DOI: 10.3901/JME.2020.07.119

考虑桁架柔性的可展开天线动力学分析*

杜雪林 杜敬利 保宏 钟旺 崔凯

(西安电子科技大学电子装备结构设计教育部重点实验室 西安 710071)

摘要: 周边桁架式可展开天线的展开过程涉及复杂的动力学问题, 对天线展开过程的研究有助于展开天线的设计、研制和优化。综合考虑天线展开过程中桁架结构的柔性变形和索网结构的变拓扑特征, 建立了周边桁架式可展开天线展开过程的动力学模型。首先采用绝对节点坐标法的梁单元对外桁架结构建模, 然后引入过渡函数来描述索段由松弛到张紧状态的转变, 最后建立了周边桁架可展开天线的系统动力学方程。对天线进行动力学仿真分析, 结果表明该方法能有效地分析天线的展开过程, 桁架结构在内部索网张力的作用下会产生柔性变形, 对驱动力和展开速度产生显著的影响。

关键词: 可展开天线; 柔性桁架结构; 索网; 展开过程

中图分类号: V414

Dynamic Analysis of Deployable Antennas Considering Truss Flexibility

DU Xuelin DU Jingli BAO Hong ZHONG Wang CUI Kai

(Key Laboratory of Electronic Equipment Structure Design of Ministry of Education,
Xidian University, Xi'an 710071)

Abstract: The deployment of the hoop truss deployable antenna involves complex dynamics problems, and the research on the deployment is helpful to the design, development and optimization of the antenna. Considering the flexible deformation of the truss structure and the variable topology of the cable-net structure during the deployment, the dynamic model of the hoop truss deployable antenna is established. Firstly, the beam element of the absolute node coordinate formulation is used to model the external truss structure, and then a transition function is introduced to describe the transition of the cable segment from relaxation to tension, finally, the dynamic equation of hoop truss deployable antenna is established. The simulation results show that the method can effectively analyze the deployment of the antenna, and the flexible deformation of the truss structure under the tension of the internal cable net has a significant impact on the driving force and deployment velocity.

Key words: deployable antenna; flexible truss structure; cable net; deployment

0 前言

随着航天科技的发展, 火箭的运载能力和星载天线的口径都会变得越来越大, 但很明显两者的速度并不相同。如美国在研的下一代多普勒气象雷达 NIS 的天线工作频率为 35 GHz^[1], 口径将达到 35 m, 要远大于运载火箭的整流罩直径。受到火箭运载能力和整流罩内空间的限制, 大口径、高精度和轻质量的可展开天线正成为星载天线理想的选择。形式众多的展开天线各有特点, 其中周边桁架式可展开天线具有柔性大, 压缩比大, 应用范围广和形式简单等优势^[2-5], 天线的结构形式不会随着口径的改变而改变, 质量也

不会成比例的增加, 是目前理想的可展开天线形式。如图 1 所示, SMAP 土壤检测卫星上采用的 AstroMesh 系列环形天线, 其主要由可展开桁架、上网面、下网面、竖向调节索、金属丝网等构成。可展开桁架由一系列相同的平行四边形单元组成, 连接电动机的驱动绳索依次通过平行四边形单元的五杆铰接关节的滑轮, 并在三杆铰接关节内的同步齿轮的作用下使天线同步展开。在天线展开过程中, 随着桁架结构的展开, 松弛的索网逐渐张紧, 电动机的能量通过驱动绳索传递给索网。在完全展开后, 索网形成了所需的预张力抛物反射面。

星载可展开天线要比卫星本体大很多, 为了能借助运载火箭将天线发射到指定的轨道, 天线需要先收拢到一个较小的体积, 待到达指定位置后再展开至工作状态。周边桁架天线的展开过程涉及复杂的

* 国家自然科学基金资助项目(51675398, 51775401)。20190104 收到初稿, 20190719 收到修改稿

图1 周边桁架式可展开天线

多柔体动力学问题, 包括柔性桁架的变形, 非线性的索网张力和变拓扑的索网结构等。此外, 驱动绳索与滑轮间存在的摩擦力, 阻尼等都使得对展开过程的分析 and 求解变得困难。

考虑到实际中天线的展开过程十分缓慢, 不少研究者们忽略展开过程中的惯性和阻尼, 采用准静态分析方法对周边桁架展开天线的展开过程进行了深入研究^[6-8], 清楚地揭示了索网在展开过程中由松弛-部分张紧-完全张紧的过程, 为进一步研究天线动态展开过程奠定了基础和提供了参考。

