

# 基于共心球透镜的大视场高分辨率红外变焦成像系统设计

杨 威<sup>1,2</sup>, 刘佳维<sup>1,2</sup>, 韩平丽<sup>1,2</sup>, 邵晓鹏<sup>1,2</sup>, 赵小明<sup>1,2\*</sup>

(1. 西安电子科技大学 西安市计算成像重点实验室, 陕西 西安 710071;  
2. 西安电子科技大学 物理与光电工程学院, 陕西 西安 710071)

**摘要:** 针对凝视型红外成像告警设备中对场景目标进行大视场广域搜索与小视场精确识别一体化的应用需求, 设计了一种基于共心球透镜的大视场高分辨率红外变焦成像系统. 该系统采用由多层共心球透镜和可连续变焦的独立次级小相机阵列级联而成的二次成像结构, 能够有效实现大视场高分辨率无畸变成像. 此外, 采用全动变焦设计的独立次级小相机阵列在对搜索到的目标进行探测、识别和跟踪的一体化检测的同时保持像面稳定, 实现对成像场景的分区管理. 设计结果表明, 该红外成像系统在全变焦范围内的调制传递函数(MTF)曲线均接近衍射极限, 且变焦曲线平滑, 避免了变焦过程中卡滞、冲击等不利现象的产生, 能有效实现大视场监测及小视场识别的功能.

**关键词:** 光学; 大视场成像; 共心球透镜; 全动变焦; 目标探测与识别; 红外系统

中图分类号: O435 文献标识码: A

## Design of an infrared zoom imaging system based on concentric spherical lens with wide FOV and high resolution

YANG Wei<sup>1,2</sup>, LIU Jia-Wei<sup>1,2</sup>, HAN Ping-Li<sup>1,2</sup>, SHAO Xiao-Peng<sup>1,2</sup>, ZHAO Xiao-Ming<sup>1,2\*</sup>

(1. Xi'an Key Laboratory of Computational Imaging, Xidian University, Xi'an 710071, China;  
2. School of Physics and Optoelectronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China)

**Abstract:** For staring infrared imaging warning equipment, both wide field of view (FOV) surveillance and accurate target detection are urgently demanded. To meet this requirement, we designed an infrared zoom surveillance system based on concentric spherical lens in this study. It consists of a multi-layer concentric spherical lens and an array of independent continuous zoom cameras. With the spherical lens, a wide FOV is achievable benefiting from its structure. The small camera array enables imaging the target scene into sub-regions. And with the continuous zoom ability, the camera array makes it possible for simultaneous wide FOV surveillance and target identification. When potential targets are detected, further determination and identification can be made by zooming in the corresponding camera to provide high-resolution images. Results show that the modulation transfer function (MTF) curves of the infrared imaging system in the full zoom range are close to the diffraction limit. The zoom curve is smooth avoiding the occurrence of jamming, impact and other adverse phenomena in the zoom process. It provides feasible solution for large field monitoring and high-resolution target identification.

**Key words:** optics, wide field of view (FOV) imaging, concentric spherical lens, full-motion zoom, target detection and identification, infrared system

PACS: 07. 57. Ty, 42. 15. Eq, 42. 15. Fr, 42. 79. -e

收稿日期: 2019-05-25, 修回日期: 2019-11-14

Received date: 2019-05-25, Revised date: 2019-11-14

基金项目: 陕西省自然科学基金(2018JQ6010), 陕西省博士后科学基金(187378)

Foundation items: Supported by the Natural Science Foundation of Shaanxi Province (2018JQ6010), and Shaanxi Postdoctoral Science Foundation (187378)

作者简介(Biography): 杨威(1966-), 男, 山西原平人, 副教授、博士. 主要研究领域为目标与环境的红外辐射特性研究. Email: weiyang@mail.xidian.edu.cn

\*通讯作者(Corresponding author): E-mail: xmzhao@mail.xidian.edu.cn

## 引言

红外成像技术通过探测目标红外辐射特性实现来袭飞机、导弹等目标的探测、识别与跟踪,具有隐蔽性好、抗干扰能力强、全天候工作等优点,是光电告警领域的主要研究热点<sup>[1-2]</sup>。受红外探测器制造技术的限制,红外成像系统通常仅提供低分辨率图像数据。在视场固定的条件下存在大范围搜索和目标精确识别无法同时实现的矛盾。如需对目标进行大范围搜索时,由于图像分辨率较低,将直接增加目标探测难度,目标识别则更加困难。因此,如何解决红外成像系统大视场广域目标搜索与小视场高精度目标识别与跟踪的矛盾是目前红外成像告警技术的迫切需求<sup>[3-4]</sup>。

一种具有大成像视场的光电告警设备采用扫描式成像,通过线阵/面阵红外探测器对物方空间进行扫描获取大视场,该方式能够在一定程度实现对物方目标的大范围搜索和定位,但是其存在扫描机构复杂、视场扫描时间长、漏检率高等不足<sup>[5-6]</sup>,实际应用受限。相比之下,凝视型成像方式能够大幅提高成像实时性,如通过分布式孔径的思想和全景鱼镜头成像的方式来实现大视场成像。由于取消了扫描机构,成像系统结构大幅简化,系统体积有效减小,并能够充分利用探测器的快速响应特性<sup>[7-8]</sup>,有效提高了场景态势感知实时性<sup>[9-11]</sup>,但存在获取的图像几何畸变较大、像面照度不均匀等问题,影响目标探测识别,且同样无法满足大视场目标搜索与高精度目标识别的需求。

