

# 宽温度范围的深紫外光学系统无热化设计

高旭东, 崔庆丰\*, 郑汉青, 胡洋, 孙林, 王琦

长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022

**摘要** 环境温度的变化会引起光学系统产生热离焦现象, 导致系统像质不稳定。由于材料的限制, 在深紫外波段内, 光学系统的无热化设计过程和结果十分复杂。因此, 提出了拆分设计和单层衍射光学元件相结合的方法实现深紫外光学系统的无热化设计。该方法首先求解了消热差、消色差方程组, 并用结果对深紫外光学系统进行拆分再组合, 简化了无热化设计过程。然后在组合系统中加入单层衍射光学元件以简化设计结果。用该方法对焦距为110 mm,  $F$  数为3.5, 温度为 $-60\sim 100\text{ }^\circ\text{C}$ 的深紫外侦察相机镜头进行无热化设计, 得到的系统在奈奎斯特频率为18.5 lp/mm处, 调制传递函数均大于0.65。结果表明, 该方法能解决深紫外透射式光学系统在宽温度范围内的热离焦问题, 同时能提升系统的光学性能。

**关键词** 光学设计; 拆分设计; 深紫外波段; 无热化; 单层衍射光学元件

中图分类号 O435

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.1722001

## Athermalization Design of Deep Ultraviolet Optical System with Wide Temperature Range

Gao Xudong, Cui Qingfeng\*, Zheng Hanqing, Hu Yang, Sun Lin, Wang Qi

*School of Opto-Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology,  
Changchun, Jilin 130022, China*

**Abstract** The changes in ambient temperature will cause thermal focus shift in the optical system, which leads to the instability of the image quality. Due to the limitation of materials, the athermal design process and results of optical system in deep ultraviolet band are very complex. Therefore, we propose a method combining split design and single-layer diffractive optical element to realize the athermal design of deep ultraviolet optical system. In this method, the solution of the athermalized and achromatic equations are first presented, and the results are used to split and recombine the deep ultraviolet optical system, which simplifies the athermal design process. Then a single layer diffractive optical element is added to the combined system to simplify the design results. With this method, a deep ultraviolet reconnaissance camera lens with a focal length of 110 mm, an  $F$ -number of 3.5, and a temperature of  $-60\sim 100\text{ }^\circ\text{C}$  is designed athermally. When the Nyquist frequency of the obtained system is 18.5 lp/mm, the modulation transfer functions are all greater than 0.65. The results show that this method can solve the thermal defocusing of the deep ultraviolet transmission optical system in a wide temperature range, and at the same time can improve the optical performance of the system.

**Key words** optic design; split design; deep ultraviolet band; athermalization; single layer diffractive optical element

**OCIS codes** 220.2740; 220.3620; 040.7190; 220.1000

## 1 引 言

空间环境温度的变化对光学系统的使用有很大影响, 特别是用于军事或航天器上的现代光学仪器都需要在一定的温度范围内保持稳定性<sup>[1-3]</sup>。当探测装置周围温度发生变化时, 光学系统由于

镜片、镜筒材料的热变形, 会产生热离焦现象, 尤其是对波长较短的深紫外光学系统成像质量影响极为严重。

无热化设计通常采用机械补偿和光学无热化两种方法实现。典型的机械补偿方法包括Friedman<sup>[4]</sup>提出的被动机械补偿方法和主动机电

收稿日期: 2020-04-29; 修回日期: 2020-05-22; 录用日期: 2020-05-29

基金项目: 国家重大科技专项高分专项(51-H34D01-8358-13/16)

\* E-mail: qf\_cui@163.com

无热化补偿方法,但这两种方法都会使系统结构变得复杂,增加制造成本,且会降低探测结果的真实性。光学无热化方法避免了这些缺点,利用镜片与镜筒材料在某一温度区间内的热变化,相互搭配,减小了光学系统的热离焦现象,使成像结果在可接受范围内。在红外光波段,Tamagawa 等<sup>[5]</sup>通过无热图挑选玻璃组合建立多透镜系统实现无热化,胡玉禧等<sup>[6]</sup>通过建立消热差、消色差方程组求解透镜组进行无热化光学设计;在可见光波段,Lim 等<sup>[7]</sup>利用系统结构等效及无热玻璃图挑选光学材料和镜筒材料的方法进行无热化设计;解娜等<sup>[8]</sup>提出了一种基于权重分组的无热化设计方法,但在波长为 230~270 nm 的深紫外波段,可用材料数量十分有限,很难实现深紫外光学系统的无热化设计。随着加工技术的进步以及对衍射光学元件(DOE)热性质、材料性质及其对光学系统性能影响的研究,DOE 温度补偿技术得到了进一步发展<sup>[9-14]</sup>,但这些折衍混合的设计方法只适用于红外和可见光波段,直接在深紫外光学系统中应用时,由于材料等因素的限制,光学系统的设计过程和结果仍然复杂、耗时,且缺乏目的性,难以实现简化光学系统的目的。

本文通过对深紫外光学系统的设计过程与结果进行分析,在深紫外波段提出了运用拆分设计与 DOE 相结合的方法实现系统的无热化设计。该方法根据消热差、消色差方程组的求解结果对深紫外光学系统进行拆分再组合,从而简化无热化设计的过程。但为了达到初步无热化的目的,设计结果的复杂性没有发生改变。因此,在初始结构中加入 DOE,利用其光学特性,去除特殊材料,改变深紫外光学系统中材料结构的搭配,仅运用氟化钙和熔融石英两种材料消除光学系统的色差和热差。仿真实验结果表明,该方法能简化深紫外光学系统无热化设计的过程与结果,同时提升系统的整体光学性能。

