

# 应 用 光 学

(一)

清华大学精密仪器系

1974, 10,

# 第一部分 几何光学

## 目 录

### 第一章 光线的折射和反射

- § 1-1 光线、波面
- § 1-2 光线经过抛光的玻璃表面时发生的反射现象
- § 1-3 反射定律
- § 1-4 折射率的概念
- § 1-5 折射定律
- § 1-6 全内反射
- § 1-7 光膜的折射

### 第二章 球面透镜成像

- § 2-1 透镜为什么能成像
- § 2-2 符号规则、大光线的计标公式
- § 2-3 近轴光线经过球面折射的计标公式 I
- § 2-4 近轴光线计标公式 II
- § 2-5 横向放大倍率
- § 2-6 拉赫尔变式
- § 2-7 轴向放大倍率
- § 2-8 计标举例

### 第三章 反射镜、棱镜和平板玻璃成像

- § 3-1 反射和折射的“特殊性”和“共同性”
- § 3-2 球面反射<sup>面</sup>成像
- § 3-3 平面反射<sup>面</sup>成像
- § 3-4 平面反射镜的拉直处理(展开)
- § 3-5 平面反射镜成像的正倒。

§ 3-6 平面镜的偏转及其在光学系统中的应用

§ 3-7 平面的折射

§ 3-8 平板玻璃的折射及其延伸量公式

§ 3-9 棱镜的展开

§ 3-10 平面反射镜和棱镜的比较

§ 3-11 本章小结

## 第四章 理想光组

§ 4-1 几种典型光线

§ 4-2 作图求象法

§ 4-3 单光透镜的半径  $r$ 、折射率  $N$ 、和焦距  $f$  的内在联系

§ 4-4 单光透镜的物象关系计算 I 式 (高斯公式)

§ 4-5 物象关系计算 II 式 (牛顿公式)

§ 4-6 透镜的两种基本类型

§ 4-7 透镜的主面、主点

§ 4-8 空气中两块透镜的合成焦距

§ 4-9 共轴光学系统的主点、焦点、焦距的确定

§ 4-10 物和象在空气中时的物象关系式

§ 4-11 光学系统的节点和节平面

## 第五章 典型光学系统工作原理

§ 5-1 眼睛的构造

§ 5-2 人眼的成象

§ 5-3 人眼对物体大小的感觉, 最佳视距 (明视距)

§ 5-4 眼睛的缺陷和校正方法

§ 5-5 放大镜的工作原理

§ 5-6 放大镜的放大倍率, 视角放大率

- § 5-7 望远镜光组
- § 5-8 望远镜的类型
- § 5-9 望远镜的转向象统
- § 5-10 目镜的视度调节
- § 5-11 显微镜工作原理
- § 5-12 显微镜的放大倍数
- § 5-13 显微镜物镜和目镜的类型

## 第六章 光学系统横向尺寸的确立

- § 6-1 透镜口径大小对光学系统的影响
- § 6-2 口径光阑

附录一：透镜外径直径 $\phi$ 外的计算

附录二：入瞳

附录三：典型光组的入瞳、出瞳分析

- § 6-3 视场光阑

- § 6-4 镜头的主要性能指标

附录：杂光光阑

- § 6-5 光学系统的分辨力

§ 6-5.1 发光物点的衍射象

§ 6-5.2 显微镜镜的分辨力

§ 6-5.3 望远物镜的分辨力

§ 6-5.4 摄影物镜的分辨力

§ 6-5.5 人眼的分辨力

§ 6-5.6 分辨力应用于光学设计的几例

- § 6-6 口径的表示方法（相对孔径和数值孔径）

## 第七章 光能

- § 7-1 辐射能通量、光通量

- § 7-2 人眼的视觉函数

- § 7-3 发光强度、照度、面发光度、亮度
- § 7-4 通过光学系统的光通量、象面照度
- § 7-5 大视场光组中视场边缘象面照度的减弱
- § 7-6 光学系统中光能损失的斗称
- § 7-7 人眼所感觉的主观亮度
- § 7-8 通过望远镜观察时人眼的主观亮度

