

# 新型折反射式连续变焦系统设计

许伟才<sup>1,2</sup> 黄 玮<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

<sup>2</sup>中国科学院研究生院, 北京 100049

**摘要** 针对长焦距、折反射式连续变焦望远系统的设计, 提出了一种新的光学结构形式。该结构形式将可变光阑放置于球面主反射镜附近, 避免了在变焦部分中使用浮动的可变光阑; 然后利用二次成像结构和场镜减小变焦组元的径向尺寸, 系统变焦部分仅包含变倍组与补偿组, 无需前固定组与后固定组, 同时无需使用特种光学材料校正二级光谱, 极大降低了系统变焦部分的复杂程度。利用该光学结构形式对一台焦距 600~3000 mm、最大口径 300 mm、工作在可见光波段的变焦望远系统进行优化设计, 该系统在 60 lp/mm 的调制传递函数(MTF)设计值在所有焦距和视场内均大于 0.3。设计结果表明该系统像质良好、制造成本低, 适用于工作在可见光波段的长焦距、变焦成像光学系统。

**关键词** 光学设计; 变焦距光学系统; 二次成像; 折反射; 二级光谱

**中图分类号** TH74 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.0622005

## Innovated Lens Design for Catadioptric Zoom System

Xu Weicai<sup>1,2</sup> Huang Wei<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China)

<sup>2</sup>Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** A new lens designed for the long focal length, catadioptric zoom telescope is presented. By setting the variable diaphragm near the primary mirror, there is no necessity to use a floating variable diaphragm in the zoom part. Then using the re-imaging form and field lens, the zoom part only contains variator and compensator, without focus unit and primelens as usual and there is no unusual partial dispersion glass used for the correction of secondary spectrum, so the complexity of zoom part is greatly reduced. By using this new lens form, a catadioptric zoom telescope working in the visible wavelength band with variable focal length between 600 and 3000 mm, 300 mm maximum aperture is designed and then optimized. The modulation transfer function (MTF) of this optimized lens is greater than 0.3 at 60 lp/mm across all the focal lengths and field of view. The result indicates that this lens reaches good image quality and is cost-effective for manufacture, so this new lens is very suitable for the long focal length, visible zoom imaging system.

**Key words** optical design; zoom system; re-imaging; catadioptric; secondary spectrum

**OCIS codes** 220.1000; 220.3620; 110.6770

## 1 引 言

为实现远距离目标的搜索和观测记录, 需要使用大口径、高空间分辨率和长焦距的望远成像系统。在通常情况下, 对于固定几何尺寸的探测器, 较短焦

距的光学系统具有较小的放大倍率、较宽的视场, 利于目标的搜索; 而较长焦距的光学系统具有较窄的视场、较大的放大倍率, 利于目标细节的观测记录。固定焦距的望远系统难以同时兼顾大视场搜索和目

**收稿日期**: 2010-12-31; **收到修改稿日期**: 2011-02-28

**基金项目**: 国家自然科学基金(409741107)资助课题。

**作者简介**: 许伟才(1984—), 男, 博士研究生, 主要从事深紫外光学系统设计方面的研究。E-mail: xuweicaixx@163.com

**导师简介**: 黄 玮(1965—), 男, 博士, 研究员, 主要从事光学系统设计方面的研究。

E-mail: huangw@ciomp.ac.cn(通信联系人)

标细节观测记录的需求,但如果采用连续变焦的望远成像系统,则可兼顾这两种需求。此外,还能根据不同的使用环境和观测目标选择合适的焦距以达到最佳的观测效果。

目前,长焦距、变焦望远系统的结构形式主要有两种:折射式<sup>[1]</sup>与折反混合式<sup>[2~6]</sup>。对于折射式的长焦距系统而言,必然需要使用较大口径非正常色散光学材料(如氟化钙、FK 玻璃和 TF 玻璃)来校正系统的二级光谱。但大口径(大于 200 mm)的特种光学材料价格昂贵并难以获得,同时材料光学性能(如气泡度、均匀性等)不佳,在较大程度上限制了长焦距、变焦折射式系统的发展。对于传统的折反混合式,反射元件本身不产生色差,极大程度地减轻了系统二级光谱的校正压力。但传统折反射系统变焦方式有些采用的是切换式<sup>[7,8]</sup>而不是连续变焦方式。即使有些折反射系统设计采用了连续变焦方式,由于包含了复杂的变焦部分,系统的元件数量会很多,同时系统一般需要采用非球面主镜,使得系统的制造和装配成本较高。

