

## 大口径折反式三组元连续变焦距光学系统设计

李宏壮, 赵勇志, 马鑫雪, 于树海, 殷丽梅

(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:** 采用一种新的结构形式对口径 1.2 m、焦距 2~6 m、相对孔径 1/1.67~1/5 的可见/近红外波段连续变焦距望远镜进行了设计。为适应目前地基大口径望远镜总体结构形式的需要, 前端主系统采用 Cassegrain 反射式结构, 后端采用三组元机械补偿变倍形式, 使结构更加简洁。在高斯光学计算、像差分析基础上对各组元初始结构选择, 并进行整体优化。设计结果各项性能指标均满足要求, 且结构紧凑、补偿曲线平滑, 表明这种结构形式是大口径连续变焦距望远镜一种较好的光学解决方案。

**关键词:** 折反式; 连续变焦距; 光学设计

**中图分类号:** TH751 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)10-3037-06

## Design of large aperture catadioptric three group continuous zoom optical system

Li Hongzhuang, Zhao Yongzhi, Ma Xinxue, Yu Shuhai, Yin Limei

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

**Abstract:** A new structure is adopted to design a visible and near infrared large aperture telescope with 1.2 m diameter, 2–6 m focal length, and 1/1.67–1/5 relative aperture. For meeting the requirement of modern ground–base large telescope, the front primary system using Cassegrain reflective form. And the back part uses three group mechanical compensation zoom refractive system, which makes the structure more simple and compact. Based on Gauss optics calculation and analysis of aberration, the initial form of each group was determined, and the whole system was optimized subsequently. The design results show that all of the optical indexes satisfy the command of the system, and the structure was compact, the compensation curve was smooth. The design demonstrates that the form is an effective optical structure for large aperture continuous zoom telescope.

**Key words:** catadioptric; continuous zoom system; optical design

收稿日期: 2015-02-05; 修订日期: 2015-03-15

作者简介: 李宏壮(1980-), 男, 副研究员, 博士, 主要从事光学设计、红外系统主动光学等方面的研究。

Email: longquanwanfa@163.com

## 0 引言

大口径望远镜具有集光能力强、分辨率高、焦距长的特点,可对远距离目标进行观测记录,因此在地面观察测量系统中被广泛采用。传统地基大口径望远镜的变焦形式多为切换式,无法完成视场和分辨率的连续变化,且切换过程中目标易丢失。如果大口径望远镜具有连续变焦能力,则可兼顾大口径和连续变焦系统的优点,根据不同目标和环境达到最佳观测效果,可以显著提高观测效率<sup>[1]</sup>。

目前报道的折反射变焦系统,有的前端采用牛顿式望远物镜,无法满足现代地面观测大口径望远镜的结构需求,并且变倍过程中,由于系统的通光口径变化,短焦时系统的通光口径减小,无法充分利用大口径望远镜的集光能力和分辨率优势;有的后端变倍补偿组采用四组元形式,使系统结构复杂、体积增大,增加了实现的难度。

文中采用了一种新的结构形式对大口径连续变焦望远镜进行设计。为适应目前地基大口径望远镜总体结构形式的需要,前端主系统采用 Cassegrain 反射式结构,后端采用三组元机械补偿变倍系统,使结构更加简单、紧凑。使用这种结构形式设计了口径 1.2 m、焦距 2~6 m、相对口径 1/1.67~1/5 的可见/近红外波段连续变焦距光学系统。

## 1 设计指标要求

根据系统总体性能要求,望远镜应同时具有大范围目标搜索和详细观测记录的功能,为充分利用了望远镜主镜口径、保证集光能力和空间分辨率,系统要求各焦距位置均全孔径成像。为此提出了光学设计指标要求如表 1 所示。

表 1 光学系统指标

Tab.1 Parameters of optical system

Parameter	Value
Focal length/mm	2 000~6 000
$D/f$	1/1.67~1/5
Field of view/(°)	0.335°~0.114°
Wavelength/nm	500~800
Back work distance/mm	>50
Pixel size/ $\mu\text{m}$	10×10
Pixel number	1024×1024

## 2 设计过程和结果

### 2.1 前端反射式系统

大口径望远镜的光路形式主要包括 Gregorian、Cassegrain、Newtonian、Schmidt、Maksutov 等<sup>[2-3]</sup>,由于 Cassegrain 形式结构紧凑,中心遮拦小,是现代地基大型望远镜最常用的形式。因此系统整体结构选用前端 Cassegrain 主系统、后接折射式连续变倍系统实现望远镜的连续变焦功能。系统采用二次成像方式,方便其他焦点的应用,同时可以通过在第一像面位置安装视场光阑,地对杂光进行抑制。

