

文章编号: 1673-4599 (2015) 06-0015-03

大型空间可展开天线结构的主动振动控制

张家应, 孟雷, 王军

(北京航空航天大学 航空科学与工程学院, 北京 100191)

摘要: 利用内置压电元件的主动构件作为作动器, 对大型空间可展开天线结构进行了振动主动控制的研究。分析了含压电单元的空间天线结构的振动主动控制的原理和方法, 采用独立模态控制法对可展开天线结构实施主动控制。并且基于作动器的模态影响矩阵对作动器进行了优化布置, 使其效能达到最大。最后采用 LQR 方法对结构进行控制, 应用 Matlab 软件对该压电结构进行仿真实验控制。仿真的结果表明, 通过振动主动控制明显增加了可展开天线结构的结构阻尼, 取得了十分有效的振动抑制效果。

关键词: 空间结构; 主动振动控制; 压电作动器; LQR

中图分类号: V214.2 文献标识码: A

Active vibration control for large-space deployable antennas

ZHANG Jia-ying, MENG Lei, WANG Jun

(School of Aeronautic Science and Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: Built piezoelectric elements as actuators active member of the large space deployable antenna structure of active vibration control. Analysis the active vibration control principles and methods about a space antenna structure containing the piezoelectric element. Use of independent modal control method for deployable antenna structure implemented active control. Based on actuator modal effect matrix, the location of actuator were optimized to achieve maximum performance. Then using the LQR method to control structure, application software Matlab was used of the piezoelectric structure control. The simulation results show that the active control by the vibration can be expanded significantly increases the structural damping of the antenna structure, to obtain a perfect effective vibration suppression effect.

Key words: large-space structure; active vibration control; actuator; LQR

空间天线作为航天器结构必不可少的组成部分, 对于实现航天器与地面控制台的数据传输有着非常重要的作用。为了保证处于工作状态空间的天线在所处的外太空环境中, 具有较高的稳定性和可靠性, 对其进行振动分析以及振动控制, 已经成为航天工程设计中必须高度重视的科研课

题。

空间大型可展开天线是一个多柔体结构, 由于其柔度大、内阻小, 当天线释放完毕后自由展开时, 或者在几乎没有外阻的空间运行时, 受到宇宙风、微粒子流等各种外力的扰动, 从而引起结构的振动。由于天线结构的本身属性会导致振

收稿日期: 2013-11-01; 修订日期: 2015-05-07

作者简介: 张家应 (1989—), 男, 安徽人, 硕士研究生, Email: j_y_zhang@yeah.net

动衰减的速度很缓慢,这不但影响空间天线的工作效果,其结构的长期振动还将引起结构的疲劳损伤^[4]。因此对空间结构的振动控制的研究具有重要的实际意义。

自1972年 Yao 提出结构振动的控制概念以来,国内外学者就对结构振动控制进行大量的研究。结构的主动振动控制是通过特殊材料构造智能材料和主动构件进行结构振动控制^[5]。国内外对压电智能结构主动控制的研究大多集中在柔性梁板结构。近年来,孙东昌等^[6]以控制各阶模态所需的控制电能尽可能小作为目标,进行压电智能梁的振动控制研究;王宗利等^[7]提出了一种状态相关的 LQR 控制方法。本文以内置压电陶瓷堆的主动杆为作动器,以位移反馈作为观测值。同时采用能量最小化原理,利用遗传算法对作动器的位置进行优化,然后采用 LQR 控制法,对大型空间可展开天线进行振动主动控制的研究。

1 空间智能天线模型

设空间智能天线装有 n_a 根主动杆, n_s 个传感器,集成各个单元,得到整体智能桁架作动方程及传感方程为

$$M_{uu}\ddot{x} + K_{uu}x = f_d + K_{u\phi}V \quad (1)$$

$$Q = K_{Qu}x \quad (2)$$

式中: f_d 为干扰力; $K_{u\phi}$ 为 $n \times n_a$ 矩阵,包含了作动器位置的信息; K_{Qu} 为 $n_s \times n$ 矩阵,包含了传感器位置的信息。

