

大型可展开网状天线展开过程仿真建模与竖向索预拉力优化调控

张进华¹ 蒋金波¹ 朱佳龙² 何亚银¹ 洪军¹ 赵强强¹

(1. 西安交通大学机械工程学院现代设计及转子轴承系统教育部重点实验室, 710049, 西安; 2. 中国空间技术研究院西安分院, 710000, 西安)

摘要: 为解决传统形面调节方法难以兼顾天线多方面性能要求的问题, 本文提出了一种面向多目标装配性能的预拉力优化方法。研究基于拉格朗日方程构建了系统动力学模型, 通过结构简化及力学等效建立了仿真简化模型, 通过天线展开过程仿真及模态振频仿真揭示了竖向索预拉力对多目标装配性能的影响。研究搭建了原理样机并进行展开实验, 验证了仿真模型的可靠性, 同时测试了样机的低阶模态与形面精度, 对仿真模型进行了标定。利用参数相关性仿真分析的样本建立了代理模型。最后基于代理模型, 在预设形面精度及样本范围约束条件下, 以突变力矩峰值、形面精度及一阶固有频率为优化目标, 优化索拉力配置。优化后天线形面精度达较基准提升16.5%, 满足样机设计要求; 展开突变力矩峰值降低8%; 一阶固有频率降低11.3%, 有效避开共振带, 实现了天线装配的形性一体化协同调控。

关键词: 大型可展开网状天线; 多目标优化; 装配性能; 形面精度; 固有频率

中图分类号: V443.4 **文献标志码:** AA

文章编号: 0253-987X(XXXX)XX-0001-18

Multi-Objective Assembly Performance Oriented Optimization of Vertical Cable Pretension in Large Deployable Mesh Antenna

ZHANG Jinhua¹, JIANG Jinbo¹, ZHU Jialong², He Yayin¹, HONG Jun¹, ZHAO Qiangqiang¹

(1. Key Laboratory of Modern Design and Rotor-Bearing System (Ministry of Education), School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;
2. China Academy of Space Technology, Xi'an Branch, Xi'an 710000, China)

Abstract: To solve the problem that traditional surface adjustment methods struggle to balance multiple antenna performance requirements, a pretension optimization method for multi-objective assembly performance is proposed. Based on Lagrange equations, a system dynamic model is constructed, and a simplified simulation model is established through structural simplification and mechanical equivalence. Through antenna deployment and modal vibration simulations, the impact of vertical cable pretension on multi-objective assembly performance is revealed. A principle prototype was built and deployment experiments were conducted to verify the reliability of the simulation model. Low-order

收稿日期: 2026-02-02。

modes and surface accuracy were tested to calibrate the simulation model. A surrogate model is established using samples from parameter correlation simulation analysis. Finally, based on the surrogate model, cable tension configuration is optimized with peak abrupt torque, surface accuracy, and first-order natural frequency as optimization objectives, under constraints of preset surface accuracy and sample range. After optimization, antenna surface accuracy is improved by 16.5% compared to the baseline, meeting prototype design requirements. Peak deployment abrupt torque is reduced by 8%, and first-order natural frequency is decreased by 11.3%, effectively avoiding the resonance band. Thereby, the integrated collaborative regulation of shape and properties in antenna assembly is achieved.

Keywords: large deployable mesh antenna; multi-objective optimization; assembly performance; surface accuracy; natural frequency

大型可展开网状天线广泛用于卫星通信及深空探测领域,其设计融合了超高折叠压缩比、极致轻量化及毫米级形面精度三大特征^[1-3]。其基本结构如图1所示,大型可展开网状天线主要由可展开桁架和柔性索网两大子系统构成。可展开桁架是实现天线高折叠压缩比的根本,由若干重复的单元环绕排列而成,单个单元通常包含竖杆、横杆、斜杆、保障展开同步性的齿轮传动系统以及提供展开驱动力的滑轮-拉索机构。索网系统则包含前索网(承载反射面)、后索网(维持形态稳定)、连接前后索网的竖向索阵列以及附着在前索网上的反射网^[4-6]。其中,反射网的形面精度直接决定了天线的电磁性能^[7],是实现天线功能的关键,鉴于反射网形面精度只能通过竖向索阵列进行调控,因此,高效精准地调控竖向索阵列的预拉力,始终是大型可展开网状天线设计、制造与在轨应用中的核心挑战与关键技术课题。

竖向索阵列装配预拉力调控的传统方法依赖工程人员的经验,通过反复测量与手动调整索力进行形面精调,过程

繁琐且效率低下。为提升效率,研究者们引入了优化算法,牛治永等^[8]应用遗传算法,建立了索力调整的影响系数矩阵模型,显著提升了形面调整效率。何柏岩^[9]、李团结^[10]进一步考虑了热效应下的索网形面精度和预拉力的优化设计。马小飞等人^[11]将神经网络应用于形面调整,进一步提高调控后的形面精度。杜敬利^[12]等人提出了一种周边桁架式索网天线形面的快速调整方法,该方法提升了调控收敛速度。然而,目前针对竖向索阵列的预拉力调节的文献的研究方向均是以索面索段的最大拉力比为约束优化形面精度,优化对象太过单一。

事实上,由于大型可展开网状天线具有多闭环和超静定结构特性,竖向索张力矩阵的调节不仅影响形面精度,还涉及其他关键性能。有研究表明预拉力矩阵与天线展开锁定后的结构固有频率^[13]存在显著关联。杨军刚^[14]等人在进行数值仿真时观察到接近展开到位时,天线展开所需驱动力矩存在突变,且该现象由索网绷紧造成,所以同样受竖向

索预拉力影响。这意味着索力的配置不仅关乎天线的形面精度,还与展开过程

所需的驱动力矩即展开可靠性以及展开后的天线固有频率有着紧密联系。

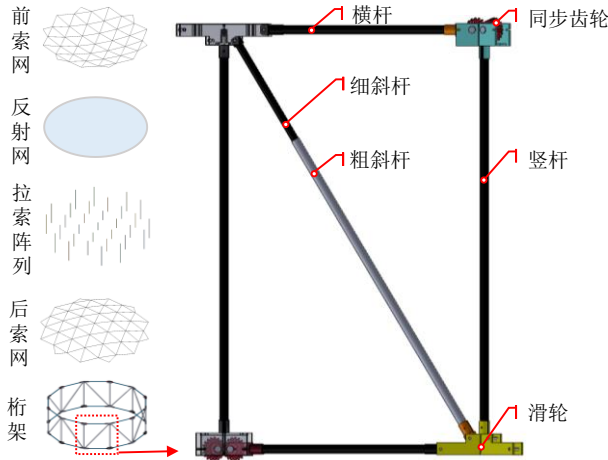


图 1 大型可展开网状天线结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of large deployable mesh antenna structure

