

# 空间伸展臂折展单元运动学分析

陈佳伟, 陈传志, 陈金宝, 郭芸芸  
(南京航空航天大学 航天学院, 江苏 南京 210016)

**摘要:** 运用螺旋理论对一种可折展三角桁架式空间伸展臂的折展单元进行运动学分析和仿真计算。利用 D-H 法建立折展单元运动的正逆位置解, 应用螺旋理论对折展单元运动的正速度进行分析。通过对比软件 Matlab 的理论数值计算结果和软件 ADAMS 仿真计算结果, 验证了该伸展臂折展单元的可行性和本文方法的正确性, 为研究伸展臂折展单元的结构及工程应用打下基础。

**关键词:** 伸展臂; 折展单元; 运动学分析

**中图分类号:** V 443.4 **文献标志码:** A

**DOI:** 10.19328/j.cnki.1006-1630.2020.05.007

## Kinematics Analysis on Deployable Unit of Space Deployable Mast

CHEN Jiawei, CHEN Chuazhi, CHEN Jinbao, GUO Yunyun

(Academy of Aeronautics, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, Jiangsu, China)

**Abstract:** The kinematics analysis and simulation calculation of the deployable unit of a deployable triangular truss space deployable mast are carried out by using the helical theory. The Denavit-Hartenberg (D-H) method is used to obtain the solutions of the forward and inverse positions of the deployable unit motion, while the helical theory is used to analyze the positive velocity of the deployable unit motion. By comparing the theoretical and numerical results of the Matlab with the simulation results of the ADAMS, the feasibility of the deployable unit of the deployable mast and the correctness of the method described in this paper are verified, which provides a foundation for studying the structure and engineering application of the deployable units of deployable masts.

**Key words:** deployable mast; deployable unit; kinematics analysis

## 0 引言

随着航天技术的不断发展, 航天事业对星载天线的需求与日俱增, 连接天线与卫星本体的伸展臂已成为了航天技术重要研究对象之一。空间伸展臂主要分为杆状伸展臂、盘压杆式伸展臂、铰接桁架式伸展臂、张拉整体式伸展臂等<sup>[1]</sup>。其中, 铰接桁架式伸展臂具有高收纳率、高刚度、高强度、高精度等特点<sup>[2]</sup>, 该类型伸展臂仍是国内外研究重点。其可分为可折叠铰接四边形桁架伸展臂、可折叠铰接三角形桁架伸展臂、剪切式伸展臂、索杆铰接式伸展臂等<sup>[1,3]</sup>。可折叠铰接三角形桁架伸展臂较其他铰接方式具有结构简单、收展比高、重量轻等更多

优点, 近年来备受关注<sup>[4]</sup>。

目前, 折叠铰接式伸展臂 FASTM 和 ADAM 应用最为广泛, 美国 NANM 的折叠铰接式伸展臂技术已十分成熟, 国内对折叠铰接式伸展臂技术在力学分析和结构设计的理论、试验和仿真等方面均有重大突破<sup>[5-7]</sup>。文献[8]提出了一种三角桁架铰接伸展臂, 对其进行力学分析。文献[9]提出一种恒力矩弹簧为驱动源的三角桁架支撑机构, 分析伸展臂单元的运动特性, 建立等效连续介质模型分析伸展臂动力学特性。文献[10]运用参数化思想建立有限元模型, 对三角桁架折展式伸展臂进行结构优化。文献[11]利用螺旋理论分析可展桁架的运动

收稿日期: 2019-07-16; 修回日期: 2019-10-11

基金项目: 国家自然科学基金(51675264, 61773265); 江苏省自然科学基金(BK20180437)

作者简介: 陈佳伟(1994—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为空间大型可展开机构结构设计、动力学分析和运动学分析。

通信作者: 陈传志(1986—), 男, 讲师, 主要研究方向为弱撞击空间对接机构、航天器结构与机构设计、航天器结构动力学等。

特性,验证了单自由度桁架的正确性。文献[12]应用螺旋理论分析四棱柱型伸展臂运动特性和收展稳定性能。

针对折叠铰接式伸展臂的理论研究主要有运动学分析、动力学分析、折展平稳性分析和结构优化,本文结合一种可折展三角桁架式空间伸展臂的单元进行运动学分析。对折展单元几何特性进行分析,再利用D-H法分析折展单元的正逆位置,基于螺旋理论建立每个运动关节的运动螺旋,得到折展单元的速度总雅克比矩阵,对其正速度进行分析。最后应用实例借助软件 Matlab 和 ADAMS 进行数值计算、仿真计算,对理论方法的结果和仿真结果进行比较,两者基本一致,说明了本文方法的正确性和准确性,为空间伸展臂的研究提供参考依据。

