柔性索对空间索杆铰接式伸展臂性能影响分析

郭宏伟，刘荣强，邓宗全

（哈尔滨工业大学 机电工程学院，哈尔滨 150001，guohongwei2002@126.com）

摘 要：为了研究柔性索对空间索杆铰接式伸展臂力学特性及稳定性的影响，对伸展臂自平衡状态的受力情况进行分析，计算出满足伸展臂承载结构的最小索拉力设计值. 计算表明，伸展臂展开驱动力矩随索拉力的增加而成比例增大；伸展臂的轴向拉伸刚度、剪切刚度和扭转刚度随着索的抗拉刚度增加而增大；静刚度实验表明索张力对静刚度几乎没有影响. 仿真分析表明，增加斜拉索直径可以提高伸展臂的扭转振动频率，而斜拉索直径及张力对伸展臂的弯曲和轴向振动频率影响较小. 对不同索张力的伸展臂桁架单元进行了动力学试验，验证了仿真分析的正确性. 伸展臂铰接结构受力分析表明，增大索张力有利于提高伸展臂稳定性.

关键词：静力学；动力学；稳定性；柔性索；空间索杆铰接式伸展臂

中图分类号：V414.1　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：0367－6234(2010)01－0055－05

Influence of flexible cable on performance of space cable-strut deployable articulated mast

GUO Hong-wei, LIU Rong-qiang, DENG Zong-quan

(School of Mechatronics Engineering , Harbin Institute of Technology, Harbin, 150001, China, guohongwei2002@126.com)

Abstract: To investigate the influence of flexible cables on mechanical properties and stability of space cable-strut deployable articulated mast, the minimum design value of the cable prestress which satisfies the mast bearing structure requirement has been calculated based on the self-balance mechanics analysis of mast. Results indicate that the driving moment increases with the linearly increased cable prestress. The axial stiffness, shearing stiffness and tortional stiffness of mast increase with the increasing axial extensional stiffness of cable. Statics experiments indicate that the cable prestress has nearly no influence on the static stiffness of mast. Simulation analysis show that increasing the cable diameter can enhance the tortional vibration frequency of mast sufficiently, while the cable prestress and cable diameter have little influence on bending vibration frequency and axial vibration frequency. Dynamics tests on the mast truss bays with different cable prestresses have verified the correctness of simulation. The structural mechanics analysis of mast joint show that increasing the cable prestress is advantageous to the improvement of mast stability.

Key words: statics; dynamics; stability; flexible cable; space cable-strut deployable articulated mast

柔性索在地面建筑、并联机器人、航天器索杆体系结构、空间可展开结构中都有较广泛的应用[1－3]. 柔性索之所以受到广泛的应用是因为它不仅质量轻，而且容易实现展开和折叠. 索在空间可展开结构收拢过程中保持松弛状态，而在展开工作过程中能够提供预紧力，使空间展开结构保持预定的形状和刚度. 索杆张力结构是指由张力索和压杆组成的、具有预应力自平衡体系的结构，通过自平衡预应力形成结构的刚度. 空间索杆张

收稿日期：2008－12－08.

基金项目：国家自然科学基金重点项目资助(50935002)；高等学校学科创新引智计划资助项目(B07018).

作者简介：郭宏伟(1980—)，男，博士，讲师；
刘荣强(1965—)，男，教授，博士生导师；
邓宗全(1956—)，男，教授，博士生导师.

力结构应用的例子有 AstroMesh 张力桁架天线，Astromast 伸展臂以及 CoilABLE、ADAM 伸展臂等. AstroMesh 索网展开天线由反射面索网系统、周边桁架、以及中央圆筒 3 部分组成，天线展开后索网以及拉索在结构内力的作用下达到平衡位置，由于索中具有预应力而形成具有一定刚度和型面精度的抛物面状反射结构型面[4]. ADAM(Able Deployable Articulated Mast)伸展臂也是典型的索杆张力结构[5].

柔性索在空间可展开结构中起着关键的作用，索张力、索几何及材料参数等影响着空间可展开结构的力学性能、结构精度等. 本文主要分析柔性索在空间索杆铰接式伸展臂中的应用，研究索张力值对空间索杆铰接式伸展臂的展开驱动力矩、静态刚度、动力学特性以及伸展臂稳定性的影响. 并对具有不同索张力值的伸展臂桁架单元进行试验研究.

