

中小型共光路系统支撑结构设计和分析

杨晓强 陶忠 刘莹奇

Design and analysis of support structure of small and medium-sized common optical path system

YANG Xiaolang, TAO Zhong, LIU Yingqi

引用本文:

杨晓强, 陶忠, 刘莹奇. 中小型共光路系统支撑结构设计和分析[J]. 应用光学, 2023, 44(5): 998–1009. DOI: 10.5768/JAO202344.0501008

YANG Xiaolang, TAO Zhong, LIU Yingqi. Design and analysis of support structure of small and medium-sized common optical path system[J]. Journal of Applied Optics, 2023, 44(5): 998–1009. DOI: 10.5768/JAO202344.0501008

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0501008>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

可见-短波红外波段光谱模块光机装调及分析

Opto-mechanical assembly and analysis of spectral module in visible-short wave infrared band

应用光学. 2019, 40(2): 193–201 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0201003>

电视观瞄/可见光直视观瞄光学系统设计

Optical system design of TV sight/visual direct-view sight

应用光学. 2017, 38(4): 538–542 <https://doi.org/10.5768/JAO201738.0401004>

用于激光定向红外对抗的光学系统设计

Optical system design for laser directional infrared countermeasure

应用光学. 2021, 42(3): 398–403 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0301004>

快速高精度电动调整镜研究

Fast and high-precision electric adjusting mirror

应用光学. 2021, 42(6): 949–955 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0601001>

基于有限元分析的小口径离轴抛物面反射镜支撑结构设计

Design of support structure for small caliber off-axis parabolic reflector based on finite element analysis

应用光学. 2019, 40(6): 1160–1166 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0605004>

应用于一体化摄像机的自动聚焦搜索算法研究

Study on auto-focusing searching algorithm applied to integrated camera

应用光学. 2018, 39(4): 483–490 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0402001>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2023) 05-0998-13

中小型共光路系统支撑结构设计和分析

杨晓强, 陶 忠, 刘莹奇

(西安应用光学研究所, 陕西 西安 710065)

摘 要: 主、次镜支撑技术是共光路光学系统的关键技术之一。针对在 $\pm 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度变化范围内工作的机载共光路光学系统, 根据热膨胀系数匹配原则分别选择殷钢和ULE、钛合金和K9配对作为主、次镜及支撑结构的材料, 并设计了高刚度无热化柔性支撑结构。最后, 利用自研的光机联合仿真程序对主、次镜面型及整个光学系统的成像质量进行了光机一体化分析。分析结果表明: 殷钢和ULE配对时, 在 $\pm 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 均匀温差和 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 轴向、径向温度梯度下, 主、次镜去除离焦后面型优于 $(1/100)\lambda$, 整个光学系统点列图RMS半径小于艾里斑半径, 相面中心波前优于 $(1/50)\lambda$, MTF@63 lp/mm优于0.45, 无热化柔性支撑的一阶固有频率高达263 Hz; 钛合金和K9配对时, $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 均匀温差下系统成像指标满足使用要求, $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 轴向、径向温度下成像质量无法满足使用要求。对装调完的殷钢和ULE配对光机系统进行了低温下分辨率测试, 分辨率无明显变化, 说明设计及分析可行。

关键词: 共光路; 光机一体化分析; 柔性支撑; 温度梯度

中图分类号: TN201, TH703

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202344.0501008

Design and analysis of support structure of small and medium-sized common optical path system

YANG Xiaoqiang, TAO Zhong, LIU Yingqi

(Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an 710065, China)

Abstract: Primary and secondary mirror support technology is one of the key technologies of common optical path system. For the airborne optical system operating within the temperature change range of $\pm 60\text{ }^{\circ}\text{C}$, the pairing of invar steel and ULE, titanium alloy and K9 were selected as the materials of primary and secondary mirrors as well as supporting structures according to the matching principle of thermal expansion coefficient, and the athermalization flexible support structure with high stiffness was designed. Finally, the imaging quality of the primary and secondary mirror types as well as the whole optical system was analyzed by using a self-developed opto-mechanical co-simulation program. The results show that when invar steel and ULE are paired, under uniform temperature difference of $\pm 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ axial and radial temperature gradient, the surface shape is better than $(1/100)\lambda$ after the primary and secondary mirror removing defocus, and the root-mean-square (RMS) radius of spot diagram of the whole optical system is smaller than Airy spot radius. The central wavefront of the phase surface is better than $(1/50)\lambda$, the MTF@63 lp/mm is better than 0.45, and the first-order natural frequency with athermalization flexible support is up to 263 Hz. When titanium alloy and K9 are paired, the imaging index of the system under uniform temperature difference of $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ meets the requirements, and the imaging quality at $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ axial and radial temperature cannot meet the requirements. The resolution of invar steel and ULE paired opto-mechanical system was tested at low temperature, and there is no obvious change in resolution, which indicates that the design and analysis are feasible.

Key words: common optical path; opto-mechanical integration analysis; flexible support; temperature gradient

引言

为满足小型化、轻量化和远距离目标的探测

跟踪需求, 共光路系统广泛应用于各种先进的机载光电稳瞄系统中。共光路远距离探测光电成像

收稿日期: 2022-05-20; 修回日期: 2022-08-10

作者简介: 杨晓强 (1983—), 男, 硕士, 研究员, 主要从事光机控制一体化设计与仿真研究。E-mail: sdk215@163.com

技术采用一体化的设计理念, 将近红外电视、短波红外、中波红外等多谱段探测器件进行综合集成, 共用一个望远镜系统, 具备集成度高、分辨率高、口径大、焦距长等特点。通过一体化共光路设计, 突破了光学系统体积尺寸对传感器性能的限制, 在实现远距离成像探测的同时可有效减小系统的体积和重量, 实现光电系统性能的最优化。国外对机载共光路系统的研究较早, 根据公开的宣传资料可以看出, 美国 FLIR 公司的 Star SAFIRE380X 光电瞄准系统、美国 Raytheon 公司的全球鹰光电广域监视系统、“捕食者”无人机 MTS-B 光电系统和加拿大 L-3 WESCAM 公司的 MX-20、MX-25 等均采用了共光路光学系统^[1], 说明其相关技术已经相当成熟, 但所采用的相关光机设计细节未见文献报道。韩国 LEE J H 等利用有限元和光机一体化程序分析了一个 300 mm 口径的可见光和红外共通道机载光电系统, 其温度变化范围只有 $\pm 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[2]。YODER 和 ANEES 等人总结了各种光机设计方法, 并介绍了两种整个光机结构采用同一材质实现无热化设计的全金属化主镜及其支撑系统^[3-4]。国内目前尚未见批量装备的共光路机载光电产品的公开报道。关于共光路光机设计及仿真, 以地基大口径望远镜和空间望远镜为主, 机载产品相对较少。地基望远镜和空间望远系统有完善的温控措施, 其温度变化范围通常很小。罗致帮等设计了空间 816 mm 口径 SiC 主镜及其支撑结构, 并对主镜组件进行了仿真及试验验证, 但是温度变化范围只有 $2\text{ }^{\circ}\text{C}$, 并且文章只对主镜进行了面型分析, 并未分析面型变化引起的光学系统成像质量变化情况^[5]。王克军设计了某天基望远镜的背部三点支撑结构, 并对其进行了有限元分析, 但是温度变化范围只有 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$, 同样没考虑整个面型变化对整个光学系统带来的影响^[6]。程志峰等利用光机热集成分析研究了某机载可见光、中波红外共口径光机系统, 其温度适应范围只有 $\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[7]。李猛等研究了口径为 136.6 mm, 用于机载光谱仪离轴金属铝反射镜的柔性支撑方法, 系统处于恒温, 未研究温度变化带来的影响^[8]。魏梦琦等对某机载光电系统的 SiC 主镜进行了轻量化设计, 文中仅分析了重力对主镜面型的影响, 未给出主镜的温度适应性情况^[9]。

