文章编号 2097-1842(2023)06-1414-10

中波红外成像系统冷反射抑制

卜和阳,虞林瑶*,田浩南,王 健

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所航空成像与测量技术研究一部, 吉林长春 130033)

摘要:冷反射现象是指在红外热成像系统中制冷探测器通过前面光学表面的反射而探测到的自身的像,冷反射的控制是 红外成像系统的重要任务。本文设计了一款采用 Cassegrain(卡塞格林)反射结构的制冷型中波红外成像系统,分析了该 系统的冷反射现象,得到了冷反射现象严重的表面。接着,通过 Zemax 软件降低这些严重面的冷发射,在控制冷反射的 同时兼顾系统传递函数 MTF 的优化。通过 NARCISSUS 宏命令(冷反射分析宏命令)、Tracepro 建模软件和实际成像图 将优化后的中波红外成像系统与冷反射抑制前的系统进行比对。结果显示:探测器像面冷反射引入的等效温差 (NITD)由 1.0484 K 下降到了 0.1576 K,同时系统在调焦过程中冷反射斑的能量和尺寸无明显变化,优化后的光学结构 有效地控制了系统的冷反射。

关键 词:冷反射;制冷型中波红外成像系统;冷反射引入等效温差
 中图分类号:O432;O432
 文献标志码:A doi:10.37188/CO.2023-0008

Narcissus suppression of medium-wave infrared imaging system

BU He-yang, YU Lin-yao*, TIAN Hao-nan, WANG Jian

 (Aeronautical Imaging and Measurement Technology Research Department, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)
 * Corresponding author, E-mail: yulinyao87@163.com

Abstract: Narcissus refers to the phenomenon in an infrared system where a cooled imaging sensor can "see" its own reflected image by the reflection of the frontal optical surfaces. Control of narcissus is one of the important requirements in the design of the infrared imaging system. A cooled medium-wave infrared imaging system with Cassegrain reflection structure is designed and analyzed to obtain the optical surfaces with serious narcissus. In addition, the narcissus is reduced by Zemax, and the optimization of the system transfer function MTF is taken into account while the narcissus is controlled. The optimized medium-wave infrared imaging system is compared with the imaging system without narcissus suppression through NAR-CISSUS macro (narcissus analysis macro), Tracepro modeling software and actual imaging, and it was found that the narcissus induced equivalent temperature difference (NITD) of the detector image surface decrease from 1.0484 K to 0.1576 K. The energy and size of the narcissus spot did not show marked change during the focusing of the system. The optimized optical structure can effectively control the narcissus of the system.

Key words: Narcissus; cooled medium-wave infrared imaging system; narcissus induced equivalent temperature difference

基金项目:吉林省科技发展计划资助项目(No. 20200403057SF)

收稿日期:2023-01-05;修订日期:2023-02-05

Supported by the R & D Project of Jilin Province (No. 20200403057SF)

1引言

制冷型中波红外成像系统因具有全时域工作 的特点,同时对隐藏目标的侦查能力更强,具有可 见光不可比拟的优势,在航空、航天领域得到越 来越广泛的应用。制冷型中波红外成像系统虽然 具有众多优点,但也存在一些问题,尤其是制冷型 红外成像系统存在的冷反射现象,需要在设计时 反复迭代加以抑制^[1]。

冷反射是制冷型红外成像系统中一种普遍的 杂光效应,是红外探测器看到的由杜瓦瓶发出后, 经红外光学系统的透镜表面反射回来的自身冷 像。红外探测器只对温度变化量有响应,也就是 红外热像仪只探测和显示目标与背景的温差。探 测器除了接收到正常成像的景物辐射外,还通过 红外系统中的光学镜片表面的微弱反射,接收到 本身及周围低温腔冷环境的影像,形成冷像。冷 像会引起图像的不均匀性,较强的冷反射信号将 淹没目标信号。设计者在追求衍射极限的设计目 标时,要兼顾系统的冷反射抑制。在航空领域,大 口径多光谱折反系统正逐步占据越来越重要的地 位,其具有更复杂的光学结构和更多的光学组件, 且各成像通道都拥有调焦机构,在中波通道的调 焦过程中冷反射会对像质产生怎样的影响,需要 细致分析。

