

三线阵 CCD 立体测绘相机结构实现技术*

苗健宇, 张立平, 田铁印, 吴国栋, 翟 岩

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 长春 130033)

摘 要: 分析了三线阵 CCD 立体测绘相机工作原理, 设计了一种可工程化实施的测绘相机光机结构。此结构由 3 台相机互成角度装入测绘基座构成。单相机采用像方远心亚对称光学系统, 由单镜组装入薄壁壳体的镜头、基于凸轮导向结构的调焦机构、基准镜和成像电器盒构成。测绘基座为测绘相机的高稳定支撑结构, 采用 7 个筒单元、3 个板单元与底座交错形成有机一体的结构形式。星敏支架为星敏感器的安装结构, 采用 3 个筒单元和一个圆锥单元相贯而成一体的结构形式。运用 PATRAN/NAS-TRAN 软件对测绘相机进行工程分析表明, 测绘相机组合体的强度和刚度好, 满足航天光学遥感器的要求。振动试验结果表明, 测绘相机一阶固有频率大于 100 Hz, 不会与整星产生共振; 通过各种环境试验后, 相机间基准镜坐标系变化小于 4", 测绘相机测量坐标系变化小于 5"。通过在轨运行表明, 测绘相机结构稳定, 满足测绘精度要求。

关键词: 测绘相机; 测绘基座; 光机结构; 坐标系

中图分类号: P236 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 420.60

Realizable technology of light-machine structure for three-line array CCD tridimensional mapping camera

Miao Jianyu, Zhang Liping, Tian Tieyin, Wu Guodong, Zhai Yan

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

Abstract: Through analyzing the principle of three-line-array CCD mapping camera, a kind of engineering implemented light-machine structure is designed, which consists of three cameras with space intersection angles. Every single camera adopts a telecentric and sub-symmetrical optical system, which is composed of lens units assembled to the thin shell, focusing mechanism based on a cam oriented frame work, fiducial mirror and imaging electrical equipment. The mapping pedestal is a steady support structure for the mapping camera system and has seven canister units and three plank units. The star sensors are installed on a bracket, which has three canister units and one taper unit. The mapping camera system is analyzed using finite element method, and simulation results show that the structural strength and dynamic stiffness of the system can meet the requirement of space remote camera well. Vibration test shows that the fundamental frequency of the system is higher than 100 Hz, which does not bring sympathetic vibration with secondary planet. After environmental tests, the variety of the reference frame of the camera fiducial mirror is less than 4", and the variety of the measuring reference frame of the mapping camera is less than 5". Orbiting results show that the structure of the mapping camera is stable, and can satisfy the mapping accuracy requirement.

Key words: mapping camera; mapping pedestal; light-machine structure; reference frame

收稿日期: 2011-06 Received Date: 2011-06

* 基金项目: 国家 863 计划(2008AA121803) 资助项目

1 引 言

立体测绘相机是 20 世纪 80 年代初出现的新一代传输型数字摄影测量相机。该相机具有在轨立体成像和从摄影图像出发重构外方位元素的特点,受到各国航天摄影测量学家的重视,并成为 20 世纪 90 年代后期国际摄影测量与遥感领域的重点研究项目之一。我国科学家 20 世纪 80 年代初即开始跟踪该项技术的发展,在其构像理论和影像的摄影测量处理等方面进行了相应的研究工作,并提出了以“等效框幅”影像进行 CCD 影像空中三角测量的思想^[1-2]。

利用三线阵 CCD 立体测绘相机进行航天摄影测量,主要以空间站和各类卫星为空间飞行平台,对地球表面进行立体测量。与其他摄影测量定位、测图卫星相互补充,可以提供包括数字地形图、数字正射影像图、数字高程图(DEM)、三维地形景观图和三维地形仿真等在内的测绘产品。三线阵 CCD 立体测绘相机在民用遥感和国土测绘、资源普查、自然灾害监测、土木工程、土地利用和城市规划、通讯视线测定、飞行模拟等领域有着广泛的应用前景,对促进我国的国民经济建设和数字地球的实现有着重要的实际意义^[3-5]。

