

大口径折反式中波红外衍射望远镜系统设计

周岩 吴时彬 汪利华 李杰 杜俊峰 边疆

Design of catadioptric middle infrared diffractive telescope system with large aperture

ZHOU Yan, WU Shibin, WANG Lihua, LI Jie, DU Junfeng, BIAN Jiang

引用本文:

周岩, 吴时彬, 汪利华, 等. 大口径折反式中波红外衍射望远镜系统设计[J]. 应用光学, 2021, 42(5): 767–774. DOI: 10.5768/JAO202142.0501002

ZHOU Yan, WU Shibin, WANG Lihua, et al. Design of catadioptric middle infrared diffractive telescope system with large aperture[J]. Journal of Applied Optics, 2021, 42(5): 767–774. DOI: 10.5768/JAO202142.0501002

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0501002>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

红外折衍混合摄远光学系统无热化设计

Athermalization design of infrared refractive–diffractive telephoto objective

应用光学. 2017, 38(1): 12–18 <https://doi.org/10.5768/JAO201738.0101003>

大口径长焦距变焦光学系统设计

Design of large aperture and long focal length zoom optical system

应用光学. 2018, 39(5): 644–649 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0501009>

大口径超长焦距紧凑型光学系统设计

Design of compact optical system with large aperture and ultra long focal length

应用光学. 2018, 39(5): 638–643 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0501008>

大口径红外离轴三反光学系统设计及公差分析

Design and tolerance analysis of infrared off–axis three–mirror optical system with large aperture

应用光学. 2018, 39(6): 803–808 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0601007>

大口径光纤倒像器制备工艺研究

Research on preparation technology of optical fiber image inverters with large aperture

应用光学. 2021, 42(4): 735–742 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0405001>

红外自适应系统中双波段望远镜与红外物镜设计

Design of dual–waveband telescope and infrared objective in infrared adaptive system

应用光学. 2017, 38(1): 19–23 <https://doi.org/10.5768/JAO201738.0101004>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2021) 05-0767-08

大口径折反式中波红外衍射望远镜系统设计

周 岩^{1,2}, 吴时彬¹, 汪利华¹, 李 杰¹, 杜俊峰¹, 边 疆¹

(1. 中国科学院 光电技术研究所, 四川 成都 610209; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 为实现空间红外望远镜的高分辨率探测, 基于 Schupmann 消色差理论, 开展了大口径折反式中波红外衍射望远镜系统的设计及消热差模型研究。设计了口径 1 m、 F 数为 2、全视场 0.12° 、波段 $3.8\ \mu\text{m}\sim 4.2\ \mu\text{m}$ 的折反式中波红外衍射望远镜系统, 其主镜及校正镜均为平面衍射透镜, 中继系统采用卡塞格林折反式结构, 再聚焦及三次成像系统均为折射式结构, 对系统进行了公差、鬼像及冷反射分析。设计结果表明: 在 $-20\ ^\circ\text{C}\sim 60\ ^\circ\text{C}$ 温度下, 系统的 MTF 在 16.7 lp/mm 范围内均大于 0.7, 接近衍射极限, 且具有 100% 冷屏效率, 公差满足现有加工装配水平; 鬼像能量为 0.1%, 对目标信号的影响较小; 冷反射等效温差 (NITD) 随温度的变化量小于探测器噪声等效温差 (NETD)。该系统可为更大口径红外衍射望远镜系统的设计提供参考。

关键词: 光学设计; 大口径; 折反式; 红外衍射望远镜; 无热化

中图分类号: TN216; TH703

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202142.0501002

Design of catadioptric middle infrared diffractive telescope system with large aperture

ZHOU Yan^{1,2}, WU Shibin¹, WANG Lihua¹, LI Jie¹, DU Junfeng¹, BIAN Jiang¹

(1. Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: To achieve the high-resolution detection of space infrared telescopes, based on the Schupmann achromatic theory, the design and athermalization model of catadioptric middle infrared diffractive telescope system with large aperture were studied. An optical system which had an aperture of 1 m, F -number of 2, full field of view of 0.12° , waveband of $3.8\ \mu\text{m}\sim 4.2\ \mu\text{m}$ was designed, the primary mirror and correction mirror were plane diffractive lenses, the relay system adopted catadioptric Cassegrain structure, and the refocusing and three times imaging systems used refractive structure, then the tolerance, ghost image and cold reflection of the system were analyzed. The design results show that at the temperature of $-20\ ^\circ\text{C}\sim 60\ ^\circ\text{C}$, the MTF of the system is greater than 0.7 in the range of 16.7 lp/mm, close to the diffraction limit, and has 100% cold shield efficiency. The tolerance of system satisfies requirements of fabrication, the ghost image energy is 0.1%, which has little influence on the target signal, and the Narcissus induced equivalent temperature difference (NITD) value of cold reflection with temperature is less than noise equivalent temperature difference (NETD). The system can provide reference for the design of larger aperture infrared diffractive telescope system.

