

薄膜衍射消热差红外光学系统设计

王焯菲^{1,2}, 程艳萍¹, 姚园¹, 李道京³, 于潇¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 中国科学院空天信息创新研究院微波成像技术国家重点实验室, 北京 100190)

摘要: 设计了一种薄膜衍射消热差红外光学系统。此光学系统口径为 200 mm, 焦距为 200 mm, 相对孔径为 1, 全视场角为 3°, 工作波段为 10.7~10.9 μm。该系统采用薄膜衍射镜作为主镜, 厚度为微米量级, 具有口径大、重量轻的优点, 解决了现有红外光学系统重量和口径无法调和的矛盾。利用含有衍射面的折衍混合透镜进行校正主镜带来的强色散, 有效解决薄膜衍射主镜成像视场小、谱段范围窄等问题。采用薄膜衍射主镜、折衍混合透镜, 很好地利用了衍射面良好的消热差特性, 再结合透镜材料的选择, 对光学系统消热差起到了良好的作用, 并且, 衍射面的使用为系统设计优化过程中增加了自由度。薄膜衍射消热差红外光学系统重量轻、成像质量好、消热差性能优良, 在红外遥感成像探测领域具有良好的应用前景。

关键词: 光学设计; 衍射光学; 薄膜; 消热差

中图分类号: TN216

文献标识码: A

文章编号: 1001-8891(2021)05-0422-07

Design of Membrane Diffractive Athermal Infrared Optical System

WANG Yefei^{1,2}, CHENG Yanping¹, YAO Yuan¹, LI Daojing³, YU Xiao¹

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3. Key Laboratory of Science and Technology on Microwave Imaging, Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: A membrane diffractive athermal infrared optical system is designed. The optical system has an aperture of 200 mm, a focal length of 200 mm, a relative aperture of 1, a full field angle of 3°, and a working wavelength of 10.7-10.9 μm. The system uses the membrane diffractive lens as the primary lens, with the thickness of a micron, and has the advantages of large aperture and light weight, which solves the contradiction between the weight and the aperture of the existing infrared optical system. A hybrid refractive diffractive lens with a diffractive surface is used to correct the strong dispersion of the primary lens, effectively solving the problems of small field of view and narrow spectral range of the membrane diffractive primary lens. The use of membrane diffractive primary lens and refractive diffractive hybrid lens effectively utilizes the good athermalization characteristics of the diffractive surface. Combined with the selection of lens materials, it plays a good role in the athermalization of the optical system; the use of the diffractive surface increases the degree of freedom in the process of system design optimization. Membrane diffractive athermal infrared optical system has the advantages of light weight, good imaging quality, and excellent athermalization performance, which has a good application prospect in the field of infrared remote sensing imaging detection.

Key words: optical design, diffractive optics, membrane, athermalization

0 引言

红外光学系统在军事侦察、环境监测、资源调查

收稿日期: 2021-02-01; 修订日期: 2021-03-30.

作者简介: 王焯菲(1996-), 女, 研究实习员, 主要从事光学系统设计方面的研究。E-mail: Rebecca2946@163.com.

基金项目: 中国科学院国防重点实验室基金项目(CXJJ-19S014), 高分辨率对地观测系统重大专项(GFZX0403260314)。

等领域都具有广泛的应用。随着科学技术的不断进步，我国对成像质量高、体积小、重量轻的大视场红外遥感相机的需求越来越迫切。机载红外光学系统需要在有限的空间内实现良好的成像效果，因此机载红外光学系统面临的主要问题是体积、重量和口径无法调和的矛盾。目前，在机载红外光学系统的设计过程中，多采用反射式系统来增大光学系统的口径^[1-3]，以提高光学系统的成像质量。反射镜对面型公差的要求通常比透镜更加严格，并且其支撑结构也更为复杂。薄膜衍射成像技术可以为解决这一问题提供新思路，薄膜衍射镜可以采用低密度的材料，厚度可做到微米量级，它具有口径大、密度低、公差精度要求较为宽松等优势。研究表明，平面薄膜衍射透射主镜的公差要比反射式薄膜主镜公差宽松 100 倍左右^[4-5]。基于这种优势，薄膜衍射成像技术的研究在国内外逐渐展开。

