



# 应用光学

# Applied Optics

任课教师：陈 瑞

电子邮箱：[chenr229@mail.sysu.edu.cn](mailto:chenr229@mail.sysu.edu.cn)

助教安排：柳夏、石福隆

答疑时间：周四下午2:30-3:30，爪哇堂307

中山大学 物理学院  
2021-1



# 第四章 小结

★ 理想光学系统

- 理想光学系统定义
- 成像性质

基点和基面

- 焦点与焦平面
- 主点与主平面
- 共轴系统的基点和基面

物像关系

★

- 基本概念
- 牛顿公式与高斯公式
- 焦距、放大率
- 光焦度、节点

第四章 理想光学系统

透镜模型

- 单透镜
- 单透镜的基点与基面
- 透镜基点位置分析
- ★ 薄透镜

系统组合

- 光组组合问题
- 焦点位置和焦距公式
- 主点位置与放大率
- ★ 正切算法

作图方法

★

- 图解方法
- 图解实例
- 图解练习



- 光阑决定了光学系统通光能力、成像范围和分辨能力；
- 本章主要讨论如何分析系统各通光孔的光束限制作用；
- **分析关键：**将系统所有光孔成像在同一空间。

## 主要内容

- 5.1 概述
- 5.2 孔径光阑
- 5.3 视场光阑与渐晕光阑
- 5.4 平面上空间像
- 5.5 远心光学系统
- 5.6 物面与瞳面的转化、光瞳匹配



# 第五章 光学系统中光束的限制

- 光阑决定了光学系统通光能力、成像范围和分辨能力；
- 本章主要讨论如何分析系统各通光孔的光束限制作用；
- **分析关键：**将系统所有光孔成像在同一空间。

## 主要内容

- **5.1 概述**
- 5.2 孔径光阑
- 5.3 视场光阑与渐晕光阑
- 5.4 平面上空间像
- 5.5 远心光学系统
- 5.6 物面与瞳面的转化、光瞳匹配



## 5.1 概述

### 一. 光学系统中的光束限制

#### 成像要求

对给定物体按照要求的倍率成像

→ 系统轴向尺寸

具有给定的成像范围

→ 系统视场

具有一定的光度水准，即一定的亮度

具有一定的分辨能力，反映物体的细节

→ 成像光束的立体角或者孔径角

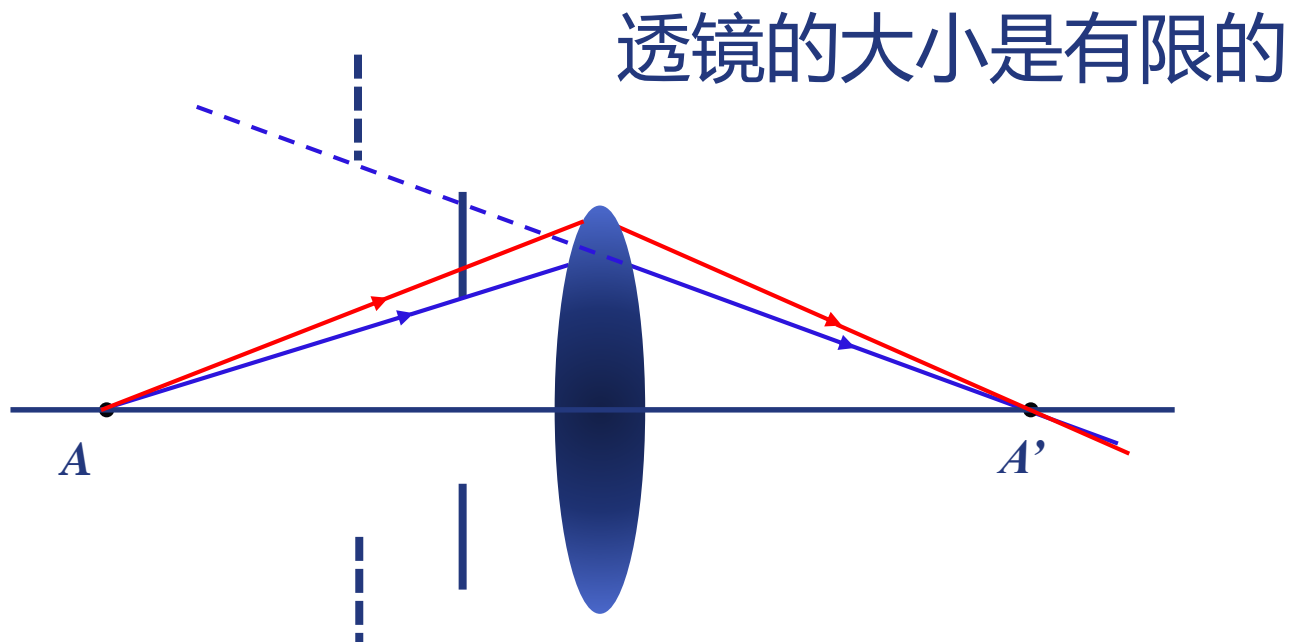
**理想光学系统：**对无限大物体以任意宽的光束成像。

**实际光学系统：**光学元件都是有一定的尺寸和大小。

## 5.1 概述

### 一. 光学系统中的光束限制

- ◆ 一条光线如果被某一光学器件限制, 则该光线的共轭光线也一定会受到该器件的共轭像所限制。



#### 实际光学系统

- 通过设计光学元件的横向尺寸或通光孔径, 可以达到合理限制通过光学系统的光束的目的。



## 5.1 概述

### 一. 光学系统中的光束限制

#### 照相机

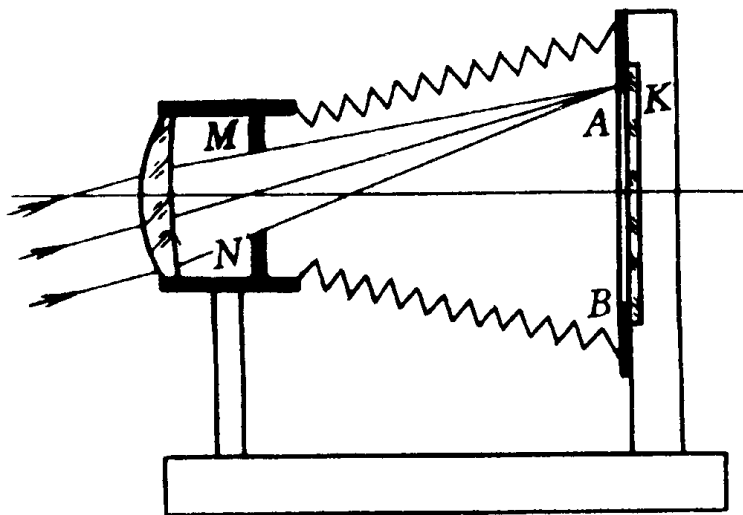
镜头：起成像作用

底片：感光部分

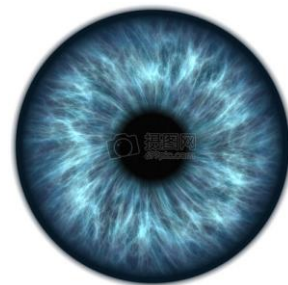
光阑：限制成像光束，

可变光阑

#### 实际光学系统



人眼瞳孔就是光阑，瞳孔随着外界明亮程度变化，白天最小 $D = 2\text{mm}$ ，晚上最大，可达 $D = 8\text{mm}$ 。



- 光学系统应对于要求成像范围内的物点，以要求的孔径角的光束成像；
- 光学系统中，不论是限制成像光束口径大小还是限制成像范围的孔或框都称为“**光阑**”。



## 5.1 概述

### 二. 光阑(diaphragm)在光学系统中的作用

❖ 决定像面的照度。



孔径光阑

aperture stop

❖ 决定系统的视场。



视场光阑

field diaphragm

❖ 限制光束中偏离理想位置的光线，用以改善系统的成像质量。



渐晕光阑

Vignetting stop

❖ 拦截系统中有害的杂散光。



消杂光光阑

flare eliminating diaphragm





# 第五章 光学系统中光束的限制

- 光阑决定了光学系统通光能力、成像范围和分辨能力；
- 本章主要讨论如何分析系统各通光孔的光束限制作用；
- **分析关键：**将系统所有光孔成像在同一空间。

## 主要内容

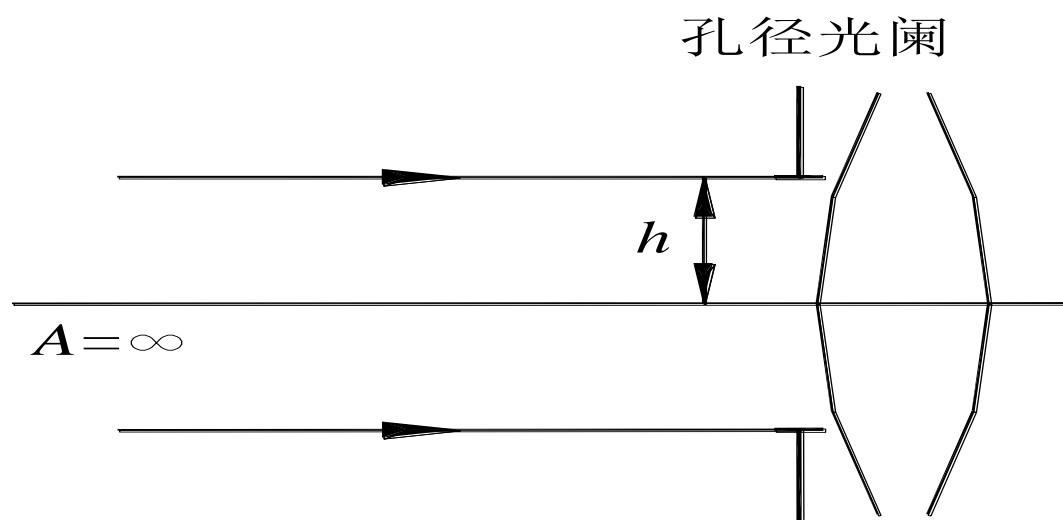
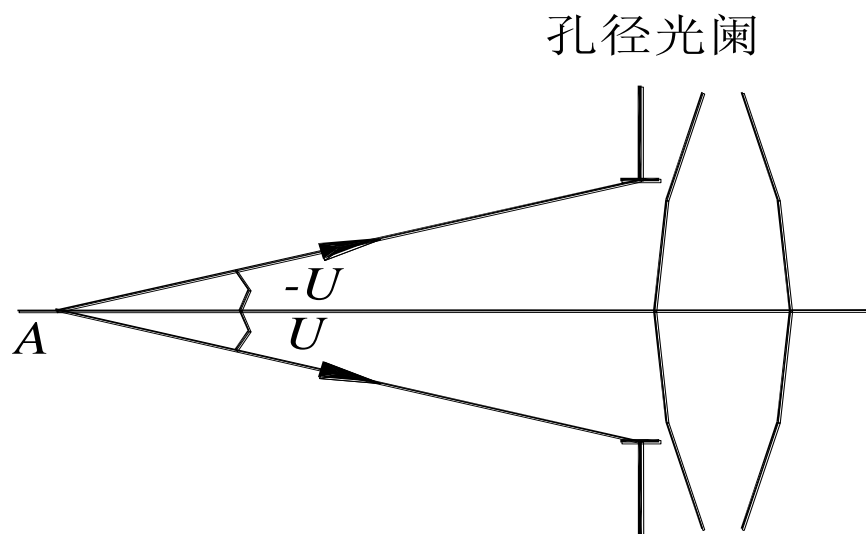
- 5.1 概述
- **5.2 孔径光阑**
- 5.3 视场光阑与渐晕光阑
- 5.4 平面上空间像
- 5.5 远心光学系统
- 5.6 物面与瞳面的转化、光瞳匹配

