

基于SMA阻尼器的输电塔风振控制

张春蕊, 张发

山东电力工程咨询院有限公司, 济南 250013

摘要 根据SMA阻尼器的工作原理和输电塔的振动特性, 提出应用SMA阻尼器对输电塔风致振动进行控制。应用有限元软件建立输电塔和阻尼器的有限元模型, 基于Matlab软件, 采用线性自回归滤波器法模拟随机脉动风荷载的时程样本; 应用能量法计算所需阻尼器数量, 根据阻尼器的工作原理和输电塔结构特点设计不同的阻尼器布置方案; 对不同方案进行结构风致振动瞬态响应仿真, 提取各方案控制点位移和加速度时间历程进行比较分析。模拟了多种风荷载, 进一步对各方案的控制效果进行了对比分析。结果表明: SMA阻尼器对输电塔风振控制效果较好; 将阻尼器布置在塔头上, 可有效控制塔顶位移, 减振率在28%以上; 在塔身上布置阻尼器, 可有效控制塔顶加速度, 减振率在66%以上。通过综合比较, 选出了阻尼器的最佳布置方案。

关键词 SMA阻尼器; 振动控制; 风振响应; 有限元法

中图分类号 TM8, TM75

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2015.07.012

Wind-induced vibration control for power transmission tower based on SMA damper

ZHANG Chunrui, ZHANG Fa

Shandong Electric Power Engineering Consulting Institute Co., Ltd., Jinan 250013, China

Abstract To reduce wind-induced vibration of power transmission tower, several wind-induced vibration reduction schemes with different SAM damper layouts are designed and compared. Firstly, the finite element models of dump-type transmission tower and SMA damper are built with ANSYS software, the wind load is simulated with Matlab software, and the time history samples of random fluctuating wind load are obtained using the linear auto-regressive filter law. Then, six layouts are proposed based on the working principle of damper and the structure of the tower. Finally, wind-induced vibration transient response simulation is performed for each different scheme. The responses of SMA dampers on the displacement and the acceleration of the controlled nodes are compared with each other. The results indicate that the SMA damper can suppress wind-induced vibration, and that different layouts have different control effects. Installing dampers at the tower head can reduce the top node displacement by more than 28% while installing dampers on the tower can reduce the top node acceleration by more than 66%. Through comparison and analysis, the optimal scheme is obtained.

Keywords SMA damper; vibrating control; wind-induced response; finite element method

结构振动控制, 根据是否需要外部能量一般分为被动控制、主动控制及半主动控制^[1]。主动控制器一般由传感器、控制器、作动器3部分组成。控制的实施全部依靠外界能量的输入。半主动控制的原理和主动控制的原理基本相同, 只是作动器只需输入少量能量就可以实施控制。被动控制不需要外部的能量, 系统的控制力是依赖于结构的运动产生。在结构振动控制的研究中, 美国和日本处于领先地位, 尤其是

日本作为多强风多地震国家, 在结构振动控制方面做了很多研究, 有较多实际工程应用。结构振动控制理论在输电线路中的研究起步较晚, 仍处于初期发展阶段, 控制方式以被动控制为主。输电塔风致振动的被动控制即为: 在输电塔的特定位点装设耗能减振装置来吸收和耗散振动能量, 以降低输电塔在风荷载作用下的动力响应, 提高结构的可靠度, 从而确保其正常工作状态^[2,3]。其控制力是由于耗能减振装置自

收稿日期: 2014-07-20; 修回日期: 2014-11-25

作者简介: 张春蕊, 助理工程师, 研究方向为线路结构, 电子邮箱: lengyueun@126.com

引用格式: 张春蕊, 张发. 基于SMA阻尼器的输电塔风振控制[J]. 科技导报, 2015, 33(7): 74-78.

