

一种抑制铁路桥梁地震反应的半主动控制新策略

马涌泉, 邱洪兴

(东南大学土木工程学院, 江苏南京 210096)

摘要: 为了有效降低桥梁在震后出现的较大梁体及支座位移, 提出变论域自适应模糊分散(VAFD)控制策略。首先设计出可以调节模糊控制策略的输入和输出变量论域的变论域自适应模糊(VAF)主动控制器; 然后将改进的剪切最优(MCO)半主动控制算法整合到VAF控制器中, 并结合分散控制策略设计出VAFD/MCO半主动控制器; 最后以一座铅芯橡胶支座隔震铁路桥梁为算例, 分别对其在无控制、Passive-on、VAFD/MCO、AFD/MCO和VAFG/MCO控制下的评价指标进行仿真计算。结果表明: VAFD/MCO策略的减震效果比Passive-on、AFD/MCO及VAFG/MCO策略的好; VAFD/MCO策略不占用计算资源, 可用于实时振动控制。

关键词: 振动控制; 铁路桥梁; 地震反应; 变论域; 自适应模糊控制; 鲁棒性

中图分类号: TU 311.3 **文献标志码:** A

引用格式: 马涌泉, 邱洪兴. 一种抑制铁路桥梁地震反应的半主动控制新策略[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2015, 39(2): 111-118.

MA Yongquan, QIU Hongxing. A new semi-active control strategy for restraining seismic response of railroad bridges[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2015, 39(2): 111-118.

A new semi-active control strategy for restraining seismic response of railroad bridges

MA Yongquan, QIU Hongxing

(College of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: In order to effectively reduce the larger displacement of girder and bearing in railroad bridges after earthquakes, a variable universe adaptive fuzzy decentralized (VAFD) controller was proposed. Firstly, a variable universe adaptive fuzzy (VAF) active controller was designed, which can online adjust the universe of input and output variables in fuzzy logic control strategy. Secondly, a VAFD/MCO semi-active controller for MRD was designed by integrating the modified clipped optimal (MCO) semi-active control algorithm into the VAF controller and using decentralized control strategy. Finally, taking the railroad continuous girder bridges isolated by lead rubber bearing as an example, the evaluation criteria under non-control, Passive-on, VAFD/MCO and AFD/MCO control strategies were calculated respectively. The results show that the VAFD/MCO strategy has better reduction effect than Passive-on, AFD/MCO and VAFG/MCO strategies. The VAFD/MCO strategy does not occupy computation resource and can be used for real-time vibration control.

Keywords: vibration control; railroad bridges; seismic response; variable universe; self-adaptive fuzzy control; robustness

隔震作为一项有效的减振技术, 在铁路桥梁减震领域得到普遍应用, 但该技术对具有较强随机性的地震激励的自适应能力较差^[1]。主动控制具有较强的自适应性, 但对外界能源的依赖性较强^[2]。半主动控制凭借其良好的自适应性和无需外界大量能源的优

势, 日益受到学者们的青睐。模糊(FL)控制算法凭借其无须建立被控结构精确数学模型的优势, 正成为学者们研究的热点^[3]。然而, 由传统优化方法确定出的隶属度函数及模糊控制规则形成的FL控制器在面对复杂控制问题时效果较差^[4]。为此, 学者们将自适

应理论引入 FL 控制领域,提出了自适应模糊(AF)控制策略,使其具备了自适应性及自调节能力^[5]。由于 AF 控制策略的论域固定,使其对具有较强结构非线性和荷载不确定性系统的控制效果不够理想,对此,学者们提出了可在线调节输入和输出变量论域的变论域自适应模糊(VAF)控制策略,并分别对四轴倒立摆^[6]、机翼^[7]、球杆^[8]和导弹电液伺服系统^[9]进行了控制。由于土木结构的惯性力较大,因此基于 VAF 策略开展土木结构振动半主动控制的研究工作具有重要意义。笔者结合分散控制理论提出用于抑制土木结构振动的 VAFD/MCO 半主动控制策略,并分别利用该策略与 Passive-on、AFD/MCO 策略对一座隔震铁路桥梁的地震反应进行仿真对比分析,验证本文所提策略的减震性能。

1 磁流变阻尼器的力学模型

采用 S-Bouc-Wen 模型^[10]模拟磁流变阻尼器(MRD)在不同运动状态和电流下的出力情况,其力学模型如图 1 所示。

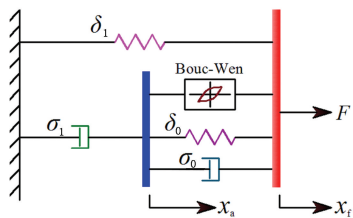


图 1 MRD 的力学模型

Fig. 1 Mechanical model of MRD

数学表达式为

$$\begin{cases} F = \alpha\lambda + \sigma_0(x_t - x_a) + \delta_0(x_t - x_a) + \delta_1(x - x_0), \\ \dot{\lambda} = -\phi | \dot{x}_t - \dot{x}_a | \lambda | \lambda |^{d-1} - \varepsilon(x_t - x_a) | \lambda |^d + A(\dot{x}_t - \dot{x}_a), \\ \dot{y} = \frac{\alpha\lambda + \sigma_0\dot{x}_t + \delta_0(x_t - x_a)}{\sigma_0 + \sigma_1}. \end{cases} \quad (1)$$

式中, \$F\$ 为 MRD 的阻尼力; \$\lambda\$ 为 Bouc-Wen 模型的滞迟量; \$\delta_1\$ 为蓄能器的刚度; \$\sigma_0\$ 为较高速度下获得的黏滞阻尼系数; \$\sigma_1\$ 为低速条件下观测到的用于描述该模型中的力-位移曲线衰减特性的阻尼系数试验值; \$\delta_0\$ 为较高速度下的控制刚度; \$x_0\$ 为产生的初始位移; \$\alpha, \phi, \varepsilon, A\$ 和 \$d\$ 均为 MRD 的参数。

