

折衍混合红外双波段变焦光学系统设计

杨洪涛¹, 杨晓帆^{1,2*}, 梅超¹, 陈卫宁¹

(1. 中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 建立了不同类型衍射元件对衍射效率的影响模型, 比较了单层衍射元件、谐衍射元件和双层衍射元件之间衍射效率的差异, 重点分析在红外双波段光学系统中应用双层衍射元件的突出优势, 计算不同材料组合情况下双层元件的平均衍射效率, 以此为基础设计一款适合于高空机载平台的折衍混合红外双波段双视场光学系统。大视场对应的地物分辨率为 1.5 m@16 km, 长焦、短焦分别为 960 mm 和 480 mm, 通过切换反射镜改变光路来实现变焦功能, 保证变焦过程中系统的光轴稳定性。仿真结果表明在 -40~60 °C 的大温差环境下, 系统的 MTF 曲线平滑且接近衍射极限, RMS 半径位于艾里斑半径以内, 二元衍射面的最小特征尺寸为 6.9 μm, 设计结果满足工程使用要求。

关键词: 光学设计; 衍射效率; 红外双波段; 变焦系统

中图分类号: O439 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA20200036

Design of hybrid refractive-diffractive infrared dual-band zoom optical system

Yang Hongtao¹, Yang Xiaofan^{1,2*}, Mei Chao¹, Chen Weining¹

(1. Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In this paper, the influence models of different diffraction elements on diffraction efficiency were established, and the diffraction efficiency among single diffraction element, harmonic diffraction element and double diffraction element was compared. The advantages of using double diffraction elements in infrared optical system were analyzed. The average diffraction efficiency of different material combinations was calculated. Based on this, a hybrid infrared dual-band and dual-field optical system suitable for airborne platform was designed. The resolution of the large field of view was 1.5 m@16 km. The long and the short focal length were 960 mm and 480 mm respectively. The zoom function was realized by switching the mirror to ensure the optical axis stability. The simulation results show that the MTF curves are smooth and close to the diffraction limit under the large temperature difference of -40 - +60 °C. The RMS radius is within the radius of airy spots, and the minimum characteristic size of the binary diffraction surface is 6.9 μm. The design results meet the engineering requirements.

Key words: optical design; diffraction efficiency; infrared double band; zoom system

收稿日期: 2020-03-05; 修订日期: 2020-04-16

基金项目: 国家重点研发计划 (2016YFC0803000)

作者简介: 杨洪涛 (1977-), 男, 研究员, 博士生导师, 博士, 主要研究方向为航空相机总体设计。Email: yanght@opt.ac.cn

通讯作者: 杨晓帆 (1994-), 男, 硕士生, 主要研究方向为航空成像光学系统设计。Email: zflx_369@163.com

0 引言

近年来红外成像技术突飞猛进,广泛服务于安防反恐等方面。传统的红外相机借助大量透镜来校正像差和消色差,面临的问题有系统体积较大、加工费用昂贵、光线透过率低等,而得益于衍射成像技术的发展应用,现有的航空相机已经逐步向小型化目标迈进^[1]。

参考文献 [2] 中高明等人以可见光/红外双波段系统为出发点,引入单层衍射元件进行消色差,但没有考虑衍射效率与波段的关系,可能出现杂光问题;中国科学院西安光学精密机械研究所的王昊等人研究双层衍射元件的衍射效率,并找出在不同波长对下的平均衍射效率关系^[3],该结果对提高双波段系统的衍射效率具有重要的指导作用;参考文献 [4] 中作者建立了衍射元件的平均衍射效率积分模型,设计了含双层衍射元件的红外系统,但衍射面的材料选择单一,尚未考虑替换材料对衍射效率的影响。国外的多数学者重点围绕衍射面的仿真及加工检测做了深入研究,例如在参考文献 [5] 中作者提出参数化建模和标量衍射方法来模拟衍射面型,误差精度仅为 1%~2%;美国罗切斯特大学的研究员介绍了凸面反射衍射光栅的设计、加工及检测技术,并演示了定量波前测量方法^[6],相比而言,国内的研究重点多集中在衍射/折射系统的设计层面,在实际工程技术的研究方面与国外存在一定差距。此文分析了在红外系统中应用 3 种衍射元件的差异,依据材料搭配组合法来确定基底材料,结合工程要求设计了含双层衍射面的消色差系统,引入折转反射镜切换大小视场,最终的性能评价结果表明该光学系统满足使用要求。

1 衍射元件特性与效率分析

1.1 衍射元件的优良特性

衍射元件具有不同于折射透镜的负色散特性,在宽波段系统中引入该元件可简化消色差的复杂度^[7]。折射、衍射元件的色散表示如下:

$$V_1 = \frac{n_m - 1}{n_s - n_1}, V_2 = \frac{\lambda_m}{\lambda_s - \lambda_1} \quad (1)$$

