空间索杆铰接式伸展臂性能参数分析与设计

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)

摘 要：提出了评价空间索杆铰接式伸展臂性能的主要参数，分析研究了空间索杆铰接式伸展臂的主要性能参数与伸展臂几何特征参数的相互关系.推导了伸展臂线密度、收拢率、弯曲刚度和抗弯强度等性能参数的表达式.分析了伸展臂材料特性对伸展臂性能参数的影响，讨论了空间索杆铰接式伸展臂的稳定性问题，分析了局部失稳与整体失稳的条件.基于抗弯强度约束、弯曲刚度和抗弯强度共同约束两种约束模式对伸展臂进行了设计，建立了伸展臂几何参数和线密度与抗弯强度和弯曲刚度之间的关系方程，并将设计结果与美国 ADAM(Able Deployable Articulated Mast)伸展臂参数进行了对比分析.

关 键 词：空间索杆铰接式伸展臂；弯曲刚度；抗弯强度；稳定性

中图分类号：V 414.1

文献标识码：A **文 章 编 号**：1001-5965(2008)10-1186-05

Performance parameters analysis and design of space cable-strut deployable articulated mast

Guo Hongwei Liu Rongqiang Deng Zongquan

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

Abstract: The primary performance parameters of the space cable-strut deployable articulated mast was derived which can evaluate the space cable-strut deployable articulated mast performance. The relationship between primary performance parameters and geometrical feature parameters of space cable-strut deployable articulated mast was analyzed and studied. The expressions of line density, packaging efficiency, bending stiffness and bending strength of the mast were derived. The influence of mast's material character to its performance parameters was analyzed. The stability problem of space cable-strut deployable articulated mast was discussed, and the condition of local instability and global instability was analyzed. The mast was designed based on two constraints modes of bending strength constraint and bending strength with bending stiffness constraints. The relation equations of geometrical parameters and line density of the mast relate with its bending strength and bending stiffness were established. The design results were analyzed and compared with the parameters of the American able deployable articulated mast.

Key words: space cable-strut deployable articulated mast; bending stiffness; bending strength; stability

1 问题的提出

空间伸展臂广泛用于展开和支撑柔性太阳能帆板、磁强针、分光计、重力梯度杆与干涉仪等.根据太空任务的不同对伸展臂的质量、弯曲刚度、弯曲强度、收拢体积等性能参数和驱动机构的要求也各不相同.由美国 AEC-Able 工程公司研制的大型空间索杆铰接式伸展臂 ADAM 在 2000 年

收稿日期：2007-11-05

基金项目：CAST创新基金资助项目(CAST200612)

作者简介：郭宏伟(1980—)，男，黑龙江哈尔滨人，博士生，guohongwei2002@126.com.

成功应用于航天飞机雷达地形测绘(STRM, Shuttle Radar Topography Mission)项目中,如图 1 所示.该伸展臂由 87 个桁架单元构成,完全展开长度60 m,是目前太空探测中应用最长的空间可展开结构,其收拢率约为 4.9%. ADAM 伸展臂自身质量为 275 kg,其前端支撑负载质量为 360 kg,ADAM 长度方向上的钢索、同轴电缆、光纤等质量为200 kg[1].

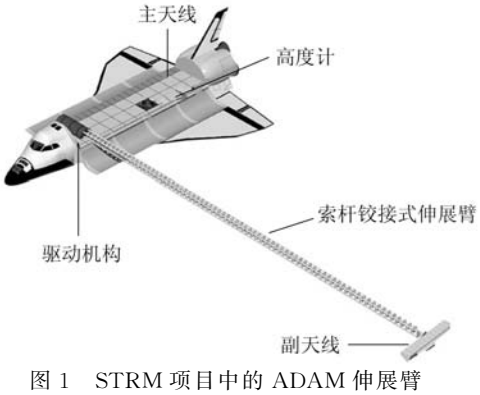


图 1　STRM 项目中的 ADAM 伸展臂

这种大型空间索杆铰接式伸展臂具有定位精度高、稳定性好、刚度和强度高等特点,可以作为大型合成孔径雷达、太空望远镜、大型展开天线等高精度探测设备的定位和支撑.大型空间索杆铰接式伸展臂的研究工作对我国实施高分辨率、高精度对地观测计划具有十分重要的意义.