1　索在空间索杆铰接式伸展臂中应用

1.1　空间索杆铰接式伸展臂结构

如图 1 所示，空间索杆铰接式伸展臂桁架单元主要由横杆、纵杆、斜拉索、锁定装置构成. 纵杆与横杆构成的刚性框架铰接，伸展臂桁架单元展开后形成一个立方体结构，4 个侧面由斜拉索张紧并通过锁定装置锁定，形成一个静定刚化单元. 4 个侧面的预应力索保证伸展臂桁架单元的结构构型，并使伸展臂具有一定结构刚度. 伸展臂桁架单元由折叠状态到展开状态过程中，斜拉索逐渐由松弛状态变为张紧状态，当伸展臂桁架单元完全展开后，索张力达到预设张力值，并由锁定装置锁定，保持伸展臂桁架单元的刚化状态. 通过锁定装置的设计及使用特定的工装进行装配，能够保证伸展臂桁架单元 4 个侧面上索张力的一致性. 伸展臂工作在太空环境中，温度交替变化较大，为了减少温度变化对索张力大小的影响，斜拉索一般采用热膨胀系数小的材料制成，如不胀钢、钛合金绳索等.

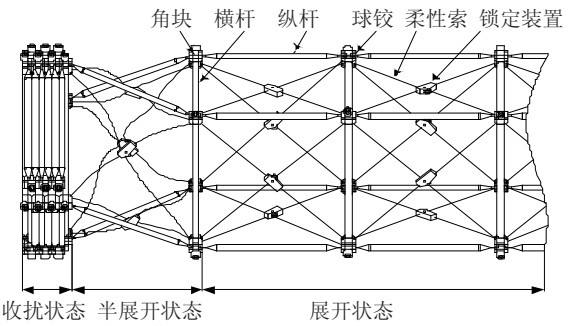


图 1　索杆铰接式伸展臂

1.2　斜拉索张力值设计

如图 2 所示，分离出一个桁架单元的侧面，结构中的索预紧力与横杆和纵杆中的压力能够自相平衡. 端部横杆中受单根索拉力作用，中间横杆与纵杆要受到两根索拉力共同作用.

端部横杆所受压力为

$$F_{b1} = -F_d \frac{l_b}{l_d} = -F_d \cos\theta ;$$

中间横杆所受压力为

$$F_{b2} = -2F_d \frac{l_b}{l_d} = -2F_d \cos\theta ;$$

纵杆所受压力为

$$F_l = -2F_d \frac{l_l}{l_d} = -2F_d \sin\theta ;$$

斜拉索张力为

$$F_d = F_p .$$

式中：l_b、l_l、l_d 分别为横杆、纵杆、斜拉索的长度；θ 为斜拉索与横杆夹角；F_p 为斜拉索张力预设值.

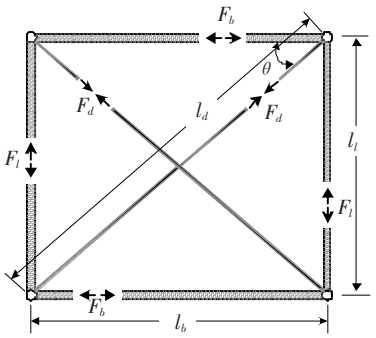


图 2　伸展臂桁架单元侧面预紧力分析

斜拉索必须具有足够大的预紧力以保证伸展臂在各种载荷工况下保持斜拉索的张紧状态和伸展臂的结构特征. 伸展臂在工作过程中，斜拉索中的实际张力值可以表示为[6]

$$F_d = F_p + F_S + F_T .$$

式中：F_S 是结构载荷，$F_S \in [-F_{S,max}, +F_{S,max}]$；$F_T$ 是热载荷，$F_T \in [-F_{T,max}, +F_{T,max}]$.

斜拉索中的张力必须满足大于保证伸展臂静定结构的安全值，即

$$F_d > F_{d,min} > 0,$$

即斜拉索的预设张力值必须满足

$$F_p > F_{d,min} + F_{S,max} + F_{T,max} .$$

因此，斜拉索中必须满足具有足够大的预紧力，才能满足伸展臂在各种载荷情况下的保持承载结构并具有一定结构刚度，例如 ADAM 伸展臂中斜拉索张力值约为 2 000 N[7].

1.3　斜拉索张力测量

制作了具有不同索张力的伸展臂桁架单元，采用德国施密特公司生产的张力仪对伸展臂斜拉

索中张力值进行测量. 其测量原理是采用三点弯曲法对斜拉索张力进行测量[8]，测量结果通过显示单元读取. 分别对 4 种张力值的伸展臂桁架单元索张力进行了测量和记录，如表 1 所示. 各个侧面索张力值与预设值偏差在 5% 以内，基本保证了索张力的一致性，并保证了后续实验的有效性.

