

文章编号:1002-2082(2014)05-0766-05

# 大相对孔径中波红外变焦系统的小型化设计

付 薇, 潘国庆, 尹 娜, 孙金霞

(中国空空导弹研究院, 河南 洛阳 471009)

**摘要:** 大相对孔径变焦系统在像差补偿自由度较少的光学补偿式变焦系统中, 通常需采用较多的镜片才能完成像差校正, 导致系统体积和质量不甚理想。通过合理分配变焦参数, 优化变焦系统结构, 并进行非球面与衍射面复合叠加设计, 完成了一个仅含8片透镜的光学补偿式变焦系统。相对孔径1:1.8, 采用320像素×240像素制冷焦平面探测器, 工作波段3 μm~5 μm, 变倍比为5<sup>×</sup>, 实现了30 mm/60 mm/90 mm/150 mm四档变焦, 冷光阑效率100%。折叠光路后, 体积约为210 mm×100 mm×85 mm, 结构紧凑, 以较少的镜片数辅以机械结构的光学补偿变焦方式有效减轻了整机质量。

**关键词:** 大相对孔径; 变焦系统; 光学补偿; 光学设计

中图分类号: TN206

文献标志码: A

doi:10.5768/JAO201435.0501006

## Miniature design of large relative aperture MWIR zoom lens

Fu Wei, Pan Guoqing, Yin Na, Sun Jinxia

(China Airborne Missile Academy, AVIC, Luoyang 471009, China)

**Abstract:** Optical system with a large relative aperture has a larger entrance pupil than its counterparts when their focal lengths are equal, so more energy collected and further distance detected. But due to its large aperture, the aberrations increase, which requires more lenses to correct and consequently cause application restrictions by volume and weight. To tackle this issue, zoom parameters were calculated and optimized reasonably, moreover by adopting compounded aspheric and diffractive surfaces, a reimaging zoom mid-wave infrared (MWIR) system with only 8 lenses was designed. The *F* number is 1.8 and the spectrum is 3 μm~5 μm. For a 320×240 pixels detector with cooled focal plane array(FPA), the magnification is 5<sup>×</sup>, and the four fields of view (FOVs) are 30 mm/60 mm/90 mm/150 m. The optical aperture stop matches the detector's and the cold stop efficiency is equal to 100%. Two reflective mirrors are applied to fold the optical path, giving a compact volume of around 210 mm×100 mm×85 mm. Less lenses and simple zoom machinery effectively reduce the weight.

**Key words:** large relative aperture; zoom lens; optical compensation; optical design

## 引言

在红外探测领域, 大相对孔径光学系统在应用中具有明显的优点。在同等焦距下增大通光口径, 可有效提高系统探测距离; 而在同等口径下, 大相对孔径系统具有更长的焦距, 可提高系统分辨能力。此外, 根据红外变焦光学系统近年来的

应用需求, 为解决系统体积、质量方面的限制, 小型、轻量化设计是一个重要的发展方向。因此, 针对采用较小 *F* 数的制冷探测器, 设计一种轻小型、大相对孔径的光学系统, 在红外变焦光学系统设计领域将具有较高的应用价值。

在红外变焦系统设计中, 采用光学补偿方式

收稿日期: 2014-03-03; 修回日期: 2014-03-20

作者简介: 付薇(1982—), 女, 江苏东台人, 工程师, 主要从事红外光学系统设计。E-mail:goya@163.com

的变焦系统较之机械补偿方式结构简单,因此更易实现小型、轻量化的目的。根据 Arthur Cox 等人在美国专利 7092150 B1 中的报道,设计了  $F$  数为 4 的光学补偿中波红外变焦系统,变倍比为  $4\times$ ,焦距变化范围为 50 mm ~ 200 mm,使用了 12 片透镜<sup>[1]</sup>。文献[3]中设计了  $F$  数为 2 的光学补偿变焦系统,变倍比为  $5\times$ ,采用了 10 片透镜。通过这些文献可知,由于光学补偿变焦方式相对于机械补偿方式而言,像差补偿自由度较少,需采用较多的镜片数量才能完成像差校正。而对采用较小  $F$  数制冷探测器的系统而言,大相对孔径本身带来的像差校正难度就很大,因此采用光学补偿方式设计大相对孔径制冷型变焦系统,并实现小型、轻量化设计将是一项挑战。

