

光 学 设 计

下 册

陈 晃 明 编

光 学 設 計

下 册

陈 晃 明 編

江苏工业学院图书馆
藏书章

北 京 工 业 学 院

1 9 6 4 . 4

光学设计讲义目录

第六章 摄影系统

- § 1. 摄影系统的分类和应用..... 1
- § 2. 摄影系统设计的基本原则..... 3
- § 3. 摄影系统的基本结构及其演变..... 5
- § 4. 三片型摄影物镜设计..... 7
- § 5. 摄影系统类型的选择及其矫正象差的可能性分析..... 17

第七章 显微系统

- § 1. 显微系统的工作原理及其光学特性..... 22
- § 2. 显微系统的有效放大率及其意义..... 23
- § 3. 显微系统的物镜和目镜..... 24
- § 4. 里斯特物镜设计..... 26

第八章 等晕系统

- § 1. 等晕面和等晕透镜..... 34
- § 2. 等晕面的光路计算..... 36
- § 3. 同心面的光路计算..... 40
- § 4. 无畸变等晕系统..... 44
- § 5. 大相对孔径等晕系统..... 49

第九章 波差

- § 1. 引言..... 51
- § 2. 轴上点和轴外点的波差表达式..... 54
- § 3. 波差与横向象差的关系..... 56
- § 4. 球差的波差计算。最佳象平面位置的确定..... 58
- § 5. 望远物镜的球差的容许限度..... 66
- § 6. 象散和象面弯曲的波差计算..... 72
- § 7. 彗差的波差计算..... 78

§ 8	象散和彗差的波差組合	80
§ 9	縱向色差的容許限度	81
§ 10	目鏡象差的容許限度	83
§ 11	象差的容許限度的實驗值	85
第十章 实际光学系統成象的衍射理論		
§ 1	光的振动方程式	86
§ 2	物点通过光学系統所成的衍射象。斯特列里数	87
§ 3	在焦散情况下点象上的能量分布	90
§ 4	在初級球差情况下点象上的能量分布	92
§ 5	在同时存在焦散和高级球差情况下点象上的能量分布	102
第十一章 鑑別率		
§ 1	望远系統的鑑別率	106
§ 2	摄影系統的鑑別率	102
第十二章 光学零件的制造和装配的公差		
§ 1	光学玻璃的质量指标。光学零件对玻璃的要求	112
§ 2	平板玻璃不平行度的公差	115
§ 3	一次反射直角稜鏡的角度公差	118
§ 4	两次反射直角稜鏡的角度公差	120
§ 5	屋脊稜鏡的角度公差	121
§ 6	道維稜鏡的角度公差	123
§ 7	透鏡中心偏差的公差	126
§ 8	光学零件表面质量的公差	130
§ 9	光学零件抛光表面的光洁度等級	133
§ 10	圓形光学零件和鏡框直径的公差	135
§ 11	光学零件倒角和厚度的公差	139
§ 12	計算实例	142

第六章 摄影系统

§ 1 摄影系统的分类和应用

摄影系统在国防科学研究，军事侦察，国民经济建设，医疗以及人们的文化生活方面都具有重要的地位。根据用途的不同，摄影系统分为以下几类：

1) 长焦距摄影系统

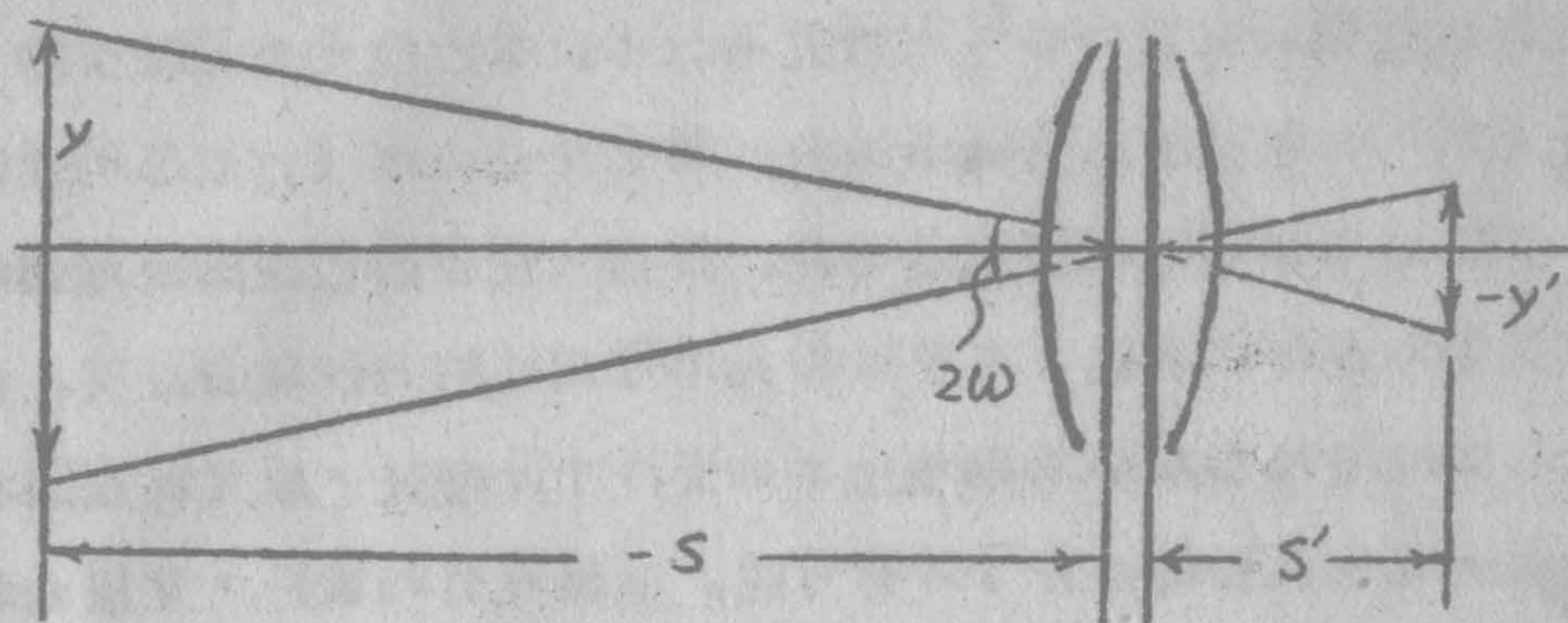


图 6-1

在图 6-1 中，设 y 和 y' 代表物和象的大小， s 和 s' 代表物距和象距， 2ω 代表视场角，得到

$$\frac{y'}{y} = \frac{s'}{s} \quad (6-1)$$

在摄影系统的情形，物距 s 总是很大，象距 s' 近似等于焦距 f' ，有

$$y' = \frac{y}{s} f' = \tan \omega f' \quad (6-2)$$

从上式可知：当视场角一定时，象的大小与焦距成正比。欲想增大象和物的比率，必须增大焦距，故焦距起成象的比例尺作用。长焦距摄影系统适用于地面或空中的远距离摄影侦察。具有 3 米以上的焦距和設計良好的摄影系统基本上能照清 10 公里以内的物体细节。