光学系统的 YNI 和 I/IBAR 一直是衡量冷反 射影响的两个重要指标^[2-3]。YNI 是近轴边缘光 线在反射面的入射高度 Y, 入射介质的折射率 N和入射角 I 的乘积。其主要反映轴上冷反射大 小。I/IBAR 表示近轴边缘光线的入射角和主 光线的入射角的比值, 反映冷反射随视场的变 化。YNI 和 I/IBAR 至少应有一个参数的绝对值 大于 1, 才能证明冷反射不严重。但同时让 YNI 和 I/IBAR 两个参数的绝对值都大于 1 也是十分 困难的, 需要不断迭代设计。

国内虽有很多这方面的研究,但大多停留在 YNI和 I/IBAR 值的模拟优化上,真正有实物依 据,从理论到实验两方面展开研究的文章不多。 本文基于多光谱折反式成像系统,选择其中波通 道,结合 Zemax设计软件和 Tracepro 建模分析软 件,定性定量地分析系统的冷反射效应,结合优化 前后系统的实际成像结果,给出具体的 Zemax 优化方案。

2 折反式制冷型中红外系统设计

2.1 中波红外系统设计

本文设计的一种折反式制冷型中波红外系 统,包括 Cassegrain 反射结构,准直透射组和成像 透射组,系统的相对孔径为 1/4,焦距为 720 mm, 口径为 180 mm,工作波段为 3.7~4.8 µm,采用 640 pixel×512 pixel、像元尺寸为 15 µm 的红外制 冷探测器成像。图 1 为该中波红外成像系统结构 示意图。其中,准直透镜组由 4 片镜组成,5 片镜 做像差校正及成像。图 2 为该系统未考虑冷反射 控制时的传递函数,全视场传递函数曲线和衍射 极限曲线趋于一致,说明系统设计达到衍射极限。



图 1 冷反射抑制前折反式中波红外成像系统结构图

Fig. 1 Structural diagram of a catadioptric medium-wave infrared imaging system without narcissus suppression





Fig. 2 MTF of a catadioptric medium-wave infrared imaging system without narcissus suppression

2.2 中红外系统冷反射影响评价

为了模拟系统的冷反射现象,可以将探测器 像面作为朗伯体发光面,所以将图1的系统倒置, 如图3所示。中红外透镜表面的反射率设置为



图 3 冷反射抑制前折反式中波红外成像系统倒置结构图

Fig. 3 Inverted structure diagram of a catadioptric medium-wave infrared imaging system without narcissus suppression

1%,追迹红外透镜各个表面的反射光线在探测器像面上的分布。由于图 3 中 Cassegrain 系统将探

测器像面发射出的光线反射出了系统,不会再回 到探测器中,所以只考虑图 4 中透射镜片的冷反 射即可^[3-4]。

制冷型红外成像热像仪是温差型探测器,因此,用于评价冷像效应引起的像面照度不均匀性时,通常采用冷反射引入等效温差(NITD)的形式进行评价,即将这种像面照度不均匀量等效为引起相等量的像面照度的景物温差。应用 Zemax 中 NARCISSUS 宏命令进行分析,忽略系统衍射效应和吸收损失。设杜瓦瓶内温度为77 K,镜筒和环境温度为 300 K,各红外透镜表面反射回探测器像面的 NITD 形成冷斑,图 5 是使用镜头拍摄的图像中的 NITD 的视觉表示^[5-6]。



图 4 有冷反射影响的透镜组

Fig. 4 Lens group with narcissus effect

图 5 中方形区域可视为像面,因为成像系统 为轴向对称结构,所以将像面显示为对称的正方 形,理论上冷斑就在像面中心。调焦组由+2 mm 位置向-2 mm 位置移动的过程中,冷斑尺寸一直 缩小且变化幅度较大,NITD 值由 0.8634 K 增加 到 1.0484 K,变化值为 0.185 K。说明系统即使 在+2 mm 的位置通过非均匀校正降低了像面的 冷反射影响后,系统调焦组变化到-2 mm 位置 时,冷反射能量也会变大,形成冷像残余。具体表 现为冷斑会以不同尺寸形式重新出现,并在像面中 心区域叠加 0.185 K 的冷反射能量,这部分能量可 以淹没部分目标信号,缩短成像系统的作用距离^[7]。