国外对薄膜衍射成像的研究开始于 20 世纪 90 年代。1998 年，美国劳伦斯-利弗莫尔国家实验室提出了 Eyeglass 计划，该方案提出用口径 20 m 的衍射镜作为主镜，将光线聚焦于相距 1 km 远的目镜上。1999 年，该项目组提出采用 Schupmann 消色差方法实现衍射镜对宽波段成像^[6]。2001 年，该项目组完成了口径 75 cm，F/52 的衍射主镜拼接。2003 年，该项目组制作了口径 5 m，F/50 的衍射主镜，并在聚焦性能测试中得到了 1~2 cm 的光斑^[7]。2010 年，美国鲍尔宇航公司联合美国劳伦斯-利弗莫尔国家实验室提出了 MOIRE 计划。2012 年，该项目组制作了口径为 80 cm、F/6.5 的离轴衍射透镜，并对其进行了性能测试^[8]。2014 年，该项目组进行了 5 m 口径衍射成像系统地面成像试验^[9]。

国内对薄膜衍射成像的研究开始于 2010 年前后。2007 年，中国科学院长春光学精密机械与物理研究所提出了口径 1000 mm，F/100 的衍射望远镜方案^[10]。2017 年，该项目组制作了口径 320 mm，F/100 的薄膜主镜，并对其进行了实验验证^[11]。2011 年，中国科学院光电技术研究所研制了口径 150 mm 的石英基底薄膜主镜和聚酰亚胺基底的薄膜主镜组成的薄膜成像系统。2012 年，该项目组研制了口径 80 mm 的样机，并进行了外场试验。2014 年，该项目组研制了口径 400 mm 的薄膜衍射望远镜^[12]。2016 年，中国科学技术大学制作了口径为 400 mm 的薄膜衍射元件^[13]。

因航空环境的不确定性，机载红外光学系统需具有良好的温度适应性，而红外光学系统对温度变化较为敏感，因此，通常需要对光学系统进行消热差设计。红外光学系统的无热化方法可分为主动无热化和被动无热化两种。主动无热化是用温度传感器测出环境

温度的变化量，再计算出因温度变化引起的像面位移，后用电机驱动透镜产生轴向位移，从而实现像面温度补偿。主动无热化虽然降低了光学系统设计的难度，但其需要使用驱动装置，增加了系统的重量和尺寸，且对调节精度的要求较高。而被动无热化，是利用不同光学元件和结构件之间的热特性差异，使系统适应不同环境温度所带来的影响，被动无热化不需增加额外的驱动装置，相对于主动无热化，系统尺寸小、重量轻^[14]。

为了解决传统红外光学系统重量大和薄膜衍射光学系统视场不足等问题，设计了一款大视场轻量化薄膜衍射红外光学系统。该系统采用薄膜衍射镜作为主镜，大大减轻了光学系统的重量；在薄膜衍射主镜后加红外透镜组，进行光束压缩和像差校正，以扩大薄膜衍射光学系统的视场。采用被动无热化设计，利用衍射面独特的温度特性、搭配锗、硒化锌两种红外光学材料，进行了系统的消热差设计，使系统达到了良好的环境适应性。

1 薄膜衍射系统的工作原理

1.1 消色差原理

薄膜衍射成像系统的光学布局图如图 1 所示。薄膜衍射成像光学系统主要包括：薄膜衍射主镜、中继镜组、折衍混合透镜、聚焦透镜组。薄膜衍射透镜具有很强的色散效应，其焦距与入射波长成反比，设计的中心波长 λ_0 的焦距 f_0 和波长 λ 的焦距 f_λ 之间的关系可由以下公式表示：

$$\frac{f_\lambda}{f_0} = \frac{\lambda_0}{\lambda} \quad (1)$$

波长 λ 的焦点相对于中心波长 λ_0 的离焦量为：

$$\Delta f = f_\lambda - f_0 = f_0 \cdot \frac{\lambda_0 - \lambda}{\lambda} \quad (2)$$

