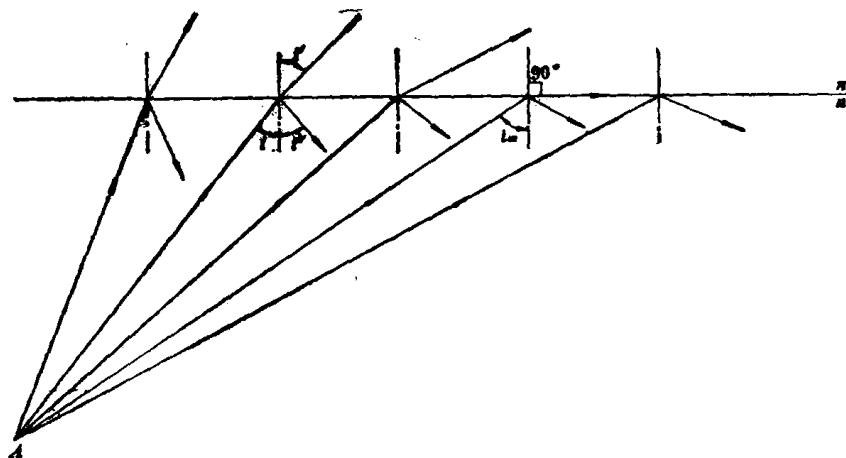


图 1-4

界面掠射，而且 $n \sin i_m = n' \sin 90^\circ = n'$ 。这种情况下的入射角 i_m 称为临界角，它等于

$$\sin i_m = n' / n \quad (1-6)$$

若再增大入射角，使 i 大于 i_m ，则按式(1-5)计算将导致 $\sin i'$ 大于 1，这显然是不可能的。这时，折射定律已经失去意义。实验证明，此时光线不发生折射，而被全部反射回来（见图 1-4），这种现象称之为全反射。综上所述，全反射现象只在下述条件下才能产生：

- (1) 光线由折射率大的介质射向折射率小的介质（也称由光密介质射向光疏介质）。
- (2) 入射角大于临界角。

在大多数实际情况下，光疏介质是空气，其折射率为 1。因此，式(1-6)可写成：

$$\sin i_m = \frac{1}{n} \quad (1-7)$$

不同折射率的光学材料，其相应的临界角也不同，见表 1-1。

表 1-1

n	1.5	1.55	1.60	1.65	1.70	1.75	1.80	1.90
i_m	$41^\circ 48'$	$40^\circ 11'$	$38^\circ 41'$	$37^\circ 18'$	$36^\circ 02'$	$34^\circ 51'$	$33^\circ 23'$	$31^\circ 45'$

全反射现象在光学仪器中有广泛的应用，例如用全反射棱镜代替平面反射镜以减少光能的反射损失。因为全反射棱镜可以反射全部入射光能，而平面反射镜只能反射 90% 左右的光能。近代发展的光导管是应用全反射现象的一个例子。光导管由许多直径约为 $10 \sim 25 \mu\text{m}$ 的细玻璃纤维组成。如图 1-5 所示，每根玻璃纤维由内外两层折射率不同的玻璃拉制而成；内层玻璃折射率 n 较高，是纤维的轴心，称为芯线；外层玻璃的折射率 n' 较低，称为包层。设入射光线 SA 由折射率为 n_s 的介质射向芯线

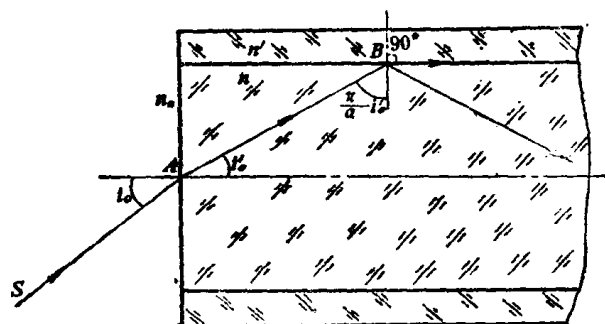


图 1-5

；外层玻璃的折射率 n' 较低，称为包层。设入射光线 SA 由折射率为 n_s 的介质射向芯线

的 A 端, 经折射后光线 AB 射向玻璃的内壁 B , 其入射角和折射角分别为 i 和 i' 。当光线 AB 在内壁上的入射角大于临界角时, 就发生全反射。在临界状态时, 定 $i_0 = i$, $i'_0 = i'$, 由式(1-6)可得

