

宽温度范围双层衍射元件优化设计及应用

毛珊^{1,2*}, 赖涛^{1,2}, 聂怀乐^{1,2}, 唐玉凤^{1,2}, 宋逸辰^{1,2}, 赵建林^{1,2**}¹西北工业大学物理科学与技术学院光场调控与信息感知工业和信息化部重点实验室, 陕西 西安 710129;²西北工业大学物理科学与技术学院陕西省光信息技术重点实验室, 陕西 西安 710129

摘要 建立了环境温度对双层衍射元件衍射效率影响的数学模型, 给出高衍射效率衍射元件的优化设计方法。通过选择宽温度范围内设计波长对, 计算衍射元件微结构参数, 确保双层衍射元件在基底材料确定的情况下仍具有高衍射效率, 发现混合成像光学系统具有最佳像质。最后设计了一套含有此双层衍射元件的中波红外混合成像光学系统。结果表明, 与传统设计相比, 本文方法能够有效地改善混合成像光学系统的无热化设计像质, 设计结果更好。

关键词 光学设计; 衍射元件; 折衍混合成像光学系统; 无热化设计

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS221894

1 引言

红外光学系统在红外制导、目标识别与跟踪、战场侦察、反隐身、海洋污染等方面具有独特优势^[1-2]。现阶段, 红外光学系统^[3-4]及红外探测器件^[5]的快速发展也加速了此类光学系统在军事、高端商业等领域的应用。光电仪器工作都需要在一定的温度范围内保持稳定, 这对于其在军事或航天器上的应用尤其重要。然而, 红外光学系统具有材料稀少、价格昂贵、温度系数较大等缺点^[6], 红外光学系统的无热化设计会带来红外光学系统结构复杂、装配难度大等问题, 这给此类光学系统的研制带来了很大困难, 因此红外光学系统的无热化设计成为现代光学工程领域的难点问题之一。

衍射元件(DOE)具有特殊色散性质和温度性质, 将其与传统折射光学系统相结合的新型混合成像光学系统, 可以在实现热稳定的同时提高成像性能, 这为红外光学系统的研制提供了一个重要思路^[7-8]。特别地, 多层衍射元件可以在更宽的波段范围内得到更高的衍射效率^[9]。在宽波段无热化光学系统设计中, 使用多层衍射元件, 不仅可以在不同温度范围内满足高质量成像的要求, 还能减少透镜片数, 大幅度降低系统成本, 减小系统质量。

随着现代光学原理的更新和技术的发展, 实现红外光学系统无热化设计的方法也越来越多, 例如传统光学透镜优化设计法、光学材料匹配法、折衍混合光学

系统设计法、波前编码技术等。文献[10-14]论述了实现传统光学系统无热化的设计方法, 这些方法主要是基于光焦度分配原则和像差理论完成对应红外光学系统的无热化设计, 使其在工作温度范围内的像质稳定; 文献[15-17]是基于衍射光学原理和方法得到混合成像光学系统, 实现光学系统的无热化设计; 文献[18-20]通过选择不同材料实现光学系统色差校正和无热化设计; 文献[21]基于波前编码技术实现了红外光学系统的无热化设计。传统透镜优化设计方法会造成系统复杂; 光学匹配法由于红外材料太少, 不是很常用, 波前编码计算耗时。混合成像光学系统设计能够有效降低系统复杂程度, 对材料依赖性也较小, 优化设计流程简单, 但使用的衍射元件会对像质有一定影响, 需要改善, 并且, 宽温度范围下如何实现高衍射效率衍射元件的设计也少有报道。

在实现光学系统的无热化设计中, 环境温度变化会导致衍射元件的衍射效率降低和混合成像光学系统的像质变差。研究温度变化对混合成像光学系统的影响、提出合适的无热化设计方法、减小温度变化对成像质量的影响、增强红外光学系统的温度适应性, 是红外光学领域的重要研究课题^[22-23]。本文提出了宽温度范围下衍射元件的温度-带宽积分平均衍射效率(TBIAD E)的概念和模型, 提出了宽环境温度范围下双层衍射元件的优化设计, 实现了基底材料和温度范围给定下的高衍射效率双层衍射元件优化设计; 最后对基于此算法的含有双层衍射元件的中波波段混合成

收稿日期: 2022-10-31; 修回日期: 2022-11-04; 录用日期: 2023-01-03; 网络首发日期: 2023-02-07

基金项目: 国家自然科学基金(61927810, 61905195)、中国科学院光谱成像技术重点实验室开放基金课题(LSIT202006W)、西北工业大学中央高校基本科研业务(310202011QD001)、西安市青年人才托举项目(095920201316)

通信作者: *maoshan_optics@nwpu.edu.cn; **jlzhao@nwpu.edu.cn

像光学系统进行优化设计,验证了所提方法的有效性和准确性。本文的研究方法和结论对折衍射混合无热化光学系统在不同环境温度下的设计和像质评价均有重要的指导作用。

2 宽温度范围衍射元件优化设计方法

2.1 环境温度对衍射元件衍射效率的影响

环境温度变化会导致衍射元件基底的光学性能变化,从而导致衍射元件微结构和基底透镜参数的变化以及衍射微结构变化,进而导致衍射效率变化,最终影响混合光学系统的调制传递函数(MTF),降低混合成像光学系统的像质。因此,对于宽温度范围的光学系统,需要进行无热化设计。一般地,衍射元件的基底所处的环境温度是相同的,因此,环境温度对衍射微结构参数的影响也是相同的,并且衍射微结构高度对其衍射效率的影响远远大于周期宽度参数改变的影响^[24]。

