

# 一种轴向变倍四视场中波红外光学系统

何红星, 赵劲松

(昆明物理研究所, 云南 昆明 650223)

**摘要:**设计了一款长焦距大变倍比轴向变倍四视场中波红外光学系统. 该光学系统由前固定组、变倍调焦组、中间补偿组、后固定组、反射镜一、反射镜二、中继组组成. 光学系统采用光学补偿叠加机械补偿方式克服单一光学补偿或机械补偿变焦方式无法同时满足光学系统长焦距、大变倍比、光学系统小型化、光学系统宽温度范围(-40℃~70℃)温度补偿等问题, 实现了兼具长焦距和大变倍比的轴向变倍四视场中波红外光学系统. 设计结果表明该光学系统像质良好, 满足热像仪整机使用要求.

**关键词:**红外光学系统; 长焦距; 轴向变倍; 四视场中波红外光学系统

**中图分类号:** TN216 **文献标识码:** A

## An axis-zoom four fields of view MWIR optical system

HE Hong-Xing, ZHAO Jing-Song

(Kunming Institute of Physics, Kunming 650223, China)

**Abstract:** In this research, we designed an MWIR optical system, which is equipped with long focal length, large zoom ratio, axis-zoom and four fields of view. The optical system is composed of seven components, including a front fixing group, a zoom focus group, an intermediate compensation group, a rear fixing group, a first mirror, a second mirror and a relay group. The optical system uses optically compensation superposition mechanical compensation method to improve the major flaws existing in previous similar optical system, that is, the single optically compensation or mechanically compensated zoom optical system cannot meet the followed requirements at the same time. The requirements includes long focal length, large zoom ratio, compact optical system, and temperature compensation for optical system under wide temperature range (-40 to 70℃), etc. The improvement achieved long focal length, large zoom ratio, axis-zoom and four fields of view. The improved design results show that the image quality of the optical system is perfect, and it can meet the requirements of the thermal imager.

**Key words:** IR optical system, long focal length, axis-zoom, four fields of view MWIR optical system

**PACS:** 42.15.Eq, 07.57.-c

## 引言

当前红外系统用于对目标进行搜索与探测时, 对多视场或连续变焦中波红外光学系统的需求日益增强, 且应用中要求多视场热像仪具有更远的识别距离、更大的搜索范围、更强的温度环境适应能力, 同时要求热像仪小型化、轻量化.

多视场变倍光学系统变倍的方式分为切入/切

除变倍和轴向变倍两种方式, 切入/切除变倍方式通过不同变倍镜组切入/切除光路实现视场的转换, 轴向变倍方式通过变倍镜组与补偿镜组在光轴上移动实现视场的转换. 为了有利于实现多视场光学系统小型化, 采用轴向变倍方式, 但设计难度更大.

为提高识别距离, 需增大红外光学系统口径、增加焦距; 为扩大搜索范围, 需缩短焦距, 增大光学系统变倍比. 多视场红外光学系统如果采用单一机械

收稿日期: 2016-11-05, 修回日期: 2017-03-05

基金项目: 预研项目支持(2016Z05-020)

Foundation items: Supported by advanced research project (2016Z05-020)

作者简介 (Biography): 何红星(1977-), 男, 贵州盘县人, 研究员级高工, 博士. 主要从事红外光学及热像仪总体技术研究. E-mail: hxhe2000@163.com

Received date: 2016-11-05, revised date: 2017-03-05

补偿或光学补偿<sup>[14]</sup>方式,变倍行程大,变倍机构重,不利于小型化;采用单一机械补偿或光学补偿方式无法同时满足长焦距、大变倍比、光学系统小型化、光学系统宽温度范围(-40℃~70℃)温度补偿等要求。

基于上述需求,有必要寻求一种新型的光学系统,以满足长焦距、大变倍比、宽温度范围温度补偿、小型化、轻量化等要求。本文将详细阐述一种轴向变倍四视场中波红外光学系统的设计。

## 1 光学系统方案

### 1.1 光学系统主要技术指标

根据中波红外成像仪的要求,光学系统的主要技术指标如下:(1)工作波段,中波红外波段 3.7~4.8 μm;(2)视场:大视场(WFOV)24.62°×19.69°,中视场(MFOV)4.51°×3.61°,小视场(NFOV)1.64°×1.31°,超小视场(SNFOV):0.82°×0.66°;(3)F数,F/4;(4)探测器,中波红外 640×512 FPA 探测器,像元尺寸 15 μm×15 μm;(5)外形包络:300 mm×140 mm(局部 185 mm)×90 mm(局部 Φ172 mm)。

