

行波激励下输电塔—导线体系纵向地震反应分析

岳茂光¹, 李宏男¹, 王东升², 翟桐³

(1. 大连理工大学海岸及近海工程国家重点实验室, 辽宁省大连市 116023; 2. 大连海事大学道路与桥梁工程研究所, 辽宁省大连市 116026; 3. 中国地震局工程力学研究所, 黑龙江省哈尔滨市 150080)

Longitudinal Response of the Power Transmission Tower-cable System Under Traveling Seismic Wave Excitations

YUE Mao-guang¹, LI Hong-nan¹, WANG Dong-sheng², ZHAI Tong³

(1. State Key Laboratory of Costal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116023, Liaoning Province, China; 2. Institute of Road and Bridge Engineering, Dalian Maritime University, Dalian 116026, Liaoning Province, China; 3. Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080, Heilongjiang Province, China)

ABSTRACT: Based on the established model of the power transmission tower-cable system, the seismic response of which is analyzed with time history method. Furthermore, the seismic response under traveling seismic wave excitations is compared with that under uniform excitations, the result indicates that: the traveling seismic wave excitation can increase, or decrease the seismic response of the transmission tower-cable system, which depends on both the traveling-wave velocity and the ground motion characteristic; the traveling seismic wave excitations increase the cable's axis force in a large scale, which will decrease gradually and is close to the case of uniform excitations along with the traveling wave velocity increasing; the traveling wave strongly magnify the cable's displacement response on the longitudinal and vertical, especially the latter is under the excitations of the near-fault ground motions; the traveling wave velocity has a great effect on the seismic response of the power transmission tower-cable system.

KEY WORDS: power transmission tower-cable system; seismic response; traveling seismic wave excitation; uniform excitation; near-fault ground motions; traveling-wave velocity

摘要: 基于所建立的输电塔—导线体系空间有限元模型, 利用非线性时程分析法研究了体系在行波输入下纵向地震反应特性, 并和一致地震动输入下的反应情况进行比较。结果表明: 行波输入可增加也可降低输电塔的地震反应, 这与行波波速、地震动性质都有关系; 行波输入很大程度上增加了导线的轴力反应, 随着行波波速的提高导线轴力逐步降低并接近于一致输入时的情况; 行波输入强烈地放大了导线的

纵向和竖向位移反应, 特别是后者在近断层地震波输入时; 输电塔—导线体系的地震反应受行波波速影响很大。

关键词: 输电塔—导线体系; 地震反应; 行波输入; 一致输入; 近断层地震动; 行波波速

0 引言

大跨越输电塔—导线体系是重要的生命线电力设施^[1-4], 不仅投资大, 而且地震破坏引起的损失也非常大。这种体系具有独特的动力特性^[5-8]和地震反应特点, 近年来的强震观测(如 1989 年美国 Loma Prieta 地震^[9], 1999 年台湾 Chi-Chi 地震等^[10])表明, 地震动在空间传播过程中会发生明显变化, 导致结构不同的支座发生不同的运动, 从而增加了大跨度结构的地震反应。引起地震动空间变化的因素很多^[11-12], 主要有: ①各支撑点可能位于显著不同的场地土层上, 导致各支撑处输入地震动不同; ②地震动以有限波速传播引起行波效应; ③地震动在介质中发生反射和折射, 或者由于波在传播方向上不同位置的叠加方式不同, 导致相干性部分损失。目前的研究者普遍认为, 在做大跨度结构抗震分析时, 仅从一致输入考虑是不够的, 必须考虑行波效应、部分相干效应, 乃至非平稳效应和非均匀调制效应等^[13-18]。但是, 当前在工程上较多采用的仍是仅考虑行波效应的地震动非一致输入模型。

基于以上原因, 本文在研究一致输入下大跨度输电塔—导线体系地震反应特性基础上^[19], 考虑导线初始轴力和大变形效应的同时进一步研究了地震行波输入对输电塔—导线体系反应影响的问题。

基金项目: 国家自然科学基金项目(59978025); 中国地震局“十五”重点项目子课题项目。

Project Supported by National Science Foundation of China(59978025).