由于为前端主系统为反射式,不产生色差,减轻了后端折射系统色差和二级光谱校正压力<sup>[4-5]</sup>。设计中根据结构尺寸、遮拦比、加工难度,并考虑其他焦点位置的应用要求,使 Cassegrain 主系统焦距为  $f_0=15\,000\text{ mm}$ ,其中主镜为抛物面,次镜为双曲面,中心线遮拦为 0.2,主次镜间隔为 1 450 mm。结构如图 1 所示,通过两块平面反射镜将第一像面导到 Bent Cassegrain 焦点位置,可通过旋转切换到其他焦点位置。主系统成像质量如图 2 所示,在  $0.05^\circ$  视场范围内成像质量达到衍射极限,便于其他焦点的应用,并方便装调。

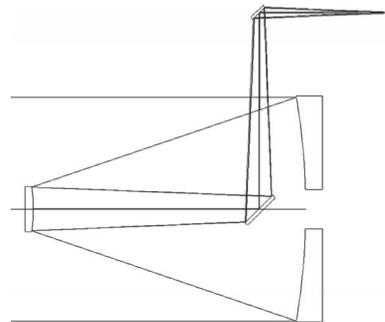


图 1 主系统光学结构

Fig.1 Primary optical system

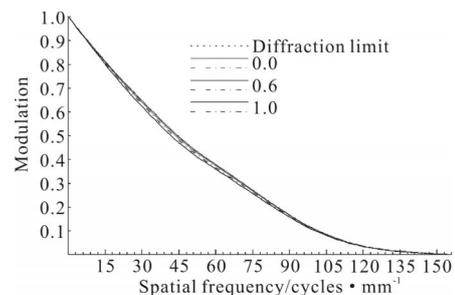


图 2 第一像面传递函数

Fig.2 MTF of first image plane

### 2.2 折射式变倍系统

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,不符合需求。机械补偿方式有两组式、三组式、四组式甚至五组式。其中三组式在变倍比小于 5、相对口径和视场角适中的要求下,可使结构更加简单、紧凑。

由于该系统要求焦距连续变化,采用机械补偿形式,为使结构简单紧凑,采用正组补偿三组式结构。固定组放在前面,为变倍、补偿组提供一个稳定的物面。变焦核采用负光焦度的变倍组和正光焦度的补偿组,利用变倍组实现系统倍率的连续变化,利用补偿组补偿像面偏移。由物象共轭距离恒定求解出变倍补偿曲线<sup>[6-7]</sup>。

为了将主系统与变倍系统合理衔接,在第一像面后增加一块场镜,用于将光束准直,并对轴外视场光线高度进行控制,以减小后面元件的尺寸。通过场镜对光束准直后,后端即可按照一定口径、焦距、视场角的三组式连续变倍系统进行设计。

变倍系统设计中,首先以系统总长、像差校正难度及补偿曲线合理性为标准,对高斯光学参数进行选择。由于系统变倍比不大,因此选择不换根的高斯解。经过反复计算,最终确定变倍组倍率为-0.31~-0.244,补偿组倍率为-0.9~-0.38;场镜焦距 390 mm,前固定组焦距 465 mm,变倍组焦距-90 mm,补偿组焦距 75 mm;变倍组导程 80 mm,补偿量 38 mm。

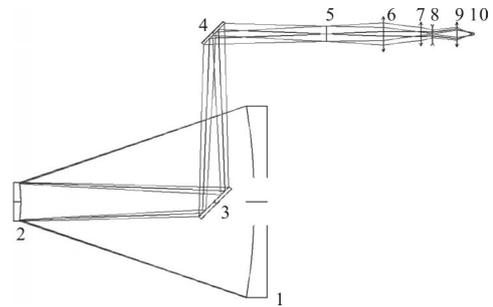
系统高斯光学结构如图 3 所示,图中,1-主镜;2-次镜;3-三镜;4-四镜;5-第一像面;6-场镜;7-前固定组;8-变倍组;9-补偿组;10-像面。变倍补偿曲线见图 4,变倍过程中系统焦距变化曲线见图 5。可见补偿曲线平滑,易于实现,焦距变化合理。

高斯光学计算完成后进行各组元初始结构设计。场镜的作用主要是将光束准直,并控制轴外光线高度。由于轴上光线在场镜上的高度低,因此其对球差影响很小,并且场镜的口径较大,约 125 mm,因此采用一块单透镜,并使其弯向第一像面。

