

自由曲面变焦的内调焦式光学系统设计

蒋婷婷, 冯华君, 李 奇*

(浙江大学 光电科学与工程学院 现代光学仪器国家重点实验室, 浙江 杭州 310027)

摘要: 具有调焦功能的光学系统在空间探测领域中有着重要的应用需求。设计了一种基于自由曲面垂轴偏移的内调焦光学系统, 该系统中采用特殊自由曲面面型结构, 构建自由曲面透镜组, 利用垂轴偏移的变焦特性, 改善光学系统的成像位置, 提升在空间环境多样性和宽物距成像的适应性能力。具体分析自由曲面透镜组的调焦原理, 并成功将自由曲面透镜组应用到焦距为 100 mm 的光学系统中, 分析像距扰动和物距变化两种情况下的成像质量和偏移量。结果表明, 光学系统的调制传递函数在奈奎斯特频率处大于 0.3, 满足成像要求, 该系统具有成像性能稳定和微米量级补偿量等特点。

关键词: 内调焦系统; 变焦透镜; 自由曲面; 垂轴偏移

中图分类号: O439 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA20200290

Design on internal focusing optical system with zoom lens of freeform

Jiang Tingting, Feng Huajun, Li Qi*

(State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, College of Optical Science and Engineering,
Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Optical systems equipped with focusing ability are crucial for space exploration. The internal focusing optical system was designed which was based on the vertical deflection of the freeform surface. Specifically, the system used a special structure of the freeform surface to establish a lens group. It used the zoom ability of the vertical deflection to improve the imaging location thus adapting to different conditions such as wide range imaging or diverse space environments. The zoom theory of the freeform lens group was analyzed, and zoom lens of freeform was successfully applied to the optical system whose focal length was 100 mm. Then the imaging quality and displacements were analyzed when the object and image distance were changed accordingly. The results show that the Modulation Transfer Function (MTF) of the optical system is better than 0.3 at the Nyquist frequency which means satisfying quality of image. The system is stable in imaging and can provide compensation on the micron scale.

Key words: internal focusing system; zoom lens; freeform; vertical deflection

0 引言

具有调焦功能的光学系统在空间探测领域中有着重要的应用需求。例如航天飞行器上的光学载荷因为空间环境气压和温度的变化、发射过程中的剧烈冲击等力学环境因素影响,存在离焦的现象^[1-3],尤其是光学监视任务需求中,最佳成像位置随监控目标空间位置的变化而变化,对于固定像面的定焦光学系统有着不可忽视的离焦量。离焦产生的模糊是获取清晰图像的重要障碍之一。

为了实现光学系统对不同物距目标的清晰成像,提升在复杂环境的适应性能,光学系统的设计方案需要重点考虑内调焦的实现方法。李丹等^[4]设计了一种二元光学内调焦望远物镜的光学系统,焦距为 245 mm,全视场为 1.5°,利用二元透镜独特的色散特性校正系统的色差,实现无穷远到 1.5 m 物距调焦范围。刘智颖等^[5]设计了一种宽光谱内调焦的光学系统,焦距为 90 mm,波段范围为 420~900 nm,全视场为 1.6°,实现了 200 m~200 km 物距调焦范围。以上光学系统采用调焦透镜沿光轴方向移动的方法,实现内调焦功能,同时也存在着系统像差变化的问题。因此在长焦距内调焦光学系统中视场角相对较小,较大视场的像差矫正也是内调焦优化方案中有待解决的关键问题之一。

光学自由曲面一般无法用球面或是非球面系数来表达^[6-7],具有较高的自由度和较强的像差矫正能力,但对加工精度提出了较为严格的要求^[8]。2010 年后,随着超精密加工和检测技术的发展^[9],自由曲面在成像光学应用的潜力不断被挖掘。近年来,Zou Y 等^[10]成功研制出一款基于自由曲面透镜组成像的内窥镜样机,焦距变化范围在 4.9~7.4 mm,通光口径为 2 mm。Petsch S 等^[11]结合 LCE 人工肌肉驱动器和自由曲面透镜对,设计了一种微型可见光范围成像的光学系统,系统焦距变化范围为 25.1~28.4 mm,通光口径为 2.5 mm。自由曲面变焦透镜的发展趋势偏向微型,在长焦距较大孔径光学系统中的应用仍有待发展。

文中设计了一种基于自由曲面横向偏移的内调焦光学系统,焦距为 100 mm,波段范围为 450~700 nm,全视场为 12°,相对口径为 1/5.6,物距调焦范围为无

