

文章编号 1004-924X(2015)06-1612-08

## 离轴三反空间相机主三镜共基准一体化结构

沙 巍\*, 陈长征, 许艳军, 张星祥, 刘 磊, 王永宪, 李新娥  
(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:**针对采用离轴三反(TMA)光学系统的空间相机中光学系统主镜和三镜的轴向位置接近的特点,提出了主三镜共基准一体化结构来提高光机结构的精度和稳定性。利用一块高刚度、高度轻量化整体背板替代分离的主镜和三镜背板,以实现主镜和三镜光学加工、检测和装调的基准统一。由于此整体背板同时也是主框架的组成部分,故降低了结构整体重量,提升了光机结构动/静态刚度。对采用主三镜共基准一体化结构的空间相机进行干涉检测,结果表明主镜和三镜的各视场镜面面形最大分别为  $0.024\lambda$  和  $0.013\lambda$ ,均满足光学公差要求。对铝结构样机进行了多入多出(MIMO)自由模态测试,测得一阶模态频率为 48 Hz,对应原理样机一阶约束模态频率 114 Hz,满足结构刚度要求。在离子束光学精加工过程中,通过分时对主镜和三镜进行加工,省去了主镜和三镜分离结构加工用的散热时间,加工效率提高了约 50%。主、三镜共基准一体化结构的应用提高了离轴 TMA 空间相机的性能和光学精加工效率,为高分辨力宽视场空间相机的光机结构设计提供了参考。

**关键词:**离轴三反空间相机;主镜;三镜;共基准;一体化结构;干涉检测;模态测试;离子束加工

**中图分类号:**V447.3 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20152306.1612

## Integrated primary and tertiary mirror components from common base line of off-axis TMA space camera

SHA Wei\*, CHEN Chang-zheng, XU Yan-jun, ZHANG Xing-xiang,  
LIU Lei, WANG Yong-xian, LI Xin-e

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

\* Corresponding author, E-mail: sha.phe@gmail.com

**Abstract:** As axial locations of two mirrors in a space camera with off-axis Three Mirror Anastigmatic (TMA) optical system are closed, this paper proposes a integrated structure combined primary and tertiary mirrors to improve the precision and stability of the opto-mechanical structure. A high-stiffness and ultra-lightweighted integrated support plate was applied as the replacement of separated primary and tertiary mirror support plates to achieve the unification of optical machining, detection and adjustment base lines. The integrated support plate was also a constituent part of the main support frame, so that the entire weight was reduced and the dynamic/static stiffness of the opto-mechanical structure was enhanced. The interference detection of the space camera with the integrated structure was performed. The results indicate that maximum surface shapes of primary mirror and tertiary mirror are  $0.024\lambda$  (rms) and  $0.013\lambda$  (rms), respectively, and both meet optical tolerance requirement. The MIMO(multi-input multi-output) free modal test was performed for an aluminum structure prototype, and the results show that the first mode is 48 Hz, which corresponds to the first

收稿日期:2014-08-20;修订日期:2014-09-27.

基金项目:国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 863-2-5-1-13B)

constrained mode of 114 Hz for the principle prototype and meets the structural stiffness requirement. During ion beam fine optical machining process, the time sharing was used to machine the primary mirror and the tertiary mirror, and the machining efficiency is improved by about 50% for omitting the heat dissipation time. It concludes that the application of integrated structure for primary mirror and tertiary mirror improves the performance and optical machining efficiency of the space camera, and provides a reference for opto-mechanical structure design of high resolution and wide field of view space cameras.

