

## 光学系统设计技巧(续)

郑保康

(云南北方光电仪器有限公司 昆明 650114)

(续 2005 年 No. 4)

### § 4.11.2 变焦距物镜设计步骤

变焦距物镜的设计与其它的光学系统设计的步骤是相近的,只是具体考虑问题的重点不一样。变焦距物镜设计步骤一般为:确定参数和型式选择;分配焦距及间隔;根据初级象差理论,求解内部结构参数(包括求解 $P^{\circ}$ 、 $W^{\circ}$ 方程和 $P^{\circ}$ 、 $W^{\circ}$ 分配,选玻璃求径);平衡象差;制定公差,确定口径。

#### 1、确定参数和型式选择

我们这里所指的确定参数,指的是变焦距物镜的焦距、相对孔径、视场、变倍比的确定。一般来说,这些参数是任务要求规定的,并不一定要我们来确定,如要设计用于35mm电影摄影机的变焦距物镜,要求焦距为25~250mm,相对孔径为1/3.5。这样所有参数,焦距、相对孔径、视场、变倍比都定下来了。但有时候需要我们的设计人员考虑,例如:要求离目标300米远处使用电视变焦距物镜,电视摄象管的接收面积尺寸是9×12平方毫米,在特写镜头时希望能显出半身象,变倍比为6倍。因为特写镜头是用最长焦距的,所以这一问题的主要要求是确定最长焦距是多少。图4.101为某一成象关系的示意图,2y为物高,2y'为象高,L为物距,f'为焦距,有近似关系

式:

$$\frac{f'}{L} = \frac{y'}{y}$$

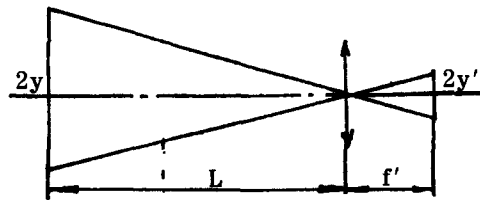


图 4.101

现在2y即为人的半身高约0.8米,2y'为接收面的尺寸,9×12是9的这一方向成半身高的象。同时不能将象面完全充满,设尺寸9mm的范围用8mm来成象,此时即可求出焦距:

$$\begin{aligned} \text{长焦: } f' &= 300 \times 1000 \times \frac{8}{0.8 \times 1000} \\ &= 3000\text{mm}, \end{aligned}$$

$$\text{短焦: } f' = \frac{3000}{6} = 500\text{mm}.$$

这样就定出了变焦距物镜的焦距范围是500~3000mm。这是长焦距的变焦距物镜,相对孔径不能大,因为口径太大不容易制造,同时重量也太重。考虑到电视物镜而且经常在室外使用,相对孔径取1:20,这时口径为150mm,比较适中。由于成象接收面是定值,所以视场也就定了,是一个小视场的变焦距物镜。

由于总焦距较大,变倍比也中等,不算太小,用四透镜系统光学补偿法时,象面位移仍有较大的数量。若用复杂的光学补偿法降低象面位移,要采用多组透镜,结构庞大,不适合。所以不取光学补偿而用机械补偿法,机械补偿法,正组补偿细长,负组补偿短粗。负组补偿的粗是由于视场角大引起的,现在视场较小,这个矛盾不突出,所以选用机械补偿的负组补偿是比较适合的。这只是初步考虑,能否实现,还需要经过下面几步计算考验。

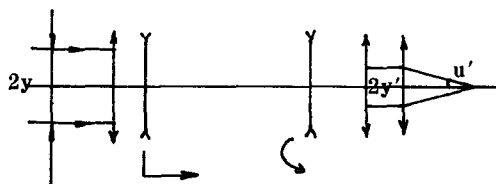


图 4.102

## 2、分配焦距及间隔

在分配焦距之前,我们首先看一下变焦距物镜的光束情况:变焦距物镜从结构上讲,一般可以分为两大部分,前一部分是变倍系统,后一部分是固定系统。如图 4.102 中的 1、2、3、4 是变倍系统,5 是固定系统。变倍系统由前固定组 1、变倍组 2、补偿组 3 和后固定组 4 组成。全口径的  $2y$  平行光束入射前固定组 1,经过变倍组 2,补偿组 3 后,在后固定组 4 以全口径  $2y'$  的平行光射出,变倍系统可以看成为一个望远系统,孔径光阑置于 4、5 之间,在变倍过程中,入射光束的高度  $y$  在改变,保持出射光束的高度  $y'$  不变,即经过固定组 5 以后出射的口径  $u'$  不变,这样入射高度  $y$  随着整个系统的焦距改变而成比例的改变,使各个不同焦距时,具有相同的相对口径。当然孔径光阑也可以置于 3、4 之间,因为 4、5 是

固定不变的,这样保证进入 4、5 的光束口径不变时,即可保证经 4、5 后的光束口径角  $u'$  不变,也就保证了相对口径不变。前面叙述的一大段,总起来说:口径光阑置于 3、4 之间或 4、5 之间,都可以达到系统在变焦过程中相对口径不变。

经过后固定组 4 出来的光束可以是平行光,可以是会聚光,也可以是发散光。负组补偿法的机械补偿经过补偿组 3 后出来的是发散光束,经过固定组 4 以后,当 4 的光焦度适中时是平行光束,光焦度较小时是发散光束,较大时是会聚光束,如图 4.103 所示。由于需要保持最后的口径角  $u'$  以达到设计任务的要求,因此当出来的是发散光束时,图 4.103 中的  $h$  最大,后工作距离  $l'$  最长,在会聚时  $l'$  最短,而后固定组 4 的偏角负担最大,这样后固定组 4 焦距选择便要考虑:

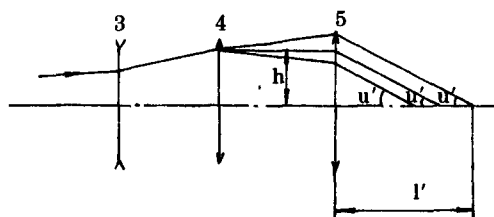


图 4.103

① 工作距离的要求;② 固定组 5 允许的口径;后固定组 4 允许的担负偏角(主要从高级象差不大的角度考虑)。不论经过 4 出来的光束是平行、发散还是会聚,总可找到某一透镜或某一面(在 4 或 5 中)出来是平行光束或接近平行光束,故把变倍系统看成一个望远系统来考虑成像情况还是可以的。固定组 5 可以看成是一个光阑在外面的照相物镜,它的设计可以单独考虑,也可以与 4 组元一起考虑。

