

基于降阶模型的斜拉索振动的半主动神经网络控制

陈 勇¹, 孙炳楠¹, 楼文娟¹, 倪一清², 高赞明²

(1. 浙江大学 土木工程学系, 浙江 杭州 310027; 2. 香港理工大学 土木及结构工程学系, 中国 香港)

摘要: 根据模态降阶理论, 获得了斜拉索—阻尼器系统的降阶模型, 有效地缩减了系统的自由度. 根据 ER/MR 阻尼器特性和主动控制中 LQG 控制理论, 建立了面向速度剪切的半主动 LQG 控制方法, 并获得了很好的控制效果. 本文设计了神经网络的观测器, 使用的传感器数目大大减少, 根据智能控制理论, 设计了神经网络控制器, 并提出采用该神经网络作斜拉索半主动控制的控制算法. 振动仿真的结果表明, 经过离线训练后的神经网络观测器和控制器, 有效地抑制了斜拉索的振动.

关键词: 斜拉索; 模态降阶; ER/MR 阻尼器; 半主动振动控制; 神经网络控制器

中图分类号: O231 **文献标识码:** A

Semi-active neuro-control of cable vibration based on reduced-order model

CHEN Yong¹, SUN Bing-nan¹, LOU Wen-juan¹, NI Yi-qing², KO Jan-ming²

(1. Department of Civil Engineering, Zhejiang University, Zhejiang Hangzhou 310027, China;

2. Department of Civil & Structural Engineering, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong, China)

Abstract: This paper designs a semi-active neuro-control of cable vibration based on a reduced-order model to suppress the cable vibration, using the smart electro/magneto rheological (ER/MR) dampers. The smart semi-active ER/MR damper has great advantages in vibration control in civil engineering, and has attracted much attention from researchers. The paper proposes a neuro-estimator and neuro-controller for the semi-active vibration control of stay cables. The effectiveness of the proposed neural network control strategies is numerically verified by applying to a 12 m long scale-model cable prototype connected with an MR damper near the lower anchorage. The generalization of the proposed two neural networks is verified, which shows the adaptive capability of the configured neuro-controllers under the dynamic excitation distinct from training. The analysis results show that the proposed control strategies can effectively implement semi-active vibration control of stay cables in the use of MR dampers.

Key words: inclined cable; modal reduction; electro/magneto-rheological (ER/MR) damper; semi-active vibration control; neural network controller

1 引言 (Introduction)

随着现代桥梁结构的发展, 斜拉桥以其结构合理、跨度大和造型美观在现代公路交通中得到了极大的发展. 根据现有观测结果, 斜拉索在特定的环境激励下会产生大幅振动, 并影响结构安全. 考虑到斜拉索是斜拉桥的主要受力构件, 因此在斜拉桥的设计中, 如何抑制斜拉索的振动是桥梁设计师必需解决的问题.

解决途径可分为被动控制和主动控制. 对斜拉索振动进行被动控制的方法目前主要有三种: 一是在靠近斜拉索锚固端的位置安装阻尼器; 二是改变

斜拉索的外表形状, 以防止风雨振; 三是将同一索面的斜拉索连在一起. 由于改变斜拉索的外表形状和连接斜拉索都会影响斜拉索结构的美观, 因此安装阻尼器是目前应用最为广泛的一种减振措施. 然而对于大跨度的斜拉桥来说, 采用被动阻尼器的方法仍不能很好的解决超长斜拉索的风雨振问题^[1,2]. 而主动控制的方法存在费用过高、作动器与斜拉索连接处的疲劳损伤等问题, 离实际应用还有很长的一段路要走. 因此采用半主动控制方法进行斜拉索的振动控制成为斜拉索振动控制的新研究方向. ER/MR 阻尼器是一种液体可控阻尼器, 采用其作系

统的振动控制属于半主动控制中的一个重要分支(最近的研究表明,采用ER/MR阻尼器的半主动控制方法能够比被动控制方法更有效的抑制斜拉索的振动^[3]).

