

# 变焦距物镜的小型化设计

冯秀恒

**摘要:**本文以 $1\frac{1}{4}$ "彩色电视10倍变焦距物镜和1"工业电视6倍变焦距物镜为例,采用目前流行的变倍补偿方式,缩小高斯光学尺寸。以像差理论分析结构,在前后固定组分别分离胶合面,利用空气间隔的作用,有效地控制轴上高级球差和轴外宽光束的成像特性,避免结构的复杂化;降低变倍组胶合面的折射率差,改善短焦距位置的像散校正状况,减少畸变;并在补偿组引入近等折射率胶合面,控制高级像差。两个实例的结构尺寸简单紧凑,口径小,重量轻,而且成像质量显著提高,从而达到变焦距物镜小型化的目的。

## 一、引言

变焦距物镜已经广泛应用于电影、电视和照相等各个领域。这不但要求变焦距物镜的成像质量日臻完善,同时,在许多场合,如新闻采访、医用或工业电视,又要求变焦距物镜的结构尽量简单紧凑,减小体积,减轻重量。即要求变焦距物镜在改善成像质量的前提下,结构尺寸做到小型化。

变焦距物镜的小型化,首先取决于变焦距系统的高斯光学问题<sup>[1]</sup>。而本文的目的则是采用目前流行的变倍补偿方式,设计出成像质量好,结构简单,尺寸尽可能小型化的变焦距物镜。

目前流行的变倍补偿方式基本上有两种。一种是负组变倍负组补偿,选段形式是变倍组的-1倍位置处于中间,对称选段(或称为物像交换原则)(图1),补偿曲线处于对称状态。另一种是负组变倍正组补偿,选段形式是变倍组的-1倍位置为起始点(长焦距位置)往上选段(图2),补偿曲线没有拐点。

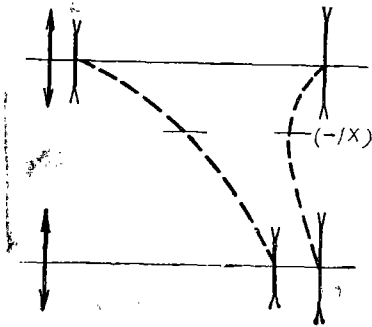


图1 负组变倍负组补偿,对称选段。

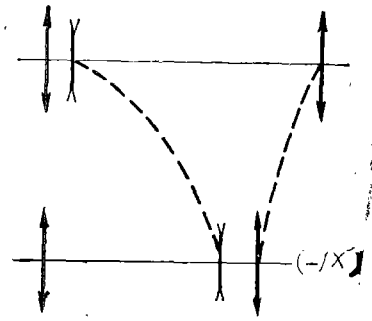


图2 负组变倍正组补偿,-1倍位置为起始点往上选段。

我们设计的 $1\frac{1}{4}$ "彩色电视10倍变焦距物镜和1"工业电视6倍变焦距物镜,就是采用上

述两种变倍补偿方式，简化结构型式，改善成像质量，做出尽可能小型化的结果。

## 二、变焦距物镜的结构分析

$1\frac{1}{4}$ " 彩色电视10倍变焦距物镜用于彩色电视摄像机，后面附有分光棱镜，要求有较长的后工作距离，所以采用负组补偿，对称选段。 $1''$ 工业电视6倍变焦距物镜用于黑白电视摄像机，不要求较长的后工作距离，所以采用正组补偿，-1倍位置往上选段。

下面着重介绍负组补偿对称选段的变焦距物镜的结构分析，顺便简单介绍正组补偿-1倍位置往上选段的变焦距物镜。

我们把整个变焦距物镜看成是由一个非聚焦的变倍系统和一个固定物镜组合而成。非聚焦的变倍系统提供变焦距物镜的变倍比，固定物镜则确定变焦距物镜的焦距范围。变倍系统如图3所示。图3中，A为前固定组（因用作调焦，固也称调焦组），B为变倍组，C为补偿组，D为后固定组。

A组为系统提供一个固定的物点O，在变倍过程中，通过B组的移动实现变倍，而C组随之作相应的移动，始终给出一个稳定的像点O'，D组把像点O'成像于无限远处，构成一个非聚焦变倍系统。

