文章编号:1002-1582(2020)02-0192-06

静、动态目标模拟离轴三反光学系统设计

王志强¹,常艳贺^{1*},王春艳¹,孙昊^{1,2},李圆圆¹,安文强³

(1. 长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022)

(2. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033)

(3. 战略支援部队航天系统部装备项目管理中心,北京 100053)

摘 要:基于单色像差理论,确定同轴三反光学系统的初始结构参数,通过二次曲面系数为0的偶次非球面的高次 项之间的平衡,校正离轴系统引起的非对称性像差,同时结合 DMD(数字微镜器件)目标生成器,设计出一款采用离轴三 反光学系统的平行光管,为坦克承载的被测光电设备提供室内模拟目标。本光学系统的设计指标是工作波段为0.2~ 1.2 μ m,有效焦距为 3000mm,全视场为 2°,F 数为 8。结果表明,系统各视场的波像差均优于 $\lambda/34$ (主波长 λ = 0.6328 μ m),传递函数 MTF均优于 0.71@36.5lp/mm,接近衍射极限,成像质量好。对系统进行公差分析之后,系统的 传递函数值远优于 0.6@36.5lp/mm,合理的公差分配使系统加工难度降低,装调检测更加方便容易。

关 键 词:离轴三反光学系统;初始结构计算;偶次非球面;公差分析

中图分类号: O435.2; O439 文献标识码: A

DOI:10.13741/j.cnki.11-1879/o4.2020.02.011

Optical system design of off-axis three mirror for static and dynamic target simulation

WANG Zhiqiang¹, CHANG Yanhe^{1*}, WANG Chunyan¹, SUN Hao^{1,2}, LI Yuanyuan¹, AN Wenqiang³

College of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China)
 (2. State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics

and Physics, Chinese Academy of Science, Changchun 130033, China)

(3. Equipment Support Center of Aerospace Systems, Strategic Support Force, Beijing 100053, China)

Abstract: Based on the theory of monochromatic aberration, the initial structural parameters of the coaxial three-mirror optical system are determined. By balancing the higher-order terms of an even aspheric surface with a quadratic surface coefficient of 0, the asymmetric aberration caused by an off-axis system is corrected. Combined with DMD (Digital micromirror device) target generator, a collimator with off-axis three mirror optical system is designed to provide indoor simulation target for the tested photoelectric equipment. The design index of the optical system is working band is $0.2 \sim$ 1.2μ m, the effective focal length is 3000mm, all field of view is 2°, F number is 8. The results show that the wavefront aberration of all field of view of the optical system is better than $\lambda/34$ (the main wavelength is 0.6328μ m), and the MTF value of the optical system is better than 0.71 at 36.51p/mm, which is close to the diffraction limit, and the imaging quality of the optical system is good. The tolerance analysis results of the optical system show that the MTF value of the optical system is much better than 0.6 at 36.51p/mm, and the reasonable tolerance distribution makes the system less difficult to process and easier to install and test.

Key words: off-axial three-mirror system; initial structure solution; even aspheric surface; tolerance analysis

基金项目: 吉林省科技厅重点研发项目(192487GX010560075)

作者简介:王志强(1990-),男,硕士研究生,从事先进光学设计及新型成像技术。969204166@qq.com

常艳贺(1982—),男,讲师,硕士生导师,博士,从事光学设计与制造方面的研究。

* 通讯作者: 56219529@qq. com

收稿日期: 2019-12-30; 收到修改稿日期: 2020-02-19

0 引 言

随着科学技术的突飞猛进,未来战争当中坦克 能够在运动状态下对敌人目标的快速反应和精准打 击,是其消灭敌人保全自己必不可少的能力。坦克 的射击精度受到炮弹、火炮和复杂的数字化火控系 统等诸多因素的影响,保证炮管定向的实时性和准 确性是最终射击精度的必要保障。传统的室外实体 靶标检测技术已经无法满足坦克上承载的被检测光 电设备的设计优化、性能评估和精度检测等诸多需 求。采用室内炮管定向精度测试技术与动态目标模 拟系统的有机结合,可以大幅度降低诸多不必要因 素的干扰,加快科研工作进度,节约试验成本。显 然,将室内动态目标模拟技术付诸实用会有明显的 科研价值和技术经济效益。