在采用物象交换原则时,变倍组移动到最长和最短焦位置时,象面保持不动,变倍组处于  $-1\times$  位置时,象面位移最大,需用补偿组补偿象面位移,在补偿偏移时,补偿组对总焦距也有影响。但是在长焦、短焦位置时,补偿组对焦距变化倍率的影响是一样的。这样保持了最大变倍比不变,就是说,  $8\times$  还是  $8\times$ ,  $10\times$  还是  $10\times$ 。在采用非物象变换原则时,则要考虑补偿组对焦距变化的影响。

下面我们具体讨论焦距和间隔的分配,使各组焦距分配后达到变化倍率的要求。变倍的要求是由变倍组移动达到,首先决定变倍组移动距离,方能满足倍率的要求(物象交换原则的倍率全决定于变倍组,非物象交换原则时,补偿组也影响倍率),我们以负组补偿,物象交换原则的  $8\times$  变焦距物镜为例来说明这一分配工作( $f = 12.5 \sim 100$ )。

我们取变倍组的焦距规范化值  $f'_2 = -1$ , 焦距变化为:  $\frac{1}{m_2} \sim m_2$ , 总变化倍率为  $m_2^2$ ,  $8\times$  短焦时的倍率为  $\frac{1}{m_2} = -\frac{1}{\sqrt{m_2^2}} = -\frac{1}{\sqrt{8}} = -0.353$  (物象在透镜组两边故取负号), 长焦时的倍率为:  $m_2 = -\sqrt{m_2^2} = -\sqrt{8} = -2.8284$ , 由公式  $\frac{1}{l'_2} - \frac{1}{l_2} = \frac{1}{f_2}$  可得:

短焦时:

$$\frac{m_2}{l_2} - \frac{1}{l_2} = \frac{1}{f_2} \quad (\because \frac{l'_2}{l_2} = m_{2短} = \frac{1}{m_2}, \therefore l'_2 = \frac{l_2}{m_2})$$

$$l_2 = (m_2 - 1)f_2 = (-2.82843 -$$

$$1)(-1) = 3.82843,$$

$$l'_2 = \frac{l_2}{m_2} = \frac{3.82843}{-2.82843} = -1.35355.$$

长焦时:

$$l'_2 = m_2 l_2, \quad \frac{1}{m_2 l_2} - \frac{1}{l_2} = \frac{1}{f_2}, \quad \frac{1 - m_2}{m_2 l_2} = \frac{1}{f_2},$$

$$l_2 = \frac{1 - m_2}{m_2} f_2 = 1.35355,$$

$$l'_2 = m_2 l_2 = -3.82843$$

变倍组的导程(从最短焦移到最长焦的移動量):

$$q = l_{2短} - l_{2长} = 3.82843 - 1.35355 = 2.47487,$$

由图 4.104 可以看出,变倍组的物点就是前固定组的象点,前固定组是担负平行光的入射,在最短焦时,变倍组与前固定组靠得最近,在计算时要考虑它们的间隔以免透镜碰撞。我们取  $d_{12短} = 0.5$ , 则前固定组焦距  $f'_1 = d_{12短} + l_{2短} = 4.32843$ ,  $d_{12长} = 0.5 + q = 2.97487$ 。

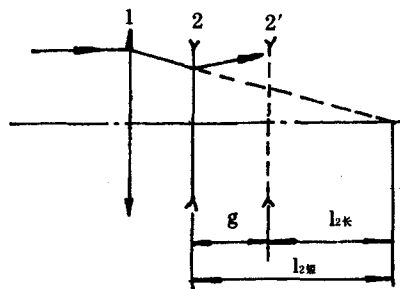


图 4.104

补偿组的焦距  $f_3$  有较大的选择余地,但也有一定的限制,过长则要补偿象面位移的补偿量太大,若过短,则补偿组负担的相对孔径太大,还是要选择适中,我们取  $f_3 = -3$ 。

为了不使变倍组与补偿组相碰,应留一定间隔,我们取长焦时间隔  $d_{23长} = 0.4$  (初看起来最长焦易碰,其实在次长焦时最易碰)。

$d_{23短} = d_{23长} + q = 2.87487$  (因为物象交换原则,补偿组的位置在长短焦距时是一样的)。

短焦时补偿组的物距(见图 4.105):

$$l_{3短} = l'_{2短} - d_{23短} = -1.35355 - 2.87487 = -4.22842,$$

$$\therefore \frac{1}{l'_3} - \frac{1}{l_3} = \frac{1}{f_3}, \text{求得 } l'_3 = -1.75492$$

取补偿组与后固定组 4 的间隔为  $d_{34} = 0.4$ , 则后固定组 4 的物距为:

$$l_4 = l'_3 - d_{34} = -1.75492 - 0.4 = -2.15492.$$

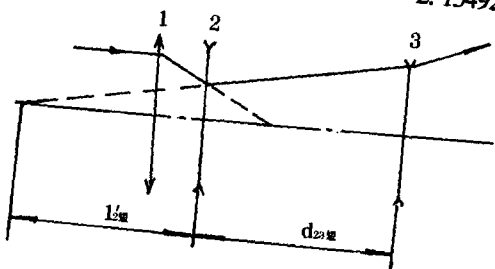


图 4.105

求  $f_4$ : 我们希望后固定组 4 出射的光束为平行光, 故后固定组 4 的焦距  $f_4 = -l_4 = 2.15492$ 。

求  $f_5$ : 后面再配一后固定组 5, 使固定组 4 出来的平行光束经 5 后成象于给定的位置, 达到一定的相对孔径。

上面的叙述中可知, 1、4、5 组元不影响变焦倍率, 只影响总焦距的大小, 用物象交换原则时, 补偿组 3 也不影响变焦倍率。

假如后固定组 4 与 5 合起来作为一组考虑, 则也可以求解:

