

光学学报

中长波红外双波段自由曲面棱镜

余俊^{1,2}, 刘晓天^{1,2}, 钮信尚^{1,2}, 姜斌斌^{1,2}, 焦宏飞^{1,2}, 张锦龙^{1,2}, 王占山^{1,2*}

¹同济大学先进微结构材料教育部重点实验室, 上海 200092;

²同济大学物理科学与工程学院精密光学工程技术研究所, 上海 200092

摘要 为解决传统双波段红外成像系统构型复杂的问题,提出了一种将自由曲面棱镜引入双波段成像系统的一体式构型。基于设计中约束追迹光线角度的低灵敏度优化方法,实现了 F 数为1、焦距为20 mm、视场角为 $21.8^\circ \times 16.4^\circ$ 的双波段(3.7~4.8 μm 和8.0~12.0 μm)红外光学系统。在20 lp/mm空间频率处,系统中波红外波段和长波红外波段内所有视场的调制传递函数(MTF)分别高于0.79和0.67。经公差分析可知,该自由曲面棱镜的制造可采用单点车削机床实现。同时,完成了长波红外自由曲面棱镜的试制。

关键词 光学设计; 自由曲面棱镜; 红外双波段; 公差分析

中图分类号 O434 **文献标志码** A

DOI: 10.3788/AOS221893

1 引言

红外成像系统具有隐蔽性好、抗干扰能力强的优点,并具有一定识别目标伪装的能力,故被广泛应用于红外夜视、红外侦查和红外制导等领域中。然而,单一波段的成像系统容易受到区域地形、环境温度和目标伪装等因素影响,从而影响最终的探测准确度。如果一个红外探测成像系统能够同时从两个波段中获取目标信息,就可以对复杂背景的干扰信息进行抑制,此时目标探测的准确度得到提高,从而在预警、搜索和跟踪系统中的虚警率得到了降低^[1-3]。一般双波段成像系统主要以三种方式构成:第一种是用两套独立的单波段成像系统;第二种是两个响应不同波段的探测器共用一个光学系统;第三种是一个响应两个波段的双色红外探测器共用一个光学系统。前一种方法需要设计两套独立的成像系统,后两种方法需要设计宽带消色差的系统,一般使用纯反射式结构。然而,传统的纯折射、纯反射或折反式双波段光学系统通常采用两个通道或者包含分光镜的分光设计,需要通过多片式镜片组合成像来校正像差,存在镜片的装配工艺和检测手段繁琐,以及最终系统体积较大和机械结构相当复杂等不足。

自由曲面棱镜具有设计优化变量多、结构灵活和系统集成度高的特性。同时,由于自由曲面棱镜利用了界面内表面的全反射特性,故其光学效率较传统多片式光学镜头高出很多。目前,国内外针对自由曲面

棱镜光学系统的研究主要集中于目视光学和照明光学系统。Yamazaki等^[4]最早提出了将自由曲面棱镜结构用于头戴显示系统。Hoshi等^[5]提出了用于增强现实的透视头戴显示系统。Cheng等^[6]提出了4种双焦面抬头显示目视系统设计。Kiontke等^[7]设计了一款视场角为 24° 、长度仅22 mm(最长维度)的自由曲面棱镜红外镜头,材料为锗,其工作波段为长波红外波段,但该系统是单通道的长波红外系统且没有实质性地校正系统色差,故成像质量不理想。之前文献的设计构型都没有涉及到利用自由曲面棱镜实现双波段的成像系统。

本文提出了一种将自由曲面棱镜引入双波段成像系统的一体式构型。基于此设计构型,设计中采用追迹光线角度约束的优化方法,实现了 F 数为1、焦距为20 mm、视场角为 $21.8^\circ \times 16.4^\circ$ 的双波段(3.7~4.8 μm 和8.0~12.0 μm)红外光学系统。此光学系统选用了非制冷红外探测器,在 $-20 \sim 70^\circ\text{C}$ 温度范围内成像质量良好。该自由曲面棱镜可采用单点车削机床来制造,并已在单通道长波红外自由曲面棱镜上进行了验证。

2 红外双波段自由曲面棱镜设计方法

自由曲面棱镜是由多个非对称曲面组成的高集成度的光学系统,直接优化设计的方法容易得到无效的光路结构,故可以采用一种将光路逐步复杂化的优化设计策略,如先设计离轴反射式系统再添加折射材料

收稿日期: 2022-10-31; 修回日期: 2022-11-29; 录用日期: 2022-12-12; 网络首发日期: 2023-01-06

基金项目: 国家自然科学基金(62105244,61621001)

通信作者: *wangzs@tongji.edu.cn

优化的方式。自由曲面棱镜制作完成后无法进行任何调整,这就需要在优化设计过程中考虑制作公差灵敏度的影响。同时,红外自由曲面棱镜的消色差和热差设计也是保证其在复杂环境下应用的前提。

2.1 低灵敏度优化设计原理

红外双波段自由曲面棱镜的光学布局如图 1 所

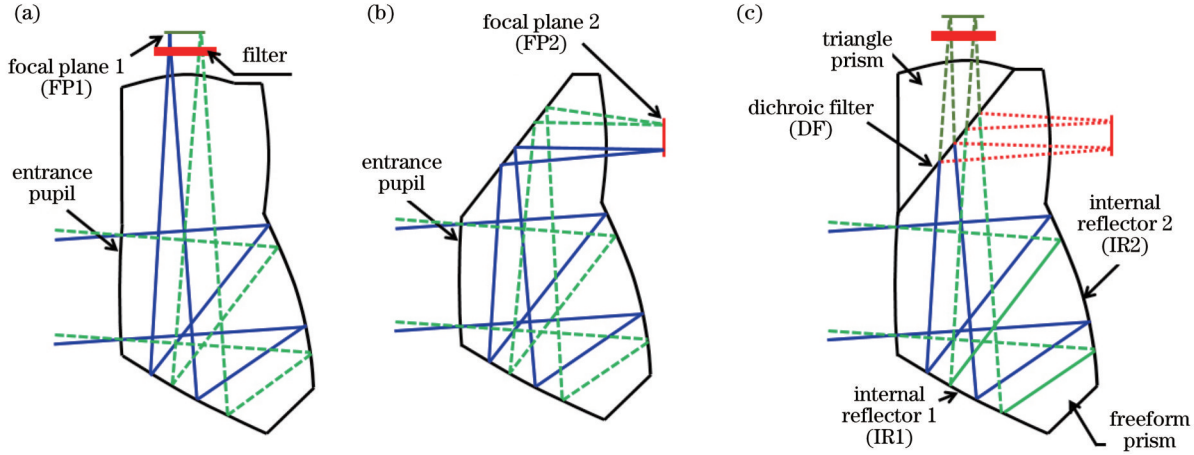


图 1 双波段成像系统光路图。(a)成像通道 FP1;(b)成像通道 FP2;(c)双波段自由曲面棱镜

Fig. 1 Optical path in dual band imaging system. (a) Imaging channel FP1; (b) imaging channel FP2; (c) dual band freeform prism