2 三线阵 CCD 立体测绘相机工作原理及结构设计任务分析

三线阵 CCD 测绘相机工作原理示意图,如图 1 所示。三线阵 CCD 立体相机由具有一定交会角的前视、正视和后视 3 个线阵 CCD 相机构成,正视相机沿飞行方向垂直对地成像,前视相机向前倾斜,后视相机向后倾斜成像,前、后视相机具有一定的交会角。在测绘时,需要确定每个扫描时刻三线阵相机的外方位元素,即相机坐标系的原点在地球坐标系中的位置和姿态角,以及三线阵相机的内方位元素,即相机的主距、主点位置和交会角,从而可以确定地面上任一物点在 3 个不同时刻时在 3 条线阵 CCD 上的像点坐标;反之,如果能够求出对应的像点坐标,那么可以计算出地面上任一物点的坐标^[6-7]。

三线阵 CCD 摄影测量相机的摄影测量处理精度依赖于相机本身内方位元素的精度和稳定性,这也是摄影测量相机与其他相机的区别所在。但由于三线阵 CCD 相机本身的特点,在设计中除应满足与常规摄影测量相机同样的要求外,还必须考虑其焦距和前、后视相机之间的夹角对摄影测量处理和相机设计本身的影响。主要考虑的因素有:1) 前、后视相机与正视相机之间夹角变化对基高比和影像数据量的影响;2) 相机内方位元素变化对三维地形信息提取精度的影响;3) 焦距变化对像元地面分辨率和影像数据量的影响;4) 地球自转对三线阵 CCD 摄影测量相机

设计的影响等。这些因素都直接影响着三线阵 CCD 数字摄影测量处理的精度和稳定性。因此,在相机系统的设计中应加以综合考虑,以满足摄影测量应用的要求。

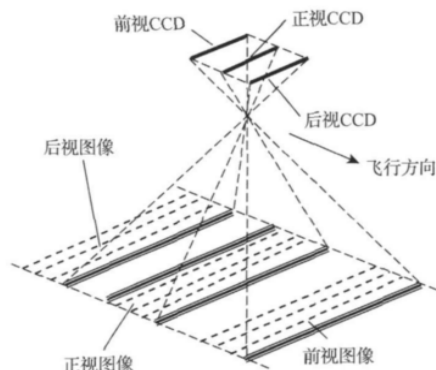


图 1 三线阵 CCD 测绘相机工作原理示意图

Fig. 1 Sketch map of the operating principle of the three-line array CCD mapping camera

本文所涉及的三线阵 CCD 立体测绘相机实际是由测绘相机,即前视相机、正视相机和后视相机,多光谱相机,以及星敏支架通过测绘基座支撑构成的测绘相机组合体。测绘相机连续推扫的影像可以构成立体测量模型,其中正视相机像面上还装有 4 个小面阵 CCD,用于测绘处理平差,提高目标定位精度。多光谱相机连续推扫获取的影像信息可以进行地物属性判读,本文对多光谱相机的结构形式和精度不做介绍。

3 坐标系定义

3.1 单相机测量坐标系

图 2 为单相机测量坐标系的定义的示意图,对于正视、前视和后视相机, +Z 轴为相机视轴方向。相机测量坐标系与自身立方镜坐标系坐标轴之间的相对几何关系用图中的 α 、 β 和 γ 角描述;前视相机、后视相机测量坐标系与正视相机测量坐标系坐标轴之间的相对几何关系也用图中的 α 、 β 、 γ 角描述^[8-9]。

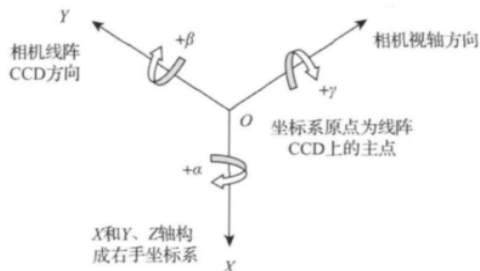


图 2 单相机测量坐标系定义

Fig. 2 Measuring reference coordinate frame of the mapping camera

通过标定单相机测量坐标系在环境试验前、后 相对于某指定参考坐标系的微转动来描述相机坐标系的漂移,并以此来评价单相机测量坐标系的稳定性,同时也用于描述相机间光轴、CCD 线阵等之间取向几何关系的变化。

