



# 第三章

## 理想光学系统

# 3.1 理想光学系统与共线成像理论

- 几何光学的主要内容是研究光学系统的成像问题；
- 系统地讨论物像关系，挖掘出光学系统的基本参量，将物、像与系统间的内在关系揭示出来；
- 暂时抛开光学系统的具体结构  $(r, d, n)$ ，将一般仅在光学系统的近轴区存在的完善成像拓展成在任意大的空间中以任意宽的光束都成立的理想模型，这个理想模型就是理想光学系统。

### 3.1 理想光学系统与共线成像理论

#### 性质

- 任何一个物点发出的光线在系统的折射或反射作用下所有的出射光线仍然相交于一点
- 每一个物点对应于唯一的一个像点
- 如果光学系统的物空间和像空间都是均匀透明介质, 则入射光线和出射光线均为直线, 根据光线的直线传播定律, 由符合点对应点的物像空间关系可推论出直线成像为直线、平面成像为平面的性质
- 这种点对应点、直线对应直线、平面对应平面的成像变换谓之**共线成像**。

“共轭”

### 3.1 理想光学系统与共线成像理论

#### 共轴理想光学系统特性

- (1) 位于光轴上的物点对应的共轭象点也必然位于光轴上;位于过(包含)光轴的某一个截面内的物点对应的共轭像点必位于同一平面内;同时, 过(包含)光轴的任意截面成像性质都是相同的。因此, 可以用一个过(包含)光轴的截面来代表一个共轴系统。另外, 垂直于光轴的物平面, 它的共轭像平面也必然垂直于光轴。

### 3.1 理想光学系统与共线成像理论

#### 共轴理想光学系统特性

使 $AB$ 绕光轴转  
180度

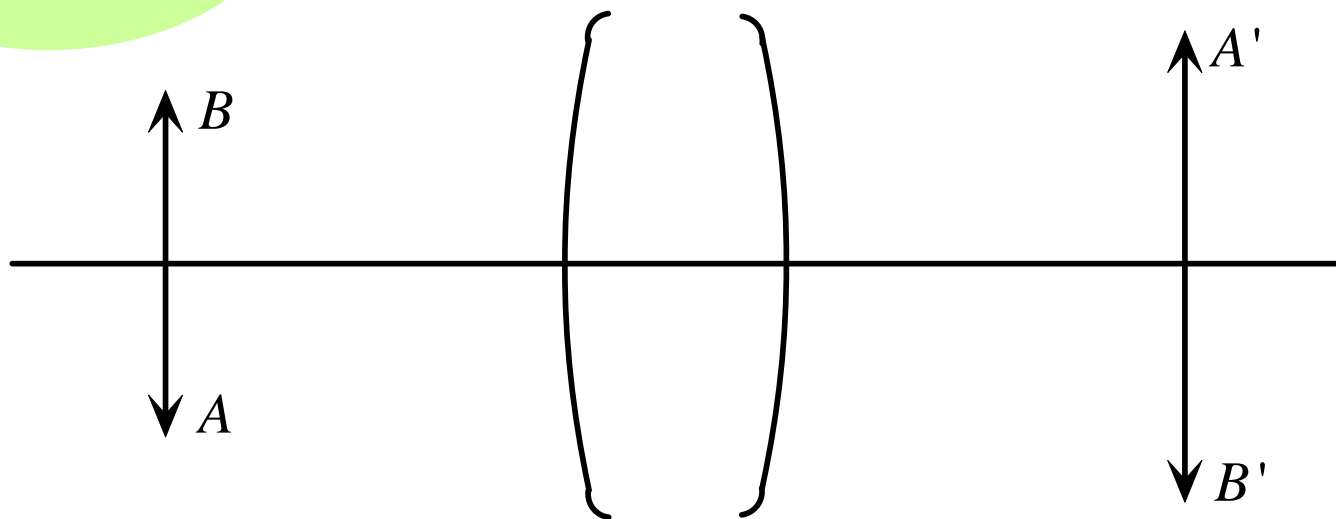
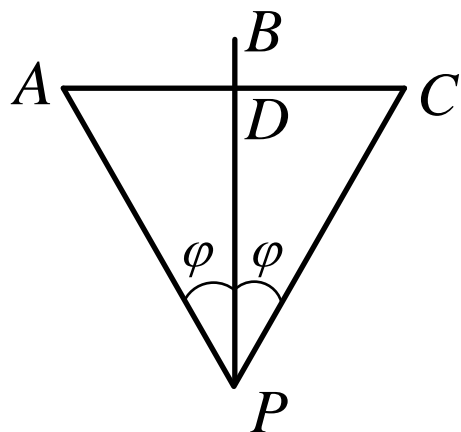


图3-1 过光轴的截面

### 3.1 理想光学系统与共线成像理论

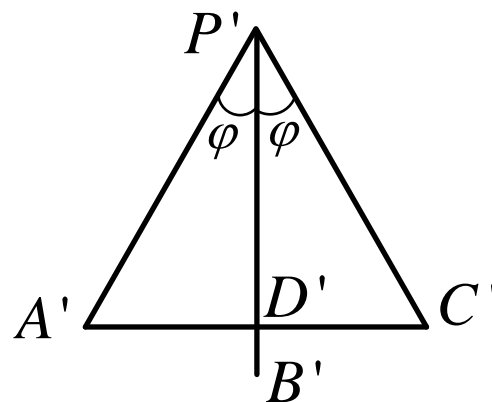
#### 共轴理想光学系统特性

(2) 垂直于光轴的平面物所成的共轭平面像的几何形状完全与物相似，也就是说在整个物平面上无论那一部分，物和像的大小比例等于常数。



$$AP=BP=CP=y$$

$$A'P'=B'P'=C'P'=y'$$



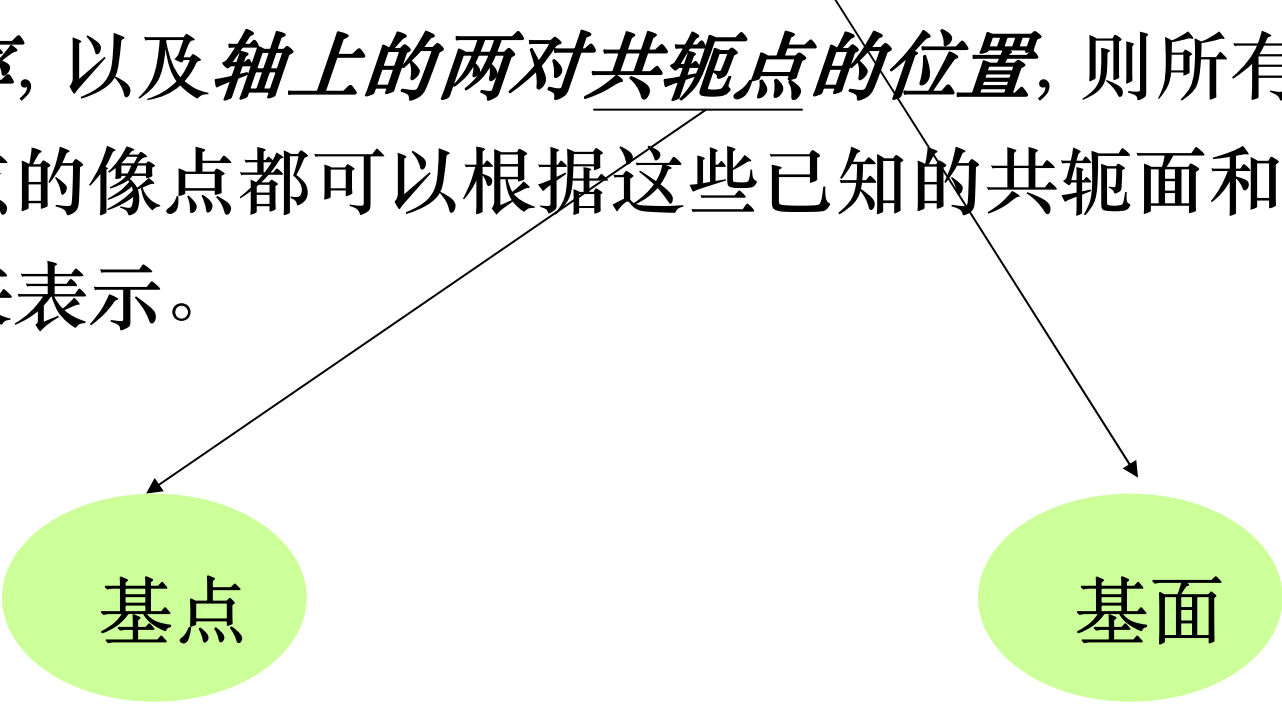
$$PD=y\cos\varphi$$

$$P'D'=y'\cos\varphi,$$

$$\frac{P'D'}{PD}=\frac{y'}{y}$$

图3-2 垂直于光轴的P.P'截面

(3) 一个共轴理想光学系统, 如果已知 **两对共轭面的位置**和**横向放大率**; 或者 **一对共轭面的位置**和**横向放大率**, 以及 **轴上的两对共轭点的位置**, 则所有其它物点的像点都可以根据这些已知的共轭面和共轭点来表示。



基点

基面

### 3.1 理想光学系统与共线成像理论

### 共轴理想光学系统特性

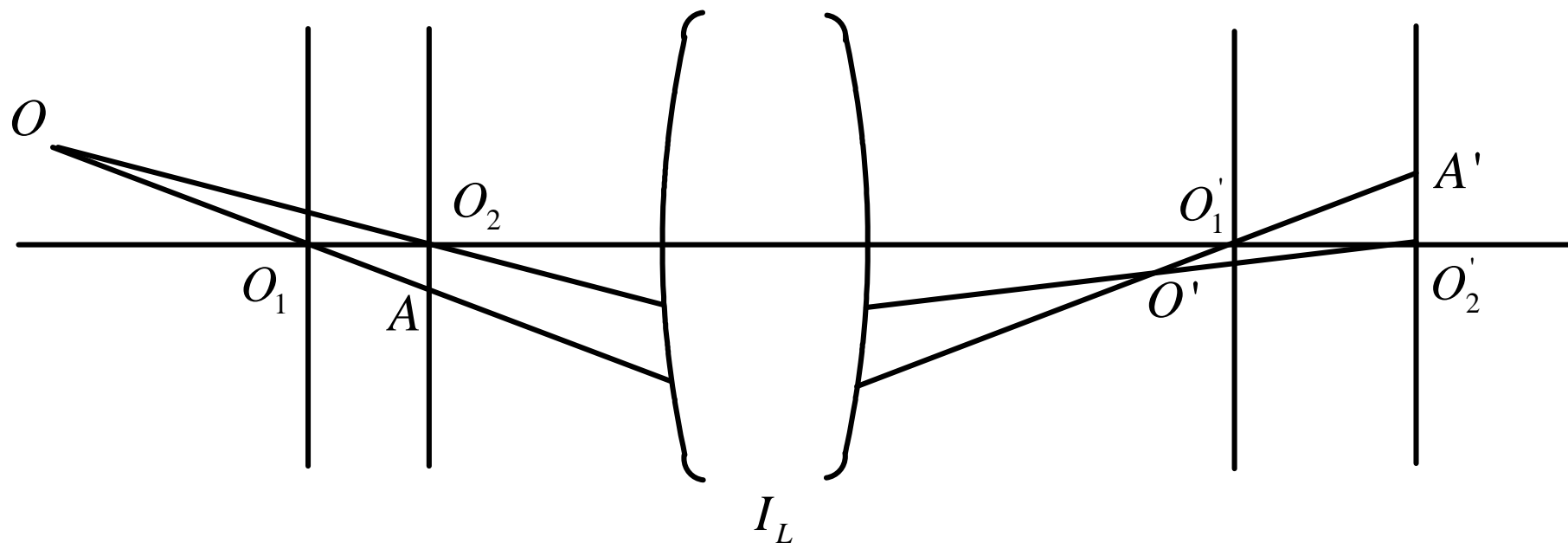
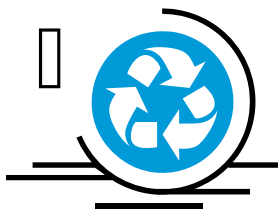


图3-3 两对共轭面已知的情况



### 3.1 理想光学系统与共线成像理论

### 共轴理想光学系统特性

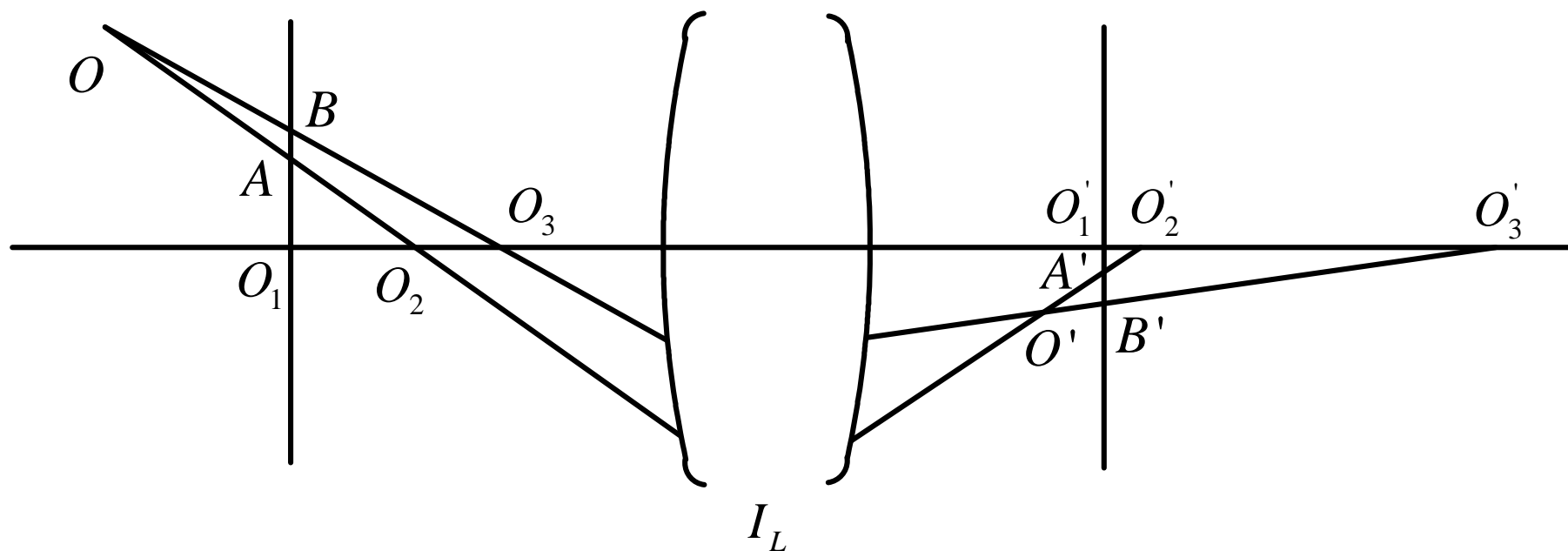
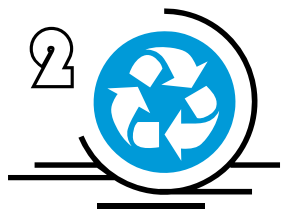


