

刘洁,刘洪波,刘红军.基于 CSI 效应的直线电机驱动塔系结构风振控制研究[J].地震工程学报,2018,40(5):1004-1011.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2018.05.1004
LIU Jie,LIU Hongbo,LIU Hongjun.Wind-induced Vibration Control of Linear-motor-driven Tower Structures Considering the CSI Effect[J].China Earthquake Engineering Journal,2018,40(5):1004-1011.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2018.05.1004

基于 CSI 效应的直线电机驱动塔系 结构风振控制研究

刘 洁¹, 刘洪波¹, 刘红军²

(1. 郑州航空工业管理学院土木建筑工程学院, 河南 郑州 450002;

2. 哈尔滨工业大学深圳研究生院, 广东 深圳 518055)

摘要: 控制系统与结构振动的相互作用(Control Structure Interaction, 简称 CSI)广泛存在于结构与主动控制系统之间,然而目前在直线电机驱动的塔系结构风振控制研究中往往没有充分考虑 CSI 效应,使得理论控制效果与实际控制效果存在偏差。为了考察 CSI 效应对塔系结构风振控制的影响,首先以电磁驱动 AMD 系统“电-力-运动”相互关系模型为基础,建立考虑 CSI 效应的塔系结构直线电机驱动 AMD 风振控制系统模型;其次综合权衡计算效率和控制精度的关系,选取考虑低阶 CSI 效应模型以及最经典的 LQR 控制算法。在此基础上,对该塔系结构确定是否考虑 CSI 效应进行相应的控制分析。结果表明,CSI 效应在塔系结构风振控制中起着重要的作用,制定与实际工程结合更佳的直线电机驱动 AMD 系统风振控制方案中需要考虑 CSI 效应,为以后在实际工程中推广应用提供一种新思路。

关键词: 塔系结构; 风振控制; 直线电机; CSI 效应; AMD

中图分类号: TU311.3

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2018)05-1004-08

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2018.05.1004

Wind-induced Vibration Control of Linear-motor-driven Tower Structures Considering the CSI Effect

LIU Jie^{1,2}, LIU Hongbo¹, LIU Hongjun²

(1. Zhengzhou Institute of Aeronautical Industry Management, Zhengzhou 450015, Henan, China;

2. Shenzhen Graduate School, Harbin Institute of Technology, Shenzhen 518055, Guangdong, China)

Abstract: Control-structure interaction (CSI) often occurs between structures and active control systems. However, current research on controlling the linear-motor-driven active-mass-damper (AMD) wind-induced vibration in tower structures doesn't always fully consider the CSI effect, which leads to differences in the theoretical and actual control effects. To investigate the influence of the CSI effect on the control of a tower structure's wind-induced vibration, we first used the "electricity-power-movement" interaction model of an electromagnetically driven AMD system to

收稿日期:2017-08-20

基金项目:国家自然科学基金(51508524)

第一作者简介:刘 洁(1981-),女,博士,副教授,主要研究方向:结构振动控制。E-mail:liuj8110@gmail.com。

establish a model of a linear-motor-driven AMD wind-induced vibration control system for tower structures that considers the CSI effect. Then, based on a tradeoff between computation efficiency and control accuracy, we adopted a model that considers a reduced-order CSI effect and uses the classical LQR control algorithm. We then performed a corresponding control analysis of the tower structure. Based on our results, we can conclude that the CSI effect plays an important role in controlling wind vibration in tower structures, and must be considered in the linear-motor-driven AMD wind-induced vibration control scheme to better align its results with those of actual projects. The results of this study provide a new consideration for future practical engineering applications.