2) 大相对孔径摄影系统

在几何光学中已經討論过以下公式

$$E' = \frac{\pi K B}{4} \left(\frac{D}{f'} \right)^2 \quad (6-3)$$

式中: E' 代表象平面上的照度, K 代表透过系数, B 代表物体的亮度, D/f' 代表相对孔径。上式說明象平面上的照度与相对孔径的平方成正比。为了在弱的照明条件下能夠照相, 必須增大相对孔径。近几年来, 火箭武器成为現代战争的重要手段之一。获得它的起始速度和运行軌跡等重要参数对研究其战术技术性能是不可缺少的, 而測定它們的有效方法只有高速摄影, 对于处在高速飞行状态的子弹或爆炸物的运动参数的測定也是这样。目前, 在各国已經陸續地出現了各种类型的高速摄影机, 其中摄影頻率可以达到每秒数百万次。由于曝光時間随着摄影頻率急剧地增加而变得十分短促, 感光仅在摄影物鏡具备大相对孔径的条件下才有可能。根据現有的資料, 专供高速摄影用的系統的相对孔径均在 $1/2.5$ 以上。

3) 大視场摄影系統

这种系統用于航空摄影測量。無論在時間或人力方面, 航空摄影測量比利用經緯仪和平板仪在地面进行的測量更为經濟, 而經濟性的提高又依賴于視场的扩大。設計大視场摄影系統的严重障碍在視场边缘的照度迅速下降。当 1938 年苏联科学技术博士 $M. M.$ 魯西諾夫教授发现了象差漸暈現象以后, 这个问题才在理論上获得解决。此外, 大視场摄影系統还可以作为从高空偵察机或人造卫星上向地面拍摄照片之用。在 $M. M.$ 魯西諾夫教授設計达到 $148^\circ 30'$ 的摄影物鏡中, 应用了非球面。

4) 普通摄影系統

屬于此类系統的有各种人象鏡頭, 它們的光学特性在以下范围內:

$$f' < 400\text{mm}, D/f' < 1/3.5, 2\omega < 60^\circ.$$

除了以上所述的四种基本类型以外，按照其结构，摄影系统可以分为折射式的和折反射式的；按照其焦距是否变化，它还可以分为不变焦距的和可变焦距的，后者在最新式的电视机上获得了应用。

长焦距，大相对孔径和大视场是现代军用光学仪器的战术技术要求的重要标志。同时满足这些要求往往给象差的矫正造成了困难。对于摄影系统来说，纵向象差（球差，象散，象面弯曲，纵向色差）和横向象差（彗差，畸变，横向色差）都很大，必须同时矫正。此外，还要矫正高级象差——区域球差和区域象散。对于专供航空摄影测量用的系统，为了减小测量误差，畸变尤其要严加控制。鉴于要求矫正的象差多，照相物镜的结构是比较复杂的。

§ 2 摄影系统设计的基本原则

摄影系统的作用为把空间的物体成一实象在感光底板上，它的光焦度必须是正的

$$\varphi = \frac{1}{h_1} \sum_{i=1}^{i=k} h_i \varphi_i > 0 \quad (6-4)$$

式中： φ 为整个系统的光焦度， h_1 为光线在第一表面上的投射高度， h_i 为第一辅助光线在第 i 透镜上的平均投射高度， φ_i 为用薄透镜公式计算的第 i 透镜的光焦度。

写出系统总纵向和横向色差公式，并使它们等于零

$$\delta S'_{F-c \text{ 总}} = - \frac{1}{n'_k u_k^2} \sum_{i=1} h_i^2 \frac{\varphi_i}{f_i} = 0 \quad (6-5)$$

$$\sigma_{F-c \text{ 总}} = - \frac{1}{n'_k u_k'^2} \sum_{i=1} h_i H_i \frac{\varphi_i}{f_i} = 0 \quad (6-6)$$

式中： $\delta S'_{F-c \text{ 总}}$ 和 $\sigma_{F-c \text{ 总}}$ 分别为整个系统的纵向和横向色差， n'_k 为象空间介质的折射系数，它在空气中等于 1， u_k' 为第一辅助光线在象空间与光轴的夹角， H_i 为第二辅助光线在第 i 透镜上的平

均投射高度。

此外，从初級象差理論还可以得到消除象面弯曲的关系式

$$\begin{aligned}
 x_p' &= -\frac{1}{2} n_k' y_k'^2 \sum_{i=1}^{i=k} \frac{n_i' - n_i}{n_i' n_i R_i} \\
 &= -\frac{1}{2} n_k' y_k'^2 \left\{ \frac{n_1 - 1}{n_1} \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) + \frac{n_2 - 1}{n_2} \left(\frac{1}{R_3} - \frac{1}{R_4} \right) \right. \\
 &\quad \left. + \dots \dots \dots \right\} \\
 &= -\frac{1}{2} n_k' y_k'^2 \left\{ \frac{\varphi_1}{n_1} + \frac{\varphi_2}{n_2} + \dots \dots \dots \right\} \quad (6-7)
 \end{aligned}$$

由于阿貝数 γ 总是大于1，从(6-5)和(6-6)明白，摄影系統必須同时具有正和負透鏡才能滿足消除色差的要求。从(6-7)不难得出結論：为了矫正象面弯曲，摄影系統不但要由正和負透鏡組成，而它們还必須是厚透鏡或正負分离的薄透鏡，而不能是密接薄透鏡，否則摄影系統就会由于光焦度等于零而失去意义。

察看图6-2，不論透鏡的位置如何排列，光綫在正透鏡上的投射高度总是大于它在負透鏡上的投射高度。这样，为了滿足(6-5)，在选择玻璃材料时，正透鏡宜採用小阿貝数（高色散）的玻璃。

