

# 应用光学

谭峭峰

tanqf@mail.tsinghua.edu.cn

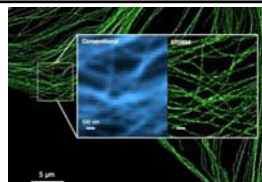
清华大学 精密仪器系 光电工程研究所

## 第七章

### 典型光学系统



超分辨率显微镜N-STORM  
STORM: 随机光学重构显微术



细胞中微管的显微照片



哈勃望远镜(主镜口径2.4米)



宇宙喷泉



遥远星系

## 7.1 放大镜

### § 7.1.1 放大镜的工作原理和视角放大率

- 一定大小的近距物体，它对人眼的张角称为视角。
- 人们观看近距物体时，不是将物体放的离人眼愈近感觉就愈好，通常将物体放在人眼前约250mm，此时看到的物体不算很小且眼睛也感到舒适。
- 在几何光学中，**-250mm**这个距离称为**明视距离**或**较佳视距**。

物体对眼睛的视角，**不仅取决于物体的大小**，还取决于该**物体到眼睛的距离**，距离越近视角越大。

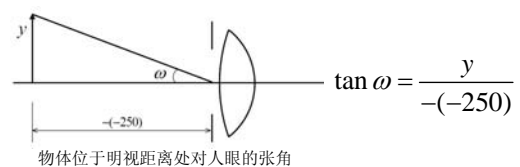
如果在近处观察细小物体其**视角小于人眼极限分辨角**。

需要借助放大镜或显微镜将其放大，使**像的视角大于人眼的极限分辨角**。

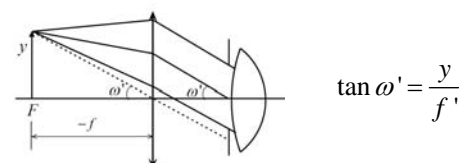
— 扩大视角是目视光学仪器的第一个要求

人眼在观察物体时完全放松的自然状态，即无限远目标成像到视网膜上。在利用仪器观察时，目标通过仪器后应成像在无限远处，即要求仪器出射**平行**光束。

— 对目视光学仪器的第二个要求



物体位于明视距离处对人眼的张角



放大镜的工作原理

定义  $\tan \omega'$  与  $\tan \omega$  之比为视角放大率，用  $\Gamma$  表示。

$$\Gamma = \frac{\tan \omega'}{\tan \omega}$$

放大镜的视角放大率：

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

### § 7.1.2 简单放大镜的设计

试设计一个5×放大镜

(1) 5×放大镜的焦距  $f'$  为50mm。

(2) 由一块薄透镜构成，薄透镜的焦距公式：

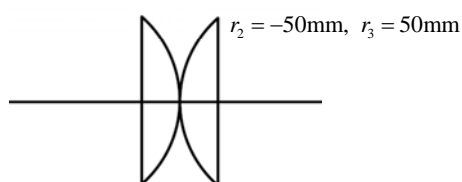
$$\frac{1}{f'} = (n-1) \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)$$

(3) 常用光学玻璃  $n$  近似为1.5。

(4) 设第一面为平面，即  $r_1 = \infty$ ，则  $r_2 = -25\text{mm}$ 。

(1) 设计自由度冗余  $\frac{1}{f'} = (n-1) \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)$

(2) 密接的两块单透镜设计



两块密接透镜构成的放大镜

(3) 100×放大镜？

$f' = 2.5\text{mm}$

球面半径？

横向口径？

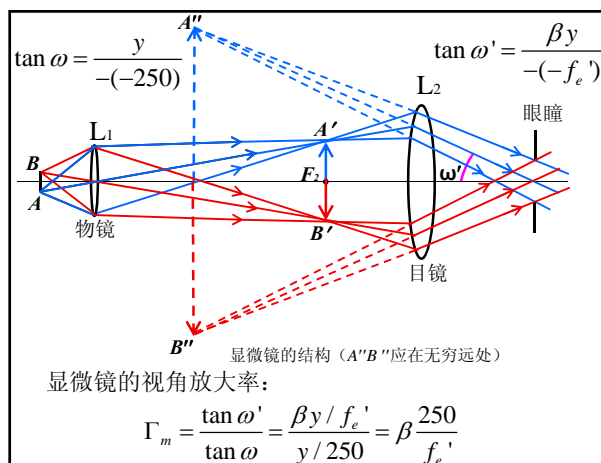
(4) 物体一定位于放大镜的前焦点处？

人们使用放大镜时物体往往位于放大镜的前焦点附近，而非一定严格地位于前焦点处。

## 7.2 显微镜

### § 7.2.1 显微镜的工作原理

放大镜	一组镜头	一次放大	15×
显微镜	两组镜头	两次放大	1000多倍



$$\Gamma_m = \frac{\tan \omega'}{\tan \omega} = \frac{\beta y / f_e'}{y / 250} = \beta \frac{250}{f_e'}$$

根据横向放大率公式的牛顿形式：

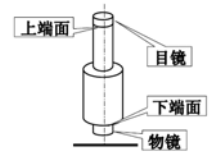
$$\Gamma_m = -\frac{\Delta}{f_o'} \frac{250}{f_e'}$$

而

$$-\frac{f_o' f_e'}{\Delta} = f_m'$$

$$\Gamma_m = \frac{250}{f_m'}$$

显微镜系统在原理上是一块复杂化了的放大镜



显微镜物镜平面到像平面的距离称为共轭距。

在显微镜中，取下显微物镜和目镜后，所剩下的镜筒长度即物镜支撑面到目镜支撑面之间的距离称为机械筒长。

对于一台显微镜来说，机械筒长是固定的。机械筒长各国标准不同，有160mm，170mm和190mm等。

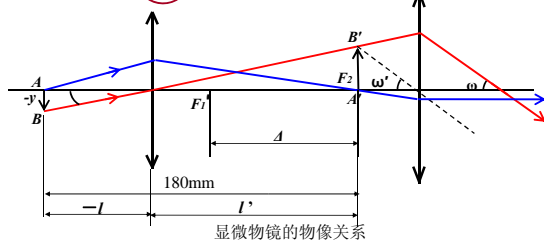
我国规定机械筒长为160mm。

### § 7.2.2 简单显微镜系统的设计例

例1、视角放大率-50×，物像共轭距180mm

目镜：10× 15×

物镜：3× 5× 10× 40× 60× 100×



显微物镜的物像关系

$$\beta = \frac{l'}{l} = -5 \quad \rightarrow \quad l = -30\text{mm}$$

$$-l + l' = 180 \quad \rightarrow \quad l' = 150\text{mm}$$

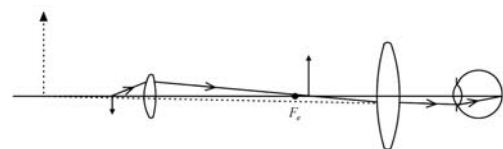
利用高斯形式的物像关系式  $\frac{1}{l'} - \frac{1}{l} = \frac{1}{f_o'}$