针对以上两种传统结构形式的限制和不足,本文提出了一种新的光学结构形式,并利用该结构形式完成了一台焦距 600~3000 mm、最大口径 300 mm 的折反射式连续变焦望远系统的 optical 设计。介绍了该结构形式的系统组成以及工作原理,给出了系统初始结构的基本计算方法,并利用光学设计软件对该光学结构形式进行优化设计,得到较好的设计结果。

## 2 基本设计原理

### 2.1 系统组成及工作原理

变焦望远系统的主要设计指标要求如表 1 所示。

表 1 变焦折反射望远系统的设计指标

Table 1 Specifications of the zoom catadioptric telescope

Parameter	Specification
Zoom ratio	5×
Focal length range	600( $f/6$ )~3000 mm( $f/10$ )
Largest aperture	300 mm
Wavelength band	486~656 nm
Full field of view	1.05°~0.21°
Image format	2/3" IT-3CCD, 9.6 mm×5.4 mm
Back focal length	>25 mm
Total track	<1200 mm
Modulation transfer function (MTF) (across all field and focal length)	≥0.5 at 30 lp/mm ≥0.3 at 60 lp/mm

结合以上各项光学指标要求,提出了一种基于二次成像的光学结构形式进行该系统的设计。系统的基本设计思想是:其结构形式可以看作是一个牛顿式望远物镜与一个变倍比为 5 的投影系统组成。即利用牛顿式望远物镜形成一个中间像面(第一像面),然后使用场镜将该中间像面作为变倍投影系统的物面,接着变倍投影系统将该物面投影至探测器(第二像面)。该系统的结构示意图以及组成如图 1 所示。

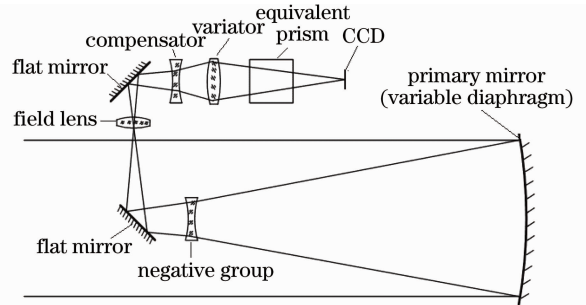


图 1 变焦折反射望远镜的结构示意图

Fig. 1 Layout of the zoom catadioptric telescope

按照功能特点,可将系统元件划分为:可变光阑、主反射镜、负组、场镜、补偿组、变倍组、等效棱镜以及平面反射镜 8 个部分。

**可变光阑**(位于主反射镜附近):将可变光阑设置于球面主镜附近,即主镜的通光口径会随着系统焦距的改变而变化(在设计中也能在变焦部分中设置浮动的可变光阑,但实现成本很高)。依靠这个可变光阑(也是系统的可变入瞳),系统就无需在变焦过程承担过大的拉格朗日不变量,大大减小了牛顿式望远系统和变倍投影系统的复杂程度。

**主反射镜**:光学结构形式中主反射镜使用的是球面,无需采用非球面。能采用球面主反射镜是因为系统的视场角相对较小(系统焦距较长,相比传统的较大画幅感光胶片而言,系统使用 2/3" IT-3CCD 作为探测器,该 CCD 对角线长度为 11 mm),这样主反射镜产生的彗差与像散较小,同时球面主反射镜产生的球差则可以通过其他折射元件进行校正。当然使用非球面主反射镜能提高系统的设计自由度和成像性能,但会增加系统的制造成本。

