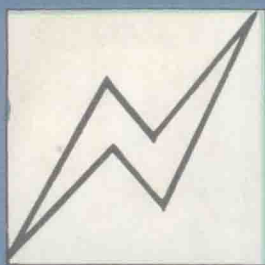


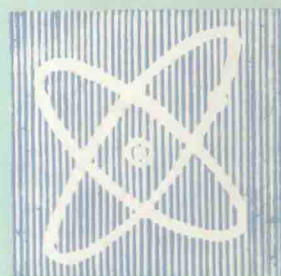
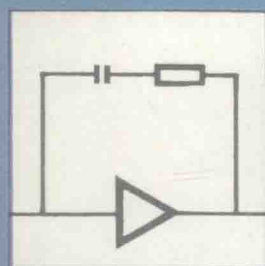
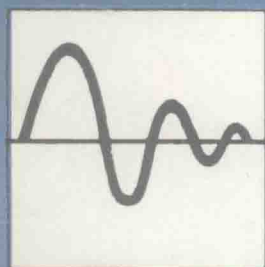
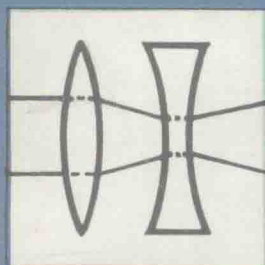
高等学校试用教材



应用光学

下 册

天津大学张以谟 主编



机械工业出版社

高等学校试用教材

应 用 光 学

下 册

天津大学张以谟 主编



机械工业出版社

应用光学

(下 册)

天津大学张以谟 主编

*

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第 117 号)

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{16}$ · 印张 $14 \frac{1}{4}$ · 字数 349 千字

1982 年 7 月北京第一版·1982 年 7 月北京第一次印刷

印数 0,001—5,700 · 定价 1.50 元

*

统一书号: 15033 · 5124

目 录

第十三章 眼睛与目视仪器	1	和结构参数的关系	93
§ 13-1 眼睛的构造及其特性	1	§ 15-5 单薄透镜的 $\overline{P^\infty}$, $\overline{W^\infty}$, $\overline{C_1}$ 和	
§ 13-2 双目立体视觉	5	结构参数的关系	99
§ 13-3 放大镜	8	§ 15-6 用 PW 方法求初始结构	
§ 13-4 显微镜系统及其特性	10	的实例	101
§ 13-5 显微镜的分辨率和有效放		第十六章 典型光学系统设计	111
大率	16	§ 16-1 概述	111
§ 13-6 显微镜的物镜	17	§ 16-2 中倍平视场显微物镜设计	112
§ 13-7 显微镜的照明系统	21	§ 16-3 双高斯型物镜设计	130
§ 13-8 望远系统	24	§ 16-4 变焦距摄影物镜	148
§ 13-9 望远物镜	31	第十七章 非球面及其在光学系统	
§ 13-10 目镜	36	中的应用	169
§ 13-11 透镜转象系统和场镜	41	§ 17-1 概述	169
§ 13-12 望远系统的外形尺寸		§ 17-2 非球面曲面方程表达式	170
计算	42	§ 17-3 二次圆锥曲面	176
§ 13-13 体视测距机的原理	49	§ 17-4 施密特校正板的设计	177
第十四章 摄影及投影光学系统	52	§ 17-5 菲涅尔透镜的设计	180
§ 14-1 摄影系统的光学特性	52	§ 17-6 宽银幕电影用柱面变形物镜	183
§ 14-2 摄影物镜	58	第十八章 象质评价	185
§ 14-3 取景与测距系统	66	§ 18-1 概述	185
§ 14-4 感光底片	70	§ 18-2 点物成象过程分析	186
§ 14-5 放映物镜	75	§ 18-3 中心点亮度	192
§ 14-6 投影物镜	79	§ 18-4 瑞利判断	193
§ 14-7 放映和投影系统的照明	82	§ 18-5 分辨率	194
第十五章 光学系统初始结构计算		§ 18-6 点列图	196
方法	85	§ 18-7 光学传递函数	197
§ 15-1 PW 形式的初级象差系数	85	第十九章 象差自动平衡	210
§ 15-2 薄透镜系统初级象差的 PW		§ 19-1 概述	210
表示式	86	§ 19-2 评价函数	211
§ 15-3 薄透镜系统的基本象差		§ 19-3 阻尼最小二乘法	215
参量	88	§ 19-4 边界条件处理	220
§ 15-4 双胶合透镜组的 $\overline{P^\infty}$, $\overline{W^\infty}$, $\overline{C_1}$		§ 19-5 计算实例	221

第十三章 眼睛与目视仪器

§ 13-1 眼睛的构造及其特性

许多光学仪器都要用眼睛来观察，人眼则作为这类目视光学系统的光能接收器。因此，在目视仪器的设计和使用中，都必然要涉及到眼睛，应当对其特性有所了解。眼睛的特性与其结构有关。

一、眼睛的构造

人眼本身就是一个光学系统，外表大体为球形，直径约为 25 毫米，它的内部构造如图 13-1 所示。

角膜：角膜是由角质构成的透明球面。厚度约 0.55 毫米，折射率为 1.3771，外界的光线就是首先通过角膜进入眼睛的。

前室：角膜后面的一部分空间称为前室。前室中充满了折射率为 1.3374 的透明液体，称为水状液，前室的深度约为 3.05 毫米。

水晶体：它是由多层薄膜构成的一个双凸透镜。中间较硬，外层较软，在自然状态下，其前表面的半径为 10.2 毫米，后表面的半径为 6 毫米。各层折射率不同，中央为 1.42，最外层为 1.373。借助于水晶体周围肌肉的作用，可以使前表面的半径发生变化，以改变水晶体的焦距，使不同距离的物体都能成象在网膜上。

虹彩：它在水晶体的前面，中央是一个圆孔，它能限制进入眼睛的光束口径，称为瞳孔。随着被观察物体的亮暗程度，它能自主地改变瞳孔直径，以调节进入眼睛的光能量。

后室：水晶体后面的空间称为后室，里面充满着一种和蛋白质类似的透明液体，叫做玻璃液，它的折射率为 1.336。

网膜：后室的内壁与玻璃液紧贴的为了一层由神经细胞和神经纤维构成的膜，称为网膜。它是眼睛的感光部分。眼睛系统将物体成象于网膜上。网膜具有非常复杂的结构，共有十层，前八层对光透明但不引起刺激。第九层是感光层，布满作为感光元素的视神经细胞。第十层直接与脉络膜相接。