为了进一步提升军事及民事领域当中被测光电 设备对静、动态目标的实时搜寻、精准标定和快速反 应能力,可以将高帧频数字微镜器件(Digital Micromirror Device, DMD)^[1]作为目标生成器与采用 离轴反射光学系统的平行光管相结合,实现静、动态 目标模拟^[2]。离轴反射光学系统克服了同轴反射系 统存在的中心挡光这一缺点,使得系统视场范围、口 径尺寸可以进一步加大,同时反射系统的光路折转 也使得系统结构可以实现紧凑化、轻量化。

本文依据高斯公式、三级像差理论^[3-7]和相关 限制条件,选择出同轴三反光学系统的初始结构类 型,通过改变孔径离轴量和视场倾斜角的方式,达到 离轴效果,同时对相关镜面引入偶次非球面面形^[8], 设计出了一款离轴三反光学系统^[9,10]。本设计对后 续工作中的炮管动态模拟目标影像获取、炮管定向 精度检测和摇摆台稳定性检测具有十分重要的意 义。

1 同轴三反光学系统像差理论

当前,离轴三反光学系统设计的方便有效的途径就是在同轴三反光学系统的基础上,通过视场离轴、孔径离轴或视场离轴和孔径离轴相结合的三种方式来实现。本文选用 COOK 型同轴三反光学系统^[11],如图1所示,其相对于存在中间一次成像的RUG 同轴系统,具有镜面加工、装调和检测难度较低的优点。

在图 1 中, M_i 表示第 *i* 个镜面、 h_i 表示第 *i* 个镜 面的半口径、 r_i 表示第 *i* 个镜面的顶点曲率半径、 d_i 表示第 *i* 面与第 *i* +1 面的间距、 $-e_i^2$ 表示第 *i* 个镜



图 1 同轴三反光学系统初始结构

面的二次曲面系数、 $-f'_1$ 表示主镜的焦距、 $-l_2$ 表示次镜的物距、 l'_2 表示次镜的像距、 l_3 表示三镜的物距、 $-l'_3$ 表示三镜的像距、 u_2 表示次镜的物方孔 径角、 u'_2 表示次镜的像方孔径角、 u_3 表示三镜的物 方孔径角、 u'_3 表示三镜的像方孔径角(i=1,2,3, f) 别表示主镜、次镜和三镜)。

同轴三反光学系统当中存在遮拦比,其中 α₁、α₂ 分别表示次镜对主镜的遮光比、三镜对次镜的遮光 比,β₁、β₂ 分别表示次镜对主镜的放大率、三镜对次 镜的放大率^[12],表示为

$$\begin{cases} \alpha_{1} = \frac{l_{2}}{f_{1}'} \approx \frac{h_{2}}{h_{1}} \\ \alpha_{2} = \frac{l_{3}}{f_{2}'} \approx \frac{h_{3}}{h_{2}} \\ \beta_{1} = \frac{l_{2}'}{l_{2}} = \frac{u_{2}}{u_{2}'} \\ \beta_{2} = \frac{l_{3}'}{l_{3}} = \frac{u_{3}}{u_{3}'} \end{cases}$$
(1)

