

柔性神经网络滑模主动控制技术*

杨庆超¹, 杨理华², 朱石坚¹, 楼京俊¹

(1. 海军工程大学 科研部, 湖北 武汉 430033; 2. 海军潜艇学院 动力操纵系, 山东 青岛 266042)

摘要:针对复杂激励条件下的振动控制,对 Jiles-atherton 模型的磁致伸缩作动器在双层隔振系统中的主动控制进行了研究。以传统滑模控制为基础,提出一种柔性神经网络滑模控制算法。用正则化方法设计控制器的切换矩阵,建立神经网络权值和柔性映射参数更新学习公式,并将该控制策略应用于双层隔振系统的振动主动控制中。通过单频、多频及随机信号激励进行仿真研究,结果表明:柔性神经网络滑模控制器具有较强的鲁棒性,具有较好的控制效果。

关键词:双层隔振;磁致伸缩作动器;滑模控制;柔性神经网络;主动控制

中图分类号: O328 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-2486(2016)04-125-07

Active control technology using flexible neural network sliding mode algorithm

YANG Qingchao¹, YANG Lihua², ZHU Shijian¹, LOU Jingjun¹

(1. Office of Research & Development, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China;

2. Power Control Department, Navy Submarine Academy, Qingdao 266042, China)

Abstract: For solving the vibration control problem in complex excitation, the active control of magnetostrictive actuator of Jiles-atherton model in double-layer vibration isolation system was researched. Based on the traditional sliding mode control, a flexible neural network sliding mode control algorithm was proposed and the controller switching matrix was designed by the regularization method, then the updating formulas of the neural network weights and flexible mapping parameter were also established. Furthermore the control strategy was used for the active vibration control in double-layer vibration isolation system. Finally, the single frequency, multi frequency and random signal excitation were simulated and the results show that the flexible neural network sliding mode controller has a strong robustness and a good control effect.

Key words: double-layer vibration isolation; magnetostrictive actuator; sliding mode control; flexible neural network; active control

目前,诸多隔振控制仅研究振源设备或基础振动,即抑制设备传递至基础振动以减小对外辐射噪声或隔离基础传递至设备振动以减小对设备的影响。实际上,设备和基础上都会存在外界激励,然而对这种复杂激励下的振动控制的研究还相对较少。双层隔振作为一种有效的隔振方式已被广泛应用,其可大幅降低机械设备振动与基础的振动传递,是隔离振动和结构噪声的有效措施,对其进行主动控制一直是国内外研究重点^[1-4]。随着智能材料的发展,智能型作动器也应运而生,如磁流变作动器、记忆合金作动器、磁致伸缩作动器等,这些智能型执行机构对主动控制产生了巨大的推动作用^[5-6]。

磁致伸缩作动器(Magnetostrictive Actuator, MA)具有定位精度高、响应快、频带宽、输出力大

等优点,在振动控制、精密定位等领域有广阔应用前景^[7-10]。张天飞等建立了超磁致伸缩作动器动力学方程,并研究了比例-积分-微分(Proportion Integration Differentiation, PID)算法的主动控制,结果表明该作动器能有效降低低频振动,但系统自适应能力较弱^[11]。Francesco等分析了作动器幅频特性,并对单自由度隔振系统进行主动控制研究,仿真表明磁致伸缩作动器可明显减小传递至基础的力^[12]。王社良等设计出一种磁致伸缩作动杆,并用线性二次型调节器(Linear Quadratic Regulator, LQR)算法研究了系统结构主动振动,结果表明磁致伸缩材料作动杆可有效地减小结构的加速度和位移响应^[13]。

目前,针对主动控制,较为常用的控制策略主要有PID控制^[14]、鲁棒控制^[15]、模糊控制^[16]、最

* 收稿日期:2015-03-21

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51179197,51579242);国家自然科学基金青年基金资助项目(51509253)

作者简介:杨庆超(1985—),男,河南许昌人,讲师,博士,E-mail:yangsuper1987@126.com

优控制^[17]、自适应控制^[18]、滑模控制^[19]及神经网络控制^[20]等。这些控制策略各有优缺点,因此可将其进行交叉融合设计复合控制器以求更好的控制效果。滑模控制在系统处于滑动模态时与系统参数扰动及外部扰动无关,鲁棒性较强,但传统滑模控制存在抖振现象,对系统稳定性有一定影响^[21]。柔性神经网络采用带有可调参数的映射函数,在学习过程中能同时调整权值和映射函数参数,大大增加了神经网络灵活性和自学习能力^[22-23]。结合两种算法优点,可设计一种鲁棒性能更好的柔性神经网络滑模控制算法,这也为复杂激励条件下的双层隔振主动控制提供了一种新的控制思路。

1 双层隔振系统描述

1.1 隔振系统动力学模型

以图 1 双层隔振系统为研究对象,上层被隔振设备质量为 M_1 ,机脚橡胶隔振器刚度和阻尼为 K_1 和 C_1 ,中层隔振平台为浮筏,筏架质量为 M_2 ,其刚度和阻尼为 K_2 和 C_2 , f 为作动器输出的主动控制力, p 为上层被隔振设备外界扰动, \ddot{z} 为基础传至系统的加速度扰动。在建立主动隔振系统动力学模型时忽略作动器质量,仅输出主动控制力。 $x, y, z, \dot{x}, \dot{y}, \dot{z}, \ddot{x}, \ddot{y}, \ddot{z}$ 分别为上层被隔振设备、浮筏和基础振动的位移、速度、加速度。受力分析可得系统动力学方程为:

$$\begin{cases} M_1\ddot{x} + C_1(\dot{x} - \dot{y}) + K_1(x - y) = p - f \\ M_2\ddot{y} + C_2(\dot{y} - \dot{z}) + K_2(y - z) + C_1(\dot{y} - \dot{x}) + K_1(y - x) = f \end{cases} \quad (1)$$