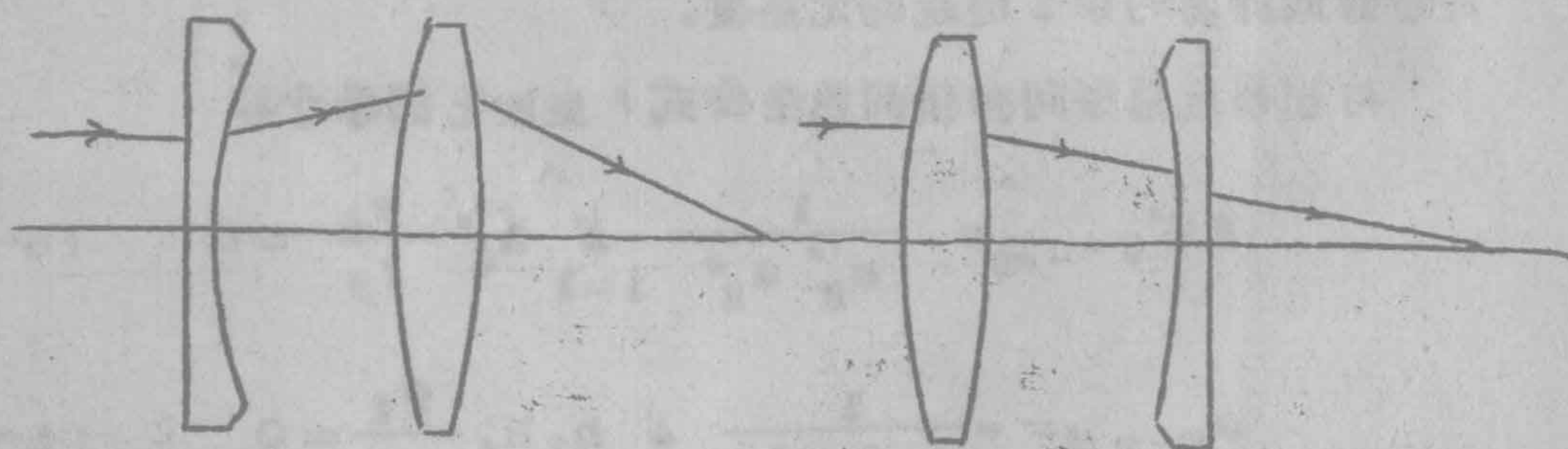


图 6-2

在設計大視場摄影系統时，差不多都遵循了系統相对光闌对称的原則，这是由于它的橫向象差特別大，而对称性恆能保証自动地消除

这样的象差。

§ 3 摄影系统的基本结构及其演变

在设计摄影系统时，不能违背上一节所述的原则。符合这些原则的结构形式不多，叫基本结构。但是，单纯依靠基本结构并不能保证良好的成象质量，为了解决这个问题，必须将它复杂化。随着基本结构复杂化的方式不同，便出现了各式各样的摄影系统。基本结构复杂化的方法可以归纳如下：

1) 加胶合面

关于利用胶合面矫正球差和象散的理論已經在第二章中叙述过了。在基本结构中，利用两种折射系数相等但阿貝数不相等的玻璃构成胶合面（图 6-3），可以在不会破坏已矫正好的单色象差的条件下矫正色差，故在一般情况下，色差对设计师没有多大的威胁。

2) 将一个透镜分裂成两个以上的透镜

透镜分裂的目的是为了减小单个透镜的光焦度（或增大它的焦距）和减小光线在折射面上的角度，从而减小高级象差，达到提高光学特性的目的。图 6-4 为将一个透镜分裂成两个透镜的情形。