本文针对需要在 $-40\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 65\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度范围内工作的机载共光路系统(工作温差 $\pm 60\text{ }^{\circ}\text{C}$, 温度梯度 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$), 进行了主、次镜和支撑结构的材料匹配及支撑结构柔性无热化设计, 运用光机一体化仿真

技术分析了主、次镜面型变化对整个光学系统成像质量的影响, 并对系统的刚度进行了模态分析评估。

1 系统简介

某机载共光路光学系统采用多波段共口径望远镜的设计思路, 采用卡塞格林望远镜形式, 多波段传感器采用棱镜分光。为了节省时间, 减少计算量, 此处取其中对反射镜面型要求最高的一路进行研究, 其光学系统示意图如图 1 所示。设计完成后的光学指标如图 2 所示。其中中心视场相面波前为 $0.008\ 8\ \lambda$ ($\lambda=632.8\text{ nm}$), 各视场点列斑小于艾里斑, 系统 MTF(modulation transfer function)@63 lp/mm 优于 0.45。

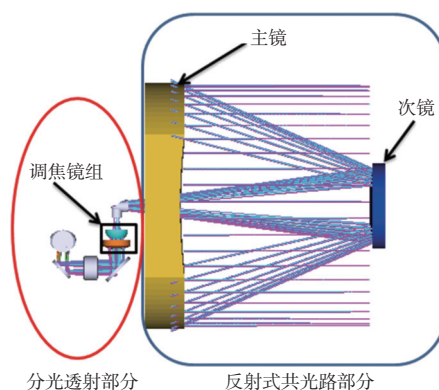
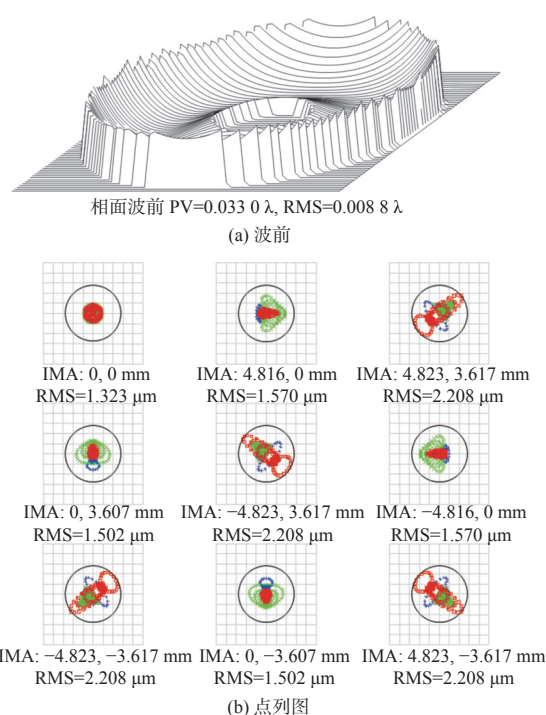


图 1 光学系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of optical system



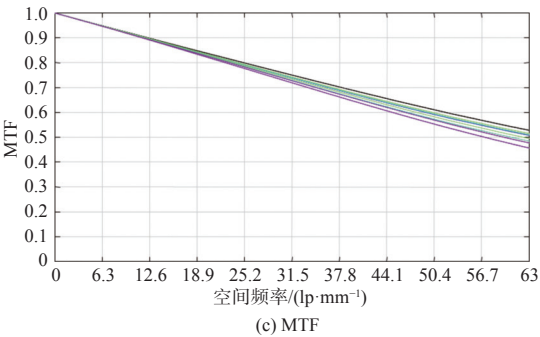


图 2 初始状态的光学指标
Fig. 2 Optical indexes of initial state

2 支撑结构设计

共光路系统若要清晰成像,就需要在各种载荷环境下保证各光学元器件的面型、相对位置和姿态变化在设计许可范围内。对本系统来说,温度环境最为苛刻,需要在-40℃~+65℃温度范围内工作,相比20℃的装配温度,最大温差±60℃。相对来说,光透射光路部分对温度变化的敏感度要远低于反射式共光路的主、次镜部分。本文的研究集中在宽温度范围内工作的共光路卡式系统的支撑结构设计及分析评估。为保证卡式系统的宽温度适应性,可采取的方法有:

- 1) 采取温控措施;
- 2) 合理选择主、次镜及支撑结构的材料,使其热匹配较好;
- 3) 合理选择胶的种类和胶层厚度等;
- 4) 对主、次镜支撑结构进行柔性化设计。

若采取温控措施,则需要添加大量的环控设备,系统的功耗和重量均会增加很多,开发成本很高且带来可靠性降低。光学材料的导热性通常很差,需要较长时间才能达到热稳态,同时容易形成各种温度梯度,本文不选用温控措施。对于支撑和反射镜粘接所用的胶来说,不同文献里推荐的胶的种类、特性及粘接工艺均有所区别,出于商业

考虑,很多细节均未提及^[10-12]。理论上存在一个可以实现径向方向上无热化的最优胶层厚度^[9-11],然而无热化计算出来的胶的厚度经常难以满足粘接工艺需求,无法保证粘接质量和强度。除厚度外,胶层粘接位置、长度和宽度均会对反射镜面型产生不同的影响^[13-14]。出于篇幅考虑,本文不对上述问题进行展开研究。本系统采用某室温硫化硅橡胶进行粘接,胶层厚度选取0.5mm,周向8点粘接。综合以上考虑,本文主要对主、次镜和支撑结构材料进行选择,以及对支撑结构进行柔性设计,以达到在宽温度范围内具有适应性的目的。

常用的反射镜镜体材料及特性如表1所示。根据材料的性质可分为:以Zerodur和ULE(超低热膨胀)为代表的光学玻璃材料,以Al和Be为代表的金属材料,以SiC为代表的陶瓷材料以及新型复合材料等。SiC陶瓷具有优异的抗震、耐高温、高导热、高比刚度及热稳定性好等特性,广泛应用于大口径空间光学系统中。但其制造难度大,成本高,国内仅有少数厂家掌握其制备工艺,此处不选用。Be和Al等金属材料,具有很高的导热率和比刚度,可轻易地进行各种构型的减重设计。然而,Be需要特殊制备工艺,成本高,此处不选用。Al作为常用结构材料,虽然热膨胀系数大,但是很容易跟周边结构实现热膨胀系数匹配,是一种理想的反射镜材料。对于需要在宽光谱范围内工作(特别是可见光波段)的光学系统来说,需要通过复杂的表面镀层和镀膜处理,目前相关工艺尚不成熟,此处不采用。常用的支撑材料及其性能如表2所示。从表2可知,SiC/Al复合材料可以根据体份的不同兼顾热膨胀系数和刚度,并具有优良的导热性和高强度,但其加工难度大、成本高,此处不采用。铝合金和镁合金因热膨胀系数大,与反射镜材料难匹配。通过以上考虑,最终选取殷钢和ULE配对,钛合金和K9配对,后面将采用光机集成分析对这两种配对的优劣展开详细分析。

表 1 常用反射镜材料及性能
Table 1 Commonly-used mirror materials and properties

材料	密度 ρ /(g/cm ³)	弹性模量 E /GPa	泊松比 μ	热膨胀系数 α /(10 ⁻⁶ /℃)	导热系数 k /(W/mK)
FS	2.19	72	0.17	0.50	1.40
ULE	2.21	67	0.17	0.03	1.31
Zerodur	2.53	91	0.24	0.05	1.64
K9	2.52	79.2	0.211	7.6	1.1
Al 6061	2.70	68	0.33	22.5	167
Be I-70	1.85	287	0.08	11.4	216
SiC(HP)	3.20	455	0.14	2.40	155
SiC(CVD)	3.21	466	0.21	2.20	300
SiC(RB)	3.09	406	0.17	3.5	156

