

# 20倍双组联动变焦距光学系统设计

李宏壮 张振铎

中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033

**摘要** 针对双组联动变焦距系统结构复杂的特点,对其设计过程进行了梳理。在此基础上编制了可视化辅助设计软件,该软件具有高斯解计算、变倍补偿曲线绘制、像差与外形尺寸分析、相对孔径图输出等功能。使用该软件可以方便地完成双组联动变焦系统高斯解的合理选择,并给出各组元承担相对孔径及其变化情况,辅助进行初始结构的确定。利用该辅助设计软件,对一套焦距25~500 mm的20倍可见光波段双组联动连续变焦距系统进行了初始结构设计,并通过整体优化使系统像差得到校正。设计结果系统光学总长478 mm,各焦距位置在50 lp/mm处轴上视场调制传递函数(MTF)大于0.6,边缘视场MTF大于0.4,各项指标满足系统要求。

**关键词** 光学设计;双组联动;连续变焦距镜头;高斯光学计算

**中图分类号** TH751

**文献标识码** A

**doi:** 103788/AOS201535.0222003

## Design of 20× Double-Linkage Continuous Zoom Optical System

Li Hongzhuang Zhang Zhenduo

*Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,  
Changchun, Jilin 130033, China*

**Abstract** For the complexity of double-linkage zoom system, the design process is settled first, and the visible assist design software is developed. The function of the software includes Guassian optical calculation, compensation curve drawing, aberration and lens size analysis, relative aperture curve output, etc. Using the software, rational Guassian parameters can be selected conveniently, and the relative aperture and its variation of each group can be given, which can help the designer to select the initial configuration. Then utilizing the software, the initial design can performed for a double-linkage zoom system with focal length range from 25mm to 500mm. And through integrated optimization, the system aberration is corrected and balanced. The design results demonstrate that the total optical length is 478 mm, and the modulation transfer function (MTF) at 50 lp/mm for each zoom configuration is higher than 0.6 for center field, and higher than 0.4 for edge field. All indexes satisfy the command of system.

**Key words** optical design; double linkage; continuous zoom system; Guassian optical calculation

**OCIS codes** 220.3620; 220.4830

## 1 引言

双组联动变焦距系统是光学补偿与机械补偿相结合的一种优越的变焦距形式,通过前后两个变倍组元固联在一起线性移动改变焦距,通过中间补偿组元非线性移动补偿像面漂移<sup>[1]</sup>。最典型的双组联动系统是Varotal-30型16~160 mm焦距、10倍变焦距系统,该系统成为双组联动变焦距系统的典范,而后这种变焦距形式被广泛采用,尤其在英国应用最多。

尽管与四组元变焦距系统相比结构稍显复杂,但这种变焦距形式具有较多的优点,首先由于采用两个变倍组元分担光焦度,使像差能够得到更好地校正,因此具有优良的成像质量,且各组元运动曲线平滑;其

收稿日期: 2014-09-01; 收到修改稿日期: 2014-10-21

作者简介: 李宏壮(1980—),男,副研究员,博士,主要从事光学设计、检测、主动光学、大口径望远镜波前探测等方面的研究。E-mail: jilinbayan@163.com

次具有独特的调焦方式,使其在近距离成像时不引起视场角和口径的明显变化;另外由于前固定组为负光焦度,有利于增加视场角。

但由于双组联动系统中移动组元多,因此高斯计算复杂,为保证各组元在变倍过程中不相碰,其约束条件也较多。尤其是实现最速变焦的换根条件,更是十分严格,稍有偏差则无法满足平滑换根。因此双组联动变焦距系统的设计过程是较为复杂和繁琐的,目前国内对这种系统设计结果的报道较少。

本文针对一款用于大视场监视、同时具有小视场详查功能的大倍率、长焦距连续变焦距镜头,采用双组联动变倍形式进行设计。对双组联动变焦距系统的设计过程进行梳理,通过开发的可视化辅助设计软件,完成高斯解的合理选择和各组元初始结构的确定,整体优化设计出一套焦距 25~500 mm、变倍比 20 的可见光波段内调焦双组联动变焦距系统,使系统总长及各项成像指标均满足要求。

## 2 双组联动变焦系统的高斯计算

### 2.1 变焦方程

变焦系统的前固定组  $\phi_1$  用于为变焦核提供稳定的像点,后固定组  $\phi_5$ 、 $\phi_6$  主要用于校正前组残余像差及调整系统焦距,而中间变焦核是整个系统高斯计算的关键。对于双组联动变焦系统,变焦核由相邻三个组元组成,其中  $\phi_2$ 、 $\phi_4$  为变倍组,固联在一起移动从而改变焦距,中间的  $\phi_3$  为补偿组,用于补偿变焦时产生的像面漂移。