## 第八章 双自立体视觉

- § 8-1 视差角
- § 8-2 人眼的立体视觉灵敏度
- § 8-3 立体图片、立体测距

## 第九章 光学系统的景深

- § 9-1 几何景深
  - § 9-1.1 几何景深的普遍式
  - § 9-1.2 投影仪的几何景深
  - § 9-1.3 用目镜观察的显微镜的几何景深
  - § 9-1.4 照相机的几何景深
  - § 9-1.5 望远镜的几何景深
- § 9-2 物理景深
- § 9-3 光学仪田的总景深

# 第一章 光线的折射和反射

## § 1-1 光线 波面

光和工农业生产、国防建设、人民的生治都有着极为密切的联系。人们通过大量的实践、很早就已经积累了大量的有关光的丰富的感性认识。光学也就随之成为适应三大革命实践发展的一门科学。

人们对光的研究可以分为二方面。一方面研究光的本性，并根据它的本性来研究各种光学现象，称为“物理光学”。

还有另一方面就是研究光线的传播规律和成像现象，以及利用这些规律设计制造各种光学仪器。叫做“几何光学”。

下面讨论几何光学中，光线传播的基本规律。见图1，一光

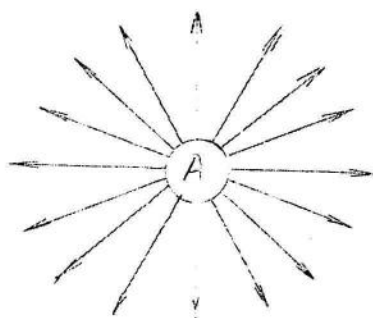


图 1.

源A向外发光，就是向四面八方发出无数的几何线，并沿着每条几何线把光能传出去。这样的几何线叫做“光线”。“光线”这个概念是从无数客观光学现象中抽象出来的，利用这个概念反过来又可以去解释自然界中的各种光学现象。例如：常见的影子的生成，日蚀、月蚀等现象。

光在均匀的介质中是沿直线传播的，这时的光线是直线。

光的直线传播是自然界中普遍存在的一个规律。

实际上光是入种电磁波。电磁波是横波，即波动振动的方向与波动传播的方向垂直。我们把某一时刻所有振动相位相同的点连结起来构成的曲面（或平面）叫波面如图(2) 1, 1', 1'' 点的振动相位相同，把 1 1' 1'' 连结起来构成一曲面Q，就是这一时刻的

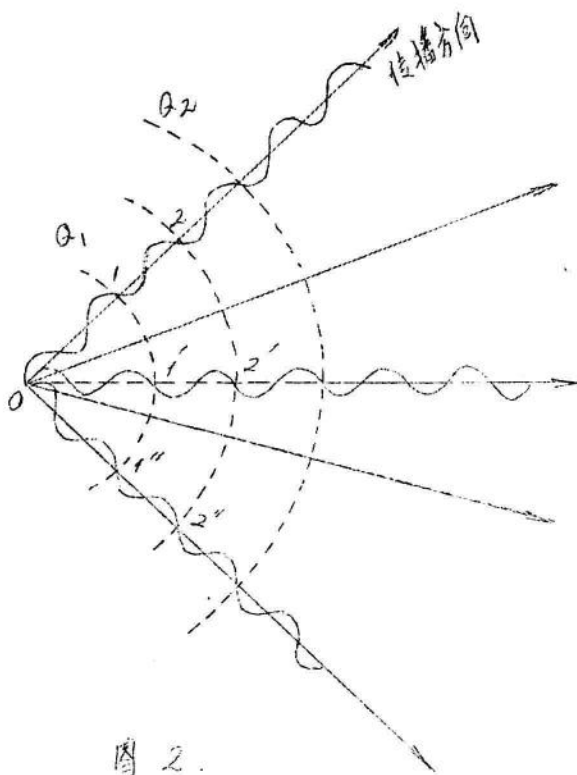


图 2.