穷远到 1.5 m。该光学系统通过自由曲面透镜组垂轴移动的方法调制入射光波的复振幅,实现较大口径的内调焦功能。

1 自由曲面变焦原理

1.1 自由曲面面型结构参数

自由曲面面型结构可以采用 XY 多项式描述,其表达式如公式 (1) 所示:

$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}} + \sum_{j=1}^N A_j x^m y^n \quad (1)$$

式中:(x,y)表示自由曲面的孔径坐标; z 为表面在对应坐标点(x,y)的厚度; c 为表面顶点曲率; k 为二次曲面常数; r 为径向半径,有 $r = \sqrt{x^2 + y^2}$; m 为 x 的级数; n 为 y 的级数; N 为多项式的项数; A_j 为多项式第 j 项数,有 $j = \frac{(m+n)^2 + m + 3n}{2} + 1$ 。

自由曲面透镜组由 4 个面构成,其中 2 个为平面,位于透镜组外侧表面,另外 2 个表面为自由曲面,位于透镜组内侧表面,2 个自由曲面的空气间隔很小,自由曲面透镜组结构模型如图 1 所示。



图 1 自由曲面透镜组模型

Fig.1 Model of the freeform lens

光线沿 z 轴方向自左向右传播。当自由曲面垂轴偏移量 $\delta = 0$ 时,透镜组对光学系统的光焦度没有贡献。因此自由曲面 surf1 和 surf2 面型结构相同,其数学表达式用公式 (2) 进行描述:

$$\begin{aligned} \text{surf1}: t_1(x,y) &= C + \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}} + \sum_{j=1}^N A_j x^m y^n \\ \text{surf2}: t_2(x',y') &= C - \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}} - \sum_{j=1}^N A_j x'^m y'^n \end{aligned} \quad (2)$$

式中: C 为常数,表示自由曲面透镜的顶点厚度; (x,y) 是以自由曲面 surf1 的顶点为原点的坐标;

(x', y') 是以自由曲面 surf2 的顶点为原点的坐标。

1.2 自由曲面垂轴偏移量 δ

当透镜组中的自由曲面 surf1 和 surf2 相对垂轴偏移量为 δ 时, 透镜组的厚度随之发生了变化。假设透镜组沿 x 方向偏移, 规定沿正 x 方向移动 $\delta > 0$ 时, 由于透镜组中两块自由曲面透镜间的空气间隔很小, 可忽略光线在自由曲面 surf1 和 surf2 传播过程中空间坐标的变化, 则透镜组的厚度可以描述为:

$$T(x, y, \delta) = t_1(x + \delta, y) + t_2(x - \delta, y) = 2C + \sum_{j=1}^N A_j [(x + \delta)^m y^n - (x - \delta)^m y^n] \quad (3)$$

当平行光线经过这组自由曲面透镜组后, 相位 φ 变化的表达式为:

$$\varphi(x, y, \delta) = \frac{2\pi(n_\lambda - 1)}{\lambda} \left\{ 2C + \sum_{j=1}^N A_j [(x + \delta)^m y^n - (x - \delta)^m y^n] \right\} \quad (4)$$

式中: λ 为通过透镜组的波长; n_λ 为透镜材料的折射率。

从公式 (4) 中提炼出相位变化与 x^2 和 y^2 相关的项, 并重新构建一个相位函数 $\varphi_f(x^2, y^2, \delta)$, 表达式如公式 (5) 所示:

$$\varphi_f(x^2, y^2, \delta) = \frac{2\pi}{\lambda} (n_\lambda - 1) \sum_{m=3}^{N'} A_{j1} C_m^2 x^2 [\delta^{m-2} - (-\delta)^{m-2}] + \frac{2\pi}{\lambda} (n_\lambda - 1) \sum_{m=1}^{N'} A_{j2} [\delta^m - (-\delta)^m] y^2 \quad (5)$$

式中: m 表示 x 的级数; N' 表示 x 幂的最大值; C_m^2 为组合排列系数; A_{j1} 表示自由曲面 XY 多项式第 $j1$ 项的系数, 且有 $j1 = \frac{m^2 + m + 2}{2} (m \geq 3)$; A_{j2} 表示自由曲面 XY 多项式第 $j2$ 项的系数, 且有 $j2 = \frac{m^2 + 5m + 12}{2} (m \geq 1)$ 。取 $N' = 3$ 进行详细分析, 公式 (5) 可简化为:

$$\varphi_f(x^2, y^2, \delta) = \frac{2\pi}{\lambda} (n_\lambda - 1) (6A_7 \delta x^2 + 2A_9 \delta y^2 + 2A_{18} \delta^3 y^2) \quad (6)$$