以往的研究结果表明,对于像斜拉索这样的大跨度三维柔性结构,其自由度数目是非常多的,如果不考虑模型降阶,将会造成控制器过大、传感器数目过多.因此本文采用模态降阶理论获得了降阶模型,进行斜拉索的振动控制.采用神经网络进行结构的振动控制最早是由Ghaoboussi(1995)和Chen(1995)各自独立建立起来的^[4,5].神经网络具有很好的描述系统的非线性的功能,而本文中的斜拉索-ER/MR阻尼器系统属于典型的非线性系统,因此采用神经网络控制能够很好地解决斜拉索的振动控制问题^[6].基于降阶模型的神经网络控制方法还很好地解决估计器精度和传感器数目之间的矛盾,考虑到在实际应用中是不可能任意布置传感器的,因此很适合于斜拉索这样的柔性结构.振动控制仿真的结果表明,本文设计的神经网络估计器能够很好的确定斜拉索振动状态,从而为斜拉索的振动控制提供准确的系统信息,有效地抑制了斜拉索的振动.

2 斜拉索-阻尼器系统(Cable-damper system)

将具有垂度的斜拉索连接上ER/MR阻尼器,连接位置为 $B_j(x_j, y_j)$ ($j = 1, 2, \dots, J$),如图1所示.其中 l, A, E 和 m 代表索的长度、截面积,弹性模量和单位长度质量.斜拉索位于 $x-y$ 平面内,其静力曲线可以用函数 $y(s)$ 来表示, s 是曲线坐标,索的静张力是 s 的函数 $H(s)$,索的相对动力变位是空间和时间的函数 $f(s, t)$,可以分解为正交的两个分量 $u(s, t)$ 和 $v(s, t)$.

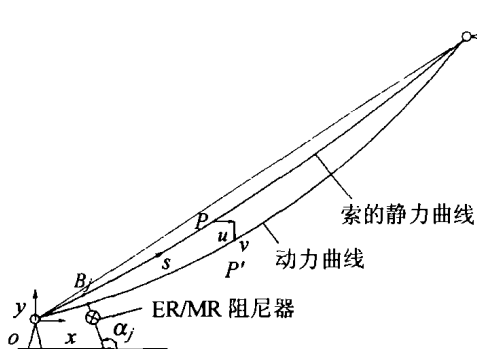


图1 斜拉索-阻尼器系统
Fig. 1 Cable-damper system

通过哈密顿原理,可以得到斜拉索的非线性动力有限元模型.将此有限元模型连接上ER/MR阻尼器后,斜拉索-阻尼器系统的非线性动力方程可以表述为

$$M\ddot{W} + C\dot{W} + [K_0 + K_1(W) + K_2(WW^T)]W =$$

$$F - P_c F_c.$$

式中: W 是节点位移向量; M 和 C 分别是索的质量、阻尼矩阵; $K_0, K_1(W)$ 和 $K_2(WW^T)$ 分别是线性刚度矩阵、二次和三次非线性矩阵; F 是随时间变化的外荷载向量; $F_c = \{F_{c1}, F_{c2}, \dots, F_{cJ}\}^T$ 是可控制的阻尼力,由ER/MR阻尼器提供, P_c 为阻尼器的位置矩阵.为简化起见,取阻尼器的安装位置 $B_j(x_j, y_j)$ ($j = 1, 2, \dots, J$)为索的节点,该节点的动态变位可以表示为索的节点位移向量的线性描述:

$$\begin{aligned} u_j &= u(x_j, y_j) = C_{1j}W, \\ v_j &= v(x_j, y_j) = C_{2j}W. \end{aligned} \quad (2)$$