**Key words:** off-axis Three Mirror Anastigmatic (TMA) space camera; primary mirror; tertiary mirror; common base line; integrated structure; interference detection; modal test; ion beam machining

## 1 引言

随着空间技术的不断发展,各国对空间相机技术指标要求不断提高,更高的地面分辨率和更宽的地面覆盖宽度是发展的主流方向<sup>[1]</sup>。离轴三反(TMA)光学系统由于无遮拦,成像质量好,结构紧凑等优点,在高性能空间相机中应用广泛。国外已成功应用的空间相机有 Quickbird-2、EO-1、SPOT-3、ALOS-PRISM 等<sup>[2]</sup>,近年来国内也有多台空间相机得到成功应用。

离轴 TMA 光学系统由 3 个反射镜组成,其中主镜和三镜一般为长条形,尺寸相对较大,长度随视场角的增大而增加;次镜一般为圆形,结构尺寸远小于主镜和三镜<sup>[3]</sup>。为了使结构更加紧凑,整体刚度更高,光学设计中一般将尺寸、重量较大的主、三镜近似布置于与光轴垂直的同一平面内,作为光机结构的基底,而较小的次镜则位于光机结构的远端<sup>[4]</sup>。

目前,国内外应用 TMA 系统的空间相机中各反射镜功能单元一般设计为相互独立的组件,每块反射镜都有与其配套的柔性连接结构和刚性背支撑板。反射镜组件各自进行独立的光学加工,最后经过光学装调确定各镜相对位置关系并将各组件固定于相机主框架上。此种结构优点是主、三镜各自成组,反射镜表面面形精度稳定,在加工和装调过程中便于调整和搬运。但由于两个反射镜组件相互独立,在光学加工中加工基准不同,所以不可避免会引入反射镜相对位置关系的系统误差,而装调过程中装调基准又与加工基准不同,所以难以校正和补偿由于加工基准不同所引入的误差。此外,由于主、三镜的刚性背支撑板是工艺和稳定性的需要,其结构力学功能与光机结构主支撑框架功能重叠,故背支撑板的重量属于冗余重量。

为了使光机结构精度达到更高水平,同时尽量减少误差来源,本文提出针对离轴 TMA 空间相机的主三镜共基准一体化结构,将主三镜分离的背板取消,用一块同时为主三镜提供支撑的整体背板代替,将主三镜的加工、检测和装调基准统一。由于整体背板具有较高的结构刚度和轻量化率,同时作为主框架的组成部分,故结构总体重量降低,结构静/动态刚度提高,从而使空间相机具有更高的性能指标。

本文将主三镜共基准一体化结构应用在某长焦距、宽视场离轴 TMA 空间相机中,并进行了仿真分析和试验验证。试验结果表明,主三镜共基准一体化结构可以使空间相机具有较高的动/静态性能,同时可提高离子束光学精加工效率。

## 2 主三镜共基准一体化结构

### 2.1 光学系统

针对应用离轴 TMA 光学系统的空间相机展开研究。由于对分辨率指标要求较高,光学系统中主镜尺寸达到了 1 m 以上,主镜和三镜的包络尺寸达到了 1 050 mm×990 mm,光学系统如图 1 所示。光学设计公差要求如表 1 所示,相机要求一阶频率 $\geq 100$  Hz。

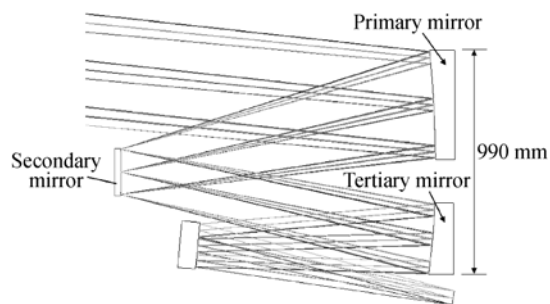


图1 光学系统

Fig. 1 Optical system layout

表 1 光学公差要求

Tab.1 Requirement of optical tolerance

反射镜	面形/ $\lambda$		刚体位移/ $\mu\text{m}$			转角/ $(^\circ)$	
	PV	RMS	$T_x$	$T_y$	$T_z$	$R_x$	$R_y$
主镜	0.125	0.025	20	20	100	10	10
次镜	0.080	0.016	20	20	100	15	15
三镜	0.090	0.018	20	20	100	15	15