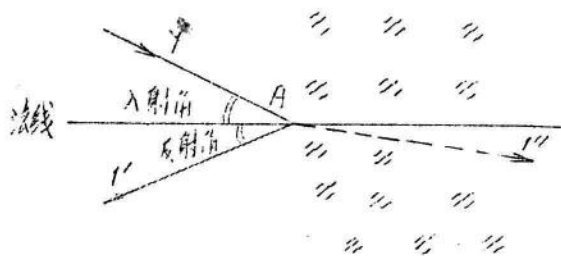


图 3

的方向将被表面 A 改变成  $1''$  的方向，这种现象称为光的折射（光线  $1$  从原有的方向折向  $1''$  的方向，所以叫做“折射”。

光线  $1$  称为入射光线。

$1'$  称为反射光线。

$1''$  称为折射光线。

反射光线  $1'$  和折射光线  $1''$  的强弱（亮度）是不相等的，(1)

波面。光线的传播方向与波面是垂直的，显然又是球面。

§1-2 光线经过抛光的玻璃表面时发生的反射和折射现象。反射定律、折射定律。

假如有一个抛光的玻璃表面 A（图 3），表面 A 可以是平面，也可以不是平面，图 3 中画的是平面的例子。

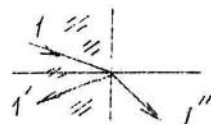
有一根光线，射到抛光的玻璃面 A 上，光线  $1$  原来是向前直进的。在表面 A 处将同时出现两个现象：一部分光线被表面 A 反射，按照  $1'$  的方向反射回去；（这种现象称为光的反射）；另一部分光线将穿过表面 A，射进玻璃中去，但是，原来光线  $1$

例如：表面A上不加任何镀膜层时，对于一般的玻璃材料，反射光的强度只有4%~6%；折射光的强度佔96%~94%，也就是说，光线中的大部份都穿过A面折射成光线1''，被反射的只佔一小部分，(2)若在A面上镀有反射膜层（铝、银、铬层等），则光线1不能穿进玻璃内部，没有折射，此时90%以上的光线都被反射。(3)如果在A面上镀有一层“半透半反膜”，则有可能使大约50%的光线被反射，余下的约50%的光线穿进玻璃折射。

上述这些现象，也适用于光线从玻璃射到空气的情况（下图）

### § 1-3 反射定律

反射定律内容如下：



仍见图3 (1) 入射光线1，反射光线1'，和入射点A

处的法线这三条线在同一平面内；

(2) 入射角的大小等于反射角的大小，入射角是指入射光线与A点法线的夹角；

反射角是指反射光线与A点法线的夹角。

### § 1-4 折射率的概念

在讨论折射定律之前，先引出几个概念——折射率。

单色光在不同的介质中的传播速度是不同的，设光在真空中的传播速度为C。（C为300000公里/秒），在某种介质中的传播速度为U，我们把C/U的比值叫做这种介质的绝对折射率。

$$N = \frac{C}{U} \quad (1)$$

从(1)式中可以见到：介质的折射率越大，光在这种介质中的传播速度越小。

又由于不同波长的光在相同的介质中的传播速度不同，因此同一介质对不同波长的光的折射率也是不同的，因而在说某介质的折射率的时候，必须同时指明是对那一波长的光而言。

我们在光学设计中经常遇到的是介质的相对折射率 $n$ 。由于光在真空中和在空气中的传播速度近似相等，所以空气的绝对折射率也近似为  $N_0 \approx 1$

$$n = \frac{N}{N_0}$$

把  $n$  称为介质对空气而言的相对折射率。由于  $n_0 = 1$ ，所以

$$n \stackrel{v}{=} N$$

折射率的大小表明介质的折光能力的大小， $n$ 值大表明折光能力大，折射率一般可由实验测量出来，在光学设计手册中给出了各种材料的折射率的数值。

§ 1-5 折射定律

在实践中总结出折射规律如下：

( 见图 4 )

(1) 入射光线  $I$ ，折射光线  $I'$  和入射点  $A$  处的法线这三条线  
在同一个平面内。

(2) 入射角  $I$  和折射角  $I'$  的大小遵循下列规律:

$$\sin I' = \frac{\lambda'}{\lambda} \cdot \sin I \quad (1)$$

(1) 式表示了折射定律的数量关系。

(1) 式有时可以改写成便于记忆的形式

$$N' \sin I' = N \sin I$$

式中：入射角  $i$  即入射光线和 A 点处的法线的夹角：

折射角  $I'$  即折

$N$ 是表面4度方的物质的折射率，

$N' \quad n \quad n \quad n \quad K \quad n \quad n \quad n \quad n \quad n \quad n \quad .$