摄影系统的基本结构及其演变如图 6-5 所示，其中的正和负号，对于对称基本结构，表示光阑右方依次的透镜符号，对于非对称型基本结构，表示从头至尾的透镜的符号。

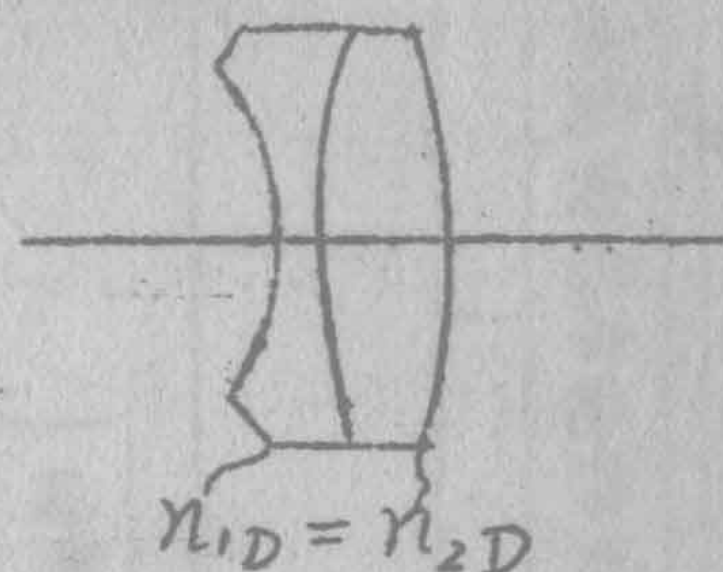


图 6-3

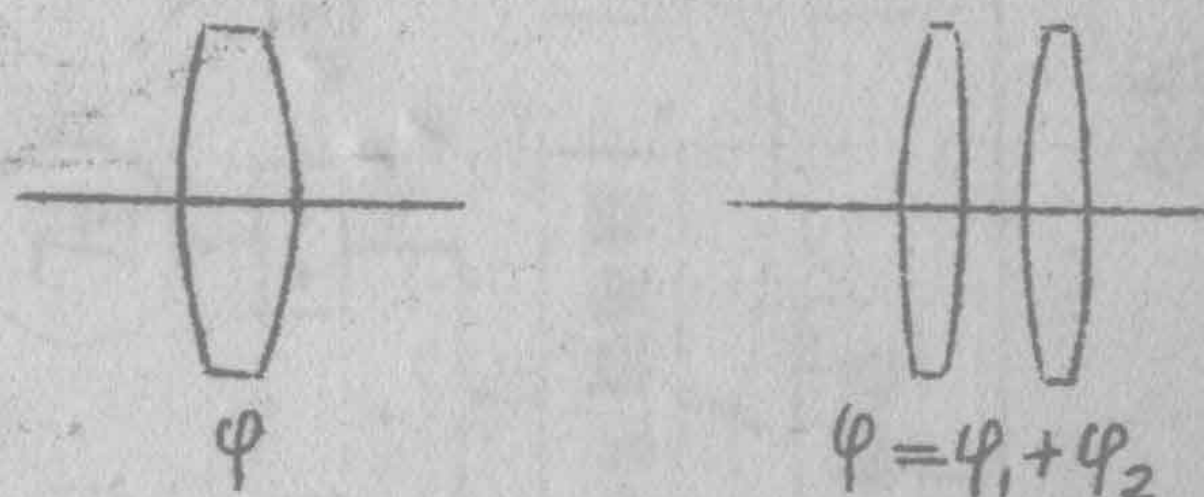


图 6-4

摄影系统的基本结构及其演变

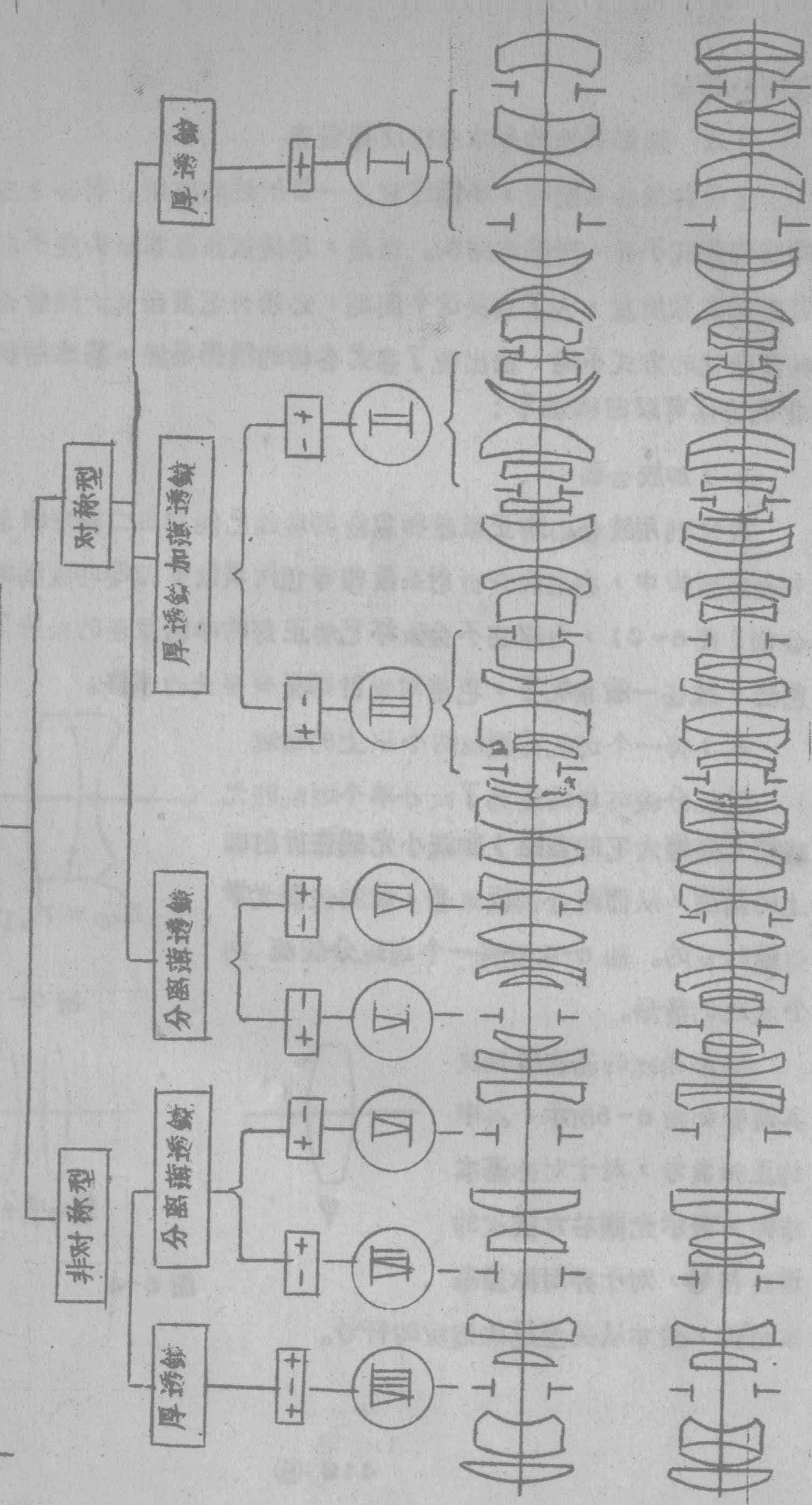


图 6-5

§ 4 三片型摄影物镜设计

1) 设计方法

三片型摄影物镜属于第Ⅳ类基本结构(图6-6)。

由于摄影物镜的对称性,它的纵向象差互相迭加,横向象差互相抵销。因此,设计时只须矫正半部系统的纵向象差。现在来研究矫正半部系统四种纵向象差的问题:

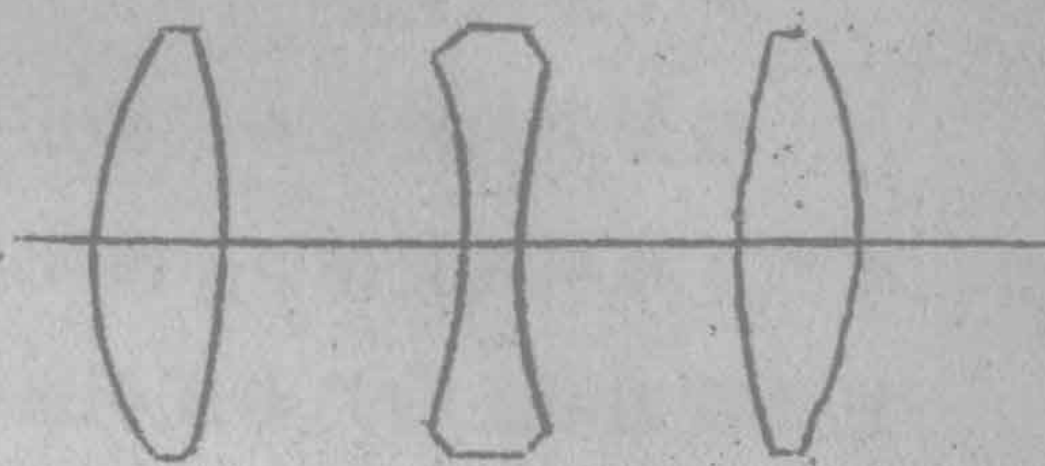


图 6-6

I. 球差

由于半部系统的第一块透镜为负透镜(图6-7),在物体位在无限远的情形,产生正球差,第二块正透镜产生的球差为负,故球差能以互相补偿。

II. 象散

半部系统是在弯月镜满足消象散的近的入射光瞳位置的基础上建立起来的(图6-8)。

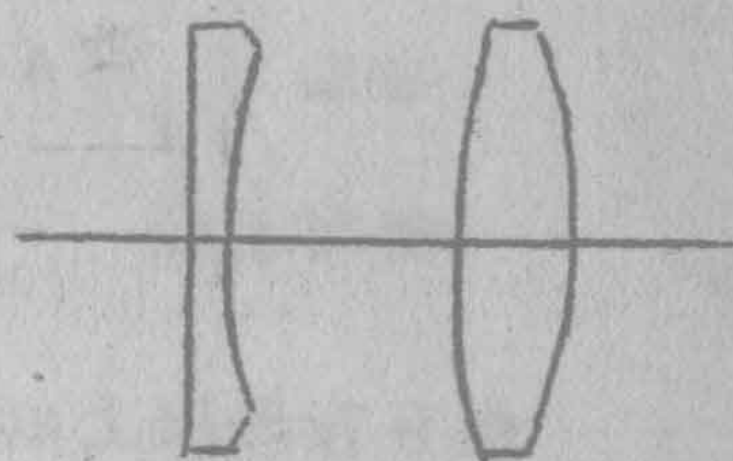


图 6-7

弯月镜可以看作由平凹透镜1,平板玻璃2和平凸透镜3组成。用相应的空气厚度代替平板玻璃2对象散没有什么影响。在第二章中已经叙述,当光阑与镜框重合时,空气中的薄透镜产生的象散与透镜的形状无关。这样,把平凹透镜的凹面向着平凸透镜的平面不会破坏已矫正好的象散(图6-9)。

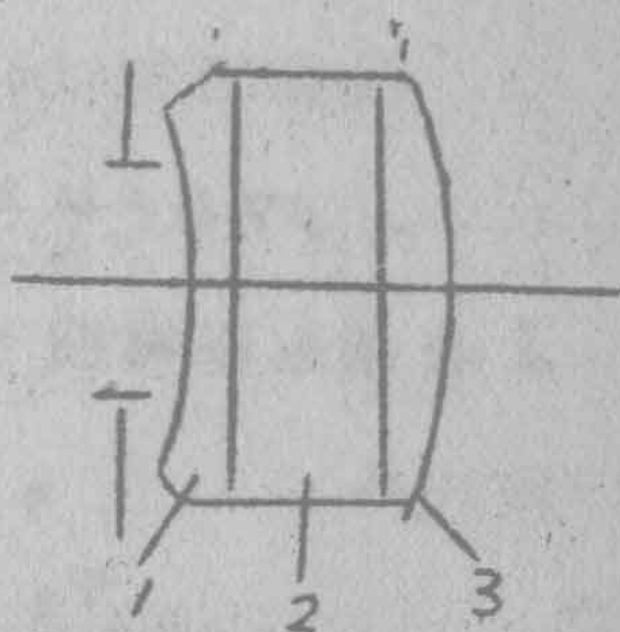


图 6-8

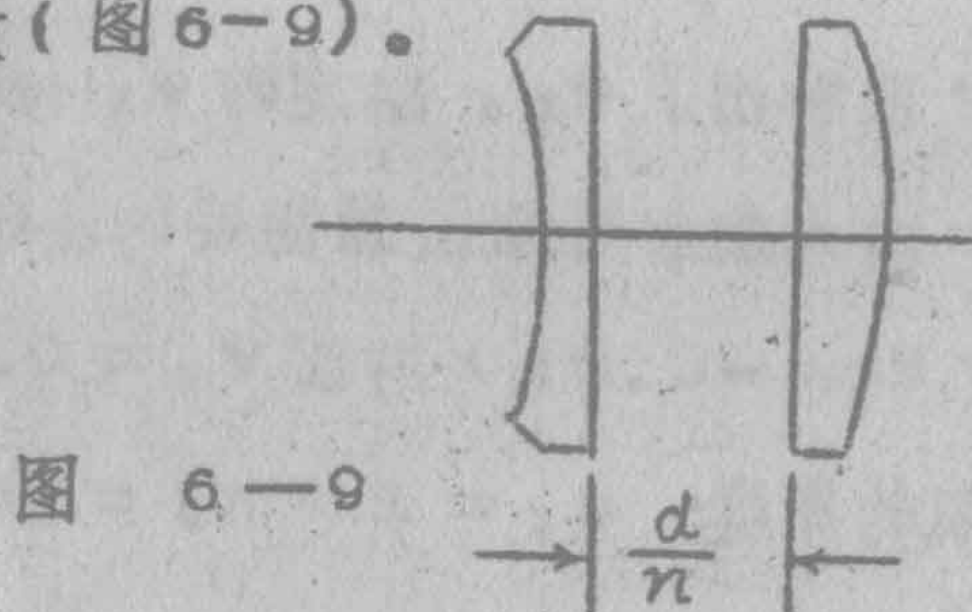
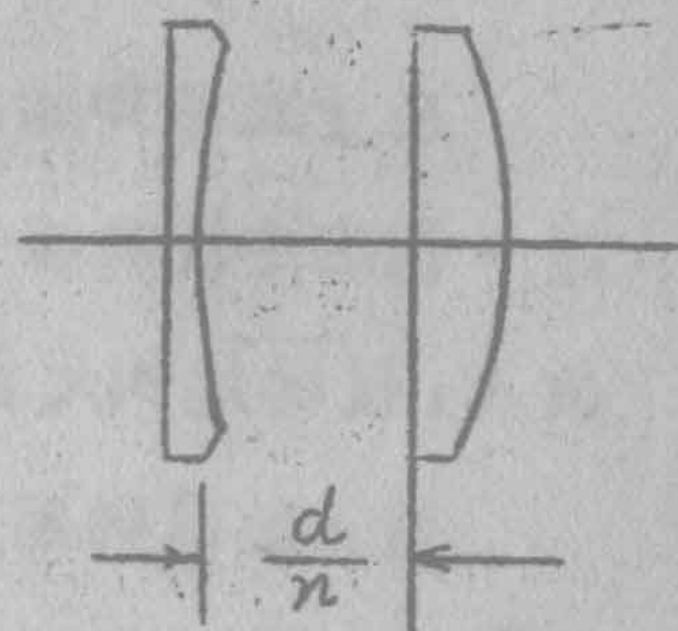


