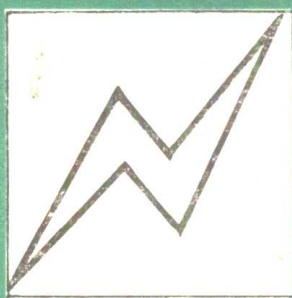
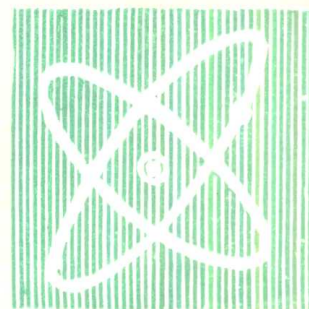
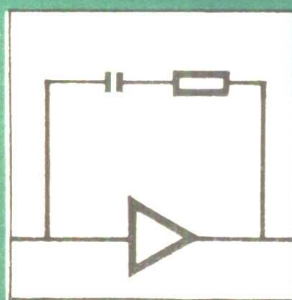
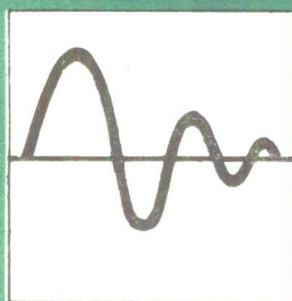
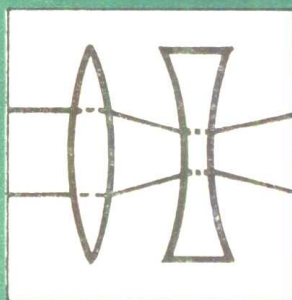


高等学校试用教材



# 计量工程光学

合肥工业大学徐家骅 主编



机械工业出版社

高等学校试用教材

# 计量工程光学

合肥工业大学徐家骅 主编



机械工业出版社

# 计 量 工 程 光 学

合肥工业大学徐家骅 主编

\*

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第 117 号)

北京市密云县印刷厂印刷

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  $34 \frac{1}{4}$  · 字数 847 千字

1981 年 7 月北京第一版 · 1982 年 5 月北京第二次印刷

印数 4,301—7,100 · 定价 3.50 元

\*

统一书号: 15033 · 5040

## 前 言

本教材是根据 1978 年 4 月高等学校一机部对口专业座谈会的精神及同年 10 月精密计量仪器专业教材会议所制定的《计量工程光学》编写大纲编写的。全书把应用光学和物理光学统一于一本教材中，着重在学习光学基本理论的基础上，分析、研究精密计量工程问题。本书是大学通用精密仪器专业的一门技术基础课，亦可供从事计量工作和光学工作的技术人员参考。

全书共十七章，分两大部分。第一章到第十二章为第一部分，主要讲应用光学。其中一到第五章叙述应用光学的基本理论，包括各种光学元件的成像规律，介绍矩阵在光学中的应用，为光学系统的外形尺寸计算打下基础；第六章是象差概论，详细地阐述了象差的基本概念，介绍各种象差的计算公式以及象差曲线走向和容限；第七章到第十一章叙述眼睛和显微、望远、投影、细分等系统的光学原理，结合精密计量中光学仪器的特点，讨论各种光学系统在精密计量中的应用，并在此基础上介绍这些光学系统的外形尺寸计算；第十二章介绍光度学的一些基本概念以及一般光学仪器中使用的灯泡类型、特点及选择原则。十三到十七章是第二部分，主要讲物理光学。在这几章里系统地叙述物理光学中光的干涉、衍射和反射的基本理论，详细讨论它们在精密计量中的应用。

本书由合肥工业大学徐家骅同志主编。参加编写的有徐家骅同志（七、八、九章和绪论），天津大学虞启璠同志（一、二、三、四、五和十二章），浙江大学王子余同志（第六章），河北工学院田大滋同志（十、十一章），合肥工业大学李国纯同志（十三到十七章）。全书由浙江大学王子余同志主审。物理光学部分由浙江大学梁铨廷同志参加审阅。

