

光学系统设计技巧

郑保康

(云南北方光学电子集团有限公司 昆明 650114)

(续 2004 年 No.2)

§3.4.2 用几何象差作为质量评价标准

用几何象差评价光学系统有它的不足之处,就是不能全面准确的评价,但是也有它的优点,直接、明了与光学结构参数的关系。在光学系统设计过程中,能清楚地了解到影响象质的因素,和找出影响象质的结构参数。因此在光学设计过程中,往往还是用几何象差进行评价和校正。

(一) 望远物镜和显微物镜的象质评价

望远物镜和显微物镜是小视场的光学系统,所以只要考虑轴上点成像质量即可。根据瑞利判断,仅有初级象差时,边缘球差:

$$LA'_m \leq \frac{4\lambda}{u'^2_m} \quad \dots\dots(3.69)$$

仅有初级球差和二级球差时,最好的校正状况为:

$$LA'_m = 0, \text{此时允许带球差:}$$

$$LA'_s \leq \frac{6\lambda}{u'^2_s}, \quad \dots\dots(3.70)$$

对于大数值孔径的显微物镜,则需要把球差曲线积分,看其波象差的数值。

$$\text{正弦差: } OSC' \leq \frac{\lambda}{2u'_k H'_k} \quad \dots\dots(3.71)$$

$$\text{色差: } (d - D)\delta_N \leq \frac{\lambda}{4} \quad \dots\dots(3.72)$$

在夜间观察的情况下,眼睛瞳孔放大,

分辨能力降低约 10 倍左右,所以允许的象差可相应增加。

(二) 目镜的象质评价

目镜是大视场、小相对孔径的光学系统,主要应该考虑轴外象差——象散、场曲和慧差的校正。当其相对孔径增大时,如夜视仪器的目镜,也要按望远镜物镜和显微镜物镜的公差条件判断轴上点的成像质量。

$$\text{初级子午慧差: } Coma'_T \leq \frac{3\lambda}{2u'_k} \quad \dots\dots(3.73)$$

$$\text{初级象散: } x'_t - x'_s \leq \frac{0.7\lambda}{u'^2_k} \quad \dots\dots(3.74)$$

子午场曲 x'_t 和弧矢场曲 x'_s 的效果是使象面成为弯曲的,其容许量则需看眼睛的调节范围而定,例如 $f' = 10$ 的目镜,当 x'_t, x'_s 为 0.4 时,轴上点成的象和轴外点成的象仍然能够同时看见,因为当眼睛注视视场不同部分时,它能自动调焦,直到象被看清为止。不过其最大限度只能够在无限远到明视距离 250mm 之间的象被同时看到,如超出这个范围,象便无法同时看到。例如 $f' = 10$ 的目镜,当物面与焦面重合时,其所成的象在无限远,而当物面离开焦面 0.4 时,其所成的象恰在离眼睛 250mm 的地方,因此,人眼通过 $f' = 10$ 的

目镜观察离焦 0.4 的物体时,能同时被看清。人眼的调节能力随着年龄而异,取 4 个屈光度的调节能力是可行的。

下面我们列出常用目镜焦距的人眼调节量(4 个屈光度)

目镜焦距	8	10	20	25	30	40
调节量	0.26	0.4	1.6	2.5	3.6	6.4

在判断象散和场曲的数量大小时,最好根据宽光束形成的象差来考虑,即计算 X'_T 和 X'_s 。

允许倍率色差 - 0.0012 左右(当出瞳直径为 2 时), - 0.0012 的数值是与眼睛的放大色差相匹配的,太大或太小均不好。

畸变 $Dist \leq 5\%$, 当目标有方框时需要更小一些。

上述这些公差是较严格的,当目镜视场边缘仅作陪衬时,可将公差放宽。

目镜一般总是和望远镜物镜或显微镜物镜配合使用的,所以考虑公差时还应该注意在相配合的情况下,不使象差超出公差。如果光学系统中没有分划板,还可以用物镜的象差来补偿目镜的象差。在把目镜和物镜的象差相配相消时,请注意,垂轴象差是同号相消,轴向象差是异号相消。

(三) 照相物镜的象质评价

照相物镜都是用胶片作为光能接收器的,其象质评价也应据此而定。一般以象差所引起的弥散圆直径范围是 0.01 ~ 0.02, 如果底片需要放大洗印,则允许的弥散圆直径还要小。为了不使人看出象的弯曲变形,畸变允许 2% 以内。上述这些象差允许值,在大孔径或大视场时还可以稍大一些。另外,我们也可以根据现在的水平,以著名的高质量照相物镜的象差数据作为参考给出合适的象质评价标准。

有些特殊用途的照相物镜,如侦察摄影物镜,由于目标常是低对比的,其象质更应优良,常以瑞利判断作为评价依据。当然,照相物镜的象质最好能以低对比分辨能力的指标来决定。

(四) 干涉仪光学系统的象质评价

当干涉仪用作检验平行平板的表面质量时,为了使干涉条纹的形状能够真实的反映出平面的优劣,应当考虑由于象差所引起的额外光程差而造成的条纹变形。

例如:

(1) 依据等厚条纹直线性的程度来判断被检验平面的质量,检验装置如图 3.37 所示。如被检验平板 A 的平面不平时,将破坏条纹的直线性,曲条纹的形状即可确定面形偏离平面的程度。但是如果物镜 L 有球差存在时,将引起初射光线不相互平行,而造成一附加的光程差,其值由图 3.38 为:

$$\delta = 2d(\cos\theta - 1) = d \cdot \theta^2 \dots\dots(3.75)$$

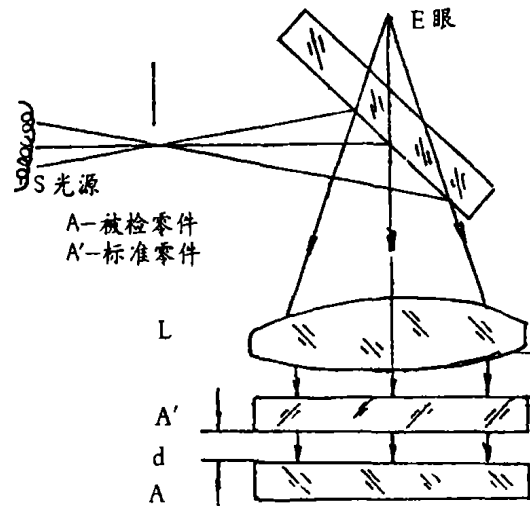


图 3.37 以等厚条纹检验平行度的装置图

式中 θ 为物镜 L 有球差时出射光线与近轴出射光线的夹角。光程差 δ 应小于允许的

测量精度范围,一般来讲,只有当 d 很大时(约 100),这对球差才有严格的限制。

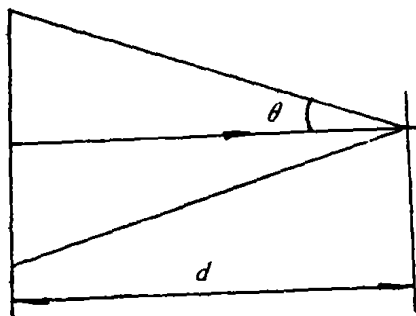


图 3.38 引起额外光程差参考图

此外,如果物镜 L 不消畸变,则原来是直线的条纹亦会被看成曲线,因此物镜 L 应对光瞳 E 和物体 A 校正畸变, δ 条纹形成在 A 附近。

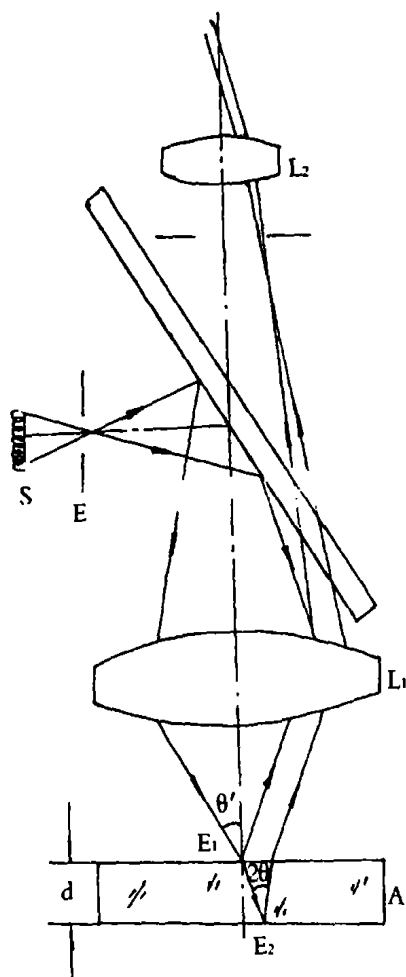


图 3.39 等倾条纹检验平行平板装置图

(2) 依据等倾条纹(圆形)检验平行平板,检验装置如图 3.39,其光程差为:

$$\delta = 2Nd\cos\theta \quad \dots\dots(3.76)$$

图中 E_1 限制着平板的工作面积于一个不大的区域内,平板沿其平面移动,使平板的各个部分达到 E_1 点,如不同地方折射率 N 或厚度 d 不同时,则干涉圈将发生变化,如 N 到处一致,则可用以检验平板的平行度,但如果物镜 L 有球差时,则将使光线出来的方向与标准角 θ' 相差 $\Delta\theta'$,而引起额外的光程差。

由(3.76)式微分,可得:

$$\Delta\delta = 2N\cos\theta\Delta d + 2d\cos\theta\Delta N - 2Nd\sin\theta\Delta\theta \quad \dots\dots(3.77)$$

θ' 与(3.37)式中的 θ 有关系:

$$\sin\theta' = N\sin\theta$$

如果 Δd 和 ΔN 为零,则平板是具备完善平行度的平行平板。此时移动平板时, $\Delta\theta$ 与 $\Delta\delta$ 的影响是常数,干涉条纹不变。所以只有当 $\Delta Nd \neq 0$ 时, $\Delta\theta'$ 才对不同的 Nd 有影响。有影响的 $\Delta\delta$ 我们记作 $\Delta\delta^*$, 这时有:

$$\Delta\delta^* = 2\Delta(Nd)\sin\theta\Delta\theta \quad \dots\dots(3.78)$$

N 不变时,

$$\begin{aligned} \Delta\delta^* &= -2N\Delta d\sin\theta\Delta\theta \\ &= -2\Delta d\sin\theta' \frac{\Delta\theta'}{N} \quad \dots\dots(3.79) \end{aligned}$$