由高斯计算,光束经过场镜后为平行光,后面变倍系统焦距为 50~150 mm,口径 30 mm,视场角 4.4°~12.8°。可以看出,由于场镜对轴外光线的压缩,使变倍系统的视场角不大,但系统短焦端相对口

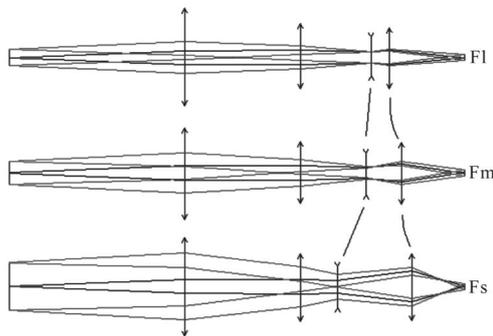
径很大,因此设计中应重点对短焦位置轴上像差进行校正<sup>[8-10]</sup>。

前固定组用于为变倍、补偿组提供一个稳定的物面,短焦端轴外光线在前固定组上的高度较高,但由于其焦距较长,承担的相对口径不大,因此采用一块双胶合透镜,并且由于前固定组产生的二级光谱对系统影响较大,因此其中的负元件采用了特殊色散材料 TF3。变倍组在各焦距位置轴上、轴外光线高度都不高,因此采用一块胶合透镜,为了降低胶合面



(a) 系统近轴光路

(a) Paraxial optical structure of system



(b) 折射变倍系统近轴光路

(b) Paraxial optical structure of refractive zoom system

图 3 高斯光学结构

Fig.3 Gauss optics structure

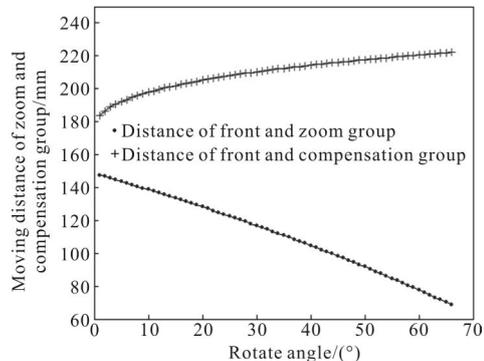


图 4 补偿曲线

Fig.4 Compensation curve

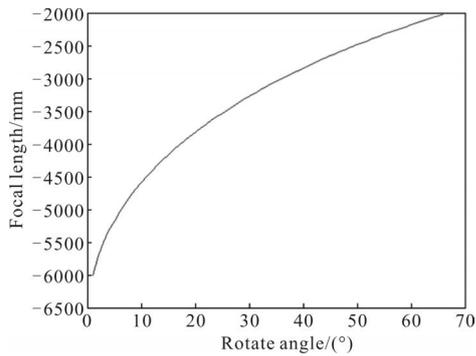


图 5 系统焦距变化曲线

Fig.5 Focal length change curve

产生的高级球差和正弦差, 两侧选择具有较大折射率差和色散系数差的材料, 以加大胶合面半径。由于系统短焦端相对口径很大, 而补偿组位于光路后部, 轴上光线高度较高, 同时补偿组焦距较短, 承担的相对孔径很大, 因此对其复杂化设计对像差校正十分重要, 最终补偿组结构设计为 3 片单透镜和 1 片双胶合透镜, 并通过一块厚弯月形透镜对场曲进行了校正。另外为校正二级光谱, 采用了一块特殊色散玻璃 FK51。

如图 6 所示, 系统中除了上述两块元件为特殊材料 TF3 和 FK51 外, 其余均采用国产普通玻璃, 包括 ZK7、QK3、LAF3、ZBAF3、ZF52 及 LAF7。

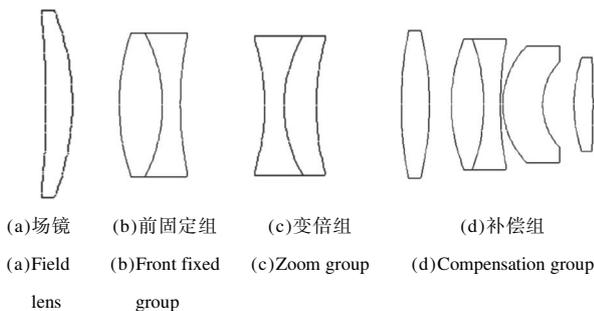


图 6 各组元结构图

Fig.6 Structure of each group

各组元初始结构选定后, 按照高斯计算得到的间隔组合起来进行整体优化, 优化过程中控制各组元焦距及主面间隔, 并对系统总长约束。最终得到光学结构如图 7、8 所示, 系统第一像面至相机靶面总长 970 mm, 最短后工作距离(短焦时)53 mm。

