

# 输电塔—线体系风致响应的鲁棒半主动控制

马涌泉, 邱洪兴

(东南大学 混凝土及预应力混凝土结构教育部重点实验室, 江苏 南京 210096)

**摘 要:** 为了抑制输电塔—线体系的风致动力响应, 基于多目标优化理论设计了鲁棒  $H_2/H_\infty$  控制器. 在体系平面内、外振动状态方程的摄动矩阵中引入不确定性, 运用 MATLAB 中的线性矩阵不等式工具箱并结合改进的限幅最优 (MCO) 控制器提出了  $H_2/H_\infty$ -MCO 半主动控制策略. 以某特高压猫头型输电塔—线体系为算例, 分别计算了其在无控制、被动控制、恒定增量 (CI) 半主动控制及  $H_2/H_\infty$ -MCO 半主动控制下的风致响应. 结果表明:  $H_2/H_\infty$ -MCO 策略对塔体位移、塔体加速度和塔底内力的抑制效果比无控制、被动控制及 CI 控制的抑制效果都要显著.

**关 键 词:** 输电塔; 阻尼器; 动力响应; 振动控制; 鲁棒性

中图分类号: O 328; TM 726.1

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2016)02-0279-06

## Wind-induced Response Suppression of Transmission Tower-Line System Using a Robust and Semi-active Controller

MA Yong-quan, QIU Hong-xing

(Key Laboratory of Concrete and Prestressed Concrete Structures of Ministry of Education, Southeast University, Nanjing 210096, China. Corresponding author: MA Yong-quan, E-mail: lemon9143@163.com)

**Abstract:** The robust  $H_2/H_\infty$  controller designed by multi-objective optimization theory was applied to suppress the wind-induced dynamic response (WIDR) of the transmission tower-line system (TTLS). The uncertain parameters (mass, damping and stiffness) were introduced into perturbed matrixes in vibration (both in-plane and out-plane of the TTLS) state equations, and the  $H_2/H_\infty$ -MCO semi-active control strategy was proposed by the linear matrix inequalities (LMI) tool box in the MATLAB and modified clipped-optimal (MCO) control algorithm. An cat's head-type TTLS with ultra high voltage was used as an example, and the WIDRs of the example under non-control (NC), passive control (PC), constant increment (CI) semi-active control and  $H_2/H_\infty$ -MCO semi-active control were computed, respectively. The consequences indicate that the vibration suppression effects of the  $H_2/H_\infty$ -MCO on tower displacements, tower accelerations and tower bottom internal forces (shear forces and bending moments) are obviously superior to those of NC, PC and CI.

**Key words:** transmission tower; damper; dynamic response; vibration control; robustness

如何有效降低输电塔—线体系 (简称体系) 的风致动力响应 (简称响应) 始终是学者们研究的重点<sup>[1]</sup>. 郭勇<sup>[2]</sup>、邓洪州<sup>[3]</sup>及李黎<sup>[4]</sup>分别采用黏弹性阻尼器 (VED)、调谐质量阻尼器 (TMD) + VED 及铅芯橡胶阻尼器 (LRD) 对体系响应进行了被动控制; 陈波<sup>[5]</sup>采用适合于磁流变阻尼器 (MRD) 的恒定增量 (CI) 算法对体系响应进行了

半主动控制. 然而文献[2-4]中所运用的被动控制对风荷载的适应性较差, 故其抑振效果不佳; 而文献[5]中的闭环控制系统 (简称系统) 没有考虑体系与风荷载的不确定性, 故其算出的抑振效果缺乏可靠性. 可见, 提出用于抑制塔线体系风振的鲁棒控制策略具有重要意义.

鲁棒  $H_2/H_\infty$  控制可以兼顾  $H_2$  和  $H_\infty$  的性能.

收稿日期: 2014-06-04

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51078077); “十二五”国家科技支撑计划项目 (2012BAJ14B00).

作者简介: 马涌泉 (1984-), 男, 山东安丘人, 东南大学博士研究生; 邱洪兴 (1962-), 男, 江苏无锡人, 东南大学教授, 博士生导师.

王曦<sup>[6]</sup>和宋刚<sup>[7]</sup>分别提出了适合航空发动机和车辆悬架的  $H_2/H_\infty$  输出反馈控制策略. 由于塔-线体系与航空发动机及车辆悬架有着显著不同, 前者在风激励下产生的惯性力很大, 因而提出适合塔-线体系的鲁棒  $H_2/H_\infty$  控制策略具有重要意义.