传统分离型双层衍射元件是由两片衍射结构组成,中间为空气介质层,其易加工和装配,应用较多。然而,分离型双层衍射元件对环境温度敏感,不能应用于较宽温度范围的折衍混合成像光学系统中,因此,有必要研究宽温度范围下如何保持衍射元件的高衍射效率。本文以常用的分离型双层衍射元件为例,分析环境温度变化造成的衍射微结构变化,如图 1 所示。其中:左半部分红色区域表示当环境温度高于设计温度时,第一层衍射元件的微结构高度从理论值 H_{01} 膨胀到 H_{a1} ,第二层衍射元件的微结构高度从理论值 H_{02} 膨胀到 H_{a2} ;右半部分蓝色区域表示当环境温度低于设计温度时,第一层衍射元件的微结构高度从理论值 H_{01} 收缩到 H'_{a1} ,第二层衍射元件的微结构高度从理论值 H_{02} 收缩到 H'_{a2} 。

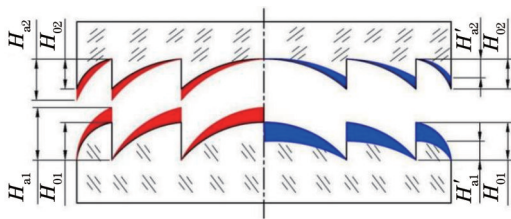


图 1 衍射微结构高度随温度的变化而改变

Fig. 1 Micro-structure heights changing with environment temperature change

对于成像衍射元件的设计,标量衍射理论能够满足其设计要求和精度要求^[25]。采用标量衍射理论的双层衍射元件的相位延迟 ϕ_i 可以表示为

$$\phi_i = \frac{2\pi}{\lambda} \sum_{k=1}^2 H_{0k} (n_k - n_0), \quad (1)$$

式中: λ 为波长; H_{0k} 为第 k 层衍射元件的微结构高度; n_k 为第 k 层衍射元件所在的衍射基底折射率; n_0 为两层衍射元件之间的介质折射率,双分离型结构的 n_0 取

值为 1。

为了讨论环境温度变化对双层衍射元件衍射效率的影响,不考虑双层衍射元件的加工误差及入射角度的影响,并且假设混合光学系统所处的环境温度变化缓慢,不考虑环境温度梯度的影响,对式(1)中等号两侧温度 t 进行微分,得到

$$\frac{d\phi_i}{dt} = \frac{2\pi}{\lambda} \sum_{k=1}^2 \left[\frac{dH_{0k}}{dt} (n_k - n_0) + H_{0k} \left(\frac{dn_k}{dt} - \frac{dn_0}{dt} \right) \right], \quad (2)$$

式中: $\frac{dn_k}{dt}$ 代表第 k 层衍射元件所处基底材料的折射率温度系数; $\frac{dn_0}{dt}$ 代表衍射元件中介质的折射率温度系数。当环境温度发生微小变化时,第 k 层衍射元件的微结构高度随之改变,此变化量与设计值的比值称为线膨胀系数 α_{gk} ,可表示为

$$\alpha_{gk} = \frac{dH_{0k}}{dt} \frac{1}{H_{0k}}. \quad (3)$$

将式(3)代入式(2),得到

$$\frac{d\phi_i}{dt} = \frac{2\pi}{\lambda} \sum_{k=1}^2 \left[\alpha_{gk} H_{0k} (n_k - n_0) + H_{0k} \left(\frac{dn_k}{dt} - \frac{dn_0}{dt} \right) \right]. \quad (4)$$

当环境温度从 t_0 变化到 $t_0 + \Delta t$ (Δt 表示温度变化量)时,双层衍射元件的相位延迟增量可表示为

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} \sum_{k=1}^2 \left[\alpha_{gk} H_{0k} (n_k - n_0) + H_{0k} \left(\frac{dn_k}{dt} - \frac{dn_0}{dt} \right) \right] \Delta t. \quad (5)$$

由式(5)可以看出,环境温度引起的相位延迟增量与基底材料的线膨胀系数和折射率温度系数均相关。

因此,当环境温度发生变化后,双层衍射元件的实际相位可表示为

$$\phi_{\text{real}} = \phi_{\text{ideal}} + \Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} \sum_{k=1}^2 \left[H_{ak} (n_k - n_0) + H_{0k} \left(\frac{dn_k}{dt} - \frac{dn_0}{dt} \right) \Delta t \right], \quad (6)$$

式中: ϕ_{ideal} 表示常温下双层衍射元件的设计衍射效率; H_{ak} 代表第 k 层衍射元件受环境温度影响后的实际微结构高度, $H_{ak} = H_{0k} (1 + \alpha_{gk} \Delta t)$ 。

因此,受环境温度影响的双层衍射元件在第 m 衍射级次的衍射效率和带宽积分平均衍射效率分别可表示为

$$\eta_{\text{real}}^{(m)} = \text{sinc}^2 \left\{ m - \frac{1}{\lambda} \times \sum_{k=1}^2 \left[H_{ak} (n_k - n_0) + H_{0k} \left(\frac{dn_k}{dt} - \frac{dn_0}{dt} \right) \Delta t \right] \right\}, \quad (7)$$

$$\bar{\eta}_{\text{real}}^{(m)} = \frac{1}{\lambda_{\text{max}} - \lambda_{\text{min}}} \int_{\lambda_{\text{min}}}^{\lambda_{\text{max}}} \text{sinc}^2 \left(m - \frac{\phi_{\text{real}}}{2\pi} \right) d\lambda, \quad (8)$$