式中: A_7 、 A_9 、 A_{18} 表示自由曲面 XY 多项式第 7、9、18 项的系数。分析公式 (6) 可得, 式中第一项和第二项与垂轴偏移量 δ 成线性关系, 当 $A_7 = A_9/3$, $A_{18} = 0$ 时, 相位 $\varphi_f(x^2, y^2, \delta)$ 为:

$$\varphi_f(x^2, y^2, \delta) = \frac{2\pi}{\lambda} (n_\lambda - 1) 2A_9 \delta (x^2 + y^2) \quad (7)$$

已知球面薄透镜相位变换为:

$$\varphi_{sp}(x_1, y_1) = \frac{2\pi}{\lambda} \frac{x_1^2 + y_1^2}{2f_{sp}} \quad (8)$$

式中: (x_1, y_1) 为常规球面透镜的孔径坐标; λ 为波长; f_{sp} 为球面透镜的焦距。结合公式 (7) 和公式 (8) 得到自由曲面透镜组焦距 f_{freeform} 的表达式:

$$f_{\text{freeform}} = \frac{1}{4\delta A_9 (n_\lambda - 1)} \quad (9)$$

根据公式 (9) 可知, 自由曲面透镜组焦距 f_{freeform} 分别与垂轴偏移量 δ 、多项式第 9 项系数 A_9 、透镜材料折射率 n_λ 成反比。其中折射率 n_λ 与波长相关, 当透镜材料的阿贝常数越小, 自由曲面透镜组的色散越明显, 不利于光学系统二级色差的矫正。多项式系数 A_9 与自由曲面的面型平缓程度相关, A_9 越大, 自由曲面的面型越陡峭, 不利于自由曲面的超精密加工和大通光口径的设计。当 $A_9 > 0$ 时, 讨论垂轴偏移量 δ 以下 3 种情况, 并结合光学设计软件得到仿真结果, 如图 2 所示。

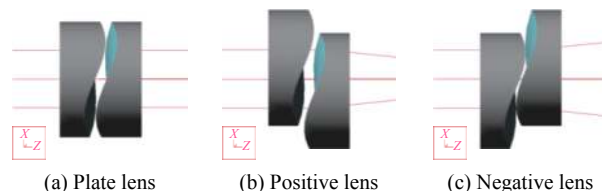


图 2 相对偏移量 δ 对透镜的影响

Fig.2 Effect of the lateral shift δ on lens

(1) 当相对偏移量 $\delta = 0$ 时, 透镜组表现为平板效果, 如图 2(a) 所示;

(2) 当相对偏移量 $\delta > 0$ 时, 透镜组表现为正透镜效果, 如图 2(b) 所示。结合公式 (9) 分析得到, 随着垂轴偏移量 δ 的增加, 入射光波调制后的会聚效果越明显;

(3) 当相对偏移量 $\delta < 0$ 时, 透镜组表现为负透镜效果, 如图 2(c) 所示。结合公式 (9) 分析得到, 随着垂轴偏移量 δ 的减小 (绝对值增加), 入射光波调制后的发散效果越明显。

2 自由曲面内调焦光学系统设计

在内调焦光学系统中, 以自由曲面透镜组作为调焦镜, 结合不同物距目标成像和像距扰动的成像情况建立数学模型, 如公式 (10) 所示:

$$\frac{1}{l'+\Delta l'} - \frac{1}{l} = \frac{f_{\text{freeform}} + f_0' - d}{f_0' f_{\text{freeform}}} \quad (10)$$

式中： f_0' 为常数，表示光学系统焦距（不含自由曲面透镜组）； f_{freeform} 为变量，表示自由曲面透镜组焦距； d 为常数，表示光学系统（不含自由曲面透镜组）主平面和自由曲面透镜组主平面的距离； l' 为常数，表示对应无穷远物距的像距； $\Delta l'$ 为变量，表示空间环境因素造成的离焦量； l 为变量，表示成像目标的物距。公式（10）中变量 f_{freeform} 作为调节组件，实现对变量 $\Delta l'$ 和 l 的补偿，使光学系统处于准确对焦位置。在自由曲面透镜的材料和面型确定的条件下， f_{freeform} 中 δ 为唯一补偿变量。