本文首先提出了适用于 MRD 的  $H_2/H_\infty$  -MCO 控制策略. 然后以  $\pm 800$  kV 输电塔-线体系为背景, 分别计算了其在无控制、被动控制、CI 及  $H_2/H_\infty$  -MCO 控制下的动力响应, 获得了一些重要结论, 可供类似塔-线体系的抗风设计参考.

## 1 计算模型

### 1.1 MRD 计算模型

采用 P-Bouc-Wen 模型<sup>[8]</sup>模拟 MRD 的力学性能, 其磁流变液在达到流变平衡时所表现出的动力学特性采用如下的一阶滤波器表述:

$$\dot{u} = -\eta(u - v). \quad (1)$$

式中:  $u$  为一阶滤波器的输出量;  $1/\eta$  为一阶滤波器的时间常数;  $v$  为施加于电流驱动器的命令电压.

### 1.2 塔-线体系计算模型

本文采用 Okamura 等<sup>[9]</sup>提出的双塔双线模型来模拟体系的动力性能. 通过对体系的离散并引入 Lagrange 方程, 可得体系平面内振动的质量矩阵  $M$  和刚度矩阵  $K$ , 以及平面外振动的质量矩阵  $M$  和刚度矩阵  $K$ , 分别为

$$M = \begin{bmatrix} M_s & M_{zo}^T & O \\ M_{zo} & M_t & M_{yo} \\ O & M_{yo}^T & M_s \end{bmatrix}, M = \begin{bmatrix} M_s & & \\ & M_t & \\ & & M_s \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$K = \begin{bmatrix} K_s & & \\ & K_t & \\ & & K_s \end{bmatrix}, K = \begin{bmatrix} K_s & K_o^T & O \\ K_o & K_t & K_o \\ O & K_o^T & K_s \end{bmatrix}.$$

式中:  $M_s$  和  $M_t$ ,  $K_s$  和  $K_t$  分别为线、塔平面内振动的质量矩阵和刚度矩阵;  $M_{zo}$ ,  $M_{yo}$  分别为体系左、右耦合质量矩阵;  $M_s$  和  $M_t$ ,  $K_s$  和  $K_t$  分别为线、塔平面外振动的质量矩阵和刚度矩阵;  $K_o$  为体系刚度矩阵;  $O$  为零矩阵. 本文将脉动风荷载向量看作零均值、互相关的高斯三维(纵向、横向和竖向)平稳随机过程, 该过程可采用具有随机振幅与随机相位的谐波振动的线性叠加来模拟<sup>[10]</sup>.

## 2 $H_2/H_\infty$ -MCO 分散控制器的设计

本文提出的多目标鲁棒  $H_2/H_\infty$  控制策略是设计一个控制器  $U = A(s) Y_{\text{cout}}$ , 使得系统具备以下性质:

$$\left. \begin{aligned} J(\lambda_{\text{co}}) &\subset \Omega^{\text{left}}, \\ \|\Gamma_{Fw_\infty}\|_\infty &< \gamma_\infty, \\ \|\Gamma_{Fw_2}\|_2 &< \gamma_2. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中:  $U$  为控制力向量;  $A(s)$  为输出增益矩阵;  $Y_{\text{cout}}$  为实测输出;  $J(\lambda_{\text{co}})$  为系统极点;  $\Omega^{\text{left}}$  为左半开复平面;  $\|\Gamma_{Fw_\infty}\|_\infty$  为风荷载  $F$  至  $W_\infty$  (与  $H_\infty$  相关的被控向量) 的闭环传递函数  $\Gamma_{Fw_\infty}$  的  $H_\infty$  范数;  $\gamma_\infty$  和  $\gamma_2$  均为指定的上界;  $\|\Gamma_{Fw_2}\|_2$  为  $F$  至  $W_2$  (与  $H_2$  相关的被控向量) 的闭环传递函数  $\Gamma_{Fw_2}$  的  $H_2$  范数.

本文设计的输出反馈控制器可表示为

$$\left. \begin{aligned} \dot{W}_z &= \lambda_z W_z + \delta_z Y_{\text{cout}}, \\ U &= \psi_z W_z. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中:  $W_z$  为控制器状态向量;  $W$  为系统状态向量;  $\lambda_z$ ,  $\delta_z$  和  $\psi_z$  均为具有适当维数的待求矩阵.