从  $N \sin i = N' \sin i'$  可以看出:

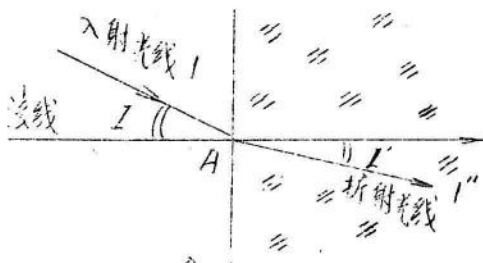


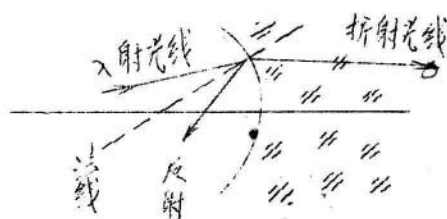
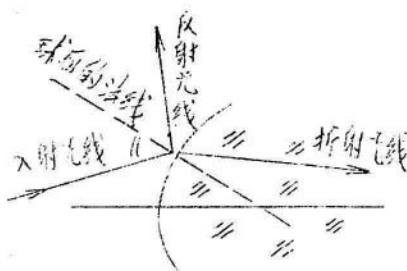
图 4

U 较大

当光线从比较“松”的介质（即  $N$  小的介质）射向比较“紧密”的介质（ $N$  大的介质）折射光线将偏向法线，反之将偏离法线。

这个结论对于粗略分析光线行进的方向是很有用的。

上面几个例子都关于平面的情况，实际上光线的折射和反射规律，对于球面形状的抛光玻璃表面，也是适用的。见下图。



入射角  $I$ ，反射角，折射角  $I'$  等等仍按照前述的规律。

显然，无论是反射还是折射光线的传播是可逆的（即可以倒转的）。在反射的情况下（见图 5a），若  $SO$  为入射光线，则  $S'O$  为反射光线。如果把  $S'O$  做为入射光线，则  $SO$  变为反射光线。在折射的情况下（见图 5b）也是一样。

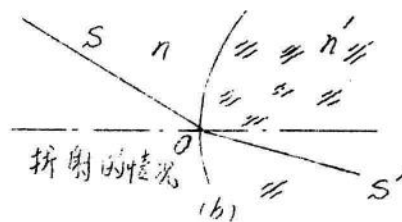
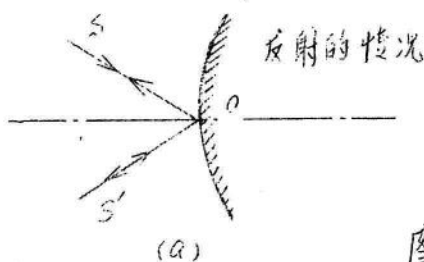
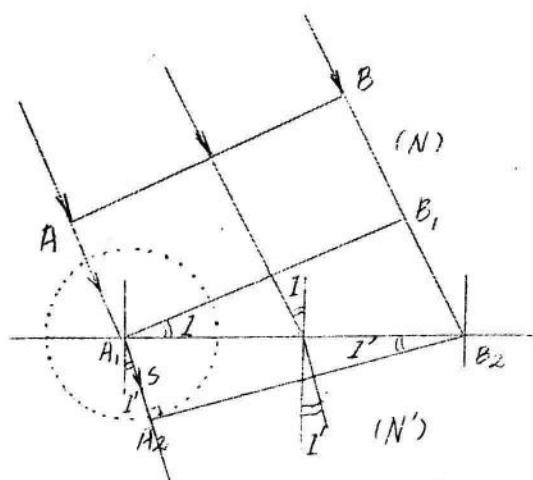


图 5

### 附录

下面利用上节的折射率概念和波面的概念来推导折射定律。

设  $A_1 B_2$  为两种介质的分界面，介质的折射率分别为  $N, N'$ 。一平面波  $AB$ （平行光的波面）以入射角  $I$  投射到分界面上。当波面  $AB$  传到  $A_1 B_2$  位置时， $A_1$  就要进入  $N'$  中，而  $B_2$  将继续在  $N$  中传播。当  $B_2$  传播到  $B_2'$  时， $A_1$  在介质  $N'$  中走过了  $S$  的距离。