2　空间索杆铰接式伸展臂

空间索杆铰接式伸展臂由纵杆单元、横杆单元、球铰、拉索、角块、锁定装置组成,如图 2 所示.4 根横杆通过角块刚性连接构成刚性平面,4 根纵杆两端分别与上下 2 个刚性平面上的角块通过球铰铰接构成一个伸展臂桁架单元,纵杆与刚性平面之间可以通过相对转动实现单元的收拢和展开.伸展臂单元展开后形成一个立方体结构,4 个侧面由拉索张紧并通过锁定装置锁定形成一个静定刚化单元.不同数量的单元铰接在一起便构成不同长度的空间伸展臂,理论上索杆铰接式伸展臂长度可无限扩充,而不增加驱动能耗.为满足伸展臂展开后同时具有较高的刚度与强度,需要采用高弹性模量、低密度的材料,纵杆、横杆的材料一般采用高强度质量比的碳纤维材料,拉索为钛丝或者不胀钢材料,角块和锁定装置一般为不锈钢或者铝合金制成[2-3].由于索杆铰接式伸展臂采用刚性的纵杆和横杆单元,克服了传统薄壁管式伸展臂、盘压杆式伸展臂柔性大、刚度低、定位精度差等缺点,可以实现较大的刚度和强度.铰接式伸展臂收拢后包含在一套筒状驱动机构内,该机构通过电机带动四线程内螺旋槽套筒转动提升或压缩刚性平面实现伸展臂的展开与收拢.

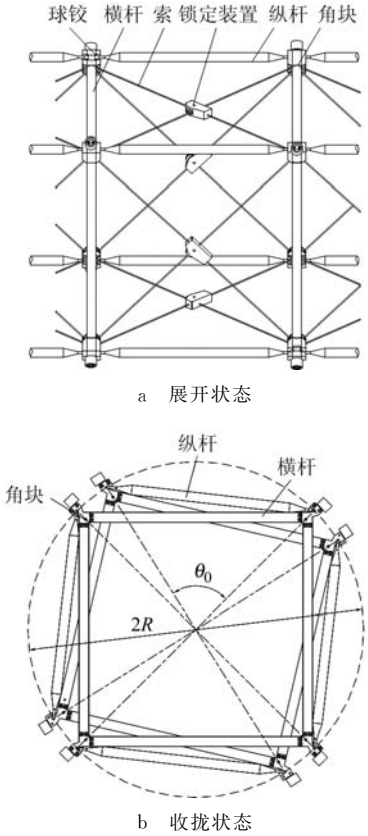


图 2　空间索杆铰接式伸展臂

3　空间索杆铰接式伸展臂参数分析

3.1　几何关系分析

空间索杆铰接式伸展臂桁架单元存在如下几何关系[4]:

$$\left(2R\sin\frac{\theta}{2}\right)^2+z^2=l^2 \tag{1}$$

式中,R 为伸展臂截面包络圆半径;θ 为上下刚性平面之间夹角;z 为上下刚性平面球铰中心之间距离;l 为纵杆高度,为了使伸展臂桁架单元能够完全收拢,$l<\sqrt{2}R$.

当伸展臂桁架单元完全收拢时,上下刚性平面之间的夹角为 θ_0,上下刚性平面间球铰中心的距离 $z=0$,由式(1)得

$$l=2R\sin\frac{\theta_0}{2} \tag{2}$$

由于角块几何尺寸的限制,θ_0 值一般在 70°～80°之间.

3.2　伸展臂的质量

索杆铰接式伸展臂的质量可以表示为[5]

$$W=4C_1\rho_l A_l L \tag{3}$$

式中，C_1 为考虑横杆、球铰、拉索以及锁定装置质量提出的修正系数；ρ_l 为纵杆材料密度；A_l 为纵杆截面面积，$A_l=\pi(d/2)^2$，d 为纵杆直径；L 为伸展臂长度.