### 1.2 光学系统方案及实现方式

光学系统基本方案如图 1 所示,光学系统由前固定组(1)、变倍调焦组(2、4)、中间补偿组(3)、后固定组(5)、反射镜一(6)、反射镜二(7)、中继组(8、9)、冷光阑及焦平面组成。

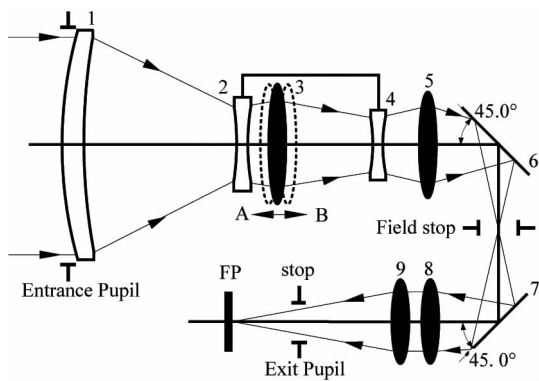


图 1 四视场中波红外光学系统原理图  
Fig.1 The principle of the MWIR optical system with the four field of view

前固定组(1)、中间补偿组(3)、后固定组(5)分别由一片透镜组成;变倍调焦组(2、4)由变倍组(2)和补偿组(4)固定连接在一起,组成一组变倍调焦补偿组,变倍组(2)和补偿组(4)分别由一片透镜组成;中继组(8、9)由第一中继组(8)和第二中继组

(9)组成,第一中继组(8)和第二中继组(9)分别由一片透镜组成。

如图 1、图 2 所示,采用光学补偿叠加机械补偿的原理,实现光学系统变倍、调焦和温度补偿。变倍调焦组采用光学补偿变焦原理,由一组伺服运动机构驱动,沿轴向运动实现光学系统的变倍、调焦,变倍曲线和补偿曲线为直线,即将变倍组(2)和补偿组(4)用机械结构固定连接在一起沿轴向直线运动,具体运动方向是沿 A 方向为大视场方向,沿 B 方向为超小视场方向;中间补偿组采用机械补偿原理,由第二组伺服运动机构驱动,沿轴向微小移动(轴向移动量小于 5 mm)实现高低温宽温度范围内四个视场的温度补偿,低温-40℃条件下,大、中视场中间补偿组沿轴向 A 方向移动,小、超小视场中间补偿组沿轴向 B 方向移动,高温 70℃条件下,大、中视场中间补偿组沿轴向 B 方向移动,小、超小视场中间补偿组沿轴向 A 方向移动。变倍调焦组和中间补偿组的位置(运动曲线)由位置传感器实时寄存在伺服电路寄存器中,伺服电路根据温度传感器的温度值即时调整两组运动运动机构到达对应位置,两组运动机构的运动曲线经软件仿真计算后在高低温条件下进行了校正。

前固定组(1)材料为硅单晶、变倍组(2)材料为锗单晶、中间补偿组(3)材料为硅单晶、补偿组(4)材料为硅单晶、后固定组(5)材料为硅单晶、第一中继组(8)材料为硫化锌、第二中继组(9)材料为硅单晶;所述的反射镜一(6)、反射镜二(7)材料为钛合金。

光学系统除采用光学补偿叠加机械补偿原理,还采用光瞳匹配技术,采用二次成像、二次折叠方式,有效地对光学系统横向和纵向尺寸进行约束。采用光瞳匹配技术,实现入瞳与大物镜匹配,出瞳与冷光阑匹配,即光学系统入瞳与大物镜—前固定组(1)的位置和口径一致,光学系统出瞳与探测器冷光阑的位置和口径一致;采用二次成像,一次像面位于反射镜一(6)和反射镜二(7)之间,一次像面处设置视场光阑,大小与探测器焦平面经中继组在一次像面处所成的像大小一致,用于消杂光,二次像面位于探测器的焦平面处;采用二次折叠方式,即两块 45°放置的反射镜(6)和(7)在后固定组(5)和中继组(8、9)之间对光路进行 180°平面折叠。

