

# CH12：典型光学系统

## CH12：典型光学系统

★表征光学系统的三个参数：

- 1. 人眼
  - 基本概念：
  - 眼镜的调节：
  - 非正常眼：
  - 眼镜的分辨率：
  - 眼镜的立体视觉
- 2. 放大镜
  - 放大倍率
  - 光束限制
  - 视场（50%渐晕）
- 3. 显微镜与照明系统
  - 放大倍率
  - 成像关系
  - 齐焦条件
  - 光束限制
  - 景深
  - 分辨率
  - 显微物镜
  - 显微目镜
  - ★ 照明系统
- 4. 望远镜与转向系统
  - 两种望远镜
  - 视觉放大率
  - 主观亮度
  - 光束限制
  - 望远物镜
  - 望远目镜
  - ★ 转像系统
- 5. 摄影光学系统
  - 三个参数
  - 光束限制
  - 景深（物方容错范围）
  - 几何焦深（像方容错范围）
  - 分辨率
- 6. 放映系统
  - 照明类型
  - ★ 共轭关系

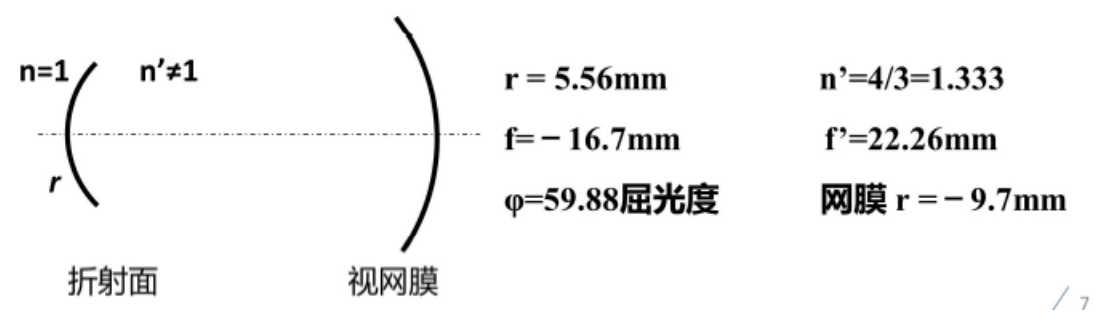
★表征光学系统的三个参数：

- $f'$  焦距
- $D/f'$  相对孔径
- $2W$  物方视场角

1. 人眼

基本概念：

- 角膜
- 瞳孔
- 水晶体（双凸透镜）
- 黄斑（中心凹）
- 简约眼（折射球面模型，数据有个大致印象即可）



/ 7

眼镜的调节：

- 远点、远点距
- 近点、近点距
- 调节范围

$$A = R - P = \frac{1}{r} - \frac{1}{p}$$

- 明视距离：250 mm

非正常眼：

- ☆近视眼：远点在眼前有限远处， $R < \theta$ ，眼球偏长，像方焦点在视网膜之前，需要用负光焦度的眼镜调整
- ☆远视眼：远点在眼后， $R > \theta$ ，眼球偏短，像方焦点在视网膜之后，需要用正光焦度的眼镜调整
- 散光：一个方向能会聚，另一个方向不能会聚，需要用柱面透镜调整
- 斜视：需要加光楔调整

眼镜的分辨率：

- 极限分辨角：

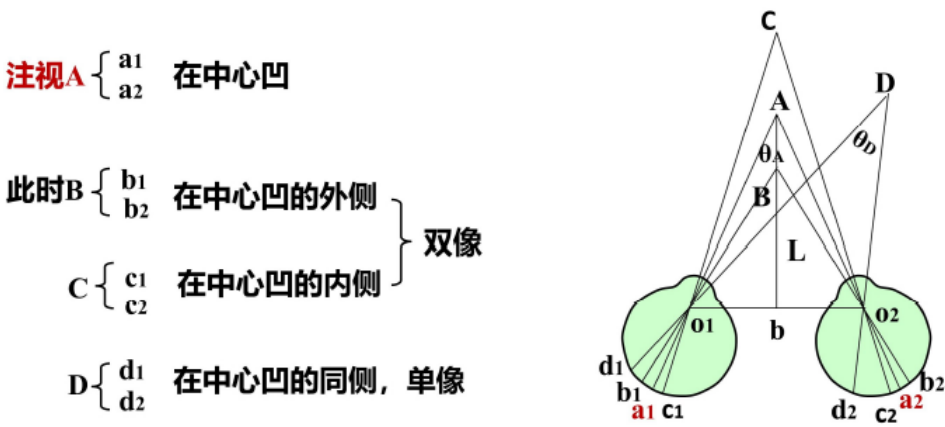
$$\phi = \frac{1.22\lambda}{D}$$

一般认为眼镜的极限分辨角为 1'

