

文章编号: 1000-4750(2010)01-0183-05

斜拉索基于 MR 阻尼器的神经网络半主动控制

*肖志荣¹, 孙炳楠²

(1. 浙江科技学院建工学院, 浙江, 杭州 310023; 2. 浙江大学建工学院, 浙江, 杭州 310027)

摘 要: 该文利用神经网络强大的学习和非线性拟合能力模拟了 MR 阻尼器的逆动力性能。为了提高神经网络的计算性及泛化性, 采用了 Levenberg-Marquardt 算法与贝叶斯正规化法相结合的方法。与此同时, 利用 MR 阻尼器的神经网络逆模型, 提出了一种新的斜拉索神经网络半主动控制策略。为验证所提控制方法的有效性, 针对典型算例进行了数值分析, 并将其与 LQR 主动控制方法进行了比较。得出结论: 所提神经网络半主动控制方法是有效的, 与 LQR 主动控制效果相比, 效果略差, 但相差不大。

关键词: 半主动控制; 神经网络; Levenberg-Marquardt 算法; 斜拉索; MR 阻尼器

中图分类号: TU311.3; U441⁺.3 **文献标识码:** A

SEMI-ACTIVE NEUROCONTROL ON STAY CABLE WITH MR DAMPER

*XIAO Zhi-rong¹, SUN Bing-nan²

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University of Science and Technology, Hangzhou, Zhejiang 310023, China;

2. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China)

Abstract: The inverse dynamic behaviour of MR damper is emulated based on neural network theory. In order to improve the calculation and generalization of the neural network model of MR damper, the Levenberg-Marquardt algorithm and Bayes Regularization method are adopted here. With the neural network model of the MR damper, a new control strategy for the stay cables is proposed. A comparison with LQR active control method is also made to check the validity of the proposed control method. Numerical results show that the proposed semi-active neurocontrol method is effective, and its results are comparable to the LQR.

Key words: semi-active control; neural network; Levenberg-Marquardt algorithm; stay cable; MR damper

斜拉索由于质量轻, 柔度大, 阻尼小, 极易在风/雨或支座运动等激励作用下发生振动。现在很多斜拉桥中都安装了被动阻尼器来抑制拉索的振动。Kovacs^[1]指出被动阻尼器向拉索提供的最大模态阻尼比与 X_c/l 成正比, X_c 为阻尼器安装点距桥面支撑点的距离; l 指索长。此比值越大则控制效果越好。但出于美观等因素的考虑, 阻尼器的安装位置不可能太高, 因此被动阻尼器对长索提供的附加阻尼是有限的, 其控制效果是不理想的。而半主动控制由于不需要大的能量输入, 适应性又很强受到了

广泛的关注。尤其是 MR 阻尼器因其能耗低、结构简单、阻尼力大、可控性强是目前应用最广的半主动变阻尼控制装置。以 Spencer、孙炳楠、Ni Y Q、陈政清等^[2-10]为首的国内外学者研究小组对 MR 阻尼器及其在斜拉索中的振动控制进行了一系列的理论和试验研究。

然而, 在利用 MR 阻尼器控制拉索振动时, 多数学者的作法是先根据主动控制算法求得需要的最优控制力, 由于半主动控制装置是耗能装置, 无法完全实现最优控制力, 只能再结合某种半主动控

收稿日期: 2008-06-11; 修改日期: 2009-04-07

基金项目: 浙江省教育厅科研项目(Y200804360); 浙江省住房和城乡建设厅项目(0903)

作者简介: *肖志荣(1974—), 女, 山东烟台人, 讲师, 博士, 主要从事结构动力学及结构振动控制等研究(E-mail: hafxzzr@sohu.com);

孙炳楠(1940—), 男, 浙江绍兴人, 教授, 博导, 从事结构风工程及斜拉索振动控制等问题研究(E-mail: sbn@zju.edu.cn).