$$n \sin(90^\circ - i'_0) = n'$$

因为 $n_a \sin i_0 = n \sin i'_0$, 将此式代入上式并整理之, 可得:

$$i_0 = \arcsin \left(\frac{1}{n_a} \sqrt{n^2 - n'^2} \right) \quad (1-8)$$

当入射光线的 i 角小于 i_0 角时, 此光线将在玻璃内壁不断地全反射并传播到另一端, 大于 i_0 角的入射光线将大部分透过玻璃内壁进入包层, 因而光很快衰减而不能继续传送。

定义 $n_a \sin i_0$ 为光学纤维的数值孔径。可以看出, 当 i_0 愈大时, 光学纤维能够传送的光能也就愈多。

图 1-6 表示了一根放大的玻璃纤维, 光线从 A 射入, 经一系列的全反射最后由 B 处出射。这样, 利用一束玻璃

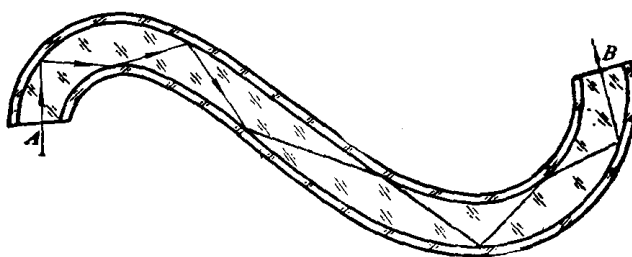


图 1-6

纤维组成的光导管就可以解决图象或光能的传送问题。由于光导管能在弯曲状态下传像或传光, 故它已成为一种新的光学元件并广泛应用于各种科学技术中。

§ 1-3 物 象 概 念

光学仪器主要用于成象, 因此, 必须搞清楚物象的基本概念和它们的相互关系。

物体是通过光学系统 (也称光组) 成象的。光学系统由一系列光学零件所组成, 常见的光学零件有透镜、菲涅尔透镜、反射和折射棱镜、平行平板和反射镜等, 如图 1-7 所示。但是, 光学系统种类繁多, 要求不一, 必须按需要选用各种光学零件, 进行计算和合理组合, 才能使之满足各种成象要求。

光学系统一般是轴对称的, 即有一条公共的轴线, 通常叫做光轴, 这种系统称为共轴光

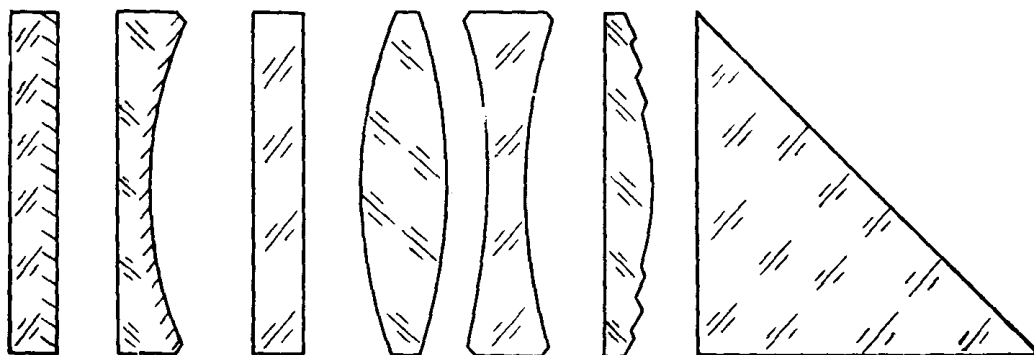


图 1-7

学系统。

透镜是光学仪器中最常用的光学零件，它是由二个曲面或一个曲面、一个平面所围成的透明体，由于非球面的加工和检验较困难，目前应用的透镜绝大多数是球面透镜。经过二球面球心的直线称透镜的光轴。在由一个球面和一个平面组成的透镜中，其光轴是通过球面球心且垂直于平面的直线。光轴与透镜面的交点称为顶点。

