

高分辨率多光谱工业炉膛内窥镜设计

袁晓涵 向阳 向铮 于璐 白宁 姜伯文

Design of industrial furnace endoscopes with high resolution and multiple spectra

YUAN Xiaohan, XIANG Yang, XIANG Zheng, YU Lu, BAI Ning, JIANG Bowen

引用本文:

袁晓涵, 向阳, 向铮, 等. 高分辨率多光谱工业炉膛内窥镜设计[J]. 应用光学, 2025, 46(4): 912–921. DOI: 10.5768/JAO202546.0405003

YUAN Xiaohan, XIANG Yang, XIANG Zheng, et al. Design of industrial furnace endoscopes with high resolution and multiple spectra[J]. Journal of Applied Optics, 2025, 46(4): 912–921. DOI: 10.5768/JAO202546.0405003

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202546.0405003>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

小口径大视场工业内窥镜光学系统设计

Optical system design of small-caliber and large-field industrial endoscope

应用光学. 2023, 44(1): 17–23 <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0101003>

高分辨率微型星载相机光学系统的设计及应用

Design and application of optical system for high-resolution micro space-borne camera

应用光学. 2020, 41(2): 235–241 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0201001>

医用输尿管内窥镜光学系统设计

Design of optical system for medical ureteroscope

应用光学. 2024, 45(5): 916–922 <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0501005>

一种2k分辨率内窥镜光学系统设计

Design of endoscopic optical system with 2k resolution

应用光学. 2024, 45(2): 276–281 <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0201001>

高分辨率光谱仪线阵CCD采集系统设计

Design of linear CCD acquisition system based on high-resolution spectrometer

应用光学. 2022, 43(5): 864–869 <https://doi.org/10.5768/JAO202243.0501006>

一种大视场高分辨率的复眼光学系统设计

Design of large field of view and high-resolution compound eye optical system

应用光学. 2024, 45(2): 314–320 <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0201006>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2025) 04-0912-10

引用格式: 袁晓涵, 向阳, 向铮, 等. 高分辨率多光谱工业炉膛内窥镜设计 [J]. 应用光学, 2025, 46(4): 912-921.

YUAN Xiaohan, XIANG Yang, XIANG Zheng, et al. Design of industrial furnace endoscopes with high resolution and multiple spectra[J]. Journal of Applied Optics, 2025, 46(4): 912-921.



在线阅读

高分辨率多光谱工业炉膛内窥镜设计

袁晓涵, 向 阳, 向 铮, 于 璐, 白 宁, 姜伯文

(长春理工大学 光电工程学院, 吉林 长春 130022)

摘 要: 针对现有炉膛监测工业内窥镜成像分辨率低、受粉尘影响测温精度不足的问题, 设计加工了一款可见波段 ($0.48\ \mu\text{m}\sim 0.65\ \mu\text{m}$) 与红外波段 ($3\ \mu\text{m}\sim 5\ \mu\text{m}$ 和 $8\ \mu\text{m}\sim 12\ \mu\text{m}$) 多光谱双通道工业内窥镜, 视场角不小于 100° , 总口径小于 $60\ \text{mm}$, 光学总长大于 $1000\ \text{mm}$ 。可见波段、中波红外波段、长波红外波段光学系统调制传递函数 (MTF) 分别在 $180\ \text{lp/mm}$ 、 $30\ \text{lp/mm}$ 、 $12.7\ \text{lp/mm}$ 处大于 0.2 。经过被动消热差处理, 整体光学系统在 $10\ ^\circ\text{C}\sim 70\ ^\circ\text{C}$ 温度范围内受热差影响小。公差分析结果表明, 内窥镜在可见波段 $1\ \text{m}\sim 5\ \text{m}$ 处可清晰成像, 在 $5\ \text{m}$ 处可分辨 $4\ \text{mm}$ 线宽。设计的工业内窥镜在工厂炉膛内经测试验证, 可以有效解决炉膛内高温、多尘环境下的监测难题, 提升工业炉窑的运行安全性和生产效率。

关键词: 光学系统设计; 工业内窥镜; 多光谱成像; 高分辨率; 无热化

中图分类号: TN202

文献标志码: A

DOI: [10.5768/JAO202546.0405003](https://doi.org/10.5768/JAO202546.0405003)

Design of industrial furnace endoscopes with high resolution and multiple spectra

YUAN Xiaohan, XIANG Yang, XIANG Zheng, YU Lu, BAI Ning, JIANG Bowen

(College of Opto-electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology,
Changchun 130022, China)

Abstract: In order to solve the existing problems for furnace monitoring, industrial endoscope imaging resolution is low and it is susceptible to dust, which affects the accuracy of temperature measurement. A dual-channel industrial endoscope with multiple spectrum in the visible band ($0.48\ \mu\text{m}\sim 0.65\ \mu\text{m}$) and infrared band ($3\ \mu\text{m}\sim 5\ \mu\text{m}$ and $8\ \mu\text{m}\sim 12\ \mu\text{m}$) was designed and processed. It had a field of view of not less than 100° , a total aperture of less than $60\ \text{mm}$, and a total optical length of more than $1\ 000\ \text{mm}$. The modulation transfer functions (MTF) of the optical system in the visible band, mid-wave infrared band, and long-wave infrared band are greater than 0.2 at $180\ \text{lp/mm}$, $30\ \text{lp/mm}$, and $12.7\ \text{lp/mm}$, respectively. After passive heat dissipation treatment, the overall optical system was less affected by the thermal difference within the temperature range of $10\ ^\circ\text{C}$ to $70\ ^\circ\text{C}$. The tolerance analysis results show that the designed endoscope has high-resolution imaging quality in the range of $1\ \text{m}$ to $5\ \text{m}$ object distance, and can distinguish $4\ \text{mm}$ line width at $5\ \text{m}$. The designed industrial endoscope has been tested and verified in the factory furnace, which can effectively solve the monitoring problems in the high-temperature and dusty environment of the furnace, and improve the operational safety and production efficiency of industrial furnaces and kilns.