Keywords: tower structure; wind-induced vibration control; linear motor; CSI effect; AMD

0 引言

在塔系结构风振控制中,主动质量驱动(AMD)振动控制技术能够对控制系统进行合理设计,控制作用可以大范围调整,其以良好的控制效果和低廉的控制代价成为目前研究与应用最为广泛的一种控制方法^[1-4]。但是由于驱动力装置本身的动力特性与塔系结构动力特性之间较强的耦合即 CSI 效应,使得理论控制效果与实际控制效果存在偏差,不能实现理想的控制,限制了 AMD 技术在塔系结构风振控制中的应用。因此,在塔系结构风振控制中,需要对 CSI 效应进行研究。从 AMD 装置的驱动力来源来看,塔系结构 AMD 控制系统主要有液压驱动、旋转伺服电机驱动和直线伺服电机驱动 3 种^[5]。液压系统存在构造复杂、所需空间大、能源利用效率低、维护成本高和运行噪音大等问题。旋转伺服电机存在响应慢、加速度不高、控制精度低等问题。而直线伺服系统直接把被控对象与直线电机作成一体化结构,通过磁力直接做直线运动的推力装置,省略了中间运动形式变换,从而在高精度、响应快速等方面具有比前两种 AMD 系统更优越的性能,在控制领域具有广阔的发展前景,成为 AMD 振动控制研究的一个热点。从理论与试验研究以及以工程应用为最终目的出发,张春巍^[6]采用直线电机驱动 AMD 系统并进行理论和试验研究。张春巍等^[7]研究了电磁式惯性型作动器与结构耦合系统的建模与试验,他们针对简单框架考虑 CSI 效应进行了直线电机相关分析。刘军龙等^[8]进行了结构振动的直驱式 AMD 控制系统建模及数值分析,给出了以泵的转速为输入量、系统主动控制力为输出量的系统转速—力关系模型,建立了受控结构—DAMD 控制系统的状态方程,并以顶部设置 DAMD 控制系统的两层剪切型框架结构为例,进行地震荷载输入下 DAMD 主动控制的数值分析。谭平等人^[9]通过在

TMD 上设置直线电机驱动的 AMD 控制系统,提出了一种新型的主被动混合控制系统(HMD),并成功应用于世界第一高塔——广州电视塔(600 m)的风振控制。刘彦辉等^[10]针对直线电机驱动的 AMD 控制系统,提出纹波推力及综合阻力的计算公式,对驱动力进行修正,然后对直线电机驱动的 AMD 控制系统进行不同频率和幅值的正弦力指令试验。针对广州电视塔的风振控制,刘彦辉等^[11]提出了直线电机驱动的 AMD 控制装置实现策略,并提出了多个直线电机驱动单个主动质量阻尼器的纹波推力和综合阻力识别方法及计算公式。

目前,对于 Spencer 和 Dyke 等^[12-13]提出来的 CSI 效应,在塔系结构风振控制研究中没有得到充分考虑。实际控制中,塔系结构风振控制由于忽略 CSI 效应容易造成理论与实践的偏差,因此 CSI 效应是塔系结构风振控制分析中的一个关键因素。刘洁等^[14]进行了超磁致伸缩作动器与结构 CSI 效应的建模与控制研究。本文将在此基础上结合张春巍建立的模型^[7],按考虑 CSI 效应驱动力模型对塔系结构进行建模,将 CSI 效应考虑在塔系结构模型中,对比分析其是否考虑 CSI 效应的控制效果并进行相关分析,为塔系结构直线电机驱动 AMD 系统风振控制提供一定的工程建议。

1 理想的塔系结构 AMD 风振控制系统模型

1.1 电视塔结构模型

根据结构有限元模型(SAP 模型),通过简化降阶,将电视塔看作 28 个质量点,如图 1 所示;对 28 个质点分别施加 X,Y 向的约束链杆,限制水平自由度,降阶模型对应 56 个自由度。依次令每根链杆发生自身方向的单位位移,即有 $28 \times 2 = 56$ 种工况,计算 56 种工况下链杆的反力即可得到刚度阵的元素 K_{ij} 。根据得到的 M 和 K ,和 $aM + bK$ 的瑞利阻尼形式,得到阻尼矩阵 C 。对电视塔采取 x, y 两个方向控制,

