

## 第五章 光阑与光瞳

### 5.1 介绍

光学设计中一个重要的概念是光阑及与光阑相关的光瞳。在拍照的时候，大多数情况下都会用到光阑。高质量的手机都有内置的可调节的光阑，以便可以控制暴光量，它不仅可以控制到达像面的光通量，设计者还可以通过光阑的位置和大小来控制像差。当你设计一个摄影镜头时，你会体会到光阑决定了光学系统中的两条重要光线，主光线和边缘光线。当你做近轴光线追迹的时候，这些是你要考虑的光线，主光线和边缘光线。他们在镜面上产生的高度和角度是用来计算像差的。

### 5.2 光阑与光瞳

光阑是光学系统的物理孔径，它起着通光的作用，只允许部分光线通过像面，而阻挡其他部分通过。

光阑可以通过光学器件的自身的孔径来定义或者由光学系统中的孔隙面来确定，如图 5.1 所示。

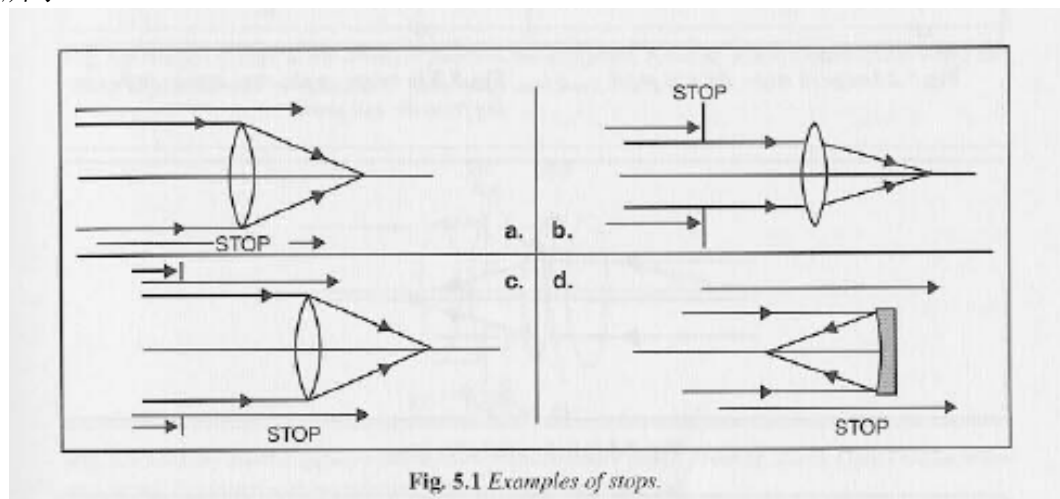


Fig. 5.1 Examples of stops.

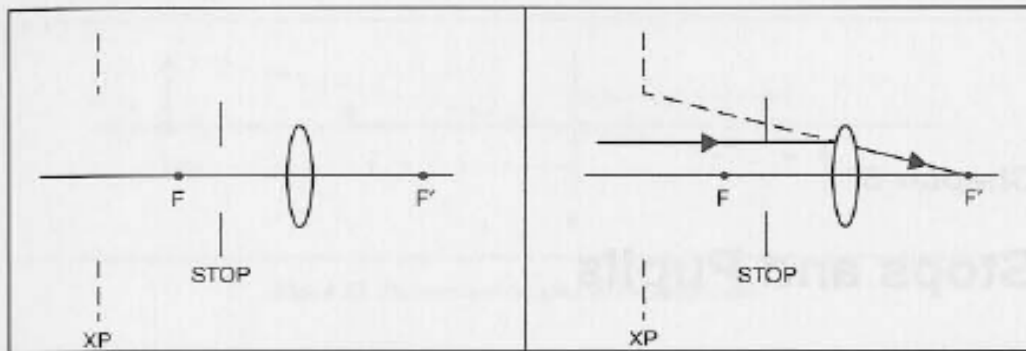
在图 5.1b 中，因为光阑位于镜头的正前面，所以又称为入瞳，光阑作为物方对镜头的成像，这个像又称为出瞳（图 5.2）。

