

[考试要求]

要求考生了解三种典型的目视光学仪器中的光束限制、系统的景深和远心光路。

[考试内容]

与光阑相关的定义，光阑的种类和作用，照相系统、显微系统、望远系统中的光束限制和特点，远心光路的定义、光路和应用，景深的定义等。

[作业]

P73: 1、3、4

第四章 光学系统中的光束限制

§ 4—1 光阑在光学系统中的作用

一、光阑

1、**定义**：光学系统中设置的带有内孔的金属薄片，是专用光阑。

光阑一般垂直于光轴放置，且其中心与光轴中心相重合。

2、**形状**：光阑多为圆形、正方形、长方形，有些光阑的尺寸大小是可以调节的（即可变光阑）。

例如：人眼瞳孔就是光阑，瞳孔的大小随着外界明亮程度的不同是可以变化的，白天最小 $D=2\text{mm}$ ，晚上最大，可达 $D=8\text{mm}$ 。

3、**光阑作用**：是用内孔限制成像光束大小的，提高成像质量。

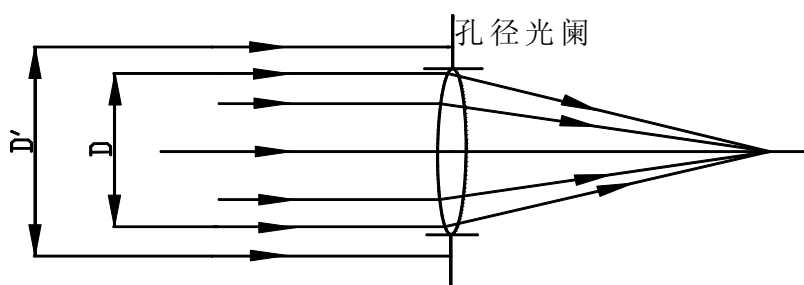


图 4—1 孔径光阑对轴上点光束的限制

二、光阑种类

主要分为：孔径光阑和视场光阑。

1、**孔径光阑（有效光阑）**：指限制进入系统的成像光束口径的光阑。

1) 对轴上点：孔径光阑决定了轴上点孔径角的大小。

结论 1：轴上点孔径角的大小受光阑大小和位置的影响，孔径角 U 由光阑决定，光阑的位置不同，其口径应不同。

2) 对轴外点：

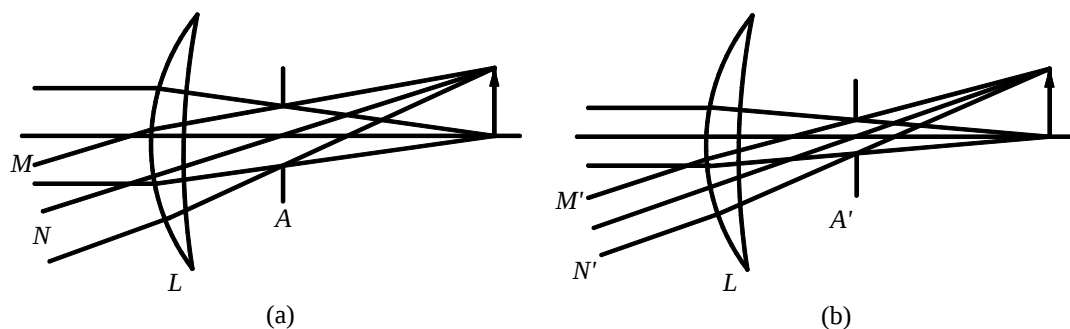


图 4—2 孔径光阑对轴外点光束的限制

结论 2: 对轴外点 B 发出的宽光束而言，在保证轴上点 U 不变的情况下，光阑处于不同位置时，将选择不同部分的光参与成像，这样通过改变光阑的位置，就可以选择成像质量较好的部分光束参与成像，提高（改善）成像质量。

