

考虑摩擦的周边桁架式可展天线展开动力学分析^{*}

赵孟良 关富玲

(浙江大学土木系空间结构研究中心 杭州 310027)

摘要 结合一种周边桁架式可展天线的模型制作,介绍了该类天线的总体布局、展开收纳机理和设计要点;然后提出了切实有效的数学算法,有效地构造了约束方程及其 Jacobi 矩阵,实时地模拟了结构收纳过程的约束条件,采用广义逆矩阵的方法分析了周边可展桁架运动过程;研究了摩擦这一非线性因素在其展开过程中的作用机理,建立其展开动力学模型,实现了考虑摩擦的周边桁架式可展天线结构展开动力学分析。编制了仿真程序进行算例分析,验证了分析方法的有效性。

关键词 周边桁架; 可展天线; 结构设计; 摩擦; 展开动力学分析

中图法分类号 V 414

Deployment Dynamic Analysis of Circular Truss Deployable Antenna With Friction

ZHAO Mengliang GUAN Fuling

(Space Structures Research Center, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

Abstract Through a design of circular truss deployable antenna model, the primary layout and deployable mechanism and the primary technique requirements are introduced in detail. In order to provide reference for optimization design and predict the dynamic performance of the deployable structure in orbit accurately, deployment dynamic analysis of the structure with friction is essential. The movement property of deployable space truss structure is analyzed with the Moore-Penrose generalized inverse method. A practical mathematic algorithm is presented to formulate the constraint equations and the relevant Jacobian matrices, and to simulate the constraint conditions of the structural deployment effectively. By studying the non-linear action mechanism of the friction during deployment, the dynamic equations of Coulomb friction and viscous friction for the deployable structures are established. Based on the above work, deployment dynamic analysis of circular truss deployable antenna with friction is carried out. The deployment dynamic of a circular truss deployable structure is simulated with friction effects and without friction. The numerical simulations show that the analytical process is efficient for deployment dynamic analysis of circular truss deployable antenna with friction.

Key words Circular truss, Deployable antenna, Structure design, Friction, Dynamic simulation

* 国家自然科学基金项目资助 (69982009)

2005-05-17 收到原稿, 2006-02-10 收到修定稿

1 引言

由于受有效荷载舱的容积限制,许多大型航天器采用了可展机构^{[1],*}。其中,由可展桁架、前索网、后索网、竖向张力索、金属反射网、驱动装置等构成的周边桁架式展开天线已成为各国竞相研究的重点^{[2],[3]}。周边可展桁架在驱动装置的作用下展开到位后,前索网、后索网、竖向索在内部预拉力的作用下达到平衡位置,构成天线所需抛物面型面,金属反射网附着于前索网背部完成电波反射任务。这种天线具有收缩比大、重量轻等优点。

本文利用矩形框架和对角杆构造了一个可展开收缩的桁架单元,该单元可动机构数较少,展开可靠度高。利用该可伸缩桁架单元,设计制作了周边桁架式可展抛物面天线模型,介绍了其设计上的关键技术难点;采用广义逆矩阵的方法分析了周边可展桁架结构运动过程,对结构各类约束条件下约束方程的建立进行了系统的分析研究;在此基础上,建立了含摩擦可展桁架结构的展开动力学模型,分

析了摩擦、重力等因素对天线展开过程的影响,编制了动力学仿真程序,实时地模拟了天线的展开过程,求得机构展开运动过程各特征参数的数值解,为机构设计优化、驱动设置和动力设计提供依据。

2 周边桁架式可展天线结构设计简介

图1为两个桁架单元的展开示意图。天线的展开原理为连续的展开索依次穿过桁架单元的可伸缩对角杆(套筒机构),通过电机带动展开索收缩来使周边桁架展开。在结点B、D、F处各有一对同步齿轮,保证整个桁架在展开过程中的同步,也即在展开过程中,各个矩形单元始终保持形状相同。当桁架运动至完全展开状态时,可伸缩对角杆AE、CE中的细管分别顶住顶点A和C,阻止其进一步运动;同时,弦杆运动至与竖杆成垂直的位置,节点盖板之间的填充限位件与弦杆连接件紧密接触,阻止其转动。