本书在清稿工作中合肥工业大学陈晓怀同志做了大量的抄写和绘图工作，在此表示感谢。

由于时间匆促，学识浅薄和缺少经验，书中一定有很多缺点、遗漏甚至错误，恳切希望任课老师及读者不吝指教，以便改正。

1980 年 4 月

# 目 录

|                                    |     |                                       |     |
|------------------------------------|-----|---------------------------------------|-----|
| 绪论 .....                           | 1   | 第五章 光学系统中光束的限制 .....                  | 161 |
| 第一章 几何光学的基本原理 .....                | 2   | § 5-1 光阑及其作用 .....                    | 161 |
| § 1-1 基本方法 .....                   | 2   | § 5-2 孔径光阑、入瞳、出瞳 .....                | 161 |
| § 1-2 基本定律 .....                   | 3   | § 5-3 视场光阑、入射窗、出射窗 .....              | 166 |
| § 1-3 全反射现象 .....                  | 5   | § 5-4 光阑位置及安放原则 .....                 | 170 |
| § 1-4 物象的基本概念 .....                | 7   | § 5-5 平面上所成空间象的不清晰度、<br>成象空间的深度 ..... | 171 |
| § 1-5 光学材料 .....                   | 10  | § 5-6 远心光路 .....                      | 175 |
| 第二章 球面成象理论 .....                   | 14  | § 5-7 光束限制在计量光学<br>仪器中的重要作用 .....     | 177 |
| § 2-1 符号规则 .....                   | 14  | 第六章 象差概论 .....                        | 180 |
| § 2-2 单个折射球面的光路计算公式 .....          | 17  | § 6-1 光线的光路计算 .....                   | 181 |
| § 2-3 轴上点以近轴光经单个<br>折射球面的成象 .....  | 22  | § 6-2 轴上点球差 .....                     | 193 |
| § 2-4 平面物体以细光束经单个<br>折射球面的成象 ..... | 25  | § 6-3 正弦差及彗差 .....                    | 201 |
| § 2-5 细光束经球面折射时的象散 .....           | 26  | § 6-4 象散与象面弯曲 .....                   | 207 |
| § 2-6 近轴区成象的放大率公式及<br>传递不变量 .....  | 27  | § 6-5 畸变 .....                        | 214 |
| § 2-7 共轴球面系统 .....                 | 31  | § 6-6 色差 .....                        | 217 |
| 第三章 理想光组理论 .....                   | 42  | § 6-7 象差综述 .....                      | 229 |
| § 3-1 共线成象理论 .....                 | 42  | § 6-8 象差公差 .....                      | 235 |
| § 3-2 理想光组的基点、基面及<br>图解求象 .....    | 43  | 第七章 眼睛与测量 .....                       | 237 |
| § 3-3 理想光组的解析法求象 .....             | 48  | § 7-1 人眼的构造 .....                     | 237 |
| § 3-4 节点和节平面 .....                 | 55  | § 7-2 人眼的调节与适应 .....                  | 238 |
| § 3-5 物象关系特性曲线 .....               | 58  | § 7-3 人眼的分辨本领、瞄准精度与<br>估读精度 .....     | 240 |
| § 3-6 共轴光组的组合 .....                | 65  | § 7-4 人眼的缺陷与视度调节 .....                | 243 |
| § 3-7 透镜与薄透镜 .....                 | 76  | 第八章 显微系统 .....                        | 246 |
| § 3-8 组合光组 .....                   | 86  | § 8-1 放大镜及其放大率 .....                  | 246 |
| § 3-9 常用镜头组合特性 .....               | 89  | § 8-2 显微镜简述 .....                     | 247 |
| § 3-10 近轴矩阵光学 .....                | 101 | § 8-3 显微镜的光束限制 .....                  | 249 |
| 第四章 平面成象理论 .....                   | 120 | § 8-4 显微镜的分辨本领 .....                  | 251 |
| § 4-1 平面反射镜 .....                  | 120 | § 8-5 光学性能与精密测量 .....                 | 253 |
| § 4-2 反射棱镜 .....                   | 125 | § 8-6 显微镜的景深 .....                    | 255 |
| § 4-3 平行平板 .....                   | 148 | § 8-7 显微物镜和目镜 .....                   | 258 |
| § 4-4 折射棱镜及光楔 .....                | 152 | § 8-8 照明系统 .....                      | 262 |
| § 4-5 平面系统和共轴球面<br>系统的组合 .....     | 155 | § 8-9 照明斜光束在测量上的影响 .....              | 268 |
|                                    |     | § 8-10 几种光学上的瞄准定位方法 .....             | 272 |
|                                    |     | § 8-11 19JA 型万能工具显微镜主显微镜              |     |

|                           |     |                           |     |
|---------------------------|-----|---------------------------|-----|
| 光学系统的整体设计 .....           | 278 | § 14-1 光的相干条件及获得相干        |     |
| 第九章 望远系统 .....            | 289 | 光的方法 .....                | 387 |
| § 9-1 望远系统的一般性质 .....     | 289 | § 14-2 双光束干涉条纹的形状 .....   | 392 |
| § 9-2 刻卜勒望远镜和伽伊略望远镜 ..... | 291 | § 14-3 双光束干涉条纹的           |     |
| § 9-3 望远系统的主要光学性能         |     | 光强度分布 .....               | 394 |
| 及其相互关系 .....              | 292 | § 14-4 影响干涉条纹对比度的因素 ..... | 396 |
| § 9-4 转象系统和场镜 .....       | 296 | § 14-5 平行平板的干涉 .....      | 407 |
| § 9-5 望远镜的物镜和目镜 .....     | 299 | § 14-6 楔形平板的干涉 .....      | 409 |
| § 9-6 内调焦、准直和自准直望远镜 ..... | 304 | § 14-7 实际光源在平板干涉          |     |
| § 9-7 望远镜外形尺寸计算 .....     | 308 | 中的意义 .....                | 413 |
| 第十章 投影系统 .....            | 316 | § 14-8 平板干涉在测量中的应用 .....  | 415 |
| § 10-1 对投影物镜的基本要求及        |     | § 14-9 平行平板的多光束干涉 .....   | 419 |
| 有关参数的确定 .....             | 316 | § 14-10 干涉滤色片 .....       | 425 |
| § 10-2 投影仪光学系统的光路分析 ..... | 320 | 第十五章 精密测量中的干涉仪 .....      | 430 |
| 第十一章 细分系统 .....           | 323 | § 15-1 干涉比较仪 .....        | 430 |
| § 11-1 细分系统在计量仪器          |     | § 15-2 干涉显微镜 .....        | 440 |
| 中的作用 .....                | 323 | § 15-3 激光干涉仪 .....        | 445 |
| § 11-2 细分系统的原理及其          |     | § 15-4 干涉系统元件的选择原则 .....  | 454 |
| 参数的选择 .....               | 323 | 第十六章 光的衍射 .....           | 461 |
| § 11-3 莫尔条纹形成原理及其在细分      |     | § 16-1 惠更斯—菲涅耳原理 .....    | 462 |
| 系统中的应用 .....              | 327 | § 16-2 菲涅耳衍射 .....        | 463 |
| 第十二章 光源与光度学 .....         | 333 | § 16-3 夫琅和费单缝衍射 .....     | 478 |
| § 12-1 光源的辐射特性 .....      | 333 | § 16-4 夫琅和费双缝衍射 .....     | 485 |
| § 12-2 光源类型及选择原则 .....    | 338 | § 16-5 衍射光栅 .....         | 493 |
| § 12-3 光度学的基本知识 .....     | 347 | § 16-6 光栅光谱仪 .....        | 500 |
| § 12-4 光束经反射和折射后的亮度 ..... | 355 | § 16-7 夫琅和费圆孔衍射 .....     | 508 |
| § 12-5 光能在介质分界面上的反射       |     | § 16-8 光的衍射在计量中的应用 .....  | 511 |
| 损失和介质中的吸收损失 .....         | 356 | 第十七章 光的反射 .....           | 516 |
| § 12-6 光学系统光能损失的计算 .....  | 358 | § 17-1 光的偏振 .....         | 516 |
| § 12-7 象平面的照度 .....       | 361 | § 17-2 光在透明介质分界面上的        |     |
| § 12-8 人眼和光束亮度的关系 .....   | 364 | 反射和折射 .....               | 519 |
| 第十三章 波动光学理论基础 .....       | 369 | § 17-3 反射光的能量 .....       | 523 |
| § 13-1 麦克斯韦方程 .....       | 369 | § 17-4 反射光位相的改变 .....     | 525 |
| § 13-2 光的电磁性质 .....       | 372 | § 17-5 反射光的偏振 .....       | 527 |
| § 13-3 波的叠加 .....         | 378 | § 17-6 光在金属表面的反射 .....    | 529 |
| 第十四章 光的干涉 .....           | 387 | § 17-7 光学薄膜 .....         | 533 |