因此,为解决天线装配中竖向索力的调节仅局限于形面精度,无法均衡考虑天线展开过程的驱动力矩、固有频率的问题,本文提出了一种利用基于回归分析的代理模型针对竖向索预拉力影响下的驱动力矩突变峰值、形面精度及模态固有频率的多目标优化方法,旨在实现天线装配的形性一体化协同调控。

1 考虑竖向索预拉力的大型可展开网状天线动力学建模

1.1 桁架系统动能

天线系统动能计算采用经典运动学分析方法^[15],以运动学分析为基础,通过各杆质心速度和角速度计算总动能。天线桁架结构简图及坐标系定义如图2

所示,假设各杆都为均质杆,铰链点质量集中于关节点,各部件均视为刚体,总计由 n 个单元构成,同一单元的相对运动皆为平面运动。第一个单元的坐标系为全局坐标系 (X_1, Y_1, Z_1) ,且其竖杆为固定杆,每个单元都是以五杆连接铰链(图2中红色点)为原点,旨在规避因单元奇偶性差异带来的计算复杂性,每个局部坐标系的 Y 轴都是沿竖杆方向, X 轴在单元平面内, Z 轴垂直于单元平面。

局部单元如图3所示,竖杆长度为 L_1 ,质量为 m_1 ,横杆长度为 L_2 ,质量为 m_2 ,每个单元有两根斜杆,以第一个单元为例,一根铰接于 O_1 ,另一根铰接于 O_2 ,彼此之间相互滑动,每对粗斜杆和细斜杆长度均为 L ,质量为 m_3 、

m_4 , 竖杆上固定的点质量铰链质量为 m_5 、 m_6 。 φ 为单元的展开角, θ 为相邻单元夹角。

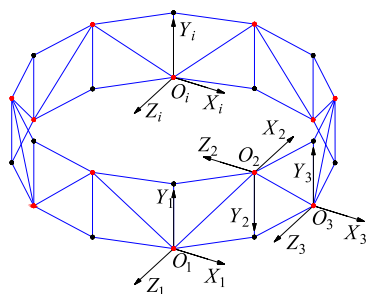


图2 天线桁架简图

Fig. 2 Antenna truss schematic

桁架的总动能为 i 个单元的动能总

$$T = \sum_{i=1}^n \left[\frac{1}{2} (m_1 + m_5 + m_6) v_{i1}^2 + m_2 v_{i2}^2 + \frac{1}{2} m_3 v_{i3}^2 + \frac{1}{2} m_4 v_{i3}^2 + \frac{1}{6} m_2 L_2^2 \omega_{i2}^2 + \frac{1}{12} (m_3 + m_4) L^2 \omega_i^2 \right] \quad (1)$$

式中: v_{i1} 为竖杆速度; v_{i1} 、 ω_{i2} 为横杆质心速度及角速度; v_{i3} 、 v_{i3}' 为粗细斜杆质心速度; ω_i 为斜杆角速度。该动能表达式可简化为通用动能计算公式

$$T = \frac{1}{2} J_\varphi \dot{\varphi}^2 \quad (2)$$

式中: J_φ 为等效转动惯量。

1.2 桁架系统势能

桁架系统势能主要由扭簧弹性势能及桁架重力势能组成(适用于地面吊挂展开实验工况下的受力状态)。其中扭簧为辅助天线展开被布置每个单元同步齿轮铰链位置, 共有 n 个, 其通常被设置为恒力扭簧, 初始扭矩为 M , 刚度为 k_1 , 展开过程中总弹性势能为

和, 单个单元为避免重复只需计算1根竖杆、两根斜杆、两根横杆及2个铰链点质量的动能, 且铰链与竖杆固定在一起。鉴于索网质量较轻且展开速率较低, 忽略其惯性效应及动能贡献^[15], 系统动能只考虑桁架动能如下

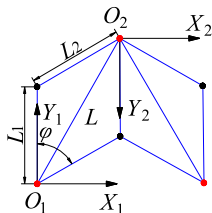


图3 桁架局部单元

Fig. 3 Truss local unit

$$U_1 = -n \int_0^{2\varphi} (M - 2k_1 \varphi) d(2\varphi) \quad (3)$$

$$= -2nM\varphi + 2nk_1\varphi^2$$

天线展开过程中桁架重力势能为各杆及点质量势能总和记为 U_2 。由此, 系统势能总和为

$$U = U_1 + U_2 \quad (4)$$

1.3 索网结点力

基于 Zhang 等^[16]的弹性悬链单元索网建模, 这里引入竖向索预拉力 F_p , 对于任意一自由结点 P_c , 连接有 k 根索段端点为 P_k 、长度为 L_{ck} , 截面积均为 A 、杨氏模量为 E , 如图4所示, (x', y', z') 为单根索局部坐标系, (x, y, z) 为全局坐标系, 通过位置矢量 $\mathbf{r}'$ 可进行坐标变换。

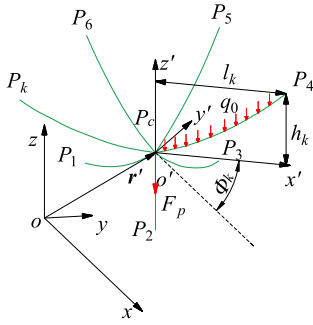


图4 局部索网建模

Fig. 4 Local cable net modeling

结点力 N_c 可表示为^[16]

$$N_c = \frac{(\mathbf{P}_k - \mathbf{P}_c)}{|\mathbf{P}_k - \mathbf{P}_c|} T_k - \mathbf{F}_p \quad (5)$$

式中: $T_k = AE(|\mathbf{P}_k - \mathbf{P}_c| - L_{ck})/L_{ck}$ 为单元张力; $\mathbf{P}_c = [x_c \ y_c \ z_c]^T$ 为中心结点坐标; $\mathbf{P}_k = [x_k \ y_k \ z_k]^T$ 为连接结点坐标; $\mathbf{F}_p = [0 \ 0 \ F_z]^T$ 为预拉力。