如果做无穷远处成像在像方焦点光线的反向延长线，可以确定出瞳的大小（图 5.3）。

在图 5.4 中，所放置的光阑位于镜头的后面，光阑又称之为出瞳，光阑由左边镜头的成像（光线由右像追迹），这个物方的成像又称之为入瞳（图 5.5）。如图 5.6 所示，无穷远处的成像光线由入瞳所限制。

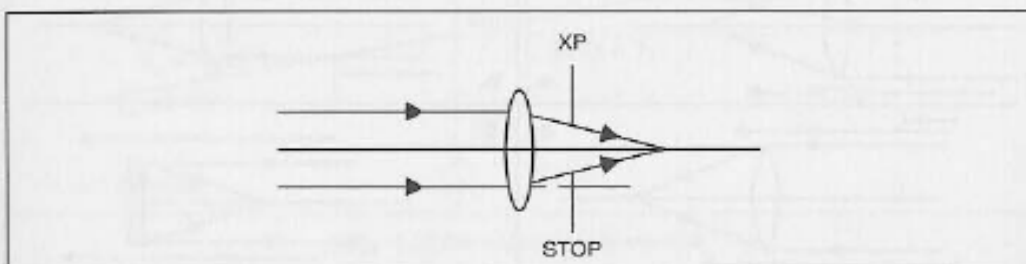
图 5.7 中，光阑的位置位于系统的中间，它既不是入瞳也不是出瞳，我们仍然将它视为物，光阑对左边系统的成像为入瞳，对右边系统的成像为出瞳（如图 5.8a&b）。