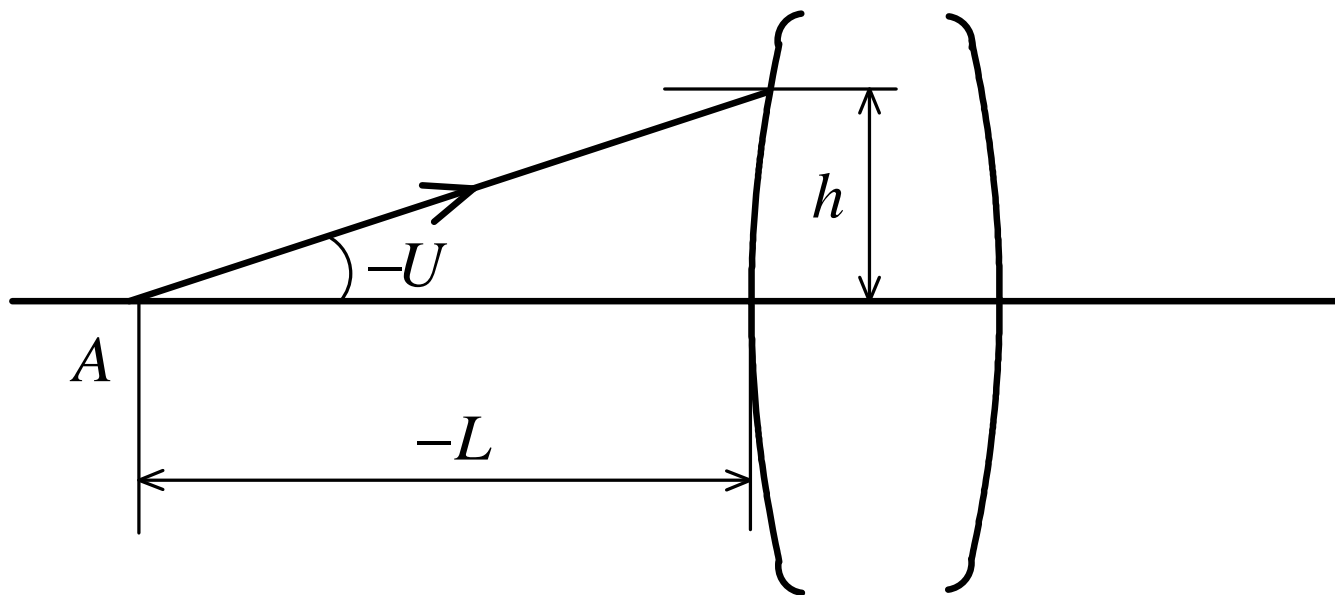
图3-4 一对共轭面及两对共轭点已知的情況

## 3.2

# 理想光学系统的基点与基面

# 1. 无限远的轴上物点和它对应的像点F'

## (1) 无限远轴上物点发出的光线



$$\operatorname{tg} U = \frac{h}{L}$$

$$L \rightarrow \infty$$

$$U \rightarrow 0$$

图3-5  $h$ ,  $L$ 和 $U$ 的关系

## 无限远的轴上物点和它对应的像点 $F'$

(2) 像方焦点 $F'$ 、焦平面; 像方主点、主平面

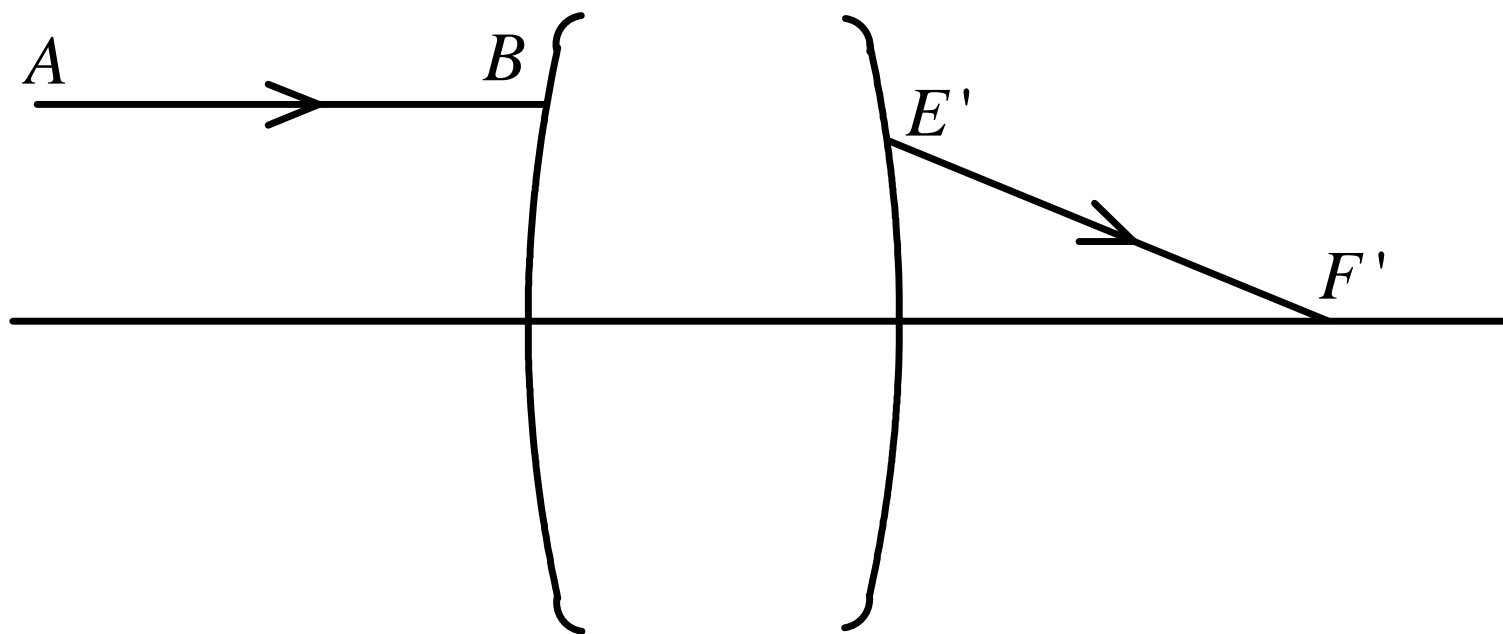


图3-6 理想光学系统的像方焦点

## 无限远的轴上物点和它对应的像点F'

(2) 像方焦点F'、焦平面; 像方主点、主平面

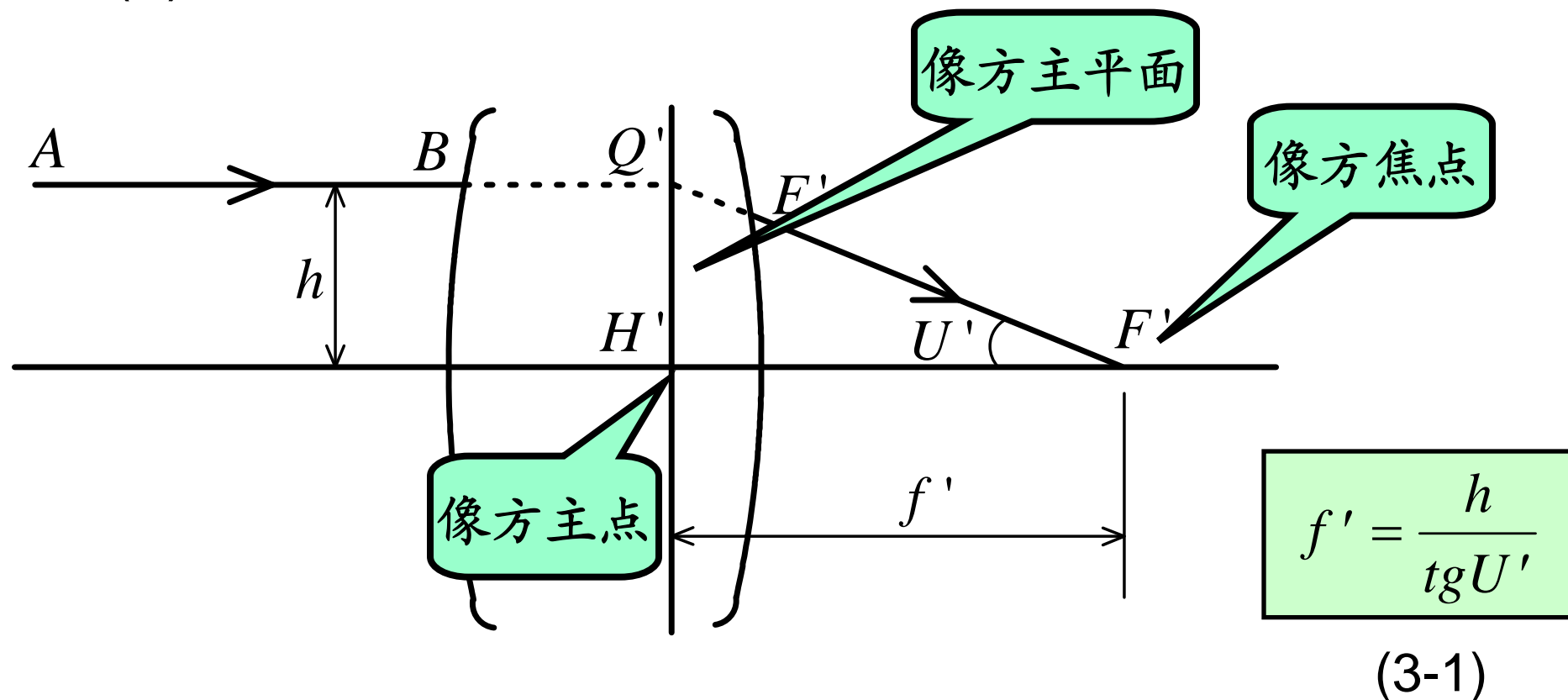


图3-7 理想光学系统的像方参数

## 无限远的轴上物点和它对应的像点 $F'$

### (3) 无限远轴外物点发出的光线

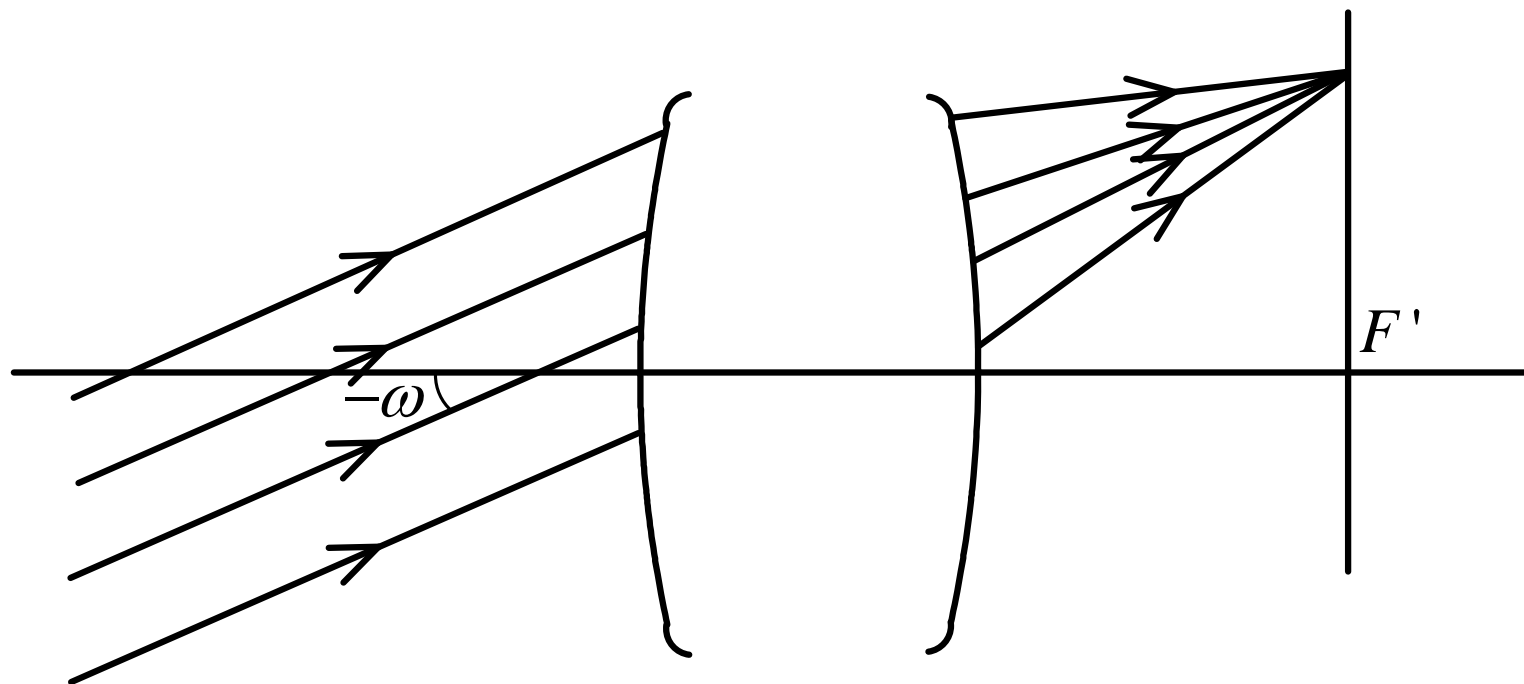


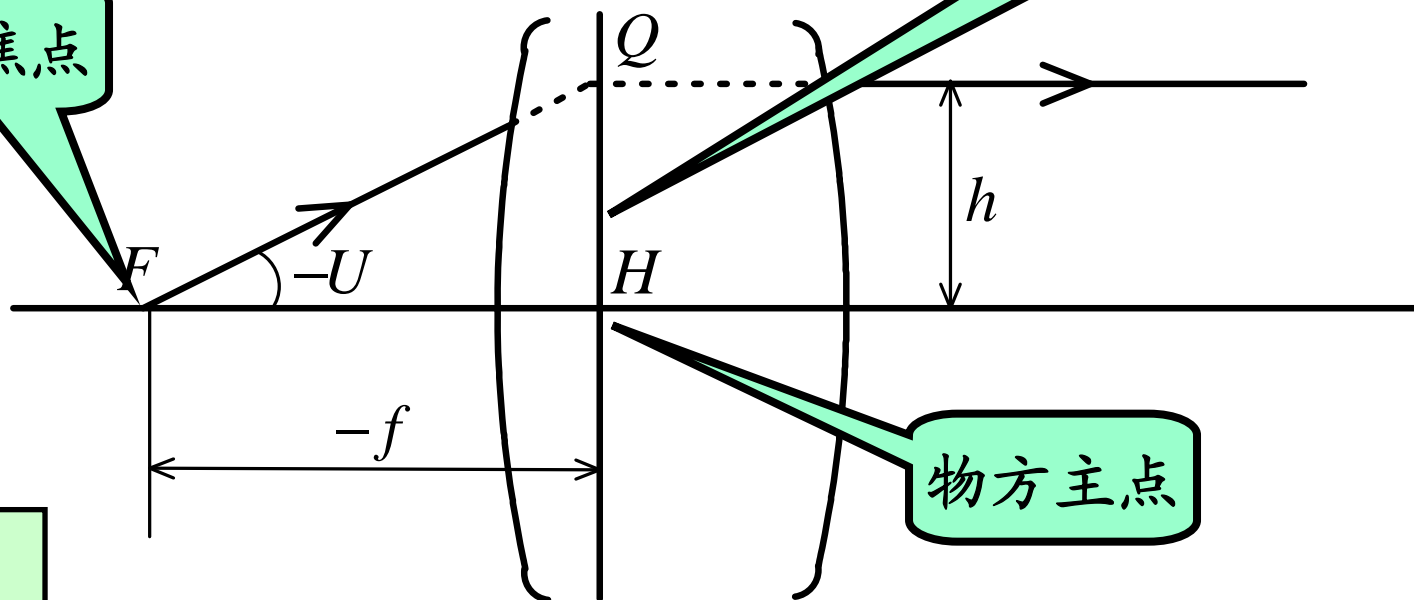
图3-8 无限远轴外物点发出的光束

## 2. 无限远轴上像点对应的物点F

(1) 无限远轴上物点发出的光线

物方焦点

物方主平面



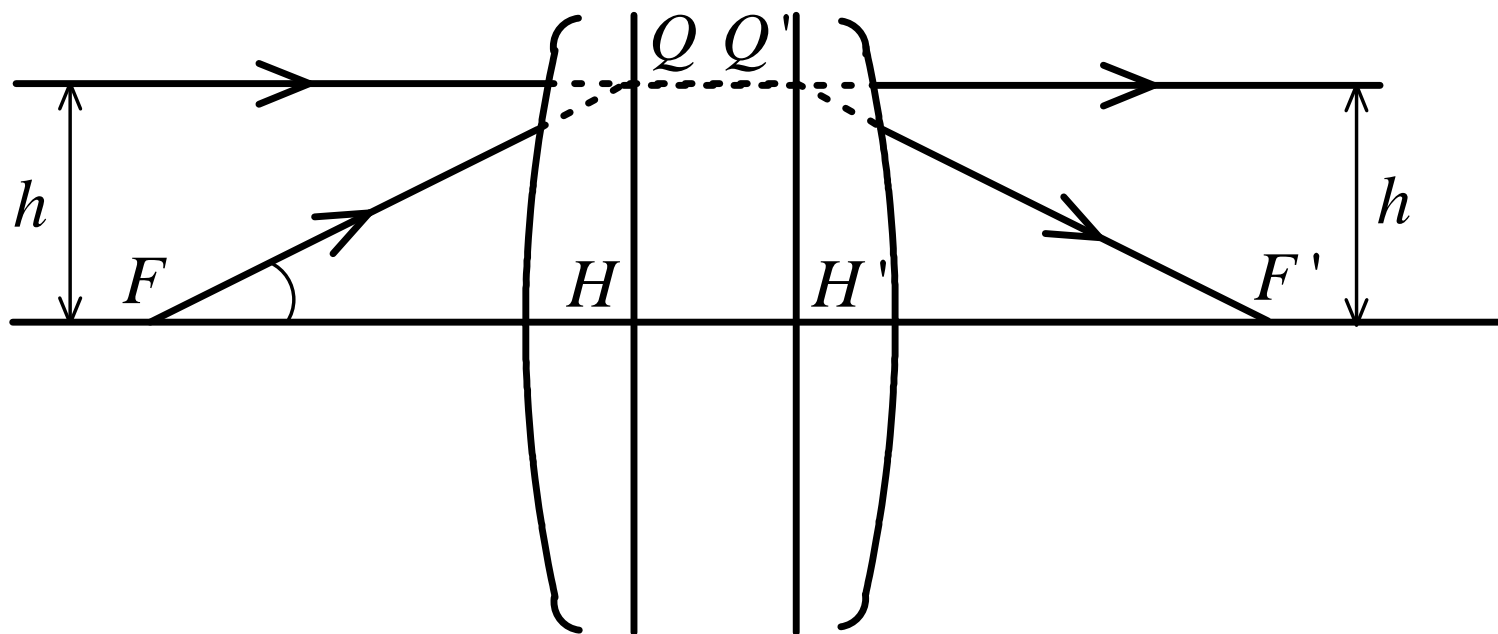
物方主点

$$f = \frac{h}{\operatorname{tg} U}$$

(3-2)

图3-9 理想光学系统的物方参数

### 3. 物方主平面与像方主平面间的关系



主平面的垂轴放大率为 **+1**

图3-10 两主面间的关系



## 物方主平面与像方主平面间的关系

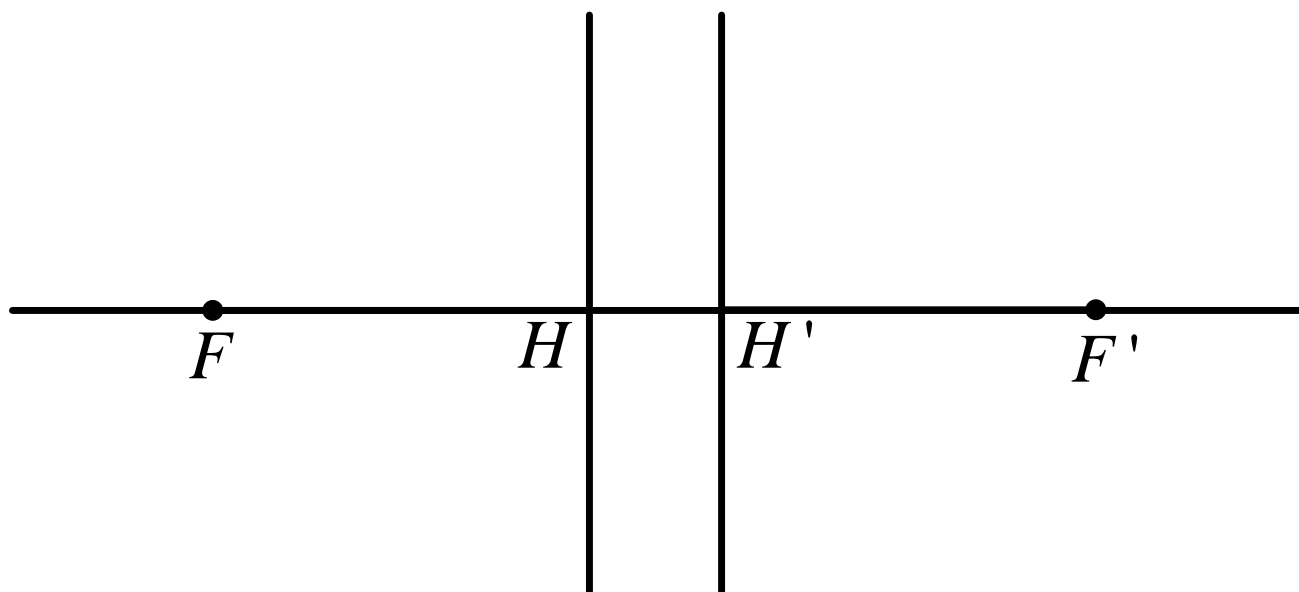


图3-11 理想光学系统的简化图

## 4. 实际光学系统的基点位置和焦距的计算

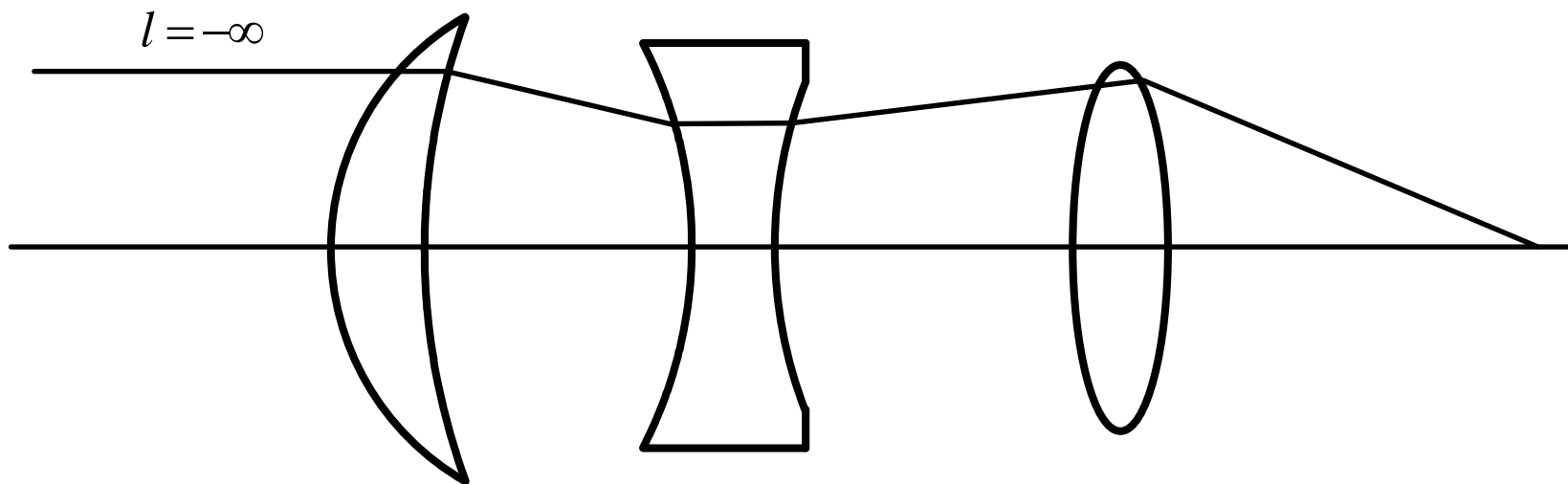


图3-12 三片照相物镜

# 实际光学系统的基点位置和焦距的计算

## (1) 三片型照相物镜的结构参数

$r/\text{mm}$	$d/\text{mm}$	$n$
26.67		
189.67	5.20	1.6140
-49.66	7.95	
25.47	1.6	1.6745
72.11	6.7	
-35.00	2.8	1.6140

# 实际光学系

(2)为求物镜

像方主点

$$l'_{F'} = 67.4907$$

$$f' = \frac{10}{0.121869} = 80.055\text{mm}$$

$$l'_{H'} = l'_{F'} - f'$$

$$=-14.5644\text{ mm}$$

面 号	1	2	3	4	5	6
$l$ $-r$	$-\infty$ 26.67	64.9065 189.67	38.2835 -49.66	124.334 25.47	-88.8583 72.11	-592.073 -35.00
$l-r$ $\times u$ $\div r$	 26.67	-124.764 0.142640 189.67	87.9435 0.200250 -49.66	98.8642 0.060875 3 25.47	-160.969 -0.09212 45 72.11	-557.073 -0.01389 19 -35.00
$i$ $\times n/n'$	0.374953 1/1.6140	-0.09382 75 1.6140	-0.35462 6 1/1.6475	0.236293 1.6475	0.205647 1/1.6140	-0.22110 8 1.6140
$i'$ $\times$ $\div u' = (u+i-i')$	0.232313 26.67 0.142640	0.151438 189.67 0.200250	-0.21525 1 -49.66 0.060875 3	0.389293 25.47 -0.09212 45	0.127414 72.11 -0.01389 19	-0.35686 9 -35.00 0.121869