红外双波段自由曲面棱镜具有共通道的双光路,双光路成像性能难以在设计时同时达到优化的平衡点,故无法采用常规光学系统的直接设计方法对其进行设计,需要采用渐进式优化方法逐步优化。在制作完成后,红外双波段自由曲面棱镜就有了确定的性能,因此需要在优化设计过程中降低制作公差灵敏度。传统光学优化设计通常在初始设计完成后进行蒙特卡罗公差分析,若系统中某项参数的公差灵敏度过高,则返回优化过程,逐步迭代直到优化出满足需求的结构。然而,红外双波段自由曲面棱镜光路结构复杂,且完成设计后需要对两个波段的光路进行公差分析,故迭代优化的效率较低。

光学表面的微小扰动会造成光线偏折异常,从而导致实际波前与理论波前有差异,如图 2 所示,其中 n_0 为入射光介质折射率, n'_0 为折射光介质折射率。图 2 (a)中 S_0 表示理想曲面的位置, S_1 表示存在微小扰动情况下的曲面。设计光线 l 从 S_0 面 O_0 点入射至表面并发生

折,其中包括一个自由曲面棱镜和一个三角形棱镜^[8]。对于成像通道 FP1,光将通过两个折射面和两个反射面,如图 1(a)所示。另一个通道 FP2 包含相同的内部反射表面,通过分光面将另外一个波段分束后出射,如图 1(b)所示。

折,表面出现微小扰动后则从 S_1 面 O_1 点入射至表面并发生折射。由于表面的扰动量非常小,故可以假设折射光线 l'_0 和 l'_1 近似平行。微小扰动导致的光程改变量为

$$\Delta w_{\text{refractive}} = l_{O_0O_1} [1 - \cos(\theta - \theta_0)] = 2l_{O_0O_1} \sin^2 \frac{\theta - \theta_0}{2} \approx \frac{l_{O_0O_1}}{2} (\theta - \theta_0)^2, \quad (1)$$

$$\Delta w_{\text{reflective}} = l_{O_0O_1} (1 + \cos 2\theta) = 2l_{O_0O_1} \cos^2 \theta, \quad (2)$$

式中: $\Delta w_{\text{refractive}}$ 为微小扰动造成的折射表面的光程改变量; $\Delta w_{\text{reflective}}$ 为微小扰动造成的反射表面的光程改变量; $l_{O_0O_1}$ 为 O_0 点与 O_1 点间的距离; θ 为折射表面的入射角度; θ_0 为折射角度。由式(1)可知,若折射表面的入射角度与折射角度的偏差值越小,则该区域光程改变量对微小扰动越不敏感。折射面上的偏折角度主要取决于材料折射率,故设计中应尽量选择折射率较低的材料。由式(2)可知,反射面因微小扰动产生的光程改变量主要取决于反射面上光线的入射角度。

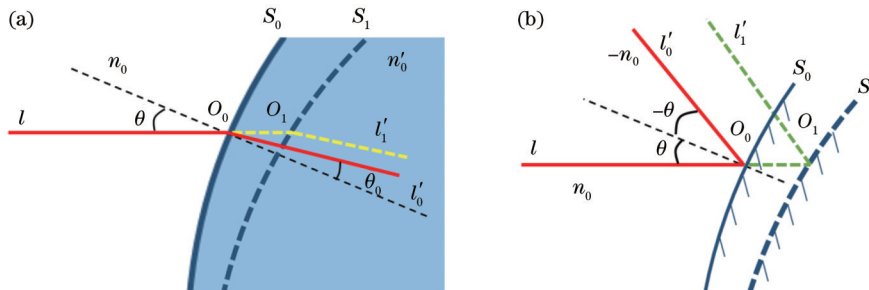


图 2 光学表面微小扰动导致的光程改变。(a)折射表面;(b)反射表面

Fig. 2 Optical path deviation caused by small perturbations on optical surfaces. (a) Refractive surface; (b) reflective surface

通常,在光学系统中往往镜片边缘光线角度的偏差较大,中心光线角度的偏差较小。因此,将视场和孔径归一化划分后可以计算出归一化的中心与边缘孔径光线,然后追迹出光学系统的光线并计算角度,如图 3 所示。若自由曲面光学系统包含 M 个折射面和 N 个反射面,则在光学优化设计中可定义出追迹光线的角度约束评价,即

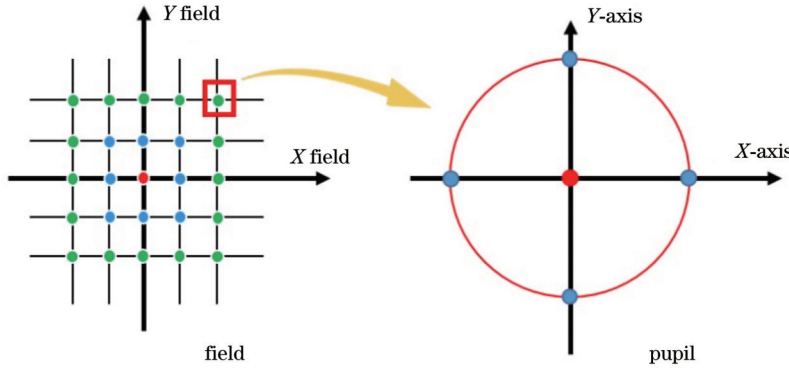


图 3 归一化视场的中心和边缘光线
Fig. 3 Center and edge rays of normalized field of view

2.2 消色差和消热差设计

消热差设计有被动式和主动式两类,被动式不需要反馈补偿温度间隔变化,具有较高的可靠性。光学被动式消色差和热差设计需要满足光焦度、消热差和消色差 3 个条件。设计的双波段自由曲面棱镜的所有折射面和反射面都为系统贡献了光焦度,但只有两个折射面产生色散会引起色差^[9]。如果该棱镜有 M 个折射面和 N 个反射面,则自由曲面棱镜的总光焦度和单色像差可以表示为

$$\begin{cases} \phi = \sum_{i=1}^M \phi_i + \sum_{j=1}^N \phi_j \\ \sum_{i=1}^M \Delta\phi_i = 0 \end{cases}, \quad (4)$$

式中: ϕ_i 为折射面光焦度; ϕ_j 为反射面光焦度; $\Delta\phi_i$ 为色差系数; ϕ 为总光焦度。

实际上,大多数折光材料都有正色散,并且对于由单一材料组成的自由曲面棱镜来说其色差是无法校正的,但衍射面有负色散。在该自由曲面棱镜中,可采用衍射面来校正色差,折光面的等效色散 V_{ref} 是指数的比值,衍射面的等效色散 V_{dif} 是波长的比值,二者的表达式为

$$\begin{cases} V_{ref} = \frac{n_{mid} - 1}{n_{short} - n_{long}} > 0 \\ V_{dif} = \frac{\phi}{\Delta\phi} = \frac{\lambda_{mid}}{\lambda_{short} - \lambda_{long}} < 0 \end{cases}, \quad (5)$$