Key words: optical design; large aperture; catadioptric; infrared diffractive telescope; athermalization

引言

现如今空间红外望远镜正在朝着高分辨率、轻量化的方向发展。提高望远镜分辨率最有效的途径之一是增加系统口径,但随着口径的增大,传

收稿日期: 2021-01-07; 修回日期: 2021-02-09

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2016YFB0500200)

作者简介: 周岩 (1999—), 男, 硕士研究生, 主要从事光学设计研究。Email: 1613282169@qq.com

通信作者: 吴时彬 (1963—), 男, 研究员, 硕士生导师, 主要从事大口径光学非球面系统设计、加工和检测技术研究。Email: sbwu@ioe.ac.cn

统红外反射式望远镜的质量也会极大地增加,难以满足轻量化发展需求^[1]。因此亟需探索新的技术来实现轻量化大口径红外望远镜的构建,在诸多技术中,衍射成像技术是一种值得探索的解决方案。它以平面衍射元件为主镜,具有面型公差宽松、质量轻的特点,可以有效地解决传统反射式红外望远镜分辨率与质量轻之间的矛盾^[2]。

近年来国内外开展了很多关于衍射望远镜系统的研究。2010年,美国国防高级研究计划局(DARPA)提出了MOIRE计划,其系统主镜为20 m的薄膜衍射元件、成像波段为580 nm~620 nm,并于2014年开展了相关的光路验证实验^[3]。在国内,中科院光电所于2012年到2014年相继研制了工作于480 nm~650 nm波段口径为80 mm和400 mm的折射式薄膜衍射望远镜系统,并制作样机开展了一系列的外景成像试验^[4];2019年,设计了工作于可见光波段的口径1 m级离轴四反式衍射望远镜系统^[5]。中科院长春光机所于2017年设计了5 m口径、工作于680 nm~720 nm波段的离轴三反式薄膜衍射望远镜系统,并对衍射元件的加工技术进行了研究^[6]。2016年,中科院西安光机所设计了3 m口径、工作波段为7.7 μm~10.3 μm的非制冷型折射式红外衍射望远镜系统^[7],获得了良好的成像效果,但该文缺少系统的消热差设计、公差及杂散光分析的报告。综上所述,目前国内外在可见光衍射望远镜领域已经取得了很多进展,但有关大口径红外衍射望远镜系统的研究却较少,且大多未充分考虑衍射元件所引起的额外杂散光以及温度变化对系统的影响,因此还需开展更深入的研究工作。

本文在分析了红外衍射望远镜系统设计原理及消热差模型的基础上,根据系统指标设计了一套大口径制冷型折反式中波红外衍射望远镜系统,并对系统进行了公差、鬼像及冷反射分析,确定了系统的公差敏感项、鬼像及冷反射特性。设计结果表明,该系统的像质、公差水平及鬼像能量占比均满足实际加工和应用需求,系统存在一定的冷反射效应,但其随温度的变化量较小,可以通过一次非均匀性校正来实现抑制。

1 基本理论分析

1.1 衍射望远镜系统基本理论

单片衍射元件的色散非常大,只能在很窄的

波段内实现光束聚焦。因此要实现宽波段衍射望远镜系统的设计,就必须对衍射主镜的大色散进行校正。不同于传统折射系统采用组合不同色散玻璃的消色差方法,衍射望远镜系统采用的是Schupmann消色差理论^[8]:即衍射主镜的色差可以通过在其中继系统的共轭位置处放置一个具有相同色散、相反光焦度的衍射元件来校正,两者满足下列关系:

$$n = \frac{F_N^\#}{F_1^\#} \quad (1)$$

$$\varphi_1 = -n^2 \varphi_N \quad (2)$$

$$D_N = n D_1 \quad (3)$$

$$l_N = n l_1 \quad (4)$$

式中: $F_1^\#$ 和 $F_N^\#$ 分别为衍射主镜和衍射校正镜的 F 数; φ_1 和 φ_N 分别为两者的光焦度; D_1 和 D_N 分别为两者的口径; l_1 和 l_N 则分别为衍射主镜至中继镜和中继镜至衍射校正镜的距离; n 为中继系统的垂轴放大率; N 表示第 N 个元件为衍射校正镜。

衍射望远镜系统光路如图1所示^[8]。入射光经过衍射主镜发生色散,不同波长的光沿不同方向传播,然后经过中继系统重新会聚为一点,再通过衍射校正镜将主镜产生的色差消除,校正后的光通过再聚焦系统投射到探测器光敏面上,进而实现成像。

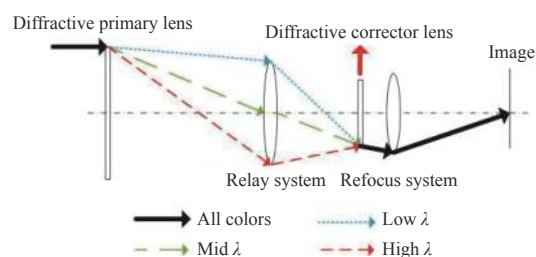


图1 衍射望远镜系统结构图

Fig. 1 Structure of diffractive telescope system

1.2 红外衍射望远镜系统消热差模型

红外光学系统的曲率半径、元件间隔等参数都会随着温度变化发生较大的变化,这将导致系统焦平面与探测器光敏面发生较大的偏离,从而影响成像质量,所以在设计时必须考虑消热差。目前主要的消热差方法有光学被动法、机械被动法、机械主动法3种方法。其中光学被动法具有成本低、性能稳定等优点,因此本文选用该方法进行系统的无热化设计^[9]。

