

文章编号: 1001-7372(2005)04-0037-05

斜拉索磁流变智能阻尼控制系统分析与设计

李 惠, 刘 敏, 欧进萍, 关新春
(哈尔滨工业大学 土木工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150090)

摘 要: 在结构主动、半主动和智能控制系统优化设计方法的基础上, 研究了斜拉索磁流变智能阻尼控制系统的设计方法, 并采用所建立的设计方法完成了山东滨州黄河公路大桥斜拉索磁流变智能阻尼减振系统的优化设计。采用限界 HROVAT 最优控制算法确定磁流变阻尼器的半主动控制力, 数值计算了斜拉索磁流变阻尼控制系统的风振反应。进一步分析比较了主动控制、半主动控制、Passive on 被动控制和 Passive off 被动控制策略下的磁流变阻尼器控制斜拉索风致振动的控制效果, 验证了磁流变阻尼器优化设计方法的正确性和磁流变阻尼器控制策略的有效性。

关键词: 桥梁工程; 斜拉索; 智能振动控制; 磁流变阻尼器; 抗风

中图分类号: 448.27 文献标志码: A

Design and analysis of magnetorheological dampers with intelligent control systems for stay cables

LI Hui, LIU Min, OU Jin ping, GUAN Xin chun
(School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China)

Abstract: The design method of MR damper for suppression of stay cables vibration was proposed based on the design approaches of structural active control, semiactive control and intelligent control systems. The MR damper for stay cables of Shandong Binzhou Yellow River Bridge was designed by utilizing the proposed design method, and the analysis of the cables incorporated with the designed MR damper was carried out. The control effectiveness of the designed MR dampers reduced the prototype cable wind induced vibration using semiactive control strategy proposed by HARVOT. Active control, semiactive control and passive on and passive off control strategy were verified numerically and compared with each other. The analytical results show that the designed MR damper can effectively reduce the cable wind induced vibration. The availability and validity of the design method of MR damper for cables were also simultaneously demonstrated through the numerical study on the prototype cables transversely connected with MR damper near the lower anchorage.

Key words: bridge engineering; stay cable; intelligent vibration control; magnetorheological damper; wind resistance

0 引 言

采用粘滞阻尼器来增加斜拉索的阻尼是减小斜拉索振动的有效手段之一^[1, 2]。但是, 粘滞阻尼器

系数存在振型最优值; 此外, 线性粘滞阻尼器给斜拉索某一振型附加的阻尼比存在最优值^[3]。粘滞阻尼器对斜拉索振动控制的上述特点限制了此类阻尼器对斜拉索振动的减振效果。粘弹性阻尼器与粘滞阻

收稿日期: 2005-04-03
基金项目: 国家自然科学基金项目(50178025)
作者简介: 李 惠(1966), 女, 山东济南人, 哈尔滨工业大学教授, 博士生导师, 工学博士, 博士后. E-mail: lihui@hit.edu.cn

尼器对斜拉索的振动具有相同的局限性,而且环境温度 and 激励频率对粘弹性阻尼器的耗能能力有很大的影响,在大幅振动时,还会出现刚度退化现象^[4]。磁流变阻尼器通过实时调节阻尼力,可以较好地跟踪和实现主动最优控制力,从而达到与主动最优控制相近的控制效果^[5],目前,已经成为斜拉索振动控制最有效的减振措施之一^[6]。磁流变阻尼器已经安装在洞庭湖斜拉桥的斜拉索上,用以减小斜拉索的风雨激励振动^[7]。笔者在主动、半主动和智能控制系统优化设计方法的基础上^[8],研究了斜拉索磁流变智能阻尼控制系统的设计方法,并采用该方法完成了山东滨州黄河公路大桥斜拉索磁流变阻尼控制系统的优化设计与反应分析,为在该桥上实施斜拉索磁流变振动控制奠定了基础。

1 系统的计算模型

1.1 一般计算模型

图 1 为斜拉索磁流变阻尼器控制系统的一般计算模型。设斜拉索的跨度为 L , 径向拉力为 T , 单位长度的质量为 m , 单位长度的粘滞阻尼系数为 c 。假定斜拉索承受随时间任意变化的分布荷载 $f(x, t)$, 磁流变阻尼器设置在距离左端 x_d 的位置, 其提供的阻尼力为 $f_d(t)$ 。

