

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. 4)

§ 4.8 中倍显微镜物镜的设计

(一) 概述

中倍显微镜物镜常用的形式是李斯特物镜,它是由两组胶合透镜组成的,这个结构是其它显微镜物镜的基础,中倍显微镜一般也只需考虑轴上点的成象质量。

设计李斯特物镜时,可以采取解方程的方法,也可以采用康拉等的配合法。解方程的方法只能满足初级象差的要求,而此类显微镜物镜中高级象差是比较大的,在解方程之后往往还需要用配合法来作最后修正,所以设计中倍显微镜物镜时,通常采用配合法,配合法也是高倍显微镜物镜、折射型复消色差显微镜物镜的设计基础。

(二) 配合法设计中倍显微镜物镜

中倍显微镜物镜靠近物方的一组叫前组,靠近像方的一组叫做后组。它的设计步骤为:

(1) 根据物象共轭距离 c 、放大倍数 β 和数值孔径 $N \cdot A$ 的要求,由薄透镜公式决定 f ;

(2) 由消色差条件前后组的个别焦距分配;

(3) 前后组各算出 3 ~ 4 个弯曲,求出象差;

(4) 作出象差曲线,在曲线上找出完

善的解;

(5) 最后进行光线设计,有个别误差时再作微量调整。

举一个例子详细说明设计步骤:

设计一个中倍的显微镜物镜,数值孔径为 $N \cdot A = 0.25$,放大倍数 $\beta = -8\times$,物象共轭距离 $c = 195$ 。

解:用配合法进行设计,就是分别对物镜的前组和后组就同一条光线进行光路计算,对各种弯曲计算出球差和慧差,然后分别画出前后组曲线,在曲线上找出前后组同时相抵消球差和慧差的弯曲位置。为了保证要求的物象共轭距离,便于修改前片来作最后的象差校正,我们采用自象点到物点的相反方向的计算。

设计步骤:

1. 计算前的准备工作

(1) 选取玻璃组合:

根据国内玻璃生产情况,根据前人积累的经验,选择玻璃组合。选用国内生产的价格低的玻璃;尽可能选用色散系数相差较大的 Δn 较大的玻璃组合,但也不能取得很大,使留有调换玻璃的余地。现选用 $K_9 - F_5$,并选用前后组相同的玻璃组合。

$$K_9 \quad n_0 = 1.5163 \quad v = 64.1 \quad n_F - n_c = 0.00806$$

$$F_5 \quad n_0 = 1.6242 \quad v = 35.9 \quad n_F - n_c$$

= 0.01738

2. 后组计算

(1) 偏角分配

$$\frac{\sin u'_6}{\sin u_1} = \beta, \sin u_1 = \frac{0.25}{-8} = -0.03125,$$

$u_1 = \sin u_1 = -0.03125$

$u'_6 = \sin u'_6 = 0.25$

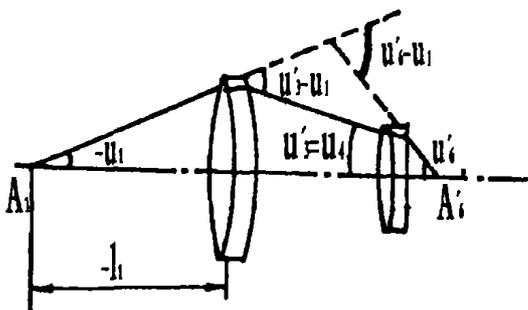


图 4.27

由图 4.27 所示,总偏角:

$u'_6 - u_1 = 0.25 - (-0.03125) = 0.28125$, 偏角分配我们采取前后组各一半, 即 $u'_3 - u_1 = \frac{0.28125}{2} = 0.140625$,

$u'_3 = 0.140625 + u_1 = 0.140625 - 0.03125 = 0.109375$ 。

(2) 求曲率半径

$l_1 u_1 = l'_3 u'_3 = h_1 = h_3, l'_3 = \frac{l_1 u_1}{u'_3} = \frac{(-170)(-0.03125)}{0.109375} = 48.5714$, 这

里的 l_1 取 -170mm , 主要是考虑物象共轭距的 195mm 的要求。

$\frac{1}{f'_后} = \frac{1}{l'_3} - \frac{1}{l_1} = \frac{1}{48.5714} + \frac{1}{170} = 0.0264704, f'_后 = 37.7777$,

$c_a = \frac{1}{f'_后(v_a - v_b)(n_F - n_c)_a} = 0.0264704 \cdot \frac{1}{(64.1 - 35.9)(0.00806)}$

= 0.116461,

取 $c_1 = \frac{1}{3}c_a = \frac{0.116461}{3} =$

0.038820,

$\Delta c = \frac{1}{5}c_a = \frac{0.116461}{5} =$

0.0023292,

取 $c_{1中} = 0.04 \quad \Delta c = \pm 0.02$,

因而得

$c_{1左} = 0.02; \quad c_{1中} = 0.04,$

$c_{1右} = 0.06,$

又因为 $c_a = c_1 - c_2$, 所以得:

$c_{2左} = -0.096461, c_{2中} = -0.076461,$

$c_{2右} = -0.056461,$

因为 $r = \frac{1}{c}$, 从而可得:

$r_{1左} = 50, \quad r_{1中} = 25, \quad r_{1右} = 16.6667,$

$r_{2左} = -10.37, \quad r_{2中} = -13.08, \quad r_{2右} = -17.71,$

(3) 确定透镜厚度

$h_1 = l_1 u_1 = (-170)(-0.03125) = 5.3125$ 。

透镜全直径 = $2h_1 + 1$ (轱边量) = $5.3125 \times 2 + 1 = 11.6$, 透镜的边缘厚度 a 可根据全直径查表得 $a = 1$, 用作图法求出凸透镜三种弯曲情况的 d 分别为 2.5; 2.7; 2.8。取最大的一个 d 值, 并考虑工艺性, 最后取 $d_1 = 3$ 。

求凹透镜的中心厚度:

取 $d_2 = 0.12D = 0.12 \times 11.6 = 1.44$, 园整后取 $d = 1.5$ 。

(4) 折射率计算

由最灵敏的 $\lambda = 5550\text{\AA}$ 的折射率来进行光路三角计算。 $n = n_D + 0.188(n_F - n_c)$

$$n_a = 1.5163 + 0.188 \times 0.00806 = 1.51782,$$

$$n_b = 1.6242 + 0.188 \times 0.01738 = 1.62747,$$

(5) 进行光路三角计算:

计算三种曲率下光路,这里只对计算中间曲率加以说明,其它两种同理。

I) 边光三角计算:

起始坐标为 $S = -170, \sin \bar{u}_1 = -0.03125$ 。

中间组的 $r_1 = 25, r_2 = -13.08$, 边光从第一面一直计算到第二面出射为止, 接下去就要求 r_3 。

(6) 用 $d-D$ 法求 r_3 (详见图 4.28)

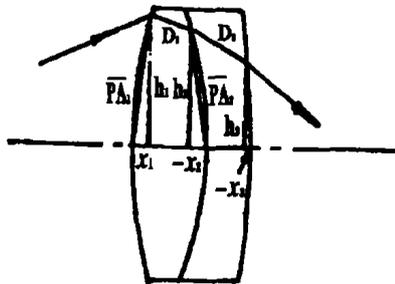


图 4.28

$$I) x_1 = \frac{h_1^2 + x_1^2}{2r_1} = \frac{\overline{PA_1^2}}{2r_1} = \frac{5.36405^2}{50}$$

$$= 0.575442,$$

$$x_2 = \frac{h_2^2 + x_2^2}{2r_2} = \frac{\overline{PA_2^2}}{2r_2} =$$

$$\frac{5.37701^2}{2 \times (-13.08)} = -1.10521,$$

$$II) D_1 = \frac{d_1 - x_1 + x_2}{\cos u_1^1}$$

$$= \frac{3 - 0.575442 - 1.10521}{\cos 3^{\circ}4'33''}$$

$$= 1.32125,$$

$$D_2 = d_2 + \frac{(d_1 - D_1)\delta N_1}{\delta N_2} = 1.5 +$$

$$\frac{(3 - 1.32125) \times 0.00806}{0.01738}$$

$$= 2.278522$$

$$III) -x_3 = d_2 - x_2 - D_2 \cos u_2^1 = 1.5 + 1.10521 - 2.278522 \cos 1^{\circ}8'32''$$

$$x_3 = -0.32715,$$

$$IV) h_3 = \tan u_2^1 \times (l_3 - x_3) = \tan 1^{\circ}8'32'' (261.321 + 0.32715) = 5.21679$$

$$[\text{或用公式: } h_2 = \overline{PA_2} \cos \frac{1}{2}(\bar{u}_2 - \bar{i}_2), h_3 = h_2 - D_2 \sin \bar{u}_2^1],$$

$$V) r_3 = \frac{h_3^2 + x_3^2}{2x_3} = \frac{5.21679^2 + (-0.32715)^2}{2 \times (-0.32715)} = -41.7572.$$

(7) 继续对第 3 面进行光路三角计算 (边光) 直至第三面出来。

(8) 对傍轴光进行 1 ~ 3 面的光路三角计算:

其起始坐标取成与边光计算的一样, 即有:

$$l_1 = -170, u_1 = -0.03125.$$

(9) 对傍轴光第 3 面进行光路计算以前先对 r_3 进行检验 (详见图 4.29):

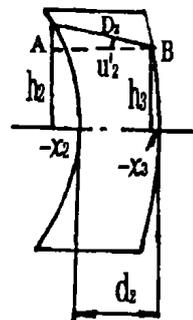


图 4.29

I) 根据光路计算得到的 $\overline{PA_3}$ 求出 x_3

$$x_3 = \frac{\overline{PA_3^2}}{2r_3} = -0.327152.$$

$$\text{II}) AB = d_2 - x_2 + x_3 = 1.5 + 1.10521 - 0.327152 = 2.27806,$$

$$\text{III}) D_2 = \frac{AB}{\cos u'_2} = 2.27851.$$

IV) 前面计算的 $D_2 = 2.27852$ 与现在的符合, 说明 r_3 的计算是正确的。

(10) 根据以上的计算求得三种曲率的 r_3 和计算结果如下:

c_1	0.02	0.04	0.06
r_3	-22.3939	-41.7572	-602.5
l'_3	45.4693	45.5249	46.0047
l_3	45.4906	45.8717	44.7801
LA_3	-0.0233	-0.3468	+1.2246
$\lg \sin \bar{u}'_3$	9.062285	9.050020	9.050780
$\lg u'_3$	9.066140	9.051361	9.032119
osc'_3	+0.00892	+0.00309	-0.042058

3. 前组计算

(1) 取 u'_3 角的标准角:

一般以中间组的 u'_3 用作标准, 现在取标准角: $u'_3 = 6^\circ 24' 52.6''$, $\lg \sin \bar{u}'_3 = 9.048140$,

(2) 换算成标准角度下的象差:

只需各象差乘以 $(\frac{\sin \bar{u}'_3 \text{ 标准}}{\sin \bar{u}'_3 \text{ 原来}})^2$ 即可

得到相应于标准角下的象差。现将标准角度下的象差值列于下表:

c_1	0.02	0.04	0.06
LA_3	-0.0218306	-0.34381	+1.2098
osc'_3	+0.00835746	+0.00306336	-0.0415498
l'_3	45.4693	45.5249	46.0047

(3) 求曲率半径:

取 $\bar{l}_4 = 25$, $\bar{u}'_3 = \bar{u}_4 = 6^\circ 24' 52.6''$ 为前组的起始坐标。

$$\text{I}) l'_6 = \frac{l_4 u_4}{u'_6} = \frac{25 \sin \bar{u}_4}{u'_6} = \frac{25 \sin 6^\circ 24' 52.6''}{0.25} = 11.1722,$$

$$\text{II}) \frac{1}{f'_{\text{前}}} = \frac{1}{l'_6} - \frac{1}{l_4} = \frac{1}{11.1720} - \frac{1}{25} =$$

$$0.0495076,$$

$$f'_{\text{前}} = 20.1989,$$

III) 由消色差条件求 c_c :

$$c_c = \frac{1}{f'_{\text{前}}(v_c - v_d)(n_F - n_c)} = 0.0495076 \times \frac{1}{(64.1 - 35.9) \times 0.00806}$$

$$c_c = 0.217815,$$

$$\text{IV}) \text{取 } c_{\text{中4}} = \frac{1}{3} c_c = \frac{1}{3} \times 0.217815 =$$

$$0.072605,$$

$$\Delta c = \frac{1}{5} c_c = 0.043563,$$

园整之后取 $c_{\text{中4}} = 0.07$, $\Delta c = \pm 0.04$,

$\therefore c_5 = c_4 - c_c$, 因而可得:

c_4	0.03	0.07	0.11
c_5	-0.187815	-0.147815	-0.107815
r_4	33.33	14.29	9.091
r_5	-5.324	-6.765	-9.276