结点 P_c 的平衡方程可写为结点力 F_c (F_{cx}, F_{cy}, F_{cz}) 的表达:

$$\begin{cases} \sum_{k=1}^m F_{cx} = \sum_{k=1}^m \pm F_k \cos \varphi_k = 0 \\ \sum_{k=1}^m F_{cy} = \sum_{k=1}^m \pm F_k \sin \varphi_k = 0 \\ \sum_{k=1}^m F_{cz} = \sum_{k=1}^m \pm F_k \sinh \left[\frac{q_0}{2} \left(\frac{l_k}{F_k} - \frac{L_{ck}}{AE} \right) \right] \pm \cosh^{-1} \left(\frac{q_0 L_{ck}}{2 F_k \sinh \left(\frac{q_0}{2} \left(\frac{l_k}{F_k} - \frac{L_{ck}}{AE} \right) \right)} \right) = F_{pz} \end{cases} \quad (6)$$

式中: l_k 为跨度; h_k 为垂度; φ_k 为索段局部坐标系到整体坐标系 z 轴旋转角度; q_0 为沿着索段水平跨度分布的重力载荷; F_k 为水平力可通过下式迭代求得:

$$\begin{aligned} f(F_k) &= \frac{4F_k^2}{q_0^2} \sinh^2 \left(\frac{q_0}{2} \left(\frac{l_k}{F_k} - \frac{L_{ck}}{AE} \right) \right) - L_{ck}^2 + \\ &\quad \frac{h_k^2}{\left[1 + \left(\frac{q_0 L_{ck}}{2AE} \right) \coth \left(\frac{q_0}{2} \left(\frac{l_k}{F_k} - \frac{L_{ck}}{AE} \right) \right) \right]^2} \\ &\equiv 0 \end{aligned} \quad (7)$$

同时根据 Zhang 等人^[16]的研究, 结合桁架铰链质点也即索网固定结点坐标, 再通过迭代求解式(6)可得到预拉力下任意结点力 $F_c(\varphi)$ 。

1.4 系统动力学方程

本研究基于经典拉格朗日方法^[17]建立动力学方程

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\varphi}} \right) - \frac{\partial L}{\partial \varphi} = Q \quad (8)$$

广义外力 Q 由关节粘性阻尼引起的广义摩擦 Q_f ^[18]、索网固定结点拉力 $F_c(\varphi)$ 及驱动力矩 Q_f 组成。驱动力矩指的是将天线拉索驱动力学等效替换为力矩驱动, 可避免滑轮拉索导致天线建模过于复杂。

将系统动能、系统势能及广义力 Q 代入到拉格朗日方程中得到系统动力学方程为

$$J_\varphi \ddot{\varphi} + \frac{1}{2} \frac{\partial J_\varphi}{\partial \varphi} \dot{\varphi}^2 + \frac{\partial U}{\partial \varphi} = Q_f + F_c(\varphi) + Q_f \quad (9)$$

由上述方程可知, 驱动力矩不仅取决于机构的惯性项与科氏力项, 更依赖于广义力项中的索网节点力。

本文在理论层面采用基于状态空间法的数值积分策略对其进行求解。引入

系统状态变量 $\mathbf{X}=[x_1, x_2]=[\varphi, \dot{\varphi}]$, 将原二阶非线性常微分方程降阶转化为一阶

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = \frac{1}{J_{x_1}} \left(Q_r + Q_f + F_c(x_1) - \frac{\partial U}{\partial x_1} - \frac{1}{2} \frac{\partial J_{x_1}}{\partial x_1} x_2^2 \right) \end{cases} \quad (10)$$

将上式简记为 $\dot{\mathbf{X}}=f(\mathbf{X}, t)$ 。在给定天线初始收拢状态（即初始条件 $\mathbf{X}(0)=[\varphi_0, 0]^T$ ）的前提下，可采用经典的四阶龙格-库塔数值积分算法在时间域内进行离散化步进求解。其时间步进迭代格式为^[19]：

$$\mathbf{X}_{n+1} = \mathbf{X}_n + \frac{\Delta t}{6} (\mathbf{K}_1 + 2\mathbf{K}_2 + 2\mathbf{K}_3 + \mathbf{K}_4) \quad (11)$$

式中： Δt 为积分时间步长； $\mathbf{K}_1 \sim \mathbf{K}_4$ 为各积分节点处的斜率（状态导数）。

通过上述数值积分算法，即可从理论模型层面求得天线展开角 φ 及展开角速度 $\dot{\varphi}$ 随时间 t 的演变规律。为了精确评估展开过程中结构局部的柔性变形与形面精度，本文在上述理论模型指导下，借助有限元方法进行更为细致的刚柔耦合仿真与参数化分析。

2 动力学仿真模型构建及仿真分析

2.1 构建仿真简化模型

本研究所构建的天线模型口径为 3.7m，12个单元，设计用于卫星通信，采用典型频率 $f=12\text{GHz}$ ，波长 $\lambda=c/f=25\text{mm}$ ，形面精度要求为 $\text{RMS} \leq 1.5625\text{mm}$ 。

为提高仿真收敛稳定性并降低计算

非线性状态空间方程组^[19]：

成本，需要简化模型。根据理论模型的假设，桁架结构大多都为杆件，简化为只有截面属性的线体，采用柔性梁单元，铰链关节处采用点质量替换。桁架运动学分析理论中同步齿轮铰链两侧的横杆转动角度相同方向相反，齿轮的同步效果可采用约束方程进行表达。

$$U_z^{n1} + aU_z^{n2} = 0 \quad (12)$$

式中： a 为齿轮传动比，通过约束一对齿轮连接的横杆的相对转动角度，实现齿轮约束的同步运动^[20]。

为精确求解构建的非线性动力学方程，本文选用 ANSYS Cable280 单元离散索网^[21]。仿真以式(6)的理论解作为索网初始形态及预应力输入。

对于简化模型，先构建展开到位后的模型^[22]然后通过动力学逆向收拢天线得到初始形态，可避免直接计算复杂索网初始形态。索网采用离散化建模方法，先建立索网内部结点和外部结点阵列，随后连接各结点构建索网线体模型。桁架各杆简化为线体，索网结点之间以及索网与桁架之间通过自由度耦合进行连接构成天线整体模型。各运动副依据理论模型中的铰接关系进行添加。最后为各部件赋予截面、材料和单元属性，为整体模型划分单元。模型参数如下表1。