以焦距为 100 mm、相对孔径为 1/5.6、视场角 2ω 为 12° 、光谱范围为 450~700 nm 为约束条件，通过 delano 图解法求解得到一个光学系统初始结构。结合公式（10）可知，在初始结构前加入自由曲面透镜组，并且使得初始结构和自由曲面透镜的主平面距离 d 较小，充分利用自由曲面的变焦特性补偿像距和物距的变化。由于光学系统装配需要一定的间隙，因此选取 $d = 2 \text{ mm}$ 。自由曲面透镜的光学材料选择折射率较大且阿贝常数较大的重磷冕玻璃，如 H-ZPK7。自由曲面透镜的面型考虑口径问题，选取 $A_9 = 0.0009$ 。物距调焦范围 l 为无穷远到 1.5 m，环境因素引起的离焦量 $\Delta l'$ 是不确定值，通过环境温度（Temperature, T ）和大气压强（Atmosphere pressure, P_{atm} ）对系统的影响定性分析，选取温度范围为 $-100 \sim 100 \text{ }^\circ\text{C}$ ，大气压强为 $0 \sim 1 \text{ atm}$ ($1 \text{ atm} = 1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$)。经过光学软件优化后得到最终的内调焦光学系统如图 3 所示，具体参数指标如表 1 所示。

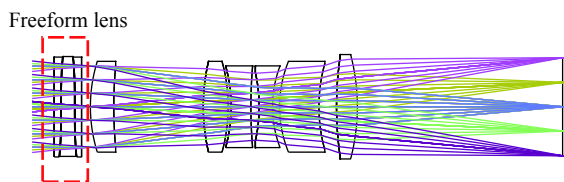


图 3 内调焦光学系统

Fig.3 Schematic diagram of internal focusing optical system

如图 3 所示，光学系统中有 1 组自由曲面透镜组和 6 片球面透镜构成，其中自由曲面透镜组由 3 片带有自由曲面的透镜组成。光学系统的面型结构和材料特性如表 2 所示。

表 1 内调焦光学系统参数指标

Tab.1 Specific parameters of internal focusing optical system

Parameter	Value
Focal length/mm	100
F number	5.6
Field of view/ $^\circ$	12
Wavelength/nm	450-700
Total length/mm	115
Size of pixel/ μm^2	5.5×5.5
Object length/m	1.5-Infinity
Temperature/ $^\circ\text{C}$	-100~100
Atmosphere/atm	0-1

表 2 自由曲面透镜的参数特性

Tab.2 Specific parameters of freeform lens

Title	Type	A_9	Radius	Thickness	Materials
Lens 1	Sphere	-	Infinity	1.5	H-ZPK7
	XY polynomial	0.0009	Infinity	0.1	
Lens 2	XY polynomial	0.0009	Infinity	3	H-ZPK7
	XY polynomial	-0.0009	Infinity	0.1	
Lens 3	XY polynomial	-0.0009	Infinity	1.5	H-ZPK7
	Sphere	-	Infinity	2	
Lens 4	Sphere	-	32.74	5.30	H-ZK11
	Sphere	-	97.91	20.26	
Lens 5	Sphere	-	42.76	5.64	H-ZK11
	Sphere	-	-36.33	0.64	
Lens 6	Sphere	-	-33.70	4.50	H-ZF3
	Sphere	-	103.82	1.88	
Lens 7	Sphere	-	-32.88	3.02	H-ZF3
	Sphere	-	24.68	1.59	
Lens 8	Sphere	-	25.87	8.91	H-ZK9B
	Sphere	-	34.59	3.99	
Lens 9	Sphere	-	74.32	4.71	H-ZF12
	Sphere	-	-44.04	46.37	

3 内调焦光学系统中成像质量分析

自由曲面透镜组由于自由曲面不具有旋转对称性，在成像性能分析的过程中，重点分析中心视场、0.5 视场和全视场的 4 个方向（+X 方向，-X 方向，+Y 方向，-Y 方向）的成像质量。