设计过程中综合运用上述技术实现光学系统长焦距、大变倍比、宽温度范围温度补偿、小型化、轻量化,将光学系统外形包络控制在 300 mm×140 mm

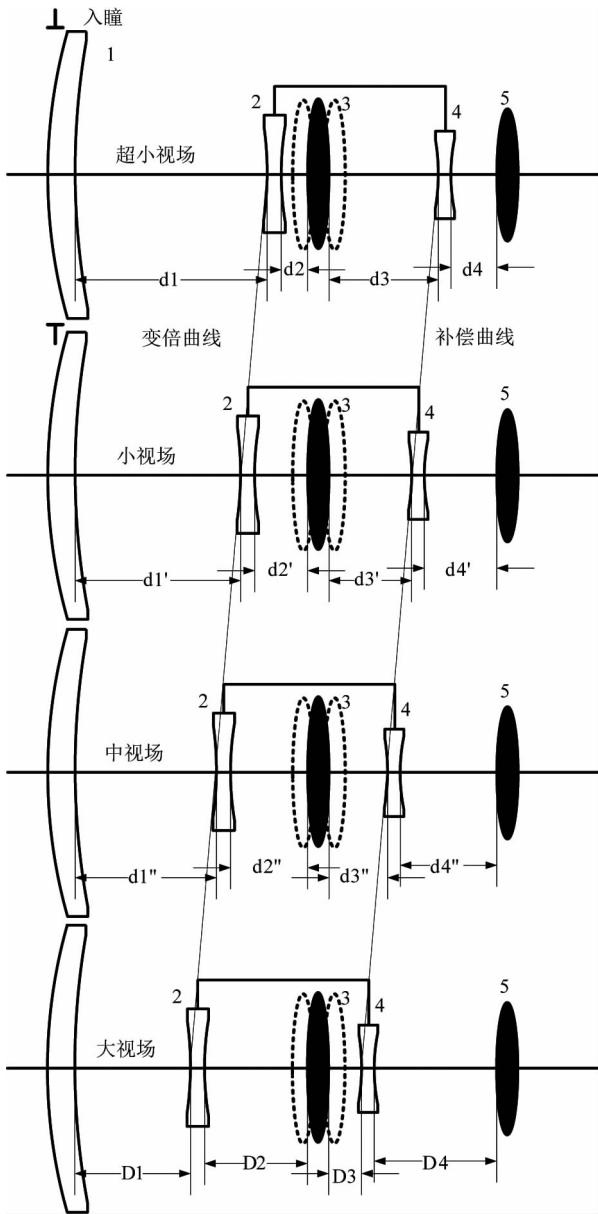


图2 四视场中波红外光学系统变倍补偿曲线  
 Fig.2 The zoom and compensation curves of the four field of view MWIR optical system

(局部 185 mm) × 90 mm (局部 Φ172 mm) 范围内。

## 2 优化设计结果及评价

### 2.1 光学系统优化设计结果

基于上述方案进行光学系统的设计,从初级象差理论<sup>[5]</sup>出发计算各子模块的初始结构参数<sup>[6]</sup>,利用 ZEMAX 和 CODE-V 软件、光学评价函数和各种优化设计技术进行优化设计<sup>[7]</sup>,校正各类象差,平衡初级和高级象差得到满足技术指标的四视场中波红外光学系统。

设计结果如图 3 所示,该光学系统四个视场对

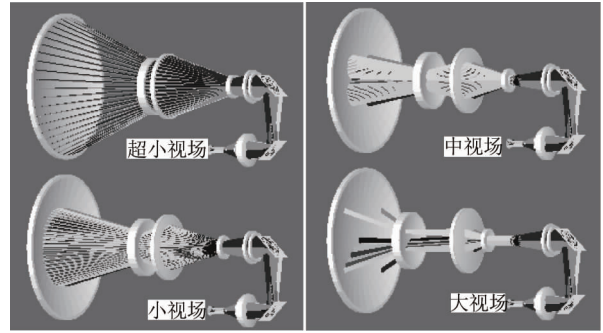


图3 四视场中波红外光学系统图  
 Fig.3 The design of the four field of view MWIR optical system

应的焦距设计值分别为 670 mm、335.7 mm、122 mm 和 22.02 mm,视场角为  $0.82^\circ \times 0.657^\circ$ 、 $1.638^\circ \times 1.31^\circ$ 、 $4.506^\circ \times 3.605^\circ$  和  $24.59^\circ \times 19.675^\circ$ ,满足技术指标要求。