假定  $\delta_2 = 0$ , 可得到系统为

$$\left. \begin{aligned} \dot{\hat{W}} &= (\lambda_b + \hat{Z}R\hat{\delta}) \hat{W} + \delta_b F, \\ W_\infty &= \hat{\psi}_\infty \hat{W} + \delta_\infty F, \\ W_2 &= \hat{\psi}_2 \hat{W}. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中:

$$\left. \begin{aligned} \hat{W} &= \begin{bmatrix} W \\ W_z \end{bmatrix}, \lambda_b = \begin{bmatrix} \lambda & \sigma_1 \psi_z \\ \sigma_z \psi_{\text{cout}} & \lambda_z + \sigma_z \varepsilon_{\text{cout}} \psi_z \end{bmatrix}, \\ \hat{\delta} &= \begin{bmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \psi_z \end{bmatrix}^T, \sigma_b = \begin{bmatrix} \sigma_2 \\ \sigma_z \delta_{\text{cout}} \end{bmatrix}, \hat{\psi}_\infty = \begin{bmatrix} \psi_\infty \\ \varepsilon_\infty \psi_z \end{bmatrix}^T, \\ \hat{\psi}_2 &= \begin{bmatrix} \psi_2 \\ \varepsilon_2 \psi_z \end{bmatrix}^T, \hat{Z} = \begin{bmatrix} Z \\ 0 \end{bmatrix}. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

其中  $\lambda, \sigma_1, \sigma_2, \psi_2, \varepsilon_2, \delta_2, \psi_\infty$  和  $\varepsilon_\infty$  均为描述系统确定部分的已知实常数矩阵;  $\psi_{\text{cout}}, \varepsilon_{\text{cout}}$  和  $\delta_{\text{cout}}$  满足  $Y_{\text{cout}} = \psi_{\text{cout}} W + \varepsilon_{\text{cout}} U + \delta_{\text{cout}} F$ .

存在对称正定矩阵  $\xi$  使得下式成立:

$$\left[ \begin{array}{cc} (\lambda_b + \hat{Z}R\hat{\delta})\xi + \xi(\lambda_b + \hat{Z}R\hat{\delta})^T & \sigma_b \xi \hat{\psi}_\infty^T \\ \sigma_b^T & -I \delta_\infty^T \\ \hat{\psi}_\infty \xi & \delta_\infty - \gamma_\infty^2 I \end{array} \right] < 0. \quad (7)$$

将矩阵  $\xi$  和逆矩阵  $\xi^{-1}$  进行如下的分块,

$$\xi = \begin{bmatrix} \xi_{11} & \xi_{12} \\ \xi_{12}^T & \xi_{22} \end{bmatrix}, \xi^{-1} = \begin{bmatrix} \xi_{11} & \xi_{12} \\ \xi_{12}^T & \xi_{22} \end{bmatrix}. \quad (8)$$

式中:  $\xi_{11}$  和  $\xi_{11}$  均为正定对称矩阵. 由  $\xi\xi^{-1} = I$  可得

$$\xi_{12}\xi_{12}^T = I - \xi_{11}\xi_{11}^{-1}. \quad (9)$$

本文定义的变量替换方程式为

$$\left. \begin{aligned} \vec{\lambda} &= \xi_{11}\lambda\xi_{11} + \xi_{11}\sigma_1\psi_z\xi_{12}^T + \xi_{12}\sigma_z\psi_{\text{coul}}\xi_{11} + \\ &\quad \xi_{12}\lambda\xi_{12}^T + \xi_{12}\sigma_z\epsilon_{\text{coul}}\psi_z\xi_{12}^T, \\ \vec{\sigma} &= \xi_{12}\sigma_z, \\ \vec{\psi} &= \psi_z\xi_{12}^T. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

$$\tilde{N} = \begin{bmatrix} \lambda\xi_{11} + \sigma_1\vec{\psi} + \xi_{11}\lambda^T + (\sigma_1\vec{\psi})^T & \\ & \lambda^T + \vec{\lambda} \end{bmatrix}$$

对于给定的标量  $\gamma_2 > 0$ , 且仅当存在正定对称矩阵  $\xi$  和  $B$  使得下式成立:

$$\left. \begin{aligned} (\lambda_b + \hat{Z}R\hat{\delta})\xi + \xi(\lambda_b + \hat{Z}R\hat{\delta})^T + \sigma_b\sigma_b^T &< 0, \\ \begin{bmatrix} -B & \psi_2\xi \\ \xi\psi_2^T & -\xi \end{bmatrix} &< 0, \\ \text{trace}(B) &< \gamma_2^2. \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