脉络膜：网膜的外面包围着一层黑色膜，它的作用是吸收透过网膜的光线，把后室变成一个暗室。

巩膜：它是一层不透明的白色外皮，将整个眼球包围起来。

黄斑：差不多位于网膜中部的椭圆形区域称为黄斑（呈黄色）。其水平方向的大小约为 1 毫米，垂直方向约为 0.8 毫米。黄斑上有一不大的凹部，直径约 0.25 毫米，称为中心凹，在中心凹处密集了大量的感光细胞，所以它是网膜上视觉最灵敏的区域。

盲斑：是神经纤维的出口，由于没有感光细胞，所以不能产生视觉。

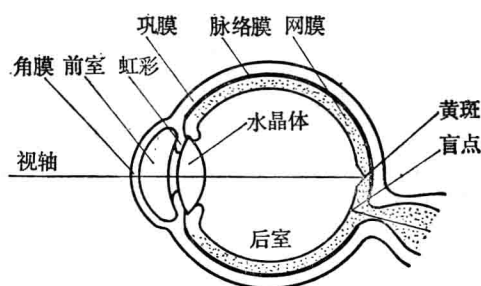


图 13-1

来自外界的光线，经过角膜以及水晶体折射后，成象在网膜上，使视神经细胞受到刺激，而产生视觉。网膜上所成的象是倒象，但我们的感觉仍然是正立的，这是由于神经系统内部作用的结果。

当注视某一物体时，眼睛依靠它外面肌肉的牵动，能自动地使该物体的象落在黄斑上。黄斑的中心凹和眼睛光学系统象方节点的连线称为视轴。眼睛的视场虽然很大（可达 150° ）。但只在视轴周围 $6^\circ \sim 8^\circ$ 的范围内能够清晰识别，其他部分就比较模糊。因此，当我们观察周围景物时，眼睛就自动地在眼窝内不停地转动。

二、眼睛的调节和适应

当观察某一物体时，必须使它在网膜上形成一个清晰的象。眼球内，眼睛光学系统和视网膜间的距离在观察过程中可以认为是不变的，为了使远近不同的物体都能成象在网膜上，必须随着物体距离的改变，相应地改变眼中水晶体的焦距。当肌肉用力时，水晶体曲率增大，可看清近物；当肌肉放松时，水晶体曲率变小，可看清远物。眼睛的这种本能地改变光焦度（或焦距）以看清不同远近物体的过程，称为调节。

当肌肉完全放松时，眼睛所能看清楚的最远的点称为远点；当肌肉在最紧张时，眼睛所能看清楚的最近的点称为近点。必须指出，近点距离并不就是明视距离，后者是指正常的眼睛在正常照明（约 50 勒克斯）下最方便和最习惯的工作距离，它等于 250 毫米。

以 p 表示近点到眼睛物方主点的距离（米），以 r 表示远点到眼睛物方主点的距离（米），则其倒数，即

$$\frac{1}{p} = P \quad \frac{1}{r} = R$$

分别是近点和远点发散度（或会聚度）的折光度数，它们的差以字母 $\bar{A}$ 表示，即

$$\bar{A} = R - P$$

就是眼睛的调节范围或调节能力。

对于每个人来说，近点距离和远点距离是随年龄而变化的。随着年龄的增大，肌肉调节能力的衰退，近点逐渐变远，而使调节范围变小，表 13-1 所列是正常眼睛在不同年龄时的调节范围。

表 13-1

年 龄	p (米)	$P = \frac{1}{p}$ (折光度)	r (米)	$R = \frac{1}{r}$ (折光度)	$\bar{A} = R - P$ (折光度)
10	-0.071	-14	∞	0	14
15	-0.083	-12	∞	0	12
20	-0.100	-10	∞	0	10
25	-0.118	-8.5	∞	0	8.5
30	-0.143	-7	∞	0	7
35	-0.182	-5.5	∞	0	5.5
40	-0.222	-4.5	∞	0	4.5
45	-0.286	-3.5	∞	0	3.5
50	-0.400	-2.5	∞	0	2.5

由表中所列数据可见，青少年时期，近点距眼睛很近，调节范围很大。到 45 岁时，近点已在明视距离 250 毫米以外。因此，我们称 45 岁以后的眼睛为老年性远视眼或老花眼。

人眼除了能够随物体距离的改变而调节水晶体的曲率以外，还能在不同亮暗程度的条件下工作。眼睛所能感受的光亮度的变化范围是非常大的，其比值可达 $10^{12}:1$ 。这是因为眼睛对不同的亮度条件有适应的能力，这种能力称为眼睛的适应。

适应是一种当周围照明条件发生变化时眼睛所产生的变态过程，可分为对暗适应和对光适应两种，前者发生在自光亮处到黑暗处的时候，后者发生在自黑暗处到光亮处的时候。

在黑暗处，眼睛适应于感受十分微弱的光能，此时眼睛的敏感度大大提高。适应并不是立即完成的，如人们从光亮的街道进入电影院放映厅时，开始什么东西都看不见，随着对暗适应过程的逐渐完成以及伴随着在暗处时瞳孔的增大，使进入眼睛的光能量增加，才能看清周围的观众。此时即认为眼睛适应于当时的环境，人在暗处逗留的时间越长，眼睛对暗的适应越好，其敏感度就越高。但经一定的时间，约 60 分钟以后，敏感度便达到一定极限，因此总存在一个能被眼睛感受的最低光照度值，这一值称之为绝对暗阈限。眼睛的绝对暗阈限是极低的，约为 10^{-8} 勒克斯，这一值相当于一支蜡烛在 30 公里远处所产生的照度，即当忽略大气的吸收时，眼睛能感受到 30 公里处的烛光。

同样，当我们由暗处跑到光亮处也要产生眩目现象，这表明对光适应也要有一定时间，但适应过程很快，几分钟即可。眼睛对光适应时，敏感度大大降低，但由于是在照度良好的条件下，并不影响眼睛的工作能力。

在眼睛已对所在环境的光亮度条件下适应，并且处于安静状态（即不用药物等刺激）时，瞳孔直径随所处环境的光亮度而有一定之值，表 13-2 列出了对各种亮度适应时瞳孔直径的平均值。

表 13-2

适应视场亮度 (坎德拉/米 ²)	10^{-5}	10^{-3}	10^{-2}	0.1	1	10	10^2	10^3	2×10^4
瞳 孔 直 径 (毫米)	8.17	7.80	7.44	6.72	5.66	4.32	3.04	2.32	2.24

