

基于绳索作动器的大型太空望远镜桁架结构的振动主动控制

唐颖卓, 卢光宇, 蔡国平

Active Vibration Control of Truss Structures for Large Space Telescopes Based on Cable Actuators

TANG Yingzhuo, LU Guangyu, and CAI Guoping

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.21656/1000-0887.420217>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

主动约束阻尼开口柱壳的NLMS反馈减振控制

NLMS Feedback Vibration Control of Open Cylindrical Shells With Active Constrained Layer Damping

应用数学和力学. 2021, 42(7): 686–695

一种基于非弹性收缩量的斜拉桥调索混合整数优化模型

A Mixed Integer Optimization Model Based on Inelastic Contraction for Cable Adjustment of Cable-Stayed Bridges

应用数学和力学. 2020, 41(12): 1336–1345

基于Gauss伪谱法的欠驱动航天器姿态优化控制

Optimal Attitude Control of Underactuated Spacecrafts With the Gauss Pseudospectral Method

应用数学和力学. 2017, 38(12): 1319–1330

六维系统环形桁架天线的非线性动力学分析

Analysis on Nonlinear Dynamics of Circular Truss Antennae in 6D Systems

应用数学和力学. 2019, 40(3): 282–301

基于四元数方法的绳系机器人姿态控制

Attitude Control of Targets Captured by Tethered Space Robots Based on the Quaternion Theory

应用数学和力学. 2017, 38(12): 1309–1318

基于复合控制的电液负载模拟器多余力抑制研究

Elimination of Surplus Forces in Electrohydraulic Load Simulators Based on Compound Control

应用数学和力学. 2017, 38(3): 321–332



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

基于绳索作动器的大型太空望远镜 桁架结构的振动主动控制*

唐颖卓, 卢光宇, 蔡国平

(上海交通大学 海洋工程国家重点实验室 工程力学系, 上海 200240)

(我刊编委蔡国平来稿)

摘要: 薄膜衍射是一种新型的太空望远镜的成像方式,它具有轻质、易折叠与展开、光学成像精度高等许多优点,是当今太空望远镜技术的研究热点.该文针对一类薄膜衍射太空望远镜桁架结构的振动主动控制进行了研究,提出了一种基于绳索作动器的振动主动控制策略.首先建立了望远镜桁架结构的动力学模型,然后采用粒子群优化算法研究了绳索作动器的优化布置,进而采用最优控制方法设计了结构振动的主动控制律,最后通过数值仿真验证了所给出方法的有效性,并详细研究了绳索作动器数量与结构振动稳定时间之间的对应关系.

关键词: 太空望远镜桁架结构; 绳索作动器; 优化布置; 振动控制

中图分类号: O322; V476 **文献标志码:** A **DOI:** 10.21656/1000-0887.420217

Active Vibration Control of Truss Structures for Large Space Telescopes Based on Cable Actuators

TANG Yingzhuo, LU Guangyu, CAI Guoping

(*Department of Engineering Mechanics, State Key Laboratory of
Ocean Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, P.R. China*)

(Contributed by CAI Guoping, M. AMM Editorial Board)

Abstract: The membrane diffraction is a new imaging method for space telescopes. It makes a hot research topic in space telescope technology with lots of advantages, such as light weight, easy foldability and high optical imaging accuracy. The active vibration control of the truss structure of a kind of membrane diffraction space telescope was investigated, and an active vibration control strategy was proposed based on cable actuators. Firstly, the dynamic model for the telescope truss structure was established. Then the particle swarm optimization algorithm was used to study the arrangement optimization of cable actuators. The active control law for the structure vibration was designed with the classical linear quadratic regulator method. Finally, the numerical simulation results verify the effectiveness of the proposed method. In the numerical simulations, the relationship between the number of cable actuators and the required time for the structure to regain stability was studied in detail.

* 收稿日期: 2021-07-28; 修订日期: 2021-10-11

基金项目: 国家自然科学基金 (12172214; 12102252); 中国博士后科学基金 (2021M692070)

作者简介: 唐颖卓 (1997—), 女, 硕士 (E-mail: tangzhaozhao@sjtu.edu.cn);

蔡国平 (1965—), 男, 教授, 博士, 博士生导师 (通讯作者. E-mail: caigp@sjtu.edu.cn).

引用格式: 唐颖卓, 卢光宇, 蔡国平. 基于绳索作动器的大型太空望远镜桁架结构的振动主动控制[J]. 应用数学和力学, 2022, 43(2): 123-131.

Key words: space telescope truss structure; cable actuator; arrangement optimization; vibration control

引言

对地观测是卫星的重要功能之一, 高分辨率实时观测是人类一直追求的目标. 为满足高分辨率成像要求, 近年来, 大口径太空望远镜技术引起了广泛关注. 若选用以镜面折反射为原理的传统太空望远镜, 高分辨率要求望远镜口径增大, 而口径的增大不仅会导致镜面变形, 对镜面精度控制技术要求提高, 而且重量和体积的增加也会导致卫星发射困难^[1-2]. 薄膜衍射太空望远镜是一种新型的太空望远镜, 与传统太空望远镜相比, 它具有易折叠与展开、重量轻、体积小、便于发射等许多优点, 因此引起了国内外的广泛研究.

