



# 第七章 典型光学系统

仪器科学与光电工程学院光电工程系

北京航空航天大学

冯丽爽 博士



# 目录 Contents

- 一、眼睛及其光学系统
- 二、放大镜
- 三、显微镜系统
- 四、望远镜系统
- 五、目镜
- 六、摄影系统
- 七、投影系统



## 第四节 望远镜系统



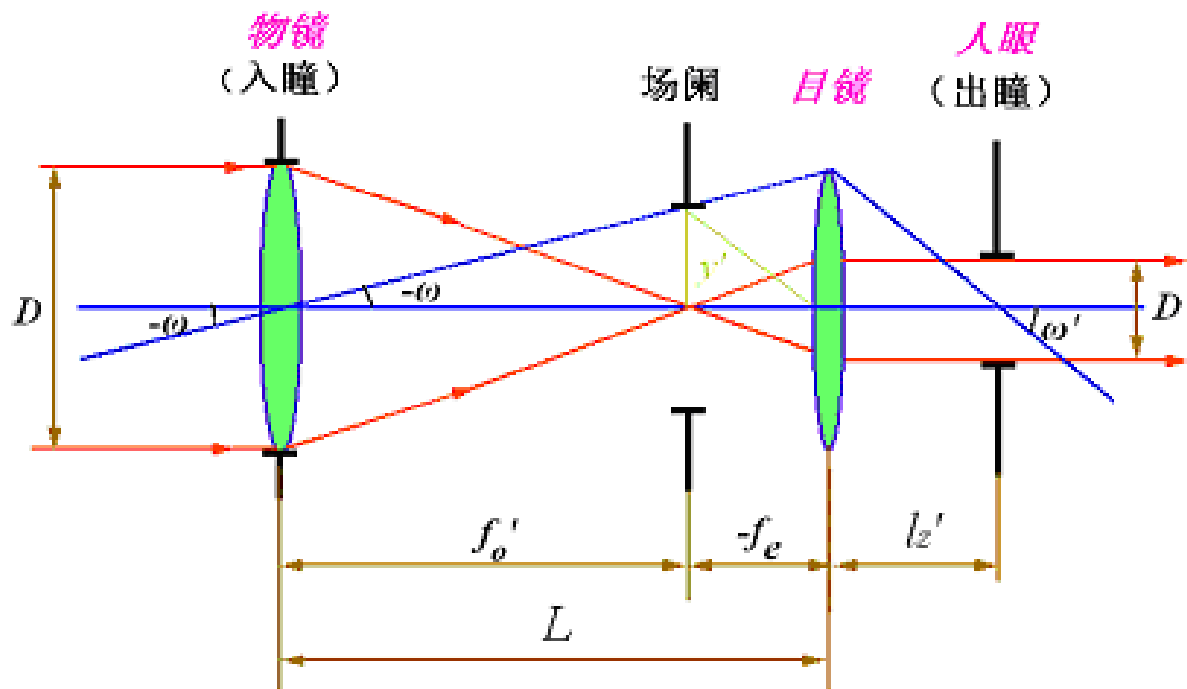
望远镜：

放大远处物体的张角，使人  
眼能看清角距更小的细节

## 第四节 望远镜系统

### 一、一般特性

- 望远镜的组成：由物镜和目镜组成。
- 物镜的像方焦点与目镜的物方焦点重合，光学间隙  $\Delta = 0$ 。



开普勒望远镜

## 第四节 望远镜系统

### 一、一般特性

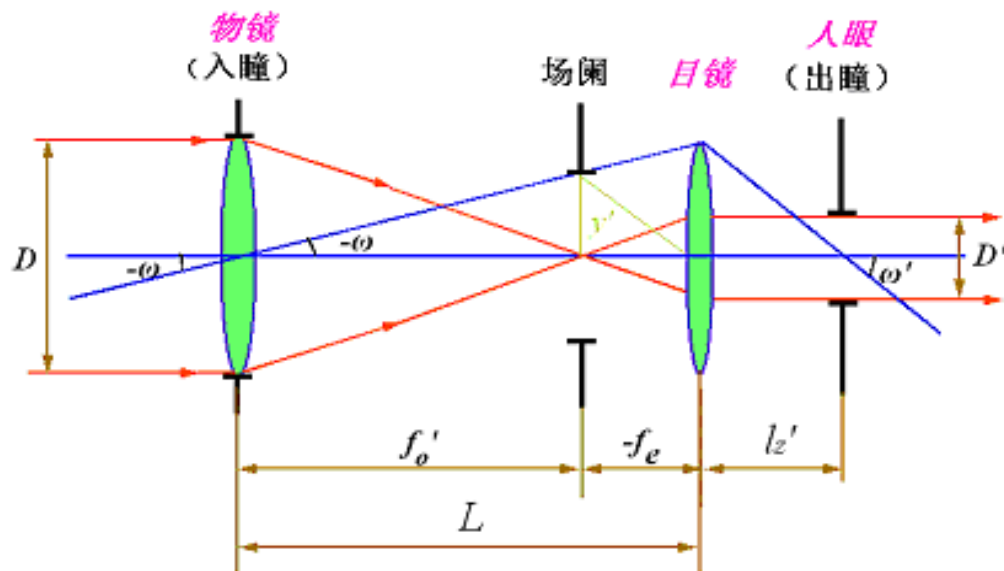
$$\beta = -f_e' / f_o'$$

$$\gamma = 1/\beta = -f_o' / f_e'$$

$$\alpha = \beta^2 = \left(f_e' / f_o'\right)^2$$

视觉放大率：

$$\Gamma = \frac{\tan \omega'}{\tan \omega} = \gamma = -\frac{f_o'}{f_e'} = -\frac{D}{D'} = \frac{1}{\beta}$$



开普勒望远镜 (P33 例3)