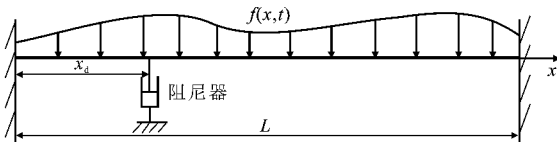


图 1 斜拉索磁流变阻尼器控制系统计算模型
Fig.1 Calculation model of MR damper control system

当不考虑斜拉索垂度时,斜拉索磁流变阻尼器控制系统的运动方程可表示为

$$m \frac{\partial^2 v(x, t)}{\partial t^2} + c \frac{\partial v(x, t)}{\partial t} - T \frac{\partial^2 v(x, t)}{\partial x^2} = f(x, t) + u_s(t) \delta(x - x_d) \quad (1)$$

$$v(0, t) = v(L, t) = 0 \quad (2)$$

式中: $v(x, t)$ 为斜拉索竖向振动位移; $u_s(t) = -f_d(t)$ 为半主动控制力; $\delta(\cdot)$ 为 DIRAC 函数。

磁流变阻尼器的阻尼力可以由式(3)表示^[8]

$$f_d = c_d \dot{x}_d + f_{dy} \operatorname{sgn}(\dot{x}_d) \quad (3)$$

式中: \dot{x}_d 为磁流变阻尼器的相对速度; c_d 、 f_{dy} 分别为磁流变阻尼器的粘滞阻尼系数和可调库仑阻尼力。

1.2 风荷载作用下的振动控制模型

考虑如图 2 所示风荷载作用下的斜拉索振动。假定斜拉索计算长度为 L , 与地面的夹角为 θ ; 风荷

载沿高度分布并垂直于索的迎风面;在索下端沿索长方向距离 x_d 处对称设置两个(也可以单边设置一个)磁流变阻尼器,阻尼器轴线方向垂直于索长方向,与地面的夹角为 β 。

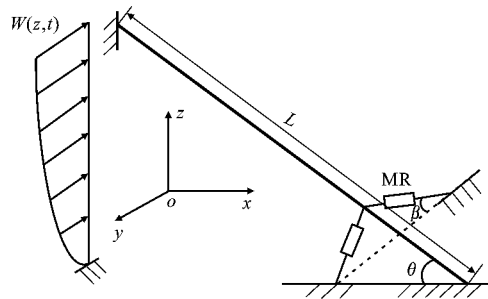


图 2 风荷载作用下斜拉索磁流变阻尼器控制系统
Fig.2 MR damper control system for stay cable under wind excitation

按图 2 设置的磁流变阻尼器对索顺风向振动的集中控制力可以表示为

$$u_s(t) = -F_d(t) \quad (4)$$

其中磁流变阻尼力 $F_d(t)$ 可以表示为

$$F_d(t) = 2f_d(t) \cos \beta = 2\{c_d v(x_d, t) \cos^2 \beta + f_{dy} \operatorname{sgn}[v(x_d, t)] \cos \beta\} \quad (5)$$

顺风向荷载沿高度分布(图 2),则风荷载按式(6)转换为沿索长 x 方向的分布荷载(图 1)

$$f(x, t) = W(z, t) d_s \Big|_{z=x \sin \theta} \quad (6)$$

沿高度分布的顺风向荷载可以表示为平均风压和脉动风压之和,作为振动控制,仅考虑脉动风压,脉动风压可以表示为^[9-11]

$$W(z, t) = c_s \mu_z(z) \mu_r(z) w_0 g(t) \quad (7)$$

式中: c_s 为索的阻尼系数或称为体形系数; d_s 为索的直径; μ_z 为平均风速高度变化系数; μ_r 为风压脉动系数; w_0 为当地基本风压; $g(t)$ 为均值为零、方差为 1 的标准随机过程。

2 系统反应的模态分析方法

根据 GALERKIN 方法,式(1)满足初始条件式(2)的斜拉索反应可以表示为

$$v(x, t) = \sum_{j=1}^r q_j(t) \varphi_j(x) \quad (8)$$

式中: $q_j(t)$ 为第 j 阶振型(模态)独立广义坐标($j=1, 2, \dots$); $\varphi_j(x)$ 为第 j 阶振型(模态)函数且满足边界条件 $\varphi_j(0) = \varphi_j(L) = 0$ 。

