

长波红外显微成像光学系统的设计与仿真

王宇^{1,2}, 许阳阳^{1,2}, 刘爱云¹, 石旺舟¹, 胡古今^{1*}, 牟浩², 潘昌翊², 邓惠勇^{2**}, 戴宁²

¹上海师范大学物理系, 上海 200234;

²中国科学院上海技术物理研究所红外物理国家重点实验室, 上海 200083

摘要 针对像元尺寸为 $50\ \mu\text{m} \times 50\ \mu\text{m}$ 的长波红外 32×32 元制冷型凝视焦平面阵列探测器的需要, 设计了一种工作波长位于 $15 \sim 35\ \mu\text{m}$ 的透射式长波红外显微成像光学系统。该系统采用一次性成像方式, 且主要由系列透镜构成, 其中冷光阑置于光路的出瞳位置。通过对称双胶合透镜组合来校正正像差, 在 $-20 \sim 40\ ^\circ\text{C}$ 温度范围采用光学被动补偿技术实现消热像差。仿真结果表明, 当所设计的光学系统的中心波长、焦距、数值孔径、有效放大倍率和空间分辨率分别为 $27\ \mu\text{m}$, $14\ \text{mm}$, 0.25 , 10 和 $0.1\ \text{mm}$ 时, 在 $10\ \text{lp} \cdot \text{mm}^{-1}$ 特征频率处调制传递函数(MTF)值达到 0.369 , 系统包围圆能量集中度超过 80% , 能够得到清晰可辨的物像, 满足对冷光学系统短结构、高分辨率的应用需求。

关键词 光学设计; 长波红外制冷型探测器; 双胶合透镜组; 显微成像光学系统; 仿真模拟

中图分类号 O43

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.0622001

Design and Simulation of Long-Wavelength Infrared Microscopic Imaging Optical System

Wang Yu^{1,2}, Xu Yangyang^{1,2}, Liu Aiyun¹, Shi Wangzhou¹,
Hu Gujin^{1*}, Mu Hao², Pan Changyi², Deng Huiyong^{2**}, Dai Ning²

¹Department of Physics, Shanghai Normal University, Shanghai 200234, China;

²State Key Laboratory for Infrared Physics, Shanghai Institute of Technical Physics,
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China

Abstract In this study, a transmission type long-wavelength infrared microscopic imaging optical system operating in wavelengths of $15 \sim 35\ \mu\text{m}$ is designed to meet the demand for cooled staring focal plane array detector containing long-wavelength infrared 32×32 pixel elements and exhibiting an elemental size of $50\ \mu\text{m} \times 50\ \mu\text{m}$. The designed system adopts disposable imaging and comprises a series of lenses. A cold diaphragm is positioned at exit pupil of the optical path. Symmetrical double gluing lens combination is introduced into the system to correct the aberration. Further, an optical passive compensation technique is employed to realize anti-thermal aberration at temperatures of $-20\ ^\circ\text{C}$ to $40\ ^\circ\text{C}$. The simulation results show that the designed system exhibits a modulation transfer function (MTF) value of 0.369 and an encircled energy concentration of $>80\%$ at a characteristic frequency of $10\ \text{lp} \cdot \text{mm}^{-1}$ when its center wavelength, focal length, numerical aperture, effective magnification, and spatial resolution are $27\ \mu\text{m}$, $14\ \text{mm}$, 0.25 , 10 , and $0.1\ \text{mm}$, respectively. Furthermore, a clear distinguishable image can be obtained using the designed system. The designed system satisfies the requirement of short structure and high resolution of cold optical system.

Key words optical design; long-wavelength infrared cooled detector; double cemented lens group; microscopy imaging optical system; analog simulation

OCIS codes 220.1010; 220.3620; 220.3630

1 引 言

红外成像系统在军事预警、深空探测、地外生命

追踪、智慧城市建设、环境监测、气象预报等领域正发挥着越来越重要的作用^[1-10]。由于红外观测的目标和对象的尺度一般较大,故红外成像系统中所采

收稿日期: 2019-08-15; 修回日期: 2019-11-06; 录用日期: 2019-12-06

基金项目: 中国科学院前沿科学重点研究项目(QYZDJ-SSW-SLH018)、国家自然科学基金重大项目(11174307)、国家重点研发计划项目(2016YFB0402405)

* E-mail: hugj@shnu.edu.cn; ** E-mail: hydeng@mail.sitp.ac.cn

用的光路架构基本上是望远镜模式,他们不能满足显微检测分析的要求。欲通过红外手段对微小物体甚至微纳尺度的目标进行高灵敏度的信息感知,并捕获目标物的清晰图像,就需要基于显微光学的红外成像系统进行观测。