系统像差曲线和传递函数如图 9、10、11 所示, 由于短焦端视场最大, 因此短焦端边缘视场畸变也最大, 为 3.6%。长焦端边缘视场相对照度较高, 短

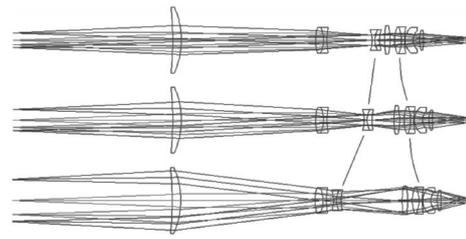


图 7 折射式变倍系统光路

Fig.7 Structure of refractive zoom system

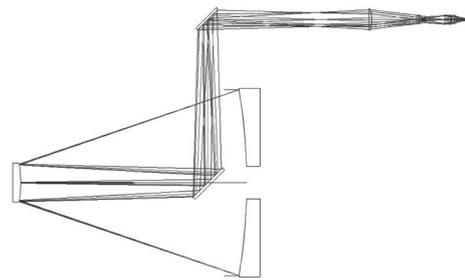
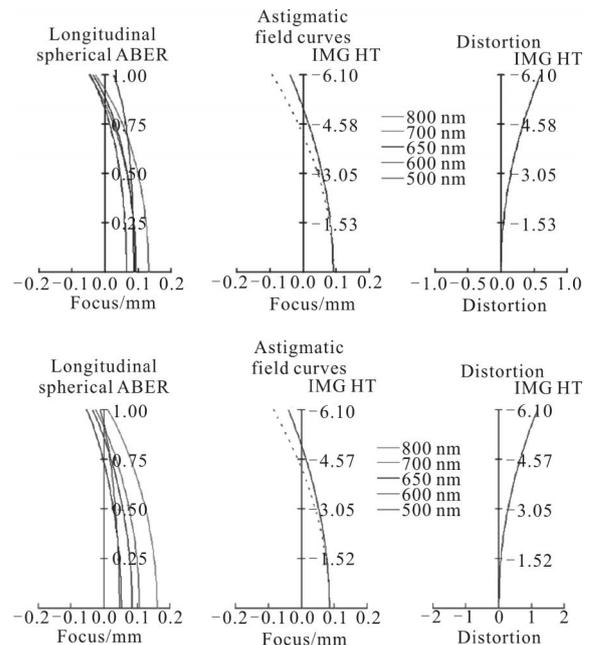


图 8 系统整体结构

Fig.8 Whole structure of system

焦端边缘视场相对照度为 84% ; 各焦距位置在 50 lp/mm 处轴上视场 MTF>0.5, 边缘视场 MTF>0.3, 具有较好的成像质量, 各项性能指标满足要求。

由于系统各焦距位置均全口径使用, 当焦距在 2~6 m 变化时, 相对孔径将从 1/1.67~1/53 倍变化, 由于像面照度与相对孔径成平方关系, 变焦过程中像面照度将产生 9 倍变化, 因此系统需要具有光学或电子学调光功能。



