

# 《工程光学》概念速查-1

---

## 简介

---

本资料用于工程光学I的背诵记忆。需要理解运用的概念放在了《工程光学》基础教程-1中。

一些内容在《工程光学》基础教程-1也已出现。这很正常。有些内容你又要理解又要记忆。

资料仅供参考，复习计划请以复习PPT为准  
然而，我们考了PPT以外的=（

**更多资料**，请前往仓库（[XJTU-Engineering-Optics](#)）查看。

## 目录

---

- [第一章 几何光学基本定律与成像概念](#)
- [第二章 理想光学系统](#)
- [第三章 平面光学系统](#)
- [第四章 光学系统中的光阑与光束限制](#)
- [第六章 像差理论](#)
- [第七章 典型光学系统](#)

## 第一章 几何光学基本定律与成像概念

---

### 波面/波阵面

某一时刻振动相位相同的点所构成的曲面。

### 波面分类

平面波、球面波、任意曲面波。

### 三大定律

### 1. 直线传播定律

在各向同性的均匀介质中，光沿直线传播。

### 2. 独立传播定律

不同光源发出的光在空间某点相遇时，彼此互不影响，各光束独立传播。

### 3. 折射定律与反射定律

#### ◦ 反射定律

1. 反射光线位于入射光线和法线所决定的平面内。
2. 反射光线和入射光线位于法线两侧，且反射角与入射角绝对值相等，符号相反。

#### ◦ 折射定律

1. 折射光线位于入射光线和法线所决定的平面内。
2. 折射角的正弦与入射角的正弦之比等于入射光所在介质折射率与折射光所在介质的折射率之比。

## 全反射条件

1. 光线从光密介质向光疏介质入射。
2. 入射角大于临界角。

## 光程

光在介质中传播的几何路程与所在介质的折射率的乘积。

## 费马原理

光沿着光程为极值的路径传播。

## 马吕斯定律

光线束在各向同性的均匀介质中传播时，始终保持与波面的正交性，且入射波面与出射波面对应点之间的光程均为定值。

## 共轴光学系统

各光学元件表面曲率中心都在同一直线上的光学系统。

## 光轴

共轴光学系统中各光线元件表面曲率中心的连线。

## 完善像点

若入射光为同心光束，出射光也为同心光束，则完善像点为同心光束的中心光线所成的像点。

## 物/像空间

物/像所在空间。

## 完善成像条件（三条等价）

1. 入射波面为球面波时，出射波面也为球面波。
2. 入射光为同心光束时，出射光也为同心光束。
3. 物点与像点之间任意两条光路光程相等。

## 实虚像

- **实像**：由实际光线相交形成的点为实像点。
- **虚像**：由光线延长线相交形成的点为虚像点。

## 球面顶点

光轴与球面的交点。

## 主光线

通过入瞳中心的光线。

## 子午面

由光轴和主光线确定的平面。

## 弧矢面

经过轴外物点的主光线并与子午面垂直的平面。

## 物/像方截距

顶点到入/出射光线与光轴交点的距离。

## 物/像方孔径角

入/出射光线与光轴的夹角。

## 高斯像

轴上物点在近轴近似下通过球面光学系统所成的像。

垂轴放大率

$$\beta = \frac{y'}{y} = \frac{nl'}{n'l}$$

轴向放大率

$$\alpha = \frac{dl'}{dl} = \frac{n'}{n} \beta^2$$

角放大率

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

放大率叠加

$$\beta = \beta_1 \beta_2 \dots \beta_k$$

$$\alpha = \alpha_1 \alpha_2 \dots \alpha_k$$

$$\gamma = \gamma_1 \gamma_2 \dots \gamma_k$$

阿贝不变量

$$Q = n \left( \frac{1}{r} - \frac{1}{l} \right) = n' \left( \frac{1}{r} - \frac{1}{l'} \right)$$

拉赫不变量

$$J = nuy = n'u'y'$$

## 第二章 理想光学系统

---

理想光学系统

将实际光学系统近轴区完善成像理论，推广到任意大的空间以任意宽的光束都成完善像的理想模型。

共轭

每一个物点对应于唯一的一个像点的物像关系。

共线成像

点对应点，线对应线，面对应面的成像变换。

## 像方焦点

无穷远轴上物点的像点。

## 物方焦点

共轭像点位于轴上无穷远的物点。

## 像/物方焦平面

过像/物方焦点且垂直于光轴的平面。

## 像方主点

过平行入射光线延长线与出射光线延长线交点作光轴的垂线，垂足为像方主点。

## 物方主点

过入射光线延长线与平行出射光线延长线交点作光轴的垂线，垂足为物方主点。

## 像/物方主平面

过像/物方主点且垂直于光轴的平面。

(主平面上垂轴放大率为1)