这光程差的变化量应在允许的测量精度范围内。例如:当 $N = 1.5, \sin\theta'_{\max} = 0.2, \Delta d_{\max} = 0.1$,若允许 $\Delta\delta^* \leq 0.1\lambda$ 时,则有:

$$\Delta\theta'_{\text{允许}} \leq \frac{0.15\lambda}{0.04} \approx 0.02 \approx 7 \text{ 弧分}$$

此时物镜 L 也应该消除畸变。

(五) 光谱仪光学系统的象质评价

光谱仪也是用照相底片作为接收器的,然而其粒度比一般的照相底片要细些,

所以光谱仪光学系统需要有较好的成像质量。但是究竟应当好到什么程度,则需看具体情况而定,通常情况下是与瑞利判断的指标相差不多。光谱仪的入射狭缝是直线时,出射狭缝是将狭缝成像,能量在狭缝延伸方向散开是允许的,此时可以不考虑象散的影响。

(六) 望远镜和显微镜光学系统全系统的象质评价

望远镜和显微镜都是通过目镜进行观察的,仪器的最终接收器是人眼,因此,光学系统全系统的象质评价标准是与人的特性密切相关的。根据不同象场亮度下的人眼察觉阈(见图 1.11 所示)和一定对比不同亮度条件下的极限分辨空间频率(见图 1.12 所示),我们可以清楚地看出,在白天良好的象场亮度下,对比度 0.2 的情况下,它的极限分辨空间频率为 40 周/度,低对比度 0.02 的情况下,它的极限分辨空间频率也有 18 周/度。从这个角度看,要求目镜出射的象差控制在 $3'$ 左右,从而提出望远镜和显微镜的象质评价标准为:

- (1) 球差 $LA' = 1' \sim 2'$, 最大允许 $3'$ 。
- (2) 位置色差 $L_{ch} = 1' \sim 5'$, 最大允许 $8'$ 。
- (3) 放大率色差 $T_{ch} = 1' \sim 5'$, 最大允许 $8'$ 。
- (4) 慧差 $K'_T = 1' \sim 2'$, 最大允许 $3'$ 。
- (5) 场曲 $x'_T = 5' \sim 10'$, 最大允许 4 个屈光度。

系统中有分划板时,目镜的场曲不能太大,要控制在 4 个屈光度以内,全系统场曲也控制在 4 个屈光度以内。

- (6) 畸变 $Dist = 5\%$ 以内,最大允许 8% ,超过这个数字就会明被察觉。由于畸

变不影响图象的清晰度,只使图象变形,有些特殊的用途可以不控制畸变量。

第四章 典型光组设计

§4.1 概述

一般光学系统设计的方法是采取逐次接近的方法。自从初级象差理论的研究比较完善以后,便有可能根据初级象差理论解出某些原始结果,并且根据象差理论来判断,哪些结果会有高的成像质量,哪些结果不会有高的成像质量,从而选择合适的结构。本章对光组的设计作较为详细的介绍,重点是列出光组的初始解方程步骤,典型的代表性光组还要分析象差,平衡象差。本章是全书的重点,将用较大的篇幅给予叙述。

§4.2 常用公式组

1. 初级象差系数

用主光线的入射角 ip 表示主光线时的初级象差系数公式为:

$$\left. \begin{aligned} S_I &= luNi(i' - u)(i - i') \\ S_{II} &= S_I(ip/i) \\ S_{III} &= S_I(ip/i)^2 \\ S_N &= j^2(N' - N)/N'NY \\ S_V &= (S_{III} + S_N)(ip/i) \\ C_I &= luNi\left(\frac{\delta N'}{N'} - \frac{\delta N}{N}\right) \\ C_{II} &= C_I(ip/i) \end{aligned} \right\} \dots\dots(4.1)$$

用主光线的入射高度表示主光线时,初级象差系数公式为:

$$\left. \begin{aligned} S_I &= \Sigma hp \\ S_{II} &= \Sigma (h_p P - jw) \\ S_{III} &= \Sigma \left(\frac{h_p^2}{h} P - 2j \frac{h_p}{h} w + j^2 \frac{1}{h} \phi \right) \\ S_N &= \Sigma j^2 \frac{\pi}{h} \\ S_V &= \Sigma \left[\frac{h_p^3}{h^2} P - 3j \frac{h_p^2}{h^2} W + j^2 \frac{h_p}{h^2} \right. \\ &\quad \left. (3\phi + \pi) + j^2 \frac{1}{h^2} \left(\frac{1}{N^2} - \frac{1}{N'^2} \right) \right] \end{aligned} \right\} \dots(4.2)$$

