

文章编号: 1672-8785(2021)08-0001-06

可见光/红外双波段离轴三反 光学系统优化设计

韩修来 聂 亮* 任梦茹

(西安工业大学光电工程学院, 陕西 西安 710021)

摘 要: 为满足多波段、长焦距、大孔径、紧凑结构的设计要求, 对反射式光学系统进行了研究。以同轴三反系统的成像理论为设计基础, 为避免光学系统遮拦同时提高成像质量, 利用 Zemax 软件介绍了一种优化离轴三反光学系统的方法。与采用 ZPL 语言的控制优化相比, 该方法更加简便、直观, 且无需使用复杂非球面, 仅采用曲面圆锥系数即可满足设计要求, 大大降低了加工、检测的成本和难度。采用视场离轴方式设计出了一种焦距为 1000 mm、口径为 6 in、视场角为 $2.2^\circ \times 0.22^\circ$ 的可见光/中波红外双波段离轴三反光学系统。仿真结果表明, 其 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 波段在空间频率 17 lp/mm 处的全视场调制传递函数 (Modulation Transfer Function, MTF) 值大于 0.4, $0.4 \sim 0.7 \mu\text{m}$ 波段在空间频率 50 lp/mm 处的全视场 MTF 值大于 0.7。该系统的成像质量良好, 接近衍射极限。

关键词: 光学设计; 光学系统; 同轴三反; 视场离轴; 优化

中图分类号: TN214 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2021.08.001

Optimal Design of Visible/Infrared Dual-Band Off-Axis Three-Reflection Optical System

HAN Xiu-lai, NIE Liang*, REN Meng-ru

(Institute of Optoelectronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China)

Abstract: In order to meet the design requirements of multi-band, long focal length, large aperture and compact structure, the reflective optical system is studied. Based on the imaging theory of the coaxial three-mirror system, in order to avoid the existence of blocking in the optical system and improve the imaging quality, the design uses Zemax optical software to introduce a method to optimize off-axis three-reflection optical system. Compared with the control optimization based on ZPL language, the method is more convenient and intuitive. It does not need to use complex aspheric surface and only uses the conic coefficient of curved surface to meet the design requirements, which greatly reduces the cost and difficulty of processing and testing. Using the off-axis field-of-view, a visible and mid-wave infrared dual-band off-axis three-reflection optical system with a focal length of 1000 mm, the diameter of 6 in and a field-of-view of $2.2^\circ \times 0.22^\circ$ is designed. The simulation results show that MTF of the full field-of-view is greater than 0.4 at the spatial frequency of 17 lp/mm in the

收稿日期: 2021-03-26

基金项目: 西安市智能探视感知重点实验室项目(201805061ZD12CG45)

作者简介: 韩修来(1995-), 男, 陕西西安人, 硕士研究生, 主要从事光学设计和光学系统设计等方面的研究。

***通讯作者:** E-mail: nlng@sohu.com

3–5 μm band, and MTF of the full field-of-view is greater than 0.7 at the spatial frequency of 50 lp/mm in the 0.4–0.7 μm band. The imaging quality of the system is good, close to the diffraction limit.

Key words: optical design; optical system; coaxial three-mirror; off-axis field-of-view; optimization

0 引言

可见光/红外双波段探测系统能够在白天与夜间对目标进行侦查。与单色探测系统相比,该系统的探测性能更佳,在复杂环境下的目标识别和干扰识别能力更强,提高了全天候作战能力。与折射式光学系统相比,反射式光学系统具有无色差、无二阶谱、结构简单紧凑、质量轻、光学系统孔径大等优点^[1-2]。

反射式光学系统可分为两类:两反射式光学系统和三反射式光学系统^[3-4]。其中两反射式光学系统由主反射镜和次反射镜组成,优化变量相对较少;若要同时校正多种像差,则需另外使用折射元件。三反射式光学系统包括同轴三反射式和离轴三反射式两种。与两反射式系统相比,同轴三反射式系统拥有更多的可优化变量,在满足焦距和视场等条件时可较好地对象差进行校正。但同轴反射式光学系统本身存在中心遮拦。这降低了进入光学系统的能量,导致同轴反射式系统的分辨率明显下降。而离轴三反射式光学系统则不存在中心遮拦,故该系统具有更大的应用前景^[5-11]。

