

大对称视场离轴三反系统设计

黄淮 林峰

Design of off-axis three-mirror system with large symmetric field of view

HUANG Huai, LIN Feng

引用本文:

黄淮, 林峰. 大对称视场离轴三反系统设计[J]. 应用光学, 2023, 44(5): 952–958. DOI: 10.5768/JAO202344.0501002

HUANG Huai, LIN Feng. Design of off-axis three-mirror system with large symmetric field of view[J]. Journal of Applied Optics, 2023, 44(5): 952–958. DOI: 10.5768/JAO202344.0501002

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0501002>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

紧凑型自由曲面离轴三反系统设计

Design of compact freeform off-axis three-mirror system

应用光学. 2018, 39(6): 780–784 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0601003>

大口径红外离轴三反光学系统设计及公差分析

Design and tolerance analysis of infrared off-axis three-mirror optical system with large aperture

应用光学. 2018, 39(6): 803–808 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0601007>

大视场反射式施密特光学系统设计与检测

Optical design and detection for reflective Schmidt system with large field of view

应用光学. 2020, 41(2): 265–269 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0201005>

主三镜一体化离轴三反光学天线设计

Design of off-axis three-mirror optical antenna based on integration of primary-tertiary mirror

应用光学. 2021, 42(1): 23–29 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0101004>

大视场航空相机光学系统设计

Design of optical system for large-field of view aerocamera

应用光学. 2019, 40(6): 980–986 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0601008>

双波段CCTV鱼眼镜头光学系统设计

Optical system design of dual band CCTV fish-eye lens

应用光学. 2021, 42(6): 1006–1010 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0601009>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2023) 05-0952-07

大对称视场离轴三反系统设计

黄 淮, 林 峰

(福建师范大学 光电与信息工程学院 医学光电科学与技术教育部重点实验室
福建省光子技术重点实验室, 福建 福州 350007)

摘 要: 离轴反射系统具有不产生色差、无中心遮拦、结构紧凑等特点, 但受其非对称结构影响, 其视场常常为线视场。基于 Zemax 设计了一种大对称视场的离轴三反系统, 视场为 $13^\circ \times 13^\circ$, 相对孔径为 1/5, 焦距为 800 mm, 波长为 400 mm~1 000 mm, 主镜和三镜为自由曲面, 次镜为二次曲面。设计结果表明: 对称视场离轴三反系统的点列图直径均方根小于 $5\ \mu\text{m}$, 80% 能量在一个像元内, 光学传递函数接近衍射极限, 各项指标满足应用要求。

关键词: 光学设计; 空间光学; 离轴三反系统; 自由曲面; 大视场

中图分类号: TN202; O439

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202344.0501002

Design of off-axis three-mirror system with large symmetric field of view

HUANG Huai, LIN Feng

(Fujian Provincial Key Laboratory of Photonics Technology, Key Laboratory of Optoelectronic Science and Technology for Medicine (Ministry of Education), College of Photonic and Electronic Engineering, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China)

Abstract: The off-axis reflection system has the characteristics of no chromatic aberration, no central obscuration and compact structure, but due to its asymmetric structure, its field of view is often a linear field of view. An off-axis three-mirror system with a large symmetric field of view was designed based on Zemax. The field of view is $13^\circ \times 13^\circ$, the relative aperture is 1/5, the focal length is 800 mm, and the wavelength is 400 mm~1 000 mm. The primary mirror and the third mirror are free-form surfaces, and the secondary mirror is a quadratic surface. The design results show that the root mean square of spot diagram diameter of the proposed system is less than $5\ \mu\text{m}$, 80% of the energy is in the one pixel, the optical transfer function is close to the diffraction limit, and all the indicators meet the application requirements.