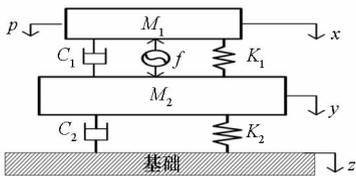


图 1 双层隔振系统主动控制模型

Fig. 1 Active control model of double-layer vibration isolation system

1.2 隔振系统状态空间

以 $X = [x, y, z, \dot{x}, \dot{y}, \dot{z}]^T$ 为状态变量、以中层隔振平台传至基础的力 $F = K_2(y - z) + C_2(\dot{y} - \dot{z})$ 为系统输出。用状态空间可将式(1)表示为:

$$\begin{cases} \dot{X}(t) = AX(t) + Bu(t) + B_1w_1(t) + B_2w_2(t) \\ Y(t) = CX(t) \end{cases} \quad (2)$$

式中,

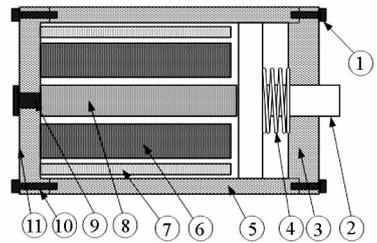
$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ -\frac{K_1}{M_1} & \frac{K_1}{M_1} & 0 & -\frac{C_1}{M_1} & \frac{C_1}{M_1} & 0 \\ \frac{K_1}{M_2} & -\frac{K_1 + K_2}{M_2} & \frac{K_2}{M_2} & \frac{C_1}{M_2} & -\frac{C_1 + C_2}{M_2} & \frac{C_2}{M_2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ -\frac{1}{M_1} \\ \frac{1}{M_2} \\ 0 \end{bmatrix}, B_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{1}{M_1} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, B_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} 0 \\ K_2 \\ -K_2 \\ 0 \\ C_2 \\ -C_2 \end{bmatrix}^T,$$

$$u = [f], w_1 = [p], w_2 = [\ddot{z}], Y = [F].$$

2 磁致伸缩作动器模型

MA 结构及原理如图 2、图 3 所示,主要由磁致伸缩棒(Giant Magnetostrictive Material, GMM)、驱动线圈、偏置磁场及输出顶杆等组成。



①顶端盖螺钉;②输出顶杆;③顶端盖;④预紧弹簧;
⑤外套;⑥驱动线圈;⑦偏置线圈;⑧GMM
⑨预紧螺钉;⑩底端盖螺钉;⑪底端盖

图 2 磁致伸缩作动器结构

Fig. 2 MA structure diagram

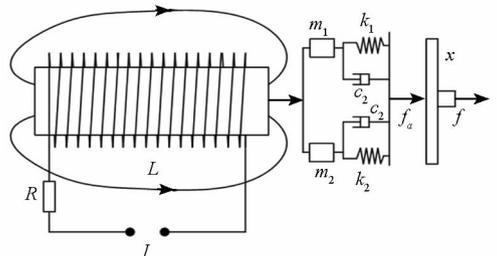


图 3 磁致伸缩作动器原理

Fig. 3 MA schematic

以 Jiles-atherton 理论为基础,研究磁致伸缩作动器的非线性磁滞特征,通过优化结构、合理配

置参数可使理论仿真和实验精确吻合并使作动器具有较高线性度。依据磁畴理论、压磁理论^[24-25]建立磁致伸缩作动器磁化过程偏微分方程及动力学方程,如式(3)~(10)所示:

$$H_e = H + \tilde{\alpha}M = nI + H_b + (\alpha + 9\lambda_s\sigma/2\mu_0M_s^2)M \quad (3)$$

$$M_{an} = M_s [\coth(H_e/a) - a/H_e] \quad (4)$$

$$\frac{dM_{irr}}{dH} = \frac{M_{an} - M_{irr}}{\delta k - \tilde{\alpha}(M_{an} - M_{irr})} \quad (5)$$

$$M_{rev} = b(M_{an} - M_{irr}) \quad (6)$$

$$M = M_{irr} + M_{rev} \quad (7)$$

$$\lambda = \frac{3}{2} \frac{\lambda_s}{M_s^2} M^2 \quad (8)$$

$$x = \frac{1}{(m_1 + m_2)s^2 + (c_1 + c_2)s + (k_1 + k_2)} \frac{A}{S^H} \lambda \quad (9)$$

$$f = \frac{m_2s^2 + c_2s + k_2}{(m_1 + m_2)s^2 + (c_1 + c_2)s + (k_1 + k_2)} \frac{A}{S^H} \lambda \quad (10)$$