美国最早开始研究衍射望远镜成像技术, 提出了“眼镜”(eyeglass)计划、猎鹰7号计划和薄膜型光学实时成像仪(MOIRE)计划^[3]. Hyde等^[4]简单介绍了“眼镜”太空望远镜的基本结构和应用原理. MacEwen等^[5]介绍了一种宽带、高透射衍射/折射膜透镜的研制方法, 并简要讨论了膜透镜在国防和天文学方面的应用前景. Domber等^[6]进行了MOIRE地面试验, 试验台结果表明薄膜衍射望远镜具有图像捕捉功能. 考虑到薄膜衍射太空望远镜的巨大潜力和应用价值, 众多学者对相关技术问题开展了探索, 并取得了一定成果. 黄泽兵等^[7]针对太空衍射望远镜桁架的展开过程, 模拟了桁架单元锁定对结构产生的扰动, 为衍射望远镜的设计提供了有效参考. 郑耀辉等^[8]设计了一种空间薄膜衍射望远镜主镜展开方案, 并用仿真结果验证了方案的合理性. Makarow等^[9]研究了航天器的系统失稳问题, 通过推导系统的运动方程和数值模拟, 对环形柔性天线在展开过程中的参数进行合理选择. Kim等^[10]提出了一种具有较高封装效率、可平面存储的可展开桁架结构, 研究了其展开特性, 并通过展开测试验证了该方案的可行性. 杨静静等^[11]考虑到衍射望远镜成像质量受非成像级次衍射光影响的问题, 提出了一种基于噪声自适应估计的块匹配三维协同滤波图像复原算法. 由于大口径Fresnel透镜的拼接误差对成像质量影响很大, Zhang等^[12]研究了三种覆盖所有拼接误差的Fresnel透镜, 通过仿真模拟验证了误差分析理论的正确性, 为透镜拼接提供了理论指导. 然而值得在此指出的是, 目前大多数对薄膜衍射望远镜的研究都集中在镜面衍射成像技术和系统结构展开上, 少有关于振动控制的研究. 薄膜衍射太空望远镜结构庞大、固有频率低且密集, 卫星调姿或受到外部扰动时结构易发生振动, 影响卫星的对地观测和高分辨率成像. 因此, 有必要对薄膜衍射太空望远镜的振动问题进行深入探讨. 空间桁架结构的振动主动控制多采用压电作动器, 需要附加额外的控制器材, 使得航天结构的重量增加. 为了保证桁架结构的完整性、提高结构的固有频率, 空间桁架常带有绳索结构, 以绳索为作动器, 无需额外附加控制装置, 具有简单易行等许多优点^[13]. 然而, 目前少有采用绳索作动器对大型空间望远镜进行振动主动控制的研究.

本文对薄膜衍射太空望远镜桁架结构的振动主动控制进行研究, 提出了一种基于绳索作动器的振动主动控制方法, 采用粒子群优化算法研究了作动器的优化布置, 研究了绳索作动器数量与结构振动稳定时间之间的关系.

1 动力学模型

1.1 基本结构

本文所考虑的薄膜衍射太空望远镜结构如图1(a)所示, 主要由星体、三根支撑桁架和主镜组成, 三根桁架位置关于星体中心对称布置, 每根桁架包含30跨桁架单元, 总长37.25 m. 每跨桁架单元由三角框、纵梁和绳索组成, 结构如图1(b)所示. 单跨桁架单元两侧为正三角形框架, 三根纵梁与两侧的三角框架固结连接, 再由相邻纵梁与三角框相连, 进而构成支撑桁架. 每根桁架顶部和底部的三角框中设有刚性板, 为简化计算, 可将刚性板简化为刚性梁, 每根桁架底部和顶部的三角框结构如图1(c)所示. 底部三角框的中心设有旋转铰, 与星体相连, 用以满足在主镜结构展开过程中桁架可沿某一方向发生转动的要求. 顶部三角框的中心连有一刚性梁, 与主镜结构相连. 主镜完全展开后, 与桁架结构完全锁定, 主镜与桁架的相对位置不再发生改变, 可将主镜简化为三根与桁架固结连接的刚性梁, 如图1(a)所示. 对结构进行振动主动控制时, 可先不考虑星体影响, 桁架结构为悬臂状态.