高低温下中间补偿组运动曲线如图 4 所示,图中四组曲线分别代表超小视场 (SFOV)、小视场 (NFOV)、中视场 (MFOV)、大视场 (WFOV) 中间补偿组运动曲线,水平轴为温度轴,单位  $^\circ\text{C}$ ,垂直轴为运动距离,分别代表  $D_2$ 、 $d_2$ 、 $d_2'$ 、 $d_2$ ,运动距离小于 5 mm,为线性运动,容易实现。

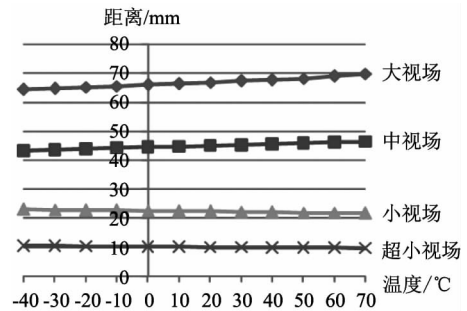
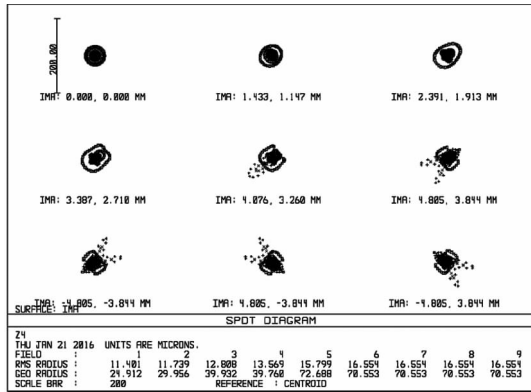


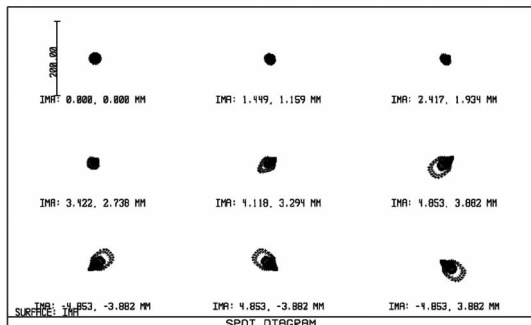
图4 四视场中波红外光学系统中间补偿组补偿曲线  
 Fig.4 The middle compensation group moving curves of the four field of view MWIR optical system

### 2.2 光学系统像质评价

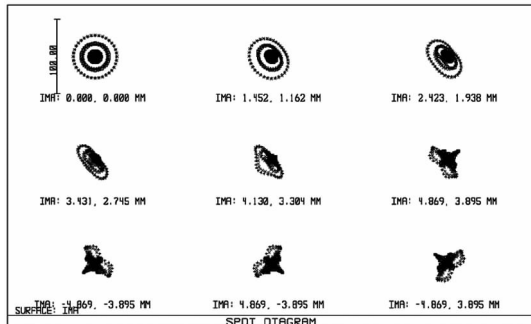
采用点列图及光学传递函数对光学系统的成像质量进行评价.光学系统点列图如图 5 所示,图 5 中,(a)为超小视场光学系统点列图,均方根弥散斑半径最大值为  $16.55 \mu\text{m}$ ,几何弥散斑半径最大值为  $70.55 \mu\text{m}$ ,79% 的能量落在探测器像元之内,满足成像要求;(b)为小视场光学系统点列图,均方根弥散斑半径最大值为  $15.70 \mu\text{m}$ ,几何弥散斑半径最大值为  $52.30 \mu\text{m}$ ,78% 的能量落在探测器像元之内,满足成像要求;(c)为中视场光学系统点列图,均方



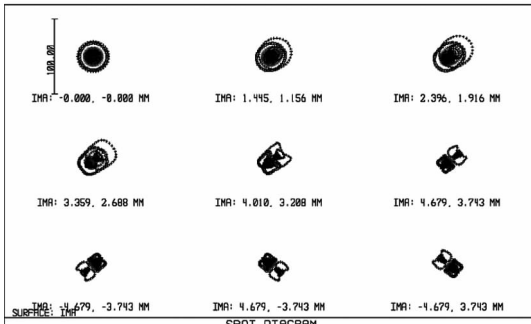
(a)



(b)



(c)



(d)

图5 光学系统点列图  
Fig.5 The spot diagram of the four field of view MWIR optical system