$$\text{取 } d_{34长} = d_{34短} = 0.4,$$

$$l_4 = l'_{3长} - d_{34长} = l'_{3短} - d_{34短} =$$

$$-2.15492,$$

取后固定组的倍率  $m_4$ , 在负组补偿情况下  $m_4$  是应该取负值, 不然整个系统焦距就不可能是正值了。当  $|m_4|$  取得大时, 整个物镜的尺寸可以小, 但是各组透镜的焦距短, 象差难校正, 我们取  $m_4 = -0.8$ 。

$$\therefore l'_4 = m_4 l_4 = -0.8 \times (-2.15492) = 1.723936,$$

$$\therefore \frac{1}{f_4} = \frac{1}{l'_4} - \frac{1}{l_4} = \frac{1}{1.723936} + \frac{1}{2.15492}$$

$$\therefore f_4 = 0.95$$

到这里我们已经确定出各透镜组焦距和它们之间的间隔, 下面还要计算其它焦距位置透镜组的间隔。以变倍组处于  $-1\times$  位置时间隔的计算为例加以说明。

$m_2 = -1\times$  位置的间隔计算:

$$\therefore \frac{1}{l'_2} - \frac{1}{l_2} = \frac{1}{f_2}, l'_2 = l_2 m_2,$$

$$l_2 = \frac{1 - m_2 f_2}{m_2}$$

$$l_2 = \frac{1 - (-1)(-1)}{-1}(-1) = 2, l'_2 = 2 \times (-1) = -2$$

$$\therefore f_1 = 4.32843, \therefore d_{12(-1\times)} = f_1 - l_2 = 4.32843 - 2 = 2.32843$$

在最短和最长焦距位置的计算中可求出透镜组 1 到透镜组 4 的总长。

$$L = d_{12} + d_{23} + d_{34} = 3.77487,$$

在其它焦距位置  $d_{12}$ 、 $d_{23}$ 、 $d_{34}$  是改变的, 但是透镜组 1 和透镜组 4 是固定不动的, 所以  $L$  是不变的。故  $-1\times$  位置的  $(d_{23} + d_{34})_{-1\times}$

$$= 3.77487 - 2.32843 = 1.44644, \text{此时的}$$

$$l_3 = l'_2 - d_{23} = -2 - d_{23}$$

$$l'_3 = l_4 + d_{34} = -2.15492 + 1.44644 -$$

$$d_{23} = -0.70847 - d_{23}$$

$$\text{又因 } \frac{1}{l'_3} - \frac{1}{l_3} = \frac{1}{f_3}, \text{ 即 } \frac{1}{-0.70847 - d_{23}} - \frac{1}{-2 - d_{23}} = -\frac{1}{3}$$

$$\text{解得: } d_{23} = 0.71738, d_{34} = 0.72906,$$

补偿组3从最短焦位置(或最长焦距)到 $-1\times$ 位置补偿组的移动量为:

$$\Delta = d_{34-1\times} - d_{34\text{短}} = 0.72906 - 0.4 = 0.32906$$

这就说明当变倍组2移到 $-1\times$ 位置时,补偿组3前移0.32906后可保持进入后固定组4的物距保持(-2.15492)不变,因而经4后出来,进入透镜组5的光线仍然是平行光。

### 3、求 $h, h_p, lu$

求解  $h, h_p, lu$  的目的是为了下一步求解  $IP^\infty, IW^\infty$  作准备工作,一般我们要对五个焦距位置校正象差,所以要求出五个焦距位置的各透镜组的  $h, h_p, lu$ 。

因为  $A$ ——相对孔径倒数,是已知的,  $f'$ ——各位置时系统的焦距值(如:短焦、次短、中焦、次长、长焦五个焦距)

$$A = \frac{1}{D/f'}, A = \frac{1}{2h_1/f'}, h_1 = \frac{f'}{2A}$$

$$\therefore \frac{h_1}{l'_1} - \frac{h_1}{l_1} = \frac{h_1}{f'_1} = u'_1 - u_1 \quad \text{设 } u'_1 -$$

$$u_1 = \Delta u_1$$

$h_1, f'_1, u_1$  均为已知,可求出  $u'_1$ 。

又因:  $h_2 = h_1 - d_{12}u_2$  ( $\because u'_1 = u_2$ )

$$\Delta u_2 = u_3 - u_2 = h_2\varphi_2$$

这样同样可以推出:

$$h_3 = h_2 - d_{23}u_3$$

$$\Delta u_3 = u_4 - u_3 = h_3\varphi_3$$

按此即可求出  $h_1, h_2, h_3, \dots$

$$u_1, u_2, u_3, \dots$$

再将求得的每透镜组  $u$  值进行归化,即  $lu$

$$= \frac{u}{h\varphi}$$

求  $h\varphi$ , 就是求主光线在每透镜组上的高度,入瞳位置不知道,不能从前面算起,但是光阑位置是可以预先确定的,是放在4,5之间,我们先假定放在第4透镜组上。这样  $hp_4 = 0, d_{34}$  已知,知道  $up_4$  后可计算出  $hp_3$ ,我们先假定  $up_4 = 1$ ,这样可以求出  $hp_3$ , ( $\because hp_3 = d_{34}up_4$ ) 同样可以求出  $hp_2, hp_1$ , 还可以求出  $up'_1, up_1$  而  $up_1$  是变焦距物镜的物方视场半角  $\omega$ , 这是已知的数值,如要求的视场  $30^\circ, up_1 = \tan 30^\circ = 0.577$ , 这样把求出的  $hp$  乘一个系数:

$$\frac{up_1}{up_1\text{算出}} = \frac{0.577}{up_1\text{算出}} \quad \text{即可得到实际需要}$$

的  $hp$ 。

若4,5合为一组(即后固定组)考虑,则当光阑在后固定组上时,可以根据象面上画幅大小和  $l'_4$  求出  $up'_4$  且  $up'_4 = up_4$  (因为光阑在透镜组4上),然后即可求出  $hp_3, hp_2, hp_1$ 。

