大型空间环形桁架天线反射器展开动力学模拟与实验研究

李培^{1*}, 马沁巍¹, 宋燕平², 刘钺¹, 田强¹, 马少鹏¹, 胡海岩¹

¹ 北京理工大学宇航学院, 北京 100081;

² 中国空间技术研究院西安分院, 西安 710000

*联系人, E-mail: lipei0603@sina.com

收稿日期: 2017-04-06; 接受日期: 2017-06-09; 网络出版日期: 2017-08-31

国家自然科学基金(编号: 11290151)资助项目

摘要 近年来,可展开环形桁架天线被广泛应用于航天领域,将其作为提升通信卫星水平的关键技术. 环形桁架式天线反射器可以看作是由可展开环形桁架和柔性索网反射器组成的复杂刚-柔耦合多体系统. 为了精确表征柔性构件发生的大转动、大变形运动特性,本文采用结合绝对节点坐标方法(ANCF)与自然坐标方法(NCF)的绝对坐标(ACB)方法对该系统进行建模. 为了提高天线展开动力学模拟的计算效率,文中提出基于静力缩聚法和多层区域分解方法的并行求解算法实现大规模刚-柔多体系统动力学方程的高效求解. 此外,为了精确反映反射器不同步展开现象,在展开动力学模型中考虑驱动力衰减的影响. 最后,基于上述方法对环形桁架天线反射器展开的第二阶段进行动力学分析,并通过4 m缩比环形桁架天线地面实验验证数值模拟的结果.

关键词 环形桁架天线, 绝对坐标方法, 并行求解算法, 地面实验, 不同步展开

PACS: 02.70.Dh, 46.70.De, 46.15.-x

1 引言

环形桁架天线与其他结构形式相比,具有应用范围广、天线口径大、拓扑结构简单、在一定范围内口径增大不改变结构的拓扑构型,质量也不会成比例增加等优点,是目前大型星载天线的理想结构形式^[1,2]. 此外,相比于其他星载天线,网架式天线在展开状态下具有更好的精度和热稳定性. 1990年美国开始研制环形桁架天线,即AstroMesh (Northrop Grumman Corporation,

<http://www.northropgrumman.com/BusinessVentures/AstroAerospace/Products/Pages/AstroMesh.aspx>). 该天线由两个相似的抛物面三角形索网(主网和副网)直接连到可展开环形桁架上,通过张力阵连接主网和副网对应的节点来保持网面形状和刚度,而将金属网直接附着在主网背面来实现信号收发. 关于AstroMesh天线的详细描述可以参见文献[3,4]. 由于受到航天运载工具的容量限制,在卫星发射阶段环形桁架天线必须折叠起来,待卫星入轨后再靠驱动装置将其展开至工作

引用格式: 李培, 马沁巍, 宋燕平, 等. 大型空间环形桁架天线反射器展开动力学模拟与实验研究. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2017, 47: 104602
Li P, Ma Q W, Song Y P, et al. Deployment dynamics simulation and ground test of a large space hoop truss antenna reflector (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2017, 47: 104602, doi: [10.1360/SSPMA2017-00100](https://doi.org/10.1360/SSPMA2017-00100)

状态. 该天线的展开原理主要是利用平行四边形对角线可伸缩的特点, 通过电机收回沿斜杆套筒结构中的驱动索, 实现各平行四边形结构的展开.

环形桁架天线的展开过程涉及复杂的动力学问题, 给天线设计和研制带来了众多挑战. 因此, 在航天科技工程的迫切需求下, 环形桁架天线展开动力学问题已受到国内外众多学者与研究机构的关注. 胡海岩等人^[5]综述了大型网架类空间结构技术所涉及的力学与控制问题, 主要涉及空间结构展开和服役过程的非线性动力学建模、分析和控制, 提出了若干应重点关注的问题. 由于天线构件柔软, 基于多刚体假设的动力学模型不能正确反映星载天线的动力学特性^[6,7]. 因此, 航天界已开始采用多柔体系统动力学方法研究星载天线的动力学. Zhang等人^[8]基于小变形假设研究了柔性环形桁架的展开动力学, 但该研究忽略了柔性构件的刚体运动和弹性变形耦合效应, 并且无法模拟地面实验中出现的不同平行四边形机构之间的展开不同步现象^[9,10].