式中: n_m 、 n_s 、 n_1 分别代表材料在中波、短波和长波情况下的折射率; λ_m 、 λ_s 、 λ_1 表示设计波段的中间和两端

数值。假设透镜材料为硒化锌,红外系统波长为 8~12 μm , 计算可得 $V_1 = 57.4$, $V_2 = -2.5$ 。折射、衍射元件的阿贝数为一正一负,因此经合理组合搭配后即可消色差^[8]。

环境温度的变化会带来镜片曲率、厚度等微小改变,假设材料折射率为 n , 线膨胀系数为 α_g , 结合透镜参数与温度的关系,推导出折射、衍射透镜的热系数方程如下:

$$X_r = \alpha_g - \frac{1}{(n-1)} \left(\frac{dn}{dT} - n \frac{dn_0}{dT} \right) \quad (2)$$

$$X_d = \frac{1}{f} \frac{df}{dT} = 2\alpha_g + \frac{1}{n_0} \left(\frac{dn_0}{dT} \right) \quad (3)$$

对比发现,折射率温度系数对于折射材料影响明显,热差特性在红外波段表现更为严重,但是衍射元件基本不受该系数影响,理论上采用折衍混合透镜设计也有利于消色差^[9]。

1.2 衍射元件效率分析

从衍射效率角度考虑,单层衍射元件的波段适用范围很窄,谐衍射元件适用于多光谱窄波段系统,在红外双波段系统中更适合采用双层衍射元件完成设计工作^[10]。通过分析衍射理论,令 λ_0 代表设计波长, n 代表基底材料的折射率, H 表示衍射面的深度值^[11], 单层衍射元件的相位函数表示如下:

$$\phi(\lambda) = \frac{2\pi\lambda_0}{\lambda} \times \frac{n(\lambda) - 1}{n(\lambda_0) - 1} \quad (4)$$

对于谐衍射元件,引入参数 p , p 为大于 1 的整数,相位函数如下所示:

$$\phi(\lambda) = \frac{p \times 2\pi\lambda_0}{\lambda} \times \frac{n(\lambda) - 1}{n(\lambda_0) - 1} \quad (5)$$

双层衍射元件 ($m=1$) 的相位函数方程如下:

$$\phi(\lambda) = \frac{2\pi H_1}{\lambda} \times [n_1(\lambda) - 1] - \frac{2\pi H_2}{\lambda} \times [n_2(\lambda) - 1] \quad (6)$$

单层衍射元件和谐衍射元件均以硒化锌材料作为基底,两者的设计波长为 9 μm , 后者的衍射级次分别为 $m=3$ 、4、5、6、7, 双层衍射元件材料的选取原则是高低折射率搭配,这样有利于消色差,选硒化锌和锗作为基底材料,两个设计波长分别取为 4 μm 和 9 μm 。经 MATLAB 数据拟合得出衍射效率曲线如图 1 所示,单层衍射元件的衍射效率在设计波长附近保持在 90% 以上,随着波段的增宽其效率明显降低,谐衍射

元件可应用在多个窄波长范围内,当衍射级次增大后适用的谱段宽度逐渐缩窄,而双层衍射元件在 3~12 μm 范围内可以保持较高的平均衍射效率,在两个设计波长处的效率均接近 100%,因此,该类型衍射元件适用于红外宽波段光学系统当中。