MRD 的功能依靠性方程可表示为

$$\begin{cases} \alpha = \alpha(u) = \alpha_a + \alpha_b u, \\ \sigma_0 = \sigma_0(u) = c_{0a} + c_{0b} u, \\ \sigma_1 = \sigma_1(u) = c_{1a} + c_{1b} u. \end{cases} \quad (2)$$

MRD 的磁流变液在达到流变平衡时所涉及的动力学特性可以采用如下的一阶滤波器表述:

$$\dot{u} = -\eta(u - v). \quad (3)$$

式中, \$u\$ 为一阶滤波器的输出; \$1/\eta\$ 为一阶滤波器的时间常数。

2 VAF 控制策略的设计

对于多输入单输出的 FL 控制器,采用 \$X_i = [-E_i, E_i]\$ (\$i=1, 2, \dots, n\$) 表示输入变量 \$x_i\$ 的初始论域,采用 \$Y = [-U, U]\$ 表示输出变量 \$y\$ 的初始论域, \$\psi_i = \{A_i^j\}\$ 表示在 \$X_i\$ 的模糊划分 (\$i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m\$), \$\phi_j = \{B^j\}\$ 表示在 \$Y\$ 上的模糊划分 (\$j=1, 2, \dots, m\$)。该控制器的模糊推理规则可表示为 Rule^(j): IF \$x_1\$ is \$A_1^j\$ and \$\dots\$ and \$x_n\$ is \$A_n^j\$, THEN \$y\$ is \$B^j\$。 (4)

采用一个 \$n\$ 元分片形函数表征如规则(4)所描述的模糊逻辑系统,表示为

$$y(x_1, x_2, \dots, x_n) = \sum_{j=1}^m \prod_{i=1}^n A_i^j(x_i) y_j. \quad (5)$$

式中, \$x_i, y_j\$ 分别为 \$A_i^j\$ 和 \$B^j\$ 的峰值点。

变论域理论规定论域 \$X_i\$ 和 \$Y\$ 能够随着输入和输出变量的变化进行合理的调节, \$X_i\$ 和 \$Y\$ 可表示为

$$\begin{cases} X_i(x_i) = [-\beta(x_i)E_i, \beta(x_i)E_i], \\ Y(y) = [-\gamma(y)U, \gamma(y)U]. \end{cases} \quad (6)$$

其中

$$\beta(x_i) = 1 - \lambda \exp(-kx_i^2). \quad (7)$$

式中, \$\beta(x_i)\$ 和 \$\gamma(y)\$ 均为论域伸缩因子; \$\lambda \in (0, 1)\$, 且 \$k > 0\$。

利用式(6),可得到式(5)的另一种表达式为

$$y(\mathbf{x}(t+1)) = \gamma[y(\mathbf{x}(t))] \sum_{j=1}^m \prod_{i=1}^n A_i^j\left(\frac{x_i(t)}{\beta(x_i(t))}\right) y_j. \quad (8)$$

其中

$$\mathbf{x}(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)]^T.$$

规则(4)所表述的模糊逻辑系统的输出为

$$y = \frac{\sum_{j=1}^m y_j \left[\prod_{i=1}^n \xi_{A_i^j}(x_i) \right]}{\sum_{j=1}^m \left[\prod_{i=1}^n \xi_{A_i^j}(x_i) \right]}. \quad (9)$$

式中, \$\xi_{A_i^j}(x_i)\$ 为变量 \$x_i\$ 的隶属度函数; \$y_j\$ 为满足 \$\xi_{B^j} = 1\$ 上的点。

如果定义模糊基函数的表达式为

$$\xi^j(\mathbf{x}) = \prod_{i=1}^n A_i^j \left[\frac{x_i(t)}{\beta(x_i(t))} \right]. \quad (10)$$

则式(8)可以重新表示为

$$y = \boldsymbol{\gamma}(y) \sum_{j=1}^m \zeta^j(\mathbf{x}) y_j. \quad (11)$$

3 自适应律推导

受控桥梁系统在地震激励下的运动方程为

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{C}(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}) + \mathbf{K}(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}) = -\mathbf{M}\mathbf{r}\ddot{\mathbf{x}}_g + \mathbf{U}. \quad (12)$$

式中, \mathbf{M} 为系统的质量矩阵; $\ddot{\mathbf{x}}$ 为系统的加速度向量; $\mathbf{C}(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}})$ 和 $\mathbf{K}(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}})$ 分别为阻尼力和恢复力矩阵; \mathbf{r} 为地震激励位置矩阵; $\ddot{\mathbf{x}}_g$ 为地震加速度向量; \mathbf{U} 为控制力向量。

对式(12)两边同时除以 \mathbf{M} , 可得到

$$\ddot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{X}) + \mathbf{g}(t) + \mathbf{u}(t). \quad (13)$$

其中

$$\begin{cases} \mathbf{X} = [\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}]^T, \\ \mathbf{f}(\mathbf{X}) = -(1/\mathbf{M}) \{ \mathbf{C}(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}) + \mathbf{K}(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}) \}, \\ \mathbf{g}(t) = -\ddot{\mathbf{x}}_g, \\ \mathbf{u}(t) = (1/\mathbf{M}) \mathbf{U}. \end{cases} \quad (14)$$