图 6-9



Ⅲ. 象面弯曲

由于半部系统由正和负透镜组成，故能以满足消象面弯曲条件（图 6-7）。

Ⅳ. 纵向色差

根据消色差条件选择正和负透镜的玻璃材料。当矫正过度和矫正不足时，可以用更换 n_D 相同但 ν 不相同的玻璃的办法达到消色差目的。

色差微量修正的关系式与望远物镜的类似

$$\frac{1}{R_4^*} = \frac{1}{R_4} - \frac{\delta S_{F-C} - \delta S'_{F-C}}{S'^2 (n_F - n_C)}$$

2) 光学特性

这种类型的摄影物镜的光学特性一般可以达到

焦距 $f' = 250 \text{ mm}$

幅面 $A = 90 \times 120 \text{ mm}^2$

相对孔径 $\frac{D}{f'} = \frac{1}{4}$

现在按照以上数据作实例设计。

3) 半部系统参数的确定

根据消色差条件分别选定负透镜和正透镜的玻璃材料为 TQ1 ($n_D = 1.6475$, $\nu = 33.9$) 和 TK16 ($n_D = 1.6126$, $\nu = 58.3$)。为了消除象面弯曲，按照 (6-7) 确定两块透镜的光焦度，并将已知数据代入

$$\frac{\varphi_1}{1.6475} + \frac{\varphi_2}{1.6126} = 0$$

在上式中如给定 φ_1 ，便解出了 φ_2 。给定的 φ_1 将影响系统的焦距，但这个没有多大关系，因为最后可以按照需要的焦距进行缩放，故 φ_1 仅起比例尺作用。设 $\varphi_1 = -0.01$ ，解出 $\varphi_2 = 0.009788$ 。

根据强度确定两块透镜的厚度： $d_1 = 2$ ， $d_2 = 16$ 。

按照下式确定负透镜的曲率半径

$$\varphi_1 = (n_1 - 1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right)$$

将数值代入

$$-0.01 = (1.6475 - 1) \left(\frac{1}{\infty} - \frac{1}{R_2} \right)$$

所以 $R_2 = 64.75$

给定 $d_2 = 20$ 对结构没有什么影响，变换正透镜的形状矫正球差

$$\varphi_2 = (n_2 - 1) \left(\frac{1}{R_3} - \frac{1}{R_4} \right)$$

将数值代入

$$0.009788 = (1.6126 - 1) \left(\frac{1}{R_3} - \frac{1}{R_4} \right)$$

当 $R_3 = 392$ ，从上式解出 $R_4 \approx -63$ ，对应的球差接近于零，

所得到的数据如次

$R_1 = \infty$		$n_1 = 1$
$R_2 = 64.75$	$d_1 = 2$	$n_2 = 1.6475 (T\Phi 1)$
$R_3 = 392$	$d_2 = 20$	$n_3 = 1$
$R_4 = -63$	$d_3 = 16$	$n_4 = 1.6126 (TK16)$
		$n_5 = 1$

$$S'_0 = 295.93 ; f'_0 = 231.09$$

$$\delta S' = -0.79$$

计算球差时，令光线的投射高度 $h = 20$ ，对应的半部系统的相对孔径 $D/f' \approx 1/6$ 。当两个半部系统合拢来时，口径将略有增加，而焦距约减小一半，故达到所需要的相对孔径是不会有太大困难的。

4) 半部系统象差的矫正

以上数据仅矫正了球差和象面弯曲，而丝毫未涉及到象散和色差。

为了计算象散，首先必须确定视场。从图 6-10 中得到

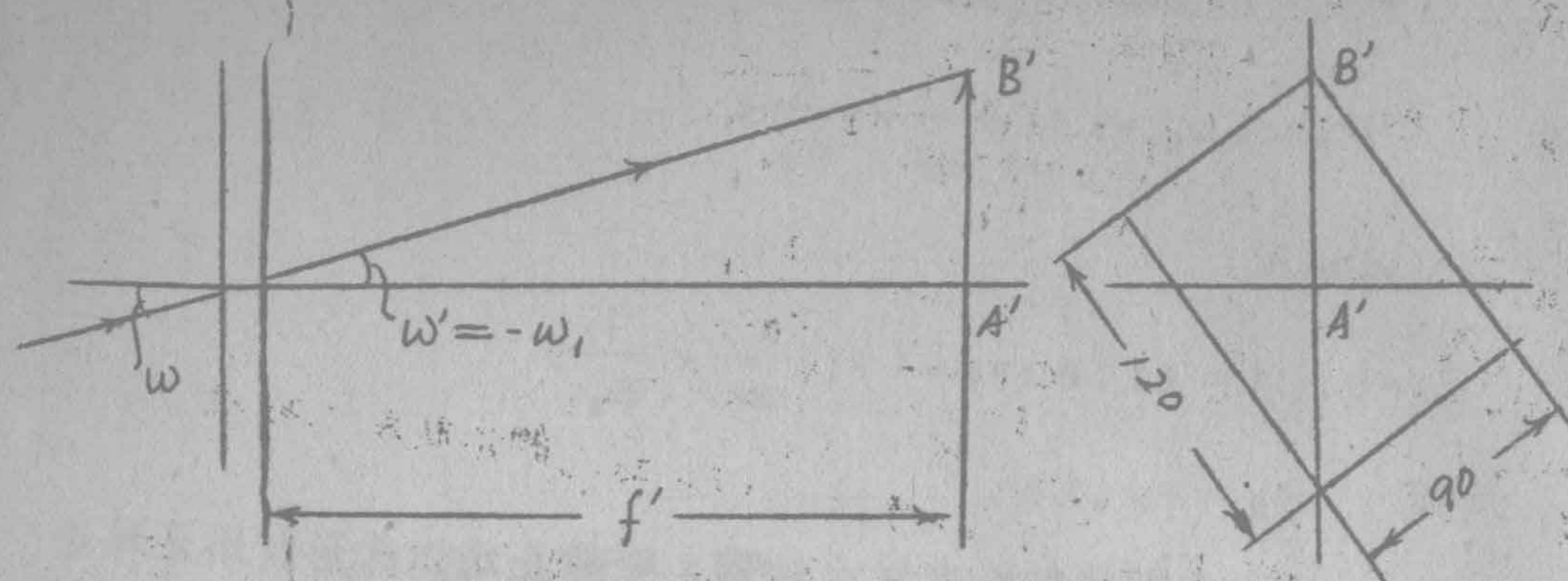


图 10

$$\operatorname{tg}(-\omega_1) = \frac{A'B'}{f'} = \frac{\sqrt{45^2 + 60^2}}{250} \approx 0.3$$

