

三组联动连续变焦中波红外光学系统

何红星*

昆明物理研究所, 云南 昆明 650223

摘要 采取将变倍组、补偿组、后固定组分开进行联动的方式对传统光学补偿连续变焦中波红外光学系统进行改进, 获得了超长焦距、超大视场、大变倍比、小型化的光学系统。推导了其数学模型, 基于该模型采用 640×512 制冷型中波探测器, 设计了焦距为 $11.56 \sim 982.6$ mm、变倍比为 $85 \times$ 的连续变焦光学系统, 该光学系统的应用波段为 $3.6 \sim 4.9 \mu\text{m}$, F 数为 5.5, 冷屏效率为 100%。设计结果显示, 该光学系统的外形尺寸为 $333.5 \text{ mm} \times 125 \text{ mm}$ (局部直径为 177.5 mm) $\times 80 \text{ mm}$ (局部直径为 180 mm), 结构紧凑, 变焦过程中变倍补偿曲线平滑、像面稳定。从点列图、光学传递函数、畸变等方面对该光学系统的像质进行评价, 结果表明, 其像质优良, 分辨率高, 可满足热像仪整机使用要求。

关键词 几何光学; 透镜系统设计; 连续变焦; 三组联动; 中波红外光学系统

中图分类号 TN216

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.190801

Medium Wave Infrared Optical System Based on Three Group Linkage Continuous Zoom

He Hongxing*

Kunming Institute of Physics, Kunming, Yunnan 650223 China

Abstract The traditional optical compensated continuous zoom medium wave infrared optical system is improved by means of the combination of the zoom group, compensation group, and post-fixed group. The optical system with super-long focal length, super-large field of view, large zoom ratio, and small envelope is obtained. The mathematical model is deduced. Based on this model, a continuous zoom optical system with focal length of $11.56 \sim 982.6$ mm and zoom ratio of $85 \times$ is designed by using 640×512 refrigerated medium wave detector. The application band of the optical system is $3.6 \sim 4.9 \mu\text{m}$, the F number is 5.5, and the cold screen efficiency is 100%. The design results show that the envelope of the optical system is $333.5 \text{ mm} \times 125 \text{ mm}$ (local diameter of 177.5 mm) $\times 80 \text{ mm}$ (local diameter of 180 mm). The structure is compact, the zoom compensation curve is smooth, and the image plane is stable in zoom process. The image quality of the optical system is evaluated from the aspects of point diagram, optical transfer function, and distortion. The results show that the optical system has excellent image quality and high resolution, and meets the requirements of the thermal imager.

Key words geometric optics; lens system design; continuous zoom; three group linkage; medium wave infrared optical system

OCIS codes 080.3620; 110.3080; 220.3620

1 引言

红外成像技术是利用目标和背景红外辐射的差异或其对自然光源的反射差异来成像的, 一般用于夜间及昼间不良气象条件下对目标的探测、识别、跟

踪和瞄准, 属于被动成像技术, 具有较强的隐蔽性和抗干扰能力^[1]。近年来, 随着红外成像技术的发展, 机载红外系统应用于对目标的探测、识别、跟踪和瞄准时, 要求热像仪具有更远的识别距离、更大的搜索范围, 导致人们对超长焦距超大视场连续变焦红外

收稿日期: 2019-03-11; 修回日期: 2019-04-10; 录用日期: 2019-04-22

基金项目: 云南省创新人才计划(2016HB022)

* E-mail: hxhe2000@163.com

光学系统的需求日益增强。连续变焦光学系统在视场连续变化的过程中能够对目标保持清晰成像,不会出现由于视场切换而导致跟踪目标丢失的情况,因而得到了广泛的应用。

连续变焦光学系统可分为机械补偿连续变焦光学系统和光学补偿连续变焦光学系统。将变焦系统中所有活动组分固连在一起沿光轴方向作直线运动的系统称作光学补偿连续变焦光学系统;一部分活动组的运动补偿是由另一部分活动组的运动而产生的像面位移的变焦系统称作机械补偿连续变焦光学系统^[2-4]。