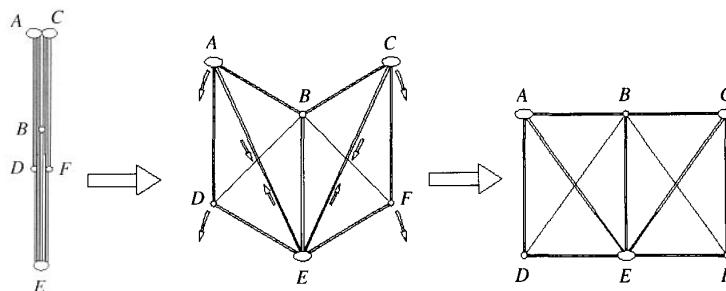


图1 两个桁架单元的展开示意图
Fig.1 Deployment of two truss unit

可动构件设计是周边桁架式可展天线设计的一个关键环节,它关系到天线是否能顺利展开,以及展开后是否具有设计要求的静、动力特性。本可展天线的可动构件设计主要包括5支杆节点(图1中的结点E)、3支杆节点(图1中的结点B)和可伸缩对角杆设计。

5支杆节点(见图2)是由节点盖板、套筒连接件、填充件、滑轮等组成的多铰节点。滑轮位于前后盖板之间的内腔,可绕销轴转动。驱动索从前一个桁架单元的对角杆穿出,通过滑轮,进入后一个桁架单元的对角杆。

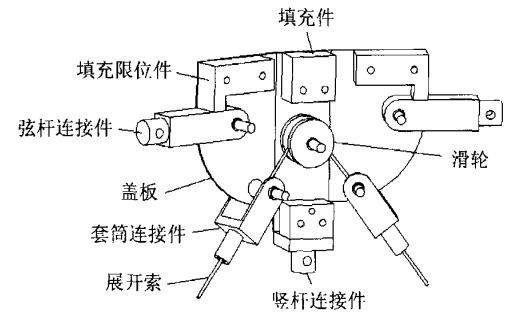


图2 5支杆节点构造图
Fig.2 Constitution of five-rods node

* Tibert G. Deployable tensegrity structures for space applications. Royal Institute of Technology Department of Mechanics, 2002, 10~17

3 支杆节点(见图 3)由节点盖板、弦杆连接件、竖杆连接件、填充件、同步齿轮等组成。其中, 弦杆连接件和与其相连的齿轮不能相对转动, 两个同步齿轮能保证两个弦杆转过的角度是相同的, 以达到天线结构在展开过程中的同步效果。收缩索依次穿过 3 支杆节点背面的滑轮。

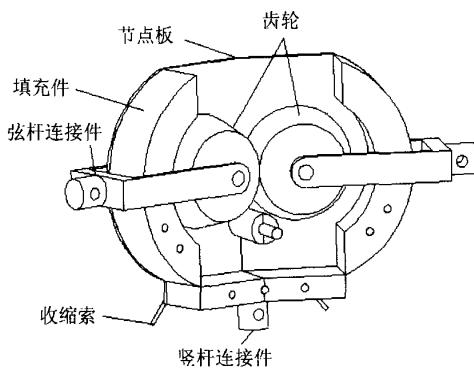


图 3 3 支杆节点构造图

Fig.3 Constitution of three-rods node

周边桁架的对角杆, 一方面为结构的受力构件, 另一方面为桁架展开到位后的卡位装置。将其设计为套筒机构, 由内、外套管(粗管和细管)组成, 桁架展开到位后, 细管顶住另一端节点处的粗管连接件, 阻止细管和粗管的相对运动。

按照以上原理, 我们制作了一个周边桁架式可展天线的实物模型如图 4 所示, 周边可展桁架为正十二边形, 抛物面索网形式为辐射状。天线的完全展开口径为 3 m, 收缩口径为 0.28 m, 收纳率优于 10:1.

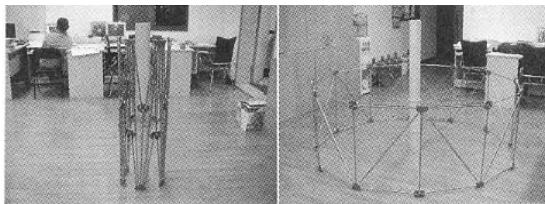


图 4 天线模型照片

Fig.4 Photo of the antenna model

3 可展天线结构的展开动力学分析

3.1 动力学方程的建立和求解

选取节点不独立的笛卡儿坐标为广义坐标, 由

第一类 Lagrange 方程^[4] 得到如下以不独立坐标表示的动力学方程,

$$\delta \mathbf{X}^T [\mathbf{M} \ddot{\mathbf{X}} - \mathbf{Q}(\mathbf{X}, \dot{\mathbf{X}})] = 0, \quad (1)$$