无月亮的夜间，理想白毛面的光亮度为 10^{-4} 坎德拉/米²，与此相应的瞳孔直径为 8 毫米，日光正射下具有照度为 100000 勒克斯的白纸，若其反射系数为 0.628，则其光亮度为 2×10^4 坎德拉/米²，与此相应的瞳孔直径约为 2 毫米。

三、眼睛的缺陷及矫正

正常眼在肌肉完全放松的自然状态下，能够看清楚无限远处的物体，也即其远点应该在无限远 ($R = \infty$)，象方焦点正好和网膜重合，见图 13-2 a。若不符合这一条件就是非正常眼。或称为视力不正常。

非正常眼有好几种，最常见的有近视眼和远视眼。

所谓近视眼就是其远点在眼睛前方有限距离处 ($r < \infty$)，这是由于眼球太长，象方焦点位于网膜之前所

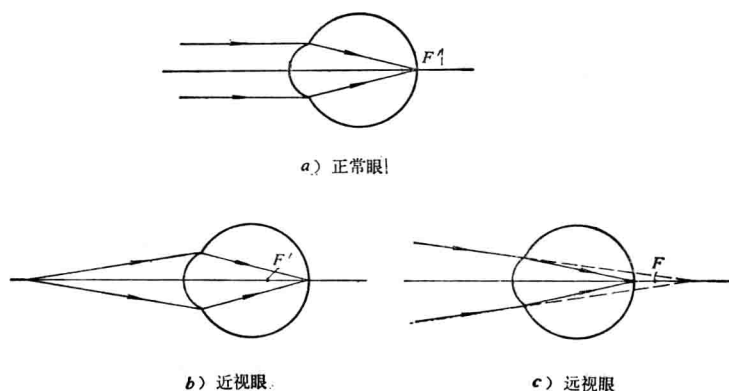


图 13-2

致。因此，只有眼睛前有限距离处的物体才能成象在网膜上。见图 13-2 b。

所谓远视眼，就是其远点在眼睛之后 ($r > 0$)，这是由于眼球较短，象方焦点位于网膜之后所致。因此，射入眼睛的光束只有是会聚时，才能正好聚焦在网膜上。见图 13-2 c。

弥补眼睛缺陷常用的方法是戴眼镜。显然，近视眼应该配上一块负透镜，远视眼应该配上一块正透镜，以使它们的象方焦点正好与近视眼或远视眼的远点重合，见图 13-3。

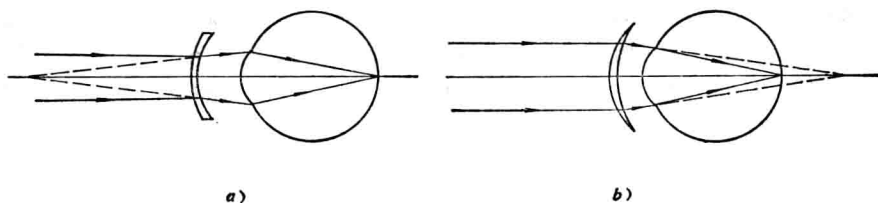


图 13-3

通常采用非正常眼远点距离的倒数来表示近视或远视的程度，称为视度。若距离以“米”为单位，则视度的单位就是“折光度”。例如对远点距离为 -0.5 米的近视眼，其近视的程度就是 (-2) 个视度单位，即 (-2) 折光度。

在光学仪器中，常常用到折光度的概念，如目镜上视度调节的刻度，就是以折光度来表示的。但是，医院和眼镜店通常把 1 折光度叫做 100 度。

四、眼睛的分辨率（分辨本领）

眼睛能分辨开两个很靠近的点的本领，称为眼睛的分辨率。刚刚能分辨开的二点对眼睛物方节点所张的角度，称为极限分辨角。眼睛的分辨率与极限分辨角成反比。

如果把眼睛看成理想光学系统，那么根据物理光学中衍射理论的分析可知，其极限分辨角为

$$\psi = \frac{1.22 \lambda}{D}$$

若以秒表示 ψ ，用毫米表示 D ，则对波长为 0.00055 毫米的光线而言，眼睛的极限分辨角为

$$\psi = \frac{1.22 \times 0.00055}{D} \times 206265 \approx \frac{140}{D} \quad (\text{秒})$$

对于眼睛而言，上式中的 D 就是瞳孔直径，在白天当瞳孔直径为 2 毫米时，眼睛的极限分辨角约为 $70''$ ，这个角度在网膜上对应的大小约为 0.006 毫米，而在黄斑上，视神经细胞的直径约为 0.003 毫米，因此，网膜的结构是能满足分辨率要求的，即不会限制眼睛的分辨率。

根据实际上的大量统计， $\psi = 50'' \sim 120''$ ，在良好的照明条件下，一般可以认为 $\psi = 60'' = 1'$ 。

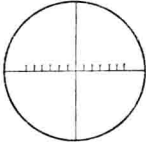
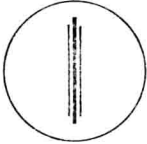
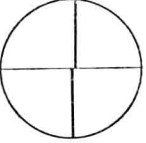
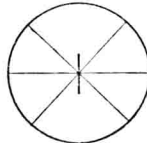
在设计光学仪器的光学系统时，必须考虑眼睛的分辨率。由于眼睛的分辨率有上述的限度，所以当我们看很小或很远的物体时，就需要借助于放大镜、显微镜和望远镜等目视仪器。目视光学系统应具有一定的放大率，以使能被光学系统分辨的物体，放大到能被眼睛所分辨的程度。否则，光学系统的分辨率就被眼睛所限制，而不能充分利用。

以上所讨论的人眼的分辨率是指对两个发光点能分辨的最小角距离或线距离。但是把一

个点（或其他形状的图案）去与另一个重合时，如果完全重合在一起，则精度是最高，这当然是不可能的。对人眼来说，感觉已重合在一起，实际并没有完全重合在一起，其偏离开角距离或线距离称为人眼的瞄准精度。把一个目标夹在两个目标中间的对中精度也是属于瞄准精度的。显然，瞄准精度和分辨率是两个概念。但二者又有一定联系，经验证明，人眼的最高瞄准精度约为分辨率的 $\frac{1}{6}$ 至 $\frac{1}{10}$ 。

人眼的瞄准精度和所选取的被瞄准图案有关。现将不同瞄准图案所能达到的瞄准精度列于表 13-3 中。

表 13-3

瞄 准 方 式	示 意 图	人眼瞄准精度	瞄 准 方 式	示 意 图	人眼瞄准精度
二实线叠合		$\pm 60''$	双线对称夹单线		$\pm 5'' \sim 10''$
二直线的端部对准		$\pm 10'' \sim 20''$	叉线对准单线		$\pm 10''$

