

前 言

随着人们生产实践活动领域的扩展和深入，提出了既要能对被观察物体作大区域小倍率的概观，同时又能对它作小区域大倍率的仔细观察，变焦距光学系统就是在这样的要求下产生的。

它的历史可追溯到最早于1902年出现的放映物镜^[1]。

变焦距光学系统从原理方案上来讲有两种：一为光学补偿；另一为机械补偿，或称为绝对补偿。在机械加工精度不断提高的今天，完全可以保证凸轮的准确性以使像面稳定。因而后者在目前已成为变焦系统中的一种最基本类型。本书仅讨论后者。

本书对变焦系统发展史上几种基本分析方法作了概述，强调了把变焦过程作为一个以各组份的倍率为参量的微分过程来理解。全书主要讨论了涉及变焦系统设计全局的四个基本问题：

(1) 变焦系统变焦方程和对变焦概念的一些讨论；

(2) 从变焦方程出发，分析变焦系统的高斯解区问题，以求选准高斯解，减少设计工作中的盲目性；

(3) 用 $h-h_0$ 图和孔径图，把变焦系统各组份的移动，与它们的第一和第二辅助光线高以及第一和第二辅助光线偏角联系起来，推断变焦系统在各焦距位置的初级像差状况；

(4) 变焦系统消像差设计及几个变焦系统设计例。

纵观变焦系统设计的几个阶段，实践证明前述第(4)个问题是重要的，然而前三个问题的影响却是深刻的。

1973年3月作者在西安应用光学研究所一次变焦系统设计的初次尝试和随之的总结^[2]构成本书的一些基本观点，实践表明一种好的变焦系统分析方法应当达到：既便于使用者用它精确计算；也便于用它与变焦运动中的物理概念联系，即便于作概念判断。只有达到这两点的分析方法才便于使用，才能推广，从而才具有生

命力。本书介绍的这种方法，则兼有这两个特点。从1973年至今，各工厂、研究所从事变焦系统研制的单位广为应用这种方法便是一个证明，当然这个方法还要不断完善和发展。

在作者从事变焦系统设计过程中，不断得到中国科学院西安光学精密机械研究所薛鸣球所长的热忱指导，他关于变焦系统的有关论述^{〔3〕〔4〕〔6〕〔8〕}是本书的基本参考文献。在本书的编写过程中又承他仔细审阅，对此表示深切感谢。

西安应用光学研究所姚多舜同志以及华东工学院901教研室冯海友同志均热情提供描光路程序。902教研室游明俊、迟泽英和沈伟生等同志从百忙中为本书的出版做了大量工作。绘图室张翔争同志完成了全部描图。在此一并表示谢忱。

为便于阅读，请读者注意：

(1) 书中经常使用 l, lm, m, sm, s 作为下角标，它们分别表示长焦，次长焦，中焦，次短焦，短焦等焦距位置；

(2) 书中凡提及长度量，其单位均为mm。

最后，由于作者水平所限，书中定有不少缺点和不足之处，望读者多提宝贵意见。

作 者

目 录

第一章	变焦系统变焦过程的微分方程	1
§ 1-1	变焦系统工作过程和对它的基本要求	1
§ 1-2	变焦过程中的几个重要规律	2
§ 1-3	变焦系统变焦方程和对它的讨论	8
§ 1-4	双组联动型变焦系统变焦方程及其讨论	23
§ 1-5	各种变焦系统及其变焦方程	33
§ 1-6	几种分析变焦过程的方法简介	41
第二章	变焦系统高斯解分析	49
§ 2-1	正组补偿变焦系统高斯解分析	49
§ 2-2	正组补偿变焦系统换根问题	59
§ 2-3	负组补偿变焦系统高斯解分析	63
§ 2-4	负组补偿变焦系统换根问题	81
§ 2-5	双组联动型变焦系统高斯解分析	82
§ 2-6	双组联动型变焦系统换根问题	93
第三章	用 $h-h_p$ 图和孔径图分析变焦系统	98
§ 3-1	$h-h_p$ 图简介	98
§ 3-2	变焦系统 $h-h_p$ 图和孔径图	105
§ 3-3	用 $h-h_p$ 图和孔径图辅助判断 正组补偿变焦系统高斯解	112
§ 3-4	用 $h-h_p$ 图和孔径图辅助判断 负组补偿变焦系统高斯解	115
第四章	变焦系统光学设计	121
§ 4-1	变焦系统设计过程	121
§ 4-2	变焦过程中变焦系统像差变化分析	135
§ 4-3	正组补偿变焦系统设计例	140
§ 4-4	负组补偿变焦系统设计例	153
§ 4-5	双组联动型变焦系统设计例	163
参考文献		176

第一章 变焦系统变焦过程 的微分方程

本章的中心是介绍变焦系统变焦过程的微分方程，或称变焦方程。即用一个微分方程把变焦系统的运动规律和各参数统一起来描述。

§ 1-1 变焦系统工作过程和对它 的基本要求

变焦系统要改变焦距，而每个组份焦距一经设计与加工之后，就是固定不变的，要变焦，只能改变各组份之间的间隔。

改变组份之间的间隔，系统的像面随之移动。为了消除像面的有害移动，需要有的组份作抵消像面移动的补偿运动，从而产生了不同的补偿形式。

几个运动组份固连在一起作同方向的移动，达到在变焦的同时能减少像面移动，这种系统叫做光学补偿系统。此种系统，本书不研究。各个运动组份按不同的运动规律作较复杂的移动，达到完全防止[●]像面移动。这种系统叫做机械补偿系统。它需要用机械加工办法加工成准确的凸轮，保证运动组份的准确移动，从而有效地防止有害的像面移动。现在，由于机械加工水平完全有保证，从而这种补偿形式的系统也就越来越显示出它的优越性。目前，大多数变焦系统都属于这种补偿形式。

图1-1-1是一个变焦系统。 ϕ_1 和 ϕ_4 在变焦过程中是固定不动的，分别叫前固定组和后固定组。 ϕ_2 和 ϕ_3 叫做变倍组和补偿组。在变焦过程中它们各自按自己的运动规律移动 q 和 Δ ，移动量用

● 至少理论上能完全防止像面移动。

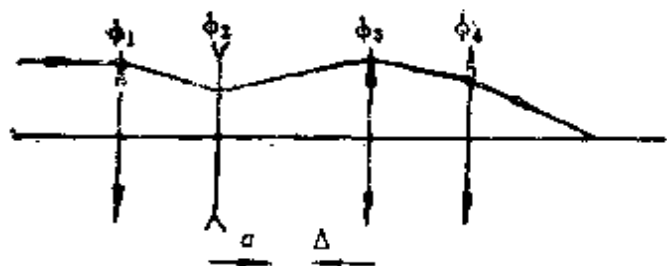


图1-1-1 变焦系统示意图

凸轮来控制。变倍组沿光轴作微小移动 a ，补偿组则相应地沿光轴作微小补偿移动 Δ ，从而保证时时没有残余的像面移动。

机械补偿系统有多种类型，但基本的是两种：其一，正组补偿变焦系统，即补偿组 ϕ_3 具有正的光焦度；其二，负组补偿变焦系统，即补偿组 ϕ_3 具有负的光焦度。

变焦系统的使用，应满足如下基本要求：

- (1) 均匀改变焦距；
- (2) 变焦过程中像面保持稳定；
- (3) 相对孔径基本保持不变；
- (4) 成像质量符合要求。

§ 1-2 变焦过程中的几个重要规律

由变焦系统的两个基本要求，即前述第(1)和第(2)项，我们发现：在分析变焦组份运动中起支配作用的是如下四个规律：

1. 系统焦距的改变是依靠组份之间间隔的改变来实现的。

由高斯光学知，由两个组份 ϕ_1 和 ϕ_2 构成的系统，如图 1-2-1 所示，其总光焦度为

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 - d\varphi_1\varphi_2 \quad (1-2-1)$$

由于组份 ϕ_1 和 ϕ_2 的光焦度 φ_1 和 φ_2 是不能改变的，欲改变此系统的焦距，即改变它的总光焦度 φ ，只能依赖于改变它们相互之间的间隔 d 来实现。变焦系统焦距的改变，就是利用这个道理。系统总焦距改变的主动因素是改变活动组份相互之间的间隔。

由此进一步引伸得出：在变焦系统的变倍组 ϕ_2 和补偿组 ϕ_3 的可能的几条补偿像面的曲线中，使相互间隔改变最迅速的那一条曲线，必然是使系统焦距变化最迅速的补偿曲线。

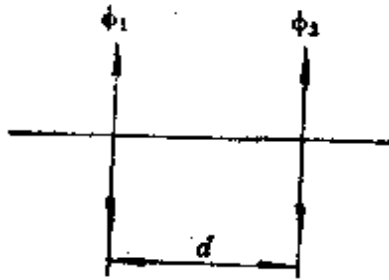


图1-2-1 总光焦度与间隔的关系

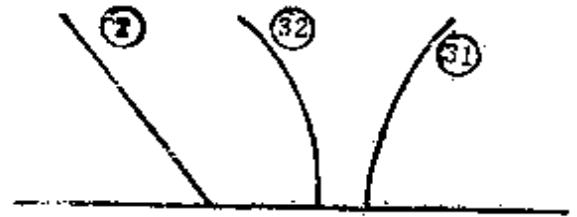


图1-2-2 补偿曲线

如图1-2-2，补偿组 ϕ_3 可能沿③②曲线移动，也可能沿③①曲线移动。可以发现，当补偿组 ϕ_3 沿③①曲线移动时，使它与变倍组之间的间隔改变快，因而总焦距变化快。相反，补偿组若沿③②曲线移动时，间隔改变慢。所以选③①曲线作为补偿曲线。

2. 系统像面的稳定，即像面位移的补偿依赖于各个运动组份共轭距改变量的总和为零来实现，即

$$\sum_i \Delta L_i = 0 \quad (1-2-2)$$

图1-2-3是由 ϕ_1 和 ϕ_2 两个组份组成的系统。物点为 A ，像点为 A' 。 ϕ_1 和 ϕ_2 的共轭距分别为 L_1 和 L_2 ，合成共轭距为 $\overline{AA'}$

$$\overline{AA'} = L_1 + L_2$$

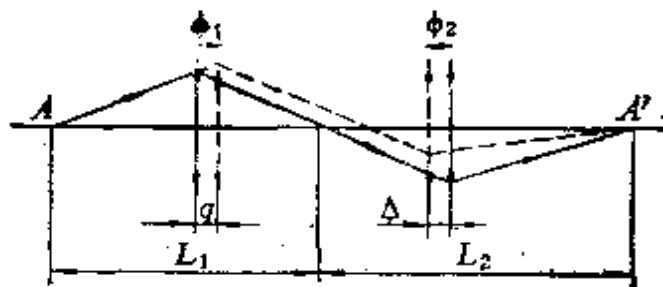


图1-2-3 共轭距关系图

如果 ϕ_1 向右移动 q ，它的共轭距 L_1 改变 ΔL_1 。为了要保持像点仍为 A' 不变，那么 ϕ_2 就要作相应的移动 Δ ，以使它的共轭距 L_2 变化，其改变量为 $\Delta L_2 = -\Delta L_1$ ，从而使像面不动。所以要使像面不动，必须 $\sum_i \Delta L_i = 0$ ，即各个组份引起的共轭距改变量应能完全抵消。这里式(1-2-2)是对所有运动组份取和。如不满足此式，必有剩余像面位移存在，最终像面将不稳定。后面我们会看到，无论变焦系统有多复杂，式(1-2-2)均成立。

3. 物像交换原则

由前知：变焦的任何瞬间都要求其像面移动得到补偿。然而，对一个已知的物点和要求的像点，我们要问：一个组份有几个位置可实现像面补偿？要回答这个问题就要用物像交换原则。在此我们只简单介绍它，其详细运用留待以后各节再讲。

图1-2-4(a)， h_1 和 h'_1 为组份在位置A时的物高和像高。 l_1 和 l'_1 为此时的物距和像距。 u_1 和 u'_1 分别为物方和像方孔径角。则倍

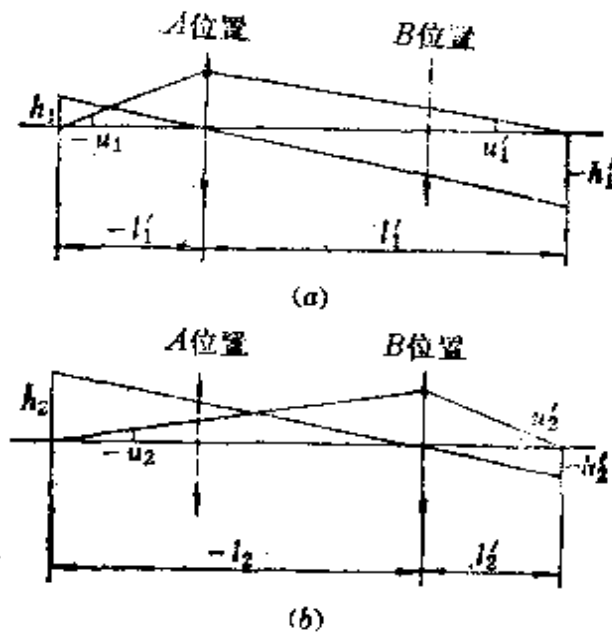


图1-2-4 物像交换原则图

(a) 透镜处于A位置；

(b) 透镜处于B位置。

率为

$$m_1 = \frac{h'_1}{h_1} = -\frac{l'_1}{l_1} = -\frac{u_1}{u'_1} \quad (1-2-3)$$

图1-2-4(b), 当组份移动到B位置时, 对应的量是 $h_2, h'_2, l_2, l'_2, u_2, u'_2$ 。此时的倍率 m_2 为

$$m_2 = \frac{h'_2}{h_2} = -\frac{l'_2}{l_2} = -\frac{u_2}{u'_2} \quad (1-2-4)$$

这两种情况下共轭距没有变化。如果我们取 $l'_1 = -l_2, l_1 = -l'_2$, 即把物和像互相交换, 有

$$m_1 = \frac{l'_1}{l_1} = \frac{(-l_2)}{(-l'_2)} = \frac{1}{m_2} \quad (1-2-5)$$

前后两个位置的倍率之比, 即变焦比 Γ 为

$$\Gamma = \frac{m_1}{m_2} = \frac{m_1}{\frac{1}{m_1}} = m_1^2 \quad (1-2-6)$$

这说明: 对任何一个组份, 当它由A位置移到B位置时, 其共轭距不变, 倍率由 m_1 变到 $m_2 = 1/m_1$ 。或者说, 对任何一个组份都存在一种现象: 该组份可以有两个位置实现共轭距不变, 即物面和像面稳定不变, 而在这两个位置上倍率互为倒数。这相当于在保持共轭距不变的同时, 把物面和像面交换一下, 这就是物像交换原则。

如图1-2-5(a), 在该时刻 ϕ_2 的共轭距为 L_2 , ϕ_2 有两个保持 L_2 不变的物像交换位置 Φ_2 和 $\bar{\Phi}_2$ 。 ϕ_3 的共轭距为 L_3 , 它的物像交换位置为 Φ_3 和 $\bar{\Phi}_3$ 。图1-2-5(b), ϕ_2 的新共轭距 L'_2 , 它此时的物像交换位置为 Φ'_2 和 $\bar{\Phi}'_2$ 。 Φ'_3 和 $\bar{\Phi}'_3$ 是 ϕ_3 此时的物像交换位置。

所以, 在变焦系统的整个变焦移动过程中, 每个活动组份每瞬间都有两个位置是它的物像交换位置。若把每个瞬间的位置连接起来, ϕ_2 有两条物像交换位置曲线, 而 ϕ_3 也有两条物像交换位置曲线。从而, 对每个活动组份凡提及物像交换原则, 一定有两

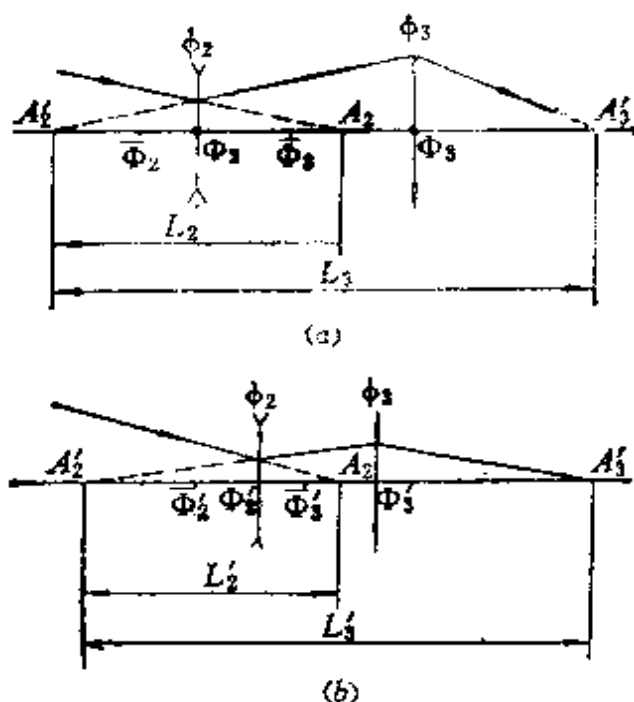


图1-2-5 正组补偿物像交换原则例图

(a) 某一时刻; (b) 另一时刻。

条孪生的曲线，它们一定是成双成对地出现。变焦组有它自己的两条曲线，补偿组亦有其两条曲线。凡活动组份，都有自己的两条补偿曲线。

物像交换原则有如下特点：

(1) 变焦系统的任何运动组份每时每刻都有两个物像交换位置，对每个运动组份都存在孪生的两条补偿曲线，

(2) 组份在此两个物像交换位置上的倍率互为倒数，即 $m_1 = 1/m_2$ ，

(3) 变焦比 $\Gamma = m_1^2$ ，即 $m_1 = \pm\sqrt{\Gamma}$ ， $m_2 = \pm\sqrt{\frac{1}{\Gamma}}$ ，

(4) 组份在这一对物像交换位置上共轭距不变。

4. 当运动组份处于倍率 $m = -1$ 时，对分析变焦移动有至关重要的意义。

由几何光学的高斯公式知

$$\frac{1}{l'} - \frac{1}{l} = -\frac{1}{f'} \quad (1-2-7)$$

式 (1-2-7) 两边同乘 l 得

$$l = f' \left(-\frac{1}{m} - 1 \right) \quad (1-2-8)$$

式 (1-2-7) 两边同乘 l' 得 $l' = f' (1 - m)$ (1-2-9)

共轭距

$$L = l' - l = f' (1 - m) - f' \left(-\frac{1}{m} - 1 \right)$$

所以

$$L = f' \left(2 - \frac{1}{m} - m \right) \quad (1-2-10)$$

由式 (1-2-10) 知, L 随 m 的变化关系是三条曲线之和。第一条, $L = 2f'$, 是平行于 m 轴的直线。第二条, $L = -f'm$, 是一条过坐标原点的倾斜直线。第三条, $L = -f' \frac{1}{m}$, 是一条双曲线。三条曲线加和的结果, 极值发生在 $m = -1$ 处, 如图 1-2-6 所示。

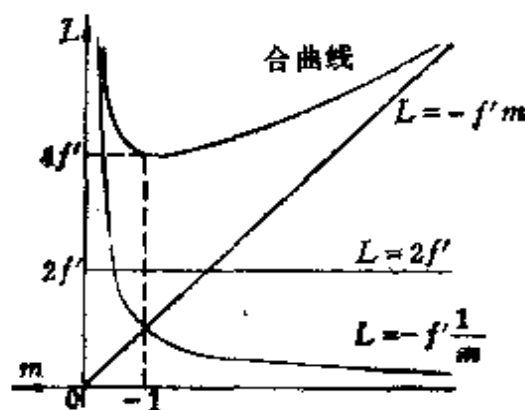


图1-2-6 共轭距 L 与 m 的关系

此时的共轭距取极小值

$$L_{\min} = 4f' \quad (1-2-11)$$

由此可知, 对任何一个焦距为 f' 的组份来说, 它可以提供任意大的共轭距。合曲线表明, 无穷大的共轭距发生在两个位置, (1)

$m = 0$ 时, $L = \infty$, 即平行光入射, 像点在后焦点。(2) $m = -\infty$ 时, $L = \infty$, 即物在前焦点, 像点在 ∞ 。然而, 最小共轭距却为一个确定值 $L_{\min} = 4f'$ 。要组份提供出比 $4f'$ 更小的共轭距是不可能的。 $m = -1$ 这个特殊点成为我们分析变焦运动的关键点。

§ 1-3 变焦系统变焦方程和对它的讨论

从分析变焦系统的全局, 有四个问题是较重要的:

(1) 变焦系统变焦方程是说明变焦系统在变焦和像面位移得到补偿条件下, 运动组份的运动方程;

(2) 基于变焦方程所获得的高斯解区, 这种高斯解只是从使补偿曲线平滑所给出的高斯解;

(3) 分析变焦系统的光束结构和渐晕情况, 找出有利于消像差设计的高斯解;

(4) 消像差设计得出系统最终结构参数。

设计实践证明: 高斯解的取值恰当与否对变焦系统设计的全过程影响是深刻的, 讨论变焦方程和由它而定的高斯解区十分重要。

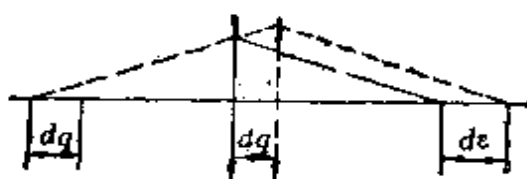
恩格斯指出: “只有用微分运算才能使自然科学有可能用数学来不仅仅表明状态, 并且也能用数学来表明过程; 运动。”(《自然辩证法》第172页) 把变焦过程理解为一个连续的微分过程是我们的出发点。机械补偿, 即绝对补偿, 必须用组份的非线性移动来达到像面位移的完全补偿, 构成运动的制约条件。微分过程只能用微分来描写, 而要达到像面补偿这个制约条件启发我们认识到: 必定存在一个微分方程。

(一) 方程的建立

我们先从只有 4 个组份的系统入手。由于只有运动组份才产生像面位移, 所以我们只分析运动组份。

为了统一符号起见, 约定: 运动组份向右的移动量为正, 反之为负。

对变焦组 ϕ_1 , 物点不动, 由于 ϕ_2 微分移动 dq , 产生像点微小

图1-3-1 de 和 dq 的关系

移动 de 。若以 ϕ_2 的倍率 m_2 表示 de ，则为

$$de = (1 - m_2^2)dq \quad (1-3-1)$$

对这个公式可理解为：首先假设像点随物点以及组份一起向右移动 dq ；然后设物点返回原位，像点相应向左移动 $m_2^2 dq$ 。所以像点实际相对于原位置移动 $(1 - m_2^2)dq$ 。此式中 m_2^2 为纵向放大率。

由式(1-3-1)知道： $|m_2| < 1$ 时， de 和 dq 同方向； $|m_2| > 1$ 时， de 和 dq 反方向。这是因为倍率由 m_2 到 $1/m_2$ ，只有在此两端点时共轭距相同[●]，除此而外，共轭距均变短。当 $m_2 = -1$ 时，共轭距达到最短，以此点为分界点， de 和 dq 由同向到反向。

由于 ϕ_2 的移动，引起整个运动组份的像面移动为

$$m_2^2(1 - m_2^2)dq \quad (1-3-2)$$

由于 ϕ_3 移动，引起整个运动组份的像面移动为

$$(1 - m_3^2)d\Delta \quad (1-3-3)$$

为达到像面稳定，两个像面移动的代数和，必为零。

$$m_2^2(1 - m_2^2)dq + (1 - m_3^2)d\Delta = 0 \quad (1-3-4 a)$$

即

$$(1 - m_2^2)dq + \frac{1 - m_3^2}{m_2^2}d\Delta = 0 \quad (1-3-4 b)$$

为把式(1-3-4 b)表示成以倍率 m 为自变量的微分方程，需用 m 来表示 dq 和 $d\Delta$ 。

● 参考图1-2-6。

对变倍组 ϕ_2 , m_2 的改变是由于物距的改变而引起。用 ϕ_2 的物距 l_2 表示 m_2 , 加以微分, 并且注意到 $dl_2 = -dq$, 得

$$dm_2 = -\frac{m_2^2}{f'_2} dl_2 \quad (1-3-5)$$

和

$$dq = \frac{f'_2}{m_2^2} dm_2 \quad (1-3-6)$$

式中 f'_2 是 ϕ_2 的焦距。

对补偿组, m_3 的改变是由于像距的改变而引起, 即

$$d\Delta = f'_3 dm_3 \quad (1-3-7)$$

式中 f'_3 是 ϕ_3 的焦距。将 (1-3-6), (1-3-7) 代入 (1-3-4 b) 有

$$\frac{1-m_2^2}{m_2^2} f'_2 dm_2 + \frac{1-m_3^2}{m_3^2} f'_3 dm_3 = 0 \quad (1-3-8)$$

这就是变焦过程微分方程。联合运用(1-3-8), (1-3-6), (1-3-7), 并通过简单积分便可方便地计算和分析变焦过程。

(二) 方程的讨论

(1) 方程形式的讨论

从式(1-3-8)可知, 不论变焦系统的型式如何[●], 不论一个系统中各个组份的具体位置如何, 也不论各个组份由于位置不同而引起的位移量如何, 各个运动组份均以 $\frac{1-m^2}{m^2} f' dm$ 的形式在方程中出现, 亦即各个运动组份用 m 为变量的数学表达式都完全相同。由式(1-2-10)可知, 一个组份的共轭距

$$L = l' - l = f' \left(2 - \frac{1}{m} - m \right) \quad (1-3-9)$$

微分得

$$dL = -d \left[f' \left(\frac{1}{m} + m \right) \right] = \frac{1-m^2}{m^2} f' dm$$

● 个别情况除外, 详见§1-5的例子。

所以式 (1-3-8) 实际上是

$$\sum_i dL_i = 0 \quad (1-3-10)$$

式 (1-3-10) 的物理意义是：所有运动组份共轭距任何瞬间的微分改变量加和必须为零，即各个运动组份由于移动引起的共轭距的微分变化，必须互相抵消。

(2) 方程解的讨论

从数学上讲，式 (1-3-8) 属于多变量全微分型微分方程。其所以是全微分型，因为它是逐次假设某个组份移动，其它组份不动而构成的方程。由式 (1-3-8)，设 $U(m_2, m_3)$ 为原函数，则有

$$dU(m_2, m_3) = 0$$

其通解为

$$U(m_2, m_3) = f_2\left(-\frac{1}{m_2} + m_2\right) + f_3\left(-\frac{1}{m_3} + m_3\right) = C \quad (\text{常量})$$

设 ϕ_2 和 ϕ_3 都处于系统长焦这个初始位置。则

$$m_2 = m_{2i}, \quad m_3 = m_{3i}$$

同样有

$$f_2\left(-\frac{1}{m_{2i}} + m_{2i}\right) + f_3\left(-\frac{1}{m_{3i}} + m_{3i}\right) = C \quad (\text{常量})$$

消去常量 C ，得方程的特解

$$\begin{aligned} & f_3\left(-\frac{1}{m_2} - \frac{1}{m_{2i}} + m_2 - m_{2i}\right) \\ & + f_3\left(-\frac{1}{m_3} - \frac{1}{m_{3i}} + m_3 - m_{3i}\right) = 0 \end{aligned} \quad (1-3-11)$$

从而补偿组 ϕ_3 的倍率 m_3 构成二次方程

$$m_3^2 - bm_3 + 1 = 0 \quad (1-3-12)$$

其中

$$b = -\frac{f_2'}{f_3'}\left(-\frac{1}{m_2} - \frac{1}{m_{2i}} + m_2 - m_{2i}\right) + \left(-\frac{1}{m_{3i}} + m_{3i}\right) \quad (1-3-13)$$

解得 m_3 的两根

$$\left. \begin{aligned} m_{31} &= \frac{b + \sqrt{b^2 - 4}}{2} \\ m_{32} &= \frac{b - \sqrt{b^2 - 4}}{2} \end{aligned} \right\} \quad (1-3-14)$$

m_{31} 和 m_{32} 的图形见图1-3-2。可以证明 m_{31} 和 m_{32} 互为倒数，即

$$m_{31} = \frac{1}{m_{32}} \quad (1-3-15)$$

归结起来，方程描写变焦过程是：

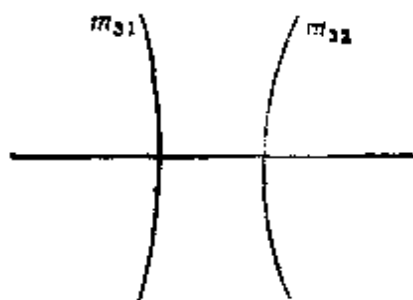


图1-3-2 m_{31} 和 m_{32} 示意图

(a) 由式(1-3-6)积分，注意 q 由零积到 q ， m_2 由 m_{21} 积到 m_2 ，得

$$q = f'_2 \left(\frac{1}{m_2} - \frac{1}{m_{21}} \right) \quad (1-3-16)$$

或

$$m_2 = \frac{1}{\frac{1}{m_{21}} + \frac{q}{f'_2}} \quad (1-3-17)$$

从而任给一个 ϕ_2 的移动量 q ，便可以求得它当时的倍率 m_{21}

(b) 从式(1-3-13)解得系数 b ；

(c) 从式(1-3-14)解得补偿组 ϕ_3 的两个倍率 m_{31} 和 m_{32} ；

(d) 由式(1-3-7)两边积分得

$$\left. \begin{aligned} \Delta_1 &= f'_3(m_{31} - m_{3l}) \\ \Delta_2 &= f'_3(m_{32} - m_{3l}) \end{aligned} \right\} \quad (1-3-18)$$

从而求出变倍组 ϕ_2 移动 q 所对应的补偿组 ϕ_3 的两个移动量 Δ_1 和 Δ_2 。

当 $b > 0$ 时,例如负组补偿系统 \ominus , $b > \sqrt{b^2 - 4}$, 有 $m_{31} > 0$ 和 $m_{32} > 0$ 。进一步如果有 $b > 2$,由式(1-3-14)判断得

$$m_{31} > 1 \quad 0 < m_{32} < 1 \quad (1-3-19)$$

当 $b < 0$ 时,例如正组补偿系统 $\omin�$, $|b| > \sqrt{b^2 - 4}$, 有 $m_{31} < 0$ 和 $m_{32} < 0$ 。进一步如果有 $b < -2$,由式(1-3-14)判断得

$$|m_{31}| < 1 \quad |m_{32}| > 1 \quad (1-3-20)$$

对应于 ϕ_2 的移动量 q , ϕ_3 有两个倍率 m_{31} 和 m_{32} 。到底哪一个倍率是系统当前的倍率呢? 在 $b > 0$ 的条件下,如果初始条件决定系统处于 $|m_{3l}| < 1$,由式(1-3-19)可知补偿组 ϕ_3 一定取 m_{32} 曲线,即取 Δ_2 补偿曲线。若 $|m_{3l}| > 1$,则 ϕ_3 取 m_{31} 曲线,即取 Δ_1 补偿曲线。若 $b < 0$,初始条件决定系统处于 $|m_{3l}| < 1$ 。由式(1-3-20)可知 ϕ_3 取 m_{31} 曲线,即取 Δ_1 补偿曲线。若初始条件决定系统处于 $|m_{3l}| > 1$,则 ϕ_3 取 m_{32} 曲线,即取 Δ_2 补偿曲线。总之,根据系统初始条件决定它的补偿组处于两条补偿曲线中的某一条。

(3) 式(1-3-12)中系数 b 的讨论

在分析不同补偿形式的系统中系数 b 是十分重要的。由式(1-3-12)得

$$b = \frac{1}{m_3} + m_3 \quad (1-3-21)$$

可知:系数 b 的正负完全决定于 m_3 的正负。例如正组补偿系统或双组联动系统 $\omin�$, $m_3 < 0$,则 $b < 0$;负组补偿系统, $m_3 > 0$ 则 $b > 0$ 。

●见§2-3。●见§2-1。●见§1-4。

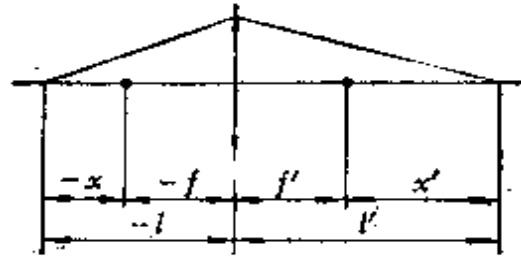


图1-3-3 共轭距图

由图1-3-3有

$$-l = -x - f$$

$$l' = x' + f'$$

共轭距

$$L = l' - l = 2f' + (x' - x) \quad (1-3-22)$$

由式(1-3-9)有 $L = f' \left(2 - \frac{1}{m} - m \right)$, 和式(1-3-22)相比较得

$$X = x' - x = -f' \left(\frac{1}{m} + m \right) \quad (1-3-23)$$

式中 X 为前后截距之和。对一透镜而言, $2f'$ 是不能改变的, 共轭距的改变则是由于前后截距之和 X 的变化而改变, 即

$$\Delta L = \Delta X$$

由式(1-3-23)得

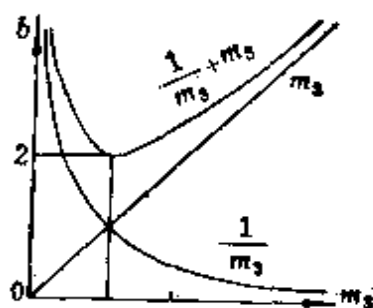
$$\frac{1}{m} + m = -\frac{X}{f'}$$

即

$$b = \frac{1}{m_s} + m_s = -\frac{X_s}{f'_s} \quad (1-3-24)$$

由上式可知 b 是补偿组前后截距的和被其焦距规化后的规化值。

由于透镜的共轭距 L 的最小值是 $4f'_s$, X_s 的最小值是 $2f'_s$, $|b|$ 的

图1-3-4 b 和 m_3 的关系

最小值只能为 2。

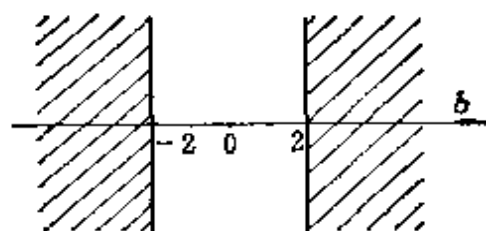
系数 b 随 m_3 变化的曲线如图 1-3-4 所示，与图 1-2-6 相似。

(4) m_3 无解区域的讨论

由式 (1-3-14) 知， m_3 无解发生在 $|b| < 2$ 情况下，即当

$$\left. \begin{array}{l} b \geq 2 \quad \text{或} \\ b \leq -2 \end{array} \right\} \quad (1-3-25)$$

时 m_3 有解，如图 1-3-5 所示的阴影部份。如果 b 不满足式 (1-3-25)，

图1-3-5 m_3 的有解区

说明该系统在选定的 f'_2 , f'_3 , m_{2j} , m_{3j} 条件下 m_3 无解，即找不到一条曲线能实现像面位移的补偿。此时，设计者应舍去这个方案，或加以适当调整修改。

如果 $|b| < 2$ ，这说明变倍组 ϕ_2 提供给补偿组 ϕ_3 的前后截距总和小于 $2|f'_3|$ ，即要求补偿组的共轭距小于 $4|f'_3|$ 。由式 (1-2-11)

和图 1-2-6 及 (1-3-24) 和图 1-3-4, 这显然是不成立的, 所以无解。

现在进一步考察:

(a) 重新列出式 (1-3-13)

$$b = -\frac{f'_2}{f'_3} \left(\frac{1}{m_2} + m_2 \right) + \frac{f'_2}{f'_3} \left(\frac{1}{m_{2l}} + m_{2l} \right) + \left(\frac{1}{m_{3l}} + m_{3l} \right)$$

可见 b 仅随 m_2 而变化。其变化关系完全相似于式 (1-3-24) 和 (1-2-10)。 $|b|$ 的最小值必定发生在 $m_2 = -1$ 时, 因为 $m_2 = -1$, 变倍组共轭距最短, 从而要求补偿组提供的共轭距也最短, 所以 $|b|$ 取最小值。这说明如果无解出现, 即 $|b|_{\min} < 2$, 必然首先出现在 $m_2 = -1$ 处, 故只要衡量 $m_2 = -1$ 这点的 $|b|$ 是否小于 2。若 $m_2 = -1$ 时, $|b|_{\min} < 2$, 肯定这个方案至少有一点无解; 反之, 无疑整条曲线有解。

(b) 无解是由于补偿组 ϕ_3 在 $m_2 = -1$ 时形成最小共轭距 $L_{\min} < 4|f'_3|$, 所以, m_{2l} 取 -1 的上半段, 即 $|m_{2l}| < 1$, 则不会发生无解; 反之, 当 m_{2l} 取在 -1 以下, f'_3 取一些不合适的值, 就会出现无解。

(c) 当 m_{2l} 确定后, 是否 $|f'_3|$ 越大的方案越易出现无解? 例如, 当 $f'_3 = 1.2$ 时为无解, 是否 f'_3 为 1.3, 1.4, 1.5……就一定无解?

回答是否定的。

例 设有一系统 $m_{2l} = -1.1$, $d_{23l} = 0.5$

由于

$$m_{3l} = \frac{f'_3}{m_{2l} - 1 - d_{23l} + f'_3}$$

$$\text{当: } f'_3 = 1.2 \text{ 时 } \quad \frac{1}{m_{3l}} + m_{3l} = -2.023809,$$

$$f'_3 = 1.3 \text{ 时 } \quad \frac{1}{m_{3l}} + m_{3l} = -2,$$

$$f'_3 = 1.4 \text{ 时} \quad \frac{1}{m_{3l}} + m_{3l} = -2.023809。$$

当只考察 $m_2 = -1$ 时

$$f'_3 = 1.2 \text{ 时} \quad |b| = 2.016816 \quad \text{有解,}$$

$$f'_3 = 1.3 \text{ 时} \quad |b| = 1.993007 \quad \text{无解,}$$

$$f'_3 = 1.4 \text{ 时} \quad |b| = 2.016816 \quad \text{有解。}$$

(d) 如果全部设计工作均已完成, 最后却发现补偿曲线在 $m_2 = -1$ 附近无解, $|b|$ 微微小于 2。这是很令人沮丧的事。怎么办? f'_2 和 f'_3 已不能改动, m_{2l} 改动对曲线影响太大。较好的办法是调整 m_{3l} 。因为

$$m_{3l} = \frac{f'_3}{f'_2(1 - m_{2l}) - d_{23l} + f'_2} \quad (1-3-26)$$

由公式可知, 调整 d_{23l} , 可以改变 m_{3l} , 从而使 $|b| \geq 2$, 消除无解。

(5) m_3 极值讨论

对 (1-3-8) 求微分 $\frac{dm_3}{dm_2}$, 有:

$$\frac{dm_3}{dm_2} = \frac{\frac{1 - m_2^2}{m_2^2} f'_2}{\frac{1 - m_3^2}{m_3^2} f'_3}$$

令 $\frac{dm_3}{dm_2} = 0$, 得

$$m_2^2 = 1$$

有 $m_2 = \pm 1$ (1-3-27)

式 (1-3-27) 便是 m_3 取极值的条件。对有光焦度的组份, 我们不考虑 $m_2 = 1$ 这个解, 所以 m_3 曲线极值一定发生在 $m_2 = -1$ 时, 也即补偿曲线 Δ 极值发生在 $m_2 = -1$ 时。造成这个特点的原因很容易理解。注意图 1-3-6, 对变倍组 ϕ_2 , 当 $m_2 = -1$ 时共轭距 L_2 达到最短。 m_2 在 -1 的前后变化, 变倍组总有具有相同共轭距的两两对应的位置, 并要求 ϕ_2 移动相同的位移 Δ 来补偿。只有在 $m =$

-1时, 只有一个最短的共轭距要求 ϕ_s 移动唯一的一个 Δ 来补偿。因此 ϕ_s 的补偿曲线在 $m_2 = -1$ 时出现极值。

$m_2 = -1$ 是分析变焦过程极其重要的特征点, 山路敬三⁽⁷⁾作了较好的论述。实践证明, 恰当利用 $m_2 = -1$ 这个特征点可设计出外形尺寸紧凑的系统。

$m_2 = -1$ 时, m_3 曲线到底是取极大值或极小值, 要由具体情况决定。当 $b > 0$ 时, 例如负组补偿系统, 有 $m_{s1} > 1$ 和 $0 < m_{s2} < 1$, 所以 $m_2 = -1$ 时, m_{s1} 取极小值, 而 m_{s2} 此时取极大值。当 $b < 0$ 时, 例如正组补偿系统, 与前种情况相反, $m_2 = -1$ 时, $|m_{s1}|$ 取极大值, $|m_{s2}|$ 取极小值。

(6) 换根的讨论

由式(1-3-27), $m_2 = -1$ 时 m_3 发生极值。又由式(1-3-14), 一般情况下 m_3 总有两个根 m_{s1} 和 m_{s2} , 两补偿曲线互相分离。但只要我们注意调整初始值 m_{2i} 和 m_{3i} , 使 $|b| = 2$, 则 $\sqrt{b^2 - 4} = 0$, 所以 m_{s1} 和 m_{s2} 等于-1[●], 即 m_{s1} 曲线和 m_{s2} 曲线在 $m_2 = -1$ 时相切。存在一种处理问题的可能: 从切点换根, 即从 m_{s1} 曲线经过切点换到 m_{s2} 曲线上来, 或从 m_{s2} 换到 m_{s1} , 以便达到补偿曲线保持单调变化, 变焦比增长迅速的目的, 见图1-3-7。换根只能发生在

$$m_2 = -1 \quad m_3 = -1 \quad (1-3-28)$$

同时满足的系统中。关于平滑换根的思想, 霍普金斯(H. H. Hopkins)于1956年曾有过论述⁽⁸⁾。

换根应当注意两点:

(a) 当 $m_2 = -1$ 时, 若 m_3 无解, 换根当然无法实现。这种情况应当避免。

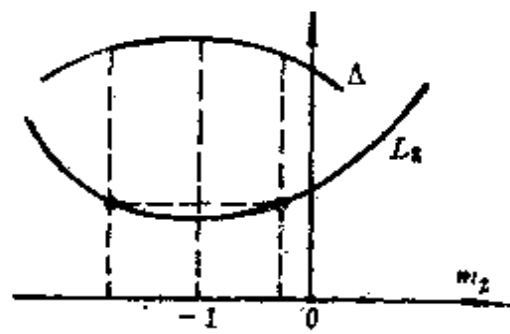


图1-3-6 补偿曲线 Δ 极值图

● $m_{s1} = m_{s2} = 1$ 这个解我们不取。

(b) 当 $m_2 = -1$ 时, m_3 虽然有解, 但 $|b|$ 并不准确为 2, m_{31} 和 m_{32} 两曲线互相分离, 衔接不好, 平滑换根仍不能实现。这时只能调整 m_{21} 和 m_{31} , 即求出 $|b| = 2$ 时的 m_{21} 和 m_{31} 的值, 从而解出平滑换根条件下系统应该具有的 d_{231} 或 d_{121} 值。这是易于做到的。

例 正组补偿系统的参数为:

$$f'_2 = -1, f'_3 = 1.2, m_{21} = 1.5, d_{231} = 0.5$$

应用式 (1-3-26) 得 $m_{31} = -0.666667$ 。

当 $m_2 = -1$ 时 $b = -2.027777$ 。

因此 m_{31} 和 m_{32} 两曲线互相分离, 如图 1-3-2 所示, 不能平滑换根。为此, 设 $m_2 = -1$

令

$$b = -\frac{f'_2}{f'_3} \left(-2 - \frac{1}{m_{21}} - m_{21} \right) + \left(\frac{1}{m_{31}} + m_{31} \right) = -2$$

得

$$m_{31} = -0.690351;$$

$$m_{31_2} = -1.448537。$$

从而解得

$$d_{231_1} = 0.438246,$$

$$d_{231_2} = -0.471578。$$

d_{231_2} 不合理只能舍去。从而只要把 d_{231} 从 0.5 调整到 0.438246, 便保证了当 $m_2 = -1$ 时肯定有 $b = -2$, 此时便可实现平滑换根。注意本例是设 $f'_2 = -1$, 实际上是假设系统中所有的长度量均以 f'_2 为单位长度的规化值。

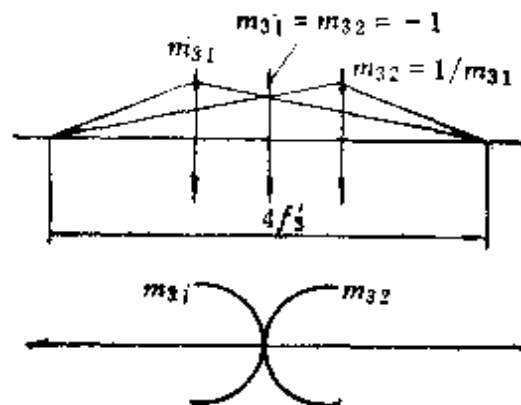


图1-3-7 换根图

(7) 最速变焦路线的讨论

下面我们对变焦比作如下分析。

系统变焦比

$$\Gamma = \frac{m_2 |m_3|}{m_2 m_3} \quad (1-3-29)$$

是一个二维数量场。我们探讨此数量在何种条件下增长最快，即最速变焦，也即在不改变系统结构时如何能得到最大变焦比。为此引入梯度概念。图 1-3-8，设 m_2 和 m_3 数轴上的单位矢量分别以 i 和 j 表示。如果我们考察 (m_2, m_3) 平面上的某点 P

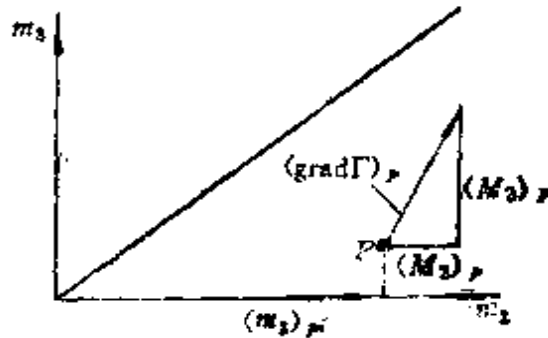


图1-3-8 grad Γ 图

$$\begin{aligned} (\text{grad } \Gamma)_P &= (M_2)_P i + (M_3)_P j \\ &= \left(\frac{\partial \Gamma}{\partial m_2} \right)_P i + \left(\frac{\partial \Gamma}{\partial m_3} \right)_P j \\ &= (-1) \frac{(\Gamma)_P}{(m_2)_P} i + (-1) \frac{(\Gamma)_P}{(m_3)_P} j \end{aligned} \quad (1-3-30)$$

梯度方向

$$\frac{(M_3)_P}{(M_2)_P} = \text{tg } \alpha = \frac{(m_2)_P}{(m_3)_P} \quad (1-3-31)$$

这说明：变焦比 Γ 的梯度 $(\text{grad } \Gamma)_P$ 的投影坐标 $(M_3)_P$ 、 $(M_2)_P$ 与 P 点的坐标 $(m_3)_P$ 、 $(m_2)_P$ 成反比例。若 $m_2 = m_3$ ，则 $\text{grad } \Gamma$ 沿 45° 方向不变；若 $m_2 \neq m_3$ ，则 $\text{grad } \Gamma$ 总是指向 m_2 和 m_3 均分的方向。不论初始状态如何， $\text{grad } \Gamma$ 稳定于 m_2 、 m_3 的均分线上，这表明平方结构的数量场在二维数量场中增值是最快的。

为使 Γ 增值合乎 $\text{grad } \Gamma$ 方向, 随着 $|m_2|$ 增加的同时, $|m_3|$ 也必须同时单调递增。由此, 为了在像面稳定的同时实现最速变焦, 应当选择补偿曲线 m_{s1} 和 m_{s2} 中尽量靠近 $\text{grad } \Gamma$ 方向的曲线 \bullet , 即应尽量选择与 m_2 成比例变化的 m_3 的曲线。

如图 1-3-9 所示, 对正组补偿系统, $b < 0$, $|m_{s1}| \leq 1$, $|m_{s2}| \geq 1$ 。从 m_{s1} 的上半段曲线经 $m_{s1} = m_{s2} = -1$ 点, 换根到 m_{s2} 上。这条曲线就是它的最速变焦路线, 而最速变焦路线就是 § 1-2 里所说在可能的补偿曲线中取使运动组份之间间隔变化最快的路线。如图 1-3-9 所示, 对正组补偿系统, 补偿组沿所示最速变焦路线, 间隔 d_2 变化最迅速。

(8) 物像交换的讨论

由式 (1-3-14) 及系数 b 的表达式 (1-3-13), 我们分别以 m_2 和 m_3 为横坐标作示意图 1-3-10。由图可知: 变倍组 ϕ_2 每处于一个位置, 相应于一个 m_2 , 或 m_{21} 或 m_{22} , 则有两个补偿组 ϕ_3 的位置 m_{s1}

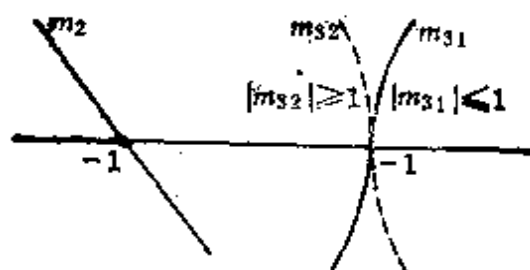


图1-3-9 正组补偿系统
最速变焦路线

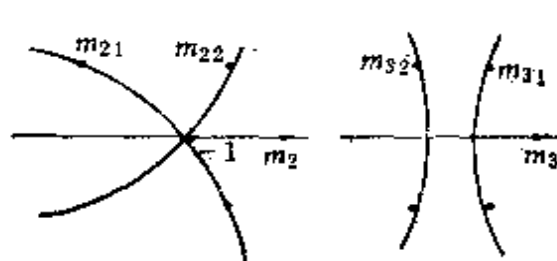


图1-3-10 物像交换示意图

和 m_{s2} 与之对应, 这可由式 (1-3-14) 看出, 其中 $m_{s1} = \frac{1}{m_{s2}}$ 。反之, 每一个 m_3 , 或 m_{s1} 或 m_{s2} , 则有两个变倍组 ϕ_2 的位置 m_{21} 及 m_{22} 与之对应, 此时 $m_{21} = \frac{1}{m_{22}}$, 这可由系数 b 的表达式 (1-3-13) 看出。

某时刻, 变倍组 ϕ_2 处于某一位置, 对应着一个共轭距 L_2 , 这

\bullet 由于事实上不可能严格沿 $\text{grad } \Gamma$ 方向。

个 L_2 可能由 ϕ_2 的两个位置 $m_{2,1}$ 和 $m_{2,2}$ 提供。与 L_2 对应,有一个补偿组 ϕ_3 的共轭距 L_3 ,这个 L_3 又可以由 ϕ_3 的两个位置 $m_{3,1}$ 和 $m_{3,2}$ 来实现。所以在该时刻,有两个 m_2 的值 $m_{2,1}$ 和 $m_{2,2}$,以及 m_3 的两个值 $m_{3,1}$ 和 $m_{3,2}$ 实现像面补偿。换一时刻,仿此又有该时刻的 $m_{2,1}$ 和 $m_{2,2}$ 以及 $m_{3,1}$ 和 $m_{3,2}$ 。所以当系统焦距连续改变,每瞬间每个运动组份都有相应的物像交换位置;这就是整个变焦过程。所以在变焦系统中凡提及物像交换原则,对所有运动组份都存在。