式中, \mathbf{X} 为定义体系位置的笛卡儿坐标矢量, $\dot{\mathbf{X}}$ 为节点的速度矢量, $\ddot{\mathbf{X}}$ 为节点的加速度, \mathbf{M} 为质量矩阵, \mathbf{Q} 为广义力。

展开机构展开过程中会受到一些运动约束, 故方程(1)中的位置、速度和加速度矢量必须满足相应的约束方程,

$$\Phi(\mathbf{X}, t) = \mathbf{0}, \quad (2)$$

$$\dot{\Phi}(\mathbf{X}, \dot{\mathbf{X}}, t) = \mathbf{A} \dot{\mathbf{X}} + \dot{\Phi}_t = \mathbf{0}, \quad (3)$$

$$\ddot{\Phi}(\mathbf{X}, \dot{\mathbf{X}}, \ddot{\mathbf{X}}, t) = \mathbf{A} \ddot{\mathbf{X}} + \dot{\mathbf{A}} \dot{\mathbf{X}} + \dot{\Phi}_t = \mathbf{0}. \quad (4)$$

式中, \mathbf{A} 为运动约束方程的 Jacobi 矩阵。

一般情况下, 运动约束方程与时间无关, 有 $\dot{\Phi}_t = \ddot{\Phi}_t = \mathbf{0}$, 方程(3)的解有如下形式^[5],

$$\dot{\mathbf{X}} = (\mathbf{I}_n - \mathbf{A}^+ \mathbf{A}) \dot{\mathbf{a}}, \quad (5)$$

式中, \mathbf{I}_n 为单位矩阵, \mathbf{A}^+ 为矩阵 \mathbf{A} 的 Moore-Penrose 广义逆矩阵, $\dot{\mathbf{a}}$ 为任意 p 维列矢量。

如果矩阵 \mathbf{A} 的特征值个数为 r , 则

$$p = \text{rank}(\mathbf{I}_n - \mathbf{A}^+ \mathbf{A}) = 3n - r, \quad (6)$$

式中, n 为可展桁架结构的节点数, p 为刚体运动自由度数。

用 p 个独立的列矢量表示矩阵 $\mathbf{I}_n - \mathbf{A}^+ \mathbf{A}$, 有

$$(\mathbf{I}_n - \mathbf{A}^+ \mathbf{A}) = [\mathbf{h}_1 \ \mathbf{h}_2 \ \cdots \ \mathbf{h}_p] = \mathbf{H}, \quad (7)$$

式中, $\mathbf{h}_1, \mathbf{h}_2, \dots, \mathbf{h}_p$ 代表 p 个独立的刚体运动模态。从而得到

$$\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{H} \dot{\mathbf{a}}. \quad (8)$$

由式(3)和(8)得

$$\dot{\mathbf{A}} \mathbf{H} + \mathbf{A} \dot{\mathbf{H}} = \mathbf{0}, \quad (9)$$

$$\dot{\mathbf{H}} = -\mathbf{A}^+ \mathbf{A} \dot{\mathbf{H}}, \quad (10)$$

再由方程(8)和(10)得出

$$\delta \mathbf{X} = \mathbf{H} \delta \mathbf{a}, \quad (11)$$

$$\ddot{\mathbf{X}} = \mathbf{H} \ddot{\mathbf{a}} + \dot{\mathbf{H}} \dot{\mathbf{a}} = \mathbf{H} \ddot{\mathbf{a}} - \mathbf{A}^+ \dot{\mathbf{A}} \mathbf{H} \dot{\mathbf{a}}. \quad (12)$$

将式(11)和(12)带入方程(1), 得到以独立坐标表示的动力学方程

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{\mathbf{X}} = \mathbf{H}\dot{\mathbf{a}}, \\ \mathbf{H}^T \mathbf{M} \mathbf{H} \ddot{\mathbf{a}} + \mathbf{H}^T (-\mathbf{M} \mathbf{A}^+ \dot{\mathbf{A}}) \mathbf{H} \dot{\mathbf{a}} - \\ \mathbf{H}^T \mathbf{Q}(\mathbf{X}, \dot{\mathbf{X}}) = \mathbf{0}. \end{array} \right. \quad (13)$$

又初值条件为

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{X}_{t=0} = \mathbf{X}_0, \\ \dot{\mathbf{X}}_{t=0} = \dot{\mathbf{X}}_0. \end{array} \right. \quad (14)$$