Key words: optical design; space optics; off-axis three-mirror reflective system; free-form surface; large field of view

引言

随着人类在大气遥感、海洋遥感、对地侦察领域的逐步深入, 人们对光学系统的要求越来越高, 空间光学也进入到新的领域。在复杂的空天环境下, 经典的透射式光学系统存在许多难题, 例如, 为

了校正色差需要多个镜片, 导致轻量化困难; 大口径玻璃镜片难以加工装调, 复杂温度环境下热像差难以平衡。作为对比, 反射系统不存在色差, 工作波长宽, 可采用低热膨胀系数材料加工, 光学效率高, 更符合实际应用要求。而其中离轴反射系

收稿日期: 2022-11-10; 修回日期: 2023-02-03

基金项目: 福建省科技重大专项 (2021YZ040012)

作者简介: 黄淮 (1996—), 男, 硕士研究生, 主要从事光学设计研究。E-mail: 120862006@qq.com

通信作者: 林峰 (1968—), 男, 高级工程师, 硕士生导师, 主要从事机器视觉及医疗光学成像系统的设计和研发。

E-mail: lfeng127@163.com

统可以做到无中心遮拦, 相比同轴系统可以做到更大视场^[1]。

美国的 UickBird-2 卫星^[2]、日本的 ALOS 卫星、法国的 SPOT3S 以及英国的 Top Sat 均搭载离轴三反光学系统^[3]。传统的离轴系统会引入非对称像差, 一般采用线视场, 即偏轴方向(子午视场)视场较小(1° 左右), 大视场的像差难以校正。随着计算机计算能力以及数控加工能力的提升, 引入自由曲面可以为离轴系统平衡对称性像差, 扩大系统视场^[4]。

本文在几何光学和像差理论的基础上, 研究了离轴反射式系统的设计问题。计算得出同轴反射系统的初始结构, 采用视场离轴的方式避免中心遮拦并逐步扩大视场^[5], 引入 Zernike 多项式自由曲面, 实现了 $13^\circ \times 13^\circ$ 的大对称视场, 最后对其成像性能进行了分析评估。

1 光学系统设计

1.1 系统设计指标

卫星在轨高度 H 、地面覆盖宽度 W 、地面分辨率 R_{GSD} 以及探测器像元尺寸 α 有以下关系式:

$$f = \frac{\alpha \times H}{R_{\text{GSD}}} \quad (1)$$

$$\omega = 2 \arctan\left(\frac{W}{2H}\right) \quad (2)$$

式中: f 为光学系统焦距; ω 为光学系统视场。假定卫星在轨高度 $H=650$ km, 地面覆盖宽度 $W=150$ km, 探测器像元尺寸为 $5 \mu\text{m}$, 则本文设计的离轴反射系统指标如表 1 所示。

表 1 光学系统指标

Table 1 Optical system parameters

参数	指标
焦距/mm	800 mm
F 数	5
视场/ $^\circ$	13×13
波长/nm	400~1 000
地面分辨率/m	4

1.2 初始结构设计

离轴反射系统的初始结构通常在同轴系统的基础上进行离轴, 最后达到中心无遮拦的效果^[6]。对于同轴系统的初始结构计算, 假定 3 个反射镜均为二次曲面, 物体在无穷远, 如图 1 所示, 即 $l_1 = \infty$, $u_1 = 0$ 。设次镜对主镜的遮拦比为 α_1 , 三镜对次镜的遮拦比为 α_2 , 次镜的放大率为 β_1 , 三镜的放大率为 β_2 , 则有:

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= \frac{l_2}{f_1} \approx \frac{h_2}{h_1}, & \alpha_2 &= \frac{l_3}{l_2} \approx \frac{h_3}{h_2}, \\ \beta_1 &= \frac{l_2}{l_1} = \frac{u_2}{u_1}, & \beta_2 &= \frac{l_3}{l_2} \approx \frac{u_3}{u_2} \end{aligned} \quad (3)$$

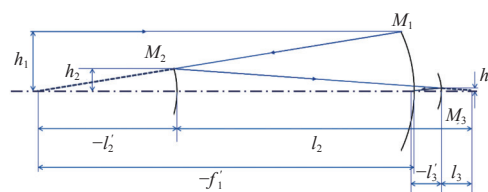


图 1 同轴三反系统结构

Fig. 1 Structure of common-axis three-mirror system

根据像差理论^[7]可以计算出初始结构的球差 S_{I} 、彗差 S_{II} 、像散 S_{III} 和场曲 S_{IV} 的像差系数分别为

$$S_{\text{I}} = \frac{1}{4} \left[(e_1^2 - 1)\beta_1^3\beta_2^3 - e_2^2\alpha_1\beta_2^3(1+\beta_1)^3 + e_3^2\alpha_1\alpha_2(1+\beta_2)^3 + \alpha_1\beta_2^3(1+\beta_1)(1-\beta_1)^2 + \alpha_1\alpha_2(1+\beta_2)(1-\beta_2)^2 \right] \quad (4)$$