光在  $N$  中速度为  $\frac{c}{N}$ ，  
在  $N'$  中为  $\frac{c}{N'}$ 。  $B_1$  到  $B_2$   
用的时间

$$t = \frac{A_1 B_2 \sin I}{\frac{c}{N}}$$

$$\therefore S = \frac{c}{N'} \cdot \frac{A_1 B_2 \sin I}{\frac{c}{N}} \\ = \frac{N}{N'} A_1 B_2 \sin I$$

这里我们把  $A_1$  又可看

作是一个新的波源。以  $A_1$  点为圆心， $S$  为半径做圆，这个圆就是时间  $t$  后的新波面。然后过  $B_2$  点做这个圆的切线，交圆于  $A_2$  点，则  $A_1 A_2$  即折射光线的方向

$$A_1 A_2 = A_1 B_2 \sin I'$$

$$A_1 A_2 = S$$

$$\frac{N}{N'} A_1 B_2 \sin I = A_1 B_2 \sin I'$$

$$\therefore N \sin I = N' \sin I'$$

## § 1-6 全内反射

当光线射到透明介质的光滑表面上时，部分光线将发生折射，部分光线将发生反射。如果光线从光密介质射向光疏介质的分界面时，会发生一种特殊的现象，这时只有反射而没有折射。这种现象叫“全内反射”。

发生全内反射的条件是什么呢？

设折射率为  $n, n'$  的两种介质由界面  $MN$  分开且  $n > n'$ ，光线由介质  $n$  中一点  $S$  发出。遇到界面  $MN$  后，同时发生折射和反射（见图 6）

$$n \sin I = n' \sin I'$$

由于  $n > n'$   $\therefore I' > I$

当  $I$  逐渐增大到某一值时 光线从界面掠过, 即  $I' = 90^\circ$ 。此时对应的  $I_m$  叫做临界角。若再继续增大入射角  $I$ , 则光线全部发生反射, 而不发生折射。所以只有当光线从光密介质射向光疏介质, 且入射角大于它的临界角时全反射才会发生。

由  $\sin I_m = \frac{n'}{n}$  可求出临界角。

全反射现象, 在光学仪器中有很多应用, 例如转折光路使用的全反射棱镜, 如图 7 所示直角等腰反射棱镜。光束孔径角  $2U$ , 如果不超过图 (7) 中所示大小, 反射面可不镀反射层, 利用全内反射规律。

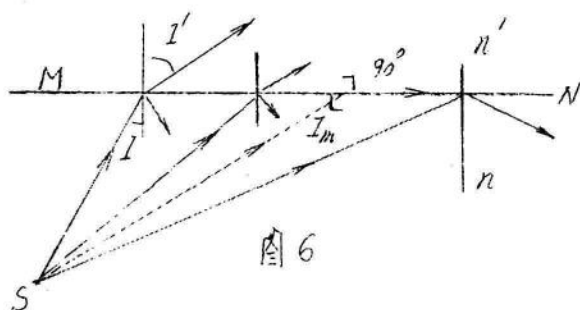


图 6

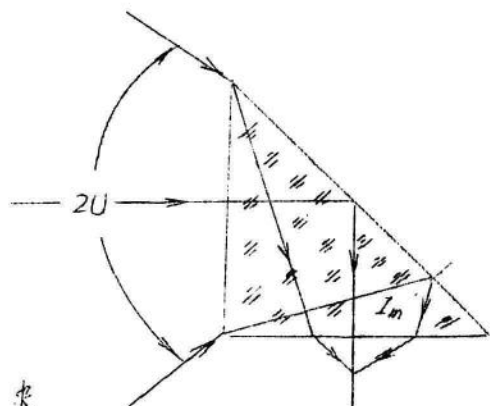


图 7

### § 1-7 光楔的折射

有时, 两个折射平面构成一个夹角不大的楔块, 称作“光楔”。下面分析光线经光楔折射以后的情况。从图 8 中可以直观看出: 光线 1 穿过楔角为  $\alpha$  的光楔后, 由于两面的折射将使光线偏折一个角度  $\delta$ 。下面分析楔角为  $\alpha$  的光楔使光线偏折的角度  $\delta$  有多大?