式中, \mathbf{X} 为系统的状态矢量。

令追踪误差向量 $\mathbf{e} = \mathbf{X} - \mathbf{X}_d = [e, \dot{e}]^T$ 。期望输出 \mathbf{X}_d 一般情况下取为零向量, 因此 $\mathbf{e} = \mathbf{X}$ 。采用状态向量作为 FL 控制器的输入, 即满足 $\mathbf{x} = \mathbf{X}$ 。控制力向量 $\mathbf{u}(t)$ 的表达式为

$$\mathbf{u}(t) = \mathbf{u} = \boldsymbol{\gamma}(y) \sum_{j=1}^m \zeta^j(\mathbf{x}) y_j = \boldsymbol{\gamma} \mathbf{Y}_0^T \boldsymbol{\zeta}. \quad (15)$$

其中

$$\boldsymbol{\zeta} = [\zeta^1(\mathbf{x}) \cdots \zeta^m(\mathbf{x})]^T, \boldsymbol{\gamma}(y) = \boldsymbol{\gamma}.$$

式中, \mathbf{Y}_0 为初始输出模糊量的中心值。

依据等效控制理论^[11], 得控制律的表达式为

$$\mathbf{u}^* = -\mathbf{f}(\mathbf{x}) - k_1 \dot{\mathbf{e}} - k_2 \mathbf{e}. \quad (16)$$

式中, k_1 和 k_2 为使多项式 $p^2 + k_1 p + k_2 = 0$ 的根位于复平面左半平面上的两个系数。

把式(16)中的 $\mathbf{f}(\mathbf{x})$ 代入式(13), 可得到

$$\dot{\mathbf{e}} = \boldsymbol{\mu} \mathbf{e} + \boldsymbol{\eta} [\mathbf{u} - \mathbf{u}^*]. \quad (17)$$

其中

$$\boldsymbol{\mu} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -k_2 & -k_1 \end{bmatrix}, \boldsymbol{\eta} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (18)$$

定义控制力向量的逼近误差 $\boldsymbol{\Lambda}$ 为

$$\boldsymbol{\Lambda} = \mathbf{u}^* - \mathbf{u}. \quad (19)$$

由式(15)、(17)和(19)可以得到

$$\dot{\mathbf{e}} = \boldsymbol{\mu} \mathbf{e} - \boldsymbol{\eta} [(\boldsymbol{\gamma}^* - \boldsymbol{\gamma}) \mathbf{Y}_0^T \boldsymbol{\zeta} + \boldsymbol{\Lambda}]. \quad (20)$$

式中, $\boldsymbol{\gamma}^*$ 为最优逼近误差。

本文中构造的 Lyapunov 函数的表达式为

$$V = \frac{1}{2} \mathbf{e}^T \mathbf{P} \mathbf{e} + \frac{1}{2\tau} (\boldsymbol{\gamma}^* - \boldsymbol{\gamma})^2, \tau > 0. \quad (21)$$

\mathbf{P} 为正定矩阵, 并且满足以下 Lyapunov 方程:

$$\boldsymbol{\mu}^T \mathbf{P} + \mathbf{P} \boldsymbol{\mu} = -\mathbf{Q}. \quad (22)$$

式中, \mathbf{Q} 为任意形式的正定矩阵。

对式(21)进行求导, 可得到

$$\dot{V} = -\frac{1}{2} \mathbf{e}^T \mathbf{Q} \mathbf{e} - \mathbf{e}^T \mathbf{P} \boldsymbol{\eta} \boldsymbol{\Lambda} - \frac{(\boldsymbol{\gamma}^* - \boldsymbol{\gamma}) (\boldsymbol{\gamma} + \tau \mathbf{e}^T \mathbf{P} \boldsymbol{\eta} \mathbf{Y}_0^T \boldsymbol{\zeta})}{\tau}. \quad (23)$$

式中, $-\frac{\mathbf{e}^T \mathbf{Q} \mathbf{e}}{2}$ 为负定的。由万能逼近定理^[12]可知, 逼近误差 $\boldsymbol{\Lambda}$ 为足够小的值, 因此 $-\mathbf{e}^T \mathbf{P} \boldsymbol{\eta} \boldsymbol{\Lambda}$ 项可忽略。

为保证 $\dot{V} < 0$, 依据 Lyapunov 稳定性理论^[13], 采用的自适应律的表达式为

$$\boldsymbol{\gamma} = -\tau \mathbf{e}^T \mathbf{P} \boldsymbol{\eta} \mathbf{Y}_0^T \boldsymbol{\zeta}. \quad (24)$$

对式(24)积分即可获得输出论域的伸缩因子 $\boldsymbol{\gamma}$ 。

4 半主动控制算法的设计

由于限幅最优(CO)控制算法^[14]的命令电压 V_i 只能取 0 或 V_{\max} , 当受控系统的主导频率较低时, 施加于结构的控制力若发生电压差值较大的切换易放大结构的加速度反应。对此, 提出了改进的 CO (MCO) 半主动控制算法。MCO 中的控制电压 V_{ci} 可在 $0 \sim V_{\max}$ 间任意调节, V_{ci} 可通过外加电压与 MRD 最大出力间的线性关系确定。当 VAF 策略算得的控制力理论值 f_{ci} 大于 MRD 的最大出力 f_{\max} 时, 则对 MRD 施加电压 V_{\max} 。MCO 算法的示意图见图 2。

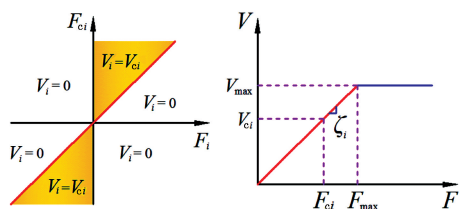


图2 MCO 算法示意图

Fig. 2 Schematic diagram of MCO algorithm

采用该算法施加于第 i 个 MRD 的命令电压 V_i 为

$$\begin{cases} V_i = V_{ci} H[(f_{ci} - f_i) f_i], \\ V_{ci} = \begin{cases} \zeta_i F_{ci}, & f_{ci} \leq f_{\max}, \\ V_{\max}, & f_{ci} > f_{\max}. \end{cases} \end{cases} \quad (25)$$

