

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2013.04.010

基于新型压电摩擦阻尼器的高压输电塔半主动抗震控制

樊禹江,王社良

(西安建筑科技大学土木工程学院,陕西 西安 710055)

摘要: 基于笔者开发的以压电陶瓷管状驱动器为核心元件的新型压电摩擦阻尼器,利用 ANSYS 软件对高压输电塔进行有限元建模,并通过超单元法与 MATLAB 编程相结合的方法提取输电塔结构的整体刚度矩阵、质量矩阵、阻尼矩阵。利用 MATLAB 编制了 LQR 最优控制策略、最优 Bang-Bang 半主动控制策略的相关程序,并利用 SIMULINK 仿真工具箱将二者结合构成适于高压输电塔结构的半主动控制系统。利用所提出的压电摩擦阻尼器及所编制的半主动控制系统,对输电塔进行了 EL-Centro 地震作用下的振动控制。结果表明,该阻尼器及半主动控制系统能够有效地控制输电塔的地震响应且平均控制效果系数达 25%。

关键词: 高压输电塔;新型压电摩擦阻尼器;半主动抗震控制;控制效果系数

中图分类号: TU311.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2013)04-0336-06

Semi-active seismic control of high-voltage transmission tower based on a new type of piezoelectric friction damper

FAN Yujiang, WANG Sheliang

(School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: Based on the proposed new type of piezoelectric friction damper, a finite element model of a high-voltage transmission tower was established with the finite element software ANSYS. Meanwhile, the overall stiffness and the quality and damping matrixes of the transmission tower structure were extracted by combining the super-element method and MATLAB programming. The LQR optimal control strategy and the Bang-Bang optimal semi-active control strategy program were compiled, and a suitable semi-active control system for the high-voltage transmission tower was established by combining the two strategies with the SIMULINK toolbox. With the proposed piezoelectric friction damper and the preparation of the semi-active control system, vibration control was carried out towards the transmission tower under the conditions of the EL-Centro earthquake. The results show that the damper and semi-active control system can effectively control the seismic response of the tower and the averaged control effect coefficient reached 25%.

Key words: high-voltage transmission tower; new type of piezoelectric friction damper; semi-active seismic control; control effect coefficient

高压输电塔是一种高柔性结构,对风荷载和地震等动力作用比较敏感,容易产生较大的动力响应^[1]。应用智能材料研发主动控制系统对高压输电塔结构进行振动控制,可有效抑制结构的动力响应,减小结构的累积损伤,提高结构的安全可靠性。随着振动控制技术在土木工程中的应用,其已成为有效改善结构延性、提高结构安全可靠度的重要技术之一。振动控制技术中的半主动控制技术与被动、主动控制技术相比,具有更加灵活、智能、高效等优点。

邓洪洲等^[2]以江阴大跨越高压输电塔为研究对象,通过气弹模型风洞试验为大跨越高压输电塔风振控制设计了悬挂水箱质量摆、阻尼棒质量摆以及两者的组合控制方案,并验证了振动控制的有效性,为实际工程的风振控制设计提供了依据。李黎等^[3]设计了一种质量板在 4 个球面上滑动的 FPS 型 MTMD 减震系统,并安装在某高压输电塔的横担处,其能有效减小高压输电塔的地震响应。江宜城等^[4]研究了王家滩直流大跨越输电铁塔在黏弹性阻尼器控制下的电力及风振响应,结果表明高压输电塔在黏弹性阻尼器控制下具有较好的减振效果。基于笔者开发的新型压电摩擦阻尼器,以我国华北电网 110 kV 典型高压输电塔结构为研究对象,利用 MATLAB 软件编制的半主动控制程序对该输电铁塔进行 EL-Centro 地震波作用下的半主动地震响应控制分析,探讨该半主动控制系统的控制效果。

1 新型压电摩擦阻尼器结构及工作原理

新型压电摩擦阻尼器主要由 2 组摩擦片(每组摩擦片由 2 块钢板组成)、高强螺栓、高摩擦阻尼涂层、压电陶瓷管状驱动器、滑动限位区及 4 个普通螺栓组成(图 1)。