式中: λ_{max} 和 λ_{min} 分别代表混合光学系统的最大和最小工作波长。

由式(7)和式(8)可以看出,环境温度和波长都会影响衍射元件的衍射特性,这对使用衍射元件的混合成像光学系统的无热化设计在不同环境温度下的像质评价具有一定影响。

2.2 宽温度范围下衍射元件优化设计

对于折衍混合成像系统,衍射特性对其 MTF^[26]的影响可表示为

$$F_{\text{real}}(f_x, f_y) = \begin{cases} \bar{\eta}_{\text{real}}^{(m)} \cdot F_{\text{ideal}}(f_x, f_y), & f_x \neq 0, f_y \neq 0 \\ 1, & f_x = f_y = 0 \end{cases}, \quad (9)$$

式中: F_{ideal} 代表混合成像光学系统的理想 MTF, 是从光学设计软件直接得到的结果, 是不考虑衍射效率对系统成像质量影响的结果; F_{real} 是考虑衍射特性影响的混合成像光学系统的实际 MTF; f_x, f_y 分别为光学系统在 x 和 y 方向的采样频率。

当环境温度变化时, 衍射元件的衍射特性发生变化, 导致混合成像系统的像差偏离设计值。因此, 只分析单个温度点的衍射特性对于像质评价是不准确的。光学系统的无热化设计是使此类光学系统在给定的环境温度范围内均要达到设计像质, 为此提出 TBIADE 的概念和模型来表示一定温度范围、一定工作波段内的衍射元件的综合衍射特性, 则有

$$\bar{\eta}_{\text{real}}^{(m)} = \frac{1}{T_{\text{max}} - T_{\text{min}}} \frac{1}{\lambda_{\text{max}} - \lambda_{\text{min}}} \times \int_{T_{\text{min}}}^{T_{\text{max}}} \int_{\lambda_{\text{min}}}^{\lambda_{\text{max}}} \text{sinc}^2 \left(m - \frac{\phi_{\text{real}}}{2\pi} \right) d\lambda dT, \quad (10)$$

式中: T 为温度; T_{max} 与 T_{min} 分别为混合成像光学系统的最大和最小工作环境温度。

将式(6)代入式(10)中, 得到衍射元件的 TBIADE 为

$$\bar{\eta}_{\text{real}}^{(m)} = \frac{1}{T_{\text{max}} - T_{\text{min}}} \frac{1}{\lambda_{\text{max}} - \lambda_{\text{min}}} \int_{T_{\text{min}}}^{T_{\text{max}}} \int_{\lambda_{\text{min}}}^{\lambda_{\text{max}}} \text{sinc}^2 \left\{ m - \frac{2\pi}{\lambda} \sum_{k=1}^2 \left[H_{ak}(n_k - n_0) + H_{0k} \left(\frac{dn_k}{dt} - \frac{dn_0}{dt} \right) \Delta t \right] \right\} d\lambda dT. \quad (11)$$

实现宽温度范围高衍射效率双层衍射元件的设计分为 4 步: 1) 计算在某一设计波长处的温度积分平均衍射效率; 2) 求取波段范围内的所有波长的温度积分平均衍射效率; 3) 在波段内积分, 求取平均值, 得到 TBIADE; 4) 更改中心波长, 重复前 3 个步骤, 得到所有中心波长处的温度-带宽积分衍射效率, 比较大小, 选出最大 TBIADE 所对应的中心波长, 该波长即为最佳设计波长, 用于计算衍射元件的微结构参数, 分析衍射特性。

3 宽温度范围下双层衍射元件的优化设计与应用

3.1 宽温度范围双层衍射元件的优化设计与分析

现以工作在 3~5 μm 中波波段光学系统中的双层

衍射元件为例进行优化设计和分析。考虑到宽波段红外光学材料的特性和可加工性, 选取硒化锌 (ZnSe) 和锗 (Ge) 作为双层衍射元件的基底材料组合。传统设计下基于带宽积分平均衍射效率 (BIADE) 最大化方法^[27], 是指在光线垂直入射至双层衍射元件基底的情况下, 通过选取设计波长对完成衍射微结构参数和级次等参数设计, 此时选取设计波长对为 3.24 μm 和 4.34 μm, 对应的衍射微结构高度和衍射级次设计结果如表 1 所示, 传统设计下环境温度对以 ZnSe-Ge 为基底的双层衍射元件衍射效率的影响如图 2 所示。

可以看出, 对于此衍射基底材料组合, 环境温度对衍射效率的影响不可忽视, 例如当环境温度为 -20 °C 和 60 °C 时, 对应的 BIADE 约为 50%, 这会很大程度上

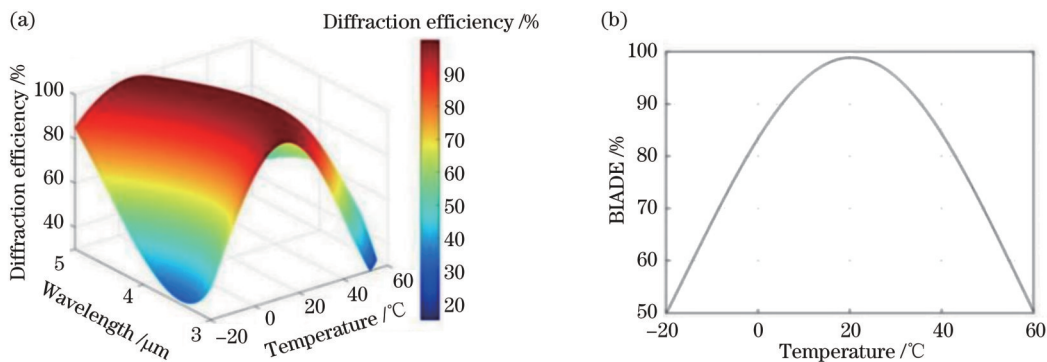


图 2 传统设计下环境温度对双层衍射元件衍射效率的影响。(a) 衍射效率随波长和环境温度的变化; (b) BIADE 随环境温度的变化

Fig. 2 Influence of ambient temperature on diffraction efficiency of double-layer DOE based on traditional design. (a) Diffraction efficiency varying with wavelength and temperature; (b) BIADE varying with temperature