视觉放大率仅取决于结构参数。增大物镜焦距或减小目镜焦距。

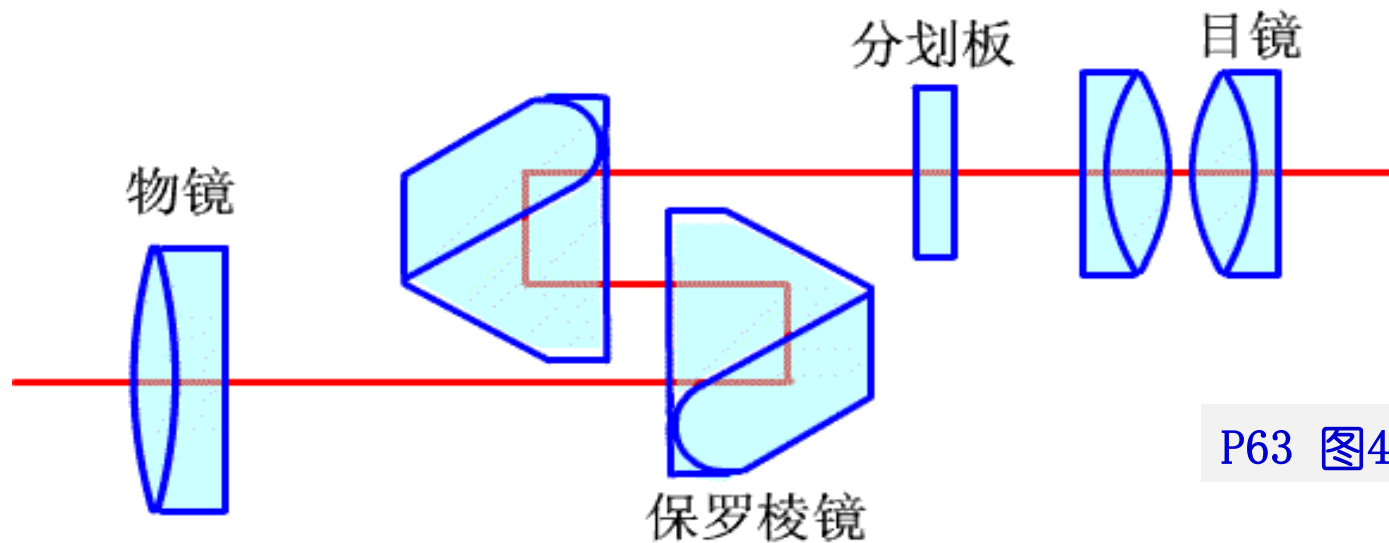
目镜焦距大于6mm，故手持望远镜一般不超过12倍。



## 第四节 望远镜系统

### 开普勒望远镜

- ★ 两个正光焦度的物镜和目镜组成
- ★ 成倒像，需加转像系统。
- ★ 物镜后焦平面上成实像，可设置分划板，用作瞄准或测量。



P63 图4-15

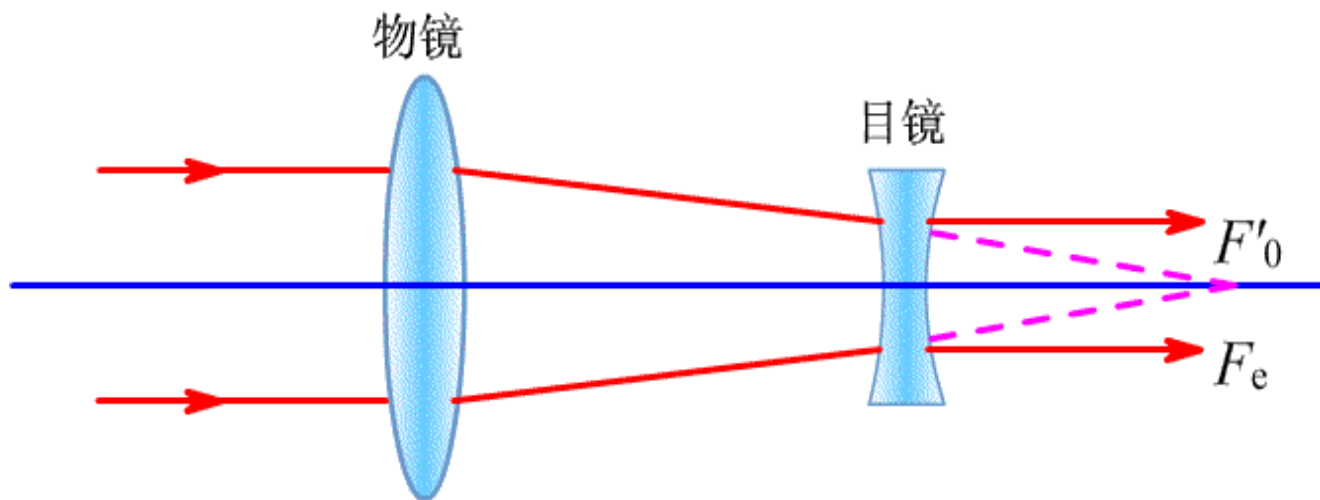
军用望远镜棱镜转像系统

## 第四节 望远镜系统

### 伽利略望远镜

- ★ 由正光焦度的物镜和负光焦度目镜组成。
- ★ 成正立像，不需加转像系统。
- ★ 无法安装分划板，只能观察。
- ★ 视觉放大率大于零。

$$\Gamma = -\frac{f'_e}{f'_o} > 0$$



伽利略望远镜成像原理图



## 第四节 望远镜系统

### 二、望远系统的分辨率及放大率

#### 1、分辨率

艾里斑半径

$$r_0 = 1.22 f \frac{\lambda}{2a}$$

P397 公式 (13-56)

角半径

$$\theta_0 = \frac{r_0}{f} = \frac{1.22 \lambda}{D}$$

P397 公式 (13-57)

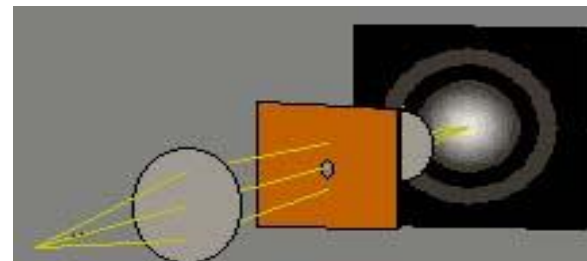
$\lambda = 0.555 \mu\text{m}$ , 由瑞利判据得到的极限分辨角分别为:

$$\varphi = \frac{1.22 \lambda}{D} = \frac{1.22 \times 0.000555 \text{mm}}{D} \times 206265'' \approx \frac{140''}{D}$$

