

· 红外技术 ·

30×制冷型中波消热差红外变焦光学系统设计

高金红, 付跃刚, 刘智颖, 侯振岩

(长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022)

摘要: 针对像素为640×512、探测器的像元尺寸为20 μm的制冷型凝视焦平面阵列探测器, 设计了变倍比为30的中波红外连续变焦光学系统。系统工作波段为3.7~4.8 μm, *F*数为3.7, 焦距变化范围为11.64~349.2 mm。系统由两部分组成: 变焦系统和二次成像系统, 共12片透镜。其中, 二次成像系统的主要作用是实现100%冷光阑效率的同时, 减小光学系统的径向尺寸。系统的空间分辨率达到21 lp/mm, 在25 μm内能量集中在75%以上, 系统成像质量较好, 在-40~+60 °C的温度范围内实现了光学被动式消热差的设计。

关键词: 红外变焦; 制冷探测器; 高变倍比; 二次成像

中图分类号: TN215

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2013)-02-0013-05

Design of Cooled Mid-infrared Athermal Zoom Optical System with Ratio of 30

GAO Jin-hong, FU Yue-gang, LIU Zhi-ying, HOU Zhen-yan

(School of Electro-optical Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: On the basis of cooled staring focal plane array (FPA) detectors with 640×512 pixel and 20 μm pixel elements, a mid-infrared continuous zoom optical system with 30 zoom ratio is designed. Operation waveband of the system is 3.7~4.8 μm, *F* number is 3.7 and focal length range is from 11.64 to 349.2 mm. The system includes two parts such as a zoom system and a re-imaging system, which includes 12 lenses. Main function of the re-imaging system is to realize 100% cooled diaphragm efficiency and reduce radial size of optical systems. Space resolution of the system can be 21 lp/mm and the energy concentration rate is above 75% in 25 μm. And imaging quality of the system is much better. Optical passive athermal design is realized in the range of -40~+60 °C.

Key words: infrared zoom; cooled detector; high zoom ratio; re-imaging

近年来, 红外技术凭借其特有的优势, 使其广泛应用于各个领域。随着人们对红外技术使用性能要求的增加, 便逐渐出现了红外变焦光学系统。将变焦的性能增加到红外光学系统中, 使红外系统具备了变焦系统可实现的大视场搜索目标、小视场瞄准跟踪功能; 而应用连续变焦又能保证在视场变化的过程中, 进行目标的连续追踪^[1]。当红外光学系统应用于温差较大的环境中时, 外界温度的变化将引起光学元件曲率半径、厚度等参数的改变, 导致光学系统焦距变化, 使得像面漂移, 影响成像质量, 因此需要采取相应的消热差设计^[2], 来抑制光学系统像质受

温度变化的影响。因此, 研究高变倍比的消热差红外变焦光学系统对于探测识别领域的发展具有重要的意义。通常的消热差方法主要有机械被动式、机电主动式以及光学被动式^[3]。其中, 光学被动式消热差方法无需额外的消热差机械结构, 具有结构简单、体积小、质量轻、可靠性好的优势, 有利于现代光学系统小型轻量化的发展方向。

针对中波640×512、像元尺寸为20 μm的制冷型凝视焦平面阵列探测器, 设计了变倍比为30的中波红外连续变焦光学系统, 并且在-40~+60 °C实现了光学被动式消热差的设计。系统工作波段为3.7~4.8

收稿日期: 2013-02-28

作者简介: 高金红(1986-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为光学设计及检测技术; 付跃刚(1972-), 男, 教授, 博导, 主要研究方向为光学系统设计及检测技术。

μm ,由变焦系统和二次成像系统两部分组成,共12片透镜,其中引入了一个非球面,在控制成本的同时,达到较好的成像质量。

1 设计指标

系统采用640×512的中波制冷型凝视焦平面阵列探测器,像元尺寸为20 μm ,冷光阑距焦平面阵列19.8 mm。综合考虑系统各方面的性能,具体的设计指标如表1所示。