这个非聚焦的变倍系统，各个组元焦距的大小，在补偿方式和选段形式确定后，将直接影响变倍系统结构尺寸的大小。而在这个系统中，各组元的焦距之间具有一定的比

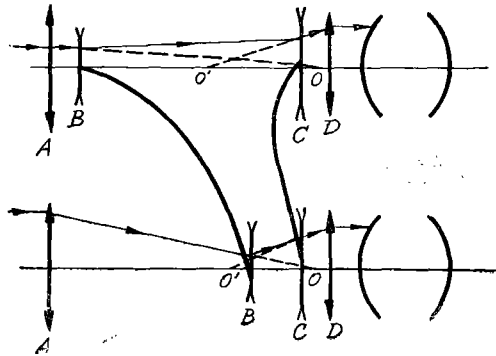


图3 负组补偿变倍系统的结构

例关系。假如各组元的焦距缩短，则非聚焦变倍系统的结构尺寸就随之缩小。反之，这个非聚焦变倍系统的尺寸就增大。当非聚焦变倍系统的各组元焦距缩小时，因为整个变焦距物镜的相对孔径不变，轴上光线高度也不变，所以引起各组元的相对孔径增大；而整个变焦距物镜的视场角不变，轴外光线高度则随之缩小。在一般的广角情况下，透镜的口径是由轴外光线高度决定的，因此透镜的口径则随着变倍系统的缩小而缩小。每个组元的相对孔径增大，必然产生很大的高级像差，使像差难以校正。但我们又要追求变焦距物镜的小型化，所以尽可能缩小变倍系统中每个组元的焦距就势在必行。

以负组补偿的10倍变焦距物镜为例，当变倍系统每个组元的焦距为

$$f_A' = 169.4$$

$$f_B' = -35$$

$$f_C' = -105$$

$$f_D' = 71.75$$

此时，高斯光学尺寸总长为148.69，各组元的相对孔径为

$$A组 \quad 1:1.86$$

$$B组 \quad 1:1.42$$

$$C组 \quad 1:3.79$$

一般说来，相对孔径A组为1:2左右，B组为1:1.5左右，用普通的结构型式来校正像差是比较容易的，但高斯光学的尺寸就嫌大了。当我们把变倍系统缩小1.2倍左右时，各组

元的焦距为

$$f_A' = 140.36$$

$$f_B' = -29$$

$$f_C' = -87$$

$$f_D' = 59.45$$

此时，高斯光学尺寸总长为 123.2，比前者缩短 25.49，口径当然也随着缩小 1.2 倍左右，但每个组元的相对口径却增加 1.2 倍左右。各组元的相对口径为

$$A \text{ 组 } 1:1.54$$

$$B \text{ 组 } 1:1.17$$

$$C \text{ 组 } 1:3.14$$

正因为这样，采用正组补偿的 6 倍变焦距物镜，其变倍系统的各个组元的焦距开始计算时就首先让它们尽可能短些。

$$f_A' = 92.46$$

$$f_B' = -23$$

$$f_C' = 30.475$$

$$f_D' = -31.05$$

高斯光学尺寸总长为 91.31，各组元的相对口径为

$$A \text{ 组 } 1:2.26$$

$$B \text{ 组 } 1:1.03$$

$$C \text{ 组 } 1:1.15$$

正组补偿与前面的负组补偿相比较，前固定组的相对口径小些，而变倍组和补偿组的相对口径都增大了，均为 1:1 左右。

我们首先分析负组补偿 10 倍变焦距物镜的结构。

对 A 组和 B 组来说，这么大的相对口径，再采用普通的结构型式来校正像差就很困难了。尤其是 A 组，必然产生大量的轴上高级球差、高级像散，以及宽光束轴外高级像差（轴外球差、慧差和轴外色球差）。为了校正上述像差，简便的办法是结构复杂化，比如 A 组增加一个单片，变为双、单、单（图 4）；B 组增加一个单片，变为单、单、双（图 5）。这种办法已为国内外不少设计者所采用<sup>[2][3]</sup>。