2.2 天线展开过程规划

表 1 仿真模型参数

Table 1 Simulation model parameters

结构件	长度/mm	密度/kg·m ⁻³	截面属性/mm	单元类型	弹性模量/GPa	泊松比
横杆	450	1700	外径20内径18	柔性梁单元	200	0.3
竖杆	900	1700	外径20内径18	柔性梁单元	200	0.3
粗斜杆	800	1700	外径20内径19	柔性梁单元	200	0.3
细斜杆	800	1700	外径19内径18	柔性梁单元	200	0.3
索网	-	1400	直径1	CABLE280	10	0.3

为研究大型可展开网状天线展开过程中的动力学规律，利用构建的仿真简

化模型进行瞬态结构仿真。仿真横杆运动曲线设计如图5。

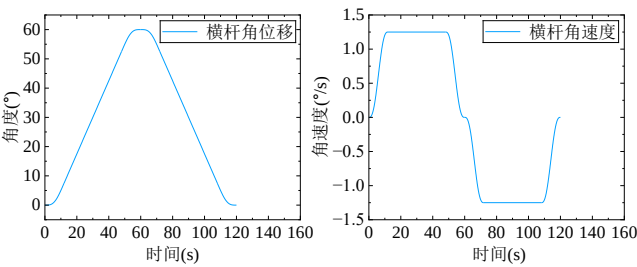


图 5 仿真横杆运动曲线

Fig. 5 Motion curve of crossbar in simulation

由于仿真模型构建的是展开后的天线姿态，所以需要先收拢再展开，为保证展开过程的平稳性，曲线过渡平滑，冲击小^[23]。仿真模拟的实际工况为天线地面吊挂展开实验，需要添加必要的边界条件，例如重力场、固定杆约束以及吊挂力等。为了便于竖向拉力阵列的设置及参数化，竖向索采用弹簧进行代替，由于索质量很轻，重力影响可以忽略。

2.3 展开过程中的力矩突变

基于瞬态结构仿真，本文对比了有无索网天线展开所需驱动力矩的差异（如图6所示）。二者曲线变化趋势总体保持一致，但在展开中期及末期（锁定前），有索网模型的驱动力矩出现了显著的峰值突变。这一突变现象与推导的动力学方程(9)相吻合。结合图7应力云图可知，中期的力矩波动源于边缘索的瞬时张紧，与索网构型有关，不影响展开；当展开至接近锁定状态，索网由松弛转为张紧，导致方程中的索网节点力

项发生阶跃。

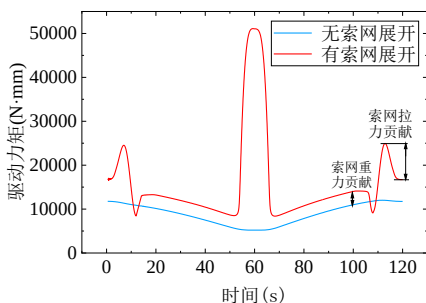


图6 有无索网桁架展开力矩对比

Fig. 6 Deployment torque comparison of truss with/without cable-net

为揭示竖向索预拉力对天线展开动力学过程的影响,本研究开展了参数化

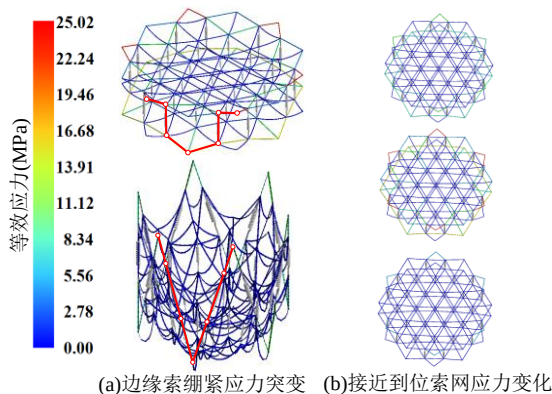


图7 展开过程索网应力云图

Fig. 7 Stress contour plot of cable-net during deployment

2.4 模态仿真及低阶振频

以展开过程瞬态结构仿真的末态位移结果作为模态分析的几何模型,在模态分析添加静态分析用以赋予模态初始应力场,网状天线一般较为关注低阶固有频率,采用单杆固定约束,分析前6

仿真分析。仿真设定弹簧刚度为200N/mm,并通过调节弹簧预载荷控制竖向索预拉力,预载荷范围设定为0-500N,增量步长为50N,共计11组工况。各组索网应变能随时间的变化曲线如图8所示。图中曲线在展开中期及末期呈现出两个显著峰值,与力矩突变情况相互对应。进一步提取各工况下的应变能峰值并进行拟合(如图9所示),结果表明索网预拉力与应变能峰值之间呈现显著的线性正相关关系。通过优化预拉力来平抑展开末期的驱动力矩冲击是切实可行的。

阶模态,得到仿真振型如图10左部所示,固有频率如下表2。

模态仿真结果展示了各阶振型的形态,1、2阶为椭圆,3、4阶为三角形,5、6阶为正方形。同时低阶固有频率普遍比较低,符合网状天线整体连接相对松散、柔性大的结构特性。

3 网状天线地面展开实验

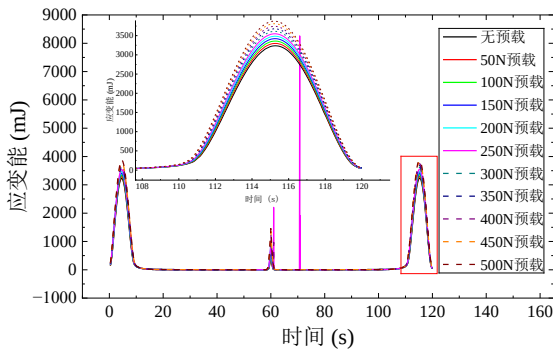


图 8 不同预载下索网展开过程应变能曲线

Fig. 8 Strain energy curves of the cable net during deployment under different preloads