表 1　伸展臂桁架单元索张力测量结果

预设张力值/N	侧面 A		侧面 *B*		侧面 *C*		侧面 *D*	
	索 1	索 2	索 1	索 2	索 1	索 2	索 1	索 2
200	197	204	202	199	202	194	202	201
300	299	306	302	306	306	298	293	299
400	401	402	399	393	408	387	392	390
500	495	498	501	496	503	502	507	497

2　索张力对伸展臂驱动力矩的影响

空间索杆铰接式伸展臂的展开与刚化是通过一套四线程的螺旋套筒式驱动机构实现的，当伸展臂桁架单元达到临界刚化位置时即斜拉索即将完全张紧并在锁定装置中锁定时刻，斜拉索中产生较大的预紧力，对伸展臂桁架单元的展开运动产生较大阻力矩，因此，驱动机构需要提供足够的驱动转矩来克服索张力的阻力矩使伸展臂展开并刚化，对应伸展臂临界刚化位置时所需的驱动力矩最大[9]. 图 3 所示为驱动机构驱动力矩与索张力的关系曲线，驱动力矩随着索张力的增大而呈线性增加. 索张力为零时，而所需驱动机构的驱动力矩并不为零是因为驱动机构要克服锁定装置的锁紧力产生的阻力矩.

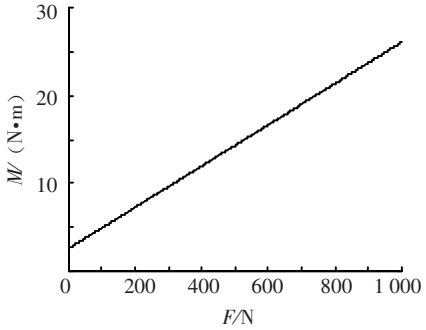


图 3　索张力对驱动力矩的影响

3　索对伸展臂静力学的影响

空间索杆铰接式伸展臂中的杆单元的刚性远大于柔性索的刚性，因此，忽略索单元对伸展臂弯曲刚度的贡献，索主要决定伸展臂的剪切刚度与扭转刚度[10-11]. 由于索只能受拉不能受压的特点，伸展臂的轴向刚度分为拉伸刚度和压缩刚度，伸展臂静刚度表达式如表 2 所示. 其中，E_d、E_l 分别为斜拉索、纵杆材料弹性模量，A_d、A_l 为斜拉索、纵杆横截面面积，R 为伸展臂的半径. 伸展臂的剪切刚度与扭转刚度与索张力的大小无关，而与索材料弹性模量和索截面面积成正比. 对不同斜拉索张力伸展臂桁架单元进行了静力学试验，伸展臂桁架单元一端固定在光学平台上，一端自由. 在伸展臂桁架单元自由端横杆中点施加一水平力，通过位移传感器测量桁架单元自由端的变形量. 图 4 所示为伸展臂桁架单元受拉力与变形的测试结果. 不同索张力值的桁架单元受相同载荷下变形相差不大，索张力对伸展臂桁架单元弯曲刚度几乎没有影响.

表 2　伸展臂静刚度表达式

刚度	表达式
轴向拉伸刚度 *EA*	$4E_lA_l + 8E_dA_d\sin^3\theta$
轴向压缩刚度 *EA*	$4E_lA_l$
弯曲刚度 *EI*	$2E_lA_lR^2$
剪切刚度 *GA*	$4E_dA_d\cos^2\theta\sin\theta$
扭转刚度 *GJ*	$4E_dA_dR^2\cos^2\theta\sin\theta$