## 1 设计原理及参数

### 1.1 设计原理

本文设计要求采用  $F$  数为 1.8 的制冷型中波红外焦平面探测器,实现 100% 冷光阑匹配,整机长度小于 220 mm,在满足其他指标的前提下质量尽可能小,其他设计要求见表 1 所示。

表 1 光学设计指标

Table 1 Parameters of optical design

指标	参数
波长/ $\mu\text{m}$	3~5
探测器像素/pixel	$320\times 240$
像元尺寸/ $\mu\text{m}$	30
$F$ 数	1.8
焦距/mm	30~150
变倍比	$5\times$
工作温度/°C	-40~+60

首先选择确定系统初始结构。由于采用制冷型探测器,为压缩系统前端口径,采用二次成像光路,变焦组件位于一次成像光路中。

其次,结合应用需求确定变焦方式。根据设计原理,变焦系统分为机械补偿和光学补偿两种方式。机械补偿式系统,变焦组和补偿组的相对位置为非线性变化,镜筒需采用变焦凸轮驱动,对机械、电控精度要求较高;而光学补偿式系统中变焦组和补偿组沿光轴等速同向运动,只需一组运

动机构,因此简化了机械结构,可有效减轻系统体积质量。

为实现轻量化设计目标,本文采用光学补偿变焦方式,原理简图如图 1 所示。系统从前至后依次为前固定组、移动组、中间固定组和后固定组。其中移动组由两片固连在一起的透镜组成,分别位于中间固定组的前后,沿光轴等速同向运动,达到变倍与补偿的目的。

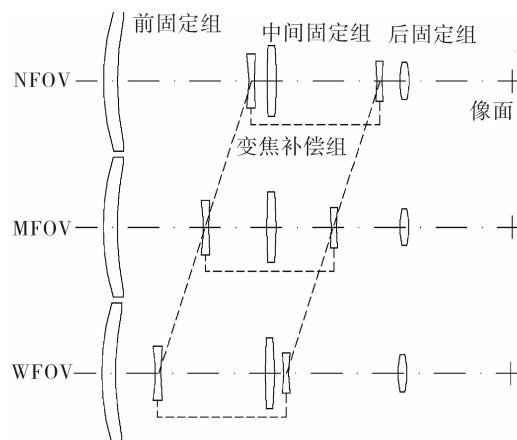


图 1 光学补偿变焦系统原理图

Fig. 1 Principle of optically compensated zoom lenses

系统光阑设置在探测器冷屏处,在变焦过程中保持系统的相对孔径不变,实现 100% 冷光阑匹配。

根据光学补偿变焦系统像差理论进行系统光焦度分配:

$$\Phi = m \cdot \Phi_{\max} \cdot \bar{\Phi} \quad (1)$$

$$d = Z_{\max} \cdot \bar{d} \quad (2)$$

$$u_{n+1} - u_n = h_n \cdot \Phi_n \quad (3)$$

$$h_{n+1} = h_n - d_n u_n \quad (4)$$

式中: $m$  为变倍比;  $\Phi_{\max}$  为系统最大光焦度;  $\bar{\Phi}$  为归一化光焦度;  $Z_{\max}$  为系统允许的最大移动量,  $\bar{d}$  为归一化间隔。根据近轴光线追迹公式,计算出大视场初始光焦度及间隔。

根据光学补偿变焦理论,像差完全补偿点数等于可变空气间隔的数目,故本系统像差完全补偿点数为 4 个,为四视场连续变焦光学系统。

根据计算结果在 CODE V 软件中建立光学系统模型,并对像差进行优化。在设计中,对固定镜组和变倍组的像差系数进行合理分配,确保在第 2 和第 4 透镜运动过程中一次像像面位置稳定,使得

全系统像差得到较好的均衡和校正。

此外对透镜材料进行合理搭配,红外中波材料不如可见光波段丰富,对几种常见的中波红外材料如硅、锗和硒化锌进行组合,通过不同折射率和色散系数的平衡,在一定程度上降低色差。