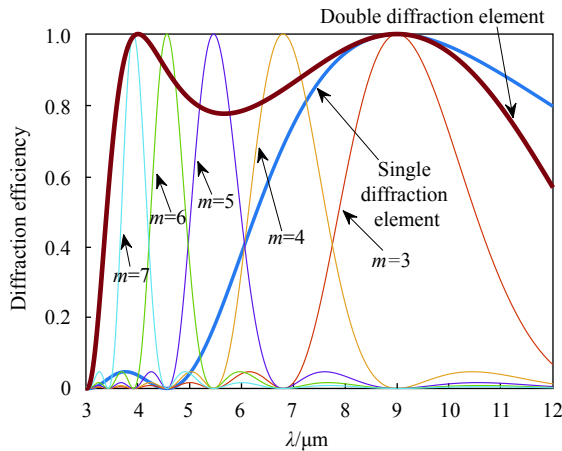


图 1 3 种衍射元件的衍射效率对比曲线

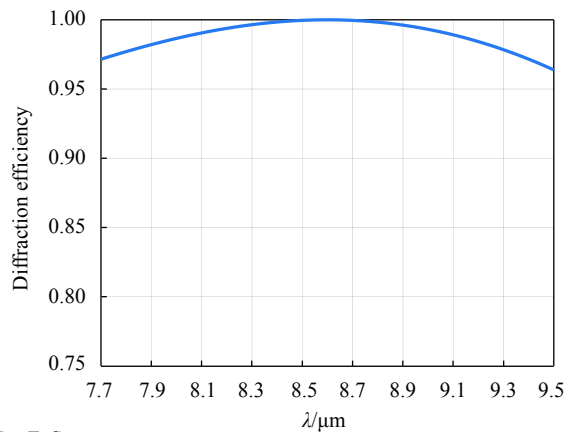
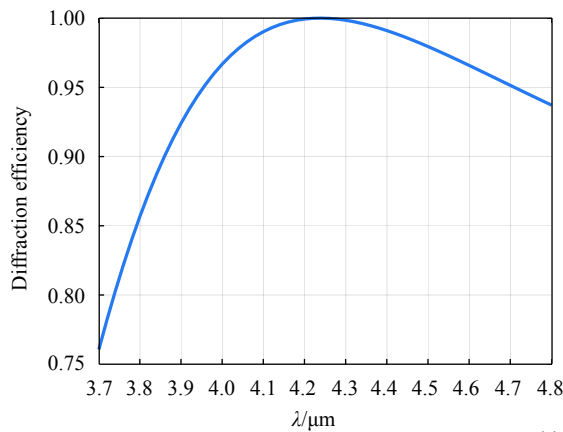
Fig.1 Diffraction efficiency comparison curves of three diffraction elements

1.3 衍射面基底材料的选择

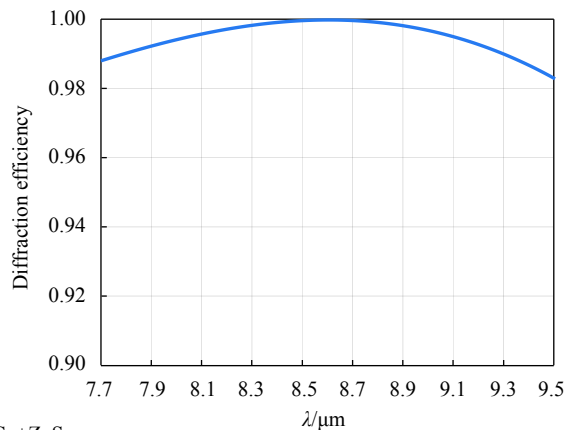
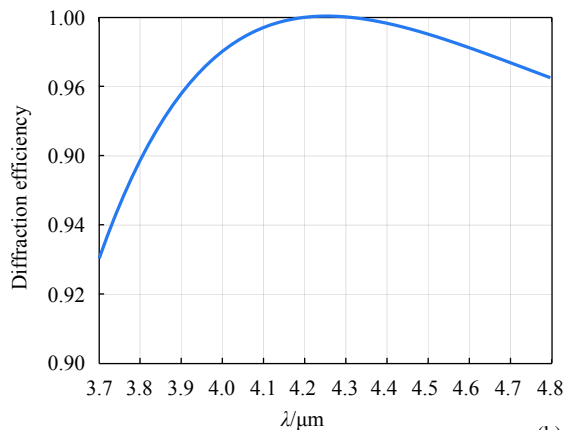
文中设计的红外双波段系统涉及光谱较宽,双波段分别为 3.7~4.8 μm 和 7.7~9.5 μm,拟引入双层衍射元件完成像差校正工作,设计波长分别取两波段的中间数值,即 4.25 μm 和 8.6 μm,红外双波段适用的基底材料有限,按照高低折射率搭配法进行组合,分别对常见的四种红外材料进行分析。第一组为锗和硒化锌,第二组为锗和硫化锌,第三组为锗和氟化铍。双波段系统的衍射效率取决于各自波段的影响之和,设定单个波段的影响权重为 1/2,则双波段系统的平均衍射效率可推导如下:

$$\eta' = \frac{1}{2(\lambda_1 - \lambda_2)} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \text{sinc}^2 \left(\frac{\varphi(\lambda)}{2\pi} - 1 \right) d\lambda + \frac{1}{2(\lambda_3 - \lambda_4)} \int_{\lambda_3}^{\lambda_4} \text{sinc}^2 \left(\frac{\varphi(\lambda)}{2\pi} - 1 \right) d\lambda \quad (7)$$

图 2 显示出在 3 种材料组合情况下,双层衍射元件的衍射效率变化趋势,在双波段区间内衍射效率基本维持在 90% 以上,组合一的衍射效率在设计波长附近明显降低,边缘波长处衍射效率较低,组合 2、