$$S_{\text{II}} = -\frac{e_2^2(\alpha_1 - 1)\beta_2^3(1+\beta_1)^3}{4\beta_1\beta_2} + e_3^2 \frac{[\alpha_2(\alpha_1 - 1) + \beta_1(1 - \alpha_2)](1+\beta_2)^2}{4\beta_1\beta_2} + \frac{(\alpha_1 - 1)\beta_2^3(1+\beta_1)(1-\beta_1)^2}{4\beta_1\beta_2} - \frac{[\alpha_2(\alpha_1 - 1) + \beta_1(1 - \alpha_2)](1+\beta_2)(1-\beta_2)^2}{4\beta_1\beta_2} - \frac{1}{2} \quad (5)$$

$$S_{\text{III}} = -e_2^2 \frac{\beta_2(\alpha_1 - 1)^2(1-\beta_1)^2}{4\alpha_1\beta_1^2} + e_3^2 \frac{[\alpha_2(\alpha_1 - 1) + \beta_1(1 - \alpha_2)]^2(1+\beta_2)^3}{4\alpha_1\alpha_2\beta_1^2\beta_2^2} + \frac{\beta_2(\alpha_1 - 1)^2(1+\beta_1)(1-\beta_1)^2}{4\alpha_1\beta_1^2} - \frac{[\alpha_2(\alpha_1 - 1) + \beta_1(1 - \alpha_2)]^2(1+\beta_2)(1-\beta_2)^2}{4\alpha_1\alpha_2\beta_1^2\beta_2^2} - \frac{\beta_2(\alpha_1 - 1)(1-\beta_1)(1+\beta_1)}{\alpha_1\beta_1} - \frac{[\alpha_2(\alpha_1 - 1) + \beta_1(1 - \alpha_2)](1+\beta_2)(1-\beta_2)}{\alpha_1\alpha_2\beta_1\beta_2} - \beta_1\beta_2 + \frac{\beta_2(1+\beta_1)}{\alpha_1} - \frac{1+\beta_2}{\alpha_1\alpha_2} \quad (6)$$

$$S_{\text{IV}} = \beta_1\beta_2 - \frac{\beta_2(1+\beta_1)}{\alpha_1} + \frac{1+\beta_2}{\alpha_1\alpha_2} \quad (7)$$

联立式(4)~式(7), 并使各项像差系数为 0,

本文选用无中间像面的同轴反射结构作为初始结构, 利用 Matlab 进行编程解方程组, 输入符合条件

的轮廓参数即可得到一组初始结构参数^[8],如表2所示。根据以上条件得到系统的同轴初始结构,如图2所示。

表2 初始结构参数

Table 2 Initial structural parameters

表面	曲率半径/mm	距离/mm	圆锥系数
主镜	-2 400	-480	-4.443
次镜	-757	480	-0.068
三镜	-960	-768	0.177

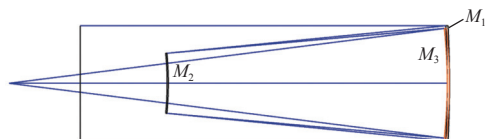


图2 初始三反系统结构

Fig. 2 Initial structure diagram of three-mirror system

2 优化思路

2.1 设计优化

在得到同轴初始结构后进行离轴处理,离轴方式分为孔径离轴和视场离轴。孔径离轴情况下光阑在主镜上,光学结构不对称,故视场角无法做得太大;视场离轴情况下光阑一般在次镜上,有利于

视场角的扩展,所以本文采用视场离轴的方式^[9]。

设置波长为 400 nm~1 000 nm,主镜和三镜均为非球面。给定同轴结构一个起始离轴视场角,并设置视场,稍作优化,在保证光线不被遮拦的情况下满足像质要求,得到小视场的离轴初始结构^[10]。视场设置为 x 方向 $-5^{\circ}\sim 5^{\circ}$, y 方向由于离轴视场的不对称性,视场设置为 $6^{\circ}\sim 7^{\circ}$,此时视场为线视场,需要在此基础上扩展视场。