由于大相对口径系统轴外像差较大,而光学补偿方式像差补偿自由度小,对像差校正造成较大难度。引入非球面和衍射面,明显降低了系统球差及色差,且减少了镜片数量。相对于文献[3],本文变焦组和补偿组均简化为单透镜,使得系统镜片总数由10片减少至8片。变焦组和补偿组镜片采用非球面和衍射面复合设计,可一次加工成型,非球面最高次为6次,衍射面最小环带0.5 mm,大于单点金刚石车刀刀头尺寸,可加工性良好。衍射面与非球面复合面型见图2所示。

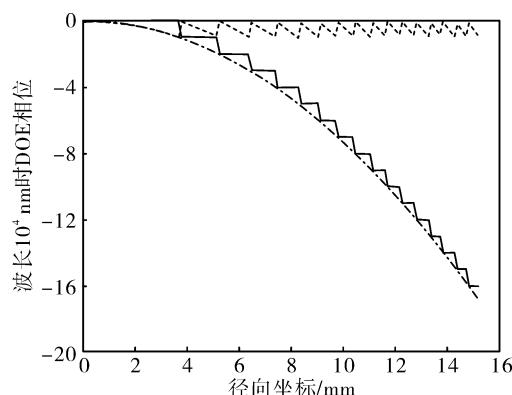


图2 衍射面与非球面复合面面型

Fig. 2 Compound diffractive and aspheric surface

## 1.2 设计参数

系统采用四档变焦,4个等效焦距下对应的视场见表2所示。

表2 4个焦距下对应的视场

Table 2 4 FOVs corresponding to 4 effective focal lengths

焦距/mm	视场/(°)
150	3.66×2.75
90	6.1×4.59
60	9.15×6.88
30	18.3×13.75

## 2 设计结果及分析

### 2.1 设计结果

设计完成的变焦系统如图3所示,图中1为

前固定组,2、4固连在一起构成变倍组,3为中固定组、5、6为后固定组,7、8为二次成像镜组,其中2和4沿光轴等速同向运动,其他组元保持不动,实现四视场变焦。图中A为长焦(150 mm),B为中焦Ⅰ(90 mm),C为中焦Ⅱ(60 mm),D为短焦(30 mm)。引入2个平面反射镜折叠光路,折叠后系统体积约为210 mm×100 mm×85 mm。从长焦至短焦变焦过程中变倍组行程75 mm,变焦倍率5:3:2:1。

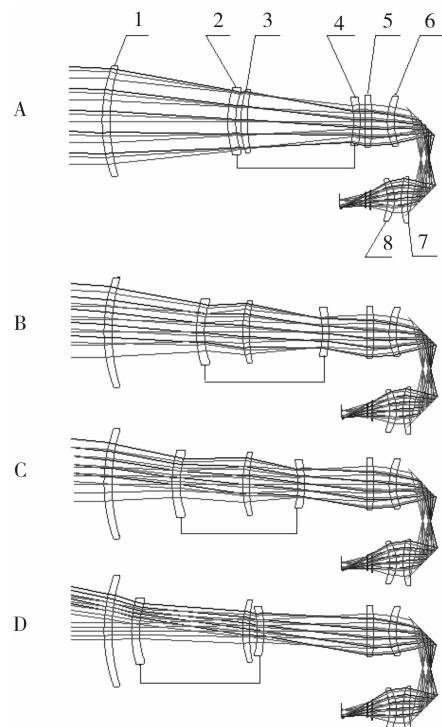


图3 光学补偿四视场变焦系统图

Fig. 3 Layout of 4 FOVs optically compensated zoom system

为补偿光学系统处于不同环境温度时的像面位置漂移,采用主动式消热差设计,通过对二次成像镜组中单透镜的轴向微调,实现-40 °C~+60 °C环境下消热差设计。

### 2.2 像质评价

系统4个视场下的调制传递函数MTF见图4~图7,根据探测器像元计算可知,系统分辨率为16 lp/mm,长焦和中焦Ⅰ时各视场MTF接近衍射极限,中焦Ⅱ和短焦时中心视场MTF接近衍射极限,边缘视场在16 lp/mm处大于0.65。点列图见图8所示,各视场均方根弥散斑直径基本在一个像素(30 μm)内。