对无穷远的物方成像，所有的光线在入瞳边缘聚焦入射，在出瞳边缘出射（图 5.9）。

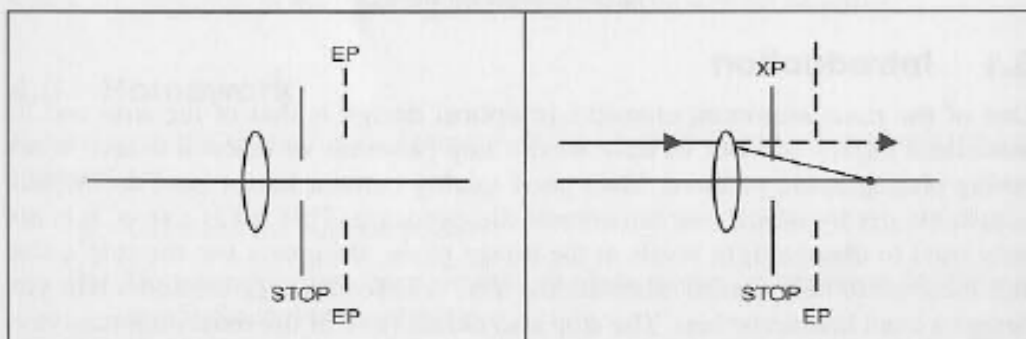


**Fig. 5.2** Image of stop—the exit pupil.

**Fig. 5.3** In image space, rays appear to be coming from the exit pupil.

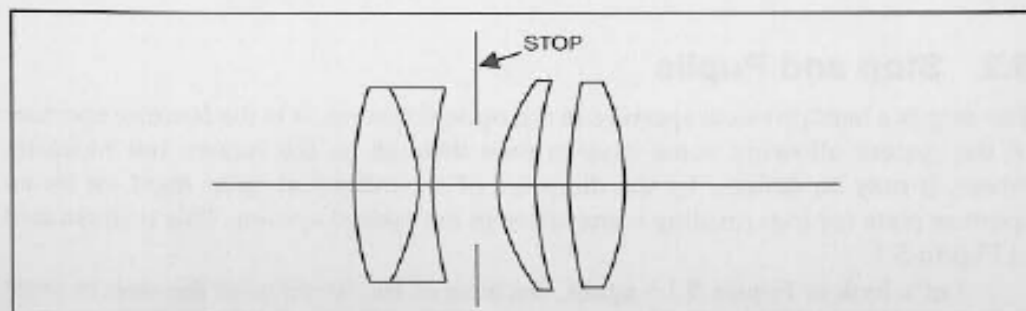


**Fig. 5.4** Stop located after lens.



**Fig. 5.5** Image of stop—the entrance pupil.

**Fig. 5.6** In object space, rays appear limited by the entrance pupil.



**Fig. 5.7** Buried stop. From M. Klein, *Optics* (John Wiley and Sons). Reprinted with permission of John

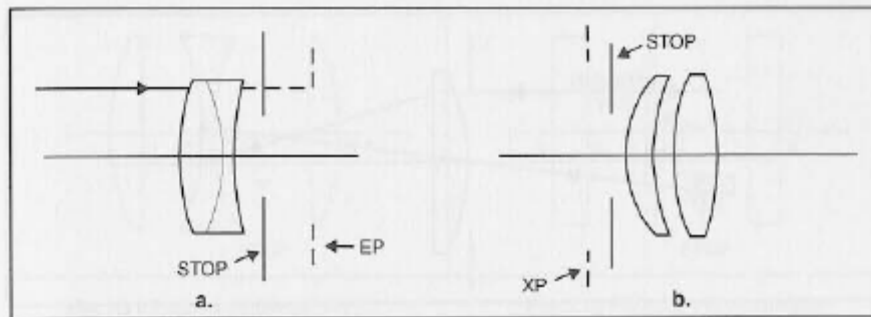


Fig. 5.8 Images of stop: a. the entrance pupil; b. the exit pupil. From M. Klein, Optics (John Wiley and Sons). Reprinted with permission of John Wiley and Sons, Inc.

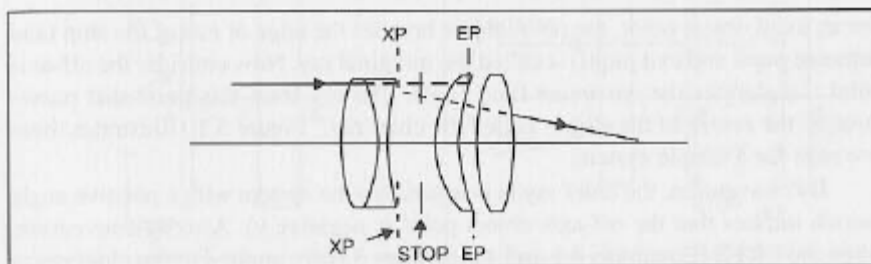


Fig. 5.9 Real ray bundle appears limited by virtual entrance pupil. From M. Klein, Optics (John Wiley and Sons). Reprinted with permission of John Wiley and Sons, Inc.

### 5.3 主光线，边缘光线

对轴上点物体，通过光阑边缘的光线（入瞳和出瞳）称之为边缘光线。现在来看决定最大视场角的这些点，从这些点发出的光线直接透过光阑的中心被称为主光线，如图 5.10 所示的简单的系统。

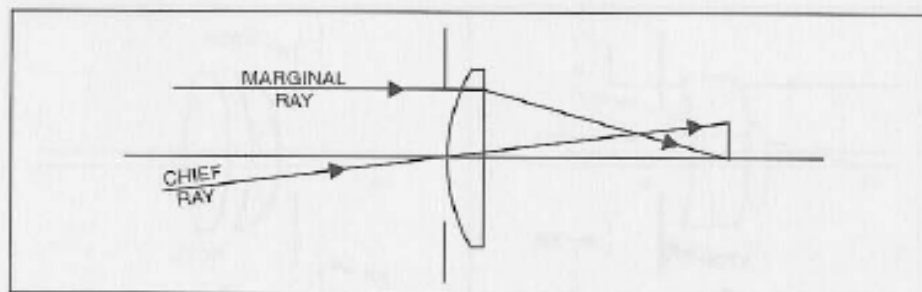


Fig. 5.10 Simple illustration of the marginal and chief ray.