## 5.2 孔径光阑

### 一. 定义

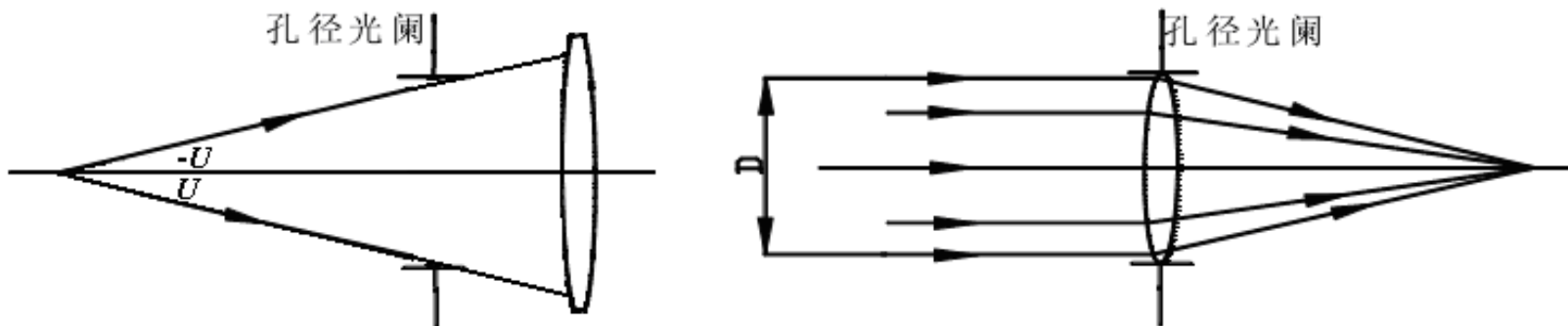
**孔径光阑：**用于限制成像光束立体角的通光孔，主要决定成像照度。

描述成像光束大小的参量称为**孔径**，近距离物体成像的孔径用孔径角 $U$ 表示，无限远物体成像的孔径用孔径高度 $h$ 表示；

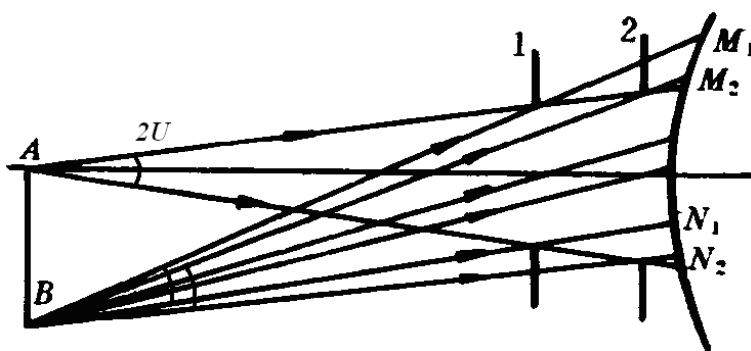


### 二. 孔径光阑对光束的限制

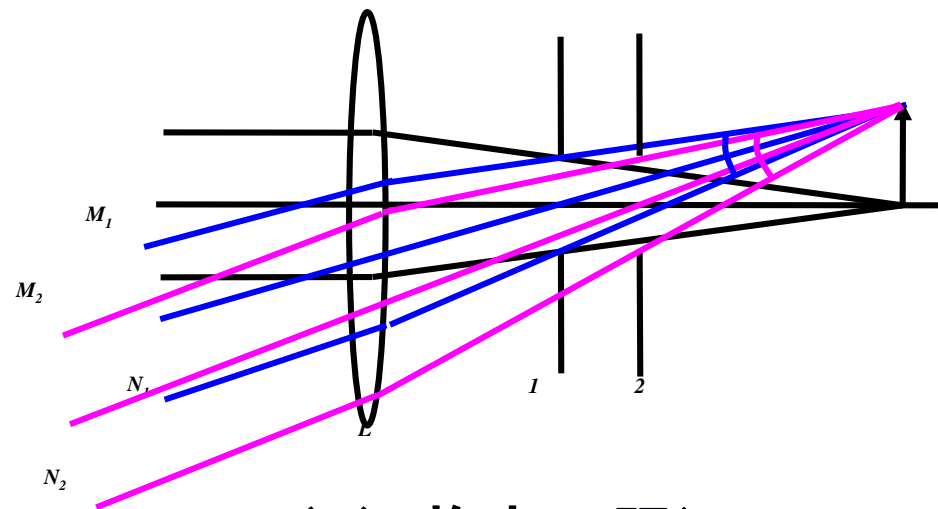
#### 1. 轴上点光束的限制



#### 2. 轴外点光束的限制



(a) 物点有限远



(b) 物点无限远



## 5.2 孔径光阑

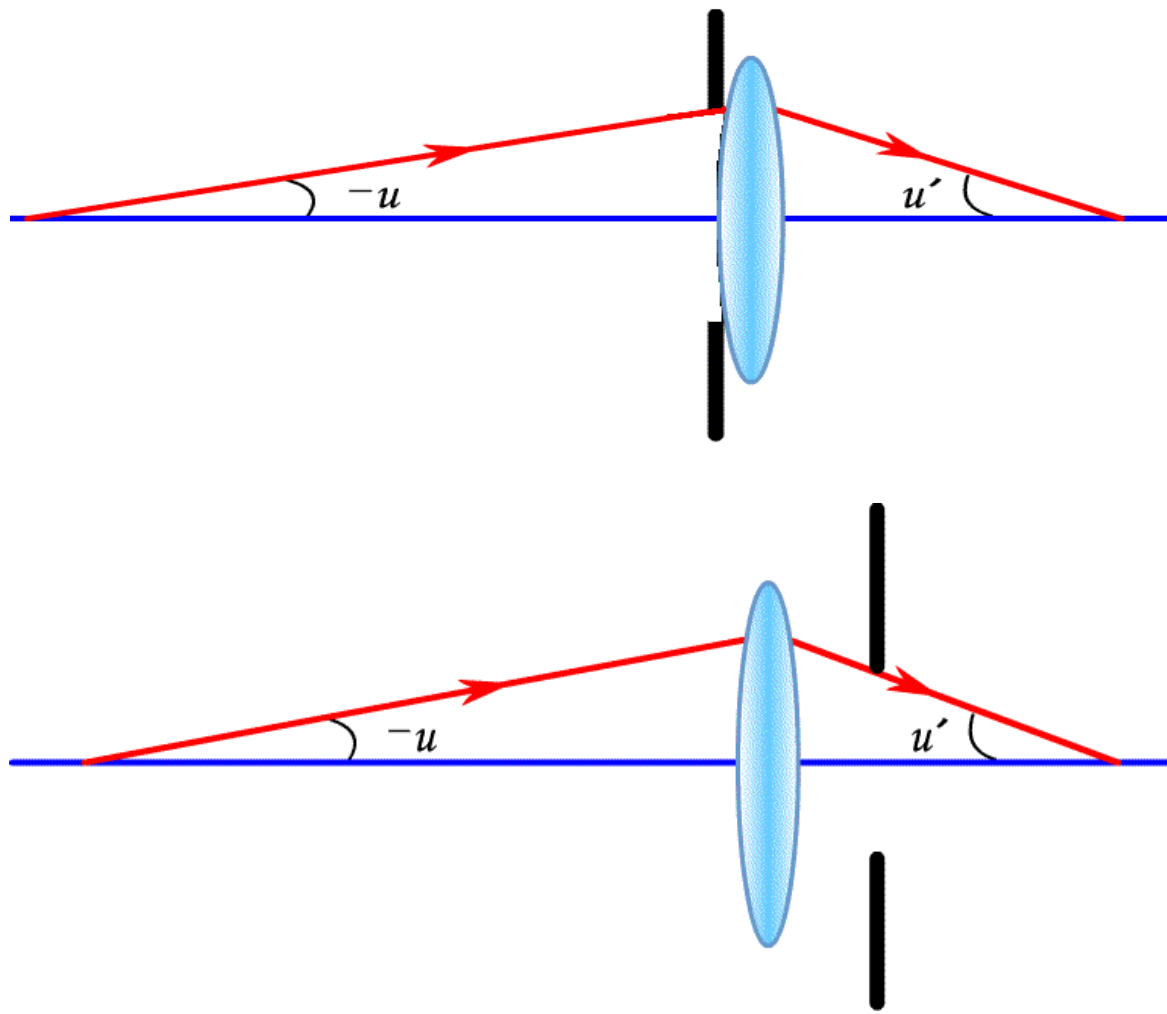
### 二.孔径光阑对光束的限制

#### 3. 孔径光阑的位置影响

孔径光阑的位置不同，但都起到了对轴上物点成像光束宽度的限制作用；

物点位置不同，孔径大小不同；

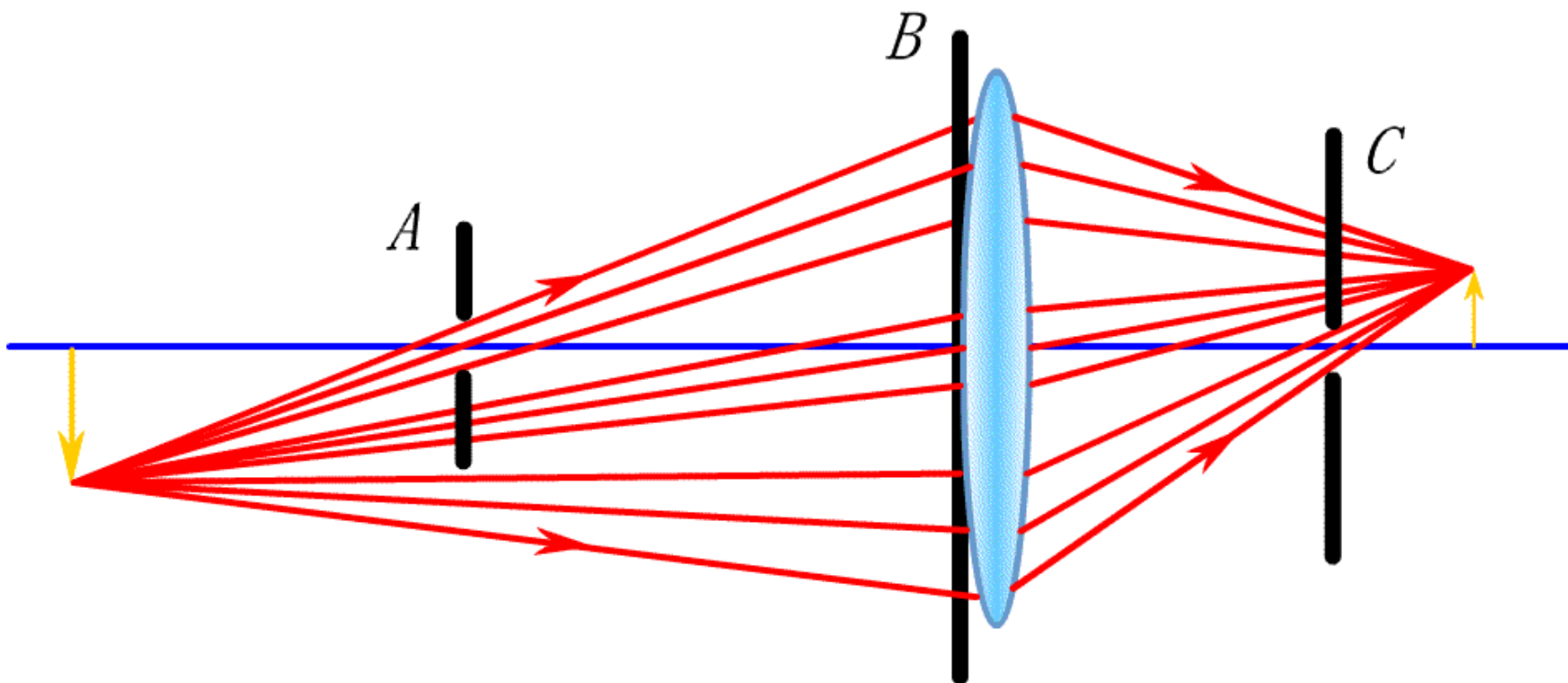
实际中，光阑位置改变时，应相应地改变其孔径以保证轴上点光束的孔径角不变



### 二.孔径光阑对光束的限制

#### 3. 孔径光阑的位置影响

孔径光阑的位置不同，则对应于选择轴外物点发出光束的不同部分参与成像。

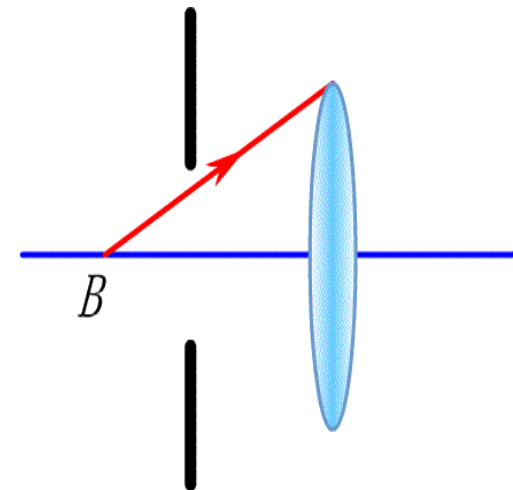
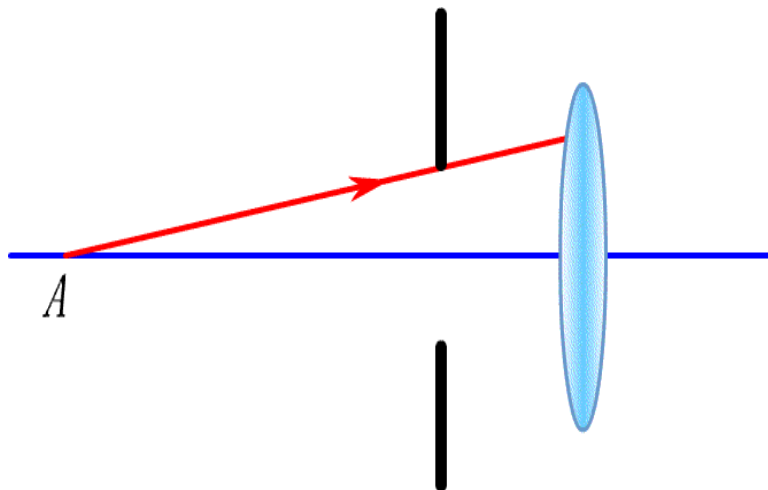




## 5.2 孔径光阑

### 三. 孔径光阑的判断

不同位置的轴上物点，  
哪个是**孔径光阑**？



多个口径确定的透镜组合，  
如何判断确定的轴上物点位置的**孔径光阑**？

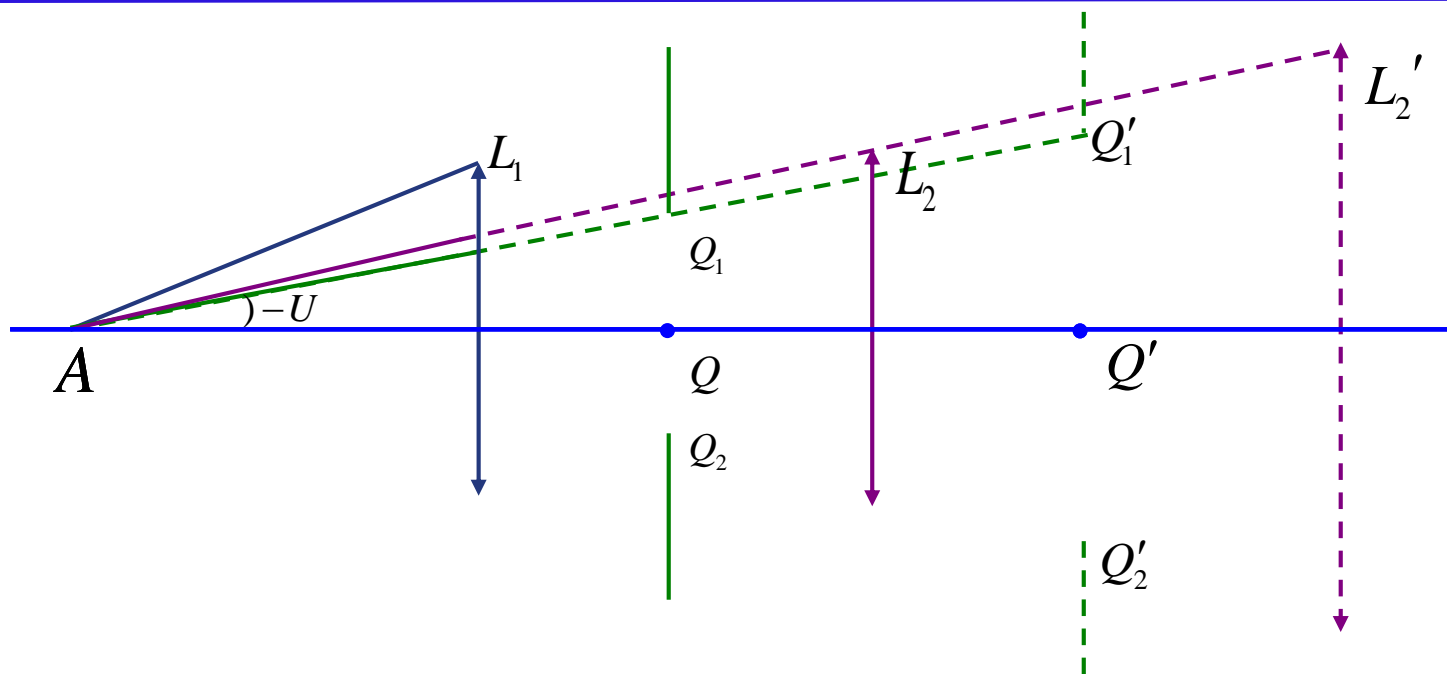




## 5.2 孔径光阑

### 三. 孔径光阑的判断

轴上物点对成像张角比较法



- 将光学系统所有光阑（透镜边框和光圈等），对其前面的光学系统（物空间）成像，求像的大小和位置；
- 由轴上物点向各像边缘、第一个透镜边缘分别作连线，求张角最小值即为**入瞳**，相应的共轭物为**孔径光阑**；
- 孔径光阑对后面光学系统（像空间）所成像即是**出瞳**。



## 5.2 孔径光阑

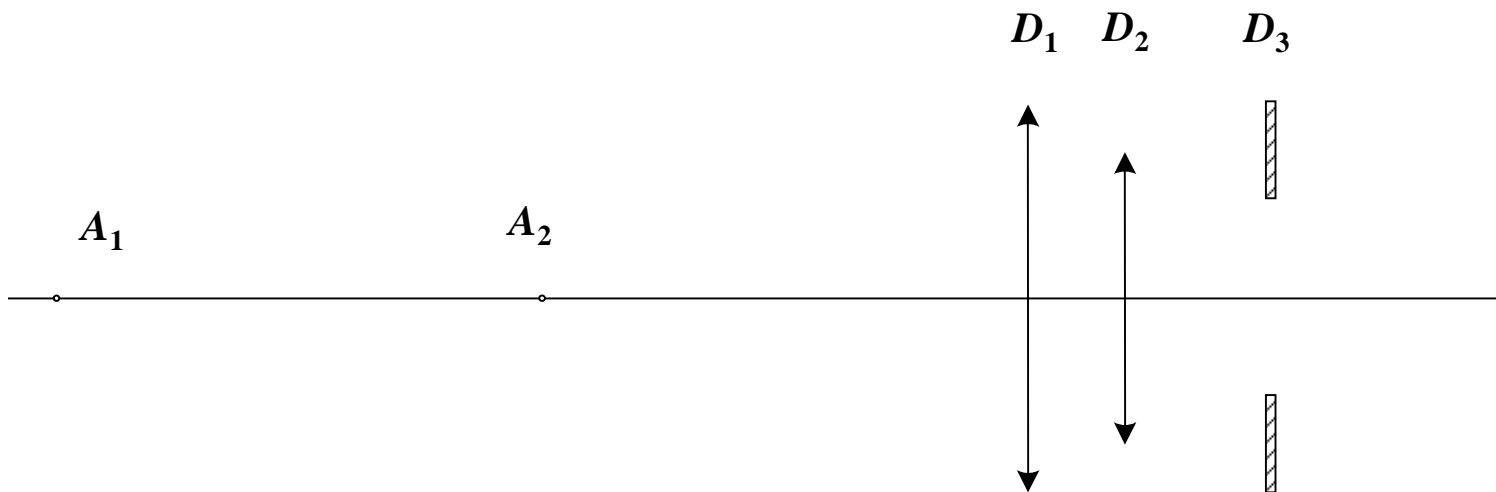
### 三.孔径光阑的判断

❖ 已知一光学系统由三个零件组成，

**透镜1：** 焦距  $f_1' = -f_1 = 100\text{mm}$ ，口径  $D_1 = 40\text{mm}$ ；

**透镜2：** 焦距  $f_2' = -f_2 = 120\text{mm}$ ，口径  $D_2 = 30\text{mm}$ ，它和透镜1之间的距离为  $d_1 = 20\text{mm}$ ；

**光阑3：** 口径为  $20\text{mm}$ ，它和透镜2之间的距离  $d_2 = 30\text{mm}$ 。



- 物点  $A_1$  的位置  $L_1 = -200\text{mm}$ ，试确定哪一个光孔是孔径光阑。
- 物点  $A_2$  的位置  $L_2 = -100\text{mm}$ ，此时哪个光孔是孔径光阑？





## 5.2 孔径光阑

### 三.孔径光阑的判断

解：由于透镜1的前面没有任何光组，所以它本身就是物空间的像。

1)  $D_2$ 对 $D_1$ 成像，也就是前面系统成像，故光从右向左照，逆光方向成像，可将系统倒转计算出纵向物理量，再将结果转回，因此 $f_1' = -f_1 = 100\text{mm}$ ， $l = -20\text{mm}$ ，利用高斯公式：

$$\frac{1}{l_1'} - \frac{1}{l_1} = \frac{1}{f_1'} \quad \rightarrow \quad \frac{1}{l_1'} - \frac{1}{-20} = \frac{1}{100} \quad \rightarrow \quad \frac{1}{l_1'} = -\frac{1}{20} + \frac{1}{100} = -\frac{4}{100}$$

$$l_1' = -25\text{mm} \quad \rightarrow \quad \text{真正位置是：} l_1' = 25\text{mm}$$

$$\beta = \frac{y'}{y} = \frac{l_1'}{l_1} = \frac{25}{20} = \frac{5}{4}$$

孔高：  $y' = \frac{25}{20} y = \frac{5}{4} \times 15 = 18.75\text{mm}$



## 5.2 孔径光阑

### 三.孔径光阑的判断

2) 再求光阑3被前面光组所成的像。(注意：为了求得光阑3在物空间的像，要使它通过透镜1和透镜2成像)

- 先求光阑3被透镜2所成的像： 因为  $l_2 = -30\text{mm}$ ,  $y_2 = D_3/2 = 10\text{mm}$ ,

$$\frac{1}{l'_2} - \frac{1}{-30} = \frac{1}{120} \rightarrow l'_2 = -40\text{mm}$$

$$\beta_2 = \frac{y'_2}{y_2} = \frac{l'_2}{l_2} = \frac{-40}{-30} = 1.33, \quad y'_2 = y_2 \times \beta_2 = 13.3\text{mm}$$

$y'_2$ 对于透镜1来说是物，故  $y_1 = y'_2 = 13.3\text{mm}$ 。



## 5.2 孔径光阑

### 三.孔径光阑的判断

因为  $l_1 = l_2' - d_1$  , 所以  $l_1 = l_2 - d_1 = -40 - 20 = -60mm$

- 求通过透镜1成的像:

$$\frac{1}{l_1'} - \frac{1}{-60} = \frac{1}{100} \quad \rightarrow \quad l_1' = -150mm \quad \text{均为反转的值, 因此为负}$$

$$\beta_1 = \frac{y_1'}{y_1} = \frac{l_1'}{l_1} = 2.5, \quad y_1' = y_1 \times \beta_1 = 33.33mm$$

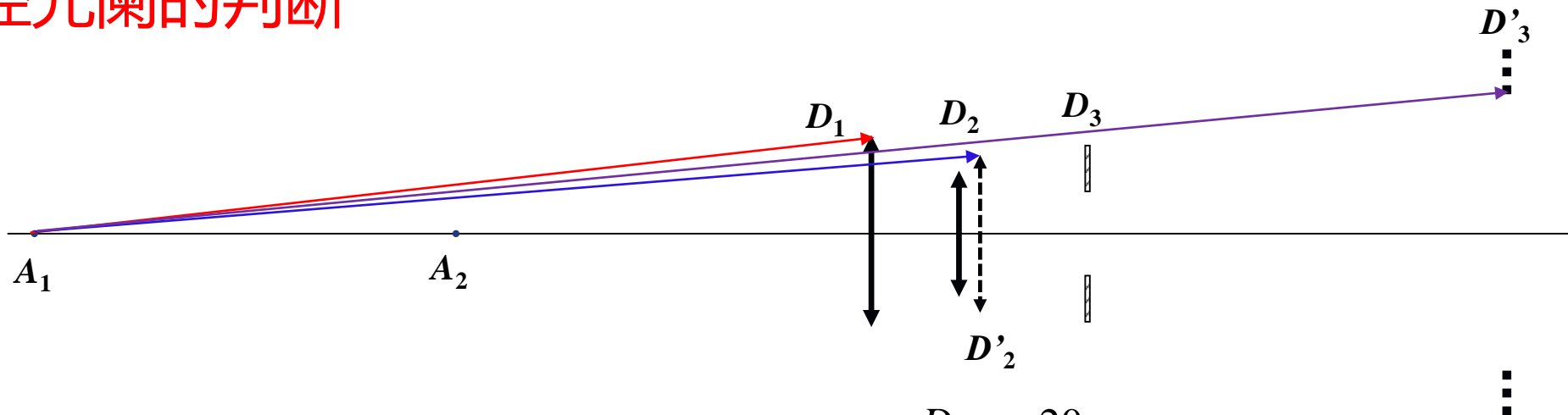
$$D_3' = 2y_1 = 66.66mm$$

- 求物平面中心点A对各光阑像的张角 (在物空间的像)



