

DOI:10.16356/j.1005-2615.2015.06.016

盘绕式伸展机构非线性屈曲模式的试验研究与数值仿真

刘涛 韩涵 冀宾 吕榕新 程雷

(上海宇航系统工程研究所,上海,201109)

摘要:针对盘绕式伸展机构在轨工作的特点,对其在不同钢丝绳预紧力和机构高度下的非线性屈曲模式和屈曲载荷开展了相关的试验研究。根据其几何非线性特点,采用弧长法对试验状态下结构的非线性屈曲模式进行了仿真分析。研究表明:(1)数值仿真计算得到的屈曲模式和屈曲载荷与试验结果一致;(2)伸展机构的屈曲模式与钢丝绳预紧力和机构高度密切相关,处于张紧状态的钢丝绳可显著提高伸展机构的轴压、弯曲承载能力。分析结果也为其他同类机构的设计和试验提供了参考依据。

关键词:盘绕式伸展机构;非线性屈曲;屈曲模式;试验研究;弧长法

中图分类号: TU311.3

文献标志码: A

文章编号: 1005-2615(2015)06-0897-07

Experimental Investigation and Numerical Simulation on Nonlinear Buckling Mode of Coil-able Mast

Liu Tao, Han Han, Ji Bin, Lü Rongxin, Cheng Lei

(Shanghai Aerospace System Engineering Institute, Shanghai, 201109, China)

Abstract: According to the on-orbit working characteristic of the coil-able mast structure, the experimental investigation on the nonlinear buckling mode and the buckling load at different height and diagonal cable pre-load is carried out. Based on the geometric nonlinearity characteristic, the corresponding numerical simulation is developed by using arc-length method to obtain the nonlinear buckling mode of the structure. The analysis results show that: (1) the buckling mode and the buckling load obtained from numerical simulation agree well with those obtained from the experimental work, (2) the buckling mode of coil-able mast is closely correlative to its height and diagonal cable pre-load, and the bearing capability for the axial compression and bending can be significantly improved if the diagonal cable is under the tension condition. The result is expected to provide some valuable information for studying other similar structures in future.

Key words: coil-able mast; nonlinear buckling; buckling mode; experimental investigation; arc-length method

盘绕式伸展机构是目前在轨应用较多的大面积柔性太阳翼支撑机构^[1-3],先后应用于美国中分辨率成像光谱仪搭载平台 EOS AM-1、日本自由飞行平台 SFU(见图 1)和欧洲航天局通信卫星 Olympus 等。因其展收可靠性高、重量轻和构造简

单等特点在大型航天器中应用前景十分广阔。

目前,国内外学者对盘绕式伸展机构展收过程中的屈曲模式进行了一系列有效的研究。戈冬明等^[4]根据弹性稳定理论与卡氏能量原理,推导了局部卷压屈曲和整体螺旋屈曲的临界压力表达式;

基金项目:国家高技术研究发展计划(“八六三”计划)(2009AA043000)重点资助项目。

收稿日期:2014-07-08;**修订日期:**2015-03-30

通信作者:吕榕新,男,研究员,E-mail:leurongxin59@sina.com。

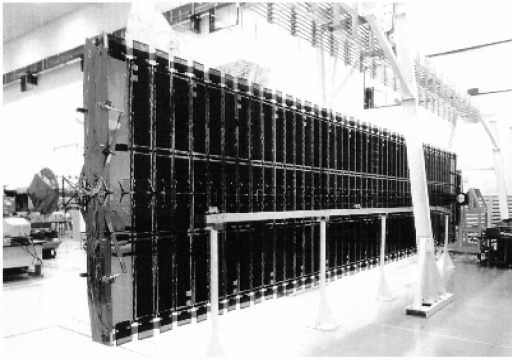


图1 日本 SFU 柔性太阳翼

Fig.1 Flexible solar array of Japanese SFU

Eiden 等^[5]利用非线性有限元法对对伸展机构的盘卷过程进行了仿真,得到了与试验一致的结果;张淑杰等^[6]依据欧拉公式给出了展开后的整体失稳和局部失稳的临界载荷。但这些研究给出的理论公式并没有考虑到钢丝绳松弛和机构大变形所带来的几何非线性影响。