本文根据同轴三反设计理论,以 Zemax 光学设计软件为基础,针对软件优化过程中可能出现的遮拦问题,通过编写 Zemax 操作数的方式给出了优化设计方法。与采用 ZPL 宏语言的控制优化相比^[12-13],本文方法无需使用复杂非球面,而仅采用曲面圆锥系数即可满足设计要求,大大降低了加工、检测的成本和难度。通过对所设计的同轴三反射式系统进行优化,得到了无遮拦的可见光/中波红外双波段离轴三反射式光学系统。

1 同轴三反光学系统的成像理论

离轴反射系统的设计是在同轴反射系统的基础上进行光阑离轴或视场离轴^[14-15]。光阑离

轴时,光阑位于主镜位置或主镜之前,以达到主镜不挡光、避免遮拦的目的。光阑离轴可使系统结构紧凑,但如果系统视场角较大,则 MTF 值下降明显;视场离轴的光阑位置在次镜上,需给予视场一定的倾斜角度以避免遮拦。视场离轴具有较好的平衡像差能力,适用于视场角相对较大、相对孔径大的多波段准直光学系统。故本文设计的离轴三反式光学系统采用视场离轴的方式。

基于高斯光学知识和初级像差理论,通过给定与反射镜轮廓尺寸相关的遮拦比和放大率,算得各个反射镜的曲率半径、圆锥系数以及镜面与镜面之间的中心距离。图 1 为同轴三反射式系统的结构示意图。

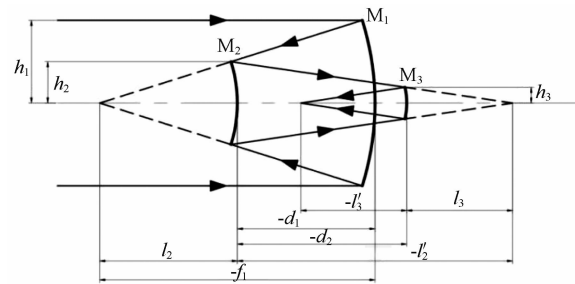


图 1 同轴三反式系统的结构示意图

图 1 中,入射平行光依次经过主镜 M_1 、次镜 M_2 、三镜 M_3 的反射,最终到达成像面。物体位于无穷远处,即 $l_1 = \infty$, $u_1 = 0$ 。 α_1 、 α_2 分别为次镜孔径尺寸与主镜孔径尺寸的比值、三镜孔径尺寸与次镜孔径尺寸的比值, β_1 和 β_2 分别为次镜和三镜的放大率。可以得到:

$$\left\{ \begin{array}{l} \alpha_1 = \frac{l_2}{f} \approx \frac{h_2}{h_1} \\ \alpha_2 = \frac{l_3}{l_2} \approx \frac{h_3}{h_2} \\ \beta_1 = \frac{l'_2}{l_2} = \frac{u_2}{u_1} \\ \beta_2 = \frac{l'_3}{l_3} = \frac{u_3}{u_2} \end{array} \right. \quad (1)$$

R_1 、 R_2 和 R_3 分别为主镜、次镜和三镜的曲率半径, d_1 和 d_2 分别为主镜中心到次镜中心的间隔和次镜中心到三镜中心的间隔, l'_3 为三镜中心到像面中心的间隔。

$$\begin{cases} R_1 = \frac{2}{\beta_1 \beta_2 f'} \\ R_2 = \frac{2\alpha_1}{\beta_2(1+\beta_1)} f' \\ R_3 = \frac{2\alpha_1 \alpha_2}{1+\beta_2} f' \\ d_1 = \frac{r_1}{2}(1-\alpha_1) \\ d_2 = \frac{r_1}{2}\alpha_1 \beta_1(1-\alpha_2) \end{cases} \quad (2)$$

2 离轴光学系统的优化设计

2.1 同轴光学系统设计

根据双波段反射式光学系统的性能指标, 确定以下设计要求: 口径为 152.4 mm; 焦距为 1000 mm; 视场角为 $2^\circ \times 0.2^\circ$; 波段为 $0.4 \sim 0.7 \mu\text{m}$ 和 $3 \sim 5 \mu\text{m}$; 像元尺寸为 $10 \mu\text{m} \times 10 \mu\text{m}$ 和 $30 \mu\text{m} \times 30 \mu\text{m}$, 像元尺寸内的能量集中度大于 80%, $0.4 \sim 0.7 \mu\text{m}$ 波段在空间频率 50 lp/mm 处的 MTF 值大于 0.6, $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 波段在空间频率 17 lp/mm 处的 MTF 值大于 0.3。

