

# 高变倍比小型化的中波红外光学系统设计

陈虹达, 薛常喜\*

长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022

**摘要** 针对制冷型中波红外  $640 \times 512$  焦平面阵列探测器, 设计了一个  $30 \times$  连续变焦光学系统, 提出从前固定组中分离出 1 片透镜作为两档移动组, 并与变倍组、补偿组及后固定组组合成复合连续变焦系统的设计方案。针对该模型, 基于衍射光学理论设计了工作波段为  $3.7 \sim 4.8 \mu\text{m}$ ,  $F$  数为 4, 可以实现  $12 \sim 360 \text{ mm}$  连续变焦, 光学总长仅有  $160 \text{ mm}$  的制冷型中波红外连续变焦光学系统。给出了系统在 6 个焦距位置的像质情况, 并对凸轮曲线进行优化设计。该系统具有高变倍比、结构小型化、像质优良、凸轮曲线平滑等优点, 可以满足红外热成像仪的要求。

**关键词** 光学设计; 中波红外; 复合连续变焦; 小型化

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.0222001

## Design of Mid-Wave Infrared Optical System with High Variable Ratio Miniaturization

Chen Hongda, Xue Changxi\*

*School of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology,  
Changchun, Jilin 130022, China*

**Abstract** The study proposes a  $30 \times$  continuous zoom lens for  $640 \times 512$  cooled mid-wave infrared focal plane detector array. Furthermore, we propose an optical system design that separates the lens from the front fixed group as a two-speed moving group, and combines the two-speed moving group, variable magnification group, compensation group, and rear fixed group into a composite continuous zoom system. To realize the above model, we design a cooling-type medium-wave infrared continuous zoom optical system based on the theory of diffractive optics. It has a working band of  $3.7 \sim 4.8 \mu\text{m}$ ,  $F$ -number of 4, continuously variable focal length of  $12 \sim 360 \text{ mm}$ , and total optical length of only  $160 \text{ mm}$ . We optimize the image quality and cam curves of the system at 6 focal lengths. The system offers advantages of a large variable ratio, miniaturized structure, excellent image quality, and smooth cam curve, which meets the requirements of infrared thermal imagers.

**Key words** optical design; mid-wave infrared; compound continuous zoom; miniaturization

**OCIS codes** 220.4830; 040.3060; 110.3080; 220.3620

## 1 引 言

传统红外变焦成像系统分为多档变焦和连续变焦两种。多档变焦系统由于设计焦距固定、视场固定, 因而只可在几个位置处清晰成像, 且无法在视场切换时准确追踪目标; 连续变焦系统在设计焦距范围内依靠凸轮结构对大视场的目标进行搜索, 对小视场的目标进行识别<sup>[1]</sup>。因此, 红外连续变焦系统被广泛应用于边防、海防、森林防火、光电探测等军用、民用领域。

如今人们对红外连续变焦系统的设计提出了更

高的要求, 尤其对于  $F$  数大的系统, 其小型化、高变倍比对红外变焦系统越来越重要。文献[2]中提到加拿大 Sinclair 等设计了一款  $20 \times$  中波红外制冷连续变焦镜头, 焦距范围为  $200 \sim 400 \text{ mm}$ ,  $F$  数为 4, 但其光学总长为  $460 \text{ mm}$ , 且使用了 11 片透镜, 导致体积大且加工成本高。北京空间机电研究所葛婧菁等<sup>[3]</sup>设计了一款  $4 \times$  机载中波红外制冷连续变焦镜头,  $F$  数为 4, 但焦距变化范围小, 为  $37.5 \sim 150 \text{ mm}$ , 且变焦系统总长为  $280 \text{ mm}$ , 应用受限。中国科学院长春光学精密机械与物理研究所周昊等<sup>[4]</sup>设计了一款  $40 \times$  机载中波红外制冷连续变焦

收稿日期: 2019-06-14; 修回日期: 2019-08-19; 录用日期: 2019-09-09

基金项目: 吉林省重点科技研发项目(20180201030GX)

\* E-mail: xc272479@sina.com

镜头,  $F$  数为 4, 焦距为 10~400 mm, 光学总长为 396 mm, 其变倍比超过 30 倍, 但光学总长接近 400 mm, 且采用 4 条变焦曲线, 因而结构复杂, 加工难度大。北京理工大学顾宪松<sup>[5]</sup>设计了一款 30× 紧凑型中波红外制冷镜头,  $F$  数为 4, 系统光学总长为 360 mm, 依然大于 200 mm, 导致体积较大, 对使用环境要求较高。

