文章编号：1672-8785(2019)01-0007-04

大靶面中波红外连续变焦光学系统设计

吴海清[1,2]　李同海[1,2]　赵新亮[1,2]　曾宪宇[2]　王　朋[2]

(1.凯迈(洛阳)测控有限公司，河南 洛阳　471009；
2. 中国空空导弹研究院，河南 洛阳　471009)

摘　要：开展了大靶面中波红外连续变焦光学系统设计研究，设计出了一种机械正组补偿式连续变焦光学系统。该系统的工作波段为 3.7～4.8 μm，焦距为 50～580 mm，*F* 数为 4.5；靶面直径为 24.6 mm，适用于目前新推出的像元间距为 15 μm 的 1280×1024 元制冷型中波红外焦平面探测器。在实现长焦距、高分辨率的同时，可保持光学系统具有大视场角，进而有效提高机载光电系统的目标搜索与识别能力。设计结果表明，本文系统的成像质量高，在 30 lp/mm 空间频率处的调制传递函数值接近 0.2。

关键词：中波红外；光学设计；连续变焦

中图分类号：O439；TN214　　**文献标志码**：A　　**DOI**：10.3969/j.issn.1672-8785.2019.01.002

Design of Large Imaging Plane Middle Wave Infrared Continuous Zoom Optical System

WU Hai-qing[1,2], LI Tong-hai[1,2], ZHAO Xin-liang[1,2], ZENG Xian-yu[2], WANG Peng[2]

(*1. Measurement and control Co. Ltd., Luoyang 471009, China;*
2. China Airborne Missile Academy, Luoyang 471009, China)

Abstract: Large imaging plane middle wave infrared continuous zoom optical systems were studied. A large imaging plane mechanical positive group compensated continuous zoom optical system was designed. The system had its operation waveband of 3.7 to 4.8 μm, the focal length of 50 to 580 mm, the F number of 4.5 and the image plane diameter of 24.6 mm. It was suitable for the newly launched 1280×1024 pixel, 15 μm pitch middle wave infrared cooled detectors. The system could keep a large field of view and effectively improve the ability of airborne electro-optical systems to search and identify targets while achieving long focal length and high resolution. The design result showed that the system had high imaging quality and its modulated transfer function value is close to 0.2 at the spatial frequency of 30 lp/mm.

Key words: middle wave infrared; optical design; continuous zoom

收稿日期：2018-12-26

作者简介：吴海清(1982-)，男，陕西榆林人，工程师，硕士，主要研究方向为成像光学系统设计。
E-mail：whqcust@163.com

0 引言

当前，各类飞行平台(有人机、无人机、飞艇等)均需挂载光电吊舱系统，利用其携带的可见光相机、红外热像仪等传感器设备对目标进行侦察、识别、跟踪和瞄准，进而引导制导武器完成打击任务。

机载光电吊舱系统要求其装载的红外热像仪既可实现大视场范围内的目标搜索，又可实现对远距离目标的小视场跟踪与识别。因此，红外热像仪的光学系统需要设计成变焦系统。连续变焦系统在视场连续变化的过程中始终保持对目标进行清晰成像，不会出现由于视场切换导致跟踪目标丢失的情况，因而获得了广泛应用[1-2]。

近年来，随着红外技术的不断发展，美国、法国和以色列等发达国家生产的制冷型红外焦平面探测器正在向大面阵、多波段、数字化的方向发展。目前，他们已经研制出了 640×512 元、1280×1024 元、1920×1536 元等一系列数字化中波红外焦平面探测器。在国内，中国电子科技集团第十一研究所于 2018 年推出了一种像元间距为 15 μm 的 1280×1024 元制冷型中波红外探测器；武汉高德红外股份有限公司推出了一种像元间距为 12 μm 的 1280×1024 元制冷型中波红外探测器。

在现阶段，机载光电吊舱系统配备的红外热像仪大多采用 640×512 元探测器。随着红外探测器向多波段、大面阵、高灵敏度的方向发展，机载光电吊舱系统配备的红外热成像系统也基本实现了高清化和数字化。例如，美国 FLIR 公司生产的 Star SAFIRE 380-HDc 吊舱装载了 1280×720 元制冷型连续变焦中波红外红外热像仪；法国 Airbus 公司生产的 ARGOS-II HD/HDT 吊舱配备了 1280×1024 元制冷型连续变焦中波红外热像仪[3-4]。目前，国内尚未见到可适配 1280×1024 元制冷型中波红外探测器的连续变焦光学系统的相关报道。