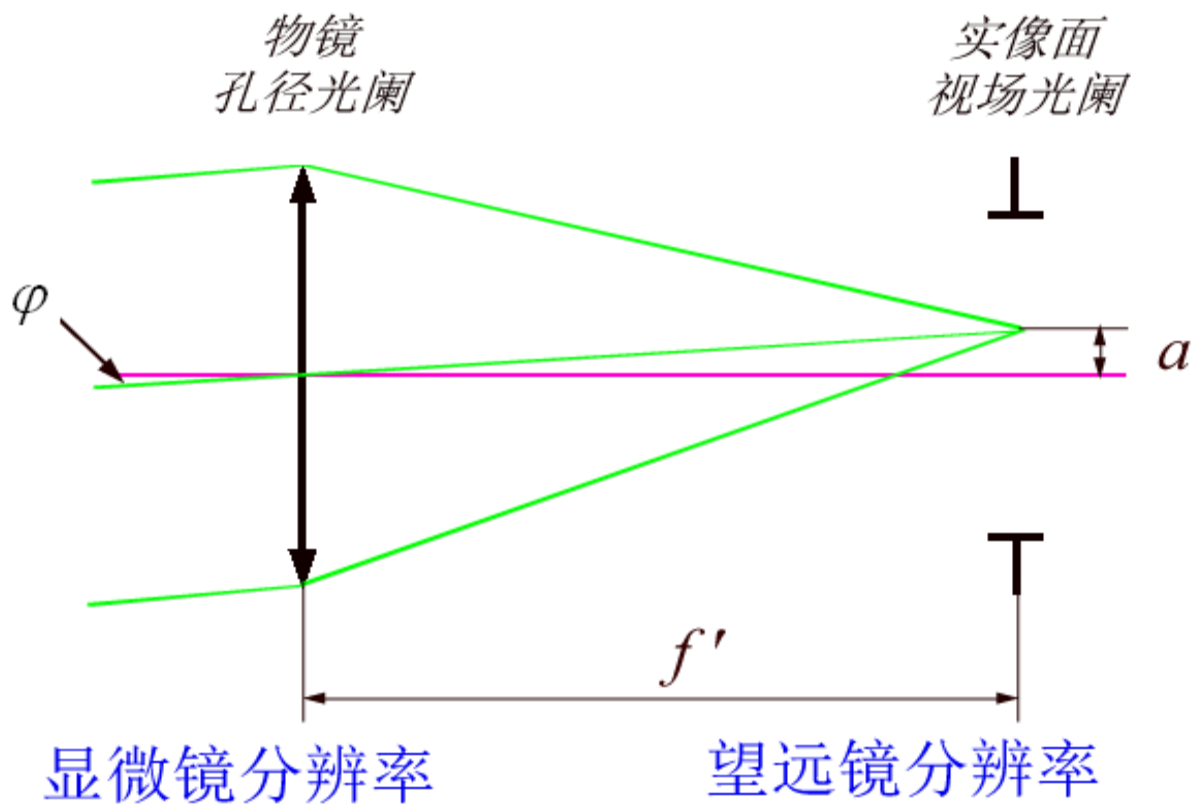
道威判据

$$\varphi = \frac{a}{f'_0} = \frac{120''}{D}$$

入射光瞳直径越大, 极限分辨率越高。







$$a = \frac{0.61\lambda}{n' \sin u'}$$

$$\sigma = \frac{a}{\beta} = \frac{0.61\lambda}{NA}$$

$$\varphi = \frac{a}{f_o'} = \frac{0.61\lambda}{n' \sin u' f_o'}$$

$$\varphi = 140'' / D$$



## 第四节 望远镜系统

### 二、望远系统的分辨率及放大率

#### 2、放大率

有效放大，与人眼的视觉分辨率为60''相匹配

$$\varphi \Gamma = 60''$$

$$\Gamma = \frac{60''}{\varphi} \approx \frac{D / mm}{2.3}$$

有效放大率（正常放大率）

极限分辨角

$$\Gamma = D / mm$$

工作放大率

以上是对观察仪器。瞄准仪器？ 与瞄准精度有关。



## 第四节 望远镜系统

### 二、望远系统的分辨率及放大率

#### 1、望远系统的分辨率：

$$\varphi = \frac{a}{f_o'} = \frac{0.61\lambda}{n'\sin u' f_o'}$$

按瑞利判断： $\varphi = 140''/D$

按道威判断： $\varphi = 120''/D$

即入射光瞳直径 $D$ 越大，极限分辨率越高。

#### 2、视觉放大率和分辨率的关系

$$\varphi \Gamma = 60'' \quad \Gamma = 60''/\varphi = D/2.3$$

#### 3、有效放大率：满足分辨要求的最小视觉放大率

#### 4、工作放大率： $\Gamma = D$

#### 5、瞄准误差 $\Delta\varphi$ ：（对瞄准仪器的精度要求）

使用压线瞄准，则有  $\Delta\varphi = 60''/\Gamma$

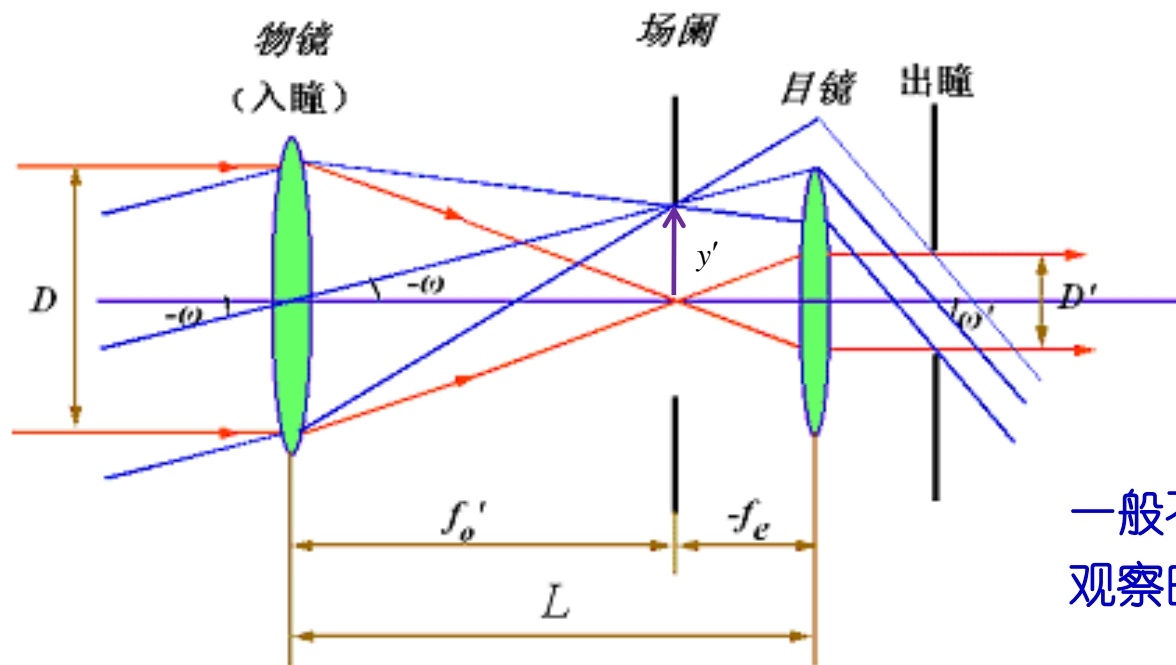
使用双线或叉线瞄准，则有  $\Delta\varphi = 10''/\Gamma$