调整三反系统光线无遮拦后,进行优化。优化过程中,Zemax 的计算方式会使系统趋于共轴,所以尽量不将距离以及角度设为变量,手动进行调整。扩大视场的方式应遵循逐步扩大的方法^[11],以 1° 、 0.5° ,甚至 0.1° 的幅度增加视场。

采用 DIMX 和 DISC 操作数在优化过程中控制畸变,优化采用波前+PTV 的方式,以质心为参考。由于视场的离轴不对称特性,光瞳采样采用矩形阵列更为合适,本文设计采用 12×12 网格。使用 EFL 操作数控制焦距为 800 mm, TTHI 控制镜面间距以及整体尺寸, COGT 以及 COLT 控制二次曲面系数在合理的范围内^[12]。除此之外,优化过程中时刻注意避免视场扩大导致光线遮拦,可编写 ZPL 宏语言对整个结构框架进行限制。设计优化思路流程图如图3所示。

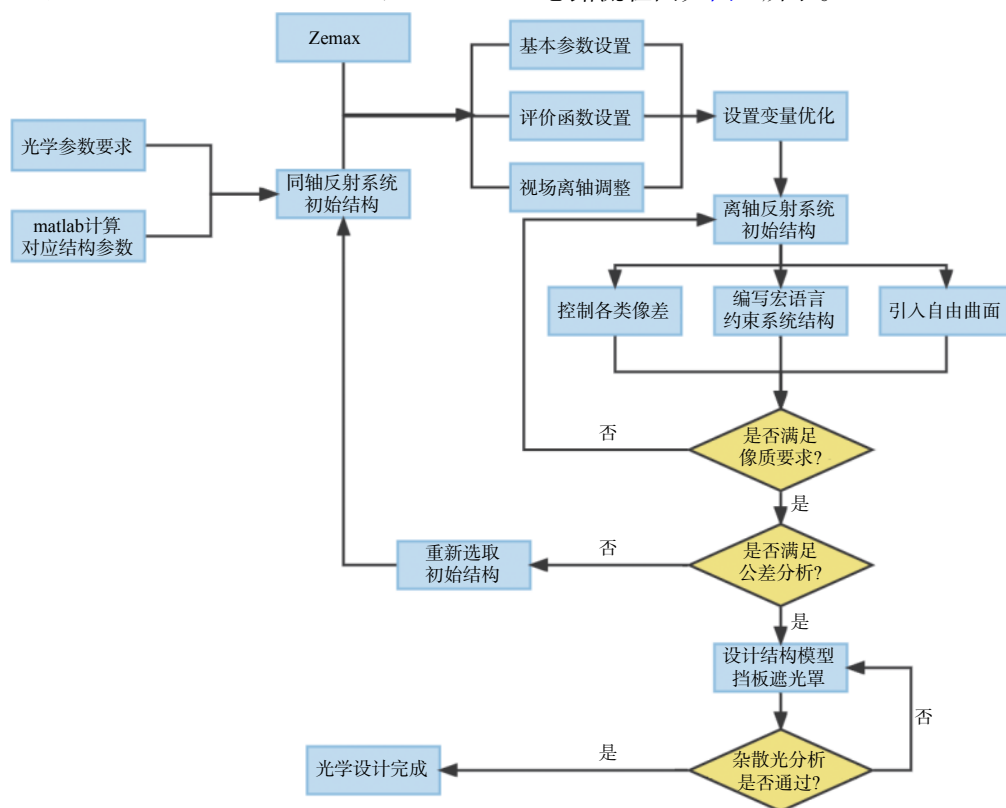


图3 设计优化思路流程图

Fig. 3 Flow chart of design optimization ideas

2.2 自由曲面的应用

自由曲面区别于传统球面和非球面, 具有非旋转对称性的特点, 因此也拥有更高的优化自由度, 对校正离轴系统的非对称性像差有天然的优势。自由曲面通常有两种数学方式进行描述: 一是用离散点拟合描述, 二是多项式组合描述。离散点拟合得到的自由曲面可以是任意形状的, 但是在加工制造、检测等方面存在工艺性不足等问题。多项式组合描述方式具有较高的精度, 所得到的自由曲面为连续平滑曲面, 并且易于检测加工^[13]。