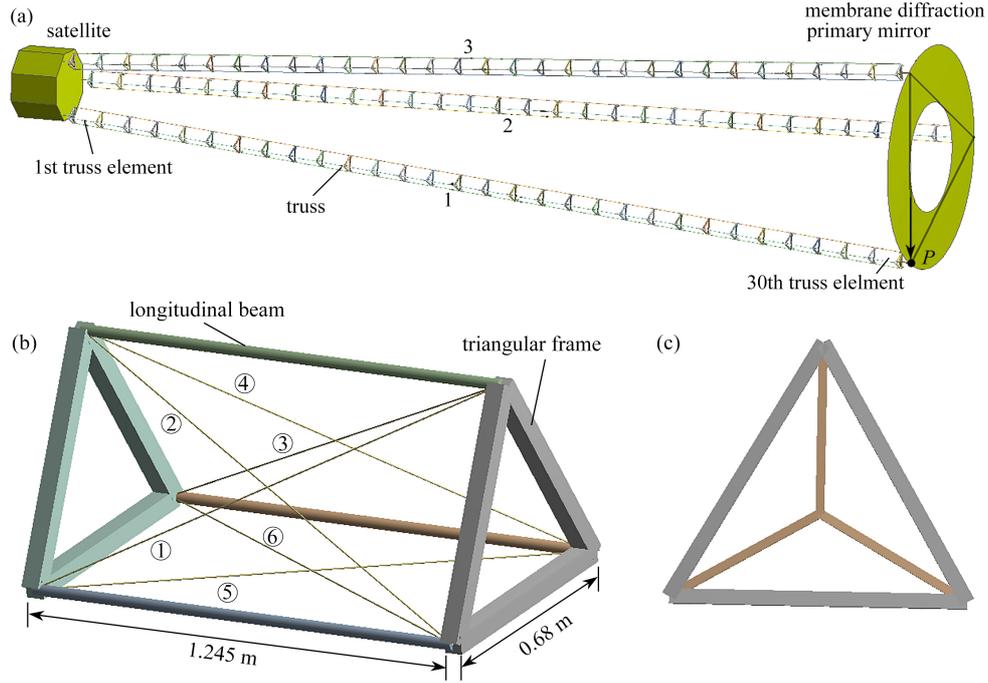


图 1 薄膜衍射太空望远镜结构示意图: (a) 薄膜衍射太空望远镜结构图; (b) 桁架单元结构图; (c) 桁架底部、顶部的三角框架结构图

Fig. 1 Schematic diagram of the membrane diffraction space telescope: (a) the structure of the membrane diffraction space telescope; (b) the structure of a truss element; (c) the triangular frame structure of the truss bottom and top

本研究采用张拉绳索作为作动器,对薄膜衍射太空望远镜的振动进行主动控制.如图 1(b) 所示,假定每跨桁架最多可布置 6 根张拉绳索,布置在桁架单元三个侧面的对角线上.本研究在满足振动控制的条件下该采用多少根绳索作动器、以及将它们布置在什么位置上.

1.2 结构动力学建模

本文采用有限元方法建立太空望远镜桁架结构的动力学模型.薄膜衍射太空望远镜可视为空间框架结构,依据 Euler-Bernoulli 梁理论,梁单元的有限元自由振动方程可表达为

$$M^e \ddot{X}^e + K^e X^e = 0, \tag{1}$$

其中, $X^e = [u_1, u_2, v_1, \theta_{z1}, v_2, \theta_{z2}, w_1, \theta_{y1}, w_2, \theta_{y2}, \theta_{x1}, \theta_{x2}]^T$ 为梁单元节点的广义坐标列阵,其中 u_i, v_i, w_i 分别表示节点 i 在 x, y, z 方向上的位移, $\theta_{xi}, \theta_{yi}, \theta_{zi}$ 分别表示节点 i 在 x, y, z 方向上的转角; M^e, K^e 为梁单元的质量阵和刚度阵,可分别表示为

$$M^e = \begin{bmatrix} M_{axial}^e & 0 & 0 & 0 \\ 0 & M_{bendingxy}^e & 0 & 0 \\ 0 & 0 & M_{bendingxz}^e & 0 \\ 0 & 0 & 0 & M_{torsion}^e \end{bmatrix}, K^e = \begin{bmatrix} K_{axial}^e & 0 & 0 & 0 \\ 0 & K_{bendingxy}^e & 0 & 0 \\ 0 & 0 & K_{bendingxz}^e & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K_{torsion}^e \end{bmatrix},$$

其中

$$M_{axial}^e = \frac{\rho Al}{6} \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix}, M_{bendingxy}^e = \frac{\rho Al}{420} \begin{bmatrix} 156 & 22l & 54 & -13l \\ 22l & 4l^2 & 13l & -3l^2 \\ 54 & 13l & 156 & -22l \\ -13l & -3l^2 & -22l & 4l^2 \end{bmatrix},$$

$$M_{torsion}^e = \frac{\rho Al}{6} \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix}, M_{bendingxz}^e = \frac{\rho Al}{420} \begin{bmatrix} 156 & -22l & 54 & 13l \\ -22l & 4l^2 & -13l & -3l^2 \\ 54 & -13l & 156 & 22l \\ 13l & -3l^2 & 22l & 4l^2 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{K}_{\text{axial}}^e = \frac{EA}{l} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{K}_{\text{bending,xy}}^e = \frac{EI_z}{l^3} \begin{bmatrix} 12 & 6l & -12 & 6l \\ 6l & 4l^2 & -6l & 2l^2 \\ -12 & -6l & 12 & -6l \\ 6l & 2l^2 & -6l & 4l^2 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{K}_{\text{torsion}}^e = \frac{GJ}{l} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{K}_{\text{bending,xz}}^e = \frac{EI_y}{l^3} \begin{bmatrix} 12 & -6l & -12 & -6l \\ -6l & 4l^2 & 6l & 2l^2 \\ -12 & 6l & 12 & 6l \\ -6l & 2l^2 & 6l & 4l^2 \end{bmatrix},$$

其中, ρ 为梁单元的密度, A 为梁单元截面面积, l 为梁单元长度, G 为结构剪切模量, I_y, I_z 分别为结构沿 y 轴和 z 轴的转动惯量, J 为结构的极惯性矩。

分别将三角形框架、纵梁、刚性板简化梁、连接梁、主镜简化梁各自的材料参数代入上述梁单元的质量阵和刚度阵中,可以得到不同结构单元的质量阵和刚度阵.将其进行适当组集,并考虑到结构的阻尼和外力影响,薄膜衍射太空望远镜桁架结构的动力学方程可以表示为

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{X}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{X}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{X}(t) = \mathbf{F}(t), \quad (2)$$

其中, $\mathbf{X}(t) \in R^n$ 为由所有节点广义坐标所构成的系统广义坐标列阵, n 为系统自由度; $\mathbf{M} \in R^{n \times n}$ 和 $\mathbf{K} \in R^{n \times n}$ 分别为系统总的质量矩阵和刚度矩阵; $\mathbf{C} = \alpha\mathbf{M} + \beta\mathbf{K}$ 为系统结构阻尼矩阵, α, β 为 Rayleigh 阻尼系数; $\mathbf{F}(t) \in R^n$ 为各绳索控制力组集得到的结构总控制力列阵,可以写为 $\mathbf{F}(t) = \bar{\mathbf{F}}\mathbf{u}(t)$,其中 $\bar{\mathbf{F}} \in R^{n \times r}$ 为绳索作动器位置与作动力输出方向矩阵, $\mathbf{u}(t) \in R^r$ 为绳索控制力列阵, r 为绳索作动器的数量,忽略绳索作动器的刚度与质量,只考虑绳索提供的作动力。