## 绪 论

光究竟是什么？十七世纪末已经有两派不同意见的争论。一派是牛顿提出的微粒学说；一派是惠更斯的弹性波动学说。当时这两种学说都能解释光的反射和折射定律，但是其结果却截然不同，微粒学说认为光从光疏到光密介质时速度要增大，折射光线偏离法线；波动学说认为速度要减小，折射光线偏向法线。显然，波动学说的结果是对的，但在当时由于实验水平较差，这种争论得不到解决。直到1850年傅科用高速旋转镜法，测定出光在水中的速度约为空气中速度的 $3/4$ ，才证明这种光学现象及其他一些光学现象用微粒学说解释是不相符的。弹性波动学说后来被托玛士·杨及菲涅尔进一步补充和发展，使得这一学说的基础才比较稳固。但是弹性波动学说也存在不能自圆其说的矛盾，这就是他把光波认为是弹性机械波，并假设了传播介质是以太而犯了错误。这个错误到1871年被麦克斯韦的电磁学说部分地解决而认为光是电磁波。这对光的本性的认识是大大地前进了一步。于是光的波动学说便愈形稳固。但麦氏理论（又称为经典电磁说）不能解释光电效应。1905年爱因斯坦推广了普朗克辐射能量子的观点、光电效应的问题遂被圆满解释。产生光电效应的能量子称为光量子或光子。康普顿于1921年测定光子和一个电子在“碰撞”前后的运动时，发现它们和具有动能和动量的实在质点一样，而且在撞击中动能或动量都是守恒的。这种量子论学说似乎要求重新恢复光的微粒学说，于是又发展到现代的光的二象性理论，即在传播现象中光表现了电磁波的性质，在与物质作用时表现了光子的性质。近代的量子力学又将二者统一起来，消除了两种概念之间的矛盾，使得人类对光本质的认识又达到了一个新的发展阶段。

应该指出，到现阶段人们对光的本性的认识，并没有达到完善的境地。但是光学本身的发展并没有停止：廿世纪五十年代以来，逐渐兴起的“傅里叶光学”为现代的光学信息处理，现代象质评价等奠定了基础；六十年代“薄膜光学”的发展，为解决各种分光和光谱滤波提供了理论；纤维光学的迅速发展，不仅给制造内窥光学系统提供了可能，同时在通讯系统中代替了传统的电缆；红外技术在国防上有着重要用途，也在资源考察、遥感遥控技术上得到成功的应用；六十年代激光科学技术的突飞猛进的发展，使得激光在材料加工、精密测量、远距离测距、全息检测、通讯、医疗以及农作物育种等方面的应用获得可喜的成果，有力的促进了现代科学技术的发展。因此可以说，在光学领域中出现了许多新的学说和分支，其发展方兴未艾，实令人欢欣鼓舞。作为这些现代光学的基础之一，仍是应用光学和物理光学，可以预料，随着科学技术的飞速发展，光学的基本理论和应用技术必将得到更大的提高和普及。本着这一精神“计量工程光学”作为精密仪器专业的光学基础课，正是要着重讨论应用光学和物理光学的理论，并在此基础上讨论工程应用问题。通过学习要求学生达到：掌握光学的基础理论及在计量工程上的应用，具有选择和组合光学系统及外形尺寸计算的能力。

在机械工业的几何量的测量中，光学计量是其中不可缺少的组成部分。一般而言，所谓光学计量实质上是被测量的光信息转换、调制和接收。光学的基本理论在这方面有着成功的应用，例如光波的波长作为长度的基准、应用干涉理论，解决了各种干涉测长。计量工程光学不仅为各种测量提供了原理方案，同时为制造和发展各种精密计量仪器提供了理论。应该指出，随着科学技术的发展，精密测量的要求和生产自动化程度日益提高，其过程更多以光、机、电的结合形式出现，因而学习和掌握“计量工程光学”要在这个总体上去把握它，也即要注意它和其他课程的联系。

# 第一章 几何光学的基本原理

## § 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。以后我们将要讨论的成象问题就是这种发光点的成象问题。

### 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略去不计时，从物理的观点来说，这种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象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。

物理光学谈及，光是一种电磁波，其波长范围（包括紫外区及红外区）从  $10 \sim 10^6$  纳米数量级，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学中谈及的波面法线。