$$\rightarrow f_o' = 25\text{mm}$$

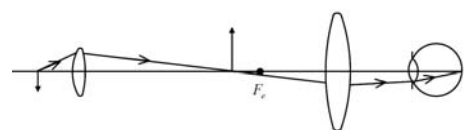
$$\Gamma_e = \frac{250}{f_e'} = 10 \quad \rightarrow \quad f_e' = 25\text{mm}$$

### § 7.2.3 显微镜的视度调节

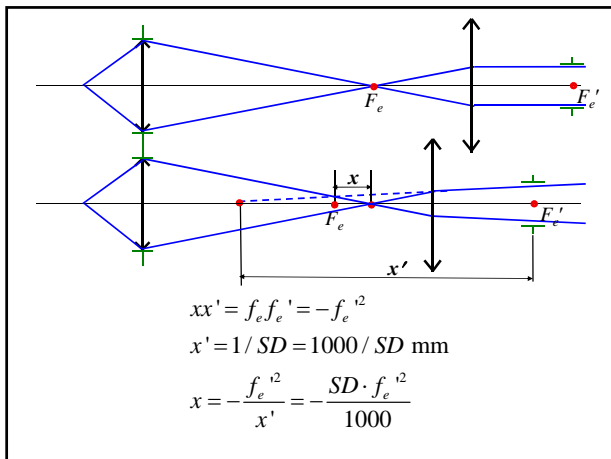
通过将目镜沿光轴方向移动适当的距离，使显微镜所成的像不再位于无限远，而位于眼睛前方或后方的一定距离上，以适应近视或远视眼的需要，弥补眼睛有近视或远视的缺陷者，就是显微镜的视度调节。



适用于近视眼的视度调节



适用于远视眼的视度调节

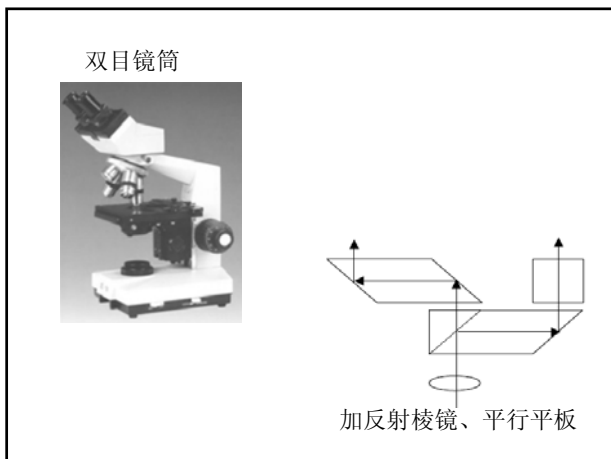


#### § 7.2.4 显微镜的机构

物镜——旋转式  
目镜——插入式



满足齐焦要求：调换物镜后，不需再调焦就能看到像  
物镜调换后，像面不动，物面不动——物镜共轭距不变  
调换物镜（目镜）后微调焦不可避免，须有微动机构

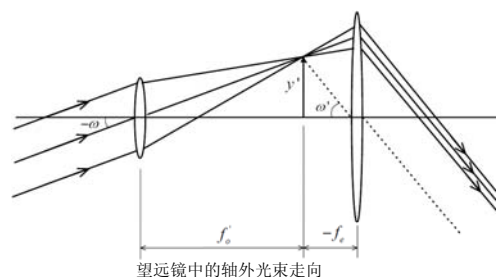
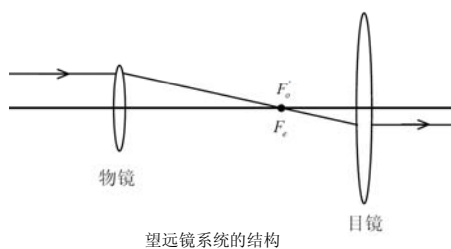


#### 显微镜与放大镜的比较

- ① 具有更大的放大率，二次放大
- ② 人眼离物面较远，使用方便
- ③ 物镜和目镜可调换，从而得到多种放大率
- ④ 具有中间实像面，可放置分划板，用于测量（构成测微目镜）

### 7.3 望远镜

#### § 7.3.1 望远镜的工作原理



$$\tan \omega = -\frac{y'}{f_o'}$$

$$\tan \omega' = \frac{y'}{f_e'}$$

视角放大率：

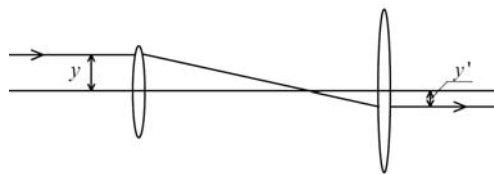
$$\Gamma_t = \frac{\tan \omega'}{\tan \omega} = -\frac{f_o'}{f_e'}$$

