

doi: 10. 3788/gzxb20124103. 0358

长焦距超高倍率变焦距光学系统设计

李宏壮, 张振铎, 曹景太, 刘欣悦, 李洪文, 王建立

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

摘 要:为设计一套焦距 17~1 700 mm 的长焦距、超高倍率变焦距光学系统, 首先在合理选择初始结构基础上, 通过比较高斯光学计算结果找出高斯解对系统性能的影响规律, 从而确定系统的关键参量; 然后通过分析各组元相对孔径和像差特点选定结构形式, 并进行系统像差的校正和优化. 设计结果系统光学总长 760 mm, 各焦距位置全视场 50 lp/mm 处 $MTF > 0.3$, 各项指标满足系统要求.

关键词:变焦距镜头; 高斯光学计算; 光学设计

中图分类号: TH751

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2012)03-0358-6

0 引言

变焦距镜头通过焦距的连续变化使画面上的景物成像倍率连续的变化, 对目标既能作大视场小倍率的概观, 又能作小视场大倍率的详细观察, 因此在摄影、跟踪与测量等诸多领域得到广泛的应用^[1-2].

评价一个变焦距镜头的主要指标包括变倍比、长焦端焦距、相对孔径、视场角等. 而这些指标又与结构紧凑性以及成像质量间相互矛盾. 变焦距镜头光学总长的决定因素是长焦端焦距、相对孔径和变倍比. 其中变倍比越大, 变倍、补偿组的移动量越大, 其结果是镜头的长度越大. 另外几何像差随焦距成比例的增加, 尤其是二级光谱的校正, 成为影响长焦距物镜成像质量的重要因素. 因此设计结构简单紧凑、像质优良的长焦距、高倍率变焦距系统具有一定的难度^[3-6], 需要经过反复的高斯光学计算分析与像差优化^[7-8].

本文根据设备指标要求, 设计了一套焦距 17~1 700 mm, 变倍比 100 倍的长焦距、超高倍率变焦距物镜. 首先通过高斯光学计算, 找出不同高斯解对系统性能影响的规律, 从而选择合理的初始结构和高斯解, 然后分析各组元的相对孔径和像差校正的特点, 确定各组元的初始型式, 再对系统进行整体优化, 最终使系统的光学总长和成像质量都满足了要求.

1 光学参量指标

系统的主要设计指标如表 1, 可见该系统是一

个相对口径和视场角适中、焦距和变倍比很大的可见光变焦距成像系统.

表 1 光学系统指标

Table 1 Parameters of optical system

Parameter	Value
Wavelength/nm	486~656
Zoom ratio	100
Focal length /mm	17~1 700
F/#	8~17
Image size(diagonal)/mm	8
Field of view(°)	26.48~0.269
Max aperture/mm	100
Overall length/mm	<800
Relative illumination/%	>50
MTF of all fileds (50 lp/mm)	>0.3
Near object distance/m	20

2 光学系统设计

2.1 形式选择与高斯光学计算

变焦距系统按像面补偿方式不同分为光学补偿和机械补偿两种, 光学补偿方式由于像面不能完全补偿、结构尺寸大、变倍比小等缺点而逐步被机械补偿方式所取代. 机械补偿方式按照技术指标要求不同, 可以有两组式、三组式、四组式甚至五组式, 其中四组式是当今最流行的典型结构. 四组式机械补偿方式按照补偿组光焦度的正负又分为负组补偿、正组补偿方式. 负组补偿的特点是短而粗, 但二级光谱和光阑球差都较大, 难以用于较高变倍比的系统中; 正组补偿的特点是细而长, 前其固定组焦距较长, 产生的二级光谱较小, 且补偿曲线单调, 因此适于长焦

距大倍率的系统. 正组补偿方式又分为换根和不换根两种,其中换根方式能够在较小的空间内实现较高的变倍比,对于变倍比的增加效果非常明显,因此本系统选择换根正组补偿方式. 正组补偿变焦距系统的结构如图 1 所示,其中 φ_1 、 φ_2 、 φ_3 、 $\varphi_{4,1}$ 、 $\varphi_{4,2}$ 分别表示前固定组、变倍组、补偿组、后固定前组、后固定后组的光焦度, d_{12} 、 d_{23} 、 d_{34} 表示其间隔、 $f_{4,2'}$ 为后固定后组焦距,s、m、l 分别表示短焦、中焦、长焦位置. 下面通过高斯光学计算确定系统的关键参量.