式中: n_{mid} 为中心波长折射率; n_{short} 为短波折射率; n_{long} 为长波折射率; λ_{mid} 为中心波长; λ_{short} 为短波波长; λ_{long} 为长波波长。

$$\begin{cases} f_1 = \sum_{i=1}^M \sum_{N_{pupil}=1}^{p_{max}} \sum_{N_{field}=1}^{f_{max}} \left| \theta_{N_{field}}^{(N_{pupil})} - \theta_{0, N_{field}}^{(N_{pupil})} \right| \\ f_2 = \sum_{j=1}^N \sum_{N_{pupil}=1}^{p_{max}} \sum_{N_{field}=1}^{f_{max}} \left| \theta_{N_{field}}^{(N_{pupil})} \right| \end{cases}, \quad (3)$$

式中: N_{pupil} 为设计孔径数; N_{field} 为设计视场数; p_{max} 和 f_{max} 为最大值; f_1 为折射面评价约束函数; f_2 为反射面评价约束函数。

在自由曲面棱镜中,RS1 和 RS2 为折射面,FFS1 和 FFS2 为反射面。当设 RS2 为衍射面时,可推导出折射面 RS1 与衍射面 RS2 的光焦度分布为

$$\begin{cases} \phi_{RS1} = \left(\phi - \sum_{j=1}^N \phi_j \right) \frac{V_{ref}}{V_{ref} - V_{dif}} \\ \phi_{RS2} = \left(\phi - \sum_{j=1}^N \phi_j \right) \frac{V_{dif}}{V_{dif} - V_{ref}} \end{cases}. \quad (6)$$

为了消除工作温度的影响,应考虑对自由曲面棱镜进行无热化补偿设计。传统的无热化补偿方法包括机械无源补偿和光学无源补偿。由于自由曲面棱镜中不存在机械结构,故无热化补偿设计可以考虑光学被动模式,无热化条件也应满足

$$\sum \gamma_i \phi_i = -X_H \phi, \quad (7)$$

式中: γ_i 为热差系数; X_H 为线性热膨胀系数。

2.3 光学系统设计

针对探测目标特性与应用需求,探测器选择像元尺寸为 $25 \mu\text{m}$ 的非制冷红外探测器,该双波段红外成像光学系统的主要设计指标如表 1 所示,其中 LWIR 为长波红外,MWIR 为中波红外。

红外双波段自由曲面棱镜的设计初期可以先设计反射光学系统,将反射面设置成平面和球面,然后逐步增加表面的自由度来优化成像质量。在优化设计过程中,常会出现光线被反射面遮拦和各个表面之间干涉的情况。因此,在设计评价函数中需要增加边缘光线和孔径边界的约束条件,如图 4 所示。

将光学系统中的边缘光线与光学表面的几何关系将转化为不等式约束。在反射光学系统中,相应的约

表 1 光学系统设计指标

Table 1 Design specification of optical system

Parameter	Description
Spectral range	LWIR (8.0–12.0 μm), MWIR (3.7–4.8 μm)
Aperture	25 mm
F-number	1.0
Field of view	21.8°×16.4°
Detector size	384 pixel×288 pixel
Pixel size	25 μm

束关系为

$$\begin{cases} Z_{A_3} - Z_{B_1} > t_1 \\ Z_{A_4} - Z_{A_1} > t_1 \\ Y_{A_4} - Y_{A_1} > t_2 \\ Y_{B_4} - Y_{A_2} > t_2 \end{cases}, \quad (8)$$

$$\begin{cases} Y_{B_2} - Y_{B_3} > t_{\min} \\ Z_{B_2} - Z_{B_3} > t_{\min} \\ Y_{B_1} - Y_{A_3} - (Z_{A_3} - Z_{B_1}) \tan \theta_{N_{\text{field}}} > t_{\min} \\ Z_{A_2} - Z_{B_1} - \frac{Y_{B_1} - Y_{A_2}}{Y_{B_3} - Y_{B_1}} (Z_{B_3} - Z_{B_1}) > t_{\min} \end{cases}, \quad (9)$$

$$\begin{cases} Y_{A'_1} - Y_{A_2} > t_{\min} \\ Z_{A'_1} - Z_{A_2} > t_3 \\ Z_{B'_1} - Z_{A_2} > t_3 \end{cases}, \quad (10)$$

式中: Z 为各节点的 Z 轴坐标值; Y 为各节点的 Y 轴坐

标值; t_1 为入口距离; t_2 为分光面尺寸; t_3 为成像通道 FP2 的焦平面位置; t_{\min} 为这些节点与边缘射线之间不受干扰的最小间距。式(8)可以限制入瞳位置和成像通道 FP1 的焦平面。采用式(9)所示的约束条件来避免反射面与边缘光线之间的干涉。式(10)可以限制成像通道 FP2 的焦平面。

在红外双波段自由曲面棱镜中, 相应的约束关系为

$$\begin{cases} Y_{F_1} - Y_{A_{T1}} > t_{\min} \\ Y_{B_{T1}} - Y_{F_2} > t_{\min} \end{cases}, \quad (11)$$

$$\begin{cases} Z_{A_3} - Z_{F_2} > t_{\min} \\ Y_{A'_{T2}} - Y_{A_2} > t_{\min} \\ Z_{F_5} - Z_{B_{T2}} - \frac{Y_{B_{T2}} - Y_{F_5}}{Y_{B_{T2}} - Y_{B_3}} (Z_{B_3} - Z_{B_{T2}}) > t_{\min} \end{cases}, \quad (12)$$

$$\begin{cases} Z_{B'_{T2}} - Z_{B_{T2}} > t_{\min} \\ Y_{B_{T2}} - Y_{B'_{T2}} > t_{\min} \end{cases}, \quad (13)$$

式(11)为第一个折射面与边缘光学线之间的限制条件, 采用式(12)所示的约束条件来避免反射面与边缘光线之间的干涉, 式(13)为两个不同通道之间最后折射面的约束条件。以上边界条件给光学表面加工留有余量, 且可保证结构紧凑和合理。自由曲面棱镜的材料选用硫系玻璃, 最终光学系统的设计结果如图 5 所示。

