

一种新型复合变焦光学系统

操 超^{1,2}, 廖志远¹, 白 瑜¹, 杨 正³, 李 帅⁴

¹中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209;

²中国科学院大学, 北京 100049;

³武汉海达数云技术有限公司, 湖北 武汉 430205;

⁴西安空间无线电技术研究所, 陕西 西安 710100

摘要 基于复合变焦光学系统原理,提出了一种新型复合变焦光学系统结构。该结构将连续变焦与两档变焦结合,可以增大变焦光学系统的焦距变化范围,实现更大的搜索范围和更远的跟踪距离。建立了新型复合变焦系统光学设计的数学模型。在该模型的指导下,针对像元数为 320×240 ,像元尺寸为 $30 \mu\text{m} \times 30 \mu\text{m}$ 的长波红外非制冷焦平面探测器,设计了一款新型复合变焦光学系统。该系统工作波段为 $8 \sim 12 \mu\text{m}$,焦距变化范围为 $10 \sim 360 \text{ mm}$,在 $10 \sim 60 \text{ mm}$ 时, F 数为 2,在 $60 \sim 360 \text{ mm}$ 时, F 数为 4。对光学系统凸轮曲线和性能进行了分析。结果表明,该系统具有变倍比大、结构简单、像质好和变焦轨迹平滑等优点,验证了该数学模型的有效性。

关键词 几何光学; 连续变焦; 复合变焦; 大变倍比

中图分类号 O435 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201737.1108001

A New Compound Zoom Optical System

Cao Chao^{1,2}, Liao Zhiyuan¹, Bai Yu¹, Yang Zheng³, Li Shuai⁴

¹*Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China;*

²*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;*

³*Wuhan Hi-Target Digital Cloud Technology Co., Ltd, Wuhan, Hubei 430205, China;*

⁴*Xi'an Institute of Space Radio Technology, Xi'an, Shaanxi 710100, China*

Abstract Based on the principle of compound zoom optical system, a new compound zoom optical system structure is proposed. The structure combines the continuous zoom system with the two-step zoom system to increase the focal length range of the zoom optical system and achieve the larger search range and the longer tracking distance. A mathematical model of optic design of the new compound zoom system is established. Under the guidance of this model, a new compound zoom optical system is designed for long wave infrared uncooled focal plane detector with pixel number of 320×240 and pixel size of $30 \mu\text{m} \times 30 \mu\text{m}$. The working band of the system is $8 \sim 12 \mu\text{m}$, the focal length range is $10 \sim 360 \text{ mm}$, the F number is 2 at $10 \sim 60 \text{ mm}$, and the F number is 4 at $60 \sim 360 \text{ mm}$. The cam curves and performance of the optical system are analyzed. The results show that the system has such advantages as large zoom ratio, simple structure, good image quality and smooth cam curves, all of which verify the validity of the mathematical model.

Key words geometric optics; continuous zoom; compound zoom; large zoom ratio

OCIS codes 080.3620; 080.3630; 080.2740; 080.1010

1 引 言

变焦距系统在日常生活、科研教育、军事侦察、国防建设等领域越来越显现出不可代替的作用^[1-4]。随着科学技术的发展,变焦距系统希望可以在更大范围内搜索目标,对更远距离的目标进行跟踪。目前有两种方

收稿日期: 2017-07-04; **收到修改稿日期:** 2017-07-13

基金项目: 国家自然科学基金(10874181)

作者简介: 操 超(1992—),男,硕士研究生,主要从事光学系统设计方面的研究。E-mail: 784488534@qq.com

导师简介: 廖志远(1976—),男,博士,副研究员,主要从事光学系统设计方面的研究。E-mail: 71814725@qq.com

(通信联系人)

法来提高连续变焦光学系统的搜索范围和跟踪距离。一种是大变倍连续变焦光学系统设计,大变倍比连续变焦光学系统是光学设计领域的难点之一,美国的 Neil^[5]采用复合变焦方法为 Panavision 公司设计了可见光 300×变焦距系统,该系统由一个 15×连续变焦系统和一个 20×连续变焦光学系统串联组成,需要 4 组凸轮曲线,机械结构复杂,体积大,透过率低;杨明洋等^[6]基于同样方法设计了一个中波红外 80×复合变焦光学系统,该系统虽然采用折叠结构减小了尺寸,但依然需要三组凸轮曲线,系统结构复杂。另一种办法就是在变焦距系统里面插入扩展镜来增大焦距范围^[7],该方法在商业上被普遍采用,佳能多款镜头都采用该方法来扩大焦距范围,由于使用时要插入扩展镜,像差校正难度较大,而且扩展镜倍率有限,目前最高只有两倍扩展镜。