$l'-r$ $+r$	43.43648 8 26.67	-143.436 189.67	175.594 -49.66	-107.629 25.47	-661.383 72.11	102.491 -35.00
$l'$	70.1065	46.2336	125.934	-82.1593	-589.273	67.4907
$lu$ $\div u'$	10 0.142640	9.25827 0.200250	7.66628 0.060875 3	7.56888 -0.09212 45	8.18612 -0.01389 19	8.22501 0.121869
$l'$ $-d$	70.1065 5.2	46.2335 7.95	125.934 1.6	-82.1593 6.7	-589.273 2.8	67.4907
$l$	64.9065	38.2835	124.334	-88.8583	-592.073	

## 实际光学系统的基点位置和焦距的计算

(3)为求物镜的像方焦距  $f$ ，像方焦点 $F'$ 的位置及像方主点 $H'$ 的位置，原则上要作反向光路计算

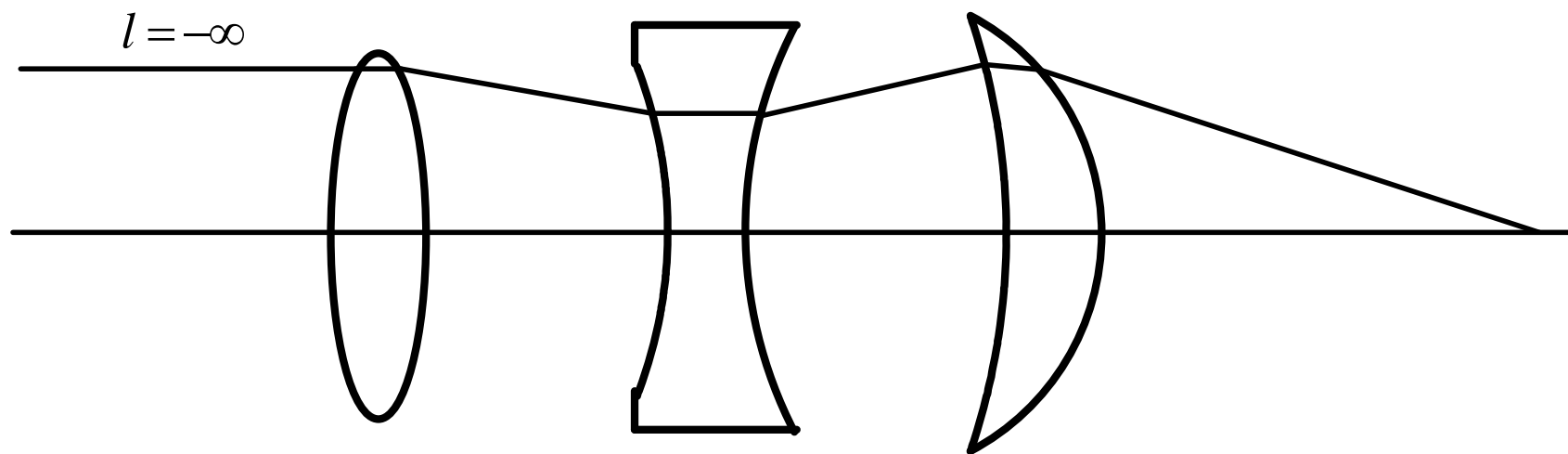


图3-13 左右倒置的三片照相物件



实际光学系统

(3)

$$l_F = -70.0184$$

mm

$$f = -80.055 \text{ mm}$$

$$l_H = 12.0366$$

mm

面 号	1	2	3	4	5	6
$l$ $-r$	$-\infty$ +35.00	89.2033 -72.11	30.8823 -25.47	235.146 49.66	-173.722 -189.67	184.662 -26.67
$l-r$ $\times u$ $\div r$	10  35.00	161.313 0.108692 -72.11	56.3523 0.257985 -25.47	185.486 0.033652 8 49.66	15.9485 -0.04773 63 -189.67	-157.992 -0.04620 93 -26.67
$i$ $\times n/n'$	0.285714 1/1.6140	-0.24314 8 1.6140	-0.57077 1 1/1.6475	0.125697 1.6475	0.004013 91 1/1.6140	-0.27374 2 1.6140
$i'$ $\times r$ $\div u' = (u+i-i')$	0.177022 35.00 0.108692	-0.39244 1 -72.11 0.257985	-0.34645 9 -25.47 0.033652 8	0.207086 49.66 -0.04773 63	0.002486 93 -189.67 -0.04620 93	-0.44182 0 -26.67 0.121869
$l'-r$ $+r$	57.0033 35.00	109.692 -72.11	262.160 -25.47	-215.431 49.66	10.2077 -189.67	96.6883 -26.67
$l'$	92.0033	37.5823	236.746	-165.771	-179.462	70.0183
$lu$ $\div u'$	10 0.108692	9.69566 0.257985	7.96717 0.033652 8	7.91332 -0.04773 63	8.29282 -0.04620 93	8.53311 0.121869
$l'$ $-d$	92.0033 2.8	37.5823 6.7	236.746 1.6	-165.772 7.95	-179.462 5.2	70.0184
$l$	89.2033	30.8823	235.146	-173.722	-184.662	

## 3.3

### 理想光学系统的物像关系

对于确定的光学系统, 给定物体位置、大小、朝向, 求其像的位置、大小、正倒及虚实。

## 1. 图解法求像

已知一个理想光学系统的主点(主面)和焦点的位置, 利用光线通过它们后的性质, 对物空间给定的点、线和面, 通过画图追踪典型光线求出像的方法称谓图解法求像。



- ①平行于光轴入射的光线, 它经过系统后过像方焦点;
- ②过物方焦点的光线, 它经过系统后平行于光轴;
- ③倾斜于光轴入射的平行光束经过系统后会交于像方焦平面上的一点;
- ④自物方焦平面上一点发出的光束经系统的后成倾斜于光轴的平行光束;
- ⑤共轭光线在主面的上的投射高度相等。