一般, 在初始时刻知道位形(位置矢量)和节点速度, 即可根据式(13)的第1式确定初始时刻的独立准速率 $\dot{\mathbf{a}}_{t=0}$ 。根据初值, 选择适当的数值积分方法, 逐步积分迭代, 即可求出结构运动过程的加速度、速度和位置矢量, 分析结构运动过程的能量变化和机构特性, 为结构设计和优化提供依据。

然而, 要对复杂的展开机构进行动力学分析, 仅仅对动力学方程进行建立和求解是不够的。复杂的展开机构在展开过程中会受到很多运动约束, 必须正确地建立这些运动约束方程, 并求解其 Jacobi 矩阵。

3.2 周边可展桁架结构约束方程及其 Jacobi 矩阵

对于本文提出的用于构造大型可展抛物面天线的周边可展桁架结构, 约束条件主要有: 边界约束、刚性杆长约束, 以及附加节点几何约束, 如同步齿轮副、套筒、节点板约束。此处以同步齿轮副和节点板约束进行说明。

3.2.1 节点处同步齿轮副约束

同步齿轮副约束主要是保证两相邻面对应杆件具有相同的转动角度。如图5所示, 有 $\theta_1 = \theta_2$, 又桁架各单元对应的杆件等长, 有 $l_{12} = l_{13}$ 。整理后, 得出约束方程

$$\begin{aligned} & (x_2 - x_3)(x_4 - x_1) + (y_2 - y_3)(y_4 - y_1) + \\ & (z_2 - z_3)(z_4 - z_1) = 0. \end{aligned} \quad (15)$$

对上式求一阶导数, 并整理为

$$\mathbf{B}_s \dot{\mathbf{X}}_s = \mathbf{0}. \quad (16)$$

式中,

$$\mathbf{B}_s = \begin{bmatrix} -x_{23} & -y_{23} & -z_{23} & x_{41} & y_{41} & z_{41} \\ -x_{41} & -y_{41} & -z_{41} & x_{23} & y_{23} & z_{23} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{X}_s = [x_1 \ y_1 \ z_1 \ x_2 \ y_2 \ z_2 \ x_3 \ y_3 \ z_3 \ x_4 \ y_4 \ z_4]^T,$$

$$y_{41} = y_4 - y_1.$$

其余表示以此类推。

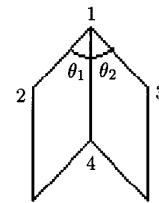


图 5 相邻面杆件示意图

Fig.5 Rods of adjacent faces

3.2.2 相邻单元面的节点板角度约束

由于桁架刚性节点板的约束, 如图6所示, 需要面1345与面1246在收纳过程中始终保持一定的角度。现已知只有各节点的坐标, 如由传统的方法, 先由3点求出面的方程, 再求面的夹角, 这种方法求出的最终约束方程只有一个等式, 但这个等式却包含12个参数, 且数学表达非常繁杂。本文采用一种平行投影的方法, 将一个十分繁杂的约束方程转换为数个只包含6个参数的相对简单的方程组如下,

$$\left\{ \begin{array}{l} x_1 - x_4 = 0, \\ x_2 - x_6 = 0, \\ x_3 - x_5 = 0, \\ y_1 - y_4 = 0, \\ y_2 - y_6 = 0, \\ y_3 - y_5 = 0, \\ \frac{(x_1 - x_2)(x_1 - x_3) + (y_1 - y_2)(y_1 - y_3)}{UV} \\ \cos \gamma = 0. \end{array} \right. \quad (17)$$

式中,

$$\begin{aligned} U &= \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}, \\ V &= \sqrt{(x_1 - x_3)^2 + (y_1 - y_3)^2}, \end{aligned}$$

γ 为两平面的初始夹角。对上式求一阶导数, 整理得

$$\mathbf{B}_d \dot{\mathbf{X}}_d = \mathbf{0}. \quad (18)$$

式中, \mathbf{B}_d 可由相应表达式得到, 为 7×18 矩阵,

$$\mathbf{X}_d = [x_1 \ y_1 \ z_1 \ x_2 \ y_2 \ z_2 \ x_3 \ y_3 \ z_3 \ x_4 \ y_4 \ z_4 \ x_5 \ y_5 \ z_5 \ x_6 \ y_6 \ z_6]^T.$$