1 分析模型和分析方法

1.1 分析模型和输入地震动

采用文献[19]建立的五跨输电塔—导线体系模型,如图1,考虑了导线初始轴力和大变形效应的影响。为消除假设边跨一侧导线不存在这一设定边界条件的影响,本文以中间跨输电塔、导线的反应结果作为讨论依据。

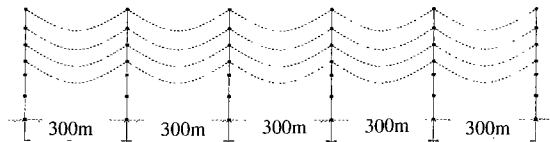


图1 输电塔—导线体系分析模型

Fig.1 Analysis model of power transmission tower-cable system

输入地震动^[19]采用中的台湾集集地震($M_s 7.6$)记录到的6条近断层地震波和常用的代表远场地震作用的El Centro波和Taft波。

1.2 分析方法

体系在地震动作用下结构的运动方程^[16-18]为

$$M\{\ddot{x}\} + C\{\dot{x}\} + K\{x\} = -M\{\ddot{x}_g(t)\} \quad (1)$$

式中: M 、 C 、 K 分别为结构的质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵; $\{\ddot{x}_g(t)\}$ 为地面运动加速度,只有结构跨度不大时才可以假定各支承点地面运动加速度 $\{\ddot{x}_g(t)\}$ 相同。如果考虑不均匀地面激励问题,则运动方程^[16-18,20]变为

$$\begin{bmatrix} M_{ss} & M_{sm} \\ M_{ms} & M_{mm} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_s \\ \ddot{x}_m \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{ss} & C_{sm} \\ C_{ms} & C_{mm} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x}_s \\ \dot{x}_m \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{ss} & K_{sm} \\ K_{ms} & K_{mm} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_s \\ x_m \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ f_m \end{Bmatrix} \quad (2)$$

式中: $\{x_m\}$ 代表地面强迫位移(主位移), $\{x_s\}$ 代表结构所有非地面节点位移(从位移), $\{f_m\}$ 代表地面作用于结构的力。下标 m 的矩阵表示和支承自由度有关的矩阵,下标 s 的矩阵表示和支承自由度无关的矩阵。

在当前的研究中,时程分析法多采用对时域内逐步积分的方法,逐步积分法包括Newmark法、Wilson- θ 法、Hilber-Hughes-Taylor法和Chung and Hulbert法等,本文采用的是SAP2000/Hilber-Hughes-Taylor法。

2 行波输入下高压输电塔—导线体系的地震反应

2.1 地震行波作用下输电塔的反应

为研究行波效应的影响,对行波输入和一致地

震动输入情况下输电塔—导线体系的纵向反应进行了分析比较。图2~4分别给出了行波输入与一致输入时输电塔的纵向地震剪力反应比、弯矩反应比和位移反应比,其中近断层地震波给出的是平均反应比,El Centro波和Taft波给出了最大反应比。

从图2~4可以看出,和一致地震动输入相比,行波输入既可增加也可降低输电塔的地震反应,这与行波波速、地震动性质都有关系。波速300m/s时,代表远场地震动作用的El Centro波和Taft波以行波输入,使输电塔相对一致输入时底部截面剪力提高了50%,底部弯矩和顶部位移也略有提高;而近断层地震动行波输入时底部截面剪力提高了近4倍,底部弯矩提高了1倍多,顶部位移提高了近1倍。近断层地震动作用和远场地震动作用时差别较为明显。随着波速提高到600m/s和900m/s,近断层地震动行波输入和远场地震动行波输入的差别,除输电塔底部剪力和下部部分节点位移外,变得不再明显,并且可看出输电塔的反应随着波速的增加而降低。波速达到1200m/s时,行波输入下输电塔的地震反应已基本小于一致输入时的反应值,如El Centro波和Taft波输入,底部截面剪力和弯矩可降至一致输入的50%左右,顶点位移可降至40%左右;而近断层地震波输入,输电塔底部截面弯矩可降至一致输入的80%左右,顶点位移可降至50%左右。此时近断层地震波输入下输电塔的反应又一定程度上大于El Centro波和Taft波。