作动器安装在建筑物的第 18 个质点处,该结构的顶层为第 19 个质点处,第 20~28 个质点为天线部分。



图 1 某电视塔简化降阶模型

Fig.1 Reduced order model for a certain TV tower

1.2 理想的 AMD 风振控制系统模型

不考虑直线电机与塔系结构的耦合(CSI),建立一个在第 18 个质点安装直线电机的电视塔 AMD 风振控制系统模型,如式(1)和(2)所示。

$$m_a \ddot{x}_a + c_a (\dot{x}_a - \dot{x}_{18}) + k_a (x_a - x_{18}) = f + IF_w \quad (1)$$

$$m_i \ddot{x}_i + c_i (\dot{x}_i - \dot{x}_{i-1}) + c_{i+1} (\dot{x}_i - \dot{x}_{i+1}) + k_i (x_i - x_{i-1}) + k_{i+1} (x_i - x_{i+1}) = -f + IF_w \quad (2)$$

式中: x_i 、 \dot{x}_i 、 \ddot{x}_i 分别是结构第 i 层相对于地面的位移、速度和加速度; m_a 、 c_a 、 k_a 分别是 AMD 系统的质量、阻尼系数和刚度; x_a 是 AMD 系统相对地面的位移; F_w 是风荷载; f 是施加于结构的驱动力。

2 考虑 CSI 效应的塔系结构直线电机驱动 AMD 风振控制系统模型

高耸结构属于多自由度结构,结构模型较大,本文首先以电磁驱动 AMD 系统“电-力-运动”相互关系模型为基础^[5]。然后将该模型推广到塔系结构直线电机驱动 AMD 风振控制模型上,针对塔系结构这种复杂的体系,在两个方向上考虑直线电机-AMD 的相互作用,选用脉动风荷载对其进行振动控制分析,建立考虑 CSI 效应的塔系结构直线电机 AMD 风振控制模型,并进行考虑 CSI 效应的风振控制分析。

2.1 塔系结构直线电机驱动 AMD 系统的驱动力模型

以张春巍的电磁驱动 AMD 系统“电-力-运动”相互关系模型^[5,7]为基础考虑塔系结构振动速度对直线电机驱动 AMD 控制系统出力的影响,按高阶模型建立塔系结构直线电机驱动 AMD 系统的驱动力模型,如式(3)所示。

$$f = \frac{K_f}{R_m} V_m - \frac{K_f K_m}{R_m} (\dot{x}_a - \dot{x}_{18}) - \frac{L_m}{R_m} \ddot{f} \quad (3)$$

式中: R_m 是线圈电阻; $V_m(t)$ 是线圈的控制输入电压; $K_f = \frac{F}{I}$ 表示单位电流产生的电磁推力,单位为 N/A; $K_m = \frac{\epsilon}{v}$ 表示单位速度引起的反向电动势电压,单位为 V·s/m; f 是由直线电机施加的驱动力; V_m 是控制电压信号。

通常对于给定的直线电机 $\frac{L_m}{R_m}$ 值很小,所以当满足高精度要求时,即 $\frac{L_m}{R_m} \neq 0$ 的情况下,相当于考虑高阶 CSI 效应;当 $\frac{L_m}{R_m} \dot{f} = 0$ 时,即忽略电感的影响,这个系统对于精度要求较低,称为考虑 CSI 效应的低阶模型^[7],所以式(3)也称为高阶模型。

以张春巍低阶模型^[5,7]为基础,按低阶模型建立塔系结构直线电机驱动 AMD 系统的驱动力模型,如式(4)。

$$f = \frac{K_f}{R_m} V_m - \frac{K_f K_m}{R_m} (\dot{x}_a - \dot{x}_{18}) \quad (4)$$

2.2 考虑高阶 CSI 效应的塔系结构直线电机双向驱动 AMD 风振控制系统模型

将高阶模型式(3)代入到式(1)(2)中,建立考虑 CSI 效应的塔系结构直线电机双向驱动 AMD 系统模型,其状态方程如式(5)。

$$\dot{Z} = AZ + BU + D_w F_w \quad (5)$$

Z 表示该控制系统的状态变量,考虑高阶 CSI 效应,加入反映驱动力的状态变量 f ,由于是双向 AMD 系统,需要两台直线电机,因此加入两个状态变量 f_1 、 f_2 ,则新系统状态变量 Z 的矩阵形式如式(6)所示。

$$Z = [x_1 \quad x_2 \quad \cdots \quad x_{2 \times 28} \quad x_{a1} \quad x_{a2} \quad \dot{x}_1 \quad \dot{x}_2 \quad \cdots \quad \dot{x}_{2 \times 28} \quad \dot{x}_{a1} \quad \dot{x}_{a2} \quad f_1 \quad f_2]^T \quad (6)$$