目前, 基于多刚体动力学方法对可展开桁架结构的研究相对成熟, 包括对桁架结构的动力学分析和展开规划等方面^[9-12]。LI^[13]基于多刚体系统动力学的Lagrange方法, 将内部索网张力等效为弹簧力, 建立了周边桁架展开天线展开过程的动力学模型。NIE等^[14]利用刚性桁架的运动规划得到桁架结构的动能, 通过多项式拟合准静态下的索网势能得到展开过程中势能的函数关系, 提出了考虑运动可行性的网状反射面天线展开过程的动态建模与分析方法。

周边桁架结构的构件多为柔性杆件, 因此多刚体假设的动力学模型不能精确地描述可展开天线的动力学特性。目前, 多柔体动力学分析方法的浮动坐标法^[15]和绝对节点坐标法^[16]已广泛应用在展开天线的动力学分析中, 如ZHANG等^[17]利用浮动坐标法, 推导了索网结构和可展开桁架的动能、弹性势能和重力势能, 建立了天线桁架和索网的综合动力学模型。与浮动坐标法相比, 绝对节点坐标法能够更加准确地描述天线柔性构件的大范围运动和大变形耦合^[18]。已有不少学者^[19-21]将绝对节点坐标法应用到对桁架式可展开天线的研究中, 经过这些学者的检验表明, 绝对节点坐标法能够准确地反映展开机构的柔性特性。

本文基于绝对节点坐标法的梁单元建立空间桁架模型, 构造过渡函数描述索网中索段的松弛/张紧状态, 对桁架式可展开天线进行动力学展开分析, 并与作者关于可展开天线的准静态展开过程的相关结果^[8]进行对比研究, 分析了天线展开过程中桁架的柔性变形对驱动力和展开速度的影响。

1 可展开天线的动力学分析

1.1 桁架结构的大变形分析

桁架结构由一系列相同的平行四边形单元组成, 每个平行四边形单元由两根横杆, 两根竖杆, 内含驱动绳索的套筒, 两个五向铰接关节和两个三向铰接关节组成, 如图2所示。通过驱动绳索来改变单元对角线的长度, 从而实现周边桁架的展开。将周边桁架单元运动规划转化为驱动绳索的运动控制, 通过控制平行四边形单元对角线驱动绳索的长度^[8, 22], 实现对天线展开过程的规划。

图2 平行四边形单元

基于 Euler-Bernoulli 梁, GERSTMAYR 等^[23]提出了一种适用于大变形, 非线性动力学模型的低阶柔性梁单元。该模型假设梁单元是各向同性的, 并且忽略了其剪切变形和扭转变形。

三维两节点的柔性梁单元如图3所示, 单元上任意一点的位置矢量可以写为

$$\mathbf{r} = \mathbf{S}\mathbf{x}_a \quad (1)$$

其中, $\mathbf{S}$ 为梁单元的形函数, $\mathbf{x}_a$ 为梁单元的节点坐标矢量并可表示为

$$\mathbf{x}_a = [\mathbf{P}_i^T \quad \mathbf{P}_{i,x}^T \quad \mathbf{P}_k^T \quad \mathbf{P}_{k,x}^T]^T \quad (2)$$

式中, $\mathbf{P}_i$ 和 $\mathbf{P}_k$ 分别为节点 i 和 k 的全局坐标矢量, $\mathbf{P}_{i,x} = \partial \mathbf{P}_i / \partial x$ 和 $\mathbf{P}_{k,x} = \partial \mathbf{P}_k / \partial x$ 分别为节点 i 和 k 的位置矢量梯度。

图3 空间梁单元模型

梁单元的形函数可写为

$$\mathbf{S} = [s_1 \mathbf{I} \quad s_2 \mathbf{I} \quad s_3 \mathbf{I} \quad s_4 \mathbf{I}] \quad (3)$$

式中, $s_1 = 1 - 3\xi^2 + 2\xi^3$, $s_2 = \xi - 2\xi^2 + \xi^3$, $s_3 = 3\xi^2 - 2\xi^3$, $s_4 = \xi^3 - \xi^2$, $\xi = x/l$, $\mathbf{I}$ 为 3×3 的单位矩阵。其中, $x \in [0, l]$ 为梁单元未变形时梁上任意一点的曲线坐标, l 为梁单元未变形时的长度。