(a) Ge+ZnSe



(b) Ge+ZnS

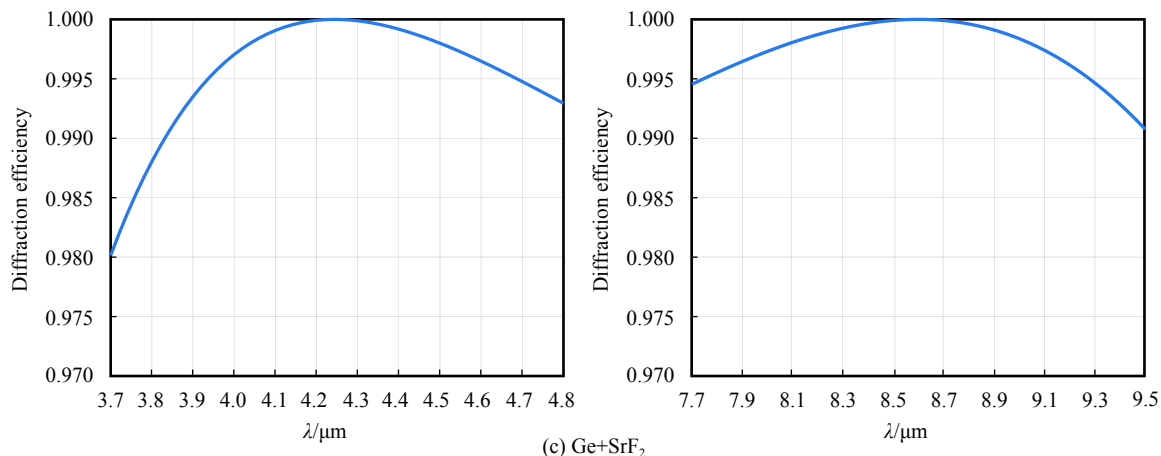


图 2 不同材料组合下中波红外和长波红外的衍射效率

Fig.2 Diffraction efficiencies of medium-wave infrared and long-wave infrared under different material combinations

3 的衍射效率均位于 93% 以上, 在长波红外区间内的效率要优于中波红外。

表 1 以数据量化的方式精确分析出: 各材料组在长波处的衍射效率均高于短波, 选择锗和氟化铯组合可获得最佳的衍射效率, 双波段系统的平均衍射效率最高可达到 99.65%, 以上分析数据为双层衍射面基底材料的选择提供重要依据。

表 1 不同材料搭配条件下的衍射效率

Tab.1 Comparison of diffraction efficiency under different material collocation conditions

Material type	Ge+ZnSe	Ge+ZnS	Ge+SrF ₂
3.7-4.8 μm	95.30%	98.71%	99.58%
7.7-9.5 μm	98.91%	99.57%	99.72%
Average efficiency	97.11%	99.14%	99.65%

2 红外双波段折衍混合变焦光学系统设计

2.1 红外双波段变焦系统结构选型

文中设计的高空机载红外双波段系统旨在对地面目标进行探测和信息获取, 运行高度约为 16 km, 探测的地面目标大小为 1.5 m×1.5 m, 首先采用大视场进行目标方位探测与跟踪, 切换小视场对目标进行识别与观察, 通过折转反射镜的切入与切出来实现视场的变化。探测器选用制冷型红外双色探测器, 分辨率大小为 640×512, 像元大小为 15 μm×15 μm。所设计光学系统的详细指标参数如表 2 所示。

表 2 设计指标

Tab.2 Design indicators

Indicator	Value	
Wavelength/μm	3.7-4.8	7.7-9.5
Entrance pupil diameter/mm	240	
Optical length/mm	412	404
Focal length/mm	480	960
F number	2	4
Field of view/(°)	1.468	0.734
Cover area/mm ²	320×256	160×128
Cold stop efficiency	100%	
Paraxial image height/mm	6.15	
Temperature/°C	-40 - +60	
MTF	Full field @33lp/mm ≥ 0.25	

该光学系统的视场较小, 为实现消色差的目的, 考虑采用 R-C 折反系统设计, 该结构在校正单色像差、消色差、适应大温差环境方面具有显著优势, 以其口径光路方式完成系统设计, 引入反射镜完成双视场光路切换, 解决了移动式变焦的光轴稳定性问题。R-C 光学结构包括前端的主次镜和后部的校正镜组, 合理改变两镜的圆锥系数可满足消球差和慧差要求, 校正镜组以双层衍射元件消除残留像差, 在满足设计指标 (表 2) 的前提下, 进一步实现机载航拍系统轻量化的设计目标^[12]。

2.2 光学系统信噪比的计算

远距离探测系统需要进行严格的信噪比验证, 确保系统口径、距离等参数达到最低信噪比要求, 信噪比的常用计算方法如下:

$$SNR = \frac{\pi\tau\tau_0 D_0^2 D^* I_0}{4\sqrt{(A_d \Delta f) R^2}} \quad (8)$$

