

地震作用下高压输电塔-线体系 纵向减震控制分析

田利,荣坤杰

(山东大学土建与水利学院,山东 济南 250061)

摘要 目的 研究地震作用下高压输电塔-线耦合体系纵向减震控制.方法 运用有限元分析软件 ABAQUS 建立高压输电塔-线耦合体系的精细化模型.利用非线性时程方法分析地震作用下碰撞摆(Pounding Tuned Mass Damper)对输电塔-线体系的减震控制,并与悬挂质量摆(Suspension Mass Pendulum)的减震效果进行对比分析.结果 以 Kobe 地震作用为例,悬挂质量摆控制下输电塔-线体系塔顶位移、加速度和主材轴力峰值减振率分别为 29%、23% 和 26%,碰撞摆控制下的峰值减振率分别为 41%、29% 和 38%,可以看出,碰撞摆的减振效果明显优于悬挂质量摆.结论 悬挂质量摆能够有效地抑制结构的不良振动,而碰撞摆的震动控制能力明显强于悬挂质量摆.

关键词 输电塔-线体系;减震控制;悬挂质量摆;碰撞摆

中图分类号 TU352.1 文献标志码 A

Longitudinal Vibration Control Analysis of Power Transmission Tower-Line System under Seismic Excitation

TIAN Li, RONG Kunjie

(School of Civil Engineering, Shandong University, Ji'nan, China, 250061)

Abstract: In this paper, the longitudinal vibration control of power transmission tower-line coupling system under the seismic excitation is studied. A three-dimensional finite element model of a power transmission tower-line coupling system is established in ABAQUS. The vibration control of the transmission tower-line system using pounding tuned mass damper (PTMD) under the seismic excitation is analyzed by the nonlinear time-history method, and compared with the control effect of the suspension mass pendulum (SMP). Taking the Kobe earthquake loading as an example, the peak reduction ratios of the displacement, acceleration, and axial force of the transmission tower-line system under the control of the pendulum mass pendulum are 29%, 23%, and 26%, respectively. The peak reduction ratios under the pounding tuned mass damper are 41%, 29% and 38%, respectively.

收稿日期:2017-11-22

基金项目:国家自然科学基金项目(51578325,51208285)

作者简介:田利(1982—),男,教授,主要从事结构抗震方面研究.

tively. It can be seen that the reduction effect of the pounding tuned mass damper is obviously better than that of the suspended mass pendulum. The results show that the suspended mass pendulum can effectively suppress the harmful vibration of the transmission tower-line system, and the vibration control ability of the pounding tuned mass damper is obviously stronger than the suspended mass pendulum.

Key words: transmission tower-line system; vibration control; suspension mass pendulum; pounding tuned mass damper

高压输电塔-线体系是极其重要的生命线,在社会经济发展中占据重要席位.新材料和新技术的应用使得输电线路朝更高、更柔和更广的领域前进,因此地震等灾害对高压输电塔-线体系的安全运行产生巨大的影响.近几十年来,输电塔在地震等自然灾害下的倒塌事故频发,对社会平稳运行造成严重阻碍^[1-2].因此,开展输电塔-线体系防灾减灾研究,确保其在地震等自然灾害作用下的安全运行,提高输电线路设计水平具有重要的参考价值.

被动控制技术广泛应用的同时,半主动控制和主动控制技术也在逐渐发展,因其技术难度大、结构复杂和需要外部能源等问题没有得到彻底解决,导致发展趋势缓慢^[3-6].国内外有关研究学者对输电塔振动控制进行了一系列研究,大多数集中于输电线路风振控制方面^[7-9],研究发现采用减震控制能够有效抑制风荷载作用下输电塔结构的不良振动.目前对于输电塔-线耦联体系这种高耸结构在地震作用下的减震控制研究甚少.研究表明^[10-14],线性阻尼器存在一定的局限性,近年来,非线性阻尼器的提出使得输电线路振动控制研究领域进入一个崭新的时代.研究学者提出碰撞阻尼器,广泛用于结构的振动控制装置,文献^[15-16]认为其减震效果优于TMD,抑振带宽大于TMD,且形式简单,很多结构在减震中优选碰撞阻尼器.以上研究表明,碰撞阻尼器具有良好的减振控制效果,且悬挂质量摆更适用于输电塔这种具有空间局限性的结构,因此考虑将两者组合成新的减振装置.ZHANG P等^[17]提出了一

种新型的碰撞摆阻尼器(PTMD),并通过MATLAB软件编程实现输电塔的振动控制模拟,验证碰撞摆在地震激励下的减震效果.