对于结构的非线性屈曲分析,弧长法被认为当前最有效的计算方法之一。向天宇等^[7]将弧长法应用在混凝土结构的全过程非线性有限元分析;祖义祯等^[8]将弧长法应用于平面连杆机构的稳定性求解;李瑞雄等^[9]以透镜式薄壁 CFRP 管空间伸展臂为对象,分析不同铺层方式和初始缺陷对轴压临界载荷的影响。弧长法还被用于一些大型结构的非线性屈曲分析中^[10-11]。但弧长法计算的屈曲载荷与结构所引入的初始缺陷密切相关,结构在初始缺陷下势能最低,在加载的最初阶段结构将沿着该初始缺陷变形,因此在缺少相关的试验研究,无法获取准确的初始缺陷情况,难以证明数值模拟得到的屈曲载荷和屈曲模式的合理性。

本文针对盘绕式伸展机构在轨工作的特点,在不同钢丝绳预紧力和结构高度下的非线性屈曲模式和屈曲载荷开展了相关的试验研究。根据其几何非线性特点,采用弧长法对试验状态下结构的非线性屈曲模式进行了仿真验证。

1 盘绕式伸展机构

图2所示为3节盘绕式伸展机构,该结构由3根连续纵杆、三角横框和钢丝绳索组成。三角横框顶点与纵杆通过滚柱连接,纵杆和横框选用玻璃纤维材料。收拢时,依靠伸展机构收藏筒内螺母旋转带动滚柱进入筒内,纵杆在轴力和扭矩的作用下产生屈曲变形而盘绕至收拢状态。展开时,螺母沿与收拢相反方向运动,伸展机构逐渐释放弹性应变

能,直至展开成直杆。

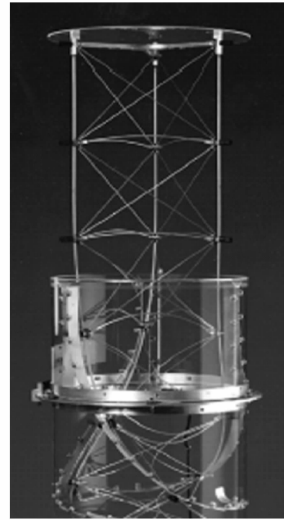


图2 盘绕式伸展机构

Fig.2 Coil-able mast

2 伸展机构试验方法

伸展机构在轨工作状态主要承受弯曲和轴压载荷。弯曲载荷主要由柔性太阳翼横向过载的剪力产生的附加弯矩,因此伸展机构的根部弯矩最大,试验中用3节伸展机构考察弯曲承载能力。轴压载荷主要来自太阳翼的轴向张紧力和轴向过载,试验中分别用3节和37节伸展机构考察其轴压承载能力。此外,在空间环境高低温长期作用下,伸展机构钢丝绳索的预紧力可能逐渐降低直至松弛,为考察极端情况对伸展机构承载能力影响,在3节伸展机构的弯曲和轴压试验中分别将伸展机构预紧力设为40 N,20 N和完全松弛3种状态,松弛状态可认为与不存在钢丝绳一致。37节伸展机构预紧力为20 N,由于高度达到14 m,调整预紧力较为困难,因此没有考察钢丝绳索其他状态对伸展机构承载能力的影响,试验工况如表1所示。