## 像/物方焦距

像/物方主点到像/物方焦点的距离。

## 节点

角放大率等于+1的一对共轭点。

## 基点

一对主点、一对焦点和一对节点。

## 基面

一对主平面。

## 牛顿公式

$$xx' = ff'$$

## 高斯公式

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

过渡公式

$$l_k = l'_{k-1} - d_{k_1}$$

$$x_k = x'_{k-1} - \Delta_{k-1}$$

$$\Delta_k = d_k - f'_k + f_{k+1}$$

$$\beta = \beta_1 \beta_2 \dots \beta_k$$

垂轴放大率（理想光学系统）

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

$$\beta = \frac{y'}{y} = -\frac{f}{f'} \frac{l'}{l}$$

轴向放大率（理想光学系统）

$$\alpha = \frac{dl'}{dl} = \frac{n'}{n} \beta^2$$

角放大率（理想光学系统）

$$\gamma = \frac{\tan u'}{\tan u} = \frac{n}{n'} \frac{1}{\beta}$$

拉赫公式

$$ny \tan U = n'y' \tan U'$$

焦平面位置 and 主面位置

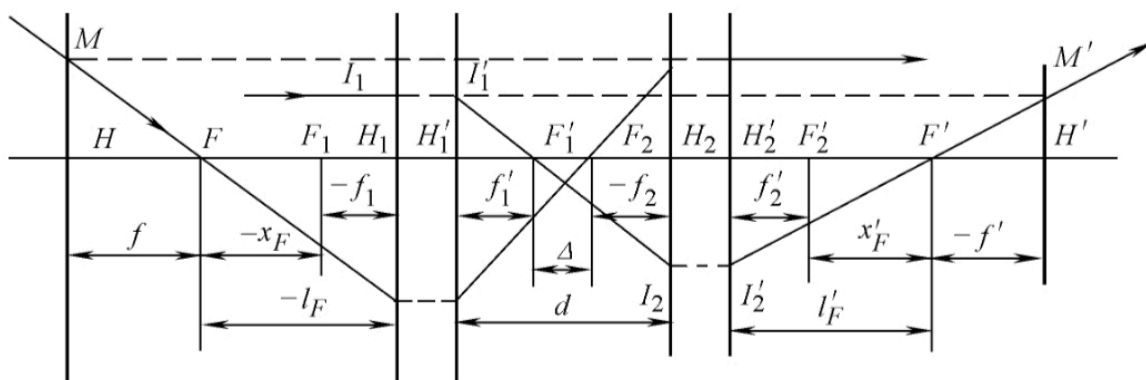
$$l'_H = -f' \frac{d}{f'_1}$$

$$l_H = -f \frac{d}{f_2}$$

$$l_F = f \left(1 + \frac{d}{f_2}\right)$$

$$l'_F = f' \left(1 - \frac{d}{f'_1}\right)$$

各物理量请参考下图：



光学间隔和主面间隔

$$d = l_1' - l_2$$

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

$$\Delta = x_1' - x_2$$

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

光焦度

像方焦距的倒数， $\phi = \frac{1}{f'}$

光焦度公式

$$\phi = \phi_1 + \phi_2 - d\phi_1\phi_2$$

（密接，也即两面靠得很近时，取 $d=0$ ）

透镜公式

$$f' = \frac{nr_1r_2}{(n-1)[(n(r_2-r_1) + (n-1)d)]}$$

薄透镜满足 $d \approx 0$ ，则：

$$\phi = (n-1)\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right) = (n-1)(\rho_1 - \rho_2)$$