(4) 确定透镜厚度

$$\text{I}) h_4 = l_4 u_4 = 25 \sin 6^\circ 24' 52.6'' = 2.79306, \text{查表得, 取 } \alpha = 0.7, D_{\text{通}} = 5.58, D_{\text{全}} = 5.58 + 0.6 (\text{ 轱边量}) = 6.18,$$

由作图得三种曲率的不同厚度 d_4 分别为 2.2、2.0、2.0, 取最大值, 并取标准, 得 $d_4 = 2.2$ 。

$$\text{II}) \text{凹透镜 } d_5 = 0.12D = 0.12 \times 6.18 = 0.74, \text{取 } d = 1.0.$$

(5) 折射率计算:

因为前后组采用相同的玻璃组合, 故 n_c 、 n_d 可直接写出:

$$n_c = 1.51782, n_d = 1.62747.$$

(6) 进行光路三角计算:

分成三组进行各种曲率的光路计算。起始坐标 $\bar{l}_4 = 25$, $\bar{u}_4 = 6^\circ 24' 52.6''$, 进行 4 ~ 5 面边缘光计算。

(7) 用 $d - D$ 法求 r_6 :

下面我们计算中间组 (如图 4.30 所示):

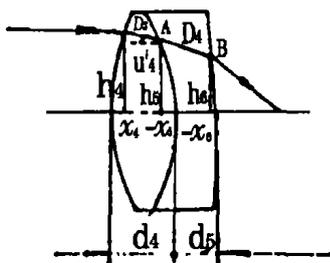


图 4.30

$$I) x_4 = \frac{h_4^2 + x_4^2}{2r_4} = \frac{\overline{PA_4^2}}{2r_4} = 0.273013,$$

$$x_5 = \frac{h_5^2 + x_5^2}{2r_5} = \frac{\overline{PA_5^2}}{2r_5} = -0.511124,$$

$$II) D_3 = \frac{d_4 - x_4 + x_5}{\cos \bar{u}'_4} = \frac{2.2 - 0.273013 - 0.511124}{\cos 8^\circ 3' 19.35''} = 1.42997$$

$$D_4 = d_5 + \frac{(d_4 - D_3)\delta N_3}{\delta N_4} = 1.0 + \frac{(2.2 - 1.42997) \times 0.00806}{0.01738} = 1.35710$$

$$III) h_5 = \overline{PA_5} \cos \frac{1}{2}(\bar{u}_5 - \bar{i}_5) = 2.57959,$$

$$h_6 = h_5 - D_4 \sin \bar{u}'_5 = 2.57959 - 1.35710 \sin 5^\circ 48' 34'' = 2.44222,$$

$$IV) x_6 = D_4 \cos \bar{u}'_5 + x_5 - d_5 = -0.160994,$$

$$V) r_6 = \frac{h_6^2 + x_6^2}{2x_6} = -18.6043.$$

(8) 进行边缘光光路三角计算直至第 6 面出。

(9) 检验 r_6 计算的正确性:

$$I) x_6 = \frac{\overline{PA_6^2}}{2r_6} = 0.160997$$

$$II) AB = d_5 - x_5 + x_6 = 1 + 0.511124$$

$$- 0.160997 = 1.350127$$

III) $D_4 = \frac{AB}{\cos \bar{u}'_5} = 1.35710$, 原来的 $D_4 = 1.35710$, 故说明 r_6 计算正确。

(10) 自右至左进行 6 ~ 4 面的傍轴光三角计算:

为了计算方便把前组倒过来进行傍轴光计算, 起始坐标为各种曲率各自边缘光计算所得的象点。详见图 4.31 所示, 把系统倒过来。

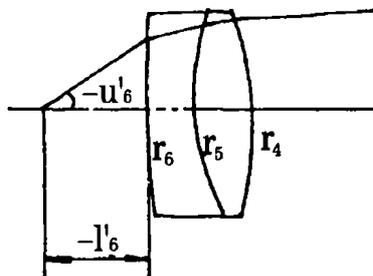


图 4.31

对中组而言: $l'_6 = \bar{l}'_6 = 9.25950$, $lgu'_6 = lgsin \bar{u}'_6 = 9.399590$.

(11) 计算象差:

根据光路计算所得的结果进行象差计算。

$$LA_4 = 24.2668 - 25 = -0.7332,$$

$$lgu_4 = 9.052255, lgsin u_4 = 9.048140,$$

$$osc_4 = \frac{u'}{\sin \bar{u}'} - 1 = \frac{u_4}{\sin \bar{u}_4} - 1 = 0.000952.$$

II) 将三组曲率的象差计算结果列于下表:

c_4	0.03	0.07	0.11
\bar{r}_6	-10.2093	-18.6043	-250.009
LA_4	-2.8179	-0.7332	+0.3244
osc_4	+0.09464	+0.000952	-0.022012

4. 绘制象差曲线

根据前后组各种曲率的球差、彗差绘制球差和彗差曲线, 从而找出消球差、彗差的解。

I) 根据前后组象差的大小确定象差坐标比例(球差与彗差的比例可不同),但前后组的象差比例必须一致,横坐标 c_1 、 c_4 的比例可以不同。

II) 在图上找出三点,再进行内插和外插作出抛物线曲线。

III) 用三角板或直尺在图上找出球差、彗差前后组相抵消的位置。

IV) 从图中得: $c_1 = 0.05235$,
 $c_4 = 0.1155$,

5. 光路三角计算和曲率半径的求得:

I) $c_1 = 0.05235$, $c_2 = c_1 - c_a = 0.05235$
 $- 0.116461 = -0.064111$,

$c_4 = 0.1155$, $c_5 = c_4 - c_c = 0.1155$
 $- 0.217815 = -0.102315$,

$\therefore r = \frac{1}{c}$, 从而得:

$r_1 = 19.1021$, $r_2 = -15.5982$,

$r_4 = 8.6580$, $r_5 = -9.77373$,

选取标准半径有:

$r_1 = 19.099$, $r_2 = -15.596$,

$r_4 = 8.670$, $r_5 = -9.772$

II) 边缘光计算至第2面,用 $d-D$ 法求 r_3 ,继续进行第4~5面计算,用 $d-D$ 法求 r_6 ,再继续进行第6面计算(光路三角计算)。起始坐标为

$l_1 = -170$, $\sin \bar{u}_1 = -0.03125$ 。

III) 求 d_3 :

计算边缘光线得: $l'_3 = 45.3525$, $d_3 = l'_3 - l_4 = 45.3525 - 25 = 20.3525$, 取 $d_3 = 20.4$, 则 $l_4 = 24.9525$, 以此数进行4~6面的计算。以后傍轴光,带光计算中的 d_3 是 20.4mm。

IV) 进行傍光、带光光路计算:

傍光的起始坐标与边光相同,带光的

起始坐标: $l_1 = -170$, $\sin u_1 = -0.03125 \times 0.7071 = -0.0220969$ 。

V) 计算结果如下:

$r_3 = -96.24$, $r_6 = 309$,

$l'_6 = 9.10905$, $\lg u'_6 = 9.388351$,

$\bar{l}'_{6\text{边}} = 9.10865$, $\lg \sin \bar{u}'_{6\text{边}} = 9.387091$,

$\bar{l}'_{6\text{带}} = 9.08882$, $\lg \sin \bar{u}'_{6\text{带}} = 9.237365$,

$L'A = 0.0004$, $\text{osc}' = \frac{u'_6}{\sin u'_6} - 1 = 0.00291$,

$L'A_{\text{带}} = 0.02023$,

6. 象差容限的计算:

I) $L'A_{\text{边容限}} = \frac{4\lambda}{N \sin^2 u'} = \frac{4 \times 5.55 \times 10^{-4}}{1 \times 0.25^2}$
 $= 0.035$,

$L'A_{\text{带容限}} = \frac{6\lambda}{N \sin^2 u'} = \frac{6 \times 5.55 \times 10^{-4}}{1 \times 0.25^2}$
 $= 0.0525$,

$L'A_{\text{色容限}} = \frac{\lambda}{N \sin^2 u'} = \frac{5.55 \times 10^{-4}}{1 \times 0.25^2}$
 $= 0.0087$,

$\sum (d - D) \delta N_{\text{容限}} = 0.00025$,

$\text{osc}'_{\text{容限}} = 0.0025$,

II) 从上面看出 osc' 已经超出容限,但量不大,故要进行象差校正。

7. 计算满足齐焦设计否:

$c = \bar{l}_1 + d_1 + d_2 + d_3 + d_4 + d_5 + \bar{l}'_6 = 170 + 3 + 1.5 + 20.4 + 2.2 + 1 + 9.10865 = 207.20865$, 满足齐焦条件时 $c = 195$, 故必须进行重新设计(增大 \bar{l}_4 即减少 d_3 进行重新计算)。假定不作重新设计的情况下,还要进行的工作有以下几步。

8. 象差校正:

由于球差很小,彗差超出容限也不多,故只作第6面修改。

I) $r_6 = 308.3$, 得 $L'A = 0.00033$,

$$\text{osc}' = 0.00292,$$

$$r_6 = 350.8, \text{ 得 } LA = 0.003, \text{osc}' = 0.00281,$$

上列说明要减小 osc', 必须增大 r₆, 也说明 osc' 的改变量是很小的。

II) 保证数值孔径 0.25 下来修改 r₆:

$$\because n'u' - nu = \frac{\Delta nh}{r}$$

$$r_6 = \frac{\Delta nh}{n'u' - nu}, \because \Delta n = n' - n = 1 -$$

$$1.62747 = -0.62747,$$

$$h = u_6 l_6 = u_5'(l_5' - d_5) = 0.153037 \times 14.5555 = 2.22753,$$

$$\because u_6 = 0.153037, u_6' = 0.25, n' = 1, n = 1.62747。$$

$$r_6 = \frac{-0.62747 \times 2.22753}{0.25 - 1.62747 \times 0.153037} =$$

$$-1493.28, \text{ 取 } r_6 = -1492.8$$

III) r₆ = -1492.8, 得

$$l_6' = 8.91013, \lg u_6' = 9.397940$$

$$\bar{l}_6' = 8.88301, \lg \sin \bar{u}_6' = 9.397144$$

$$LA = 0.02712, \text{osc}' = 0.00183。$$

IV) 考虑工艺性好一些, 取 r₆ = ∞ 得:

$$l_6' = 8.94363, \lg u_6' = 9.396313,$$

$$\bar{l}_6' = 8.92112, \lg \sin \bar{u}_6' = 9.395432,$$

$$LA = 0.02251, \text{osc}' = 0.00203。$$

球差、彗差皆在容限内, 故取 r₆ = ∞ 作为设计结果的一组数据。

9. 完成修改后的带光计算, 并进行 1~6 面的带傍光计算:

带傍光的起始坐标即为带光的超始坐标, 从而得: $\bar{l}_{6\text{带}}' = 8.91356, \lg \sin \bar{u}_{6\text{带}}' = 9.245493, \lg u_{6\text{带}}' = 9.245792,$

$$LA_{\text{带}} = 0.03007, \text{osc}'_{\text{带}} = \frac{u_{6\text{带}}'}{\sin u_{6\text{带}}'} - 1$$

$$= 0.00069。$$

10. 进行色差计算(d - D) 法:

$$\text{结果得 } \sum (d - D)\delta_N = 0.00014878。$$

11. 将以上结果列于下:

$$r_1 = 19.099, r_2 = -15.596,$$

$$r_3 = -96.24, r_6 = 8.670, r_5 = -$$

$$9.772, r_6 = \infty$$

$$d_1 = 3, d_2 = 1.5, d_3 = 20.4,$$

$$d_4 = 2.2, d_5 = 1.0$$

象差:

$$LA = 0.02251, LA_{\text{带}} = 0.03007$$

$$\text{osc}' = 0.00203, \text{osc}'_{\text{带}} = 0.00069$$

$$\sum (d - D)\delta_N = 0.00014878。$$

12. 绘制象差曲线(如图 4.32)