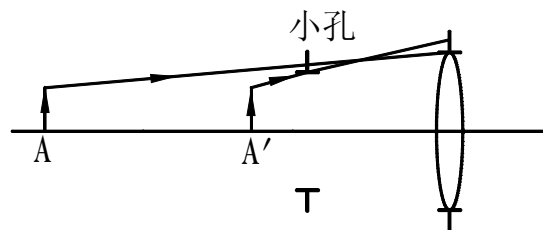


图 4—3 孔径光阑和物体位置的关系

结论 3: 在保证成像质量的前提下，合理选取光阑的位置，可使整个系统的横向尺寸减小，结构匀称。

结论 4: 系统中的光阑只是针对某一物体位置而言的，若物体位置发生了变化，则原光阑会失去限光作用。

2、**视场光阑：**用以限制成像范围的光阑。

视场光阑的形状多为正方形、长方形。例如：显微系统中的分划板就是视场光阑，照相系统中的底片也是视场光阑。

§ 4-2 入瞳、出瞳

一、定义：

1、**入瞳**：孔径光阑经前面的透镜组（光学系统）在物空间所成的像。

入瞳决定了物方最大孔径角的大小，是所有入射光的入口。

2、**出瞳**：孔径光阑经后面的透镜组（光学系统）在像空间所成的像。

出瞳决定了像方孔径角的大小，且是所以出射光的出口。

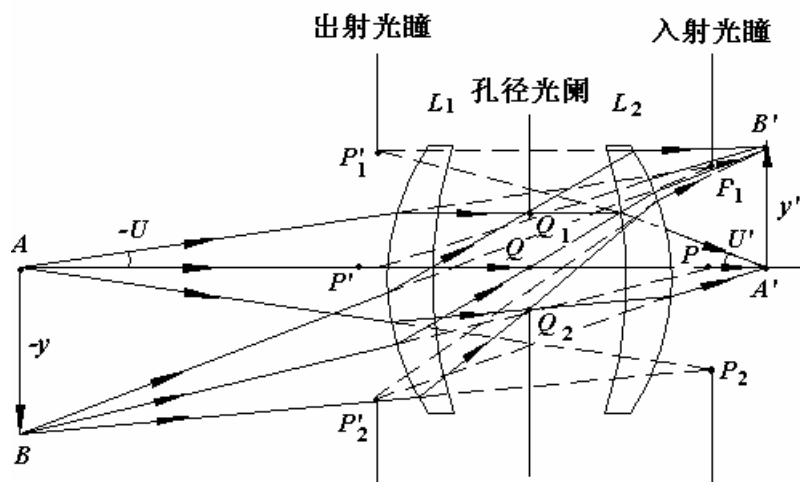


图 4-4

3、判断入瞳、出瞳的方法：

将光学系统中所有的光学元件的通光口径分别对其前（后）面的光学系统成像到系统的物（像）空间去，并根据各像的位置及大小求出它们对轴上物（像）点的张角，其中张角最小者为入瞳（出瞳）。

二、主光线、相对孔径

1、**主光线**：通过入瞳中心的光线叫主光线。

主光线不仅通过入瞳中心也通过孔径光阑中心及出瞳中心。

2、**相对孔径** ($\frac{D_\lambda}{f'}$)：系统的入瞳直径与系统的焦距之比；

3、**光瞳数 (F 数)**：相对孔径的倒数即， $K = \frac{f'}{D_\lambda}$

4、**数值孔径 NA**： $NA = n_1 \sin U_1$ ，物方孔径角的正弦与物方折射率之积。

§ 4—3 视场光阑

一、视场度量的二种方式

1、线视场

$$\left\{ \begin{array}{ll} \text{物方线视场} & 2y \text{ —— 二倍的物高;} \\ \text{像方线视场} & 2y' \text{ —— 二倍的像高。} \end{array} \right.$$

视场光阑多为矩形、方形及圆形。若为圆形，用直径度量；但若为矩形，应用对角线来表示。这就是线视场的度量。

2、视场角

$$\left\{ \begin{array}{ll} \text{物方视场角} & \text{—— } 2\omega \\ \text{像方视场角} & \text{—— } 2\omega' \end{array} \right.$$

