



DOI: 10.12086/oe.2019.190099

离轴四反射镜衍射成像 光学系统设计

何传王^{1,2}, 汪利华¹, 黄鹏^{1,2}, 董小春¹, 范斌^{1*}¹中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209;²中国科学院大学, 北京 100049

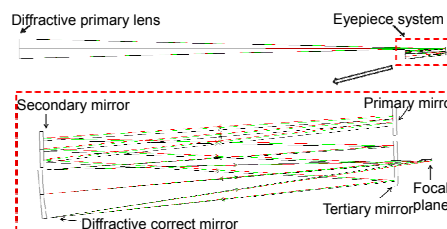
摘要: 本文基于 Schupmann 消色差理论, 介绍了一种离轴四反射镜衍射成像光学系统设计方法。设计了口径 1 m、F 数为 8、视场 0.12°、波段 582.8 nm~682.8 nm 的离轴四反射镜衍射成像光学系统。设计结果表明, 该光学系统的色差得到有效校正, 系统调制传递函数(MTF)在 50 lp/mm 范围内优于 0.53, 弥散斑半径的均方根值小于艾里斑半径, 成像质量接近衍射极限。分析了平面衍射物镜和曲面衍射校正镜可分别采用二元光刻工艺和金刚石车削技术制作的原因。对设计结构进行公差分析, 确定公差误差主要来源于中继反射镜的倾斜角度, 为装调过程提供指导。设计的系统为宽波段、高像质的反射式衍射成像光学系统发展提供了参考。

关键词: 光学设计; 衍射成像; 离轴; 四反射镜

中图分类号: O439; TH743

文献标志码: A

引用格式: 何传王, 汪利华, 黄鹏, 等. 离轴四反射镜衍射成像光学系统设计[J]. 光电工程, 2019, 46(11): 190099



Design of diffractive imaging optical system based on off-axis four-mirror

He Chuanwang^{1,2}, Wang Lihua¹, Huang Peng^{1,2}, Dong Xiaochun¹, Fan Bin^{1*}¹Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China;²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: According to the Schupmann's achromatic theory, a calculation method of off-axis four-mirror diffractive imaging optical system is introduced. By using the method, an optical system which has an aperture of 1 m, F-number of 8, full field of view of 0.12°, waveband of 582.8 nm~682.8 nm is designed. The results show that the chromatic aberration is corrected effectively. The modulation transfer function (MTF) is more than 0.53 in the range of 50 lp/mm, and the RMS radius of diffusion spot is less than the airy radius. It demonstrates that the image quality of this system is close to the diffraction limit. It is analyzed that the processing of diffractive primary lens and diffractive correct mirror can be realized by traditional lithography and diamond turning, respectively. Monte-Carlo simulation of tolerance analysis is carried out, it determined that the tolerance error mainly originates from the tilt angle of relay mirror, which provides guidance for the process of assembling and adjusting. This system has the advantages of broadband, high image quality, which can provide references for the development of reflective diffractive imaging

收稿日期: 2019-03-08; 收到修改稿日期: 2019-05-10

基金项目: 国家重点研发计划“地球观测与导航重点”专项(2016YFB0500200); 国家自然科学基金资助项目(61007024, 61475159, 61271150)

作者简介: 何传王(1992-), 男, 博士研究生, 主要从事光学设计、衍射光学的研究。E-mail: hechuanwang92@163.com

通信作者: 范斌(1977-), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事空间光学系统的研究。E-mail: fanbin@ioe.ac.cn

optical system.

Keywords: optical design; diffractive imaging; off-axis; four-mirror

Citation: He C W, Wang L H, Huang P, *et al.* Design of diffractive imaging optical system based on off-axis four-mirror[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2019, 46(11): 190099

1 引言

高轨道光学相机实现高分辨率的有效途径之一是增大系统口径^[1-2]。然而伴随着系统口径的增大,传统反射式光学系统无论在重量、复杂程度以及发射成本等方面均难以实现超大口径镜面的制作。以微结构制备主镜的衍射光学成像技术具有超轻质量、宽松公差等特点,为超大口径空间光学系统提供了新的发展思路^[3-9]。

1998年,美国劳伦斯利弗莫尔国家实验室(Lawrence Livermore National Laboratory, LLNL)提出制造地球同步轨道超大口径空间光学系统的眼镜计划(Eyeglass),该方案规划口径为20 m,初始结构为同轴三反式光学系统^[10-11]。2010年,美国国防高级研究计划局(Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA)提出了薄膜光学成像实时开发(membrane optic imager real-time exploitation, MOIRE)计划,继承LLNL的Eyeglass计划,其系统口径10 m、波段580 nm~620 nm,视场0.016°^[12-16]。美国空军学院(United States Air Force Academy, USAFA)从2010年开始研制薄膜衍射空间望远镜猎鹰卫星-7(FalconSat-7),该卫星是一种光学系统物镜为光子筛结构的0.2 m口径、0.4 m焦距、工作波长656.3 nm薄膜衍射望远镜,在450 km轨道的对地观测分辨率为1.8 m^[17-18],其系统采用折射式结构进行光路的折转和会聚。国内方面,中国科学院光电技术研究所于2011年研制了150 mm口径石英基底衍射主镜和聚酰亚胺薄膜衍射主镜组成的450 nm~650 nm波段成像系统;2012年开展了80 mm口径、480 nm~650 nm波段衍射成像样机的外场复杂场景观测成像实验;2014年,国内首次成功研制了400 mm口径、490 nm~680 nm波段衍射成像系统^[8]。2016年,北京空间机电研究所研制了400 mm口径薄膜衍射透镜^[19]。2017年,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所研制出300 mm口径的衍射成像系统,分辨率测试结果接近理论设计值^[20]。