当楔角  $\alpha$  小时 (一般只有几度),  $\delta$ ,  $i$ ,  $i'$  等角度均很小,  $\sin i = i$ ,  $\sin i' = i'$ 。从四边形  $ADBC$  的几何关系得:

$$\angle B = 180^\circ - \alpha,$$

$$\text{从 } \triangle BCD \text{ 得 } i_1' + i_2 = \alpha \quad (1)$$

$$\text{从 } \triangle CDE \text{ 得 } \delta = (i_1 - i_1') + (i_2' - i_2) \quad (2)$$

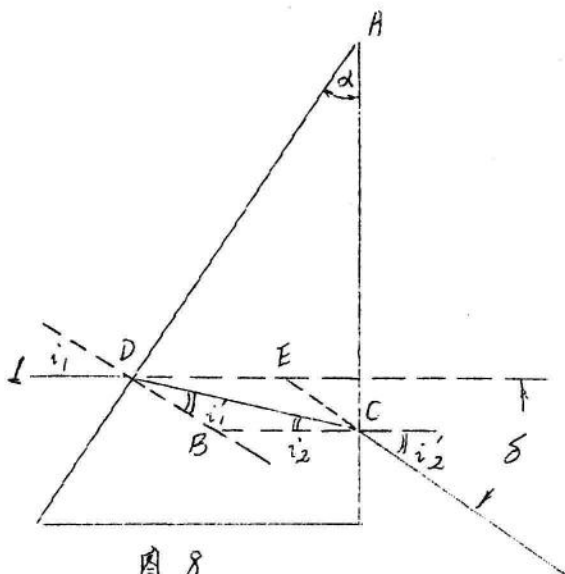


图 8

$$= (i_1 + i_2) - (i'_1 + i'_2) \quad (3)$$

又对第一、二面用折射定律

$$\left. \begin{aligned} i_1 &= N i'_1 \\ i'_2 &= N i_2 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

把(4)和(1)代入(3)得:

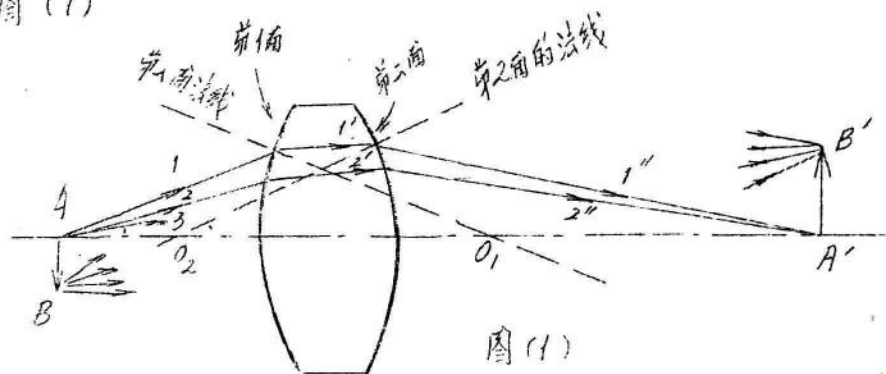
$$\delta = (N - 1) \alpha \quad (5)$$

(5)式即为光楔造成的光线偏折量  $\delta$ 。

## 第二章 球面透镜成象

### §2-1 透镜为什么能成象？

在生产斗争的实践中，人们发现：一块凸透镜能使物体放大（或缩小）。而一块平板玻璃就没有这种放大（缩小）作用。（见实验）。通过大量实践，找出了规律性的东西。原来凸透镜所以能把物体放大（或缩小），其原因就是凸透镜的球面使光线折射。下面先结合五倍读数物镜实例，来分析凸透镜的放大（或缩小）作用。见图（1）



