

# 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

## 第五章

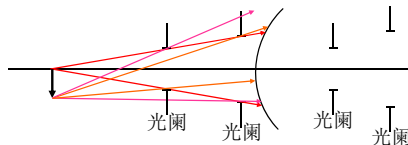
## 光学系统中的光束限制

### 5.1 光阑（光栏）

实际光学系统只能对物空间的一定区域成比较满意的像，而且该区域内每一点的成像光束都限制在一定的立体角内。

光学系统中用一些中心开孔的薄金属片来合理限制**成像光束的宽度、位置和成像范围**。这些限制成像光束和成像范围的薄金属片称为**光阑**。

光阑通光孔一般为圆形，光阑平面垂直于光轴。



### 光学系统中的光阑及其作用

光阑对光束加以限制，对系统的几何光学和物理光学性质将产生重大影响。表现为：

- 1、影响光学系统（不考虑衍射效应）的几何像差，即影响自光学系统出射的光束结构。
- 2、影响由于光的波动性所决定的衍射性质，这种衍射性质即使在没有像差时也将使点的像发生畸变。
- 3、由于光阑决定光束截面，因而决定了能通过光学系统的光能量，也就决定了光学系统在屏、接受元件(如底片、CCD等)或人眼的网膜上所产生的照度。
- 4、影响与入射光束孔径有关的成像空间深度（即景深）与分辨本领。