## 5.2 孔径光阑

### 三.孔径光阑的判断



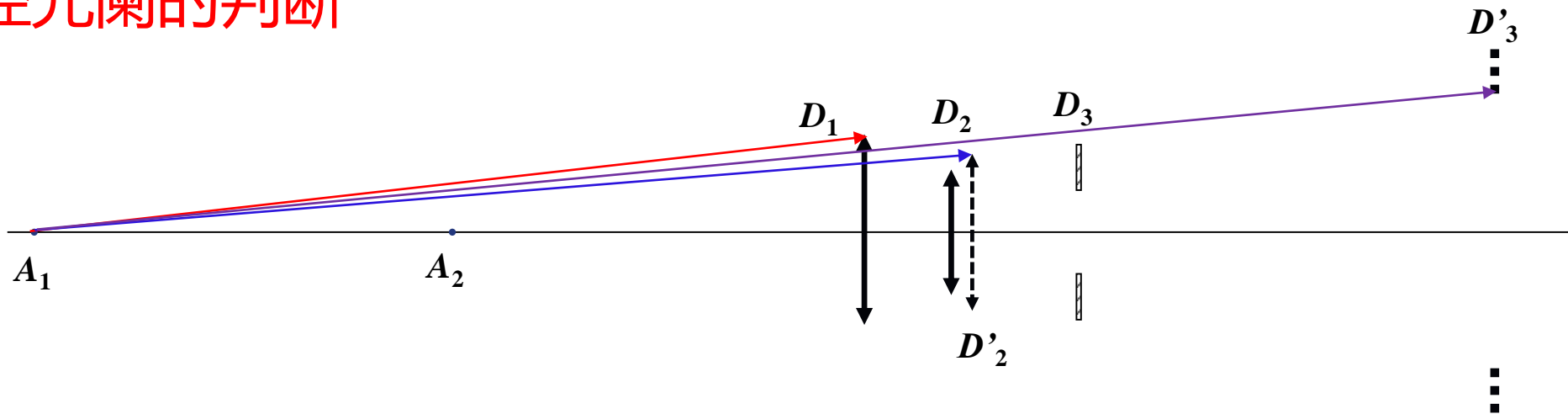
- 物点 $A_1$ 对光阑 $D_1'$ 的张角:  $\tan u_1 = \frac{D_1}{200} = \frac{20}{200} = 0.1$
- 物点 $A_1$ 对光阑 $D_2'$ 的张角:  $\tan u_2 = \frac{18.75}{225} = 0.0833$
- 物点 $A_1$ 对光阑 $D_3'$ 的张角:  $\tan u_3 = \frac{33.33}{350} = 0.0952$

$u_2$  为最小, 说明光阑像 $D_2'$ 限制了物点的孔径角, 故透镜2为孔径光阑。



## 5.2 孔径光阑

### 三. 孔径光阑的判断



当一个系统中有多  
个光阑时，到底谁  
是**孔径光阑**？

**标准：**谁对成像光束的大小起决定作用，谁就是孔径光阑

**步骤：**①将系统中所有光阑分别对其前面的光组成像；

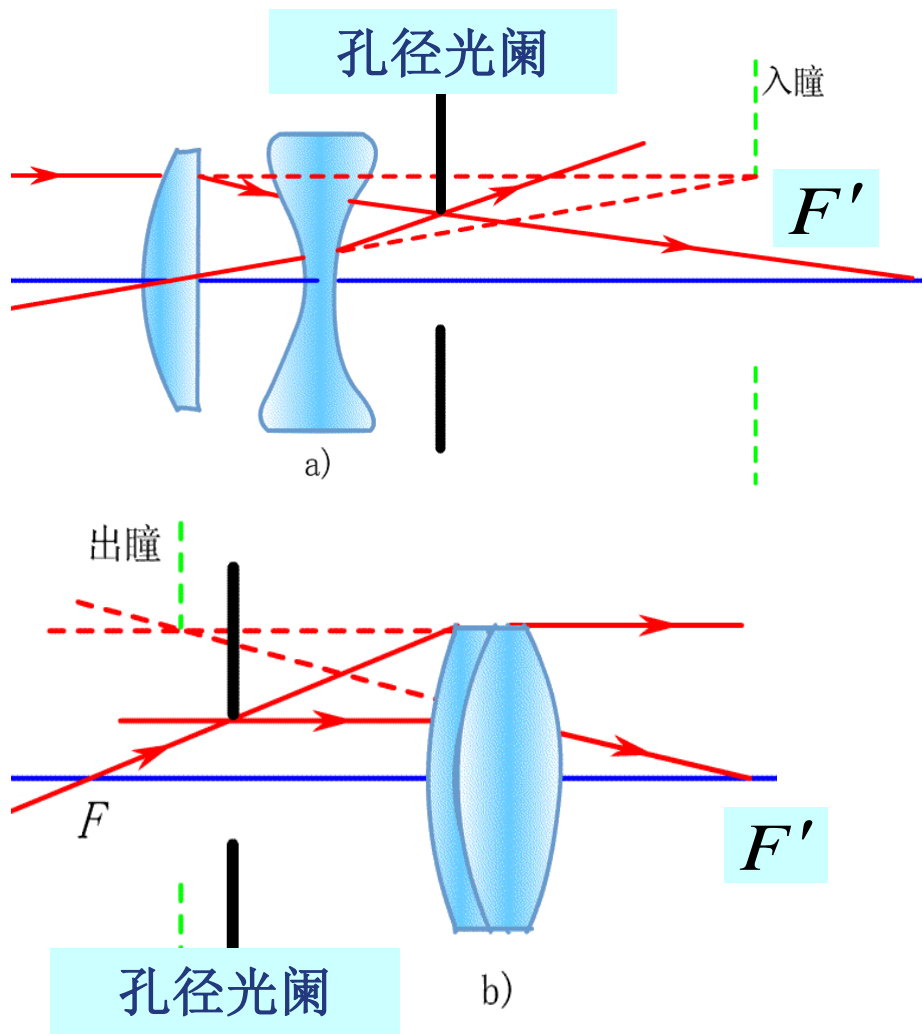
②确定各个像中对轴上物点张角最小者；

③此最小者所对应的光阑即是孔径光阑，称**入瞳**。

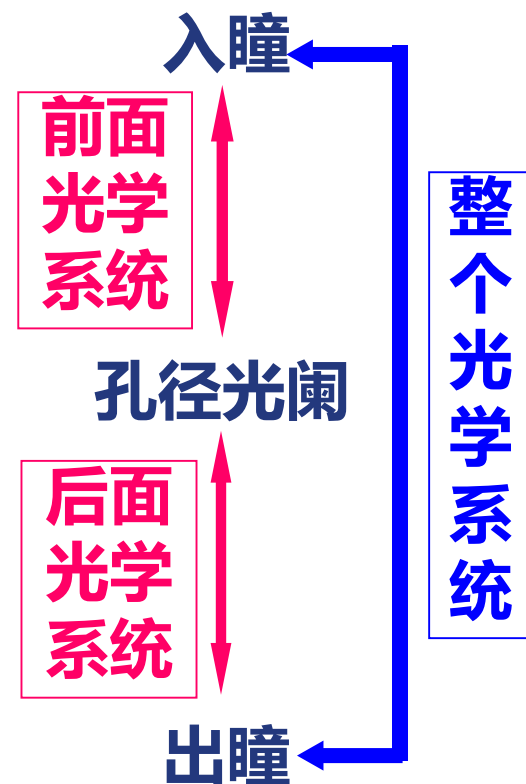
**求法：**作图法；解析法

## 5.2 孔径光阑

### 四.入射光瞳与出射光瞳



★入射光瞳：孔径光阑经其前面光学系统所成的像(物空间)

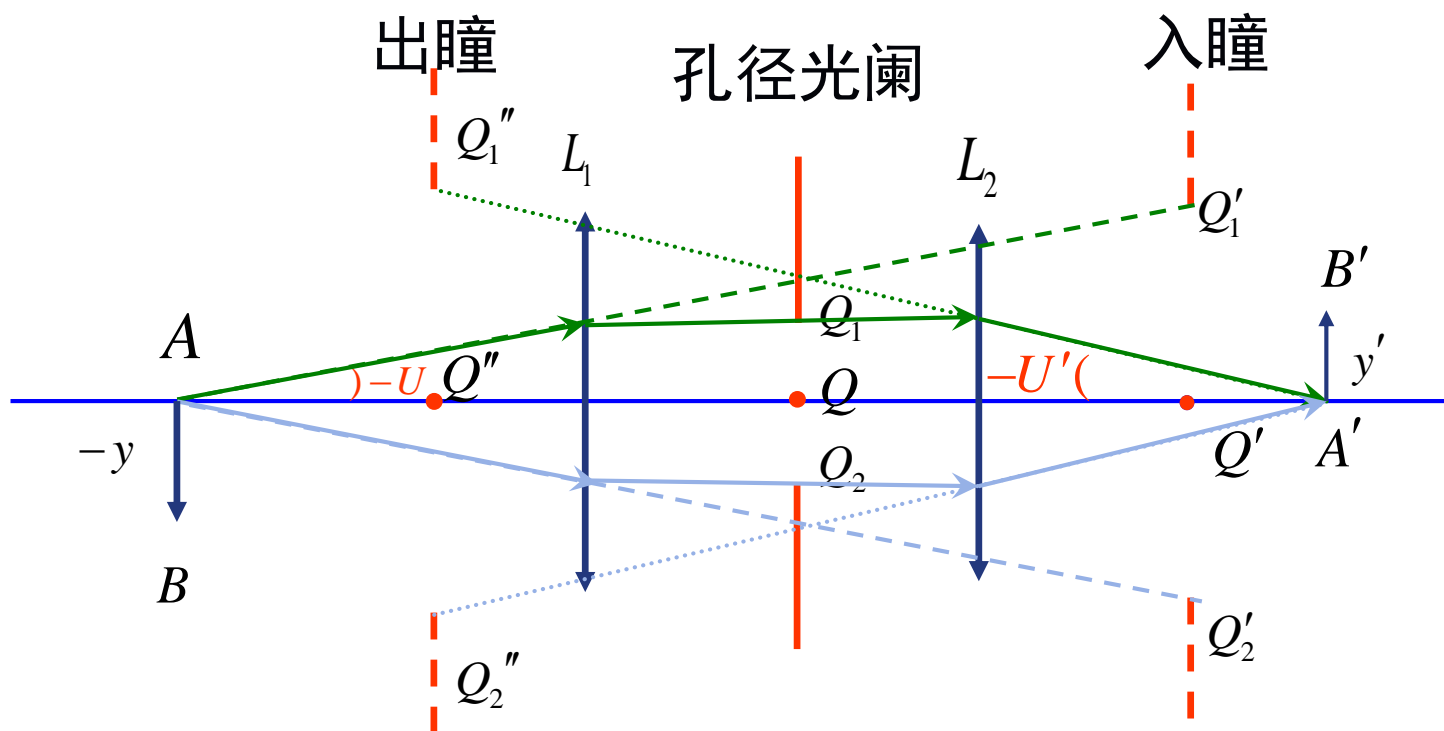


★出射光瞳：孔径光阑经其后面光学系统所成的像(像空间)



## 5.2 孔径光阑

### 四.入射光瞳与出射光瞳



□ 物方孔径角：轴上物点发出的过入瞳边缘的光线与光轴的夹角 $U$ ,

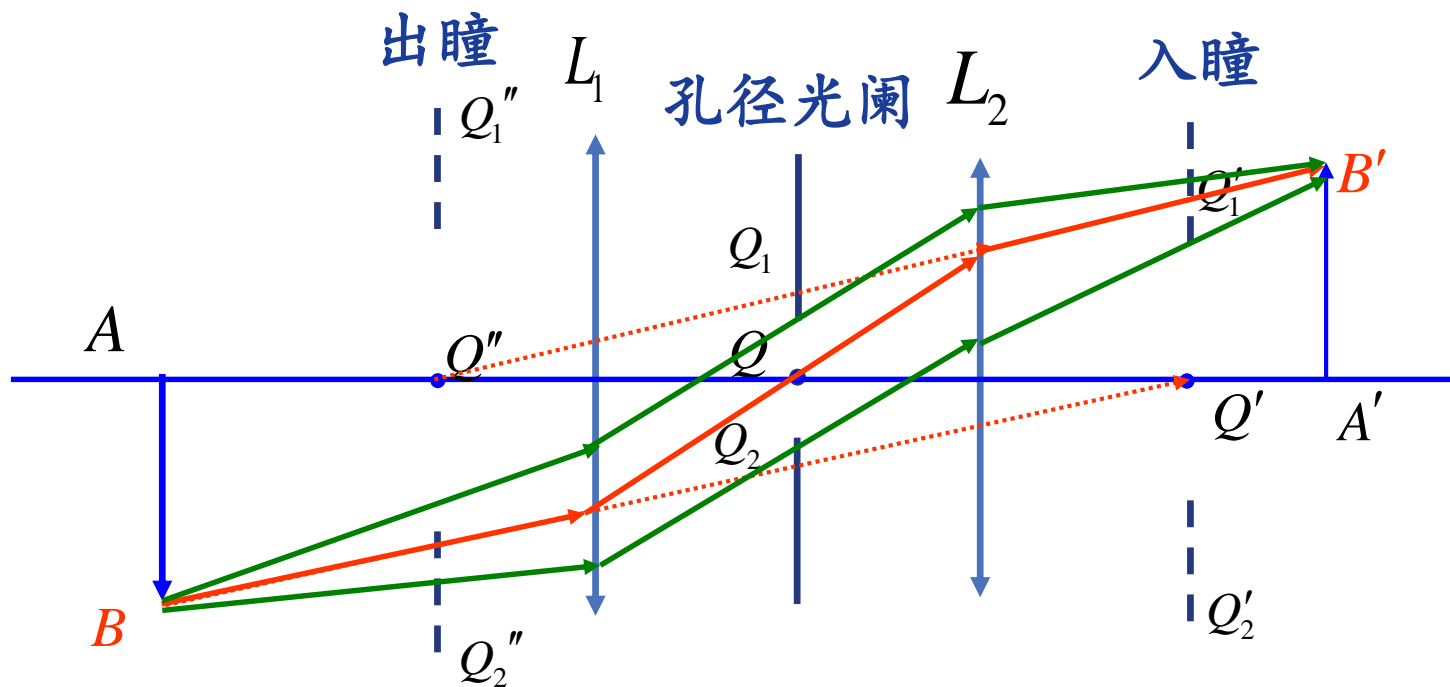
□ 像方孔径角：由出瞳边缘射至轴上像点的光线与光轴的夹角 $U'$  .



## 5.2 孔径光阑

### 四.入射光瞳与出射光瞳

★**主光线：** 通过孔径光阑中心的光线。



- ★ 理想光学系统：主光线必然通过入瞳及出瞳的中心。
- ★ 主光线是通过孔径光阑、并参与成像的物光束的中心光线。





## 5.2 孔径光阑

### 四.入射光瞳与出射光瞳

#### Notes

- 入瞳的位置和直径代表了入射光束的位置和口径；入瞳描述了一条光线能否通过系统；
- 入瞳、孔径光阑、出瞳互为物象共轭；
- 通过入瞳中心的光线，经光组后，必然经过孔径光阑和出瞳的中心；（主光线）
- 通过入瞳边缘的光线，必然成为出瞳的边缘光线；
- 孔径光阑对一定位置的物点而言，物体位置改变，孔径光阑可能改变。



# 第五章 光学系统中光束的限制

- 光阑决定了光学系统通光能力、成像范围和分辨能力；
- 本章主要讨论如何分析系统各通光孔的光束限制作用；
- **分析关键：**将系统所有光孔成像在同一空间。

## 主要内容

- 5.1 概述
- 5.2 孔径光阑
- **5.3 视场光阑与渐晕光阑**
- 5.4 平面上空间像
- 5.5 远心光学系统
- 5.6 物面与瞳面的转化、光瞳匹配



## 5.3 视场光阑与渐晕光阑

### 一. 基本概念

- **视场**：光学系统中能够清晰成像的范围；如果范围针对的是物面大小范围，称为**物方视场**；相应的像面范围称为**像方视场**。

例如：照相机底片框限制了被成像的范围。

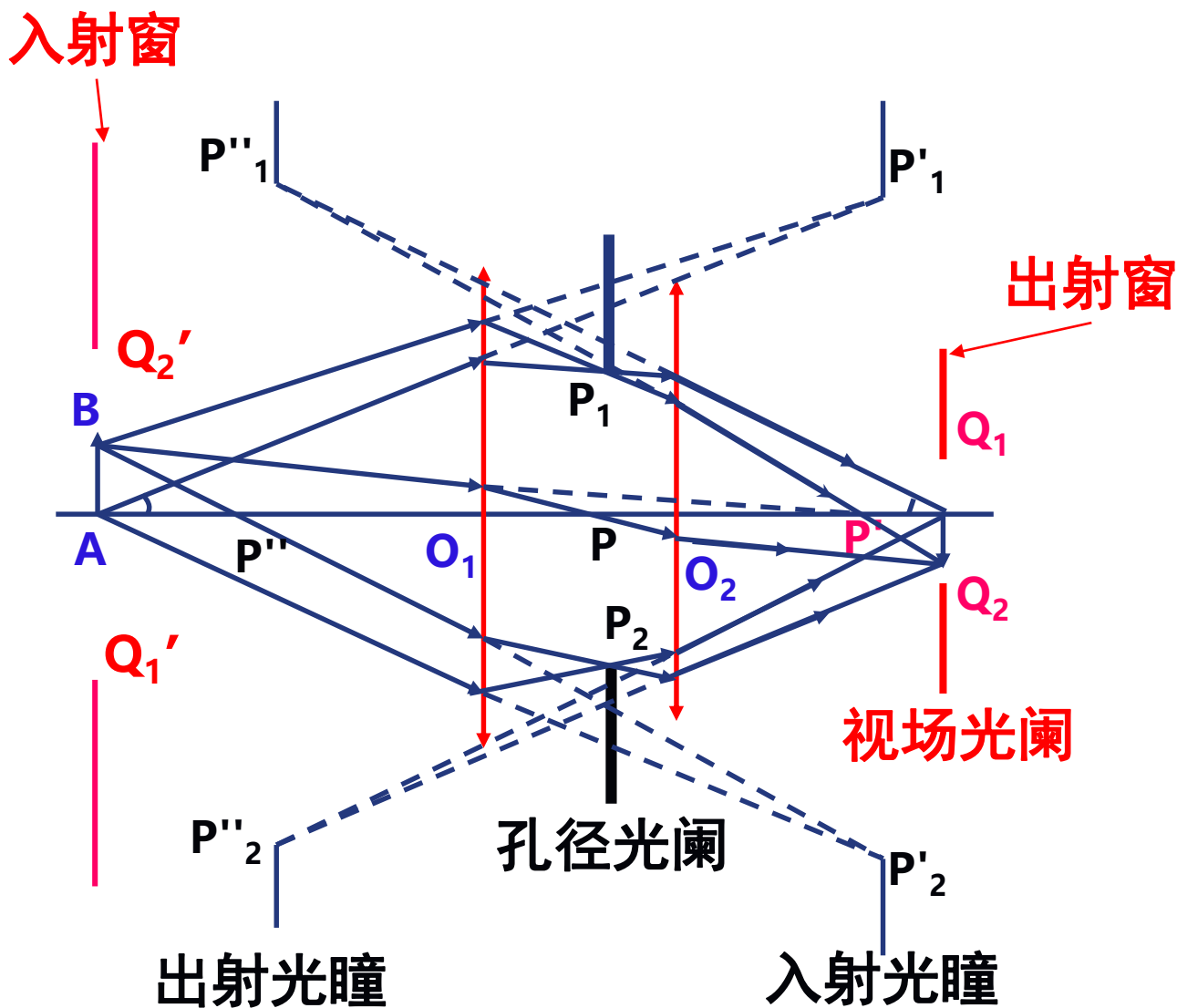
- **视场光阑**：光学系统中起限制成像范围作用的光孔。
- **入射窗**：视场光阑经其前面光学系统所成的像（物空间）
- **出射窗**：视场光阑经其后面光学系统所成的像（像空间）

