光学

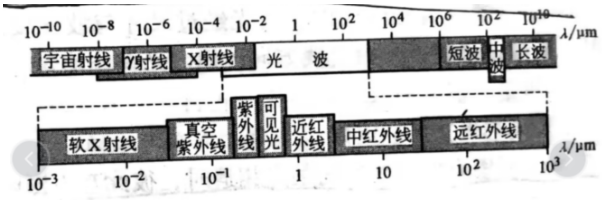
洛白

2023 年 5 月 28 日

目　录

1　球面和球面系统

可见光是一种波长在 380-760nm 波段的电磁波



虚实像物点，物像空间。

1.1　概念和符号系统

1.1.1　完善成像条件

1. 同心光束成同心光束
2. 球面波成球面波
3. 物点像点之间等光程

1.1.2　一些成像中的概念

同心光束 从同一点发出的或**汇聚到同一点**的光线束。

光具组 若干反射折射面组成的光学系统

虚实像物点
同一点发出（实际光线汇聚）的为**实物** (像) 点，汇聚（延长线汇聚）到同一点的为**虚物** (体) 点。

像物方空间
实际上，一束光经过一个光学系统，整个空间都是物方空间和像方空间，就是有虚实之分。只不过我们习惯上将像（物）实空间叫做像（物）空间。

同时，符号中不带 $'$ 的为物方，带的为像方。如 l, l', n, n', u, u'。

1.1.3 一些规定的概念

子午平面 包含光轴的平面

截距 物方或像方光线与光轴交点到顶点的距离。

倾斜角 物方或像方光线与光轴的夹角。

1.1.4 约定的符号

为了表示各种线段量和角度量的属性，我们约定俗成地规定了一些符号。

传播方向 物方到像方，并且定义此方向单位向量 $\vec{n}$

沿轴线段 从折射球面顶点出发到终点（名称左到右），向量为 $\vec{r}$, 定义其长度为 $\vec{r}\cdot\vec{n}$

垂轴线段 光轴上正，下负。如果 $\vec{n}=(x_0,y_0)$, 定义 $\vec{n_v}=(-y_0,x_0)$, 从折射球面顶点出发到终点（名称左到右），向量为 $\vec{r}$, 定义其长度为 $\vec{r}\cdot\vec{n_v}$

间隔 d 见上。对于一般角度，类比上个方法。

角度 从**光轴到光线到法线**(**轴线法**)，锐角转向，顺正逆负。

球面半径 以球面和主光轴的交点为准到球心做向量 $\vec{r}$,$r=\vec{r}\cdot\vec{n}$。如右图，其为

$$L_{OC}$$

1.2 基本公式和定理

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

定理 1.1 (费马原理). *光是沿着光程取极值的路径传播的 (极大值、极小值或常数)。*

定理 1.2 (马吕斯定律). *光线束在***各向同性的均匀介质中***传播时，始终保持着与波面的正交性，并且入射波面与出射波面对应点之间的光程均为定值。*

几何光学有三个基本定律，分别是**光的直线传播，光的独立传播，光的折反射定律**。

1.2.1 光的直线传播

在各向同性的介质中，不遇到波长量级的障碍物时 (衍射)，光沿直线传播。

1.2.2 光的独立传播

不同光源发出的光，在空间某点相遇时，彼此互不影响。(同一单色点光源，干涉)

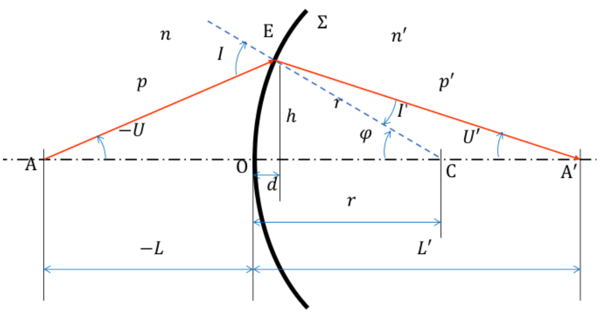
1.2.3 光的折反射定律

- 全反射是从光密到光疏，入射角大于临界角。
- 对于反射
$$n'=-n$$
- 对于折射
$$n\sin I=n'\sin I'$$

注意 I, I' 是入射和出射和法线所成角。

1.3 基本公式推导 (单球面折射)

我们需要根据入射光线给出的条件 r, n, n', L, U, 求出 L', U'



根据折射定律得

$$n\sin I=n'\sin I' \tag{1.2.1.a}$$

在 ΔEAC 中运用正弦定理，得到

$$\frac{\sin I}{r-L} = \frac{\sin -U}{r} \tag{1.2.2.a}$$

显然又因为内外角定理，可得

$$\varphi = U + I = U' + I' \tag{1.2.3.a}$$

在 ΔACE 中再使用正弦定理，可得

$$L' = r + \frac{r}{\sin U'} \sin I' \tag{1.2.4.a}$$

显然固定 L, r, n, n'，动 U，显然 L' 会发生改变，即不是同心光束，不能**完善成像**。

1.3.1 近轴光路近似

近轴（傍轴）光线

与光轴很靠近的光线，即-U 很小，此时

用小写（如-u 等）表示近轴光线的参数。此时可利用小角近似，$i = \sin i = \tan i$, 所以 (1.2.1.a-1.2.4.a) 可以写成

$$ni = n'i' \tag{1.2.1.b}$$

$$\frac{i}{r-l} = \frac{-u}{r} \tag{1.2.2.b}$$

$$\varphi = u + i = u' + i' \tag{1.2.3.b}$$

$$l' = r + \frac{r}{u'} i' \tag{1.2.4.b}$$

化简 (1.2.4.b)