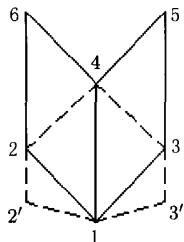


图 6 相邻面单元示意图

Fig.6 Adjacent face element

3.3 重力的影响

空间可展开天线在轨道上处于无重力状态,但是在地面的组装、测试和试验的状态为有重力环境,特别是对于结构、展开方式和运动轨迹等复杂的展开结构,专门研制其零重力环境设备花费较高,且不能完全消除重力,所以对可展结构进行展开动力学分析时考虑重力的影响具有重要的指导意义。

考虑重力的影响时,可以将杆件的重量以集中荷载的形式等效至结构的节点,将重力直接作为外加驱动荷载就可以分析重力对展开过程的影响,得出如下方程组,

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{X}} = \mathbf{H}\dot{\mathbf{a}}, \\ \mathbf{H}^T \mathbf{M} \mathbf{H} \ddot{\mathbf{a}} + \mathbf{H}^T (-\mathbf{M} \mathbf{A}^+ \dot{\mathbf{A}}) \mathbf{H} \dot{\mathbf{a}} - \\ \mathbf{H}^T \mathbf{Q}(\mathbf{X}, \dot{\mathbf{X}}) + \mathbf{H}^T \mathbf{G} = \mathbf{0}. \end{cases} \quad (19)$$

式中, \mathbf{G} 为重力荷载的等效矢量, 为 $3n \times 1$ 矢量。

4 展开过程中的摩擦分析

结合周边可展桁架结构的实际运动特性,从粘性摩擦和库仑摩擦两方面分析摩擦的作用机理^[6],建立其动力学模型。

4.1 考虑粘性摩擦力

粘性摩擦的特点是摩擦力大小正比于相对滑动速度大小,而方向与相对速度的方向相反。根据 Raileigh 耗散函数,粘性摩擦力引起的能量损耗为

$$\mathbf{R} = \frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^n C_{ij} \dot{\mathbf{X}}_i \dot{\mathbf{X}}_j, \quad (20)$$

则粘性摩擦力为

$$\mathbf{f} = -\frac{\partial \mathbf{R}}{\partial \dot{\mathbf{X}}} = -\mathbf{C} \dot{\mathbf{X}}, \quad (21)$$

式中, \mathbf{f} 为可展桁架节点上与速度有关的粘性摩擦

力, \mathbf{C} 为系统的粘性阻尼矩阵,可由周边可展桁架相对运动构件间的实际作用求出。

由于阻尼力是通过节点坐标代入动力学方程的,需将可展桁架结构中杆件上的阻尼转化为节点阻尼,从而需引入杆件的形函数。由有限单元法中以节点位移表示的杆件位移函数,

$$\mathbf{U}^{(e)}(x, y, z) = \mathbf{N} \begin{Bmatrix} \mathbf{X}_i \\ \mathbf{X}_j \end{Bmatrix}, \quad (22)$$

式中, \mathbf{X}_i 和 \mathbf{X}_j 为杆件两端点的位移, $\mathbf{U}^{(e)}(x, y, z)$ 为杆件内任一点的位移, \mathbf{N} 为形函数矩阵,有

$$\mathbf{N} = [(1 - \beta) \mathbf{I} \quad \beta \mathbf{I}], \quad (23)$$

式中, 系数 $\beta = \frac{x}{l_e}$, \mathbf{I} 为 3×3 单位矩阵, l_e 为第 e 根杆件的杆长。式(22)求导得速度函数

$$\dot{\mathbf{U}}^{(e)}(x, y, z) = \mathbf{N} \begin{Bmatrix} \dot{\mathbf{X}}_i \\ \dot{\mathbf{X}}_j \end{Bmatrix}, \quad (24)$$

则单根杆件引起的能量损耗为

$$\begin{aligned} R &= \frac{1}{2} \iiint_{V(e)} \xi_e \dot{\mathbf{U}}^{(e)T} \dot{\mathbf{U}}^{(e)} dV \\ &= \frac{1}{2} \dot{\mathbf{X}}^{(e)T} \iiint_{V(e)} \xi_e \mathbf{N}^T \mathbf{N} dV \dot{\mathbf{X}}^{(e)} \\ &= \frac{1}{2} \dot{\mathbf{X}}^{(e)T} \mathbf{C}^{(e)} \dot{\mathbf{X}}^{(e)}. \end{aligned} \quad (25)$$