衍射光学成像系统中,用于衍射物镜色差校正、系统像差校正、光路控制的目镜系统在折射式方面较为成熟,但该种结构在质量、玻璃材料以及复杂程度

等方面几乎难以满足超大口径空间光学系统的要求。而反射式目镜系统无色差、结构简单、设计灵活的特点使其在宽波段、轻量化、小体积的设计中具有明显优势。国防科学技术大学于2007年设计了25 m口径、衍射主镜F数100、波段480 nm~520 nm的同轴超大口径衍射望远系统^[21]。2017年,哈尔滨工业大学设计了10 m口径、波段580 nm~620 nm、视场0.02°、总长为115.73 m的同轴反射式色差校正结构^[22]。由于同轴反射系统存在遮拦较大问题,使得进入系统能量减少,降低调制传递函数,最终影响系统成像质量。而离轴反射系统可以克服中心遮光问题,实现优良成像质量,更具有应用前景。中国科学院长春光学精密机械与物理研究所于2007年设计了1 m口径、8 m焦距、650 nm~750 nm波段、0.02°×0.035°视场、系统长度100 m左右的离轴三反射镜衍射成像系统^[23]。2016年,该单位设计了5 m口径、45 m焦距、680 nm~720 nm波段、0.06°视场、系统长度513 m的离轴三反射镜衍射成像光学系统^[20]。

由于离轴三反射镜衍射成像系统的成像质量难以在具有更小系统长度的同时达到最优,因此需要一种改进系统。离轴四反射镜系统已在传统光学遥感领域应用,本文将用于衍射成像系统,以增加设计自由度。结合Schupmann消色差理论,给出了离轴四反射镜衍射成像光学系统设计步骤和优化要点,并在此基础上给出设计实例。设计的系统有效拓宽工作波段、增大视场、缩短系统长度,并保持优良的成像质量。最后进行光学系统公差分析,对光学元件公差进行了分配,给出公差敏感度分析,为系统的装调提供指导。

2 衍射成像光学系统基本原理

衍射元件利用光的衍射原理实现光线会聚,入射光经过衍射元件的各环带发生衍射,相邻环带到像点的相位差为 2π 的整数倍,产生相干叠加。然而衍射元件的焦距与波长密切相关,如图1所示。式(1)说明其数值与波长成反比关系。因此,衍射元件的色差大,应用带宽较窄。

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

式中 f_0 为对应设计波长 λ_0 处的焦距值。

为了解决衍射元件带宽窄问题,实现宽波段应用,需要在衍射物镜后增加校正系统平衡色差。衍射成像系统色差的校正主要基于 Schupmann 消色差原理,即任何一个具有色差的光学元件,其色差的校正可以通过在其共轭像位置放置一个具有相同色散、相反光焦度的元件来实现^[24]。衍射成像光学系统由衍射物镜与校正系统组成,其中校正系统包括中继镜、衍射校正镜以及会聚镜,如图 2 所示^[10]。一束平行光经过衍射物镜发生色散,不同颜色的光被散射到不同方向,而后经过场镜重新汇聚为一点,继而通过衍射校正镜,将衍射物镜产生的色差消除,最终使得平行光成像在 CCD 上。

在设计过程中,考虑到衍射物镜口径较大,校正系统采用反射式结构代替折射式结构,以降低系统的复杂程度和重量;将中继系统置于衍射物镜中心设计波长所对应的焦点处,减小中继镜组口径。

3 初始结构参数计算

通过将三反射镜作为中继镜、衍射校正镜改进为反射镜,构成同轴四反射衍射成像光学系统。利用光阑离轴方式获得非对称光学系统,减少同轴系统的中心遮拦,实现离轴四反射镜衍射成像光学系统。

离轴四反射镜衍射成像光学系统初始结构参数的计算有三个步骤:

1) 衍射物镜与衍射校正镜间存在关系^[10]:

$$\eta = \frac{F_N/\#}{F_1/\#}, \quad (2)$$

$$f_N = -\eta^2 f_1, \quad (3)$$

$$l_2 = \eta l_1, \quad (4)$$

$$l_1 = D_1 \times F_1/\#, \quad (5)$$

式中: $F_1/\#$ 和 $F_N/\#$ 分别为衍射物镜和衍射校正镜的 F

数, f_1 和 f_N 分别为衍射物镜和衍射校正镜的焦距, l_1 和 l_2 分别为衍射物镜至中继镜和中继镜至衍射校正镜的距离, D_1 为衍射物镜口径。

2) 根据设计指标,衍射物镜 D_1 、 $F_1/\#$ 以及衍射校正镜 $F_N/\#$, 利用式(2)~式(5)计算出 l_1 和 l_2 的值。高斯公式求出中继镜组的焦距 f_{relay} :

$$\frac{1}{l'} - \frac{1}{l} = \frac{1}{f_{\text{relay}}}. \quad (6)$$

选取合适的反射镜间隔 d , 计算出中继镜组中三个反射镜的曲率半径 $R^{[25]}$:

$$\begin{cases} (4d_1^2 - 4d_1d_2d_3\varphi)c_1^2 \\ + (4d_1d_3\varphi - 2d_1d_2\varphi - 4d_1)c_1 \\ + (1 + d_2\varphi - 2d_3\varphi + d_3^2\varphi^2) = 0, \\ c_3 = \frac{d_2\varphi - d_3\varphi + 1 - 2d_1c_1}{2d_2d_3\varphi} \\ c_2 = c_1 + c_3 \end{cases}, \quad (7)$$