制算法使半主动控制装置产生的控制力尽可能接近最优控制力。这在理论分析时是完全可行的。但在实际应用中,调节MR阻尼器来产生所需控制力是通过调节其内部励磁线圈电流来实现的。即MR阻尼器通过接收电压/电流控制信号,从而产生需要的控制力。而在现有的MR阻尼器模型中,是用一组非线性微分方程来描述其动力特性的。通过求解这些微分方程,在给定的位移、速度和电压下可求得相应的控制力。由于位移、速度、电压和力之间的强非线性,由力反求相应的电压却是不容易的。本文利用神经网络模拟了MR阻尼器的逆向模型,该模型解决了由于MR阻尼器强非线性导致的由控制力反求控制电压的难题。与此同时,本文利用MR阻尼器的神经网络逆模型,将其与成熟的优化算法相结合完成拉索的神经网络半主动控制,该控制方法能实现MR阻尼器对拉索振动的全态控制,从而能避免现有双态控制不能充分发挥MR阻尼器在各种电压下的工作性能,控制效果粗糙的缺点。

1 MR阻尼器的神经网络逆模型

本文选用了BP神经网络来模拟MR阻尼器的逆向动力性能。神经网络的输入变量定为位移和力,输出变量为相应的电压。神经网络只有一个隐含层,单元数分别为8、17、1。

至于神经网络的学习算法,由于BP算法收敛速度慢,同时受学习速率 η 的变化影响很大。为避免BP算法的缺陷,本文采用了二阶微分收敛的Levenberg-Marquardt算法与贝叶斯正规化法相结合的方法。

在Levenberg-Marquardt算法中,性能指标函数 E 用的是误差平方和:

$$E = \frac{1}{2} \sum_p (e^p)^2 = \frac{1}{2} \| \mathbf{e} \|^2 \quad (1)$$

式中 \mathbf{e} 是以 e^p 为元素的向量。则Levenberg-Marquardt算法可用下式表达:

$$\mathbf{w}^{i+1} = \mathbf{w}^i - (\mathbf{Z}^T \cdot \mathbf{Z} + \mu \cdot \mathbf{I})^{-1} \cdot \mathbf{Z}^T \cdot \mathbf{e}(\mathbf{w}^i) \quad (2)$$

式中向量 \mathbf{Z} 的元素为 $Z_{pj} = \frac{\partial e^p}{\partial w_j}$ 。当 μ 很小时,

Levenberg-Marquardt算法变为牛顿法, μ 很大时则成为梯度下降法。

为了提高网络的泛化能力,使用了正规化方法。修正的性能指标函数为:

$$E = \beta E_D + \alpha E_w$$

式中: E_D 是误差平方和函数; E_w 是网络权值和阈值的平方和。在此参数 α 、参数 β 的确定是一个重要问题,可在贝叶斯理论基础上,对其进行优化处理。

根据贝叶斯规则有:

$$p(\alpha, \beta | D) = \frac{p(D | \alpha, \beta) p(\alpha, \beta)}{p(D)} \quad (3)$$

其中,似然函数:

$$p(D | \alpha, \beta) = \int p(D | w, \alpha, \beta) p(w | \alpha, \beta) dw = \int p(D | w, \beta) p(w | \alpha) dw。$$

通过推导可得:

$$\alpha = \frac{\gamma}{2E_w^{MP}} \quad (4)$$

$$\beta = \frac{n - \gamma}{2E_D^{MP}} \quad (5)$$

其中 γ 定义为: $\gamma = N - \sum_{i=1}^N \frac{\alpha}{\lambda_i + \alpha} = \sum_{i=1}^N \frac{\lambda_i}{\lambda_i + \alpha}$, N 为权值(包括阈值)的总个数; $\{\lambda_i\}$ ($i=1, 2, \dots, N$)是 H 的特征值, $H = \beta \nabla \nabla E_D$ 。