对于传统红外光学系统,在利用光学被动法时系统必须同时满足光焦度、消色差、消热差条件^[10-11],

其公式表示如下:

$$\sum_{i=1}^k \frac{h_i}{h_1} \varphi_i = \varphi \quad (5)$$

$$\frac{1}{\varphi} \sum_{i=1}^k \frac{h_i^2}{h_1^2} W_i \frac{\varphi_i}{\varphi} = 0 \quad (6)$$

$$\frac{1}{\varphi} \sum_{i=1}^k \frac{h_i^2}{h_1^2} T_i \frac{\varphi_i}{\varphi} = -\alpha_h L \quad (7)$$

式中: h_i 为第一近轴光线在第 i 元件的高度; φ_i 为第 i 元件的光焦度; φ 为系统的总光焦度; k 为系统光学元件总数; T_i 和 W_i 分别为第 i 元件的热差和色差系数; α_h 为镜筒材料的线膨胀系数; L 为镜筒长度。

但对于红外衍射望远镜系统, 计算热差时还需要考虑主镜和校正镜的共轭关系。先去除对(7)式的简化^[12], 然后将(2)式和(3)式带入(7)式可得:

$$-\frac{1}{\varphi} \left[\sum_{i=2, i \neq N}^k \frac{h_i^2}{h_1^2} T_i \frac{\varphi_i}{\varphi} + (T_1 - T_N) \frac{\varphi_1}{\varphi} \right] - \sum_1^k \left(\frac{f^2}{f_{1,i}^2} \right) d_i \alpha_i = 0 \quad (8)$$

式中: f 为系统总焦距; $f_{1,i}$ 为第 i 元件(包含自身)之前的分系统焦距; d_i 为第 i 和 $i+1$ 元件间的距离; α_i 为第 i 和 $i+1$ 元件间镜筒材料的线膨胀系数。若主镜和校正镜的材料相同, 则两者所产生的热差会相互抵消; 若材料不同, 则计算时仅需考虑两者的热差系数和主镜的光焦度。同时该式还引入了镜筒长度变化对系统焦距的影响, 从而提高了热差计算结果的准确性。

另外, 温度变化也会引起系统内衍射元件微结构的高度、线宽以及位置的变化, 主要体现为衍射元件相位系数的改变, 因此在进行无热化设计时需考虑相位系数的变化对系统的影响。通过衍射元件的相位分布函数可以计算出温度与相位系数之间的关系^[13], 根据该关系编写宏语言程序并在优化时载入, 即可获得更加准确的系统。

2 系统指标及设计

2.1 指标要求

该红外衍射望远镜系统采用制冷型中波红外焦平面探测器, 像元尺寸为 $30 \mu\text{m} \times 30 \mu\text{m}$, F 数为 2, 结合系统的研制要求可得其主要设计指标, 如表 1 所示。

2.2 初始结构选型及计算

衍射望远镜系统根据目镜系统的结构可以分为透射式和反射式, 其中反射式更加适合于大口

表 1 光学系统参数

Table 1 Parameters of optical system

参数	指标
口径/mm	1 000
波段/ μm	3.8~4.2
焦距/mm	2 000
F 数	2
全视场/(°)	0.12
MTF(@16.7 lp/mm)	> 0.6
工作温度/°C	-20~60

径系统的构建, 因而目前可见光领域的大口径衍射望远镜系统多采用反射式结构^[2-3, 5, 8]。反射式结构为了简化光路, 一般是将衍射校正面刻蚀在再聚焦反射镜上, 但这样会增加衍射校正镜的加工难度, 同时该结构也较难满足红外衍射望远镜系统被动消热差及 100% 冷屏效应设计要求。因此本文提出了一种折反式红外衍射望远镜系统, 其光路结构如图 2 所示。

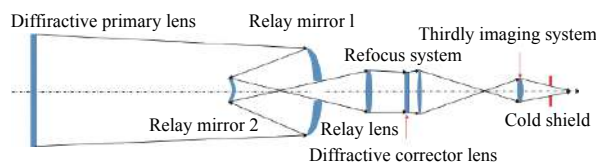


图 2 折反式中波红外衍射望远镜系统初始结构

Fig. 2 Initiating structure of catadioptric mid-wave infrared diffractive telescope system

系统由衍射主镜、中继系统、衍射校正镜、再聚焦系统及三次成像系统构成。其中, 衍射主镜和衍射校正镜均为平面透镜, 加工难度较低; 中继系统采用卡塞格林折反式结构, 目的是缩短系统长度以及使光线平滑传递, 从而降低系统的公差要求; 再聚焦系统采用折射式结构, 紧靠衍射校正镜, 起到聚焦发散光束及校正系统像差和热差的作用。系统要求冷光阑匹配, 即系统的出瞳和冷光阑重合, 但由于主镜与校正镜共轭且再聚焦系统紧靠衍射校正镜, 而系统的入瞳一般设置在衍射主镜处, 故系统的二次出瞳位置在衍射校正镜附近, 距离冷光阑位置较远, 因此难以实现冷光阑匹配, 所以引入三次成像系统来使系统的最终出瞳与冷光阑重合, 其结构为折射式结构。