1998年, Sinclair^[5]采用机械补偿方式利用11片透镜实现了焦距范围为20~400 mm、变倍比为20×的连续变焦系统,该系统总长较长(429 mm),透镜数量多,变倍比小;2002年, Kim^[6]采用机械补偿方式实现了焦距范围为13.19~275 mm、变倍比为20×的连续变焦系统,该系统体积小,但长焦距较短,变倍比小;2010年, Sanson等^[7]采用机械补偿方式实现了焦距范围为15.25~456 mm、变倍比为30×的连续变焦系统,该系统总长较长(355 mm),变倍比小;2012年,江伦等^[8]采用机械补偿方式设计了焦距范围为35~700 mm、变倍比为20×的连续变焦系统,该系统长焦距长,但总长较长,变倍比小;2012年,姜凯等^[9]采用机械补偿变焦方式设计了焦距范围为30~900 mm、变倍比为30×的连续变焦系统,该系统长焦距长,但总长较长,未折叠情况下总长为750 mm;2012年,骆守俊等^[10]采用机械补偿变焦方式设计了焦距范围为50~500 mm、变倍比为10×的连续变焦系统,该系统外形尺寸为350 mm×245 mm×140 mm(长×宽×高),体积大,变倍比小;2013年,李岩等^[11]采用机械补偿方式设计了焦距范围为50~500 mm、变倍比为10×的连续变焦系统,该系统体积小,但长焦距较短,变倍比小;2013年,周昊等^[12]基于320×256制冷中波探测器,采用双组联动变焦结构形式设计了焦距范围为10~400 mm、变倍比为40×的连续变焦系统,该系统体积小,但长焦距较短,小视场大;2014年,张良等^[13]采用机械补偿方式设计了焦距范围为20~300 mm、变倍比为15×的扫描型连续变焦系统,该系统体积小,但长焦距短,变倍比小;2016年,吴耀等^[14]采用机械补偿变焦方式和衍射元件设计了焦距范围为70~800 mm的连续变焦系统,该系统外形尺寸为410 mm×220 mm×255 mm(长×宽×高),体积大,变倍比

小;2017年,曲锐等^[15]基于640×512制冷中波探测器和机械补偿叠加中继组变倍方式设计了焦距范围为6.5~455 mm、变倍比为70×的连续变焦系统,该系统变倍比大,但长焦距短,镜片数量多达10片;2017年,操超等^[16]采用机械补偿叠加中继组补偿方式设计了焦距范围为10~360 mm、变倍比为36×的连续变焦系统,该系统体积小,但长焦距短,变倍比小;2018年,刘钧等^[17]基于640×512制冷中波探测器,采用机械补偿方式设计了焦距范围为50~601 mm的连续变焦系统,该系统变倍比小,总长较长,折叠后总长为412 mm;2018年,张国伟等^[18]采用机械补偿方式设计了焦距范围为13~460 mm的连续变焦系统,该系统体积小,但长焦距短,变倍比小。总的来看,上述光学系统在实现超长焦距、超大视场、大变倍比、小型化、轻量化方面均存在不足,无法满足机载红外系统的需求。

本文在前人研究基础上,基于传统光学补偿方式提出了三组联动连续变焦中波红外光学系统(MWIR)设计的数学模型,推导了其设计原理,并以此为基础,基于640×512制冷型中波探测器,设计了一款焦距范围为11.56~982.6 mm、变倍比为85×的连续变焦光学系统,实现了机载红外系统对光学系统超长焦距(982.6 mm)、超大视场(45.1°)、大变倍比(85×)、小型化、轻量化的要求,经过三次光路转折后光学系统结构紧凑,像质评价显示光学系统分辨率高、成像质量好。装载该光学系统的热像仪可实现远距离探测识别和大范围搜索。

2 设计原理

为了实现超长焦距、超大视场、大变倍比的设计目标,在传统光学补偿变焦系统的基础上,打破变倍组和补偿组固定连接的模式,使变倍组和补偿组分别独立运动,并增加后固定组作为变倍补偿组,从而实现变倍组、补偿组、后固定组3组联动。这种3组联动的变焦结构形式如图1所示,光

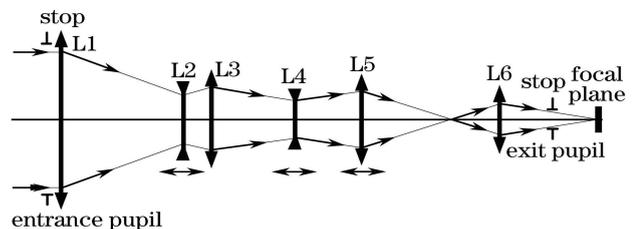


图1 三组联动连续变焦中波红外光学系统原理图

Fig. 1 Principle of three group linkage continuous zoom MWIR optical system

学系统由前固定组 L1、变倍组 L2、中间固定组 L3、补偿组 L4、补偿组 L5、中继组 L6 组成,光焦度分别用 $\phi_1, \phi_2, \phi_3, \phi_4, \phi_5, \phi_6$ 表示,焦距分别用 $f'_1, f'_2, f'_3, f'_4, f'_5, f'_6$ 表示。光学系统采用二次成像方式,变倍补偿关系如图 2 所示,WFOV 为大视场,NFOV 为小视场。

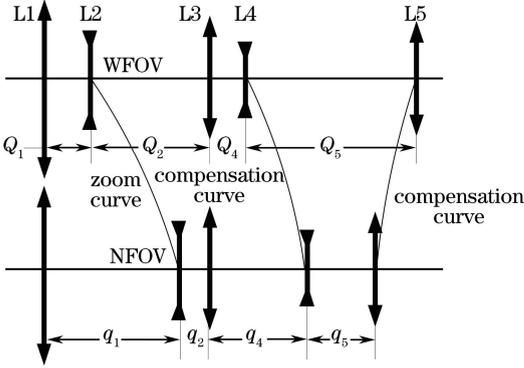


图 2 三组联动连续变焦中波红外光学系统变倍补偿示意图
Fig. 2 Zoom and compensation diagram of three group linkage continuous zoom MWIR optical system