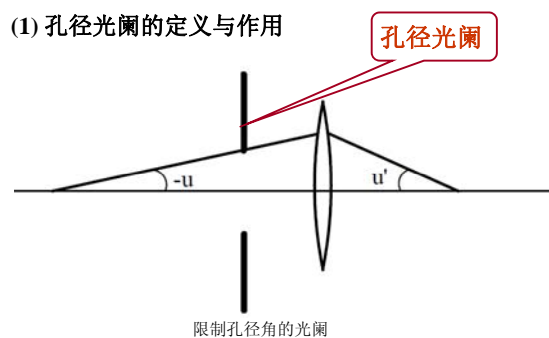
光阑按其作用可分为以下几种：

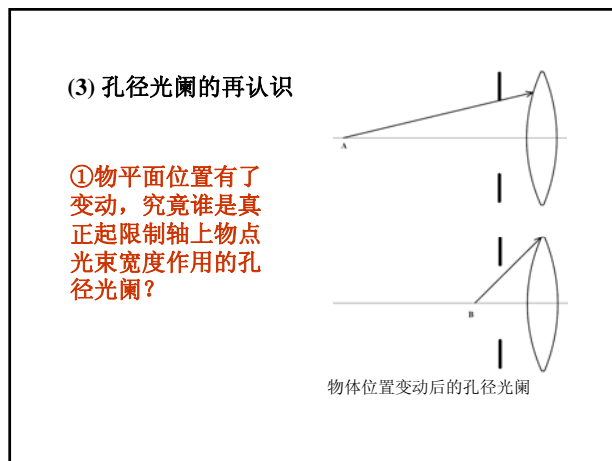
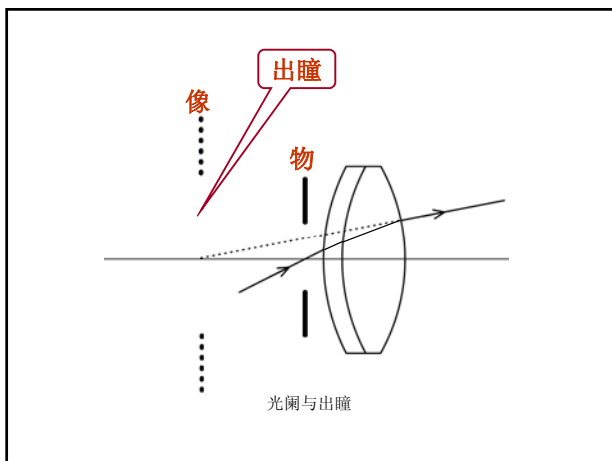
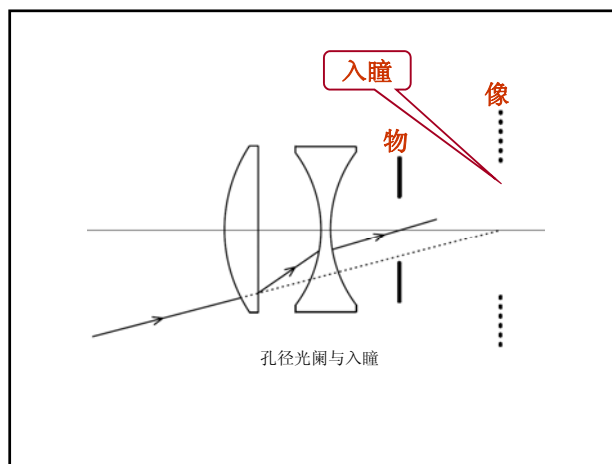
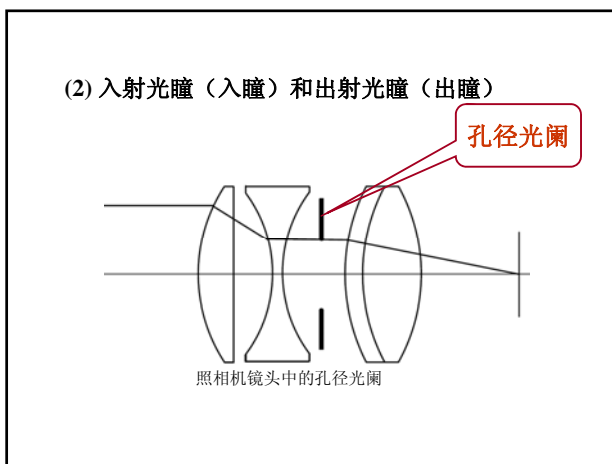
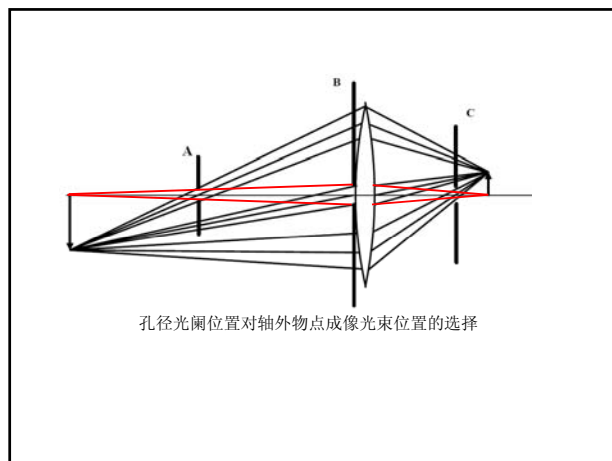
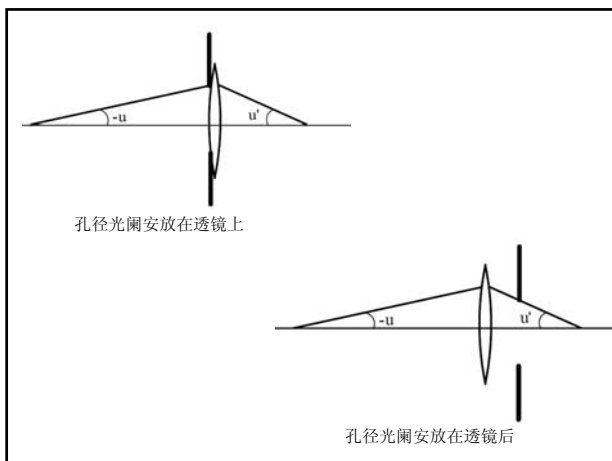
- (1) **孔径光阑**：限制轴上物点成像光束立体角、并有选择轴外物点成像光束位置作用的光阑；也称“有效光阑”。如果在过光轴的平面上来看，这种光阑就是决定轴上点发出的平面光束的孔径角。
- (2) **视场光阑**：决定物平面或物空间中成像范围的光阑。
- (3) **渐晕光阑**：影响轴外物点成像光束能量的光阑。
- (4) **消杂光光阑**：不限制通过光学系统的成像光束，只限制那些从非成像物体射来的光、光学系统各折射面反射的光和仪器内壁反射的光等，这些光称为杂光。