对于反射光学系统而言, $n_1 = n'_2 = n_3 = 1$, $n'_1 = n_2 = n'_3 = -1$,其中 n_i , n'_i 分别表示第i镜面的物方 折射率和像方折射率(i = 1, 2, 3, 7分别表示主镜,次 镜和三镜)。运用高斯公式和归一化法处理后, $h_1 = 1$,f' = 1, $\theta = -1$,其中 θ 为半视场角(用弧度表示), 求得同轴三反光学系统初始结构参数 r_i , d_i 、 $-e_i^2$, 表示为

$$\begin{cases} r_{1} = \frac{2f'}{\beta_{1}\beta_{2}} \\ r_{2} = 2\alpha_{1} \frac{f'}{(1+\beta_{1})\beta_{2}} \\ r_{3} = 2\alpha_{1}\alpha_{2} \frac{f'}{1+\beta_{2}} \\ d_{1} = (1-\alpha_{1}) \frac{f'}{\beta_{1}\beta_{2}} \\ d_{2} = \alpha_{1}(1-\alpha_{2}) \frac{f'}{\beta_{2}} \\ d_{3} = l'_{3} = \alpha_{1}\alpha_{2} f' \end{cases}$$

$$(2)$$

由三级像差理论可知,球差 S₁、彗差 S₁、像散 S₁、场曲 S₁、表示为

193

$$\begin{cases} S_{1} = \frac{1}{4} \left[(e_{1}^{2} - 1)\beta_{1}^{3}\beta_{1}^{3} - e_{2}^{2}\alpha_{1}\beta_{2}^{3}(1 + \beta_{1})^{3} + e_{3}^{2}\alpha_{1}\alpha_{2}(1 + \beta_{2})^{3} + \alpha_{1}\beta_{2}^{3}(1 + \beta_{1})(1 - \beta_{1}) - \alpha_{1}\alpha_{2}(1 + \beta_{2})(1 - \beta_{2})^{2} \right] \\ S_{II} = \frac{e_{1}^{2}(1 - \alpha_{1})\beta_{1}^{2}\beta_{2}^{2}}{4\alpha_{1}} + \frac{e_{3}^{2}(1 - \alpha_{1})(1 + \beta_{2})^{3}}{4\beta_{1}} - \frac{(1 - \alpha_{1})\beta_{1}^{2}\beta_{2}}{4\beta_{2}} - \frac{(1 - \alpha_{2})(1 + \beta_{1})(1 - \beta_{2})^{2}}{4\beta_{2}} - \frac{1}{2} \\ S_{III} = \frac{e_{1}^{2}(\alpha_{1} - 1)^{2}\beta_{1}\beta_{2}}{4\alpha_{1}^{2}} - \frac{(\alpha_{1} - 1)^{2}\beta_{1}\beta_{2}}{4\alpha_{1}^{2}} + \frac{e_{3}^{2}(1 - \alpha_{2})^{2}(1 + \beta_{2})^{3}}{4\alpha_{1}\alpha_{2}\beta_{2}^{2}} - \frac{(1 - \alpha_{2})(1 - \beta_{2})^{2}}{\alpha_{1}\alpha_{2}\beta_{2}} - \frac{(1 - \alpha_{2})(1 - \beta_{2})^{2}}{\alpha_{1}\alpha_{2}\beta_{2}} - \frac{(1 - \alpha_{2})(1 - \beta_{2})^{2}}{\alpha_{1}\alpha_{2}\beta_{2}} - \frac{\beta_{1}\beta_{2}}{\alpha_{1}} + \frac{\beta_{2}(1 + \beta_{1})}{\alpha_{1}} - \frac{1 + \beta_{2}}{\alpha_{1}\alpha_{2}} \\ S_{IV} = \beta_{1}\beta_{2} - \frac{\beta_{2}(1 + \beta_{1})}{\alpha_{1}} + \frac{1 + \beta_{2}}{\alpha_{1}\alpha_{2}} \end{cases}$$
(3)