3.2 相机基准镜坐标系

相机基准镜坐标系的原点在基准镜的几何中心, X 、 Y 和 Z 三轴与相机自身测量坐标系的三轴平行。

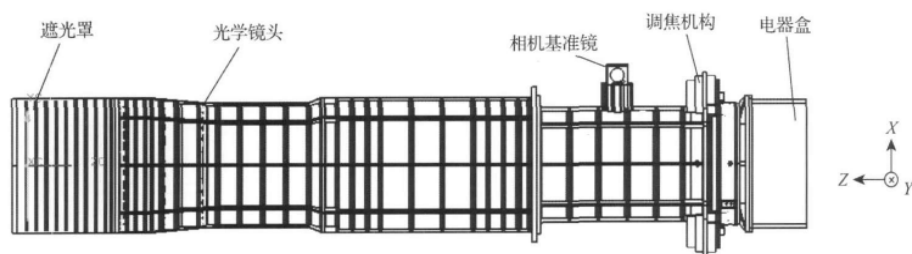


图 3 前视相机

Fig. 3 Forward camera

1) 光学系统

采用像方远心的亚对称光学系统,光学系统成像质量好,在 Nyquist 频率为 77 lp/mm 时,正视相机镜头全视场的平均传递函数为 0.613,前、后视相机镜头全视场的平均传递函数为 0.578^[10]。另外,此光学系统兼顾了测绘相机组合体的外形尺寸和布局,更有利于保证相机的小型化、轻量化及稳定性。

2) 镜头结构

镜头前端设计有遮光罩,用于消除相机对地成像时进入镜头内部的杂散光,遮光罩采用碳纤维复合材料,此材料密度小,强度和刚度好,有利于减轻相机质量;

镜头结构材料采用铸钛合金,采取单镜组,即镜座、透镜和压圈独立装配形成组件,进而装入薄壁壳体中的结构形式。通过分析表明此种结构能够满足单台测绘相机技术指标的要求。单镜组装配方便,可拆卸性强;薄壁壳体整体精度高,强度和刚度性能好,有利于达到多透镜同心精度^[11-13]。

镜头装调完成后,正视相机、前视相机和后视相机光学镜头的全视场平均传递函数均在 0.451 以上,相对畸变均小于 3×10^{-4} ,满足测绘相机高成像质量的要求。

3) 调焦机构

调焦机构是为了补偿因发射过程及空间复杂环境引起的相 CCD 像面位置的变化而设计的^[14]。调焦机构基于凸轮导向结构设计,采用沿光轴方向移动 CCD 像面,14 位绝对式光电轴角编码器反馈像面位置的检测调焦方案,精度检测结果表明此种机构满足测绘相机调焦精度

4 测绘相机结构设计及工程分析

4.1 结构设计

4.1.1 单相机

前视相机和后视相机采用相同的结构形式,正视相机与前视相机结构类似,只在光学元件数量和外形尺寸上有区别。前视相机的外形结构如图 3 所示。

的需求。

4) 相机基准镜

基准镜是传递镜头光轴,或视轴位置的外部基准,同时也是考察相机在组合体中稳定性的重要参考基准。在测绘相机组合体总装调的过程中,通过精密研磨基准立方镜组件底面,建立镜头光轴与相机基准镜 + Z 轴的关系;通过精密研磨 CCD 组件安装隔垫,建立相机视轴与相机基准镜 + Z 轴的关系,保证精度,误差小于 10"。

4.1.2 测绘基座

三线阵 CCD 立体测绘相机相互几何位置关系的稳定性是保证相机在轨工作的前提条件,因此,构建测绘相机的支撑结构——测绘基座的结构形式和几何稳定性是三线阵 CCD 立体测绘相机研制工作中的关键环节之一。

测绘基座外形图如图 4 所示,通过 7 个简单单元、3 个板单元以及底座交错形成有机的一体结构,该结构各向受力均匀,足以保证三线阵立体测绘相机空间几何位置关系的稳定性。简单单元和板单元构建的测绘基座,内、外腔贯通,没有形成“死腔”,加工工艺性好;在测绘基座中加入简单单元,整体的刚度和强度明显提高,其几何稳定性也随之增加。