在光学设计领域中, 通常使用 Zernike 多项式和 XY 多项式进行自由曲面设计^[14]。本文采用 Zernike 多项式进行设计, 以二次曲面作为基底, 用以下形式表示:

$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}} + \sum_{j=1}^N A_j Z_j(\rho, \varphi) \quad (8)$$

式中: $\frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}}$ 为非球面方程; c 为顶点处的曲率; r 为径向口径; k 为圆锥系数; $\sum_{j=1}^N A_j Z_j(\rho, \varphi)$ 为 Zernike 方程的描述部分; N 为 Zernike 多项式的项数; A_j 为第 j 项系数; $Z_j(\rho, \varphi)$ 为多项式表达式; ρ , φ 分别为极坐标半径和坐标角。

Zernike 多项式与像差理论吻合较好, 其各项指标与 Seidel 像差可以很好地对应, 有利于我们在优化过程中平衡像差。Zemax 设计中常用 Zernike Standard 和 Zernike Fringe 两种形式, 本文采用 Zernike Fringe 形式。

在 y 方向大于 10° 以后, 普通非球面已经很难平衡不对称性像差^[15], 此时引入自由曲面, 将主镜和三镜设置为 Zernike Fringe 矢高形式的自由曲面。主镜和三镜优化后, 在归一化半径为 400 mm 情况下, Zernike Fringe 多项式系数如表 3 和表 4 所示。

表 3 主镜 Zernike 系数

Table 3 Zernike coefficients of primary mirror

项数	参数	项数	参数	项数	参数
Z4	-5.888 998	Z16	12.048 383	Z28	1.973 612 5
Z5	0.763 341 68	Z17	11.405 128	Z31	-0.353 444 91
Z8	16.720 45	Z20	-4.986 482 8	Z32	0.550 896 96
Z9	-4.715 094 2	Z21	2.208 169 9	Z35	0.541 426 4
Z11	-17.063 728	Z24	2.607 720 1	Z36	0.072 619 379
Z12	0.655 611 58	Z25	6.987 462 3	Z37	-0.456 826 89
Z15	7.971 883	Z27	2.018 285		

表 4 三镜 Zernike 系数

Table 4 Zernike coefficients of tertiary mirror

项数	参数	项数	参数	项数	参数
Z4	3.068 102 3	Z16	4.80 572 96	Z28	-0.089 332 522
Z5	-13.302 909	Z17	-0.471 574 32	Z31	0.105 020 45
Z8	-37.987 146	Z20	0.465 797 18	Z32	-0.568 719 95
Z9	1.328 642 4	Z21	-3.647 934 9	Z35	-0.864 518 24
Z11	0.821 888 53	Z24	-6.847 451 6	Z36	-0.721 849 52
Z12	-9.709 854 9	Z25	-0.930 853 56	Z37	-0.215 162 03
Z15	-22.614 259	Z27	0.086 890 123		

表 3 和表 4 中并未选择所有的 Zernike 系数进行优化, 而是选择了与 x 视场方向(弧矢方向)无关的系数进行优化, 这样 x 方向视场便可设置为对称视场。本文设置 x 方向视场为 $0^\circ \sim 6.5^\circ$ 对称视场以及 y 方向视场为 $6^\circ \sim 19^\circ$, 二者组合形成矩形视场。最终得到焦距 800 mm、相对孔径 1:5、视场角 $13^\circ \times 13^\circ$ 的大对称视场的离轴三反光学系统, 具体结构参数如表 5 所示, 光路图如图 4 所示。系统中次镜为孔径光阑, 无中间像面, 主镜和三镜为 Zernike 多项式自由曲面, 次镜为二次曲面。

表 5 系统优化后结构参数

Table 5 Optimized structural parameters

表面	曲率半径/mm	距离/mm	圆锥系数
主镜	-1 696.393	-527.344	8.742
次镜	-741.679	515.891	10.233
三镜	-460.872	-540.355	-4.352