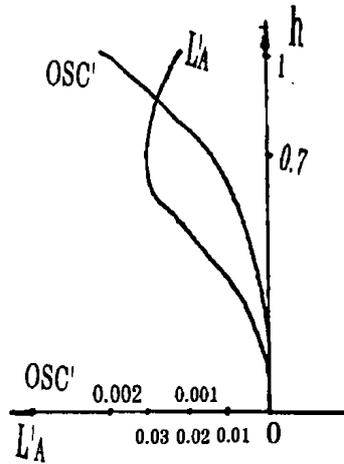


图 4.32

13. 附配合曲线图(如图 4.33)

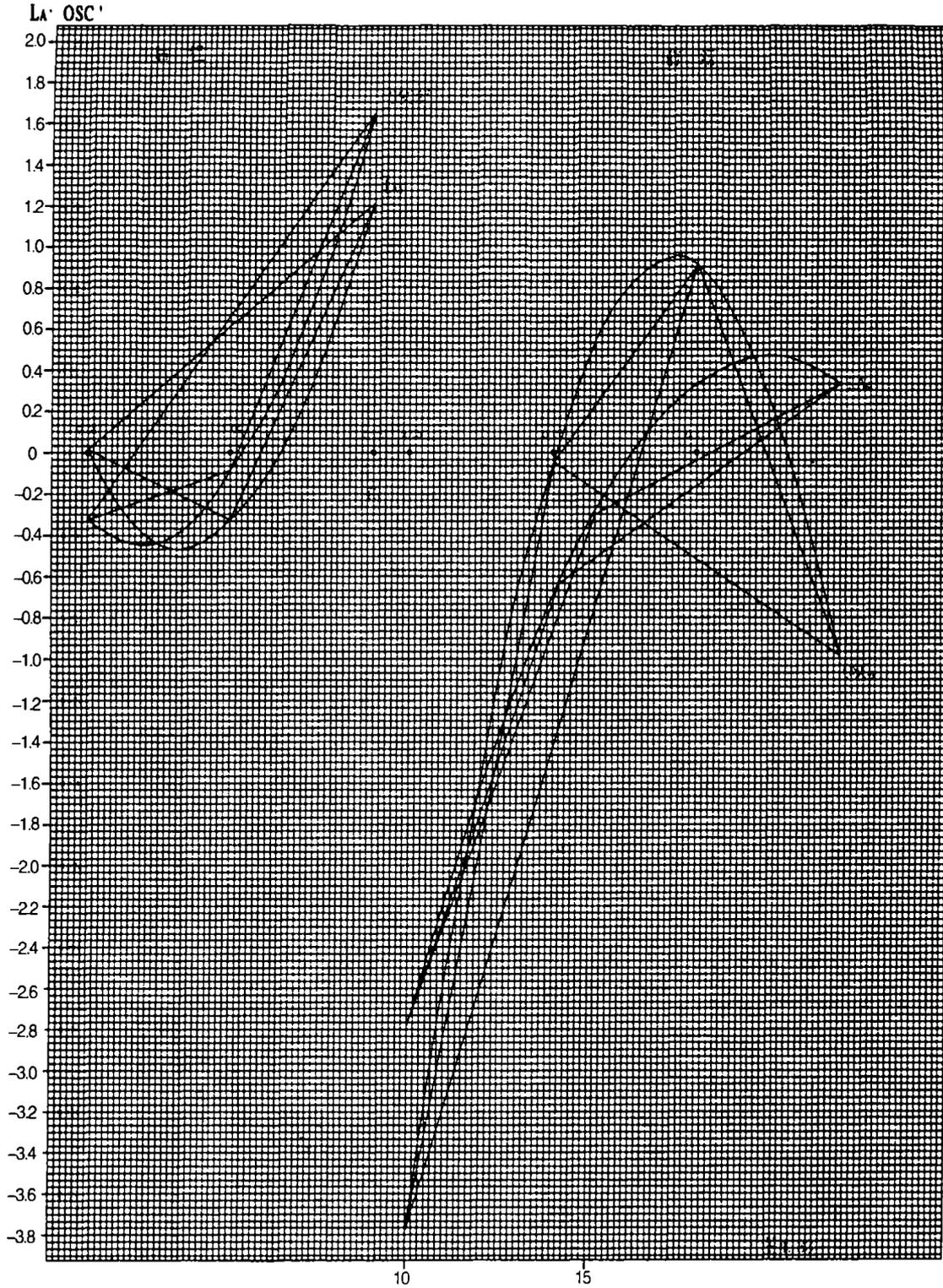


图 4.33

ξ 4.9 远心物镜设计

(一) 概述

仪器中的光学系统在很多场合中用来测量长度。远心光路一般用来解决二个任务：

(1) 量出被测定物体象的长度以求出物体的长度；

(2) 已知物体的长度再根据所量得的物体象的长度，求出到物体的距离（视距测量）。

在光学系统中，入射光瞳位于无穷远，物方空间的主光线平行于光轴，投影中心在无穷远，这样的光路称为物方远心光路，在各种计量仪器上为测量长度、度盘间隔等的读数显微镜，带尺显微镜和显微测微器中应用物方远心光路是有好处的。反之在具有测距装置的光学系统中，则适宜于应用象方远心光路，它用来解决上述的第二个任务。象方远心光路在物镜的物方焦平面上安置一个光阑，因此它成为物镜的入射光瞳，所有通过入射光瞳中心的主光线，在象方空间相应的主光线都平行于光轴，投影中心在无穷远，从而不产生视差引起的测量误差。

(二) 远心物镜设计

以万能工具显微镜一倍物镜为例子，来说明这种系统的设计方法。

由于要考虑轴外象差的校正，所以我们取两组分离的双胶合透镜来完成，如图 4.34 所示，前后两组焦距相同，中间为平行光组成一倍系统；入射光瞳位于无限远处，且使入射光瞳经过前组成象在后组透镜上。我们对象差校正作如下考虑：

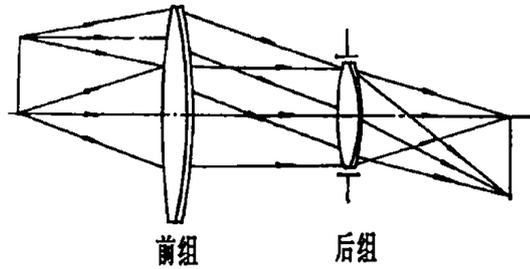


图 4.34 一倍远心物镜光路图

(1) 前后二组分别校正轴上色，则倍率色差自动校正。

(2) 光阑放在后组透镜上，故后组的 S_{III} 、 S_V 与弯曲无关，且 $S_V = 0$ ，故可由后组的弯曲来产生定量的 S_I 、 S_{II} 。

