工程光学基础-几何光学

黄军辉

西安交通大学 机械工程学院

E-mail：huangjh@mail.xjtu.edu.cn

课程内容

- 第一章：几何光学基本定律与成像理论
- 第二章：理想光学系统
- 第三章：平面与平面系统
- 第四章：光学系统中的光束限制
- 第六章：光线的光路计算及像差理论
- 第七章：典型光学系统

课程特点

- 概念多
- 公式多
- 线索多

光学四个基本定律：直线传播、独立传播、反射与折射（费马原理、马吕斯定律）

单个折射面成像（公式、近轴区细光束、物像关系与角度关系、放大率）

平面光学系统（平面镜成像、平行平板、反射棱镜、折射棱镜、棱镜展开与等效）

理想光学系统（基点与基面定义、图解法、解析法求物像关系）

光学系统的光束限制（孔径光阑、视场光阑、典型光学系统的光束限制、景深）

光线的光路计算及像差理论（像差产生原因、分类及性质）

典型光学系统成像分析（眼睛、放大镜、显微镜、望远镜、目镜、摄像机、投影仪-成像特点）

Huangjh@mail.xjtu.edu.cn

第一章 几何光学基本定律与成像理论

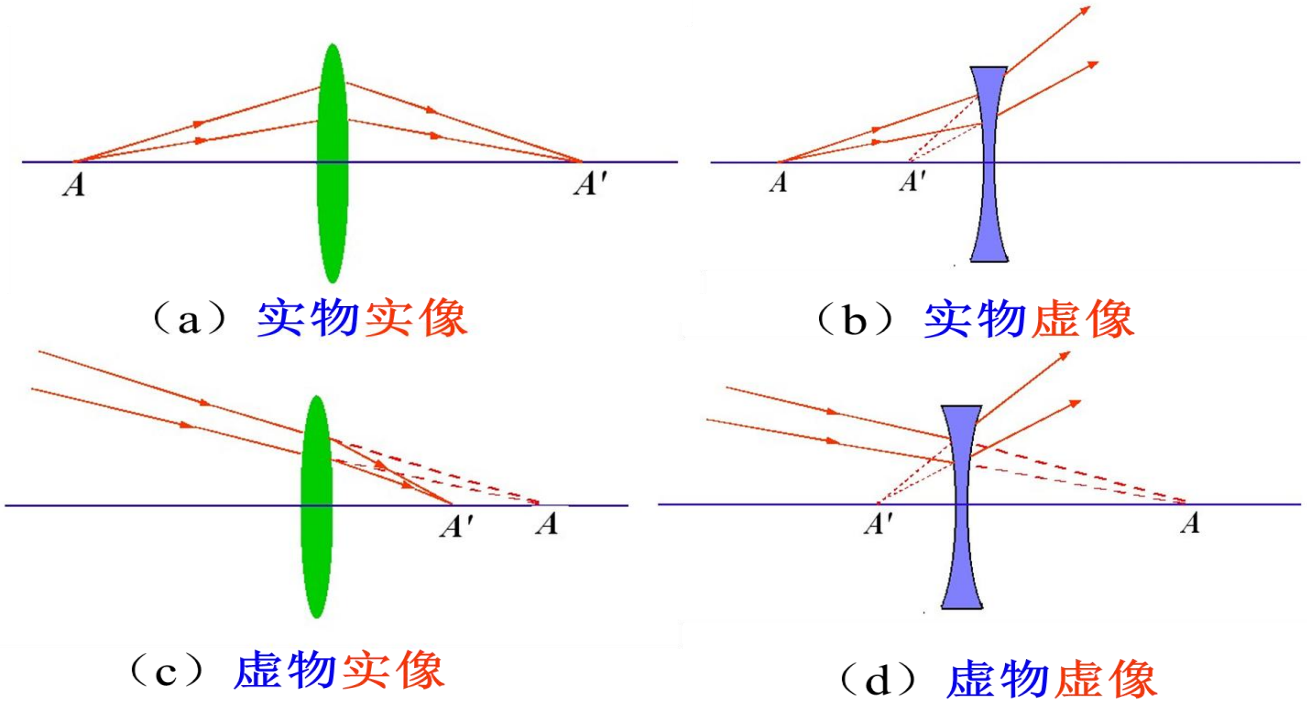
■ 几何光学的基本定律 ★

- ✓ **波面**：振动位相相同的点在空间构成的曲面
- ✓ **几何光学的基本定律**：
  - ➢ 直线传播、独立传播、折射与反射
- ✓ **全反射**：全反射条件与应用（光纤、反射棱镜-逆反射、自行车尾灯、钻石举例） $\sin I_m = n'/n$
- ✓ **费马原理**：光从一点传播到另一点时，其间无论进行了多少次反射或折射，其光程为极值。（**光程?**）
- ✓ **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**。

Huangjh@mail.xjtu.edu.cn

■ 成像的基本概念与完善成像条件 ★

- ✓ 共轴光学系统、光轴、完善物点和像点、物空间与像空间
- ✓ 完善成像条件：球面波、同心光束、等光程
- ✓ 物（像）的虚实



（a）实物实像　（b）实物虚像

（c）虚物实像　（d）虚物虚像

Huangjh@mail.xjtu.edu.cn

■ 光路计算与近轴光学系统

- ✓ 顶点、子午面、弧矢面、物方截距和孔径角、像方截距和孔径角、高斯像
- ✓ **符号规则**：线段、角度 ★
- ✓ 近轴光线的光路计算

$$\begin{cases} i = \dfrac{l-r}{r}u & (1) \\ i' = \dfrac{n}{n'}i & (2) \\ u' = u + i - i' & (3) \\ l' = r(1+\dfrac{i'}{u'}) & (4) \end{cases}$$

$$l' = \frac{n'lr}{n'l - n(l-r)} \qquad (5)$$

$$h = l'u' = lu \qquad (6)$$

$$\begin{cases} n'(\dfrac{1}{r} - \dfrac{1}{l'}) = n(\dfrac{1}{r} - \dfrac{1}{l}) = Q & (7) \\ n'u' - nu = (n'-n)\dfrac{h}{r} & (8) \\ \boxed{\dfrac{n'}{l'} - \dfrac{n}{l} = \dfrac{n'-n}{r}} & (9) \end{cases}$$