2 离轴三反光学系统设计

2.1 设计指标

本光学系统在 0. $2 \sim 1.2 \mu m$ 光谱范围内,采用 由型号为 V-7001 的 DMD(数字微镜器件)为光电 设备的性能检测生成动态模拟目标源,其微镜间距 大小约为13.7 μ m。在室内通过承载被检测光电设 备的摇摆台摆角活动范围、平行光管的通光口径及 其平行光管的间距,确定了本光学系统设计的视场 为 2° 。考虑 DMD 性能、被检测光电设备活动范围、 被检测模拟目标辐亮度等因素之后,确定光学系统 的光圈数 F 为 8,其中 DMD 的相关性能与系统像 质并列地成为影响光学系统设计指标的决定性因 素,具体设计指标如表 1 所示。

设计指标	参数值
光波波段 /μm	0.2~1.2
F 数	8
有效焦距/mm	3000
全视场 /(°)	2
入瞳直径/mm	375
传递函数 MTF@36.5lp/mm	≥0.6

表1 光学系统主要设计指标参数表

2.2 设计思想

光学系统的总体设计参数如表 1 所示。在本光 学系统结构的选型方面,透射式光学系统受到加工 材料尺寸、适用光谱范围、应用环境温度等诸多因素 干扰,同轴反射光学系统存在中心挡光这一缺点,明 显地降低系统视场大小和光束能量利用率。就消像 194 根据设计指标要求,本论文选择 COOK 型离轴 三反射式光学系统,并且以次镜为光阑位置,各反射 镜的光焦度分配呈负、正、负分布,主要通过主、三镜 的协调优化来完成。光学系统结构结接近对称式分 布,便于实现大视场的指标要求。其既解决了同轴 反射光学系统存在的中心挡光这一缺点,又降低具 有中间一次成像的离轴反射光学系统的设计难度。 2.3 设计过程

2.3.1 初始结构参数计算

球差与有效通光口径相关,校正较为容易,令 $S_{I} = 0$,且主镜为抛物面,即 $-e_{1}^{2} = -1$,经过整理之后,可表示为

$$\alpha_{2} (1+\beta_{2}) (1-\beta_{2})^{2} - \beta_{2}^{3} (1+\beta_{1}) (1-\beta_{1})^{2} + e_{2}^{2} \beta_{2}^{3} (1+\beta_{1})^{3} - e_{3}^{2} \alpha_{2} (1+\beta_{2})^{3} = 0$$

$$(4)$$

上式与光学系统的 α_1 无关,设定 $\beta_1\beta_2 = 1$ 并将 式(4)进一步整理,表示为

$$e_{3}^{2} = \frac{e_{2}^{2}}{\alpha_{2}} + \left(1 - \frac{1}{\alpha_{2}}\right) \left(1 - \frac{2}{\beta_{2} + 1}\right)^{2} \tag{5}$$

式中,当 α_2 逼近于1时,即次镜与三镜之间的传播光 束逼近于平行光束,既可以使得 $e_2^2 \approx e_3^2$,又可以使 得 β_2 降低到足够小。为了使系统具有合理的结构, 则 β_1 必须足够大。选取 $S_{II} = S_{III} = 0$,整理之后的可 表示为

$$\begin{cases} e_{2}^{2} = \frac{(\alpha_{1} + 1)[\beta_{1}(\alpha_{2} - 1) - 2]}{\beta_{1}(\alpha_{1} - 1)(\alpha_{2} - 1)} \\ e_{3}^{2} = \frac{[\beta_{1}(\alpha_{2} - 1) - 2][\alpha_{1} + 1 - \beta_{1}(\alpha_{2} - 1)]}{\beta_{1}(\alpha_{2} - 1)[\alpha_{1} - 1 - \beta_{1}(\alpha_{2} - 1)]} \end{cases}$$
(6)

式中,仅当 $\beta_1(\alpha_2-1)-2=0$ 时, $e_2^2=e_3^2=0$ 。本文选 取 $f_1'=3000$ mm, $\beta_1=-500$, $\beta_2=-0.002$, $\alpha_2=0.996$,同时设定与光学系统轮廓参数 α_1 为变量。 运用MATLAB软件对式(2)进行编程,通过改变 α_1 数值大小,观察光学系统结构参数变化趋势,具体 结果如表 2 所示。