§ 1-4 双组联动型变焦系统 变焦方程及其讨论

典型的双组联动型变焦系统如图 1-4-1 所示。它有两个变倍组 ϕ_2 和 ϕ_4 固连一起作线性移动,有一个补偿组 ϕ_3 ,相对于变倍组作微量补偿移动,因而它兼有光学补偿和机械补偿两种特点。在整个变焦移动过程中成像质量良好,运动组份移动曲线比较平缓,有其特有的调焦方式,使其在近距离物体成像时不致引起视场角的变化和口径的明显增加。

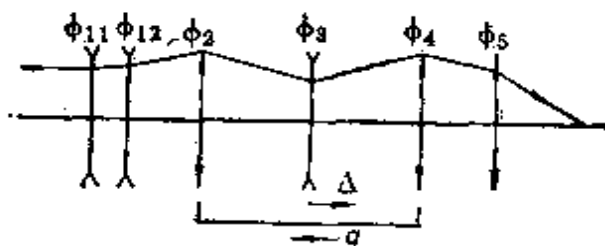


图1-4-1 双组联动变焦系统简图

这种变焦系统是一种较为优越的型式,已得到较广泛的应用。它的典型代表是日本《特許公報》发表的库克(G. H. Cook)所设计的瓦罗塔尔-30型(Varotal-30)16~160mm彩色电视变焦

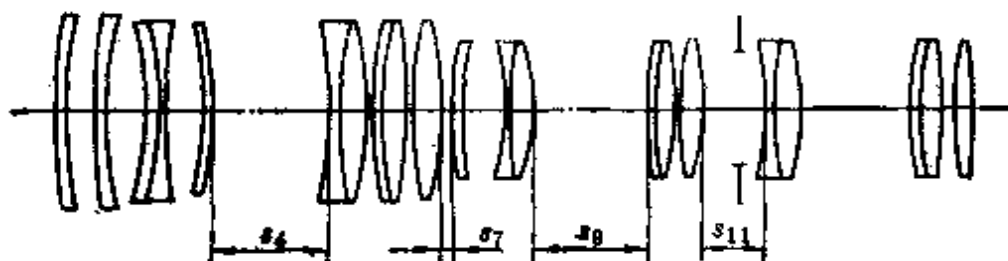


图1-4-2 瓦罗塔尔-30系统

表1-1 瓦罗塔尔-30系统间隔表

f' (规范化值)	s_4 (mm)	s_7 (mm)	s_9 (mm)	s_{11} (mm)
1.000	39.048	2.9472	132.4912	5.5456
1.660	31.6688	35.3984	100.0416	12.9248
2.950	22.4432	67.7696	67.6688	22.1504
5.450	11.8784	100.0216	35.4144	32.7152
10.000	1.1072	132.5120	2.9264	43.4864

系统⁽⁸⁾。

瓦罗塔尔-30型系统如图1-4-2所示，该专利给出它的四个间隔如表1-1所示。

(一) 方程的建立

为了获得它的变焦方程，我们抽出运动组份 ϕ_2 、 ϕ_3 和 ϕ_4 加以分析。由于变倍组 ϕ_2 的微小移动引起整个运动组份像面移动为：

$$m_4^2 m_3^2 (1 - m_2^2) dq_2 \quad (1-4-1)$$

两组份 ϕ_3 和 ϕ_4 的微小移动引起整个运动组份像面移动分别为

$$m_4^2 (1 - m_3^2) d\Delta \quad (1-4-2)$$

$$(1 - m_4^2) dq_4 \quad (1-4-3)$$

为保持像面稳定必须有

$$m_4^2 m_3^2 (1 - m_2^2) dq_2 + m_4^2 (1 - m_3^2) d\Delta + (1 - m_4^2) dq_4 = 0 \quad (1-4-4)$$

而组份 ϕ_2 、 ϕ_3 和 ϕ_4 的微分移动量 dq_2 、 dq_4 和 $d\Delta$ 与倍率的关系为：

$$dq_2 = -\frac{f'_2}{m_2^2} dm_2 \quad (1-4-5)$$

$$dq_4 = f'_4 dm_4 \quad (1-4-6)$$

$$d\Delta = (1 - m_3^2) dq_2 + \frac{f'_3}{m_3^2} dm_3 \quad (1-4-7)$$

将式(1-4-5)、(1-4-6)和(1-4-7)代入式(1-4-4)，经整理就得到双组联动型变焦系统的变焦方程：

$$\frac{1-m_2^2}{m_2^2} f_2' dm_2 + \frac{1-m_3^2}{m_3^2} f_3' dm_3 + \frac{1-m_4^2}{m_4^2} f_4' dm_4 = 0 \quad (1-4-8)$$

把式(1-4-8)与式(1-3-8)比较发现两者形式完全一样,前者仅比后者增加一项。由数学归纳法的推演可知,对有任何个运子组份的变焦系统有方程

$$\sum_i \frac{1-m_i^2}{m_i^2} f_i' dm_i = 0 \quad (1-4-9)$$

或记为

$$\sum_i f_i' d\left(\frac{1}{m_i} + m_i\right) = 0 \quad (1-4-10)$$

式(1-4-10)是式(1-3-10)的扩展,故有

$$\sum_i dL_i = 0 \quad (1-4-11)$$

(二) 式(1-4-8)的讨论

(1) 解的讨论

该式的通解为

$$U(m_2, m_3, m_4) = f_2' \left(\frac{1}{m_2} + m_2 \right) + f_3' \left(\frac{1}{m_3} + m_3 \right) + f_4' \left(\frac{1}{m_4} + m_4 \right) = C \quad (1-4-12)$$

其中C为待定常量。代入起始条件:

$$m_2 = m_{2i}, \quad m_3 = m_{3i}, \quad m_4 = m_{4i}$$

定C, 得:

$$f_2' \left(\frac{1}{m_2} - \frac{1}{m_{2i}} + m_2 - m_{2i} \right) + f_3' \left(\frac{1}{m_3} - \frac{1}{m_{3i}} + m_3 - m_{3i} \right) + f_4' \left(\frac{1}{m_4} - \frac{1}{m_{4i}} + m_4 - m_{4i} \right) = 0 \quad (1-4-13)$$

补偿组 ϕ_3 的倍率 m_3 依然构成与(1-3-12)一样形式的二次方程

$$m_3^2 - bm_3 + 1 = 0 \quad (1-4-14)$$

其中系数 b 为

$$b = -\frac{f'_2}{f'_3} \left(\frac{1}{m_2} - \frac{1}{m_{2l}} + m_2 - m_{2l} \right) - \frac{f'_4}{f'_3} \left(\frac{1}{m_4} - \frac{1}{m_{4l}} + m_4 - m_{4l} \right) + \left(\frac{1}{m_{3l}} + m_{3l} \right) \quad (1-4-15)$$

解得两根

$$\left. \begin{aligned} m_{31} &= \frac{b + \sqrt{b^2 - 4}}{2} \\ m_{32} &= \frac{b - \sqrt{b^2 - 4}}{2} \end{aligned} \right\} \quad (1-4-16)$$

现将双组联动系统的变焦过程说明如下

(a) 由式(1-4-5)积分得

$$m_2 = \frac{1}{\frac{1}{m_{2l}} - \frac{q_2}{f'_2}} \quad (1-4-17)$$

从此式, 只要给定变倍组 ϕ_2 的移动量 q_2 , 就能解得它的倍率 m_2 。

(b) 由式(1-4-5)和(1-4-6)以及由于 ϕ_2 和 ϕ_4 固连, $dq_2 = dq_4$, 积分得

$$m_4 = m_{4l} + \frac{q_2}{f'_4} \quad (1-4-18)$$

(c) 将式(1-4-17)和(1-4-18)求得的 m_2 和 m_4 代入式(1-4-15)便得系数 b , 从而解得 m_{31} 和 m_{32} 。

(d) 由式(1-4-7)积分得

$$\Delta = f'_3 \left(\frac{1}{m_3} - \frac{1}{m_{3l}} \right) - q_2 + f'_2 (m_2 - m_{2l}) \quad (1-4-19)$$

由此式可解得为了补偿变倍组 ϕ_2 和 ϕ_4 各自作 q_2 和 q_4 的移动量引起的像面位移所必须有的补偿量 Δ 。

利用式(1-4-17)、(1-4-18)、(1-4-15)、(1-4-16)、(1-4-14)和(1-4-19),可顺利地解得各组份的运动情况。对瓦罗塔尔-30变焦系统,应用这些公式计算得的间隔列于表1-2中。

表1-2 瓦罗塔尔-30按方程调整后间隔表

f' (规化值)	s_4 (mm)	s_7 (mm)	s_9 (mm)	s_{11} (mm)
1.000	39.048	2.9472	132.4912	5.5456
1.660	31.6688	35.203439027	100.234960973	12.9248
2.950	22.4432	67.202539719	68.235860281	22.1504
5.450	11.8784	101.990902119	33.4474978808	32.7152
10.000	1.1072	133.064634296	2.373765704	43.4864

按表1-2中的间隔值,经光路追迹后所得结果如表1-3所示。

表1-3 瓦罗塔尔-30按方程调整间隔后像面误差表

f' (规化值)	s'_p (mm)	误差(mm)
1.000	61.37195010	0
1.660	61.37195216	0.00000206
2.950	61.37195740	0.00000730
5.450	61.37197286	0.00002276
10.000	61.37199912	0.00004902

按微分方程办法调整间隔之后,最大像面误差约为 4.9×10^{-5} mm。说明这组公式是可靠的。为作比较,现列出瓦罗塔尔-30系统的像面误差(见表1-4)。至于为何会出现这样的像面误差,可参考图1-4-5。

(2) m_s 曲线极值讨论

对式(1-4-8)两边同除以 dm_2 ,并因 $dq_2 = dq_4$,有

$$\frac{dm_s}{dm_2} = -\frac{f'_2}{f'_4} \cdot \frac{1}{m_2^2}$$

表1-4 瓦罗塔尔-30系统像面误差表

f' (规范化值)	s'_F (mm)	误差 (mm)
1.000	61.37195010	0
1.660	61.39349050	0.02154040
2.950	61.42726538	0.05531528
5.450	61.49373820	0.12178810
10.000	61.66340570	0.29145560

将它代入原式，且令

$$\frac{dm_3}{dm_2} = \frac{\frac{1-m_4^2}{m_4^2} \frac{f'_2}{m_2^2} - \frac{1-m_2^2}{m_2^2} f'_1}{\frac{1-m_3^2}{m_3^2} f'_3} = 0$$

便得

$$m_2^2 m_4^2 = 1 \quad (1-4-20)$$

这说明 m_3 曲线的极值发生在

$$m_2 m_4 = \pm 1 \quad (1-4-21)$$

的条件下。在一般情况下，我们取

$$m_2 m_4 = 1 \quad (1-4-22)$$

即

$$m_4 = \frac{1}{m_2} \quad (1-4-23)$$

但考虑到式(1-4-18)，也即

$$m_4 = m_{4l} - \frac{f'_2}{f'_4} \left(-\frac{1}{m_2} - \frac{1}{m_{2l}} \right) \quad (1-4-24)$$

根据式(1-4-23)，令 $\frac{1}{m_2}$ 与式(1-4-24)相等，解得，

$$\frac{1}{m_2} = \frac{m_{4l} + \frac{f'_2}{f'_4} \frac{1}{m_{2l}}}{1 + \frac{f'_2}{f'_4}} \quad (1-4-25)$$

当变倍组 ϕ_2 和 ϕ_4 一起移动时, m_2 有自身变化规律, m_4 也有其自身变化规律, 但 m_3 曲线的极值只能发生在 m_2 和 m_4 满足式(1-4-25)的情况。所以 m_3 曲线发生极值的条件可以有两种表述形式:

$$m_2 m_4 = \pm 1 \quad (1-4-26)$$

和

$$\frac{1}{m_2} = \frac{m_4 + \frac{f'_2}{f'_4} \frac{1}{m_2}}{1 + \frac{f'_2}{f'_4}} \quad (1-4-27)$$

由式(1-4-7)可得:

$$d\Delta = \left(\frac{1}{m_2^2} - 1 \right) f'_2 dm_2 + \frac{f'_3}{m_3^2} dm_3 \quad (1-4-28)$$

两边同除以 dm_2

$$\frac{d\Delta}{dm_2} = \left(\frac{1}{m_2^2} - 1 \right) f'_2 + \frac{f'_3}{m_3^2} \frac{dm_3}{dm_2} \quad (1-4-29)$$

由此式可知, 若 $\frac{dm_3}{dm_2} = 0$, 并不能保证 $\frac{d\Delta}{dm_2} = 0$ 。这与一般正组补偿和负组补偿变焦系统式(1-3-7)有区别。后者 m_3 曲线达到极值, Δ 曲线必定达到极值, Δ 和 m_3 成正比例; 而双组联动系统, m_3 曲线达到极值并不能保证补偿曲线 Δ 达到极值。在式

(1-4-29)中令 $\frac{d\Delta}{dm_2} = 0$ 得

$$\frac{dm_3}{dm_2} = -\frac{m_3^2}{f'_3} \left(\frac{1}{m_2^2} - 1 \right) f'_2$$

由前面知道

$$\frac{dm_3}{dm_2} = \frac{-\frac{1-m_4^2}{m_4^2} \frac{f'_2}{m_2^2} - \frac{1-m_2^2}{m_2^2} f'_2}{\frac{1-m_3^2}{m_3^2} f'_3}$$

联立解得

$$m_3^2 = \frac{1 - m_4^2}{m_2^2 m_4^2 - m_4^2} \quad (1-4-30)$$

由式 (1-4-30) 可知: 若要 m_3 曲线达到极值, 只要 $m_2^2 m_4^2 = 1$ 条件成立; 若还要补偿曲线 Δ 达到极值 $\frac{d\Delta}{dm_2} = 0$, 那么必有 $m_3^2 = 1$ 。所以 m_3 和 Δ 曲线均到达极值的条件是

$$\left. \begin{aligned} m_2^2 m_4^2 &= 1 \\ m_3^2 &= 1 \end{aligned} \right\} \quad (1-4-31)$$

(3) 补偿曲线 Δ 换根讨论

在 (1-4-20) 条件下, m_3 曲线达到极值, 如果调整初始参数使 $b = -2$, 那么 $m_3 = -1$ 。因而有

$$\left. \begin{aligned} m_2 m_4 &= 1 \\ m_3 &= -1 \end{aligned} \right\} \quad (1-4-32)$$

在此条件下, m_3 曲线显然是平滑换根的。

下面考察在此条件下, 补偿曲线 Δ 的形态?

(a) 首先, 由于 $m_{31} = m_{32} = -1$, 由式 (1-4-19) 有

$$\Delta_1 = \Delta_2 \quad (1-4-33)$$

(b) 其次, 式 (1-4-32) 必须满足式 (1-4-31), 因而此时两补偿曲线 Δ_1 和 Δ_2 均达到极值, 从而达到平滑换根。

(c) 由式 (1-4-29), 由于 $m_2 m_4 = 1$, 必有 $\frac{dm_2}{dm_2} = 0$, 且 $m_2 \neq \pm 1$, 因而 $\frac{d\Delta}{dm_2} \neq 0$, 所以两条补偿曲线 Δ_1 和 Δ_2 有

$$\frac{d\Delta_1}{dm_2} = \frac{d\Delta_2}{dm_2} \neq 0 \quad (1-4-34)$$

即两补偿曲线此时是倾斜相切。如图 1-4-3 所示。归结起来, 在 (1-4-31) 和 (1-4-32) 条件下, 补偿曲线有解, 像面位移完全补偿, 补偿曲线由 Δ_1 到 Δ_2 平滑换根, 但两补偿曲线为倾斜相切。

为何会形成这样一种特殊的换根形式呢? 这可从物像交换原

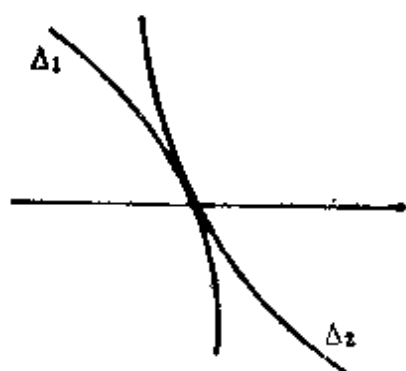


图1-4-3 在式(1-4-31)条件下两补偿曲线图

则两点分共轭距的办法来说明^[4]。

图 1-4-4 是 $m_2 m_4 = 1$, $m_3 = -1$ 时的情形。组份 ϕ_2 , 其倍率

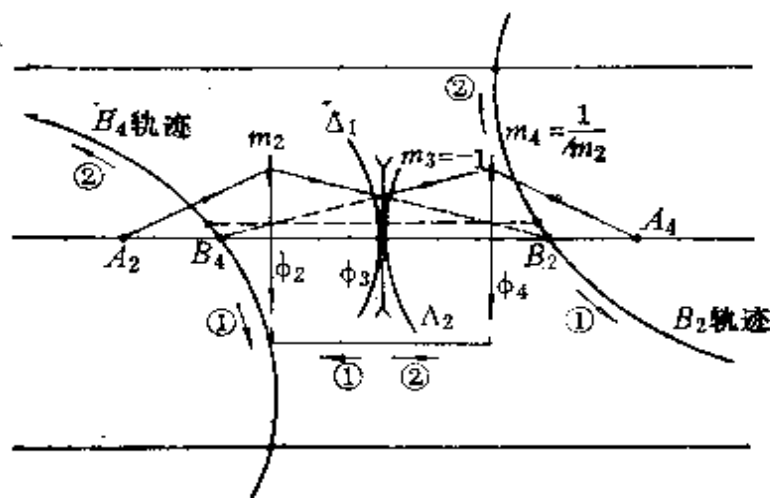


图1-4-4 补偿曲线 Δ_1 和 Δ_2 构成图

为 m_2 , 共轭距是 $\overline{A_2 B_2}$, 组份 ϕ_4 , 倍率 m_4 , 共轭距为 $\overline{A_4 B_4}$ 。由于 $m_4 = \frac{1}{m_2}$, 因此共轭距 $\overline{A_2 B_2} = \overline{A_4 B_4}$ 。再设 $m_3 = -1$, 因而补偿组 ϕ_3 对于它的共轭距 $\overline{B_2 B_4}$ 是对称分布, 正处于它的中点。

设 ϕ_2 向 ① 方向移动, 即向系统的长焦方向移动, 其像点 B_2 沿它自己的 ① 方向前进, 其共轭距增大。设 ϕ_2 向 ② 方向移动, 即向系统的短焦方向移动, 也即沿使其共轭距减少的 ② 方向前进。同理可分析 ϕ_4 的移动所带来的共轭距变化。

此时, $\overline{B_2 B_4}$ 是对称分布于 ϕ_s , 按物像交换两点分, 两物像交换位置重合; 按每瞬间对应的 $\overline{B_2 B_4}$ 作两点分, 便得到如图 1-4-4 Δ_1 和 Δ_2 两补偿曲线倾斜相切的状态。可见物像交换原则表现在变焦过程中。

在图 1-4-4 中, 当系统由短焦向长焦位置移动时, 如果系统要换根的话, 补偿组应当先在 Δ_1 上, 经过与 Δ_2 的切点, 换根到 Δ_2 上来。

至于瓦罗塔尔-30 系统的换根还有些特殊的地方。将 $f'_2, f'_4, m_{21}, m_{41}$ 代入式 (1-4-25), 在系统换根时, 有

$$m_2 = -1.23115823323,$$

$$m_4 = -0.81224327873,$$

$$b = -2.00628928707.$$

可见, 当 m_{31} 和 m_{32} 取极值时, $b \approx -2, m_3 \approx -1$ 。因而瓦罗塔尔-30 系统的补偿曲线 Δ_1 和 Δ_2 没有图 1-4-3 的严格相切的形式, 而是有一段分离。真实补偿曲线见图 1-4-5。当系统由短焦向长焦位置移动时, 补偿组从与 Δ_1 相接近的部位移动到与 Δ_2 相接近的部位。

(4) 最速变焦讨论

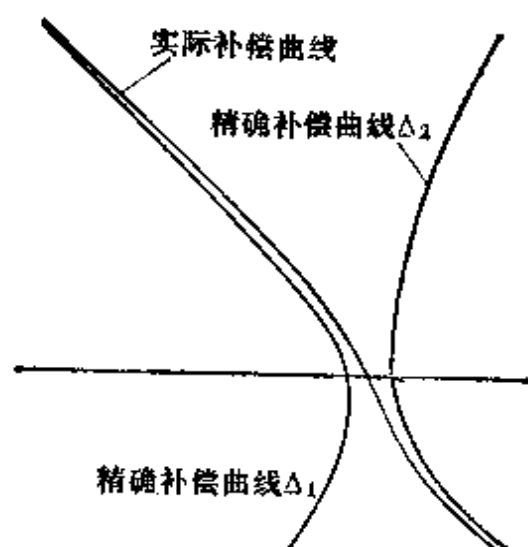


图1-4-5 瓦罗塔尔-30系统真实补偿曲线

为确定最速变焦路线，设该系统变焦比为

$$\Gamma = \frac{m_2 m_3 m_4}{m_2 m_3 m_4} \quad (1-4-35)$$

得 Γ 的梯度为

$$\begin{aligned} (\text{grad}\Gamma)_P = & (-1) \frac{(\Gamma)_P}{(m_2)_P} \mathbf{i} + (-1) \frac{(\Gamma)_P}{(m_3)_P} \mathbf{j} \\ & + (-1) \frac{(\Gamma)_P}{(m_4)_P} \mathbf{k} \end{aligned}$$

$(\text{grad}\Gamma)_P$ 的方向余弦之比例为

$$\cos\alpha_P : \cos\beta_P : \cos\gamma_P = \frac{1}{(m_2)_P} : \frac{1}{(m_3)_P} : \frac{1}{(m_4)_P} \quad (1-4-36)$$

所以随 $|m_2|$ 增加的同时， $|m_3|$ 亦应随之增加，符合 $(\text{grad}\Gamma)_P$ 方向，即最速变焦方向。

当系统由短焦向长焦移动时， $|m_2|$ 增大，而对补偿组 ϕ_3 其 m_{31} 和 m_{32} 图形如图1-4-6所示。按图所示的路线，在上半段时沿

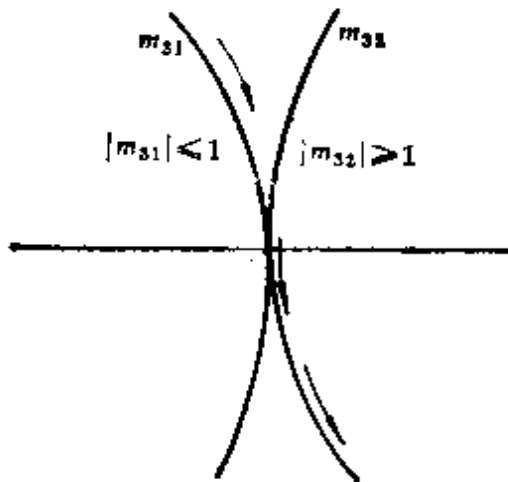


图1-4-6 最速变焦路线

m_{31} 曲线，在下半段时，沿 m_{32} 曲线，在 $m_3 = -1$ 时换根，从而可保证在整个运动过程中 $|m_3|$ 由小于1到大于1，这是符合最速变焦路线的。这种分析和实际瓦罗塔尔-30系统的换根相吻合。

§ 1-5 各种变焦系统及其变焦方程

在 § 1-3 我们已对通常的正组补偿系统和负组补偿系统的变焦方程作了讨论。这两种系统的特点是：其变焦核，如图 1-1-1 所示，由相邻的变倍组和补偿组组成，它们互相作非线性移动以补偿像面位移，且变焦核的物点和像点均在有限距离上。在 § 1-4，我们还对瓦罗塔尔-30 系统的变焦方程作了讨论。这种系统，见图 1-4-1，变焦核是由相邻的三个组份组成。 ϕ_2 和 ϕ_4 固连，被认为是变倍组，而 ϕ_3 起到补偿作用。该变焦核的物点和像点也在有限距离上。

我们将把微分方程的办法推广到分析各种不同型式的变焦系统，这种方法具有高度的概括性，可以把各种类型系统都包含在其中。

1. 系统的变焦核由相邻的两运动组份组成，核的物点和像点在有限距离上。如图 1-5-1 所示。

多数变焦系统属于此类。在 § 1-3，§ 2-1 和 § 2-3 所讨论的

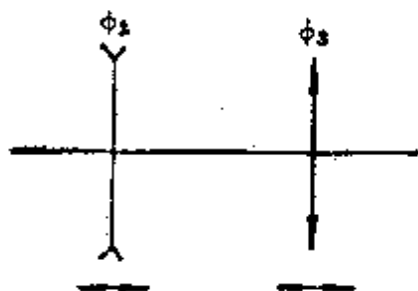


图 1-5-1 第(一)类变焦核图

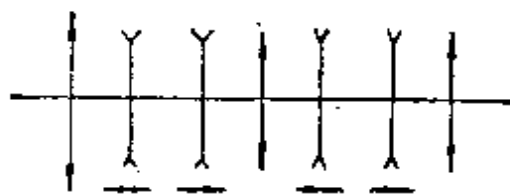


图 1-5-2 第(一)类变焦核例图之一

正组补偿和负组补偿系统均属此类。它的变焦方程为

$$\frac{1-m_2^2}{m_2^2} f'_2 dm_2 + \frac{1-m_3^2}{m_3^2} f'_3 dm_3 = 0 \quad (1-5-1)$$

苏联《电影和电视技术》杂志报导的一个系统^[10]，见图 1-5-2，只不过是第(一)类系统的推广而已。此时可以认为是两个负组补偿系统串联起来，以达到提高变焦比的目的。田中一夫在日本

《光学》上发表论文^[11]，其第 87~117 例，见图 1-5-3，均属此类，只不过增添了不同的固定组而已。

2. 系统的变焦核由相邻的两运动组份组成，核的物点或像点中有一个位于无限远。

为此，我们举一美国专利^[12]为例。方案如图 1-5-4。该变焦核经常用在低倍变焦系统中。变焦过程中，组份 ϕ_3 的起点和终点

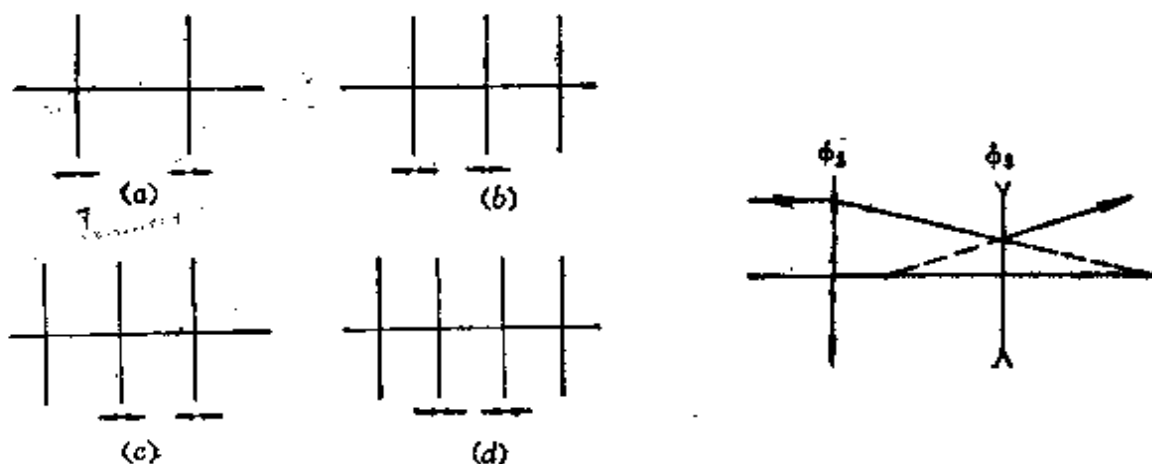


图 1-5-3 第(一)类变焦核例图之二

图 1-5-4 第(二)类变焦核图

满足物像交换原则，因而组份 ϕ_2 在起点和终点位置相同，仅由 ϕ_3 起到变焦作用。它在长焦和短焦时的倍率分别为

$$\left. \begin{aligned} m_{3l} &= -\sqrt{\Gamma} \\ m_{3r} &= -\frac{1}{\sqrt{\Gamma}} \end{aligned} \right\} \quad (1-5-2)$$

为了达到像面补偿，由式 (1-3-4 b) 可得

$$(1 - m_2^2)dq + \frac{1 - m_3^2}{m_3^2}d\Delta = 0 \quad (1-5-3)$$

这就是变焦核物点在无限远系统的变焦方程。因为此系统 $m_2 = 0$ ，它不能表为式 (1-3-8) 的形式。

对 ϕ_3 有 $d\Delta = f'_3 dm_3$ ，积分得

$$\Delta = f'_3 m_{3l} \left(\frac{1}{\Gamma} - \frac{1}{\Gamma'} \right)$$

其中

$$\Gamma = \frac{f'_{\max}}{f'_{\min}} = \frac{m_{3l}}{m_{3r}}$$

$$\Gamma' = \frac{f'_{\max}}{f'} = \frac{m_{3l}}{m_3}$$

所以有

$$\Delta = f'_3 \left(\frac{f' - f'_{\min}}{\sqrt{f'_{\max} f'_{\min}}} \right) \quad (1-5-4)$$

此式决定了 ϕ_3 是作直线运动。

对 ϕ_2 , 有

$$(1 - m_2^2) dq + \frac{1 - m_3^2}{m_3^2} d\Delta = 0$$

由于 $m_2 = 0$

$$dq = - \frac{1 - m_3^2}{m_3^2} f'_3 dm_3 \quad (1-5-5)$$

对此式积分得

$$q = f'_3 \frac{f' (f'_{\max} + f'_{\min} - f') - f'_{\max} f'_{\min}}{f' \sqrt{f'_{\max} f'_{\min}}} \quad (1-5-6)$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{若令, } f' = f'_{\max}, \text{ 则 } q = 0 \\ \text{令, } f' = f'_{\min}, \text{ 亦有 } q = 0 \end{array} \right\} \quad (1-5-7)$$

可见 ϕ_2 的起点和终点相同。系统运动曲线如图1-5-5所示。 ϕ_3 的物点为 A_3 , 像点为 A'_3 。只有当 ϕ_3 在(I)和(II)的位置, 即满足

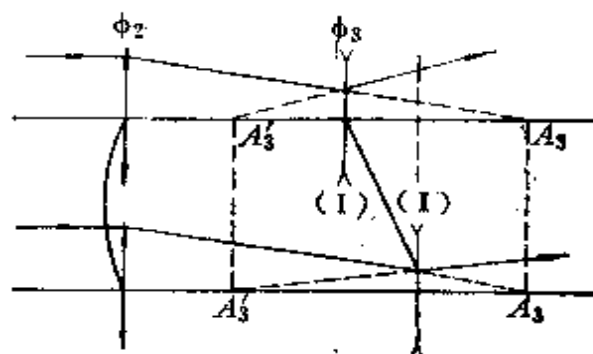


图1-5-5 第(二)类变焦核例图之一

物像交换原则的两个位置，它的物点和像点才准确地在 A_3 和 A'_3 。当 ϕ_3 由(I)向(II)移动的过程中，为了保持像点 A'_3 不变，物点 A_3 必须作曲线运动，为了补偿 A_3 的曲线运动，补偿组 ϕ_2 也只有作与 A_3 相同的曲线移动。

不论 ϕ_2 和 ϕ_3 组份何者为变倍组，何者为补偿组；不论变焦核的物点在无限远或像点在无限远；也不论它们是否一定满足物像交换原则，其基本分析方法都与此相似。这种系统是屡见不鲜的。如苏联《光学与光谱学》杂志报导的一个系统⁽¹³⁾（如图1-5-6所

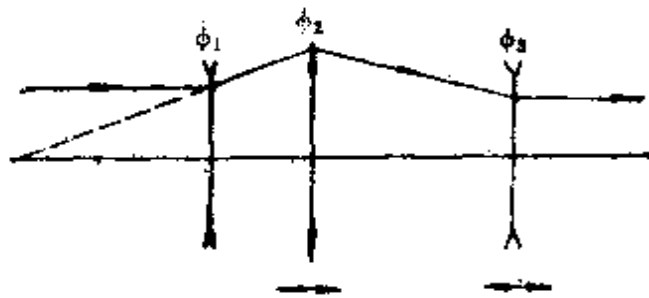


图1-5-6 第(二)类变焦核例图之二

示)，便属此类。又如德国《光学》杂志所发表的系统⁽¹⁴⁾，亦属此类。

3. 变焦核由三组份组成，两移动组份 ϕ_2 和 ϕ_3 被固定组 ϕ_1 隔开，见图1-5-7。

田中一夫发表的论文⁽¹¹⁾上第12)~14)例均属此类，见图1-5-8所示。

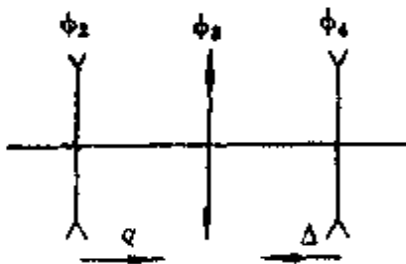


图1-5-7 第(三)类变焦核图

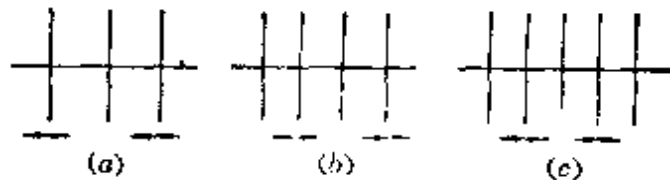


图1-5-8 第(三)类变焦核例图

在图1-5-7中, ϕ_2 移动产生的位移经 ϕ_3 的轴向倍率传递才与 ϕ_4 移动产生的像面位移相抵消达到像面稳定。

$$(1 - m_2^2)m_3^2m_4^2dq + (1 - m_4^2)d\Delta = 0 \quad (1-5-8)$$

其中

$$dq = \frac{f'_2}{m_2^2} dm_2 \quad (1-5-9)$$

$$d\Delta = f'_4 dm_4 \quad (1-5-10)$$

这种变焦核的变焦方程为

$$m_3^2 \cdot \frac{1 - m_2^2}{m_2^2} f'_2 dm_2 + \frac{1 - m_4^2}{m_4^2} f'_4 dm_4 = 0 \quad (1-5-11)$$

如果从运动组份共轭距改变量最后应互相抵消的角度来考察, 方程 (1-5-11) 就是下式

$$m_3^2 dL_2 + dL_4 = 0 \quad (1-5-12)$$

为了解运动方程 (1-5-11) 式, 有必要计算 m_3^2 , 为此设短焦时

$$m_{3r} = \frac{f'_3}{f'_2(1 - m_{2r}) - d_{23r} + f'_3} \quad (1-5-13)$$

当系统处于任意焦距位置时

$$m_3 = \frac{f'_3}{f'_2(1 - m_2) - (d_{23r} - q) + f'_3}$$

其中

$$q = f'_2 \left(\frac{1}{m_{2r}} - \frac{1}{m_2} \right)$$

如果令

$$A = f'_2 \left(-\frac{1}{m_{2r}} + m_{2r} \right) + \frac{f'_3}{m_{3r}}$$

则

$$m_3^2 = \frac{\left(\frac{f'_3}{f'_2} \right)^2 m_2^2}{\left(m_2^2 - \frac{A}{f'_2} m_2 + 1 \right)^2} \quad (1-5-14)$$

得

$$\frac{f'_3}{f'_2} \left(\frac{1 - m_2^2}{m_2^2 - \frac{A}{f'_3} m_2 + 1} \right)^2 f'_2 dm_2 + \frac{1 - m_4^2}{m_4^2} f'_4 dm_4 = 0 \quad (1-5-15)$$

联立运用 (1-5-9), (1-5-10) 和 (1-5-15) 便可解得这种系统的运动关系。

(4) 系统变焦核由三个相邻的运动组份组成, 见图1-5-9。

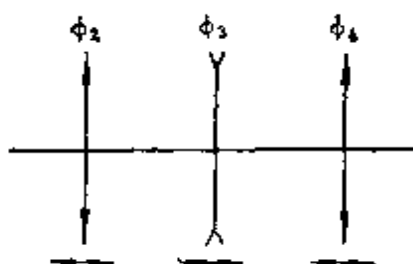


图1-5-9 第(四)类变焦核图

这种变焦核的特点是三个运动组份各自独立移动, 达到像面补偿。有

$$(1 - m_2^2) m_3^2 m_4^2 dq_2 + (1 - m_3^2) m_4^2 dq_3 + (1 - m_4^2) dq_4 = 0 \quad (1-5-16)$$

各运动组份的微分移动与倍率变化关系为

$$\left. \begin{aligned} dq_2 &= \frac{f'_2}{m_2^2} dm_2 \\ dq_4 &= f'_4 dm_4 \\ dq_3 &= \frac{f'_3}{m_3^2} dm_3 + \frac{1 - m_2^2}{m_2^2} f'_2 dm_2 \end{aligned} \right\} \quad (1-5-17)$$

运动方程为

$$\frac{1 - m_2^2}{m_2^2} f'_2 dm_2 + \frac{1 - m_3^2}{m_3^2} f'_3 dm_3 + \frac{1 - m_4^2}{m_4^2} f'_4 dm_4 = 0 \quad (1-5-18)$$

这个系统除了没有 $dq_2 = dq_4$ 外，其解法与瓦罗塔尔-30系统相似，有相同的变焦方程。

田中一夫论文⁽¹¹⁾中的第15)~18)例均属此类。见图1-5-10。

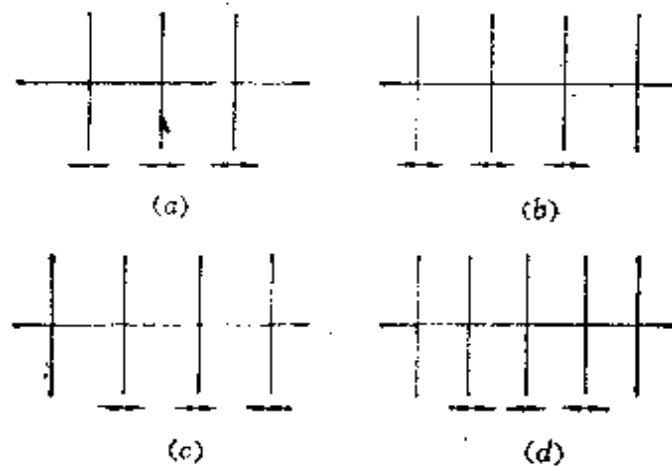


图1-5-10 第(四)类变焦核例图

(5) 系统变焦核由三个运动组份组成，且 ϕ_2 与 ϕ_4 固连，此即为§1-4所讨论的瓦罗塔尔-30系统，称为第(五)类变焦核。

(6) 系统变焦核由四个组份组成，其中有一组份为固定组，见图1-5-11，称为第(六)类变焦核。

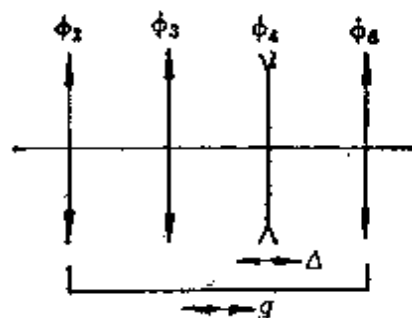


图1-5-11 第(六)类变焦核图

即在瓦罗塔尔-30系统中间加进一个固定组 ϕ_3 ，为了达到像面位移补偿，有：

$$m_3^2 m_4^2 m_5^2 (1 - m_2^2) dq_2 + m_5^2 (1 - m_4^2) d\Delta + (1 - m_5^2) dq_5 = 0 \quad (1-5-19)$$

各运动组份与倍率的变化关系为

$$\left. \begin{aligned} dq_2 &= \frac{f'_2}{m_2^2} dm_2 \\ dq_5 &= f'_5 dm_5 \\ d\Delta &= \frac{f'_4}{m_4^2} dm_4 + m_3^2 \left[\frac{1-m_2^2}{m_2^2} f'_2 dm_2 \right] \end{aligned} \right\} \quad (1-5-20)$$

从而得到方程

$$m_3^2 \frac{1-m_2^2}{m_2^2} f'_2 dm_2 + \frac{1-m_4^2}{m_4^2} f'_4 dm_4 + \frac{1-m_5^2}{m_5^2} f'_5 dm_5 = 0 \quad (1-5-21)$$

此式即为

$$m_3^2 dL_2 + dL_4 + dL_5 = 0$$

这个系统在计算过程中，与图1-5-7的第（三）类情形相似，需要把固定组的量 m_3^2 用已知量表示出来。

至此，我们已对各种类型的变焦核及其变焦方程作了简要介绍，概括起来有如下几点：

（1）无论由多少个相邻的运动组份组成的变焦核，不论其中几个运动组份固连与否，它的变焦方程均为

$$\sum_i \frac{1-m_i^2}{m_i^2} f'_i dm_i = 0 \quad (1-5-22)$$

（2）变焦核中运动组份若被固定组份隔开，则变焦方程要稍作修改，见式（1-5-11）和式（1-5-21）。此时需要把固定组份前的运动组份的共轭距改变量经固定组份纵向放大之后，与固定组份之后的运动组份引起的共轭距的改变量相抵消，实现像面补偿。为了解这种系统的变焦过程，需要把固定组的纵向放大率用已知量表示出来。

（3）变焦核的物点或像点若处于无限远，则总有一个组份的倍率为0，因而变焦方程形式较为简单，只要把

$$\begin{cases} d\Delta = f'_3 dm_3 \\ dq = -\frac{1-m_3^2}{m_3^2} f'_3 dm_3 \end{cases}$$

联立起来便可解析变焦过程。

§ 1-6 几种分析变焦过程的方法简介

在变焦系统设计的发展过程中，产生了不少分析方法。归结起来，不外乎有高斯括弧、变高斯括弧、连分数、几何法等。前三种方法的核心是赫茨伯格 (M·Herzberger) 阐述的高斯括弧方法^[15]。因为伯格斯特 (L. Bergstein) 提出的变高斯括弧^[16]只不过是高斯括弧的变形，至于连分数^[16]又可以表示为两个高斯括弧的商，进而表示为一个高斯括弧的方程。田中一夫^[18]方法的实质也是高斯括弧。本节，我们概述这些方法，突出其特点，便于让读者了解我们提出的微分方程方法与其它方法的区别与联系，了解变焦系统诸分析方法的优缺点及发展进程。

(一) 赫茨伯格的高斯括弧^[15]

元素 a_1, \dots, a_k 的高斯括弧按如下规则构成：

$$\begin{aligned} [a_1, \dots, a_k] &= a_k [a_1, \dots, a_{k-1}] \\ &\quad + [a_1, \dots, a_{k-2}] \end{aligned} \quad (1-6-1)$$

对于由间隔为 $d_{i,j}$ 分开光焦度为 φ_i 的透镜组组成的系统，其出射光线高 h' 、出射角 u' 、入射高 h_1 及入射角 u_1 之间有关系式：

$$\left. \begin{aligned} h' &= h_1 [\varphi_1, -d_{1,2}, \dots, d_{k-1,k}] \\ &\quad + u_1 [-d_{1,2}, \varphi_2, \dots, -d_{k-1,k}] \\ u' &= h_1 [\varphi_1, -d_{1,2}, \dots, \varphi_k] \\ &\quad + u_1 [-d_{1,2}, \dots, \varphi_k] \end{aligned} \right\} \quad (1-6-2)$$

式中的 4 个高斯括弧分别记为 a_g, b_g, c_g, d_g ，即

$$\left. \begin{aligned} a_g &= [\varphi_1, -d_{1,2}, \dots, \varphi_{k-1,k}] \\ b_g &= [-d_{1,2}, \varphi_2, \dots, -d_{k-1,k}] \\ c_g &= [\varphi_1, -d_{1,2}, \dots, \varphi_k] \\ d_g &= [-d_{1,2}, \dots, \varphi_k] \end{aligned} \right\} \quad (1-6-3)$$

则式 (1-6-2) 可记为

$$\begin{cases} h' = a_g h_1 + b_g u_1 \\ u' = c_g h_1 + d_g u_1 \end{cases}$$

全系统的总光焦度则为

$$\varphi = c_g = [\varphi_1, -d_{1,2}, \varphi_2, \dots, \varphi_k] \quad (1-6-4)$$

全系统后焦点到最后组份主面的距离 s'_F 与总光焦度 φ 之积为

$$s'_F \varphi = a_g = [\varphi_1, -d_{1,2}, \dots, -d_{k-1,k}] \quad (1-6-5)$$

赫茨伯格所导出的式 (1-6-4) 和 (1-6-5) 是分析机械补偿和光学补偿变焦系统的基本公式。

(二) 伯格斯特特的变高斯括弧⁽¹⁶⁾⁽¹⁷⁾

这是光学补偿变焦系统的一种全面分析方法, 一直沿用至今。

系统中第 v 个透镜按牛顿公式有

$$X'_v = -\left(\frac{f'_v{}^2}{X_v}\right) \quad (1-6-6)$$

对由透镜串联起来的多透镜系统, 构成连分数

$$X'_v = \frac{f'_v}{D_{v,v+1} - \frac{f'_{v+1}{}^2}{D_{v+1,v+2} - \frac{f'_{v+2}{}^2}{D_{v+2,v+3} - \dots - \frac{f'_{n-1}{}^2}{D_{n-1,n}}}} \quad (1-6-7)$$

分析式 (1-6-7) 便会发现 X'_v 是由 $f'_v{}^2, \dots, f'_{n-1}{}^2$ 和各焦点之间间隔 $D_{v,v+1}, \dots, D_{n-1,n}$ 按一定方式排列而成。伯格斯特特设计了一种变高斯括弧 $\Psi_k(n, m)$, 它是由 $f'_{n-1}{}^2, f'_{n-2}{}^2, \dots, f'_{m+2}{}^2, f'_{m+1}{}^2$ 和

$(-1)^n D_{n,n-1}, (-1)^{n-1} D_{n-1,n-2}, \dots, (-1)^{m+1} D_{m+1,m}$ 等系统参量构成的 k 次幂的交叉积之和。例如对于 4 透镜系统, $n = 4$

$$\left. \begin{aligned} \Psi_2(4, 1) &= -D_{4,3}D_{3,2} + D_{4,3}D_{2,1} \\ &\quad - D_{3,2}D_{2,1} + f_3'^2 + f_2'^2 \\ \Psi_3(4, 1) &= -D_{4,3}D_{3,2}D_{2,1} \\ &\quad + f_3'^2 D_{2,1} + f_2'^2 D_{4,3} \end{aligned} \right\} (1-6-8)$$

对于 $n = 5$ 的系统

$$\left. \begin{aligned} \Psi_4(5, 1) &= D_{5,4}D_{4,3}D_{3,2}D_{2,1} - f_4'^2 D_{3,2}D_{2,1} \\ &\quad - f_3'^2 D_{5,4}D_{2,1} - f_2'^2 D_{5,4}D_{4,3} + f_4'^2 f_2'^2 \end{aligned} \right\}$$

如图 1-6-1 所示。透镜的序号按反方向排列, 即越靠近像平面的透镜序号越低。

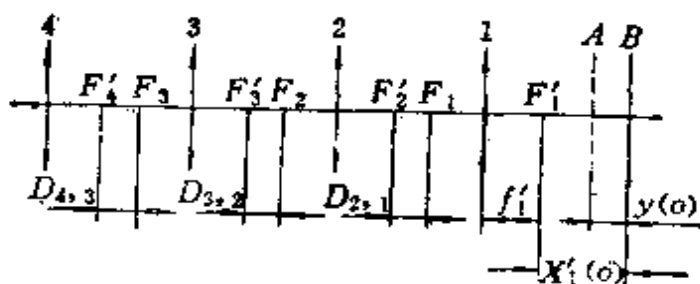


图 1-6-1 伯格斯特公式例图

镜序号越低。A 平面为参考面, B 为像平面。则

$$X_v' = (-1)^{v-1} f_v'^2 [\Psi_{n-v-1}(n, v+1) / \Psi_{n-v}(n, v)] \quad (1-6-9)$$

全系统像距

$$X_1' = f_1'^2 [\Psi_{n-2}(n, 2) / \Psi_{n-1}(n, 1)] \quad (1-6-10)$$

设光学补偿变焦系统运动组份移动量为 Z , 则对应于 Z 的系统参量所构成的变高斯括弧应当计为 $\psi_k(n, v; Z)$, 它与 $Z = 0$ 时的变高斯括弧的关系为

$$\psi_k(n, v; Z) = \sum_{j=0}^k \binom{n-v-j}{k-j} \psi_j(n, v) Z^{k-j} \quad (1-6-11)$$

即 $\psi_k(n, v, Z)$ 用位移 Z 的多项式来表示。对位移量 Z 作如下归化

$$z = Z/Z_m \quad (1-6-12)$$

则归化的最后像距 $x'_1(z)$ 表示为

$$\begin{aligned} x'_1(z) &= \frac{X'_1(Z)}{Z_m} \\ &= f_1'^2 \frac{z^{n-2} + a_1 z^{n-3} + a_2 z^{n-4} + \dots + a_{n-3} z + a_{n-2}}{z^{n-1} + b_1 z^{n-2} + b_2 z^{n-3} + \dots + b_{n-2} z + b_{n-1}} \end{aligned} \quad (1-6-13)$$

其中对各透镜的焦距和间隔均作了归化

$$f_v = \frac{f'_v}{Z_m} \quad d_{v,v+1} = \frac{D_{v,v+1}}{Z_m} \quad (1-6-14)$$

式 (1-6-13) 的系数为

$$\begin{cases} \psi_k(n, 2) = a_k \\ \psi_k(n, 1) = b_k \end{cases} \quad (1-6-15)$$

在变焦过程中需要解最后像面相对于某个参考平面的像面偏离 $y(z)$

$$y(z) = x'_1(z) + z - x'_1(0) - y(0) \quad (1-6-16)$$

则

$$y(z) = \frac{z^n + c_1 z^{n-1} + c_2 z^{n-2} + \dots + c_{n-2} z^2 + c_{n-1} z + c_n}{z^{n-1} + b_1 z^{n-2} + b_2 z^{n-3} + \dots + b_{n-2} z + b_{n-1}} \quad (1-6-17)$$

式中

$$c_n = b_n - (x'_1 - y(0))b_{n-1} + f_1'^2 a_{n-2}$$

设 $0 \leq z_1 < z_2 < z_3 \dots < z_n \leq 1.0$ 为完全补偿点, 则

$$y(z) = \frac{(z - z_1)(z - z_2) \dots (z - z_n)}{z^{n-1} + b_1 z^{n-2} + b_2 z^{n-3} + \dots + b_{n-2} z + b_{n-1}} \quad (1-6-18)$$