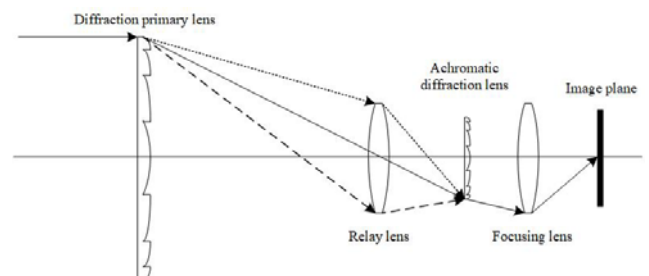


图 1 薄膜衍射成像系统光学布局图

Fig.1 Optical layout of membrane diffractive imaging system

该薄膜衍射主镜的设计中心波长为 10.8 μm ，工作波长为 10.7~10.9 μm ，两波长对应的焦点之间的距离为 3.7 mm，需要引入透镜组对薄膜衍射主镜所产生的色差进行像差校正。采用 Schupmann 像差校

正方法校正主镜所产生的像差^[6,13]。薄膜衍射主镜与用于像差校正的折衍混合透镜互为共轭位置，经红外透镜组进行像差校正后的光线最终会聚到红外探测器上。

1.2 消热差原理

光学元件的光热膨胀系数定义为单位温度变化引起的光焦度的相对变化，表示为：

$$x_f = -\frac{\Delta\phi_T}{\phi} = \frac{1}{f} \frac{df}{dT} \quad (3)$$

式中： $\Delta\phi_T$ 为温度 T 变化所引起的光焦度变化量； ϕ 为光学系统总光焦度； f 为光学系统焦距。

薄透镜的光焦度公式为：

$$\phi = (n - n_0) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \quad (4)$$

则光焦度 ϕ 随温度 T 变化可由以下公式表示：

$$\frac{d\phi}{dT} = \left(\frac{dn}{dT} - \frac{dn_0}{dT} \right) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) + (n - n_0) \left(-\frac{1}{r_1^2} \frac{dr_1}{dT} + \frac{1}{r_2^2} \frac{dr_2}{dT} \right) \quad (5)$$

$$\frac{1}{r_1} \frac{dr_1}{dT} = \frac{1}{r_2} \frac{dr_2}{dT} = \alpha_g \quad (6)$$

可以得到透镜的光热膨胀系数：

$$\chi_{f,r} = \alpha_g - \frac{1}{n_0(n - n_0)} \left(n_0 \frac{dn}{dT} - n \frac{dn_0}{dT} \right) \quad (7)$$

式中： n 为透镜材料的折射率； n_0 为介质空间的折射率； r_1 为透镜第一面曲率半径； r_2 为透镜第二面曲率半径； α_g 为透镜的线膨胀系数。

衍射光学元件的焦距由环带位置决定，表示为：

$$f = n_0 r_m^2 / 2m\lambda \quad (8)$$

式中： n_0 为介质空间的折射率； r_m 是第 m 个环带的径向距离； λ 为设计波长。

当环境温度发生变化时，环带径向距离 r_m 和介质空间的折射率都会发生变化， r_m 随温度变化后可表示为：

$$r_m(T) = r_m(1 + \alpha_g \Delta T) \quad (9)$$

式中： α_g 为衍射光学元件的线膨胀系数； ΔT 为温度变化量。则可以得到衍射光学元件的光热膨胀系数：

$$x_{f,d} = 2\alpha_g + \frac{1}{n_0} \frac{dn_0}{dT} \quad (10)$$

可以看出，衍射光学元件的光热膨胀系数是由基底材料的线膨胀系数决定的，与基底材料的折射率无关。

为了实现光学系统的无热化设计，需对光学系统进行光焦度分配、消色差、消热差，具体公式如下^[15-16]：

$$\sum_{i=1}^n h_i \phi_i = \phi \quad (11)$$

$$\left(\frac{1}{h_i \phi} \right)^2 \sum_{i=1}^n (h_i^2 \omega_i \phi_i) = 0 \quad (12)$$

$$\left(\frac{1}{h_i \phi} \right)^2 \sum_{i=1}^n (h_i^2 \chi_i \phi_i) = \alpha_h L \quad (13)$$

式中： h_i 为第一近轴光线在第 i 个光学元件上的入射高度； ϕ_i 为第 i 个光学元件的光焦度； ϕ 为系统总光焦度； χ_i 为第 i 个光学元件的光热膨胀系数； α_h 为光学系统外部机械结构件的线膨胀系数； L 为机械结构总长。

