

文章编号: 1005—0523(2005)05—0001—04

斜拉桥拉索 MR 模糊半主动控制研究

陈水生¹, 任东红²

(1. 华东交通大学 土木建筑学院, 江西 南昌 330013; 2. 江西省公路管理局, 江西 南昌 330005)

摘要:提出了使用 MR 阻尼器(Magnetorheological Damper)作为控制设备,模糊集为基础的半主动控制算法,并运用提出的算法对索—阻尼器系统进行了振动控制分析.本文方法的优势在于算法自身的鲁棒性、处理非线性问题的能力和不需要结构的精确数学模型,算法需要的输入变量少,可以解决实际工程中斜拉索的振动响应信息难以测量的困难.模糊算法的输出直接控制 MR 阻尼器的输入电压,与 LQR—Clipped 算法不同,MR 阻尼器的输入电压可以是零与最大值之间的任意值.本文以实际斜拉桥拉索为例,分析了拉索在谐荷载及风荷载作用下的系统振动控制效果,数值结果表明,本文提出的模糊半主动控制算法比 MR 被动控制效果好,且可以减小需要的控制力,使 MR 阻尼器的功能得到了更好的发挥.

关 键 词:斜拉索;模糊控制;半主动控制;MR 阻尼器

中图分类号:TP206 **文献标识码:**A

1 引 言

近年来,半主动控制由于不需要大的外部能量输入,吸引了大量研究人员,其中磁流变阻尼器(MR Dampers)开发利用,引起了极大的关注,由于它不需要大的外部能量输入、安全可靠和费用相对低等特点,很适合在土木工程中使用,但由于 MR 阻尼器是非线性的半主动控制设备,所以研究合适的半主动控制算法成为很有挑战性的课题,也是如何提高阻尼器使用效率的主要问题.

1965 年,模糊集理论首次由 Zedeh^[1]提出,1974 年, Mam-dani^[2]使用 Zedeh 提出的模糊语言表示法和模糊推理规则成功的在气轮机的自动操作控制中使用了“IF—Then”规则,从而引起了广泛的关注和研究.由于不需要复杂的结构计算,大大减小了反馈的时间延滞,在工程结构系统中使用模糊控制理论已被广泛的研究^[3].Teng^[4]等使用模糊推理对一个悬臂梁进行了主动控制,Battaini^[5]等对一个 28 个自由度的 Benchmark 结构使用了模糊控制,Li^[6]等对一个单自由度系统分析了自适应模糊控制算法的可行性,Faravell^[7]等使用自适应网格模糊控制对一个两自由度系统地震响应进行了控制,验证了模糊控制算法的有效性.

磁流变(MR)阻尼器的半主动控制在实际工程中的应用还很少,更多的是处于理论及实验研

究阶段.文献^[8]介绍了四种针对 MR 阻尼器的半主动控制算法,并用各种算法对一个缩尺的 6 层建筑模型进行了实验及理论分析;H. Li 等^[9]依据最大能量耗散准则对半主动流体阻尼器提出了一种控制算法;Johnson 等^[10,11,12]则对斜拉索的半主动控制进行了系列的研究,采用包括一个静挠度模态在内的标准弦振动模态,用 Galerkin 方法将偏微分方程转化为常微分方程,用 LQR(Linear Quadratic Regulator)最优控制算法对斜拉索进行了被动、主动、半主动控制研究,结果表明半主动控制与最优的被动控制相比,可以使振动响应减小 50%~80%,陈^[13]提出了 LQR—Clipped 控制算法,分析了斜拉索的半主动控制;Ni^[14]等首次将 MR 阻尼器使用在中国的洞庭湖大桥上,将 MR 阻尼器电压固定在某一最优值,对斜拉索进行被动控制.

本文的目的在于提出更适合斜拉桥拉索振动控制使用的 MR 半主动控制算法,由于 LQR—Clipped 算法^[13]是据于最优控制理论而提出的,它的使用需要知道系统状态的所有振动信息,这在实际工程中是很难实现的,而且,MR 的输入电压只能取零或者最大值.为此,本文使用模糊控制基本原理,只使用系统的很少信息,MR 阻尼器的输入电压直接由

收稿日期:2005—02—18

作者简介:陈水生(1968—),男,江西乐安人,博士,华东交通大学土木建筑学院教授.