**负组**:负组是光焦度为负的光学元件,负的光焦度主要配合主反射镜来形成摄远系统。采用一个双胶合的负组,一方面用来校正主镜反射镜的球差与轻微的彗差,改善第一像面(中间像面)的成像质量。同时利用它产生的过校正二级光谱(正值)来补偿系统变倍组的负二级光谱<sup>[9]</sup>。在实际使用中,该负组

还能用来对系统进行温度和距离调焦补偿。

平面反射镜：主要用来折转系统的光路走向。

场镜：场镜最主要的作用是对牛顿式望远物镜与变倍投影系统进行光瞳匹配。通过场镜，牛顿式望远物镜的可变光阑（主反射镜，又是系统入瞳）与变倍投影系统浮动的可变光阑实现了良好的成像共轭。这样变倍投影系统就不需要前固定组、浮动的可变光阑以及后固定组来限制成像光束的径向尺寸和方向，仅需要变倍组与补偿组来实现系统焦距的变化和像面稳定。同时场镜还能有效地限制边缘视场光线的高度，很大程度地减小变倍投影系统的光学元件的口径大小。

补偿组与变倍组：变焦系统选取常用的负正结构<sup>[10]</sup>，即负光焦度的补偿组，正光焦度的变倍组。利用变倍组实现投影系统焦距（倍率）的变化，同时利用补偿组来补偿变焦过程中像面的偏移。在实际设计中，需要将正光焦度变倍组复杂化（分解为两个正光焦度的胶合组），增加设计自由度，提高设计质量。

等效棱镜：系统使用 2/3" IT-3CCD 作为成像探测器，该探测器含有 3 片分光棱镜和一些平板滤光片<sup>[11]</sup>，在设计中可直接展开等效为平板玻璃。值得注意的是正确地使用该种类型的探测器有利于降低系统二级光谱校正的压力。

## 2.2 初始结构的计算

依据设计指标要求，首先确定牛顿式望远物镜的焦距以及变倍投影系统倍率的变化范围。对于牛顿式望远物镜，为实现系统尽可能小的遮拦，就要求负组口径尽量小，但负组减小会使得系统总长变大。综合考虑，选取负组的口径约为 30 mm。同时为保证系统结构的紧凑性，选择负组到中间像面（第一像面）约为 180 mm，即略大于系统半口径 150 mm，此时中间像面刚好位于主镜筒边缘，利于场镜的放置。这样牛顿式望远物镜在第一像面的  $F$  数为

$$F_1 = L/d = 180/30 = 6, \quad (1)$$

式中  $F_1$  为牛顿式望远物镜在长焦端的  $F$  数， $L$  为负组到第一像面的距离， $d$  为负组的通光口径大小。可得牛顿式望远物镜的焦距为

$$f_1 = DF_1 = 300 \times 6 = 1800(\text{mm}), \quad (2)$$

式中  $D$  为系统最大的通光口径。由于系统的焦距为 600~3000 mm，则变焦投影系统在短、长焦距端的倍率分别约为

$$M_{\min} = f_{\min}/f_1 = 600/1800 = 0.33, \quad (3)$$

$$M_{\max} = f_{\max}/f_1 = 3000/1800 = 1.67, \quad (4)$$

式中  $M_{\min}$  为变倍投影系统在短焦端的投影倍率， $M_{\max}$  为变倍投影系统在长焦端的投影倍率， $f_{\min}$  为系统短焦端的焦距， $f_{\max}$  为系统长焦端的焦距。