本文针对 1280×1024 元制冷型中波红外探测器，设计了一种机械补偿式中波红外连续变焦光学系统。该系统可以实现 50～580 mm 连续变焦，并具有焦距长、相对孔径大以及小型化等特点，因而适用于机载光电系统。

1 连续变焦实现方式的选择

光学系统的焦距变化是由透镜沿着轴向运动来实现的。根据补偿方式的不同，变焦系统可以分为光学补偿式和机械补偿式两种。其中，光学补偿式变焦系统是在两块固定透镜之间加入可一起沿同轴方向作等速移动的两组透镜，以实现改变系统焦距和离焦补偿的目的。其优点是结构简单，容易制造；缺点是无法很好地补偿像面移动，不容易实现大变倍比。机械补偿式变焦系统由前固定组、变倍组、补偿组和后固定组构成。其中，变倍组与补偿组沿光轴方向按照不同规律移动。通过移动变倍组来实现系统焦距变化，并通过移动补偿组来补偿由于变倍组移动所引起的系统离焦，从而保证在变焦过程中能够清晰成像。根据补偿组光焦度的正负，可以分为正组补偿和负组补偿两种形式。当正组补偿变焦系统由短焦端向长焦端运动时，变倍组与补偿组作相向运动。当负组补偿变焦系统由短焦端向长焦端运动时，变倍组与补偿组先作相向运动，然后再一起向右移动，导致系统补偿曲线较为弯曲。

由于 1280×1024 元红外探测器的靶面大，相应光学系统的视场较大。为了有效校正光学系统的二级色差，设计时选用正组补偿式连续变焦的结构型式。图 1 所示为机械正组补偿式变焦系统的光学原理。其中，1 为前固定组，2 为变倍组，3 为补偿组，4 为后固定组。

光学系统的变倍比为[5]

$$M=\frac{\beta_2^{*}\beta_3^{*}}{\beta_2\beta_3}=\frac{B}{\beta_2\beta_3} \tag{1}$$

变倍组与补偿组的初始放大率分别为

$$\beta_2=\frac{f_2'}{f_2'+f_1'-d_{12}} \tag{2}$$

$$\beta_3=\frac{f_3'}{f_3'+f_2'(1-\beta_2)-d_{23}} \tag{3}$$

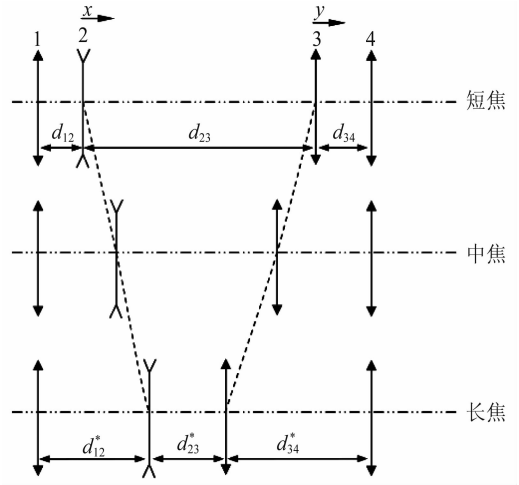


图 1 机械正组补偿式连续变焦的原理图

变倍组与补偿组的倍率分别为

$$\beta_2^* = \frac{1}{\frac{1}{\beta_2} - \frac{1}{f_2'}} \tag{4}$$

$$\beta_3^* = \frac{b \pm \sqrt{b^2 - 4}}{2} \tag{5}$$

式中，$b = -\frac{f_2'}{f_3'}\left(\frac{1}{\beta_2^*} - \frac{1}{\beta_2} + \beta_2^* - \beta_2\right) + \left(\frac{1}{\beta_3} + \beta_3\right)$。