根据模态叠加原理^[8],

$$x = \phi_c \eta \quad (3)$$

式中: $\phi_c = \{\phi_1, \dots, \phi_{n_c}\}$ 为控制模态的特征向量; η 为模态坐标向量。

将式(3)代入式(1),左乘 ϕ_c^T ,利用模态正交性得到解耦的模态作动方程

$$\ddot{\eta}_i + \omega_i^2 \eta_i = f_i', \quad i = 1, 2, \dots, n_a \quad (4)$$

式中: ω_i 为第 i 阶固有频率; f_i' 为模态致动力。

$$f = \phi_c^T K_{u\phi} V \quad (5)$$

将式(3)代入式(2)得到模态观测方程

$$Q = K_{Qu} \phi_c \eta \quad (6)$$

2 作动器位置优化准则

航天器上的电能主要依靠太阳能转化而来,可提供的能量很有限。则要求主动振动控制系统所耗费的电能越少越好。因此,如果主动杆的布

置可以保证相同作动电压可以提供最大的控制力,那么就能保证效率最高,即主动杆的位置为最优布置。

令 $A = \phi_c^T B K_v$, 则主模态的控制力

$$f_{mc} = AV \quad (7)$$

式中: A 为主动杆位置矩阵; B 为 n_a 个压电主动杆方向余弦组成的 $n \times n_a$ 维位置矩阵; $K_v = \text{diag}(k_{uvi}^e)$ 为对角矩阵, k_{uvi}^e 为第 i 个作动器单位电压作用下产生的控制力; V 为作动电压向量; f_{mc} 为 $n_a \times 1$ 维主模态控制力。

由(7)可得作动电压与控制力之间的关系

$$V \bar{A} V = f_{mc}^T f_{mc} \quad (8)$$

式中: $\bar{A} = A^T A$ 为 $n_a \times n_a$ 正定对称矩阵。借鉴文献^[5]提出的优化准则,提出了优化准则^[9]

$$J_a = \left(\sum_{j=1}^{n_c} \lambda_j^a \right) \sqrt{\prod_{j=1}^{n_s} (\lambda_j^a)} \rightarrow \max \quad (9)$$

式中: λ_j^a 为矩阵 \bar{A} 的特征值。

3 数值算例

某 10 m 抛物面天线,如图 1 所示,共有 276 根杆,72 个节点。结构的约束为中间圆柱区域固支,杆主体部分材料弹性模量为 $E_h = 70 \text{ GPa}$; 杆件横截面积为 $S = 10^{-4} \text{ m}^2$ 。主动杆件中作动器部分的弹性模量为 $E_a = 63 \text{ GPa}$ 。由 500 块圆形压电薄片叠成,相应的有效长度为 0.5 m。等效的应力系数为 $1746 \text{ N}/(\text{V} \cdot \text{m})$ 。天线口径为 $d_0 = 10 \text{ m}$, 焦距为 $l = 6 \text{ m}$ 。

