弱耦合星载天线结构振动神经网络预测控制

刘相秋，王 聪，邹振祝

（哈尔滨工业大学 航天学院，哈尔滨 150001，liuwang2824@gmail.com）

摘 要：为了研究弱耦合星载天线结构的振动控制，建立了该结构的有限元计算模型；并对结构失谐前后的动力学特性进行了分析；针对失谐前后的结构，分别采用神经网络预测（NNP）控制方法进行了振动控制，并与二次线性最优控制（LQR）方法的振动抑制效果进行了对比. 仿真结果表明，弱耦合星载天线结构参数的微小失谐会导致结构振动产生明显的模态局部化；采用 NNP 控制方法进行结构振动控制的效果明显优于 LQR 控制方法，且在由失谐导致模型失配时，NNP 控制方法对结构振动亦有较好的抑制；在进行此种结构的振动主动控制时必须考虑到结构失谐的影响.

关键词：弱耦合天线结构；有限元模型；失谐；动力学特性；神经网络预测控制；模态局部化

中图分类号：O327；V414.9 **文献标志码**：A **文章编号**：0367－6234(2010)03－0373－05

Vibration control of weak coupling antenna structure in satellite by neural networks predictive method

LIU Xiang-qiu, Wang Cong, ZOU Zhen-zhu

(School of Astronautics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China, liuwang2824@gmail.com)

Abstract: In order to research the vibration control of weak coupling antenna structures in satellite, a dynamics model of this kind of structure is established through the finite element method, by which the dynamic characteristics of the disordered and perfect structures are investigated respectively. Active vibration control of the structure is studied by applying neural networks predictive (NNP) control method and linear quadratic regulator (LQR) control method respectively. Simulation results show that little disorder of the weak coupling antenna structure can induce remarkable mode localization of vibration. The vibration control effects of NNP method are superior to those of LQR method, and NNP method has good performance on the occurrence of model mismatch induced by the structure disorder. The disorder must be considered seriously in active vibration control of weak coupling antenna structures.

Key words: weak coupling antenna structures; finite element model; disordered; dynamic characteristics; neural networks predictive control; mode localization

星载大型可展开天线大多采用弱耦合结构形式，如缠绕肋天线、径向肋天线等. 通常在进行这种结构的动力学分析及振动控制时，都将其看作是完全对称的，只需对其某几个子结构进行分析，然后将结果拓扑到整个结构上即可. 但由于制造等因素，实际上天线的 N 个子结构并不完全相同，是存在微小失谐的，例如：径向肋天线中各肋的材料参数（刚度、密度等）、长度等都在一定程度上存在差别. 子结构间的微小失谐会对这种结构的动力学特性产生较大的影响，使结构振动出现模态局部化现象. 模态局部化对卫星天线的精度和寿命等有极大影响，而且有可能使相关的振动控制系统失效. 随着星载大型柔性天线尺寸的增加，失谐所导致的结构振动模态局部化对结构整体性能的影响也随之增加，因而在进行弱耦合

收稿日期：2008－10－08.
基金项目：航天科技创新基金资助项目（CASC0113）.
作者简介：刘相秋（1980—），女，博士研究生；
王 聪（1966—），男，教授，博士生导师；
邹振祝（1937—），男，教授，博士生导师.

天线结构的动力学分析和振动控制系统设计时必须考虑模态局部化的影响.

失谐对弱耦合结构的影响在工程中被日渐重视[1-6]. 但以往的研究工作大多局限于简单结构、简单机械,或使用波动方法进行振动模态分析,且没有进行相关的振动控制研究. Jeffrey, 赵豫等[7-9]研究了大型天线的动力学特性及相关的振动控制问题,但在进行振动控制时,这些研究工作没有考虑失谐对控制系统设计的影响. 神经网络预测(NNP)控制方法是近年来发展起来的新型控制方法,具有控制效果好、鲁棒性强、对模型精确性要求不高等优点,且控制动作具有较强的预见性,从而对于存在由失谐导致的模型失配的情况,该方法较为适用[10-12]. 本文针对弱耦合天线结构采用有限元方法进行动力学特性研究,并应用 NNP 控制方法对这种结构的振动进行控制,以期为该类结构优化设计和动力学特性改善等提供基础.