(3) 用前组的弯曲来产生 S_{III} 、 S_V ($S_V = 0$) 与后组的 S_{III} 、 S_V 相消，此时，前组的 S_I 、 S_{II} 便不能变更了，可用后组的弯曲来校正它。

前后组均取规格化条件，具体求解如下：

$$\text{令: } f'_1 = f'_2 = 1, h_1 = 1, h_2 = 1, hp_1 = 1, hp_2 = 0,$$

$$d = 1, l_1 = -1, lp_1 = \infty, \text{ 则 } j = 1$$

各符号的意义如图 4.35 所示：

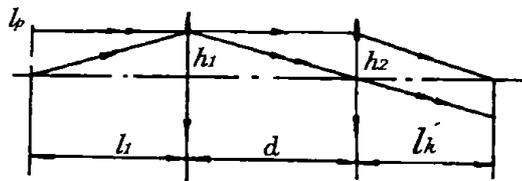


图 4.35 一倍物镜近轴光线量表示

由公式(4.12) 求解 $|P$ 、 $|W$ ：

$$S_{III} = h^2 hp^2 \varphi^3 |P - 2jh hp^2 \varphi^2 |W + j^2 \varphi$$

$$S_V = h hp^3 \varphi^3 |P - 3jh p^2 \varphi^2 |W + j^2 \frac{hp}{h} (3 + \mu) \varphi$$

将后组的已知条件代入上面两式，则可得后组的 $S_{III} = 1$ ， $S_V = 0$

用前组的弯曲来平衡后组的 S_{III} 、 S_V ，

把前组看成是图 4.36 的安排求解时, 则得:

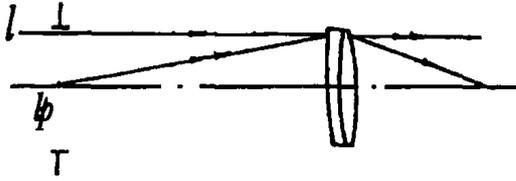


图 4.36 一倍远心物镜前组近轴光线表示
 $|P_1 - 2|W_1 + 1 = 1, |P_1 - 3|W_1 + 3.7 = 0$
 此时式中的 $|P|, |W|$ 即 $|P^\infty|, |W^\infty|$, 解以

上方程式得: $|W| = 1.7, |P| = 1.4,$

由公式(4.31)求得:

$$|P_0| = |P^\infty| - 0.83(|W^\infty| - 0.14)^2 = 1.4 - 0.83(1.7 - 0.14)^2 = -0.6$$

根据 $|P_0|$ 表, 查玻璃组合, 或用选玻璃程序选取玻璃对得:

$$F_4 \quad n_D = 1.6199, \nu = 36.3$$

$$K_9 \quad n_D = 1.5163, \nu = 64.1$$

由公式(4.36)得:

$$\begin{cases} \varphi_a + \varphi_b = \varphi_1 = 1 \\ \frac{\varphi_a}{\nu_a} + \frac{\varphi_b}{\nu_b} = 0 \end{cases}$$

$$\begin{cases} \varphi_a + \varphi_b = 1 \\ \frac{\varphi_a}{36.3} + \frac{\varphi_b}{64.1} = 0 \end{cases}$$

从上面的方程式得: $\varphi_b = 2.306, \varphi_a = -1.306$

$|Q_0| = 5.62$ (可查表得, 也可计算得到)

$$|Q| = |Q_0| - \frac{1}{1.7}(|W^\infty| - 0.14) = 5.62 -$$

$$\frac{1}{1.7}(1.7 - 0.14) = 4.70.$$

求出前组的曲率半径:

$$c_2 = |Q| + \varphi_a = 4.70 - 1.306 = 3.394$$

$$c_1 = c_2 + \frac{\varphi_a}{n_a - 1} = 3.394 + \frac{-1.306}{1.6199 - 1} = 3.394 - 2.1068 = 1.287$$

$$c_3 = c_2 - \frac{\varphi_b}{n_b - 1} = 3.394 - \frac{2.306}{1.5163 - 1} = 3.394 - 4.466 = -1.072$$

$$\text{即: } r_1 = 0.777$$

$$r_2 = 0.295$$

$$r_3 = -0.933$$

由公式(4.12) $S_I = h^4 \varphi^3 |P|, S_{II} = h^3 h p \varphi^3 |P - j h^2 \varphi^2 |W|$, 求得前组的 $\bar{S}_I = |P_1| = 1.4,$
 $\bar{S}_{II} = |P_1| - |W_1| = 1.4 - 1.7 = -0.3$ 。后组的 $S_I = |P_2|, S_{II} = |W_2|$, 令后组平衡前组的 S_I, S_{II} , 则要求:

$$|P_2| = -1.4, |W_2| = 0.3,$$

求出后组的 $|P_0| = |P^\infty| - 0.83(|W^\infty| - 0.14)^2 = 1.4 - 0.83(0.3 - 0.14)^2 = 1.421$ (后组的 $|P|$ 即为 $|P^\infty|, |W|$ 即为 $|W^\infty|$, 因为物在前组的焦点上, 入射到后组的是平行光)。

根据 $|P_0|$ 表查得, 或根据 $|P_0|$ 值用选玻璃程序计算得到:

$$BaK_1 \quad n_D = 1.5302, \nu = 60.5,$$

$$F_4 \quad n_D = 1.6199, \nu = 36.5,$$

$$|Q_0| = -5.69.$$

$$|Q| = |Q_0| - \frac{1}{1.7}(|W^\infty| - 0.14) = -5.69$$

$$- \frac{1}{1.7}(0.3 - 0.14) = -5.784, \text{ 又因为后组}$$

双胶透镜有公式:

$$\varphi_a + \varphi_b = 1, \frac{\varphi_a}{\nu_a} + \frac{\varphi_b}{\nu_b} = 0,$$

$$\begin{cases} \varphi_a + \varphi_b = 1 \\ \frac{\varphi_a}{60.5} + \frac{\varphi_b}{36.5} = 0 \end{cases}$$