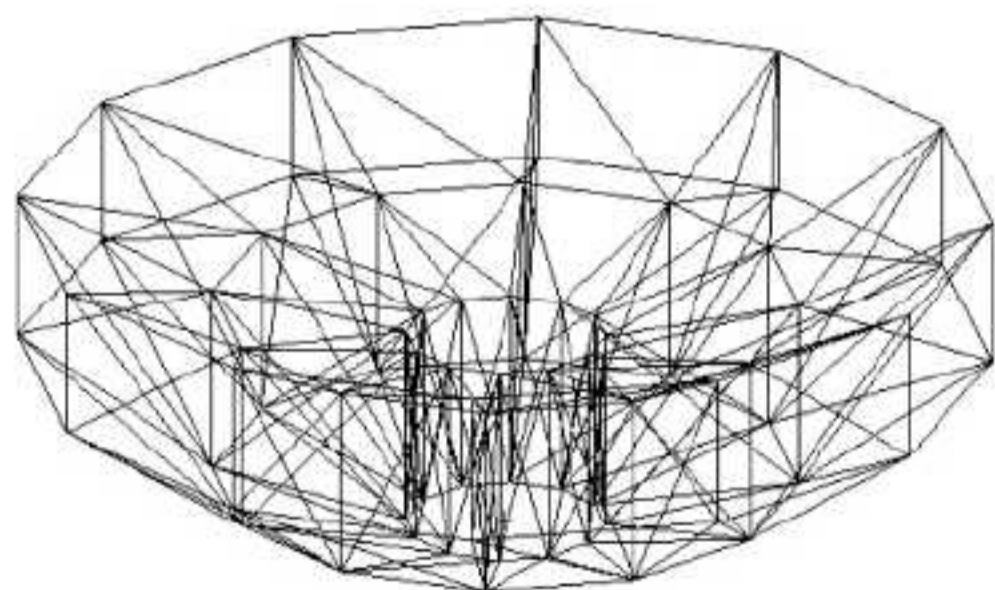


图 1 276 单元 10 m 天线轴视图

取结构前 4 阶为控制模态。在 MSC. Patran 建立大型空间可展开天线的有限元模型(如图 1 所示)。

遗传算法和 LQR 控制器的相关参数确定。遗传算法参数的选取:种群数为 $N_{\text{con}} = 100$,交叉概率 $P_c = 0.3$,变异概率 $P_m = 0.05$,最大遗传代数 $N_{\text{end}} = 200$ 。主动杆的数目为 $l = 24$ 。LQR 控制器

的权重矩阵参数

$$Q = \begin{bmatrix} \omega & \\ & I \end{bmatrix}, R = 10I$$

初始时刻在右侧端部节点处给一个沿天线口径半径方向向外的瞬时冲击，分别对结构不控制和控制，并且进行对比。

图2为利用遗传算法求解的过程图，从图中可以发现，达到稳定的遗传代数在178代，优化的目标函数值为 4.3210×10^{-14} 。主动杆的位置优化结果比较可靠。图3为对主动杆进行位置优化后的节点11的时间位移曲线。图4为对主动杆进行随机配置后的节点11的时间位移曲线。