透镜可以分成正透镜和负透镜两大类。正透镜具有正的象方焦距，能对光束起会聚作用；负透镜具有负的象方焦距，对光束起发散作用。

按形状，正透镜可分双凸、平凸、凹凸（正月牙透镜）等三种。负透镜有双凹、平凹、凸凹（负月牙透镜）等三种（见图 1-8）。一般情况下，正透镜沿光轴的厚度比边缘厚度大，而负透镜则边缘厚度比中心厚度大。

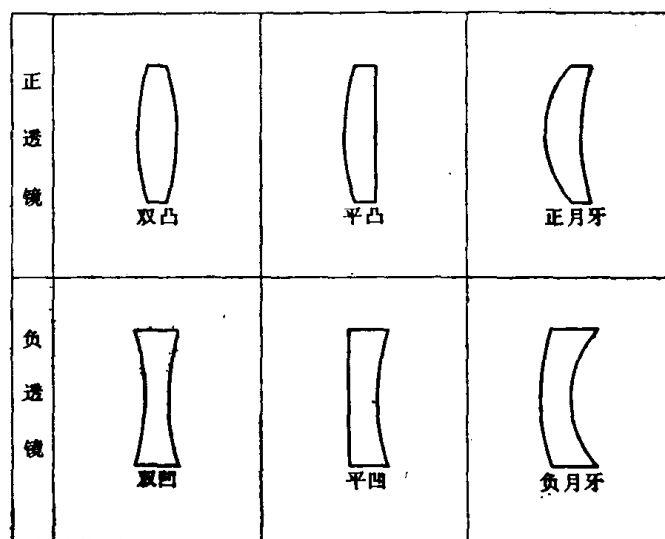


图 1-8

如图 1-9 所示，在正透镜的前方某一合适的位置，放上一个图形 AB （图中为一垂直于光轴的箭头），如果在透镜后方安置一纸屏（也垂直于光轴），并使它来回沿光轴移动，在某一位置，纸屏上可以看到一个清晰的影象 $A'B'$ ，它就是 AB 被透镜所成的象。由于 $A'B'$ 是实际光线所成的象，这种象称为实象， AB 称为物体。日常生活中，光学系统成实象的例子是非常多的。例如银幕上的影象就是影片上的景物被电影放映机所成的放大实象；可是，有的光学系统所成的象，虽然能被眼睛看到，但无法在纸屏上显示出来。照镜子是一个非常典型的例子（见图 1-10），人们在镜子里可以看到物体 AB 被镜子所成的象 $A'B'$ ，显然此象并不是实际光线相交而成，而是由反射光线的反向延长线相交所得。这种由反射（或折射）光线的反向延长线相交所成的象称为虚象。综上所述，象可分为两种——实象和虚象。与此类似，物体也可以分为两种——实物和虚物。能实际发出光线的物体称为实物（从光学的意

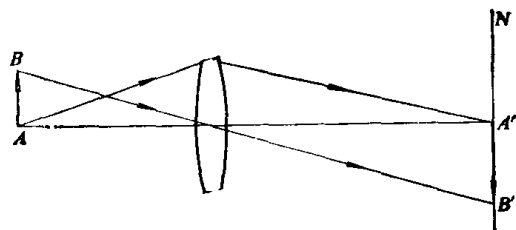


图 1-9

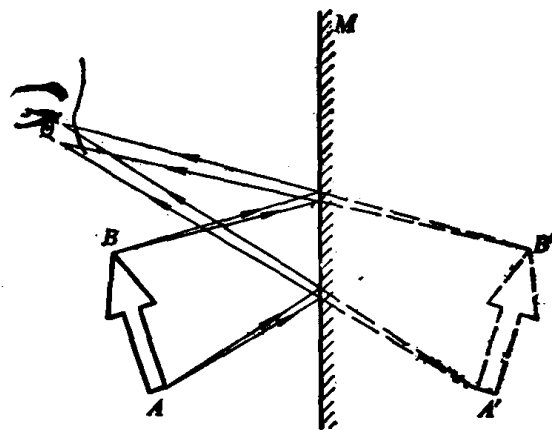


图 1-10

义上说, 实物可以是自己能发光的物体, 例如灯泡、蜡烛等等, 也可以是本身并不能发光但由其它光源照明后才发光的, 例如人物、景物、月亮等等), 不是由实际光线, 而是由光线的延长线相交而成的物体称之为虚物。