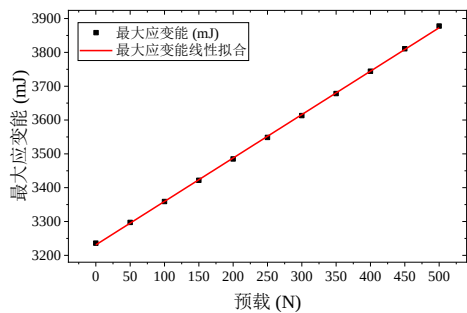


图 9 索网最大应变能随预载变化曲线

Fig. 9 Variation curve of maximum strain energy of the cable net with preload

3.1 实验样机搭建

为了验证仿真可靠性，需开展天线展开实验验证。本研究搭建了3.7m口径的12单元的网状天线及配套系统，如图11所示，网状天线实验台主要有构成天线本身的桁架和索网结构、吊挂系统以及实验测试系统组成。

天线的桁架部分各杆均为碳纤维复合材料，关节部分则采用航空铝材机加工而成。索网材料为凯夫拉纤维索，结

点处由开有小孔的结点圆片连接各索段，竖向索中间有塑料螺杆调节预拉力。

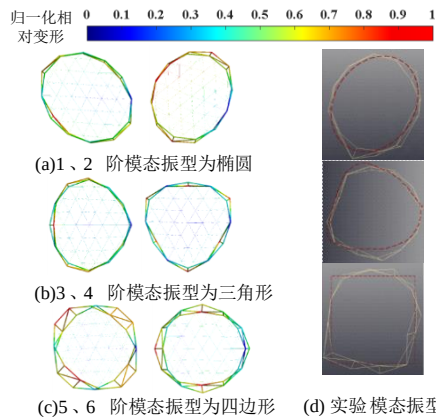


图 10 天线低阶模态振型

Fig. 10 Low-order Modal Shapes of Antenna

表 2 低阶固有频率仿真值
Table 2 Simulated low-order natural frequencies

阶数	1 阶	2 阶	3 阶	4 阶	5 阶	6 阶
频率/Hz	3.467	4.321	7.127	9.311	10.865	11.796

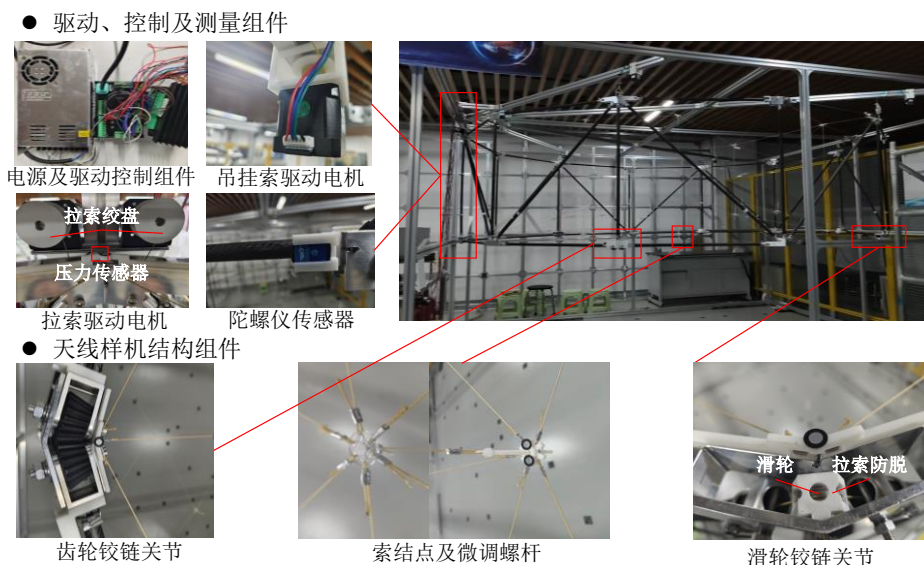


图 11 原理样机

Fig. 11 Principled sample machine

吊挂架顶部配置呈辐射状的五组导轨与滑轮机构，用于自适应调整天线展开过程中的吊挂点位。

3.2 地面展开实验结果及仿真对比



图 12 天线展开过程

Fig. 12 Antenna deployment process

地面展开实验依托原理样机，天线总共布设7台步进电机，5台用于配合

天线展开调整吊挂位置，2台用于驱动斜向拉索滑轮系统拉动天线展开。在电

电机机架下设置有压力传感器以间接测量驱动力矩。上方12根横杆装有六轴加速度陀螺仪传感器^[24],控制信号通过上位机输入多轴控制卡,再传递至电机控制天线展开,传感器信号实时返回上位机,测量各杆转角。

基于运动学理论分析,采用公式(13)、(14)协同控制斜向拉索双驱动电机和吊挂索电机转速 ω_1' 、 ω_2' ,共同驱动天线展开,以实现天线匀速、稳定的展开过程,图12为实验部分展开过程,最终天线能够顺利展开到位。

$$\omega_1't = \frac{12(D-d)}{4\pi r} \quad (13)$$

$$\omega_2't = \frac{l}{2\pi r} \quad (14)$$

式中: t 表示展开时间; D 为收拢状态下桁架单元对角线长度; r 为电机轴半径; l 为导轨长度。

图13 实验及仿真各杆转角曲线

Fig. 13 Rotation angle curves of each link in experiments and simulations

对图12展开过程各横杆传感器转角数据进行处理得到图13(a),由各杆运动曲线可见天线的展开存在明显的不同步现象,据此将杆件分为三组,1、2、11、12为一组杆最先展开到位,3、4、9、10为二组杆,5、6、7、8为三组杆最后展开到位,与距驱动电机远近有关,摩擦导致展开存在明显的滞后效应;同一同步齿轮铰链的两根横杆的运动曲线比较接近,说明齿轮同步性较好。

针对实验设定的展开工况,在动力

学模型中施加与实验一致的理想驱动函数进行仿真求解。由此得到的各杆展开角度曲线如图13(b)所示(粗实线),与实验测量数据(虚线)对比,二者吻合度较高。同时,还提取仿真模型中驱动关节为维持上述运动所需的驱动力矩作为仿真基准值。聚焦于末尾接近展开到位时的力矩突变,图14展示了仿真力矩与实验测量力矩的对比,由于关节摩擦等因素实验力矩整体略高于仿真值,但两者在展开过程中的变化趋势一致。实验曲线清晰地复现了仿真预测的由索网张紧引起的力矩突变特征,且突变发生时刻吻合。整体而言该模型能够高保真地描述天线展开的动力学行为。