## 2 设计原理

### 2.1 拆分消色差及消热差分析

深紫外光学系统的消色差和消热差设计,需要满足光焦度方程、色差方程以及热差方程。若光学系统由  $K$  块镜片组成,总光焦度为  $\Phi$ ,则该光学系统的消色差、消热差方程为<sup>[15-16]</sup>

$$\begin{cases} \Phi = \sum_{i=1}^K \varphi_i \\ \frac{d\Phi}{d\lambda} = \sum_{i=1}^K \frac{\varphi_i}{\nu_i} = 0 \\ \frac{d\Phi}{dT} = \left[ \sum_{i=1}^K (\varphi_i \gamma_i) \right] = -\Phi \alpha_h \end{cases}, \quad (1)$$

式中, $\varphi_i$  为第  $i$  块镜片的光焦度, $\lambda$  为波长, $\nu_i$  为第  $i$  块镜片所用材料的阿贝数, $T$  为温度, $\alpha_h$  为镜筒材料的线膨胀系数, $\gamma_i$  为第  $i$  块镜片材料的光热膨胀系数,可表示为

$$\gamma_i = \frac{\partial \varphi_i / \partial T}{\varphi_i} = \frac{\partial n_i / \partial T}{n_i - 1} - \alpha_i, \quad (2)$$

式中, $n_i$  和  $\alpha_i$  分别为第  $i$  块镜片材料的折射率和线膨胀系数。

考虑到深紫外波段基底材料的局限性和成本,中长焦距且视场相对较大的深紫外光学系统,难以满足(1)式。为解决因材料较少而导致深紫外光学系统无热化设计困难的问题,将(1)式变形为

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^L \varphi_j = 1 \\ \sum_{j=1}^L \frac{\varphi_j}{\nu_j} = \sum X_{\text{TchC}} \\ \left[ \sum_{j=1}^L (\varphi_j \gamma_j) \right] + \Phi \alpha_h = \sum X_{\text{TC}} \end{cases}, \quad (3)$$

式中, $L$  为材料数量, $\varphi_j$ 、 $\nu_j$ 、 $\gamma_j$  分别为所用材料的光焦度、阿贝数和光热膨胀系数, $\sum X_{\text{TchC}}$  和  $\sum X_{\text{TC}}$  分别为光学系统的色差与热差,为了简化后续计算,对光学系统的总光焦度  $\Phi$  进行归一化处理。

拆分设计的原理如图 1 所示,首先将深紫外波段基底材料的参数带入(3)式,利用 Matlab 软件建立数学模型,根据求解结果,对光学系统进行预分组,对各小组的  $\sum X_{\text{TchC}}$  和  $\sum X_{\text{TC}}$  进行相加对比,

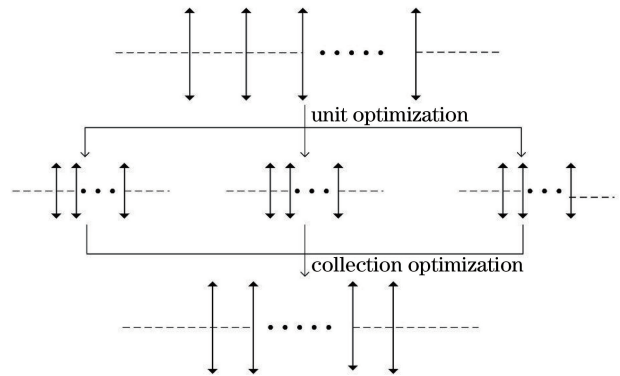


图 1 初始结构模型

Fig. 1 Model of initial structure

得到最优色差、热差组合  $\min(\sum X_{\text{TchC}}, \sum X_{\text{TC}})$ , 完成对光学系统的拆分。然后采用平均分配方法, 得到每组系统所用材料的光焦度。最终通过光瞳衔接原则, 将所得的多个光学组件组合成一个光学系统, 经简单调整完成光学系统初始结构的搭建。

通过拆分设计再组合的方法将光学系统的复杂设计转变为简单的、有方向的设计, 简化了消热差、消色差方程组的求解和无热化设计过程。但只是简化了设计过程, 并没有简化结果, 甚至会使最终设计结果变复杂。深紫外波段常用的基底材料仅有氟化钙和熔融石英, 氟化钙的阿贝数  $\nu_1$  大于熔融石英的阿贝数  $\nu_2$ , 通过消色差理论和方程可知, 用氟化钙做正透镜, 熔融石英做负透镜, 能很好地控制光学系统的色差。但氟化钙的线膨胀系数  $\alpha_1$  远远大于熔融石英的线膨胀系数  $\alpha_2$ , 且氟化钙的折射率温度系数为负值, 熔融石英的折射率温度系数为正值, 若仅考虑热差, 在光学系统中需要用熔融石英做正透镜。为了使初始结构的色差和热差都在可接受范围内, 无热化设计通常会很复杂, 同时还需加入氟化镁和蓝宝石等难以加工且具有双折射性质的特殊材料, 导致最终的设计结果无论在材料使用还是镜片数量上, 都不能达到理想效果。

在上述深紫外光学系统的初始结构中加入 DOE, DOE 具有的特殊色散性和热性质, 可以去除系统初始结构中的特殊材料。针对氟化钙和熔融石英材料组合消色差和消热差的冲突问题, 找到一个可接受范围内的平衡点, 使光学系统既能很好地实现色差校正又能满足无热化需求, 同时还可以减少系统的镜片数量, 降低紫外侦察相机的生产制造成本。此外, 由于深紫外波段较窄, 使用单层衍射光学元件(SLDOE)对非中心波长处的衍射效率影响很小, 避免了多层衍射光学元件(MLDOE)在结构、制造、角度范围和成本等方面的缺陷。