### § 7.3.2 望远系统的特点

光学间隔等于零

(1) 望远镜系统是一个无焦系统。

(2) 整个系统的横向放大率是一个定数。



望远镜系统中平行于光轴的光线

设物体距离物镜物方焦点为 $x_1$ ，其像距离物镜像方焦点为 $x_1'$ 。又设经物镜所成的这个像距离目镜物方焦点为 $x_2$ ，根据牛顿形式的横向放大率关系式有

$$\beta_o = -\frac{x_1'}{f_o}, \quad \beta_e = -\frac{f_e}{x_2}$$

光学间隔等于零，即 $x_2 = x_1'$

$$\beta = \beta_o \beta_e = \frac{x_1' f_e}{f_o' x_2} = -\frac{f_e'}{f_o'}$$

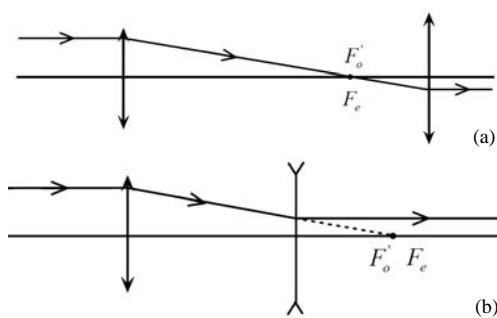
(3) 视角放大率与角放大率相等。

$$\gamma = \frac{1}{\beta} = -\frac{f_o'}{f_e'} = \Gamma_t$$

(4) 轴向放大率也只与物镜和目镜焦距之比有关。

$$\alpha = \beta^2 = \left(\frac{f_e'}{f_o'}\right)^2$$

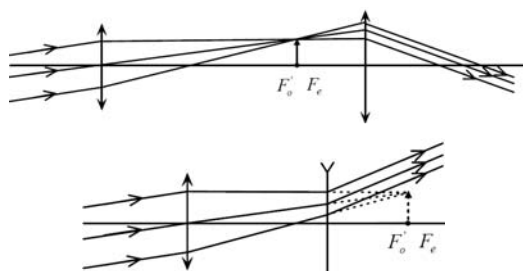
### § 7.3.3 望远镜系统的两种结构(透射式)



(a)开普勒望远镜系统和(b)伽利略望远镜系统

### 透射式望远镜系统

(1) 轴外光束走向



两类望远镜系统中的轴外光束走向

(2) 实像面

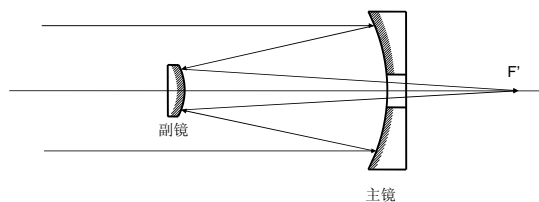
开普勒望远镜系统有一次实像面，可以在这个实像面处安放一把尺子（通常称为**分划板**）与实像比较，从而得到测量数据；伽利略望远镜系统没有一次实像面，所以它就不能用于测量；

(3) 筒长

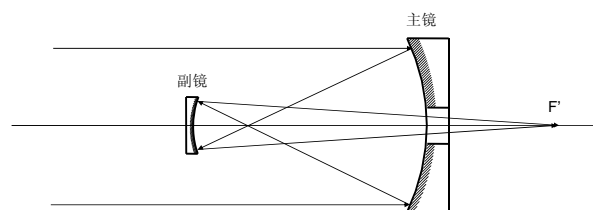
伽利略望远镜的筒长一定小于开普勒望远镜的筒长。

### § 7.3.4 望远镜系统的两种结构(反射式)

卡塞格林系统和格列果里系统。



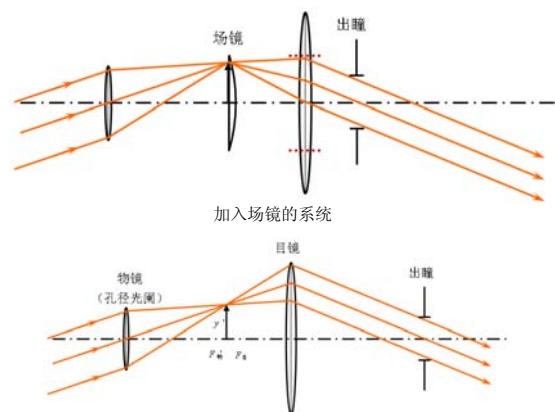
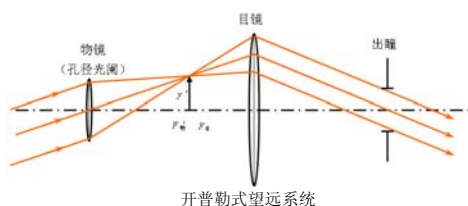
**卡塞格林系统**是由两个反射镜组成，主镜是抛物面，副镜是双曲面，成倒像。筒长比较短。



**格列果里系统**也是由两个反射面组成，主镜仍为抛物面，副镜为椭球面，成正像。筒长比较长。

### § 7.3.5 场镜

在实际工作中，有时为了减小光学元件（一般为目镜）的通光直径，同时又不改变仪器的光学特性，常常采取在物镜和目镜的共同焦面处放置一个正透镜的办法来解决。把放置在物镜和目镜共同焦面上的正透镜称为场镜。



## 7.4 照相物镜 (摄影物镜)

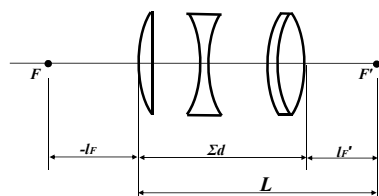
照相物镜属于大视场、大相对孔径的光学系统，为了获得较好的成像质量，它既要校正轴上点像差，又要校正轴外点像差。

照相物镜根据不同的使用要求，其光学参数和像差校正也不尽相同。结构型式多种多样。

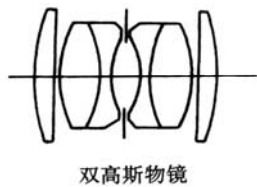
照相物镜主要分为普通照相物镜，大孔径照相物镜、广角照相物镜、远摄物镜和变焦距物镜等。

普通照相物镜是应用最广的物镜。一般具有下列光学参数。焦距20~500mm，相对孔径 $D/f' = 1:9 \sim 1:2.8$ ，视场角可达 $64^\circ$ 。

最著名的是天赛（Tessar）物镜的结构型式，其相对孔径 $1:3.5 \sim 1:2.8$ ， $2\omega = 55^\circ$ 。

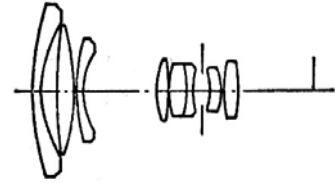


大相对孔径照相物镜相对比较复杂。图示双高斯物镜的结构形式，光学参数  $f'=50\text{mm}$ ,  $2\omega'=40^\circ\sim 60^\circ$ ,  $D'/f'=1:2$ 。