(a) 理论设计位直接反射处 (a) Narcissus spot in the theoretical design position

(b) 调焦组调焦 +2 mm 后冷反射超
 (b) Narcissus spot when focusing
 +2 mm by the focus group

 (c) 调焦组调焦 -2 mm 后冷反射斑
 (c) Narcissus spot when focusing -2 mm by the focus group

图 5 探测器像面冷斑在调焦前后的变化

Fig. 5 Changes of the narcissus spot in the detector image surface before and after focusing

系统对焦距为 1800 mm 的光管采用不同频 率靶标进行测试,实测最小可分辨温差 (MRTD) 结果见表 1。

特征频率下的目标,没有合适的靶标,可以利

用 MRTD 计算公式获得[13]:

 $MRTD = \frac{\pi^2}{4\sqrt{14}}SNR_{\rm DT}f_{\rm 2D}\frac{NETD_{\rm sys}}{MTF(f_{\rm 2D})}\cdot\left(\frac{\alpha\cdot\beta}{t_ef_P\Delta f\tau_e}\right)^{\frac{1}{2}},$

式中: SNR_{DT} 为观察者能分辨线条的阈值视觉信 噪比, 一般取 2.5; t_e 为人眼积分时间, 约为 0.2 s; f_{2D} 为角空间频率; $NETD_{sys}$ 是系统等效噪声温 差, 一般为 40 mK; $\alpha \pi \beta$ 为探测器瞬时视场, $MTF(f_{2D})$ 是系统传递函数; f_P 是探测器帧频; Δf 是等效噪声带宽, τ_e 为探测器积分时间。计算 出特征频率下的 MRTD 为 0.218 K。可见 NITD 远大于 MRTD, 会淹没目标信号。尽管在准直光 路中引人非均匀化校正可以降低其影响^[8], 但调 焦组移动, 冷反射效应就会重新表现出来, 所以该 系统必须进行冷反射控制。

表 1 不同靶标对应的 MRTD 值 Tab. 1 MRTD values for different targets

	~
Target frequency (cy/mrad)	MRTD (K)
2.5	0.035
4.01	0.055
10.77	0.103

图 6(彩图见期刊电子版)绘制了各透镜表面 上的 NITD 贡献。图 6 从下至上分别为 S2~S23, 图 6 和图 4 表示了表面和结构的对应关系。

图 6 中自下而上影响严重的面分别为 S2, S3, S5, S14, S15 和 S18, 通过 Zemax 软件 NAR-CISSUS 宏命令查询这几个面的 YNI 和 I/IBAR 值^[8-9], 如表 2 所示。S2, S3 是制冷探测器窗口的



图 6 中红外成像系统各透镜表面的 NITD 贡献

Fig. 6 NITD of each lens surface of the medium-wave infrared imaging system

表 2 冷反射严重面的 YNI 和 I/IBAR 值

 Tab. 2
 YNI and I/IBAR values for the optical surfaces with serious narcissus

Surface	S2	S3	S5	S14	S15	S18
YNI	0.367	0.371	0.454	-0.091	-0.091	-0.298
I/IBAR	0.420	0.424	0.378	0.106	0.106	0.512

固有冷反射,无法通过设计进行消除。S14和S15是分光镜的两个平面,在实际使用时分光镜倾斜置于光路中,会将冷反射能量引导出光路,也可以不用考虑,所以只需要控制S5和S18的YNI和I/IBAR值即可。

3 中波红外系统冷反射抑制优化

3.1 YNI 和 I/IBAR 的控制思路

当 I/IBAR 的绝对值大于 1 时, 表明该面产生 的冷像噪声基本不随视场扫描过程而变化, 即使 该面上的轴上点温度下降很大 (即 YNI 很小), 产 生较强的冷像噪声, 但由于大部分为可滤掉的直 流噪声信号, 故它所产生的冷像影响也很小。若 I/IBAR 的绝对值小于 1, 其值越小, 就表明该面产 生的冷像噪声随着视场扫描的变化而变化, 冷像 噪声大都是不可滤掉的交流信号, 在这种情形下, 为了消除冷反射现象, 就必须要求该面上的冷像 引起的轴上点温度下降值很小 (即 YNI 值很大), 以削弱此面的冷像强度, 使其随视场变化的缺点 反映不出来。