例如有一块两面都是球面的凸透镜， $O_1$ 是第一个球面的球心， $O_2$ 是第二个球面的球心；一物体AB放在凸透镜前的某一位置。

分析的方法是把物体AB分成许多点，逐点地分析光线行进情况。先看位于透镜的中心轴线上（称为光轴）上的A点。从物点A发出许多条光线1、2、3……等。光线1射入第一个球面后，按照前述的折射规律，将偏向法线。（图1中用虚线画出了第一条光线折射时的法线）。于是光线1射入球面后，在玻璃内部将按照1'的方向前进。

光线1'射到第二个球面后，按照折射规律，将沿1''的方向射出玻璃进入空气（光线偏向法线），与光轴交在A'点。类似，从物点A发出一束光线（1、2、3……许多条光线，形成一个以A点为顶点的圆锥），经过凸透镜的二个球面折射后，都交到A'外（或A'点附近）。（图1中，未把每条光线都画出）

同样，对光轴外的物点 $B$ 进行相同的分析，可以发现从物点 $B$ 发出的许多条光线，经过凸透镜的折射后，都交到 $B'$ 点（或 $B'$ 点附近）。这样，由于凸透镜的两个球面的折射作用，使物点 $A$ 发出的全部光线都交到 $A'$ 点（或 $A'$ 点附近）（见图2），使物点 $B$ 发出的全部光线都交到 $B'$ 点（或 $B'$ 点附近），使物点 $C$ 发出的全部光线都交到 $C'$ 点（或 $C'$ 点附近）。

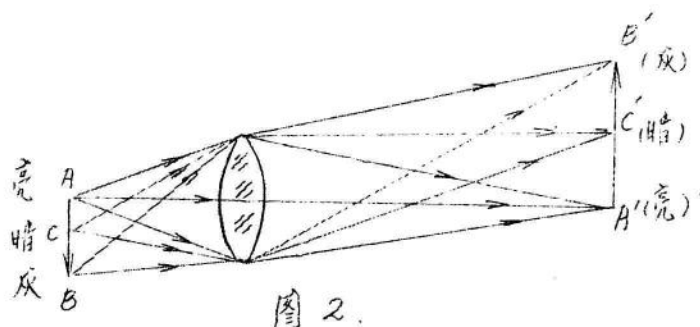


图 2.

如果 $A$ 点是亮点， $C$ 点是暗点， $B$ 点是灰点，那么，由于从 $A, B, C$ 点发出的光线全部聚交到相应的 $A', B', C'$ 点（或这些点的附近），没有跑到别处去。所以当人眼看象面 $A'C'B'$ 时，看到的 $A'C'B'$ 的排列次序（亮、暗、灰）和原来的物体 $ACB$ 的排列次序一样（亮、暗、灰）。在人眼的感觉中， $A'C'B'$ 和原来的物体 $ACB$ 几乎一模一样，只是上下方向颠倒了。于是把 $A'C'B'$ 称为物体 $ACB$ 的“象”。

在图(2)中，只是找出 $ACB$ 三个点作典型分析，实际上，在物体 $AB$ 上还有许多个点，（假想物体 $AB$ 由无限多个点 $A, B, C, D, E, \dots$ 等之组成）那么，在象面上由光线聚交得到无限多个点 $A', B', C', D', E', \dots$ 等之。它们的排列次序及亮暗和原物点 $A, B, C, D, E, \dots$ 相应，这样就形成了“象”。

图(2)所示的情况，象的上下方向和原物体颠倒了，称为倒象（倒立的象）。

在图(2)的情况下，凸透镜的折射结果是使“象”比原来的“物”放大了。

利用同一块凸透镜，如果把物体放在 $A'B'$ 处，而使光线射向凸透镜，那么，凸透镜按图示的光路折射的结果，将在 $AB$ 处得到八个缩小的象。

总结以上的规律，凸透镜的作用是使从物点 $A$ 发出的一束光线经折射后重新聚交到某一点 $A'$ 处（仅与聚交到某一点 $A'$ 处而不是杂乱地散射到各处），同样，从 $BC$ 各点发出的光线经折射后也仅与聚交到相应的 $B'C'$ 点处，而不是杂乱地散射到其他各处。那么，人眼就能在 $A'C'B'$ 处看到一个与物体相似的“象”。随着外界条件的变化，例如物体 $AB$ 离透镜距离改变时，这个象的位置、大小、正倒也随之变化。