三组联动的变焦方式将变倍组 L2、补偿组 L4、补偿组 L5 分开独立运动,L2 通过轴向运动实现变倍,L4、L5 通过轴向运动对由 L2 带来的像面位移给予补偿。L2 和 L4、L5 均可作非线性运动,且变倍功能和补偿功能是相对的,即补偿组也可起到变倍的功能,变倍组也可起到补偿的功能,以充分发挥变倍组和补偿组的作用,从而在较小的移动范围内实现尽可能大的变倍比,获得较好的成像质量。

在这种变焦结构形式中,L2、L4、L5 独立运动以达到像面稳定。针对整个运动组分 L2、L4、L5 进行分析。为了保持像面稳定,L2、L4、L5 微分运动引起的整个运动组分像面位移之和应为 0,即

$$(1 - m_2^2)m_5^2m_4^2dq_2 + (1 - m_4^2)m_5^2dq_4 + (1 - m_5^2)dq_5 = 0, \quad (1)$$

式中: m_2, m_4, m_5 分别为 L2、L4、L5 的放大率; q_2 为 L2 与 L1 的间距; q_4 为 L4 与 L3 的间距; q_5 为 L5 相对于 L4 的间距; dq_2, dq_4, dq_5 分别为 L2、L4、L5 的微分位移量。

设小视场长焦距位置为变焦起始位置,则有

$$m_2 = m_{2N}, m_4 = m_{4N}, m_5 = m_{5N}, \quad (2)$$

式中: m_{2N}, m_{4N}, m_{5N} 为小视场长焦距位置的放大率;下标 N 代表小视场。

各运动组分 L2、L4、L5 的微分位移量 dq_2, dq_4, dq_5 与倍率微分变化量 dm_2, dm_4, dm_5 之间的关系为

$$dm_2 = -\frac{m_2^2}{f'_2} dl_2, \quad (3)$$

$$dq_2 = \frac{f'_2}{m_2^2} dm_2, \quad (4)$$

$$dq_4 = \frac{1 - m_2^2}{m_2^2} f'_2 dm_2 + \frac{f'_4}{m_4^2} dm_4, \quad (5)$$

$$dq_5 = f'_5 dm_5, \quad (6)$$

式中: l_2 为 L2 相对于 L1 的间距。

计算得到关于 m_4 的二次方程为

$$m_4^2 - bm_4 + 1 = 0, \quad (7)$$

其中,

$$b = -\frac{f'_2}{f'_4} \left(\frac{1}{m_2} - \frac{1}{m_{2N}} + m_2 - m_{2N} \right) - \frac{f'_5}{f'_4} \left(\frac{1}{m_5} - \frac{1}{m_{5N}} + m_5 - m_{5N} \right) + \left(\frac{1}{m_{4N}} + m_{4N} \right), \quad (8)$$

解得

$$\begin{cases} m_{41} = \frac{b + \sqrt{b^2 - 4}}{2} \\ m_{42} = \frac{b - \sqrt{b^2 - 4}}{2} \end{cases}. \quad (9)$$

m_{41} 和 m_{42} 为 L4 放大率的两个根。

由(4)式可得

$$m_2 = \frac{1}{\frac{1}{m_{2N}} + \frac{q_2}{f'_2}}. \quad (10)$$

由(6)式可得

$$m_5 = -\frac{q_5}{f'_5} + m_{5N}. \quad (11)$$

由(5)式可得

$$q_4 = f'_2 \frac{1}{m_2} - \frac{1}{m_{2N}} - q_2 + f'_4 (m_4 - m_{4N}). \quad (12)$$

在变焦起始位置, $m_2 = m_{2N}, m_4 = m_{4N}, m_5 = m_{5N}$;在变倍过程中,由(8)~(11)式可得 m_2, m_5, m_4 。

在 L2、L4、L5 移动的过程中,系统的变倍比为

$$M^* = \frac{m_{2N} m_{4N} m_{5N}}{m_2 m_4 m_5}. \quad (13)$$

达到变倍比的要求之后,当前位置为大视场短焦距位置(变焦终止位置),即 $m_{2W} = m_2, m_{4W} = m_4, m_{5W} = m_5, q_{2W} = q_2, q_{4W} = q_4, q_{5W} = q_5$ (下标 W 代表大视场),其中: m_{2W}, m_{4W}, m_{5W} 分别为大视场短焦距位置的放大率; q_{2W}, q_{4W}, q_{5W} 为大视场短焦距位置的间距。故系统的变倍比为

$$M = \frac{m_{2N} m_{4N} m_{5N}}{m_{2W} m_{4W} m_{5W}} \quad (14)$$

3 设计实例与分析

3.1 设计参数

光学系统的主要技术指标如表 1 所示,其中 FPA 为焦平面阵列。

表 1 光学系统指标

Table 1 Parameters of optical system

Item	Value
Waveband / μm	3.6-4.9
Field of view	continuous zoom: 45.1°×36.1° - 0.56°×0.45°; wide field of view (WFOV): 45.1°×36.1°; narrow field of view (NFOV): 0.56°×0.45°
F number	5.5
Detector	Medium wave infrared: 640×512 FPA detector: pitch of 15 μm ×15 μm 335 mm×126 mm
Envelope	(local diameter of 180 mm)× 120 mm(local diameter of 180 mm)