1996年, Shabana^[11]基于连续介质力学和有限元方法提出了绝对节点坐标方法(Absolute Nodal Coordinate Formulation, ANCF), 该方法能精确描述天线中柔性构件的大范围运动和大变形耦合. 田强等人^[12]、Gerstmayr等人^[13]以及Nachbagauer^[14]综述了绝对节点坐标方法, 详细介绍了该方法在单元构造、高效计算格式构建与工程应用方面进展情况. Li等人^[15]基于ANCF平面梁单元建立了空间环形桁架中平行四边形结构的动力学模型, 研究了热流变化对四边形单元展开动力学特性的影响规律. Peng等人^[16]将变长度单元应用到了环形桁架天线展开动力学分析中, 实现了斜杆长度随时间变化的仿真, 能较好地模拟环形桁架展开过程中的不同步展开现象. 最近, Liu等人^[10]基于ANCF建立了环形桁架天线反射器的柔性多体动力学模型, 通过在模型中施加衰减的驱动力正确反映了天线反射器的不同步展开现象. 但是在以上所有的动力学模拟中, 都没有计入柔性索网的影响, 并且仿真结果均没有进行验证.

环形桁架天线展开动力学分析是否准确, 需要通过地面实验来进行验证, 目前为止, 对天线展开过程的实验研究很少. 程亮等人^[17]对构架式可展开天线缩比模型进行了展开实验, 其中采用3种方法对天线重力进行卸载. 但是在展开过程中, 这3种消重系统会导

致导轨摩擦过大, 对位移误差影响较大. 针对此问题, 徐虎荣^[18]提出了一种新的悬挂方式可以有效地消除重力对天线展开过程的影响. 但是, 以上所有实验系统中, 都没有对索网结构进行测量.

为了准确描述环形桁架天线的力学行为, 本文基于绝对坐标(Absolute-Coordinate-Based, ACB)方法建立这类天线的力学模型, 对天线中相对刚硬的部件采用描述刚体的自然坐标方法(Natural Coordinate Formulation, NCF)^[19]进行建模, 对天线中的柔性部件采用ANCF进行描述. 基于作者关于环形桁架天线的相关研究^[3,4], 本文模拟了该天线的展开过程并通过4 m缩比环形桁架天线地面实验验证数值模拟的结果.

2 环形桁架天线的动力学模型

本文研究对象是由中国空间技术研究院西安分院与北京理工大学联合研制的4 m环形桁架天线反射器, 如图1所示. 该反射器主要由索网反射器、可展开环形桁架、吊索装置和刚性导轨组成. 其中, 环形桁架通过吊索装置悬挂在刚性导轨上, 此设计的目的是用来抵消环形桁架的重力. 吊索装置中的每根吊索包含上吊索和下吊索, 吊索中间依靠弹簧连接(弹簧刚度为1000 N/m). 环形桁架中的一根竖杆固定在一个只能沿垂直方向运动的臂上.

如图2(a)所示, 环形桁架由18个完全相同的平行四边形机构组成, 每个平行四边形包含两根横杆、两根竖杆和两根斜杆(图2(b)). 两个轻质抛物面索网(前

图1 (网络版彩图)4 m可展开环形桁架天线. (a) 地面实验系统; (b) 动力学模拟系统

Figure 1 (Color online) 4 m deployable ring truss reflector antenna. (a) Ground experiment system; (b) dynamic simulation system.

图 2 (网络版彩图) 环形桁架天线示意图. (a) 环形桁架天线反射器; (b) 相邻平行四边形中的运动副; (c) 环形桁架的刚性关节; (d) 索网及其约束

Figure 2 (Color online) The schematic views of the reflector antenna. (a) The antenna composed of two meshes on a ring truss; (b) the joints connecting two neighboring parallelogram mechanisms; (c) the rigid joints of the ring truss; (d) the joints of the mesh.

