轻小型大视场自由曲面离轴光学系统设计

赵宇宸,何 欣,张 凯,刘 强,崔永鹏,孟庆宇

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,吉林 长春 130033)

摘 要: 随着空间技术的不断发展,高性能、低成本的轻小型空间光学系统成为空间光学领域一个新的研究热点。离轴三反光学系统具有成像质量高、大视场、轻量化程度高等特点,能够更好地适应轻小型、低成本空间光学系统的应用要求,具有广泛的应用前景。以高斯光学和三反消像差理论为基础,设计了一款第三反射镜为自由曲面的离轴三反光学系统,焦距 1 550 mm,视场 3.6°×0.45°,相对孔径 1:6.2,自由曲面的加入极大地提高了系统设计自由度和成像质量。设计结果表明,在有效视场内系统成像质量良好,f_{MTF} 优于 0.43@111 lp/mm,系统最大波像差为 0.049 λ(λ=632.8 nm),平均波像差 RMS 值为 0.034 λ,最大网格畸变 0.9%,成像质量相对于子午面完全对称。系统的总长小于 f′/3.1,高度小于 f′/4.1,且系统的加工和装配公差较为宽松,易于实现。该设计结果对轻小型空间光学系统的设计具有一定的参考价值。

关键词: 光学设计; 离轴三反系统; 自由曲面; 公差分析

中图分类号: O439 **文献标志码:** A DOI: 10.3788/IRLA201847.1218001

Optical design of miniaturized and large field of view off-axis optical system based on freeform surface

Zhao Yuchen, He Xin, Zhang Kai, Liu Qiang, Cui Yongpeng, Meng Qingyu

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: With the increasing development of space technology, space optical system with the characteristics of high-performance, miniaturization has become a new hotspot research in space optical fields. Off-axis three-mirror optical system has the advantage of high quality image, large field of view and high level of lightweight etc., which can better suit the application of miniaturized and low-cost space optical system and has broad application prospects. Based on the Gaussian optics and three-mirror aberration theory, the off-axis three-mirror with freeform surface of tertiary mirror was designed. The focal length was 1 550 mm, field of view was 3.6°×0.45°, relative aperture was 1:6.2, degrees of freedom and image quality were increased efficiently by the introduction of freeform surface. The design results show that system has a better performance in effective field of view, modulation transfer function value is above 0.43@111 lp/mm, wave-front error maximum value is 0.049 λ (λ=632.8 nm), RMS

收稿日期: 2018-07-17; **修订日期:** 2018-08-19

基金项目: 国家自然科学基金(61705220)

作者简介: 赵宇宸(1986-),男,助理研究员,博士,主要从事空间光学系统设计及杂散光分析方面的研究。

Email: bernard19@163.com

wave-front error value is 0.034 λ, maximum grid distortion value is 0.9%, and the imaging quality is complete symmetrical about the tangential plane. The total length of the optical system is less than f′/3.1, the height is less than f′/4.1, and is easily implemented because of the relatively loose tolerance about processing and assembling. The obtained results have a certain reference value for miniaturized space optical system.

Key words: optical design; off-axis three-mirror system; freeform surface; tolerance analysis

0 引 言

在遥感领域中,空间光学系统的角色至关重要,是卫星的重要载荷之一。随着空间技术的不断发展,人们对空间光学系统分辨率、幅宽、成像质量及低成本等要求不断提高,轻小型空间光学系统可以在高成像质量的前提下,利用卫星的机动性能实现大范围机动成像,这也使得轻小型、低成本、高分辨率空间光学系统以一种全新的概念和崭新的设计思想成为空间遥感领域一个新的研究热点[1]。反射式光学系统凭借其温度稳定性高、长焦距、无色差、光谱范围广等优点,在航天、航空领域得到了广泛的应用[2-3]。目前,以 SkySat、NanoEye、Kstrel Eye、SATAS 等为代表的一系列轻小型空间光学系统均采用反射式光学结构[4]。