表 2 常用光学支撑结构材料性能

Table 2 Commonly-used optical support structural materials and properties

材料	密度 $\rho/(\text{g}/\text{cm}^3)$	弹性模量 E/GPa	泊松比 μ	热膨胀系数 $\alpha/(10^{-6}/^\circ\text{C})$	导热系数 $k(\text{W}/\text{mK})$
铝合金	2.70	68	0.3	22.5	167
钛合金	4.40	114	0.33	8.6	7.4
镁合金	1.80	40	0.3	25	201
殷钢	8.90	141	0.3	0~2	13.7
Al/SiC	3.00	100~180	0.25~0.35	8~16	155~225

由于需要在 $-40\text{ }^\circ\text{C}\sim+65\text{ }^\circ\text{C}$ 温度范围内保证主次镜的位置、姿态及面型, 尽管前面已经对镜体和支撑材料进行了热膨胀系数的匹配, 但是计算和实践均表明在很大温度范围内工作时, 反射镜仍会因为热膨胀系数的差异产生畸变, 影响成像质量^[15]。为了进一步降低反射镜畸变, 对支撑结构进行柔性化设计是一个不错的选择。根据不同的使用目的及设计经验, 可以采取各种柔性方式^[3,15-16]。本文采用悬臂弹片形式, 主要对支撑结构的径向进行柔性化, 保证其余方向的刚度。通过多轮迭代确定了弹簧片的悬臂长度和厚度, 以及主镜的轻量化形式, 其迭代过程不是本文的重点, 此处不作展开论述。次镜支撑采用与主镜相同的柔性化支撑方式, 最终设计完成的结构如图 3 所示。

3 光机集成分析

采用光机集成分析可以有效评估各种载荷组合下结构变形对光学系统性能的影响。光机集成分析的基本思路是, 将有限元计算出的镜面节点位移进行数据拟合, 转换成光学软件可以接收的数据, 导入光学设计软件中评估镜面位姿和面型变化对成像性能的影响。最常用的数据拟合方式为刚体位移拟合和 Zernike 多项式拟合^[17-18]。对有限元数据进行拟合可采用商用软件 Sigfit^[16-17]或利用 Matlab 或 Vc++ 自编程序^[19-21], 需要在多个软件之间进行多次数据交互, 操作复杂, 容易出错。本文利用 ANSYS 自带的编程语言 APDL(ANSYS parametric design language) 和 Zemax 自带的编程语言 ZPL(Zemax programming language) 对两者进行二次开发, 自动化完成光机转换和数据导入, 减少了中间环节和出错率, 提高了计算效率。利用的软件版本为 ANSYS15.0 和 Zemax 13.0, 光学模型见图 1 所示, 有限元模型和所采用的坐标系见图 3 所示。在图 3 所示的螺钉固定孔处添加相应的约束。

3.1 60 °C 均匀温差下系统光学指标

该系统需要在 $-40\text{ }^\circ\text{C}\sim+65\text{ }^\circ\text{C}$ 温度范围内工作, 相比 20 °C 装配温度, 最大温差 60 °C。首先评估两种材料组合在 60 °C 温差下主、次镜面型和光学指标的变化。对于殷钢和 ULE 组合, 去除刚体位移和离焦后, 主、次镜面型 RMS(root-mean-square) 分别为 0.01 λ 和 0.000 7 λ ; 对于钛合金和 K9 组合, 去除刚体位移和离焦后, 主、次镜面型 RMS 分别为 0.006 5 λ 和 0.014 λ 。主、次镜去除刚体位移和离焦后面型如图 4 所示。相比于常温下指标, 60 °C 温差下两种材料组合时系统在调焦前指标均有所下降, 在调焦后指标均接近常温下指标。相面上的点列图 RMS 均在衍射极限艾利斑范围内, 相面波前优于 $(1/40)\lambda$, MTF@63 lp/mm 均优于 0.45, 其

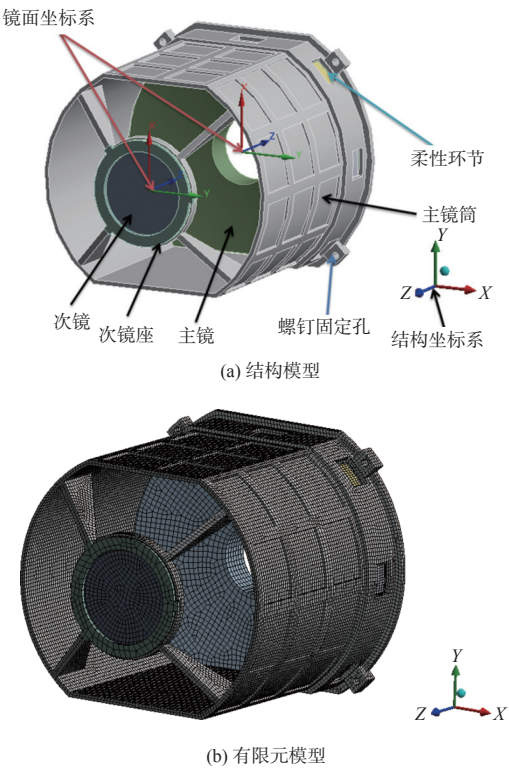
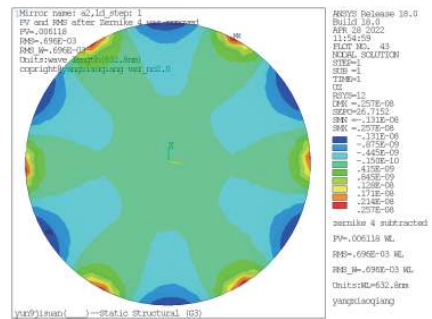
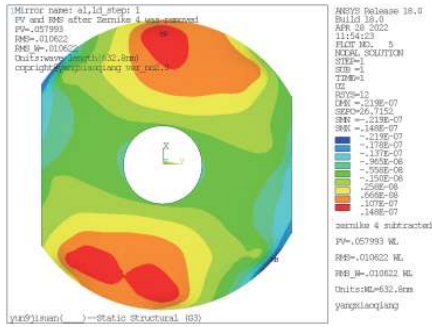
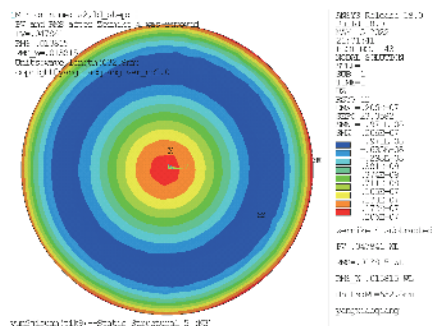
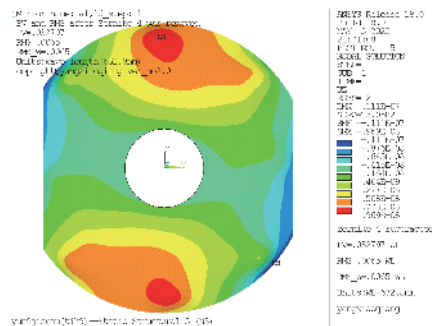


图 3 结构模型和有限元模型
Fig. 3 CAD model and FEM model

相关形状和曲线如图5所示, 计算结果如表3所示。上述指标远高于设计要求的装调指标, 可以认为对系统性能的影响可以忽略, 在60℃温差下两种材料组合均可满足使用要求。