系统有限元自由度 n 较大,无法进行控制设计与实现,通常的解决方法是通过结构少数低阶模态的控制从而达到对整体结构进行振动控制的目的.考虑对结构的前 p 阶模态进行主动控制,利用模态转换:

$$\mathbf{X} \approx \Phi\mathbf{q}, \quad (3)$$

其中, $\Phi = [\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_p] \in R^{n \times p}$ 为系统前 p 阶的模态矩阵, $\varphi_i \in R^n$ 为第 i 阶模态列向量; $\mathbf{q} = [q_1, q_2, \dots, q_p]^T \in R^p$ 为系统前 p 阶的模态坐标列向量, q_i 为第 i 阶模态坐标.将式 (3) 代入式 (2),可以得到系统的前 p 阶模态振动方程为

$$\tilde{\mathbf{M}}\ddot{\mathbf{q}}(t) + \tilde{\mathbf{C}}\dot{\mathbf{q}}(t) + \tilde{\mathbf{K}}\mathbf{q}(t) = \Phi^T \mathbf{F}(t), \quad (4)$$

其中 $\tilde{\mathbf{M}} = \Phi^T \mathbf{M} \Phi \in R^{p \times p}$, $\tilde{\mathbf{C}} = \Phi^T \mathbf{C} \Phi \in R^{p \times p}$, $\tilde{\mathbf{K}} = \Phi^T \mathbf{K} \Phi \in R^{p \times p}$.

将式 (4) 转化到状态空间,可得系统的状态方程为

$$\dot{\mathbf{Z}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{Z}(t) + \mathbf{B}\mathbf{u}(t), \quad (5)$$

其中

$$\mathbf{Z} = [\mathbf{Z}_1^T, \mathbf{Z}_2^T, \dots, \mathbf{Z}_p^T]^T \in R^{2p \times 1}, \quad \mathbf{Z}_i = \begin{bmatrix} q_i \\ \dot{q}_i \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{A} = \text{diag}(\mathbf{A}_i) \in R^{2p \times 2p}, \quad \mathbf{A}_i = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\omega_i & -2\xi_i\omega_i \end{bmatrix},$$

ω_i, ξ_i 分别为系统第 i 阶固有频率和阻尼系数, $\mathbf{B} = [\mathbf{B}_1^T, \mathbf{B}_2^T, \dots, \mathbf{B}_p^T]^T \in R^{2p \times r}$, $\mathbf{B}_i = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \varphi_i^T \bar{\mathbf{F}}/m_i \end{bmatrix} \in R^{2 \times r}$, m_i 为第 i 阶模态对应的质量。

2 结构主动控制

本文采用二次线性最优控制 (LQR) 设计控制器来抑制太空望远镜桁架结构的振动.取性能指标函数为

$$J = \frac{1}{2} \int_0^\infty (\mathbf{Z}^T \mathbf{Q} \mathbf{Z} + \mathbf{u}^T \mathbf{R} \mathbf{u}) dt, \quad (6)$$

其中, $\mathbf{Q} \in R^{2p \times 2p}$ 为状态加权矩阵,为半正定矩阵; $\mathbf{R} \in R^{2p \times 2p}$ 为控制加权矩阵,为正定矩阵.根据最优控制理论,可得最优控制律为

$$\mathbf{u}(t) = -\mathbf{R}^{-1}\mathbf{B}^T\mathbf{P}\mathbf{Z}(t), \quad (7)$$

其中, $\mathbf{P} \in R^{2p \times 2p}$ 为如下 Riccati 矩阵代数方程的解:

$$\mathbf{P}\mathbf{A} + \mathbf{A}^T\mathbf{P} - \mathbf{P}\mathbf{B}\mathbf{R}^{-1}\mathbf{B}^T\mathbf{P} + \mathbf{Q} = \mathbf{0}. \quad (8)$$

本文采用绳索作动器进行结构振动主动控制, 考虑绳索的承载能力, 可通过调节控制加权矩阵 \mathbf{R} 来改变最优控制 $\mathbf{u}(t)$ 的大小.

3 作动器位置优化布置

在结构振动主动控制中, 作动器的优化布置很关键, 不当的作动器布置有可能导致控制效率的下降或者控制系统失稳. 作动器的优化布置本质上是一优化问题, 是选择合适的优化算法使得某一指标函数取得全局最优. 本文拟采用基于系统可控性的作动器位置准则, 求解算法拟采用搜索效率高的离散粒子群优化算法 (PSO). 将不同的作动器分布方案看作粒子群优化算法中的个体, 通过多代种群寻优计算, 得到最终的作动器位置最优的分布结果.