由虚功原理可以推导得出, 梁单元的质量矩阵和弹性力分别为

$$\mathbf{M}_l = \rho_l A_l \int_0^l \mathbf{S}^T \mathbf{S} dx \quad (4)$$

$$\mathbf{F}_l = \left[E_l A_l \int_0^l \varepsilon_l \mathbf{S}'^T \mathbf{S}' dx + E_l I \int_0^l \mathbf{S}''^T \mathbf{S}'' dx \right] \mathbf{x}_a \quad (5)$$

式中, E_l 为梁单元的弹性模量, A_l 为梁单元的横截面积, I 为截面惯性矩, ρ_l 为梁单元的密度, ε_l 为梁单元的轴向应变, 即

$$\varepsilon_l = \frac{1}{2}(\mathbf{r}'^T \mathbf{r}' - 1) = \frac{1}{2}(\mathbf{x}_a^T \mathbf{S}'^T \mathbf{S}' \mathbf{x}_a - 1) \quad (6)$$

1.2 绳索的建模方法

在描述空间索单元时, 仅考虑索两端节点的空间坐标^[24], 如图 4 所示。对于索单元上任意点 C 的位置矢量可以写为

$$\mathbf{r}_c = \mathbf{S}_c \mathbf{x}_c \quad (7)$$

式中, $\mathbf{S}_c$ 为索单元的形函数, $\mathbf{x}_c$ 为索单元的位置矢量, 它们可写为

$$\mathbf{S}_c = \left[\left(1 - \frac{x}{l_0} \right) \mathbf{I} \quad \frac{x}{l_0} \mathbf{I} \right] \quad (8)$$

$$\mathbf{x}_c = [\mathbf{P}_i^T \quad \mathbf{P}_j^T]^T \quad (9)$$

式中, $\mathbf{P}_i$ 和 $\mathbf{P}_j$ 为索单元的节点坐标矢量, l_0 为索单元未变形时的长度, x 为索单元未变形前其上任意一点沿索轴线方向的坐标, $\mathbf{I}$ 为 3×3 单位矩阵。

图 4 空间索单元模型

索单元的质量矩阵与梁单元相似, 可写为

$$\mathbf{M}_c = \rho_c A_c \int_0^{l_0} \mathbf{S}_c^T \mathbf{S}_c dx \quad (10)$$

式中, A_c 为索单元的横截面积, ρ_c 为索单元的密度。

在天线的展开过程中, 索网要经历松弛-部分张紧-完全张紧的过程。尽管存在时间上的前后顺序, 索网上的每一根索段都会经由最初的松弛态过渡至最后的张紧态。实际上, 用来制作索网的

芳纶绳是由多股芳纶单丝捻制而成的辫状结构。芳纶绳受到初始应力后, 仅内部小部分单丝被拉紧, 获得较小的轴向刚度; 随着荷载的增加, 绳内被张紧的单丝数量和轴向刚度逐渐增大; 当内部大部分单丝被拉伸后, 绳内的轴向刚度才趋于稳定。为了能清楚地描述这一非线性过程, 本文给出一个在 $0 \sim \varepsilon_0$ 区间内值域在 $[0, 1]$ 的过渡函数^[8], 其形式为

$$f(x, x_0, h_0, x_1, h_1) = h_0 + (h_1 - h_0) \left(\frac{x - x_0}{x_1 - x_0} \right)^3 \left[10 - 15 \left(\frac{x - x_0}{x_1 - x_0} \right) + 6 \left(\frac{x - x_0}{x_1 - x_0} \right)^2 \right] \quad (11)$$

$$y = \begin{cases} 10^{-6} & \varepsilon_c < 0 \\ f(\varepsilon, 0, 10^{-6}, \varepsilon_0, 1) & 0 \leq \varepsilon_c < \varepsilon_0 \\ 1 & \varepsilon_0 \leq \varepsilon_c \end{cases} \quad (12)$$

式中, ε_c 为索单元的轴向应变。取 $\varepsilon_0 = 0.025$, 在图 5 中给出了函数 y 的函数图像。为了防止无约束结构的“自由浮动”, 仍需要保证松弛索段具有很小的刚度。