收稿日期: 2024-09-13; 修回日期: 2024-10-19

基金项目: 吉林省科技发展计划项目 (20240305039YY)

作者简介: 袁晓涵 (2001—), 女, 硕士研究生, 主要从事内窥镜光学设计研究。E-mail: 1196563755@qq.com

通信作者: 向阳 (1968—), 男, 硕士, 教授, 硕士生导师, 主要从事内窥镜光学镜头设计研究。E-mail: xyciom@163.com

Key words: optical system design; industrial endoscopes; multi-spectral imaging; high resolution; athermalization

引言

高温工业内窥镜在钢铁厂、垃圾焚烧厂、冶金厂和发电厂等工厂的炉膛内部监测中发挥着至关重要的作用。实时监测记录炉膛内温度场分布、炉膛缺损程度、喷煤粉管路堵塞情况等重要信息,对窑炉工厂确保高温窑炉安全运行、提高生产效率和产品质量具有重要意义。而炉膛处于高温、多尘、密闭的复杂恶劣环境的“黑箱状态”,大大增加了炉膛监测难度^[1]。

为了对炉壁早期结构退化现象及炉膛内火焰燃烧情况进行可视化监测,中国科学院西安光学精密机械研究所研制了一款可见光谱段工作的高温摄像镜头^[2],视场角为 60° ,相对孔径 $1:4.8$,焦距为 5.35 mm ,总长为 $800\text{ mm}\sim 1\,000\text{ mm}$ 。2022年,长春理工大学团队针对工业内窥镜分辨能力低、工作距离短等问题,设计了一款可见光波段视场角为 103° 、靶面对角线长度为 16 mm 的工业内窥镜^[3]。然而,该内窥镜仅具有可见光观测范围,无法为炉膛内部温度场的定量分析提供必要的数据支持,这对于实现精确的热状态监测和安全监控构成了实质性的限制。

为了对炉膛内进行非接触式测温,可采用物体辐射的红外光成像进行测温的方法。根据维恩位移定律, $580\text{ K}\sim 950\text{ K}$ 对应的辐射峰值波长范围在中波范围内。2013年,长春光学精密机械与物理研究所研究发现在 $300\text{ K}\sim 900\text{ K}$ 测温范围内,干扰信号对中波红外光学系统测温精度影响相比长波红外光学系统较小^[4]。为获取更准确的图像信息,中波红外为最佳波段选择。但由于炉膛内成像空间含有大量的弥散介质及一氧化碳、二氧化硫等气体介质,易造成成像不清晰,影响测温精度^[5]。

针对炉内粉尘多散射环境导致图像模糊的问题,2023年中南大学团队提出了基于粉尘多散射的高炉料面图像退化模型,量化了退化图像与清晰图像之间的关系^[6]。然而,由于图像处理只能针对特定炉膛环境进行针对性处理,无法通用于多种窑炉类型,且受计算机硬件水平影响,处理速度不足,难以满足实时监测的需求。

2018年,福建福光天瞳光学有限公司针对熔融金属物的温度检测,发明了一款长波红外广角测温镜头,工作光谱范围为 $8\text{ }\mu\text{m}\sim 12\text{ }\mu\text{m}$,视场角

为 108° ,像高为 8.2 mm ,该方法响应时间短且具有良好的测温精度^[7]。中波红外在湿热环境中探测效果具有优势,长波对于烟尘、弥散介质等环境测温精度更高^[8]。为了获取目标更多的红外辐射信息,利用目标在不同红外波段图像里固有的、较强的差异性和互补性,本文采用双波段共口径光学系统成像,搭配图像融合技术,可以有效地提高光学系统的抗干扰能力和测温精度^[9]。

本文设计了一款可见波段与中波/长波红外波段多光谱的双通道工业内窥镜,系统总口径小于 60 mm ,长度大于 $1\,000\text{ mm}$,可见光学系统视场角为 104° , F 数为 6 ,靶面对角线尺寸为 18 mm ,调制传递函数(MTF)(@ 180 lp/mm) ≥ 0.2 ,可对炉膛内壁微小磨损、焊接裂缝、管道堵塞等情况进行可视化监测。红外光学系统采用中/长波 $3\text{ }\mu\text{m}\sim 5\text{ }\mu\text{m}$ 、 $8\text{ }\mu\text{m}\sim 12\text{ }\mu\text{m}$ 宽谱段, 100° 视场角, F 数为 5 ,中波红外光学系统 $\text{MTF}@30\text{ lp/mm}>0.2$,长波红外光学系统 $\text{MTF}@12.7\text{ lp/mm}>0.2$ 。中/长波红外共口径光学系统能够减小整体系统口径的同时,可以降低粉尘、水汽等对成像质量的影响,提高系统分辨率,实现炉膛内的温度分布高精度测量。

1 光学系统方案分析及设计参数

1.1 硬性内窥镜原理

工业硬性内窥镜结构主要由物镜组、中继系统两部分组成^[3],如图1所示。

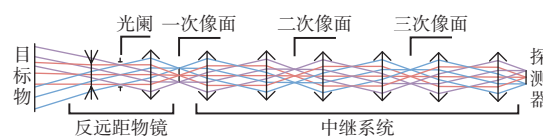


图1 工业硬性内窥镜系统原理图

Fig. 1 Schematic of industrial rigid endoscopic system

物体发出的光线经过物镜系统后成像在一次像面上,再经过中继系统传像后在探测器上成像。物镜组选用反远距像方远心结构,采用负-正透镜组分离的形式,视场角较大的轴外光束经负透镜组发散后,相对于正透镜组视场角变小,从而达到广角的目的。中继系统由奇数组对称式棒镜传像系统组成,起到延长光学系统、平衡物镜像差的作用^[10]。

由于内窥镜具有细长的特点,需要在设计时特别注意对系统参数与波前像差的平衡。小口径限制了光学系统的通光口径,从而影响其衍射极限分辨率。大靶面设计可以提高光学系统分辨率,但增加了边缘视场像差校正难度。

1.2 光学系统波段选择

由于炉膛监测具有可视化及温度显示的需求,而可见光与中波/长波红外的共用高透过率材料很少,因此,本系统采用可见光与中波/长波红外双通道的光学结构,将中波红外与长波红外2个波段共口径设计,双波段同时对目标温度进行探测,搭配中波/长波双色非制冷型红外探测器,实时获得双波段图像数据。