基于以上研究现状,目前关于碰撞摆阻尼器的研究主要集中在单个输电塔方面,并未考虑导线的耦合作用影响,且输电塔-线耦合体系的有限元模型通过一般编程软件很难实现.考虑输电线的几何非线性,笔者利用有限元软件ABAQUS建立输电塔-线耦合体系三塔四线精细化模型,实现碰撞摆减振控制装置的数值模拟.研究地震作用下碰撞摆对高压输电塔-线耦合体系纵向减振控制,数值分析表明碰撞摆能够有效地减小结构体系的地震响应,为输电线路振动控制研究领域提供了理论基础,推进减振装置落实工程应用的进程.

1 高压输电塔-线耦合体系精细化有限元模型

选取500 kV输电线路实际工程,输电塔角钢构件弹性模量均为206 GPa,其中主材为Q345的角钢,斜材和辅材为Q235的角钢.输电模式为双回路四分裂式导线布置,输电线跨度为400 m,共分为四层,最上层两根地线,以下三层为六根四分裂导线.输电线中地线和导线的型号分别为LGJ-95/55和LGJ-400/35,其规格与性能指标见表1.利用有限元软件ABAQUS建立了输电塔-线耦联体系的精细化模型,包括三基输电塔和四跨输电线,如图1所示.利用ABAQUS软件中的B31和Truss单元分别模拟输电塔和输电线,其中绝缘子与输电线采用同一单元

进行数值模拟,输电塔各塔腿均约束其六个自由度. 基于 SAP2000 软件,对输电塔-线体系进行有限元模态分析. 根据质量参与系

数确定输电塔-线体系中以输电塔振动为主的纵向(X向)频率为 1.589 Hz,图 2 给出了输电塔-线耦合体系纵向一阶振型图.

表 1 导(地)线规格和性能指标

Table 1 Conductor(ground) wire properties and performance indices

名称	外径/mm	横截面积/mm ²	弹性模量/GPa	单位长度质量/(kg·m ⁻¹)	铝计算面积/mm ²	钢计算面积/mm ²	密度/(kg·m ⁻³)	线膨胀系数/℃ ⁻¹
导线	26.82	425.24	65	1.349	390.00	34.36	3 172.326	2.05 × 10 ⁻⁵
地线	16.00	152.81	105	0.708	96.51	56.30	4 631.241	1.55 × 10 ⁻⁵

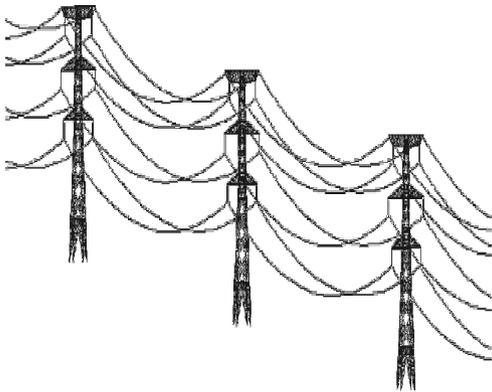


图 1 输电塔-线耦合体系三维有限元模型

Fig. 1 Three-dimensional finite element model of transmission tower-line coupled system

