

DOI: 10.3901/JME.2022.19.095

一种新型张力-杆系结构展开过程动力学研究^{*}

张大羽^{1,2} 马小飞¹ 王辉¹ 罗建军² 王坤³ 李洋¹ 吴迪⁴

(1. 中国空间技术研究院西安分院 西安 710100;

2. 西北工业大学航天学院 西安 710072;

3. 北京理工大学宇航学院 北京 100081;

4. 南京航空航天大学航天学院 南京 210000)

摘要: 针对新型张力-杆系结构展开过程复杂导致动力学分析困难的问题, 采用多柔体动力学方法, 提出了张力-杆系结构的全新多体系统模型, 实现了结构的展开过程仿真, 研究了不同的绳索加载方式对桁架展开动力学行为的影响, 总结了绳索力光滑加载方式的优点, 揭示了桁架壁厚和绳索张紧力大小对张力-杆系结构展开过程的影响机理, 结果表明杆件壁厚及绳索张紧力过大均对结构展开过程中桁架受力产生显著影响。在此基础上, 提出了张力-杆系结构的理论驱动力矩, 给出了力矩与桁架杆件展开角度之间的关系, 可以为电机选型提供参考。新型张力-杆系结构动力学分析为实际工程应用提供一种新的建模与仿真方法。

关键词: 新型张力-杆系结构; 展开过程仿真; 多柔体动力学; 绳索张紧力; 驱动力矩

中图分类号: O313

Deployment Dynamics Simulation of a Novel Tension/Rod Structural System

ZHANG Dayu^{1,2} MA Xiaofei¹ WANG Hui¹ LUO Jianjun² WANG Kun³
LI Yang¹ WU Di⁴

(1. China Academy of Space Technology (Xi'an), Xi'an 710100;

2. School of Astronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072;

3. School of Aerospace Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081;

4. College of Astronautics, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210000)

Abstract: Concerning solving the problem that the complex deployment dynamics analysis of the novel tension/rod system structure, a multi-body model of the novel tension/rod structural system is proposed using the multi-flexible body dynamics. First, its deplorable process is simulated, and the effect of different cable loading methods on the hoop's deployment dynamics behavior is studied; the advantages of the smooth loading method of the cable forces are summarized. Then, the effect of the hoop thickness and the magnitude of the cable tension force on the deployment dynamics of the tension-rod system structural system is analyzed. The results show that rod's thickness and the excessive tensioning force of the cables can significantly affect the hoop's strength during the structure deployment. On this basis, the theoretical driving moment of the tension/rod structural system is proposed. The relationship between the moment and the deplorable angle of the hoop's rod is given, providing a reference for motor selection. The structural dynamics analysis of the novel tension/rod system provides a new modeling and simulation method for practical engineering applications.

Key words: novel tension/rod structural system; deployment dynamics simulation; multi-flexible body dynamics; cable tensioning force; driving moment

^{*} 国家自然科学基金(11290154, U20B2033)和中国博士后科学基金(2020M683601)资助项目。20220307 收到初稿, 20220630 收到修改稿

0 前言

随着航天科技的发展,大型空间可展开结构是未来空间资源利用、空间发电的重大战略性航天装备。空间张力-杆系结构以可折叠、高收纳比和展开稳定性好等优点,成为目前大型空间发电的典型结构型式^[1-5]。

空间张力-杆系结构是以梁/杆为基础单元组成的结构,刚性和柔性部件间以运动副连接,属于典型的刚-柔耦合多体系统。由于受保密和行业的限制,国内外针对空间张力-杆系结构分析的基础理论公开资料非常有限。国外研究方面,HASANZADE 等^[6]通过有限元方法建立了空间张力-杆系结构的柔性反射器,并计算了在空间热流辐射变形下反射器的变形量。国内研究方面,马小飞等^[7]综述了多种典型的大型空间可展开结构的研究现状,其中介绍了空间张力-杆系结构的特点,并详述了其中涉及的多体动力学等技术。刘荣强等^[8]分析了空间可展开结构研究的发展趋势,为开展大型空间可展开结构和机构研究提供了借鉴与参考。以上关于空间张力-杆系结构的研究均未进行展开动力学分析。

由于空间张力-杆系结构具有环形桁架,是由杆/梁组成的多体系统,因此空间张力-杆系结构的展开动力学建模理论主要有刚体和多柔体动力学两种方法。目前,多刚体系统动力学的研究在理论、数值计算方法以及软件开发等方面已经趋于成熟和完善。随着空间可展开结构口径增大、部件柔性显著,基于多刚体假设的动力学模型已不能正确反映可展开结构的动力学特性。几何精确梁方法和绝对节点坐标方法是目前处理大变形柔性体建模的两大主流方法^[9,10],两种方法均能处理柔性体的大位移与大转动问题,并且均以成功地用于大型空间可展开结构的展开动力学分析。例如,LI 等^[11]基于绝对节点坐标方法建立了大型环形桁架结构的刚-柔耦合多体系统动力学模型,数值分析了这类结构的展开动力学行为;荣吉利等^[12]采用绝对节点坐标方法建立了大型空间电站多体模型,实现了空间电站在轨展开与组装动力学的精确仿真;杜雪林等^[13]考虑桁架的柔性变形,采用绝对节点坐标法建立了周边桁架结构,研究了桁架柔性变形对整体结构展开速度的影响;PENG 等^[14-15]采用几何精确梁理论模拟了环形桁架结构的展开过程,复现了地面试验中展开

不同步的现象,给出了展开过程中杆件受力情况与驱动优化策略;马小飞等^[16]采用几何精确梁理论系统地分析了大型椭圆形结构展开过程的动力学行为,通过动力学分析对其展开过程进行了优化设计。