红外成像系统是一种被动成像系统,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、能量利用率低、设计限制较多,所以大变倍比红外变焦距光学系统设计具有很大的技术挑战^[8]。

本文提出了一种新型复合变焦光学系统结构,该结构可以提高连续变焦系统的搜索范围和跟踪距离,只需两组凸轮曲线。新型复合变焦系统由一个传统的连续变焦系统与一个两档变焦系统组成,可以增大传统连续变焦系统的焦距变化范围,与传统的复合变焦系统相比,该系统机械结构简单,体积小,透过率高;与使用扩展镜相比可以实现更大的变倍比。该新型复合变焦光学系统为大变倍比红外变焦距光学系统设计提供了一种新思路。

2 系统设计原理

鉴于两组原变焦系统结构难以实现大变倍比变焦系统设计,复合式变焦结构是增大系统焦距变化范围的新方法,图 1 是光学系统变焦原理示意图。新型复合变焦光学系统包括连续变焦和两档变焦两部分,由 6 个透镜组组成,分别为前固定组、变倍组 1、补偿组、后固定组 1、变倍组 2 和后固定组 2。前 4 个透镜组组成一个传统的连续变焦系统,后两个透镜组组成一个两档变焦系统。变倍组 1 沿轴向移动改变系统焦距,补偿组沿轴向移动补偿像面漂移,变倍组 2 沿轴向两点移动改变系统焦距并切换工作状态。新型复合变焦系统有两个工作状态:状态 1 为当变倍组 2 处于位置 1 时,变倍组 1 沿轴向移动改变系统焦距,补偿组沿轴向移动补偿像面漂移,可以进行大范围搜索与近距离跟踪;状态 2 为变倍组 2 处于位置 2 时,变倍组 1 沿轴向移动改变系统焦距,补偿组沿轴向移动补偿像面漂移,可以实现小范围搜索与长距离跟踪。在使用时可以根据需求选择合适的工作状态或将二者结合使用。另外,沿轴向移动变倍组 2 可以对温度、气压等变化引起的离焦进行补偿。

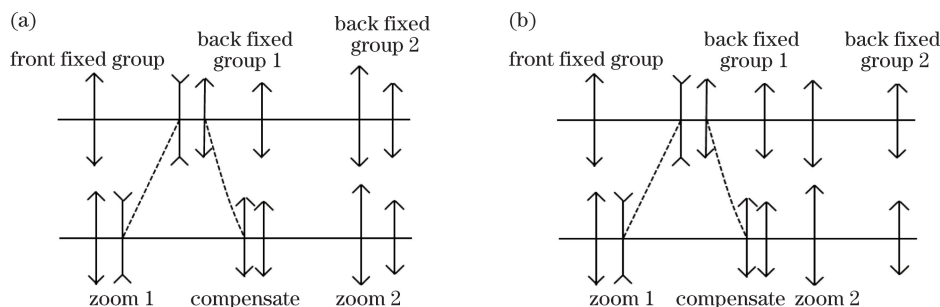


图 1 光学系统变焦原理示意图。(a)状态 1; (b)状态 2

Fig. 1 Zoom principle diagrams of optical system. (a) State 1; (b) state 2

图 1 中前固定组、变倍组 1、补偿组、后固定组 1、变倍组 2 和后固定组 2 的焦距分别为 $f'_1, f'_2, f'_3, f'_4, f'_5, f'_6$ 。变倍组 1、补偿组、后固定组 1、变倍组 2、后固定组 2 的放大倍率分别为 m_2, m_3, m_4, m_5, m_6 。变倍组 1 在长焦时的放大倍率为 m_{2l} , 补偿组在长焦时的放大倍率为 m_{3l} , 变倍组 2 在状态 1 时的放大倍率为 m_{5l} , 在状态 2 时的放大倍率为 m_{5l}^* , 变倍组 1、补偿组、变倍组 2 的移动距离分别为 q_2, q_3, q_5 。连续变焦系统部分的焦距为 f' , 状态 1 时复合变焦系统的焦距为 f'_{state1} , 状态 2 时复合变焦系统的焦距为 f'_{state2} , 复合变焦光学系统总焦距为 f^{**} 。