### 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面波。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光束

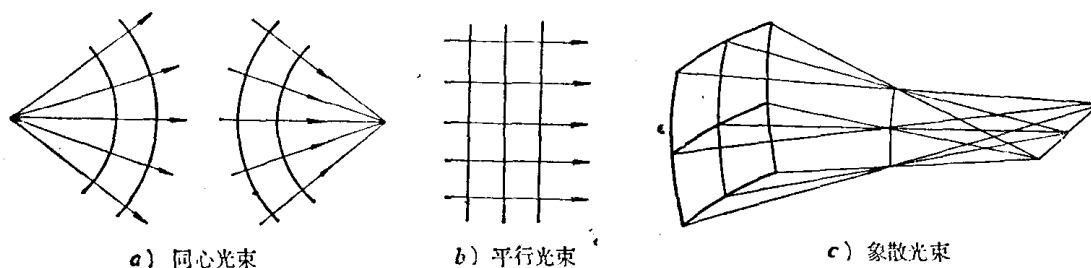


图 1-1

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）。但是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象原理。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，成象问题就可得到解决，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，彼此不发生影响，对其中的一光线而言犹如没有其他光线存在那样来传播，在这一点上，其作用是相加的。这就是光的独立传播定律。

在夜晚，探照灯的巨大光束在黑暗的天空来回探索，当两光束共同对准某一目标时，尽管这时光束相交在一起，但并不影响每个光束的照射方向和光能分布，只是在相交处显得更亮一些。利用光的独立传播定律，可使我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，可以不考虑其他光线对它的影响。

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，独立传播定律就不复适用。

### 三、折射和反射定律

当一束光射到  $a, b$  两种透明介质的光滑分界面时，光就被分成两部分。如图 1-2 所示，一部分光在分界面上被反射回原介质，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  $\angle BON$  称为反射角，用字母  $i'$  表示，折射光线  $OA'$  和法线  $ON$  之间的夹角  $\angle A'ON$  称为折射角，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为—恒量  $n_{ba}$ ，与两角度的大小无关，仅决定于两介质的性质。即

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

$n_{ba}$  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。

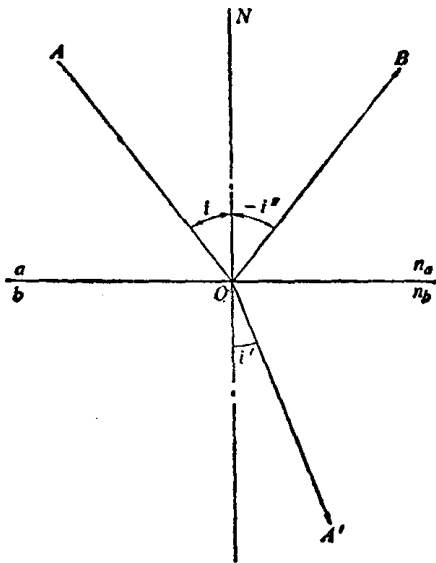


图 1-2

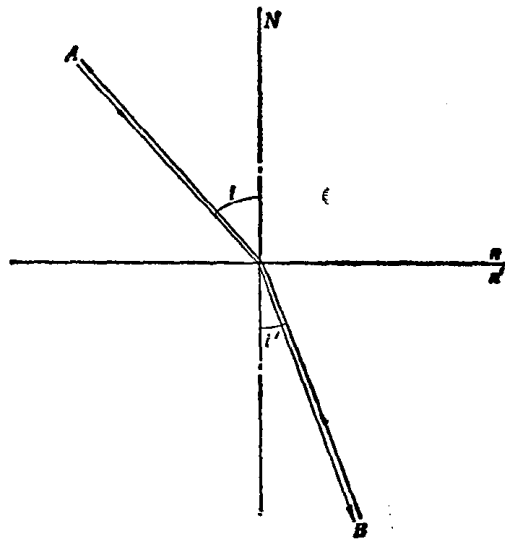


图 1-3

同样可以写出两介质的相对折射率与光在该两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

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

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。

真空的绝对折射率为 1，而空气的绝对折射率在标准压力 760 毫米汞柱，温度  $20^\circ\text{C}$  时为 1.00028。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，而认为空气的折射率为 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)可得  $i'' = -i$ 。

上述四个定律是几何光学的基本定律, 是本课程讨论光线传播和光学成像问题的基础。利用上述基本定律, 我们将研究光线传播的一个重要现象。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。光线的这种传播特性称为光路可逆性原理。

这个原理由折射定律很容易证明, 设光线由折射率为  $n$  的介质中的  $A$  点射向折射率为  $n'$  的介质中的  $B$  点,  $i$  为入射角,  $i'$  为折射角, 它们的传播规律遵循折射定律, 即  $n \sin i = n' \sin i'$ 。若光线由  $B$  按反向传播, 且入射角为  $i'$ , 按折射定律  $n' \sin i' = n \sin i$ , 其折射角  $i$  必与第一种情况的入射角  $i$  相等, 即光线由  $B$  射向  $A$ 。