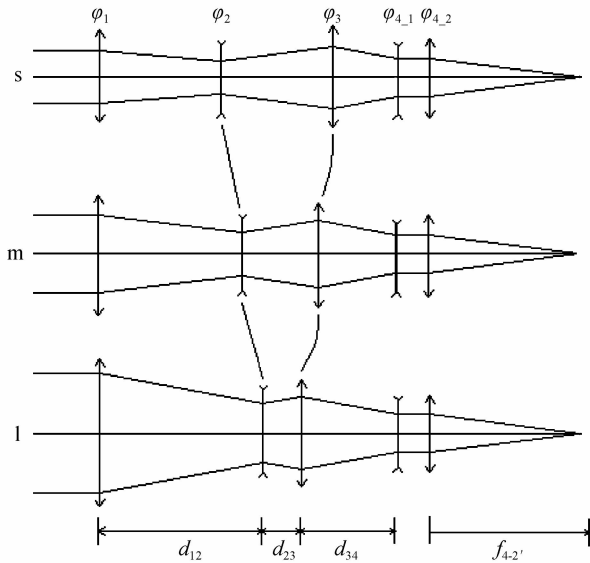


图 1 正组补偿变焦距系统示意图
Fig. 1 Diagram of zoom system with positive compensation

变焦距系统高斯光学计算的任务是根据系统的焦距范围、外形尺寸等要求,确定系统中各个组元的焦距、间隔、倍率等,从而讨论系统是否有解、补偿曲线是否合理等全局性问题,对系统的性能具有本质的影响,是变焦距系统设计的基础. 而其核心任务是选择变倍组在长焦时的倍率 m_2l 和补偿组的焦距 f_3' ,使系统在满足变倍比前提下,达到结构尺寸与像差校正难度之间的平衡.

为此我们选择不同的 m_2l 、 f_3' 参量进行计算,由于 m_2l 确定后, f_3' 往往受到变倍和补偿组最小间隔的限制而不再是独立的变量,因此主要考察不同 m_2l 对应高斯解的性能,也即系统的选段问题. 而系统性能的评价主要从结构尺寸、补偿曲线、像差校正等方面考虑,具体包括以下几点:

1) 系统总长: 由于后固定前组和后组之间为平行光,因此系统总长由式(1)表示

$$OAL = d_{12} + d_{23} + d_{34} + f_{4,2'} \quad (1)$$

2) 变倍组移动量 q_2 和补偿组移动量 Δ : 由于采用换根补偿方式,令换根点 ($m_2l = m_3l = -1$) 处 $q_2 = 0$ 、 $\Delta = 0$; 越过换根点向下选段时 q_2 和 Δ 取负值,向上选段时取正值.

3) 后固定组倍率绝对值 $|m_4|$: $|m_4|$ 大,物镜的尺寸可以减小,但后组焦距短,像差校正困难.

4) 各组元相对孔径: 为了更加准确地表示各组元在不同焦距位置的相对孔径及其变化,我们采用孔径图方法^[1],即将各组元轴上边缘光线高度 h 和轴外主光线高度 h_p 分别除以其焦距,作为该组元在孔径图上的纵坐标和横坐标. 曲线上每点与原点的距离能够全面地表示该组元所承担的像差情况.

为找出不同高斯解对系统性能的影响规律,进行了反复计算,下面列出其中典型的四组结果,设变倍组焦距为归一化值,即 $f_2' = -1$. 变倍组焦距直接影响系统尺寸,同时对各组元相对孔径及系统像差校正影响也很大,仅通过高斯计算不容易确定,往往需要进入像差校正阶段根据设计的难易程度反复试验,本系统中最终选择 f_2' 实际值为 45 mm.