针对上述系统的光学镜头无法兼顾高变倍比和结构小型化的问题, 本文应用一种从前固定组中分离出 1 片透镜可两档移动并结合传统连续变焦的复合变焦方式<sup>[6]</sup>, 设计了一个应用制冷型中波红外 640×512 焦平面阵列探测器的连续变焦光学系统。该光学系统的  $F$  数为 4, 工作波段为 3.7~4.8 μm, 焦距范围为 12~360 mm。该系统第 1 片透镜的通光孔径仅为 80 mm, 光学总长仅有 160 mm, 无需通过添加反射镜来对系统光路进行折叠, 避免了反射镜装调误差对系统像质的影响<sup>[2-3, 7-9]</sup>。系统采用二次成像, 实现 100% 冷光阑效率。该光学系统具有变倍比高、光学总长短、全视场像质优良、凸轮曲线平滑及结构小型化等优点, 在光电探测等领域具有良好的应用前景。

## 2 复合连续变焦原理

传统变焦方式分为光学补偿式和机械补偿式两种, 随着国内凸轮加工水平的提高, 凭借机械补偿式在变焦过程中成像清晰的优势, 机械补偿式成为变焦方式的首选<sup>[7-12]</sup>。传统的机械补偿连续变焦光学系统一般分为四组元, 如图 1 所示, 分别为前固定组、变倍组、补偿组及后固定组, 变倍组移动实现变倍, 补偿组移动实现像面移动的消除, 最终在设计焦距范围内实现连续变焦。本文采用三移动组元实现连续变焦, 三移动组元的光学系统按移动组元之间有无固定组分为两类, 第一类是移动组元之间有固定组相隔, 第二类是三个移动组元之间无固定组加入。两类变焦系统的变焦方程有差异, 无固定组加入的系统无需考虑固定组之前移动组的共轭距改变量经中间固定组的轴向放大引起的改变。为实现长焦距、高变倍比、小型化的设计目标, 选择第二类变焦方式, 并结合多档变焦及传统连续变焦方式, 在前固定组中分离出 1 片透镜, 使其可以两档移动<sup>[6]</sup>, 从而构成三移动组元变焦系统。此种复合变焦方式能补偿系统在长焦和短焦处的像质下降, 提高光学系统的变倍比, 减少光学总长, 实现变焦系统小型化。此复合变焦系统包含五个组元, 如图 2 所示, 第一组

元为前固定组, 第二组元为两档移动组, 第三组元为变倍组, 第四组元为补偿组, 第五组元为后固定组。当系统在大视场搜索目标时, 第二组元位置不改变, 通过第三、四组元移动即可实现像面稳定。系统继续运动, 视场逐渐减小, 焦距离开长焦位置, 此时需要第二组元改变位置并结合第三、四组元的移动, 才能实现在小视场对目标的追踪与识别。

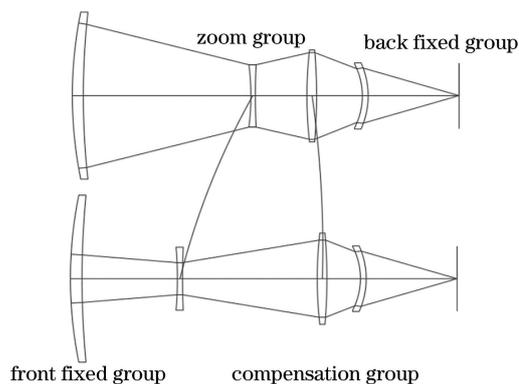


图 1 传统四组元变焦系统示意图

Fig. 1 Schematic of traditional four-component zoom system

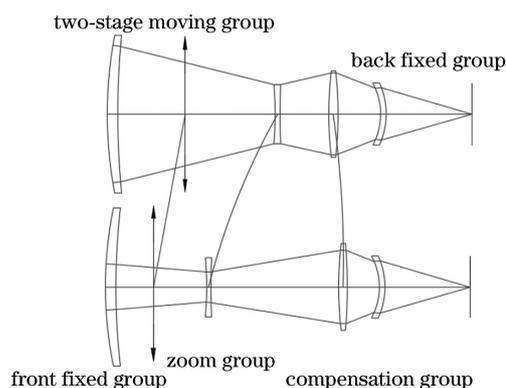


图 2 复合连续变焦系统示意图

Fig. 2 Schematic of composite continuous zoom system

基于薄透镜理论, 为满足系统整体共轭距为零<sup>[1]</sup>, 此种复合变焦方式的变焦方程表示为

$$(1 - m_2^2)m_3^2m_4^2dq_2 + (1 - m_3^2)m_4^2dq_3 + (1 - m_4^2) dq_4 = 0, \quad (1)$$