2 薄膜衍射光学系统设计

2.1 指标要求

采用 640×512 非制冷型长波红外探测器，其像元尺寸为 $14 \mu\text{m} \times 14 \mu\text{m}$ ，设计了一款大相对孔径的薄膜衍射消热差长波红外光学系统。光学系统具体参数如表 1 所示。

表 1 光学系统参数

Table 1 Optical system parameters	
System parameter	Numerical value
Wavelength band	10.7-10.9 μm
Focal length	200 mm
F number	1
Working temperature	-50°C-+60°C

2.2 薄膜衍射主镜设计

薄膜衍射主镜设计波长选为 $10.8 \mu\text{m}$ ，主镜的口径为 200 mm，焦距为 250 mm。采用低密度的聚酰亚胺材料，厚度为 $20 \mu\text{m}$ 。20 μm 厚的聚酰亚胺材料在 $10.7 \sim 10.9 \mu\text{m}$ 波段处的透过率大于 95%。薄膜衍射主镜的光学系统结构图如图 2 所示。

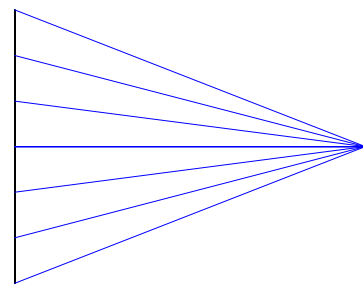


图 2 薄膜衍射主镜光路图

Fig.2 Optical path diagram of membrane diffractive primary lens

薄膜衍射主镜衍射面相位曲线如图 3 所示，最小线宽为 $29.206 \mu\text{m}$ 。

MTF 曲线如图 4 所示。在长波红外波长 $10.8\ \mu\text{m}$, 0° 视场处的 MTF, 优于 $0.45@30\ \text{lp/mm}$, 接近衍射极限, 满足设计要求。

2.3 薄膜衍射红外光学系统设计

薄膜衍射红外光学系统采用色差校正的方式扩展红外波段和视场宽度。长波红外成像光学系统结构形式如图 5 所示, 在薄膜衍射主镜后采用 6 片透镜所组成的红外透镜组进行校正像差。采用锗、硒化锌加上衍射面来消热差。

在不同环境温度下, MTF 曲线如图 6 所示, 全视场传递函数优于 $0.4@30\ \text{lp/mm}$ 。

在不同环境温度下, 光学系统场曲和畸变曲线

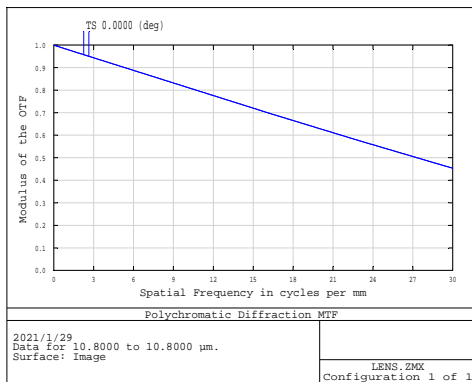


图 4 薄膜衍射主镜 MTF 曲线

如图 7 所示。全视场相对畸变优于 0.2% 。

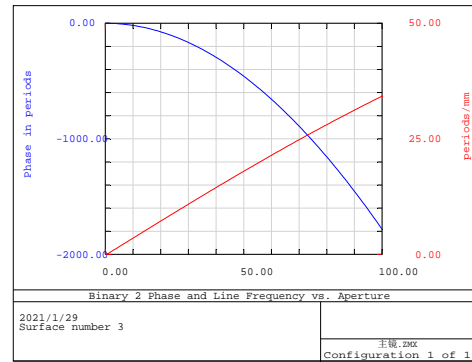


图 3 薄膜衍射主镜相位曲线

Fig.3 Phase curve of membrane diffractive primary lens

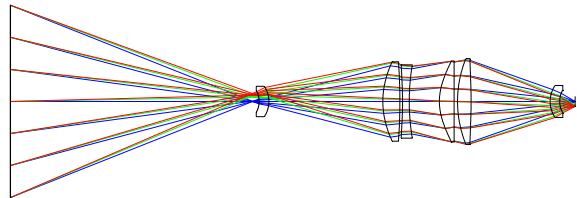
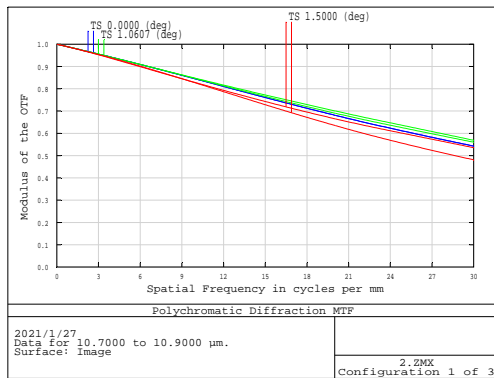