(7) 阿贝不变量

(8) 物、像孔径角的关系

(9) 物、像位置关系 ★

Huangjh@mail.xjtu.edu.cn

■ 球面光学成像系统

✓ **单个折射面的成像：★**

- **垂轴放大率** $\beta=y'/y=nl'/n'l$ ——放大缩小、虚实、正立倒立
- **轴向放大率** $\alpha=dl'/dl=nl'^2/n'l^2=n'/n*\beta^2$
- **角放大率** $\gamma=u'/u=l/l'=n/n'*1/\beta$
- α、β、γ的关系： $\boxed{\alpha*\gamma=\beta}$
- **拉赫不变量：拉格朗日-赫姆霍兹不变量**

$$\boxed{J=nuy=n'u'y'}$$

✓ **球面反射镜成像：** $n'=-n$

$$\boxed{\frac{1}{l'}+\frac{1}{l}=\frac{2}{r}} \qquad f=f'=\frac{r}{2} \qquad \beta=-\frac{l'}{l}=-\frac{r}{2l-r}=-\frac{1}{\frac{2l}{r}-1}$$

球面反射凸面镜成像特点

■ 共轴球面系统的过渡公式

1.某一面的物空间为其前一面的像空间：

$$\begin{cases} n_2 = n_1^{'}, n_3 = n_2^{'}, \cdots, n_k = n_{k-1}^{'} \\ u_2 = u_1^{'}, u_3 = u_2^{'}, \cdots, u_k = n_{k-1}^{'} \\ y_2 = y_1^{'}, y_3 = y_2^{'}, \cdots, y_k = y_{k-1}^{'} \end{cases}$$

2.后一面的物距与前一面的像距之间的关系

$$l_2 = l_1^{'} - d_1, l_3 = l_2^{'} - d_2, \cdots, l_k = l_{k-1}^{'} - d_{k-1}$$

3.光线入射高度的关系 $h_2 = h_1 - d_1 u_1^{'}, h_3 = h_2 - d_2 u_2^{'}, \cdots, h_k = h_{k-1} - d_{k-1} u_{k-1}^{'}$

4.拉赫不变量 $n_1 u_1 y_1 = n_1^{'} u_1^{'} y_1^{'} = \cdots = n_k u_k y_k = n_k^{'} u_k^{'} y_k^{'} = J$

成像放大率公式： ★

$$\begin{cases} \beta = \dfrac{y_k^{'}}{y_1} = \dfrac{y_1^{'}}{y_1} \bullet \dfrac{y_2^{'}}{y_2} \cdots \dfrac{y_k^{'}}{y_k} = \beta_1 \beta_2 \cdots \beta_k \\ \alpha = \dfrac{dl_k^{'}}{dl_1} = \dfrac{dl_1^{'}}{dl_1} \bullet \dfrac{dl_2^{'}}{dl_2} \cdots \dfrac{dl_k^{'}}{dl_k} = \alpha_1 \alpha_2 \cdots \alpha_k \\ \gamma = \dfrac{u_k^{'}}{u_1} = \dfrac{u_1^{'}}{u_1} \bullet \dfrac{u_2^{'}}{u_2} \cdots \dfrac{u_k^{'}}{u_k} = \gamma_1 \gamma_2 \cdots \gamma_k \end{cases}$$

Huangjh@mail.xjtu.edu.cn

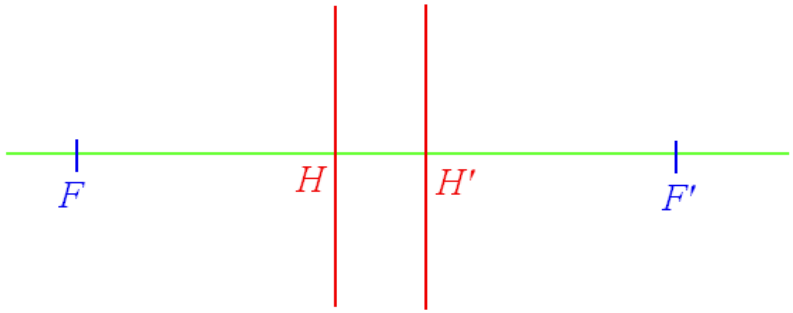
第二章 理想光学系统

■ 理想光学系统与共线成像理论

- ✓ **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光学系统即为理想光学系统
- ✓ **高斯光学、共轭、共线成像**
- ✓ **理想光学系统的成像性质——作图的依据** ★

■ 理想光学系统的基点和基面 ★

- ✓ **无限远的物点和它对应的像点*F'***
- ✓ **无限远的轴上像点和它对应的物点*F***
- ✓ **物方主平面与像方主平面的关系：物方主平面与像方主平面是一对共轭面；主平面的垂轴放大率为+1。**
- ✓ **常用的基点和基面：主平面、物/像方焦点**

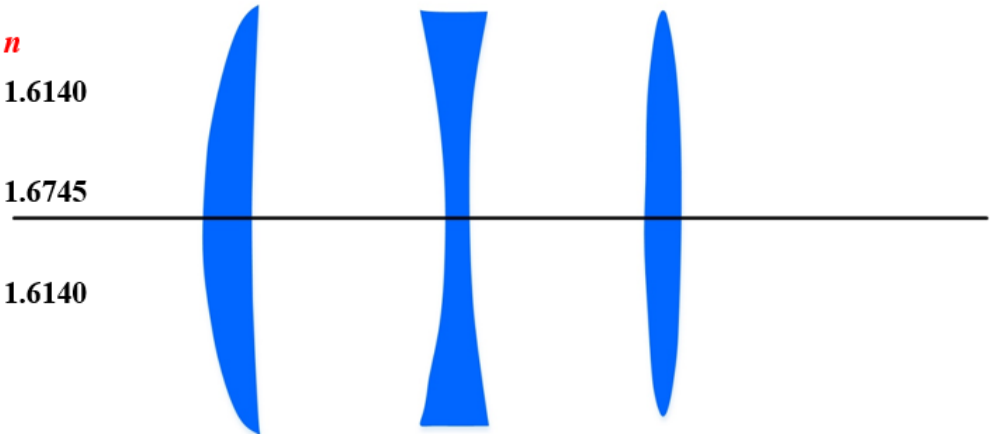


Huangjh@mail.xjtu.edu.cn

■ 理想光学系统的基点和基面 ★

✓ 实际光学系统的基点位置和焦距的计算：近轴区追迹平行于光轴的光线，可以计算出实际系统的近轴区的基点位置和焦距

r/mm	*d*/mm	*n*
26.67	5.20	1.6140
189.67	7.95	
-49.66	1.6	1.6745
25.47	6.7	
72.11	2.8	1.6140
-35.00		



$$\begin{cases} i = \dfrac{l-r}{r}u & (1) \\ i' = \dfrac{n}{n'}i & (2) \\ u' = u + i - i' & (3) \\ l' = r(1+\dfrac{i'}{u'}) & (4) \end{cases}$$