对不同的物面上的点其视场角不相同。

注意：

- 1) 方视场角定义的时候是 2ω ，很多情况下，我们都用半视场 ω 来表示。
- 2) 场角也有符号，它也遵循符号原则。

二、入射窗、出射窗

1、**入射窗**：视场光阑经前面的光组在物空间所成的像；

2、**出射窗**：视场光阑经后面的光组在像空间所成的像；

入、出射窗之间是共轭的，也可以将出射窗看作是入射窗经系统所成的像。

3、判断入射窗的方法：

将光学系统中所有的光学元件的通光口径分别对其前（后）面的光学系统成像到系统的物（像）空间去，并根据各像的位置及大小求出它们对入（出）瞳中心的张角，其中张角最小者为入射窗（出射窗）。

三、渐晕

1、**定义**：轴外点发出的充满入瞳的光被透镜的通光口径所拦截的这种现像。

为了说明这个问题，用图来表示一下

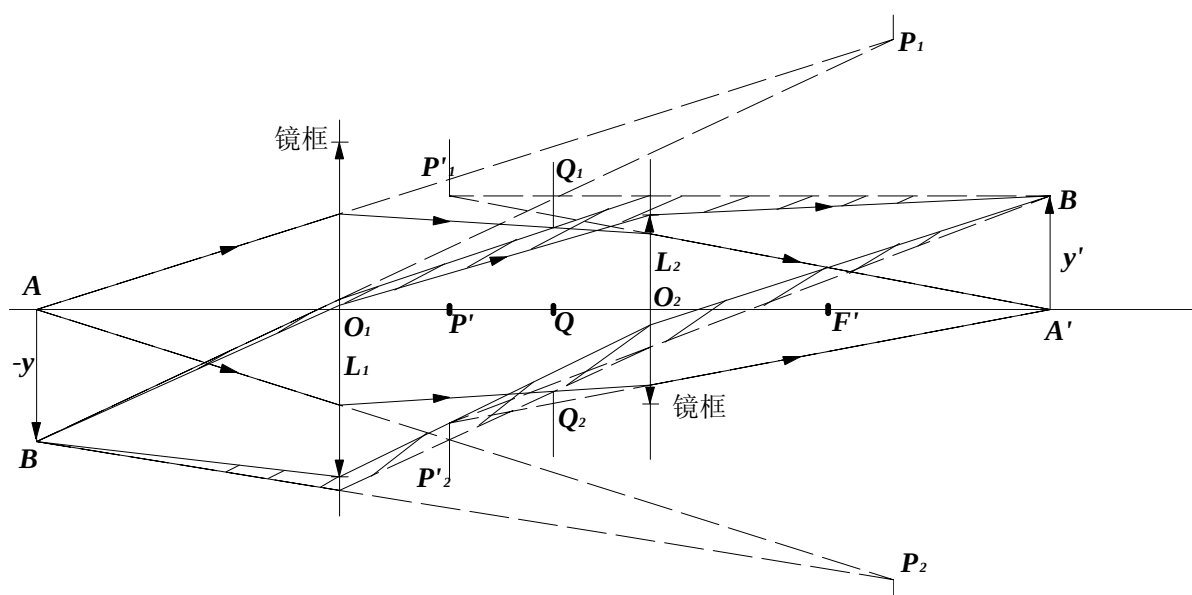


图 4—5 轴外光束的渐晕

实际上，渐晕现象是普遍存在的，我们用不着片面的消除渐晕。一般系统允许有 50% 的渐晕（拦一半），甚至 30% 的渐晕。

2、消除渐晕的条件

只要入射窗（决定了物方视场的大小）与物平面重合，出射窗与像平面重合就可消除渐晕。

3、线渐晕系数

线渐晕系数表示式为：
$$K_{\omega} = \frac{2b}{2h}$$

式中， $2b$ 是轴外点发出光束的宽度； $2h$ 是轴上点发出光束宽度（它们都是在垂直于光轴的平面上度量）；

若 $2b, 2h$ 在入瞳面内度量，则上式变为： $K_{\omega} = \frac{D_{\omega}}{D}$ ，分子是斜光束在入瞳平面上垂直于光轴方向上的宽度；分母是入瞳直径。