模糊控制器调节,可以是允许的任意值.使用提出的算法对某一实际斜拉索的自由振动、谐荷载作用及风荷载作用的振动控制效果进行了分析,并比较了各种算法的控制效果.

2 MR 模糊半主动控制算法

为使 MR 阻尼器具有更广泛的用处,各国学者提出了各种理论模型,主要有 BingHam 模型及 Bouc－Wen 模型, Spencer 等^[16]在 Bouc－Wen 模型的基础上,提出了修正的 Bouc－Wen 模型,端部力控制方程为:

$$F=c_1\cdot\dot{y}+k_1\cdot(x-x_0) \tag{7}$$

$$\dot{y}=\frac{1}{c_0+c_1}\cdot[\alpha\cdot z+c_0\cdot\dot{x}+k_0\cdot(x-y)] \tag{8}$$

$$\dot{z}=-\gamma\cdot|\dot{x}-\dot{y}|\cdot z\cdot|z|^{n-1}-\beta\cdot(\dot{x}-\dot{y})\cdot|z|^n+\mu\cdot(\dot{x}-\dot{y}) \tag{9}$$

$$\alpha=\alpha_a+\alpha_b\cdot u, \quad c_1=c_{1a}+c_{1b}\cdot u \quad c_0=c_{0a}+c_{0b}\cdot u \tag{10}$$

$$\dot{u}=-\eta\cdot(u-\omega) \tag{11}$$

其中 ω 为输入电压,各参数 c_{0a} , c_{0b} , k_0 , c_{1a} , c_{1b} , x_0 , α_a , α_b , γ , β , n , η , μ 由 MR 原型阻尼器^[16]确定, x 、 $\dot{x}$ 分别为阻尼器端部位移和速度.

结构振动控制的目的在于寻求合适的 $F(t)$,使结构振动响应最小.将结构振动响应反馈给控制器作为决定施加控制力大小的依据,本文使用的 MR 阻尼器是一个半主动控制设备,采用模糊推理器决定 MR 阻尼器的输入电压,如何设计合适的模糊控制算法是获得有效控制效果的关键.

本文模糊算法采用两个输入变量,一个是控制设备施力点处的速度,另一个是斜拉索最大响应结点处的速度.对各输入语言变量采用 5 个模糊子集,分别是:

NL=Negative Large NS=Negative Small ZE=Zero
PS=Positive Small PL=Positive Large

MR 阻尼器的输入电压作为模糊控制器的输出变量,输出语言变量采用 3 个模糊子集,分别是:ZE=Zero, M=Medium, L=Large.各语言变量模糊子集均采用三角形隶属度函数,各子集的重叠点一般在 0.30.8 之间,如图 2 所示,图中 X 表示系统响应的极大值,Y 表示 MR 阻尼器的允许输入最大电压.如何选择各语言变量的合适论域是保证算法成功实现的关键,为了合理选择论域,需要进行以下计算:

- 1) 计算没有控制时的系统响应,找出两个输入变量的极大、极小值;
- 2) 依据(1)算出的结果,确定各输入变量的语言论域,各模糊子集的隶属度重叠点为 0.5;
- 3) 使用包含(2)的控制系统计算结构的响应,得出输入变量的极大、极小值;
- 4) 重新修正各输入变量论域,一般取(3)计算得到的极值的 1.2 倍作为输入变量论域的限值.

模糊控制规则的基本原则是,如果两个输入变量都是大值,则输出变量也取大值,控制规则如表 1 所示.

表 1 模糊控制规则

	NL	NS	ZE	PS	PL
NL	L	L	M	L	M
NS	L	M	ZE	M	ZE
ZE	M	ZE	ZE	ZE	M
PS	ZE	M	ZE	M	L
PL	M	L	M	L	L

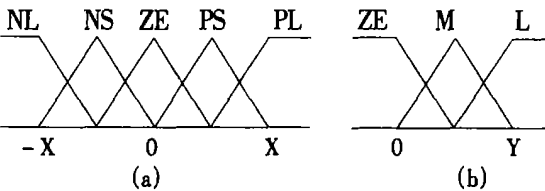


图 1 输入(a)、输出(b)变量隶属度函数

3 数值算例

为说明本文提出算法的有效性,本节某一实际斜拉桥拉索为例,拉索基本参数如表 2 所示,其中 ω_{01} 为无阻尼器拉索振动基频, λ^2 、 Θ 分别为反映拉索垂度、抗弯刚度的无量纲参数^[15].计算了在零电压时 MR 被动控制(Passive Off)、最大电压时 MR 被动控制(Passive On)、LQR－Clipped 半主动控制及本文提出的模糊半主动控制算法的控制效果,分析计算了系统在均布谐荷载作用及随机风荷载作用的系统响应.