## 2.2 光机结构材料选择

空间相机常用的光机结构材料如表 2 所示。碳纤维材料制作杆件比较成熟<sup>[5]</sup>,但对于细节较精细的板类结构,碳纤维材料会有较明显的各向异性现象,给结构稳定性带来不确定因素。结构材料中高体份 SiC<sub>p</sub>/Al 材料兼具高比刚度和高稳定性,同时材料制备能力和工艺水平可满足制备 1 m×1 m 板料的需求<sup>[6-7]</sup>,所以离轴 TMA 空间相机结构材料主要选用高体份 SiC<sub>p</sub>/Al 材料。

表 2 常用光机结构材料

Tab.2 Opto-mechanical materials in common use

类型	结构材料				
材料名称	环氧碳纤维	低体份 SiC <sub>p</sub> /Al	殷钢 4J32	钛合金 TC4	高体份 SiC <sub>p</sub> /Al
密度/(g/cm <sup>3</sup> )	1.6	2.8	8.1	4.4	2.9
弹性模量/GPa	150.0	97.5	141.0	114.0	180.0
比刚度	93.8	35.1	17.4	25.9	61.2
膨胀系数/(10 <sup>-6</sup> /K)	0.1	16.0	0.7	9.1	8.0
热传导系数/(W/m·K)	0.9	155.0	13.7	7.4	235.0
热畸变系数/(10 <sup>-8</sup> m/W)	0.1	10.3	4.7	123.0	3.4

## 2.3 共基准一体化结构

为了使空间相机光机结构具有更高的精度和支撑刚度,并提高光机结构的稳定性,这里结合光学系统中主、三镜轴向位置接近的特点和材料制备的工艺水平,提出了主三镜共基准一体化结构。

该结构将主、三镜组件各自独立背部支撑板取消,用一块同时为主镜和三镜提供支撑的整体背板代替。整体背板不仅具备原主、三镜独立背板的结构功能,同时作为相机主框架的组成部分。离轴 TMA 空间相机应用主三镜共基准一体化方法结构如图 2 所示,整体背板与主框架组合形式如图 3 所示。

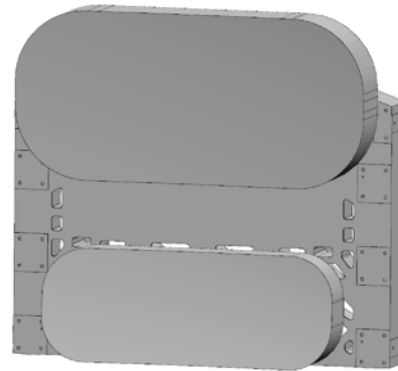


图 2 主三镜共基准一体化结构

Fig.2 Integrated primary and tertiary mirror component from a common base line

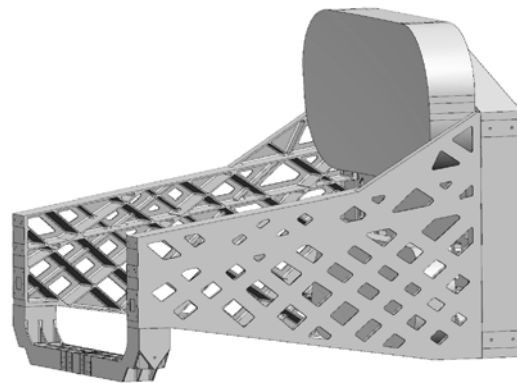


图 3 一体化结构与框架组合形式

Fig.3 Constitution of integrated component and main support frame

离轴 TMA 空间相机主三镜共基准一体化结构具有如下优点:

### (1) 基准统一

在光学加工过程中,在主三镜各自光学加工达面形精度优于  $\lambda/20$  后,将主三镜一体化组件装调成组后进行离子束精加工。精加工后空间相机主、三镜相对位置关系不再发生变化,避免了主、三镜组件独立结构在精加工之后再次装调引入的