表1 试验工况

Tab.1 Experimental conditions

序号	载荷	机构高度	预紧状态/N
1			40
2	弯曲	3节	20
3			松弛
4			40
5	轴压	3节	20
6			松弛
7	轴压	37节	20

为模拟真实边界条件,伸展机构下端通过固定工装固支,弯曲载荷通过伸展机构上端加载工装两

侧连接的液压缸实现,在加载过程中两侧的液压缸产生大小相同、方向相反的轴向拉和轴向压载荷,形成一对力偶,如图 3 所示。3 节伸展机构轴压试验采用与弯曲试验相似的方法实现,而 37 节伸展机构轴压试验则通过加载工装吊装砝码方式实现加载。所有试验采用逐级加载方式。由于结构伸展机构刚度较差,加载过程中结构变形较大,限于试验条件没有测量加载过程中变形,基于加载过程中载荷的突然下降和机构形状突变作为失稳的标志。

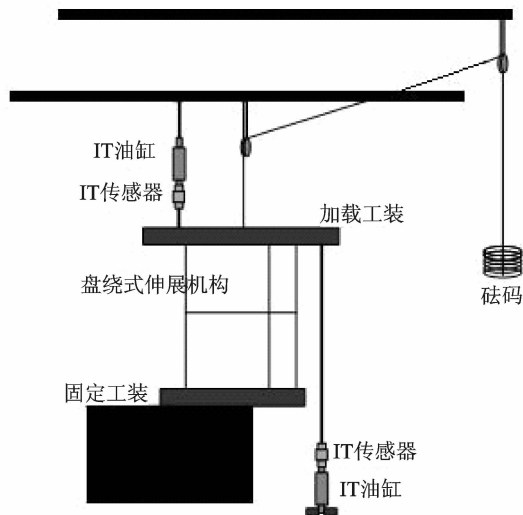


图 3 伸展机构弯曲载荷加载示意图

Fig. 3 Bending load schematic diagram of coil-able mast

3 有限元分析

3.1 有限元建模

在伸展机构的有限元建模中,纵杆和横框均采用线性梁单元模拟,两者之间的连接采用共节点的方法处理,纵杆和横框的材料为玻璃纤维材料,弹性模量为 50 GPa,泊松比 0.3。对于钢丝绳的处理,由于其只能受拉,不能受压,为准确地描述其力学行为,采用非线性弹簧单元模拟,定义弹簧的受压刚度为 0,受拉刚度为 1 000 N/mm,弹簧位移-力曲线如图 4 所示,通过控制图中与纵坐标交点大小改变预紧力值。

非线性屈曲求解采用 Abaqus 中的弧长法进行求解计算,首先通过特征值法获取伸展机构的线性屈曲模式,计算表明对于非线性伸展机构线性特征值法得到的一阶模式并不总是对应试验得到的屈曲模式,需要提取多阶模式并选取与试验一致的屈曲模式,将其作为初始缺陷引入到非线性屈曲分析中进行求解,3 节伸展机构的有限元模型如图 5 所示。