实现大成像视场的另一方式为采用具有中心对称结构的球透镜,杜克大学 Brady 等人利用球透镜设计的 AWARE (The Advanced Wide Field of View Architectures for Image Reconstruction and Exploitation Multiscale Camera) 系列十亿超高像素相机能同时获得 120° 的大视场和仅 40  $\mu\text{rad}$  的瞬时视场<sup>[12-16]</sup>,且能够解决传统凝视型光电成像系统畸变大、照度不均匀等问题,为实现大视场成像提供了新思路。

受球透镜成像特性启发,本文针对传统凝视型红外成像系统大视场目标搜索与高精度目标识别的矛盾问题,设计了一种基于共心球透镜的大视场高分辨率红外变焦成像系统,该系统充分利用了球透镜视场大、光能收集能力强、轴外像差小等特点,以大尺度多层共心球透镜为主物

镜,多个小尺度相机阵列为次级成像系统的多尺度成像结构。在对物方场景进行高精度无畸变成像的同时对场景进行分区域管理,同时实现了大视场广域目标搜索与小视场高精度目标识别、跟踪等一体化侦测需求。此外,小相机采用全动变焦的方式实现视场间的连续切换,可对目标进行搜索与跟踪时维持像面稳定,保证目标不丢失。设计结果表明该系统的 MTF 曲线值接近衍射极限,且各视场成像效果良好,系统在变焦过程中具有良好的成像稳定性。

## 1 基于多尺度共心球透镜的红外成像系统设计原理

基于多尺度共心球透镜的红外成像系统是一个多尺度成像系统,由主物镜和次级小相机阵列组成。其中主物镜为一个双层四胶合共心球透镜,如图 1 所示,收集光能接收目标场景光场信息;二级成像结构为排布于球透镜一次像面的可变焦小相机阵列,通过二者的配合对目标进行多级侦测的同时实现对成像场景的分区域管理。

主物镜四胶合共心球透镜结构具有旋转对称特点,没有传统意义上的主光轴,因此与视场相关的像差较小。且球透镜口径大、边缘视场无渐晕,作为光能收集系统可以解决传统像面边缘照度降低的问题。二次成像系统位于球透镜的一次像面附近,将主物镜的像中继转换至二次像面上。使小相机阵列的若干子像面之间存在视场重叠,经子像面拼接处理获取完整的目标场景信息。此外,该二次成像系统还能够进一步校正主物镜的残留像差,减小成像畸变,解决传统光学系统由于像差随视场角增大而增大、二者相互制约难以同时实现大视场、高分辨率成像的问题。

次级小相机阵列兼具连续变焦的功能,通过电机调节凸轮机构改变系统的组合焦距实现,使系统在对目标进行多级侦测时保持像面的稳定性。在对目标进行广域搜索时,系统工作在短焦模式,次级小相机阵列转接一次像面且子图像间存在部分重叠,拼接后获取大视场成像结果;与此同时,每个独立的次级小相机分管部分视场,当探测到敏感目标时,调节特定象限区域的次级小相机焦距实现长焦小视场成像,实现对敏感目标的精确识别,其余次级小相机维持广域监视功能,不参与变焦识别,如图 1 所示。系统的这一分区域管理特点能够同时满足红外系统大视场目标搜索与高精度目标识别的

需求.

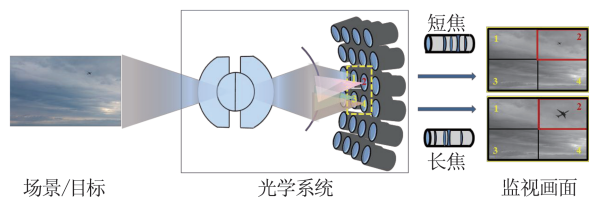


图1 光学成像系统原理图

Fig. 1 Schematic diagram of the optical imaging system

## 2 变焦系统设计理论基础

变焦功能是该系统实现大视场目标搜索与高精度目标识别的基础,利用连续变焦的成像方式使光学系统在两种监测状态之间进行视场的连续缩放,保证目标不丢失且维持像面稳定.本文中采用三组全动型变焦方式设计可变焦次级小相机阵列,每个相机都具有完全变焦能力和像差补偿能力,可实现全系统同时校正像差;且多组全动型变焦系统各组份的移动距离相比其他变焦方式小很多,有利于减小光学系统筒长,实现系统小型化<sup>[17]</sup>.