表 1 基于 BIADE 的双层衍射元件设计结果

Table 1 Design results of double-layer DOE based on BIADE

Substrate material	ZnSe	Ge
Diffraction order	107	-106
Micro-structure heights H_1 and $H_2 / \mu\text{m}$	325.212	-152.689

降低系统成像质量。因此,在宽温度范围下实现高衍射效率衍射元件设计是非常必要的。

综上,对双层衍射元件的优化设计,应当考虑环境温度和工作波段对衍射特性的综合影响。只有在完成对光学系统 F_{ideal} 的最优设计的基础上,对 TBIAD 进行最优设计才能保证混合成像光学系统最优。采用 MATLAB 软件模拟了环境温度范围为 $-20\sim 60\text{ }^\circ\text{C}$ 时中波红外波段工作波长对 TBIAD 的影响以及在此情况下优化设计波长对的选择,如图 3 所示。

根据图 3,当 TBIAD 达到最大时,对应的横坐标即为最佳设计波长对。在确定最佳波长对后,可以计算双层衍射元件的相关参数,设计结果如表 2 所示。

基于优化设计下的双层衍射元件设计结果,当同时考虑设计波长和工作温度时,以 ZnSe-Ge 为基底材料的双层衍射元件衍射效率计算结果如图 4 所示。

从图 3 和表 2 可以看出,相较于不考虑环境温度对衍射效率的影响时双层衍射元件设计结果,基于 TBIAD 设计的双层衍射元件的衍射级更小,并且相应的衍射微结构高度数值也变小,这也会在一定程度上减小加工过程中的遮挡和加工误差的影响。此外,对比图 2 和图 4 可以看出,相比传统设计方法,优化设计方法能更有效地提高宽温度范围下双层衍射元件的

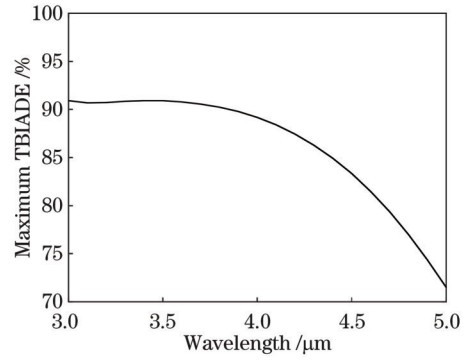


图 3 在 $-20\sim 60\text{ }^\circ\text{C}$ 环境温度范围内入射波长对衍射特性的影响
Fig. 3 Influence of incident wavelength on diffraction characteristics under ambient temperature of $-20\sim 60\text{ }^\circ\text{C}$

表 2 $-20\sim 60\text{ }^\circ\text{C}$ 环境温度范围内双层衍射元件设计结果
Table 2 Design results of double-layer DOE under ambient temperature of $-20\sim 60\text{ }^\circ\text{C}$

Index	Value	
Ambient temperature / $^\circ\text{C}$	$-20\sim 60$	
Design wavelength pair / μm	3.0 and 3.42	
TBIAD / %	95.96	
Design order	ZnSe	64
	Ge	-63
$H_1 / \mu\text{m}$	ZnSe	153.323
$H_2 / \mu\text{m}$	Ge	-71.416

衍射效率和 TBIAD,这也证明此优化设计的可靠性。

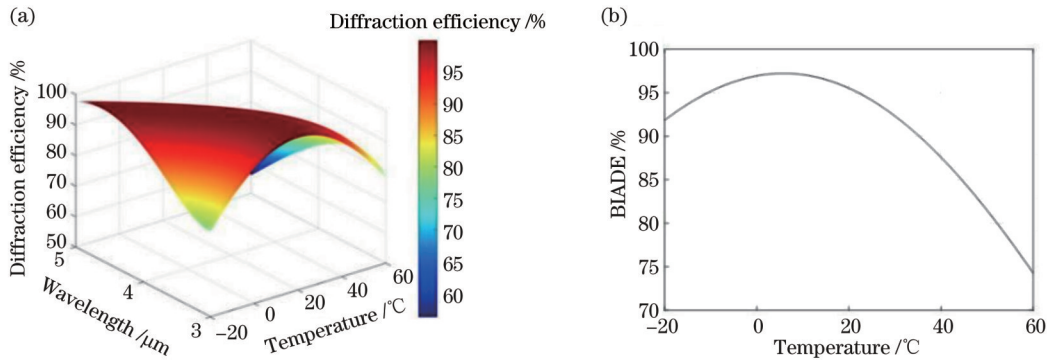


图 4 优化设计下环境温度对双层衍射元件衍射效率的影响。(a)衍射效率随波长和环境温度的变化;(b) BIADE 随环境温度的变化

Fig. 4 Influence of ambient temperature on diffraction efficiency of double-layer DOE based on optimized design. (a) Diffraction efficiency varying with wavelength and temperature; (b) BIADE varying with temperature