## 图解法求像

(1)对于轴外点B或一垂轴线段AB的图解法求像

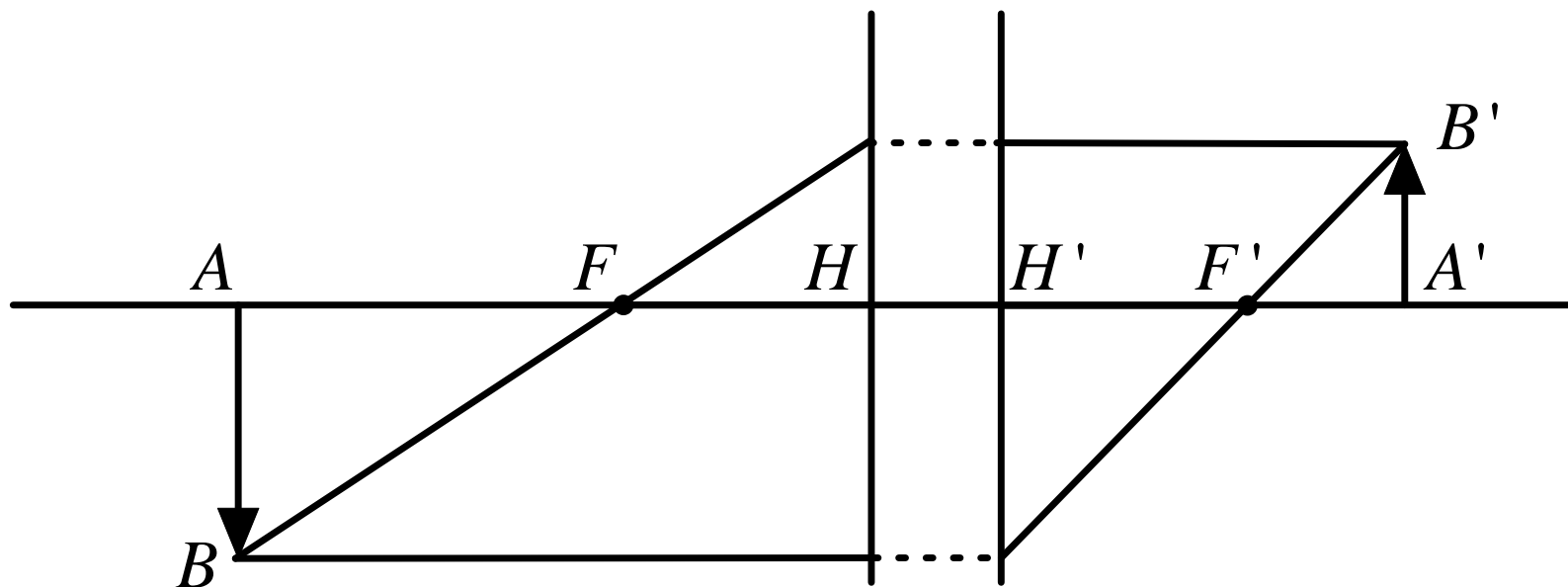


图3-14 作图法求像

## (2)图解法求轴上点的像



## 图解法求像

### (2)图解法求轴上点的像

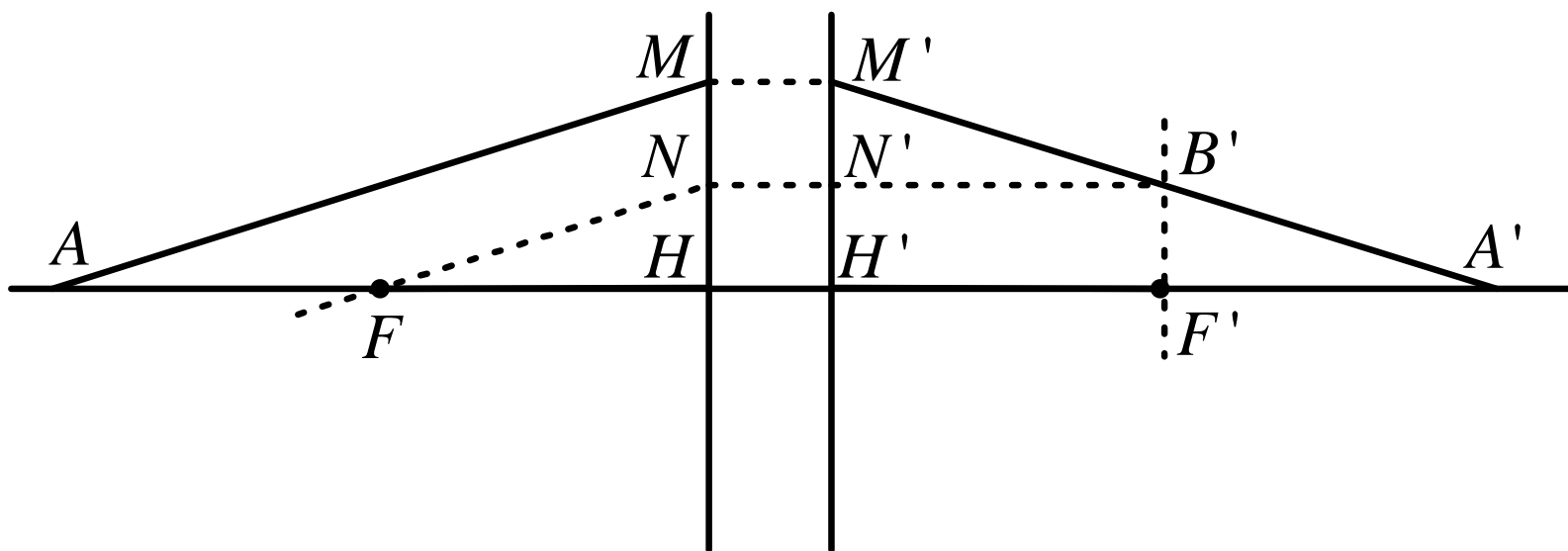


图3-16 作图法求光线

## 图解法求像

### (3)轴上点经两个光组的图解法求像

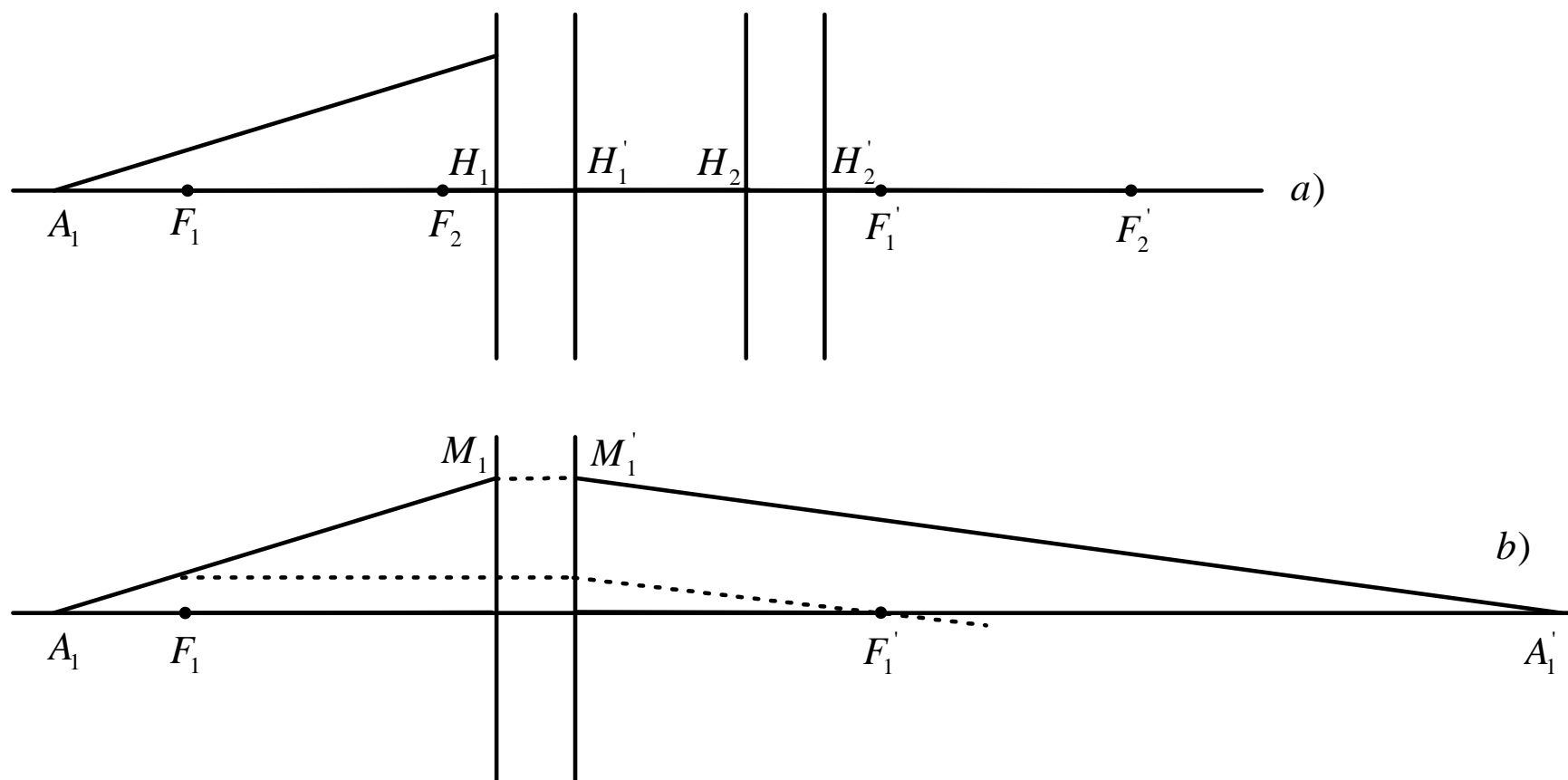


图3-17 轴上点经两个光组成的像

## 图解法求像

### (3)轴上点经两个光组的图解法求像

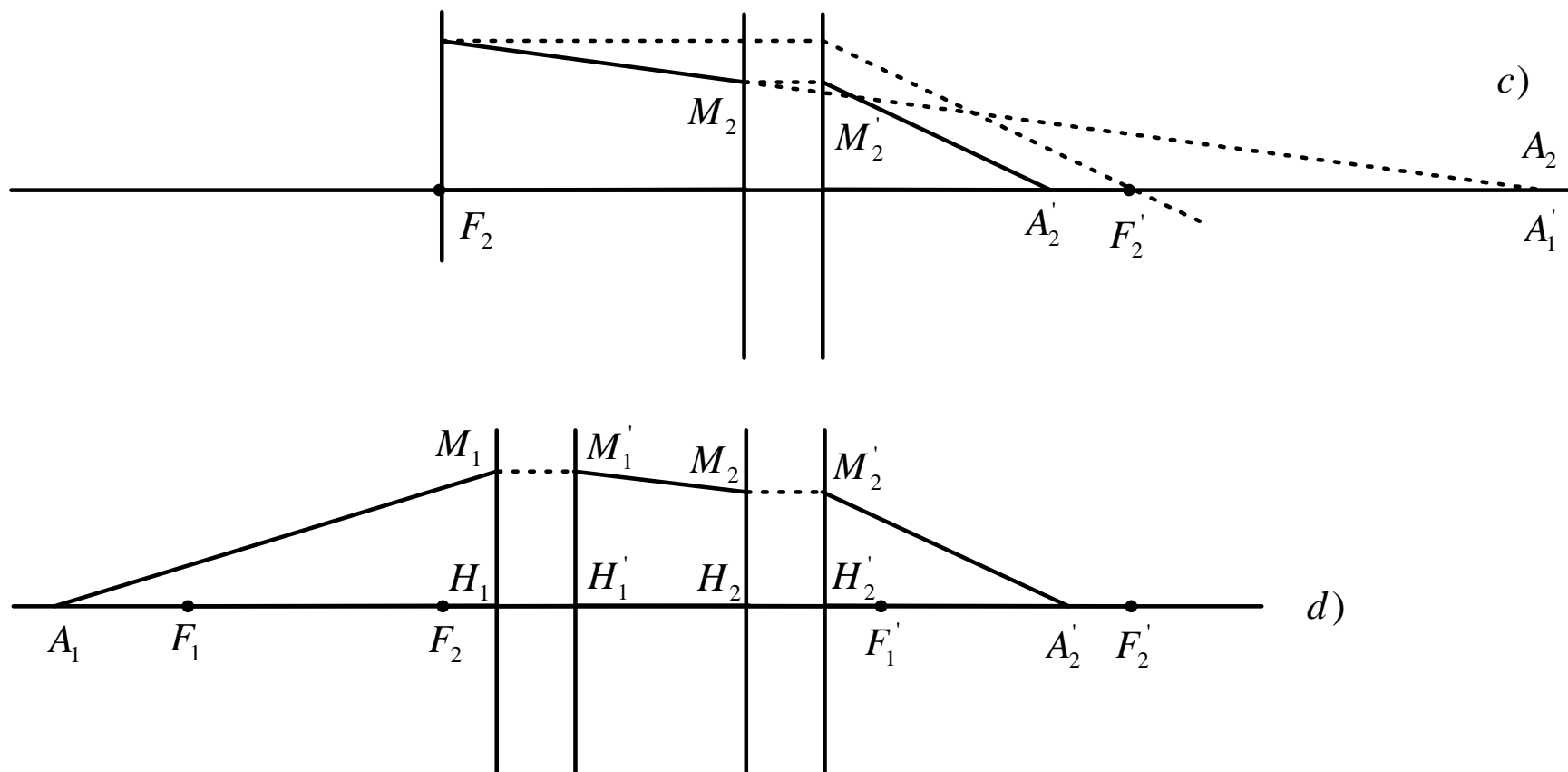


图3-17 轴上点经两个光组成的像

## 2. 解析法求像

知道了主平面这一对共轭面、以及无限远物点与像方焦点和物方焦点与无限远像点这两对共轭点, 则其它一切物点的像点都可以根据这些已知的共轭面和共轭点来表示。这就是解析法求像的理论依据。