式中, $H[*]$ 为 Heaviside 阶跃函数; f_i 为测得的 MRD 控制力; ζ_i 为与控制力相关的电压系数, 取为 1.12; V_{\max} 为施加到与 MRD 的磁流变效应饱和度相对应的电流驱动器的电压。

将 MCO 算法整合到 VAF 控制器中, 设计出了 VAF/MCO 半主动控制策略。由于受控桥梁含有多

个自由度且安装有多个 MRD(该装置被安装在梁底与桥墩间,便于其产生相对运动,进而达到耗能的目的)。另外,此处 MRD 的两端能产生较为显著的位移和速度反应,将这些输入信号反馈至控制器,可算出 MRD 所需的命令电压,以驱使其产生阻尼力来对桥梁振动进行控制,故全局控制策略的模糊推理速度会很慢。对此,本文中提出了利用各子系统局部信息对桥梁进行控制的 VAF/MCO 分散(VAFD/MCO)控制策略。该策略须为每个 MRD 设计一个 VAF/MCO 半主动控制器,并采用 MRD 两端的相对位移 $x_i(i=1, 2, \dots, 12)$ 和相对速度 \dot{x}_i 作为该控制器的输入。带有半主动控制器的受控隔震铁路桥梁系统的框图见图 3。

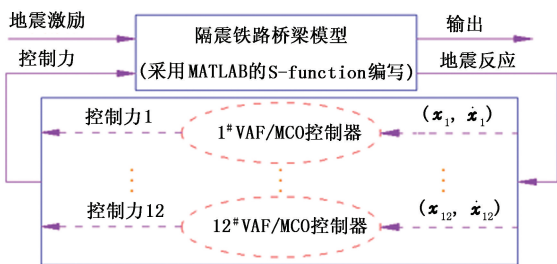


图3 带有半主动控制器的受控桥梁系统框图
Fig.3 Block diagram of controlled bridge system with semi-active controllers

5 仿真分析

5.1 系统参数

选取一座三跨(3×24 m)铅芯橡胶支座(LRB)隔震铁路桥作为算例(图4),箱梁截面为单箱单室、双柱式桥墩。边墩和中墩的性能参数相同,边墩和

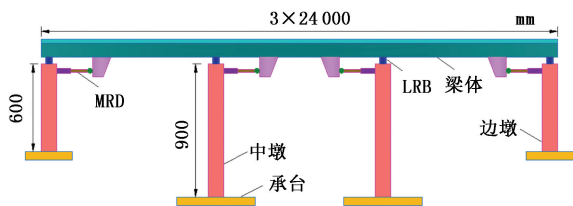


图4 受控隔震连续梁桥的立面图
Fig.4 Elevation of controlled seismically isolated continuous girder bridge

中墩布置相同型号的 LRB。桥梁结构和 LRB 的参数分别见表 1、2;足尺 MRD 铭牌标定的最大出力和冲程分别为 1 000 kN 和 50 cm。MRD 的优化参数为: $\alpha_b = 641 \text{ N} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{V}^{-1}$, $\phi = 362 \text{ cm}^{-2}$, $\alpha_a = 140 \text{ N} \cdot \text{cm}^{-1}$, $A = 300$, $\eta = 196 \text{ s}^{-1}$, $c_{0a} = 20.15 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{cm}^{-1}$, $c_{0b} = 3.56 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{V}^{-1}$, $\varepsilon = 362 \text{ cm}^{-2}$, $\delta_0 = 46.5 \text{ N} \cdot \text{cm}^{-1}$, $d = 2$, $x_0 = 14.5 \text{ cm}$, $c_{1a} = 290 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{cm}^{-1}$, $\delta_1 = 4.85 \text{ N} \cdot$

cm^{-1} , $c_{1b} = 2.92 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{V}^{-1}$ 。MRD 的编号及在桥梁上的位置见图 5。

表1 桥梁结构的计算参数

Table 1 Computation parameters of bridge structure

构件	S/m^2	$I/10^{-3} \text{m}^4$	E/GPa	$\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	m_c/kg
梁体	5.07	2986	32.5	2600	13182
桥墩	1.54	188	31.5	2600	4005
盖梁	6.92	569	31.5	2600	17992

注: S 为横截面积, I 为抗弯惯性矩, E 为弹性模量, ρ 为材料密度, m_c 为每延米质量。

表2 LRB 的计算参数

Table 2 Computation parameters of LRB

支座	D/mm	$k_b/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-1})$	$k_d/(\text{kN} \cdot \text{mm}^{-1})$	Q/kN
LRB1	120	19.79	1.98	95.1
LRB2	140	26.92	2.69	128.6