3.2 含有双层衍射元件的红外折衍混合成像光学系统的优化设计与像质评价

选用 ZnSe-Ge 作为双层衍射元件的基底材料,基于一款像元尺寸为 $30\text{ }\mu\text{m}$ 、面阵规格为 320×256 的制冷红外探测器,对含有双层衍射元件的中波红外折衍混合成像系统进行优化设计和分析,设计指标如表 3 所示。表 3 中 ω 为半视场角, α_b 为机械热膨胀系数。

由于匹兹伐物镜视场较小,相对孔径能设计得较大,且球差和彗差都能得到很好的校正,初始结构能够较好地满足设计要求。根据表 3 要求,采用 ZEMAX OpticStudio 光学设计软件对系统进行优化设计后,得到含有双层衍射元件的红外折衍混合成像光学系统的结构如图 5 所示。

如图 5 所示,优化后光学系统由 6 片透镜组成,第

表 3 中波红外波段折衍混合成像光学系统的无热化设计指标
Table 3 Athermalization design specifications of mid-infrared waveband hybrid imaging optical system

Index	Value
Working waveband / μm	3–5
Field of view /($^\circ$)	$2\omega=4^\circ$
Effective focal length /mm	100
Entrance pupil /mm	150
F number	1.25
Mechanical construction material	AL100 ($\alpha_b=23.6 \times 10^{-6}$)
Temperature range / $^\circ\text{C}$	-20-60
Total length /mm	≤ 150
MTF@17 lp $\cdot\text{mm}^{-1}$	$>0.5 @ 3-5 \mu\text{m}$

3 片透镜和第 4 片透镜的后表面和前表面分别为双层衍射元件第一、二表面,中间为薄空气层,系统设计总长为 150 mm,优化设计后的混合成像光学系统具体设

表 4 含有双层衍射元件的中波红外波段混合成像光学系统的结构参数

Table 4 Structure parameters of mid-infrared waveband hybrid imaging optical system with double-layer DOE

Surface type	Radius /mm	Thickness /mm	Glass
0 Standard (object)	Infinity	Infinity	Air
1 Standard	108.177	11.466	ZnSe
2 Standard	93.731	7.391	Air
3 Standard	131.858	11.685	GAAS
4 Standard	700.731	5.667	Air
5 Standard	-342.223	6.000	Ge
6 Standard	-1471.239	8.144	Air
7 Standard	55.878	10.955	ZnSe
8 Binary 2	48.539	0.050	Air
9 Binary 2	48.539	9.069	Ge
10 Standard	37.381	21.960	Air
11 Standard	-594.369	15.000	ZnSe
12 Standard	-89.155	5.112	Air
13 Standard	Infinity	2.000	Ge
14 Standard	Infinity	0.500	Air
15 Standard (stop)	Infinity	35.000	Air
16 Standard (image)	Infinity	-	Air

从表 4 可以看出,该光学系统均由球面透镜组成,包含两个衍射元件表面,ZEMAX OpticStudio 中的衍射表面(Binary 2)的相位延迟表达式为

$$\phi = m \sum_{i=1}^N A_i R^{2i}, \quad (12)$$

式中: R 为衍射元件所在基底的归一化半口径; N 为优化变量的级数; A_i 为衍射元件相位优化参数。 A_1 为光焦度项,用来校正系统色差; A_2 用来校正三级单色像差;其余更高阶数用来校正光学系统的高级像差。经优化设计,两层衍射表面的参数结果如表 5 所示。

优化设计后,混合成像光学系统的 MTF 如图 6 所

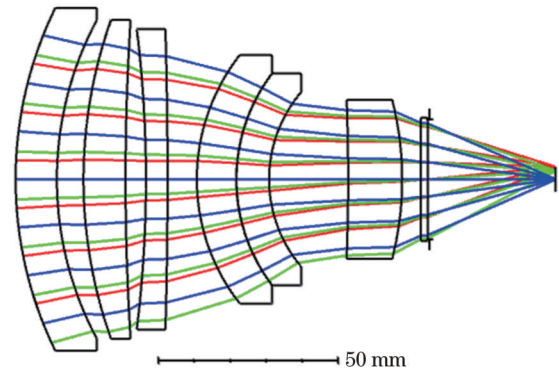


图 5 含有双层衍射元件的中波红外波段折衍混合成像系统结构的无热化设计结果

Fig. 5 Athermalization design results of mid-infrared waveband hybrid imaging optical system containing double-layer DOE

计参数如表 4 所示。

表 5 双波段混合成像光学系统的双层衍射元件表面参数

Table 5 Parameters of binary DOE surfaces for double waveband hybrid imaging optical system

Surface No.	R	A_1	A_2
6	100	-1412.836148812	-930.7069454066
7	100	-1412.836148812	-930.7069454066

示,图 6(a)、(b)、(c)分别代表 20 $^\circ\text{C}$ 、-20 $^\circ\text{C}$ 和 60 $^\circ\text{C}$ 对应的 MTF 曲线。