- 影响因素：
  - 物体的亮度、对比度
  - 照明光的光谱成分
  - 在视网膜上的成像位置

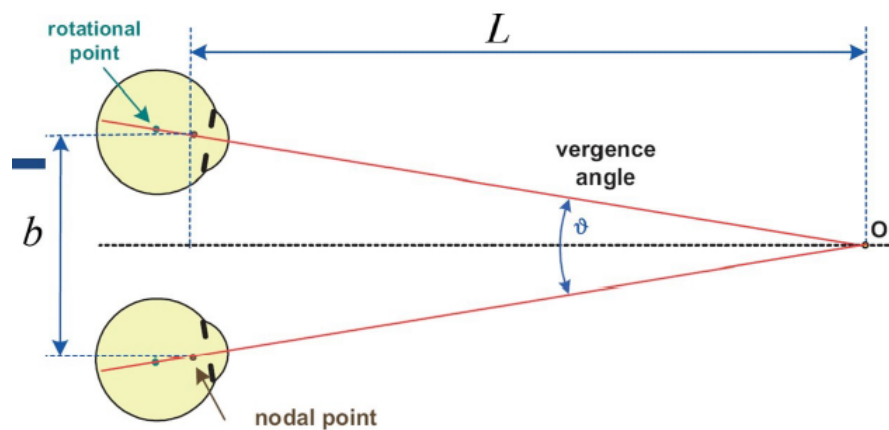
眼镜的立体视觉

- 双眼视觉：  
成像于双眼中心凹的同侧对应点时产生单向，异侧则产生双像



- 视差角：

$$\theta = \frac{b}{L}$$



$b$  为两眼节点的连线长度，称为基线长度，成年人的  $b$  一般为 65 mm

$L$  为物点到基线的距离

- 体视锐度：  
人体能觉察的最小立体视差

$$\Delta\theta_0 = 30'' - 60''$$

一般以 10'' 作为体视锐度的极限值

- 体视圈半径：  
存在立体视觉的范围

$$L_m = \frac{b}{\Delta\theta_0}$$

$L_m$  越大，人眼观察立体的能力越强

- 体视阈值：

$$\Delta L_0 = \frac{L^2}{b} \Delta\theta_0$$

$\Delta L_0$  越小，分辨能力越强

- 应用：双筒望远镜

放大率为  $\Gamma$ ，两个物镜的中心距即基线长度为人眼的  $K$  倍

$$L_{mt} = K\Gamma L_m$$
$$\Delta L_t = \frac{1}{K\Gamma} \Delta L_0$$

## 2. 放大镜

### 放大倍率

**视觉放大率** 适用于 **目视光学仪器**，如放大镜、显微镜、望远镜等

$$M = \frac{250}{f'}$$

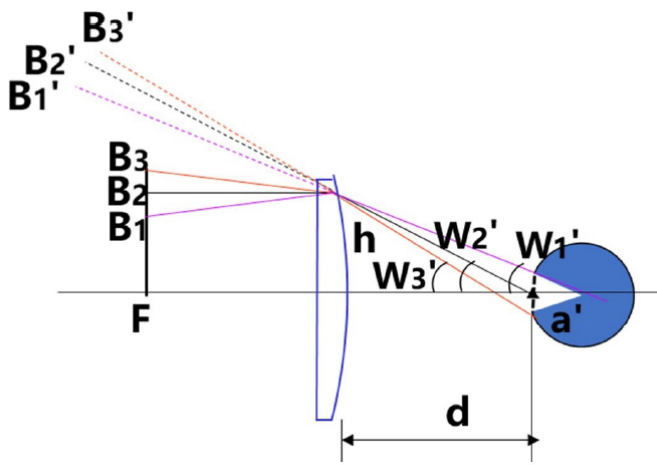
### 光束限制

- **孔径光阑、出瞳**：瞳孔
- **渐晕光阑**：放大镜
- **视场光阑**：无

### 视场（50%渐晕）

$$2y = \frac{500h}{Md}$$