高斯解 1: $m_2l = -3$; $f_3' = 3.05$; $OAL = 15.27$; $|m_4| = 0.88$; $q_2 = -0.67 \sim 4.84 = 5.51$; $\Delta = -2.79 \sim 2.03 = 4.82$;

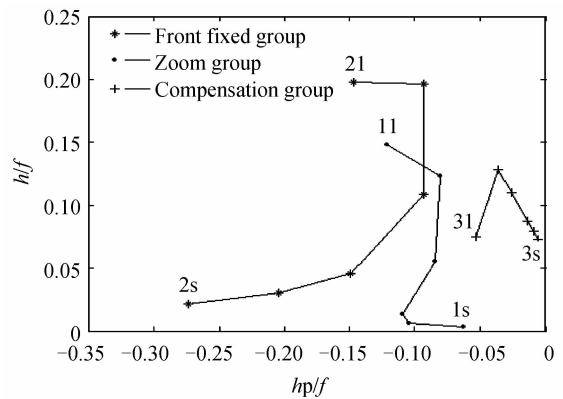


图 2 孔径图 1
Fig. 2 Aperture curve 1

高斯解 2: $m_2l = -2.5$; $f_3' = 2.65$; $OAL = 14.87$; $|m_4| = 1.04$; $q_2 = -0.6 \sim 5.5 = 6.1$; $\Delta = -2.06 \sim 1.89 = 3.95$;

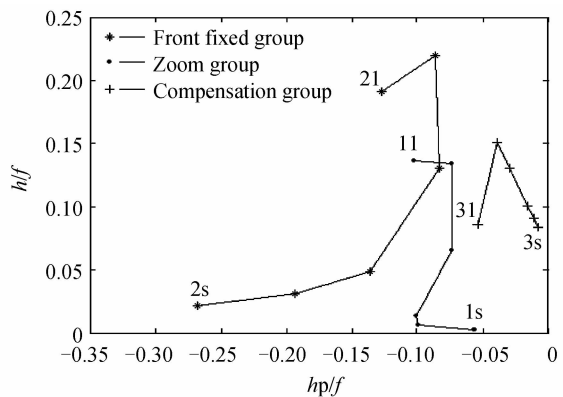


图 3 孔径图 2
Fig. 3 Aperture curve 2

高斯解 3: $m_2l = -2$; $f_3' = 2.25$; $OAL = 14.73$; $|m_4| = 1.31$; $q_2 = -0.5 \sim 6.42 = 6.92$; $\Delta = -1.34 \sim$

1.72=3.06;

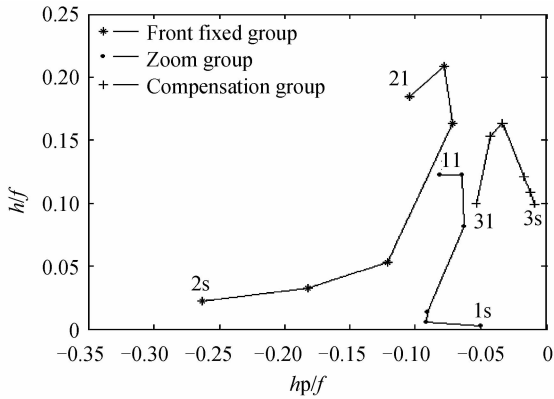


图 4 孔径图 3

Fig. 4 Aperture curve 3

高斯解4: $m_2 l = -1.5$; $f_3 = 1.81$; $OAL = 14.84$;
 $|m_4| = 1.79$; $q_2 = -0.33 \sim 7.78 = 8.11$; $\Delta = -0.64 \sim$
 $1.49 = 2.13$;

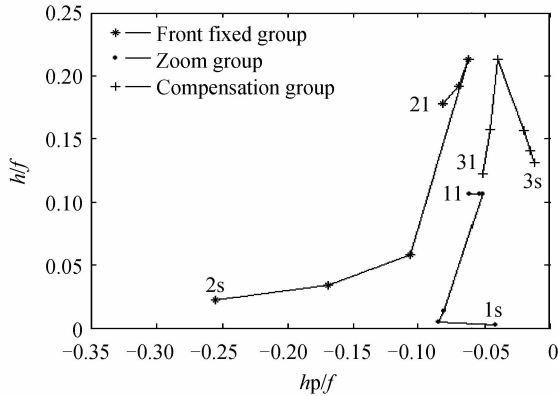


图 5 孔径图 4

Fig. 5 Aperture curve 4

由以上结果和孔径图可以看出:

1) 由于系统变倍比很大, 变倍组和补偿组移动量不可避免地都较大, 但在换根点之前 ($m_2 l > -1$) 变倍组移动量大, 而补偿组只做少量移动; 越过换根点向下 ($m_2 l < -1$), 变倍组移动量不大即可实现焦距的迅速增加, 但这时补偿组移动量很大. 因此当 $m_2 l$ 分别取得过于偏上或偏下时都将使系统总长增加.