根据同轴三反光学系统的设计理论以及性能指标要求, 利用 MATLAB 得到一组满足使用要求的同轴三反初始结构(其参数见表 1)。

表 1 同轴三反结构参数

面序号	曲率半径/mm	厚度/mm	圆锥系数
PM	-2077.37	-484.75	-2.542
SM	-689.87	484.75	-0.428
TM	-1030.75	-812.97	0.133

2.2 离轴优化方法

设置系统的整体视场离轴角, 然后将其主反射镜、次反射镜、第三反射镜的曲率半径和圆锥系数, 镜面与镜面之间的厚度, 镜面的倾角和偏心量设置为优化变量, 并对光学系统进行优化。经试验发现, 在优化三个镜面的倾角和偏心量的过程中, 如果不对镜面和光线加以控制, 那么当系统存在同轴化的趋势时, 就会出现中心遮拦的情况。所以需要系统边界条件进行控制。利用 Zemax 软件中的自定义优化操作数功能, 在光线可能会被遮拦的位置上将镜面与可能被遮拦光线的垂直距离的最小间隔控制在 20 mm。如图 2 所示, 对三个镜面的倾角和偏心量进行优化, 具体步骤如下:

- (1) 利用操作数提取点 A、B、C 的全局坐标点;
- (2) 根据斜率计算公式, 利用 B 点和 C 点的坐标求出该条光线的斜率;
- (3) 根据直线斜截式方程, 利用 B 点坐标与斜率求得该条光线的截距;
- (4) 根据两点之间距离公式计算 A 点与 D 点之间的距离;

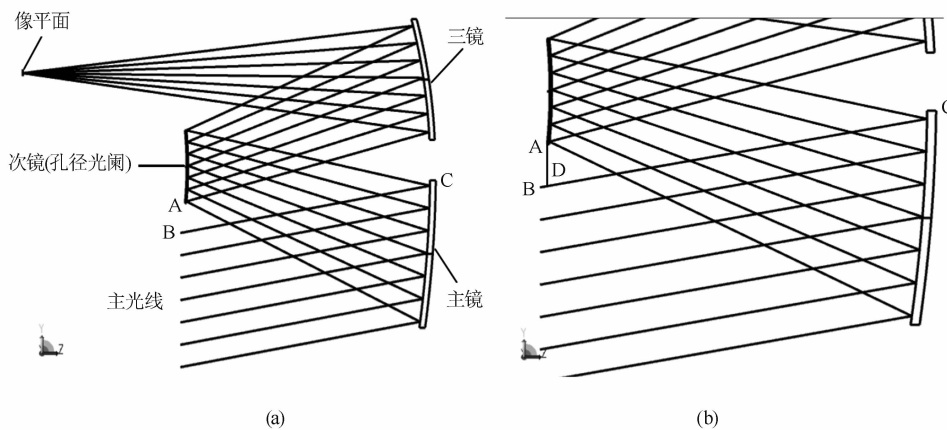


图 2 无遮拦离轴三反式光学系统的示意图

类型	面	波	Hx	Hy	Px	Py	目标	权重
1	BLNK	计算次镜下边缘点到面1边缘与主镜上边缘连线距离						
2	BLNK	面1边缘yz点坐标line						
3	RAGY	1	1	0.00000	1.00000	0.00000	1.00000	0.00000 0.00000
4	RAGZ	1	1	0.00000	1.00000	0.00000	1.00000	0.00000 0.00000
5	BLNK	主镜3边缘点yz坐标line						
6	RAGY	3	1	0.00000	1.00000	0.00000	1.00000	0.00000 0.00000
7	RAGZ	3	1	0.00000	1.00000	0.00000	1.00000	0.00000 0.00000
8	BLNK	次镜5下边缘点point						
9	RAGY	5	1	0.00000	1.00000	0.00000	-1.00000	0.00000 0.00000
10	RAGZ	5	1	0.00000	1.00000	0.00000	-1.00000	0.00000 0.00000
11	BLNK							
12	BLNK	线斜率						
13	DIFF	6	3					0.00000 0.00000
14	DIFF	7	4					0.00000 0.00000
15	DIVI	13	14					0.00000 0.00000
16	BLNK	线截距						
17	PROD	15	4					0.00000 0.00000
18	DIFF	3	17					0.00000 0.00000
19	BLNK	距离						
20	BLNK	分子						
21	PROD	15	10					0.00000 0.00000
22	SUMM	21	18					0.00000 0.00000
23	DIFF	22	9					0.00000 0.00000
24	ABSO	23						0.00000 0.00000
25	BLNK	分母						
26	PROD	15	15					0.00000 0.00000
27	CONS							1.00000 0.00000
28	SUMM	26	27					0.00000 0.00000
29	SQRT	28						0.00000 0.00000
30	BLNK	控制距离						
31	DIVI	24	29					0.00000 0.00000
32	OPGT	31						20.00000 1.00000