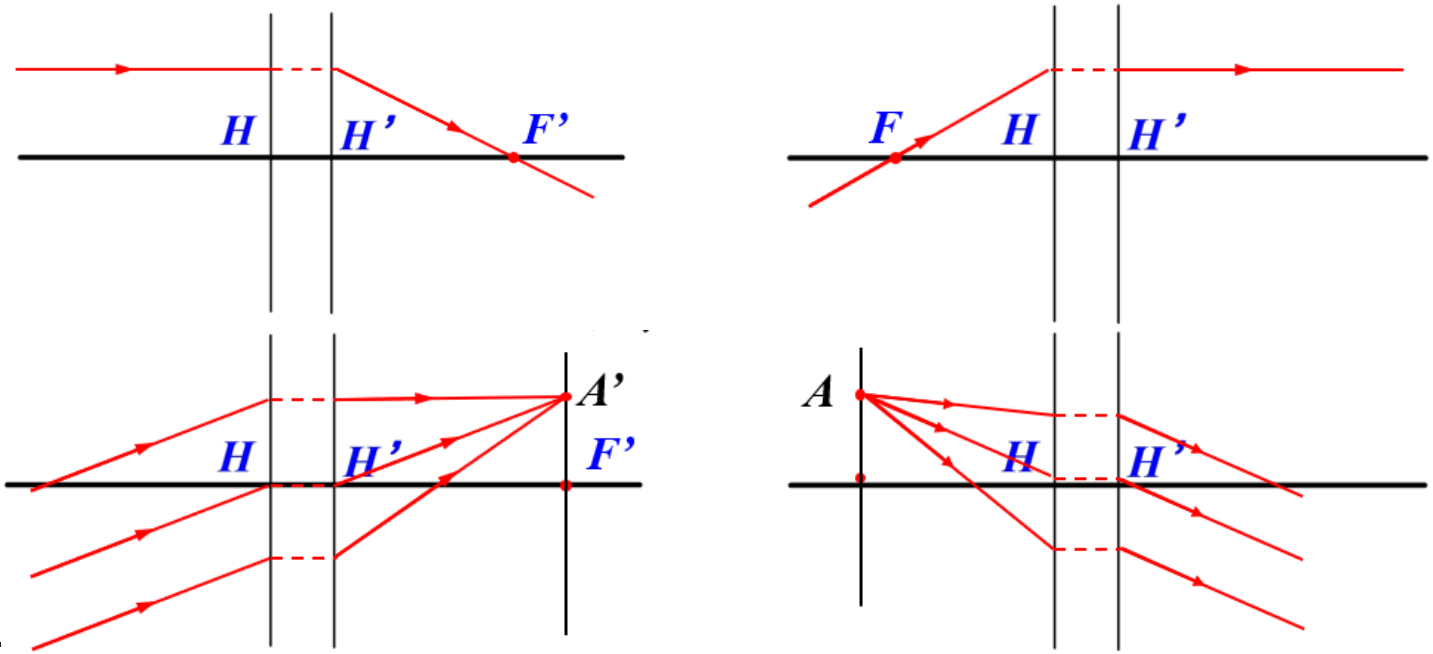
像方焦距：$f' = h_1/u_k'$

Huangjh@mail.xjtu.edu.cn

■ 理想光学系统的物像关系

✓ 图解法求像 ★

- 平行于光轴入射的光线，经过系统后过像方焦点；
- 过物方焦点的光线，经过系统后平行于光轴；
- 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；
- 自物方焦平面上一点发出的光束，经过系统后成倾斜于光轴的平行光束；
- 共轭光线在主面上的投射高度相等。

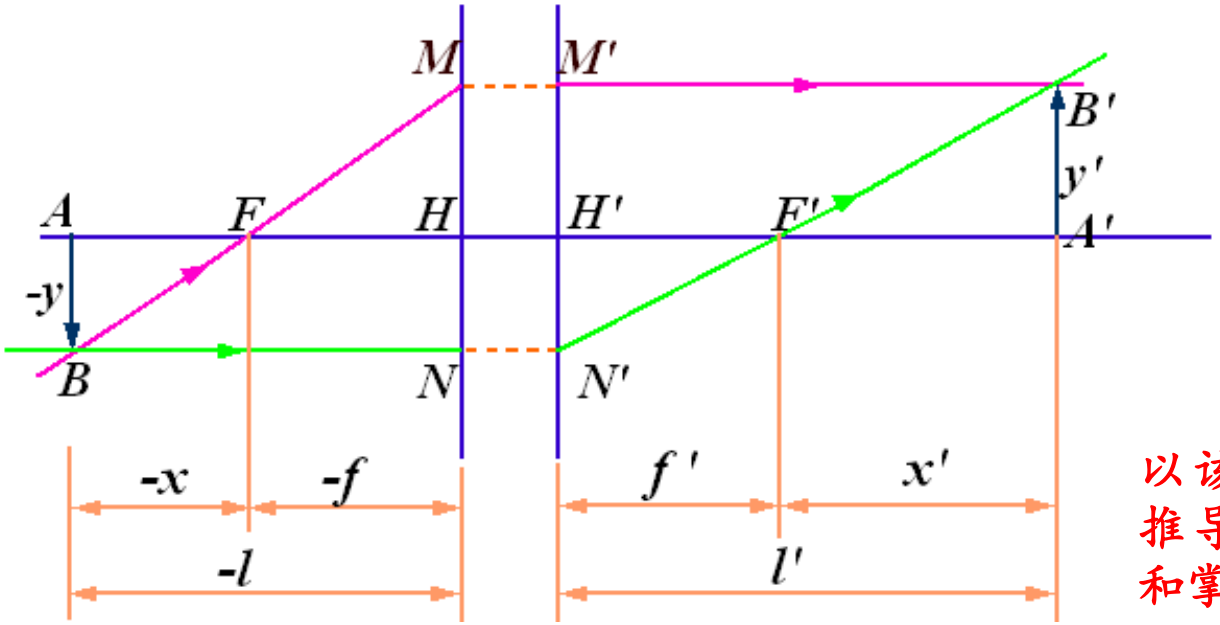


■ 理想光学系统的物像关系

✓ 解析法求像 ★

➢ **牛顿公式（以焦点为坐标原点）** $\boxed{xx' = ff'}$ $\beta = \frac{y'}{y} = -\frac{f}{x} = -\frac{x'}{f'}$

