

doi:10.3788/gzxb20174605.0522003

# 80 倍中波红外连续变焦光学系统设计

杨明洋<sup>1,2</sup>, 杨洪涛<sup>1,2</sup>, 曲锐<sup>1</sup>, 梅超<sup>1</sup>, 周祚峰<sup>1</sup>

(1 中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710119)

(2 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘 要:** 基于复合式变焦系统结构, 提出了一种三组元连续变焦设计数学模型. 在该模型的指导下, 针对中波制冷型  $15\ \mu\text{m}$ 、 $640\times 512$  的凝视型焦平面探测器, 设计了一款紧凑型高变倍比连续变焦光学系统. 该系统工作波段为  $3.7\sim 4.8\ \mu\text{m}$ ,  $F$  数为 4, 利用该模型分配光焦度、计算初始点得到系统焦距变化范围为  $9\sim 740\ \text{mm}$ , 变倍比达  $80\times$ . 整个光学系统仅采用硅、锗两种红外材料, 共八片透镜, 利用二次成像方法及  $45^\circ$  反射镜对系统进行了 U 型折叠, 在实现 100% 冷屏效率的同时有效控制了横向和纵向尺寸. 完成了各动组凸轮廓线的优化设计和对比分析, 从光学传递函数、点列图、畸变、冷反射及环境适应特性等多方面对系统进行了分析. 结果表明, 该系统具有变焦轨迹平滑、冷反射抑制特性优良、成像质量佳、环境适应性好及工程可实现性等优点. 该数学模型的正确性和可行性也得到了验证.

**关键词:** 光学设计; 红外技术; 连续变焦; 大变倍比

中图分类号: 0435

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2017)05-0522003-7

## Design of High Ratio Middle Infrared Continuous Zoom Optical System

YANG Ming-yang<sup>1,2</sup>, YANG Hong-tao<sup>1,2</sup>, QU Rui<sup>1</sup>, MEI Chao<sup>1</sup>, ZHOU Zuo-feng<sup>1</sup>

(1 Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China)

(2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** Based on the structure of compounding zoom system, a mathematical model of three component continuous zoom design was proposed. Under the guidance of the model, a compact high zoom ratio continuous zoom optical was designed with medium-wave cooling  $15\ \mu\text{m}$ ,  $640\times 512$  staring focal plane array. The system works in the range of  $3.7\sim 4.8\ \mu\text{m}$  and  $F$  number is 4. By using this model to distribute the optical power, the initial focal point is calculated to obtain the focal length range of  $9\sim 740\text{mm}$  and the zoom ratio is  $80\times$ . The whole system used only two kinds of infrared materials of silicon and germanium and eight lenses were used. The system was U-folded by using the secondary imaging and two  $45^\circ$  reflecting mirrors, it effectively achieved 100% cold shield efficiency and controlled the horizontal and vertical dimension. It got the moving lens zoom track and cam curve of each group, and analyzed the continuous zoom optical system from MTF, spot diagram, distortion, narcissus, environment analysis and so on. The design results prove that the zoom system has the advantages of smooth zoom track, great narcissus controlled features and excellent image and it has also been found to apply to infrared imaging system matching with advanced middle wave detector greatly. Finally, the correctness and feasibility of the mathematical model are verified exactly.

**Key words:** Optical design; Infrared technique; Continuous zoom; Large zoom ratio

**OCIS Codes:** 220.0220; 220.3620; 220.2740

基金项目: 国家自然科学基金(No. 61201376)、中科院西部之光(No. Y429611213)和陕西省青年科技新星专项(No. 2016-KJXX-01)资助

第一作者(通讯作者): 杨明洋(1991-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为光学系统设计. Email: yangmingyang@opt. cn

导师: 杨洪涛(1977-), 男, 研究员, 硕士, 硕导, 主要研究方向为航空相机总体设计. Email: yanght@opt. ac. cn

收稿日期: 2016-12-06; 录用日期: 2017-02-13

<http://www.photon.ac.cn>

## 0 引言

大变倍比光学系统在摄影、工业检测、安防领域有着广泛的应用。超大变倍比光学系统是光学设计的难点之一。2005年,美国 I. A. Neil 为 Panavision 公司设计的可见光  $300\times$  变焦距系统已经投入使用<sup>[1]</sup>;国内长春光机所冯秀恒采用传统的变焦型设计的  $100\times$  可见光连续变焦系统也投入使用<sup>[2]</sup>;2011年,台湾研究人员引入衍射元件,在原理上实现了可见光  $7\sim 2\,450\text{ mm}$ ,  $350\times$  连续变焦<sup>[3]</sup>。