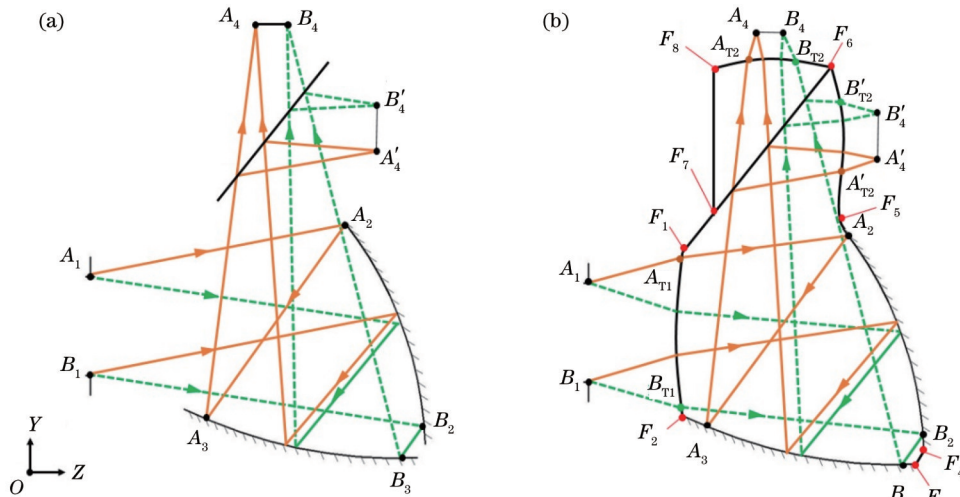


图 4 反射光学系统和红外双波段自由曲面棱镜的边缘光线与节点。(a)反射光学系统; (b)红外双波段自由曲面棱镜

Fig. 4 Margin rays and nodes of all-reflective system and infrared dual band freeform prism

2.4 像质分析

根据探测器选型指标要求, 探测器像元尺寸为 25 μm, 由此可以计算出探测器的特征频率为 20 lp/mm。红外双波段无热化光学系统在 -20、25、70 °C 的调制传递函数 (MTF) 曲线如图 6 所示。在 20 lp/mm 空间频率处, 25 °C 温度下系统的中波红外和长波红外所有视场的 MTF 值分别高于 0.79 和 0.67,

如图 6(c)、(d) 所示。当空间频率为 20 lp/mm 时, 所有温度情况下的系统 MTF 值均大于 0.45。因此, 对于所有温度范围的光学系统, 红外两通道的图像质量都可以匹配探测器的性能。

设计的光学系统采用离轴折反射结构, 光路沿 Y 轴方向离轴且关于设计坐标系的 YOZ 面对称, 故光学系统的畸变是仅关于坐标系的 YOZ 面对称的, 最大的

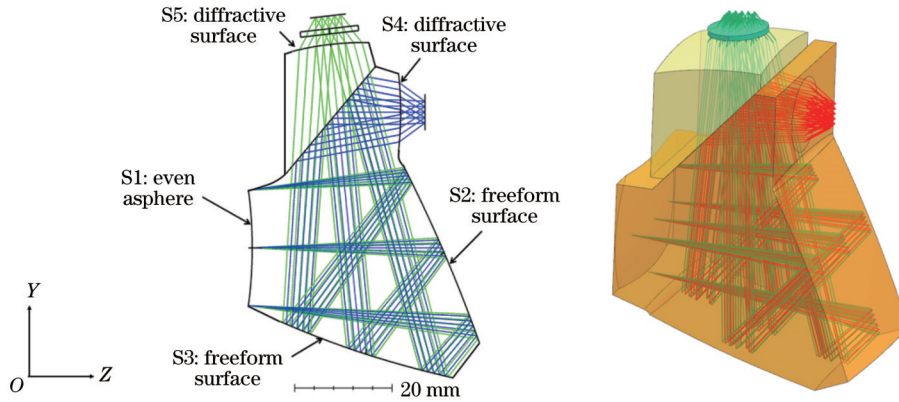


图 5 红外双波段自由曲面棱镜设计结果

Fig. 5 Design result of infrared dual band freeform prism

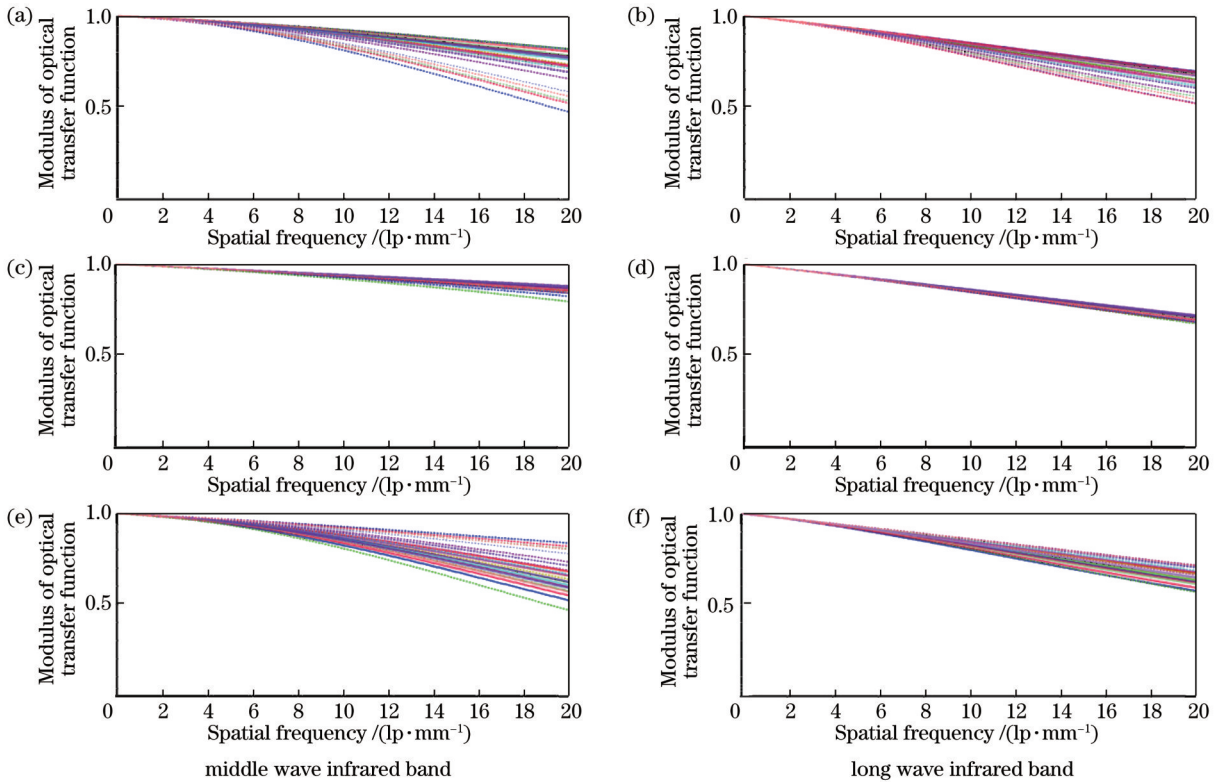


图 6 光学系统在 -20、25、70 °C 的 MTF 曲线。(a)(b) -20 °C; (c)(d) 25 °C; (e)(f) 70 °C

Fig. 6 MTF curves of optical system at -20 °C, 25 °C, and 70 °C. (a)(b) -20 °C; (c)(d) 25 °C; (e)(f) 70 °C

变形出现在视场边缘处。如图 7 所示,中波红外下光学系统的最大畸变约为 3.25%,长波红外下光学系统的最大畸变约为 3.33%。光学系统中波和长波的最大场曲均小于 0.05 mm。系统的环围能量(一个像元直径内的分布能量)曲线分布如图 8 所示,中波红外通道的轴上和轴外能量集中度均大于 91%,长波红外通道的轴上和轴外能量集中度均大于 78%。

