

文章编号 1004-924X(2017)增-0103-08

大口径薄膜相机伸展机构设计与精度测量

吴英辉*, 刘 路, 郭宏伟, 王春龙, 刘荣强
(哈尔滨工业大学 机电工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要:为实现大口径、高精度、高稳定空间薄膜成像系统在空间探测和地球观测应用,对相机可展开机构系统设计、精度建模与试验研究。基于空间一维伸展臂机构,提出了一种针对大口径、高精度的空间薄膜光学成像展开机构系统设计方案。可折展薄膜相机光机结构由 3 个铰接三角桁架伸展臂和由伸展臂支撑的薄膜主镜系统组成。铰接三角桁架的关节铰链由恒力弹簧驱动,在展开后通过锁定销锁定和加强索张紧以保持刚度。考虑伸展臂单元构件尺寸误差和铰链间隙等因素,将伸展臂单元等效,构建精度分析模型,并与样机试验结果对比。设计完成大口径可折展薄膜相机伸展机构,该伸展机构折展比 1:15。对伸展臂单元进行地面重复展开精度测量,其轴线、竖直和水平方向的重复展开精度分别为 24 μm 、261 μm 和 218 μm 。说明该伸展臂具有较大的折展比,同时,伸展臂单元具有较高的重复展开精度。

关键词:空间薄膜相机;展开机构;精度模型;重复展开精度测量

中图分类号:V445.8 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20172514.0103

Design of deployable mechanism and accuracy measurement for heavy-caliber film camera

WU Ying-hui*, LIU Lu, GUO Hong-wei, WANG Chun-long, LIU Rong-qiang

(School of Mechatronics Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

* Corresponding author, E-mail:1844463113@qq.com

Abstract: Experimental research on system design of deployable mechanism and accuracy modeling for camera was conducted so as to realize application of heavy-caliber and high-precision spatial film imaging system with high stability to space exploration and earth observation. A systematic design scheme aiming at deployable mechanism of heavy-caliber and high-precision spatial film optics imaging was proposed based on spatial one-dimensional extended arm mechanism. Optical-mechanical structure of deployable film camera was constituted by extended arm of three articulated triangular trusses and primary mirror system of film supported by extended arm. Hinge joint of articulated triangular truss was driven by constant force spring so as to maintain rigidity through locking stop pin and strengthening tensioner after deployment. In consideration of dimension error of unit member for extended arm, hinge gap, and other factors, unit of extended arm was equivalent and precision analysis model was constructed, which was compared with test result of model machine. Deployable mechanism of heavy-caliber deployable film camera was completely designed with folding and deployable rate of 1:15. Unit of extended arm was subject to repetitive deployable accuracy measurement on the ground. Repetitive deployable accuracy in axis, vertical, and horizontal direction was respectively

收稿日期:2017-08-23;修订日期:2017-09-11.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51575119)

24 μm , 261 μm , and 218 μm . It indicates that the extended arm has larger folding and deployable rate. Meanwhile, unit of extended arm has higher repetitive deployable accuracy.

Key words: spatial film camera; deployable mechanism; accuracy model; repetitive deployable accuracy measurement

1 引言

空间光机系统中伸展机构的主要目的是完成主镜和次镜之间系统布局,为了满足高精度及大口径的系统要求,伸展机构需要具备大折展比、高精度、高刚度和质量轻等特点^[1-2]。在大型的光机系统设计中,伸展机构通常选择桁架铰接式、盘压式和薄壁管状伸展机构作为光机系统的基础构型^[3-4]。美国“MOIRE”项目采用盘压式伸展臂,其具有很大的折展比、展开后的桁架结构具有较高的刚度和较好的稳定性,但是其长距离伸展中的精度较低,这限制了盘压杆式一维伸展结构在大口径空间相机支撑结构上的应用。美国 Able 公司研制了 10 m 盘绕伸展臂,对其所支撑太阳翼展开了试验,并已成功应用。哈勃空间望远镜的主镜与次镜间采用整体桁架式支撑结构,空间太阳望远镜(Space Solar Telescope, SST)的主镜与次镜间也采用桁架式支撑结构,次镜的支撑结构通过三层桁架与主镜形成光路布局^[5]。整体式桁架式支撑结构具有高刚度、高精度和高可靠性等优点,但其自身体积较大,收拢困难,发射条件较为苛刻。桁架铰接式伸展臂是空间伸展机构中研究较早、构型较多的一类伸展臂,具有刚度高、稳定性好、精度高、可长距离伸展与设计灵活等优点,并已经成功应用于空间光学望远镜、空间站半刚性太阳能电池阵与大型星载天线等航天飞行器支撑结构中^[6]。在桁架式伸展臂中应用得最为广泛的是四边形铰接桁架伸展臂与三角形铰接桁架式伸展臂。AEC-Able 研制的可折叠铰接四边形伸展臂 FASTM 已经成功应用于国际空间站(International Space Station, ISS)的太阳能电池阵的支撑结构。AEC-Able 研制的可展铰接四边形伸展臂 ADAM,具有更高的强度与刚度,且具有良好的稳定性。然而,这些技术虽然解决了系统口径问题,但是仍然存在精度、成像谱段带宽增加等问题^[7]。