上式也可表示为

$$y(z) = \frac{z^n - \gamma_1(n)z^{n-1} + \gamma_2(n)z^{n-2} - \dots + (-1)^{n-1}\gamma_{n-1}(n)z + (-1)^n\gamma_n(n)}{z^{n-1} + b_1z^{n-2} + b_2z^{n-3} + \dots + b_{n-2}z + b_{n-1}} \quad (1-6-19)$$

当设 $n = 4$ 时

$$\left. \begin{aligned} \gamma_1(4) &= z_1 + z_2 + z_3 + z_4 \\ \gamma_2(4) &= z_1z_2 + z_1z_3 + z_1z_4 + z_2z_3 + z_2z_4 + z_3z_4 \\ \gamma_3(4) &= z_1z_2z_3 + z_1z_2z_4 + z_1z_3z_4 + z_2z_3z_4 \\ \gamma_4(4) &= z_1z_2z_3z_4 \end{aligned} \right\} \quad (1-6-20)$$

式 (1-6-13), (1-6-17), (1-6-18), (1-6-19) 构成了伯格斯特分析光学补偿变焦系统的基础。

(三) 田中一夫方法^[18]

田中一夫运用赫茨伯格的方法研究了机械补偿变焦系统。设一个透镜的物距和像距为 d_0 和 d_1 , 光焦度表为 φ_1 , 由透镜成像的高斯公式有

$$\varphi_1 = \frac{1}{d_1} - \frac{1}{d_0} \quad (1-6-21)$$

化成连分数

$$d_1 = \frac{1}{\varphi_1 + \frac{1}{-d_0}} = \frac{[-d_0]}{[\varphi_1, -d_0]} \quad (1-6-22)$$

由高斯括弧的规则得

$$[-d_1, \varphi_1, -d_0] = 0$$

由高斯括弧的对称性得

$$[-d_0, \varphi_1, -d_1] = 0 \quad (1-6-23)$$

当为多个透镜组成的系统时, 则得方程:

$$[-d_0, \varphi_1, -d_1, \varphi_2, \dots, \varphi_k, -d_k] = 0 \quad (1-6-24)$$

在变焦移动过程中，若保持 (1-6-24) 成立，就保证了像面的稳定。这是田中一夫方法的核心。设 x_j 为补偿组移动量，则有

$$X_0 x_j^2 + Y_0 x_j + Z_0 = 0 \quad (1-6-25)$$

其中二次方程的系数为：

$$\left. \begin{aligned} X_0 &= -I_0 \\ Y_0 &= I_0(-E_{j-1} + E_j) + J_0 - K_0 \\ Z_0 &= I_0 E_{j-1} E_j + J_0 E_{j-1} + K_0 E_j + L_0 \end{aligned} \right\} \quad (1-6-26)$$

其中

$$\left. \begin{aligned} I_0 &= {}^0 D_{j-1} \psi_j^{j+1} A_{k+1} \\ J_0 &= -{}^0 D_{j-1} ({}^{j+1} A_{k+1} + \psi_j^{j+1} B_{k+1}) \\ K_0 &= -{}^{j+1} A_{k+1} ({}^0 B_{j+1} \psi_j + {}^0 D_{j-1}) \\ L_0 &= {}^0 B_{j-1} ({}^{j+1} A_{k+1} + \psi_j^{j+1} B_{k+1}) + {}^0 B_{j-1} {}^{j+1} B_{k+1} \end{aligned} \right\} \quad (1-6-27)$$

式中 ${}^0 B_{j-1}$, ${}^0 D_{j-1}$, ${}^{j+1} A_{k+1}$ 和 ${}^{j+1} B_{k+1}$ 是以下高斯括弧的简写

$$\left. \begin{aligned} {}^0 B_{j-1} &= \begin{cases} [-d_0, \varphi_1, \dots, -d_{j-2}] & j \neq 1 \\ 0 & j = 1 \end{cases} \\ {}^0 D_{j-1} &= \begin{cases} [-d_0, \varphi_1, \dots, -d_{j-2}, \varphi_{j-1}] & j \neq 1 \\ 1 & j = 1 \end{cases} \\ {}^{j+1} A_{k+1} &= \begin{cases} [\varphi_{j+1}, -d_{j+1}, \dots, \varphi_k, -d_k] & j \neq k \\ 1 & j = k \end{cases} \\ {}^{j+1} B_{k+1} &= \begin{cases} [-d_{j+1}, \dots, \varphi_k, -d_k] & j \neq k \\ 0 & j = k \end{cases} \end{aligned} \right\} \quad (1-6-28)$$

田中一夫把他的分析方法进一步扩展到 5 组份的复杂系统^[19]，并分析了变焦方程的奇异点问题。最近又推广到用广义高斯常数分析多种光学系统，具有较好的概括性。

归结起来，第 (一)，(二) 和 (三) 种方法的特点是：

(a) 表达式形式简洁；

(b) 表达式以各个透镜的直接几何参量——焦距 f'_i (或光焦度 φ_i) 和间隔 $d_{i,j}$ 为变量, 对逐个组份连续使用高斯公式或牛顿公式;

(c) 实践表明: 这些方法不便运算和作概念判断。

(四) 几何法⁽³⁾

几何法是我国从事变焦系统设计者常用的方法。它是取变倍组在长焦时的倍率 m_{2l} 和在长焦时变倍组和补偿组之间间隔 d_{23l} 为起始数据, 反复应用关于倍率 m 的公式:

$$\left. \begin{aligned} l &= f'(1-m)/m \\ l' &= f'(1-m) \\ \frac{1}{l'} - \frac{1}{l} &= \frac{1}{f'} \end{aligned} \right\} \quad (1-6-29)$$

式中 l 和 l' 为各组份的物距和像距, 由 m_{2l} 开始计算, 可得

$$\left. \begin{aligned} l'_{2l} &= m_{2l} - 1 \\ l_{2l} &= l'_{2l}/m_{2l} \end{aligned} \right\} \quad (1-6-30)$$

给定计算机步长, 任给 m_2 有:

$$\left. \begin{aligned} l'_2 &= m_2 - 1 \\ l_2 &= l'_2/m_2 \end{aligned} \right\} \quad (1-6-31)$$

得变倍组移动量

$$q = l_2 - l_{2l} \quad (1-6-32)$$

由 d_{23l} 和 l'_{2l} 得

$$l_{3l} = l'_{2l} - d_{23l}$$

$$l'_{3l} = \frac{f'_3 l_{3l}}{l_{3l} + f'_3}$$

设对应于 q 的补偿组移动量为 Δ , 则

$$\Delta^2 + \bar{A}_0 \Delta + \bar{B}_0 = 0 \quad (1-6-33)$$

式中 \bar{A}_0 , \bar{B}_0 是与系统参量有关的系数, 从而得补偿组的物距和像距及倍率

$$\left. \begin{aligned} l'_3 &= l'_{31} - \Lambda \\ l_3 &= \frac{f'_3 l'_3}{f'_3 - l'_3} \\ m_3 &= \frac{l'_3}{l_3} \end{aligned} \right\} \quad (1-6-34)$$

便可在计算机上逐次试探变焦比:

$$\Gamma = \frac{m_2 m_{31}}{m_2 m_3} \quad (1-6-35)$$

直到满足已知的变焦比为止。

几何法的长处是以组份的间接参量——倍率 m 为变量，使用方便。其不足之处是略显琐细，不易作解析判断。

微分方程方法吸取了几何法以 m 为变量从而使用方便这个优点，又进一步发展为以 m 为变量的方程来描述变焦运动，从而便于解析判断。

第二章 变焦系统高斯解分析

变焦系统是复杂光学系统，它涉及众多的问题。在本章，我们讨论它的高斯解。所谓高斯解，即由理想光学系统参数，如各组份的焦距 f' ，间隔 d ，倍率 m 等，讨论变焦系统的有解或无解、倍率选段，变焦运动曲线的合理与否，各种型式变焦系统的换根等涉及全局的问题。实践证明：变焦系统的高斯解取得是否合适，是带前提性、全局性的问题。我们必须十分注意。高斯解的核心任务是选准变倍组在长焦时的倍率 m_{2l} 和补偿组的焦距 f'_3 两个关键参量。

§ 2-1 正组补偿变焦系统高斯解分析

正组补偿系统，即补偿组的光焦度为正的变焦系统。其运动方式如图2-1-1所示。当处于短焦位置时，变倍组 ϕ_2 紧靠前固定

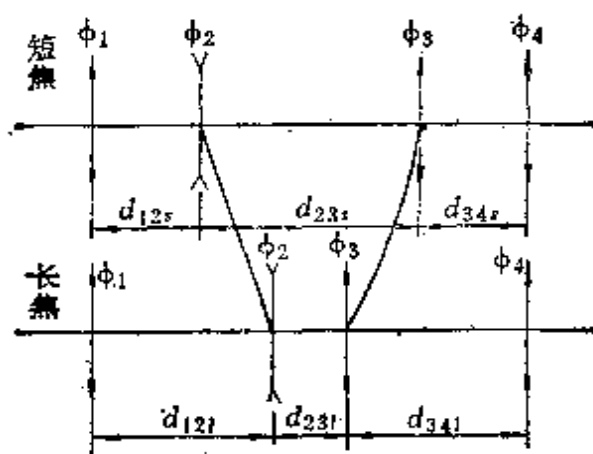


图2-1-1 正组补偿系统运动图

组 ϕ_1 ，而补偿组紧靠后固定组 ϕ_4 。当系统向长焦位置运动时，变倍组 ϕ_2 向右运动，而补偿组 ϕ_3 向左运动，最后它们在中部靠拢，

形成最短的 d_{23l} 。

设计正组补偿变焦系统，在给短焦时的 d_{12l} 及 d_{34l} 和长焦时的 d_{23l} ，应留出足够的间隔，使各组份不至于相碰。这样就可以把长焦时变倍组的倍率 m_{2l} 和长焦时补偿组的倍率 m_{3l} 联系起来。由于人们总把长焦时的参量作为计算正组补偿的起算位置，因而长焦时的 m_{2l} 便作为初始数据。

(一) 计算公式

为简便起见，把变倍组 ϕ_2 的焦距值 f'_2 取作规范化值，即设

$$f'_2 = -1 \quad (2-1-1)$$

再任设一个 m_{2l} 。为了不至于 ϕ_2 和 ϕ_3 在长焦时相碰，设 $d_{23l} = 0.5$ ，得

$$m_{3l} = \frac{f'_3}{f'_2(1 - m_{2l}) - 0.5 + f'_3} \quad (2-1-2)$$

式中，有 f'_2 ， f'_3 和 m_{2l} 三个参量，然而独立的只有 f'_3 和 m_{2l} 两个。把计算公式顺次书写如下：

(1) 由变倍组的移动量 q_2 ，求它的倍率 m_2

$$m_2 = \frac{1}{\frac{1}{m_{2l}} + \frac{q_2}{f'_2}} \quad (2-1-3)$$

(2) 求系数 b

$$b = -\frac{f'_3}{f'_2} \left(\frac{1}{m_2} - \frac{1}{m_{2l}} + m_2 - m_{2l} \right) + \left(\frac{1}{m_{3l}} + m_{3l} \right) \quad (2-1-4)$$

(3) 求补偿组 ϕ_3 的两个满足运动方程的解 m_{31} 和 m_{32}

$$\left. \begin{aligned} m_{31} &= \frac{b + \sqrt{b^2 - 4}}{2} \\ m_{32} &= \frac{b - \sqrt{b^2 - 4}}{2} \end{aligned} \right\} \quad (2-1-5)$$

(4) 由补偿组 ϕ_3 的两个倍率 m_{31} 和 m_{32} ，求满足运动方程补

像面位移的移动量 Δ_1 和 Δ_2

$$\left. \begin{aligned} \Delta_1 &= f'_3(m_{31} - m_{3l}) \\ \Delta_2 &= f'_3(m_{32} - m_{3l}) \end{aligned} \right\} \quad (2-1-6)$$

注意： m_{3l} 也是两个值，即 m_{3l_1} 和 m_{3l_2} 。如果是以 m_{3l_1} 作为补偿组 ϕ_3 的长焦起始位置，则对应地 Δ_1 的起点就为零， Δ_2 的起点是 $f'_3(m_{3l_2} - m_{3l_1})$ 。相反，则 Δ_2 的起点为零， Δ_1 的起点为 $f'_3(m_{3l_1} - m_{3l_2})$ 。 Δ_1 和 Δ_2 曲线的起点之间总有一段距离 $|f'_3(m_{3l_2} - m_{3l_1})|$ 。如图2-1-2所示。

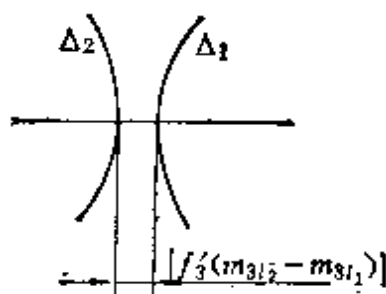


图2-1-2 曲线 Δ_1 和 Δ_2

(5) 求系统的总变焦比

$$\left. \begin{aligned} \Gamma_1 &= \frac{m_{2l}m_{3l}}{m_2m_{31}} \\ \Gamma_2 &= \frac{m_{2l}m_{3l}}{m_2m_{32}} \end{aligned} \right\} \quad (2-1-7)$$

每有一个变倍组 ϕ_2 的移动量 q_2 ，对应着 Γ_1 和 Γ_2 。变倍组和补偿组一起同步运动直到预定的总变焦比为止。

(6) 前固定组 ϕ_1 的焦距 f'_1

系统从长焦位置开始运动，一旦总变焦比达到预定要求，此时变倍组 ϕ_2 向左移动到最左端，见图2-1-3。此时变倍组 ϕ_2 的位置就是短焦位置时它所在的位置。设 $d_{12r} = 0.5$ 有

$$f'_1 = 0.5 + \frac{f'_2(1 - m_{2r})}{m_{2r}} \quad (2-1-8)$$

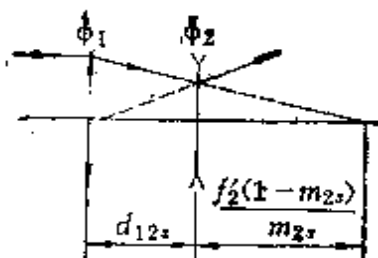


图2-1-3 短焦时变倍组位置

(7) 全系统总长

由于具体情况不一，不同系统的最终像面位置亦不一样，因而不便比较不同系统的总长。为简便起见，规定 ϕ_1 到后固定组 ϕ_4 的距离作为总长 L_s 。有

$$L_s = d_{12s} + |q_2|_{\max} + d_{23l} + |\Delta|_{\max} + d_{34s} \quad (2-1-9)$$

设

$$d_{12s} = d_{23l} = d_{34s} = 0.5$$

则

$$L_s = 1.5 + |q_2|_{\max} + |\Delta|_{\max} \quad (2-1-10)$$

(二) 无解范围的讨论

找准无解区，避免起始解进入无解区，不言而喻是十分重要的。此节目的在于：探讨 f'_3 和 m_{2l} 取什么数据范围是无解区，从而增加设计中的自觉性，减少盲目性。

设 f'_3 和 m_{2l} 取如下范围

$$\left. \begin{array}{l} -2 < m_{2l} < -0.8 \\ 0.5 < f'_3 < 1.45 \end{array} \right\} \quad (2-1-11)$$

这个范围对正组补偿系统是足够的。

由§1-3节可知：变焦系统产生无解的原因在于要让它提供一个短的共轭距将受到它焦距的4倍的限制。当变倍组的倍率 $m_2 = -1$ 时，就要求补偿组 ϕ_3 提供一个最短的共轭距。如果此最短的共轭距比补偿组的焦距 f'_3 的4倍更短，就出现无解。因此，凡是 m_{2l} 取在-1之下变焦过程要经过 $m_2 = -1$ 的系统在 f'_3 的一

定范围由就会出现无解现象。

经计算表明, m_{2l} 和 f'_3 在如下区域:

$$\left. \begin{aligned} -2 \leq m_{2l} \leq -1 \\ 1.25 \leq f'_3 \leq 1.45 \end{aligned} \right\} \quad (2-1-12)$$

系统无解, 故此范围是不可取的。注意, d_{23l} 值不同, (2-1-12) 的范围会有所变化。

(三) m_{31} 和 m_{32} 的特点

应用 § 1-3 节的讨论, 图 2-1-4 表明当 m_2 由一个绝对值小的负值, 经过 -1 , 向绝对值大的负值方向移动时, 对应地有

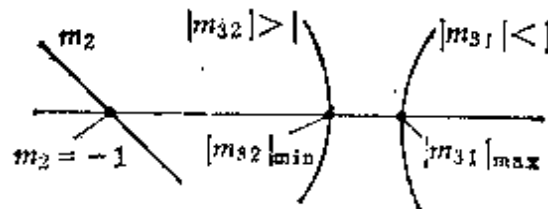


图 2-1-4 正组补偿系统的 m_{31} 和 m_{32} 曲线

$|m_{31}|$: 由 $|m_{31}| < 1$ 上升至 $|m_{31}|_{\max}$ 下降至 $|m_{31}| < 1$;

$|m_{32}|$: 由 $|m_{32}| > 1$ 下降至 $|m_{32}|_{\min}$ 上升至 $|m_{32}| > 1$ 。

因而如果在变焦过程中, m_2 由绝对值小的负值向绝对值大的负值变化时, 若又由初始条件决定补偿组 ϕ_3 是处于 m_{31} 曲线的上半段, 则 $|m_{31}|$ 由小于 1, 逐渐上升至 $|m_{31}|_{\max}$, 从而乘积 $|m_2 m_{31}|$ 增长迅速。由式 (2-1-7) 知, 变焦比增长迅速。

相反, 如果初始条件决定了补偿组 ϕ_3 处于 m_{32} 曲线的上半段, 则 $|m_{32}|$ 由大于 1, 下降至 $|m_{32}|_{\min}$, 则乘积 $|m_2 m_{32}|$ 增长十分缓慢, 变焦比增长亦缓慢, 见表 2-1。

表 2-1 所示是初始数据决定补偿组 ϕ_3 正好在 m_{32} 曲线上, 因而当 $q_2 = 0$ 时 Γ_2 是从 1 开始, 而 Γ_1 不是。相反, 若初始数据决定 ϕ_3 在 m_{31} 曲线上, 则 Γ_1 是从 1 开始, 见表 2-2。表列数据表明, 不论初始数据取在 m_{31} 上或 m_{32} 上, 即不论 Γ_1 从 1 开始或 Γ_2 从 1 开始都无关紧要, 但取在 m_{31} 上半段, 则变焦比增长迅速, 而取在 m_{32} 上

表2-1 补偿组位于 m_{32} 曲线上两补偿曲线的变焦比
$$f'_2 = -1 \quad f'_3 = 1.4 \quad m_{21} = -1.1$$

q_2	Γ_1	Γ_2	q_2	Γ_1	Γ_2
0	1.36	1	1.2	5.17	1.41
0.2	1.66	1.21	1.4	6.11	1.43
0.4	2.18	1.29	1.6	7.12	1.45
0.6	2.80	1.33	1.8	8.22	1.47
0.8	3.51	1.36	2.0	9.38	1.48
1.0	4.30	1.39	2.2	10.16	1.49

表2-2 补偿组位于 m_{31} 曲线上两补偿曲线的变焦比
$$f'_2 = -1 \quad f'_3 = 1.2 \quad m_{21} = -1.1$$

q_2	Γ_1	Γ_2	q_2	Γ_1	Γ_2
0	1	0.734	1.4	4.73	1
0.2	1.22	0.892	1.6	5.55	1
0.4	1.62	0.935	1.8	6.43	1.01
0.6	2.11	0.957	2.0	7.37	1.02
0.8	2.67	0.971	2.2	8.38	1.02
1.0	3.29	0.983	2.4	9.44	1.03
1.2	3.98	0.992	2.5	10	1.03

半段，则变焦比增长缓慢。

归结起来，为变焦比增长迅速起见，补偿组 ϕ_3 处在 m_{31} 曲线上是可取的，相反，在 m_{32} 曲线上是不可取的。

如何取 m_{21} 和 f'_3 才能避免补偿组 ϕ_3 取在 m_{32} 上，而有把握地取在 m_{31} 上呢？区分 m_{31} 和 m_{32} 的根本特征在于：

$$|m_{31}| < 1 \quad \text{而} \quad |m_{32}| > 1$$

考察

$$m_{31} = \frac{f'_3}{m_{21} - 1.5 + f'_3} \quad (2-1-13)$$

如果 $|f'_3 - (1.5 + |m_{2t}|)| < f'_3$, 则 $|m_{3t}| > 1$, 必定造成 m_3 在 m_{32} 曲线上, 不可取。如果 $|f'_3 - (1.5 + |m_{2t}|)| > f'_3$, 则 $|m_{3t}| < 1$, m_3 在 m_{31} 曲线上, 可取。为了便于判断, 利用图2-1-5。图中横坐标为

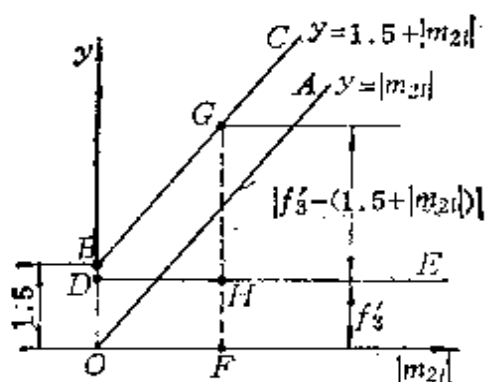


图2-1-5 判断 m_{3t}

$|m_{2t}|$, 纵坐标为 y 。作过原点的直线 OA , 它的方程为

$$y = |m_{2t}|$$

过 B 点作直线 BC 平行于 OA , 直线 BC 在 y 轴上的截距为 1.5, 因而 BC 的方程为

$$y = 1.5 + |m_{2t}|$$

再过 D 点作 DE 平行于横坐标轴, 使 DE 与纵轴截距为 f'_3 , 因而 GH 的长度为 $|f'_3 - (1.5 + |m_{2t}|)|$ 。平行于 y 轴移动 GF 线, 一旦移动到 G 点的纵坐标 y 满足

$$y = 1.5 + |m_{2t}| = 2f'_3$$

时, 有 $GH = HF$, 也即

$$|f'_3 - (1.5 + |m_{2t}|)| = |f'_3|$$

此时则刚巧有 $|m_{3t}| = 1$ 。于是, 只要 $y = 1.5 + |m_{2t}| < 2f'_3$, 必有 $|f'_3 - (1.5 + |m_{2t}|)| < f'_3$, 则 $|m_{3t}| > 1$, 而 $y = 1.5 + |m_{2t}| > 2f'_3$, 必有 $|f'_3 - (1.5 + |m_{2t}|)| > f'_3$, 则 $|m_{3t}| < 1$ 。于是可得规则如下:

对每一个 m_{2t} 值, 数 $(1.5 + |m_{2t}|)/2$ 必存在关于补偿组 ϕ_3 的焦距 f'_3 的一个范围, 若

$$f'_3 < \frac{(1.5 + |m_{2l}|)}{2} \quad (2-1-14)$$

则 $|m_{3l}| < 1$ ，补偿组 ϕ_3 的倍率 m_3 一定在 m_{31} 上半段上，可取。若

$$f'_3 > \frac{(1.5 + |m_{2l}|)}{2} \quad (2-1-15)$$

则 $|m_{3l}| > 1$ ，补偿组 ϕ_3 的倍率 m_3 一定在 m_{32} 上半段上，不可取。

例 设 $m_{2l} = -1$

则

$$\frac{(1.5 + |m_{2l}|)}{2} = 1.25$$

凡 $f'_3 > 1.25$ 均为不可取的初始解。

设 $m_{2l} = -0.9$

则

$$\frac{(1.5 + |m_{2l}|)}{2} = 1.2$$

凡 $f'_3 > 1.2$ 均为不可取的初始解。

在表 2-1 中， $m_{2l} = -1.1$ ，则 $\frac{(1.5 + |m_{2l}|)}{2} = 1.3$ ，但 $f'_3 = 1.4$ ，因而 $f'_3 > 1.3$ ，有 $|m_{3l}| > 1$ ，补偿组 ϕ_3 的倍率 m_3 必定在 m_{32} 上， Γ_2 从 1 开始，变焦比上升缓慢。我们的判断与表内计算数据相符。

在表 2-2 中， $m_{2l} = -1.1$ ， $\frac{(1.5 + |m_{2l}|)}{2} = 1.3$ ，而 $f'_3 = 1.2$ ，所以 $f'_3 < 1.3$ ， ϕ_3 在 m_{31} 曲线上， Γ_1 从 1 开始，变焦比上升迅速。

应当说明一下。单就取 m_{31} 和 m_{32} 曲线的上半段而言，为使变焦比上升迅速，我们是取 m_{31} 的上半段而舍去 m_{32} 的上半段。我们曾在 § 1-3 中提到换根问题，有意识地从 m_{31} 的上半段换根到 m_{32} 的下半段，说明并非对 m_{32} 曲线一概排除。

(四) 正组补偿变焦系统高斯解范围

作了如前的分析之后，把式 (2-1-11) 所示 m_{2l} 和 f'_3 的范围分为几个区域，分别说明如下：

(1) 图2-1-6区域 (I), 为无解区, 应舍去。它的区域是

$$\left. \begin{aligned} -2 \leq m_{2l} \leq -1 \\ 1.25 \leq f'_3 \leq 1.45 \end{aligned} \right\} \quad (2-1-16)$$

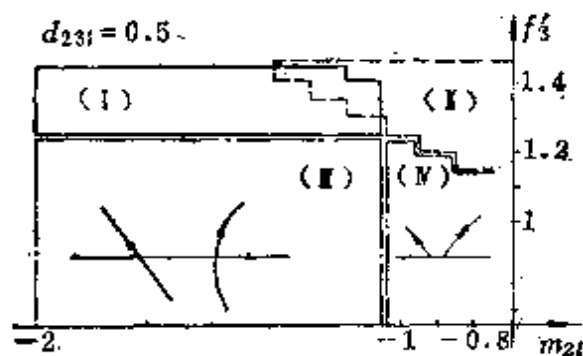


图2-1-6 正组补偿系统高斯解区

(2) 图2-1-6区域 (II), 此时补偿组 ϕ_3 的倍率 m_3 在 m_{32} 曲线上, 即 $|m_{31}| > 1$, Γ_2 从 1 开始, 变焦比增长十分缓慢, 应舍去。它的区域是

$$f'_3 > \frac{(1.5 + |m_{2l}|)}{2} \quad (2-1-17)$$

(3) 图2-1-6区域 (III), 在此范围内, m_3 曲线有解, 同时 m_3 在 m_{31} 曲线上, 变焦比增长迅速。但是, 当在 m_{2l} 的下半段, 即 $|m_{2l}| > 1$ 时, 在 m_3 曲线的上半段和曲线下半段两两对应处, 补偿组 ϕ_3 处于相同位置, 即此两位置为物像交换位置。曲线拐弯严重, 不是单调变化。在正组补偿中, 我们一般也不取它。它的区域是

$$\left. \begin{aligned} -2 < m_{2l} < -1 \\ 0.5 < f'_3 < 1.25 \end{aligned} \right\} \quad (2-1-18)$$

(4) 图2-1-6区域 (IV), 在此范围内, m_3 曲线有解。 m_3 在 m_{31} 曲线上, 变焦比增长迅速, 且使补偿组避开了物像交换位置, 曲线单调变化。该区域是可选区域。

因而, 从补偿曲线单调、平滑且变焦比增长快的角度考虑,

当 $d_{23l}=0.5$ 时，高斯解取如下值：

$$\left. \begin{array}{l} m_{2l} = -1 \quad f'_3 = 1, 1.1, 1.2 \\ m_{2l} = -0.9 \quad f'_3 = 1, 1.1 \\ m_{2l} = -0.8 \quad f'_3 = 1, 1.1 \end{array} \right\} \quad (2-1-19)$$

(五) d_{23l} 的影响

补偿组的位移曲线，除与 m_{2l} 及 f'_3 有关外，还与 m_{3l} 有关。 m_{3l} 受到 d_{23l} 的制约，随 d_{23l} 取值不一样，正组补偿系统的解区会相应有些变化。图2-1-7和图2-1-8为 $d_{23l}=0.7$ 和 $d_{23l}=0.3$ 条件下的解区。

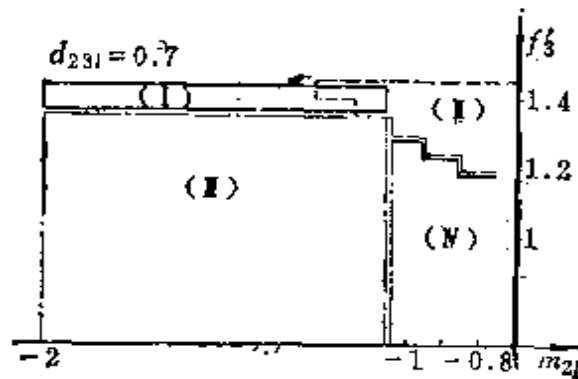


图2-1-7 正组补偿系统高斯解区

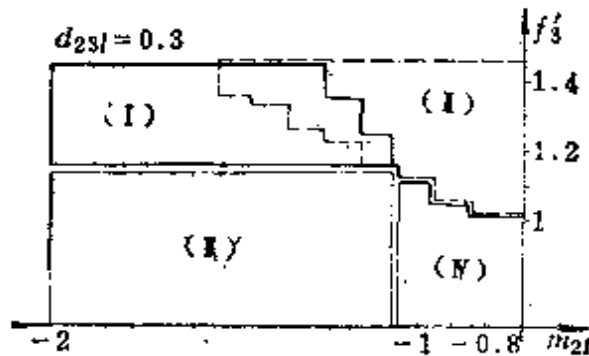


图2-1-8 正组补偿系统高斯解区

比较 $d_{23l}=0.7$, $d_{23l}=0.5$ 和 $d_{23l}=0.3$ 的高斯解区表明， d_{23l} 适当取大一点，高斯解范围会大一些，在大相对孔径系统中更应注意这点。

归结本节内容，正组补偿系统的高斯解，就是从补偿曲线是

否有解，曲线是否平滑，倍率上升是否迅速等因素来考虑。以下三个参数决定着系统的高斯解范围：

$$m_{2l}, f'_3, d_{23l}$$

Γ 值大小决定了在既定补偿曲线上取段的长短，但不决定高斯解范围。

§ 2-2 正组补偿变焦系统换根问题

在 § 1-3 节中，已说明补偿组两个解 m_{31} 和 m_{32} 的极值一定发生在变倍组倍率 $m_2 = -1$ 的时候。若适当调节参数 f'_3 , m_{2l} 和 m_{3l} , 便能使系数 $b = -2$, 从而得

$$m_{31} = -1, m_{32} = -1 \quad (2-2-1)$$

就可使补偿组的倍率 m_3 从 m_{31} 的上半段，经 -1 换根到 m_{32} 这条曲线的下半段来。考察公式：

$$b = -\frac{f'_2}{f'_3} \left(\frac{1}{m_2} - \frac{1}{m_{2l}} + m_2 - m_{2l} \right) + \left(\frac{1}{m_{3l}} + m_{3l} \right) \quad (2-2-2)$$

和

$$m_{3l} = \frac{f'_3}{f'_2(1 - m_{2l}) - d_{23l} + f'_3} \quad (2-2-3)$$

看 b 是否等于 -2 。在 $m_2 = -1$ 点处考察，为使 $b = -2$, 只有调整 m_{2l} 和 m_{3l} 。而调整 m_{2l} 会使 m_{3l} 改变，不合适。若改变 d_{23l} , 从而改变 m_{3l} , 使 b 达到 -2 , 则较方便。

下面看如何调 d_{23l} ：

在式 (2-2-2) 中，以

$$\left. \begin{aligned} m_2 &= -1 \\ b &= -2 \end{aligned} \right\} \quad (2-2-4)$$

代入，得

$$-2 = -\frac{1}{f'_3} \left(-2 - \frac{1}{m_{2l}} - m_{2l} \right) + \left(\frac{1}{m_{3l}} + m_{3l} \right) \quad (2-2-5)$$

式中, m_{2l} 是设计者选定的, f'_3 是设计定了的。解得

$$\frac{1}{m_{3l}} + m_{3l} = \frac{1}{f'_3} \left(2 + \frac{1}{m_{2l}} + m_{2l} \right) - 2 = A_u$$

有

$$m_{3l}^2 - A_u m_{3l} + 1 = 0 \quad (2-2-6)$$

使 $b = -2$ 的 m_{3l} 满足下式:

$$m_{3l} = \frac{A_u \pm \sqrt{A_u^2 - 4}}{2} \quad (2-2-7)$$

式中, 取“+”号, 则得 m_{3l_1} , 取“-”号, 则得 m_{3l_2} , 即

$$\left. \begin{aligned} m_{3l_1} &= \frac{A_u + \sqrt{A_u^2 - 4}}{2} \\ m_{3l_2} &= \frac{A_u - \sqrt{A_u^2 - 4}}{2} \end{aligned} \right\} \quad (2-2-8)$$

换根, 就是要使起始的 m_{3l} 取 m_{3l_2} 。

由式 (2-2-3) 得

$$d_{23l} = m_{2l} - 1 + f'_3 - \frac{f'_3}{m_{3l_2}} \quad (2-2-9)$$

把式 (2-2-8) 中解出的 m_{3l_2} 代入式 (2-2-9), 便得到为了使 $b = -2$ 的 d_{23l} 值, 具体图形见图 2-2-1。表 2-3 列出具体的数据。

注意图 2-2-1, 因为在正组补偿系统中, 经常是由 $m_{2l} = -1$ 向上半段取, 将此 $m_{2l} = -1$ 记为 $\bar{m}_{2l} = -1$ 。为了同 d_{23l} 相区别,

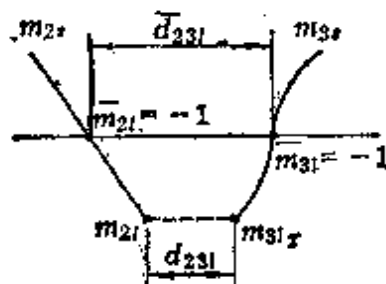


图 2-2-1 正组补偿系统的换根

表2-3 换根时间隔 d_{23l} 的数据

$f'_3 = 1.5$			
m_{2l}	A_w	m_{3l2}	d_{23l}
-1.1	-2.006061	-1.080942	0.787678
-1.2	-2.022222	-1.160596	0.592439
-1.3	-2.046154	-1.239148	0.410509
$f'_3 = 1.6$			
m_{2l}	A_w	m_{3l2}	d_{23l}
-1.1	-2.005682	-1.078273	0.983854
-1.2	-2.020833	-1.155128	0.785128
-1.3	-2.043269	-1.230768	0.600001

将 $\bar{m}_{2l} = -1$ 时的 d_{23l} 记为 \bar{d}_{23l} ，它即是换根时变倍组和补偿组的间隔。相应有 $\bar{m}_{3l} = -1$ ，此时的 \bar{d}_{23l} 应为多少？把

$$\bar{m}_{2l} = -1, \bar{m}_{3l} = -1 \quad (2-2-10)$$

代入式(2-2-9)中，得

$$\bar{d}_{23l} = \bar{m}_{2l} - 1 + f'_3 - \frac{f'_3}{\bar{m}_{3l}}$$

即

$$\bar{d}_{23l} = 2f'_3 - 2 \quad (2-2-11)$$

此式意义在于：换根正组系统当 $\bar{m}_{2l} = \bar{m}_{3l} = -1$ 时， ϕ_2 和 ϕ_3 的间隔 \bar{d}_{23l} 仅依赖于 f'_3 ，关系见表2-4。

表2-4 \bar{d}_{23l} 与 f'_3 的关系

\bar{d}_{23l}	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
f'_3	1.25	1.30	1.35	1.4	1.45	1.50

可见，正组补偿换根方案的补偿组焦距 f'_3 比不换根方案的 f_3 要大。

f'_3 加大的原因是因为换根方案中 m_{2l} 越过 -1 向下半段取值, 变倍组 ϕ_2 还要向右继续移动, 而补偿组 ϕ_3 经过 m_{31} 和 m_{32} 曲线的切点之后, 还要继续在 m_{32} 曲线的下半段向左移动, 使 ϕ_2 与 ϕ_3 间隔减小。为使 ϕ_2 与 ϕ_3 不至相碰, \bar{d}_{23l} 只能取大, 由式 (2-2-11) 可知, f'_3 只能取大。

设有一系统:

$$\bar{m}_{2l} = -1, \bar{d}_{23l} = 0.8, f'_2 = -1, f'_3 = 1.4$$

原变焦比为 10^\times 。当变倍组 ϕ_2 从 $m_2 = -1$ 处继续向右分别移动 $0.1, 0.2, 0.3$ 时, 其变焦比从 10^\times 分别增高至 $12.48^\times, 15.5^\times, 19.85^\times$, 说明换根增高变焦比的效果是明显的。然而, 另一方面, 当变倍组 ϕ_2 向右移动 0.3 时, 补偿组 ϕ_3 得向左作相应的补偿移动 0.49 , 即变倍组与补偿组共向内相向移动约 0.8 , 透镜之间原来所定 $\bar{d}_{23l} = 0.8$, 已无任何间隔余量。为不使 ϕ_2 与 ϕ_3 相碰, 只得加长 \bar{d}_{23l} , 也就是只能以增长 f'_3 为代价。

由此可知, 换根也有利弊, 不是可以无条件应用的, 想不付出任何代价便可获得极大的变焦比是办不到的。换根之后只能作少量移动, 以达到变焦比有相当增高就适可而止。

换根的另一特点是它的前固定组 ϕ_1 相对孔径较大。为了说明此点, 我们先考察一般不换根的系统。这时先选定 m_{2l} 和 m_{3l} , 以一定的步长, 逐点移动变倍组 ϕ_2 和补偿组 ϕ_3 , 使其倍率达到 m_{2r} 和 m_{3r} , 直到变焦比 Γ 满足要求为止。此时变倍组的物距 l_{2r} 为

$$l_{2r} = f'_2 \frac{1 + |m_{2r}|}{(-|m_{2r}|)} = \frac{1}{|m_{2r}|} + 1$$

欲要变焦比大, 必有 $|m_{2r}|$ 下降, 由上式知 $|l_{2r}|$ 增大

$$\text{而} \quad f'_1 = d_{12r} + l_{2r} = d_{12r} + \frac{1}{|m_{2r}|} + 1$$

从而导致 f'_1 增长, 因而对不换根正组补偿系统前固定组的相对

孔径不大。换根方案却不同。此时 m_{2s} 和 m_{3s} 不变化，而是使变倍组和补偿组越过 $m_2 = -1$ 和 $m_3 = -1$ 点进一步向中心靠拢。由于 m_{2s} 不变， f'_1 亦不变；随着换根变焦比增长，前固定组的第一辅助光线高 h_1 在换根后迅速增长，即孔径增大，导致前固定组相对孔径增长。

§ 2-3 负组补偿变焦系统高斯解分析

负组补偿，如图2-3-1所示，它是变焦系统中的又一基本类型。所以叫负组补偿，在于它的补偿组 ϕ_3 的光焦度为负，它的

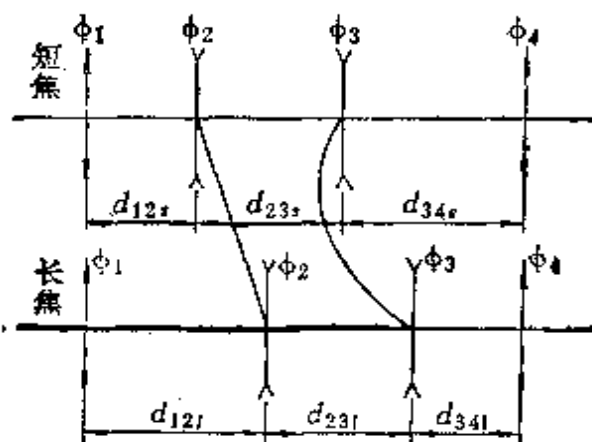


图2-3-1 负组补偿系统的运动

运动方式也与正组补偿有较大的区别。当系统由短焦向长焦变化时，变倍组 ϕ_2 和补偿组 ϕ_3 先是互相分离，然后靠拢，最后一起向右移动，补偿曲线较为弯曲。

(一) 负组补偿变焦系统运动特点概述

(1) 一般特点

负组补偿是一种比较灵活的型式，有如下一般特点：

(a) 补偿组可按物像交换原则设计，也可按非物像交换原则设计。当按物像交换原则设计时，变倍组的倍率取为

$$\left. \begin{aligned} m_{2s} &= \frac{-1}{\sqrt{\Gamma}} \\ m_{2l} &= -\sqrt{\Gamma} \end{aligned} \right\} \quad (2-3-1)$$

则有

$$m_{3m} = \frac{f'_3}{f'_2(1 - m_{2m}) - 0.3 + f'_3} \quad (2-3-4)$$

对式 (1-3-13), 现在有

$$\begin{aligned} b &= -\frac{f'_2}{f'_3} \left(\frac{1}{m_{2l}} - \frac{1}{m_{2m}} + m_{2l} - m_{2m} \right) + \left(\frac{1}{m_{3m}} + m_{3m} \right) \\ &= -\frac{f'_2}{f'_3} \left(\frac{1}{m_{2l}} + m_{2l} + 2 \right) + \left(\frac{f'_3}{f'_3 - 2.3} + \frac{f'_3 - 2.3}{f'_3} \right) \end{aligned} \quad (2-3-5)$$

用式 (2-3-5) 计算得的 b , 是以中焦为起点计算长焦对应的 b 。按下式

$$m_{3l} = \frac{b \pm \sqrt{b^2 - 4}}{2} \quad (2-3-6)$$

算得的是满足 $m_{2m} = -1$ 时, $d_{23m} = 0.3$, 对应于预先选定 m_{2l} 的 m_{3l} 。再以此 m_{2l} 和 m_{3l} 作为计算的起点, 就一定能得出满足式 (2-3-2)、(2-3-3) 和 (2-3-4) 约束条件的整条 m_2 和 m_3 曲线。

这样做又使我们不得不考虑出现的另一种可能: 此时虽保证了 $d_{23m} = 0.3$, 然而却可能由于曲线太平缓 (见图 2-3-3), 致使 d_{23l} 太小, 导致长焦时变倍组 ϕ_2 和补偿组 ϕ_3 相碰。

上述两种可能, 均要求试探中焦 d_{13m} 是否够的同时, 又要试探 d_{23l} 是否够, 存在不少重复劳动, 盲目性大。从而促使采取如下计算过程:

(a) 由式 (2-3-2)、(2-3-3) 和 (2-3-4) 计算与 $m_{2m} = -1$ 对应的 m_{3m0} 。由预先选定的 m_{2l} , 按式 (2-3-5) 和 (2-3-6) 计算与 m_{2l} 对应的 m_{3l0} 。

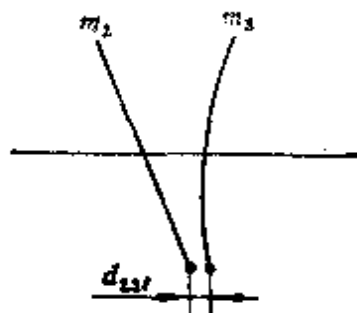


图2-3-3 负组补偿系统一种可能的补偿曲线

(b) 计算由中焦到长焦补偿组和变倍组的移动量 Δ_{m-1} 和 $Q_{2,m-1}$, 其中

$$\Delta_{m-1} = f'_3 \left(\frac{f'_3}{f'_3 - 2.3} - m_{3l_1} \right) \quad (2-3-7)$$

$$Q_{2,m-1} = \frac{1}{m_{2l_1}} + 1 \quad (2-3-8)$$

(c) 作判断。如果 $|\Delta_{m-1}| > |Q_{2,m-1}|$, 说明曲线 m_3 太弯曲, 曲线 m_2 和 m_3 之间的最窄间隔发生在中焦。为此, 按 (a) 算得的 m_{2l_1} 和 m_{3l_1} 作为起点, 用式 (2-1-3)~(2-1-6) 计算整个曲线。此组 m_2 和 m_3 曲线, 保证预先给定的 $m_{2m} = -1$, $d_{23m} = 0.3$ 和与之对应的 m_{3m_0} 。

(d) 作判断。如果 $|\Delta_{m-1}| < |Q_{2,m-1}|$, 说明曲线 m_3 与 m_2 相比太平直, 曲线 m_2 和 m_3 之间最窄的间隔发生在长焦时。应选定 m_{2l_1} , 给定 $d_{23l_1} = 0.3$, 计算

$$m_{3l_1} = \frac{f'_3}{f'_2(1 - m_{2l_1}) - 0.3 + f'_3} \quad (2-3-9)$$

以 m_{2l_1} 和 m_{3l_1} 作为起始点, 按式 (2-1-3)~(2-1-6) 算得整个曲线。由此求得的一组解, 因 $d_{23l_1} = 0.3$, 而最窄间隔又不在 d_{23m} 处, 就不用担心在中焦 $m_{2m} = -1$ 时 ϕ_2 和 ϕ_3 相碰。按式 (2-3-9) 计算得的 m_{3l_1} , 不同于按 (2-3-6) 算得的 m_{3l_1} , 但对曲线的影响并不剧烈, 即不会改变曲线最窄发生在长焦这个特点。

按以上方法, 一直计算到预先给定的变焦比 Γ 为止。

上述方法避免了不必要的重复, 可以一次算成。且对每一组初始数据 m_{2l_1} 和 f'_3 都能找出它是属于上述 (c) 类型或 (d) 类型, 对最窄的地方注意留下足够的余量, 使尺寸达到紧凑与合理。

如果初始解属于 (c) 类型, 我们称为 *M* 型, 如果属于 (d) 型, 称之为 *L* 型。

计算实践证明, 对一给定的 m_{2l_1} , 系统到底属于 *M* 型或 *L* 型, 主要取决于 f'_3 的大小, 见图 2-3-4。

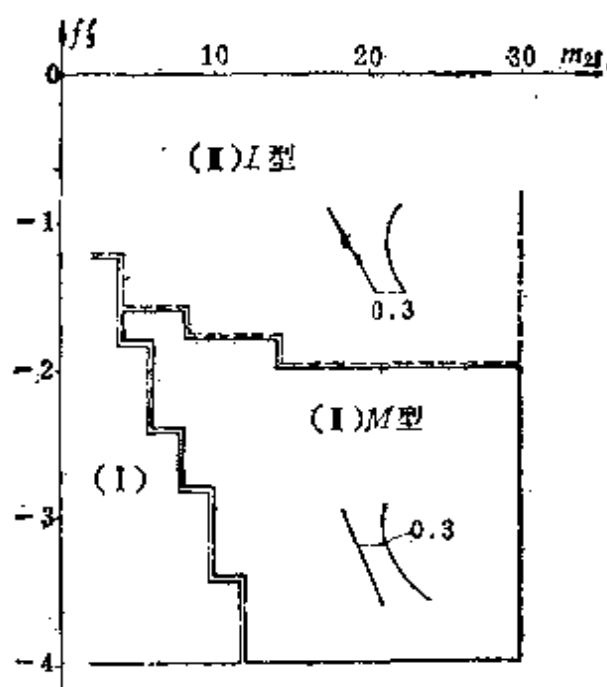


图2-3-4 $m_{2t} > 0$ 的非物像交换负组补偿系统高斯解区

(e) 前固定组焦距 f'_1 仍按下式计算:

$$f'_1 = 0.5 + \frac{f'_2(1 - m_{2t})}{m_{2t}} \quad (2-3-10)$$

(f) 系统总长 L_a 为

$$L_a = 1 + |q_2| + f'_2(1 - m_{2t}) + f'_3 - \frac{f'_3}{m_{3t}} \quad (2-3-11)$$

在式 (2-3-11) 中, $f'_2(1 - m_{2t})$ 代表长焦时变倍组的像距 l'_2 , 而 $f'_3 - f'_3/m_{3t}$ 代表长焦时补偿组的物距绝对值, 即 $|l_3|$, 则 $f'_2(1 - m_{2t}) + f'_3 - f'_3/m_{3t}$ 实际上是 d_{23t} 。按式 (2-3-11) 计算得的是前固定组 ϕ_1 和后固定组 ϕ_4 之间的距离。

最后应注意, 由 $m_{2m} = -1$ 及 m_{3m} 计算 m_{2t} 对应的 m_{3t} 时, 这个 m_{3t} 是指 m_{3t_1} , 即按式 (2-3-6) 计算时, 只取正号

$$m_{3t_1} = \frac{b + \sqrt{b^2 - 4}}{2} \quad (2-3-12)$$

(二) 按 $m_{2t} > 0$ 的非物像交换原则设计的负组补偿系统

这种系统变倍组的倍率变化范围最大, m_2 从一个正数经绝对值大的负数, 到绝对值小的负数, 它具有较多的特点。

我们考察的区域为：

$$\left. \begin{aligned} 4 \leq m_2 \leq 30 \\ -4 \leq f'_3 \leq -0.8 \end{aligned} \right\} \quad (2-3-13)$$

(1) 无解区域

当按照式(2-2-2)、(2-2-3)和(2-2-4)作为起始条件，由式(2-3-5)计算得 b ，用式(2-3-6)去计算 m_3 时，可能会发生无解。无解区域见图2-3-4的区域(I)。

(2) m_{s1} 和 m_{s2} 的特点

正组补偿系统的 m_{s1} 和 m_{s2} 是两条互相独立的补偿曲线，而对 $m_{2l} > 0$ 的非物像交换负组补偿，有个独特之处，即 m_{s1} 和 m_{s2} 互相衔接起来，成为一条唯一的补偿曲线。

如图2-3-5所示。 A 点为前固定组 ϕ_1 提供给变倍组 ϕ_2 的物

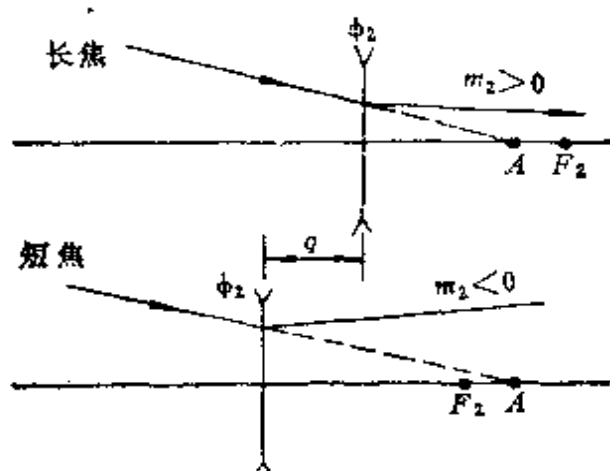


图2-3-5 负组补偿系统的倍率

点， F_2 为变倍组前焦点。在长焦位置时， ϕ_2 和 ϕ_3 均与后固定组 ϕ_4 靠拢于后部，因而物点 A 处于变倍组的前焦点 F_2 之内，所以倍率 $m_2 > 0$ 。随着向短焦位置移动， ϕ_2 向左，则物点 A 由 F_2 之内移动到 F_2 之外，导致 $m_2 < 0$ ，因而 m_2 由有限的正数顺次变为 $+\infty$ ，变为 $-\infty$ ，最后达到绝对值为有限的一个负数。当

$$\left. \begin{aligned} m_2 = \pm \infty \\ m_3 = 0 \end{aligned} \right\} \quad (2-3-14)$$