目前空间应用较多的反射式光学系统主要包括同轴三反(Three-Mirror Coaxis,TMC)系统及由同轴反射式系统演变而来的离轴三反 (Three-Mirror Anastigmat,TMA)系统,而离轴三反系统除了具有反射式光学系统的特点外,还具有大视场、能量集中度高、无中心遮拦等优点,因此得到了越来越多的关注[5-6]。然而,随着人们对空间光学系统分辨率、幅宽、体积、质量等需求的不断提高,采用传统球面或非球面面形的离轴三反光学系统由于设计自由度有限,很难满足大视场与轻小型的应用需求。因此,如何在高分辨率、高成像质量的前提下增大系统视场并保证系统结构紧凑, 成为轻小型空间光学系统中一个亟需解决的问题。

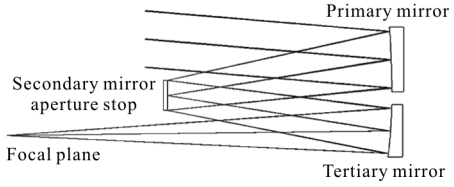
自由曲面光学元件是随着计算机运算能力及光学加工水平不断提高而产生的一种新型式的光学面形, 国内外已有多家科研机构对此展开了深入的研究:Fuerschbach K 等使用 Zernike 多项式自由曲面设计了一款离轴三反光学系统,视场为 10°[7];清华大学在 2014 年设计并制造了一款离轴三反光学系统,视场为 4°×5°,入瞳直径为 Φ100 mm[8];中国科学院长春光学精密机械与物理研究所在 2012 年研制了一款采用 Zernike 多项式自由曲面的离轴四反光学系统,该系统的视场达到 76°[9]。自由曲面主要是指非旋转对称的光学面形, 该面形具有较高的轴外视场像差矫正能力, 并为光学系统提供更多的设计自由度[8]。

文中首先对离轴三反光学系统的结构形式进行了分析, 并通过高斯光学和三反射消像差理论,计算得到了具有中间像面的离轴三反光学系统的初始结构。在初始结构的基础上,设计了一种基于 **X-Y** 多项式自由曲面的轻小型大视场离轴三反光学系统,并对设计数据及结果进行了详细分析。该系统对空间光学系统设计具有一定参考价值,适合作为轻小型、高分辨率、大视场线阵推扫对地成像光学系统。

1 光学结构分析

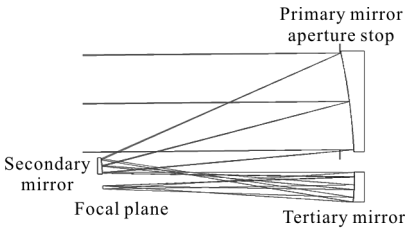
空间光学领域常用的离轴三反光学系统主要可以分为两种类型: 无中间像面的 Cook 型 (Cook-TMA),如图 1(a)所示;具有中间像面的 Rug 型(Rug-TMA),如图 1(b)所示[6]。

Cook-TMA 系统没有中间像面, 采用视场离轴的方式消除中心遮拦。系统孔径光阑位于次镜,主镜、三镜相对于次镜对称,这种结构有利于轴外视场



(a) Cook-TMA 光学系统

(a) Cook-TMA optical system



(b) Rug-TMA 光学系统

(b) Rug-TMA optical system

图 1 光学系统图

Fig.1 Optical system configuration

的像差矫正,因此 Cook-TMA 系统可以获得较大的成像视场,且容易实现像方远心。从 Cook-TMA 系统的结构图可以看出,主镜、三镜位于孔径光阑(次镜)两侧,其横向尺寸相当于各视场子孔径投影尺寸,反射镜通常为长条矩形结构,因此视场的增大必然导致反射镜横向尺寸的增加。同时,随着系统焦距和 **F#** 的增加,主镜、次镜间隔及主镜、三镜的离轴量也会随之增加,导致系统体积和加工装调难度增大。