2.5 衍射效率分析

红外双波段自由曲面棱镜的两个通道光路上分别设计有衍射面。衍射效率是评价衍射光学元件的重要指标,并影响整个系统的成像性能。由于波长远小于衍射面的周期,故可基于标量衍射理论计算波长 λ 的

m 阶衍射效率^[10](忽略透镜材料色散的小影响),即

$$\eta(\lambda) = \frac{\sin^2 \left[\pi \left(\frac{\lambda_0}{\lambda} - m \right) \right]}{\left[\pi \left(\frac{\lambda_0}{\lambda} - m \right) \right]^2}, \quad (14)$$

式中: λ_0 为自由曲面棱镜的中心波长。 $\lambda_{\min} \sim \lambda_{\max}$ 范围内的波段积分效率为

$$\eta_{\text{poly}}(\lambda) = \frac{\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \eta(\lambda) d\lambda}{\lambda_{\max} - \lambda_{\min}}. \quad (15)$$

通过式(15)计算得到衍射级次为 1 时,中波红外

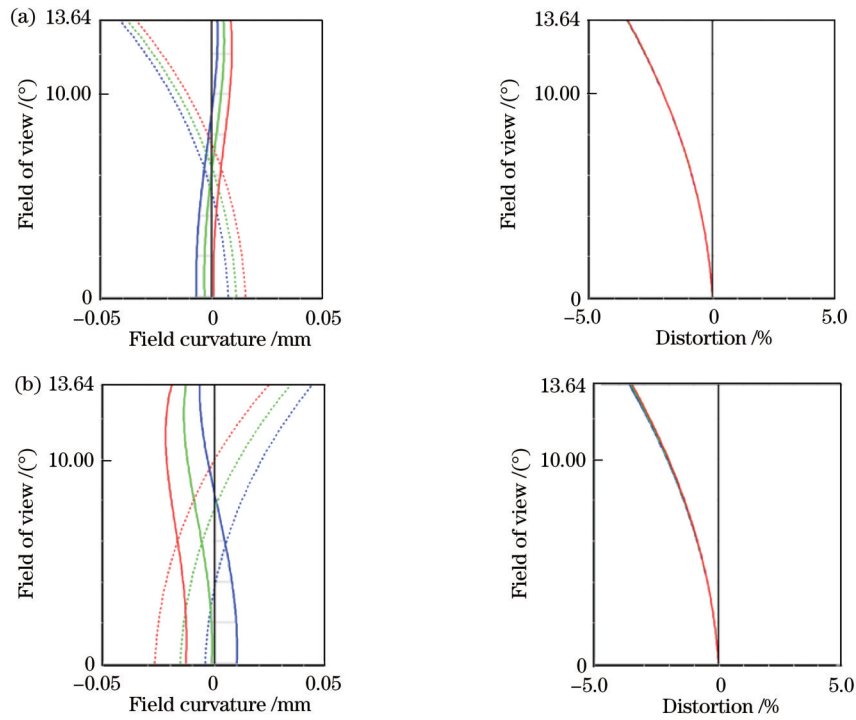


图 7 不同波段下光学系统的场曲和畸变。(a)中波红外波段;(b)长波红外波段

Fig. 7 Field curvature and distortion of optical system under different bands. (a) Middle wave infrared band; (b) long wave infrared region

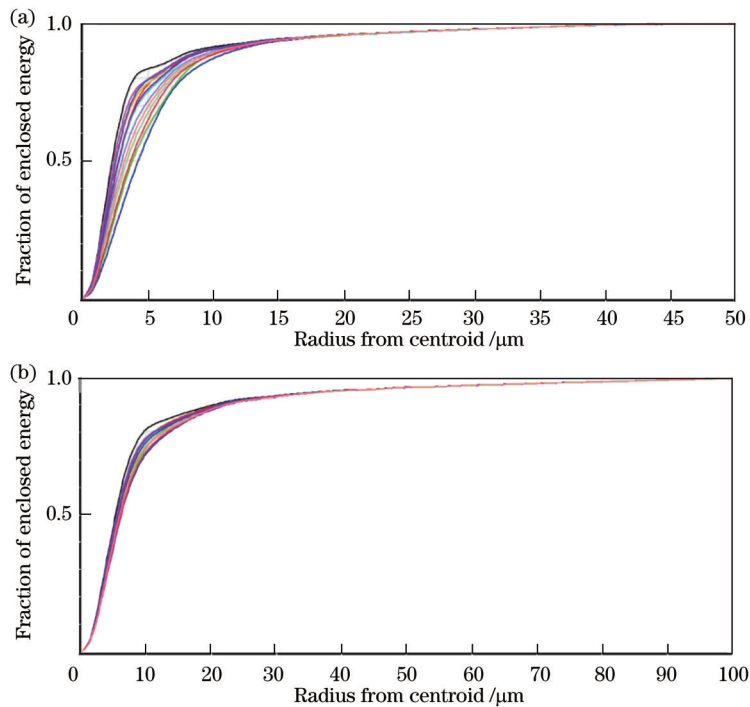


图 8 不同波段下光学系统的环围能量曲线。(a)中波红外波段;(b)长波红外波段

Fig. 8 Diffraction enclosed energy of optical system under different bands. (a) Middle wave infrared region; (b) long wave infrared region

光路的衍射效率为 98.17%，长波红外光路的衍射效率为 95.46%。

3 公差分析

为了使现有设计的光学结构可以满足制造需求，

通常采用蒙特卡罗方法来分析各个表面的加工公差。然而，由于 Zemax 软件不直接支持非标准表面类型的不规则分析，故这些非标准曲面的面形误差需要用多项式参数来分析。首先，通过蒙特卡罗公差分析确定自由曲面系数的公差范围。然后，根据这些公差范围

重构大量具有表面误差的随机曲面。最后,利用重构曲面与原始曲面的差值计算曲面误差,确定曲面误差的峰谷(PV)值和均方根(RMS)值。

表 2 为加工表面位置的公差分配,表 3 为加工表面面形的灵敏度分析。对设计的自由曲面棱镜进行了蒙特卡罗公差分析,中波红外通道 MTF 值在 20 lp/mm 空间频率处超过 0.3,长波红外通道 MTF 值在 20 lp/mm 空间频率处超过 0.45,评估的 MTF 曲线如图 9 所示。设计的自由曲面棱镜的所有加工公差都是松散的,但这种结构的制作难点在于需要一体化超精密加工来保证多个自由曲面之间的位置精度。

表 2 加工表面的位置公差分配

Table 2 Position tolerance assignment of machined surface

Tolerance type	Value
<i>x</i> decenter /mm	±0.1
<i>y</i> decenter /mm	±0.1
<i>x</i> tilt / (°)	±0.05
<i>y</i> tilt / (°)	±0.05
Clocking angle / (°)	±0.15
Thickness /mm	±0.1