## 第四节 望远镜系统

### 三、望远镜的视场

#### 1、开普勒望远系统

- 物镜框是孔径光阑，也是入瞳；出瞳在目镜以外，与人眼重合；
- 目镜框是渐晕光阑，一般要求有50%的渐晕；
- 物镜的后焦平面放分划板，视场光阑。



$$\tan \omega = y' / f_o'$$

$y'$  - 分划板半径

一般不超过 $15^\circ$ 。

观察时，眼瞳必须位于出瞳处。

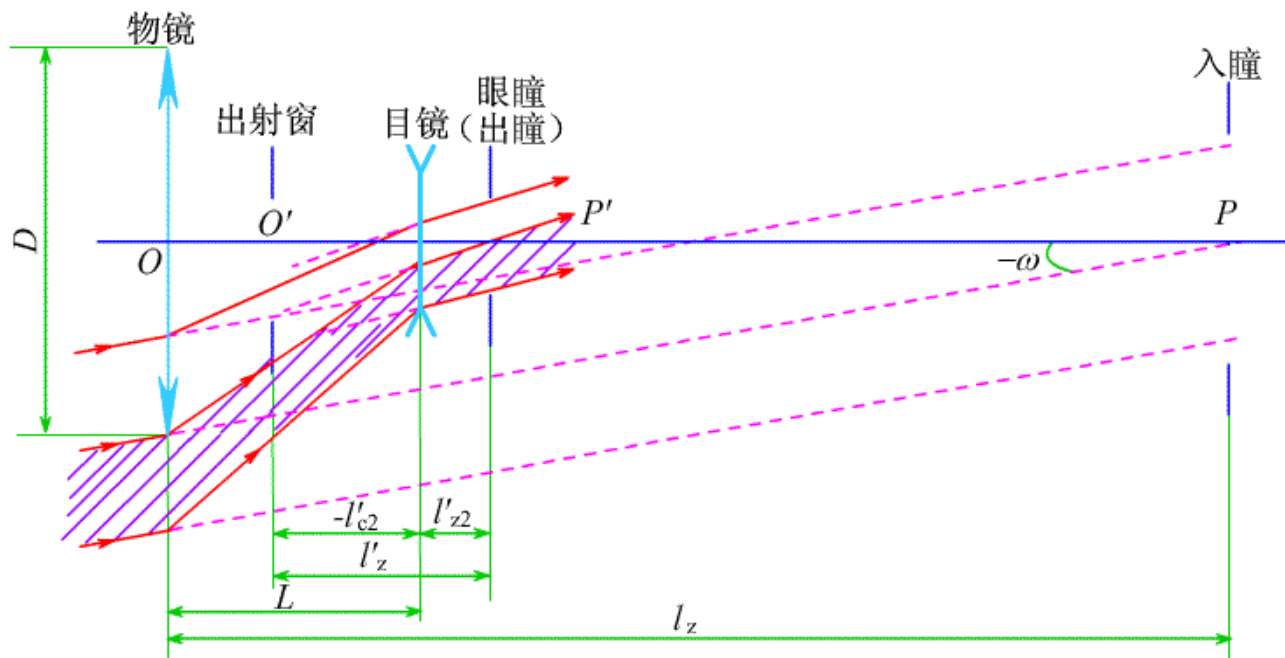


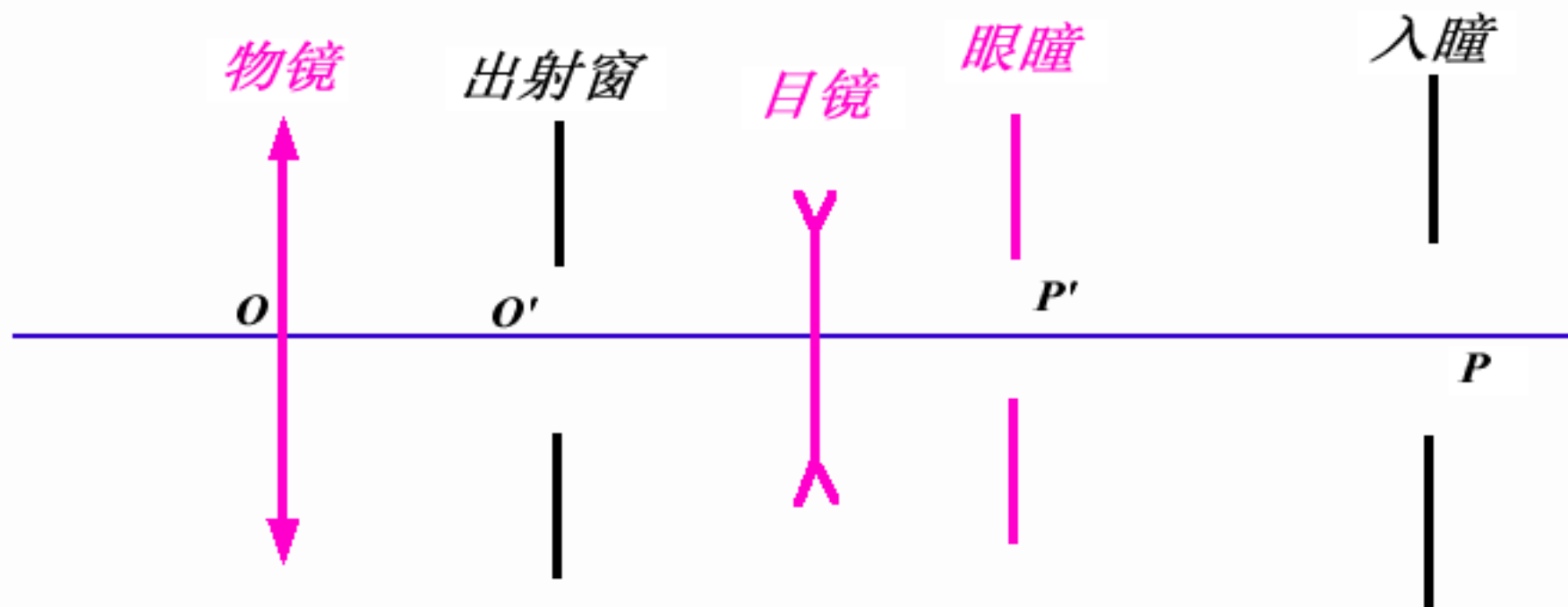
## 第四节 望远镜系统

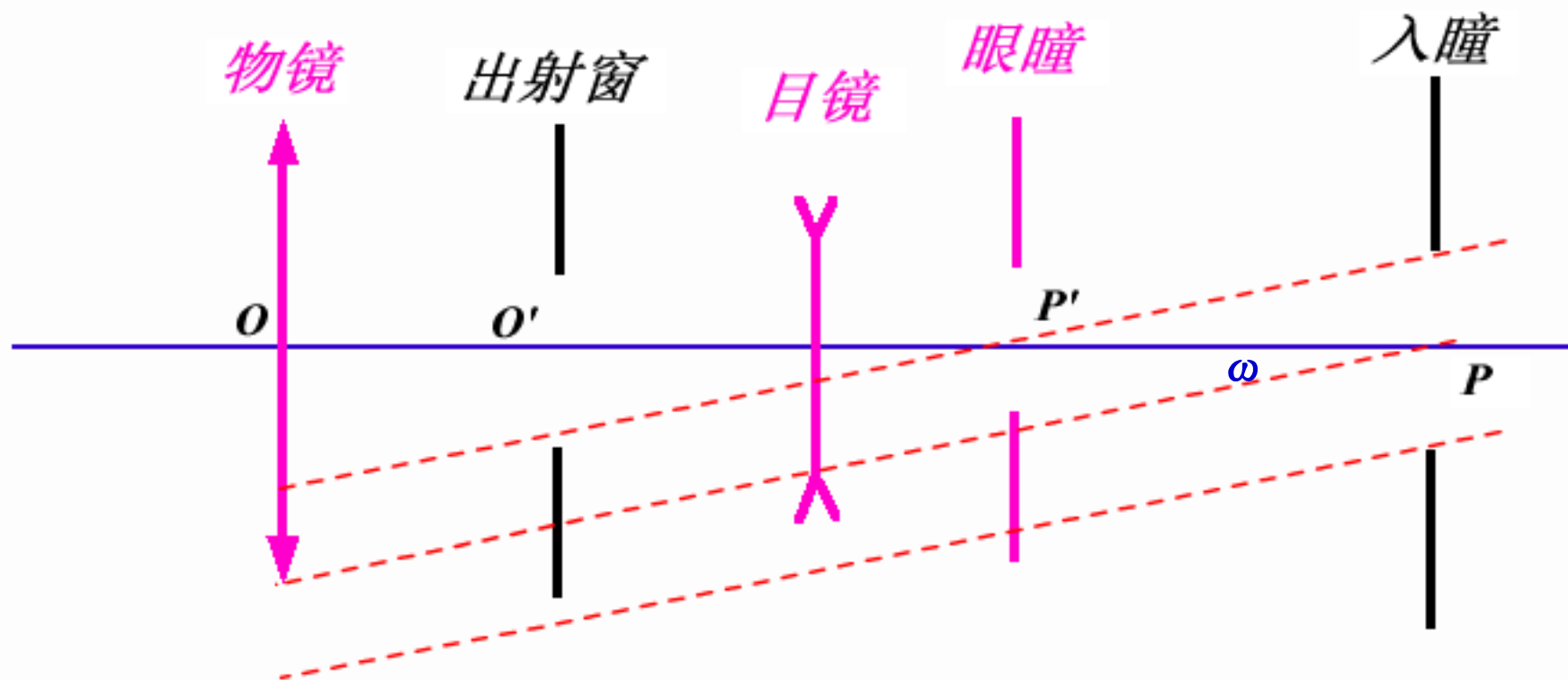
### 三、望远镜的视场

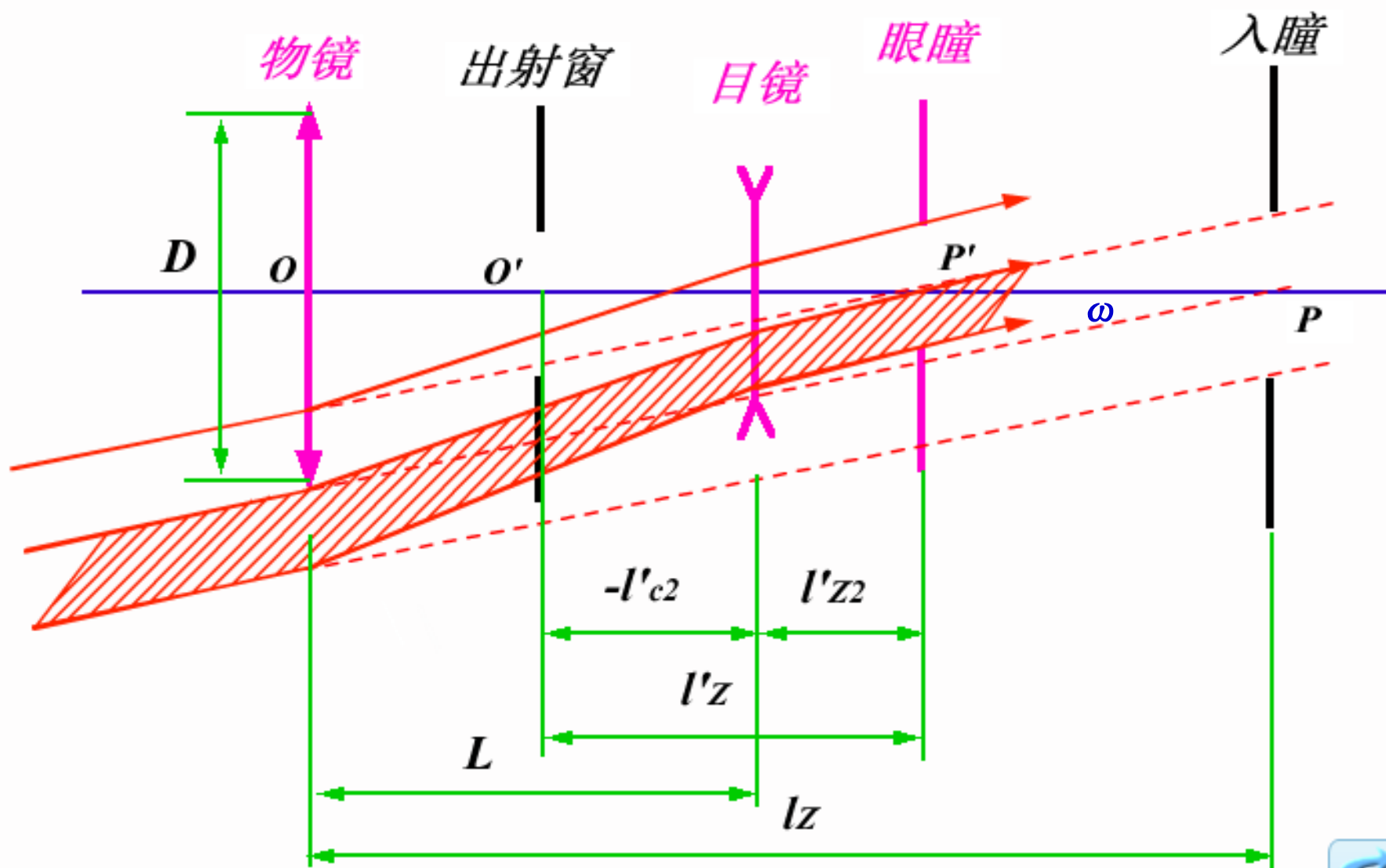
#### 2、伽利略望远系统

- 孔径光阑：眼瞳，也是出瞳；
- 视场光阑：物镜框，也是入射窗；
- 视场光阑与物面不重合，对大视场有渐晕现象













## 第四节 望远镜系统

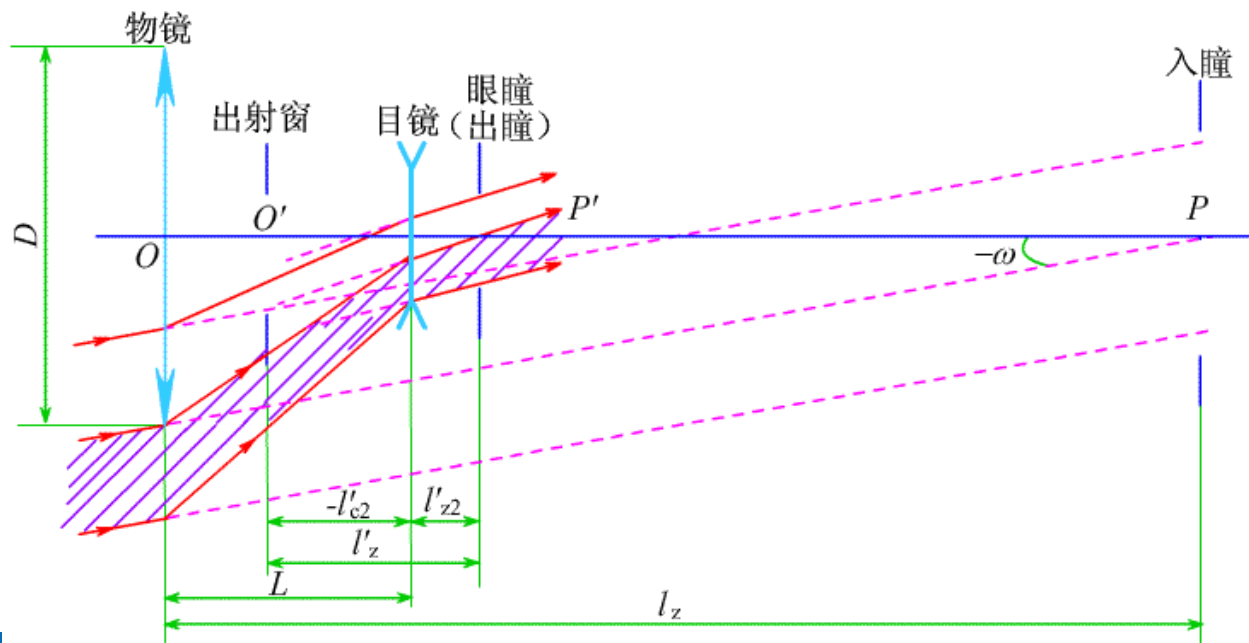
★ 当视场为50%渐晕时 ( $K=50\%$ )，其视场角为

$$\tan \omega = \frac{D}{2l_z} = \frac{D}{2\Gamma(L + \Gamma l'_{z2})}$$

$$L = f'_0 + f'_e$$

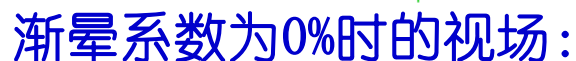
$$l_z = \frac{l'_z}{\alpha} = \frac{l'_z}{\beta^2} = \Gamma^2 l'_z = \Gamma^2 (-l'_{c2} + l'_{z2})$$