C_{ij} ($i = 1, 2, j = 1, 2, \dots, j$)是 $1 \times N$ 的常数矩阵, N 是有限元模型中的节点数.由ER/MR阻尼器提供的非线性可控制阻尼力 F_{cj} ($j = 1, 2, \dots, J$)可以用Bingham模型来表示^[6]:

$$F_{cj}(t) = f_{\eta j} + f_{dj}(t) = c_{\eta j} \dot{v}_{\eta j}(t) + f_j^{\text{yield}}(t) \text{sgn}[\dot{v}_{rj}(t)]. \quad (3)$$

其中: $\dot{v}_{\eta j} = \dot{u}_j \cos \alpha_j + \dot{v}_j \sin \alpha_j$ 是第 j 个ER/MR阻尼器活塞的速度; c_{rj} 是第 j 个ER/MR阻尼器的粘性阻尼系数; f_j^{yield} 是第 j 个ER/MR阻尼器的屈服力,并且 $0 \leq f_j^{\text{yield}}(t) \leq f_j^{\text{max}}$, f_j^{max} 是阻尼器所能提供的最大屈服力.斜拉索-阻尼器系统的输出可以用下面的线性关系来描述:

$$b = SW. \quad (4)$$

b 是 $\gamma \times 1$ 的系统输出向量, S 是 $\gamma \times N$ 的变换矩阵, γ 是系统输出的个数.

3 半主动控制(Semi-active control)

3.1 模态降阶(Modal reduction)

采用模态降阶方法进行振动控制,体系的自由度数目相对较小,因此可以进行更有效的实时控制.然而,需要注意的问题是所采用的模态数必须足够多,以保证降阶后的模型能准确的反映原系统的特性.设 ϕ_i ($i = 1, 2, \dots, p$)是索的第 i 阶自振频率和振型,并且截止到 p ($p \leq N$)阶模态,位移向量 W 可以近似的用下式表示

$$W \approx \sum_{i=1}^p \phi_i q_i(t) = \Phi q(t). \quad (5)$$

其中: $\Phi = [\phi_1 \ \phi_2 \ \dots \ \phi_p]$ 为截断后的模态矩阵,且该矩阵已对质量阵归一化即 $\Phi^T M \Phi = I$; $q(t)$ 是模态坐标; p 是所采用的模态数.以往的研究表明,斜拉索的非线性振动特性只有在斜拉索发生大幅振动时才会体现出来.考虑到在受控阶段,斜拉索的振动相对较小,几何非线性对斜拉索振动影响可以忽略,因此控制采用的有限元模型忽略了式(1)中的几何非线性项.将式(5)代入式(1)后,可得

$$\bar{M}\ddot{q} + \bar{C}\dot{q} + \bar{K}_0 q = \bar{F} - \bar{P}_c \bar{F}_c. \quad (6)$$

其中: $\bar{M} = \Phi^T M \Phi$, $\bar{C} = \Phi^T C \Phi$ 和 $\bar{K}_0 = \Phi^T K_0 \Phi$ 分别是 $p \times p$ 模态质量、模态阻尼和模态刚度矩阵, 由于模态的正交性, 它们都是对角阵; $\bar{F} = \Phi^T F$ 是外力向量; $\bar{P}_c = \Phi^T P_c$ 是位置矩阵. 传感器输出可以表示为

$$b = S \Phi q = \bar{S} q. \quad (7)$$

为了设计 LQG 控制器进行斜拉索振动控制, 将式(6)写成状态空间的表达式:

$$\dot{z}(t) = A z(t) + B f_d(t) + f(t), \quad (8a)$$

$$\xi = C_s z(t). \quad (8b)$$

这里的 $z(t) = [q^T(t) \quad \dot{q}^T(t)]^T$ 是状态空间的变量, 其中 $f_d(t) = \{f_{d1}(t) \quad f_{d2}(t) \quad \cdots \quad f_{dJ}(t)\}^T$ 是由 ER/MR 阻尼器所产生的可控制力, $C_s = [\bar{S} \quad 0]$, 以及

$$\begin{cases} A = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -\bar{M}^{-1}\bar{K}_0 & -\bar{M}^{-1}\bar{C} \end{bmatrix}, \\ B = \begin{bmatrix} 0 \\ -\bar{M}^{-1}\bar{P}_c \end{bmatrix}, f(t) = \begin{bmatrix} 0 \\ \bar{M}^{-1}\bar{F}(t) \end{bmatrix}. \end{cases} \quad (9)$$

