

文章编号: 1000-4750(2008)06-0176-05

铰接盘绕式空间伸展臂屈曲分析理论研究

戈冬明,*陈务军,付功义,董石麟

(上海交通大学空间结构研究中心, 上海 200030)

摘 要: 首先介绍了铰接式可展空间伸展臂设计构造、受力特点与展开折叠机理, 然后根据弹性稳定理论与卡氏能量原理, 分别推导出局部卷压屈曲和整体螺旋屈曲的临界压力表达式, 并据此进行参数特性分析。该文分析理论对铰接式空间伸展臂的设计具有重要指导意义。

关键词: 可展结构; 铰接盘绕式伸展臂; 稳定屈曲分析; 屈曲模式; 能量原理

中图分类号: V212; O343.2 **文献标识码:** A

BUCKLING THEORETIC ANALYSIS OF COILABLE HINGED EXTENDABLE / RETRACTABLE SPACE MAST

GE Dong-ming, *CHEN Wu-jun, FU Gong-yi, DONG Shi-lin

(Space Structures Research Centre, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

Abstract: The detail design philosophy, construction characteristic and structural mechanical performances are firstly introduced, and mechanism of expanding and folding procedure is described for one kind of continuous longeron extendible mast with hinges, named Hinged Mast. Based on the elastic stability theorem and Castigliano energy principle, the critical buckling forces to activate deployment are formulated respectively in detail for the local coil mode and helix mode, and series of numerical computations are performed for structural parametric analysis of hinged space mast. The analytical theory can make a significant contribution to the design of space mast.

Key words: extendible structure; hinged coilable mast; buckling analysis; coil mode; energy principle

空间伸展臂是一种较简单的空间可展结构, 是研究开发大型空间结构的基础, 也是目前研究与应用较活跃的领域^[1-4], 国外较早研究并成功应用。我国近年也开展了一些对伸展臂的形式探索、分析理论与式样研究等^[5-10]。盘绕式伸展臂是一种经典的构架伸展臂, 构造简单、刚性高、抗振性好、可靠性高、收纳率高, 适用于强度、刚度较大的探测臂、太阳帆板等, 如“旅行者”、哈勃望远镜等。

盘绕式伸展臂伸缩(伸展、盘绕折叠)过程一直

是研究的难点, 伸展臂在展开折叠过程发生大位移且动力效应复杂, 国内外有效的理论分析模拟未能解决。伸展臂屈曲是盘绕屈曲发生的前提, 屈曲临界荷载对伸展臂结构特性、传动效率、驱动机构设计、电机功率选择有重要影响, 目前仍值得深入研究。

文献[1]给出了一个计算屈曲荷载的经验公式, 但该公式仅体现了材料属性, 没能反应出构造、几何方面的特性, 因而也是不够全面的。本文主要研

收稿日期: 2006-11-16; 修改日期: 2007-05-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(10102010)

作者简介: 戈冬明(1981—), 男, 江苏苏州人, 硕士生, 从事空间可展结构研究(E-mail: dmge@sjtu.org);

*陈务军(1969—), 男, 重庆人, 副教授, 博士, 从事空间可展结构、大跨空间结构的研究(E-mail: cwj@sjtu.edu.cn);

付功义(1957—), 男, 浙江义乌人, 教授, 博士, 从事结构工程研究(E-mail: gyfu@sjtu.edu.cn);

董石麟(1932—), 男, 浙江杭州人, 教授, 中国工程院院士, 从事空间结构研究。

研究对象为铰接式空间伸展臂，根据弹性稳定分析理论，推导开始折叠的临界屈曲荷载，并进行理论分析。

1 空间伸展臂结构机构特点

如图 1，空间伸展臂为三棱桁架体系，由三根连续纵杆、三叉架或三角形框架横杆系、斜向加劲索等构成。三叉架三角顶点外侧由滚柱与纵杆连接，这种设计可减少构件、构造简单，可减少调节和检验，节约制造成本。连续纵杆用 S2-玻璃/环氧材料，三叉架用碳纤维复合材料。