其中: H_e 为有效磁场强度; $H = nI + H_b$ 为外加驱动磁场强度(n 为单位长度线圈匝数, I 为驱动电流, H_b 为偏置磁场); α 为分子场参数, M 为磁化强度, λ_s 为饱和磁致伸缩系数, σ 为预紧应力, μ_0 为真空磁导率, M_s 为饱和磁化强度, λ 为轴向磁致伸缩应变, a 为无磁滞磁化强度形状系数, k 为不可逆损耗系数, $\tilde{\alpha}$ 为综合磁畴作用系数, b 为可逆系数;当 $dH > 0$ 时, $\delta \equiv +1$, 当 $dH < 0$ 时, $\delta \equiv -1$; M_{an} 为无磁滞磁化强度, M_{irr} 为不可逆磁化强度, M_{rev} 为可逆磁化强度。设 c, ρ, L, A, S^H 为 GMM 等效阻尼系数、密度、长度、横截面积及轴向柔顺系数, 则 $m_1 = \rho LA/3, c_1 = cA/L, k_1 = A/S^H L$ 为其等效质量、阻尼系数和刚度系数。 m_2, c_2, k_2, s 分别为负载(包括输出顶杆、末端质量)的等效质量、阻尼系数、刚度系数、拉普拉斯算子。结合图1所示隔振系统,文中取 $m_2 = M_1, c_2 = C_1, k_2 = K_1$ 。

3 控制器的设计及分析

3.1 系统描述

将设备和基础扰动均看作外界激励,令 $\Delta B_2 = B_1^{-1}B_2$, 方程式(2)可表示为:

$$\dot{X}(t) = AX(t) + Bu(t) + B_1[w_1(t) + \Delta B_2w_2(t)] = AX(t) + BU(t) \quad (11)$$

式中, $U = u + B^{-1}B_1(w_1 + \tilde{B}_2w_2)$, 记

$$X(t) = \begin{bmatrix} \tilde{x}(t) \\ \dot{\tilde{x}}(t) \end{bmatrix}, A = \begin{bmatrix} 0 & I_3 \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ M^{-1}D \end{bmatrix},$$

$$\text{其中, } M = \begin{bmatrix} M_1 & 0 & 0 \\ 0 & M_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, K = \begin{bmatrix} K_1 & -K_1 & 0 \\ -K_1 & (K_1 + K_2) & -K_2 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$C = \begin{bmatrix} C_1 & -C_1 & 0 \\ -C_1 & (C_1 + C_2) & -C_2 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, D = [-1 \ 1 \ 0]^T \text{ 分别为}$$

系统质量矩阵、刚度矩阵、阻尼矩阵、控制力位置矩阵。

3.2 滑模控制设计

滑模控制使系统从任意初始状态趋近滑模面后以全状态反馈为基础用跃变方式实现滑模运动。因此,合理设计滑模面对系统动态特性至关重要。假定系统切换函数有如式(12)所示形式^[26-27]:

$$S(t) = \Theta X \quad (12)$$

式中, S 为切换函数, Θ 为 1×6 维待定切换矩阵, $X = [x, y, z, \dot{x}, \dot{y}, \dot{z}]^T$ 为状态变量,取非奇异状态转换矩阵 $\Gamma \in R^{6 \times 6}$ 对式(12)进行正则化处理,坐标变换为:

$$Z(t) = \Gamma X(t) \quad (13)$$

式中, $\Gamma = \begin{bmatrix} I_5 & -\tilde{B}_1\tilde{B}_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} \tilde{B}_1 \\ \tilde{B}_2 \end{bmatrix}, \tilde{B}_1 \in R^{5 \times 1}, \tilde{B}_2 \in R^{1 \times 1}$, 将式(13)代入式(11)和式(12)中可得系统正则形式及切换面为:

$$\begin{cases} \dot{Z}(t) = \bar{A}Z(t) + \bar{B}U(t) \\ S(t) = \bar{\Theta}Z(t) \end{cases} \quad (14)$$

式中, $\bar{A} = \Gamma A \Gamma^{-1}, \bar{B} = [0 \ \tilde{B}_2^T]^T, \bar{\Theta} = \Theta \Gamma^{-1}$, 令 $Z(t) = \begin{bmatrix} Z_1(t) \\ Z_2(t) \end{bmatrix}, \bar{A} = \begin{bmatrix} \bar{A}_{11} & \bar{A}_{12} \\ \bar{A}_{21} & \bar{A}_{22} \end{bmatrix}, \bar{\Theta} = \begin{bmatrix} \bar{\Theta}_1 \\ \bar{\Theta}_2 \end{bmatrix}$, 其中 $Z_1(t) \in R^{5 \times 1}, Z_2(t) \in R^{1 \times 1}, \bar{A}_{11} \in R^{5 \times 5}, \bar{A}_{12} \in R^{5 \times 1}, \bar{A}_{21} \in R^{1 \times 5}$ 及 $\bar{A}_{22} \in R^{1 \times 1}$, 式(14)可以分解为:

$$\begin{cases} \dot{Z}_1(t) = \bar{A}_{11}Z_1(t) + \bar{A}_{12}Z_2(t) \\ S = \bar{\Theta}_1Z_1(t) + \bar{\Theta}_2Z_2(t) \end{cases} \quad (15)$$

令式(15)中 $S = 0$ 及 $\bar{\Theta}_2 = 1$, 则有:

$$\begin{cases} Z_2(t) = -\bar{\Theta}_1Z_1(t) \\ \dot{Z}_1(t) = (\bar{A}_{11} - \bar{A}_{12}\bar{\Theta}_1)Z_1(t) \end{cases} \quad (16)$$