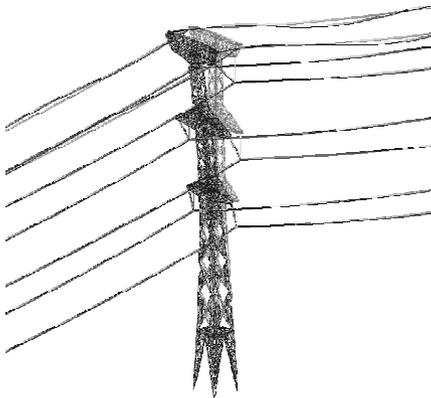


图 2 输电塔-线耦合体系振型图

Fig. 2 Vibration mode shape of transmission tower-line coupled system

2 碰撞摆的减震机理

2.1 悬挂质量摆减震机理

悬挂质量摆是一种传统的减振装置,构造简单,应用方便.当地震作用下结构本身安装有此类减振器时,整个体系产生水平方向的振动,从能量的角度来看,主结构的振动带

动摆锤的振动,即主结构的部分动能被摆锤吸收,而摆锤因吸收动能而产生的惯性力则反作用于结构本身,当两者运动相反时就产生了吸振效果,从而能够抑制结构的振动.单自由度的结构体系,考虑悬挂质量摆减振装置,减震体系如图 3 所示.

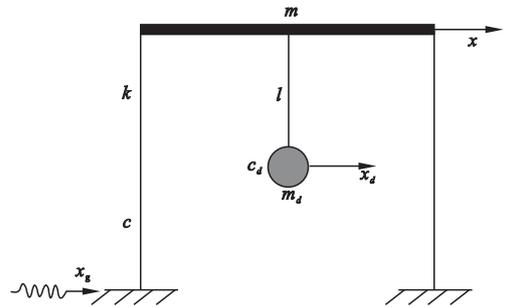


图 3 悬挂质量摆示意图

Fig. 3 Schematic of the suspending mass damper

悬挂质量摆的运动方程:

$$m_d \ddot{x}_d + c_d (\dot{x}_d - \dot{x}) + \frac{m_d g}{l} (x_d - x) = 0. \quad (1)$$

式中: x_d 为悬挂质量摆的位移; x 为结构的位移; m_d 、 c_d 、 l 分别为悬挂质量摆的质量、阻尼和摆长.

受控结构的运动方程:

$$m \ddot{x} + c \dot{x} + c (\dot{x} - \dot{x}_d) + kx + \frac{m_d g}{l} (x - x_d) = -m \ddot{x}_g(t). \quad (2)$$

式中: m 、 c 、 k 为结构的质量、阻尼和刚度; $\ddot{x}_g(t)$ 为激励的地震波.

式(1)和(2)可合写为

$$\begin{bmatrix} m_d & 0 \\ 0 & m \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_d \\ \ddot{x} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_d & -c_d \\ c_d & c_d + c \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x}_d \\ \dot{x} \end{Bmatrix} +$$

$$\begin{bmatrix} \frac{m_d g}{l} & -\frac{m_d g}{l} \\ -\frac{m_d g}{l} & k + \frac{m_d g}{l} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_d \\ x \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ -m \ddot{x}_g(t) \end{Bmatrix}. \quad (3)$$

由式(3)可得,主结构安装减震器相当于增大结构自身的阻尼和刚度,故能够在一定程度上抑制结构的不良振动。

2.2 碰撞摆减震机理

碰撞摆可以视为悬挂质量摆和碰撞阻尼器的结合,由悬挂质量摆、限位装置和连接板组成。悬挂质量摆由悬挂摆线和质量球组成,可改变悬挂摆线长短来调节摆的频率,质量球表面附属黏弹性材料以增强撞击耗能,限位装置固定在连接板上,碰撞摆经连接板与输电塔自身结构相连。

选取摆锤的质量为输电塔结构重量的2%,根据公式 $l = g/4\pi^2 f^2$ 计算摆线长度,其中 f 为输电塔结构的一阶频率。运用 ABAQUS 软件模拟碰撞摆,摆锤为薄壁空心球体,采用壳单元模拟;摆线采用 Spring 单元模拟,轴向刚度设置足够大,忽略其竖向变量;侧向弹簧提供侧向刚度 $k = m\omega^2$,其中 m 为质量球的质量, ω 结构的纵向一阶频率。限位装置为薄壁圆筒,采用 Shell 单元模拟,圆筒内侧附着黏弹性材料;碰撞摆的碰撞间隙设置为 0.05 m,接触定义为面-面接触 (Surface-to-Surface Contact),接触算法采用罚函数法 (Penalty Contact Method),这种算法对接触约束的严格性低于运动依从 (Kinematic contact method) 的运动学算法,易收敛。图 4 为碰撞摆模拟示意图。