误差。即在光学加工中就实现了基准统一,避免了最终装调引入的误差,并将误差降低至光学加工设备的测量误差水平。

(2)增强结构刚度

离轴 TMA 空间相机应用常规的主、三镜组件独立安装形式如图 4 所示,成组后安装在主框架上。共基准一体化方法与之相比,由于整体背板兼具框架刚度的功能,相当于光机结构减轻了 2 块独立背板的重量。整体背板在设计过程中采用结构拓扑优化方法进行设计,频率最大化的拓扑优化数学模型为:

$$\begin{aligned} & \max: \beta \\ & \text{S. t. : } \left\{ \begin{aligned} & [\alpha]^i \lambda_i \geq \beta, i = 1, \dots, N_{\text{dof}} \\ & (\mathbf{K} - \lambda_i \mathbf{M}) \Phi_i = 0 \\ & \sum_{j=1}^N V_j x_j - V \leq 0, j = 1, \dots, N \\ & 0 < x_j < 1 \end{aligned} \right\}, \quad (1) \end{aligned}$$

式中:  $\mathbf{K}$  为背板刚度矩阵;  $\mathbf{M}$  为背板的质量矩阵,  $V$  为结构体积。  $\Phi_i$  是与第  $i$  阶特征值  $\lambda_i$  相关的特征向量。  $x$  为设计变量,  $j$  为单元数目,  $i = 1, \dots, N_{\text{dof}}$  为特征值问题的所有模态,在整体背板设计中,取前 3 阶模态即可。  $\beta$  为指定的可能发生共振的频率值,  $\alpha$  为迭代常数,优化过程中取  $\alpha = 0.95$ 。优化过程的目标函数为:

$$\lambda_i = (\Phi_i^T \mathbf{K} \Phi_i) / (\Phi_i^T \mathbf{M} \Phi_i). \quad (2)$$

经过拓扑优化设计,独立设计方案与一体化设计方案的重量比较如表 3 所示,一体化设计方案较独立背板方案结构重量降低了 24.6 kg。

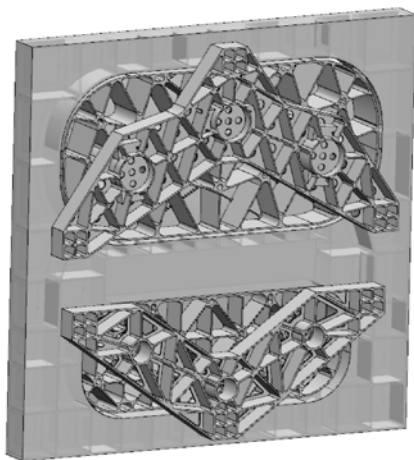


图 4 主三镜组件分离结构

Fig. 4 Separated primary and tertiary mirror components

表 3 结构设计方案重量对比

Tab. 3 Weight comparison between structural design schemes (kg)

类别	重量			
	主三镜独立		主三镜一体化	
	主镜组件	三镜组件	主镜组件	三镜组件
反射镜	33.7	19.4	33.7	19.4
连接结构	3.3	2.3	3.3	2.3
柔性结构	4.9	2.8	4.9	2.8
独立背板	15	10.7	—	—
后框架 (整体背板)	60.4		61.5	
总计	152.5		127.9	

表 4 两设计方案仿真对比验证

Tab. 4 Simulation analysis comparison between structural design schemes

项目		子午向重力		光轴向重力		4℃温升		一阶 频率/Hz		
		主镜	三镜	主镜	三镜	主镜	三镜			
主三镜组件独立方案	面形 PV	48.5	47.1	58.7	63.4	47.2	33.3	100		
	/nm RMS	8.8	9.3	12.8	12.9	8.8	5.7			
	位移 /μm	$T_x$	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0		0.0	
		$T_y$	13.5	12.2	-8.2	5.4	-32.6		-16.7	
		$T_z$	-1.9	-2.2	23.8	11.7	24.2		19.5	
	转角 /(")	$R_x$	-4.7	-2.9	14.7	-11.3	9.4		-6.2	
		$R_y$	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		0.0	
	MTF@71.4lp	0.415		0.427		0.420				
	一体化方案	面形 PV	40.6	37.2	52.6	61.5	43.6		28.0	126
		/nm RMS	7.7	7.6	12.6	12.9	8.0		4.9	
位移 /μm		$T_x$	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0		
		$T_y$	9.5	11.2	-4.2	0.4	-26.6	-9.7		
		$T_z$	-0.8	-0.5	14.8	6.7	20.2	15.5		
转角 /(")		$R_x$	-2.6	-2.0	10.4	-1.8	5.2	-2.1		
		$R_y$	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
MTF@71.4lp		0.435		0.438		0.432				

