

含弱阻尼空间结构的耦合动力学保结构分析*

宋明哲¹ 邓子辰^{1†} 赵云平² 余大宏¹ 胡伟鹏³

(1.西北工业大学 力学与土木建筑学院,西安 710072) (2.西北工业大学 理学院,西安 710072)

(3.西安理工大学 土木建筑工程学院,西安 710048)

摘要 大型空间结构的平面运动、姿态变化和结构振动影响着其在轨运行的工作精度、效率和寿命.针对太阳帆塔空间太阳能电站,根据其设计方案的结构特征,简化得到轨道平面内的梁-弹簧-梁模型.考虑系统中存在的弱阻尼作用,建立了耦合系统的动力学控制方程,采用辛 Runge-Kutta 和广义多辛结合的复合保结构方法,对系统的耦合动力学行为和阻尼作用进行了分析.研究发现,弱阻尼作用对空间结构轨道变化存在微小影响,其值与轨道半径的比值在 10^{-8} 量级.姿态角的变化会导致系统非刚性构件的形变变化.研究工作拓展了保结构方法在复杂空间结构动力学问题中的应用,为复杂系统结构的设计和主动控制提供了理论参考.

关键词 太阳帆塔, 保结构方法, 弱阻尼, 耦合动力学行为

DOI: 10.6052/1672-6553-2019-059

引言

在世界人口数量持续增长和人类传统化石能源有限储量急剧减少的背景下,利用创新科技探索和开发可持续再生资源的需求日趋迫切.亘古至今,太阳热辐射对地球生命的繁衍和发展起到了关键性作用,太阳能作为清洁能源将逐渐在世界能源结构中占据重要位置,未来其利用程度的高低可能会决定人类发展的速度和潜能.受大气层反射、海拔、晴雨变化和昼夜、季节更替的限制,太阳光照射到地表的能量密度远低于近地空间的能量密度,因此地面太阳能电站往往需要在开阔的高海拔地区占用成片的土地资源,不仅增大了投入和维护的成本,同时也对生态环境构成了威胁.

美国人 Glaser 在 1968 年首次提出建立空间太阳能电站的构想^[1],这是人类在近地空间实现太阳能最大限度利用的可行途径.经过长期发展,各类空间电站的设计方案相继被提出,具有代表性的有 Abacus 模型^[2]、绳系空间太阳能电站^[3]、太阳帆塔^[4]、多旋转关节空间太阳能电站^[5]、SSPS-OMEGA^[6]等.其中,太阳帆塔可依靠重力梯度作用,实现在轨运行,且结构规则,所载电池板的光照射率

估测可达 88%,相较于其他方案,具有功率质量高、面质比大的特点^[7],具有较高的可行性和应用价值.在空间结构的力学问题中,结构物理特性(尺寸,柔性等)、外部环境摄动(重力梯度,太阳光压等)以及姿态和轨道运动的耦合均会影响系统的动力学特性,为了保障空间结构的任务实现、工作效率和寿命,这些影响因素的研究受到了人们的广泛关注^[8-10].另一方面,系统结构的振动与姿-轨运动间同样存在耦合作用,其影响的累积效应与结构的共振和疲劳也是十分具有挑战性的研究课题.然而,这类动力学问题也为保结构方法^[11]提供了应用和发展舞台.其中,辛方法在系统辛结构、局部能量、动量的保持上表现优异且在长时间的数值模拟中能够很好地保持其算法的稳定性^[12,13].基于辛理论体系发展出的多辛^[14]和广义多辛方法^[15]继承了辛算法优点,并将研究范围推广到无限维 Hamiltonian 动力学系统.

本文结合太阳能电站空间尺寸、面质比超大和柔性等特点,针对太阳帆塔简化模型,运用辛 RK 和广义多辛方法构造复合保结构方法对其轨道运动、姿态变化和结构振动的耦合动力学行为及阻尼作用进行研究,为多辛理论的应用和复杂系统的结

2019-09-02 收到第 1 稿,2019-09-12 收到修改稿.