通过 Zemax 设计软件进行改进设计时, YNI 值可以通过 Zemax 中的控制函数 YNIP 直接读 出,之后用 OPGT 函数设置目标值加以控制; I/IBAR 的绝对值不能直接读出,但可以通过定 义,使用 RAED、DIVI、ABSO 三个操作数组合读 出,在优化设计时,以表 2 中的 S5 为例,具体优化 函数的定义如表 3 所示。波长 2 是主波长。

表 3 中, RAED 指实际光线的出射角。这是 指定表面的法线和折射光线之间的夹角, H_x和 H_y是归一化视场坐标, P_x和 P_y是归一化入瞳坐 标。如图 7 所示, 序号 1 的操作数表示上边缘光 线, 即通过物体中心到达入瞳顶点的光线在 S5 面 上的出射角θ₁, 在冷反射反向追迹时, 这就是 S5 面上的冷光线入射角; 序号 2 的操作数表示从 视场的上边缘点到入瞳中心的主光线在 S5 面上 出射角θ₂, 在冷反射反向追迹时, 同样是 S5 面上 的冷光线入射角。DIVI 表示相除, 这里指操作数 序号 1 的值除以操作数序号 2 的值。ABSO 表示 取 DIVI 计算值的绝对值。OPGT 指将 ABSO 的 数值控制在大于 1 的范围。

通过以上数据可看出, Zemax 操作数组合求出的 I/IBAR 值(表 3)和 NARCISSUS 宏命令计

Tab. 3Merit function of I/IBAR values with surface S5										
OPER#	type	surf	wave	H_x	H_y	P_x	P_y	Target	Weight	Value
1	RAED	5	2	0	0	0	1	0	0	1.08
2	RAED	5	2	0	1	0	0	0	0	2.86
3	DIVI	1	2	0	—	—	—	0	0	0.378
4	ABSO	3	—	—	—	—	—	0	0	0.378
5	OPGT	4	—	—	—	—	_	1	1	0.378





图 7 评价函数示意图



算出的值(表 2)一致。通过操作数的组合,在设 计之初就可以对特定表面的 I/IBAR 绝对值进行 限定,使其尽量大于1。

经过前面的分析虽然已经找出对冷反射影响

严重的表面,但在控制这几个面的冷反射时,可能 将其它面的冷反射贡献加大,所以应该对所有透 镜表面的 YNI 和 I/IBAR 加以不同权重进行控 制,同时兼顾系统传递函数的优化。

3.2 抑制冷反射中红外系统的改进设计

准直组是将 Cassegrain 系统的一次像点准 直为平行光出射,这样不仅使得调焦组处于准直 光路中,有更优的调焦效果^[6];还可以在准直光路 中加入挡板做非均匀化校正[10-12]。因 S18 属于准 直组,考虑保持 Cassegrain 结构不改动,对准直组 和成像组焦距进行整体优化。优化后的结构经倒 置后如图 8 所示。优化后的系统传递函数见 图 9。





Fig. 8 Transmission structure diagram of the optimized medium-wave infrared imaging system



优化后的折反式中波红外成像系统的传递函数 图 9

Fig. 9 MTF of the optimized catadioptric medium-wave infrared imaging system

中波红外成像系统优化前后的主要差异在最 后5片透镜,如图10所示。优化后的结构可在控 制冷反射的同时使透镜厚度变薄。





4 仿真分析

4.1 NARCISSUS 宏命令分析

图 11 给出了优化后的中波红外成像系统各透镜表面的 NITD。通过 NARCUSSUS 宏命令再次对冷反射严重面进行分析。可见,除了探测器窗口对探测器像面有较强的冷反射外,其余面的冷反射能量基本可以忽略^[13-15]。



图 11 优化后的中波红外成像系统各透镜表面的 NITD

Fig. 11 NITD of each lens surface of the optimized medium-wave infrared imaging system

这时重新查看 S5 和 S18 的 YNI 和 I/IBAR 值, 如表 4 所示。

表 4 冷反射严重面在优化后系统中的 YNI 和 I/IBAR 值

Tab. 4 YNI and I/IBAR values of the surfaces with serious narcissus in optimized system

