

文章编号 1004-924X(2012)12-2667-07

## 卫星结构件常压热变形的数字摄影测量

许 杰<sup>1\*</sup>, 蒋山平<sup>1</sup>, 杨林华<sup>1</sup>, 肖大舟<sup>2</sup>, 张景川<sup>1</sup>

(1. 北京卫星环境工程研究所, 北京 100094; 2. 北京空间机电研究所, 北京 100076)

**摘要:** 针对卫星光学系统在轨工作时机上相机和星敏传感器受温度影响其相互间夹角会出现变化而影响相机指向精度的问题, 利用数字摄影测量方法在试验室常温常压环境下对结构件进行了热变形测量试验。通过拍摄组合体结构件上相机和星敏器的特定表面标志点, 计算了坐标值, 拟合了光轴矢量。以相机之一为基准计算法线矢量差和不同工况下矢量差的变化, 即夹角在各工况下的变形量。试验按照试件温度状态分为 4 个工况、20 个子工况。测量结果显示最大变形量为 227.9", 测量精度优于 13.9"; 与有限元分析对比, 两者在各子工况的变化趋势一致, 均方值为 30.4"。得到的结果表明, 通过用合理选择拍摄位置、剔除粗大误差以及将编码标志点作为公共点进行坐标系转换等方法, 可以提高数字摄影测量系统的测量精度, 满足卫星结构件热变形测量的需求。

**关键词:** 数字摄影测量; 卫星结构件; 热变形; 平面拟合; 精度分析

**中图分类号:** V416.5; P232 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20122012.2667

## Digital photogrammetry for thermal deformation of satellite structures in normal environment

XU Jie<sup>1\*</sup>, JIANG Shan-ping<sup>1</sup>, YANG Lin-hua<sup>1</sup>, XIAO Da-zhou<sup>2</sup>, ZHANG Jing-chuan<sup>1</sup>

(1. Beijing Institute of Spacecraft Environment Engineering, Beijing 100094, China;  
2. Beijing Institute of Space Mechanics and Electricity, Beijing 100076, China)

\* Corresponding author, E-mail: xuji027@126.com

**Abstract:** As the angles among the optical systems of cameras and star sensors would be changed when a satellite worked on orbits in space environments, this paper proposed a method to measure the angles to improve the orientation precision of cameras. A thermal deformation test for the changed angles of these structures was performed under air pressures and normal temperatures. The digital photogrammetry was used to take the pictures for signed positions on the cameras and star sensors and to calculate coordinates and fit the given planes. By taking a camera as the scale, the angles and their variations were calculated in different working conditions. Results show that the maximum thermal deformation is 227.9" under 4 working conditions and 20 sub-working conditions with different temperature distributions, and the test precision is better than 13.9". The result is very close to that of the finite element analysis, and the RMS between them is 30.4". It suggests that the precision of digital photogrammetry could be improved by choosing proper signed positions in photos, eliminating gross errors and taking coordinate conversion with code targets. The method satisfies test require-

收稿日期: 2012-08-07; 修订日期: 2012-10-12.

基金项目: 十一五装备预先研究资助项目

ments for thermal deformation of the satellite structures.

**Key words:** digital photogrammetry; satellite structure component; thermal deformation; plane fitting; precision analysis.

## 1 引言

数字摄影测量是基于摄影测量的基本原理,应用计算机技术、数字影像处理、影像匹配、模式识别等多学科的理论与方法,用数字方式提取拍摄对象的几何与物理信息的摄影测量分支学科,具有非接触、精度高、易存储、可复现的特点<sup>[1-2]</sup>,在国外广泛应用于航空、航天、造船、汽车等领域。美国 Langley 研究中心于 1999 年完成了  $\Phi 5$  m 口径反射面天线的面形测量,精度达到 0.05 mm<sup>[3]</sup>,后又于 2004 年完成对 10 m 太阳柔性帆板的真空低温变形测量试验<sup>[4-5]</sup>。近年来,国内也陆续开展了摄影测量方面的研究。北京卫星环境工程研究所研制了真空低温环境下针对  $\Phi 660$  mm 天线的变形测量系统,成功进行了常温常压和模拟空间环境下的数次测试试验,精度优于 0.05 mm<sup>[6-7]</sup>;王保平等利用该技术对我国天文观测用  $\Phi 50$  m 大口径天线进行测试,其点位的摄影测量精度优于 0.11 mm,面形精度达到 0.4 mm<sup>[8]</sup>。北京航空航天大学多年来开展数字摄影测量研究,研制的形貌测量系统可实现远距离高精度表面测量<sup>[9-10]</sup>。