Rug-TMA 系统具有中间像面(位于次镜、三镜之间),孔径光阑位于主镜前或系统的入瞳处,采用孔径离轴的方式消除中心遮拦。Rug-TMA 系统可以视为同轴系统的离轴部分, 主镜通常采用圆形或方形结构, 因此该系统继承了同轴系统结构紧凑的优点, 而中心遮拦的移除也使得该系统成像质量和视场明显提高, 同时该系统可以在中间像面位置放置视场光阑,极大地提高了系统的杂散光抑制能力。然而, 该系统的结构特点导致离轴镜面的非球面度往往成倍于同轴系统, 在一定程度上增加了系统的加工、检测及装调难度。

对于轻小型空间光学系统而言, 反射镜的轻量化水平也是评价系统性能的重要指标之一。目前空间应用的反射镜材料主要为 SiC 或低膨胀系数的微晶玻璃,在反射镜面形精度较高、结构为圆形或方形且轻量化程度较高的情况下, 反射镜的镜厚比可以达到 15,而长条矩形反射镜在同等条件下却很难达到这样的轻量化水平。

通过上文的分析可以看出,Rug-TMA 结构具有较高的成像质量和轻量化水平, 并继承了同轴系统结构紧凑的优点, 同时可以利用卫星的机动性能大幅提高系统的成像幅宽, 弥补该结构与 Cook-TMA 结构相比在视场上的不足,更好地平衡系统像质、视场与整体尺寸、质量之间的关系。

2 光学系统设计

2.1 光学系统参数

Rug-TMA 系统的初始结构是由同轴三反光学系统经过孔径和视场离轴演变而来, 文中所采用的同轴初始结构如图 2 所示, 该初始结构的分析与计算方法在诸多文献中都有详细的介绍, 在此不再赘述[10-11]。

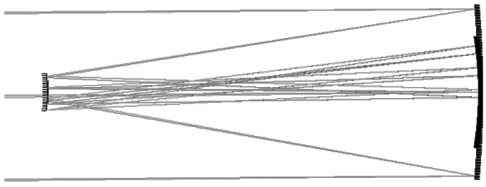


图 2 同轴初始结构

Fig.2 Coaxial initial configuration

空间光学系统性能参数主要是由轨道高度 **H**、地面覆盖宽度 **W**、像元尺寸 α 和地面像元分辨率 $\mathbf{g_{GSD}}$ 所决定。各参数之间的关系可以表示为[12]:

$$f=\mathbf{H}\times\alpha/\mathbf{g_{GSD}} \tag{1}$$

$$\theta_\alpha=\alpha/f \tag{2}$$

$$\theta_0=1.22\lambda/\mathbf{D} \tag{3}$$

$$\mathbf{W}=2\mathbf{H}\times\tan(\omega/2) \tag{4}$$

$$f_{MTFstatic}(\rho\mathbf{N})=f_{MTF\alpha}\times f_{MTFe}\times f_{MTFd}(\rho\mathbf{N})\times f_{MTFs}(\rho\mathbf{N}) \tag{5}$$

式中:f 为光学系统焦距;θ_α 为像元角分辨率;θ_0 为光学系统角分辨率;λ 为系统的工作波长;**D** 为系统口径;ω 为视场;$f_{MTFstatic}(\rho\mathbf{N})$为系统在奈奎斯特频率 $\rho\mathbf{N}$ ($\rho\mathbf{N}=1/2\alpha$)处的静态调制传递函数;$f_{MTF\alpha}$ 为系统的加工装调传函,通常取 0.85;f_{MTFe} 为电子学传函,通常取 0.9;$f_{MTFd}(\rho\mathbf{N})$为系统在奈奎斯特频率处的设计传函;$f_{MTFs}(\rho\mathbf{N})$为系统的采样传函,通常取 0.64。这里需要注意的是,公式(2)表示光学系统在像元尺寸和焦距一定时像元的角分辨率, 而在光学设计过程中要求 θ_0 要大于 θ_α,从而通过公式(2)、(3)即可求出满足设计要求的光学系统口径。根据相应参数,可以得到系统的设计参数如表 1 所示。