变倍投影系统可简单看成由弱光焦度的补偿组和较大光焦度的变倍组构成（初始假定补偿组的光焦度为变倍组的  $-1/3$ ）。变倍投影系统的总长限制在约 400 mm，当考虑变倍投影系统工作倍率为 1 时，补偿组和变倍组的组合焦距约为 100 mm。

$$f_c = -3f_v, \quad 1/f_c + 1/f_v = 1/(100 \text{ mm})$$

$$\text{故 } f_c = -200 \text{ mm}, f_v = 67 \text{ mm}, \quad (5)$$

式中  $f_c$  为补偿组的焦距， $f_v$  为变倍组的焦距。在实际设计中变倍组由 2 个双胶合元件构成，则两个双胶合初始焦距约为 134 mm。

然后利用光学设计软件，对焦距为 1800 mm 的牛顿式望远物镜与变倍投影系统（投影倍率变化范围 0.33~1.67，变倍比为 5）分别进行简单计算和优化<sup>[12]</sup>。最后加入场镜（胶合元件）和等效棱镜块，将牛顿式望远物镜与变倍投影进行组合，即得到系统初始结构。

## 3 设计结果分析

结合系统的设计指标要求，利用光学设计软件以及针对该系统编制的宏程序，对上一步得到的系统初始结构进行优化设计。最终设计结果的外形如图 2 所示。图中从上至下仅给出了系统焦距分别为 600, 1500 和 3000 mm 时的外形结构以及所对应的调制传递函数 (MTF)。3 个特征焦距位置的其它设计参数结果如表 2 所示。

表 2 3 个特征焦距位置的设计结果

Table 2 Designed parameters of lens in the three different characteristic focal lengths

Parameter	Wide field	Moderate field	Narrow field
Focal length $f$ /mm	600	1500	3000
Entrance pupil diameter /mm	100	175	300
Relative aperture	1:6	1:8.6	1:10
Full field of view /( $^\circ$ )	1.05	0.42	0.21
Image height $\times 2$ /mm	11	11	11
Total track /mm	970	970	970
Back focal length /mm	25.9	60.3	158.5