单相机分别装入简单单元所构建的安装孔内,通过简单单元保证测绘相机的交会角;多光谱相机安装在正视相机的底部,即通过简单单元、板单元及底座交错构建的安装腔内;星敏支架安装在前视相机顶部的安装平面上;组合体通过底座与卫星连接。

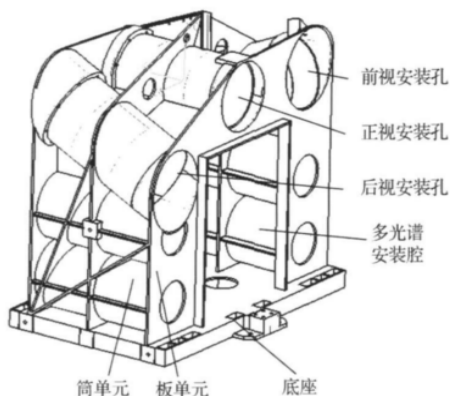


图 4 测绘基座

Fig. 4 Mapping pedestal

4.1.3 星敏支架

相机的外方位元素主要依靠星敏传感器测量和确定。外方位元素与内方位元素相对关系准确稳定是保障测绘相机正常工作的前提^[15]。星敏支架是提供星敏传感器安装接口,保证各星敏传感器指向关系稳定的重要结构件。

星敏支架通过 3 个简单单元和 1 个圆锥单元相贯而成,每个简单单元的一端设计有法兰,用于连接星敏传感器,圆锥单元与板单元连接,星敏支架通过板单元与测绘基座连接固定^[15-16],如图 5 所示。星敏支架采用铸造成型,材料选用铸钛合金,此结构能够保证星敏传感器的指向稳定性。

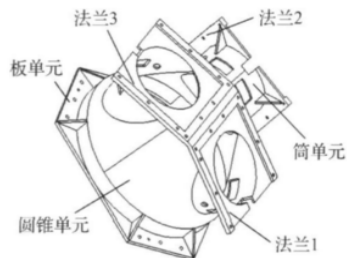


图 5 星敏支架

Fig. 5 Bracket of star sensors

4.1.4 测绘相机组合体

正视相机、前视相机、后视相机和多光谱相机装入测绘基座相应的安装孔或安装腔内,星敏支架安装到测绘基座的顶部,即形成测绘相机组合体,如图 6 所示。基座基准镜为测绘相机组合体装调的总基准,以此为基准依次进行各相机镜头装调,以及相机像面装调,从而建立起各相机测量坐标系和相机基准镜之间的关系。