摩擦片 1、摩擦片 2 为 2 块可相互摩擦的钢板,为增强二者之间的摩擦力,在二者间喷涂由某电机有限公司提供的摩擦系数为 0.65 的高摩擦阻尼涂层。新型压电摩擦阻尼器的预紧固力由高强螺栓提供,预紧固力为压电陶瓷管状驱动器在零电场时高强螺栓为摩擦阻尼器提供的正压力。当输电塔结构振动时,基于检测装置所提供的反馈信号及预设控制算法,利用压电陶瓷管状驱动器的“电致变形”实时地调节高强螺栓的紧固力,使 2 组摩擦片间的正压力得到有效调节,以达到智能改变阻尼器所施加阻尼力的目的,使输电塔结构尽可能地追踪最优化控制效果。

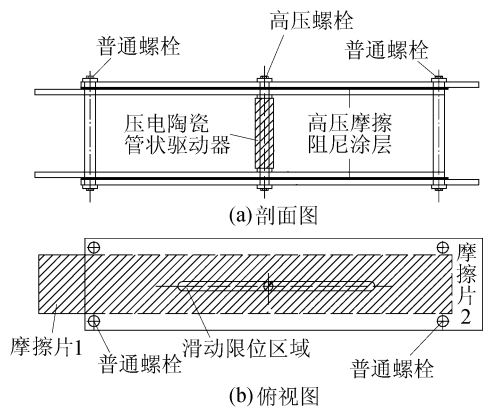


图 1 新型压电摩擦阻尼器设计构造
Fig. 1 Structure of a new type of piezoelectric friction damper

2 输电塔结构振动控制方程及其状态空间方程

对于具有 n 个节点的输电塔结构,为简化计算,将各节点自由度缩聚为 3,则共有 $3n$ 个自由度。在地震荷载作用下,不考虑摩擦阻尼器对结构布置杆件刚度影响的其输电塔结构振动方程为^[5]

$$M\ddot{x}(t) + C\dot{x}(t) + Kx(t) = D_s F(t) + B_s U(t) \tag{1}$$

式中: M ——结构质量矩阵, $M \in R_{3n \times 3n}$; C ——结构阻尼矩阵, $C \in R_{3n \times 3n}$; K ——结构刚度矩阵, $K \in R_{3n \times 3n}$; $F(t)$ ——地震作用力向量, $F(t) \in R_r$; D_s ——地震力作用位置矩阵, $D_s \in R_{3n \times r}$; $U(t)$ ——阻尼力向量, $U(t) \in R_p$; B_s ——阻尼力位置矩阵, $B_s \in R_{3n \times p}$; p ——阻尼器布置数目。

取

$$Z(t) = \begin{bmatrix} x(t) \\ \dot{x}(t) \end{bmatrix}_{6n \times 1} \tag{2}$$

对式(1)进行变形得

$$\begin{cases} \dot{\tilde{x}}(t) = \dot{x}(t) \\ \ddot{\tilde{x}}(t) = -M^{-1}C\dot{x}(t) - M^{-1}Kx(t) + M^{-1}B_s U(t) + M^{-1}D_s F(t) \end{cases} \tag{3}$$

由式(2)(3)得式(1)的状态空间方程为

$$\begin{cases} \dot{Z}(t) = AZ(t) + DF(t) + BU(t) \\ Z(t_0) = Z_0 \end{cases} \tag{4}$$

其中

$$A = \begin{bmatrix} 0_{3n} & I_{3n} \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{bmatrix}_{6n \times 6n} \quad B = \begin{bmatrix} 0_{3n \times p} \\ M^{-1}B_s \end{bmatrix}_{6n \times p} \quad D = \begin{bmatrix} 0_{3n \times r} \\ M^{-1}D_s \end{bmatrix}_{6n \times r}$$