在一致地震动输入条件下,近断层地震动与代表远场地震动作用的El Centro波和Taft波相比,输电塔地震反应比较相近^[19]。采用行波输入后,差异变得较为显著,并一定程度上依赖于波速,当波速较低时(如300m/s),近断层地震动非常强烈地放大了输电塔的地震反应。总体上看,行波波速在300~1200m/s时,与一致输入相比,El Centro波和Taft波输入时输电塔的反应变化范围在 $\pm 50\%$ 左右,而近断层地震波输入时反应变化范围则大得多。

当一致地震动输入相当于行波波速趋于无限大时的情况,为校验上述计算结果的可靠性,本文以El Centro波和Taft波为例,计算了波速为3000、6000和15000m/s时输电塔—导线体系的地震反应,限于篇幅只给出了考虑行波效应与纵向一致输入时输电塔的地震弯矩反应比,如表1。可以看出,反应比基本上是趋向于1.0的,特别是Taft波,El Centro波相对小一些。

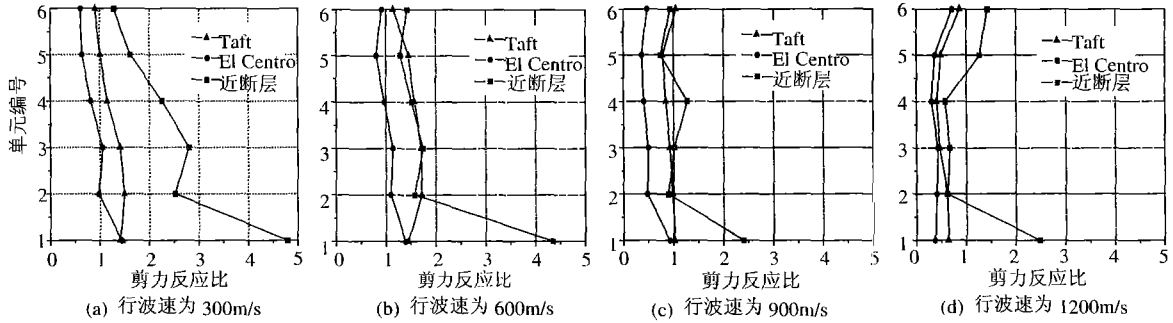


图 2 输电塔的剪力反应比分布情况
Fig.2 Tower's shear force ratio distribution

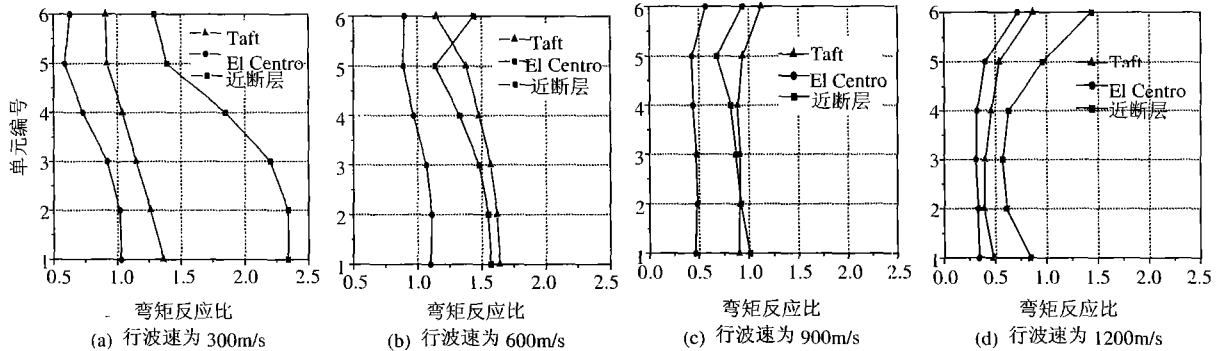


图 3 输电塔的弯矩反应比分布情况
Fig.3 Tower's moment ratio distribution

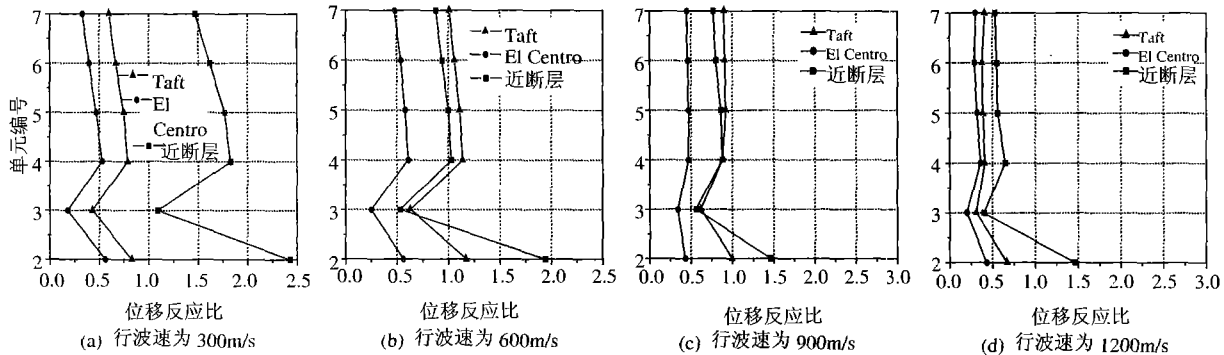


图 4 输电塔位移反应比分布情况
