

文章编号:1006-7329(2003)02-0043-05

连续梁桥竖向振动半主动滑动模式控制研究*

韩 西^{1,2}, 钟 厉², 王志坚²

(1.重庆大学 光电工程学院,重庆 400044;2.重庆交通学院,重庆 400074)

摘要:利用可变阻尼器对连续梁桥的竖向振动进行半主动控制,提出基于滑动模式理论的控制算法,并以实例加以说明。研究结果表明,滑动模式方法对控制系统溢出是不敏感的,具有较好的控制稳定性。通过实例仿真,这种控制方法能有效抑制连续梁桥的竖向振动,对桥梁结构的振动控制有重要的理论意义。

关键词:可变阻尼器;连续梁桥;滑动模式;振动控制

中图分类号:U442

文献标识码:A

桥梁结构的振动控制,是随着桥梁结构的发展、各种大跨度大柔度桥梁结构形式的出现、结构动力学的进步以及现代振动控制技术的革新而出现的一个新领域。它是通过调整或改变桥梁结构动力参数的途径,以明显衰减结构的振动响应,有效地增加桥梁结构在地震、强风及车辆荷载中的安全,或在其他外干扰力作用下使桥梁结构满足更高的动力特性要求,提高桥梁结构的动力安全性。在现代桥梁结构的设计中,结构振动控制技术已得到一定的应用,显示出明显的减振效果,取得显著的社会效益、技术进步效益和经济效益,引起国内外学术界和工程界的极大关注。

自20世纪90年代以来,随着桥梁现代设计和分析技术的不断发展和结构形式的多样化,对桥梁结构的动力性能的要求也越来越高,使对现代桥梁结构采用结构控制技术来进一步提高其舒适性、抗振性的要求更加迫切。日本和美国是多地震国家,很重视结构的抗震研究,他们在结构的主动、半主动控制、智能控制方面投入巨大。由美国国家科学基金支持成立了全美结构控制委员会和日本地震响应委员会协作,负责组织有关研究活动,并制定双方合作研究计划^{[1][2]}。

结构振动控制的方法主要有三种:即被动、半主动及主动控制方法。被动控制方法是在结构上加阻尼器或阻尼材料吸收结构振动能量,降低结构振动响应,其阻尼值是固定不变的。目前,这种方法在许多结构上已广泛采用,但这种方法无可控性,是被动的。而主动控制系统是根据结构位移(变形)和速度、加速度响应实施主动反馈控制,系统需较大的输入能量,其特点是控制系统能适应结构变化而做出相应控制,比被动方法更为有效。然而,由于土木工程结构十分巨大,其振动能量也相应较大,控制能量输入也会很大,而且结构也可能被主动系统输入的能量激发出新的扰动,系统在可控模态和不可控模态(剩余模态)之间可能发生扰动,即产生所谓的“溢出问题”,引起系统的不稳定^[8]。

另一种主动控制方法是半主动控制,其要点是混合主动控制的反馈控制特性和被动能量耗散装置特性,其阻尼可由控制器进行控制,在系统吸收能量时激活其阻尼,使其耗散系统能量。目前,这种控制方法已在高层建筑、汽车悬架系统等方面有实际应用,但在桥梁工程中的应用还较少见。半主动控制方法既有主动控制(反馈控制)又有被动方法(能量耗散)的特点,随着智能材料(如磁流变材料、压电材料、记忆合金等)、可控阻尼器的发展,使其工程应用成为可能。因此,发展半主动控制算法并将其应用于工程实际,具有重要的理论意义和工程应用前景^[7]。

* 收稿日期:2002-12-22

基金项目:重庆市科委应用基础项目(20006380)

作者简介:韩 西(1964-),男,重庆市人,博士,教授,主要从事结构动力分析、振动控制及结构有限元分析方面的研究。

对结构进行半主动控制的首要问题是控制系统由于相关状态阻尼参数而产生的控制系统非线性特性、被动系统的不稳定性及作动器的约束特性等。为此,文献[12]提出基于滑动模式理论的柔性结构体系的主动控制方法,其主要特点是滑动模式控制方法综合了非线性系统和计算的高效性,控制系统鲁棒性较好。这种算法在系统需要负阻尼参数时将阻尼系统设为0,方法虽然简单,但却十分有效。

本文主要研究利用可控阻尼器对连续梁桥竖向振动实施半主动控制,探讨控制算法及其稳定条件,为半主动控制方法在桥梁工程中的应用提供理论基础。近年来,各种可变阻尼器得到很大发展,从可变阻尼孔电-液阻尼器、电流变(ER)阻尼器到磁流变(MR)阻尼器,其可控性和阻尼变化引起研究者的广泛注意,也使其工程应用成为可能^[7]。