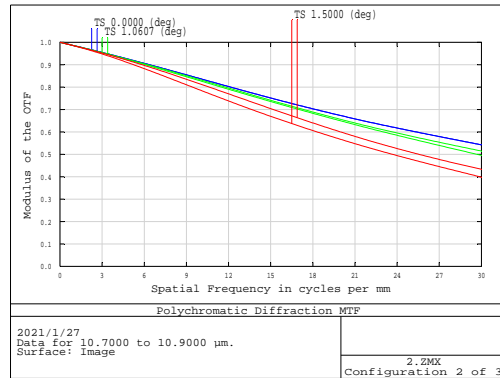
图 5 薄膜衍射消热差红外光学系统光路图

Fig.4 MTF of membrane diffractive primary lens

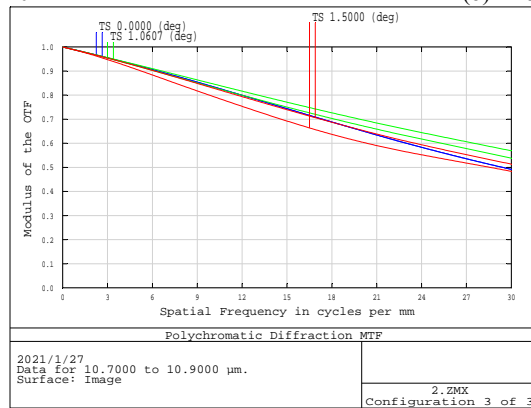
Fig.5 Optical path diagram of membrane diffractive athermal infrared optical system