Fig.4 Tower's displacement ratio distribution

表 1 不同行波波速下输电塔的弯矩反应比

Tab. 1 Tower's moment ratio under different traveling-wave velocity

节点编号	3000m/s		6000m/s		15000m/s	
	El Centro	Taft	El Centro	Taft	El Centro	Taft
7	—	—	—	—	—	—
6	0.75	1.09	0.90	1.07	0.97	1.00
5	0.48	1.02	0.81	1.02	1.06	1.02
4	0.44	1.00	0.78	0.98	1.15	1.00
3	0.48	1.03	0.80	0.97	1.20	1.03
2	0.54	1.08	0.80	0.98	1.23	1.08
1	0.59	1.12	0.81	0.99	1.24	1.12

2.2 地震行波作用下导线的反应

2.2.1 导线的轴力反应

为了更好地分析行波效应对导线轴力反应的影响，以模型中间跨跨端为例研究了行波输入和一致

输入情况下导线的轴力反应比如图 5，近断层地震波给出的是平均反应比，El Centro 波和 Taft 波给出了最大反应比。

从图 5 可以看出，和一致地震动输入相比：①

行波输入很大程度上增加了导线的轴力反应，特别是近断层地震波在波速较低时(300~600m/s)，导线轴力可增加1倍以上，相应的 El Centro 波和 Taft