式中:  $m_2, m_3, m_4$  为第二、三、四组元的倍率;  $dq_2, dq_3, dq_4$  为第二、三、四组元的微分移动量。各组元的微分移动量和倍率的关系为

$$\begin{cases} dq_4 = f'_4 m_4 \\ dq_2 = \frac{f'_2}{m_2^2} dm_2 \\ dq_3 = \frac{(1 - m_2^2)}{m_2^2} f'_2 dm_2 + \frac{f'_3}{m_3} dm_3 \end{cases}, \quad (2)$$

式中:  $f'_2, f'_3, f'_4$  为第二、三、四组元的焦距。

假设系统从长焦处开始移动,不改变第二组元的位置,此时系统的变焦方式为传统四组元变焦,变焦方程为

$$(1 - m_3^2)m_4^2 dq_3 + (1 - m_4^2) dq_4 = 0. \quad (3)$$

此时各组元的微分移动量和倍率的关系为

$$\begin{cases} dq_3 = \frac{f'_3}{m_3^2} dm_3 \\ dq_4 = f'_4 dm_4 \end{cases}. \quad (4)$$

设起始条件为

$$m_3 = m_{3L}, m_4 = m_{4L}, \quad (5)$$

式中: $m_{3L}, m_{4L}$ 为第三、四组元在长焦时的倍率; $L$ 为光学系统的长焦位置。求得关于第四组元倍率 $m_4$ 的二次方程为

$$m_4^2 - bm_4 + 1 = 0, \quad (6)$$

式中:

$$b = -\frac{f'_3}{f'_4} \left( \frac{1}{m_3} - \frac{1}{m_{3L}} + m_3 - m_{3L} \right) + \left( \frac{1}{m_{4L}} + m_{4L} \right). \quad (7)$$

由(6)式求得第四组元补偿组的 $m_4$ 为

$$m_4 = \frac{b \pm \sqrt{b^2 - 4}}{2}. \quad (8)$$

第三组元变倍组的倍率 $m_3$ 的改变由物距 $q_3$ 变化引起,对(4)式积分得

$$m_3 = \frac{1}{\frac{1}{m_{3L}} + \frac{q_3}{f'_3}}. \quad (9)$$

对(4)式中第四组元补偿组的微分移动量 $q_4$ 和其倍率 $m_4$ 的关系积分得

$$q_4 = f'_4(m_4 - m_{4L}). \quad (10)$$

此时系统总的焦距变化范围为 $f'_1 m_{2L} m_3 m_4 m_5 \sim f'_1 m_{2L} m_{3L} m_{4L} m_5$ ,其中 $f'_1$ 为第一组元前固定组的焦距, $m_{2L}$ 为第二组元两档移动组在长焦处的倍率, $m_5$ 为第五组元后固定组的倍率。

此时光学系统相应的变倍比为

$$\Gamma = \frac{m_{3L} m_{4L}}{m_3 m_4}. \quad (11)$$

由(3)~(11)式即可求出系统从长焦处开始运动,第三组元移动时第四组元的移动量。

当系统继续移动,运动到短焦处,系统此时的变焦方式为复合连续变焦,变焦方程为

$$(1 - m_2^2)m_3^2 m_4^2 dq_2 + (1 - m_3^2)m_4^2 dq_3 + (1 - m_4^2) dq_4 = 0. \quad (12)$$

系统在长焦处的计算方法同理。根据上述条件设起始条件为

$$m_2 = m_{2S}, m_3 = m_{3L}, m_4 = m_{4L}, \quad (13)$$

式中: $m_{2S}$ 为第二组元在短焦处的倍率; $S$ 为光学系统的短焦位置。

求得关于 $m_4$ 的二次方程为

$$m_4^2 - cm_4 + 1 = 0, \quad (14)$$

式中:

$$c = -\frac{f'_2}{f'_4} \left( \frac{1}{m_2} - \frac{1}{m_{2S}} + m_2 - m_{2S} \right) - \frac{f'_3}{f'_4} \left( \frac{1}{m_3} - \frac{1}{m_{3L}} + m_3 - m_{3L} \right) + \left( \frac{1}{m_{4L}} + m_{4L} \right). \quad (15)$$

同理求此时第四组元补偿组的 $m_4$ 为

$$m_4 = \frac{c \pm \sqrt{c^2 - 4}}{2}. \quad (16)$$

由(2)式中各组元微分移动量和倍率关系积分得

$$m_2 = \frac{1}{\frac{1}{m_{2S}} - \frac{q_2}{f'_2}}, \quad (17)$$

$$m_4 = m_{4L} + \frac{q_4}{f'_4} \quad (18)$$

$$q_3 = f'_3 \left( \frac{1}{m_3} - \frac{1}{m_{3L}} \right) - q_2 + f'_2 \left( \frac{1}{m_2} - \frac{1}{m_{2L}} \right). \quad (19)$$