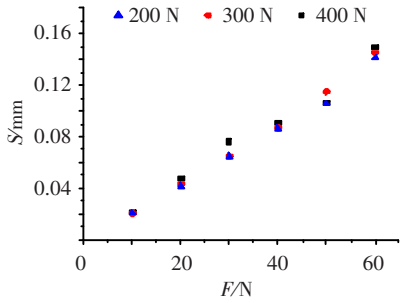


图 4　不同索张力值桁架单元静力学试验曲线

4　索对伸展臂动力学的影响

伸展臂是由斜拉索及压杆构成的索杆结构，因此，斜拉索及压杆的振动频率对伸展臂的振动频率影响较大. 受拉索的振动频率为

$$f_{i,d} = \sqrt{F_d/\rho_d}\,i/(2l),$$

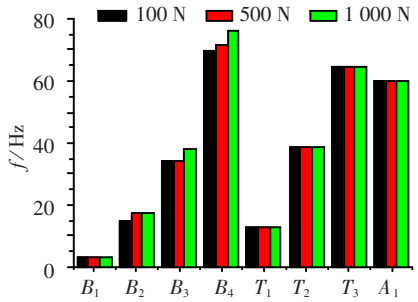
受压杆的振动频率为

$$f_{i,l} = \sqrt{i^2 - F/P_{eu}}\,\sqrt{EI/\rho}\,(i\pi)/(2l^2).$$

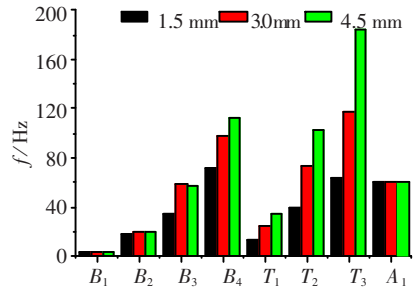
式中：P_{eu} 为杆的欧拉载荷，$P_{eu} = \pi^2EI/l^2$.

索的振动频率随着索拉力的不断增大而增大;而随着索拉力的增大,横杆和纵杆单元中所受的压力也随之增大,横杆和纵杆的振动频率逐渐减小. 伸展臂的振动频率是索与杆振动频率共同作用的结果,因此,存在一个索张力的最优值,能够满足伸展臂的振动频率达到最大.

如图 5 所示,运用有限元软件对斜拉索直径与拉力对 20 个桁架单元的伸展臂固有频率的影响进行了仿真分析. 从图 5(a)可以得出,斜拉索预紧力对伸展臂的各阶弯曲、扭转、轴向振动频率影响较小,随着索张力的增加,伸展臂高阶弯曲频率略有增大,但是增加的量值很小. 从图 5(b)可以得出,索直径对伸展臂的弯曲和轴向振动频率影响较小,而对伸展臂的扭转振动频率影响较大.



(a) 索拉力对频率的影响



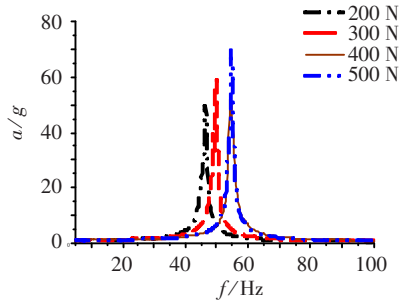
(b)索直径对频率的影响

B_i—伸展臂的第 i 阶弯曲振动频率,T_i—伸展臂的第 i 阶扭转振动频率,A_i— 伸展臂的第 i 阶轴向振动频率.

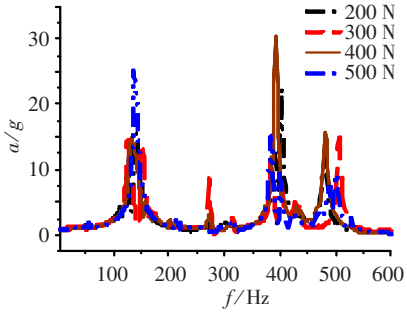
图 5　斜拉索参数对伸展臂频率的影响

分别对 200、300、400、500 N 四种不同索张力的伸展臂桁架单元进行了正弦扫频振动试验. 对索和桁架单元的振动频率进行了测量,如图 6 所示. 随着索张力的提高,斜拉索及伸展臂桁架单元的振动频率增大,但是增幅较小.

由此可见,虽然存在一个最优的索张力值能够使得伸展臂振动频率达到最大值,但是由有限元仿真和振动试验说明索张力的大小对伸展臂的振动频率增大效果并不显著. 另外,索张力的增大势必增加伸展臂驱动机构的驱动功率,同时较大的索张力又给预紧力的加载和伸展臂的装配带来较大的难度,因此,不能选用增大索张力作为提高伸展臂固有频率的主要手段,而可以通过增加索直径的方法提高伸展臂的扭转振动频率.



(a)索振动频率



(b)伸展臂桁架单元振动频率

图 6　不同索张力伸展臂单元试验曲线

5　索张力对伸展臂稳定性的影响

由于空间伸展臂为多铰结构,铰接副特性直接影响伸展臂的整体性能. 索张力使纵杆产生压力,而纵杆两端与横杆框架铰接,如图 7 所示. 因此索张力的作用结果是使铰接副产生较大的法向接触力. 消除了铰接间隙,同时增大了铰间摩擦力.