可折展三角形桁架铰接式伸展臂具有折展比

大、高刚度、高精度的特点,应用条件更广泛。因此,可折展三角形桁架铰接式伸展臂应用于光机系统作为主镜支撑伸展机构的可能性更大。本文结合伸展臂在光机系统中的实际工程应用,提出了由 3 个伸展臂驱动光学主镜同步展开的方案。通过对伸展臂运动仿真,分析了伸展臂单元在恒力矩扭簧的驱动下的展开速度和展开次序。通过理论分析计算伸展臂单元轴向重复展开精度,再通过试验测量得到伸展臂单元的轴线、竖直和水平方向的重复展开精度,验证了伸展臂单元高精度的特点,满足光机系统伸展精度要求。

2 空间大口径薄膜相机机构

2.1 大口径薄膜相机系统

光学衍射成像是一种利用光的衍射现象改变光路传播方向的成像方式。影响衍射成像质量的主要因素有成像原理、薄膜材料及大型空间结构的刚柔耦合等^[8]。而本文从伸展机构的结构方面提高衍射成像质量。空间薄膜相机光学成像系统组成示意图如图 1 所示。依据空间薄膜相机光学成像系统组成和空间薄膜相机光学成像系统成像原理,需针对多个领域的关键技术进行研究,主要包括相机系统总体设计、薄膜衍射光学主镜技术、空间大型可展开伸展臂结构设计与在轨调节控制技术。

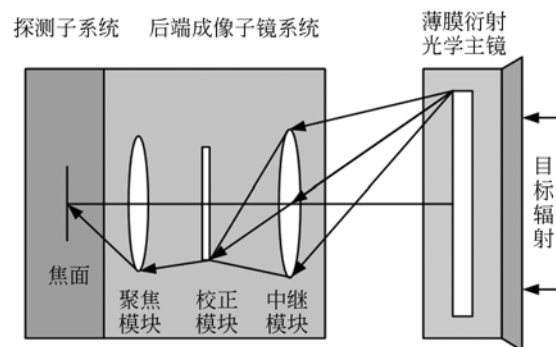


图 1 光学相机系统成像原理

Fig. 1 Imaging principle of optical camera system

根据空间薄膜相机光学成像系统的成像要求,结合其设计指标与约束条件,提出一种由铰接三角形桁架式伸展臂支撑前端薄膜衍射光学主镜展开的相机折展系统。整个光学相机成像系统包括卫星载体、折展机构子系统、薄膜衍射光学主镜及后端成像子系统。折展机构子系统选取 3 根伸展臂圆周均布于相机光轴支撑光学主镜进行伸展。卫星发射时,相机系统处于收拢状态,如图 2 所示。折展机构子系统中的 3 根伸展臂分别收拢于各自收拢筒中。

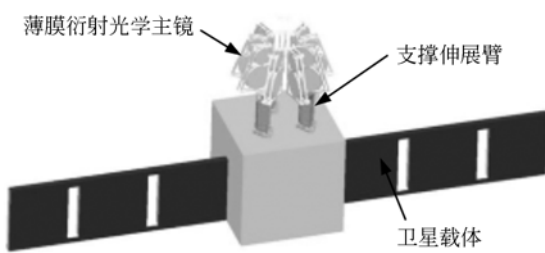


图 2 系统收拢状态
Fig. 2 Folding state of whole system

卫星到达指定轨道后,3 根伸展臂在驱动作用下展开,推动前端薄膜光学主镜达到预定的位置。整个光学成像系统完全展开状态如图 3 所示,伸展臂将薄膜衍射光学主镜推至成像系统焦距位置。