式中: Z_0 ——输电塔结构初始状态矩阵; I_{3n} ——单位矩阵, $I_{3n} \in R_{3n \times 3n}$; 0 ——零矩阵。

3 输电塔结构有限元模型及半主动控制系统

3.1 输电塔结构有限元模型的建立

以华北电网公司 110 kV 典型设计杆塔 1J 模块结构为研究对象建立其有限元模型。该杆塔呼高为 27 m, 总高为 38.2 m, 塔头宽度为 0.8 m, 根开为 5.6 m。主材杆件钢材为 Q345; 斜材、水平材、辅助材杆件钢材均为 Q245, Q245 的弹性模量为 2.1 MPa, 泊松比为 0.3, 密度为 7 800 kg/m³。经合理简化后, 输电塔结构共有 120 个节点、348 根杆件, 腿部通过 4 个节点施加固定约束^[6]。对于输电塔结构力学模型的获取, 较简单的单自由度振动系统可选用解析法获取其力学模型; 较复杂的空间点阵结构, 其力学模型则可选用有限元法获取。故此, 采用 ANSYS 软件对其进行有限元建模。其中利用 ANSYS 中的 link8 单元模拟输电塔中各杆件, 并认为各杆件单元之间为铰接连接, 且每个节点具有 x, y, z 共 3 个方向的自由度。建立的高压输电塔结构有限元模型如图 2 所示。

基于已建立的高压输电塔结构有限元模型, 利用超单元法与 MATLAB 软件编程即可方便地获取 M, C, K 。具体过程如下: (a) 对输电塔结构进行有限元建模, 并施加约束条件; (b) 定义分析类型子结构(ANTYPE 命令); (c) 设置所有节点为主自由度; (d) 定义输出何种矩阵(输出 M, C, K); (e) 进行求解并用 SELIST 命令列出 M, C, K 数据; (f) 利用 MATLAB 编写程序对所提取的 M, C, K 进行重新排列, 得到最终的 M, C, K 。

3.2 输电塔结构半主动控制系统的建立

基于新型压电摩擦阻尼器的结构半主动控制是利用输电塔结构随地震动输入所产生的往复相对变形或相对速度^[7], 通过压电摩擦阻尼器追寻主动最优控制力, 并通过控制算法主动调节阻尼力大小, 使阻尼力对主动最优控制力进行实时追踪, 以达到与主动控制接近的控制效果, 半主动控制流程如图 3 所示。输电塔结构的半主动控制算法包括两方面内容: (a) 结构主动最优控制力的确定, 其为目标信号, 即半主动控制策略所需追踪的命令信号。 (b) 适当的半主动控制策略对目标信号的有效追踪, 由主动最优控制力与阻尼器性能共同决定。因此首先需要设计主动最优控制策略, 笔者选择 LQR 线性二次型经典最优控制策略对其进行设计, 最后按照最优 Bang-Bang 半主动控制策略确定压电摩擦阻尼器工作时的阻尼系数和阻尼力, 并将阻尼力作为下一步结构反应分析的控制力。

3.2.1 LQR 线性二次型经典最优控制策略

对于受控结构, 定常系统的状态方程^[8](式(4)) 定义的控制系统二次性能泛函为

$$J = \frac{1}{2} \int_{t_0}^{\infty} (Z^T Q Z + U^T R U) dt \tag{5}$$

式中 Q, R 为权矩阵, 其中 Q 为半正定矩阵, R 为正定矩阵。

系统状态控制的主要任务是当系统由于外部能量输入而偏离初始零状态时对系统施加控制力, 使系统重新趋近于零状态。在此过程中应尽量少消耗能量, 即使式(5) 所定义的性能泛函取最小值。故此, 最优控制问题转换的数学描述为

$$\begin{cases} \text{find} & U(t) \ t_0 \leq t < \infty \\ \min & J \\ \text{s. t.} & \dot{Z}(t) = A Z(t) + B U(t) \ Z(t_0) = Z_0 \end{cases} \tag{6}$$