图 3 无遮拦离轴三反式光学系统的优化操作数

(5) 将 A 点与 D 点之间的距离控制在合适的范围内, 以避免遮挡。

具体操作数如图 3 所示。

2.3 系统设计结果

依据上述优化思路, 对所有可能产生遮挡的位置采用相同的方法: 利用操作数控制边界距离, 对同轴三反式系统的初始结构进行反复优化, 得到可见光/中波红外双波段离轴三反系统参数(见表 2)。图 4~图 11 所示为该系统的结构及成像质量。

表 2 离轴三反结构参数

面序号	曲率半径/mm	厚度/mm	圆锥系数
PM	-2226.46	-479.59	-2.858
SM	-738.42	511.90	-0.260
TM	-1093.52	-900.00	0.169

图 5 表明, 系统畸变值为 -1.84%。从图 6 和图 7 中可以看出, 系统在 0.4~0.7 μm 和

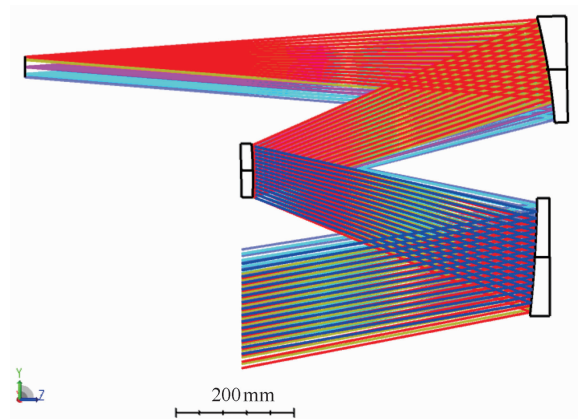


图 4 离轴三反结构图

3~5 μm 两个波段的全视场 MTF 曲线接近衍射极限。其中, 3~5 μm 波段在空间频率 17 lp/mm 处的全视场 MTF 值大于 0.43, 0.4~0.7 μm 波段在空间频率 50 lp/mm 处的全视场 MTF 值大于 0.75。图 8 和图 9 表明, 可见光与中波红外两波段像元尺寸内的能量集中度均