## 解析法求像

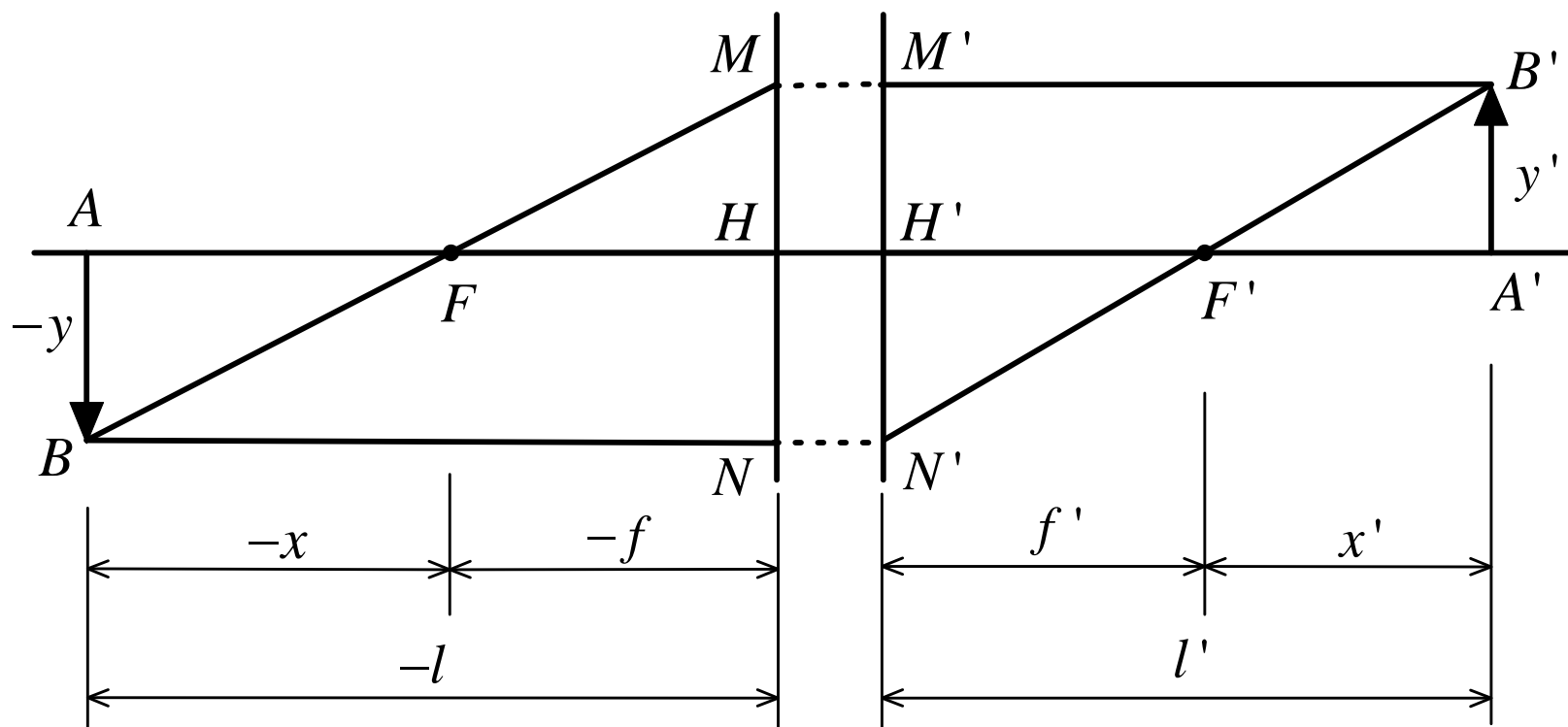


图3-18 牛顿公式中的符号意义



# 解析法求像

## (1) 牛顿公式

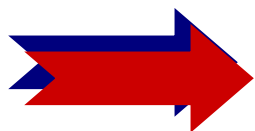
物和像的位置相对于光学系统的焦点来确定

物距:  $x$

像距:  $x'$

由两对相似三角形  $\triangle BAF$ 、 $\triangle FHM$  和  $\triangle H'N'F'$ 、 $\triangle F'A'B'$  可得

$$-\frac{y}{y'} = \frac{-f}{-x} \quad \frac{-y'}{y} = \frac{x'}{f'}$$



$$xx' = ff' \quad (3-3)$$

$$\text{垂轴放大率 } \beta = \frac{y'}{y} = -\frac{f}{x} = -\frac{x'}{f'} \quad (3-4)$$

牛顿公式

# 解析法求像

## (1) 高斯公式

物和像的位置相对于光学系统的**主点**来确定

$$x = l - f \qquad x' = l' - f'$$

代入牛顿公式得

$$lf' + l'f = ll'$$

两边同除  $ll'$



$$\frac{f'}{l'} + \frac{f}{l} = 1 \quad (3-5)$$

高斯公式

## 解析法求像

在  $x' = ff' / x$  的两边各加  $f'$

$$x' + f' = \frac{ff'}{x} + f' = \frac{f'}{x}(x + f)$$

$$\frac{x' + f'}{x + f} = \frac{f'}{x} = \frac{x'}{f} = \frac{l'}{l}$$

由于  $\beta = -\frac{x'}{f'}$

$$\beta = \frac{y'}{y} = -\frac{f}{f'} \cdot \frac{l'}{l} \quad (3-6)$$

当光学系统的物空间和像空间的介质相同时  $f' = -f$

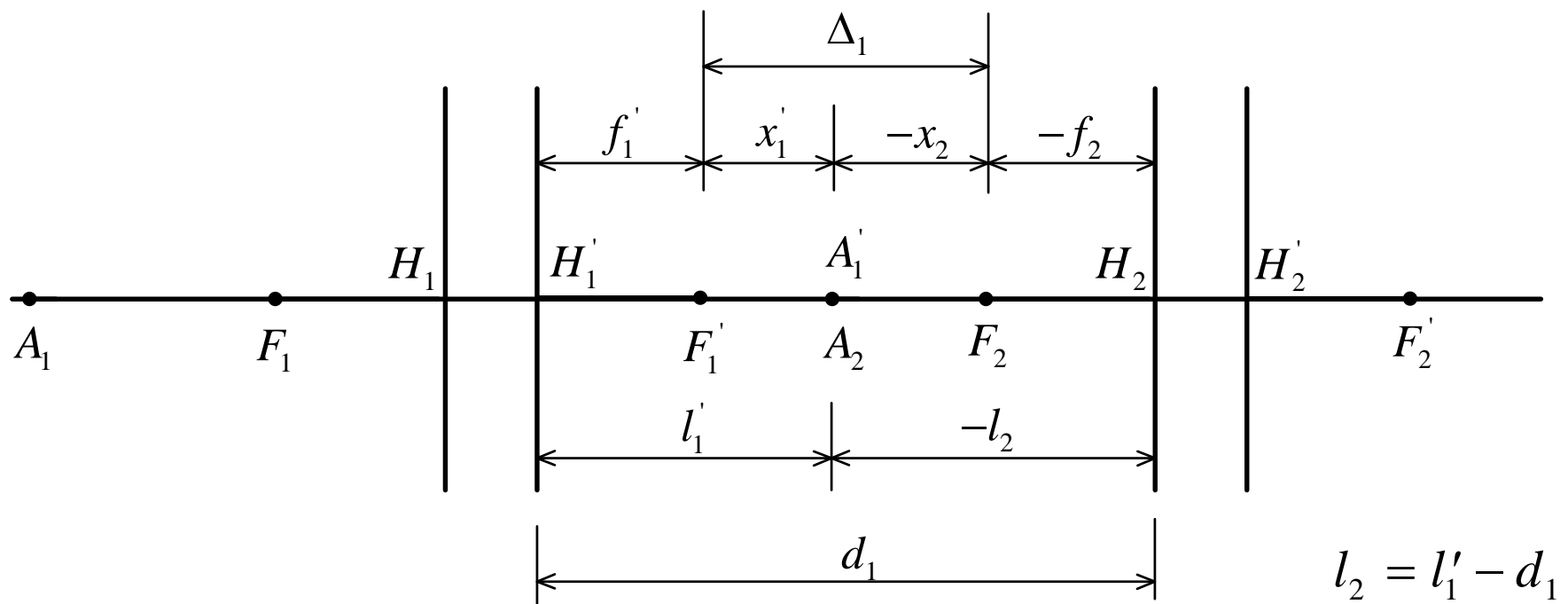
$$(3-5) \Rightarrow \frac{1}{l'} - \frac{1}{l} = \frac{1}{f'} \quad (3-7)$$

$$(3-6) \Rightarrow \beta = \frac{l'}{l} \quad (3-8)$$

### 3. 由多个光组组成的理想光学系统的成像

- 一个光学系统可由一个或几个部件组成, 每个部件可以由一个或几个透镜组成, 这些部件被称为**光组**。
- 光组可以单独看作一个理想光学系统, 由焦距, 焦点或主点的位置来描述。

# 由多个光组组成的理想光学系统的成像



$$l_2 = l_1' - d_1$$

$$x_2 = x_1' - \Delta_1$$

$$\Delta_1 = d_1 - f_1' + f_2$$

图3-19 过渡关系

光学间隔

## 由多个光组组成的理想光学系统的成像

过渡公式和两个间隔间的关系：

$$l_i = l'_{i-1} - d_{i-1} \quad (3-9)$$

$$x_i = x'_{i-1} - \Delta_{i-1} \quad (3-10)$$

$$\Delta_i = d_i - f'_i + f_{i+1} \quad (3-11)$$

$$y_2 = y'_1, y_3 = y'_2, \dots, y_k = y'_{k-1}$$

$$\beta = \frac{y'_k}{y_1} = \frac{y'_1}{y_1} \cdot \frac{y'_2}{y_2} \dots \frac{y'_k}{y_k} = \beta_1 \cdot \beta_2 \dots \beta_k \quad (3-12)$$

## 4. 理想光学系统两焦距之间的关系

$$l \tan U = h = l' \tan U'$$

$$(x + f) \tan U = (x' + f') \tan U'$$

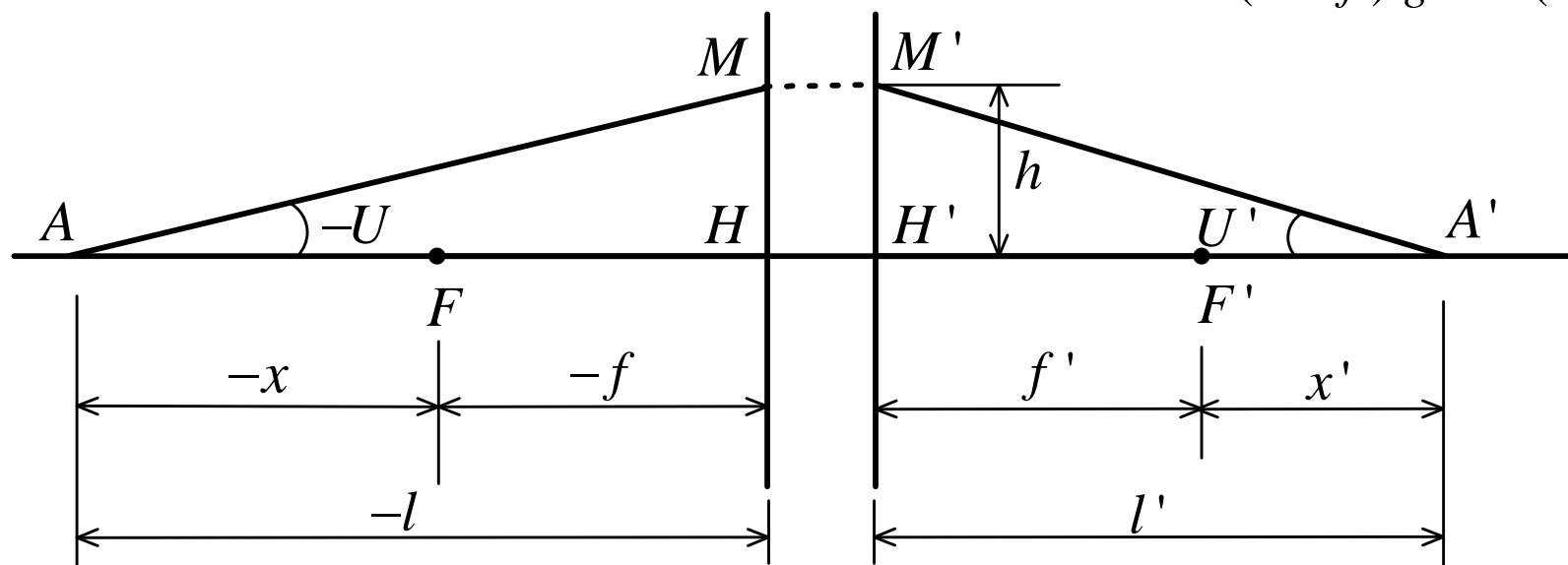


图3-20 两焦距的关系

## 理想光学系统两焦距之间的关系

结合  $x = -f(y / y')$   $x' = -f'(y' / y)$

$$fytgU = -f'y'tgU' \quad (3-13)$$

小角度下

$$fyu = -f'y'u' \quad (3-14)$$

比较近轴区适用的光学不变量(拉赫不变量)  $nyu = n'y'u'$

$$\frac{f'}{f} = -\frac{n'}{n} \quad (3-15)$$

反射面的数目为k时


$$\frac{f'}{f} = (-1)^{k+1} \frac{n'}{n} \quad (3-16)$$

(3-15), (3-13) =>

$$nytgU = n'y'tgU' \quad (3-17)$$

理想光学系统的拉赫不变公式





# 3.4

## 理想光学系统的放大率

# 1. 轴向放大率

$$\alpha = \frac{dx'}{dx} = \frac{dl'}{dl} \quad (3-18)$$

微分牛顿公式(3-3)

$$x dx' + x' dx = 0$$

即

$$\alpha = -\frac{x'}{x}$$

$$\beta = -f / x = -x' / f'$$

$$\alpha = -\beta^2 \frac{f'}{f} = \frac{n'}{n} \beta^2 \quad (3-19)$$

## 轴向放大率

物方空间的媒质与像方空间的媒质一样时

$$\alpha = \beta^2 \quad (3-20)$$

定义

$$\bar{\alpha} = \frac{\Delta x'}{\Delta x} = \frac{x'_2 - x'_1}{x_2 - x_1} = \frac{n'}{n} \beta_1 \beta_2 \quad (3-21)$$

证明如下：

$$\begin{aligned} \Delta x' &= x'_2 - x'_1 & \frac{\Delta x'}{\Delta x} &= \frac{x'_2 - x'_1}{x_2 - x_1} \\ &= \frac{ff'}{x_2} - \frac{ff'}{x_1} & &= -\frac{f'}{f} \cdot \left(-\frac{f}{x_1}\right) \left(-\frac{f}{x_2}\right) \\ &= -ff' \left( \frac{x_2 - x_1}{x_1 x_2} \right) & &= \frac{n'}{n} \beta_1 \beta_2 \end{aligned}$$

## 2. 角放大率

$$r = \frac{\operatorname{tg} U'}{\operatorname{tg} U}$$

(3-22)

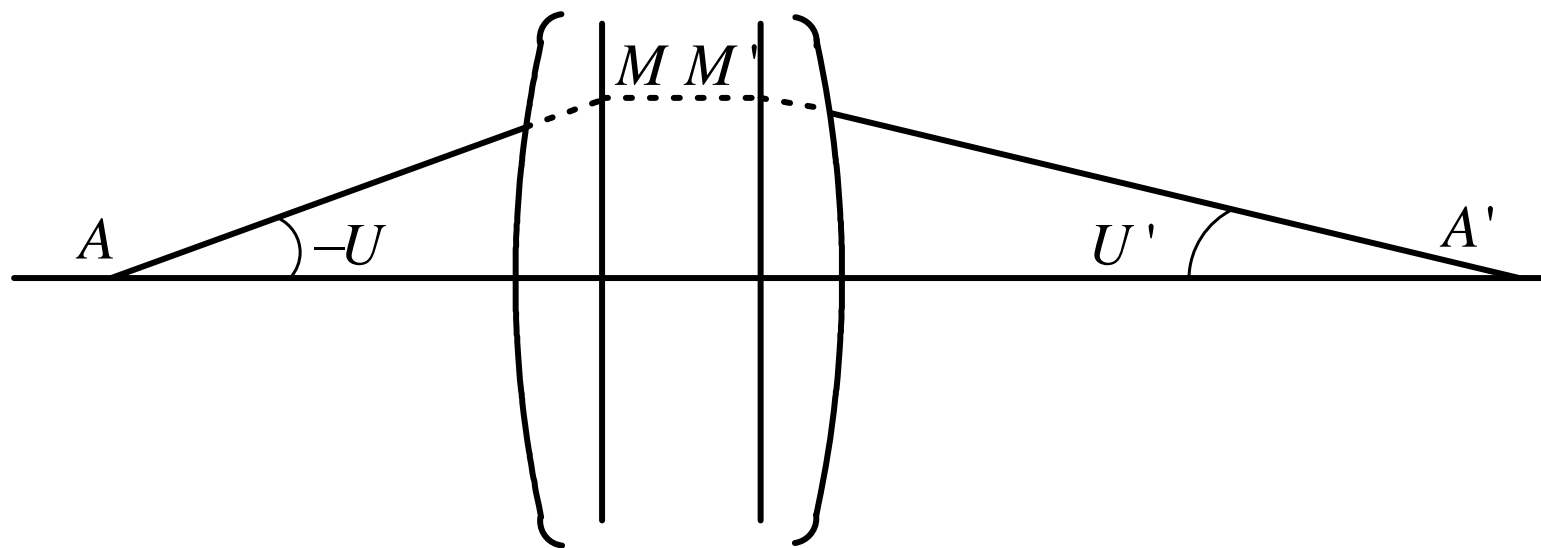


图3-21 光学系统的角放大率

$$r = \frac{n}{n'} \frac{1}{\beta}$$

(3-23)

$$\alpha \cdot r = \beta$$

(3-24)