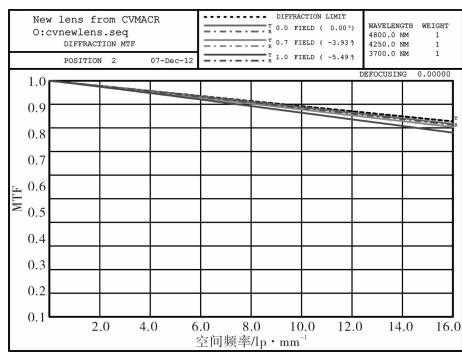
图 4 长焦  $f=150$  mm 时 MTF

Fig. 4 MTF curve of NFOV

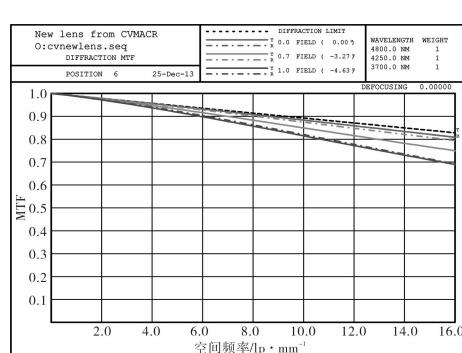
图 6 中焦 II  $f=60$  mm 时 MTF

Fig. 6 MTF curve of MFOV II

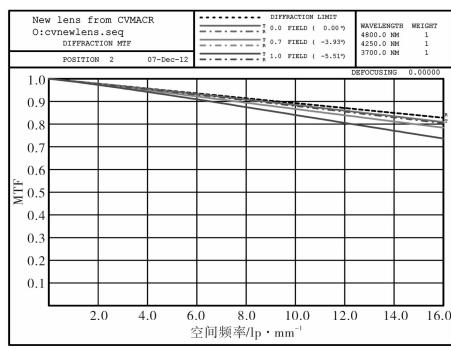
图 5 中焦 I  $f=90$  mm 时 MTF

Fig. 5 MTF curve of MFOV I

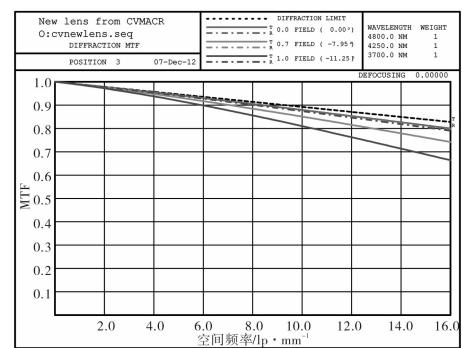
图 7 短焦  $f=30$  mm MTF

Fig. 7 MTF curve of WFOV

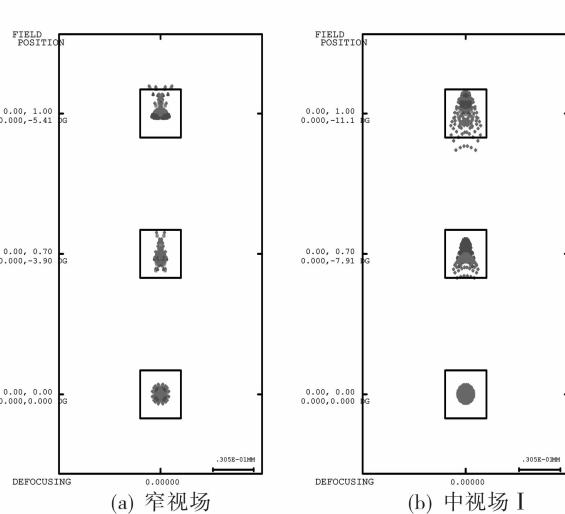


图 8 各视场点列图

Fig. 8 Spot diagram of 4 FOVs

### 2.3 冷反射分析

冷反射是采用制冷型探测器的红外光学系统需要避免的现象。为防止从系统某个透镜表面的反射中看到探测器冷屏,需要注意 2 个特征量  $YNI$  和  $I/I_{BAR}$ ,其中  $Y$  是边缘光线在该面的透射