已知探测距离 $R = 16 \text{ km}$, 口径 $D_0 = 240 \text{ mm}$, 大气透过率 τ 和系统透过率 τ_0 一般取为 0.4 和 0.7, 探测率 $D^* = 1 \times 10^{10} \text{ W}^{-1} \cdot \text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2}$, 单个像元面积 $A_d = 225 \mu\text{m}^2$, Δf 取决于积分时间 t , 且 $\Delta f = 1/(2t)$, 即当 $t = 5 \text{ ms}$ 时, 对应 $\Delta f = 100 \text{ s}^{-1}$. 目标有效辐强度 I_0 在不同波段下的数值不同, 假设热源目标温度为 400 K, 求出指定目标对应的辐射强度 I 为:

$$I = \frac{\epsilon\sigma T^4}{\pi} A = 728 \text{ W} \cdot \text{sr}^{-1} \quad (9)$$

参考黑体辐射表计算出中波红外和远红外的辐射占比约为 0.099 3 和 0.144 0, 即地面目标在 3.7~4.8 μm 和 7.7~9.5 μm 波段的有效辐射强度分别为 $I_1 = I \times 0.0993 = 72.29 \text{ W} \cdot \text{sr}^{-1}$ 、 $I_2 = I \times 0.1440 = 104.83 \text{ W} \cdot \text{sr}^{-1}$. 根据上述结果求出光学系统的信噪为 $SNR_1 = 29 \text{ dB}$ 、 $SNR_2 = 42 \text{ dB}$, 因此, 该双波段光学系统的指标满足信噪比要求。

2.3 折衍混合系统具体设计方案

折反系统的主次镜均为双曲面, 优化设计变量包括曲率半径、间隔、二次曲面系数等, 首先计算长焦距小视场的初始结构, 主镜相对孔径的确定既要保证次镜的遮拦比较小, 同时也要避免增大加工难度, 借助软件自动求解最佳的像面位置, 加入折转反射镜改变光线传播路径同时缩短系统轴向长度, 其次选择在主镜后部加入衍射校正镜扩大视场完成短焦部分的光路设计, 同时在一次像面后设置中继像转组保证出瞳与冷光阑大小匹配, 抑制杂散光进入接收器, 最后将长焦、短焦分光路系统合二为一, 共用主次镜结构。R-C 系统初始结构计算公式如下:

$$\begin{cases} l_2 = (-f' + \Delta) / (\beta - 1) \\ \alpha = l_2 / f' \\ R_2 = \alpha\beta R_1 / (\beta + 1) \\ d = f' (1 - \alpha) \\ (e_1)^2 = 1 + 2\alpha / [(1 - \alpha)\beta^2] \\ (e_2)^2 = \{ [2\beta / (1 - \alpha)] + (\beta + 1)(1 - \beta)^2 \} / (\beta + 1)^3 \end{cases} \quad (10)$$

式中: l_2 为副镜位置; α 为次镜遮拦比; Δ 为焦点伸出量; R 为两个镜面的曲率半径; e_1 和 e_2 为面型偏心率。根据经验当遮拦比过大将影响系统接收的光能量, 表 3 比较了在入瞳口径一定的条件下, 主镜相对孔径

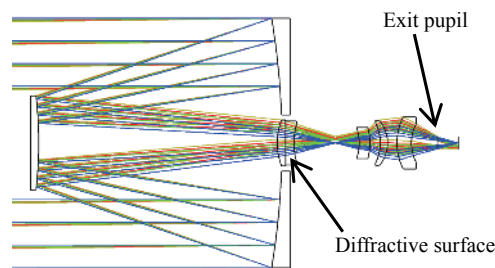
对次镜遮拦比、曲率半径及非球面系数的影响, 选择最佳系统参数并对结构二次优化。表中参数 A 代表主镜的相对孔径, O 代表次镜遮拦比, R_1 、 R_2 代表主、次镜的曲率半径, K_1 、 K_2 表示主、次镜的圆锥系数。

表 3 R-C 系统初始结构表

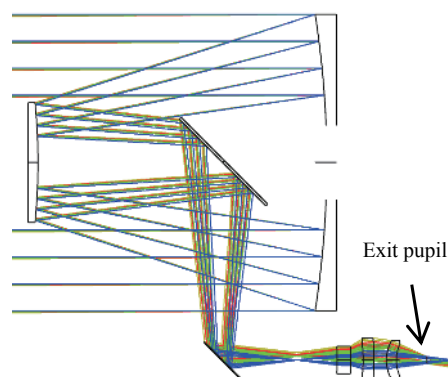
Tab.3 Initial structure of R-C system

A	O	R_1/mm	R_2/mm	K_1	K_2
1/1.5	0.34	-720	-401	-1.15	-6.61
1/2	0.40	-960	-773	-1.34	-15.70
1/2.5	0.45	-1200	-1436	-1.64	-45.65
1/3	0.49	-1440	-2811	-2.07	-189.65