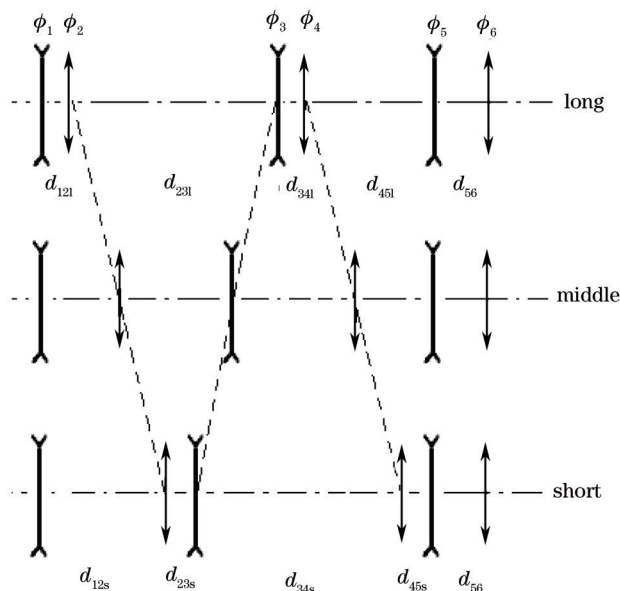


图 1 双组联动系统变焦过程

Fig.1 Zoom progress of double-linkage system

双组联动系统变焦核的变焦微分方程为

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

式中  $m_2$ 、 $m_3$ 、 $m_4$  分别为变倍组、补偿组、变倍组的倍率<sup>[1-2]</sup>。

变焦过程的高斯计算如下:

1) 给定初始参数,包括:  $f_2$ 、 $f_3$ 、 $f_4$ ;长焦时变倍组  $\phi_2$  的倍率  $m_{2l}$ ;以及变倍组  $\phi_2$  与补偿组  $\phi_3$  及变倍组  $\phi_4$  在长焦位置间隔  $d_{23l}$ 、 $d_{34l}$ 。

2) 计算长焦位置补偿组  $\phi_3$  及变倍组  $\phi_4$  的倍率  $m_{3l}$ 、 $m_{4l}$ :

$$m_{3l} = \frac{f_3'}{f_2'(1 - m_{2l}) - d_{23l} + f_3'}; m_{4l} = \frac{f_4'}{f_3'(1 - m_{3l}) - d_{34l} + f_4'} \quad (2)$$

3) 由变倍组  $\phi_2$  的移动量  $q_2$  得到其倍率  $m_2$ :

$$m_2 = \frac{1}{\frac{1}{m_{21}} - \frac{q_2}{f_2'}} \quad (3)$$

4) 由于  $\phi_2$  与  $\phi_4$  固联,  $d_{q2} = d_{q4}$ , 因此有:

$$m_4 = m_{41} + \frac{q_2}{f_4'} \quad (4)$$

5) 得到中间系数  $b$ :

$$b = -\frac{f_2'}{f_3'} \left( \frac{1}{m_2} - \frac{1}{m_{21}} + m_2 - m_{21} \right) - \frac{f_4'}{f_3'} \left( \frac{1}{m_4} - \frac{1}{m_{41}} + m_4 - m_{41} \right) + \left( \frac{1}{m_3} + m_3 \right) \quad (5)$$

6) 由  $b$  计算补偿组  $\phi_3$  的倍率:

$$m_{3-1} = \frac{b + \sqrt{b^2 - 4}}{2}; m_{3-2} = \frac{b - \sqrt{b^2 - 4}}{2} \quad (6)$$

进而求得对应于变倍组移动量  $q_2$  的补偿组移动量:

$$\Delta_1 = f_3' \left( \frac{1}{m_{3-1}} - \frac{1}{m_{31}} \right) - q_2 + f_2'(m_2 - m_{21}); \Delta_2 = f_3' \left( \frac{1}{m_{3-2}} - \frac{1}{m_{31}} \right) - q_2 + f_2'(m_2 - m_{21}) \quad (7)$$

7) 相应变倍比:

$$\Gamma_1 = \frac{m_{21}m_{31}m_{41}}{m_2m_{3-1}m_4}; \Gamma_2 = \frac{m_{21}m_{31}m_{41}}{m_2m_{3-2}m_4} \quad (8)$$

重复上述计算过程,直到变倍比达到要求为止。

## 2.2 双组联动系统最速变焦的换根解

如图2所示,当不换根时,一般取变焦曲线的上半段。即由长焦到短焦变化过程中,取  $m_2 \times m_4$  由  $1 \sim < 1$ 、 $m_3$  则取  $m_{31}$  上半段,即  $|m_{31}|$  由  $1 \sim < 1$ ;

当换根时,由长焦到短焦变化过程中由  $m_{32}$  下半段起始,经过换根点过度到  $m_{31}$  上半段。为实现平滑换根,需满足在换根瞬间  $b = -2$ ;  $m_3 = -1$ ;  $m_2 m_4 = 1$ 。