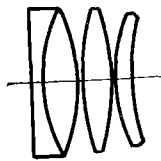


图 4 A 组的复杂化结构

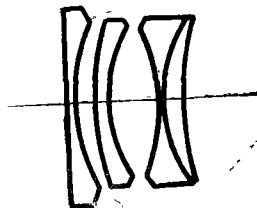


图 5 B 组的复杂化结构

但是，我们认为结构的复杂化是应该避免的。因为它给加工制造增加了工作量，提高了成本，并且显然也增加了变焦距物镜的光能损失。可取的途径应该是采用简单的结构型式，充分利用结构本身的有效参数来校正像差。在这里，A 组采用“三片头”结构；B 组仍然采用单、双结构；而 C 组的相对口径仅在 1:3 左右，用一个双胶合透镜就可以了。这样变倍系统前三组结构型式如图 6 所示。变倍系统的 D 组可以看作是后固定物镜的一部分，将在后面

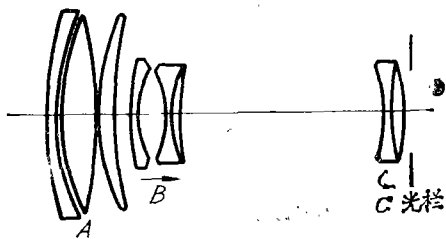


图6 负组补偿10×变焦距物镜前三组的结构型式

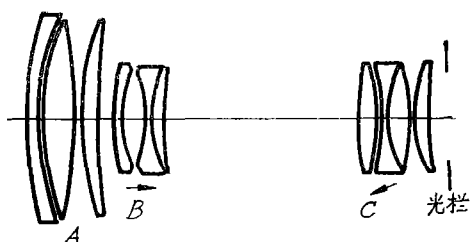


图7 正组补偿6倍变焦距物镜前三组的结构型式

加以论述。

正组补偿6倍变焦距物镜的结构，A组和B组均与负组补偿10倍变焦距物镜相类似。而C组的焦距是正的，相对孔径又很大。我们不准备采用高折射率玻璃，它的结构型式仍采用单、双、单结构。这样正组补偿6倍变焦距物镜前三组结构型式如图7所示。

### 三、变倍系统的像差校正

变焦距物镜的像差校正分为两步：第一步是使变倍系统前三组残存的各种像差，在不同焦距位置上达到一致；第二步是选择合适的后固定组平衡前三组残存的像差，从而校正好整个变焦距物镜的像差。

我们首先分析负组补偿的10倍变焦距物镜前三组在各焦距位置的像差影响。

#### 1. A组

A组在长焦距位置时，轴上和轴外光线高度均很高，所谓A组的相对孔径就是指长焦距位置而言。因此，A组在长焦距位置时，高级球差很大；轴外宽光束轴外高级球差也很大。A组所采用的“三片头”结构，实际上可以看作是普通的双、单结构增加一个空气间隔，利用这个空气间隔的大小和半径的差别，一方面校正轴上高级球差，另一方面有效地控制轴外宽光束下光线的成像特性，校正轴外球差。

普通的双、单结构，轴外宽光束下光线的成像特性曲线如图8中虚线所示。我们分离双胶合透镜，给出一个适当的间隔，使得下光线在正透镜面上有较高的高度，以使下光线的成像点位置变高，成像特性曲线如图8中实线所示。变焦距物镜总是允许有渐晕的，有时允许渐晕甚至达50%。这样，我们就可以根据下光线的遮拦情况，给出恰当的空气间隔和半径差别，随心所欲地控制轴外宽光束下光线成像特性曲线的拐点。这不仅对校正单色轴外球差有好处，对校正轴外色球差更有好处。

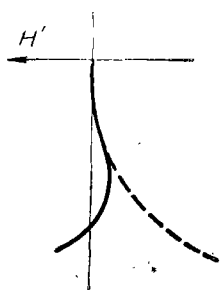


图8 轴外宽光束下光线成像特性曲线的校正

A组在短焦距位置时，轴上光线高度很低，而轴外光线高度较高。这就是说，长、短焦距位置轴外光线高度均很高。因此，A组无

论对长焦距位置，还是对短焦距位置，对像散和畸变均有较大影响。我们在保证空气间隔对长焦距位置的高级球差校正状况的前提下，弯曲每个单元，把长、短焦距位置的像散校正一致，并且尽量降低畸变。