### 1 可折展三角桁架式空间伸展臂的简介

可折展三角桁架式空间伸展臂主要由三角板、板间铰链、杆间铰链、折展杆、底板构成。其中,板间铰链和杆间铰链都设有驱动弹簧和锁紧装置。折展单元有3个支链,每条支链有3个旋转铰链,由弹簧驱动实现折展单元的展开。初始状态为压紧收拢状态,解锁后开始展开,完全展开后锁定。展开锁定后,形成稳固的刚性伸展臂结构。

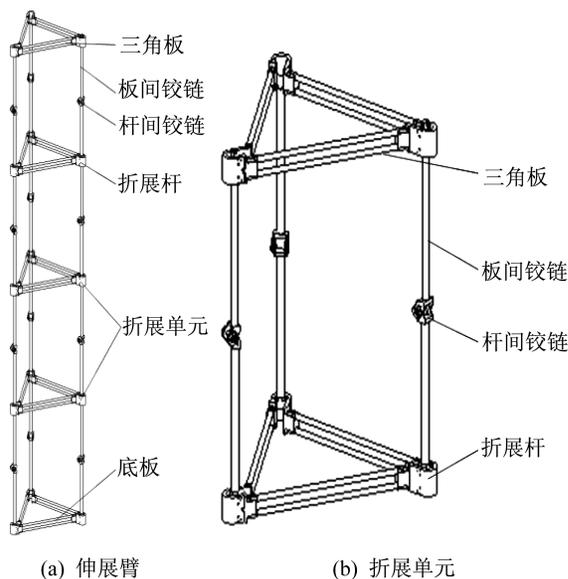


图 1 可折展三角桁架式空间伸展臂示意图

Fig.1 Schematic diagram of the deployable triangular truss space deployable mast

### 2 空间伸展臂的折展单元的位置分析

伸展臂的折展单元结构原理图如图 2 所示,由定三角板、动三角板和三条支链组成。

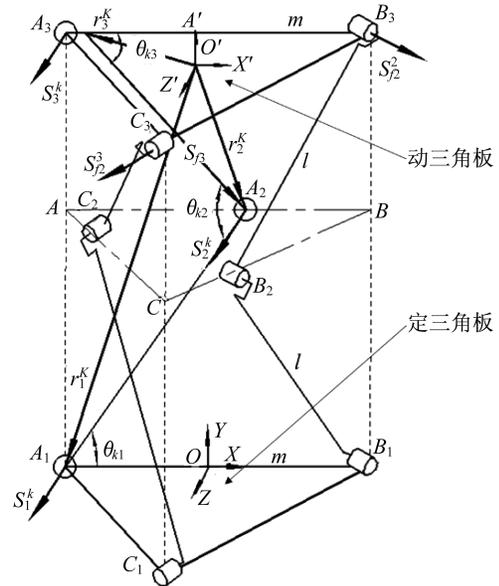


图 2 折展单元的原理图

Fig.2 Schematic diagram of the deployable unit

折展单元的完全收拢为  $\theta_{k1}=0^\circ$ , 完全展开为  $\theta_{k1}=90^\circ$ , 该折展单元有一个自由度, 运动平稳。

以折展单元的一个支链为例进行分析, 已知动、定三角板是边长  $m$  的等边三角形, 支链的杆长为  $l$ 。根据几何关系可以看出, 动三角板与定三角板关于平面  $ABC$  对称, 可以得到如下折展单元的运动约束方程:

$$|A_3B_3| = |A_3C_3| = |C_3B_3| = n \quad (1)$$

每个支链旋转角都满足如下方程:

$$\frac{1}{2}\theta_{k2} = \theta_{k1} = \theta_{k3}, \quad k=1, 2, 3 \quad (2)$$

式中:  $k=1$  为支链  $A$ ;  $k=2$  为支链  $B$ ;  $k=3$  为支链  $C$ 。

同时满足式(1)和式(2), 则定三角板与动三角板在运动过程中始终平行, 即

$$\theta_{11} = \theta_{21} = \theta_{31} \quad (3)$$

由式(2)可知, 确定支链的  $\theta_{k1}$  即确定了支链位姿; 由式(3)可知, 确定了  $\theta_{11}$  即确定了  $\theta_{21}$ 、 $\theta_{31}$ , 故确定  $\theta_{11}$  即确定了三角板的位姿。