光路可逆性原理使我们在今后考虑物象关系时大为方便。利用这个原理, 可以从已知物体的位置寻找象的位置。反之, 也可以从已知象的位置找物体的位置。

### § 1-3 全 反 射 现 象

全反射是光线传播的另一个重要现象。它是在某些特殊条件下产生的, 如图 1-4 所示, 由  $A$  点发出一光束射向两介质的分界面, 现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  $90^\circ$ , 此时折射光线将沿两介质的分界面掠射, 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

$$\sin i_m = \frac{n'}{n} \quad (1-6)$$

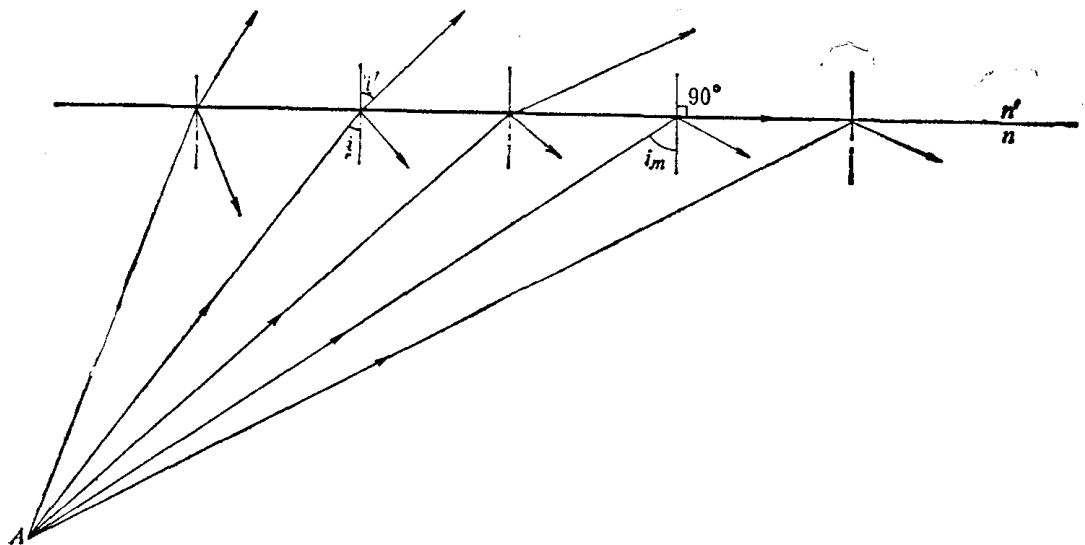


图 1-4

若再增大入射角, 使  $i$  大于  $i_m$ , 则按式(1-5), 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，光线不再遵循折射定律了。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

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

不同折射率的玻璃，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           |
|-------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| $i_m$ | $41^\circ 48'$ | $40^\circ 11'$ | $38^\circ 41'$ | $37^\circ 18'$ | $36^\circ 02'$ | $34^\circ 51'$ | $33^\circ 23'$ |

从表 1-1 可以看出，当玻璃折射率愈大时，其相应的临界角则愈小。此外，从表中的数值看出，当光线由玻璃射向空气时，入射角大于  $42^\circ$  时，即可获得全反射。

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，以减小光能的反射损失。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。近代发展的光导管是应用全反射现象的又一个例子，如图 1-5 所示。在一根细长而弯曲的管子中，希望光线能从一端传播到另一端，用以前的技术是很难办到的。但是采用光导管却很容易达到，而且光能量的传递效率也很高。光导管由许多

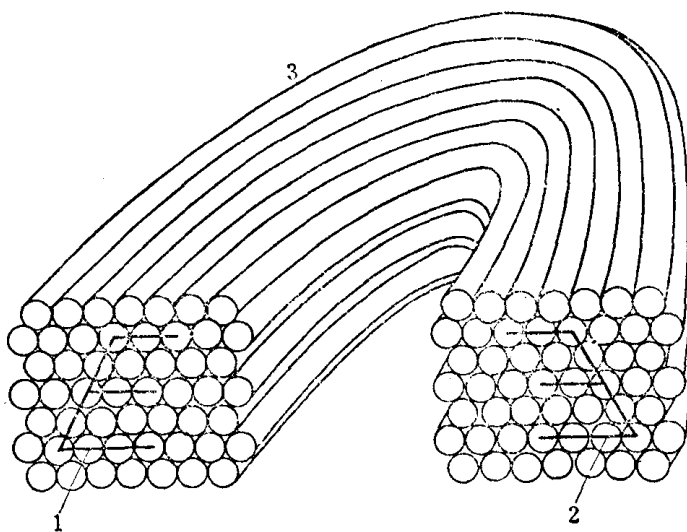


图 1-5

1—物 2—传输过来的象 3—可弯曲的纤维束

直径约为 5~10 微米的细玻璃纤维组成。如图 1-6 a，每根玻璃纤维由内外两层折射率不同的

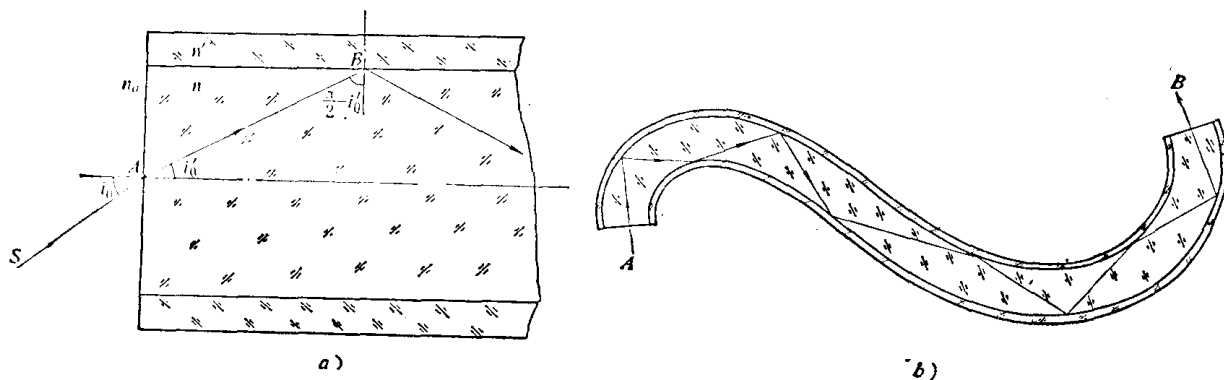


图 1-6

玻璃拉制而成, 内层玻璃折射率  $n$  较高, 是纤维的轴心, 外层玻璃的折射率  $n'$  较低。设入射光线  $SA$  由折射率为  $n_0$  的介质射向内层玻璃的  $A$  端, 经折射后射向玻璃的内壁  $B$ , 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。在临界状态时的入射角  $i$  定为  $i_0$ , 折射角  $i'$  定为  $i'_0$ , 由式 (1-6) 可得