### 3. 光学系统的节点

光学系统中角放大率等于  $1^\times$  的一对共轭点称谓节点

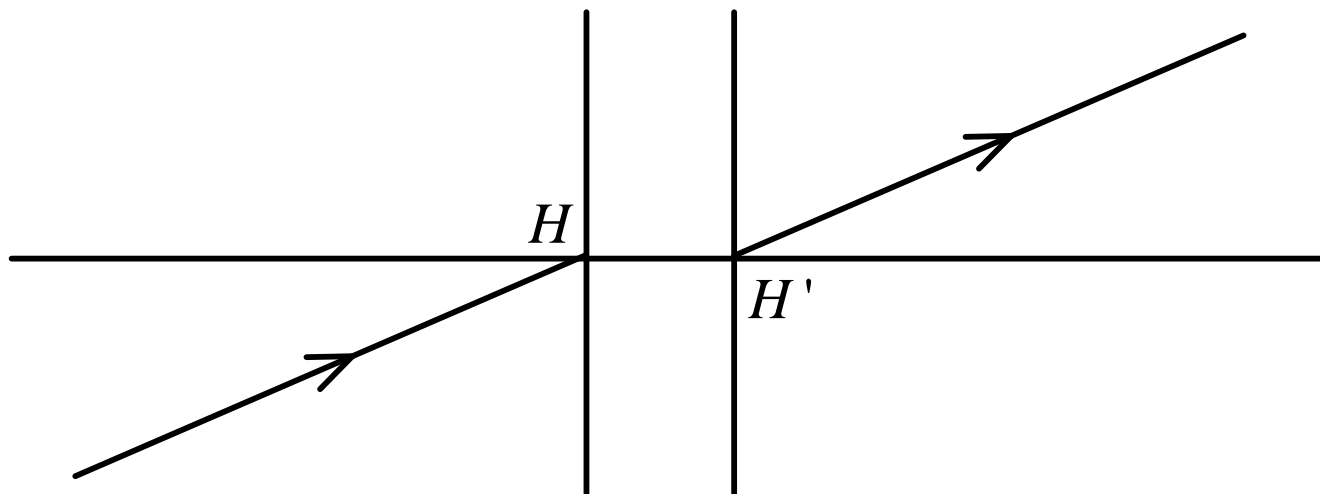


图3-22  $n = n'$  时过主点的光线

$$r = \frac{1}{\beta}$$

## 光学系统的节点

$$x = f'$$

(3-25)

$$x' = f$$

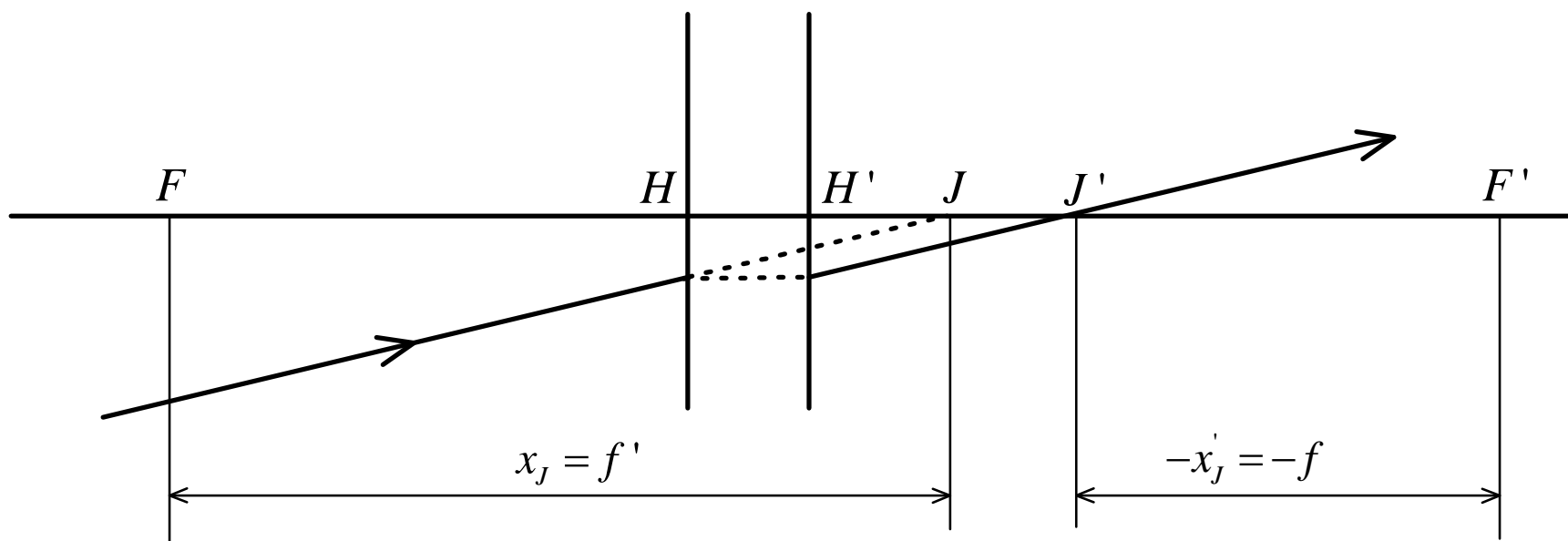
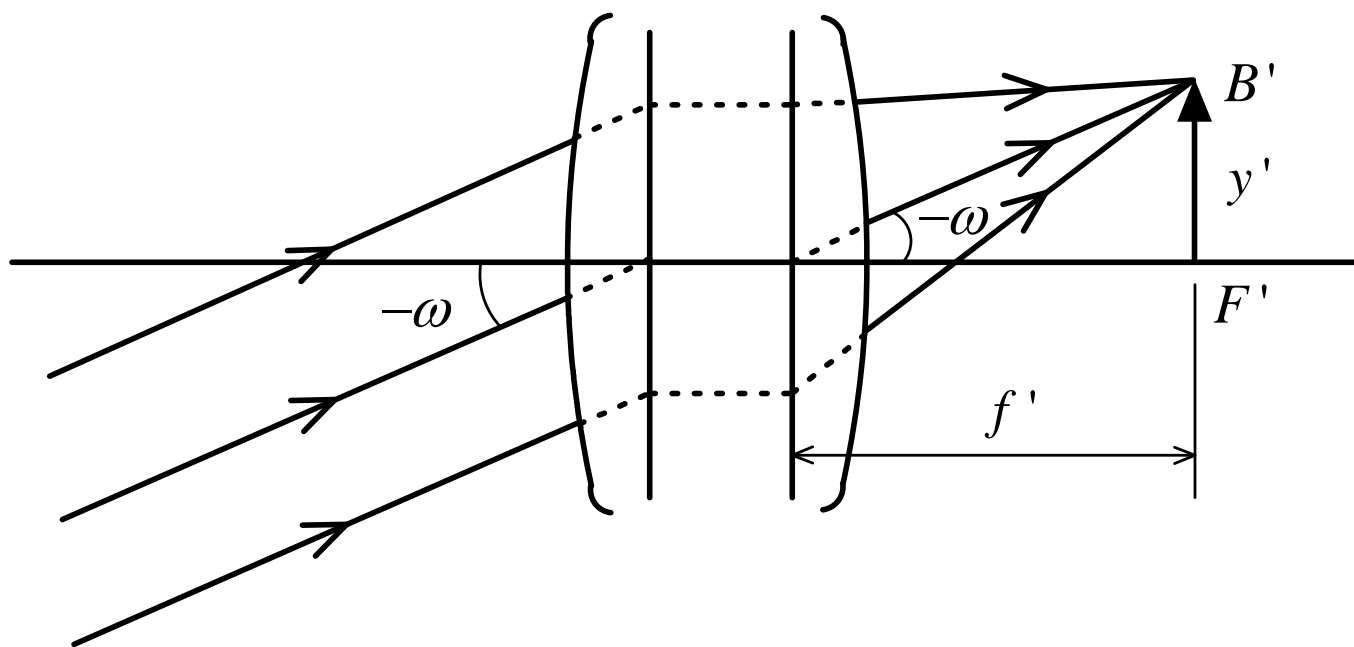


图3-23 过节点的光线

#### 4. 用平行光管测定焦距的计算依据



$$y' = -f' \tan \omega$$

(3-26)

图3-24 无限远物体的理想像高

## 用平行光管测定焦距的计算依据

$$f_2' = \frac{f_1}{y} y' \quad (3-27)$$

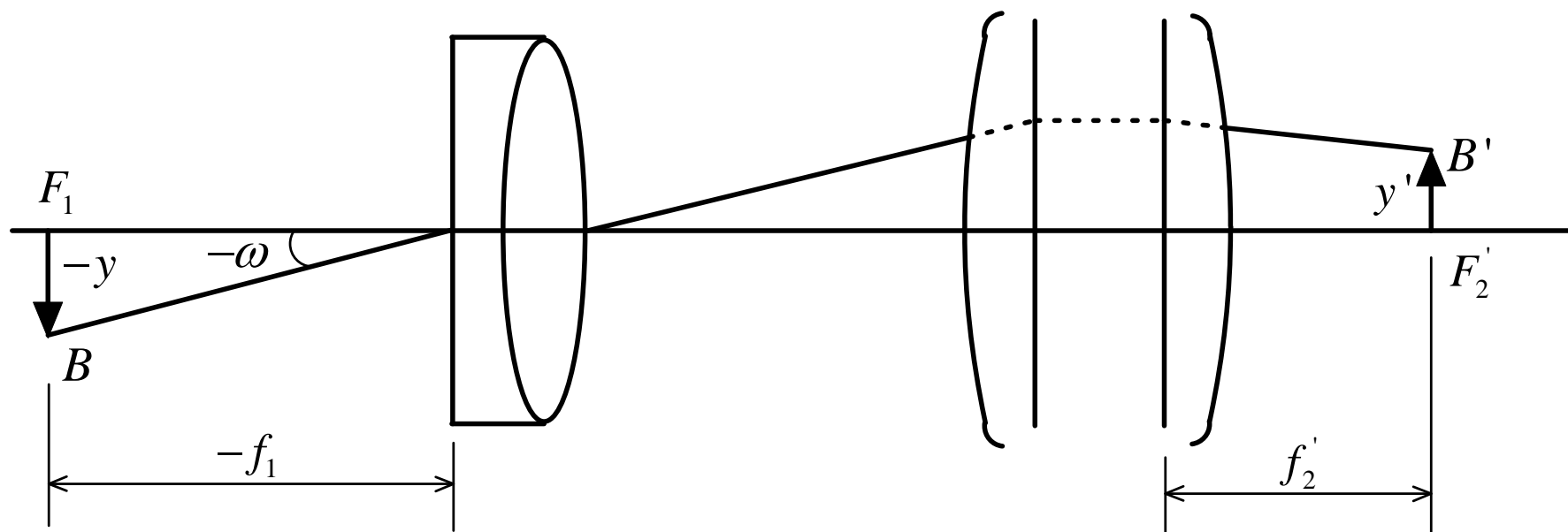


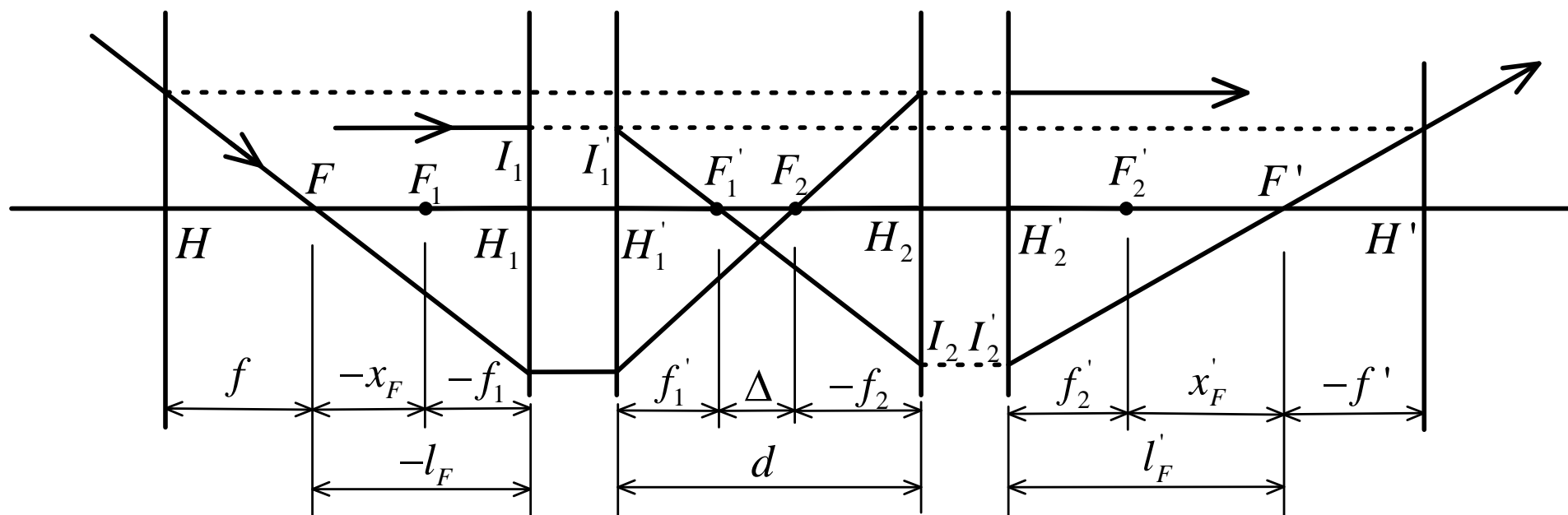
图3-25 焦距测量原理



# 3.5

## 理想光学系统的组合

# 1. 两个光组组合分析



$$x_F = \frac{f_1 f_1'}{\Delta}$$

(3-29)

图3-26 两光组组合

$$x_F' = -\frac{f_2 f_2'}{\Delta}$$

(3-28)

## 两个光组组合分析

$$\Delta M'F'H' \sim \Delta I_2'H_2'F', \Delta I_2H_2F_1' \sim \Delta I_1'H_1'F_1'$$

$$\frac{H'F'}{F'H_2'} = \frac{H_1'F_1'}{F_1'H_2'}$$

根据图中的标注, 有

$$\frac{-f'}{f_2' + x_F'} = \frac{f_1'}{\Delta - f_2'}$$

将  $x_F' = -\frac{f_2f_2'}{\Delta}$  代入上式得

$$f' = -\frac{f_1'f_2'}{\Delta} \quad (3-30)$$

组合系统物空间介质的折射率为  $n_1$ , 两个系统间的折射率为  $n_2$   
像空间的折射率为  $n_3$

$$f = -f' \frac{n_1}{n_3} = \frac{f_1'f_2'}{\Delta} \frac{n_1}{n_3} \quad f_1' = -f_1 \frac{n_2}{n_1} \quad f_2' = -f_2 \frac{n_3}{n_2}$$



$$f = \frac{f_1f_2}{\Delta} \quad (3-31)$$

## 两个光组组合分析

由图3-26得:

$$\begin{aligned}d &= f_1' + \Delta - f_2 \\ \Delta &= d - f_1' + f_2\end{aligned}\quad (3-32)$$