基于以上折展单元的几何特性以及建立的折展单元运动约束方程, 运用D-H法的齐次变换矩阵对其进行正逆位置, 利用螺旋理论对其进行正速度分析。

## 2.1 正位置分析

对折展单元的正位置分析,即位置角  $\theta_{11}$  作为输入量,求解动三角板的位姿。为更好描述动三角板的位姿,以中心点的运动代替。

建立如图 2 所示的笛卡尔坐标系  $O(X, Y, Z)$ , 以  $A_1B_1$  中点为坐标原点,  $X$  轴正方向从原点  $O$  指向

$$A_{j+1} = \begin{bmatrix} \cos \theta_{j+1} & -\sin \theta_{j+1} \cos \alpha_{j+1} & \sin \theta_{j+1} \sin \alpha_{j+1} & a_{j+1} \cos \theta_{j+1} \\ \sin \theta_{j+1} & \cos \theta_{j+1} \cos \alpha_{j+1} & -\cos \theta_{j+1} \sin \alpha_{j+1} & a_{j+1} \sin \theta_{j+1} \\ 0 & \sin \alpha_{j+1} & \cos \alpha_{j+1} & d_{j+1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

式中,  $\theta_{j+1}$  为  $O_{j+1}$  绕  $O_j$  的  $Z$  轴的旋转角;  $d_{j+1}$  为  $O_{j+1}$  沿  $O_j$  的  $Z$  轴的平移距离;  $a_{j+1}$  为  $O_{j+1}$  绕  $O_j$  的  $X$  轴的平移距离;  $\alpha_{j+1}$  为  $O_{j+1}$  绕  $O_j$  的  $X$  轴的旋转角。

3 条支链运动平面的关于坐标系  $O$  的  $XOY$  平面变换矩阵的通式为

$$Tr_k = \begin{bmatrix} \cos \beta_k & 0 & \sin \beta_k & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\sin \beta_k & 0 & \cos \beta_k & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad k=1, 2, 3 \quad (6)$$

式中:  $\beta_k$  为支链所在运动平面与坐标系  $O$  的  $XOY$  平面的夹角。

根据折展单元的几何性质可得出  $A_1, B_1, C_1$  的坐标, 结合平面变换矩阵与齐次变换矩阵, 可求得在笛卡尔坐标系下各节点坐标  $P_{k(j+1)}$ , 最终确定动三角板  $O'$  的位置为

$$P_{k(j+1)} = P_{k1} \cdot Tr_k \cdot T_{j+1}, \quad j=1, 2 \quad (7)$$

## 2.2 逆位置的分析

对折展单元的逆位置分析, 即  $O'$  运动作为输入, 求解位置角  $\theta_{11}$ 。坐标系仍采用  $O(X, Y, Z)$ , 在各转动副上建立当前节点局部动坐标系  $O'_j$ , 下一节点的局部坐标系  $O'_{j+1}$ , 局部坐标系之间的齐次变换通式为  ${}^jT'_{j+1} = {}^jT_{j+1}$ , 各支链平面变换通式为  $Tr'_k = Tr_k$ 。结合平面变换矩阵与齐次变换矩阵, 可求得各节点坐标  $P'_{kj}$ , 进而确定  $\theta_{11}$ ,

$$P'_{k(j+1)} = Tr'_k \cdot T'_{j+1} \quad (8)$$

$$\sin \theta_{11} = y'_{k3} / 2l \quad (9)$$

式中:  $P'_{kj}$  的坐标为  $[x'_{k3} \ y'_{k3} \ z'_{k3}]^T, k=1, 2, 3$ 。

## 2.3 正速度分析

对折展单元的正速度分析将位置角  $\theta_{11}$  作为输

入,  $Z$  轴正方向从原点  $O$  指向  $C_1$ ,  $Y$  轴正方向满足右手定则。在转动副上建立当前节点局部动坐标系  $O_j$ , 下一节点的局部坐标系  $O_{j+1}$ , 局部坐标系之间的齐次变换通式为  ${}^jT_{j+1}$ ,