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

因为  $n_0 \sin i_0 = n \sin i'_0$ , 将此式代入上式并整理之, 可得

$$i'_0 = \arcsin\left(\frac{1}{n_0} \sqrt{n^2 - n'^2}\right) \quad (1-8)$$

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  $i_0$  角的入射光线将透过玻璃内壁进入外层, 不能继续传送。

$n_0 \sin i_0$  定义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 b 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  $B$  处射出。这样, 利用一束玻璃纤维组成的光导管就可以解决图象的传送问题。目前光导管已成为一种新的光学元件, 广泛应用于各种科学技术中。

## § 1-4 物象的基本概念

在长度计量中, 人们使用了各种光学仪器。例如用工具显微镜测定螺纹, 用自准直光管检定机床导轨的直线性; 用投影仪检定齿轮的形状和参数等。所有这些测试工作, 都要通过成象来解决, 因此必须搞清楚物象的基本概念。

物体是通过光学系统 (有时也称光组) 成象的。而光学系统是由一系列光学零件所组成, 常见的光学零件有透镜, 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, 必须按需选用各种光学零件, 进行合理组合, 才能使之满足各种各样的成象要求。图 1-8 是一个自准直光管的光学系统图。

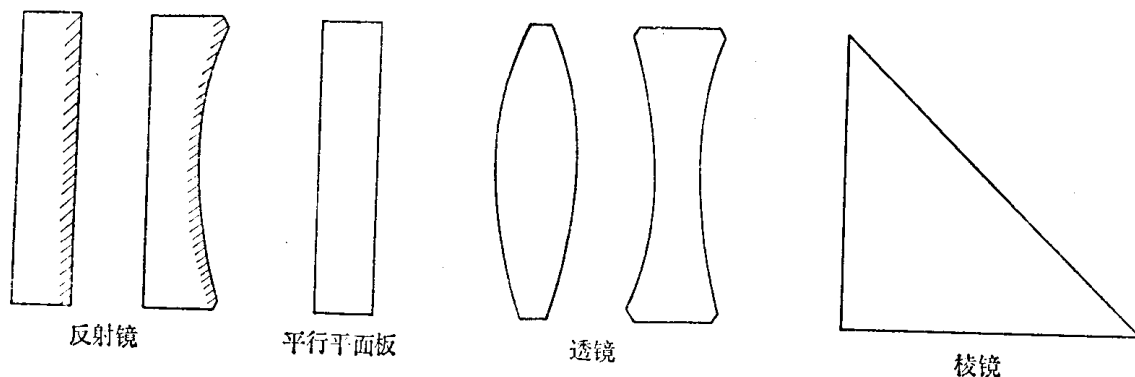


图 1-7

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学系统。

透镜是光学仪器中最常用的光学零件, 它是由两个曲面或一个曲面、一个平面所围成的透明体。由于非球面的加工和检验很困难, 目前所实际应用的透镜, 绝大多数是球面透镜。