**孔径光阑和视场光阑是光学系统中的主要光阑。任何光学系统都有这两种光阑。**

#### § 5.1.1 孔径光阑

##### (1) 孔径光阑的定义与作用



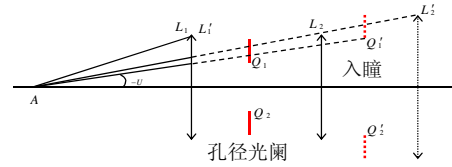


②. 如果几块口径一定的透镜组合在一起形成一个镜头，对于确定的轴上物点位置，要找出究竟那个透镜的边框是孔径光阑？

(i) 追迹光线

(ii) 透镜成像

将光学系统所有光学元件和开孔屏的内孔，经其前方的光学系统成像到整个系统物空间，然后比较这些像的边缘对轴上物点张角的大小，其中张角最小者，即为入瞳；与入射光瞳共轭的实际光阑即为孔径光阑。以此可得出瞳。



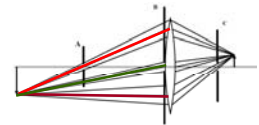
对于无限远轴上物点，所有光孔经其前方的光学系统在物空间所成的像中，直径最小的是入瞳。

③. 孔径光阑位置的安放原则在不同的光学系统中是不同的。

- (i) 目视光学系统                      出瞳在人眼瞳孔处
- (ii) 投影度量光学系统              入瞳/出瞳在无限远处
- (iii) 当仪器不对光阑位置提出要求时  
    光阑像差

通过入瞳中心的光线：主光线

主光线必然通过孔径光阑中心和出瞳中心。



主光线是各个物点发出的成像光束的光束轴线。

孔径光阑决定了光束的孔径角，光束的孔径角是表征实际光学系统功能的重要性能参数之一。它不但决定了像面的照度，而且还决定了光学系统分辨能力，对于不同类型的光学系统，有不同的表示方法来表征这种孔径角相应的性能参数。

拉赫不变量  $nuy$

### § 5.1.2 视场光阑

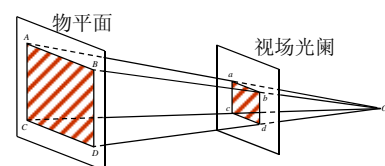
(1) 视场光阑的定义与作用

限定成像范围

照相机中底片框限制了成像范围的大小

显微镜中分划板的直径决定成像物体的大小

当眼睛位于O点，通过矩形窗孔abcd观察物平面N时，所能看到的物面范围为ABCD。abcd是视场光阑。



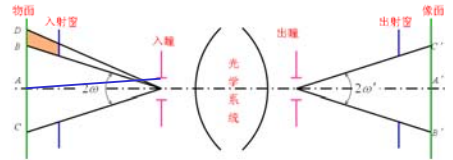
## (2) 入射窗（入窗）和出射窗（出窗）

视场光阑被其前面的光学系统所成的像

视场光阑经它后面的光学系统所成的像

(3) 有的系统，如果在像面处无法安放视场光阑，在物面处安放视场光阑又不现实，成像范围的分析就复杂一些。

从物方（或像方）确定视场光阑的方法和步骤：首先将光学系统中的所有光阑（包括透镜边框）经其前方（或后方）光学系统成像在整个系统的物空间（或像空间）；然后从系统的入瞳中心（或出瞳中心）分别向物空间（或像空间）所有的光阑的边缘作连线，其中张角最小的称为“入窗”（或“出窗”），与其共轭的实际光阑即为视场光阑。



光学系统的成像范围，由对主光线发生限制的光孔所决定。

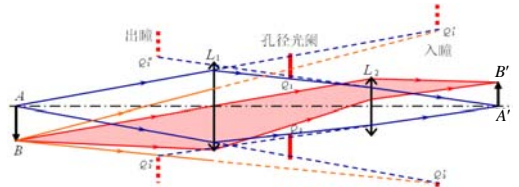
入射窗、视场光阑和出射窗在各自的空间对同一条主光线起限制作用，主光线和光轴间的夹角即表示整个光学系统的视场角。

当物体在无限远时，常用视场角表示光学系统的视场，以 $2\omega$ 表示。

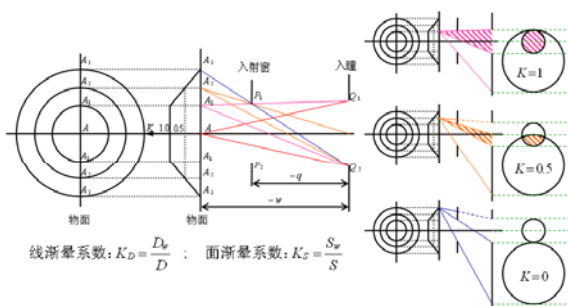
当物体在有限距离时，常用物高表示视场，称为线视场，以 $2y$ 表示之。

## § 5.1.3 渐晕

在大多数情况下，轴外点发出并充满入瞳的光束，会被某些透镜边框或某些光阑所遮挡，使轴外物点的成像光束小于轴上点的成像光束，造成像面边缘的光照度有所下降。这种轴外点光束被部分地拦掉的现象称为光学系统的轴外点光束的渐晕。