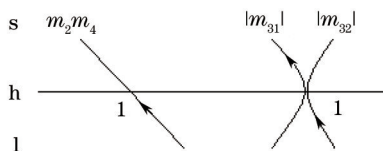


图2 双组联动系统补偿曲线

Fig.2 Compensation curve of double-linkage system

为保证换根条件,需要初始参数匹配准确。由于补偿组  $\phi_3$  及变倍组  $\phi_4$  在长焦位置的间隔  $d_{341}$  是变焦核的最后一个参数,其对调整将对高斯计算的影响最小,因此选择对  $d_{341}$  调整来改变  $m_4$ ,从而保证换根条件。

经过整理后,得到换根应满足

$$-2 = - \left[ \frac{m_{41} + \frac{1}{f_4'} \cdot \frac{1}{m_{21}}}{1 + \frac{1}{f_4'}} + \frac{1 + \frac{1}{f_4'}}{m_{41} + \frac{1}{f_4'} \cdot \frac{1}{m_{21}}} \right] \cdot \left( \frac{1 + f_4'}{f_3'} \right) + \frac{1}{f_3'} \left( \frac{1}{m_{21}} + m_{21} \right) + \frac{f_4'}{f_3'} \left( \frac{1}{m_{41}} + m_{41} \right) + \left( \frac{1}{m_{31}} + m_{31} \right) \quad (9)$$

将由给定初始参数,包括:  $f_2, f_3, f_4$ ; 长焦时的倍率  $m_{21}$ 、变倍组  $\phi_2$  与补偿组  $\phi_3$  在长焦位置的间隔  $d_{231}$  以及由(2)式计算出的  $m_{31}$ ,代入(9)式,即可计算出满足换根条件的  $m_4$  的两个解,再由(2)式求出相应  $d_{341}$  的两个解,从中选择合适的。

## 3 双组联动最速变焦系统的设计流程

尽管双组联动系统的变倍补偿曲线可以通过(1)~(8)式推导出来,但当初始参数选择不合适时将使中间

参数  $|b| < 2$ , 导致无解。初始参数的确定应在有解的前提下, 保证总长最短、光焦度分配合理、间隔合适、凸轮升角不大、二级光谱适中等多个条件, 因此合理的初始参数往往很难确定, 要经过多次反复计算。而双组联动系统的最速换根条件更是十分严格, 稍有偏差变焦曲线即要断裂。

由于双组联动变焦系统设计的复杂性, 对其设计过程的梳理及可视化辅助设计软件的开发是十分必要的。通过前面对高斯解的计算及变焦距系统的设计经验, 整理得到如下的双组联动变焦距系统设计流程图:

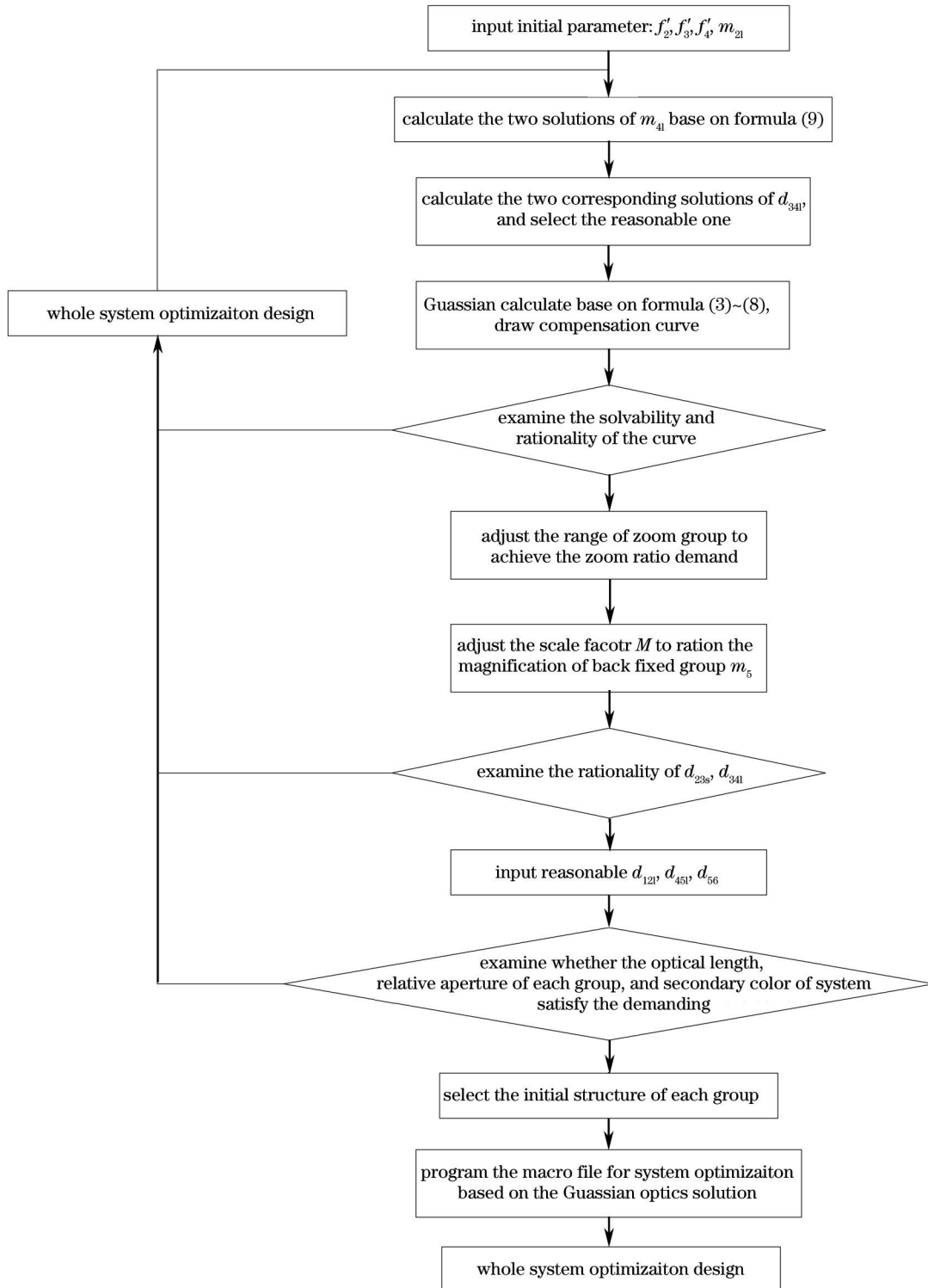


图3 双组联动系统设计流程图

Fig.3 Design process of double-linkage system

根据以上设计流程图,编制可视化辅助设计软件,实现以下功能:

- 1) 由初始参数计算满足换根条件的两个  $d_{341}$ ,并从中选择合适的解;
- 2) 输出变倍补偿曲线及焦距变化曲线;
- 3) 输出前固定组、后固定前后组焦距、各组元移动量、光学总长及长焦端系统的二级光谱;
- 4) 输出长焦  $l$ 、中长焦  $l_m$ 、中焦  $m$ 、中短焦  $s_m$ 、短焦  $s$  共 5 个位置的组元间隔;
- 5) 计算各组元 5 个焦距位置轴上边缘光线与轴外主光线高度,绘制各组元相对孔径及其变化曲线;

通过此软件即可确定系统的高斯光学参数,并给出各组元所承担的相对孔径及其变化率曲线,以及系统长焦位置二级光谱等信息。而后选择各组元初始结构,通过编制优化宏文件,进行整体优化设计,完成双组联动变焦距系统的设计过程。

## 4 20倍内调焦双组联动系统设计

### 4.1 光学设计指标

按照总体观测性能要求,系统光学设计指标要求见表 1,传感器采用 2/3"电荷耦合器件(CCD)相机,分辨率 880 pixel×660 pixel,像素尺寸 10 μm。

由系统指标可以看出,该系统为一款相对口径和视场角适中、长焦距、大变倍比,且像质要求较高的可见光连续变倍系统。考虑到系统对像质要求高及双组联动系统的优点,选择双组联动变焦形式进行设计。

表 1 光学系统指标

Table 1 Parameters of optical system

Parameter	Value
Wavelength /nm	486 ~ 656
Zoom ratio	20
Focal length /mm	25 ~ 500
$F \#$	5 ~ 6
Image size (diagonal) /mm	8.8×6.6
Field of view /( $^{\circ}$ )	1.26 ~ 25
Max aperture /mm	<100
Overall length /mm	<550
Relative illumination /%	>70
Modulation transfer function of all fileds (50 lp/mm)	>0.5 (field center), >0.3 (field edge)
Near object distance /m	20

### 4.2 设计过程

#### 4.2.1 高斯光学计算

选定变焦系统形式后,首先要进行高斯光学计算,这是变焦距系统设计的基础。按照双组联动系统常用的初始参数范围<sup>[1-2]</sup>:

$$\begin{cases} -3 < m_{21} < -1; \\ -0.6 < f_3' < -0.3; \\ 0.3 < f_4' < 0.8. \end{cases} \quad (10)$$

从中选择选择一组初始值: $f_2=1$ 、 $f_3=-0.5$ 、 $f_4=0.7$ 、 $m_{21}=-1.5$ 、 $d_{231}=1.5$ ,输入可视化辅助设计软件。通过反复调整初始参数及变倍组导程,使变倍比达到 20 倍要求,并满足补偿曲线平滑、组元间隔紧凑,总长、二级光谱、及各组元承担光焦度适中要求,软件界面如图 4 所示。最终确定系统高斯光学参数为: $f_2=1$ 、 $f_3=-0.4$ 、 $f_4=0.55$ 、 $f_{21}=-1.2$ 、 $d_{231}=1.5$ 、 $d_{341}=0.1079$ ;