4 双色分光膜设计与单通道自由曲面棱镜制作

双色分光膜是双波段成像系统的核心薄膜元件,

表 3 加工表面的面形公差分配

Table 3 Surface tolerance assignment of machined surface

Surface type	PV / μm	RMS / μm
S1-asphere	0.4	0.1
S2-freeform surface	0.9	0.3
S3-freeform surface	0.9	0.3
S4/S5-binary	0.5	0.2

其中在中波红外 3.7~4.8 μm 波段的反射效率和长波红外 8.0~12.0 μm 波段的透射效率直接决定了整个系统的成像质量。为了尽可能提高分色膜的光谱效率,选择中长波红外波段吸收较低的 Ge 和 ZnS 分别作为多层膜的高折射率材料和低折射率材料,其光学常数如图 10 所示,其中 n 为镀膜材料的折射率, k 为膜层材料的消光系数。随后,根据 $(0.5H L 0.5H)^{N^*}$ (H 代表 Ge 材料, L 代表 ZnS 材料, N^* 为长波通对称周期膜堆的周期数)的长波通对称周期膜堆光谱特征和反射带带宽展宽理论^[11],利用商业薄膜设计软件 OptiLayer^[12] 对分色膜进行优化设计。特别指出,为了保证成像系统在视场角范围内满足分光效率需求,分色膜入射角度设置为 31°~52°。最终优化后得到的分色膜膜层结构如图 11 所示,反射率和透射率光谱如图 12 所示。可以发现,当入射角度为 31°、45° 和 52° 时,薄膜在 3.7~4.8 μm 波段中的平均反射率大于 90%,在 8.0~12.0 μm 波段中的平均透过率大于 93%,满足实际应用需求。其中,损耗的光谱效率与 Ge 薄膜材料的本征吸收相关。

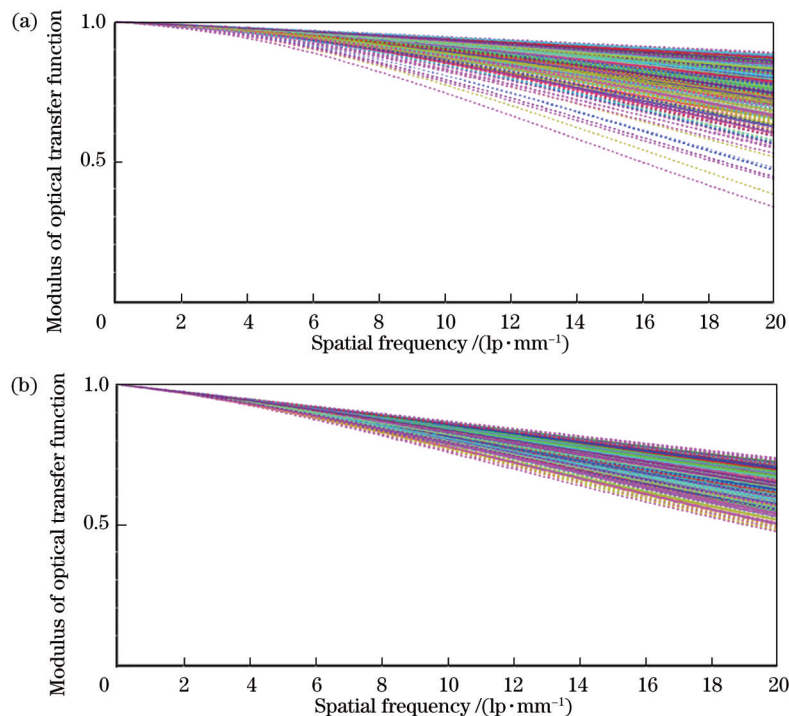


图 9 不同波段下蒙特卡罗分析 MTF 曲线。(a)中波红外;(b)长波红外

Fig. 9 MTF curve obtained by Monte Carlo analysis under different bands. (a) Middle wave infrared region; (b) long wave infrared region

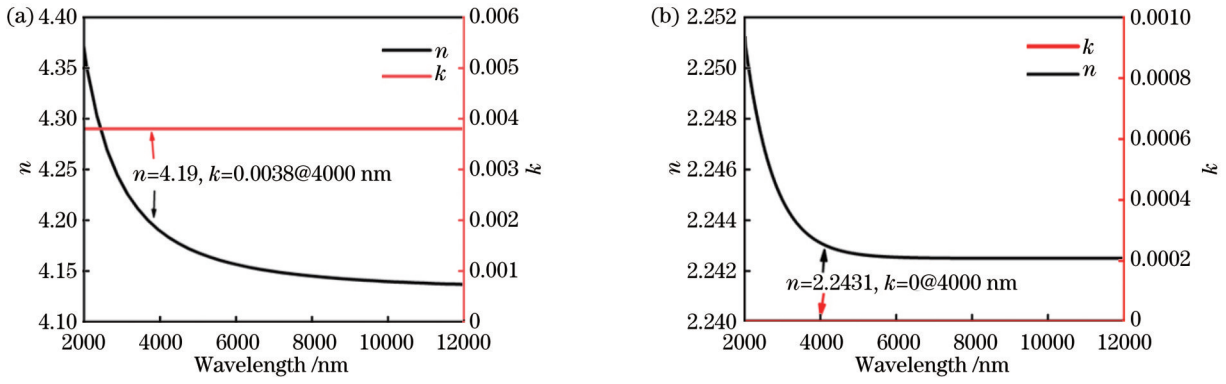


图 10 高折射率材料和低折射率材料的光学常数曲线。(a) Ge膜层材料;(b) ZnS膜层材料

Fig. 10 Optical constant curves of high and low refractive index materials. (a) Ge coating material; (b) ZnS coating material

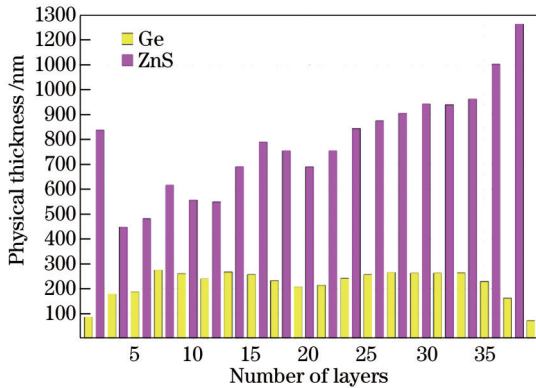


图 11 分光膜膜层结构图

Fig. 11 Coating structure of dichroic film

设计的单通道长波红外自由曲面棱镜的光路如图 13(a)所示。图 13(b)为研制的长波红外自由曲面棱镜与非制冷红外探测器装调后的照片,其中自由曲面

棱镜入射面为高次非球面,两个内反射面为自由曲面,光线出射面为衍射面。图 13(c)为设计的长波红外自由曲面棱镜的 MTF 曲线。使用 Optikos 公司的 LensCheck 传函仪设备测量自由曲面棱镜的 MTF,经测试,20 lp/mm 空间频率处 MTF 在各个视场的平均值均优于 0.2,如图 13(d)所示,其中 OT 和 OS 为子午视场和弧矢视场。实际成像的照片如图 13(e)所示,中心视场和边缘视场处均成像清晰。自由曲面棱镜的加工需要保证面形精度和位置精度。其中,面形精度的保证是通过在线检测与补偿加工方法实现的^[13],而位置精度的保证是通过离线检测自由曲面棱镜各个加工面的角度信息再补偿修正实现的。因此,长波红外自由曲面棱镜制作技术可应用至中长波双波段自由曲面棱镜的制作中,如结合磁流变抛光技术可进一步提升表面面形质量。