在衡量伸展臂性能好坏或者不同类型伸展臂进行比较和选择时，通常以伸展臂单位长度的质量作为评价指标，因此提出伸展臂线密度的概念. 索杆铰接式伸展臂的线密度为

$$\rho_L=\frac{W}{L}=4C_1\rho_l A_l \tag{4}$$

3.3 伸展臂的收拢率

伸展臂折叠后高度为

$$H=\left(\frac{L}{l}+1\right)d=\left(\frac{L}{2R\sin\dfrac{\theta_0}{2}}+1\right)d \tag{5}$$

则伸展臂收拢率为

$$\eta=\frac{H}{L}\times 100\%\approx\frac{d}{2R\sin\dfrac{\theta_0}{2}}\times 100\% \tag{6}$$

以上是单纯考虑伸展臂收拢高度计算的收拢率，实际上套筒驱动机构要包含收拢状态的伸展臂，并且要驱动伸展臂展开和收拢，因此实际的收拢率为套筒驱动机构的长度与伸展臂完全展开长度之比.

3.4 伸展臂的弯曲刚度

伸展臂完全展开状态下的弯曲刚度和抗弯强度是空间伸展臂的重要性能指标，首先计算索杆铰接式伸展臂的惯性矩. 如图3所示，设第1根纵杆与 x 轴夹角为 φ_1，则第 i 根纵杆与 x 轴夹角为

$$\varphi_i=\varphi_1+\frac{2\pi}{4}(i-1)\qquad i=1\sim 4 \tag{7}$$

各纵杆与 y 轴距离为

$$x_i=R\cos\varphi_i \tag{8}$$

伸展臂对 y 轴的惯性矩为

$$I_y=4I_l+\sum_{i=1}^{4}A_l x_i^2=$$

$$4I_l+A_lR^2\sum_{i=1}^{4}\cos^2\left[\varphi_1+\frac{2\pi}{4}(i-1)\right]=$$

$$4I_l+2A_lR^2 \tag{9}$$

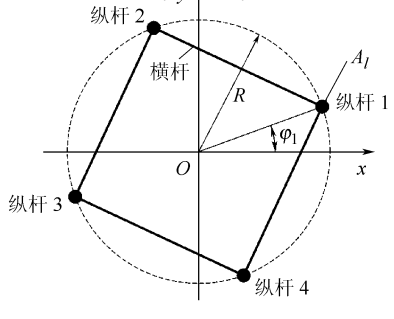


图3 铰接式伸展臂截面图

式中 I_l 为纵杆惯性矩，$I_l=\dfrac{\pi d^4}{64}=\dfrac{A_l^2}{4\pi}$.

从式(9)中可以看出伸展臂惯性矩 I_y 与伸展臂各纵杆在圆周上的位置无关，由于 $d\ll R$，忽略纵杆自身惯性矩，则索杆铰接式伸展臂的惯性矩为

$$I=2A_lR^2 \tag{10}$$

不考虑索张力对刚度的影响，因此，伸展臂的弯曲刚度为

$$EI=C_2E(2A_lR^2) \tag{11}$$

式中，E 为纵杆材料弹性模量；C_2 为铰接副对刚度削弱系数[6].

3.5 伸展臂的抗弯强度

如图3所示，分析伸展臂绕 y 轴的抗弯强度，作用在每根纵杆上的载荷与纵杆到 y 轴的距离成线性关系，即离 y 轴距离较大的纵杆受载也较大[7]，则有

$$\frac{P_i}{x_i}=\frac{P_1}{x_1} \tag{12}$$

伸展臂对 y 轴的弯矩为

$$M=\sum_{i=1}^{4}P_ix_i=$$

$$\frac{P_1R}{\cos\varphi_1}\sum_{i=1}^{4}\cos^2\left[\varphi_1+\frac{2\pi}{4}(i-1)\right]=\frac{2P_1R}{\cos\varphi_1} \tag{13}$$