红外显微成像技术集红外热成像、图像处理和显微光学技术于一体,主要包括红外探测器、显微物镜、图像采集卡、处理软件、工作台和低温杜瓦等^[11]。物点经过显微光学系统的物镜之后成像在探测器靶面上,探测器将其转换为模拟电信号输出,读出电路将电信号放大并转换成视频信号。自20世纪60年代第一台红外热像仪研制成功以来,美、法、英等国又陆续推出了多款成熟的产品。红外显微成像系统的研制始于90年代。早期,受红外光学材料和探测器性能等的制约,工作进展缓慢。近年来,随着显微光学镜头设计和加工工艺的完善,加之出现大量高透光率的玻璃晶体材料,显微成像技术的发展有了质的飞跃。不过当下的工作兴趣均聚焦在紫外到中波红外波段^[12-14],关于长波红外显微成像光学系统还尚未报道^[15]。国内所使用的红外显微热成像系统都是从国外购买的,价格极其昂贵^[16-17]。因此,开发具有自主知识产权的长波红外显微热成像系统具有重要的现实意义。

本文围绕应用于 32×32 元制冷型阻挡杂质带(BIB)长波红外焦平面阵列探测器的显微光学成像系统的设计及其性能仿真模拟等内容开展了相关工作。理论结果表明,当探测器的像元尺寸为 $50 \mu\text{m} \times 50 \mu\text{m}$,响应波段为 $15 \sim 35 \mu\text{m}$ 时,如果采用由5块BrCs和KRS-5透镜构成的透镜组作为光学系统的物镜,外加一个数值孔径(NA)为0.25的光阑,就可以得到一个横向放大倍率为10,空间分辨率为0.1 mm,工作在相应波长范围且中心波长为 $27 \mu\text{m}$ 的长波红外显微成像系统,同时该系统在 $-20 \sim 40 \text{ }^\circ\text{C}$ 范围拥有较好的图像质量。

2 光学系统的设计指标

研究的对象是长波红外显微成像系统,它包括 32×32 元BIB长波红外制冷型凝视焦平面阵列探测器和显微成像光路两部分。探测器上的像元尺寸为 $50 \mu\text{m} \times 50 \mu\text{m}$,像元间距为 $10 \mu\text{m}$,冷光阑离焦平面阵列的距离为115 mm。考虑到长波红外显微成像系统的综合性能,表1给出了显微成像光学系统的参数指标。

表1 长波红外显微成像光学系统的参数指标

Table 1 Parameters index of long-wavelength infrared microscopic optical system

Item	Value
Working wave range / μm	15-35
Zoom ratio	$10 \times$
NA	0.25
Focal length /mm	14
Image height /mm	1
Working length /mm	< 10
Operating temperature / $^\circ\text{C}$	$[-20, 40]$

3 光学系统的设计

3.1 设计原理

红外光学成像系统所用的光路主要有反射式和透射式两种。考虑到透射式光路结构简单,没有中心遮挡物,且具有红外辐射能量利用率高的特点,本研究选择透射式光路,并通过减少镜片数量和采用镀制增透膜的方法尽可能地减少入射光能的损失。在显微光学系统设计中,按反向光路计算。靠近物方一组为前组,辅助光线在前组上的入射光线高度为 h_2 ,靠近像方一组为后组,辅助光线在后组上的入射高度为 h_1 。如图1所示,将透镜合理组合可以实现10倍放大倍数的显微光学系统^[18],其中 s 和 s' 分别代表像距和物距,虚线处代表薄透镜组,等效于一个单透镜的位置; Δu_1 为后组的偏角, Δu_2 为前组的偏角。长波红外光线通过两组透镜发生偏折后会聚于像面处,根据表1中的参数,可得光线的总偏折角 Δu 约为0.275, $\Delta u = u_2 - u_1$, $u_1 = \frac{0.25}{-10} = -0.025$, $u_2 = 0.25$ 。目前由于所有的双胶合透镜对红外光线的最大偏折角约0.15,单透镜的最大偏折角约0.2,因此在本设计中采用1个单凸透镜和2个双胶合透镜的组合,一方面能达到光路系统对总偏折角0.275的要求,另一方面通过对称的双胶合透