在全动型变焦系统的设计中,为确定系统各个组份的光焦度值,需要确定任意两个不同变焦位置的组份间距及系统的后截距<sup>[18]</sup>,并以系统各组份光焦度值不变为基础建立变焦方程进行求解.图2所示为理想透镜组的变焦示意图,该系统由3个组份构成,其中 $\varphi_i$ 为组份*i*的光焦度; $h_i$ , $H_i$ 分别为组份*i*在两个变焦位置的光线高度; $d_{i+1}$ , $D_{i+1}$ 分别为组份*i*,*i*+1在两个变焦位置的间隔; $u_i$ , $U_i$ 分别为组份*i*在两个变焦位置的光线入射角; $l_j$ , $L_j$ 分别为两个变焦位置的后截距.

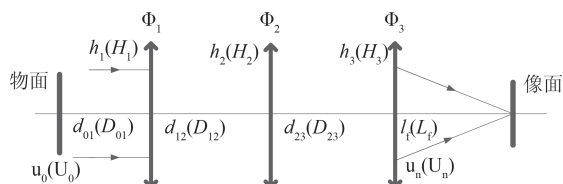


图2 变焦系统示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the zoom system

建立图2所示的三组全动型变焦系统的变焦方程,式(1)为两个变焦位置时薄透镜之间的传递公式.在此,设组份 $\Phi_1$ 和 $\Phi_3$ 的光焦度值分别为 $x$ 和 $y$ ,将 $x$ 和 $y$ 分别替换(1)式中的 $\varphi_1, \varphi_3$ ,则组份 $\Phi_2$ 的光焦度 $\varphi_2$ 可表示为 $x$ 和 $y$ 的函数.

zoom1

$$u_1 = u'_0 = h_1\varphi_1 + u_0 \quad U_1 = U'_0 = H_1\varphi_1 + U_0$$

$$h_1 = h_0 - u_1d_{01} \quad H_1 = H_0 - U_1D_{01}$$

$$u_2 = u'_1 = h_1\varphi_1 + u_1 \quad U_2 = U'_1 = H_1\varphi_1 + U_1$$

$$h_2 = h_1 - u_2d_{12} \quad H_2 = H_1 - U_2D_{12}$$

$$u_3 = u'_2 = h_2\varphi_2 + u_2 \quad U_3 = U'_2 = H_2\varphi_2 + U_2 \quad (1)$$

$$h_3 = h_2 - u_3d_{23} \quad H_3 = H_2 - U_3D_{23}$$

$$u_4 = u'_3 = h_3\varphi_3 + u_3 \quad U_4 = U'_3 = H_3\varphi_3 + U_3$$

$$h_4 = h_3 - u'_3l_f \quad H_4 = H_3 - U'_3L_f$$

$$\varphi_2 = \frac{u_3 - u_2}{h_2} \quad \varphi_2 = \frac{U_3 - U_2}{H_2}$$

zoom2

在两个不同的变焦位置时组份 $\Phi_2$ 的光焦度为定值,令 $\varphi_2(\text{zoom1}) = \varphi_2(\text{zoom2})$ ,整理(1)式可得组份 $\Phi_1$ 和 $\Phi_2$ 光焦度的方程式(2),其中 $p_1 \sim p_5$ 是关于 $h_i, u_i, l_j, d_{i+1}, H_i, U_i, L_j, D_{i+1}$ 的函数.

$$p_1x^2 + p_1x + p_3xy + p_4y + p_5 \quad (2)$$

由薄透镜公式的过渡式(1)可得到组份 $\Phi_1$ 和 $\Phi_2$ 光焦度的另一关系式(3):

$$y = \frac{d_{12}h_1x + u'_3d_{23} + h_3 - h_1}{d_{23}h_3} \quad (3)$$

由式(2-3)可得到满足任意给定初始间距和系统总焦距的光焦度的分配.设组份 $\Phi_2$ 为变焦组,计算组份 $\Phi_2$ 在长焦和短焦位置的放大倍率.在变焦过程中,当系统的变焦组的放大倍率越过-1时,为使系统不出现断点,需要考虑换根问题.换根条件如下:

$$m_2 = \frac{f'_2}{f_2 + f_1 - d_{12}} = -1$$

$$m_3 = \frac{f'_3}{f_3 + \frac{f'_2(f_1 - d_{12})}{f_2 + f_1 - d_{12}} - d_{23}} = -1 \quad (4)$$

由式(4)可计算满足换根条件的组份间隔:

$$d_{12} = 2f_2 + f_1$$

$$d_{23} = 2(f_2 + f_3) \quad (5)$$

其中 $m$ 为系统组份的垂轴放大倍率, $d$ 为系统组份的主面间隔.求出满足换根条件的组份之间的间隔,然后在这个组份间距的基础上再对系统各组份的间隔进行适当取值,以避免各透镜组在移动过程中出现断裂现象.可基于上述全动变焦理论完成对于次级可变焦小相机的高斯光学讨论,下文将根据上述变焦理论进行光学系统的设计,使三个组份 $\Phi_1, \Phi_2$ 和 $\Phi_3$ 在变焦过程中作独立运动且相互补偿像面,实现基于多尺度共心球透镜的红外成像系统焦距的变换,从而满足系统对于目标场景一体化多级侦测的功能.