$$l'_{c2} \quad ? \quad L$$



物像共轭点  
高斯公式

### 渐晕系数 $\mu$



$$\tan \omega_{max} = \frac{D + D_p}{2\Gamma(L + \Gamma l_{z2}')}.$$

伽利略望远镜的视觉放大率一般不大，仅用于剧场、体育场使用。

**注意：开普勒望远镜成倒像，需加转像装置，如转像棱镜；**

伽利略望远镜成正像，但无法安装分划板，应用较少。



# 目 录 Contents

一、眼睛及其光学系统

二、放大镜

三、显微镜系统

四、望远镜系统

五、目镜

六、摄影系统

七、投影系统



## 第五节 目镜

$$\Gamma = \frac{\tan \omega'}{\tan \omega} = -\frac{(250\text{mm})\Delta}{f_0' f_e'} = \beta \Gamma_e$$

$$\Gamma = \frac{tg \omega'}{tg \omega} = \gamma = -\frac{f_0'}{f_e'} = -\frac{D}{D'} = \frac{1}{\beta}$$

### 一、作用

类似于放大镜，把物镜所成的像放大在人眼的远点或明视距离处。

### 二、主要光学参数

小孔径、大视场、短焦距、光阑在外的光学系统。

其轴上像差不大，结构复杂时，较易校正像差。

(1) 焦距  $f_e'$  : 15~30mm

(2) 视场  $2\omega'$  : 一般在 $40^\circ \sim 50^\circ$ ，广角目镜达 $60^\circ \sim 80^\circ$ 。  $tg \omega' = \Gamma tg \omega$