4.2 工程分析

测绘相机组合体工程分析采用 PATRAN/NASTRAN 程序进行,模型构造遵循结构一致、能量等效、载荷等效

和材料等效等原则。测绘相机组合体单元总数为 125 697,节点总数为 171 269,有限元模型如图 7 所示。

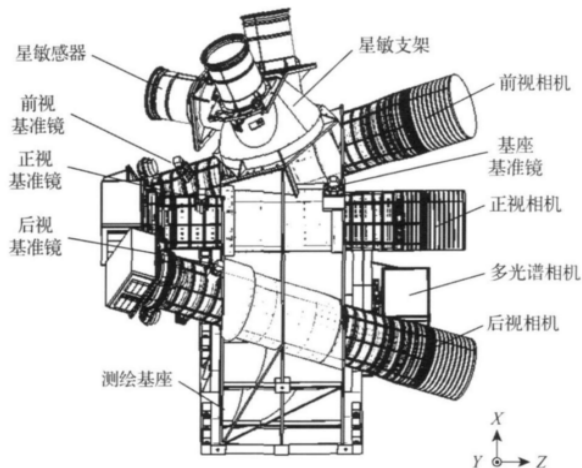


图 6 测绘相机组合体

Fig. 6 Mapping camera assembly

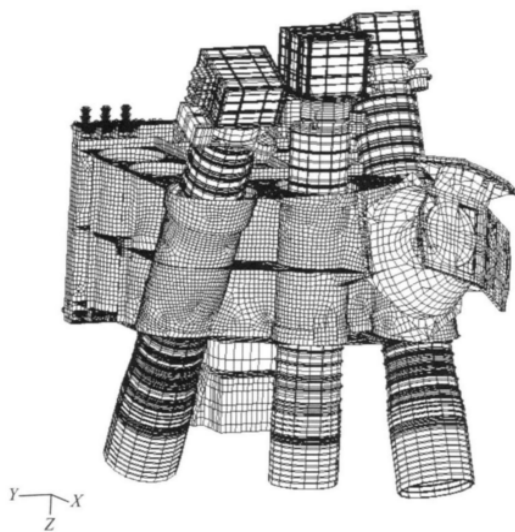
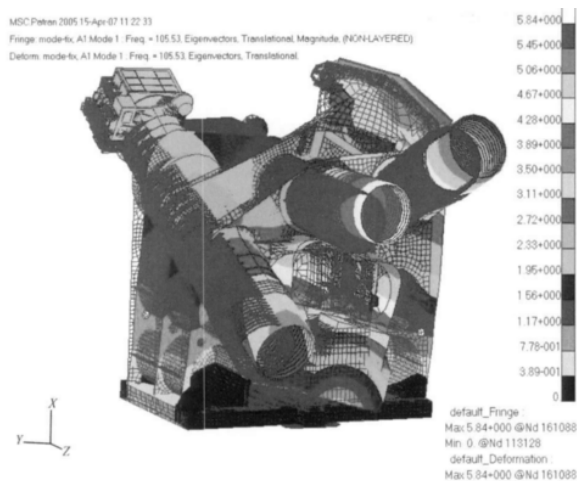


图 7 测绘相机组合体有限元模型

Fig. 7 Finite element model of the mapping camera assembly

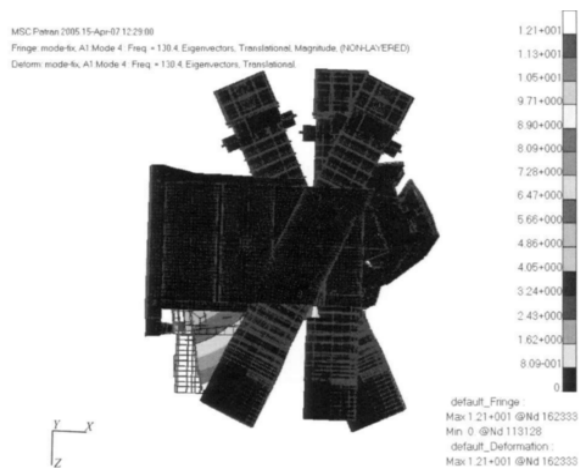
由于空间遥感仪器还要经历地面运输和发射运载等阶段,为保证结构在这些阶段不破坏、不变形,要求它具备一定的动态特性,需要进行动力学分析。首先,对测绘相机组合体进行模态分析,模态分析结果云图,如图 8 所示。测绘相机组合体前 4 阶的固有频率分别为 105.5 Hz、112.5 Hz、119.4 Hz 和 130.4 Hz,测绘相机组合体的动态刚度足够高,满足结构动态刚度要求。