身跟随结构一起振动变形而被动产生的,因此,被动控制可以看作是通过增加结构阻尼对结构实施振动控制的方法。

输电塔被动控制有两种方式:一种是通过附加耗能装置的塑性变形,在塔架结构发生塑性变形前耗能装置材料先发生屈服,以耗散大部分风荷载传递给结构的能量。Battista等^[4]提出了一种非线性摆锤吸振器的设计方法,主要控制输电塔的一阶模态振动。当NLPD的自振频率与结构顺风向一阶频率接近时,对一阶模态振动的控制效果达到90%。郭勇等^[5]以舟山大跨越输电塔为工程背景,选取黏弹性阻尼器为被动耗能装置来进行塔线体系的风振控制。另一种是通过振动^[6]利用悬吊式调谐质量阻尼器对某双钢管圆锥塔结构的顺风向脉动风振响应控制。杨靖波等^[7]以1000 kV淮南—上海输电工程同塔双回路钢管塔为研究对象,提出了应用黏弹性阻尼器控制弯曲振动、调谐质量阻尼器控制扭转振动的控制策略。

在输电塔被动控制中,耗能减振装置通常称为阻尼器,常用的阻尼器有调谐质量阻尼器、黏弹性阻尼器、金属阻尼器、橡胶铅芯阻尼器、摩擦阻尼器等。虽然这些阻尼器的减振效果明显,但也存在黏弹性阻尼器易老化,金属屈服阻尼器产生塑性屈服后变形很难恢复,摩擦型阻尼器在长期应用下可靠性较差等缺点。

输电塔被动控制的研究有2个层面,即设计或选用合适的耗能减振装置及耗能减振装置在输电塔上的合理布置^[8]。

1 SMA 阻尼器

新型智能材料形状记忆合金(shape memory alloy, SMA)具有形状记忆性、超弹性、高阻尼性和电阻性。形状记忆合金丝的本构关系^[9]如图1所示,其应力-应变曲线形成一个完整的滞回环,且卸载后残余应变为零,图1中A点之前的变形由奥氏体相的弹性变形引起;A点之后,应力达到一定的极限值,应力将诱发奥氏体向马氏体转变,相变过程中合金的弹性模量将出现很大的降低,类似于发生屈服,当变形到B点时几乎变成完全马氏体相,此时的应力-应变曲线出现了应力平台(对应曲线的AB段);当奥氏体相完全转变为马氏体相时,继续加载,合金的应力-应变曲线又将呈现线弹性(对应曲线的BC段),该现象称为应变硬化;由于马氏体相只有在应力作用下才可保持稳定的状态,因此卸载时,首先弹性恢复到D点,然后通过马氏体逆相变恢复到E点,最后通过母相(奥氏体相)的弹性卸载恢复为零。

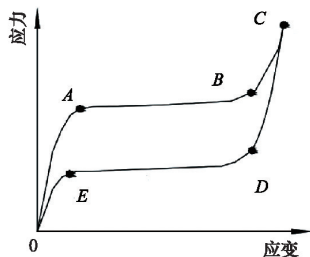


图1 形状记忆合金丝的本构关系

Fig. 1 Stress-strain curve of SMA wire

滞回环包围的面积为合金丝在加、卸载过程中可吸收和耗散的能量。利用SMA的超弹性及高阻尼性制成的被动耗能阻尼器,可以克服其他阻尼器面临的老化、可靠性、维护及残余变形等问题,且目前已有将SMA阻尼器应用于框架结构、桥梁、电视塔振动控制,其减振效果明显^[10]。

本文选用筒式自复位SMA阻尼器^[11]。SMA阻尼器通过SMA丝往复的拉伸和恢复消耗能量,实现对结构减振目的(图2)。SMA阻尼器等效刚度为 $K=3.8 \times 10^5 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$,等效阻尼为 $C=8.6 \times 10^5 \text{ N} \cdot \text{S} \cdot \text{m}^{-1}$ 。

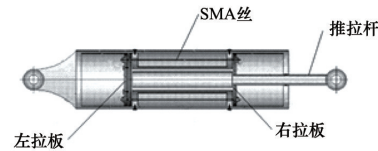


图2 SMA阻尼器示意

Fig. 2 SMA damper schematic

2 有限元模型

2.1 输电塔有限元模型

输电塔为GuZ2型双回路直线塔,主材采用Q345钢,受力构件为Q235钢。呼称高27 m,总高43 m。线路地形为B类地形,设计风速25 m/s。输电塔有限元模型采用梁杆混合单元,梁单元选Beam189,杆单元选用Link8。横线向(x方向),顺线向(y方向),竖向(z方向),杆塔用989个节点,1114个单元模拟,塔底四角固结。输电塔有限元模型如图3所示。