3.1 物距变化分析

物距 l 的变化范围为无穷远到 1.5 m，选取物距 l 分

别为无穷远、4 m、2 m 和 1.5 m 进行成像分析。光学系统处于温度为 20 ℃、大气压强为 1 atm 的空间环境中。图 4 所示为光学系统的调制传递函数 (MTF) 曲线, 在 1.5 m 到无穷远物距范围内表现出良好的成像性能, 在奈奎斯特频率 91 lp/mm 处的中心视场 MTF 大于 0.4, 全视场范围的 MTF 大于 0.3, 满足成像要求。图 5 所示为自由曲面透镜组在不同物距成像条件下的垂轴补偿量 δ 变化曲线, 曲线具有单调性, 符合自动对焦算法的应用环境。当垂轴补偿量 $\delta = 0$ mm 时, 对应的物距 $l = 4$ m, 该状态为光学系统的初始状态。在 1.5 m 到无穷远物距成像范围内, 垂直于光轴

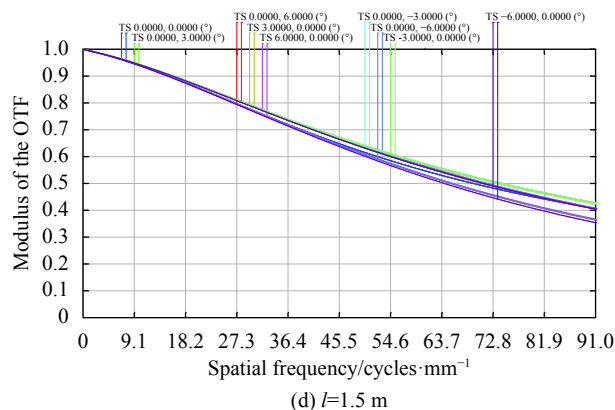
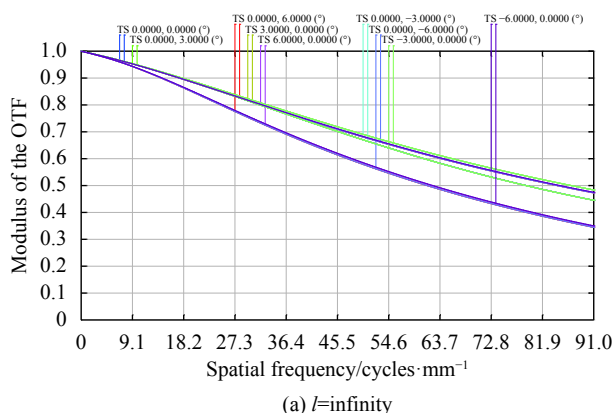
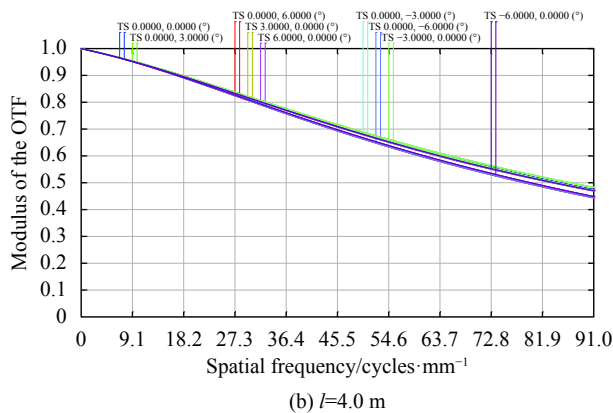


图 4 不同物距情况下的光学系统 MTF 曲线图

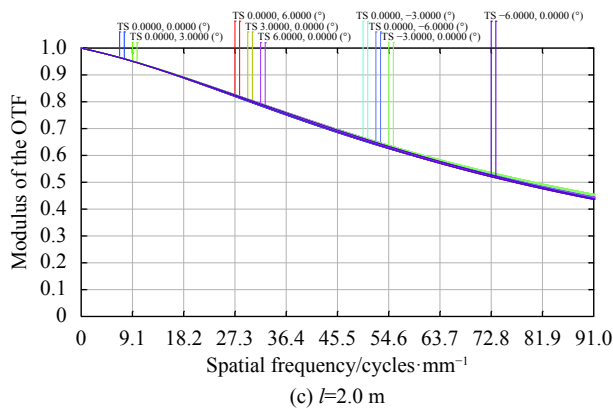
Fig.4 MTF of optical system with different object distance