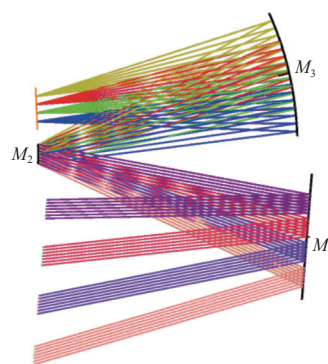


图 4 光学系统光路图

Fig. 4 Optical path diagram of optical system

3 像质评价

由奈奎斯特频率计算公式 $N=1/2\alpha$ (α 为探测器像元) 可得, 该系统的光学传递函数 (MTF) 参考频率为 100 lp/mm, 如图 5 所示。光学传递函数是评

价光学系统各项性能的综合体现^[16],由图 5 可知,该系统在 100 lp/mm 处光学传递函数大于 0.5,符合设计要求。

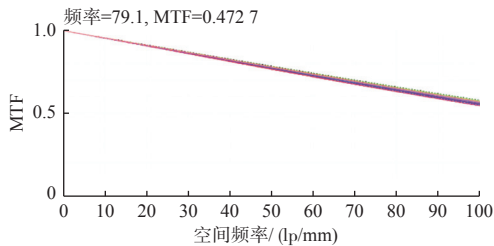


图 5 系统光学传递函数
Fig. 5 Modulation transfer function of system

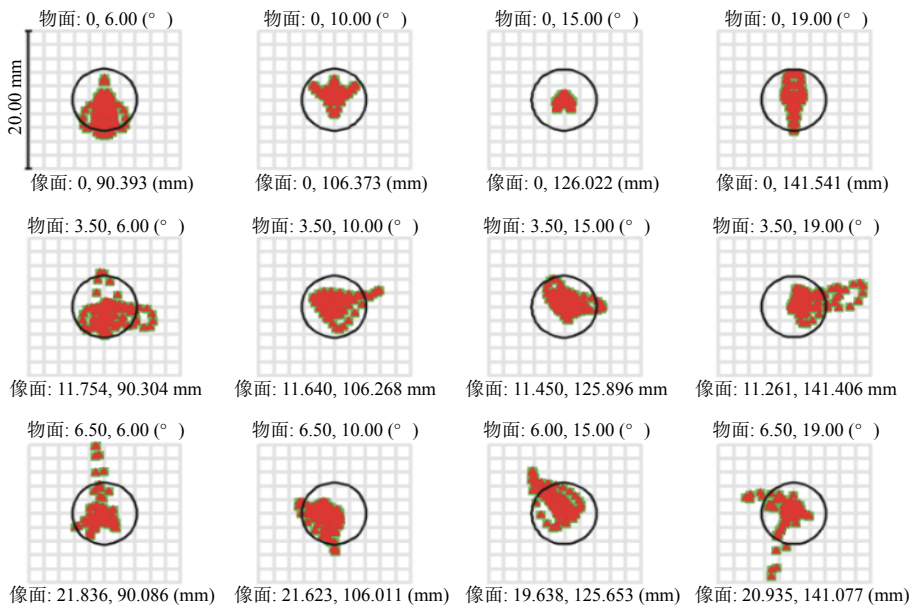


图 6 系统点列图
Fig. 6 Spot diagram of system

表 6 各视场 RMS 光斑半径
Table 6 RMS spot radius of each field of view μm

x方向视场	y方向视场			
	6°	10°	15°	19°
0°	2.606	1.445	0.783	1.850
3.5°	2.657	2.177	1.947	3.005
6.5°	2.432	2.313	2.835	2.405

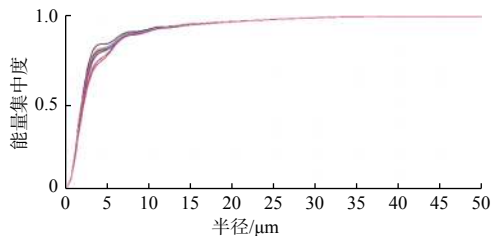


图 7 能量集中度曲线
Fig. 7 Energy concentration curves

点列图的 RMS(均方根)半径能够很好地反映光斑的能量集中度^[17],本系统点列图如图 6 所示,具体数值如表 6 所示。本系统的艾里斑半径为 $4.276\text{ }\mu\text{m}$,各个视场的最大弥散斑半径为 $3.105\text{ }\mu\text{m}$,均小于艾里斑半径,且小于一个像元尺寸 $5\text{ }\mu\text{m}$,满足清晰成像的要求。由于反射系统不产生色差,由图 6 也可以看出,相同视场不同波长的光斑形状一致。图 7 为本系统的能量集中度曲线,可以看出 80% 以上的能量集中在 $5\text{ }\mu\text{m}$,也小于一个像元尺寸。图 8 为该系统的场曲及畸变曲线图,可以看出畸变均在 5% 以内。