* 国家自然科学基金资助项目(11872303,11672241,11972284),西北工业大学博士论文创新基金资助项目(CX201810)

† 通讯作者 E-mail:dweifan@nwpu.edu.cn

构设计、力学性能预测及主动控制寻找突破。

1 动力学建模

太阳帆塔的组成构件分为微波发射天线、太阳能电池板和中央缆绳^[7]。依据其构件的力学性质,将太阳帆塔电池阵模块中的电池板和中央缆绳简化为具有弯曲刚度 EI 和弹性刚度 k 的梁-弹簧-梁模型,如图 1 所示。

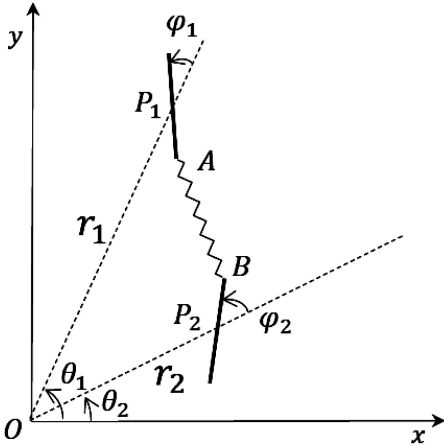


图 1 太阳帆塔(SSPS)简化模型

Fig.1 Simplified model of sail tower SSPS

根据轨道平面模型中空间结构绕地运动、姿态变化和横向振动的动力学分析,分别选取两梁的轨道半径 r_1, r_2 , 轨道转角 θ_1, θ_2 和姿态角 φ_1, φ_2 为系统的广义坐标,定义原点固定于梁中点 P_1, P_2 的两子坐标系,其横坐标 $x_i, i=1, 2$ 平行于梁轴向,取梁无连接端为正向,逆时针旋转 $\frac{\pi}{2}$ 得到子坐标系纵坐标正方向,梁随时间演化的横向振动位形为 $u_1(x_1, t)$ 和 $u_2(x_2, t)$, 综上可以得系统的动能为:

$$T = \frac{\rho L}{2} (\dot{r}_1^2 + r_1^2 \dot{\theta}_1^2 + \dot{r}_2^2 + r_2^2 \dot{\theta}_2^2) + \frac{1}{2} \left[\frac{\rho L^3}{12} (\dot{\theta}_1 + \dot{\varphi}_1)^2 + (\dot{\theta}_2 + \dot{\varphi}_2)^2 \right] + \frac{\rho}{2} \int_{-L/2}^{L/2} [(\dot{u}_1)^2 + (u_1)^2 (\dot{\theta}_1 + \dot{\varphi}_1)^2] dx_1 + \frac{\rho}{2} \int_{-L/2}^{L/2} [(\dot{u}_2)^2 + (u_2)^2 (\dot{\theta}_2 + \dot{\varphi}_2)^2] dx_2 \quad (1)$$

同时,由模型结构的几何关系可知,梁-弹簧连接点 A、B 的坐标可分别表示为:

$$\begin{cases} x_A = r_1 \cos \theta_1 - \frac{L}{2} \cos(\theta_1 + \varphi_1) \\ y_A = r_1 \sin \theta_1 - \frac{L}{2} \sin(\theta_1 + \varphi_1) \end{cases}$$

$$\begin{cases} x_B = r_2 \cos \theta_2 - \frac{L}{2} \cos(\theta_2 + \varphi_2) \\ y_B = r_2 \sin \theta_2 - \frac{L}{2} \sin(\theta_2 + \varphi_2) \end{cases} \quad (2)$$

则系统运动过程中弹簧的形变量可表示为 $\Delta l = [(x_A - x_B)^2 + (y_A - y_B)^2]^{\frac{1}{2}} - l_0$, 其中, l_0 为弹簧无拉压状态下的初始长度。考虑万有引力作用、弹簧和梁的变形,得到系统势能表达式为:

$$U = -\mu \rho L \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) + \frac{k}{2} \Delta l^2 + \frac{\mu \rho L^3}{24} \left[\frac{1 - 3 \cos^2 \varphi_1}{r_1^3} + \frac{1 - 3 \cos^2 \varphi_2}{r_2^3} \right] + \frac{EI}{2} \left(\int_{-L/2}^{L/2} \left(\frac{\partial^2 u_1}{\partial x_1^2} \right)^2 dx_1 + \int_{-L/2}^{L/2} \left(\frac{\partial^2 u_2}{\partial x_2^2} \right)^2 dx_2 \right) \quad (3)$$