这里的 $\bar{C} = \bar{C} + C_c$, 且

$$C_c = \bar{P}_c \begin{bmatrix} c_{11}(\cos \alpha_1 C_{11} + \sin \alpha_1 C_{21}) \\ c_{12}(\cos \alpha_2 C_{12} + \sin \alpha_2 C_{22}) \\ \cdots \\ c_{1J}(\cos \alpha_J C_{1J} + \sin \alpha_J C_{2J}) \end{bmatrix} \Phi. \quad (10)$$

3.2 半主动控制(Semi-active control)

阻尼器的控制力可以由二次型的目标函数最小化来得到, 目标函数 J_c 见下式:

$$J_c = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T [z^T(t) Q z(t) + f_d^T(t) R f_d(t)] dt. \quad (11)$$

这里 Q, R 分别是 $2p \times 2p$ 和 $2J \times 2J$ 权矩阵. 针对式 $\dot{z}(t) = A z(t) + B f_d(t)$, 从目标函数最小化, 则可得控制力

$$f_d(t) = -R^{-1} B^T P z(t) = L z(t). \quad (12)$$

其中: L 是增益矩阵; P 可从求解下面的 Riccati 方程得到

$$PA + A^T P - P B R^{-1} B^T P = -Q. \quad (13)$$

当采用 ER/MR 阻尼器来实现 LQG 控制时, 由于 ER/MR 阻尼器并不是主动控制理论中的作动器, 因此应该采用半主动的控制策略. 考虑到阻尼器的粘性阻尼项已经进入了系统的阻尼矩阵, 因此可将 ER/MR 阻尼器视为可控制的简单摩擦型阻尼器. 由 ER/MR 阻尼器提供的可控制阻尼力其本质是被动的, 即由控制算法所得到的控制力与阻尼器所能提供的力的方向应该保持一致. 在实际应用中, ER/MR 阻尼器所能提供的控制力的大小存在一个

上限, 因此式(12)中的控制力应修正为

$$\bar{f}_{dj}(t) = \begin{cases} f_j^{\max}, & \text{if } U_j(t) \dot{v}_{vj}(t) > 0 \text{ and } U_j(t) > f_j^{\max}, \\ f_{dj}(t), & \text{if } U_j(t) \dot{v}_{vj}(t) > 0 \text{ and } -f_j^{\max} < f_{dj}(t) < f_j^{\max}, \\ -f_j^{\max}, & \text{if } U_j(t) \dot{v}_{vj}(t) > 0 \text{ and } U_j(t) < -f_j^{\max}, \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (14)$$

其中 $j = 1, 2, \dots, J$. 式(12)和式(14)合称为面向速度剪切的 LQG 控制, 即 clipped LQG 控制方法, 是一种半主动控制策略.

图2给出了半主动 LQG 控制的流程图. 系统上所安装的传感器给出了系统的输出, 通过估计器可以得到系统的振动状态. 通过半主动的控制器获得所需的控制力, 再将其转化为电压/电流作用在半主动的作动器(ER/MR 阻尼器)上, 来实现系统控制.