### 3 基于共心球透镜的红外变焦系统设计

#### 3.1 技术参数

系统设计中选用 Flir 公司 TAU2-640 凝视型非制冷焦平面阵列探测器, 像元数量  $640 \times 512$ , 像元尺寸  $17 \mu\text{m} \times 17 \mu\text{m}$ , 工作波段  $7.5 \sim 13.5 \mu\text{m}$ , 探测器有效光敏面对角线长度为  $14 \text{ mm}$ . 系统变焦范围为  $68 \sim 136 \text{ mm}$ , 短焦(大视场)状态时, 空间分辨率达  $0.36 \text{ mrad}$ , 长焦(小视场)时, 空间分辨率达  $0.179 \text{ mrad}$ . 以坦克目标为例进行探测距离估算, 可知该系统满足在  $20 \text{ km}$  对  $4 \text{ m} \times 10 \text{ m}$  的坦克目标进行探测的需求.

为实现大视场高分辨率成像, 采用次级小相机阵列对球透镜所成的一次像面进行多尺度拼接, 在此使用  $6 \times 4$  个小相机阵列组成二级成像系统. 短焦时单个小相机有效视场为  $11.8^\circ$ , 长焦时视场为  $5.9^\circ$ . 共心球透镜结构旋转对称无固定主光轴, 因此每个次级小相机都可看作与球透镜共轴成像, 故只需设计中心视场的光学结构<sup>[19]</sup>. 由于系统变倍比较低, 且像差优化良好, 所以系统采用固定的相对孔径设计. 综合考虑系统像差矫正难度、加工可行性及系统衍射各项因素,  $F$  数取 2. 系统整体设计技术参数如表 1 所示.

表 1 光学系统设计参数

Table 1 Design parameters of the optical system

Parameter	Specification
Focal length range/mm	68~136 mm
Wavelength band/ $\mu\text{m}$	8~12
Zoom ration	2 $\times$
Total track/mm	<1 000

#### 3.2 主物镜设计

共心球透镜的结构具有旋转对称性, 过球心的每一条光线都可视为主光轴, 完全对称结构可自动校正彗差、畸变、垂轴色差等轴外像差, 因此仅存在轴上像差(轴上球差与色差)以及较小的轴外像差. 利用胶合透镜可以校正球差, 此外根据不同材料的色散特性对玻璃材料进行组合可进一步补偿色差, 因此本文采用完全对称结构的双层四胶合共心球透镜作为主物镜.

共心球透镜各个面共用一个曲率中心, 故仅需确定第一面的曲率半径, 其他表面曲率类型设置为共心曲率即可. 因此主物镜设计需确定以下参数:

第一面的曲率半径、四片玻璃的厚度及两种玻璃材料<sup>[20]</sup>. 如下表 2 所示为球透镜的初始结构参数. 通过优化可获得像差矫正良好的主物镜, 从而减轻次级透镜系统对残余像差校正的压力. 如图 3 所示为优化后的共心球透镜结构图.

表 2 球透镜的初始结构参数

Table 2 Initial structural parameters of the spherical lens

Surf: Type	Radius	Thickness	Glass	Semi-Diameter
0(OBJ)	Infinity	Infinity	-	Infinity
1	50.099	21.266	CDSE	49.600
2	28.833	28.814	CSBR	28.700
3(STO)	Infinity	27.539	CSBR	27.100
4	-27.520	22.594	CDSE	27.100
5	-50.114	49.730	-	49.600
6(IMA)	-99.844	-	-	49.981

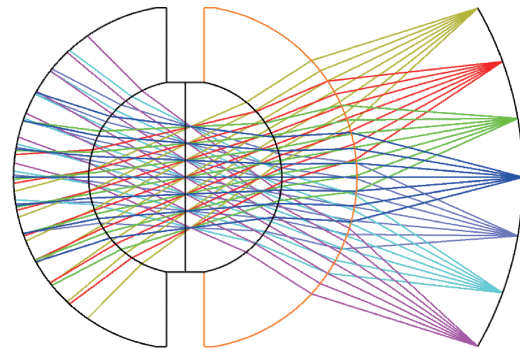


图 3 共心球透镜结构图

Fig. 3 Concentric spherical lens structure

该共心球透镜的调制传递函数曲线(MTF)如图 4(a)所示, 在空间频率  $29 \text{ lp/mm}$  处, 全视场范围的 MTF 值达 0.2 以上, 且 MTF 曲线趋势一致, 均接近衍射极限, 说明各视场的成像质量一致性好; 此外, 子午方向与弧矢方向的 MTF 曲线重合, 说明该共心球透镜无像散. 优化后的点列图如图 4(b)所示, 全视场的 RMS 最大值为  $9.7 \mu\text{m}$ , 均小于艾里斑半径, 表明共心球透镜在各视场均具有较好的能量收集能力, 可在像面上获得均匀的照度, 根据各个视场点列图的形状近似为圆斑且在三个波长下无颜色分离现象, 表明该光学系统彗差及色差较小. 上述数据表明, 文中所设计的双层共心球透镜具有光学结构简单, 与视场相关的像差小、成像质量良好的特点.