§ 13-2 双目立体视觉

眼睛除了能感受到物体的大小、形状、亮暗及表面颜色以外，还能产生远近的感觉以及分辨不同物体在空间的相对位置。这种对物体远近的估计就是空间深度感觉。对于物体位置在空间分布以及对物体的体积感觉，即为立体视觉。

当用单眼观察时，对物体的距离和大小的估计极为粗略。对于近距离物体，是利用眼睛的调节而产生远近感觉。但当物体位置较远时，因为水晶体的曲率已不改变，或改变很小，所以估计不准确。利用单眼调节来估计物体的距离，一般不超过 5 米。

对于较远且熟悉的物体，从物体对眼睛张角的大小来估计它的远近。

对于非常熟悉的物体，常常利用能分辨此物体的细节程度来决定其远近。空气的透明度对距离的估计有很大影响，当大气层空气干燥而清洁时，感到一些熟悉的物体比天气阴湿时近些。在高山顶上空气的透明度影响更明显，在山顶上看来所有的山都很近。

人眼的视网膜近于平面，用单眼观看熟悉的物体，根据人们的经验，仍能将视网膜上的平面象，想象成为一个空间物体。因此，单眼看熟悉物体能产生空间感觉，但是这种空间感觉是极差的。

日常人们用双眼来观察，同一物体在左右两只眼中各成一个象，由两眼的视觉汇合到人们的大脑中成为单一的印象。形成单一的印象是有一定条件的，可用下述实验来说明。若在双眼连线的垂直平面上前一后放两根针，当两眼注视其中一根时，就会感到另一根针在两只眼中各有一个象（见图 13-4 a）。 a_1 和 a_2 是较远针尖 A 在两眼的中心凹处所成的象。对于较近的针尖 B，在右眼中所成的象是在黄斑右边 b_2 处，左眼所成的象则在黄斑左边 b_1 处。

反之,若双眼注视较近的针尖 B ,如图13-4b所示,则 B 点的象在两眼的中心凹处,而较远的针尖 A 在左眼所成的象是在黄斑的右边 a_1 处,在右眼所成的象是在黄斑左边 a_2 处。在图13-5中,设 A 、 B 和 C 为三个针尖,它们位于眼前近于相等的距离,若双眼注意 A 点,则必将同时看到 B 、 C 两点。这时并不发生双象,因为 B 、 C 点所成的象是在中心凹的同一侧,即 c_1 与 c_2 都在 A 点的象 a_1 和 a_2 的左边, b_1 和 b_2 在 a_1 和 a_2 之右边,且 $\widehat{a_1b_1}$ 、 $\widehat{a_1c_1}$ 和 $\widehat{a_2b_2}$ 、 $\widehat{a_2c_2}$ 的差别不大,此时人眼感觉 A 、 B 、 C 三点在同一距离,且都是单一象。

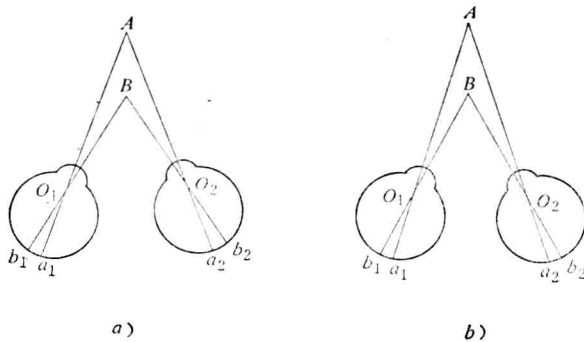


图 13-4

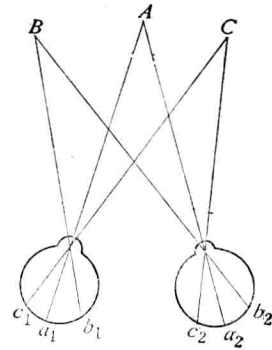


图 13-5

由以上实验可得结论:当眼睛注意空间某点 A 时,则在角 $a_1 A a_2$ 内的空间中的所有点都成双象,而在角 $a_1 A a_2$ 外的空间中的所有点,在双眼中所成的象都在中心凹的一边,可感到是单一象。后者两个象点在视网膜上处于中心凹的同一侧,称为网膜上的对应点。对应点上的两点象在大脑中的反映为单一象的印象。

由于双眼不断转动、改变注视点,所以日常不易觉察双象的那部分空间在人眼中的影响。

以上讨论了双眼观察物体时的成象特性。在讨论单眼视觉时知,单眼有空间深度感觉,即可估计物体的远近,事实上人们更多地用双眼来观察空间物体。与单眼相似,用双眼肌肉调节的感觉来估计距离的绝对值,也只能在一个不大的范围内有效,最长不超过16米,要估计准确些也只能有几米。超过以上距离时,用双眼估计距离和单眼相似,也是靠物体本身的特征来判断,例如熟悉物体对人眼的张角,物体细节分辨清晰程度等。

人的双目视觉的一个重要特性,是能分辨两物体的相对位置,即估计空间物体的相对距离,这种本领就是立体视觉。

如图13-6中所示,两眼节点 O_1 和 O_2 的连接线称为视觉基线,以 b 表示。注视点为 A ,即两眼视轴通过 A 点,角 $O_1 A O_2$ 称为立体视差角,以 θ_A 表示之,以 L 表示 A 点到基线 $O_1 O_2$ 的距离,则

$$\theta_A = \frac{b}{L} \quad (13-1)$$

两眼的注视点 A 称为定位点。 A 点在双眼网膜上的象在中心凹处,为 a_1 和 a_2 , C 点在黄斑上的象为 c_1 和 c_2 ,角 $O_1 C O_2$ 为 C 点的立体视差角,以 θ_C 表示。

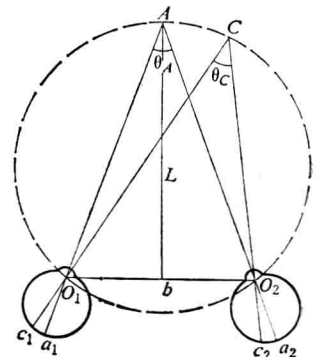


图 13-6

在圆周 O_1O_2CA 上的 AC 这一段, 由于其相对于 L 是很小的, 可认为是直线, 并且其上所有点和基线 b 的距离相等。因此, 对于这些点都有相同的视差角。