$$\begin{aligned} l' &= r + r\frac{i'}{u'} = r + r\frac{i'}{u+i-i'} \\ &= r + r\frac{\frac{n}{n'}i}{u+i-\frac{n}{n'}i} \\ &= r + r\frac{n}{\frac{n'u}{i} + n' - n} \end{aligned} \tag{1.2.5}$$

先算 i

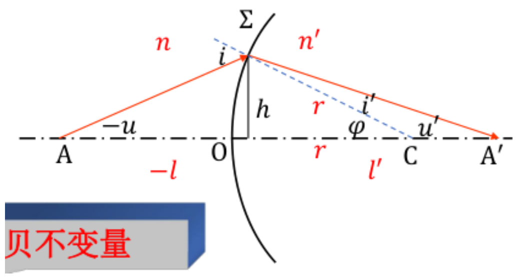
$$i = \frac{u(l-r)}{r} \tag{1.2.6}$$

(1.2.6) 代入 (1.2.5)

$$l' = r + r\frac{n}{\frac{n'r}{l-r} + n' - n} \tag{1.2.7}$$

显然 l' 与 u 无关, 其**完善成像**。此时的像物点又叫做**共轭点**。近轴光所成像称为**高斯像**，仅考虑近轴光的光学叫**高斯光学**。

1.3.2 近轴光路其他公式



我们新引入了一个 h，先来引入几个关于它的式子

$$h = lu = l'u' \tag{1.2.8}$$

$$\varphi \approx \tan\varphi = \frac{h}{r} \tag{1.2.9}$$

Then Let,s start our solve

折射球面的物像位置关系

由 (1.2.8) 得,

$$u = \frac{h}{l} \quad u' = \frac{h}{l'} \tag{1.2.10}$$

化简 (1.2.1.b) 得 1.2.11.a, 其移项化简可得后一项

$$n(\varphi - u) = n'(\varphi - u') \tag{1.2.11.a}$$

$$nu - n'u' = (n-n')\varphi = (n-n')\frac{h}{r} \tag{1.2.11.b}$$

将 (1.2.10) 代入 (1.2.11.b)，可得

$$\frac{h}{l}n - \frac{h}{l'}n' = (n-n')\frac{h}{r}\text{[①]} \tag{1.2.12.bef}$$

$$\frac{n}{l} - \frac{n'}{l'} = \frac{n-n'}{r} \tag{1.2.12}$$

此式即为**折射球面的物像位置关系**, 同时, 此式也可由式 (1.2.7) 直接化简而来. 下面

[①]bef 表示该公式的前置证明步骤公式

简要说明

$$\begin{aligned} l' &= r + r(\frac{n}{\frac{n'r}{l-r} + n' - n}) \\ &= r(1 + \frac{nl - nr}{n'r + (n'-n)(l-r)}) \\ &= r(1 + \frac{nl - nr}{n'l - nl + nr}) \\ &= r(\frac{n'l}{n'l - nl + nr}) \end{aligned} \tag{1.2.12.af1}$$

继续化简

$$rn'l = (n'-n)ll' + rnl' \tag{1.2.12.af 2}$$

$$r(n'l - nl') = (n'-n)ll' \tag{1.2.12.af 3}$$

$$\frac{n'}{l'} - \frac{n}{l} = \frac{n'-n}{r} \tag{1.2.12.af 4}$$

阿贝不变量

化简 (1.2.11.a)

$$n(\frac{h}{r} - \frac{h}{l}) = n'(\frac{h}{r} - \frac{h}{l'}) \tag{1.2.13.bef}$$

$$n(\frac{1}{r} - \frac{1}{l}) = n'(\frac{1}{r} - \frac{1}{l'}) = Q \tag{1.2.13}$$

式 (1.2.13) 即为**阿贝不变量**公式。

光焦度

表示折射面偏折光线的能力

$$\Phi = \frac{n'-n}{r} \tag{1.2.14}$$

焦距

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{l_{l'\to\infty}} = \frac{n-n'}{nr} \tag{1.2.15.a}$$

$$\frac{1}{f'} = \frac{1}{l_{l\to\infty}} = -\frac{n-n'}{n'r} \tag{1.2.15.b}$$

用光焦度表示的焦距

$$\frac{1}{f} = -\frac{1}{n}\Phi \quad \frac{1}{f'} = \frac{1}{n'}\Phi \tag{1.2.16}$$