大型张力-杆系结构相比于传统环形结构的展开口径更大、柔性部件更多以及展开过程中的动力学行为更加复杂,因此需要采用可表征大变形的柔性体建模方法对空间张力-杆系结构的大范围运动和大变形相互耦合进行精确描述。相比绝对节点坐标方法,几何精确梁方法在精度和计算速度方面更占优势^[17]。鉴于此,本文致力于将几何精确梁方法^[18]引入多体动力学计算的框架下,为空间张力-杆系结构提供一种高效的建模与分析方法。

1 张力-杆系结构的展开动力学模型

1.1 张力-杆系结构系统组成

新型张力-杆系结构主要由斜拉绳索、环形桁架组成,如图 1 所示,箭头所示为集中力,代表绳索张紧力;桁架采用柔性体描述,桁架之间通过同步铰链连接。新型张力-杆系结构可分解为多个“V 字型”单元,每个单元中包括绳索和桁架。其中,绳索的一端通过旋转副与桁架连接,另一端与定滑轮连接实现长度的收展。系统由多个刚体和柔性体部件组成,部件之间的连接通过多种约束实现,分别如表 1 和表 2 所示。例如球副主要用于绳索与桁架之间的连接。旋转副和同步齿轮副用于桁架杆件间的连接。该结构的主动源驱动为桁架上的蜗轮蜗杆电机。

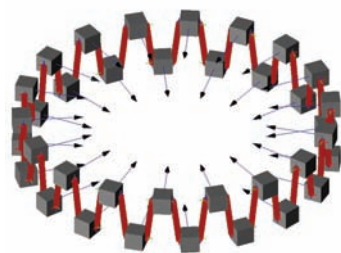


图 1 新型张力-杆系结构模型

表 1 周期单元部件类型表

编号	部件类型	部件名称
1	柔性体	桁架
2	柔性体	绳索

表 2 周期单元约束类型表

编号	部件类型	部件名称
1	球副	绳索与桁架之间
2	旋转副	桁架杆件之间
3	同步齿轮副	桁架杆件之间

新型张力-杆系结构的环形桁架通过斜拉绳索连接。为了确保桁架展开的稳定性,绳索在释放过程中要求带着一定大小的张紧力进行释放。为了近似描述绳索的特点,可以用力元简化。简化后的张力-杆系结构单元模型如图 2 所示。图中的单元沿着圆形虚线进行周边阵列, $\phi = 2\pi/N$ 为每个铰链在环形桁架平面内的分布角度, N 为多边形的边数。

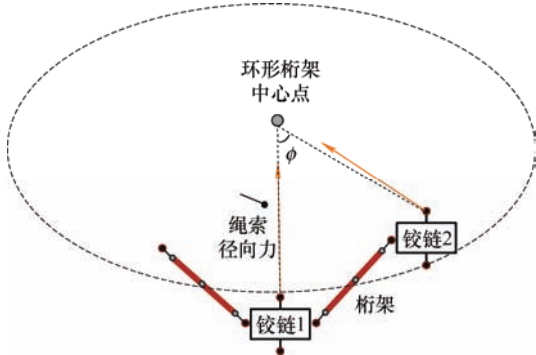


图 2 新型张力-杆系结构的单元简化模型

1.2 系统控制方程

根据图 2 所示的张力-杆系结构示意图,采用多柔体动力学方法对整体结构建模,柔性桁架通过几何精确梁单元离散、绳索通过力元描述,最终得到系统的微分-代数方程组^[19]

$$\begin{cases} M\ddot{q} - Q(q, \dot{q}, t) + (\partial C / \partial q)^T \lambda = 0 \\ C(q, t) = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中, M 是系统的质量阵; q 是系统广义坐标,包含刚体坐标和柔性体坐标; λ 是拉格朗日乘子; $Q(q, \dot{q}, t)$ 是系统广义力,包含外力、弹性力、科氏力、离心力; $C(q, t) = 0$ 是约束方程,该方程描述了张力-杆系结构中各类运动副的数学形式。

2 张力-杆系结构展开动力学仿真分析

本节研究在绳索张紧力作用下的桁架受力和运动情况。在张力-杆系结构展开过程中,绳索需带有一定大小的张紧力,其作用是维持桁架展开受力的

稳定性。采用第 1 节中多柔体动力学方法对张力-杆系结构进行工程建模,模型中桁架为 36 边形结构,其口径为 10 m,初始展开口径为 5 m,桁架的杆件外径为 0.040 m,杆件内径为 0.036 m,杆件密度为 $1\,560\text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$,杆件的弹性模量为 155 Gpa。驱动方式采用 6 个主动源驱动。本文新型张力-杆系结构的结构参数选取依据实际产品的参数。仿真设置桁架从初始展开 5 m 口径伸展至完全展开状态,展开过程中伴随着每个铰链上径向 20 N 的向心力作用。展开时间为 300 s,采用隐式积分求解,步长选择为 $5 \times 10^{-3}\text{ s}$ 。

2.1 工程模型验证

为了验证张力-杆系结构模型的准确性,本小节采用多刚体动力学软件 MSC.ADAMS 建立了相同的结构。电机驱动设计采用角度驱动形式,角度驱动函数设计如下

$$\theta_h = \alpha \left[\frac{T}{2\pi} t - \left(\frac{T}{2\pi} \right)^2 \sin \frac{2\pi t}{T} \right] \quad (2)$$

式中, T 为仿真总时长, t 为时间, α 为展开角度系数。设定电机将桁架从预展口径 5 m 驱动展开到最终口径 10 m。在这种情况下,桁架中每个杆件角度变化为 $\theta_h \in [\pi/6, \pi/2]$, 因此展开角度系数为 $\alpha = 2\pi^2/3T^2$ 。