其次,对测绘相机组合体在微重力条件下进行了强度分析,各种材料的安全系数均大于 1.5,测绘相机组合体在微重力条件下,结构强度满足要求。



(a) 1 阶模态

(a) First model

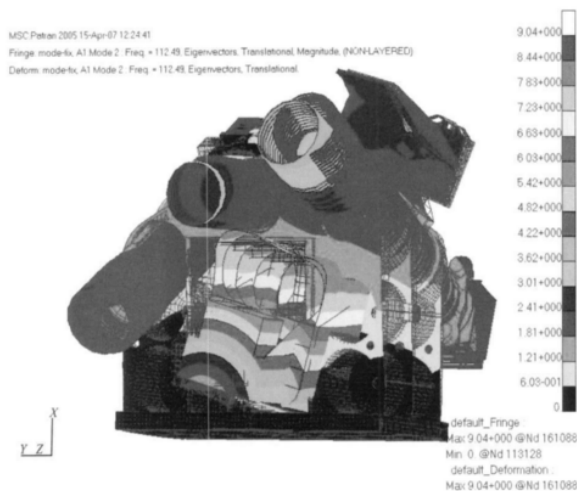


(d) 4 阶模态

(d) Forth model

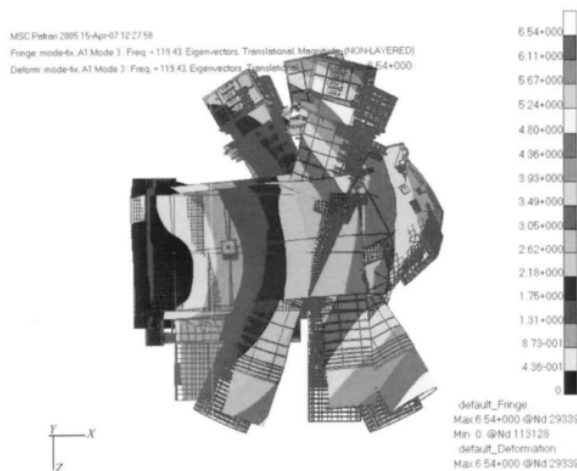
图 8 测绘相机组合体模态分析结果云图

Fig. 8 Modal analysis results of the mapping camera assembly



(b) 2 阶模态

(b) Second model



(c) 3 阶模态

(c) Third model

最后,对测绘相机组合体进行了正弦振动分析,通过分析表明测绘相机组合体正弦扫描各个方向的加速度响应不大,放大倍率较低,测绘相机组合体在正弦扫描条件下,结构动态刚度满足要求。

综合以上分析,测绘相机组合体的各项性能指标均满足航天光学遥感器对结构的要求。

5 稳定性验证

测绘相机组合体装调结束后,对其进行了随机振动和正弦振动等力学试验,以及热真空和热光学等热试验,以验证相机各项性能指标和结构的稳定性。

5.1 振动试验

通过对测绘相机组合体进行低频扫描获取其模态情况,试验结果表明测绘相机组合体 X 、 Y 和 Z 三个方向的一阶固有频率分别为 124.4 Hz、114.0 Hz 和 115.5 Hz 与工程分析结果接近;在正弦振动和随机振动后进行低频扫描,其一阶固有频率变化较小,验证测绘相机组合体结构稳定,没有因振动产生结构破坏。

5.2 坐标系变化情况

1) 相机基准镜坐标系变化情况

在温度范围 $18\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、4 h 温度变化小于 $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、洁净度 10 万级,实验室隔振效果(频率 5 Hz 以下、振动速度频域 $V_{\text{rms}} \leq 10\text{ }\mu\text{m/s}$)良好的精密几何标定实验室进行相机基准镜坐标系关系测量。

测量前,精密调整莱卡 TM5100A 自准直经纬仪的垂直度盘指标差、水平视准差和水平轴倾斜误差,保证 3 种误差小于 $1''$;测试时,使用莱卡 TM5100A 自准直经纬仪

的综合误差矫正功能完成误差修正;多次经纬仪瞄准基准镜及经纬仪互瞄后,逐一将准直测量数据和互瞄测量数据导入软件,即可解算出相机基准镜坐标系间的关系。各基准镜坐标系相对正视相机基准镜坐标系振动后角度变化情况,如表 1 所示。由此可以看出,测绘相机组合体中基准镜坐标系相对正视相机基准镜坐标系变化小于 4",相机间相对位置关系稳定。

表 1 相机基准镜坐标系变化情况

Table 1 The variety of the reference frame of the camera fiducial mirror (")

	基准镜	正视相机基准镜三轴		
	三轴	+X	+Y	+Z
前视相机	+X	1.3	2.1	1.3
	+Y	1.3	0.4	2.0
	+Z	1.3	1.3	1.3
后视相机	+X	0.7	3.7	0.7
	+Y	2.4	3.2	3.6
	+Z	0.7	2.3	0.7
测绘基座	+X	2.3	2.0	1.2
	+Y	2.0	0.7	3.4
	+Z	1.2	3.4	0.8

2) 相机测量坐标系变化情况

相机测量坐标相对自身的立方镜坐标系关系的标定环境同上,实验设备主要有光学平台,极限误差 0.5"二维转台,7.5 m 焦距平行光管,莱卡 TM5100A 自准直经纬仪,通过精密调整转台及监测经纬仪瞄准等变化情况解算出相应的 α 、 β 和 γ 值。在各项试验前、后分别对相机测量坐标系相对自身的立方镜坐标系关系进行了标定,结果见表 2,测绘相机测量坐标系相对于自身基准镜坐标系变化小于 5",相机测量坐标系稳定。