**视场光阑、入射窗与出射窗三者互为物象关系。**

## 5.3 视场光阑与渐晕光阑

### 一. 基本概念

- 通常设置在系统的实像平面或物平面
- $Q_1Q_2$ 是视场光阑。
- $Q'_1Q'_2$ 为入射窗；
- $Q_1Q_2$ 本身也为出射窗。





## 5.3 视场光阑与渐晕光阑

### 二. 视场光阑

#### 1. 确定视场光阑的方法

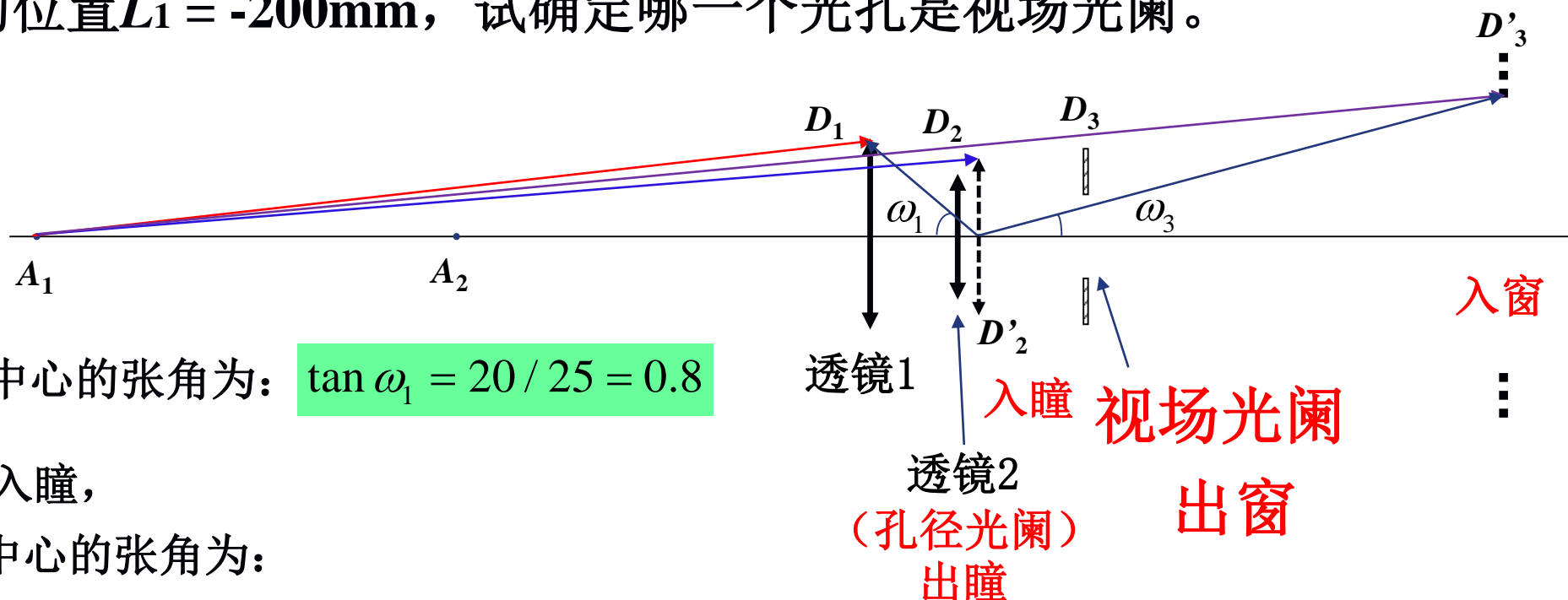
- 1) 把孔径光阑以外的所有光孔经其前方光学系统成像到物空间，确定入瞳中心位置 (实际上在确定孔径光阑时这一步骤已完成)。
- 2) 计算像的边缘对入瞳中心的张角大小，张角最小者即为入射窗，与其共轭的实际光阑即为视场光阑。
- 3) 入射窗边缘对入瞳中心的张角为物方视场角 $2w$ ，同时也决定了视场边缘点。视场光阑经后面光学零件所成的像即为出射窗，出射窗对出瞳中心的张角即为像方视场角 $2w'$ 。



## 5.3 视场光阑与渐晕光阑

❖ 已知一光学系统由三个零件组成，**透镜1**：其焦距  $f_1' = -f_1 = 100\text{mm}$ ，口径  $D_1 = 40\text{mm}$ ；**透镜2**：的焦距  $f_2' = -f_2 = 120\text{mm}$ ，口径  $D_2 = 30\text{mm}$ ，它和透镜1之间的距离为  $d_1 = 20\text{mm}$ ；**光阑3**：口径为  $20\text{mm}$ ，它和透镜2之间的距离  $d_2 = 30\text{mm}$ 。

- 物点  $A_1$  的位置  $L_1 = -200\text{mm}$ ，试确定哪一个光孔是视场光阑。



$D_1'$  对入瞳中心的张角为：  $\tan \omega_1 = 20 / 25 = 0.8$

$D_2'$  本身是入瞳，

$D_3'$  对入瞳中心的张角为：

$$\tan \omega_3 = \frac{33.33}{150 - 25} = 0.256$$

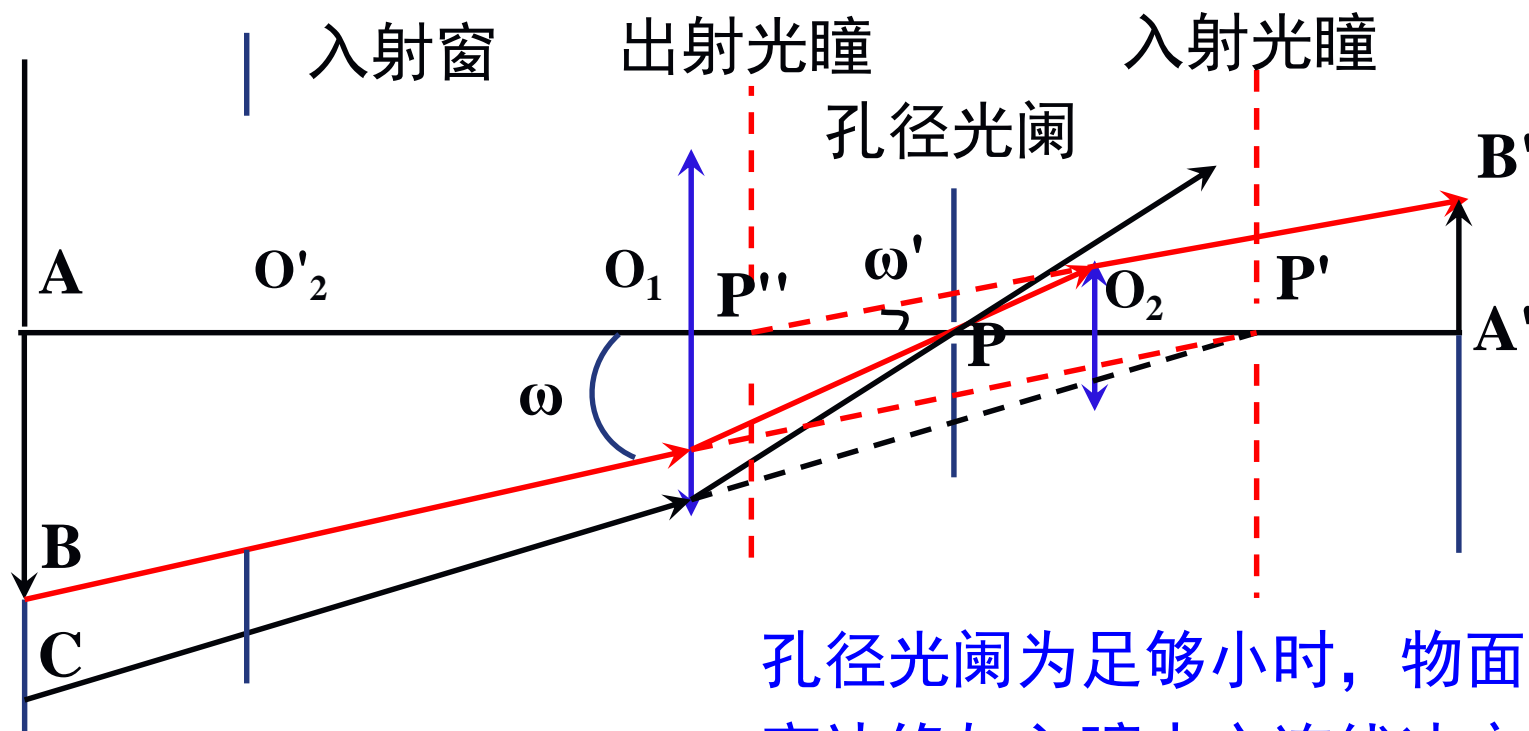
$D_3'$  对入瞳中心的张角最小，故光阑3是视场光阑。



## 5.3 视场光阑与渐晕光阑

### 二. 视场光阑

#### 2. 入瞳无限小时的视场光阑



孔径光阑为足够小时，物面范围由入窗边缘与入瞳中心连线决定。

**线视场：**物方线视场为物高的两倍，以 $2y$ 表示。像方线视场为像高的两倍，以 $2y'$ 表示。



## 5.3 视场光阑与渐晕光阑

### 三. 视场光阑与孔径光阑的区别与联系

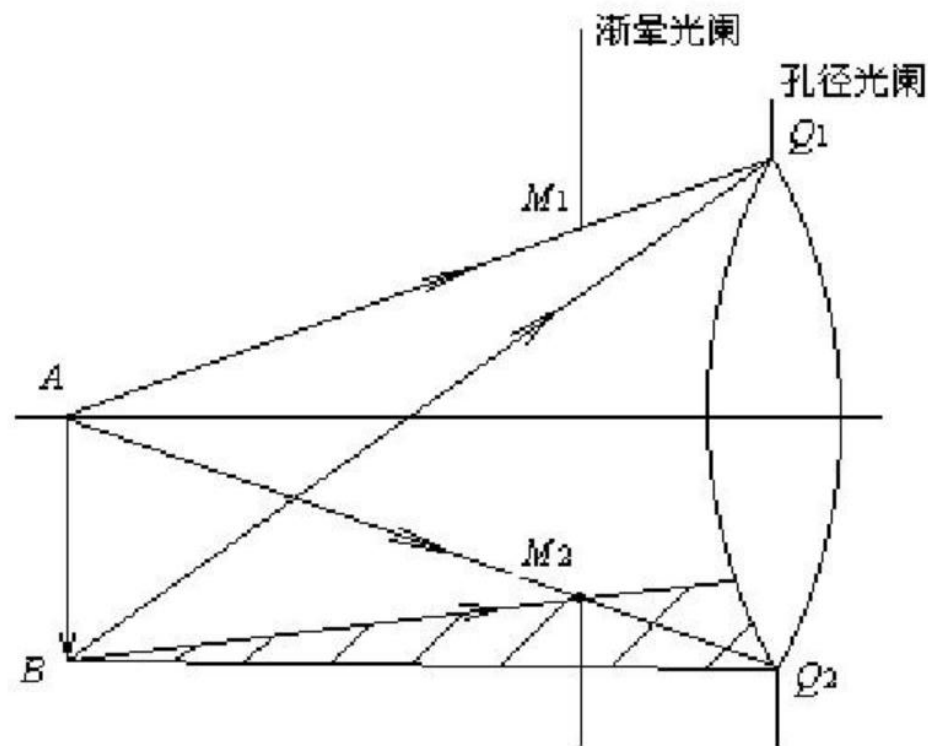
- ❖ **孔径光阑**主要限制成像光束的孔径，即决定像的照度；**视场光阑**决定视场，即物体被成像的范围。
- ❖ **孔径光阑**是对一定位置的物体而言的，而**视场光阑**是对一定位置的孔径光阑而言的，当孔径光阑位置改变时，原来的视场光阑将可能被另外的光孔所代替。（视场角的计算是以入瞳和出瞳为出发点的。）
- ❖ **视场光阑**总是设置在系统的物面、实像平面或中间实像平面上，比如显微镜、照相机是安置在像面上，投影仪、放映机是安置在物面上；
- ❖ 尽量使入窗与物面重合，或像平面与出窗重合——不产生渐晕的必要条件。



## 5.4 渐晕光阑与渐晕光阑

### 四. 渐晕光阑

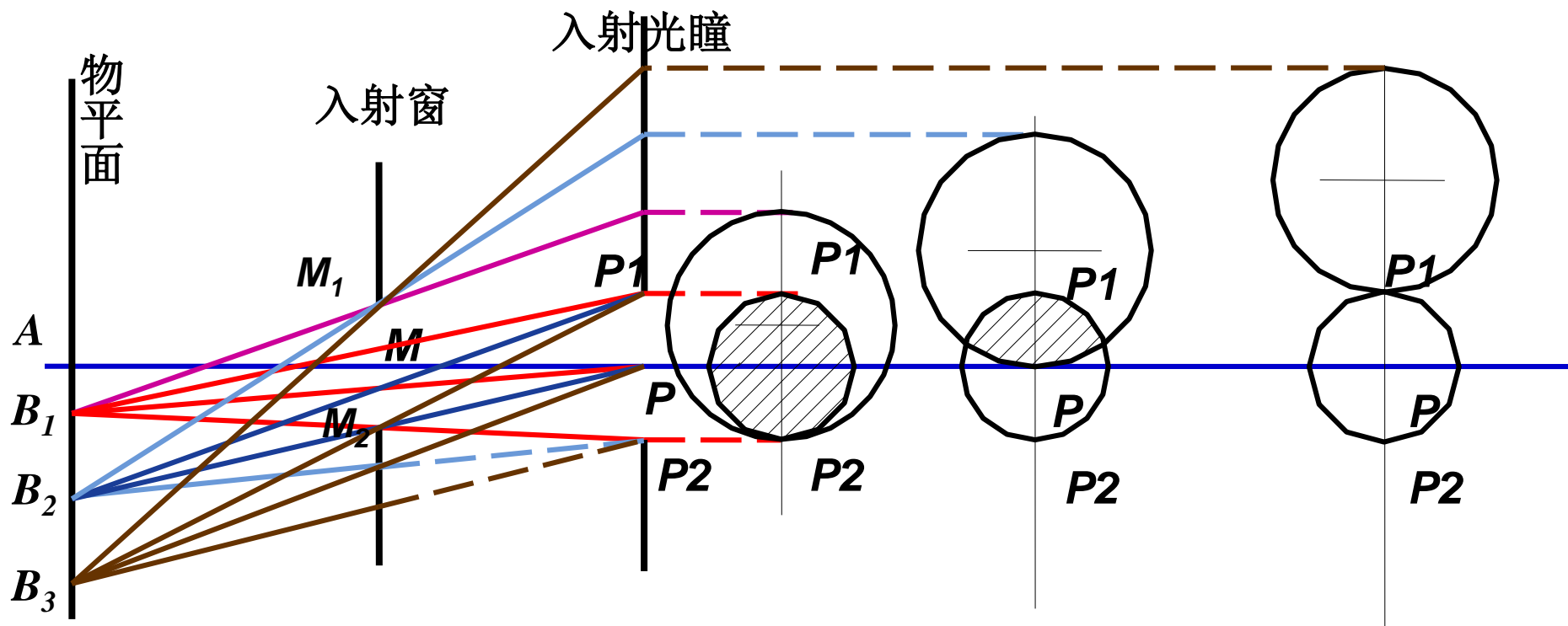
- 前面讨论了入射光瞳为无限小时的情况，实际上光学系统的入射光瞳总有一定的大小；
- 光孔在不同位置时将阻拦光束的上面或者下面部分，使成像光束不能全部通过系统；
- 轴外光束被拦截的现象称为**渐晕**，称此时的光孔为**渐晕光阑**。
- 把成像质量较差的那部分光束拦截，适当提高成像质量；但会造成轴外点像光照度较低。
- 允许渐晕存在可使得光学系统的外形尺寸有所减小。



## 5.4 渐晕光阑与渐晕光阑

### 四. 渐晕光阑

$$\text{渐晕系数} = \frac{\text{含轴面光束在入瞳面上的线度}}{\text{入瞳直径}}$$



- 区域1:  $AB_1$ 圆形区, 充满入射光瞳的全部光束成像, 渐晕系数1.0;
- 区域2:  $B_1B_2$ 环形区; 从 $B_1$ 到 $B_2$ 线渐晕系数由1.0到0.5;
- 区域2:  $B_2B_3$ 环形区; 从 $B_2$ 到 $B_3$ 线渐晕系数由0.5到0。

怎么消除  
渐晕?