式中 $\bar{\Theta}_1$ 可以采用最优控制法或极点配置法获得,当 $\bar{\Theta}_1$ 确定后可得系统滑模面 $S(t)$ 。在确定滑模面以后,本文采用饱和函数的指数趋近律,如式(17):

$$\dot{S}(t) = -\beta S(t) - \xi \text{sat}[S(t)] \quad \xi > 0, \beta > 0 \quad (17)$$

式中, β 为趋近系数, ξ 为切换面趋近速率, 其值越大系统抖振也越强烈, sat 为饱和函数, 联合式(11)、式(12)、式(17)并忽略外界扰动可得滑模控制律为:

$$u = -(\mathbf{OB})^{-1} \{ \mathbf{OAX}(t) + \beta S(t) + \xi \text{sat}[S(t)] \} \quad (18)$$

3.3 柔性神经网络滑模控制器设计

柔性神经网络采用柔性 Sigmoid 映射函数, 可同时修改连接权及自身参数, 具有收敛速度快和学习能力强的特点^[28]。可用柔性神经网络对滑模控制参数进行在线修正, 设计柔性神经网络滑模控制器减小系统抖振。建立图 4 所示输入 $s_i = [S(t) \quad \text{sat}(S(t))]^T$ 与输出 $O_l^{(3)} = [\beta \quad \xi]^T$ 间的柔性神经网络, 其结构形式为 $2 \times r \times 2$ 。

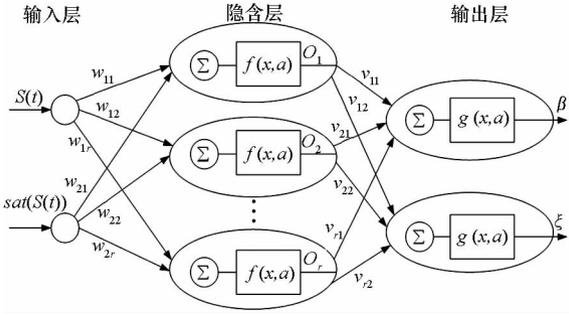


图 4 柔性神经网络模型

Fig. 4 Flexible neural network model

其中, $\mathbf{W}_1 = \begin{bmatrix} w_{11} & w_{12} & w_{13} & \cdots & w_{1r} \\ w_{21} & w_{22} & w_{23} & \cdots & w_{2r} \end{bmatrix}$ 为输入

层和隐含层间连接权矩阵, $\mathbf{D}_1 = [d_{11} \quad d_{12} \quad d_{13} \quad \cdots \quad d_{1r}]^T$ 为隐含层阈值矢量,

$\mathbf{A}_1 = [a_1 \quad a_2 \quad a_3 \quad \cdots \quad a_r]^T$ 为隐含层参数矢量,

$\mathbf{V}_2 = \begin{bmatrix} v_{11} & v_{21} & v_{31} & \cdots & v_{r1} \\ v_{12} & v_{22} & v_{32} & \cdots & v_{r2} \end{bmatrix}^T$ 为隐含层和输出层

间连接权矢量, $\mathbf{D}_2 = [d_{21} \quad d_{22}]^T$ 为输出层阈值矢量,

$\mathbf{E}_2 = [e_1 \quad e_2]^T$ 为输出层参数矢量, 控制器的隐含层及输出层映射函数如式(19)所示:

$$\begin{cases} f(x_j, a_j) = \frac{1 - \exp^{-2x_j a_j}}{a_j (1 + \exp^{-2x_j a_j})} & j = 1, 2, \dots, r \\ g(x_l, e_l) = \frac{2|e_l|}{1 + \exp^{-2|e_l| x_l}} & l = 1, 2 \end{cases} \quad (19)$$

那么, 隐含层和输出层的输入、输出可表示为:

$$\begin{cases} x_j^{(2)}(t) = w_{1j} \cdot S(t) + w_{2j} \cdot \text{sat}[S(t)] + d_{1j} \\ O_l^{(2)}(t) = f[x_j^{(2)}(t), a_j] \end{cases} \quad (20)$$

$$\begin{cases} x_l^{(3)}(t) = \sum_{j=1}^r O_j^{(2)}(t) \cdot v_{jl} + d_{2l} \\ O_l^{(3)}(t) = g[x_l^{(3)}(t), e_l] \end{cases} \quad (21)$$

以中层平台位移为调整指标, 如式(22)所示:

$$E = \frac{1}{2} (y - z)^2 \quad (22)$$

应用梯度下降法, 柔性神经网络输出层网络权值调整算法为:

$$\Delta v_{jl} = -\eta \frac{\partial E}{\partial v_{jl}} = -\eta \frac{\partial E}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial u} \frac{\partial u}{\partial O_l^{(3)}(t)} \frac{\partial O_l^{(3)}(t)}{\partial x_l^{(3)}(t)} \frac{\partial x_l^{(3)}(t)}{\partial v_{jl}} \quad (23)$$

式中: η 为学习速率; $\frac{\partial E}{\partial y} = y - z$; $\frac{\partial y}{\partial u} = \text{sgn}(\frac{\partial y}{\partial u})$, 一

般可取为 1; $\frac{\partial O_l^{(3)}(t)}{\partial x_l^{(3)}(t)} = \frac{\partial g[x_l^{(3)}(t), e_l]}{\partial x_l^{(3)}(t)}$; $\frac{\partial x_l^{(3)}(t)}{\partial v_{jl}} =$