此时， $l_H = l_H' = 0$ （这意味着主点就是球面顶点）。

## 第三章 平面光学系统

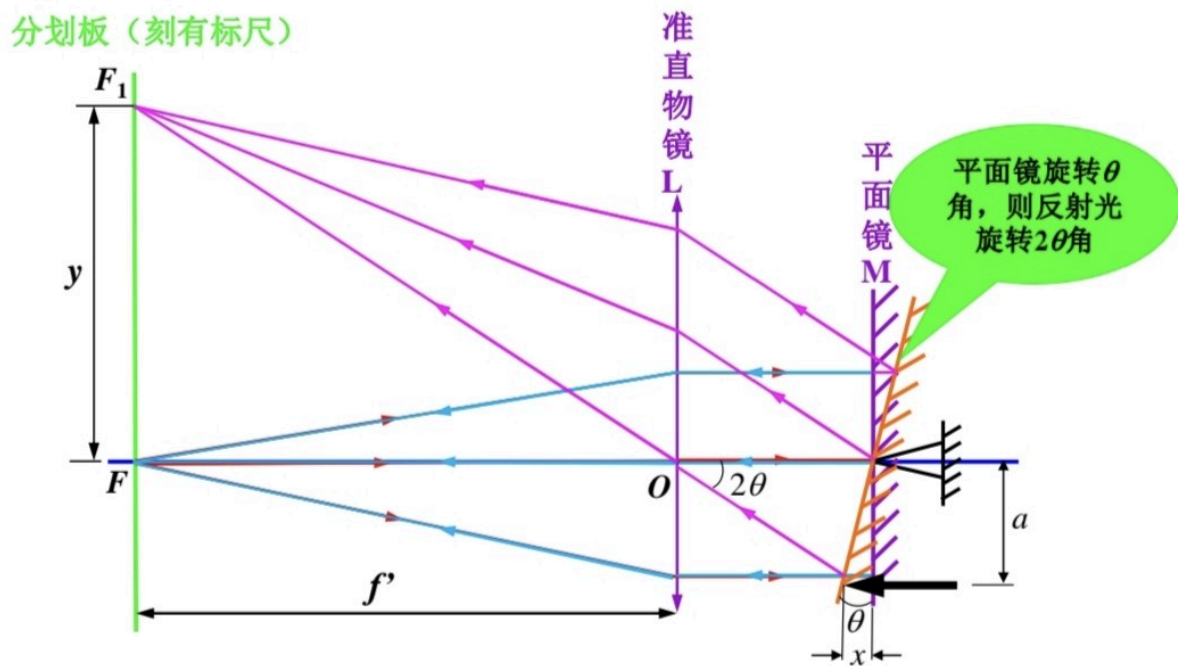
## 平面镜

唯一能成完善像的最简单的光学元件

## 平面镜旋转

当平面镜转动 $\alpha$ ，反射光线转动 $2\alpha$

## 光学杠杆



$$y = \frac{2f'}{a}x = Kx$$

## 双平面镜成像

两个平面镜夹角是 $\alpha$ 时，出射光线与入射光线的夹角是 $2\alpha$

## 等效空气平板

等效厚度

$$d' = \frac{d}{n}$$

轴向平移量

$$\Delta l' = d(1 - \frac{1}{n})$$

## 三种复合棱镜

1. 分光棱镜：用于分光



2. 分色棱镜：用于彩色电视摄像机
3. 转向棱镜：用于望远镜倒像

## 折射棱镜最小偏向角

$$\delta_m = I_1 - I_2' - \alpha$$
$$\sin \left[ \frac{\alpha + \delta_m}{2} \right] = n \sin \left( \frac{\alpha}{2} \right)$$

## 折射色散公式

$$n(\lambda) = \frac{\sin \left( \frac{\alpha + \delta_m}{2} \right)}{\sin \left( \frac{\alpha}{2} \right)}$$

## 光楔

$$\delta = (n - 1)\alpha$$

(向着长的底边一侧偏移)

## 光学材料分类

光学玻璃、光学晶体、光学塑料。

## 平均折射率

$$n_D$$

## 平均色散

$$dn = n_F - n_C$$

(折射率之差的最大值)

## 阿贝常数

$$\nu_D = \frac{n_D - 1}{n_F - n_C}$$

(衡量色散程度，越大色散越小，性能越好)