(a) 20°C



(b) -50°C



(c) 60°C

图 6 红外光学系统不同环境温度下 MTF 曲线

Fig.6 MTF at different temperatures of the infrared optical system

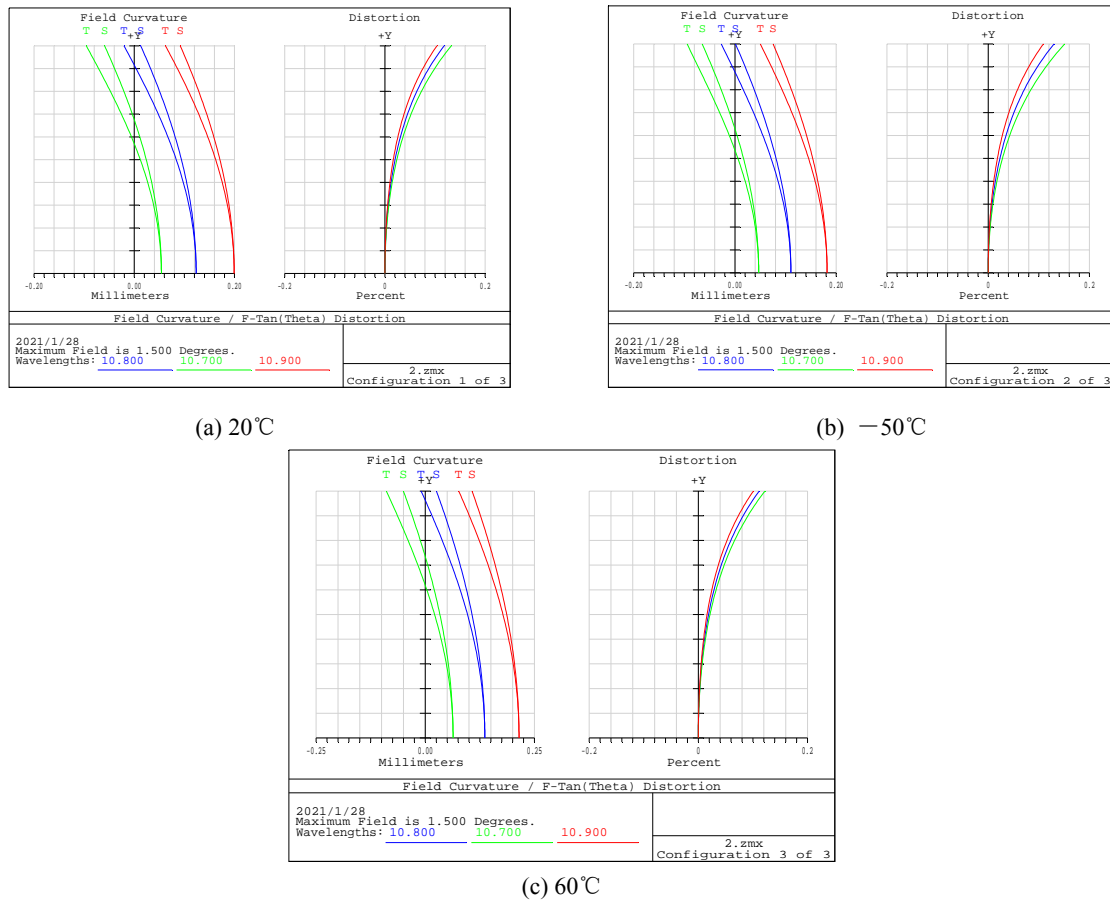


图7 不同环境温度下场曲和畸变曲线

Fig.7 Field curvature and distortion at different temperatures

根据不同环境温度下, MTF 曲线和场曲畸变曲线结果表明, 光学系统在 $-50^{\circ}\text{C}\sim 60^{\circ}\text{C}$ 环境温度下, 光学系统成像质量良好, 光学系统具有较好的消热差效果。

2.4 薄膜衍射光学系统公差分析

使用设计软件中的公差分析程序, 对所有光学

元件的加工、装调进行了公差分析计算, 公差参数包括半径、表面不规则性、元件厚度、空气间隔、元件倾斜等。计算在奈奎斯特频率 30 lp/mm 处的 MTF, 通过分析每一公差在该空间频率下的 MTF 下降情况, 最终确定合适的公差, 如表 2 所示。

表2 光学系统公差 Table 2 Tolerance of optical system

Component serial number	Surface serial number	RMS	Thickness and air separation/mm	Tilt/"
1	1	0.025	± 0.02	40
	2	0.025	± 0.02	40
2	1	0.025	± 0.02	40
	2	0.025	± 0.02	40
3	1	0.025	± 0.02	40
	2	0.025	± 0.02	40
4	1	0.025	± 0.02	40
	2	0.025	± 0.02	40
5	1	0.025	± 0.02	40
	2	0.025	± 0.02	40
6	1	0.025	± 0.02	40
	2	0.025	± 0.02	40
7	1	0.025	± 0.02	40
	2	0.025	± 0.02	40

对公差进行蒙特卡罗分析，公差分析的结果表明：按照设置的公差加工、装调后 90% 以上的光学系统的 $MTF \geq 0.28@30 \text{ lp/mm}$ 。

2.5 薄膜衍射主镜衍射效率分析

薄膜衍射光学系统主镜采用谐衍射的方式进行设计。单层谐衍射光学元件衍射效率的一般表达式为^[17]：

$$\eta_m = \sin^2 c^2 \left\{ m - \frac{d}{\lambda} \left[\sqrt{n^2(\lambda) - n'^2(\lambda) \sin^2 \theta_1} - n'(\lambda) \cos \theta_1 \right] \right\} \quad (14)$$

式中： m 为衍射级次； d 为刻画深度； λ 为入射波长； θ_1 为入射角； $n(\lambda)$ 为薄膜衍射镜在波长为 λ 时基底的折射率； $n'(\lambda)$ 为波长为 λ 的光束在入射到薄膜衍射镜前介质的折射率。

刻画深度可以表示为：

$$d = \frac{m\lambda}{n-1} \quad (15)$$

当光束从空气中入射到衍射光学元件上时， $n'(\lambda)=1$ ，式(14)变为：

$$\eta_m = \sin^2 c^2 \left\{ m - \frac{d}{\lambda} \left[\sqrt{n^2(\lambda) - \sin^2(\theta_1)} - \cos(\theta_1) \right] \right\} \quad (16)$$