Surface	S5	S18
YNI	-0.52	0.74
I/IBAR	1.46	1.93

经冷反射抑制后的光学结构,各红外透镜表 面反射回探测器像面的 NITD 形成冷斑,如图 12 所示。由图 12 可见,系统在调焦组移动过程中冷 斑尺寸基本没有变化,且各透镜表面的反射对探 测器像面的 NITD 的最大贡献值由 1.0484 K 降 到 0.1576 K,系统优化前后,NITD 值的对比结果 如表 5 所示。可见,系统冷反射现象得到了明显 改善。

表 5 优化前后的 NITD 值 Tab. 5 NITD values before and after optimization (K)

Structural state	Max	Min	ΔNITD
Non-optimization	1.0484	0.8634	0.1850
Optimization	0.1576	0.1557	0.0019



(a)理论设计位置冷反射斑

(a) Narcissus spot in the theoretical design state



(b) 调焦组调焦 +2 mm 冷反射斑(b) Narcissus spot when focusing +2 mm by focus group



(c) Marcissus spot when focusing -2 mm by focus group

- 图 12 冷反射抑制后探测器像面冷反射斑在调焦前后的 变化
- Fig. 12 Changes of the narcissus spot in the detector image surface of the optimized system before and after focusing

4.2 Tracepro 建模分析模拟

Tracepro 是可视化可量化的建模分析软件, 可用于分析每个面对冷光的反射量。根据阈值设 定,可以拟定冷反射光在特定表面的一次反射或 多次反射。将中红外系统设计文件导入 Tracepro 软件,设置透镜表面的反射率为 1%,透射率为 99%,忽略系统衍射效应和吸收损失,模拟冷反射 光返回到探测器像面的能量分布情况^[16-18],如 图 13 所示。

将图 13 中数据归纳如表 6 所示。可见, 在红 外系统的调焦过程中, 冷反射在探测器像面上的



图 13 Tracepro 仿真探测器靶面的冷反射能量模拟结果

Fig. 13 Simulation results of narcissus on the image surface through Tracepro modeling software

表 6 调焦过程中探测器像面冷反射仿真结果

Tab. 6 Simulation results of narcissus on the detector's image surface during focusing

Structural state	$Maximum\text{-intensity}(W\!/\!m^2)$	$Average\text{-intensity}(W\!/\!m^2)$	Total-luminous-flux(W)
Theoretical design location	6.95×10 ⁻⁴	4.48×10 ⁻⁴	2.96×10 ⁻⁶
The focus group moves by +2 mm	6.97×10 ⁻⁴	4.49×10 ⁻⁴	2.97×10 ⁻⁶
The focus group moves by -2 mm	6.97×10 ⁻⁴	4.48×10 ⁻⁴	2.96×10 ⁻⁶

光通量强度基本一致,不会因为调焦状态的变化 引入新的冷反射现象^[19]。 从以上结果可知,红外成像系统调焦前后探

测器接收到的冷反射能量无明显变化,且冷反射

能量在整个探测器像面呈均匀分布。此外,通过 平行光路中的校正板进行非均匀校正,系统冷反 射可得到很好抑制。

5 成像比对

冷反射控制前的系统对目标成像如图 14(a) 所示,此时,室外温度为6℃,目标距离为5km。 由图 14(a)可知,图像中心有一个较明显的黑斑, 说明该系统存在冷反射现象。经过冷反射控制后 的成像系统,对同一目标进行成像,如图 14(b)所 示。可见图像清晰,已经没有冷斑。以上结果表明 优化后的中波红外系统很好地控制了冷反射现象。



(a) 存在冷反射成像图 (a) Image with narcissus effect



(b) 冷反射控制后成像图(b) Image without narcissus effect

图 14 红外系统优化前后成像图

Fig. 14 Images of the infrared system before and after optimization

6 结 论

本文设计了一款大口径制冷型中波红外成像 系统,通过在设计阶段对函数进行优化,对冷反射 严重面的 YNI 和 I/IBAR 两个参数进行控制,可 在控制冷反射严重面的同时,兼顾其它透镜表面 的冷反射效应,提高系统传递函数。利用 Zemax 设计软件的 NARCISSUS 宏命令和 Tracepro 建模 分析软件对成像系统冷反射抑制前后的冷发射效 应进行分析,并通过成像图进行比对。