表 2 索的基本参数

参数	L (m)	T (10 ⁻⁴ kN)	E (10 ⁻¹¹ N/m ²)	A (m ²)	m (kg/m)	θ ($^{\circ}$)	ω_{01} (s ⁻¹)	λ^2	Θ
数值	144.1	1.32	1.95	0.0314	260.6	37.2	4.91	0.023	133

为检验本文算法的控制效果,计算了沿索长均匀分布的简谐荷载作用下,系统的振动效果.激励荷载表示为:

$$f(t)=F_0\cdot\sin(2\pi\phi\cdot t) \tag{12}$$

其中, F_0 为激励幅值, ϕ 是激励频率, t 为振动时间,在本节的计算中, $F_0=0.8$ kN, $\phi=0.94$ Hz,总的计算时间为 100 秒.本节计算了在没有控制和 MR 模糊控制时短索系统的振动响应,模糊算法两个输入变量论域为: $-0.23\sim0.23$ 、 $-4.35\sim4.35$.图 2 给出了频率－功率谱曲线(跨中点的响应谱),显示结果表明,在没有阻尼器时,索的振动包括两种频率成分,即:索的一阶固有振动频率及外激励荷载频率,而在有控制时,索的一阶固有振动成分很小,同时,外激励频率成分的功率谱密度也一定的减小,这说明了振动控制有很好的效果.为便于比较,图 3 同时给出了,在有无控制时索的跨中振动响应时间历程;结果表明,拉索在较短的时间便进入稳态,并以外激励频率振动,而在进入稳态之前(瞬态),索的振动包含了一定的一阶固有频率成分,这也可以解释为什么在模糊振动控制时频率－功率谱图中有很少的一阶固有频率成分.

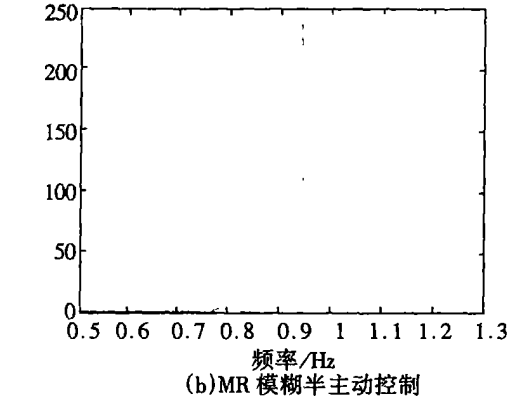
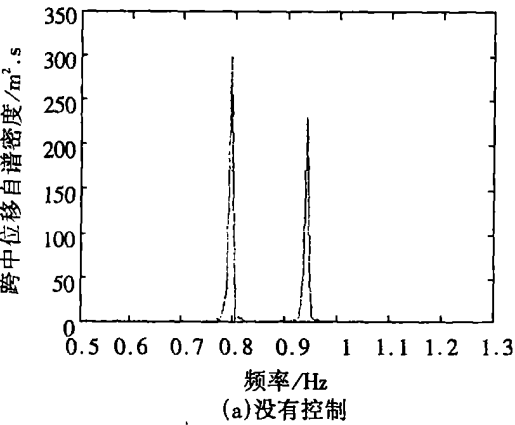


图2 在均匀简谐荷载作用时,跨中位移自谱密度曲线

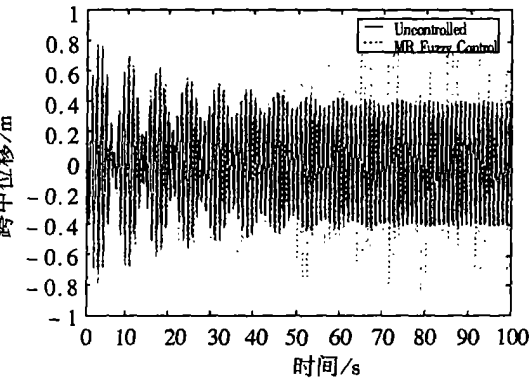


图3 均匀谐荷载作用,响应时间历程

对 Davenport 风谱,用修正的 AR^[17]算法模拟得出了作用在拉索上的风力时程,如图 4 所示,不计风速沿高度的变化.模糊算法两个输入变量论域为:−0.017~0.017、−0.306~0.311.结果如图 5 所示,图中给出了拉索在有无控制时的跨中位移响应时程曲线,结果表明,在模糊控制时,拉索的位移响应有很大的减小,说明模糊控制算法有很好的控制效果.