3.2 设计结果

基于上述设计模型和技术参数进行光学系统设计,依据高斯成像关系分配物镜组和中继组的光焦度,基于近轴光学薄透镜理论和初级像差理论,依据变倍组和补偿组的制约关系,考虑变倍组和补偿组的约束条件,计算得到初始结构参数: $f'_1 = 240.23 \text{ mm}$, $f'_2 = -36.58 \text{ mm}$, $f'_3 = 49.56 \text{ mm}$, $f'_4 = -19.1 \text{ mm}$, $f'_5 = 43.92 \text{ mm}$, $f'_6 = 13.36 \text{ mm}$ 。将其代入 ZEMAX 进行优化,考虑光学系统的像差、边界约束、评价指标等,经过拆分、增减和调整镜片,得到光学系统的三维设计结果,如图 3 所示。

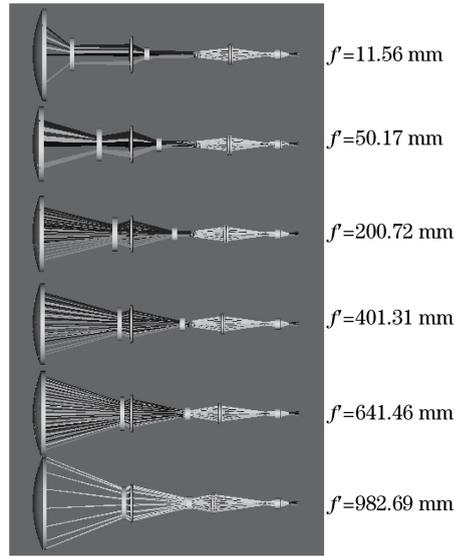


图 3 三组联动连续变焦光学系统图

Fig. 3 Diagram of three group linkage continuous zoom MWIR optical system

抽取变焦过程中的 6 个典型焦距位置进行分析。6 个典型焦距的设计值分别为 982.69, 641.46, 401.31, 200.72, 50.17, 11.56 mm, 视场角分别为 0.56°×0.45°(NFOV)、0.86°×0.69°(第 1 中视场, the first MFOV)、1.37°×1.10°(第 2 中视场, the second MFOV)、2.74°×2.19°(第 3 中视场, the third MFOV)、10.93°×8.74°(第 4 中视场, the fourth MFOV)和 45.10°×36.08°(WFOV),小视场至大视场的变倍比为 85×。

为了减小光学系统的外形尺寸,采用 3 片反射镜对光学系统进行三维立体 270°光路折转,光路 3 次折转的结果如图 4 所示。光路折转后,光学系统的外形尺寸为 333.5 mm×125 mm(局部直径为 177.5 mm)×80 mm(局部直径为 180 mm),体积小。光学系统包括 8 片透镜和 3 片反射镜,镜片数量少。

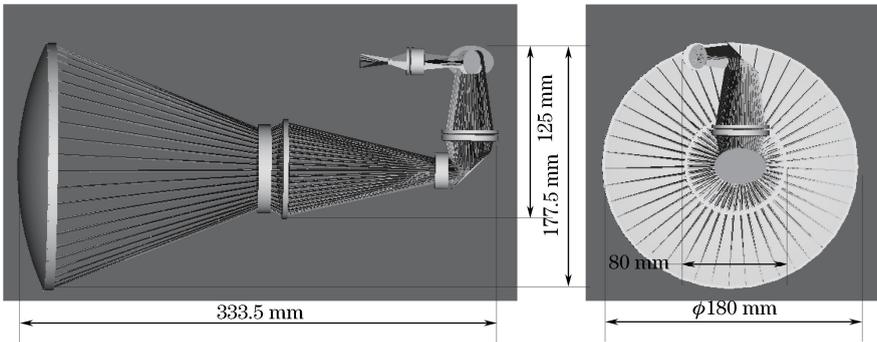


图 4 三组联动连续变焦光学系统光路三维折转图。(a)主视图;(b)左视图

Fig. 4 Three-dimensional fold plot of three group linkage continuous zoom MWIR optical system.