并由此计算得出  $f_1=-1.783$ 、 $f_5=-0.679$ 、 $f_6=0.9109$ ;变倍组导程  $q_2=0.414$ 、补偿量  $\Delta=0.992$ ;并取  $d_{121}=0.05$ 、 $d_{451}=0.478$ 、 $d_{56}=0.1$ ;前固定组  $\phi_1$  到后固定前组  $\phi_5$  的总长  $L=2.145$ ;系统比例因子  $M=140$ ;将高斯参数输入 Zemax 软件,得到如图 5 的近轴光学结构,通过 Zemax 软件对各位置的焦距、总长、孔径高度等分析,验证辅助

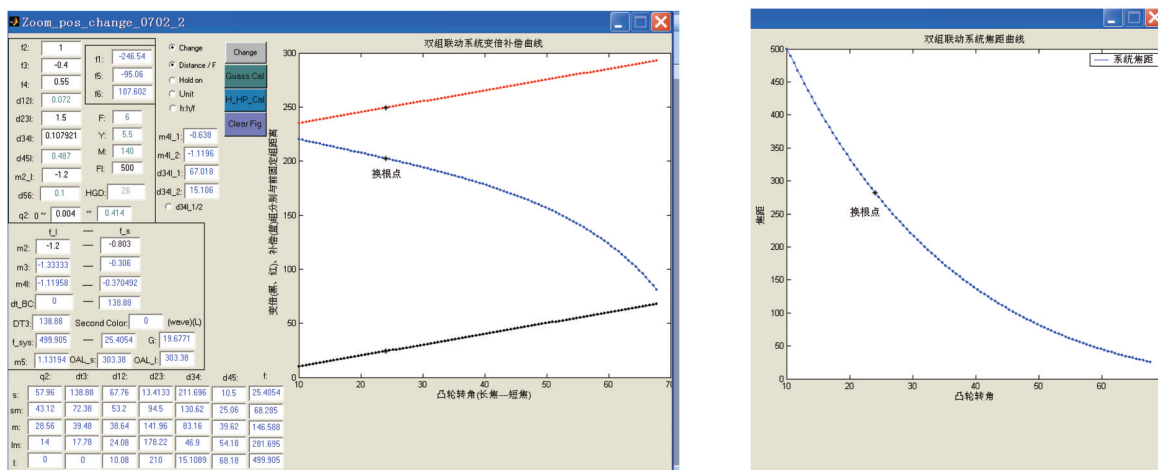


图4 可视化辅助设计软件界面(补偿曲线与焦距曲线)

Fig.4 Visible design software interface(compensation and focus curve)

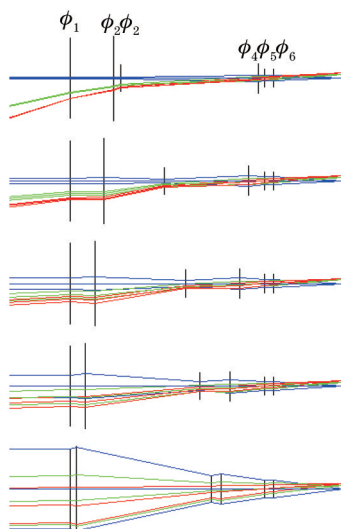


图5 近轴光学结构  
Fig.5 Paraxial layout

软件计算结果是正确有效的。

#### 4.2.2 各组元结构选择

通过辅助软件计算各组元的轴上边缘光线及轴外主光线高度,绘制孔径及相对孔径变化图,即  $h-h_p$  图和  $hlf-hplf$  图,如图6所示。

对于变焦距系统,各焦距位置的二级光谱是不同的,长焦位置最大,因此软件给出了长焦位置系统的二级光谱波像差,为  $2.985\lambda$ 。由于系统相对孔径不大,前固定组的焦距较长,并且双组联动结构中各组元具有较多的正负组份匹配,因此该系统的二级光谱不是很大。

由  $h-h_p$  图和  $hlf-hplf$  图对各组元承担像差的特点分析,确定其初始结构<sup>[3-4]</sup>。由于前固定组  $\phi_1$  长焦端轴上光线和短焦端轴外光线都很高,因此其长焦端的球差、正弦差及长、短焦位置的像散、畸变以及轴外球差都很大,并且二级光谱的贡献主要来自前固定组,因此采用较为复杂的正、负光焦度的双、双结构,并且为加大胶合面曲率半径,选择高折射率材料。

变焦组  $\phi_2$  在长焦端的轴上光线高度最高,相对孔径也最大,其承担了较大的球差、正弦差及其高级量,选择正、正光焦度的双、单结构;补偿组  $\phi_3$  焦距较短,相对孔径大,选择负、负光焦度的单、双结构,由于补偿组移动量很大,应对其像差进行较好的校正,为此单透镜选择折射率高的材料,双胶合透镜选择折射率差小、折射率高的材料。由于变焦组  $\phi_4$  与光阑距离近,因此轴外光线高度低,轴外的像散、畸变不大,重点对