(3) 镜目距（出瞳距离） $P'$  : 表示出瞳到目镜后表面的距离。

相对镜目距（相对出瞳距离） $P' / f_e'$  : 镜目距与目镜焦距之比。

(4) 工作距离  $l_F$  : 目镜第一面的顶点到其物方焦平面的距离。

一般工作距应大于视度调节的深度（适应近视、远视要求），视度调节范围在 $\pm 5D$ 。



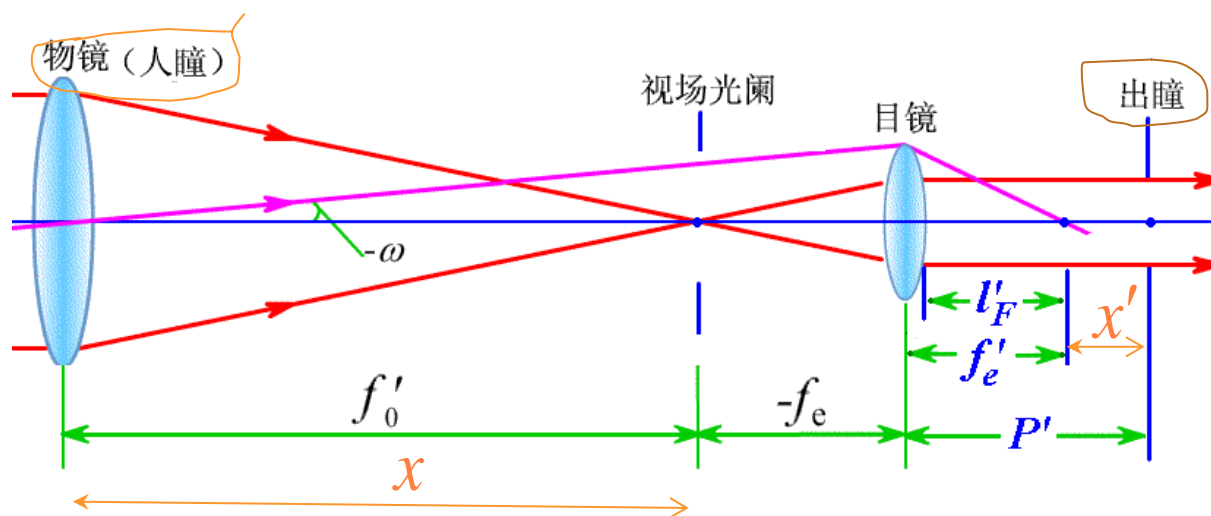
## 第五节 目镜

镜目距：一般不得小于6mm

$$(P' - l'_F) = f_e'^2 / f_o' = f_e' / \Gamma$$

$$P' = l'_F + f_e' / \Gamma$$

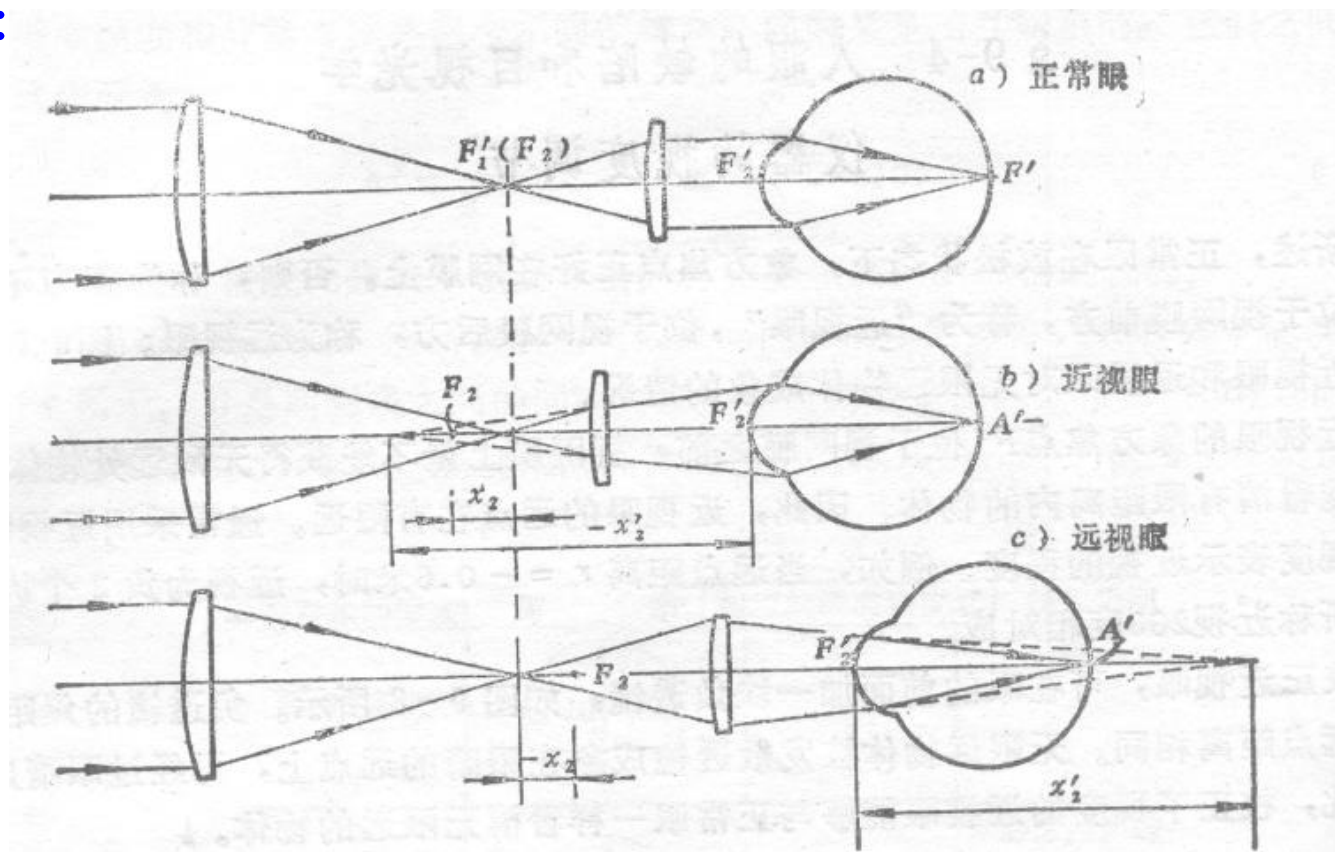
牛顿公式





## 第五节 目镜

★工作距离：



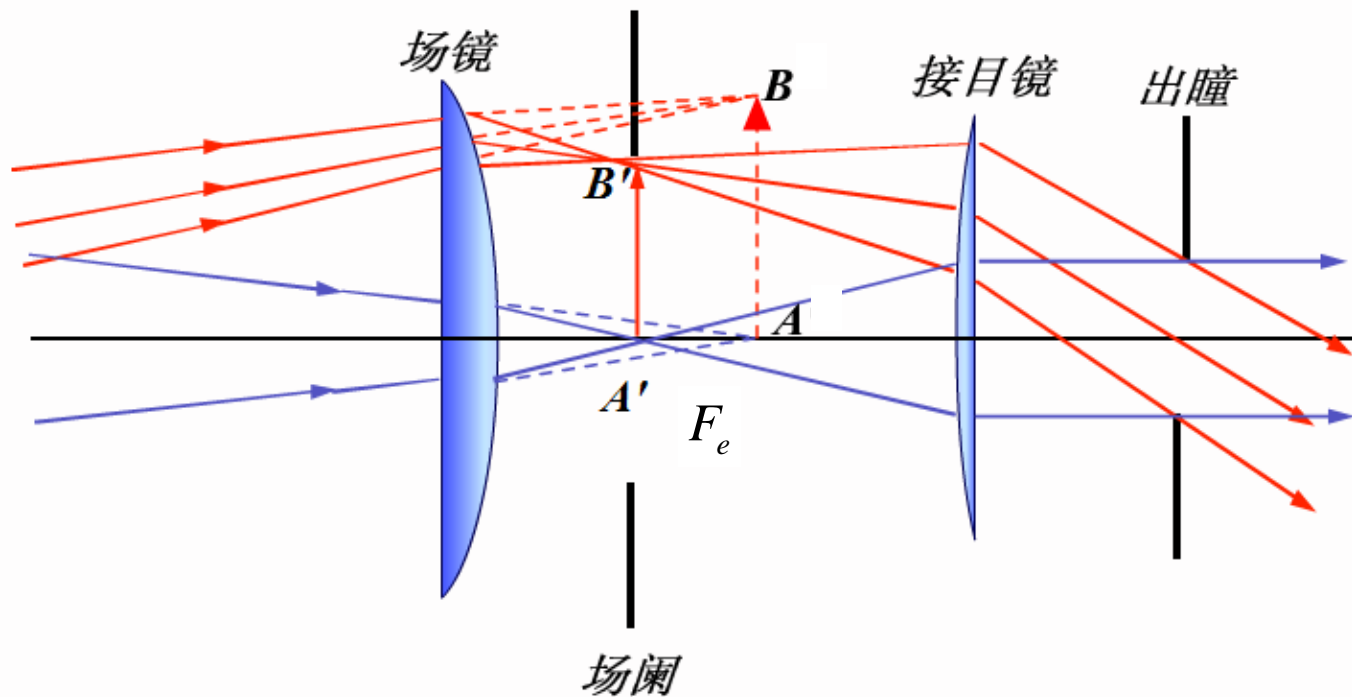
视度调节移动量：

$$x = \frac{\pm 5 f_e'^2}{1000 \text{mm}}$$

很重要

## 第五节 目镜

### 三、常用的目镜



$$2\omega' = 40^\circ \sim 50^\circ, \quad P'/f' \approx 1/3, \quad f' \geq 15\text{mm}$$