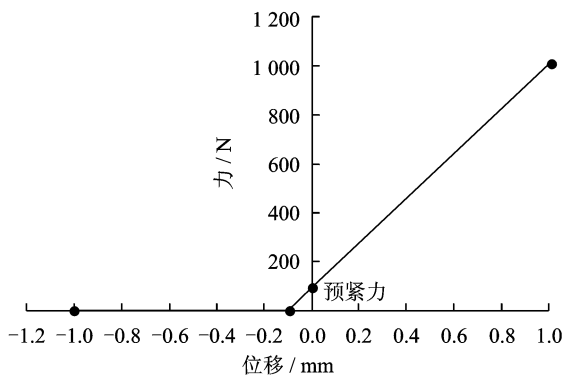


图 4 非线性弹簧的位移-力曲线

Fig. 4 Force-displacement curve of nonlinear spring

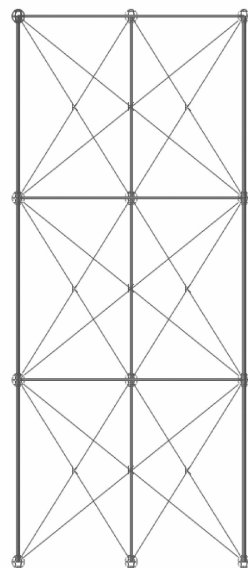


图 5 3 节伸展机构的有限元模型

Fig. 5 3-bay finite element model of coil-able mast

3.2 弧长法求解理论

图 6 为弧长法的迭代求解过程,图中下标 i 表示载荷步,上标 j 表示 i 载荷步下的迭代次数,若 $\Delta\lambda_i^j = 0 (j > 1)$,则为牛顿-拉夫逊法,它无法越过极值点得到完整的载荷-位移曲线,而弧长法的载荷增量 $\Delta\lambda_i^j \neq 0$ 是变化的,可以自动控制载荷增量,弧长法基本控制方程为

$$(x_i^j - x_{i-1})^2 + (\lambda_i^j - \lambda_{i-1})^2 = l_i^2 \quad (1)$$

该控制方程说明迭代路径是以上一个载荷步收敛点 (x_{i-1}, λ_{i-1}) 为圆心、半径为 l_i 的圆弧。设第 i 个载荷步收敛计算切线刚度为 $[K]_i$,外部参照力为 $\{F_{ref}\}$,当 $j=1$ 时,切线位移为

$$[K]_i \{X_{ref}\}_i = \{F_{ref}\} \quad (2)$$

$$l_i^2 = (\Delta\lambda_i^1)^2 + (\Delta\lambda_i^1 \{X_{ref}\}_i)^2 \quad (3)$$

$\Delta\lambda_i^1$ 按式(4)确定

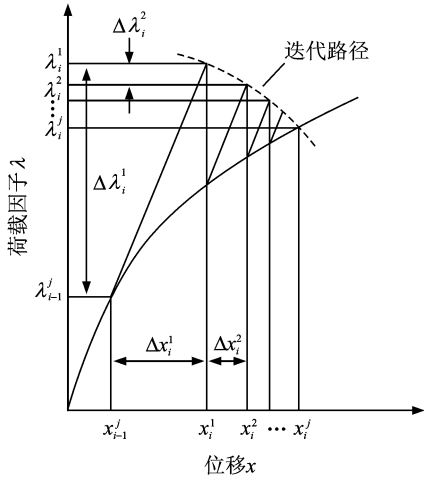


图6 弧长法的收敛过程

Fig.6 Convergence process of Riks method

$$\Delta\lambda_i^j \langle \{\mathbf{X}_{ref}\}_i^T \{\mathbf{X}_{ref}\}_{i-1} \Delta\lambda_{i-1}^j \rangle > 0 \quad (4)$$

当 $j \geq 2$ 时, $\Delta\lambda_i^j$ 按式(5)确定

$$(x_i^j - x_{i-1}^j, \lambda_i^j - \lambda_{i-1}^j) \cdot (\Delta x_i^j, \Delta\lambda_i^j) = 0 \quad (5)$$

此外,需补充单元增量平衡方程

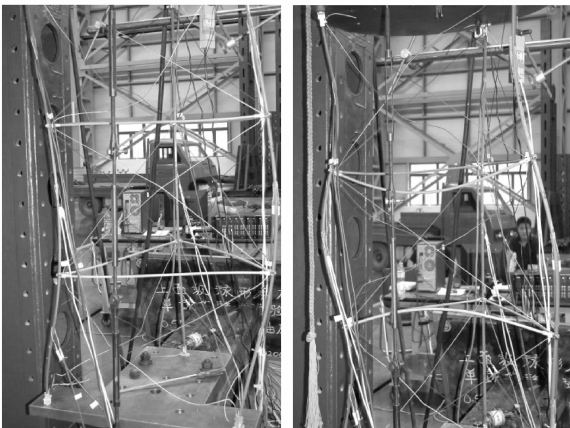
$$[\mathbf{K}]_i \{\Delta \mathbf{x}\}_i = \Delta\lambda_i^j \{\mathbf{F}_{ref}\}_i - \{\mathbf{R}\}_i^{j-1} \quad (6)$$