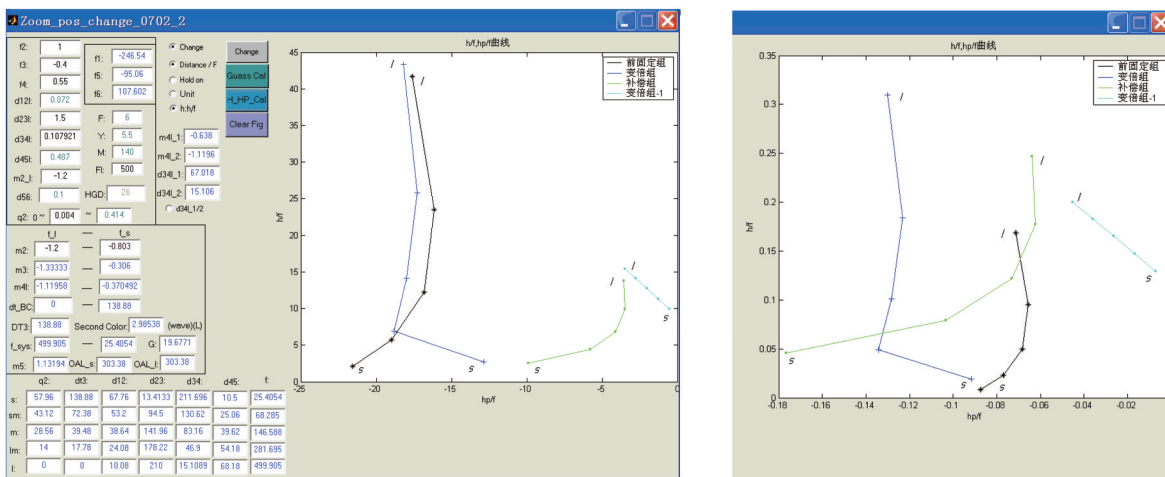


图 6 可视化辅助设计软件界面(孔径图与相对孔径图)

Fig.6 Interface of visible design software ( $h-hp$  and  $h/f-hp/f$  curve)

轴上的球差、正弦差及其高级量校正,选择与  $\phi_2$  类似的正、正光焦度的双、单结构。后固定前组  $\phi_5$  负责将光束准直,以便于按照滤光片及衰减片,由于其紧靠光阑,因此像散、畸变为定值,主要依靠其弯曲校正轴上像差,采用一块弯向光阑的高折射率单透镜;后固定后组  $\phi_6$  用于保证系统焦距、校正前面各组剩余像差,为了缩短长度,采用正负光焦度分离的远摄结构。各组元结构如图 7 所示。

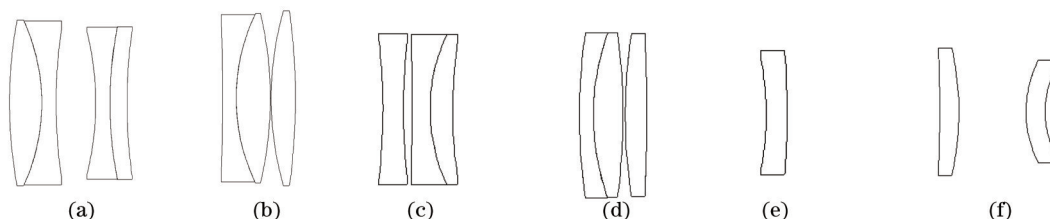


图 7 各组元结构。(a)前固定组;(b)变倍组 1;(c)补偿组;(d)变倍组 2;(e)后固定前组;(f)后固定后组

Fig.7 Structure of each group. (a) Front fixed group; (b) zoom group 1; (c) compensation group; (d) zoom group 2; (e) front part; (f) back part

#### 4.2.3 系统整体优化

将各组元按照高斯计算得到的间隔组合起来,进行整体优化,优化过程中严格按照高斯计算的结果,控制各组元焦距、各焦距位置的主面间隔,并对系统总长进行约束。最终优化得到光学结构如图 8 所示。