时，由 § 1-3 的 b 表达式 (1-3-13) 可知：

$$\left. \begin{array}{l} \text{当 } m_2 \rightarrow +\infty \text{ 时,} \\ \text{当 } m_2 \rightarrow -\infty \text{ 时,} \end{array} \right\} \begin{array}{l} b \rightarrow -\infty \\ b \rightarrow +\infty \end{array} \quad (2-3-15)$$

再由 m_{31} 和 m_{32} 表达式 (1-3-14) 知：

$$\text{当 } b \rightarrow -\infty \text{ 时,} \quad \left\{ \begin{array}{l} m_{31} \rightarrow -0 \\ m_{32} \rightarrow -\infty \end{array} \right\} \quad (2-3-16)$$

$$\text{当 } b \rightarrow +\infty \text{ 时,} \quad \left\{ \begin{array}{l} m_{31} \rightarrow +\infty \\ m_{32} \rightarrow +0 \end{array} \right\} \quad (2-3-17)$$

把式 (2-3-15)、(2-3-16) 和 (2-3-17) 合在一起，可概括为：当图 2-3-5 中的物点 A 正好处于 ϕ_2 的前焦点 F_2 处时，则 $m_2 \rightarrow \pm\infty$ ， $b \rightarrow \pm\infty$ ，式 (2-3-16) 的 m_{31} 与式 (2-3-17) 的 m_{32} 均为 0，因而 m_{31} 与 m_{32} 两条曲线此时准确地衔接起来成为一条平滑曲线，过程见图 2-3-6 和图 2-3-7。

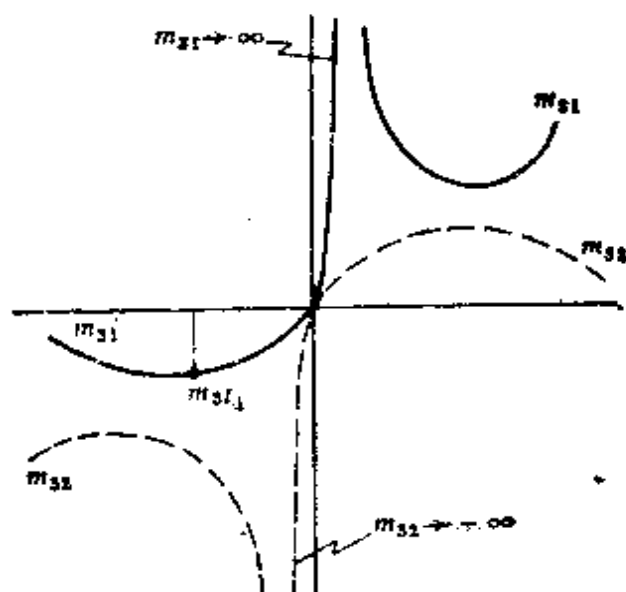
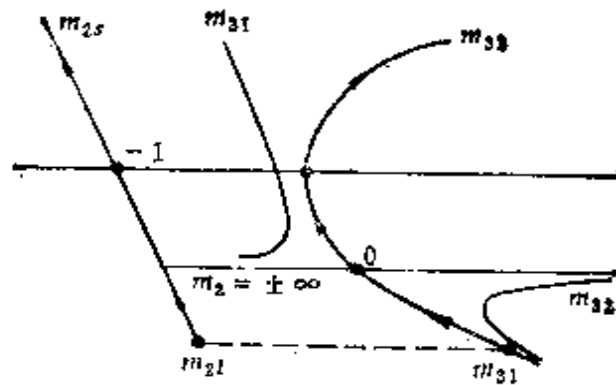


图 2-3-6 m_{31} 与 m_{32} 衔接图

这条衔接起来的曲线，是 $m_{21} > 0$ 的非物像交换原则负组补偿系统唯一可供使用的曲线。

为了保证曲线从负的一支 m_{31} 曲线开始，因而长焦时，补偿组的倍率 m_3 ，只能取 m_{31} ，这就是式 (2-3-12) 的根号前取正号的

图2-8-7 负组补偿系统的 m_{31} 和 m_{32} 曲线

原因。

m_{31} 和 m_{32} 曲线经由 $m_{31} = m_{32} = 0$ 点衔接的现象，详见表2-5。

表2-5 $m_{21} > 0$ 非物像交换负组补偿
系统 m_{31} 与 m_{32} 衔接数据表

$f_1' = 3.08 \quad f_2' = -1 \quad f_3' = -2.3 \quad m_{21} = 8.6$					
q_2	m_2	m_{31}	m_{32}	Δ_1	Δ_2
0	8.6	-0.479	-2.08	0	3.69
0.1	61.4	-0.00392	-25.4	-1.01	57.4
	⋮	⋮	⋮		
	$+\infty$	-0	$-\infty$		
	$-\infty$	$+\infty$	+0		
	⋮	⋮	⋮		
0.2	-11.9	6.29	0.158	-15.5	-1.46
0.3	-5.44	3.37	0.29	-8.86	-1.78
0.4	-3.52	2.47	0.403	-6.79	-2.03

由此表可以看出，当变倍组 ϕ_2 移动0.1至0.2之间时，

(a) m_2 由大于零变为小于零。

(b) m_{31} 由负至零，然后跳变到 $+\infty$ ， m_{31} 曲线间断。

(c) m_{32} 由 $-\infty$ 跳变至零, 然后到正, m_{32} 曲线间断。

(d) 负的一支 m_{31} 曲线与正的一支 m_{32} 曲线在零处衔接起来, 构成补偿组 ϕ_3 的补偿曲线。

在实际工作中, 经常会碰到在解负组补偿系统时, 当补偿曲线收敛很慢或不收敛, 甚至把解曲线的程序编得十分复杂, 这是由于把间断了的 m_{31} 或 m_{32} 误认为是此时的补偿曲线所致。有的甚至把 $m_2 = \infty$ 这点排除于选段范围, 这是不对的。其实它并不会招致麻烦。凡是 $m_{21} > 0$ 的负组补偿系统, 都是选取由负 m_{31} 一支曲线开始, 经 ± 0 点, 最后过渡到正 m_{32} 一支曲线上来。图2-3-4的区域 (I) 和区域 (II) 都属于这种情况。

(3) 图2-3-4区域 (I)。

该区域是指:

$$\left. \begin{array}{l} 4 < m_{21} < 30 \\ |f'_3| > (2 \sim 1.8) \end{array} \right\} \quad (2-3-18)$$

其特征是 $|f'_3|$ 显得较大, 有:

(a) 补偿组 ϕ_3 的 m_3 补偿曲线相当弯曲。 m_2 曲线与 m_3 曲线之间的间隔最窄处发生在中焦, 即属于 M 型, 应当对中焦的 d_{23m} 留有必要的余量。

(b) 系统总长 L_0 增大。由于 $|f'_3|$ 较大, 因而 ϕ_2 的移动量 q_2 小, 而补偿组 ϕ_3 的移动量 Δ 大, 并且随 $|f'_3|$ 的增加, 这个特点更为明显。总长 L_0 的增加往往是由于补偿组 ϕ_3 移动量 Δ 的增加而引起的。

(c) 在 $m_2 = \infty$ 这个点附近, 若变倍组有一微小改变量 dq_1 , 与之对应的补偿组移动量的改变量 $d\Delta$ 数倍地增长, 导致补偿曲线压力角可能不合适, 移动中容易出现“卡死”现象。

(4) 图2-3-4区域 (II)。

该区域是指:

$$\left. \begin{array}{l} 4 < m_{21} < 30 \\ |f'_3| < (2 \sim 1.8) \end{array} \right\} \quad (2-3-19)$$

有如下特点:

(a) m_2 曲线与 m_3 曲线之间的间隔最窄处发生在长焦, 即属于 L 型, 应当对长焦时的间隔 d_{23l} 留有余量。

(b) 总长 L_e 大约总保持在 2.7~2.9 左右。随 $|f'_3|$ 的缩短, 总长反而增加。

(c) 由于 $|f'_3|$ 较小, ϕ_2 移动量 q_2 大, 而 ϕ_3 移动量 Δ 小。

归结以上讨论, $m_{2l} > 0$ 的非物像交换原则负组补偿系统的高斯解是比较灵活的, 在相当大的 f'_3 和 m_{2l} 范围内都能得到较好的补偿曲线解。虽然在图 2-3-4 的 (I) 和 (II) 区域都是有解范围, 但当 $|f'_3|$ 取得太大时, 比如说 $|f'_3| > 2.5$, 就会引起总长 L_e 和补偿量 Δ 的明显增大; 而当 $|f'_3|$ 取得太小时, 比如说 $|f'_3| < 1$, 一方面曲线过于平缓, 刻制曲线的精度要求高; 另一方面, ϕ_3 相对孔径增高, 增加了校正像差的困难。所以 $|f'_3|$ 在

$$1 < |f'_3| < 2.4 \quad (2-3-20)$$

的范围内均可。

若从总长 L_e 考虑, 当 $|f'_3| > 1.8$, 会引起 Δ 的明显增加而导致总长 L_e 增加; 而 $|f'_3| < 1.8$, 会由于 q_2 的增加而导致总长 L_e 的增加。

$$|f'_3| \sim 1.8 \quad (2-3-21)$$

左右整个尺寸最为紧凑。

以上介绍了 $m_{2l} > 0$ 的非物像交换负组补偿系统, 依据 $m_2 = -1$ 时 d_{23} 最小, 或者 m_{2l} 时 d_{23} 最小, 分为 M 型和 L 型。计算实践表明: 除了考虑以上两点外, 有时还应考虑 $m_2 = \pm \infty$ 这一点。即总共考虑如下三种情况:

(a) $m_2 = -1$ 时;

(b) $m_2 = \pm \infty$ 时;

(c) $m_2 = m_{2l}$ 时。

上列 (b) 点有时是不可忽略的。有这样一种情况: 要么 $d_{23m} = 0.3$, 已考虑了给中焦留有余量; 要么 $d_{23l} = 0.3$, 已考虑了给长

焦留有余量，似乎不会发生 ϕ_2 和 ϕ_3 相碰了，但是，仔细一算，却在 $m_2 = \pm \infty$ 处变倍组和补偿组相碰（见图2-3-8）。对应于 $m_2 =$

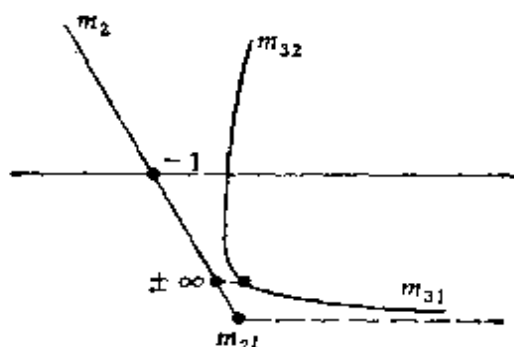


图2-3-8 $m_{2t} > 0$ 非物像交换补偿曲线

$\pm \infty$ 时，变倍组的移动量为

$$q_2 = -\frac{f'_2}{m_{2t}} \quad (2-3-22)$$

此时补偿组移动量

$$\Delta = -f'_3 m_{31} \quad (2-3-23)$$

利用式(2-3-22)和(2-3-23)计算 q_2 和 Δ ，以便校核 d_{23} 是否合适。

(三) 按物像交换原则设计的负组补偿系统

按物像交换原则设计的负组补偿系统是一种较简单的负组补偿。这时，变倍组 ϕ_2 在长焦和短焦位置满足物像交换原则，即补偿组 ϕ_3 处于同一位置。

此时，变倍组 ϕ_2 的 m_{2t} 只能取得比较靠上，否则若 m_{2t} 取得靠下，又要物像交换，势必使 ϕ_2 和 ϕ_3 的移动量 q_2 和 Δ 相当大。与负组补偿非物像交换原则不同，此时 m_2 从一个绝对值较大的负数，变化到一个绝对值较小的负数，总有 $m_{2t} < 0$ （见图2-3-9）。

下面介绍物像交换负组补偿系统的有关问题。

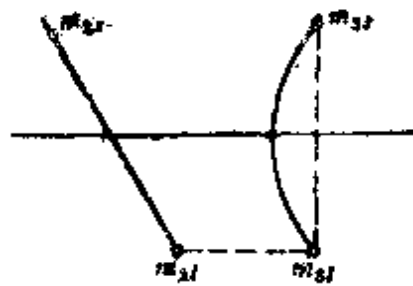


图2-3-9 物像交换负组补偿系统的补偿曲线

(1) 全系统变焦比 Γ

$$\Gamma = \frac{m_{2l}}{m_{2r}} \quad (2-3-24)$$

按物像交换原则, $m_{2l} = 1/m_{2r}$, 有

$$\left. \begin{aligned} m_{2r} &= -\frac{1}{\sqrt{\Gamma}} \\ m_{2l} &= -\sqrt{\Gamma} \end{aligned} \right\} \quad (2-3-25)$$

(2) 变倍组的移动量

$$\text{此时} \quad m_{3r} = m_{3l} \quad (2-3-26)$$

由 (2-3-24) 知, 变焦比仅由变倍组 ϕ_2 的移动引起, 与补偿组无关, 即补偿组 ϕ_3 仅起补偿像面位移的作用, 对变焦比无贡献。由式 (1-3-16) 知, 变倍组的移动量

$$q_2 = f'_2 \left(\frac{1}{m_{2r}} - \frac{1}{m_{2l}} \right)$$

即

$$q_2 = \sqrt{\Gamma} - \frac{1}{\sqrt{\Gamma}} \quad (2-3-27)$$

(3) 前固定组 ϕ_1 的焦距

$$f'_1 = 0.5 + f'_2 (1 - m_{2r}) / m_{2r} = 1.5 + \sqrt{\Gamma} \quad (2-3-28)$$

(4) 当我们取

$$m_{2m} = -1, \quad m_{3m} = \frac{f'_3}{f'_2(1 - m_{2m}) - 0.3 + f'_3}$$

来考察 m_{2l} 时, 可以发现, 此时总有 $|\Delta_{m-l}| < |q_{2,m-l}|$ 。即负组补偿物像交换原则系统总属于 L 型。 d_{23} 的最窄处发生在长焦时, 应对 d_{23l} 留有适当余量。

(5) 系统的总长

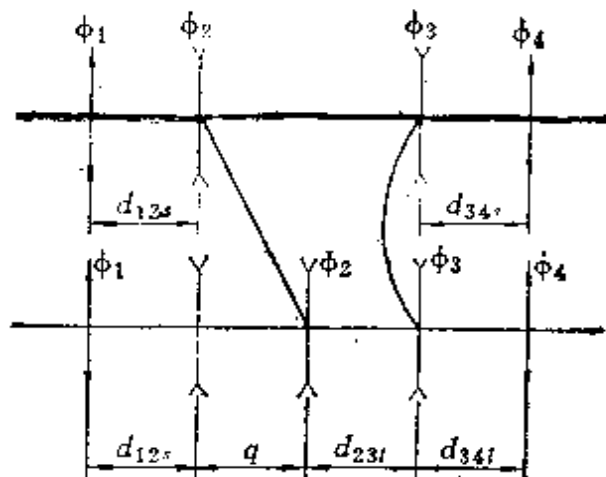


图2-3-10 物像交换负组补偿系统运动图

由图2-3-10可知, 系统的总长 L_a 为

$$L_a = d_{12s} + q_2 + d_{23l} + d_{34l}$$

设 $d_{12s} = d_{34l} = 0.5$, $d_{23l} = 0.3$, 则

$$L_a = 1.3 + q_2 = 1.3 + \sqrt{\Gamma} - \frac{1}{\sqrt{\Gamma}} \quad (2-3-29)$$

由以上各点可以看出: 只要变焦比 Γ 确定, 则 q_2 、 f'_1 、 L_a 三个参数均确定, 且它们随 Γ 的增长而增长, 详见表2-6。

由表可见, 对物像交换负组补偿系统, 要想取得大的变焦比是困难的。

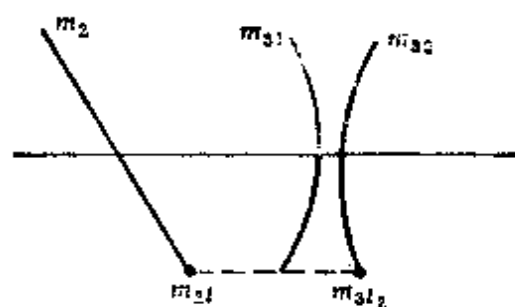
(6) 对物像交换负组补偿系统, 由于总有 $|m_3| < 1$, 只能取

$$m_{32} = \frac{b - \sqrt{b^2 - 4}}{2} \quad (2-3-30)$$

表2-6 f'_1 、 q_2 、 L_a 与 Γ 的关系

Γ	f'_1	q_2	L_a
4	3.5	1.5	2.8
6	4	2.1	2.9
8	4.35	2.5	3.3
10	4.71	2.9	3.7
12	4.98	3.2	4
14	5.26	3.5	4.3
16	5.55	3.8	4.6
18	5.83	4.1	4.9

这一支曲线，见图2-3-11。补偿组的长焦倍率只能是 $m_{3/2}$ ，补偿组的补偿曲线只能为 Δ_2 ，这是与正组补偿系统、 $m_{2/1} > 0$ 的非物

图2-3-11 物像变换负组补偿系统的 m_{31} 和 m_{32} 曲线

像交换负组补偿系统不同的。

注意图2-1-4、图2-3-7和图2-3-11，它们表示了正组补偿、 $m_{2/1} > 0$ 的非物像交换负组补偿、物像交换负组补偿的 m_{31} 和 m_{32} 的相互关系。

(7) 补偿组 ϕ_3 的移动量 Δ

$$\Delta = f'_3(m_{32} - m_{3/2}) \quad (2-3-31)$$

计算表明：随着 $|f'_3|$ 的增长，补偿量 Δ 增长。这是十分自然

的，因为 $\Delta \propto |f'_3|$ 。另一方面，当固定 $|f'_3|$ 不变，欲增加变焦比 Γ ，由于移动量 q_2 势必增加，所以随之 ϕ_3 的补偿量 Δ 也增加（见表2-7）。

表2-7 物像交换负组补偿系统 Γ 与 Δ_{\max} 的关系

		$f'_3 = -3$			$m_2 = -1$				
Γ		4	6	8	10	12	14	16	18
Δ_{\max}		-0.7	-0.266	-0.342	-0.407	-0.462	-0.51	-0.551	-0.588

由上可得如下结论：

物像交换负组补偿系统的运动形式较简单，它没有无解区，可在大范围内得到平滑补偿曲线，其前固定组形成的二级光谱不大。这种系统主要问题是不易获得较大变焦比。

（四）按 $m_{21} < 0$ 的非物像交换原则设计的负组补偿系统

在前面，已讨论了 $m_{21} > 0$ 的非物像交换负组补偿系统，以及物像交换负组补偿系统，现在来讨论 $m_{21} < 0$ 的非物像交换负组补偿系统就容易理解。它只不过是介于第（二）和第（三）种之间的中间类型。

其特点如下：

（1）这种系统 $m_{21} < 0$ ，因而与第（二）种 $m_{21} > 0$ 的情形相比，它的 m_2 没有越过 $m_2 = \infty$ 点，所以它的 m_{31} 必定是取在如图2-3-7所示 $m_2 < 0$ 对应的 m_{32} 一段上，即 m_{31} 是 m_{31_2} 。

（2）这种系统不满足物像交换原则，因而不满足式（2-3-25），比物像交换更向下半段取，它的 m_{21} 取得比 $-\sqrt{\Gamma}$ 更负一些。然而，它又不像 $m_{21} > 0$ 的非物像交换负组补偿系统那样严重地偏离于物像交换原则。

除此而外，它与 $m_{21} > 0$ 的负组补偿系统的计算方法没有两样。假设考察范围是：

$$\left. \begin{aligned} -30 < m_{2l} < -2 \\ -4 < f'_3 < -0.4 \end{aligned} \right\} \quad (2-3-32)$$

计算得图2-3-12。

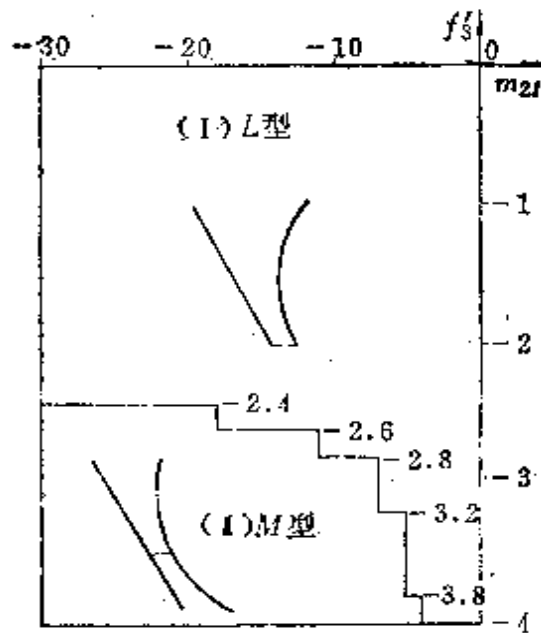


图2-3-12 $m_{2l} < 0$ 的非物像变换负组
补偿系统 f'_3 与 m_{2l} 关系

由图可得如下结论：

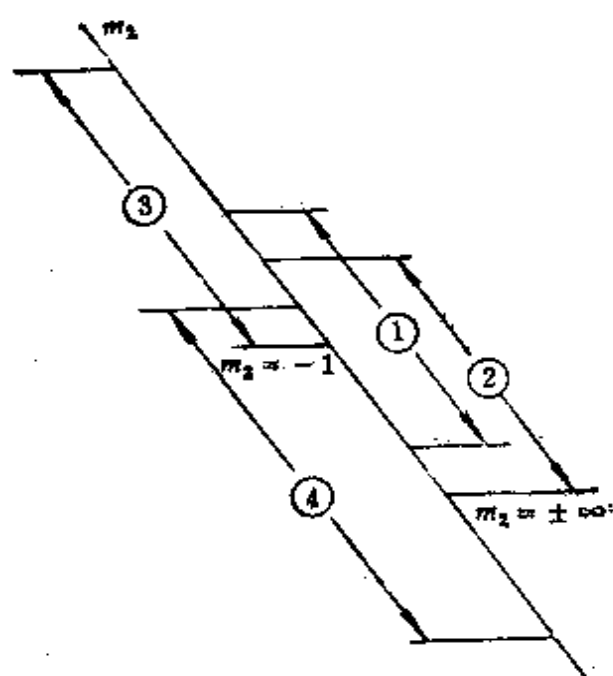
- (1) 在式 (2-3-32) 的整个范围内，没有无解区。
- (2) 当 $|m_{2l}|$ 和 $|f'_3|$ 较小时，即在图形的上半区，属 L 型，即补偿曲线较为平缓，变倍组和补偿组最窄间隔发生在长焦时。
- (3) 当 $|m_{2l}|$ 和 $|f'_3|$ 较大时，即在图形的下半区，属 M 型，补偿曲线较弯曲，变倍组和补偿组最窄间隔发生在中焦。

(五) 几种负组补偿系统的比较

在此把正组补偿系统、 $m_{2l} > 0$ 的非物像交换负组补偿系统、 $m_{2l} < 0$ 非物像交换负组补偿系统、物像交换负组补偿系统作一个简单的比较：

(1) 关于变倍组 ϕ_2 倍率 m_2 的选段

把变倍组在变焦过程中移动曲线展开成一条倾斜直线，其倍率 m_2 亦随之变动，绘出图2-3-13。

图2-3-13 几个系统 m_2 比较图

①—物像交换系统；②— $m_{2l} < 0$ 系统；③—正组补偿；④— $m_{2l} > 0$ 系统。

如图所示，正组补偿系统，一般情况下（换根除外）， m_2 都是从-1往上半段取，是几个方案中最靠上的。物像交换原则负组补偿系统， m_2 是从一个负的较大的数向上取到负的较小的数，它是几个方案中处于中间段的方案。 $m_{2l} < 0$ 的非物像交换负组补偿系统更向下一些。 $m_{2l} > 0$ 非物像交换负组补偿系统的 m_2 取得最向下半段。

几个方案的 m_{2l} 均为负。就 $|m_{2l}|$ 而论，正组补偿最小，物像交换负组补偿大些，而 $m_{2l} < 0$ 非物像交换负组补偿更大一些， $m_{2l} > 0$ 的非物像交换负组补偿系统最大。

就 m_{2l} 而论，正组补偿的 m_{2l} 绝对值在1附近；物像交换负组补偿的 m_{2l} 是绝对值稍大的负数； $m_{2l} < 0$ 的非物像交换系统 m_{2l} 绝对值更大； $m_{2l} > 0$ 非物像交换系统的 m_{2l} 为一正数。

(2) 关于总长 L_0 和前固定组焦距 f'_1

几个系统的总长和前固定组焦距 f'_1 分别为：

正组补偿：

$$\left. \begin{aligned} f'_1 &= 0.5 + f'_2(1 - m_{2r})/m_{2r} \\ L_a &= 1.5 + |q_2|_{\max} + |\Delta|_{\max} \end{aligned} \right\} \quad (2-3-33)$$

物像交换负组补偿:

$$\left. \begin{aligned} f'_1 &= 1.5 + \sqrt{\Gamma} \\ L_a &= 1.3 + \sqrt{\Gamma} - \frac{1}{\sqrt{\Gamma}} \end{aligned} \right\} \quad (2-3-34)$$

非物像交换负组补偿:

$$\left. \begin{aligned} f'_1 &= 0.5 + f'_2(1 - m_{2r})/m_{2r} \\ L_a &= 1 + |q_2|_{\max} + f'_2(1 - m_{2l}) + f'_3 - \frac{f'_3}{m_{3l}} \end{aligned} \right\} \quad (2-3-35)$$

为了便于比较起见, 对四种方案均设变焦比 $\Gamma = 10^*$ 。

正组补偿系统

$$\left. \begin{aligned} f'_1 &= 5 \sim 5.5 \\ L_a &= 4.2 \sim 4.3 \end{aligned} \right\} \quad (2-3-36)$$

物像交换负组补偿系统

$$\left. \begin{aligned} f'_1 &= 4.7 \\ L_a &= 3.7 \end{aligned} \right\} \quad (2-3-37)$$

$m_{2l} < 0$ 非物像交换负组补偿系统

$$\left. \begin{aligned} f'_1 &= 3.7 \sim 4.2 \\ L_a &= 3 \sim 3.6 \end{aligned} \right\} \quad (2-3-38)$$

$m_{2l} > 0$ 非物像交换负组补偿系统, 对 $m_{2l} = 8 \sim 24$, $f'_3 = -1.6 \sim -2$, 有

$$\left. \begin{aligned} f'_1 &= 2.7 \sim 3.5 \\ L_a &= 2.5 \sim 2.9 \end{aligned} \right\} \quad (2-3-39)$$

从上面比较知:

就总长 L_a 而论, 正组补偿最长, 物像交换负组补偿次之, $m_{2l} < 0$ 系统再次, $m_{2l} > 0$ 系统最短。

就前固定组焦距 f'_1 而论, 正组补偿最长, 物像交换负组补偿次之, $m_{2l} < 0$ 系统再次, $m_{2l} > 0$ 系统最短。因为

$$f'_1 = 0.5 + f'_2(1 - m_{2l})/m_{2l}$$

对几种方案均有 $m_{2l} < 0$, 且 $f'_2 = -1$,

$$f'_1 = 0.5 + \frac{1 + |m_{2l}|}{|m_{2l}|} = 1.5 + \frac{1}{|m_{2l}|} \quad (2-3-40)$$

由于正组补偿 $|m_{2l}|$ 最小, 物像交换负组补偿次之, $m_{2l} > 0$ 系统最大, 导致前面关于 f'_1 的结论。

由于长焦时系统二级光谱基本上由前固定组焦距决定, 所以, 正组补偿的二级光谱最小, 物像交换负组补偿次之, $m_{2l} < 0$ 系统再次, $m_{2l} > 0$ 系统最大。

§ 2-4 负组补偿变焦系统换根问题

本节讨论负组补偿变焦系统换根问题。结论是: 负组补偿变焦系统不能实现换根。由几何光学知一个透镜的倍率为

$$m = -\frac{x'}{f'} \quad (2-4-1)$$

其中 x' 为从后焦点到像点的距离。对一个负透镜而言, 当 $x' =$

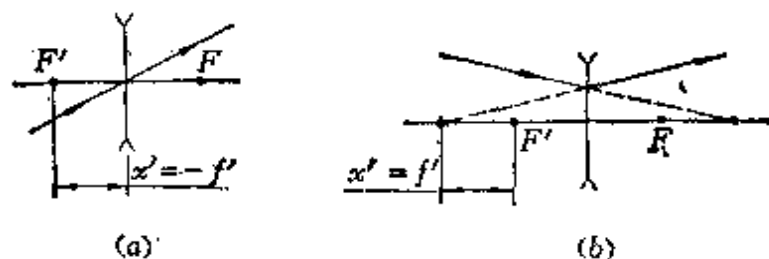


图2-4-1 负透镜倍率 + 1 和 - 1 示意图

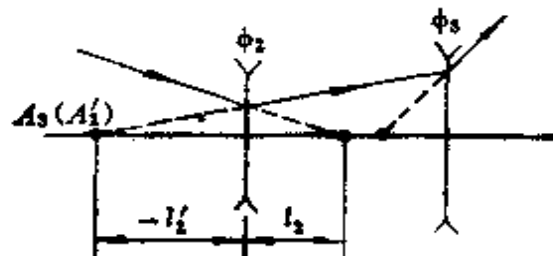


图2-4-2 $m_{2l} < 0$ 负组补偿系统示意图

$-f'$ 时, $m = 1$, 如图2-4-1(a)所示。当 $x' = f'$ 时, $m = -1$, 如图2-4-1(b)所示。

当负组补偿 $m_{2i} < 0$ 时, 变倍组 ϕ_2 提供给 ϕ_3 的物点一定在 ϕ_3 的左侧, 如图2-4-2所示 A_3 点处。此时补偿组倍率 $m_3 > 0$, 且 $m_3 < 1$ 。为要换根, 要求 $b = 2$, 即要 $m_3 = 1$, 因此 ϕ_3 只能移动到变倍组 ϕ_2 的左侧 A_3 处, 必然导致 $d_{23i} < 0$, 这是不可能实现的。

§ 2-5 双组联动型变焦系统高斯解分析

关于双组联动型变焦系统的高斯光学问题已在 § 1-3 中作了较详细讨论。本节只研究它的高斯解范围, 即在此范围确定的结构参数系统是有解的。

图 2-5-1 表明了运动组份的运动情况。当处于长焦位置时, ϕ_2 位于最前, 而 ϕ_3 和 ϕ_4 在后部靠紧。 ϕ_2 和 ϕ_4 固连一起向后作 $q_2 = q_4$ 的移动, 同时, ϕ_3 向前作 Δ 的补偿移动, 从而系统由长焦变到短焦。最后, ϕ_2 和 ϕ_3 在中部靠拢, ϕ_4 处于最后部。

首先, 双组联动系统由于有三个运动组份, 从而它们在运动上一定受到比正组补偿和负组补偿系统更多的制约。为了在长焦时 ϕ_3 和 ϕ_4 不至于相碰, 必要的 d_{34i} 应给出。为了使短焦时 ϕ_2 和 ϕ_3 不至于相碰, 必要的 d_{23f} 亦应给出。

它们满足如下关系:

$$d_{23f} = |q_2|_{\max} + |\Delta|_{\max} + d_{23i} \quad (2-5-1)$$

$$d_{34f} = |\Delta|_{\max} + |q_4|_{\max} + d_{34i} \quad (2-5-2)$$

如果 $d_{23f} = d_{34f}$

则 $d_{23i} = d_{34i}$ (2-5-3)

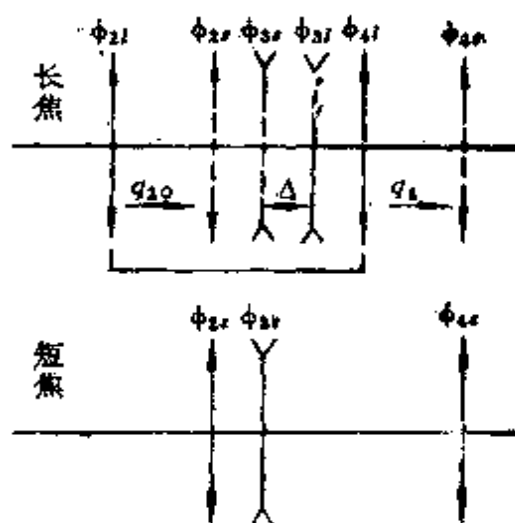


图2-5-1 双组联动系统运动图

(一) 计算公式

设取规化

$$f'_2 = 1 \quad (2-5-4)$$

计算的起始数据是:

$$d_{23l}(\text{或 } d_{34r}), d_{34l}(\text{或 } d_{23r}), f'_3, f'_4, m_{2l}$$

设以长焦作为起始位置, 有

$$m_{3l} = \frac{f'_3}{f'_2(1 - m_{2l}) - d_{23l} + f'_3} \quad (2-5-5)$$

$$m_{4l} = \frac{f'_4}{f'_3(1 - m_{3l}) - d_{34l} + f'_4} \quad (2-5-6)$$

任设一个 ϕ_2 的移动量 q_2 , 得相应的倍率 m_2 为

$$m_2 = \frac{1}{\frac{1}{m_{2l}} - \frac{q_2}{f'_2}} \quad (2-5-7)$$

但是 ϕ_2 和 ϕ_4 是固连一起移动, m_4 为

$$m_4 = m_{4l} + \frac{q_2}{f'_4} \quad (2-5-8)$$

系数 b 为

$$b = -\frac{f'_2}{f'_3} \left(\frac{1}{m_2} - \frac{1}{m_{2l}} + m_2 - m_{2l} \right) - \frac{f'_4}{f'_3} \left(\frac{1}{m_4} - \frac{1}{m_{4l}} + m_4 - m_{4l} \right) + \left(\frac{1}{m_{3l}} + m_{3l} \right) \quad (2-5-9)$$

补偿组 ϕ_3 的倍率

$$\left. \begin{aligned} m_{31} &= \frac{b + \sqrt{b^2 - 4}}{2} \\ m_{32} &= \frac{b - \sqrt{b^2 - 4}}{2} \end{aligned} \right\} \quad (2-5-10)$$

求得补偿组 ϕ_3 的补偿移动量

$$\Delta_1 = f'_3 \left(\frac{1}{m_{31}} - \frac{1}{m_{3l}} \right) - q_2 + f'_2 (m_2 - m_{2l}) \quad (2-5-11)$$

$$\Delta_2 = f'_3 \left(\frac{1}{m_{32}} - \frac{1}{m_{3l}} \right) - q_2 + f'_2 (m_2 - m_{2l}) \quad (2-5-12)$$

相应的变焦比

$$\Gamma_1 = \frac{m_{2l} m_{3l} m_{4l}}{m_2 m_{3l} m_4} \quad (2-5-13)$$

$$\Gamma_2 = \frac{m_{2l} m_{3l} m_{4l}}{m_2 m_{32} m_4} \quad (2-5-14)$$

计算是在计算机上进行，过程将会自动地进行下去，直到变焦比或间隔 d_{23l} 和 d_{34l} 达到预先给定的值为止。应注意的是

$$f'_1 = d_{12l} + f'_2 (1 - m_{2l}) / m_{2l} \quad (2-5-15)$$

不要把上式与式 (2-1-8) 混淆。

(二) 无解范围的讨论

与正组补偿、负组补偿一样，当 $|b| < 2$ ，则出现无解。此时有必要分为两种无解情况加以研究：

(1) 第一种情形。 m_2 和 m_4 同为负号，而 $m_2 \cdot m_4 > 0$ ，此时总有 $m_3 < 0$ 。由 § 1-3 的式 (1-3-21)， $b < 0$ ，从而出现

$$\left. \begin{array}{l} b < 0 \\ |b| < 2 \end{array} \right\} \quad (2-5-16)$$

的无解情况。

例见图 2-5-2。

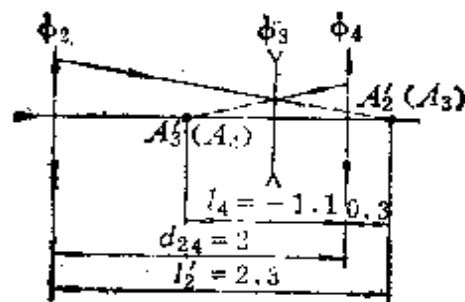


图 2-5-2 双组联动无解例图

$$\begin{array}{lll}
 d_{23l} = 1.5 & d_{34l} = 0.5 & \\
 m_{2l} = -1.5 & m_{3l} = -0.538 & m_{4l} = -1.36 \\
 f'_2 = 1 & f'_3 = -0.35 & f'_4 = 0.6
 \end{array}$$

当 $q_2 = 0.1$ 时

$$\begin{array}{ll}
 m_2 = -1.3 & l'_2 = 1 - m_2 = 2.3 \\
 m_4 = -1.2 & l_4 = f'_4 \frac{1 - m_4}{m_4} = -1.1
 \end{array}$$

由上数据可得

$$d_{24} = d_{23l} + d_{34l} = 2$$

ϕ_3 的共轭距应当是 $L_3 = 1.1 + (2.3 - 2) = 1.4$

而 $4|f'_3| = 1.4$, 从而 $4|f'_3| = L_3$ 有解。

修改 f'_4 , 令 $f'_4 = 0.65$

$$m_{2l} = -1.5 \quad m_{3l} = -0.538 \quad m_{4l} = -1.67$$

$$\begin{array}{ll}
 \text{有} & m_2 = -1.30 \quad l'_2 = 2.3 \\
 & m_4 = -1.516 \quad l_4 = -1.709
 \end{array}$$

补偿组 ϕ_3 的共轭距 L_3 应当为

$$L_3 = 1.079 + (2.3 - 2) = 1.379$$

因而 $4|f'_3| > L_3$, 这组数据无解。

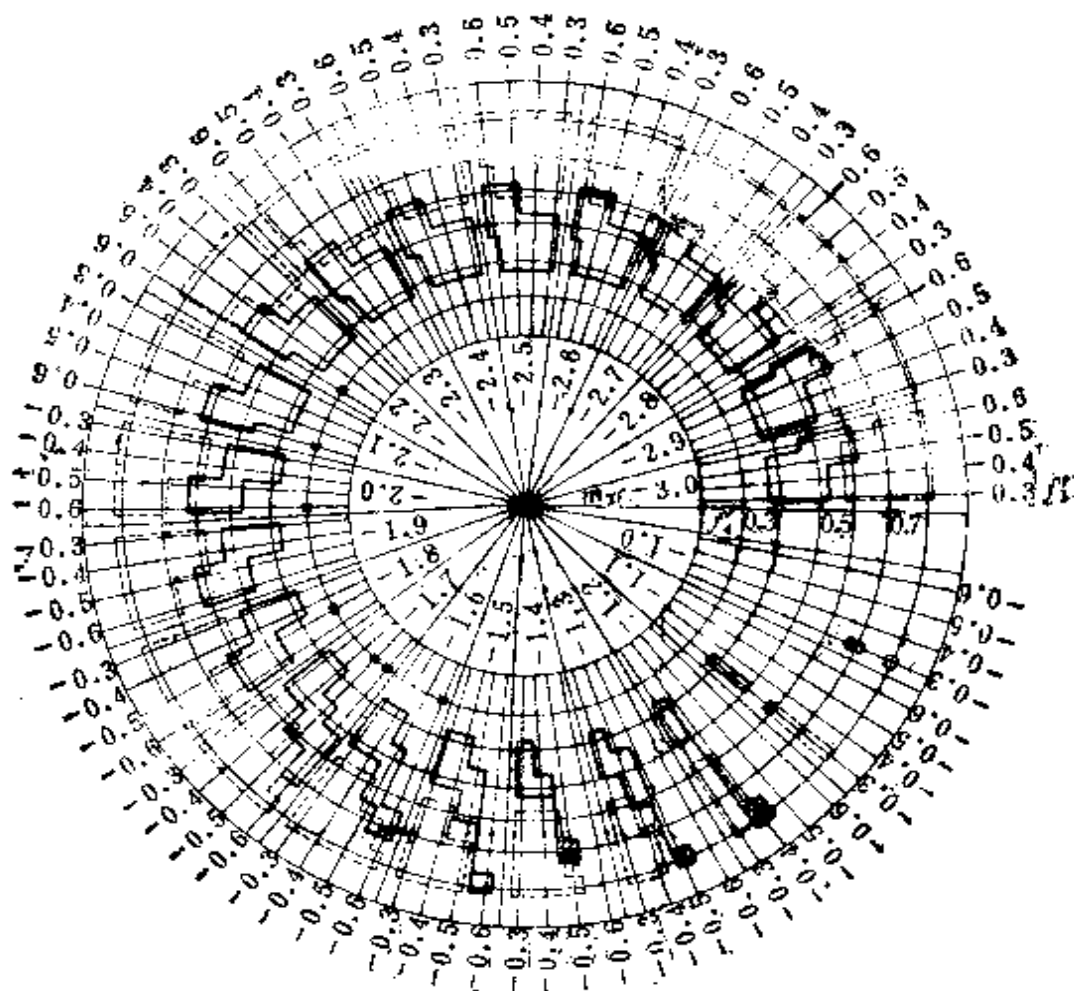
这种无解是双组联动型系统中的主要无解原因, 大多数无解范围由此产生。图2-5-3详细地标明了无解区。图中讨论了如下范围的初始数据:

$$\left. \begin{array}{l}
 -3 < m_{2l} < -1 \\
 -0.6 < f'_3 < -0.3 \\
 0.3 < f'_4 < 0.8
 \end{array} \right\} \quad (2-5-17)$$

在式 (2-5-17) 所述范围内, 属于上述无解情形的有

$$\left. \begin{array}{l}
 f'_3 = -0.3 \sim -0.5 \\
 f'_4 = 0.6 \sim 0.7
 \end{array} \right\} \quad (2-5-18)$$

$$\left. \begin{array}{l}
 f'_3 = -0.5 \sim -0.6 \\
 f'_4 = 0.7 \sim 0.8
 \end{array} \right\} \quad (2-5-19)$$



□可用区域 □无解区 ▨换相区

图2-5-3 双组联动高斯解区

此范围的解应舍去。

(2) 第二种情形。 m_2 和 m_4 异号, 即 $m_2 < 0$, 而 $m_4 > 0$, 有 $m_2 \cdot m_4 < 0$, 此时总有补偿组 ϕ_3 的倍率 $m_3 > 0$ 。又根据式 (1-3-21), $b > 0$, 从而出现

$$\left. \begin{array}{l} b > 0 \\ b < 2 \end{array} \right\} \quad (2-5-20)$$

的无解情况。为了说明这点, 有必要先说明在双组联动型变焦系统中经常发生的现象, 即

$$m_3 < 0 \text{ 同时有 } m_4 < 0$$

经过某点之后突然变为

$$m_3 > 0 \quad \text{和} \quad m_4 > 0$$

为此先观察 $m_{21} > 0$ 的非物像交换负组补偿系统中的一种现象，见表2-8。

表2-8 $m_{21} > 0$ 非物像交换负组补偿例

$f'_2 = -1$	$f'_3 = -1.6$	$m_{21} = 8$	$m_{31} = -0.316$
q_2	m_2	m_{31}	m_{32}
0	8	-0.316	-3.16
0.1	40	-0.0427	-0.00253
0.2	-13.3	9.87	0.101

由表可见，从 $q_2 = 0.2$ 起，系统由 $m_2 > 0$ ， $m_3 < 0$ 突变为 $m_2 < 0$ ， $m_3 > 0$ 。原因在于：一旦前固定组提供给变倍组 ϕ_2 的物点进入变倍组 ϕ_2 的前焦点之内，就产生这种 m_2 和 m_3 的符号突变。

回到说明双组联动系统。

当 ϕ_2 提供给补偿组 ϕ_3 的物点在 ϕ_3 的前焦点之外时，显然 $m_3 < 0$ 。因而补偿组 ϕ_3 的像点一定是在正的 ϕ_4 的前焦点之外，即 $m_4 < 0$ 。随着 ϕ_3 的移动，一旦 ϕ_2 提供给 ϕ_3 的物点进入 ϕ_3 的前焦点之内时，立即有 $m_3 > 0$ ，导致 $m_4 > 0$ 。由此，当 ϕ_2 提供给 ϕ_3 的物点跨越焦点时，就发生了由

$$m_3 < 0 \quad m_4 < 0$$

突变为

$$m_3 > 0 \quad m_4 > 0$$

见表2-9。

随着 m_3 和 m_4 同时变为正号，在 f'_3 和 f'_4 的一定范围内，就发生了第二种无解情形。现举例说明。

$$\text{例} \quad f'_1 = 1 \quad f'_2 = -0.5 \quad f'_4 = 0.3$$

表2-9 双组联动系统 m_3, m_4 变号例

q_2	m_{31}	m_{32}	m_4
0	-0.666	-1.5	-0.891
0.1	-0.764	-1.3	-0.710
0.2	-0.552	-1.81	-0.528
0.3	-0.321	-3.1	-0.346
0.4	-0.134	-7.43	-0.161
0.5	80.9	0.0123	0.0171

$$m_{21} = -1.7 \quad m_{31} = -0.714 \quad m_{41} = -0.283$$

$$\text{当 } q_2 = 0.3 \text{ 时} \quad m_2 = -1.12 \quad l'_3 = 1 - m'_2 = 2.12$$

$$m_4 = 0.717 \quad l_4 = f'_4(1 - m_4)/m_4 = 0.118$$

由于 $d_{24} = 2$ ，变倍组 ϕ_2 提供给 ϕ_3 的物点位于 ϕ_4 之右 0.12。由于 $l_4 = 0.118$ ，即 ϕ_4 之物点距 ϕ_4 为 0.118，从而知 $l'_3 - l_3 = 0.118$

$-0.12 = -0.002$ ，由于有 $l'_3 - l_3 = f'_3 \left(2 - m_3 - \frac{1}{m_3} \right)$ 可得

$$\frac{1}{m_3} + m_3 = b = 1.996 < 2 \quad \text{无解。}$$

从物理意义上来讲也很明显，因为找不到一个负组份 ϕ_3 ，当

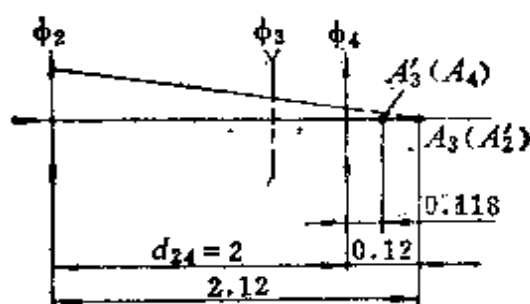


图2-5-4 双组联动系统无解例

其物点 A_3 和像点 A'_3 处于同侧时，像点 A'_3 发散之后，却比物点 A_3 更靠近 ϕ_3 。

若在本例中，把 f'_4 由 0.3 改为 0.4，则

$$\frac{1}{m_3} + m_3 = b = 3.3696 > 2$$

此时变为有解。与第一种无解情形相反，这时 f'_4 不是由于过大，却是由于过小，产生了这种 $m_3 > 0$ ，同时 $m_4 > 0$ 的第二种无解情形。其区域是：

$$\left. \begin{aligned} m_{2l} &= -2.2 \sim -1.6 \\ f'_3 &= -0.5 \sim -0.6 \\ f'_4 &\leq 0.3 \end{aligned} \right\} \quad (2-5-21)$$

(三) 在 m_3 和 m_4 突然换号区域，出现变焦比突然间断

由表 2-10，当 q_2 由 0.3 到 0.4 时，变焦比产生突变。原因在

表 2-10 双组联动系统 Γ 间断例

	$f'_2 = 1$	$f'_3 = -0.4$	$f'_4 = 0.5$
	$m_{2l} = -1.5$	$m_{3l} = -0.666$	$m_{4l} = -0.75$
q_2	Γ_1		Γ_2
0	1.00		0.44
0.1	1.76		0.62
0.2	5.30		0.65
0.3	36.4		0.64
0.4	0.62		413
0.5	0.58		20.7

于：当 ϕ_3 的物点 A_3 处于它的前焦点之外，决定了 m_3 和 m_4 同时为负；而当其物点 A_3 进入前焦点之内时，则 m_3 和 m_4 同时变为正。在此转变过程中，变焦比产生突变。

总之，在双组联动系统中，无论是讨论无解问题，还是变焦

第三章 用 $h-h_p$ 图和孔径图分析变焦系统

§ 3-1 $h-h_p$ 图简介

$h-h_p$ 图是德拉诺 (E. Delano) 于1963年提出的^[20]。贝申麦特 (W. Besenmatter) 把 $h-h_p$ 图引入变焦系统, 做了大量的工作^{[14][21]~[24]}。我们在实践中对后者作了部分补充, 形成自己的一套分析方法。

一个光学系统的初级像差性质由第一辅助光线和第二辅助光线决定。由物中心发出经光阑边缘的光线称为第一辅助光线, 它经光学系统之后与光轴的交点决定了像面位置, 此光线在光阑面上的高度决定了光阑尺寸。由物面边缘点发出经过瞳孔中心的光线称为第二辅助光线, 它经光学系统之后与光轴的交点则决定了入瞳与出瞳的位置, 它与像面交点的高度就是像高。

图3-1-1中, 物平面以 O 为中心, 瞳孔平面以 O_1 为中心, OA_1 为第一辅助光线, AO_1 为第二辅助光线。作 AA_1 光线, 即把水平

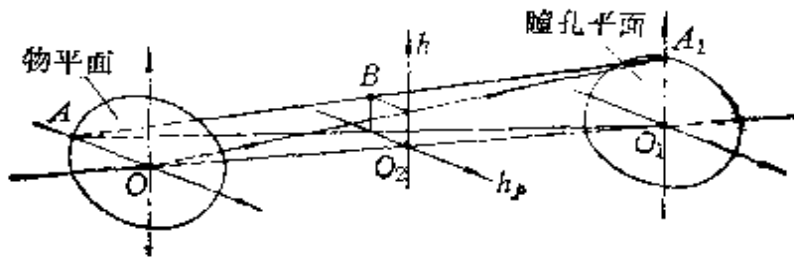


图3-1-1 $h-h_p$ 图的构成

方向物的边缘点 A 与垂直方向瞳孔的边缘点 A_1 连接起来, 这条光线叫做近轴倾斜光线。在物平面和瞳孔平面之间取另一平面, 以 O_2 为中心, 横坐标为 h_p , 纵坐标为 h 。 AA_1 光线与以 O_2 为中心的平面的交点 B , 它的纵坐标正好是第一辅助光线 OA_1 与此平面的

移动, ϕ_2 和 ϕ_3 的间隔 d_{23} 缩短, 而 d_{34} 却增大, 促使变焦比 Γ 迅速改变。相反, 如果 ϕ_3 取 m_{32} 曲线的下半段, 变焦比 Γ 改变缓慢。

为作比较起见, 给出了正组补偿系统的情况(图2-5-5(a))。

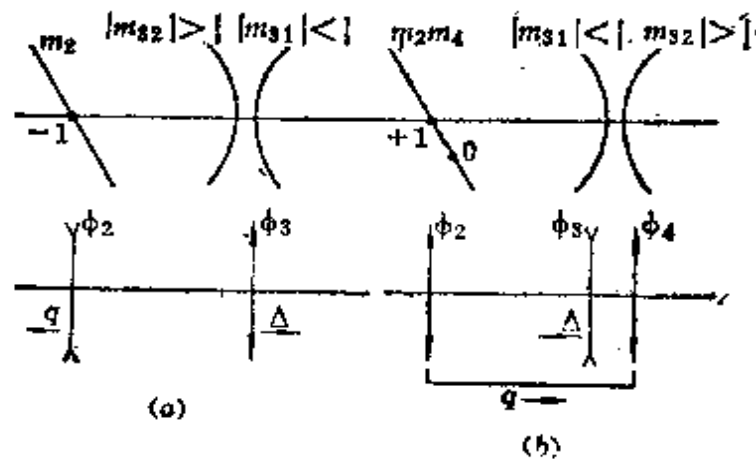


图2-5-5 双组联动与正组补偿运动比较

(a) 正组补偿, (b) 双组联动。

当系统由长焦向短焦变化时, 它是从 $m_2 = -1$ 附近向上半段取; 而双组联动在不换根时, 却是向下半段取。注意图2-5-5(b), 当 q_2 达到最大值时, 系统处于短焦, 补偿组 ϕ_3 位于 m_{31} 曲线上, 这相当于在图1-4-4的 Δ_1 曲线的上半部。

在双组联动变焦系统中, 在不换根时, 对于 ϕ_3 总取 m_{31} 下半段这个解, 而不取 m_{32} 。若要换根, 令 $b = -2$, 使 m_{31} 和 m_{32} 在极值点相切。起始点选在 m_{32} 上半段, 经过切点, 过渡到 m_{31} 下半段曲线。

如何能由初始数据迅速地确定哪组参数保证补偿组 ϕ_3 在 m_{31} 曲线的下半段上, 而不在 m_{32} 曲线上呢?