3.3 模态测试及仿真对比

本研究采用LMS模态测量系统进行样机展开后的模态测试。天线展开到位后锁定各铰链及斜杆,于铰链处非对称部署3个灵敏度约为500mV/g的单轴加速度传感器,传感器量程为98.1m/s²,传感器轴向对准天线径向;力锤选用最软的硅胶锤头,依次敲击各铰链,每个铰链的 x 、 y 、 z 方向各敲击三次。得到实验数据如下表3所示,相对误差均在较低范围内,提取模态振型如前图10右部所示,和仿真结果一致,验证了模型的准确性。

3.4 形面精度测试及模型标定

为测量上索网形面精度,研究搭建了摄影测量平台,通过地面光学反射靶标点构建参考坐标系,在内部索网结点

和边缘索网结点位置都布设有反射靶标用以捕捉索网结点位置坐标,利用光学摄影仪器及上位机处理程序得到样机索网结点如图15,与理想抛物面相差最大不超过11mm,精度较高,计算样机

天线前索网初始形面精度为1.66mm。通过实际测量的天线索网坐标标定仿真模型的索网坐标,引入尺寸误差使得模型贴合真实样机。

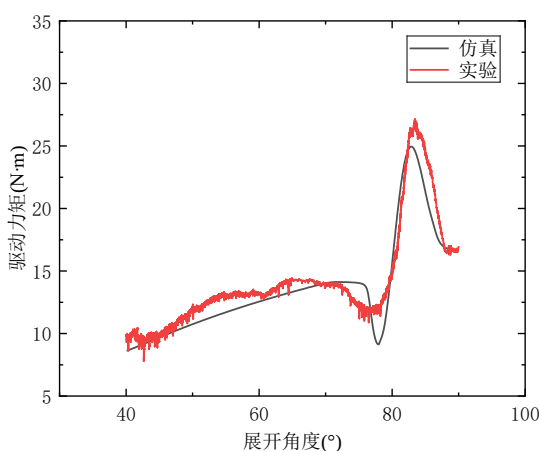


图14 仿真与实验驱动力矩对比

Fig. 14 Comparison of driving torque between simulation and experiment

表3 低阶固有频率实验测量值与仿真值对比

Table 3 Natural frequencies comparison: experimental vs. simulation (low-order modes)

	1阶	2阶	3阶	4阶	5阶	6阶
测量频率(Hz)	3.175	4.122	7.054	9.083	10.616	11.367
仿真频率(Hz)	3.467	4.321	7.127	9.311	10.865	11.796
相对误差	8.4%	4.6%	1.02%	2.4%	2.3%	3.6%
振型	椭圆	椭圆	三角形	三角形	四边形	四边形

4 竖向索预拉力影响下的多目标优化

4.1 预拉力影响下的驱动力矩突变

根据 Peng 等人^[25]的研究,滑轮拉

索的拉力离驱动源由近到远而逐渐衰减,同一滑轮两侧拉索拉力衰减系数为 η ,从近端到远端一侧的单元驱动力矩 T_i 为

$$T_i = F_l \eta^{(i-1)} (\eta + 1) \frac{L_1 + L_2 \cos \varphi}{d} L_2 \sin \varphi \quad (15)$$

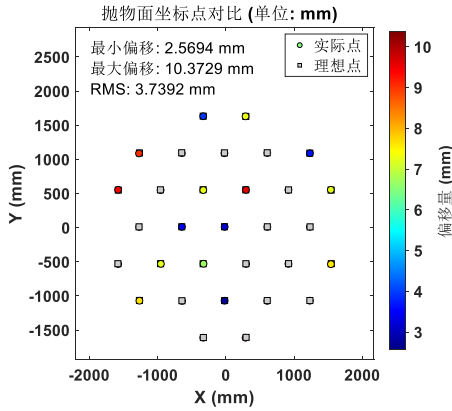


图 15 前索网理想结点坐标与样机实际结点坐标对比

Fig. 15 Comparison of ideal nodal coordinates vs. actual prototype nodal coordinates in the front cable-net structure

$$\Omega_j = \sqrt{\frac{k_j^e}{m_j}}$$

$$= \sqrt{\frac{k_j}{m_j} \left(1 + \frac{-\frac{1}{2} k_j q_{ej} + \{\phi_j\}^T \{F_e\} - m_j \ddot{q}_{ej} - c_j \dot{q}_{ej}}{k_j q_{ej} + m_j \ddot{q}_{ej} - \{\phi_j\}^T \{F_p\} + c_j q_{ej}} \right)} \quad (17)$$

固有频率调控的核心目的在于规避共振风险,本研究通过控制天线固有频率使得其与激振力频率错开的方式来实现。天线激励频率为 f_{exc} ,相对阻尼系数为 ζ ,优化后固有频率 f_n' 只需满足:

$$\begin{cases} f_n' > \frac{f_{exc}(1+\zeta)}{1-\zeta} \\ f_n' < \frac{f_{exc}(1-\zeta)}{1+\zeta} \end{cases} \quad (18)$$

天线在轨运行期间的主要激振源为太阳翼驱动机构的步进扰动,其在对日定向跟踪下的步进激励频率约为5Hz,相对阻尼系数实验值为0.05。计算得到

$$Q_T = 2 \sum_{i=1}^{\frac{n}{2}} T_i \quad (16)$$

通过将上式代入动力学方程(9),对方程求解可得到竖向索预拉力影响下的驱动力矩,而其中索网结点力项造成了驱动力矩突变。

4.2 预拉力影响下的固有频率

预拉力影响下的天线系统固有频率的推导采用师甜等人^[26]的方法,其在天线系统振动微分方程添加了预拉力项,得到预拉力 F_p 影响下的天线 j 阶振频为:

需回避的共振频率区间为(4.52Hz, 5.52Hz)。

4.3 预拉力影响下的形面精度

竖向索预拉力是调节上索网形面精度的直接手段,当索网预拉力 F_p 变化时,增量平衡方程为

$$\Delta F_p + \sum_{k=1}^m \Delta T_k = 0 \quad (19)$$

结点位移为

$$\delta \mathbf{r} = -\Delta F_p \cdot \mathbf{K}_c^{-1} \mathbf{e}_c \quad (20)$$

式中: $\mathbf{K}_c$ 为结点刚度矩阵; $\mathbf{e}_c$ 为方向向量。

推广到上索网共 t 个自由节点, 预拉力变化时形面精度为

$$R_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{t} \sum_{i=1}^t \left([K^{-1}P]_i \cdot n_i \right)^2} \quad (21)$$