现在来看物点对于基线有不同距离的情况, 如图 13-7 所示。当注视 A 点时, 在双眼中心凹处成象为 a_1 和 a_2 。设另一点 C 和 D 位于同一直线 CDO_2 上, 则右眼中的象 c_2 和 d_2 相重合, 而左眼中的象 c_1 和 d_1 不重合, 令角 $c_1O_1d_1$ 为 $\Delta\theta$, 显然有

$$\Delta\theta = \theta_D - \theta_C$$

在三维空间中, 只要物点和观察者的距离不同, 它们在两眼中所形成的象便与中心凹有不同的距离。表现在角度上就是不同距离的物体有视差角之差异 $\Delta\theta$, 称为“立体视差”, 简称视差。视差 $\Delta\theta$ 大时, 人眼就感到两个物体间纵向的相对距离大, 即深度大。当 $\Delta\theta$ 角小时, 则两物体的纵向相对距离就小, 当 $\Delta\theta$ 小到一定程度, 人眼刚能感到两个物体间的距离差异时, 此时的视差以 $\Delta\theta_{\min}$ 表示, 称为人眼的体视锐度 (立体视觉锐度), 或体视灵敏度。通常人眼的体视锐度约为 $30'' \sim 60''$, 经过训练可达 $5'' \sim 10''$, 甚至 $3''$ 。一般情况下把人眼体视锐度定为 $10''$ 。

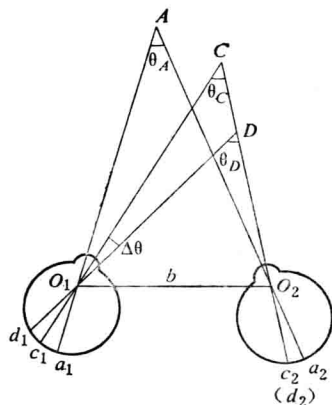


图 13-7

当物体在无限远时, 立体视差角为零。如果在有限距离的另外一点的立体视差角 θ 为 $10''$, 该点和无限远点的视差为 $\Delta\theta = 10''$, 等于人眼的体视锐度 $\Delta\theta_{\min}$, 说明人眼对该有限距离点和无限远点有深度感觉, 即人眼能分辨出该有限距离点不同于无限远。由式 (13-1) 可得此距离, 以 L_m 表示, 即

$$L_m = \frac{b}{\Delta\theta_{\min}} = \frac{b}{10''} \times 206265$$

多数人眼的视觉基线 $b = 65$ 毫米, 可得

$$L_m = \frac{0.065}{10''} \times 206265 \approx 1341 \text{ 米}$$

此 L_m 值称为体视半径。位于体视半径以外的物体, 人眼已分不出它们的近远, 看起来就似在一个深度上。

观察者用双眼能分辨空间两点间的最短空间深度距离以 ΔL 表示, 称之为“立体视觉限” (立体视觉阈), 其值可由微分式 (13-1) 得到:

$$\Delta\theta = -\frac{b}{L^2} \Delta L$$

即

$$\Delta L = \Delta\theta \frac{L^2}{b} \quad (13-2)$$

式中本有负号, 表明 $\Delta\theta$ 和 ΔL 符号相反, 此处无实际意义, 故略去。

当定位点在不同距离处, 即 L 取值不同时, 立体视觉限有不同数值。式 (13-2) 中体视锐度以 $\Delta\theta_{\min} = 10''$, 视觉基线以 $b = 0.065$ 米代入可得

$$\Delta L \approx 7.5 \times 10^{-5} L^2 \text{ (米)}$$

表 13-4 中给出定位点在不同距离时的立体视觉限值。

表 13-4

定位点距离 L (米)	立体视觉限 ΔL (米)	定位点距离 L (米)	立体视觉限 ΔL (米)	定位点距离 L (米)	立体视觉限 ΔL (米)
1350	∞	169	24	4.5	0.015
675	675	150	19	2.7	0.0054
450	225	135	15	1.35	0.0013
338	112	45	1.55	1.00	0.0007
270	68	27	0.55	0.75	0.0004
225	45	17	0.21	0.50	0.0002
193	32	13.5	0.136	0.25	0.00005

由上式可知, 在明视距离时, 人眼的立体视觉限只有 0.05 毫米, 此时人眼的深度感觉是很灵敏的。

在某些情况下, 定位点虽在体视半径 L_m 以内, 仍有可能不产生体视感觉或难于产生体视感觉, 例如以下几种情况:

(1) 如前面图 13-7 中所示, 对于右眼而言 C 、 D 两点所成的象重合, C 点被 D 掩蔽, C 点在右眼中不成象, 因此观察者不可能估计 C 点的位置。只要移动一下头部, 使 C 点能单独在右眼中成象, 便可恢复立体视觉。

(2) 两物体的横向距离太远, 它们在网膜上的象相距很大, 立体视觉就感到困难, 两眼的视轴对准一点时, 另一点在两眼的中心凹以外成象, 可能在视神经上感觉是双象, 因而破坏了立体视觉。

(3) 如果物体位于两眼连线的垂直平分线上, 由于此时, 象不处在网膜的对应点, 故在定位点之外的物可能产生双象的感觉, 立体视觉被破坏。只要把头稍移动一下, 便可恢复立体视觉。

(4) 若两物体之一为直线并与两眼中心连线平行, 也是得不到体视效应的, 若将头倾斜移动, 使视觉基线与该直线垂直, 便可恢复体视效应。

§ 13-3 放 大 镜

由 § 13-1 已经知道, 眼睛要很好地辨别出所观察物体的细节, 就必须使该细节对眼睛的视角大于眼睛的极限分辨角。在照明良好的条件下, 这一极限分辨角约为 $1'$ 。如果客观条件较差, 或者为了使人眼能够方便而又不太吃力的分辨, 则视角应不小于 $2' \sim 4'$ 。

物体对眼睛的视角, 取决于该物体到眼睛的距离, 距离越近, 视角越大。但是, 被观察物体不可能无限地移近眼睛, 它必须位于眼睛的近点之外, 才能被眼睛看清。所以, 当细小物体位于最近距离而其视角仍小于极限分辨角值 $1'$ 时, 就必须借助于放大镜或显微镜将其放大, 使放大后象的视角大于眼睛的极限分辨角, 这样才能分辨出它的细微结构。