## 光学玻璃分类

冕牌玻璃 ( $K, \nu_D$  大) 和火石玻璃 ( $F, \nu_D$  小)。

## 目视仪器玻璃参数

平均折射率 $n_D$ 、平均色散 $dn$ 、阿贝常数、部分色散、相对色散。

## 反射光学材料特性

对各种色光的反射率 $\rho(\lambda)$

---

# 第四章 光学系统中的光阑与光束限制

---

## 孔径光阑

限制轴上物点孔径角的光阑

## 入\出射光瞳

孔径光阑经孔径光阑前\后面光学系统所成的像称为入\出射光瞳

## 视场光阑

限定成像范围的光阑

## 入\出射窗

视场光阑经视场光阑前\后面光学系统所成的像称为入\出射窗

## 物\像方视场角

以入瞳中心为顶点，物面可成像范围的张角； 以出瞳中心为顶点，像面的张角；

## 渐晕光阑

使轴外物点成像光束宽度比轴上点成像光束宽度窄的光阑

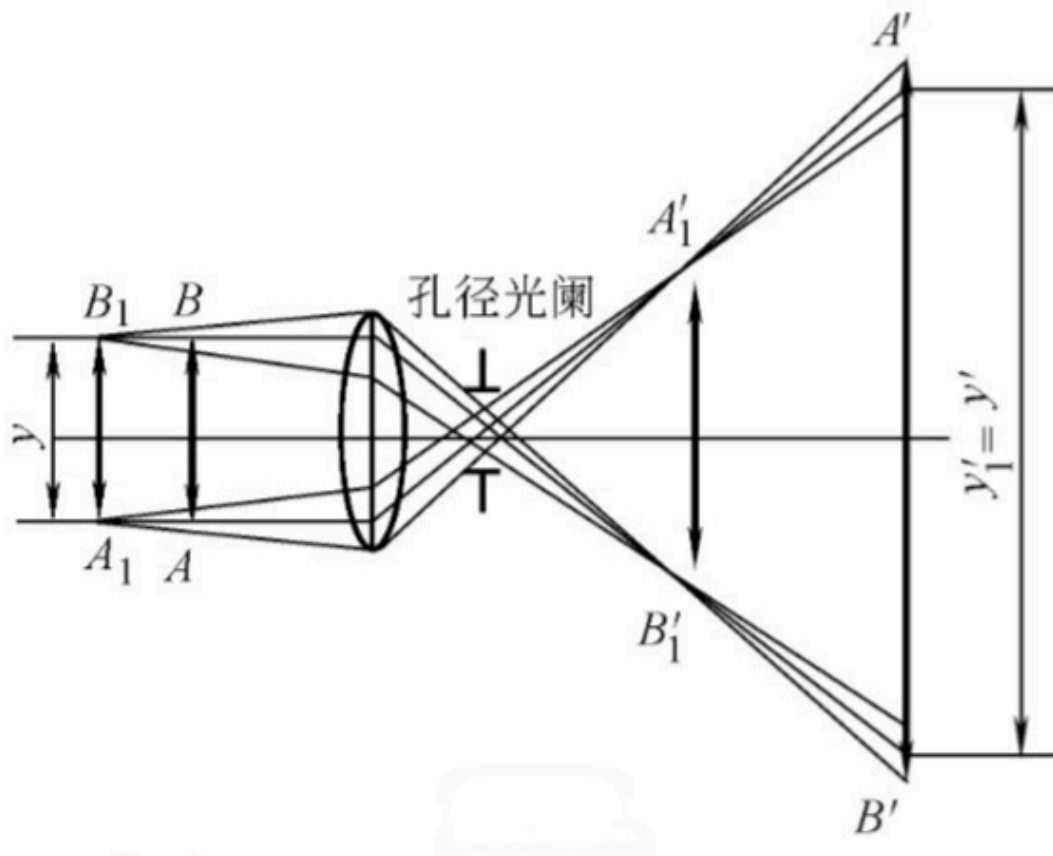
## 光瞳衔接原则

前一个系统的出瞳和后一个系统的入瞳重合。

## 远心光路

孔径光阑与像方焦平面重合的光学系统。

入瞳位于无穷远处。通过测量弥散圆的圆心距离来测量长度，消除深度位置不准的测量误差。



## 场镜

和像平面重合或很靠近像平面的透镜。  
可以压低光线，减小后续光路通光孔径。

## 空间像

空间中有一定深度的物点成像在一个像平面上

## 景像平面

空间像的像平面

## 对准屏幕

景像平面在物空间的共轭面

## 弥散斑

物点在像平面上形成的弥散光斑

## 景深

能在景象平面上获得清晰像的物空间深度

# 第六章 光线的光路计算与像差理论

## 矫正原则

- 用对接收器的最灵敏谱线校正单色像差；
- 用对接收波段范围两边缘附近的谱线校正色差；

## 齐明点（没有球差、慧差和场散）

1. 物点和像点均位于球面顶点。
2. 物点和像点均位于球面的曲率中心。
3.  $l = \frac{(n+n')r}{n}$ ,  $l' = \frac{(n+n')r}{n'}$