图 3 为施加绳索张紧力后的桁架展开角度 θ_h 分析。通过桁架预展半径可得杆件初始角度为 30° , 完全展开后的角度为 90° , 从图中可知本文模型与多刚体模型拟合较好。图 4 为桁架展开口径 R 与高度 h 分析。桁架半径从预展阶段口径 5 m 增大至指定的展开口径 10 m, 桁架在高度方向最终展开至 0 m, 并与多刚体模型计算的结果一致。以上结果说明桁架在口径和高度上均实现了顺利地展开,证明了本文模型在运动学上的准确性。

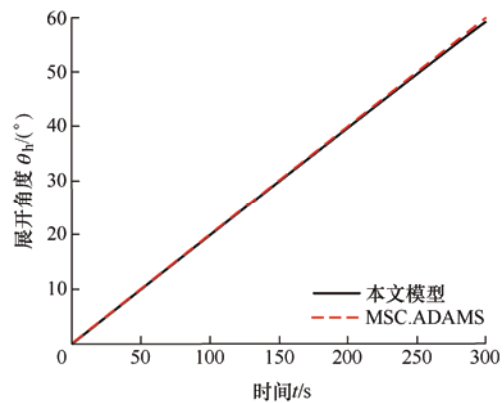


图 3 展开角度变化

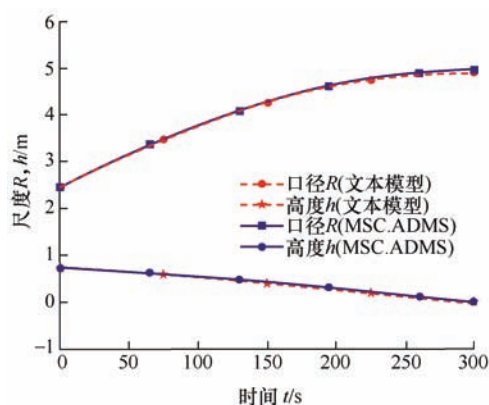


图4 展开口径与高度变化

2.2 桁架受力分析

本小节对整体桁架进行受力分析,给出结构在承受 20 N 径向力时桁架杆件的最大受力情况与桁架弹性势能的变化。绳索的径向张紧力是影响张力-杆系结构顺利展开的关键因素,本小节设计绳索力的加载有三种方式。

(1) 光滑加载。从仿真开始至结束,绳索力以三次光滑曲线从 0 N 加载至 20 N,即

$$F_t = y_0 + c\Delta^2(3-2\Delta), \quad t_0 < t < t_f \quad (3)$$

式中, $\Delta = (t - t_0) / (t_f - t_0)$, $y_0 = 0 \text{ N}$, $y_1 = 20 \text{ N}$, $c = y_1 - y_0$, 及 $t_0 = 0 \text{ s}$, $t_f = 300 \text{ s}$ 。

(2) 非光滑加载。从仿真开始至 50 s,绳索力线性从 0 N 加载至 20 N;从 50 s 至仿真结束,绳索力维持 20 N 不变,即

$$F_t = \begin{cases} y_0 + c\Delta, & t_0 < t < t_1 \\ y_1, & t \geq t_1 \end{cases} \quad (4)$$

式中, $y_0 = 0 \text{ N}$, $y_1 = 20 \text{ N}$, $t_0 = 0 \text{ s}$, $t_1 = 50 \text{ s}$ 。

(3) 直接加载。绳索力以常值 $F_t = 20 \text{ N}$ 的方式从仿真开始介入,直至仿真结束。这种方式代表绳索迅速被张紧,随后在桁架展开过程中绳索一直处于紧绷状态。

图 5 给出了桁架的最大受力分析。在力矩方面,选取桁架每个杆件 midpoint 处 M_x 、 M_y 和 M_z 之间的最大值进行对比。可以看到,① 当绳索力加载方式为光滑加载时杆件最大受力小于绳索力非光滑加载方式的情况。这是因为非光滑加载方式存在“拐点”,在“拐点”处会造成杆件受力的突然增大,容易导致杆件断裂。② 新型张力-杆系结构模型中驱动的实现是通过分别施加大小相等,符号相反的力矩于主动源铰链相对铰链连接的左右杆件上,另外模型未计入关节摩擦与碰撞效应、被动源弹簧力等因素,因此使得靠近主动源的杆件受力较大,远离主动源的杆件受力较小,杆件受力分布较为规律。后续可以