此时系统短焦处总的焦距变化范围为 $f'_1 m_{2S} m_3 m_4 m_5 \sim f'_1 m_{2S} m_{3L} m_{4L} m_5$ ,为保证光学系统变焦时像面的稳定,则 $f'_1 m_{2L} m_{3L} m_{4L} m_5 = f'_1 m_{2S} m_3 m_4 m_5$ <sup>[6]</sup>,得

$$m_{2S} = \frac{m_{2L} m_{3L} m_{4L}}{m_3 m_4}. \quad (20)$$

由(3)式和(12)式两个变焦方程知

$$(1 - m_2^2) dq_2 = 0. \quad (21)$$

将(2)式代入(21)式并积分得

$$f'_2 \left( \frac{1}{m_2} + m_2 \right) = 0. \quad (22)$$

由(22)式可知系统在短焦时第二组元的倍率和焦距的关系为

$$f'_2 \left( \frac{1}{m_{2S}} - \frac{1}{m_{2L}} + m_{2S} - m_{2L} \right) = 0. \quad (23)$$

根据(20)式和(22)式知

$$m_{2L} = -\sqrt{\frac{m_3 m_4}{m_{3L} m_{4L}}}, m_{2S} = -\sqrt{\frac{m_{3L} m_{4L}}{m_3 m_4}}. \quad (24)$$

由(17)式可知系统由长焦移动到短焦时,第二组元的移动改变量 $q_2$ 为

$$q_2 = f'_2 \left( \frac{1}{m_{2S}} - \frac{1}{m_{2L}} \right). \quad (25)$$

根据(24)式和(25)式知

$$q_2 = f'_2 \left( \sqrt{\frac{m_{3L}m_{4L}}{m_3m_4}} - \sqrt{\frac{m_3m_4}{m_{3L}m_{4L}}} \right). \quad (26)$$

系统在短焦处相应的变倍比为

$$\Gamma = \frac{m_{2S}m_{3L}m_{4L}}{m_2m_3m_4}. \quad (27)$$

对比(11)式和(27)式可知:两档移动组的加入能有效提高系统的变倍比,增大光学系统的可探测焦距范围,且两档移动组移动行程短,有利于减少光学系统的总长;通过两档移动组的移动,还可对温度进行补偿,系统无需设计消热差移动组件,节约了加工成本;该结构无需凸轮驱动,简化了系统结构。

自此,复合变焦系统的各种公式表述完成。基于此变焦模型,可计算出系统变倍时各组元之间的距离关系。

### 3 设计与评价

#### 3.1 设计思想

本文光学系统主要设计参数见表1。

根据上述变焦模型及设计参数,求得当系统两档移动组不改变位置时系统焦距变化范围为15~300 mm,由(24)式并结合设计参数可知,两档移动组的放大率分别为  $m_{2L} = -0.82$ ,  $m_{2S} = -1.19$ 。反复计算(17)、(18)、(19)式得初始结构的前固定组焦距  $f'_1 = 52.98$  mm,两档移动组焦距  $f'_2 = -161.31$  mm,变倍组焦距  $f'_3 = -11.12$  mm,补偿组焦距  $f'_4 = 21.01$  mm,后固定组焦距  $f'_5 = 12$  mm,

表1 光学设计参数

Table 1 Optical design parameters

Parameter	Index
Working waveband / $\mu\text{m}$	3.7-4.8
$F/\#$	4.0
Focal range /mm	12-360
Detector type	640×512(cooled)
Pixel size / $\mu\text{m}$	15

由上述参数继续求得系统焦距改变时各移动组元的间距,并将数据输入 ZEMAX 软件后进行优化。系统计划采用多个衍射面和非球面的组合,并通过衍射面的优化对系统进行消色差,衍射面的加入可减少透镜的使用数量,缩小整体光学总长,减小了系统的质量。

#### 3.2 优化设计结果及评价

根据设计思想,将上述参数输入到 ZEMAX 软件中进行优化并得出设计结果。该系统由8片透镜组成,镜片材料只采用 Ge、Si、ZnSe 这三种常用的红外材料,并引入2个衍射面和3个非球面,有助于优化系统结构并有效提高光学系统的像质,光学系统总长仅有160 mm。光学系统采用二次成像,系统的出瞳设计在探测器冷屏处,以保证100%冷光阑效率。图3为6个有效焦距(EFL)处的光学系统原理图,该系统由前固定组、两档移动组、变倍组、补偿组、后固定组组成,对光学系统的光焦度贡献分别为正、负、负、正、正。