表1 光学系统设计参数

Tab.1 Design parameters of optical system

Parameters	Value
Spectral band/μm	0.48-0.78
Focal length/m	1.55
F#	6.3
Field of view/(°)	3.6×0.45
f_{MTFd}	≥0.408
α/μm	4.5
g_{GSD}/m	1.5
H/km	500

2.2 自由曲面分析

在光学领域中,自由曲面是指无法用球面或者非球面系数进行表示的一种非旋转对称光学表面面形的集合。相比于传统的光学表面,自由曲面可以为光学系统提供更多的设计自由度,更好地矫正系统轴外像差,提高系统的成像质量和空间布局的灵活性。

目前成像光学系统中常用的两种自由曲面表达式为 Zernike 多项式和 X-Y 多项式。其中:Zernike 多项式具有在单位圆内部正交的特点, 各项与几何像差之间存在对应关系且不会相互干扰[13];X-Y 多项式虽然是一种非正交表达式,但该表达式与 Zernike 多项式之间具有互换关系, 对于光学面形的表征能力与正交表达式相同,同时 X-Y 多项式与数控机床加工表达式一致, 随着金属反射镜在空间应用的不断深入,基于 X-Y 多项式的自由曲面光学元件也具有广泛的应用前景[14]。

基于前文所研究的 Rug-TMA 系统的初始结构,在轻小型离轴三反光学系统中选择了 X-Y 多项式自由曲面面形进行系统设计, 其面形表达式如公式(6)所示:

$$Z=\frac{cr^2}{1+\sqrt{1-(1+k)c^2r^2}}+\sum_{i=1}^{N}A_iE_i(x,y) \qquad (6)$$

式中:c 为曲率半径;r 为径向坐标;k 为二次曲面系数;N 为多项式序列;A_i 为多项式系数;$E_i(x,y)$为多项式像差项表达式。

Rug-TMA 系统在 X 轴方向(弧矢方向)具有较大的线视场,反射镜为离轴镜,镜面相对于子午面对称,在引入 X-Y 多项式时并非所有像差项都可以作为变量进行优化。X-Y 多项式的像差项按照函数的奇偶对称性可以分为四类,即关于 X 轴奇对称、关于 X 轴偶对称、关于 Y 轴奇对称和关于 Y 轴偶对称。根据系统的结构对称特点, 在优化过程中不能采用关于 X 轴奇对称的像差项进行优化, 这样可以保证设计优化后的成像质量相对于子午面对称。

3 系统优化设计与分析

3.1 系统优化设计

在初始结构的基础上,将 X-Y 多项式自由曲面面形应用于系统中, 可以优化得到孔径光阑位于主镜前的 Rug-TMA 系统,如图 3 所示。系统主镜为椭球面,次镜为双曲面,三镜为自由曲面。通过增加自由曲面光学元件, 可以实现在增大视场的基础上更好地矫正轴外像差, 以保证系统在全视场范围内均具有良好的成像质量。各反射镜参数如表 2 所示,三镜自由曲面面形参数如表 3 所示。

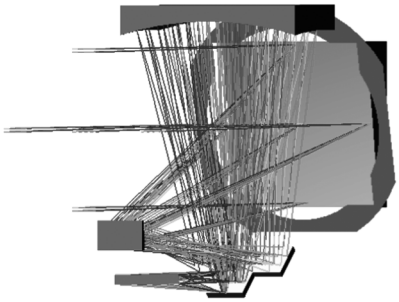


图 3 光学系统结构图

Fig.3 Optical system configuration

表 2 光学系统参数

Tab.2 Parameters of optical system

Mirror	Surface type	Radius/mm	Distance/mm	Conic	Size/mm²
PM	Conic	-1 181.601	-500	-0.871	220×220
SM	Conic	-352.691	640	-4.643	66×40
TM	X-Y polynomial	-576.305	-570.6	-0.279	267×106

系统光路图如图 4 所示, 地面目标光线经过主镜(1)、次镜(2)后形成一次像面,这种结构有利于视场光阑的设计与安装。为了减小系统的轴向尺寸,在一次像面后增加反射镜(3),将三镜(4)折转至主镜上