A 、 B 系数矩阵分别如式(7)(8)所示, U 为液压阀的控制电压信号, F_w 为所施加的风荷载, D_w 表示风荷载加载在各质量点上。

$$B = \begin{bmatrix} [0]_{1 \times 2n} & 0 & \cdots & \frac{-d_1}{m_{18}} & \cdots & 0 & \cdots & \frac{d_1}{m_a} & 0 \\ [0]_{1 \times 2n} & 0 & \cdots & 0 & \cdots & \frac{-d_1}{m_{28+18}} & \cdots & 0 & \frac{d_1}{m_a} \end{bmatrix} \quad (11)$$

2.4 两种模型对比

高阶模型虽然能精确反映 AMD 控制系统在结构中的实际工作状态,但是由于引入一个高阶力的微分项作为系统的状态变量,导致系统状态方程系数矩阵特征值分布有些畸形,一旦控制算法参数选取不当,AMD 控制很容易导致不稳定;而低阶模型不存在控制力的微分项,其实用价值可能更好^[7]。综合权衡计算效率和控制精度的关系,选取低阶模型进行电视塔的风振控制分析。

3 考虑低阶 CSI 效应的电视塔直线电机驱动 AMD 系统风振控制效果分析

3.1 电视塔 AMD 子系统参数

传统的 AMD 子系统物理参数包括质量、刚度、阻尼,考虑 CSI 效应的 AMD 子系统物理参数还包括作动器的相关参数。AMD 子系统参数的确定一般要考虑两个方面的问题^[15]:一是风和地震两种不同性质的输入和作用;二是 AMD 控制系统物理参数和控制优化参数的选取。从风荷载输入的情况入手进行 AMD 子系统物理参数的分析,并以此进行 AMD 子系统的构造设计。在本文中,确定 AMD 子系统的质量为 1 062.082 56 t,刚度为 405.613 67 kN/m,阻尼为 131.383 72 kN·s/m。考虑 CSI 效应中,表

征作动器直线电机 3 个参数分别为 $K_f = 18.12$, $K_m = 6.63$, $R_m = 10.35$ 。

3.2 控制算法考虑与不考虑低阶 CSI 效应的控制效果对比

采用考虑低阶 CSI 效应的塔系结构直线电机双向驱动 AMD 风振控制系统模型作为建模对象。对控制算法考虑与不考虑低阶 CSI 效应的控制效果对比。考虑低阶 CSI 效应的控制算法以式(10), (11)为基础,采用最经典最稳定的 LQR 控制算法,由于 LQR 控制算法使得性能目标 $J = \int_0^{t_f} [Z^T(t)QZ(t) + U^T(t)RU(t)]dt$ 取得最小的最优驱动力,因此系统控制参数选用 $Q = \begin{bmatrix} \alpha_1 K & 0 & 0 \\ 0 & \alpha_2 M_s & 0 \\ 0 & 0 & \alpha_a m_a \end{bmatrix}$, $R = \beta$, 其中 $\alpha = \alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_a = 10^5$, $\beta = 10^{-4}$ 。设计最优控制增益。对该系统模型进行考虑低阶 CSI 效应控制。同时为了对比控制效果,控制参数仍然用 $\alpha = 10^5$, $\beta = 10^{-4}$ 。不考虑 CSI 效应的控制算法以式(1)、(2)为基础形成的系数矩阵设计最优控制增益。

在 10 年一遇风荷载作用下,数值模拟结果见表 1 所列。

表 1 控制算法考虑与不考虑 CSI 效应的控制效果对比

Table 1 Comparison between control effects of the control algorithm with and without the consideration of CSI effect