以近轴光线追迹的形式计算标准球面的 Seidel 像差系数可以评价光学系统成像质量, 结果如表 3 所示. 其中影响传统光学系统成像质量的彗差、像

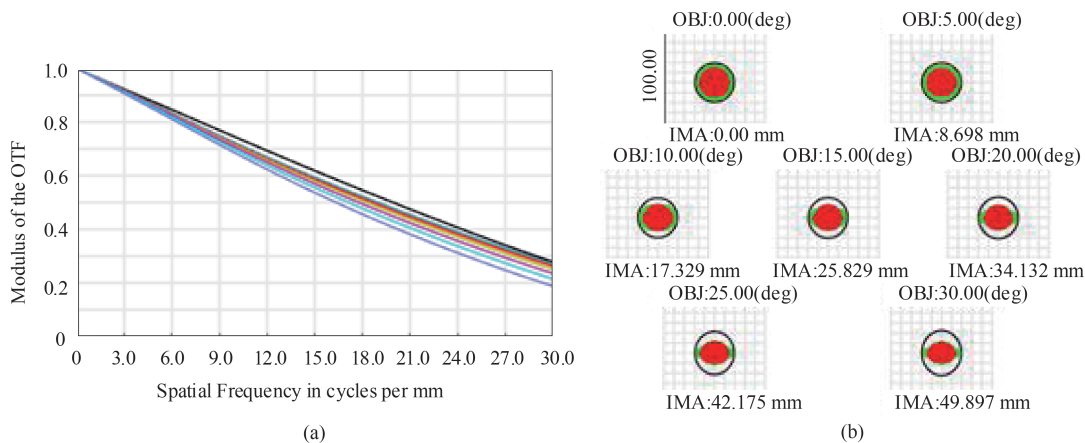


图4 共心球透镜优化后的成像评价图(a) MTF 曲线图, (b) 点列图

Fig.4 Imaging evaluation of the designed spherical lens (a) MTF curve, (b) spot diagram

散、畸变及垂轴色差均小于  $0.02\lambda$ , 可见球透镜与视场相关的像差较小;此外轴向色差通过不同色散玻璃进行组合也已校正完善;主要影响系统成像质量的为球差和场曲,其中球差(约为  $1.34\lambda$ )作为轴上像差可利用次级成像系统进行进一步校正;针对球透镜固有的 Petzval 场曲,通过设计按特定规则排布于一次曲像面附近的次级小相机阵列的方式,减小其对成像质量的影响。

表3 共心球透镜 Seidel 像差系数

Table 3 Seidel aberration coefficients of the concentric spherical lens

Seidel 像差系数	参数( $\lambda$ )
球差 $W_{040}$	1.339 0
彗差 $W_{131}$	-0.000 5
像散 $W_{222}$	0.000 0
场曲 $W_{220}$	65.104 2
畸变 $W_{311}$	-0.012 9
轴向色差 $W_{020}$	0.089 0
垂轴色差 $W_{111}$	0.000 0

### 3.3 次级小相机设计及整体系统优化

次级小相机阵列作为二次成像系统主要起中继成像作用,球透镜将场景成像于与其自身共心的一次球形像面,次级小相机阵列将其转接并形成若干个视场存在重叠的子图像,最后对子图像进行拼接获取大视场高分辨率图像。此外,次级小相机阵列的变焦功能是实现大视场目标搜索与高精度目标识别的基础,因此依据全动变焦设计理论并结合系统设计指标要求进行结构选型、材料匹配、优化及像差校正平衡,使  $\Phi_1$ 、 $\Phi_2$  和  $\Phi_3$  三个组份在变焦过程中作独立运动实现变焦的同时对像面移动进行

补偿<sup>[21]</sup>。

除中继成像与变焦功能外,次级小相机阵列设计中还需考虑校正主物镜的残留像差。由于球透镜的固有 Petzval 场曲,导致像平面的中心处与边缘处模糊程度不一,利用现有的平面探测器无法解决,因此通过设计按特定规则排布的次级小相机阵列,并排布于一次曲像面附近的方式减小场曲对成像质量的影响。球透镜残余的球差则通过在整体优化中采用次级小相机的设计来补偿。

共心球透镜结构对称、无固定光轴,每个次级成像系统都可看作与共心光学主物镜系统共轴成像,因此次级小相机阵列可采取相同的光学结构,故只需设计中心视场的次级成像系统即可,可大大简化设计过程。利用光学设计工具 ZEMAX 对系统进行设计优化,选定三个不同焦距:短焦 68 mm、中焦 100 mm 和长焦 136 mm 设计满足要求的变焦结构,系统最终结构图如图 5 所示。