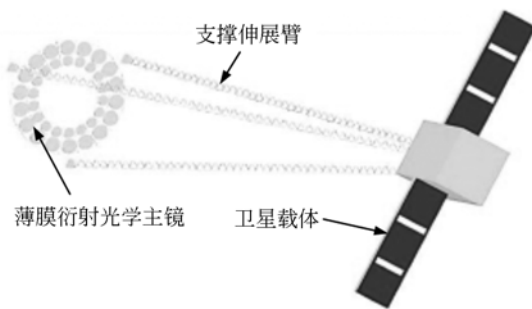


图 3 系统展开状态
Fig. 3 Deploying state of whole system

2.2 伸展臂机构设计

在伸展机构设计过程中,伸展臂选择了三棱柱桁架结构。每根光学主镜伸展臂由多个伸展臂单元组成,基本伸展臂单元之间通过三角框架 3 个节点连接组成光学主镜伸展臂。根据 Sarrus 机构设计一种铰接三角桁架可折展伸展臂。图 4

所示即为标准的 Sarrus 机构和带有虚约束的 Sarrus 机构。

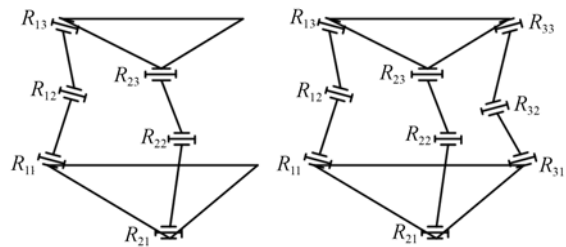


图 4 Sarrus 机构和有虚约束的 Sarrus 机构
Fig. 4 Sarrus mechanism and Sarrus mechanism with virtual constraints

Sarrus 机构具有运行平稳和结构可靠等优点,根据有虚约束的 Sarrus 机构,对伸展臂的展开方式进行优化设计,伸展臂单元折叠状态俯视图如图 5 所示,伸展臂通过棱边向内折叠实现伸展臂单元的收拢^[9]。伸展臂与伸展臂单元框架在框架平面内的夹角为 α , α 的取值范围为 $[0^\circ, 30^\circ]$,在考虑伸展臂之间的干涉问题情况下,随着角度的变化,伸展臂单元的折展比也随之变化,本伸展臂单元选取的夹角 α 为 0° ,即伸展臂收拢到伸展臂框架上。

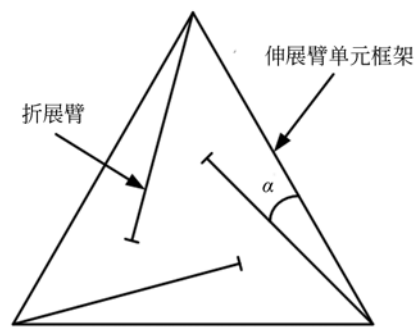


图 5 伸展臂单元折叠状态俯视图
Fig. 5 Top view for folding state of deployable mast unit

伸展臂展开过程如图 6 所示。伸展臂外包络直径为 450.0 mm,伸展臂长度方向的折展比为 1:15。伸展臂完全展开后,铰链锁定,绳索张紧。伸展臂设计时根据对伸展距离要求的不同,单元构架的数量也是变化的。

根据恒力矩弹簧尺寸及单元结构设计参数,

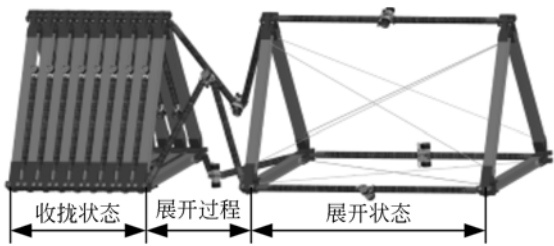


图 6 伸展臂展开过程

Fig. 6 Deployment process of deployable mast

设计完成伸展臂单元的关节铰链,收拢状态与完全展开状态形式如图 7 所示,关节铰链的主要组成包括:公铰部件、恒力矩弹簧、轴系部件、限位螺钉、锁定部件与母铰部件等。与普通回转铰链相比,该铰链通过使用高精度轴承、提高零部件加工精度和装配精度,可有效降低铰链间隙影响,同时采用双恒力矩弹簧对称布置形式,有利于母铰部件在展开过程中受力平稳。展开过程中,锁定摆杆在压簧的作用下沿着滑轨滑动,铰链展开到位后,限位螺钉可阻止铰链展开到位后继续转动,避免对碳纤维管的破坏,摆杆前端锁销压入锁槽内,整个关节实现锁定刚化。