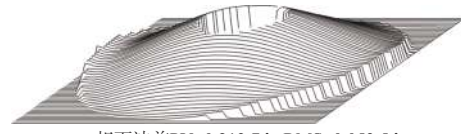


(a) 殷钢和ULE组合(上, 主镜; 下, 次镜)



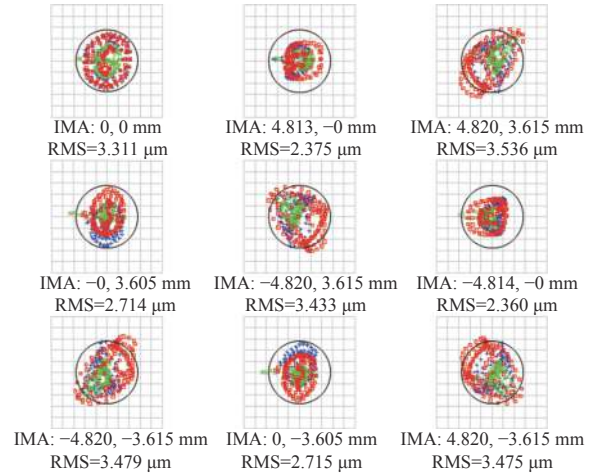
(b) 钛合金和K9组合(上, 主镜; 下, 次镜)

图4 60℃温差下去除刚体位移和离焦后主、次镜面型
Fig. 4 Surface shapes of primary and secondary mirror after removing rigid body displacement and defocus at 60℃ temperature difference

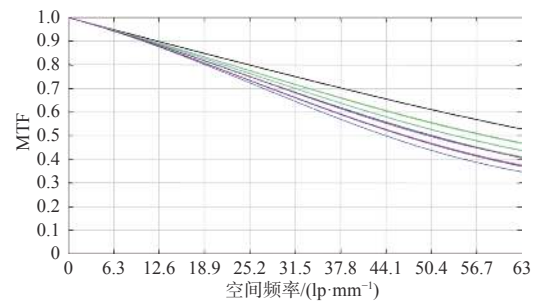


相面波前PV=0.213 7λ, RMS=0.053 5λ

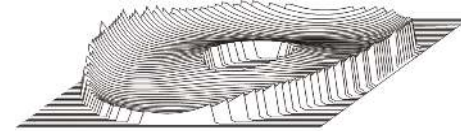
(a) 调焦前系统波像差(殷钢和ULE)



(b) 调焦前系统点列斑(殷钢和ULE)

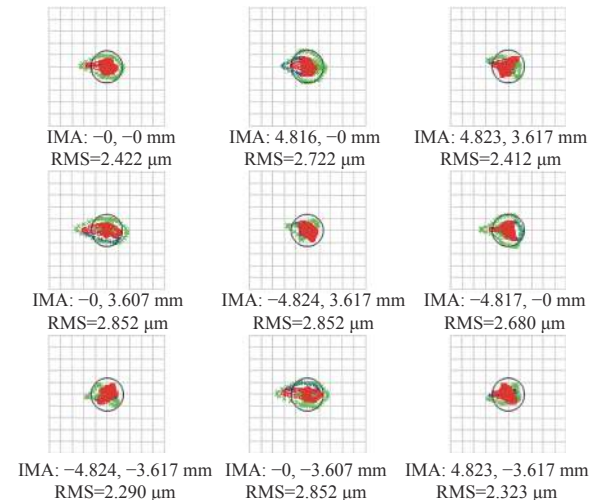


(c) 调焦前系统MTF(殷钢和ULE)

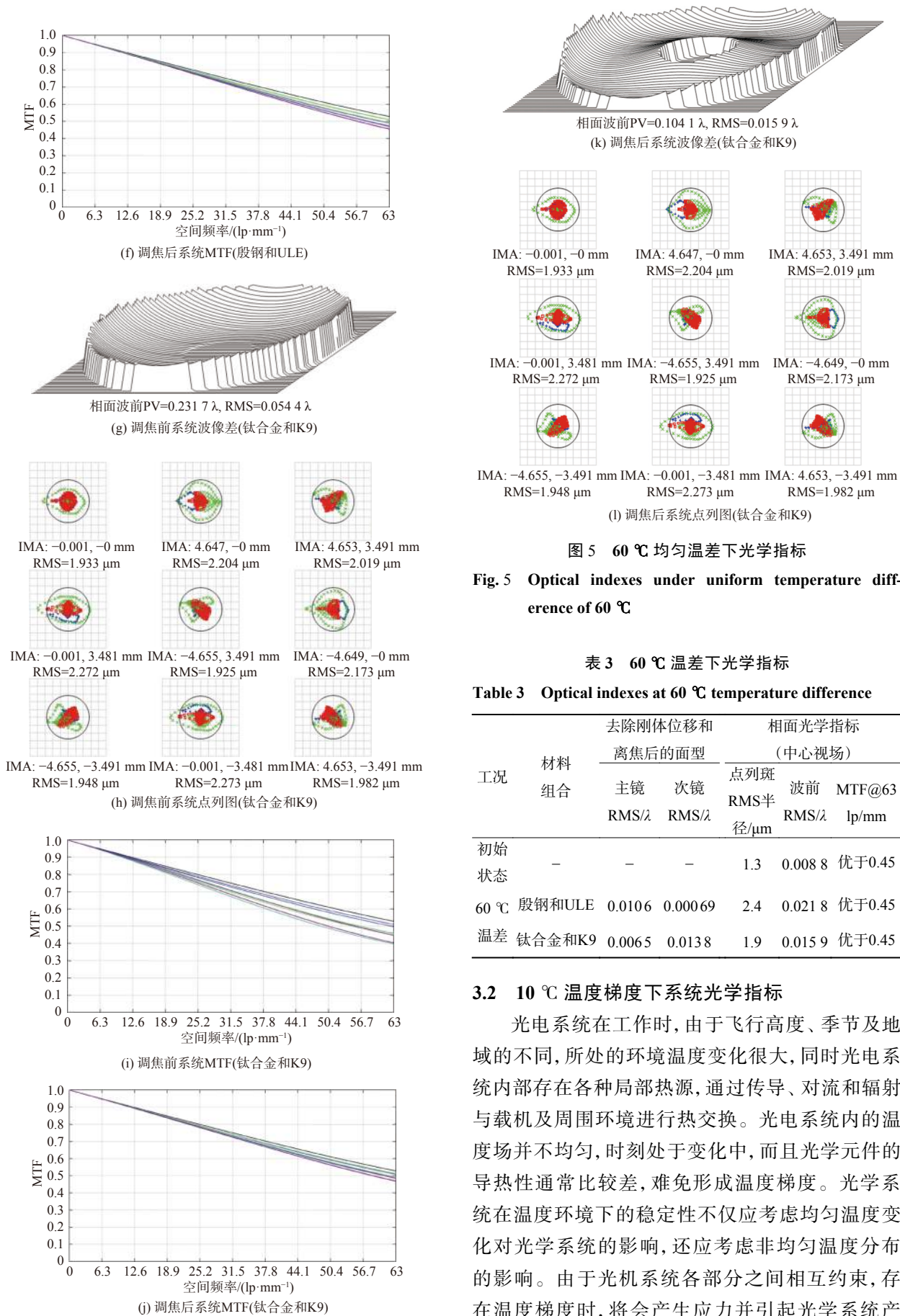


相面波前PV=0.142 5λ, RMS=0.021 8λ

(d) 调焦后系统波像差(殷钢和ULE)



(e) 调焦后系统点列图(殷钢和ULE)