对式(13)第二项左边矩阵分别左乘矩阵  $\text{diag}(R_2^T, I)$  与右乘矩阵  $\text{diag}(R_2, I)$ , 可得

$$\begin{bmatrix} -B & \psi_2\xi_{11} + \epsilon_2\vec{\psi} & \psi_2 \\ (\psi_2\xi_{11} + \epsilon_2\vec{\psi})^T & -\xi_{11} & -I \\ \psi_2^T & -I & -\xi_{11} \end{bmatrix}. \quad (14)$$

通过以上推导可以得出: 若给定的标量  $\gamma_\infty > 0$ , 常数  $\alpha > 0$ , 且使得式(11)、式(13)第三项和式(14)存在解  $\xi_{11}, \xi_{11}, \vec{\lambda}, \vec{\sigma}, \vec{\psi}$  和  $B$ , 则对于系统(5)而言, 其优化问题可通过求解下式来解决.

$$\min_{\xi_{11}, \xi_{11}, \vec{\lambda}, \vec{\sigma}, \vec{\psi}, B} \gamma_2^2. \quad (15)$$

进一步依据式(9)进行奇异值分解便可求得  $\xi_{11}$  和  $\xi_{11}$ , 然后依据式(10)反求  $\lambda_z, \sigma_z$  和  $\psi_z$ , 并将其分别代入如式(4)所示的控制器, 进而得到了满足式(3)的鲁棒  $H_2/H_\infty$  控制器.

本文在  $H_2/H_\infty$  控制器中引入分散控制算法<sup>[11]</sup>, 该算法将系统划分为若干子系统, 根据各子系统内测点的速度和位移来对各子系统内的体系响应进行分散控制. 采用改进的限幅最优半主动控制算法(MCO)<sup>[12]</sup>来计算施加于MRD的命令电压, 并将MCO算法整合至  $H_2/H_\infty$  分散控制器中, 形成了  $H_2/H_\infty$  - MCO 半主动分散控制策略.

对式(7)左侧矩阵分别左乘矩阵  $\text{diag}(R_2^T, I, I, I)$  和右乘矩阵  $\text{diag}(R_2, I, I, I)$ , 可得

$$\left[ \begin{array}{cccc} \tilde{N} & & & \text{对} \\ \sigma_2^T\sigma_2^T\xi_{11} + (\vec{\sigma}\delta_{\text{coul}})^T & -I & & \\ \psi_\infty\xi_{11} + \epsilon_\infty\vec{\psi}\psi_\infty & \delta_\infty & -\gamma_\infty^2 I & \text{称} \\ Z^T Z^T \xi_{11} & 0 & 0 & -\rho^{-1} I \\ \delta_1\xi_{11} + \delta_2\vec{\psi}\delta_1 & 0 & 0 & 0 & -\rho I \end{array} \right]. \quad (11)$$

式中  $\tilde{N}$  的表达式为

$$\begin{bmatrix} \lambda + \vec{\lambda}^T \\ \xi_{11}^T \lambda + \lambda\xi_{11} + \vec{\sigma}\psi_{\text{coul}} + (\vec{\sigma}\psi_{\text{coul}})^T \end{bmatrix}. \quad (12)$$

### 3 数值分析

#### 3.1 系统参数

以白浪河-杨家集  $\pm 800$  kV 特高压直流输电塔-线体系为背景, 跨越塔(猫头型直线塔)的呼称高为 104.4 m, 跨越距离为 800 m, 垂度为 79.5 m, 两侧耐张塔高 60.5 m, 水平档距为 380 m. 输电线路的上层为地线, 下层为四分裂导线. 该输电塔(跨越塔)的计算模型及尺寸见图1; 足尺MRD的出力及冲程峰值的铭牌标定值分别为 20 kN 和  $\pm 30$  cm. MRD 的优化参数见文献[12]. 地线和导线的外径分别为 19.6 mm 和 37.3 mm, 弹性模量分别为 140.7 GPa 和 65.9 GPa. 控制器中的  $\gamma_\infty^2 = 220, \rho = 3.5 \times 10^{-6}$ .