$O_j^{(2)}(t)$; $\frac{\partial u}{\partial O_l^{(3)}(t)}$ 由式(18)可得。输出层权值调整应为:

$$\Delta v_{jl} = -\eta (y - z) \frac{\partial u}{\partial O_l^{(3)}(t)} \frac{\partial g[x_l^{(3)}(t), e_l]}{\partial x_l^{(3)}(t)} O_j^{(2)}(t) \quad (24)$$

同理, 可得输出层映射函数参数调整为:

$$\Delta e_l = -\eta (y - z) \frac{\partial u}{\partial O_l^{(3)}(t)} \frac{\partial g[x_l^{(3)}(t), e_l]}{\partial e_l} \quad (25)$$

柔性神经网络隐含层网络权值调整算法为:

$$\Delta w_{ij} = -\eta \frac{\partial O_j^{(2)}(t)}{\partial x_j^{(2)}(t)} \frac{\partial x_j^{(2)}(t)}{\partial w_{ij}} \frac{\partial E}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial u} \cdot \sum_{l=1}^2 \left[\frac{\partial u}{\partial O_l^{(3)}(t)} \frac{\partial O_l^{(3)}(t)}{\partial x_l^{(3)}(t)} \frac{\partial x_l^{(3)}(t)}{\partial O_j^{(2)}(t)} \right] \quad (26)$$

式中: η , $\frac{\partial E}{\partial y}$, $\frac{\partial y}{\partial u}$, $\frac{\partial u}{\partial O_l^{(3)}(t)}$ 及 $\frac{\partial O_l^{(3)}(t)}{\partial x_l^{(3)}(t)}$ 的解释说明

同上; $\frac{\partial x_l^{(3)}(t)}{\partial O_j^{(2)}(t)} = v_{jl}$; $\frac{\partial O_j^{(2)}(t)}{\partial x_j^{(2)}(t)} = \frac{\partial f[x_j^{(2)}(t), a_j]}{\partial x_j^{(2)}(t)}$;

$\frac{\partial x_j^{(2)}(t)}{\partial w_{ij}} = s_i, s_1 = S(t), s_2 = \text{sat}[S(t)]$, 隐含层权值调整可表示为:

$$\Delta w_{ij} = -\eta (y - z) \frac{\partial f[x_j^{(2)}(t), a_j]}{\partial x_j^{(2)}(t)} s_i \cdot \sum_{l=1}^2 \left\{ \frac{\partial u}{\partial O_l^{(3)}(t)} \frac{\partial g[x_l^{(3)}(t), e_l]}{\partial x_l^{(3)}(t)} v_{jl} \right\} \quad (27)$$

同理, 隐含层柔性映射函数参数调整为:

$$\Delta a_j = -\eta(y-z) \frac{\partial f[x_j^{(2)}(t), a_j]}{\partial a_j} + \sum_{l=1}^2 \left\{ \frac{\partial u}{\partial O_l^{(3)}(t)} \frac{\partial g[x_l^{(3)}(t), e_l]}{\partial x_l^{(3)}(t)} v_{jl} \right\} \quad (28)$$

输出层、隐含层网络权值及参数更新算法为:

$$\begin{cases} v_{jl}(t) = v_{jl}(t-1) + \Delta v_{jl}(t) + \alpha[v_{jl}(t) - v_{jl}(t-1)] \\ e_l(t) = e_l(t-1) + \Delta e_l(t) + \alpha[e_l(t) - e_l(t-1)] \\ w_{ij}(t) = w_{ij}(t-1) + \Delta w_{ij}(t) + \alpha[w_{ij}(t) - w_{ij}(t-1)] \\ a_j(t) = a_j(t-1) + \Delta a_j(t) + \alpha[a_j(t) - a_j(t-1)] \end{cases} \quad (29)$$

其中,学习速率为 $\eta \in (0, 1)$, 惯性量系数为 $\alpha \in (0, 1)$ 。柔性神经网络滑模控制器通过以上算法可自适应改变连接权值和 Sigmoid 函数参数, 从而实现滑模参数 β 和 ξ 自动调节, 柔性神经网络滑模控制律可表示为:

$$u = -(\mathbf{OB})^{-1} \{ \mathbf{OAX}(t) + O_1^{(3)}(t)S(t) + O_2^{(3)}(t) \text{sat}[S(t)] \} \quad (30)$$

4 数值算例

本节通过数值仿真对上述理论进行验证, 中低频条件下以中层筏架平台位移为评价指标, 将不同控制策略的主动控制与被动隔振进行对比, 相关参数如下:

$n = 1200, H_b = 10 \text{ kA/m}, a = 7102 \text{ A/m}, \tilde{\alpha} = -0.01, M_s = 7.65 \times 10^5 \text{ A/m}, \lambda_s = 1.005 \times 10^{-6}, k = 3283 \text{ A/m}, b = 0.18, S^H = 1.3 \times 10^{-11}, d = 1.0 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{N}, \sigma = 6.7 \text{ MPa}, c = 3000 \text{ kNs/m}^2, \rho = 9250 \text{ kg/m}^3, L = 8.6 \times 10^{-4} \text{ m}, A = 78.5 \times 10^{-6} \text{ m}^2, M_1 = 155.42 \text{ kg}, C_1 = 302.7 \text{ Ns/m}, K_1 = 57\,016.2 \text{ N/m}, M_2 = 22.5 \text{ kg}, C_2 = 290.544 \text{ Ns/m}, K_2 = 190\,000 \text{ N/m}, \eta = 0.5, \alpha = 0.02, \ddot{z}$ 为微量随机激励, 通过有限元软件计算双层隔振系统的固有频率为 $f_1 = 2.8 \text{ Hz}, f_2 = 15.6 \text{ Hz}, p$ 分别取单频 f_1, f_2 、多频 $\sqrt{2}f_1 \text{ Hz} + \sqrt{2}f_2 \text{ Hz} + 50 \text{ Hz}$ 及随机激励, 仿真结果如图 5~9 及表 1 所示。