### 4、求解 $IP^\infty, IW^\infty$

前面已经求出了满足高斯光学的外部结构参数,现在接下去求出满足初级象差的内部结构参数如半径、折射率等,我们利用  $IP^\infty, IW^\infty$  做中间联系者,它一方面与初级象差有关,另一方面又与半径、折射率有关。

我们现在求满足初级象差的  $IP^\infty, IW^\infty$ :

$$S_I = \sum h^4 \varphi^3 |P = h_1^4 \varphi_1^3 |P_1 + h_2^4 \varphi_2^3 |P_2 + \dots$$

$$S_{II} = \sum (h^3 h_p \varphi^3 |P - j h^2 \varphi^2 |W) =$$

$$= h_1^3 h_{p1} \varphi_1^3 |P_1 - j h_1^2 \varphi_1^2 |W_1 + h_2^3 h_{p2} \varphi_2^3 |P_2 - j h_2^2 \varphi_2^2 |W_2 + \dots$$

$$S_{\text{III}} = \sum (h^2 h_p^2 \varphi^3 |P - 2j h h_p \varphi^2 |W + j^2 \varphi) = h_1^2 h_{p1}^2 \varphi_1^3 |P_1 - 2j h_1 h_{p1} \varphi_1^2 |W_1 + j^2 \varphi_1 + h_2^2 h_{p2}^2 \varphi_2^3 |P_2 - 2j h_2 h_{p2} \varphi_2^2 |W_2 + j^2 \varphi_2 + \dots$$

$$S_V = \sum [h h_p^3 \varphi^3 |P - 3j h_p^2 \varphi^2 |W + j^2 \frac{h p}{h} (3 + \mu) \varphi] = h_1 h_{p1}^3 \varphi_1^3 |P_1 - 3j h_{p1}^2 \varphi_1^2 |W_1$$

$$+ j^2 \frac{h_{p1}}{h_1} (3 + \mu) \varphi_1 + h_2 h_{p2}^3 \varphi_2^3 |P_2 -$$

$$3j h_{p2}^2 \varphi_2^2 |W_2 + j^2 \frac{h_{p2}}{h_2} (3 + \mu) \varphi_2 + \dots$$

式中 $|P$ 、 $|W$ 为规化时的(即 $h = 1, f' = 1$ 时的)

$$p = n i (i' - u) (i - i'), W = - (i' - u) (i - i')$$

$j$ 是拉氏不变量,  $j = n u \eta = n' u' \eta'$

$$\mu = \frac{1}{n} = 0.6 \sim 0.7, \varphi = \frac{1}{f'}$$

$\varphi$ 是透镜组的光焦度。

每个透镜组有一个 $|P^\infty$ ,有一个 $|W^\infty$ ,假如用1,2,3,4四组透镜组于三个焦距位置(短焦、中焦、长焦)在一起求解,则共有 $|P^\infty$ 、 $|W^\infty$ 8个未知数,而有12个方程式,方程数多于未知数,求的解是近似的最佳解,可以用数学上的最小二乘法解。

把求得的 $|P$ 、 $|W$ 化成 $|P^\infty$ 、 $|W^\infty$ :

$$|P = |P^\infty + |u(4 |W^\infty - 1) + |u^2(3 + 2\mu)$$

$$|W = |W^\infty + |u(2 + \mu)$$

$$|u = \frac{f'}{l}$$

我们可以专门编制一个 $|P^\infty$ 、 $|W^\infty$ 程序,用电子计算机来完成这一步工作。

### 5、 $|P^\infty$ 、 $|W^\infty$ 分配

在求出满足初级象差要求的 $|P^\infty$ 、 $|W^\infty$

之后,接着是分配 $|P^\infty$ 、 $|W^\infty$ ,解决用怎样的透镜组来满足 $|P^\infty$ 、 $|W^\infty$ ,是用单透镜,还是双胶合透镜,还是单透镜与双胶合透镜组合而成的更复杂的透镜组。为了消色差,每一个组的透镜起码是双胶合的,便于在变焦过程中有较好的倍率色差。 $|P^\infty$ 、 $|W^\infty$ 的分配是透镜组组内的分配问题,我们举几个典型的例子就可以说明问题。

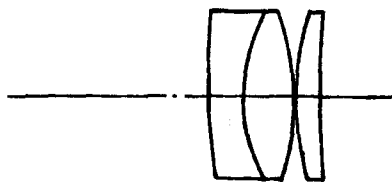


图 4.106

#### (1) 双胶加单片

前固定组简单一点取此形式,即双单。

我们假设要求这一组总的 $|P^\infty = 0.11893$ ,  
 $|W^\infty = 0.752131$ 。

##### i) 分配光焦度

取 $\varphi_1 = \varphi_2 = 0.5 \varphi_{\text{总}} = 0.5$ 。

##### ii) 单透镜的 $|u_2$

$$|u_2 = \frac{f_2}{l_2} = \frac{f_2}{f_1} = \frac{\varphi_1}{\varphi_2} = \frac{0.5}{0.5} = 1$$

##### iii) 单透镜的 $|P^\infty$ 、 $|W^\infty$

单透镜的 $|P^\infty$ 、 $|W^\infty$ 由它的折射率、弯曲形势决定。取 $n = 1.6594, \nu = 57.3$ (我们取 $\nu$ 值大一些,使双胶的消色差负担少一些),我们取弯曲形势为凸平弯向光栏对高级象差有利。弯曲的形势对双胶合组的选择影响很大,要注意这一点。