在杆塔的上塔头(I)、下塔头(II)、上横担(III)、下横担(IV)、上塔身(V)和下塔身(VI)等区域选取7个(①~⑦)关键点, 用于比较各策略的抑振效果. 控制方案有: (0) 无控制(简称NC), 杆塔不布置阻尼器; (1) TMD + VED 控制, 在上横担边缘斜杆上布置4个TMD(每个TMD质量为2.5 t), 在上、下塔头斜杆上分别布置8个和6个VED, 在下横担边缘斜杆上布置12个VED; (2) LRD 控制, 在上塔身斜杆上布置12个LRD, 在下横担边缘斜杆上布置8个LRD; (3) CI 控制, 在上塔头斜杆上布置6个MRD, 在上横担边缘斜杆上布置10个MRD, 在上、下塔身斜杆上分别对称布置8个和4个MRD; (4)  $H_2/H_\infty$  - MCO 控制, 其MRD的布置方案与CI控制的相同. 本文采用减振率(方案(0)与方案(i) ( $i=1, 2, 3, 4$ ) 的响应峰值的差值占方案(0)的响应峰值的百分比)来表征方案(i)对体系响应的抑制效果. 上横担③点处的脉动风荷载纵向分量模拟时

程见图 2.

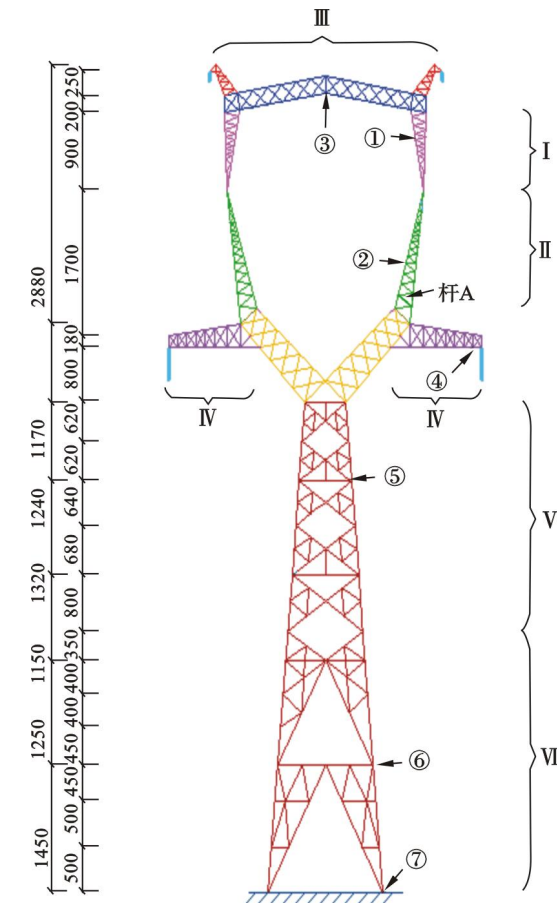


图 1 输电塔的计算模型及尺寸 (单位:cm)  
Fig. 1 Computing model and dimension of the transmission tower (unit:cm)

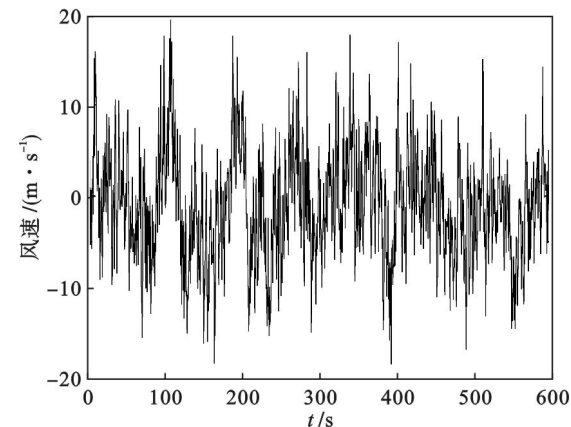


图 2 ③点的脉动风纵向分量时程  
Fig. 2 Time history of fluctuating wind velocity along longitudinal direction at the point ③

3.2 结果分析

分别计算各方案下的系统在风激励下的响应时程和评价指标,结果分别见图 3、图 4 和表 1. 通过分别计算  $H_2/H_\infty$ \_MCO 和 CI 控制体系的初始刚度在发生  $\pm 30\%$  扰动时的指标峰值来比较两者的鲁棒性,结果见表 2.

由图 3 可以看出,  $H_2/H_\infty$ \_MCO 策略能在整个风激励时程内有效地降低①点和④点的体系响应. 由图 4 可知,  $H_2/H_\infty$ \_MCO 策略下的 MRD(安装于杆 A)控制力很光滑且无颤振产生. 而 CI 策略下的 MRD 控制力却发生了两次明显的颤振,这会对其控制性能产生不利影响.