## 像差种类、原因、影响及矫正

你只需要记住一张表：

几何像差的特点							
类别	名称	说明	现象	度量方向	与孔径及视场的关联	影响	校正
单色像差	球差	轴上点同心光束成像后变为非同轴同心光束	点物不成点像，像为弥散斑	轴向	孔径	清晰度	齐明透镜，组合透镜，减小光阑直径
	彗差	近轴物点宽光束成像后不对称于主光线，不再形成同心光束	像点形似彗星	垂轴	孔径和视场		选择光阑位置，全对称系统，减小光阑直径，组合透镜，满足正弦条件
	细光束像散	远轴物点细光束成像，分散为两个像	不同位置的像截面形状不一样	轴向	视场		双分离透镜，选择光阑位置
	细光束场曲	轴外物点的像，位置随视场而变，且偏离高斯像面	平面物成弯曲像面				双分离透镜，厚透镜，像散过校正
	畸变	轴外不同视场物点的垂轴放大率不同	像发生变形，相对于原物失去相似性	垂轴		精度	选择光阑位置，全对称系统
色差	位置色差	轴上物点不同波长的像点位置不一致(光学材料的折射率随波长而变)	彩色弥散斑	轴向	孔径(近轴、远轴都存在)	清晰度	选择透镜材料，组合透镜
	倍率色差	轴外物点不同波长的像大小不一样(光学材料的折射率随波长而变)	像带彩边	垂轴	视场(近轴、远轴都存在)		选择光阑位置，全对称系统，组合透镜

# 第七章 典型光学系统

## 摄影系统

$F$ 数/ $F\#$ /光圈数:  $F = \frac{f'}{D}$ ,  $D$ 是入瞳直径

相对孔径:  $\frac{D}{f'} = \frac{1}{F}$

物镜分辨率:  $N_L = \frac{D}{1.22\lambda f'} = \frac{1}{1.22\lambda F}$

景深:  $F$ 越大,  $f'$ 越小, 物距 $L$ 越大, 景深越大

## 视觉系统

明视距离是 $250mm$   $l_r$ 是远点距离,  $l_p$ 是近点距离

近/远视程度:  $\frac{1}{l_r}$  (近视为负, 远视为正)