2) 如果 $m_2 l$ 偏向下选段, 将使前固定组焦距减小, h/f' 和 h_p/f' 都增加; 变倍组 h/f' 减小, h_p/f' 增加; 补偿组焦距增加相对孔径减小, 主要是 h/f' 减小; 同时后固定组倍率 $|m_4|$ 减小, 利于像差的校正; 但补偿组移动量迅速增大, 凸轮曲线陡度增加.

3) 如果 $m_2 l$ 偏向上选段, 则将使前固定组焦距增加, h/f' 和 h_p/f' 都减小, 从而使二级光谱减小; 变倍组 h/f' 增加, h_p/f' 减小; 由于 $|m_2 l|$ 的减小, 长焦时变倍组距前固定组更近, 轴上边缘光线在变倍组上的高度增高, 经过变倍组发射后, 引起补偿组上的高度迅速增加, 使其承担的像差加大; 同时导致后

固定组倍率 $|m_4|$ 也迅速增大, 不利后固定组的设计.

为在总长较短下保证前固定组、变倍、补偿组相对孔径不大, 后固定组倍率适中, 并且补偿曲线陡度合适, 我们折衷选择了高斯解 2.

2.2 各组元设计与系统优化

1) 前固定组

前固定组像差校正的特点是长焦时轴上光线高度最高, 而短焦时轴外光线高度较高, 因此长焦的球差和正弦差, 以及长、短焦的象散、畸变和轴外球差都很大, 另外前固定组产生的二级光谱最大. 对于此系统, 由图 3 中的孔径图可知, 前固定组的相对孔径不大, 因此采用双单结构, 并将双胶合分离, 利用其空气间隔和半径差对像差进一步校正. 同时由于系统焦距很长, 必须尽量减小二级光谱, 因此两块正元件采用 FK 特殊材料, 如图 6 所示.

2) 变倍组

变倍组长焦时轴上光线高度高, 相对孔径大, 球差、正弦差及其高级量较大, 短焦时轴外光线高度高, 象散较大. 由孔径图可见, 本系统中由于长焦端系统 F 数变为 17, 因此变倍组 h/f' 最大位置为次长焦, 约为 0.22, 短焦端的 h_p/f' 约为 0.27, 都不是很大, 但由于变倍组移动量很大, 为减小系统的色差, 必须对该组元色差更好的校正, 因此采用双双结构, 如图 7. 为了同时降低高级正球差和高级正象散, 将第二块双胶合透镜的折射率差降低, 并均采用高折射率的材料.



图6 前固定组结构
Fig.6 Front fixed group

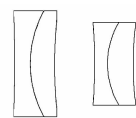


图7 变倍组结构
Fig.7 Zoom group

3) 补偿组

正组补偿的补偿组在长焦时相对孔径最大, 重点校正此时的球差和正弦差, 由于其处在光阑附近, 轴外光线高度不高, 因此像散和畸变不大. 同样由于本系统长焦端相对孔径减小的原因, 补偿组 h/f' 最大位置在次长焦, 但仅为 0.15, h_p/f' 则更小. 因此结构相对简单, 仅用一块双胶合透镜即可, 如图 8.



图 8 补偿组结构
Fig. 8 Compensation group

4) 后固定组

后固定组起着保证系统焦距、缩短总长、校正前

面各组剩余像差的作用,分为前组和后组,二者之间为平行光,便于安装滤光片、衰减片等.其中前组靠近光阑,像散和畸变几乎为定值,主要校正球差和正弦差.本系统中前组采用一块双胶合透镜,并采用特殊材料 TF 玻璃进一步校正二级光谱;后组主要校正前面各种剩余的正象散,因此为产生较大的负象散,后组采用三块分离较远的单透镜,并且后面两块正、负透镜的折射率差很大,如图 9 和 10 所示.