表1 设计指标

参数	数值
波长	3.7~4.8 μm
M	30×
f'	11.64~349.2 mm
ω'	1.05×0.84°~28.8×23.74°
$F\#$	3.7
工作温度	-40~+60 °C

2 设计思路

(1)常用的实现连续变焦的机械补偿变焦系统按照补偿组光焦度的正负分为正组补偿和负组补偿形式^[4],由于所要设计的变焦系统变倍比较大(30×),在像差校正的方面相对于负组补偿来说,正组补偿相对容易校正,因此系统采用正组补偿方式实现连续变焦。根据正组补偿变焦光学系统的基本原理及高斯光学理论^[5],取中焦作为系统的起始状态,令变倍组和补偿组的垂轴放大倍率均为-1;变倍组的规一化焦距值为-1;变倍组和补偿组之间的归一化间距值为1.2;长焦时变倍组的规一化焦距值为-1.5;短焦时后固定组的垂轴放大倍率为0.8;前固定组和变倍组的归一化间距值为0.5;补偿组和后固定组的归一化间距值为0.3。利用MATLAB编程计算得到系统的初始解,包括系统各组元的焦距、不同运动状态下组元间隔。其中, $f'_1=211.021\ 3\ \text{mm}$, $f'_2=-35.968\ 9\ \text{mm}$, $f'_3=57.550\ 3\ \text{mm}$, $f'_4=256.349\ 8\ \text{mm}$;各组元的间隔如表2所示。

(2)考虑到红外光学系统的温度敏感性,应合理地选择透镜的材料类型,从光学设计的初期,降低温度对系统的影响。常用的红外材料中^[6],Si和Ge的

折射率温度变化系数相对较低,且Si的价格较Ge低,因此,考虑选用Si作为变焦系统的主要材料,部分透镜选用Ge来校正色差。

表2 各焦距状态下的组元间隔

状态	组元间隔		
	d_{12}	d_{23}	d_{34}
短焦	17.984 54	204.484 2	10.790 7
中焦	139.083 5	43.162 7	51.031 2
长焦	151.073 1	9.361 1	72.825 2

(3)光学被动式消热差方法是利用不同透镜材料的温度特性与色差特性,通过适当的分配材料与光焦度的关系,使得光学系统受温度变化产生的像面漂移与镜筒材料随温度热胀冷缩产生的像面漂移相互补偿,从而实现消热差设计^[7]。光学系统实现光学被动式消热差设计应满足光焦度方程、消色差方程以及消热差方程^[8]

$$\sum_{i=1}^j \varphi_i = \varphi \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^j \frac{\varphi_i}{v_i} = 0 \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^j \chi_i \varphi_i + a_H \varphi = 0 \quad (3)$$

式中, φ_i 为第*i*个透镜的光焦度, φ 为系统总光焦度, v_i 为透镜材料的阿贝数, χ_i 为透镜材料的热膨胀系数, a_H 为镜筒材料的热膨胀系数。

(4)对于红外光系系统来说,要抑制系统中的来自于景物辐射以外的杂散辐射,应采用100%的冷光阑效率。对于制冷型红外光学系统来说,应将探测器的冷光阑作为光学系统的出瞳,从而实现100%的冷光阑效率^[9]。因此,系统采用二次成像结构,可以在保证实现100%冷光阑效率的同时,减小系统的径向尺寸。

3 设计结果

根据设计指标的要求,利用变焦系统基本理论及高斯光学得到系统的高斯解以后,对变焦系统中各组元选取适当的结构形式。在光学设计软件ZEMAX中,用多重结构实现系统的变焦,并对初始结构进行优化设计,得到系统的变焦部分;利用光瞳衔接原则,通过计算,可得到与前部变焦系统相连接的二

次成像系统的参数,选择合适的初始结构,经缩放优化、精简透镜,得到二次成像系统;最后,将前后两部分系统衔接在一起,作进一步的像质提高,从而得到整个制冷红外变焦光学系统。