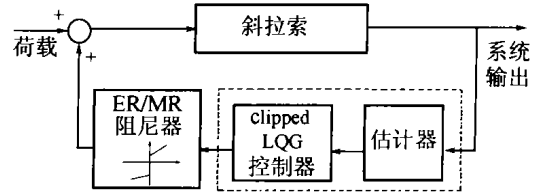


图2 半主动 LQG 控制的流程图

Fig. 2 Flow chart of semi-active LQG control

4 神经网络控制(Neuro-control)

神经网络能够很好的描述系统的非线性特征, 采用神经网络对非线性的斜拉索-ER/MR 阻尼器系统进行半主动控制能达到良好的控制效果. 这里的神经网络控制系统主要由两部分组成: 1) 由于经典的 Kalman 滤波器必须知道荷载的形式, 而且要求系统是线性的, 使得引入具有非线性特性的半主动 ER/MR 阻尼器作为作动器会带来了一定的困难, 而采用神经网络的估计器可以解决这个问题; 2) 采用神经网络控制器来代替 LQG 控制器, 将能更好的适应系统的非线性特征. 考虑到控制系统的实际应用过程和现代控制技术的要求, 系统为一个离散系统, 即系统的输入和输出必须按照控制板的采样频率进行. 因此, 本文假设系统的输入和输出的采样间隔相同, 即当前时间步为 k 时刻, 上一时间步为 $k-1$ 时刻, 依次类推.

这里的神经网络估计器是一个三层的 BP 网络, 包含一个隐层. 它的输入层共有 $3+5m$ 个神经元, 其中 3 个神经元的输入为过去及当前时刻的索

在连接有 ER/MR 阻尼器位置的速度, $5m$ 个神经元为所布置的 m 个传感器过去及当前时刻的位移. 其输出层的输出为状态空间里的状态向量, 共 $2p$ 个神经元. 神经网络控制器也是一个三层的 BP 网络, 包含一个隐层. 其输入为神经网络估计器的输出, 其输出层为所需要的控制力, 共 J 个神经元. 神经网络估计器和控制器中隐层的神经元个数可采用试算法进行确定, 依赖于系统的本身特征和神经网络设计者的经验. 图 3 给出了神经网络控制方法运用于斜拉索-阻尼器系统后的流程图. 图 4 给出了神经网络估计器和控制器的构造图.

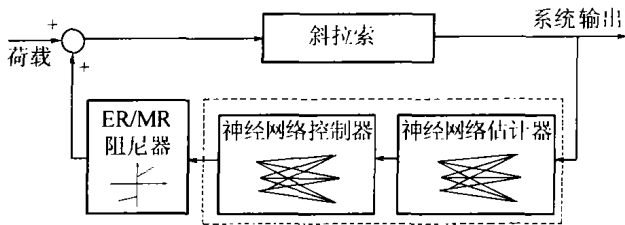


图 3 包含神经网络控制系统的斜拉索-阻尼器系统
Fig. 3 Cable-damper system including the neuro-control system