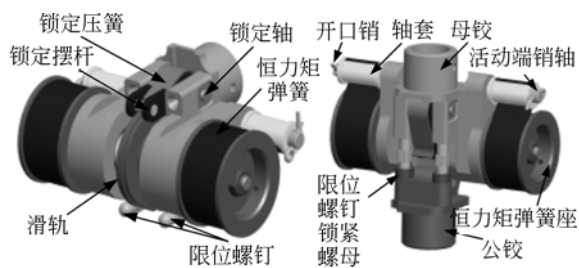


图 7 铰链结构

Fig. 7 Hinge structure

对伸展臂单元进行 Adams 运动仿真分析,结果显示:伸展臂单元在零重力情况下,采用恒力矩弹簧作为驱动,通过伸展臂单元样机的重复展开、收拢试验,能够实现伸展臂单元顺畅地展开和收拢,并完成铰链的锁定和绳索的张紧,其展开过程如图 8 所示。在进行伸展臂多个单元的运动仿真分析中,能够实现伸展臂多个单元的顺序展开。

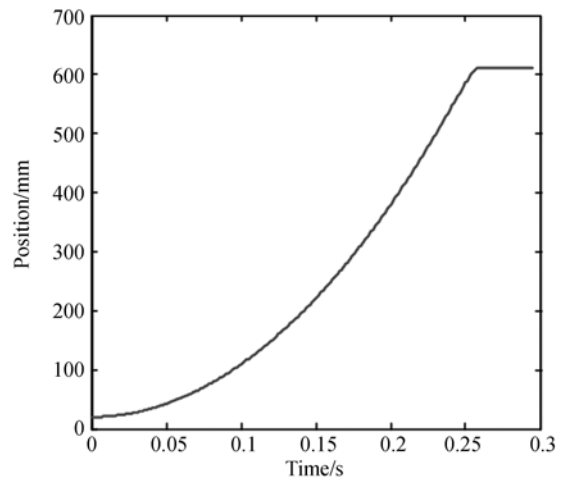


图 8 伸展臂单元末端展开过程

Fig. 8 Deployment process of deployable mast unit's end

3 伸展臂单元精度分析

伸展臂的展开精度对整个光机系统成像具有较大的影响,以伸展臂单元为研究对象,影响精度的主要因素包括伸展臂单元构件尺寸误差、铰链间隙和各个构件形状变形。根据伸展臂单元的运动展开原理,将伸展臂单元的 3 个并联的伸展组件等效为曲柄滑块机构,并且滑块的相对位置固定在伸展臂上端三角框架顶点位置,如图 9 所示。

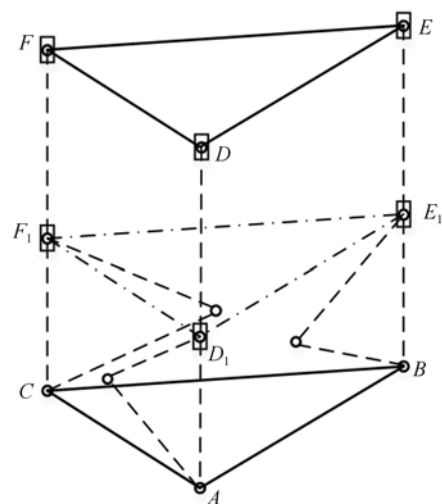


图 9 伸展臂单元精度分析等效模型

Fig. 9 Equivalent model for accuracy analysis of deployable mast unit

在每个运动支链允许的误差范围内,确定各个单元展开末端滑块的坐标; $D: [x_D \ y_D \ z_D]$ 、 $E: [x_E \ y_E \ z_E]$ 、 $F: [x_F \ y_F \ z_F]$,然后根据空间平面方程求解方法,得到单元上端框平面方程表达式。由此,即可求出端框上任意点的位置坐标,进而分析各种因素对伸展臂的展开精度的影响。分析过程中,由于 3 个驱动伸展组件构成与运动方式均相同,选取其中 1 个支链进行分析,最后推广到整个机构的分析上。