取消独立背板同时减少了 2 个反射镜质心与接口位置的悬臂长度,降低了总重量,在这些条件的综合作用下,实现了空间相机动/静态刚度提升。对独立设计和一体化设计的主三组件在光学系统光轴向 1g 重力、子午向 1g 重力和 4 °C 温升 3 种工况下进行对比仿真计算<sup>[8]</sup>,结果如表 4 所示,静态性能通过将各工况下镜面面形变化和位置变化量代入光学系统进行 MTF 验证。由结果可知,一体化设计的主三镜组件具有更佳的动/静态特性。

### (3) 提高离子束光学精加工效率

离子束加工<sup>[10]</sup>是高效率的非接触纳米级加工方法,作为一项新技术被广泛应用于精密光学加工中<sup>[9]</sup>。离子束加工反射镜光学表面的过程中,由于能量较高,反射镜温度会随加工时间逐渐升高<sup>[11]</sup>。当反射镜温度超过允许范围,会引起镜面面形及曲率变化超过公差要求。因此独立背板的反射镜组件在光学加工过程中,通常是加工进行一定时间,当温度达到允许上限后暂停加工过程,待反射镜温度降到期望值后再继续加工,这样就降低了加工效率。

应用主三镜一体化方法,主三镜同时进入离子束加工设备进行光学加工,如图 5 所示。采取分时加工方法,即待主镜温度达到限值后,主镜暂停加工,转而加工三镜;待三镜到达温度限值后,暂停三镜加工,继续加工主镜。如此迭代进行,避免了加工中的降温等待时间,提高了加工效率。



图 5 主三镜离子束加工

Fig. 5 Primary and tertiary mirrors by ion beam machining

离轴 TMA 空间相机主三镜离子束光学精加

工过程中通过温度传感器得到的加工时间-反射镜温度曲线如图 6 所示,主三镜分时加工,在 28 h 的加工之内,加工一直进行,充分利用了主镜和三镜的散热时间,使加工效率提高了约 50%。

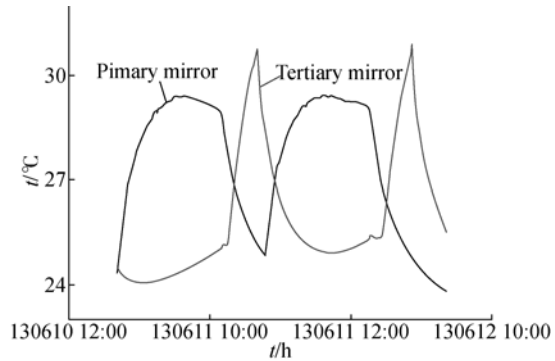


图 6 主三镜离子束加工反射镜温度

Fig. 6 Mirror temperature of primary and tertiary mirrors by ion beam machining

## 3 试验研究

### 3.1 镜面面形干涉检测

1 m 100 km 空间相机主三镜共基准一体化结构如图 7 所示。经干涉检测<sup>[12]</sup>,各视场检测结果如表 5 所示。主镜各视场镜面面形最大 RMS 值为 0.024 $\lambda$ ,三镜各视场镜面面形最大 RMS 值为 0.013 $\lambda$ ,主、三镜各视场镜面面形均满足表 1 中的光学公差要求。



图 7 主三镜共基准装调

Fig. 7 Integrated component adjustment from a common base line

表 5 主三镜干涉检测结果

Tab. 5 Interference detection results of primary and tertiary mirror

视场	主镜		三镜	
	干涉图	RMS/ $\lambda$	干涉图	RMS/ $\lambda$
-1		0.021		0.012
-0.7		0.023		0.011
-0.5		0.023		0.010
0		0.023		0.009
+0.5		0.023		0.008
+0.7		0.024		0.010
+1		0.024		0.013
全视场		0.027		0.020