- 放大镜直径： $2h$
- 人眼与放大镜的距离： $d$
- 放大镜的放大倍率： $M$



### 3. 显微镜与照明系统

#### 放大倍率

显微镜的主光学系统由 **物镜** 和 **目镜** 两部分组成，目镜是 **放大镜**，显微镜整体是一个复杂的 **放大镜**

$$M_o = \beta = -\frac{\Delta}{f'_o}$$

$$M_e = \frac{250}{f'_e}$$

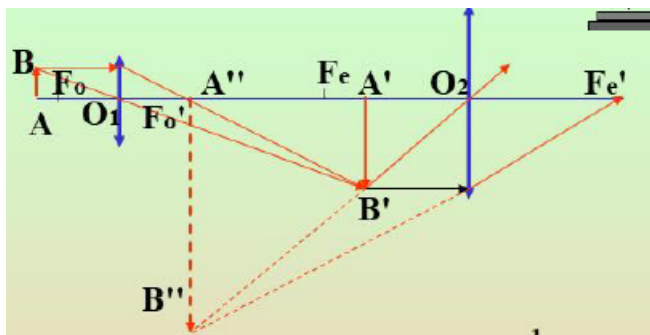
$$M = M_o \cdot M_e = -\frac{250\Delta}{f'_o f'_e} = \frac{250}{f'}$$

$$f' = -\frac{f'_o f'_e}{\Delta}$$

- 横向放大率:  $\beta$
- **光学间隔**:  $\Delta$  --  $F'_o F_e$  的长度
- 显微镜的总焦距:  $f'$

#### 成像关系

- 第一次成像:  
**倒立的实像**，有中间实像面，像面靠近  $F_e$
- 第二次成像:  
倒立的 **虚像**，无实像面，像面在无穷远处或者明视距离处



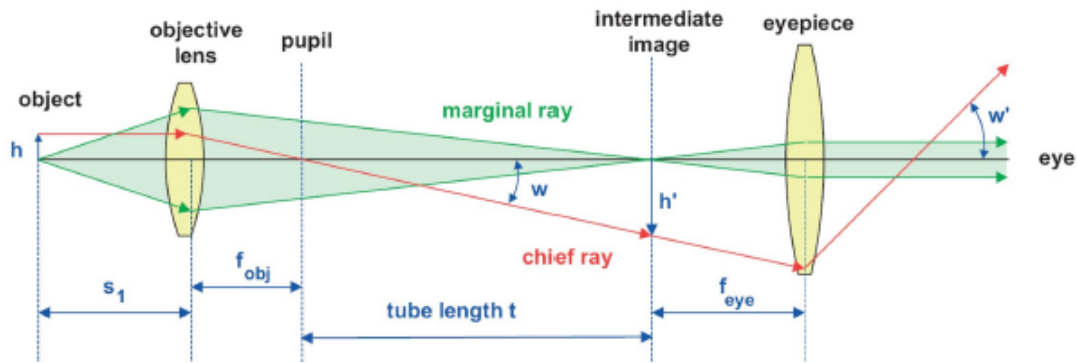
(lxt的ppt是真的丑...

#### 齐焦条件

**调换物镜之后，不需要再次调焦即可看到清晰的像**

- 不同物镜有 **相同的物像共轭距**
- 目镜的物方焦面（前焦面）不移动
- 目镜的物方焦面与物镜的像面重合  $x'_o = \Delta$

#### 光束限制



- **孔径光阑**：低倍物镜的镜框本身 / 多组物镜的最后一组镜框 /  $F'_o$  处单独设孔阑
- **出瞳**：在  $F'_e$  稍后处，在 **整个系统的像面** 上
- ★ **数值孔径**：