1 系统模型

连续梁桥作为一分布参数系统,可用有限元方法建立的竖向弯曲振动方程为:

$$[M]\{\ddot{y}\} + [C]\{\dot{y}\} + [K]\{y\} = \{F(t)\} \quad (1)$$

由模态分析理论,可将式(1)转换为由 N_m 阶模态参数描述的模态方程:

$$\{\ddot{y}(t)\} + [C]\{\dot{y}(t)\} + [\Omega]\{y(t)\} = \{f(t)\} \quad (2)$$

式中: $\{y(t)\}$ 是 $N_m \times 1$ 阶位移向量; $[C]$ 是 $N_m \times N_m$ 阶阻尼控制矩阵,为使阻尼矩阵解耦,系统阻尼考虑为线性比例阻尼; $[\Omega]$ 是 $N_m \times N_m$ 阶对角矩阵; $\{f(t)\}$ 是梁的竖向扰动力向量。

将式(2)中的 N_m 阶模态划分为 N_C 阶可控模态和 N_R 阶剩余模态。同时,可将式(2)写成分块矩阵形式:

$$\begin{bmatrix} \dot{y}_C(t) \\ \dot{y}_R(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{CC} & C_{CR} \\ C_{RC} & C_{RR} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{y}_C(t) \\ \dot{y}_R(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Omega_C & 0 \\ 0 & \Omega_R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_C(t) \\ y_R(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_C(t) \\ f_R(t) \end{bmatrix} \quad (3)$$

在设计控制器时,仅考虑可控模态,即有下列方程:

$$\{\ddot{y}_C(t)\} + [\Omega_C]\{y_C(t)\} + [D(\{\dot{y}_C(t)\})]\{u(t)\} = \{f_C(t)\} \quad (4)$$

式中: $\{u(t)\}$ 是 $M \times 1$ 阶向量,即由 M 个可变阻尼器作为作动器参数的位移向量; $[D]$ 是 $N \times M$ 阶可控阻尼矩阵。

2 控制方法

对一般粘性阻尼系统,式(4)中的 $[D]$ 矩阵不是对角矩阵,整个方程是耦合的,故可选择其滑动表面为^[12]:

$$\{S(t)\} = \{\dot{y}_C(t)\} + [\lambda]\{y_C(t)\} \quad (5)$$

其控制量为:

$$\{u(t)\} = [D(\{\dot{y}_C(t)\})]^{-1} \{-[\Omega_C]\{y_C(t)\} + [\lambda]\{\dot{y}_C(t)\} + [\eta + \alpha_C]I(s)\} \quad (6)$$

式中:

$$S = [S_1, \dots, S_N]^T \quad (7)$$

$$u = [u_1, \dots, u_N] \quad (8)$$

$$[\lambda] = \begin{bmatrix} \lambda_1 & & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & \lambda_N \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$[\eta + \alpha_C] = \begin{bmatrix} (\eta_1 + \alpha_1) & & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & \eta_N + \alpha_N \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$I_S = \begin{bmatrix} \text{sat}\left(\frac{S_1}{\lambda_1 \varphi_1}\right) \\ \vdots \\ \text{sat}\left(\frac{S_N}{\lambda_N \varphi_N}\right) \end{bmatrix} \quad (11)$$

式(7)~(11)中, $\lambda_K > 0$, η_K 是一小位置数, α_K 是第 K 阶扰动的上边界 ($K = 1, 2, \dots, N$)。

引入饱和函数 sat 以消除控制振荡, 即

$$\text{sat}\left(\frac{S_K}{\lambda_K \varphi_K}\right) = \begin{cases} 1, & \frac{S_K}{\lambda_K \varphi_K} \geq 1 \\ -1, & \frac{S_K}{\lambda_K \varphi_K} \leq -1 \\ \frac{S_K}{\lambda_K \varphi_K}, & -1 < \frac{S_K}{\lambda_K \varphi_K} < 1 \end{cases} \quad (12)$$

对每一时间步的控制算法为:

- 1) 由式(1)计算控制输入 $u_K (K = 1, 2, \dots, N)$;
- 2) 如所有 u_K 有: $u_{\min} \leq u_K \leq u_{\max}$, 则继续到下一时间步;
- 3) 如有 N_0 个 u_K 有 $u_K < u_{\min}$ (或 $u_K > u_{\max}$), 可取 $u_K = u_{\min}$ (或 $u_K = u_{\max}$), 并在 $(N - N_0)$ 的滑动面上重新计算 $(N - N_0) u_K S$ 的值。这种方式表明系统是在 N_0 个被动阻尼器和 $(N - N_0)$ 个主动阻尼器的控制下运动。在这种情况下, 有 $(N - N_0)$ 个模态处于滑动模式控制下 (即满足滑动条件), 其余的 N_0 个模态仅受被动阻尼作用;
- 4) 如果 $(N - N_0) = 1$, 其滑动条件为:

$$S\dot{S} < 0 \text{ 或 } S\dot{S} \leq -\eta |S| \quad (13)$$

如果控制计算中矩阵求逆出现奇异, 可设其值为先前的计算值。

3 算例

不失一般性地, 设一连续梁桥模型如图 1 所示, 整个桥跨共有 4 个桥墩, 在 4 个支座上设置可变阻尼器, 其弯曲振动方程可表示为: (忽略材料内阻尼和空气介质阻尼)

$$EIy^{IV} + m\ddot{y} + c\dot{y} = F(t) \quad (14)$$

式(14)也可用有限元方程表示为:

$$[m]\{\ddot{y}\} + \sum_{i=1}^4 \delta(x - x_i)(u_i \{\dot{y}\}) + [K]\{y\} = \{F(t)\} \quad (15)$$

式中: $\delta(x - x_i)$ 为 $x - x_i$ 时的 δ 函数; u_i 为 x_i 位置上可变阻尼器的阻尼常数。

建立此连续梁桥的梁单元有限元分析模型, 将其划分为 30 个单元、31 个节点。对此系统进行仿真分析, 材料参数值见表 1。计算分析表明, 利用模型前 9 阶模态就可以较为全面描述结构的动力特性, 分析模型结构阻尼器的分布在前 4 阶模态内刚好不在振动的节点上, 具有最好的控制效果, 故选择前 4 阶模态为控制模态, 并将后 5 阶模态作为剩余模态处理 (见表 2)。

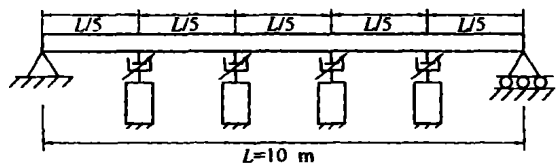


图 1 连续梁桥模型

表 1 连续梁材料参数

EI	长度 (L)	单位长度质量 (m)
548 Nm^2	10 m	3 kg/m

表 2 可控模态和剩余模态

控制模态数	剩余模态数
4	5

在分析计算时,在连续梁桥第3跨中点处施加一随机激励(图2),并计算出施加控制前后结构的响应,计算结果如图3。图中可以看出,结构施加控制后,其振动明显被抑制。

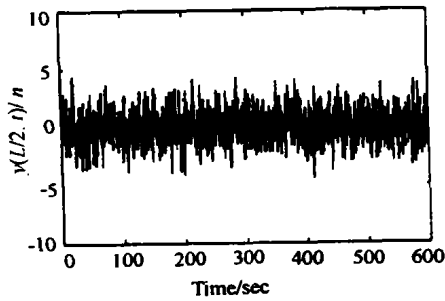


图2 随机激励信号

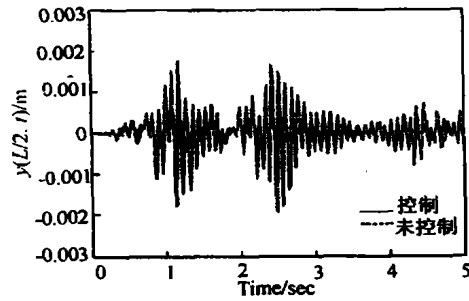


图3 系统响应

为检验本文提出的控制方法对连续扰动激励的有效性,特在连续梁桥的 $x = 2L/5$ 和 $x = 3L/5$ 处施加周期激励并计算其响应,同时在 $t = 9.5$ s 时按滑动模式控制方法进行控制,其结果分别如图4和图5所示。