其中: $c = \frac{1}{R}$, $\varphi = \frac{1}{f_{\text{relay}}}$ 。

$$R_N = 2f_N, \quad (8)$$

其中: R_N 为衍射校正镜的曲率半径。为了简化计算,四个反射镜的非球面系数可直接利用光学设计软件优化获得(或参考文献[26]计算)。

3) 采用光阑离轴方式,通过式(9)计算中继镜的离轴量 h_{off} , 同时可进行适当调整,即获得中继镜组离轴量。

$$\begin{cases} h_{\text{off}} = \frac{1}{2}(A \cdot \alpha_1 + D) \\ A = \frac{2D + 2d_1\omega}{1 - \alpha_1} \end{cases}, \quad (9)$$

其中: A 为中继镜初始结构孔径值, D 为需要设计主反射镜孔径值, α_1 和 d_1 为主、次反射镜之间的遮拦比和间距, ω 为系统的半视场角。

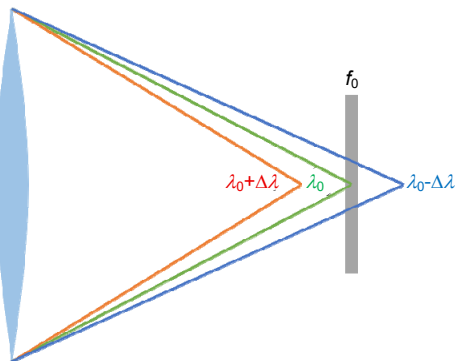


图 1 衍射元件色散示意图

Fig. 1 Diffractive optical element dispersion

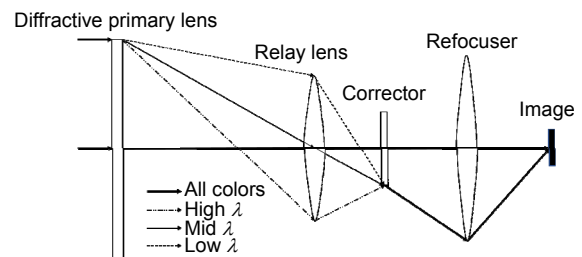


图 2 衍射成像光学系统原理图

Fig. 2 Concept of diffractive imaging optical system

4 设计实例

根据上述初始结构参数计算公式,进行实例设计,衍射物镜口径和 F 数分别为 1 m 和 20,衍射校正镜 F 数为 1,系统焦距 8 m,圆形视场 $2\omega=0.12^\circ$,波段 582.8 nm~682.8 nm。

4.1 设计结果

首先利用 ZEMAX 光学设计软件优化衍射物镜 Binary 2 面的相位系数,将系数最大项数设置为 5,归一化半径设置为 1,当入射光线被完美聚焦在一点时,即可获得式(10)所示相位函数中的各项系数 A_i [27]。

$$\varphi(r) = A_1 r^2 + A_2 r^4 + A_3 r^6 + A_4 r^8 + \dots, \quad (10)$$

其中: r 为衍射面的半径坐标, A_i 为相位系数。

根据设计指标及式(2)~式(6),计算出衍射物镜至中继镜距离 20000 mm、中继镜至衍射校正镜距离 1000 mm 以及中继镜焦距 20000/21 mm,再取中继镜各反

射镜间距 1000 mm,并将其代入式(7)~式(8),即可获得同轴四反射镜衍射成像光学系统的初始结构参数,如表 1 所示。采用光阑离轴方式,离轴量 170 mm,将各镜的曲率半径、厚度;中继镜组的倾斜、衍射校正镜与像面的偏心和倾斜;衍射校正镜相位函数的各项系数设置为变量,优化过程中利用 ZEMAX 操作数控制系统结构参数,宏语言控制系统遮拦;反射镜采用高次非球面,系统优化后参数如表 2 所示。其中,中继镜组整体倾斜 1.1° 。

表 2 中,面 1 和 5 为衍射面,其多项式系数见表 3。

优化后的离轴四反射镜衍射成像光学系统如图 3 所示,该系统光路长度为 20.95 m,目镜系统长度为 2.15 m。其中第三反射镜中心通光孔的面积占比为 1.85%,对应 MTF 下降值为 0.04,对系统成像质量影响较小。

表 1 同轴四反射镜衍射成像光学系统初始结构参量

Table 1 Initial parameters of diffractive imaging optical system based on coaxial four-mirror

Surface	Radius/mm	Thickness/mm
Diffractive objective	—	20000.000
Primary mirror	-1980.200	-1000.000
Secondary mirror	-666.561	1000.000
Tertiary mirror	-1004.784	-1000.000
Diffractive correct mirror	100.000	70.000
Image	—	—