高度,  $N$  是折射率,  $I$  是边缘光线的入射角,  $I_{BAR}$  是主光线的入射角。当  $YNI$  很小且  $I/I_{BAR} < 1$  时,该面是可能会产生冷反射的可疑面。而根据经验,系统在短焦时冷反射最强,表 3 列出了系统在短焦时的冷反射数据。

表 3 冷反射分析

Table 3 Analysis of cold reflection

反射面	YNI	$I/I_{BAR}$
1	12.465 0	20.012
2	5.531 4	-10.044
3	-5.260 6	3.440
4	4.242 3	-2.985
5	5.305 5	-3.618
6	-5.251 9	3.657
7	-2.396 5	2.998
8	1.545 1	-0.813
9	0.898 7	-0.137
10	-3.448 1	8.617
11	6.561 0	1.863
12	-0.456 0	0.853
13	-0.325 2	-0.258
14	-0.923 9	0.458
15	-1.431 4	0.864
16	-1.413 1	0.880

由表 3 可知, 系统第 9 和第 13 面为冷反射可疑面。对这两面分别进行反向光线追迹, 观察光线被这 2 个表面反射后的会聚情况。由图 9(a) 和 9(b) 可知, 光线均在探测器前方会聚, 不会成像到探测器上, 避免了产生冷反射的可能。

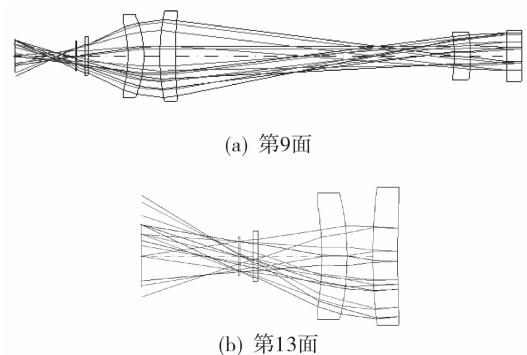


图 9 冷反射光线追迹图

Fig. 9 Schematic of cold reflection ray tracing

### 3 结论

本文设计了一个采用  $F$  数为 1.8 的制冷焦平面探测器的中波红外变焦系统, 实现了四视场变

焦设计。通过非球面与衍射面复合设计, 解决了大相对孔径像差校正困难、光学补偿方式像差补偿自由度小的问题。全系统仅含 8 片透镜, 非球面最高次项为 6 次, 衍射面最小环带 0.5 mm, 与非球面复合设计在同一镜面上, 可一次加工成型, 降低了加工制造成本。系统具有相对孔径大、体积小、质量轻、变焦机械简单的优点, 且较之以往同类型光学系统具有更少的光学镜片数, 从而有力地减少了光能损失, 提高了光能透过率, 具有良好的应用价值和应用前景。

### 参考文献:

- [1] Arthur Cox. Optically compensated infrared zoom lens having a single movable lens carriage and no aspheric lenses, US: 7,092,150 B1 [P]. 2006-05-01.
- [2] Chen Lyuji, Li Ping. Optically compensated MWIR zoom system [J]. Infrared Technology, 2010, 32(11):645-648.  
陈吕吉, 李萍. 光学补偿中波红外变焦光学系统设计[J]. 红外技术, 2010, 32(11):645-648.
- [3] Tao Liang, Zhao Jinsong. Optically compensated LWIR zoom objective with magnification of 5<sup>×</sup> [J]. Infrared Technology, 2008, 30(4):210-213.  
陶亮, 赵劲松. 5<sup>×</sup> 光学补偿长波红外连续变焦物镜系统[J]. 红外技术, 2008, 30(4):210-213.
- [4] Luo Shoujun, He Wubin, Li Wenhui, 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.
- [5] Paiez G, Scholim S. Relationship between temperature-dependent emissivity and gray-body incidence detected with a quantum detector [J]. SPIE, 1998, 3437: 407-415.
- [6] Scherr L M, Orlando H J, Hall J T, et al. Narcissus consideration in optical designs for infrared staring arrays [J]. SPIE, 1996, 2864: 442-452.
- [7] Tao Chunkan. Zoom focus optic system design [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.