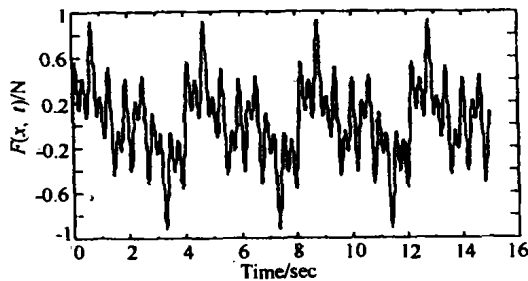


图4 外部周期激励

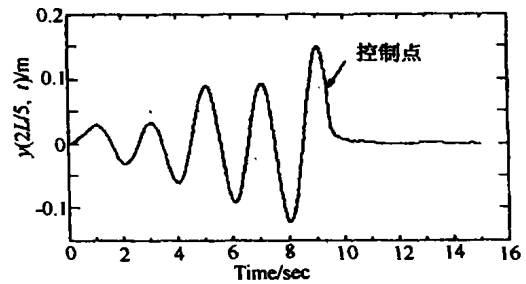


图5 连续梁 $L/2$ 处响应

4 结论

本文提出采用可控阻尼器和滑动模式控制方法对连续梁桥进行竖向振动控制,这种控制方法是一种半主动控制方法,与被动和主动控制方法相比,它具有系统无需很大的能量输入,控制系统对控制溢出不敏感等优点。仿真结果表明:滑动模式控制方法能很好地控制连续梁桥的竖向振动,采用这种控制方法能极大地改善连续梁桥的动力性能,提高结构的动力稳定性。

参考文献:

- [1] Fujino, Y. Recent Research and Developments on Control of Bridges under Wind and Traffic Excitations in Japan[J]. Proceedings of the International Workshop on Structural Control, 1993: 144 - 151.
- [2] Kobori, T., Inoue, Y., Seto, K., Iemura, H., Nishitani, A., Eds. Proceedings of the Second World Conference on Structural Control[A], International Association for Structural Control[C], Kyoto, Japan, 1998.
- [3] 张微微, 欧进萍. 智能控制算法及其在结构振动控制中的应用[J]. 世界地震工程, 2002, 18(2): 32 - 38.
- [4] 王民, 费仁元. 电流变材料在结构振动控制中的非线性特性及理论模型[J]. 机械工程学报, 2002, 38(6): 88 - 92.
- [5] 岳林, 刘福强. 柔性智能桁架结构振动的主动控制方法实验研究[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2001, 031(006): 64 - 67.
- [6] 赵斌, 梅占馨. 结构振动控制的指数趋近律滑移模态方法[J]. 应用力学学报, 2000, 17(1): 146 - 149.
- [7] 丁炜, 王强. 智能材料与结构在振动控制中的应用[J]. 噪声与振动控制, 2000, 14(2): 28 - 29.

- [8] Michael D.; Constantinou, Michael C. Semi-active control systems for seismic protection of structures: a state-of-the-art review[J], *Engineering Structures*, 1999, 21(6): 469-487.
- [9] Saang Bum Kim, Chung Bang Yun. Sliding mode fuzzy control: Theory and verification on a benchmark structure[J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2000, 29(11): 1587-1608.
- [10] Battaini, M., Yang, G., and Spencer, B. F., Jr. Bench-Scale Experiment for Structural Control[J]. *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, 2000, 126 (2): 140-148.
- [11] 张俊平, 李新平. 桥梁结构振动控制发展及存在的问题[J]. *世界地震工程*, 1998, 14(2): 9-16.
- [12] 李敏霞, 刘季. 主动结构振动控制算法综述[J]. *世界地震工程*, 1998, 14(4): 61-69.

Research on the Sliding Mode of Semi-Active Control on Vertical Vibration for Continuous Beam Bridge

HAN Xi^{1,2}, ZHONG Li², WANG Zhi-jian²

(1. College of Opto-electronic Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China; 2. Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, P. R. China)

Abstract: This paper is concerned with semi-active control of vertical vibration for continuous beam by variable dampers and puts forward the semi-active control law based on the sliding mode theory. Such an approach is intensive to the spillover problem encountered in full-active system and has better robustness. As the simulating result shows that such control can reduce vertical vibration of continuous beam effectively. This algorithm has an important theoretical significance for vibration control of bridge structures.

Keywords: variable damper; continuous beam bridge; sliding mode; vibration control

(上接第 25 页)

On Construction of Mountains Urban Pedestrians System

LI He-ping, DENG Bo-ji

(College of Architecture and Urban Planning, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China)

Abstract: This paper firstly advances the significance of the construction of urban pedestrians system, at the same time it raises the current problems in its construction. Based on the systems analysis to some urban design experiences, this paper analyzes the factor that influences the construction of the system and summarizes manners of pedestrians system. Finally, it establishes a pedestrians that enriches the urban space.

Keywords: mountain city; pedestrians system; construction