4.4 多目标优化模型构建

针对多目标优化问题, 包含三个目标: 突变力矩峰值 $f_1(\mathbf{x})$ 、一阶固有频率 $f_2(\mathbf{x})$ 和形面精度 $f_3(\mathbf{x})$ 。根据式(18)错频避振策略, 固有频率的优化是双向方向的, 这里采用降低固有频率的方法, 得到的竖向索预拉力整体较小, 可以在避免共振的同时使得的驱动力矩突变更小, 所以多目标优化需要同时最小化 f_1 、 f_2 和 f_3 。突变力矩峰值以及一阶固有频率的样本数据是基于展开过程的动力学仿真通过 Workbench 的参数相关性分析直接获取, 而形面精度需要提取各组样本的索网结点位移间接计算得到。由于各优化目标的样本数据量级差距较大, 为便于处理约束和目标阈值需要对每个目标进行归一化处理, 然后使用加权和方法将它们组合成一个单一目标, 多目标优化函数定义为

$$\min \sum_{j=1}^3 \alpha_j \rho_j \left(f_j(\bar{x}) \right) \quad (22)$$

其中,

$$\rho_j(f_j(\bar{x})) = \frac{f_j - \min f_j}{\max f_j - \min f_j}, j \in \{1, 2, 3\} \quad (23)$$

自变量取值在样本范围内, 边界约束为

$$\min X_j \leq x_j \leq \max X_j \quad (24)$$

权重向量 α 满足 $\alpha_j > 0$, 且

$$\sum_{j=1}^3 \alpha_j = 1 \quad (25)$$

4.5 多目标优化求解流程

多目标优化求解首先需基于天线动力学仿真模型, 利用 Workbench 进行参数相关性分析, 并提取索网结点坐标及位移, 通过下式(26)计算形面精度^[7], 从而获取各优化目标样本数据。

$$R_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum (\Delta x_j^2 + \Delta y_j^2 + \Delta z_j^2)} \quad (26)$$

式中: N 为索网内部结点总数; Δx_j 、 Δy_j 、 Δz_j 表示结点坐标与理想抛物面的差值。

为保留完整的物理耦合特性并确保精度, 本文对 31 根竖向索直接采用全参数优化方案。针对有限元仿真耗时长、多目标难以协同的难题, 采用岭回归与支持向量回归算法构建了适用于小样本的高效代理模型, 以替代有限元计算来预测驱动力矩突变、固有频率及形面精度。在通过决定系数 (R^2) 验证模型精度的基础上, 引入归一化与加权系数法构建多目标优化函数, 并在物理边界约束下求解出综合目标最小化的最优预拉力配置。

4.6 多目标优化算例

基于前期动力学仿真模型构建以 31 根竖向索预拉力为输入、突变力矩峰值及一阶固有频率为输出的参数相关性分析。模型中设定竖向索预拉力初值为 400N 作为基准工况, 求解得到此时的突变力矩峰值为 26522.4364N·mm、

一阶固有频率为4.3753Hz、形面精度为1.5562mm。在此基准上，设定输入变量的波动范围为±100N，采用超拉丁采样方法获取100组数据进行参数相关性分析得到多目标优化的样本数据。

基于样本数据进行回归模型训练，训练后模型预测能力如下表4所示，决定系数 R^2 均大于0.9，整体预测效果较好，计算相对误差不超过1.5%。

利用训练好的回归模型根据多目标优化函数进行优化，权重系数的设定遵循‘电性能优先、安全性次之、频率兼顾’的工程分级原则，并结合参数灵敏

度分析结果，赋予了对天线增益起决定性作用且敏感度最高的形面精度最大权重0.565，关乎展开机构安全的突变力矩峰值中等权重0.335，而仅需满足避频约束的固有频率最小权重0.1，目标优化值分别为24904.6299N·mm、3.9289Hz、1.5615mm，其中形面精度小于预设的形面精度1.5625mm。

本研究还对比了单目标优化结果，同样记录在下表4中，单独优化的指标其优化效果高于多目标优化下对应指标的，但是无法兼顾其他指标，且难以满足预设的形面精度。

表 4 多目标优化结果
Table 4 Multi-objective optimization results

优化目标	突变力矩	一阶固有频率	形面精度
单位	N·mm	Hz	mm
样本范围	25757.596 ~ 27082.52	3.53 ~ 4.65	1.31 ~ 1.87
优化值	24904.6299	3.9289	1.5615
优化效果	8.0%	11.3%	16.5%
单独优化突变力矩	24565.7985	3.9285	1.6229
单独优化固有频率	26500.1796	3.7252	1.5711
单独优化形面精度	26041.7367	4.0882	1.3995

5 结 论

(1)本研究通过仿真分析，揭示了大型可展开网状天线竖向索预拉力与形面精度、展开末期驱动力矩突变及低阶固有频率存在强关联的规律，验证了传统单目标调控方法存在“顾此失彼”的局限性。

(2)通过动力学分析及拉格朗日方程构建了系统动力学模型，并基于该模

型建立了仿真模型，同时为驱动力矩逆向解算提供理论基础。

(3)研究搭建了原理样机及包含形面精度、力矩突变、固有频率的综合测试平台。实验结果与仿真数据在趋势上高度吻合，有效验证了动力学模型的准确性与边界条件的合理性，确保了后续构建代理模型所需样本数据的物理真实性。

(4)研究建立了多目标优化模型，

基于代理模型的寻优结果显示:相比初始设计,优化后的天线形面精度提升了16.5%,突变力矩峰值降低了8%,且一阶固有频率避开共振带降低了11.3%,实现突变力矩峰值、形面精度与固有频率的协同调控。