通常, 对某一光学系统来说, 当物体的位置固定后, 就可以在一个相应位置上成清晰象 (今后将会谈到, 象的位置和大小不但与光组的性能有关, 还与物体的位置有关), 例如放电影时胶片 (即物体) 和银幕上的象相对于镜头的位置就有这样的对应关系。这种物象之间的对应关系在光学上称之为共轭。因此, 物和象之间的关系就可进一步抽象成共轭概念。

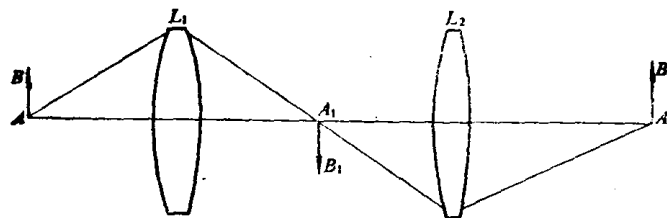


图 1-11

必须注意, 物象概念是相对于光组而言的, 如图 1-11 所示, 物体 AB 经光组 L_1 后成象为 A_1B_1 , 再经光组 L_2 后成象为 $A'B'$ 。显然, 对光组 L_1 而言, A_1B_1 是 AB 的象。但对光组 L_2 而言, A_1B_1 则是物体, 它经 L_2 后成象为 $A'B'$ 。对整个光组而言, AB 是物体, $A'B'$ 是象, 而 A_1B_1 则称为中间象。

阐明物象概念和它们的虚实性后, 引入一个物象空间的概念, 即物体所在的空间称为物空间, 象所在的空间称为象空间。由于物象有虚、实之分, 因此物象空间也可分为实物空间、实象空间, 虚物空间和虚象空间。

§ 1-4 光 学 材 料

在光学仪器中, 光学零件 (如透镜、反射镜、棱镜……等等) 是用各种各样的光学材料制造的。例如光学玻璃、晶体、光学塑料等等。其中, 以光学玻璃应用最为广泛。

为了得到良好的成象质量, 光学材料应满足以下要求:

(1) 高度的光学均匀性。这就是说, 对某一种材料, 必须有一定的光学常数, 而且在同一材料的不同部分, 也要具有同样的数值或差别甚小。这个要求不仅改善了成象质量, 而且使性能相同的光学仪器大量生产成为可能。

(2) 最大的透明度, 以减少光能的吸收损失。

(3) 无色性。除特殊需要外 (如滤色片), 光学材料要求尽量无色, 以便成象后不改变或尽量不改变原有物体的色彩。

(4) 良好的物理性能和化学稳定性, 以扩大光学仪器的使用范围。

(5) 内部尽可能无气泡、杂质及条纹。

(6) 对某些特殊场合 (如荧光使用), 要求光学材料在激发光照射时不产生荧光。

对各种光学玻璃的性能要求在国家标准 GB903-65 中已作了具体规定, 光学设计者在设计光学系统时应按具体要求选定。

为了设计出各种用途的优良光学系统, 所需的光学玻璃种类很多, 目前生产的光学玻璃多达几百种, 它们的化学成分和物理性能是不同的。光学玻璃基本上分成两大类: 冕牌玻璃 (不含氧化铅或含少量氧化铅的玻璃) 和火石玻璃 (含大量氧化铅的玻璃)。

一般说,冕牌玻璃的特征是低折射率、低色散;火石玻璃的特征是高折射率高色散。但是,随着科学技术的发展,人们利用稀土元素,例如镧、钍、钽、铌、钇……等制造了高折射率、低色散的光学玻璃(称为稀土光学玻璃)。利用氟化物、钛等制造了低折射率高色散的光学玻璃(称为氟钛玻璃)。由于这些新型玻璃的产生,人们可以设计出象质更好的光学系统,对现代光学仪器的发展起了很大的推动作用。

对光学设计者而言,只要知道玻璃某些特定波长的折射率,那么该玻璃的特性也就完全决定了。由于同一玻璃对各种色光具有不同的传播速度,也即不同的色光具有不同的折射率,因此,光学玻璃的性质由一系列特定光谱线的折射率来决定。这些光谱线的波长如表1-2所示。