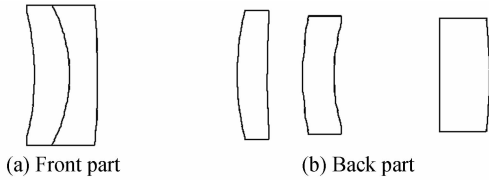


图 9 后固定组
Fig. 9 Configuration of back fixed group

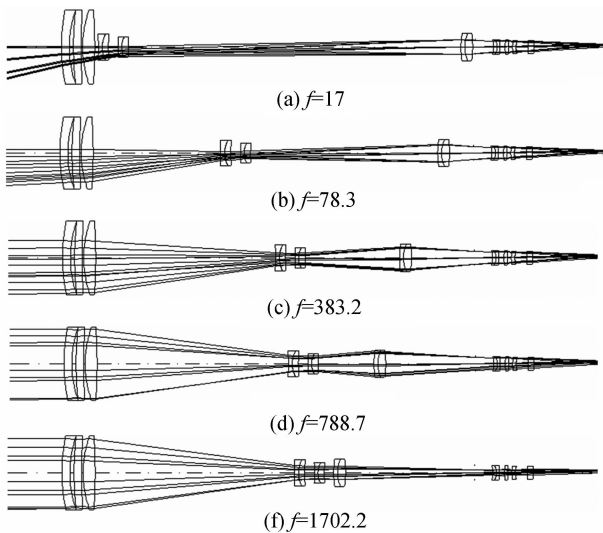


图 10 不同焦距时光学系统结构
Fig. 10 Zoom lens layout with different focal length

5) 系统优化

将各个组元按照高斯光学计算的间隔连接起来进行系统优化,约束条件包括各组元的焦距、各组元在各焦距位置时的主面间隔、系统总长及透镜最小厚度等.当保证了各组元焦距和主面间隔后,系统的倍率、焦距和后固定前、后组之间出射光束平行都将自动保证.

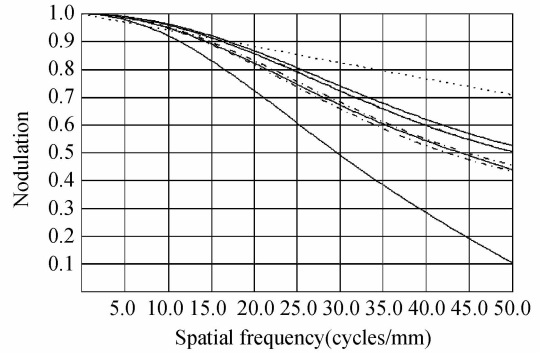
2.3 设计结果

光学系统结构如图 10 所示.系统参量如下:

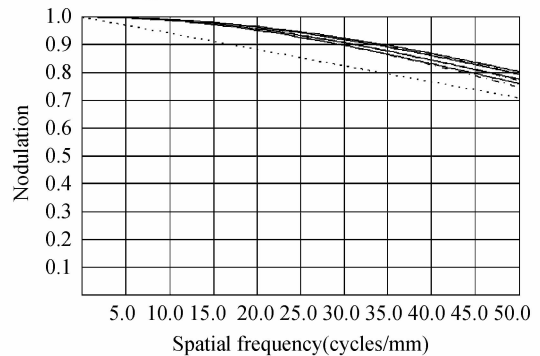
- 变倍组导程:274.5 mm;
- 补偿量:177.5 mm;
- 后工作距离:99.6 mm;
- 前片到后片:660.4 mm;
- 光学总长:760 mm;
- 前片口径:100mm;

后片口径:16.4 mm;

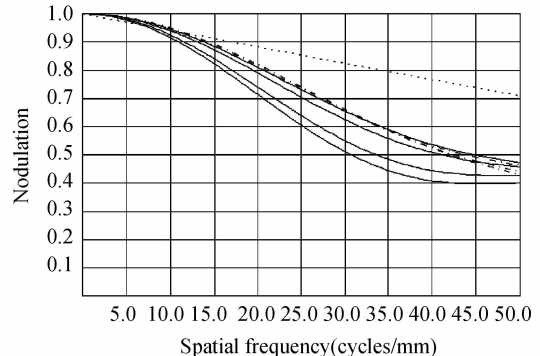
各焦距位置 50 lp/mm 处,全视场子午、弧矢平均 MTF 均达到 0.3 以上,如图 11 所示.最大渐晕发生在系统的长焦端,此时边缘视场照度约为中心视场的 64%,满足指标要求.