图7-21 惠更斯目镜

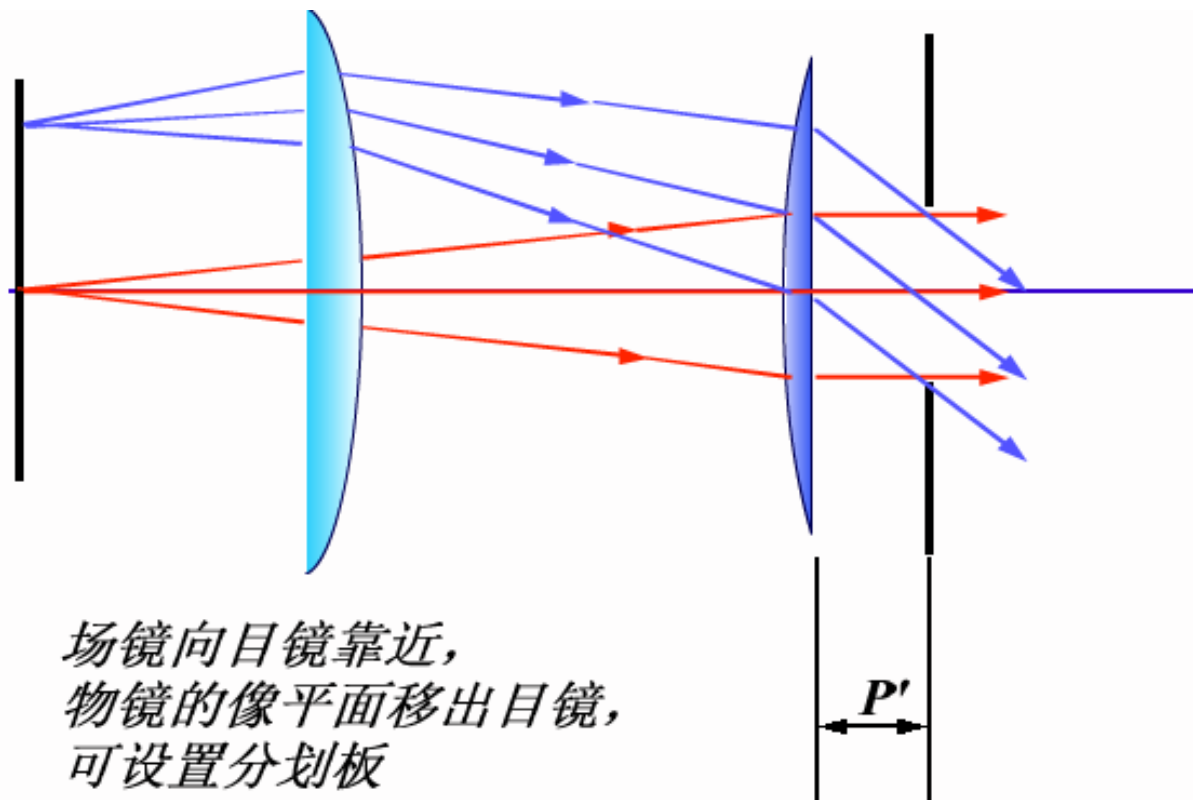




## 第五节 目镜

### 三、常用的目镜

- ☒ 冉斯登目镜
- ☐ 无畸变目镜
- ☐ 凯涅尔目镜
- ☐ 长出瞳目镜

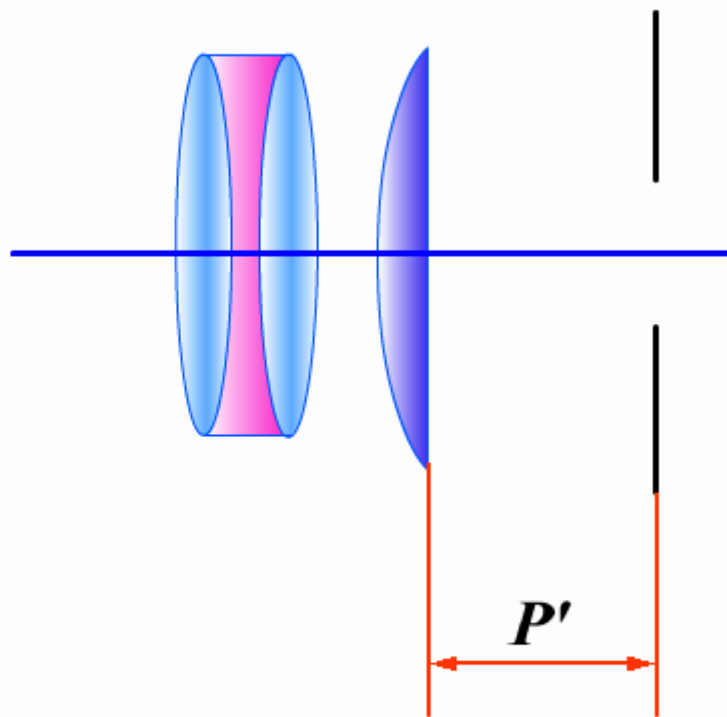


$$2\omega' = 30^\circ \sim 40^\circ, \quad P'/f' \approx 1/3$$



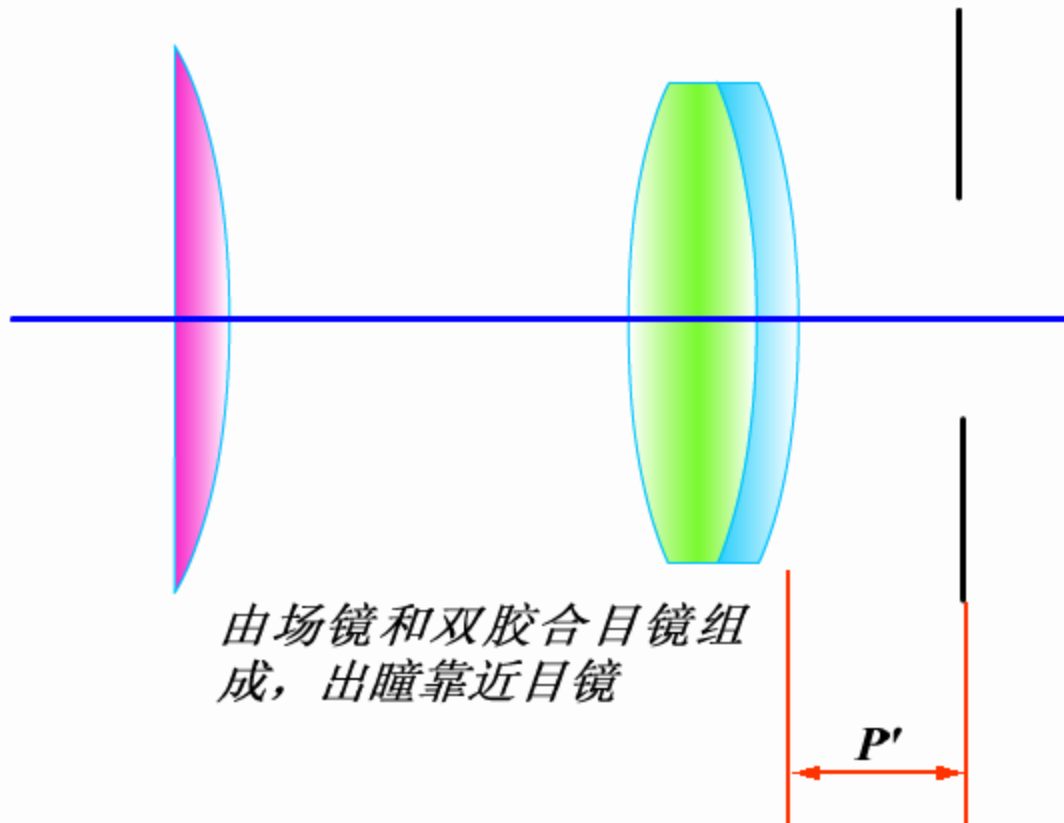
畸变较小,适用于测量仪器

- ☐ 冉斯登目镜
- ☒ 无畸变目镜
- ☐ 凯涅尔目镜
- ☐ 长出瞳目镜



$2\omega' = 48^\circ$ ,  $P'/f' \approx 0.8$ ,  
40°视场相对畸变为3~4%。

- ☐ 冉斯登目镜
- ☐ 无畸变目镜
- ☒ 凯涅尔目镜
- ☐ 长出瞳目镜

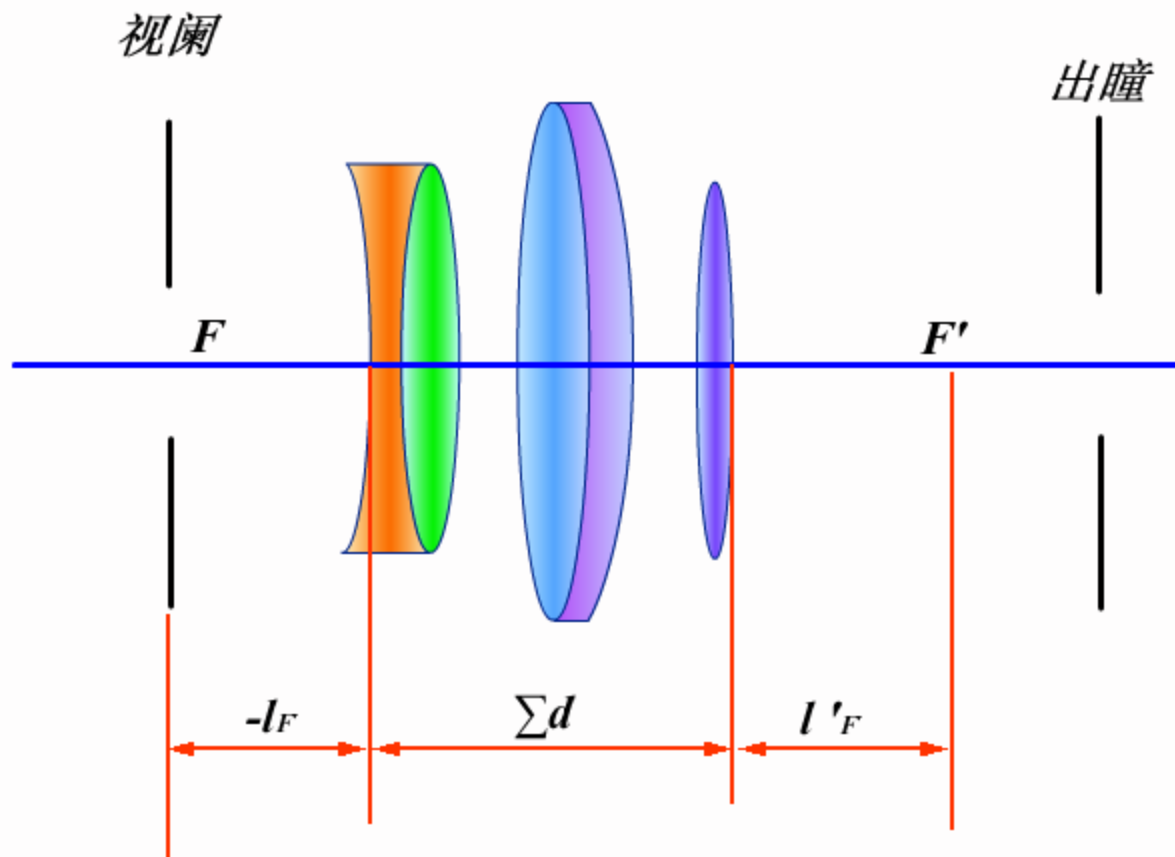


由场镜和双胶合目镜组成，出瞳靠近目镜

$2\omega' = 45^\circ \sim 50^\circ$ ,  $P'/f' \approx 1/2$   
 $l_F \approx 0.3f'$ ,  $l'_F \approx 0.4f'$ ,  
目镜总长度近似为  $1.25f'$ 。



- ☐ 冉斯登目镜
- ☐ 无畸变目镜
- ☐ 凯涅尔目镜
- ☒ 长出瞳目镜



$2\omega' = 50^\circ$ , 截距  $l_F \approx 0.3f'$ ,  $l'_F \approx f'$

具有较长的出瞳距





## 习题讲解

开普勒望远镜的筒长225mm，视觉放大率  $\Gamma = -8\times$ ，视场角  $2\omega = 6^\circ$ ，出瞳  $D' = 5\text{mm}$ ，系统无渐晕，求：

- (1) 物镜和目镜的焦距；
- (2) 目镜的通光孔径和出瞳距；
- (3) 在物镜焦面处放一场镜，其焦距  $f' = 75\text{mm}$ ，求新的出瞳距和目镜的通光孔径；
- (4) 目镜的视度调节在  $\pm 4\text{D}$ （屈光度），求目镜的移动量。



## 习题讲解

【解】：

$$f_o' + f_e' = 225, \Gamma = -8^\times, 2\omega = 6^\circ, D' = 5\text{mm}, K = 1$$

$$(1) \quad \begin{cases} f_o' + f_e' = 225 \\ \Gamma = -\frac{f_o'}{f_e'} = -8 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} f_o' = 200\text{mm} \\ f_e' = 25\text{mm} \end{cases}$$

$$(2) \quad D' = 5, D = \Gamma D' = 40$$

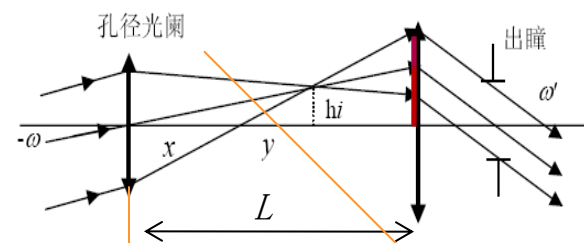
对目镜， $D, D'$ 共轭；物镜框是孔径光阑和入

$$\therefore \beta = \frac{D'}{D} = \frac{l_z'}{L} \quad \left[ \left( \frac{1}{l_z'} - \frac{1}{-225} \right) = \frac{1}{25} \right]$$

$$\therefore \text{出瞳距 } l_z' = \frac{225}{8} = 28.125\text{mm}$$

$$\frac{A}{2} = h_{\text{主}} + \frac{D/2}{\Gamma} = L \cdot \tan \omega + \frac{D/2}{\Gamma} = 225 \times \tan 3^\circ + \frac{20}{8} = 14.3$$

$$\therefore \text{目镜的通光孔径 } A = 28.6\text{mm}$$



$$\Gamma = \frac{\tan \omega'}{\tan \omega} = \gamma = -\frac{f_o'}{f_e'}$$

(3) 方法一:

对物镜

$$l_1 = -200, f' = 75$$

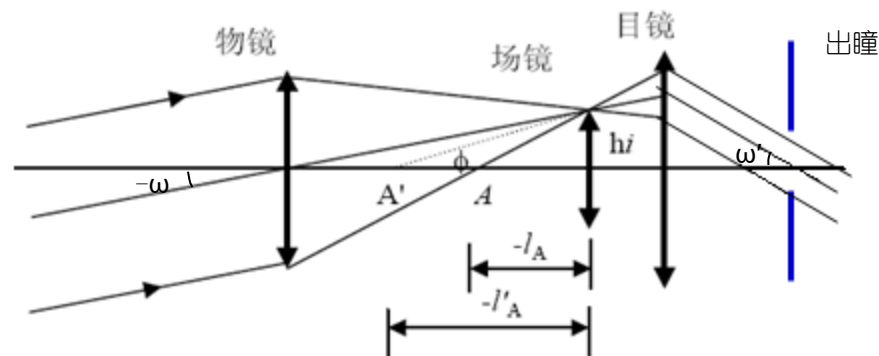
$$\therefore \frac{1}{l_1'} - \frac{1}{l_1} = \frac{1}{f'}$$

$$\therefore l_1' = 120$$

对目镜

$$l_2 = l_1' - f_e' = 120 - 25 = 95$$

$$\therefore \text{新的出瞳距 } l_2' = 19.8mm$$



无渐晕，打在出瞳上边缘的光经过目镜边

$$\frac{A}{2} = h_z + \frac{D'}{2} = l_z' \cdot \tan \omega' + \frac{D'}{2} = l_z' \cdot \tan \omega \cdot \Gamma + \frac{5}{2} = 19.8 \cdot \tan 3.8^\circ + \frac{5}{2} = 10.8$$

$$\therefore \text{目镜通光孔径 } A = 21.6mm$$



方法二：（最下边光束成像及相似三角形求解）

$$y' = 200 \cdot \tan 3^\circ = 10.48$$

对场镜：

$$\frac{20}{10.48} = \frac{200 - (-l)}{(-l)}$$

$$\therefore -l = 68.77$$

$$\therefore \frac{1}{l'} - \frac{1}{l} = \frac{1}{f_{\text{场}}'}$$

$$\therefore \frac{1}{l'} = \frac{1}{l} + \frac{1}{f_{\text{场}}'} = \frac{1}{75} - \frac{1}{68.77}$$

$$\therefore l' = -827.89$$

$$\frac{y'}{827.89} = \frac{A/2}{827.89 + 25}$$

$$\therefore \text{目镜通光孔径 } A = 21.6\text{mm}$$



### 方法三（利用光线追迹求高度）：

场镜对下端光线的偏折：

$$\tan \omega_1 = -\left( \frac{y' + \frac{D}{2}}{f_o'} \right) = -\left( \frac{f_o' \cdot \tan \omega + \frac{D}{2}}{f_o'} \right) = -\frac{30.48}{200}$$

$$\tan \omega_2 = \tan \omega_1 + y' \varphi = -\mathbf{0.0127}$$

$$\frac{A}{2} = y' - f_e' \tan \omega_2 = \mathbf{10.8}$$

∴目镜通光孔径  $A = \mathbf{21.6mm}$

### (4) 目镜的移动量：

$$x = \frac{\pm 4 f_e'^2}{1000} = \frac{\pm 4 \times 25^2}{1000} = \pm \mathbf{2.5mm}$$





Homework:

No. 6, 7, 14, 15

On page 169





## 1、应用光学的基本定律与成像概念

**主要内容：**掌握应用光学的基本定律，成像的基本概念和完善成像条件，光路计算与近轴光学系统，球面光学成像系统。

**基本要求：**重点是应用光学的四个基本定律，近轴光线的光路计算及球面光学成像系统的物像位置关系。



## 2、理想光学系统

**主要内容：** 掌握理想光学系统与共线成像理论，理想光学系统的基点与基面，理想光学系统的物像关系，理想光学系统的放大率，理想光学系统的组合，透镜。

**基本要求：** 重点是实际光学系统的基点位置和焦距计算，各类透镜的光学性质，图解法求像、解析法求像，理想光学系统的组合及放大率。



### 3、平面与平面系统

**主要内容：**掌握平面镜、平行平板、反射棱镜、折射棱镜与光楔的成像特性。了解光学材料的光学特性。

**基本要求：**重点是平面镜、平行平板、反射棱镜的成像特性。



## 4、光学系统的光束限制

**主要内容：**掌握照相系统和光阑，望远镜系统中成像系统的光束的选择，显微镜系统中的光束限制与分析。

**基本要求：**重点是孔径光阑、视场光阑的定义和确定方法，消除渐晕的方法，以及在不同渐晕系数下的光束限制的求解；照相系统、望远镜系统、显微镜系统中的光束限制与分析。



## 5、光度学与色度学基础

**主要内容和基本要求：**掌握各种辐射量和光学量的定义及其单位，光传播过程中光学量的变化规律，成像系统像面的光照度。

## 6、光线的光路计算及像差理论

**主要内容：**概述，轴上点球差，正弦差和慧差，像散和场曲，畸变，色差，波像差。

**基本要求：**重点是实际光学系统各种像差的基本概念和对光学系统成像质量的影响，不要求计算。



## 7、典型光学系统与现代光学系统

**主要内容：**掌握眼睛及其光学系统的特性，对放大镜、显微镜系统、望远镜系统、目镜、摄影系统、投影系统的物镜和目镜的结构型式及其主要光学参数深入理解。掌握光电系统的基本组成及光学特性。

**基本要求：**重点是眼睛、放大镜、显微镜系统、望远镜系统、摄影系统的成像原理及其主要光学参数；并掌握光电系统的基本组成及光学特性。





Thank You !



## 第四章 光学系统中的光束限制

1. 孔径光阑、入瞳、出瞳、孔径角的定义及它们的关系
2. 视场光阑、入窗、出窗、视场角的定义及它们的关系
3. 渐晕、渐晕光阑、渐晕系数的定义及渐晕光阑和视场光阑的关系
4. 照相系统的基本结构、成像关系和光束限制
5. 望远系统的基本结构、成像关系和光束限制
6. 显微系统的基本结构、成像关系和光束限制，物方远心光路原理
7. 光瞳衔接原则及其作用
8. 场镜的定义、作用和成像关系
9. 景深、远景景深、近景景深的概念，景深公式和影响因素



## 第五章 光度学和色度学基础

1. 光度学中辐射量和光学量的定义、单位，光度学基本量的定义和单位，辐射量和光学量的关系
2. 光传播过程中光学量的主要变化规律

## 第六章 光线的光路计算及像差理论

1. 像差的定义、种类和消像差的基本原则
2. 单个折射球面的不晕点（齐明点）的概念和性质，求解方法
3. 7种几何像差的定义、影响因素、性质和消像差方法
4. 波像差的定义及其与几何像差的关系



## 第七章 典型光学系统

1. 正常眼、近视眼和远视眼的定义和特征，校正非正常眼的方法，眼睛调节能力的计算
2. 视觉放大率的概念、表达式及其意义，与光学系统角放大率的异同点
3. 放大镜的视觉放大率
4. 显微镜系统的概念和计算公式，包括：1) 组成、成像关系、光束限制 2) 视觉放大率公式 3) 线视场公式 4) 数值孔径和出瞳 $D'$  5) 物镜的分辨率 6) 显微镜的有效放大率 7) 物镜的景深 8) 视度调节：
5. 临界照明和柯拉照明



## 第七章 典型光学系统

6. 望远系统的概念和计算公式，包括： 1) 组成、成像关系、光束限制 2) 视觉放大率公式 3) 分辨率与视觉放大率的关系 4) 有效分辨率和工作分辨率
7. 摄影系统的概念和计算公式，包括： 1) 组成、成像关系、光束限制 2) 摄影物镜的3个主要参数及其影响作用 3) 分辨率公式 4) 光圈的定义及其与孔径光阑、分辨率、像面照度、景深的关系 5) 景深公式及其影响因素 6) 摄影物镜的种类
8. 投影系统的概念和计算公式，包括： 1) 系统的基本要求 2) 主要光学参数 3) 其照明系统的衔接条件