将式(8)代入式(1),然后两边同乘以 $\varphi_i(x)$ 并沿索长度积分,即

$$\sum_{j=1}^r [m_{ij} \ddot{q}_j(t) + c_{ij} \dot{q}_j(t) + k_{ij} q_j(t)] =$$

$$f_{qi}(t) + \varphi_i(x_d)u_s(t) \tag{9}$$

为了增加斜拉索反应求解的收敛速度, JOHN-SON 等建议增加一个在阻尼力作用下的静力变形曲线作为 0 阶振型^[5]

$$\varphi_0(x) = \begin{cases} x/x_d & 0 \leq x \leq x_d \\ (L-x)/(L-x_d) & x_d \leq x \leq L \end{cases} \tag{10}$$

其他的振型采用正弦函数 $\varphi_i(x) = \sin(\pi i x/L)$ 的形式。则斜拉索阻尼器系统的独立广义坐标运动方程的矩阵形式为

$$M\dot{q} + Cq + Kq = f_q(t) + \varphi(x_d)u_s(t) \tag{11}$$

式中: $q = [\varphi, q_1, \dots, q_r]^T$ 为截取的 $r+1$ 个独立广义坐标向量; M 、 K 、 C 的元素分别为

$$m_{ij} = \begin{cases} mL \delta_{ij} / 2 & i > 0, j > 0 \\ mL / 3 & i = 0, j = 0 \\ \frac{mL^3 \sin(kx_d \pi / L)}{(\pi k)^2 x_d (L - x_d)} & k = \max(i, j) \end{cases}$$
$$k_{ij} = \begin{cases} T \pi^2 i^2 \delta_{ij} / (2L) & i > 0, j > 0 \\ LT / [x_d (L - x_d)] & i = 0, j = 0 \\ \frac{TL \sin(kx_d \pi / L)}{x_d (L - x_d)} & k = \max(i, j) \end{cases}$$
$$f_{qi}(t) = \int_0^L f(x, t) \varphi_i(x) dx$$
$$i = 0, 1, 2, \dots, r; j = 0, 1, 2, \dots, r$$
$$C = cM / m$$

将式(11)的运动方程表示为状态方程

$$\begin{cases} \dot{Z}_q(t) = AZ_q(t) + Bu_s(t) + Df_q(t) \\ Z_q(t_0) = 0 \end{cases} \tag{12}$$

式中

$$Z_q = \begin{bmatrix} q \\ \dot{q} \end{bmatrix}; A = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{bmatrix};$$
$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ M^{-1}\varphi(x_d) \end{bmatrix}; D = \begin{bmatrix} 0 \\ M^{-1} \end{bmatrix};$$
$$\varphi(x_d) = [\varphi_0(x_d), \varphi_1(x_d), \varphi_2(x_d), \dots, \varphi_r(x_d)]^T.$$

3 阻尼器参数设计与半主动控制算法

在预先确定传感器和驱动器的数目与位置的前提下, 斜拉索磁流变阻尼控制系统设计主要是确定阻尼器参数和控制算法。根据文献[8] 的方法, 斜拉索磁流变阻尼控制系统的阻尼器参数可以按照此步骤设计: 先进行斜拉索无控和主动控制分析, 可以预先确定主动控制力与观测反馈, 即最优增益反馈和主动最优控制力的关系, 它是磁流变阻尼器控制算法和半主动控制力尽可能实现的目标; 其次, 预先确定斜拉索的控制效果及其相应的最大主动最优控制

力, 它是磁流变阻尼器控制效果尽可能达到的目标, 特别是设计磁流变阻尼器参数以便在量值上达到最大主动最优控制力的依据。

3. 1 斜拉索无控和主动控制分析

由广义坐标状态方程式(12)和 LQR 模态控制算法, 得到主动控制力的最优增益反馈

$$u(t) = -GZ_q(t) \tag{13}$$

式中: $G = R^{-1}B^TP$ 为 $1 \times 2(r+1)$ 维广义坐标状态反馈增益矩阵, 其中 P 是 $2(r+1) \times 2(r+1)$ 维矩阵, 由式(14) RICCATI 矩阵代数方程求解

$$A^TP + PA - PBR^{-1}B^TP + Q = 0 \tag{14}$$

式中: Q 、 R 为相应于式(12)的性能目标权矩阵。

通过性能目标权矩阵 Q 、 R 的合理选取得到期望的控制效果, 相应的最大主动最优控制力记为 u_{max} 。

3. 2 磁流变阻尼器参数设计

为了尽可能实现主动最优控制的效果, 磁流变阻尼器应按照下述的设计准则和等效准则进行设计

$$u_{smax} = u_{max} \tag{15}$$

$$\left. \begin{aligned} v_s(x_d, t_m) &= v(x_d, t_m) \\ \dot{v}_s(x_d, t_m) &= \dot{v}(x_d, t_m) \end{aligned} \right\} \tag{16}$$