Axis	Wavelength	Weight
T	656.3mm	1
R	656.3mm	1
T	587.6mm	1
R	587.6mm	1
T	486.1mm	1
R	486.1mm	1



Axis	Wavelength	Weight
T	656.3mm	1
R	656.3mm	1
T	587.6mm	1
R	587.6mm	1
T	486.1mm	1
R	486.1mm	1



Axis	Wavelength	Weight
T	656.3mm	1
R	656.3mm	1
T	587.6mm	1
R	587.6mm	1
T	486.1mm	1
R	486.1mm	1

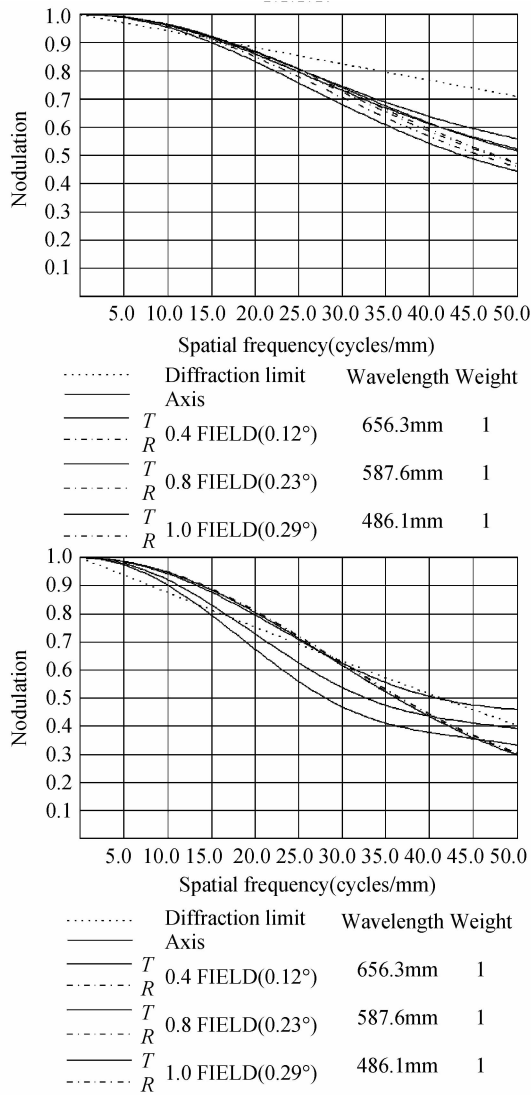


图 11 各焦距位置系统传函
Fig. 11 MTF of zoom lens with different focal length

图 12 是凸轮转角与变倍组移动量成线性关系时的变倍补偿曲线,可见变倍组和补偿组移动曲线平滑,没有明显跳动点.

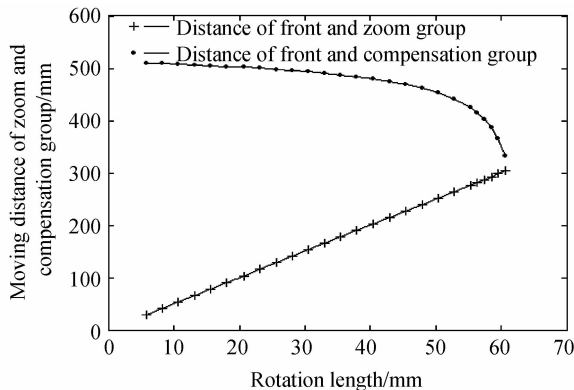


图 12 变倍补偿曲线
Fig. 12 Zoom and compensation curve

2.4 近摄调焦

当最近物距为系统长焦的 7 倍以上时,采用前固定组调焦即可,而本系统要求近摄距离 20m,大于

7 倍的长焦,因此将前固定组作为调焦组,调焦量为

$$\delta = \frac{1}{2} \times [-(l + f'_1) + \sqrt{(l + f'_1)^2 - 4f'_1^2}] \quad (2)$$

式中 l 为前固定组前主面与物面距离, f'_1 为前固定组焦距. 当物距由无穷远向近距离移动时,前固定组相对后面的镜组向前移动,移动量见表 2.