从图 6 可以看出,当不考虑衍射元件衍射效率对光学系统 MTF 的影响时,该混合光学系统的最优设

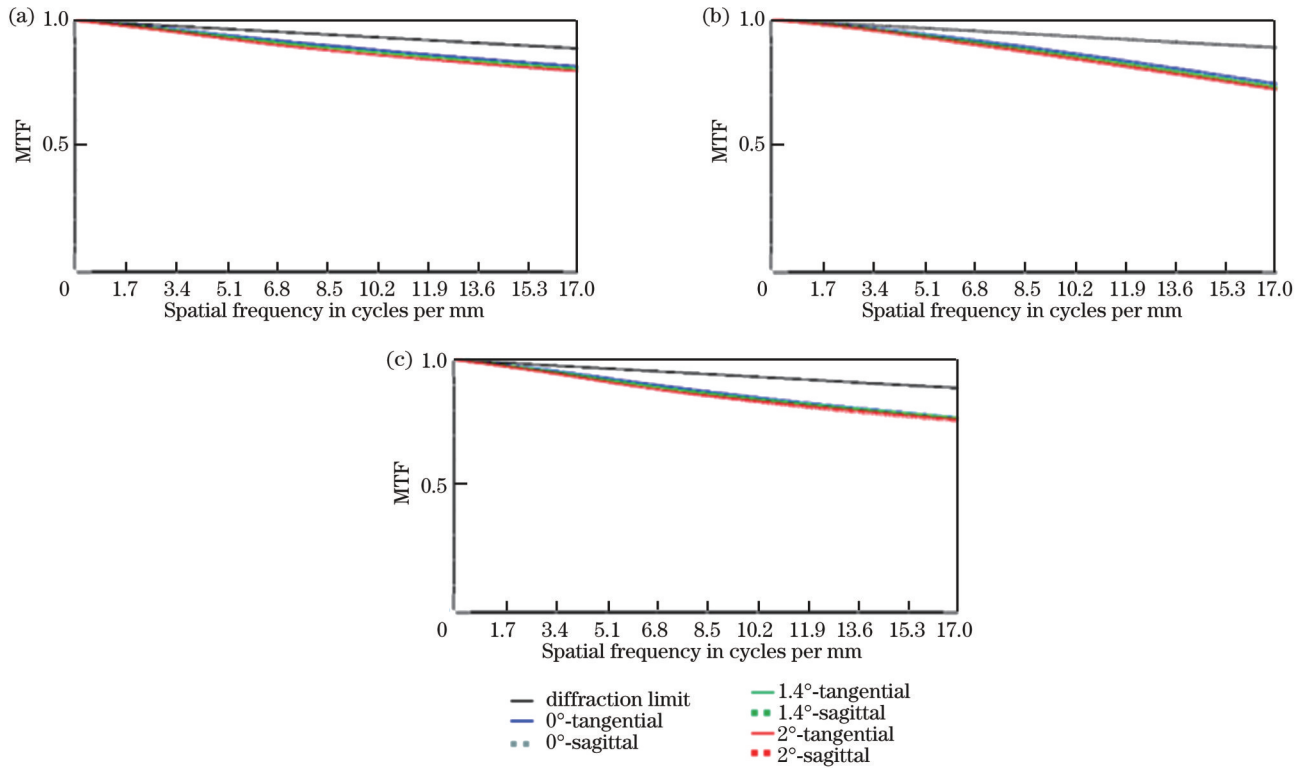


图 6 不同温度下中波红外波段混合成像光学系统的 MTF。(a) 20 °C; (b) -20 °C; (c) 60 °C

Fig. 6 MTF of middle infrared hybrid imaging optical system at different temperatures. (a) 20 °C; (b) -20 °C; (c) 60 °C

计结果是:在截止频率为 17 lp/mm 时,中波波段在各温度范围下的 MTF 数值分别达到 0.80、0.75 和 0.78,满足理论设计要求,并且系统在整个温度范围内成像良好。

3.3 双层衍射元件的衍射特性和实际像质评价

为了准确评价含有双层衍射元件的折衍混合成像光学系统像质,还应该考虑双层衍射元件的 TBIAD

对 F_{real} 的影响。图 7(a) 中给出了传统设计和优化设计下的环境温度双层衍射元件衍射效率的影响;考虑到双层衍射元件的 TBIAD 对混合成像光学系统 F_{real} 的影响,将 TBIAD 代入式(9)对 F_{real} 进行计算,在截止频率为 17 lp/mm 处,该系统在不同环境温度下的 F_{real} 如图 7(b) 所示。可以看出,混合成像系统 F_{real} 也完全满足设计要求。

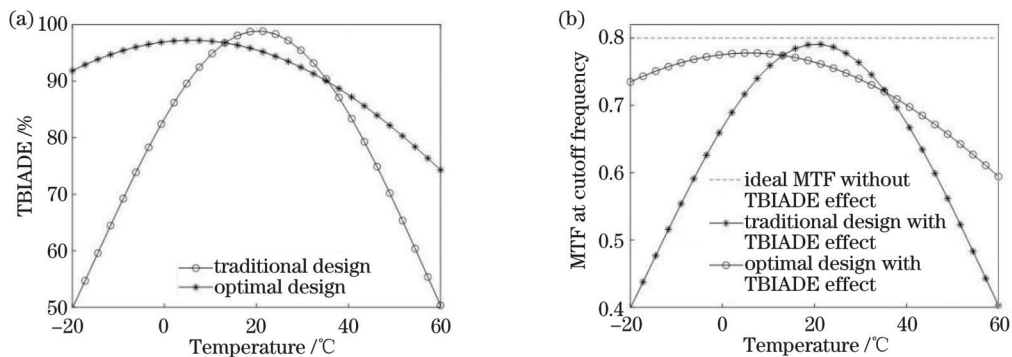


图 7 混合成像光学系统在截止频率处的 MTF 最小值。(a) 两种设计下的 TBIAD; (b) TBIAD 对 MTF 的影响

Fig. 7 Minimum MTF of hybrid imaging optical system at cutoff frequency. (a) TBIAD under two designs; (b) effect of TBIAD on MTF