薄膜主镜选用聚酰亚胺材料，在波长变化范围较小时，折射率近似不变， $n(\lambda)=1.6$ ，衍射级次 $m=1$ 时，波长与衍射效率和入射角的关系如图 8 所示。由图可知，在 $10.7 \sim 10.9 \mu\text{m}$ 波段范围内，入射角小于 1.5° 时，薄膜镜衍射效率大于 99.96%。

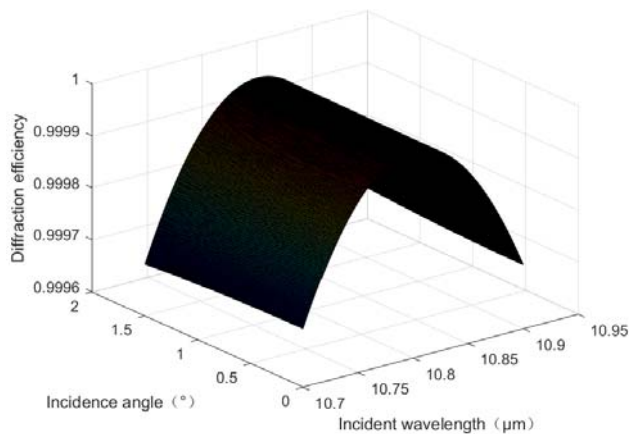


图 8 薄膜衍射主镜衍射效率与入射角及波长关系

Fig.8 Relationship between membrane diffractive primary lens and incident angle and wavelength

2.6 薄膜衍射光学系统鬼像分析

光学系统的杂散光会聚到像面附近，对目标成像造成干扰，称之为鬼像。衍射光学系统鬼像来源主要有两类，一是传统折射透镜表面的残余反射；二是衍射光学元件在非设计级次的多级衍射。

传统折射透镜表面的残余反射所导致的鬼像可

由光学设计软件自带的鬼像分析程序进行分析，分析结果如表 3 所示。仅有一条路径下的鬼像比较明显。为了减小鬼像的影响，将第一个透镜和第二个透镜镀增透膜，将其透过率提高到 99%，这样经两次反射后，能量降低 10^{-4} 倍，以减小其因表面残余反射产生鬼像的可能性。

表 3 鬼像路径信息

Table 3 Ghost image path information

Ghost image path	Distance to ghost focus/mm	Effective focal length/mm	Marginal ray height/mm
7-5	-0.1544	7.2220	-2.1375

衍射光学元件产生鬼像的原因是由于衍射光学元件的多级衍射。根据公式(16)可以计算出在 $10.7 \sim 10.9 \mu\text{m}$ 波段内，不同级次衍射效率如表 4 所示。可以看到非设计级次的衍射效率均小于设计级次衍射效率的 1%，因此，可以忽略多级衍射对鬼像产生所带来的影响。

表 4 不同级次下主镜衍射效率

Table 4 Diffraction efficiency of primary lens at different diffraction orders

Diffraction order	Diffraction efficiency
-2	0.0009%
-1	0.0022%
+1	99.9600%
+2	0.0089%
+3	0.0022%

3 结论

本文设计了一种薄膜衍射消热差红外光学系统。采用薄膜衍射镜作为主镜，减轻了光学系统重量。采用 Schupmann 色差校正方法，校正了薄膜衍射主镜所带来的强色散，采用衍射面和材料组合的被动消热差方式进行了消热差设计，实现了薄膜衍射消热差红外成像。该系统可以在环境温度为 $-50^\circ\text{C} \sim 60^\circ\text{C}$ 条件下，实现高分辨率成像。这种重量轻、温度适应性好、分辨率高的薄膜衍射消热差成像系统将在军事侦察、环境检测、资源调查等领域获得广泛的应用。

参考文献：

[1] 项建胜, 潘国庆, 孟卫华. 一种激光与红外复合光学系统设计[J]. 激光与红外, 2018, 48(1):104-108.
XIANG Jiansheng, PAN Guoqing, MENG Weihua. Design of laser and infrared compound optical system[J]. *Laser & Infrared*, 2018, 48(1): 104-108.