2 控制策略

由于MR阻尼器的强非线性,利用MR阻尼器控制系统振动时,多数学者采用了双态控制策略。其控制策略就是,在任意时刻当最优控制力大于MR阻尼器处于关闭状态下的阻尼力时,就将MR阻尼器处于开启状态。即在该控制算法中,MR阻尼器只可能处于两种状态($v=0$ 或 $v=v_{\max}$)。双态控制操作简单,但其不能充分发挥MR阻尼器在各种电压下的工作性能,其控制效果必然受到限制。

本文提出的控制策略是利用MR阻尼器的神经网络逆模型,实现MR阻尼器对拉索振动的全态控制,控制策略见图1。由图1可见,主动控制算法与开关形成了半主动控制的控制器。MR阻尼器作为一种半主动阻尼器,只能耗能,即阻尼器提供的力与阻尼器处的速度必须是方向相反的,同时考虑到实际中的MR阻尼器具有最大出力的限制,则半主动控制器表示为:

$$F_d(t) = \begin{cases} F_d^{\max}, & U(t)\dot{v}(x_d, t) < 0 \text{ 且 } U(t) > F_d^{\max} \\ U(t), & U(t)\dot{v}(x_d, t) < 0 \text{ 且 } -F_d^{\max} < U(t) < F_d^{\max} \\ -F_d^{\max}, & U(t)\dot{v}(x_d, t) < 0 \text{ 且 } U(t) < -F_d^{\max} \\ 0, & \text{其他 } U(t)\dot{v}(x_d, t) > 0 \end{cases} \quad (6)$$

式中： $U(t)$ 是主动控制算法提供的最优力； F_d^{max} 是阻尼器的工作上限。通过MR阻尼器的神经网络逆模型可以方便的由控制力求出控制电压，从而实现MR阻尼器对拉索的全态控制。

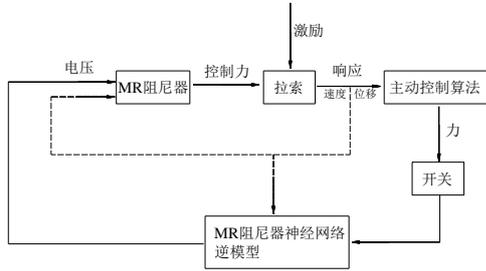


图1 神经网络半主动控制策略
Fig.1 Semi-active neurocontrol diagram

3 算例分析

为了验证所提控制策略的有效性，本文以洞庭湖大桥中的拉索为分析对象，计算了拉索-阻尼器系统在各种激励作用下的时程响应，并将所提控制方法的控制效果与LQR主动控制方法的控制效果做了比较。拉索的相关几何、物理参数见表1所示。从实际应用角度考虑，阻尼器的安装位置位于距拉索低端 $0.04L$ 处，阻尼器与拉索面内振动平面保持垂直。拉索的计算模型见图2。

表1 斜拉索的几何及物理量
Table 1 Parameters of the stay cable

长度 L/m	截面积 A/m^2	倾斜角 $\theta/(^\circ)$	弹性模量 $E/(N/m^2)$	质量 $m/(kg/m)$	张力 T/N	一阶固有 频率 f/Hz
114.72	6.27×10^{-3}	36.94	2×10^{11}	51.8	3.095×10^6	1.0668

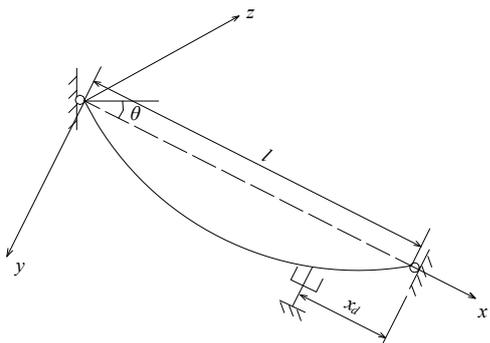


图2 斜拉索模型
Fig.2 Model of stay cable

首先采用了点激励形式，激励幅值为300N，激励频率为拉索的一阶固有频率，激励作用点位于距拉索上端 $0.3L$ 处。由此可预见，拉索将按此频率发生共振。图3给出了拉索跨中位移频谱曲