通常，主光线以正的入射角入射（也就是说轴外的物点为 $-y$ ），当 PRTE（33 页方程式 4.1 和 4.2）应用于主光线时，这时水平杠加在变量高度和角度上：

$$\bar{r}'_j \bar{u}' = \bar{r}_j \bar{u} - \bar{y} \Phi \quad (5.1)$$

$$\bar{y}_{j+1} = \bar{y}_j + \bar{u}' \quad (5.2)$$

### 5.4 用 PRTE 方式得出内置光阑系统的入瞳和出瞳

如图 5.11 所示，我们用内置光阑的三片式透，我们来追迹系统的边缘和主光线。但是要做到这一点，我们需要瞄准通过入瞳边缘的边缘光线和通过中心的主光线。我们怎么找到这些目标点？首先我们找到光阑对左边系统的成像。如图 5.12

所示我们用三片式近似的表示法。我们来选择光栏上的两个点，一个中心点，一个边缘的点。由每个点出发来对光线由右向左追迹，追迹的角度是不重要的。（我们也可以如图 5.12 所示那样把光路转过来，根据光路可逆原理）。由中心点出发的光线经过整个系统，在最后一面上肯定会产生某一个高度和角度，这个光线延长与 **光** 轴的交点就是像面的位置，这样我们也就确定了轴上的入瞳的位置。入瞳的大小如

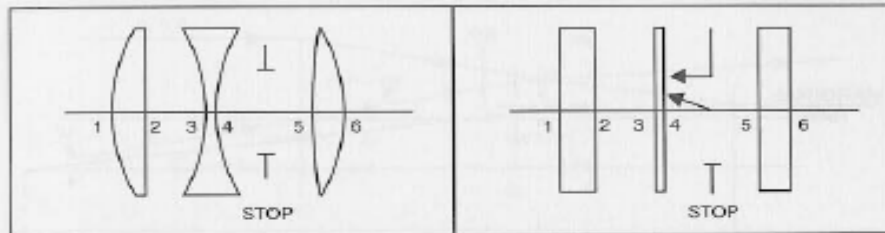


Fig. 5.11 Triplet with buried stop.

Fig. 5.12 Paraxial triplet with stop.

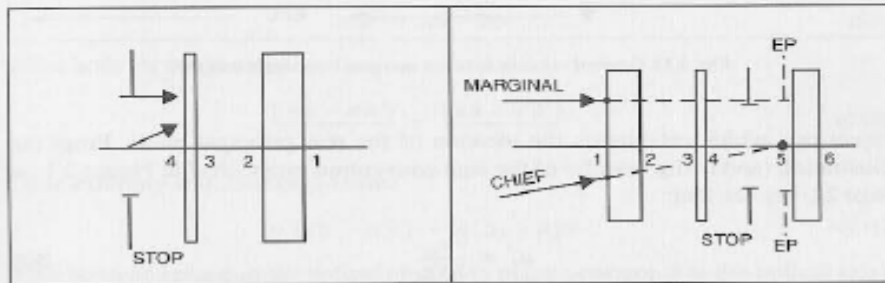


Fig. 5.13 Front portion of triplet turned around.

Fig. 5.14 Triplet with airm points located.