求解式(6) 可得最优反馈增益:

$$U(t) = - G Z(t) \tag{7}$$

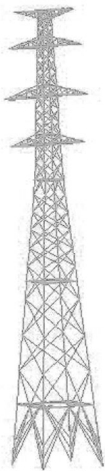


图2 输电塔结构有限元模型
Fig. 2 Finite element model of transmission tower

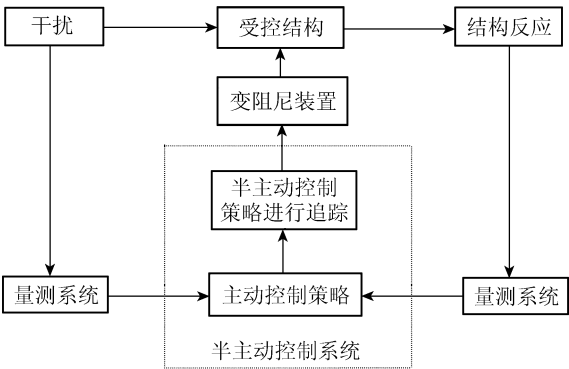


图3 结构半主动控制流程
Fig. 3 Flow graph of semi-active control

其中 $G = R^{-1}B^TP$

式中 P 为 Riccati 方程 $\dot{P}(t)+P(t)A+A^TP(t)-P(t)BR^{-1}B^TP(t)+Q=0$ 的解。

3.2.2 最优 Bang-Bang 半主动控制策略

本文所提出的压电摩擦阻尼器为一种半主动控制装置,其阻尼力可调范围大,但仍不能像主动控制装置那样可根据所计算的最优控制力主动调节阻尼器出力。因此,半主动控制装置仍需被动地依赖于结构层(或控制杆件)振动时的相对运动,即当主动控制力与阻尼器所在杆件相对位移方向相反时,需由半主动控制系统进行决算,使阻尼器提供最大阻尼力。当所计算主动控制力与杆件相对位移方向相同时,由半主动控制系统调节该阻尼器使其提供最小阻尼力。因此,压电摩擦阻尼器半主动控制装置仅能施加阻止结构发生相对运动的力,而无法对结构主动施加推动或阻止结构运动的力。

最优 Bang-Bang 半主动控制算法^[9]可表示如下:

$$C_d(t) = \begin{cases} C_{d\max} & u\dot{x} < 0 \\ C_{d\min} & u\dot{x} \geq 0 \end{cases} \tag{8}$$

式中: C_d ——阻尼系数; $C_{d\max}, C_{d\min}$ ——阻尼器所能提供的最大、最小阻尼系数; u ——压电摩擦阻尼器半主动控制装置与结构发生相对运动时主动控制系统部分计算出的主动控制力。

式(8)表述的半主动控制算法实质上为一类开关控制系统(Passive-off 和 Passive-on 控制),即对所计算出的结构状态进行判定后进行选择 Passive-off 或 Passive-on。当压电摩擦阻尼器所在杆件相对速度与 LQR 主动控制系统所计算的主动控制力方向相反时,阻尼器立刻对结构施加最大阻尼力;当二者方向相同时,该阻尼器提供最小阻尼力。

3.2.3 半主动控制系统的建立

根据由输电铁塔有限元模型所提取的 M, K, C , 按照 LQR 主动控制系统对结构进行动力反应分析, 计算结构主动最优控制力及相关结构振动状态, 然后按照 Bang-Bang 半主动控制策略对该状态下的阻尼系数和阻尼力进行选择, 最后将阻尼力作为控制力代入下一步结构分析中。利用 MATLAB 中 SIMULINK 仿真工具箱^[10]对结构半主动控制系统进行编制, 其仿真系统如图 4 所示。