1 结构动力学模型

图 1 为某星载弱耦合天线结构简化有限元模型. 天线由 N 根刚度较大的径向肋 R_i 作为主要骨架,天线反射面 M_{ri} 和辅助牵引面 M_{di} 被覆于相邻肋间的索网上,并由调节绳索相连接,它们均固定在位于结构中心的刚性毂上.

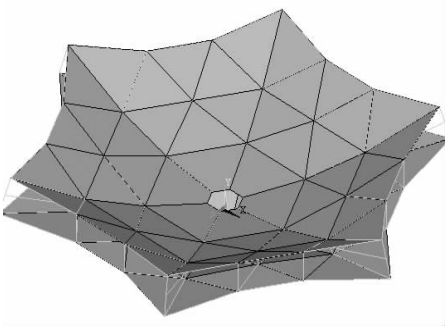


图 1 某弱耦合天线简化结构有限元模型

结构共由三种单元组成. 其中刚性肋及主动杆均采用 2 节点的线性梁单元模拟,主动部件结构为在调节绳索中局部采用压电主动杆的形式,传感器与作动器采取对位配置,个数相同. 每个节点有 6 个自由度,每个单元共 12 个自由度. 节点 i 的节点变量为

$$\{u_{ri}\} = \{u_{xi} \quad u_{yi} \quad u_{zi} \quad r_{xi} \quad r_{yi} \quad r_{zi}\}^{\mathrm{T}}.$$

单元差值函数为

$$N_{ri} = \frac{1}{2}(1 + \xi_i\xi).$$

其中: ξ_i 为正则化梁单元局部坐标,$\xi_i = \pm 1$.

反射面和辅助牵引面采用 3 节点三维薄膜单元,每个节点 3 个自由度,每个单元共 9 个自由度. 节点 i 的节点变量为

$$\{u_{mi}\} = \{u_{mxi} \quad u_{myi} \quad u_{mzi}\}^{\mathrm{T}}.$$

单元差值函数为

$$N_{mi} = L_i,$$

其中: L_i 为面积坐标.

索网和调节绳索均采用 2 节点索单元,每个节点有 3 个自由度,每个单元共 6 个自由度. 节点 i 的节点变量为

$$\{u_{li}\} = \{u_{lxi} \quad u_{lyi} \quad u_{lzi}\}^{\mathrm{T}}.$$

索单元的单元差值函数 N_{li} 采用与梁单元相同的形式. 膜单元和索单元能承受拉力而不承受压力,即当应变为负值时,刚度为零.

单元的动力学方程最终可由 Hamolton 原理得到,通过将单元局部坐标系内的刚度矩阵和质量矩阵变换到整体坐标系内,并组集所有单元的动力学方程,假设传感器及作动器不引起结构的失谐,则无阻尼系统的动力学方程最终可写为

$$[M]\{\ddot{u}\} + [K]\{u\} = \{F\} + [B][U].$$

其中: $\{F\}$ 为节点力向量,$[B]$ 为控制器作用矩阵,$[U]$ 为控制输入矩阵,质量矩阵 $[M]$、刚度矩阵 $[K]$ 分别为

$$\begin{aligned}[M] = {} & \sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N_b}\int_{l_{rj}}\rho_{ri}[N_r]^{\mathrm{T}}[N_r]\,\mathrm{d}l + \\ & \sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N_m}\iint_{A_j}\rho_{mi}[N_M]^{\mathrm{T}}[N_M]\,\mathrm{d}A + \\ & \sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N_l}\iint_{l_{lj}}\rho_{li}[N_l]^{\mathrm{T}}[N_l]\,\mathrm{d}l + \\ & \sum_{i=1}^{N_c}\int_{l_{si}}\rho_{si}[N_{bs}]^{\mathrm{T}}[N_{bs}]\,\mathrm{d}l + \\ & \sum_{i=1}^{N_c}\int_{l_{ai}}\rho_{ai}[N_{ba}]^{\mathrm{T}}[N_{ba}]\,\mathrm{d}l,\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}[K] = {} & \sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N_b}\int_{l_{rj}}[B_r]^{\mathrm{T}}[D_{ri}][B_r]A_r\,\mathrm{d}l + \\ & \sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N_m}\iint_{A_j}[B_m]^{\mathrm{T}}[D_{mi}][B_m]h\,\mathrm{d}A + \\ & \sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N_l}\int_{l_{lj}}[B_l]^{\mathrm{T}}[D_{li}][B_l]A_l\,\mathrm{d}l + \\ & \sum_{i=1}^{N_c}\int_{l_{si}}[B_{bs}]^{\mathrm{T}}[c_{si}][B_{bs}]A_s\,\mathrm{d}l + \\ & \sum_{i=1}^{N_c}\int_{l_{ai}}[B_{bs}]^{\mathrm{T}}[c_{ai}][B_{ba}]A_a\,\mathrm{d}l.\end{aligned}$$