设计结果如图1所示,图1a~图1c分别为短焦、中焦、长焦状态时的光学结构图。系统由变焦系统和二次成像两部分组成,总长为415 mm,口径为155 mm。系统由包括1片探测器窗口在内的13片单透镜组成,变焦组透镜的第一个表面为二次非球面,其中变焦组、补偿组和后固定组中共4片透镜材料为Ge,其余全为Si。其中,系统的出瞳为制冷探测器的冷光阑,冷光阑距探测器的距离为19.8 mm。

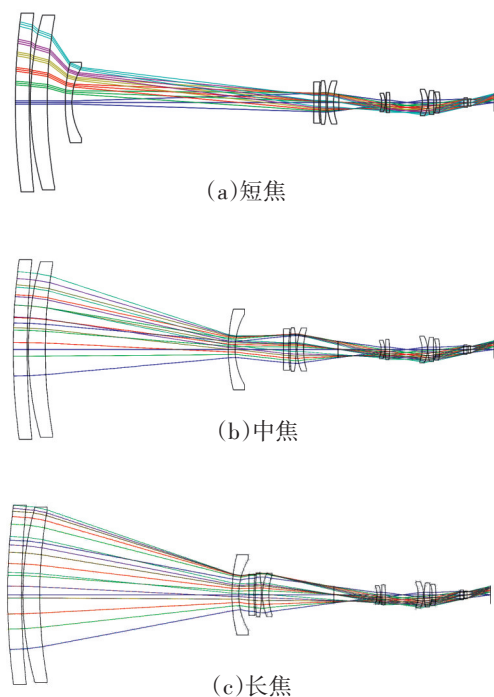


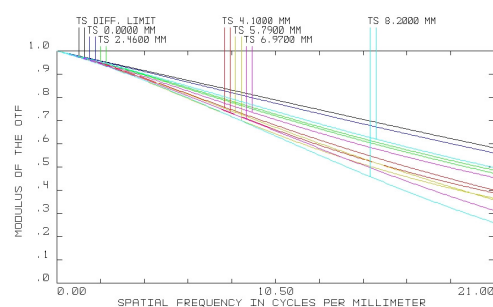
图1 变焦系统结构图

图2为变焦系统的传递函数曲线,图2a~图2c分别为常温状态短焦、中焦、长焦时系统的传递函数曲线。由MTF曲线可以看出,传递函数曲线平滑,轴上视场的传递值均接近衍射极限,轴外最大视场的传递函数值也达到0.25以上。

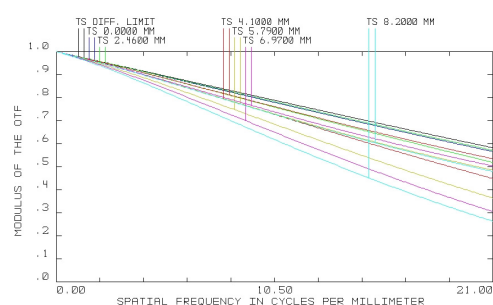
由于光电成像系统的传递函数可近似为各传输环节对应调制传递函数的乘积^[10],即

$$MTF = MTF_{\text{目标}} \times MTF_{\text{设计}} \times MTF_{\text{加工}} \times MTF_{\text{装调}} \times MTF_{\text{探测器}} \times MTF_{\text{电子学}} \quad (4)$$

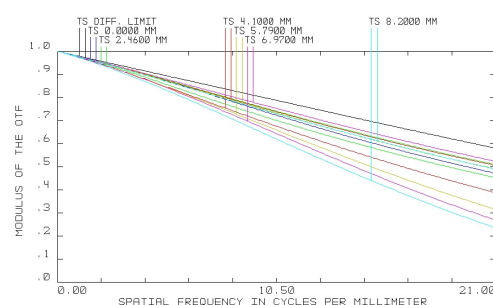
根据目前实际加工装调水平,取 $MTF_{\text{加工}} = 0.9$ 、 $MTF_{\text{装调}} = 0.9$ 、 $MTF_{\text{电子学}} = 0.8$;再由人眼的视觉阈 $MTF_{\text{min}} = 0.026$ 可知,实际光电系统的调制传递函数