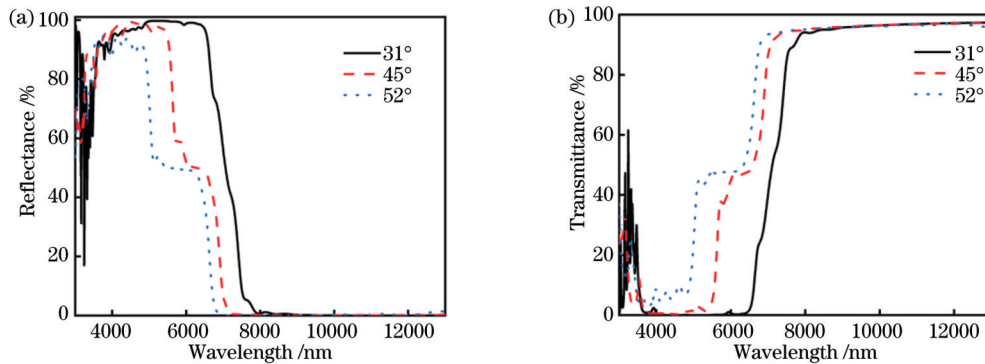


图 12 分光膜膜系设计光谱。(a)反射率光谱曲线;(b)透射率光谱曲线

Fig. 12 Coating design spectra of dichroic film. (a) Reflectance spectral curve; (b) Transmittance spectral curve

5 结 论

提出了一种将自由曲面棱镜引入双波段成像系统的一体式构型。基于设计中约束追迹光线角度的低灵敏度优化方法,实现了中长波红外双波段自由曲面棱镜的设计。在 20 lp/mm 空间频率处,系统中波红外和

长波红外波段内所有视场的 MTF 分别高于 0.79 和 0.67,中波红外波段内和长波红外波段内的最大场曲均小于 0.05 mm,最大畸变均小于 3.5%,该光学系统在 -20~70 °C 范围内成像质量良好。经公差分析可知,该自由曲面棱镜的制造可采用单点车削机床实现。同时,试制了 8.0~12.0 μm 的长波红外自由曲面棱

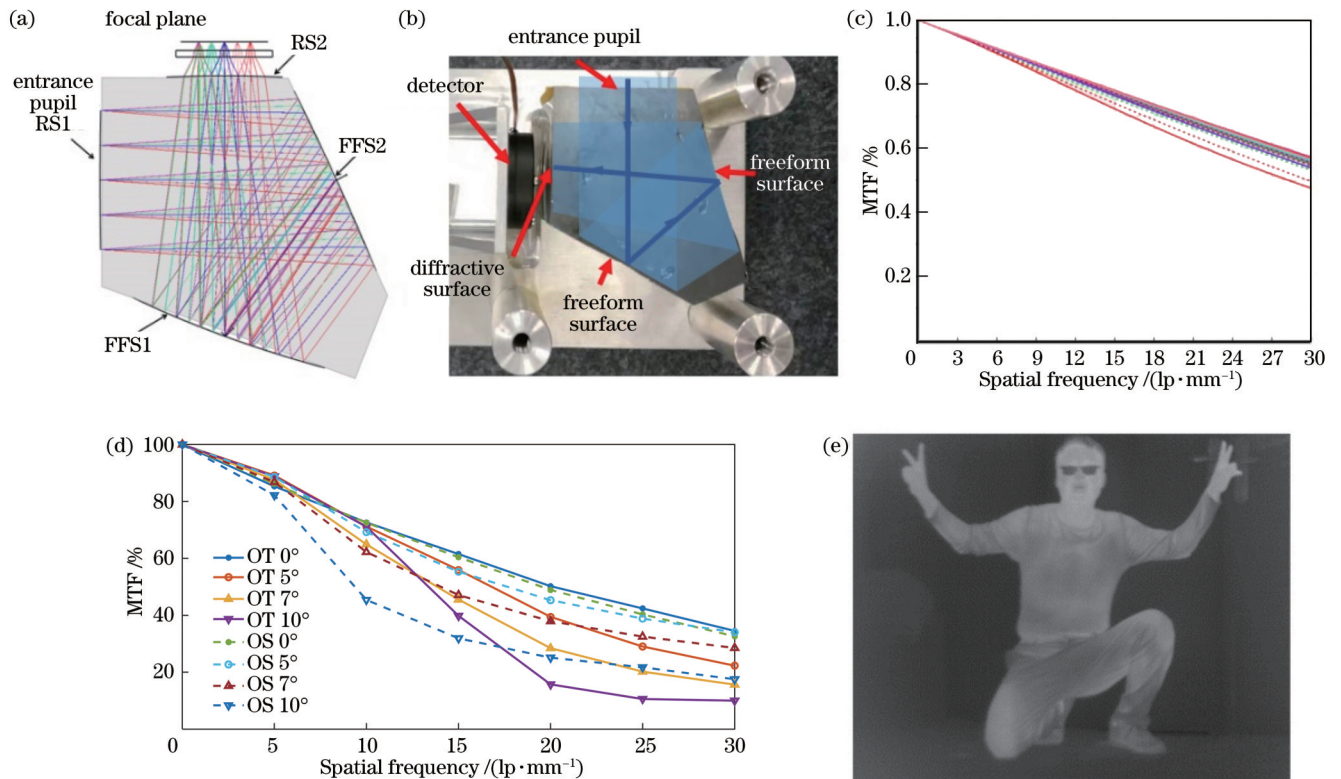


图 13 自由曲面棱镜的制造与测试。(a)长波红外自由曲面棱镜光路图;(b)长波红外自由曲面棱镜样片;(c)设计的 MTF;(d)实测的 MTF;(e)实拍照片

Fig. 13 Manufacture and test of freeform prism. (a) Optical layout of long wave infrared freeform prism; (b) sample of long wave infrared freeform prism; (c) designed MTF curve; (d) measured MTF curve; (e) captured image

镜,各个视场的平均 MTF 在 20 lp/mm 空间频率处均优于 0.2。当前双波段自由曲面棱镜正在研制中。此类系统在航天遥感、机载侦察和红外导引系统等领域中具有十分重要的意义。

参 考 文 献

[1] 田晓航, 薛常喜. 小 F 数红外双波段无热化衍射摄远物镜设计[J]. 光学学报, 2022, 42(14): 1422002.
Tian X H, Xue C X. Athermalization design of small F -number refractive-diffractive telephoto objective lens in infrared dual-band[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(14): 1422002.