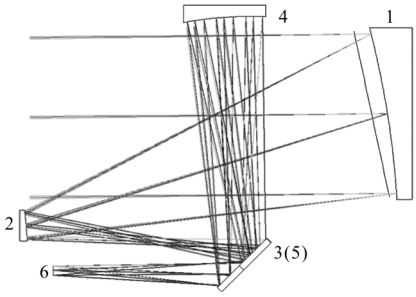


图 4 系统光路图

Fig.4 System optical path

部,再通过平面反射镜(5)最终在像面处进行成像。在系统优化设计过程中需要注意的是：平面反射镜(3)应尽可能远离中间像面,减小镜面缺陷对系统成像质量的影响;三镜位于主镜上部,为了减小系统装调难度,镜面的法线方向应与系统的子午面重合;焦平面位于次镜下部，通过离轴角度的优化以保证焦平面组件的安装空间。最终,经过平面反射镜对光路进行压缩后,光学系统总长 f′/3.1,高 f′/4.1,宽 f′/7(f′为系统焦距)。

表 3 三镜自由曲面参数

Tab.3 Polynomial parameters of freeform tertiary mirror

Number	Item	A_{ij}	Number	Item	A_{ij}	Number	Item	A_{ij}
1	X^1Y^0	0	10	X^4Y^0	-1.641e-2	19	X^1Y^4	0
2	X^0Y^1	-0.9757	11	X^3Y^1	0	20	X^0Y^5	7.409e-3
3	X^2Y^0	1.621e-3	12	X^2Y^2	-3.227e-2	21	X^6Y^0	-1.136e-3
4	X^1Y^1	0	13	X^1Y^3	0	22	X^5Y^1	0
5	X^0Y^2	2.513e-3	14	X^0Y^4	-1.231e-2	23	X^4Y^2	-3.878e-3
6	X^3Y^0	0	15	X^5Y^0	0	24	X^3Y^3	0
7	X^2Y^1	-2.187e-2	16	X^4Y^1	-4.151e-3	25	X^2Y^4	-2.658e-3
8	X^1Y^2	0	17	X^3Y^2	0	26	X^1Y^5	0
9	X^0Y^3	-2.232e-2	18	X^2Y^3	-2.422e-3	27	X^0Y^6	-1.136e-3

3.2 系统成像质量分析

文中所设计的 Rug-TMA 系统弧矢方向有效视场为-1.8°~1.8°，子午方向有效视场为 0.35°~0.8°，在有效矩形视场内取 10 个视场,如表 4 所示,并采用 λ=632.8 nm 作为参考波长对光学系统的成像质量进行评价。从设计结果可以看出,系统最大波像差为 0.0493 λ,平均波像差 RMS 值为 0.034 λ。系统光学传递函数 f_{MTF} 在奈奎斯特频率(111 lp/mm)处均优于 0.43,如图 5 所示。在有效矩形视场内,最大网格畸变值为 0.9%，如图 6 所示。系统的点列图如图 7

表 4 视场角

Tab.4 Field of view

No.	x/(°)	y/(°)	No.	x/(°)	y/(°)
1	0	0.35	6	0	0.8
2	0.9	0.35	7	0.9	0.8
3	1.8	0.35	8	1.8	0.8
4	-0.9	0.35	9	-0.9	0.8
5	-1.8	0.35	10	-1.8	0.8