#### 2. B组

B组在长焦距位置时，轴上光线高度较高，所谓B组的相对孔径就是指长焦距位置而

言。它的高级球差是胶合面产生的。为了降低高级球差，一种办法是加大胶合面的折射率差和 $\nu$ 差，使半径变大；另一种办法是降低胶合面的折射率差，使半径本身所起的作用减弱。我们采用后一种办法，并且提高玻璃的折射率，这样，既或相对孔径很大，高级球差也可以降下来。

在短焦距位置时， $B$ 组移动到最贴近 $A$ 组的位置，视场角最大，轴外光线的高度最高，这时的高级正像散很大。高级正像散同样是胶合面产生的。前面提到的加大胶合面的折射率差和 $\nu$ 差，仅对校正高级球差有利，对降低高级正像散并不利。以往的变焦距物镜短焦距位置的高级正像散很大(图9)，就是这个原因造成的。如果要求同时兼顾高级球差和高级正像散的校正，就必须降低胶合面的折射率差。这样才有可能在降低高级球差的同时，把高级正像散降下来，使长、短焦距位置的像散校正一致，并且照顾到短焦距位置的畸变。本文中的两个例子，10倍和6倍变焦距物镜，就采取上述措施，降低了短焦距位置的高级正像散，像散曲线分别如图10和图11所示。

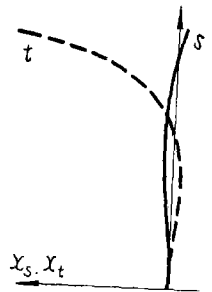


图9 以往的变焦距物镜短焦距位置的像散校正状况。

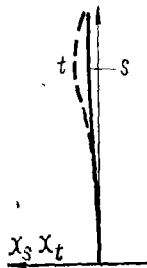


图10 本文中10倍变焦距物镜短焦距位置像散校正状况

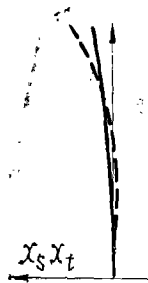


图11 本文中6倍变焦距物镜短焦距位置像散校正状况。

### 3. C组

对于C组，由于是对称选段，长、短焦距位置是一致的，并且相对孔径很小，只有1:3左右。在校正正像差时，只要注意不产生较大的高级像差就可以了。为此，我们适当地提高折射率，并且使胶合面接近等折射率。因为C组靠近光栏，像散和畸变几乎是定值，不用考虑。

在采取上述这些措施之后，综合平衡各种像差，使得变倍系统前三组的像差在各个焦距位置上基本一致。像差一致性如表I

表 I

	$\angle A'$	高级量	$osc'$	高级量	$A_s'$	高级像	$C_1$	$C_{11}$	$DT'$
长焦	-1.226	0.092	-0.0275	0.0027	-0.366	-0.132	-0.0072	0.0040	-0.030
次长	-1.225	0.060	-0.0267	0.0001	-0.455	-0.146	-0.0081	0.0065	-0.031
中焦	-1.143	-0.002	-0.0241	-0.0007	-0.379	-0.101	-0.0077	0.0106	-0.036
次短	-1.079	-0.025	-0.0224	-0.0005	-0.188	0.053	-0.0068	0.0136	-0.046
短焦	-1.122	-0.033	-0.0221	-0.0006	-0.345	-0.038	-0.0069	0.0149	0.047

我们再简单介绍正组补偿6倍变焦距物镜前三组在各焦距位置的像差影响。

正组补偿的变倍系统的  $A$  组和  $B$  组, 结构与负组补偿相类似。在这里, 因为  $A$  组相对孔径小些, 所以玻璃折射率可以适当降低。  $B$  组相对孔径大些, 但  $C$  组的相对孔径也大, 而且焦距符号相反, 二者产生的像差高级量符号也相反, 可以互相抵消一些。我们在  $B$  组已经把胶合面的折射率差降低, 高级像差自行降低了大部分。那么为了  $C$  组自行降低高级像差, 它的胶合面也要相应地选择等折射率的玻璃。变倍系统前三组的像差一致性如表 II