根弥散斑半径最大值为 10.84  $\mu\text{m}$ ,几何弥散斑半径最大值为 29.72  $\mu\text{m}$ ,78%的能量落在探测器像元之内,满足成像要求;(d)为大视场光学系统点列图,均方根弥散斑半径最大值为 10.49  $\mu\text{m}$ ,几何弥散斑半径最大值为 33.06  $\mu\text{m}$ ,75%的能量落在探测器像元之内,满足成像要求。

常温 20 $^{\circ}\text{C}$  光学系统调制传递函数(MTF)如图 6 所示,低温(-40 $^{\circ}\text{C}$ )下光学系统 MTF 如图 7 所示,高温(+70 $^{\circ}\text{C}$ )光学系统 MTF 如图 8 所示。

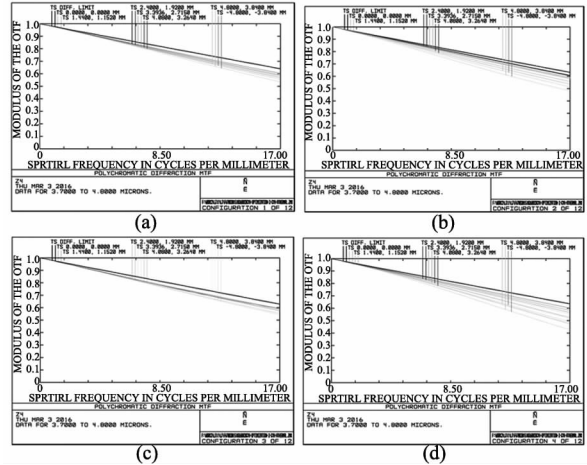


图6 常温下光学系统 MTF  
Fig.6 The MTF of the four field of view MWIR optical system at the temperature of 20 $^{\circ}\text{C}$

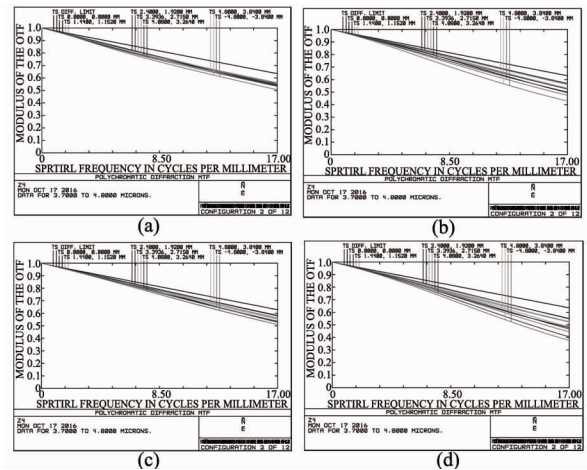


图7 -40 $^{\circ}\text{C}$ 光学系统 MTF  
Fig.7 The MTF of the four field of view MWIR optical system at the temperature of minus 40 $^{\circ}\text{C}$

如图 6 所示、图 7、图 8 所示,a 图为超小视场光学系统 MTF,b 图为小视场光学系统 MTF,c 图为中视场光学系统 MTF,d 图为大视场光学系统 MTF,在特征频率 16.671 lp/mm 处,光学系统 MTF 大于

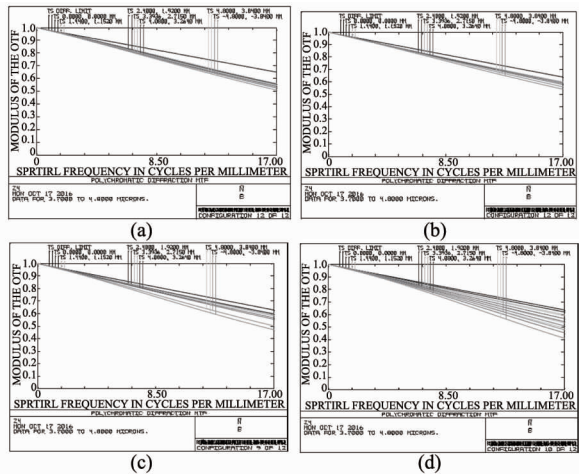


图8 +70℃光学系统 MTF

Fig. 8 The MTF of the four field of view MWIR optical system at the temperature of 70℃