(a) Front view; (b) slide view

光学系统的透镜设计结果见表 2, 非球面参数可表示为

$$z = \frac{c_0 Y^2}{1 + \sqrt{1 - (1 + K)c_0^2 Y^2}} + AY^4 + BY^6 + CY^8 + DY^{10}, \quad (15)$$

式中: $c_0 = 1/R_0$; R_0 为非球面顶点曲率半径; K 为非球面二次项系数, $K = 0$; Y 为非球面弦高; A 、 B 、 C 、 D 为非球面高次项系数; z 为非球面弧矢高度。

第 4 表面非球面参数为: $A = -1.869621 \times 10^{-7}$, $B = -1.9605614 \times 10^{-12}$, $C = D = 0$; 第 8 表面非球面参数为: $A = 7.18062 \times 10^{-7}$, $B = 9.9106059 \times 10^{-10}$, $C = 6.8583926 \times 10^{-11}$, $D = 0$; 第 11 表面非球面参数为: $A = -6.6232566 \times 10^{-7}$, $B = 6.9998369 \times 10^{-11}$, $C = D = 0$; 第 17 表面非球面参数为: $A = -3.9252682 \times 10^{-5}$, $B = -3.2405334 \times 10^{-7}$, $C = D = 0$ 。

表 2 光学系统设计结果

Table 2 Design results of optical system

Surface	Type	Radius /mm	Thickness /mm	Glass
1	Standard	218.49	14.27	Silicon
2	Standard	334.24	154.11/151.17/145.98/136.91/108.29/56.50 *	
3	Standard	-318	4.50	Germanium
4	Evenasph	148.56	7.12/10.07/15.25/24.32/52.94/104.74 *	
5	Standard	147.06	9.11	Silicon
6	Standard	-436.23	100.41/96.53/87.22/72.03/42.71/20.73 *	
7	Standard	164.26	7.51	Silicon
8	Evenasph	36.70	22.11/25.54/34.855/50.04/79.36/101.35 *	
9	Standard	Infinity	20/32.73/37.59/43.3/49.77/52.402 *	Mirror
10	Standard	98.20	3	Zns_broad
11	Evenasph	65.64	1	
12	Standard	63.61	4.66	Silicon
13	Standard	213.40	49.50/37.21/32.355/26.65/20.17/17.54 *	
14	Standard	Infinity	30	Mirror
15	Standard	Infinity	32.78	Mirror
16	Standard	105.71	7.5	Zns_broad
17	Evenasph	17.75	1	
18	Standard	19.36	4	Silicon
19	Standard	-1806.63	13	
20	stop	Infinity	20	

Note: * represents the distance between lenses of the above 6 typical focal length positions.

3.3 性能分析

采用点列图、光学传递函数(MTF)和畸变对所设计的光学系统的成像性能进行分析和评价。点列图是像素化传感器成像系统中评价成像质量的重要指标,可反映光学系统的几何像差;MTF可反映光学系统对物体不同频率成分的传递能力,曲线整体越高,表明系统的成像质量越好。超大视场光学系统的畸变一般都很难校正,因此也将畸变作为评价系统成像质量的指标。

光学系统的点列图如图 5 所示,图中(a)、(b)、(c)、(d)、(e)、(f)分别为前述 6 个典型焦距位置($f' = 982.69, 641.46, 401.31, 200.72, 50.17, 11.56$ mm)光学系统的点列图,每个典型焦距位置的点列图依次为轴上视场至轴外视场的情况,均方根弥散斑半径最大值分别为 10.66, 9.42, 7.47, 6.97,

6.02, 8.71 μm , 均小于艾里斑半径 26.84 μm , 全视场(轴上视场和轴外视场)均符合 78% 的能量落在探测器像元之内的成像要求,其余变焦位置也满足 78% 的能量落在探测器像元之内的要求。

常温(20 $^{\circ}\text{C}$)下光学系统的 MTF 曲线如图 6 所示,图中(a)、(b)、(c)、(d)、(e)、(f)分别为上述 6 个典型焦距位置光学系统的 MTF 曲线,横坐标为空间频率,纵坐标为归一化光学传递函数值,传递函数曲线族对应轴上视场和轴外视场的传递函数曲线。在中心频率 16.67 lp/mm 处,全视场光学系统 MTF 值大于 42%,轴上像差和轴外像差得到了很好的校正,实现了接近衍射极限的性能,其余变焦位置中心频率处全视场 MTF 也接近衍射极限,可满足光学系统成像要求。