其中:

$$\left. \begin{aligned} P &= Ni(i' - u)(i - i') \\ W &= -(i' - u)(i - i') \\ \phi &= (i' - u) \left(\frac{1}{N} - \frac{1}{N'} \right) = \left(\frac{u'}{N'} - \frac{u}{N} \right) \\ \pi &= (i - u) \left(\frac{1}{N} - \frac{1}{N'} \right) = \frac{h}{r} \left(\frac{1}{N} - \frac{1}{N'} \right) \end{aligned} \right\} \dots(4.3)$$

h_p 及 h 的意义如图 4.1 所示, 而且 P 、 W 、 ϕ 之间有如下的关系:

$$P = -Ni w = (Ni)^2 \Phi \dots\dots\dots(4.4)$$

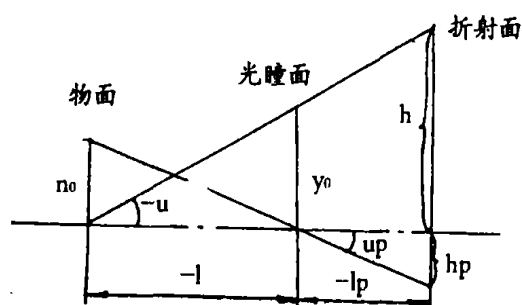


图 4.1

(1) 对于贴合的薄透镜, h 、 h_p 可提出在括号外。再若此组透镜处于空气中, 则有:

$N_1 = N'_k = 1, N'_k{}^2 - N_1{}^2 = 0$, 于是有:

$$\left. \begin{aligned} S_I &= h \Sigma p \\ S_{II} &= hp \Sigma p - j \Sigma w \\ S_{III} &= \frac{h_p^2}{h} \Sigma p - 2j \frac{h_p}{h} \Sigma w + j^2 \frac{1}{h} \Sigma \Phi \\ S_N &= \frac{j^2}{h} \Sigma \frac{\Phi}{N} \\ S_V &= \frac{h_p^3}{h^2} \Sigma p - 3j \frac{h_p^2}{h^2} \Sigma w + j \frac{h_p}{h^2} \Sigma \left(3 + \frac{1}{N} \right) \Phi \end{aligned} \right\} \dots(4.5)$$

对于色差也有:

$$\left. \begin{aligned} C_I &= h^2 \Sigma \Phi / v \\ C_{II} &= h h_p \Sigma \Phi / v \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(4.6)$$

(2) 当光栏位于透镜上时, $h_p = 0$, 则有:

$$\left. \begin{aligned} S_I &= h \Sigma p \\ S_{II} &= -j \Sigma w \\ S_{III} &= j^2 \Sigma \phi \\ S_N &= j u \Sigma \phi \\ S_V &= 0 \\ C_I &= h^2 \Sigma \frac{\phi}{v} \\ C_{II} &= 0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(4.7)$$

其中 $\mu = \Sigma \frac{\Phi}{N} / \Sigma \Phi$

注意此处的 ϕ 以及(4.6)式中的 ϕ 与 Φ 不同, 有 $\Phi = h\phi$, 此时亦可注意到光栏处于透镜上时, $S_V = C_{II} = 0$, 而 S_{III} 及 S_N 为与弯曲状况无关的定值。

2、 P 、 W 的各种表示式

$$(1) \left. \begin{aligned} P &= Ni(i' - u)(i - i') \\ W &= -(i' - u)(i - i') \end{aligned} \right\} \dots(4.8)$$

(2) 物体在无限远时 P^∞ 、 W^∞ 与物体在有限距离时的 P 、 W 有下列关系:

$$\left. \begin{aligned} W &= W^\infty + u(2 + u)h\phi \\ P &= P^\infty + u(4W^\infty - h^2\phi^2) \\ &\quad + u^2(3 + u)h\phi \end{aligned} \right\} \dots(4.9)$$

取规格化条件 $h\phi = 1$ 时, $u = \frac{h}{l} = \frac{1}{\phi}$, 有:

$$\left. \begin{aligned} |W| &= |W^\infty + u(2 + u)| \\ |P| &= |P^\infty + u(4|W^\infty - 1)| \\ &\quad + u^2(3 + 2u) \end{aligned} \right\} \dots\dots(4.10)$$

$|P|$ 、 $|W|$ 与 P 、 W 的关系:

$$\left. \begin{aligned} |P| &= \frac{P}{(h\phi)^3}, \\ |W| &= \frac{W}{(h\phi)^2} \end{aligned} \right\} \dots\dots(4.11)$$

根据上面的关系式, (4.5) 式可写成下式:

$$\left. \begin{aligned} S_I &= h^4 \phi^3 |P| \\ S_{II} &= h^3 h p \phi^3 |P| - j h^2 \phi^2 |W| \\ S_{III} &= h^2 h^2 \phi^3 |P| - 2 j h h p \phi^2 |W| + j^2 \phi \\ S_{IV} &= j^2 u \phi \\ S_V &= h h^3 \phi^3 |P| - 3 j h^2 \phi^2 |W| + \\ &\quad j^2 \frac{h p}{h} (3 + u) \phi \end{aligned} \right\} \dots\dots(4.12)$$

(3) 正反向计算时 P 、 W 的关系:

光线由正向计算变为反向计算时, 若入射点高度不变, 则有:

$$\left. \begin{aligned} \vec{u} &= -\vec{u}', \\ \vec{i} &= -\vec{i}', \\ \vec{i}' - \vec{u} &= -\vec{i} + \vec{u}' = (\vec{i}' - \vec{u}), \\ \vec{i} - \vec{i}' &= \vec{i}' + \vec{i} = \vec{i} - \vec{i}' \end{aligned} \right\} \dots\dots(4.13)$$