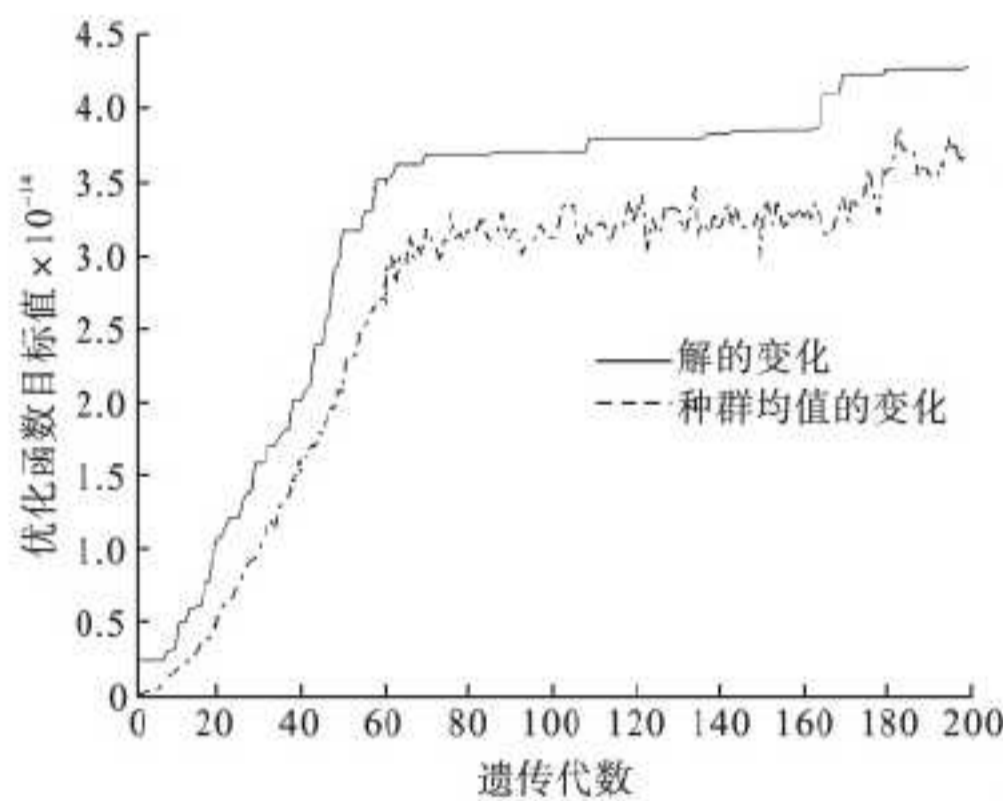


图2 利用遗传算法求解的过程

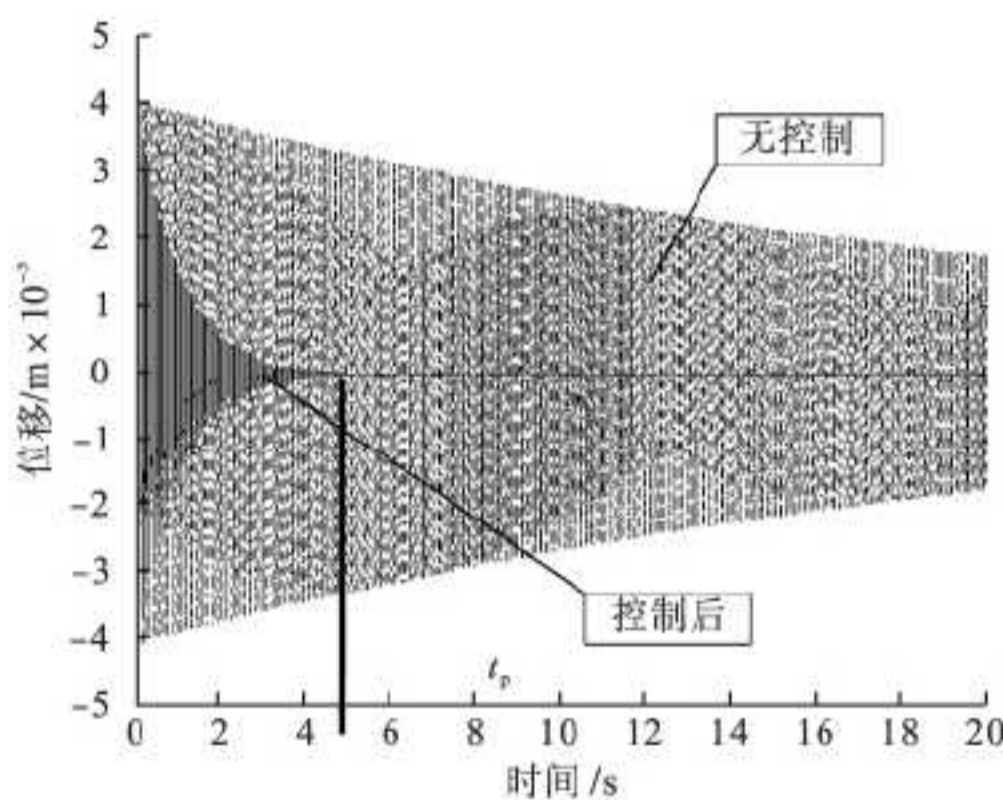


图3 利用优化配置准则配置主动杆的节点11的时间位移曲线

不进行主动控制时，天线结构系统在受到瞬态激励时，其振动幅值衰减很小；而进行主动控

制后，天线结构系统的振动幅值衰减速度有较大提高。在经历 8_s 内，进行主动控制的天线系统趋于平衡。对比图3和图4还可以发现，相同数目的主动杆件对其进行优化配置后得到的控制效果更加明显。