注: D 为铅芯直径, k_b, k_d 分别为初始刚度和屈服后刚度, Q 为屈服力。

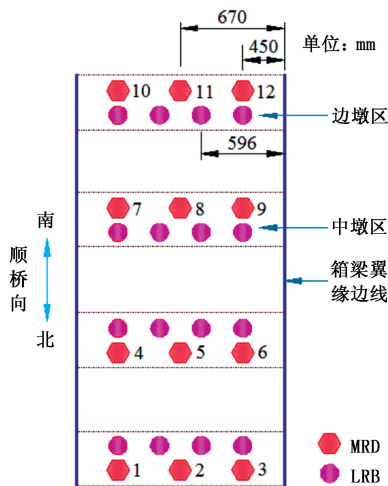


图5 MRD 的编号及布置位置

Fig.5 Layout position and serial number of MRD

选取具有不同场地特性和幅值的强震加速度记录作为地震波,其特征参数见表 3;把 12 个 VAF/MCO 控制器的输入变量 x_i 和 \dot{x}_i 的初始论域都换算至 $[-2.2, 2.2]$,把输出论域都换算至 $[-11, 11]$ 。将输入和输出变量的隶属度函数进行归一化处理,如图 6 所示。初始的模糊控制规则如表 4 所示, Y_0^T 的维数为 49。输入变量伸缩因子的参数取值为: $\lambda = 0.60$, $k = 0.85$, $k_1 = 110$, $k_2 = 22$, $Q = \text{diag}([11 \ 11])$ 。输出变量伸缩因子的初始值 $\gamma_0 = 1.1 \times 10^5$;在 AFD/MCO 控制器中,仍采用 MRD 两端的 x_i 和 \dot{x}_i 作为其子控制器的输入,其输入和输出模糊子集仍划分为 7 挡,采用三角形隶属度函数表述输入变量,重合度为 0.5。 Y_0^T 的维数为 49,输入变量 x_i 和 \dot{x}_i 的论域均换算至 $[-2.2, 2.2]$,输出论域均换算至

$[-1.1 \times 10^6, 1.1 \times 10^6]$, x_i 的量化因子取 11; VAFG/MCO(VAF 全局/MCO)半主动控制器的系统参数与 VAFD/MCO 控制器的相同;隔震桥的前 5 阶振频分别为 1.06、1.14、1.26、1.57 和 1.89 Hz。考虑到伸缩及限位装置的正常使用,梁体及支座的位移限值均为 6.00 cm,梁体与桥墩的相对位移限值为 4.00 cm。

表 3 地震波的特征参数

Table 3 Characteristic parameters of earthquake wave

地震波	分量	震级	断层距 s/km	PGA/ ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-2}$)	场地 类型
Golden Gate	S80E	6.1	11.9	348.3	I
Coyote Lake	S36E	7.2	4.5	271.6	II
El Centro	S00E	7.0	8.9	306.7	II
Ning He	S00E	6.9	10.7	146.8	III
Santa Barbara	S48E	7.4	4.8	375.2	III
Loma	S62E	6.8	12.6	409.5	IV

注:PGA 为地面加速度的峰值。

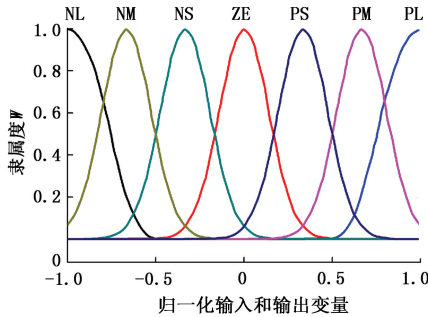


图 6 归一化的隶属度函数

Fig. 6 Normalized membership functions

表 4 初始模糊控制规则

Table 4 Initial fuzzy control rules

x/x	NL	NM	NS	ZE	PS	PM	PL
NL	PL	PL	PM	PM	PM	PS	PS
NM	PL	PL	PM	PM	PS	PS	ZE
NS	PL	PM	PS	ZE	NS	NS	NS
ZE	PM	PM	PS	ZE	NS	NM	NM
PS	PM	PS	PS	ZE	NS	NM	NM
PM	ZE	NS	NS	NM	NM	NM	NM
PL	NS	NS	NM	NM	NM	NL	NL

5.2 结果分析

分别对 LRB 隔震铁路连续梁桥进行无控制、Passive-on(此策略要求对 MRD 持续施加最大电压(2.5 V))被动控制、VAFD/MCO、AFD/MCO 及 VAFG/MCO 半主动控制下的仿真分析,得到各控制策略下的评价指标如表 5 所示。表中的最大值和平均值分别定义为

$$J_{\max} = \max_{\substack{\text{Golden Gate} \\ \text{Coyote Lake} \\ \text{El Centro} \\ \text{Ning He} \\ \text{Santa Barbara} \\ \text{Loma}}} \{J_1 \sim J_{20}\}; J_{\text{ave}} = \text{ave}_{\substack{\text{Golden Gate} \\ \text{Coyote Lake} \\ \text{El Centro} \\ \text{Ning He} \\ \text{Santa Barbara} \\ \text{Loma}}} \{J_1 \sim J_{20}\}. \quad (26)$$

由表 5 可以看出,VAFD/MCO 半主动控制策略对 J_1 (中跨跨中梁体位移)、 J_2 (边跨跨中梁体位移)、

J_3 (中跨跨中梁体加速度)、 J_4 (边跨跨中梁体加速度)、 J_5 (中墩顶位移)、 J_6 (边墩顶位移)、 J_7 (中墩顶加速度)、 J_8 (边墩顶加速度)、 J_9 (中墩底剪力)、 J_{10} (边墩底剪力)、 J_{11} (中墩底弯矩)和 J_{12} (边墩底弯矩)等地震反应指标的减震效果比 Passive-on、AFD/MCO 和 VAFG/MCO 控制的要好很多;无控制和 Passive-on 控制下的 J_1 和 J_2 的最大值均已超出限值,并且两者控制下的梁墩之间相对位移($J_1 - J_5$ 和 $J_2 - J_6$)的最大值也均已超出限值;AFD/MCO 和 VAFG/MCO 控制下的 J_1 和 J_2 的最大值均逼近限值,其中 VAFD/MCO 控制下的 J_1 、 J_2 、 $J_1 - J_5$ 及 $J_2 - J_6$ 的最大值均已远离限值。引起无控制和 Passive-on 控制桥梁较大地震反应的地震波是 Coyote Lake 和 Santa Barbara,两者均为低频脉冲波(图 7),其在 0.82 ~ 2.21 Hz 频带间的振幅较高,而隔震桥梁的前 5 阶振频均在此范围内,易引起共振。MRD 的加入对隔震桥的振频几乎没有影响,因此无控制及 Passive-on 控制下的桥梁均出现了较大的反应。VAFD/MCO 的论域可随输入和输出变量的变化进行合理调节,且该策略采用的是分散控制,故能够根据每个测点的反馈信号算出不同的控制指令,并施加给每个 MRD。指令是各控制器依据各自测点处的信号给出的,故对各测点处地震反应具有良好的减震效果,使该策略能显著提升其自适应外界地震激励的能力。虽然 AFD/MCO 也是采用的分散控制,但该策略的论域是固定不变的,造成其自适应能力大大减弱。VAFG/MCO 采用的是全局控制,控制器根据测点处的反馈信号算出一个统一的控制指令并施加给所有的 MRD,由于该指令仅是控制器依据特定测点的信号给出的,故对桥梁在其他位置的地震反应并不一定有抑制效果。