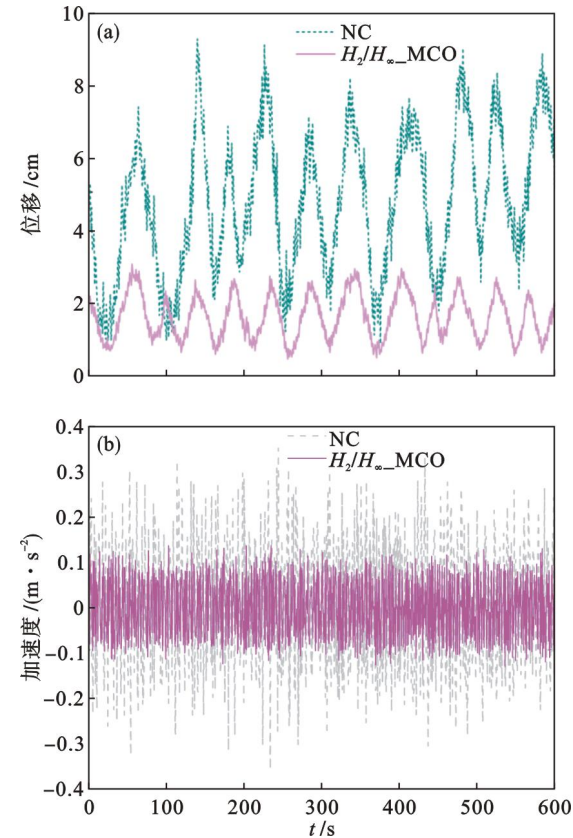


图 3 体系关键点的风致响应时程  
Fig. 3 Wind-induced vibration responses time history of key point in the system  
(a) —上塔头①点的平面外位移;  
(b) —下横担④点的平面内加速度.

由表 1 可知,方案(4)对  $J_1$ (①点加速度)、 $J_2$ (②点位移)、 $J_3$ (③点加速度)、 $J_4$ (④点位移)、 $J_5$ (⑤点加速度)、 $J_6$ (⑥点位移)、 $J_7$ (⑦点剪力)和  $J_8$ (⑦点弯矩)等指标的减振率比方案(1),(2)和(3)都要显著;方案(4)的  $J_9$ (MRD 出力峰值)和  $J_{10}$ (MRD 冲程峰值)比方案(3)的  $J_9$  和  $J_{10}$  都要大得多;此外,方案(4)的  $J_{11}$ (控制系统每分钟的耗电量)比方案(3)的  $J_{11}$  要小得多;虽然方案(4)所需的  $J_{12}$ (传感器数目)比方案(3)所需的  $J_{12}$  要多,但是方案(4)的  $J_{13}$ (计算模态的数目)为零,而方案(3)却需要较多的  $J_{13}$ . 可见,在上述 4 种控制方案中,  $H_2/H_\infty$ \_MCO 策略的减振效果最好,能使 MRD 产出接近铭牌值的阻尼力和冲程,且节能性和抗时滞性( $J_{13} = 0$ )均较好.



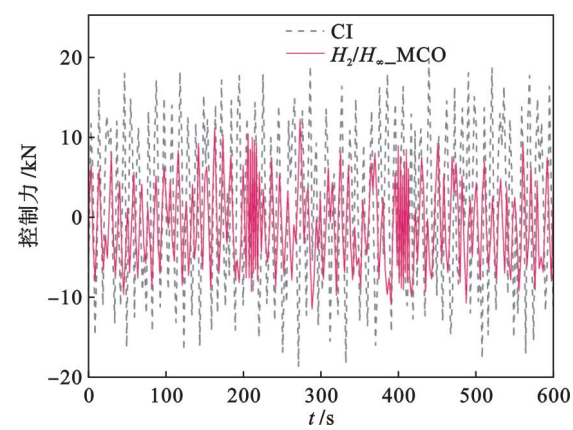


图 4 半主动控制策略的控制力时程

Fig. 4 Control force time histories of the different semi-active control strategies