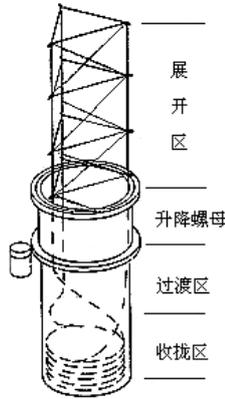
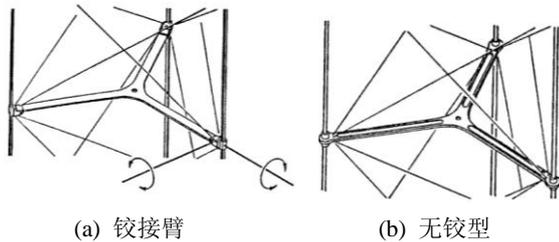


图 1 可展伸展臂

Fig.1 Extendable space mast

纵杆与横杆连接方式有两种，铰接(如图 2(a))和无铰连接(如图 2(b))。在早期 Astro-Mast、Simplex Mast 中采用有铰连接，节间分隔为三角形框架^[1-2]，纵杆节点局部可绕三角撑杆轴心转动。有铰连接使纵杆节点无切向转动约束，可“理想转动”，仅径向弹性支撑，但节点构造复杂，可展和重复性精度较低。



(a) 铰接臂 (b) 无铰型

图 2 伸展臂纵杆与三叉架连接模式

Fig.2 Connective relationship between longeron and integrated radial spacers

2 盘绕机理分析

如图 3，伸展臂底部有收藏筒，筒底有联动托盘，筒上有环形螺纹槽以及电机、展开螺母等。盘

绕式伸展臂工作机理可概述为：通过电机、减速装置带动螺母旋转，纵杆、三角形框架节点外端头处的滚柱与螺母螺纹槽啮合产生(进、出)运动，以实现伸展臂展开和收拢。当伸展臂收拢时，螺母旋转带动滚柱进入筒内，同时转盘在联动装置带动下绕筒体轴线旋转，纵杆由于受到超过弹性屈曲临界压力发生屈曲，渐进盘绕成螺旋形，横杆亦产生一定屈曲变形，对角拉索一半绷紧，另一半松弛；当伸展臂展开时，过渡段中处于屈曲变形状态的纵杆类似受压弹簧，在驱动螺母反向旋转作用下释放弹性变形能，逐渐恢复直杆，并伸展出收藏筒，至整个伸展臂完全展开。

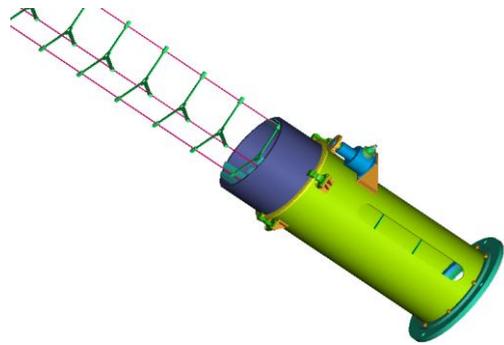


图 3 盘绕式伸展臂构造图

Fig.3 Coilable space mast

3 局部卷压屈曲模式屈曲荷载

3.1 基本假设

当纵杆的抗弯刚度相对于集成三叉架的刚度较接近时，两者易同时发生变形，并按照局部卷压模式折叠模型。由于研究的是纵杆开始屈曲时瞬间的受力，因此忽略系统动能，并假定屈曲过程中 P_{cr} 保持不变。另外，作如下假定：

- ① 纵杆与上部连接处约束条件取为固结，下部为单向铰(可沿切线方向滑动)。
- ② 纵杆抗弯刚度较强，失稳时微屈(忽略二次效应，仍然采用小变形假设)。
- ③ 纵杆总长保持不变，且三根纵杆同时屈曲。
- ④ 忽略伸展臂屈曲过程中与收藏筒间的接触。

三根纵杆完全对称，所以只需要研究一根纵杆屈曲，其余两根完全一样。

3.2 空间几何分析

如图 4，设纵杆屈曲时，杆端 B 滑动到 B' ，滑动圆心角度为 θ ，并认为 θ 很小(实际计算表明 $\theta \ll 2.5^\circ$)，有：

勾股定理:

$$\left(2r \sin \frac{\theta}{2}\right)^2 + l_e^2 = l_{1e}^2 \quad (1)$$

杆总长不变:

$$\int_0^{l_{1e}} \sqrt{1+(y')^2} dx = l_{0e} \quad (2)$$

式中: l_{0e} 为原 AB 杆长, 杆件失稳后上下刚性平面间距变为 l_e , $A'B'$ 直线距离为 l_{1e} ; y 为杆的挠曲变形。采用小变形假设, $y' \ll 1$ 且忽略 y 两阶以上导数, 可近似认为 $l_{1e} = l_{0e}$, 取 $\sin \frac{\theta}{2} \approx \frac{\theta}{2}$, 则有:

$$(r\theta)^2 + l_e^2 = l_{0e}^2 \quad (3)$$

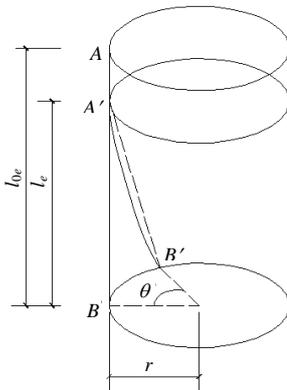


图4 纵杆屈曲变形

Fig.4 Buckling shape of the longeron

3.3 受力分析

纵向主杆基本单元段受力分析如图5所示。

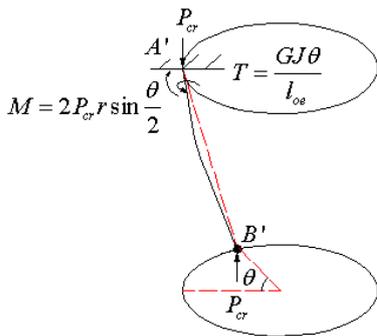


图5 纵杆受力分析模型

Fig.5 Mechanical model of the local coiled longeron

3.4 纵杆挠曲函数

纵杆曲率可表示为 $\rho = \frac{y''}{[1+(y')^2]^{3/2}}$, 取为 $\rho = y''$ 。于是由欧拉方程 $EIy''(x) = -M(x)$, 得:

$$EIy''(x) = -p_{cr}r\theta - \frac{l_e}{l_{0e}}P_{cr}y + \frac{p_{cr}r\theta x}{l_{0e}} \quad (4)$$

由边界 $y(0) = 0$ 和 $y'(0) = 0$, 并利用固定端

$y''(l_{0e}) = 0$, 代入计算并化简后得:

$$P_{cr}l_e l_{0e} = 20.19EI \quad (5)$$

$$y(x) = \frac{r\theta l_{0e}}{l_e} \cos \frac{4.4934x}{l_{0e}} - \frac{r\theta l_{0e}}{4.4934l_e} \sin \frac{4.4934x}{l_{0e}} + \frac{r\theta x}{l_e} - \frac{r\theta l_{0e}}{l_e} \quad (6)$$

3.5 运用能量原理分析

伸展臂纵向主杆受力如图6, 几何条件满足:

$$\sin \phi = \frac{2r \sin \frac{\theta}{2}}{l_0} \approx \frac{r\theta}{l_0}, \quad \cos \phi = \frac{l_e}{l_{0e}} \quad (7)$$

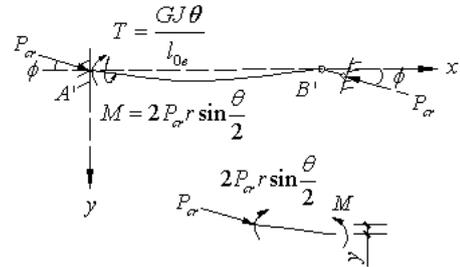


图6 纵杆受力分析

Fig.6 Mechanical analysis of the local coiled longeron

纵杆的弹性变形能为:

$$V = \int_{l_e} \frac{F_N^2}{2EA} dx + \int_{l_e} \frac{T(x)^2}{2GJ} dx + \int_{l_e} \frac{M(x)^2}{2EI} dx = \frac{P_{cr}^2 l_{0e}}{2EA} + \frac{GJ\theta^2}{2l_{0e}} + \frac{P_{cr}^2 r^2 \theta^2 l_{0e}}{4EI} \quad (8)$$

由卡氏第二定理: $\frac{\partial V}{\partial p_{cr}} = l_{0e} - l_e$, 得到:

$$\frac{P_{cr} l_{0e}}{EA} + \frac{P_{cr} r^2 \theta^2 l_{0e}}{2EI} = l_{0e} - l_e \quad (9)$$

联立式(3)、式(5)和式(9)三式, 得到:

$$\left(\frac{l_{0e}}{EA} + \frac{l_{0e}^3}{2EI}\right) P_{cr}^2 - l_{0e} P_{cr} - \frac{183.64EI}{l_{0e}} = 0 \quad (10)$$

$$\text{即: } P_{cr} = \frac{l_{0e} + \sqrt{\frac{734.56I}{A} + 368.28l_{0e}^2}}{2\left(\frac{l_{0e}}{EA} + \frac{l_{0e}^3}{2EI}\right)} \quad (11)$$