由式(2-5-5),

$$m_{31} = \frac{f'_3}{f'_2(1 - m_{21}) - d_{231} + f'_3}$$

中, $f'_2 = 1$, $f'_3 < 0$, $m_{21} < 0$, 且设 $d_{231} = 1.5$, 则

$$m_{31} = \frac{|f'_3|}{0.5 + |f'_3| - |m_{21}|} \quad (2-5-22)$$

(1) 若 $|m_{2l}|=0.5$, 则 $m_{3l}=1$, ϕ_2 提供给 ϕ_3 的物点正好在 ϕ_3 上, 这是不需要的。

(2) 若 $|m_{2l}|=0.5+|f'_3|$, 则 ϕ_2 提供给 ϕ_3 的物点正处于 ϕ_3 的前焦点上, $m_{3l} \rightarrow \pm\infty$, 这也是不需要的。

(3) 若 $0.5+|f'_3| < |m_{2l}| < 0.5+2|f'_3|$, 则

$$-\infty < m_{3l} < -1$$

因为 m_3 在 m_{32} 曲线上, 这还是不需要的。

(4) 若 $|m_{2l}| \geq 0.5+2|f'_3|$, (2-5-23)

则 $|m_{3l}| \leq 1$

由它们保证了 $m_{3l} < 0$, 且 $|m_{3l}| < 1$, 正好使 m_{3l} 处在 m_{31} 上, 即 m_3 在 m_{31} 上, 这是需要的解。

例 $f'_2=1$ $f'_3=-0.5$ $f'_4=0.55$

$$m_{2l}=-1.45 \quad m_{3l}=-1.11 \quad m_{4l}=-0.54$$

由于 $2|f'_3|+0.5=1.5$, 所以 $|m_{2l}| < 2|f'_3|+0.5$, m_3 曲线在 m_{32} 上, 这是不需要的。而

$$f'_2=1 \quad f'_3=-0.45 \quad f'_4=0.55$$

$$m_{2l}=-1.45 \quad m_{3l}=-0.9 \quad m_{4l}=-0.683$$

由于 $2|f'_3|+0.5=1.4$, 所以 $|m_{2l}| > 2|f'_3|+0.5$, m_3 曲线在 m_{31} 上, 这是需要的解。

(五) 双组联动变焦系统高斯解范围

归纳上述的分析:

(1) 无解区分两种情况。第一种, $m_2 < 0$, $m_4 < 0$, $m_2 m_4 > 0$, 使式 (2-5-16) 成立的无解。这是主要无解区, 原因是 f'_4 太大。第二种, $m_2 < 0$, $m_3 > 0$, $m_4 > 0$, 而使式 (2-5-20) 成立, 原因是 f'_4 太小。

(2) 双组联动系统一般工作在 $m_3 < 0$, $m_4 < 0$ 。当移动到某一时刻, 可能换号为 $m_3 > 0$, $m_4 > 0$, 此时变焦比突然增长, 有一间断点存在。应避免此点在工作区域中出现, 至少也应使高斯解范围在此点之前。

(3) 当不要求换根时, 应当选 m_3 曲线处于 m_{31} 的下半段。

(4) 若要求换根, 则应选择 $(m_2 m_4)_i \geq 1$, 即让 m_3 曲线处于 m_{32} 的上半段。调整参数, 使 $b = -2$, 让 m_{31} 和 m_{32} 相切。从 m_{32} 上的初始点起, 经切点, 换根到 m_{31} 的下半段。

按照上述, 高斯解范围是:

$$(a) \quad \left. \begin{aligned} m_{2i} &= -1 \sim -3 \\ f'_3 &= -0.3 \sim -0.6 \\ f'_4 &= 0.4 \sim 0.7 \end{aligned} \right\} \quad (2-5-24)$$

且总有 $f'_4 \approx |f'_3| + (0.1 \sim 0.2)$

(b) 倘若要求换根, m_3 的起始点应在 m_{32} 上, 即应满足 $|m_{2i}| < 2|f'_3| + 0.5$ 。但在式 (2-5-24) 中已取 $|f'_3|_{\max} = 0.6$, 要换根必须有

$$\left. \begin{aligned} |m_{2i}| &< 1.6 \\ (m_2 m_4)_i &> 1 \end{aligned} \right\} \quad (2-5-25)$$

(c) 在式 (2-5-24) 的条件下

$$\begin{array}{lll} m_{2i} = -1 & f'_3 \approx -0.3 & f'_4 \approx 0.7 \\ m_{2i} = -1.2 & f'_3 \approx -0.4 & f'_4 \approx 0.7 \\ m_{2i} = -1.3 & f'_3 \approx -0.5 & f'_4 \approx 0.8 \\ m_{2i} = -1.4 & f'_3 \approx -0.5 & f'_4 \approx 0.7 \end{array}$$

是合适的。

详细的高斯解区, 请见图2-5-3。图中详细标出了无解区及可用区以及换根的区域。图中, 无解区和可用区的重叠区域说明, 虽然出现无解点, 但其前段曲线仍可用。换根只存在于 $|m_{2i}| < 1.6$ 的扇形区域内。

§ 2-6 双组联动型变焦系统换根问题

换根, 对于双组联动型变焦系统来说, 是一个较重要的问题。由于其组份多, 间隔多, 换根问题亦相对复杂一些。b 表达式为

$$b = -\frac{f'_2}{f'_3} \left(\frac{1}{m_2} - \frac{1}{m_{2l}} + m_2 - m_{2l} \right) - \frac{f'_4}{f'_3} \left(-\frac{1}{m_4} - \frac{1}{m_{4l}} + m_4 - m_{4l} \right) + \left(\frac{1}{m_{3l}} + m_{3l} \right) \quad (2-6-1)$$

换根都是在 $m_3 < 0$ 条件下，从而 b 一定小于 0。

在换根瞬间

$$\left. \begin{aligned} m_2 m_4 &= 1 \\ \frac{1}{m_2} &= \frac{m_{4l} + \frac{f'_2}{f'_4} \cdot \frac{1}{m_{2l}}}{1 + (f'_2/f'_4)} \end{aligned} \right\} \quad (2-6-2)$$

$$m_{3l} = \frac{f'_3}{f'_2(1 - m_{2l}) - d_{23l} + f'_3} \quad (2-6-3)$$

和

$$m_{4l} = \frac{f'_4}{f'_3(1 - m_{3l}) - d_{34l} + f'_4} \quad (2-6-4)$$

为了实现换根，在式(2-6-1)中调节各种参数使 $b = -2$ 。因式中 f'_3 、 f'_2 和 f'_4 是固定的， m_{2l} 是预先选定的，由式(2-6-3)和(2-6-4)可知，若改变 m_{2l} ，则 m_{3l} 改变，从而 m_{4l} 亦改变，故把 m_{2l} 作为调整 $b = -2$ 的调整环节是不合适的。若把 m_{3l} 作为调整环节，同样亦不方便。若把 m_{4l} 作为调整环节，那么换根时的 m_2 也要改变，但终究 d_{34l} 是最后一个间隔，调节它，使 m_{4l} 改变，以使 $b = -2$ ，会较之调节其它要方便。

从式(2-6-2)中有 $m_4 = \frac{1}{m_2}$ ，代入式(2-6-1)，

$$b = -\left(\frac{1}{m_2} + m_2 \right) \left(\frac{1 + f'_4}{f'_3} \right) + \frac{1}{f'_3} \left(\frac{1}{m_{2l}} + m_{2l} \right) + \frac{f'_4}{f'_3} \left(\frac{1}{m_{4l}} + m_{4l} \right) + \left(\frac{1}{m_{3l}} + m_{3l} \right)$$

在换根瞬间有

$$\frac{1}{m_2} = \frac{m_{4l} + \frac{f'_2}{f'_3} \cdot \frac{1}{m_{2l}}}{1 + f'_2/f'_4}$$

代入上式，且令 $b = -2$ ，有

$$-2 = - \left[\frac{m_{4l} + \frac{1}{f'_4} \cdot \frac{1}{m_{2l}}}{1 + \frac{1}{f'_4}} + \frac{1 + \frac{1}{f'_4}}{m_{4l} + \frac{1}{f'_4} \cdot \frac{1}{m_{2l}}} \right] \cdot \left(\frac{1 + f'_4}{f'_3} \right) + \frac{1}{f'_3} \left(\frac{1}{m_{2l}} + m_{2l} \right) + \frac{f'_4}{f'_3} \left(\frac{1}{m_{4l}} + m_{4l} \right) + \left(\frac{1}{m_{3l}} + m_{3l} \right) \quad (2-6-5)$$

由式 (2-6-5)，换根计算的次序归纳为： m_{2l} ， f'_3 ， f'_4 是给定的，再由 d_{23l} 给定，由 (2-6-3)， m_{3l} 也已固定，一并代入式 (2-6-5)，从而把此式变换为一关于 m_{4l} 的二次方程，解得使 $b = -2$ 的 m_{4l} 的两个解。将此两解代入式 (2-6-4) 便可解出欲换根且满足 $b = -2$ 的间隔 d_{34l} 的值。

从图 2-5-3 中取出几个属于 $|m_{2l}| < 1.6$ 范围的初始数据为例，说明换根的过程。

$$\begin{aligned} \text{例 1} \quad f'_2 &= 1 & f'_3 &= -0.5 & f'_4 &= 0.8 \\ m_{2l} &= -1.3 & d_{23l} &= 1.5 \end{aligned}$$

代入式 (2-6-5)，经整理得：

$$2.334m_{4l}^2 + 4.25643m_{4l} + 1.5384 = 0$$

解得：

$$m_{4l_1} = -0.49665$$

$$m_{4l_2} = -1.32748$$

由式 (2-6-4) 得

$$d_{34l_1} = 0.06929$$

$$d_{34l_2} = 1.07741$$

d_{34l_1} 太小, d_{34l_2} 又太大, 两个解均不合适。

$$\begin{aligned} \text{例 2} \quad f'_2 &= 1 \quad f'_3 = -0.5 \quad f'_4 = 0.7 \\ m_{2l} &= -1.4 \quad d_{23l} = 1.5 \end{aligned}$$

得 $2.75003m_{4l}^2 + 4.05098m_{4l} + 1.42857 = 0$
解得

$$m_{4l_1} = -0.58521$$

$$m_{4l_2} = -0.88785$$

且有

$$d_{34l_1} = 0.771$$

$$d_{34l_2} = 0.363$$

两解均合适。

$$\begin{aligned} \text{例 3} \quad f'_2 &= 1 \quad f'_3 = -0.4 \quad f'_4 = 0.8 \\ m_{2l} &= -1.2 \quad d_{23l} = 1.5 \end{aligned}$$

经整理有

$$2.9166m_{4l}^2 + 5.0868m_{4l} + 2.0834 = 0$$

解得

$$m_{4l_1} = -0.6572$$

$$m_{4l_2} = -1.0868$$

且有

$$d_{34l_1} = 1.084$$

$$d_{34l_2} = 0.603$$

其中 d_{34l_1} 太大, d_{34l_2} 合适。

归纳起来, 如下几组双组联动型系统换根较合适:

$$\left. \begin{aligned} (1) \quad f'_2 &= 1 & f'_3 &= -0.4 & f'_4 &= 0.8 \\ m_{2l} &= -1.2 & d_{23l} &= 1.5 & d_{34l} &= 0.603 \end{aligned} \right\} \quad (2-6-6)$$

$$(2) \left. \begin{array}{l} f'_2 = 1 \quad f'_3 = -0.5 \quad f'_4 = 0.8 \\ m_{21'} = -1.3 \quad d_{231'} = 1.5 \quad d_{341'} = 1.08 \end{array} \right\} (2-6-7)$$

$$(3) \left. \begin{array}{l} f'_2 = 1 \quad f'_3 = -0.5 \quad f'_4 = 0.7 \\ m_{21'} = -1.4 \quad d_{231'} = 1.5 \quad d_{341'} = 0.363 \text{ 及 } d_{341'} = 0.771 \end{array} \right\} (2-6-8)$$

著名的瓦罗塔尔-30系统即属于(2-6-8)这组解。

第三章 用 $h-h_p$ 图和孔径图分析变焦系统

§ 3-1 $h-h_p$ 图简介

$h-h_p$ 图是德拉诺 (E. Delano) 于1963年提出的⁽²⁰⁾。贝申麦特 (W. Besenmatter) 把 $h-h_p$ 图引入变焦系统, 做了大量的工作^{(14)(21)~(24)}。我们在实践中对后者作了部分补充, 形成自己的一套分析方法。

一个光学系统的初级像差性质由第一辅助光线和第二辅助光线决定。由物中心发出经光阑边缘的光线称为第一辅助光线, 它经光学系统之后与光轴的交点决定了像面位置, 此光线在光阑面上的高度决定了光阑尺寸。由物面边缘点发出经过瞳孔中心的光线称为第二辅助光线, 它经光学系统之后与光轴的交点则决定了入瞳与出瞳的位置, 它与像面交点的高度就是像高。

图3-1-1中, 物平面以 O 为中心, 瞳孔平面以 O_1 为中心, OA_1 为第一辅助光线, AO_1 为第二辅助光线。作 AA_1 光线, 即把水平

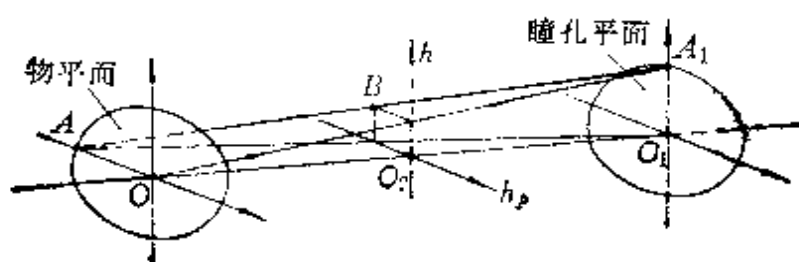


图3-1-1 $h-h_p$ 图的构成

方向物的边缘点 A 与垂直方向瞳孔的边缘点 A_1 连接起来, 这条光线叫做近轴倾斜光线。在物平面和瞳孔平面之间取另一平面, 以 O_2 为中心, 横坐标为 h_p , 纵坐标为 h 。 AA_1 光线与以 O_2 为中心的平面的交点 B , 它的纵坐标正好是第一辅助光线 OA_1 与此平面的

交点高度，即第一辅助光线高，它的横坐标正好是第二辅助光线 AO_1 与此平面交点的横坐标。

所以， $h-h_p$ 图是把各个光学零件用图上的一点来表示。该点以光学零件的第一辅助光线高作为纵坐标，第二辅助光线高作为横坐标。把这些表明每个光学零件的点逐一连接起来就构成 $h-h_p$ 图。由 $h-h_p$ 图，人们既得到第一辅助光线的信息，又得到第二辅助光线的信息，它对综合了解一个系统的情况十分方便。

图3-1-2中， O 为物点，此物点是物平面上的边缘点，因而只有 h_p 的值，而 $h=0$ ，它的横坐标 h_p 代表物高。 OA 为由物点发出并在第一组份之前的近轴倾斜光线的投影， A 点表示第一光学零件， B 及 C 点分别表示第二和第三光学零件， I 表示象点，这是因为此点的 $h=0$ ， I 的横坐标 h_p 代表象高。注意 BC 线与纵坐标的交点 S ，此点 $h_p=0$ ，可知 S 是光学系统的光阑， S 的纵坐标代表光阑的半孔径。入射光线 OA 及出射光线 CI 线的延长线与 h 轴的交点 E 和 E' 分别代表入瞳和出瞳。 E 和 E' 的纵坐标代表入瞳和出瞳的半孔径。现对 $h-h_p$ 图有关于变焦系统的概念介绍如下：

(一) 近轴倾斜光线方程

图3-1-3中，设 OP 为任一条近轴倾斜光线， P 点的纵坐标为 h^* ， O 点的横坐标为 h_p^* 。考察 OP 线上任意一点 A ，它的坐标为 (h_p, h) 。用点斜式直线方程表示 OP

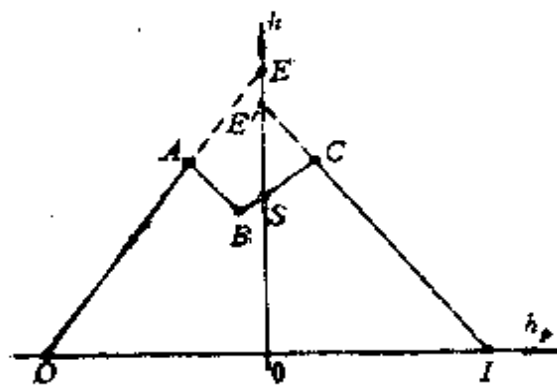


图3-1-2 $h-h_p$ 图例

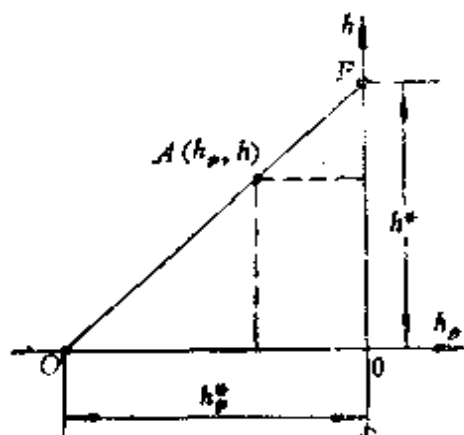


图3-1-3 近轴倾斜光线

$$h = k \cdot h_p + h^* \quad (3-1-1)$$

从而解得直线的斜率

$$k_r = \frac{h - h^*}{h_p} \quad (3-1-2)$$

我们以 O 点的坐标代入式 (3-1-2) 得

$$k_r = -\frac{h^*}{h_p^*} \quad (3-1-3)$$

设物平面与瞳孔平面距离为 d ，则第一辅助光线和第二辅助光线孔径角分别为：

$$u = -\frac{h^*}{d} \quad u_p = \frac{h_p^*}{d}$$

将它们代入式 (3-1-3)，有：

$$k_r = -\frac{h^*}{h_p^*} = \frac{nu}{nu_p} = \frac{\omega}{\omega_p} \quad (3-1-4)$$

式中 n 为空间折射率， ω 和 ω_p 为 nu 和 nu_p 的记号。

(二) 物空间与象空间的关系

在 $h-h_p$ 图上，物光线上的任何点就代表了物方近轴倾斜光线在一个垂直于光轴的平面上的投影，因而 $h-h_p$ 图上的物光线就代表系统的物空间。该物光线经一光学零件折射之后的出射线，就代表象空间。应注意的是，某一物平面和与它共轭的象平面是用横向放大率 m 联系着，有：

$$m = \frac{h'}{h} = \frac{h_p'}{h_p} \quad (3-1-5)$$

由此得：

$$\frac{h'}{h_p'} = \frac{h}{h_p} \quad (3-1-6)$$

式中 (h_p', h') 是与物平面坐标 (h_p, h) 共轭的象平面的坐标。由式 (3-1-6) 可知，用倍率 m 联系着的一对共轭的物平面和象平面的坐标，在 $h-h_p$ 图上必定是经过原点的一条直线。称为共轭线，即在图3-1-4里过原点 O 且经过 (h_p, h) 和 (h_p', h') 的直线。这条共轭线的斜率为：

$$k_c = \frac{h}{h_p} = \frac{h'}{h'_p} \quad (3-1-7)$$

此共轭线与物光线和象光线的交点则为物空间和象空间中的一对共轭点。利用前面的关系可得：

$$k_c = \frac{\omega - m\omega'}{\omega_p - m\omega'_p} \quad (3-1-8)$$

对 h_p 轴，由于斜率 $k_c = 0$ ，有 $m = \frac{\omega}{\omega'}$ ，为物象共轭关系。

可知 h_p 轴当把它理解为共轭线时，代表物平面和象平面这对共轭关系。任何物光线和与之共轭的象光线与 h_p 轴的交点，代表一对共轭的物平面和象平面，见图 3-1-2 的 O 点和 I 点。

对 h 轴， $k_c = \infty$ ， $\omega_p - m\omega'_p = 0$ ，有 $m = \frac{\omega_p}{\omega'_p}$ ，它代表入瞳和出瞳的关系。任何物光线和象光线与 h 轴相交的交点，代表着一对共轭的入瞳和出瞳。

对后焦面，它的放大率 $m = 0$ ，由式 (3-1-8) 得 $k_c = \frac{\omega}{\omega_p}$ ，与式 (3-1-4) $k_c = \frac{\omega}{\omega_p}$ 相比较可知：以后焦面为象面的这对物象平面的共轭线，是过原点而与物光线平行的直线，如图 3-1-5

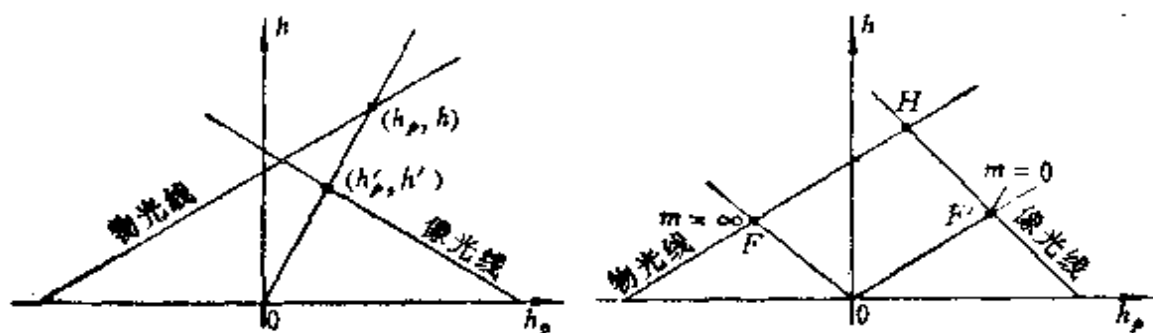


图 3-1-4 物空间与象空间关系 图 3-1-5 前焦面和后焦面的决定

所示。因此，共轭线与物光线交点只能在 ∞ 点，共轭线与象光线的交点则决定了后焦点 F' 。

对前焦面，它的放大率 $m = \infty$ ，得 $k_c = -\frac{\omega'}{\omega_p}$ ，它平行于象光

线，它与物光线的交点决定了前焦点 F 。物光线与象光线的交点 H 代表一个光学系统的主平面位置。

(三) 透镜移动

图3-1-6，设有一条光线 AA_1 倾斜入射到处于位置1的透镜上，经折射之后出射线为 $A_1A_{F_1}$ ，此出射线经后焦面上的 A_{F_1} 点。此

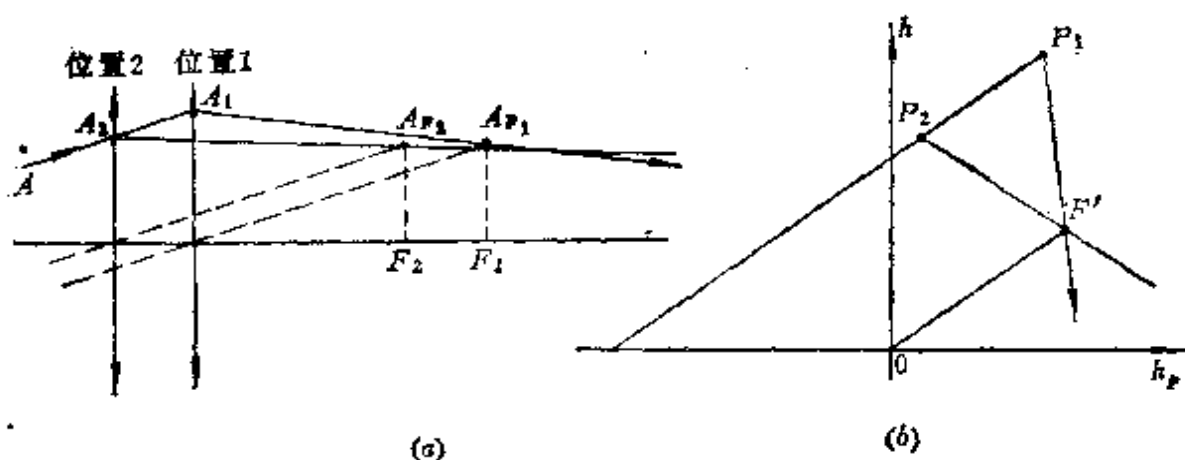


图3-1-6 透镜移动

(a) 透镜移动情况；(b) 用 $h-h_p$ 图表示透镜移动。

时透镜位于位置1相当于图3-1-6(b)的 P_1 点。出射线 $A_1A_{F_1}$ 相当于图示的 P_1F' 线。

当透镜由位置1移到位置2时，后焦平面亦移到 F_2 处，图3-1-6(a)的出射线是 $A_2A_{F_2}$ ，相当于图(b)的 P_2F' 线。

由此可知，不改变物光线而移动透镜，在 $h-h_p$ 图上是沿物光线作直线移动点。

(四) 渐晕

渐晕是一种比较复杂的光学现象。它体现在：物区域由边缘物点发出通过光学系统的光束与由视场中心的物点发出通过光学系统的光束相比要窄，且越靠近物区域边缘，这种现象越严重，随之发生了在象平面边缘点照度下降的现象。这种现象对于复杂光学系统尤为明显。

下面简要介绍如何用 $h-h_p$ 图来说明光学系统中的渐晕情况。

图3-1-7中， A 为物的水平边缘点， P 为瞳孔的垂直边缘点。考察以物点 A 为顶点，以瞳孔为底的一个锥形光束的渐晕情况。

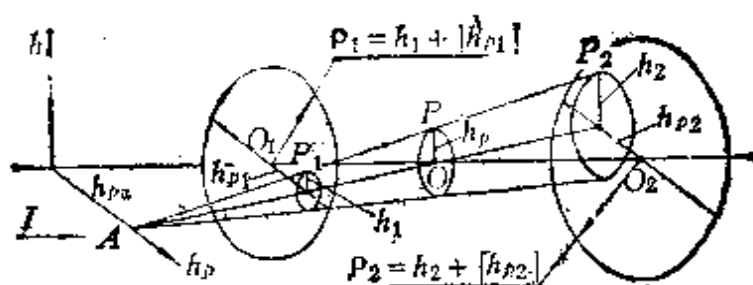


图3-1-7 光束渐晕

由 A 点发出经过瞳孔中心 O 的光线为主光线。设在 O_1 处有一光学零件，倾斜光线 AP 与此光学零件的交点为 P_1 ，它的横坐标 h_{p1} ，纵坐标为 h_1 ，此光学零件的全孔径为

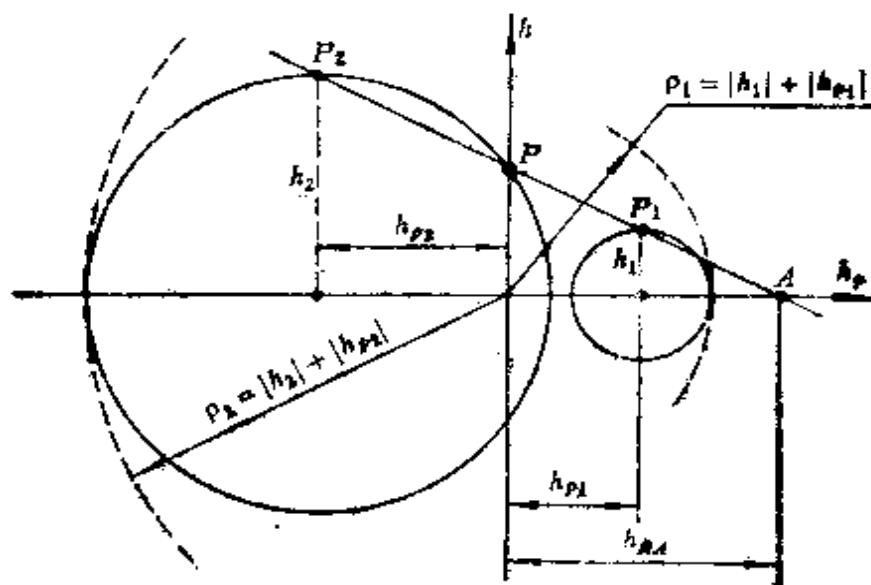
$$\rho_1 = |h_1| + |h_{p1}|$$

才能保证全光束通过，即渐晕系数为 100%。同理，设在 O_2 处有另一光学零件，它的全孔径为

$$\rho_2 = |h_2| + |h_{p2}|$$

才能保证渐晕系数为 100%。

如果从图 3-1-7 的视图 I 方向对整个图形加以投影，就得到图 3-1-8 的 $h-h_p$ 图。图中把 h_p 轴上横坐标为 h_{pA} 的 A 点与纵坐标轴

图3-1-8 由3-1-7图构成的 $h-h_p$ 图

系统的 $h-h_p$ 图。光阑位于 E 点， E' 为出瞳，全系统的物在无穷远， I 为系统的象点。由坐标原点 O 连接 A 点并延长，使之与象光线 CI 的延长线相交，交点 A' 代表 A 的象点。同理得 B 的象点 B' 。从图上还可清楚地看出以 I 为顶点、以出瞳为底的锥形光束与三个透镜所在平面相截的圆的圆心分别为 $O_{A'}$ 、 $O_{B'}$ 和 $O_{C'}$ 点。如果对图 3-1-9(a) 从顶部作顶视图，便得图 (b)。以 $h_{A'} + |h_{pA'}|$ 为半径的圆在瞳孔平面上投影得到以 $K_{A'}$ 为中心的圆，顺次可得 $K_{B'}$ 和 $K_{C'}$ 为中心的圆，这样便可得到如图 (c) 所示的渐晕情况。

§ 3-2 变焦系统 $h-h_p$ 图和孔径图

实践表明用 $h-h_p$ 图分析变焦系统具有如下优点：

1. 比较形象地表明了在各组份上 h 和 h_p 随变焦过程的变化。对一个组份而言， h 和 h_p 的数值，从一个侧面反映了其象差校正的难易程度，可以作为我们判断一个方案好坏的参考，且形象地指明应当用哪个组份去校正何种焦距位置的何种象差。图 3-2-1 是一个正组补偿变焦系统的 $h-h_p$ 图的示意图。1 l -1 m -1 s 是前固定组的 h 和 h_p 坐标的变化

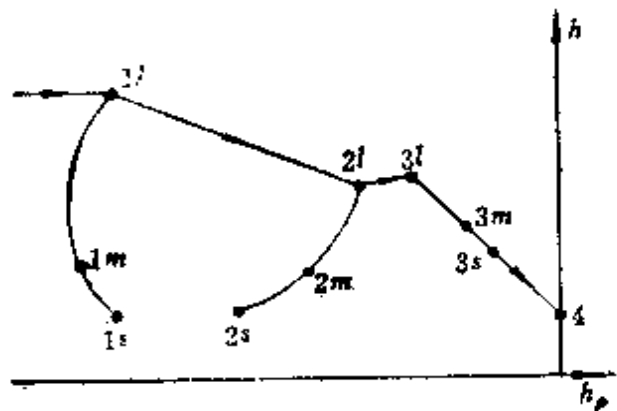


图 3-2-1 变焦系统 $h-h_p$ 图

分别代表变倍组和补偿组的变化曲线。由图清晰表明在变焦过程中 h 和 h_p 的变化情况。为了全面了解象差状况，贝申麦特作了孔径图⁽²³⁾。在实践中，我们发展了孔径图的作法，即把变焦系统每个组份的 h 和 h_p 分别除以其焦距作为该组份在孔径图上的纵坐标和横坐标。这样作更形象和直观，因为它把光学设计中的相对孔径概念引入孔径图中。

图 3-2-2 中，1 l -1 m -1 s 是前固定组的 h/f' 和 h_p/f' 的变化曲线。

2l-2m-2s及3l-3m-3s分别代表变倍组和补偿组相对孔径的变化曲线。曲线上每点与原点的距离 $\sqrt{(h/f')^2 + (h_p/f')^2}$ 全面地代表着该组份当时的象差状况。如果有某个方案，它使各个组份在孔径图上距坐标原点的距离明显加大，那么这个方案从校正象差的角度来说必定是不好的。由于补偿组在 $h-h_p$ 图上为直线，从而在孔径图（图3-2-2）上亦为直线。

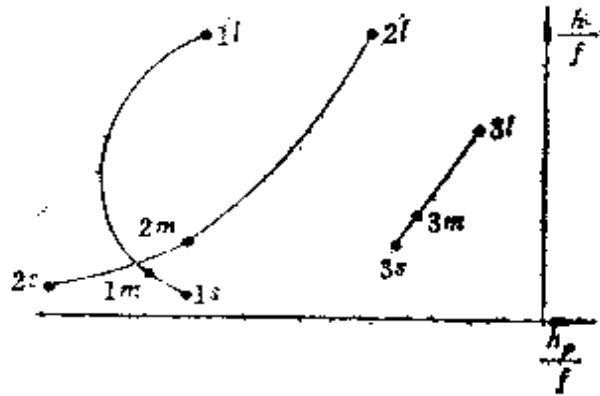


图3-2-2 变焦系统孔径图

图3-2-2是一个负组补偿系统的孔径图的示意图。由图可知，前固定组在整个变焦过程中第二辅助光线相对孔径 h_p/f' 变化不大，第一辅助光线相对孔径在长焦时很高，而在短焦时却很低。所以前固定组相对孔径的变化，主要是由于第一辅助光线高度变化引起的。再考察变倍组，从长焦向短焦变化时，第一辅助光线相对孔径急剧变小，而第二辅助光线相对孔径却急剧增高，当到达短焦时，变倍组的相对孔径由于第二辅助光线高度增高而达到最大。补偿组在整个变焦过程中第一辅助光线和第二辅助光线相对孔径变化不明显。

由此可知， $h-h_p$ 图和孔径图能够形象地表明变焦过程中各组份的第一和第二辅助光线高 h 和 h_p 的变动情况，尤其能形象地表明各组份相对孔径 h/f' 和 h_p/f' 在变焦过程中的变化情况，便于合理地选择各组份的初始型式以利于校正象差。这是 $h-h_p$ 图和孔径图的第一个明显优点。

2. $h-h_p$ 图的另一优点是能较方便地判断变焦系统渐晕情况。

变焦距光学系统具有较多组份，在变焦过程中，有的组份要作移动。由于这两方面原因，使变焦系统的渐晕比较复杂， $h-h_p$

h_p 图则提供了分析变焦系统渐晕的一种较方便的方法。

图3-2-3中, E 点代表瞳孔, h_E 代表瞳孔半径, O 点为物点。如果有一光学零件处于光瞳之前, 它沿图中点1到点4的直线移动。在点1位置时, 由于以 $|h_1| + |h_p|$ 为半径的圆孔在 OE 直线范围内, 从而没有光束割截。如果移动到点3, 此时主光线恰巧能进入光学零件。在点4, 其渐晕系数比点3更低, 甚至主光线也不能进入光学零件。

在变焦系统中, 常用到子午渐晕系数的概念。所谓子午渐晕系数, 表示能通过整个系统的倾斜子午光束宽度与轴上光束宽度的比值。

如图3-2-4所示, 如果光学零件的半径取为 $|h| + |h_p|$, 即图

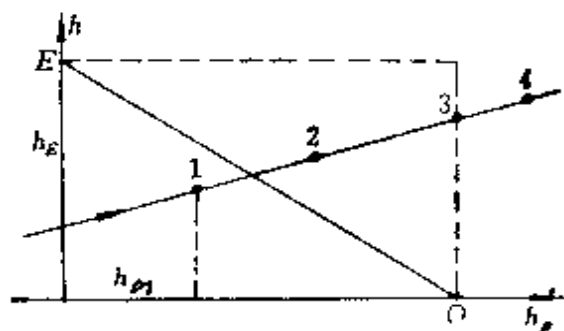


图3-2-3 移动透镜渐晕变化图

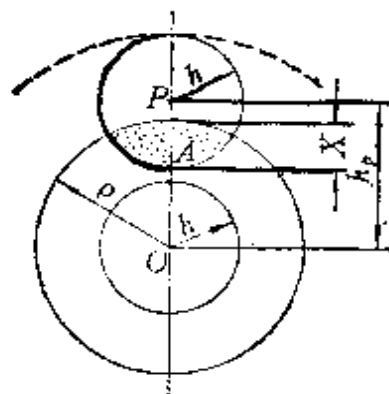


图3-2-4 子午渐晕系数示意图

上虚线所绘的圆形, 那么, 整个倾斜光束 (即以 P 为中心, 以 h 为半径的圆形光束) 就可通过光学系统。但是, 一旦光学零件的半径 $\rho < |h| + |h_p|$, 就出现渐晕现象。如图所示, $|h_p| + |h| - \rho$ 代表被遮拦的倾斜光束宽度, 则能进入系统的倾斜光束在子午面的宽度为

$$X = 2|h| - [|h_p| + |h| - \rho] = \rho + |h| - |h_p|$$

子午渐晕系数定义为

$$V_m = \frac{X}{2|h|} = \frac{\rho + |h| - |h_p|}{2|h|} \quad (3-2-1)$$

从中可以解出 $|h|$ 来

$$|h| = -\frac{|h_p|}{2V_m - 1} + \frac{\rho}{2V_m - 1} \quad (3-2-2)$$

h 代表圆形光束的半径, 总有 $h > 0$, 即 $|h| = h$ 。在图3-2-4中, h_p 却可能由于倾斜光束位于光轴 O 点的上方或下方而成为正量或负量。考虑 h_p 的正负号, 则有

$$h = \mp \frac{h_p}{2V_m - 1} + \frac{\rho}{2V_m - 1} \quad (3-2-3)$$

式中当 $h_p > 0$ 时, 公式前取负号; 当 $h_p < 0$ 时, 公式前取正号。式 (3-2-3) 说明了当光学零件的孔半径 ρ 已固定, 为了得到给定的渐晕系数 V_m , h 和 h_p 的关系是什么。为了形象起见, 设 $\rho = 1$, 考察 $V_m = 1$ 这条曲线, 且

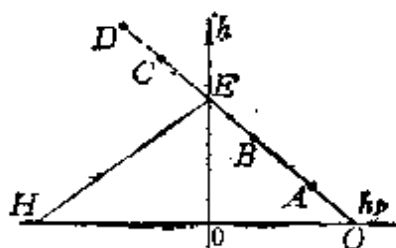


图3-2-5 公式 (3-2-4) 示图

设瞳孔半径 h 与物点的横坐标 h_p 一样大, 作图3-2-5, 则有:

$$h = \mp h_p \quad (3-2-4)$$

在物点与光阑之间, 即在图的第 I 象限, 维持渐晕系数 $V_m = 1$ 的只能是 $h = -h_p$ 直线。过了光阑之后, 即在第 II 象限, 维持渐晕系数 $V_m = 1$ 的只能是 $h = h_p$ 直线。

当透镜由图3-2-5中的 A 点移到 B 点时, $|h_p|$ 虽然减少了, 然而倾斜光束的半径 $|h|$ 却增加, 与固定透镜 2ρ 相截, X 虽然按直线增加, 但轴上光束的口径 $|2h|$ 也按此直线增加, 其比值 V_m 保持不变。

如果透镜处于图3-2-5中从 C 点向 D 点移动, 一方面倾斜光束距光轴的距离 $|h_p|$ 越来越大, 从而使 X 下降; 另一方面它的光束的半径却在不断增加。考察式 (3-2-1), 这两方面原因均促使 V_m 明显下降, 而不能保持 $V_m = 1$ 。所以在第二象限, 维持 $V_m = 1$ 的线不是 $h = -h_p$ 的延长线, 而应当是 $h = h_p$ 。这个道理, 在图3-2-4中, 当 h_p 由正变到负时, 也同样容易解释。

为了形象地描绘出渐晕系数 V_m 为常数的点在 $h-h_p$ 图上的轨迹, 设 ρ 为固定的量 (例如设 $\rho = 1$), 再取 V_m 为一系列不同的

值, 从式 (3-2-2) 中解出 h 和 h_p 的关系, 并作图 3-2-6。

如果在变焦移动中, 某光学零件在 $h-h_p$ 图上的曲线与图 3-2-6 中某一条曲线平行, 那么, 该光学零件由于移动就保持了该固定的渐晕系数。

应当注意, 光学零件是在第几象限, 就要用图 3-2-5 的第几象限的计算曲线来作判断。

通过进一步分析, 会发现用 $h-h_p$ 图评定变焦系统的渐晕系数是有局限性的。当 $\rho - |h_p| \leq h$, 即斜光束有渐晕时, 上述分析是准确的。

一旦 $\rho - |h_p| > h$, 即整个光束进入光学零件孔径, 自然应该有 $V_m = 1$, 然而只要保持斜光束在 2ρ 的范围内, 它在 $h-h_p$ 图的坐标却可以是任意的。这说明: 当斜光束存在渐晕时, 即 $\rho - |h_p| \leq h$ 时, $V_m = 1$ 的轨迹是如图 3-2-5 的直线; 反之, 所有 $V_m = 1$ 的光束并非都是图 3-2-5 的直线, 这在使用时应当注意。

现在转到说明变焦系统的光束限制问题。

(1) 关于限制斜宽光束的上光线和下光线问题

图 3-2-7 是正组补偿系统。图中表明是后固定组限制了斜宽光束的上光线 a , 而前固定组限制了斜宽光束的下光线 b 。图 3-2-8 是图 3-2-7 的补偿组的 $h-h_p$ 图。图 3-2-8 中的 A 点即图 3-2-7 像面上的像点 A 。图中 $3l \cdot 3m$ 和 $3s$ 为补偿组在长焦、中焦和短焦时的位置, $3l'$ 为补偿组在像方的位置。由于补偿组的真实孔径半

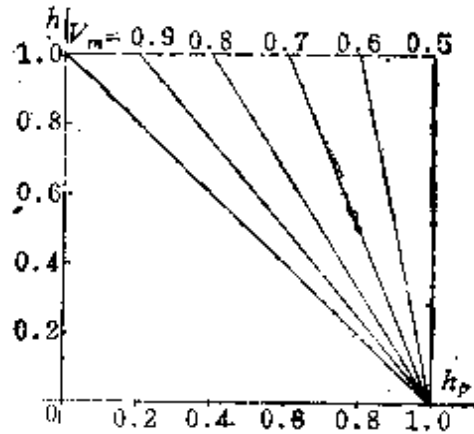


图 3-2-6 不同渐晕系数的 $h-h_p$ 图

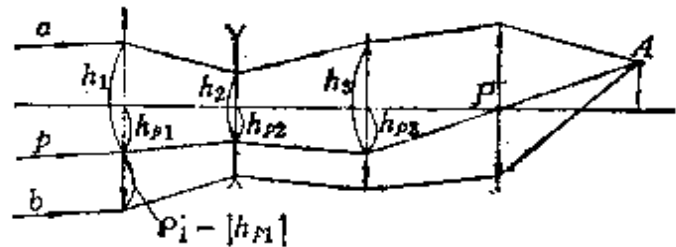


图 3-2-7 正组补偿系统光束限制

表3-1 正组补偿系统拦光数据

		前 固 定 组			变 倍 组			补 偿 组		
		h	h_p	$h + h_{pi} $	h	h_p	$h + h_{pi} $	h	h_p	$h + h_{pi} $
s		3.33	-17.2	20.53	2.99	-10.7	13.69	11.7	-2.0	13.7
sm		5.13	-20.8	25.93	3.89	-8.36	12.25	12.3	-2.35	14.65
m		8.16	-21.2	29.36	5.22	-6.51	11.73	13.2	-2.81	16.01
lm		14.9	-19.5	34.4	7.79	-5.03	12.82	14.6	-3.59	18.19
l		34.2	-19.1	53.3	13.6	-4.87	18.47	17.2	-4.92	22.12

和 lm 的下边缘光线，后固定组，任何焦距位置都是拦截上边缘光线。

对前固定组，由于任何焦距位置的 $|h| + |h_p|$ 都大，而且变化也大，透镜口径对光束的限制也严重，所以前固定组是变焦系统中渐晕最薄弱的，应当予以特殊注意。

(3) 变焦移动中保持 V_m 为常量的条件

由式 (3-2-5)，同时考虑式 (3-2-3)，当在第 I 象限时，第一项之前应取为正号，即有：

$$h_i = \frac{|h_{pi}|}{\frac{V_m}{0.5} - 1} + \frac{\rho_i}{\frac{V_m}{0.5} - 1} \quad (3-2-6)$$

此式描写光学零件有确定的孔径半径 ρ_i 时，希望渐晕系数保持 V_m ， h_i 和 h_{pi} 的关系。若 V_m 令其为 1，则 h_i 和 h_{pi} 在图 3-2-9 中为一条倾斜 45° 的直线。

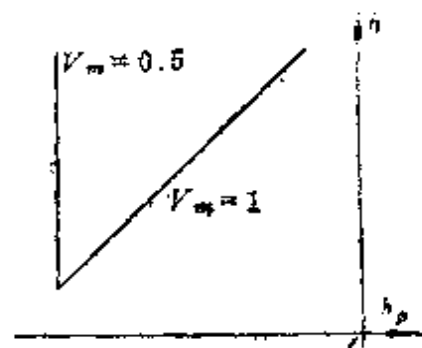


图3-2-9 渐晕系数为常量的直线系

设 $0.5 < V_m < 1$ ，则式 (3-2-6) 的斜率介于 $\infty > \frac{1}{\frac{V_m}{0.5} - 1}$

> 1 ，即在图3-2-9中直线越陡，渐晕系数越小。当直线变为垂直于 h_p 轴，则渐晕系数下降至0.5。若直线超过垂直，成为负斜率的直线，则渐晕系数 V_m 下降至0.5以下。

由此可知，若一个变焦系统的某组份在变焦过程中，在 $h-h_p$ 图上的轨迹是沿图3-2-9中的斜率为固定值的倾斜直线，或近似平行于该条直线，则此组份在变焦过程中渐晕系数维持该常量。

§ 3-3 用 $h-h_p$ 图和孔径图辅助判断正组 补偿变焦系统高斯解

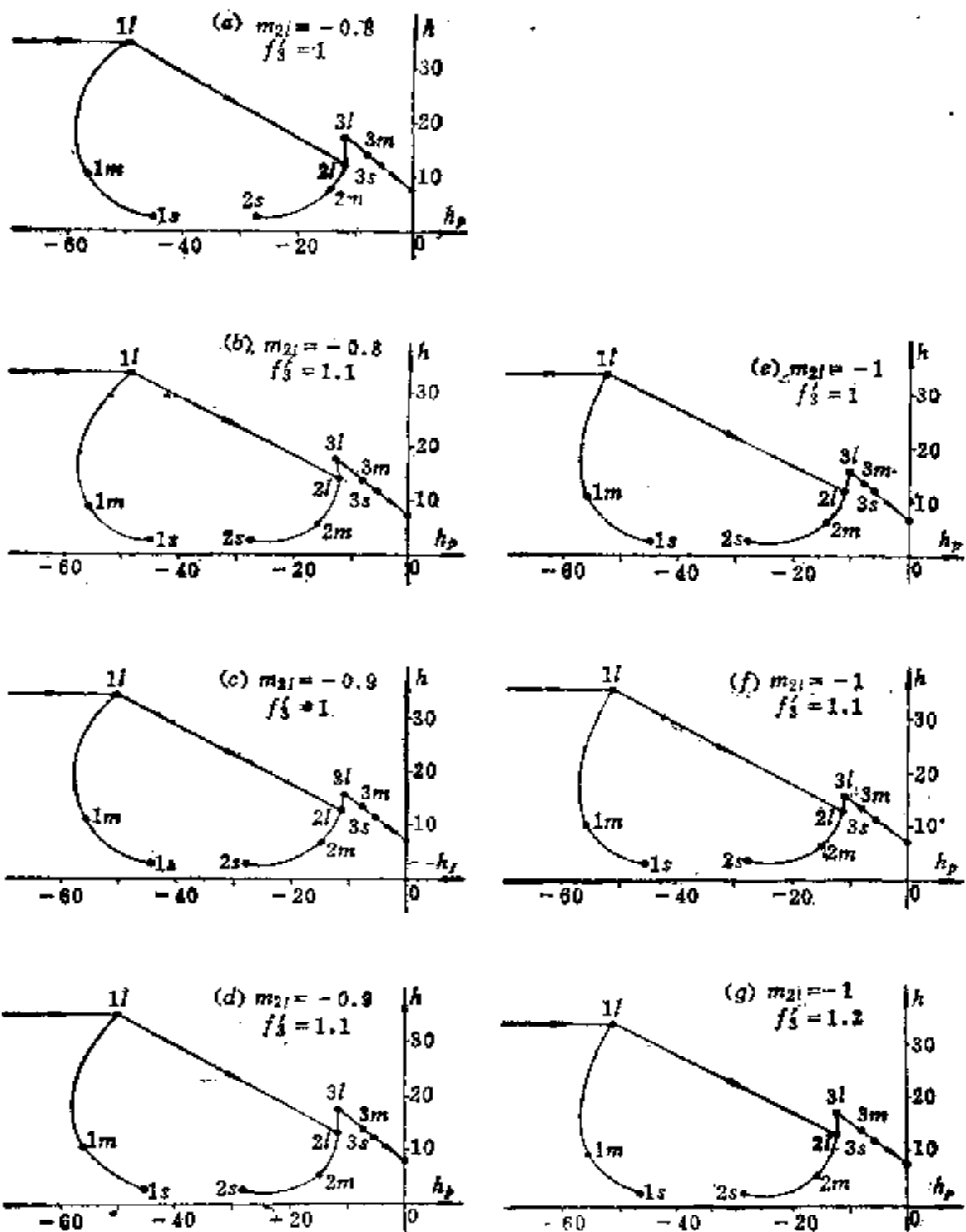
第二章中已经给出了正组补偿变焦系统的解区范围，现在以此解区的系统为例。并且规定：

$$\begin{aligned} f'_{\min} &= 20 & D/f' &= 1/3 \\ \Gamma &= 10'' & \eta &= 6.4 \end{aligned}$$