表 1-2

颜色	红		黄		绿	青		蓝	紫
谱线符号	A'	C	D	d	e	F	g	G'	h
波长/nm	768.5	656.3	589.3	587.6	546.1	486.1	435.9	434.1	404.7
产生谱线的元素	K	H	Na	He	Hg	H	Hg	H	Hg

波长为 589.3 nm 黄色的谱线的折射率 n_D 称为基本折射率,它必须精确到小数后第四位(以微米为单位)。由于波长为 546.1 nm 的绿色汞谱线更接近人眼最敏感的 555nm 波长,所以近年来已有很多人把它的折射率 n_e 作为基本折射率。 F 光和 C 光的折射率差($n_F - n_C$)称为平均色散或中部色散,而任何一对其他谱线的折射率之差称为部分色散,所有这些色散值必须精确到小数后第五位(以微米为单位),这是光学设计时保证成象良好的必要精度。

由于光学设计的需要,在光学玻璃目录中通常给出下列光学参数:

(1) 基本折射率 n_D ;

(2) 平均色散 $n_F - n_C$;

(3) 阿贝常数 $\nu = \frac{n_D - 1}{n_F - n_C}$;

(4) 相对色散 $\frac{n_F - n_e}{n_F - n_C}$; $\frac{n_F - n_D}{n_F - n_C}$; $\frac{n_g - n_F}{n_F - n_C}$

(5) 部分色散 $n_d - n_D$; $n'_G - n_g$;

(6) 谱线 C 、 F 、 h 、 g 、 e 、 A' 及红外波长 863.0nm、960.8nm 及紫外波长 365.0 nm 的折射率。

由于各种光学玻璃的物理和化学性质均不相同,光学工作者在选用它们时,一方面要考虑成象质量(消象差)的要求,另一方面也要注意使用环境(室内还是野外,一般场所还是特殊——有腐蚀、放射——场所等等)。这样,制得的光学仪器才能保证象质和使用寿命。值得注意的是,为了及时地生产出光学仪器,降低成本,选用大量生产的常用光学玻璃是必要的。而这点却往往被人们所忽视,以致于设计的光学仪器因买不到光学玻璃而不能投产。

除光学玻璃以外,光学仪器中还常用各种晶体做光学零件,如石英、萤石、岩盐和其它碱金属卤化物的大块单晶体。由于这些材料不可能由紫外到红外的全部光谱区域都具有良好的光学性能,因此对不同的光谱区域需要用不同的材料。例如,常用于紫外光谱区的晶体

材料有：氟化锂(LiF)、氯化钠(NaCl)、溴化钾(KBr)、石英(SiO_2)；用于红外光谱区的晶体材料有：硅(Si)、三硫化二砷玻璃(As_2S_3)、氯化钠(NaCl)；激光器常用的光学材料有：宝石(Al_2O_3)、氟化钙(CaF_2)、钹玻璃(掺钹的硅酸盐玻璃)，钇铝石榴石等。

由于自然界中大块单晶不易获得，人工制造也较困难，因此它们常用在一些特殊要求的光学仪器中。

近些年来，有些国家已开始采用光学塑料制造某些光学零件。它大致有丙烯酸酯、乙-甲基丙烯酸酯(俗称有机玻璃)、聚苯乙烯、聚碳酸酯……等等类型，其折射率约在1.47~1.59左右。

由于光学塑料成型方便(100mm以下通常直接成型，不需研磨)、重量轻、不易破裂、便于大量生产，故可以制造形状很复杂的光学零件。从长远的角度来看，它将在光学工业中占有一定的地位。