线，图3中虚线表示的是无控制(nocontrol)时拉索的频谱曲线，实线表示的是采用神经网络半主动控制(neurocontrol)的结果。由图3可清楚的看到，拉索振动幅度得到有效的抑制。为了更好的表示比较结果，图4给出了无控制时及采用神经网络半主动控制时拉索跨中位移时程曲线的比较，由图4可知神经网络半主动控制效果较好，拉索振动幅值由无控制时的0.5m减少至神经网络半主动控制时的0.23m，减少程度达54%。

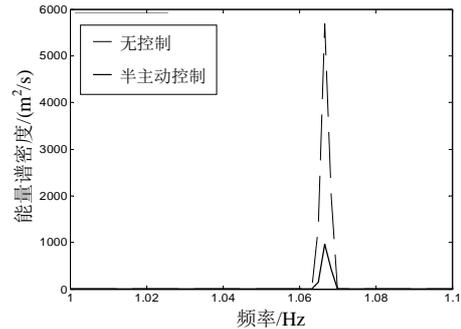


图3 拉索跨中位移能量谱密度曲线
Fig.3 Power spectral density of mid-span displacement

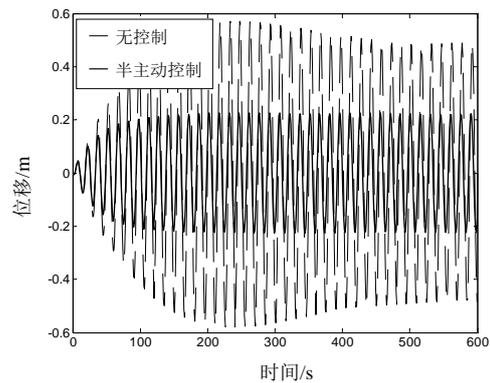


图4 拉索跨中位移时程
Fig.4 Time history of mid-span displacement

以上分析了所提神经网络半主动控制策略对于拉索单模态振动的控制是有效的。由于拉索并非总以单模态形式振动，随着外界激励条件的改变，其也有可能发生多模态振动。因此，有必要验证所提控制策略对拉索多模态振动的控制效果。在此，选用多频率点激励形式，激励频率分别等于拉索的一阶固有频率和二阶固有频率。图5—图8给出了拉索跨中及1/4点处神经网络半主动控制的相应结果。由图5—图8可知，无论是按一阶固有频率振动的成分还是按二阶固有频率振动的成分都得到了有效的控制。具体比较见表2。

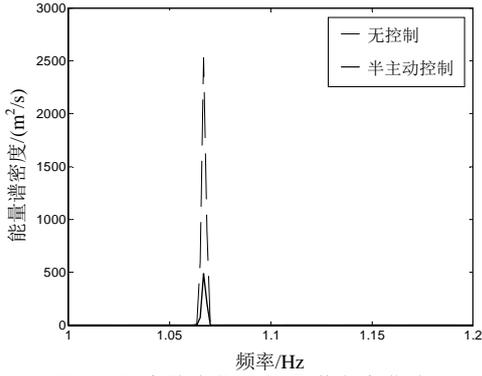
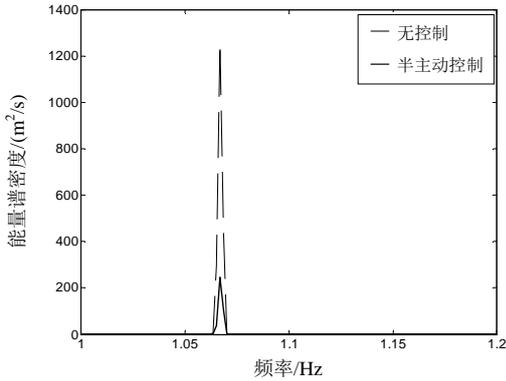
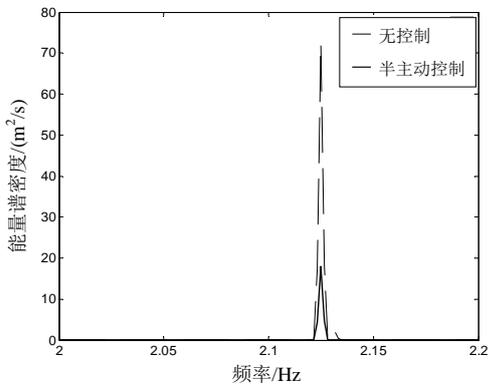