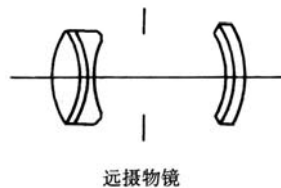
广角照相物镜多为短焦距物镜，以便获得更大的视场。其结构型式一般采用反远距型物镜。

- 焦距  $f'=28\text{mm}$
- 相对孔径  $D/f' \approx 1:2.8$
- $2\omega'=80^\circ$
- $r_{\text{后}}=1.5f'$
- $L/f'=3.8$



远摄物镜一般在高空摄影中使用，为获得较大的像面，远摄物镜的焦距可达3m以上。但其机械筒长 $L$ 小于焦距，远摄比 $L/f'<0.8$ 。随着焦距的增加，系统的二级光谱也增加，设计时常用特种火石玻璃。为缩短筒长，也可以采用折反型物镜，但其孔径中心光束有遮拦。

- 远摄天赛物镜
- 相对口径  $D/f'=1:6$
  - $2\omega<30^\circ$



变焦距物镜的焦距可以在一定范围内连续地变化，故对一定距离的物体其成像的放大率也在一定范围内连续变化，但系统的像面位置保持不变。在照相领域，变焦距物镜几乎代替了定焦距物镜，并已用于望远系统、显微系统、投影仪、热像仪等。变焦系统由多个子系统组成。焦距变化是通过一个或多个子系统的轴向移动，改变光组间隔来实现。

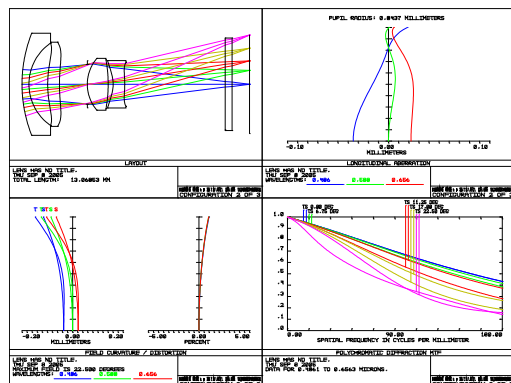
$$\frac{1}{f'} = \frac{1}{f_2'} + \frac{1}{f_1'} - \frac{d}{f_1' f_2'}$$

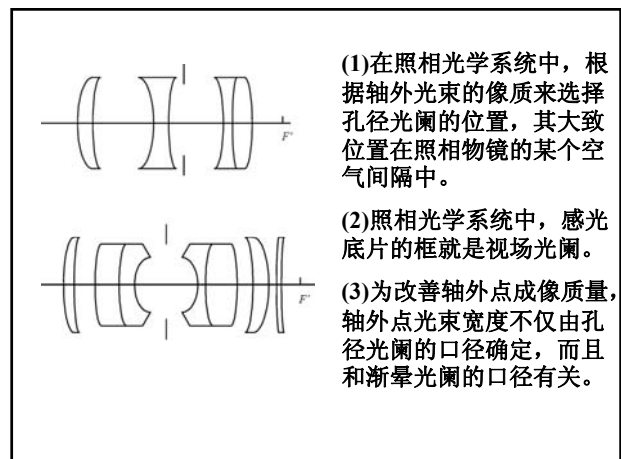
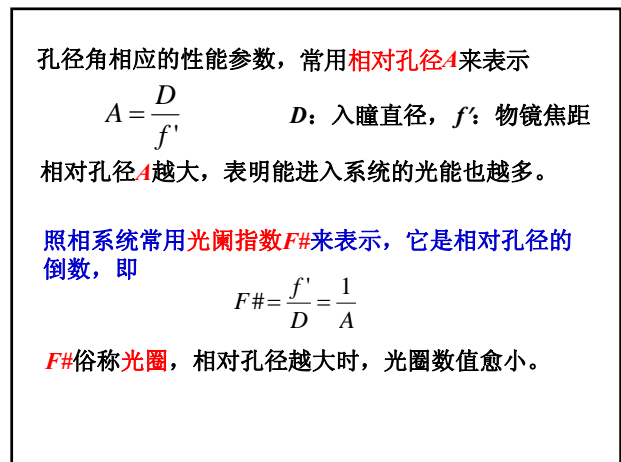
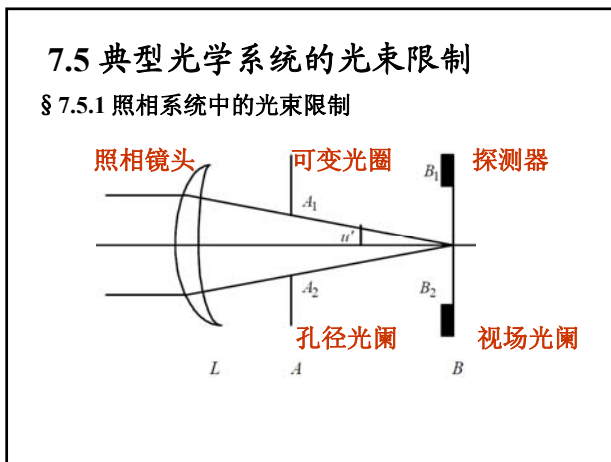
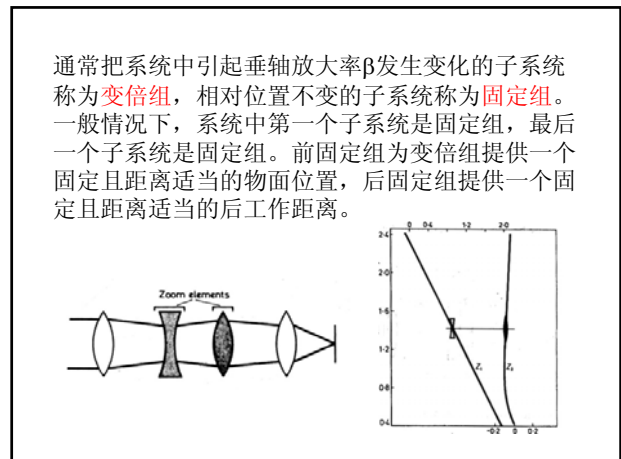
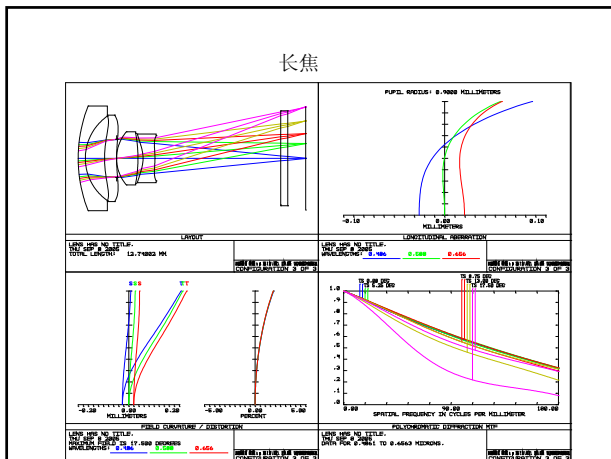
**关键：物面、像面保持不变**