式中: u_{max} 、 $v(x_d, t_m)$ 、 $\dot{v}(x_d, t_m)$ 分别为主动控制的最大控制力、坐标 x_d 处斜拉索的位移和速度; u_{smax} 、 $v_s(x_d, t_m)$ 、 $\dot{v}_s(x_d, t_m)$ 分别为斜拉索磁流变阻尼器的最大控制力、坐标 x_d 处斜拉索相应的位移和速度。

假定结构磁流变阻尼器控制与主动最优控制的效果相同; C_d 、 F_{dymax} 分别为坐标 x_d 处设置的 1 个或 2 个磁流变阻尼器总的被动粘滞阻尼系数和总的最大库仑阻尼力; 磁流变阻尼器的最小库仑阻尼力 $F_{dymmin} = 0$, 阻尼力的可调倍数为 s , 则

$$u_{smax} = sC_d \dot{v}(x_d, t_m) \cos^2 \beta = u_{max} \tag{17}$$

$$C_d = u_{max} / [s \dot{v}(x_d, t_m) \cos^2 \beta] \tag{18}$$

于是, 磁流变阻尼器的最大库仑阻尼力可由式(19)求得

$$F_{dymax} = (s - 1)C_d \dot{v}(x_d, t_m) \cos \beta \tag{19}$$

4 系统的设计与反应分析

以山东滨州黄河公路大桥中塔尾索 N₂₆ 索(最长的一根索)为例, 介绍斜拉索磁流变阻尼控制系统的设计过程和反应分析。N₂₆ 索计算长度 $L = 218.556$ m, 索力 $T = 7\,260$ kN, 单位长度质量 $m = 85.496$ kg/m, 索直径 $d_s = 0.118$ m, 阻尼器安装在 $0.03L$ 处。此外, 设计的每根斜拉索上安装两个磁流变阻尼器, 它们与水平面的夹角 β 均为 45° 。磁流变阻尼控制系统如图 2 所示。

4.1 斜拉索的脉动风荷载

假设风荷载水平向垂直作用在 N₂₆ 斜拉索上, 风荷载按式 (6)、(7) 计算。山东省滨州市的设计风速 (20 m 高度处的标准风速) $V_{20}=28.7\text{ m/s}$; 100 年一遇的基本风压为 $w_0=0.45\text{ kN/m}^2$; 该桥建造于开阔平坦地面上, 属于 B 类地貌, 地面粗糙度指数 $\alpha=0.16$ 。根据 20 m 高度处的标准风速, 换算得到 10 m 高度处的标准风速^[12]

$$V_{10}=V_{20}(10/20)^{\alpha}=28.7\times(10/20)^{0.16}=25.687\text{ m/s}$$

然后, 利用标准 DAVENPORT 谱密度^[11], 采用随机抽样的方法, 得到斜拉索 10 m 高度处的 3 条标准风速时程。

4.2 控制性能指标

安装阻尼器后的斜拉索振动是多振型耦合振动, 衡量斜拉索振动及其控制效果的性能指标可以采用沿斜拉索长度上的最大位移反应和整个斜拉索上位移反应总和的最大均方差来度量, 分别表示为

$$v_{\max}=\max_{x,t}|v(x,t)|\tag{20}$$

$$\sigma_{\text{is}}=\max_t\sqrt{\int_0^L v(x,t)^2\text{d}x}\tag{21}$$

4.3 主动控制系统的最优控制力特点与控制效果

采用 LQR 模态控制算法, 首先, 研究斜拉索的主动控制及其效果。图 3 为权系数 $R=5\times10^{-4}$ 主动最优控制力与作动器位置处斜拉索位移的关系曲线。图 3 表明: 主动最优控制力表现出具有负刚度