图5 拉索跨中位移能量谱密度曲线

Fig.5 Power spectral density of mid-span displacement



(a) 拉索 1/4 处位移能量谱密度曲线
(一阶固有频率处局部放大)



(b) 拉索 1/4 处位移能量谱密度曲线
(二阶固有频率处局部放大)

图6 拉索 1/4 处位移能量谱密度曲线

Fig.6 Power spectral density of displacement of 1/4 location

表2 拉索在各种工况下的响应幅值受控结果的比较

Table 2 Comparison of different control method at different cases

控制方法	点激励作用下的响应幅值/m			均布谐荷载作用下的响应幅值/m
	单频点激励	多频点激励		
		中点处	1/4 点处	
无控制	0.5	0.34	0.28	0.11
本文方法	0.23(54%)	0.17(50%)	0.14(50%)	0.062(43.6%)
主动控制	0.2(60%)	0.14(58.8%)	0.13(53.6%)	0.06(45.4%)

注：括号里百分比是指(无控制时幅值-控制时幅值)/无控制时幅值。

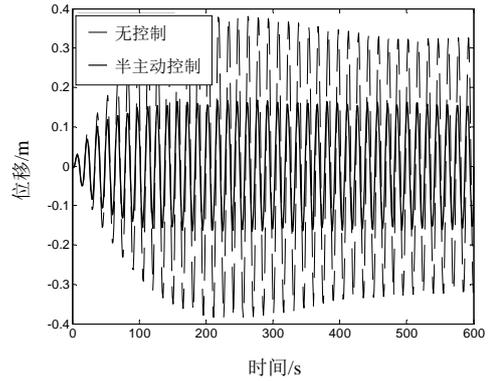


图7 拉索跨中位移时程

Fig.7 Time history of mid-span displacement

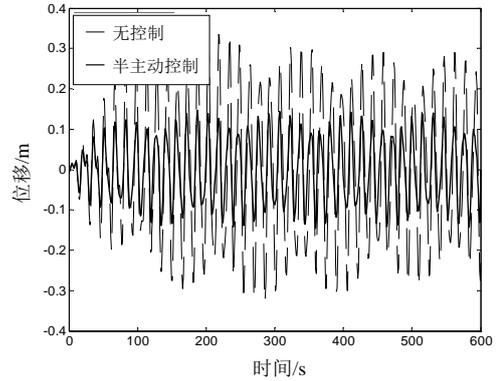


图8 拉索 1/4 处位移时程

Fig.8 Time history of displacement at L/4 location

最后分析了拉索在均布谐荷载作用下的非线性响应特性。荷载幅值为 40N/m，激励频率为 0.85 Hz。图 9 给出了在无控制时及神经网络半主动控制时拉索跨中中点位移时程曲线。由图 9 可知，拉索振动幅值由无控制时的 0.11m 减少到 0.062m；且由于受到有效控制，拉索很快由瞬态进入到稳态振动。在稳态振动中，拉索只按外激励频率振动。通过比较，LQR 主动控制效果仅略好于神经网络半主动控制的效果。