表 2 优化后的离轴四反射镜衍射成像光学系统结构参量

Table 2 Optimized parameters of diffractive imaging optical system based on off-axis four-mirror

Surface	Radius/mm	Thickness/mm	Conic	Diameter/mm
Diffractive objective	—	20750.000	—	1000
Primary mirror	-9925.477	-1938.785	-2.794	160
Secondary mirror	45520.000	1938.785	-4.982	200
Tertiary mirror	153600.000	-1938.785	2.745	250
Diffractive correct mirror	1539.624	2148.094	-0.160	270
Image	—	—	—	17

表 3 衍射面多项式系数

Table 3 Coefficient of diffractive surface

Surface	Coefficient
Diffractive objective	-0.248, 1.551E-010, -1.926E-019, -6.008E-027, 1.026E-032
Diffractive correct mirror	3.411, 3.141E-007, -1.094E-013, 1.392E-017, -4.556E-022

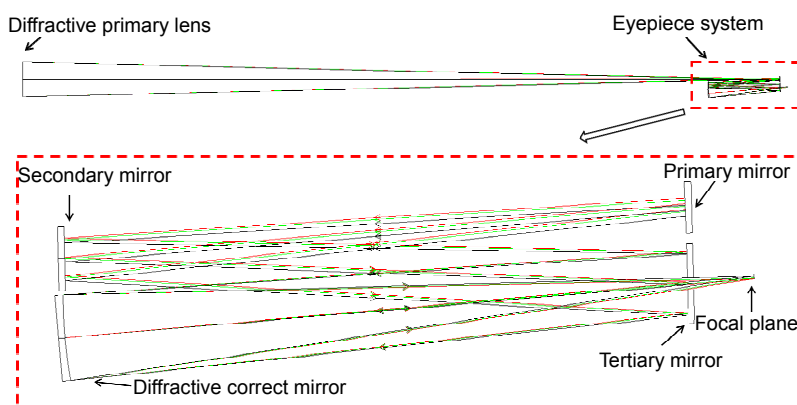


图 3 离轴四反射镜衍射成像光学系统结构

Fig. 3 Structure of diffractive imaging optical system based on off-axis four-mirror

4.2 像质分析

衍射元件色差大、波段窄是制约其应用的主要原因，如图 4 所示，衍射物镜在 582.8 nm~682.8 nm 波段内轴向色差达 2.93 m。利用离轴四反射镜目镜系统进行衍射物镜色差校正后，衍射成像光学系统的轴向

色差减小至 57.37 μm ，如图 5 所示。

探测器像元尺寸为 10 μm ，系统的奈奎斯特频率为 50 lp/mm。图 6 给出了 100 nm 波段、0.06°半视场的衍射成像光学系统 MTF 曲线，在 50 lp/mm 范围内，各视场 MTF 值均大于 0.539。系统的点列图如图 7 所