➢ **高斯公式（以主点为坐标原点）** $\boxed{\frac{f'}{l'} + \frac{f}{l} = 1}$ $\beta = \frac{y'}{y} = -\frac{f}{f'}\frac{l'}{l}$



以该图进行公式推导，易于理解和掌握！

Huangjh@mail.xjtu.edu.cn

■ 理想光学系统的物像关系

✓ 由多个光组组成的理想光学系统的成像

➢ 光组间的过渡公式

① 过渡关系式：$l_2=l_1'-d_1$、$x_2=x_1'-\Delta_1$

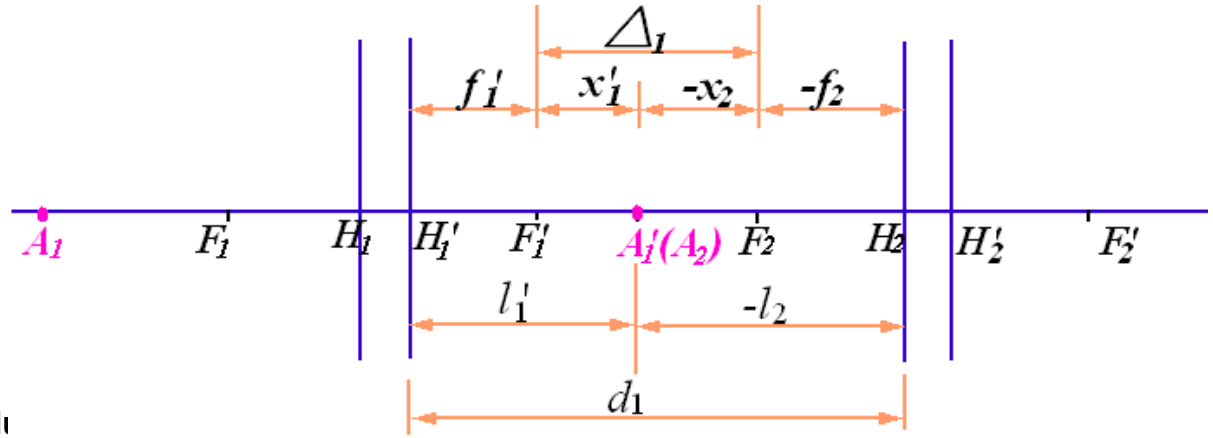
② 焦点间隔或光学间隔：$\Delta_1=F_1'F_2=d_1-f_1'+f_2$（两焦点之间的间隔）

③一般的过渡公式和两个间隔间的关系为：

$$l_k=l'_{k-1}-d_{k-1}、x_k=x'_{k-1}-\Delta_{k-1}、\Delta_k=d_k-f'_k+f_{k+1}$$

④整个系统的放大率等于各光组放大率的乘积

$$\beta=\frac{y_k'}{y_1}=\frac{y_1'}{y_1}\bullet\frac{y_2'}{y_2}\bullet\cdots\bullet\frac{y_k'}{y_k}=\beta_1\beta_2\cdots\beta_k$$



■ 理想光学系统的物像关系 ★

- ✓ 理想光学系统两焦距之间的关系 $\boxed{\dfrac{f'}{f}=-\dfrac{n'}{n}}$
- ✓ 两边都为空气：$f'=-f$
- ✓ 有反射面：反射面个数k $\dfrac{f'}{f}=(-1)^{k+1}\dfrac{n'}{n}$
- ✓ 理想光学系统的拉赫公式：$ny\tan U=n'y'\tan U'$

■ 理想光学系统的放大率 ★

- ✓ 轴向放大率：$\alpha=-\dfrac{x'}{x}=-\beta^2\dfrac{f'}{f}=\dfrac{n'}{n}\beta^2$
- ✓ 角放大率：$\gamma=\dfrac{\tan U'}{\tan U}=\dfrac{n}{n'}\dfrac{1}{\beta}$
- ✓ 光学系统的节点：角放大率等于+1的一对共轭点
- ✓ 实验：用平行光管测定物镜焦距

光学系统的基点：一对节点、一对主点、一对焦点

光学系统的基面：主平面

特性！

Huangjh@mail.xjtu.edu.cn

■ 理想光学系统的组合 ★

✓ 两个光组组合分析

➢ **焦点位置和焦距（牛顿公式）：**

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

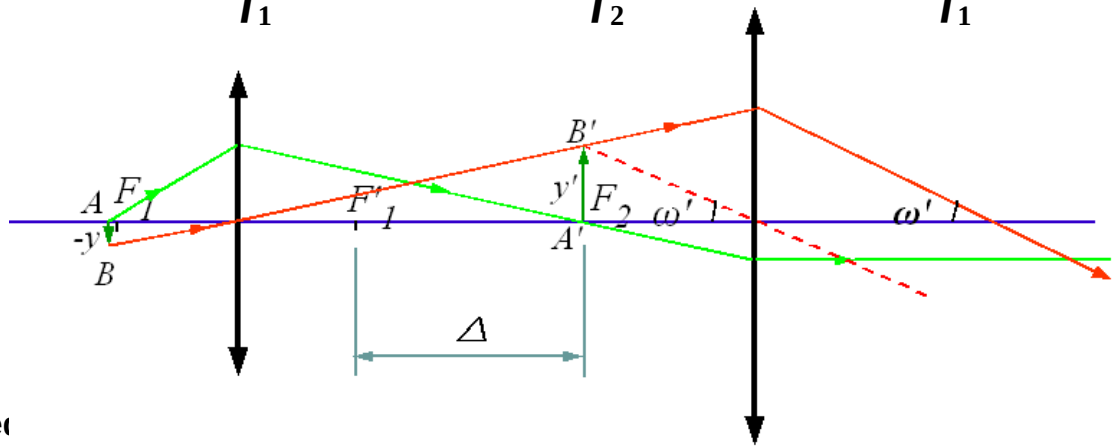
➢ **光焦度：像方焦距的倒数** $\varphi = \dfrac{1}{f'}$