由入瞳和入射窗共同限制所产生的渐晕：



用眼睛通过放大镜观察物面时，由放大镜和眼睛组成的光学系统存在渐晕。

何时不存在渐晕？

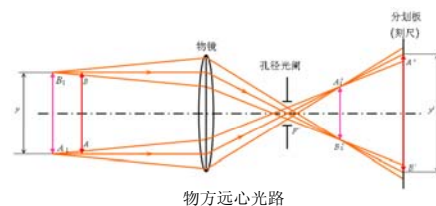
光学系统中光阑的设置原则：

- 1、限制成像范围的视场光阑，在大多数光学仪器中，均与系统的实像平面重合（或者接近实像平面），以保证入射窗与物平面重合，使系统有清晰的视场边界。
- 2、限制成像光束口径的孔径光阑，不仅限制轴上点成像光束的口径，而且影响轴外点成像光束的口径。对某些类型的光学系统，孔径光阑的位置应满足其特定的要求。
- 3、在一些较复杂的系统中，为了减少仪器的径向尺寸以及改善轴外点的成像质量，拦掉那些像质不好的光线，常加入光阑，使轴外光束产生一定的渐晕。

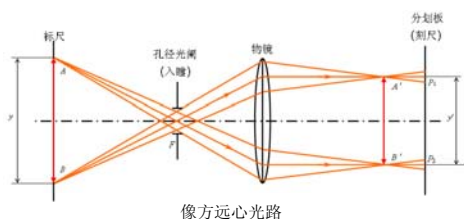
## § 5.2 远心光路

在测量仪器中，有两类常用的系统，是利用将孔径光阑置于物镜的像方焦面或物方焦面上，以实现物体长度或距离的精确测量，这就是应用在工具显微镜等计量仪器中的**物方远心光路**和应用于视距法测距仪器中的**像方远心光路**。

入瞳位于无穷远，轴外点主光线平行于光轴  
“**物方远心光路**”

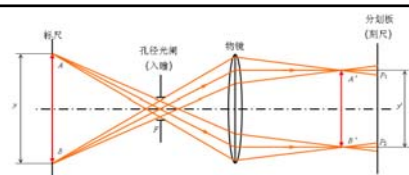


应用在工具显微镜等计量仪器中。



应用于视距法测距仪器中。

在远心光路中，由于孔径光阑与物镜不重合，因此在相同孔径下，物镜的口径要增大！



1975年珠峰测量，5月27日首次 3.51m 的红色金属测量视标树立在珠峰峰顶，测量峰顶积雪厚度以及在珠峰附近选择了9个测量点，对珠峰视标观测水平角、垂直角。数据综合后 8848.13m！