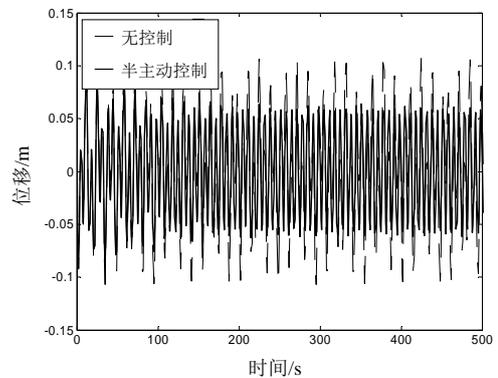


图9 拉索跨中位移时程

Fig.9 Time history of mid-span displacement

4 结论

本文将 MR 阻尼器的神经网络逆模型与优化算法相结合,提出了新的拉索神经网络半主动控制策略。在形成 MR 阻尼器的神经网络逆模型时,为提高神经网络的泛化性,采用了二阶微分收敛的 Levenberg-Marquardt 算法与贝叶斯正规化法 (Regularization)相结合的方法。所提控制策略利用 MR 阻尼器的神经网络逆模型反求出控制电压,解决了由于强非线性导致的由力反求电压不易的难题,实现了拉索-MR 阻尼器的全态控制。为验证所提控制策略的有效性,详细分析了所提控制方法对拉索在各种激励作用下的振动控制效果,并与 LQR 主动控制效果做了比较,结果表明:所提控制方法对拉索的单模态及多模态振动均有较好的控制效果;与 LQR 主动控制效果相比,控制效果略差,但差别不大。本文只是从理论方面验证了所提控制方法的有效性,如何在实际工程中推广应用,还需在试验方面进一步做工作。

参考文献:

- [1] Kovacs I. Zur frage der seil-schwingungen und der seildampfung [J]. Die Bautechnik, 1982, 10: 325—332.
- [2] Johnson E A, Spencer B F, Fujino Y. Semi-active damping of stay cables: A preliminary study [C]// Proceedings of the 17th International Modal Analysis Conference, Society for Experimental Mechanics. Bethel, Connecticut, 1999: 417—423.
- [3] Johnson E A, Christenson R E, Spencer B F. Semi-active damping of cables with sag [J]. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2003, 18: 132—146.
- [4] Johnson E A, Baker G A, Spencer B F, Fujino Y. Mitigating stay cable oscillation using semi-active damping [J]. Smart Structures and Materials, SPIE, 2000, 3988: 207—216.
- [5] Christenson R E, Spencer B F, Johnson E A. Experimental verification of smart cable damping [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2006, 132(3): 268—278.
- [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, 2001.
Chen Yong. Semi-active control of cable vibration using electro/magneto rheological damper [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2001. (in Chinese)
- [7] Lou W J, Ni Y Q, Ko J M. Modal damping and stepping-switch control of stay cables with magnetroheological fluid dampers [J]. Smart Structures and Materials SPIE, 2001, 4330: 354—365.
- [8] Chen Y, Ko J M, Ni Y Q. Semi-active vibration control of stay cables using neural networks [J]. Smart Structures and Materials, SPIE, 2001, 4330: 377—386.
- [9] 王修勇, 陈政清, 倪一清. 斜拉索-磁流变阻尼器系统半主动控制的神经网络法[J]. 振动与冲击, 2003, 22(4): 49—53.
Wang Xiuyong, Chen Zhengqing, Ni Yiqing. Neural network approach of semi-active control for cable_MR damper system [J]. Journal of Vibration and Shock, 2003, 22(4): 49—53. (in Chinese)
- [10] 肖志荣. 大跨度斜拉桥拉索的非线性振动及智能半主动控制研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2008.
Xiao Zhirong. Non-linear vibration and intelligent semi-active control of cables for large-span cable-stayed bridge [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008. (in Chinese)