3.1 优化配置准则

本文采用 Leleu 等^[14] 提出的作动器优化配置准则. 由该准则定义的目标函数与系统的可控 Gram 矩阵 \mathbf{W}_c 相关, 目标函数值越大, 则系统对应的可控度越好. 该准则定义的目标函数为

$$F_{\text{crit}} = \text{tr}(\mathbf{W}_c) \sqrt[2n]{\det \mathbf{W}_c} / \sigma(\lambda_i), \quad (9)$$

其中, $\sigma(\lambda_i)$ 是可控 Gram 矩阵 \mathbf{W}_c 特征值的标准差, 其作用是为了惩罚那些同时具有很大和很小特征值的位置; λ_i 为矩阵 \mathbf{W}_c 的特征值; $\text{tr}(\mathbf{W}_c)$ 为矩阵 \mathbf{W}_c 的迹, 代表着结构传递给传感器的总能量; $\sqrt[2n]{\det \mathbf{W}_c}$ 代表特征值的几何平均值, $\det \mathbf{W}_c$ 为矩阵 \mathbf{W}_c 的行列式, n 为系统的自由度. \mathbf{W}_c 满足如下 Lyapunov 方程:

$$\mathbf{A}\mathbf{W}_c + \mathbf{W}_c\mathbf{A}^T + \mathbf{B}\mathbf{B}^T = \mathbf{0}. \quad (10)$$

3.2 优化算法

粒子群优化算法是一种基于群智能的演化计算方法, 它源于鸟群群体运动行为的研究, 由 Eberhart 和 Kennedy 于 1995 年提出. 它的一个最基本的特点是在一个群体中去选择最优解, 通过对群体的不断迭代、演化以最终求得全局最优值. 粒子群优化算法用无质量和无体积的粒子作为个体, 并为每个粒子规定简单的行为规则, 从而使整个粒子群呈现出复杂的特性, 可用来求解复杂的优化问题. 在粒子群优化算法中, 每个解都是搜索空间中的一只“鸟”, 称之为“粒子”, 它代表着一次传感器最优位置的选择. 假设在一个 D 维的搜索空间中, 有 f 个粒子组成一个群落, 粒子群优化算法初始化为一群随机粒子, 然后通过迭代、演化寻找最优解. 在每一次迭代中, 粒子 i 通过跟踪两个“极值”来更新自己: 第一个就是粒子本身所找到的最优解, 称之为个体最优解 p_i ; 另一个极值是整个种群目前找到的最优解, 称之为全局极值 p_g . 每一个粒子是按照下述两式进行变化的:

$$v_{i,d}(t+1) = v_{i,d}(t) + c_1r_1[p_{i,d}(t) - x_{i,d}(t)] + c_2r_2[p_{g,d}(t) - x_{i,d}(t)], \quad (11)$$

$$x_{i,d}(t+1) = x_{i,d}(t) + v_{i,d}(t+1), \quad (12)$$

式中, $i = 1, 2, \dots, f$; $d = 1, 2, \dots, D$; 加速因子 c_1 和 c_2 分别调节向 p_i 和 p_g 方向飞行的最大步长, 合适的 c_1 和 c_2 可以加快收敛且不易陷入局部最优; r_1 和 r_2 为 $[0, 1]$ 之间的随机数.

4 数值仿真

本节进行数值仿真, 以验证本文方法的有效性. 薄膜衍射太空望远镜的基本结构如图 1 所示, 参考文献 [15], 结构材料的相关参数见表 1.

首先计算结构的固有频率和模态. 用 ANSYS 进行建模时, 三角框和单跨纵梁为 2 单元模型, 连接梁、刚性板简化梁和主镜简化梁为 1 单元模型. 采用本文理论模型计算所得结构的前四阶固有频率值如表 2 中所示, 表中同时给出了 ANSYS 软件的计算结果, 可以看出两者结果吻合良好. 图 2 为结构的前四阶模态, 图中阴影表示结构原始状态, 实体表示结构变形后状态. 由图 2 可看出, 结构前两阶振型表现为弯曲、三阶振型为扭转、四阶振型为弯曲.

表1 薄膜衍射太空望远镜结构的物理参数

Table 1 Physical parameters of the structure of the membrane diffraction space telescope

structural component	size		elastic modulus E/GPa	density $\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$	Poisson's ratio μ	Rayleigh damping coefficient	
	length l/m	cross-sectional area A/m^2				α	β
triangular frame	0.68	2.5×10^{-3}	70	2700			
longitudinal beam	1.245	7.07×10^{-4}	70	2700			
connecting beam	0.3926	2.5×10^{-3}	7000	2700	0.3	0.05	0.03
simplified beam of the rigid plate	0.3926	2.5×10^{-3}	7000	2700			
simplified beam of the primary mirror	7.9556	2.5×10^{-3}	7000	2700			

表2 薄膜衍射太空望远镜的前四阶固有频率(单位: Hz)

Table 2 The 1st 4 natural frequencies of the membrane diffraction space telescope (unit: Hz)

natural frequency	1st order	2nd order	3rd order	4th order
theoretical model	0.15337	0.15337	0.22946	0.63599
ANSYS	0.15314	0.15314	0.23549	0.63464
error $\varepsilon/\%$	0.15019	0.15019	2.56062	0.21272