式中, ξ_e 为阻尼系数, $\mathbf{C}^{(e)}$ 为第 e 根杆件运动引起的阻尼矩阵,

$$\begin{aligned} \mathbf{C}^{(e)} &= \iiint_{V(e)} \xi_e \mathbf{N}^T \mathbf{N} dV \\ &= \frac{A_e l_e \xi_e}{6} \begin{bmatrix} 2\mathbf{I} & \mathbf{I} \\ \mathbf{I} & 2\mathbf{I} \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (26)$$

式中, A_e 为第 e 根杆件的截面面积。对周边可展桁架中所有引起粘性摩擦的杆件组集即得可展桁架的等效阻尼矩阵 \mathbf{C} 。

将式(21)代入式(13)得到考虑粘性摩擦的可展桁架展开分析的动力学方程组为

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{X}} = \mathbf{H}\dot{\mathbf{a}}, \\ \mathbf{H}^T \mathbf{M} \mathbf{H} \ddot{\mathbf{a}} + \mathbf{H}^T (\mathbf{C} - \mathbf{M} \mathbf{A}^+ \dot{\mathbf{A}}) \mathbf{H} \dot{\mathbf{a}} - \\ \mathbf{H}^T \mathbf{Q}(\mathbf{X}, \dot{\mathbf{X}}) = \mathbf{0}. \end{cases} \quad (27)$$

4.2 考虑库仑摩擦力

库仑摩擦力的特点是摩擦力与作用在摩擦面上的正压力成正比。对周边桁架式可展天线分析

库仑摩擦时, 主要考虑传递电机驱动力的驱动索与可展桁架节点处的滑轮产生摩擦力, 从而使驱动力逐步减小。设电机输出力为 T_1 , 由于节点处滑轮的摩擦力, 传经桁架各节点后依次变为 $T_2, \dots, T_{k-1}, T_k, \dots, T_{n-1}, T_n$, 则应有 $T_1 > T_2 > \dots > T_{k-1} > T_k > \dots > T_{n-1} > T_n$ 。

现推导它们的关系, 不考虑索的伸长变形, 认为通过驱动索张力传递电机驱动力, 如图 7(a) 所示。如图 7(b), 考虑索与滑轮接触部分的一小微段长 ds , 索的单位长度密度为 ρ , 令 $T(\theta)$ 为索在 θ 时之张力, 将索与滑轮在该点处的接触力用 N_θ 和 f_θ 表示, 由平衡条件可得

$$\begin{cases} T(\theta + d\theta) \cos d\theta - T(\theta) - f_\theta = \rho ds \ddot{l}, \\ T(\theta + d\theta) \sin d\theta = N_\theta + \rho ds \frac{\dot{l}^2}{r}. \end{cases} \quad (28)$$

式中 \ddot{l} 和 \dot{l} 为索的加速度和速度, 可由节点的笛卡儿坐标表示; r 为滑轮的半径。 α 为索与竖杆在两索面投影线间的夹角, 随可展桁架的展开而变化, 可由节点的笛卡儿坐标表示。根据库仑摩擦定律,

$$f_\theta = \mu N_\theta, \quad (29)$$

式中, μ 为索与滑轮之间的动摩擦系数。将式 (28) 和 (29) 结合, 可以得到

$$\begin{aligned} T(\theta + d\theta) \cos d\theta - T(\theta) \\ - \mu \left[T(\theta + d\theta) \sin \theta - \rho ds \frac{\dot{l}^2}{r} \right] = \rho ds \ddot{l}, \end{aligned} \quad (30)$$

取极限使 $d\theta \rightarrow 0$, 有

$$\begin{aligned} \lim_{d\theta \rightarrow 0} \cos(d\theta) = 1, \quad \lim_{d\theta \rightarrow 0} \left(\frac{\sin d\theta}{d\theta} \right) = 1, \\ ds = rd\theta. \end{aligned} \quad (31)$$

将式 (30) 除以 $d\theta$, 并取极限使 $d\theta \rightarrow 0$, 根据式 (31) 得

$$\frac{dT}{d\theta} = \mu T + (\rho r \ddot{l} - \mu \rho \dot{l}^2), \quad (32)$$

用微积分可以求出 T_k 和 T_{k-1} 的关系。令 θ_k 和 θ_{k-1} 为相应接触区域对应的角度, 则

$$\int_{T_k}^{T_{k-1}} \frac{dT}{\mu T + (\rho r \ddot{l} - \mu \rho \dot{l})} = \int_{\theta_k}^{\theta_{k-1}} d\theta, \quad (33)$$