根据该位置特点优化杆件尺寸或主动源数量,以此减小杆件的受力。③ 直接加载方式对杆件受力影响最大,不建议使用。

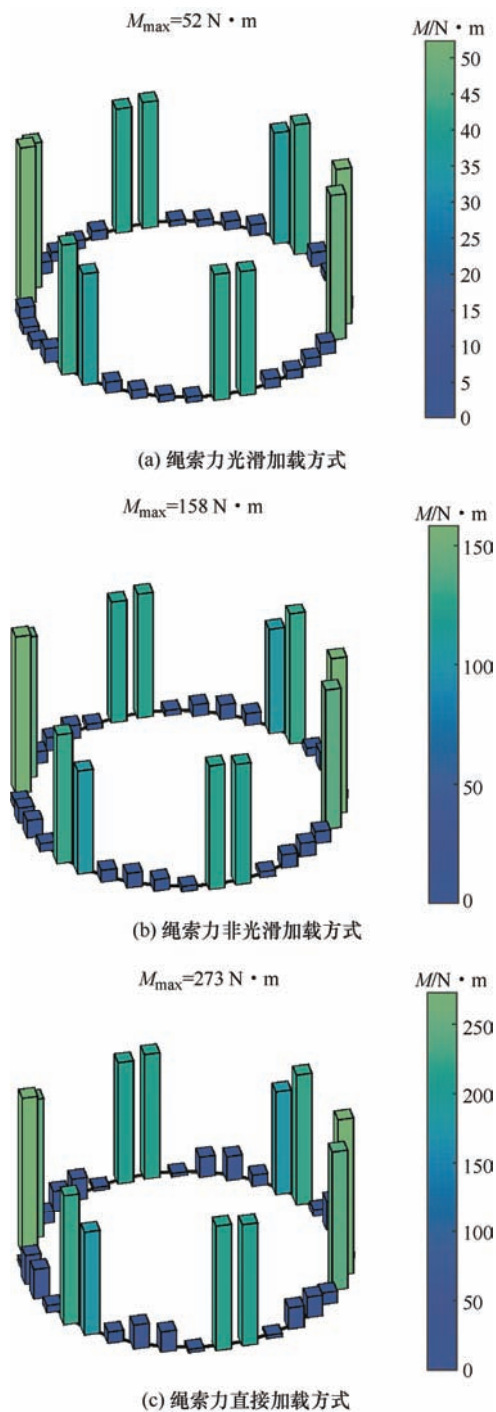


图5 桁架最大受力分析

图 6 为桁架弹性势能 P 的变化趋势,图中同时给出了初始、峰值、末段对应的结构构型。可以看到,① 在绳索力光滑加载方式下,弹性势能变化均匀,未出现“拐点”;② 在绳索力非光滑加载方式下,弹性势能最大时刻对应于绳索力达到峰值 20 N 时,即“拐点”处。之后绳索力维持恒值,桁架系统没有新的外力介入,因此势能逐渐减小;③ 非光

滑加载方式下产生的弹性势能大于光滑加载方式, 可能会造成桁架展开失败; ④ 直接加载方式会在展开初期造成较大的冲击效应, 可能导致桁架在初期阶段展开失败。

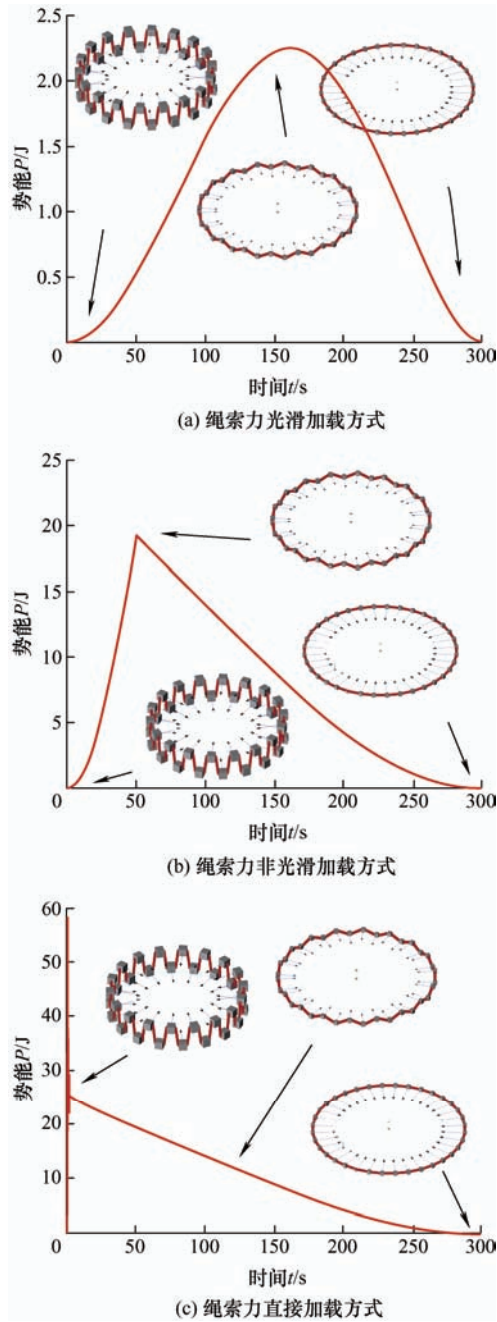


图 6 桁架弹性势能变化

3 张力-杆系结构参数敏感度分析

张力-杆系结构中最主要的两个部件是桁架和斜拉绳索, 因此本节探讨桁架壁厚和绳索张紧力对张力-杆系结构展开性能的影响。

3.1 杆件壁厚影响

本小节重点研究在绳索力确定的情况下, 桁架

杆件壁厚对整体系统展开动力学的影响。壁厚参数的选择如表 3 所示, 其余结构不变。

表 3 壁厚参数

编号	外径 D / m	内径 d / m
1	0.025	0.021
2	0.025	0.024
3	0.090	0.086
4	0.090	0.089

图 7 为桁架弹性势能 P 分析。首先, 从图 7a 中可以看出, 杆件外径减小致使弹性势能上升, 导致杆件受力增大, 影响杆件变形的最主要因素是杆件壁厚, 当内外径之间的差值减小时, 代表杆件壁厚薄 ($D=0.025$ m, $d=0.024$ m), 其势能几乎是厚壁情况的 4 倍, 杆件更容易发生变形。其次, 图 7b 为增加杆件内外径情况下的桁架弹性势能分析。可以发现增加壁厚对杆件受力影响较小, 但是增加壁厚会使得桁架整体重量升高, 这对于电机驱动将造成较大的负担。