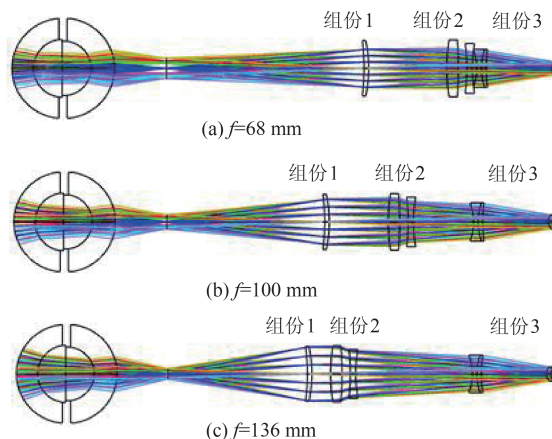


图5 变焦系统结构图

Fig.5 The structure of zoom system

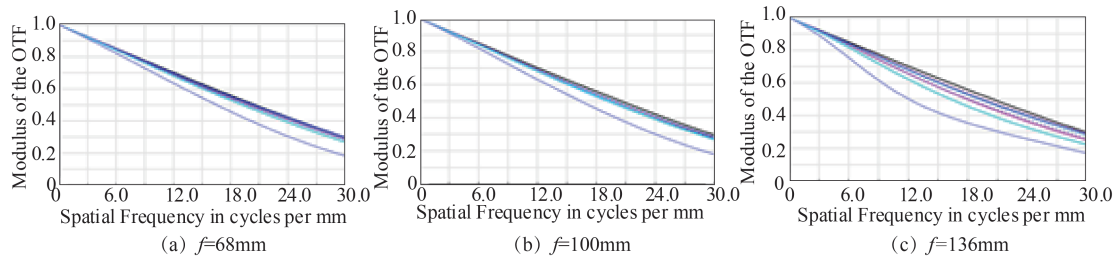


图6 系统MTF曲线

Fig.6 MTF curve of the imaging system

调制传递函数(MTF)曲线是综合评估光学系统成像质量的主要方法,系统在短焦(68 mm)、中焦(100 mm)和长焦(136 mm)处的 MTF 曲线如图 6 所示,在变焦范围内系统在整个视场的传递函数曲线趋势一致且均接近衍射极限,在三个焦距值处系统在空间频率 29 lp/mm 处 MTF 值均可达 0.2,且传递函数曲线平直,说明系统在变焦范围内像质优良。

图 7 和图 8 分别为系统点列图和场曲/畸变图,图 7 包含三个不同焦距处全谱段点列图,由图可见均方根半径(RMS)值基本小于光学系统的衍射极限分辨尺寸,像差矫正情况良好。图 8 为系统场曲与畸变情况,场曲在 0.2 mm 以内,畸变 $<\pm 5\%$ ,两者均控制在有效范围内,满足成像指标要求。

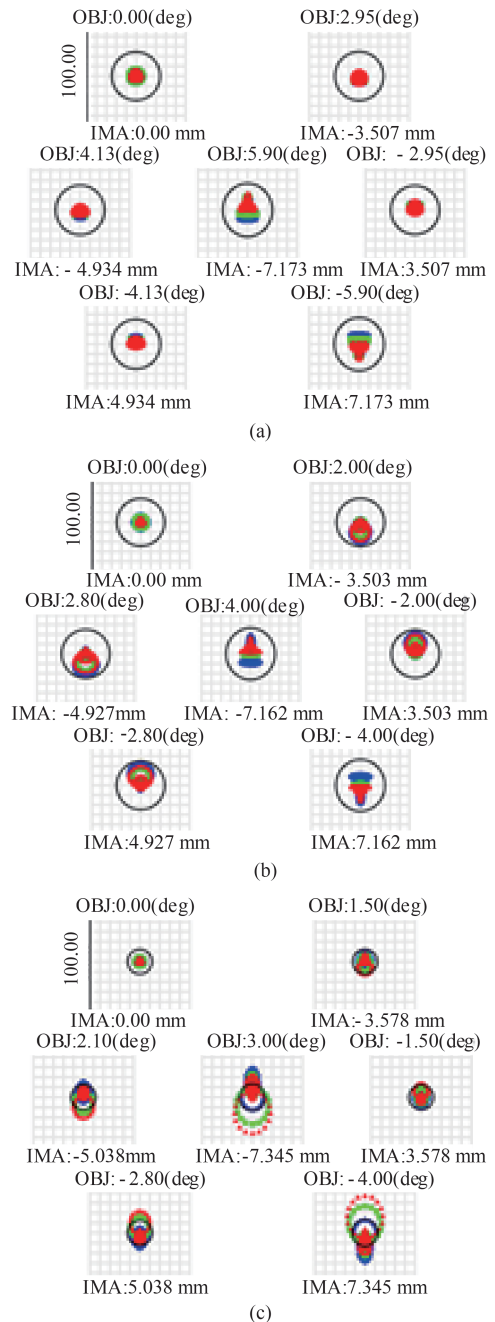
上述分析表明,基于变焦理论设计的多尺度共心球透镜红外成像系统在全焦范围内各参数均满足设计要求,成像效果良好。

### 3.4 变焦凸轮曲线拟合

变焦凸轮是变焦系统实现焦距连续变化的关键部件,能够保证系统中各运动组份依据一定关系移动时保持像面稳定。通过凸轮的转动,驱动固定在曲线凹槽内的机械联动机构带动透镜组沿光轴移动实现系统焦距的连续变化。凸轮曲线设计是变焦系统后期设计过程中十分重要的环节,良好的凸轮曲线能够保证光学系统变焦的精确性、平滑性和转动力矩均衡<sup>[21]</sup>。