索网和后索网)直接连在环形桁架上, 并通过纵向调节索连接前索网和后索网对应的节点来保持天线的反射型面和结构刚度. 天线反射面的典型偏置抛物面构型、网格布置形式和找形方法在文献[3]中已经进行了详细阐述, 本文中没有考虑索网结构接触缠绕的影响. 表1给出了天线的几何参数和材料参数. 此外, 图2(c)给出了环形桁架中各杆件和刚性关节之间的相对位置, 其中 $l_1=0.01$ m, $l_2=0.027$ m, $l_3=0.01$ m, $l_4=0.072$ m, $l_5=0.047$ m, $l_6=0.025$ m. 五根杆连接处和三根杆连接处刚性关节的高度分别为0.053和0.045 m.

表 1 环形桁架天线的模型参数

Table 1 The model parameters of the ring truss reflector antenna

	长度 (m)	横截面外径/内径 (m)	密度 (kg/m^3)	杨氏模量 (Pa)	泊松比
竖杆	0.78682	0.026/0.024	1800	1.55×10^{11}	0.3
横杆	0.60462	0.026/0.024	1800	1.55×10^{11}	0.3
粗斜杆	0.71506	0.027/0.025	1800	1.55×10^{11}	0.3
细斜杆	0.73	0.0235/0.0215	1800	1.55×10^{11}	0.3
吊索索段	1.2	0.0025/0.0	1440	4×10^{10}	0.3
索网索段	—	0.0012/0.0	1167	2×10^9	0.3

环形桁架天线反射器可视为通过固定铰、旋转铰、齿轮副、滑移铰和球铰等联结的多柔体系统. 图2(b)给出了环形桁架中相邻的两个平行四边形之间的运动副: 刚性关节通过固定铰固定在环形桁架的竖杆上; 五根杆铰接处各杆件之间采用旋转铰连接; 三根杆铰接处各杆件之间采用齿轮副连接; 套筒式的斜杆装置中两根斜杆之间采用滑移铰连接. 在悬吊系统中, 环形桁架的横杆与吊索之间通过球铰连接, 而吊索与导轨之间则通过滑移铰连接. 对于索网结构, 其内部各索段之间以及索网与环形桁架之间均采用球铰连接(图2(d)).

本文采用结合描述柔性构件的ANCF和描述刚体的NCF的ACB方法对环形桁架天线进行建模, 如图1(b)所示. 首先考虑环形桁架中的关节, 由于在天线展开过程中可以忽略这些关节的变形, 可将这些关节视为刚体, 因此采用NCF来描述这些刚体. 而对于索网结构和吊索装置中的索段, 由于其横截面很小、柔性较大, 其截面变形可忽略, 因此本文中采用ANCF缩减梁单元来描述这些索段. 最后, 对于环形桁架中的杆件, 由于环形桁架结构中存在比较复杂的约束, 因此本文采用ANCF全参数梁单元来描述这些杆件. 关于环形桁架天线模型的详细介绍可以参见文献[3,4]. 此外, 由于NCF和ANCF中节点坐标均是在全局坐标的框架下定义, 基于ACB方法模拟的天线系统中复杂运动副的约束方程将会很容易表达, 关于约束方程的表达形式也可以参见文献[4].

3 环形桁架天线反射器的展开动力学并行计算

为了精确预测反射器展开过程中柔性构件发生的

大转动和大变形, 需要采用较为稠密的ANCF单元对柔性构件进行建模, 但这无疑导致整个天线系统的动力学模型具有很高自由度, 为动力学计算带来极大的挑战, 因此本节研究了多体系统动力学方程的高效求解方法. 首先基于ACB方法, 整个天线的动力学方程可以表示为如下微分代数方程组^[19,20]:

$$\begin{cases} M\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{F}(\mathbf{q}) + P_1\Phi_q^T\lambda + P_2\Phi_q^T\Phi - \mathbf{Q}(\mathbf{q}) = 0, \\ P_1\Phi(\mathbf{q}, t) = 0, \end{cases} \quad (1)$$