表 2 初始结构参数计算列表

α1	r_2/mm	r_3/mm	d_1/mm	d_2/mm	$d_1 + d_2/\mathrm{mm}$
0.320	-1923.848	-1916.152	-2040.000	1920.000	-120.000
0.330	-1983.968	-1976.032	-2010.000	1980.000	-30.000
0.333	-2002.004	-1993.996	-2001.000	1998.000	-3.000
0.334	-2008.016	-1999.984	-1998.000	2004.000	6.000
0.335	-2014.028	-2005.972	-1995.000	2010.000	15.000
0.336	-2020.040	-2011.960	-1992.000	2016.000	24.000
0.339	-2038.076	-2029.924	-1983.000	2034.000	51.000

2.3.2 初始结构选取及优化

在表 2 中,本文选择 $\alpha_1 = 0.333, d_1 + d_2 = -3$, 即主镜与三镜的母镜顶点接近,为实现离轴三反光 学系统的主、三镜母镜顶点重合降低优化难度,同时 设定次镜和三镜的面形均为球面面形,降低同轴三 反光学系统初始结构的复杂程度。利用光学设计软 件 ZEMAX 软件对同轴三反光学系统初始结构进



行多次优化之后,结果如表3所示。

表 3 同轴三反系统的初始参数

	面型	曲率半径/mm	间距 /mm	二次曲面系数
主镜	非球面	-4670.214	-1800.000	-1
次镜	球面	-1063.947	1387.255	0
三镜	球面	-1385.456	-698.161	0



(b) 系统 MTF 曲线图

图 2 优化后的同轴三反光学系统像质评价

在图 2 中,优化后的同轴三反光学系统点列图 显示各视场的半径均方根值均大于艾力斑半径, MTF 曲线图显示 MTF 曲线与衍射极限并不重合。 通过孔径离轴与视场离轴相结合的方式,对同轴三 反光学系统进行离轴,优化之后的系统像质并不良 好。在此基础上,将主镜和三镜面形设定为二次曲 面系数为 0 的偶次非球面面形,二次曲面系数为 0 可以降低反射镜的加工、装调难度,高次项系数之间 的协调有效地校正光学系统的各阶像差,从而提高 像质,便于达到光学系统的设计指标^[13],同时能够 使得复杂光学系统在结构方面得以简化^[14]。

运用 ZEMAX 软件设定不同的系统结构参数

为变量,及设定不同的优化操作数及其权重,经过多次重复性优化之后,最终的离轴三反光学系统光路 图如图 3 所示,其中 PM(主镜)、SM(次镜)和 TM (三镜)的具体结构参数如下表 4 所示。



图 3 离轴三反光学系统光路图

表 4

	面型	曲率半径/mm	间隔/mm	四阶项	六阶项	机械口径 /mm	Y 方向离轴量/mm
主镜	偶次非球面	-5928.211	-1730.000	8.259 $\times 10^{-13}$	5.269 $\times 10^{-21}$	590	452
次镜	球面	-1877.456	1730.000	0	0	170	100
三镜	偶次非球面	-2730.442	-1800.000	-1.179×10^{-12}	5.724×10^{-20}	440	-256