## 2.2 单层衍射光学元件的特性

DOE 实质上是一个变周期光栅, 与传统的折射和反射光学元件相比, DOE 有很多独特的性质。利用其特殊的色散性质和热性质, 可以对光学系统实现消色差和热差。DOE 的色散性质可以用等效阿贝数  $\nu'$  表示为

$$\nu' = \frac{n_o - 1}{n_{\min} - n_{\max}} = -\frac{\lambda_o}{\lambda_{\max} - \lambda_{\min}}, \quad (4)$$

式中,  $\lambda_o$ 、 $\lambda_{\max}$  和  $\lambda_{\min}$  分别为工作波段内的中心波长、最大波长和最小波长,  $n_o$ 、 $n_{\max}$  和  $n_{\min}$  分别为 DOE 在中心波长、最大波长和最小波长对应的折射

率。通过(4)式可知, SLDOE 的等效阿贝数  $\nu'$  为负值, 将其与传统折射光学元件组合, 可以实现单一衍射混合光学元件的消色差<sup>[17]</sup>。在深紫外光学系统中加入 SLDOE 后, 利用其特殊的色散性减少熔融石英材料校正色差的权重, 使熔融石英在光学系统中承担的负光焦度变小, 甚至部分熔融石英可作为正透镜。此外, 随着环境温度的变化, 折射透镜和衍射透镜的焦点漂移方向相反<sup>[18]</sup>, 利用 DOE 的特殊热性质使系统中折射透镜和衍射透镜离焦量相互补偿, 减小了光学系统的离焦量, 达到深紫外光学系统无热化设计目的。

衍射效率是评价 DOE 的重要指标之一, 通常在忽略 DOE 吸收、反射等因素下, 将 DOE  $m$  级次上的衍射光能量与入射到 DOE 上的总能量之比定义为该级次的衍射效率<sup>[19]</sup>, 可表示为<sup>[20]</sup>

$$\eta_m = \text{sinc}^2 [m - \varphi(\lambda)], \quad (5)$$

式中, sinc 为辛格函数,  $\lambda$  为计算时的波长,  $\varphi(\lambda)$  为 SLDOE 对应波长的相位延迟, 当光线从空气垂直入射到衍射面上时, 可表示为

$$\varphi(\lambda) = \frac{H_o}{\lambda} (n - n_o), \quad (6)$$

式中,  $n$  为衍射元件的基底折射率系数,  $n_o$  为 SLDOE 周围环境的折射率系数,  $H_o$  为子周期的相位高度, 可表示为

$$H_o = \frac{\lambda_o}{n(\lambda_o) - 1}, \quad (7)$$

式中,  $\lambda_o$  为设计波长,  $n(\lambda_o)$  为材料在对应波长下的折射率。

随着温度的变化, SLDOE 子周期的相位高度  $H_o$  与基底材料同时发生形变, 进而导致  $\varphi(\lambda)$  发生变化, 影响 SLDOE 的衍射效率。受温度影响 SLDOE 的子周期相位高度  $H_a$  和相位延迟  $\varphi_a$  可表示为<sup>[21]</sup>

$$H_a = H_o (1 + \alpha \Delta T), \quad (8)$$

$$\varphi_a = \frac{2\pi}{\lambda} \left[ H_a (n - n_o) + H_o \left( \frac{dn}{dT} - \frac{dn_o}{dT} \right) \Delta T \right], \quad (9)$$

式中,  $\alpha$  为衍射元件基底材料的线膨胀系数,  $\Delta T$  为温度变化量,  $dn/dT$  和  $dn_o/dT$  分别为对应折射率的温度变化系数。将(8)式、(9)式代入(5)式, 得到光线从空气垂直入射到衍射面上的温度衍射效率为

$$\eta_m = \text{sinc}^2 \left\{ m - \frac{H_o}{\lambda} \left[ (1 + \alpha \Delta T) (n(\lambda) - 1) + \frac{dn}{dT} \Delta T \right] \right\}. \quad (10)$$

通过(10)式可以搭建紫外波段温度衍射效率的数学模型。

### 3 设计实例与分析

#### 3.1 设计指标

通过上述分析对有效焦距(EFL)为 110 mm, 波长为 230~270 nm, 光圈数(*F*-number)为 3.5, 视场角(FOV)为±10°的紫外侦察相机镜头进行无热化设计, 探测器为 Princeton Instruments 公司生产的 PISIX2048BUV, 其像元尺寸为 13.5 μm×13.5 μm, 光敏面尺寸为 27.6 mm×27.6 mm, 操作温度范围为-60~100 °C, 镜筒材料为金属铝, 系统的具体参数如表 1 所示, 其中, > 0.65 @ 18.5 lp/mm 表示在截止频率为 18.5 lp/mm 处系统的调制传递函数(MTF)大于 0.65。

#### 3.2 深紫外光学系统初始结构的无热化设计

由于常用的材料很难实现深紫外光学系统的无热化设计, 因此建立在初始结构时除了氟化钙和熔融石英两种材料外, 还需加入特殊材料氟化镁。将这三种材料的参数带入(3)式, 利用 Matlab 软件建立数学模型, 得到的结果如表 2 所示。表 2 中 Glass1、Glass2、Glass3 分别为各小组所选材料名