故得:

$$\left. \begin{aligned} \vec{P} &= \vec{P}, \\ \vec{W} &= -\vec{W}' \end{aligned} \right\} \dots\dots(4.14)$$

(4) 单薄透镜的 P 、 W 表示式:

(i) 当物体在无限远时 $u_1 = 0$, 取规格化条件 $h\phi = 1$, 则有:

$$\left. \begin{aligned} \phi &= (N - 1)(C_1 - C_2) = 1 \\ u_1 &= 0 \\ i_1 &= N i_1' = C_1 \\ u_1' &= u_2 = C_1(1 - \frac{1}{N}) \\ u_2' &= 1 \\ i_2' &= N i_2 = C_2 - 1 \end{aligned} \right\} \dots\dots(4.15)$$

以符号 $|Q|$ 表示 i_2' 时, 有:

$$\left. \begin{aligned} C_2 &= |Q| + 1 \\ C_1 = i_1 &= \frac{1}{N - 1} + \\ |Q| + 1 &= \frac{N}{N - 1} + |Q| \end{aligned} \right\} \dots\dots(4.16)$$

$$\begin{aligned} |P^\infty| &= (1 + \frac{2}{N}) |Q|^2 + \frac{3}{N - 1} |Q| + \frac{N}{(N - 1)^2} \\ &= |P_{\min}^\infty| + [1 + \frac{2}{(N + 1)^2}] [|Q| + \\ &\quad \frac{3N}{2(N - 1)(N + 2)}]^2 \end{aligned}$$

$$|P^\infty| = |P_{\min}^\infty| + [1 - \frac{1}{(N + 1)^2}] \times (|W^\infty| - \frac{1}{2(N + 2)})^2 \dots\dots(4.17)$$

$$|W^\infty| = -\frac{N + 1}{N} |Q| - \frac{1}{N - 1} \dots\dots(4.18)$$

$$\text{其中 } |P_{\min}^\infty| = \frac{N}{(N - 1)^2} [1 - \frac{9}{4(N + 2)}] \dots\dots(4.19)$$

(ii) 物体在近距离时的相应公式:

$$|P| = |P_{\min}| + [1 - \frac{1}{(N + 1)^2}] [|W| - \frac{1}{2(N + 2)}(1 + 2u_1)]^2 \dots\dots(4.20)$$

$$|W| = |W^\infty| + (2 + \frac{1}{N})u_1 \dots\dots(4.21)$$

$$\text{其中 } |P_{\min}| = |P_{\min}^\infty| - \frac{N}{N + 2}(u_1 + u_1') \dots\dots(4.22)$$

(5) 正负胶合双透镜的 P 、 W 表示式

由于胶合透镜的 $r_3 = r_2$, 故可类似前面取规格化条件, 令 $i_2' = |Q$, 求得下列公式组:

(i) 当物体在无限远时, $u_1 = 0$, 有:

$$|P^\infty = a |Q^2 + b |Q + C = C - \frac{b^2}{4a} + a(|Q + \frac{b}{2a})^2 = |P_{\min}^2 + [1 - \frac{1}{(1 + \frac{u_1}{u})^2}] [|W^\infty - |W_o]^2 \dots\dots\dots(4.23)$$

$$|W^\infty = -\frac{a+1}{2} |Q + \frac{b-\phi_2}{3} = (1+u)(|Q - |Q_o) + |W_o \dots\dots\dots(4.24)$$

其中:

$$\left. \begin{aligned} a &= \frac{N_1+2}{N_1} \phi_1 + \frac{N_2+2}{N_2} \phi_2 = 1 + 2u \\ b &= \frac{3\phi_1^2}{N_1-1} - \frac{3\phi_2^2}{N_2-1} - 2\phi_2 \\ C &= \frac{N_1}{(N_1-1)^2} \phi_1^3 + \frac{N_2}{(N_2-1)^2} \phi_2^3 + \frac{N_2}{(N_2-1)} \phi_2^2 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(4.25)$$

$$\left. \begin{aligned} |W_o &= -\frac{b-\phi_2}{3} + \frac{b}{2a} \\ \frac{a+1}{2} &= \frac{(u-1)|Q_o + \phi_2}{3} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(4.26)$$

$$\left. \begin{aligned} |P_o &= |P_{\min}^\infty = C - \frac{b^2}{4a} \\ |Q_o &= -\frac{b}{2a} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(4.27)$$

(ii) 当物体在近距离时, 有:

$$|P = |P_{\min} + [1 - \frac{1}{(1 + \frac{1}{u})^2}] [|W - |W_o(1 + \frac{u}{|W_o(1 + 2u)} u_1)]^2 \dots\dots\dots(4.28)$$

$$|W = |W^\infty + u_1(2 + u) \dots\dots\dots(4.29)$$

$$\text{其中 } |P_{\min} = |P_{\min}^\infty - \frac{1}{1 + 2u} u_1^2 - (1 - 4 |W_o) u_1 \dots\dots\dots(4.30)$$