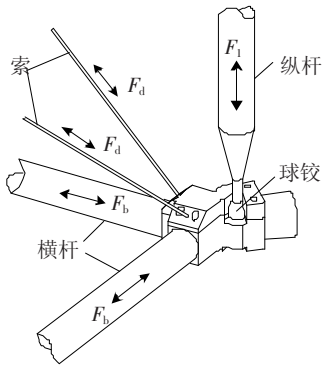


图 7　球铰受力图

铰接副间切向载荷与法向载荷的比值 F_t/F_n 是影响铰接副稳定性的重要参数. 球铰在受到切向载荷时,产生的微小位移可表示为[12]

$$\frac{\mathrm{d}F}{\mathrm{d}\delta} = C\left(1 - \frac{F_t}{\mu F_n}\right)^i. \tag{1}$$

式中:$\mathrm{d}F$ 为铰接副受到的外力,$\mathrm{d}\delta$ 为接触铰在 $\mathrm{d}F$ 作用下产生的变形量,F_t 为切向力,F_n 为法向力,μ 为摩擦系数,C、i 为常数.

从式(1)可以看出，增加铰接副的法向载荷可以减少球铰的变形量. 另外铰间接触力的增大增加了接触刚度，同时降低了接触阻尼. 因此增加索张力对提高伸展臂的稳定性起着重要作用.

6　结　论

1)分析了柔性索在空间索杆铰接式伸展臂中的应用，提出了保证伸展臂承载结构的最小索拉力设计值.

2)伸展臂展开驱动力矩随索拉力的增加成比例增大. 伸展臂的轴向拉伸刚度、剪切刚度和扭转刚度随着索的抗拉刚度增加而增大，索张力几乎对伸展臂的静刚度没有影响.

3)增加斜拉索直径可以提高伸展臂的扭转振动频率，而斜拉索直径及张力对伸展臂的弯曲和轴向振动频率影响较小.

4)索拉力的增大可以消除铰接间隙，减少铰接副的滑移位移，增加伸展臂的稳定性.

参考文献：

[1] 隋春平，赵明扬. 3 自由度并联柔索驱动变刚度操作臂的刚度控制[J]. 机械工程学报，2006，42(6)：205－210.

[2] 蔺军，董石麟，袁行飞. 环形平面空间索桁张力结构的预应力设计[J]. 浙江大学学报：工学版，2006，40(1)：67－72.

[3] SAKAMOTO H，PARK K C，MIYAZAKI Y. Dynamic Wrinkle Reduction Strategies for Cable Suspended Membrane Structures[C]//45th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures，Structural Dynamics & Materials Confer. California：Palm Springs，2004：AIAA 2004－1581.

[4] TIBERT A G. Optimal Design of Tension Truss Antennas[C]. 44th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures，Structural Dynamics，and Materials Conference. Norfolk，VA，United States：American Inst Aeronautics and Astronautics Inc，2003.

[5] BROWN C G，KAMAL J，PIERCE L E. Validation of the shuttle radar topography mission height data[J]. IEEE Transactions on geoscience and remote sensing，2005，43(8)：1707－1715.

[6] GRESCHIK G. Truss beam with tendon diagonals：mechanics and designs[J]. AIAA Journal，2008，46(3)：557－567.

[7] LEVINE M B. On-orbit microdynamic behavior of a flexible structure：IPEX Ⅱ[C]. Proceedings of 17th International Modal Analysis Conference. Kissimmee，FL，USA：SPIE，1999：915－921.

[8] 陈鲁，张其林，吴明儿. 索结构中拉索张力测量的原理与方法[J]. 工业建筑，2006(36)：368－371.

[9] 郭宏伟，刘荣强，邓宗全，等. 空间索杆式伸展臂展开过程力学分析与仿真[J]. 机械设计，2008，25(7)：31－35.

[10] 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.

[11] MURPHEY T W. Symbolic Equations for the Stiffness and Strength of Straight Longeron Trussses[C]//47th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures，Structural Dynamics，and Materials Conference. Newport，Rhode Island：[s. n.]，2006：AIAA 2006－2123.

[12] HARDAWAY L M R，PETERSON L D. Stability and Mechanics of Precision Deployable Structures under Nanometer Deformation[R]. [S. l.]：University of Colorado，2000：CAS Report No：CU－CAS－00－12.

（编辑　杨　波）