4 结 论

采用修正的 Bouc-Wen 模型模拟 MR 阻尼器的非线性特性,据于模糊集理论提出了适合斜拉桥拉索振动控制的 MR 模糊半主动控制算法.对两根斜拉索在自由振动、均布谐荷载作用及随机风荷载作用下,使用 MR 被动控制、LQR

—Clipped 半主动控制及本文提出的 MR 模糊半主动控制进行了计算分析.计算结果表明,模糊半主动控制效果比被动控制好,而比 LQR—Clipped 半主动控制稍差,但模糊控制所需要的相应控制力比其它算法小;同时,更应该认识到,模糊控制只需要知道两个系统响应速度值,而 LQR—Clipped 算法需要知道系统响应的所有位移及速度值,这在工程上是很难实现的;同时,模糊控制算法计算时间少、实现容易,所以,MR 模糊半主动控制算法的提出为实际工程使用 MR 阻尼器提供了一个很好的半主动控制算法.

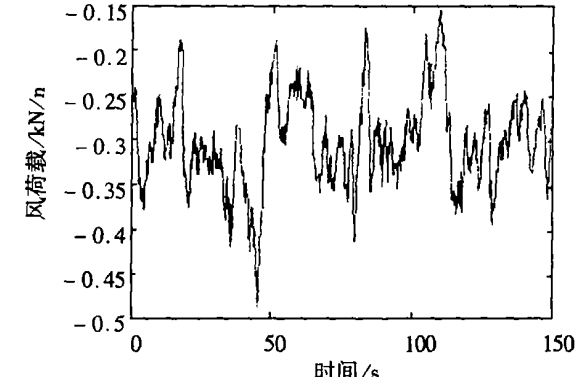


图4 风荷载时间历程曲线

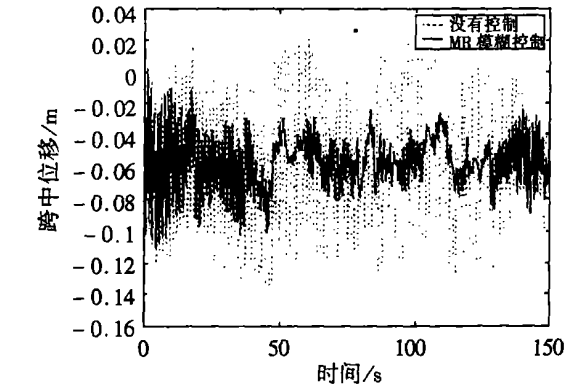


图5 均布风荷载作用时,响应时程曲线

参考文献:

[1] Zedeh L. A. Fuzzy set [J]. Information and Control 1965, (8): 338—353

[2] Mamdani EH. Application of fuzzy algorithms for control of simple dynamics plants. Proceedings of the IEEE, 1974, (121): 1585—1588

[3] Kang-Min Choi, Sang-Won Cho, Hyung-Jo Jung and In-Won Lee. Semi-active fuzzy control for seismic response reduction using magnetorheological dampers [J]. Earthquake engineering and structural dynamics, 2004, (33): 723—736

[4] Tso-Liang Teng, Cheng-Ping Peng, Chun Chuang. A study on application of fuzzy theory to structure active control [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2000; 189: 439—448