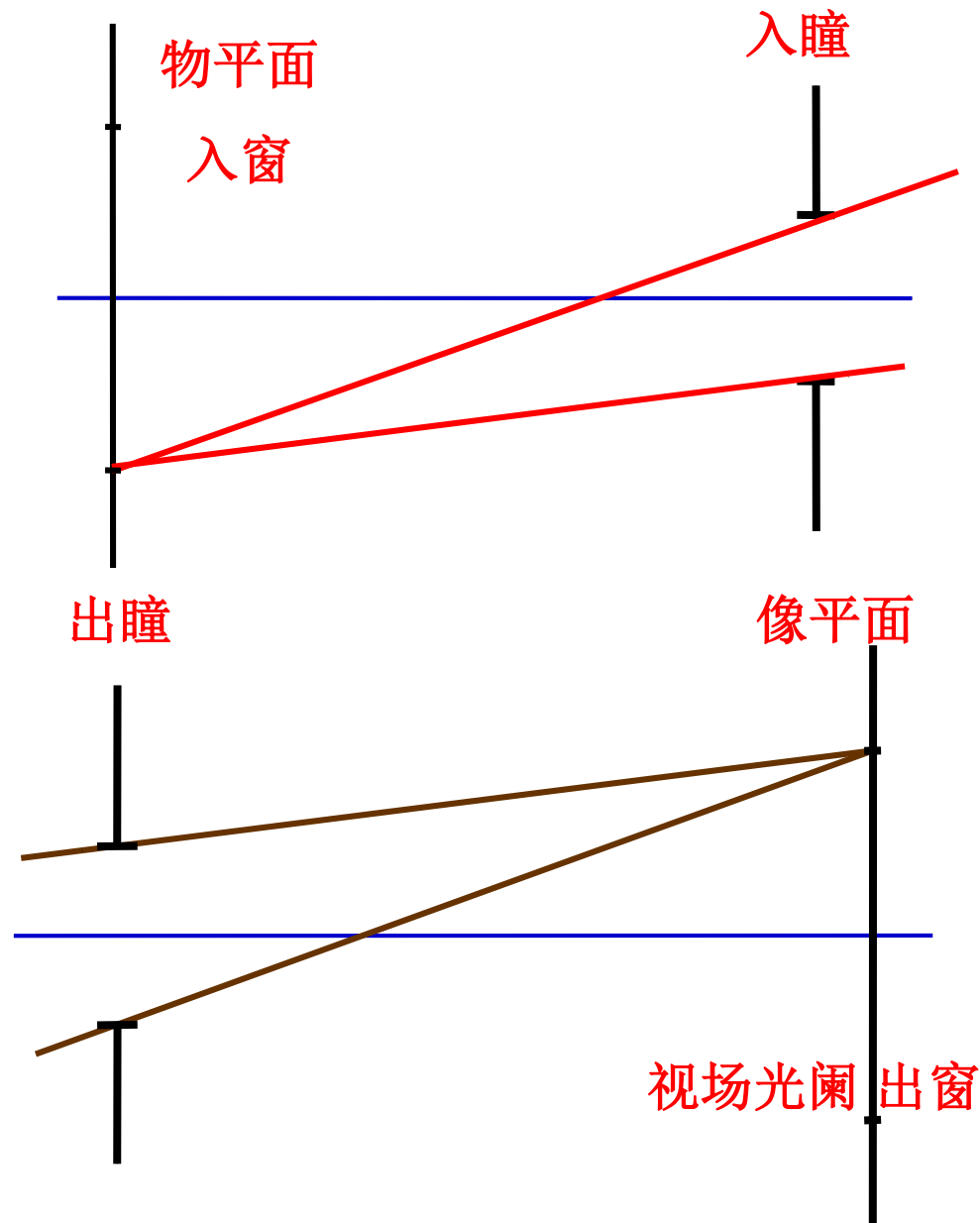


## 5.4 渐晕光阑与渐晕光阑

### 四. 渐晕光阑

入射光瞳具有一定大小时，没有渐晕的情况也是存在的

- ❖ 入射窗和物平面相重合
- ❖ 大多数光学仪器为了得到清晰的视场边界，均将视场光阑放在与物平面共轭的实像平面上，比如照相机的底片框





## 复习

❖ 决定像面的照度。

孔径光阑

aperture stop

❖ 决定系统的视场。

视场光阑

field diaphragm

❖ 限制光束中偏离理想位置的光线，用以改善系统的成像质量。

渐晕光阑

Vignetting stop

❖ 拦截系统中有害的杂散光。

消杂光光阑

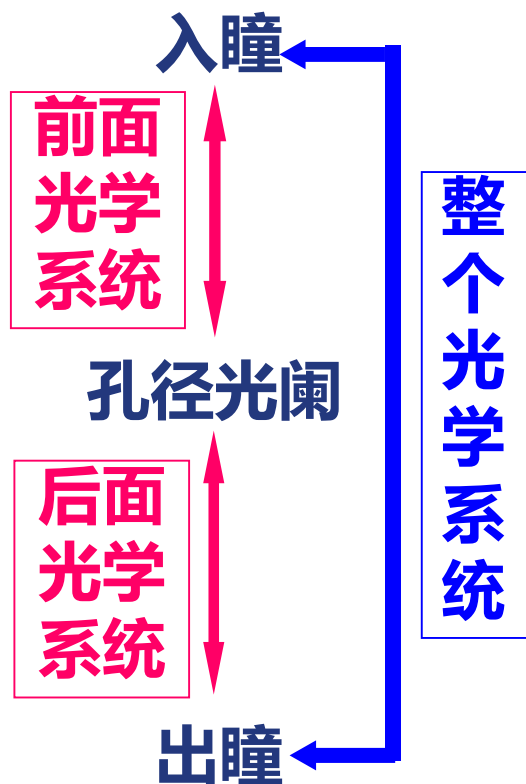
flare eliminating diaphragm



# 第五章 光学系统中光束的限制

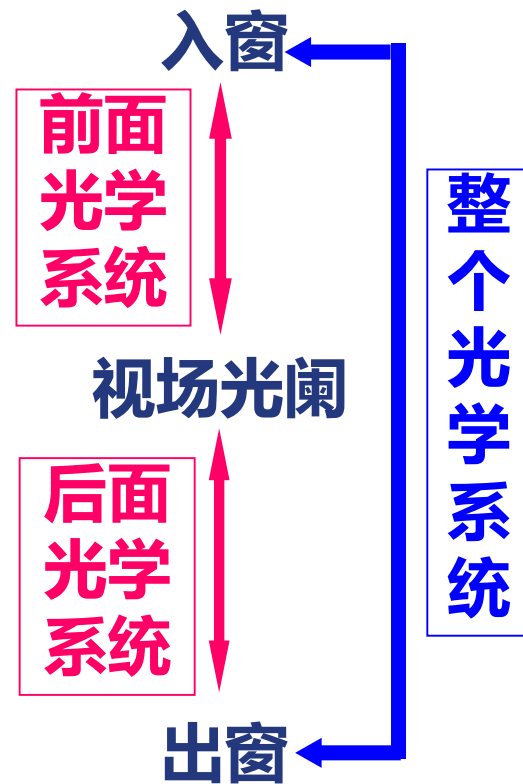
复习

★入射光瞳：孔径光阑经其前面光学系统所成的像(物空间)



★出射光瞳：孔径光阑经其后面光学系统所成的像(像空间)

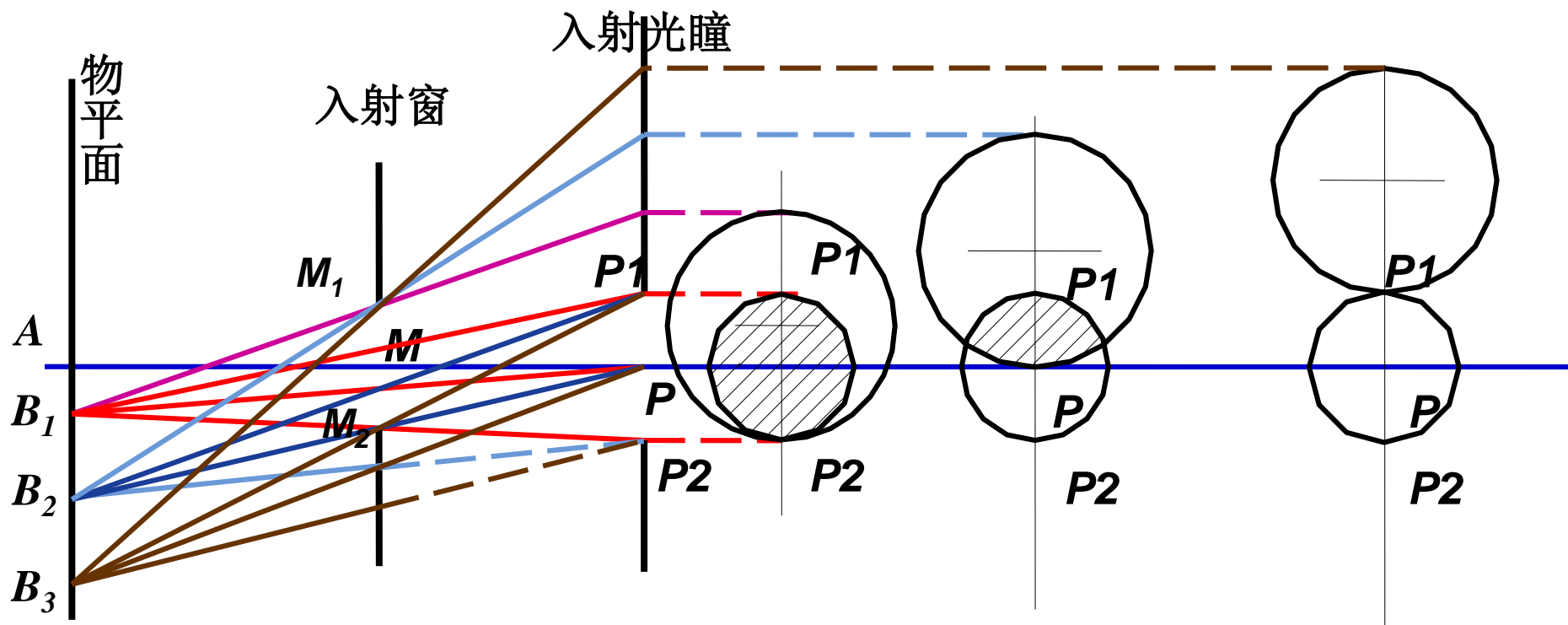
★入射窗：视场光阑经其前面光学系统所成的像(物空间)



★出射窗：孔径光阑经其后面光学系统所成的像(像空间)

## 四. 渐晕光阑

$$\text{渐晕系数} = \frac{\text{含轴面光束在入瞳面上的线度}}{\text{入瞳直径}}$$



- 区域1:  $AB_1$ 圆形区, 充满入射光瞳的全部光束成像, 渐晕系数1.0;
- 区域2:  $B_1B_2$ 环形区; 从 $B_1$ 到 $B_2$ 线渐晕系数由1.0到0.5;
- 区域2:  $B_2B_3$ 环形区; 从 $B_2$ 到 $B_3$ 线渐晕系数由0.5到0。



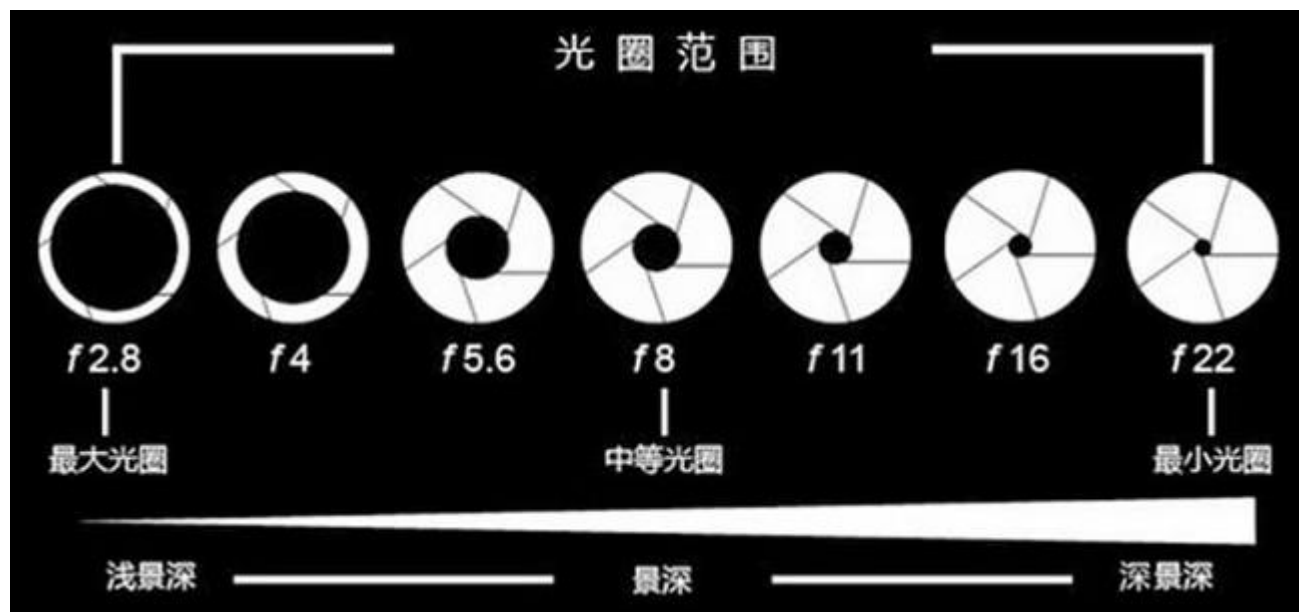
## 第五章 光学系统中光束的限制

- 光阑决定了光学系统通光能力、成像范围和分辨能力；
- 本章主要讨论如何分析系统各通光孔的光束限制作用；
- **分析关键：**将系统所有光孔成像在同一空间。

### 主要内容

- 5.1 概述
- 5.2 孔径光阑
- 5.3 视场光阑与渐晕光阑
- **5.4 平面上空间像**
- 5.5 远心光学系统
- 5.6 物面与瞳面的转化、光瞳匹配

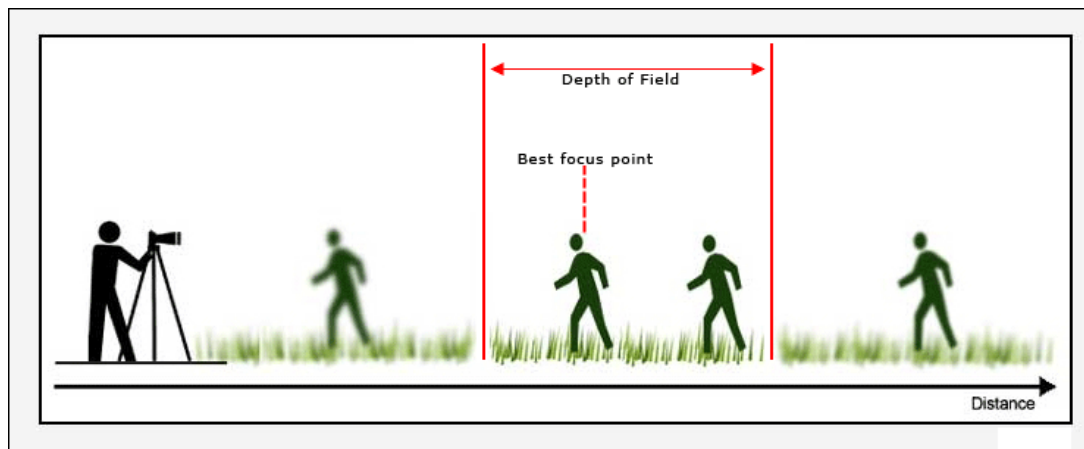
## 5.5 平面上空间像







## 5.5 平面上空间像



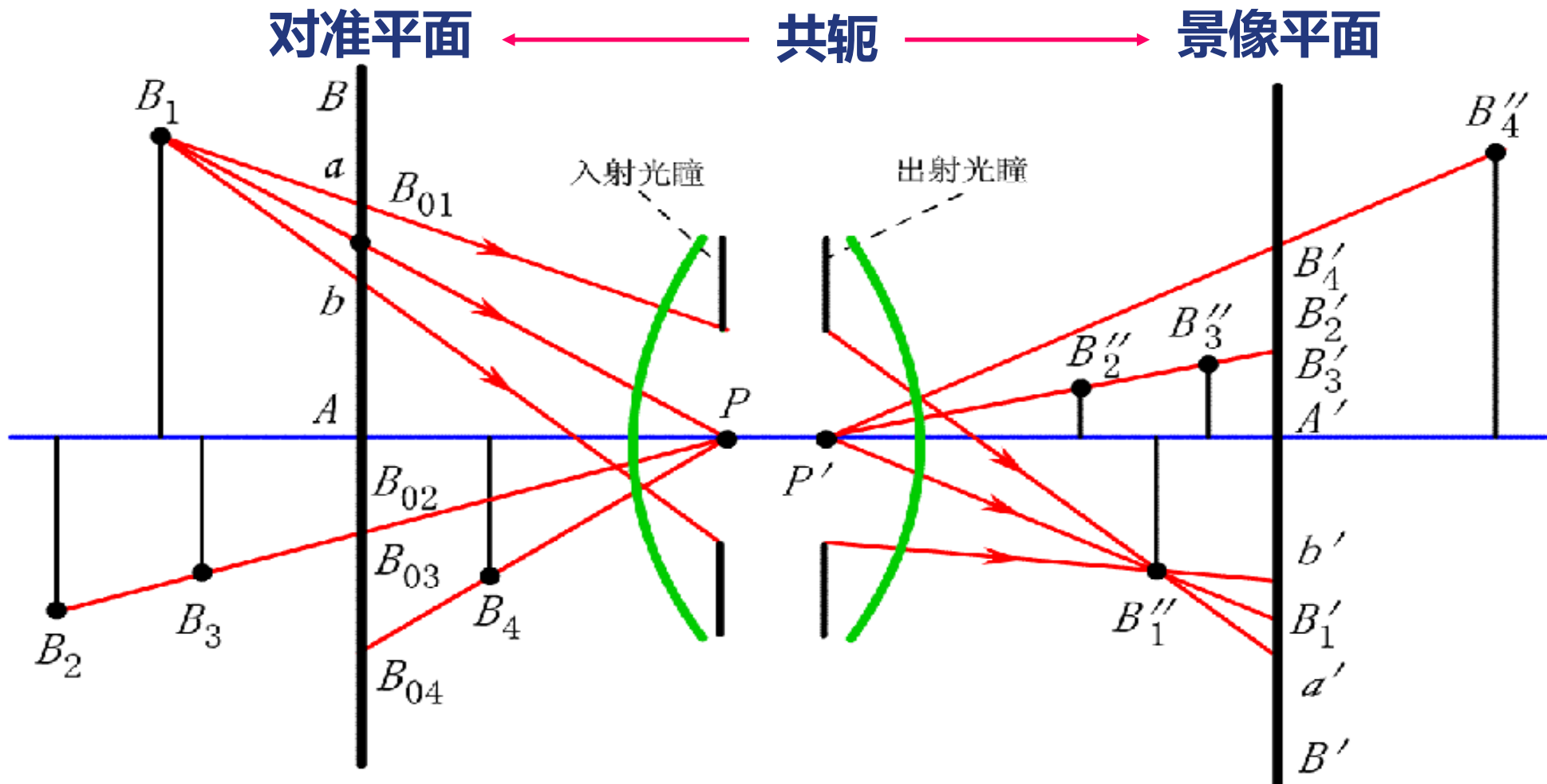


## 5.5 平面上空间像

### 一. 平面上空间像

- 前述主要介绍垂直于光轴的平面上点的成像问题，如显微镜和电影放映；
- 实际很多光学仪器需要把空间中的物点成像在一个像平面上（称为平面上的空间像），如望远镜和照相物镜等就属于这一类；
- 立体空间经光学系统成像时，只有与像平面共轭的物平面上的物点能够真正成像在该像平面上；
- 非共轭平面上的物点在这个像平面上只能得到相应光束的截面，即**弥散斑**。