新型复合变焦光学系统若要保持像面稳定,需满足^[9]

$$m_5^2 m_4^2 m_3^2 (1 - m_2^2) dq_2 + m_5^2 m_4^2 (1 - m_3^2) dq_3 + (1 - m_5^2) dq_5 = 0. \quad (1)$$

状态 1 时,变倍组 2 位于位置 1,由(1)式可知,保持像面稳定需满足

$$m_5^2 m_4^2 m_3^2 (1 - m_2^2) dq_2 + m_5^2 m_4^2 (1 - m_3^2) dq_3 = 0。 \quad (2)$$

设长焦位置为起始点,可知

$$m_2 = m_{2l}, m_3 = m_{3l}, m_5 = m_{5l}, \quad (3)$$

根据(2)、(3)式可以得到关于 m_3 的二次方程

$$m_3^2 - b m_3 + 1 = 0, \quad (4)$$

式中系数 $b = -\frac{f'_2}{f'_3} \left(\frac{1}{m_2} - \frac{1}{m_{2l}} + m_2 - m_{2l} \right) + \left(\frac{1}{m_{3l}} + m_{3l} \right)。$

变倍组 1 的移动量 q_2 与放大倍率 m_2 的关系为

$$m_2 = \frac{1}{\frac{1}{m_{2l}} + \frac{q_2}{f'_2}}, \quad (5)$$

根据(3)、(4)式即可解得 m_3 ,从而求出补偿组的移动距离:

$$q_3 = f'_3 (m_3 - m_{3l})。 \quad (6)$$

因此连续变焦部分的焦距 f' 的变化范围为 $f'_1 m_2 m_3 m_4 \sim f'_1 m_{2l} m_{3l} m_4。$

状态 1 时,复合变焦光学系统焦距 f'_{state1} 的变化范围为 $f'_1 m_2 m_3 m_4 m_{5l} m_6 \sim f'_1 m_{2l} m_{3l} m_4 m_{5l} m_6。$

状态 2 时,变倍组 2 移动 q_5 到位置 2,变倍组 1 与补偿组运动轨迹不变,由(1)式可知,保持像面稳定需满足

$$m_5^2 m_4^2 m_3^2 (1 - m_2^2) dq_2 + m_5^2 m_4^2 (1 - m_3^2) dq_3 + (1 - m_5^2) dq_5 = 0, \quad (7)$$

由(2)、(7)式可知

$$\frac{(1 - m_5^2) dq_5}{m_5^2} = 0。 \quad (8)$$

因为

$$dq_5 = f'_5 dm_5, \quad (9)$$

设长焦位置为起始点,可知

$$m_2 = m_{2l}, m_3 = m_{3l}, m_5 = m_{5l}^*。 \quad (10)$$

由(8)、(9)、(10)式可知

$$f'_5 \left(\frac{1}{m_{5l}^*} - \frac{1}{m_{5l}} + m_{5l}^* - m_{5l} \right) = 0。 \quad (11)$$

同理可得,状态 2 时复合变焦系统焦距 f'_{state2} 的变化范围为 $f'_1 m_2 m_3 m_4 m_{5l}^* m_6 \sim f'_1 m_{2l} m_{3l} m_4 m_{5l}^* m_6。$

为实现焦距连续变化,需要满足

$$f'_1 m_{2l} m_{3l} m_4 m_{5l} m_6 = f'_1 m_2 m_3 m_4 m_{5l}^* m_6, \quad (12)$$

根据(12)式可得

$$m_{5l}^* = \frac{m_{2l} m_{3l} m_{5l}}{m_2 m_3}。 \quad (13)$$

根据(11)、(13)式可得

$$m_{5l} = -\sqrt{\frac{m_2 m_3}{m_{2l} m_{3l}}}; m_{5l}^* = -\sqrt{\frac{m_{2l} m_{3l}}{m_2 m_3}}, \quad (14)$$

由(14)式可知

$$|m_{5l}| < 1, |m_{5l}^*| > 1。 \quad (15)$$

复合变焦光学系统总焦距 f'^* 的变化范围为 $f'_1 m_2 m_3 m_4 m_{5l} m_6 \sim f'_1 m_{2l} m_{3l} m_4 m_{5l}^* m_6。$