§ 4—4 景深

一、景深

- 1、定义：在景像平面上所获得成清晰像的空间深度（ Δ ）
- 2、产生原因：接收器件本身不完善性造成的（衍射的影响）。

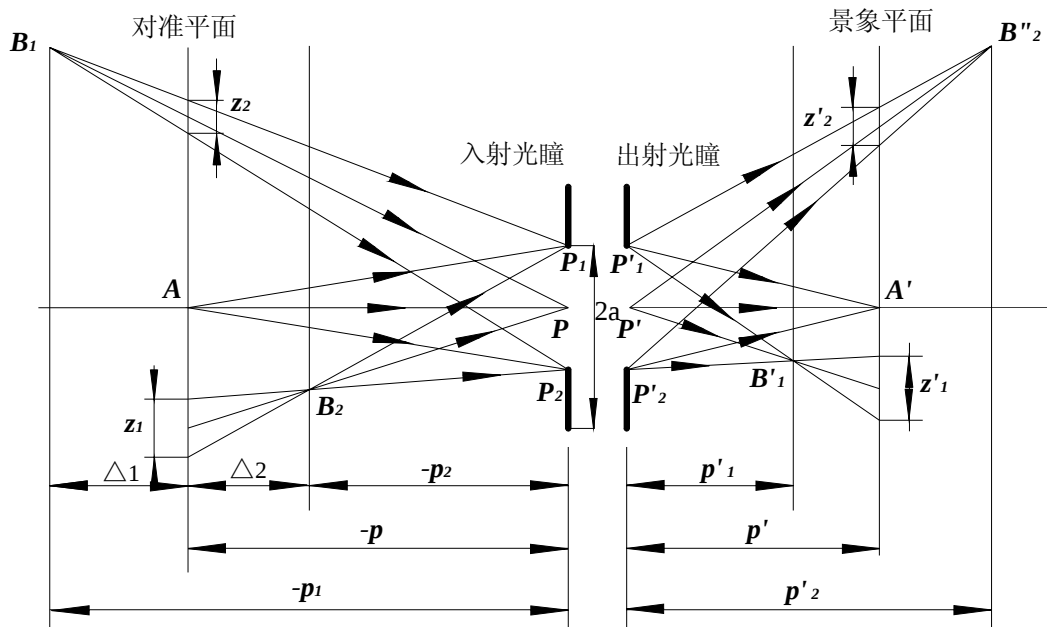


图 4—6 景深

假设现有一物面，根据共线成像理论，那么它经系统成像有个共轭面。称此物面为对准平面，像面为景像平面。现取物面上一点A，它发出的光经系统成像后，一定会聚于共轭面上一点，它们是一对共轭点。有一物点 B_1 不在对准平面上，那么按照共线成像理论，其共轭点也一定不在景像平面上， B_1 点发出的光在对准面上成一弥散斑，而在景像平面上也成一弥散斑。如果我们仍在景像平面进行观察 B_1 不能成清晰像。这是从原理上进行分析，但实际上由于景像平面作为接收器来说可能有缺陷，从而导致 B_1 点也被认为成像清晰。

相类似的，再取空间任一点 B_2 ，若它在景像平面上也成一足够小的弥散斑，则系统也将认为它能成清晰像。从而产生了一个沿轴方向的空间深度，我们称这个空间深度为景深。

二、公式

1、远景、近景、远景平面、近景平面

- 1) 远景平面、远景深度：能成清晰像的最远的平面；远景对对准平面的距离叫远景深度（ Δ_1 ）。
- 2) 近景平面、近景深度：能成清晰像的最近的平面；近景对对准平面的距离叫近景深度（ Δ_2 ）。

而景深就是 $\Delta_1 + \Delta_2$ 。

图 4-6 给出了入、出瞳，对准平面（它与入瞳之间的距离用 P 表示）、景像平面，及能够看到的最近的平面（近景，它与入瞳之间的距离用 P_2 表示）与能够看到的最远的平面（远景，它与入瞳之间的距离用 P_1 表示）， P_1 ， P ， P_2 均以入瞳中心为原点。