其中, $\mathbf{M}$ 是系统常数质量矩阵, $\mathbf{q}$ 是整个柔性多体系统的广义坐标向量, $\mathbf{F}(\mathbf{q})$ 是柔性体的弹性力向量, $\Phi(\mathbf{q}, t)$ 是系统约束向量, Φ_q 是约束向量关于广义坐标向量 $\mathbf{q}$ 的导数矩阵, λ 是拉格朗日乘子向量, $\mathbf{Q}(\mathbf{q})$ 是广义外力向量, P_1 和 P_2 是约束方程的比例因子和惩罚因子^[4].

对于多体系统动力学方程(1)的求解, 目前已有多种数值计算方法^[21,22]. 最近, 作者提出了一种新的多体系统动力学并行求解算法^[4]. 该算法采用广义- α 隐式算法对动力学方程进行求解. 算法主要分为两个部分, 一个是系统的分解过程, 另一个是回代过程. 系统分解过程主要包括子系统划分和每个子系统的多层划分. 首先进行一层网格划分, 将柔性多体系统分为若干个独立的子系统. 以第 k 个子系统为例, 在每一步Newton-Raphson迭代过程中需要求解如下线性代数方程组:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{K}_k & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} P_2\mathbf{A}_k^T\mathbf{A}_k & P_1\mathbf{A}_k^T \\ P_1\mathbf{A}_k & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\mathbf{q}_k \\ \Delta\lambda_k \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \mathbf{F}_k^r \\ \mathbf{F}_k^c \end{bmatrix}, \quad (2)$$

其中,

$$\begin{cases} \mathbf{K}_k = \hat{\beta}\mathbf{M}_k + (\mathbf{F}_k)_{q_k} - (\mathbf{Q}_k)_{q_k}, \\ \mathbf{A}_k = (\Phi_k)_{q_k}, \\ \mathbf{F}_k^r = \mathbf{M}_k\ddot{\mathbf{q}}_k + \mathbf{F}_k + P_1(\Phi_k)_{q_k}^T\lambda_k + P_2(\Phi_k)_{q_k}^T\Phi_k - \mathbf{Q}_k, \\ \mathbf{F}_k^c = P_1\left(\Phi_k + \sum_{i=1, i \neq k}^n (\Phi_k)_{q_i}^T\Delta\mathbf{q}_i\right). \end{cases} \quad (3)$$

而 $\hat{\beta}$ 是算法参数, 可通过广义- α 算法的谱半径 $\rho \in [0, 1]$ 来确定, ρ 值越大则数值耗散越小. 采用静力缩聚法^[23]缩聚各子系统的内部广义坐标和拉格朗日乘子增量, 得到缩聚之后的第一层网格中每个子系统的平衡方程, 表示为

$$\begin{bmatrix} \bar{\mathbf{K}}_k & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} P_2\mathbf{A}_k^{bT}\mathbf{A}_k^b & P_1\mathbf{A}_k^{bT} \\ P_1\mathbf{A}_k^b & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\mathbf{q}_k^{(h)} \\ \Delta\lambda_k^{(h)} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{F}}_k^r \\ \bar{\mathbf{F}}_k^c \end{bmatrix}, \quad (4)$$

其中, h 代表网格的层数, $\bar{\mathbf{K}}_k^{(h)}$ 和 $\bar{\mathbf{F}}_k^{r(h)}$ 分别代表缩聚后第 k 个子系统的刚度矩阵和广义力向量. 对于每个子系统, 刚度矩阵和约束方程的Jacobi矩阵都使用了压缩存储(CRS)格式存储. 为了进一步提高计算效率, 不直接对式(4)组装求解, 而是将缩聚后的系统进一步划分为若干个独立的子系统, 其各子系统的刚度矩阵和广义力向量分别通过组装得到

$$\begin{aligned} \mathbf{K}_k^{(h+1)} &= \sum_{j=1}^{n_k} \mathbf{A}_j \bar{\mathbf{K}}_j^{(h)}, \\ \Delta\mathbf{q}_k^{(h+1)} &= \sum_{j=1}^{n_k} \mathbf{A}_j \Delta\mathbf{q}_j^{b(h)}, \\ \mathbf{F}_k^{r(h+1)} &= \sum_{j=1}^{n_k} \mathbf{A}_j \bar{\mathbf{F}}_j^{r(h)}, \end{aligned} \quad (5)$$