化简上述公式可得

$$\frac{f'}{f} = -\frac{n'}{n} \tag{1.2.17}$$

$\frac{1}{(1.2.15.a)} + \frac{1}{(1.2.15.b)}$ 可得

$$f + f' = \frac{1}{r} \tag{1.2.18}$$

如果对于空气中（理想光学系统），$n = 1$ 就有

$$f + f' = \frac{1}{r} = 0 \tag{1.2.18.a}$$

$$\Phi = -\frac{1}{f} = \frac{1}{f'} \tag{1.2.16.a}$$

屈光度

光焦度的单位称为**屈光度**，以字母 D 表示（对应焦距单位：米）

1. 200 度近视镜光焦度-2.00D（凹透镜）**负透镜**
2. 300 度老花镜光焦度 3.00D（凸透镜）**正透镜**

高斯公式

将 (1.2.15.a),(1.2.15.b) 代入式 (1.2.12) 得

$$\frac{n-n'}{r} = \frac{(n-n')f}{rl} + \frac{(n-n')f'}{rl'} \tag{1.2.19.bre1}$$

显然可得

$$\frac{f}{l} + \frac{f'}{l'} = 1 \tag{1.2.19}$$

式 (1.2.19) 即为**高斯公式**。

牛顿公式

设 A 为物垂点，A' 为像点垂点，$x = l_{FA}, x' = l_{F'A'}$(见下图 1.1)，有

$$l = x + f \tag{1.ad.1.a}$$

$$l' = x' + f' \tag{1.ad.1.b}$$

将 (1.ad.1.a),(1.ad.1.b) 代入式 (1.2.19) 得

$$\frac{f}{x+f} + \frac{f'}{x'+f'} = 1 \tag{1.ad.2.bef.1}$$

$$x'f + 2ff' + xf' = xx' + ff' + x'f + xf' \tag{1.ad.2.bef.2}$$

$$ff' = xx' \tag{1.ad.2}$$

1.3.3 三种放大率和拉氏不变量

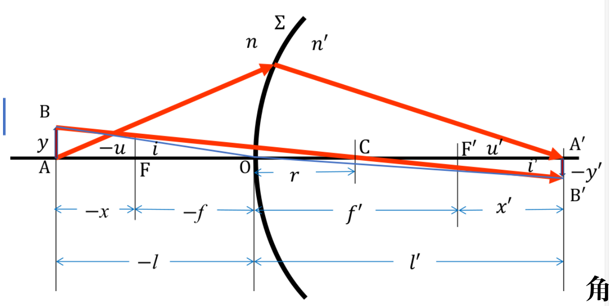


图 1: 光路示意图

横向放大率

$$\beta = \frac{y'}{y} = \frac{l'i'}{li} \tag{1.2.20}$$

又因为有

$$ni = ni' \quad lu = l'u' \tag{1.2.21.bre 1}$$

$$nlui = n'l'u'i' \tag{1.2.21.bre 2}$$

所以可得

$$\beta = \frac{nu}{n'u'} = \frac{nl'}{n'l} \tag{1.2.21}$$

继续化简

$$\begin{aligned}\beta = -\frac{fl'}{f'l} &= -\frac{f(x'+f')}{f'(x+f)} \\ &= -\frac{fx'+xx'}{f'(x+f)} = -\frac{x'}{f'} \\ &= -\frac{f(x'+f')}{f'x+xx'} = -\frac{f}{x}\end{aligned} \tag{1.ad.3}$$

$\beta > 0$ 正立虚实相反像, $\beta < 0$ 倒立虚实相同像。>1 放大, <1 缩小。

横向 (垂轴) 放大率

$$\alpha = \frac{\mathrm{d}l'}{\mathrm{d}l} \tag{1.2.22.a}$$

(1.2.12) 两端分别对 u 进行求导,r 对 u 是常数, 所以有

$$\frac{n'}{l'^2}\frac{\mathrm{d}l'}{\mathrm{d}u} - \frac{n}{l^2}\frac{\mathrm{d}l}{\mathrm{d}u} = 0 \tag{1.2.22.bef 1}$$

$$\frac{n'}{l'^2}\frac{\mathrm{d}l'}{1} = \frac{n}{l^2}\frac{\mathrm{d}l}{1} \tag{1.2.22.bef 1}$$

所以求得

$$\alpha = \frac{\mathrm{d}l'}{\mathrm{d}l} = \frac{nl'^2}{n'l^2} = \frac{\beta^2}{\frac{n}{n'}} = \frac{n'}{n}\beta^2 \tag{1.2.22}$$

角放大率

$$\gamma = \frac{u'}{u} = \frac{l}{l'} = \frac{1}{\beta}\frac{n}{n'} \tag{1.2.23}$$

或者说

$$\beta = \frac{nu}{n'u'} = \frac{n}{n'}\frac{1}{\gamma} \tag{1.add.4}$$

显然以上三种放大率 α β γ 之间存在关系,

$$\alpha\gamma = \beta \tag{1.2.24}$$

拉式不变量

同时根据 β 我们定义一个叫做拉式不变量的概念

$$\frac{y'}{y} = \beta = \frac{nu}{n'u'} \tag{1.2.25.bef 1}$$

$$nuy = n'u'y' = j \tag{1.2.25}$$

j 为拉氏不变量，它是表征光学系统性能的重要参数

1.4 反射球面

其实就是将 $n + n' = 0$ 代入上述所有基本公式进行化简, 下面给出部分常用公式

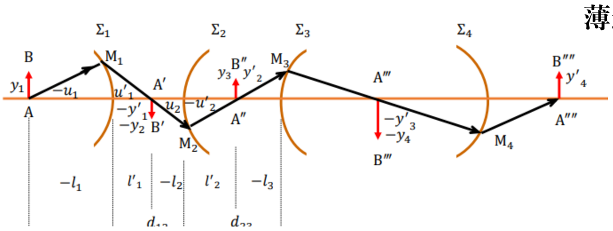
$$\Phi = \frac{-2n}{r} = \frac{2n'}{r} \tag{1.2.26}$$