图 3 即为设计的共口径双通道光学系统二维图, 主镜口径为 240 mm, 增加反射镜的作用在于改变光线的传播路径, 当反射镜位于光路之外时, 右方的探测器接收到来自大视场的光线, 当电机驱动反射镜切入光路后, 来自次镜的光线折转入下方的探测器, 便于进行目标识别, 双通道光路均采用红外双波段进行探测。



(a) Short focus system diagram (Mirror leaves the path of light)



(b) Long focus system diagram (Mirror enters the path of light)

图 3 折衍混合双视场光学系统二维图

Fig.3 2D diagram of a hybrid refractive-diffractive dual-field optical system

双层衍射元件置于短焦光路部分,仅依靠两片衍射透镜即可取代传统复杂的校正镜组完成像差校正工作,选择衍射面材料为锗和氟化铯,两片透镜以微米量级密接并在密接的两个表面分别加工衍射环带,中间介质为空气,两个表面的衍射环带位置和数量完全相同,每个衍射面共计有 242 个环带,最小环带周期为 56 μm ,经理论分析可实现高达 99.65% 的衍射效率。中继像转组采用 3 片硫系玻璃完成设计,在校正像差的同时也保证系统的出瞳处于探测器的冷阑位置,因此可实现极高的冷光阑效率。

图 4 显示了衍射面的相位、线频参数随透镜口径的变化关系,随着镜面口径的增大,环带间隔逐渐变窄,透镜中心部分的环带密集度比较稀疏,最高线频在 21 mm 附近,其数值为 18 period/mm,经分析可知最小环带周期为 55 μm ,考虑到衍射效率的大小,一般将量化台阶数按 8 台阶进行设计,最终的特征线宽为 6.9 μm ,符合单点金刚石车削的加工条件。

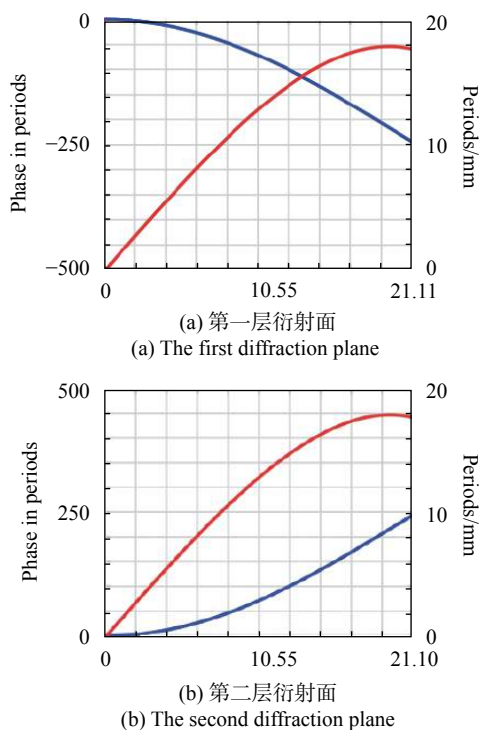


图 4 二元衍射面相位曲线图
Fig.4 Phase diagram of binary diffraction surface

2.4 像质分析

对光学系统进行像质分析可以客观了解设计结果的优劣程度,这里选择具有代表性的 MTF 曲线、均方根半径、衍射环包围能量和色差曲线来说明所设计

系统的成像效果。

图 5 反映了在不同高低温状况下短焦处的 MTF 曲线,曲线低频处的数值代表系统对物体外形轮廓的传递能力,高频数值直接关系到光学系统对物体表面细节信息的传递效果,在无热化设计之后系统的传函曲线接近衍射极限,边缘视场的数值相较于中心视场略有降低,但依然保持在 0.3 以上。此外由气压和温差导致的像面离焦也不容忽视,严重时会产生模糊虚化的像质,根据焦深公式有:

$$\Delta = \pm 2\lambda F^2 \tag{11}$$

以设计波长 $\lambda = 8 \mu\text{m}$ 计算得到两部分光路的焦深,具体数值分别为 128 μm 和 512 μm ,优化后系统的离焦变化量较小,最大数值均未超出焦深范围,表明采用光学被动方式可以实现工程探测要求。