根据普朗克黑体辐射定律可知,温度越高,辐射度峰值对应波长越短。对于炉膛内耐火砖、蒸汽管道、点火器等高温区域,3 μm~5 μm中波红外波段具有较高的测温灵敏度,且中波红外波段成像具有较好的透水雾特性,有利于提升炉膛红外成像清晰度。对于炉膛内安全阀、隔热材料、输送带、料面等中高温区域,8 μm~12 μm长波红外波段具有更高的测温灵敏度,可以更好地识别炉壁等破损缺陷产生的微小温度差异,从而获得更精准的监测能力。长波红外对于烟尘、弥散介质等环境测温精度更高。通过红外双波段共口径设计,可以在图像融合后,整合图像的互补信息到单个图像上,提高图像质量和信息量,进而提高光学系统的抗干扰能力和测温精度。

双波段光学系统的设计难点在于,同时覆盖2个波段的高透过率透镜材料较少,光学设计过程中材料选择自由度较小,红外材料透镜参数受温度影响较大,考虑热膨胀系数及可加工性的同时,难以平衡2个波段的各项像差^[11]。

1.3 光学系统设计指标

根据炉膛实际应用需求,窑炉原有人工观测孔一般为60 mm~150 mm,炉壁厚度一般为500 mm~800 mm,为避免窑炉再次开孔影响生产安全,且预留镜筒厚度,本文设计的双通道高温工业内窥镜总直径小于60 mm,光学总长大于1 000 mm。

光学系统放大倍率表示为

$$\beta = \frac{y'}{y} = \frac{\varepsilon'}{\varepsilon} \quad (1)$$

式中:β为光学系统放大倍率;y'为像面高度;y为物面高度;ε'为像面最小可分辨率;ε为物面最小可分辨率。ε'计算公式为

$$\varepsilon' = 1.22\lambda F \quad (2)$$

式中:λ为中心波长;F为光学系统F数。

可见波段光学系统探测器选用尺寸为3.048 mm(1.2 inch)、像元尺寸为2.77 μm的CMOS,像素数为5 328(H)×4 608(V),靶面对角线尺寸为18 mm,可计算出像方MTF截止频率为180 lp/mm。物距为5 m,视场角为104°,可计算出物面高度为12 800 mm;ε取4 mm时,根据式(1)可计算出ε'为5.63 μm。λ为0.588 μm时,根据式(2)可计算出可见波段光学系统F数应小于7.8。

红外光学系统探测器选用像元尺寸为17 μm,响应频段为3 μm~14 μm的双色非制冷型红外机芯。像面高度为14 mm,在物距为5 m处,物面高度为11 920 mm;ε取55 mm时,根据式(1)可计算出ε'为64.60 μm。λ分别取4 μm、10 μm,根据式(2)可计算出中波/长波红外光学系统F数应分别小于13.23、5.295。

光学系统设计参数如表1所示。

表1 光学系统设计参数

Table 1 Design parameters of optical system

参数	可见波段	红外波段
波长范围/μm	0.486~0.656	3~5、8~12
总长/mm	≥1 000	≥1 000
直径/mm	≤26	≤26
视场角/(°)	104	100
工作距离/mm	500~5 000	500~5 000
F#	6	5
像面高度/mm	18	14
温度范围/°C	10~70	10~70
探测器像素尺寸/μm	2.7	17

2 光学系统设计

2.1 可见波段光学系统设计及像质分析

为了实现小孔径、大靶面、高分辨率的设计要求,物镜反远距结构后组采用天塞正透镜组的相似结构,在此基础上增加2片正透镜,可以在平衡像差的同时,减小出射光线远心度。在第一块平凹透镜后面增加了一块厚度15 mm,材料为K9型号玻璃的平行平板,可根据实际需要适配不同角度的等光程视向角棱镜,完成对炉膛不同角度的监测^[10]。

内窥镜中继系统为双远心结构,入瞳位置在无

穷远处, 为了保证内窥镜物镜与中继系统拼接过程中遵循光瞳衔接原则, 物镜的远心度控制在 3° 以下^[3]。远心度较大会导致边缘视场光线发散角较大, 无法进入中继系统。最终设计的物镜系统如图2所示。物镜系统总长为67.7 mm, 像面高度为18 mm, 像方远心度为 0.5° , F 数为6, 后截距为5 mm, 焦距为11 mm。

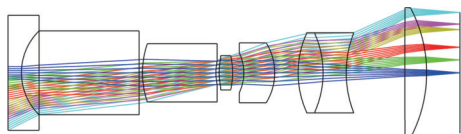


图2 可见波段物镜光学系统结构

Fig. 2 Optical system structure of objective lens in visible band

中继系统采用双远心对称式结构, 放大倍率为 -1 倍。采用对称式结构可以有效抵消垂轴像差^[12]。常用的内窥镜大数值孔径传像系统为霍普金斯 (Hopkins) 三胶合棒镜系统^[13], 如图3所示。

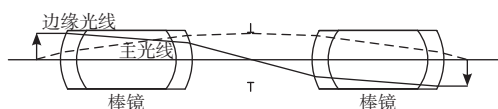


图3 Hopkins 三胶合棒镜系统示意图

Fig. 3 Schematic of Hopkins triple glued rod lens system

由于物镜像方数值孔径(0.083)较大, 设计过程中发现选用双胶合棒镜会造成中间表面曲率较小, 较难加工, 因此选用三胶合透镜, 分担表面折光能力的同时可以有效校正轴向像差, 也可以有效解决装配过程中镜片偏心、脏污等人工误差造成的像面不清晰。

加入一片厚度较大的凸透镜作为场镜, 改善边缘光线成像质量, 起到准直远心度、补偿系统场曲的作用。最终设计的棒镜光学系统结构图如图4所示。图4中系统远心度小于 0.0019° , 单组棒镜总长为270 mm, 像面高度为18 mm。

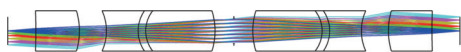


图4 可见波段单组棒镜光学系统结构

Fig. 4 Single-group rod lens optical system structure in visible wavelength band

将3组棒镜依次拼接在物镜后, 由于棒镜的叠加, 系统像面轴向像差大幅度增加, 导致成像质量较差。对物镜及中继系统进行一体化优化设计, 使各项像差相互抵消^[3], 最终得到较好的成像质