表 2 相机测量坐标系变化情况

Table 2 The variety of the measuring reference frame of the mapping camera (")

	几何关系	装调后	振动试验后	热试验后	最大变化值
前视相机	α	4	3	0	4
	β	-35	-40	-39	5
	γ	-35	-34	-33	2
正视相机	α	-7	-8	-12	5
	β	-36	-37	-40	4
	γ	-36	-40	-36	4
后视相机	α	-12	-15	-13	3
	β	-3	-5	-2	3
	γ	0	2	3	3

5.3 小 结

通过上述试验表明,测绘相机组合体一阶固有频率大于 100 Hz,满足大于整星固有频率 3 倍以上的要求,不会与整星产生共振;测绘相机组合体结构稳定,通过环境

试验后相机间基准镜坐标系变化小于 4",相机测量坐标系变化小于 5"。综上所述,测绘相机具备抵抗发射过程中复杂力学环境的能力。

6 结 论

测绘相机采用像方远心的亚对称光学系统,镜头采取单镜组装入薄壁壳体中的结构形式,光学镜头传递函数均在 0.451 以上,调焦机构采用沿光轴方向移动 CCD 像面,编码器反馈像面位置的检调焦方案,并在相机外部安装传递镜头光轴,或视轴位置关系的基准镜;测绘基座通过 7 个简单单元、3 个板单元以及底座交错形成有机的一体结构,该结构可以保证测绘相机空间几何位置关系的稳定性;基座基准镜为测绘相机组合体装调的总基准,以此为基准依次进行各相机镜头装调,以及像面装调;工程分析表明,测绘相机组合体的动态刚度足够高,满足结构动态刚度要求。通过各种环境试验表明,测绘相机组合体 3 个方向的一阶固有频率大于 100 Hz,结构状态稳定,相机间基准镜坐标系变化小于 4",相机测量坐标系变化小于 5"。通过在轨运行表明,测绘相机光机结构稳定,满足测绘精度需求。

参考文献

- [1] 王任享. 三线阵 CCD 影像卫星摄影测量原理[M]. 北京: 测绘出版社, 2006: 10-15.
WANG R X. Satellite photogrammetric principle for three-line-array CCD imagery [M]. Beijing: Sinomaps Press, 2006: 10-15.
- [2] 王任享. 我国无地面控制点卫星摄影测量综述[J]. 海洋测绘, 2008, 28(5): 2-8.
WANG R X. Mapping satellite without control point in China [J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2008, 28(5): 2-8.
- [3] 李晨曦, 张宇烽. 传输型测绘相机内方位元素误差对高程精度的影响分析[J]. 航天返回与遥感, 2010, 31(2): 23-28.
LI CH X, ZHANG Y F. Analysis of influences of real-time transmission mapping camera interior orientation error on elevation [J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2010, 31(2): 23-28.
- [4] 宋梅. 多镜头面阵 CCD 测绘相机的精度分析[J]. 空间科学学报, 2010, 30(6): 589-595.
SONG M. Analysis on precision of multi-lens area array CCD mapping Camera [J]. Chin J. Space Sci., 2010, 30(6): 589-595.
- [5] 刘金国, 李杰, 郝志航. 三线阵相机亚像元精度几何标定方法研究[J]. 光电工程, 2004, 31(1): 36-39.