$$A = n \sin U$$

设出瞳大小为  $2a'$ ，显微镜的放大倍率为  $M$

$$a' = \frac{250A}{M}$$

- **视场光阑**：放置在经物镜成像的 **实像平面** 上
- 设视阑的直径为  $D_F$

$$D_F = 2y \times \beta_o$$

### 景深

- 显微镜本身的景深：
- $\varepsilon$  是人眼的极限分辨角

$$2dx = \frac{250n\varepsilon}{MA}$$

- 眼睛的调节：

$$r - p = -0.001n\bar{A}(\frac{250}{M})^2$$

- 显微镜系统的景深：

$$2dx + r - p$$

**显微镜的景深非常小**

**放大倍率 M 越大，景深越小；数值孔径 A 越大，景深越小**

### 分辨率

- **最小分辨距**

$$\sigma = \frac{0.61\lambda}{A}$$

- 分辨本领随着波长的减小而提高
- 分辨本领随着数值孔径增大而提高，通过浸油的办法增大  $n$ ，从而提高  $A$
- **有效放大率**

$$500A < M < 1000A$$

$$A_{max} = 1.5$$

$$M_{max} = 1500$$

### 显微物镜

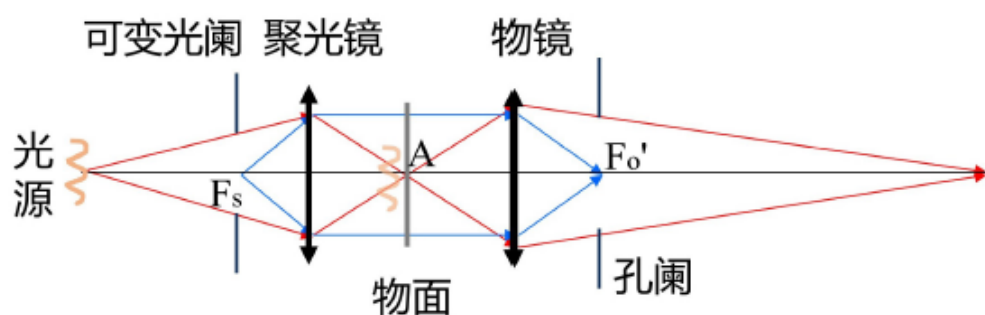
- 低倍物镜：双胶合 3 ~ 6 倍
- 中倍物镜：双双胶合 8 ~ 20 倍
- 高倍物镜：中倍物镜 + 前片（半球透镜：平面 + 齐明面）
- 阿贝物镜：浸油

## 显微目镜

- 镜目镜  $l'_p$   
出瞳与目镜最后一面的距离
- 目镜的工作距离  
目镜的物方焦面到目镜第一面的距离
- 近视眼用户使用，目镜向像方移动
- 短焦距，小孔径，大视场