变倍组的移动量为

$$x = f_2'\left(\frac{1}{\beta_2} - \frac{1}{\beta_2^*}\right) \tag{6}$$

补偿组的移动量为

$$y = (\beta_3^* - \beta_3) f_3' \tag{7}$$

各组元之间的间隔为

$$d_{12}^* = d_{12} + x \tag{8}$$

$$d_{23}^* = d_{23} - x + y > 0 \tag{9}$$

$$d_{34}^* = d_{34} - y \tag{10}$$

先给定归一化初值（d_{12}、d_{23}、$f_2' = -1$、f_3'、$\beta_3 = \frac{-1}{\sqrt{M}}$），然后对系统初始结构进行计算。

2 设计指标及结果

2.1 设计指标

表 1 列出了基于 1280×1024 元制冷型中波红外探测器的光学系统的设计参数。

2.2 设计结果及像质分析

利用光学设计软件对初始结构进行了调整和优化。设计出了一种适用于 1280×1024 元制冷型中波红外探测器的大靶面连续变焦光学系统（见图 2 和图 3）。该系统的 F 数为 4.5，工作波段为 3.7～4.8 μm；由 9 片透镜组成，其中最大口径为 140 mm。采用 Ge、ZnSe、Si 三种普通的红外材料。

表 1 本文系统的设计参数

参数	描述
探测器	1280×1024 元（制冷型）
像元尺寸	15 μm
工作波段	3.7～4.8 μm
F 数	4.5
靶面直径	24.6 mm
焦距	50～580 mm
系统口径	≤140 mm

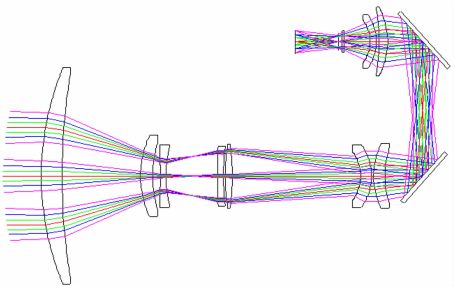


图 2 光学系统的结构图

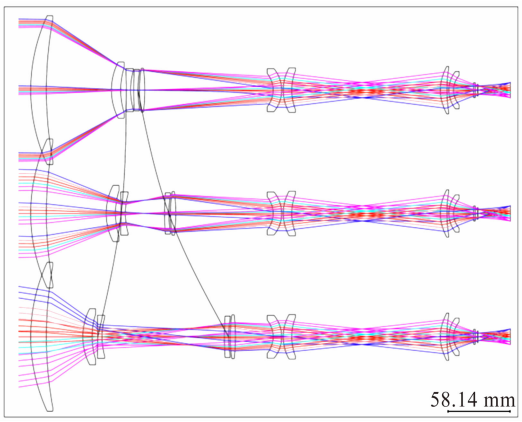


图 3 连续变焦光学系统的示意图

图 4～图 6 所示分别为本文系统在短焦、中焦和长焦条件下的调制传递函数曲线。可以看出，当空间频率为 30 lp/mm 时，传递函数

值接近 0.2，满足应用要求。

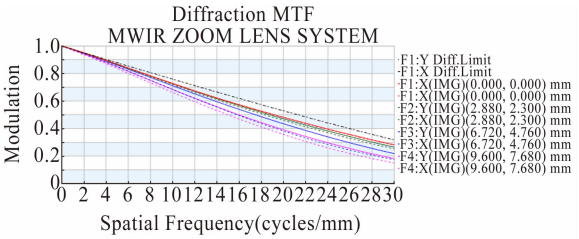


图 4 短焦调制传递函数

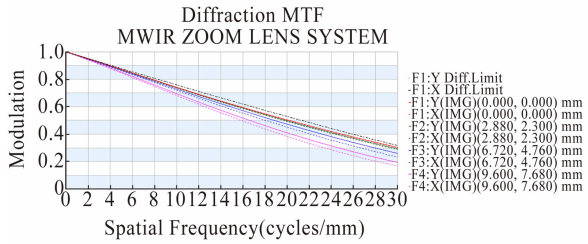


图 5 中焦调制传递函数

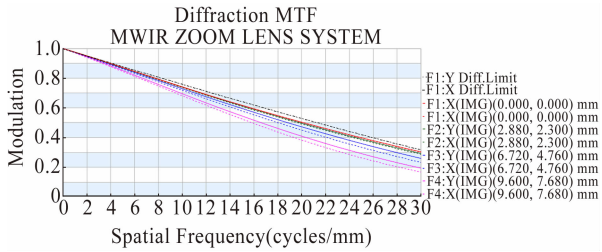


图 6 长焦调制传递函数

图 7～图 9 分别为本文系统在短焦、中焦和长焦条件下的点列图。可以看出，在不同的焦距状态下，该系统的弥散斑 RMS 直径均小于或接近探测器的像元尺寸，满足应用要求。