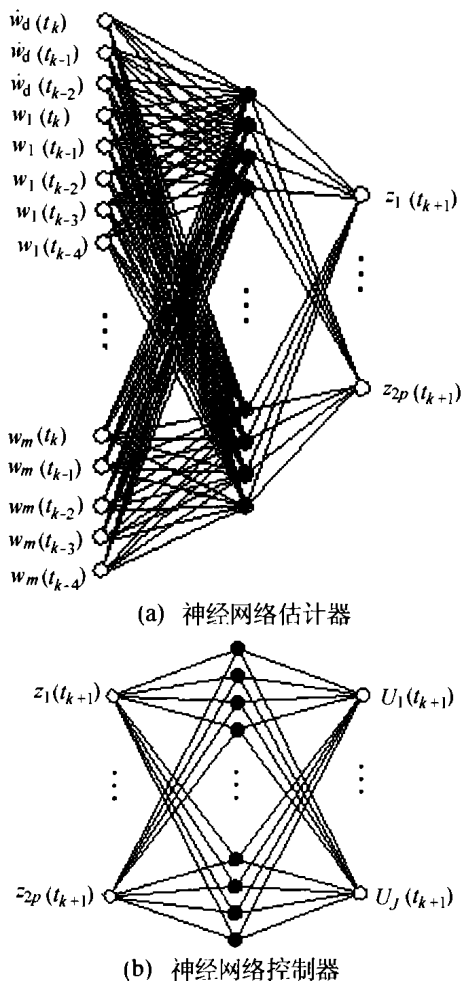


图 4 采用 BP 网络的神经网络估计器和神经网络控制器

Fig. 4 Neural network estimator and neural network controller

在利用神经网络控制器进行斜拉索-阻尼器系统的振动控制前, 应该先训练所构造的神经网络观测器和控制器. 这里采用半主动 LQG 控制的计算结果对神经网络进行离线训练. 将当前 k 时刻的系统输出作为神经网络观测器的输入, 并以未来 $k+1$ 时刻的系统状态作为神经网络观测器的训练目标. 这样训练好的神经网络观测器就可以预测在 $k+1$ 时刻的系统状态. 采用系统在 $k+1$ 时刻的系统输出来训练神经网络控制器在 $k+1$ 时刻的输出, 即控制力. 将训练好的两个网络串联, 即可实现对系统的神经网络系统的在线控制. 在作神经网络训练时, 训练的样本对神经网络的泛化性能起决定性的作用. 神经网络的泛化功能要求斜拉索-阻尼器系统在各种形式的荷载下, 都能达到良好的控制效果.

5 应用实例(Application)

从某一实际工程中选取一根 143 m 长的斜拉索, 按照 1:12 的相似比和相似准则在试验室中建立了一根索长 l 为 12 米的斜拉索模型, 该索的详细参数可参见相关文献^[6]. 本文采用该索的有限元计算模型来验证所提出的神经网络控制方法. 假设阻尼器安装在离索的底部锚固端 5% 的位置. 索本身的阻尼采用两项的瑞利阻尼, 即 $C = \alpha M + \beta K$, 其中系数 α 和 β 均取 0.001. 连接在斜拉索上的 ER/MR 阻尼器的粘性阻尼项为 $0.8 \text{ N}\cdot\text{s}/\text{m}$, 阻尼器所能提供的最大阻尼力 $f_{\max}$ 为 30 N. 采用 LQG 控制算法时的 $Q = \text{diag}[1 \ 1 \ \cdots \ 0 \ 0 \ \cdots \ 0]$ 和 $R = \text{diag}[0.001 \ 0.001 \ \cdots \ 0.001]$. 神经网络训练时采用的荷载样本如图 5 所示, 并沿 x 方向作用, 该荷载沿拉索为均匀分布, 沿时间为随机荷载.

由于采用了模态降阶法来实现系统控制, 因此首先必须验证所采用的模态数目是否满足要求. 图 6 给出了降阶前后的索中点位移时程比较图. 结果表明, 仅采用 5 个模态就能够满足数值模拟试验的要求.

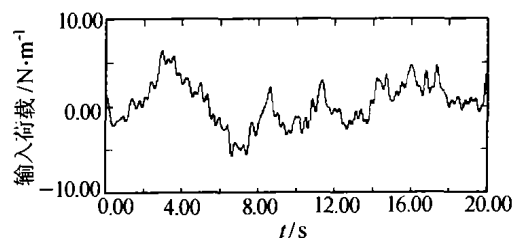


图 5 斜拉索上作用的随机荷载的时程图

Fig. 5 Time history of random excitation on the cable

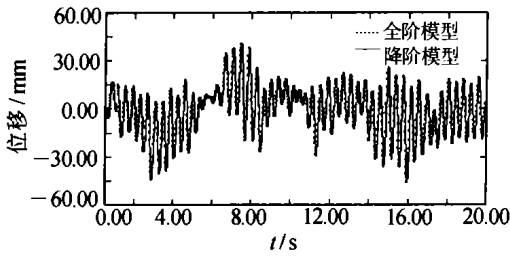


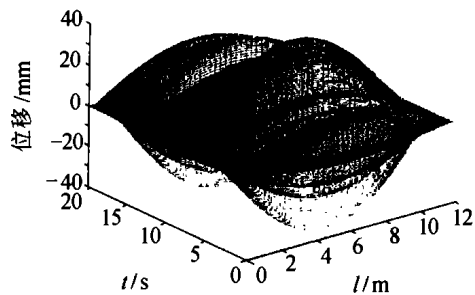
图6 降阶前后的中点位移时程比较图

Fig. 6 Comparison of displacement of midpoint of cable before and after modal reduction