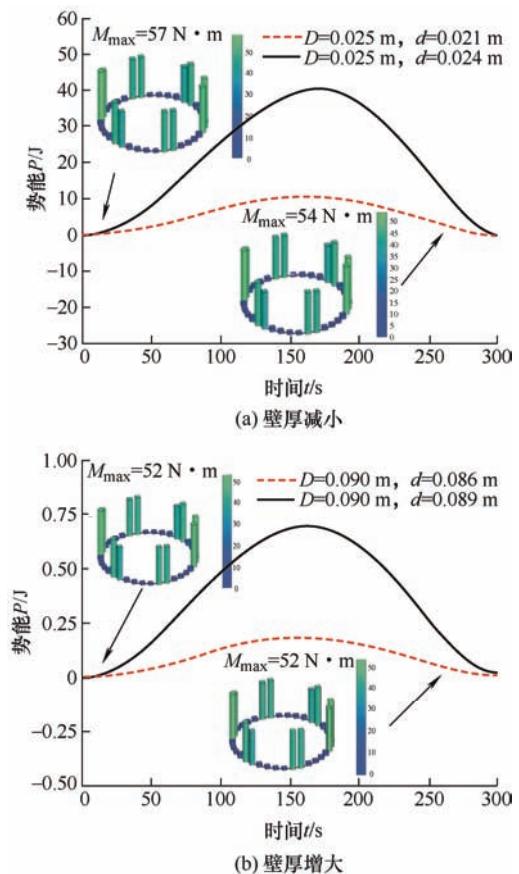


图 7 桁架弹性势能分析

3.2 绳索张紧力影响

本小节重点研究在桁架结构参数确定的情况下, 绳索力大小对整体系统展开动力学的影响。桁

架驱动选择公式(2)的方式,通过改变绳索力大小以获取使得桁架顺利展开的最大张紧力大小。桁架的模型参数与第 3 章模型一致,表 4 为绳索张紧力大小测试值。实际工程中绳索被张紧多为短时间内,因此本小节选择绳索力直接加载的方式。

表 4 张紧力大小

编号	力 F_t / N
1	40
2	60
3	80
4	100

图 8 为桁架口径变化分析。可以看到当绳索力为 100 N 时,桁架未能展开,图中给出了桁架展开失败的构型图,因此对于影响本文桁架模型顺利展开的最大张紧力为 100 N。另外,从图 9 中的小图发现,绳索张紧力越大,桁架前期展开过程中的振动现象越明显。图 9 为桁架弹性势能变化。可以发现,增大张紧力导致桁架展开前期过大的弹性势能,使得桁架在绳索力作用下被绷的太紧。这种情况下桁架杆件会受到较大的弯矩,导致杆件的弯曲正应力超出其材料许用弯曲正应力大小,会造成杆件断裂。因此,绳索力须依据具体采用杆件的材料许用应力进行计算与选取。

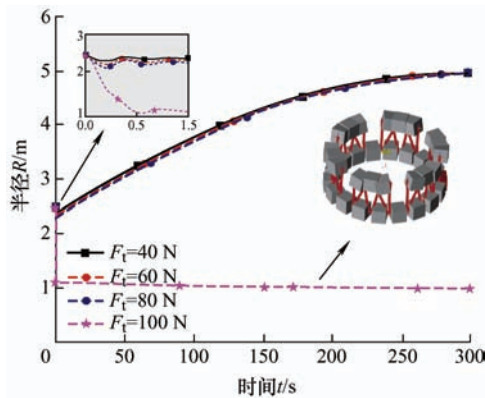


图 8 桁架口径变化

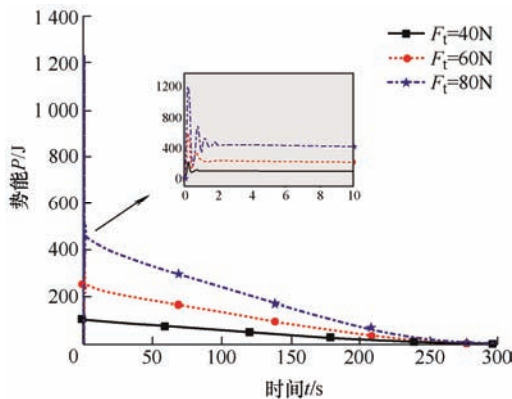


图 9 桁架弹性势能变化

4 张力-杆系结构的理论驱动力矩

张力-杆系结构展开过程中,绳索张紧力方向朝向环形桁架的圆心,对桁架起到径向向心力作用,因此绳索张紧力是影响这类结构驱动力矩选择的关键因素。本节将分析桁架驱动力矩与绳索张紧力之间的关系,确定桁架驱动力矩的理论表达式。

4.1 理论驱动力矩计算

取一个周期单元进行分析,即两个铰链和中间连接的杆件,如图 10 所示。

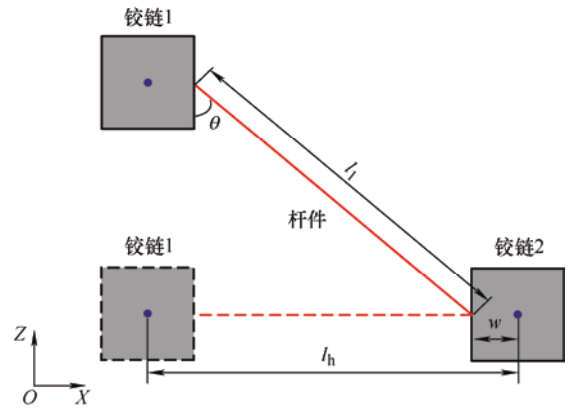


图 10 周期单元模型

式中, w 为铰链与杆件连接点到铰接中心的距离。 l_l 为杆件的长度。杆件的展开角度为 $\theta \in [0, \pi/2]$, 可以得到两个铰链中心之间的水平距离为

$$l_h = l_l \sin \theta + 2w \quad (5)$$

l_h 相当于多边形的边长,那么此时与多边形外接的圆环半径可以写成

$$R = \frac{l_h}{2 \sin \frac{\pi}{N}} \quad (6)$$

式中, N 为多边形的边数。通过公式(6)可确定铰链的位置坐标为

$$\mathbf{q}_i = \left(R \cos(i-1)\phi, R \sin(i-1)\phi, \frac{l_l}{2} \cos \theta \right)^T \quad (7)$$