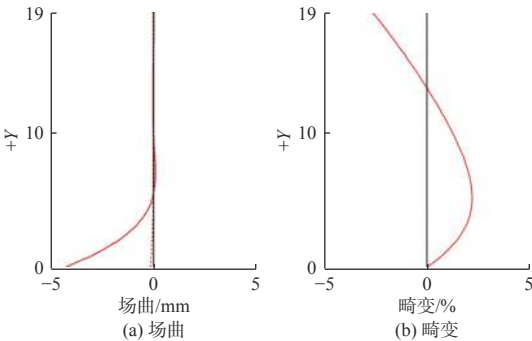


图 8 系统场曲及畸变图
Fig. 8 System field curvature and distortion diagram

4 公差分析

公差分析是评判光学系统可行性的重要流程,公差如果过于严格,会导致成本上升甚至无法制

造,公差过于宽松将会使成像质量下降严重。一般公差主要包括设计残余误差、加工误差和装调误差^[18]。利用 Zemax 软件进行公差分析,将公差分配成若干个公差类别,随机作用于光学系统。以 100 lp/mm 处的衍射 MTF 为标准,进行 200 次蒙

特卡洛分析,使用后截距进行公差补偿,根据实际加工装调状况对公差默认项进行适当地增添删改。最终公差分配结果如表 7 所示^[19]。从表 7 可知,公差在可加工范围之内,满足实际生产状况。表 8 为蒙特卡罗分析结果。

表 7 离轴反射系统的系统公差

Table 7 System tolerances for off-axis reflection system

元件	公差参数						元件间隔/mm
	曲率半径/mm	二次曲面系数	X轴倾斜/(°)	Y轴倾斜/(°)	X轴偏心/mm	Y轴偏心/mm	
主镜	±0.2	±0.001	0.01	0.01	±0.1	±0.1	±0.1
次镜	±0.1	±0.001	0.01	0.01	±0.1	±0.1	±0.1
三镜	±0.1	±0.001	0.03	0.01	±0.1	±0.1	±0.1

表 8 蒙特卡罗公差分析结果

Table 8 Monte Carlo tolerance analysis results

蒙特卡罗百分比/%	MTF值@100 lp/mm
90	0.39
80	0.45
50	0.51

5 结论

本文针对离轴反射系统在航空航天领域的优势,基于成像光学理论,计算出同轴反射系统的初始结构,再利用 Zemax 软件对同轴系统进行视场离轴,引入 Zernike 自由曲面并扩大视场,最终设计完成了一个视场为 $13^\circ \times 13^\circ$,相对孔径为 1/5,焦距为 800 mm,波长为 400 nm~1 000 nm 大对称视场的光学系统。该系统成像质量优良,MTF 接近衍射极限,在 100 lp/mm 处大于 0.5,RMS 光斑半径小于像元尺寸 5 μm 。系统公差分析结果表明,公差在可加工范围内,工艺性良好。

参考文献:

- [1] 孙永雪,夏振涛,韩海波,等.大口径红外离轴三反光学系统设计及公差分析[J].应用光学,2018,39(6):803-808.
SUN Yongxue, XIA Zhentao, HAN Haibao, et al. Design and tolerance analysis of infrared off-axis three-mirror optical system with large aperture[J]. Journal of Applied Optics, 2018, 39(6): 803-808.
- [2] JOHNSON R B. Unobscured reflective zoom system[J]. SPIE, 1995, 2539: 218-225.