4 结 论

环境温度改变会影响光学元件参数,导致衍射元件衍射效率下降,最终降低含有衍射元件的混合成像光学系统的成像质量。然而,传统设计方法忽略了环

境温度变化导致衍射元件衍射效率下降的问题,导致对此类光学系统的实际像质评价不准确。为实现此类光学系统在宽环境温度变化下像质最优,提出了 TBIAD 概念和设计方法,通过给定基底材料组合和工作环境温度范围,在 TBIAD 最大化的基础上,重

新选择设计波长对,计算相应的衍射微结构参数,以保证混合成像光学系统的MTF最优。最后设计了一款基于双层衍射元件的中波红外波段光学系统,并实现其无热化设计,设计结果表明此方法能够有效提高宽波段、宽温度范围综合影响下的双层衍射元件衍射效率,并且衍射微结构参数比传统设计更优,可以在设计和加工两方面实现更优结果,且保证像质评价更准确。本文研究方法有助于完善衍射光学设计理论,并将其扩展至一般类型衍射元件的设计和像质评价中。

参 考 文 献

- [1] Fischer R E. Optical design for the infrared[J]. Proceedings of SPIE, 1985, 0531: 82-120.
- [2] Jamieson T H. Athermalization of optical instruments from the optomechanical viewpoint[J]. Proceedings of SPIE, 1992, 10265: 1026508.
- [3] 毛珊,解娜,赵建林.斜入射下双波段双层衍射光学元件优化设计与分析[J].光学学报,2020,40(16):1605001.
Mao S, Xie N, Zhao J L. Optimal design and analysis of dual-band double-layer diffractive optical element under oblique incidence[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(16): 1605001.
- [4] Simola E T, de Iacovo A, Frigerio J, et al. Voltage-tunable dual-band Ge/Si photodetector operating in VIS and NIR spectral range[J]. Optics Express, 2019, 27(6): 8529-8539.
- [5] Jamieson T H. Thermal effects in optical systems[J]. Optical Engineering, 1981, 20(2): 156-160.
- [6] Bigwood C R. New infrared optical systems using diffractive optics[J]. Proceedings of SPIE, 2002, 4767: 1-12.
- [7] Swanson G J, Veldkamp W B. Diffractive optical elements for use in infrared systems[J]. Optical Engineering, 1989, 28(6): 605-608.
- [8] Wood A P, Rogers P J. Diffractive optics in modern optical engineering[J]. Proceedings of SPIE, 2005, 5865: 58650B
- [9] 徐晓焱,徐亮,沈先春,等.基于红外多光谱相机分析长后焦距对无热化设计的影响[J].物理学报,2021,70(18):184201.
Xu H Y, Xu L, Shen X C, et al. Analysis of influence of long back focal length on athermal design based on infrared multispectral camera[J]. Acta Physica Sinica, 2021, 70(18): 184201.
- [10] 张继艳,林海峰,黄章超.基于硫系玻璃的紧凑式大相对孔径长波红外光学系统无热化设计[J].应用光学,2021,42(5):790-795.
Zhang J Y, Lin H F, Huang Z C. Compact large relative aperture long wavelength infrared athermalization optical system with chalcogenide glasses[J]. Journal of Applied Optics, 2021, 42(5): 790-795.
- [11] 闫阿奇,崔雯,董森.大变倍比光学被动半无热化变焦系统设计[J].光学学报,2022,42(4):0422001.
Yan A Q, Cui W, Dong S. Optical design of optical passive half-athermalization zoom lens with high zoom ratio[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(4): 0422001.
- [12] Kozun M N, Bourassa A E, Degenstein D A, et al. Adaptation of the polarimetric multi-spectral Aerosol Limb Imager for high altitude aircraft and satellite observations[J]. Applied Optics, 2021, 60(15): 4325-4334.
- [13] Ivanov S E, Romanova G E. Passive athermalization and achromatization of a two-component system with air gap[J]. Applied Optics, 2021, 60(8): 2324-2330.
- [14] 田晓航,薛常喜.小F数红外双波段无热化折衍摄远物镜设计[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.
- [15] Riedl M J. Design example for the use of hybrid optical elements in the infrared[J]. Applied Optics, 1996, 35(34): 6833-6834.
- [16] Fan C J, Wang Z Q, Lin L, et al. Design of infrared inverted telephoto-optical system with double-layer harmonic diffractive element[J]. Chinese Physics Letters, 2007, 24(7): 1973-1976.
- [17] Tamagawa Y, Tajime T. Dual-band optical systems with a projective athermal chart: design[J]. Applied Optics, 1997, 36(1): 297-301.
- [18] 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.
Hu Y X, Zhou S X, Xiangli B, et al. Design of athermal optical system[J]. Acta Optica Sinica, 2000, 20(10): 1386-1391.
- [19] 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.
- [20] Ivanov S E, Romanova G E. Optical material selection method for an apochromatic athermalized optical system[J]. Journal of Optical Technology, 2016, 83(12): 729-733.
- [21] 张发强,冯斌,李洪顺.基于波前编码的红外光学系统消热差设计研究[J].激光与光电子学进展,2021,58(22):2208001.
Zhang F Q, Feng B, Li H S. Research on athermalization design of infrared optical system based on wavefront coding[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(22): 2208001.
- [22] 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.
- [23] Rogers J R. Passive athermalization: required accuracy of the thermo-optical coefficients[J]. Proceedings of SPIE, 2014, 9293, 92931A.
- [24] Piao M X, Cui Q F, Zhu H, et al. Diffraction efficiency change of multilayer diffractive optics with environmental temperature [J]. Journal of Optics, 2014, 16(3): 035707.
- [25] O' Shea D C, Suleski T J, Kathman A D, et al. Diffractive optics: design, fabrication, and test[M]. Bellingham: SPIE, 2003.
- [26] 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.
- [27] 薛常喜,崔庆丰,潘春艳,等.基于带宽积分平均衍射效率的多层衍射光学元件设计[J].光学学报,2010,30(10):3016-3020.
Xue C X, Cui Q F, Pan C Y, et al. Design of multi-layer diffractive optical element with bandwidth integral average diffraction efficiency[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(10): 3016-3020.