[2] 毛文峰, 张新, 曲贺盟, 等. 红外双色宽波段高衍射效率衍射光学系统设计[J]. 光学学报, 2014, 34(10): 1022002.
Mao W F, Zhang X, Qu H M, et al. Broad dual-band kinoform infrared double-layer diffractive optical system design[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(10): 1022002.

[3] de la Barrière F, Druart G, Guérineau N, et al. Compact multichannel infrared camera integrated in an operational detector dewar cooler assembly[J]. Applied Optics, 2018, 57(17): 4761-4770.

[4] Yamazaki S, Inoguchi K, Saito Y, et al. Thin wide-field-of-view HMD with free-form-surface prism and applications [J]. Proceedings of SPIE, 1999, 3639: 453-462.

[5] Hoshi H, Taniguchi N, Morishima H, et al. Off-axial HMD

optical system consisting of aspherical surfaces without rotational symmetry[J]. Proceedings of SPIE, 1996, 2653: 234-242.

[6] Cheng D W, Wang Y T, Hua H, et al. Design of an optical see-through head-mounted display with a low f -number and large field of view using a freeform prism[J]. Applied Optics, 2009, 48(14): 2655-2668.

[7] Kiontke S R. Monolithic freeform element[J]. Proceedings of SPIE, 2015, 9575: 95750G.

[8] Yu J, Shen Z X, Wang Z S. Compact dual band/dual FOV infrared imaging system with freeform prism[J]. Optics Letters, 2021, 46(4): 829-832.

[9] Yu J, et al. Achromatic and athermal catadioptric long wave infrared freeform prism with a diffractive surface[J]. Infrared Physics & Technology, 2022, 123: 104207.

[10] Buralli D A, Morris G M. Effects of diffraction efficiency on the modulation transfer function of diffractive lenses[J]. Applied Optics, 1992, 31(22): 4389-4396.

[11] 卢进军, 刘卫国, 潘永强. 光学薄膜技术[M]. 2版. 北京: 电子工业出版社, 2011.
Lu J J, Liu W G, Pan Y Q. Optical thin film technology[M]. 2nd ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2011.

[12] OptiLayer[EB/OL]. [2022-11-12]. <http://www.optilayer.com>.

[13] Yu J, Shen Z X, Wang X Q, et al. *In situ* noncontact measurement system and two-step compensation strategy for ultra-precision diamond machining[J]. Optics Express, 2018, 26(23): 30724-30739.

Dual-Band Freeform Prism in Middle and Long Wave Infrared Region

Yu Jun^{1,2}, Liu Xiaotian^{1,2}, Niu Xinshang^{1,2}, Jiang Binbin^{1,2}, Jiao Hongfei^{1,2}, Zhang Jinlong^{1,2},
Wang Zhanshan^{1,2*}

¹Key Laboratory of Advanced Micro-Structured Materials, Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China;

²Institute of Precision Optical Engineering, School of Physics Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China

Abstract

Objective Infrared imaging system has been widely applied in infrared night vision, infrared detection, and infrared guidance. However, the detection accuracy of conventional infrared imaging systems in a single wave band is easily affected by regional terrain, ambient temperature, and target camouflage. If an infrared imaging system can obtain the target information in two infrared wave bands at the same time, the interference information can be easily suppressed during complex environment detection applications. The conventional refraction, reflection or reflector dual-band optical systems are usually designed with two channels or a channel including a spectroscope. The former design configuration contains two independent imaging systems, and the latter design configuration contains a reflective system or a broadband achromatic system. To solve the complex configuration of dual-band infrared imaging system, this paper proposes a dual-band freeform prism in the middle and long wave infrared region.

Methods The freeform prism is a highly integrated optical system consisting of multiple asymmetric surfaces. The direct optimization design strategy can easily obtain invalid optical path structures. Therefore, a progressive optimization design strategy that gradually complicates the optical path can be adopted. Firstly, the on-axis reflective system can be designed according to the optical parameters. Then, the off-axis reflective system can be designed based on the above rotationally symmetric system. Finally, the media air in the optical path can be substituted by refractive materials. Additionally, the achromatic and thermal aberration corrections of the infrared freeform prism should also be considered. After the freeform prism fabrication, surface adjustment cannot be conducted, so it is necessary to decrease the influence of the fabrication tolerance sensitivity during the optimization design. When the deviation between the incident angle and the refraction angle of the refraction surface is smaller, the optical path change in this region is less sensitive to small disturbance. As for the reflective surface, the optical path change due to small disturbance depends mainly on the incident angle of the light on the reflector. Based on a low sensitivity optimization method of limiting the tracing ray angle in the design, a dual-band (3.7–4.8 μm and 8.0–12.0 μm) infrared optical system with an F number of 1, a focal length of 20 mm, and a field of view of $21.8^\circ \times 16.4^\circ$ has been designed.

Results and Discussions The modulation transfer functions of the dual-band freeform prism are above 0.79 and 0.67 at a spatial frequency of 20 lp/mm for the middle wave infrared (MWIR) and long wave infrared (LWIR), respectively (Fig. 6). The maximum field curvature is less than 0.05 mm, and the maximum distortion is less than 3.5% (Fig. 7). The distortion of the optical system is only symmetrical about the YOZ plane of the coordinate system, and the most deformation is at the edge of the field of view. The energy concentration of the middle wave infrared channel is greater than 91%, and that of the long wave infrared channel is greater than 78% (Fig. 8). The final optimized color separation film layer structure has been designed by OptiLayer (Fig. 11). When the incidence angles are 31° , 45° and 52° , the average reflectance of the film at 3.7–4.8 μm is greater than 90%, and the average transmittance at 8.0–12.0 μm is greater than 93% (Fig. 12). The diamond machined long wave infrared freeform surface prism and the uncooled infrared detector have been assembled. The LensCheck optical transfer function instrument is adopted to measure the transfer function of the freeform surface prism. After testing, the average transfer function over each field of view is better than 0.2 at 20 lp/mm (Fig. 13), and the captured image at the center and edge field of view are both clear.

Conclusions A dual-band freeform prism in the middle and long wave infrared region has been designed based on low sensitivity optimization method of limiting the tracing ray angle in this paper. When the system is at a spatial frequency of 20 lp/mm, the modulation transfer functions of the designed system are above 0.79 and 0.67 for MWIR and LWIR, respectively. The maximum field curvature is less than 0.05 mm, and the maximum distortion is less than 3.5%. The imaging quality of the optical system is good in the temperature range of -20 – 70°C . According to tolerance analysis, the designed freeform prism can be fabricated by single point diamond turning technique, and a long wave freeform prism with working wavelength range of 8.0–12.0 μm has been fabricated and measured. The average modulation transfer function over each field of view is better than 0.2 at 20 lp/mm. At present, the developed dual-band design configuration in this paper has the advantages of high performance and compact structure.

Key words optical design; freeform prism; infrared dual-band; tolerance analysis