式中, $i \in [1, N]$, $\phi = 2\pi/N$ 。

假设环形桁架的中心点位置坐标为 $[0, 0, 0]$, 那么铰链中心到桁架中心的距离 d 为

$$d_\theta = \sqrt{(R)^2 + \left(\frac{l_l}{2} \cos \theta \right)^2} \quad (8)$$

式中, 距离 d_θ 是关于展开角度 θ 的函数, 随着桁架展开口径变化而变化。

假设铰链上的驱动力完全克服斜拉索的径向张紧力, 且不考虑桁架的柔性变形, 根据虚功原理可得

$$n_m \cdot M \delta\theta = \sum_{i=1}^N F_i \delta q_i \quad (9)$$

式中, n_m 是驱动力矩的数量。

(1) 弹簧元模型

当斜拉索采用弹簧元模拟时, 其数学模型为

$$F_i = k(\|q_i\| - l_0) n + c \dot{q}_i \quad (10)$$

式中, l_0 为初始展开角度 θ_0 下对应的铰链中心到桁架中心的距离 d_{θ_0} 。刚度系数 $k = F_t / (d_{\theta_t} - d_{\theta_0})$, F_t 为绳索张紧力, d_{θ_t} 为最终展开角度 $\theta = \pi/2$ 对应的铰链中心到桁架中心的距离。 c 和 \dot{q}_i 分别为阻尼系数和距离的变化率。 $n = q_i^T / \|q_i\|$ 。

将铰链位置公式(7)和斜拉索模型公式(10)代入公式(9), 可得

$$\begin{aligned} n_m \cdot M_s \delta\theta &= \sum_{i=1}^N k(\|q_i\| - l_0) \frac{q_i^T}{\|q_i\|} \delta q_i = k \sum_{i=1}^N \left(1 - \frac{l_0}{\|q_i\|}\right) q_i^T \frac{\partial q_i}{\partial \theta} \delta\theta \\ &= k \sum_{i=1}^N \left(1 - \frac{l_0}{\|q_i\|}\right) \cdot \end{aligned}$$

$$\left[\left(\frac{l_1}{2 \sin \frac{\pi}{N}} \right)^2 \frac{\sin 2\theta}{2} + \frac{2wl_1}{\left(2 \sin \frac{\pi}{N}\right)^2} \cos \theta - \left(\frac{l_1}{2} \right)^2 \frac{\sin 2\theta}{2} \right] \delta\theta \quad (11)$$

于是, 驱动力矩的理论表达式为

$$M_s = \frac{k}{n_m} \sum_{i=1}^N \left(1 - \frac{l_0}{\|q_i\|}\right) \cdot$$

$$\left[\left(\frac{l_1}{2 \sin \frac{\pi}{N}} \right)^2 \frac{\sin 2\theta}{2} + \frac{2wl_1}{\left(2 \sin \frac{\pi}{N}\right)^2} \cos \theta - \left(\frac{l_1}{2} \right)^2 \frac{\sin 2\theta}{2} \right] \quad (12)$$

(2) 集中力模型

当采用集中力模型时, 公式(9)可写为

$$n_m \cdot M_f \delta\theta = F_t \sum_{i=1}^N \delta q_i = F_t \sum_{i=1}^N \left| \frac{\partial q_i}{\partial \theta} \right| \delta\theta \quad (13)$$

驱动力矩理论表达式变为

$$M_f = \frac{N \cdot F_t}{n_m} \cdot$$

$$\left[\left(\frac{l_1}{2 \sin \frac{\pi}{N}} \right)^2 \frac{\sin 2\theta}{2} + \frac{2wl_1}{\left(2 \sin \frac{\pi}{N}\right)^2} \cos \theta - \left(\frac{l_1}{2} \right)^2 \frac{\sin 2\theta}{2} \right] \quad (14)$$

对比公式(12)和公式(14)发现, M_s 和 M_f 仅为第一项不同。

本小节举例说明驱动力矩与杆件展开角度之间的关系, 例如, 36 边形环形桁架, 初始展开角度设定为 $\theta_0 = 30^\circ$ 。杆长为 $l_1 = 0.782$ m, 铰链与杆件连接点到铰接中心的距离 $w = 0.045$ m。初始状态下铰链与环形桁架中心距离为 $l_0 = d_{60^\circ} = 4.401$ m。桁架完全展开状态下, 铰链与环形桁架中心距离为 $d_{90^\circ} = 5$ m。当采用 6 个主动源, 所需的驱动力矩数量为 $j = 12$ 。绳索张紧力选取 $F_t = 20$ N。

图 11 为弹簧元模型和集中力模型计算的结果, 可以发现, ① 相比集中力模型, 通过弹簧元模型计算的力矩较大; ② 应选取曲线中最大的驱动力矩作为后续电机选型的依据, 选择最大驱动力矩是确保了理论计算中使得桁架顺利展开的最稳健的力矩大小, 例如 $M_s^{\max} = 54$ N·m 和 $M_f^{\max} = 37$ N·m。在下一节中将通过数值仿真的手段验证所计算最大驱动力矩的正确性。