如果凸透镜不能起到“使一点发出的光聚交到另一点”的作用，而是使光线杂乱地折射，那么，从 $A$ 点发出的光可能不是射到相应的 $A'$ 点处，而是乱射到其他各点处。这样，得到的象就较模糊，甚至完全看不清。例如图(2)中从灰点 $B$ 发出的光，有的折射到 $B'$ 点处，有的折射到亮点 $A'$ 处，结果就使 $A'$ 处也变成模糊之的一片。

既然透镜成像的本质就是球面对光线的折射作用，下面就进一步分析球面对光线的折射情况。

## §2-2 符号规则，大光线的计算式。

下面先分析光线经过一个球面折射时的计算方法。计算的目的就是：已知球面的半径 $r$ ，入射光线的方向，需要求出光线经过球面折射后，折射光线的方向，这样就能求出象的位置（成象在什么地方）和象的大小（放大或缩小）等。

在图3中，有一个球面，半径为 $r$ ，球心在 $O$ 点处。左方有一个物体 $BC$ 。现需求出物点 $B$ 被球面成象在什么地方（即找出 $B'$ 点的位置），也就是要找光线经球面折射后折射光线的方向。

由于折射计算是经常用到的计算方法，我国各光学工厂和设计科研单位基本上采用了统一的字母代号和正负号规则。

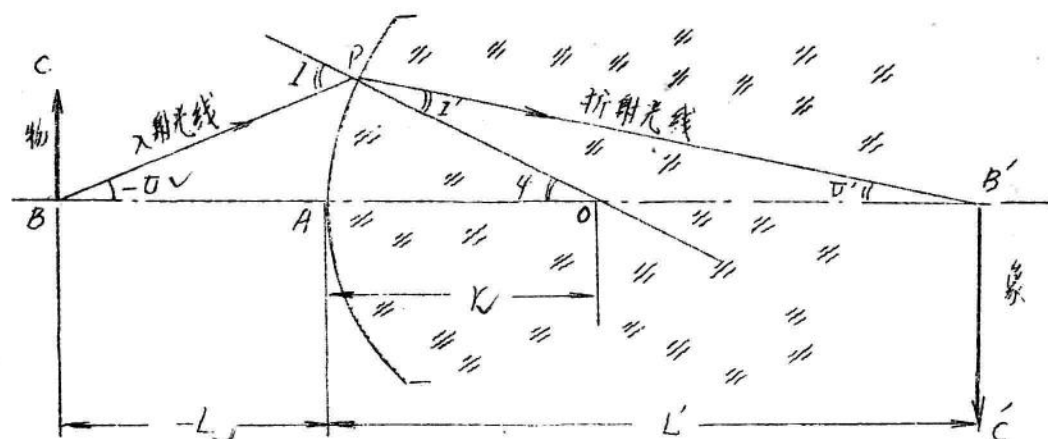


图3

光线的行进方向取为从左向右前进。

(1) 对于沿光轴方向的线段，以球面的顶点A作为座标原点，(起标点)，从A向左的线段定为负值，从A向右的线段定为正值。

这种正负值是人为地规定的，例如光说球面半径多大而不指正负，则不能知道究竟是凹面还是凸面。图(3)中半径  $R=AO$ ，(从A点起向右)故AO为正值。

物点B距离球面顶点A的距离称为物距L，同样，从A点起标，图(3)所示的物距为负值。

象点B'距离球面顶点A的距离称为象距L'。(凡是物方和象方相对应的数值，都用同一个字母表示：只是在代表象方值的字母上角加上撇“'”，)正负规则同前，图中的L'是正值。

(2) 对于垂轴线段，为了区分正象、倒象，光轴以上取为正，光轴以下为负。如图(3)物高 $q$ 为正，象高 $q'$ 为负。

(3) 设从B点发出某一条与光轴夹角为 $u$ 的光线， $u$ 角称为物方“孔径角”(或称物方“孔径角”)。例如图(3)中的 $u$ 角为 $1.3752^\circ$ 。

为了区分入射光线的方向，为 $u$ 角人为地规定一个正负号。