表 2 透镜组的部分求解参数

Table 2 Partial solution parameters of lens group

Serial number	$\varphi_1$	$\varphi_2$	$\varphi_3$	Glass1	Glass2	Glass3	$\sum X_{TchC}$	$\sum X_{TC}$
1	1.51	-2.45	1.94	CAF2	F_SILICA	MGF2	$-2.42 \times 10^{-4}$	$-1.10 \times 10^{-4}$
2	1.60	-2.52	1.92	CAF2	F_SILICA	MGF2	$-7.59 \times 10^{-4}$	$-1.16 \times 10^{-4}$
3	1.73	-2.74	2.01	CAF2	F_SILICA	MGF2	$-3.37 \times 10^{-3}$	$-1.26 \times 10^{-4}$
4	1.80	-3.31	2.51	CAF2	F_SILICA	MGF2	$-7.65 \times 10^{-3}$	$-1.71 \times 10^{-4}$
5	-3.45	1.53	2.92	CAF2	F_SILICA	MGF2	$3.23 \times 10^{-4}$	$1.75 \times 10^{-4}$

平均分配系统光焦度可得, I、II 组的焦距均为 220 mm, 且两组中各材料的光焦度所占比例适中, 因此都采用三片式结构。由于光线近似从无穷远进入光学系统, I 组中第一块透镜为正透镜, 所以将 I 组作为组合光学系统的前组, 根据光瞳衔接原则, 将 I、II 组按照前后顺序组合成一个光学系统。对初始结构进行简单优化后, 系统的横向色差、彗差、场曲、像散较大。且当光学系统的光焦度确定后, 光阑的移动不会改变球差和轴向色差以及热差的大小, 但对横向色差、像散、彗差有很大影响。因此, 可通过移动光阑减小初始结构中的横向色差、彗差以及像散, 最终发现, 当光阑位于第八面(第四块镜片后表面)和第九面(第五块镜片前表面)之间时, 效果最好。此外, 由于 I、II 组都是正光焦度, 像面为负场

表 1 系统参数

Table 1 Parameters of system

Parameter	Value
wavelength range /nm	230-270
EFL /mm	110
<i>F</i> -number	3.5
FOV / (°)	±10
MTF	>0.65@18.5 lp/mm
temperature range /°C	-60-100
housing material	aluminum ( $23.6 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ )

称,  $\varphi_1$ 、 $\varphi_2$ 、 $\varphi_3$  分别为各小组对应材料归一化后的光焦度。可以发现, 熔融石英做负透镜时,  $\sum X_{TchC}$ 、 $\sum X_{TC}$  为负值; 熔融石英材料做正透镜时,  $\sum X_{TchC}$ 、 $\sum X_{TC}$  为正值。根据表 2 中各材料光焦度所占的比例、 $\sum X_{TchC}$ 、 $\sum X_{TC}$  以及系统参数的指标要求, 将光学系统预分为两组。为了便于初始结构的无热化设计以及后期系统优化, 选择色差、热差互为相反数的两组进行相互补偿, 且热差所占权重较大, 最终选取表 2 中第 4 组与第 5 组得到最优色差、热差组合  $\min(\sum X_{TchC}, \sum X_{TC})$ , 记为 I、II。

曲, 所以在靠近焦平面处加入一负透镜的场镜, 以增大光学系统视场角。最终优化后的深紫外光学系统初始结构如图 2 所示, 光学系统的总长为 134.64 mm, 共 7 块镜片。

该结构在温度为-60~100 °C 时成像稳定, 可

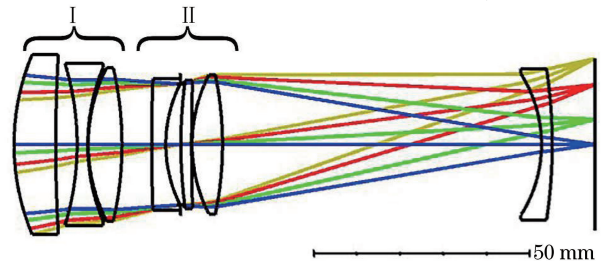


图 2 深紫外光学系统初始结构

Fig. 2 Initial structure of deep ultraviolet optical system



达到消热差的预期效果,但由于受像差影响,成像质量不好。深紫外光学系统初始结构的 MTF 如图 3 所示,由于深紫外光学系统的能量集中度与探测器的限制,采用像元拼接方法,将像素尺寸为  $2 \text{ pixel} \times 2 \text{ pixel}$  的像元当作一个像元进行处理,拼接后的像元尺寸为  $27 \mu\text{m} \times 27 \mu\text{m}$ , 极限分辨为

$18.5 \text{ lp/mm}$ , 在空间频率为  $18.5 \text{ lp/mm}$  时, MTF 大于 0.2, 无法达到预期成像效果。为了使该结构在要求温度范围内得到良好的成像质量, 只能增加镜片数量或加入其他特殊材料, 但这样会导致系统的整体结构变重, 增加设计成本, 且使用的氟化镁等特殊材料会带来双折射问题。