图 5 为输电单塔结构在地震作用下无控制、悬挂质量摆和碰撞摆控制下的塔顶加速度反应谱,可以看出两种减震器均能够有效

抑制结构本身的响应,且后者的控制效果更为显著。

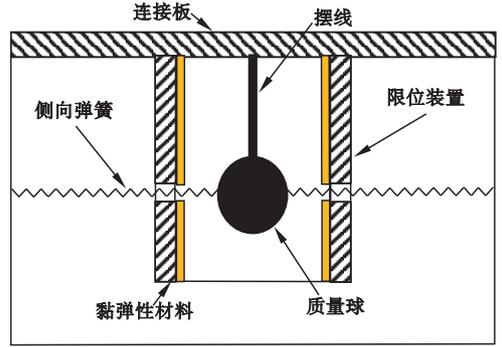


图 4 碰撞摆模拟示意图

Fig. 4 Simulated schematic of the pounding tuned mass damper

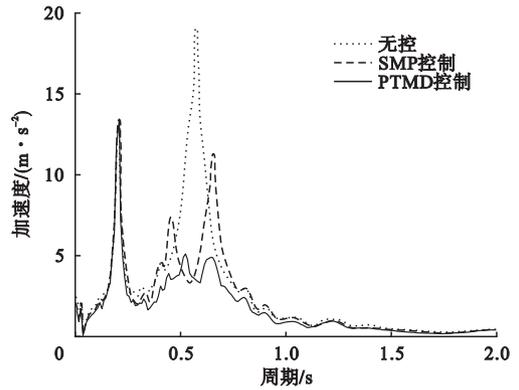


图 5 塔顶加速度反应谱

Fig. 5 Response spectra of the acceleration

3 地震波的选择

地震激励具有较强的离散性,在不同的地震激励下结构本身的动力响应差别较大。依据文献[18],选取三条典型的天然地震波,表2给出了选取的地震记录。将地震波加速度最大值按照8度罕遇烈度调幅为400 gal,水平地震波最大值分量沿着输电塔-线体系的纵向激励。

表 2 地震记录

Table 2 Seismic records

序号	名称	日期	震级	记录地点
1	Kobe	1995-01-16	6.9	Oka
2	Northridge	1994-01-17	6.6	La-Baldwin Hills
3	Kern County	1952-07-21	7.4	Taft

4 地震作用下减震控制效果分析

为了研究碰撞摆对高压输电塔-线体系纵向的振动控制效果,分别模拟地震激励下高压输电塔-线体系纵向在无控制、悬挂质量摆和碰撞摆控制下的动力响应.悬挂质量摆和碰撞摆的减震效果采用减震率表示,其表达如下:

$$\eta_d = \frac{D_0 - D_c}{D_0} \times 100\% \quad (4)$$

$$\eta_a = \frac{Acc_0 - Acc_c}{Acc_0} \times 100\% \quad (5)$$

$$\eta_f = \frac{F_0 - F_c}{F_0} \times 100\% \quad (6)$$

式中: η_d 、 η_a 和 η_f 分别定义为位移减震率、加速度减震率和轴力减震率; D_0 、 Acc_0 和 F_0 分别为无控制时塔顶位移、塔顶加速度和主材轴力; D_c 、 Acc_c 和 F_c 分别为有控制时塔顶位移、塔顶加速度和主材轴力.

图6~图8给出了地震激励下输电塔-线体系纵向有无控制的响应对比.由图可知,悬挂质量摆和碰撞摆可以减小输电塔地震作用下的响应;由于碰撞耗能的原因,碰撞摆的减震能力优于悬挂质量摆.由塔顶位移和加速度时程曲线可以看出,减震效果随着时间是变化的,悬挂质量摆整体上减小输电塔响应,但个别时间会放大输电塔响应,这是由于共振影响所致;但考虑碰撞摆的输电塔响应时程幅值均小于无控的.由沿高度变化轴力最大响应对比可以得到,考虑减震控制的响应均小于无控的,考虑碰撞摆的响应均小于考虑悬挂质量摆的.