图 3 为随着焦距变化时，相对于系统的成像面（固定位置的探测器），补偿组和变倍组的位置变化。

图 4 是系统位于不同焦距位置时，系统轴上视场与边缘视场分别在频率 30 lp/mm 和 60 lp/mm 处，

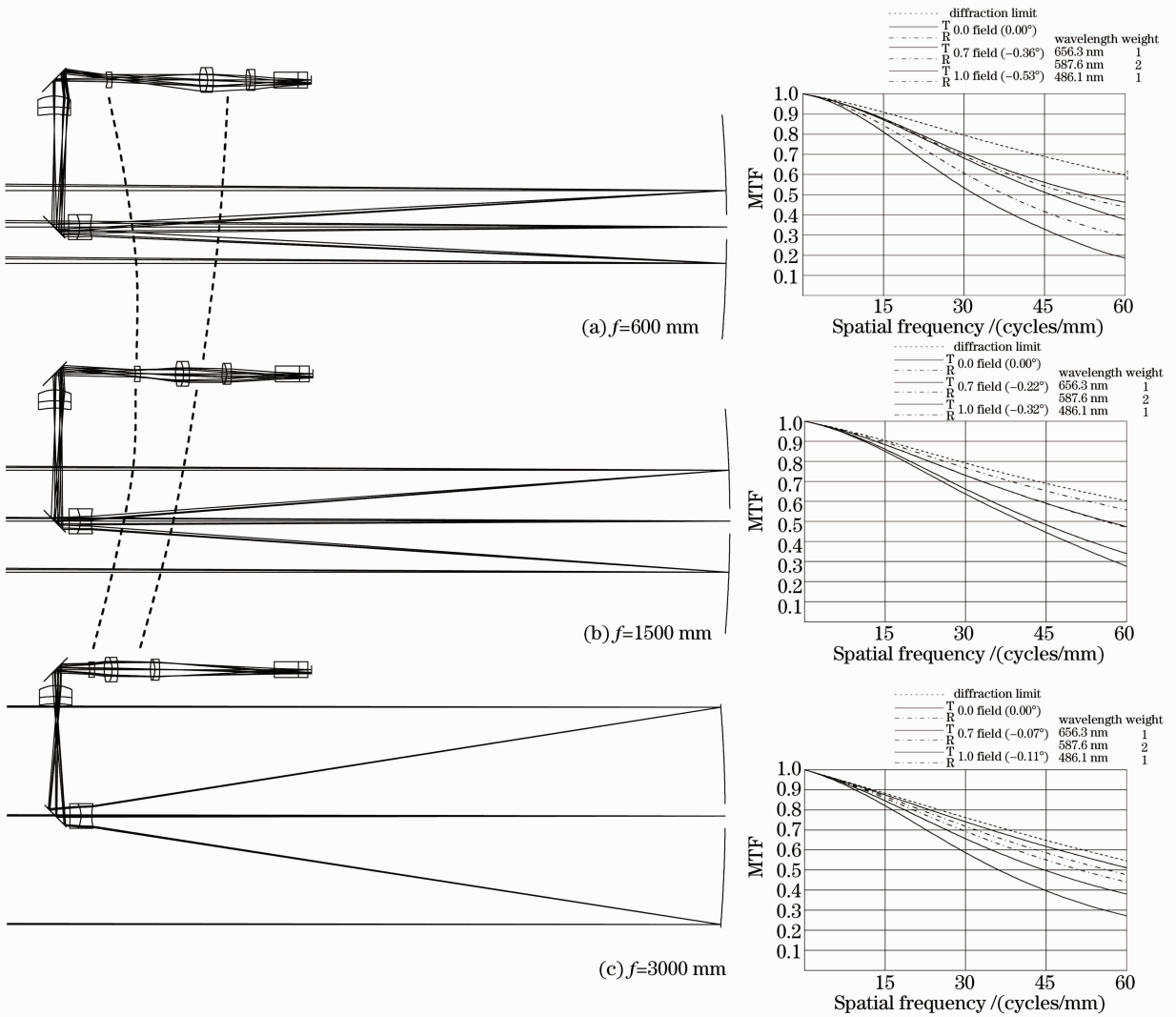


图 2 系统外形结构与对应的 MTF

Fig. 2 Layout and MTF of lens with three different focal lengths

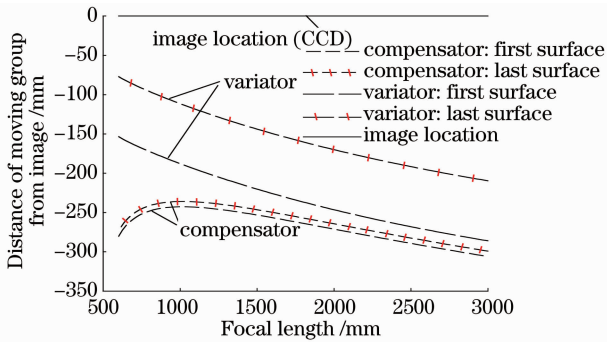


图 3 补偿组和变倍组位置与系统焦距的关系

Fig. 3 Motions of compensator and variator versus focal length

MTF 设计值的大小。图中边缘视场 MTF 为弧矢和子午方向的平均值。

从以上设计结果可知系统在不同焦距处轴上视场在频率 30 lp/mm 处 MTF 大于 0.65, 在 60 lp/mm

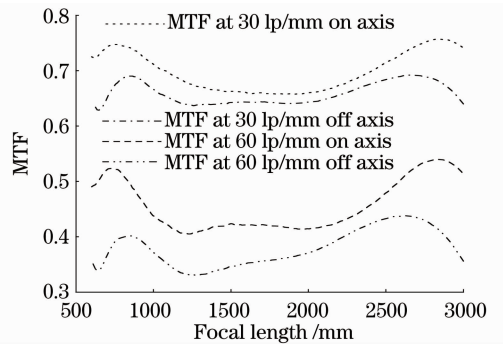


图 4 不同焦距位置的 MTF(在频率 30 和 60 lp/mm 处)

Fig. 4 MTF (at 30 and 60 lp/mm) versus focal length

处, MTF 大于 0.4, 边缘视场子午与弧矢在频率 30 lp/mm 处平均 MTF 大于 0.62, 在 60 lp/mm 处平均 MTF 大于 0.33, 满足像质的设计指标要求。系统