何来确定？通过系统我们来追迹光栏的边缘光线，它与像面的交点有个高度这个高度就决定了入瞳的大小。这样我们就找到了系统的入瞳，再将系统旋转过来，如图 5.14。

### 5.5 瞳大小和 F 数

在 2.8.1 节我们知道 F 数是和到像面的边缘光线的角度有关，这对于薄透镜是成立的，同样对复杂系统也是成立的。考虑如图 5.15 的内置光栏系统，图中

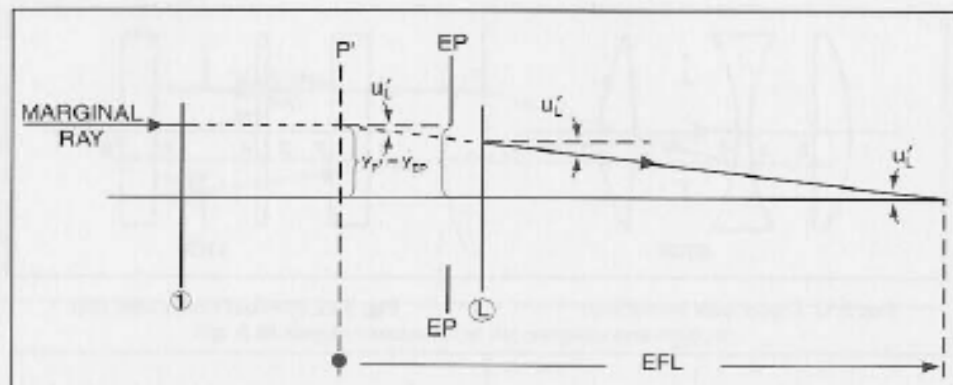


Fig. 5.15 General relation between marginal ray angle and  $f/\#$ .

标示出了第一面最后一面及主面的位置，追迹入瞳边缘的光线，会以一定的角度和高度出射到最后一面。

反向延长到达像面的光线和边缘光线会有交点,这就是像方主点的位置。  
我们来看第 22 页图 3.1 中:

$$u_L' = \frac{-y_{EP}}{\text{EFL}} \quad (5.3)$$

$$u_L' = -\left(\frac{\text{EPD}}{2}\right) / \text{EFL} \quad (5.4)$$

$$u_L' = \frac{-1}{2\left(\frac{\text{EFL}}{\text{EPD}}\right)} \quad (5.5)$$

$$u_L' = \frac{-1}{2(f/\#)} \quad (5.6)$$

所以

$$f/\# = \frac{-1}{2 \tan U_L'} \quad (5.7)$$

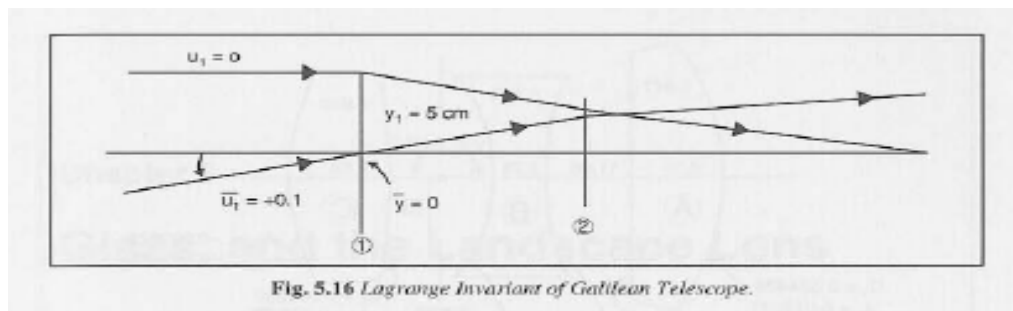
其中  $U_L'$  是负值, 方程式 5.7 表明了一般近轴边缘光线和近轴 F 数之间的关系。

## 5.6 拉格朗日不变量

对边缘光线和主光线我们来考虑 PRTE1

$$n'u' = nu - y\phi$$

$$n'\bar{u}' = n\bar{u} - \bar{y}\phi$$



对  $\phi$  的解有下面的等式:

$$\frac{(nu - n'u')}{y} = \frac{(n\bar{u} - n'\bar{u}')}{\bar{y}} \quad .$$

交叉相乘, 重新整理各项, 得:

$$n'(\bar{u}'y - u'\bar{y}) = n(\bar{u}y - u\bar{y}) \quad .$$

如果我们对光学系统中的任何一面的左边和右边来进行计算, 我们将会得到一个常量, 这个数我们成为拉格朗日不变量。我们命名为  $L$ , 拉格朗日不变量的重要的应用是在薄透镜计算和轴外像差的计算。

伽利略望远镜是用薄透镜组成，第一面镜片既是入瞳又是光栏。在入瞳面  $L=\bar{u}y=+0.5\text{cm}$ ，假如我们计算其他的面，也会得到同样的数值。