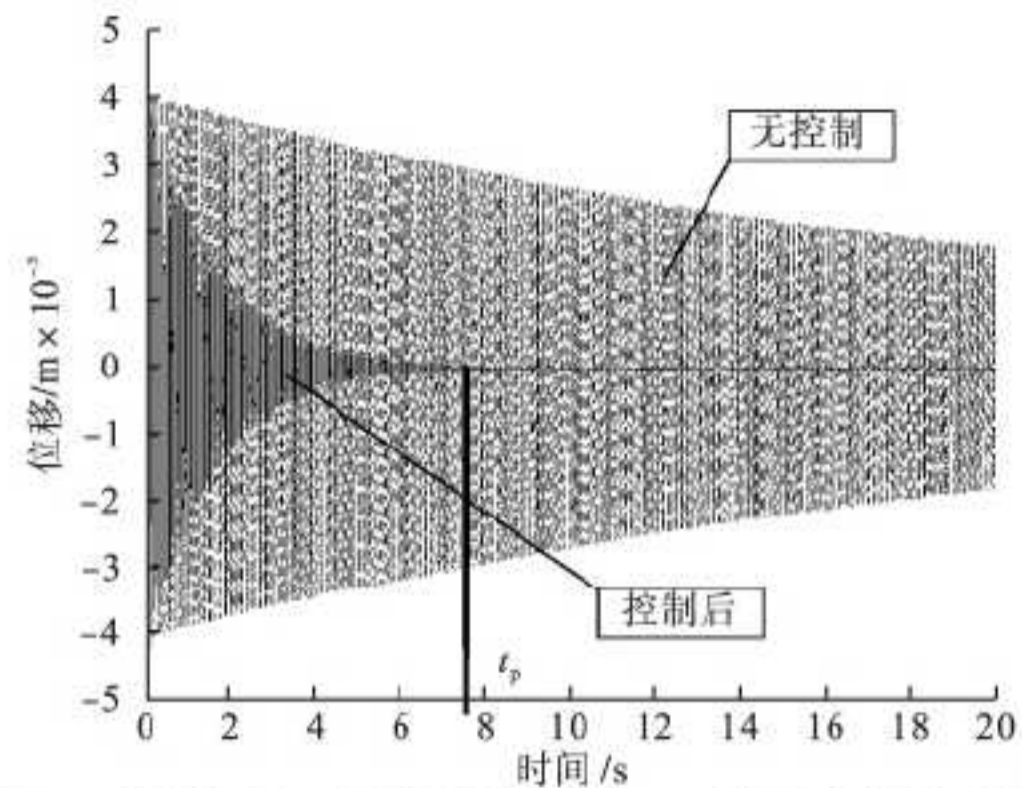


图4 随机配置主动杆得到节点11的时间位移曲线

4 结论

本文建立了以压电材料为基础的智能空间可展开天线结构的机电耦合动力学模型，并且结合结构振动的独立模态空间控制的方法，进行了压电主动杆的最优位置配置，通过 Matlab 软件对276杆空间天线进行数值仿真，从振动控制仿真的结果可以发现，优化结果具有可信性，文中的建模和分析方法对空间复杂的天线结构具有实际的工程意义。

参考文献 (References)

- [1] 黄文虎, 王心清, 张景绘, 等. 航天柔性结构振动控制的若干新进展 [J]. 力学进展, 1997, 27(1): 5-18.
- [2] 董聪, 夏人伟. 智能结构设计与控制中的若干核心技术问题 [J]. 力学进展, 1996, 26(2): 166-178.
- [3] 孙东昌, 张洪华, 吴宏鑫, 等. 压电智能梁中致动片的优化布置与实验 [J]. 中国空间科学技术, 1999, (6): 46-52.
- [4] 王宗利, 林启荣, 刘正兴. 压电智能梁的状态相关 LQR 振动控制 [J]. 上海交通大学学报, 2001, 35(4): 503-508.
- [5] 聂润兔, 邵成勋. 压电桁架结构动力学建模与振动控制 [J]. 宇航学报, 1998, 14(4): 8-14.
- [6] 曾光, 李东旭. 空间智能桁架作动器/传感器位置优化中的遗传算法应用 [J]. 宇航学报, 2007, 28(2): 461-464.