根据(15)式和 f', f'^* 的变化范围可知,与两档变焦结合后,连续变焦光学系统部分短焦距更短,长焦距更长。

光学系统的最大跟踪距离为

$$L = f'_l \frac{y'}{y}, \quad (16)$$

式中 L 为跟踪距离, f'_1 为系统长焦焦距, y' 为可跟踪目标对应的最小像面尺寸, y 为目标尺寸。

光学系统的最大搜索视场为

$$2\omega = 2\arctan \frac{d/2}{f'_s}, \quad (17)$$

式中 2ω 为最大搜索视场, d 为探测器对角线长度, f'_s 为系统短焦焦距。

由(16)、(17)式可知, 新型复合变焦系统结构可以提高传统连续变焦光学系统的跟踪距离和搜索视场。

变倍组 2 由状态 1 移动到状态 2 时的移动距离^[10]为

$$q_5 = (m_5^* - m_5) f'_5, \quad (18)$$

由(14)式可得

$$q_5 = \left(\sqrt{\frac{m_2 m_3}{m_{2l} m_{3l}}} - \sqrt{\frac{m_{2l} m_{3l}}{m_2 m_3}} \right) f'_5. \quad (19)$$

根据(14)式和 $f^{*'}$ 的变焦范围可得复合变焦系统的变倍比为

$$\Gamma = \left(\frac{m_{2l} m_{3l}}{m_2 m_3} \right)^2. \quad (20)$$

至此, 完成了新型复合变焦光学系统设计模型的建立。由该模型可以确定各组分的运动轨迹、组元间隔及光焦度分配关系。

3 设计实例

3.1 设计指标

系统采用像元数为 320×240 、像元尺寸为 $30 \mu\text{m} \times 30 \mu\text{m}$ 的长波红外非制冷焦平面探测器, 状态 1 时, 焦距为 $10 \sim 60 \text{ mm}$, F 数为 2; 状态 2 时, 焦距为 $60 \sim 360 \text{ mm}$, F 数为 4。复合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	Value
Wavelength range / μm	8-12
Focal length / mm	10-360
Field of view / ($^\circ$)	30.96-0.95
Sensor	320×240
Pitch / μm	30
Zoom ratio	$36 \times$

3.2 设计结果

根据上节中的理论计算公式, 再结合系统设计指标可得连续变焦部分焦距 f' 的范围为 $25 \sim 150 \text{ mm}$, 根据 f' 的变焦范围和(14)式可得 $m_{5l} = -0.4$, $m_{5l}^* = -2.45$, 根据以上参数各透镜组的焦距分配如下: 前固定组的焦距 $f'_1 = 304.26 \text{ mm}$, 变倍组 1 的焦距 $f'_2 = -63.85 \text{ mm}$, 补偿组的焦距 $f'_3 = 59.6 \text{ mm}$, 后固定组 1 的焦距 $f'_4 = 46.1 \text{ mm}$, 变倍组 2 的焦距 $f'_5 = 39.33 \text{ mm}$, 后固定组 2 的焦距 $f'_6 = 96.72 \text{ mm}$ 。根据以上参数即可求得不同焦距处的透镜间隔, 将以上数据代入 Code V 软件进行优化, 图 2 给出了该系统在不同有效焦距(EFL)位置处的光学系统光路示意图。

该系统共包含 9 片透镜, 仅采用锗和硒化锌两种红外材料。前固定组采用锗, 承担主要光焦度; 变倍组 1 光焦度为负, 采用锗材料, 通过沿轴向移动改变系统焦距; 补偿组光焦度为正, 采用锗和硒化锌两种红外材料, 有利于校正系统色差, 通过沿轴向移动补偿像面漂移; 后固定组 1 采用双分离结构, 材料均为锗; 连续变焦光学系统部分是个传统正组补偿连续变焦系统, 变倍组 2 采用双分离结构, 光焦度为正, 采用锗和硒化锌两种红外材料, 通过沿轴向两点移动改变系统焦距和进行状态切换; 后固定组 2 采用硒化锌材料与前面系统一起校正系统像差, 两档变焦系统部分是一个变倍组光焦度为正的两档变焦系统。