3.1 考虑原始尺寸误差的精度分析模型

机构中构件的原始尺寸误差是影响机构运动精度的重要因素,主要的形成原因为构件制造加工的质量。研究伸展臂单元支撑展开支链的运动过程,发现影响支链运动精度的构件原始尺寸误差主要包括两根碳纤维管的尺寸误差与下端框架的固定铰点与上端框架连接点间的安装位置尺寸误差,建立运动支链精度分析模型如图 10 所示。

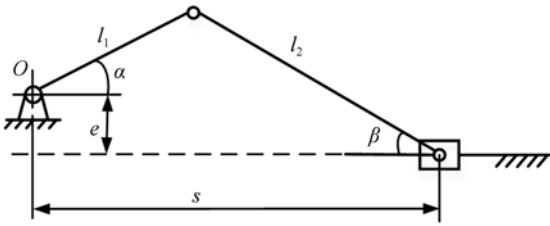


图 10 考虑构件原始尺寸误差的精度分析模型

Fig. 10 Accuracy analysis model considering original size errors of components

其中,点 O 表示运动支链与下端框架的铰链点, l_1 与 l_2 分别表示两根碳纤维管的原始长度, α 与 β 分别表示碳纤维管 1 与碳纤维管 2 与移动方向的夹角, e 表示铰链点与框架连接点间的安装位置偏移尺寸, s 表示伸展距离。

根据误差独立作用原理,各原始误差之间相互独立,则各原始误差引起的机构从动件的总误差等于各原始误差引起的局部误差的总和。计算各原始误差造成的机构中滑块的总误差,结合机构误差的概率分析,得到该机构位置的误差均值(即数学期望),根据工程装配所测的误差数据,实际分析时认为伸展臂单元中铰链点与上端框架连接点间的安装位置偏移尺寸可以忽略不计,测量其他零部件的基本尺寸和误差,从而计算得到伸展臂轴线方向的极限误差。

3.2 考虑铰链间隙的精度分析模型

为保证设计机构的顺利运转,各运动副中必须具有合适的间隙。过小的间隙则会使构件产生卡顿与热变形,而过大的间隙则会降低构件的位置精度。对于光机系统,较小的光学主镜位置精度是必要的。伸展臂单元的运动依靠铰链转动副和移动副实现,因此建立铰链间隙的精度分析模型是必要的^[10]。

铰链转动副间隙可以定义为铰链中轴销与轴套的半径差,采用无质量假想杆模拟的方法,认为运动副中作用力的方向即为间隙矢量的方向^[11]。分析过程中不考虑相互作用元件表面发生的弹性变形与摩擦力的影响,保证轴销与轴套间中心距保持不变。依据以上方法,建立铰链的间隙模型如图 11 所示。

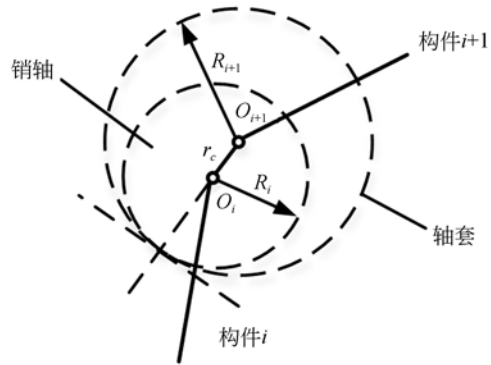


图 11 铰链间隙模型

Fig. 11 Hinge clearance model

根据图中所示尺寸关系,半径间隙为 $r_c = R_{i+1} - R_i$,销轴与轴套的圆心连线 $O_i O_{i+1}$ 的方向在 360° 范围内变动。假设每个运动支链的 3 个转动副与移动副均具有间隙,各半径间隙分别为 r_i ($i=1\sim 4$),各构件的长度为 l_i ($i=1\sim 3$),各运动构件的质心位于 S_i ($i=1\sim 4$)。建立运动支链的分析模型如图 12 所示。