设单根纵杆的临界屈曲载荷为 $P_{l\mathrm{cr}}$，则

$$P_{l\mathrm{cr}}=\frac{\pi^2EI_l}{l^2} \tag{14}$$

当 $P_1=P_{\mathrm{cr}}$，$\varphi_1=0$ 时，得到伸展臂的抗弯强度为

$$M_{\mathrm{cr}}=2P_{l\mathrm{cr}}R=\frac{\pi EA_i^2}{8R\sin^2\dfrac{\theta_0}{2}} \tag{15}$$

设纵杆材料CFRP的弹性模量 $E=210$ GPa，密度 $\rho=1\,660$ kg/m^3，质量修正系数 $C_1=4$，刚度削弱系数 $C_2=0.75$，伸展臂完全收拢时上下刚性平面夹角 $\theta_0=77.037°$. 伸展臂性能参数与几何参数之间关系曲线如图4所示.

伸展臂的弯曲刚度与半径 R 平方成正比，而伸展臂的抗弯强度与半径 R 成反比，增加伸展臂的直径可以大大增强伸展臂的弯曲刚度，但是随着半径增大，伸展臂的抗弯强度减小. 对于不同的伸展臂纵杆直径 d，当伸展臂半径较小时，抗弯强度变化较明显；当伸展臂半径较大时，弯曲刚度变化较明显. 伸展臂的收拢率随着半径增大而减小，对于不同的纵杆直径，随伸展臂半径变化收拢率变化规律一致.

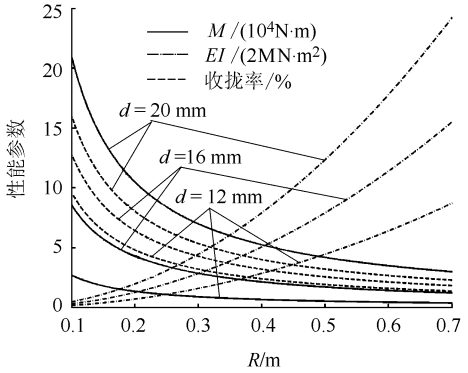


图 4　伸展臂性能参数与几何参数关系曲线

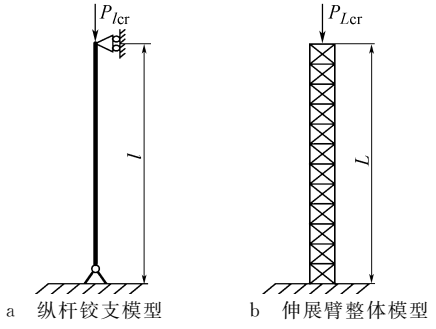
3.6　伸展臂的失稳分析

伸展臂足够长时,其整体可看作为一根细长杆,当伸展臂受到通过中心轴线的轴向载荷 P 时,伸展臂可能出现失稳现象,因此需对其稳定性进行分析[8].伸展臂的失稳分为局部失稳和整体失稳两种情况,局部失稳是指伸展臂在受轴向压缩时,纵杆首先达到临界失稳的屈曲载荷而导致伸展臂的失稳.纵杆两端铰支,如图 5a 所示,局部失稳临界力为

$$P_{l\mathrm{cr}}=\frac{\pi^2 EI_l}{l^2}=\frac{\pi^2 EA_l d^2}{16l^2} \tag{16}$$

伸展臂的整体失稳是指在轴向受压时整体被压溃,伸展臂可以看作一端固定,一端自由,如图 5b 所示,整体失稳临界力为

$$P_{L\mathrm{cr}}=\frac{\pi^2 EI}{(2L)^2}=\frac{\pi^2 EA_l R^2}{2L^2} \tag{17}$$



a　纵杆铰支模型　　b　伸展臂整体模型

图 5　伸展臂轴向受压模型

局部失稳与临界失稳情况讨论:

1) 当 $4P_{l\mathrm{cr}}<P_{L\mathrm{cr}}$ 时,伸展臂首先出现局部失稳.此时,出现局部失稳的条件为

$$\frac{d}{l}<\frac{\sqrt{2}R}{L} \tag{18}$$

2) 当 $4P_{l\mathrm{cr}}>P_{L\mathrm{cr}}$ 时,伸展臂首先出现整体失稳.此时,出现整体失稳的条件为

$$\frac{d}{l}>\frac{\sqrt{2}R}{L} \tag{19}$$

4　基于强度约束伸展臂设计

基于抗弯强度约束条件的伸展臂设计不考虑伸展臂刚度条件要求,该设计约束必须保证由弯矩产生的最大应力满足伸展臂纵杆材料工作应力的要求.