各移动组元间的距离  $d$  关系见表2。

调制传递函数(MTF)是评价光学系统性能的参数,6个有效焦距处的MTF如图4所示,图中

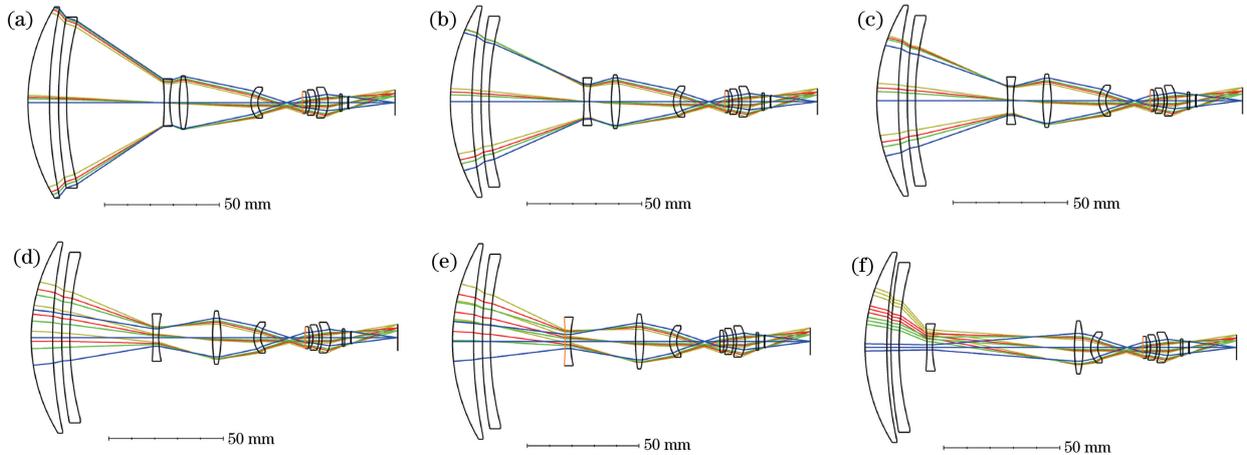


图3 光学系统原理图。(a) EFL:360 mm; (b) EFL:250 mm; (c) EFL:200 mm; (d) EFL:100 mm; (e) EFL:70 mm; (f) EFL:12 mm

Fig. 3 Schematic of optical system. (a) EFL:360 mm; (b) EFL:250 mm; (c) EFL:200 mm; (d) EFL:100 mm; (e) EFL:70 mm; (f) EFL:12 mm

表 2 移动组元间距参数

Table 2 Parameters of moving component spacing

mm

Focal $f'$ /mm	360	250	200	100	70	12
$d_1$	3.952	3.952	3.952	3.952	3.952	1.756
$d_2$	42.563	41.356	40.538	36.731	33.556	11.992
$d_3$	4.360	9.567	12.703	22.959	29.014	61.175
$d_4$	27.695	23.332	21.378	14.928	11.674	3.273