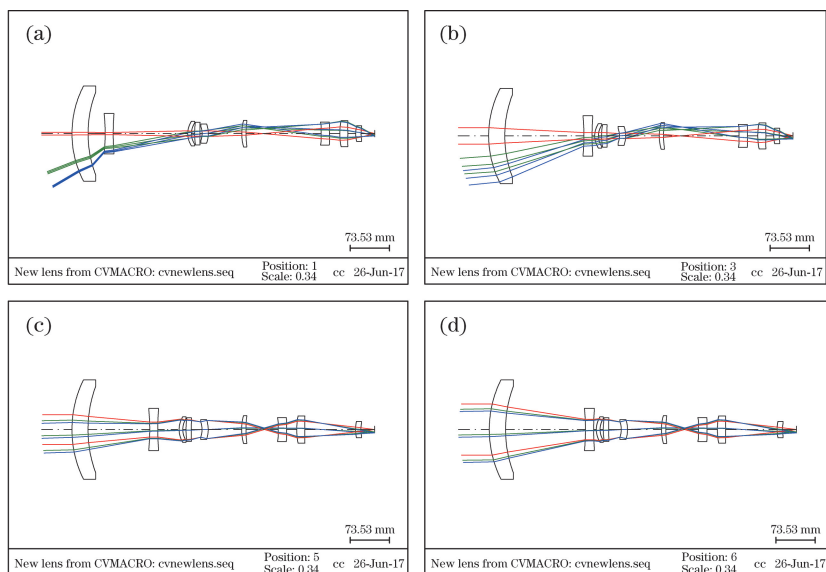


图 2 变焦光学系统光路示意图。(a) EFL: 10 mm; (b) EFL: 60 mm; (c) EFL: 210 mm; (d) EFL: 360 mm
 Fig. 2 Optical path diagrams of zoom optical system. (a) EFL: 10 mm; (b) EFL: 60 mm; (c) EFL: 210 mm; (d) EFL: 360 mm

4 光学系统性能分析

4.1 调制传递函数

调制传递函数(MTF)反映光学系统对物体不同频率成分信息的传递能力,是评价光学系统成像质量的重要手段之一。图 3 给出了该系统在不同焦距位置处的调制传递函数曲线。可以看出,各焦距处调制传递函数接近衍射极限,表明该系统具有较好的成像质量。

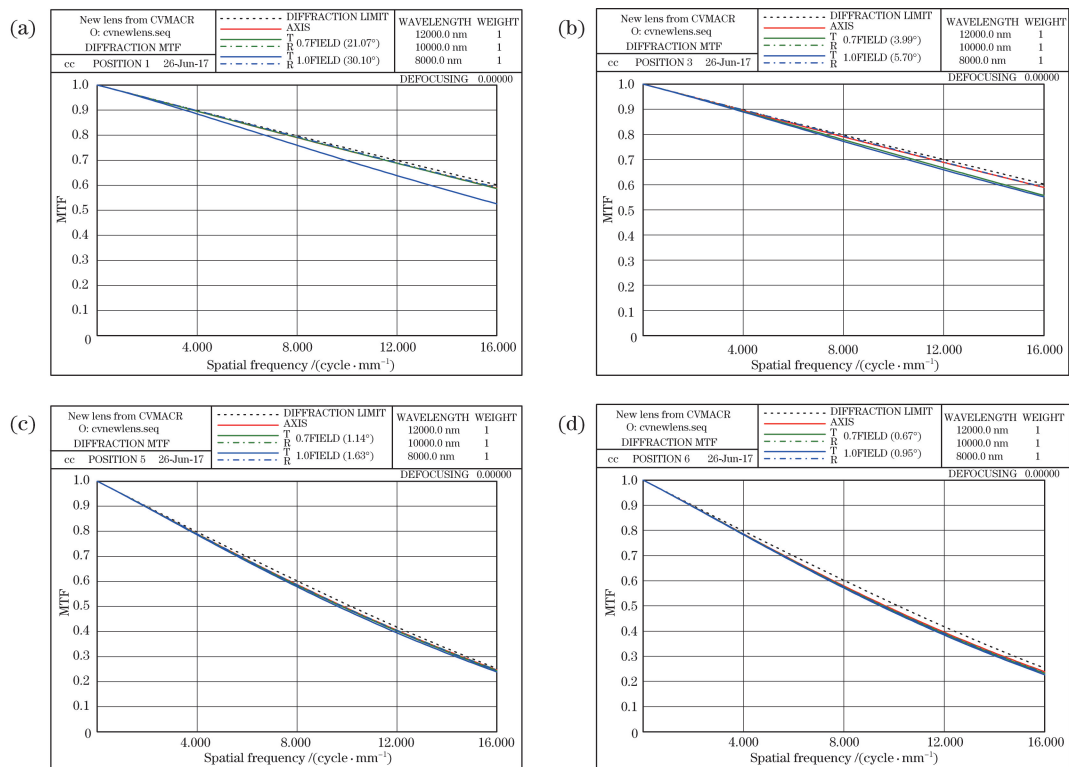


图 3 变焦光学系统的调制传递函数曲线。(a) EFL: 10 mm; (b) EFL: 60 mm; (c) EFL: 210 mm; (d) EFL: 360 mm
 Fig. 3 MTF curves of zoom optical system. (a) EFL: 10 mm; (b) EFL: 60 mm; (c) EFL: 210 mm; (d) EFL: 360 mm