目前国内外数字摄影测量系统的应用对象主要是天线、太阳能帆板等相对平滑、简单的大尺寸连续表面,而在卫星及其载荷等具有较多零件、部件、位置关系复杂的表面上应用较少。面对新的应用对象,系统本身的精度会有所降低,能够达到什么程度,是否能够满足测量需求,是一个值得深入分析和探讨的问题。

本文也利用数字摄影测量系统对卫星及其载荷这样具有复杂表面的物体进行了测量试验。针对卫星在轨运行时受空间冷黑和太阳辐照等环境影响,机械结构可能发生一定程度的热变形,导致载荷光轴夹角变化,影响指向精度的问题,在总装

阶段对其热变形进行测量试验,以便验证结构设计的可靠性并对由此带来的指向影响进行评估。试验中被测的高分辨率卫星光学系统由 2 台相机、3 台星敏感器等载荷组成,装配过程中严格确定了各载荷光轴的夹角,以保证相机的指向精度。结合多年来积累的课题经验,成功地利用数字摄影测量系统在常温常压下对卫星结构件进行了热变形测量试验,并取得了较高的测试精度。

## 2 数字摄影测量系统

### 2.1 数字摄影测量原理

摄影测量法的基本原理是基于双目立体视觉的三维重建,即利用 2 个相机从不同位置和方向分别记录空间同一场景的图像,通过处理寻找二维图像中的对应点,根据已知的相机内、外部参数,计算得到其相对于空间中某个坐标系的三维坐标,如图 1 所示。数字摄影测量系统则是采用数字方式进行图像的拍摄、存储和处理来完成摄影测量过程<sup>[11-12]</sup>。

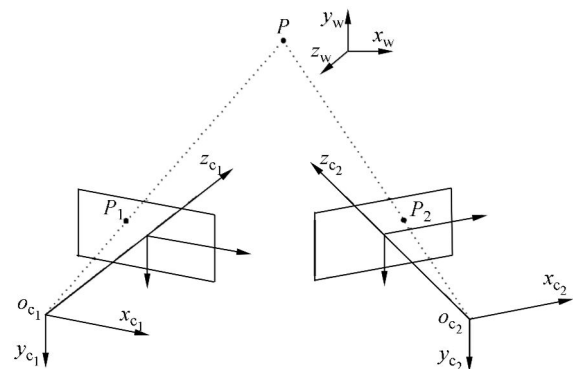


图 1 摄影测量原理图

Fig. 1 Theory of the photogrammetry

### 2.2 数字摄影测量系统组成

数字摄影测量系统由相机、标志点、标尺、图像处理软件组成。



图 2 数字摄影测量系统相机

Fig. 2 Camera of photogrammetric system

相机用于被测物图像的拍摄,采用如图 2 所示的工业级数码相机,像素为 800 万,像元尺寸为  $10\ \mu\text{m}$ ,焦距为 21 mm,视场角为  $77^\circ \times 56^\circ$ 。图中灰色圆环为发光二极管(LED)光源,可在摄影过程中开启,对标志点照明。左上方为真空密封小舱的舱体部分,与底座固定后用于在真空低温环境下对相机进行保护,小舱内的工作状态为常温常压。

标志点是摄影测量中的目标物,主要分为两类:圆形标志点和编码标志点,前者用于计算其粘贴位置的空间坐标,后者可以方便图像处理软件在多幅图像中自动识别对应点,并用于图像拼接,如图 3 所示。