生离焦和面型畸变等,造成成像质量下降^[22-23],即使对系统进行了无热化设计和温度调焦补偿,也不能完全消除这些影响。实际的温度梯度很复杂,需要进行详细的温度场分析或实验才能确定。通常为了简化计算,进行一阶近似,将温度梯度分解为特定方向的温度梯度来考虑。对于本系统来说,热源主要集中在反射镜背面和周边,造成轴向温度梯度和径向温度梯度。根据经验,取温度梯度为 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$,对比不同材料对温度梯度的敏感性。 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 轴向温度梯度下主镜面型如图6所示,系统光学指标变化情况如图7所示。 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 径向温度梯度下主镜面型如图8所示,系统光学指标变化情况如图9所示。相关结果如表4所示。通过对比可以发现,当主镜采用ULE制作时,对温度梯度不敏感,系统光学指标几乎不变。主镜材料采用K9时,系统对温度梯度极为敏感,系统光学指标完全不能满足使用要求。造成这一结果的主要原因是K9自身热膨胀系数远大于ULE,从而造成主镜面型变化过大。

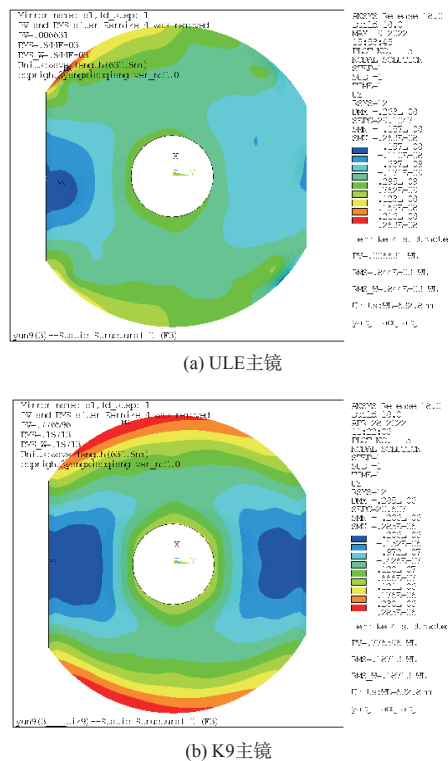
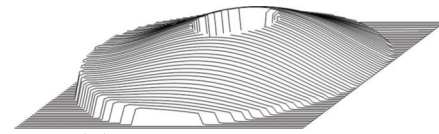
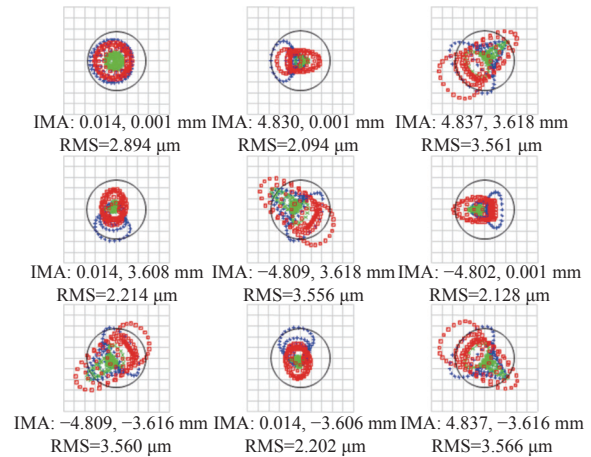


图6 主镜轴向温度梯度 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时去除刚体位移和离焦后面型

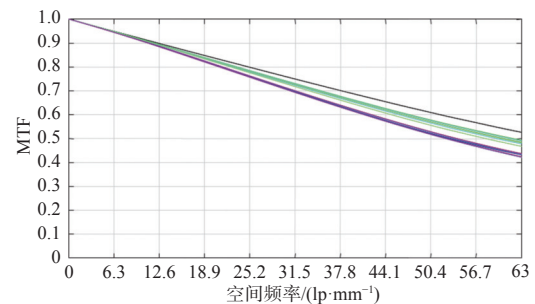
Fig. 6 Surface shapes after removing rigid body displacement and defocus when primary mirror axial temperature gradient is $10\text{ }^{\circ}\text{C}$



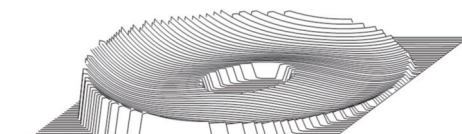
(a) 调焦前系统波像差(殷钢和ULE)



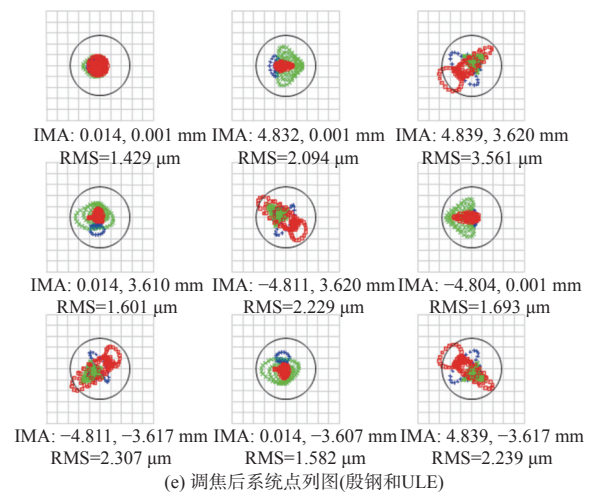
(b) 调焦前系统点列图(殷钢和ULE)



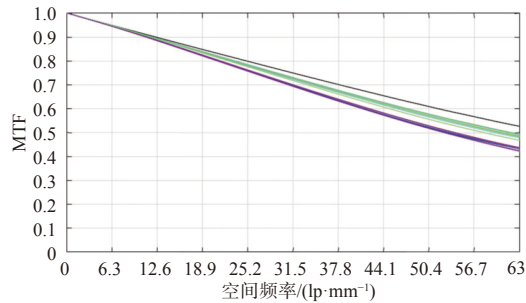
(c) 调焦前系统MTF(殷钢和ULE)



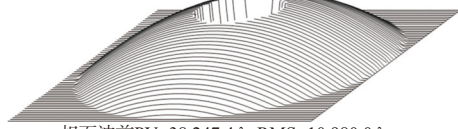
(d) 调焦后系统波像差(殷钢和ULE)



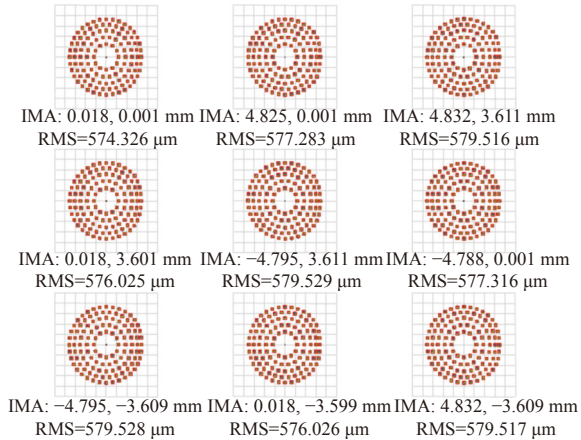
(e) 调焦后系统点列图(殷钢和ULE)



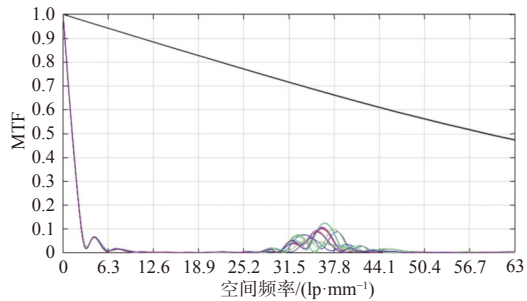
(f) 调焦后系统MTF(殷钢和ULE)