表3给出了地震作用下输电塔在两种减振装置控制下的减振率.以Kobe地震激励为例,由动力响应的峰值减震率可以得到,输电塔在悬挂质量摆控制下塔顶位移、加速度峰值分别降低了29%、23%,塔身主材轴力峰值减震率为26%;碰撞摆控制下塔顶位

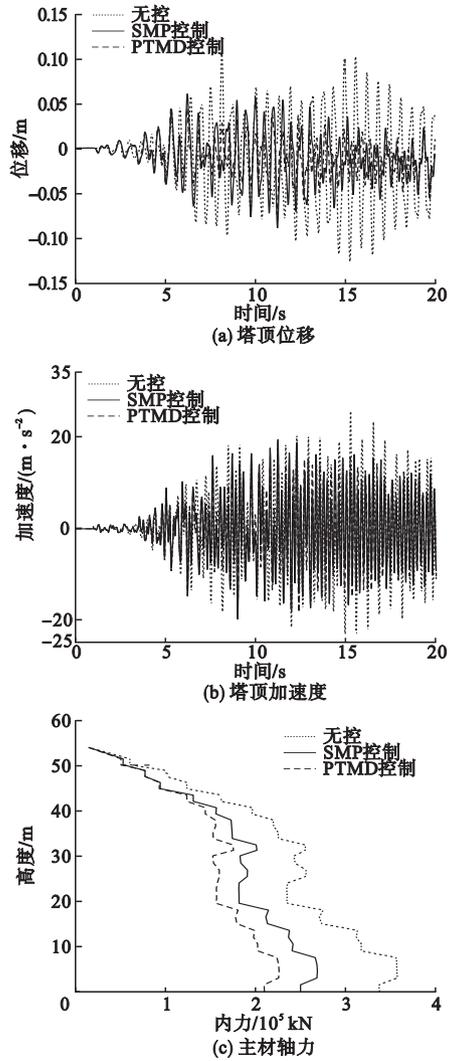
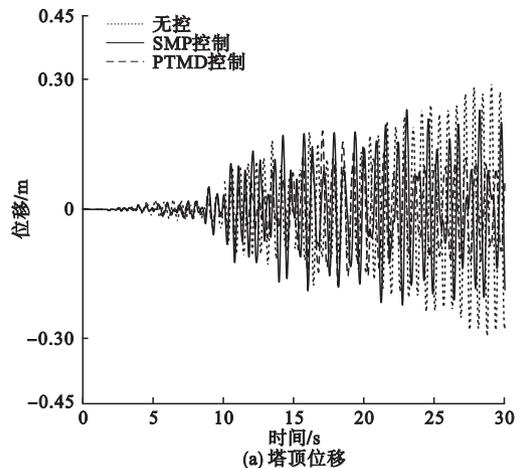


图6 Kobe地震激励下输电塔的动力响应

Fig. 6 Dynamic responses of transmission tower under the Kobe earthquake loadings



(a) 塔顶位移

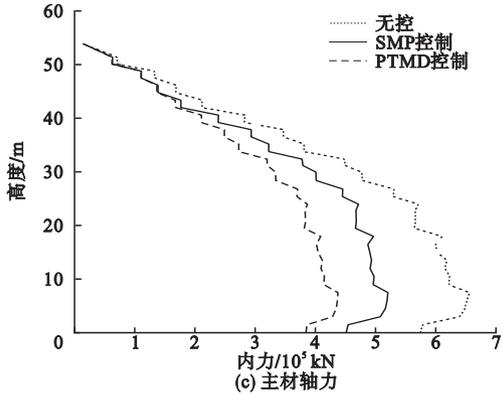
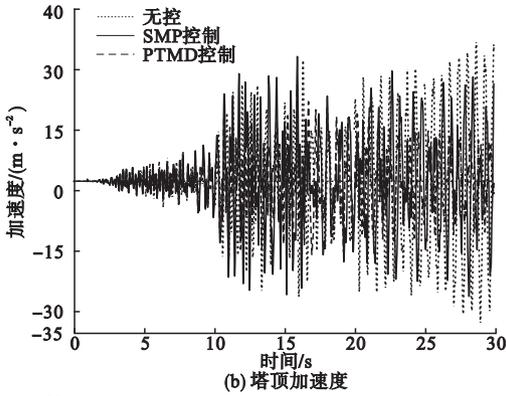