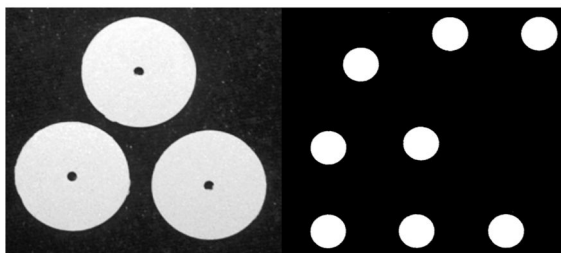


图 3 摄影测量系统中的圆形和编码标志点

Fig. 3 Circular and coding targets of photogrammetric system

标尺是摄影测量过程中的长度基准,需要预先标定,以其长度作为标志点坐标解算时的标准输入,如图 4 所示。

图像处理软件用于标志点的识别、坐标解算



图 4 摄影测量系统标尺

Fig. 4 Standard ruler of photogrammetric system

以及面形拟合,是摄影测量系统的核心,操作界面如图 5 所示。

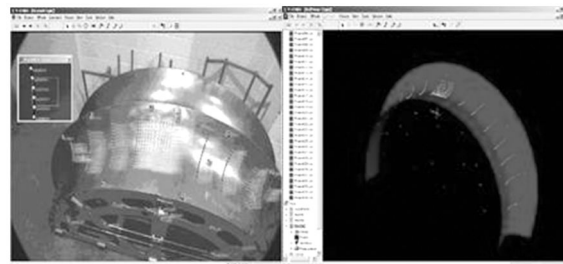


图 5 数字摄影测量系统图像处理软件

Fig. 5 Image-processing software of photogrammetric system

### 3 组合体结构件摄影测量试验

#### 3.1 试验概况

被测组合体结构件中相机 A、B 和星敏感器 1、2、3 的位置如图 6 所示,在相机 A、B 底板以及星敏感器 1、2、3 支架背面粘贴圆形标志点,在相机机械结构以及现场支架等附近区域粘贴编码标志点,用于图像拍摄。

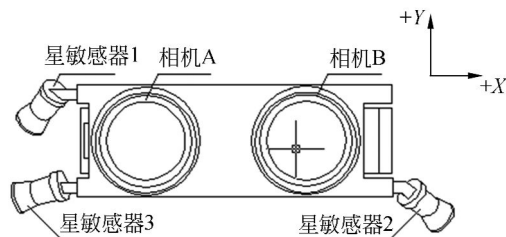


图 6 组合体结构件示意图

Fig. 6 Combination structure of satellite

试验过程中,按照组合体结构件的温度分布分为 4 个工况,20 个子工况,温度分布情况如表 1 所示,其中组合体 +X 侧为图 6 中相机 B 右侧位置,X 向中部为相机 A、B 之间,组合体 -X 侧为相机 A 左侧,组合体 +Y 侧为图 6 中相机 A、B 上方。

表 1 测量试验中各工况、子工况组合体温度分布表

Tab. 1 Temperature distributions of combinations in different working conditions

工况	位置	1 级子工况	2 级子工况	3 级子工况	4 级子工况	5 级子工况
1	组合体各点	室温	32 °C	39 °C	32 °C	室温
2	相机	室温	32 °C	39 °C	32 °C	室温
3	星敏感器及其支架	室温	室温	室温	室温	室温
	组合体+X 侧	室温	室温	室温	室温	室温
	组合体 X 向中部	室温	26 °C	30 °C	26 °C	室温
4	组合体-X 侧	室温	32 °C	39 °C	32 °C	室温
	组合体+Y 侧	室温	32 °C	39 °C	32 °C	室温

为压缩试验时间,将前一工况的五级子工况与后一工况的一级子工况合并,仅测量 1 次。试验中控温精度优于 $\pm 4$  °C。

测量过程中,每个子工况拍摄如图 7 所示 200 张左右的照片,图像处理软件自动计算出各标志点的空间坐标,选取特定表面的标志点坐标进行平面拟合,计算法线矢量,将相机 B、星敏感器 1、2、3 的法线矢量与相机 A 的法线矢量相减,得到法线夹角。不同子工况下的夹角之差,即为所求的夹角变化量。