参考文献

- [1] YOU, G. Application of Flexible Reflector Space-Borne Deployable Antenna. In: Xu, Z., Parizi, R. M., Loyola-González, O., Zhang, X. (eds) *Cyber Security Intelligence and Analytics*. CSIA 2021. Advances in Intelligent Systems and Computing, vol 1342. Springer, Cham.
- [2] 陈传志,董家宇,陈金宝,等.空间大型星载抛物面天线研究进展[J].航空学报,2021,42(01):133-153.
- CHEN C, DONG J, CHEN J, et al. Research progress of large spaceborne parabolic antennas [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2021, 42(01): 133-153.
- [3] 刘荣强,田大可,邓宗全.空间可展开天线结构的研究现状与展望[J].机械设计,2010,27(09):1-10.
- LIU R, TIAN D, DENG Z. Research status and prospects of space deployable antenna structures [J]. *Journal of Machine Design*, 2010, 27(09): 1-10.
- [4] 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 X, DU J, BAO H, et al. Dynamic analysis of deployable antenna considering truss flexibility [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2020, 56(07): 119-126.
- [5] 冯涛,冀有志,肖勇,等.星载环形天线结构及其应用综述[J].空间电子技术,2015,12(02):22-28.
- FENG T, JI Y, XIAO Y, et al. Review of spaceborne hoop antenna structures and their applications [J]. *Space Electronic Technology*, 2015, 12(02): 22-28.
- [6] L. Dwight Gilger, Mark W. Thomson, John C. Gereau. Mi-cro fold reflector[P]. United States Patent 6323827B1.
- [7] 魏聚周.计及桁架柔性的环形天线找形方法研究[D].天津大学,2014.
- WEI J. Research on form-finding method of hoop antenna considering truss flexibility [D]. Tianjin University, 2014.
- [8] 牛治永,李晓岚,王三民,等.空间桁架可展天线反射器的形面精度优化调整[J].机械设计与制造,2011,(06):123-125.
- NIU Z, LI X, WANG S, et al. Surface accuracy optimization adjustment of space truss deployable antenna reflector [J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2011, (06): 123-125.
- [9] 韩若宇,何柏岩,聂锐,等.考虑在轨热效应的网状天线索网优化设计[J].中国空间科学技术,2022,42(04):111-119.
- HAN R, HE B, NIE R, et al. Optimization design of mesh antenna cable-net considering on-orbit thermal effects [J]. *Chinese Space Science and Technology*, 2022, 42(04): 111-119.
- [10] 李团结,杨丽,李洋,等.绳索-金属丝网组合结构力热匹配设计[J].西安电子科技大学学报,2018,45(02):48-53.
- LI T, YANG L, LI Y, et al. Thermal-mechanical matching design of cable-metal mesh composite structure [J]. *Journal of Xidian University*, 2018, 45(02): 48-53.

- [11] 苏冠龙,马小飞,范叶森,等.基于多神经网络的可展开网状天线型面调整方法[J].中国空间科学技术(中英文),2024,44(02): 51-58.
- SU G, MA X, FAN Y, et al. Surface adjustment method for deployable mesh antennas based on multiple neural networks [J]. Chinese Space Science and Technology, 2024, 44(02): 51-58.
- [12] 杨东武,杜敬利,李团结.周边桁架式索网天线型面的快速调整方法[J].中国机械工程,2010,21(01):35-37.
- YANG D, DU J, LI T. Rapid surface adjustment method for perimeter truss cable-net antenna [J]. China Mechanical Engineering, 2010, 21(01): 35-37.
- [13] 袁安,彭湘涛.星载环形网架天线的振动特性分析[J].电子产品可靠性与环境试验,2020,38(S1):31-34.
- XI A, PENG X. Vibration characteristics analysis of spaceborne hoop-truss antenna [J]. Electronic Product Reliability and Environmental Testing, 2020, 38(S1): 31-34.
- [14] 杨军刚,肖勇,赵治华,等.大型环形桁架天线分布式驱动展开方法与数值分析[J].中国科学:物理学 力学 天文学,2017,47(10):27-36.
- YANG J, XIAO Y, ZHAO Z, et al. Distributed drive deployment method and numerical analysis of large hoop-truss antenna [J]. Scientia Sinica: Physica, Mechanica & Astronomica, 2017, 47(10): 27-36.
- [15] 任伟峰,何柏岩,聂锐.环形桁架天线展开动力学分析[J].中国机械工程,2019,30(24):2945-2952.
- REN W, HE B, NIE R. Deployment dynamics analysis of hoop-truss antenna [J]. China Mechanical Engineering, 2019, 30(24): 2945-2952.
- [16] ZHANG Yiqun, RU Wenrui, YANG Guigeng, LI Na, Deployment analysis considering the cable-net tension effect for deployable antennas, Aerospace Science and Technology, Volume 48, 2016, Pages 193-202, ISSN 1270-9638.
- [17] GOLDSTEIN H, POOLE C P, SAFKO J L. Classical Mechanics. San Francisco: Addison Wesley, 2002
- [18] 齐晓志.环形桁架式可展开天线机构设计及展开动力学研究[D].哈尔滨工业大学,2016.
- QI X. Mechanism design and deployment dynamics research of hoop-truss deployable antenna [D]. Harbin Institute of Technology, 2016.
- [19] SHABANA A A. Dynamics of multibody systems[M]. Cambridge University Press, 2020.
- [20] 董富祥,周志成,曲广吉.星载大型天线反射器桁架展开动力学建模仿真[J].航天器工程,2012,21(04):26-31.
- DONG F, ZHOU Z, QU G. Dynamic modeling and simulation of truss deployment for large spaceborne antenna reflector [J]. Spacecraft Engineering, 2012, 21(04): 26-31.
- [21] YANG, Z, HE K, LIU Let al. Active Vibration Control of Beam-Pointing-Sensitive Modes in Large Space Deployable Antennas. Adv. Astronaut. (2025).
- [22] JIANG X, BAI Z. Dynamics Modelling and Simulation for Deployment Characteristics of Mesh Reflector Antennas. Applied Sciences. 2020; 10(21):7884.
- [23] 邓汉卿.空间可展开索网天线的机构构型综合与形面设计方法研究[D].西安电子科技大学,2016.

- DENG H. Research on mechanism configuration synthesis and surface design method for space deployable cable-net antenna [D]. Xidian University, 2016.
- [24] HE B, JIA L, LI K, et al. Deployment Dynamic Modeling and Driving Schemes for a Ring-Truss Deployable Antenna. Chin. J. Mech. Eng. 37, 79 (2024).
- [25] PENG Y, ZHAO Z, 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.
- [26] 师甜,肖勇.一种大型可展开天线结构频率调整技术研究[J].现代电子技术,2013, 36(11):75-78+81.
- SHI T, XIAO Y. Research on frequency adjustment technology for large deployable antenna structure [J]. Modern Electronics Technique, 2013, 36(11): 75-78+81.