对冷反射进行抑制首先要寻找到对冷反射贡 献较大的表面,通过软件的优化函数控制冷反射 严重面的 YNI 和 I/IBAR 两个参数,使其中至少 一个数的绝对值大于 1。在系统优化过程中,采 用 YNIP、READ、DIVI等优化函数组合进行优 化。同时,要考虑调焦组在调整像面质量时,不会 导致冷反射效应发生迅速变化,出现新的冷反射 现象;其次,考虑添加非均匀化校正板,尽量在平 形光路中加入,可以校正某一状态下像面上的冷 反射效应;最后,对于设计好的光学结构,结合实 际的结构尺寸,利用建模软件分析冷反射对探测 器像面的综合影响。结果显示冷反射在像面呈均 匀分布,且系统像面的 NITD 在调焦过程中基本 不变,可认为已经从设计角度降低了冷反射效应。

以上是从光学结构设计角度提出的冷反射抑 制方案,暂不涉及目标和环境温度的变化。当目 标温度变化时,系统的冷反射也不一样,这时,可 以通过在平行光路中设置挡板进行非均匀校正。 当目标背景温度或者光学系统温度变化较大时, 系统的冷反射会发生变化,导致校正效果变差,此 时,需要重新进行非均匀化校正。考虑已有的技 术条件也可以提前对探测器进行两点校正系数预 存,或者结合装调好的系统进行系统级的黑体两 点校正。

参考文献:

- [1] 杨正, 屈恩世, 曹剑中, 等. 对凝视红外热成像冷反射现象的研究[J]. 激光与红外, 2008, 38(1): 35-38.
 YANG ZH, QU E SH, CAO J ZH, *et al.*. The narcissus study in the optical system for the infrared staring arrays[J].
 Laser & Infrared, 2008, 38(1): 35-38. (in Chinese)
- [2] 任国栋, 张良, 兰卫华, 等. 红外成像系统冷反射的定量分析[J]. 红外技术, 2016, 38(4): 290-295. REN G D, ZHANG L, LAN W H, *et al.*. Quantitative analysis of the narcissus of infrared imaging system[J]. *Infrared*

Technology, 2016, 38(4): 290-295. (in Chinese)

- [3] 王文芳,杨晓许,姜凯,等. 大视场红外折反光学系统杂散光分析[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(1): 138-142.
 WANG W F, YANG X X, JIANG K, *et al.*. Stray light analysis of catadioptric infrared optical system with large field[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(1): 138-142. (in Chinese)
- [4] 刘鑫,黄一帆,李林,等. 多谱段相机红外光学系统杂散辐射分析[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(12): 3201-3206.
 LIU X, HUANG Y F, LI L, *et al.*. Stray radiation analysis of infrared optical system in multispectral camera[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(12): 3201-3206. (in Chinese)
- [5] 张葆, 洪永丰, 史光辉. 非均匀性校正在红外杂散辐射抑制中的应用[J]. 光学 精密工程, 2008, 16(12): 2421-2428. ZHANG B, HONG Y F, SHI G H. Application of non-uniformity correction to stray radiation suppression of infrared optical system[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, 16(12): 2421-2428. (in Chinese)
- [6] 陈锐, 谈新权. 红外图像非均匀性校正方法综述[J]. 红外技术, 2002, 24(1): 1-3.
 CHEN R, TAN X Q. Study on non-uniformity correction of infrared image[J]. *Infrared Technology*, 2002, 24(1): 1-3. (in Chinese)
- [7] 代少升, 袁祥辉. 红外图像非均匀性实时校正的新技术[J]. 光学 精密工程, 2004, 12(2): 201-204.
 DAI SH SH, YUAN X H. Real-time correction of infrared image nonuniformity[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2004, 12(2): 201-204. (in Chinese)
- [8] 陈迎娟, 张之江, 张智强. CCD像素响应不均匀性的校正方法[J]. 光学 精密工程, 2004, 12(2): 216-220.
 CHEN Y J, ZHANG ZH J, ZHANG ZH Q. Correction of CCD pixel nonuniformity[J]. Optics and Precision Engineering, 2004, 12(2): 216-220. (in Chinese)
- [9] 刘欣, 潘枝峰. 红外光学系统冷反射分析和定量计算方法[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(7): 1684-1688. LIU X, PAN ZH F. Analysis and quantitative calculating methods for narcissus of infrared optical system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(7): 1684-1688. (in Chinese)
- [10] 栾亚东. 红外扫描成像系统中冷反射的光学抑制[J]. 红外与激光工程, 2006, 35(S2): 26-30.
 LUAN Y D. Optical method of restraining narcissus in scanning infrared system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(S2): 26-30. (in Chinese)
- [11] 牛金星,周仁魁,刘朝晖,等. 红外探测系统自身热辐射杂散光的分析[J]. 光学学报, 2010, 30(8): 2267-2271.
 NIU J X, ZHOU R K, LIU ZH H, *et al.*. Analysis of stray light caused by thermal radiation of infrared detection system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(8): 2267-2271. (in Chinese)
- [12] 姚秀文,肖静,曾曙光,等.红外光学系统自身杂散辐射分析及抑制[J].激光与光电子学进展,2009,46(12):91-94. YAO X W, XIAO J, ZENG SH G, et al.. Analysis and suppression of self-generated thermal emission in infrared optical systems[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2009, 46(12): 91-94. (in Chinese)
- [13] 孙文芳. 基于 MRTD 的红外成像系统性能评估和大气影响的研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2015.
 SUN W F. Research of performance evaluation of infrared imaging system and atmospheric effects based on MRTD[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2015. (in Chinese)
- [14] 梁子健,杨甬英,赵宏洋,等.非球面光学元件面型检测技术研究进展与最新应用[J].中国光学,2022,15(2):161-186.
 LIANG 7 L VANG V V 7HAO H V at al. Advances in research and applications of optical aspheric surface