相面波前PV=38.247 4 λ , RMS=10.980 0 λ

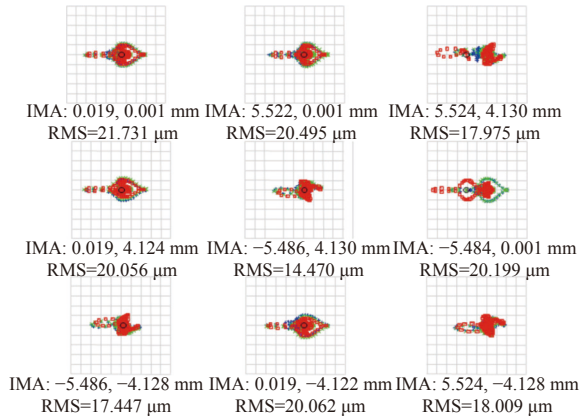
(g) 调焦前系统波像差(钛合金和K9)



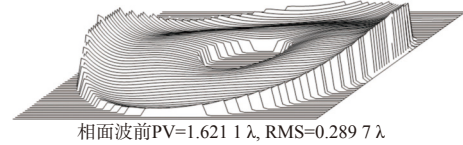
(h) 调焦前系统点列图(钛合金和K9)



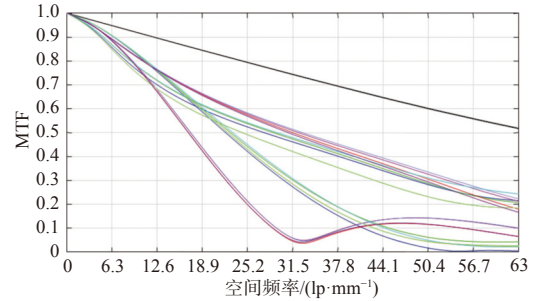
(i) 调焦前系统MTF(钛合金和K9)



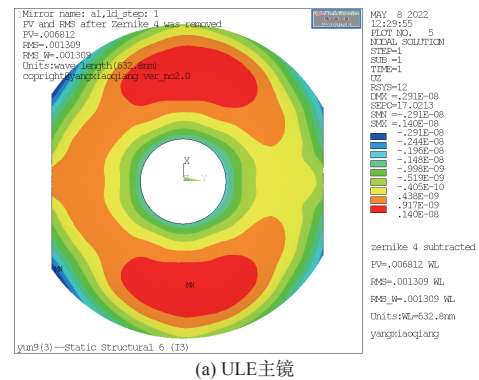
(j) 调焦后系统点列图(钛合金和K9)

相面波前PV=1.621 1 λ , RMS=0.289 7 λ

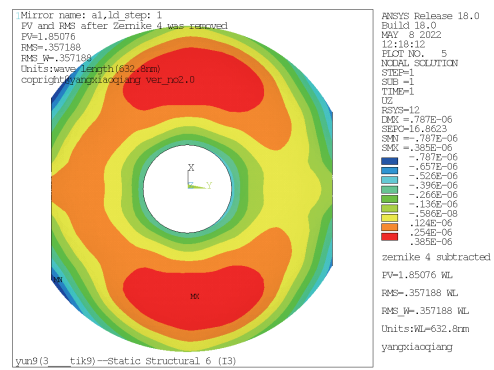
(k) 调焦后系统波长差(钛合金和K9)



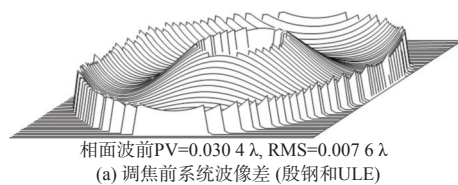
(l) 调焦后系统MTF(钛合金和K9)

图 7 10 $^{\circ}\text{C}$ 轴向温度梯度下的光学指标Fig. 7 Optical indexes under axial temperature gradient of 10 $^{\circ}\text{C}$ 

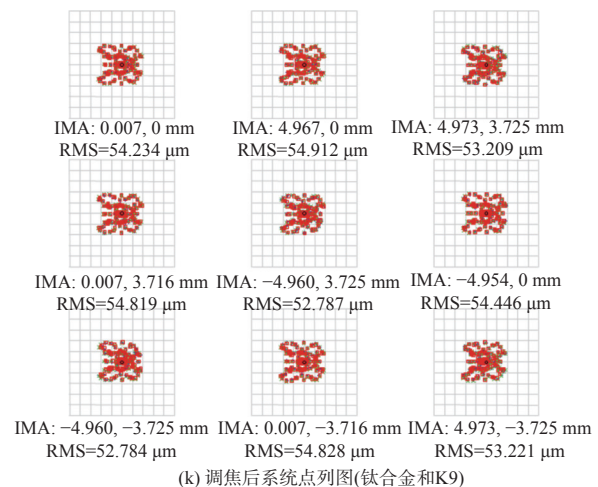
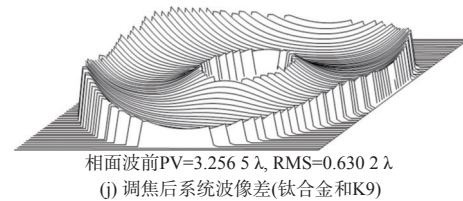
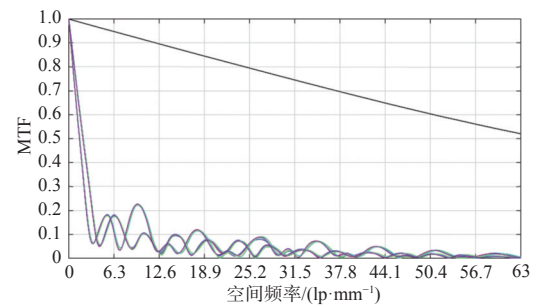
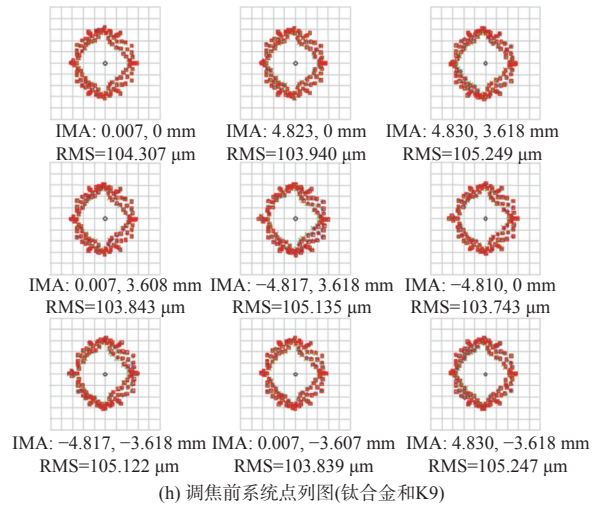
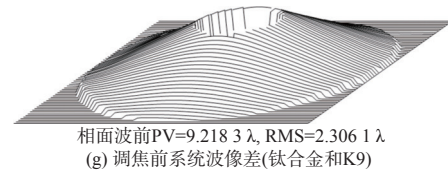
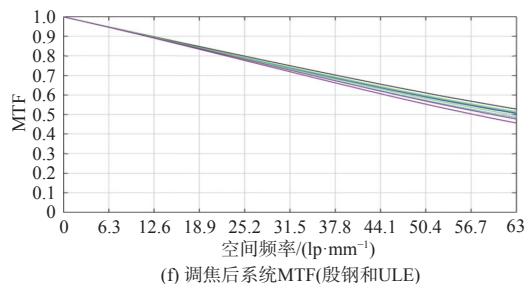
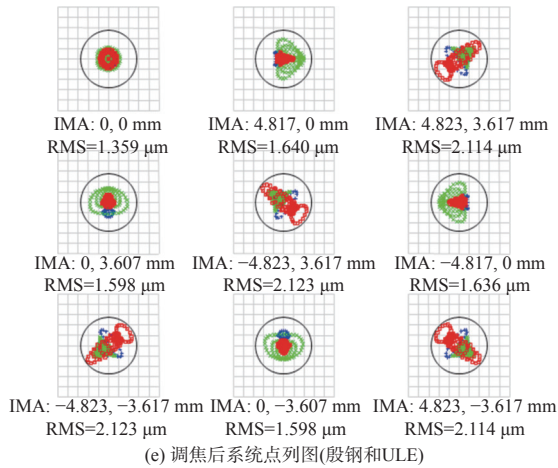
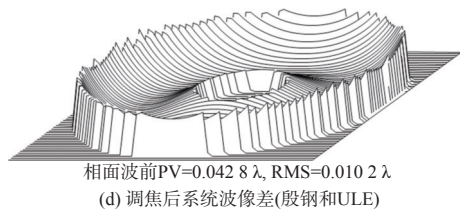
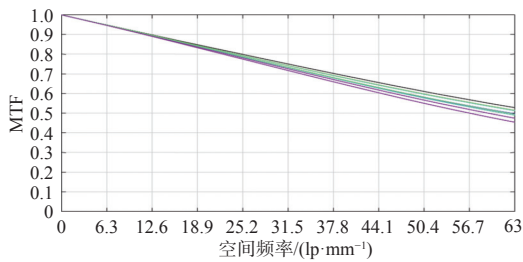
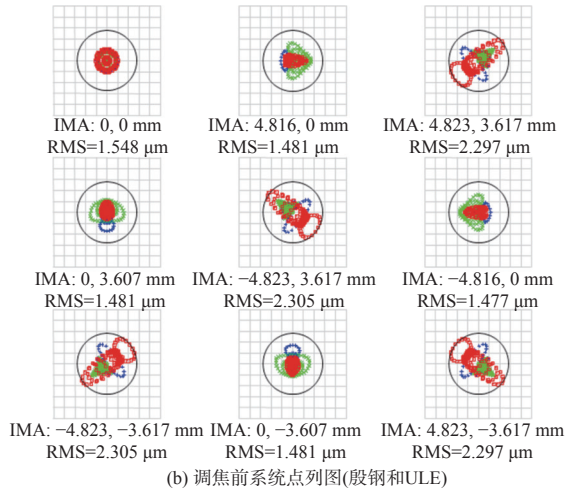
(a) ULE主镜