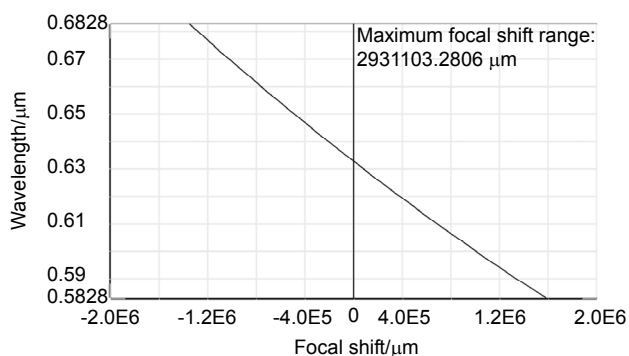


图 4 衍射物镜 100 nm 波段轴向色差

Fig. 4 Focal shift of 100 nm wavelength for diffractive primary lens

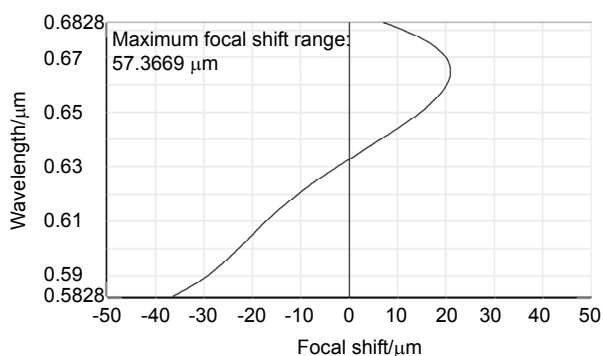


图 5 衍射成像光学系统 100 nm 波段轴向色差

Fig. 5 Focal shift of 100 nm waveband for optical system

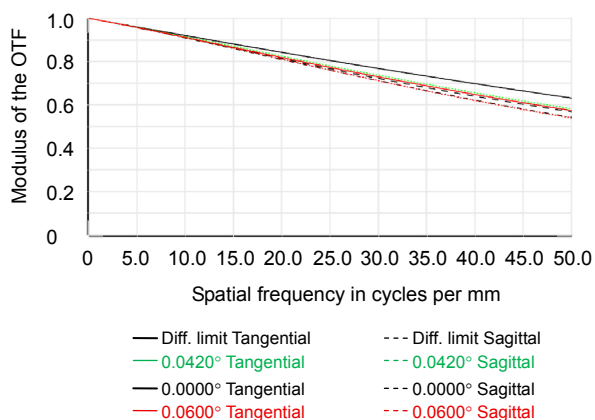


图 6 系统 MTF 曲线

Fig. 6 MTF curve of optical system

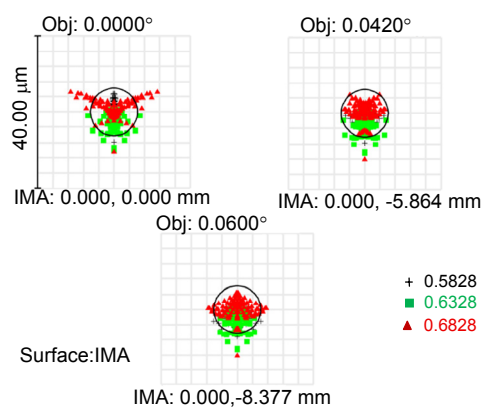


图 7 系统点列图

Fig. 7 Spot diagram of optical system

示,各视场弥散斑半径的均方根值分别为 3.777 μm, 3.261 μm 及 3.710 μm,均小于艾里斑半径 6.176 μm,成像质量接近衍射极限。

图 8 所示的垂轴色差得到了有效控制,最大值为 1.049 μm,小于艾里斑半径。图 9 为场曲和畸变曲线图,系统的子午方向最大场曲为 -0.089 mm,弧矢方向最大场曲为 0.153 mm,像散为 0.242 mm,系统畸变为 -0.010%。从上述分析可以看出,该系统的色差和单色像差均得到了有效校正。

4.3 衍射面加工可行性分析

单块 1 m 口径的衍射物镜加工难度较大,因此采用拼接方式实现制造。在二元面尺寸确定后,需要制作的环带越多,对应的线宽也越小,加工难度随之增加。式(11)为二元面环带数计算公式^[28],根据表 3 参数计算的衍射物镜和衍射校正镜的环带数分别为 9866 和 9872。

$$K_{\max} = \text{Int} \left\lceil \frac{A_1 R^2 + A_2 R^4 + A_3 R^6 + A_4 R^8 + A_5 R^{10} + \dots}{2\pi} \right\rceil, \quad (11)$$

其中 R 为实际半径最大值。

最小周期反映了二元光学加工难度,图 10、图 11 分别给出了衍射物镜和衍射校正镜的相位、线频率沿径向的分布曲线。在平面衍射物镜边缘处,其线频率的最大值为 39.26 period/mm,对应的最小周期为 25.47 μm。曲面衍射校正镜边缘处线频率的最大值为 146.04 period/mm,对应最小周期为 6.85 μm。

深度是衡量二元光学面加工难度的另一参数^[28],台阶深度 h 为

$$h = \frac{\lambda}{L(n-1)}, \quad (12)$$

式中: λ 为设计波长, L 为台阶数, n 为基底材料的折射率。本系统衍射物镜的基底材料选择聚酰亚胺^[29]。反射式衍射校正镜的结构深度为 $\lambda/2$ 。将衍射物镜量化成 4 台阶结构进行加工,理论一级衍射效率可达 81%,