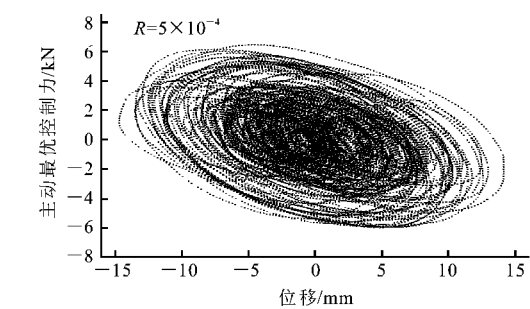


图 3 主动最优控制力(沿振动方向分解后)与作动器位置处斜拉索位移的关系

Fig.3 Force and deformation relation of active damper

的粘弹性阻尼力特性。无控和权系数 $R=5\times10^{-4}$ 时, 斜拉索在 3 条风速样本作用下的最大位移反应和位移反应总和的最大均方差反应以及最大主动最优控制力如表 1 所示。从表 1 可以看出: 在 3 条风速样本作用下, 斜拉索的最大位移反应的控制效果平均值为 56.137%, 最大控制力平均值为 6.962 kN, 斜拉索的控制效果较好, 最大控制力较小、容易实现, 因此, 下面将参照这组最大主动控制力及其控制效果

设计磁流变阻尼器的阻尼力参数。

表 1 斜拉索磁流变智能阻尼减振系统反应

Tab.1 Responses of vibration resistance of MR damper system for stay cables

工 况		最大位移反应 v_{\max}/m	位移反应的最大均方差 $\sigma_{\text{is}}/\text{m}$	最大控制力 u_{\max}/kN
无控	a	0.319 6	3.480 0	
	b	0.359 8	3.729 4	
	c	0.329 7	3.405 2	
主动控制	a	0.126 4	1.342 9	6.136
	b	0.170 5	1.779 3	8.174
	c	0.147 2	1.504 0	6.575
半主动控制	a	0.142 7	1.500 8	7.239
	b	0.207 5	2.149 0	10.040
	c	0.158 2	1.663 8	8.097
Passive On 被动控制	a	0.126 4	1.385 5	7.296
	b	0.177 7	1.980 9	8.965
	c	0.153 2	1.690 1	8.932
Passive Off 被动控制	a	0.206 3	2.164 3	1.944
	b	0.315 5	3.280 1	2.564
	c	0.240 0	2.527 6	2.328

注: a、b、c 分别为风速样本 1、2、3。

4.4 磁流变阻尼器参数设计与控制效果

选取磁流变阻尼器最大阻尼力和最小阻尼力的可调倍数 $s=6$, 根据最大主动最优控制力及其相应时刻作动器位置处斜拉索的速度反应, 磁流变阻尼器的粘滞阻尼系数可按 $C_d=u_{\max}/[2s\dot{v}(x_d,t_m)\cdot\cos^2\beta]$ 求得, 再由式 (19) 可分别求得在 3 条风速样本作用下的斜拉索磁流变智能阻尼器的阻尼系数和最大库仑阻尼力

$$C_d=22.6403\text{ kN}\cdot\text{s/m}, F_{\text{dymax}}=3.6159\text{ kN}$$
$$C_d=20.9455\text{ kN}\cdot\text{s/m}, F_{\text{dymax}}=4.8168\text{ kN}$$
$$C_d=25.3569\text{ kN}\cdot\text{s/m}, F_{\text{dymax}}=3.8743\text{ kN}$$

磁流变智能阻尼器的平均阻尼系数和平均最大库仑阻尼力分别为: $C_{\text{ad}}=22.9799\text{ kN}\cdot\text{s/m}, F_{\text{admax}}=4.1023\text{ kN}$, 它们即是磁流变智能阻尼器的最后设计参数。采用文献[8]中限界 HROVAT 最优控制算法确定磁流变阻尼器的半主动控制力。数值计算了斜拉索磁流变阻尼控制系统的风振反应, 得到了斜拉索最大位移反应和整个斜拉索上位移反应总和的最大均方差及最大磁流变阻尼力(表 1)。其中, 在风速样本 3 作用下磁流变阻尼器的阻尼力与阻尼器相对位移的关系如图 4 所示。从表 1 可以看出: 对样本 1、3 而言, 磁流变阻尼控制的控制效果与主

动控制的效果接近, 最大半主动控制力与最大主动控制力也基本相同。从图 4 可以看出: 磁流变阻尼力能够较好地跟踪和实现主动最优控制力。

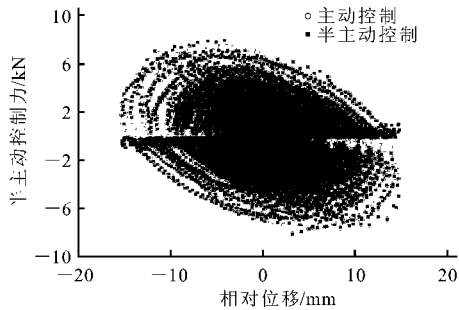


图 4 半主动控制力与阻尼器相对位移关系(样本 3)