## 二组元小型二倍变焦镜头

	4片型		
Pixel Size	2.8μm x 2.8μm		
Cover glass	0.4 mm (Borosilicate Glass)		
EFL	4.5mm	6.75mm	9mm
FOV	64°	45°	35°
F/#	2.8	3.8	4.6
Distortion	< 3.5%	< 2%	< 2%
Relative Illumination	> 50%		
MTF (ML)	>0.4 on axis 140 lines/mm		
	>0.4 0.7 Field 89 lines/mm		

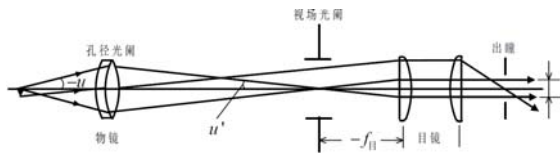
## 中焦







### § 7.5.2 显微镜系统中的光束限制



孔径角相应的性能参数，常用**数值孔径NA**表示，即

$$NA = n \sin U_{\max}$$

### § 7.5.3 显微镜的照明方法

照明系统要**满足以下要求**：

- 1) 保证有足够的光能；
- 2) 有足够的照明范围和均匀的亮度；
- 3) 照明光束应充满物镜口径；
- 4) 尽可能减少杂光进入物镜，以免降低像面的对比度；
- 5) 满足仪器尺寸布局要求；

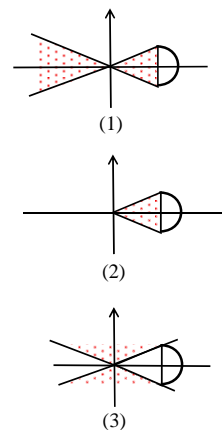
#### 1、孔径转接原则

设照明系统的入瞳位置为光源的位置，则照明系统的出瞳应与物镜的入瞳重合；

2、照明系统的拉赫不变量应大于或等于物镜的拉赫不变量，

$$n_0 u_0 y_0 \geq n u y = n' u' y'$$

- (1) 透射光亮视场照明
- (2) 反射光亮视场照明
- (3) 透射光暗视场照明
- (4) 反射光暗视场照明

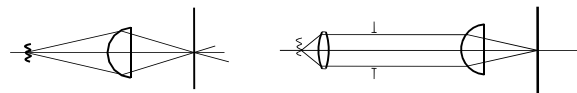


### 亮视场照明方式

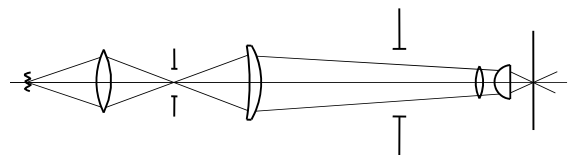
1、**直接照明** 利用自然光或灯泡照明。

2、**临界照明**

光源发光面通过聚光镜成像在物面上或其附近的照明方式称为**临界照明**。

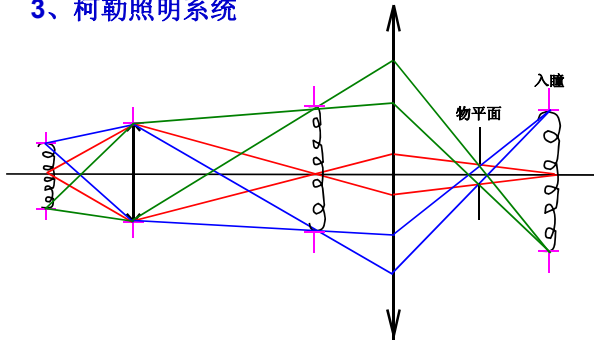


其**缺点**是光源亮度的不均匀性将直接反映在物面上，同时也不满足光孔转接原则。



电影放映机大多采用这种照明方式。读数显微镜中刻线尺或度盘的照明也常采用。

### 3、柯勒照明系统



## 7.6 典型光学系统的分辨率

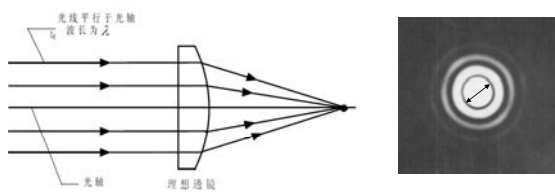
**分辨率：**衡量分开相邻两物点的像的能力

几何点？

像斑？

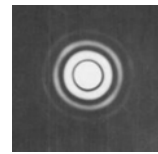
衍射！

### § 7.6.1 圆孔夫琅和费衍射的实验装置



$$d_{\text{Airy}} = \frac{1.22\lambda_0}{n' \sin u'}$$

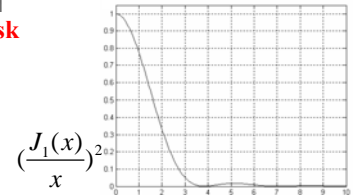
### § 7.6.2 衍射图样及其特征



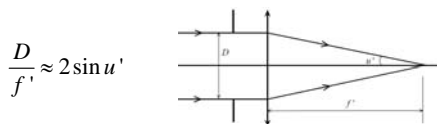
艾里斑 Airy disk

#### 能量的百分比

艾里斑	83.9%
第一亮环	7.2%
第二亮环	2.8%
第三亮环	1.4%
第四亮环	0.9%
其他亮环	3.9%



$$d_{\text{airy}} = 2\sigma' = \frac{1.22\lambda_0}{n' \sin u'}$$



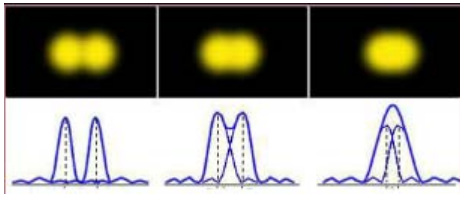
- ① 实验系统相同，所用光波**波长愈短**则艾里斑愈小；
- ② 理想透镜像方空间中的**媒质折射率愈高**则艾里斑愈小；
- ③ 理想透镜**像方孔径角愈大**则艾里斑愈小。