继而,系统的 Lagrange 函数 $L = T - U$ 可通过整理得到。在此基础上,根据 Hamiltonian 原理 $\delta S = \int_{t_0}^{t_1} \delta L dt = 0$, 提取各独立变分项系数,引入梁的结构阻尼,得到系统的控制方程组,如下:

$$\begin{aligned} \rho L \ddot{x}_i &= \rho L r_i \ddot{\theta}_i - \frac{\mu \rho L}{r_i^2} + \frac{\mu \rho L^3 (1 - 3 \cos^2 \varphi_i)}{8 r_i^4} + \\ &(-1)^i k \Delta l (\lambda_1^2 + \lambda_2^2)^{-\frac{1}{2}} (\lambda_1 \cos \theta_i + \lambda_2 \sin \theta_i), \\ \rho L r_i^2 \ddot{\theta}_i + 2 \rho L r_i \dot{r}_i \dot{\theta}_i + \frac{\rho L^3}{12} (\ddot{\theta}_i + \ddot{\varphi}_i) + \\ \rho \int_{-L/2}^{L/2} [u_i^2 (\ddot{\theta}_i + \ddot{\varphi}_i) + 2 u_i \dot{u}_i (\dot{\theta}_i + \dot{\varphi}_i)] dx_i + \\ &(-1)^i k \Delta l (\lambda_1^2 + \lambda_2^2)^{-\frac{1}{2}} \left\{ \lambda_1 \left[-\frac{L}{2} \sin(\theta_i + \varphi_i) + \right. \right. \\ &\left. \left. r_i \sin \theta_i \right] - \lambda_2 \left[r_i \cos \theta_i - \frac{L}{2} \cos(\theta_i + \varphi_i) \right] \right\} = 0, \\ \rho \int_{-L/2}^{L/2} [u_i^2 (\ddot{\theta}_i + \ddot{\varphi}_i) + 2 u_i \dot{u}_i (\dot{\theta}_i + \dot{\varphi}_i)] dx_i = \\ &-\frac{\rho L^3}{12} (\ddot{\theta}_i + \ddot{\varphi}_i) - \frac{\mu \rho L^3 \cos \varphi_i \sin \varphi_i}{4 r_i^3} + \\ &(-1)^i \frac{k L \Delta l}{2} (\lambda_1^2 + \lambda_2^2)^{-\frac{1}{2}} [\lambda_1 \sin(\theta_i + \varphi_i) - \\ &\lambda_2 \cos(\theta_i + \varphi_i)], \\ \rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} + EI \frac{\partial^4 u_i}{\partial x_i^4} + c \frac{\partial u_i}{\partial t} &= \rho u_i (\dot{\theta}_i + \dot{\varphi}_i)^2, \\ i &= 1, 2. \end{aligned} \quad (4)$$

2 广义多辛方法

基于辛和多辛理论,适用于含弱阻尼无限维

Hamiltonian 系统的广义多辛方法被提出,且在非线性波^[16]、微纳米振荡器^[17]、空间柔性梁^[18]等系统中得到了验证和应用,进一步完善了多辛算法理论体系.在本文简化模型中,梁结构的横向振动同样可以用广义多辛方法进行模拟分析.用一般情形作简要介绍,系统中两梁振动方程均为如下形式:

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + EI \frac{\partial^4 u}{\partial x^4} + c \frac{\partial u}{\partial t} = \rho u (\dot{\theta} + \dot{\varphi})^2 \quad (5)$$

首先,引入状态变量 $\mathbf{z} = (u, v, w, p, q)^\top$, $v = \frac{\partial u}{\partial t}$,