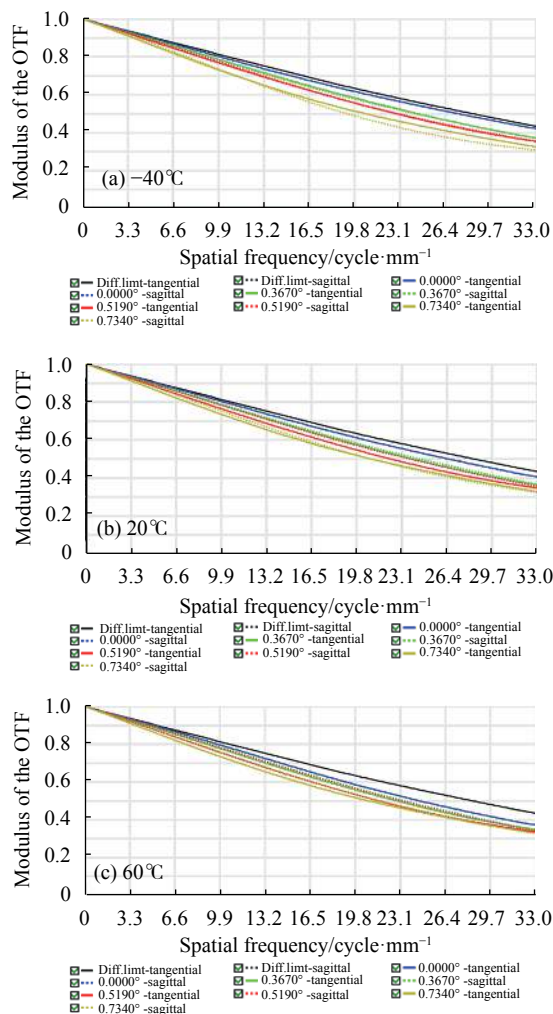


图 5 不同温度条件下光学系统的 MTF 数值(短焦处)
Fig.5 MTF values of optical systems at different temperatures (Short focal points)

图 6 给出了经衍射面校正后,系统在常温条件下的均方根半径,数值显示系统的艾里斑半为 18.73 μm ,所有视场下的 RMS 数值和几何半径数值明显低于艾里斑半径,球差和彗差在合理范围之内,弥散斑图像效果良好。

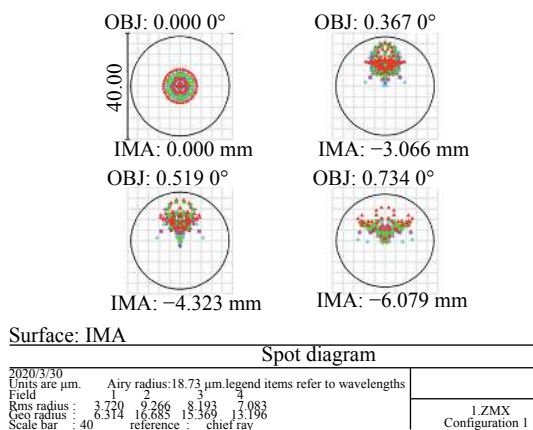


图 6 常温条件下光学系统的 RMS 数值

Fig.6 RMS of optical systems at room temperature

不同波长造成的色差情况如图 7 所示,随着光瞳半径的增加,系统的轴向色差逐渐减小,在 0.707 孔径处的最大色差值约为 70 μm ,边缘光瞳处的数值仅为 40 μm 左右,不同波长光线的像点均位于系统焦深以内,满足色差容限要求。

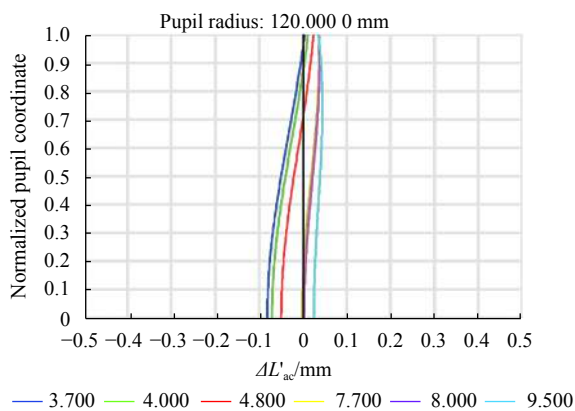


图 7 系统的轴向色差曲线 (短焦处)

Fig.7 Axial color difference curve of the system (short focal points)

图 8 显示了该系统衍射能量的分布情况,分析上图可知,全视场有 80% 的能量落在半径为 20 μm 的圆内,所有视场下的衍射能量非常接近衍射极限,表明探测器像元接收到的能量相对比较集中,高低温环境下状况与此类似。