习 题

1. 试由折射定律证明光线的可逆性原理。
2. 试对几何光学的每条基本定律提出一个实验来证明它。
3. 弯曲的光学纤维可以将光线由一端传至另一端，这是否和光在均匀介质中直线传播定律相违背？
4. 证明光线通过置于空气中的几个平行的玻璃板时，出射光线和入射光线的方向永远平行。
5. 有一个玻璃球，其折射率为1.5163，处于空气中，今有一光线射到球的前表面，若入射角为 60° ，求在该表面上此反射光线和折射光线之间的夹角。
6. 折射率 $n_1 = 1.4$ ， $n'_1 = n_2 = 1.6$ ， $n'_2 = 1$ 的三种介质，被二平行界面分开，试求在第二介质中发生全反射时，光线在第一分界面上的入射角 i_1 。
7. 一条位于空气中的光学纤维，其芯线和包层的折射率分别为1.62和1.52，试计算该光学纤维的数值孔径。
8. 一个截面为等边三角形的棱镜，用光学玻璃ZF₆制成，其折射率 $n_c = 1.7473$ (红光)， $n_D = 1.7550$ (黄光)， $n_v = 1.8061$ (紫光)，若D光经第一折射面折射后与截面底边平行，而C光、F光在第一面的入射角与D光相同，求三色光经第二折射面后的折射角各为多少，并用示意图表示出三色光的位置。

第二章 球面成像理论

在光学系统中,透镜是最基本的成像元件,它是由两个球面或一个球面和一个平面所构成。因此,为了讨论透镜的成像规律,必须首先了解单个球面的成像规律。

§ 2-1 符 号 规 则

如图 2-1 所示,折射球面 OE 为两种介质 n 和 n' 的光滑分界面, C 为球面的曲率中心, OC 是球面的半径,以字母 r 表示。对单个球面来说,通过球心的直线称为光轴,光轴与球面的交点 O 称为顶点。

从光轴上任一物点 A 发出一条光线,它的传播规律将遵循前面所述的基本定律。设光线经球面折射后交光轴于 A' 点。如果由 A 点发出的所有光线经球面折射后均交于 A' 点,则称 A' 点为 A 点的象。所以,成像问题实质上就是光线的成像问题,只要能求得物点发出光线的光路,这一问题就可得到解决。

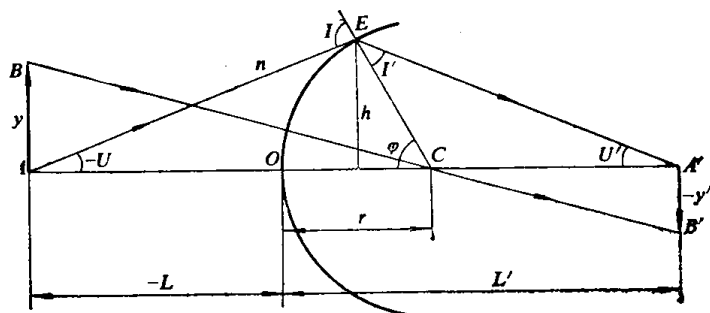


图 2-1

由于球面的轴对称性,我们只要研究在包含物点和光轴的截面内少数几条光线的光路,整个光束的传播情况也就知道了。这种包含物点(或物体)和光轴的光路截面称为子午面,也称为含轴面。

单个折射球面的性质由 r 、 n 、 n' 三个量所确定,称之为结构参数。给定了结构参数和物点 A 的位置以后,为了确定象点 A' 的位置,可以在子午面内选取二条由 A 点发出的光线。一条为 AO ,它沿光轴入射球面,由于其入射角为零,因此经球面后仍沿光轴射出。另一条光线为 AE (任意选取),它经球面折射后和第一条光线(即沿光轴那条光线 OA')相交于 A' 点,显然 A' 即是 A 点的象。

由折射定律可知,入射光线 AE ,入射点的法线 CE ,折射光线 EA' 均在同一平面(子午面)内。光线 AE 的位置可用二个参量(物方截距 L 和物方倾斜角 U)来表示,其中,物方截距 L 为入射光线与光轴的交点(在此即是物点 A)到球面顶点 O 的距离,物方倾斜角 U 为入射光线和光轴的夹角。同样,光线 EA' 的位置可用两个相应的参量(象方截距 L' 和象方倾斜角 U')表示,象方截距 L' 为折射光线与光轴的交点 A' 到球面顶点 O 的距离,象方倾斜角 U' 为折射光线和光轴的夹角。通常,对于象方空间的量值,常用与物方相应值相同的字母并在右上方加撇来表示,如 A' 、 U' 、 n' 等等。

显然,为了确定光线的位置,仅作上述的规定是不明确的。如图 2-2 所示,若已知入射光线 AE 的二个参数 $L = 200\text{mm}$, $U = 30^\circ$,该光线的位置可有四种,我们将无法断定指的是哪种情况。对其它量值也会有同样的情况。为了使各种量值和光学系统的结构参数具有明