$w = \frac{\partial u}{\partial x}$, $p = \frac{\partial w}{\partial x}$, $q = \frac{\partial p}{\partial x}$, 得到近似对称形式:

$$\mathbf{M} \frac{\partial \mathbf{z}}{\partial t} + \mathbf{K} \frac{\partial \mathbf{z}}{\partial x} = \nabla_z S(\mathbf{z}) \quad (6)$$

其中,

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} -c & -\rho & 0 & 0 & 0 \\ \rho & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & -EI \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & EI & 0 \\ 0 & 0 & -EI & 0 & 0 \\ EI & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$S(\mathbf{z}) = \frac{\rho}{2} \left[v^2 - \frac{EI}{\rho} p^2 - u^2 (\dot{\theta} + \dot{\varphi})^2 \right] + EI w q.$$

在阻尼系数 c 足够小,使得系统多辛残差小于等于算法局部截断误差的条件下,系统满足广义多辛守恒律,其有效性得到了广泛验证^[15-18].在此基础上,运用 Preissmann 方法,对近似对称形式(6)式进行离散有:

$$\left\{ \begin{array}{l} -\rho \frac{v_{i+1/2}^{j+1} - v_{i+1/2}^j}{\Delta t} - c \frac{u_{i+1/2}^{j+1} - u_{i+1/2}^j}{\Delta t} \\ = EI \frac{q_{i+1}^{j+1/2} - q_i^{j+1/2}}{\Delta x} - \rho u_{i+1/2}^{j+1/2} (\dot{\theta}_{i+1/2}^{j+1/2} + \dot{\varphi}_{i+1/2}^{j+1/2})^2, \\ \rho \frac{u_{i+1/2}^{j+1} - u_{i+1/2}^j}{\Delta t} = \rho v_{i+1/2}^{j+1/2}, \\ EI \frac{p_{i+1}^{j+1/2} - p_i^{j+1/2}}{\Delta x} = EI q_{i+1/2}^{j+1/2}, \\ -EI \frac{w_{i+1}^{j+1/2} - w_i^{j+1/2}}{\Delta x} = -EI p_{i+1/2}^{j+1/2}, \\ EI \frac{u_{i+1}^{j+1/2} - u_i^{j+1/2}}{\Delta x} = EI w_{i+1/2}^{j+1/2}. \end{array} \right. \quad (7)$$

为了提高计算效率,避免非所求变量对计算时间和内存空间的占用,可由式(7)的离散关系,消去中间变量,得到系统关于 u 的广义多辛格式:

$$EI \cdot D_x^4 A_x^2 u_i^j + \rho \cdot A_x^4 D_t^2 u_i^j \\ = -c \cdot A_x^4 D_x A_t u_i^j + 16\rho (\hat{\varphi}^j + \hat{\theta}^j)^2 \cdot A_x^4 A_t^2 u_i^j \quad (8)$$

其中,

$$\hat{\theta}^j = \frac{\theta^{j+1} + \theta^j}{2}, \hat{\varphi}^j = \frac{\varphi^{j+1} + \varphi^j}{2},$$

$$A_x u_i^j = \frac{u_{i+1}^j + u_i^j}{2}, A_t u_i^j = \frac{u_i^{j+1} + u_i^j}{2},$$

$$D_x u_i^j = \frac{u_{i+1}^j - u_i^j}{\Delta x}, D_t u_i^j = \frac{u_i^{j+1} - u_i^j}{\Delta t}.$$