4.2 点列图

点列图是评价光学系统成像质量比较好的方法,它表示来自点目标的光线在像面上的交点的集中程度和弥散范围,集中程度越高,弥散半径越小,成像质量也就越好。图 4 给出了该系统在不同焦距位置处的点列图,结果表明各焦距位置处均方根(RMS)弥散斑直径均在 $30\ \mu\text{m}$ 以内,该系统具有较好的能量集中度。

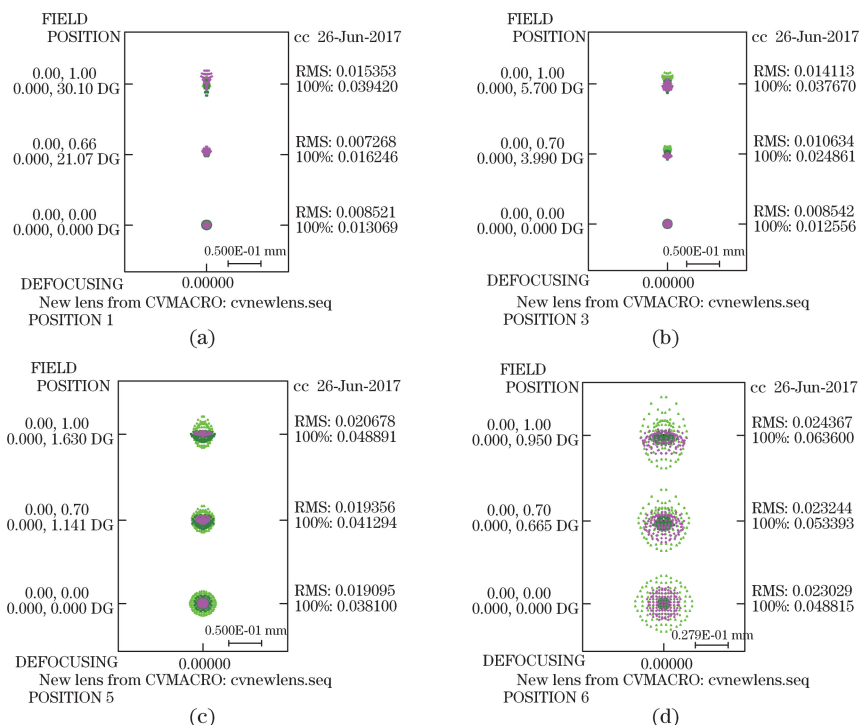


图 4 变焦光学系统点列图。(a) EFL: 10 mm; (b) EFL: 60 mm; (c) EFL: 210 mm; (d) EFL: 360 mm

Fig. 4 Spot diagrams of zoom optical system. (a) EFL: 10 mm; (b) EFL: 60 mm; (c) EFL: 210 mm; (d) EFL: 360 mm

4.3 凸轮曲线优化设计

本系统利用编写的 Code V 宏程序对连续变焦系统部分的凸轮曲线进行优化设计,变倍组 1 做线性运动,补偿组做非线性运动,变倍组 1 导程为 102.13 mm,补偿组导程为 27.97 mm。连续变焦系统部分焦距随凸轮转角呈线性关系,凸轮总转动角为 270° 。结果如图 5 所示,其中横坐标表示凸轮转动的角度,纵坐标表示变倍组 1 和补偿组与前固定组之间的距离,可以看出,变倍组 1 与补偿组运动曲线平滑无拐点。