解得 $\varphi_a = 2.52, \varphi_b = -1.52$ 。

求出后组的曲率半径:

$$c_2 = |Q| + \varphi_a = -5.784 + 2.52 = -3.264$$

$$c_1 = c_2 + \frac{\varphi_a}{n_a - 1} = -3.264 + \frac{-1.52}{1.6199 - 1} = -0.812$$

$$\frac{2.52}{1.5302 - 1} = 1.489$$

$$c_3 = c_2 - \frac{\varphi_b}{n_b - 1} = -3.264 -$$

即有:

$$r_1 = 0.672, r_2 = -0.306, r_3 = -1.232,$$

最后得出前后两组结构参数如下:

$r_1 = +0.933$	$n_D = 1.5163$	$\nu = 64.1$	K9
$r_2 = -0.295$	$n_D = 1.6199$	$\nu = 36.5$	F4
$r_3 = -0.777$			
$d = 1$			
$r_4 = +0.672$	$n_D = 1.5302$	$\nu = 60.5$	BaK ₁
$r_5 = -0.306$	$n_D = 1.6199$	$\nu = 36.5$	F4
$r_6 = -1.232$			

这个系统至此,解方程的步骤全部完成了,接下来是把前后组规化为 $f'_1 = f'_2 = 1$ 的系统,化为实际焦距的系统即可。

ξ 4.10 照相物镜的设计

ξ 4.10.1 概述

照相物镜的作用是把空间物体投影成像在感光底片上,显然也包括把平面物体成像在感光底片上。底片上的感光层经过光的作用,获得潜象。它经过化学处理以后即显出了影象,其暗黑的部分对应于物体上亮的部分,而透明的部分则对应于物体上暗的部分,因此称为负象或负片。用另一感光片,例如照相纸与负片相接触,再经一次光作用和与上相同的化学处理以后,即可获得正象(即黑白与物体完全对应的影象)。用接触印象法获得正象,不需任何光学系统,正象的大小与负象完全一致。有时,为了要从负象得到放大或缩小的正象,需用二次照相的方法。用特殊的工艺方法可以把象做到金属板上,就是用照相化学处理方法在金属板上现出凹凸象。这样就可印刷事业上用来印得所摄象。

由此可见,照相具有重大意义,它不仅在日常生活和宣传教育事业中为广大的业余摄影者和职业摄影者所采用,而且在军事、科学、技术领域中也存在着日益广泛的应用。例如冶金学中的显微摄影;印刷出版事业中的复照技术;航空测量中的空中摄影;各种科学研究中的记录摄影;军事侦察上的高空摄影和地面远距摄影等。

照相物镜的光学特性,主要由三个因素表征:即照相物镜的焦距 f 、相对孔径 $\frac{D}{f}$ (入射光瞳直径与焦距之比) 和视场角 2ω 。

物镜的焦距决定了象的大小,用不同焦距物镜,在同一距离对某一物体所摄得的象,焦距大的其象也大。这可以从几何学中的公式:

$$y' = f' \tan \omega,$$

式中 y' 是象的大小, f' 是物镜焦距, ω 是视场角。

照相物镜没有专门的视场光栏,视场的大小是被镜框所限制的。焦距一定时,底片尺寸愈大,物镜的视场角也愈大。在一般

的照相机或电影摄影机中,根据拍摄的需要,常配置一套不同焦距的镜头,但在同一架摄影机中,底片的大小是一定的,也即象大小 y' 是一定的,因此可以看出,具有较长焦距的物镜,只能有较小的视场,而短焦距的物镜,则须是广角的。

从三级象差的公式可知,物镜的象差,在相对孔径和视场角一定时,与焦距(或象的大小)成正比,因此长焦距的物镜具有比短焦距为大的象差。但是,底片上的象的质量,不论是物镜的焦距长短怎样,都需要有一定的限度,这一限度可具体表示为允许代替象点的弥散园直径大小。如果是只用肉眼观察而不需放大的照片,弥散园的允许直径可到0.05 ~ 0.1mm,由此可以看出长焦距物镜的象差要设计得与短焦距的象差一样,是比较困难。

从另一方面看,由相同象差所产生的弥散园直径与相对孔径成正比。设入射光瞳直径为 D 的物镜的球差为 LA (如图4.37),则当焦距为 f' 时,在理想象面上的弥散园直径为:

$$2\Delta Y' = LA \left(\frac{D}{f'} \right)$$

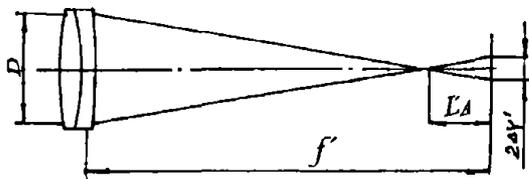


图 4.37

因此,一个长焦距物镜,欲控制其象面上的弥散园到一定的允许值,只能具有比较小的相对孔径。

相对孔径小,不仅可使因象差引起的弥散园小一些,而且容易在设计时控制象差于预定的数值。因此,焦距和视场相同

时,大相对孔径的物镜设计要困难得多。它只能在比小相对孔径物镜具有更为复杂的结构时才能达到。

设计照相物镜,要同时达到大相对孔径与大视场的要求,将遭到极大的困难,因此,常常根据物镜的用途,满足其中的一种要求,强光物镜和超强光物镜的视场都较普通物镜为小,而广角物镜,则只能有较小的相对孔径。现代中等复杂程度的照相物镜,随着相对孔径的减小,视场角增加的情况如下表(焦距 $f' = 100$)。

相对孔径 $\frac{D}{f'}$	1:1	1:2	1:3	1:4.5	1:6	1:8
视场 2ω	20°	50°	60° ~ 65°	75°	90°	120°

随着设计水平的提高,可以在同样相对孔径下提高视场角几度,反之亦然。一般讲,上表所列是现代中等复杂程度的照相物镜功能的限制情况,超过这个限度时,势必使象质变坏或结构复杂化。

综上所述,照相物镜的三个光学特性量是彼此联系又彼此制约的,这三个特性量决定了物镜光学系统的作用,它不可能同时都达到很高的性能要求,只能根据不同的使用要求进行有重点的选择,而确定其合理的特性量。由于三个特性量或多或少地限制了得到完善光学系统的可能性。因此,一般讲,照相物镜的象差,要比其它的光学系统为大。