建立无质量杆的精度模型后,整个机构变成了平面 7 杆滑块机构,共具有 5 个自由度,选取 θ_i 和 α_i ($i=1\sim 4$) 作为机构的广义坐标,构建机构各构件与间隙无质量杆组成的封闭矢量方程。根据精度分析中微分法,结合封闭矢量方程,确定各铰链间隙对滑块末端位置的影响。计算各铰链间隙误差造成的机构从动件的误差。

基于原始构件尺寸误差和铰链间隙的精度分

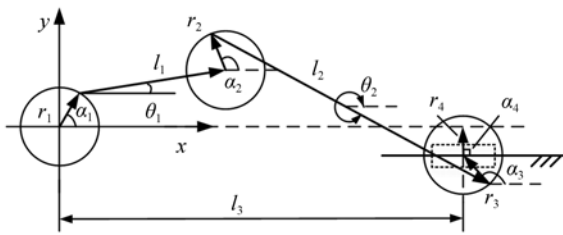


图 12 考虑铰链间隙的精度分析模型

Fig. 12 Accuracy analysis model considering hinge clearance

析模型,将上下框架的 3 个铰链回转中心位置固定,并将下端框的位置固定,每根运动支链根据等效的精度分析模型,计算伸展臂单元的上端框中心位置的变化范围。计算过程中将各个参数带入实际数据,利用 MATLAB 编程,输出上端框中心的变化范围,可以计算得到该运动支链末端滑块在伸展方向的极限误差约为 $20\ \mu\text{m}$ 。

4 伸展臂重复展开精度测量

加工完成的伸展臂单元样机如图 13 所示,对该伸展臂单元进行重复展开精度试验,伸展臂的重复展开精度是伸展臂的一项重要指标,包括轴线、竖直和水平方向的重复展开精度。将伸展臂重复收拢、展开,测量伸展臂单元各个方向上的相对位置变化作为伸展臂的重复展开精度。重复展开精度的测量采用激光位移传感器测量伸展臂末端在轴线、竖直和水平方向的相对位置,通过该项指标反应伸展臂的重复展开精度^[12]。



图 13 伸展臂单元样机

Fig. 13 Deployable mast unit model machine

4.1 轴线方向重复展开精度

伸展臂单元重复收拢、展开 20 次,测量其在轴线方向重复展开精度如图 14 所示,伸展臂在轴线方向上的相对位置变化最大值为 $12\ \mu\text{m}$,最小为 $-12\ \mu\text{m}$,位置偏差为 $24\ \mu\text{m}$ 。

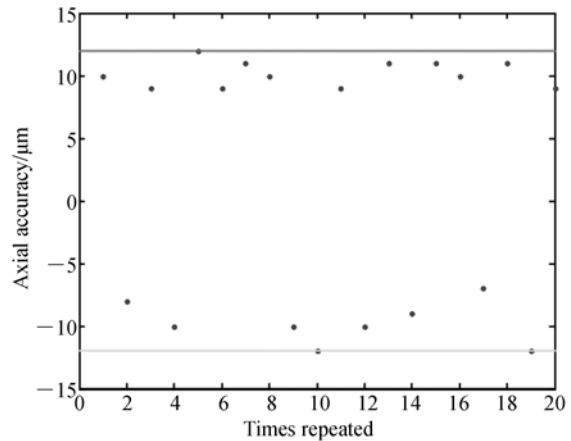


图 14 轴线方向重复展开精度

Fig. 14 Repetitive deployment accuracy in axial direction

4.2 竖直方向重复展开精度

伸展臂单元重复收拢、展开 20 次,测量其在竖直方向重复展开精度如图 15 所示,伸展臂在竖直方向上的相对位置变化最大值为 $127\ \mu\text{m}$,最小为 $-134\ \mu\text{m}$,位置偏差为 $261\ \mu\text{m}$ 。