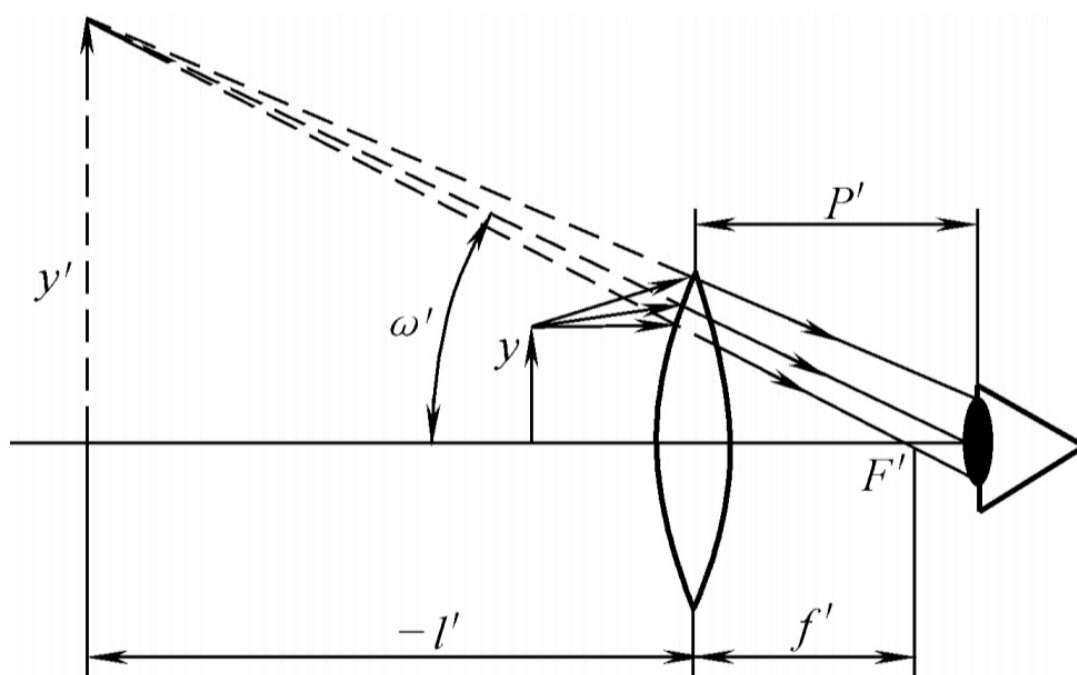
调节能力:  $\frac{1}{l_r} - \frac{1}{l_p}$

眼镜度数:  $\frac{100}{f'}$  (近视眼镜其实是负度数, 只是我们说是正的)

极限分辨角:  $\phi = \frac{\epsilon}{\Gamma}$

## 目视系统

目视系统的瞳孔是孔径光阑兼出瞳, 物镜就是视场光阑兼入射窗。



线视场: 物高的两倍。

镜目距: 出瞳中心 (瞳孔) 到目镜的距离。

相对镜目距: 镜目距/目镜焦距。

视觉放大率:  $\Gamma = \frac{\tan \omega'}{\tan \omega}$ ,  $\tan \omega$ 和 $\tan \omega'$ 分别是物体对眼睛形成张角和像对眼睛形成的张角。

(调焦距离无穷远时) 目镜视觉放大率:  $\Gamma_e = \frac{250}{f'_e}$

(调焦距离 $D = 250mm$ 时)  $\Gamma_e = \frac{250}{f'_e} + 1 - \frac{P'}{f'_e}$  ( $p$ 是镜目距)

(在没有提到调焦距离时默认无穷远)

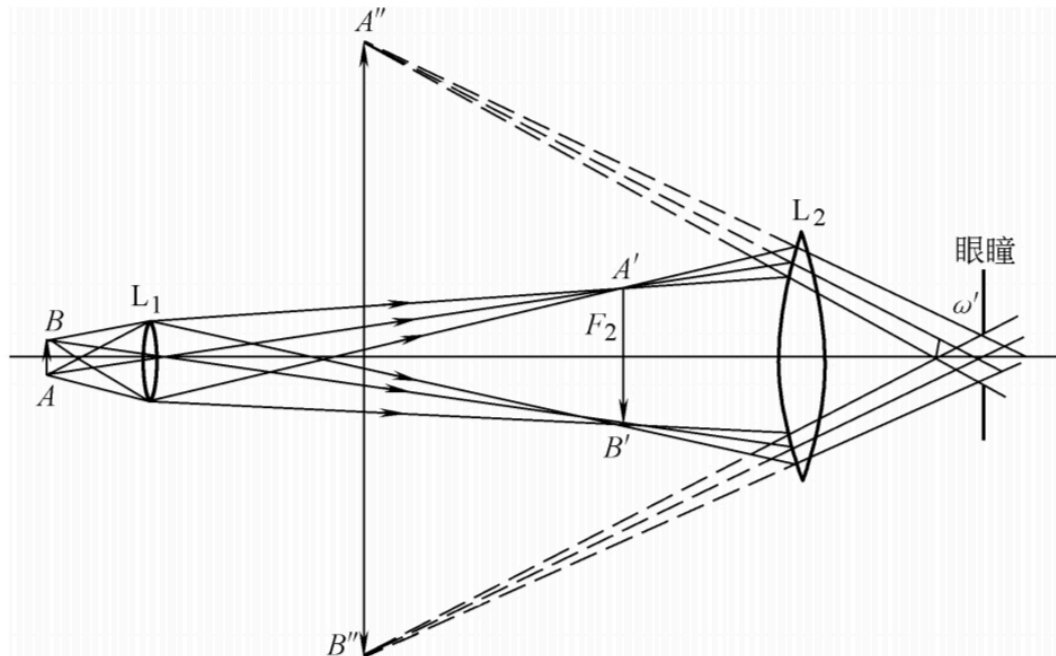
渐晕系数0.5时的线视场:  $2y = \frac{500h}{\Gamma P'}$ ,  $h$ 是目镜口径的一半