	X 方向				Y 方向			
	位移 /m	加速度 /($m \cdot s^{-1}$)	力 /kN	行程 /m	位移 /m	加速度 /($m \cdot s^{-1}$)	力 /kN	行程 /m
无控	0.351 04	0.166 795	-	-	0.137 803	0.112 598	-	-
无 CSI	0.205 81	0.099 876	518.63	0.968 40	0.064 808	0.072 377	357.50	0.372 05
CSI	0.205 81	0.099 878	471.15	0.968 26	0.064 806	0.072 388	281.49	0.371 98

直线电机作动器考虑和考虑低阶 CSI 效应的位移、加速度、作动器出力的响应时程如图 2~图 7 所示(仅给出 X 方向)。

从表 1 和图 2~图 7 中可以看到,当 CSI 效应对结构的位移、加速度的控制效果影响不大时,CSI 效应对控制效果的影响体现在驱动器出力上;从驱动器出力大小来看,在 X、Y 方向上,前者比后者分别少 47.48 kN 和 76.01 kN,分别节省 9.15% 和 21.26%;如果牺牲能量,由于 LQR 控制算法,控制

效果将更好。这说明,考虑 CSI 效应的控制算法在考虑结构动力特性的风振控制中十分必要。

4 结论

本文以 10 年一遇的风荷载作用下的某塔系结构 AMD 系统风振控制模型为对象,模拟其考虑 CSI 效应的直线电机双向驱动 AMD 风振控制系统下的动力响应,分析了 CSI 效应对控制效果的影响,得到以下几点结论:

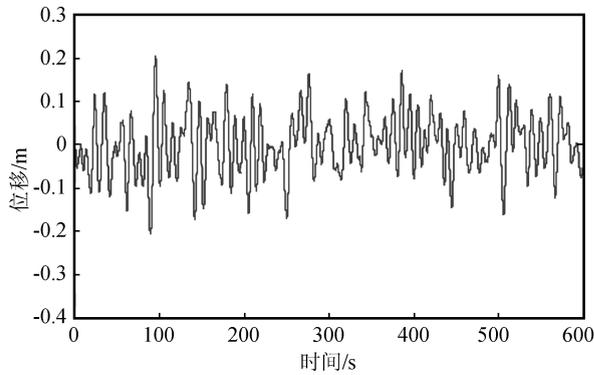


图2 不考虑 CSI 效应的主塔顶层位移时程

Fig.2 Displacement time history at the top of the main tower without considering CSI effect

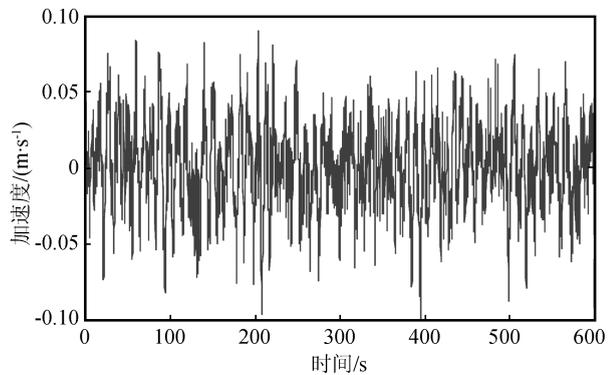


图5 考虑 CSI 效应的主塔顶层加速度时程

Fig.5 Acceleration time history at the top of the main tower considering CSI effect

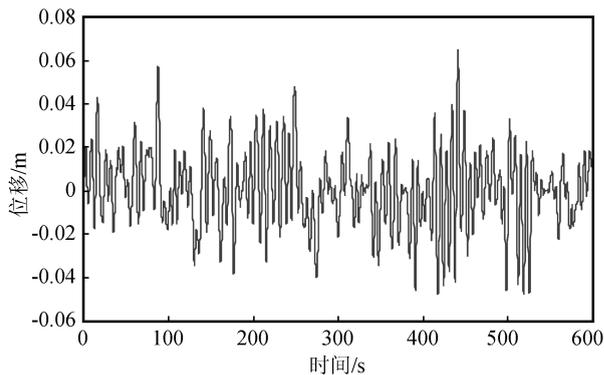


图3 考虑 CSI 效应的主塔顶层位移时程

Fig.3 Displacement time history at the top of the main tower considering CSI effect