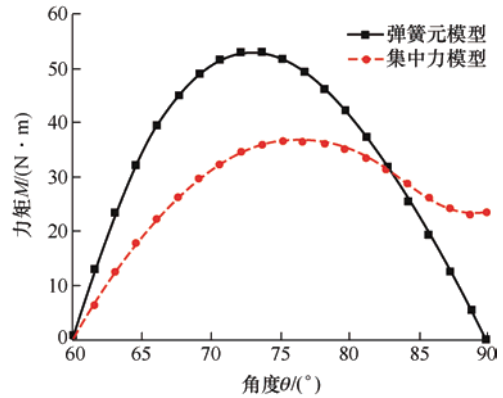


图 11 驱动力矩与展开角度之间的关系

4.2 驱动力矩模型验证

本小节分别采用本文的多柔体动力学方法和多体动力学商业软件 MSC.ADAMS 对理论力矩进行验证。所有模型中均采用 6 个主动源的驱动方式。

图 12 为本文模型展开角度变化与施加力矩的局部关系图。测量的角度是模型中第一根杆件与其连接铰链之间的夹角 θ , 该角度的变化范围为 $\theta \in [0, \pi/2]$ 。驱动力矩施加在主动源上, 共计 12 个。可以看到, ① 当展开力矩为 60 N·m, 桁架与铰链

的展开角度可达到 90° 。由于模型中没有设置锁定力, 因此展开角度达到 90° 后继续增加; ② 当绳索张紧力为 $40 \text{ N} \cdot \text{m}$ 和 $50 \text{ N} \cdot \text{m}$, 展开角度均不超过 30° (可见于第一次波峰), 之后桁架在张紧力的径向向心作用下反向收缩, 未能成功展开; ③ 在本文模型中, 使得桁架顺利展开的驱动力矩 ($60 \text{ N} \cdot \text{m}$) 与理论弹簧元模型计算结果 ($54 \text{ N} \cdot \text{m}$) 相近。

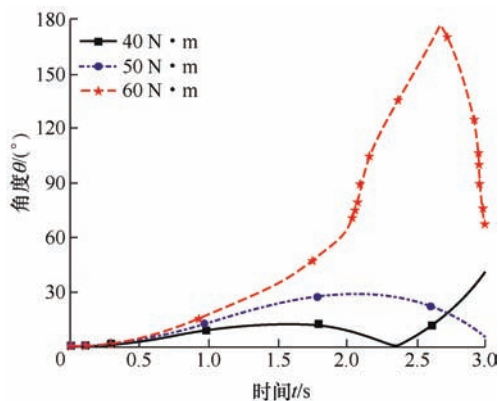


图 12 本文模型展开角度变化(局部图)

图 13 为 MSC.ADAMS 所建立的刚体模型中展开角度变化与施加力矩的局部关系图, 测量角度和施加力矩方式与本文模型相同。可以看到, 可使得桁架顺利展开的力矩是 $60 \text{ N} \cdot \text{m}$, 而 $40 \text{ N} \cdot \text{m}$ 和 $50 \text{ N} \cdot \text{m}$ 力矩作用下的桁架展开不超过 20° (可见于第一次波峰), 之后桁架在绳索径向力作用下进行了回缩。

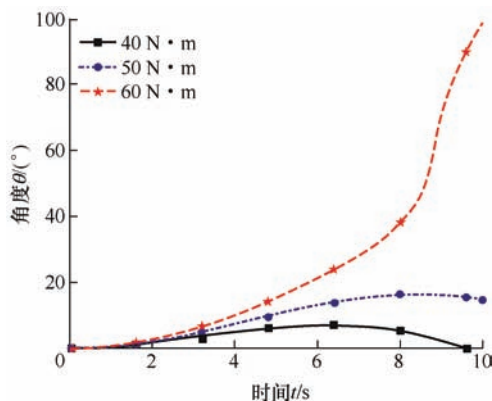


图 13 MSC.ADAMS 模型展开角度变化(局部图)

综上所述可得, 弹簧元模型计算结果更为准确, 其原因是弹簧元模型将绳索力通过刚度系数进行描述, 可较真实地体现具有一定刚度的绳索特征。

5 结论

本文针对新型张力-杆系结构展开过程动力学行为复杂的问题, 进行了结构的动力学建模与展开过程分析的研究, 得到如下结论。

(1) 采用多柔体动力学方法建立了新型张力-杆系结构模型, 分析了结构的展开动力学性能, 集成了一套针对新型张力-杆系结构的动力学仿真平台搭建方法。经与商业软件 MSC.ADAMS 仿真结果对比, 验证了本文模型的准确性。

(2) 采用三种绳索张紧力的加载方式, 研究了张紧力对桁架展开特性的影响。结果表明, 光滑加载方式最佳, 非光滑加载和直接加载的方式会对桁架展开产生冲击效应, 造成桁架受力过大, 可能导致其展开失败。

(3) 探索了张力-杆系结构的参数敏感度特性。发现了降低桁架的壁厚会导致桁架杆件发生变形与过大的绳索张紧力会对桁架展开前期造成明显的振动现象, 以上特点均会降低桁架的展开稳定性。

(4) 理论推导了张力-杆系结构的驱动力矩。采用正向动力学分析方法, 通过与本文多柔体模型以及 MSC.ADAMS 多刚体模型数值结果对比, 验证了理论力矩的准确性。结果表明, 相较集中力模型, 弹簧元模型可较真实地模拟具有一定刚度的绳索特征, 其结果更为准确。