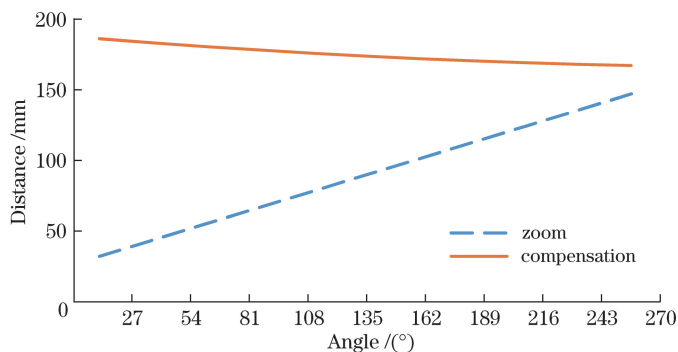


图 5 变焦光学系统的凸轮曲线

Fig. 5 Cam curves of zoom optical system

两档变焦部分变倍组 2 通过轴向移动改变系统焦距和切换不同工作状态,状态 1 时,变倍组 2 与后固定组 1 的距离为 140.46 mm;状态 2 时,变倍组 2 与后固定组 1 的距离为 60.25 mm;两档变焦部分变倍组 2 的导程为 80.21 mm。

5 结 论

提出了一种新型复合变焦光学系统结构,在一个传统的低倍连续变焦系统后面加入一个两档变焦部分,增大传统的低倍连续变焦系统的焦距变化范围。针对长波红外像元数为 320×240 ,像元尺寸为 $30 \mu\text{m} \times 30 \mu\text{m}$ 的非制冷焦平面探测器,设计了一款新型复合变焦光学系统,工作波段为 $8 \sim 12 \mu\text{m}$,焦距变化范围为 $10 \sim 360 \text{ mm}$,该系统具有变倍比大、调制传递函数接近衍射极限、凸轮曲线平滑、机械结构简单等优点。传统的连续变焦系统很难同时满足大范围搜索目标和远距离跟踪目标的使用要求,新型复合变焦光学系统与传统的连续变焦光学系统相比可以增大焦距变化范围,实现大范围搜索目标和远距离跟踪目标,与传统复合变焦光学系统相比,凸轮曲线少,结构简单,体积小,透过率高。新型复合变焦光学系统可以通过增大连续变焦部分和两档变焦部分的变倍比以实现更大变倍比,随着变倍比增大,新型复合变焦光学系统的尺寸也会增加,可以通过折叠光路来减小系统尺寸。

参 考 文 献

- [1] Xue Hui. Optical design of infrared search and trace system[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(8): 2383-2386.
薛慧. 红外搜索与跟踪系统中光学系统的设计[J]. 光学学报, 2010, 30(8): 2383-2386.
- [2] Sansona M, Cornell J, Roy B, *et al.* Development of MWIR continuous zoom with large zoom range[C]. SPIE, 2011, 8012: 80122F.
- [3] Ma Yingjun, Zhang Bao, Hong Yongfeng. Aberration automatic design of continuous zoom optical system[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 33(8): 0822003.
马迎军, 张葆, 洪永丰. 连续变焦光学系统的像差自动校正[J]. 光学学报, 2015, 33(8): 0822003.
- [4] Pan Wenqiang, Li Xiangning, Lu Shan, *et al.* Gauss theoretical analysis of liquid crystal lens zoom system[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(12): 1222003.
潘文强, 李湘宁, 卢山, 等. 液体透镜变焦系统高斯理论分析[J]. 光学学报, 2016, 36(12): 1222003.
- [5] Neil I A. Optical design dependence on technology development[C]. SPIE, 2009, 7428: 742802.
- [6] Yang Mingyang, Yang Hongtao, Qu Rui, *et al.* Design of high ratio middle infrared continuous zoom optical system[J]. Acta Photonica Sinica, 2017, 46(5): 0522003.
杨明洋, 杨洪涛, 曲锐, 等. 80 倍中波红外连续变焦光学系统设计[J]. 光子学报, 2017, 46(5): 0522003.
- [7] Ding Xuming. Focal length range extension mirror[J]. Acta Photonica Sinica, 1984, 13(4): 33-37.
丁旭明. 焦距范围扩展镜[J]. 光子学报, 1984, 13(4): 33-37.
- [8] Gao Hongyun, Xiong Tao, Yang Changcheng. Middle infrared continuous zoom optical system[J]. Optics 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.
- [9] Tao Chuncan. Design of zoom optical system[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1988.
陶纯勤. 变焦距光学系统设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 1988.
- [10] Yu Daoyin, Tan Hengying. Engineering optics[M]. Beijing: China Machine Press, 2006: 28-30.
郁道银, 谈恒英. 工程光学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006: 28-30.