通用公式： $\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 - d\varphi_1\varphi_2$

密接薄镜组(d=0)光焦度公式： $\varphi = \varphi_1 + \varphi_2$

➢ **焦点位置和主点位置（高斯公式）：**

$$l_F' = f'(1 - \frac{d}{f_1'}) \qquad l_F = f(1 + \frac{d}{f_2}) \qquad l_H' = -f'\frac{d}{f_1'} \qquad l_H = -f'\frac{d}{f_2}$$



■ 理想光学系统的组合 ★

✓ 两个光组组合分析

➢ 多光组组合计算 $f' = \dfrac{h_1}{\tan U_k'} \Leftarrow \begin{cases} \tan U_k' = \tan U_k + \dfrac{h_k}{f_k'} \\ h_k = h_{k-1} - d_{k-1}\tan U_{k-1}' \end{cases}$

➢ 举例：远摄型光组、反远距型光组、望远系统、显微镜系统

■ 透镜 ★

✓ 透镜的分类：按作用（正负透镜）、按形状（双凸…）

✓ 透镜计算公式

➢ 焦距公式：$\boxed{f' = -f = -\dfrac{f_1' f_2'}{\Delta} = \dfrac{n r_1 r_2}{(n-1)[n(r_2 - r_1) + (n-1)d]}}$

➢ 光焦度

➢ 薄透镜 $\boxed{\varphi = (n-1)(\rho_1 - \rho_2) \qquad l_H' = l_H = 0}$

✓ 讨论

Huangjh@mail.xjtu.edu.cn

第三章 平面与平面系统

■ 平面镜成像——唯一能成完善像的最简单的光学元件★

- ✓ 平面镜成像：成像特点——奇数次反射成镜像，偶数次成一致像；物旋转时，像反方向旋转相同度数。
- ✓ 平面镜旋转特性与应用：当入射光线方向不变，使平面镜转动α角时，反射光线的方向改变了2α角；测量微小角度或位移

$$y = (2f'/a)x = Kx$$

- ✓ 双平面镜成像与应用：$\beta=2\alpha$ 出射光线和入射光线的夹角与入射角无关，只取决于双面镜的夹角α；转折光路；应用——自行车尾灯-逆反射、长距离测距-立方角锥棱镜。

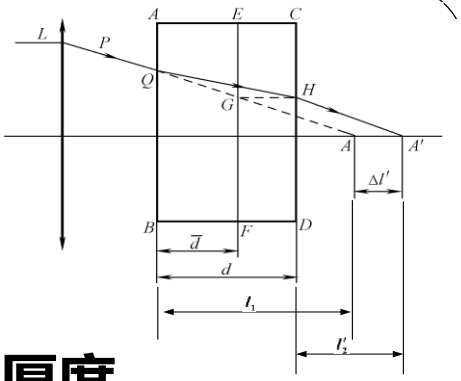
■ 平行平板

- ✓ 平行平板的成像特性：两次折射——光线经平行平板后方向不变；光线经平行平板后，产生侧向位移ΔT、和轴向位移$\Delta L'$：

$$\Delta T = d\sin I_1\left(1-\frac{\cos I_1}{n\cos I_1'}\right) \quad \Delta L' = d\left(1-\frac{\tan I_1'}{\tan I_1}\right)$$

Huangjh@mail.xjtu.edu.cn

■ 平行平板



- ✓ 平行平板的等效光学系统 ★
  - ➢ **近轴区细光束成像**：$\boxed{\Delta l' = d(1-1/n)}$
  - ➢ 将平行平板简化为一个等效空气平板：等效厚度

$$\boxed{\bar{d} = d - \Delta l' = d/n}$$

■ 反射棱镜 ★

- ✓ 一次反射棱镜：主截面内的坐标改变方向，垂直于主截面的坐标不改变方向，O'Z'始终沿出射光轴方向

  等腰直角棱镜、等腰棱镜、道威棱镜

  二次反射棱镜：其出射光线与入射光线的夹角取决于两反射面的夹角，像与物一致，不存在镜像

  三次反射棱镜、屋脊棱镜、立方角锥棱镜

  棱镜的组合：分光棱镜、分色棱镜、转像棱镜

  举例：单反相机中坐标的变化

Huangjh@mail.xjtu.edu.cn

■ 反射棱镜

✓ **棱镜系统的成像方向判断★**

判断原则：

1、O’Z’坐标轴和光轴的出射方向一致

2、垂直于主截面的坐标轴O’Y’视屋脊面的个数而定

3、平行于主截面的坐标轴O’X’的方向视反射面个数

✓ 反射棱镜的**等效作用**与**展开**：**平面镜+平行平板**

➢ 棱镜等效平板厚度L的计算

■ 折射棱镜与光楔

✓ 折射棱镜的偏折：

$$\sin\frac{\alpha+\delta}{2}=n\sin\frac{\alpha}{2}\frac{\cos\frac{I_1'+I_2}{2}}{\cos\frac{I_1+I_2'}{2}}$$