图3 输电塔有限元模型

Fig. 3 Finite element model of drum-type power transmission tower

2.2 阻尼器有限元模型

SMA阻尼器是位移型阻尼器,可以提供一定刚度,可以用弹簧-阻尼器(spring-damper)单元COMBINE 14模拟。单元通过2个节点、刚度(力/长度)和阻尼系数(力×时间/长度)进行描述。COMBINE 14单元示意如图4所示。

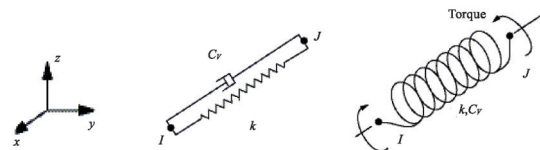


图4 COMBINE 14计算模型

Fig. 4 Computational model of COMBINE 14

3 风荷载数值模拟

输电塔风振响应分析时将模拟风荷载作为激励。将输电塔划分为9个区域(图5)。

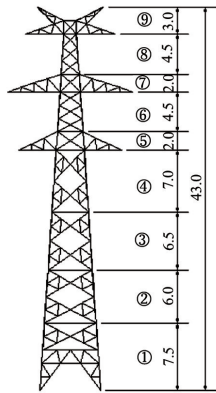


图5 输电塔分段示意(单位:m)

Fig. 5 Schematic diagram sections of drum-type power transmission tower (unit: m)

采用线性滤波法中的自回归模型,选用沿高度变化的Kaimal风速谱,输电塔10 m高度处的最大风速为25 m/s,模拟时间步长0.1 s,共5000步,总时长500 s,通过Matlab运行可以得到铁塔沿高度方向9个高程点的脉动风速,将其转换为风压施加在铁塔的相应位置。第9段代表点的风速时程曲线如图6所示,风速模拟谱和目标谱的对比如图7所示。

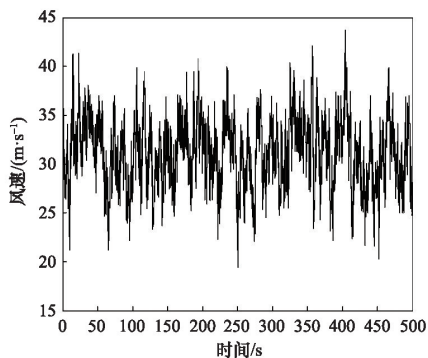


图6 第9段风速时程曲线

Fig. 6 Time history curve of wind speed on the ninth section

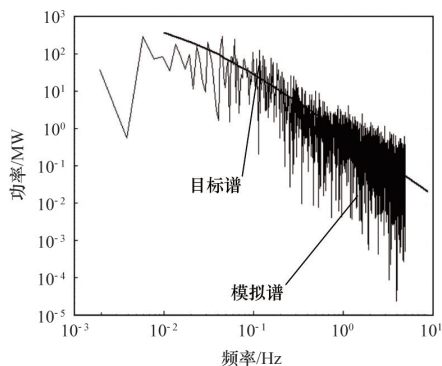


图7 第9段代表点模拟谱和目标谱比较

Fig. 7 Comparison of simulated wind speed spectrum and target wind speed spectrum on the ninth section

通过图7可以看出,模拟的脉动风速谱与目标谱符合得很好,证明这种方法模拟脉动风速可行,可以为后续的时程分析提供风速依据。

4 阻尼器布置方案及加载分析

4.1 阻尼器布置方案

对于位移型阻尼器来说,安装在结构不同的位置控制效果不同,安装在结构变形越大的地方阻尼器的控制效果越好,所以,合理的设计阻尼器的布置方案不仅可以使控制效果最好,还可以节省工程造价。布置方案的设计包括阻尼器数量的确定及安装位置的确定。

4.1.1 阻尼器数量的计算

阻尼器的数量与风荷载输入结构的总能量及阻尼器的耗能能力有关,在阻尼器型号确定的情况下,可用能量法^[2]计算所需的数量。阻尼器数量 n 的计算式为

$$n = \frac{E_{in}}{\psi m E_{di}} \quad (3)$$

式中, E_{in} 为风振时输入结构的总能量,可根据风振能量反应谱确定; E_{di} 为单个阻尼器循环一周所耗散的能量; m 为阻尼器滞回循环数,一般是200~600次,为保证安全,取 $m=50$; ψ 为多台阻尼器同时工作系数,一般为0.4~0.6,本文中取0.5。经计算所需阻尼器数量为 $n=12$ 。