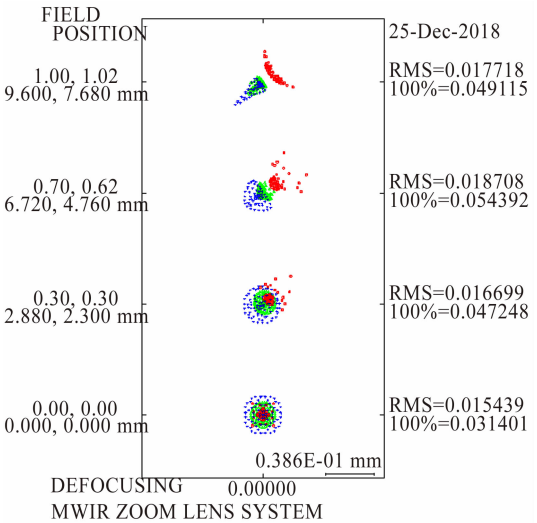


图 7 短焦点列图

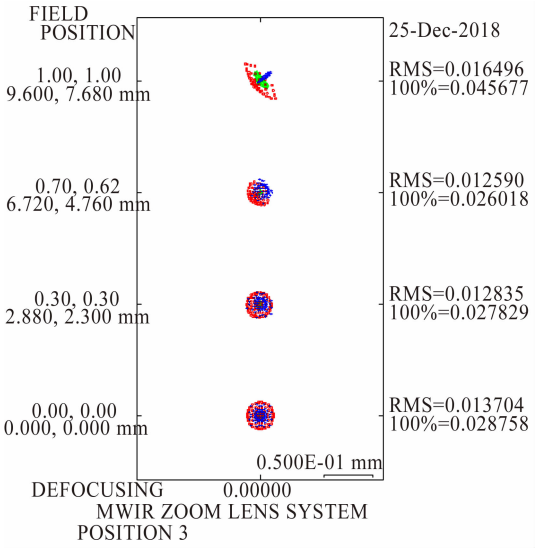


图 8 中焦点列图

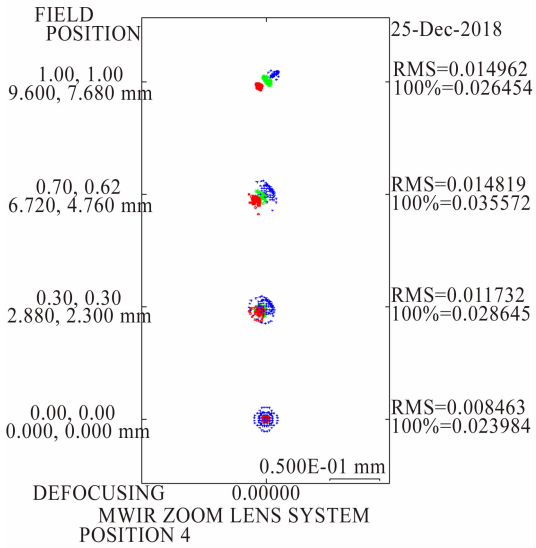


图 9 长焦点列图

图 10～图 12 所示分别为本文系统在短焦、中焦和长焦条件下的场曲与畸变曲线。可以看出，在不同的焦距状态下，该系统的畸变均小于 3.5%，满足应用要求。

3 结束语

本文开展了大面阵中波红外光学系统设计研究。针对像元间距为 15 μm 的 1280×1024 元制冷型中波红外探测器，设计出了一种机械正组补偿式中波红外连续变焦光学系统。该系统的焦距范围为 50～580 mm，适合于机载光

（下转第 15 页）