由弯矩产生的最大应力为

$$\sigma_M=\frac{MR}{I} \tag{20}$$

由单根纵杆临界载荷产生的最大压应力为

$$\sigma_{P_{l\mathrm{cr}}}=\frac{P_{l\mathrm{cr}}}{A_l}=\frac{\pi^2 EI_l}{l^2 A_l}=\frac{\pi EA_l}{4l^2}=\frac{\pi EA_l}{16\sin^2\dfrac{\theta_0}{2}R^2} \tag{21}$$

由 $\sigma_M=\sigma_{P_{l\mathrm{cr}}}=\sigma$ 得到伸展臂的线密度、伸展臂半径、纵杆截面面积分别为

$$\rho_L=\frac{W}{L}=3C_1\rho\left(\frac{4\sin^2\dfrac{\theta_0}{2}}{\pi\sigma E}\right)^{\frac{1}{3}}M^{\frac{2}{3}} \tag{22}$$

$$R=\left(\frac{\pi E}{32\sin^2\dfrac{\theta_0}{2}\sigma^2}\right)^{\frac{1}{3}}M^{\frac{1}{3}} \tag{23}$$

$$A_l=\left(\frac{4\sin^2\dfrac{\theta_0}{2}}{\pi\sigma E}\right)^{\frac{1}{3}}M^{\frac{2}{3}} \tag{24}$$

其中 σ 为伸展臂纵杆工作应力或纵杆材料许用应力.

影响伸展臂线密度的材料性能参数为 $\dfrac{P}{E^{1/3}}$.图 6 为满足伸展臂强度要求时,伸展臂的纵杆直径、线密度和半径随强度变化的关系曲线.

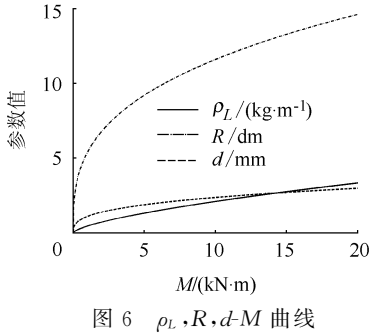


图 6　ρ_L,R,d-M 曲线

5　基于刚度和强度约束伸展臂设计

基于伸展臂弯曲刚度和抗弯强度约束设计要求,伸展臂的几何特征参数必须同时满足所需的弯曲刚度和抗弯强度要求.

由式(11)和式(15)联立得到伸展臂弯曲刚度和抗弯强度约束方程组为

$$\left.\begin{aligned} EI &= 2C_2 EA_l R^2 \\ M &= \frac{\pi EA_l^2}{8R\sin^2\dfrac{\theta_0}{2}} \end{aligned}\right\} \tag{25}$$

由方程组(25)及方程(4)解得伸展臂的线密度、伸展臂半径、纵杆截面面积分别为

$$\rho_L = \frac{W}{L} = 8C_1\rho_l\left(\frac{\sin^4\dfrac{\theta_0}{2}}{\pi^2 C_2^3 E^3}\right)^{\frac{1}{5}}(EI)^{\frac{1}{5}}M^{\frac{2}{5}} \tag{26}$$

$$R = \left(\frac{\pi}{32C_2^2 E\sin^2\dfrac{\theta_0}{2}}\right)^{\frac{1}{5}}(EI)^{\frac{2}{5}}M^{-\frac{1}{5}} \tag{27}$$

$$A_l = \left(\frac{32\sin^4\dfrac{\theta_0}{2}}{\pi^2 C_2^3 E^3}\right)^{\frac{1}{5}}(EI)^{\frac{1}{5}}M^{\frac{2}{5}} \tag{28}$$

此时影响伸展臂线密度的材料性能参数为 $\frac{\rho}{E^{3/5}}$. 同时满足伸展臂弯曲刚度和抗弯强度要求时,伸展臂的线密度、纵杆直径以及半径与弯曲刚度和抗弯强度关系曲线如图7、图8所示.