(a) 短焦时传递函数曲线



(b) 中焦时传递函数曲线

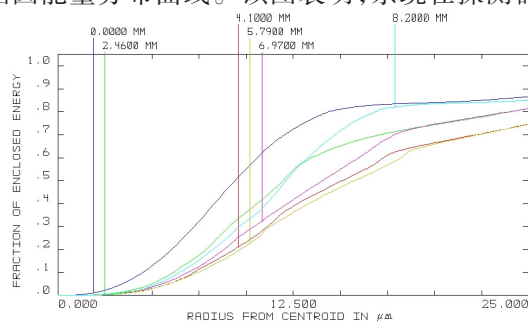


(c) 长焦时传递函数曲线

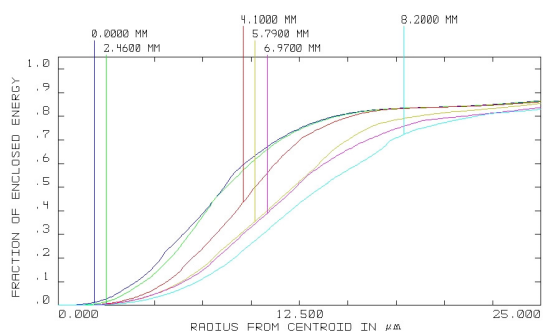
图2 变焦系统的传递函数曲线

值大于0.026时所对应的空间分辨率即为系统分辨率。拟定景物调制传递函数 $MTF_{\text{目标}} = 0.6$,由上述公式、人眼视觉阈以及光学系统传递函数值,经过计算可知,系统的空间分辨率为21 lp/mm。当景物调制函数低于0.6时,系统的空间分辨率会有所降低。

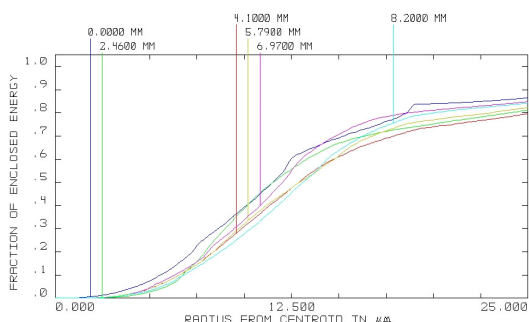
图3是光学系统在短焦、中焦和长焦状态时的几何包围圆能量分布曲线。该图表明,系统在探测器



(a) 短焦



(b)中焦



(c)长焦

图3 几何包围圆能量曲线

像元尺寸 25 μm 范围内,能量集中度均大于 75%。

3.1 变焦曲线拟合

应用动态光学理论可以推导得到像移补偿公式,从而计算出变焦曲线和补偿曲线的关系

$$Aq_2^2 + Bq_2 + C = 0 \tag{5}$$

式中,

$$\begin{cases} A = (f_1' - \beta_1 q_1) \beta \\ B = \beta_1 \beta_2 q_1^2 + [f_2'(1 - \beta_2^2) \beta_1 - f_1'(1 - \beta_1^2) \beta_2] q_1 - f_1' f_2'(1 - \beta_2^2) \\ C = \beta_2^2 f_2' [\beta_1 q_1 - f_1'(1 - \beta_1^2)] q_1 \end{cases} \tag{6}$$

$$\text{即 } q_2 = \frac{-B \pm \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \tag{7}$$