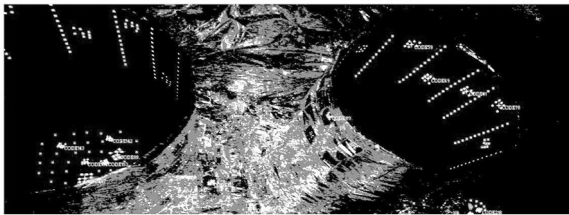


图 7 数字摄影测量系统拍摄的组合体照片

Fig. 7 Picture of combination by photogrammetric system

### 3.2 测量结果及分析

各级工况、子工况下的夹角变化量测量结果见图 8~11。可以看出,各工况下夹角变化量与

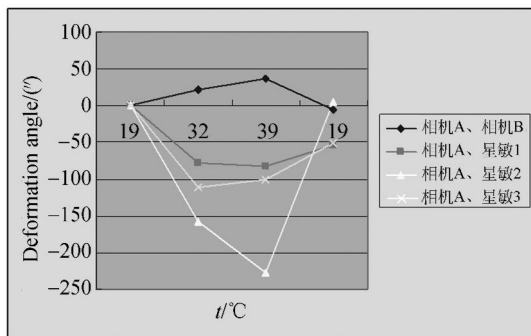


图 8 工况 1 测量结果图

Fig. 8 Test result in working condition 1

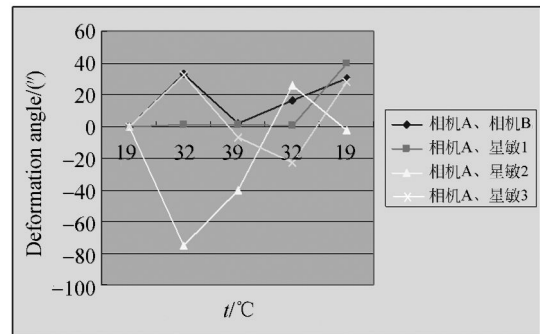


图 9 工况 2 测量结果图

Fig. 9 Test result in working condition 2

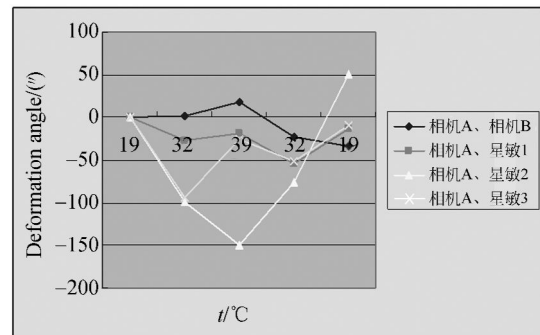


图 10 工况 3 测量结果图

Fig. 10 Test result in working condition 3

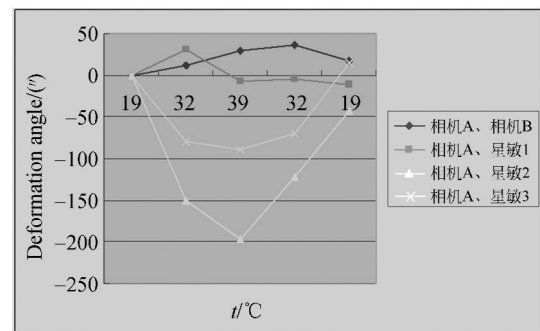


图 11 工况 4 测量结果图

Fig. 11 Test result in working condition 4

温度呈较大的相关性,随温度升高而变大,随温度降低而恢复,最终回到初始位置。测量结果中最大变化量为工况 1 的 3 级子工况中相机 A、星敏传感器 2 夹角,达到 227.9",数值较大,需要对结构进行修正,提高卫星相机指向精度。

3.3 测量精度分析

组合体结构件数字摄影测量试验精度主要从系统精度、测量精度和拟合精度三方面考虑。

国家计量院对所用数字摄影测量系统的长度测量标定结果表明,其相对精度为 1:50 000,认为各方向测量误差分布平均,对于外形尺寸约为 Φ500 mm 的相机底座,测量精度达到 0.01 mm,角度误差为  $10/500 \times 10^{-3} \times 206\ 265 \times 2^{1/2} = 5.8"$ ,即测量试验中的系统精度为 5.8"。

实际测量精度用测量重复性来近似说明。鉴于每级子工况中均需拍摄 200 张左右图片,拍摄次数过多将影响试验进度,因此仅在 3 个子工况中各进行了 1 次重复拍摄,拟合出的各表面法线矢量重复性结果见表 2。可以看出,相机 A、B 的法线测量重复性平均值为 12.5",星敏感器的法线测量重复性平均值为 13.9"。

表 2 组合体结构件摄影测量试验中的重复性数据表

Tab.2 Repetition characteristic of the test result of combination thermal deformation by photogrammetry system (")

工况名称	相机 A	相机 B	星敏传感器 1	星敏传感器 2	星敏传感器 3
工况 3 中 2 级子工况	11.2	8.3	15.8	9.7	24.1
工况 4 中 1 级子工况	14.4	15.8	14.4	11.5	11.5
工况 4 中 5 级子工况	15.8	9.3	14.8	14.6	8.3
平均值	12.5		13.9		

对平面拟合结果进行分析,各平面 RMS 值平均误差约为 0.3 μm 左右,外形较小的星敏底座尺寸为 Φ200 mm,角度偏差为  $0.3/200 \times 10^{-3} \times 2^{1/2} \times 206\ 265 = 0.44"$ ,与系统精度和测量精度相比,可以忽略。