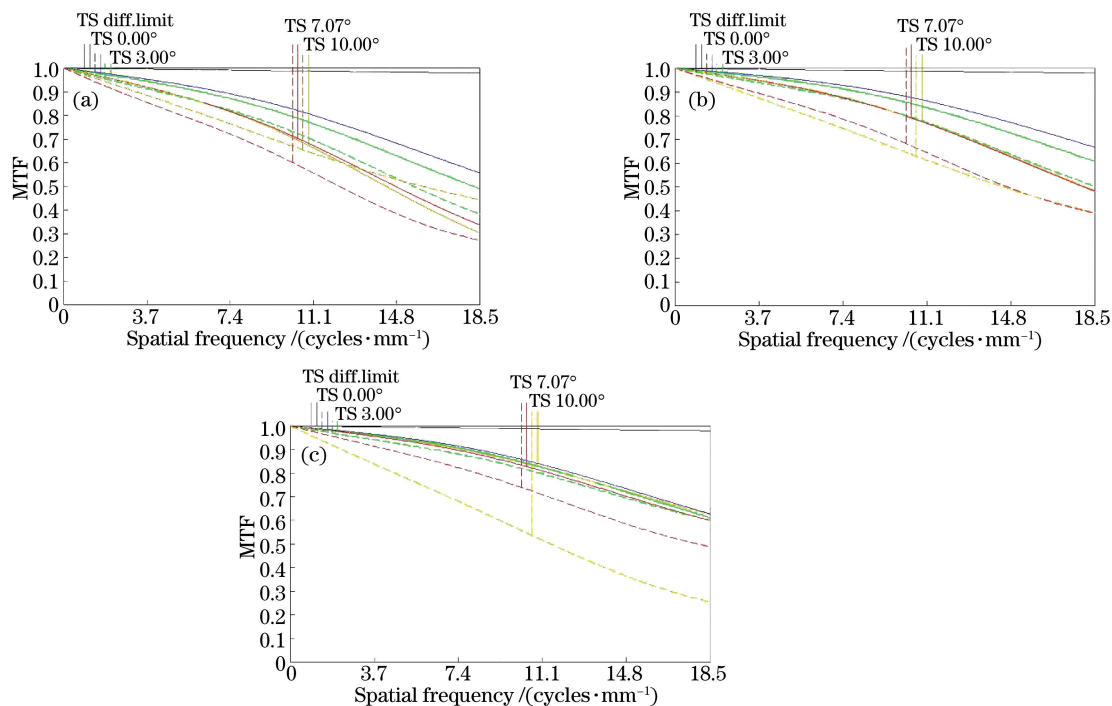


图 3 不同温度下光学系统 MTF 曲线。(a)  $-60 \text{ }^\circ\text{C}$ ; (b)  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ ; (c)  $100 \text{ }^\circ\text{C}$

Fig. 3 MTF curves of optical system at different temperatures. (a)  $-60 \text{ }^\circ\text{C}$ ; (b)  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ ; (c)  $100 \text{ }^\circ\text{C}$

### 3.3 无热化深紫外折衍混合系统设计

在上述初始结构中, 加入 SLDOE 后, 利用 SLDOE 特殊的色散性与热性质, 重新调整系统材料的结构搭配, 去除第三块和第七块氟化镁镜片 (从左向右数), 通过软件优化后得到深紫外无热化光学系统的结构, 如图 4 所示。光学系统共有

五块镜片, 总长为  $140.503 \text{ mm}$ , 第二、四、五块镜片的材料是熔融石英, 且第四块镜片为正透镜, 第二块镜片虽然是负透镜, 但与初始结构中第二块镜片相比, 光焦度绝对值变小。第一、三块为氟化钙镜片, SLDOE 以第三块镜片为基底, 加在其前表面上。

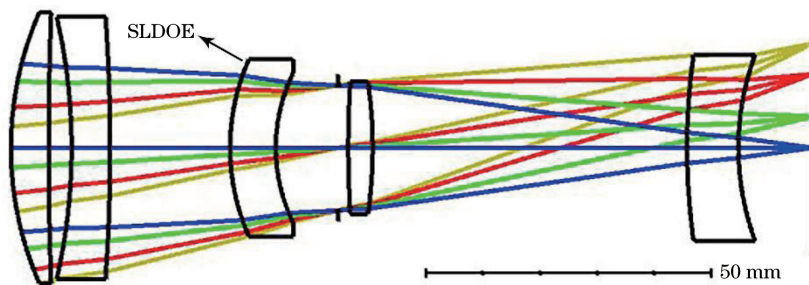


图 4 折衍混合深紫外光学系统的结构

Fig. 4 Structure of refraction-diffraction hybrid deep ultraviolet optical system

对优化后的光学系统进行无热化分析可知, 加入 SLDOE 后, 与初始结构相比去除了特殊材料氟化镁, 减少了镜片数并提高了系统的光学性能。在

温度分别为  $-60 \sim 100 \text{ }^\circ\text{C}$  时, 仿真得到深紫外光学系统的 MTF 曲线, 如图 5 所示。可以发现, 在空间频率为  $18.5 \text{ lp/mm}$  时, 不同温度下系统的