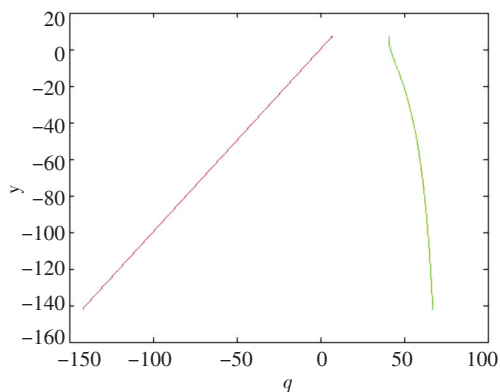
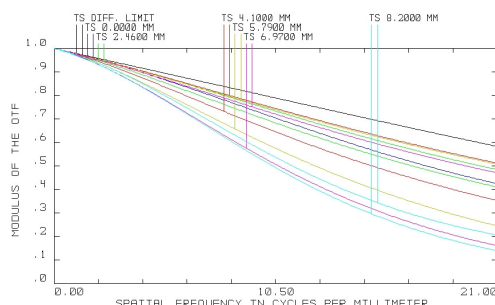


图4 变焦系统凸轮曲线

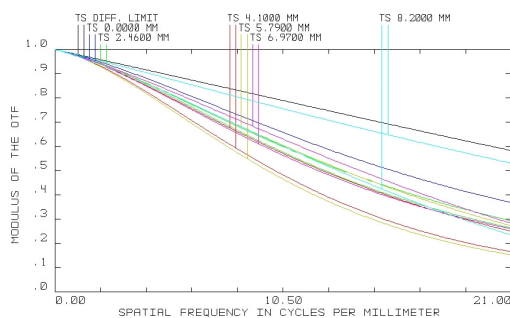
通常情况 q_1 为线性运动,由以上公式可以得到与 q_1 曲线相对应的能够满足像面稳定性要求的 q_2 曲线,即变焦组与补偿组的运动关系。由 MATLAB 编程,输入相应的参量(变焦组、补偿组的焦距,中焦状态时两组元的放大倍率以及变焦组的运动范围),即可得到凸轮曲线,绘制结果如图 4。

3.2 无热化分析

利用 ZEMAX 软件在 $-40 \sim +60 \text{ }^\circ\text{C}$ 的温度范围内分析温度对系统的影响,拟定镜筒材料为钛合金,其热膨胀系数为 $9.1 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ 。在 ZEMAX 中对系统进行热分析,系统的像面始终保持稳定,像质良好。分析结果如图 5、图 6、图 7 所示,分别为短焦、中焦、长焦时系统在 $-40 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 $+60 \text{ }^\circ\text{C}$ 状态下的传递函数曲线。结果表明,温度对传递函数的影响不大,系统在 $-40 \sim +60 \text{ }^\circ\text{C}$ 的温度适应性好。