其中: $l_{rj}, l_{lj}, l_{sj}, l_{aj}$ 分别为各肋、各索、各传感器和作动器单元的长度,A_j 为各膜片单元的面积,N_b, N_m, N_l 分别为各肋、膜和索所划分的单元数;h 为

膜的厚度，A_r 为梁单元截面面积，A_a，A_s 分别为作动器及传感器的横截面面积；ρ_{ri}，$[D_{ri}]$，ρ_{li}，$[D_{li}]$ 和 ρ_{mi}，$[D_{mi}]$ 分别为各肋、索和膜的密度和弹性矩阵，$i = 1,2,\cdots,N$，N 为结构含有的子结构数目，即肋、膜片对和索网对的数目；ρ_{si}，ρ_{ai}，$[c_{si}]$，$[c_{ai}]$ 为各传感器和作动器的密度、弹性系数矩阵，$i = 1,2,\cdots,N_c$；$[B_r]$，$[B_m]$，$[B_l]$，$[B_{bs}]$，$[B_{ba}]$ 为肋、膜、索和主动单元的应变矩阵；$[N_r]$，$[N_M]$，$[N_l]$，$[N_{bs}]$，$[N_{ba}]$ 为肋、膜、索和主动单元的形函数矩阵；当结构为无失谐理想状态时，上述各参数随着 i 的不同是相等的；而当结构失谐时，上述各参数随着 i 的不同也可能是不同的，这时结构的动力学特性与理想结构有着明显差异.

2　控制方法

NNP 控制系统见图 2. 该系统分为模型预测、反馈校正和滚动优化三部分. 模型预测的作用是预测对象在一定时间范围内给定输入下的输出；反馈校正减小了不确定性对模型预测的影响；滚动优化就是在每个间隔周期内寻找最优输入使实际输出与参考轨迹吻合. 该控制方法对预测模型不苛求结构形式，只强调其预测功能，控制动作具有较强的预见性；由于神经网络可以无限逼近系统，并可随系统的真实输出来调节网络本身的权值以减小模型失配的影响，所以即使存在一些模型失配，采用神经网络作为预测模型的预测控制方法仍可达到理想的效果. 从而对于存在由失谐导致的模型失配的情况，这种控制方法较为适用.

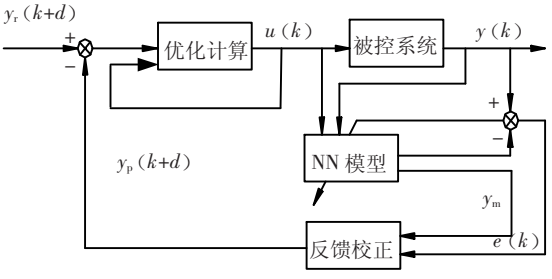


图 2　神经网络控制系统简图

2.1　预测模型

采用一具有适当节点数的三层 BP 神经网络理论上可以任意精度逼近任意连续和非连续函数. 神经网络模型 k 时刻的输出 $y(k)$ 可表示为前几步输入 $y(k-i)$ 和输出 $u(i)$ 的函数：

$$y(k) = f(y(k-1),y(k-2),\cdots,y(k-n),u(k),u(k-1),\cdots,u(k-m+1)).$$

其中：y，u 分别为被控系统的输出和输入，n、m 为系统阶次. 由于在 k 时刻是无法测得系统的实际输出的，所以利用神经网络模型来预测系统未来 d 步的输出：

$$y_m(k+d) = f(y(k+d-1),y(k+d-2),\cdots,y(k+d-n),u(k),u(k-1),\cdots,u(k-m+1)).$$

在计算 $y_m(k+d)$ 时，网络权值不变.