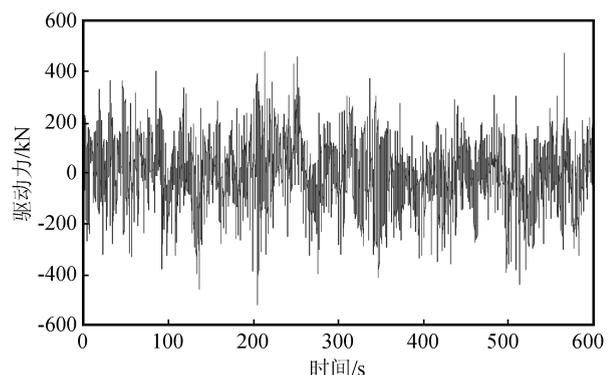


图6 不考虑 CSI 效应的主塔顶层驱动力时程

Fig.6 Driving force time history at the top of the main tower without considering CSI effect

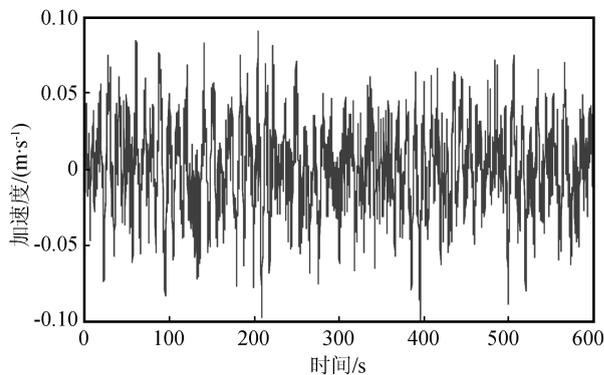


图4 不考虑 CSI 效应的主塔顶层加速度时程

Fig.4 Acceleration time history at the top of the main tower without considering CSI effect

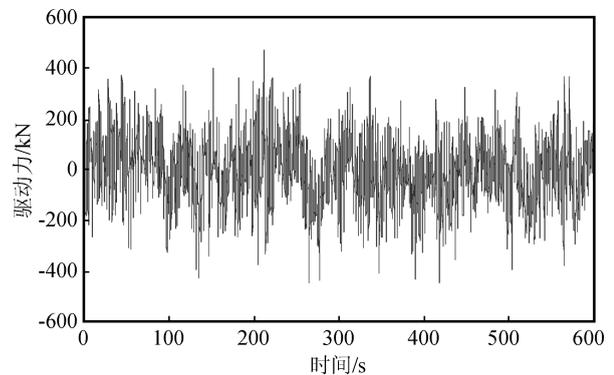


图7 考虑 CSI 效应的主塔顶层驱动力时程

Fig.7 Driving force time history at the top of the main tower considering CSI effect

(1) 基于电磁驱动 AMD 系统“电-力-运动”相互关系模型建立了考虑 CSI 效应的塔系结构直线电机双向驱动 AMD 风振控制系统模型。该模型考虑了 AMD 系统的复杂动力特性,与实际工程更接近,建议理论建模时考虑 CSI 效应。

(2) 塔系结构直线电机驱动 AMD 风振控制系

统模型考虑 CSI 效应的状态下,控制算法考虑与不考虑 CSI 效应,需要在控制效果和能量之间权衡。控制效果一致情况下,前者需要的能量较少;当控制能量一致时,可以预见前者的控制效果较好。

鉴于对足尺模型试验的局限性,本文的数值模拟结果,有必要在将来实时混合试验技术逐渐成熟

之后,做进一步的验证,为在实际工程中的进一步推广打下基础。

参考文献(References)