单片的第二面为平面,则 $c_2 = 0$ ,透镜弯曲:

$$|Q_2 = c_2 - \varphi_2, \text{规化时: } |Q_2 = c_2 - 1 = -1,$$

$$|W_2^\infty = -\frac{n+1}{n} |Q - \frac{1}{n-1} =$$

$$= -\frac{1.6594 + 1}{1.6594} \times (-1) - \frac{1}{1.6594 - 1}$$

$$= 1.6026 - 1.5165 = 0.0861,$$

$$|W_2| = |W_2^\infty| + (2 + \frac{1}{n}) |u_2| = 0.0861 +$$

$$2.6026 = 2.6887,$$

物在  $\infty$  时的极小值:

$$|P_{02}| = \frac{n}{(n-1)^2} \left[ 1 - \frac{9}{4(n+2)} \right]$$

$$= \frac{1.6594}{(1.6594-1)^2} \left[ 1 - \frac{9}{4 \times (1.6594+2)} \right]$$

$$= 1.47$$

物在有限距离时的极小值:

$$|P_{\min 2}| = |P_{02}| - \frac{n}{n+2} (|u| + |u|^2) = 1.47$$

$$- \frac{1.6594}{1.6594+2} (1 + 1^2) = 1.47 - 0.88$$

$$= 0.59$$

$$|P_2| = |P_{\min 2}| + \left[ 1 - \frac{1}{(n+1)^2} \right] \left[ |W_2| - \frac{1}{2(n+2)} (1 + 2|u|) \right]^2 = 0.59 + 0.858 \times$$

$$(2.6887 - 3 \times 0.137)^2 = 5.02$$

iv) 求双胶  $|P_1^\infty|$ 、 $|W_1^\infty|$

$$\because |P^\infty| = h_1^3 \varphi_1^3 |P_1^\infty| + h_2^3 \varphi_2^3 |P_2| +$$

$$h_3^3 \varphi_3^3 |P_3| + \dots$$

$$|W^\infty| = h_1^2 \varphi_1^2 |W_1^\infty| + h_2^2 \varphi_2^2 |W_2| +$$

$$h_3^2 \varphi_3^2 |W_3| + \dots$$

规范化条件下:

$$h\varphi = 1 \text{ (即 } h = 1 \quad \varphi = 1)$$

$\because h = h_1 = h_2 = 1$  ( $\because$  规定是相接触的薄透镜)

$$\therefore |P^\infty| = \varphi_1^3 |P_1^\infty| + \varphi_2^3 |P_2|,$$

$$|W^\infty| = \varphi_1^2 |W_1^\infty| + \varphi_2^2 |W_2|$$

代入具体数字则得:

$$0.1189 = 0.5^3 |P_1^\infty| + 0.5^3 \times 5.02,$$

$$|P_1^\infty| = -4.07$$

$$0.752 = 0.5^2 |W_1^\infty| + 0.5^2 \times 2.6887,$$

$$|W_1^\infty| = 0.32$$

v) 求双胶透镜的  $|P_{01}|$

$$|P_{01}| = |P_1^\infty| - 0.84(|W_1^\infty| - 0.14)^2$$

$$= -4.07 - 0.84(0.32 - 0.14)^2 = -4.09$$

vi) 双胶透镜担负的色差

单透镜的色差为  $\varphi_2/\nu_2$ , 故双胶透镜担负的色差为  $-\varphi_2/\nu_2$ 。下面对色差进行规化:

由于  $c_1$  与相对孔径平方成比例, 与焦距的一次方成比例, 故规化为:

$$|c_1| = -\frac{\varphi_2}{\nu_2} \cdot \frac{h_1^2}{f_1^2} = -\frac{\varphi_2}{\nu_2 \varphi_1} (\because h_1 \varphi_1 = 1,$$

$$h_1 = \frac{1}{\varphi_1})$$

$$\therefore |c_1| = -\frac{0.5}{57.3 \times 0.5} = -0.01745$$

根据双胶合组  $|P_{01}| = -4.09$ ,  $|c_1| = -0.01745$  选择玻璃对。

(2) 单、单、双

单单双结构如图 4.107 所示。两负单片在前, 一双胶在后, 进行规化时  $\varphi = 1$ , 即按正透镜组一样考虑。这是变焦物镜的变焦组。这组总的  $|P^\infty| = 1.013$ ,  $|W^\infty| = 1.35$ 。

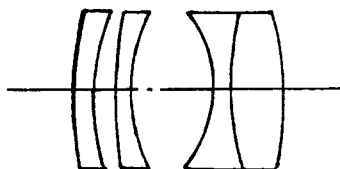


图 4.107

i) 光焦度分配

取  $\varphi_1 = \varphi_2 = 0.3$ ,  $\varphi_3 = 0.4$ , 一般讲  $\varphi_1$  取得大一些, 与前固定组的单片相当, 这样象差可以匹配得好些。

ii) 求透镜组中的  $lu$

$$|u_1| = \frac{f_1'}{l_1} = 0,$$

$$|u_2| = \frac{f_2'}{l_2} = \frac{\varphi_1}{\varphi_2} = \frac{0.3}{0.3} = 1,$$

$$|u_3| = \frac{f_3'}{l_3} = \frac{\varphi_2 + \varphi_1}{\varphi_3} = \frac{0.3 + 0.3}{0.4}$$

= 1.5,

iii) 单透镜的  $|P|$ 、 $|W|$ ,

第一单透镜:

$|P_1| = |P_1^{\infty}|$ ,  $|W_1| = |W_1^{\infty}|$ , 取第 1 面为平面, 即  $c_1 = 0$ , 这样第一面与前固定组的最后一面相匹配, 即相等或接近。这样对校正象差有利一些。

取  $n = 1.6594$ ,  $\nu = 57.3$ ,

$$|Q| = |c_2 - 1| = |c_1 - \frac{n}{n-1}| = 0 -$$

$$\frac{1.6594}{1.6594 - 1} = -2.5165,$$

$$|W_1^{\infty}| = -\frac{n+1}{n}|Q| - \frac{1}{n-1}$$

$$= -\frac{1.6594 + 1}{1.6594} \times (-2.5165) -$$

$$\frac{1}{1.6594 - 1} = 2.5165$$

$$|P_{01}| = \frac{n}{(n-1)^2} \left[ 1 - \frac{9}{4(n+2)} \right]$$

= 1.47

$$|P_1^{\infty}| = |P_{01}| + \left[ 1 - \frac{1}{(n+1)^2} \right] \left[ |W_1^{\infty}| -$$

$$\frac{1}{2(n+2)} \right]^2 = 1.47 + 0.858 [2.5165 -$$

0.14]^2 = 6.333,

第二单透镜:

我们取弯曲、透镜材料与第一透镜相同,

$$\therefore |W_2^{\infty}| = |W_1^{\infty}| = 2.5165,$$

$$|W_2| = |W_2^{\infty}| + (2 + \mu) |u_2| = 2.5165 +$$

$$2.603 = 5.119$$

$$|P_{02}| = |P_{01}| = 1.47,$$

$$|P_{\min 2}| = |P_{02}| - \frac{n}{n+2} (|u_2| + |u_2|^2) = 1.47$$

$$- \frac{1.6594}{1.6594 + 2} (1 + 1^2) = 0.563,$$

$$|P_2| = |P_{\min 2}| + \left[ 1 - \frac{1}{(n+1)^2} \right] \left[ |W_2| -$$

$$\frac{1}{2(n+2)} (1 + 2|u_2|) \right]^2 = 0.563 +$$

$$0.858 [5.119 - 0.137 \times (1 + 2 \times 1)]^2$$

= 19.6

iv) 求双胶透镜的  $|P_3^{\infty}|$ 、 $|W_3^{\infty}|$

有公式  $|P^{\infty}| = \varphi_1^3 |P_1^{\infty}| + \varphi_2^3 |P_2| + \varphi_3^3 |P_3|$

$$|W^{\infty}| = \varphi_1^2 |W_1^{\infty}| + \varphi_2^2 |W_2| + \varphi_3^2 |W_3|$$

代入数据得:

$$1.013 = 0.3^3 \times 6.33 + 0.3^3 \times 19.6 +$$

$$0.4^3 |P_3|, |P_3| = 4.888,$$

$$1.35 = 0.3^2 \times 2.5165 + 0.3^2 \times 5.119 + 0.4^2 |W_3|, |W_3| = 4.142,$$

$$|W_3^{\infty}| = |W_3| - |u_3|(2 + \mu) = 4.142 - 1.5(2 + 0.7) = 0.1$$

$$|P_3^{\infty}| = |P_3| - |u_3|(4|W_3^{\infty}| - 1) - |u_3|^2(3 + 2\mu) = 4.888 - 1.5 \times (4 \times 0.1 - 1) - 1.5^2 \times (3 + 2 \times 0.7) = -4.06$$

v) 求双胶透镜的  $|P_{03}|$

$$\therefore |P_3^{\infty}| = |P_{03}| + 0.84(|W_3^{\infty}| - 0.14)^2$$

$$|P_{03}| = |P_3^{\infty}| - 0.84(|W_3^{\infty}| - 0.14)^2 = -4.06 - 0.84(0.1 - 0.14)^2 = -4.06$$

vi) 双胶透镜担负的色差  $|c_3|$

$\therefore$  单透镜的色差为  $(\frac{\varphi_1}{\nu_1} + \frac{\varphi_2}{\nu_2})$ , 双胶透

镜担负的色差为:  $-(\frac{\varphi_1}{\nu_1} + \frac{\varphi_2}{\nu_2})$ ,



$$\begin{aligned} \text{规范化色差为: } |c_3| &= -\frac{\varphi_1/\nu_1 + \varphi_2/\nu_2}{\varphi_3} \\ &= -\frac{0.3/57.3 + 0.3/57.3}{0.4} = -0.0262 \end{aligned}$$

根据  $|P_{03}$ 、 $|c_3$  选择双胶透镜的玻璃对。

(3) 单、单、双、双

主要目的是看一下两双胶透镜的  $|P$ 、 $|W$  和  $|c$  的分配。当变倍组负担很大时可取此形式,如图 4.108 所示。要求  $|P^\infty| = 1.456$ ,  $|W^\infty| = 1.348$ ,

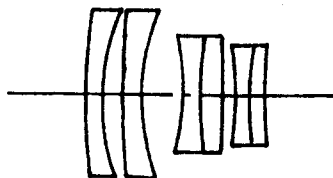


图 4.108

i) 光焦度分配

$$\text{取 } \varphi_1 = \varphi_2 = 0.3, \varphi_4 = \varphi_3 = 0.2,$$

ii) 各透镜的  $|u$

$$|u_1| = \frac{f_1}{l_1} = 0,$$

$$|u_2| = \frac{h_2}{l_2} = \frac{f_2}{l_2} = \frac{\varphi_1}{\varphi_2} = 1 (\because h_2\varphi_2 = 1,$$

$$\varphi_2 = \frac{1}{h_2})$$

$$|u_3| = \frac{f_3}{l_3} = \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{\varphi_3}$$

$$= \frac{0.3 + 0.3}{0.2} = 3$$

$$|u_4| = \frac{f_4}{l_4} = \frac{\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3}{\varphi_4} =$$

$$\frac{0.3 + 0.3 + 0.2}{0.2} = 4$$

iii) 两单透镜的  $|P$ 、 $|W$

第一单透镜:

$$\text{取 } |c_2| = -2, |Q| = |c_2 - 1| = -3,$$

取  $n = 1.6204, \nu = 60.3$  的玻璃。

$$|W_1^\infty| = -\frac{n+1}{n}|Q| - \frac{1}{n-1} =$$

$$= -\frac{1.6204+1}{1.6204} \times (-3) - \frac{1}{1.6204-1} =$$

$$4.85 - 1.61 = 3.24$$

$$|P_{01}| = \frac{n}{(n-1)^2} \left[ 1 - \frac{9}{4(n+2)} \right]$$

$$= \frac{1.6204}{(1.6204-1)^2} \left[ 1 - \frac{9}{4(1.6204+2)} \right]$$

$$= 4.21 \times 0.378 = 1.59$$

$$|P_1^\infty| = |P_{01}| + \left[ 1 - \frac{1}{(n+1)^2} \right] \left[ |W_1^\infty| -$$

$$\frac{1}{2(n+2)} \right]^2 = 1.59 + 0.84 \times (3.24 - 0.1)^2$$

$$= 9.87$$

第二单透镜:

材料与第一单透镜相同,即  $n =$

1.6204,  $\nu = 60.3$ , 弯曲形势更弯向光栏,

取  $|c_2| = -2.5$ , 则  $|Q| = |c_2 - 1| = -3.5$ ,

$$|W_2^\infty| = -\frac{n+1}{n}|Q| - \frac{1}{n-1}$$

$$= -\frac{1.6204+1}{1.6204} \times (-3.5) - \frac{1}{1.6204-1}$$

$$= 5.66 - 1.61 = 4.05$$

$$|W_2| = |W_2^\infty| + (2 + \mu)|u_2| = 4.05 +$$

$$2.6 \times 1 = 6.7$$

$$|P_{02}| = \frac{n}{(n-1)^2} \left[ 1 - \frac{9}{4(n+2)} \right] = 1.59$$

$$|P_{\min 2}| = |P_{02}| - \frac{n}{n+2} (|u_2| + |u_2^2|) = 1.59 -$$

$$\frac{1.6204}{1.6204+2} (1 + 1^2) = 0.7$$

$$|P_2| = |P_{\min 2}| + \left[ 1 - \frac{1}{(n+1)^2} \right] \left[ |W_2| -$$

$$\frac{1}{2(n+2)} (1 + 2|u_2|) \right]^2 = 0.7 + 0.85 \times$$

$$(6.7 - 0.14 \times 3)^2 = 34.2$$

iv) 两双胶透镜的  $|P^\infty|$ 、 $|W^\infty|$

$$\therefore |P^{\infty} = \varphi_1^3 |P_1^{\infty} + \varphi_2^3 |P_2 + \varphi_3^3 |P_3 + \varphi_4^3 |P_4$$

$$|W^{\infty} = \varphi_1^2 |W_1^{\infty} + \varphi_2^2 |W_2 + \varphi_3^2 |W_3 + \varphi_4^2 |W_4$$

将具体数据代入

$$1.456 = 0.3^3 \times 9.87 + 0.3^3 \times 34.2 + 0.2^3 (|P_3 + |P_4)$$

$$|P_3 + |P_4 = 33.4,$$

$$1.348 = 0.3^2 \times 3.24 + 0.3^2 \times 6.7 + 0.2^2 (|W_3 + |W_4)$$

$$|W_3 + |W_4 = 11.3$$

我们给定  $|P_3$  求  $|P_4$ , 给定  $|W_3$  求  $|W_4$ , 或给定它们的比例关系求  $|P$ ,  $|W$ 。一般取  $|W_3 \doteq |W_4$ ,  $|P_3 \doteq |P_4$  的解有较好的结果。现在我们取  $|W_3 = 5$ ,  $|P_3 = 16$ , 得到:  $|W_4 = 6.3$ ,  $|P_4 = 17.4$ 。

$$|W_3^{\infty} = |W_3 - 2.7 \quad |u_3 = 5 - 2.7 \times 3 = -3.1,$$

$$|P_3^{\infty} = |P_3 - (4|W_3^{\infty} - 1) |u_3 - (3 + 2\mu) \times |u_3^2 = 16 - [4 \times (-3.1) - 1] \times 3 - (3 + 2 \times 0.7) \times 3^2 = 16 + 40.2 - 39.6 = 16.6$$

同样的方法求得:

$$|W_4^{\infty} = -4.5$$

$$|P_4^{\infty} = 23,$$

V) 求两双胶透镜的  $|P_0$

$$|P_{03} = |P_3^{\infty} - 0.84 (|W_3^{\infty} - 0.14)^2 = 16.6 - 0.84 (-3.1 - 0.14)^2 \doteq 7.8$$

$$|P_{04} = |P_4^{\infty} - 0.84 (|W_4^{\infty} - 0.14)^2 = 23 - 0.84 (-4.5 - 0.14)^2 = 4.9$$

vi) 求两双胶透镜的  $lc$ ,

两单透镜产生的色差为:

$$\frac{\varphi_1}{\nu_1} + \frac{\varphi_2}{\nu_2} = \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{\nu} \quad (\because \nu_1 = \nu_2 = \nu)$$

从而可得两双胶透镜担负的色差为:

$-\frac{\varphi_1 + \varphi_2}{\nu}$ , 我们假定两双胶透镜的色差是

以光焦度大小分担, 即为:

$$\varphi_3 \text{ 分担色差比量为: } \varphi_3 / (\varphi_3 + \varphi_4),$$

$$\varphi_4 \text{ 分担色差比量为: } \varphi_4 / (\varphi_3 + \varphi_4),$$

因而  $\varphi_3$  分担的色差量为:  $-\frac{\varphi_1 + \varphi_2}{\nu} \times$

$$\frac{\varphi_3}{\varphi_3 + \varphi_4},$$

$\varphi_4$  分担的色差量为:  $-\frac{\varphi_1 + \varphi_2}{\nu} \times$

$$\frac{\varphi_4}{\varphi_3 + \varphi_4},$$

再进行色差的规化, 则有:

$\varphi_3$  分担的规化色差为:

$$-\frac{\varphi_1 + \varphi_2}{\nu} \times \frac{\varphi_3}{\varphi_3 + \varphi_4} \times \frac{1}{\varphi_3} = -\frac{\varphi_1 + \varphi_2}{\nu(\varphi_3 + \varphi_4)}$$

$\varphi_4$  分担的规化色差为:

$$-\frac{\varphi_1 + \varphi_2}{\nu} \times \frac{\varphi_4}{\varphi_3 + \varphi_4} \times \frac{1}{\varphi_4} = -\frac{\varphi_1 + \varphi_2}{\nu(\varphi_3 + \varphi_4)}$$

从上面可以看出, 两双胶透镜分担的规化色差是一样的, 要负担的色差可表示为下式:

$$lc_1 = -\frac{\sum \varphi_{\text{单}}}{\nu \sum \varphi_{\text{双}}}$$

$$\text{在本例中为 } lc_1 = -\frac{0.6}{0.4} \times \frac{1}{60.3} =$$

$$-0.024。$$

## 6. 选玻璃求半径

根据上面求得的  $|P_0$ 、 $lc$ , 选择满足要求的玻璃对。在变焦距物镜的设计中, 要求的  $|P_0$ 、 $lc$  的范围很广,  $|P_0$  值大到好几百,  $lc$  值