量。优化过程中, 保证各组棒镜结构一致且具有对称性, 保证物镜及棒镜出射的中间成像面距离透镜表面5 mm以上, 以免光线聚焦在镜片表面的加工误差上, 影响成像质量。保证后截距 ≥ 18 mm, 口径小于26 mm。最终光学系统结构如图5所示。

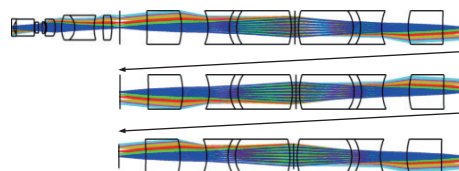


图5 可见波段内窥镜光学系统结构

Fig. 5 Optical system structure of visible wavelength endoscopes

最终系统设计参数: 景深500 mm到无穷远处, 视场角 104° , 总长1 144 mm, 像高18 mm。可见光学系统调制传递函数曲线图如图6所示。从图6可以看出, 调制传递函数在截止频率180 lp/mm处大于0.2, 各视场成像质量均接近衍射极限。

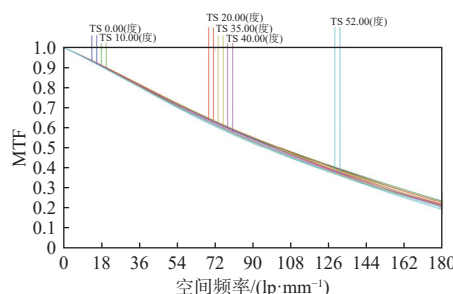


图6 可见波段光学系统MTF曲线

Fig. 6 MTF curves of visible waveband optical system

可见光学系统点列图如图7所示。从图7可以看出, 最大弥散斑均方根(RMS)半径为 $3.01 \mu\text{m}$, 尺寸小于1.5个探测器像元尺寸。

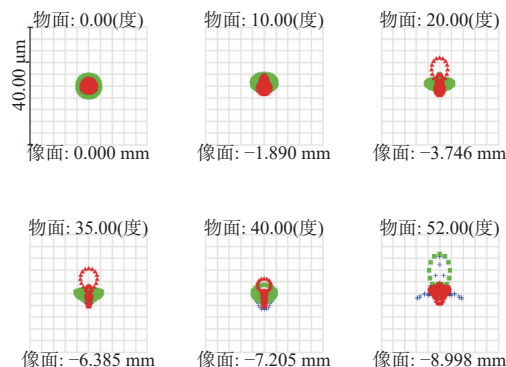


图7 可见波段光学系统点列图

Fig. 7 Spot diagram of visible waveband optical system

2.2 红外光学系统设计及像质分析

针对炉膛内温度监测要求,本文提出中波/长波双谱段、共孔径红外光学系统,工作波段为 $3\ \mu\text{m}\sim 5\ \mu\text{m}$ 和 $8\ \mu\text{m}\sim 12\ \mu\text{m}$ 。双色探测器实际工作时的响应谱段各自分立,因此,设计中采用多重结构,分别设置波段范围,中心波长分别为 $4\ \mu\text{m}$ 和 $10\ \mu\text{m}$ ^[14]。

红外物镜组采用与可见光学系统相似的反远距像方远心结构,如图8所示。整体光学系统第一片窗口玻璃选择硫化锌材料,具有耐高温能力强,硬度高的特点。物镜组其他镜片采用锗、国产硫系玻璃(IRG206、IRG208)和硒化锌等材料,对中波/长波红外光谱均有很高的透过率^[15]。硫系玻璃具有较好的折射率温度系数及色散系数,有利于红外光学系统无热化处理^[16]。光阑放置在物镜中间位置,对轴外像差有限制作用。前2片透镜采用负透镜,反远距物镜通常采用1片平凹透镜作为负组,本文选用2片球面负透镜,更好地实现大视场角的同时,可保证透镜曲率半径相对易于加工。本文设计的红外光学系统靶面较大,为保证物镜能够准直出射光线,最后一块透镜口径略大于靶面直径,同时边缘视场光线偏离光轴位置相对于小口径系统更远,球差较大,因此,选用偏折光线能力较强的锗平衡像差^[15]。

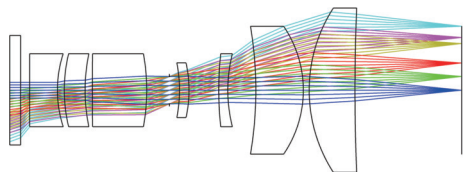


图8 红外双波段物镜光学系统结构

Fig. 8 Optical system structure of infrared dual-band objective lens

红外中继系统设计原理与可见光系统相似,选用对称式棒镜结构,采用双波段同时设计,保证同一棒镜系统在2个波段范围内成像质量较好,垂轴放大倍率为-1倍。设计过程中,在约束口径的同时,注意光线的偏折角度,避免边缘光线在系统中出现全反射,使像面受到杂散光影响^[17]。约束棒的长度应避免因光学结构太短,使用过多组棒会产生过多累计像差的情况。物方数值孔径为0.1,物高及像高均为14 mm,总长为219 mm。红外单组棒镜设计结果如图9所示。

将红外系统3组棒镜依次拼接在物镜系统上,

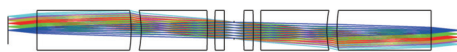


图9 红外波段单组棒镜光学系统结构

Fig. 9 Single-group rod lens optical system structure in infrared wavelength band

调节每组棒镜间距,对系统进行整体优化,使棒镜系统像差与物镜像差尽量抵消。对多重结构、各视场协同优化,控制总体系统长度及像高,平衡成像质量与加工成本^[18],最终设计的光学系统结构图如图10所示。

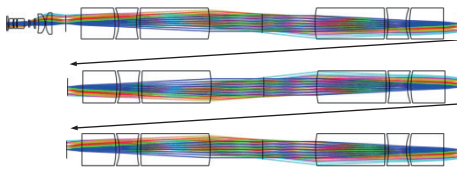
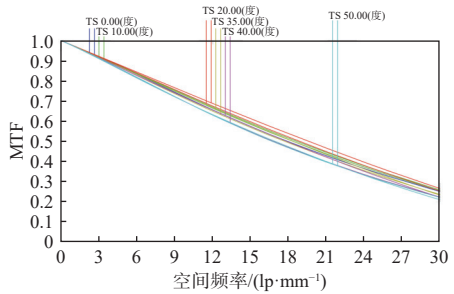