相比于可见光系统被动成像,红外成像是一种主动成像,具有隐蔽性好、抗干扰能力强、环境适应性好等优点。但其可用材料有限,以及能量利用率低、自身噪声较大、设计限制较多,所以大变倍比红外光学系统设计具有很大的技术挑战。

2010年,美国康宁公司基于  $30\mu\text{m}$ ,  $320\times 240$  中波制冷型探测器,设计了  $30\times$  连续变焦光学系统,焦距范围为  $15.25\sim 456\text{ mm}$ ,  $F$  数为 4.5,系统总长为  $355\text{ mm}$ <sup>[4]</sup>;2012年,西安光机所姜凯等基于同样探测器,设计了  $30\times$  连续变焦光学系统,焦距范围为  $30\sim 900\text{ mm}$ ,  $F$  数为 4,系统总长为  $750\text{ mm}$ <sup>[5]</sup>;2013年,昆明物理研究所陈津津等基于  $15\mu\text{m}$ ,  $640\times 512$  中波制冷型探测器,设计了  $35\times$  连续变焦光学系统,焦距范围为  $15\sim 550\text{ mm}$ ,  $F$  数为 4,折叠后系统尺寸为  $390\text{ mm}\times 137.5\text{ mm}\times 110\text{ mm}$ <sup>[6]</sup>;2014年,长春光机所周昊等基于  $30\mu\text{m}$ ,  $320\times 240$  中波制冷型探测器,设计了  $30\times$  连续变焦光学系统,焦距范围为  $10\sim 300\text{ mm}$ ,  $F$  数为 2,系统总长为  $405\text{ mm}$ <sup>[8]</sup>。

本文在前人研究的基础之上进一步优化了复合式变焦方式,提出了一种三组元连续变焦设计数学模型,用于解决大变倍比光学系统中存在的问题,可降低其设计难度,提高光学系统成像质量,以及压缩光学系统结构尺寸。在该模型的指导下,基于  $15\mu\text{m}$ ,  $640\times 512$  中波制冷型探测器,设计了一款  $9\sim 740\text{ mm}$ ,  $80\times$  连续变焦光学系统,该系统  $F$  数为 4, U 型折叠后尺寸为  $180\text{ mm}\times 142\text{ mm}\times 185\text{ mm}$ ;并进行了冷反射、高低温和凸轮曲线的优化设计,具有结构紧凑、分辨率高、成像质量好、作用距离远、变焦行程短以及工程可实现性等优点。

## 1 系统设计原理

连续型变焦距系统有多种实现形式,鉴于两组元变焦结构难以实现大变倍比连续变焦系统的设计,所以大多数设计系统采用复合式变焦结构实现连续变焦。图 1 是基于制冷型中波红外复合式连续变焦原理示意图。

复合式变焦结构由前变焦镜组和中继放大镜组两级变焦结构串联而成。在焦距较短的情况下,前变焦镜组承担主要的变倍作用,通过中继动组的前后移动对像面偏移进行补偿;在焦距较长的情况下,两者作用相反。另外,通过前后移动中继动组还可以对因温度、气压等变化引起的离焦进行补偿。

复合式连续变焦系统中组元 2、3、6 独立运动,达到像面稳定。有

$$(1 - m_2^2) \times m_3^2 \times m_4^2 \times dq_2 + (1 - m_3^2) \times m_4^2 \times dq_3 + (1 - m_6^2) \times dq_6 = 0 \quad (1)$$

式中,设长焦位置为起始点,即

$$m_2 = m_{2l}; m_3 = m_{3l}; m_6 = m_{6l}.$$

$m_2$  为变倍组的放大倍率,  $q_2$  为变倍组的移动量,  $m_{2l}$  为变倍组在长焦位置的放大倍率,  $f_2'$  为变倍组焦距;  $m_3$  为补偿组的放大倍率,  $q_3$  为补偿组的移动量,  $m_{3l}$  为补偿组在长焦位置的放大倍率,  $f_3'$  为补偿组焦距;  $m_6$  为中继动组的放大倍率,  $q_6$  为中继动组的移动量,  $m_{6l}$  为中继动组在长焦位置的放大倍率,  $f_6'$  为中继动组焦距。