积分得

$$\frac{\mu T_{k-1} + (\rho r \ddot{l} - \mu \rho \dot{l}^2)}{\mu T_k + (\rho r \ddot{l} - \mu \rho \dot{l}^2)} = e^{\mu(\theta_{k-1} - \theta_k)}, \quad (34)$$

又有 $\theta_{k-1} - \theta_k = \pi - 2\alpha$, 最后得出索张力的关系为

$$\frac{\mu T_{k-1} + (\rho r \ddot{l} - \mu \rho \dot{l}^2)}{\mu T_k + (\rho r \ddot{l} - \mu \rho \dot{l}^2)} = e^{\mu(\pi - 2\alpha)}. \quad (35)$$

根据式 (35) 即可求得摩擦力, 然后再将考虑库仑摩擦的摩擦力列阵 Q^2 代入式 (27), 即得到如下考虑摩擦的动力学方程组

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{X}} = \mathbf{H}\dot{\mathbf{a}}, \\ \mathbf{H}^T \mathbf{M} \mathbf{H} \ddot{\mathbf{a}} + \mathbf{H}^T (\mathbf{C} - \mathbf{M} \mathbf{A}^+ \dot{\mathbf{A}}) \mathbf{H} \dot{\mathbf{a}} - \\ \mathbf{H}^T \mathbf{Q}(\mathbf{X}, \dot{\mathbf{X}}) + \mathbf{H}^T \mathbf{Q}^2 = 0. \end{cases} \quad (36)$$

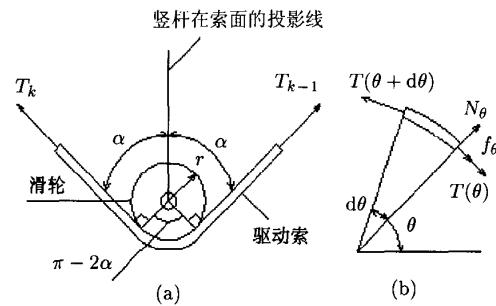


图 7 驱动索、滑轮示意图

Fig.7 Driving cable and pulley

5 仿真算例

为了验证算法, 我们编制了可展结构的动力学分析程序, 仿真如下应用背景: 图 8(e) 为周边桁架式可展开天线桁架的完全展开状态, 图中隐去了天线的上弦拉索、下弦拉索、中央圆筒等。十二边形的外接圆半径 $R = 2050$ mm, 桁架高 $h = 1400$ mm, 每边弦长 $l = 1061.2$ mm, 对角线为展开索和收缩索。杆件在节点处通过节点板铰接, 在有收缩索经过的节点上, 有同步齿轮约束保证相邻单元的转动角相同。节点的集中质量均为 5 kg, 杆件线质量为 0.1 kg/m, 电机给驱动索的初始驱动力为 5 N。从粘性摩擦和库仑摩擦两方面考虑摩擦力, 取粘性摩擦系数 $\xi = 0.1$, 库仑摩擦系数 $\mu = 0.15$ 。坐标系为: 原点在节点 1, x 轴为 1~7, z 轴为 1~13, y 轴符合右手规则。

桁架一竖杆 1~13 两端固定, 初始时桁架静止, $t = 0$ 时开始施加驱动力, 当各相邻节点距离大于 2049.50 mm 时机构锁定 (理论值为 2050 mm)。用本文的方法编制的程序计算得到在 $t = 26.811$ s 时机构到达锁定状态。图 8 为机构在展开过程中的位置图。