最小偏向角δ_m及其应用★

$$\boxed{\sin\frac{\alpha+\delta_m}{2}=n\sin\frac{\alpha}{2}}$$

求棱镜顶角或折射率

色散分光

Huangjh@mail.xjtu.edu.cn

■ 折射棱镜与光楔

✓ **棱镜色散** ★

$$n(\lambda)=\frac{\sin\frac{\delta_{\min}+\alpha}{2}}{\sin\frac{\alpha}{2}}$$

✓ **光楔及其应用** $\delta=(n-1)\alpha$

应用：双光楔螺旋测微

■ 光学材料 ★

✓ 光学材料分为**光学玻璃**、**光学晶体**和**光学塑料**三大类

✓ 光学玻璃分为**冕牌玻璃**和**火石玻璃**两大类，分别用符号K、F表示

一般冕牌玻璃具有低折射率和低色散（ν_D大），火石玻璃具有高折射率和高色散（ν_D小）

✓ 目视仪器的**常规光学玻璃参数**：**平均折射率nD**、平均色散dn、**阿贝常数**、部分色散、相对色散

✓ 反射光学材料的光学特性：对各种色光的**反射率（随波长不同而不同）**

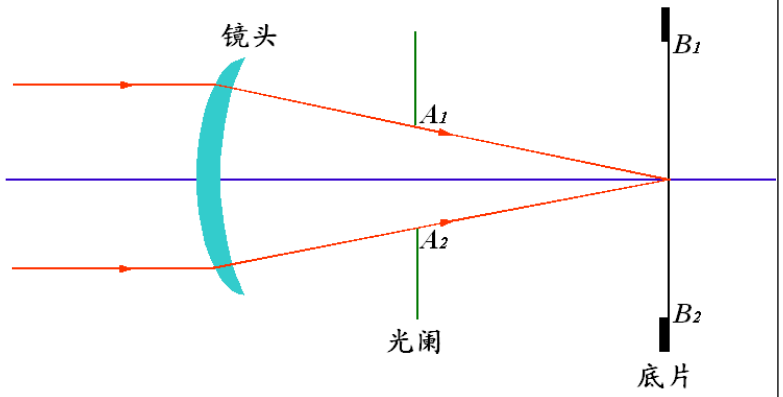
第四章 光学系统中的光束限制

■ 成像光束的限制——光阑★

- ✓ 孔径光阑、入射光瞳、出射光瞳
- ✓ 视场光阑、入射窗、出射窗、物方/入射视场角、像方/出射视场角
- ✓ 渐晕光阑

■ 照相系统中的光阑★

- ✓ 照相系统的孔径光阑、视场光阑
- ✓ 渐晕系数： $K_\omega = \dfrac{D_\omega}{D}$



Huangjh@mail.xjtu.edu.cn

■ 照相系统中的光阑 ★

- ✓ 孔径光阑和视场光阑的**判定与相关计算**（位置与孔径大小）

■ 望远系统中成像光束的选择 ★

- ✓ 光学数据：视角放大率Γ、视场角$2w$、出瞳直径D'、出瞳距离lz'、物镜焦距$f_{物}'$、目镜焦距$f_{目}'$
- ✓ 望远系统的**孔径光阑**、**视场光阑**

  开普勒望远镜：物镜框是孔径光阑，也是入瞳，出瞳在目镜外面，与人眼衔接，目镜框是渐晕光阑，一般允许50%渐晕；分划板是视场光阑

  伽里略望远镜：人眼瞳孔为孔径光阑，是望远系统的出瞳，物镜框是视场光阑，又是入射窗；由于视场光阑不与物面（或像面）重合，大视场存在渐晕
- ✓ **光瞳衔接原则**
- ✓ 目视光学系统的出瞳一般在外，且**出瞳距**$l'_Z > 6mm$

■ 显微系统的光束限制 ★

- ✓ 显微镜系统的**孔径光阑**（物镜框）与**视场光阑**（目镜物方焦平面/分划板）
- ✓ **远心光路**：孔径光阑放在像方焦面处，消除深度位置不准的测量误差
- ✓ **场镜**及其应用：和像平面重合或很靠近像平面的透镜，压低光线，减小后续光路通光孔径

■ 光学系统的景深

- ✓ 光学系统的空间像、景像平面 / 对准平面、主光线、弥散斑
- ✓ 景深：能在景象平面（像面）上获得清晰像（物点所成的弥散圆斑不能被接收器所分辨）的物空间深度为“景深”
- ✓ 景深的计算：

$$\Delta L_1 = \frac{F\delta L(L-f)}{f^2 + F\delta(L-f)}$$

$$\Delta L_2 = \frac{F\delta L(L-f)}{f^2 - F\delta(L-f)}$$

$$\Delta L = \Delta L_1 + \Delta L_2$$

$$\Delta_1 = \frac{p^2\varepsilon}{2a - p\varepsilon},$$

$$\Delta_2 = \frac{p^2\varepsilon}{2a + p\varepsilon}$$

$$\Delta = \Delta_1 + \Delta_2 = \frac{4ap^2\varepsilon}{4a^2 - p^2\varepsilon^2}$$

- ✓ 景深影响因素：F、f、L ★
- ✓ 景像畸变（透视投影失真）

Huangjh@mail.xjtu.edu.cn

第六章 光线的光路计算及像差理论

■ 概述及光路计算

✓ 像差产生的原因：孔径、视场（波长）

✓ **像差的种类：★**

几何像差：

①单色像差：

球差、慧差（正弦差）、像散、场曲、畸变

②色差：位置色差（纵向色差）、倍率色差（横向色差）

波像差：实际波面与理想波面的偏差

✓ **消像差原则**：主要像差，接收器不能察觉。

Huangjh@mail.xjtu.edu.cn

■ 概述及光路计算

- ✓ **像差计算的谱线选择**：基本原则——对接收器的最灵敏谱线校正**单色像差**；对接收波段范围两边缘附近的谱线校正**色差**。 ★
- ✓ 光路计算：对计算像差**有特征意义**的光线

■ 各类像差的定义、产生的原因

- ✓ **不晕点（齐明点）**：$S_{-}=\dfrac{niL\sin U(\sin I-\sin I')(\sin I'-\sin U)}{\cos\frac{I-U}{2}\cos\frac{I'+U}{2}\cos\frac{I+I'}{2}}$

（1）$L=0$，$L'=0$，$\beta=1$。即物点和像点均位于球面顶点时，不产生球差。

（2）$I=I'=0$，物点和像点均位为球面的曲率中心，或$L=L'=r$，垂轴放大率$\beta=n/n'$。

（3）$\sin I'-\sin U=0$，即$I'=U$，则 $L=(n+n')r/n$ $L'=(n+n')r/n'$

- ✓ 与孔径、视场等关系 ★

成像清晰度：仅畸变不影响，其余像差均会影响；
仅与孔径有关的像差：球差、位置色差；
仅与视场有关的像差：细光束像散、细光束场曲、畸变、倍率色差；
与视场和孔径都有关的像差：彗差。

■ 各类几何像差的校正

✓ 定性掌握各类像差校正方法

■ 各类像差特点总结

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

■ 眼睛及其光学系统

- ✓ 眼睛的适应能力（动态范围）：明适应和暗适应
- ✓ 眼睛的调节及校正、明视距离=250mm ★
- ✓ 眼睛的分辨率：$\tan\varepsilon = \dfrac{0.006}{f'} \times 206265''$ $\boxed{\varphi \times \Gamma = \varepsilon}$ ★
- ✓ 眼睛的对准精度
- ✓ 眼睛的景深：$\Delta L_1 = L - L_1 = \dfrac{L^2\varepsilon}{D_p + L\varepsilon}$ $\Delta L_2 = L_2 - L = \dfrac{L^2\varepsilon}{D_p - L\varepsilon}$
- ✓ 双目立体视觉