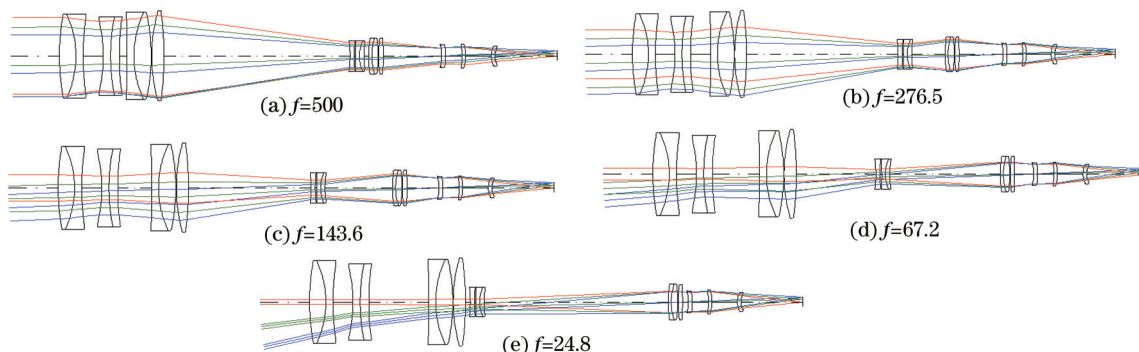


图 8 各焦距位置的光学结构

Fig.8 Zoom lens layout with different focal lengths

系统参数为:变倍组导程:58 mm,补偿量:138.88 mm,后工作距离:68.5 mm,光学总长:478 mm,最大口径:93 mm。

系统调制传递函数(MTF)如图 9 所示,各焦距位置在 50 lp/mm 处轴上视场 MTF 大于 0.6,边缘视场 MTF 大

于0.4,具有较好的成像质量。最大渐晕发生在长焦位置,此时边缘视场相对照度为75%,系统最大畸变为短焦端边缘视场,畸变值小于3%,满足指标要求。

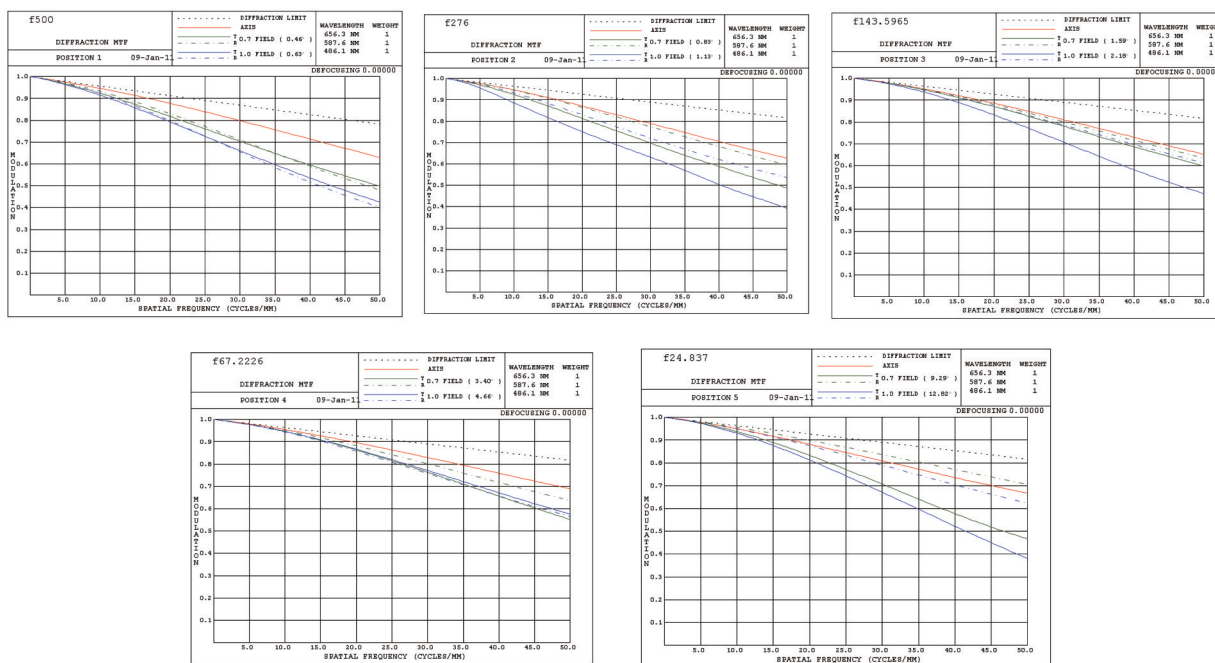


图9 各焦距位置系统传递函数  
Fig.9 MTF of zoom lens with different focal lengths

### 4.3 近摄调焦方式

变焦距系统一般是对物距无穷远进行像差校正,当对近距离成像时需要进行调焦,要求各焦距位置在相同物距时调焦量完全一致。变焦距系统一般采用前固定组进行调焦,可分为外调焦和内调焦方式。外调焦通过前固定组整组或其最前面镜组调焦;内调焦可采用前固定组中后面的正元件或负元件调焦。内调焦具有光组口径增加平缓、不改变入射光线角度、光学总长不变、易于保证镜头密封性的优点<sup>[5-6]</sup>。

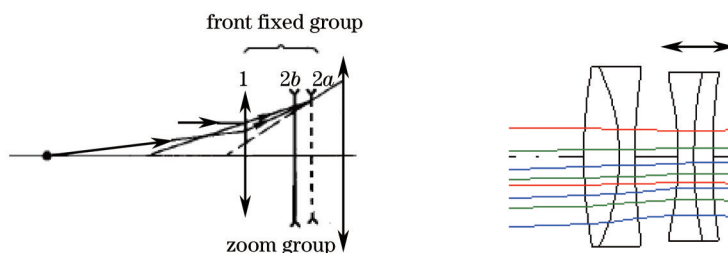


图10 近摄调焦结构  
Fig.10 Focusing configuration

本设计光路结构中前固定组为正、负光焦度的双、双结构,因此采用后面的负元件内调焦的方式进行近摄调焦。当物距由无穷远向近距离移动时,负调焦组向前移动,移动量如表2所示。