所以 $\omega_1 = -17.5^\circ$

计算象散时，令半部系统的视场等于整个系统的视场对矫正象散没有甚么影响。设入射光瞳到第一折射面的距离 $S_1 = -1$ ，计算象散后得到

$$x_t' = 5.897; \quad x_s' = 1.027$$

可见，象散很大，必须进一步矫正。

矫正象散的方案有两个：

I. 改变厚度 d_1

这个方案的优点在于矫正了象散以后不会破坏已经矫正好的球差，缺点在于厚度 d_1 的变化量有限。

II. 改变厚度 d_2

这个方案的依据为负透镜产生的正象散为定值，厚度 d_2 的改变相当入射光瞳位置相对正透镜移动，正透镜产生的负象散发生较大的变化，从而使半部系统的象散很快地得到矫正，它的缺点在于破坏了

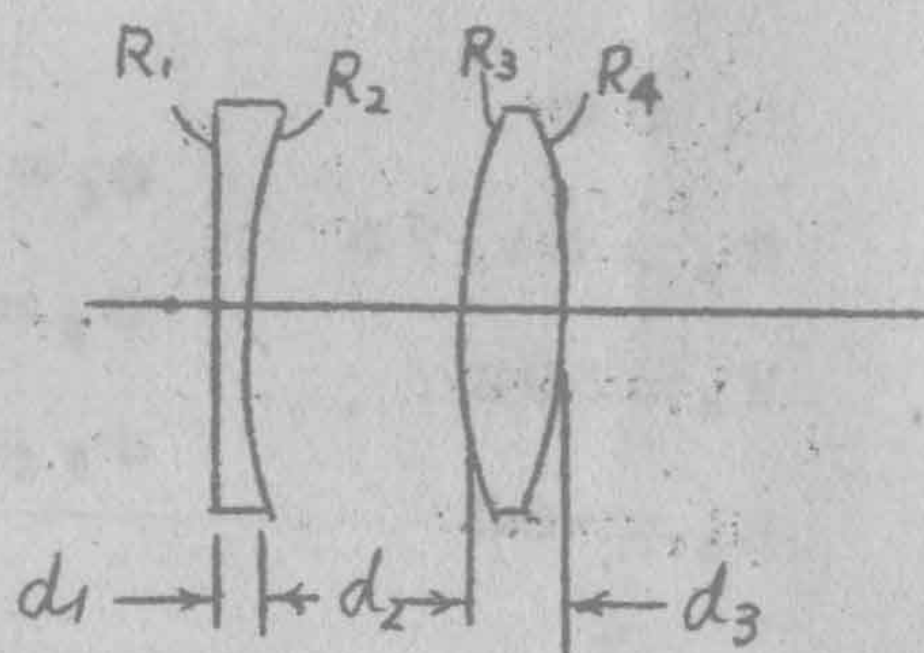


图 6-11

已經矫正好的球差。

我們採用了第二个方案。为了减小剩余正象散，应当增加厚度 d_2 。
計算結果列在下面

d_2	22	24
x_t'	3.554	1.790
x_s'	0.175	-0.045

当 $d_2 = 24$ 时，象散被矫正，但对应的剩余球差很大 ($\delta S' = -13.11$)。

矫正剩余球差的方案亦有两个：

I. 从新变换 R_3 ，按照消象面弯曲条件确定 R_4 ，直到球差等于零。

II. 变换厚度 d_3 ，使光线在第四面上的高度改变，从而使第四面产生的球差发生相应的变化。

这个方案的优点在于只要計算最后一个面的光路，計算工作量少。由于剩余负球差很大，故应当减小 d_3 ，使第四面产生的负球差减小。
計算結果如下

d_3	14	11	7
$\delta S'$	-9.99	-6.04	-0.03

当 $d_3 = 7$ 时，球差被矫正。 d_3 虽然减小了许多，但仍能满足强度要求。

驗算象散的結果如次

ω	-17.5°	-12°
x_t'	-0.058	0.988
x_s'	-0.568	1.588

故象散基本上符合要求。图 6-12 为象散

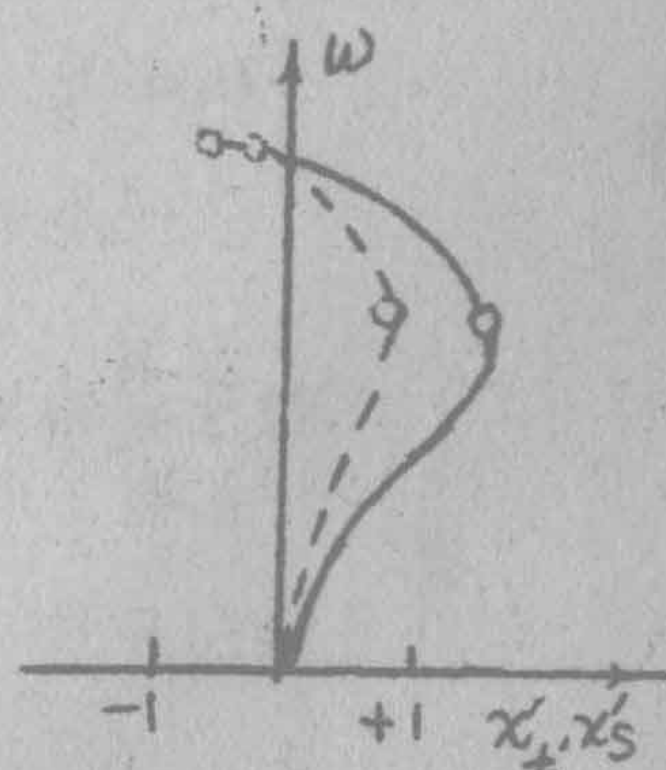


图 6-12

随视场变化的曲线图。

计算色差的結果如次

h	D	F	C
0	294.06	293.64	294.52
14	291.89	291.56	292.12
20	294.03	294.07	294.46

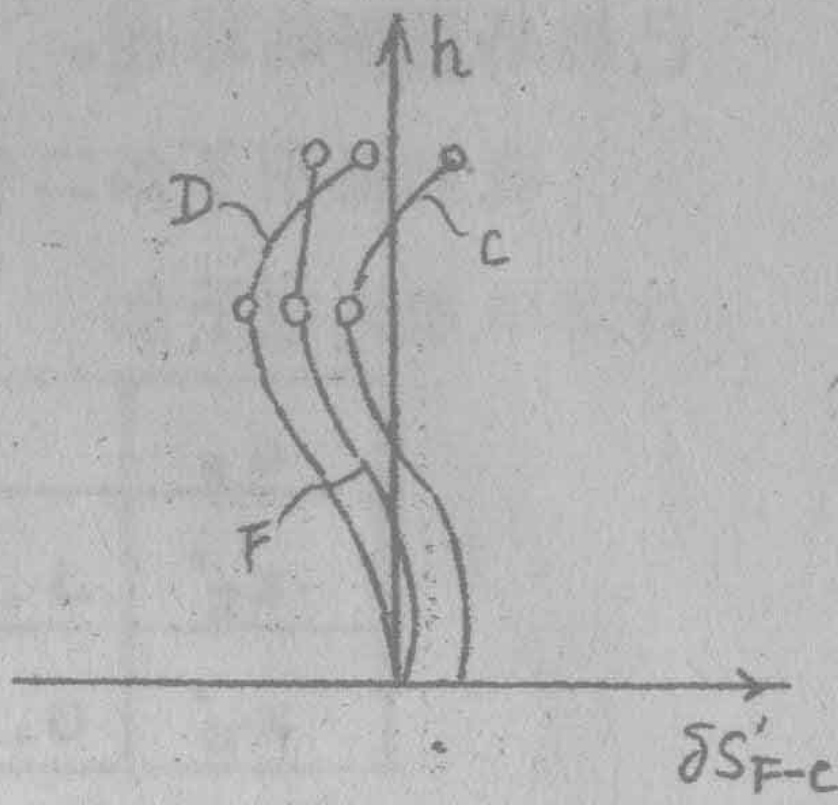


图 6-13

图 6-13 为色差曲线图。

列出最后所得的半部系统的数据如次

$$\begin{aligned}
 R_1 &= \infty & d_1 &= 2 & n_1 &= 1 \\
 R_2 &= 64.75 & d_2 &= 24 & n_2 &= 1.6475 (\text{T}\Phi 1) \\
 R_3 &= 392 & d_3 &= 7 & n_3 &= 1 \\