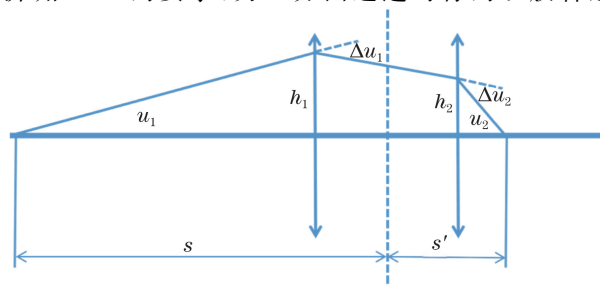


图1 所设计的成像光学系统结构示意图

Fig. 1 Structural schematic of designed imaging optical system

镜组可校正系统像差。

进行光学镜头设计时,需要考虑环境温度对光学元件的影响。光学元件的曲率半径、厚度、元件间的空气间隔以及材料的折射率等均随着温度的改变而变化,元件参数的细微改变会对光学系统的成像质量产生显著影响,特别是温度变化引起的折射率变化会使像平面发生严重偏移,因此必须对低温制冷型焦平面阵列 BIB 探测器的光学系统进行消热像差处理。通用的消热像差方法主要有机械被动式、机电主动式以及光学被动式等^[19-21]。光学被动式消热像差是当前的主流技术,它巧妙借助不同透镜材料折射率的温度特性和色差特性,通过调整分配材料与光焦度的关系,使得光学系统因温度变化而造成的像面漂移与镜筒材料因热胀冷缩产生的像面漂移相互补偿,从而达到消除热像差的效果^[22-24]。被动式消热像差光学系统具有结构简单、体积小、质量小、可靠性高的优点,有利于光学系统的小型化和轻量化。在光学被动式消热像差方案中,光学材料的性能参数和系统的结构参数满足

$$\sum_{i=1}^k h_i \phi_i = \phi, \quad (1)$$

$$C = \sum_{i=1}^k \frac{h_i^2 C_i \phi_i}{\phi} = 0, \quad (2)$$

$$L = \sum_{i=1}^k \frac{h_i^2 T_i \phi_i}{\phi} = \alpha_m L, \quad (3)$$

式中: i 为计算的初始镜面数; k 为镜面总数。 h_i 为近轴光线在各透镜上的入射点离光轴的距离; C_i 为

光学材料的色差系数; ϕ_i 为系统各个透镜的光焦度; α_m 为镜筒材料的线膨胀系数; L 为系统结构的总长度; T_i 为透镜材料的热差系数。(1)式为光焦度方程,(2)式为消色差方程,(3)式为消热像差方程。

设计的红外显微光学系统采用一次成像结构,红外光线经过光学透镜组和冷光阑直接成像在焦平面阵列上,其中冷光阑作为整个系统的孔径光阑与系统的出瞳位置相匹配。

3.2 长波红外显微成像光学系统透镜的选取

对于中短波红外辐射,相同温度下目标物的长波红外辐射强度低,光子能量小,因此,应用于长波红外光学系统中且以透射方式工作的光学元件应该具有尽可能高的光学透明性。由于反射、吸收和散射的作用,大部分现有的玻璃态或晶态材料对红外波段的透过率较低,没法在长波红外光学成像系统中使用。在选择制作透镜的材料时,除了要考虑高的透过率之外,还应顾及材料折射率 n , n 越大越有利于校正系统像差,阿贝数 V 与热差系数 T 相差越大越有助于消除系统色差和热像差^[25]。表 2 列出了几种典型的红外材料在相应波长范围内的光学和热学的性能参数。根据表 2 中的数据,选取折射率大,涵盖探测器工作波段的 KRS-5 和 CsBr 晶体材料制成的透镜,作为构筑光路的基本元件,充分利用两种透镜材料热差系数大的优势,实现像差的有效校正,同时材料的透过率都在 70% 以上,对长波红外辐射能量造成的损失也较小。

表 2 红外光学材料的光学和热学性能参数

Table 2 Optical and thermal property parameters of infrared optical materials

Material	KRS-5	CsBr	KI	CsI	KBr
Wave band / μm	0.5-45	0.2-40	0.3-31	0.2-60	0.2-34
Refractive index	2.30	1.62	1.56	1.70	1.45
Coefficient of temperature-refractive index /($10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$)	-235	-79	-50	-85	-40
Thermal expansivity /($10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$)	58	48	43	50	43
Light transmittance /%	70	90	90	90	90

3.3 设计结果

利用 ZEMAX 软件对光学系统的结构参数进行优化计算时,需要事先给出一组初始数据。为此根据已有的文献资料并结合(1)~(3)式的意义,选择表 3 所示的初始结构参数,然后将镜片的曲率半径 ρ 、厚度 D 、镜片间距 f 视为变量进行优化,最终得到长波红外显微成像光学系统最优的结构参数,如表 4 所示。光学镜头的总长为 173 mm、焦距为