Fig. 4 Force and relative deformation relation of damper in semiactive strategy

斜拉索磁流变阻尼控制系统的 Passive on 被动控制的最大位移反应和整个斜拉索上位移反应总的最大均方差以及最大被动阻尼力见表 1。从表 1 可看出: 对 3 条风速样本, 除样本 3 外, 磁流变阻尼器的 Passive on 被动控制的效果比半主动控制效果好。主要原因是磁流变阻尼器的库仑摩擦力适当, 阻尼器滑动(屈服)的机会较多, 耗能大, 如图 5 所示。笔者还进一步计算了磁流变阻尼器设置在 Passive off 状态, 磁流变阻尼器相当于一个线性粘

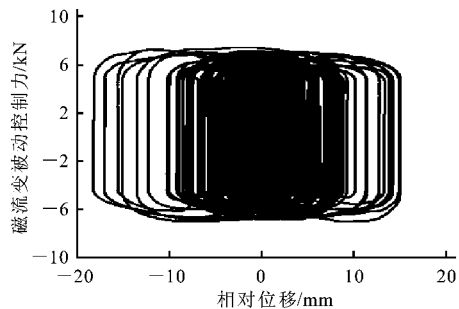


图 5 磁流变 Passive on 被动控制力与阻尼器相对位移的关系(样本 3)

Fig. 5 Force and relative deformation relation of damper in passive on strategy

滞阻尼器, 有关计算结果见表 1。从表 1 中可看出: 在 3 条风速样本激励下, 磁流变阻尼器在 Passive off 状态下控制效果分别为 35.45%、12.31%和 27.21%, 因此, 即使磁流变阻尼器的驱动器发生故障, 仅靠其被动粘滞阻尼部分也能达到一定的减振效果。

5 结 语

(1)建立的斜拉索磁流变智能控制设计方法可以方便地确定磁流变阻尼器的最大半主动控制力、

最大库仑阻尼力和最小阻尼系数, 所设计的磁流变阻尼器能够较好地跟踪和基本实现主动最优控制所达到的控制效果。所设计的磁流变阻尼器可以有效地减小山东滨州黄河公路大桥斜拉索的风致振动, 阻尼器的最大阻尼力较小, 容易实现。

(2)山东滨州黄河公路大桥斜拉索磁流变智能阻尼控制采用界限 HROVAT 半主动最优控制算法; 在较大风荷载激励下, 也可以采用 Passive on 被动摩擦阻尼控制策略; 磁流变阻尼器 Passive off 控制策略下的被动粘滞阻尼对斜拉索的风致振动也具有一定的减振效果, 从而能够保证一旦磁流变阻尼器的驱动器发生故障, 磁流变阻尼器仍具有一定的减振作用。

参考文献:

[1] 张戎社, 杜彦良, 金秀梅, 等. 基于光纤光栅的斜拉索索力在线监测[J]. 交通运输工程学报, 2003, 3(4): 22—23.

[2] XU Y L, ZHAN S KO J M, YU Z. Experimental study of vibration mitigation of bridge stay cables[J]. Journal of Structural Engineering, 1999, 125(9): 977—979.

[3] PACHECO B M, FUJINO Y, SULEKH A. Estimation curve for modal damping in stay cable with viscous damper[J]. Journal of Structural Engineering, 1993, 119(9): 1 961—1 965.

[4] 张红志. 大跨度拉索振动智能控制分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2003.

[5] JOHNSON E A, SPENCER B F, FUJINO Y. Semi active damping of stay cables: preliminary study[A]. Proceedings of 17th International Modal Analysis Conference[C]. Kissimmee: SEM Inc, 1999. 417—423.

[6] 陈水生, 秦 鸣, 陈 勇, 等. 斜拉桥拉索的振动及控制现场试验[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2003, 23(2): 50—51.

[7] 王修勇, 陈政清, 倪一清, 等. 斜拉桥拉索磁流变阻尼器减振技术研究[J]. 中国公路学报, 2003, 16(2): 53—56.

[8] 欧进萍. 结构振动控制——主动、半主动和智能控制[M]. 北京: 科学出版社, 2003.

[9] 张相庭. 工程结构风荷载理论和抗风计算手册[M]. 上海: 同济大学出版社, 1990.

[10] 王光远, 欧进萍. 结构随机振动[M]. 北京: 高等教育出版社, 1994.

[11] 田石柱. 建筑结构的 AMD 主动控制[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 1999.