3 数值实验

对于建立的控制方程组(4)式,姿-轨运动(由方程组中前三式描述)和结构振动部分(由方程组中第四式描述)分别采用二级四阶辛 RK^[12]方法和所构造广义多辛方法进行同步模拟.选取基本参数梁长 $L = 400\text{m}$, 线密度 $\rho = 10 \text{ kg/m}$, 弹性模量 $E = 6.9 \times 10^8 \text{ MPa}$, 截面惯性矩 $I = 1 \times 10^{-4} \text{ m}^4$, 结构阻尼系数 $c = 0.01$, 弹簧初始长度 $l_0 = 100 \text{ m}$, 中心轨道高度 $r_0 = 6.7 \times 10^6 \text{ m}$. 对选取的 12 个独立的广义坐标 $\mathbf{q} = [r_1, r_2, \theta_1, \theta_2, \varphi_1, \varphi_2, \dot{r}_1, \dot{r}_2, \dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2, \dot{\varphi}_1, \dot{\varphi}_2]$, 取参照初值 $\mathbf{q}_0 = [r_1, r_2, 0, 0, \pi, 0, 0, 0, \sqrt{\frac{\mu}{r_1^3}}, \sqrt{\frac{\mu}{r_2^3}}, 0, 0]$, 其

中, $r_1 = r_0 - \frac{l_0 + L}{2}$, $r_2 = r_0 + \frac{l_0 + L}{2}$, 即初始时刻弹簧未发生形变且与梁平行于轨道半径方向, $\mu = 3.986005 \times 10^{14}$ 为地球引力常数. 首先, 考虑轨道半径初始加速度以及系统结构阻尼的影响, 将参照 \mathbf{q}_0 作为情形 1; 在 \mathbf{q}_0 的基础上增大阻尼系数到 $c = 0.1$ 为情形 2; 在 \mathbf{q}_0 基础上给以微小轨道半径加速度 $R_1 = \dot{r}_1 = 0.5$ 为情形 3. 模拟的时空步长分别取 $\Delta x = 10$, $\Delta t = 1$. 得到系统轨道半径演化过程的对比, 见图 2.

由于太阳帆塔主要依靠重力梯度作用实现在轨稳定, 因此参照初值 \mathbf{q}_0 的情形 1 下, 系统是相对稳定的状态. 由情形 1, 2 模拟结果几乎重合可知, 在弱阻尼条件下, 阻尼的变化对模型轨道半径存在较为微小的影响, 通过计算, 改变量与轨道半径的比值 $\frac{\Delta r}{r_0}$ 在 10^{-8} 量级. 情形 3 的结果表明, 梁在初始受

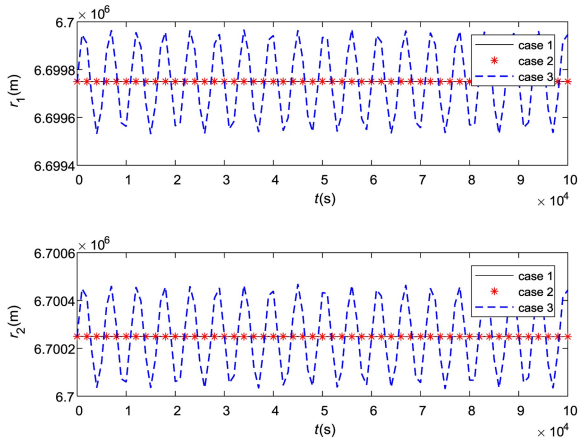


图2 梁中点轨道半径演化图

Fig.2 Evolution of orbit radius at midpoint of beams

到微小扰动后,其轨道会出现周期性振荡,且具有传递性,这也是系统结构间耦合的结果.又考虑初始姿态角对系统的影响,仍以 q_0 为情形 1,在其基础上情形 4 为:使梁 2 的初始姿态角与轨道半径方向偏离 $\varphi_2 = \frac{\pi}{16}$ 并忽略其对梁 2 初始轨道半径和真近点角的影响.模拟得到:

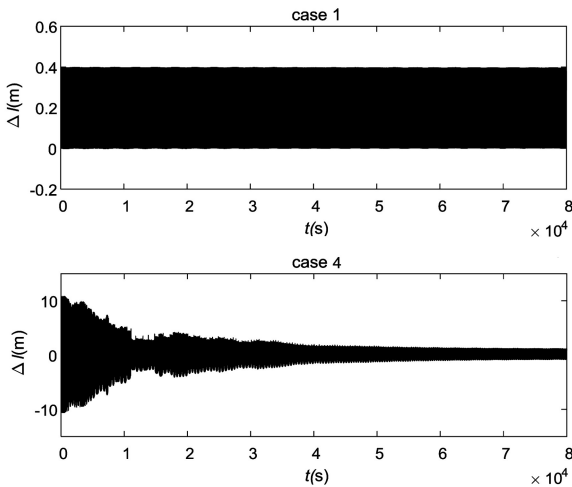


图3 不同初始姿态角下弹簧的形变演化

Fig.3 Deformation evolution of spring under different initial attitude angles

图 3 表明,姿态角的突变会引起弹簧(中央缆绳)的形变,并在持续衰减振荡后趋于稳定.因此,在空间结构运行过程中,姿态角的有效控制对系统稳定性的保持具有十分重要的意义.

进一步,单纯考虑阻尼系数大小对结构振动的影响,对比初始的 $c=0.01$,将其值增大为 $c=0.1$,模拟得到梁段节点的振动演化对比,见图 4.

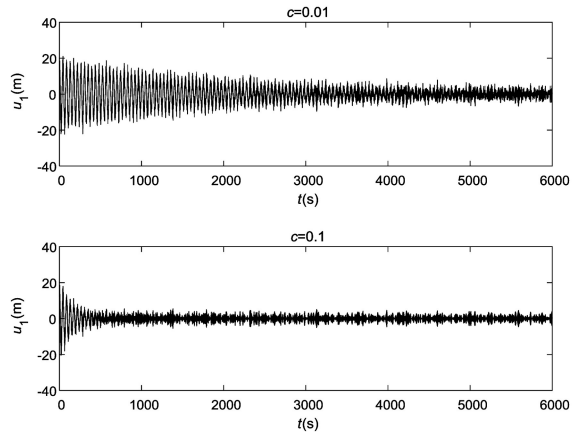


图4 不同结构阻尼作用下梁节点横向振动

Fig.4 Transverse vibration of beam joint under different structural damping

结果对比与通常情形相一致,随着阻尼系数的增大,结构振动的幅值衰减速度变快.然而,空间结构所处的复杂环境,存在许多导致干扰的外部作用,作者期待在进一步的工作中,探索外部摄动和阻尼对结构振动的综合影响.

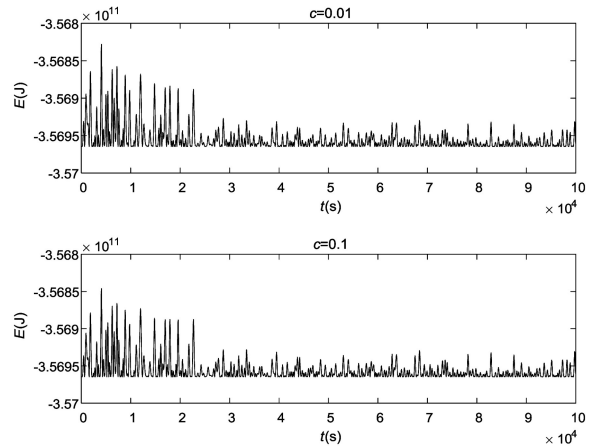


图5 系统能量演化图

Fig.5 Energy evolution of the system

图 5 是系统能量 E 的演化模拟.一般情况下研究弱阻尼对系统能量演化的影响,主要观察系统长时间下能量的变化速率,可参考相关文献^[15],这里不做详细讨论.图 5 反映出,在整体上,本文所采用的复合保结构方法,能够在时间区间内有效地保持系统能量的近似守恒性.图 6 是系统中轨道半径 r_1 的相图,其中情形 5,是对不考虑结构横向振动的模拟结果.可见,结构振动对系统的稳定性存在着持续的影响,是空间结构在设计和控制过程中所必须考虑的重要因素.