由此得出结论,结构件组合体常压热变形试验的测量精度优于 13.9"。

3.4 与有限元分析结果比对

对结构体建立有限元模型进行仿真分析,计算出的变形场云图如图 12 所示。各级工况中常

温子工况与高温子工况即 3 级子工况的对应夹角变化量的有限元分析与摄影测量结果偏差见表 3,与测量对应结果比对,两者的趋势完全一致,数据的均方值为 30.4"。

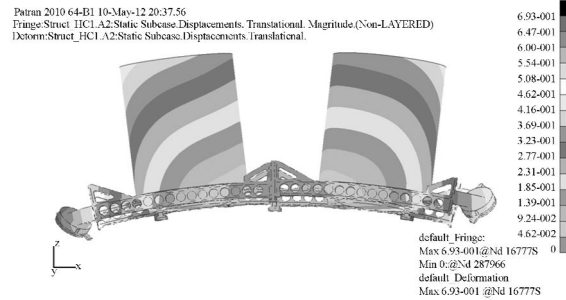


图 12 组合体结构件有限元分析变形场云图

Fig.12 Deformation distribution by finite element of satellite combination structure

表 3 组合体常压热变形有限元分析与数字摄影测量偏差表

Tab.3 Comparison of combination thermal deformations by finite element analysis and photogrammetry (")

工况	相机 A、相机 B	相机 A、星敏 1	相机 A、星敏 2	相机 A、星敏 3
1	35.7	61.8	30.9	26.4
2	2.0	0.1	25.3	5.7
3	16.5	16.8	29.2	24.6
4	31.3	6.3	64.7	17.1

4 分析与讨论

从精度分析可以看出,相机 A、B 的法线拟合精度要高于星敏传感器 1、2、3,其原因在于星敏传感器背面的法线角度与相机拍摄时光轴的夹角过大,使得圆形标志点的成像形状趋于椭圆,甚至不规则,如图 13 所示,严重影响了质心计算,从而影

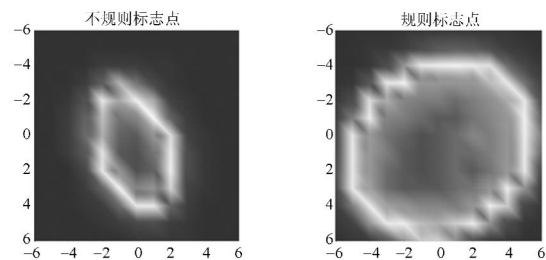


图 13 不规则与规则标志点对比图

Fig.13 Regular and irregular images of target

响坐标解算和平面拟合精度。因此,摄影测量系统的拍摄角度和被测物的相互关系非常重要,理想的拍摄位置,更有利于发挥测量系统高精度的特点。

平面拟合过程中,个别标志点与其他点相比在前后两个子工况中的位置变化过大,导致拟合出的法线变化量较大,应该加以剔除,试验过程中采用剔除 3 倍标准差以上粗大误差的做法,有效降低了系统误差。

在计算单一表面法线前后两级子工况的变化量时,需要为两级子工况的测量结果统一坐标系。试验前计划采用在结构件周围放置基准尺作为坐标基准的方法,但在实际过程中发现误差较大,改

为利用在结构件周围位置粘贴编码标志点作为公共点,用最小二乘法进行公共点转换,有效降低了坐标转换带来的测量误差。

## 5 结 论

卫星相机、星敏感器组合体结构件常压热变形数字摄影测量试验是数字摄影测量系统在卫星型号试验中的首次成功应用,积累了大量的工程经验,进一步验证了系统可靠性,为今后开展更多的型号应用奠定了坚实基础。今后还将构建适应于在真空低温环境下应用的摄影测量系统,服务于日益增长的试验需求。