表 II

	$\angle A'$	高级量	$osc'$	高级量	$A_s'$	高级量	$C_1$	$C_{11}$	$DT'$
长焦	1.163	0.193	-0.0346	-0.0038	2.893	-0.016	-0.0007	0.0040	-0.051
次长	1.090	-0.115	-0.0307	-0.0011	2.888	0.026	-0.0006	0.0054	-0.049
中焦	1.175	-0.102	-0.0297	-0.0012	2.932	0.095	-0.0004	0.0071	-0.046
次短	1.182	-0.034	-0.0295	-0.0015	2.929	0.204	-0.0002	0.0091	-0.032
短焦	1.132	0.002	-0.0293	-0.0014	2.927	0.301	-0.0002	0.0109	0.050

从两个结果可以看出, 各焦距位置的像差比较一致。球差和像散的高级量均很小;  $osc'$  各焦距位置最大相差 0.005 左右, 是允许的; 轴上色差  $C_1$  几乎完全一致; 短焦距位置的  $C_{11}$ , 有较大的正值, 是因为短焦距视场大, 有很大的高级负倍率色差, 所以留给它较大的正值  $C_{11}$ , 方能平衡。长、短焦距位置的畸变也都不大。

#### 四、后固定组的选型和像差平衡

这里所说的后固定组, 实际包括了变倍系统的  $D$  组和后面的固定物镜。

我们首先谈谈后固定组的选型。

$1\frac{1}{4}''$  彩色电视 10 倍变焦距物镜要配备一个 2 倍的倍率镜, 我们认为这个倍率镜放在后固定组的中间为宜。为此, 在后固定组高斯光学尺寸的安排上, 把它分为前后两部分。前组仍称为  $D$  组, 后组则称为  $E$  组。两组之间近似平行光, 间隔大约等于  $E$  组的焦距。这样的安排是为了达到出射远心光路的目的。

$1''$  工业电视 6 倍变焦距物镜的后固定组同样分为  $D$ 、 $E$  两组, 两组之间要求近似平行光, 那么  $D$  组的焦距应该是负的。

下面介绍后固定组的像差校正。

##### 1. $D$ 组

$1\frac{1}{4}''$  彩色电视 10 倍变焦距物镜,  $D$  组的焦距是正的。因为  $D$  组靠近光栏, 像散和畸变基本上是定值, 它的主要作用是校正球差和正弦差, 因此  $D$  组采用单、双结构就可以了。

$1''$  工业电视 6 倍变焦距物镜,  $D$  组焦距是负的。正组补偿变倍系统前三组残存的像散是一个很大的正值。为了校正像散, 我们使  $D$  组加厚, 出现一个远离光栏的校正像散的面, 变成一个双胶合厚透镜组, 使得  $D$  组在校正球差和正弦差的同时, 还要负担像散的校正。

##### 2. $E$ 组

无论 10 倍变焦距物镜, 还是 6 倍变焦距物镜, 它们的  $E$  组都离光栏较远, 不但要负担球差和正弦差的校正, 还要校正残存的像散, 以及控制轴外宽光束上光线的成像特性。因此,  $E$  组的结构型式采用在普通的单、双结构或单、单、双结构的基础上, 把双胶合透镜分离。

本来  $E$  组的胶合面是校正像散最主要的面, 现在既要求它仍然校正像散, 又要求它控制

轴外宽光束上光线的成像特性，我们只好把胶合面分离。它的作用与前面A组胶合面的分离道理相同。本来双胶合透镜的轴外宽光束上光线的成像特性曲线如图12的虚线所示。我们选择恰当的空气间隔和半径差别，使上光线的成像像高降低，成像特性曲线如图12中的实线所示。与下光线相同，我们可以根据上光线的遮栏情况，选择曲线的拐点。