现设入瞳的直径为 $2a$ ，人眼极限分辨角 $\varepsilon = 1' = 0.00029rad$

则由于景深的存在，除了对准平面外，所有的空间点在对准平面上都将形成一个弥散斑，在正确透视距离条件下，该弥散斑允许的直径为：

$$z = z_1 = z_2 = p\varepsilon$$

z_1 为远景平面上的点在对准平面上形成的弥散斑大小；

z_2 为近景平面上的点在对准平面上形成的弥散斑大小；

P 为对准平面与入瞳之间的距离；

则根据三角形相似关系可得：

（下角标为 2 是指近景，为 1 是指远景相关的各量）

$$P_1 = \frac{2ap}{2a - z_1} = \frac{2ap}{2a - p\varepsilon}$$

$$P_2 = \frac{2ap}{2a + z_2} = \frac{2ap}{2a + p\varepsilon}$$

$$\text{而远景深度} \quad \Delta_1 = p - p_1 = \frac{p^2\varepsilon}{2a - p\varepsilon}$$

$$\text{而近景深度} \quad \Delta_2 = p_2 - p = \frac{p^2\varepsilon}{2a + p\varepsilon}, \text{ 故有景深为:}$$

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

这就是景深的求取，它是用入瞳表示的；此外也可以表示成用孔径角表示显然从公式中可见，景深与入瞳的大小（孔径角）大小有关，入瞳直径越小，景深越大；孔径角越小，景深越大。

三、讨论二种特殊情况的景深

1、使对准平面以后整个空间都能成清晰像

从对准平面往后至远景平面直至无限远的整个空间全部都能成清晰像。不仅如此，在对准平面之前还有个近景平面，这个小空间内也能成清晰像，所以要想求系统的整个景深，只要求出近景平面就可以了。

由 $\Delta_1 = \infty = \frac{p^2 \varepsilon}{2a - p\varepsilon}$ 可知：要想 Δ_1 为无穷，即 $2a - p\varepsilon = 0 \Rightarrow p = \frac{2a}{\varepsilon}$

$$p_2 = p - \Delta_2 = p - \frac{p^2 \varepsilon}{2a + p\varepsilon} = \frac{2ap + p^2 \varepsilon - p^2 \varepsilon}{2a + p\varepsilon} = \frac{2ap}{2a + p\varepsilon} = \frac{2a \cdot \frac{2a}{\varepsilon}}{2a + \frac{2a}{\varepsilon} \cdot \varepsilon} = \frac{a}{\varepsilon}$$

即近景平面位于入瞳前 $\frac{a}{\varepsilon}$ 位置处。为此可得如下结论：

结论：当把照相物镜调焦于 $p = \frac{2a}{\varepsilon}$ 时，在景像平面上可得到自入瞳前 $\frac{a}{\varepsilon} \sim$ 无限远整个空间内的物体都能成清晰像。

2、把物镜调焦于无限远

根据已知条件有： $p \rightarrow \infty$ 即对准平面位于无限远处，远景平面也位于无限远，则：

$$p_2 = \frac{2ap}{2a + p\varepsilon} = \frac{2a}{\frac{2a}{p} + \varepsilon} = \frac{2a}{\varepsilon}$$

上式是分子分母同时除以 p 得到的。故有：

结论：此时景深为自物镜前 $\frac{2a}{\varepsilon} \sim$ 无限远整个空间都能成清晰像。

§ 4-5 远心光路

远心光路是比较重要也是在实际应用中使用比较多的一类光路类型，主要用于计量仪器之中。常用的计量仪器分为二种：一种是测量长度的如工具显微镜，一种是测量距离的如：水准仪、经纬仪等。