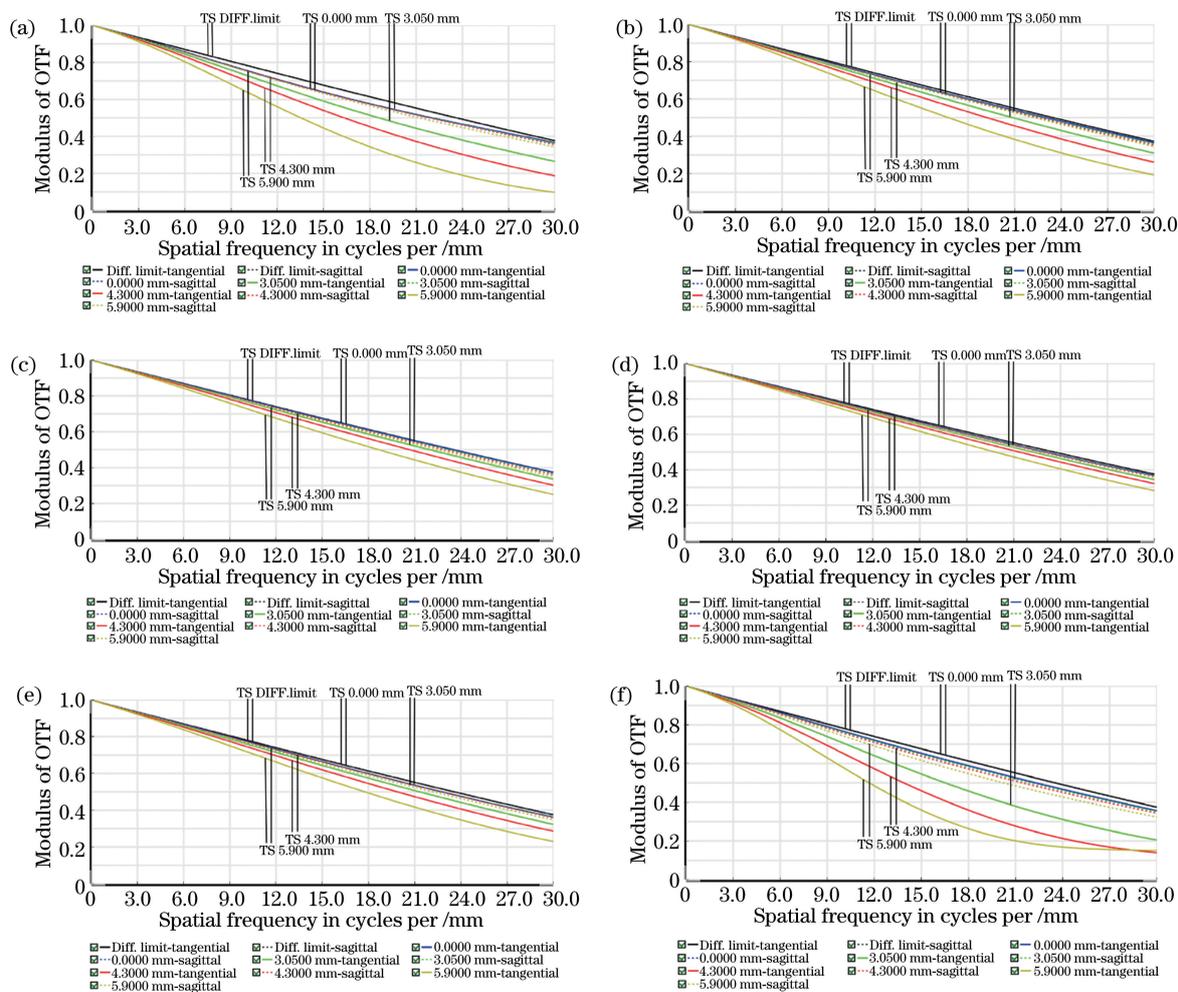


图 4 MTF 曲线。(a) EFL:360 mm;(b) EFL:250 mm;(c) EFL:200 mm;(d) EFL:100 mm;  
(e) EFL:70 mm;(f) EFL:12 mm

Fig. 4 MTF curves. (a) EFL:360 mm; (b) EFL:250 mm; (c) EFL:200 mm; (d) EFL:100 mm;  
(e) EFL:70 mm; (f) EFL:12 mm

OTF 表示光学传递函数。

由图 4 可知,在 6 个有效焦距的近轴视场,系统的 MTF 值在 30 lp/mm 处超过 0.36,接近衍射极限。短焦 12 mm 处产生最大畸变,系统最大畸变为 4.45%,中焦 150 mm 相对照度最低,最低值为 85.26%,各参数满足使用要求,此系统具备优良的成像质量。图 5 为光学系统 6 个有效焦距处的点列图,图中 IMA 为每个视场的实际像高,从图中可以

看出,艾里斑半径为 19.79  $\mu\text{m}$ ,弥散斑方均根值均小于艾里斑半径。两档移动组的加入并结合衍射光学元件的使用,有效提高了系统在长焦和短焦处的成像质量,提高了系统的能量集中度,满足实际需求。

在光学设计中以非球面为基底引入 Binary 2 面,由于 Si 透镜不适合进行单点金刚石车削,最终选择在后固定组中两片 Ge 透镜上引入衍射面。

衍射面各参数关系如图 6 所示,各环带周期见表 3。由图 6 和表 3 可知,衍射面的微结构深度均为  $1.3223 \mu\text{m}$ ,环带个数分别为 6 个和 7 个,最小环带间隔分别为  $0.39013 \text{ mm}$  和  $0.32893 \text{ mm}$ ,满足

单点金刚石车削的加工要求。衍射光学元件的引入减少了光学系统的透镜个数、减小了整体质量,系统镜片总质量仅有  $193.728 \text{ g}$ ,有效提高了系统的透过率。