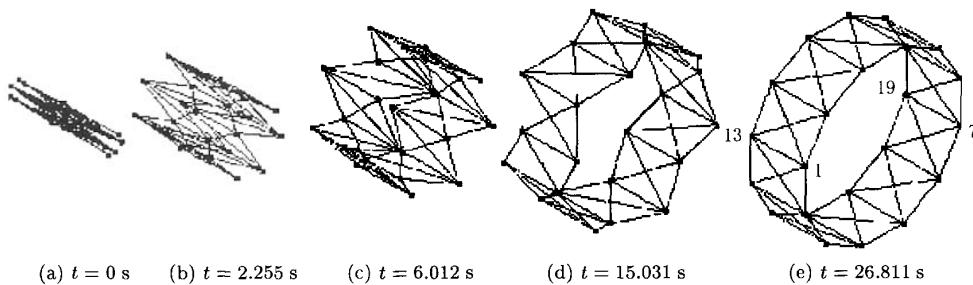


图 8 十二边可展桁架展开过程分析结果

Fig.8 Deploying stages of twelve-side truss structure

由图 8 可见, 由于有效地构造了各类约束方程, 天线桁架在一边固定的非轴对称条件下, 也能很好地展开。根据仿真分析结果, 在天线的展开动力学分析中考虑摩擦的影响时, 拉索的拉力在不同位置、不同角度、各个节点上都不相同, 但由于这种周边桁架式可展天线节点处有同步齿轮副约束保证两相邻面杆件具有相同的转动角度, 因此天线展开过程中基本保持同步, 由表 1 可见, 摩擦的主要影响是减缓了天线的展开速度。而对于此类天线, 在一边固定的情况下, 重力对天线的展开提供了有利的影响, 能够加快天线的展开过程。

表 1 摩擦对结构展开的影响

Table 1 Effects of friction on deployment of the structure

考虑摩擦的情况	展开所需时间 /s	节点 7 的最大展开速度 /($m \cdot s^{-1}$)	节点 7 的最大展开加速度 /($m \cdot s^{-2}$)
不考虑摩擦	15.250	0.660	2.362
考虑摩擦	26.811	0.445	1.875

6 结语

(1) 本文结合周边桁架式可展天线的模型制作, 简要介绍了该类天线的结构设计要点; 系统地构造了环状可展桁架结构几何约束方程及其 Jacobi 矩阵, 实时地模拟了结构收纳过程的约束条件, 采用广义逆矩阵的方法分析了空间可展桁架运动过程。

(2) 研究了周边桁架式可展天线展开过程中摩擦的作用机理, 建立了含摩擦可展桁架结构的展开动力学模型, 并对含摩擦的周边桁架式可展天线进行了仿真分析。仿真结果表明: 摩擦力能够减缓天线的展开速度, 是天线展开过程中的一个主要阻力; 而重力则加快了天线的展开速度, 所以在天线的地面上展开试验时, 需要研制专门的重力消除装置以便准确地预测天线的展开驱动力。

参考文献

- [1] Chen Xiangyang, Guan Fuling. A large deployable hexapod paraboloid antenna. *Chin. J. Space Sci.*, 2001, 21(1):68~72. in Chinese (陈向阳, 关富玲. 六棱柱单元可展天线结构设计. 空间科学学报, 2001, 21(1):68~72)
- [2] Thomson M W. The astromesh deployable reflector. *IEEE Antennas and Propagation Society*, 1999, 3:1516~1519
- [3] Luo Ying, Duan Baoyan. Layout optimization of large flexible deployed antenna. *Chin. J. Space Sci.*, 2004, 24(2):132~137. in Chinese (罗鹰, 段宝岩. 周边桁架式展开天线的几何布局优化. 空间科学学报, 2004, 24(2):132~137)
- [4] Hong Shantao. Advanced Dynamics. Shanghai: Tongji University Press, 1996. 16~26. in Chinese (洪善桃. 高等动力学. 上海: 同济大学出版社, 1996. 16~26)
- [5] Wu Minger, Guan Fuling. Analytical shape finding for deployable structures. *J. Hangzhou Inst. Elec. Eng.*, 1993, 13(2):13~21. in Chinese (吴明儿, 关富玲. 可展结构的展开分析. 杭州电子工业学院学报, 1993, 13(2):13~21)
- [6] Wen Shizhu. Tribology Principle. Beijing: Tsinghua University Press, 1990. 372~396. in Chinese (温诗铸. 摩擦学原理. 北京: 清华大学出版社, 1990. 372~396)

如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深，让许多工程师望而却步，然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上，我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识，借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训(www.edatop.com)专注于微波射频和天线设计人才的培养，推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程，化繁为简，直观易学，可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛，让天线设计不再难…



HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书，课程从基础讲起，内容由浅入深，理论介绍和实际操作讲解相结合，全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程，可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计，让天线设计不再难…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程，由经验丰富的专家授课，旨在帮助您从零开始，全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程，边操作边讲解，直观易学；购买套装同时赠送 3 个月在线答疑，帮您解答学习中遇到的问题，让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程，培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合，全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作，同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习，可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试…

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



关于易迪拓培训:

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立,一直致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养;后于 2006 年整合合并微波 EDA 网(www.mweda.com),现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地,成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 **ADS**、**HFSS** 等专业软件使用培训课程,广受客户好评;并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书,帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司,以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年, 10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养, 更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果, 又能免除您舟车劳顿的辛苦, 学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲, 结合实际工程案例, 直观、实用、易学

联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>