45%, 接近衍射限, 满足要求。

### 2.3 光学系统误差分析

对光学元件曲率半径、中心厚度、离心、倾斜等制造和装配要素取适当公差, 半径光圈误差为 2, 中心厚度误差为 0.05 mm, 表面倾斜误差为 0.05 mm, 元件倾斜误差为 0.05 mm, 利用蒙特卡洛方法对光学系统进行误差分析, 得到最差的结果 (Worst of-fenders) 如表 1。

表 1 误差分析结果

Table 1 The results of tolerance analysis of the four field of view MWIR optical system

Type	Value	Criteria	Change
TETY	5	-0.036 728	0.045 243
TETY	5	0.036 728	0.045 243
TETX	5	0.036 728	0.044 601
TETX	5	-0.036 728	0.044 601
TETY	4	0.045 473	0.038 169
TETY	4	-0.045 473	0.038 169
TETX	4	-0.045 473	0.037 248
TETX	4	0.045 473	0.037 248
TFRN	5	-2.000 000	0.029 684
TIRX	6	0.050 000	0.029 611

从上述最差的 10 个结果可以看出, 第二透镜的倾斜误差 (TETY 4, TETX 4) 以及第三透镜的表面倾斜误差 (TIRX6)、元件倾斜误差 (TETY 5, TETX 5) 和曲率半径误差 (TFRN 5) 对系统影响较大, 因此第二透镜和第三透镜的加工和装调误差需要严格控制, 使其误差在上述预算范围内。

## 3 结论

该轴向变倍四视场中波红外光学系统, 采用光学补偿叠加机械补偿的原理, 实现变倍、调焦和温度补偿。变倍调焦组采用光学补偿变焦原理, 由一组伺服运动机构驱动, 沿轴向运动实现光学系统的变倍、调焦, 中间补偿组采用机械补偿原理, 由第二组伺服运动机构驱动, 轴向微小移动 (轴向移动量小于 5 mm) 实现高低温宽温度范围内 (-40℃ ~ +70℃) 四个视场的温度补偿。另外, 采用光瞳匹配技术, 采用二次成像、二次折叠方式, 有效地对光学系统横向和纵向尺寸进行了约束, 将光学系统外形包络控制在 300 mm × 140 mm (局部 185 mm) × 90 mm (局部 Φ172 mm) 范围内, 实现了外形包络最小化, 系统紧凑。

该光学系统是一个高性能的轴向变倍四视场中波红外光学系统, 在常温、高温、低温下成像质量好, 性能稳定, 该光学系统已应用到热像仪整机, 整机性能高, 热像仪冲振和高低温环境试验后超小视场光轴稳定性误差小于 0.04 mrad, 视场转换光轴平行性误差: 大视场/中视场小于 4.00 mrad, 中视场/小视场小于 1 mrad, 小视场/超小视场小于 0.06 mrad; 对 2.3 m × 2.3 m 坦克目标的识别距离大于 13 km, 探测距离大于 18 km。

## References

- [1] ZHANG Yi-Mo, *Applied optics* [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry (张以谟, 应用光学, 北京: 电子工业出版社), 2008, 636-658.
- [2] XUE Hui, LI Chang-Wei. Optical design of infrared continuous-zoom lenses[J]. *Infrared Millim. Wave* (薛慧, 李常伟. 红外中波连续变焦光学系统的设计[J]. *红外与毫米波学报*), 2012, 31(5): 421-436.
- [3] FU Yan-Peng, JIN Ning, LI Xun-Niu, et al. Airborne novel design for MWIR continuous zoom optical system[J]. *Infrared Millim. Wave* (付艳鹏, 金宁, 李训牛, 等. 机载新颖连续变焦中波红外光学系统设计[J]. *红外与毫米波学报*), 2013, 32(4): 309-324.
- [4] ZHANG Liang, MAO Xin, WANG He-Long. The design of MWIR/LWIR multiple FOV optical system[J]. *Infrared Millim. Wave* (张良, 毛鑫, 王合龙. 中波/长波双色多视场光学系统设计[J]. *红外与毫米波学报*), 2013, 32(3): 254-264.
- [5] LI Jing-Zhen, *Handbook of optics* [M]. Xian: Publishing House of Shanxi Science and Technology (李景镇, 光学手册, 西安: 陕西科学技术出版社), 2010, 845-855.
- [6] Warren J. Smith. *Practical optical system layout* [M]. New York: McGraw-Hill, 1997, 12-34, 145-151, 57-92.
- [7] Warren J. Smith. *Modern lens design* [M]. New York: McGraw-Hill, 2005, 11-68.