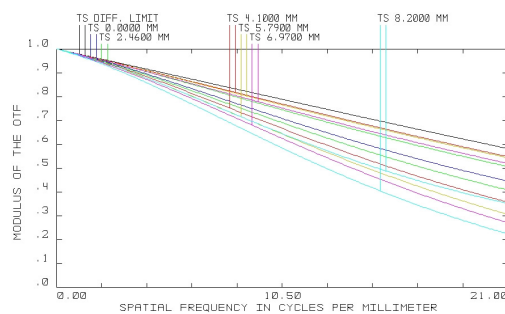


(a) $-40 \text{ }^\circ\text{C}$ MTF

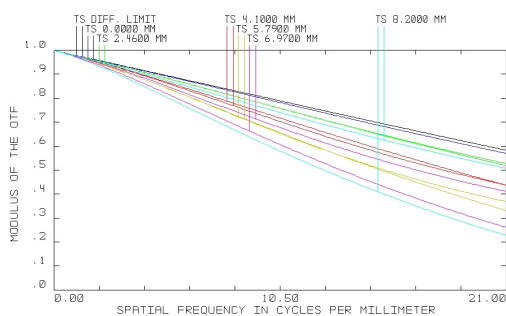


(b) $+60 \text{ }^\circ\text{C}$ MTF

图5 短焦热分析传递函数

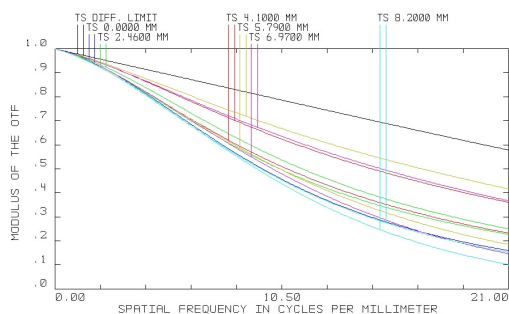


(a) $-40 \text{ }^\circ\text{C}$ MTF

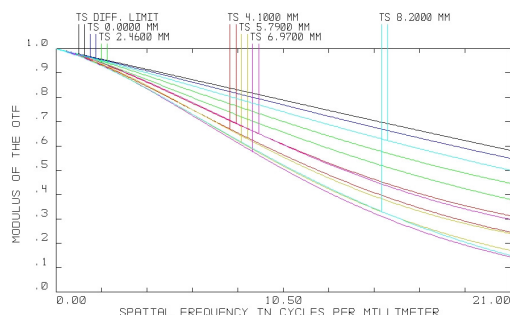


(b)+60 °C MTF

图6 中焦热分析传递函数



(a)-40 °C MTF



(b)+60 °C MTF

图7 长焦热分析传递函数

4 结 论

针对640×512的中波制冷型红外焦平面阵列探

测器,设计了30×中波红外变焦光学系统。系统由机械补偿法的正组补偿方式实现连续变焦设计,加以后部分的二次成像系统实现100%的冷光阑效率。系统的 $F\#$ 为3.7,变倍比为30,可实现11.64~349.2 mm的连续变焦。系统分辨率可以达到21 lp/mm,包围圆能量在75%以内,在-40~+60 °C的温度范围内系统具有较好的温度适应性。系统凸轮曲线平滑无拐点,满足实际需求。本系统具有高变倍比、结构简单、环境适应性好的优点,可以应用于侦查、制导、导航、搜索等领域。

参考文献

- [1] 张良. 中波红外变焦距系统的光学设计[J]. 应用光学, 2006, 36(1):32-34.
- [2] 王学新,焦明印. 红外光学系统无热化设计方法的研究[J]. 应用光学, 2009, 30(1):129-133.
- [3] 陈吕吉,冯生荣. 一种紧凑的红外消热差光学系统[J]. 红外技术, 2007, 29(4):203-205.
- [4] 陶纯堪. 变焦距光学系统设计[M]. 北京:国防工业出版社, 1988:2-22.
- [5] 王艳彬. 中波红外变焦光学系统研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2010.
- [6] 余怀之. 红外光学材料[M]. 北京:国防工业出版社, 2007.
- [7] T H Jamieson. Thermal effects in optical systems[J]. Opt. Soc Am. 1998, 38(2):542-546.
- [8] 温彦博,白剑,侯西云,等. 红外无热化混合光学系统设计[J]. 光学仪器, 2005, 27(5):82-86.
- [9] 贾永丹,付跃刚,刘智颖,等. 双视场/双色红外消热差光学系统设计[J]. 光子学报, 2012, 41(6):638-641.
- [10] 王志坚,王鹏,刘志颖. 光学工程原理[M]. 北京:国防工业出版社, 2010:180-187.

版 权 声 明

本刊已成为《中国核心期刊(遴选)数据库》、《中文科技期刊数据库》、《中国期刊全文数据库》、《中国学术期刊综合评价数据库》、美国《乌利希期刊指南》、波兰《哥白尼索引》收录期刊,加入了中国光学期刊网,建立了《光电技术应用》期刊网站,所刊载的文章在国内外数据库检索机构及网站(包括纸版、光盘版、网络版)报道时,不再征求作者意见。稿件刊登录用后作者著作权使用费与本刊稿酬一次性付给,并赠送当期样刊两份。