用 $h-h_p$ 图和孔径图来分析这些方案。

先用 $h-h_p$ 图来判断它们的渐晕情况。对前固定组，从中焦 $1m$ 到长焦 $1l$ ， $h_1 + |h_{p1}|$ 越来越大。正如表3-1所指出，此时光束的拦截比较严重。从 $1m \rightarrow 1l$ 曲线的趋势几乎与 h_p 轴垂直，渐晕系数 V_m 在0.5左右。变倍组的趋势较好，它与 $V_m = 1$ 的直线近似平行。然而在 $2l$ 和 $2s$ ， $h_2 + |h_{p2}|$ 明显增高，由表3-1知在长焦和短焦两位置拦光较严重。把补偿组的曲线与图3-2-9比较表明， V_m 在0.5以下。

再看孔径图。由图3-3-2可知，前固定组相对孔径相当小。它在孔径图上的变化主要来自于第一辅助光线高度的变化， h_p/f' 改变不大。对变倍组，在 $2s$ 时， h_p/f' 均维持在0.35左右这个相当高的数值，这是变倍组的特点；在 $2l$ ， h/f' 约0.16~0.17左右。补偿组的变化主要是由于 h/f' 的变化引起，当 m_{2l} 由-1向-0.8变化时，补偿组在 $3l$ 时的 h/f' 由0.19增加到0.22。关于 h/f' 上升的道理，只要画一个草图便可看清。随着 $|m_{2l}|$ 取得小， l_{2l} 增大，即在长焦时变倍组隔前固定组越近。第一辅助光线在变倍组上高度越高，经它发散之后，补偿组的高度增加，导致相对孔

图3-3-1 各种方案正组补偿系统 $h-h_p$ 图

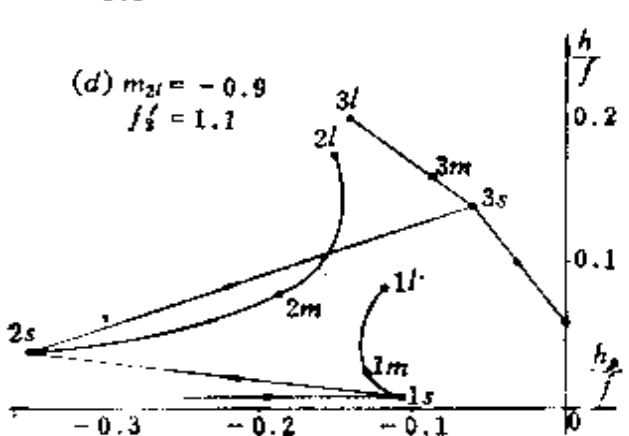
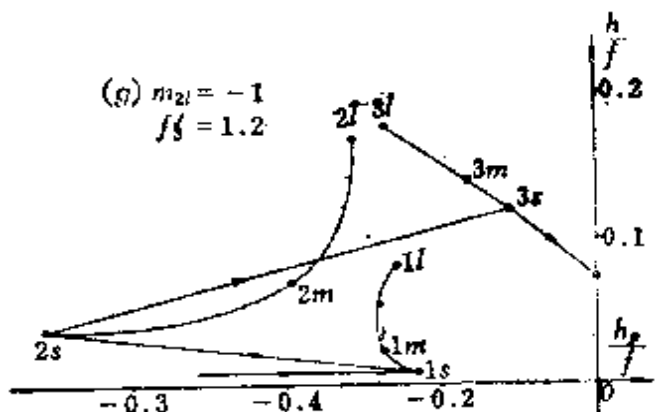
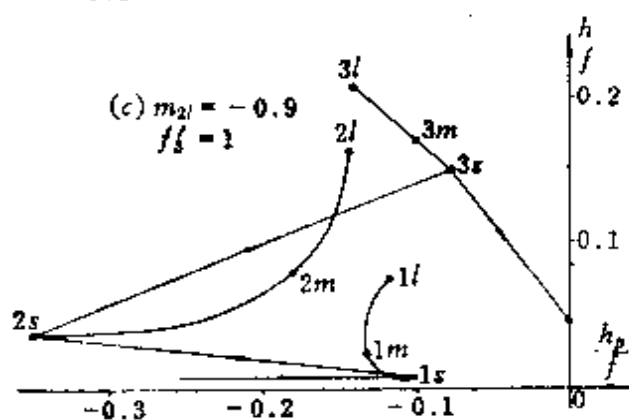
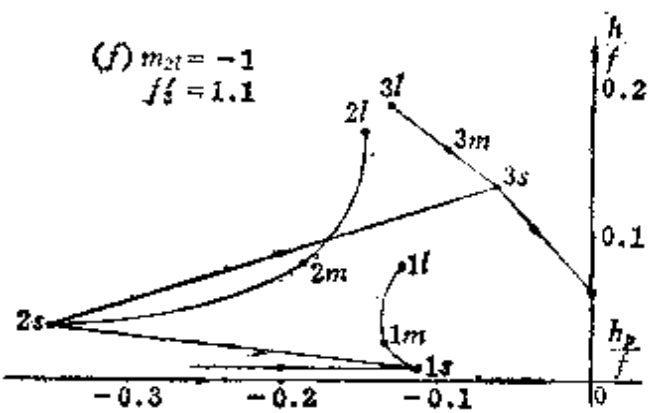
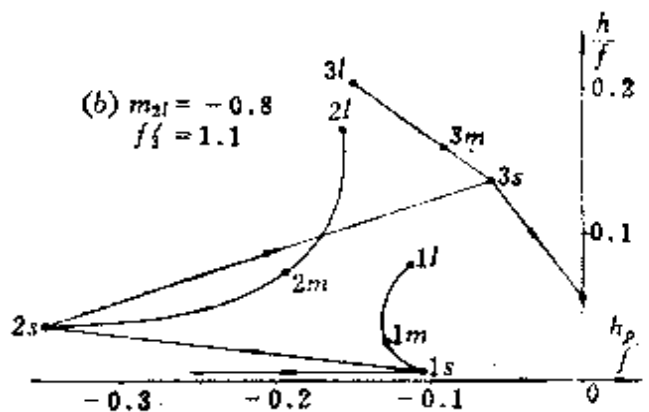
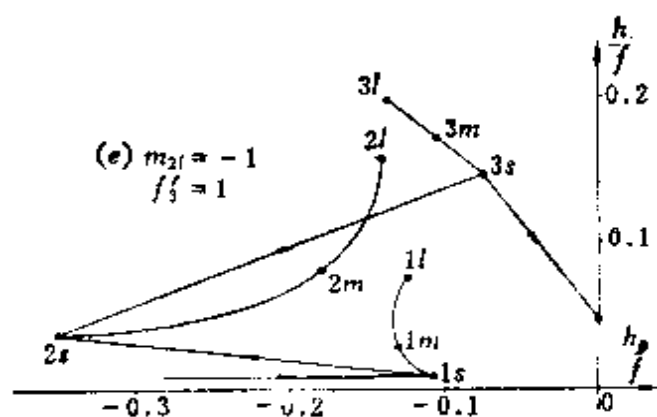
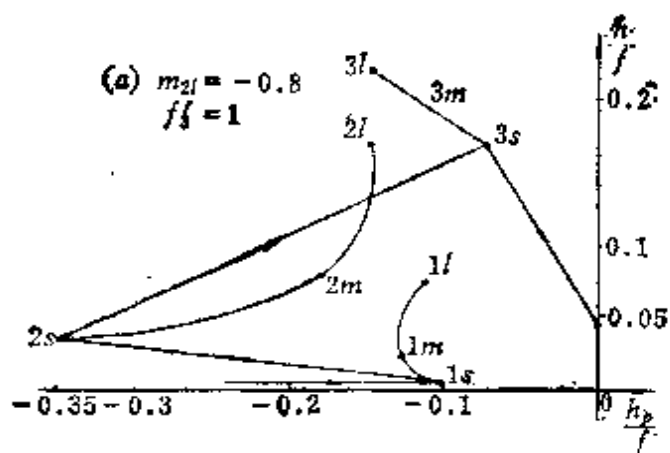


图3-3-2 各种方案正组
补偿系统孔径图

径 h/f' 增加。归结起来，经用 $h-h_p$ 图和孔径图判断，对正组补偿系统，推荐如下几个方案：

$$\left. \begin{array}{l} m_{2l} = -1 \quad f'_3 = 1.1, 1.2 \\ m_{2l} = -0.9 \quad f'_3 = 1.1 \end{array} \right\} \quad (3-3-1)$$

从 $h-h_p$ 图分析它们的光束拦截，从孔径图分析它们各组份的偏角负担，不难推断 (3-3-1) 这个结论。

§ 3-4 用 $h-h_p$ 图和孔径图辅助判断负组补偿变焦系统高斯解

由于负组补偿较为灵活，可以有物像交换负组补偿、非物像交换负组补偿，还有稍偏离于物像交换的负组补偿。 m_{2l} 和 f'_3 可以在较大范围内取值。在此，仅以 $m_{2l} > 0$ 这种非物像交换为例来说明。

从图3-4-1可看出，对前固定组，当由 $1m$ 至 $1s$ 时，渐晕情况与 § 3-3 的正组补偿时趋势相当。当考察 $1m$ 至 $1l$ 时，只要取恰当的 $|f'_3|$ ，使其不要太大，则渐晕可以改善。在图3-4-1中的如下曲线

$$\begin{array}{l} (a) m_{2l} = 6 \quad f'_3 = -1; \quad (d) m_{2l} = 10 \quad f'_3 = -1.8; \\ (f) m_{2l} = 16 \quad f'_3 = -1; \quad (g) m_{2l} = 16 \quad f'_3 = -1.8; \\ (j) m_{2l} = 22 \quad f'_3 = -1. \end{array}$$

较好，前固定组的 $1m \rightarrow 1l$ 这段曲线趋势大为改善，近乎于 $V_m = 1$ 。

对变倍组，由 $2s \rightarrow 2l$ ，曲线趋势仍然是好的。尤其应该注意补偿组，它的轨迹与 § 3-3 的正组补偿的补偿组轨迹截然相反。负组补偿型式的补偿组 V_m 近似于 1，从负组补偿所有组份的 $h-h_p$ 图趋势来看，渐晕情况较之正组补偿有改善。

比较图3-4-2和图3-3-2，发现：

(1) 负组补偿的后固定组 h/f' 达到 $0.2 \sim 0.27$ ，远远高于正组补偿的后固定组的 h/f' ，有较复杂的正光焦度的后固定组

是负组补偿的一个特点。

(2) 负组补偿的补偿组在孔径图上的轨迹其坐标远远低于正组补偿的轨迹坐标, 这说明负组补偿系统较之正组补偿有明显低的补偿组相对孔径。

(3) 负组补偿的变倍组在 $2s$ 时的坐标与正组补偿相比, 只要 $|f'_3|$ 不取太大, 几乎没有什么变化。其差异主要反映在长焦 $2l$ 时。表3-2数据说明, 在 $2l$ 时, 正组补偿的第一辅助光线相对孔径明显大于负组补偿, 而负组补偿系统的第二辅助光线相对孔径变动范围较大。

(4) 负组补偿系统的前固定组较之正组补偿有明显的不同。注意长焦 $1l$ 时, 正组补偿系统 h/f' 约为 $0.07\sim 0.08$, 而负组补

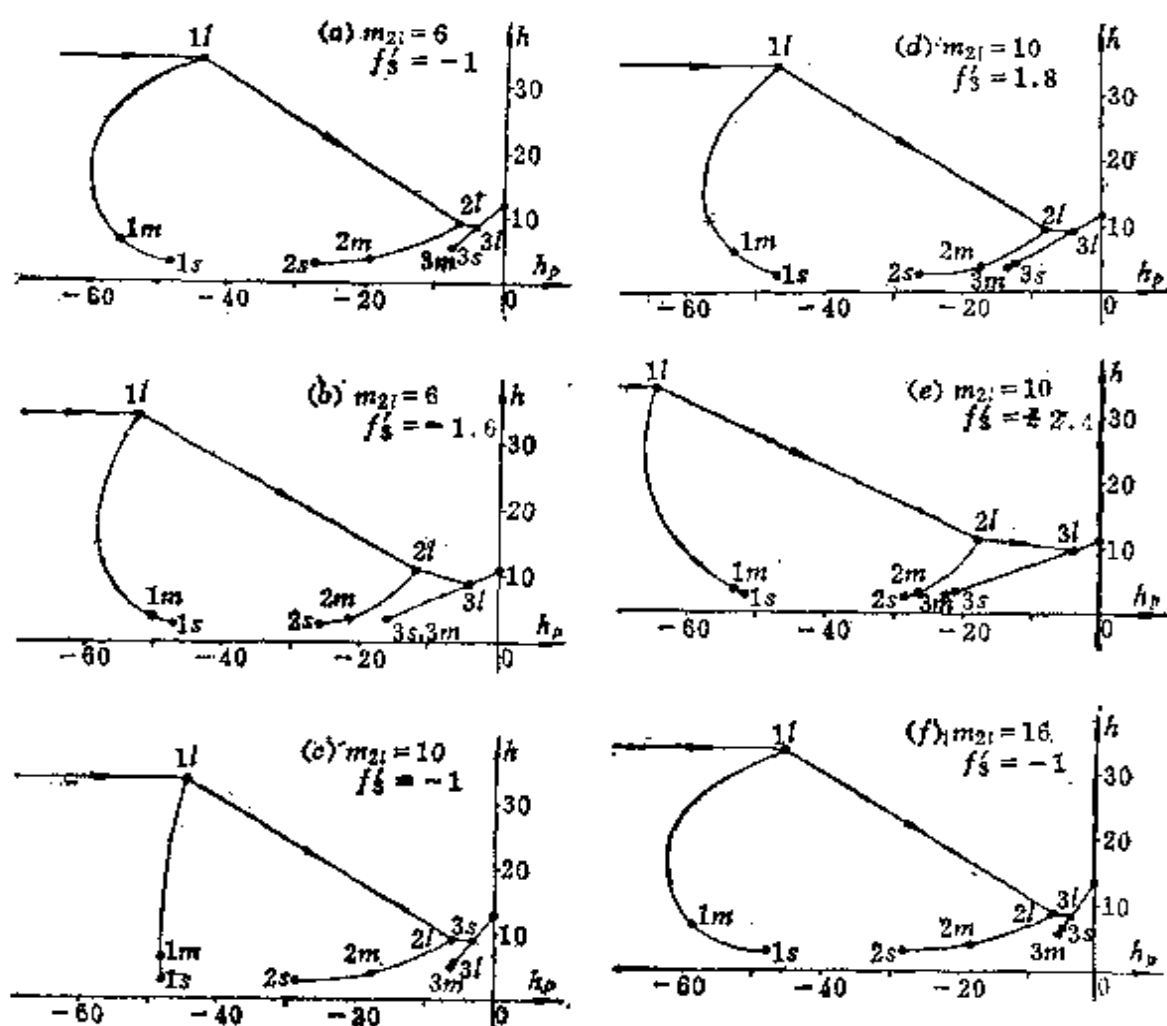
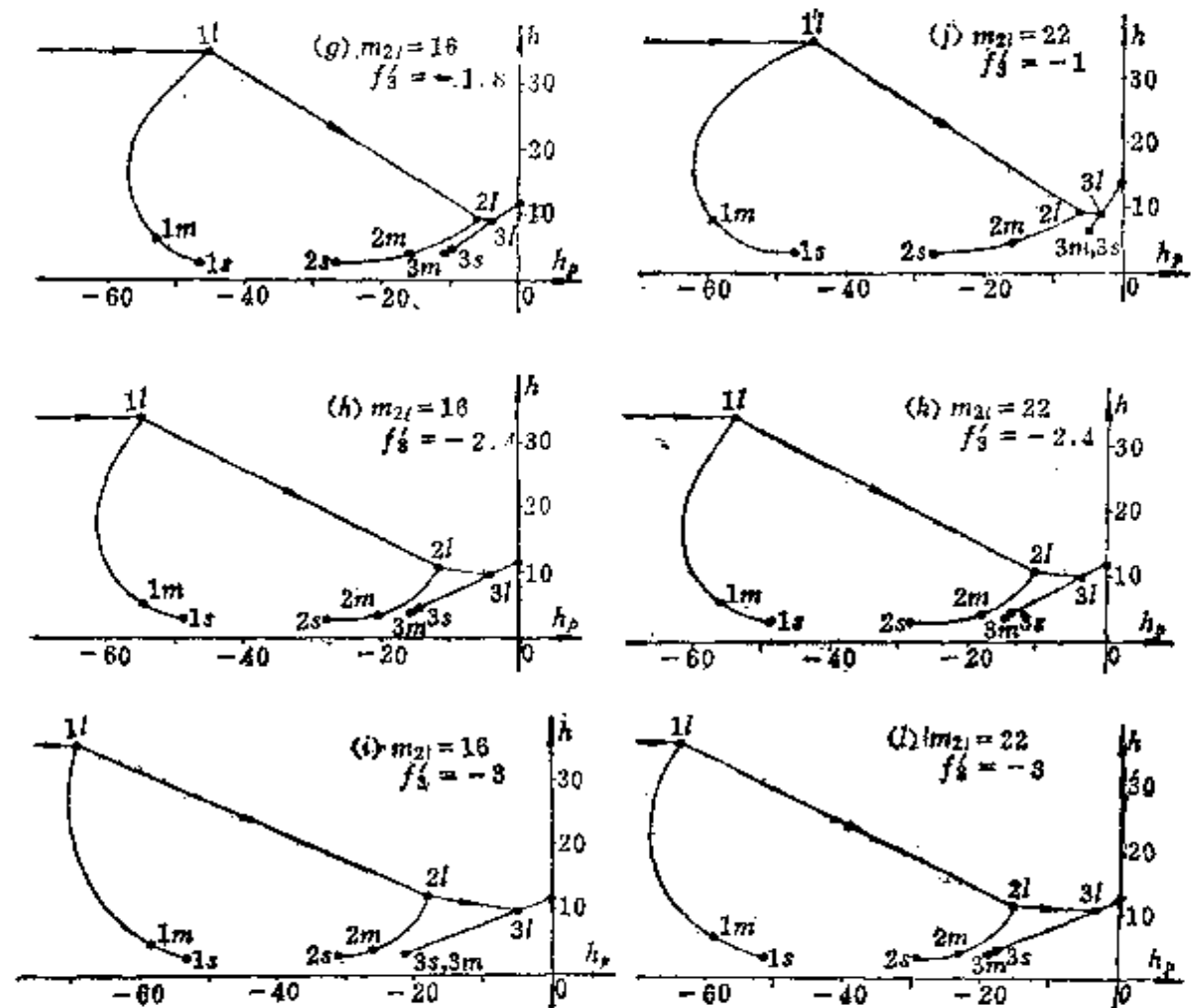


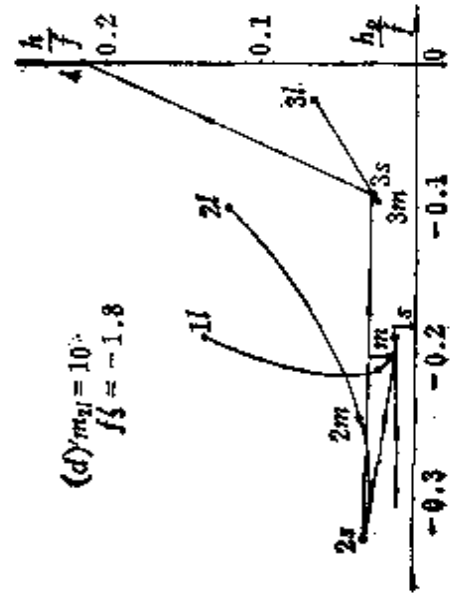
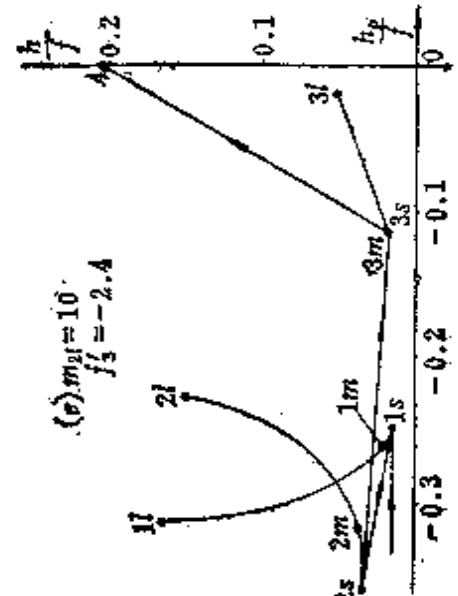
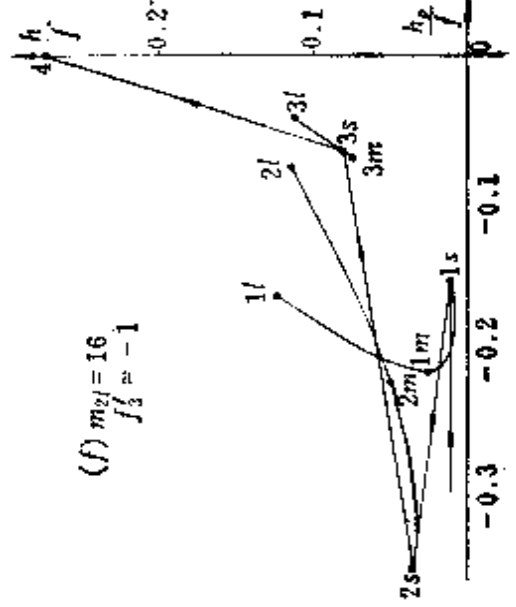
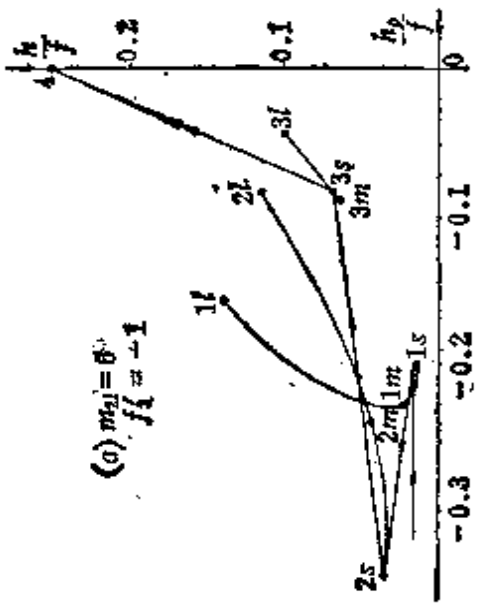
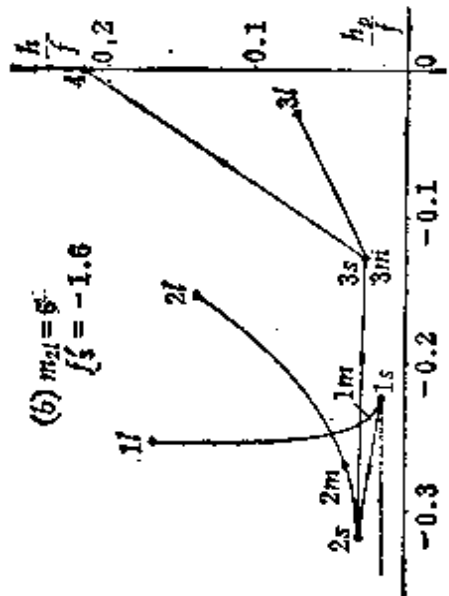
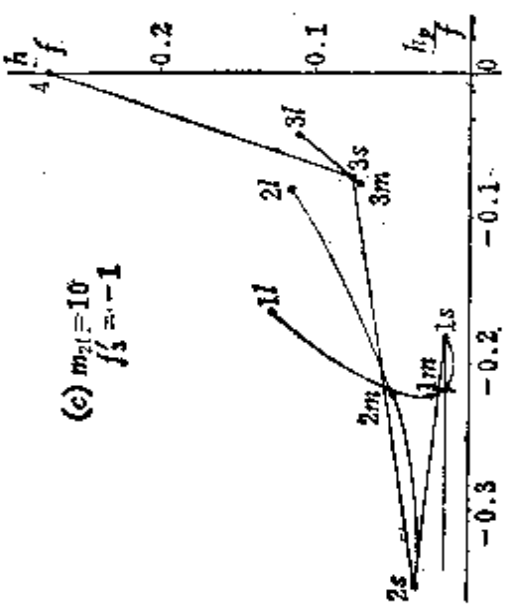
图3-4-1 各种方案

表3-2 正组与负组补偿系统变倍组长焦相对孔径比较表

	h/f'	h_p/f'
正组补偿	0.16~0.17	0.14~0.16
负组补偿	0.12~0.15	0.08~0.23

补偿系统 h/f' 约为0.13~0.16, 即在长焦时, 负组补偿系统的前固定组的第一辅助光线相对孔径明显大于正组补偿。另一方面, 负组补偿前固定组的 h_p/f' 约为0.18~0.23甚至0.25~0.31, 而正组补偿前固定组的 h_p/f' 约为0.1~0.3。所以负组补偿第二辅助光线相对孔径高于正组补偿。

负组补偿系统 $h-h_p$ 图



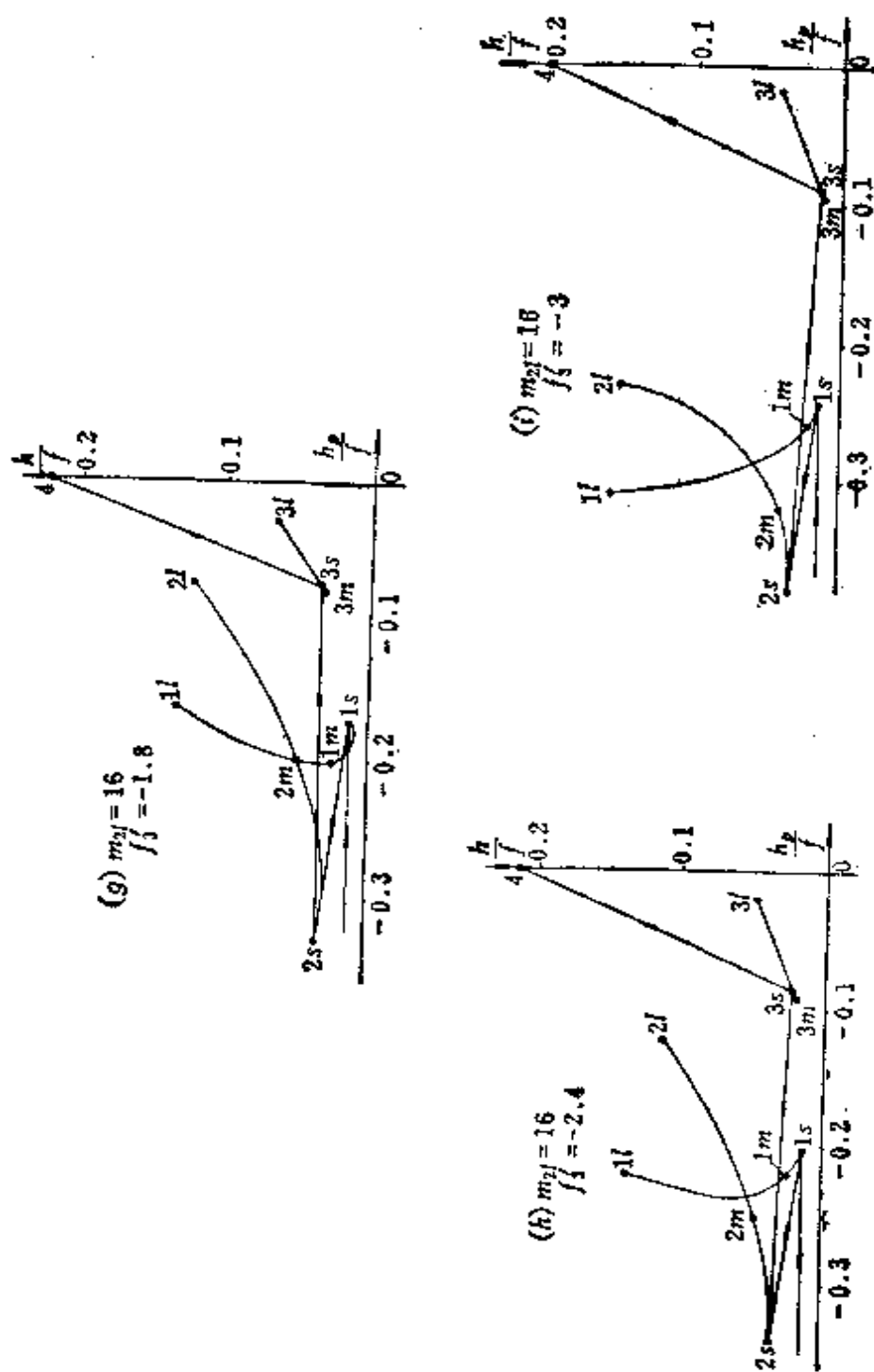


图3-4-2 各种方案负组补偿系统孔径图

本章内容可归结为:

(1) 由 $h-h_p$ 图及其坐标变化大小来决定用什么组份来校正哪个焦距位置的何种像差。

(2) 由孔径图结合 $h-h_p$ 图来决定各组份初始型式的选取。

(3) 由 $h-h_p$ 图判明光束限制情况。

第四章 变焦系统光学设计

本章介绍变焦系统设计的最后阶段，即光学设计的阶段，即能设计出既能变焦和像面稳定，同时又满足必要像质要求的光学系统。

作为本章的第一个问题，将介绍变焦系统设计的具体过程，即高斯解和消像差设计两个阶段，以求对整个设计过程有个概貌的了解。变焦系统的根本特点是要变焦，从而带来了它的像差特点与定焦系统最大的不同在于：组份移动所引起的像差变动。分析变焦系统中像差的变动状况，以便指导光学设计是本章介绍的第二个问题。最后列举几个变焦系统设计的例。

§ 4-1 变焦系统设计过程

变焦距光学系统设计的整个过程包含两个主要阶段：其一，变焦系统高斯解的阶段，这部份内容，是由第二、三章完成的；其二，消像差设计阶段，这是本章所要完成的任务。

(一) 高斯解阶段

设计一个变焦系统，需有如下几个指标：

Γ ——变焦比；

2ω ——视场角；

η ——像面尺寸；

D/f' ——相对孔径；

f'_{\min} 和 f'_{\max} ——最短及

L ——系统总长（第一组份

最长焦距；

至像面）。

设计者在高斯解阶段要解决如下问题：

(1) 决定选取何种型式

决定选取正组补偿、负组补偿，还是双组联动。

(2) 决定倍率选段

首先决定计算起点 $m_{2,1}$ ，然后用高斯解程序计算为达到所需

变焦比 Γ ，终点 m_{2r} 为多少。倍率选段的问题，也就是选取恰当 m_{2l} 的问题。

(3) 决定补偿组焦距 f'_3

因为 f'_3 与 m_{2l} 一起决定着全部高斯参数。

所以，在决定了系统的型式之后，高斯解的核心问题是决定 m_{2l} 和 f'_3 两个参量。

举例来说，若已选取正组补偿系统，则需要完成如下任务：

(1) 从(2-1-19)中选取 m_{2l} 和 f'_3 作为计算的初始数据。

(2) 假设一系列等间隔的变倍组 ϕ_2 移动量 q_2 ，用式(2-1-3)得对应的倍率 m_2 。

(3) 由式(2-1-4)算得对应于每一 m_2 的系数 b 。

(4) 由式(2-1-5)得对应的补偿组倍率 m_{31} 和 m_{32} 。

(5) 用式(2-1-6)得对应于 q_2 的补偿组 ϕ_3 移动量 Δ_1 和 Δ_2 。

(6) 用式(2-1-7)逐点计算所达到的变焦比 Γ ，一直到所给变焦比为止。

(7) 计算总长。

(8) 用式(2-1-8)计算 f'_1 。

对已算得的 f'_1 ，作二级光谱大小的估计，从而对不同的 m_{2l} 和 f'_3 方案作比较。

关于二级光谱的估算需要作如下说明：

因为对一个组份而言，二级光谱的波差为

$$2W_{\lambda_1\lambda_2} = n' u'^2 LC_{\lambda_1\lambda_2} \quad (4-1-1)$$

不论是对单透镜或双胶合透镜或更复杂的近贴组合透镜都存在

$$2W_{\lambda_1\lambda_2} = K_\lambda h^2 \varphi \quad (4-1-2)$$

其中 K_λ 为常量， h 和 φ 为整个组份的第一辅助光线高和光焦度。当然，不同型式结构的组份， K_λ 值不同。

对单透镜：

$$K_\lambda = \frac{P_{\lambda_1\lambda_2}}{v} \quad (4-1-3)$$

其中 $P_{\lambda_1\lambda_2}$ 为相对色散。

对双胶合透镜

$$K_\lambda = \frac{(P_{\lambda_1\lambda_2})_1 - (P_{\lambda_1\lambda_2})_2}{v_1 - v_2} \quad (4-1-4)$$

计算对应于波差值 $2W_{\lambda_1\lambda_2}$ 的几何像差值 $LC_{\lambda_1\lambda_2}$ ，由式 (4-1-1) 有

$$LC_{\lambda_1\lambda_2} = \frac{2W_{\lambda_1\lambda_2}}{n' u'^2} = K_\lambda l'^2 \varphi = K_\lambda \left(-\frac{1}{l'} - \frac{1}{l} \right) l'^2 = K_\lambda (l' - ml') \quad (4-1-5)$$

式中 l 为物距， l' 为像距， m 为横向放大率。从而 $LC_{\lambda_1\lambda_2}$ 可用如下形式表达

$$LC_{\lambda_1\lambda_2} = K_\lambda l' (1 - m) \quad (4-1-6)$$

$$LC_{\lambda_1\lambda_2} = K_\lambda lm (1 - m) \quad (4-1-7)$$

因为其中

$$l = f' \cdot \frac{1 - m}{m}$$

有 $LC_{\lambda_1\lambda_2} = K_\lambda (1 - m)^2 f' \quad (4-1-8)$

当用像距表达二级光谱时，用式 (4-1-6)；用物距表达时，是式 (4-1-7)；用焦距表达时，是式 (4-1-8)。如果物距为无限远，即 $m = 0$ ，则二级光谱表达为：

$$LC_{\lambda_1\lambda_2} = K_\lambda f' \quad (4-1-9)$$

由式 (4-1-8) 和 (4-1-9)，得全系统二级光谱为^①

$$LC_{\lambda_1\lambda_2} = K_\lambda \{ f'_1 (m_2 m_3 m_4)^2 + f'_2 (1 - m_2)^2 (m_3 m_4)^2 + f'_3 (1 - m_3)^2 m_4^2 + f'_4 (1 - m_4)^2 \} \quad (4-1-10)$$

为比较不同方案，不同组份的二级光谱，由式 (4-1-10) 可以看出，每组份贡献于全系统总的二级光谱量，实际是由如下等值焦距决定⁽⁸⁾

$$\left. \begin{aligned} & f'_1 (m_2 m_3 m_4)^2 \\ & f'_2 (1 - m_2)^2 (m_3 m_4)^2 \\ & f'_3 (1 - m_3)^2 m_4^2 \\ & f'_4 (1 - m_4)^2 \end{aligned} \right\} \quad (4-1-11)$$

① 参阅 (4-2-12) 的第一式。

在此，假设 K_1 作为公共常量处理。由式(4-1-10)和(4-1-11)，除了从玻璃材料上入手减少 K_1 值以减少二级光谱而外，还应注意：

(a) 二级光谱值与每个组份的焦距值同号。从消除全系统二级光谱的观点出发，系统内正负组份应匹配。正组补偿系统宜采取“+ - + -”的型式，负组补偿应取“+ - - +”的型式。

(b) 二级光谱的主要贡献量来自前固定组⁽⁵⁾⁽⁶⁾。因而，如何降低 $f'_1(m_2m_3m_4)^2$ 则是消除二级光谱的重要一环。

由于

$$(m_2m_3m_4)^2 = \left(\frac{-f'}{f'_1} \right)^2$$

所以有

$$f'_1(m_2m_3m_4)^2 = \frac{f'^2}{f'_1} \quad (4-1-12)$$

式中 f' 为对应于 m_2 、 m_3 和 m_4 时的全系统焦距值。由此，应选取 f'_1 大的系统。

(c) 在正组补偿系统中，设法用变倍组及后固定组的二级光谱去抵消前固定组及补偿组的二级光谱。在负组补偿中，设法用变倍组和补偿组的二级光谱去抵消前固定组和后固定组的二级光谱。查式(2-3-33)(2-3-34)及(2-3-35)可知，负组补偿 f'_1 小，在具有相同透镜焦距值情况下，负组补偿的前固定组总比正组补偿前固定组对全系统产生更大的二级光谱贡献。同理，由式(2-5-15)，双组联动系统 f' 亦较小，也有较大二级光谱。

(二) 消像差设计阶段

(1) 根据前面确定的 f'_1 、 f'_2 、 f'_3 、 f'_4 ，以及由 q_2 及 Δ 所决定

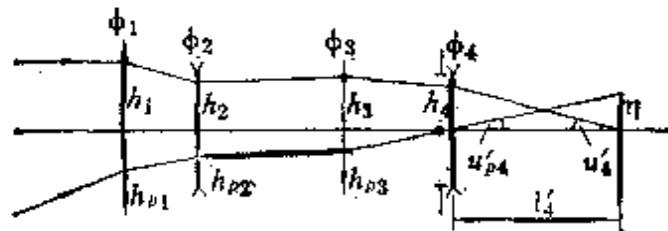


图4-1-1 变焦系统简图

的 d_{12} 、 d_{23} 、 d_{34} ，计算在长焦、中焦和短焦三个或更多个变焦位置各组份的第一辅助光线高度 h 及第二辅助光线高度 h_p 。

当然这种计算均应当用计算机来完成。求第一辅助光线在各组份上的高度可反复用如下公式：

$$\frac{D}{f'} = \frac{1}{A_0} \quad (4-1-13)$$

$$h_i = \frac{f'}{2A_0} \quad (4-1-14)$$

$$u_i = 0 \quad (4-1-15)$$

$$u'_i - u_i = \frac{h_i}{f'_i} \quad (4-1-16)$$

$$u'_j = u_{i+1} \quad (4-1-17)$$

$$h_{i+1} = h_i - d_{i,i+1} u'_i \quad (4-1-18)$$

式中 A_0 为相对孔径的倒数。

在此需要补充说明，经常会有这种情况，人们为了增加后固定组校正像差的作用，把它复杂化为前后两个组份 $\phi_{4,1}$ 和 $\phi_{4,2}$ ，并且设在两组份之间第一辅助光线为平行光线。

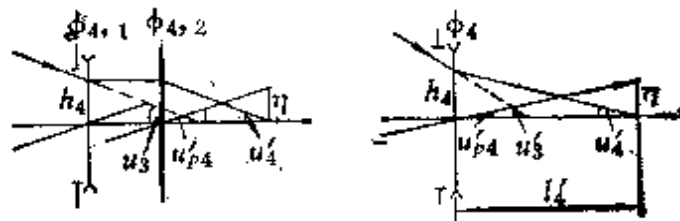


图4-1-2 后固定组光路图

因为从补偿组出射的 u'_3 是固定不变的。

$$f'_{4,1} = -\frac{h_4}{u'_3} \quad (4-1-19)$$

而全系统孔径角 u'_4 固定不变，为 $\frac{1}{2A_0}$ ，

$$f'_{4,2} = \frac{h_4}{u'_4} = 2A_0 h_4 \quad (4-1-20)$$

由 $\phi_{4,2}$ 出射的第二辅助光线仍为 u'_p4 ，像高 η 为

$$\eta = u'_{p4} \cdot f'_{4,2} = u'_{p4} \cdot \frac{h_4}{u'_4} = u'_{p4} \cdot l'_4$$

仍与原来未分为两组份前的像高一样。用按式(4-1-19)和(4-1-20)取焦距值而有任意间隔 $d_{4,6}$ 的 $\phi_{4,1}$ 和 $\phi_{4,2}$ 来代替原后固定组,则两辅助光线的入射和出射状况均不变。

假设光阑在后固定组 $\phi_{4,1}$ 上,求第二辅助光线在各组份上高度可反复用如下公式:

$$u'_{p4} = \frac{\eta}{l'_4} \quad (4-1-21)$$

$$h_{p4} = 0 \quad (4-1-22)$$

$$u'_{pi} - u_{pi} = \frac{h_{pi}}{f'_i} \quad (4-1-23)$$

$$u'_{pi} = u_{pi+1} \quad (4-1-24)$$

$$h_{pi+1} = h_{pi} - d_{i,i+1} u'_{pi} \quad (4-1-25)$$

(2) 列出在各变焦位置各组份上 h 和 h_p 的数值,作 $h-h_p$ 图和孔径图,判断不同方案的优劣,最后确定一组合适的 m_{2i} 和 f'_3 。

(3) 用阻尼最小二乘法解各组份的 P^{∞} 和 W^{∞} 。

经过前面几个阶段,求得 m_{2i} 和 f'_3 以及对应于此组解的 f'_1, f'_2, f'_3 和 f'_4 以及它们在不同变焦位置时的第一辅助光线高 h 及第二辅助光线高 h_p 。现在便可以进到从满足初级像差的角度求解各组份应有的 P^{∞} 和 W^{∞} 。

初级像差系数 $S_I, S_{II}, S_{III}, S_V$ 与 h_i, h_{pi}, φ_i 以及各组份当物在有限远时的 P_i 和 W_i 的关系如下:

$$\left\{ \begin{array}{l} S_I = \sum_{i=1}^k h_i^3 \varphi_i^3 P_i \end{array} \right. \quad (4-1-26)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} S_{II} = \sum_{i=1}^k h_i^3 h_{pi} \varphi_i^3 P_i - J \sum_{i=1}^k h_i^3 \varphi_i^3 W_i \end{array} \right. \quad (4-1-27)$$

$$\left\{ \begin{aligned} S_I &= \sum_{i=1}^k h_i^2 h_{pi}^2 \varphi_i^3 P_i - 2J \sum_{i=1}^k h_i h_{pi} \varphi_i^2 W_i + J^2 \sum_{i=1}^k \varphi_i \\ & \hspace{20em} (4-1-28) \end{aligned} \right.$$

$$\left\{ \begin{aligned} S_V &= \sum_{i=1}^k h_i h_{pi}^3 \varphi_i^3 P_i - 3J \sum_{i=1}^k h_{pi}^2 \varphi_i^2 W_i \\ &+ J^2 \sum_{i=1}^k \frac{h_{pi}}{h_i} (3 + \mu) \varphi_i \\ & \hspace{20em} (4-1-29) \end{aligned} \right.$$

式中的和式是对系统的 k 个组份求和， J 为拉-亥不变量， μ 的表达式为：

$$\mu = \frac{\sum_{i=1}^k \varphi_i / n_i}{\sum_{i=1}^k \varphi_i} \approx 0.6 \sim 0.65 \quad (4-1-30)$$

因 S_k 是由各组份的光焦度 φ_i 所决定，在此不列入方程组。

P_i 和 W_i 与物在无限远时的 P_i^∞ 和 W_i^∞ 的关系如下：

$$W_i = W_i^\infty + (2 + \mu) u_i \quad (4-1-31)$$

$$P_i = P_i^\infty + u_i (4W_i^\infty - 1) + u_i^2 (3 + 2\mu) \quad (4-1-32)$$

式中 u_i 为

$$u_i = u_i / h_i \varphi_i = f'_i / l_i \quad (4-1-33)$$

方程组 (4-1-26)~(4-1-29) 经由 (4-1-31)~(4-1-32) 把系统的像差系数与每组份的 P_i^∞ 及 W_i^∞ 关联起来。人们提出对像差系数的要求，只要方程数与未知数 P_i^∞ 及 W_i^∞ 个数合适，便可用适当算法解得每组份的 P_i^∞ 和 W_i^∞ 。

把 (4-1-31) 和 (4-1-32) 代入 (4-1-26)~(4-1-29) 方程组，则方程组右部表为由未知数 P_i^∞ 和 W_i^∞ 以及系数所组成，系数仅与每组份的光焦度 φ_i 及各组份上 h_i 、 h_{pi} 和规化角 u_i 有关。未知数 P_i^∞ 和 W_i^∞ 不随各组份移动而改变。设系统由 5 个组份组成，则未知数 P_i^∞ 和 W_i^∞ 总数为 10。对一个变焦位置，像差系数只有 4

个，即方程数为4个。如考虑长、中、短三个变焦位置，共有12个方程。若考虑长、次长、中、次短及短焦共5个位置，则有20个方程。因而在变焦系统求解 P^* 和 W^* 时，总是方程数多于未知数个数，只能求最小二乘解。

利用严格选大元消去法解线性方程组算法，编制阻尼最小二乘法解 P^* 和 W^* 的程序。该程序需要输入如下已知量：

- J ——系统的拉-亥不变量，共 M 个；
- μ ——式(4-1-30)的常量；
- b_0 和 c_0 ——分别为公式 $P_0 = P^* - 0.84(W^* - 0.14)^2$ 中的常量0.84和0.14；
- M ——变焦位置数；
- k ——系统组份数；
- φ_i ——各组份光焦度，共 k 个；
- h_i ——第一辅助光线在各组份位于各变焦位置时的高度，共 $M \times k$ 个；
- h_{pi} ——第二辅助光线在各组份位于各变焦位置时的高度，共 $M \times k$ 个；
- u_i ——各组份位于各变焦位置时的规化入射角，共 $M \times k$ 个；
- S_i ——不同变焦位置上的4个像差系数目标值，共 $4 \times M$ 个。对4种像差系数目标值取值时，应满足 $S_1 < S_2 < S_3 < S_4$ ；
- QQ ——权因子，共 $4 \times M$ 个。对4个像差系数的权因子取值时应满足 S_1 的 $> S_2$ 的 $> S_3$ 的 $> S_4$ 的；
- pp ——阻尼因子，共 $2 \times k$ 个。

上述数据能由设计者改变的，仅是目标值 S_i 、权因子 QQ 及阻尼因子 pp 。对此三项作适当改变，以期得到满意的 P^* 和 W^* 。

最后，得如下输出数据：

- P_i^* ——共 k 个；
- W_i^* ——共 k 个；

P_0 ——共 k 个;

P_i ——共 $M \times k$ 个;

W_i ——共 $M \times k$ 个;

\bar{S}_i ——系统所能达到的初级像差系数, 共 $4 \times M$ 个。

自动平衡到何时解才是合适的? 这难于用一句话来回答各种纷繁复杂的具体例子, 但下述原则必须考虑:

(a) P^* 和 W^* 绝对值尽量小, 由它们决定的 P_0 尽量接近于零, 便于选取合适的玻璃组合及弯曲去满足初级像差要求。

(b) 此组解的初级像差是合适的。

(c) 此组解提供的 W^* 与设计者欲选取的系统型式相符合。

即对正组份, 欲采取火石在前方案, 则 W^* 应为正; 冕牌玻璃在前, 则 W^* 为负。这样作可使胶合面半径尽可能大, 减小高级像差。选取玻璃, 应在计算机上自动选取。

(4) 分解 P^* 和 W^* , 求各组份结构参数

这是解决在一个组份之内的各个透镜用什么半径数值及玻璃组合来实现从上节程序中解出来的 P^* 和 W^* 。必须顺次做三件事: 确定该组份用几个透镜组合; 每个透镜取何弯曲形式; 分解整组份的 P^* 和 W^* 为每个透镜的 P^* 和 W^* , 求出每个单片透镜或胶合透镜的半径, 决定胶合透镜玻璃组合。

为确定一个组份由几个透镜组成, 首先必须了解该组份的最大光线高度和最大相对孔径, 当然, 应该把这两个数据结合起来作判断。若两个组份相对孔径一样, 但对光线高度高的一个组份, 视情况应选用更复杂的结构型式。实践证明 $h-h_p$ 图尤其是孔径图对于选取组份型式是十分重要的。经验数据见表 4-1。

表 4-1 相对孔径与组份数

相 对 孔 径	组 份 数
高于 (1/0.8 ~ 1/0.9)	三 透 镜 组
1/0.9 ~ 1/3	二 透 镜 组
低于 1/3	一 透 镜 组

再则需要确定每个组份内各透镜的弯曲形式及各透镜的光焦度分配比例。对前固定组，其特点是第一辅助光线的高度很高，主要应考虑轴上光束的走向。如图 4-1-3 所示。第一辅助光线在前固定组上的合适走向是经胶合透镜 ϕ_{11} 的稍微会聚之后，逐次经 ϕ_{12} 和 ϕ_{13} 的会聚，且 ϕ_{12} 和 ϕ_{13} 一个比一个更加弯曲。胶合透镜 ϕ_{11} 的胶合面当然取弯向光阑的形式。

对变倍组，如图 4-1-4 所示，其特点是 h_p 高，且变化也大，

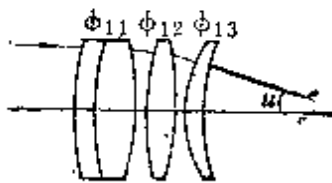


图4-1-3 前固定组形式

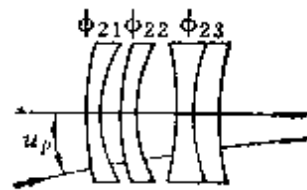


图4-1-4 变倍组形式

因而应从第二辅助光线走向来决定其透镜弯曲形式。第二辅助光线经 ϕ_{21} 应作较大发散，光束在已发散的情况下经 ϕ_{22} 和 ϕ_{23} 逐步发散度减小。胶合透镜 ϕ_{23} 的胶合面也取弯向光阑的形式。

对补偿组，两辅助光线高度均不大，且变化也不大。因而其形式可以比较随便，可取双单形式，也可取单双单形式。

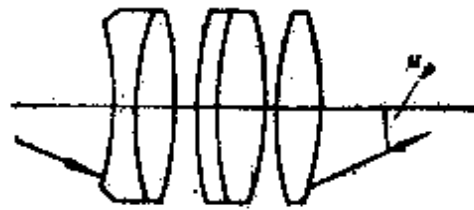


图4-1-5 双组联动系统
变倍组形式

双组联动系统中的变倍组

ϕ_2 ，第一和第二辅助光线高度均高，尤其是后者，它的前面为发散的前固定组，为此取如图 4-1-5 的形式为好。

另外，还应注意，在 h 和 h_p 变动的组份，即前固定组、变倍组和补偿组，每组份中至少必须有一组双胶合透镜。设每组份的色差为：

$$C_i = \sum_i \frac{h_i^2 \phi_i}{v_i}$$

$$C_1 = \sum_i \frac{h_i h_{pi} \varphi_i}{v_i}$$

可知新位置色差系数为^①：

$$\left. \begin{aligned} C_1^{**} &= C_1 + 2BC_1, \\ C_1^{**} &= A^*C_1 + C_1 + BC_{1p}, \end{aligned} \right\} \quad (4-1-34)$$