(a) $l = \infty$



(b) $l = 4.0$ m



(c) $l = 2.0$ m

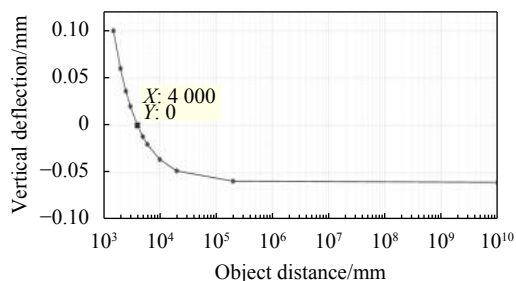


图 5 不同物距时的垂轴偏移量

Fig.5 Displacement of vertical deflection with different object distance

的最大补偿量为 0.1 mm。结合图 4 和图 5 分析可得, 随着成像物距偏离初始状态物距 $l = 4$ m 越远, 自由曲面透镜组的垂轴补偿量 δ 的绝对值越大, 光学系统 MTF 下降越明显。

3.2 环境适应性分析

环境因素引起的离焦量 $\Delta l'$ 是不确定值, 通过预设环境温度和大气压强变化范围对系统进行分析, 温度范围为 $-100 \sim 100$ ℃, 大气压强为 $0 \sim 1$ atm。光学系统的初始状态为垂轴偏移量 $\delta = 0$ mm, 对应的物距为 $l = 4$ m, 物距无穷远和 1.5 m 为光学系统的极限成像位置。因此对物距为无穷远、4 m 和 1.5 m 进行空间环境适应性分析。图 6 所示为无穷远、4 m 和 1.5 m 物距时自由曲面透镜组的垂轴补偿量 δ 和温度、大气压强的曲线图。图中横坐标表示温度变化范围, 纵坐标为自由曲面透镜组的垂轴补偿量, 带“*”的曲线表示光学系统在 0 atm 环境中, 带“o”的曲线表示光学系统在 1 atm 环境中。由图可知, 无穷远物距成像条件下, 温度 $T = 100$ ℃ 和大气压强 $P_{\text{atm}} = 0$ atm 的空间环境有最大偏移量 $\delta = 0.063$ (沿 X 轴负方向); 4 m 物距成像条件下, 温度 $T = 100$ ℃ 和大气压强 $P_{\text{atm}} = 0$ atm

的空间环境有最大偏移量 $\delta = 0.0028$ (沿 X 轴负方向);
1.5 m 物距成像条件下, 温度 $T = -100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和大气压强

$P_{\text{atm}} = 1\text{ atm}$ 的空间环境有最大偏移量 $\delta = 0.1015$ (沿
 X 轴正方向)。图 7 所示为不同物距在最大偏移量的