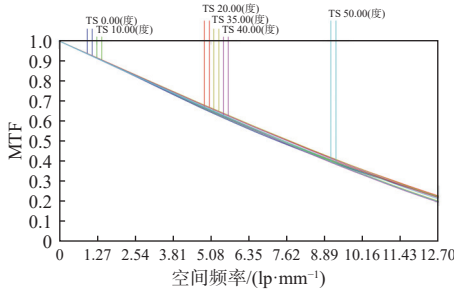
图10 红外双波段内窥镜光学系统结构

Fig. 10 Optical system structure of infrared dual-band endoscope

最终设计的中波/长波红外光学系统视场角为 100° ,由于光学材料的色散特性影响,不同波长在介质中的折射率稍有差异,中波/长波红外光学系统实际焦距分别为8.64 mm和8.68 mm。调制传递函数曲线如图11所示。从图11可以看出,各视场MTF均接近衍射极限,中波红外光学系统MTF在截止频率30 lp/mm处大于0.2,长波红外光学系统MTF在截止频率12.7 lp/mm处大于0.2。



(a) 中波红外波段



(b) 长波红外波段

图11 红外光学系统MTF曲线

Fig. 11 MTF curves of infrared optical system

红外光学系统点列图如图 12 所示。从图 12 可以看出, 中波/长波红外光学系统 RMS 半径最大分别为 $31.24\ \mu\text{m}$ 、 $19.57\ \mu\text{m}$, 尺寸小于 2 个探测器像元尺寸。

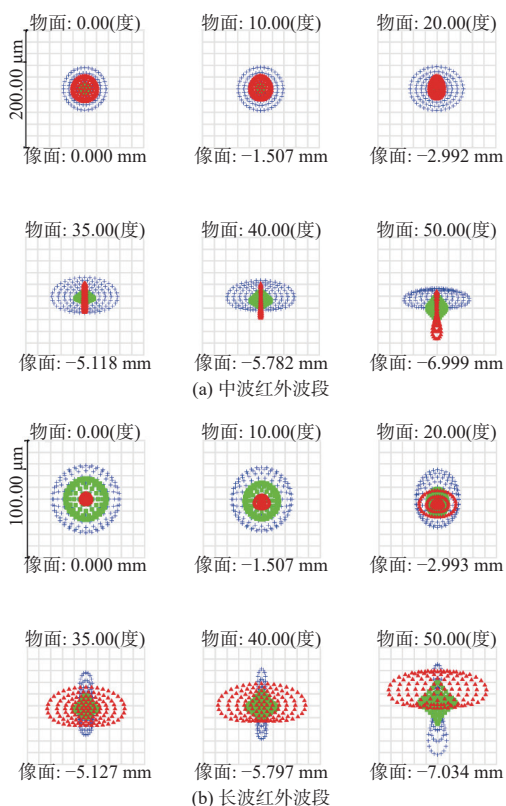


图 12 红外光学系统点列图

Fig. 12 Spot diagram of infrared optical system

3 系统分析

3.1 光学系统消热差分析

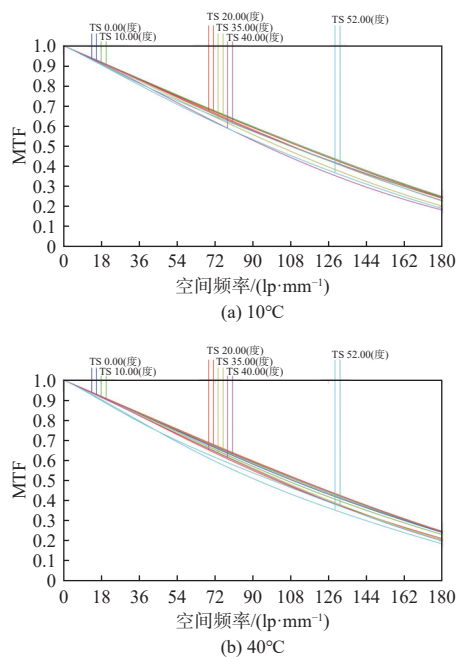
窑炉炉膛侧壁环境温度为 $200\ ^\circ\text{C} \sim 400\ ^\circ\text{C}$ 左右, 即使系统采用风冷/水冷循环方式对内窥镜进行冷却降温, 仍需要内窥镜在 $10\ ^\circ\text{C} \sim 70\ ^\circ\text{C}$ 范围内稳定工作^[19]。在高温条件下, 透镜材料及机械零件热膨胀会使透镜材料折射率、透镜厚度、隔圈厚度、压圈厚度等发生一定量的变化^[20]。内窥镜透镜个数较多, 微小变化累积易导致像面偏移, 影响成像质量, 因此, 需要对系统进行热分析。

本文选用光学被动式无热化设计方法, 通过匹配透镜与结构件之间的热性能参数, 使得高低温时产生的离焦量抵消, 且光学系统轴向色差为零, 故系统需要满足光焦度分配条件。消轴向色差方程和消热差方程可表示为

$$\begin{cases} \phi = \frac{1}{f} = \frac{1}{h} \sum_{i=1}^k h_i \phi_i \\ \left(\frac{1}{h_i \phi} \right)^2 \sum_{i=1}^k h_i^2 \frac{\phi_i}{v_i} = 0 \\ \left(\frac{1}{h_i \phi} \right)^2 \sum_{i=1}^k h_i^2 \theta_i \phi_i = -\alpha_h L \end{cases} \quad (3)$$

式中: $i=1,2,3,\dots,k$, 表示第 i 个透镜, k 为透镜总数; ϕ 及 ϕ_i 为光焦度; h_i 为近轴边缘光线在第 i 个透镜上的入射高度; v 表示阿贝数, 为色差系数的倒数; θ_i 为第 i 个透镜的热差系数, 由于红外材料在中波和长波的热差系数差别很小, 式中取 2 个波段的平均值计算; α_h 为机械结构材料的线性膨胀系数; L 为机械结构件的长度。