当系统光学参数(包括玻璃材料、间隔及表面半径)确定后,需确定系统各运动组份移动量之间的对应关系,设计凸轮曲线<sup>[22]</sup>。在 ZEMAX 中优化变焦结构时,需选取多个焦距值同时进行优化,因此采用 MATLAB 与 ZEMAX 联合优化的方式完成多个焦距值优化过程。首先利用 MATLAB 对初始数据点进行拟合得到初始变焦曲线,然后用 ZEMAX 优化直至其满足系统指标要求,最后利用足够多的采样数据点拟合各个组份的运动轨迹曲线<sup>[23]</sup>。

该红外连续变焦系统采用全动型变焦方式,包

图7 系统点列图 (a) $f=68$  mm, (b) $f=100$  mm, (c) $f=136$  mmFig.7 Spot diagram of the imaging system (a) $f=68$  mm, (b) $f=100$  mm, (c) $f=136$  mm

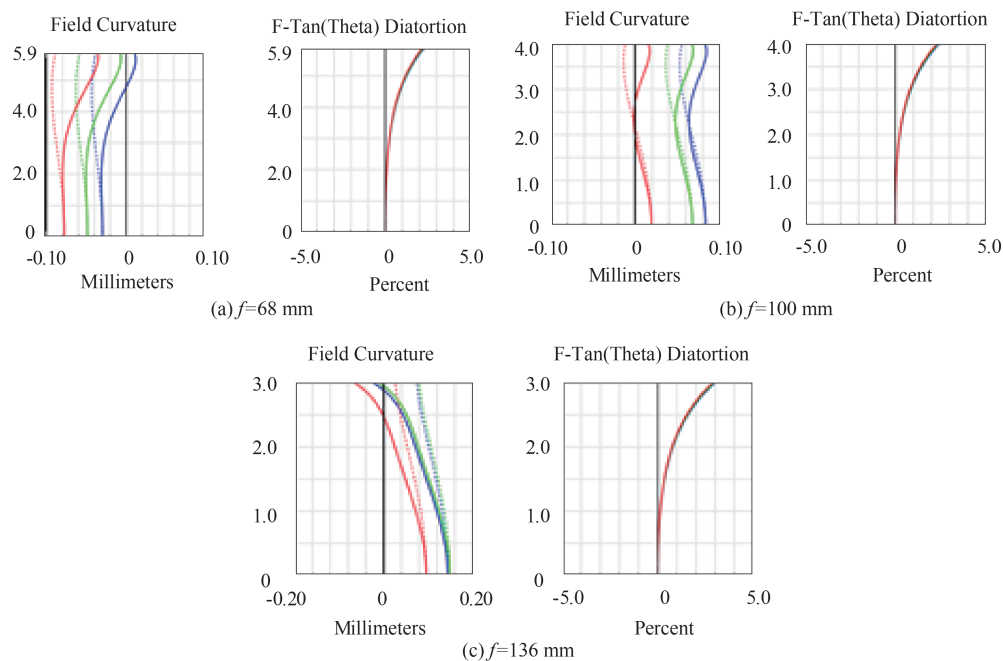


图8 系统场曲/畸变示意图

Fig.8 Field-curve and distortion of the imaging system

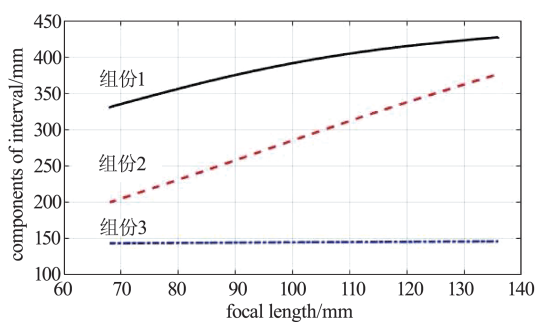


图9 红外连续变焦距系统组份运动曲线

Fig. 9 Component motion curve of the infrared continuous zoom system

含有三组运动组份,各组份运动曲线拟合结果如图9所示。由图可见,拟合后的运动曲线平滑,有利于凸轮结构的实现;系统焦距和各运动组份位移之间可近似为线性关系,能够实现匀速变焦;曲线不存在任何拐点,运动中加速度无突变,避免了变焦过程中卡滞、冲击与震动等不利情况,从而更好地保持像面稳定。

#### 4 结论

针对红外告警系统大视场目标搜索与高精度目标识别的需求,利用共心球透镜视场大、畸变小等优点,设计了一种基于共心球透镜大视场高分辨率红外变焦成像系统。该系统以双层四胶合共心球透镜为主物镜实现大视场监测,并设计可变焦次级

成像系统实现分区域管理。系统工作在短焦状态时进行大视场范围全面搜索,当探测到可疑目标时,调节该监测区域的次级小相机至长焦状态,获取目标细节信息为精确识别提供依据,与此同时其余小相机仍保持监测状态。该系统可在68~136 mm范围内实现平滑连续变焦;在变焦过程中,全视场范围内传递函数曲线趋势一致且接近衍射极限,在空间频率29 lp/mm处MTF值均可达0.2;RMS半径在全视场范围内基本小于衍射极限分辨尺寸;场曲值在0.2 mm以内;畸变<5%。设计结果表明,基于共心球透镜大视场高分辨率红外变焦成像系统结构简单,成像效果优良,可一体化实现大视场探测与小视场识别的功能。由于共心球透镜的理论视场可达近180°,在此基础上可根据需求调整次级小相机阵列数量增大或缩小有效视场,具有很高的工程应用价值