由此式可知，如果我们使起始位置每组份自身消色差，即 $C_1 = 0$ ， $C_{1p} = 0$ ， $C_{1p} = 0$ ，则也自然消除了在新位置的色差，即有 $C_1^{**} = 0$ 和 $C_1^{**} = 0$ 。否则，总有色差随位置变动的改变量。为了达到每组份自身消色差，每组份中至少需要一组双胶合透镜。

分解 P^∞ 和 W^∞ 的第三件事是，需要由整组份的 P^∞ 和 W^∞ 求组份内每个透镜的 P^∞ 和 W^∞ 。对组份内各透镜取和有：

$$\left. \begin{aligned} P &= \sum_i P_i \\ W &= \sum_i W_i \end{aligned} \right\} \quad (4-1-35)$$

令组份处于归化条件 $h\varphi = 1$ ，且物在无限远，对组份由各透镜取和，有

$$\left. \begin{aligned} P^\infty &= \varphi_1^3 P_1^\infty + \varphi_2^3 P_2^\infty + \dots + \varphi_N^3 P_N^\infty \\ W^\infty &= \varphi_1^2 W_1^\infty + \varphi_2^2 W_2^\infty + \dots + \varphi_N^2 W_N^\infty \end{aligned} \right\} \quad (4-1-36)$$

式中 P_2 至 P_N 和 W_2 至 W_N 均可按下式

$$\left. \begin{aligned} W &= W^\infty + (2 + \mu)u \\ P &= P^\infty + u(4W^\infty - 1) + u^2(3 + 2\mu) \\ u &= \frac{f'}{l} \end{aligned} \right\} \quad (4-1-37)$$

换算为各透镜的归化值 P^∞ 和 W^∞ 。因而，由联立式 (4-1-36) 和 (4-1-37)，已知组份的 P^∞ 和 W^∞ ，解各透镜的 P_1^∞ 至 P_N^∞ 和 W_1^∞ 至 W_N^∞ 。为此，先决定每个透镜的 φ 及 u 是解方程的前提，每个透镜的 φ ，只能预先作为已知数给定。所以在—一个组份之内各透镜

① 参阅 (4-2-10)。

的光焦度 φ 的分配过程，是个靠经验摸索并逐步逼近的过程。为了得到一个好的解，往往需要反复多次，而且，我们总是先从单透镜着手。因为只要把单透镜的折射率和弯曲给定，它的 P^* 和 W^* 就已知，便可从式 (4-1-36) 中解出胶合透镜的 P^* 和 W^* 来。从而进一步解得 P_0 ，选取玻璃组合和解半径。

为了在组份内作到正确地分配光焦度，往往要使组份内单透镜的光焦度高于胶合透镜的光焦度。这是因为，对于一个正的胶合透镜，至少其内的正透镜的光焦度高于胶合透镜总光焦度。为了避免由此而引起的胶合面半径太小，胶合透镜在光焦度分配中，其光焦度应低于单透镜光焦度。其次，还应注意，对前固定组应顺序使光焦度分配越来越递增，对变倍组应顺序使光焦度分配越来越降低，才符合光束的走向。据经验，如下光焦度分配较好⁽²⁵⁾：

前固定组	双单型	$\varphi_{11}:\varphi_{12} = 0.35:0.65$
	双单单型	$\varphi_{11}:\varphi_{12}:\varphi_{13} = 0.25:0.3:0.45$
变倍组	单双型	$\varphi_{21}:\varphi_{22} = 0.65:0.35$
	单单双型	$\varphi_{21}:\varphi_{22}:\varphi_{23} = 0.55:0.25:0.2$
正补偿组	单双单型	$\varphi_{31}:\varphi_{32}:\varphi_{33} = 0.25:0.25:0.5$

为了联立求解式 (4-1-36) 和 (4-1-37)，还得求解密接薄透镜组内各透镜的规化 u_i ，公式如下：

$$\left. \begin{aligned}
 &\text{对第一透镜} \quad u_1 = 0 \\
 &\text{对第二透镜} \quad u_2 = \frac{f'_2}{l_2} = \frac{\varphi_1}{\varphi_2} \quad (\text{因为 } l_2 = f'_1) \\
 &\text{对第三透镜} \quad u_3 = \frac{f'_3}{l_3} = \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{\varphi_3} \quad (\text{因为 } l_3 = \frac{1}{\varphi_1 + \varphi_2}) \\
 &\dots\dots \quad \dots\dots \\
 &\text{对第 } N \text{ 透镜} \quad u_N = \frac{f'_N}{l_N} = \frac{\sum_{i=1}^{N-1} \varphi_i}{\varphi_N}
 \end{aligned} \right\} (4-1-38)$$

设一个组份的单透镜处于平行光路中，即 $u_1 = 0$ 。

再估计单透镜的第二面规化曲率 c_2 ，得

$$Q_2 = c_2 - 1 \quad (4-1-39)$$

接着设单透镜折射率 n 为已知，得

$$W^\infty = -\frac{n+1}{n}Q_2 - \frac{1}{n-1} \quad (4-1-40)$$

进而得

$$P_0 = \frac{n}{(n-1)^2} \left[1 - \frac{9}{4(n+2)} \right] \quad (4-1-41)$$

$$P^\infty = P_0 + \left[1 - \frac{1}{(n+1)^2} \right] \left[W^\infty - \frac{1}{2(n+2)} \right]^2 \quad (4-1-42)$$

将 (4-1-40) 和 (4-1-42) 的结果代入 (4-1-36)，便可解得胶合透镜的 P 和 W ，再用式 (4-1-37) 便可求得胶合透镜的 P^∞ 及 W^∞ 。

设一个组份内的单透镜并不处于平行光， $u \neq 0$ 。但对单透镜而言， $\mu = \frac{1}{n}$ ，则式 (4-1-37) 变为单透镜公式：

$$W = W^\infty + u \left(2 + \frac{1}{n} \right) \quad (4-1-43)$$

$$P = P^\infty + u(4W^\infty - 1) + u^2 \left(3 + \frac{2}{n} \right) \quad (4-1-44)$$

利用上两式求得的 P 和 W 代入 (4-1-36)，解得胶合透镜的 P 、 W 及 P^∞ 、 W^∞ 。

一俟求得双胶合透镜的 P^∞ 、 W^∞ ，可代入

$$P_0 = P^\infty - 0.84(W^\infty - 0.14)^2 \quad (4-1-45)$$

解得胶合透镜 P_0 值。又为了使整组份消色差，只能使胶合透镜与各单透镜的色差相互抵消。前面式 (4-1-34) 已述及，为了使初始位置消色差，且新位置也消色差，必须初始位置 $C_l = 0$ ， $C_{l'} = 0$ ，又 $C_{lp} = 0$ ，并考虑组份为密接薄透镜组，组份内的 h 和 h_p 相等。

$$C_1 = \sum_{i=1}^N \frac{h_i^2 \varphi_i}{v_i} = h_i^2 \sum_{i=1}^N \frac{\varphi_i}{v_i} = 0$$

$$C_1 = \sum_{i=1}^N \frac{h_i h_{pi} \varphi_i}{v_i} = h_i h_{pi} \sum_{i=1}^N \frac{\varphi_i}{v_i} = 0$$

$$C_{1p} = (h_{pi})^2 \sum_{i=1}^N \frac{\varphi_i}{v_i} = 0$$

为此都必须有下式成立

$$\left(\frac{\varphi}{v} \right)_{\Sigma} + \sum_i^{\text{单透镜数}} \frac{\varphi_i}{v_i} = 0$$

从而胶合透镜规范化色差系数

$$(c_1)_{\Sigma} = \frac{\sum_{i=1}^{\text{单透镜数}} \varphi_i / v_i}{\varphi_{\Sigma}} \quad (4-1-46)$$

利用所求结果 P_0 和 $(c_1)_{\Sigma}$ 选玻璃组合, 得满足该 P_0 和 $(c_1)_{\Sigma}$ 的胶合透镜参数 $n_a, v_a, n_b, v_b, \varphi_a, \varphi_b, Q_0$ 及系数 a 。可利用如下步骤解半径:

$$Q = Q_0 - \frac{W^{\infty} - 0.14}{\frac{a+1}{2}} \quad (4-1-47)$$

从此式解得满足既定的 P^{∞} 和 W^{∞} 所具有的弯曲参量 Q , 用下式解得三个表面的曲率:

$$\left. \begin{aligned} C_2 &= Q + \varphi_a \\ C_1 &= C_2 + \frac{\varphi_a}{n_a - 1} \\ C_3 &= C_2 - \frac{\varphi_b}{n_b - 1} \end{aligned} \right\} \quad (4-1-48)$$

即

$$\left. \begin{aligned} r_1 &= \frac{f'}{C_1 \varphi_{\text{总}}} \\ r_2 &= \frac{f'}{C_2 \varphi_{\text{总}}} \\ r_3 &= \frac{f'}{C_3 \varphi_{\text{总}}} \end{aligned} \right\} \quad (4-1-49)$$

以上选玻璃组合的过程，应该在计算机上完成。

按如上手续计算得的组份，保证了整组份的 P^{\sim} 及 W^{\sim} ，又在初始位置和新的位置消色差。归结我们的整个工作，都是致力于初级像差理论解方程得初始结构，从高级像差选取合理的组份形式。

(5) 修改全系统像差直至符合要求。见本章设计例。

(6) 最后准确追迹各组份焦距，利用式(2-1-3)~(2-1-6)，计算运动组份精确位移补偿曲线。

§ 4-2 变焦过程中变焦系统像差变化分析

变焦系统的特点在于它的运动组份处于不停地移动之中，运动组份的移动对像差有什么影响？我们如何分析它？回答这些问题是本节的任务。

可以把透镜移动而物面和光阑不动理解为透镜不动而物面和光阑相对于此透镜作反向移动。光阑移动引起第二辅助光线高度改变 Δh_p ，即通过量

$$A = \frac{l(u_p^* - u_p)}{lu} = \frac{\Delta h_p}{h} \quad (4-2-1)$$

对初级像差的改变如下：

$$\left. \begin{aligned} S_1^* &= S_1 \\ S_1^* &= S_1 + AS_1 \\ S_1^* &= S_1 + 2AS_1 + A^2S_1 \\ S_V^* &= S_V \\ S_V^* &= S_V + A(3S_1 + S_V) + 3A^2S_1 + A^3S_1 \end{aligned} \right\} \quad (4-2-2)$$

二级像差的变化如下:

$$\begin{aligned}
 S_I^* &= S_I \\
 S_I^* &= S_I + AS_I \\
 S_{II}^* &= S_{II} \\
 S_{II}^* &= S_{II} + AS_{II} \\
 S_{II}^* &= S_{II} + 2AS_{II} + A^2S_{II} \\
 S_I^* &= S_I + 4AS_I + 2A^2S_I \\
 S_I^* &= S_I + 3AS_I + 6A^2S_I + 2A^3S_I \\
 S_I^* &= S_I + A(4S_I + 2S_{II}) + A^2(6S_I + S_{II}) \\
 &\quad + 8A^3S_I + 2A^4S_I \\
 S_V^* &= S_V + \frac{1}{2}A(5S_I + S_{II}) + A^2(5S_I \\
 &\quad + 3S_{II}) + A^3(5S_I + S_{II}) + 5A^4S_I + A^5S_I
 \end{aligned} \tag{4-2-3}$$

物面移动引起第一辅助光线高度改变 Δh , 通过量

$$B = \frac{l - l^*}{l_p - l^*} \cdot \frac{y_0}{\eta_0} = \frac{\Delta h}{h_p} \tag{4-2-4}$$

对初级像差的变化如下:

$$\begin{aligned}
 S_{I_p}^* &= S_{I_p} \\
 S_V^* &= S_V + BS_{I_p} \\
 S_{II}^* &= S_{II} \\
 S_I^* &= S_I + B(2S_V + J\Delta u_p^2) + B^2S_{I_p} \\
 S_I^* &= S_I + B(3S_I + S_{II} + J\Delta uu_p) \\
 &\quad + B^2(3S_V + 2J\Delta u_p^2) + B^2S_{I_p} \\
 S_I^* &= S_I + B(4S_I + J\Delta u^2) + B^2(6S_I + 2S_V \\
 &\quad + 3J\Delta uu_p) + B^3(4S_V + 3J\Delta u_p^2) + B^4S_{I_p}
 \end{aligned} \tag{4-2-5}$$

引起二级像差的变化如下:

$$\begin{aligned}
S_{I_p}^* &= S_{I_p} \\
S_V^* &= S_V + BS_{I_p} \\
S_I^* &= S_I \\
S_V^* &= S_V + BS_V \\
S_I^* &= S_I + 2BS_V + B^2S_V \\
S_I^* &= S_I + B\left(4S_V - \frac{3}{2}J\Delta u_p^4\right) + 2B^2S_{I_p} \\
S_I^* &= S_I + B\left(3S_I - \frac{3}{2}J\Delta uu_p^3\right) + B^2(6S_V \\
&\quad - 3J\Delta u_p^4) + 2B^3S_{I_p} \\
S_I^* &= S_I + B\left(4S_I + 2S_V - \frac{3}{2}J\Delta u^2u_p^2\right) \\
&\quad + B^2\left(6S_I + S_V - \frac{9}{2}J\Delta uu_p^3\right) \\
&\quad + B^3\left(8S_V - \frac{9}{2}J\Delta u_p^4\right) + 2B^4S_{I_p} \\
S_I^* &= S_I + B\left(-\frac{5}{2}S_I + \frac{1}{2}S_V + \frac{7}{4}J\Delta u^3u_p\right) \\
&\quad + B^2(5S_I + 3S_V - 3J\Delta u^2u_p^2) \\
&\quad + B^3\left(5S_I + S_V - \frac{9}{2}J\Delta uu_p^3\right) + B^4(5S_V \\
&\quad - 3J\Delta u_p^4) + B^5S_{I_p} \\
S_I^* &= S_I + B\left(6S_I - \frac{3}{4}J\Delta u^4\right) \\
&\quad + B^2\left[\frac{15}{2}S_I + \frac{3}{2}S_V - \frac{15}{4}J\Delta u^3u_p\right] \\
&\quad + B^3\left[10S_I + 6S_V - \frac{15}{2}J\Delta u^2u_p^2\right] \\
&\quad + B^4\left[6S_V - \frac{15}{4}J\Delta u_p^4\right] + B^5S_{I_p}
\end{aligned}
\tag{4-2-6}$$

在变焦移动中，对一个运动组份既存在第一辅助光线高度的变化，亦存在第二辅助光线高度的变化，当同时存在 A 和 B 参数作用的情况下，如果只考虑 A 和 B 一次量影响，高阶作用忽略不计，便得变焦系统初级像差的改变如下：

$$\left. \begin{aligned} S_I^{**} &= S_I + B(4S_I + J\Delta u^2) \\ S_I^{**} &= S_I + B(3S_I + S_V + J\Delta u u_p) + A^* S_I \\ S_I^{**} &= S_I + B(2S_V + J\Delta u_p^2) + 2A^* S_I \\ S_V^{**} &= S_V + BS_{I_p} + A^*(3S_I + S_V) \end{aligned} \right\} (4-2-7)$$

上式中，两个星号表示同时考虑 Δh_p 和 Δh 作用的像差；用一个星号表示的 A^* 是指当只有 Δh 变化的前提下，为表示出 Δh_p 变化对像差影响的系数 A ；没有星号的像差是初始像差。

由式 (4-2-7) 还可以发现，当同时存在 Δh 和 Δh_p 时，系统的像差不单与初始的同名像差有关，而且通过系数 B 和 A^* 与其他初级像差关联起来。把式 (4-2-7) 重新排列为：

$$\left. \begin{aligned} S_I^{**} &= S_I + B(4S_I + J\Delta u^2) \\ S_I^{**} &= A^* S_I + S_I + B(3S_I + S_V + J\Delta u u_p) \\ S_I^{**} &= 2A^* S_I + S_I + B(2S_V + J\Delta u_p^2) \\ S_V^{**} &= A^*(3S_I + S_V) + S_V + BS_{I_p} \end{aligned} \right\} (4-2-8)$$

二级像差的改变如下：

$$\left. \begin{aligned} S_I^{1**} &= S_I^I + B\left(6S_I^I - \frac{3}{4}J\Delta u^4\right) \\ S_I^{1**} &= A^* S_I^I + S_I^I + B\left(\frac{5}{2}S_I^I + \frac{1}{2}S_V^I + \frac{7}{4}J\Delta u^3 u_p\right) \\ S_V^{1**} &= S_V^I + 2BS_I^I \\ S_V^{1**} &= A^* S_V^I + S_V^I + BS_V^I \\ S_I^{1**} &= 2A^* S_V^I + S_V^I \\ S_I^{1**} &= 4A^* S_I^I + S_I^I + B\left(4S_I^I + 2S_V^I - \frac{3}{2}J\Delta u^2 u_p^2\right) \\ S_I^{1**} &= 3A^* S_I^I + S_I^I + B\left(3S_I^I - \frac{3}{2}J\Delta u u_p^3\right) \\ S_V^{1**} &= A^*(4S_I^I + 2S_V^I) + S_V^I + B\left(4S_V^I - \frac{3}{2}J\Delta u_p^4\right) \\ S_V^{1**} &= -\frac{1}{2}A^*(5S_I^I + S_V^I) + S_V^I + BS_{I_p}^I \end{aligned} \right\} (4-2-9)$$

变焦系统中初级像差和高级像差由于移动所引起的变化的概念，以及上述像差分析公式，可直接由王之江的专著《光学设计理论基础》^[26]加以引伸和推导而得。上列公式中的符号解释如下：

S_I ——初级球差	S_I^I ——二级球差
$S_{I'}^I$ ——初级彗差	$S_{I'}^{II}$ ——二级彗差
S_{II}^I ——初级像散	S_{II}^I ——第二轴外球差
S_{IV}^I ——初级场曲	S_{IV}^I ——第一轴外球差
S_V^I ——初级畸变	S_{II}^{II} ——第二轴外彗差
	S_{IV}^{II} ——第一轴外彗差
	S_{II}^{III} ——二级像散
	S_{IV}^{III} ——二级场曲
	S_V^{III} ——二级畸变

同样，组份的移动会引起系统色差的变化：

$$\begin{cases} C_I^* = C_I + B \left[2C_I - J \left(\frac{\delta n'_k}{n'_k} - \frac{\delta n_l}{n_l} \right) \right] \\ C_I^* = A^* C_I + C_I + BC_{I,p} \end{cases} \quad (4-2-10)$$

其中 C_I ——位置色差；
 C_I ——倍率色差；
 $C_{I,p}$ ——光阑位置色差。

式(4-2-8)、(4-2-9)和(4-2-10)结合在一起说明了变倍组、补偿组和前固定组各自像差的变化，它们的像差综合在一起，构成了整个变焦系统像差总和及其变化。设 $\delta s'_1, \delta s'_2, \delta s'_3$ 和 $\delta s'_4$ 分别代表前固定组、变倍组、补偿组和后固定组各自产生的纵向像差； $\delta g'_1, \delta g'_2, \delta g'_3$ 和 $\delta g'_4$ 分别代表这些组份各自产生的横向像差。 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ 代表它们的纵向放大率； m_1, m_2, m_3 和 m_4 代表它们的横向放大率。整个变焦系统的纵向像差 $\delta s'$ 和横向像差 $\delta g'$ 的近似值表述如下^[27]：

$$\left. \begin{aligned} \delta s' &= \delta s'_1(\alpha_2 \alpha_3 \alpha_4) + \delta s'_2(\alpha_3 \alpha_4) + \delta s'_3 \alpha_4 + \delta s'_4 \\ \delta g' &= \delta g'_1(m_2 m_3 m_4) + \delta g'_2(m_3 m_4) + \delta g'_3 m_4 + \delta g'_4 \end{aligned} \right\} \quad (4-2-11)$$

亦即:

$$\left. \begin{aligned} \delta s' &= \delta s'_1(m_2m_3m_4)^2 + \delta s'_2(m_3m_4)^2 + \delta s'_3m_4^2 + \delta s'_4 \\ \delta g' &= \delta g'_1(m_2m_3m_4) + \delta g'_2(m_3m_4) + \delta g'_3m_4 + \delta g'_4 \end{aligned} \right\} (4-2-12)$$

式中 $\delta s'_4$ 和 $\delta g'_4$ 是不变的。其它几个组份产生的像差,由式(4-2-8)~(4-2-10)的作用在变焦过程中改变着自己的像差值。再由(4-2-11)或(4-2-12)综合的结果,全系统像差亦在改变。如果我们把式(4-2-12)改写为:

$$\left. \begin{aligned} \delta s' &= [\delta s'_1(m_2m_3)^2 + \delta s'_2m_3^2 + \delta s'_3]m_4^2 + \delta s'_4 \\ \delta g' &= [\delta g'_1(m_2m_3) + \delta g'_2m_3 + \delta g'_3]m_4 + \delta g'_4 \end{aligned} \right\} (4-2-13)$$

此式给出一个鲜明的概念:仅后固定组的像差 $\delta s'_4$ 和 $\delta g'_4$ 才直接贡献于全系统;补偿组的像差分别以 m_4^2 和 m_4 为权贡献于系统;变倍组的像差分别以 $(m_2m_3)^2$ 和 (m_2m_3) 为权贡献于系统;前固定组的像差以 Γ^2 和 Γ 为权贡献于系统。

总之,变焦系统像差变化的分析所以复杂,在于:一方面随变焦移动每组份各自产生的像差 $\delta s'_1, \delta s'_2, \delta s'_3, \delta g'_1, \delta g'_2, \delta g'_3$ 在变动;另一方面,它们对整个系统像差贡献的权系数亦在变化。因而探索准确的解析方法还有一段不短的路程要走。

§ 4-3 正组补偿变焦系统设计例

在本节,将说明一个换根的正组补偿变焦系统的设计过程和结果,将分别介绍它的高斯光学、尺寸计算、解初级像差方程以及计算结果。

(一) 系统的初始参数

$$\begin{aligned} \Gamma &= 16^\circ, & f' &= 20 \sim 320 \text{mm}, \\ \frac{D}{f} &= \frac{1}{3}, & \eta &= 6.4 \text{mm}, \\ 2\omega &= 35.5^\circ \sim 3.66^\circ. \end{aligned}$$

此初始数据的相对孔径为中等,视场角不大,唯有变焦比较大,为达到大变焦比且尺寸不能过大,用正组补偿换根方式较为

合适。

(二) 高斯解分析

要换根，当 $m_2 = -1$ 时必须达到 $b = -2$ ，由式 (2-2-11) 知应满足

$$\bar{d}_{231} = 2f'_3 - 2 \quad (4-3-1)$$

设取补偿组焦距 $f'_3 = 1.7$ ，则 $\bar{d}_{231} = 1.4$ 。若经换根点之后，变倍组再向左移 $q_2 = -0.2$ ，对应于此时，有如下数据：

$$m_{21} = 1 - 1.25; \quad m_{22}m_{32} = 0.0964;$$

$$\frac{1}{m_{31}} + m_{31} = -2.029412; \quad \Gamma = 15.4^\circ;$$

$$m_{312} = 0.882382; \quad \Delta = -0.3176178.$$

$$m_{21}m_{312} = 1.4835;$$

这说明越过换根点之后，变倍组和补偿组分别移 0.2 和 0.318，整个系统的变焦比迅速从 10^\times 上升到 15^\times 。

在此，应当注意，由于在计算中有式 (4-3-1)，保证 m_{31} 一支曲线与 m_{32} 一支曲线相切，同时在上半段取 m_{31} 支，在下半段取 m_{32} 支。从而：

(1) 换根方案必定有解；

(2) 换根方案是按 m_{31} 的上半段与 m_{32} 的下半段衔接起来，整个变焦过程 Γ 单调递增；

(3) 不会出现补偿曲线过份弯曲现象。

对本方案，算得移动量 q_2 和 Δ 以及各组份的间隔，列于表 4-2 中。组份间的移动示意图见图 4-3-1。计算此组的初始数

表 4-2 移动量及间隔

	q_2	Δ	d_{12}	d_{23}	d_{34}
s (短焦)	2.7	1.093	0.6	5.193	0.5
sm (次短焦)	1.8	0.939	1.4	4.139	0.654
m (中焦)	0.9	0.664	2.3	2.964	0.929
lm (次长焦)	0	0	3.2	1.4	1.593
l (长焦)	反向 0.2	反向 0.3176	3.4	0.88238	1.9106

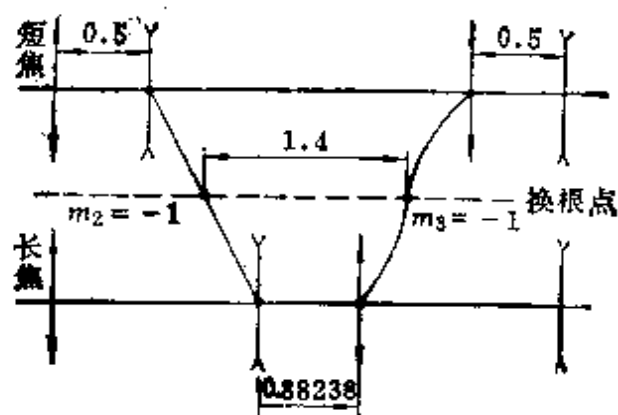


图4-3-1 系统运动示意图

据为:

$$f'_2 = -1, f'_3 = 1.7, d_{12s} = 0.5,$$

$$d_{34s} = 0.5; \bar{d}_{23l} = 1.4。$$

为计算实际尺寸, 令变倍组的焦距为 $f'_2 = -40\text{mm}$ 。按照 § 4-1 把后固定组分为两组份, 第一辅助光线在 ϕ_4 与 ϕ_5 之间为平行光线。各组份光焦度如下:

$$\varphi_1 = 0.0048077; \varphi_2 = -0.025,$$

$$\varphi_3 = 0.0147; \varphi_4 = -0.013823,$$

$$\varphi_5 = 0.013879。$$

得各组份之间的实际间隔如表4-3所示。各组份上第一辅助光线高

表4-3 组份间实际间隔

	d_{12}	d_{23}	d_{34}
s	20	207.72	20
sm	56	165.56	26.16
m	92	118.56	37.16
lm	128	56	63.72
l	136	35.28	76.42

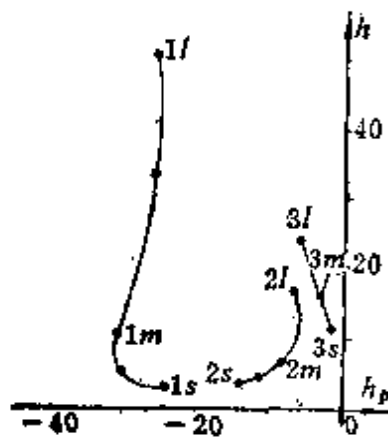
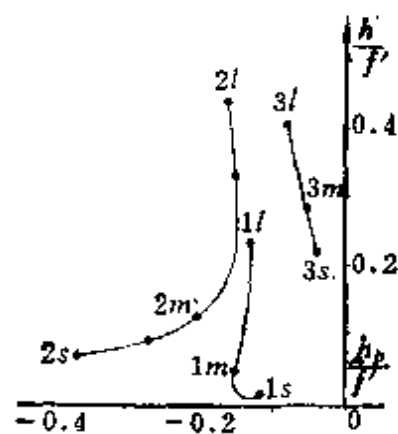
和第二辅助光线高, 见表4-4和表4-5, 从而得到本系统的 $h-h_p$ 图。为得到孔径图, 按 § 3-2的方法, 计算每个组份第一和第二

表4-4 各组份第一辅助光线高

	h_1	$(\Delta h_1)_{\max}$	h_2	$(\Delta h_2)_{\max}$	h_3	$(\Delta h_3)_{\max}$	h_4	h_5		
s	3.333		3.013		15.329		五个 位置 均为	五个 位置 均为		
sm	5.548		4.046		16.352					
m	11.095	47.949	6.183	14.732	18.179	9.37			12.008	12.008
lm	34.579		13.292		22.589					
l	51.282		17.745		24.699					

表4-5 各组份第二辅助光线高

	h_{p1}	$(\Delta h_{p1})_{\max}$	h_{p2}	$(\Delta h_{p2})_{\max}$	h_{p3}	$(\Delta h_{p3})_{\max}$	h_{p4}	h_{p5}		
s	-23.458		-14.803		-1.776		五个 位置 均为	五个 位置 均为		
sm	-30.360		-11.374		-2.324					
m	-30.369	6.911	-8.079	8.828	-3.301	5.012			0	3.552
lm	-25.814		-5.975		-5.660					
l	-26.675		-6.401		-6.788					

图4-3-2 换根正组
补偿系统 $h-h_p$ 图图4-3-3 换根正组
补偿系统孔径图

辅助光线高与其焦距的比值。得表4-6 和表 4-7。分析以上数据，得到，

表4-6 各组份第一辅助光线孔径

	h_1/f_1'	h_2/f_2'	h_3/f_3'	h_4/f_4'	h_5/f_5'
<i>s</i>	0.016	0.075	0.225	五个位 置均为 0.166	五个位 置均为 0.166
<i>sm</i>	0.027	0.101	0.240		
<i>m</i>	0.053	0.154	0.267		
<i>lm</i>	0.166	0.332	0.332		
<i>l</i>	0.246	0.444	0.363		

表4-7 各组份第二辅助光线孔径表

	h_{p1}/f_1'	h_{p2}/f_2'	h_{p3}/f_3'	h_{p4}/f_4'	h_{p5}/f_5'
<i>s</i>	- 0.113	- 0.370	- 0.026	五个位 置均为 0	五个位 置均为 0.0493
<i>sm</i>	- 0.146	- 0.284	- 0.034		
<i>m</i>	- 0.146	- 0.202	- 0.048		
<i>lm</i>	- 0.124	- 0.149	- 0.083		
<i>l</i>	- 0.128	- 0.160	- 0.099		

(1) h_{\max} 发生在前固定组的长焦位置, $h_{\max} = 51.2$ 。

(2) h 改变量的最大值 $(\Delta h)_{\max}$ 发生在前固定组长焦位置。且 $(\Delta h)_{\max} = 47.949$ 。因此用前固定组来校正长焦位置的球差和正弦差最为有效。

(3) $(h_p)_{\max}$ 发生在前固定组的中焦位置, $|(h_p)_{\max}| = 30.369$, 而前固定组上 Δh_p 并不大。

(4) h_p 改变量的最大值 $(\Delta h_p)_{\max}$ 发生在变倍组的短焦位置, $|(h_p)_{\max}| = 8.828$, 因此用变倍组来校正短焦位置的细光束像差最为有效。

(5) 变倍组的第一和第二辅助光线偏角改变量都相当大, 分别为0.444和0.37, 这说明本系统中变倍组具有最复杂的结构; 补偿组第一辅助光线偏角改变量也相当大, 为0.363, 这说明补偿

组具有较为复杂的结构。

(6) 本系统 $\Gamma = 15.4^*$, 系统总体尺寸较紧凑。

(7) 长焦二级光谱估算为 6.86λ 。

(三) 解初级像差方程并分解 P^∞ 和 W^∞ 求各组份结构参数

用 § 4-1 求解 P^∞ , W^∞ 的程序, 输入必要高斯解数据, 调整阻尼系数, 权系数及初级像差系数目标值, 得到各组份 P^∞ , W^∞ 及 P_0 以及全系统对应于这些数据的初级像差系数, 见表 4-8。此组解最大的初级像差值为:

表 4-8 最后像差系数及 P^∞ , W^∞

	1	2	3	4	5
P^∞	0.1074	1.8934	0.7875	-0.0980	0.1941
W^∞	0.2100	1.6273	1.1172	1.1728	0.8824
P_0	0.1033	0.0353	-0.0147	-0.9940	-0.2689
	<i>s</i>	<i>sm</i>	<i>m</i>	<i>lm</i>	<i>l</i>
s_I	0.0114	0.0077	0.0021	0.0052	0.0218
s_{II}	-0.0061	-0.0031	0.0023	0.0111	0.0105
s_{III}	0.0204	0.0193	0.0158	0.0026	-0.0028
s_{IV}	0.0364	-0.0037	-0.0066	0.0010	0.0033

$$LA' = 0.3924;$$

$$OSC' = 0.00522;$$

$$x'_1 - x'_2 = 0.7344;$$

$$\text{dist} = 1.7\%。$$

其中拉-亥不变量 $J = 1.0624$ 。全面权衡此组解, 认为结果可以达到要求。下面说明分解 P^∞ 和 W^∞ 的过程:

(1) 前固定组

换根正组补偿系统的一个特点是前固定组相对孔径较大, 取双单单的形式。光焦度分配为 $\varphi_{11} : \varphi_{12} : \varphi_{13} = 0.25 : 0.3 : 0.45$, 单

表4-9 前固定组单透镜数据

	φ	c_2	Q_2	P_0	P^∞	W^∞	u	P	W
ϕ_{12}	0.3	1.4	0.4	1.5939	6.5028	-2.2590	0.8333	1.0801	-0.0781
ϕ_{13}	0.45	1.4	0.4	1.5939	6.5028	-2.2590	1.222	0.5619	0.9392

透镜玻璃为 ZK9 (1.6203, 60.3), 规化曲率为 $c_2=1.4$, 有关数据见表4-9。有方程

$$P_1^\infty = 0.0156P_{11}^\infty + 0.027P_{12} + 0.09113P_{13}$$

$$W_1^\infty = 0.0625M_{11}^\infty + 0.09W_{12} + 0.2025W_{13}$$

得胶合透镜的

$$P_{11}^\infty = 1.7308;$$

$$W_{11}^\infty = 0.4288;$$

$$P_0 = 1.6607。$$

且考虑到整组份消色差, 应当有 $C_l = -0.04975$ 。选玻璃组合为 ZF7(1.80608, 25.4)/LaK9(1.78833, 50.5), 得

$$\left\{ \begin{array}{l} r_1 = 611.241; \\ r_2 = 144.179; \\ r_3 = -125658.048。 \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} r_4 = 230.181; \\ r_5 = 495.236。 \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} r_6 = 153.454; \\ r_7 = 330.158。 \end{array} \right.$$

(2) 变倍组

变倍组取单双形式。光焦度分配比为 $\varphi_{21}:\varphi_{22}:\varphi_{23}=0.43:0.29:0.28$, 单透镜为 ZK9 (1.6203, 60.3), $c_2=-2$, 两单透镜 ϕ_{21} 和 ϕ_{22} 数据见表4-10。有方程

$$P_2^\infty = 0.07951P_{21}^\infty + 0.024389P_{22} + 0.02195P_{23}$$

$$W_2^\infty = 0.1849W_{21}^\infty + 0.0841W_{22} + 0.0784W_{23}$$

表4-10 变倍组单透数据

	φ	c_2	Q_2	P_c	P^∞	W^∞	u	P	W
ϕ_{21}	0.43	-2	-3	1.5939	9.8105	3.2394	0	9.8105	3.2394
ϕ_{22}	0.29	-2	-3	1.5939	9.8105	3.2394	1.4828	36.8502	7.1200

解得胶合透镜的

$$P_{23}^\infty = -1.6867,$$

$$W_{23}^\infty = -1.4639,$$

$$P_0 = -3.8476,$$

$$C_I = -0.04264。$$

选胶合透镜玻璃组合为LaK3(1.7468, 50.9)/ZF6(1.755, 27.5),
得变倍组结构参数为

$$\left\{ \begin{array}{l} r_1 = 239.825, \\ r_2 = 46.511。 \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} r_3 = 355.6, \\ r_4 = 68.965。 \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} r_5 = -60.4, \\ r_6 = 36.048, \\ r_7 = -146.982。 \end{array} \right.$$

(3) 补偿组

取单双形式。光焦度分配比为 $\varphi_{s1}:\varphi_{s2}=0.6:0.4$ 。单透镜玻璃为ZK9(1.6203, 60.3), $c_2 = -0.6$, 有

$$P_3^\infty = 0.216P_{s1}^\infty + 0.064P_{s2}^\infty$$

$$W_3^\infty = 0.36W_{s1}^\infty + 0.16W_{s2}^\infty$$

得胶合透镜

$$P_{32}^\infty = -7.9236,$$

$$W_{32}^\infty = 0.7380,$$

$$P_0 = -8.2239,$$

$$C_T = -0.02487。$$

选玻璃组合为 ZF5(1.7398, 28.2)/ZK3(1.5891, 61.2), 得补偿组结构参数为

$$\begin{cases} r_1 = 111.976; \\ r_2 = -188.889; \\ r_3 = 75.774; \\ r_4 = 32.967; \\ r_5 = -853.208。 \end{cases}$$

后固定组的结构参数求解, 就不在此详述。正如前面指出的: 求解系统初始结构的过程是个反复的过程, 每个组份分解为几个透镜, 单透镜的初始弯曲 c_2 取得是否恰当, 光焦度分配是否合理, 这些问题都要在描光路修改像差实践中不断摸索。

(四) 换根正组补偿系统的一个重要特点

众所周知: 换根正组补偿系统能在较小的空间内达到较高的变焦比。本系统当变倍组和补偿组向内移动 0.5mm, 则变焦比从 $10\times$ 上升到 $16\times$, 然而事物总是相反相成的, 为了得到一定的收益, 不可能不为此付出一定的代价。其代价有三:

(1) d_{23l} 得拉大, 为变倍组和补偿组向中心移动腾出空间;

(2) 由 $d_{23l} = 2f'_3 - 2$ 知, 补偿组的焦距得加大, 即补偿组的移动加大, 能用 $10\times$ 的系统长度实现变焦比 $16\times$, 本身就说明虽然要付出代价也仍然是合算的;

(3) 前固定组的相对孔径加大, 从而使全系统长焦时的球差和正弦差较为突出, 在此拟说明换根正组补偿系统的这个特点。

在 § 2-2 已说明前固定组焦距由下式决定

$$f'_1 = d_{12r} + \frac{1}{|m_{2r}|} + 1 \quad (4-3-2)$$

式中 d_{12r} 是固定的; 对换根正组补偿系统, 是变倍组和补偿组向中心靠拢, 所以 m_{2r} 与不换根的系统一样; f'_1 不变。当系统由次

长焦向长焦移动时，即越过换根点向中心移动时，各组份第一辅助光线和第二辅助光线高度的改变如表4-11所示。把表4-4和4-11结合起来说明：

表4-11 第一和第二辅助光线高改变量

	Δh_1	Δh_2	Δh_3	$ \Delta h_{p1} $	$ \Delta h_{p2} $	$ \Delta h_{p3} $	$ q_2 + \Delta $
$lm \rightarrow l$	16.703	4.453	2.11	0.861	0.426	1.128	0.5176

(1) 换根正组补偿系统与不换根的正组补偿系统在短焦至次长焦时，像差特点一样，对换根系统应注意的是它的长焦位置特点。

(2) 变倍组和补偿组由次长焦至长焦移动0.5mm的微小间隔，各组份上第二辅助光线高度变化不大，因而它的轴外细光束像差与不换根系统相比相差甚微。

(3) 各组份上第一辅助光线高度有较大的增长，尤其是前固定组更甚，其增量的绝对量很大，约为16mm，相对孔径从1/3增加到1/2；这都是在变倍组和补偿组移动0.5mm之内发生的。前固定组决定着全系统长焦的球差和正弦差，因而如何校正好长焦位置的球差和正弦差是换根正组补偿系统的特点。紧紧抓住这一环，克服由于第一辅助光线在前固定组上高度迅速增高带来的高级孔径球差和高级孔径彗差，就成为设计换根正组补偿系统重要的工作内容。试探更换前固定组的形式，改变光焦度分配比例，分裂光焦度，变更胶合透镜的玻璃组合，是不难解决这个问题。

(五) 渐晕问题

已如第三章所述，前固定组、变倍组和补偿组限制倾斜宽光束的下光线，后固定组限制上光线。随着各个组份孔径 2ρ 取得不同，每个组份对光束的限制程度也不一样，故应仔细计算。现仅从渐晕最为薄弱的前固定组来说明如何由 $h-h_p$ 图确定渐晕系数，作表4-12。表中取 $\rho = 51.28$ ，当 $\rho - |h_p| > h$ 时，取 $V_{\infty} =$

1, 由表中可以看到由短焦到中焦, V_m 保持为 1, 由中焦到长焦由于光束被截割渐晕系数下降。

表4-12 系统渐晕系数

	h	h_p	$ h_p + h$	$\rho - h_p + h$	V_m
s	3.33	- 23.46	26.79	31.15	1
sm	5.55	- 30.36	35.91	26.47	1
m	11.09	- 30.37	41.46	32.00	1
lm	34.58	- 25.81	60.39	60.05	0.87
l	51.28	- 26.67	77.95	75.89	0.74

(六) 系统设计结果

系统结构参数如表4-13所示, 得系统图如图4-3-4, 像差曲

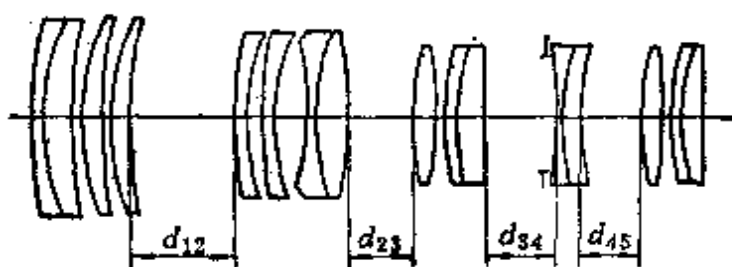


图4-3-4 换根正组补偿系统

线见图4-3-5。关于此系统还要作如下说明,

(1) 最后全系统的参数为

$$f' = 21.04 \sim 308.14 \text{mm},$$

$$\Gamma = 14.7^\circ,$$

$$\frac{D}{f'} = 1/3.4,$$

$$\text{光学总长} = 381.25.$$

(2) 球差和 OSC'

从图4-3-5, 在短焦与中焦 d 光球差均不大, 而换根正组补

表4-13 换根正组补偿系统结构参数

组份名称	半 径	间 隔	玻 璃	n_d	v
前固定组	214.960	5	ZF7	1.80608	25.4
	102.847				
	331.873	14	LaK9	1.78833	50.5
	230.181				
	495.236	0.1	ZK9	1.62030	60.3
	153.454	6	ZK9	1.62030	60.3
	330.158	0.1			
$d_{12} = 115.75(l) \sim 71.75(m) \sim 3.75(s)$					
变倍组	246.169	2	ZK9	1.62030	60.3
	47.741				
	365.005	4.2	ZK9	1.62030	60.3
	70.789				
	-61.997	2	LaK3	1.74680	50.9
	37.001	5.3			
	-150.869	2	ZF6	1.75500	27.5
$d_{23} = 22.518(l) \sim 105.78(m) \sim 190.376(s)$					
补偿组	111.431	3	ZK9	1.62030	60.3
	-187.969				
	75.405	0.1	ZF5	1.73980	28.2
	32.806	2			
	-849.053	9			
$d_{34} = 66.34(l) \sim 27.08(m) \sim 10.476(s)$					
后固定组	-78.380	2	K10	1.5181	58.9
前 组	23.491				
	48.550	3	ZF2	1.6725	32.2
$d_{45} = 30.377$					
后固定组	90.024	2	ZK7	1.61300	60.6
	-277.120				
后 组	58.044	0.1	ZF2	1.67250	32.2
	25.747	2			
	780.398	5			

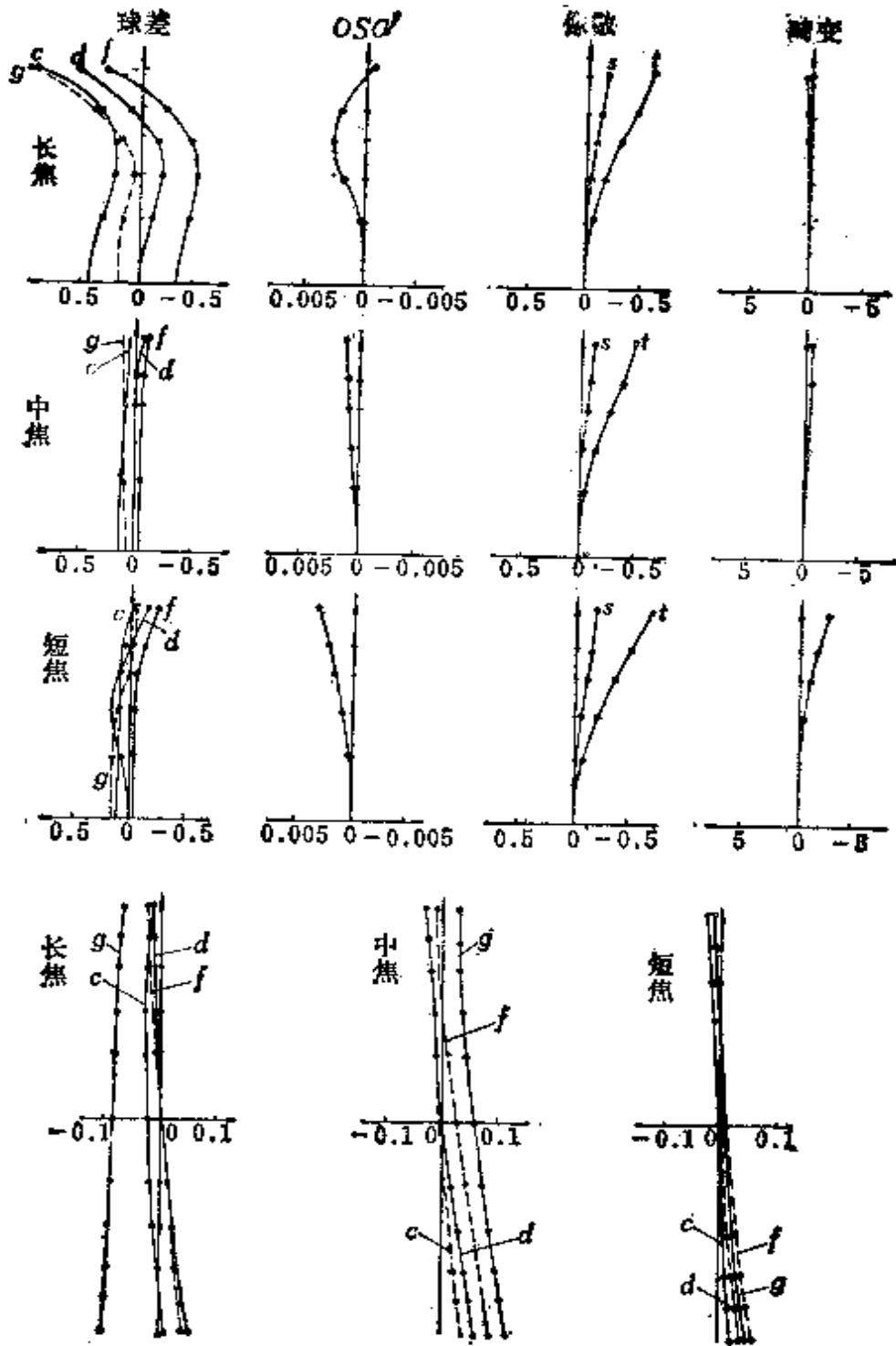


图4-3-5 换根正组补偿系统像差曲线

偿系统的特点是长焦时球差的高级量较大，达 -0.4745 ，此时球差的平衡方案尚好，它考虑到高级孔径球差较大而放松边缘质量照顾中间带区质量。

从图4-3-5，在短焦和中焦，OSC'的线性性较好，最大值分别不超过 0.00329 和 0.00123 ；长焦时，曲线相当弯曲，基本上是边缘校到零，而 0.707 带为 0.0029 。按经验估计高级孔径彗差为 0.003025 。

(3) 二级光谱

若保证前固定组整组份 $C_l = 0$ ，胶合组的 $C_l = -0.04975$ 。按此方案，有相当大的色弥散。当存在二级光谱和色球差时，为减少色弥散，应使近轴色差有一定的留量，即给胶合透镜 C_l 有一定正的增量，则 g 线球差曲线向左移动，而 c 线球差曲线向右移动。当增量为 $\Delta C_l = 0.003$ ，即 $C_l = -0.04675$ 时，则得如图4-3-5的各色球差曲线。图上表明 c 线和 g 线的球差曲线在 0.85 和 0.707 带之间相交，二级光谱值较小，不到 0.4mm 。

(4) 倾斜宽光束像差

d 光的最大弥散控制在 0.05 数量级。长焦、中焦、短焦像差均较好，但也存在一些缺点：

(a) 放大率色差较大。长焦时， c 和 f 线的放大率色差控制在 0.027 ，但 g 线与 d 线差 0.089 ；短焦时， c 和 f 线的放大率色差为 0.031 ，而 g 线与 d 线却相差 0.057 。

(b) 色畸变大。

(c) 长焦时， g 线的色像散与 d ， c ， f 线的像散反号，从而增大了 g 线下光线的弥散。

以上三点合在一起使色弥散最大达到 0.1 。

(d) d 光像散和场曲稍大。

§ 4-4 负组补偿变焦系统设计例

(一) 系统的初始参数

$$\Gamma = 10^\circ, f' = 25 \sim 250\text{mm},$$

$$D/f' = 1/3.5, \quad \eta = 10\text{mm},$$

$$2\omega = 43.6^\circ \sim 4.58^\circ.$$

(二) 高斯解分析

在 § 2-3, 已介绍过负组补偿系统。它可分为按物像交换原则、稍偏离于物像交换原则以及 $m_{21} > 0$ 的非物像交换原则三种形式设计。本例, 变焦比 $\Gamma = 10$, 是属较高变焦比, 用物像交换原则是不合适的。按 $m_{21} > 0$ 的非物像交换原则, 如图 2-3-7 中所示 m_{32} 和 m_{31} 的衔接点, 容易出现不平滑。所以, 采用稍偏离物像交换原则, 即令 m_{21} 比物像交换原则的起点 $-\sqrt{\Gamma} = -\sqrt{10} = -3.16$ 更向下取, 即取

$$m_{21} = -4 \quad f'_3 = -2 \quad (4-4-1)$$

表 4-14 负组补偿系统间隔

	q_2	Δ	d_{12}	d_{23}	d_{34}
s (短焦)	2.7	-0.0924	0.5	2.9076	0.5924
sm (次短焦)	1.5	-0.2301	1.7	1.5699	0.7301
m (中焦)	0.7	-0.2923	2.5	0.7077	0.7923
lm (次长焦)	0.2	-0.1729	3	0.3271	0.6729
l (长焦)	0	0	3.2	0.3	0.5

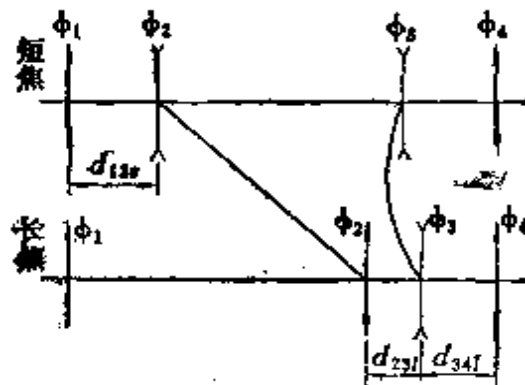


图 4-4-1 负组补偿系统运动示意图

经计算得间隔表 4-14。各组份运动示意图见图 4-4-1。此方案的数据如下:

$$\begin{aligned}
 f'_1 &= 4.45; \quad f'_2 = -1, \\
 f'_3 &= -2; \quad d_{12'} = 0.5; \\
 d_{34'} &= 0.5; \quad d_{23'} = 0.3; \\
 m_{2l} &= -4.
 \end{aligned}$$