$$f = f' = \frac{r}{2} \tag{1.2.27}$$

$$\frac{1}{l} + \frac{1}{l'} = \frac{2}{r} \tag{1.2.28}$$

2 薄透镜理想光学系统

2.1 共轴球面系统



2.1.1 过渡公式

第 i 面的物方空间就是第 $i+1$ 面的像方空间。所以

$$n_{i+1} = n'_i \tag{2.add.1.a}$$

$$u_{i+1} = u'_i \tag{2.add.1.b}$$

$$y_{i+1} = y'_i \tag{2.add.1.c}$$

同时有

$$d_i = d_{i(i+1)} = l'_i - l_{i+1} \tag{2.add.2.pre}$$

$$l_{i+1} = l'_i - d_i \tag{2.add.2}$$

(2.add.2) 乘 (2.add.1.b) 可得 ($h_i = l_i u_i$)

$$h_{i+1} = h_i - d_i u'_i \tag{2.add.3}$$

对每个面应用拉式不变量和过度公式 (2.add.1) 可得

$$n_i u_i y_i = J \tag{2.add.4}$$

2.1.2 放大率

$$\alpha_n = \frac{\mathrm{d}l'_n}{\mathrm{d}l_1} = \prod_{i=1}^{n} \alpha_i \tag{2.1.1.a}$$

$$\beta_n = \frac{y'_n}{y_1} = \prod_{i=1}^{n} \beta_i \tag{2.1.1.b}$$

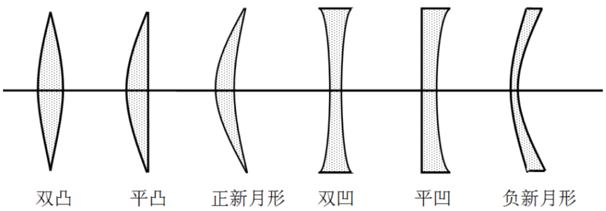
$$\gamma_n = \frac{u'_n}{u_1} = \prod_{i=1}^{n} \gamma_i \tag{2.1.1.c}$$

其关系顺延之前。

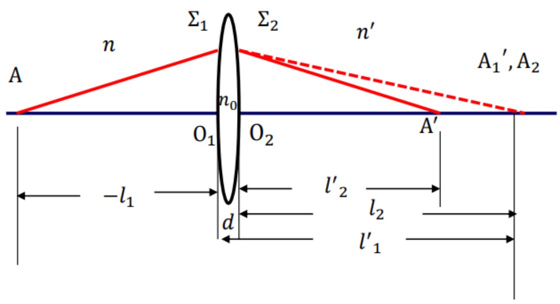
2.2 薄透镜

薄透镜

透镜厚度 d 远小于物距、像距、焦距、曲率半径等



2.2.1 成像



$$\frac{n_0}{l'_1} - \frac{n}{l_1} = \frac{n_0 - n}{r_1} \tag{2.2.1.a}$$

$$\frac{n'}{l'_2} - \frac{n_0}{l_2} = \frac{n' - n_0}{r_2} \tag{2.2.1.b}$$

并且

$$l_2 = l'_1 + d \approx l'_1 \tag{2.2.2}$$

(2.2.1.a)+(2.2.1.b)

$$\frac{n'}{l'_2} - \frac{n}{l_1} = \frac{n_0 - n}{r_1} + \frac{n' - n_0}{r_2} \tag{2.2.3.a}$$

$$\frac{n'}{l'} - \frac{n}{l_1} = \frac{n_0 - n}{r_1} + \frac{n' - n_0}{r_2} \tag{2.2.3.b}$$

(2.2.3.b) 就是**薄透镜傍轴成像的物像距公式**。化简一下

$$n(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{l}) - n'(\frac{1}{r_2} - \frac{1}{l'}) = n_0(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}) \tag{2.2.4}$$

设 (2.2.3.b) 等式右边为 Φ，可得

$$\text{物方焦距} f = \lim_{l'\to\infty} \frac{-n}{\Phi} \quad (2.2.5.a)$$

$$\text{像方焦距} f' = \lim_{l\to\infty} \frac{n'}{\Phi} \quad (2.2.5.b)$$

$$f = -f' = \frac{n}{\Phi} \quad (2.2.5.c)$$

$f' > 0$ 汇聚 < 0 发散。联立以上各方程组，可得其牛顿公式和高斯公式基本不变

$$\text{高斯公式} \frac{f'}{l'} + \frac{f}{l} = 1 \quad (2.2.6.a)$$

$$\text{牛顿公式} xx' = ff' \quad (2.2.6.b)$$

并且如果在空气中 $n = n' = 1$, 可得

$$f' = -f = \frac{1}{\Phi} \quad (2.2.7.a)$$

$$\Phi = (n_0 - 1)(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}) \quad (2.2.7.b)$$