### § 7.6.3 衍射分辨率与瑞利判据

**分辨率：**衡量分开相邻两物点的像的能力

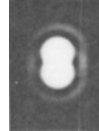
**物面**上的两个物点靠的有多近，从**像面**上的艾里斑重叠情况看，还能判断出它们是两个点。

仅考虑衍射效应的分辨率为**衍射分辨率**。



**瑞利(Rayleigh)判据：**两个像点间能够分辨的最短距离约等于艾里斑的半径。

$$\sigma' = \frac{0.61\lambda_0}{n' \sin u'}$$

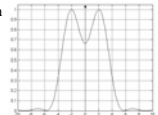


刚能分辨的两个像点

瑞利判据下，

$$\kappa = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \approx 0.15$$

对比度

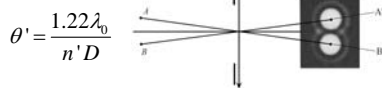


#### § 7.6.4 人眼的分辨率

眼睛前面的物方两物点相距多小的角距离时人眼还是可分辨的？

瞳孔直径：  $D=2\text{mm}$   
敏感波长：  $\lambda_0=550\text{nm}$   
后室折射率：  $n'=1.336$

$$\theta = n' \theta' = \frac{1.22\lambda_0}{D} = 1.22 \frac{550\text{nm}}{2\text{mm}} \approx 3.4 \times 10^{-4} \text{ rad} \approx 1'$$



视觉细胞的直径，约  $5\mu\text{m}$

#### § 7.6.5 望远镜系统的分辨率

望远镜系统的分辨率用物方两点对望远物镜的物方主点的张角大小来描述。

入瞳直径：  $D$   
敏感波长：  $\lambda_0=550\text{nm}$   
物镜像方折射率：  $n'=1$

$$\theta = n' \theta' = \frac{1.22\lambda_0}{D} = 1.22 \frac{550\text{nm}}{D(\text{mm})} \times 206000'' = \left[ \frac{140}{D(\text{mm})} \right]''$$

通过望远镜观察物方的两个发光点时，这两个点通过望远镜所成的像对人眼的张角应该等于或大于人眼分辨率，即：

$$\tan \omega' \geq \tan 1'$$

$$\text{衍射分辨率要求: } \tan \omega \geq \tan \left[ \frac{140}{D} \right]''$$

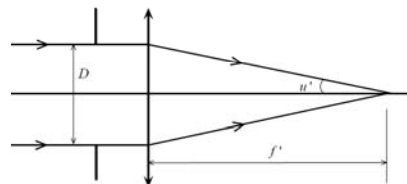
望远镜的视角放大率：

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

望远镜的有效放大率

#### § 7.6.6 照相物镜的理论分辨率

照相物镜的分辨率是以像面上每毫米内能分辨开的黑白相间的线对数来表征。



$$\sin u' \approx \frac{D}{2f'} \\ n' = 1$$

$$\sigma' = \frac{1.22\lambda_0}{D/f'} \quad \text{照相物镜的相对孔径}$$

每毫米内能分辨开的黑白线对数(550nm):

$$N = \frac{1}{\sigma'} \approx 1500 \frac{D}{f'} \quad (\text{lp/mm})$$

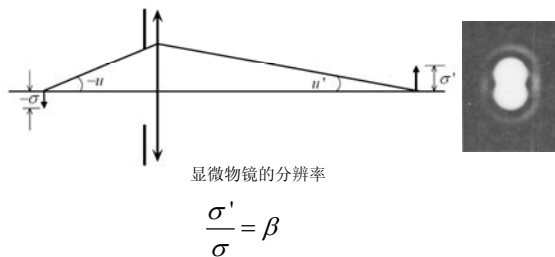
A. 一个相对孔径为0.5的照相物镜, 如果一物点成像为直径0.01~0.03mm的弥散斑就认为像质较好。该相对孔径理论上艾里斑的大小仅为0.0013mm。

B. 照相系统中, 多用感光胶片或CCD/CMOS作接收器。普通感光胶片的分辨率为60~80lp/mm, CCD像素大小一般约为7μm (70lp/mm)。

照相物镜的实际分辨率远低于它的理论分辨率; 为与接收器的分辨率匹配, 照相物镜的成像质量可以放松一些。 大视场、大孔径角

### § 7.6.7 显微镜系统的分辨率

对于显微镜, 关心的是物方相邻多近的两个点可以被显微镜系统分辨。



近轴光学中:  $\beta = \frac{nu}{n'u'}$

显微镜成像满足阿贝正弦条件:

$$\frac{u}{u'} = \frac{\sin u}{\sin u'}$$

$$\sigma = \frac{\sigma'}{\beta} = \frac{0.61\lambda_0}{n \sin u} \quad \text{数值孔径 } NA$$

- (1) 增大显微物镜数值孔径是提高显微物镜分辨率的主要途径之一: 增大孔径角或物方空间媒质折射率。
- (2) 选择短波长光源照明, 是提高显微物镜分辨率的另外一个途径。