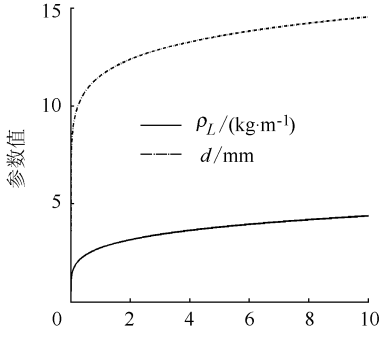


图7 ρ_L, d-$EI\cdot M^2$ 曲线

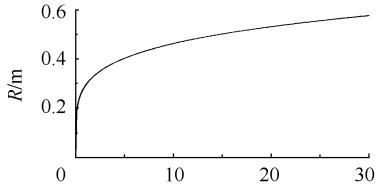


图8 R-EI^2/M 曲线

美国ADAM伸展臂的弯曲刚度和强度分别为:EI=13 MN·m^2,M=8 140 N·m,基于抗弯强度约束和基于弯曲刚度与抗弯强度约束的伸展臂设计结果与ADAM设计参数对比见表1.

基于弯曲刚度与抗弯强度约束时伸展臂的半径、纵杆直径、线密度均大于基于抗弯强度约束时设计结果,而小于ADAM伸展臂的实际设计参数值.其原因可能是质量修正系数 C_1 值估计过小,而铰接副对刚度削弱系数 C_2 取值较大,为了较准确的估计 C_2 值,铰接副柔性效应需进一步深入研究,另外伸展臂的基频、动力响应等其它约束条件也将制约伸展臂的设计.

表1 基于不同约束伸展臂设计参数与ADAM对比

类 型	R/m	d/mm	ρ_L/(kg·m^{-1})
强度约束	0.22	10.82	1.8
刚度强度约束	0.49	13.13	2.7
ADAM伸展臂	0.56	15.75	4.5

6 结束语

本文建立了空间索杆铰接式伸展臂线密度、收拢率、弯曲刚度、抗弯强度等性能参数与伸展臂几何特征参数半径、纵杆截面面积之间的关系方程;同时对伸展臂的局部失稳和整体失稳情况进行了讨论.分别基于抗弯强度约束和弯曲刚度、抗弯强度共同约束两种约束条件对索杆铰接式伸展臂进行了设计,并将几何参数、线密度等设计结果与*ADAM*伸展臂实际参数进行了对比分析.

参考文献(References)

[1] SRTM hardware-the mast: Payload bay[EB/OL]. Shuttle Press Kit, 2000-01-18. http://www.shuttlepresskit.com/STS-99/playload57.htm

[2] Levine M B. Microdynamic behavior of a joint dominated structure on-orbit[R]. AIAA-99-1267, 1999

[3] Farr T G, Rosen P A. The shuttle radar topography mission [R/OL]. http://trs-new.jpl.nasa.gov

[4] 苏斌,关富玲,杨大彬,等.索杆式伸展臂的展开驱动设计与动力学分析[J].空间科学学报,2004,24(4):312-320
Su Bin, Guan Fuling, Yang Dabin, et al. Design and dynamic analysis of a driving system for rob-cable deployable mast[J]. Chinese Journal of Space Science, 2004, 24(4): 312-320(in Chinese)

[5] Crawford R F. Strength and efficiency of deployable booms for space applications[R]. AIAA-1971-396, 1971

[6] Boom information[EB/OL]. AEC-Able Engineering Company Inc, 2004. http://www.aec-able.com

[7] Murphey T W. A material structure performance index for strain based deployable trusses[R]. AIAA-2004-1656, 2004

[8] 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(in Chinese)

(责任编辑:文丽芳)