因此, 下一层网格的系统平衡方程可以表示为类似式(2)的线性代数方程组. 再次使用静力缩聚法可以进一步缩聚掉各子系统的内部广义坐标和拉格朗日乘子增量, 如此依照上述过程, 根据多层区域分解方法, 不同层网格刚度矩阵和广义力向量可最终求解. 而对于最后一层网格, 界面问题的边界广义坐标和拉格朗日乘子的增量可以通过式(4)求解得到, 从而可以求解该层网格内部广义坐标和拉格朗日乘子增量.

最后, 当求解得到最后一层网格中所有结果即进入回代求解过程, 在该过程中求解从最后一层到第一层的广义坐标和拉格朗日乘子增量. 该回代过程可以表示为

$$\begin{aligned} \Delta\bar{\mathbf{q}}_j^{b(h-1)} &= \left[(\Delta\mathbf{q}_k^{i(h)})^T (\Delta\lambda_k^{i(h)})^T (\Delta\mathbf{q}_k^{b(h)})^T (\Delta\lambda_k^{b(h)})^T \right]_j^T, \\ \Delta\bar{\mathbf{q}}_j^{i(h-1)} &= - \left((\Theta_j^{ii})^{-1} (\Theta_j^{ib} \Delta\bar{\mathbf{q}}_j^b + \mathbf{F}_j^i) \right)^{(h-1)}, j = 1, 2, \dots, n_k. \end{aligned} \quad (6)$$

在本文中, 环形桁架的每根杆件采用8个ANCF全参数梁单元进行离散, 索网反射面和吊索装置中的索段分别采用20个和8个ANCF缩减梁单元进行离散. 因此, 整个天线模型包含122598个广义坐标. 基于多层区域分解方法, 天线系统中环形桁架和索网反射面被划分为两层网格, 如图3所示, 在每层网格中, 使用静力缩聚法缩聚掉每个子系统的内部自由度. 而对于吊索系统则根据区域分解方法将其划分为一层网格, 其中将每根索段视为一个独立子系统. 经过静力缩聚后,

图3 (网络版彩图) 环形桁架天线反射器多层区域分解过程
Figure 3 (Color online) The recursive parallel computation strategy for the mesh reflector.

最后的系统只剩下每个子系统边界节点的位置坐标.

4 环形桁架天线反射器的地面展开实验

地面实验中环形桁架天线反射器的展开过程分为两个阶段: 在第一阶段天线依靠环形桁架关节处的扭簧装置实现天线自动弹开, 直至半展开状态, 该阶段展开时间短, 需要进行高速测量; 在第二阶段天线依靠驱动电机回收沿斜杆套筒中的驱动索来实现结构展开, 直至完全展开的状态, 该阶段展开时间长, 可以进行低速测量. 本文对天线展开第二阶段进行研究. 由于天线的对称性, 因此只需要对半天线进行测量.

如图4(a)所示, 实验中采用36台($A_1, A_2, \dots, A_6, B_1, \dots, B_6, \dots, F_6$) AVT GuppyPro 125B黑白数字相机对天线中环形桁架不同区域进行观测, 每个相机的帧率是30 fps, 分辨率为1292 pixel $\times$ 964 pixel. 将这些相机分成6组每组6台相机, 每两组相机拍摄环形桁架三个平行四边形中的杆件, 比如A组和B组相机用来测量平行四边形 R_1, R_2 和 R_3 中的杆件, 结合双目立体视觉算法即可实现杆件的三维测量. 其中为了进行图像匹配, 在环形桁架杆件上的特定位置粘贴圆形标记点. 由于天线杆件是黑色的, 因此实验中选择的标记点是黑底白点. 最后, 通过三维重建和拼接可以得到环形桁架杆件的运动过程, 从而计算展开过程中杆件之间的夹角. 如图4(b)所示, 实验中采用36台相机对索网反射器进行观测. 将这些相机分成4组每组9台相机, 每两组相机拍摄一半索网中的节点坐标, 从而实现天线展开全过程网面动态三维形貌测量. 图5为实验系统实物图.