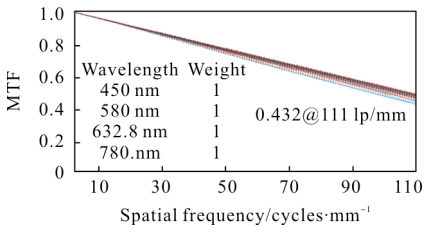


图 5 调制传递函数曲线

Fig.5 Curves of modulation transfer function

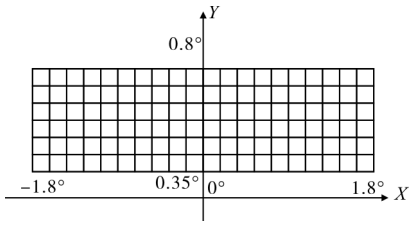


图 6 畸变网格

Fig.6 Grid distortion

所示,从图 7 中可以看出,系统的成像特点与上文分析一致,即成像质量完全相对于子午面对称。

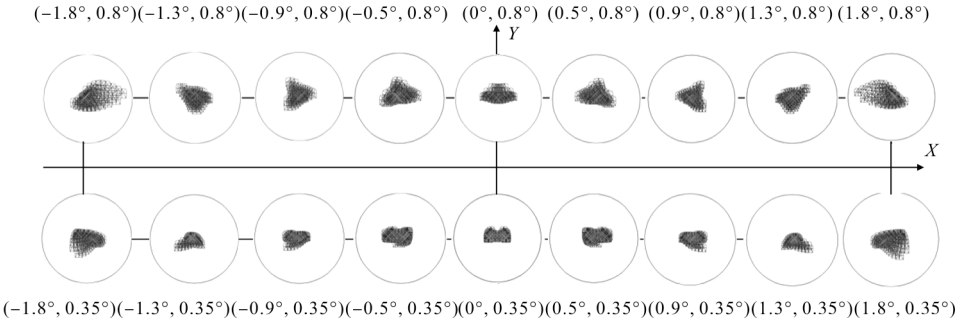


图 7 光学系统点列图

Fig.7 Spot diagram of optical system

3.3 系统公差分析

反射式光学系统的公差主要包括位置公差和加工公差。各反射镜均具有六个自由度,即六个位置公差:沿 **X**、**Y**、**Z** 轴的平移公差(**DLX**、**DLY**、**DLZ**)和绕 **X**、**Y**、**Z** 轴的旋转公差(**DLA**、**DLB**、**DLC**)。光学元件的加工公差主要包括:曲率半径公差(DLR)、二次曲面系数公差(**DAK**)和面型公差(**RES**)。为了保证系统在有效矩形视场内均具有良好的成像质量,以奈奎斯特频率(111 lp/mm)处的 f_{MTF} 作为性能指标,以表 4 中的视场作为特征参考点,采用像面的位置调整量作为补偿对系统各光学元件的公差进行分析。同时,在系统装调过程中拟采用主镜作为系统基准,通过调整次镜、三镜和像面以完成系统的整体装调。

采用灵敏度和反转灵敏度分析可以得到系统的公差分配结果,如表5 所示。

表 5 公差分配结果

Tab.5 Results of tolerance allocation

Type	Item	Primary mirror	Secondary mirror	Third mirror
Assembling	Displacement x/mm	-	0.05	0.1
	Displacement y/mm	-	0.05	0.1
	Displacement z/mm	-	0.2	0.3
	Tilt α/(″)	-	20	20
	Tilt β/(″)	-	20	30
	Tilt γ/(″)	-	40	60
Manufacturing	**ΔR**/mm	0.8	0.3	0.3
	ΔK	0.1%	0.05%	0.3%
	Surface error RMS(λ=632.8 nm)	λ/50	λ/50	λ/50

将上述公差分配结果代入系统,通过 Monte-Carlo 方法对结果进行分析,试验 1 000 次,可以得到系统在奈奎斯特频率处的 f_{MTF} 变化曲线如图 8 所示,统计结果如表 6 所示。从表 6 中可以看出,按照上述公差分配结果进行试验后,系统在奈奎斯特频率处有 84%的概率优于 0.368,即系统的静态 f_{MTF} 优于 0.2。

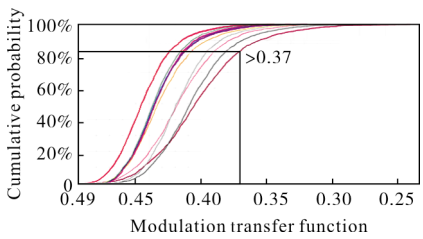


图 8 公差概率曲线

Fig.8 Curves of tolerance probability

表 6 公差分析结果

Tab.6 Results of tolerance analysis

Cumulative probability	f_{MTF}(@111 lp/mm)
50%	0.401 8
84.1%	0.396 3
97.7%	0.360 8
99.9%	0.325 3