### 分辨率匹配问题

一次实像面上艾里斑的半径:

$$\sigma' = \frac{0.61\lambda_0}{n' \sin u'} = \beta \frac{0.61\lambda_0}{NA}$$

目镜的张角:

$$\omega' = \frac{\sigma'}{f_e'} \times 3438' = \beta \frac{250}{f_e'} \frac{0.61\lambda_0}{250NA} \times 3438'$$

$$= \Gamma_m \frac{0.61\lambda_0}{250NA} \times 3438'$$

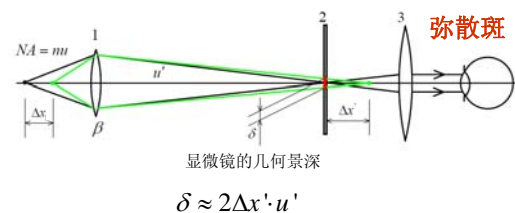
设计仪器时, 取人眼的分辨角为2'~4'  $2' \leq \omega' \leq 4'$

$$500NA \leq \Gamma_m \leq 1000NA$$

### § 7.6.8 显微镜系统的景深

几何景深、物理景深和调节景深

#### ■ 几何景深



对人眼的张角：  $\theta = \frac{\delta}{f_e'}$

要小于或等于人眼的分辨角：

$$2\Delta x' \cdot u' \leq \varepsilon f_e'$$

利用轴向放大率和横向放大率间的关系式得到：

$$\Delta x = \frac{n\Delta x'}{\beta^2} = \frac{1}{2} n \frac{\varepsilon f_e'}{\beta^2 u'}$$

根据  $\beta = \frac{nu'}{n'u'} (n'=1)$ ：

$$\Delta x = \frac{1}{2} n \frac{\varepsilon \cdot 250}{NA \cdot \beta \frac{250}{f_e'}} = \frac{1}{2} \frac{250n\varepsilon}{NA \cdot \Gamma_m}$$

$$\text{总的几何景深: } \Delta_g = 2\Delta x = \frac{250n\varepsilon}{NA \cdot \Gamma_m}$$

### ■ 物理景深

由于衍射效应，沿光轴方向的光能分布是一个sinc函数：

$$I(\xi, 0) = \left( \frac{\sin \xi / 4}{\xi / 4} \right)^2 I_0, \quad \xi = \frac{2\pi}{\lambda} u'^2 z'$$

光强变化在20%以内难以区分，即：

$$\left( \frac{\sin \xi / 4}{\xi / 4} \right)^2 = 0.8 \quad \rightarrow \quad \xi = 3.2$$

$$\Delta z' = 3.2 \frac{\lambda}{2\pi u'^2} \approx \frac{\lambda}{2u'^2}$$

$$\Delta z = \frac{\Delta z'}{\alpha} = \frac{n}{n'} \left( \frac{n'u'}{nu} \right)^2 \frac{\lambda}{2u'^2} = n \frac{\lambda}{2NA^2}$$

$$\text{总的物理景深: } \Delta_p = 2\Delta z = \frac{n\lambda}{NA^2}$$

### ■ 调节景深

眼睛可调节，能看清一定范围内远近不同的物体。

设人眼通过调节能看清的最远距离为  $x_1''$ ；最近距离为  $x_2''$ 。显微镜的出瞳可近似看成与目镜的像方焦平面重合，在目镜的物方分别有：

$$x_1' = -\frac{f_e'^2}{x_1''}, \quad x_2' = -\frac{f_e'^2}{x_2''}$$

换算到显微镜物方范围，则调节景深：

$$\Delta_a = x_1 - x_2 = \frac{n}{n'} \frac{1}{\beta_o^2} (x_1' - x_2')$$

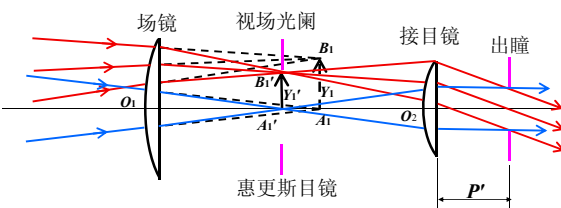
$$n'=1 \quad \Delta_a = \frac{250^2 n}{\Gamma_m^2} \left( \frac{1}{x_2''} - \frac{1}{x_1''} \right)$$

显微镜的景深是上述三项之和，即：

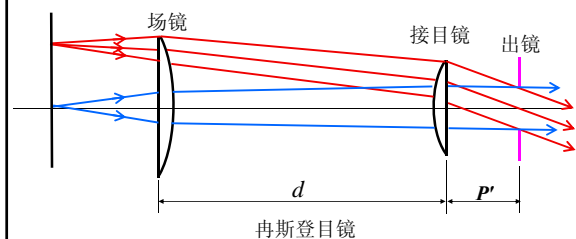
$$\Delta = \Delta_g + \Delta_p + \Delta_a$$

### § 7.6.9 目镜

- 惠更斯目镜。其视场角  $2\omega' = 40^\circ \sim 50^\circ$ ，相对镜目距约  $P'/f' = 1/3$ ，焦距不小于15mm。

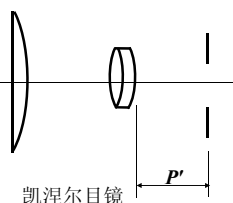


- 冉斯登目镜，其场镜向接目镜移近，使物镜的像平面移出目镜，可以设置分划板。冉斯登目镜的视场角  $2\omega' = 30^\circ \sim 40^\circ$ ，相对镜目距  $P'/f' = 1/3$ 。



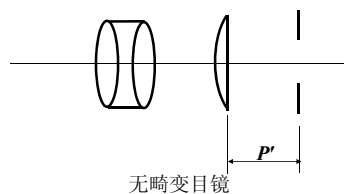
- **凯涅尔目镜**，由场镜和双胶合目镜组成，像质优于冉斯登目镜。光学特性为  $2\omega'=30^\circ\sim 40^\circ$ ， $P'/f'=1/2$ 。

出瞳靠近目镜。目镜总长度近似为  $1.25f'$ 。



凯涅尔目镜

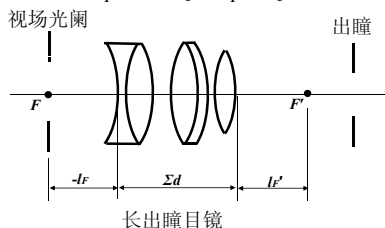
- **无畸变目镜**。无畸变目镜并非完全校正了畸变，只是畸变小些，适用于测量仪器。其光学特性为  $2\omega'=48^\circ$ ， $P'/f'=0.8$ ，在  $40^\circ$  视场时的相对畸变为  $3\%\sim 4\%$ 。