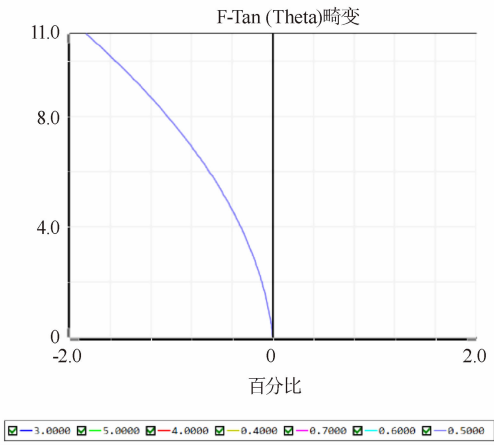


图 5 系统畸变图

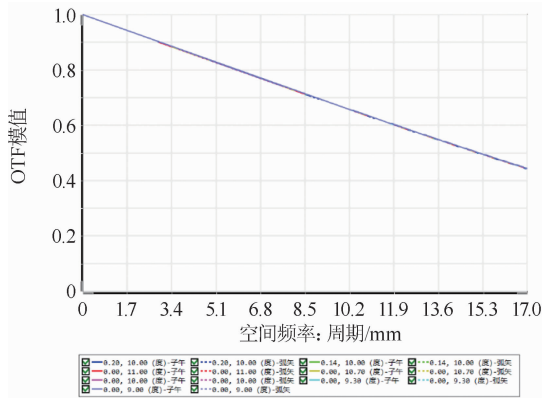


图 6 3~5 μm MTF 曲线图

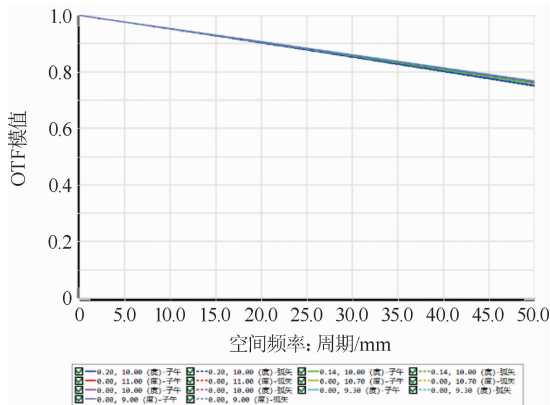


图 7 0.4~0.7 μm MTF 曲线图

超过 80%。由图 10 和图 11 可知, 可见光波段光斑的均方根半径小于艾里斑直径 $4 \mu\text{m}$, 中波红外波段光斑的均方根半径小于艾里斑直径 $24 \mu\text{m}$, 均位于艾里斑直径以内, 达到中波红外和可见光波段的探测器像元尺寸要求。结果表明, 本文设计能够满足成像需要。

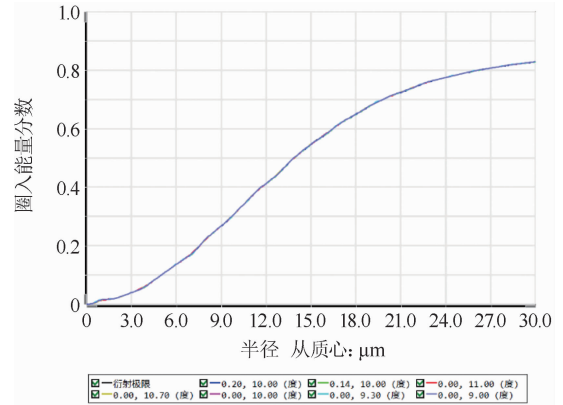


图 8 3~5 μm 像元尺寸内圈入能量分数

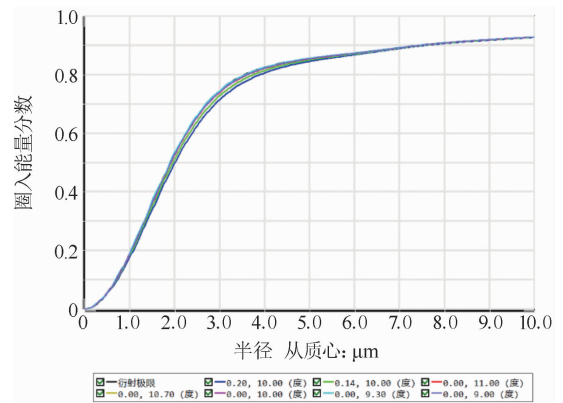


图 9 0.4~0.7 μm 像元尺寸内圈入能量分数

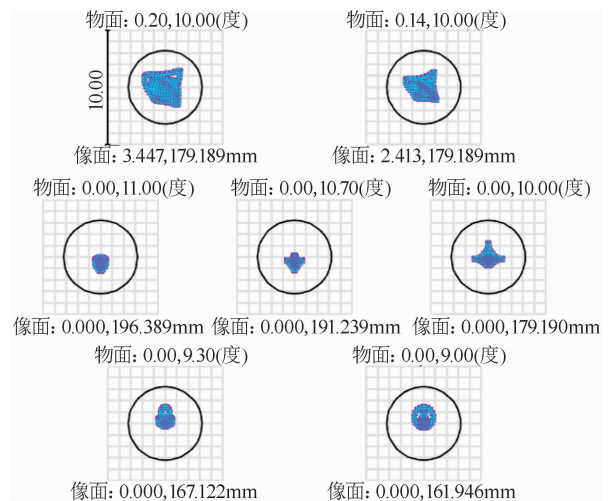


图 10 可见光波段的点列图

3 结论

本文提出了一种优化离轴三反光学系统的方法。利用该方法编写自定义操作数, 控制和避免光线在传播过程中出现挡光的情况。与使用 Zemax 中的 ZPL 宏语言相比, 这种方法更