#### References

- [1] Lloyd J M. *Thermal Imaging Systems* [M]. New York: Plenum Press, 1975:25-28.
- [2] Liu F, Shao X P, Han P L, *et al.* Detection of infrared stealth aircraft through their multispectral signatures [J]. *Optical Engineering*, 2014,53(9): 094101.
- [3] ZHOU Yu-Long. Image analysis of ultra-wide field of view infrared warning system [J]. *Journal of Applied Optic.* (周玉龙. 超大视场红外告警系统的成像特点分析. *应用光学*) 2010, V31(6):871-875.
- [4] FU Wei. Status and development trend of photoelectric re-

- connaissance alarm technology [J]. *Aerospace electronic countermeasure* (付伟. 光电侦察告警技术现状及发展趋势. 航天电子对抗) 1995, 2:13-17.
- [5] Song C, Chang J, Cao J, et al. Airborne infrared scanning imaging system with rotating drum for fire detection [J]. *J. Opt. Soc. Korea*, 2011, 15(4):340-344.
- [6] Sugiyama H, Koshoubu J, Kashiwabara S, et al. Time-Resolved Step-Scan Infrared Imaging System Utilizing a Linear Array Detector [J]. *Applied Spectroscopy*, 2008, 62(1), 17 - 23.
- [7] Marron J C, Kendrick R L. Distributed aperture active imaging [J]. *Laser Radar Technology and Applications*, 2007, 6550:6550A.
- [8] Rabb D, Jameson D, Stokes A, et al. Distributed aperture synthesis [J]. *Optics Express*, 2010, 18(10):10334-10342.
- [9] Powell I. Panoramic lens [J]. *Applied Optics*, 1994, 33(31):7356-7361.
- [10] H M, Rodgers J M, Hoffman J M. Optical design of a panoramic, wide spectral band, infrared fisheye lens: International Optical Design, 2006 [C]. Vancouver Canada: Optical Society of America, 2006:WD1.
- [11] WANG Yong-Zhong. CAD of LWIR and MWIR fish-eye lens [J]. *J. Infrared Millim. Waves*. (王永仲. 长波及中波红外鱼眼镜头的计算机设计. 红外与毫米波学报) 2005, 24(6):455-458.
- [12] Brady D J, Gehm M E, Stack R A, et al. Multiscale gigapixel photography [J]. *Nature*, 2012, 486:386-389.
- [13] Marks D L, Llull P R, Phillips Z, et al. Characterization of the AWARE 10 two-gigapixel wide-field-of-view visible imager [J]. *Applied Optics*, 2014, 53(13):C54.
- [14] Llull P, Bange L, Phillips Z, et al. Characterization of the AWARE 40 wide-field-of-view visible imager [J]. *Optica*, 2015, 2(12):1086.
- [15] LIU Fei, WEI Ya-Zhe, HAN Ping-Li, et al. Design of monocentric wide field-of-view and high-resolution computational imaging system [J]. *Acta Physica Sinica* (刘飞, 魏雅喆, 韩平丽, 等. 基于共心球透镜的多尺度广域高分辨率计算成像系统设计. 物理学报) 2019, 68(8):084201.
- [16] Brady D J, Hagen N. Multiscale lens design [J]. *Optics Express*, 2009, 17(13):10659-74.
- [17] Miks A, Novák J, Novák P. Method of zoom lens design [J]. *Applied Optics*, 2008, 47(32):6088-6098.
- [18] Kryszczyński T, Mikucki J. Structural optical design of the complex multi-group zoom systems by means of matrix optics [J]. *Optics Express*, 2013, 21(17):19634-19647.
- [19] Tremblay E J, Marks D L, Brady D J, et al. Design and scaling of monocentric multiscale imagers [J]. *Applied Optics*, 2012, 51(20):4691-702.
- [20] Stamenov I, Agurok I P, Ford J E. Optimization of two-glass monocentric lenses for compact panoramic imagers: general aberration analysis and specific designs [J]. *Applied Optics*, 2013, 52(22):5348-9.
- [21] Vizgaitis J N, Dual Band Infrared Continuous Zoom Lenses: *International Optical Design Conference and Optical Fabrication and Testing*, 2010 [C]. Jackson Hole: Optical Society of America, 2010: IWD6.
- [22] Olson C, Goodman T, Addiego C, et al. Design and Construction of a Short-Wave Infrared 3.3X Continuous Zoom Lens: *International Optical Design Conference and Optical Fabrication and Testing*, 2010 [C]. Jackson Hole: Optical Society of America, 2010: IWD2.
- [23] XUE Hui, LI Chang-Wei. Optical design of infrared continuous-zoom lenses [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (薛慧, 李长伟. 红外中波连续变焦光学系统的设计. 红外与毫米波学报) 2012, 31(5):431-436.