光学系统的畸变曲线如图 7 所示,图中(a)、(b)、

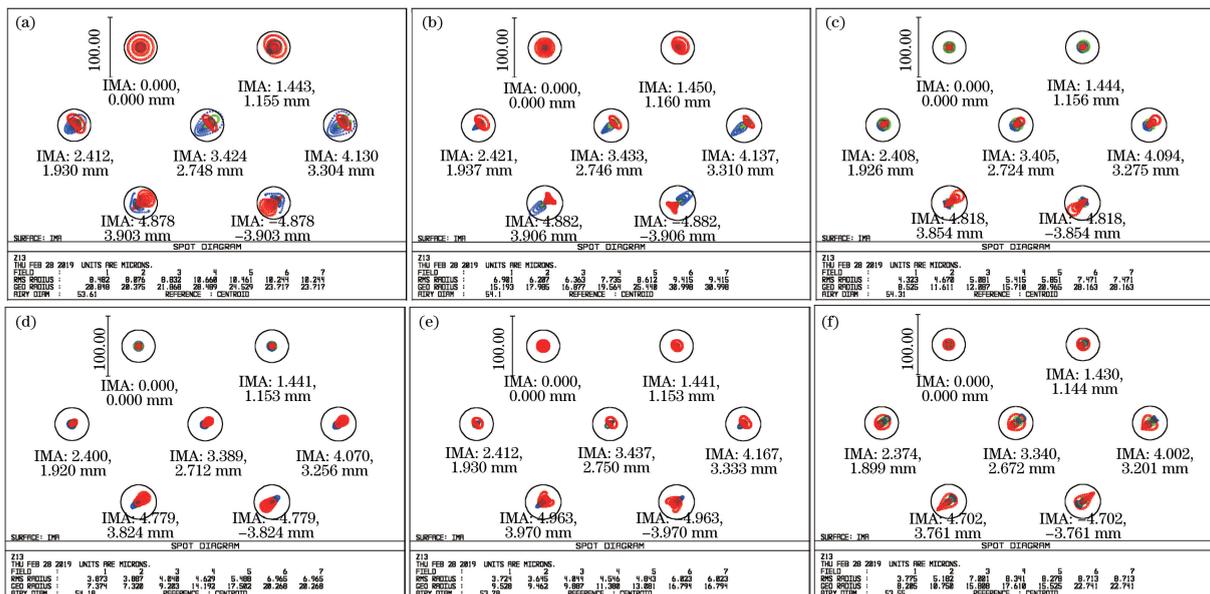


图 5 光学系统点列图。(a)小视场;(b)第 1 中视场;(c)第 2 中视场;(d)第 3 中视场;(e)第 4 中视场;(f)大视场
Fig. 5 Spot diagrams of the optical system. (a) NFOV; (b) the first MFOV; (c) the second MFOV; (d) the third MFOV; (e) the fourth MFOV; (f) WFOV

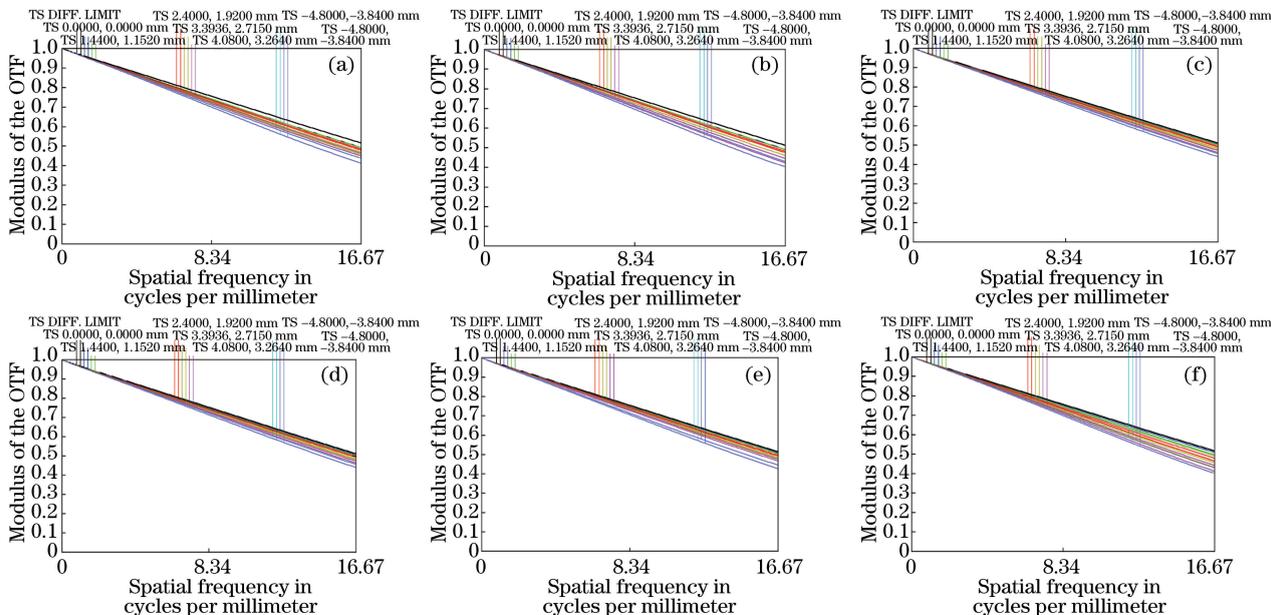


图 6 常温下光学系统的 MTF 曲线。(a)小视场;(b)第 1 中视场;(c)第 2 中视场;(d)第 3 中视场;(e)第 4 中视场;(f)大视场
Fig. 6 MTF curves of the optical system. (a) NFOV; (b) the first MFOV; (c) the second MFOV; (d) the third MFOV; (e) the fourth MFOV; (f) WFOV