珠峰视标现在的全重为4.6公斤，采用高强度铝合金制成。设计寿命不少于3年。增加了6块反射棱镜，既能进行角度测量又能进行距离测量，进一步增加了测量的精度。



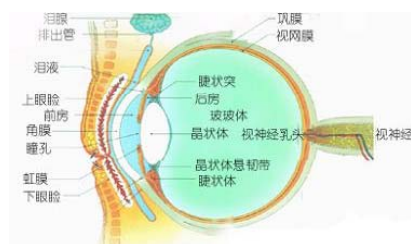
没有远心镜头

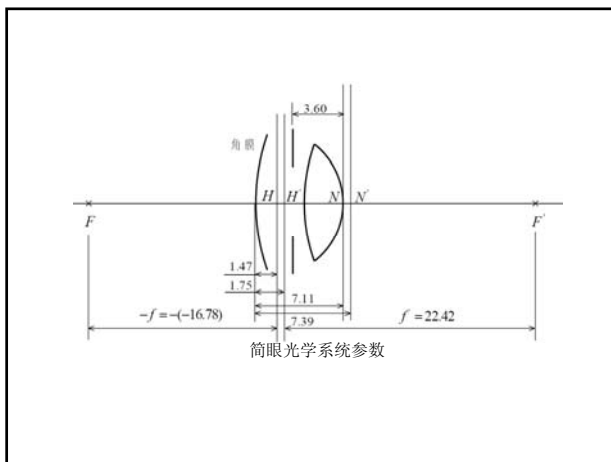
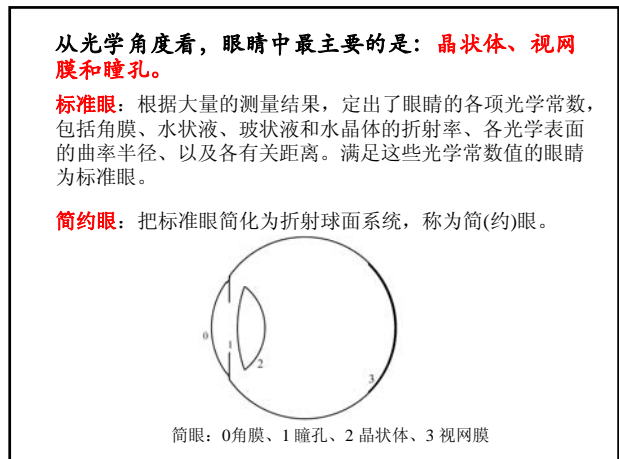
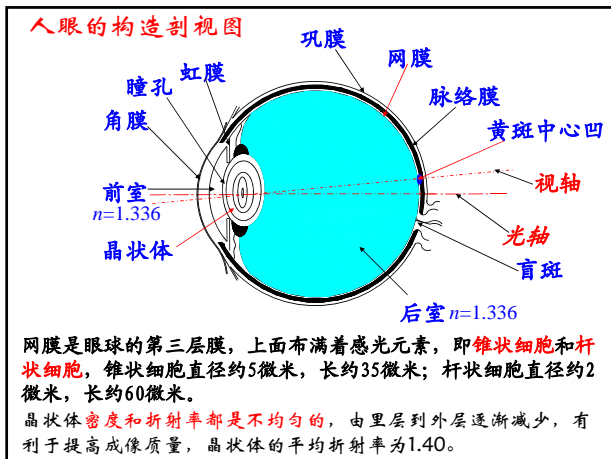


加上远心镜头

## 5.3 光学系统的景深

### § 5.3.1 简眼结构





**§ 5.3.2 眼睛的调节**

从几何光学讲，眼睛的**像距是一定的**，人眼通过调整晶状体的焦距将不同物距位置上的物体成像在视网膜上。**人眼的这个功能称为调节**。

正常人的眼睛，处于完全放松的无调节状态时，位于无穷远的物体成像在视网膜上，此时人眼的像方焦点位于视网膜上。此时人眼处于放松状态，因此看远处的物体时人眼不易疲劳。

人眼通过自身的变焦作用，能对人眼前方的物体清晰地成像在视网膜上。能成像的最近距离称为人眼的**近点距离**： $l$  (m)。

近点视度  $SD=1/l$   
单位：屈光度

人眼**调节能力**是用近点距的倒数和远点距的倒数之差来描述。

不同年龄段的人眼调节范围

年龄	最大调节能力 (屈光度)	近点距离 (m)
10	-14	-0.07
15	-12	-0.083
20	-10	-0.10
30	-7	-0.14
40	-4.5	-0.22
50	-2.5	-0.40

**§ 5.3.3 眼睛的适应**

- 根据周围环境的照明情况不同，人眼瞳孔开启的大小也不一样。
- 在室外，阳光普照，照明条件好，则人眼瞳孔自动收缩，不让过多的光能进入眼睛，以免视网膜受到过渡刺激；
- 在黑暗的房间，照明条件不好，则人眼瞳孔自动放大，让较多的光能进入眼睛而尽可能收集到较多的信息；
- 人眼瞳孔大小能随外界照明条件而自动变化的功能称为**眼睛的适应**。
- 一般人眼的**瞳孔直径**在**2mm到8mm**的范围内变动。