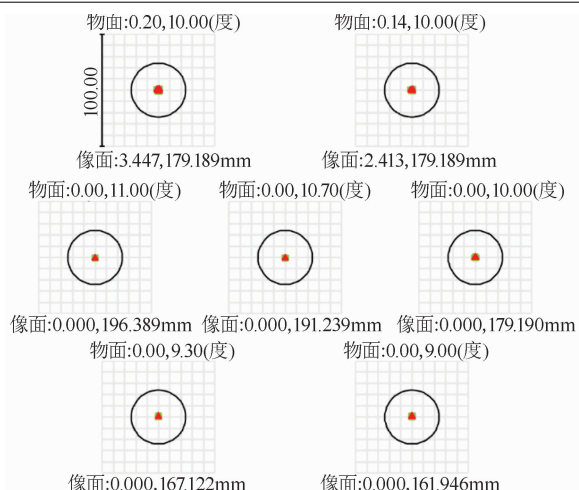


图 11 中红外波段的点列图

加简便且直观有效。根据提出的设计要求，经计算得到同轴三反式光学系统的结构参数。在此基础上，采用视场离轴的方法进行优化，最终设计出了一种焦距为 1000 mm、口径为 6 in、视场角为 $2.2^\circ \times 0.22^\circ$ 的可见光/中波红外双波段离轴三反式准直光学系统。其 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 波段在空间频率 17 lp/mm 处的全视场 MTF 值大于 0.3， $0.4 \sim 0.7 \mu\text{m}$ 波段在空间频率 50 lp/mm 处的全视场 MTF 值大于 0.6。该系统的成像质量接近衍射极限，证明了这种优化设计方法的有效性。

参考文献

- [1] 伍和云, 王培纲. 离轴反射式光学系统设计 [J]. *光电工程*, 2006, **33**(1): 34–37.
- [2] 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): 84–92.
- [3] 刘辉, 李兴隆, 裴云天, 等. 离轴三反射式光学系统的设计 [J]. *激光与光电子学进展*, 2008, **45**(12): 59–63.
- [4] 陈博, 王治乐, 赵松庆, 等. 反射式红外多波段准直投影光学系统设计 [J]. *航空兵器*, 2019, **26**(2): 69–74.
- [5] 刘晓梅, 向阳. 宽视场成像光谱仪前置远心离轴三反光学系统设计 [J]. *光学学报*, 2011, **31**(6): 233–236.
- [6] 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]. *光子学报*, 2013, **42**(8): 950–955.
- [7] Hammar A, Park W, Chang S, et al. Wide-field Off-axis Telescope for the Mesospheric Airglow/Aerosol Tomography Spectroscopy Satellite [J]. *Applied Optics*, 2019, **58**(6): 1393.
- [8] Sang X Z, Chen Z D, Gao X, et al. Design and Fabrication of a Wide-angle Off-axis Three-mirror Head-mounted Display System [J]. *Optik*, 2019, **191**: 139–145.
- [9] 潘思豪, 潘枝峰, 陈建发. 紧凑型离轴三反光学系统的自由曲面设计 [J]. *电光与控制*, 2019, **26**(3): 97–102.
- [10] 凌明椿, 宋茂新, 洪津, 等. 离轴三反同时偏振成像仪光机设计 [J]. *红外与激光工程*, 2019, **48**(5): 241–250.
- [11] 黄晓园, 黄铭焯, 陈冠亮, 等. 高分辨率空间遥感卫星的离轴三反光学系统设计 [J]. *光学与光电技术*, 2018, **16**(4): 75–79.
- [12] 杨波, 刘成林, 丁学专, 等. 使用 ZPL 宏指令辅助设计离轴三反射镜系统 [J]. *红外技术*, 2010, **32**(10): 559–561.
- [13] 陈泽, 胡明勇. 基于 ZPL 宏指令的大口径反射式平行光管设计 [J]. *量子电子学报*, 2017, **34**(1): 9–14.
- [14] 赵亮. 离轴三反射式光学系统设计 [J]. *光电技术应用*, 2014, **29**(4): 1–4.
- [15] 于鑫, 张葆, 洪永丰. 一种离轴三反射系统初始结构的求解方法 [J]. *激光与光电子学展*, 2015, **52**(11): 175–181.