$\Phi > 0, \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} > 0$ 凸透镜，反之凹透镜。(其实只考虑两种最极端的情况就行) 对于放大率来说，

$$\beta_1 = \frac{n_1 l_1'}{n_1' l_1} \quad (2.2.8.a)$$

$$\beta_2 = \frac{n_2 l_2'}{n_2' l_2} \quad (2.2.8.b)$$

$$\beta = \beta_1\beta_2 = \frac{n_1 n_2 l_1' l_2'}{n_1' n_2' l_1 l_2} \quad (2.2.8.c)$$

$$l_1' = l_2, l_1 = l, l_2' = l' \quad (2.2.8.d)$$

$$n_1 = n, n_2' = n', n_1' = n_2 = n_0 \quad (2.2.8.e)$$

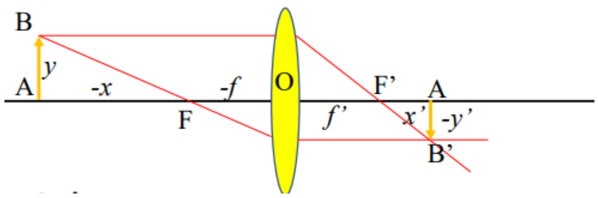
联立以上五式可得

$$\beta = \frac{nl'}{n'l} = -\frac{fl'}{f'l} \quad (2.2.9)$$

注意上式中 f, f' 的顺序

$$fn' + f'n = 0$$

下面再来看几个放大率，一样的分析方法（略去一点推导）



$$-\frac{y'}{y} = \frac{f}{x} = \frac{x'}{f'} \quad (2.2.10.a)$$

$$\beta = \frac{y'}{y} = -\frac{f}{x} = -\frac{x'}{f'} \quad (2.2.10.b)$$

然后一如既往的

$$\alpha = \frac{n'}{n}\beta^2 \quad (2.2.11.a)$$

$$\gamma = \frac{n}{n'}\frac{1}{\beta} \quad (2.2.11.b)$$

$$\alpha\gamma = \beta \quad (2.2.11.c)$$

注意算透镜的时候，多用焦距，这样十分简单。

例3 一双凸薄透镜两球面的曲率半径均为100cm，一高为2cm 的物体在光轴上距透镜 20cm。透镜材料折射率n_0 = 1.5，物方空气折射率n = 1.00，像方水的折射率n' = 1.33。求物体经透镜所成的像并作图。

例4 一虚物PQ位于凹透镜右侧二倍焦距处，试用作图法求它经透镜成的像。

3 理想光学系统

单个折射球面或者是单薄透镜是对细小平面以细光束成完善像，但是实际的光学系统需要对一定大小的场以宽光束成像，其**成像有缺陷**。所以其必须要由若干元件组成，经过反复计算，使其成像**趋于**完善。

并且对于理想光学系统，所成的像是完全相似的。这种理想光学系统理论，也被称作**高斯光学**。并且引出共轭的表示

$$\text{点} \to \text{共轭点} \quad (3.0.a)$$

$$\text{线} \to \text{共轭线} \quad (3.0.b)$$

$$\text{面} \to \text{共轭面} \quad (3.0.c)$$

$$\text{同心光束} \to \text{共轭同心光束} \quad (3.0.d)$$

3.1 共线成像理论

由于系统的对称性，理想共轴光学系统有如下性质

光轴 光轴物点的共轭点还在光轴上

子午平面 通过光轴的平面，物点的共轭点在一子午平面上

垂轴平面 物面垂轴，其共轭像面一定也垂轴，并且几何形状相似。

表示 如果已知两对共轭平面的位置和 β，或者一对共轭平面的位置和 β，以及一对共轭点，则一切物点的像点均可确定。

同心 同心光束还是同心光束（理想成像）

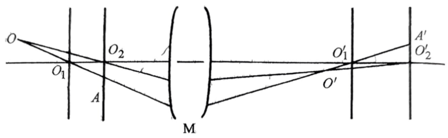


图 2-3 两对共轭面已知的情况

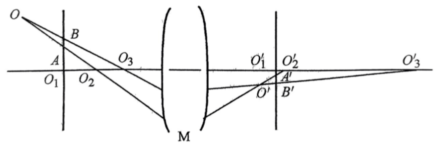


图 2-4 一对共轭面及两对共轭点已知的情况

3.2 各种定义

3.2.1 对于无限物点

无限远**轴上**物点发出的同心光束等效于平行于光轴的平行光束，其共轭像点为 F'。对于轴外的话，就是下图所示

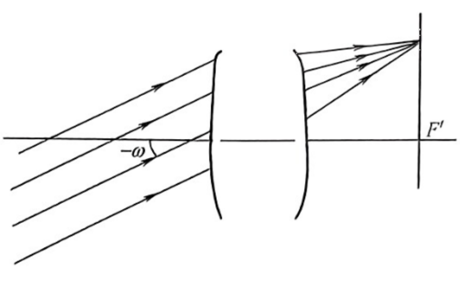
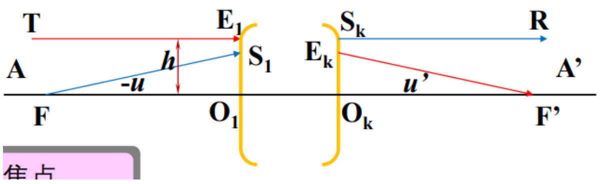