■ 放大镜

- ✓ 视觉放大率：$$\boxed{\Gamma = \frac{\tan\omega'}{\tan\omega} = \frac{y'D}{y(P'-l')} = \frac{f'-l'}{P'-l'} \times \frac{D}{f'}}$$

放大镜的视觉放大率不是常数，取决于观察条件：P'和l'

Huangjh@mail.xjtu.edu.cn

■ 放大镜

✓ **视觉放大率：** 目视光学仪器的放大率用视觉放大率表示，其定义为，用仪器观察物体时视网膜上的像高 y′i与用人眼直接观察物体时视网膜上的像高 y′e之比

$$\Gamma=\frac{y'_i}{y'_e}=\frac{l'\tan\omega'}{l'\tan\omega}=\frac{\tan\omega'}{\tan\omega}$$

➢ **两种特殊情况**

1)当眼睛调焦在无限远，即$l'=\infty$时，物体放在放大镜的前焦点上。

$$\Gamma_0=\frac{D}{f'}=250/f'$$

通常该放大率标注在镜筒上，由此可知透镜焦距。

2)正常视力的眼睛一般把物像调焦在明视距离D，则

$$P'-l'=D \qquad \Gamma=1-\frac{P'-D}{f'}=\frac{250}{f'}+1-\frac{P'}{f'}$$

若眼睛紧靠着放大镜，即$P'\approx 0$，则 $\Gamma=\frac{250}{f'}+1$

✓ **光束限制和线视场：**

➢ **眼瞳是孔径光阑，又是出瞳。放大镜框是视场光阑，又是入窗，同时放大镜本身又是渐晕光阑。**

➢ **像方视场角ω′、物方线视场2y**

100% $\tan\omega_1'=(h-a')/P'$

50% $\tan\omega'=h/P'$

0 $\tan\omega_2'=(h+a')/P'$

$$2y=2f'\tan\omega'$$

$$2y=\frac{500}{\Gamma_o}\frac{h}{P'}$$

放大倍率越大，线视场越小。
观察距离越近，线视场越大。

■ 显微镜系统

✓ 视觉放大率 ★

➢ 成像与光束限制：孔径光阑—物镜框；视场光阑—目镜物方焦面上的圆孔光阑或分划板

➢ 视觉放大率：$\boxed{\Gamma = \frac{\tan\omega'}{\tan\omega} = \frac{250\Delta}{f'_o f'_e} = \beta\Gamma_e}$

$\beta = y'/y = l_o'/l_o$

$\Gamma_e = 250/f_e'$

等效焦距f'：$\boxed{f' = {-f'_o f'_e}/{\Delta}, \quad 则\Gamma = {250}/{f'}}$

➢ 共轭距：物镜从物平面到像平面的距离

➢ 机械筒长

✓ 线视场：$2y = \frac{500\tan\omega'}{\Gamma}$ 视觉放大率越大，线视场越小

Huangjh@mail.xjtu.edu.cn

■ 显微镜系统

✓ **显微镜的出瞳直径：★**

$$D' = \frac{500NA}{\Gamma}$$

$$NA = n\sin u$$ 数值孔径

✓ **显微镜分辨率 ★**

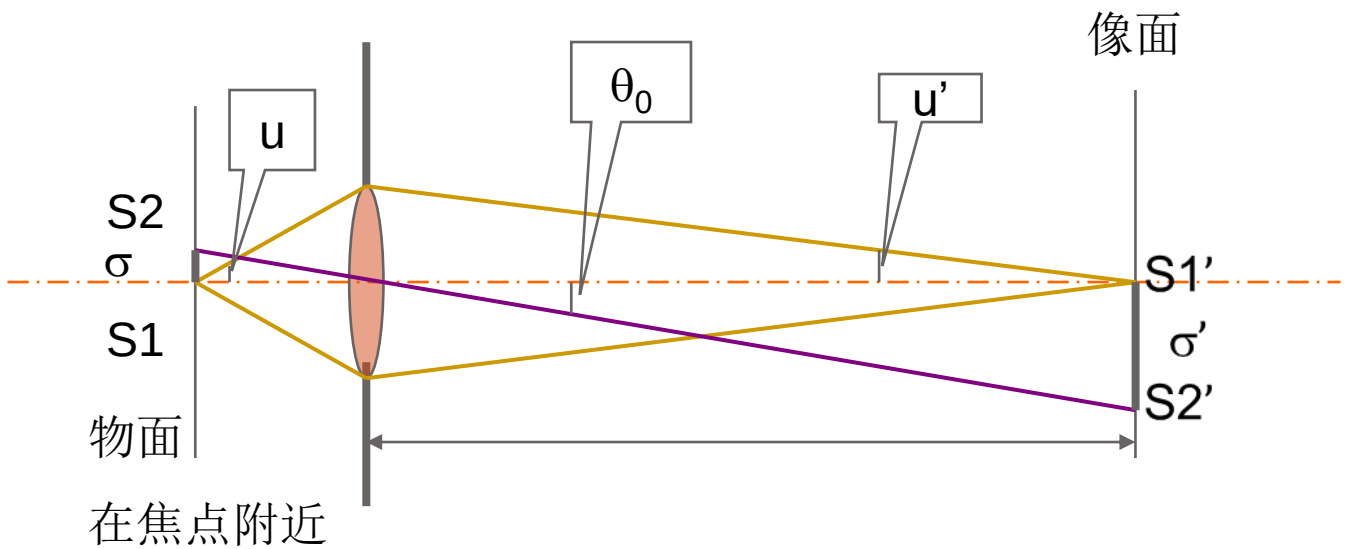
瑞利判据：$\sigma = 0.61\lambda / NA$

道威判据：$\sigma = 0.5\lambda / NA$

$$\sigma n \sin u = \sigma' n' \sin u'$$

$$\sin u' \approx u' = \frac{D/2}{l'}$$

$$\sin u \approx u = \frac{D/2}{l}$$



Huangjh@mail.xjtu.edu.cn

■ 显微镜系统

- ✓ 显微镜**有效放大率** $500NA \le \Gamma \le 1000NA$
- ✓ 显微镜的景深：$\Delta_1 = \dfrac{nf'^2\varepsilon}{D'+a\varepsilon}; \Delta_2 = \dfrac{nf'^2\varepsilon}{D'-a\varepsilon};$