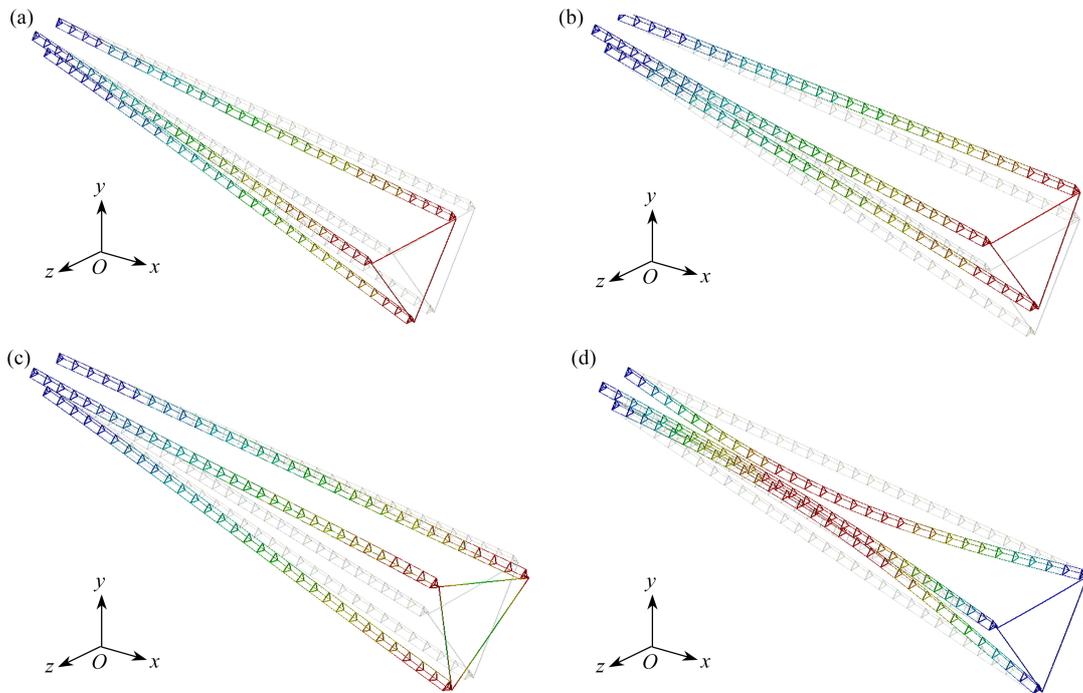


图2 薄膜衍射太空望远镜前四阶模态振型: (a) 一阶振型; (b) 二阶振型; (c) 三阶振型; (d) 四阶振型

Fig. 2 The 1st 4 modal shapes of the membrane diffraction space telescope: (a) the 1st-order mode; (b) the 2nd-order mode; (c) the 3rd-order mode; (d) the 4th-order mode

然后考虑绳索作动器的优化位置. 在采用粒子群优化算法寻优计算时, 式(11)中常数 c_1, c_2 分别取值为10和60, 粒子的最大和最小速度限制分别取为70和-70. 桁架结构共3根, 每根桁架结构30跨, 每跨最多可布置6个绳索作动器, 因此整个系统最多可布置540个绳索作动器. 本文研究1~20个绳索作动器的最优位置布置, 计算得到的结果见表3. 例如, 只采用一个绳索作动器时, 其最优位置为(3, 2, 5), 其中“3”表示第三根桁架, “2”表示桁架的第二跨, “5”表示在⑤号绳索位置. 桁架、桁架跨数和绳索的编号如图1(a)、(b)所示.

最后考虑太空望远镜桁架结构的振动主动控制. 本文对结构的前四阶模态进行控制, 因此方程(3)中 $p=4$. 太空望远镜在太空轨道上的运行速度一般约为10 km/s左右, 每隔一段时间望远镜对地成像一次. 为了对地成像, 航天器需要不断调整姿态以使望远镜对准地面目标, 因此望远镜结构的振动表现为航天器调姿所引

发的自由振动. 成像时, 望远镜对振动量级有要求, 只有当结构振动小于某一阈值时才能正常成像. 本文采用均方根来描述这一阈值, 假定太空望远镜所有桁架节点位移的均方根 $\delta_{RMS} \leq 0.01$ m 时望远镜能够对地成像. 为模拟结构自由振动, 本文假定在结构的 P 点施加 100 N 的外力, 如图 1(a) 所示, 使结构产生初始位移, 可以计算得知在该外力作用下结构的最大位移为 0.131 2 m. 若不对结构施加控制, 去掉外力后, 结构产生自由振动, 结构重新稳定 (所有桁架节点位移均方根 $\delta_{RMS} \leq 0.01$ m) 所需时间为 137.02 s. 以下采用本文控制方法对结构的自由振动进行控制. 考虑到绳索承载力有限, 参考文献 [16], 本文假定绳索能承受的最大力为 260 N. 控制设计时, 取方程 (6) 中状态加权矩阵 Q 的值为 $\text{diag}(10^4, 10, 10^3, 10, 10^2, 10, 10^2, 10)$, 调整控制加权矩阵 R , 使得绳索的最大控制力尽可能地接近 260 N. 绳索作动器的数量以及对应的结构重新达到稳定所需时间见表 3, 将其绘制成曲线图, 如图 3 所示. 分析表 3 和图 3 可知, 薄膜衍射太空望远镜系统重新稳定所需时间随绳索作动器数量的增加而减少, 且时间减少的速率随绳索作动器数量的增加而降低, 到 18 个左右时若继续增加作动器, 时间几乎不再减少. 实际中, 可以根据表 3 结果选择绳索作动器的最小数量与位置, 例如, 当要求太空望远镜每间隔 25 s 进行成像一次时, 由表 3 可知至少需要 17 个绳索作动器.

表 3 绳索作动器的数量、最优位置与结构稳定所需时间

Table 3 Number of cable actuators, optimal positions and required time for structural stabilization