式中: P_{cr} 为纵杆屈曲荷载; r 为三角撑杆外接圆半径; E 为纵杆弹性模量; l_{0e} 为伸展臂节间长度; I 为纵杆截面惯性矩; A 为杆件截面面积。

4 整体卷压螺旋屈曲模式临界荷载

当纵杆的抗弯刚度相对于集成三叉架的抗弯刚度较大时, 且展开机构设计为“自由展开”, 则

集成三叉架杆易先于纵杆变形, 体系按照整体螺旋卷压模式屈曲。推导的过程与局部卷压屈曲模式相似, 但压杆计算长度改变, 另外增加了中间约束(集成三叉架与纵杆有铰连接)。计算假设与局部卷压模式相同, 另外假设各集成三叉架同时下降且节间距相等。螺旋卷曲模式的变形如图 7 所示(过渡区内共有 n 节)。

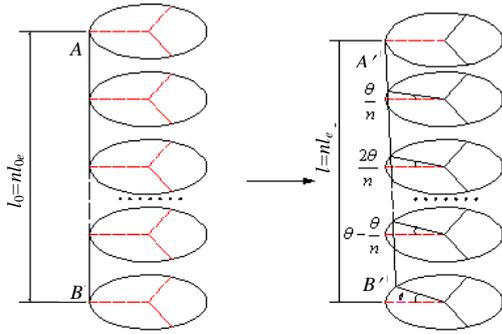


图 7 整体螺旋卷压屈曲模式变形

Fig.7 Overall helix coil mode

4.1 空间几何关系

$$(r\theta)^2 + l^2 = l_0^2 \tag{12}$$

$$l_0 = nl_0e, \quad l = nl_e \tag{13}$$

4.2 三叉架径向杆受力分析

由于假设“丫”形三叉架整体保持水平且三根纵杆变形同步, 则三叉架随纵杆弯曲发生水平面内的转动, 因而无弯曲变形。节点处铰接使三叉架径向杆不因纵杆弯曲而受扭, 如图 8 所示, 径向杆只受到压力。

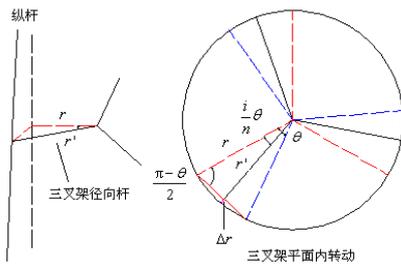


图 8 “丫”形三叉架变形分析

Fig.8 Deformation of the “Y”-shape radial spacers for hinged mast

第 $i(i=1,2,\dots,n-1)$ 个节点处的“丫”三叉架径向杆压缩变形为:

$$\Delta r_i = r - \frac{r \cos \frac{\theta}{2}}{\cos \left(\frac{\theta}{2} - \frac{i\theta}{n} \right)} \tag{14}$$

由此产生的压力在 $\theta < 2.56^\circ$ 时,

$$N_{i\max} = \left(1 - \cos \frac{\theta}{2} \right) E_s A_s < N_{cri} = \frac{\pi^2 E_s I_s}{(2r)^2} \tag{15}$$

所有的径向杆都不会因此压力而屈曲, 但是当 $\theta \geq 2.56^\circ$ 时, 仅少数径向杆可能发生屈曲。至于径向杆和纵杆哪个先屈曲, 可先假定径向杆不屈曲, 算出纵杆屈曲时刻对应的 θ 值再作判断(计算表明, 在“铰接”整体螺旋屈曲情况下纵杆屈曲时 $\theta \ll 2.5^\circ$, 故一般情况下纵杆先屈曲)。由于径向

杆的轴向应变 $\varepsilon_i = 1 - \frac{\cos \frac{\theta}{2}}{\cos \left(\frac{\theta}{2} - \frac{i\theta}{n} \right)}$, 在 $\theta < 5^\circ$ 时此

应变不足千分之一, 因而三叉架径向杆轴向压缩变形能可以忽略不计。

与局部卷压屈曲荷载的推导方式相同, 可得:

$$P_{cr} = \frac{l_0 + \sqrt{\frac{734.56I}{A} + 368.28l_0^2}}{2 \left(\frac{l_0}{EA} + \frac{l_0^3}{2EI} \right)} \tag{16}$$