(iii) 近似公式

因为 $|W_o$ 和 u 一般变动较小, 因此可以近似看做为常数。 $u \doteq 0.7$, $|W_o = 0.14$ 则由(4.23)、(4.24)、(4.28)、(4.29)、(4.30)式, 可得到下列近似公式:

$$|P^\infty = |P_o + 0.83(|W^\infty - 0.14)^2 \dots\dots\dots(4.31)$$

$$|W^\infty = -1.7(|Q - |Q_o) + 0.14 \dots\dots\dots(4.32)$$

$$|P = |P_{\min} + 0.83[|W - 0.14(1 + 2u_1)]^2 \dots\dots\dots(4.33)$$

$$|W = |W^\infty + 2.7 u_1 \dots\dots\dots(4.34)$$

$$\text{其中 } |P_{\min} = |P_o - 0.44(u_1 + u_1^2) \dots\dots\dots(4.35)$$

3 消色差方程组

(1) 正负双胶合透镜

令 $h = 1, f' = 1$, 则有公式组:

$$\left. \begin{aligned} \phi_1 + \phi_2 &= 1 \\ \frac{\phi_1}{u_1} + \frac{\phi_2}{u_2} &= C_1 = 0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(4.36)$$

(2) 正负分离的双透镜

令 $h_1 = 1, f' = 1$, 则有公式组:

$$\left. \begin{aligned} \phi_1 + h_2 \phi_2 &= 1 \\ \frac{\phi_1}{u_1} + \frac{h_2^2 \phi_2}{u_2} &= C_1 = 0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(4.37)$$

$$\text{其中 } h_2 = 1 - d\phi_1 \dots\dots\dots(4.38)$$

§4.3 放大镜设计

(一) 放大镜及其放大率

为了使眼睛能够很好地辨别被观察物体的细节, 必须做到由眼睛入射光瞳中心对细节所张的角度不小于某一极限值。当

被观察物体有良好的照明和物体细节有足够的衬度时,眼睛能辨别细节的这一最小极限角为 $0.5' \sim 1'$ 。在照明条件比较差的环境下观察时,这个角度将达 $2' \sim 4'$ 。细小物体的尺度一定时,它对眼睛所张的角度就决定于该物体到眼睛的距离。同样大小的物体,距离眼睛越近,其视角就越大。但是,被观察物体不能无限地移近眼睛。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上述极限值时,就必须借助于放大镜或显微镜,使细小物体被放大后在眼睛网膜上得到具有足够大小的象。这样才能分辨其细微结构。

要表征放大镜的放大作用,应该是眼睛网膜上象的大小。所以我们把放大镜的放大率定义为:通过放大镜看物体时,其象对眼睛张角的正切与眼睛直接看该物体时,物对眼睛张角的正切之比。

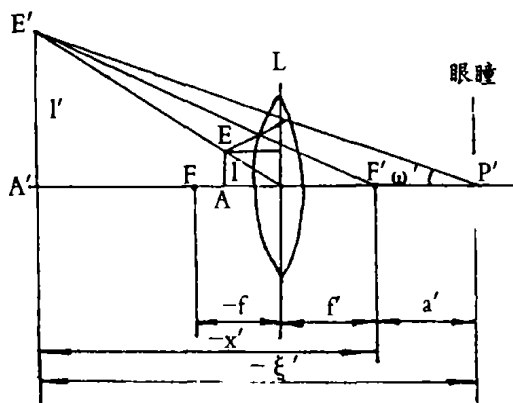


图 4.2

如图 4.2 所示,在物方焦点 F 和透镜 L 之间置一物体 $EA = l$ 。它的虚象是 $E'A' = l'$,眼睛的入射光瞳位于 P' 点,象 $E'A'$ 对眼睛入射光瞳中心 P' 点所张的角度为 ω' ,象相对于象方焦点 F' 的位置由 x' 决定,图中 $x' < 0$,相对于眼睛的距离为 ξ' ($\xi' <$

0)。眼睛相对于象方焦点的距离为 a' 。为方便计算,我们假定放大镜为一薄透镜。

从图 4.2 可得:

$$\tan \omega' = -\frac{l'}{\xi'} \quad \dots\dots(4.39)$$

对于物象大小之间的关系,按放大率公式有:

$$l' = -\frac{x'}{f}l$$

上式中的 x' 用 $\xi' + a'$ 代替以后,再将整个 l' 的表达式代入公式(4.39)得:

$$\tan \omega' = \frac{l}{f} \left(1 + \frac{a'}{\xi'}\right)$$

假如用眼睛直接在相距 D 处看物体 EA ,则其张角 ω 之正切有

$$\tan \omega = -\frac{l}{D}$$

$\tan \omega'$ 和 $\tan \omega$ 之比值,即为放大镜的放大率。

$$N = \frac{\tan \omega'}{\tan \omega} = -\frac{D}{f} \left(1 + \frac{a'}{\xi'}\right) \quad \dots\dots(4.40)$$

从上式可以看到,放大镜的放大率主要与放大镜的焦距有关,其次是决定于与系统无关的表征眼睛特性的距离 D ,及眼睛的位置 a' 和眼睛到象的距离 ξ' 。在大多数情况下,用放大镜时,眼睛很接近于焦点 F' ,即数值 a' 很小。而数值 ξ' 与观察时眼睛的调节有关,相对于 a' 讲是一很大的数值,因此 $\frac{a'}{\xi'}$ 是一个很小的数值。