$${}^jT_{j+1} = A_{j+1} = \text{Rot}(z, \theta_{j+1}) \text{Trans}(0, 0, d_{j+1}) \cdot \text{Trans}(a_{j+1}, 0, 0) \text{Rot}(x, \alpha_{j+1}) \quad (4)$$

$$= \begin{bmatrix} \cos \theta_{j+1} & -\sin \theta_{j+1} \cos \alpha_{j+1} & \sin \theta_{j+1} \sin \alpha_{j+1} & a_{j+1} \cos \theta_{j+1} \\ \sin \theta_{j+1} & \cos \theta_{j+1} \cos \alpha_{j+1} & -\cos \theta_{j+1} \sin \alpha_{j+1} & a_{j+1} \sin \theta_{j+1} \\ 0 & \sin \alpha_{j+1} & \cos \alpha_{j+1} & d_{j+1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

入, 求解  $O'$  的速度螺旋  $V = (\omega; V_0)^T$ 。折展单元如图 2 所示, 将每个支链简化为一个开环运动链, 其运动轴线记作单位螺旋  $S_j^k (k=1, 2, 3; j=1, 2, 3)$ , 则每个支链的运动螺旋可表示为

$$S_1^k = [S_1^k; r_1^k \times S_1^k] \quad (10)$$

$$S_2^k = [S_2^k; r_2^k \times S_2^k] \quad (11)$$

$$S_3^k = [S_3^k; r_3^k \times S_3^k] \quad (12)$$

式中:  $r_1^k = O'A_1; r_2^k = O'A_2; r_3^k = O'A_3$ 。

则动三角板的速度螺旋与第  $k$  支链的 3 个瞬时单位螺旋的关系为

$$S_1^k \omega_1^k + S_2^k \omega_2^k + S_3^k \omega_3^k = V, \quad k=1, 2, 3 \quad (13)$$

式中:  $\omega = (\omega_x, \omega_y, \omega_z)$  为动三角板相对于定三角板的角速度;  $V_0 = (V_{0x}, V_{0y}, V_{0z})$  为点  $O'$  的线速度。则式(12)可以简化为

$$J^K \Omega^k = V, \quad k=1, 2, 3 \quad (14)$$

式中:  $J^K = [S_1^k, S_2^k, S_3^k]$  为支链的总雅克比矩阵;  $\Omega^k = [\omega_1^k, \omega_2^k, \omega_3^k]$  为每支链各运动关节的角速度。

由折展单元的运动特性可知同支链上的各运动关节的运动轴线相互平行, 即支链上各运动关节的单位螺旋是相互平行的。取一经过原点且与运动螺旋  $S_j^k$  方向平行的螺旋记做  $S_{j1}^k = [S_j^k; 0]$ , 根据两相交或平行螺旋的互易积为 0, 则  $S_{j1}^k$  与动三角板的速度螺旋  $V$  做互易可得到如下公式的 3 个方程:

$$S_{j1}^k \circ V = 0, \quad k=1, 2, 3 \quad (15)$$

在第  $B, C$  支链上取一平行于  $S_3^k (k=2, 3)$  的螺旋  $S_{j2}^k$ ,

$$S_{j2}^k = S_3^k = [S_3^k; r_3^k \times S_3^k], \quad k=2, 3 \quad (16)$$

将螺旋  $S_{j2}^k$  与速度螺旋  $V$  做互易可得到如下的 2 个方程:

$$S_{j2}^k \circ V = 0, \quad k=2, 3 \quad (17)$$

取一过点  $A_3$  方向为  $A_3A_2$  的单位螺旋记为  $S_{j3}$ ,

将螺旋  $\$_{\beta}$  与动三角板的速度螺旋  $V$  做互易可得到如下 1 个方程:

$$\$_{\beta} \circ V = (\$_{\beta} \circ \$_1^1) \omega_1^1 + (\$_{\beta} \circ \$_2^1) \omega_2^1 + (\$_{\beta} \circ \$_3^1) \omega_3^1 \quad (18)$$

螺旋  $\$_{\beta}$  与  $\$_2^1$ 、 $\$_3^1$  相交, 则式(16)化简为

$$\$_{\beta} \circ V = (\$_{\beta} \circ \$_1^1) \omega_1^1 \quad (19)$$

将式(14)、式(16)、式(18)联立, 得到 6 个方程, 可求解出动三角板的速度螺旋  $V$  的 6 个未知参数,

确定动三角板  $O'$  的正速度。

### 3 仿真试验及结果分析

举例说明上述方法的应用, 考虑折展单元的几何特点, 取折展杆长  $n=90$  mm, 三角板的边长  $m=100$  mm, 输入量主动关节驱动角  $\theta_{11} = \frac{12\pi}{9} + 16\sin\left(0.35x + \frac{\pi}{12}\right)$ , 折展单元的展开过程如图 3 所示。