图中, control-off, SMC 及 FNNSMC 分别表示被动隔振、滑模算法及柔性神经网络滑模的主动控制。由图 5~8 可知, 两种控制算法的主动控制均可有效抑制复杂条件下的外界激励, 但相对 SMC 算法而言, FNNSMC 明显具有更好的隔振效果和响应速度。由表 1 可知, 相对于被动隔振, SMC 和 FNNSMC 在单频、多频及随机激励时筏架位移分别减小了约 81.08%, 78.22%, 81.13%, 55.34% 及 99.46%, 93.17%, 96.25%, 73.57%。因此, FNNSMC 比 SMC 具有明显的优越性和良好

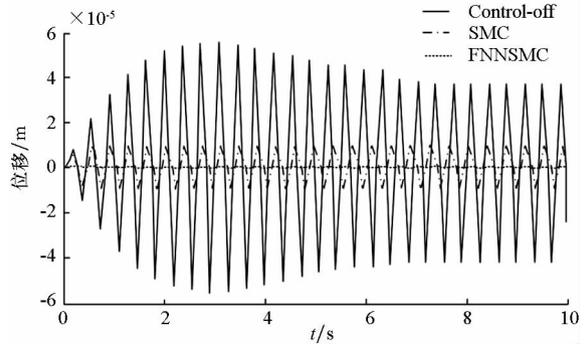


图5 单频 f_1 激励中层位移历程图
Fig. 5 Time history of middle-layer displacement with f_1 excitation

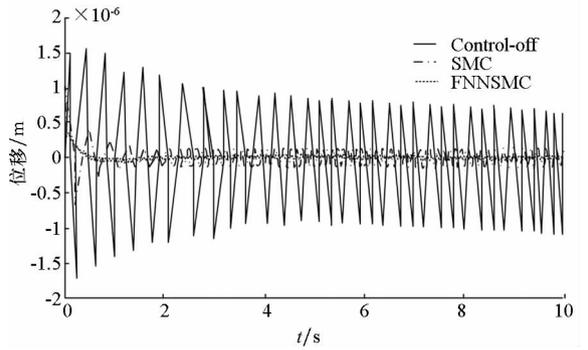


图6 单频 f_2 激励中层位移历程图
Fig. 6 Time history of middle-layer displacement with f_2 excitation

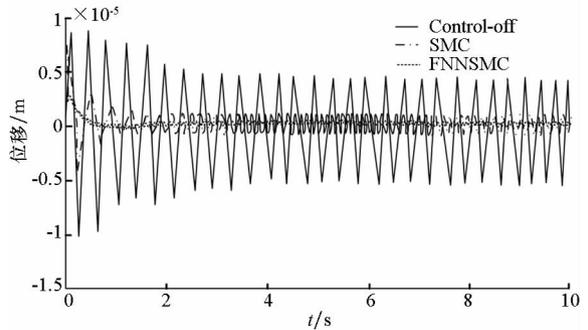


图7 多频 $\sqrt{2}f_1 \text{ Hz} + \sqrt{2}f_2 \text{ Hz} + 50 \text{ Hz}$ 激励中层位移历程图

Fig. 7 Time history of middle-layer displacement with $\sqrt{2}f_1 \text{ Hz} + \sqrt{2}f_2 \text{ Hz} + 50 \text{ Hz}$ excitation

的控制效果。

由图 9 可知, 被动隔振系统的两个峰值所对应的固有频率与有限元软件计算的固有频率完全吻合, 通过主动控制可以改变系统模态, 消除系统一阶和二阶共振峰, 从而达到隔振目的。由图可知, 在复杂激励条件下, SMC 算法主动控制在 2 Hz 之前隔振效果较差, 随着激励频率增加控制效果存在一定振荡。而 FNNSMC 算法则在较宽频段内都有良好的控制效果, 特别是 10 Hz 以内

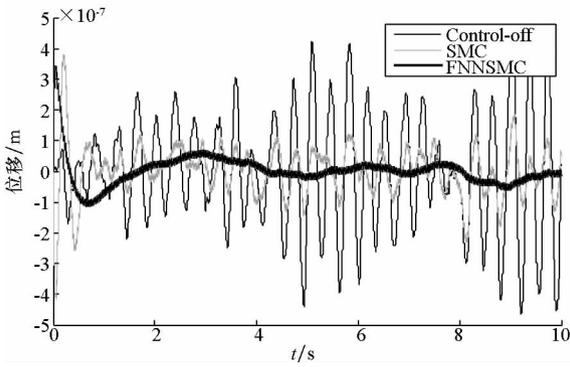


图 8 随机激励中层位移历程图
Fig. 8 Time history of middle-layer displacement with random excitation