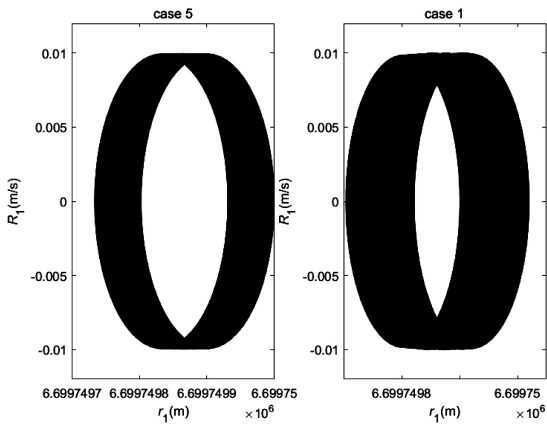


图6 轨道半径相图

Fig.6 Phase diagram of orbit radius

4 结论

空间结构的在轨运行、任务实现等对稳定性都有较高的要求,而除外部摄动外,平面运动、姿态变化和结构振动的耦合作用是其主要的影响因素,也是当前空间结构研究工作的重要内容.同时,结构的阻尼作用也会对系统的力学行为产生持续影响.

本文针对太阳帆塔的简化模型,结合辛 RK 方法和广义多辛方法,对其轨道运动、姿态变化和结构振动的耦合动力学行为进行了分析,主要研究了系统初始状态对轨道半径演化过程和结构形变的影响.同时,重点分析了结构阻尼对系统的影响.研究结果发现:

1) 弱阻尼作用对空间结构轨道变化存在微小

影响,其值与轨道半径的比值 $\frac{\Delta r}{r_0}$ 在 10^{-8} 量级.

2) 姿态角的变化会造成系统非刚性构件的形变变化.

研究结果还反映出阻尼作用会抑制结构振动,而对梁段(质量构件)的瞬时扰动会引起轨道的周期振荡.复合保结构方法的有效性和近似保结构性质也在模拟中得到了验证.本文工作进一步拓展了保结构理论的应用,为大型空间结构方案的设计和主动控制提供了理论参考.

参 考 文 献

- 1 Glaser P E. Power from the sun: Its future. *Science*, 1968, 162: 857~861
- 2 Carrington C, Fikes J, Gerry M, et al. The abacus/reflec-

tor and integrated symmetrical concentrator-concepts for space solar power collection and transmission. In: 35th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference and Exhibit. 2000: 3067

- 3 Sasaki S, Tanaka K, Higuchi K, et al. A new concept of solar power satellite: Tethered-SPS. *Acta Astronautica*, 2007, 60(3): 153~165
- 4 Seboldt W, Klimke M, Leipold M, et al. European sail tower SPS concept. *Acta Astronautica*, 2001, 48(5): 785~792
- 5 侯欣宾,王立,张兴华等.多旋转关节空间太阳能电站概念方案设计. *宇航学报*, 2015, 36(11): 1332~1338 (Hou X B, Wang L, Zhang X H, et al. Concept design on multi-rotary joints SPS. *Journal of Astronautics*, 2015, 36(11): 1332~1338 (in Chinese))
- 6 杨阳,段宝岩,黄进等. OMEGA 型空间太阳能电站聚光系统设计. *中国空间科学技术*, 2014, 34(5): 18~23 (Yang Y, Duan B Y, Huang J, et al. SSPS-OMEGA: A new concentrator system for SSPS. *Chinese Space Science and Technology*, 2014, 34(5): 18~23 (in Chinese))
- 7 李庆军,邓子辰.空间太阳能电站及其动力学与控制研究进展. *哈尔滨工业大学学报*, 2018, 50(10): 1~19 (Li Q J, Deng Z C. Review on space solar power stations and their dynamics and control. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2018, 50(10): 1~19 (in Chinese))
- 8 穆瑞楠,王艺睿,谭述君等.空间太阳能电站姿态运动-结构振动耦合建模与分析. *宇航学报*, 2018, 39(6): 615~623 (Mu R N, Wang Y R, Tan S J, et al. Attitude-structure coupled modeling and dynamics of space solar power station. *Journal of Astronautics*, 2018, 39(6): 615~623 (in Chinese))
- 9 刘玉亮,邬树楠,刘家夫等.空间太阳能电站重力姿态-轨道-结构耦合特性. *航空学报*, 2017, 38(12): 221244 (Liu Y L, Wu S N, Liu J F, et al. Gravitational attitude-orbit-structure coupling of space solar power station. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2017, 38(12): 221244 (in Chinese))
- 10 董富祥,周志成,曲广吉.柔性航天器拖拽空间碎片动力学与控制仿真研究. *动力学与控制学报*, 2018, 16(2): 165~170 (Dong F X, Zhou Z C, Qu G J. Simulation study on dynamics and control of space debris tugged by flexible spacecraft. *Journal of Dynamics and Control*, 2018, 16(2): 165~170 (in Chinese))
- 11 韩磊,胡伟鹏. WBK 方程稳态解的保结构分析. *动力学与控制学报*, 2019, 17(4): 313~317 (Han L, Hu W