3 像质评价

由图 4(a)可知,各视场弥散斑的均方根半径 (RMS Radius)最大值为 1.861 μ m,小于本设计所选 择的 DMD 的微镜半间距的 1/6,同时弥散斑的几何 半径(GEO Radius)的最大值为 5.805 μ m,小于艾里 斑半径(Airy Radius) 6.23 μ m。由图 4(b)可知,在 系统有效光谱范围内,各视场的 MTF 曲线在各空 间频率处均接近光学系统的衍射极限曲线,且在对 应的截止频率 36.5lp/mm 处,MTF 值远优于。由 图 4(c)可知,系统在辐射半径为 10μ m 包圈范围内, 所有波长在不同视场下的最小能量百分比大于 88%,与图 4(d)PSF(点扩散函数)共同反映出本光 学系统的能量集中度良好。光学系统的中心波长在 不同视场下的最大波前差 RMS 值为0.0291 λ ,小于 $\lambda/34(\lambda=0.6328\mu$ m),如表 5 所示。综合分析,光学

195



系统成像质量良好,满足系统设计指标要求。

表 5 不同视场波前差的 RMS 值(主波长 $\lambda = 0.6328 \mu m$)

x/(°)	y/(°)	RMS/λ
0	-1	0.0235
0	0	0.0174
0	1	0.0266
1	-1	0.0271
1	0	0.0206
1	1	0.0291

4 公差分析

公差分析是对光学系统实用性能评价的重要环 节。光学系统的误差源主要来自于以下三个方面, 加工误差主要针对反射镜顶点曲率半径(*R*),非球 面系数(-*e*²);面形不规则误差主要是由反射镜面 上存在的较小缺陷造成影响光学系统成像质量的误 差;装配误差主要针对装配过程中,机械轴相对于光 轴的倾斜(TILT)和偏心(DEC)和厚度(D)引起的 误差。

本文采用 Monte-Carlo 分析方法对光学系统进 行公差分析,通过缩小对像质影响较大的误差源的 公差范围,较大程度地加大对像质影响较小误差源 的公差范围,为后续的加工和装调过程提供足够的 196

图 4 离轴三反光学系统像质评价参考图

调整范围,达到减少投资成本,降低装配难度,满足 设计要求的效果。运用 Monte-Carlo 分析方法统计 分析 2000 个样本之后,具体的公差分配结果如表 6 所示,得到的公差分析结果如表 7 所示,在截止频率 36.5lp/mm处,有 100%系统满足 MTF 大于0.6的 光学系统设计指标要求。

表 6 光学系统公差分配结果

公差类别	装配误差				ţ	加工误	差
各项 公差源	$ ext{DEC} X/ ext{mm}$	DEC Y/mm	TILT $X(')$	TILT Y(")	ΔD /mm	ΔR /mm	$\Delta(-e^2)$
主镜	± 0.075	± 0.12	± 2.1	± 14.4	± 0.4	± 0.3	± 0.004
次镜		_			± 0.4	± 0.3	_
三镜	± 0.3	± 0.1	±3	±18	± 0.4	± 0.3	± 0.004

表 7 光学系统的公差分析结果

百分比/%
100
90
80
50
20
10

5 结 论

本文基于三级像差理论,推导出同轴三反光学 系统轮廓参数之间的关系,运用 MATLAB 软件详 细计算出初始结构参数,从三个反镜面同轴,且主、 三镜的母镜相切的限制条件出发,选择出最佳的同 轴三反光学系统初始结构,采用孔径离轴和视场离 轴相结合的方式,达到离轴效果,同时对主、三镜引 入非球面,最终设计出一款基于偶次非球面的离轴 三反光学系统。系统当中各视场对应的 MTF 曲线 均接近光学系统的衍射极限,成像质量良好。通过 对系统进行合理地公差分配,其公差分析结果为,在 截止频率36.5lp/mm处,有100%系统的MTF优于 0.619, 既实现了光学设计指标要求, 又通过光路折 转有效地压缩系统体积,解决了光学系统结构紧凑、 成本降低和易装调的实际问题。由本光学系统、 DMD 目标生成器和计算机组合的平行光管,可以 为军事或民事领域中,光电设备的实时反应、准确搜 索等性能检测提供静、动态室内模拟目标源,具有极 大地工程应用价值。

参考文献:

- [1] 冯维,曲兴华,王惟婧,等.基于数字微镜成像系统的响应曲线标定方法研究[J].光学学报,2018,38(04):176—182.
 Feng Wei, Qu Xinhua, Wang Weiqing, et al. Research on response curve calibration method of imaging system based on digital micromirror device[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(04): 176—182.
- [2] 高泽东,朱院院,高教波,等. 动态红外三角形目标及干扰模拟 技术研究[J]. 应用光学,2013,34(02):341—348.
 Gao Zedong, Zhu Yuanyuan, Gao Jiaobo, et al. Simulation technology of dynamic infrared triangle target with decoy[J].
 Journal of Applied Optics,2013,34(02):341—348.
- [3] 李林,黄一帆,王涌天.现代光学设计方法[M].北京:北京理 工大学出版社,2015.

Li Lin, Huang Yifan, Wang Yongtian. Modern optical design [M]. Beijing:Beijing Institute of Technology Press, 2015.

[4]陈哲,张星祥,陈长征,等. 高分辨率共孔径同轴三反光学系统
[J].中国激光,2015,42(11):310—316.
Chen Zhe, Zhang Xingxiang, Chen Changzheng, et al. A common aperture coaxial three-mirror optical system with high reso-

lution[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42, (11): 310-316.

[5] 刘军, 刘伟奇, 康玉思, 等. 大视场离轴四反射镜光学系统设计

[J]. 光学学报,2013,33(10):235-240.

Liu Jun, Liu Weiqi, Kang Yusi, et al. Optical design of off-axis four-mirror optical system with wide field of view[J]. Acta Optica Sinica,2013,33(10):235-240.

- [6] Seidl K, Knobbe J, Gruger H, et al. Design of an all-reflective unobscured optical-power zoom objective[J]. Applied Optics, 2009,48(21):4097-4107.
- [7] 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]. 激光与光电子学进展,2015,52,112201.
 Yu Xin, Zhang Bao, Hong Yongfeng. A method for solving the initial structure of an off-axis tri-reflection system[J]. Progress in Laser and Optoelectronics, 2015,52,112201.
- [8] 张峰. 高精度离轴凸非球面反射镜的加工及检测[J]. 光学精密 工程,2010,18(12):2557—2563.
 Zhang Feng. Fabrication and testing of precise off-axis convex aspheric mirror[J]. Optics and Precision Engineering,2010,18 (12):2557—2563.
- [9] Zhong Yi, Gross Herbert. Initial system design method for nonrotationally symmetric systems based on gaussian brackets and Nodal aberration theory[J]. Optics express, 2017, 25(9):10016—10030.
- [10] 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(06):803—808.
 Sun Yongxue, Xia Zhengtao, Han Haibo, et al. Design and tolerance analysis of infrared off-axis three-mirror optical system with large aperture[J]. Journal of Applied Optics,2018, 39(06):803—808.
- [11] 李旭阳, 倪栋伟,杨明洋. 基于自由曲面的大视场空间相机光 学系统设计[J]. 光子学报,2018,47(09):0922003.
 Li Xuyang, Ni Dongwei, Yang Mingyang. Design of large field of view space camera optical system based on freeform surfaces
 [J]. Acta Photonica Sinica,2018,47(09):0922003.
- [12] 潘君骅. 光学非球面的设计加工与检验[M]. 江苏:苏州大学 出版社, 2004.

Pan Junhua. The design, manufacture and test of the aspherical optical surfaces[M]. Jiangsu: Soochow University Press, 2004.

[13] 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.

 [14] 孟晓辉,王永刚,李文卿,等. Φ420mm 高次非球面透镜的加 工与检测[J]. 光学精密工程,2016,24(12):3068—3075.
 Meng Xiaohui, Wang Yonggang, Li Wwenqin, et al. Fabricating and testing of Φ 420mm high-order aspheric lens[J]. Optics and Precision Engineering,2016,24(12):3068—3075.