系统的初始结构参数计算分为 3 个部分: 1) 衍射主镜与衍射校正镜参数 利用(1)~(4)式, 结合系统指标设置合理的 F 数即可求得两者的结构参

数。2) 中继系统参数 首先根据上部分所得参数计算出中继系统的焦距^[5], 然后以卡塞格林两反式结构为中介系统, 设置合理的反射镜1焦距及遮拦比计算出其参数^[14]; 最后在优化时加入中继透镜来构建折反式中介系统。3) 再聚焦系统及三次成像系统参数 首先计算出两者需要校正热差值, 并合理分配它们的光焦度; 然后利用中红外波段材料的无热 $T-W$ 图定性地选择出合适的透镜材料组合^[15]; 最后联立(5)式、(6)式和(8)式, 根据所选材料的热差系数 T 和色差系数 W 定量分配透镜光焦度。

2.3 设计结果

在红外衍射望远镜系统中, 衍射主镜和校正镜的参数决定了系统的长度、口径等参数。为了在提高两者衍射效率的同时降低系统的加工装配难度, 将它们的 F 数设为 20:2, 由此可得衍射校正镜的口径为 100 mm。中继反射镜1口径取 400 mm, 其光焦度根据实际情况调整, 中继反射镜2遮拦比取 0.225, 则其口径为 90 mm。按上述方法计算系统的初始结构参数, 并将其输入到软件中进行优化, 最终获得的系统光路结构如图3所示。

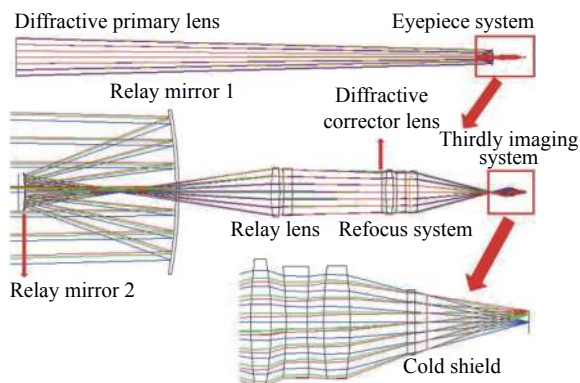


图3 折反式中波红外衍射望远镜系统结构

Fig. 3 Structure of catadioptric mid-wave infrared diffractive telescope system

该系统的衍射主镜和衍射校正镜的材料均采用 Si。中继反射镜1为抛物面, 中心通光孔的面积占比为 2.21%, 对系统成像质量影响较小。中继反射镜2为双曲面, 圆锥系数为 -2.98; 中继透镜组的材料为 ZnSe、Ge, 均采用球面, 对系统光焦度的贡献分别为正、负。再聚焦镜组及三次成像镜组均采用 Cooke 三片式结构, 材料分别为 Si、Ge、ZnSe, 均加入了高次非球面以校正轴外像差, 它们对系统光焦度的贡献分别为正、负、正。系统的反射镜及镜筒材料均采用铝合金, 系统的整体长度为

14.035 m, 目镜系统长度为 921.76 mm。系统的出瞳位于像面前 19.8 mm 处, 半径为 5.1137 mm, 与探测器冷光阑相匹配。

2.4 设计结果分析

2.4.1 传递函数

传递函数是红外衍射望远镜系统重要的综合评价指标, 图4(a)、图4(b)、图4(c)分别为该系统在 20 °C、-20 °C、60 °C 温度下的 MTF 曲线。红外探测器像元尺寸为 30 μm , 系统的奈奎斯特频率为 16.7 lp/mm。由图4可见, 系统的 MTF 值在 16.7 lp/mm 范围内均大于 0.7, 接近衍射极限。

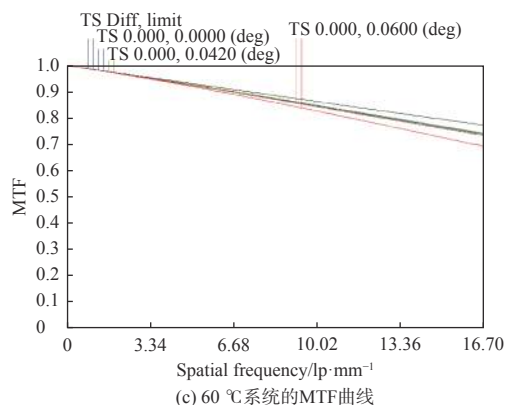
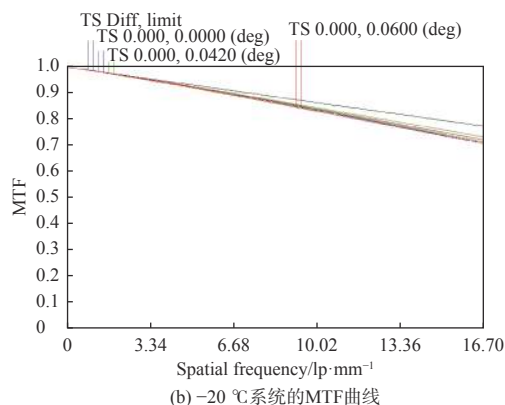
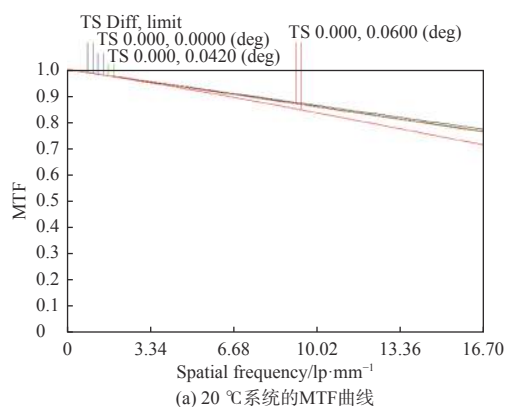