计算得到关于  $m_3$  的二次方程<sup>[17]</sup>为

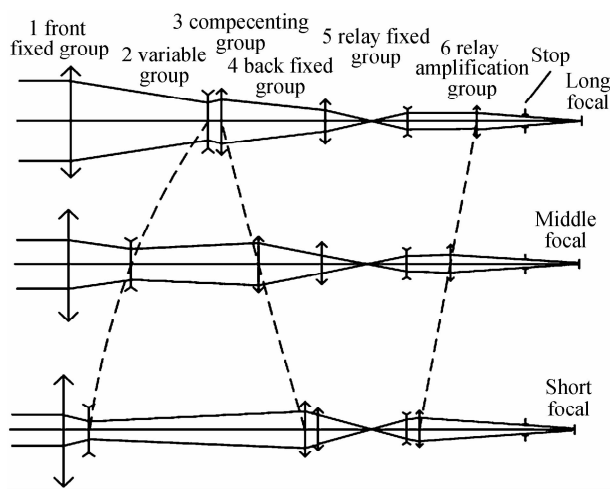


图 1 光学系统原理

Fig. 1 The sketch of the principle of zoom lens

$$m_3^2 - b \times m_3 + 1 = 0 \quad (2)$$

式中,系数  $b$  为

$$b = -\frac{f'_2}{f'_3} \times \left( \frac{1}{m_2} + m_2 - \frac{1}{m_{2l}} - m_{2l} \right) - \frac{f'_6}{f'_3} \times \left( \frac{1}{m_6} + m_6 - \frac{1}{m_{6l}} - m_{6l} \right) + \left( \frac{1}{m_{3l}} + m_{3l} \right) \quad (3)$$

得

$$m_{31} = \frac{b + \sqrt{b^2 - 4}}{2} \quad (4)$$

$$m_{32} = \frac{b - \sqrt{b^2 - 4}}{2} \quad (5)$$

$q_2$  的移动量与倍率  $m_2$  的关系式为

$$\frac{1}{m_2} = \frac{1}{m_{2l}} - \frac{q_2}{f'_2} \quad (6)$$

$q_6$  的移动量与倍率  $m_6$  的关系式为

$$m_6 = m_{6l} - \frac{q_6}{f'_6} \quad (7)$$

$$q_3 = f'_3 \times \left( \frac{1}{m_3} - \frac{1}{m_{3l}} \right) - q_2 + f'_2 \times (m_2 - m_{2l}) \quad (8)$$

至此,建立了三组元连续变焦光学系统设计模型.由该模型可以确定各组分的运动轨迹:首先,确定长焦位置为计算起点, $m_{6l}$ 、 $q_6$  为已知量,给定  $q_2$  的值可以确定系数  $b$ ,计算得到长焦位置补偿组的移动量  $q_3$ .其次,改变  $m_6$  的放大倍率,得到相应  $q_6$  的移动量,由式(7)确定出  $q_6$  随  $m_6$  的变化曲线.最后,结合式(6)、(7),任意改变  $q_2$  的一个移动量,均可以确定系数  $b$  的值,由此得到式(2)的两个解  $m_{31}$ 、 $m_{32}$ ,将这两个解带入式(8)得到补偿  $q_2$ 、 $q_6$  任意位置时的补偿组的移动量  $q_3$ .由此可以解出各组分的运动情况.

## 2 设计实例

### 2.1 设计指标

本文连续变焦光学系统具体设计指标见表1.

表1 设计指标

Table 1 Design parameters

Item	Wavelength range/ $\mu\text{m}$	Zoom ratio	Detector	Pitch	F number	Horizontal Field of View(HFOV)	Distortion	Temperature
Value	3.7~4.8	80:1	640×512	15 $\mu\text{m}$	4	46.85°~0.74°	<10%	-40℃~+60℃

### 2.3 设计结果

根据设计原理分配光焦度,得到各组焦距值:前变焦镜组前固定焦距  $f_1' = 171.36$  mm,变倍组焦距  $f_2' = -49.74$  mm,补偿组焦距  $f_3' = 132.40$  mm,后固定组焦距  $f_4' = 137.97$  mm;中继放大组前定组焦距  $f_5' = -203.52$  mm,中继动组  $f_6' = 40.364$  mm,后定组  $f_7' = 18.62$  mm.将这些值代入 Code V 进行优化.图2给出了不同有效焦距(Effective Focal Length,EFL)位置的光学系统结构示意图.