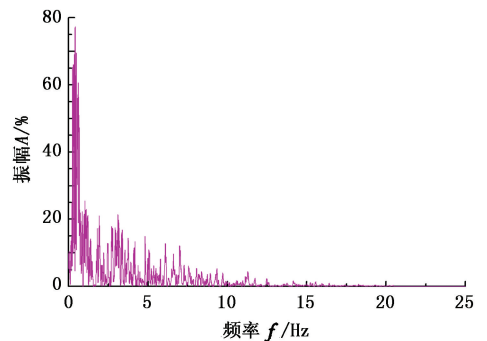


图 7 Santa Barbara 波的频谱特性

Fig. 7 Spectral characteristics of Santa Barbara wave

VAFD/MCO 控制下的 J_{13} (塑性铰数目)和 J_{14} (桥墩耗能量)等结构损伤指标比 Passive-on、AFD/MCO 和 VAFG/MCO 控制的要少很多,故 VAFD/MCO 策略比 Passive-on、AFD/MCO 和 VAFG/MCO 策略更能降低地震带给桥梁结构的损伤破坏。

VAFD/MCO 的 J_{15} (实际最大出力)和 J_{16} (实际最大冲程)比 Passive-on、AFD/MCO 和 VAFG/MCO 的都大;VAFD/MCO 的 J_{17} (所需外界能量)比 Passive-on、AFD/MCO 和 VAFG/MCO 的都少。

VAFD/MCO 策略的 J_{18} (所需的 MRD 数目)与 Passive-on、AFD/MCO 和 VAFG/MCO 策略的相同。VAFD/MCO 策略的 J_{19} (所需的传感器数目)与 AFD/MCO 策略的相同,而 VAFG/MCO 策略的 J_{19} 要比前两种策略少得多。这是由于 VAFG/MCO 采用的是全局控制,无须为每个测点布置传感器;VAFD/MCO 策略的 J_{20} (所需的计算资源)为零,而 AFD/MCO 和 VAFG/MCO 策略的 J_{20} 却较大,因此前种策

略可避免控制器运算所带来的时滞。

通过对比 Passive-on、VAFD/MCO 及 AFD/MCO 控制桥梁的初始刚度在发生 $\pm 30\%$ 摄动时的部分指标(平均值)的仿真值与实测值(制作了 1:10 的模型桥,并对其进行了实测)比较 3 种策略的鲁棒性,结果见表 6。可以看出,VAFD/MCO 控制的各地震反应和损伤指标均小于 Passive-on 和 AFD/MCO 的各相应指标,并且前者比后两者更利于 MRD 性能的充分发挥。由此可见,当隔震桥梁的刚度存在不确定性时,VAFD/MCO 的性能要明显优于 Passive-on 和 AFD/MCO,故 VAFD/MCO 策略的鲁棒性要明显优于 Passive-on 和 AFD/MCO 策略。

表 5 各种控制策略下的评价指标

Table 5 Evaluation criteria under various control strategies

控制策略		J_1/cm	J_2/cm	$J_3/(m \cdot s^{-2})$	$J_4/(m \cdot s^{-2})$	J_5/cm	J_6/cm	$J_7/(m \cdot s^{-2})$	$J_8/(m \cdot s^{-2})$	J_9/kN	J_{10}/kN
无控制	最大值	7.16	7.43	8.62	8.54	2.89	2.95	7.23	7.41	812	826
	平均值	5.87	5.94	7.75	7.68	1.96	2.08	6.27	6.42	636	647
Passive-on	最大值	6.47	6.61	7.25	7.16	2.42	2.49	5.62	5.78	725	737
	平均值	5.37	5.49	4.82	4.73	1.87	1.95	4.28	4.39	589	602
VAFD/MCO	最大值	2.46	2.58	1.98	1.92	0.83	0.89	2.16	2.21	387	392
	平均值	1.79	1.83	1.65	1.61	0.62	0.67	1.75	1.80	346	351
AFD/MCO	最大值	5.41	5.52	4.75	4.66	1.89	1.95	3.81	3.93	572	581
	平均值	4.58	4.65	4.26	4.19	1.56	1.61	3.42	3.51	553	559
VAFG/MCO	最大值	5.36	5.46	4.15	4.02	1.64	1.70	3.31	3.41	497	504
	平均值	4.47	4.54	3.68	3.61	1.35	1.39	2.96	3.03	479	485