- [3] STAMENOV I, ARIANPOUR A, OLIVAS S J, et al. Panoramic monocentric imaging using fiber-coupled focal planes[J]. Optics Express, 2014, 22(26): 31708-31721.
- [4] 刘强,王欣,王庚华,等.大视场大相对孔径斜轴离轴三反望远镜的光学设计[J].光子学报,2019,48(3): 322002.
LIU Qiang, WANG Xin, WANG Genghua, et al. Optical design of wide field view and large relative aperture off-axis three-mirror reflective system with tilted optical axis[J]. Acta Photonica Sinica, 2019, 48(3): 322002.
- [5] BEIER M, HARTUNG J, PESCHEL T, et al. Development, fabrication, and testing of an anamorphic imaging snap-together freeform telescope [J]. Applied Optics, 2015, 54(12): 3530-3542.
- [6] 王伟.自由曲面离轴反射式光学系统设计[D].南京:南京理工大学,2016.
WANG Wei. Design of off-axis reflective optical system with free-form surface [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2016.
- [7] VANBROCKLIN R R, NAVAN W D, EDWARDS M J. Corning: supplier of multiple optical materials for telescope projects[J]. SPIE, 2006, 6273: 627301.
- [8] 操超,廖胜,廖志远,等.基于自由曲面的大视场离轴反射光学系统设计[J].光学学报,2020,40(8): 37-45.
CAO Chao, LIAO Sheng, LIAO Zhiyuan, et al. Design of off-axis reflective optical system with large field-of-view based on freeform surfaces[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(8): 37-45.
- [9] 项建胜,潘国庆,孟卫华,等.一种含自由曲面的离轴三反光学系统设计[J].激光与红外,2022,52(7): 1073-1077.

- XIANG Jiansheng, PAN Guoqing, MENG Weihua, et al. The design of an off-axis three-mirror optical system with a freeform surface[J]. *Laser and Infrared*, 2022, 52(7): 1073-1077.
- [10] 赵文才. 改进的离轴三反光学系统的设计[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(12): 2837-2843.
- ZHAO Wencai. Design of improved off-axial TMA optical systems[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(12): 2837-2843.
- [11] 陈伟, 薛闯. 用于成像光谱仪的宽视场离轴三反望远镜设计[J]. *光学学报*, 2013, 42(8), 950-955.
- CHEN Wei, XUE Chuang. Design of wide field-of-view off-axis three-mirror telescope for imaging spectrometer [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, 42(8), 950-955.
- [12] 黄一帆, 李林. 光学设计教程[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2009: 83-101.
- HUANG Yifan, LI Lin. Optical design tutorial [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2009: 83-101.
- [13] 李晓彤, 岑兆丰. 几何光学·像差·光学设计[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2003: 98-101.
- LI Xiaotong, CEN Zhaofeng. Geometrical optics, aberration and optical design [M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2003: 98-101.
- [14] CALAMAI L, BARSOTTI S, FOSSATI E, et al. Ring-field TMA for PRISMA: theory optical design, and performance measurements[J]. *SPIE*, 2015, 9626: 5-10.
- [15] 李岩, 张葆, 洪永丰. 灵巧型离轴三反光学系统设计[J]. *应用光学*, 2014, 35(3): 391-394.
- LI Yan, ZHANG Bao, HONG Yongfeng. Compact and multispectral off axial three-mirror reflective optical system[J]. *Journal of Applied Optics*, 2014, 35(3): 391-394.
- [16] 宋岩峰, 邵晓鹏, 徐军. 离轴三反射镜光学系统研究[J]. *红外与激光工程*, 2008, 37(4): 706-709.
- SONG Yanfeng, SHAO Xiaopeng, XU Jun. Off-axis three-mirror reflective optical system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(4): 706-709.
- [17] 梁宝雯, 吴晗平, 王华泽. 空间相机离轴三反红外光学系统设计[J]. *红外技术*, 2013, 35(4): 217-222.
- LIANG Baowen, WU Hanping, WANG Huaze. Design of off-axial TMA infrared optical system for space camera[J]. *Infrared Technology*, 2013, 35(4): 217-222.
- [18] 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: 130-138.
- PAN Junhua. The design, manufacture and test of the aspherical optical surfaces [M]. Suzhou: Suzhou University Press, 2004: 130-138.
- [19] 李欢, 向阳. 10°远心离轴三反消像散望远系统的光学设计[J]. *光子学报*, 2009, 38(9): 2256-2260.
- LI Huan, XIANG Yang. Design of 10° FOV telecentric off-axis three-mirror anastigmatic telescope[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, 38(9): 2256-2260.