$$\text{视度} SD = \frac{1}{f'}$$

调节范围  $\Delta x = \pm \frac{Df_e'^2}{1000} mm$ ,  $\Delta x$  是目镜移动的距离

## 显微系统

显微镜的物镜框是孔径光阑，目镜框是渐晕光阑，分划板是视场光阑



共轭距：物体经过物镜所成像到物体的距离，也即  $l' - l$

镜目距：出瞳到目镜的距离

$$\text{目镜视觉放大率: } \Gamma_e = \frac{250}{f_e'}$$

$$\text{系统视觉放大率: } \Gamma = \beta \Gamma_e = \frac{250}{f'}$$

数值孔径:  $NA = n \sin u$ ,  $u$  是物方孔径角

出瞳直径:  $D' = \frac{500 NA}{\Gamma}$  (这个公式用了小角度近似)

$$\text{线视场: } 2y = \frac{500 \tan \omega'}{\Gamma}$$

分辨率:

$$\sigma = \frac{0.61\lambda}{NA} \quad (\text{瑞利判据})$$

$$\sigma = \frac{0.5\lambda}{NA} \quad (\text{道威判据})$$

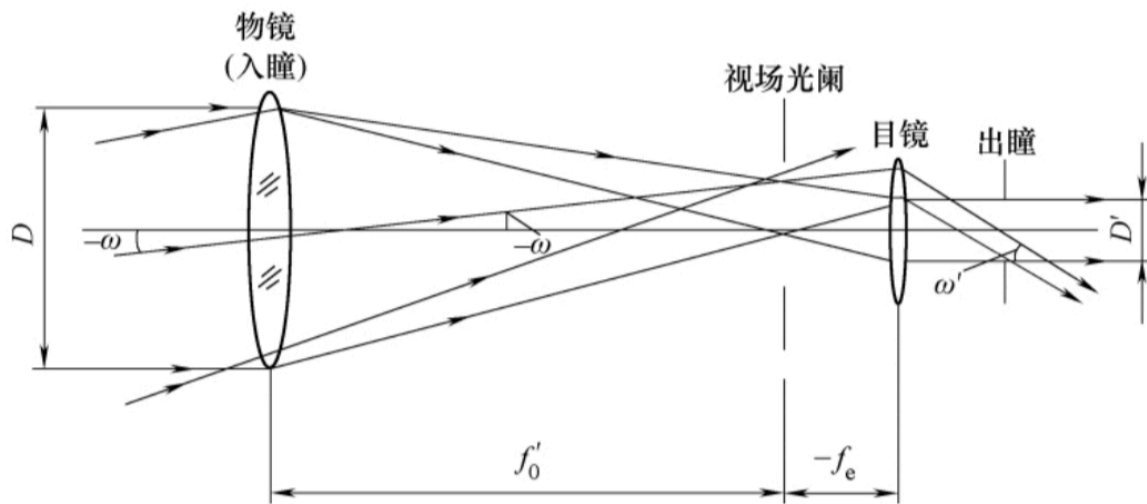
景深：数值孔径越大，放大率越大，景深越小。

## 显微系统照明

临界照明（不均匀）、柯勒照明（均匀）。

## 望远系统

望远系统的物镜框是孔径光阑，目镜框是渐晕光阑，分划板是视场光阑



视觉放大率:  $\Gamma = \frac{1}{\beta}$

$$\Gamma = -\frac{f'_0}{f'_e}$$

$$\Gamma = -\frac{D}{D'}$$

极限分辨角:  $\phi = \frac{1.22\lambda}{D} = \frac{140''}{D}$  (只有极限分辨角这里的  $D$  的物镜通光口径, 别的都是入瞳直径)

有效放大率:

$$\Gamma = \frac{D}{2.3}$$

$$\Gamma = \frac{60''}{\phi}$$

工作放大率:

$$\Gamma = D$$

$$\Gamma = \frac{1'}{\phi}, \phi \text{ 是分辨率。}$$

## 投影系统

普通摄影物镜倒置使用

## 投影系统照明衔接条件

- 照明系统拉赫不变量  $J_1$  大于投影系统拉赫不变量  $J_2$
- 保证光瞳衔接和成像关系