5 算例

算例 1. 纵杆直径 4mm, “丫”形三叉架径向杆直径为 3.2mm, 三角形外接圆盘绕直径为 320mm, 节距 200mm, 纵杆总长 22.4m, 节数 $n=112$, 纵杆材料 GFRP(玻璃纤维)的弹性模量 44.7GPa, “丫”形三叉架径向杆材料也为 GFRP, 其弹性模量 16.0GPa, 泊松比 0.27。

算例 2. 纵杆直径 4mm, “丫”形三叉架径向杆直径 2.3mm, 三角形外接圆盘绕直径为 250mm, 节距 150mm, 纵杆总长 4.5m, 节数 $n=30$, 纵杆材料弹性模量 44.7GPa, 三角撑杆弹性模量 16.0GPa, 泊松比 0.27。

表 1 为“丫”形三叉架铰接式伸展臂两算例过渡区段不同节距数的屈曲临界载荷。随节间数增加, 伸展臂屈曲载荷逐渐降低, 开始降低幅度很大, 但节间数较多时节间数变化对屈曲载荷影响减小。

在实际应用时既非单节距内局部屈曲, 亦非整个伸展臂卷压整体螺旋屈曲, 而是特定折叠屈曲过渡段, 过渡段大小决定展开折叠机构设计、收藏筒限制。收藏筒高度一般为 2 倍盘绕直径, 过渡段节数小于 10。

表 1 “Y”形三叉架铰接式伸展臂不同节距数
折叠屈曲临界载荷

Table 1 The critical buckling force of the “Y” shape hinged
coiled space mast for different bays

算例	折叠屈曲过渡段节距数						
	4	5	6	7	8	9	10
1	17.67	11.31	7.85	5.77	4.42	3.49	2.83
2	31.41	20.10	13.96	10.26	7.85	6.20	5.03

6 结论

本文首先介绍了铰接式空间可展伸展臂的构造、盘绕折叠机理，并从弹性稳定理论与能量原理出发进行分析，推导了局部卷压屈曲和整体螺旋屈曲的临界压力表达式，并给出了算例和参数分析。本文的分析理论对铰接式盘绕空间伸展臂的结构设计具有一定指导意义和参考价值。利用大变形非线性有限元分析以及动力模拟的方法有待进一步研究，同时需要试验研究。

参考文献:

- [1] Kitamura Takayuki, Okazaki Kakuma. Development of a “hingeless mast and its applications” [J]. *Acta Astronautica*, 1988, 17(3): 341—345.
- [2] Eiden M, Brunner O. Deployment analysis of the olympus astromast and comparison with test measurements [J]. *J. Spacecraft & Rocket.*, 1987, 24(1): 63—68.
- [3] Kitamima Takayuki. Developments of extendible beams for space applications. AIAA-93-0977 [C]. Proceedings of the AIMAH/ASEE Aerospace Design Conference, Washington D C, 1993.
- [4] Escrig F, Valcarcel J P. Geometry of expandable space structures [J]. *Int. J. Space Structures*, 1993, 8(1/2): 71—84.
- [5] Guan Fuling, Chen wujun. An overview of space deployable structures [C]. Taipei: ICCSS'97, 1997: 181—186.
- [6] Chen Wujun, Luo Yaozhi. A study on space masts based on octahedral truss family [J]. *Int. J. Space, Structures*, 2000, 16(1): 75—82.
- [7] Chen Wujun, Guan Fuling. Development of a highly synchronized deployment space mast [J]. *Journal of IASS*, 1999, 40(2)/130: 113—119.
- [8] Chen Wujun, Guan Fuling. Design and analysis of a deployable/retractable space mast [J]. *Journal of IASS*, 1998, 39(2): 111—116.
- [9] 苏斌, 关富玲, 石卫华. 索杆式伸展臂的结构设计与分析[J]. *工程设计学报*, 2003, 10(10): 287—294.
Su Bin, Guan Fuling, Shi Weihua. Structure design and analysis of space mast [J]. *Journal of Engineering Design*, 2003, 10(10): 287—294. (in Chinese)
- [10] 陈务军, 张淑杰. 空间可展结构体系与分析理论[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2006.
Chen Wujun, Zhang Shujie. Deployable space structures and analysis theory [M]. Beijing: China Astronautic Publishing House, 2006. (in Chinese)