一、放大镜的放大率

与眼睛一起使用的目视光学仪器, 其放大作用不能单由以前所讲的光学系统本身的放大率来表征。因为眼睛通过放大镜或显微镜等目视光学仪器来观察物体时, 有意义的是在眼睛网膜上的象的大小。所以, 放大镜的放大率应该是: 通过放大镜看物体时, 其象对眼睛所张角度的正切, 与眼睛直接看物体时, 物体对眼睛所张角度的正切之比。通常也称之为视放大

率, 用 Γ 表示。

图 13-8 是物体经放大镜成象的光路图。位于物方焦点 F 以内的物 AB , 其大小为 y , 它被放大镜成一大小为 y' 的虚象 $A'B'$, 这一放大的虚象对眼睛所张角度的正切为

$$\operatorname{tg} \omega' = \frac{y'}{-x' + x'_z}$$

而当眼睛直接观察物体时, 一般是将其放在明视距离, 即相距人眼 250 毫米处。此时物体对眼睛张角的正切为

$$\operatorname{tg} \omega = \frac{y}{250}$$

则放大镜的放大率 Γ 可由下式求得

$$\Gamma = \frac{\operatorname{tg} \omega'}{\operatorname{tg} \omega} = \frac{\frac{y'}{-x' + x'_z}}{\frac{y}{250}} = \frac{250 y'}{(-x' + x'_z) y}$$

将 $\beta = \frac{y'}{y} = -\frac{x'}{f'}$ 代入上式得

$$\Gamma = \frac{250}{f'} \cdot \frac{x'}{x' - x'_z}$$

由上式可见, 放大镜的放大率, 除了和其焦距有关以外, 还和眼睛离开放大镜的距离有关。

在实际使用的过程中, 眼瞳大致位于放大镜的象方焦点 F' 的附近。则上式分母中的 x'_z 相对于 x' 而言, 是一个很小的值, 可以略去。所以放大镜放大率的公式, 通常采用以下形式:

$$\Gamma = \frac{250}{f'} \quad (13-3)$$

由上式可见, 放大镜的放大率仅由其焦距所决定, 焦距越大则放大率越小。

二、放大镜的光束限制和视场

放大镜总是与眼睛一起使用, 在讨论其光束限制时, 应将眼瞳也作为一个光阑来考虑, 见图 13-9。整个系统有两个光孔: 直径为 $2h$ 的放大镜镜框和直径为 $2a'$ 的眼瞳。眼瞳是整个系统的出瞳, 也是孔径光阑。另外, 因为整个系统除了眼瞳以外, 只剩下一个光孔, 即放大镜镜框, 它本身也必然起着限制视场的作用而为视场光阑, 同时也是入射窗和出射窗。因此, 物平面上能够被成象的范围或线视场的大小, 就被放大镜镜框、眼瞳的直径以及它们之间的距离 d 所决定。

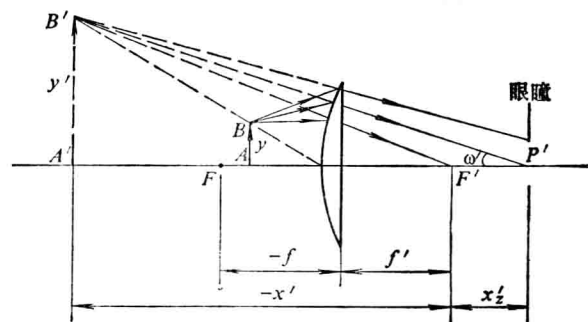


图 13-8

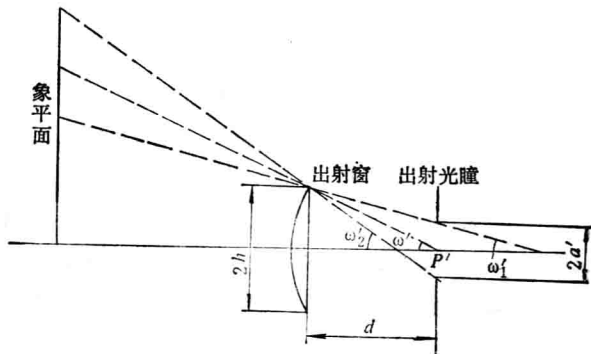


图 13-9

由于在系统中, 入射窗不和物平面重合, 因而视场边缘部分成象必有渐晕现象。其中, 由角度 $2\omega'_1$ 所决定的视场内没有渐晕, 在这个范围内每点均以充满眼瞳的全光束成象, 由 $2\omega'$ 所决定的是有 50% 渐晕的视场, 而由 $2\omega'_2$ 所决定的是放大镜所可能成象的最大视场。

由图 13-9 易于知道, 它们分别有

$$\left\{ \begin{array}{l} \operatorname{tg} \omega'_1 = \frac{h - a'}{d} \\ \operatorname{tg} \omega' = \frac{h}{d} \\ \operatorname{tg} \omega'_2 = \frac{h + a'}{d} \end{array} \right. \quad (13-4)$$

从以上公式可见, 放大镜镜框的直径越大, 眼睛越靠近放大镜, 视场就越大。

通常, 放大镜的视场用通过它所能看到的物平面上的圆直径或线视场 2γ 来表示, 当物平面位于放大镜的物方焦点上时, 象平面在无限远, 见图 13-10。

由图可得

$$2\gamma = 2f' \operatorname{tg} \omega'$$

将式(13-3)中的 f' , 和式(13-4)中的 $\operatorname{tg} \omega'$ 代入上式得

$$2\gamma = \frac{500h}{\Gamma d} \quad (13-5)$$

可见, 放大镜的放大率越大, 视场越小。

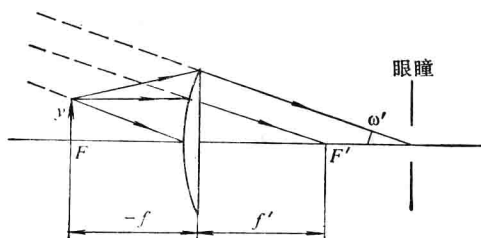


图 13-10

§ 13-4 显微镜系统及其特性

显微镜是人眼睛的辅助工具, 主要是用来观察近处物体的微小细节, 它大量地应用于各种科学和技术领域中, 是一种极为重要的目视光学仪器。

显微镜的光学系统由物镜和目镜两个部分组成。但是, 为了充分发挥其效能, 还要有一个主要由聚光镜组成的照明系统。

一、显微镜成象原理

显微镜和放大镜起着同样的作用, 就是把近处的微小物体成一放大的象, 以供人眼观察。只是显微镜比放大镜可以具有更高的放大率而已。

图 13-11 是物体被显微镜成象的原理图。图中为方便计, 把物镜 L_1 和目镜 L_2 均以单块透镜表示。物体 AB 位于物镜前方, 离开物镜的距离大于物镜的焦距, 但小于两倍物镜焦距。所以, 它经物镜以后, 必然形成一个倒立的放大的实象 $A'B'$ 。 $A'B'$ 位于目镜的物方焦点 F_2 上, 或者在很靠近 F_2 的位置上。再经目镜放大为虚象 $A''B''$ 后供眼睛观察。虚象 $A''B''$ 的位置取决于 F_2 和 $A'B'$ 之间的距离, 可以在无限远处 (当 $A'B'$ 位于 F_2 上时), 也可以在观察者的明视距离处 (当 $A'B'$ 在图中焦点 F_2 之右边时)。目镜的作用与放大镜一样。所不同的只是眼睛通过目镜所看到的不是物体本身, 而是物体被物镜所成的、已经放大了一次的象。