从公差分析结果可以看出，系统中次镜公差较为宽松，因此在装调过程中可以通过 offner 型补偿器对主镜、次镜依次进行装调。通过调整主、次间隔及光轴倾斜可以有效地减小装调过程中所引入的球差和像散,从而得到像质优良的两镜系统。以两镜系统作为基础,对平面镜及三镜进行装调。具有自由曲面面形的三镜可以采用 CGH (Computer-Generated Hologram)进行安装与检测,而该方法已广泛应用于高精度自由曲面光学元件的加工和检测中。

4 结 论

研究并设计了一种基于自由曲面的轻小型大线视场离轴三反光学系统。系统主、次镜采用二次曲面镜,三镜为 **X-Y** 多项式自由曲面,为了保证设计的合理性和可实现性，根据系统的结构特点对优化设计中所采用的像差项进行了分析，使系统的成像质量与系统结构特点相一致。系统经过设计优化后,最终实现了 3.6°×0.45°视场，视场内最大网格畸变 0.9%,平均波像差 RMS 值为 0.034 λ,并通过平面反射镜对光路的折叠，极大地减小了系统的尺寸。因此,该系统具有很好的应用价值,对高分辨率、大视场、轻小型空间光学系统设计具有一定的参考价值。

参考文献:

[1] Ye Zhao, Li Xiwei, Wang Chao, et al. Survey of technological development of optical payload for micro-nano satellite[J]. Spacecraft Engineering, 2016, 25(6): 122-130. (in Chinese)

[2] Lampton M L, Sholl M J, Levi M E. Off-axis telescopes for dark energy investigations[C]//SPIE, 2010, 7731: 77311G.

[3] Zhao Wencai. Design of improved off-axis TMA optical systems[J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(12): 2837-2842. (in Chinese)

[4] Ma Dingkun, Kuang Yin, Yang Xinquan. Development actual state and trends of nano-satellite [J]. Space Electronic Technology, 2017(3): 42-45. (in Chinese)

[5] Meng Qingyu, Wang Hongyuan, Wang Kejun, et al. Off-axis three-mirror freeform telescope with a large linear field of view based on an integration mirror [J]. Applied Optics, 2016, 55(32): 8962-8970.

[6] Gong Dun, Wang Hong. Optical design of large field and low distortion coaxial three mirror system with free-form surface[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(7): 0700001. (in Chinese)

[7] Fuerschbach K, Rolland J P, Thompson K, P. A new family of optical systems employing φ-polynomial surfaces [J]. Optical Express, 2011, 19(22): 21919-21928.

[8] Meng Qingyu, Wang Hongyuan, Wang Yan, et al. Off-axis three-mirror freeform optical system with large linear field of view [J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45(10): 1018002. (in Chinese)

[9] Zhang X, Zheng L G, He X, et al. Design and fabrication of imaging optical systems with freeform surfaces [J]. SPIE Optical Engineering Applications International Society for Optics and Photonics, 2012, 8486: 848607.

[10] Pan Junhua. Design, Fabrication and Testing of the Aspherical Optical Surfaces[M]. Suzhou: Soochow University Press, 2004: 10-37. (in Chinese)

[11] Li Peimao, Wang Xia, Jin Weiqi, et al. Dual-band infrared optical system design and image quality evaluation [J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(11): 2882-2888. (in Chinese)

[12] Chen Yonghe, Chen Hongda, Fu Yutian. Optical design of small-sized camera in visible for micro-satellite[J]. Infrared and Laser Engineering, 2015, 44(7): 2087-2092. (in Chinese)

[13] Xue Donglin, Zheng Ligong, Zhang Feng. Off-axis three-mirror system based on freeform mirror [J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(12): 2813-2820.

[14] Wang Wei. Optical design of off-axis reflective system with freeform surface [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technonogy, 2016: 8-14. (in Chinese)