对可见、中波/长波红外波段光学系统进行消热差分析, 结构件材料选择常用的铸铝(线性膨胀系数 $\alpha_h=23.6 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$)。在不同温度下, 可见光学系统像面离焦量均小于焦深范围。红外光学系统针对不同温度下最佳像面的焦移方向及大小, 对光学系统的材料进行替代优化, 使用不同温度折射率系数的透镜材料组合, 从而达到消热差的目的。由于锗的阿贝数较大、热差系数较小, 硒化锌的阿贝数较小、热差系数较小, 硫系玻璃具有优异的透过率^[21], 最终红外光学系统选用锗-硒化锌-国产硫系玻璃 (IRG206、IRG208) 等材料组合, 可以很好地校正系统色差及热差。各波段系统在 $10\ ^\circ\text{C}$ 、 $40\ ^\circ\text{C}$ 、 $70\ ^\circ\text{C}$ 时的 MTF 曲线图分别如图 13、图 14 和图 15 所示。



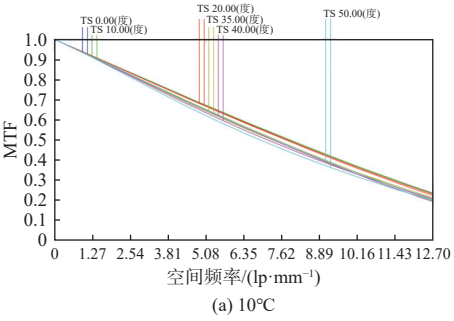
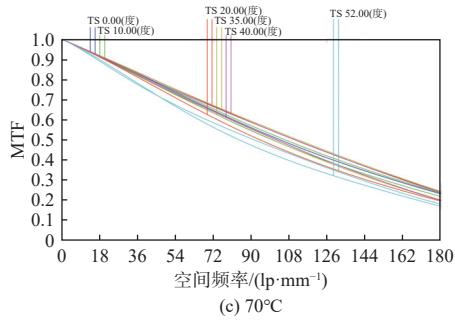


图 13 可见光学系统不同温度下 MTF 曲线
Fig. 13 MTF curves of visible optical system at different temperatures

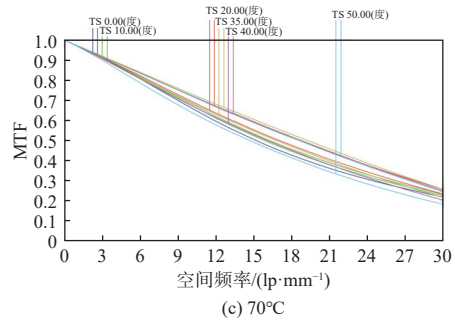
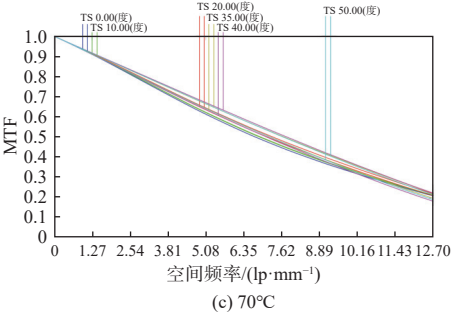
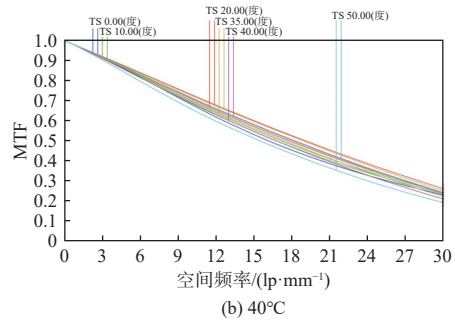
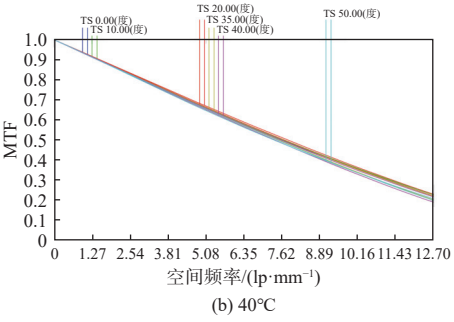
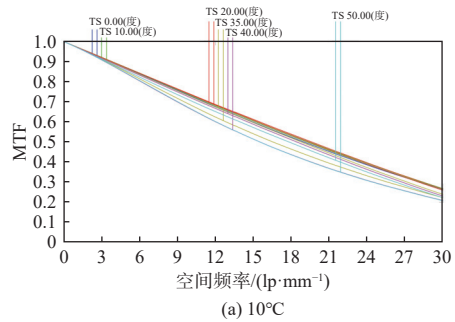


图 14 中波红外光学系统不同温度下 MTF 曲线
Fig. 14 MTF curves of mid-wave infrared optical system at different temperatures

从图 13~图 15 可以看出,系统在 10℃~70℃范围内,光学系统不同波段 MTF 曲线有不同程度下降,但可见波段、中/长波红外波段在 180 lp/mm、30 lp/mm、12.7 lp/mm 处 MTF 均大于 0.15,满足设计要求。镜头焦移受温度影响较小,像面偏移量均小于各波段系统焦深。系统适应于炉膛高温环

图 15 长波红外光学系统不同温度下 MTF 曲线
Fig. 15 MTF curves of long-wave infrared optical system at different temperatures

境下使用,镜头的成像质量及高温适应能力可以满足使用要求。

3.2 公差分析

公差分析是光学系统设计的重要过程,根据实践经验及厂家生产能力给予系统合适的公差,可以保证内窥镜生产、装配时的合格率。对本文可见及红外系统分别进行公差分析,公差容限值如表 2 所示。

表 2 公差容限值

Table 2 Tolerance values

公差类型	可见波段	红外波段
曲率半径/rings	1	2
中心厚度/mm	0.015	0.02
偏心/mm	0.01	0.02
倾斜/(°)	0.008 3	0.016 7
折射率	0.002	0.001
阿贝数	0.1	1
不规则度	0.25	0.5