本研究中将反射器展开过程的总时间设定为500 s,

图4 (网络版彩图) 地面测试系统原理图. (a) 环形桁架观测; (b) 索网反射器观测

Figure 4 (Color online) The schematic view of the ground testing system. (a) Ring truss; (b) mesh reflector.

图5 (网络版彩图) 地面测试系统实物图

Figure 5 (Color online) The practical ground testing system picture.

图6给出了地面实验中环形桁架天线展开过程中6个指定时刻的动力学构型. 图中可以看出环形桁架展开呈现明显的不同步现象, 产生该现象的主要原因是由于摩擦力的影响, 使得每个平行四边形结构中的驱动力呈现衰减趋势, 进而导致环形桁架中杆件发生一定的变形, 最终使得天线不同步展开. 在整个天线展开过程中, 选定环形桁架中平行四边形的展开角度 ϕ 作为衡量天线展开状态的标志, 如图7所示. 在地面实验中, 角度 ϕ 是通过相机采集到的杆件节点坐标求解得到.

基于地面实验系统中测量所获得的天线系统初

图6 (网络版彩图)地面实验展开过程中6个指定时刻的反射器动态构型

Figure 6 (Color online) Typical dynamic configurations of the deployment process in the ground experiment.

图7 (网络版彩图)沿斜杆的衰减驱动力

Figure 7 (Color online) The degenerative driving force along the diagonal members.

始构型, 对环形桁架天线的动力学过程进行模拟. 为了简化分析, 本研究采用如图7所示沿着斜杆方向施加驱动力的方式来实现天线的展开. 如图7所示, 由于环形桁架结构关于X轴对称, 天线结构中施加的驱动力关于X轴对称. 由于摩擦力的影响, 各平行四边形机构中沿着斜杆方向的驱动力是逐个衰减的, 此处将衰减的驱动力定义如下:

$$F_{i+1} = CF_i, i = 1, 2, \dots, 8, \quad (7)$$

其中, C 是驱动力的衰减系数, 根据经验取为0.729, F_i

是第*i*个平行四边形机构中的驱动力.

为了保证天线展开过程的平稳性, 根据逆动力学方法^[24]得到第一个平行四边形机构中驱动力随时间的变化曲线, 如图8所示. 在仿真过程中, 沿驱动力方向的最大静摩擦力设定为50 N.

图9给出了反射器动力学模拟和地面实验的展开过程中第六个平行四边形的展开角度 ϕ_6 随时间变化的曲线. 结果显示, 动力学分析中的展开角度 ϕ_6 与地面试验中的结果吻合较好.

最后, 图10给出了环形桁架天线展开过程中6个指定时刻的系统构型. 该图明显展示了天线展开过程中的不同步现象, 经过与图6进行对比可以发现, 该结果与地面实验结果几乎一致.

5 结论

本文采用能够精确描述柔性构件大转动、大变形

图8 (网络版彩图)第一个平行四边形中驱动力的变化曲线

Figure 8 (Color online) The driving force for the first parallel quadrilateral mechanism.

图9 (网络版彩图)第六个平行四边形展开角度变化曲线

Figure 9 (Color online) The deployment angle of the sixth parallel quadrilateral mechanism.

图 10 (网络版彩图)展开动力学模拟中6个指定时刻的反射器动态构型

Figure 10 (Color online) Typical dynamic configurations of the deployment process in the dynamic simulation.