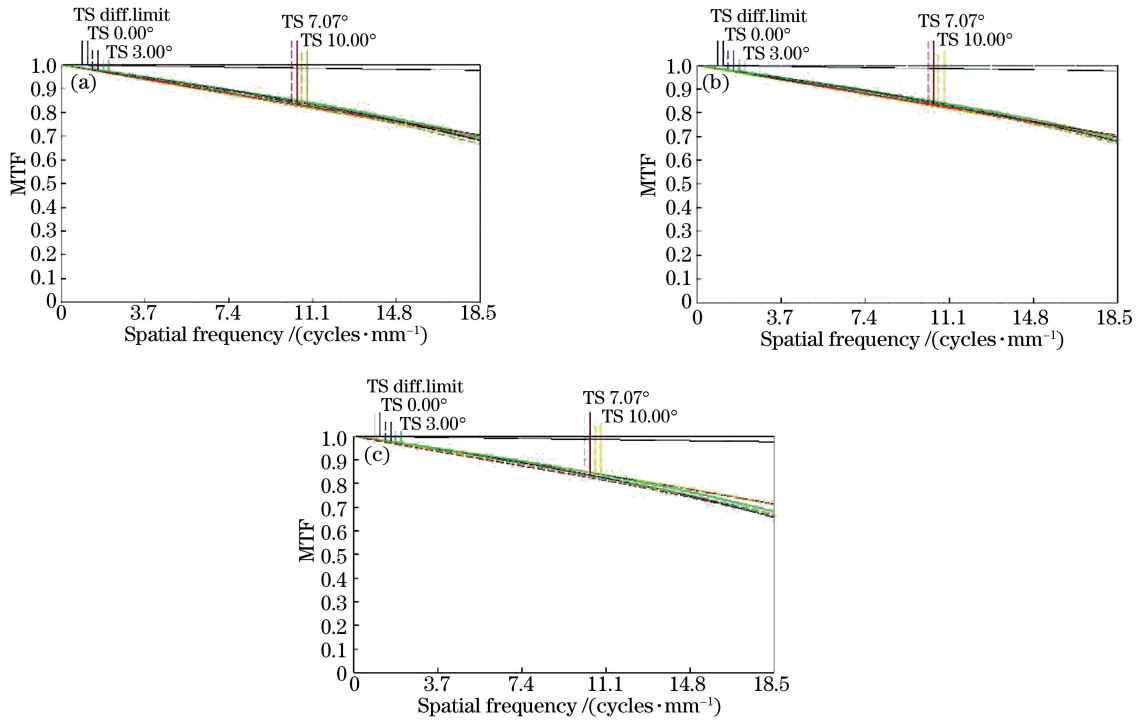


图 5 不同温度下折衍混合光学系统 MTF 曲线。(a)  $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; (b)  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; (c)  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$

Fig. 5 MTF curves of refractive-diffraction hybrid optical systems at different temperatures. (a)  $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; (b)  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; (c)  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$

MTF 均大于 0.65, 这表明光学系统有较好的成像质量。

表 3 为深紫外光学系统在温度为  $-60\sim 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 弥散斑均方根半径为  $13.5\text{ }\mu\text{m}$  (一个像元) 处的最小能量集中度和点列图的最大均方根半径。可以发现, 系统的能量集中度在一个像元内均大于 80%, 满足深紫外系统能量集中度的设计要求, 光学系统弥散斑的形状与尺寸也得到了较好的控制, 点列图的最大均方根半径基本保持不变, 满足像差设计要求。与初始结构相比, 加入 SLDOE 可提升光学系统的性能, 且简化了光学系统结构, 最终实现了深紫外光学系统无热化设计过程和结果的简化。

表 3 消热差后的系统参数随温度的变化

Table 3 Changes of system parameters with temperature after adiabatic difference

Temperature / $^{\circ}\text{C}$	Spot diagram / $\mu\text{m}$	Encircled energy /%
-60	12.675	81.194
-40	11.760	81.126
20	12.120	81.318
60	12.159	81.801
100	12.224	80.032

### 3.4 SLDOE 在深紫外波段的分析

在上述折衍混合光学系统结构中, SLDOE 的

特征参量曲线如图 6 所示, 其中, 曲线 A 表示衍射面每毫米周期数 (periods/mm) 随实际径向坐标的变化。可以发现, 在衍射面边缘处, 每毫米环带周期数为 127, 对应 SLDOE 最小周期宽度为  $7.87\text{ }\mu\text{m}$ 。曲线 B 表示衍射面相位随实际径向坐标的变化, 用周期数 (periods) 表征, 可以发现, 衍射面每毫米的周期数随径向坐标的增加而增加。由于 SLDOE 的最小周期宽度远大于中心波长, 用标量衍射设计理论进行分析, 证明了 SLDOE 在深紫外波段设计的理论可行性<sup>[19]</sup>。对于加工方面, 近些年以氟化钙为基底的 SLDOE 在日盲紫外预警光学系统中得到了广泛应用<sup>[22-24]</sup>, 此外氟化钙晶体可以用超精密单点

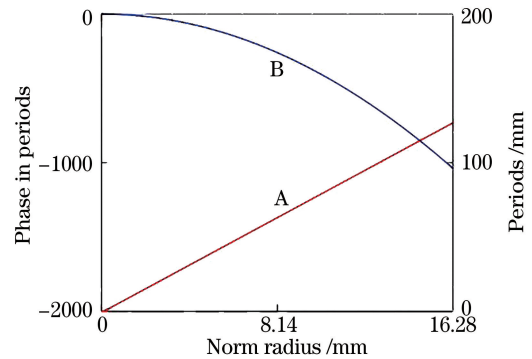


图 6 SLDOE 的特征参量曲线

Fig. 6 Characteristic parameter curves of SLDOE

金刚石车削等方法进行加工,且加工粗糙度可以控制在 2 nm 左右<sup>[25-26]</sup>,因此实验中以氟化钙为基底的 SLDOE 在实际中是可行的。

为了分析基底为氟化钙的 SLDOE 在深紫外波段受温度衍射效率的影响,将(10)式带入 Matlab 软件进行数学建模,结果如图 7 所示,图 7(a)是温度为-60,20,100 °C 时的衍射效率曲线,图 7(b)为温度、波长、衍射效率的三维模型。可以发现,温度为

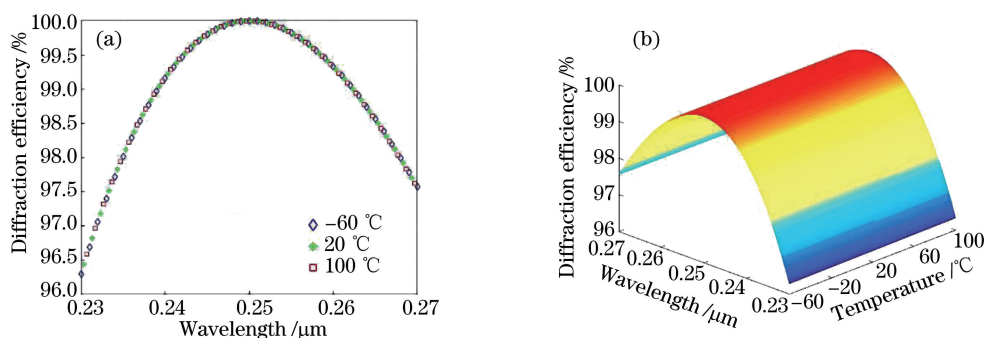


图 7 氟化钙晶体在深紫外波段的衍射效率。(a)不同温度下的衍射效率曲线;(b)温度,波长和衍射效率的三维模型

Fig. 7 Diffraction efficiency of calcium fluoride crystals in the deep ultraviolet band. (a) Diffraction efficiency curves at different temperatures; (b) three-dimensional model of temperature, wavelength and diffraction efficiency