图4 3种温度下系统的 MTF 曲线

Fig. 4 MTF curves of system at three temperatures

2.4.2 点列图

系统在 20 ℃(组态 1)、-20 ℃(组态 2)、60 ℃(组态 3)温度下的点列图如图 5 所示。系统在各视场下的弥散斑半径的 RMS 值均小于艾里斑半径 9.759 μm , 表明系统具有良好的成像质量。

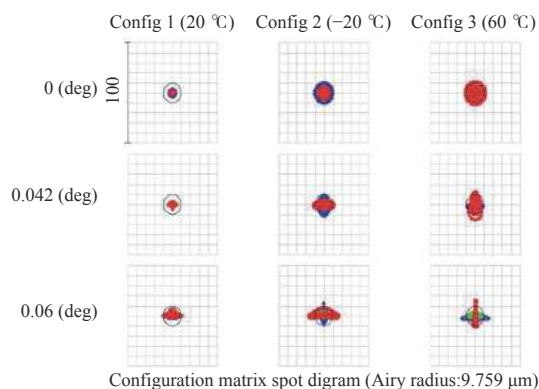


图 5 3 种温度下系统的点列图

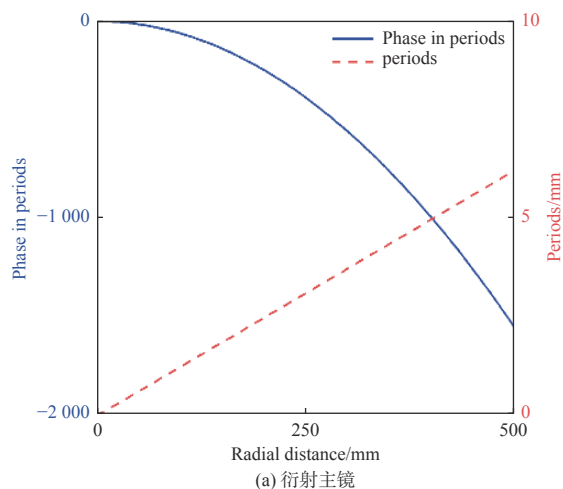
Fig. 5 Spot diagram of system at three temperatures

2.4.3 衍射面可加工性分析

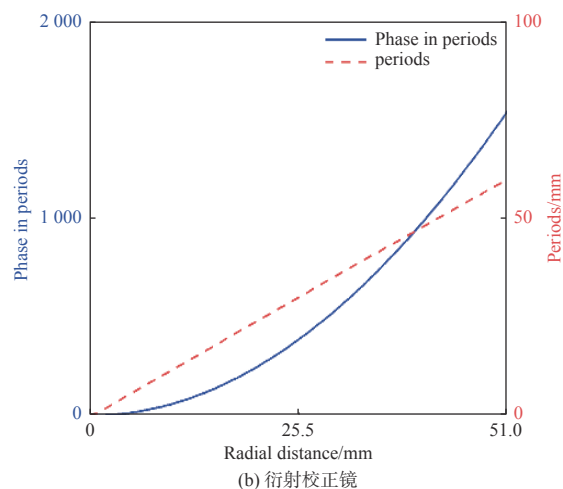
衍射元件的最小加工线宽反映了其加工难度, 因此设计的衍射元件的最小加工线宽越大越好。图 6(a)、6(b)分别给出了衍射主镜和衍射校正镜的相位、线频率的分布曲线, 在 2 个衍射元件的边缘处, 线频率的最大值分别为 6.216 period/mm 和 60.032 period/mm, 对应的最小周期分别为 160.8 μm 和 16.6 μm 。若将两者都量化为 4 台阶结构进行加工, 则其对应的最小线宽尺寸分别为 40.2 μm 和 4.15 μm , 可采用二元光刻工艺来实现元件的制作, 其中主镜采用拼接方式来制造, 从工程角度来讲两者都较易实现。

2.4.4 公差分析

加工误差和装配误差往往会降低理论设计系



(a) 衍射主镜



(b) 衍射校正镜

图 6 衍射物镜和衍射校正镜的相位和线频率径向分布曲线

Fig. 6 Phase and line frequency radial distribution curves of diffractive lens and diffractive correction lens

统的成像性能, 因此需对光学系统进行公差分析。本系统的初始公差分配方案如表 2 所示。在分析过程中根据实际情况适当调整敏感公差项的参数, 使得 MTF 值的下降量小于 0.1。表 3 为调整后系统较敏感的公差项。从表 3 中可以看出中继反射镜 1 的倾斜(TET)以及三次成像系统中第 1 个透镜的元件偏心(TED)、前表面偏心(TSD)较为敏感, 因此在装配过程中需重点进行调试。