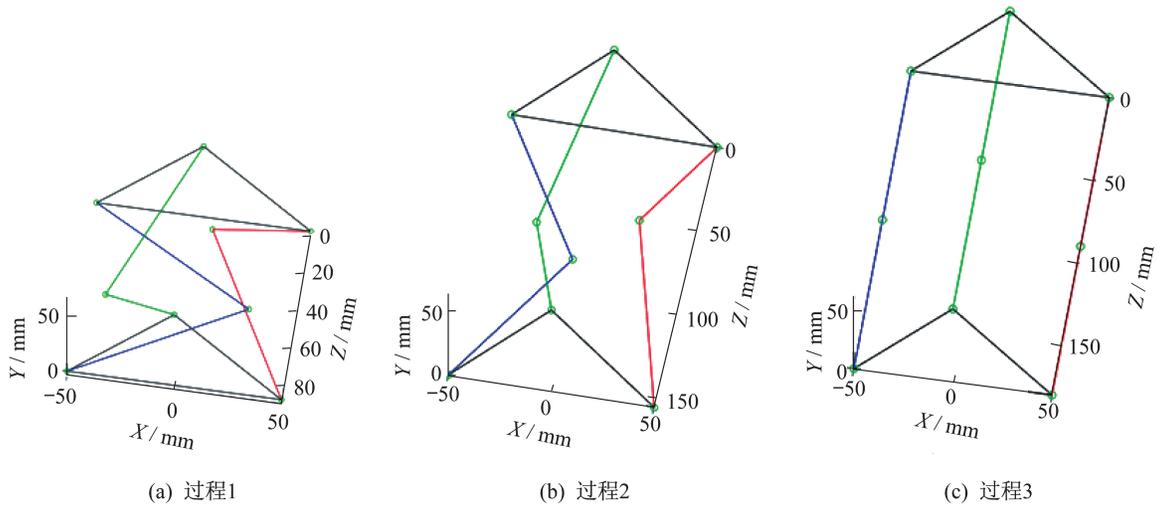


图 3 折展单元的展开过程

Fig 3 Deploying process of the deployable unit

将预设的参数代入 D-H 法建立的正逆位置解中, 借助软件 Matlab 的“solve”函数计算出理论结果, 得出动三角板中心点  $O'$  的位置曲线。为更好说明本文方法的正确性, 借助软件 ADAMS 仿真计算折展单元的正运动的位置, 代入相同预设参数得到 ADAMS 仿真模型。将理论计算结果与仿真计算结果进行比较, 如图 4 所示。图 4 中虚线曲线为理论计算结果, 实线曲线为 ADAMS 仿真计算结果。从图中可以看出, 理论计算结果与仿真计算结果重叠, 验证位置分析方法的正确性。

将预设的参数代入螺旋理论建立的速度分析正解中, 利用软件 Matlab 求解动三角板中心点  $O'$  的运动速度, 得到动平台  $O'$  的速度变化曲线。同样, 将相同的参数代入 ADAMS 软件中进行仿真计算, 去验证速度计算结果的正确性。将理论计算结果与仿真计算结果进行比较, 如图 5 所示。图 5 中的虚线曲线为理论计算结果, 实线曲线为 ADAMS 仿真计算结果, 从图中可以看出理论计算结果与仿真

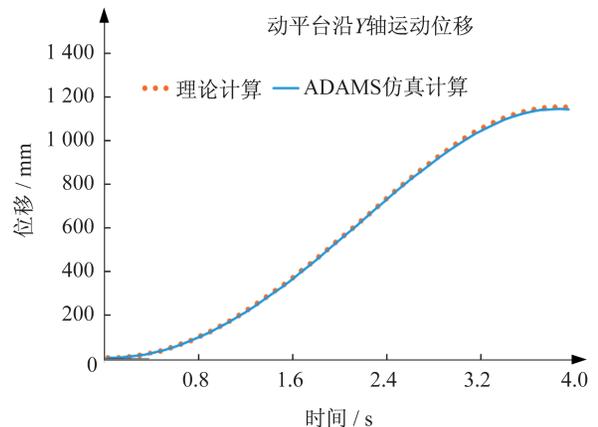


图 4 仿真计算与理论计算位移变化对比图

Fig 4 Comparison diagram of the displacement changes obtained by the simulation and theoretical calculations