(c)、(d)、(e)、(f)分别为上述 6 个典型焦距位置光学系统的畸变曲线,横坐标为畸变值,纵坐标为像面高度,大视场的视场值为 $45.10^{\circ} \times 36.08^{\circ}$,远大于当前通用的 $24^{\circ} \times 19.2^{\circ}$,畸变值最大(3.44%),其余变焦位置的畸变也都小于 3.5%,可满足光学系统的技术指标要求。

3.4 变倍补偿曲线

变焦过程中,变倍组、补偿组与固定组之间的相

对位置——变倍补偿曲线如图 8 所示,图中水平轴为变倍步长,垂直轴表示不同组分间的距离,其中:TH4 代表 L2 与 L3 的距离,TH6 代表 L4 与 L3 的距离,TH8 代表 L4 与 L5 的距离。采用电子凸轮实现上述变倍补偿关系。可以看出,在变焦过程中,变倍组和补偿组的运动曲线平滑无拐点,变倍组和补偿组的约束关系为非线性关系。变焦过程中,变倍组和补偿组的移动位置由位置传感器实时记录并

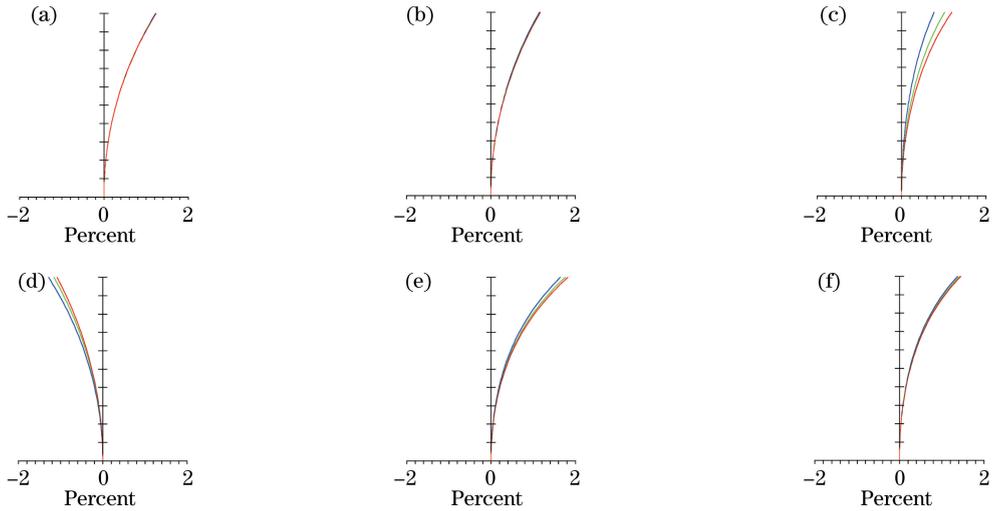


图7 光学系统畸变。(a)小视场;(b)第1中视场;(c)第2中视场;(d)第3中视场;(e)第4中视场;(f)大视场
Fig. 7 Distortion curves of the optical system. (a) NFOV; (b) the first MFOV; (c) the second MFOV; (d) the third MFOV; (e) the fourth MFOV; (f) WFOV

传递给控制电路实时存储,通过控制电路根据温度传感器实测的温度值调整运动模块并驱动变倍组和补偿组到达变倍补偿曲线对应的位置,利用仿真软件计算变倍组和补偿组运动模块的运动曲线,在实际使用环境下进行标定,以满足热像仪使用需要。

177.5 mm)×80 mm(局部直径为180 mm)范围内,光学系统紧凑,实现了外形尺寸小型化。该光学系统可广泛应用于机载搜索瞄准、舰载搜索瞄准、地基防空警戒光电系统热像仪。

参 考 文 献

[1] Zhang W F, Zhao J S, Shi Y L, *et al.* Study on zoom mechanisms of thermal imagers [J]. *Infrared Technology*, 2015, 37(12): 993-998, 1010.
张卫锋, 赵劲松, 史衍丽, 等. 多视场热像仪变倍机构设计技术研究[J]. *红外技术*, 2015, 37(12): 993-998, 1010.

[2] Yao D S. Design method of mechanical compensation three component continuous zoom optical system(1) [J]. *Journal of Applied Optics*, 2008, 29(1): 165-170.
姚多舜. 机械补偿式三组元连续变焦光学系统设计方法(1)[J]. *应用光学*, 2008, 29(1): 165-170.

[3] Yao D S. Design method of mechanical compensation three component continuous zoom optical system(2) [J]. *Journal of Applied Optics*, 2008, 29(2): 321-326.
姚多舜. 连续变焦光学系统设计讲座机械补偿式三组元连续变焦光学系统设计方法(2)[J]. *应用光学*, 2008, 29(2): 321-326.