- [5] M. Battaini, F. Casciati and L. Faravelli. Fuzzy control of structural vibration. An Active mass system driven by a fuzzy controller[J]. Earthquake engineering and structural dynamics, 1998, (27); 1267—1276
- [6] Li Zhou and Chih-Chen Chang. Adaptive fuzzy control for a structure-MR damper system. In smart structures and materials smart system for bridges, structures, and highways, Proceedings of SPIE, 2000, (3988); 105—115
- [7] Lucia Faravelli and Timothy Yao. Use of Adaptive networks in fuzzy control of civil structures [J]. Microcomputers in Civil Engineering, 1996, (11); 67—76
- [8] Laura M. Jansen and Shirley J. Dyke. Semi-active control strategies for MR dampers; Comparative study [J]. J. Engrg. Mech. ASCE 2000, 126(8), 102—112.
- [9] H. Li, B. Wu, L. Kafayoi, Y. Suzuki and X. S. Yuan. A control algorithm based on maximum energy dissipation criterion for semi-active fluid dampers. International Conference of Advances in structure dynamics, J. M. Ko and Y. L. Xu (Eds), Elsevier Science Ltd, 2000. I, 319—326.
- [10] E. A. Johnson, G. A. Baker, B. F. Spencer and Y. Fujino. Mitigating stay cable oscillation using semi-active damping. In Smart Structures and Materials 2000; Smart System for Bridges, Structure and Highways, S. C. Liu, Editor, Proceedings of SPIE, 2000(3988); 207—216.
- [11] E. A. Johnson, R. E. Christenson, and B. F. Spencer, Jr., Semi-active damping of cables with sag, International Conference of Advances in structure dynamics, J. M. Ko and Y. L. Xu (Eds), Elsevier Science Ltd, 2000 I, 327—334.
- [12] E. A. Johnson, Billie F. Spencer, Jr., Yozo Fujino, Semi-active damping of stay cables: a preliminary study, Proceedings of the 17th international modal analysis conference (IMAC XVII), Society for Experimental Mechanics, Bethel, Connecticut, 1999, 417—423.
- [13] 陈水生, 孙炳楠. 大跨度斜拉桥拉索的半主动控制研究 [J]. 中国公路学报, 2004(2).
- [14] Ni Y. Q., Ko, J. M., Chen Z. Q., Spencer B. F.. Lessons Learned From Application of Semi-Active MR Dampers to Bridge Cables for Win-Rain-Induced Vibration Control, China-Japan Workshop on Vibration Control and Health Monitoring of Structures, Shanghai, China, Dec. 2002.
- [15] Chen ShuiSheng, Nao Aki Noda, Zhang Ling. Nonlinear Transient Response of Stay Cable With Viscoelasticity Damper in Cable-Stayed Bridge [J]. 计算力学学报, 2004, 21(3); 356—360.
- [16] Spencer BF, Dyke SJ, Sain MK. Phenomenological model for magnetorheological dampers. Journal of Engineering Mechanics (ASCE) 1997(123); 230—238
- [17] Attiillio Iannuzzi, Paolo Spinelli, Artificial Wind Generation and Structural Response, Journal of Structural Engineering, 1987(113); 12, 2382—2398.

MR Fuzzy Semi-Active Control of Cables in Cable-Stayed Bridges Using Magnetorheological Dampers

CHEN Shui-sheng¹, REN Dong-hong²

(1. School of Civil Engineering, East-China Jiaotong University, Nanchang 330013; 2. Bureau of Highway Management of Jiangxi Province, Nanchang 330005, China)

Abstract: A semi-active control strategy, the MR (Magnetorheological Dampers) dampers are used as actuator, is presented based on the fuzzy set theory. And the vibration control of the cables-dampers system is analyzed by the proposed strategy. The proposed method has some advantages of an inherent robustness, and easiness to handle the nonlinear characteristics of the structure because there is no longer the needs for an exact mathematical model of the structure, and need to know few input variables from the vibration sensors that will deal with the difficulty of testing response information of the structure vibration. The output of the present method is directly input to the MR damper as the input voltage and the fuzzy logical controller can be easily evaluated in the real Civil Engineering structure. Compared with the LQR-Clipped method, in which the MR dampers voltage only can be Zero or Maximum, the present method can make the voltage for MR dampers the desired value. As numerical examples, the practical cables are analyzed for free vibration, uniformed harmonic load, and the uniformed stochastic wind load respectively. The research results demonstrate that the present method can get better effectiveness than both of the Passive off and Passive On control, and almost the same effectiveness as LQR-Clipped strategy and has very good efficiency to reduce the vibration response. However, the smaller control force need in the present method than the LQR-Clipped method. It means that the proposed strategy can promote the efficiency of the MR Dampers.

Key words: stay-Cables; fuzzy control; semi-active; MR damper