4.1.2 阻尼器位置的设计

根据位移型阻尼器的工作原理,应布置在结构相对位移较大的位置,设计以下6种方案,方案0为无阻尼器。方案1塔顶边缘杆件加阻尼器,方案2塔头横担间加阻尼器,方案3在塔头层间加阻尼器,方案4塔身层间加阻尼器,方案5塔头和塔身层间加阻尼器,方案6层间菱形空间加阻尼器(图8)。

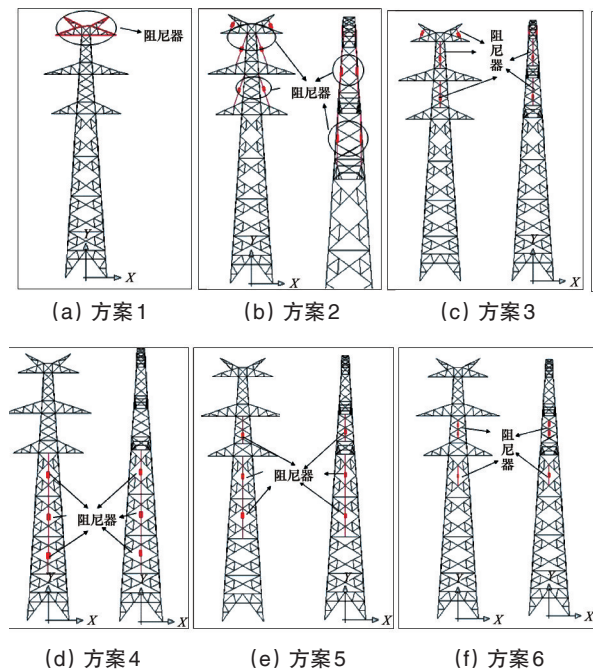


图8 布置方案示意

Fig. 8 Installation schemes for SMA damper

4.2 加载分析

对输电塔施加风向角为90°的横线向风荷载,加载点在迎风面和背风面均匀布置,共72个加载点。阻尼器的控制效果通过减振率进行评价。选取塔顶节点为控制点。

4.2.1 输电塔在动风作用下时程分析

对输电塔施加动风荷载,进行动力时程分析,塔顶节点

的位移、加速度时程曲线对比如图9、图10所示。

由图9、图10可以得出,SMA阻尼器对输电塔塔顶位移和加速度控制效果明显,方案2对塔顶位移控制效果最好,方案4对塔顶加速度控制效果最好。方案1和方案6效果最差。

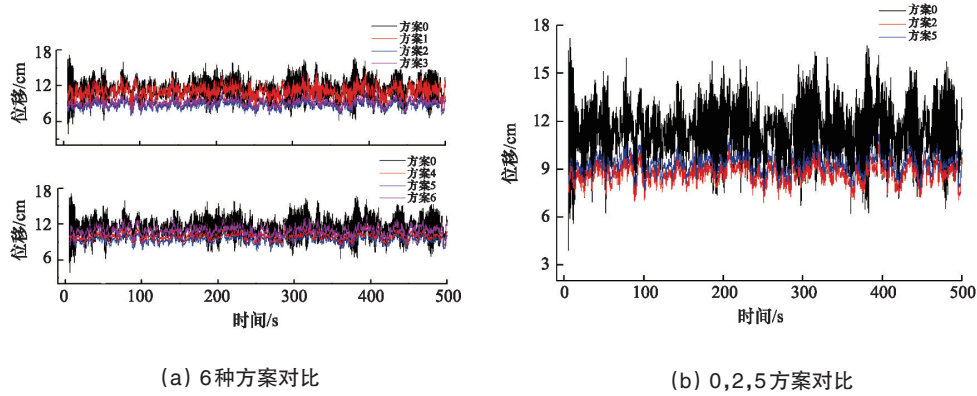


图9 塔顶x方向位移时程对比(载荷作用方向)