14 mm,镜片的最大厚度应不超过 18 mm,最小厚度大于 4 mm。图 2 说明长波红外显微成像光学系统的剖面结构。第一部分为 KRS-5 正透镜,它分担光路上大部分光焦度。第二和第三部分是由 KRS-5 透镜和 CsBr 透镜构成的双胶合透镜,他们可以弥补单透镜球差和色差都大的不足,进而起到校正系统像差的作用。镜筒由热膨胀系数为 $2.36 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 的铝材制成。

表 3 用于模拟的初始结构参数

Table 3 Initial structure parameters used for simulation

Surface	Radius of curvature /mm	Interval /mm	Glass
1		155.000	
2	16.982	2.700	CsBr
3	-13.092	1.800	KRS-5
4	-102.090	17.550	
5	8.356	2.900	CsBr
6	-6.252	1.400	KRS-5
7	-15.488	7.203	
8	10.000	0.170	KRS-5
9	11.118	7.200	

表 4 长波红外显微成像光学系统的优化结构参数

Table 4 Optimized structure parameters of long wave infrared microscopic imaging optical system

Surface	Radius of curvature /mm	Interval /mm	Glass
1		115.385	
STO		16.859	
2	-28.747	4.000	CsBr
3	13.685	14.096	KRS-5
4	-45.489	4.337	
5	-7.199	4.000	CsBr
6	9.185	4.926	KRS-5
7	57.718	4.006	
8	11.428	5.409	KRS-5
9	27.737	4.027	

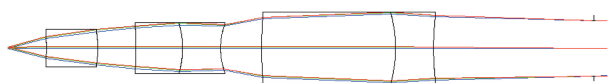


图 2 长波红外显微成像光学系统的剖面示意图

Fig. 2 Cross-sectional diagram of long wave infrared imaging optical system

4 系统像质的评价

4.1 几何像差分析

成像光学系统的像质可以用光学传递函数进行评估。光学传递函数是一个以空间频率为变量,反映成像过程中调制度和横向相移相对变化的函数,其表达式为 $H(\xi, \eta) = M(\xi, \eta) \exp[j\phi(\xi, \eta)]$, 其中 $M(\xi, \eta)$ 为调制传递函数(MTF), $\phi(\xi, \eta)$ 为相位传递函数, ξ 和 η 为频域坐标。 $\phi(\xi, \eta)$ 对像质的影响较小,可以忽略,而 $M(\xi, \eta)$ 与光学系统的像差、衍射等有关,反映了空间频域对比度的传递特性,是描

写成像质量优劣的重要函数^[26]。

图 3 为用 ZEMAX 软件模拟得到的 20 °C 时长波红外显微成像光学系统的 MTF 曲线,曲线 a, b, c, d 分别对应于 4 组 ρ, f, D 不同的值。对曲线 a, b, c 而言,在中心波长对应的 $10 \text{ lp} \cdot \text{mm}^{-1}$ 截止频率处,MIT 值小于 0.2,不能满足长波红外显微光学成像系统 MIT 值应大于等于 0.3 的要求。因此经过不断优化后得到系统最佳状态时的曲线 d,由图 3 可以发现 d 曲线在截止频率处对应的 MTF 值为 0.38,表明系统的物像传递性有了显著提高,像质得到改善,能满足成像的需要。

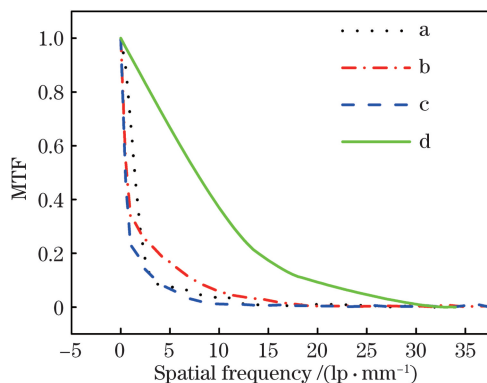


图 3 光学系统的模拟 MTF 曲线

Fig. 3 Simulated MTF curves of optical system

图 4 为用 ZEMAX 软件模拟得到的长波红外显微成像光学系统所成像的点列图。从图 4 可以看出,在所有视场下系统的弥散圆的方均根(RMS)半径以及最大半径都小于 $10 \mu\text{m}$, 小于探测器 $50 \mu\text{m} \times 50 \mu\text{m}$ 的像元尺寸,表明 32×32 元阵列探测器的每个像元能够很好地接收来自成像光学系统会聚的长波红外辐射光通量,最终形成目标物的高质量图像。