number N	cable actuator position	time t/s	number N	cable actuator position	time t/s
1	(3, 2, 5)	133.93	11	(1, 2, 6), (1, 5, 5), (1, 25, 4), (2, 2, 4), (2, 3, 1), (2, 8, 4), (2, 19, 4), (3, 1, 5), (3, 2, 3), (3, 4, 1), (3, 9, 1)	33.01
2	(3, 2, 1), (3, 27, 6)	104.48	12	(1, 1, 5), (1, 4, 6), (1, 22, 4), (1, 27, 1), (2, 4, 4), (2, 6, 4), (2, 29, 6), (3, 2, 1), (3, 10, 2), (3, 10, 5), (3, 12, 2), (3, 21, 3)	32.95
3	(1, 2, 5), (1, 29, 1), (3, 2, 2)	81.47	13	(1, 1, 6), (1, 5, 3), (1, 10, 5), (1, 29, 3), (2, 2, 3), (2, 6, 1), (2, 7, 3), (2, 8, 4), (2, 23, 5), (3, 3, 1), (3, 5, 1), (3, 15, 1), (3, 28, 5)	29.80
4	(1, 3, 8), (2, 4, 4), (3, 1, 1), (3, 27, 5)	65.45	14	(1, 2, 6), (1, 14, 6), (1, 26, 1), (2, 1, 2), (2, 2, 3), (2, 6, 4), (2, 25, 2), (3, 2, 2), (3, 2, 6), (3, 6, 2), (3, 8, 1), (3, 17, 3), (3, 25, 4), (3, 26, 5)	29.64
5	(1, 3, 6), (1, 28, 2), (2, 2, 4), (3, 2, 2), (3, 3, 5)	55.78	15	(1, 4, 2), (1, 4, 5), (1, 8, 5), (2, 2, 4), (2, 2, 5), (2, 3, 4), (2, 22, 3), (2, 29, 6), (3, 1, 1), (3, 1, 4), (3, 2, 1), (3, 4, 2), (3, 5, 5), (3, 6, 4), (3, 29, 3)	26.49
6	(1, 1, 5), (1, 28, 4), (2, 1, 4), (2, 3, 1), (3, 4, 1), (3, 28, 6)	52.56	16	(1, 2, 6), (1, 6, 5), (1, 7, 6), (1, 18, 4), (1, 26, 3), (1, 27, 2), (2, 2, 4), (2, 20, 3), (2, 22, 3), (2, 27, 5), (3, 2, 1), (3, 2, 2), (3, 2, 4), (3, 4, 2), (3, 7, 1), (3, 24, 6)	26.38
7	(1, 3, 5), (1, 29, 3), (2, 2, 2), (2, 5, 4), (3, 2, 2), (3, 4, 5), (3, 29, 6)	45.97	17	(1, 2, 1), (1, 4, 4), (1, 6, 6), (2, 2, 3), (2, 2, 6), (2, 3, 3), (2, 5, 3), (2, 8, 2), (2, 13, 3), (2, 26, 1), (2, 30, 5), (3, 3, 2), (3, 4, 2), (3, 10, 2), (3, 11, 2), (3, 23, 2), (3, 29, 4)	23.24
8	(1, 2, 6), (1, 25, 2), (2, 3, 3), (2, 24, 6), (3, 1, 2), (3, 3, 2), (3, 4, 5), (3, 27, 4)	42.83	18	(1, 3, 6), (1, 4, 6), (1, 9, 5), (1, 13, 5), (1, 28, 2), (2, 1, 2), (2, 1, 3), (2, 2, 4), (2, 6, 1), (2, 11, 1), (2, 26, 6), (2, 30, 5), (3, 1, 4), (3, 2, 1), (3, 7, 1), (3, 20, 1), (3, 27, 2), (3, 28, 5)	23.42
9	(1, 2, 6), (1, 30, 1), (2, 1, 2), (2, 1, 3), (2, 2, 3), (2, 24, 6), (3, 3, 2), (3, 4, 1), (3, 30, 4)	39.42	19	(1, 2, 6), (1, 6, 3), (1, 6, 6), (1, 10, 5), (1, 30, 1), (2, 2, 3), (2, 5, 4), (2, 6, 4), (2, 8, 3), (2, 12, 3), (2, 23, 6), (2, 26, 3), (2, 29, 3), (2, 30, 1), (3, 2, 1), (3, 3, 1), (3, 6, 2), (3, 20, 6), (3, 25, 3)	23.20
10	(1, 5, 5), (1, 6, 5), (1, 25, 4), (2, 2, 4), (2, 3, 2), (3, 1, 2), (3, 3, 2), (3, 12, 2), (3, 23, 6), (3, 28, 3)	39.22	20	(1, 2, 6), (1, 4, 5), (1, 6, 5), (1, 9, 1), (1, 26, 4), (1, 28, 1), (2, 1, 6), (2, 3, 4), (2, 5, 3), (2, 7, 4), (2, 8, 2), (2, 16, 3), (2, 26, 2), (3, 2, 6), (3, 3, 1), (3, 5, 4), (3, 6, 2), (3, 12, 1), (3, 12, 6), (3, 15, 6)	23.02

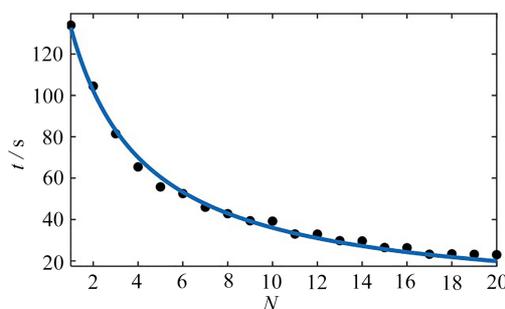


图 3 绳索作动器数量与系统稳定所需时间关系曲线

Fig. 3 The correlation curve between the number of cable actuators and the time required for system stabilization

图4给出了桁架结构上 P 点在无控制和有17个绳索作动器控制条件下的位移响应曲线,可以看出施加控制后结构响应得到了有效控制。

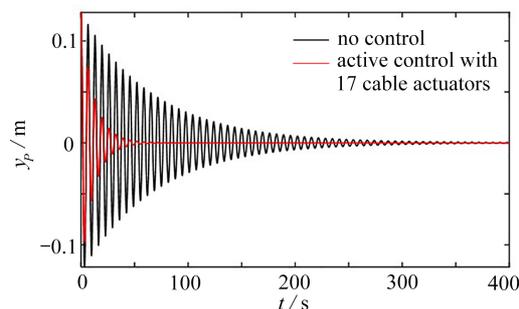


图4 桁架结构上 P 点竖直方向的位移响应曲线

Fig. 4 The displacement response curve of point P in the vertical direction of the truss structure