为计算尺寸, 设 $f'_2 = 50\text{mm}$ 。仍按 § 4-1 的办法把后固定组分为两组份。全系统各组份光焦度如下:

$$\begin{aligned}
 \varphi_1 &= 0.004494; \quad \varphi_2 = -0.02; \\
 \varphi_3 &= -0.01; \quad \varphi_4 = 0.010246; \\
 \varphi_5 &= 0.009899.
 \end{aligned}$$

各组份之间的实际间隔如表4-15所示。各组份第一和第二辅助光

表4-15 各组份实际间隔

	d_{12}	d_{23}	d_{34}	d_{45}
s	25	145.38	29.62	五个位置均为40
sm	85	78.495	36.505	
m	125	35.385	39.615	
lm	150	16.355	33.645	
l	160	15	25	

线高度示于表4-16和表4-17中。第一和第二辅助光线高与其焦距的比值示于表4-18和表4-19中。综合表4-16~表4-19可得本系

表4-16 各组份第一辅助光线高度

	h_1	$(\Delta h_1)_{\max}$	h_2	$(\Delta h_2)_{\max}$	h_3	$(\Delta h_3)_{\max}$	h_4	h_5
s	3.571		3.170		10.054		五个位置均为14.435	五个位置均为14.435
sm	7.316		4.521		9.037			
m	14.554	32.491	6.377	6.96	8.576	2.162		
lm	26.357		8.588		9.460			
l	36.062		10.130		10.738			

表4-17 各组份第二辅助光线高度

	h_{p1}	$(\Delta h_{p1})_{\max}$	h_{p2}	$(\Delta h_{p2})_{\max}$	h_{p3}	$(\Delta h_{p3})_{\max}$	h_{p4}	h_{p5}
<i>s</i>	-35.577		-21.580		-2.931		五个	五个
<i>sm</i>	-49.867		-14.216		-3.612		位置	位置
<i>m</i>	-48.105	14.29	-8.810	17.25	-3.920	1.446	均为	均为
<i>lm</i>	-41.810		-5.493		-3.829		0	3.96
<i>l</i>	-37.978		-4.330		-2.474			

表4-18 各组份第一辅助光线孔径

	h_1/f_1	h_2/f_2	h_3/f_3	h_4/f_4	h_5/f_5
<i>s</i>	0.016	0.063	0.100	五个位置 均为 0.148	五个位置 均为 0.143
<i>sm</i>	0.033	0.090	0.090		
<i>m</i>	0.065	0.128	0.086		
<i>lm</i>	0.118	0.172	0.095		
<i>l</i>	0.162	0.203	0.107		

表4-19 各组份第二辅助光线孔径

	h_{p1}/f_1	h_{p2}/f_2	h_{p3}/f_3	h_{p4}/f_4	h_{p5}/f_5
<i>s</i>	-0.160	-0.432	-0.029	五个位置 均为 0	五个位置 均为 0.039
<i>sm</i>	-0.224	-0.284	-0.036		
<i>m</i>	-0.216	-0.176	-0.039		
<i>lm</i>	-0.188	-0.110	-0.033		
<i>l</i>	-0.171	-0.087	-0.025		

统的 $h-h_p$ 图和孔径图, 见图 4-4-2 和图 4-4-3, 图中补偿组已基本退化为一个点。从图可以看出,

(1) $h_{\max} = 36.062$, 发生在前固定组的长焦位置, 改变量 $(\Delta h)_{\max}$ 亦在此时发生。

(2) $(h_p)_{\max}$ 发生在前固定组的次短焦位置, $|(h_p)_{\max}| =$

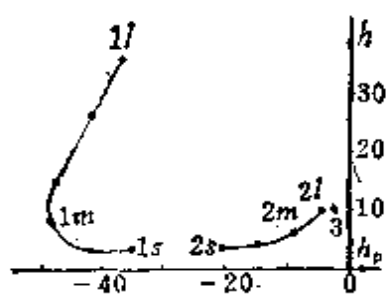
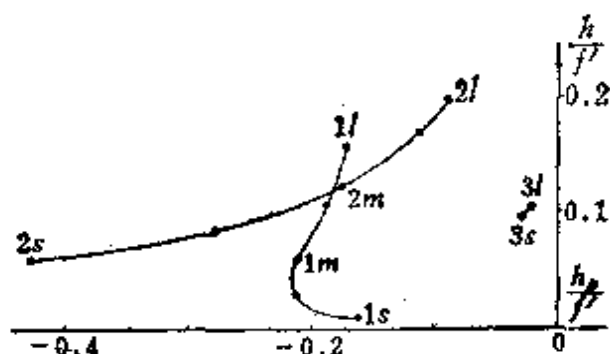
图4-4-2 负组补偿系统 $h-h_p$ 图

图4-4-3 负组补偿系统孔径图

49.867, 但前固定组上的 (Δh_p) 并不是最大。 $|(\Delta h_p)_{\max}| = 17.25$, 发生在变倍组的短焦位置。

(3) 变倍组的 h_2/f'_2 和 h_{p2}/f'_2 都相当大, 所以负组补偿系统的变倍组的结构较复杂, 这点是和正组补偿系统相似的。

(4) 补偿组的 $(\Delta h_3)_{\max}$ 和 $(\Delta h_{p3})_{\max}$ 都小, 而且均在中焦取得极值。这是由于在负组补偿系统中补偿组移动曲线相当弯曲所致。这点与 § 4-3 的换根正组补偿系统补偿组 h_3 和 h_{p3} 均单调变化不同。

(5) 补偿组的 h_3/f'_3 和 h_{p3}/f'_3 是几个组份中最低的, 因而具有最简单的结构形式, 如双胶合透镜等。

(6) 后固定组两组 $h/f' = 0.15$, 比较大, 即第一辅助光线的偏角负担较重, 为适应第一辅助光线光束走向, 组份的结构形式亦较复杂。

(7) 二级光谱估算为 3.418λ 。

(三) 分解各组份 P^* 和 W^*

用解 P^* 和 W^* 的计算机程序, 得各组份 P^* , W^* 及对应的 P_0 和全系统像差系数。数据列于表4-20中。

对应于此系统

$$u' = 0.14286,$$

$$\eta = 10,$$

$$J = 1.4286.$$

表4-20 像差系数及 P^{∞} , W^{∞} 表

	1	2	3	4	5
P^{∞}	0.1472	2.3412	0.8556	-0.9590	-0.5844
W^{∞}	0.2223	1.7810	-0.7610	0.9115	1.1637
P_0	0.1415	0.0790	0.1738	-1.4591	-1.4646
	s	sm	m	lm	l
S_1	0.0063	0.0055	0.0039	0.0015	0.0133
S_1	0.0041	0.0015	-0.0017	-0.0067	0.0027
S_1	0.0213	0.0217	0.0207	0.0136	-0.0070
S_v	0.0715	0.0110	0.0110	0.0231	0.0152

估算最大初级像差值为:

$$LA' = 0.3258;$$

$$OSC' = 0.0014;$$

$$x'_1 - x'_2 = 1.0632;$$

$$\text{dist} = 2.5\%。$$

全面考虑上述(1)~(7)个特点,以及 P^{∞} 、 W^{∞} 和像差系数,初级像差的估算,说明这是一个可行的方案。至于由所解得的 P^{∞} 、 W^{∞} 求每组份的初始结构,与§4-3类似,在此就不一一说明。

(四) 渐晕问题

注意到只要 $\rho < |h_p| + h$ 就会在该光学零件上发生渐晕现象,所以 $|h_p| + h$ 与 ρ 的差异则反映了斜光束被拦光的强弱, $\rho - |h_p| + h$ 代表通过光学系统的斜光束宽度。为此,作表4-21,此时取 $\rho = 49.867$ 。渐晕系数 V_m 作为我们修改宽光束像差,考察宽光束弥散的起始数据。由表可知负组补偿系统前固定组渐晕的一致性较好。

表4-21 负组补偿系统渐晕系数

	h	h_p	$ h_p + h$	$\rho - h_p + h$	V_m
s	5.571	-35.577	41.148	19.861	1
sm	7.316	-49.867	57.183	7.316	0.5
m	14.554	-48.105	62.659	16.316	0.56
lm	26.357	-41.810	68.167	34.414	0.65
l	36.062	-37.978	74.04	47.951	0.66

(五) 系统设计结果

系统的结构参数见表4-22，系统图如图4-4-4所示，系统像差见图4-4-5。

表4-22 负组补偿系统结构参数

组份名称	半 径	间 隔	玻 璃	n_d	ν
前固定组	380.440	5.8	ZF6	1.7550	27.6
	140.866				
	-3052.76	14.82	LaK4	1.6404	60.1
	154.899	0.1	ZK10	1.622	56.7
	674.908	9.66			
$d_{12} = 142.54(l) \sim 107.54(m) \sim 7.54(s)$					
变倍组	375.511	2.2	LaK2	1.692	54.5
	109.293				
	108.289	0.69	LaK2	1.692	54.5
	46.834	2.2			
	-68.887	9.44	ZK9	1.6203	60.3
	54.023	2.2			
	934.249	7.87			

(续)

组份名称	半 径	间 隔	玻 璃	n_d	ν
$d_{23} = 3.69(l) \sim 24.07(m) \sim 134.07(s)$					
补 偿 组	-54.950	1.5	ZK3	1.5891	61.2
	54.700		BaF2	1.5696	49.4
	-559.800				
$d_{34} = 18.27(l) \sim 32.88(m) \sim 22.89(s)$					
后 固 定 组	-217.077	3	F9	1.62031	38.1
	-69.011	0.1			
前 组	140.917	4.5	BaK5	1.5606	58.3
	-28.169	2	BaF8	1.6259	39.1
	-256.696				
$d_{46} = 40$					
后 固 定 组	202.936	3	ZBaF12	1.62362	47.0
	-216.392	0.1			
后 组	509.569	2	ZF8	1.65429	33.7
	44.169	4.5	K10	1.5181	58.9
	-89.965				

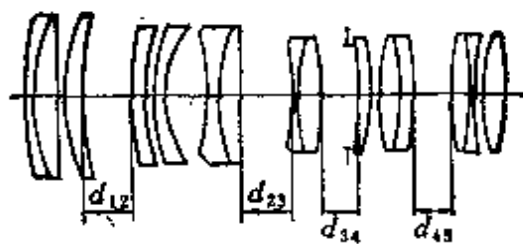


图4-4-4 负组补偿系统

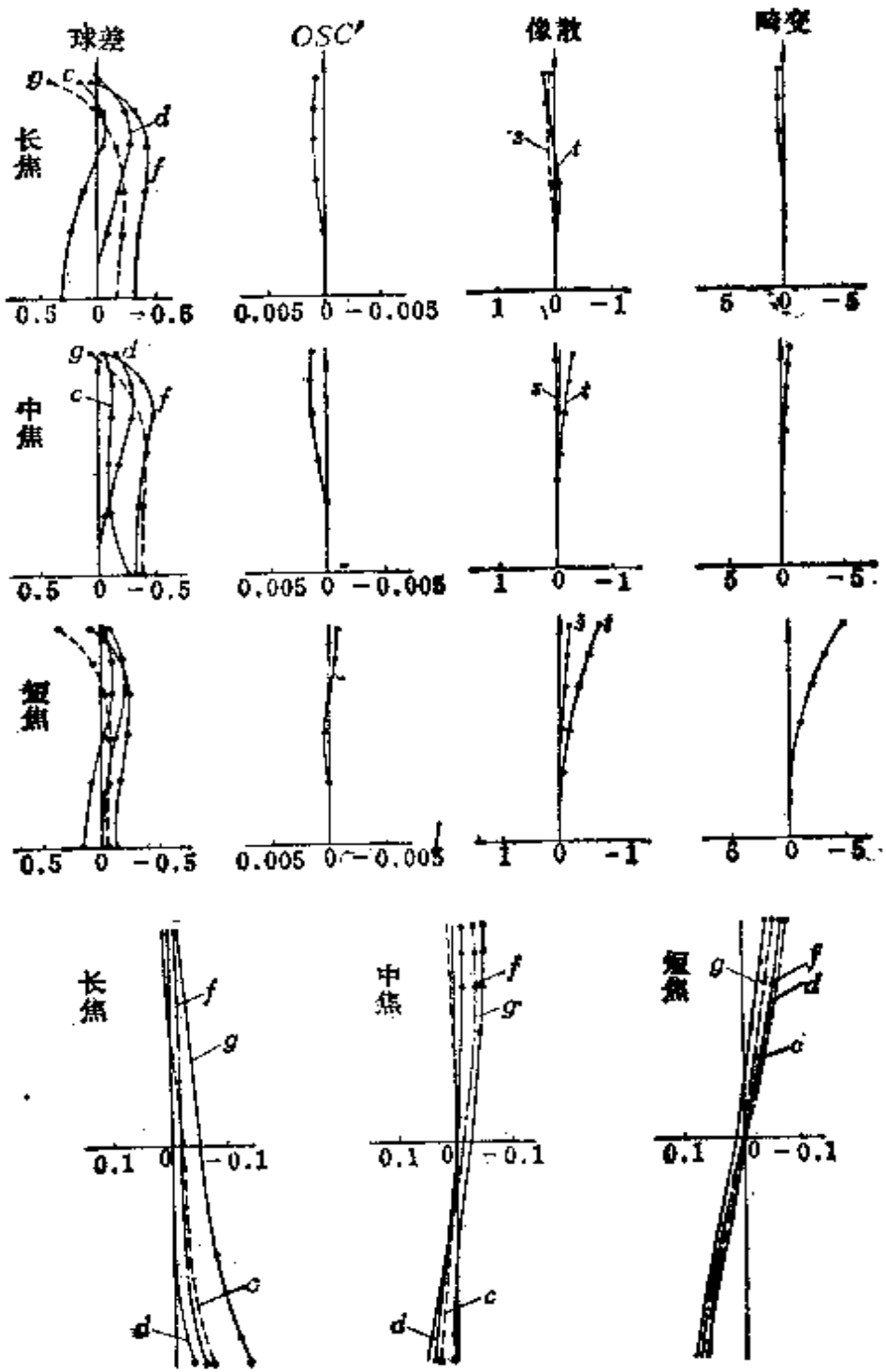


图4-4-5 负组补偿系统像差曲线

(六) 负组补偿变焦系统校正像差应注意的几点

与正组补偿系统相似，负组补偿系统修改像差仍然依据 $h-h_p$ 图。

(1) 由于长焦时第一辅助光线在前固定组上的高度和改变量最大，所以长焦时的轴上像差由前固定组校正。

(2) 长焦时，用前固定组的胶合透镜增加不同程度正色差来控制 g , c , f 线的移动速度，达到二级光谱与初级轴向色差的平衡。

(3) 由于短焦时第二辅助光线在变倍组上有最大的高度改变量，所以短焦时细光束像差由变倍组来修改。

(4) 由于有下述原因，在校正负组补偿系统像差时，后固定组显得较为重要：

(a) 负组补偿系统，尤其是按物像交换原则或稍偏离于物像交换原则的负组补偿系统，其补偿组 ϕ_3 起始点和终点位置相同或相近，这可见表 4-14。对本系统，补偿组 ϕ_3 在长焦和短焦位置仅相差 0.0924mm，从而在长焦、中焦和短焦全系统像差的变动量不十分明显。因而在一定程度上剩余像差要由后固定组来统一校正。

(b) 负组补偿系统轴上光线经前固定组会聚之后，要连续经变倍组 ϕ_2 和补偿组 ϕ_3 两次发散，从而决定了后固定组的第一辅助光线高度较高，孔径角亦较大，所以负组补偿系统都有较复杂的后固定组。

(c) 在短焦时，第一辅助光线在后固定组上的高度是所有组份中最高的（见表 4-16），这决定了负组补偿系统校正短焦的轴上像差由后固定组来完成。

(d) 短焦时，系统的二级光谱与其初级轴向色差的匹配，也应当由后固定组胶合透镜增加不同程度的正色差来实现。

采取如上措施不难把负组补偿系统的像差校到允许的程度，见图 4-4-5。本系统的球差校正得尚好，本来可以平衡得更好，之所以采取欠校正的办法，是为了缓和 c 线近轴量和 g 线边缘量的

矛盾。OSC' 在整个变焦范围内均很小，像散和场曲也不大，短焦畸变稍大，轴外宽光束像差 g 线的下光线弥散较大，达到 0.1 mm。系统最终参数： $\Gamma = 10^\circ$ ， $D/f' = 1/3.4$ 。

§ 4-5 双组联动型变焦系统设计例

在本节，我们将在 § 2-5 基础上介绍一个换根的双组联动型系统的设计过程。它将涉及众多的问题，诸如高斯光学问题、系统总体参数的确定、系统内各组份形式的选取和像差的修改等。

(一) 系统初始参数

$$\begin{aligned} \Gamma &= 8^\circ; & f' &= 25 \sim 200 \text{ mm}; \\ D/f' &= 1/3.5; & \eta &= 8.5 \text{ mm}; \\ 2w &= 37.5^\circ \sim 4.87^\circ. \end{aligned}$$

(二) 高斯解分析

要设计一个换根的双组联动型系统，只能在图 2-5-3 的阴影区域中来寻找。选取如下解：

$$\left. \begin{aligned} f'_2 &= 1; & f'_3 &= -0.5; & f'_4 &= 0.7; \\ m_{2l} &= -1.4; & d_{23l} &= 1.5. \end{aligned} \right\} \quad (4-5-1)$$

可算得：

$$\begin{aligned} m_{3l} &= -1.25; & \frac{1}{m_{3l}} + m_{3l} &= -2.05; \\ \frac{1}{f'_3} \left(\frac{1}{m_{2l}} + m_{2l} \right) &= 4.228572; & \frac{1}{f'_3} \cdot \frac{1}{m_{2l}} &= -1.020408; \\ 1 + \frac{1}{f'_4} &= 2.428572; & \frac{1 + f'_4}{f'_3} &= -3.4; \\ & & \frac{f'_4}{f'_3} &= -1.4. \end{aligned}$$

将这些数据代入 (2-6-5) 式，化简得

$$2.75m_{4l}^2 + 4.0510228m_{4l} + 1.4285712 = 0 \quad (4-5-2)$$

解得

$$m_{4l} = -0.584812$$

$$m_{4i} = -0.888286$$

从而得

$$\left. \begin{aligned} d_{34l} &= 0.771970 \\ d_{34i} &= 0.363034 \end{aligned} \right\} \quad (4-5-3)$$

结合式(4-5-1)决定选取如下解

$$\left. \begin{aligned} f'_2 &= 1 & f'_3 &= -0.5 & f'_4 &= 0.7 \\ m_{2l} &= -1.4 & d_{23l} &= 1.5 & d_{34l} &= 0.363034 \end{aligned} \right\} \quad (4-5-4)$$

在(4-5-4)条件下利用双组联动尺寸计算的一组公式(2-5-7)~(2-5-14)得表4-23。可以看出：变焦移动之前，补偿组 ϕ_3 的起

表4-23 双组联动型系统变焦过程数据

q_2	m_2	m_{31}	m_{32}	m_4	Δ_1	Δ_2	Γ_1	Γ_2
0	-1.4	-0.8	-1.2500	-0.8883	0.2250	0	1.5625	1.0000
0.02	-1.3619	-0.8509	-1.1752	-0.8597	0.2057	0.0436	1.5603	1.1298
0.04	-1.3258	-0.9054	-1.1044	-0.8311	0.1864	0.0870	1.5581	1.2774
0.06	-1.2915	-0.9639	-1.0374	-0.8026	0.1672	0.1305	1.5558	1.4456
0.07	-1.2750	-0.9949	-1.0051	-0.7883	0.1575	0.1524	1.5548	1.5388
0.08	-1.2590	-0.9739	-1.0268	-0.7740	0.1744	0.1480	1.6380	1.5536
0.10	-1.2281	-0.9135	-1.0946	-0.7454	0.2192	0.1287	1.8588	1.5513
0.12	-1.1986	-0.8562	-1.1680	-0.7169	0.2654	0.1095	2.1130	1.5490
0.14	-1.1706	-0.8016	-1.2475	-0.6883	0.3132	0.0902	2.4069	1.5466
0.16	-1.1438	-0.7496	-1.3340	-0.6597	0.3632	0.0710	2.7482	1.5443
0.18	-1.1182	-0.7000	-1.4285	-0.6311	0.4160	0.0518	3.1465	1.5419
0.20	-1.0937	-0.6527	-1.5321	-0.6026	0.4723	0.0326	3.6137	1.5395
0.22	-1.0703	-0.6075	-1.6461	-0.5740	0.5327	0.0134	4.1651	1.5371
0.24	-1.0479	-0.5642	-1.7723	-0.5454	0.5982	-0.0058	4.8201	1.5346
0.26	-1.0264	-0.5229	-1.9125	-0.5169	0.6699	-0.0250	5.6041	1.5321
0.28	-1.0057	-0.4832	-2.0693	-0.4883	0.7489	-0.0441	6.5502	1.5297
0.30	-0.9859	-0.4453	-2.2458	-0.4597	0.8370	-0.0633	7.7027	1.5271

点位于 Δ_2 曲线， Γ_2 为1。当变焦组 ϕ_2 移动到0.07时，补偿组 ϕ_3 由 Δ_2 换根到 Δ_1 。在终点，当变焦组 ϕ_2 移动到0.3时，倍率达到7.7。注意表中在换根点 Δ_1 和 Δ_2 有0.005的微量之差，只要进一步取好

初始数据就可避免，其变焦过程见图4-5-1。

有必要提醒一下：在计算双组联动型系统时，人们常把 f'_1 确定的方法与正组补偿或负组补偿系统混淆，误认为是(2-1-8)式，其实应当是(2-5-15)。因为正组补偿系统或负组补偿系统是在短焦时 ϕ_1 和 ϕ_2 最靠近，而在双组联动型系统中，则是在长焦时 ϕ_1 和 ϕ_2 最靠近。在保证初始数据 $m_{21} = -1.4$ 的前提下定：

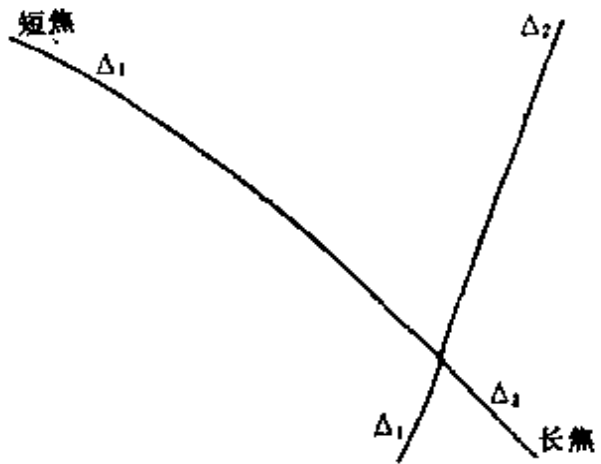


图4-5-1 式(4-5-4)双组联动型系统变焦过程

$$f'_1 = -1.0642857 \quad (4-5-5)$$

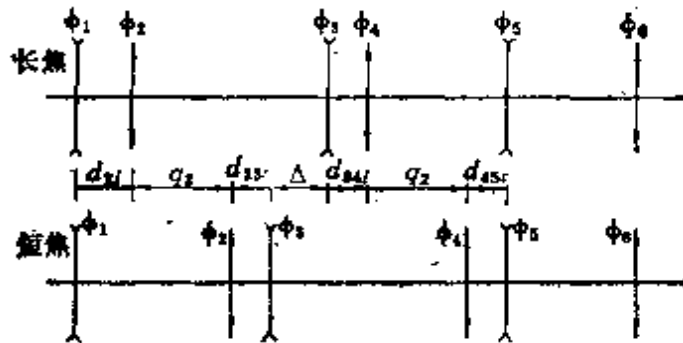


图4-5-2 双组联动型系统运动示意图

设

$$\begin{aligned} d_{12l} &= 0.65 & d_{34l} &= 0.36303 \\ d_{23l} &= 1.5 & d_{45r} &= 0.10 \end{aligned}$$

在此尽可能把 d_{45r} 取短，以降低在各个组份上的 h_p ，有利于校正轴外光束像差。所以有

$$\left. \begin{aligned} d_{12} &= 0.65 + q_2 \\ d_{23} &= 1.5 - q_2 - \Delta \\ d_{34} &= 0.36303 + q_2 + \Delta \\ d_{45} &= 0.40 - q_2 \end{aligned} \right\} \quad (4-5-6)$$

由这些参数，可计算出换根的双组联动型系统的间隔数据（见表4-24）。计算中，假设本系统的规化单位为 $f'_2=100\text{mm}$ 。我

表4-24 双组联动型系统间隔

	q_2	Δ	d_{12}	d_{23}	d_{34}	d_{45}	d_{50}
s	30	83.701	95	36.299	150.004	10	五个位置均为 30
sm	24.5	61.552	89.5	63.948	122.355	15.5	
m	16.5	37.614	81.5	95.886	90.417	23.5	
lm	7	15.75	72	127.25	59.053	33	
l	0	0	65	150	36.303	40	

们仍把后固定组分解为两组份，从而得各组份光焦度为：

$$\left. \begin{aligned} \varphi_1 &= -0.009395973; & \varphi_5 &= -0.01061934; \\ \varphi_2 &= 0.01; & \varphi_6 &= 0.009125103. \\ \varphi_3 &= -0.02; \\ \varphi_4 &= 0.01428571; \end{aligned} \right\} (4-5-7)$$

至此，便可以计算第一辅助光线和第二辅助光线在各组份上的高度以及它们的孔径角，得表4-25，4-26，4-27，4-28。利用这四个表，可绘制 $h-h_0$ 图和孔径图（见图4-5-3和4-5-4）。这两个图是校正像差和选取各组份初始结构形式的依据。

表4-25 第一辅助光线高度

	h_1	$(\Delta h_1)_{\max}$	h_2	$(\Delta h_2)_{\max}$	h_3	$(\Delta h_3)_{\max}$	h_4	$(\Delta h_4)_{\max}$	h_5, h_6
s	3.571		6.759		5.524		16.990		五个位置均为15.660
sm	5.499		10.123		6.953		17.905		
m	9.680	23.939	17.092	37.552	9.424	11.093	19.235	4.989	
lm	17.697		29.669		13.074		20.815		
l	27.510		44.311		16.617		21.979		

表4-26 第二辅助光线高度

	h_{p1}	$(\Delta h_{p1})_{max}$	h_{p2}	$(\Delta h_{p2})_{max}$	h_{p3}	$(\Delta h_{p3})_{max}$	h_{p4}	$(\Delta h_{p4})_{max}$	h_{p5}	h_{p6}
s	-28.344		-21.345		-10.922		-0.620		五个位置 均为0	五个位置 均为2.325
sm	-23.686		-23.839		-8.704		-1.047			
m	-19.489	12.749	-24.189	2.844	-6.525	6.689	-1.667	2.326		
lm	-16.703		-23.062		-4.955		-2.404			
l	-15.595		-22.250		-4.283		-2.946			

表4-27 第一辅助光线孔径

	h_1/f_1	h_2/f_2	h_3/f_3	h_4/f_4	h_5/f_5	h_6/f_6
s	0.034	0.058	0.110	0.243	五个位置均为 0.166	五个位置均为 0.143
sm	0.052	0.101	0.139	0.256		
m	0.091	0.171	0.188	0.275		
lm	0.166	0.297	0.261	0.297		
l	0.258	0.443	0.332	0.314		

表4-28 第二辅助光线孔径

	h_{p1}/f_1	h_{p2}/f_2	h_{p3}/f_3	h_{p4}/f_4	h_{p5}/f_5	h_{p6}/f_6
s	- 0.266	- 0.213	- 0.218	- 0.009	五个位	五个位
sm	- 0.223	- 0.238	- 0.174	- 0.015	置均为	置均为
m	- 0.183	- 0.242	- 0.130	- 0.021	0	0.02
lm	- 0.157	- 0.231	- 0.099	- 0.034		
l	- 0.146	- 0.222	- 0.085	- 0.042		

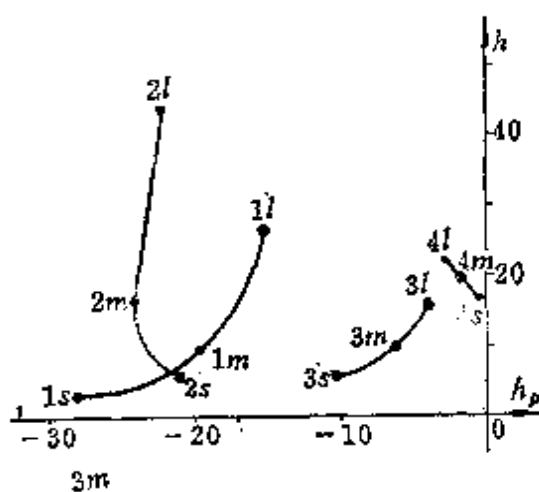
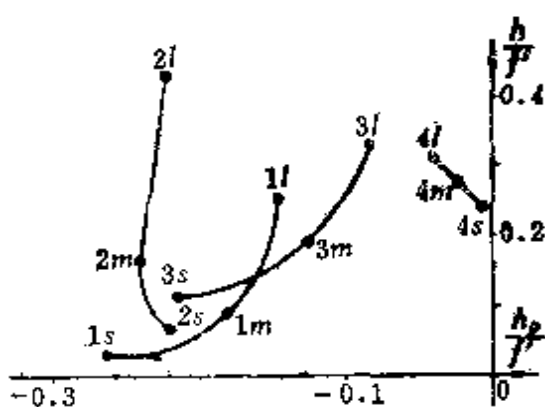
图4-5-3 双组联动型系统 $h-h_p$ 图

图4-5-4 双组联动型系统孔径图

由这些数据，我们注意到：

(1) h_{\max} 发生在变倍组 ϕ_2 的长焦位置， $h_{\max} = 44.311$ 。
 (2) h 改变量的最大值 $(\Delta h)_{\max}$ 发生在变倍组 ϕ_2 的长焦位置，且 $(\Delta h)_{\max} = 37.552$ ，所以用 ϕ_2 校正长焦时的球差和正弦差较为有效。

(3) $(h_p)_{\max}$ 发生在前固定组的短焦位置， $(h_p)_{\max} = 28.344$ 。

(4) h_p 改变量的最大值 $(\Delta h_p)_{\max}$ 发生在前固定组的短焦位置， $(\Delta h_p)_{\max} = 12.749$ 。因此用前固定组校正短焦位置的轴外光束像差较为有效。

(5) 前固定组的第一和第二辅助光线孔径较大，分别为 0.258 和 0.266，它具有较复杂的结构形式。变倍组 ϕ_2 ，分别为

0.443和0.238, 从而具有更复杂的形式。

(三) 分解各组份 P^m 和 W^m

各组份 P^m 和 W^m 以及全系统对应于这些数据的初级像差系数见表4-29。此组解的最大初级像差值为:

$$LA' = 1.0315;$$

$$OSC' = 0.009616;$$

$$\alpha'_1 - \alpha'_2 = 1.112;$$

$$\text{dist} = 4.3\%。$$

表4-29 系统像差系数及各组份 P^m 、 W^m

	1	2	3	4	5	6
P^m	-0.001973	1.1748	0.2436	0.5024	0.001727	-0.05395
	1.1073	1.3722	0.9535	1.0725	1.4887	1.1575
	s	sm	m	lm	l	
S_I	0.009803	0.001577	-0.004726	0.001527	0.04207	
S_{II}	-0.009852	-0.004022	0.006805	0.02336	0.02209	
S_{III}	0.02268	0.01976	0.01332	0.004471	0.008351	
S_V	0.1049	0.004637	-0.02908	-0.02947	-0.03174	

对双组联动型系统, 前固定组 ϕ_1 和变倍组 ϕ_2 具有相当较复杂的形式。力求使 ϕ_1 和 ϕ_2 均有尽可能大的胶合面半径, 是设计中的突出矛盾。利用 § 4-1 所述程序求解表4-29各组份 P^m 、 W^m 的过程, 是反复多次的过程。在此, 只介绍如何分解变倍组 ϕ_2 的 P^m 和 W^m 。

变倍组有

$$\left. \begin{aligned} P_2^m &= 1.1748 \\ W_2^m &= 1.3722 \end{aligned} \right\} \quad (4-5-8)$$

设变倍组 ϕ_2 由三个组份组成, 前两个组份为双胶合透镜, 第三组

份为单透镜。其光焦度分配比为

$$\phi_{21}:\phi_{22}:\phi_{23}=0.1768:0.3641:0.4601$$

所以

$$\left. \begin{aligned} u_1 &= 0 \\ u_2 &= 0.48572 \\ u_3 &= 1.17562 \end{aligned} \right\} (4-5-9)$$

设变倍组单透镜第二面的规化曲率 $c_2=0.3$ ，取其玻璃为

$$n = 1.6404 \quad \nu = 60.1$$

有

$$\left. \begin{aligned} W_{23} &= 2.633 \\ P_{23} &= 4.42 \end{aligned} \right\} (4-5-10)$$

对变倍组有方程

$$\left. \begin{aligned} 1.3722 &= 0.03127W_{21}^{\infty} + 0.13254W_{22} + 0.21168W_{23} \\ 1.1748 &= 0.00553P_{21}^{\infty} + 0.04825P_{22} + 0.09739P_{23} \end{aligned} \right\} (4-5-11)$$

现在的任务是要使两个胶合组份的胶合面半径都要尽可能大，所以得把两组份的 P^{∞} 和 W^{∞} 综合在一起考虑。除了色差系数而外，决定两组份结构形式的参量是 $(P_0)_{21}$ ， W_{21}^{∞} 和 $(P_0)_{22}$ ， W_{22}^{∞} 。为此把如下公式：

$$P_{22} = P_{22}^{\infty} + 0.48572(4W_{22}^{\infty} - 1) + 0.48572^2(3 + 2 \times 0.65)$$

$$W_{22} = W_{22}^{\infty} + 1.287158$$

$$P_{22}^{\infty} = (P_0)_{22} + 0.84(W_{22}^{\infty} - 0.14)^2$$

$$P_{21}^{\infty} = (P_0)_{21} + 0.84(W_{21}^{\infty} - 0.14)^2$$

代入式 (4-5-11) 中，这就把第二组份的参量 $(P_0)_{22}W_{22}^{\infty}$ 用 $(P_0)_{21}W_{21}^{\infty}$ 及 P_{23} 、 W_{23} 来表示了，即

$$\left. \begin{aligned} W_{22}^{\infty} &= (1.3722 - 0.03127W_{21}^{\infty} - 0.1706 \\ &\quad - 0.21168W_{23}) / 0.13254 \\ (P_0)_{22} &= [1.1748 - 0.09739P_{23} - 0.0255 \\ &\quad - 0.00553(P_0)_{21} - 0.0046(W_{21}^{\infty} \\ &\quad - 0.14)^2 - 0.0405(W_{22}^{\infty} - 0.14)^2 \\ &\quad - 0.0937W_{23}] / 0.04825 \end{aligned} \right\} (4-5-12)$$

实践证明： W_{21}^{∞} 取7.5~10.5， $(P_0)_{21}$ 取-6~-20，即如图4-5-5所示区域，均能得到较好的解。利用式(4-5-10)的参数，经由式(4-5-12)的变换，得到变倍组第二组份的求解参数 $(P_0)_{22}$ 和 W_{22}^{∞} 。调整 $(P_0)_{22}$ 和 W_{22}^{∞} ，主要依靠两个方法：

(a) 改变 P_{23} 和 W_{23} ，即改变单透镜 c_{20} 。

(b) 利用§4-1所述程序重新平衡全系统像差，改变变倍组 ϕ_2 的 P_7^{∞} 和 W_7^{∞} 。

计算实践表明： W_{22}^{∞} 在1~3， $(P_0)_{22}$ 在0(或一个绝对值不大的负数)~1.5，均能得到较好的解。所以取变倍组 ϕ_2 前两个双胶透镜为

$$\left. \begin{array}{l} (P_0)_{21} = -20 \\ (P_0)_{22} = -1.212 \end{array} \right\} \begin{array}{l} W_{21}^{\infty} = 8 \\ W_{22}^{\infty} = 2.97 \end{array} \quad (4-5-13)$$

从而得变倍组的结构参数为：

$$\left\{ \begin{array}{l} r_1 = -798.346, \\ r_2 = 191.492, \\ r_3 = -156.071. \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} n_1 = 1.7550, \quad v_1 = 27.5, \\ n_2 = 1.5724, \quad v_2 = 57.5. \end{array}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} r_4 = 318.924, \\ r_5 = 112.073, \\ r_6 = -164.171. \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} n_1 = 1.755, \quad v_1 = 27.5, \\ n_2 = 1.5335, \quad v_2 = 55.5. \end{array}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} r_7 = 116.758, \\ r_8 = 724.496. \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} n = 1.6404, \quad v = 60.1. \end{array}$$

(四) 渐晕问题

由图4-5-3可知：变倍组 ϕ_2 的拦光较为严重，列出它的有关数据于表4-30中，表中取 $\rho = 45$ 。由表所列 V_m 数据可知：该双组联动型系统的渐晕情况与表4-12所列换根正组补偿系统相似。

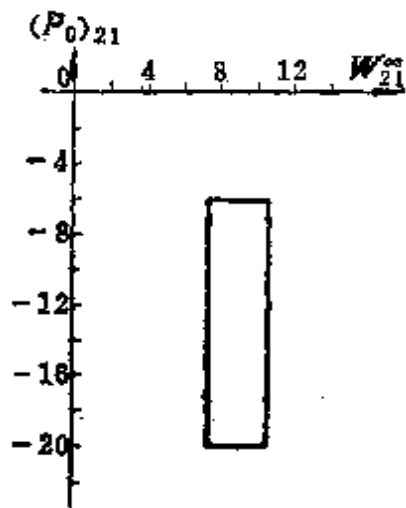


图4-5-5 双组联动系统变倍组第一组份参数区域图

表4-30 双组联动型系统渐晕系数

	h	h_p	$ h_p + h$	$\rho - h_p + h$	V_m
s	6.759	-21.345	28.104	30.414	1
sm	10.123	-23.839	33.962	31.284	1
m	17.092	-24.189	41.281	37.903	1
lm	29.669	-23.062	52.731	51.607	0.87
l	44.311	-22.250	66.561	67.061	0.76

(五) 系统设计结果

系统结构参数如表 4-31 所示, 得系统图 4-5-6 和像差曲线图 4-5-7。

表4-31 双组联动型系统结构参数

组份名称	半 径	间 隔	玻 璃	n	v
前固定组	-1343.41				
	208.036	6	F6	1.6248	35.6
	-251.894	8			
	638.721	6	ZK9	1.62031	60.3
	-164.901	40			
	-98.708	6	ZK9	1.62031	60.3
	-171.224	5			
	74.076	6	PK2	1.5486	68.1
282.159	10	F4	1.6199	36.3	

$$d_{12} = 1.46(l) \sim 17.96(m) \sim 31.46(s)$$

变倍组	-238.635				
	-1924.938	6	ZF14	1.91725	21.5
	-106.531	10	BaK8	1.5724	57.5
	277.156	0.1			
	125.944	6	ZF7	1.80608	25.4
	-177.115	10	K8	1.51593	56.8
	116.753	0.1			
	616.961	8	LaK4	1.6404	60.1

(续)

组份名称	半 径	间 隔	玻 璃	n	v
$d_{23} = 137.67(l) \sim 83.556(m) \sim 23.969(s)$					
补 倍 组	979.153	5	ZK9	1.62031	60.3
	50.630				
	-40.178	5	K12	1.5335	55.5
	42.419				
-2424.795	8	ZF6	1.7550	27.5	
$d_{34} = 12.873(l) \sim 66.987(m) \sim 126.574(s)$					
变倍组(ϕ_4)	88.042	6	ZF7	1.80608	25.4
	39.359				
	-212.967	0.1	BaK8	1.5724	57.5
	78.862				
-564.386	8	ZK7	1.6130	60.6	
$d_{45} = 30.71(l) \sim 14.21(m) \sim 0.71(s)$					
后固定组	-58.936	8	ZF6	1.7398	28.2
前 组	-32.132				
	102.673	6	K8	1.51593	56.8
$d_{56} = 15.43$					
后固定组	120.673	6	ZF6	1.7550	27.5
	52.306				
后 组	-269.478	10	K9	1.5163	64.1
	121.141				
	-1826.467	8	ZK10	1.6220	56.7

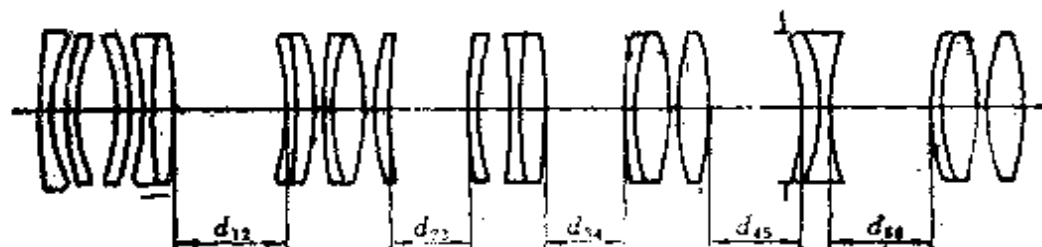


图4-5-6 双组联动型系统

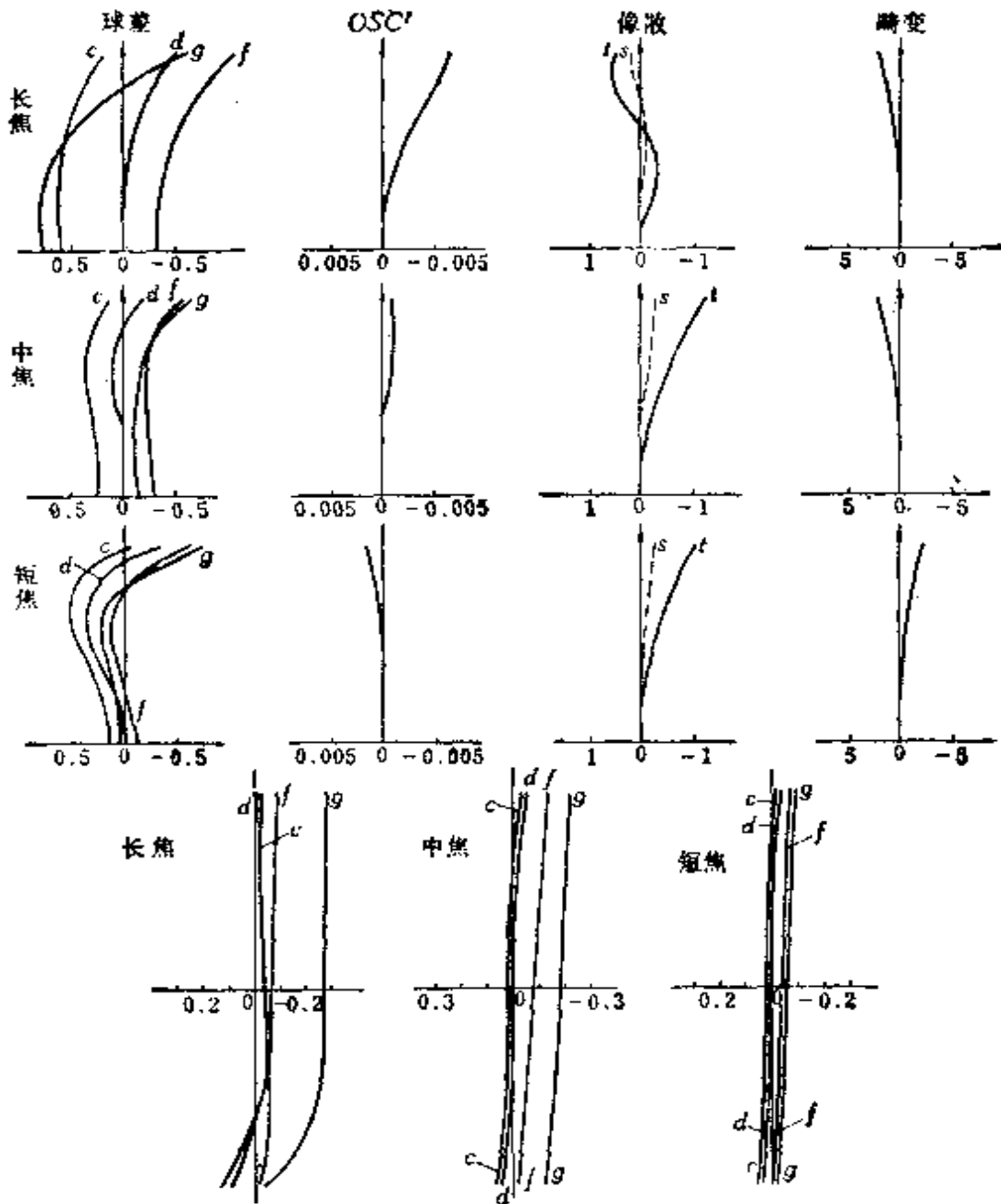


图4-5-7 双组联动型系统像差曲线

关于像差修改，以下几个特殊点需说明：

(1) 前固定组 ϕ_1 和变倍组 ϕ_2 是校正像差的关键部件。变倍组 ϕ_2 的 $(\Delta h_2)_{\max} = 37.552$ ，而前固定组 ϕ_1 的 $(\Delta h_1)_{\max}$ 为 23.939，所以校正轴上光束像差， ϕ_1 和 ϕ_2 均起较大作用，得通盘考虑。对前固定组有 $(\Delta h_{p1})_{\max} = 12.749$ ，变倍组 ϕ_2 的 $(\Delta h_{p2})_{\max}$ 虽只有 2.844，但其 h_{p2} 的绝对量却相当高，均在 20 以上，所以校正轴外

光束像差, ϕ_1 和 ϕ_2 均起较大作用, 也得综合起来考虑。

利用 ϕ_1 和 ϕ_2 校正不同焦距位置的轴上和轴外光束像差, 其间有密切牵连, 不易孤立开来分别处理。这是校正双组联动型系统像差的一个困难之处。

(2) 当系统位于长焦位置, 存在校正负球差 LA' 和负 x'_i , 却伴随过多的负 OSC' , 产生这样一种冲突现象, 难于三者同时校好。为此, 只有更换不同参数的前固定组胶合透镜 ϕ_{14} 和变倍组胶合透镜 ϕ_{21} 和 ϕ_{22} 来解决。

(3) 中、短焦位置负 x'_i 的控制, 主要依靠变倍组 ϕ_2 的胶合透镜 ϕ_{21} 和 ϕ_{22} 。为控制长焦时负 OSC' 不要增长太快, 往往要使 ϕ_{21} 和 ϕ_{22} 作负增量的等量弯曲。这便导致中、短焦位置负 x'_i 的迅速增长。所以又存在长焦负 OSC' 与中、短焦负 x'_i 的矛盾 (见图 4-5-7)。为此, 采取如下方法控制:

(a) 粗略校好长焦位置像差。

(b) 检查中、短焦位置像差, 固定 x'_i 达到合适程度的 ϕ_{21} 和 ϕ_{22} 的弯曲。

(c) 精确校正长焦位置像差, 尽量少动已固定的 ϕ_{21} 和 ϕ_{22} 。

(4) 减少长焦 g 线和 d 线畸变之差, 是一个重要的工作内容。在开始追迹像差时, 这个量甚至高达 0.4 左右, 由于⁽²⁸⁾⁽²⁵⁾,

$$\begin{aligned} S_1 &= \sum l u n i (i' - u) (i - i') \\ &= \sum l u n i^2 (i' - u) \left(\frac{n' - n}{n'} \right) = \sum K_1 \frac{\Delta n}{n'} \end{aligned} \quad (4-5-14)$$

式中

$$K_1 = l u n i^2 (i' - u) \quad (4-5-15)$$

$$S_V = \sum \left[K_1 \frac{\Delta n}{n'} - (i_p / i)^2 + J^2 \frac{n' - n}{n' n r} \right] (i_p / i)$$

由式 (4-5-15) 可知 g 线畸变主要取决于 $\left(\frac{\Delta n}{n'} \right)_g$ 和主光线偏角。为此

(a) 增大 ϕ_1 和 ϕ_2 中胶合透镜胶合面的折射率差。

(b) 为使主光线偏角有利于 g 线畸变的降低, 应适当弯曲。

胶合透镜 ϕ_{14} , ϕ_{21} 和 ϕ_{22} 。

采取这些措施便可逐步降低 g 线畸变, 缩小 g 线和 d 线畸变之差。本实例中此像差仍嫌大。

总之, 统筹考虑, 选取合适的 ϕ_{14} , ϕ_{21} 和 ϕ_{22} 的结构形式、玻璃组合及配合得当的弯曲是协调各种互相矛盾的像差、满足像质要求的重要问题。系统最终参数: $\Gamma=7.7'$, $D/f'=1/5$ 。

参 考 文 献

- [1] 颜敏达 王之江, 《变焦距照相物镜》(载《中国科学院光学精密机械研究所光学设计论文集》1964)。
- [2] 陶纯塔, 《科学通报》, 1977年4-5期。
- [3] 电影镜头设计组《电影摄影物镜光学设计》, 中国工业出版社, 1971年。
- [4] 薛鸣球, 《电影光学》, 1978年3期。
- [5] 薛鸣球, 《电影光学》, 1980年2期。
- [6] 薛鸣球, 《仪器仪表学报》, 1984年3期。
- [7] K. Yamaji (山路敬三), "Progress in Optics", **VI**, Amsterdam 1967.
- [8] H. Hopkins, "USP 2741155", 1956.
- [9] 《特许公报》, 昭和48. 3. 1。
- [10] В. Савоскин, "Техника Кино и Телевидения", 1980 No. 2.
- [11] K. Tanaka, 《光学》, 1981 No. 10.
- [12] G. Cook, "USP 3045546", 1962.
- [13] М. Шпякия, "Оптика и Спектроскопия", 1980 Том49. No. 2.
- [14] W. Besenmatter, "Optik", 47(1977)153.
- [15] M. Herzberger, "J. Opt. Soc. Am.", 33(1943)651.
- [16] L. Bergstein, "J. Opt. Soc. Am.", 48(1958)154.
- [17] R. Pegis and W. Peck, "J. Opt. Soc. Am.", 52(1962)905.
- [18] K. Tanaka, "Optics Communications", 29(1979)138.
- [19] K. Tanaka "Appl. Opt.", 22(1983)541.
- [20] E. Delano, "Appl. Opt.", 2(1963)1251.
- [21] W. Besenmatter, "Optik", 47(1977)381.
- [22] W. Besenmatter, "Optik", 48(1977)289.
- [23] W. Besenmatter, "Optik", 49(1977)1.
- [24] W. Besenmatter, "Optik", 49(1977)325.
- [25] 常群, 《光学设计文集》, 科学出版社, 1976年。
- [26] 王之江, 《光学设计理论基础》, 科学出版社, 1965年。
- [27] 杜德罗夫斯基, 《光学仪器理论》, 第二卷, 科学出版社, 1963年。