代入上面的焦距公式:

$$\frac{1}{f'} = \frac{-\Delta}{f_1'f_2'} = \frac{1}{f_2'} - \frac{f_2}{f_1'f_2'} - \frac{d}{f_1'f_2'}$$

当两个系统位于同一种介质(例如空气)中时 $f_2' = -f_2$

$$\frac{1}{f'} = \frac{1}{f_1'} + \frac{1}{f_2'} - \frac{d}{f_1'f_2'}\quad (3-33)$$

光焦度  $\varphi = \frac{1}{f'}$ :

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 - d\varphi_1\varphi_2\quad (3-34)$$

$d=0$ 时

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2\quad (3-35)$$

## 两个光组组合分析

由图3-26得:

$$l'_F = f'_2 + x'_F \quad l_F = f_1 + x_F$$

结合式(3-28), (3-29) :

$$l'_F = f'_2 - \frac{f'_2 f_2}{\Delta} = \frac{f'_2 \Delta - f_2 f'_2}{\Delta}$$

根据式(3-30):

$$l'_F = f'(1 - \frac{d}{f'_1}) \quad (3-36)$$

同理可得

$$l_F = -f'(1 + \frac{d}{f_2}) \quad (3-37)$$

主平面位置

$$l'_H = -f' \frac{d}{f'_1} \quad (3-38)$$

$$l_H = -f' \frac{d}{f_2} \quad (3-39)$$

## 2. 多光组组合计算

(1) 求合成焦距的正切计算法

$$f' = \frac{h_1}{\operatorname{tg} U'_K} \quad (3-40)$$

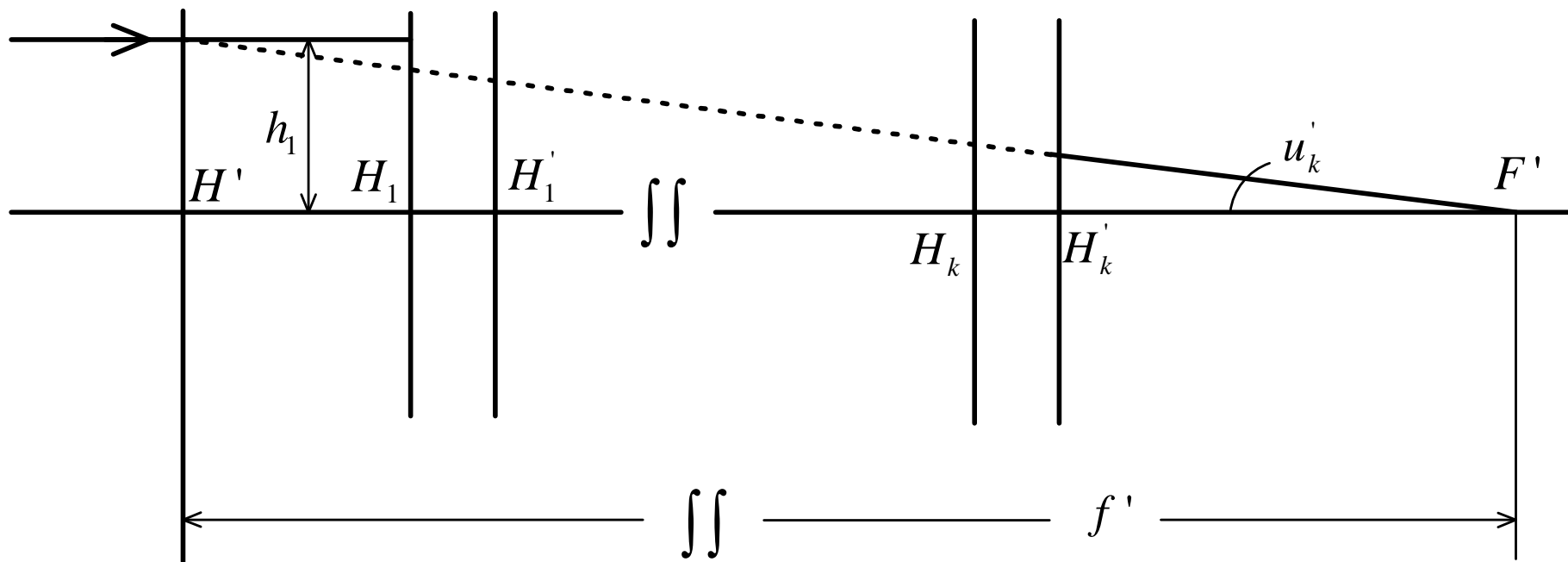


图3-27 合成系统的焦距

## 多光组组合计算

(3-7)两边同乘  $h$

$$\frac{h}{l'} - \frac{h}{l} = \frac{h}{f'}$$

因有  $\frac{h}{l'} = tgU'$   $\frac{h}{l} = tgU$

$$tgU' = tgU + \frac{h}{f'}$$

(3-41)

利用过渡公式(3-9)

和  $tgU'_{i-1} = tgU_i$

$$h_i = h_{i-1} - d_{i-1}tgU'_{i-1}$$

(3-42)

用于3个光组的组合系统, 任取  $h_1$   
并令  $tgU_1 = 0$  有

$$tgU'_1 = tgU_2 = \frac{h_1}{f'_1}$$

$$h_2 = h_1 - d_1tgU'_1$$

$$tgU'_2 = tgU_3 = tgU_2 + \frac{h_2}{f'_2} \quad (3-43)$$

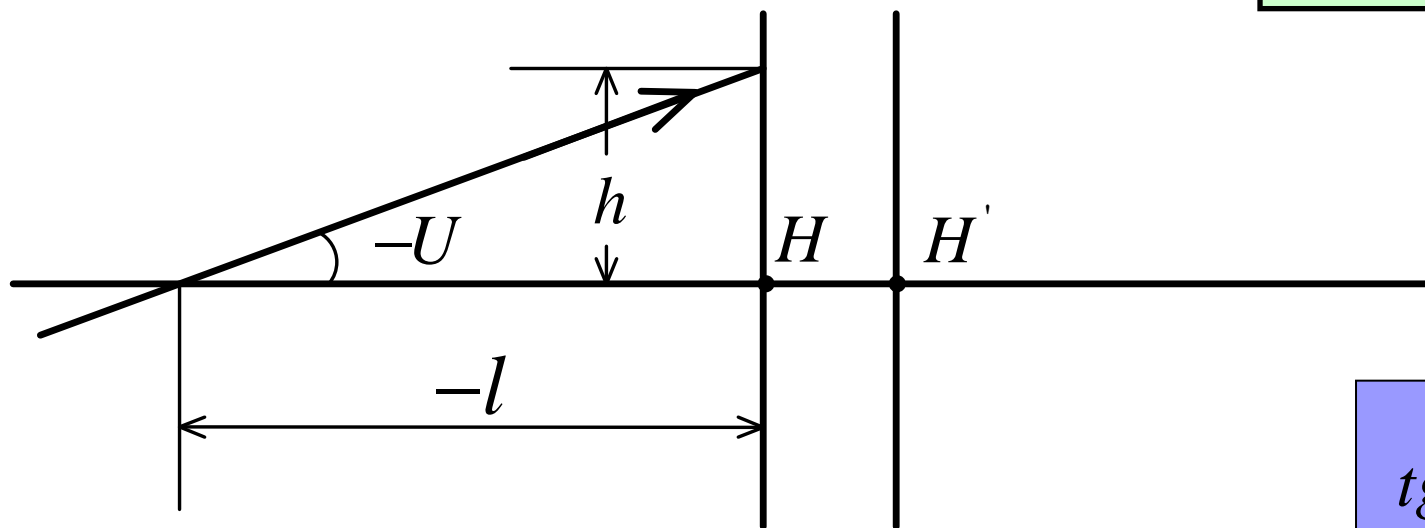
$$h_3 = h_2 - d_2tgU'_2$$

$$tgU'_3 = tgU_3 + \frac{h_3}{f'_3}$$

正切算法

# 多光组组合计算

## (2)对正切算法的再认识



$$\operatorname{tg} U = \frac{h}{l}$$

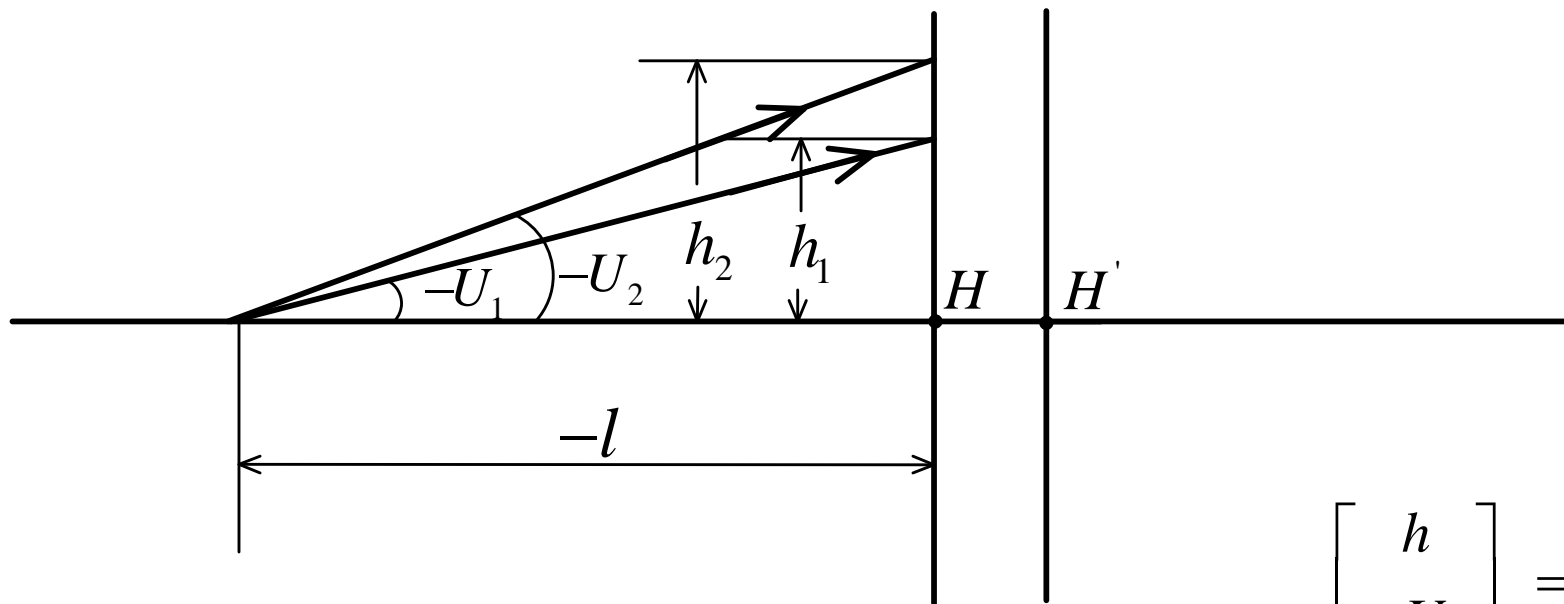
(3-44)

图3-28 表示光线的两个参量



# 多光组组合计算

定义光线矢量  $\begin{bmatrix} h \\ tgU \end{bmatrix}$



$$\begin{bmatrix} h \\ tgU \end{bmatrix}_1 = c \begin{bmatrix} h \\ tgU \end{bmatrix}_2$$

图3-29 过同一轴上点的两条光线

(3-45)

## 多光组组合计算

出射光线与入射光线在主平面上的投射高度相同  $h' = h$

联立(3-41)式

$$\begin{bmatrix} h' \\ tgU' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{f'} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h \\ tgU \end{bmatrix} \quad (3-46)$$

$tgU_i = tgU'_{i-1}$  联立(3-42)式

$$\begin{bmatrix} h_i \\ tgU_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -d \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h'_{i-1} \\ tgU'_{i-1} \end{bmatrix} \quad (3-47)$$

若光学系统是由  $K$  个光组组合而成

光学系统的系统矩阵  $\mathbf{R}$

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{f'_K} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & -d_{K-1} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdots \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{f'_1} & 1 \end{bmatrix} \quad (3-48)$$

## 多光组组合计算

利用式(3-48)，由式(3-45)有

$$\begin{bmatrix} h' \\ tgU' \end{bmatrix}_1 = c \begin{bmatrix} h' \\ tgU' \end{bmatrix}_2 \quad (3-49)$$

$$\left(\frac{tgU'}{tgU}\right)_1 = \left(\frac{tgU'}{tgU}\right)_2 \quad (3-50)$$