控制策略		$J_{11}/(kN \cdot m)$	$J_{12}/(kN \cdot m)$	J_{13}	J_{14}/kJ	J_{15}/kN	J_{16}/cm	J_{17}/kJ	J_{18}	J_{19}	J_{20}
无控制	最大值	7145	4807	28	382.51	—	—	—	—	—	—
	平均值	5603	3762	20	367.29	—	—	—	—	—	—
Passive-on	最大值	6381	4276	22	291.14	765	36.5	7.982	12	—	—
	平均值	5182	3495	16	278.35	738	33.2	7.653	—	—	—
VAFD/MCO	最大值	3406	2274	0	63.26	994	49.5	1.265	12	24	0
	平均值	3045	2036	0	61.85	989	48.8	1.206	—	—	—
AFD/MCO	最大值	5032	3368	8	187.92	940	42.7	3.263	12	24	16
	平均值	4865	3241	6	173.76	913	41.1	3.157	—	—	—
VAFG/MCO	最大值	4367	2923	6	163.08	815	43.9	3.058	12	4	8
	平均值	4219	2811	4	150.79	792	42.3	2.962	—	—	—

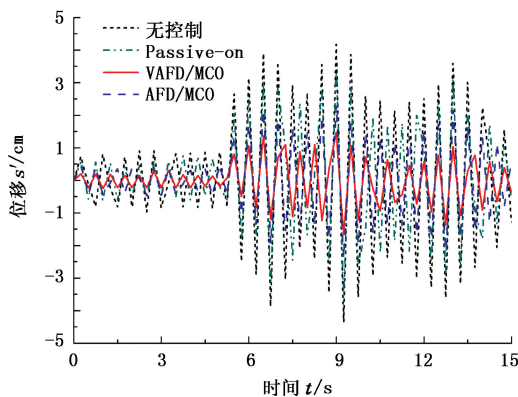
表 6 $\pm 30\%$ 桥梁刚度摄动下的部分评价指标

Table 6 Parts of evaluation criteria caused by $\pm 30\%$ bridge stiffness perturbed

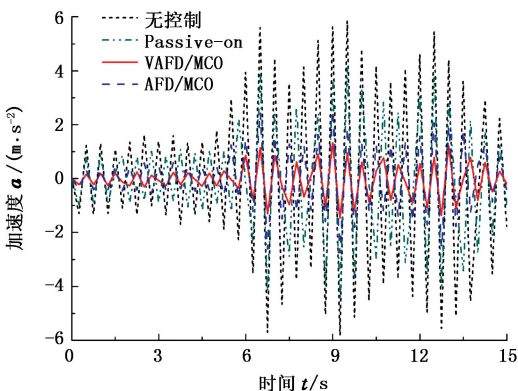
刚度 摄动	控制策略	J_1/cm	$J_4/(m \cdot s^{-2})$	J_5/cm	$J_8/(m \cdot s^{-2})$	J_{10}/kN	$J_{11}/(kN \cdot m)$	J_{14}/kJ	J_{15}/kN	J_{16}/cm	J_{20}	
+30%	Passive-on	仿真	5.41	4.75	1.92	4.43	609	5271	280.25	758	36.1	—
		实测	5.42	4.74	1.91	4.42	610	7273	280.27	759	36.2	—
	VAFD/MCO	仿真	1.83	1.65	0.67	1.84	358	3128	63.62	990	48.9	0
		实测	1.82	1.66	0.68	1.83	357	3129	63.59	989	49.0	0
	AFD/MCO	仿真	4.65	4.36	1.62	3.65	574	4951	179.54	917	41.5	16
		实测	4.66	4.35	1.61	3.64	575	4953	179.52	918	41.4	16
-30%	Passive-on	仿真	5.46	4.8	1.98	4.49	615	5283	282.46	759	36.3	—
		实测	5.45	4.79	1.99	4.50	616	5281	282.45	758	36.4	—
	VAFD/MCO	仿真	1.88	1.71	0.73	1.89	365	3142	64.87	991	49.0	0
		实测	1.89	1.72	0.72	1.88	366	3141	64.85	992	49.1	0
	AFD/MCO	仿真	4.72	4.43	1.71	3.72	581	4974	181.67	922	41.8	16
		实测	4.71	4.42	1.70	3.73	582	4973	181.63	923	41.7	16

从控制器机理的角度来看,VAFD/MCO 策略的论域可随着输入和输出变量的变化进行自行调节,故增强了其适应桥梁动力特性变化的能力。Passive-on 为被动控制,故其自适应性较差。AFD/MCO 策略虽然在模糊控制的基础上添加了自适应律,但其论域仍是固定的,故其适应桥梁动力特性变化的能力依然较差。

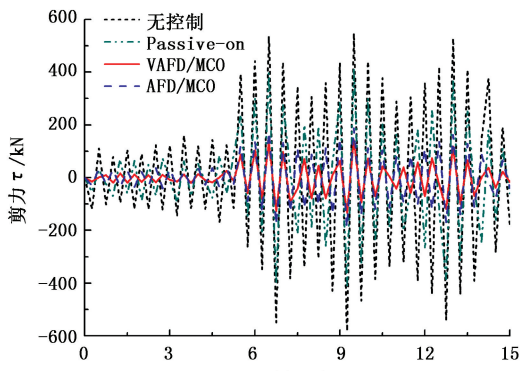
图 8 为各控制策略下的结构地震反应时程。由



(a) 中跨跨中梁体位移



(b) 中跨跨中梁体加速度



(c) 中墩底剪力

图 8 各控制策略下的结构地震反应时程

Fig. 8 Time history of structural seismic response under various control strategies

图 8 可以看出,在 Ning He 波激励的整个时程内,VAFD/MCO 控制下的 J_1 、 J_3 和 J_9 比无控制、Passive

-on 控制和 AFD/MCO 控制的都小。由图 9 可以看出,无控制及 Passive-on 控制的支座位移已超出限值,AFD/MCO 策略的支座位移仍接近限值,而 VAFD/MCO 策略的支座位移仍接近限值,而 VAFD/MCO 策略却能将支座位移降至理想值。由图 10 可看出,在 Ning He 波激励下,VAFD/MCO 的控制力曲线很平滑,而 AFD/MCO 的控制力曲线却出现了较为明显的抖振。由图 11 可看出,在 Golden Gate 波和 Coyote Lake 波的分别激励下,5 号和 12 号 VAFD/MCO 控制器的输出论域伸缩因子时程曲线均非常平滑。