5 结 论

本文提出了一种基于绳索作动器的大型薄膜衍射太空望远镜桁架结构的振动主动控制方法,研究了绳索作动器的优化布置以及作动器数量与结构振动稳定时间之间的关系.研究得到了如下结论:

- 1) 采用绳索做作动器对太空望远镜桁架结构进行振动控制是可行的,绳索作动器能够有效地抑制结构的振动;
- 2) 本文所建立的薄膜衍射太空望远镜桁架结构的动力学模型,能够取得和 ANSYS 软件相同的数值结果,表明理论模型是正确的;
- 3) 绳索作动器到达一定数量后,继续增加作动器数量对控制效果增加有限;
- 4) 本文通过数值仿真给出了绳索作动器数量与望远镜桁架结构振动稳定时间之间的对应关系,这对实际工程应用具有参考价值。

参考文献(References):

- [1] 孙莹, 张伟, 吴瑞琴. 六维系统环形桁架天线的非线性动力学分析[J]. 应用数学与力学, 2019, 40(3): 282-301. (SUN Ying, ZHANG Wei, WU Ruiqin. Analysis on nonlinear dynamics of circular truss antennae in 6D systems[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2019, 40(3): 282-301.(in Chinese))
- [2] AKIRA M, AKIO T, NAOKAZU H, et al. Technology status of the 13 m aperture deployment antenna reflectors for engineering test satellite VIII[J]. *Acta Astronautica*, 2000, 27(2/9): 147-152.
- [3] 焦建超, 苏云, 王保华, 等. 地球静止轨道膜基衍射光学成像系统的发展与应用[J]. 国际太空, 2016, 450: 49-55. (JIAO Jianchao, SU Yun, WANG Baohua, et al. Development and application of GEO membrane based diffraction optical imaging system[J]. *Space International*, 2016, 450: 49-55.(in Chinese))
- [4] HYDE R, DIXIT S, WEISBERG A, et al. Eyeglass: a very large aperture diffractive space telescope[C]//*Conference on Highly Innovative Space Telescope Concepts*. Waikoloa, HI, 2002.
- [5] MACEWEN H, BRECKINRIDGE J. Large diffractive/refractive apertures for space and airborne telescopes [C]//*Conference on Sensors and Systems for Space Applications VI*. Baltimore, MD, 2013.
- [6] DOMBER J, ATCHESON P, KOMMERS J. MOIRE: ground test bed results for a large membrane telescope [C]//*Spacecraft Structures Conference*. National Harbor, MD, USA, 2014.
- [7] 黄泽兵, 刘锦阳, 袁婷婷, 等. 太空衍射望远镜大型桁架展开过程动力学建模[J]. 中国空间科学技术, 2021, 41(1): 55-63. (HUANG Zebing, LIU Jinyang, YUAN Tingting, et al. Dynamic modeling for the deployment of the folded truss of space diffraction telescope[J]. *Chinese Space Science and Technology*, 2021, 41(1): 55-63.(in Chinese))
- [8] 郑耀辉, 阮萍, 曹尚. 空间薄膜衍射望远镜展开结构设计与分析[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(1): 121-125 (ZHENG Yaohui, RUAN Ping, CAO Shang. Deployable structure design and analysis for space membrane diffraction tele-

- scope[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, **45**(1): 121-125. (in Chinese))
- [9] MAKAROW A L, KHOROSHILOV V S, ZAKRZHEVSKII A E. Spacecraft dynamics due to elastic ring antenna deployment[J]. *Acta Astronautica*, 2011, **69**(7/8): 691-702.
- [10] KIM T H, SUH J E, HAN J H. Deployable truss structure with flat-form storability using scissor-like elements[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2021, **159**: 104252.
- [11] 杨静静, 王帅, 文良华, 等. 基于图像复原的衍射望远镜暗弱目标成像[J]. 光学学报, 2020, **40**(14): 101-108. (YANG Jingjing, WANG Shuai, WEN Lianghua, et al. Faint-object imaging of diffractive telescopes based on image restoration[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, **40**(14): 101-108. (in Chinese))
- [12] ZHANG H L, LIU H, XU W B, et al. Error analysis of large-diameter subaperture stitching Fresnel diffractive elements[J]. *Applied Optics*, 2017, **56**(27): 7672-7678.
- [13] LU G Y, ZHOU J Y, CAI G P. Active vibration control of a large space antenna structure using cable actuator[J]. *AIAA Journal*, 2021, **59**(4): 1457-1468.
- [14] LELEU S, ABOU-KANDIL H, BONNASSIEUX Y. Piezoelectric actuators and sensors location for active control of flexible structures[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2001, **50**(6): 1577-1582.
- [15] 黄泽兵. 太空衍射望远镜展开动力学建模与分析[D]. 硕士学位论文. 上海: 上海交通大学, 2021. (HUANG Zebing. Dynamic modeling and analysis for the deployment of the space diffraction telescope[D]. Master Thesis. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2021. (in Chinese))
- [16] ZHOU J Y, LU G Y, CAI G P, et al. Static shape adjustment and actuator layered optimization for planar phased array satellite antenna[J]. *International Journal of Aeronautical and Space Sciences*, 2019, **20**: 891-901.