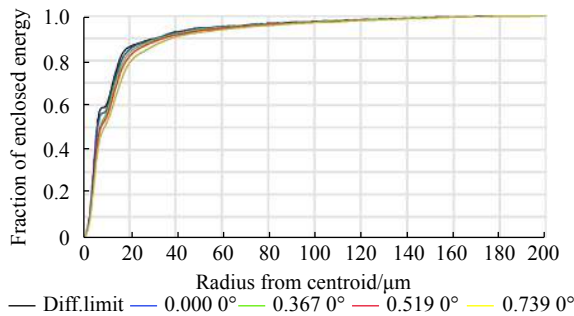


图 8 衍射圈入能量图

Fig.8 Diffraction circle energy diagram

3 结论

基于衍射光学理论,建立多类型衍射元件的衍射效率模型,经 MATLAB 拟合分析衍射效率在红外双波段的区别,重点研究双层衍射元件在不同基底材料下的衍射效率差异,根据对比结果选出最佳的材料组合,即锗和氟化铟。考虑到折衍射混合系统在消色差和消热差上的显著优势,设计一种可搭载于高空机载平台的红外双波段双视场光学系统,前端共口径部分以 R-C 反射镜汇集光能量,后端以双光路方案分别设计长、短焦距分系统,采用切换反射镜的方式实现光学变焦功能,经光学性能分析可知,短焦处的 MTF 数值在奈奎斯特频率处平均为 0.35,长焦处平均约为 0.30,系统的弥散斑较小,探测器像面接收到的能量比较集中,该系统可用于对地面目标的探测与信息获取。

参考文献:

- [1] Ma Zebin, Kang Fuzeng, Wang Hao. Analysis of influence of double-layer BOE machining error on diffraction efficiency [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(9): 0918001. (in Chinese)
马泽斌,康福增,王昊. 双层BOE加工误差对衍射效率的影响分析[J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(9): 0918001.
- [2] Gao Ming, Xu Huangrong, Liu Jun, et al. Design of dual band common light path integrated focus optical system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 45(5): 0518003. (in Chinese)
高明,许黄蓉,刘钧,等. 折/衍射双波段共光路齐焦光学系统设计[J]. *红外与激光工程*, 2017, 45(5): 0518003.
- [3] Wang Hao, Kang Fuzeng, Zhao Wei, et al. An optical design for dual-band infrared diffractive telescope [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2019, 38(1): 39-43.
- [4] Yang Liangliang, Shen Fahua, Liu Chenglin, et al. Design of

- infrared dual-band non-thermalized optical system with double-layer diffraction optical elements [J]. *Infrared Technology*, 2019, 41(8): 699-704. (in Chinese)
- 杨亮亮, 沈法华, 刘成林, 等. 含有双层衍射光学元件的红外双波段无热化光学系统的设计[J]. 红外技术, 2019, 41(8): 699-704.
- [5] Nemes-Czopf Anna, Bercsényi Dániel, Erdei Gábor. Simulation of relief-type diffractive lenses in ZEMAX using parametric modelling and scalar diffraction [J]. *Applied Optics*, 2019, 58(32): 8931-8942.
- [6] Xu Di, Owen Joseph D, Papa Jonathan, et al. Design, fabrication, and testing of convex reflective diffraction gratings [J]. *Optics Express*, 2017, 25(13): 15252-15267.
- [7] Wang Jikai. Diffraction efficiency analysis of infrared wide-band multilayer diffraction optical element[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2016. (in Chinese)
- 王继凯. 红外宽波段多层衍射光学元件衍射效率分析[D]. 长春: 长春理工大学, 2016.
- [8] Zhao Xiang, Guo Yan, Zhang Peng, et al. Design of infrared dual-band optical system based on double-layer diffraction element [J]. *Electro-optic & Control*, 2017, 24(10): 85-89. (in Chinese)
- 赵翔, 郭岩, 张鹏, 等. 基于双层衍射元件的红外双波段光学系统统设计[J]. 电光与控制, 2017, 24(10): 85-89.
- [9] Liang Ling, Zhang Liang. Thermal design of hybrid infrared optical systems[C]//2007 Symposium on Development and Application of Photoelectric Detection and Guidance Technology, 2007: 120-124. (in Chinese)
- 梁玲, 张良. 折/衍混合红外光学系统无热设计[C]//2007年光电探测与制导技术的发展与应用研讨会论文集. 2007: 120-124.
- [10] Yang Liangliang. Research on diffraction efficiency of multilayer diffraction optical element[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2013. (in Chinese)
- 杨亮亮. 多层衍射光学元件衍射效率的研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2013.
- [11] Yang Hongfang. A modified model of scalar diffraction theory for multilayer diffraction optical elements[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2018. (in Chinese)
- 杨红芳. 多层衍射光学元件的标量衍射理论修正模型研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2018.
- [12] Xue Qingsheng. Optical design and stray light analysis of a fold-trans large diameter star sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 407(2): 0222001. (in Chinese)
- 薛庆生. 折反式大口径星敏感器光学设计及杂散光分析[J]. 光学学报, 2016, 407(2): 0222001.