(b) K9主镜

图 8 主镜径向温度梯度 10 $^{\circ}\text{C}$ 时去除刚体位移和离焦后面型Fig. 8 Surface shapes after removing rigid body displacement and defocus when primary mirror radial temperature gradient is 10 $^{\circ}\text{C}$ 相面波前PV=0.030 4 λ , RMS=0.007 6 λ

(a) 调焦前系统波像差(殷钢和ULE)



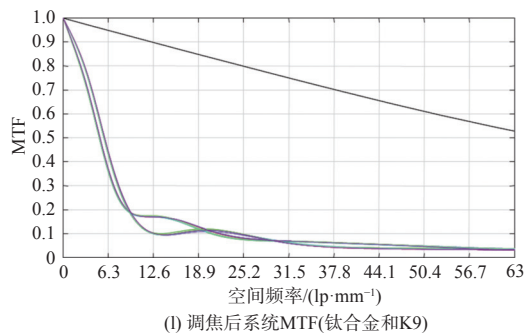


图9 10℃径向温度梯度下的光学指标

Fig. 9 Optical indexes under radial temperature gradient of 10℃

表4 10℃温度梯度下光学指标

Table 4 Optical indexes under temperature gradient of 10℃

温度 梯度	材料 组合	去除刚体 位移和离 焦后的面型				相面光学指标 (中心视场)	
		主镜 RMS/ λ	点列斑RMS 半径/ μm	波前 RMS/ λ	MTF@63 lp/mm		
轴向	殷钢和ULE	0.00084	1.429	0.0167	优于0.4		
	钛合金和K9	0.1871	21.731	0.2897	远差于0.4		
径向	殷钢和ULE	0.0013	1.359	0.0102	优于0.45		
	钛合金和K9	0.3572	54.234	0.6302	远差于0.4		

3.3 模态分析

对于光学系统来说,除了温度适应性外,还应有足够的刚度,可以利用光学灵敏度和模态振型组合进行振动环境下的光轴稳定精度^[4,22]分析,模态和振型分析结果如表5所示。

表5 模态和振型

Table 5 Modality and vibration types

阶次	殷钢和ULE组合		钛合金和K9组合	
	频率/Hz	振型描述	频率/Hz	振型描述
1	263.55	主镜沿光轴方向平动	245.27	主镜沿光轴方向平动
2	269.97	次镜沿光轴方向平动	249.27	主镜Y向平动
3	276.66	主镜Y向平动	251.16	次镜沿光轴方向平动
4	296.3	主镜X向平动	266.12	主镜X向平动
5	335.9	主镜绕Y轴摆动	312.24	主镜绕Y轴摆动
6	352.77	主镜绕光轴横滚	321.85	次镜X向平动

系统固有频率是刚度的直接体现,此处对系统进行模态分析,可得到前六阶固有频率,前六阶振型如图10所示。两种材料匹配的主、次镜支撑部分一阶固有频率高达263 Hz和245 Hz,实际系统

在工作时安装在减振平台上,减振系统固有频率选择为16 Hz左右,共光路部分固有频率远高于减振频率,光学系统具有足够的刚度。综上所述,主、次镜支撑组件的刚度满足结构要求。

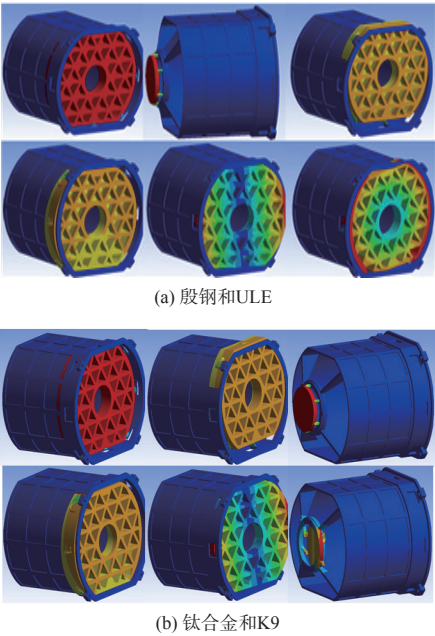


图10 前六阶振型

Fig. 10 The first six-order vibration types

4 结论

针对在-40℃~+65℃范围内工作的某共光路系统进行了主、次镜和支撑材料的选配、支撑柔性设计、光机一体化仿真分析。反射镜和支撑结构材料根据热膨胀系数匹配的原则可选取殷钢和ULE组合、钛合金和K9组合。在±60℃均匀温差下,殷钢和ULE组合、钛合金和K9组合的成像质量在调焦前均有所下降,经过调焦后成像质量均接近常温下的设计指标。采用ULE材料的反射镜对温度梯度不敏感,采用K9材料的反射镜则对温度梯度极为敏感。当分别存在10℃轴向和径向温度梯度时,ULE主镜去除离焦后面型精度接近(1/1000) λ ,系统经过调焦后成像质量接近设计指标。K9主镜由于自身热膨胀系数大,对温度梯度极为敏感,无法满足使用要求。对设计的柔性支撑材料进行了刚度分析,一阶固有频率高达263 Hz,说明设计的柔性支撑材料在保证温度适应性的同时具有足够的刚度。