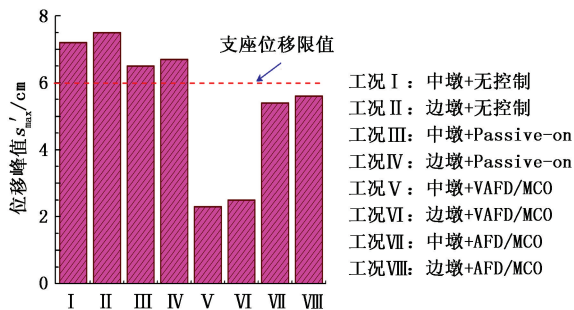


图 9 不同工况下的支座位移峰值

Fig. 9 Peak bearing displacement under various cases

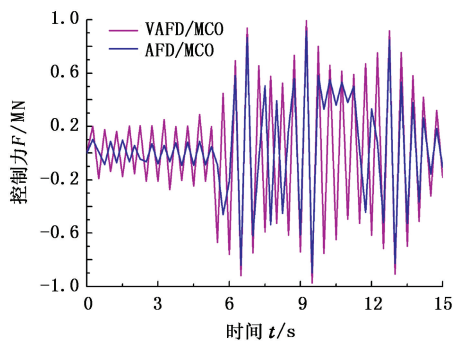


图 10 控制力时程

Fig. 10 Time history of control force

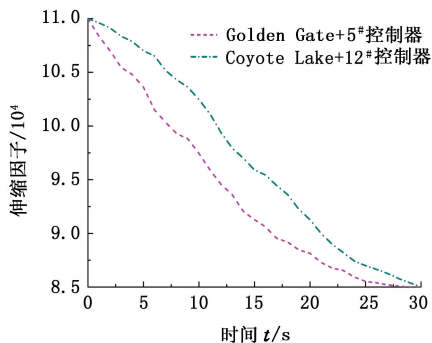


图 11 输出论域的伸缩因子时程

Fig. 11 Time history of output universe's expansion-contraction factor

6 结 论

(1) VAFD/MCO 策略对隔震桥梁的减震效果比 Passive-on、AFD/MCO 和 VAFG/MCO 策略的都要显著,前者控制下的梁体及支座位移均降至理想值;与 Passive-on、AFD/MCO 和 VAFG/MCO 控制相比,VAFD/MCO 控制桥梁的损伤程度最低。

(2) VAFD/MCO 策略比 Passive-on、AFD/MCO 和 VAFG/MCO 策略更利于 MRD 性能的发挥;VAFD/MCO 控制器在运算时,不会产生时滞,可用于结构振动的实时控制;VAFD/MCO 控制策略的鲁棒性要明显优于 Passive-on 和 AFD/MCO 控制器。

参考文献:

- [1] SAHASRABUDHE S S, NAGARAJIAH S. Semi-active control of sliding isolated bridges using MR dampers: an experimental and numerical study[J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2005,34(8):965-983.
- [2] SPENCER B F, NAGARAJIAH S. State of the art of structural control[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2003,129(7):845-856.
- [3] SYMANS M D, KELLY S W. Fuzzy logic control of bridge structures using intelligent semi-active seismic isolation systems[J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 1999,28(1):37-60.
- [4] DAS T, KAR I N. Design and implementation of an adaptive fuzzy logic-based controller for wheeled mobile robots[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2006,14(3):501-510.
- [5] ZHOU L, CHANG C C, WANG L X. Adaptive fuzzy control for nonlinear building-magnetorheological damper system[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2003,129(7):905-913.
- [6] LI H X, MIAO Z H, WANG J Y. Variable universe adaptive fuzzy control on the quadruple inverted pendulum [J]. *Science in China Series E: Technological Sciences*, 2002,45(2):213-224.
- [7] LIU Z L, SU C Y, SVOBODA J. Control of wing rock phenomenon with a variable universe fuzzy controller [C]//*Proceedings of the 2004 American Control Conference*. Washington: IEEE Computer Society, c2004: 1719-1724.
- [8] HOU B B, GAO Y. Variable universe fuzzy controller with correction factors for ball and beam system [C]//*Proceedings of the 3rd International Workshop on Intelligent Systems and Applications*. Washington: IEEE Computer Society, c2011:1-4.
- [9] 刘云峰,刘华峰. 基于变论域的导弹电液伺服机构自适应模糊滑模控制[J]. *上海航天*, 2009,26(6):25-30.
- [10] LIU Yunfeng, LIU Huafeng. Adaptive fuzzy sliding mode control for missile electro-hydraulic servo mechanism based on variable universe [J]. *Aerospace Shanghai*, 2009,26(6):25-30.
- [11] SPENCER B F, DYKE S J, SAIN M K, et al. Phenomenological model for magneto-rheological dampers [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 1997,123(3):230-238.
- [12] HUANG S J, LIN W C. Adaptive fuzzy controller with sliding surface for vehicle suspension control [J]. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2003,11(4):550-559.
- [13] YAGER R R, KREINOVICH V. Universal approximation theorem for uniform-based fuzzy systems modeling [J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 2003,140(2):331-339.
- [14] WU H, MIZUKAMI K. Lyapunov stability theory and robust control of uncertain descriptor systems [J]. *International Journal of Systems Science*, 1995,26(10):1981-1991.
- [15] DYKE S J, SPENCER B F, SAIN M K, et al. Modeling and control of magneto-rheological dampers for seismic response reduction [J]. *Smart Materials and Structures*, 1996,5(5):565-575.

(编辑 沈玉英)