图 5 函数 y 的图像

引入了过渡函数 y 后索单元的弹性势能可写为

$$U_c = \frac{1}{2} \int_0^{l_0} y E_c A_c \varepsilon_c^2 dx \quad (13)$$

式中, E_c 为索单元的弹性模量, A_c 为索单元的横截面积。

进一步可以得到索单元的弹性力表达式

$$\mathbf{F}_c = \frac{1}{2} E_c A_c \left[\int_0^{l_0} \left(\frac{\partial y}{\partial \varepsilon_c} \varepsilon_c^2 + 2y \varepsilon_c \right) \mathbf{S}_c'^T \mathbf{S}_c' dx \right] \mathbf{x}_c \quad (14)$$

与索网索段建模不同的是, 驱动绳索在建模的过程中索单元的长度 l_0 是实时更新的。

2 系统的动力学方程

周边桁架可展开天线多体动力学建模时, 索网结构和驱动绳索采用索单元进行建模, 桁架结

构则采用梁单元进行离散。其中,横杆与五向铰接关节的旋转副,三向铰接关节内的同步齿轮副等均用约束方程来描述^[8]。忽略掉上网面金属反射网的质量和刚度的影响,给出系统的动力学方程^[25]如下

$$\begin{cases} \mathbf{M}\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{D}\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{F} + \Phi_q^T \lambda - \mathbf{Q} = 0 \\ \Phi(\mathbf{q}) = 0 \end{cases} \quad (15)$$

式中, $\mathbf{M}$ 为系统的质量矩阵, $\mathbf{F}$ 为系统的弹性力矢量, $\mathbf{q}$ 是系统的广义坐标, λ 为拉格朗日乘子, $\mathbf{Q}$ 包括系统所受外力和摩擦力, $\Phi(\mathbf{q})$ 为系统的约束方程, Φ_q 为广义坐标 $\mathbf{q}$ 对约束方程 $\Phi(\mathbf{q})$ 的偏导数。 $\mathbf{D}$ 为系统的阻尼矩阵, 采用 Rayleigh 比例阻尼矩阵^[26]可写为

$$\mathbf{D} = \beta_1 \mathbf{M} + \beta_2 (\partial \mathbf{F} / \partial \dot{\mathbf{q}}) \quad (16)$$

式中, β_1 和 β_2 为比例系数。

3 数值仿真

基于第 2 节的动力学建模方法, 本文建立了 2 m 口径的桁架式可展开天线模型, 如图 6 所示, 其中竖杆 A_1B_1 固定约束。周边桁架结构由 6 个平行四边形结构组成, 横杆和竖杆的长度分别为 $R_2=1$ m 和 $R_1=0.6$ m, 横截面为空心圆管, 外径 18 mm, 壁厚 1.2 mm。杆件弹性模量为 150 GPa, 密度 1.8×10^3 kg/m³。驱动绳索和索网的材质相同, 密度为 1.685×10^3 kg/m³, 弹性模量 20 GPa。驱动绳索和索网索段的横截面为圆截面, 驱动绳索横截面半径为 0.7854×10^{-5} m², 索网中索段横截面半径为 0.7854×10^{-6} m²。

图 6 2 m 口径的桁架式可展开天线模型

桁架展开天线的展开分为两个阶段: ① 天线桁架的关节处在扭簧作用下快速弹开至一定角

度, 这一过程耗时短, 速度快, 不易测量; ② 驱动电动机启动并回收套筒内的驱动绳索, 此时天线缓慢展开至工作状态。本文主要对第二阶段进行研究。

如图 2 中, 五向铰接处横杆和竖杆的夹角为 α , 以角 α 衡量天线的展开程度, 选取第二阶段的角度区间为 $\alpha=30^\circ \sim 90^\circ$, 展开周期 $T=10$ s。对展开过程中的角度 α 进行如下规划

$$\alpha = \begin{cases} \frac{5kt^2}{2} + \frac{\pi}{6} & 0 \leq t < T/5 \\ Kt + c_1 + \frac{\pi}{6} & T/5 \leq t < 4T/5 \\ -\frac{5kt^2}{2} + 5kTt + c_2 + \frac{\pi}{6} & 4T/5 \leq t \leq T \end{cases} \quad (17)$$

式中, $k=5\pi/12T^2$, $c_1=-\pi/24$, $c_2=-17\pi/24$ 。图 7 给出了展开过程中夹角的变化趋势。

由平行四边形内对角线和夹角之间的关系, 可知驱动索的长度变化满足

$$(R_1 + R_2 \sin(\pi/2 - \alpha))^2 + (R_2 \cos(\pi/2 - \alpha))^2 = L_t^2 \quad (18)$$