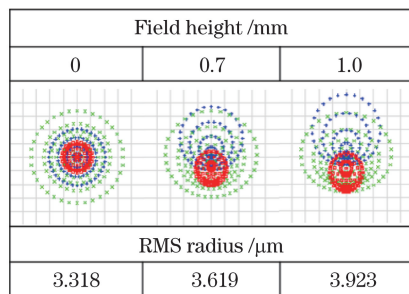


图 4 光学系统的模拟点列图

Fig. 4 Simulated spot diagram of optical system

当不考虑由非同轴传播,表界面反射、吸收、散射等原因引起的光能损失时,因成像系统存在各种像差和衍射,物点通过光学系统在焦平面上所成的

像通常表现为一个像斑。为此,用 ZEMAX 软件模拟分析了长波红外显微成像光学系统的包围圆能量占比与包围圆半径的关系,即通过系统投射到像平面上一定半径的几何圆内的光能与总入射光能的百分比随相应圆半径的变化。图 5 为系统的包围圆能量图。图 5 显示,对应于中心波长处,在全视场和像元尺寸范围内系统的能量集中度大于 80%。根据斯特列尔判据,当系统存在像差的成像衍射斑中心亮度与没有像差的衍射斑中心亮度之比大于 0.8 时,系统的成像质量较高。因此,可以断定设计的长波红外显微成像系统拥有不错的成像功能。

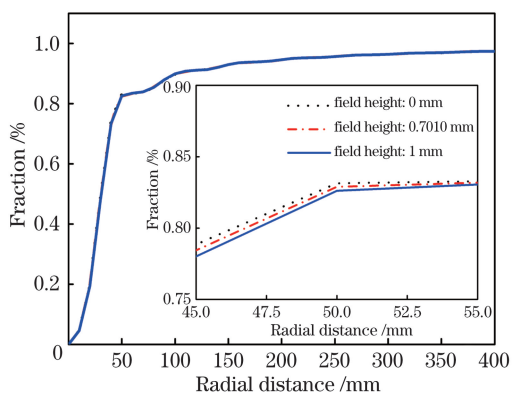


图 5 光学系统的包围圆能量图

Fig. 5 Encircled energy map of optical system

在光学系统中,同一介质对不同色光有不同的折射率,导致从轴外物点发出的不同色光的垂轴放大率不同,因此不同波长的色光经过光学系统后会形成不同的像高,从而产生倍率色差。当倍率色差严重时,物体的像有彩色边缘,会破坏轴外物点像的清晰度。图 6 为长波红外显微成像光学系统的倍率色差曲线。

在全视场下,中心波长的倍率色差为 $-2.25 \mu\text{m}$,位于设计所要求的 $\pm 4 \mu\text{m}$ 范围内,并且远远小于系

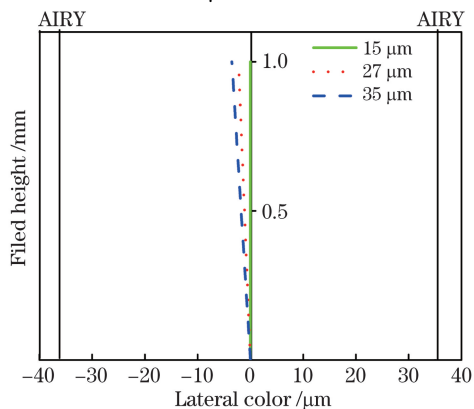


图 6 光学系统的倍率色差曲线

Fig. 6 Lateral color curve of optical system

统的艾里斑。因此,色差对长波显微光学系统的影响较小,可以不予考虑。图中 AIRY 为光学系统的艾里斑。在光学系统中,点源受孔径的影响形成衍射斑称之为艾里斑。其中心位置的能量集中度超过 80%。

由于实际的光学系统或多或少地存在场曲像差,平面物通过成像系统时将变成曲面像,像曲面与最佳像平面产生偏移,偏移量越大,图像越不清晰。所容许的最大偏移量可用焦深表示,焦深定义为在保持影像较为清晰的前提下,焦平面沿着镜头光轴所允许移动的距离 $d_{D.O.F}$ 。通过计算得到显微成像光学系统的焦深约为 $430 \mu\text{m}$ 。从图 7 给出的长波红外显微成像光学系统的场曲分布曲线可以推知,中心波长处的场曲为 $25 \mu\text{m}$,相比其他波长的场曲来说,这个值较大,但远小于系统的焦深,场曲影响较小,可以忽略,图中 T 代表子午场曲, S 代表弧矢场曲。如果光学镜头沿垂直轴方向的放大率不同,就会得到畸变的像。这种垂轴像差虽然只改变像点在理想像面上的位置,使图像的形状产生失真,但不影响像的清晰度。图 8 的 ZEMAX 模拟结果表明,长波红外显微成像光学系统在 $15, 27, 35 \mu\text{m}$ 三个典型波长处,所有视场下的畸变都小于 0.05%,这说明系统的垂轴像差不需要校正。