图7 Northridge地震作用下输电塔的动力响应

Fig. 7 Dynamic responses of transmission towers under the Northridge earthquake loadings

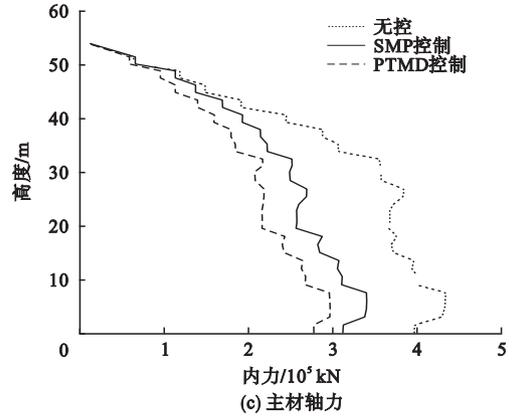
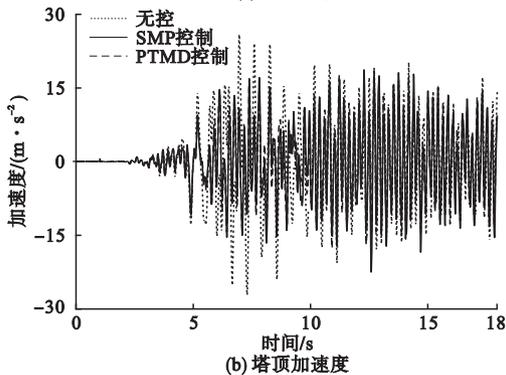
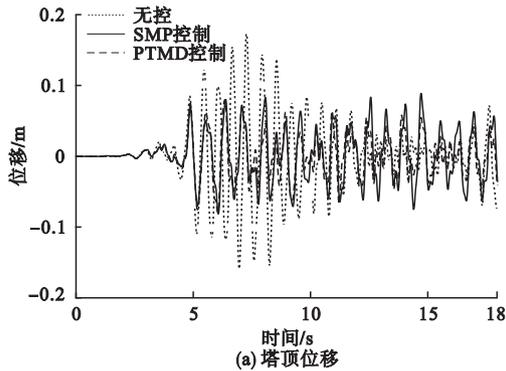


图8 Taft地震激励下输电塔的动力响应

Fig. 8 Dynamic responses of transmission tower under the Taft earthquake loadings

移、加速度峰值减震率分别为41%、29%，塔身主材轴力峰值减震率为38%。对比不同减振装置控制下结构动力响应的峰值减震率可得，碰撞摆的减震率明显大于悬挂质量摆的，尤其是塔身主材轴力的减震率。由表3可以看出，悬挂质量摆和碰撞摆在不同地震作用下均能够有效减小输电塔的动力响应，但随着地震作用变化而不同；碰撞摆的减震率明显大于悬挂质量摆的，且控制效果稳定，这是由于碰撞摆具有双重减震特点，通过碰撞耗能，提高减震装置的振动控制能力。

表3 地震激励下输电塔减震效果

Table 3		Vibration control performance of transmission tower under earthquake			%
地震记录	减震器	η_d 峰值	η_a 峰值	η_f 峰值	
Kobe	SMP	29	23	26	
	PTMD	41	29	38	
Northridge	SMP	21	12	21	
	PTMD	38	32	33	
Taft	SMP	49	17	23	
	PTMD	54	32	32	