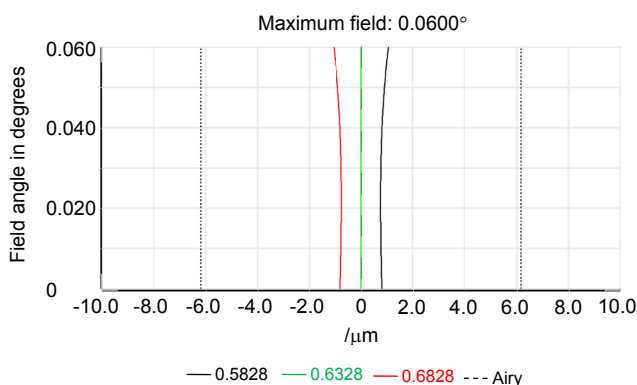


图 8 垂轴色差曲线
Fig. 8 Lateral color curve

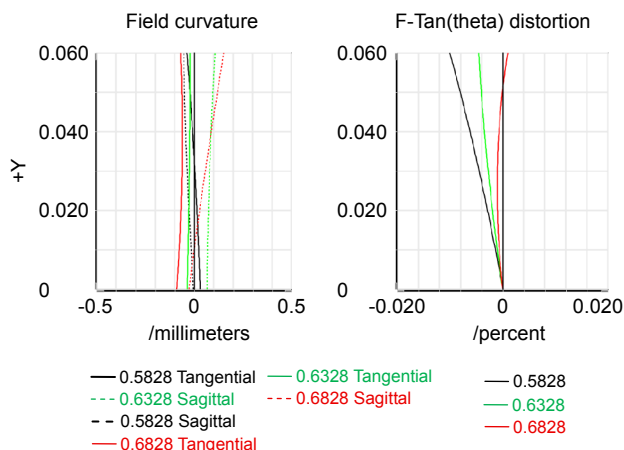


图 9 场曲畸变图
Fig. 9 Field curvature and distortion

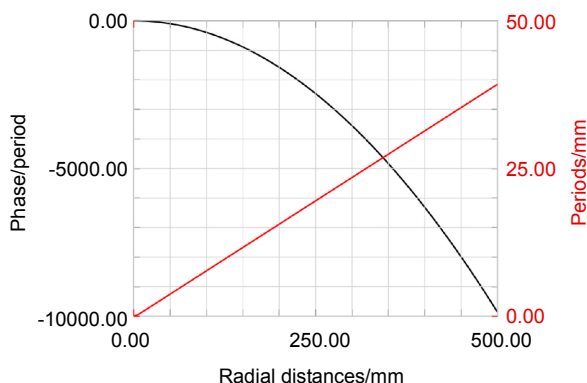


图 10 衍射物镜的相位和线频率径向分布曲线
Fig. 10 Phase and line frequency versus aperture of diffractive primary lens

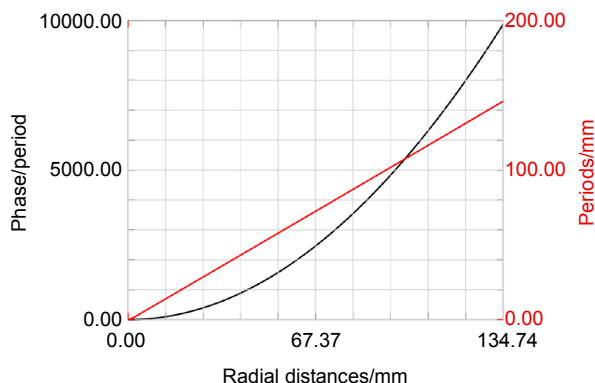


图 11 衍射校正镜的相位和线频率径向分布曲线
Fig. 11 Phase and line frequency versus aperture of diffractive correct mirror

最小特征尺寸为 6.37 μm ，台阶深度为 0.31 μm ，可采用二元光刻工艺，通过两次接近、接触式套刻实现元件的制作；而曲面衍射校正镜连续面型对应的最小周期和深度分别为 6.85 μm 和 0.16 μm ，可通过金刚石车削技术完成制作^[30]。

4.4 公差敏感度分析

加工误差和装配误差往往会改变和降低理论设计的性能水平，因此公差分析及光学元件的公差分配是十分必要的。在公差分析过程中需对所有光学元件进行分配公差，本系统的分配方案为：厚度公差为 $\pm 10 \mu\text{m}$ ，元件偏心为 $\pm 10 \mu\text{m}$ ，衍射物镜和衍射校正镜的倾斜为 $\pm 10''$ ，中继系统中反射镜的倾斜和面型分别为 $\pm 5''$ 和 $\lambda/40$ 。本文以全视场内 50 lp/mm 范围内 MTF 值作为评价标准进行公差分析，并给出最敏感的公差分析结果。

采用敏感度对全视场内 50 lp/mm 的 MTF 进行公差分析，对 1000 个蒙特卡洛样本进行分析，结果如表 4 所示：98%和 90%的系统在 50 lp/mm 处的 MTF 值分

表 4 蒙特卡洛最终分析结果

Table 4 Final Monte-Carlo analysis results

Monte-Carlo analysis	MTF value
98%	0.111
90%	0.165
80%	0.216
50%	0.302
20%	0.400
10%	0.439
2%	0.481

表 5 最敏感的公差分析结果

Table 5 Results of the most sensitive tolerance analysis

Type	Value	Criterion	Change
TETY 3 4	0.00140000	0.32911857	-0.19965035
TETY 3 4	-0.00140000	0.32911857	-0.19965035
TETX 3 4	0.00140000	0.38914889	-0.13962002
TETX 3 4	-0.00140000	0.39516929	-0.13359962
TEDY 3 4	0.01000000	0.49963567	-0.02913324
TEDY 9 9	-0.01000000	0.50957441	-0.01919451
TEDX 3 4	0.01000000	0.51019057	-0.01857834
TEDX 3 4	-0.01000000	0.51019057	-0.01857834
TEZI 5	-1.5820E-005	0.51396962	-0.01479929
TEDX 9 9	0.01000000	0.51761049	-0.01115843

别大于 0.111 和 0.165。敏感公差分析对元件的装调具有指导意义，表 5 中给出系统敏感的公差分析结果，可以看出中继镜组倾斜角度的公差最为敏感，因此，可在装配过程中重点进行调试。

5 结论

本文基于 Schupmann 消色差理论，介绍了一种离轴四反射镜衍射成像光学系统设计方法，根据该方法对一个具体实例进行了设计和分析，获得了系统口径 1 m、焦距 8 m、系统长度 20.95 m 的离轴四反射镜衍射成像光学成像系统。像质分析表明：该系统在 582.8 nm~682.8 nm 波段、 0.12° 视场内色差得到有效校正，成像质量接近衍射极限。四个反射镜的利用使得该系统保持优良性能的同时，在波段拓宽、视场增大、系统长度减小方面具有优势。其次，分析了衍射面加工的可行性，确定平面衍射物镜和曲面衍射校正镜可分别通过二元光刻工艺和金刚石车削技术实现制作。最后，对光学系统进行了公差分析，确定了公差误差主要来源于中继反射镜的倾斜角度，对系统装调具有指导意义。设计的系统可为反射式衍射成像光学系统的发展提供参考。