LIANG Z J, YANG Y Y, ZHAO H Y, *et al.*. Advances in research and applications of optical aspheric surface metrology[J]. *Chinese Optics*, 2022, 15(2): 161-186. (in Chinese)

- [15] 袁方,谭庆贵, 王光耀, 等. 基于液晶偏振光栅的快速大角度光束偏转[J]. 液晶与显示, 2022, 37(11): 1411-1419. YUAN F, TAN Q G, WANG G Y, *et al.*. Fast and large-angle optical beam deflection based on liquid crystal polarization grating[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2022, 37(11): 1411-1419. (in Chinese)
- [16] 路陆, 姜鑫, 杨锦程, 等. 基于自适应引导滤波的红外图像细节增强[J]. 液晶与显示, 2022, 37(9): 1182-1189.
 LU L, JIANG X, YANG J CH, *et al.*. Adaptive guided filtering based infrared image detail enhancement[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2022, 37(9): 1182-1189. (in Chinese)
- [17] 黎四明, 李青, 董旭辉. 具有取向转换膜的偏振无关模式控制液晶透镜[J]. 液晶与显示, 2022, 37(10): 1293-1301.
 LI S M, LI Q, DONG X H. Polarizer-free modal liquid crystal lenses with an alignment conversion layer[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2022, 37(10): 1293-1301. (in Chinese)
- [18] 付强, 闫磊, 谭双龙, 等. 轻小型金属基增材制造光学系统[J]. 中国光学 (中英文), 2022, 15(5): 1019-1028. FU Q, YAN L, TAN SH L, *et al.*. Light-and-small optical systems by metal-based additive manufacturing[J]. *Chinese*

Optics, 2022, 15(5): 1019-1028. (in Chinese)

[19] 王成龙, 王春阳, 谷健, 等. 一种基于定标的非均匀性校正改进算法[J]. 中国光学, 2022, 15(3): 498-507.
 WANG CH L, WANG CH Y, GU J, *et al.*. An improved non-uniformity correction algorithm based on calibration[J]. *Chinese Optics*, 2022, 15(3): 498-507. (in Chinese)

作者简介:



卜和阳(1984—), 男, 吉林长春人, 硕 士, 助理研究员, 主要从事光学设计与 检测方面的研究。E-mail: bhy0125@126. com



虞林瑶(1987—),男,吉林长春人,博 士,副研究员,主要从事光学设计与装 调检测方面的研究。E-mail: yulinyao87 @163.com



田浩南(1987—), 男, 吉林长春人, 博 士, 副研究员, 主要从事电子学方面的 研究。E-mail: tju_thn@163.com



王 健(1995—), 男, 吉林长春人, 硕 士, 助理研究员, 主要从事机械设计 方面的研究。E-mail: 15764339602@163. com