图 2-8 无限远轴外物点发出的光束

3.2.2 对于无限像点

同上

3.2.3 焦点和焦面



对于无穷远轴上像物点 A', A

$$A \to F' \tag{3.2.1.a}$$

$$F \to A' \tag{3.2.1.b}$$

物方无穷远垂轴平面的共轭平面为通过 F’ 的垂轴平面（后焦平面，像方焦面），像方无穷远垂轴平面的共轭平面为物方过 F 的垂轴平面（前焦平面，物方焦面）。

物方无穷远垂轴平面一轴外点，其所成平行光一定交于后焦平面一点。显然此两平面共轭。像方同理。

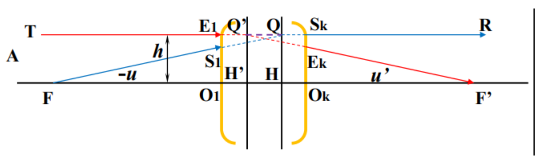
$$f = \frac{h}{\tan U} \tag{3.2.2.a}$$

$$f = \frac{h}{\tan U'} \tag{3.2.2.b}$$

[1]

3.2.4 主点 H, H' 和主平面

定义 3.1 (主平面). $\beta = 1$ 的一对平面



[1]这时候用大写的，因为有轴外物点，其不再满足前文所述傍轴条件

如图所示找到 Q, Q', H, H'

$$Q \to Q' \tag{3.2.3.a}$$

$$H \to H' \tag{3.2.3.b}$$

$$QH \to QH' \quad (\beta = 1) \tag{3.2.3.c}$$

主点 H，带不带' 取决于其经过是像方焦点还是物方焦点。显然对于正透镜，左边是 H'，对于负透镜，$f' < 0$，左边是 H

3.2.5 基点

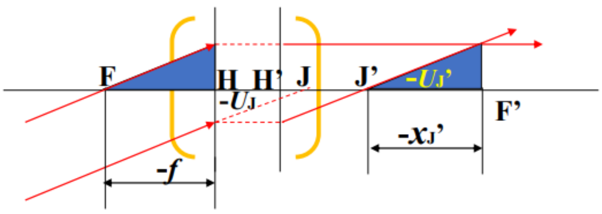
无限远轴外像物点 A, A'，和像方、物方焦点 F, F' 以及主面的交点 H, H'，可以确定所有物点的像点，代表一个理想光学系统。

同时对于一些特殊的折射球面，单个折射球面，球面镜和波透镜都相当于两个主面重叠的情况。

H, H', F, F' 这四点就称作光学系统的基点。

3.2.6 节点 J, J'