式中, L_t 为平行四边形单元对角线驱动索的长度。

图 7 展开过程中夹角 α 的变化

取文献[8]中展开角度为 30° 时的天线构型为初始展开态, 进行动力学仿真。

3.1 算例 1

不考虑重力的影响, 仅在套筒上施加 4 N 的摩擦阻力, 对 2 m 天线的展开过程进行动力学分析。天线的参数和展开方式如第三节所述, 其中比例系数分别为 $\beta_1=0.1$ 和 $\beta_2=1 \times 10^{-6}$ 。图 8 为天线展开过程中驱动力的变化曲线, 其中实线为动力学展开模型中的驱动力, 虚线为准静态展开过程求得的驱动力^[8]。从整体上看, 本文动力学模型求得的驱动力曲线和准静态方法所得的驱动力曲线吻合的比较好, 即展开初期, 索网处于松弛状态且存在机构自由度, 驱动力较小, 到了展开中后期, 索网逐渐张紧, 驱动力逐渐增大后减小。从图 8 中可以看出, 动力学模型中的驱动力曲线有明显的振动, 为了表征振动的程度, 以准静态过程中的驱动力为基准,

用动力学模型的驱动力减去准静态模型的驱动力, 所得曲线如图 9 所示。可以看出图 9 中曲线的振幅在 $60^\circ \sim 70^\circ$ 有一个激变, 联系图 8 中曲线在该段的驱动力走势可以看出, 此时内部索网开始逐渐被张紧, 外桁架开始受到索网产生的作用力, 产生了更为明显的抖动。通过对比图 9 中 $30^\circ \sim 60^\circ$ 和 $60^\circ \sim 90^\circ$ 两阶段的曲线振幅, 还可以发现, 索网逐渐张紧时天线的振动程度要比索网松弛时天线的振动程度剧烈。

图 8 展开过程中驱动力的变化曲线

图 9 动力学展开过程和准静态展开过程中驱动力的差值

为了便于讨论, 如图 6 所示, 从天线的固定竖杆 A_1B_1 开始, 沿顺时针方向依次定义桁架上方的节点为 $A_1, A_2, \dots, A_6$, 桁架下方节点为 $B_1, B_2, \dots, B_6$ 。不失一般性, 取桁架节点 A_6 的位移进行分析, 如图 10 所示, 可以看到在展开过程中, 动力学模型和准静态模型中相同节点的位移基本一致, 能够按照规划的展开路径顺利展开。

(a) X方向的位移

(b) Y方向的位移

(c) Z方向的位移

图 10 节点 A_6 的位移

桁架节点 A_6 的速度曲线如图 11 所示, 其中实线为准静态模型中规划的展开速度。通过对比发现, 动力学模型中的速度和规划的展开速度的趋势基本一致, 但动力学模型中速度一直处于振动状态。仔细观察可以发现, 自某一时刻(约为 5.8 s)开始, 动力学模型中的速度曲线的振动幅度呈增大趋势。

由于算例中考虑了桁架的柔性变形, 当索网由松弛状态被逐渐张紧时, 桁架的变形势必随着索网内的张力状态而变化, 如图 12 给出了展开过程中索网和桁架的弹性势能。从图 12 中可以看出, 约在 5.8 s 处, 索网内的弹性势能开始逐渐上升, 证明此刻索网开始由松弛状态逐渐张紧, 与此同时, 桁架也开始产生柔性变形。考虑到索网开始张紧的时刻和驱动力曲线及桁架节点速度曲线振动幅度加剧的时刻相一致, 可以肯定, 逐渐张紧的索网促使桁架产生柔性变形是出现驱动力曲线和桁架节点速度曲线振动幅度加剧的直接原因。另外, 可以观察图 12, 在索网被逐渐张紧的时间段内, 桁架内的柔性变形主要是弯曲变形, 直至接近最后时刻, 才被轴向变形所替代。这是因为展开过程中, 桁架上三向铰接关节和五向铰接关节上受到的索网作用力不同导致的, 完全展开后, 桁架上各节点受力相同, 结构对称, 此时主要变形为轴向变形, 这一现象和文献[8]中完全相同。