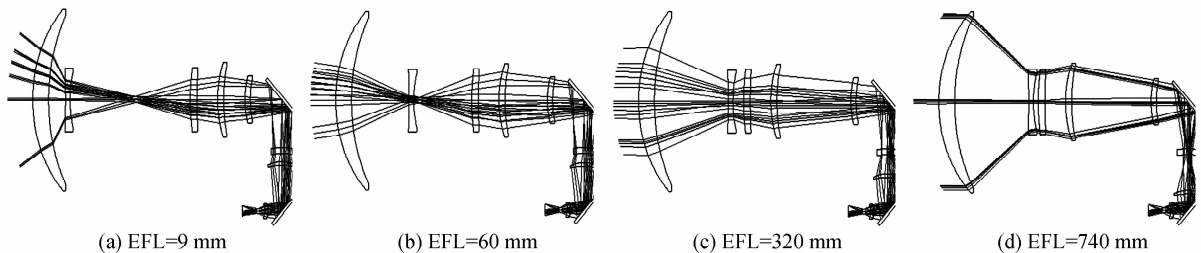


图2 光学系统

Fig. 2 Schematic of the zoom lens

图2中,该系统共包含八片透镜和两片反射镜,仅采用硅和锗两种红外材料.系统整体的外形尺寸为 $180\text{ mm}\times 142\text{ mm}\times 185\text{ mm}$ (长 $\times$ 宽 $\times$ 高).前固定组采用高折射率、低色散的硅材料,承担主要光焦度;变倍组光焦度为负,采用高色散、高折射率的锗材料,并在前表面使用非球面,校正不同焦距位置的轴外像差;补偿组采用双分离结构,均为硅材料,与后固定组配合共同校正了前变焦镜组的初级像差;中继镜组采用了典型的双视场系统结构,动组采用了低色散、高折射率的硅材料,与定组配合实现对前组焦距放大的同时,校正了系统的残余色差及其他高级像差.

### 3 性能分析

#### 3.1 传递函数

光学传递函数(Modulation Transfer Function, MTF)反映系统对物体不同频率成分的传递能力,是评价系统成像质量的重要手段之一.图3给出了 $9\text{ mm}$ 、 $60\text{ mm}$ 、 $320\text{ mm}$ 、 $740\text{ mm}$ 四个变焦位置处传递函数曲线.可以看出,系统各变焦位置在截止频率 $33\text{ lp/mm}$ 处中心视场的MTF值均在 $0.3$ 附近,接近衍射极限,各轴外视场MTF合理分布,表明该系统具有较好的成像质量.