5 结论

(1) 不同地震激励下悬挂质量摆与碰撞摆减振装置对输电塔结构的减震效果有所不同。

(2) 悬挂质量摆能够有效减小输电塔的动力响应峰值，但由于共振影响所致可能在

个别时间会放大输电塔的动力响应,控制效果不稳定。

(3) 碰撞摆减振装置减震效果更加优于悬挂质量摆,由于碰撞摆具有双重减震特点,因此碰撞摆的减震效果更加明显,且具有稳定的振动控制能力。

参考文献

- [1] LIU Huixian. Seismic damage of Tangshan earthquake[M]. Beijing: Seismological Press, 1989.
- [2] 谢强,王亚非. 汶川地震中变电站开关设备破坏机理[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2009, 25(6): 1050-1057.
(XIE Qiang, WANG Yafei. Seismic failure analysis on substation switch equipments in Wenchuan earthquake[J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2009, 25(6): 1050-1057.)
- [3] 苏桥磊. 高压输电塔结构主动抗震控制优化研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2012.
(SU Qiaolei. Theoretical research of active seismic control of power transmission tower structure[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2012.)
- [4] 朱军强,张彬,周双科,等. 基于LQR控制算法的输电塔风振控制研究[J]. 四川建筑科学研究, 2014, 40(1): 197-199.
(ZHU Junqiang, ZHANG Bin, ZHOU Shuangke, et al. Research about wind vibration control of transmission tower based on LQR control algorithm[J]. Sichuan building science, 2014, 40(1): 197-199.)
- [5] 高铭尚. 风荷载作用下输电塔结构 MATLAB、ANSYS 联合主动控制数值模拟研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2016.
(GAO Mingshang. The study on active control of transmission tower structure under wind load which based on the combination of MATLAB and ANSYS software[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2016.)
- [6] 樊禹江,王社良. 基于新型压电摩擦阻尼器的高压输电塔半主动抗震控制[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2013(4): 336-341.
(FAN Yujiang, WANG Sheliang. Semi-active seismic control of high-voltage transmission tower based on a new type of piezoelectric friction damper[J]. Journal of Hohai university (natural sciences), 2013(4): 336-341.)
- [7] 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.
- [8] PARK J H, MOON B W, MIN K W, et al. Cyclic loading test of friction-type reinforcing members upgrading wind-resistant performance of transmission towers[J]. Engineering structures, 2007, 29(11): 3185-3196.
- [9] LI L, CAO H, YE K, et al. Simulation of galloping and wind-induced vibration control[J]. Noise & vibration worldwide, 2010, 41(10): 15-21.
- [10] LI H, ZHANG P, SONG G, et al. Robustness study of the pounding tuned mass damper for vibration control of subsea jumpers[J]. Smart materials and structures, 2015, 24(9): 95-100.
- [11] ZHANG P, LI L, PATIL D, et al. Parametric study of pounding tuned mass damper for subsea jumpers[J]. Smart materials and structures, 2015, 25(1): 15028.
- [12] SONG G, ZHANG P, LI L, et al. Vibration control of a pipeline structure using pounding tuned mass damper[J]. Journal of engineering mechanics, 2016, 142(6): 1395-1406.
- [13] HAO H, BI K, CHOUW N, et al. State-of-the-art review on seismic induced pounding response of bridge structures[J]. Journal of earthquake and tsunami, 2013, 7(3): 2345-2353.
- [14] TIAN L, YU Q, MA R. Study on seismic control of power transmission tower-line coupled system under multicomponent excitations[J]. Mathematical problems in engineering, 2013(2013): 561-576.
- [15] LI K, DARDY A P. An experimental investigation into the use of a buffered impact damper[J]. Journal of sound and vibration, 2006, 291(3): 844-860.
- [16] LI K, DARDY A P. Experiments on the effect of an impact damper on a multiple-degree-of-freedom system[J]. Journal of vibration and control, 2006, 12(5): 445-464.
- [17] ZHANG P, SONG G, LI H, et al. Seismic control of power transmission tower using pounding TMD[J]. Journal of engineering mechanics, 2013, 139(10): 1395-1406.
- [18] 中国建筑科学研究院. 建筑抗震设计规范: GB 50011—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
(China Academy of Building Research. Code for seismic design of buildings: GB 50011—2010[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.)