## 一. 平面上空间像

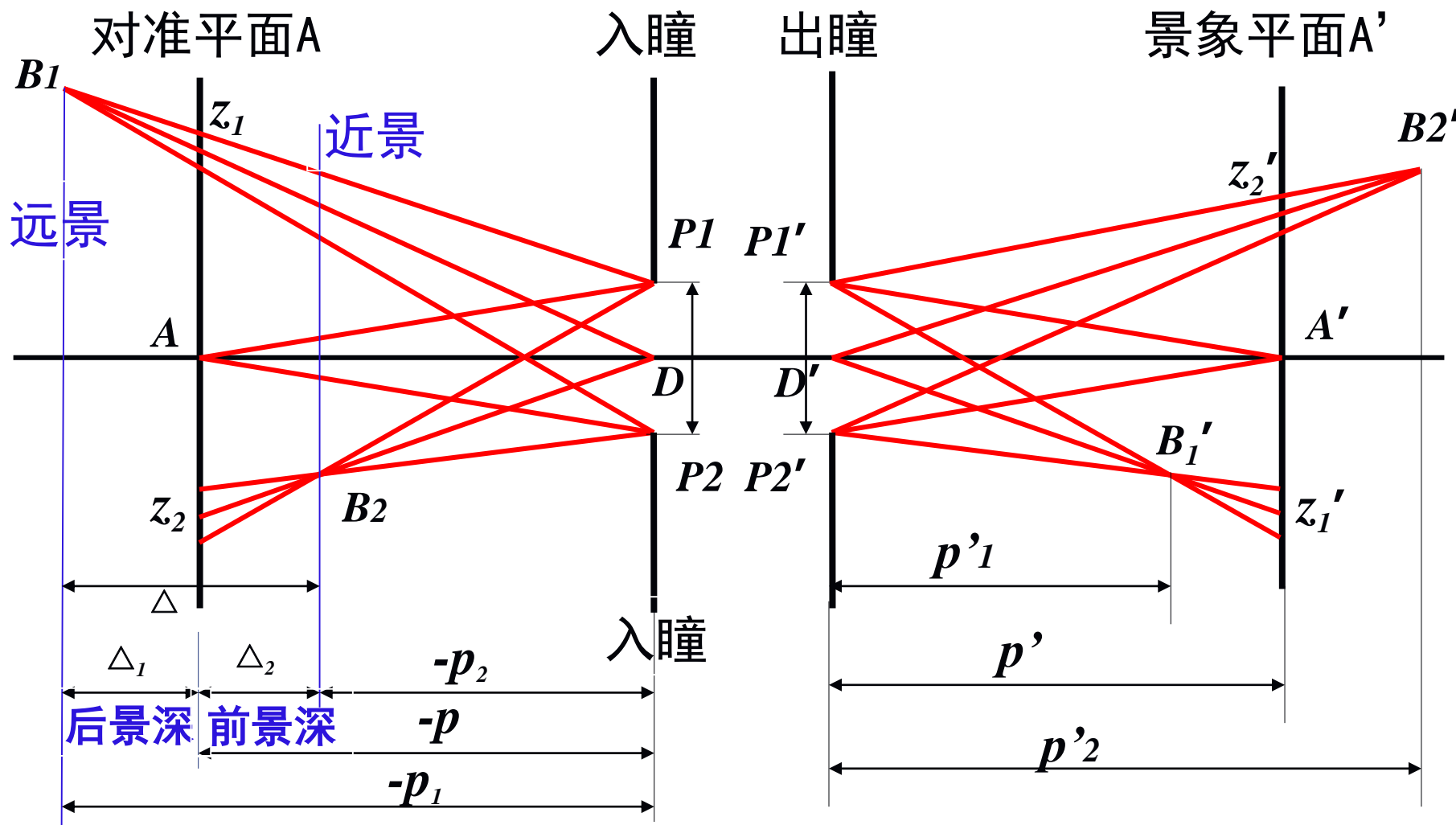




## 5.5 平面上空间像

### 二. 景深

景深：能在像平面上获得清晰的像的空间深度。





## 5.5 平面上空间像

### 二. 景深

★对准平面的弥散斑直径:  $z_1, z_2$

★景像平面的弥散斑直径:  $z'_1 = \beta z_1 \quad z'_2 = \beta z_2$

★由相似三角形得:  $\frac{z_1}{D} = \frac{p_1 - p}{p_1} \quad \frac{z_2}{D} = \frac{p - p_2}{p_2}$

→ {

$z_1 = D \frac{p_1 - p}{p_1}$	$z_2 = D \frac{p - p_2}{p_2}$
$z'_1 = \beta D \frac{p_1 - p}{p_1}$	$z'_2 = \beta D \frac{p - p_2}{p_2}$

$z'_1, z'_2 \sim (D, p, p_1, p_2)$

$z'_1, z'_2$  是否可以看做一个几何点, 取决于其对观测元件的张角!

两个因素: 观测距离、极限分辨角





## 5.5 平面上空间像

### 二. 景深

$$z'_1 = \beta D \frac{p_1 - p}{p_1}$$

$$\beta = -\frac{f}{x} \approx -\frac{f'}{p}$$

$$p_1 = \frac{Dpf'}{Df' + pz'_1}$$

$$z'_2 = \beta D \frac{p - p_2}{p_2}$$

$$(|p| \gg f')$$

$$p_2 = \frac{Dpf'}{Df' - pz'_2}$$



$$\Delta_1 = p - p_1 = \frac{p^2 z'_1}{Df' + pz'_1}$$

$$\Delta_2 = p_2 - p = \frac{p^2 z'_2}{Df' - pz'_2}$$

两截面被系统成像于景象平面上，成为弥散斑，当小到一定程度时，可以认为是清晰的像，故对 $z_1$ 和 $z_2$ 有相同的限制,因此有：

$$\Delta = \Delta_1 + \Delta_2 = \frac{2Df' \cdot p^2 z'}{D^2 f'^2 - p^2 z'^2}$$

- 入瞳直径越大，焦距越大，景深越小；
- 拍摄距离越大，景深越大；
- 远近深度总要比近景深度大。



## 5.5 平面上空间像

### 二. 景深

下面对远景和近景深度 $\Delta_1$ 、 $\Delta_2$ 的讨论。有下列两种情况：

$$p_1 = \frac{Dpf'}{Df' + pz'}$$

$$\Delta_1 = p - p_1 = \frac{p^2 z'}{Df' + pz'}$$

$$p_2 = \frac{Dpf'}{Df' - pz'}$$

$$\Delta_2 = p_2 - p = \frac{p^2 z'}{Df' - pz'}$$

1)  $\Delta_1 = \infty$ ，即对准平面以后的整个空间深度都能在景象平面上成清晰像，此时有：

$$p = \frac{-Df'}{z'}$$

$$p_2 = \frac{p}{2}$$



景深范围： $\left(-\infty, \frac{p}{2}\right)$

2)  $p = -\infty$ ，即调焦于无穷远，则：

$$p_2 = \lim_{p \rightarrow -\infty} \frac{Dpf'}{Df' - pz'} = \frac{Df'}{-z'}$$



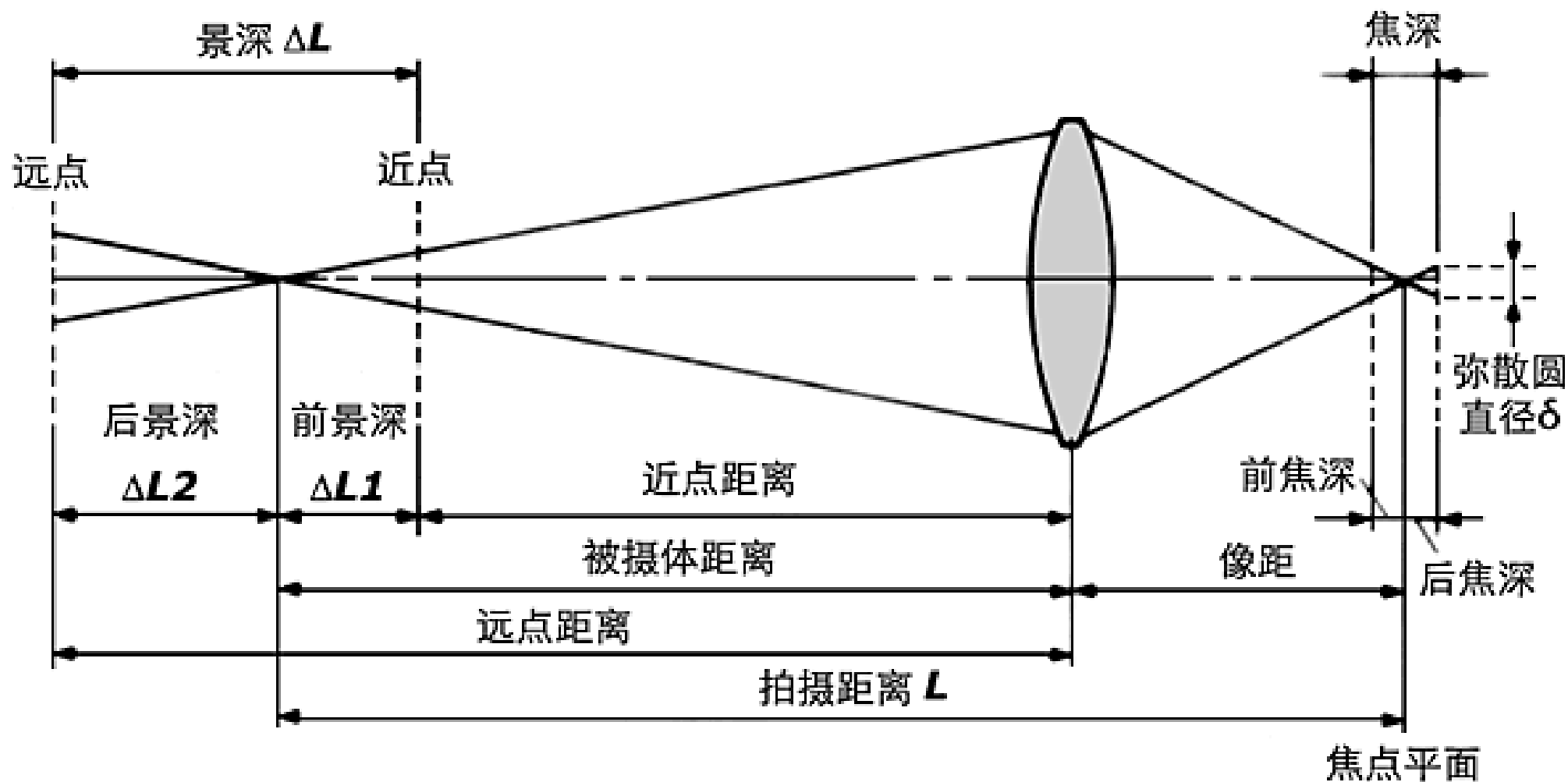
景深范围： $\left(-\infty, \frac{Df'}{-z'}\right)$

此时对准平面以后的整个空间也都能在景像平面上成清晰像，但是，调焦至无限远时的景深要小一些。

## 5.5 平面上空间像

### 二. 景深

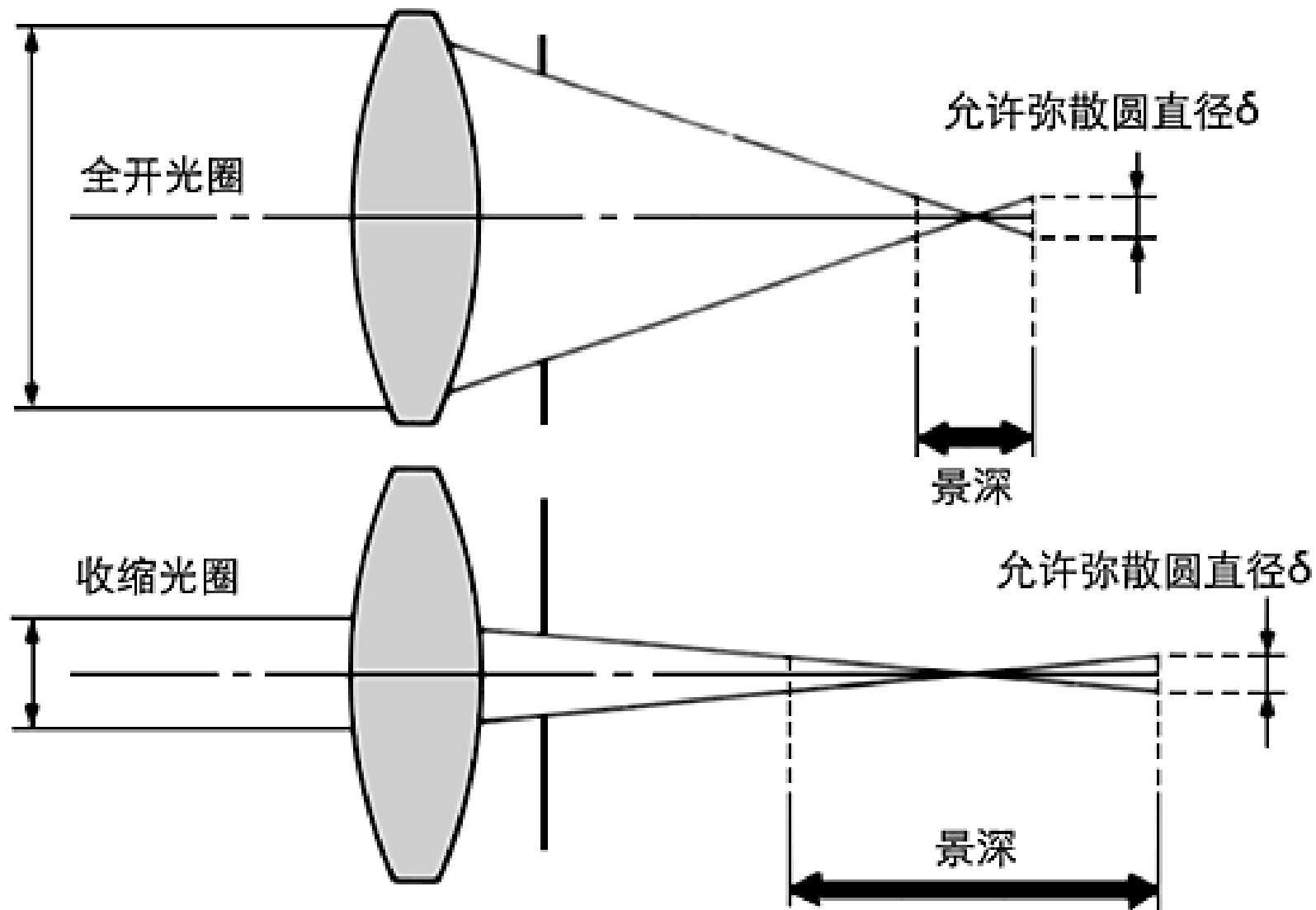
例：照相机的原理图





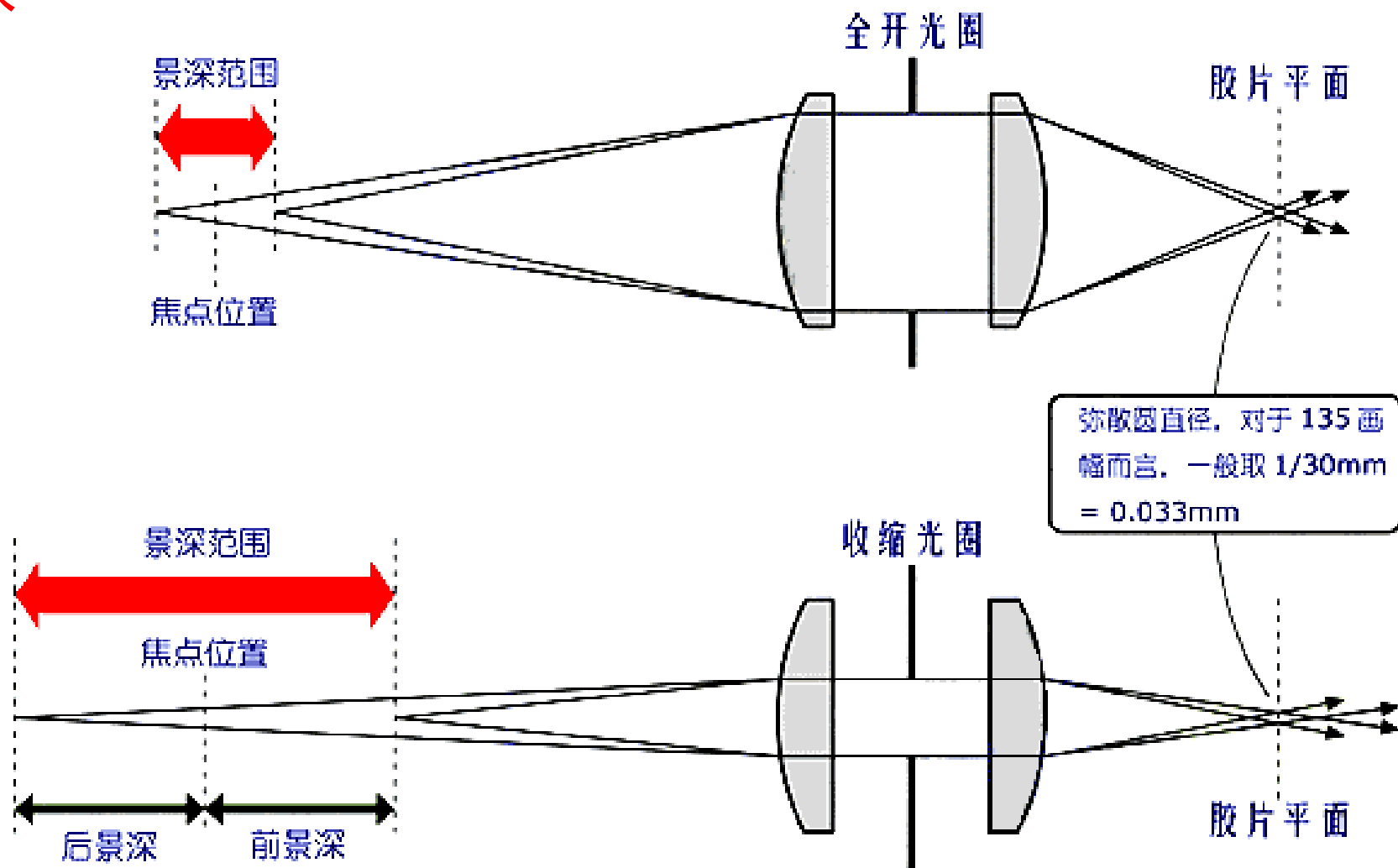
## 5.5 平面上空间像

### 二. 景深



## 5.5 平面上空间像

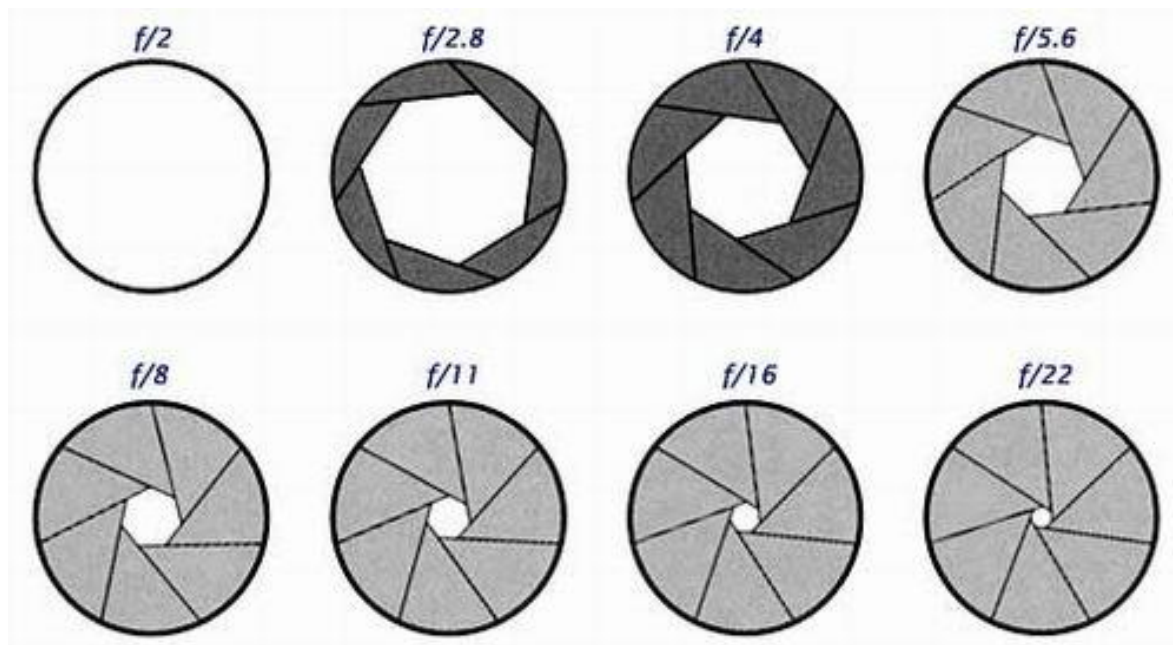
### 二. 景深



## 5.5 平面上空间像

### 二. 景深

#### 孔径光阑—光圈



1. 相对孔径越小，F数越大，景深越大。

2. 这就是拍照时，缩小光圈可以获得较大空间深度的清晰像的缘故。

**相对孔径：** 镜头通光孔径 $D$ 与其焦距 $f'$ 之比 $D/f'$ ，

**光圈数或F数：** 相对孔径的倒数 $F=f'/D$

$$\Delta = \frac{2Df' \cdot p^2 z'}{D^2 f'^2 - p^2 z'^2} = \frac{2(D/f') \cdot z'}{(D/f')^2 f'^2 / p^2 - z'^2 / f'^2}$$