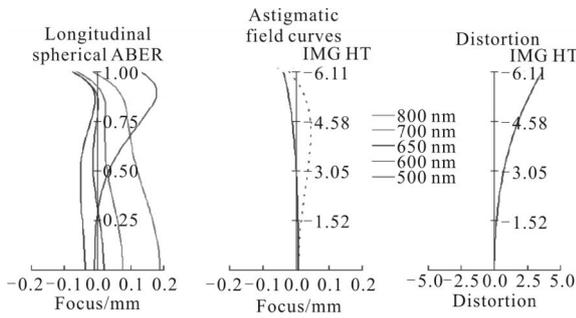


图 9 各焦距位置像差曲线

Fig.9 Aberration curve of each zoom position

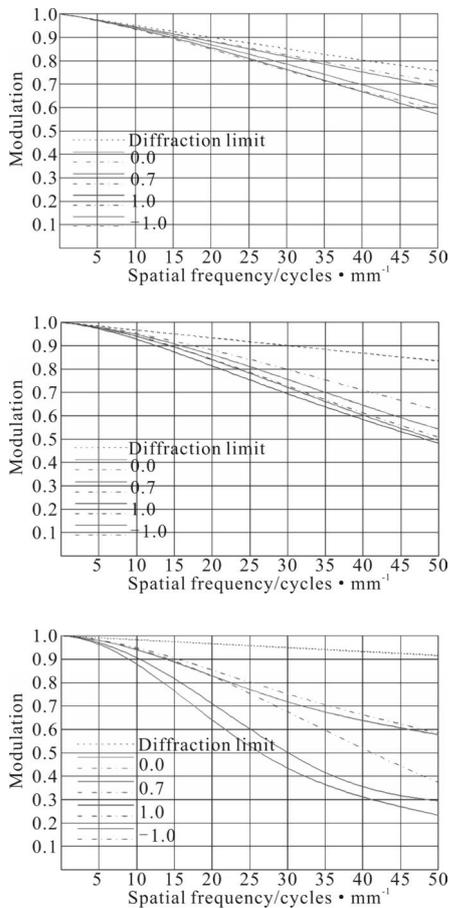


图 10 各焦距位置系统传函

Fig.10 MTF curve of each zoom position

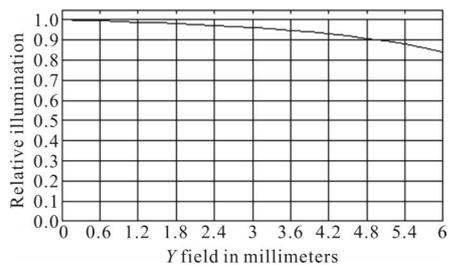


图 11 f2000 位置相对照度曲线

Fig.11 Relative illumination curve of f2000

通过对系统公差分析得出,对于前端反射系统,除对反射镜面形精度要求较高外,对于主、次镜之间的相对倾斜要求也较为严格,应达到  $10''$ ;对于后端折射系统,由于系统波段较宽,且相对孔径较大,因此对材料的折射率精度要求较高,可以采用实测的方法放宽对材料的要求。

### 3 结论

文中采用了一种新的结构形式对口径 1.2 m,焦距 2~6 m 的可见/近红外波段望远镜大口径连续变焦距望远镜进行设计。前端采用的 Cassegrain 反射式主系统更符合目前地基大口径望远镜总体结构形式的需要,后端采用三组元机械补偿变倍系统使结构更加简单、紧凑。设计结果系统结构尺寸合理、成像性能优良,各项指标均满足要求,表明这种结构形式是大口径连续变焦距望远镜一种较好的光学解决方案。

### 参考文献:

- [1] Tao Chunkan. Zoom Lens Design [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1988: 153-163. (in Chinese)  
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 Peng, Zhao Wencai, Hu Mingyong, et al. Design of catadioptric large aperture three group elements infrared zoom system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, 22(5): 577-581. (in Chinese)  
王鹏, 赵文才, 胡明勇, 等. 折反式大口径三组元红外变焦距系统设计[J]. *光学学报*, 2002, 22(5): 577-581.
- [3] Xu Weicai, Huang Wei. Innovated lens design for catadioptric zoom system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(6): 0622005-1-5. (in Chinese)  
许伟才, 黄玮. 新型折反射式连续变焦系统设计 [J]. *光学学报*, 2011, 31(6): 0622005-1-5.
- [4] Cui Jicheng. Design of large aperture refractive-reflective zoom lens[J]. *Optical Engineering*, 2008, 16(11): 2087-2091. (in Chinese)  
崔继承. 大口径折反射式变焦距物镜的设计 [J]. *光学精密工程*, 2008, 16(11): 2087-2091.
- [5] Jiang Kai, Zhou Sizhong, Duan Jing, et al. Design of catadioptric middle infrared continuous zoom lens for uncooled infrared detector[C]//SPIE. 2011, 8193: 8193.
- [6] 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. (in Chinese)
- 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.
- [7] Li Hongzhuang, Zhang Zhenduo. Design of 20 × double-linkage continuous zoom optical system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(2): 0222003. (in Chinese)
- 李宏壮, 张振铎. 20 倍双组联动变焦距光学系统设计[J]. 光学学报, 2015, 35(2): 0222003.
- [8] Hu Jixian. Design of long focal length large-aperture optical zoom system [J]. *Journal of Applied Optics*, 2007, 28(5): 569–572. (in Chinese)
- 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.
- [9] Feng Xiuheng. The miniaturization of zoom with long focal length and big zooming ratio [J]. *Optical Mechanics*, 1992(5): 12–16. (in Chinese)
- 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.
- [10] 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. (in Chinese)
- 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.
- [11] Li Hongzhuang, Zhao Yongzhi, Wang Guoqiang, et al. The design of refractive optical system with large relative aperture and long focal length [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(9): 2954–2958. (in Chinese)
- 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.