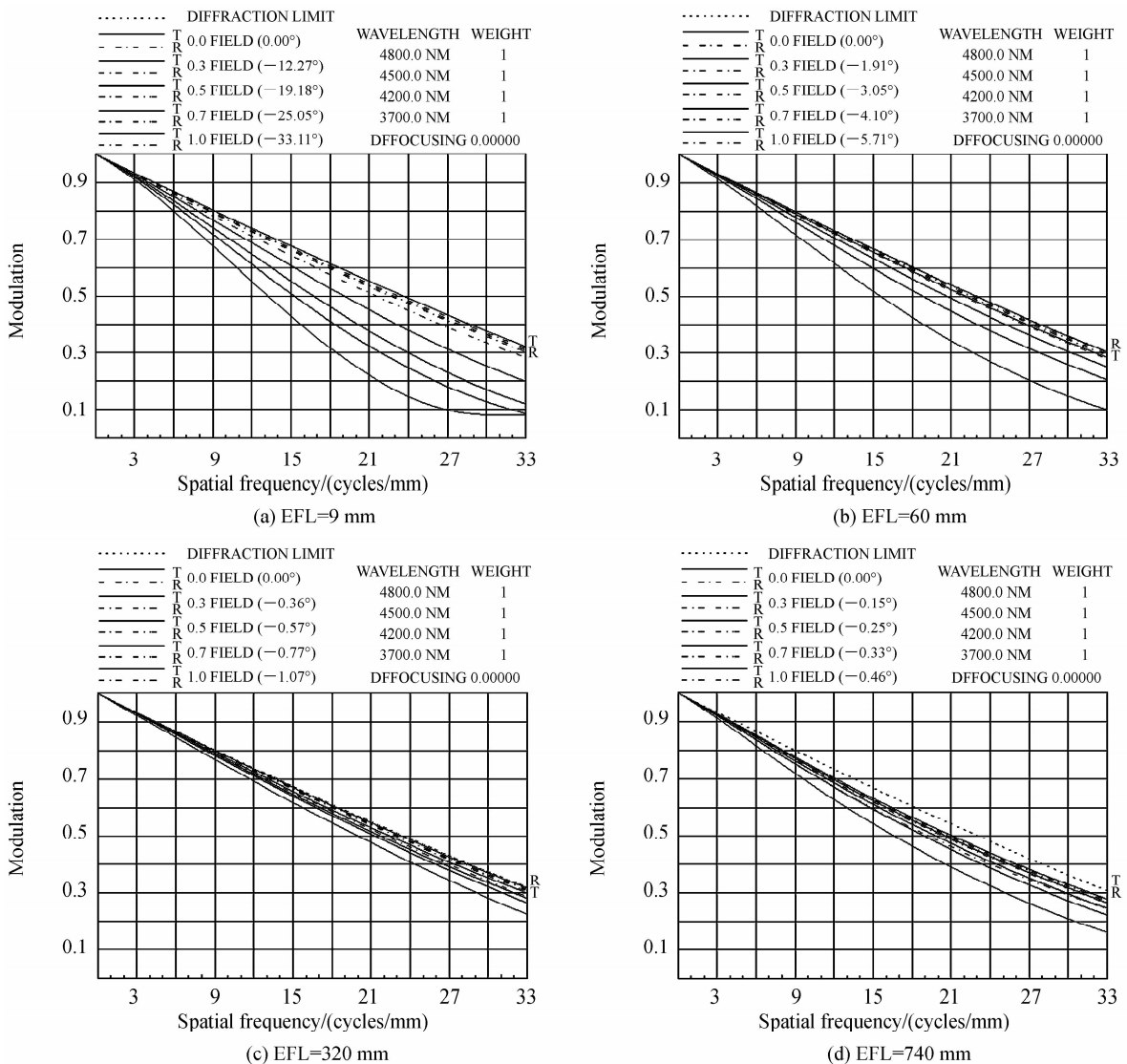


图3 光学系统的传递函数曲线  
Fig. 3 MTF curve of the zoom lens

#### 3.2 点列图

点列图是评价成像质量的另外一种重要手段,其反映能量度集中的同时,还可以将系统的像差特性直观地呈现出来.如图4,对系统四个典型变焦位置的点列图评价表明,各焦距位置在 $0.85$ 视场内无明显色差,

且均方根弥散斑直径均在  $15\mu\text{m}$  以内,具有较好的能量集中度特性.

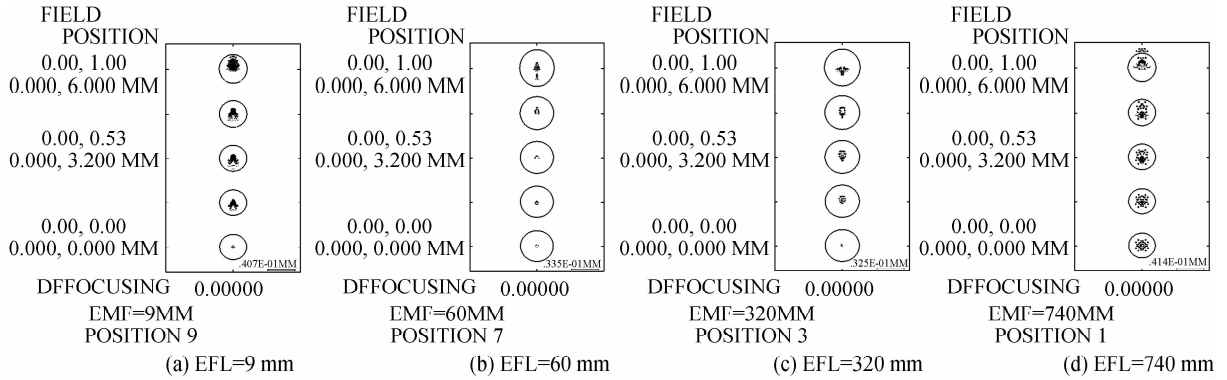


图 4 光学系统的点列图  
Fig. 4 Spot diagram of the zoom lens

### 3.3 畸变

如图 5,给出了系统焦距在 9 mm,60 mm,320 mm,740 mm 四个典型焦距位置的畸变曲线.结果显示,光学系统最大畸变发生在短焦位置,最大畸变小于 9%. 满足设计指标要求.