式中 \mathbf{R} 为残余力向量。

4 试验结果与计算结果分析

4.1 弯曲屈曲分析

试验加载至 100% 设计载荷时结束。试验表明:钢丝绳松弛时,伸展机构的弯曲屈曲模式表现为受压纵杆沿同一方向整体弯曲,如图 7(a)所示;钢丝绳在 20 N 和 40 N 的预紧力下,伸展机构的弯曲屈曲模式相同,为 1、3 节内凹,中间节外凸的典型节间失稳模式,如图 7(b)所示。图 8 所示为数值模拟计算所得到的屈曲模式,与试验结果一致。

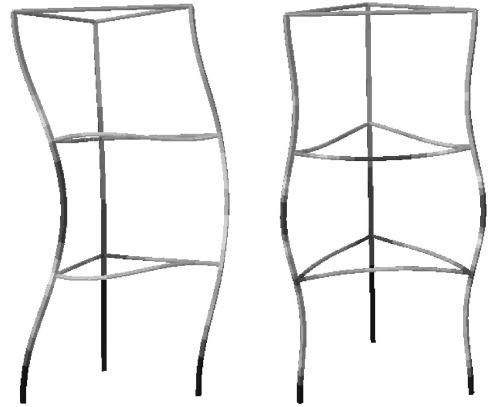


(a) 钢丝绳松弛 (b) 钢丝绳张紧

图7 弯曲屈曲模式(试验)

Fig.7 Bending buckling mode (experiment)

进一步说明钢丝绳在松弛和预紧状态下,结构的屈曲模式不同。

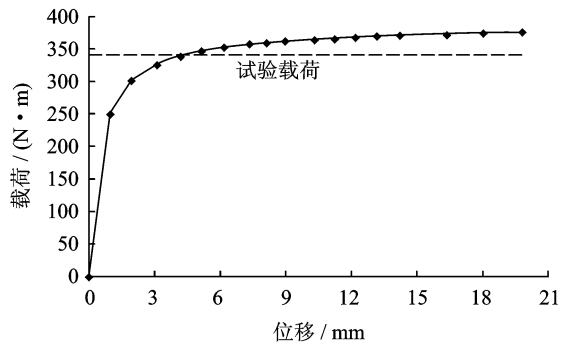


(a) 钢丝绳松弛 (b) 钢丝绳预紧力20 N

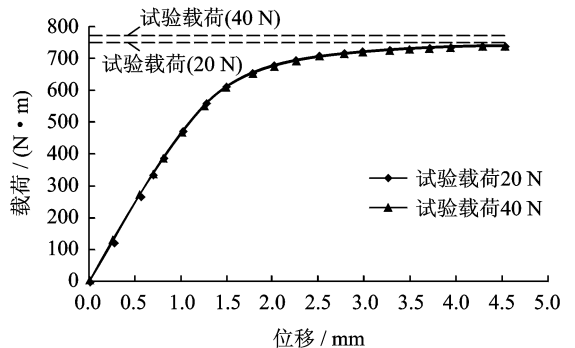
图8 弯曲屈曲模式(计算)

Fig.8 Bending buckling mode (numerical simulation)

图9给出了数值模拟计算所得的载荷-位移曲线。钢丝绳在松弛状态下,当弯曲载荷达到 250 N·m 时,机构刚度开始弱化,其屈曲载荷为 383 N·m;钢丝绳在张紧状态下,当弯曲载荷达到 600 N·m 之后,机构整体刚度开始弱化;在 20 N 和 40 N 预紧力下,机构的屈曲载荷分别为 740 N·m 和 753 N·m。表2所示为弯曲屈曲的