一、物方远心光路

1、定义：光学系统的物方主光线平行于光轴，主光线的会聚中心位于物方无限远处。

物方远心光路的特点及优点可以工具显微镜为例进行说明。

2、光路：

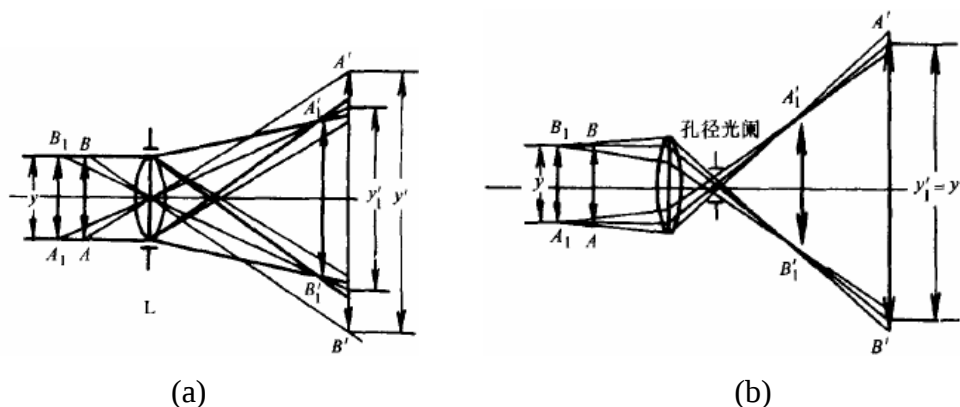


图 4—8 物方远心光路

3、作用：消除（减少）由于视差所引起的测量误差。

二、像方远心光路

1、定义：光学系统的像方主光线平行于光轴，主光线的会聚中心位于像方无限远处。

2、作用：消除/减少测距误差。

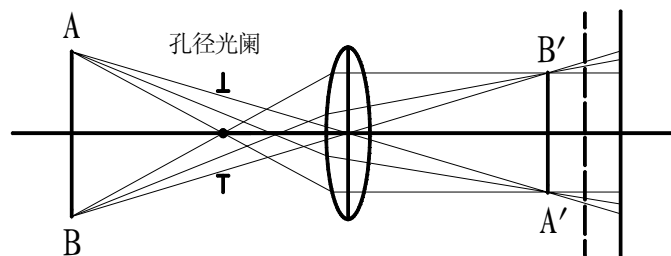


图 4—9 像方远心光路

如果把刻尺当作物，则系统带着分划一起移动调焦，由于调焦不准造成视差，同样影响测距精度，为此也用孔径光阑来控制主光线。这样物面上一点 A 发出

的过焦点的光，经系统之后将变为平行光，由于孔阑放于 F 处，所以这条光线就是主光线，这样不论像面与分划面是否重合，我们读的都是主光线的位置，从而消除（减少）了测距误差。

§ 4-6 典型系统的光束限制

一、放大镜（一般说来低倍的放大镜都是由平凸/双凸单透镜构成）

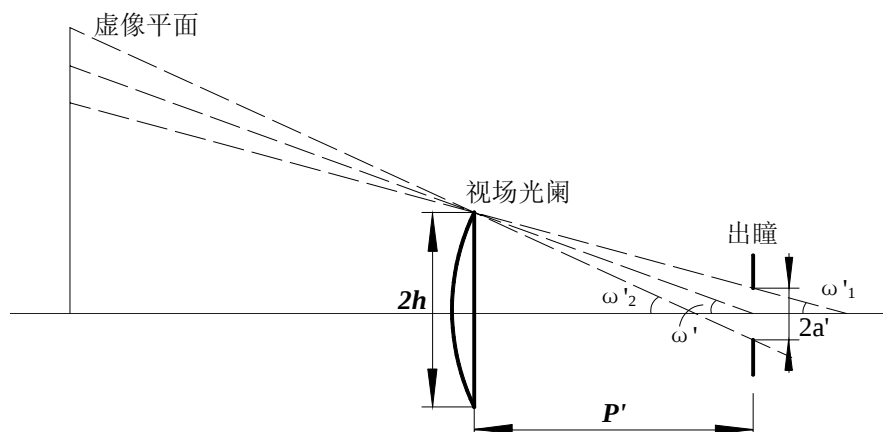


图 4-10 放大镜的光束限制

放大镜成一正立、放大的虚像。人眼是孔径光阑（出瞳），限制的是成像光束，放大镜本身是视场光阑（入射窗），限制的是成像范围。其最大的视场由入瞳的下边缘与入射窗的上边缘决定。