  当系统焦距用视觉放大率表示，$f' = \dfrac{250}{\Gamma}$ 则：

$$\Delta_1 = \Delta_2 = \frac{n250^2\varepsilon}{\Gamma^2 D'} \xrightarrow{D'=500NA/\Gamma} \frac{250n\varepsilon}{2\Gamma NA}$$

  显微镜的数值孔径越大、系统的放大率越大，景深越小。

  景深的大小决定了显微镜**纵向**调焦时的调焦误差。

- ✓ 显微镜的**照明方法**：透视光亮视场照明、反射光亮视场照明、透射光暗视场照明、反射光暗视场照明、**临界照明**、**柯勒照明** ★
- ✓ 显微镜的**物镜**

■ 望远镜系统

✓ 望远系统结构及参数 ★

➢ **视觉放大率**：$\Gamma = \dfrac{\tan\omega'}{\tan\omega} = \gamma$　　$\Gamma = -\dfrac{f_o'}{f_e'} = -\dfrac{D}{D'}$　　$\Gamma = \dfrac{1}{\beta}$

视觉放大率Γ是入瞳、出瞳物像垂轴放大率β的倒数

✓ 望远系统的分辨率及工作放大率 ★

➢ **极限分辨角**：$\varphi = \dfrac{1.22\lambda}{D} \approx 140''/D$ （瑞利判据）

➢ **受人眼分辨率的限制，视觉放大率和分辨率要满足关系**：

$\varphi\Gamma = 60''$ ➡ $\Gamma = \dfrac{60''}{\varphi} = \dfrac{D}{2.3}$ 设计望远镜时，视觉放大率取上式的2.3倍，称为工作放大率

✓ 望远镜的视场

开普勒望远镜 $\tan\omega = \dfrac{y'}{f_o'}$

伽里略望远镜 $\tan\omega = \dfrac{D}{2l_z} = \dfrac{D}{2\Gamma(L+\Gamma l_{z2}')}$

（50%渐晕）

Huangjh@mail.xjtu.edu.cn

■ 目镜

✓ 主要参数

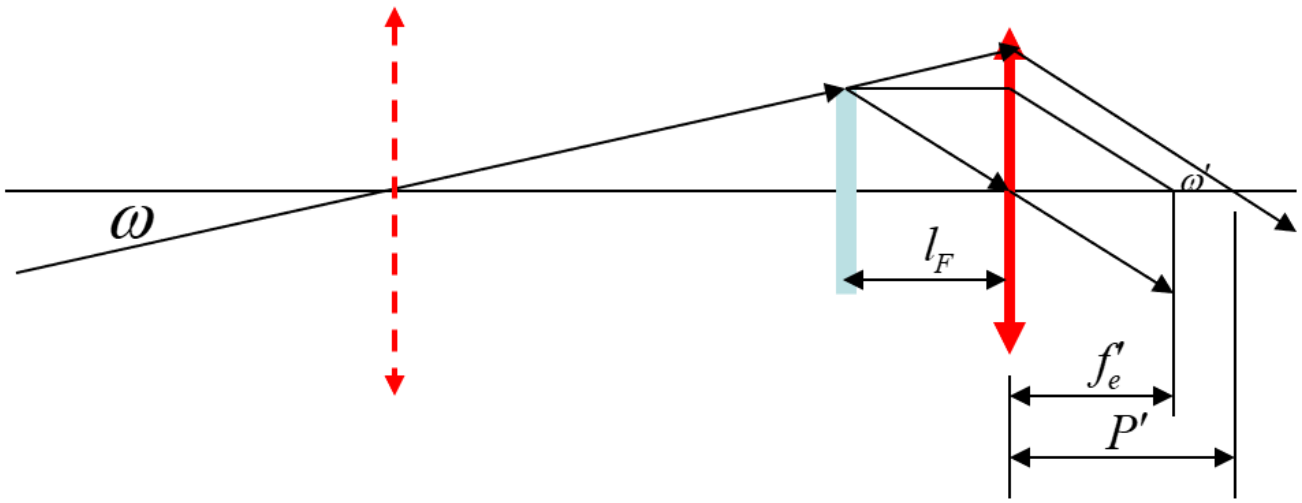
焦距：f_e'

视场角：$2\omega'$

镜目距（出瞳到目镜最后一面的距离）P'

相对镜目距P'/f_e'

目镜工作距离（目镜第一面到分划板的距离）l_F



Huangjh@mail.xjtu.edu.cn

■ 摄影系统

✓ 摄影物镜的光学参数 ★

主要参数：焦距f'、相对孔径D/f'、视场角$2\omega'$。焦距决定成像的大小，相对孔径决定像面照度，视场决定成像的范围。

➢ **视场：由物镜的焦距和接收器的尺寸决定**

拍摄远处物体时，像的大小为 $y' = -f' \tan\omega$

拍摄近处物体时，像的大小取决于垂轴放大率 $y' = y\beta = yf'/x$

当拍摄远处物体时，物方最大视场角为 $\tan\omega_{\max} = y'_{\max}/2f'$

底片的对角线长度

➢ **分辨率：摄影系统的分辨率取决于物镜的分辨率和接收器的分辨率**

$1/N = 1/N_L + 1/N_r$ （N_L为物镜分辨率，N_r为接收器分辨率）

物镜的理论分辨率为 $N_L = 1/\sigma = D/(1.22\lambda f')$

取$\lambda = 555\text{nm}$，则$N_L = 1475D/f' = 1475/F$

光圈数：$F = f'/D$ （相对孔径：D/f'）

Huangjh@mail.xjtu.edu.cn

■ 摄影系统

✓ **摄影物镜的景深**

$$\Delta_1 = \frac{P^2\varepsilon}{2a(\frac{f'}{L}) - P\varepsilon} \qquad \Delta_2 = \frac{P^2\varepsilon}{2a(\frac{f'}{L}) + P\varepsilon}$$

✓ 摄影物镜的类型：普通、大孔径、广角、远摄和变焦等类型摄影物镜

■ 投影系统

✓ 投影物镜的结构型式：普通摄影物镜倒置使用时，均可用作投影系统

✓ **照明系统**

照明系统与成像系统衔接条件：

$J_1 \geq J_2$：保证光瞳衔接和成像关系

✓ 照明系统光束全部进入成像系统，充满整个视场。

✓ 光瞳衔接：避免光线切割

祝大家学业有成、
勇攀高峰！
《工程光学2》再见……