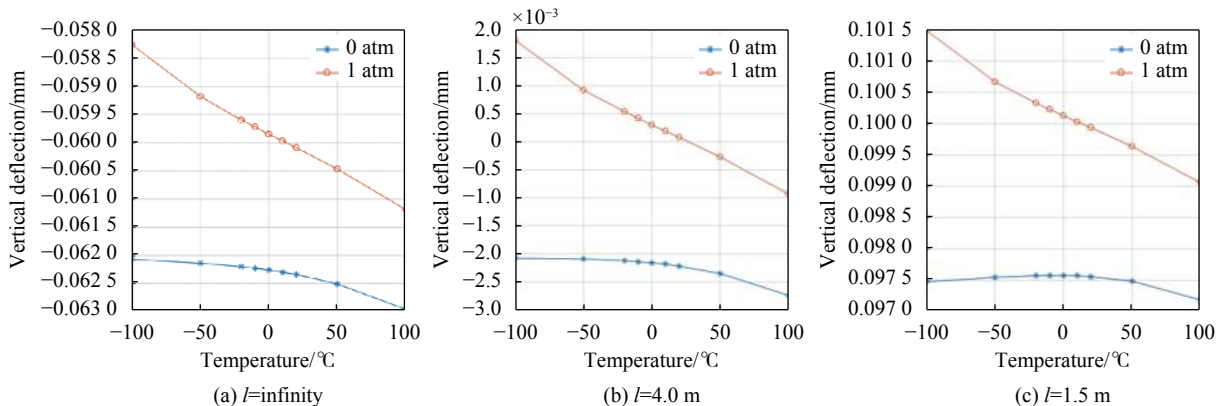


图 6 不同像距时的补偿量

Fig.6 Amount of compensation at different image distance

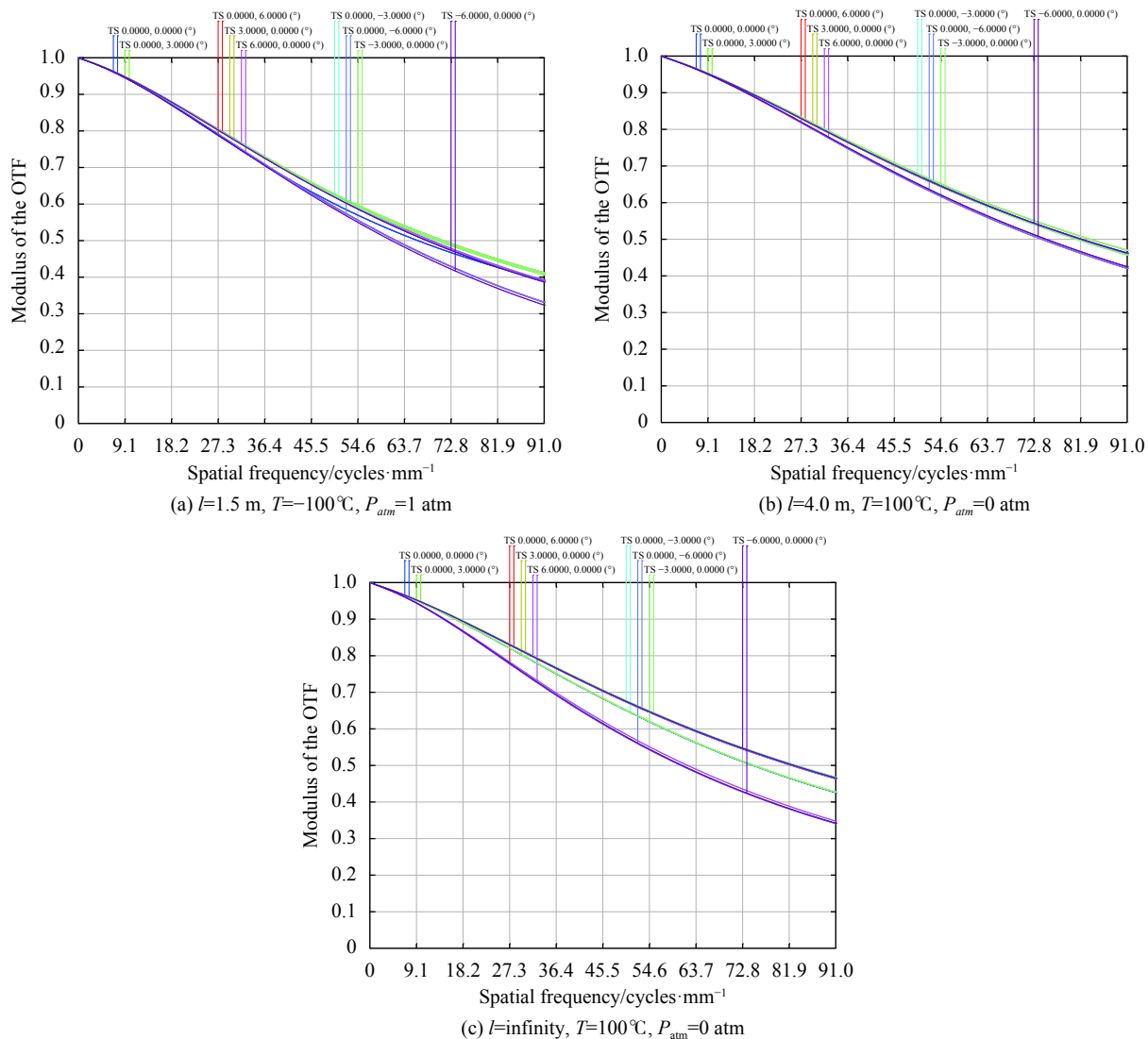


图 7 不同成像条件下的光学系统 MTF 曲线图

Fig.7 MTF diagram of optical system with different imaging conditions

条件下,光学系统的 MTF 曲线图。由图可知,光学系统的 MTF 全视场范围大于 0.3,满足成像要求,具有良好的空间适应性能力。

4 结 论

文中基于自由曲面变焦的理论,设计了一种内调焦光学系统。光学系统的焦距为 100 mm,波段范围为 450~700 nm,相对口径为 1/5.6,全视场为 12°,系统总长为 115 mm。物距调焦范围为无穷远到 1.5 m,该光学系统通过自由曲面透镜组垂轴偏移的方法调整透镜组的光焦度,实现对入射光波复振幅的调制功能。物距调焦过程中,在奈奎斯特频率 91 lp/mm 处的全视场 MTF 大于 0.3,具有宽物距的稳定成像性能,垂轴偏移量最大补偿量为 0.1 mm。空间环境适应性分析中,在奈奎斯特频率 91 lp/mm 处的全视场 MTF 大于 0.3,具有复杂空间环境的稳定成像能力,结合物距调焦范围,垂轴偏移量最大补偿量为 0.1015 mm,微米级的补偿量适用于高精度的压电陶瓷驱动装置。