(a) 钢丝绳松弛



(b) 钢丝绳张紧

图9 弯曲工况下的位移-载荷曲线

Fig.9 Displacement-load curves of bending condition

计算值和试验值对比。通过对比可以发现,相较于松弛状态,张紧状态下的伸展机构承载能力明显提高。

表 2 弯曲屈曲载荷

Tab.2 Bending buckling load of bending condition

预紧状态/N	失稳载荷/(N·m)		误差/%
	计算	试验	
松弛	383	340	11.0
20	750	740	1.0
40	770	753	2.2

4.2 轴压屈曲分析

试验加载至 100%设计载荷时结束。试验表明:钢丝绳在松弛状态下,3 节伸展机构的轴压屈曲模式主要表现为整体扭转的失稳,如图 10(a)所示;在张紧状态下,3 节伸展机构的轴压失稳屈曲

主要表现为各纵杆的节间失稳,如图 10(b)所示;而 37 节伸展机构在轴压载荷下表现出了整体向一侧偏移的整体失稳模式,如图 10(c)所示。图 11 所示为计算得到的失稳模式,仿真结果与试验结果一致。

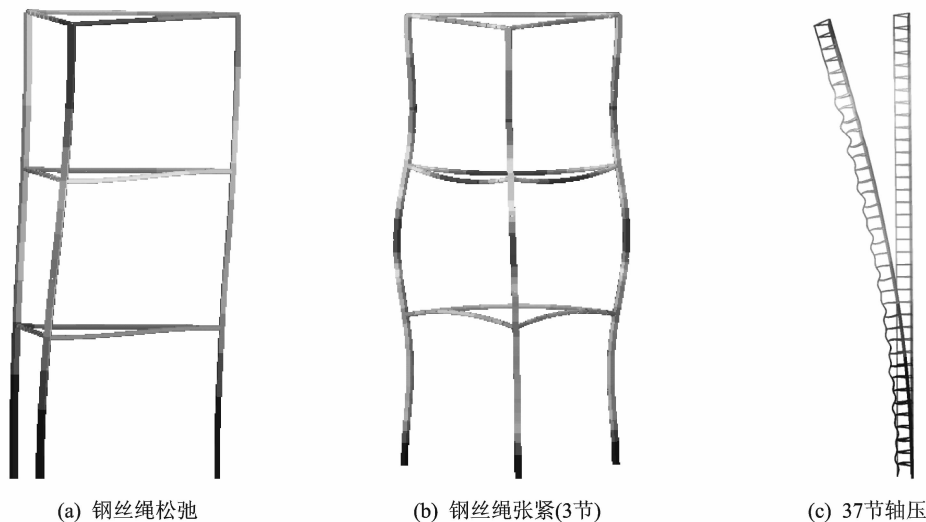
图 12 所示为轴压作用载荷下,3 节伸展机构在钢丝绳松弛、20 N 预紧力和 40 N 预紧力下的载荷-位移曲线;图 13 所示为 37 节伸展机构的载荷-位移曲线。由图 12 和图 13 可见,3 节伸展机构在钢丝绳松弛、20 N 预紧力和 40 N 预紧力下的承载能力分别为 465,2 428 和 2 462 N;37 节伸展机构的轴压承载能力为 1 478 N。表 3 所示为轴压屈曲的计算值和试验值对比。通过对比可以进一步得出:有无钢丝绳对伸展机构轴压承载能力影响很大,增加预紧力可使轴压承载能力略有提高。此外,值



(a) 钢丝绳松弛(3节) (b) 钢丝绳张紧(3节) (c) 钢丝绳张紧(37节)

图 10 轴压屈曲模式(试验)

Fig. 10 Axial compression buckling mode (experiment)



(a) 钢丝绳松弛 (b) 钢丝绳张紧(3节) (c) 37节轴压

图 11 轴压屈曲模式(仿真)

Fig. 11 Axial compression buckling mode (numerical simulation)