如果 $a' = 0$,即眼睛位于放大镜的焦点 F' 上则:

$$N_0 = -\frac{D}{f} \quad \dots\dots(4.41)$$

如果 $\xi' = \infty$,即物体位于放大镜的物方焦点 F 处,象位于无限远。此时眼睛可以无需调节地进行观察。在此情况下,放大

镜的放大率也得到与公式(4.41)一样的结果。一般取 $D = -250$ 毫米,也就是对于中等年龄的人正常眼睛的最明视距离。因此公式(4.41)得:

$$N_0 = \frac{250}{f} \dots\dots\dots(4.42)$$

如果眼睛在通过放大镜看物体时,把它的象调节到明视距离,即 $\xi' = -250$,同时眼睛靠近放大镜,即 $a' = -f$ 。则公式(4.40)可得如下形式:

$$N = -\frac{D}{f} + 1 = N_0 + 1$$

就是说如果眼睛紧靠着放大镜,放大率要增加一些。

(二) 放大镜的光束限制和视场

设放大镜为一单块薄透镜,则整个系统内限制光束的光阑有两个,即透镜框和观察者的眼瞳。眼睛的瞳孔是整个系统的出射光瞳,透镜框是出射窗。系统没有专门的视场光阑。在物平面或象平面上的视场决定于窗和瞳孔的直径以及它们之间的距离。

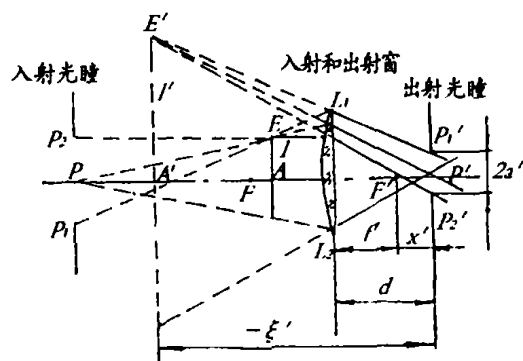


图 4.3

如图4.3所示, L_1L_2 为直径等于 $2h$ 的放大镜,人眼的瞳孔 P_1P_2 位于透镜后,其直径为 $2a'$,相对于放大镜的位置用 d 表示。物体 EA 位于物方焦点 F 和透镜之间。它和焦点 F 之间的距离,正好使被放大镜

放大的虚象 $E'A'$ 位于透镜之间相距人眼瞳孔中心 250 毫米处,即 $\xi' = -250$ 。系统的出射光瞳,即眼瞳,也是孔径光阑。它被透镜所成的象 $P_1'P_2'$ 为入射光瞳。而透镜本身是系统的出射窗,又是视场光阑和入射窗。

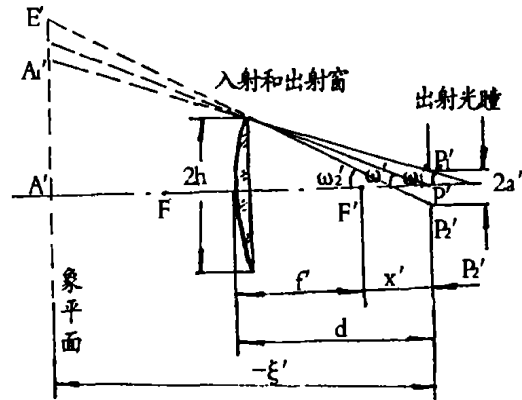


图 4.4

由于在系统中,入射窗不与物平面重合。因此,在整个可见视场内不同部分发出的光束有不同程度的渐晕现象。如图 4.4 所示,由角度 $2\omega'_1$ 所决定的视场内所有点是用充满整个眼睛瞳孔的光束成像。最后由 $2\omega'_2$ 决定了整个可见视场的范围。显然视场的边缘没有明显的界限,因为视场内各象点的照度从 A'_1 开始降低,至 E' 点,连续下降直到零。从图 4.4 可以得出上述三个角度的关系式:

$$\left. \begin{aligned} \tan\omega'_1 &= \frac{h - a'}{d} \\ \tan\omega' &= \frac{h}{d} \\ \tan\omega'_2 &= \frac{h + a'}{d} \end{aligned} \right\} \dots\dots(4.43)$$

从公式可以看出,放大镜的视场与放大镜的直径有关,直径越大,视场也越大。同时放大镜的视场还随着眼睛与放大镜的相对位置而变,当眼睛靠近放大镜时视场

会有所增大。

对于一般放大镜而言,倍数总不是很高的,其直径比起眼瞳要大得多,而眼睛也总是很靠近放大镜来观察。此时按(4.43)式所计算得的有相当大的视场,但由于象差的缘故,往往不能整个地利用。