表 1 各方案下的评价指标峰值  
Table 1 Peak evaluation indexes of the different schemes

指标	(0)	(1)	(2)	(3)	(4)
$J_1/(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$	0.418 [0.404]	0.301 [0.283]	0.342 [0.325]	0.229 [0.216]	0.136 [0.122]
$J_2/\text{cm}$	8.68 [7.84]	6.25 [5.40]	7.76 [6.98]	4.63 [3.86]	2.65 [2.13]
$J_3/(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$	0.453 [0.437]	0.346 [0.331]	0.382 [0.369]	0.254 [0.237]	0.168 [0.156]
$J_4/\text{cm}$	8.04 [7.37]	5.72 [5.16]	7.26 [6.59]	4.09 [3.27]	2.21 [1.85]
$J_5/(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$	0.373 [0.320]	0.252 [0.216]	0.318 [0.274]	0.195 [0.174]	0.114 [0.105]
$J_6/\text{cm}$	5.16 [4.57]	3.68 [3.15]	4.52 [4.27]	2.49 [2.06]	1.13 [0.95]
$J_7/\text{MN}$	11.65 [11.03]	8.27 [8.02]	10.21 [9.83]	5.31 [5.05]	2.92 [2.61]
$J_8/(\text{MN}\cdot\text{m})$	1218 [1157]	863 [839]	1060 [1024]	554 [529]	305 [286]
$J_9/\text{kN}$				12.7	19.8
$J_{10}/\text{cm}$				21.5	29.2
$J_{11}/(\text{kJ}\cdot\text{min}^{-1})$				37.13	14.85
$J_{12}$				36	84
$J_{13}$				64	0

注：表 1 和表 2 中，无方框数值和方框内数值分别为平面内、外体系响应峰值。

由表 2 可以看出，方案(4)的体系响应均明显小于方案(3)的体系响应。可见在体系刚度存在不确定性时， $H_2/H_\infty$ \_MCO 的控制性能要明显优于 CI，故  $H_2/H_\infty$ \_MCO 控制器的鲁棒性要优于 CI 控制器。

表 2 体系刚度发生 ±30% 扰动时的部分指标 Table 1 Part of indexes for ±30% system stiffness perturbed				
指标	+30%		-30%	
	(3)	(4)	(3)	(4)
$J_1/(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$	0.258 [0.245]	0.166 [0.153]	0.274 [0.257]	0.173 [0.161]
$J_2/\text{cm}$	4.91 [4.03]	2.87 [2.32]	5.12 [4.34]	2.99 [2.48]
$J_7/\text{MN}$	5.52 [5.19]	3.04 [2.83]	5.68 [5.27]	3.11 [2.91]
$J_8/(\text{MN}\cdot\text{m})$	571 [546]	317 [294]	590 [557]	332 [306]
$J_9/\text{kN}$	12.2	19.3	11.7	19.0
$J_{10}/\text{cm}$	20.8	28.7	20.5	28.3
$J_{11}/(\text{kJ}\cdot\text{min}^{-1})$	35.28	13.69	35.02	13.47
$J_{13}$	64	0	64	0

4 结 论

本文提出的  $H_2/H_\infty$ \_MCO 半主动分散控制策略对塔体位移、塔体加速度和塔底内力的减振效果比 TMD + VED 控制、LRD 控制和 CI 控制的效果都显著； $H_2/H_\infty$ \_MCO 策略与 CI 策略相比，前者不仅利于 MRD 性能的发挥，且更节能。此外，前者可避免因控制器运算所产生的时滞，且 MRD 的控制力曲线光滑无颤振，其鲁棒性也要明显优于后者。

参考文献：

[ 1 ] 邓洪洲,朱松晔,苏速,等. 大跨越输电塔线体系风振控制风洞试验[J]. 同济大学学报(自然科学版),2003,31(9): 1009 – 1013.  
(Deng Hong-zhou, Zhu Song-ye, Su Su, et al. Wind tunnel investigation on wind-induced vibration control of long span transmission line systems [ J ]. Journal of Tongji University ( Natural Science ), 2003, 31 ( 9 ): 1009 – 1013. )

[ 2 ] 郭勇,孙炳楠,叶尹. 大跨越输电塔线体系风振响应频域分析及风振控制[ J ]. 空气动力学学报,2009,27(3):289 – 295.  
(Guo Yong, Sun Bing-nan, Ye Yin. Frequency-domain analysis on wind-induced dynamic response and vibration control of long span transmission line system [ J ]. Acta Aerodynamica Sinica, 2009, 27 ( 3 ): 289 – 295. )