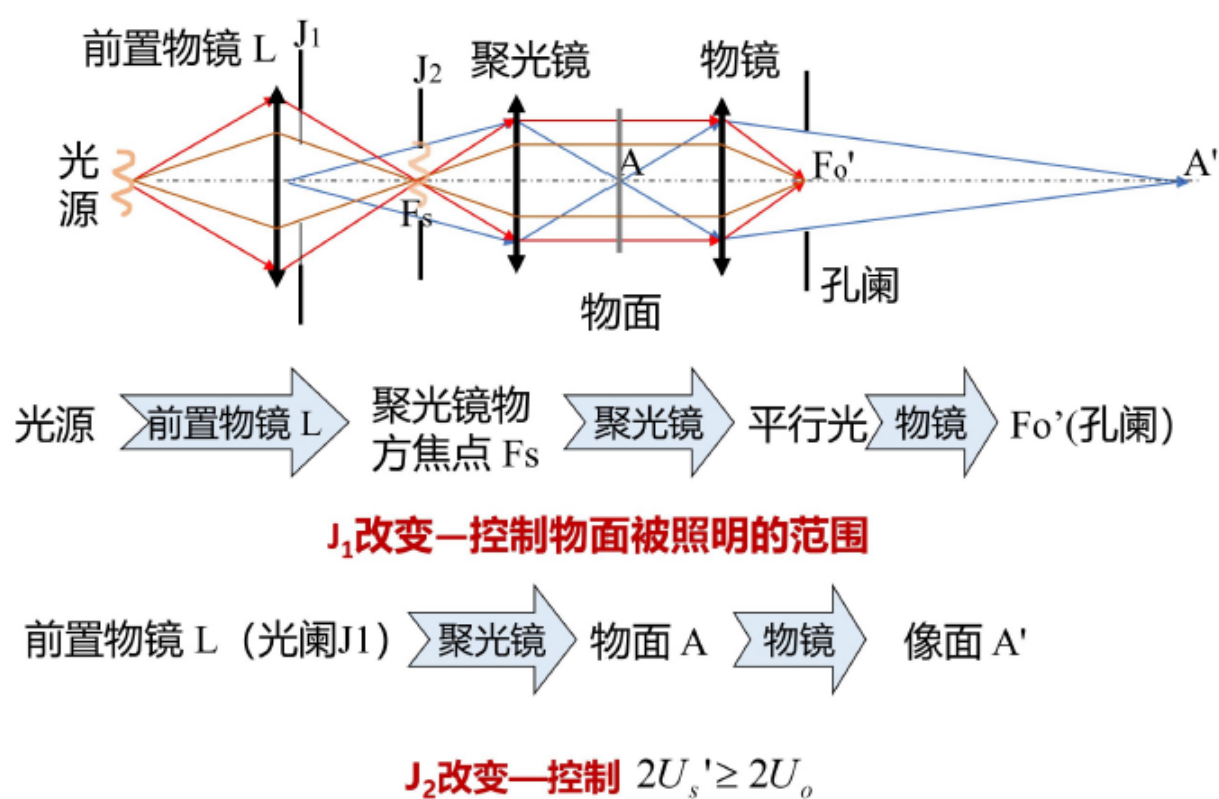
## ★ 照明系统

- 临界照明



### Key Points:

- 光阑和孔阑共轭
  - 光源和物面共轭
  - 缺点：物面照度会不均匀
  - ★ 窗对窗，瞳对瞳
- 柯拉照明



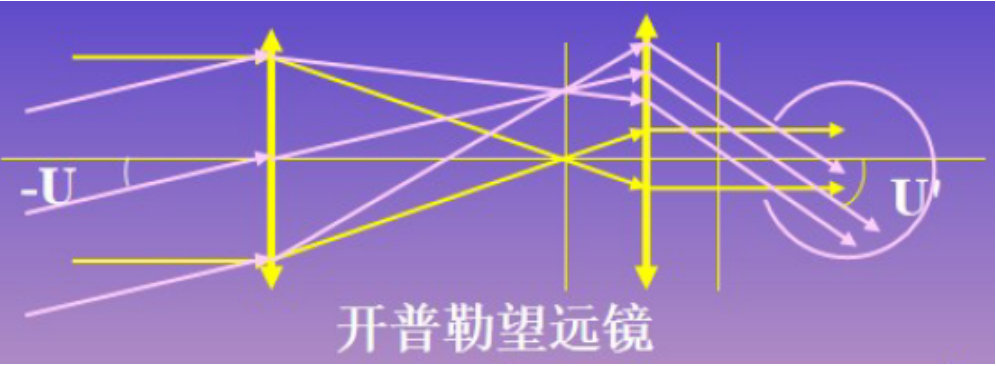
### Key Points:

- $J_1$  是照明系统的孔径光阑， $J_2$  是照明系统的视场光阑
- 光源与孔阑  $F_o'$  共轭，光源成像在聚光镜物方焦面上， $J_2$  防置在物方焦面上
- 光源孔阑  $J_1$  与物面 A 共轭，也与像面 A' 共轭
- ★ 窗对瞳，瞳对窗，照明系统的视场光阑与成像系统的孔径光阑共轭

## 4. 望远镜与转向系统

### 两种望远镜

- 开普勒望远镜

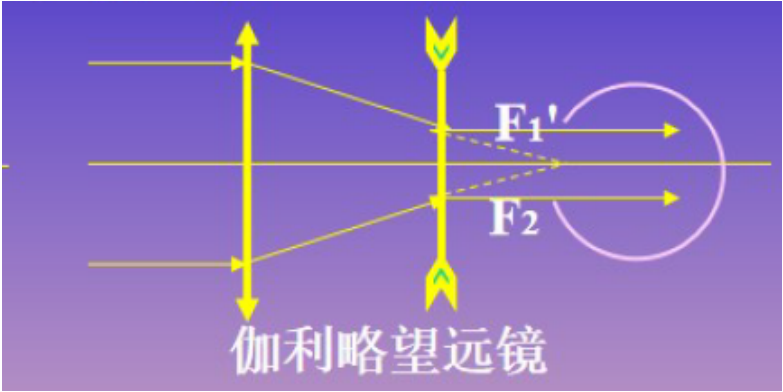


(太丑了...