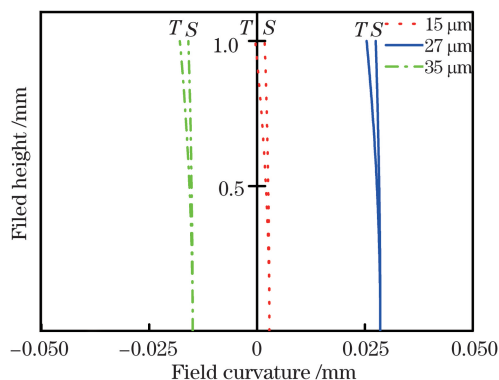


图 7 光学系统的场曲分布曲线

Fig. 7 Field curvature of optical system

4.2 无热化分析

红外显微成像光学系统对温度变化甚为敏感,镜头结构设计完成后还需要对成像系统进行无热化评价分析。由于 ZEMAX 光学软件能够直接确定系统的 MTF 值与温度的对应关系,在特定的温度范围,如果 MTF 值低于设计值,需不断调节 ρ 、 D 和 k 等参量,通过软件优化系统的结构参数,直至符合预期。图 9 为长波红外显微成像光学系统在 $-20, 10, 20, 40 \text{ }^\circ\text{C}$ 时的 MTF 值随特征频率变化的曲线。20 $^\circ\text{C}$ 时,系统在特征频率 $10 \text{ lp}\cdot\text{mm}^{-1}$ 处

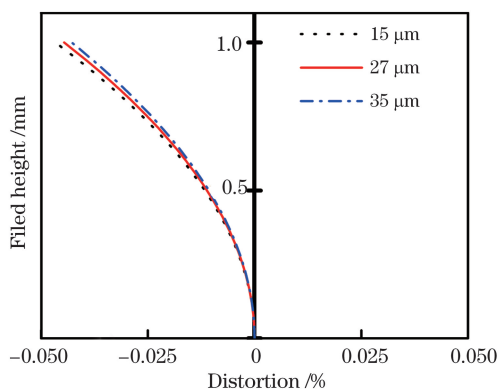


图 8 光学系统的垂轴像差特性

Fig. 8 Vertical axis aberration characteristics of optical system

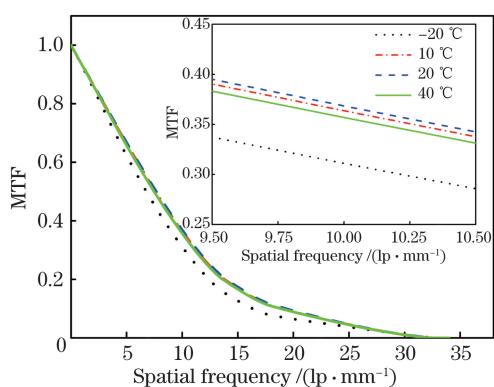


图 9 不同温度时 MTF 随特征频率变化的曲线

Fig. 9 Curves of MTF changing with characteristic frequency at different temperatures

MTF 值最大,此时系统性能最佳。其余温度下,尽管光学元件的热膨胀产生像面漂移,进而导致 MTF 值减小,不过在 $-20 \sim 40 \text{ }^\circ\text{C}$ 范围内系统的 MTF 值都大于 0.3, 满足设计要求。图 10 为系统在 $10 \text{ lp}\cdot\text{mm}^{-1}$ 特征频率处的 MTF 值随温度变化的

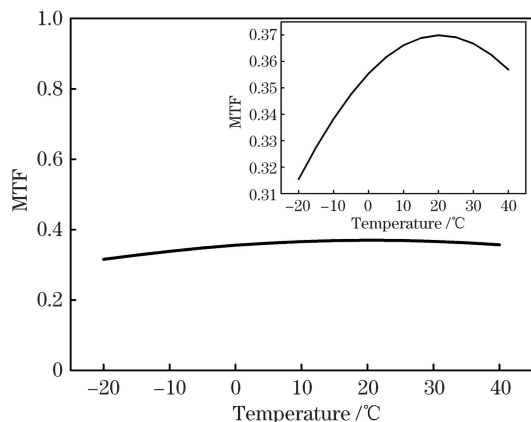


图 10 特征频率 $10 \text{ lp}\cdot\text{mm}^{-1}$ 处的 MTF 变化曲线

Fig. 10 Variation curve of MTF at the characteristic frequency of $10 \text{ lp}\cdot\text{mm}^{-1}$