经过两球面中心的直线称为透镜的光轴。在由一个球面和一个平面组成的透镜中，其光轴是通过球面中心并垂直于平面的直线。光轴与透镜面的交点称为顶点。

透镜可以分成正的和负的两大类。今后将会谈到，正透镜具有正的象方焦距，能对光束

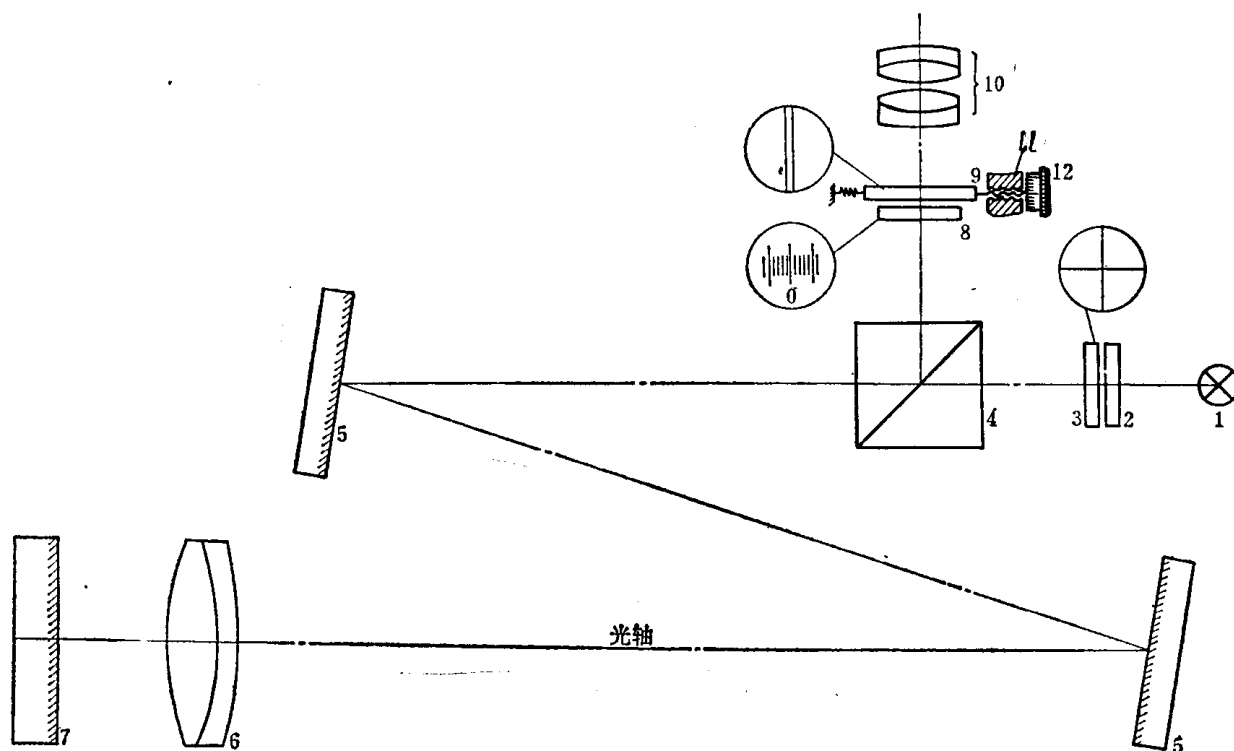


图 1-8

1—光源 2—滤色片 3—指示分划板 4—分光棱镜 5—平面反射镜 6—物镜 7—平面反射镜 8—固定分划板 9—可动分划板 10—目镜 11—千分螺杆 12—读数鼓轮

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 1-9）。可以看出，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。

如图 1-10 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

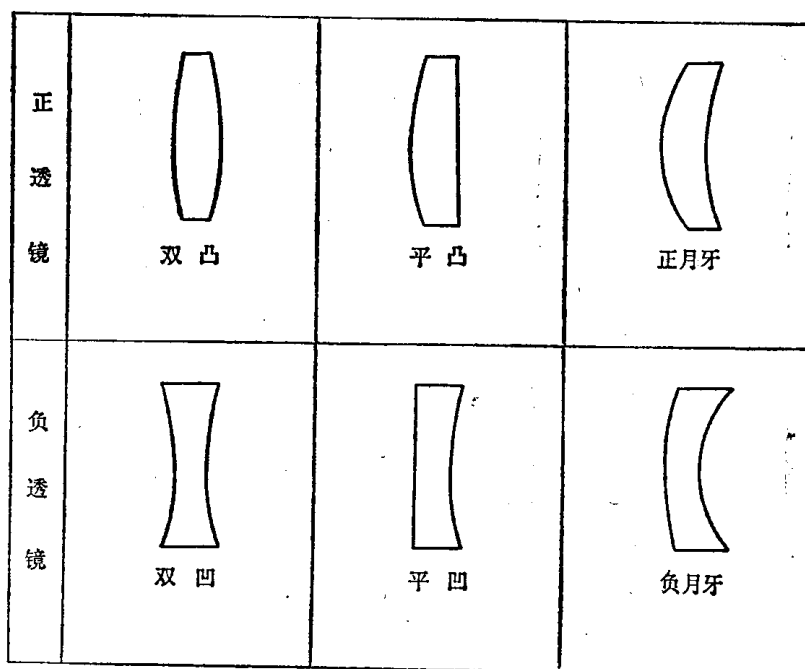


图 1-9

$N$  (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, 工具显微镜就是把被测工件成实象在分划板上等等。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 1-11), 在平面镜  $M$  里可以看到物体  $AB$  被  $M$  所成的象  $A'B'$ , 显然此象并不是实际光线相交而成, 而是由光线的延长线相交所得。这种由光线的延长线所成的象称为虚象。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他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其反向延长线相交而得到的物体称为虚物。如图 1-12 所示, 物体  $AB$  被平面镜  $M$  成一虚象  $A'B'$ , 而人眼所看到的是被  $M$  所反射的光线  $L$  (图中画了四条), 这些光线好似由  $A'B'$  发出, 它经过人眼后在视网膜上成一实象  $A''B''$ 。对人眼而言,  $A'B'$  是虚物,  $A''B''$

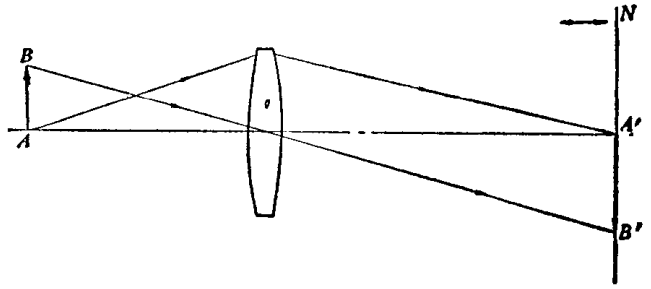


图 1-10

是由光线的延长线相交所得。这种由光线的延长线所成的象称为虚象。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他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其反向延长线相交而得到的物体称为虚物。如图 1-12 所示, 物体  $AB$  被平面镜  $M$  成一虚象  $A'B'$ , 而人眼所看到的是被  $M$  所反射的光线  $L$  (图中画了四条), 这些光线好似由  $A'B'$  发出, 它经过人眼后在视网膜上成一实象  $A''B''$ 。对人眼而言,  $A'B'$  是虚物,  $A''B''$