根据以上公差容限值, 采用灵敏度和蒙特卡罗 (Monte Carlo) 分析方法分析 500 组镜头数据^[15], 公差分析结果如图 16 所示。

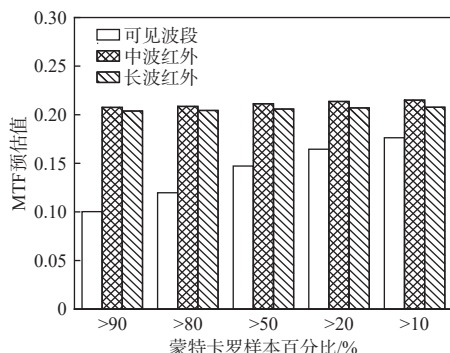


图 16 公差分析结果

Fig. 16 Tolerance analysis results

可见波段光学系统在奈奎斯特频率 180 lp/mm 处超过 90% 样本的 MTF 预估值大于 0.1, 中波红外光学系统在 30 lp/mm 处超过 90% 样本的 MTF 预估值大于 0.1, 长波红外光学系统在 12.7 lp/mm 处超过 90% 样本的 MTF 预估值大于 0.2, 公差范围加工难度较小, 加工、装配后可以满足成像质量要求。

3.3 实验结果

根据本文设计结果对系统进行加工装调, 最终设计的工业内窥镜实物图如图 17 所示。



图 17 双通道工业内窥镜实物图

Fig. 17 Physical image of dual-channel industrial endoscope

使用加工好的可见波段内窥镜进行分辨率成像测试。实验装置包括: 可见波段工业内窥镜、内窥镜夹持装置、分辨率板、图像探测器、显示装置, 如图 18 所示。

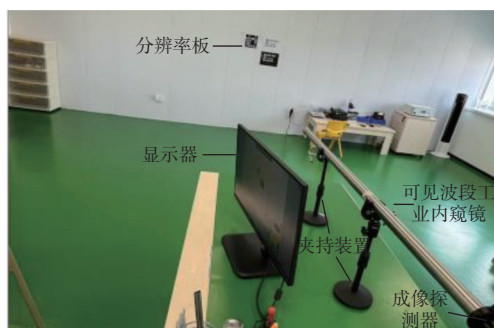
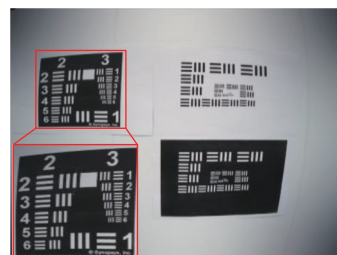


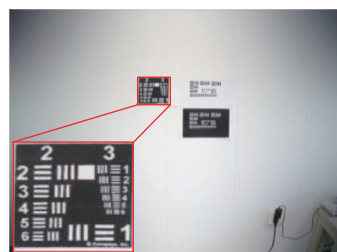
图 18 可见波段内窥镜分辨率实验图

Fig. 18 Visible-band endoscopic resolution experiment

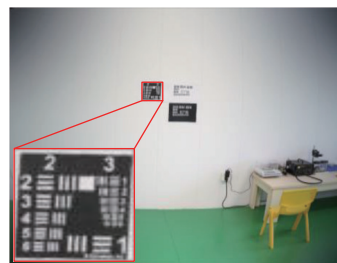
分别对 1 m、3 m、5 m 不同距离处内窥镜进行分辨率成像测试, 测试结果如图 19 所示。



(a) 1 m



(b) 3 m



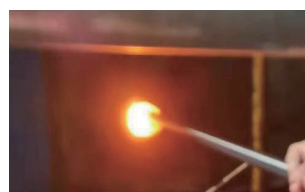
(c) 5 m

图 19 在不同距离处内窥镜成像效果图

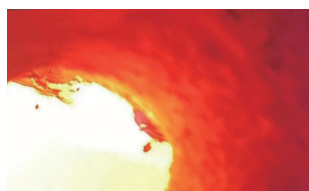
Fig. 19 Endoscopic imaging effects at different distances

从图 19 可以看出, 本文设计、加工的内窥镜各视场成像解析度良好, 对比度高, 在 1 m 处可以清晰分辨图中所有线宽, 其中最小线宽为 1 mm; 在 3 m 处可以分辨局部图中右侧 2 号线对, 线宽为 2.7 mm; 在 5 m 处可以分辨左侧 4 号线对, 最小线宽为 4 mm, 对应物方分辨率为 0.25 lp/mm。实验结果表明, 设计、加工的内窥镜满足高分辨率成像要求。

将设计、加工的工业内窥镜深入窑炉火焰观察孔进行实验, 实验现场图及成像图如图 20 所示。



(a) 实验现场图



(b) 成像图

图20 内窥镜炉膛实验图

Fig. 20 Experimental diagram of endoscope in furnace chamber

从图20可以看出,设计的工业内窥镜可以清晰分辨炉壁瑕疵及纹理,在实际炉膛应用中具有较好的视野明亮度及图像清晰度,可以为高温工业炉膛提供高分辨率可视化监测,满足工厂对高温环境下关键设备状态进行精确监测和能效优化的要求。

4 结论

针对传统高温内窥镜在高温、多尘环境下成像分辨率低和测温精度不准确的问题,设计加工了一款可见波段和 $3\mu\text{m}\sim 5\mu\text{m}$, $8\mu\text{m}\sim 12\mu\text{m}$ 红外波段多光谱的双通道工业内窥镜。可见光学系统满足4k分辨率成像要求,红外光学系统提出了一种中波/长波共口径工业内窥镜设计方案,可实现 100° 视场角的温度监测。消热差分析结果显示,光学系统在 $10^\circ\text{C}\sim 70^\circ\text{C}$ 环境中温度对成像质量影响较小。实验及仿真结果表明:该内窥镜在可见光波段成像清晰,且系统分辨率满足设计指标,红外波段双波段共口径设计适配红外双色探测器,便于后续温度标定及图像融合工作。本文设计的高温内窥镜系统对于炉膛监测、准确测温具有重要意义。

参考文献:

- [1] 易遵辉. 面向高炉料面检测的弱光内窥式成像方法及应用[D]. 长沙: 中南大学, 2023.
YI Zunhui. Low-light endoscopic imaging method and its application for blast furnace burden surface detection[D]. Changsha: Central South University, 2023.
- [2] 杨建峰. 高温摄像镜头的光学系统: CN98113031.3[P]. 2001-10-31.
YANG Jianfeng. Optical system for high temperature camera lens: CN98113031.3 [P]. 2001-10-31.
- [3] 杨凯明, 向阳, 王鑫, 等. 大靶面、长工作距高清工业内窥镜设计[J]. 光学学报, 2022, 42(22): 150-157.
YANG Kaiming, XIANG Yang, WANG Xin, et al. Design of high-definition industrial endoscope with large optical format and long working distance[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(22): 150-157.
- [4] 孙志远, 赵楠. 中、长波热红外系统辐射测温精度比较[J]. 激光与红外, 2013, 43(1): 38-43.
SUN Zhiyuan, ZHAO Nan. Comparison of radiation temperature measurement precision between middlewave and longwave thermal-imaging systems[J]. Laser and Infrared, 2013, 43(1): 38-43.
- [5] KEPRT J, POSPÍŠIL L, HRABOVSKÝ M, et al. Optical system of borescope for flame observation in visible (VIS) and infrared (NIR) part of light[J]. SPIE, 2014, 9441: 94411S-1-94411S-6.
- [6] 李阳哲. 强光干扰下基于粉尘多散射模型的高炉料面图像复原方法[D]. 长沙: 中南大学, 2023.
LI Yangzhe. Image restoration method of blast furnace burden surface based on dust multi-scattering model under strong light interference[D]. Changsha: Central South University, 2023.
- [7] 陈丽娜, 刘涛, 陈梦强, 等. 一种长波红外针孔广角测温镜头及其成像方法: CN201811617398.8[P]. 2023-05-12.
CHEN Lina, LIU Tao, CHEN Mengqiang, et al. A long-wave infrared pinhole wide-angle temperature measurement lens and a method of imaging for the lens: CN201811617398.8[P]. 2023-05-12.
- [8] 崔晓荣, 沈涛, 黄建鲁, 等. FABEMD和改进局部能量窗口的红外中波和长波图像融合[J]. 光谱学与光谱分析, 2021, 41(7): 2043-2049.
CUI Xiaorong, SHEN Tao, HUANG Jianlu, et al. Infrared mid-wave and long-wave image fusion based on FABEMD and improved local energy window[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2021, 41(7): 2043-2049.
- [9] 赵志刚, 王鑫, 彭廷海, 等. 国外中长波双波段红外成像技术的发展及应用[J]. 红外技术, 2020, 42(4): 312-319.
ZHAO Zhigang, WANG Xin, PENG Tinghai, et al. Status quo and application of middle and long wave dual-band infrared imaging technologies in occident[J]. Infrared Technology, 2020, 42(4): 312-319.
- [10] 王鑫, 向阳, 冯大伟, 等. 鼻黏膜纤毛显微内窥镜光学系统设计[J]. 光学学报, 2023, 43(4): 174-183.
WANG Xin, XIANG Yang, FENG Dawei, et al. Design of optical system for nasal mucociliary microendosc-

- ope[J]. *Acta Optica Sinica*, 2023, 43(4): 174-183.
- [11] 江伦, 胡源, 董科研, 等. 红外双波段光学系统被动式消热差设计[J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(11): 3353-3357.
- JIANG Lun, HU Yuan, DONG Keyan, et al. Passive athermal design of dual-band infrared optical system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(11): 3353-3357.
- [12] 何旭舟, 林峰, 谢忠鑫, 等. 一种 2 k 分辨率内窥镜光学系统设计[J]. *应用光学*, 2024, 45(2): 276-281.
- HE Xuzhou, LIN Feng, XIE Zhongxin, et al. Design of endoscopic optical system with 2 k resolution[J]. *Journal of Applied Optics*, 2024, 45(2): 276-281.
- [13] TOMKINSON T H, BENTLEY J L, CRAWFORD M K, et al. Rigid endoscopic relay systems: a comparative study[J]. *Applied Optics*, 1996, 35(34): 6674-6683.
- [14] 付强, 张新. 中波/长波双色红外光学系统材料选择[J]. *光学学报*, 2015, 35(2): 81-87.
- FU Qiang, ZHANG Xin. Materials choose for mid-wave/long-wave dual-waveband infrared optics[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(2): 81-87.
- [15] 党更明, 高明, 范晨, 等. 红外双波段共焦复合孔径光学系统设计[J]. *光学学报*, 2023, 43(8): 321-334.
- DANG Gengming, GAO Ming, FAN Chen, et al. Design of infrared dual-band confocal composite aperture optical system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2023, 43(8): 321-334.
- [16] 王静, 吴越豪, 戴世勋, 等. 硫系玻璃在长波红外无热化连续变焦广角镜头设计中的应用[J]. *红外与激光工程*, 2018, 47(3): 165-171.
- WANG Jing, WU Yuehao, DAI Shixun, et al. Application of chalcogenide glass in designing a long-wave infrared athermalized continuous zoom wide-angle lens[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(3): 165-171.
- [17] 禹璐, 程德文, 周伟, 等. 硬性内窥镜光学系统的杂散光分析与抑制[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(3): 525-532.
- YU Lu, CHENG Dewen, ZHOU Wei, et al. Stray light analysis and suppression of rigid endoscope system[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(3): 525-532.
- [18] 禹璐, 程德文, 周伟, 等. 大景深高清硬性内窥镜光学系统的优化设计[J]. *光学学报*, 2013, 33(11): 221-229.
- YU Lu, CHENG Dewen, ZHOU Wei, et al. Optimization design of rigid endoscope with high definition and large depth of field[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(11): 221-229.
- [19] 姜怒涛. 采用耐高温镜头的高温内窥式炉膛火焰监视工业电视系统[J]. *中国电力*, 1998(6): 72.
- JIANG Nutao. High-temperature endoscopic furnace flame monitoring industrial TV system using high-temperature resistant lens[J]. *Electric Power*, 1998(6): 72.
- [20] 史天翼, 杨磊, 刘泽武, 等. 小口径大视场工业内窥镜光学系统设计[J]. *应用光学*, 2023, 44(1): 17-23.
- SHI Tianyi, YANG Lei, LIU Zewu, et al. Optical system design of small-caliber and large-field industrial endoscope[J]. *Journal of Applied Optics*, 2023, 44(1): 17-23.
- [21] 冯丽军, 李训牛, 陈洁, 等. 大相对孔径大面阵长波红外光学无热化镜头的设计[J]. *红外技术*, 2022, 44(10): 1066-1072.
- FENG Lijun, LI Xunniu, CHEN Jie, et al. Design of long-wavelength infrared athermalization lens with large relative aperture for large-array detectors[J]. *Infrared Technology*, 2022, 44(10): 1066-1072.