Optimal Design and Application of Double-Layer Diffractive Optical Element over Wide Temperature Range

Mao Shan^{1,2*}, Lai Tao^{1,2}, Nie Huaile^{1,2}, Tang Yufeng^{1,2}, Song Yichen^{1,2}, Zhao Jianlin^{1,2**}

¹Key Laboratory of Light-Field Manipulation and Information Acquisition, Ministry of Industry and Information Technology, School of Physical Science and Technology, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, Shaanxi, China;

²Shaanxi Key Laboratory of Optical Information Technology, School of Physical Science and Technology, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, Shaanxi, China

Abstract

Objective Infrared optical systems have unique advantages in infrared guidance, target identification and tracking, battlefield reconnaissance, anti-stealth, and other fields. However, the optical materials used in such systems are rare, which causes the disadvantages of complex systems, time-consuming calculations, and so on. Multi-layer diffractive optical elements (MLDOEs) can achieve high diffraction efficiency over a wide waveband. Hybrid imaging optical systems composed of diffractive optical elements (DOEs) with special imaging characteristics and refractive lenses can not only meet the requirements of high-quality imaging but also reduce the number of lenses, system weight, and system cost. Especially, the MLDOEs applied in infrared optical systems can correct both color and thermal aberrations, thereby effectively reducing the system's complexity and dependence on optical materials. However, the ambient temperature affects diffraction efficiency and further influences the modulation transfer function (MTF) of the hybrid imaging optical system. So, it is an important research topic in the field of infrared optics, and research should be conducted on investigating the effect of temperature change on a hybrid imaging optical system, proposing a suitable athermalization design, reducing the effect of temperature on imaging quality, and enhancing the temperature adaptability of the hybrid infrared optical system.

Methods This paper selects the commonly used separated double-layer DOE as an example to illustrate the microstructure changes caused by the changes in the ambient temperature (Fig. 1). A concept and a model of temperature-bandwidth integral average diffraction efficiency (TBIADe) are proposed to represent the comprehensive diffraction characteristics of a DOE in a certain temperature range and working waveband, and the optimal design of a double-layer DOE is achieved by selecting the design wavelength pair. Then, a cooled hybrid imaging optical system in the mid-infrared waveband is optimally designed with ZnSe-Ge as the substrate material of the double-layer DOE. Finally, the MTF of the hybrid imaging optical system with the traditional design is compared with that of the system with the optimal design presented in this paper to verify the correctness of the proposed design.

Results and Discussions The MATLAB software is used to calculate the effects of the temperature range and the mid-infrared waveband on diffraction efficiency under the TBIADe-based optimal design (Fig. 3 and Table 2). The diffraction efficiency of the double-layer DOE with ZnSe-Ge as its substrate material is calculated with due consideration given to both the working waveband and ambient temperature (Fig. 4). Compared with the traditional design, the optimized design can more effectively improve the diffraction efficiency and TBIADe of the DOE in the ambient temperature range, which also proves that the design of the hybrid imaging optical system is reliable. Then, a cooled infrared detector with a pixel size of 30 μm and an area array size of 320×256 is employed to optimally design a hybrid imaging system in the mid-infrared waveband composed of 6 lenses. The back and front surfaces of the 3rd and 4th lenses are the 1st and 2nd surfaces of the double-layer DOE, and the middle is a thin air gap (Fig. 5). The specific design parameters of the optimized hybrid imaging optical system are calculated (Table 4). After optimization, the real MTF of the system under different ambient temperatures also fully meets the design requirements at the cutoff frequency of 17 lp/mm when the effect of the TBIADe of the double-layer DOE on the real MTF is considered (Fig. 6).

Conclusions The ambient temperature affects the structure and properties of optical elements, including traditional refractive lenses and DOEs. In particular, it can lower diffraction efficiency and ultimately reduce the imaging quality of hybrid imaging optical systems. However, the traditional design ignores the effect of temperature change on diffraction efficiency, resulting in inaccurate evaluations of the actual image quality. To enable such optical systems to achieve the optimal image quality over a wide ambient temperature range, this paper proposes the concept and design of TBIADe and selects the optimal design wavelength pair on the basis of the given substrate material combination and working ambient

temperature range. Then, the paper calculates the corresponding microstructure parameters to ensure the optimal MTF of the hybrid imaging optical system. Finally, it designs a hybrid imaging optical system in the mid-infrared waveband based on a double-layer DOE and presents the thermal aberration correction of the system. The result shows that this design can effectively improve the diffraction efficiency of the double-layer DOE under the comprehensive influence of wide waveband and temperature range, and the results of the microstructure parameters are better than their counterparts in the traditional design. Better results can then be achieved in both design and processing, and more accurate image quality evaluation is ensured. The proposed method helps promote the design theory of diffractive optics and extend it to the design and image quality evaluation of common types of DOEs.

Key words optical design; diffractive element; refractive-diffractive hybrid imaging optical system design; athermalization design