### 3.2 结构样机模态测试

对空间相机进行自由模态测试需将相机整体悬挂起吊以实现自由状态,对于原理样机风险较大,所以对力学试验用铝结构样机进行了模态测试对比。相机自由模态测试状态如图 8 所示,结构样机由弹簧起吊,近似模拟自由状态。



图 8 结构样机自由模态测试条件

Fig. 8 Free modal test condition of structural prototype

对结构样机进行 MIMO 模态测试,整机结构响应曲线如图 9 所示,可知结构样机一阶自由频率为 48 Hz,仿真结果与测试结果对比如表 6 所示。

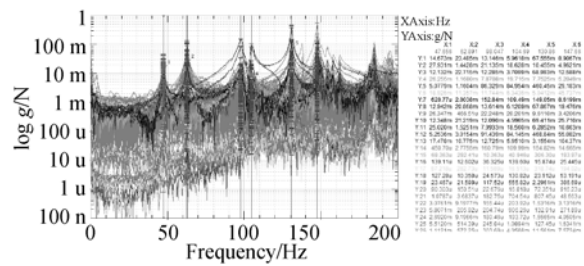


图 9 结构样机自由模态测试响应曲线

Fig. 9 Response curves of structural prototype free modal test

表 6 仿真结果与测试结果对比

Tab. 6 Comparison of simulation analysis and test result

模态	结构样机			原理样机		
	自由		约束	自由	约束	
阶数	测试 结果/Hz	仿真 结果/Hz	误差/%	仿真结 果/Hz	仿真结 果/Hz	仿真结 果/Hz
1	47.7	49.9	4.61	86.2	74.1	113.6
2	62.9	65.6	4.29	98.8	97.0	114.7
3	98.0	95.1	-2.96	119.0	135.2	139.6
4	104.7	102.9	-1.72	129.6	148.4	158.7
5	130.9	126.1	-3.67	141.2	155.0	166.3
6	147.7	146	-1.15	142.2	170.2	176.7

结构样机自由模态测试与仿真结果最大误差为 4.61%，小于 5%，可认为仿真结果具有可信度，利用同一有限元模型更改为原理样机各部分材料后计算原理样机与平台接口连接约束模态为 113 Hz，大于 100 Hz，满足结构动态刚度设计要求。

#### 参考文献：

- [1] 史光辉. 卫星对地观测高分辨率光学系统和设计问题[J]. 光学精密工程, 1999, 7(2): 16-24.  
SHI G H. High resolution optical systems used to observation from the satellites to the earth and problems in design [J]. *Opt. Precision Eng.*, 1999, 7(2): 16-24. (in Chinese)
- [2] 张科科, 阮宁娟, 傅丹鹰. 国外空间用三反离轴相机发展分析与思考[J]. 航天返回与遥感, 2008, 29(3): 63-70.  
ZHANG K K, RUAN N J, FU D Y. Analysis and consideration of development of oversea space off-axis TMA system camera [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2008, 29(3): 63-70. (in Chinese)
- [3] 刘磊. 空间三反相机调焦范围的确定[J]. 光学精密工程, 2013, 21(3): 631-636.  
LIU L. Focusing range of space off-axial TMA optical camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(3): 631-636. (in Chinese)
- [4] 姚昱, 黄颖, 傅丹鹰. 一种易于制造、较大视场离轴三反光学系统设计[J]. 航天返回与遥感, 2010, 31

## 4 结 论

将空间相机主三背板共基准一体化结构应用于离轴 TMA 空间相机, 使尺寸较大的主、三镜实现了加工检测装调共基准条件, 减少了误差来源, 提高了结构精度和稳定性; 同时减轻了光机结构重量, 提升了相机动/静态刚度; 在离子束光学精加工中, 通过分时加工方法提高了加工效率约 50%。对采用主三镜共基准一体化结构的空相机进行干涉检测, 结果显示: 主镜各视场镜面面形最大 RMS 值为 0.024λ, 小于等于 0.025λ; 三镜为 0.013λ, 小于等于 0.016λ, 满足光学设计要求; 对铝结构样机进行 MIMO 模态测试, 测得铝结构样机一阶自由模态频率为 48 Hz, 测试结果与仿真结果误差小于 5%, 验证了原理样机与平台固定约束的条件下一阶模态可达 113 Hz, 满足一阶频率大于 100 Hz 的动态刚度要求。主三一体化方法成功应用于长焦距、宽视场的离轴 TMA 空间相机, 提高了相机综合指标, 为高分辨力宽视场空间相机的光机结构设计提供了参考。

(5): 44-48.