计算结果基本一致, 本文提出计算动平台  $O'$  运动位置的方法可以准确计算出动三角板中心点  $O'$  的运动速度。

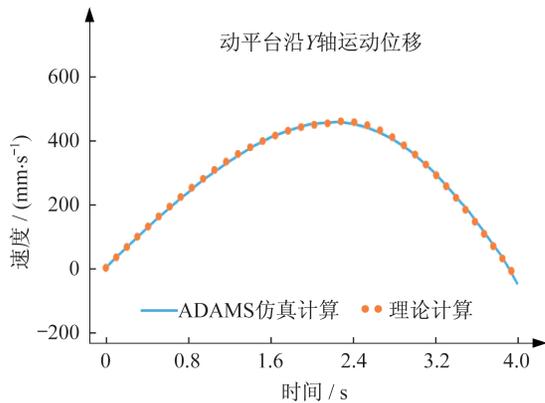


图 5 仿真计算与理论计算速度变化对比图

Fig 5 Comparison diagram of the velocity changes obtained by the simulation and theoretical calculations

结合图 4 和图 5 曲线的变化,可得动三角板中心点  $O'$  的运动速度大小与位移变化曲线的曲率正相关,则可通过速度曲线的曲率估算加速度。

#### 4 结束语

本文对可折展三角桁架式空间伸展臂单元进行运动学分析,运用 D-H 法分析了折展单元正逆位置,利用螺旋理论对折展单元进行正速度分析。借助 ADAMS 对折展单元进行运动学仿真计算,对比仿真计算结果与本文方法的计算结果基本一致,验证了本文方法的正确性。计算结果可看出,折展单元动三角板中心点的位移和速度都只在 Y 轴方向上有变化,其他方向的运动分量都为 0,说明了折展单元运动的单一性,能够满足空间折展

机构的功能需求,为空间伸展臂的进一步研究提供参考依据。

#### 参考文献

- [1] 李旭. 空间折叠式伸杆机构设计与研制[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2017.
- [2] 郭宏伟, 刘荣强, 邓宗全. 空间索杆铰接式伸展臂性能参数分析与设计[J]. 北京航空航天大学学报, 2008, 34(10): 1186-1190.
- [3] 关富玲, 杨大彬, 苏斌, 等. 索杆式伸展臂系统的实验分析[J]. 工程设计学报, 2004, 11(3): 132-138.
- [4] 姜智先. 大型星载天线的多级伸展臂折叠展开设计与仿真[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- [5] UMLAND J, EISEN H. SRTM on-orbit structural dynamics [R]. AIAA 2001-1058: 10-21.
- [6] 周思达, 周小陈. 空间伸展臂的技术现状与难点[J]. 中国空间科学技术, 2014, 34(6): 38-50.
- [7] SHAKER J F, ACQUAVIVA T H. Static stability of the space station solar array FAST mast structure [R]. NASA STI/ Recon Technical Rep N, 1995, 96: 10328.
- [8] 张航. 伸缩拉杆对三角形桁架铰接伸展臂力学性能影响研究[D]. 长春: 吉林大学, 2018.
- [9] 王春龙. 空间大口径可折展薄膜相机机构设计与分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
- [10] 张燕娜, 任茹菲. 基于有限元方法的天线折叠式伸展臂结构优化设计[J]. 电子质量, 2015(11): 36-40.
- [11] 邓强. 锥形可展桁架的设计与分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
- [12] 冯军, 胡明, 陈文华, 等. 空间伸展臂折展单元展开运动特性分析[J]. 机械设计与制造, 2017(8): 175-178.

## 欢迎关注本刊微信公众号

为了加强《上海航天(中英文)》数字化、网络化建设以及信息化管理,扩大刊物宣传力度,本刊现已开通微信公众平台。关注微信公众号后,读者可查阅期刊发表论文,进行文章检索;作者可随时查询自己稿件的处理状态,了解期刊最新发展动态;编辑部能更便捷地加强编者、作者和读者之间的交流,促进学术沟通,创建学术共同体,扩大《上海航天(中英文)》期刊的学术影响力。