 R_4 &= -63 & & & n_4 &= 1.5162 (\text{BK}16) \\
 & & & & n_5 &= 1
 \end{aligned}$$

$S'_0 = 294.06$; $f'_0 = 230.64$

5) 系统的合成

系统的合成可以采用保持第一辅助光线在各折射面上的偏向角不变的方法来完成。

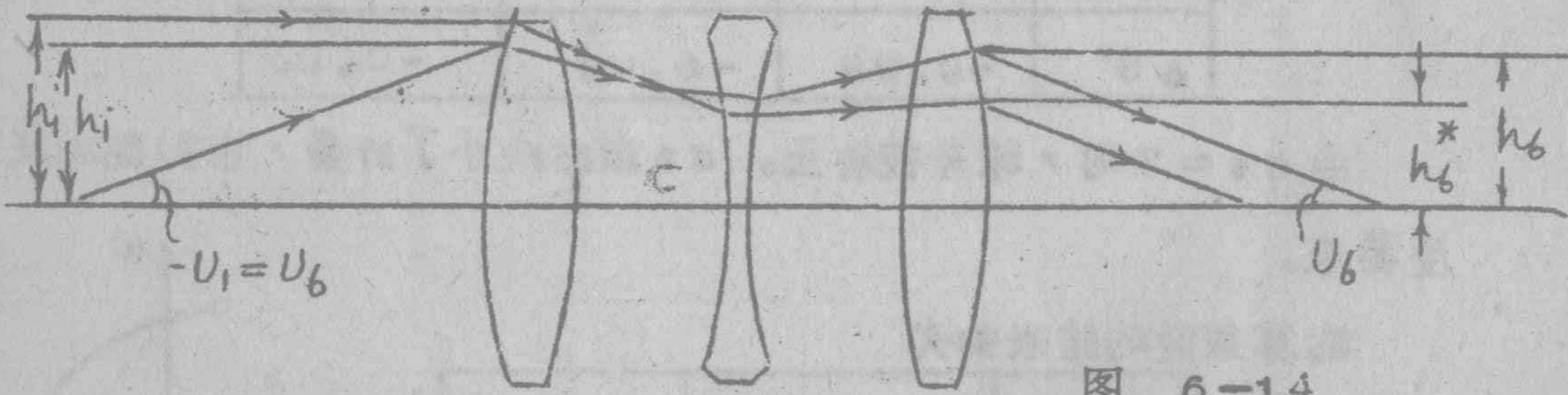


图 6-14

对于完全对称的系统，图 6-14 中各量已经通过光路计算求出如次

$$U_1 = -U_7 = -0.086716$$

$$h_1 = 25.50$$

$$U_2 = -U_6 = 0.099990$$

$$h_2 = 24.80$$

$$U_3 = -U_5 = 0.2$$

$$h_3 = 20.00$$

$$U_4 = 0$$

$$h_4 = 20.00$$

$$U_5 = -0.2$$

$$h_5 = 24.80$$

$$U_6 = -0.099990$$

$$h_6 = 24.50$$

$$U_7 = 0.086716$$

当物由与其象对称的位置移至无限远时，新的系统参数确定如次
角度

$$U_1^* = -U_7 + U_7 = 0$$

$$U_2^* = -U_6 + U_7 = 0.186706$$

$$U_3^* = -U_5 + U_7 = 0.286716$$

$$U_4^* = U_7 = 0.086716$$

$$U_5^* = U_5 + U_7 = -0.113284$$

$$U_6^* = U_6 + U_7 = -0.013247$$

$$U_7^* = 2U_7 = 0.173432$$

高度

$$\begin{aligned} h_1^* &= h_2^* + U_2^* d_1 = 27.054616 + 0.186706 \times 7 \\ &= 28.361558 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} h_2^* &= h_3^* + U_3^* d_2 = 20.173432 + 0.286716 \times 24 \\ &= 27.054616 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} h_3^* &= h_4^* + U_4^* \frac{d_3}{2} = 20.00 + 0.086716 \times 2 \\ &= 20.173432 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} h_4^* &= h_5^* - U_5^* \frac{d_3}{2} = 20.00 - 0.086716 \times 2 \\ &= 19.826568 \end{aligned}$$