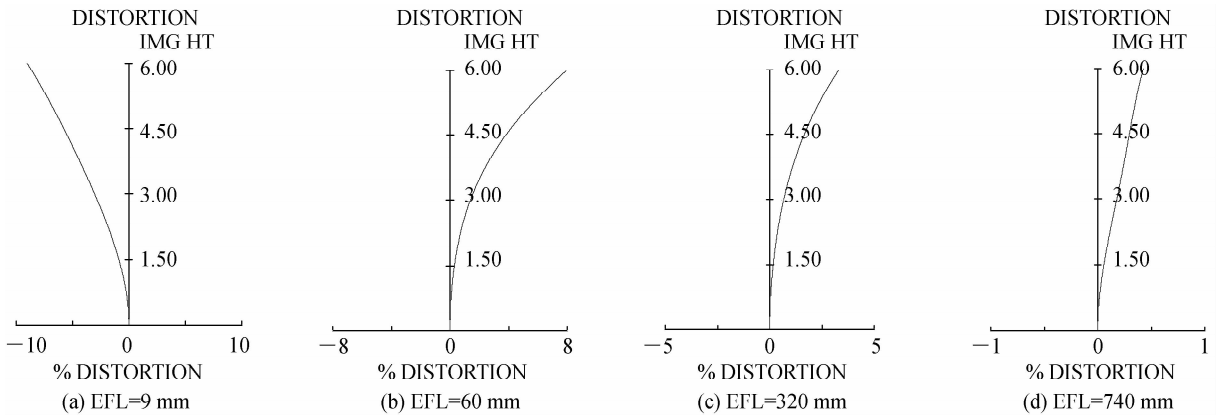


图 5 光学系统畸变图  
Fig. 5 Distortion curve of the zoom lens

### 3.4 冷反射分析

制冷型红外系统成像时会存在冷反射现象,严重时导致所成图像中心出现明显黑斑,造成成像质量下降.变焦系统在对远距离目标进行探测时,工作在长焦位置,目标辐射经大气传输后,迅速衰减,此时,冷反射可能会淹没信号,所以对长焦位置进行冷反射分析十分必要.反映轴上点冷反射大小的 YNI 和反映冷反射随视场变化的  $I/I_{bar}$  是考察冷反射的两个重要参数.在进行红外光学系统设计时应使 YNI 和  $I/I_{bar}$  的绝对值至少有一个大于 1.表 2 给出了长焦位置的 YNI 和  $I/I_{bar}$  数据.可以看出,各表面  $I/I_{bar}$  绝对值均大于 1, YNI 绝对值均大于 0.75,该结果表明系统整体对冷反射的抑制效果较好,可满足制冷型红外光学系统设计

表 2 冷反射分析  
Table 2 Narcissus analysis

Reflecting surface	1	2	3	4	5	6	7	8	9
YNI	61.4150	-10.431	-15.342	17.4850	15.5553	7.5977	16.4770	2.8730	2.1615
$I/I_{bar}$	10.084	6.343	7.478	20.878	28.139	-61.235	40.927	-5.207	-2.612
Reflecting surface	10	11	12	13	14	15	16	17	18
YNI	0.9665	1.2546	-0.7845	0.7594	0.7514	0.9065	0.7992	1.3076	0.7854
$I/I_{bar}$	-1.228	20.537	1.932	1.302	1.154	1.536	-1.341	4.215	1.347

### 3.5 环境适应性分析

环境的变化会使红外光学系统成像质量下降. 该系统的工作温度范围在 $-40^{\circ}\text{C}\sim+60^{\circ}\text{C}$ 之间, 采用机电主动式进行设计, 以中继放大镜组作为补偿组进行调焦. 表 3 给出了不同焦距位置、不同温度值下的 MTF 值. 通过温度补偿, 系统在 $-40^{\circ}\text{C}\sim+60^{\circ}\text{C}$ 范围内具有稳定的像质.