表 2 调焦量

Table 2 Defocus adjustment

Object distance/m	Adjust distance/mm
∞	0
100	1.35
50	2.70
40	3.38
30	4.52
20	6.82

3 结论

本文设计了一套焦距 17~1 700 mm 的 100 倍变焦距光学系统. 文中对设计的主要过程,从初始结构选择、高斯光学计算到各组元结构确定、系统优化设计及结果都做了较详细的介绍,设计的系统结构简单,尺寸和成像质量等均满足要求.

参考文献

[1] 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] TIAN Hai-xia, YANG Jian-feng, MA Xiao-long. Design for visible video zoom optical system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(9): 1797-1799.
 田海霞, 杨建峰, 马小龙. 可见光变焦距电视光学系统设计[J]. *光子学报*, 2008, **37**(9):1797-1799.
 [3] FENG Xiu-heng. The miniaturization of zoom with long focal length and big zooming ratio[J]. *Optical Mechanics*, 1992 (5):12-16.
 冯秀恒. 长焦距大倍率变焦距物镜的小型化[J]. *光学机械*, 1992(5):12-16.
 [4] LIU Xiao-min. The design of high resolution zooming lens[J]. *Journal of Applied Optics*, 1993, **14**(4): 5-11.
 刘肖民. 高倍率高分辨率变焦距镜头设计[J]. *应用光学*, 1993, **14**(4):5-11.
 [5] HU Ji-xian. Design of long focal length large-aperture optical zoom system[J]. *Journal of Applied Optics*, 2007, **28**(5): 569-572.
 胡际先. 长焦距大口径连续变焦光学系统的设计[J]. *应用光学*, 2007, **28**(5):569-572.
 [6] LIU Feng, XU Xi-ping, SUN Xiang-yang. Design of high zoom ratio thermal infrared zoom optical system[J]. *Journal of Applied Optics*, 2009, **30**(6): 1020-1023.
 刘峰, 徐熙平, 孙向阳. 高变焦比红外变焦距光学系统设计[J]. *应用光学*, 2009, **30**(6):1020-1023.
 [7] LI Xiao-tong, HE Guo-xiong. Research of optimization design for zoom lens Gaussian parameters[J]. *Journal of Zhejiang University*, 1993, **27**(1): 122-127.
 李晓彤, 何国雄, 变焦距系统高斯解优化的研究[J]. *浙江大学学报*, 1993, **27**(1):122-127.
 [8] YAN Lei, JIA Ping, HONG Yong-feng, 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.
- [9] WANG An-ke, XU Hong-bin, YANG Jian-feng, *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.
- [10] CHEN Ke, ZHOU Si-zhong, ZHANG Heng-jin. Design of a short focal-length zoom system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(12): 1825-1828.
- 程珂, 周泗忠, 张恒金. 短焦距变焦物镜设计[J]. 光子学报, 2005, **34**(12):1825-1828.
- [11] ZHANG Li-qin, WANG Yong-tian, 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量的求解方法[J]. 光学学报, 2002, **22**(5):572-576.

Design of Zoom Optical System with Long Focal Length and Super-high Zoom Ratio

LI Hong-zhuang, ZHANG Zhen-duo, CAO Jing-tai, LIU Xin-yue, LI Hong-wen, WANG Jian-li
(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: In order to design an optical system with focal length range from 17 to 1 700 mm, a proper initial optical layout is selected first, the rule of system performance influenced by Gaussian solution is found through comparing Gaussian optical calculation results, and the key parameters of the system are selected. Then the configuration of each assembly is chosen through analyzing the relative aperture and characteristics of aberrations, and the system aberration is corrected and balanced. The total track of the result lens is 760 mm, the modulation transfer functions at 50 lp/mm for each zoom configurations and all fields of view are greater than 0.3, and all indexes satisfy the command of system.

Key words: Zoom lens; Gaussian optical calculate; Optical design