## 5.5 平面上空间像





## 5.5 平面上空间像

**例:** 设某光电成像系统物镜  $f'=50\text{mm}$ ,  $D/f'=1/4$ , 即  $D=12.5\text{mm}$ , 设  $z'=0.05\text{mm}$ 。分别求调焦至5m时的景深, 调焦至无限远及对景后平面空间都成完善像时的近景位置与景深。

解: 若调焦至  $p = -5\text{m}$  处时, 由公式可分别求得:

$$p_1 = \frac{Dpf'}{Df' + pz'} = \frac{-12.5 \times 10^{-3} \times 5 \times 50 \times 10^{-3}}{12.5 \times 10^{-3} \times 50 \times 10^{-3} - 5 \times 5 \times 10^{-3}} \approx 8.33\text{m}$$

$$p_2 = \frac{Dpf'}{Df' - pz'} = \frac{-12.5 \times 10^{-3} \times 5 \times 50 \times 10^{-3}}{12.5 \times 10^{-3} \times 50 \times 10^{-3} + 5 \times 5 \times 10^{-3}} \approx 3.57\text{m}$$

$$\Delta_1 = p - p_1 = \frac{p^2 z'}{Df' + pz'} = \frac{5^2 \times 0.05 \times 10^{-3}}{12.5 \times 10^{-3} \times 50 \times 10^{-3} - 5 \times 0.05 \times 10^{-3}} \approx 3.33\text{m}$$

$$\Delta_2 = p_2 - p = \frac{p^2 z'}{Df' - pz'} = \frac{5^2 \times 0.05 \times 10^{-3}}{12.5 \times 10^{-3} \times 50 \times 10^{-3} + 5 \times 0.05 \times 10^{-3}} \approx 1.43\text{m}$$

**总景深为:  $D=D_1+D_2=4.76\text{m}$**



## 5.5 平面上空间像

例: 设某光电成像系统物镜 $f'=50\text{mm}$ ,  $D/f'=1/4$ , 即 $D=12.5\text{mm}$ , 设 $z'=0.05\text{mm}$ 。分别求调焦至5m时的景深, 调焦至无限远及对景后平面空间都成完善像时的近景位置与景深。

● 解: 使对准平面后的空间都能成完善像时:  $p = \frac{-Df'}{z'} = -12.5\text{m}$

近景平面位置:  $p_2 = \frac{p}{2} = -6.25\text{m}$       景深范围:  $(-\infty, -6.25\text{m})$

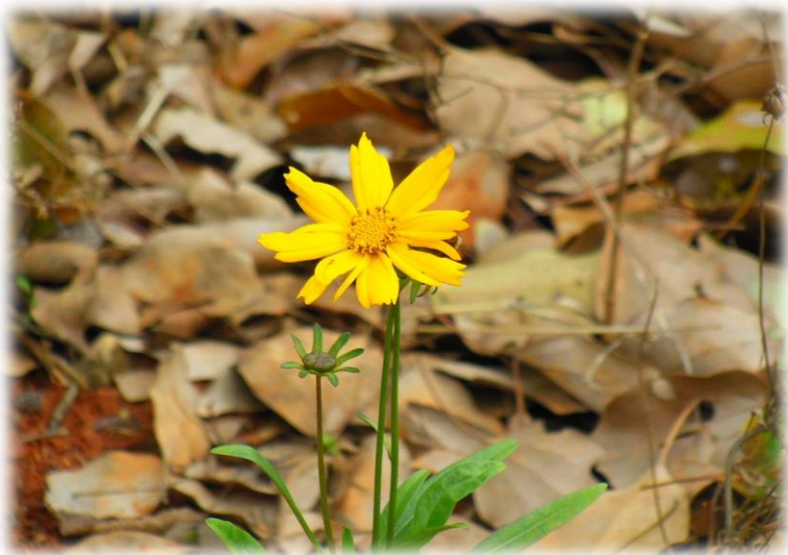
● 调焦于无穷远,  $p = -\infty$ , 则:

$$p_2 = \lim_{p \rightarrow -\infty} \frac{Dpf'}{Df' - pz'} = \frac{Df'}{-z'} = -12.5\text{m} \quad \longrightarrow \quad \text{景深范围: } (-\infty, -12.5\text{m})$$

即: 对准无限远时, 12.5m以远能成像清晰。这表明: 将物镜调焦至无限远并不能获得最大景深!

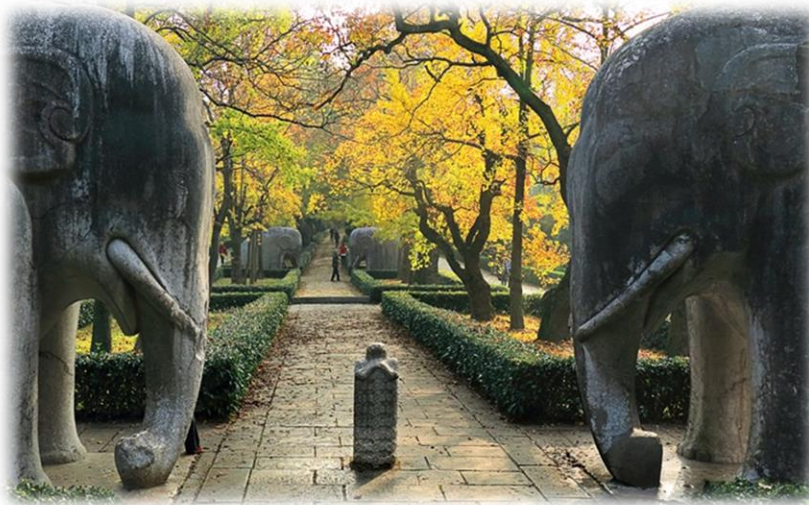


# 短景深照片





# 长景深照片







## 第五章 光学系统中光束的限制

- 光阑决定了光学系统通光能力、成像范围和分辨能力；
- 本章主要讨论如何分析系统各通光孔的光束限制作用；
- **分析关键：**将系统所有光孔成像在同一空间。

### 主要内容

- 5.1 概述
- 5.2 孔径光阑
- 5.3 视场光阑与渐晕光阑
- 5.4 平面上空间像
- **5.5 远心光学系统**
- 5.6 物面与瞳面的转化、光瞳匹配



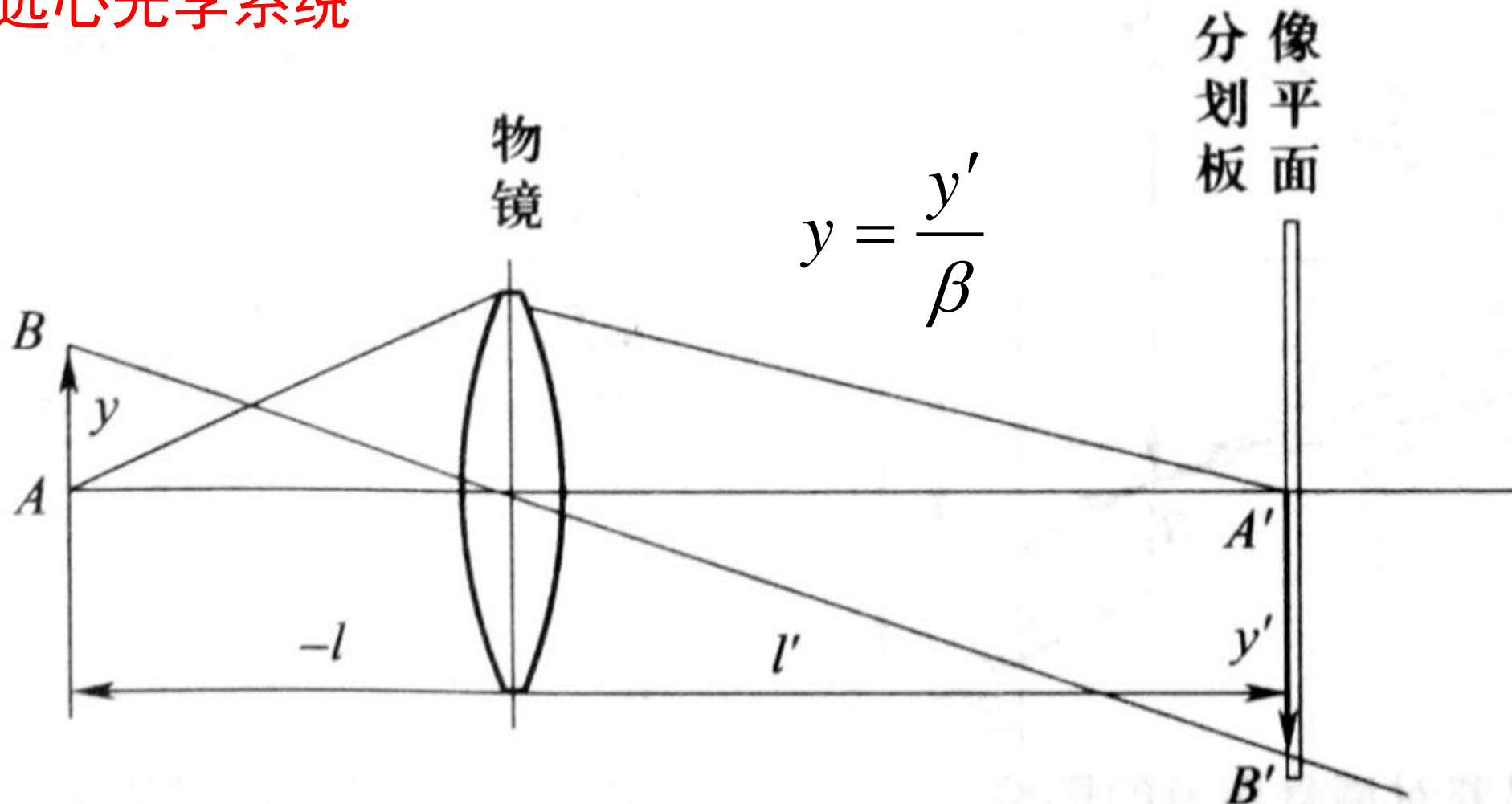
## 5.5 远心光学系统

- ❖ 在光学仪器中，很大一部分仪器用来测量长度，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者物方焦面，以实现对物体或距离的精确测量；
- ❖ 物方远心光学系统：用在工具显微镜等计量仪器，光学系统有一定放大率，使被测物的像和标准刻尺相比，求被测物体的长度。
- ❖ 像方远心光学系统：用在如大地测量仪器中的视距测量，把一标尺放在不同的位置，光学系统改变放大率，使标尺的像等于一个已知值，来求仪器到标尺间距离。