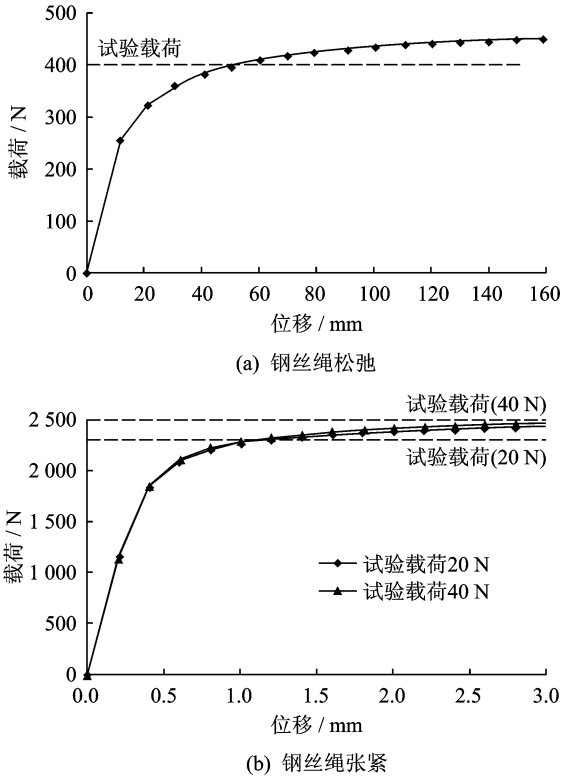


图 12 3 节轴压位移-载荷曲线

Fig. 12 3-bay displacement-load curves of axial compression

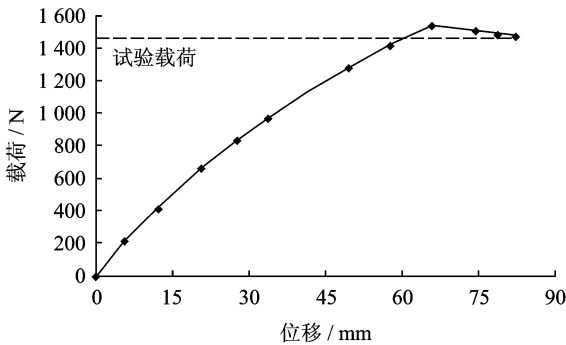


图 13 37 节轴压载荷-位移曲线

Fig. 13 37-bay displacement-load curve of axial compression

表 3 轴压屈曲载荷

Tab. 3 Axial compression buckling load

预紧状态/N	失稳载荷/N		误差/%	
	计算	试验		
松弛	465	430	8.0	
3 节	20	2 428	2 300	5.5
	40	2 462	2 500	1.5
37 节	20	1 510	1 465	3.0

得注意的是,由于屈曲模式的不同,并不能根据欧拉公式中屈曲载荷与长度平方成反比的关系来推

算 3 节和 37 节之间的承载能力关系。

5 结 论

本文针对盘绕式伸展机构在轨工作的特点,对在不同钢丝绳预紧力和结构高度下的非线性屈曲模式和屈曲载荷开展了相关的试验研究。根据其几何非线性特点,采用弧长法对试验状态下结构的非线性屈曲模式进行了仿真实验验证。结论如下:

(1)对于非线性伸展机构,由线性特征值法得到的一阶模态与试验屈曲模态通常并不一致,通过试验得到了伸展不同状态下的屈曲模态,为数值模拟中伸展机构初始缺陷的引入提供合理的依据。

(2)通过数值模拟和试验对比可以发现,数值模拟所得到的屈曲载荷与试验结果基本一致,验证了弧长法可以有效地对伸展机构非线性屈曲进行分析,也可以获取表征刚度的载荷-位移变化趋势。