一对 $\gamma = 1$ 的共轭点。物方入射于 J 的任意光线，将以相同方向从 J' 射出



由三角形全等，显然可得

$$x'_J = F'J' = f \tag{3.2.4.a}$$

$$X_J = FJ = f' \tag{3.2.4.b}$$

当 $f = f'$ 有

$$x'_J = F'J' = -f' = F'H' \tag{3.2.4.a}$$

$$X_J = FJ = f' = -f = FH \tag{3.2.4.b}$$

节点 J, J' 和主点 H, H' 重合，这时光学系统两边折射率相同。

3.2.7 各物理量的表示

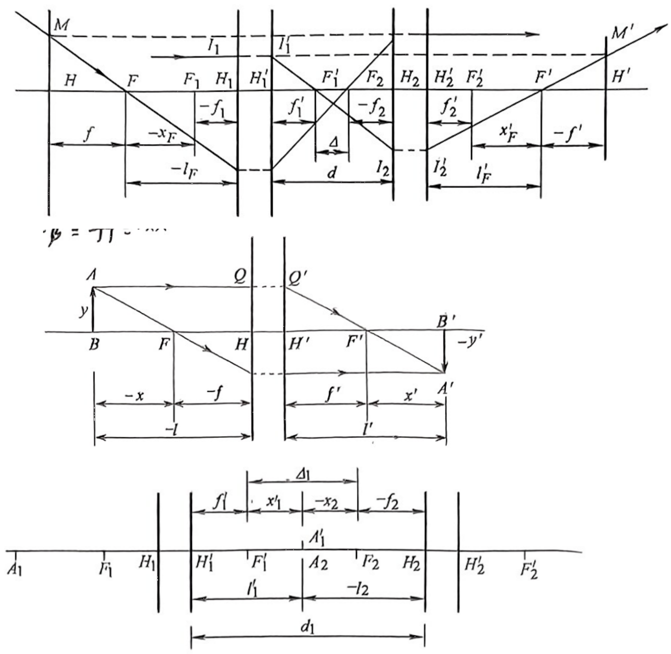


图 2: 两光组组合及符号示意图

如上图 2 所示，有

$$f_i = H_iF_i \quad f'_i = H'_iF'_i \tag{3.2.5.a}$$

$$x_i = F_iA_i \quad x'_i = F'_iA'_i \tag{3.2.5.b}$$

$$l_i = H_iA_i \quad l'_i = H'_iA'_i \tag{3.2.5.c}$$

$$A'_i = A_{i+1} \tag{3.2.5.d}$$

$$d_i = H'_iH_{i+1} = l'_i - l_{i+1} \tag{3.2.5.e}$$

$$\Delta_i = F'_iF_{i+1} = x'_i - x_{i+1} \tag{3.2.5.f}$$

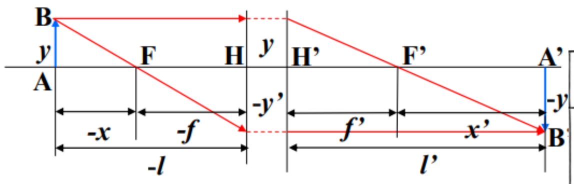
$$l_F = H_1F \quad l'_F = H'_2F' \tag{3.2.5.g}$$

$$l_H = H_1H \quad l'_H = H'_2H' \tag{3.2.5.h}$$

显然通过对以上公式的化简，有

$$\Delta_i = F'_iF_{i+1} = -f'_i + d_i + f_{i+1} \tag{3.2.6.a}$$

3.3 理想光学系统的物像位置关系和放大率



看图显然可以得到

$$\beta = \frac{y'}{y} = -\frac{x'}{f'} = -\frac{f}{x} \qquad (2.3.5)$$

这里只列举一部分，就和第一章一样，参照第一章就好。

如果含有 k 个反射面，有

$$\beta = \frac{y'}{y} = (-1)^{k+1}\frac{n'}{n} \qquad (2.3.6)$$

轴向点移动 Δ 距离后，其垂轴放大率为

$$\overline{\alpha} = \frac{n'}{n}\beta_1\beta_2 \qquad (2.3.7)$$

3.3.1 作图原则

同心光束 同心光束还成同心光束

轴上 轴上物点的像点还在轴上

主面 $\beta = 1$

节点 $\gamma = 1$

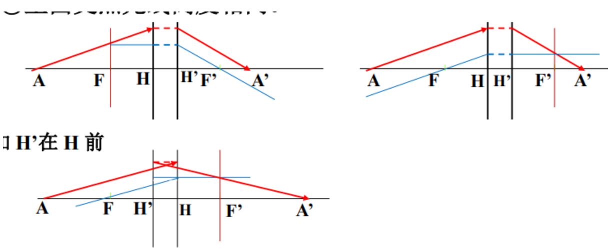
无穷远像物方轴上点

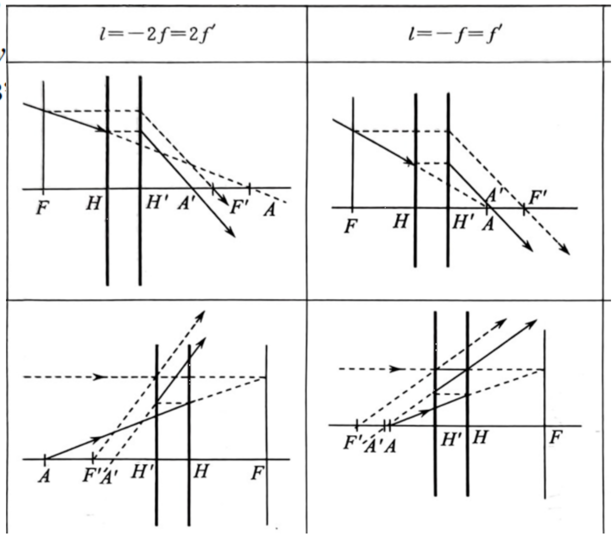
平行轴向光，与焦点共轭

无穷远像物轴外电点

斜向平行光，与焦面某点共轭

对于轴外一点，一平行一过焦点。对于轴上，找过 A 点和 F 的平行光线或者同心光束，使用以上方法即可。





3.3.2 光束的汇聚度和系统的汇聚度

首先直接给出几个概念

折合物距 $\frac{l}{n}$

折合像距 $\frac{l'}{n'}$

折合焦距 $\frac{f'}{n'}$

汇聚度 $V = \frac{n}{l}$ $V' = \frac{n'}{l'}$，并且其为正代表光束是汇聚光束，反之为发散光束。

光焦度 $\Phi' = \frac{n'}{f'} = \frac{-n}{f}$，正表示汇聚作用。表征光学系统偏折光线的能力。单位：屈光度——以米为单位的焦距的倒数。