参考文献:

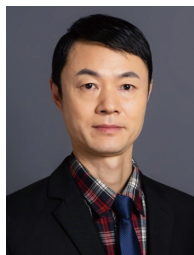
- [1] Wu Yanxiong, Qiao Jian, Wang Liping. Optical system design of star sensor with long focal length and athermalization [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(9): 20200061. (in Chinese)
- [2] Yu Tao, Xu Shuyan, Song Kefei. Auto-focusing system based on temperature for space camera [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(8): 2085-2089. (in Chinese)
- [3] Wang Kai, Yan Yong, Xu Minglin, et al. Design and experiment of precision focusing mechanism of space remote sensing camera with lightweight and miniaturization [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(12): 1218004. (in Chinese)
- [4] Li Dan, Yang Bo, Shu Xinwei. The design for internal focusing telescope objective using binary optical lens [J]. *Optical Instruments*, 2015, 37(1): 31-34, 38. (in Chinese)
- [5] Liu Zhiying, Li Shuqi, Huang Yunhan, et al. Design and analysis of the transmitted inner focusing wide spectrum optical system [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, 49(3): 0322004. (in Chinese)
- [6] Zhu Jun, Wu Xiaofei, Hou Wei, et al. Application of freeform surfaces in designing off-axis reflective space optical imaging systems [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2016, 37(3): 1-8. (in Chinese)
- [7] Yang Tong, Duan Yingzhe, Cheng Dewen, et al. Freeform imaging optical system design: Theories, development and applications [J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(1): 0108001. (in Chinese)
- [8] Tian Fei. Study on effect of machining errors on optical performance in freeform optics[D]. Tianjin: Tianjin University, 2016. (in Chinese)
- [9] Lee W, Cheung C, To Suet, et al. Ultra-precision machining technology of freeform optics and its applications [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(1): 110-115. (in Chinese)
- [10] Zou Y, Chau F, Zhou G. et al. Ultra-compact optical zoom endoscope using solid tunable lenses [J]. *Optics Express*, 2017, 25(17): 20675-20688.
- [11] Petsch S, Grewe A, Köbele L, et al. Ultrathin Alvarez lens system actuated by artificial muscles [J]. *Applied Optics*, 2016, 55(10): 2718-2723.



第一作者简介: 蒋婷婷(1990-),女,硕士研究生,主要研究方向为光机系统设计和分析。参与探月工程的嫦娥五号试验星、嫦娥四号中继星光学成像系统等多项。



导师简介: 冯华君(1963-),男,教授,主要研究方向为光学成像系统设计、遥感成像理论。负责国家自然科学基金、国家教委、科技部、973、863 项目、探月工程的“带像差小孔径成像系统高分辨反演”、“计算机三维视觉新方法研究”、“高分辨数字成像技术研究”、“遥感成像关键技术”、“数字成像自动对焦技术”、“智能手机图像处理”、嫦娥二号、嫦娥三号、嫦娥五号试验星、嫦娥四号中继星光学成像系统等多项。主讲或曾主讲物理光学、现代成像技术、微处理机原理及应用等 12 门课程。已授权发明专利四十余项、近五年中发表学术论文 100 余篇,其中被 SCI、EI、ISTP 收录论文一百余篇。



通讯作者简介：李奇 (1973-)，男，副教授，主要从事光学工程、成像技术、图像获取与处理等领域的研究工作。迄今，作为负责人承担了多项国家、省部级科研项目，包括 2007 年负责 863 计划“基于颤振探

测的遥感图像分辨率提供技术”，2009 年负责 973 子课题“基于光学相关的快速高精度运动测量方法”，2011 年负责自然科学基金项目“基于双模式成像的遥感图像去运动模糊方法研究”，2017 年负责民用航天项目等。获得浙江省科技二等奖 2 项，发表 SCI 论文 30 余篇，分别发表在 Optics Letters, Applied Optics, Optics & Laser Technology, Optical Engineering, Optics & Laser in Engineering 等期刊，近年来申请发明专利二十余项。