表 3 补偿后在不同焦距位置不同温度下的 MTF

Table 3 The MTF under the different focal length and different temperature after compensation

Focal length	Temperature	$-40^{\circ}\text{C}$			$-20^{\circ}\text{C}$			$+20^{\circ}\text{C}$			$+40^{\circ}\text{C}$			$+60^{\circ}\text{C}$		
		Field of view Value of MTF	0	0.7	1	0	0.7	1	0	0.7	1	0	0.7	1	0	0.7
740 mm		0.32	0.2	0.1	0.3	0.2	0.12	0.3	0.25	0.12	0.32	0.23	0.21	0.33	0.27	0.18
320 mm		0.31	0.23	0.12	0.29	0.25	0.10	0.3	0.28	0.13	0.34	0.25	0.11	0.37	0.29	0.2
60 mm		0.28	0.15	0.11	0.28	0.18	0.12	0.3	0.11	0.08	0.32	0.12	0.1	0.35	0.25	0.16
9 mm		0.25	0.15	0.08	0.27	0.10	0.06	0.3	0.11	0.07	0.32	0.25	0.12	0.32	0.28	0.12

### 3.6 凸轮曲线绘制

本文利用两种方法对凸轮曲线进行了绘制. 一种是利用编写的 Code V 宏程序对各动组的凸轮曲线进行优化设计, 结果如图 6. 可以看出, 各动组运动曲线平滑无拐点, 变倍组最大行程为 73.71 mm, 补偿组最大行程为 81.97 mm. 另一种是根据设计原理、利用 MATLAB 程序模拟各动组移动轨迹, 结果如图 7. 由图 6、7 对比分析可知, 两种凸轮曲线优化设计方法得到的各动组运动曲线吻合程度高, 行程相近, 证明了该模型的可行性, 也为整机视轴一致性指标的实现提供了有利保障.

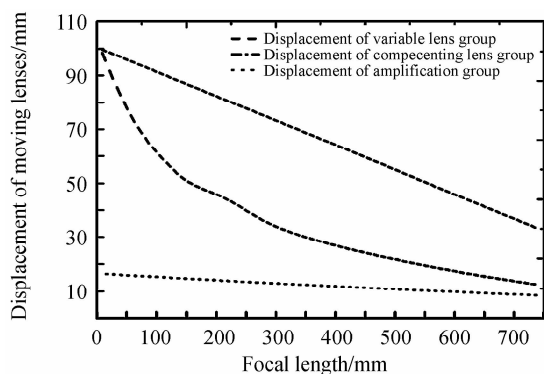


图 6 各动组移动轨迹

Fig. 6 Cam curve produced by Code V macro

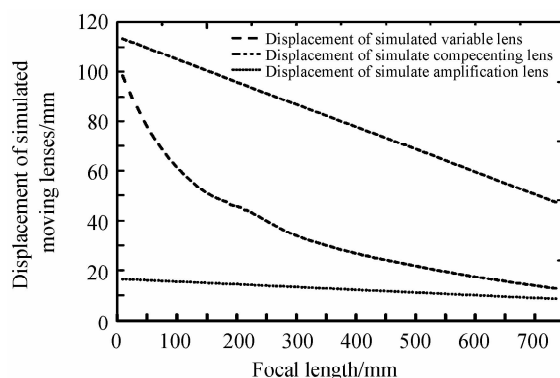


图 7 根据本文设计模型得到的变焦轨迹

Fig. 7 The cam curve produced by the method in this paper

## 4 结论

本文提出了一种三组元连续变焦光学系统设计模型, 解决了大变比光学系统中存在的设计难度大、计算效率低、结构复杂等问题. 为了验证理论模型的正确性与可行性, 针对  $640\times 512$  凝视制冷型焦平面探测器, 利用二次成像方法、复合式结构设计完成了一款大变比连续变焦光学系统. 该系统工作波段为  $3.7\sim 4.8\mu\text{m}$ ,  $F$  数为 4; 变倍比达  $80\times$ . 各焦距位置中心视场 MTF 在  $33\text{lp/mm}$  处均接近衍射极限, 变焦全程最大畸变小于  $9\%$ , 各镜片表面  $I/I_{\text{bar}}$  绝对值均大于 1, YNI 绝对值均大于 0.75, 满足制冷型红外变焦系统的设计要求; 采用机电主动式消热差方法设计, 使系统在  $-40^{\circ}\text{C}\sim+60^{\circ}\text{C}$  大温度范围内实现稳定成像. 另外, 利用两种凸轮曲线绘制方法得到了各动组的运动轨迹, 两组运动曲线平滑连续无拐点、变焦行程短、吻合度高, 表明该设计系统的结构紧凑. 相比于国内外已有报道的类似系统, 本文提供的结果具有变倍比大、分辨率高、结构紧凑、变焦行程短及具有工程可实现性等特点. 对类似系统的设计具有一定参考价值, 有望在军、警、民用等领域获得较多应用.