## 5.6 理想光学系统的组合

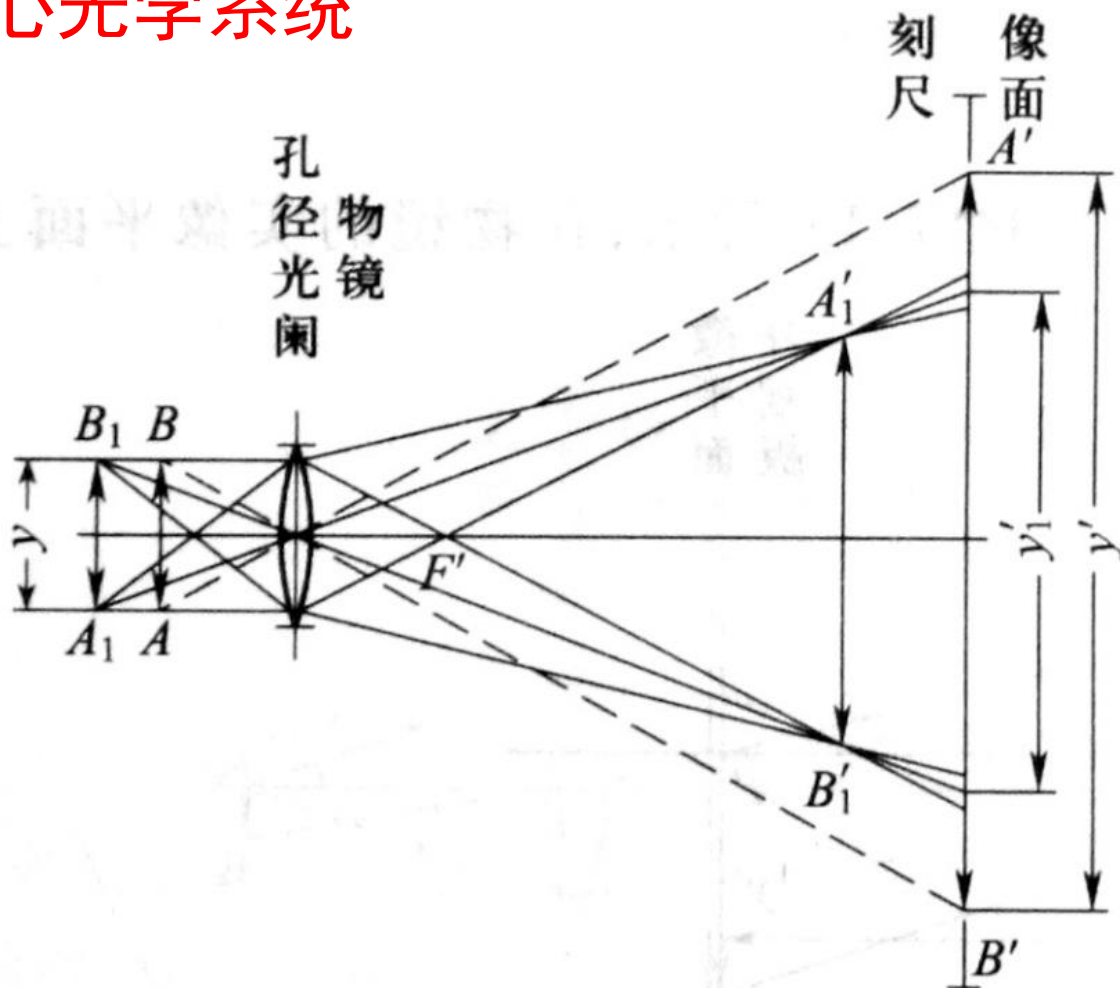
### 一.物方远心光学系统



工具显微镜的测量原理

## 5.6 理想光学系统的组合

### 一.物方远心光学系统



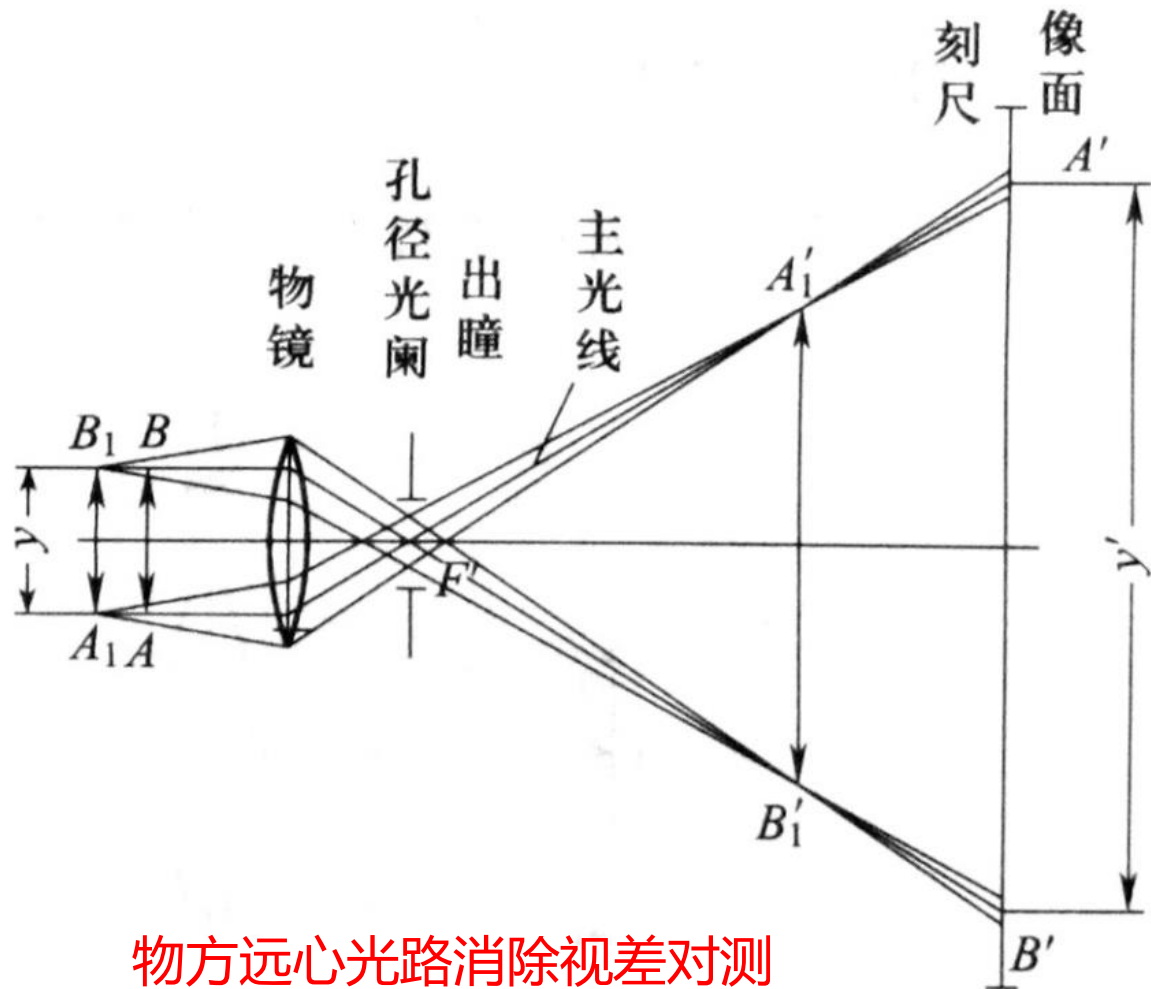
像平面与分划刻线的不重合现象为“视差”。

物面对准误差对测量误差的影响

## 5.6 理想光学系统的组合

### 一.物方远心光学系统

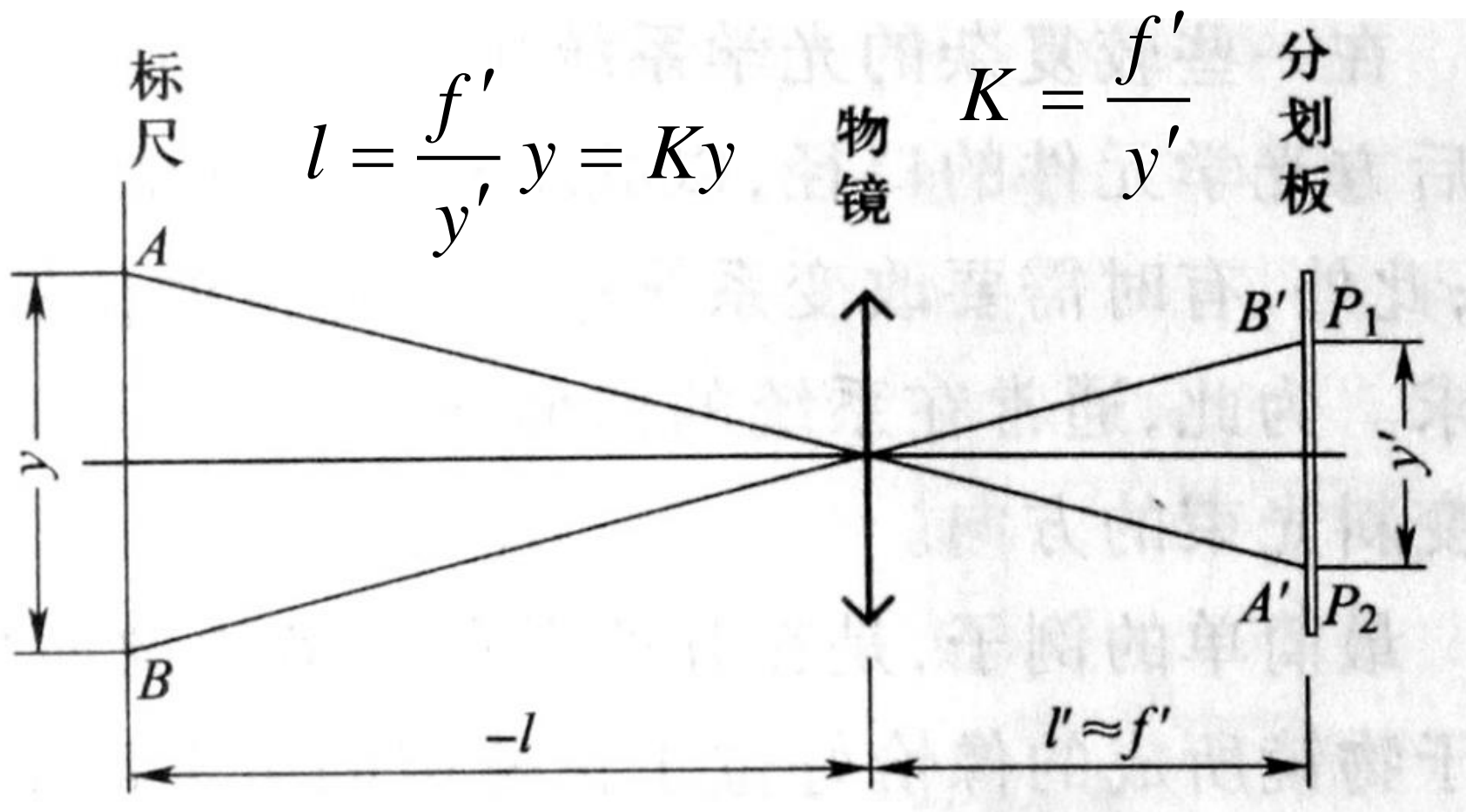
- 为了消除或减小视差对测量精度的影响，可采用控制主光线方向的方法来实现。
- 物体上同一点发出的主光线并不随物体位置的移动而改变，表明调焦不准所造成的视差，不会影响测量结果。
- 主光线平行于光轴的光学系统称为**远心光学系统(telecentric optical system)**；上述系统物方主光线平行于光轴，相当于其会聚中心在物方无穷远，因此称为**物方远心光学系统**。



物方远心光路消除视差对测量误差影响的原理

## 5.6 理想光学系统的组合

### 二.像方远心光学系统

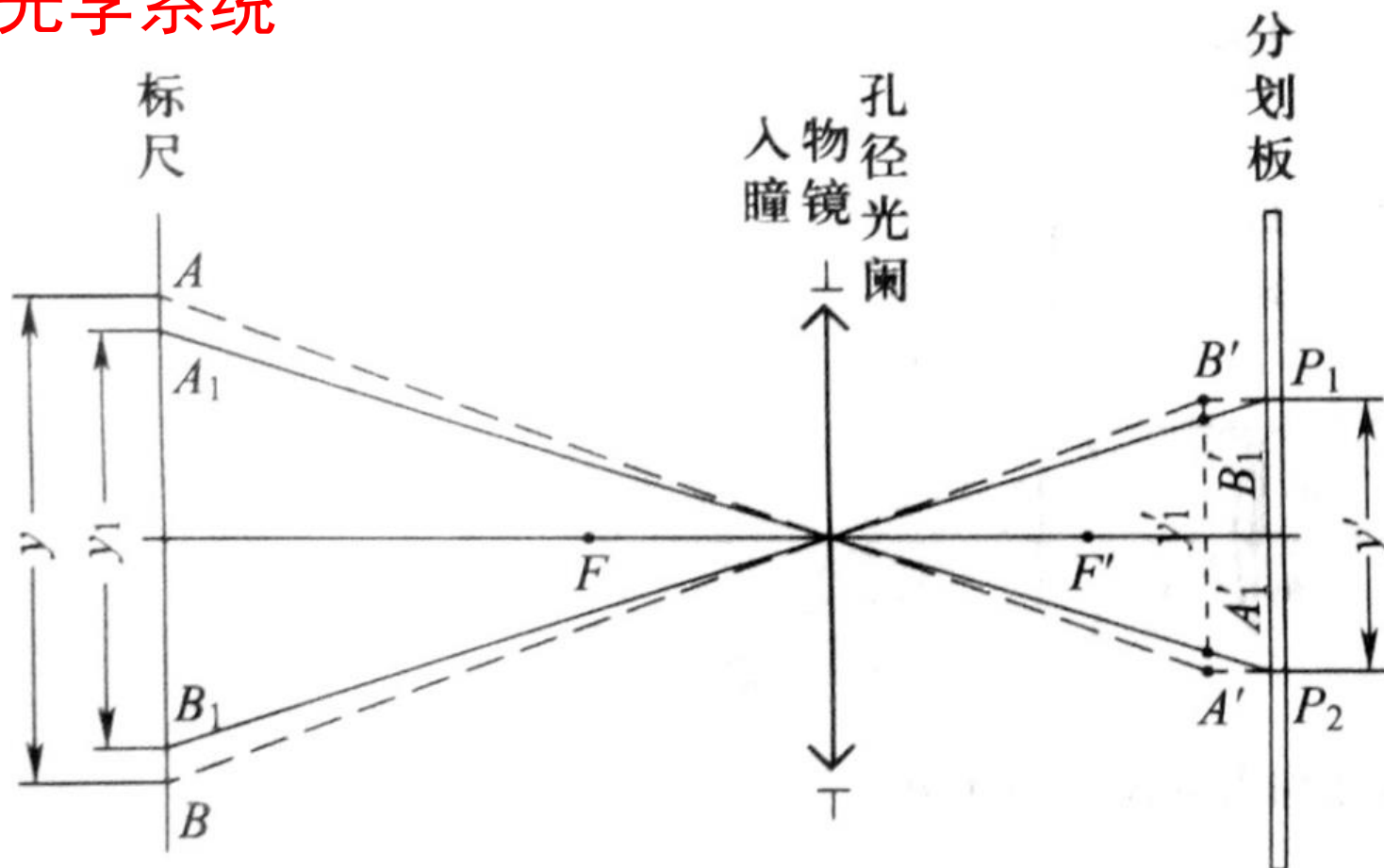


视距法测距原理(调焦实现对准)



## 5.6 理想光学系统的组合

### 二.像方远心光学系统



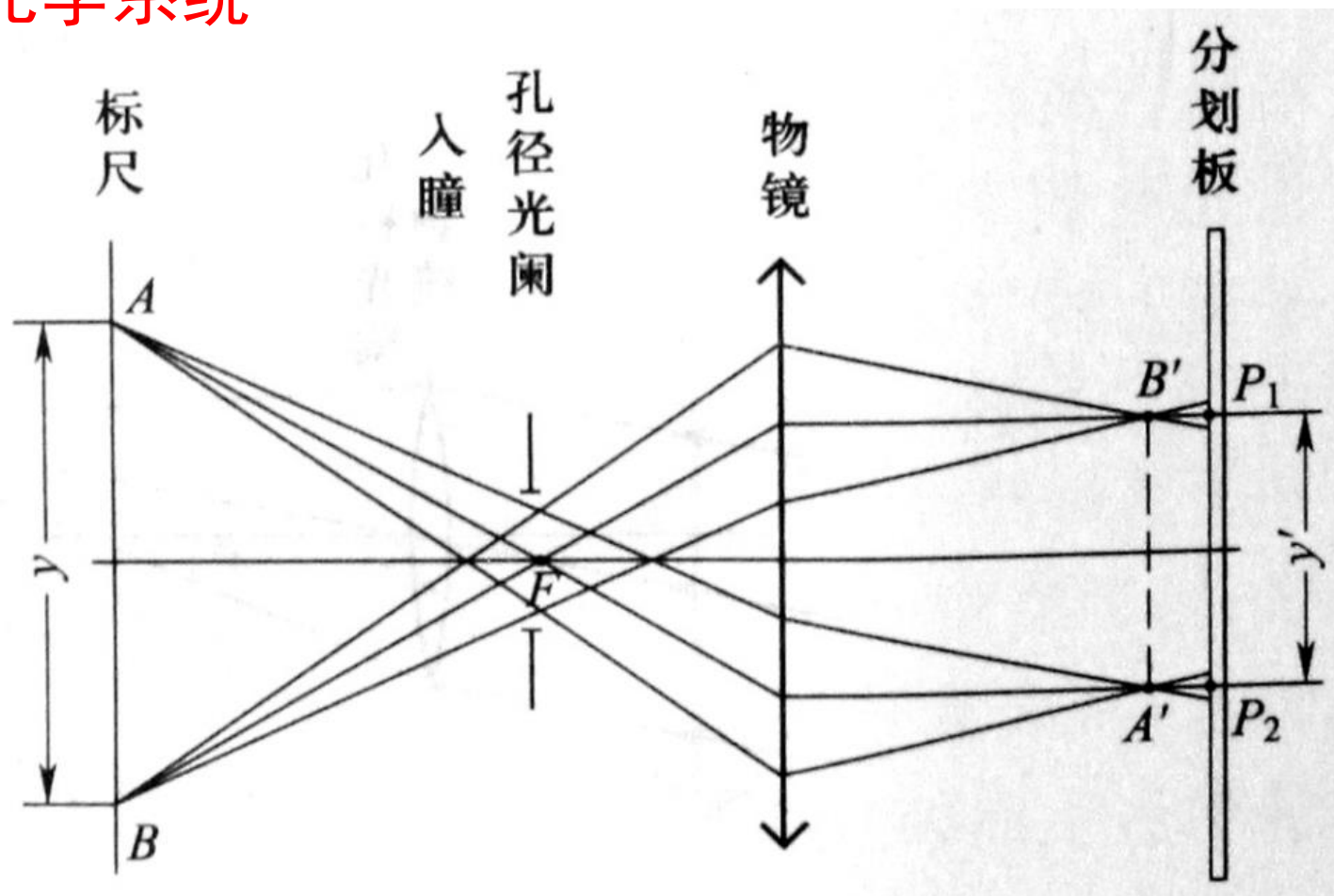
视距法调焦误差对测距误差的影响





## 5.6 理想光学系统的组合

### 二.像方远心光学系统



像方远心光路消除测距误差的原理





## 第五章 光学系统中光束的限制

- 光阑决定了光学系统通光能力、成像范围和分辨能力；
- 本章主要讨论如何分析系统各通光孔的光束限制作用；
- **分析关键：**将系统所有光孔成像在同一空间。

### 主要内容

- 5.1 概述
- 5.2 孔径光阑
- 5.3 视场光阑与渐晕光阑
- 5.4 平面上空间像
- 5.5 远心光学系统
- **5.6 物面与瞳面的转化、光瞳匹配**



## 5.6 物面与瞳面的转化、光瞳匹配

### 一.物面与瞳面

**孔径光阑：**限制了能够进入系统参与成像的光束立体角；入瞳、出瞳；物(像)方孔径角：轴上物(像)点-入(出)瞳边缘连线，与光轴的夹角。

**视场光阑：**限制了成像范围；入射窗、出射窗；物(像)方视场角：入(出)射窗两边缘对入(出)瞳中心的张角。

**渐晕光阑：**由轴外物点发出的、充满入瞳的光束中，部分光线被其他光孔阻挡，导致像平面内的视场逐渐昏暗的现象，对应的光孔即为渐晕光阑。



## 5.6 物面与瞳面的转化、光瞳匹配

### 一.物面与瞳面

- 由入瞳发出的每一条光线又必须通过视场光阑才能成像到出瞳，因此，入射窗和出射窗又成为了入瞳到出瞳成像时的“光瞳”。
- 拉氏不变量表征光学系统能够传输信息量的大小，拉氏不变量越大，传输的信息量越大，可对较大的物面以较大的孔径角成像，具有更高的分辨率，设计难度也随之增大。

拉赫不变量：

$$nyu = n'y'u'$$



## 5.6 物面与瞳面的转化、光瞳匹配

### 二.光瞳匹配

- 一个系统由若干子系统构成，能够通过系统到达像面的光必须能够通过每个子系统的所有光阑，而不被任一个子系统的任一个光孔所拦。以两个系统为例：
- 两个子系统的孔径光阑互为共轭关系，视场光阑也互为共轭关系；（瞳对瞳，窗对窗）
- 子系统一的孔径光阑与子系统二的视场光阑共轭，子系统一的视场光阑与子系统的孔径光阑共轭。（瞳对窗，窗对瞳）

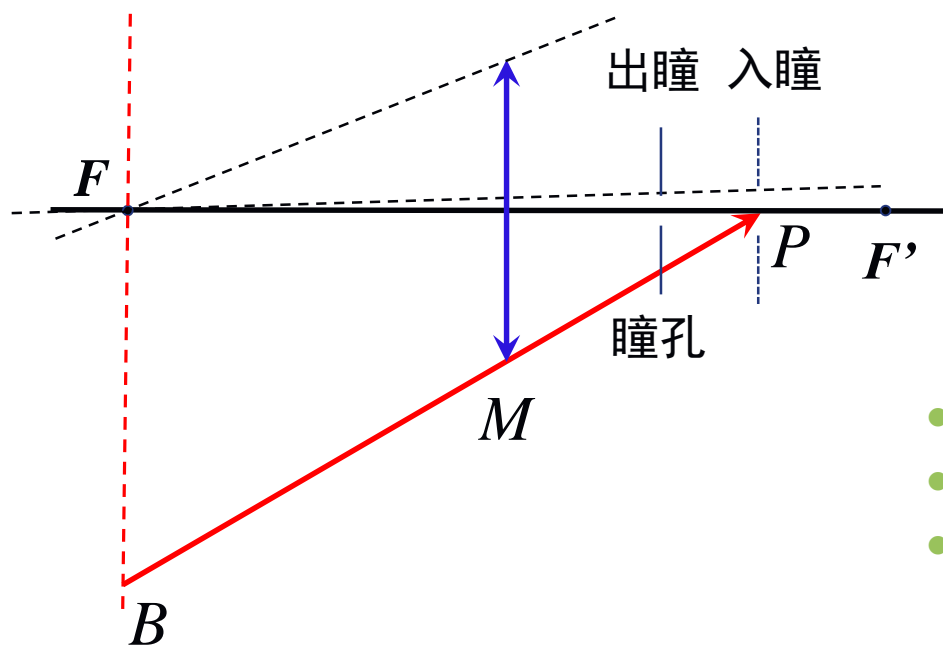
具体的对应将在典型光学系统中做详细的讲解，比如显微镜与照明系统的匹配。



## 第五章 练习



**习题3:** 有一焦距为**50mm**的放大镜，直径**D=40mm**，人眼（指瞳孔）离放大镜**20mm**来观看位于物方焦平面上的物体，瞳孔直径为**4mm**。**1)**在此系统中，何者为孔径光阑？何者为渐晕光阑？并求入瞳、出瞳和渐晕光阑在物方、像方的像的位置和大小。**2)**求能看到半渐晕时的视场范围。



$$FB = FP \times \frac{D/2}{-l'} = 83.3 \times \frac{20}{33.3} = 50$$

半渐晕时的视场范围是100 mm。

$$\frac{1}{l'} - \frac{1}{l} = \frac{1}{f'} \quad \begin{matrix} l = -20, f' = 50 \\ l' = -33.3 \end{matrix}$$

$$2y = \frac{l'}{l} \times 2y' = \frac{-33.3}{-20} \times 4 = 6.7$$

- 瞳孔是孔径光阑，透镜时渐晕光阑
- 入瞳为镜后**33.3mm**处，直径**6.7mm**
- 出瞳为瞳孔，镜后**20mm**，直径**4mm**
- 渐晕光阑即为放大镜本身，其像为其本身，大小**40mm**；
- 半渐晕时，视场范围的边缘点即入射光瞳中心**P**和入射窗的下边缘**M**的连线与物平面的交点。



## 第五章 光学系统中光束的限制

- 光阑决定了光学系统通光能力、成像范围和分辨能力；
- 本章主要讨论如何分析系统各通光孔的光束限制作用；
- **分析关键：**将系统所有光孔成像在同一空间。
  - 5.1 概述
  - 5.2 孔径光阑
  - 5.3 视场光阑与渐晕光阑
  - 5.4 平面上空间像
  - 5.5 远心光学系统
  - 5.6 物面与瞳面的转化、光瞳匹配

### 主要内容



# 第五章 光学系统中光束的限制

## 概述

- 光学系统中光束限制
- 光阑的作用

## ★ 孔径光阑

- 定义
- 孔径光阑的限制作用
- 孔径光阑的判断
- 入射光瞳与出射光瞳

## ★ 视场光阑渐晕光阑

- 基本概念
- 视场光阑
- 视场光阑与孔径光阑
- 渐晕光阑

## 第五章 光学系统中光束的限制

## 光瞳匹配

- 物面与瞳面的转化
- 光瞳匹配（后续典型系统中会有详细的讲述）

## 远心光学系统

- 物方远心光路
- 像方远心光路

## 平面上空间像

- 平面上空间像
- ★ 景深