Fig. 9 x-displacement comparison of the node on tower top

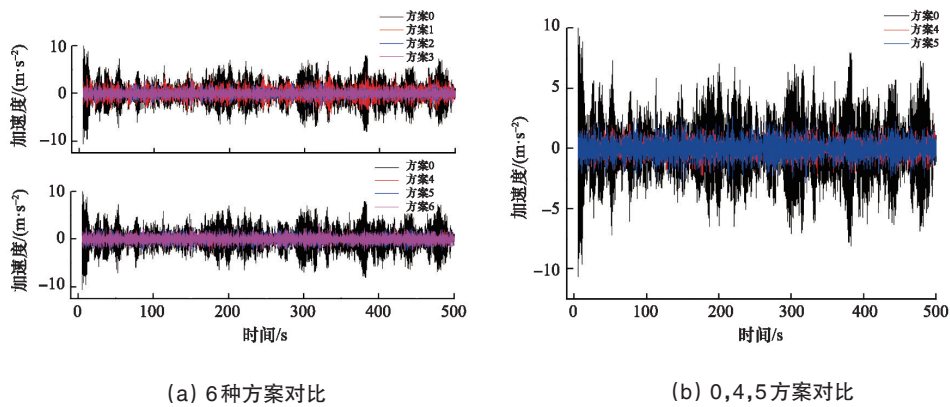


图10 塔顶x方向加速度时程对比

Fig. 10 x-acceleration comparison of the node on tower top

4.2.2 输电塔塔顶动力响应

提取塔顶节点位移、加速度最大值及减振率,沿塔高节点位移减振率均值数据绘制见表1。可以得出,方案1和方案6控制效果较差,说明在杆件上并联以及在相对位移小的位置安装阻尼器减振效果差,进一步证明了阻尼器应布置在相对位移较大的位置,减振效果较好。方案2对塔顶位移的减振率最大为37.89%,方案5次之为34.77%,方案4对塔顶加速度减振率最大为75.37%,方案5次之为73.05%。方案5对于沿塔高位移控制效果最好,沿塔高位移减振率均值为33.5%。

综上所述,方案2为位移控制最优方案,方案4为加速度控制最优方案,方案5为沿塔高位移控制最优方案。

表1 风速为25 m/s时塔顶节点风振控制效果

Table 1 Wind-induced vibration control effects of top of tower when wind speed is 25 m/s

方案	塔顶位移		塔顶加速度		沿塔高位移 减振率 均值/%
	最大 值/cm	减振 率/%	最大值/ (m·s ⁻²)	减振 率/%	
0	17.19	—	10.03	—	—
1	14.55	15.34	4.52	54.96	13.1
2	10.68	37.89	3.12	68.87	31.6
3	11.33	34.12	3.10	69.09	28.5
4	11.91	30.70	2.47	75.37	30.7
5	11.21	34.77	2.70	73.05	33.5
6	13.62	20.74	3.39	66.20	19.4

4.3 施加不同风荷载

进一步对风速为20、28、30 m/s时的3种方案,即方案2、方案4、方案5进行比较,结果见表2。

分析表2可知:1)不同风荷载作用下,SMA阻尼器都有较好控制效果,3种控制方案对塔顶位移的减振率都在28%以上。塔顶加速度减振率都在66%以上;2)20 m/s风速时,塔顶位移减振率小于25 m/s风速时。由于本文阻尼器数量是根据基本风速为25 m/s时确定的,风速较低时,输电塔变形较小,未发挥全部阻尼器的最大耗能功能,说明针对不同风速,计算所需阻尼器数量,可以提高阻尼器的振动控制效率,避免浪费;3)在塔头安装阻尼器,阻尼器对减少塔顶位移效果最明显;在塔身安装阻尼器,对塔顶加速度控制效果最明显;在塔头和塔身层间安装阻尼器,可以有效控制塔顶位移和加速度,且对沿塔高位移减振率控制效果最明显。

表2 3种风速3种阻尼器安装方案风振控制效果

Table 2 Wind-induced vibration control effects of three damper installation schemes under different wind speeds

风速/ (m·s ⁻¹)	阻尼器 布置 方案	塔顶位移 减震率/%	塔顶加速 度减振 率/%	沿塔高节点位 移减振率 均值/%
20	2	35.43	72.22	29.14
	4	28.26	73.26	28.19
	5	32.31	70.60	31.02
28	2	38.19	68.28	31.90
	4	33.44	69.27	33.12
	5	36.98	66.28	35.42
30	2	37.02	68.32	31.31
	4	30.76	69.25	31.24
	5	34.57	66.28	33.83