波约增长 25%~50%左右；②随着行波波速的提高，行波输入下导线轴力增长幅度降低并逐步接近于一致输入时的情况。

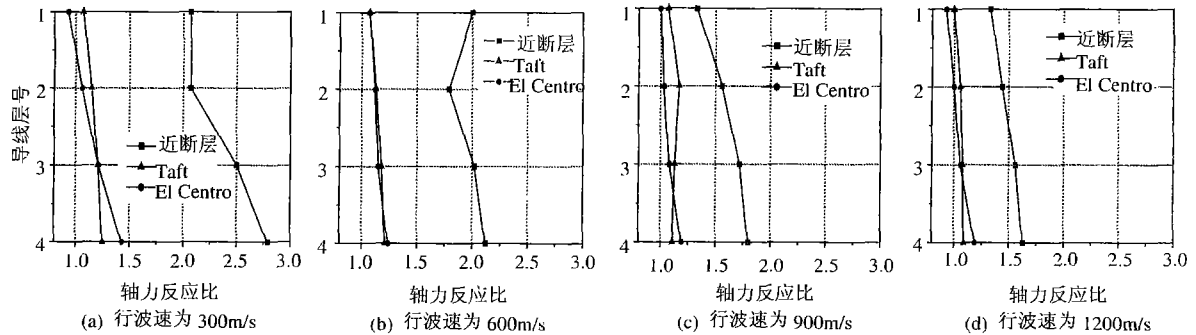


图5 导线的轴力反应比

Fig.5 Cable's axis force ratio

2.2.2 导线的位移反应

表 2~3 分别给出了一致输入和行波输入时导线 1/4(3/4)跨度处纵向位移和跨中竖向位移的比较，括号内为行波输入和一致输入时导线的位移

反应比。

导线纵向位移与导线层数的关系在行波输入时与一致输入时相近，都表现为上层稍大，下层稍小，行波输入时各层导线的纵向位移反应更接近一

表2 一致输入和行波输入时导线 1/4(3/4)跨度处纵向位移

Tab. 2 Cable's longitudinal displacement on 1/4(3/4) span under uniform and traveling-wave excitations

地震波	层号	行波输入				一致输入
		300m/s	600m/s	900m/s	1200m/s	
近断层	1	35.1(3.2)	27.1(2.5)	15.8(1.4)	11.3(1.0)	11.0
	2	30.9(4.4)	21.8(3.1)	14.0(2.0)	10.2(1.4)	7.1
	3	30.4(7.1)	20.1(4.7)	13.0(3.0)	9.6(2.2)	4.3
	4	30.1(12.0)	19.0(7.6)	12.4(5.0)	9.3(3.7)	2.5
El Centro	1	14.3(1.1)	17.6(1.4)	9.8(0.8)	8.5(0.7)	13.0
	2	13.6(1.6)	13.8(1.6)	8.3(1.0)	7.3(0.9)	8.4
	3	13.1(2.6)	11.0(2.2)	7.3(1.4)	6.7(1.3)	5.1
	4	12.8(4.3)	9.1(3.0)	6.9(2.3)	6.8(2.3)	3.0
Taft	1	11.4(1.3)	12.8(1.4)	12.5(1.4)	8.3(0.9)	9.0
	2	10.1(1.8)	10.4(1.8)	9.8(1.7)	7.2(1.3)	5.7
	3	10.0(2.7)	9.3(2.5)	7.8(2.1)	6.4(1.7)	3.7
	4	10.3(4.9)	8.4(4.0)	7.2(3.4)	6.1(2.9)	2.1

注：导线层号自上至下，括号中为行波输入与一致输入的反应比。

表3 一致输入和行波输入时导线跨中处竖向位移

Tab. 3 Cable's vertical displacement on span center under uniform and traveling-wave excitations

地震波	层号	行波输入				一致输入
		300m/s	600m/s	900m/s	1200m/s	
近断层	1	493.1(616)	326.0(408)	194.7(243)	157.1(196)	0.8
	2	525.9(1753)	341.1(1137)	195.2(651)	158.0(527)	0.3
	3	561.2(2806)	357.3(1787)	195.7(979)	158.6(793)	0.2
	4	594.3(2972)	372.3(1862)	196.3(982)	159.1(796)	0.2
El Centro	1	53.5(107)	33.9(68)	24.2(48)	18.6(37)	0.5
	2	56.8(284)	34.8(174)	24.4(122)	18.6(93)	0.2
	3	61.6(616)	35.6(356)	24.5(245)	18.6(186)	0.1
	4	65.8(658)	36.3(363)	24.7(247)	18.6(186)	0.1
Taft	1	115.7(289)	63.0(158)	43.4(109)	32.7(82)	0.4
	2	115.3(1153)	63.3(633)	43.1(431)	32.5(325)	0.1
	3	117.5(1175)	63.6(636)	43.0(430)	32.2(322)	0.1
	4	120.7(1207)	63.9(639)	42.8(428)	32.1(321)	0.1