$$\Phi = V' - V \qquad (2.3.8)$$

3.3.3 透镜不同位置的成像情况

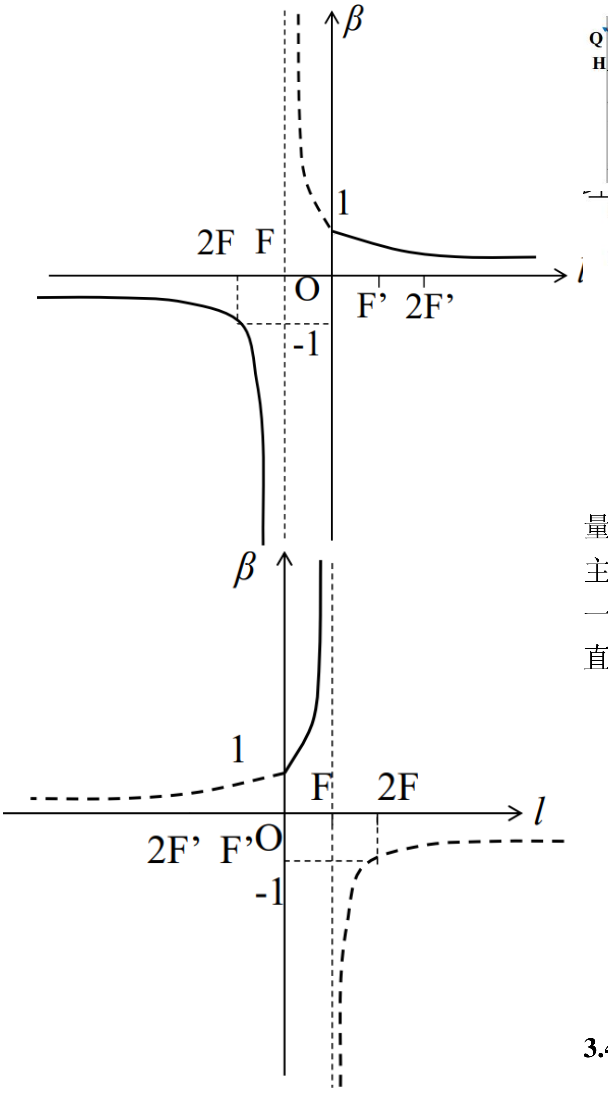


图 3: 其实就看 *when* $l' = \infty$

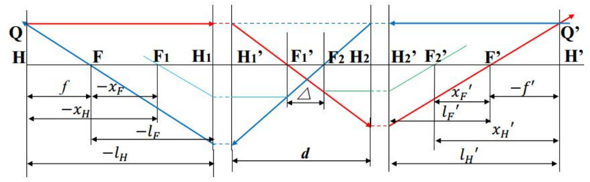
上面的一个是正透镜，下面是负透镜。注意 F' 的位置。然后注意 2F 的位置是-1，原点是 1，画出趋势图就行。

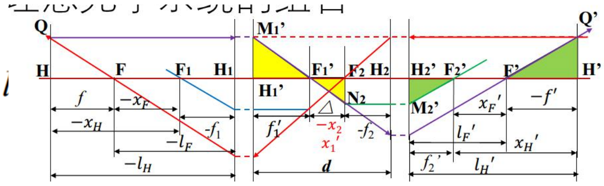
$$\beta = \frac{nl'}{n'l} = -\frac{fl'}{f'l}$$

3.4 理想光学系统的组合分析

3.4.1 两个理想光学系统

图解法，任意高度做一平行于光轴的线，经过光组在像方与入射线延长线相交。得到主面，另一方同理。(根据定义，主面高度相同)





然后我们对找完之后的图，来进行一下定量的分析。(以第二个光组的像方焦点、像方主点为起始点——合成光组的物方参量以第一个光组的物方焦点、物方主点为起始点。) 直接列写

$$\Delta_i = -f_i' + d + f_{i+1}' \tag{2.3.7.a}$$

$$d_i = H_i'H_{i+1} = l_i' - l_{i+1} \tag{2.3.7.b}$$

$$\Delta_i = F_i'F_{i+1} = f_i' - f_{i+1} \tag{2.3.7.c}$$

3.4.2 像差和组合分析

4 平面与平面系统

5 光阑

光阑 光学系统中的一些中央开孔的挡光屏或光学元件的边缘。

孔径光阑 限制成像光束口径的大小，

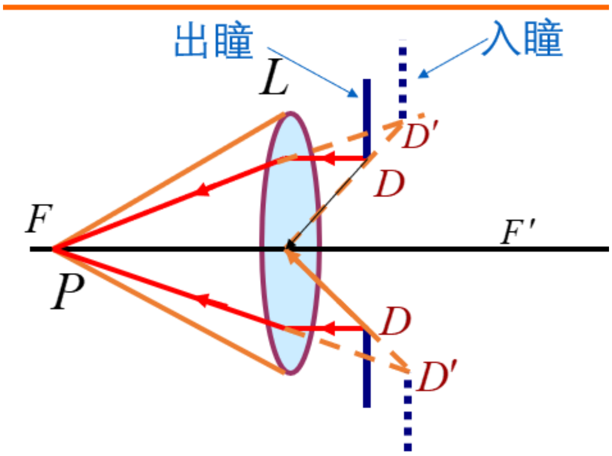
视场光阑 限制成像范围的大小。

渐晕光阑 遮挡轴外物体的部分光场，使像边缘模糊；

消杂光光阑

消除镜面反射光、镜架炫光等引起的杂散光。

5.1 入瞳出瞳和孔径角



入瞳是孔径光阑经过光阑后面的光学系统成的像，出瞳是经过前面的光学系统成的像。如果其在最前面，那本来就是入瞳，如果在最后面，本来就是出瞳。

物方孔径角

轴上物点到入射光瞳

6 光学仪器

7 像差的种类和矫正