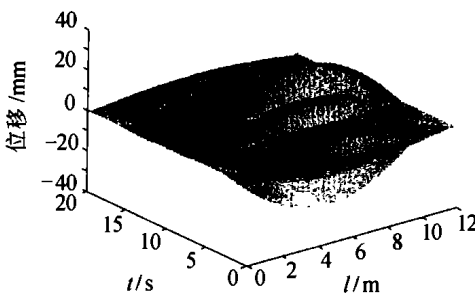
5.1 神经网络控制应用(Application of neuro-control)

在上述斜拉索中安装 ER/MR 阻尼器的位置上,布置了2个位移传感器:其中一个布置在斜拉索与阻尼器相连接的位置,其输出为该点的速度;在考虑到实际应用时的现场条件限制,另一个布置在斜拉索上并靠近第一个传感器,距斜拉索下部锚固端距离为 $0.067l$,其输出为该点的位移.首先采用半主动的 LQG 控制和所选用的荷载样本来产生训练数据,然后根据斜拉索-阻尼器系统的半主动 LQG 振动控制结果来训练神经网络.训练好的神经网络估计器通过系统输出来估计在 $k+1$ 步(未来时刻)的系统状态,再根据所得到的系统状态作为神经网络控制器的输入,从而得到 $k+1$ 步(未来时刻)的控制力,根据阻尼器的模型将其转化为电压/电流作用在 ER/MR 阻尼器上,从而实现了神经网络在线控制.

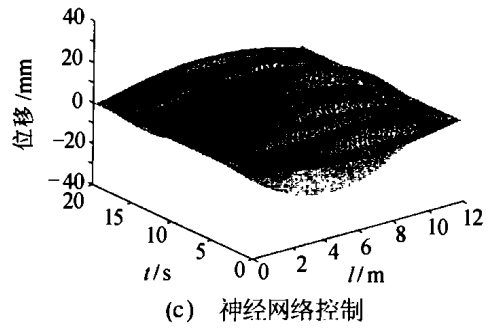
图7给出了在训练荷载和神经网络控制器下的整条斜拉索的振动时程图.采用振动控制后,斜拉索的振动得到了极大的抑制,神经网络控制器和半主动 LQG 控制器都取得了良好的振动控制效果.



(a) 没有控制



(b) 半主动 LQG 控制



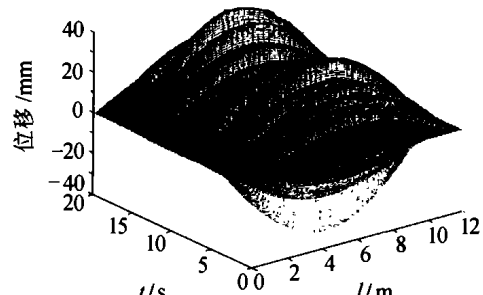
(c) 神经网络控制

图7 斜拉索在控制前后的振动过程

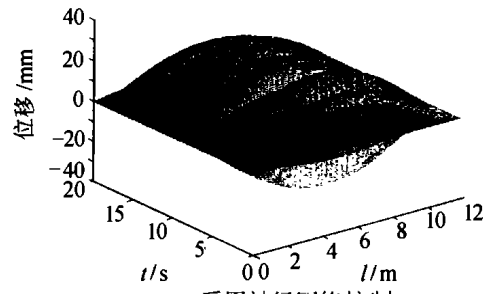
Fig. 7 Time histories of cable vibration before and after control

5.2 神经网络的泛化特性校验 (Generalization of neural networks)