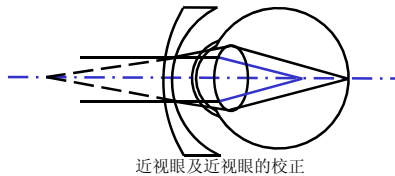
### § 5.3.4 眼睛的缺陷

#### 1. 近视

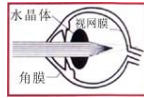
正常人的眼睛，远点在无穷远处。远点不在无穷远处，则为近视。

若远点在-0.5m处，则近视程度为：

$$\frac{1}{-0.5\text{m}} = -2 \text{ 屈光度} = -200^\circ$$

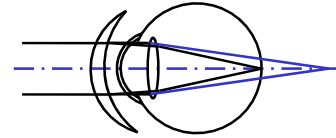


近视眼及近视眼的校正

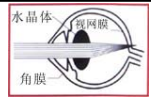


#### 2. 远视

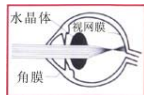
正常人的眼睛，近点在近点距离处。近点大于近点距离，则为远视。



远视眼及远视眼的校正



#### 3. 散光



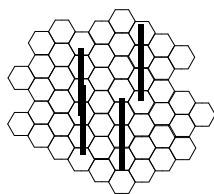
眼睛不再是一个以光轴为对称轴的旋转对称系统，在包含光轴在内的两个相互正交的平面内眼睛的光焦度是不相等的。

校正的方法是戴一副柱面或轮胎面的眼镜。

### § 5.3.5 眼睛的分辨本领和瞄准精度

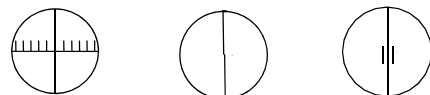
- 视网膜在人眼中起接收器的作用。
- 视网膜上的视觉神经细胞有一定的大小，人眼能分辨开外界两个很靠近点的能力一定是有限的，将人眼的这个能力称为**眼睛的分辨率**。
- 将刚能分辨的物方两点对眼睛物方节点的张角称为**极限分辨角**，以此极限分辨角来描述人眼的分辨率。
- 统计数据显示人眼的极限分辨角约为**1'**。

两几何中心线对人眼的张角小于某一角度值时，虽然存在不重合，但眼睛认为完全重合，该角度值即为**人眼瞄准精度**。



人眼对于**线条的变形**或**两条线错开**造成的外形变化或**比较两条线宽的变化**具有很高的灵敏度。人眼通过两物的比较**发现它们外形变化的能力**比**分辨率**它们要强得多。

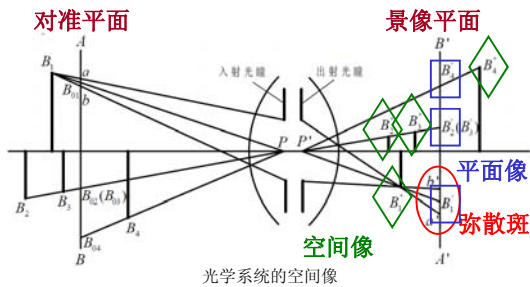
**瞄准精度**和**分辨率**是两个概念，有联系。经验证明，**人眼的最高瞄准精度约为分辨率的1/6至1/10**。



- 1、两实线瞄准  $\pm 60''$
- 2、两实线端部瞄准  $\pm 10 \sim 20''$
- 3、双线平分或对称瞄准  $\pm 5 \sim 10''$



### § 5.3.6 光学系统的空间像



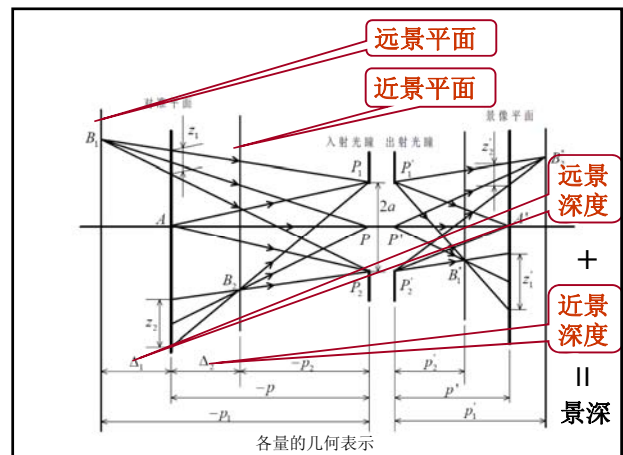
物方空间点成像相当于以**入瞳中心**为**投影中心**，以**主光线**为**投影线**，使空间点投影在对准平面上，再成像在景像平面上。  
在像空间，以**出瞳中心**为**投影中心**，各空间像点沿主光线投影在景像平面，可形成空间物点的平面像。