- [2] 李杰, 罗箫, 吴晗平. 基于折/衍混合的机载红外光学系统设计[J]. 激光与红外, 2020, **50**(2): 89-97.
LI Jie, LUO Xiao, WU Hanping. Design of airborne infrared optical system based on refraction/diffraction hybrid[J]. *Laser & Infrared*, 2020, **50**(2): 89-97.
- [3] 白瑜, 廖志远, 廖胜, 等. 共孔径消热差红外双波段光学系统[J]. 光学精密工程, 2016, **24**(2): 268-277.
BAI Yu, LIAO Zhiyuan, LIAO Sheng, et al. Infrared dual band athermal optical system with common aperture[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, **24**(2): 268-277.
- [4] Atcheson P, Domber J, Whiteaker K, et al. MOIRE: ground demonstration of a large aperture diffractive transmissive telescope[C]//*SPIE*, 2014, **9143**: 1-15.
- [5] 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 Membrane Diffractive Primary Lens [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, **46**(4): 24-29.
- [6] Hyde R A. Eyeglass. 1. Very large aperture diffractive telescopes[J]. *Applied Optics*, 1999, **38**(19): 4198-212.
- [7] Early J T, Hyde R, Baron R L. Twenty-meter space telescope based on diffractive Fresnel lens[C]//*Proceedings of SPIE the International Society for Optical Engineering*, 2004, **5166**: 148-156.
- [8] Atcheson P D, Stewart C, Domber J, et al. MOIRE: initial demonstration of a transmissive diffractive membrane optic for large lightweight optical telescopes[C]//*Space Telescopes & Instrumentation: Optical, Infrared, & Millimeter Wave*, 2012: 21.
- [9] Atcheson P, Domber J, Whiteaker K, et al. MOIRE: ground demonstration of a large aperture diffractive transmissive telescope[C]//*SPIE Astronomical Telescopes + Instrumentation. International Society for Optics and Photonics*, 2014, **9143**: 91431W.
- [10] 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(1): 106-108.
ZHANG Nan, LU Zhenwu, LI Fengyou. Optical design of diffractive telescope[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007(1): 106-108.
- [11] 王若秋, 张志宇, 薛栋林, 等. 用于空间望远镜的大口径高衍射效率薄膜菲涅尔衍射元件[J]. 红外与激光工程, 2017, **46**(9): 123-130.
WANG Ruoqiu, ZHANG Zhiyu, XUE Donglin, et al. Large-diameter high-efficiency diffractive Fresnel membrane elements for space telescope[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, **46**(9): 123-130.
- [12] 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.
- [13] 张健, 栗孟娟, 阴刚华, 等. 用于太空望远镜的大口径薄膜菲涅尔衍射元件[J]. 光学精密工程, 2016, **24**(6): 1289-1296.
ZHANG Jian, LI Mengjuan, YIN Ganghua, et al. Large-diameter membrane Fresnel diffraction elements for space telescope[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, **24**(6): 1289-1296.
- [14] 吴海清, 田海霞, 崔莉. 大视场、大相对孔径长波红外机械无热化光学系统设计[J]. 红外, 2015, **36**(8): 1-4,8.
WU Haiqing, TIAN Haixia, CUI Li. Design of Mechanically Athermalized Longwave Infrared Optical System with Wide Field of View and Large Relative Aperture[J]. *Infrared*, 2015, **36**(8): 1-4,8.
- [15] 韩莹, 王肇圻, 杨新军, 等. 8~12 μm 波段折/衍混合反摄远系统消热差设计[J]. 光子学报, 2007, **36**(1): 77-80.
HAN Ying, WANG Zhaoqi, YANG Xinjun, et al. Design on Athermal Infrared Diffractive-Refractive Hybrid Inversed Telephoto System in 8~12 μm [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(1): 77-80.
- [16] 张发平, 张华卫. 基于二元衍射面的长波无热化光学系统设计[J]. 红外技术, 2020, **42**(1): 25-29.
ZHANG Faping, ZHANG Huawei. Design of Long-wave Athermal Optical System Based on Binary Diffraction Surface[J]. *Infrared Technology*, 2020, **42**(1): 25-29.
- [17] 李升辉, 李欣, 李虹静. 基于谐衍射的红外双波段共口径消热差光学系统设计[J]. 红外技术, 2020, **42**(1): 19-24.
LI Shenghui, LI Xin, LI Hongjing. Design of Infrared Dual-Band Common Aperture Thermal Elimination Optical System Based on Harmonic Diffraction[J]. *Infrared Technology*, 2020, **42**(1): 19-24.