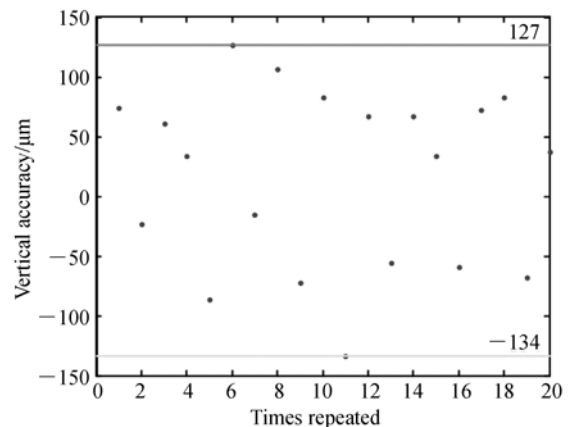


图 15 竖直方向重复展开精度

Fig. 15 Repetitive deployment accuracy in vertical direction

4.3 水平方向重复展开精度

伸展臂单元重复收拢、展开 20 次,测量其在

水平方向重复展开精度如图 16 所示,伸展臂在水平上的相对位置变化最大值为 $113 \mu\text{m}$,最小为 $-105 \mu\text{m}$,位置偏差为 $218 \mu\text{m}$ 。

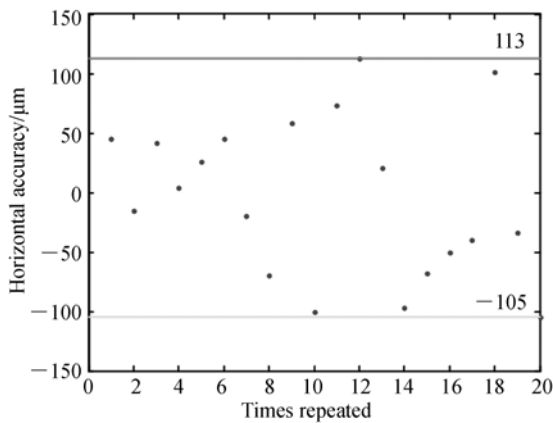


图 16 水平方向重复展开精度

Fig. 16 Repetitive deployment accuracy in horizontal direction

4.4 多单元伸展臂重复展开精度分析

伸展臂单元精度测量显示,单个伸展臂单元的具有较高的重复展开精度,当伸展臂有 n 个伸展臂单元,伸展臂的重复展开精度是伸展臂单元重复展开精度的叠加,因此整个伸展臂的轴线、竖直和水平方向重复展开精度分别小于 $0.024n$ 、 $0.261n$ 和 $0.218n$ (单位: mm)。该伸展臂单元进行重复展开精度试验是在无重力补偿的情况下完成的,因此精度较低。在后续整个伸展臂的精度测试过程中,将设计吊挂装置对每个伸展臂单元

进行重力补偿。伸展臂的重复展开精度将有所提高。

从以上对伸展臂单元轴线、竖直和水平方向的重复展开精度测量结果和对整个伸展臂重复展开精度的分析可以看出,单个伸展臂单元的轴向重复展开精度可以达到 $24 \mu\text{m}$,验证了伸展臂具有较高的重复展开精度,适合应用于光机系统的伸展机构中。

5 结 论

本文基于 Sarrus 机构组合设计完成该伸展本机构,给出已经设计完成的伸展机构驱动方式和展开原理,该折展机构的折展比达到 $1:15$,验证该伸展臂具有较大的折展比。并研制了伸展臂单元样机。对伸展臂单元进行运动分析,伸展臂单元在力矩下能够顺利展开和锁定,多单元能够顺序展开。同时,对该伸展臂单元样机进行重复展开、收拢试验,该伸展臂单元样机能够顺畅的展开和收拢,也验证了伸展臂单元能够展开锁定,并实现绳索的张紧。

在进行伸展臂单元重复展开精度分析中,构建原始构件尺寸误差和铰链间隙的精度分析模型,计算伸展臂单元样机的轴向重复展开精度为 $20 \mu\text{m}$,同时通过对伸展臂单元进行地面重复展开精度测量,其轴线、竖直和水平方向的重复展开精度分别为 $24 \mu\text{m}$ 、 $261 \mu\text{m}$ 和 $218 \mu\text{m}$ 。验证了伸展臂单元具有较高的重复展开精度,适用于光学成像系统的光机结构中。

参考文献:

- [1] 韩昌元. 高分辨力空间相机的光学系统研究[J]. 光学精密工程, 2008, 16(11): 2164-2172.
HAN CH Y. Study on optical system of high resolution space camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(11): 2164-2172. (in Chinese)
- [2] 李志来, 徐宏, 关英俊, 等. 1.5 m 口径空间相机主镜组件的结构设计[J]. 光学精密工程, 2015, 23(6): 1635-1641.
LI ZH L, XU H, GUAN Y J, *et al.*. Structural design of 1.5 m mirror subassembly for space camera[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(6): 1635-1641. (in Chinese)
- [3] SEEFELDT P, SZNAJDER M, HILLEBRANDT M, *et al.*. State of the art concepts and verification strategies for passive de-orbiting systems using deployable booms and membranes[C]. *Third International Symposium on Solar Sailing 11th of June 2013*, 2015: 1-40.
- [4] STRAUBEL M, BLOCK J, SINAPIUS M, *et al.*. Deployable composite booms for various gossamer space structures[C]. *Proceedings of 52nd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference*, AIAA, 2012: 1656-1663.
- [5] 陈志平, 陈志远, 杨世模. 空间太阳望远镜主桁架的模态分析与试验[J]. 光电工程, 2004, 31(12):

- 1-3, 7.
- CHEN ZH P, CHEN ZH Y, YANG SH M. Modal analysis and experiment on the main truss of space solar telescope[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2004, 31(12): 1-3, 7. (in Chinese)
- [6] 刘荣强, 郭宏伟, 邓宗全. 空间索杆铰接式伸展臂设计与试验研究[J]. 宇航学报, 2009, 30(1): 315-320.
- LIU R Q, GUO H W, DENG Z Q. Space cable-strut deployable articulated mast design and experimental study[J]. *Journal of Astronautics*, 2009, 30(1): 315-320. (in Chinese)
- [7] 张学军, 樊延超, 鲍赫, 等. 超大口径空间光学遥感器的发展和应用[J]. 光学精密工程, 2016, 24(11): 2613-2626.
- ZHANG X J, FAN Y CH, BAO H, *et al.*. Applications and development of ultra large aperture space optical remote sensors[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(11): 2613-2626. (in Chinese)
- [8] 焦建超, 苏云, 王保华, 等. 地球静止轨道膜基衍射光学成像系统的发展与应用[J]. 国际太空, 2016(6): 49-55.
- JIAO J CH, SU Y, WANG B H, *et al.*. Development and application of GEO membrane based diffraction optical imaging system[J]. *Space International*, 2016(6): 49-55. (in Chinese)
- [9] 单明贺. 三棱柱单元构架式可展开支撑臂结构设计与分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- SHAN M H, *Mechanical design and analysis of a triangular prism modular deployable mast* [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013. (in Chinese)
- [10] 杨会生, 李志来, 樊延超, 等. 空间相机均力输出式调焦机构[J]. 光学精密工程, 2016, 24(4): 796-803.
- YANG H SH, LI ZH L, FAN Y CH, *et al.*. Focusing mechanism with equal output forces for space camera[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(4): 796-803. (in Chinese)
- [11] 丁建中, 王春浩. 含铰链间隙板式卫星天线展开精度分析[J]. 北京航空航天大学学报, 2016, 42(12): 2625-2631.
- DING J ZH, WANG CH J. Deployment accuracy analysis of planar satellite antenna with joint clearances[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2016, 42(12): 2625-2631. (in Chinese)
- [12] 郭宏伟, 邓宗全, 刘荣强. 空间索杆铰接式伸展臂参数设计与精度测量[J]. 光学精密工程, 2010, 18(5): 1105-1111.
- GUO H W, DENG Z Q, LIU R Q. Parameter design and precision measurement of space cable-strut deployable articulated mast[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(5): 1105-1111. (in Chinese)

作者简介:



吴英辉(1994—),男,内蒙古赤峰人,2016年于东北大学获得学士学位。主要从事伸展机构设计与分析的研究。
E-mail: 1844463113@qq.com



刘荣强(1965—),男,黑龙江哈尔滨人,教授,博士生导师,主要从事空间大型可展开机构与控制、大口径可展开天线机构、着陆缓冲机构等方面的研究。
E-mail: liurq@hit.edu.cn



郭宏伟(1980—),男,黑龙江省哈尔滨人,副教授,博士生导师,主要从事空间可展开机构与控制、可变构型结构与机构研究等方面工作。
E-mail: guohw@hit.edu.cn