2.2　反馈校正

为更好的消除静差和模型误差，对模型预测输出 $y_m(k+i)$ 加以修正. 将 k 时刻的实际系统输出测量值与 NNP 模型输出之间的误差 $e(k)$ 作为反馈校正，附加到模型的预测输出上，则系统的预测输出可写为

$$y_p(k+i) = y_m(k+i) + h\cdot[y(k) - y_m(k)] = y_m(k+i) + h\cdot e(k). \quad (1)$$

其中：$h > 0$ 为误差加权因子.

2.3　参考输入

参考输入是一条从现在输出到给定输出的光滑曲线，它使系统的输出沿着一条光滑轨迹逐渐达到设定值 $r(k)$，可以用于减少过量控制，参考输入可表示为

$$y_r(k) = y(k), \quad (2)$$

$$y_r(k+i) = \alpha\cdot y(k+i-1) + (1-\alpha)\cdot r(k). \quad (3)$$

其中：$\alpha \in (0,1)$ 为柔化因子，α 越大，系统鲁棒性越好，但快速性越差.

2.4　滚动优化

滚动优化即在控制的每一步都对预测的未来有限步提出优化准则，进而求出当前步的控制输入 $u(k)$. k 时刻的优化性能函数为

$$J = \sum_{i=1}^{M}[y_r(k+i) - y_p(k+i)]^2 + \rho\sum_{i=1}^{P}[u(k+i-1) - u(k+i-2)]^2. \quad (4)$$

其中：M 为预测时域，P 为控制时域. 使上式极小化即可求出 k 时刻控制输入.

具体实施该算法时，首先取被控对象在一定输入输出范围内的样本，对已确定好网络层数、节点数的神经网络进行训练；然后确定初值，计算 k 时刻的输入 $u(k)$ 和输出 $y(k)$，并将其传递给神经网络；由神经网络预测出 $y_m(k)$，$y_m(k+i)$，$i = 1,2,\cdots,d$，进而由式(1) 求得 $y_p(k+i)$，同时根据 $y(k)$，$e(k)$ 调整网络权值；接着由式(3) 求出参考输入 $y_r(k+i)$，并按式(4) 所示的优化函数得到新一步的控制输入 $u(k)$.

3　算　例

3.1　模态分析算例

考虑图 1 所示的某弱耦合天线结构的有限元

模型,结构共有 6 根刚性肋组成,有效口径为4 m. 假设除各肋刚度外的结构参数均不失谐. 各肋的实际刚度与理想刚度的比为一组期望值为 1,均方差为 $\sigma = 0.1$ 的服从均匀分布的随机数.

图 3、图 4 分别为由 ANSYS 算得的结构无失谐与失谐时的模态振动应变云图,从图中可以看出结构无失谐时,应变分布均匀,整个结构的振动模态是延展的;而结构失谐时,只有一个或极少数几个子结构振动,应变只局限在上方一根肋的附近区域上,其他部位的应变几乎为零,模态是局部的. 经过对比失谐与无失谐结构各低阶最大振幅之比均在 2.5 以上. 其他阶模态的振动情形几乎与前几阶相同,只是局部共振发生的位置和应变大小等有所不同,这里不再给出相应图形. 可以看出,由于失谐给结构的动力学特性带来显著变化,所以在进行弱耦合结构的振动控制设计时,结构失谐的影响是不可忽略的. 下面将通过振动控制算例进一步阐述这一问题.