苏联凸·c伏洛索夫研究了若干优良的物镜后,曾得出了一个经验公式来表示三个特性之间的关系,有:

$$\frac{D}{f'} \tan \omega \sqrt{\frac{f'}{100}} = c_m$$

式中 $\frac{D}{f}$ 为物镜的相对孔径; 2ω 为物镜的视场角; f 为物镜焦距。对于多数的物镜来说, c_m 差不多是一个常数, 约为 0.24 左右。这就表明了最优良的物镜它的三个光学特性之间是相互矛盾的, 提高这个特性, 就势必降低其它特性。为了保证一定的象质, 相对孔径、焦距和视场不能同时增加。一般焦距等于 100mm, 物镜的最大相对孔径达到 $\frac{1}{3.5} \sim \frac{1}{2}$, 而 1000mm 以上的长焦距物镜的最大相对孔径只达到 $\frac{1}{8} \sim \frac{1}{12}$, 前者为中等视场, 后者为小视场; 至于红外和微光夜视物镜, 相对孔径达到 $\frac{1}{1.4} \sim \frac{1}{0.8}$, 而焦距和视场都很小。

对于照相物镜, 总的说来, 焦距、视场和相对孔径都比较大, 从而必须同时校正各种纵向象差(球差、象散、象面弯曲和纵向色差)和横向象差(彗差、畸变和横向色差)。此外, 还需要校正区域球差和区域象散。对专供航空摄影测量用的系统, 为了减少测量误差, 畸变应当很小。至于制版物镜, 如果要求对原画稿不失真, 畸变一般不应当超过万分之一。另外, 当要求颜色不失真时, 需要复消色差。鉴于要求校正的象差多, 照相物镜的结构是比较复杂的。

现代所用的照相物镜按照用途的不同, 可以分为以下几类:

(1) 普通物镜

这类物镜的外形尺寸不大, 结构简单, 除了用作普通人象和风景照相以外, 还可以配备在微型相机上。

(2) 航空照相物镜

航空照相物镜一般分为两种: 一种用

于航空摄影测量; 另一种用于军事侦察和空中探测, 高空气球和人造卫星或宇宙飞船上的照相物镜也属于后一种。

(3) 电影摄影物镜和电视摄像物镜

电影摄影物镜按照胶卷的规格不同分为 16mm、35mm、8mm 和 8.75mm 等。电视摄像物镜根据其 CCD 靶面尺寸而异有

$1\frac{1}{4}$ "、1"、 $\frac{1}{2}$ "、 $\frac{1}{3}$ " 和 $\frac{1}{4}$ " 等。

(4) 投影和放映物镜

投影物镜一般能够把被照明的画片或工件成象于屏幕上。放映物镜从原理上讲也和投影物镜一样, 不过它是把连续的电影胶卷上的图象放映在银幕上。

(5) 制版物镜

制版物镜要能忠实地反映原来画稿的面貌。要求同一制版物镜可以把原稿放大, 也可以缩小, 但象质不得因此而变坏。微缩物镜也是制版物镜的一种, 它把线路图缩小以后通过照相腐蚀变成实际电路, 在制作超小型半导体收音机和电子计算机中都用到它。

(6) 红外和微光夜视物镜

这种物镜多为军事目的服务。红外物镜借助自身的红外发生器或热辐射物体的红外光成象, 然后经过红外管将不可见红外光象变成可见象供人眼观察。微光夜视物镜是借助夜间外界微弱的光照, 例如月光或星光成象的。它的象的照度要经过象增器(变象管)的增强, 方可以为人眼所察觉。

(7) 特种用途的物镜

为了某种特殊的照相目的, 例如高速摄影, 需要对瞬时爆炸物拍摄照片, 以便了解爆炸过程, 一般在物镜最后一面和底片

之间安装高速旋转反射镜。要安装反射镜,因此要求物镜具有长的后工作距离。又如海底摄影,为了科学研究的需要拍摄海底的情况,这种物镜也就要特殊考虑进行设计。

照相物镜按照相对孔径的大小可以分为:

(1) 弱光镜头,它仅有很小的相对孔径,约从 $1/18$ 到 $1/9$ 。

(2) 普通镜头,其相对孔径从 $1/9 \sim 1/6.8$ 。

(3) 强光镜头,它具有较大的相对孔径, $1/6.8 \sim 1/3.5$ 。

(4) 超强光镜头,它具有特别大的相对孔径,从 $1/3.5 \sim 1/1.4$,甚至到 $1/0.8$ 。

照相物镜的视场角,决定能在底片上成象的空间大小。按照视场角的大小,照相物镜可分为:

(1) 小视场物镜,视场角在 $20^\circ \sim 25^\circ$ 以下。

(2) 普通物镜,视场角在 $25^\circ \sim 55^\circ$ 之间。

(3) 广角物镜,视场角在 $70^\circ \sim 100^\circ$ 之间。

(4) 特广角物镜,视场角在 100° 以上。

电影摄影物镜和一般物镜不同,由于

要考虑到人物、场面、背景和艺术性诸方面。一个电影摄影师为了拍摄大场面的镜头,需要大视场,短焦距物镜;而当他要拍摄特写镜头时,就需要长焦距,小视场物镜。考虑到电影的特殊性,电影摄影物镜一般按照焦距分为以下三个系列:

(1) 短焦距: $f18$ 、 $f20$ 、 $f25$ 、 $f28$ 、 $f32$ 。

(2) 中焦距: $f35$ 、 $f40$ 、 $f50$ 、 $f75$ 、 $f100$ 、 $f150$ 。

(3) 长焦距: $f300$ 、 $f600$ 、 $f800$ 、 $f1000$ 、 $f1500$ 、 $f2000$ 。

短焦距 $f18\text{mm}$ 物镜的视场可以达到 74° ,而长焦距 $f2000\text{mm}$ 物镜的视场不到 1° 。这样的系列,从焦距和视场的角度出发,基本上能够满足拍摄电影的要求。但是,从使用的角度出发,还有许多不方便之处。正如上面已经说过的,一个摄影师随着所拍摄的场面和人物的变化,时而需要长焦距物镜,时而需要短焦距物镜。但是要做到这一点,客观上是不允许的,这个问题直到变焦距物镜的普遍应用,才基本上得到了解决。有关变焦距物镜的设计问题,我们在后面还要专门详细地讨论。

(未完待续)