曲线。从图 10 可以看出 MTF 值随温度变化比较平缓,在 $-20 \sim 40 \text{ }^\circ\text{C}$ 范围,MTF 的平均值为 0.354; $-20 \text{ }^\circ\text{C}$ 时 MTF 值最小,为 0.315; $20 \text{ }^\circ\text{C}$ 时 MTF 值最大,为 0.369,这意味着所设计的光学系统对环境温度适应性良好,可以自动实现光学被动补偿,确保图像清晰。

5 结 论

设计了一种能够应用于制冷型长波红外凝视焦平面阵列探测器的透射式显微成像光学系统,其光路主要由透镜组成,有效工作波长范围为 $15 \sim 35 \text{ }\mu\text{m}$ 。通过双胶合透镜和光学被动补偿技术的结合实现了系统各种像差的自动校正。模拟结果表明,当成像光学系统的中心波长、焦距、数值孔径、有效放大倍率和空间分辨率分别为 $27 \text{ }\mu\text{m}$, 14 mm , 0.25 , 10 和 0.1 mm 时,在 $10 \text{ lp}\cdot\text{mm}^{-1}$ 特征频率处全视场条件下系统的 MTF 值为 0.369。在像元尺寸范围内,系统包围圆能量集中度超过 80%,接近衍射极限所需的成像要求。在 $-20 \sim 40 \text{ }^\circ\text{C}$ 温度范围,MTF 值都大于 0.3,且 MTF 的最大变化量仅为 0.056,系统具有较高的温度稳定性,符合制冷型红外光学系统的无热化处理条件。

致谢 感谢王跃明研究员、刘峰和张敬涛教授在光路设计方面的热心指导和对模拟结果进行的有益讨论。

参 考 文 献

- [1] Yano K, Ohoshima S, Gotou Y, et al. Direct measurement of human lung cancerous and noncancerous tissues by Fourier transform infrared microscopy: can an infrared microscope be used as a clinical tool? [J]. Analytical Biochemistry, 2000, 287(2): 218-225.
- [2] Essendoubi M, Toubas D, Bouzaggou M, et al. Rapid identification of Candida species by FT-IR microspectroscopy [J]. Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-General Subjects, 2005, 1724(3): 239-247.
- [3] Orsini F, Ami D, Villa A, et al. FT-IR microspectroscopy for microbiological studies [J]. Journal of Microbiological Methods, 2000, 42(1): 17-27.
- [4] Ngo Thi N A, Naumann D. Investigating the heterogeneity of cell growth in microbial colonies by FTIR microspectroscopy [J]. Analytical and Bioanalytical Chemistry, 2007, 387(5): 1769-1777.
- [5] Erukhimovitch V, Pavlov V, Talyshinsky M, et al.