### 参考文献:

- [1] 张祖勋,张剑清. 数字摄影测量学[M]. 武汉:武汉大学出版社,1997.  
ZHANG Z X, ZHANG J Q. *Digital Photogrammetry* [M]. Wuhan: Wuhan University Press, 1997. (in Chinese)
- [2] 黄桂平. 数字近景工业摄影测量关键技术研究与应用[D]. 天津:天津大学博士论文,2005.  
HUANG G P. *Key Technology Research and Application of Digital Close Range Industry Photogrammetry System* [D]. Tianjin: Tianjin University, 2005. (in Chinese)
- [3] PAPPA R S, GIERSCH L R, QUAGLIAROLI J M. Photogrammetry of a 5m inflatable space antenna with consumer digital cameras [R]. Hampton, Virginia: Langley Research Center, NASA, 2000.
- [4] MEYER C G, JONES T W, LUNSFORD C B, *et al.*. In-vacuum photogrammetry of a 10-meter solar sail [R]. Hampton, Virginia: Langley Research Center, NASA, 2005.
- [5] PAPPA R S, JONES T W, BLACH J T, *et al.*. Photogrammetry methodology for gossamer spacecraft structures [J]. *Sound and Vibration*, 2002, 36(8):12-21.
- [6] 于江,蒋山平,杨林华. 基于数字近景摄影测量的天线变形测量[J]. 航天器环境工程, 2008, 25(1): 56-58.
- [7] 蒋山平,杨林华,于江. 真空低温环境用高精度 CCD 摄影测量系统[J]. 航天器环境工程, 2010, 27(3):361-363.  
JIANG SH P, YANG L H, YU J. A high accuracy CCD photogrammetry system used in the vacuum cryogenic environment [J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2010, 27(3):361-363. (in Chinese)
- [8] 王保丰,李广云,李宗春,等. 高精度数字摄影测量技术在 50m 大型天线中的应用[J]. 测绘工程, 2007, 16(1):42-46.  
WANG B F, LI G Y, LI Z CH, *et al.*. Application of high accuracy digital photogrammetry technology in a 50-meter large antenna [J]. *Engineering of Surveying and Mapping*, 2007, 16(1):42-46. (in Chinese)
- [9] 李旭东,崔磊,赵慧洁,等. 双振镜点扫描三维形貌测量系统[J]. 光学精密工程, 2010, 18(7):1648-1653.  
LI X D, CUI L, ZHAO H J, *et al.*. Three-dimensional shape measurement system based on dual oscillating mirrors with point scanning [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(7):1648-1653. (in Chinese)

- [10] 姜宏志,赵慧洁,李旭东,等. 用于强反射表面形貌测量的投影栅相位法[J]. 光学精密工程,2010,18(9):2002-2008.  
JIANG H Z, ZHAO H J, LI X D, *et al.*. Projected fringe profilometry for profile measurement of high reflective surface [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(9): 2002-2008. (in Chinese)
- [11] XIAO ZH ZH, LIANG J, YU D H, *et al.*. Large-field-of-view deformation measurement for transmission tower based on close-range photogrammetry [J]. *Measurement*, 2011, 44(9):1705-1712.
- [12] 刘建伟,蒋志强,刘元朋,等. 输电塔架承载变形的三维光学测量[J]. 光学精密工程,2012,20(5):942-948.  
LIU J W, JIANG ZH Q, LIU Y P, *et al.*. Measurement on structural deformation of load-bearing power transmission tower based on 3D optical method [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(5): 942-948. (in Chinese)

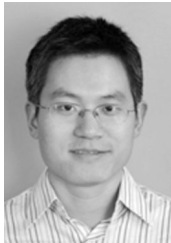
## 作者简介:



许 杰(1984—),男,北京人,工程师,2006年于浙江大学获得学士学位,2009年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得硕士学位,主要从事成像系统、照明系统光学设计,杂散光分析以及低温光学等方面的研究。E-mail: xujie027@126.com



肖大舟(1978—),男,山西临汾人,硕士,工程师,2005年于清华大学航天航空学院获硕士学位,主要从事航天光学精密仪器设计方面的研究。E-mail: xiaodz2011@sina.com



蒋山平(1980—),男,湖北天门人,硕士,高级工程师,2005年于北京理工大学获得硕士学位,主要从事卫星红外遥感器辐射定标技术、光学机械设计方面研究。E-mail: jiangshp\_cast@163.com



张景川(1982—),男,博士,工程师,2010年于天津大学获得博士学位,主要从事航天器真空热试验测控技术方面的研究。E-mail: zhangjingchuan@tju.edu.cn.



杨林华(1962—),女,山东莱州人,硕士,研究员,1986年于哈尔滨工业大学获得学士学位,2002年于北京航空航天大学获得硕士学位,主要从事卫星光学遥感器模拟空间环境下辐射定标技术、空间太阳辐照环境模拟技术方面的研究。E-mail: ylh1357@yahoo.com.cn