表 2 系统元件公差分配

Table 2 Tolerance allocation of system elements

项目	衍射元件	其他元件
厚度和空气间隔/mm	± 0.025	± 0.015
半径/mm	—	± 0.015
表面和元件偏心/mm	± 0.015	± 0.015
表面和元件倾斜/(°)	20	10
面型误差/局部光圈	$1/30\lambda$	0.2

表 3 敏感公差项

Table 3 Sensitive tolerance terms

项目	值	MTF下降量
TETX(Y)-中继反射镜1/(°)	10°	0.050 2
TEDY-三次成像镜1/mm	± 0.01	0.023 8
TEDX-三次成像镜1/mm	± 0.01	0.023 8
TSDY-三次成像镜1前表面/mm	± 0.01	0.020 0
TSDX-三次成像镜1前表面/mm	± 0.01	0.020 0

3 鬼像及冷反射分析

鬼像和冷反射是制冷型红外光学系统中常见

的两种杂光效应,它们会在像面上形成噪声,对目标的识别与观测产生干扰,严重时甚至会淹没目标信号^[9,16]。因此,在光学设计时需对系统的鬼像及冷反射进行分析,评估其影响。不同于传统红外光学系统,在本系统中,除了要考虑系统折射元件及衍射元件设计级次光线引起的鬼像及冷反射外,还需要考虑衍射元件非设计级次衍射光线引起的额外鬼像及冷反射。

3.1 鬼像分析

利用 ASAP 软件对红外衍射望远镜系统进行鬼像分析,建立的模型如图 7 所示。系统中反射镜镀增反膜,反射率为 99%;折射透镜与衍射元件未刻蚀微结构的一面均镀增透膜,透过率为 98%,反射率为 2%;衍射元件刻蚀微结构的一面不镀膜,其光学参数为衍射面各衍射级次的透射及反射衍射效率,其中两片衍射元件均为 4 台阶结构。

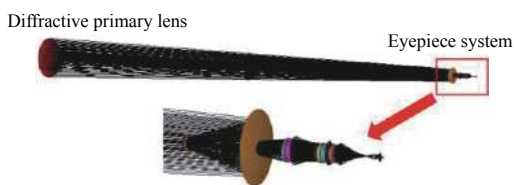
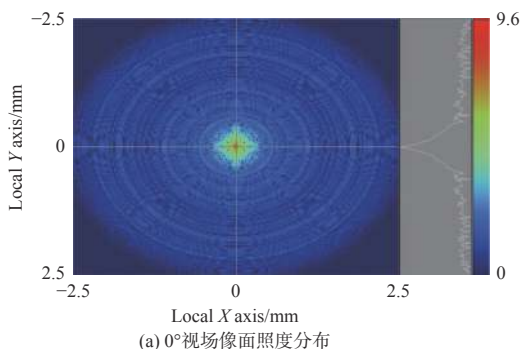


图 7 杂散光分析模型

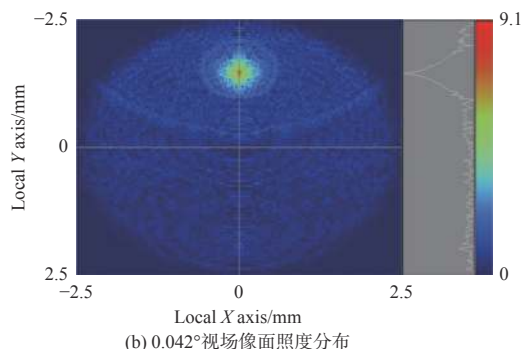
Fig. 7 Stray light analysis model

本文仅考虑由衍射元件非设计级次衍射光线所引起的零阶鬼像和由折射元件表面反射引起的二阶鬼像。是否为鬼像路径按以下条件来判断:该路径下的光通量大于等于成像路径下光通量的 0.01%。由于成像光束与杂散光的能量差异巨大,所以对像面上的照度分布进行求对数运算,图 8(a)、图 8(b)、图 8(c) 分别为处理后的 0°、0.042°、0.06°视场下的像面照度分布图,可以看出系统并无明显的鬼点。

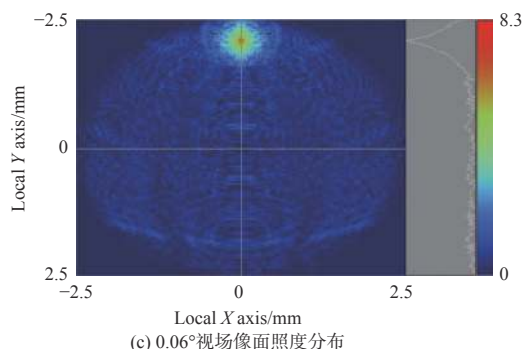
系统鬼像的具体路径如表 4 所示。其中,衍射元件所产生的零阶鬼像的能量大小及位置分布与



(a) 0°视场像面照度分布



(b) 0.042°视场像面照度分布



(c) 0.06°视场像面照度分布

图 8 系统鬼像照度分布

Fig. 8 Ghost image illumination distribution of system

表 4 鬼像路径信息统计

Table 4 Ghost image path information

具体路径	光线数量	光通量占比/%
成像光线	22 549	99.90
三次成像镜3后表面与三次成像镜2前表面反射	5 460	0.01
再聚焦镜2后表面与校正镜前表面反射	14 468	0.01
再聚焦镜1前表面与校正镜前表面反射	14 468	0.01
三次成像镜3后表面与三次成像镜1后表面反射	6 460	0.01
中继透镜2前表面与中继透镜1后表面反射	5 344	0.01
再聚焦镜3后表面与再聚焦镜2前表面反射	3 871	0.01
主镜-3级与校正镜-3级衍射	237	0.01
主镜+5级与校正镜+5级衍射	259	0.01