其它参数指标也均满足系统要求,并且像面照度均匀(在同一焦距位置,各视场遮拦比一致)。同时系统不使用特种玻璃,折射元件最大通光口径不超过40 mm,补偿组与变焦组变焦行程也均小于110 mm,较好地降低了系统的制造成本。

## 4 结 论

提出了一种新的光学结构形式,实现了大口径、长焦距、连续变焦折反射式望远系统设计。该结构形式成功应用于一台焦距600~3000 mm、最大口径300 mm工作在可见光波段的连续变焦望远系统的光学设计。该结构形式将可变光阑放置于球面主反射镜附近,避免了在变焦部分中使用难以实现的浮动可变光阑;然后利用二次成像结构和场镜减小变焦组元的径向尺寸,系统变焦部分仅包含变焦组与补偿组,无需前固定组与后固定组,同时无需使用特种光学材料校正二级光谱,极大降低了系统变焦部分的复杂程度。设计结果表明该系统二级光谱校正良好、像质优良、结构简单、制造成本低,非常适用于大口径、长焦距、变焦可见光成像系统。使用非球面主镜和少量特种光学材料,可以应用该结构形式构建更大通光口径和更大视场的折反射式连续变焦光学系统。

## 参 考 文 献

- 1 J. Michael Finlan, David J. Manzi, Lenuar Rutberg *et al.*. Precision refractive zoom lens with long focal length[C]. *SPIE*, 2006, **6203**: 62030R
- 2 Ellis Betensky. Zoom relay lens for a family of catadioptric objective lenses[C]. *SPIE*, 1997, **3129**: 90~96
- 3 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
- 王 鹏, 赵文才, 胡明勇等. 折反式大口径三组元红外变焦系统[J]. *光学学报*, 2002, **22**(5): 577~581
- 4 Cui Jicheng. Design of large aperture refractive-reflective zoom lens[J]. *Opt. Precision Engng.*, 2008, **16**(11): 2087~2091
- 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 Huang Wei, Xu Weicai. Standardization of the Optical System Design of the Catadioptric Zoom Lens[S]. *The Standardization of Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun*: QJ/KCGW02. 02. 001-2010
- 黄 玮, 许伟才. 折反射连续变焦距光学系统设计规范[S]. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所标准: QJ/KCGW02. 02. 001-2010
- 6 Zhang Tingcheng, Wang Yongtian, Chang Jun *et al.*. Design of reflective zoom systems with 3 mirrors[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(10): 3034~3038
- 张庭成, 王涌天, 常 军等. 三反变焦系统设计[J]. *光学学报*, 2010, **30**(10): 3034~3038
- 7 Wang Haitao, Geng Anbing, Yang Changcheng. Design of rotate-in-group zoom optical system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(3): 872~875
- 王海涛, 耿安兵, 杨长城. 切换变焦光学系统设计[J]. *光学学报*, 2010, **30**(3): 872~875
- 8 He Yinghong, Ma Zhen, Zhao Baochang *et al.*. Optical system design of space sensor with two long focal length lens[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(10): 3027~3033
- 贺应红, 马 臻, 赵葆常等. 实现两档长焦距的空间遥感光学系统设计[J]. *光学学报*, 2010, **30**(10): 3027~3033
- 9 Hu Jiasheng. Introduction to Optical Engineering [M]. 2nd Edition, Dalian: Dalian University of Technology Press, 2006. 811~825
- 胡家升. 光学工程导论[M]. 第二版. 大连: 大连理工大学出版社, 2006. 811~825
- 10 W. J. Smith. Modern Lens Design[M]. New York: McGraw-Hill Companies Inc., 1992. 373~379
- 11 Offsets in back focal distances for television cameras with CCD sensors[OL]. EBU document Tech 3294, 2002
- 12 Joseph M. Geary. Introduction to Lens Design: with Practical ZEMAX Examples[M]. Richmond, VA: Willmann-Bell, Inc., 2002. 287~299