- [1] HOUSNER G W, BERGMAN L A, CAUGHEY T K, et al. Structural Control: Past, Present and Future[J]. *ASCE Journal of Engineering Mechanics*, 1997, 123(9): 897-971.
- [2] 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.
OU Jinping. *Structural Vibration Control-Active, Semi-active and Intelligent Control*[M]. Beijing: Science Press, 2003.
- [3] SOONG T T. *Active Structural Control: Theory and Practice* [M]. New York: Longman Scientific & Technical, 1990.
- [4] SPENCER B F, NAGARAJAIAH S. State-of-the-Art of Structural Control [J]. *ASCE Journal of Structural Engineering*, 2003, 129(7): 845-856.
- [5] 张春巍. 结构振动的电磁驱动 AMD 控制系统机器及其相关理论与试验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2005.
ZHANG Chunwei. *The Electromagnetic Mass Damper Driven Structural Vibration System, Its Associated Theory and Testing Study*[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2005.
- [6] 张春巍, 欧进萍. 电磁驱动 AMD 系统控制结构地震响应的振动台试验[J]. *地震工程与工程振动*, 2006, 26(2): 104-110.
ZHANG Chunwei, OU Jinping. *Shaking Table Tests of Electromagnetic Mass Damper System for Control of Structural Seismic Response*[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2006, 26(2): 104-110.
- [7] 张春巍, 欧进萍. 电磁式惯性型作动器与结构耦合系统建模与试验研究[J]. *振动工程学报*, 2006, 19(3): 289-295.
ZHANG Chunwei, OU Jinping. *Modeling and Testing for Electromagnetic Mass Damper and Structure Coupled System*[J]. *Journal of Vibration Engineering*, 2006, 19(3): 289-295.
- [8] 刘军龙, 张春巍, 欧进萍. 结构振动的直驱式 AMD 控制系统建模及数值分析[J]. *振动工程学报*, 2008, 21(4): 323-328.
LIU Junlong, ZHANG Chunwei, OU Jinping. *Modeling and Numerical Analysis on Direct Driving Active Mass Driver Control System for Structural Vibrations*[J]. *Journal of Vibration Engineering*, 2008, 21(4): 323-328.
- [9] TAN Ping, NING Xiangliang, ZHANG Ying, et al. Application of Hybrid Mass Dampers for Vibration Control of Guangzhou TV and Sightseeing Tower[C]//11th World Conference on Seismic Isolation, Energy Dissipation and Active Vibration Control of Structures. Guangzhou, 2009.
- [10] 刘彦辉, 谭平, 周福霖, 等. 直线电机驱动的 AMD 性能测试试验研究[J]. *土木工程学报*, 2010, 43(12): 50-55.
LIU Yanhui, TAN Ping, ZHOU Fulin, et al. *Experimental Investigation of AMD Performance Driven by Linear Motors* [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2010, 43(12): 50-55.
- [11] 刘彦辉, 谭平, 周福霖, 等. 广州电视塔直线电机驱动的主动质量阻尼器动力特性研究[J]. *建筑结构学报*, 2015, 36(4): 126-132.
LIU Yanhui, TAN Ping, ZHOU Fulin, et al. *Study of Dynamic Performance of AMD Control Device Driven by Multiple Linear Motors in the Canton Tower*[J]. *Journal of Building Structures*, 2015, 36(4): 126-132.
- [12] DYKE S J, SPENCER B F, QUAST P, et al. Role of Control-Structure Interaction in Protective System Design[J]. *ASCE Journal of Engineering Mechanics*, 1995, 121(2): 322-338.
- [13] SPENCER B F J R, SAIN M K. *Controlling Buildings: A New Frontier in Feedback* [J]. *IEEE Control Systems Magazine: Special Issue on Emerging Technologies* (Tariq Samad Guest Ed.), 1997, 17(6): 19-35.
- [14] LIU J, LIU H J, DYKE S J. Control-Structure Interaction for Micro-vibration Structural Control[J]. *Smart Materials and Structures*, 2012, 21(10): 105021.
- [15] 欧进萍, 张春巍, 李惠, 等. 大连市某高层建筑风振和地震反应的主动质量阻尼(AMD)控制分析与设计[J]. *建筑结构学报*, 2004, 25(3): 29-37.
OU Jinping, ZHANG Chunwei, LI Hui, et al. *Analysis and Design of Active Mass Damper (AMD) Control against Wind and Earthquake for a High-rise Building in Dalian*[J]. *Journal of Building Structures*, 2004, 25(3): 29-37.