注：导线编号自上至下，括号中为行波输入与一致输入的反应比。

些。在一致输入时，导线纵向位移沿跨长分布还是比较均匀的，而行波输入时则基本表现为 1/4(3/4) 跨度处略大，跨中略小。导线的纵向位移反应规律与轴力反应较为相似：①行波输入很大程度上增加了导线的纵向反应，特别是对近断层地震波在波速较低时(300~600m/s)，其最上层导线 1/4(3/4) 跨度处的纵向位移可达 27~35cm，最下层可达 19~30cm，而一致输入时其最上层仅为 11cm，最下层仅为 3cm；②随着行波波速的提高，导线纵向位移反应降低并逐步接近于一致输入时的情况。

行波输入时导线竖向位移反应底层略大于上层，一致输入则相反。行波输入时导线的竖向位移比一致输入时大得多，并且跨中较明显地大于 1/4 跨度处和 3/4 跨度处。与 El Centro 波和 Taft 波相比，近断层地震动输入时导线的竖向位移反应更为强烈。以反应最小的波速 1200m/s 为例：导线竖向位移在近断层地震波输入时在跨中约为 158cm，1/4 跨度处约为 105cm，在 El Centro 波和 Taft 波输入下，它们分别为 25cm 和 20cm，与近断层地震波相差 5~6 倍；而在一致输入下，导线的竖向位移在跨中和 1/4 跨度处最大分别不超过 1cm 和 7cm。注意到在波速 300m/s 近断层地震波输入时，导线的跨中竖向位移向上可达 5~7m，已十分接近导线在重力作用静止时的垂度值，即此时导线接近于水平。

3 结论

(1) 行波输入与一致输入相比既可增加也可降低输电塔的地震反应，与行波波速、地震动性质都有关系。当行波波速较低时，近断层地震动一定程度上放大了输电塔的地震反应，且对输电塔接近底部部分的反应较为不利。

(2) 行波输入很大程度上增加了导线的轴力反应，近断层地震动尤为明显，在波速较低时(300~600m/s)，导线轴力可增加 1 倍以上。随着行波波速的提高，导线轴力增长幅度降低并逐步接近于一致输入时的情况。