- P. Structure-preserving analysis for steady-state solution of WBK equation. *Journal of Dynamics and Control*, 2019, 17(4):313~317 (in Chinese))
- 12 魏乙, 邓子辰, 李庆军等. 绳系空间太阳能电站动力学响应分析. *宇航学报*, 2016, 37(9):1041~1048 (Wei Y, Deng Z C, Li Q J, et al. Analysis of dynamic response of tethered space solar power station. *Journal of Astronautics*, 2016, 37(9):1041~1048 (in Chinese))
- 13 都琳, 侯平兰. Duffing 方程的辛精细积分方法研究. *动力学与控制学报*, 2017, 15(1):1~5 (Du L, Hou P L. Symplectic precise integration method for Duffing equation. *Journal of Dynamics and Control*, 2017, 15(1):1~5 (in Chinese))
- 14 Bridges T J. Multi-symplectic structures and wave propagation. *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, 1997, 121(1):147~190.
- 15 Hu W P, Deng Z C, Ouyang H J. Generalized multi-symplectic method for dynamic responses of continuous beam under moving load. *International Journal of Applied Mechanics*, 2013, 5(3):1350033
- 16 Hu W P, Deng Z C, Han S M, et al. Generalized multi-symplectic integrators for a class of Hamiltonian nonlinear wave PDEs. *Journal of Computational Physics*, 2013, 235:394~406
- 17 Hu W P, Song M Z, Yin T T, et al. Energy dissipation of damping cantilevered single-walled carbon nanotube oscillator. *Nonlinear Dynamics*, 2018, 91:767~776
- 18 Hu W P, Li Q J, Jiang X H, et al. Coupling dynamic behaviors of spatial flexible beam with weak damping. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 2017, 111:660~675

COUPLING DYNAMIC STRUCTURE-PERSEVERING ANALYSIS OF SPATIAL STRUCTURE WITH WEAK DAMPING *

Song Mingzhe¹ Deng Zichen^{1†} Zhao Yunping² Yu Dahong¹ Hu Weipeng³

(1. School of Mechanics, Civil Engineering and Architecture, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

(2. School of Natural and Applied Sciences, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

(3. School of Civil Engineering and Architecture, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract The accuracy, efficiency and life of large spatial structures in orbit are affected by the plane motion, attitude and vibration. According to the structural characteristics, the sail tower space solar power station (SSPS) was simplified into a beam-spring-beam model. Weak structural damping was taken into account, and dynamic equations of the model in the orbital plane were established. The coupling dynamic behaviors and damping effects of the system were analyzed by a complex structure-persevering method combining the symplectic Runge-Kutta method and the generalized multi-symplectic method. It was found that weak damping has a slight influence on the variation of orbit radius of the spatial structure, and the ratio of the variation to the orbit radius is the order of 10^{-8} , and the change of the attitude angle induces the deformation of non-rigid components of the system. This study extends the structure-persevering method into the dynamic analysis of complicated spatial structures, which provides theoretical references for the design and control of these systems.

Key words sail tower SSPS, structure-persevering method, weak damping, coupling dynamic behavior

Received 2 September 2019, revised 12 September 2019.

* The project supported by the National Natural Science Foundation of China (11872303, 11672241, 11972284), Innovation Foundation for Doctor Dissertation of Northwestern Polytechnical University (CX201810).

† Corresponding author E-mail: dweifan@nwpu.edu.cn