神经网络的泛化性校验对神经网络控制具有重要的意义.经过离线训练以后的神经网络如果只能满足在特定的荷载下获得良好的振动控制效果,这样的神经网络控制是一种失败的控制方法.因为在现实情况中,作用在斜拉索上的荷载是各种各样的.如风荷载,在不同的地区、不同时期就有不同的风谱,同一结构不同安装位置上的斜拉索所承受的风荷载也是不同的.因此良好的神经网络控制策略必需能够在各种荷载作用之下都能满足控制要求.为此,这里选用训练荷载不同的荷载时程序列,作用在斜拉索上,来检验所提出的神经网络控制策略的控制效果.图8给出了基于这种输入,系统分别在没有控制和神经网络控制下的斜拉索振动时程图.可以发现神经网络估计器和控制器对新的输入仍然表现



(a) 没有控制



(b) 采用神经网络控制

图8 斜拉索在新荷载序列下的振动时程图

Fig. 8 Time histories of cable vibration under a new random excitation

出了良好的控制效果,因此所给出的神经网络具有良好的泛化性能.

6 结论(Conclusion)

由于斜拉索本身的特性,在一定的荷载条件下会发生大幅的振动,如何抑制斜拉索的振动成为工程界在设计拉索结构时所关心的焦点.本文采用模态降阶理论进行系统降阶,然后采用神经网络估计器来代替传统的 Kalman 滤波器进行系统观测,有效的减少了传感器数目,实现了对非线性系统的估计.采用非线性神经网络控制器很好的解决了斜拉索-半主动阻尼器系统非线性控制问题.最后通过实例验证,对本文所提出的神经网络估计器和神经网络控制器的有效性和泛化性进行了验证.

参考文献(References):

- [1] PACHECO B M, FUJINO Y, SULEKH A. Estimation curve for modal damping in stay cables with viscous damper [J]. *J of Structural Engineering*, ASCE, 1993, 119: 1961 - 1979.
- [2] XU Y L, ZHAN S, KO J M, et al. Experimental study of vibration mitigation of bridge stay cables [J]. *J of Structural Engineering*, ASCE, 1999, 125: 977 - 986.
- [3] JOHNSON E A, BAKER G A, SPENCER Jr B F, et al. Mitigating stay cable oscillation using semiactive damping [C]// LIU S C, editor. *Smart Structures and Materials 2000: Smart Systems for*

Bridges, Structures, and Highways. Bellingham: Proceedings of SPIE, 2000, 3988: 207 - 216.

- [4] GHABOUSSI J, JOGHATAIE A. Active control of structures using neural networks [J]. *J of Engineering Mechanics*, ASCE, 1995, 121: 555 - 567.
- [5] CHEN H M, TSAI K H, QI G Z, et al. Neural network for structural control [J]. *J of Computing in Civil Engineering*, ASCE, 1995, 9: 168 - 176.
- [6] 陈勇.采用 ER/MR 阻尼器作斜拉索振动的半主动控制[D].杭州:浙江大学,2002.
(CHEN Yong. *The semi-active cable vibration using ER/MR damper* [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2002.)

作者简介:

陈 勇 (1974 —),男,博士,副教授.主要从事风工程,振动控制,预应力等方面的研究. E-mail: cecheny@zju.edu.cn;

孙炳楠 (1940 —),男,教授,博士生导师.主要从事风工程,振动控制,桥梁结构,预应力,加固等方面的研究. E-mail: sbn@civil.zju.edu.cn;

楼文娟 (1963 —),女,教授.主要从事风工程,振动控制,预应力,桥梁结构等方面的研究. E-mail: louwj@zju.edu.cn;

倪一清 (1964 —),男,助理教授,博士生导师.主要从事振动控制,非线性振动,健康监测等方面的研究. E-mail: ceyqni@polyu.edu.hk;

高赞明 (1943 —),男,首席教授,博士生导师.主要从事振动控制,非线性振动,健康监测等方面的研究. E-mail: cejmko@polyu.edu.hk.