[ 3 ] 邓洪洲,朱松晔,陈亦,等. 大跨越输电塔线体系风振控制研究[ J ]. 建筑结构学报,2003,24(4):60 – 64.  
(Deng Hong-zhou, Zhu Song-ye, Chen Yi, et al. Study on wind-induced vibration control of long span transmission line system [ J ]. Journal of Building Structures, 2003, 24 ( 4 ): 60 – 64. )

- [4] 李黎,曹化锦,罗先国,等. 输电塔-线体系的舞动及风振控制[J]. 高电压技术,2011,37(5):1253-1260.  
(Li Li, Cao Hua-jin, Luo Xian-guo, et al. Galloping and wind-induced vibration control on transmission tower-line system[J]. *High Voltage Engineering*, 2011, 37(5): 1253-1260.)
- [5] Chen B, Zheng J, Qu W. Control of wind-induced response of transmission tower-line system by using magnetorheological dampers[J]. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 2009, 9(4): 661-685.
- [6] 王曦,陈华荣. 不确定性系统鲁棒  $H_\infty/H_2$  混合控制在航空发动机中的应用[J]. 航空动力学报, 2002, 17(2): 250-254.  
(Wang Xi, Chen Hua-rong. Robust  $H_\infty/H_2$  mixed control for aeroengine parameter uncertainty systems[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2002, 17(2): 250-254.)
- [7] 宋刚,林家浩,吴志刚. 考虑参数不确定性的主动悬架鲁棒  $H_2/H_\infty$  混合控制[J]. 动力学与控制学报, 2008, 6(2): 156-164.  
(Song Gang, Lin Jia-hao, Wu Zhi-gang. Robust  $H_2/H_\infty$  control of active vehicle suspension subjected to parameter uncertainties[J]. *Journal of Dynamics and Control*, 2008, 6(2): 156-164.)
- [8] Spencer B F, Dyke S J, Sain M K, et al. Phenomenological model for magnetorheological dampers [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 1997, 123(3): 230-238.
- [9] Okamura T, Ohkuma T, Hongo E, et al. Wind response analysis of a transmission tower in a mountainous area[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2003, 91(1): 53-63.
- [10] Yasui H, Marukawa H, Momomura Y, et al. Analytical study on wind-induced vibration of power transmission towers[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1999, 83(2): 431-441.
- [11] Lei Y, Wu D T, Liu L J. A decentralized structural control algorithm with application to the benchmark control problem for seismically excited buildings[J]. *Structural Control and Health Monitoring*, 2013, 20(9): 1211-1225.
- [12] 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 Yong-quan, Qiu Hong-xing. A new semi-active control strategy for restraining seismic response of railroad bridges [J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Sciences)*, 2015, 39(2): 111-118.)

(上接第 278 页)

- [23] Schleser G, Helle G, Lücke A, et al. Isotope signals as climate proxies; the role of transfer functions in the study of terrestrial archives[J]. *Quaternary Science Reviews*, 1999, 18(7): 927-943.
- [24] Li M C, Liu H Y, Li L X, et al. Carbon isotope composition of plants along altitudinal gradient and its relationship to environmental factors on the Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Polish Journal of Ecology*, 2007, 55(1): 67-78.
- [25] Llorens L, Osborne C P, Beerling D J. Water-use responses of 'living fossil' conifers to  $\text{CO}_2$  enrichment in a simulated cretaceous polar environment [J]. *Annals of Botany*, 2009, 104(1): 179-188.
- [26] Körner C, Farquhar G D, Roksandic Z. A global survey of carbon isotope discrimination in plants from high altitude [J]. *Oecologia*, 1988, 74(4): 623-632.
- [27] Hultine K R, Marshall J D. Altitude trends in conifer leaf morphology and stable carbon isotope composition [J]. *Oecologia*, 2000, 123(1): 32-40.
- [28] Pedicino L, Leavitt S, Betancourt J, et al. Historical variations in  $\delta^{13}\text{C}$  (leaf) of herbarium specimens in the southwestern US [J]. *Western North American Naturalist*, 2002, 62(3): 348-359.
- [29] 刘光琇,张威,陈桂琛,等. 西部中国沙棘叶片稳定碳同位素组成的空间特征及其气候意义[J]. 中国沙漠, 2009, 29(5): 866-871.  
(Liu Guang-xiu, Zhang Wei, Chen Gui-chen, et al. Spatial characters and climate significances of stable carbon isotope composition in *Hippophate rhamnoides sinensis* leaves in western China [J]. *Journal of Desert Research*, 2009, 29(5): 866-871.)