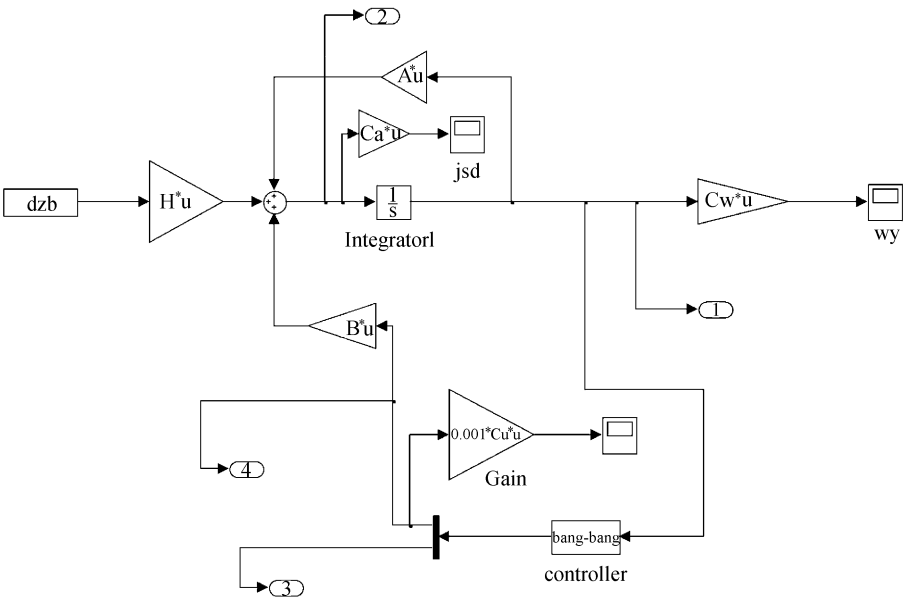


图 4 半主动控制仿真系统

Fig. 4 Semi-active control simulation system

4 输电铁塔结构的半主动控制分析

高压输电塔的过大变形会引起导地线较大摆动,导致导地线间相互触碰,引起放电,更严重的还会引起结构较大 $P-\Delta$ 效应。JGJ 135—1990《高耸结构设计规程》^[11] 规定在风荷载(标准值)作用下,高耸结构任意

点的水平位移不得大于该点离地高度的 1/100。《110~750 kV 架空输电线路设计规范》(报批稿)规定在长期荷载工况下自立式高压输电塔结构任意点的水平位移不得大于该点离地高度的 3/1 000。本文仅考虑地震作用,通过减小最大位移限值来考虑其他荷载因素的影响,取半主动控制下的高压输电塔最大计算位移不得超过该点离地高度的 3/1 000^[12](本文高压输电塔全高为 38.2 m,即取最大位移限值为 0.1 m)。

根据高压输电塔的结构特点可知,在地震作用下结构顶点的计算位移最大。因此在比较不同数量阻尼器的控制效果时,选取结构顶点处的第 1 节点在不同数量压电摩擦阻尼器半主动控制系统下的 EL-Centro 地震 x 方向输入作用下,分析其未控和受控 2 种情况下的最大位移以及控制效果,其中压电摩擦阻尼器布置位置由 MATLAB 中所提供遗传算法及文献[13]中的方法确定,具体位置见表 1。图 5 为布置不同数量压电摩擦阻尼器时第 1 节点 x 方向的位移时程对比曲线。

表 1 不同数量压电摩擦阻尼器优化后位置

阻尼器数量/个	压电摩擦阻尼器优化后布置位置
40	9,13,19,25,47,51,53,63,77,86,88,93,95,126,135,152,159,177,193,198,201,205,207,215,225,227,243,273,274,283,296,297,310,312,331,337,339,342,344,346
60	2,6,13,15,18,24,30,31,35,36,39,41,42,45,46,54,56,66,73,74,78,82,87,88,92,97,109,117,133,138,139,145,146,156,169,161,163,203,210,211,214,216,218,223,227,231,233,246,247,249,255,257,281,283,307,308,323,325,332,334,335
80	5,6,7,8,9,13,20,22,23,28,30,37,38,42,46,51,63,67,74,76,77,78,82,90,92,95,98,101,105,108,112,118,120,126,135,137,138,149,151,153,157,162,165,168,170,171,176,179,181,182,183,186,188,189,202,203,215,225,228,238,241,243,246,251,256,266,285,288,290,293,297,300,302,319,320,321,326,339,344,348
100	18,20,24,30,36,37,39,42,45,53,62,63,66,69,70,71,74,76,79,80,83,84,88,91,92,93,95,98,100,105,107,108,111,115,116,117,122,124,128,131,142,146,148,150,151,154,161,162,167,170,171,173,174,177,178,179,180,182,183,184,185,187,190,192,198,200,202,206,207,211,221,229,235,238,252,253,254,259,270,271,277,280,285,286,298,299,300,302,305,311,313,318,321,323,325,334,335,337,338,343