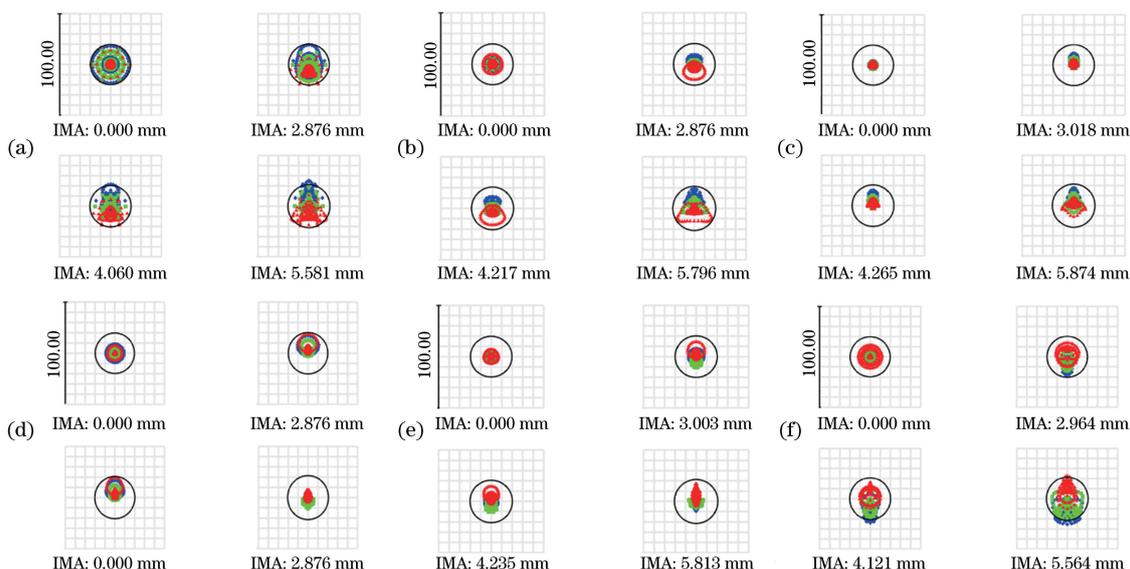


图 5 弥散斑点列图。(a) EFL:360 mm;(b) EFL:250 mm;(c) EFL:200 mm;(d) EFL:100 mm;  
(e) EFL:70 mm;(f) EFL:12 mm

Fig. 5 Diffuse speckle diagrams. (a) EFL:360 mm; (b) EFL:250 mm; (c) EFL:200 mm; (d) EFL:100 mm;  
(e) EFL:70 mm; (f) EFL:12 mm

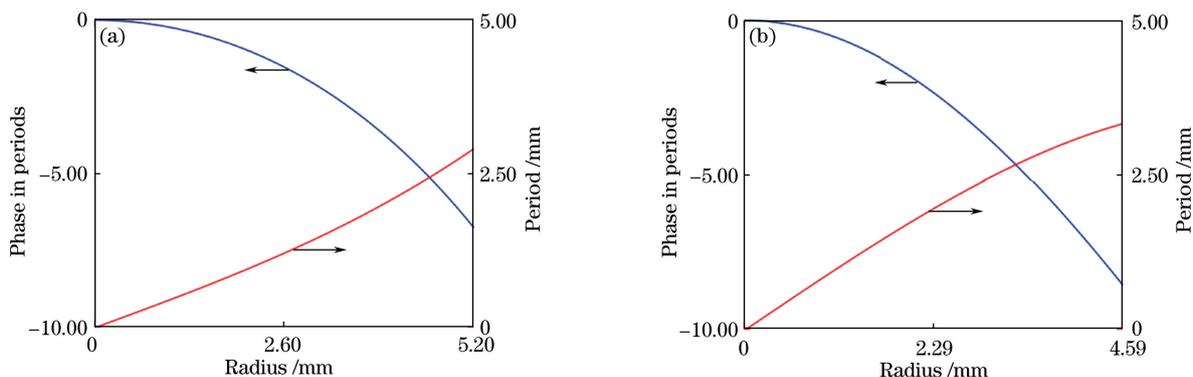


图 6 衍射光学元件半径、相位及周期之间的关系。(a)第 5 片透镜衍射面;(b)第 7 片透镜衍射面

Fig. 6 Relation among radius, phase, and period of diffraction optical element. (a) Diffraction plane of the fifth lens;  
(b) diffraction plane of the seventh lens

### 3.3 凸轮曲线的设计与分析

采用机械补偿式的连续变焦镜头,其变焦过程是通过电机驱动凸轮转动来实现视场的切换,凸轮中的透镜组沿光轴移动,来保证像面稳定所需要的镜片间隔,因此凸轮设计是组成变焦光学系统的关键。本文中第二组元为两档移动组,无需凸轮结构,凸轮结构只包含第三、四组元的移动。

凸轮设计主要考虑凸轮曲线的升角和凸轮的转角范围。凸轮曲线的升角过大会导致系统在变焦时拨钉与凸轮槽的摩擦阻力过大,容易导致凸轮在运

表 3 衍射光学元件的环带周期

Table 3 Ring period of diffraction optical element

Radius /mm	The fifth lens diffraction ring	The seventh lens diffraction ring
$r_1$	2.114599	1.496816
$r_2$	2.957900	2.128281
$r_3$	3.585547	2.261199
$r_4$	4.100169	3.044253
$r_5$	4.542089	3.424050
$r_6$	4.932224	3.774302
$r_7$		4.103236