相互耦合的ACB方法,建立了地面实验系统中4 m环形桁架天线反射器的刚-柔耦合多体系统动力学模型.为了提高展开动力学分析计算效率,采用多层区域分解方法将反射器多柔体模型划分为多层网格,每层网格包含若干个独立的子系统.然后基于静力缩聚法缩聚掉每个子系统的内部广义坐标和拉格朗日乘子.最

终采用地面实验验证了提出的并行求解算法和数值模拟结果的正确性,对比研究结果表明环形桁架的弹性变形、驱动力的衰减、运动副的摩擦力会导致天线展开过程的不同步现象.本文的研究为后续更大口径环形桁架式天线结构的模拟及其控制奠定了高效求解基础.

参考文献

- 1 Thomson M W. The astromesh deployable reflector. *IEEE Trans Antennas Propag*, 1999, 3: 1516–1535
- 2 Tibert A G. Deployable Tensegrity Structure for Space Applications. Dissertation for Doctoral Degree. Sweden: Royal institute of Technology, 2002
- 3 Li P, Liu C, Tian Q, et al. Dynamics of a deployable mesh reflector of satellite antenna: form-finding and modal analysis. *J Comput Nonlinear Dynam*, 2016, 11: 041017
- 4 Li P, Liu C, Tian Q, et al. Dynamics of a deployable mesh reflector of satellite antenna: Parallel computation and deployment simulation 1. *J Comput Nonlinear Dynam*, 2016, 11: 061005
- 5 Hu H Y, Tian Q, Zhang W, et al. Nonlinear dynamics and control of large deployable space structures composed of trusses and meshes (in Chinese). *Adv Mech*, 2013, 43: 390–414 [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. *力学进展*, 2013, 43: 390–414]
- 6 Zhao M L, Wu K C, Guan F L. Dynamic analysis of deployable space truss structures (in Chinese). *J Zhejiang Univ*, 2005, 39: 1669–1674 [赵孟良, 吴开成, 关富玲. 空间可展桁架结构动力学分析. *浙江大学学报*, 2005, 39: 1669–1674]
- 7 Li T J, Zhang Y, Duan B Y. Deployment kinematic analysis and control of hoop truss deployable antenna (in Chinese). *J Xidian Univ*, 2007, 34:

- 916–921 [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. 西安电子科技大学学报, 2007, 34: 916–921]
- 8 Zhang Y, Duan B, Li T. A controlled deployment method for flexible deployable space antennas. *Acta Astronaut*, 2012, 81: 19–29
- 9 Tao C, Liu L K, Zhou Z C, et al. Research on non-synchronization during deployment of hoop truss deployable antenna (in Chinese). *Chin Space Sci Technol*, 2015, 35: 1–8 [陶成, 刘丽坤, 周志成, 等. 环形桁架式天线展开不同步现象分析. 中国空间科学技术, 2015, 35: 1–8]
- 10 Liu L, Shan J, Tao C, et al. Simulation of non-synchronous deployment of the large deployable hoop truss antenna. In: *Proceedings of 2nd AIAA Spacecraft Structures Conference*. Florida: AIAA, 2015. 2015-0947
- 11 Shabana A A. An absolute nodal coordinates formulation for the large rotation and deformation analysis of flexible bodies. Technical Report, University of Illinois at Chicago. 1996, No. MBS96-1-UIC
- 12 Tian Q, Zhang Y Q, Chen L P, et al. Advances in the absolute nodal coordinate method for the flexible multibody dynamics (in Chinese). *Adv Mech*, 2010, 40: 189–202 [田强, 张云清, 陈立平, 等. 柔性多体系统动力学绝对节点坐标方法研究进展. 力学进展, 2010, 40: 189–202]
- 13 Gerstmayr J, Sugiyama H, Mikkola A. Review on the absolute nodal coordinate formulation for large deformation analysis of multibody systems. *J Comput Nonlinear Dynam*, 2013, 8: 031016
- 14 Nachbagauer K. State of the art of ANCF elements regarding geometric description, interpolation strategies, definition of elastic forces, validation and the locking phenomenon in comparison with proposed beam finite elements. *Arch Computat Methods Eng*, 2014, 21: 293–319
- 15 Li T, Wang Y. Deployment dynamic analysis of deployable antennas considering thermal effect. *Aerospace Sci Tech*, 2009, 13: 210–215
- 16 Peng Y, Zhao Z H, Ma Y H, et al. Flexible multi-body dynamical simulation of astromesh truss deployment. In: *Proceedings of 3rd Joint International Conference on Multibody System Dynamics & The 7th Asian Conference on Multibody Dynamics*. Busan, 2014
- 17 Cheng L, Guan F L, Zhang H F. Deployment experiment of deployable truss antenna (in Chinese). *Chin J Space Sci*, 2010, 30: 79–84 [程亮, 关富玲, 张惠峰. 构架式可展开天线的展开试验研究. 空间科学学报, 2010, 30: 79–84]
- 18 Xu H R. Deployment Dynamics, Control and Experiment of Deployable Antennas (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Xi'an: Xidian University, 2014 [徐虎荣. 周边桁架式可展开天线展开过程动力学分析、控制与实验. 博士学位论文. 西安: 西安电子科技大学, 2014]
- 19 García De Jalón J, Bayo E. Kinematic and Dynamic Simulation of Multibody Systems the Real-Time Challenge. New York: Springer, 1994
- 20 Shabana A A. Computational Dynamics. Singapore: Wiley, 2010
- 21 Shabana A A, Bauchau O A, Hulbert G M. Integration of large deformation finite element and multibody system algorithms. *J Comput Nonlinear Dynam*, 2007, 2: 351–359
- 22 Tian Q, Chen L P, Zhang Y Q, et al. An efficient hybrid method for multibody dynamics simulation based on absolute nodal coordinate formulation. *J Comput Nonlinear Dynam*, 2009, 4: 021009
- 23 Kocak S, Akay H U. Parallel Schur complement method for large-scale systems on distributed memory computers. *Appl Math Modelling*, 2001, 25: 873–886
- 24 Liu C, Tian Q, Hu H. Dynamics and control of a spatial rigid-flexible multibody system with multiple cylindrical clearance joints. *Mech Machine Theor*, 2012, 52: 106–129

Deployment dynamics simulation and ground test of a large space hoop truss antenna reflector

LI Pei^{1*}, MA QinWei¹, SONG YanPing², LIU Cheng¹, TIAN Qiang¹,
MA ShaoPeng¹ & HU HaiYan¹

¹ School of Aerospace Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

² Xi'an Institute of China Academy of Space Technology, Xi'an 710000, China

In recent years, the space community has paid much attention to the development of the hoop truss antenna of satellite so as to improve the quality of telecommunication of high frequency. The antenna reflector is mainly composed of a mesh net and a deployable ring truss, which can be considered as a rigid-flexible multibody system. During the research process of the hoop truss antenna of satellite, an accurate and effective dynamics model has to be built. In order to describe the flexible components in this system accurately, the Absolute-Coordinate-Based (ACB) method combining the Absolute Nodal Coordinate Formulation (ANCF) and Natural Coordinate Formulation (NCF) is used to predict the deployment dynamics of the reflector antenna. Furthermore, the parallel computation methodology based on the multilevel decomposition method and the Schur Complement method is used to improve the computational efficiency. Using the parallel computation methodology, the dynamic simulation of a rigid-flexible multibody system is efficiently completed based on the Message Passing Interface. To analyze the asynchronous deployment phenomenon in the ground test, the decrease of the driving force is applied to the antenna reflector model. Finally, based on the above method, a computational program is developed via the Fortran language to analyze the deployment dynamics of the hoop truss mesh antennas. Using the program, the second phase of the deployment process of the hoop truss mesh antennas is simulated, and the computational results are verified by a deployment experiment on the 4 m aperture antenna reflector.

hoop truss antenna, Absolute-Coordinate-Based (ACB) method, parallel computation methodology, ground experiment, asynchronous deployment

PACS: 02.70.Dh, 46.70.De, 46.15.-x

doi: [10.1360/SSPMA2017-00100](https://doi.org/10.1360/SSPMA2017-00100)