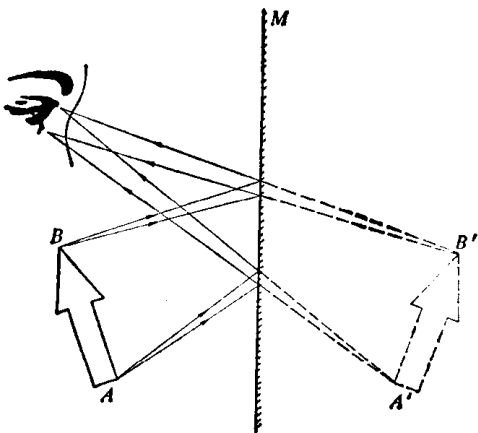


图 1-11

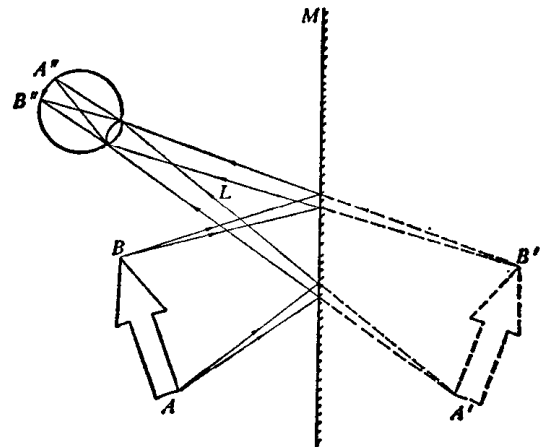


图 1-12

是虚物  $A'B'$  经人眼所成的实象。由于实象是实际光线通过的, 所以象  $A''B''$  能引起视觉效应, 人们便看到了物体  $A'B'$ 。从图 1-12 清楚看到, 人们通过镜子所看到的物体  $AB$  是经过二次成象的。第一次, 镜子把实物  $AB$  成一虚象  $A'B'$ , 第二次, 人眼把虚物  $A'B'$  成一实象  $A''B''$ 。通过这个例子可以看到, 在光学上物和象有一定的相对性。某种情况下的象可以

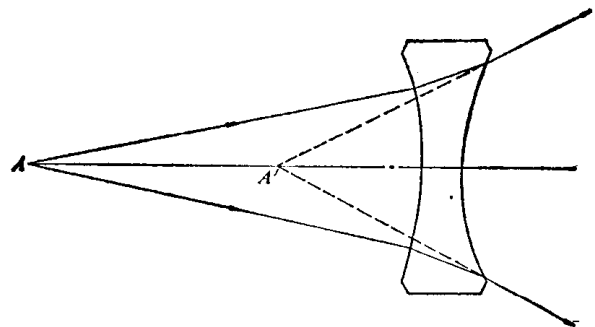


图 1-13

是另一种情况的物。上例中,  $A'B'$  对镜子成象来说它是象, 但对人眼成象来说, 它又是物, 对整个光组成象而言 (指物体  $AB$  经镜子和人眼成象),  $A'B'$  称为中间象。

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。

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。必须指出, 物空间和象空间在某些情况下是分居光学系统两侧, 例如图 1-11 中镜子成象, 在镜子左边是物空间, 在镜子右边是象空间。另外一些情况, 物空间则和象空间的一部分是重合的。例如, 由图 1-13 可以看到, 物点  $A$  经凹透镜后成一虚象  $A'$ , 这时, 物空间和象空间的一部分是重合的, 它们同在该透镜的左边。

## § 1-5 光 学 材 料

在光学仪器中, 光学零件 (如透镜、反射镜、棱镜……) 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, 尤以光学玻璃应用最为广泛, 这是因为它的性能较好, 生产方便, 容易大量获得之故。

为了得到良好的成象质量, 通常希望光学材料能满足如下要求:

1. 高度的光学均匀性 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的大量生产成为可能。
2. 最大的透明度 以减小光能的吸收损失。
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。

目前, 绝大多数的光学零件均用光学玻璃制成。对各种光学玻璃的性能要求在国家标准 GB 903-65 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三百多种, 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)。按成分和性能这两大类又可细分为若干种, 国产光学玻璃分类由表 1-2 所示。

每一种玻璃又有很多牌号, 例如冕牌玻璃有 BaK1、BaK2……。轻火石玻璃有 QF1、QF2……。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、铈、铈、钇……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进作用。

对光学设计者而言, 只要知道玻璃某些特定波长的折射率, 该玻璃的特性也就完全可以

表 1-2

| 名 称   | 符 号   | 名 称     | 符 号    |
|-------|-------|---------|--------|
| 轻 冕   | (QK)  | 轻 火 石   | (QF)   |
| 冕     | (K)   | 钡 火 石   | (EaF)  |
| 磷 冕   | (PK)  | 重 钡 火 石 | (ZBaF) |
| 钡 冕   | (EaK) | 重 火 石   | (ZF)   |
| 重 冕   | (ZK)  | 特 重 火 石 | (TF)   |
| 镧 冕   | (LaK) |         |        |
| 冕 火 石 | (KF)  |         |        |

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 1-3 所示。

表 1-3

| 颜 色     | 红           | 黄           | 绿     | 青           | 蓝     | 紫     |
|---------|-------------|-------------|-------|-------------|-------|-------|
| 谱线符号    | $A'$ $C$    | $D$ $d$     | $e$   | $F$ $g$     | $G'$  | $h$   |
| 波长(纳米)  | 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 纳米的黄色钠谱线的折射率  $n_D$  称为基本折射率,它必须精确到小数后第四位。由于波长为 546.1 纳米的绿色汞更接近人眼最敏感的 555 纳米波长,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,这是保证成象质量良好所必需的精度。

为了方便光学工作者设计光学系统时的实际需要,在光学玻璃的目录中通常给出下列光学参数:

基本折射率  $n_D$ 。

平均色散  $n_F - n_C$ 。

阿贝常数  $v = \frac{n_D - 1}{n_F - n_C}$ 。

相对色散  $\frac{n_F - n_e}{n_F - n_C}$ ;  $\frac{n_F - n_D}{n_F - n_C}$ ;  $\frac{n_g - n_F}{n_F - n_C}$ 。

部分色散  $n_D - n_D$ ;  $n'_G - n_g$ 。

谱线  $C$ 、 $F$ 、 $h$ 、 $g$ 、 $e$ 、 $A'$  及红外波长 863.0 纳米、960.8 纳米及紫外波长 365.0 纳米的折射率。

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、放射一场所等等)。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,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,以致于所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、岩盐和其他