- YAO G, HUANG Y, FU D Y. An easily fabricated unobscured three-mirror reflective system with large FOV [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2010, 31(5): 44-48. (in Chinese)
- [5] 张雷, 姚劲松, 贾学志, 等. 同轴空间相机碳纤维复合材料桁架结构的研制[J]. 光学精密工程, 2012, 20(9): 1967-1973.  
ZHANG L, YAO J S, JIA X ZH, *et al.*. Development of trusses made of carbon fiber composites for coaxial space remote sensors [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(9): 1967-1973. (in Chinese)
- [6] 王晓虹, 冯培忠, 强颖怀. SiC<sub>p</sub> 增强铝基复合材料的制备与应用的研究进展[J]. 轻合金加工技术, 2002, 30(12): 9-11.  
WANG X H, FENG P ZH, QIANG Y H. Research and development of fabrication & applications for SiC<sub>p</sub> particle-reinforced aluminum matrix composites [J]. *Light Alloy Fabrication Technology*, 2002, 30(12): 9-11. (in Chinese)
- [7] 崔岩, 李丽富, 李景林, 等. 制备空间光机结构件的高份 SiC/Al 复合材料[J]. 光学精密工程, 2007, 15(8): 1175-1180.

- CUI Y, LI L F, LI J L, *et al.*. High volume fraction SiC/Al composites for space-based optomechanical structures [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(8):1175-1180. (in Chinese)
- [8] 徐宏,关英俊. 空间相机1 m口径反射镜组件结构设计[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(6):1489-1495.  
XU H, GUAN Y J. Structural design of 1 m diameter space mirror component of space camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(6):1489-1495. (in Chinese)
- [9] 武建芬,卢振武,张红鑫,等. 光学元件离子束加工驻留时间优化求解[J]. *光学学报*, 2010, 30(1):192-197.  
WU J F, LU ZH W, ZHANG H X, *et al.*. Optimized dwell time solution for optics in ion beam figuring [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(1):192-197. (in Chinese)
- [10] 康健,宣斌,谢京江. 表面改性碳化硅基底反射镜加工技术现状[J]. *中国光学*, 2013, 6(6):824-833.  
KANG J, XUAN B, XIE J J. Manufacture technology status of surface modified silicon carbide mirrors [J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(6):824-833. (in Chinese)
- [11] 袁征,戴一帆,解旭辉,等. 离子束修形中光学元件表面热量沉积数值模拟[J]. *物理学报*, 2012, 61(22):277-285.  
YUAN ZH, DAI Y F, XIE X H, *et al.*. Numerical simulation on the thermal deposition of optical surface irradiated by low energy ion beam in ion beam figuring [J]. *Acta Phys. Sin.*, 2012, 61(22):277-285. (in Chinese)
- [12] 师途,杨甬英,张磊,等. 非球面光学元件的面形检测技术[J]. *中国光学*, 2014, 7(1):26-46.  
SHI Y, YANG Y Y, ZHANG L, *et al.*. Surface testing methods of aspheric optical elements [J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(1):26-46. (in Chinese)

#### 作者简介:



沙 巍(1984—),男,天津人,助理研究员,2012年于中科院长春光机所获博士学位,主要研究方向为空间相机光机结构设计及工程分析。E-mail: sha.phe@gmail.com



陈长征(1976—),男,山东德州人,副研究员,2007年于中科院长春光机所获博士学位,主要研究方向为光机热集成仿真。E-mail:may328@163.com

(版权所有 未经许可 不得转载)