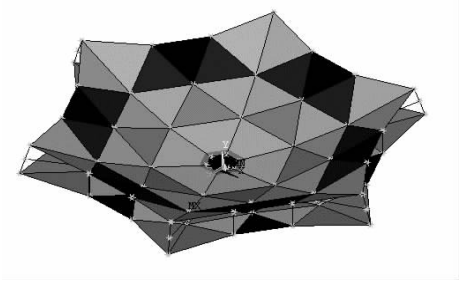


图 3 结构无失谐时的模态应变云图

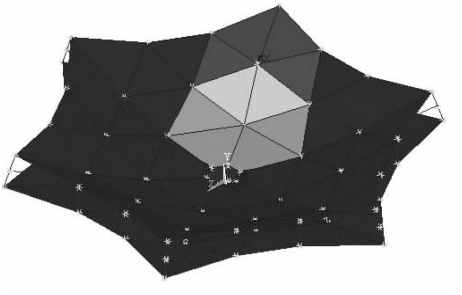


图 4 结构失谐时的模态应变云图

3.2 结构振动控制算例

振动控制算例仍采用 3.1 中的算例结构,某些调节绳索的局部采用压电主动杆,对位配置传感器. 在某肋的端部施加大小为 10 N,作用时间为 0.001 s 的纵向脉冲. 采用 LQR 控制方法和 NNP 控制方法分别对结构进行振动控制. 设无失谐结构模型为 M_1;失谐结构模型为 M_2;由 M_1 设计的 LQR 控制器为 A_1, NNP 控制器为 NNP_1. NNP_1 中的神经网络采用 Levenberg-Marquardt 方法提前进行离线训练,预测时域 $M = 7$,控制时域 $P = 2$,$\rho = 0$.

图 5、图 6 为采用 A_1 分别控制 M_1 和 M_2 振动前后的响应. 从图中可以看出:虽然采用理想结构参数设计的控制器 A_1 控制理想模型 M_1 本身效果较好,但实际结构会有失谐发生,这时如果仍采用 A_1 来控制失谐结构 M_2 时,效果不好,而且产生了激振.

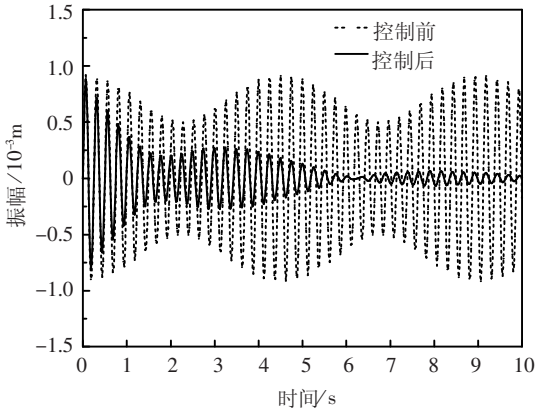


图 5 A_1 控制 M_1 振动前后的响应

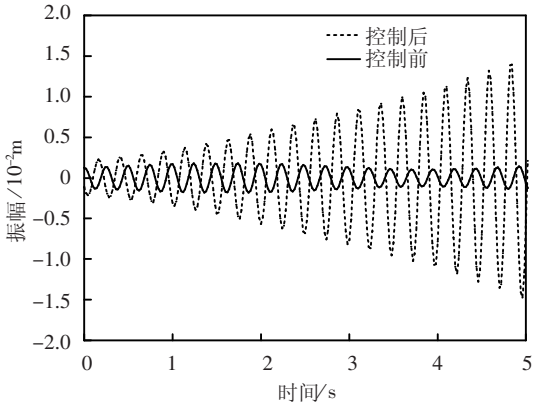


图 6 A_1 控制 M_2 振动前后的响应

图 7、图 8 为采用 NNP_1 控制 M_1 和 M_2 振动前后的响应,从图中可以看出:即使结构由失谐产生了模型的失配,但由于 NNP 控制的泛化性较好,而且由于采用了滚动优化,网络可以随时根据模型的实测输出与预测输出的误差来调整网络权值,该方法仍可达到较好的控制效果.