动时卡死。为减小凸轮运动时产生的升角,可将第三组元变倍组和第四组元补偿组均设为非线性运动。凸轮的转角范围越大,运动时的升角就越小,但综合考虑变焦时间、电机使用寿命和加工后凸轮结构的整体刚性,选择  $160^\circ$  为本结构的凸轮转角范围。图 7 为利用 Matlab 软件拟合的凸轮曲线,图 8 为利用 SolidWorks 软件绘制的凸轮筒 3D 模型图。由仿真可知,凸轮曲线平滑,压力角小于  $45^\circ$ ,满足变焦凸轮使用要求。

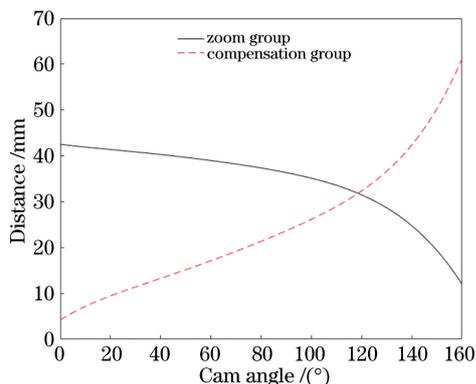


图 7 凸轮曲线

Fig. 7 Cam curves



图 8 凸轮筒 3D 模型

Fig. 8 3D model of cam

## 4 结 论

应用复合连续变焦方式,推导出该模型的变焦方程,设计出一款  $30\times$ 、 $F$  数为 4 的中波制冷红外连续变焦镜头,设计结果表明此种复合连续变焦系统具有优良的像质和紧凑的整体结构。本系统采用二次成像,引入衍射光学元件,仅采用 8 片透镜,光学结构外包络仅有  $160\text{ mm}\times 80\text{ mm}\times 80\text{ mm}$ 。本系统的镜头总长小于现有变倍比超过  $30\times$ 、 $F$  数为 4 的中波红外制冷镜头,满足军用、民用小型吊舱的使用要求。该系统具有变倍比高、体积小、凸轮曲线升角小等优点,可应用于光电探测等领域。

## 参 考 文 献

- [1] Tao C K. Design of zoom optical system [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1988.  
陶纯堪. 变焦距光学系统设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 1988.
- [2] Bai Y, Xing T W, Li H, et al. Advances in foreign MWIR lens with high ratio[J]. Infrared and Laser Engineering, 2015, 44(3): 795-802.  
白瑜, 邢廷文, 李华, 等. 国外高变焦比中波红外镜头的研究进展[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(3): 795-802.
- [3] Ge J J, Lin Z R, Zhu D K. Design of mid-wave infrared continuous zoom system [J]. Journal of Applied Optics, 2013, 34(5): 728-732.  
葛婧菁, 林招荣, 朱大凯. 机载轻小型中波红外连续变焦系统设计[J]. 应用光学, 2013, 34(5): 728-732.
- [4] 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.
- [5] Gu X S. Compact MWIR continuous zoom optical system with large zoom range[J]. Journal of Applied Optics, 2019, 40(1): 33-38.  
顾宪松. 紧凑型大变倍比中波红外连续变焦光学系统设计[J]. 应用光学, 2019, 40(1): 33-38.
- [6] 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.
- [7] He H X. Separate optically compensated continuous zoom medium wavelength infrared optical system [J]. Acta Photonica Sinica, 2019, 48(1): 0111001.  
何红星. 分离式光学补偿连续变焦中波红外光学系统[J]. 光子学报, 2019, 48(1): 0111001.
- [8] Fu Y P, Jin N, Li X N, et al. Airborne novel design for MWIR continuous zoom optical system [J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2013, 32(4): 309-312, 324.  
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): 309-312, 324.
- [9] Zhang T C, Liao Z B. Design of  $6\times$  cooled thermal imaging middle infrared continuous zoom optical system [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(11): 1122004.  
张庭成, 廖志波. 6 倍制冷型中波红外连续变焦光学系统设计[J]. 光学学报, 2012, 32(11): 1122004.

- [10] Zhou H, Liu Y, Sun Q. Mid-infrared zoom optical system with ratio of 25 [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(4): 0422001.  
周昊, 刘英, 孙强. 25 倍中红外连续变焦光学系统设计[J]. *光学学报*, 2012, 32(4): 0422001.
- [11] Li H Z, Zhang Z D. Design of  $20\times$  double-linkage continuous zoom optical system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(2): 0222003.  
李宏壮, 张振铎. 20 倍双组联动变焦距光学系统设计[J]. *光学学报*, 2015, 35(2): 0222003.
- [12] Yan J, Liu Y, Sun Q, et al. Design of  $10\times$  MWIR continuous zoom optical system [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(1): 012201.  
闫晶, 刘英, 孙权, 等. 10 倍中波红外连续变焦光学系统设计[J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(1): 012201.