非设计级次衍射效率和入射光位置有关。在本系统中,该类鬼像主要由处于主镜中心区域的+5、-3级衍射光线引起,但由于被中继反射镜 2 遮挡了部分光线,所以其能量得到了一定的抑制,光通量占比仅为 0.02%。另外系统的二阶鬼像光通量占比为 0.06%,系统的总体鬼像能量占比为 0.1%,可以满足成像探测需求。

结合红外衍射望远镜系统的鬼像分布特性,可

以采用以下措施来抑制系统残余的零阶和二阶鬼像:增加衍射元件台阶数、在二次像面处增加消杂光光阑、镀膜增加系统内元件的透过率和在主镜前方设置适当口径的挡光装置等。

3.2 冷反射分析

本文利用在 ASAP 中建立的模型来进行红外衍射望远镜系统的冷反射分析。将模型的像面设置为光源,将衍射主镜前表面(表面 1)的反射率降低至 0.7%,并对系统做逆向光线追迹,然后引入冷反射等效温差(NITD)来定量分析系统的冷反射特性^[9],图 9(a)为系统各表面的 NITD 曲线(以 20 °C 系统为例,其中未标出表面的 NITD 均为 0),图 9(b)为系统像面处的总 NITD 曲线。由图 9(a)可得,系统表面 2(主镜刻蚀微结构的面)的 NITD 为 137.5 mK,且其值在像面边缘处的下降较为明显,说明该面是冷反射的主要贡献者。表面 2 产生冷反射的原因是:由于光线平行入射且主镜垂直于光轴放置,所以当像面中心区域发出的光沿原路入射到主镜衍射面时,主镜反射的+2 级衍射光线会再次沿原路返回像面,因此其冷反射效应较强。由图 9(b)

可知,以 20 °C 为基准温度时,系统总的 NITD 值随温度的变化较小,其中最大的变化量为 24.5 mK,小于探测器的 NETD 值 25 mK,即系统的冷反射现象不会随温度的不同而产生太大的变化,所以在本系统中通过一次非均匀性校正即可实现冷反射效应的抑制。

4 结论

为了适应和满足空间红外望远镜高分辨率、大口径、轻量化的发展趋势和要求,本文基于 Schupmann 消色差理论,计算了红外衍射望远镜系统的光学被动消热差模型,并据此设计了一套 1 m 口径的制冷型折反式中波红外衍射望远镜系统,然后对其进行了相关分析。像质分析结果表明,该系统在-20~60 °C 温度下具有良好的成像质量,同时满足 100% 冷光阑效率。公差分析结果表明,该系统满足现有加工及装调要求,其中在装调时,需要重点关注中继反射镜 1 的倾斜。鬼像分析结果表明,该系统的零阶及二阶鬼像的总能量占比为 0.1%,可以满足成像探测需求。冷反射分析结果表明,该系统衍射主镜反射的+2 级衍射光线虽然会产生一定的冷反射,但是由于系统总的 NITD 值随温度的最大变化量小于探测器的 NETD 值,因此通过一次非均匀性校正即可将系统的冷反射效应消除。设计的系统与现有多数非制冷型红外衍射望远镜系统相比,在实现更大口径系统的构建及杂光抑制方面具有一定的优势,为大口径红外衍射望远镜系统的发展可提供一定的参考。

参考文献:

- [1] WHITEAKER K L, MARSHALEK R G, DOMBER J L, et al. Large aperture diffractive receiver for deep space optical communications[J]. *Imaging and Applied Optics*, 2015, 53(3): 7-11.
- [2] 张楠, 卢振武, 李凤有. 衍射望远镜光学系统设计[J]. *红外与激光工程*, 2007, 36(1): 106-108.
ZHANG Nan, LU Zhenwu, LI Fengyou. Optical design of diffractive telescope[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(1): 106-108.
- [3] BRITTEN J A, DIXIT S N, DEBRUYCKERE M, et al. Large-aperture fast multilevel Fresnel zone lenses in glass and ultrathin polymer films for visible and near-infrared imaging applications[J]. *Applied Optics*, 2014, 53(11):