### § 5.3.7 光学系统的景深

任何光接收器都不能接受到真正的几何像点，且分辨本领不一样。像的弥散斑足够小并能满足接收器的分辨本领，就可认为该弥散斑是一个点。

一个光学系统是对**空间物体**成一个清晰的**平面像**

能在像平面上获得清晰像并沿光轴方向的物空间深度称为**成像空间深度(景深)**。



$$z_1' = \beta z_1 \quad z_2' = \beta z_2$$

由相似三角形关系得：

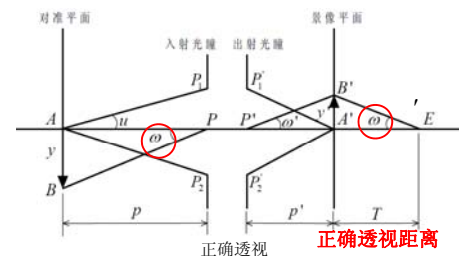
$$\frac{z_1}{2a} = \frac{p_1 - p}{p_1} \quad \frac{z_2}{2a} = \frac{p - p_2}{p_2}$$

$$z_1 = 2a \frac{p_1 - p}{p_1} \quad z_2 = 2a \frac{p - p_2}{p_2}$$

$$z_1' = 2\beta a \frac{p_1 - p}{p_1} \quad z_2' = 2\beta a \frac{p - p_2}{p_2}$$

对于照相物镜，若照片上各点的弥散斑**对人眼的张角小于人眼极限分辨角** $\varepsilon(1' \sim 2')$ ，则感觉犹似点像，可认为图像是清晰的。

正确透视距离：获得正确的空间感觉，不发生景像的歪曲，使照片上的各像点对眼睛的张角与直接观察该空间物体时各对应点对眼睛的张角相等。



$$\tan \omega = \frac{y}{p} = \frac{y'}{T} \quad T = \frac{y'}{y} p = \beta p$$



景像面上弥散斑直径的允许值:

$$z' = z_1' = z_2' = T\varepsilon = \beta p\varepsilon$$

对准平面上弥散斑的允许值:

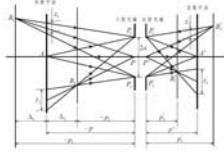
$$z = z_1 = z_2 = \frac{z'}{\beta} = p\varepsilon$$

$$z_1 = 2a \frac{p_1 - p}{p_1}, z_2 = 2a \frac{p - p_2}{p_2} \rightarrow p_1 = \frac{2ap}{2a - z_1}, p_2 = \frac{2ap}{2a + z_2}$$

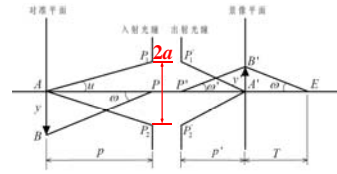
远景深度和近景深度:

$$\Delta_1 = p_1 - p = \frac{pz_1}{2a - z_1}, \Delta_2 = p - p_2 = \frac{pz_2}{2a + z_2}$$

$$\Delta_1 = \frac{p^2\varepsilon}{2a - p\varepsilon}, \Delta_2 = \frac{p^2\varepsilon}{2a + p\varepsilon}$$



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



$$2a = 2p \tan U$$

$$\Delta = \frac{4p\varepsilon \tan U}{4 \tan^2 U - \varepsilon^2}$$

把入瞳缩小可以获得大的空间深度的清晰像

把入瞳扩大可以获得小的空间深度的清晰像

$$\Delta_1 = \frac{p^2\varepsilon}{2a - p\varepsilon}, \Delta_2 = \frac{p^2\varepsilon}{2a + p\varepsilon}$$

• 若对准平面后的整个空间都能在景像平面上成清晰像, 即  $\Delta_1 = \infty, 2a - p\varepsilon = 0$

$$p = \frac{2a}{\varepsilon}, p_2 = p - \Delta_2 = p - \frac{p^2\varepsilon}{2a + p\varepsilon} = \frac{p}{2} \left( \frac{a}{\varepsilon} \right)$$

• 把照相物镜调焦到无限远, 即  $p = \infty$ , 以  $z_2 = p\varepsilon$

代入  $p_2 = \frac{2ap}{2a + z_2}$ , 取极限

$$p_2 = \frac{2a}{\varepsilon}$$

小结:

孔径光阑、视场光阑、渐晕光阑、入瞳、出瞳、入窗、出窗

远心光路, 物方远心光路、像方远心光路

人眼, 景深