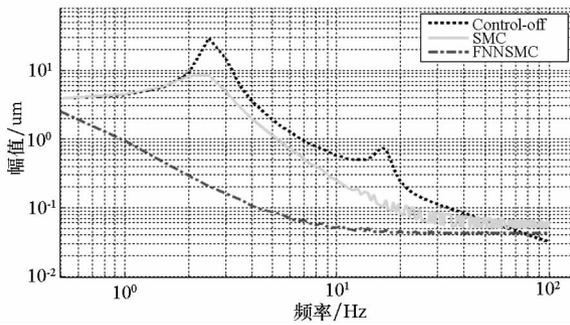


图 9 中层位移幅频曲线
Fig. 9 Amplitude frequency curves of middle-layer displacement

隔振效果特别明显。但是,主动控制和被动隔振的幅频曲线始终有交叉点,这也说明主动控制比较适合于中低频振动控制,可以弥补被动隔振的不足,能有效抑制振动传递并拓宽系统隔振频段,这对研究复杂激励条件下的振动控制有重要意义。

表 1 各激励中层位移均方根值

Tab. 1 The middle-layer displacement RMS with excitations

	中层位移 RMS/ μm			
	f_1	f_2	$\sqrt{2}f_1 \text{ Hz} + \sqrt{2}f_2 \text{ Hz} + 50 \text{ Hz}$	随机
被动隔振	32.197 0	0.657 6	3.706 7	0.189 2
SMC	6.089 9	0.143 2	0.699 6	0.084 5
FNNSMC	0.171 98	0.044 9	0.139 1	0.050 0

5 结论

针对复杂激励条件下的振动控制,建立了双层隔振系统动力学方程,以磁致伸缩作动器为执行机构,结合滑模和神经网络理论,提出了柔性神

经网络滑模控制器的设计方法,并研究其在主动控制中的应用。结果表明:在单频、多频及随机激励条件下,滑模算法及柔性神经网络滑模算法的主动控制效果均优于被动隔振;柔性神经网络滑模算法的主动控制具有更好的隔振效果和更宽的隔振频段,能有效提高响应速度并抑制振动传递;主动控制有一定的隔振范围,超出该有效频段隔振效果有所恶化。本文对研究复杂激励条件下隔振系统的设计、控制及工程应用具有实际意义。

参考文献 (References)

- [1] 高宏伟, 罗军, 贾建援. 双层隔振系统主动控制的建模与仿真[J]. 机械科学与技术, 2005, 24(11): 1340-1344. GAO Hongwei, LUO Jun, JIA Jianyuan. Modeling and simulation of active control of two-layer vibration isolation system [J]. Mechanical Science and Technology, 2005, 24(11): 1340-1344. (in Chinese)
- [2] 杨铁军, 顾仲权, 刘志刚, 等. 双层隔振系统耦合振动主动控制试验研究[J]. 振动工程学报, 2003, 16(2): 25-27. YANG Tiejun, GU Zhongquan, LIU Zhigang, et al. Experimental research on active control of coupled vibration for a two-stage isolation system [J]. Journal of Vibration Engineering, 2003, 16(2): 25-27. (in Chinese)
- [3] 张克国, 杜清府. 复杂激励下双层隔振系统的主动控制研究[J]. 中国机械工程, 2006, 17(2): 134-136. ZHANG Keguo, DU Qingfu. Study on active control of vibration in two-layer isolation system with multiple excitations [J]. China Mechanical Engineering, 2006, 17(2): 134-136. (in Chinese)
- [4] 何琳, 徐伟. 舰船隔振装置技术及其进展[J]. 声学报, 2013, 38(2): 128-135. HE Lin, XU Wei. Naval vessel machinery mounting technology and its recent advances [J]. Acta Acustica, 2013, 38(2): 128-135. (in Chinese)
- [5] 王云峰, 程伟. 小型航天器微振动主动控制平台建模与仿真[J]. 振动与冲击, 2013, 32(22): 140-145. WANG Yunfeng, CHENG Wei. Modeling and simulation of a mini micro-vibration active control platform for spacecrafts [J]. Journal of Vibration and Shock, 2013, 32(22): 140-145. (in Chinese)
- [6] 权渭锋, 毛剑琴, 李超. 智能结构与智能控制在振动主动控制中的应用[J]. 信息与电子工程, 2004, 2(3): 232-237. QUAN Weifeng, MAO Jianqin, LI Chao. Application of intelligent structure and intelligent control in active vibration control [J]. Information and Electronic Engineering, 2004, 2(3): 232-237. (in Chinese)
- [7] Sathishkumar R, Vimalajuliet A, Prasath J S. Terfenol-D: a high power giant magnetostrictive material for submarine mapping [J]. International Journal of Engineering Science and Technology, 2010, 2(12): 7165-7170.
- [8] 陶孟仑, 陈定方, 卢全国, 等. 超磁致伸缩材料动态涡流损耗模型及试验分析[J]. 机械工程学报, 2012, 48(13): 146-151. TAO Menglun, CHEN Dingfang, LU Quanguo, et al. Eddy current losses of giant magnetostrictors: modeling and experimental analysis [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(13): 146-151. (in Chinese)
- [9] 胡世峰, 朱石坚. 基于CMAC小脑神经网络的超磁致伸缩