无畸变目镜

- 有的军用仪器要求较长的出瞳距，例如  $22\sim 25\text{mm}$ 。选择**长出瞳距目镜**可以满足这种要求。图示为长出瞳距目镜，其视场  $2\omega'=50^\circ$ 。截距

$$l_F \approx 0.3f', l_F' \approx f'$$



长出瞳目镜

对称目镜，广角目镜，超广角目镜等

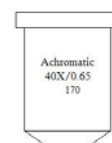
#### § 7.6.10 显微物镜

光学性能主要有：

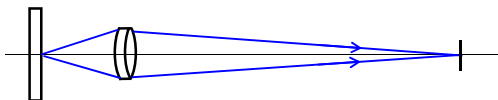
放大率	$\beta = \frac{l'}{l}$
数值孔径	$NA = n \sin U_{\max}$
线视场	$2y = \frac{2y'}{\beta}$

对于不同倍率的物镜，像方视场  $2y'$  为一定值，高倍物镜视场小。

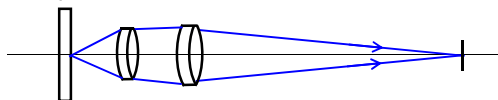
$NA$  直接影响分辨率，是物镜的主要性能指标。



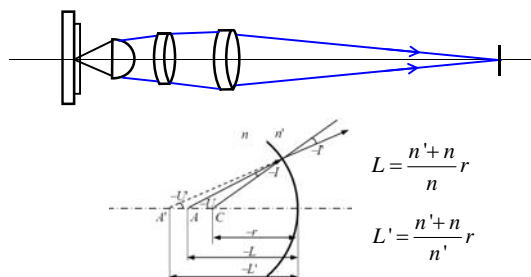
- 低倍双胶合物镜， $\beta=3\times\sim 6\times$ ， $NA=0.1\sim 0.15$ ；



- 中倍物镜，由两组双胶合透镜组成，称为**里斯特物镜**， $\beta=8\times\sim 10\times$ ， $NA=0.25\sim 0.3$ ；



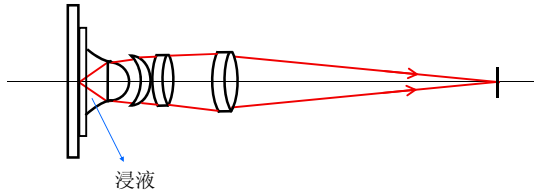
- 高倍物镜，在**里斯特物镜**前加一**半球透镜**，其第二面为**齐明面**，半球透镜使里斯特物镜的孔径角增加  $n^2$  倍。这种物镜称作“**阿米西**”物镜， $\beta=40\times$ ， $NA=0.65$ ；



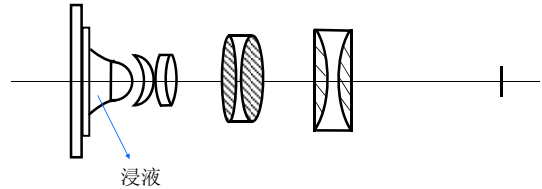
$$L = \frac{n' + n}{n} r$$

$$L' = \frac{n' + n}{n'} r$$

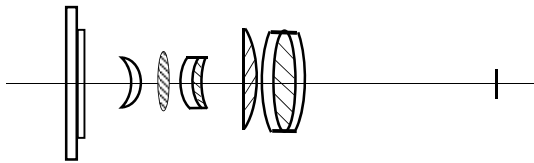
- 浸液物镜，在阿米西物镜中再加一个同心齐明透镜，称作阿贝浸液物镜。在玻璃盖片和物镜前片之间浸液（折射率为 $n$ ），可使数值孔径提高 $n$ 倍； $\beta=90^\circ \times 100^\circ$ ， $NA=1.25 \sim 1.4$ ；



- 复消色差物镜，有阴影线的透镜，是由特殊材料萤石制成， $\beta=90^\circ$ ， $NA=1.3$ ；



- 平视场复消色差物镜， $\beta=40^\circ$ ， $NA=0.85$ 。



### 小结：

放大镜、视角放大率、明视距离

显微镜、视角放大率、物镜、目镜

望远镜、特点、结构、场镜

照相物镜、特点、结构、变焦

典型光学系统的光束限制及分辨率等

### 作业：

- 针对无焦系统简述横向放大率 $\beta$ 、轴向放大率 $\alpha$ 、角放大率 $\gamma$ 、视角放大率 $\Gamma$ 的区别与联系。
- 用一个读数显微镜观察直径为200mm的圆形刻度盘，两刻线之间对应的圆心角为 $6''$ ，要求通过显微镜以后两刻线之间对应的视角为 $1'$ ，应使用多大倍率的显微镜？
- 一个 $-5^\circ$ 开普勒望远镜，物镜焦距120mm，当一个具有 $-1000^\circ$ 深度近视眼的人用该望远镜观察远物时，目镜应向哪个方向移动？移动多少距离？当一个具有 $500^\circ$ 深度远视眼的人用该望远镜观察远物时，目镜应向哪个方向移动？移动多少距离？假定人眼在目镜像方焦面上。
- 一架显微镜，物镜焦距为4mm，中间像成在物镜像方焦点后面160mm处，如果目镜是20倍，显微镜总的放大率是多少？
- 一显微镜物镜由相距20mm的两薄透镜组成，物镜的共轭距为195mm，放大率 $-10^\circ$ ，且第一透镜承担总偏角的60%，求两透镜的焦距。

- 6、6倍双目望远镜系统中，物镜焦距为108mm，物镜口径为30mm，目镜口径为20mm，如系统中没有视场光阑，问该望远镜最大极限视场角等于多少？渐晕系数 $KD=0.5$ 时的视场角等于多少？如要求出瞳距离开目镜像方主平面的距离为15mm，求在物镜焦面上加入的场镜焦距。
- 7、显微镜目镜的视角放大率 $\Gamma=15^\circ$ ，物镜的倍率 $\beta=-2.5^\circ$ ，出射光瞳直径为2mm，求物镜的焦距和要求的通光口径。如该显微镜用于测量，假定分划板 $\phi 10mm$ ，物镜的通光口径需要多大（显微物镜的物平面到像平面的距离为180mm）？
- 8、在开普勒望远镜系统中应用远心光路时，孔径光阑应放在何处？
- 9、要求照相物镜的对准平面以后的整个空间都能在景象平面上清晰成像。物镜焦距 $f=75mm$ ，所用光圈数为16，求对准平面位置与景深。如果调焦在无穷远，求近景位置和景深。