Key Points:

- 正透镜 + 正透镜
- 有中间实像面
- 成倒像

- 伽利略望远镜



(太丑了...

Key Points:

- 正透镜 + 负透镜
- 无中间实像面
- 成正像

视觉放大率

$$\Gamma = \frac{\tan W'}{\tan W} = -\frac{f_1'}{f_2'} = \frac{D}{D'}$$

- $f_1'$  为物镜焦距,  $f_2'$  为目镜焦距
- $D$  为入瞳直径,  $D'$  为出瞳直径
- $W'$  为像方视场角,  $W$  为物方视场角

正常放大率:

$$\Gamma \geq 0.5D$$

主观亮度

$$\frac{\Phi_T}{\Phi_e} = k \frac{D^2}{D_e^2}$$

眼瞳直径  $D_e$ , 入瞳直径  $D$  , 出瞳直径  $D'$

- $D_e \geq D'$ : 进入望远镜的光通量全部进入眼睛
- $D_e < D'$ : 进入望远镜的光通量全部进入眼睛
- 观察 点光源 主观亮度增大, 如星星
- 观察 线/面光源 主观亮度降低, 如天空

光束限制

- 伽利略望远镜:
  - 孔径光阑、出瞳: 眼瞳
  - 渐晕光阑: 物镜

视场:

$$\tan W = \frac{D}{2\Gamma(f_1' + f_2' + \Gamma l_p')}$$

$D$  为物镜的直径,  $l_p'$  是出瞳距,  $\Gamma$  为望远镜的视觉放大率

- 开普勒望远镜:



- 孔径光阑：物镜
- 视场光阑：中间实像面上

视阑直径：

$$D_F = 2f_1' \cdot \tan W$$

望远物镜

焦距长，孔径中等，视场小

望远目镜

焦距短，孔径中等，视场大

- 目视调节调焦量：

$$\Delta l = \pm \frac{Nf_2'^2}{1000}$$

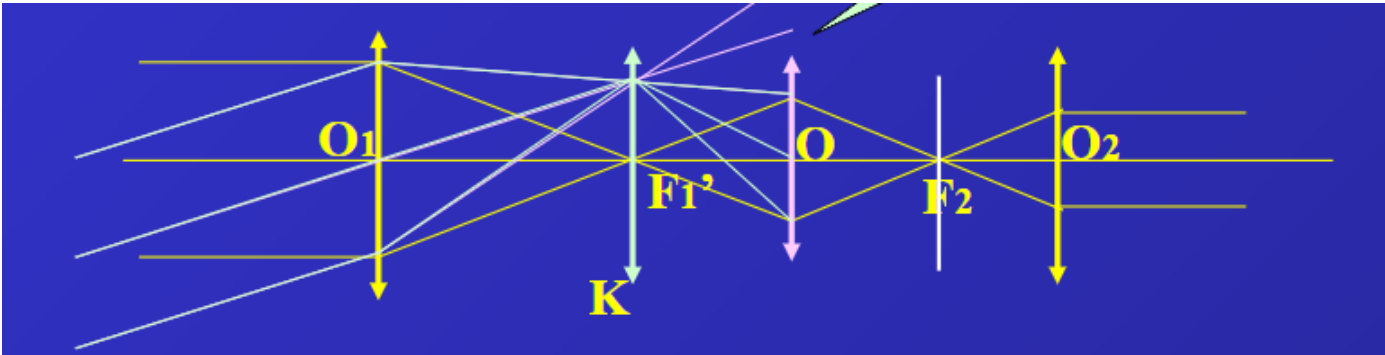
$f_2'^2$  为目镜的焦距，一般  $N$  取 5 左右

★ 转像系统

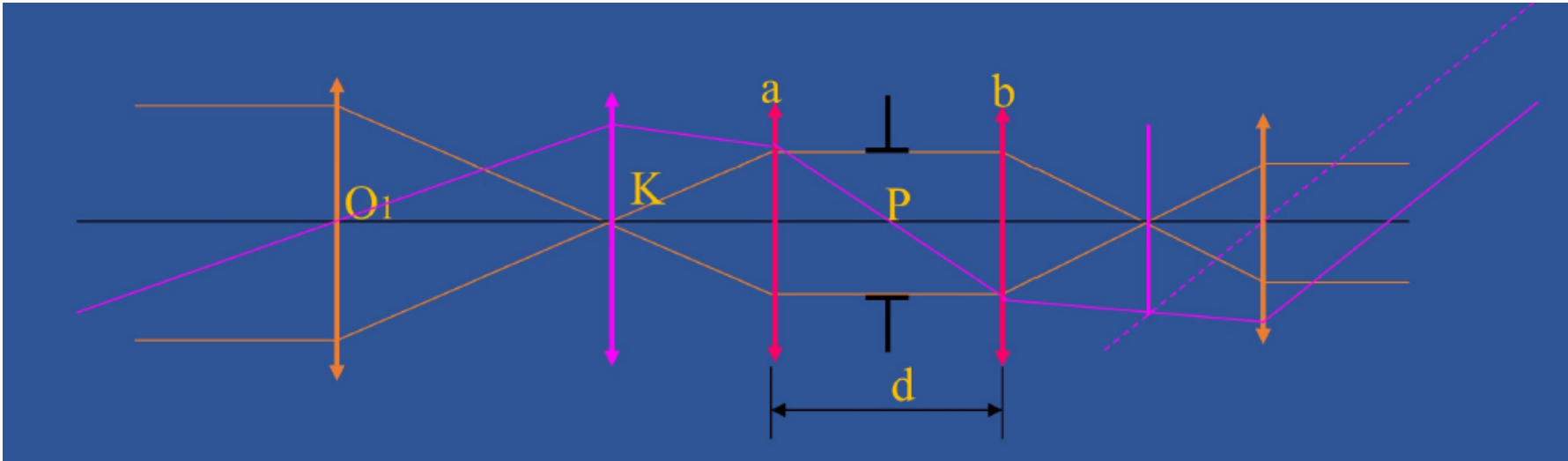
- 棱镜转像系统
  - 特点：筒长较短，结构紧凑
  - 偶数次反射构成转像系统

透镜转像系统

- 单组透镜转像系统



- 转像透镜： $\beta = 1$
- 筒长增加了  $4f_c$  (转像透镜焦距)
- 转像透镜的孔径是物镜孔径的两倍
- 场镜  $K$ ：使物镜与转像透镜共轭，不影响系统的光焦度
- 系统的 孔径光阑是转像透镜
- 分划板 放置在转像透镜的 实像平面 上
- 缺点：焦距小，视场大，不利于校正像差
- 双组透镜转像系统



- 转像透镜组
- 筒长增加了  $f_A' + d + f_B'$
- 场镜  $K$  和 孔径光阑  $P$  是共轭的
- 系统的 孔径光阑是转像透镜组中的孔阑  $P$
- 分划板 放置在转像透镜组的 实像平面 上
- 场镜  $K$  与分划板共轭 ( 两个像面 )



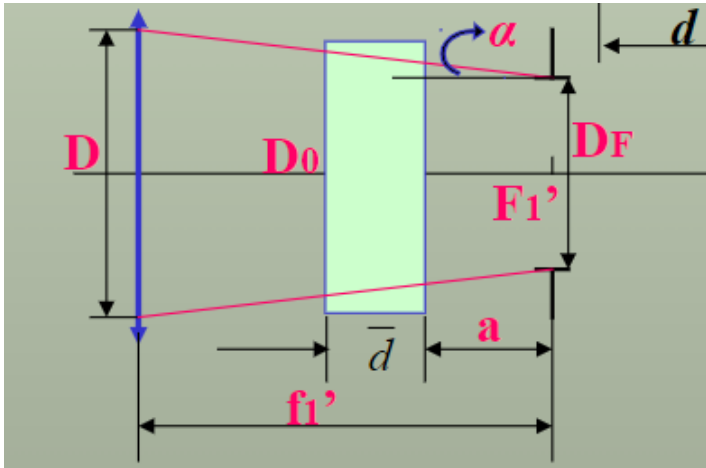
外形尺寸计算（希望别考）

棱镜 --> 平行平板 --> 等效空气平板

等效空气平板的厚度：

$$\bar{d} = d - \Delta l' = d - (1 - \frac{1}{n})d = \frac{d}{n} = \frac{KD_0}{n}$$