3.2 算例 2

在相同情况下, 不考虑天线的内部索网, 仅以

(a) X方向的速度

(b) Y方向的速度

(c) Z方向的速度

图11 节点 A_6 的速度

图12 天线展开过程中索网和桁架的弹性势能

外部桁架为对象进行动力学展开分析。在不考虑内部索网对桁架的作用时,展开过程中桁架的驱动力和产生的变形能都很小,故不作详细讨论。结合算例1,这里重点对天线展开过程中的位移和速度进行讨论。

在两种情况下对天线的展开过程进行分析:①综合考虑索网和桁架的动力学展开过程(算例1);②不考虑内部索网,仅外部桁架的展开过程(算例2)。

仍取桁架节点 A_6 的位移进行分析,如图13所示,

可以看出,在图13c中,节点位移基本一致,而在图13a~13b中,节点位移曲线仅在前半段保持一致,内部索网开始张紧后,两种情况下的位移曲线出现偏离,也就是说,因为内部索网开始张紧,在算例1中的桁架发生了柔性变形。桁架节点 A_6 的速度曲线如图14所示,可以看出,在前半段两种情况下的节点速度高度一致,后半段内部索网开始张紧后,考虑内部索网的情况下节点的速度出现了更大幅度的振动。

(a) X方向的位移

(b) Y方向的位移

(c) Z方向的位移

图13 节点 A_6 的位移

(a) X方向的速度

图 14 节点 A_6 的速度

通过以上对比进一步说明, 在逐渐张紧的索网的作用下, 桁架产生了柔性变形, 而柔性变形的存在又使得在展开后期天线速度的振动幅度增大。

4 结论

(1) 本文考虑了桁架结构的柔性变形和索网结构的变拓扑特征, 建立了周边桁架可展开天线的动力学分析模型。通过动力学模型求得的驱动力曲线趋势和相应准静态模型大体一致, 由驱动力曲线可以看出, 天线在展开过程中存在振动现象, 并且振动幅度会随着索网开始受力而加剧。

(2) 在索网开始受力后, 桁架节点的速度曲线也出现振动幅度增大的现象。通过分析发现, 展开中后期的 5.8 s 处, 索网开始收紧, 桁架产生柔性变形, 驱动力曲线和桁架节点速度曲线出现更加显著的振动, 可知桁架的柔性变形是驱动力曲线和桁架节点速度曲线出现显著振动的主要原因。

(3) 桁架结构的柔性变形在展开过程中, 以弯曲变形为主, 展开完成后以轴向变形为主。由于桁架柔性变形的存在会加剧展开过程中的振动, 降低天线展开过程的可靠性, 并对卫星姿态的控制带来不良影响。因此在天线的设计之初即要将桁架的柔性变形对展开过程的影响考虑在内。

参 考 文 献

- [1] IM E, THOMSON M, FANG Houfei, et al. Prospects of large deployable reflector antennas for a new generation of geostationary doppler weather radar satellites[J]. Aiaa Journal, 2013(1): 1-11.
- [2] THOMSON M W. The AstroMesh deployable reflector[C]// Antennas and Propagation Society International Symposium, July 11-16, 1999, Orlando, Florida. IEEE, 2002: 1516-1519.
- [3] PUIG L, BARTON A, RANDO N. A review on large deployable structures for astrophysics missions[J]. Acta Astronautica, 2010, 67(1): 12-26.
- [4] 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(9): 1-10.
LIU Rongqiang, TIAN Dake, DENG Zongquan. Research actuality and prospect of structure for space deployable antenna[J]. Journal of Machine Design, 2010, 27(9): 1-10.
- [5] WANG Yan, DENG Zongquan, LIU Rongqiang, et al. Topology structure synthesis and analysis of spatial pyramid deployable truss structures for satellite SAR antenna[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2014, 27(4): 683-692.
- [6] ZHANG Yiqun, RU Wenrui, YANG Guigeng, et al. Deployment analysis considering the cable-net tension effect for deployable antennas[J]. Aerospace Science & Technology, 2016, 48: 193-202.
- [7] NIE Rui, HE Baiyan, ZHANG Lianhong, et al. Deployment analysis for space cable net structures with varying topologies and parameters[J]. Aerospace Science & Technology, 2017, 68: 1-10.
- [8] DU Xuelin, DU Jingli, BAO Hong, et al. Deployment analysis of deployable antennas considering cable net and truss flexibility [J]. Aerospace Science & Technology, 2018, 82-83: 557-565.
- [9] ZHANG Yiqun, DUAN Baoyan, LI Tuanjie. A controlled deployment method for flexible deployable space antennas[J]. Acta Astronautica, 2012, 81(1): 19-29.
- [10] LI Tuanjie, ZHANG Yan, LI Tao. Deployment dynamic analysis and control of hoop truss deployable antenna[J]. Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica, 2009, 30(3): 444-449.
- [11] 张逸群, 段宝岩, 李团结. 空间可展开天线展开过程轨迹与控制系统集成设计[J]. 机械工程学报, 2011, 47(9): 21-28.
ZHANG Yiqun, DUAN Baoyan, LI Tuanjie. Integrated design of deployment trajectory and control system for deployable space antennas[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(9): 21-28.
- [12] SUN Yuantao, WANG Sanmin, JAMES K. et al. Kinematics and dynamics of deployable structures with scissor-like-elements based on screw theory[J]. Chinese