注:布置位置列出的数字代表布置阻尼器所在杆件编号。

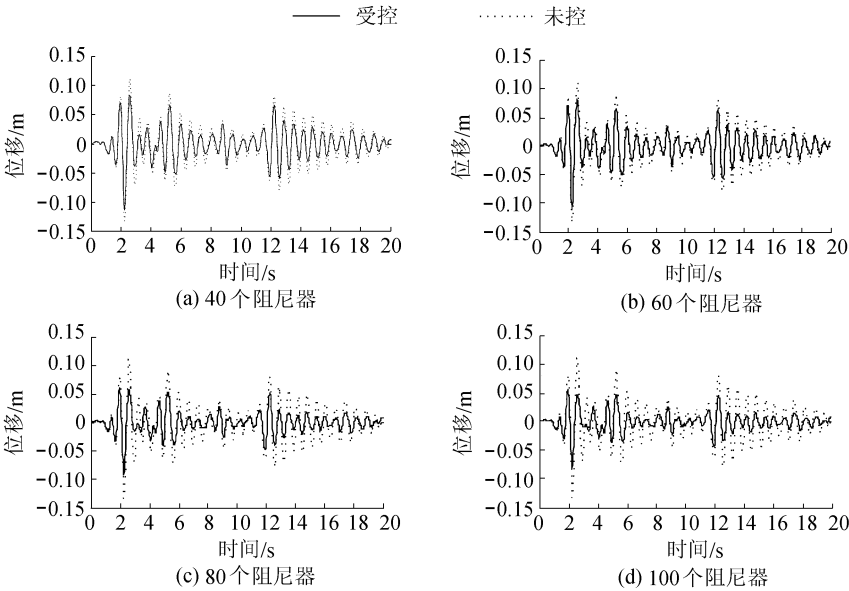


图 5 布置不同数量压电阻尼器时第 1 节点 x 方向的位移时程对比曲线

Fig. 5 1 Displacement-time curves with different amounts of piezoelectric friction dampers at first node in x -direction

引入控制效果系数 β :

$$\beta = \frac{\max |Y_i^{\text{未}}| - \max |Y_i^{\text{有}}|}{\max |Y_i^{\text{未}}|} \tag{9}$$

式中: $\max |Y_i^{\text{未}}|$ ——无控时结构第 i 个自由度的最大位移响应; $\max |Y_i^{\text{有}}|$ ——有控时结构第 i 个自由度的最大位移响应。

由式(9)可知,当半主动控制使结构完全不发生振动时, $\beta=100\%$;当半主动控制不能抑制振动响应时,

则 $\beta=0$ 。

通过布置不同数量的压电摩擦阻尼器,采用本文所设计的半主动控制系统,由图 5 可知结构中第 1 节点均具有明显的控制效果,且随着压电摩擦阻尼器数量的增加,控制系统对第 1 节点的控制效果越好。

5 结 语

针对高压输电铁塔的振动控制,以压电陶瓷管状驱动器作为核心元件,开发了一种新型压电摩擦阻尼器。利用 ANSYS 软件建立了输电塔的有限元模型,并提取了结构整体刚度矩阵等;利用 MATLAB 软件编制了较有效的半主动控制系统,最后对华北电网公司 110 kV 典型设计杆塔进行有效的半主动控制仿真分析。得出结论如下:

- a. 新型压电摩擦阻尼器的耗能机制明确、构造简单可靠,能够有效地削弱传统主动、半主动控制中阻尼器的“迟滞”现象。
- b. 利用 ANSYS 软件建立了输电塔的有限元模型,并采用超单元法与 MATLAB 软件相结合的方法有效地对高压输电塔的 M,K,C 进行了提取,为半主动控制系统的建立奠定基础。
- c. 利用 MATLAB 编制了 LQR 最优控制策略及最优 Bang-Bang 半主动控制策略,并利用 SIMULINK 仿真工具箱结合上述 2 种控制策略,编制了半主动控制仿真系统。该控制系统能够有效地对该高压输电塔进行控制,随着阻尼器布置数量的增加,控制效果逐渐增加且平均控制效果达 25%。

参考文献:

[1] 郭惠勇,李正良.大跨越高压输电塔线体系风致振动的研究与进展[J].河海大学学报:自然科学版,2008,36(1):106-111. (GUO Huiyong, LI Zhengliang. Advances in research of wind-induced vibration of long-span high-voltage transmission line system[J]. Journal of Hohai University:Natural Sciences, 2008,36(1):106-111. (in Chinese))

[2] 邓洪洲,朱松哗,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 Hongzhou, ZHU Songye, 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. (in Chinese))

[3] 李黎,夏正春,张行,等.FPS 型 MTMD 在输电塔减震中的应用[J].华中科技大学学报:城市科学版,2007,24(3):4-7. (LI Li, XIA Zhengchun, ZHANG Hang, et al. Seismic performance of FPS-MTMD for transmission tower-line systems[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology:Urban Science Edition,2007,24(3):4-7. (in Chinese))

[4] 江宜城,钟寅亥,樊剑,等.黏弹性阻尼器控制下大跨越输电塔风振响应分析[J].钢结构,2003,18(4):34-36. (JIANG Yicheng, ZHONG Yin Hai, FAN Jian, et al. Wind vibration responses analyses for electrical transmission tower with viscoelastic dampers under wind load[J]. Steel Construction,2003,18(4):34-36. (in Chinese))

[5] 李东旭.大型挠性结构分散化振动控制理论与方法[M].长沙:国防科技大学出版社,2002.

[6] 李宏男.高压输电塔抗震分析与设计[M].北京:中国电力出版社,2009.

[7] TASKOV L, BOJADZIEV M, STEFANOVSKI M. Experiment studies for development and application of dampers for vibration damping at power transmission structures[C]//8th European Conference on Earthquake Engineering. Paris:Yugoslav Association for Earthquake Engineering,1986,8(5):25-32.

[8] 顾仲权,马扣根,陈卫东.振动主动控制[M].北京:国防工业出版社,1997.

[9] 欧进萍.结构振动控制:主动、半主动与智能控制[M].北京:科学出版社,2003.

[10] 徐赵东,郭迎庆.MATLAB 语言在建筑抗震工程中的应用[M].北京:科学出版社,2004.

[11] JGJ 135—1990 高耸结构设计规程[S].

[12] QU W L, CHEN Z H, XU Y L. Dynamic analysis of wind-excited truss tower with friction dampers[J]. Couput and Struc,2001,79:2817-2831.

[13] 樊禹江,王社良,代建波.基于大跨空间网架结构主动控制的新型超磁致伸缩材料作动器优化配置研究[J].空间结构,2012,18(3):14-20. (FAN Yujiang, WANG Sheliang, DAI Jianbo. Optimization study of new GMM actuator for active control in long span spatial truss structures[J]. Spatial Structures, 2012,18(3):14-20. (in Chinese))

表 2 不同数量压电摩擦阻尼器的控制效果对比

Table 2 Comparison of control effect with different amounts of piezoelectric friction dampers

压电阻尼器 数量/个	结构顶点最大位移/m		$\beta/\%$
	未控	有控	
40	0.13	0.11	15.4
60	0.13	0.11	15.4
80	0.13	0.09	30.8
100	0.13	0.08	38.5