[4] Yao D S. Design method of mechanical compensation three component continuous zoom optical system(3) [J]. *Journal of Applied Optics*, 2008, 29(3): 481-486.
姚多舜. 机械补偿式三组元连续变焦光学系统设计

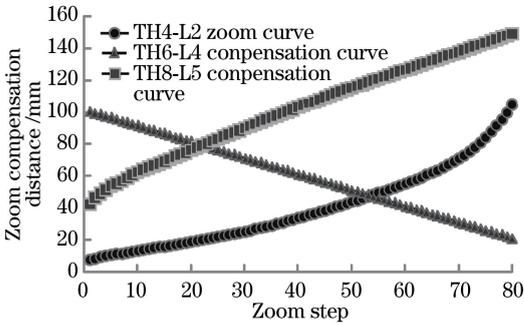


图8 光学系统变倍补偿曲线

Fig. 8 Zoom compensation curve of optical system

4 结 论

基于传统光学补偿方式提出了新颖的三组联动连续变焦中波红外光学系统设计数学模型,基于该模型设计了超长焦距、超大视场、大变倍比、小型化的连续变焦中波红外光学系统,该系统可满足机载红外系统的需要。推导了设计原理并给出了设计实例,设计及分析结果显示,成像质量优良,变倍过程中变倍曲线和两组补偿曲线平滑、像面稳定,较好地实现了连续变焦,可满足系统要求。同时,采用光路立体空间三次折转 270°的方式,将光学系统的外形尺寸控制在 333.5 mm×125 mm(局部直径为

- 方法(3)[J]. 应用光学, 2008, 29(3): 481-486.
- [5] Sinclair R L. High-magnification zoom lenses for 3- to 5- μm applications[J]. Proceedings of SPIE, 1998, 3429: 11-18.
- [6] Kim H S. Compact mid-wavelength infrared zoom camera with 20 : 1 zoom range and automatic athermalization[J]. Optical Engineering, 2002, 41(7): 1661-1667.
- [7] Sanson M C, Cornell J. MWIR continuous zoom with large zoom range[J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7660: 76601X.
- [8] Jiang L, Huang W. Design of long focal length large zoom ratio MWIR zoom optical system[J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(7): 1867-1871.
江伦, 黄玮. 长焦距大变倍比中波红外变焦距系统设计[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(7): 1867-1871.
- [9] Jiang K, Zhou S Z, Wang Y B, *et al.* Design of 30 \times middle infrared continuous zoom system[J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(8): 2162-2166.
姜凯, 周泗忠, 王艳彬, 等. 30 \times 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.
- [10] Luo S J, He W B, Li W H, *et al.* Design of middle infrared continuous zoom optical system with a large FPA[J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(10): 2117-2122.
骆守俊, 何伍斌, 李文虎, 等. 大面阵中波红外连续变焦光学系统设计[J]. 光学精密工程, 2012, 20(10): 2117-2122.
- [11] Li Y, Zhang B, Hong Y F. Design of large zoom ratio middle wavelength infrared zoom optical system [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(4): 0422005.
李岩, 张葆, 洪永丰. 大变倍比中波红外变焦光学系统设计[J]. 光学学报, 2013, 33(4): 0422005.
- [12] Zhou H, Liu Y, Sun Q. MWIR zoom optical system with large zoom range [J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(3): 663-668.
周昊, 刘英, 孙强. 高变焦比中波红外连续变焦光学系统[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(3): 663-668.
- [13] Zhang L, Pan X D. Infrared zoom optical system design based on 480 \times 6 focal plane array[J]. Acta Photonica Sinica, 2014, 43(4): 0422007.
张良, 潘晓东. 基于480 \times 6阵列探测器的红外连续变焦光学系统设计[J]. 光子学报, 2014, 43(4): 0422007.
- [14] Wu Y, Chen L, Xiong T, *et al.* Optical system design of a middle infrared long-focus continuous zoom based on diffractive element [J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2016, 14(3): 58-61.
吴耀, 陈利, 熊涛, 等. 基于衍射元件的长焦距中波红外连续变焦光学系统设计[J]. 光学与光电技术, 2016, 14(3): 58-61.
- [15] Qu R, Mei C, Yang H T, *et al.* Design of compact high zoom ratio infrared optical system[J]. Infrared and Laser Engineering, 2017, 46(11): 1104002.
曲锐, 梅超, 杨洪涛, 等. 紧凑型大变倍比红外光学系统设计[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(11): 1104002.
- [16] Cao C, Liao Z Y, Bai Y, *et al.* A new compound zoom optical system[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(11): 1108001.
操超, 廖志远, 白瑜, 等. 一种新型复合变焦光学系统[J]. 光学学报, 2017, 37(11): 1108001.
- [17] Liu J, Li X J, Xu R C. Design of large target surface cooled middle wavelength infrared zoom optical system [J]. Journal of Xi'an Technological University, 2018, 38(2): 114-120.
刘钧, 李西杰, 徐瑞超. 大靶面制冷中波红外变焦光学系统设计[J]. 西安工业大学学报, 2018, 38(2): 114-120.
- [18] Zhang G W, Wang H T. Design of airborne mid-wave infrared continuous zoom system with large zoom range and large field [J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2018, 16(5): 20-25.
张国伟, 王海涛. 机载大变倍比大视场中波红外连续变焦光学系统设计[J]. 光学与光电技术, 2018, 16(5): 20-25.