由于经过物镜和目镜的两次放大, 所以显微镜总的放大率 Γ 应该是物镜放大率 β 和目镜

放大率 Γ_1 的乘积。和放大镜相比, 显然, 显微镜可以具有高得多的放大率, 并且通过调换不同放大率的物镜和目镜, 能够方便地改变显微镜的放大率。由于在显微镜中存在着中间实象, 故可以在物镜的实象平面上放置分划板, 从而可以对被观察物体进行测量, 并且在该处还可以设置视场光阑, 消除渐晕现象。

因为物体被物镜成的象 $A'B'$ 位于目镜的物方焦面上或者附近, 所以此象相对于物镜象方焦点的距离 $x' \approx \Delta$ 。这里, Δ 为物镜和目镜的焦点间隔, 在显微镜中称它为光学筒长。

设物镜的焦距为 f'_1 , 则物镜的放大率为

$$\beta = -\frac{x'}{f'_1} = -\frac{\Delta}{f'_1}$$

物镜的象再被目镜放大, 其放大率为

$$\Gamma_1 = \frac{250}{f'_2}$$

式中 f'_2 为目镜的焦距。由此, 显微镜的总放大率为

$$\Gamma = \beta \Gamma_1 = -\frac{250 \Delta}{f'_1 f'_2} \quad (13-6)$$

由上式可见显微镜的放大率和光学筒长 Δ 成正比, 和物镜及目镜的焦距成反比。并且, 由于式中有个负号, 所以当显微镜具有正物镜和正目镜时 (一般如此), 则整个显微镜给出倒象。

根据几何光学中合成光组的焦距公式可知, 整个显微镜的总焦距 f' 和物镜及目镜焦距之间, 符合以下关系式:

$$f' = -\frac{f'_1 f'_2}{\Delta}$$

代入式 (13-6), 则有

$$\Gamma = \frac{250}{f'}$$

它与放大镜的放大率公式 (13-3) 具有完全相同的形式。可见, 显微镜实质上就是一个复杂化了的放大镜。由单组放大镜发展成为由一组物镜和一组目镜组合起来的显微镜, 它比单组放大镜具有前面已经提到过的一系列优点。

二、显微镜的机械筒长和光学筒长

绝大多数的显微镜, 其物镜和目镜各有数个, 组成一套, 以便通过调换获得各种放大率。一般物镜有 4 个, 其放大率分别为 3 倍, 10 倍, 40 倍和 100 倍。通常表示为 $3\times$, $10\times$, $40\times$ 和 $100\times$ 。目镜一般有 3 个, 放大率分别为 $5\times$, $10\times$ 和 $15\times$ 。这样, 整个显微镜就能有从最低的 $15\times$ 到最高 $1500\times$ 的 12 种不同的放大率。在使用中为了能使放大率迅速地改变, 在显微镜中, 几个物镜可以同时装在一个旋转圆盘上, 旋转该盘就能方便地选用不同放大率的物镜。目镜一般是插入式的, 调换极为方便。

在显微镜中, 取下物镜和目镜后, 所剩下的镜筒长度, 即物镜支承面到目镜支承面之间

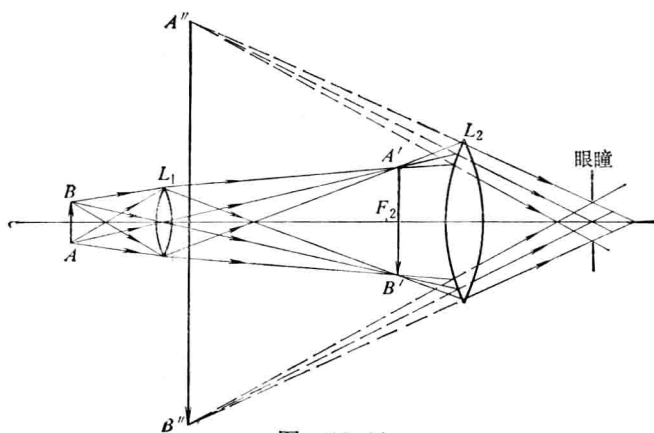


图 13-11

的距离 t_m 称为机械筒长, 见图 13-12。

对于一台显微镜来说, 机械筒长是固定的。机械筒长各国标准不同, 有 160 毫米, 170 毫米和 190 毫米等。我国规定机械筒长为 160 毫米。

由物镜象方焦点到目镜物方焦点之间的距离 Δ , 称光学筒长。它随着物镜焦距的不同而改变。光学筒长的选择, 应该使显微镜满足齐焦条件要求, 即在显微镜使用过程中, 当调换物镜时, 不需要重新调焦就能看到物体的象。为此, 在显微镜的光学机械尺寸上, 应该满足以下要求:

(1) 不同焦距或放大率的物镜, 由物平面到象平面的距离 T (共轭距) 均应相同, 对于大量使用的生物显微镜, 我国规定 195 毫米作为显微物镜的共轭距标准。

(2) 物镜的外壳要保证物体经物镜所成的实象面有固定的位置, 我国规定, 由物镜实象面到目镜支承面的距离 t_0 为 10 毫米。

(3) 为要使调换目镜时也不需要重新调焦, 则目镜的镜筒也应保证其物方焦点与物镜的象面重合。

这些尺寸, 当然不能做得很准确, 但是, 满足以上要求后, 只要作微动调焦就行了。并且, 也给各个工厂生产的物镜和目镜, 创造了互换使用的条件。

另外, 还有一种所谓筒长无限的显微物镜。这种物镜的后方一般带有辅助物镜 (也有把它叫补偿物镜或镜筒透镜的), 被观察物体经过物镜以后, 成象在无限远, 再经过辅助物镜成象在辅助物镜的焦平面上。在物镜和辅助物镜之间是平行光, 如图 13-13 所示。