5 结论

1) SMA阻尼器对输电塔风振控制效果明显,不同的布置方案效果不同,设计风速25 m/s时,塔顶位移、加速度的最大减振率分别为37.89%、75.37%。

2)对6种布置方案,方案2塔顶位移控制效果最好,方案4塔顶加速度控制效果最好,方案5沿塔高位移控制效果最好,考虑安装操作方便以及综合减振效果,选取方案5(塔头和塔身层间)为最优布置方案,其塔顶位移减震率34.77%,加速度减振率73.05%。

3)方案1和6与方案5相比,减振效果不明显,说明在杆件上并联安装阻尼器,减振效果差,进一步证明了阻尼器应布置在相对位移较大的位置,减振效果较好。

4)不同风荷载作用下,SMA阻尼器都有较好的控制效果,根据不同风荷载,确定阻尼器数量,可以充分利用阻尼器耗能能力,发挥最大控制功能。

参考文献 (References)

- [1] Housner G W, Bergman L A, Caughey T K. Structural control: Past, present, and future[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1997, 123(9): 897-958.
- [2] Albert Richardson S. Performance requirements for vibration dampers [J]. Electric Power System Research, 1996, 36: 21-28.
- [3] 陈晓明, 邓洪洲, 王肇民. 大跨越输电线路舞动稳定性的研究[J]. 工程力学, 2004, 21(1): 56-62.
Chen Xiaoming, Deng Hongzhou, Wang Zhaomin. Conductor galloping stability analysis of long-span transmission system[J]. Engineering Mechanics, 2004, 21(1): 56-62.
- [4] Battista R C, Rodrigues R S, Pfeil M S. Dynamic behavior and stability of transmission line towers under wind forces[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2003, 91(8): 1051-1067.
- [5] 郭勇, 孙炳楠, 叶尹, 等. 大跨越输电塔线体系风振响应频域分析及风振控制[J]. 空气动力学报, 2009, 27(3): 288-295.
Guo Yong, Sun Bingnan, Ye Yi, et al. Frequency-domain analysis on wind-induced dynamic response and vibration control of long span transmission line system[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2009, 27(3): 288-295.
- [6] 鄢圣超, 闫维明, 何浩祥, 等. 双钢管塔顺风向风振反应的TMD控制研究[J]. 工程结构, 2006, 26(2): 109-113.
Yan Shengchao, Yan Weiming, He Haoxiang, et al. Research on TMD control of double steel pipe tower of along wind responses[J]. Engineering Structure, 2006, 26(2): 109-113.
- [7] 杨靖波, 韩军科, 华旭刚, 等. 1000 kV 淮南—上海输电工程同塔双回路钢管塔风振控制[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(7): 104-105.
Yang Jingbo, Han Junke, Hua Xugang, et al. Wind-induced vibration suppression of tubular towers for 1000 kV double-circuit transmission lines on the same tower from Huainan to Shanghai[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(7): 104-105.
- [8] 李爱群, 高振世. 工程结构抗震与防灾[M]. 南京: 东南大学出版社, 2003.
Li Aiqun, Gao Zhenshi. Seismic and disaster prevention of engineering structure[M]. Nanjing: Southeast University Press, 2003.
- [9] 吴昉洋. 形状记忆合金的力学性能与本构模型研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2012.
Wu Junze. Study on mechanical properties and constitutive model of shape memory alloy[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2012.
- [10] 杨慧, 陈国平, 罗晓惠, 等. 基于形状记忆合金阻尼器的混凝土框架结构减振分析[J]. 四川建筑科学研究, 2010, 36(4): 158-161.
Yang Hui, Chen Guoping, Luo Xiaohui, et al. Dissipation of frame construction with shape memory alloy[J]. Sichuan Building Science, 2010, 36(4): 158-161.
- [11] 李宏男, 钱辉, 宋刚兵, 等. 一种新型SMA阻尼器的试验和数值模拟研究[J]. 振动工程学报, 2008, 21(2): 179-184.
Li Hongnan, Qian Hui, Song Gangbing, et al. A type of shape memory alloy damper: Design, experiment and numerical simulation[J]. Journal of Vibration Engineering, 2008, 21(2): 179-184.
- [12] 周云, 陈小兵, 汪大洋. 基于能量的结构风振控制设计方法研究[J]. 振动与冲击, 2012, 31(8): 24-28.
Zhou Yun, Chen Xiaobing, Wang Dayang. Energy-based design method for wind-induced vibration control[J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(8): 24-28.

(责任编辑 赵业玲)