### 参考文献

- [1] NEIL I A. Optical design dependence on technology development[C]. SPIE, 2009, 7428, 8-15.
- [2] FENG Xiu-heng. Comparison of the miniaturization of the positive group and the negative group for the zoom lens[J].

- Optical Machinery*, 1984, **6**:97-102.
- 冯秀恒. 变焦距物镜正组补偿和负组补偿小型化的比较[J]. 光学机械, 1984, **6**:97-102.
- [3] FANG Yi-chin, LIN Han-ching. Optical design and optimization of zoom optics with diffractive optical element[C]. SPIE, 2009, 7282:98-109.
- [4] MARK C S, JAMES C. MWIR Continuous zoom with large zoom range [C]. SPIE, 2010, 7660: 1-12.
- [5] JIANG Kai, ZHOU Si-zhong, WANG Yan-bin, *et al.* Design of 30× middle infrared continuous zoom system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, **41**(8): 2162-2166.  
姜凯, 周泗忠, 王艳彬, 等. 30x中波红外连续变焦光学系统设计[J]. 红外与激光工程, 2012, **41**(8): 2162-2166.
- [6] CHEN Jin-jin, JIN Ning, ZHOU Li-gang *et al.* High resolution middle infrared continuous zoom optical system with large zoom range [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, **42**(10): 2742-2747.  
陈津津, 金宁, 周立钢, 等. 高清晰大变倍比中波红外连续变焦光学系统设计[J]. 红外与激光工程, 2013, **42**(10): 2742-2747.
- [7] HYUN S K, CHANG W K, SEOK M H. Compact mid-wavelength infrared zoom camera with 20:1 zoom range and automatic athermalization[C]. SPIE, 2002, 1661-1667.
- [8] ZHOU Hao. Study on midwave infrared continuous zoom optical system with a large zoom range[D]. Changchun: Changchun Institute of optical, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences; 2014.  
周昊. 高变焦比中波红外连续变焦光学系统研究[D]. 长春, 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所; 2014.
- [9] ELLIS I B, JAMES B Cl. [P]. *United States Patent*: US6,961,188, B2; 2005-11-1.
- [10] FAN Zhe-yuan, GAO Li-nin, JIANG Zhang-zhi. *et al.* Design of three-field middle-wave infrared zoom system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, **43**(2): 523-527.  
范哲源, 高立民, 张志, 等. 中波红外三视场变焦光学系统设计[J]. 红外与激光工程, 2014, **43**(2): 523-527.
- [11] SANSONA M, COMELL, B R. Development of MWIR continuous zoom with large zoom range[C]. SPIE, 2012, 0122F: 1-7.
- [12] SCHERR L M, ORLANDO H, JHALL J T, *et al.* Narcissus consideration in optical designs for infrared staring arrays [C]. SPIE, 1996, **2864**: 442-452.
- [13] ARON Y, BOUBIS I, SHABIT R. Topaz: a novel design of a high magnification athermalized 1:30 zoom in the MWIR [C]. SPIE, 2004, **5406**: 97-106.
- [14] CHENG 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, 短焦距变焦系统设计[J]. 光子学报, 2005, **34**(12), 1825-1828.
- [15] YIN Na, MENG Qing-chao, QI Yan-long, *et al.* Middle infrared continuous zoom optical system [J]. *Infrared Technology*, 2009, **31**(12): 694-697.  
尹娜, 孟庆超, 齐雁龙, 等. 中波红外连续变焦光学系统设计[J]. 红外技术, 2009, **31**(12): 694-697.
- [16] GAO Hong-yun, XIONG Tao, YANG Chang-cheng. Middle infrared continuous zoom optical system [J]. *Optical and Precision Engineering*, 2007, **15**(7): 1038-1043.  
郜洪云, 熊涛, 杨长城. 中波红外连续变焦光学系统[J]. 光学精密工程, 2007, **15**(7): 1038-1043.
- [17] 陶纯勤. 变焦光学系统设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 1988.