(3)在伸展机构的设计中,钢丝绳是十分必要的,让其具有一定预紧力可以大幅度提高伸展机构的轴压、弯曲承载能力,增加预紧力也可使承载能力略有提高。

(4)钢丝绳有预紧力时,3 节伸展机构屈曲模式表现为节间失稳;而松弛状态时,机构屈曲模式则表现为整体失稳;37 节伸展机构的轴压屈曲模式也表现为整体失稳,屈曲模式的不同从另一方面也反映了屈曲承载能力的差别。

参考文献:

- [1] Kitamura T, Yumashiro K, Obata A, et al. Development of a high stiffness and retractable mast "HI-MAT" for space applications [C]//31st AIAA/ASME/-ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference. Long Beach: AIAA, 1990.
- [2] Pellegrino S. Large retractable appendages in spacecraft[J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 1995,32(6):1006-1014.
- [3] Takayuki K, Okazaki K. Development of a "Hingeless Mast" and its application[J]. Acta Astronautica, 1998,17(3):341-346.
- [4] 戈冬明,陈务军,付功义. 铰接盘绕式空间伸展臂屈曲分析理论研究[J]. 工程力学,2008,25(6):176-180. Ge Dongming, Chen Wujun, Fu Gongyi. Buckling theoretic analysis of coilable hinged extendable/retractable space mast [J]. Engineering Mechanics, 2008,25(6):176-180.
- [5] Eiden M, Brunner O. Deployment analysis of the Olympus Astromast and comparison with test meas-

- ure-elements[J]. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 1987, 24(1):63-68.
- [6] 张淑杰,李瑞祥,丁同才. 盘绕式杆状展开机构的设计与力学分析[J]. *力学季刊*, 2006, 27(2):341-347.
Zhang Shujie, Li Ruixiang, Ding Tongcai. Design and mechanical analysis of coilable lattice mast[J]. *Chinese Quarterly of Mechanics*, 2006, 27(2):341-347.
- [7] 向天宇,赵人达,刘海波. 混凝土结构全过程非线性分析的弧长法研究[J]. *铁道学报*, 2002, 24(3):67-70.
Xiang Tianyu, Zhao Renda, Liu Haibo. Application of arc-length method to whole process nonlinear analysis of concrete structures[J]. *Journal of China Railway Society*, 2002, 24(3):67-70.
- [8] 祖义祯,邓华. 基于弧长法的平面连杆机构运动分析[J]. *浙江大学学报:工学版*, 2011, 45(12):2159-2169.
Zu Yizhen, Deng Hua. Kinematic analysis of planar pin-bar linkage by arc-length method[J]. *Journal of Zhejiang University: Engineering Science*, 2011, 45(12):2159-2169.
- [9] 李瑞雄,陈务军,付功义. 透镜式薄壁 CFRP 管空间伸展臂轴压屈曲分析及试验[J]. *宇航学报*, 2012, 33(8):1164-1170.
Li Ruixiong, Chen Wujun, Fu Gongyi. Buckling analysis and experiment of lenticular thin-walled tube space boom under axial compression[J]. *Journal of Astronautics*, 2012, 33(8):1164-1170.
- [10] 赵海,白国良,徐亚洲,等. 初始缺陷对超大型双曲冷却塔极限承载力的影响[J]. *西安建筑科技大学学报:自然科学版*, 2011, 43(6):777-783.
Zhao Hai, Bai Guoliang, Xu Yazhou, et al. The influence of initial imperfection on the ultimate bearing capacity of super-large hyperbolic cooling towers[J]. *J Xi'an Univ of Arch & Tech: Natural Science Edition*, 2011, 43(6):777-783.
- [11] 袁英战,王元清,周国强. 采油井架钢结构非线性力学行为分析[J]. *工程力学*, 2000, 17(6):104-109.
Yuan Yingzhan, Wang Yuanqing, Zhou Guoqiang. Nonlinear analysis of the mechanical behavior of oil derrick steel structures[J]. *Engineering Mechanics*, 2000, 17(6):104-109.