- LIU J G, LI J, HAO ZH H. Study on a geometric calibration method for three-linear-array CCD camera with sub-pixel accuracy [J]. Opt-Electronic Engineering, 2004, 31(1): 36-39.
- [6] 胡燕 胡莘 王新义 等. 偏流角对星载三线阵相机摄影的影响[J]. 测绘科学, 2006, 31(4): 62-63.
HU Y, HU X, WANG X Y et al. The influence of drift angle on satellite photography of three-line array camera [J]. Science of Surveying and Mapping, 2006, 31(4): 62-63.
- [7] 贺冬雷 曹喜滨. 三线阵 CCD 立体测绘卫星像移姿态跟踪补偿研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2006, 38(10): 1744-1747.
HE D L, CAO X B. Image motion compensation of three-lines CCD camera stereo mapping satellite by attitude tracking [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2006, 38(10): 1744-1747.
- [8] 吴国栋. 一种三线阵测绘相机 CCD 像面的装调方法[J]. 仪器仪表学报, 2009, 30(11): 2395-2398.
WU G D. Alignment method of CCD image plane for three-line array mapping camera [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2009, 30(11): 2395-2398.
- [9] 刘亚侠. 基于线阵 TDI CCD 相机的辐射标定试验[J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(6): 1192-1193.
LIU Y X. Radiometric demarcation experiment based on the linear TDI CCD camera [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2006, 27(6): 1192-1193.
- [10] 田铁印 王红 谷凤安. 三线阵立体测绘相机光学系统设计[J]. 光学 精密工程, 2009, 17(11): 2692-2698.
TIAN T Y, WANG H, GU F AN. Optical system design of three-line-array stereoscopic mapping camera [J]. Opt. Precision Eng., 2009, 17(11): 2692-2698.
- [11] 苗健宇 张立平 吴清文. 测绘相机光学镜筒设计、加工及装配[J]. 光学 精密工程, 2008, 16(9): 1648-1653.
MIAO J Y, ZHANG L P, WU Q W. Design, manufacturing and assembly for optical lens of mapping camera [J]. Opt. Precision Eng., 2008, 16(9): 1648-1653.
- [12] 李朝辉. 月基对地观测极紫外相机光机结构设计[J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(10): 2352-2356.
LI ZH H. Opto-mechanical design of lunar based EUV camera for imaging the earth [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2010, 31(10): 2352-2356.
- [13] 苗健宇 张立平 吴清文. 测绘相机光学镜头装调技术及稳定性研究[J]. 光学技术, 2010, 36(增刊): 69-71.
MIAO J Y, ZHANG L P, WU Q W. Research of the assembling and calibration and stability on optical lens of mapping camera [J]. Optical Technique, 2010, 36(Suppl.): 69-71.
- [14] 王智 张立平 李朝辉. 传输型立体测绘相机的调焦机构设计[J]. 光学 精密工程, 2009, 17(5): 1051-1056.
WANG ZH, ZHANG L P, LI ZH H. Design of focusing mechanism of space tridimensional mapping camera [J]. Opt. Precision Eng., 2009, 17(5): 1051-1056.
- [15] 王志 吴小霞. 水平式望远镜经纬周垂直度误差的一种光学检测方法[J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(7): 1608-1612.
WHANG ZH, WU X X. Optical measurement method of perpendicularity error of longitude and latitude shafts for horizontal telescope [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2010, 31(7): 1608-1612.
- [16] 张泽斌, 张立平, 刘刚. 基于 DMU125P 的一种复杂空间斜面加工方法[J]. 长春理工大学学报, 2008, 31(1): 53-56.
ZHANG Z B, ZHANG L P, LIU G. Method of processing the complicated inclined plane which based on DMU 125P [J]. Journal of Changchun University of Science and Technology, 2008, 31(1): 53-56.

作者简介



苗健宇 2003 年于中南大学获得学士学位, 2005 年于中南大学获得硕士学位, 2010 年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位, 现为中国科学院长春光学精密机械与物理研究所助理研究员, 主要研究方向为精密机械与航天光学有效载荷光机结构设计及制造。

E-mail: mjiyokok@163.com

Miao Jianyu received B. Sc. and M. Sc. both from CSU in 2003 and 2005, respectively. He received his Ph. D. degree from Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences in 2010. He is currently an assistant research fellow in Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics. His main research focuses on design and manufacture of precise mechanics and space optical remote sensor.



张立平 1982 年于长春光学精密机械学院获得学士学位, 现为中国科学院长春光学精密机械与物理研究所研究员, 主要研究方向为精密机械与航天光学遥感器的研制。

E-mail: zhang_lp2005@163.com

Zhang Liping received B. Sc. from Changchun University of Science & Technology in 1982. He is currently a research fellow in Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics. His main research focuses on research and development of precise mechanics and space optical remote sensor.