参考文献

- [1] Yu Q Y, Qu H S. Realization of high-resolution visible earth observation on geostationary earth orbit[J]. *Chinese Journal of Optics and Applied Optics*, 2008, 1(1): 1-12.
于前洋, 曲宏松. 实现同步轨道(GEO)高分辨力对地观测的技术途径(上)[J]. *中国光学*, 2008, 1(1): 1-12.
- [2] Whiteaker K L, Marshalek R G, Domber J L, et al. Large aperture diffractive receiver for deep space optical communications[C]//*Proceedings of Applications of Lasers for Sensing and Free Space Communications 2015*, Arlington, Virginia United States, 2015: LTh3C.3.
- [3] Huang W, Ma J Y, Zhu F, et al. Low divergent diffractive optical element for remote detection[J]. *Chinese Optics Letters*, 2014, 12(7): 070501.
- [4] Liu T, Zhou Y M, Wang J Q, et al. Application of zone plate diffractive imaging technology in earth observation satellites[J]. *Spacecraft Engineering*, 2012, 21(3): 88-95.
刘韬, 周一鸣, 王景泉, 等. 波带片衍射成像技术在对地观测卫星中的应用[J]. *航天器工程*, 2012, 21(3): 88-95.
- [5] Rahlves M, Rezem M, Boroz K, et al. Flexible, fast, and low-cost production process for polymer based diffractive optics[J]. *Optics Express*, 2015, 23(3): 3614-3622.
- [6] Liu Y F, Li L. Application of binary optical lens in resource satellite[J]. *Optical Technique*, 2004, 30(5): 590-593.
刘玉凤, 李林. 二元光学透镜在资源卫星中的应用[J]. *光学技术*, 2004, 30(5): 590-593.
- [7] Tullson D, Andersen G. Broadband antihole photon sieve telescope[J]. *Applied Optics*, 2007, 46(18): 3706-3708.
- [8] Yang W, Wu S B, Wang L H, et al. Research advances and key technologies of macrostructure membrane telescope[J].

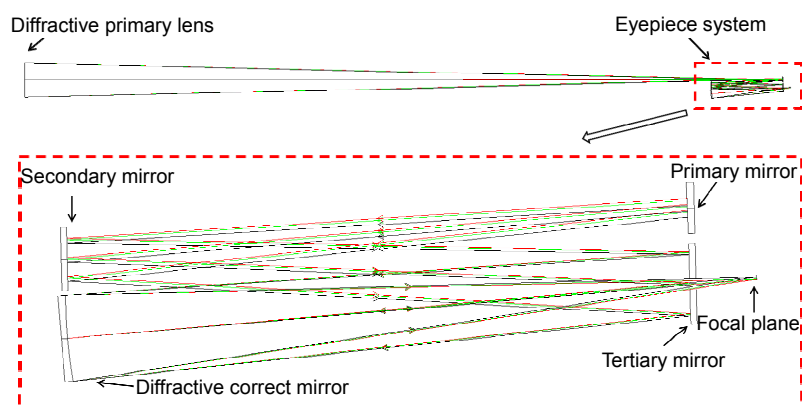
- Opto-Electronic Engineering*, 2017, **44**(5): 475–482.
杨伟, 吴时彬, 汪利华, 等. 微结构薄膜望远镜研究进展分析[J]. 光电工程, 2017, **44**(5): 475–482.
- [9] Li Z L, Kim I, Zhang L, et al. Dielectric meta-holograms enabled with dual magnetic resonances in visible light[J]. *ACS Nano*, 2017, **11**(9): 9382–9389.
- [10] Hyde R A. Eyeglass. 1. Very large aperture diffractive telescopes[J]. *Applied Optics*, 1999, **38**(19): 4198–4212.
- [11] Hyde R A, Dixit S N, Weisberg A H, et al. Eyeglass: a very large aperture diffractive space telescope[J]. *Proceedings of SPIE*, 2002, **4849**: 28–39.
- [12] Atcheson P D, Stewart C, Domber J, et al. MOIRE: initial demonstration of a transmissive diffractive membrane optic for large lightweight optical telescopes[J]. *Proceedings of SPIE*, 2012, **8442**: 844221.
- [13] Copp T L, Domber J L, Atcheson P D, et al. MOIRE: membrane material property characterizations, testing and lessons learned[C]//*Proceedings of Spacecraft Structures Conference*, National Harbor, Maryland, 2014.
- [14] Domber J L, Atcheson P D, Kommers J. MOIRE: ground test bed results for a large membrane telescope[C]//*Proceedings of Spacecraft Structures Conference*, National Harbor, Maryland, 2014.
- [15] Atcheson P, Domber J, Whiteaker K, et al. MOIRE: ground demonstration of a large aperture diffractive transmissive telescope[J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, **9143**: 91431W.
- [16] Britten J A, Dixit S N, DeBruyckere M, et al. Large-aperture fast multilevel Fresnel zone lenses in glass and ultrathin polymer films for visible and near-infrared imaging applications[J]. *Applied Optics*, 2014, **53**(11): 2312–2316.
- [17] Andersen G. Large optical photon sieve[J]. *Optics Letters*, 2005, **30**(22): 2976–2978.
- [18] Andersen G. Membrane photon sieve telescopes[J]. *Applied Optics*, 2010, **49**(33): 6391–6394.
- [19] Zhang J, Li M J, Yin G H, et al. Large-diameter membrane Fresnel diffraction elements for space telescope[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, **24**(6): 1289–1296.
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.
- [20] Wang R Q. Research on key technologies of thin film element based on diffractive imaging system[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2017.
王若秋. 基于衍射成像系统的薄膜元件关键技术研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2017.
- [21] Xu Y, Yan S H, Zhou C L, et al. Design of hybrid reflective-diffractive telescope with very large aperture and broad bandwidth[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2007, **28**(4): 579–592.
徐琰, 颜树华, 周春雷, 等. 宽波段超大孔径反衍望远系统设计[J]. 半导体光电, 2007, **28**(4): 579–592.
- [22] Ren Z B, Hu J S, Tang H L, et al. Study on chromatic aberration correction of 10 meter large aperture membrane diffractive primary lens[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, **46**(4): 0422004.
任智斌, 胡佳盛, 唐洪浪, 等. 10m 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): 0422004.
- [23] Zhang N, Lu Z W, Li F Y. Optical design of diffractive telescope[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, **36**(1): 106–108.
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, **36**(1): 106–108.
- [24] Faklis D, Morris G M. Broadband imaging with holographic lenses[J]. *Optical Engineering*, 1989, **28**(6): 286592.
- [25] 郭永洪. 现代红外光学系统研究[D]. 杭州: 浙江大学, 1999.
- [26] Pan J H. *The Design, Manufacture and Test of the Aspherical Optical Surfaces*[M]. Suzhou: Suzhou University Press, 2004.
潘君骅. 光学非球面的设计、加工与检验[M]. 苏州: 苏州大学出版社, 2004.
- [27] ZEMAX Development Corporation. *Zemax OpticStudio 17 Help Files*[M]. 2016.
- [28] Zhang Y M. *Contemporary Applied Optics*[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2018.
张以谟. 现代应用光学[M]. 北京: 电子工业出版社, 2018.
- [29] Wang S, Yang W, Wu S B, et al. Refractive index homogeneity measure method of flexible optical polyimide film[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2016, **43**(7): 85–88.
王松, 杨伟, 吴时彬, 等. 柔性光学聚酰亚胺薄膜折射率均匀性检测方法[J]. 光电工程, 2016, **43**(7): 85–88.
- [30] Wang P. Research on design and process parameters of diamond turning of diffractive optical elements[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2007.
王鹏. 衍射光学元件设计及金刚石单点车削技术的研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2007.