- 作动器高精度控制的仿真研究[J]. 振动与冲击, 2009, 28(3): 68-72.
- HU Shifeng, ZHU Shijian. High-precision control of giant magnetostrictive actuator based on CMAC neural network[J]. Journal of Vibration and Shock, 2009, 28(3): 68-72. (in Chinese)
- [10] Lau H Y, Liu K P. Feasibility of using GMM based actuators in active control of journal bearing system [C]//Proceedings of the World Congress on Engineering, 2009.
- [11] 张天飞, 汪鸿振, 孙曜. 超磁致伸缩作动器用于振动主动控制中的仿真研究[J]. 振动与冲击, 2006, 25(1): 61-65.
- ZHANG Tianfei, WANG Hongzhen, SUN Yao. Simulation on active vibration control [J]. Journal of Vibration and Shock, 2006, 25(1): 61-65. (in Chinese)
- [12] Francesco C D, Simone C. A model of magnetostrictive actuators for active vibration control [C]//Proceedings of IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 2011.
- [13] 王社良, 纪庆波, 代建波, 等. 基于超磁致伸缩作动杆的结构振动主动控制研究[J]. 噪声与振动控制, 2010, 30(6): 23-26.
- WANG Sheliang, JI Qingbo, DAI Jianbo, et al. Study on active vibration control of the structure using giant magnetostrictive actuator [J]. Noise and Vibration Control, 2010, 30(6): 23-26. (in Chinese)
- [14] 李斌, 董万元, 王小兵. 一种气动/电磁联合驱动的主动隔振器设计与仿真[J]. 西北工业大学学报, 2013, 31(6): 871-877.
- LI Bin, DONG Wanyuan, WANG Xiaobin. Design and simulation of an active vibration isolator based on pneumatic electromagnetic hybrid driving [J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2013, 31(6): 871-877. (in Chinese)
- [15] 郝慧荣, 白鸿柏, 张慧杰. 六自由度主被动一体隔振平台鲁棒控制[J]. 振动与冲击, 2012, 31(7): 122-127.
- HAO Huirong, BAI Hongbai, ZHANG Huijie. Robust control of a 6-DOF active-passive vibration isolation platform [J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(7): 122-127. (in Chinese)
- [16] 赫晓光. 双层隔振系统模糊振动主动控制技术[J]. 噪声与振动控制, 2010, 30(2): 38-42.
- HE Xiaoguang. Fuzzy logic control of double stage vibration isolation system [J]. Noise and Vibration Control, 2010, 30(2): 38-42. (in Chinese)
- [17] 高新科, 邵鹊. 智能阻尼双层隔振系统的半主动最优控制[J]. 振动与冲击, 2012, 31(19): 128-133.
- GAO Xinke, SHAO Que. Semi-active optimal control of intelligent damping double vibration isolation system [J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(19): 128-133. (in Chinese)
- [18] 李以农, 张锋, 王雷. 次级通道在线辨识的齿轮啮合振动主动控制[J]. 振动与冲击, 2013, 32(16): 7-12
- LI Yinong, ZHANG Feng, WANG Lei. Active vibration control of gear meshing based on online secondary path identification algorithm [J]. Journal of Vibration and Shock, 2013, 32(16): 7-12. (in Chinese)
- [19] 胡庆雷, 马广富, 姜野. 三轴稳定挠性卫星姿态机动时变滑模变结构和主动振动控制[J]. 控制理论与应用, 2009, 26(2): 122-126.
- HU Qinglei, MA Guangfu, JIANG Ye. Variable structure control with time varying sliding mode and vibration control for flexible satellite [J]. Control Theory and Applications, 2009, 26(2): 122-126. (in Chinese)
- [20] 朱熹育, 王社良, 朱军强. 基于 Sugeno 型模糊神经网络的空间杆系结构的压电驱动器主动控制[J]. 工程力学, 2013, 30(8): 272-277.
- ZHU Xiyu, WANG Sheliang, ZHU Junqiang. Sugeno-type fuzzy neural network active control of space frame structure based on piezoelectric actuator [J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(8): 272-277. (in Chinese)
- [21] Lan K J, Yen J Y, Kramar J A. Sliding mode control for active vibration isolation of a long range scanning tunneling microscope [J]. Review of Scientific Instruments, 2004, 75(11): 4367-4373.
- [22] Chen Y H, Yang B, Dong J W. Evolving flexible neural networks using ant programming and PSO algorithm [J]. Advances in Neural Networks, 2004, 3173: 211-216.
- [23] 葛宝明, 林飞, 李国国. 先进控制理论及其应用[M]. 北京:机械工业出版社, 2007.
- GE Baoming, LIN Fei, LI Guoguo. Advanced control theory and its application [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2007. (in Chinese)
- [24] Won J K, Ali S. A novel low-power linear magnetostrictive actuator with local three-phase excitation [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2010, 15(2): 299-307.
- [25] 王博文, 曹淑瑛, 黄美文. 磁致伸缩材料与器件[M]. 北京:冶金工业出版社, 2008.
- WANG Bowen, CAO Shuying, HUANG Meiwen. Magnetostrictive materials and devices [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2008. (in Chinese)
- [26] Young K D, Utkin V I, Ozguner U. A control engineer's guide to sliding mode control [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 1999, 7(3): 328-342.
- [27] Ricardo C L, Mauricio C O, Pedro L D. Convergent LMI relaxations for robust analysis of uncertain linear systems using lifted polynomial parameter-dependent lyapunov functions [J]. Systems & Control Letters, 2008, 57(8): 680-689.
- [28] 郑凯, 陈杰, 杨义勇. 压电自适应桁架结构智能振动控制[J]. 控制理论与应用, 2010, 27(7): 943-947.
- ZHENG Kai, CHEN Jie, YANG Yiyong. Intelligent vibration control of adaptive piezoelectric truss structure [J]. Control Theory & Applications, 2010, 27(7): 943-947. (in Chinese)