### 3.5 公差分析

光学系统结构的设计需要考虑后期的加工与装调,因此需要对设计完成的光学系统结构进行公差分析。在折衍混合光学系统的公差分析中,主要分析曲率半径公差、厚度公差、偏心公差以及倾斜公差等。与灵敏度和反转灵敏度的分析不同, Monte Carlo 分析法可以同时模拟所有波动的效果<sup>[27]</sup>。实验基于 ZEMAX 软件利用 Monte Carlo 分析法模拟公差,用 MTF 均值作为结构的评价标准。根据

表 4 折衍混合系统的加工公差

Table 4 Machining tolerance of the refraction-diffraction hybrid system

Parameter	Tolerance specification
surface aperture	±2
thickness tolerance /mm	±0.05
X-eccentricity of lens element /mm	±0.05
Y-eccentricity of lens element /mm	±0.05
X-inclination of lens element	±3'
Y-inclination of lens element	±3'
X-eccentricity of lens surface /mm	±0.08
Y-eccentricity of lens surface /mm	±0.08
X-inclination of lens surface	±4.8'
Y-inclination of lens surface	±4.8'
surface irregularity tolerance	±0.5
refractive index tolerance	±1×10 <sup>-3</sup>

-60 °C 和 100 °C 时的衍射效率相差最大值为 0.0376%,温度为-60 °C 与 20 °C 时的衍射效率相差最大值为 0.0188%。且波长范围为 0.23 ~ 0.27 μm 时,衍射效率在温度为-60~100 °C 时的变化很小。还可以发现,温度为-60~100 °C 时的衍射效率均大于 96%。因此当环境温度发生变化时,以氟化钙为基底的 SLDOE 在深紫外波段,衍射效率对成像质量的影响可以忽略。

表 4 的公差分配方案得到的分析结果如图 8 所示,其中,图例表示半视场角,可以发现,在空间频率为 18.5 lp/mm 处,超过 90%样本的 MTF 预估值大于 0.5,这表明采用该公差分配方案装配完成的深紫外侦察相机系统满足成像质量要求。

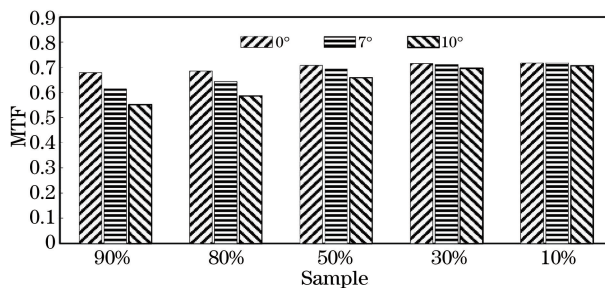


图 8 MTF 的预估结果

Fig. 8 Estimated results of MTF

## 4 结 论

针对深紫外光学系统无热化设计过程与结果复杂的问题,提出了拆分设计与 SLDOE 相结合的无热化设计方法。该方法仅使用氟化钙和熔融石英两种常用深紫外材料,通过 5 块镜片实现了宽温度范围内的折衍混合深紫外侦察相机镜头的无热化设计。设计的系统在温度为-60~100 °C,空间频率为 18.5 lp/mm 时,MTF 均大于 0.65,公差分析后的 MTF 均大于 0.5。设计结果表明,该方法通过拆