Design of diffractive imaging optical system based on off-axis four-mirror

He Chuanwang^{1,2}, Wang Lihua¹, Huang Peng^{1,2}, Dong Xiaochun¹, Fan Bin^{1*}

¹Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China;

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China



Structure of diffractive imaging optical system based on off-axis four-mirror

Overview: The most effective way to improve the resolution of space optical telescope is to enlarge the aperture. With the increase of aperture, it has become increasingly difficult for traditional reflective space telescope system considering manufacturing technology, the ability to launch and space expansion as well as adjustment technology. Furthermore, considering the support and control structure, the weight of optical telescope system is proportional to the square of aperture. As a result, the control becomes more complex and the cost of optical system is increasing rapidly. Compared with the reflective telescope optical system, diffractive imaging system based on the thin film material as the objective lens can achieve large diameter, high resolution, light weight structure, space packagable and deployable, loose tolerance and so on. Diffractive imaging technology can save launch and manufacturing costs significantly, and has great potential applications in the field of high orbit high-resolution imaging. The existing eyepiece systems of diffractive telescopes mostly use refractive structure, but it can hardly meet the requirements of large aperture space optical telescope in terms of complexity and quality. The reflective eyepiece system has obvious advantages of high image quality, light weight and wide waveband because of its non-chromatic aberration and deflection of optical path. To realize an off-axis reflective diffractive imaging optical system with broadband and compact structure, we analysis the basic principle of diffractive imaging optical system. According to the Schupmann's achromatic theory, a calculation method of off-axis four-mirror diffractive imaging optical system is introduced. By using the method, an optical system which has an aperture of 1 m, F-number of 8, waveband of 582.8 nm~682.8 nm and the full field of view of 0.12° is designed. The results show that the chromatic aberration is corrected effectively. The modulation transfer function (MTF) of the full field of view is more than 0.53 in the range of 50 lp/mm, the RMS radius of diffusion spot is less than the airy radius. It demonstrates that the image quality of system is close to the diffraction limit. It is analyzed that the processing of diffractive primary lens and diffractive correct mirror can be realized by traditional lithography and diamond turning, respectively. Monte-Carlo simulation of tolerance analysis is carried out, it determined that the tolerance error mainly originate from the tilt angle of relay mirror, which provides guidance for the process of assembling and adjusting. This system has the advantages of broadband, short optical path, ideal obscuration, which can provide references for the development of reflective diffractive imaging optical system.

Citation: He C W, Wang L H, Huang P, *et al.* Design of diffractive imaging optical system based on off-axis four-mirror[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2019, 46(11): 190099

Supported by National Key R & D Program of China (2016YFB0500200) and National Natural Science Foundation of China (61007024, 61475159, 61271150)

* E-mail: fanbin@ioe.ac.cn