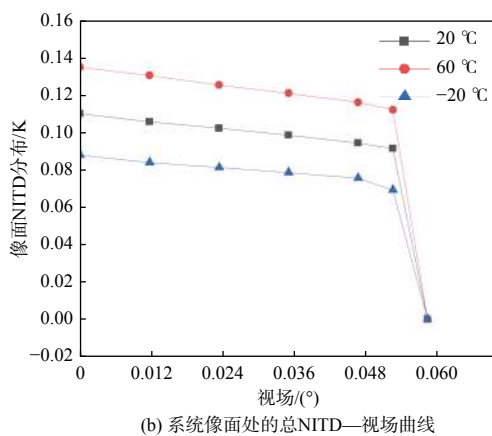
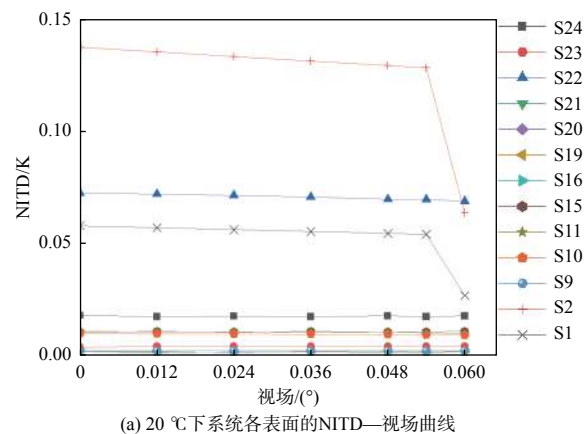


图 9 系统的 NITD 分布曲线

Fig. 9 NITD curves of system

- 2312-2316.
- [4] 杨伟, 吴时彬, 汪利华, 等. 微结构薄膜望远镜研究进展分析[J]. 光电工程, 2017, 44(5): 475-482.
- YANG Wei, WU Shibin, WANG Lihua, et al. Research advances and key technologies of macrostructure membrane telescope[J]. Opto-Electronic Engineering, 2017, 44(5): 475-482.
- [5] 何传王, 汪利华, 黄鹏, 等. 离轴四反射镜衍射成像光学系统设计[J]. 光电工程, 2019, 46(11): 190099.
- HE Chuanwang, WANG Lihua, HUANG Peng, et al. Design of diffractive imaging optical system based on off-axis four-mirror[J]. Opto-Electronic Engineering, 2019, 46(11): 190099.
- [6] 王若秋. 基于衍射成像系统的薄膜元件关键技术研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2017.
- WANG Ruoqiu. Research on key technologies of thin film element based on diffractive imaging system[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2017.
- [7] 王昊, 康福增, 赵卫, 等. 一种红外衍射望远镜的光学设计[J]. 红外与毫米波学报, 2016, 35(4): 425-429.
- WANG Hao, KANG Fuzeng, ZHAO Wei, et al. Optical design of infrared diffractive telescope[J]. Journal of Infrared and Milli-meter Waves, 2016, 35(4): 425-429.
- [8] 任智斌, 胡佳盛, 唐洪浪, 等. 10 m大口径薄膜衍射主镜的色差校正技术研究[J]. 光子学报, 2017, 46(4): 24-29.
- REN Zhibin, HU Jiasheng, TANG Honglang, et al. Study on chromatic aberration correction of 10 meter large aperture[J]. Acta Photonica Sinica, 2017, 46(4): 24-29.
- [9] 谢洪波, 孟庆斌, 杨磊, 等. 中波红外光学系统无热化设计和冷反射抑制[J]. 应用光学, 2017, 38(3): 352-357.
- XIE Hongbo, MENG Qingbin, YANG Lei, et al. Athermalization and suppression of narcissus for medium-wave infrared optical system[J]. Journal of Applied Optics, 2017, 38(3): 352-357.
- [10] 白瑜, 邢廷文, 林妩媚, 等. 中波红外成像无热化光学系统设计[J]. 应用光学, 2012, 33(1): 181-185.
- BAI Yu, XING Tingwen, LING Wumei, et al. Athermalization of middle infrared optical system[J]. Journal of Applied Optics, 2012, 33(1): 181-185.
- [11] 张婉仪. 红外折衍混合摄远光学系统无热化设计[J]. 应用光学, 2017, 38(1): 12-18.
- ZHANG Wanyi. Athermalization design of infrared refractive-diffractive telephoto objective[J]. Journal of Applied Optics, 2017, 38(1): 12-18.
- [12] 廖劲峰, 丁亚林, 姚园. 机载折反式光学系统的无热化设计[J]. 液晶与显示, 2019, 34(1): 43-50.
- LIAO Jingfeng, DING Yalin, YAO Yuan. Athermalized design of airborne mirror-lens optical system[J]. Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays, 2019, 34(1): 43-50.
- [13] 白瑜. 长焦距宽光谱红外双波段消热差探测成像光学系统研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2017.
- BAI Yu. Research on infrared dual-band athermal detection imaging system with long focal length and wide spectrum[D]. Chengdu: School of Optoelectronic Information, 2017.
- [14] 韩培仙, 金光, 钟兴, 等. 一种新型微小视频卫星光学系统设计[J]. 应用光学, 2015, 36(5): 691-697.
- HAN Peixian, JING Guang, ZHONG Xing, et al. Design of new type of micro video-capable satellite optical system[J]. Journal of Applied Optics, 2015, 36(5): 691-697.
- [15] 姜凯, 周泗忠, 李刚, 等. 折反式中波红外双视场变焦系统无热化设计[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(2): 403-407.
- JIANG Kai, ZHOU Sizhong, LI Gang, et al. Athermalization design of catadioptric middle infrared dual field zoom system[J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(2): 403-407.
- [16] 刘盾. 折、衍混合成像光学系统杂散光研究[D]. 成都: 中国科学院光电技术研究所, 2018.
- LIU Dun. Research on stray light in hybrid diffractive/refractive imaging optical system[D]. Chengdu: Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, 2018.