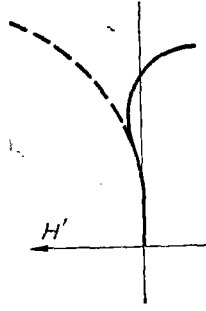


图12 轴外宽光束上光线成像特性曲线的校正。

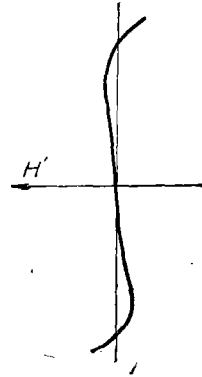


图13 轴外宽光束成像特性曲线的校正。

总之，我们利用A组和E组中分离透镜的空气间隔，在校正其它像差的同时，改善轴外宽光束的成像特性，特性曲线如图13所示，轴外光线的传递函数显著提高。

另外，变焦距物镜的变倍比越大，以及高斯光学尺寸越小，则 *Petzval* 和就越小，使像面弯曲变负，这对轴上和轴外像差的匹配很不利，*Petzval* 和应当校正到什么程度，应当视轴上和轴外像差的匹配情况而定。我们知道

$$S_{\text{IV}} = j^2 \sum \frac{\varphi}{N}$$

即在光焦度 $\varphi$ 为定值时，玻璃折射率与 $S_{\text{IV}}$ 成反比。对10倍变焦距物镜，*Petzval*和太小了，为了把像面弯曲校正到与轴上球差相匹配的程度，则降低D组和E组的玻璃折射率，使后固定组的*Petzval*和增大；对6倍变焦距物镜，*Petzval*和比较适中，则用不着降低D组和E组的玻璃折射率。

我们用D组和E组平衡了前三组残存的各种像差，完成了整个变焦距物镜的像差校正。10倍和6倍变焦距物镜的后固定组的结构分别如图14和图15所示。

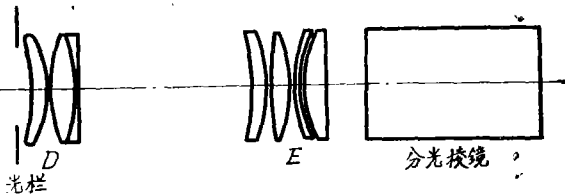


图14 10倍变焦距物镜后固定组的结构型式

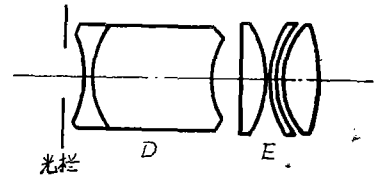


图15 6倍变焦距物镜后固定组的结构型式

## 五、简短的结论

我们采用上述的设计方法设计的  $1\frac{1}{4}$  彩色电视10倍变焦距物镜，焦距为20~200毫米，

相对孔径1:2.2, 视场角 $58.7^{\circ}\sim 6^{\circ}$ , 最近摄像距离为1.7米, 前片到后片的长度为255.44毫米, 前片通光口径为123毫米, 后片通光口径为38毫米。而1"工业电视6倍变焦距物镜, 焦距为15~90毫米, 相对孔径1:2.2, 视场角 $58.2^{\circ}\sim 9.6^{\circ}$ , 最近摄像距离为1.2米, 前片到后片的长度为150.69毫米, 前片通光口径为67毫米, 后片通光口径为18毫米。

这两个变焦距物镜, 长焦距位置的高级球差、轴外宽光束的高级像差以及短焦距位置的高级像散、均得到显著的改善。光学传递函数尤其是短波部分更是大为提高, 10倍变焦距物镜波长546.1毫微米和656.3毫微米频率为15对线/毫米时, 在整个变焦范围内,  $MTF$  值均不低于55%。而波长450毫微米, 频率为15对线/毫米时, 长焦距位置的 $MTF$  值从以往的16%提高到31%。6倍变焦距物镜各波长选择同一像面, 频率为18对线/毫米时,  $MTF$  值大都在50%以上, 只有在波长656.3毫微米时, 长焦距位置的 $MTF$  值下降为33%。

两个变焦距物镜的结构均比较简单紧凑, 口径小, 长度短, 重量轻, 达到了小型化的目的。

## 六、后 记

$1\frac{1}{4}$ "彩色电视10倍变焦距物镜是为 $1\frac{1}{4}$ "彩色电视摄像机设计的, 1"工业电视6倍变焦距物镜是为1"黑白工业电视摄像机设计的。史光辉、孙晶、匡裕光等同志参加了这项工作, 在工作中, 得到薛鸣球同志的具体指导, 仅致谢意。

### 参 考 文 献

- [1] 薛鸣球:《变焦距物镜的高斯光学》电影光学, 1978, 3 (1~15)
- [2] 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.
- [3] 常群:《光学设计文集》科学出版社, 1976, (16~81)