上面的讨论,只是眼睛不动的情况。事实上,眼睛不时在眼窝内转动。其转动中心一般在角膜顶点后 13 ~ 15 毫米处,此时

(4.43) 式中的分母 d 应以 \bar{d} 来代替:

$$\bar{d} = d + (13 \sim 15)$$

放大镜的视场有时不用视场边缘所引光线间的夹角来表示,而用眼睛固定时通过放大镜后在物平面上所能见到的圆直径表示。用 $2l$ 表示这一直径,并假定在物平面位于放大镜物方焦点时来确定之。此时象平面位于无限远,按图 4.5 有:

$$2l = 2f' \tan \omega'$$

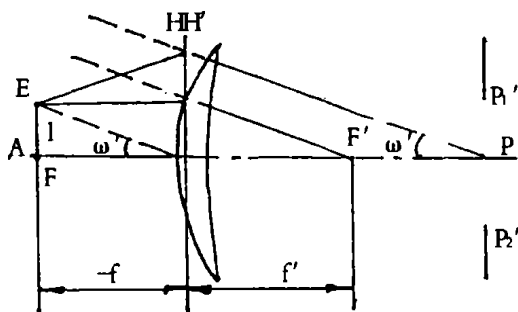


图 4.5

将公式(4.42)中的 f' 值代入上式得:

$$2l = \frac{500 \tan \omega'}{N_0} \quad \dots\dots\dots(4.44)$$

或将公式(4.43)中的 $\tan \omega'$ 代入上式得:

$$2l = \frac{500h}{N_0 d} \quad \dots\dots\dots(4.45)$$

由公式(4.44)和(4.45)可见,当放大镜的放大率增大时,视场减小。

(三) 放大镜设计

理论上完全能够建立起具有很大放大率的放大镜,按公式(4.42),具有放大率为 1000 倍的放大镜,其焦距应该等于 0.25 毫米,若用折射率为 1.5 的玻璃做成平凸透镜,则其半径只有 0.5 毫米。那末,最大的直径也只能有 1 毫米,显然用焦距很短直径很小的放大镜是完全不现实的。实际上,现在使用的放大镜,其放大率不超过 40 倍。

因为放大镜是用比较细的光束成像,所以对放大镜系统象差校正的要求不严的,由球差所产生的弥散圆的角直径可以允许到 5', 在要求比较高的情况下也不必小于 2'。对于低倍率的放大镜,位置色差完全不校正。但在高倍率,特别是要求有较大的视场时,就应该校正慧差、象散和放大率色差。象散是通过眼睛转动中心的主光线作校正的。

放大镜的类型主要有以下几种:① 单透镜;② 二单透镜组成的放大镜;③ 双目放大镜;④ 齐明放大镜;⑤ 望远放大镜(指望远镜系统和放大镜组合使用,且放大镜置于望远镜物镜前)。

复杂的放大镜设计归入目镜设计中,这里只介绍单透镜作成的放大镜设计。

A、单透镜放大镜设计

对于放大倍数不超过 5 倍的低倍放大镜。通常用简单的非消色透镜。有令人满意的象的视场直径可达焦距的五分之一,用角度表征时约为 12°。

放大率低的时候,球差和色差尚不明显。在下面的表里列出了简单放大镜在透镜形状不同时的象散和畸变量。计算是对与光轴成 10° 的元光束进行的,亦即视场扩大至 20°。放大镜的焦距为 50 毫米(即放

大倍率为5倍)。用折射率为1.525的玻璃,厚度为1毫米。眼睛转动中心距透镜的第二面顶点为20毫米。结果如下表所示。

透镜形状	元光束的会聚度(屈光度)		象散差(屈光度) $1000 \times (\frac{1}{S'_1} - \frac{1}{S'_2})$	畸变 %
	弧矢的 $\frac{1000}{S'_s}$	子午的 $\frac{1000}{S'_l}$		
平凸,平面朝向眼睛	0.21	0.25	0.04	1.0
双凸,两面等半径	0.39	0.69	0.30	1.6
平凸,平面朝向物体	0.73	1.82	1.09	2.8

由表可知,采用单透镜放大镜时,应该使平面朝向眼睛。为了减少象散,通常不用平凸或双凸透镜,而用弯月形透镜代替。

设计步骤为:

(1) 根据要求的放大倍数求出焦距值。利用(4.42)公式,即 $N_0 = \frac{250}{f}$ 。

(2) 根据焦距值计算透镜的形状,利用公式

$$f = \frac{nr_1r_2}{(n-1)[n(r_2-r_1) + (n-1)d]} \text{ 或}$$

$$\varphi = \frac{1}{f} = (n-1)(\rho_1 - \rho_2) + \frac{(n-1)^2}{n}d\rho_1\rho_2, \text{ 式中的 } \rho_1 = \frac{1}{r_1}, \rho_2 = \frac{1}{r_2}, d$$

为透镜中心厚度。当透镜为平凸透镜时,则

$$f = \frac{r}{n-1}。$$

(未完待续)



带有“激光瞄准”系统的鼠标

美国罗技公司生产一种采用激光传感器的鼠标。研制者声称,利用激光能确保鼠标在各种不同表面上的正常工作,并且传感器灵敏度与传统发光二极管工艺相比提高了20倍。

建立在利用激光基础上跟踪鼠标移动的系统,利用的激光是人眼看不见的,研制者指出,激光对于人的视力没有任何危险。除此之外,还可以使鼠标的组成部分最小化。

罗技 MX1000 型激光鼠标检测移动系统的工作原理是激光束穿过鼠标底部的一个抛光银环。表面图像被传感器“捕捉”,传感器能以秒速来处理分辨率为580万像素的图象,在鼠标移动时传感器会对表面图象进行比较,同时将表面图象差别转换成显示器屏幕上的光标移动。

摘自《科学与技术》