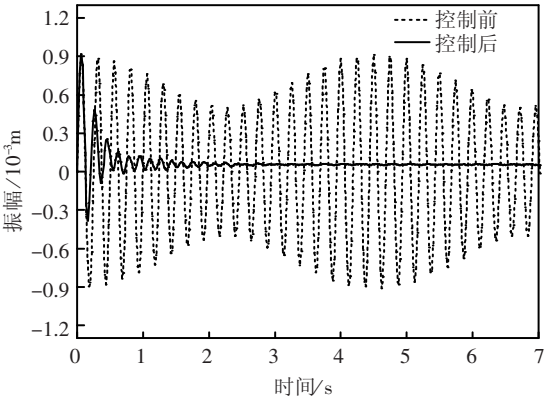


图 7 NNP_1 控制 M_1 振动前后的响应

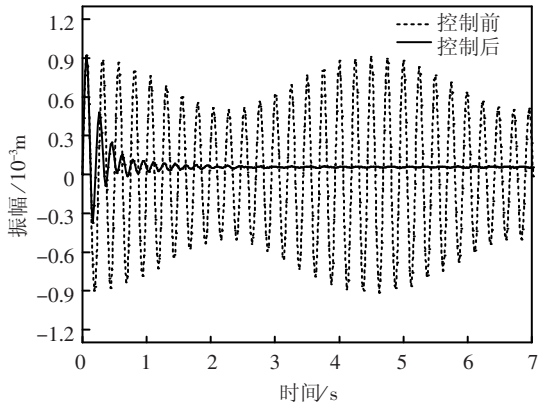


图 8　NNP_1 控制 M_2 振动前后的响应

4　结　论

1）用有限元方法建立了考虑失谐的弱耦合星载天线结构的动力学模型，并针对该模型研究了考虑失谐的结构振动 NNP 控制；

2）通过数值算例发现：无失谐结构与失谐结构的模态振型是完全不同的，前者的振型延周向均匀分布，而后者存在振动模态局部化的现象，且微小的失谐就会导致明显的模态局部化，失谐与无失谐结构各低阶最大模态振幅之比均 2.5 以上；

3）按照理想模型设计的普通振动控制系统控制实际上失谐的模型，控制效果不理想，严重时会引起控制系统失效，甚至导致激振；所以进行振动控制系统的设计时，结构失谐的影响不可忽略；

4）采用 NNP 控制方法对结构振动控制的效果明显，且在由失谐导致的模型失配时，仍有较好的控制效果.

参考文献：

[1] CHALLAMEL N, LANOSAND C, CASANDJIAN C. Localization in the buckling or in the vibration of a two-span weakened column [J]. Engineering Structures, 2006, 28(5):776 – 782.

[2] CASTANIER M P, PIERRE C. Lyapunov exponents and localization phenomena in multi-coupled nearly periodic system [J]. Journal of Sound and Vibration, 1995, 183(3):493 – 515.

[3] BENDIKSON O O. Localization phenomena in structural dynamics [J]. Chaos, Solitons and Fractals, 2000, 11:1621 – 1660.

[4] XIE W C, ARIARATNAM S T. Vibration mode localization in disordered cyclic structures, I: Single substructure mode [J]. Journal of Sound and Vibration, 1996, 189(5):625 – 645.

[5] AL-BEDOOR B O. Modeling the coupled torsional and lateral vibrations of unbalanced rotors [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2001, 190 (45):5999 – 6008.

[6] 李凤明，汪越胜，黄文虎，等. 失谐周期结构中振动局部化问题的研究进展[J]. 力学进展，2005，35(4)：498 – 512.

[7] 赵豫. 基于压电材料的智能天线结构控制实验研究[J]. 压电与声光，2007，29(3)：295 – 301.

[8] DOSCH J J. Comparison of vibration control schemes for a smart antenna[C]//Proceedings of the 31st Conference on Decision and Control. Tucson: IEEE, 1992: 1815 – 1820.

[9] 段宝岩. 柔性天线结构分析、优化与精密控制[M]. 北京：科学出版社，2005.

[10] 王丽珍，郑晟，张爱新. 神经网络预测控制算法及其应用 [J]. 机械工程与自动化，2007(2)：98 – 100.

[11] 翟东武，朱晞. 基于神经网络的结构振动响应预测控制[J]. 清华大学学报：自然科学版，2000，40(s1)：61 – 65.

[12] 舒迪前. 预测控制系统及其应用[M]. 北京：机械工业出版社，1998.

（编辑　张　宏）