分设计,降低了深紫外光学系统的设计难度,结合SLDOE简化光学系统,可提升系统的性能,实现宽温度范围的深紫外光学系统无热化设计。

## 参 考 文 献

- [1] Qu H M, Zhang X, Zhang J Z, et al. Design of compact athermalizing uncooled infrared optical system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(5): 0522003.  
曲贺盟, 张新, 张继真, 等. 紧凑型无热化非制冷红外光学系统设计 [J]. *光学学报*, 2014, 34(5): 0522003.
- [2] Qu R, Deng J, Peng X L, et al. 0.4–1.7  $\mu\text{m}$  wideband fast  $F$ -number optical system design [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(8): 0822007.  
曲锐, 邓键, 彭晓乐, 等. 0.4~1.7  $\mu\text{m}$  宽波段大相对孔径光学系统设计 [J]. *光学学报*, 2015, 35(8): 0822007.
- [3] Liu W Y, Xu Y S, Yao Y, et al. Relationship analysis between transient thermal control mode and image quality for an aerial camera [J]. *Applied Optics*, 2017, 56(4): 1028-1036.
- [4] Friedman I. Thermo-optical analysis of two long-focal-length aerial reconnaissance lenses [J]. *Proceedings of SPIE*, 1980, 0216: 146-155.
- [5] Tamagawa Y, Tajime T. Dual-band optical systems with a projective athermal chart: design [J]. *Applied Optics*, 1997, 36(1): 297-301.
- [6] Hu Y X, Zhou S X, Xiang L B, et al. Design of athermal optical system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, 20(10): 1386-1391.  
胡玉禧, 周绍祥, 相里斌, 等. 消热差光学系统设计 [J]. *光学学报*, 2000, 20(10): 1386-1391.
- [7] Lim T Y, Park S C. Achromatic and athermal lens design by redistributing the element powers on an athermal glass map [J]. *Optics Express*, 2016, 24(16): 18049-18058.
- [8] Xie N, Cui Q F. Athermalization design of visible light optical system based on grouping by weight [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(12): 1222001.  
解娜, 崔庆丰. 基于权重分组的可见光光学系统无热化设计 [J]. *光学学报*, 2018, 38(12): 1222001.
- [9] Behrmann G P, Bowen J P. Influence of temperature on diffractive lens performance [J]. *Applied Optics*, 1993, 32(14): 2483-2489.
- [10] Guo Y H, Shen M Z, Lu Z K. Athermal design for infrared diffractive/refractive optical system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, 20(10): 1392-1395.  
郭永洪, 沈忙作, 陆祖康. 折射/衍射红外光学系统的消热差设计 [J]. *光学学报*, 2000, 20(10): 1392-1395.
- [11] Bai J, Sun T, Sheng Y B, et al. Athermalization analysis of infrared hybrid refractive-diffractive optical systems [J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, 19(7): 997-1002.  
白剑, 孙婷, 沈亦兵, 等. 红外折射-衍射混合光学系统的热差分析 [J]. *光学学报*, 1999, 19(7): 997-1002.
- [12] Wang X, Xu S W. Athermal design for visible diffractive-refractive hybrid optical system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, 24(12): 1595-1598.  
王茜, 许士文. 可见光折/衍射混合光学系统消热差设计 [J]. *光学学报*, 2004, 24(12): 1595-1598.
- [13] Chen X, Yang J F, Ma X L, et al. Athermalization design of wide temperature range for hybrid refractive-diffractive objective in 8–12  $\mu\text{m}$  [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(7): 2089-2092.  
陈潇, 杨建峰, 马小龙, 等. 8~12  $\mu\text{m}$  折-衍混合物镜超宽温度消热差设计 [J]. *光学学报*, 2010, 30(7): 2089-2092.
- [14] Han Y, Wang Z Q, Yang X J, et al. Design on athermal infrared diffractive-refractive hybrid inversed telephoto system in 8–12  $\mu\text{m}$  [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, 36(1): 77-80.  
韩莹, 王肇圻, 杨新军, 等. 8~12  $\mu\text{m}$  波段折/衍混合反望远系统消热差设计 [J]. *光子学报*, 2007, 36(1): 77-80.
- [15] Xie N, Cui Q F, Sun L, et al. Optical athermalization in the visible waveband using the 1+ $\Sigma$  method [J]. *Applied Optics*, 2019, 58(3): 635-641.
- [16] Hu Y, Cui Q F, Sun L, et al. Athermalization of dual-waveband infrared systems containing diffractive optical elements via optical-digital joint design [J]. *Applied Optics*, 2020, 59(4): 1212-1216.
- [17] Meng Y T, Piao M X, Wang Q. Design of refractive diffraction hybrid annular aperture ultrathin imaging optical system [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2019, 48(12): 1211003.  
孟禹彤, 朴明旭, 王琦. 折衍射混合环形孔径超薄成像光学系统设计 [J]. *光子学报*, 2019, 48(12): 1211003.
- [18] Guo Q, Wang R L, Pei Y T, et al. Analysis in thermal stability of diffractive lens [J]. *Acta Photonica Sinica*, 1999, 28(5): 463-466.  
郭晴, 王汝笠, 裴云天, 等. 衍射光学元件热稳定性的分析 [J]. *光子学报*, 1999, 28(5): 463-466.
- [19] Yang L L. Studies on diffraction efficiency of multilayer diffractive optical elements [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2013: 23-29, 16-19.



- 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: 23-29, 16-19.
- [20] Zhao L D. Studies on design theory and application of multi-layer diffractive optics [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2019: 23-27.
- 赵丽东. 多层衍射光学设计理论和应用研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2019: 23-27.
- [21] Piao M X, Cui Q F, Zhang B. Effect of ambient temperature and substrate material selection on diffraction efficiency for diffractive optical elements [J]. Optik, 2018, 166: 189-198.
- [22] Chen Y, Huo F R, Zheng L Q. Solar-blind ultraviolet optical system design for missile warning [J]. Proceedings of SPIE, 2015, 9521: 95210X.
- [23] Wang W S, Mou D, Chen Y. Contemporary optical system design [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2016: 130-132, 135-141.
- 王文生, 牟达, 陈宇. 现代光学系统设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 2016: 130-132, 135-141.
- [24] Song S S. Design of solar blind ultraviolet warning optical system [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2014: 24-35.
- 宋珊珊. 日盲紫外告警光学系统设计[D]. 长春: 长春理工大学, 2014: 24-35.
- [25] Luo X C, Sun J N, Chang W L, et al. Single point diamond turning of calcium fluoride optics [J]. Key Engineering Materials, 2012, 516: 408-413.
- [26] Xu H H. Research on surface roughness control of brittle optical materials by single-point diamond turning[D]. Shanghai: Fudan University, 2012: 41-52.
- 许宏淮. 单点金刚石车削加工脆性光学材料表面粗糙度的控制研究[D]. 上海: 复旦大学, 2012: 41-52.
- [27] Smith W J. Modern optical engineering[M]. Zhou H X, Cheng Y F, Transl. 4th ed. Beijing: Chemical Industry Press, 2011: 511-524.
- Smith W J. 现代光学工程[M]. 周海宪, 程云芳, 译. 4版. 北京: 化学工业出版社, 2011: 511-524.