到 0.03 以上,但解得的结果不一定差。

应用如下公式进行选玻璃对:

$$\frac{\varphi_a}{\nu_a} + \frac{\varphi_b}{\nu_b} = |c_1|$$

$$\varphi_a + \varphi_b = 1$$

$$a = \frac{n_a + 2}{n_a} \varphi_a + \frac{n_b + 2}{n_b} \varphi_b$$

$$b = \frac{3\varphi_a^2}{n_a - 1} - \frac{3\varphi_b^2}{n_b - 1} - 2\varphi_b$$

$$c = \frac{n_a}{(n_a - 1)^2} \varphi_a^3 + \frac{n_b}{(n_b - 1)^2} \varphi_b^3 + \frac{n_b}{n_b - 1} \varphi_b^2$$

$$|Q_0| = -\frac{b}{2a}$$

$$|P_0| = c - \frac{b^2}{4a}$$

$$|W_0| = \frac{(\mu - 1)|Q_0 + \varphi_b|}{3}, \mu = \frac{\varphi_a}{n_a} + \frac{\varphi_b}{n_b}$$

玻璃对的选择我们专门编制一个程序进行计算。

我们还是以前面的例子说明求半径:

$$|P_0| = -4.1, |c_1| = -0.01745, |W_1^\infty| = 0.32,$$

选择得到的玻璃对:

$$n_a = 1.7398, \nu_a = 28.2,$$

$$n_b = 1.519, \nu_b = 69.8,$$

$$|P_0| = -4.1, |c_1| = -0.01745,$$

$$\varphi_a = -1.5, \varphi_b = 2.5,$$

$$|Q_0| = 6.245, a = 2.57,$$

这一解火石在前,准备作前固定组,取火石在前,胶合面可弯向光栏。

求各面的半径

$$|Q| = |Q_0 - \frac{2}{a+1}(|W_1^\infty| - |W_0|) = 6.245 - \frac{2}{2.57+1}(0.32 - 0.14) = 6.245 - 0.5606 \times$$

$$\times 0.18 = 6.144,$$

$$|c_2| = \frac{1}{r_2} = |Q + \varphi_a| = 6.144 + (-1.5) = 4.64$$

$$|c_1| = \frac{1}{r_1} = |c_2 + \frac{\varphi_a}{n_a - 1}| = 4.64 + \frac{-1.5}{1.7398-1} = 4.64 - 2.03 = 2.61$$

$$|c_3| = \frac{1}{r_3} = |c_2 - \frac{\varphi_b}{n_b - 1}| = 4.64 - \frac{2.5}{1.519-1} = 4.64 - 4.82 = -0.18$$

把整个透镜组焦距为 1 的曲率化为实际焦距为  $f'$  的半径:

$$r_1^* = \frac{f'}{|c_1|}, r_2^* = \frac{f'}{|c_2|}, r_3^* = \frac{f'}{|c_3|}.$$

### 7. 配厚度、组合成全系统

前面求得的半径是在薄透镜情况下,实际的透镜都有一定的厚度,所以要根据求得的半径和实际需要的口径,用计算法或作图法确定透镜的厚度,我们一般采用作图法确定厚度。取透镜厚度时要注意正透镜边缘需要有一定厚度,便于加工。负透镜的中心厚度可取全口径的 1/6 ~ 1/10,由于变焦距物镜中心厚度对变焦倍率影响较大,故一般取得较薄,负透镜厚度有取全口径的 1/14 ~ 1/20,尽至更薄的。

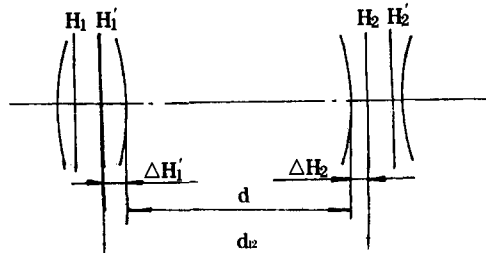


图 4.109

透镜加厚以后,焦距有变化,便不满足

理想光学系统的要求,因此加厚以后需要调整一下间隔,首先计算各组的理想光线(或叫近轴光线),求出各透镜组的焦距和主面位置,再缩放成需要的焦距,此时主面位置也要同时按比例地缩放。接着透镜组之间的间隔进行调整。图 4. 109 是两透镜组的间隔示意图, $d_{12}$  是薄透镜计算时需要的两透镜组的间隔,透镜加厚以后,在第一透镜组的  $H'_1$  到第二透镜组的  $H_2$  之间要保持  $d_{12}$ ,这样两透镜组的实际间隔为:

$$d = d_{12} - \Delta H'_1 + \Delta H_2。$$

#### 8. 平衡象差

变焦距物镜的象差平衡基本上是与定焦距物镜的象差平衡一样的,要考虑降低高级象差,初级象差与高级象差的匹配,高级象差不能降低时,考虑用异号的初级象差相补偿,以及轴上点象差与轴外点象差相匹配, $x_s$  与  $X_T$  相匹配等等。但是变焦距物镜还要考虑各个焦距位置的象差校正问题。一般的说,可以利用前固定组、变倍组、补偿组来使象差相等而且尽量的小,残留量可以用后固定组来校正,但前面的象差也不能残留很多,因为后固定组要校正很多的残留象差是困难的,特别是象散和畸变。

后固定组对各个焦距位置的象差贡献是一样的。一般来说,后固定组是正透镜组,而前固定组也是正光焦度的,都产生同号的高级球差,因之后固定组要考虑降低高级球差问题。前固定组上长焦距的轴上光线高度最高,次长焦距次之,短焦距最低,所以前固定组对长焦距的球差、正弦差贡献最大,同时象散贡献也大。所以一般来说是利用前固定组的参数来校正长焦距及次长焦距位置的象差,使之与短焦距位置的象差相等而且数值很小。轴外主光线在变倍组上的高度一般是在短焦距位置时最高,所以一般可以利用变倍组的参数来校正短焦距位置的轴外象差。在物象交换原则的情况下或接近物象交换原则的情况下,短焦距和长焦距的补偿组位置是接近的,而中焦距位置则是远离的,所以可以利用补偿组来校正中焦位置的象差使之与长短焦距相等。另外,有时轴上光束在补偿组上的高度最高,也可以利用它来校正球差、正弦差。

关于具体的象差平衡方法,是与定焦距物镜的象差平衡是相似的,这里不详细叙述。

(未完待续)