本文没有给出共光路系统在各种姿态下受重力等影响时面型变化的计算结果。对于中小型共

光路系统来说,主镜的相对刚度很高,重力的影响通常可以忽略,但当主镜轻量化率比较高时,则需要仔细校对。

根据本文设计的光机系统已完成了部分验证试验,在低温时,用分辨率靶进行检测,分辨率无明显下降,说明设计和仿真结果可行,开发的光机仿真程序能够满足工程使用要求。

参考文献:

- [1] 鲜勇,李文强,赵翔.一种机载多波段共光路望远光学系统[J].*电光与控制*,2020,27(8):109-112.
XIAN Yong, LI Wenqiang, ZHAO Xiang. Design of an airborne telescope optical system with multispectrum and common aperture[J]. *Electronics Optics & Control*, 2020, 27(8): 109-112.
- [2] LEE J H, JUNG Y S, RYOO S Y, et al. Imaging performance analysis of an EO/IR dual band airborne camera[J]. *Journal of the Optical Society of Korea*, 2011, 15(2): 174-181.
- [3] ANEES A. Handbook of optomechanical engineering[M]. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2017: 300-358.
- [4] YODER P R, VUKOBRATOVICH D. Opto-mechanical systems design [M]. 4th ed. Boca Raton: CRC Press, 2015: 440-450.
- [5] 罗致帮,李巍,徐佳坤,等.临近空间816 mm口径望远镜复合支撑主镜组件设计[J].*光学精密工程*,2021,29(3):558-569.
LUO Zhibang, LI Wei, XU Jiakun, et al. Design of primary mirror assembly with compound support for $\phi 816$ mm near space telescope[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2021, 29(3): 558-569.
- [6] 王克军,董吉洪,周平伟,等.空间遥感器反射镜背部支撑结构设计[J].*红外与激光工程*,2019,48(7):0718004-1-11.
WANG Kejun, DONG Jihong, ZHOU Pingwei, et al. Back support structure design of mirror of space remote sensor[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(7): 0718004-1-11.
- [7] 程志峰,刘福贺,荀显,等.双波段共口径成像系统光机设计与分析[J].*红外与激光工程*,2015,44(11):3366-3372.
CHENG Zhifeng, LIU Fuhe, XUN Xian, et al. Opto-mechanical design and analysis of dual-band sharing aperture imaging system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(11): 3366-3372.
- [8] 李猛,闫钰峰,白素平.机载光谱仪前置光学系统主镜支撑结构设计[J].*长春理工大学学报(自然科学版)*,2020,43(5):62-67.
LI Meng, YAN Yufeng, BAI Suping. Structural design of primary mirror support for the front optical system of the onboard spectrometer[J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2020, 43(5): 62-67.
- [9] 魏梦琦,高世林,温庆荣,等.某机载光电系统主镜的轻量化设计与分析[J].*激光与红外*,2015,51(5):634-639.
WEI Mengqi, GAO Shilin, WEN Qingrong, et al. The lightweight design and analysis of the primary mirror for a new airborne opto-electronic system[J]. *Laser & Infrared*, 2015, 51(5): 634-639.
- [10] 杨利伟,李志来,薛栋林.结构胶固化收缩对反射镜面形影响的分析与试验[J].*光学技术*,2014,40(4):307-312.
YANG Liwei, LI Zhilai, XUE Donglin. Analysis and test for effect of structural adhesive shrinkage during curing on mirror surface[J]. *Optical Techniue*, 2014, 40(4): 307-312.
- [11] 周小华,邢辉,杨居奎.空间光学遥感器反射镜组件中环氧胶的选用[J].*航天返回与遥感*,2019,40(3):65-71.
ZHOU Xiaohua, XING Hui, YANG Jukui. Epoxy selection for reflect mirror assembly in space remote sensor[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2019, 40(3): 65-71.
- [12] 韩旭,吴清文,董得义,等.室温硫化胶层建模在透镜结构分析中的应用[J].*光学精密工程*,2010,18(1):118-125.
HAN Xu, WU Qingwen, DONG Deyi, et al. Application of RTV adhesive modeling to structure analysis of reflective mirror[J]. *Optics and Precidion Engineering*, 2010, 18(1): 118-125.
- [13] DOYLE K B, MICHELS G J, GENBERG V L. Athermal design of nearly incompressible bonds[J]. *SPIE*, 2002, 4771: 296-303.
- [14] 刘强,何欣,张峰,等.反射镜无热装配中胶层厚度的计算及控制[J].*光学精密工程*,2012,20(10):2229-2236.
LIU Qiang, HE Xin, ZHANG Feng, et al. Calculational and control of adhesive layer in reflector athermal mount[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(10): 2229-2236.
- [15] 杨建莉,齐媛,杨晓强,等.一种轻质薄型反射镜的挠性

- 支撑结构设计[J]. 应用光学, 2017, 38(5): 815-819.
- YANG Jianli, QI Yuan, YANG Xiaoqiang, et al. Flexible support structure design of lightweight thin reflector[J]. Journal of Applied Optics, 2017, 38(5): 815-819.
- [16] 王忠素, 翟岩, 梅贵. 空间光学传感器反射镜柔性支撑的设计[J]. 光学精密工程, 2010, 18(8): 1833-1839.
- WANG Zhongsu, ZHAI Yan, MEI Gui. Design of flexible support structure of reflector in space remote sensor[J]. Optics and Precision Engineering, 2010, 18(8): 1833-1839.
- [17] 李伟艳, 吕群波, 刘扬阳, 等. 基于低体分 SiC/Al主镜框的空间相机主支撑结构热特性分析与验证[J]. 光子学报, 2021, 50(4): 0412001-1-10.
- LI Weiyan, LYU Qunbo, LIU Yangyang, et al. Thermal characteristics analysis and verification of primary supporting structure for spaceborne camera based on low volume SiC/Al primary mirror frame[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(4): 0412001-1-10.
- [18] 张颖, 丁振敏, 赵慧洁, 等. 光机热集成分析中镜面刚体位移分离[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(10): 2763-2767.
- ZHANG Ying, DING Zhenmin, ZHAO Huijie, et al. Integrated optomechanical analysis the displacement of the mirror body separation[J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(10): 2763-2767.
- [19] DOYLE K B, MICHELS G J, GENBERG V L. Integrated optomechanical analysis [M]. 2nd ed. Washington: SPIE Press, 2002: 100-150.
- [20] DOYLE K B, GENBERG V L, MICHELS G J, et al. Optical modeling of finite element surface displacements using commercial software[J]. SPIE, 2005, 5867: 1-12.
- [21] 刘家国, 李林. 光机热集成分析中数据转换接口研究[J]. 北京理工大学学报, 2007, 27(5): 428-431.
- LIU Jiaguo, LI Lin. Study on the data transfer interface in the thermal/structural/optical integrated analysis[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2007, 27(5): 428-431.
- [22] 杨晓强. 卡塞格林系统在振动环境下的光轴抖动量研究[J]. 应用光学, 2018, 39(增刊): 60-64.
- YANG Xiaoqiang. Line-of-sight jitter of Cassegrain system under vibration[J]. Journal of Applied Optics, 2018, 39(Sup): 60-64.
- [23] 姬文晨, 张宇, 黄攀, 等. 温度梯度对红外光学系统成像质量的影响[J]. 激光与红外, 2015, 42(4): 640-645.
- Ji Wenchen, ZHANG Yu, HUANG Pan. Effect of temperature gradient on imaging quality of infrared optical system[J]. Laser & Infrared, 2015, 42(4): 640-645.