二、望远镜

- 1、望远系统的特点：是平行光射入，平行光射出，其光学间隔 $\Delta = 0$ 。
- 2、光瞳衔接原则：前一个系统的出瞳与后一系统的入瞳相重合，否则就会出现光束拦截现象。
- 3、光束限制：

在望远系统中，一般情况下，物镜镜框是它的孔径光阑，也是系统的入瞳。它经目镜所成的像就是系统的出瞳。一般与人眼瞳相重合。而出瞳的位置与目镜最后一面之间的距离就是出瞳距。一般出瞳距 $P' \geq 8mm \sim 10mm$ ，若加防毒面具则出瞳距至少要为几十毫米。

分划板是其视场光阑。它放置于实像平面上，主要用于限制视场的大小。

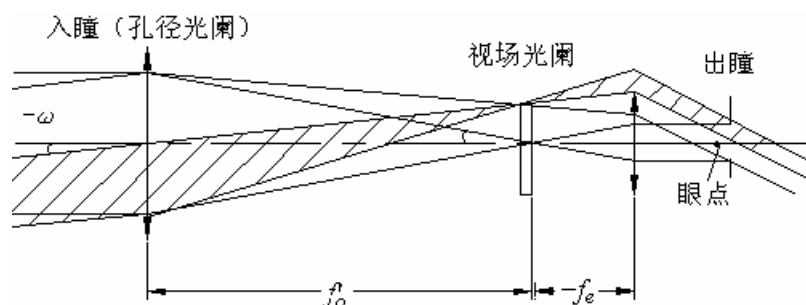


图 4-11

三、显微系统

由物镜与目镜构成，在中间也有一实像面，可放置分划板，用于观察近处的

物体。显微系统它的物镜焦距与目镜焦距都比较短，从而出现较大的光学间隔。

当物经显微系统成像时，实现的是二次成像过程，物位于物方焦面附近，经物镜成一放大的、倒立的实像，实像面一般位于目镜的物方焦面附近，之后再经目镜成一正立、放大的虚像。最终的结果是：成一倒立、放大的虚像。

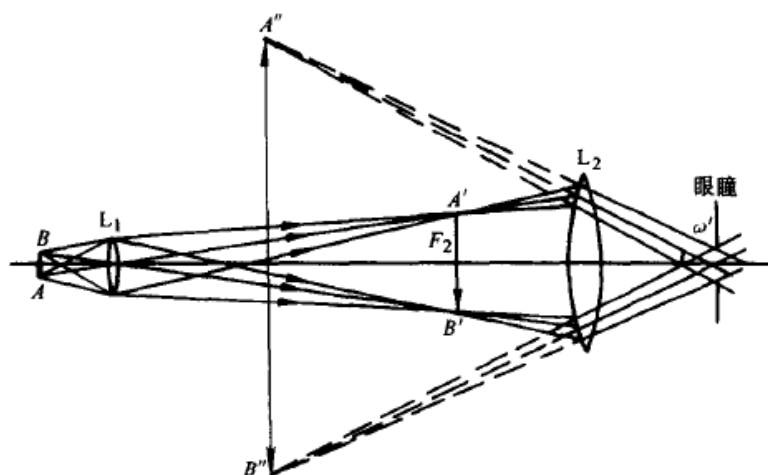


图 4-12 显微镜成像原理

可见，实际上显微镜是个复杂的放大镜。

对低倍显微系统而言，其孔径光阑是物镜框（入瞳）；而出瞳也与人眼瞳相重合；对高倍显微系统而言，其孔径光阑是专门设置的；对显微系统而言，其视场光阑是分划板；位于目镜物方焦点附近。

四、照机系统

照机系统主要由三部分构成，各自完成自己的功能：

- 1、底片：用于记录物体经系统所成的像，在照相机中它起到视场光阑作用，限制的是照相机的成像范围。
- 2、可变光阑：是系统的孔径光阑，其大小可调，能够调节进入系统的能量多少。
- 3、物镜：可以把不同远近物体发出的光经系统进行成像。