辅助物镜的焦距一般为 250 毫米, 也有为 200 毫米的。

这种物镜的放大率由下式决定:

$$\beta = \frac{y'}{y} = -\frac{f'_2}{f'_1}$$

由上式可见, 它的放大率等于两组透镜的焦距之比, 并且象相对于物是倒的,

当辅助物镜的焦距 f'_2 固定后, 整个物镜的放大率只和前置物镜的焦距有关, 并与之成反比。这种物镜在使用过程中, 一般保持辅助物镜不动, 只通过更换不同焦距的前置物镜来达到变倍的目的。由于两组中间是平行光, 所以中间距离可以比较自由一些, 这对装配调整, 以及中间加入棱镜等都比较方便。这种物镜多用于一些金相显微镜中, 此外, 还广泛的应用于机械制造中测光洁度的双管显微镜以及胶合对中仪和工具显微镜中。

这种筒长无限的物镜在物镜镜筒的侧面, 刻有 “ ∞ ” 的标志, 见图 13-17。

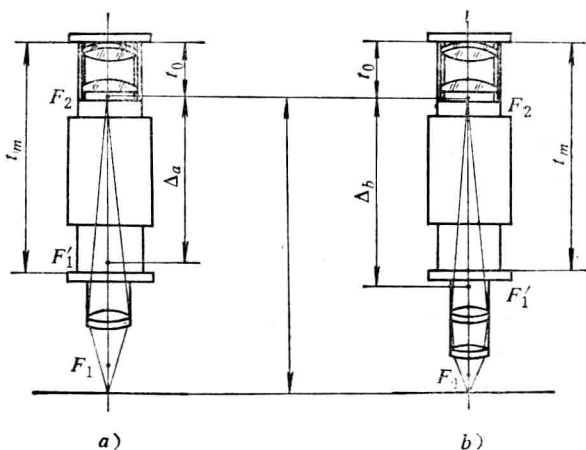


图 13-12

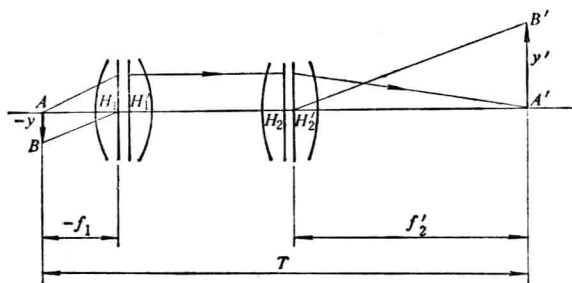


图 13-13

三、显微镜中的光束限制

(一) 显微镜的孔径光阑

在显微镜中, 孔径光阑按如下的方式设置: 对于单组的低倍物镜, 物镜框就是孔径光阑, 它被目镜所成的象, 是整个显微镜的出瞳, 显然应在目镜的象方焦点之后。对于由多组透镜组成的复杂物镜, 一般以最后一组透镜的镜框作为孔径光阑, 或者在物镜的象方焦面上或其附近设置专门的孔径光阑。在后一种情况下, 如果孔径光阑位于物镜的象方焦面上, 则整个显微镜的入瞳在物方无限远, 出瞳则在整个显微镜的象方焦面上, 其相对于目镜象方焦点的距离为

$$x'_F = -\frac{f_2 f'_2}{\Delta} = \frac{f'^2_2}{\Delta}$$

式中 f'_2 为目镜的焦距, Δ 为光学筒长, 并且总是正值, 因此 $x'_F > 0$, 即此时出瞳所在的显微镜象方焦面, 位于目镜象方焦点之外。

如果孔径光阑位于物镜象方焦点附近相距 x'_1 的位置, 见图 13-14, 则整个显微镜的出瞳相对于目镜象方焦点的距离为

$$x'_2 = \frac{f_2 f'_2}{x'_1 - \Delta} = \frac{f'^2_2}{\Delta - x'_1}$$

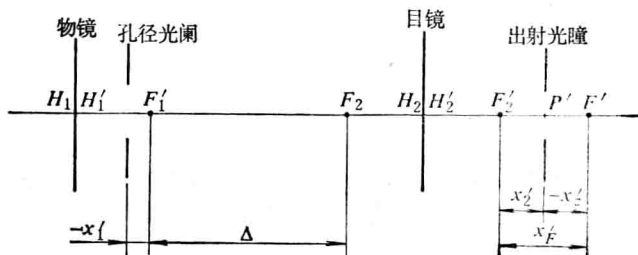


图 13-14

而显微镜出瞳相对于显微镜象方焦点的距离为

$$x'_z = x'_2 - x'_F = \frac{f'^2_2}{\Delta - x'_1} - \frac{f'^2_2}{\Delta} = \frac{x'_1 f'^2_2}{\Delta (\Delta - x'_1)}$$

上式中 x'_1 和 Δ 比较是一很小的值, 故上式可表示成

$$x'_z = \frac{x'_1 f'^2_2}{\Delta^2}$$

由于 x'_1 是一小值, 而 $\frac{f'^2_2}{\Delta^2}$ 也是一个很小的数, 约为几十分之一, 甚至几百分之几, 因此 x'_z 的值很小。这说明, 即使孔径光阑位于物镜象方焦点的附近, 整个显微镜的出瞳仍可认为与显微镜的象方焦面重合, 即总是在目镜象方焦点之外距离 x'_F 处。所以, 用显微镜来观察耳, 观察者的眼瞳总可以与出瞳重合。

(二) 显微镜出瞳直径

图 13-15 画出了象方空间的成象光束, 设出瞳和显微镜的象方焦面重合, $A'B'$ 是物体 AB 被显微镜所成的象, 大小为 y' 。

由图可见, 出瞳半径

$$a' = x' \operatorname{tg} U'$$

因显微镜的象方孔径角 U' 很小, 故可以用正弦来代替其正切, 则

$$a' = x' \sin U' \quad (13-7a)$$

另外, 显微镜应满足正弦条件, 有

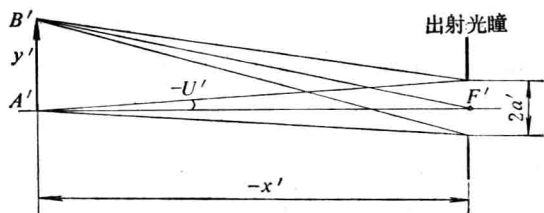


图 13-15