$$\left(\frac{h'}{tgU'}\right)_1 = \left(\frac{h'}{tgU'}\right)_2 \quad (3-51)$$

这两条入射光线中设第一条为满孔径边缘光线  
第二条为近轴光线，即

$$(tgU)_1 = tgU_{\max} = tgU$$

$$(tgU)_2 = tgu \approx u$$

## 多光组组合计算



$$\left(\frac{tgU'}{tgU}\right)_1 = \frac{u'}{u} \quad (3-52)$$

$$\left(\frac{h'}{tgU'}\right)_1 = \frac{h'}{u'} \quad (3-53)$$

在式(3-52)中，我们可以将右端的分子分母同时扩大若干倍，使得

$$tgU = u \quad (3-54)$$



$$tgU' = u' \quad (3-55)$$

## 多光组组合计算

理想光学系统中的光学不变量（拉赫不变量）与近轴光学中的光学不变量有统一的表述形式；

依据近轴光学理论和理想光学系统理论求光学系统焦距的表述公式是统一的。

所谓用“正切”算法来求理想光学系统的焦距是不必作正切运算的。

### 3. 两个光组组合例

#### (1) 远摄型光组例

$$f_1' = 500\text{mm}$$

$$f_2' = -400\text{mm}$$

$$d = 300\text{mm}$$

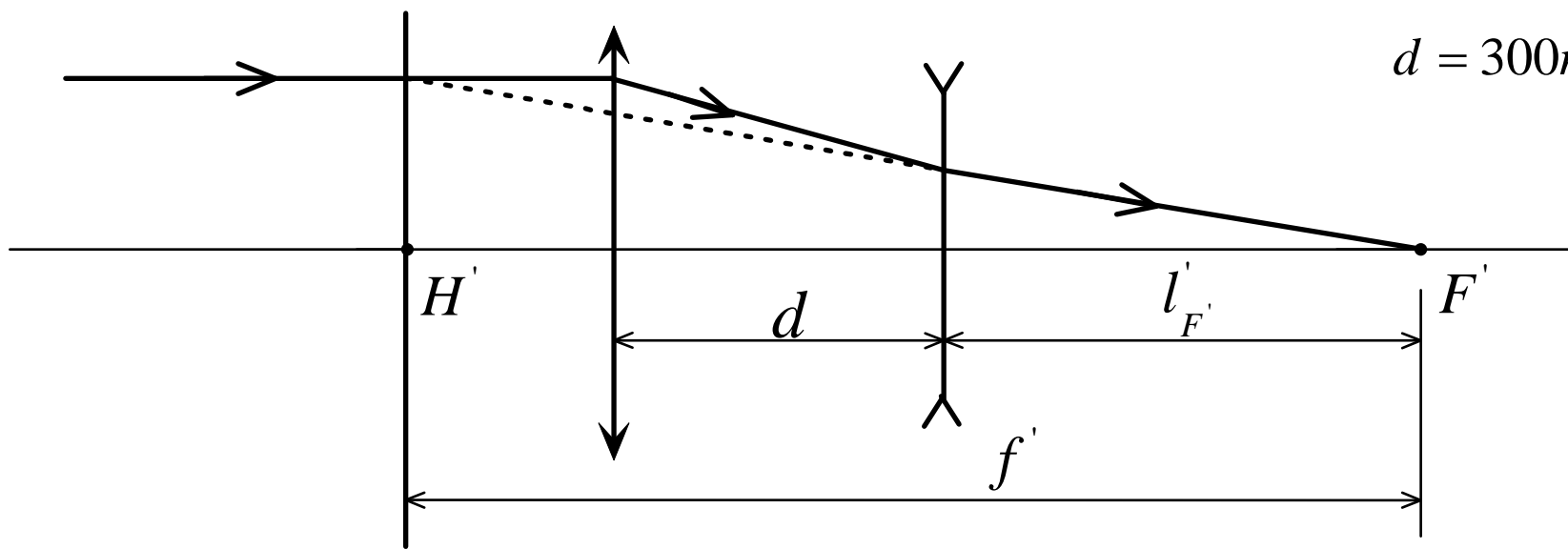


图3-30 远摄型光组

## (1)远摄型光组例

求组合光组的焦距 $f'$ ，求组合光组的像方主平面位置  
求像方焦点的位置 $l'_F$ 。

解：

设 $h_1 = 100mm$ ，有

$$u'_1 = \frac{h_1}{f'_1} = 0.2$$

$$h_2 = h_1 - d_1 u'_1 = 40mm$$

$$u'_2 = u'_1 + \frac{h_2}{f'_2} = 0.1$$

所以

$$f' = \frac{h_1}{u'_2} = 1000mm$$

$$l'_F = \frac{h_2}{u'_2} = 400mm$$

## (1)远摄型光组例

用式(3-36)求出像方焦点的位置

$$l'_F = f'(1 - \frac{d}{f'_1}) = 1000 \times (1 - \frac{300}{500}) = 400mm$$

用式(3-38)求出像方主平面的位置

$$l'_H = -f' \frac{d}{f'_1} = -1000 \times \frac{300}{500} = -600mm$$

---

焦距另解

$$\frac{1}{f'} = \varphi = \varphi_1 + \varphi_2 - d\varphi_1\varphi_2 = \frac{1}{500} + \frac{1}{(-400)} - 300 \times \frac{1}{500} \times \frac{1}{(-400)} = 0.001$$

$$f' = 1000mm$$



## (2)反远距型光组

解：

设  $h_1 = 10mm$  , 有

$$u'_1 = u_2 = \frac{h_1}{f'_1} = -0.2857143$$

$$h_2 = h_1 - d_1 u'_1 = 14.28571mm$$

$$u'_2 = u_2 + \frac{h_2}{f'_2} = 0.2857141$$

$$f' = \frac{h_1}{u'_2} = 35mm$$

$$l'_F = \frac{h_2}{u'_2} = 50mm$$

## 两个光组组合例

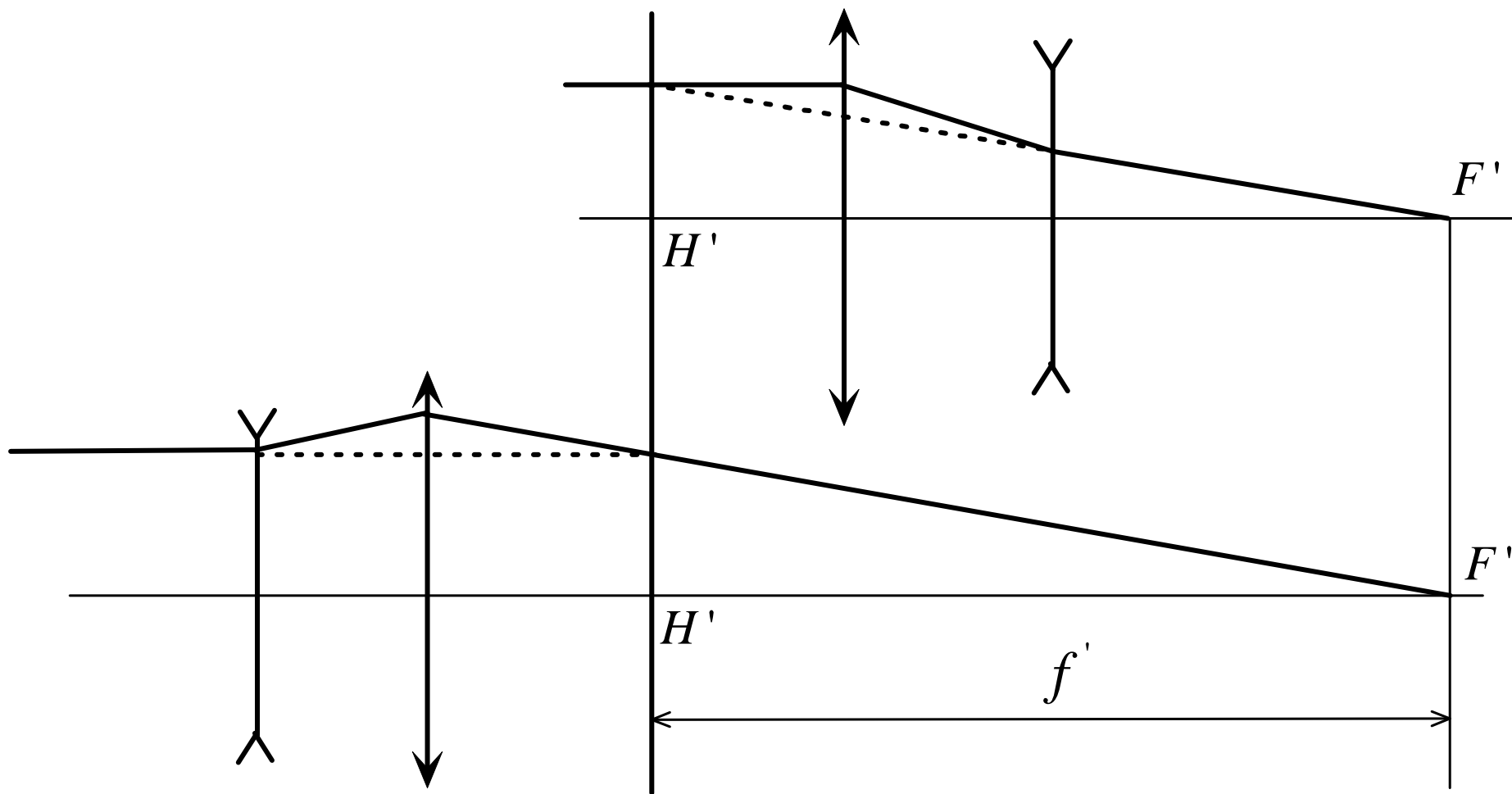


图3-32 焦距相等的远摄型与反远距型比较

## 3.6

# 透镜

透镜是构成光学系统的最基本单元，它是由两个曲面包围一种透明介质（例如玻璃）所形成的光学零件。

## 3.6 透镜

- 透镜按其对光线的作用可分为两类，对光线有会聚作用的称为会聚透镜，它的光焦度为  $\varphi$  正值，又称为正透镜；对光线有发散作用的称为发散透镜，它的光焦度  $\varphi$  为负值，亦称为负透镜。
- 将透镜的两个折射球面看成是两个单独的光组，分别求出它们的焦距和基点位置，应用前述的光组组合公式就可以求得透镜的焦距和基点位置。
- 由单个折射球面构成的系统，其两个主面都重合于球面顶点

## 3.6 透镜

单个折射球面的成像公式

$$\frac{n'}{l'} - \frac{n}{l} = \frac{n' - n}{r} \quad (2-9)$$

令  $l(l')$  为无穷大, 就有  $l' \rightarrow f'$  或  $l \rightarrow f$

$$l' = \frac{n'r}{n' - n} = f'$$

$$l = -\frac{nr}{n' - n} = f$$

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

透镜放在空气中, 即  $n_1 = n'_2 = 1$  ; 又设透镜的材料折射率为  $n$   
即  $n'_1 = n_2 = n$  , 则有

$$f_1 = -\frac{r_1}{n-1} \quad f'_1 = \frac{nr_1}{n-1}$$

$$f_2 = \frac{nr_2}{n-1} \quad f'_2 = -\frac{r_2}{n-1}$$

## 3.6 透镜

透镜的光学间隔

$$\Delta = d - f_1' + f_2$$

根据合成焦距公式(3-30)

$$f' = -f = -\frac{f_1' f_2'}{\Delta} = \frac{n r_1 r_2}{(n-1)[n(r_2 - r_1) + (n-1)d]}$$

$$\varphi = \frac{1}{f'} = (n-1)(c_1 - c_2) + \frac{(n-1)^2}{n} d c_1 c_2 \quad (c = 1/r)$$

对薄透镜,  $d = 0$

$$\varphi_{thin} = \frac{1}{f'_{thin}} = (n-1)(c_1 - c_2) \quad (3-58)$$

## 3.6 透镜

根据式(3-36)、(3-37)

$$l'_F = f'(1 - \frac{n-1}{n}dc_1)$$

$$l_F = -f'(1 + \frac{n-1}{n}dc_2)$$

根据式(3-38)、(3-39)

$$l'_H = -f' \frac{n-1}{n} dc_1$$

$$l_H = -f' \frac{n-1}{n} dc_2$$

代入  $f'$  值

$$\begin{aligned} l'_H &= \frac{-dr_2}{n(r_2 - r_1) + (n-1)d} \\ l_H &= \frac{-dr_1}{n(r_2 - r_1) + (n-1)d} \end{aligned} \tag{3-59}$$

### 3.6 透镜

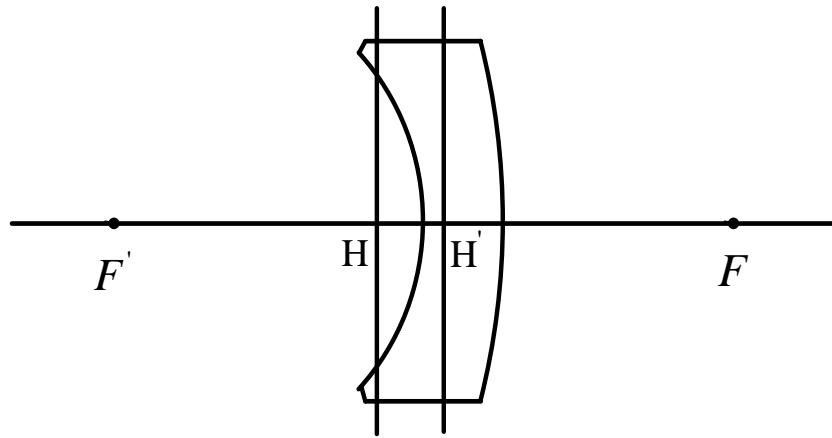
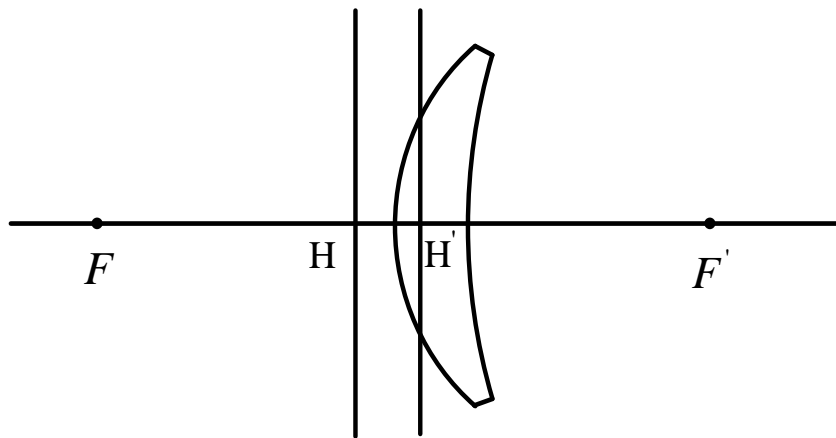
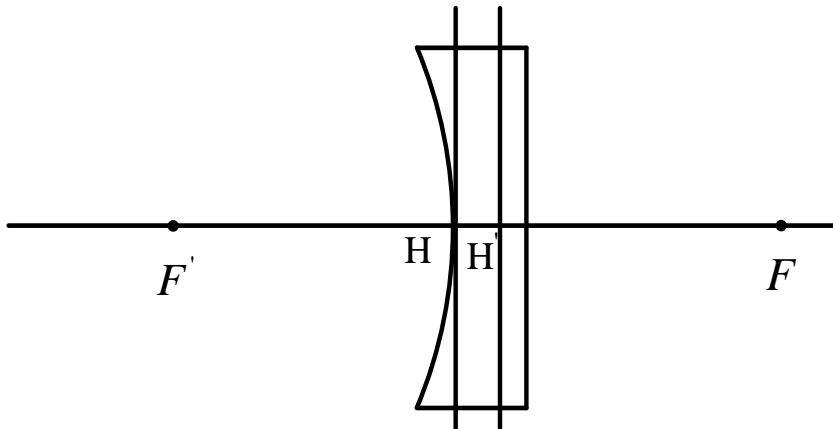
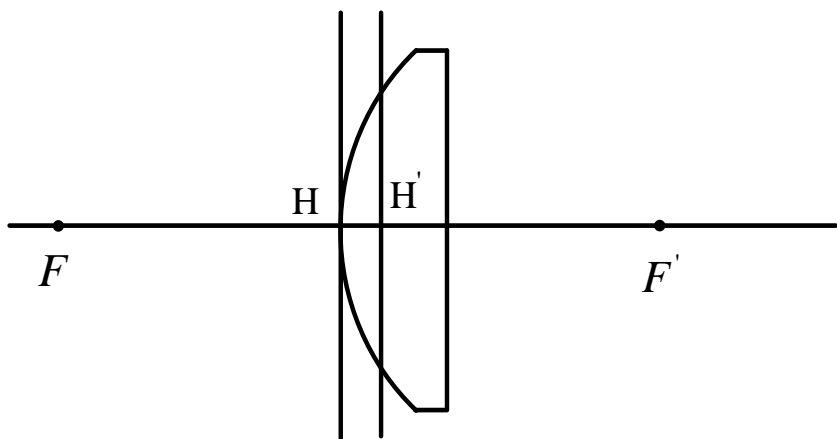
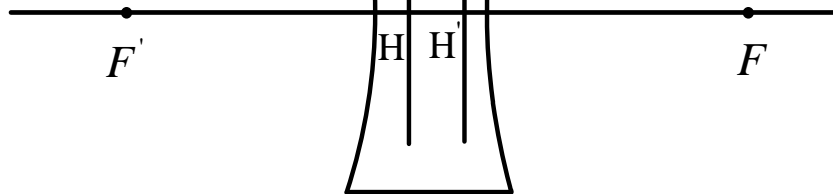
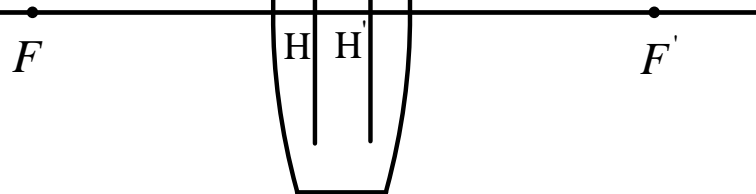


图 3-33 几种不同形状透镜的主点和焦点位置