- FTIR microscopy as a method for identification of bacterial and fungal infections[J]. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*, 2005, 37(5): 1105-1108.
- [6] Ramesh J, Kapelushnik J, Mordehai J, et al. Novel methodology for the follow-up of acute lymphoblastic leukemia using FTIR microspectroscopy[J]. *Journal of Biochemical and Biophysical Methods*, 2002, 51(3): 251-261.
- [7] Kretlow A, Wang Q, Kneipp J, et al. FTIR-microspectroscopy of prion-infected nervous tissue[J]. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Biomembranes*, 2006, 1758(7): 948-959.
- [8] Park H, Choi M, Park J, et al. A study on detection of micro-cracks in the dissimilar metal weld through ultrasound infrared thermography[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2014, 62: 124-131.
- [9] Cao Y, Gu X M, Jin Q. Infrared technology in the fault diagnosis of substation equipment [C] // 2008 China International Conference on Electricity Distribution, December 10-13, 2008, Guangzhou, China. New York: IEEE, 2008: 10838144.
- [10] Zhu J J, Wang Y Z, Cui S P, et al. The application of infrared diagnosis technology in diagnosis of the high voltage electrical equipment internal defect[J]. *High Voltage Engineering*, 2004, 30(7): 34-36.
朱建军, 王贇中, 崔绍平, 等. 红外技术诊断高压电气设备内部缺陷[J]. *高电压技术*, 2004, 30(7): 34-36.
- [11] Yue J J, Wu Z M, Mu E Z, et al. Research and applications of infrared thermal microscope imaging system[J]. *Infrared Technology*, 2017, 39(11): 973-978.
岳静静, 吴之茂, 木二珍, 等. 红外显微热成像系统研究及应用[J]. *红外技术*, 2017, 39(11): 973-978.
- [12] Xue J L, Gong Y, Li D M. Optical design of the N. A. 0.75 plan-apochromatic microscope objective[J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(6): 957-963.
薛金来, 巩岩, 李佃蒙. N. A. 0.75平场复消色差显微物镜光学设计[J]. *中国光学*, 2015, 8(6): 957-963.
- [13] Kuang Y G. Lens design of the flat field, apochromatic CF microscopic objective[J]. *Acta Optica Sinica*, 1994, 14(5): 558-560.
匡裕光. 平象场复消色差大视场显微物镜光学设计[J]. *光学学报*, 1994, 14(5): 558-560.
- [14] Ru Z B, Hua K. Design of a wide spectral UV lens [J]. *Journal of Applied Optics*, 2003, 24(1): 11-14.
茹志兵, 华珂. 一种宽光谱紫外镜头的设计[J]. *应用光学*, 2003, 24(1): 11-14.
- [15] Cheng V S, Bai J F, Chen Y Z. A high-resolution three-dimensional far-infrared thermal and true-color imaging system for medical applications[J]. *Medical Engineering & Physics*, 2009, 31(9): 1173-1181.
- [16] Han J. Research on the key techniques of thermal microscope imaging system[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2015.
韩杰. 红外显微成像系统关键技术研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2015.
- [17] Wang G D. Structure design and analysis of infrared microscopy thermal imaging system[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2011.
王国栋. 红外显微镜热成像系统结构设计及分析[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2011.
- [18] Chen J, Jiao M Y, Chang W J, et al. Optical design of apochromatic microscope objective for near ultraviolet-visible wide spectrum[J]. *Journal of Applied Optics*, 2011, 32(6): 1098-1102.
陈姣, 焦明印, 常伟军, 等. 近紫外-可见光宽波段复消色差显微物镜设计[J]. *应用光学*, 2011, 32(6): 1098-1102.
- [19] Gao J H, Fu Y G, Liu Z Y, et al. Design of cooled mid-infrared athermal zoom optical system with ratio of 30 [J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2013, 28(2): 13-17.
高金红, 付跃刚, 刘智颖, 等. 30×制冷型中波消热差红外变焦光学系统设计[J]. *光电技术应用*, 2013, 28(2): 13-17.
- [20] Liu F, Xu X P, Duan J, et al. Design of 20 × uncooled thermal infrared continuous-zoom lenses [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, 39(5): 866-870.
刘峰, 徐熙平, 段洁, 等. 20×非制冷型红外变焦光学系统设计[J]. *光子学报*, 2010, 39(5): 866-870.
- [21] Jiang B, Wu Y H, Dai S X, et al. Design of a compact dual-band athermalized infrared system[J]. *Infrared Technology*, 2015, 37(12): 999-1004.
姜波, 吴越豪, 戴世勋, 等. 紧凑型双波段无热化红外光学系统设计[J]. *红外技术*, 2015, 37(12): 999-1004.
- [22] Tamagawa Y, Wakabayashi S, Tajime T, et al. Multilens system design with an athermal chart[J]. *Applied Optics*, 1994, 33(34): 8009-8013.
- [23] Zhang X T, An Z Y. Design of infrared athermal optical system for dual-band with double-layer harmonic diffraction element[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(6): 0622004.
张欣婷, 安志勇. 双层谐衍射双波段红外消热差光学系统设计[J]. *光学学报*, 2013, 33(6): 0622004.
- [24] Hu Y X, Zhou S X, Xiangli B, et al. Design of athermal optical system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, 20(10): 1386-1391.

- 胡玉禧, 周绍祥, 相里斌, 等. 消热差光学系统设计[J]. 光学学报, 2000, 20(10): 1386-1391.
- [25] Zhang Y, Ding X Z, Yang B, et al. Design of three-lens athermalized and cooled midwave infrared objective[J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45(4): 0418005.
- 张营, 丁学专, 杨波, 等. 三分离式消热差制冷型中红外物镜的设计[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(4): 0418005.
- [26] Boreman G D. Modulation transfer function in optical and electro-optical systems[M]. Bellingham: SPIE, 2001.