- Journal of Mechanical Engineering, 2014, 27(4): 655-662.
- [13] LI Tuanjie. Deployment analysis and control of deployable space antenna[J]. Aerospace Science & Technology, 2012, 18(1): 42-47.
- [14] NIE Rui, HE Baiyan, ZHANG Lianhong. Deployment dynamics modeling and analysis for mesh reflector antennas considering the motion feasibility[J]. Nonlinear Dynamics, 2017(1): 1-16.
- [15] SHABANA A A. Dynamics of multibody systems[M]. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1998.
- [16] BERZERI M, CAMPANELLI M, SHABANA A A. Definition of the elastic forces in the finite-element absolute nodal coordinate formulation and the floating frame of reference formulation[J]. Multibody System Dynamics, 2001, 5(1): 21-54.
- [17] ZHANG Yiqun, LI Na, YANG Guigeng, et al. Dynamic analysis of the deployment for mesh reflector deployable antennas with the cable-net structure[J]. Acta Astronautica, 2017, 131: 182-189.
- [18] 赵春璋, 余海东, 王皓, 等. 基于绝对节点坐标法的变截面梁动力学建模与运动变形分析[J]. 机械工程学报, 2014, 50(17): 38-45.
- ZHAO Chunzhang, YU Haidong, WANG Hao, et al. Dynamic modeling and kinematic behavior of variable cross-section beam based on the absolute nodal coordinate formulation[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(17): 38-45.
- [19] LI Pei, LIU Cheng, TIAN Qiang, et al. Dynamics of a deployable mesh reflector of satellite antenna: Parallel computation and deployment simulation[J]. Journal of Computational and Nonlinear Dynamics, 2016, 11(6): 061005.
- [20] PENG Yun, ZHAO Zhihua, ZHOU Ming, et al. Flexible multibody model and the dynamics of the deployment of mesh antennas[J]. Journal of Guidance Control Dynamics, 2017, 40(6): 1-8.
- [21] LIU Likun, SHAN Jinjun, TAO Cheng. Simulation of non-synchronous deployment of the large deployable hoop truss antenna[C]// Aiaa Spacecraft Structures Conference, January 5-9, 2015, Kissimmee, Florida. AIAA, 2015: 1-12.
- [22] 李团结, 张琰, 段宝岩. 周边桁架可展开天线展开过程运动分析及控制[J]. 西安电子科技大学学报, 2007, 34(6): 916-921.
- LI Tuanjie, ZHANG Yan, DUAN Baoyan. Deployment kinematic analysis and control of hoop truss deployable antenna[J]. Journal of Xidian University, 2007, 34(6): 916-921.
- [23] GERSTMAYR J, SHABANA A A. Analysis of thin beams and cables using the absolute nodal coordinate formulation[J]. Nonlinear Dynamics, 2006, 45(1-2): 109-130.
- [24] DU Jingli, BAO Hong, CUI Chuanzhen. Shape adjustment of cable mesh reflector antennas considering modeling uncertainties[J]. Acta Astronautica, 2014, 97(2): 164-171.
- [25] SHABANA A A. Computational dynamics[M]. 3rd ed. John Wiley & Sons, 2010.
- [26] BATHE K J. Finite element procedures[M]. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1996.
-
- 作者简介: 杜雪林, 男, 1984 年出生, 博士研究生。主要研究方向可展开天线。
E-mail: xldu_1@stu.xidian.edu.cn
杜敬利(通信作者), 男, 1977 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向机器人技术, 可展开天线。
E-mail: jldu@mail.xidian.edu.cn