$K$  是棱镜的结构常数， $D_0$  是棱镜的通光口径， $D_F$  是出瞳直径， $D$  是物镜直径



由几何关系：

$$D_0 = D_F + 2(a + \bar{d})\tan\alpha$$
$$\tan\alpha = \frac{D - D_F}{2f_1'}$$

5. 摄影光学系统

三个参数

- $f'$ ：决定像的大小  $y'$ ，是画幅 对角线的一半
  - 远处： $y' = -f'\tan W$
  - 近处： $y' = \beta y = -\frac{f}{x}y$
  - 望远镜头：焦距长，视场角小，适合拍特写    广角镜头：焦距短，视场角大，适合拍全景
- $D/f'$ ：决定像面照度
  - $F$  数：相对孔径的倒数，又叫光圈数
  - 曝光量： $Q = E \cdot t$ ，与  $F$  数的平方成反比
- $2W$ ：决定摄影的视场角，由像面大小决定

光束限制

- 孔径光阑：特设，一般在镜头内部
- 视场光阑：CCD 感光面
- 渐晕光阑：透镜框

景深（物方容错范围）

$$\Delta_1 = p_1 - p = \frac{p^2 Z'}{f'^2/F - pZ'}$$
$$\Delta_1 = p - p_2 = \frac{p^2 Z'}{f'^2/F + pZ'}$$

- 物距越大，景深越大
- $F$  数越大，景深越大
- 焦距越小，景深越大

几何焦深（像方容错范围）

$$2\Delta' = 2Z'F(1 - \beta)$$

- $F$  数越大，像面的可调焦范围越大

分辨率

- 最小分辨距

$$\sigma = \varphi \cdot f' = \frac{1.22\lambda}{D/f'} = 1.22\lambda F$$
$$N = \frac{1}{\sigma} = 1475 \frac{D}{f'}$$

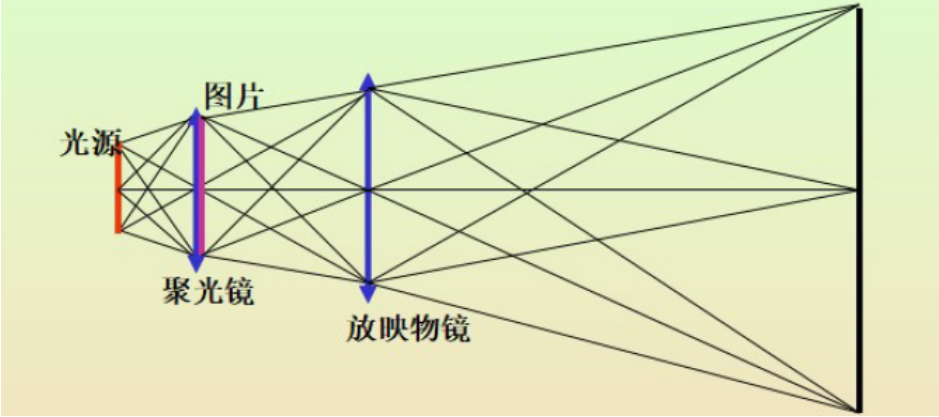
- 

6. 放映系统

照明类型

- 透射光照明
  - 电影放映仪、幻灯机
- 漫反射光照明
  - 反射投影仪

★ 共轭关系



- 照明系统的孔阑（聚光镜）和成像系统的视阑（图片）重合
- 光源与放映物镜共轭
- 与柯拉照明的共轭关系类似，窗对瞳，瞳对窗
- 照明系统的拉赫不变量 ≥ 成像系统的拉赫不变量