确的意义,并使以后导出的公式在各种情况下都能适用,必须对各种量值作符号上的规定。

本课程所定的符号规则如下:

一、光路方向

规定光线传播方向从左到右为正向光路,反之为反向光路。

二、线段

1. 沿轴线段

凡由规定的计算起点(称为原点)到终点的方向与光线的传播方向相同者,取为正,反之为负。因此,线段以坐标原点为起始点,向右为正,向左为负。不同线段的坐标原点规定如下:

(1) 曲率半径 r 以球面顶点 O 为原点,球心 C 在右者为正,在左者为负。

(2) 物方截距 L 和象方截距 L' 也以球面顶点 O 为原点,光线与光轴的交点在顶点之右者为正,在左者为负。

(3) 球面之间的间隔 d 以前一个球面的顶点为原点,向右为正,向左为负。因此,在折射系统中间隔 d 总为正值。只有反射和折反射系统中才可能出现间隔为负的情况。

2. 垂轴线段

以光轴为界,在光轴之上者为正,反之为负。

三、角度

如图 2-3 所示,一律以锐角来衡量。由规定的起始边顺时针转成者为正,逆时针转成者为负。不同角度的起始边规定如下:

(1) 光线与光轴的倾斜角 U 、 U' 。规定由光轴转向光线。顺时针为正,反之为负。

(2) 光线与法线的夹角,即入射角 I 和折射角 I' ,规定由光线顺时针转到法线为正,反之为负。

(3) 入射点的法线与光轴的夹角 φ (称为球心角),以光轴顺时针转到法线为正,反之为负。

图 2-1 中的有关量即是按此法则画出的。可以看出,在该图中 r 、 L' 、 y 、 U' 、 φ 、 I 及 I' 是正的,而 L 、 y' 和 U 是负的。对于负的量,必须在表示该量的字母前面加一负号,如 $-L$ 、 $-y'$ 、 $-U$ 。还有一些其它的参量,正负号待它们出现时再予规定。

制订了符号规则以后,再来看图 2-2 所对应的情况。因为 $L = 200\text{mm}$, $U = 30^\circ$,也就是说,物方截距是正的,光线与光轴的交点应在球面顶点之右。另外, U 角也为正,则由光轴转到入射光线应为顺时针方向。因此只有图 2-2 c) 符合这种情况,其它三种情况均不符合,符号规则的重要意义就在于此。

必须指出,符号规则是人为地规定的,但一经定下,就要严格遵守。只有这样,才能依据光路图导出正确而有普遍意义的公式,并在应用这些公式时获得正确的结果。

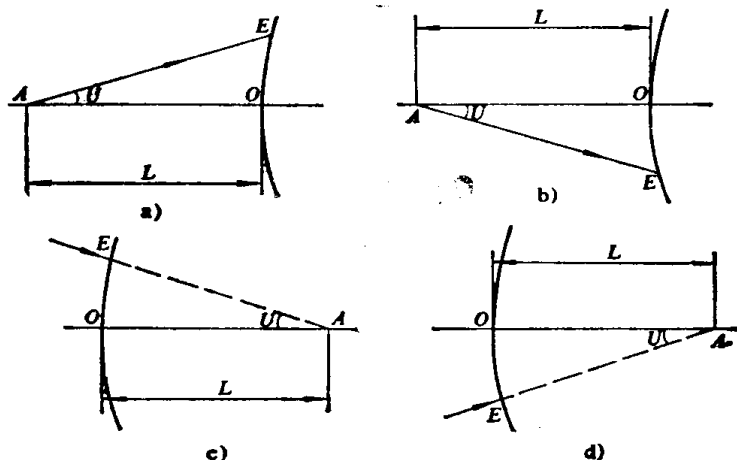


图 2-2

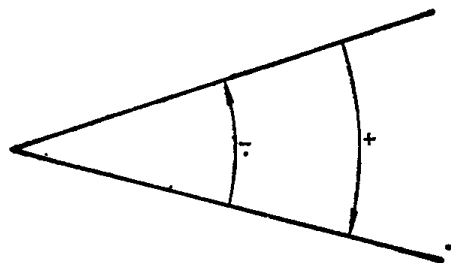


图 2-3