表2 调焦量

Table 2 Defocus adjustment

Object distance/m	Adjust distance/mm
$\infty$	0
100	0.87
50	1.71
40	2.12
30	2.8
20	4.12



## 5 结 论

由于双组联动变焦距系统设计的复杂性,对设计过程进行了梳理。在此基础上编制了可视化辅助设计软件,该软件具有高斯解计算、变倍补偿曲线绘制、像差与外形尺寸分析、孔径图绘制等功能。使用该软件可以方便地完成高斯解的合理选择,并辅助进行各组元初始结构的确定。

最后采用论述的设计流程,利用辅助设计软件,设计出一套焦距25~500 mm、变倍比20倍的可见光波段内调焦双组联动变焦距系统,使系统总长及各项成像指标均满足要求。

## 参 考 文 献

- 1 Tao Chuncan. Zoom Lens Design [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1988. 153-163.  
陶纯堪. 变焦距光学系统设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 1988. 153-163.
- 2 Wang Nanxi, Jiao Mingyin, Jiang Xiaobai, *et al.*. Calculation of initial configuration for 15 double-linkage infrared continuous zoom system [J]. Journal of Applied Optics, 2012, 33(4): 670-674.  
王楠茜, 焦明印, 姜霄白, 等. 15倍双组联动红外连续变焦系统的初始结构计算[J]. 应用光学, 2012, 33(4): 670-674.
- 3 Li Hongzhuang, Zhang Zhenduo, Cao Jingtai, *et al.*. Design of zoom optical system with long focal length and super-high zoom ratio [J]. Acta Photonica Sinica, 2012, 41(3): 358-363.  
李宏壮, 张振铎, 曹景太, 等. 长焦距超高倍率变焦距光学系统设计[J]. 光子学报, 2012, 41(3): 358-363.
- 4 Cai Wei, Zhang Xin, Feng Xiuheng, *et al.*. Compensating modes for zoom system [J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(9): 2063-2071.  
蔡 伟, 张 新, 冯秀恒, 等. 变焦距系统的变倍补偿方式[J]. 光学 精密工程, 2011, 19(9): 2063-2071.
- 5 Yan Lei, Jia Ping, Hong Yongfeng, *et al.*. Selection of cam curve for zoom lens [J]. Journal of Applied Optics, 2010, 31(6): 876-882.  
晏 蕾, 贾 平, 洪永丰, 等. 变焦距镜头凸轮曲线形式的选择[J]. 应用光学, 2010, 31(6): 876-882.
- 6 Wang Anke, Xu Hongbin, Yang Jianfeng, *et al.*. Application of visible video zoom system in the television-guided system [J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2010, 30(3): 41-43.  
王安科, 徐宏斌, 杨建峰. 变焦距光学系统在电视制导中的应用[J]. 弹箭与制导学报, 2010, 30(3): 41-43.
- 7 Zhang Liqin, Wang Yongtian, Li Lin. Method of determining Gaussian parameters for zoom systems with multiple moving lens groups [J]. Acta Optica Sinica, 2002, 22(5): 572-576.  
张丽琴, 王涌天, 李 林. 多组元全动型变焦距透镜高斯光学参数的求解方法[J]. 光学学报, 2002, 22(5): 572-576.
- 8 Li Hongzhuang, Zhao Yongzhi, Wang Guoqiang, *et al.*. Design of refractive optical system with large relative aperture and long focal length [J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(9): 2954-2958.  
李宏壮, 赵勇志, 王国强, 等. 大相对孔径长焦距折射式光学系统设计[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(9): 2954-2958.
- 9 Li Hongzhuang, Zhang Zhenduo, Liu Xinyue, *et al.*. Optical design of a wide spectral fish-eye lens [J]. Acta Photonica Sinica, 2012, 41(11): 1312-1313.  
李宏壮, 张振铎, 刘欣悦, 等. 一款宽光谱鱼眼镜头的设计[J]. 光子学报, 2012, 41(11): 1312-1313.
- 10 Lu Bo, Liu Weiqi, Kang Yusi, *et al.*. Design of all spherical surface zoom lithographic system [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(6): 0622001.  
吕 博, 刘伟奇, 康玉思, 等. 全球面变焦距光刻系统设计[J]. 光学学报, 2013, 33(6): 0622001.
- 11 Zheng Shaolin, Liu Yongji, Wang Zhaoqi, *et al.*. Design of optical system for novel imaging keratometer [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(5): 0522004.  
郑少林, 刘永基, 王肇圻, 等. 新型成像角膜曲率仪的光学系统设计[J]. 光学学报, 2013, 33(5): 0522004.

栏目编辑: 韩 峰