本文的研究结果对张力-杆系结构的优化设计具有较强的指导意义和参考价值。

参 考 文 献

- [1] 胡海岩, 田强, 张伟, 等. 大型网架式可展开空间结构的非线性动力学与控制[J]. 力学进展, 2013, 43(4): 390-414.
HU Haiyan, TIAN Qiang, ZHANG Wei, et al. Nonlinear dynamics and control of large deployable space structures composed of trusses and meshes[J]. Advances in Mechanics, 2013, 43(4): 390-414.
- [2] 段宝岩. 大型空间可展开天线的研究现状与发展趋势[J]. 电子机械工程, 2017, 33(01): 1-14.
DUAN Baoyan. The state-of-art and development trend of large space-borne deployable antenna[J]. Electro-Mechanical Engineering, 2017, 33(01): 1-14.
- [3] MA X, LI T J, MA Y J, et al. Recent advances of space deployable structures in China[J]. Engineering, 2022 (accepted).
- [4] 侯欣宾, 王立. 空间太阳能电站技术发展现状及展望[J]. 中国航天, 2015(2): 12-15.
HOU Xinbin, WANG Li. Status and prospect of space solar power station technology[J]. Aerospace China, 2015(2): 12-15.
- [5] 肖洪, 成正爱, 郭宏伟, 等. 空间太阳能电站大折展比

- 体展开桁架机构[J]. 机械工程学报, 2020, 56(13): 128-137.
- XIAO Hong, CHENG Zhengai, GUO Hongwei, et al. Large folding ratio 3D deployable truss mechanism for space solar power station[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(13): 128-137.
- [6] HASANZADE V, SEDIGHY S H, SHAHRAVI M. Compact deployable umbrella antenna design with optimum communication properties[J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 2017, 54(3): 781-785.
- [7] 马小飞, 李洋, 肖勇, 等. 大型空间可展开天线反射器研究现状与展望[J]. 空间电子技术, 2018, 2: 16-26.
- MA Xiaofei, LI Yang, XIAO Yong, et al. Development and tendency of large space deployable antenna reflector [J]. Space Electronic Technology, 2018, 2: 16-26.
- [8] 刘荣强, 史创, 郭宏伟, 等. 空间可展开天线机构研究与展望[J]. 机械工程学报, 2019, 56(5): 1-12.
- LIU Rongqiang, SHI Chuang, GUO Hongwei, et al. Review of space deployable antenna mechanisms[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 56(5): 1-12.
- [9] 田强, 刘铖, 李培, 等. 多柔体系统动力学研究进展与挑战[J]. 动力学与控制学报, 2017, 15(05): 385-405.
- TIAN Qiang, LIU Cheng, LI Pei, et al. Advances and challenges in dynamics of flexible multibody system[J]. Journal of Dynamics and Control, 2017, 15(05): 385-405.
- [10] 周志成, 董富祥. 空间大型天线多体动力学分析[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2014.
- ZHOU Zhicheng, DONG Fuxiang. Multi-body dynamics analysis of large antennas in space [M]. Beijing: China Astronautic Publishing House, 2014.
- [11] LI P, LIU C, TIAN Q, et al. Dynamics of a deployable mesh reflector of satellite antenna: form-finding and modal analysis[J]. ASME Journal of Computational and Nonlinear Dynamics, 2016, 11(4): 041017.
- [12] 荣吉利, 崔硕, 石文静, 等. 大型空间电站在轨展开与组装动力学与控制[J]. 宇航学报, 2021, 42(03): 295-304.
- RONG Jili, CUI Shuo, SHI Wenjing, et al. On-orbit deployment and assembly dynamics and control of large space power station[J]. Journal of Astronautics, 2021, 42(03): 295-304.
- [13] 杜雪林, 杜敬利, 保宏, 等. 考虑桁架柔性的可展开天线动力学分析[J]. 机械工程学报, 2020, 56(07): 119-126.
- DU Xuelin, DU Jingli, BAO Hong, et al. Dynamic analysis of deployable antennas considering truss flexibility[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(07): 119-126.
- [14] PENG Y, ZHAO Z H, ZHOU M, et al. Flexible multibody model and the dynamics of the deployment of mesh antennas[J]. Journal of Guidance Control and Dynamics, 2017, 40(6): 1499-1510.
- [15] 彭云, 杨军刚, 肖勇, 等. 重力对大型环形可展天线展开动力学的影响研究[J]. 工程力学, 2018, 35(4): 226-256.
- PENG Yun, YANG Jungang, XIAO Yong, et al. Gravity effect on deployment dynamics of astromesh[J]. Engineering Mechanics, 2018, 35(4): 226-256.
- [16] 马小飞, 杨军刚, 胡建峰, 等. 大型椭圆环形可展开天线展开过程动力学数值仿真[J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2019, 49(2): 024516.
- MA Xiaofei, YANG Jungang, HU Jianfeng, et al. Deployment dynamical numerical simulation on large elliptical truss antenna[J]. Scientia Sinica Physica, Mechanica & Astronomica, 2019, 49: 024516.
- [17] SIMO J C. A finite strain beam formulation. the three-dimensional dynamic problem. Part I[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1985, 49: 55-70.
- [18] BAUCHAU O A, HAN S L, MIKKOLA A, et al. Comparison of the absolute nodal coordinate and geometrically exact formulations for beams[J]. Multibody System Dynamics, 2014, 32(1): 67-85.
- [19] SHABANA A A. Computational continuum mechanics[M]. New York City, New York: Cambridge University Press, 2012.

作者简介: 张大羽, 男, 1987 年出生, 博士后。主要研究方向为空间可展开结构动力学。

E-mail: zhangdayu504@foxmail.com

马小飞(通信作者), 男, 1980 年出生, 博士, 研究员, 博士研究生导师。主要研究方向为空间可展开结构与机构、空间新材料与工艺。

E-mail: Maxf041600@sina.com