(3) 行波输入与一致输入相比强烈地放大了导线的纵向和竖向位移反应，特别是后者在近断层地震波输入时，其向上反应的最大值甚至可与导线的跨中垂度值相当。

(4) 行波输入时输电塔-导线体系地震反应结果受波速影响很大，因此相对合理地评估行波波速在实际应用中就变得较为重要。

本文就较为简单的行波输入情况进行了分析，还需要就包括行波效应、相干效应和局部场地效应等的空间地震动场作用下输电塔-导线体系地震反应情况做进一步研究。

参考文献

- [1] 张惠勤. 世界各国 750kV 电网的发展状况[J]. 电网技术, 2002, 26(3): 37-40.
Zhang Huiqin. Development Situation of 750kV Power Network in Other Countries[J]. Power System Technology, 2002, 26(3): 37-40(in Chinese).
- [2] 周浩, 余宇红. 我国发展特高压输电中一些重要问题的讨论[J]. 电网技术, 2005, 29(12): 1-9.
Zhou Hao, Yu Yuhong. Discussion on several important problems of developing UHV AC transmission in China[J]. Power System Technology, 2005, 29(12): 1-9(in Chinese).
- [3] 屈靖, 郭剑波. “九五”期间我国电网事故统计分析[J]. 电网技术, 2004, 28(21): 60-62.
Qu Jing, Guo Jianbo. Statistics and analysis of faults in main domestic power systems from 1996 to 2000[J]. 2004, 28(21): 60-62(in Chinese).
- [4] 中村秋夫, 冈本浩, 曹祥麟. 东京电力公司的特高压输电技术应用现状[J]. 电网技术, 2005, 29(6): 1-5.
Nakamura Aki-o, Okamoto Hiroshi, Cao Xianglin. Introduction to 1000kV Transmission Technologies Conducted by Tokyo Electric Power Company[J]. Power System Technology, 2005, 29(6): 1-5(in Chinese).
- [5] 莫付江, 陈允平, 阮江军. 输电线路杆塔模型与防雷性能计算研究[J]. 电网技术, 2004, 28(21): 80-84.
Mo Fujiang, Chen yunping, Ruan Jiangjun. Study on transmission tower models and their lightning performance calculation[J]. Power System Technology, 2004, 28(21): 80-84(in Chinese).
- [6] 张禹芳. 我国 500kV 输电线路风偏闪络分析[J]. 电网技术, 2005, 29(7): 65-67.
Zhang Yufang. Analysis on flashover between tower and conducting wires in domestic 500kV transmission lines caused by windage yaw[J]. Power System Technology, 2005, 29(7): 65-67(in Chinese).
- [7] 韩祯祥, 曹一家. 电力系统的安全性及防治措施[J]. 电网技术, 2004, 28(9): 1-6.
Han Zhenxiang, Cao Yijia. Power system security and its prevention [J]. Power System Technology, 2004, 28(9): 1-6(in Chinese).
- [8] 张强, 王宝华, 杨成梧. 电力系统周期振荡的失稳分析[J]. 电网技术, 2004, 28(22): 15-19.
Zhang Qiang, Wang Baohua, Yang Chengwu. Analysis of unstable periodic oscillations in power system[J]. Power System Technology, 2004, 28(22): 15-19(in Chinese).
- [9] Kiureghian A. D., Neuenhofer A. Response spectrum method for multi-support seismic excitations[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1992, 21(8): 713-740.
- [10] 台湾地震工程研究中心. 九二一集集大地震震灾调查报告[R]. 台北, 2001.
Taiwan Earthquake Engineering Research Center. Report on the 921 Chi-Chi (Taiwan) Large Earthquake Disasters[R]. Taipei, 2001(in

- Chinese).
- [11] 尹荣华, 李东亮, 刘戈林, 等. 高压输电塔震害及抗震研究[J]. 世界地震工程, 2005, 21(1): 51-54.
Yin Ronghua, Li Dongliang, Liu Gelin, et al. Seismic damage and analysis of power transmissions towers[J]. World Earthquake Engineering, 2005, 21(1): 51-54(in Chinese).
- [12] 吴春秋, 朱以文. 大跨度结构TMD减震系统多点激励的地震随机响应分析[J]. 地震工程与工程振动, 2003, 23(4): 131-135.
Wu Chunqiu, Zhu Yiwen. Random response analysis of span structures with TMD under multiple support excitation[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2003, 23(4): 131-135(in Chinese).
- [13] 范立础, 王君杰, 陈玮. 非一致地震激励下大跨度斜拉桥的响应特征[J]. 计算力学学报, 2001, 18(3): 358-363.
Fan Lichu, Wang Junjie, Chen Wei. Response characteristics of long-span cable-stayed bridges under non-uniform seismic action [J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2001, 18(3): 358-363(in Chinese).
- [14] 林家浩, 张文首, 钟万镒. 大跨度结构随机地震响应[J]. 固体力学学报, 1991, 12(4): 319-328.
Lin Jiahao, Zhang Wenshou, Zhong Wanxie. Stochastic earthquake response of long span structures[J]. Acta Mechanica Solida Sinica, 1991, 12(4): 319-328(in Chinese).
- [15] 赵灿晖. 大跨度桥梁地震响应分析中的非一致地震激励模型[J]. 西南交通大学学报, 2002, 37(3): 236-240.
Zhao Canhui. The asynchronous excitation model for the seismic response analysis of long-span bridges[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2002, 37(3): 236-240(in Chinese).
- [16] 林家浩, 钟万镒, 张亚辉. 大跨度结构抗震计算的随机振动方法[J]. 建筑结构学报, 2000, 21(1): 29-36.
Lin Jiahao, Zhong Wanxie, Zhang Yahui. Seismic analysis of long span structures by means of random vibration approach[J]. Journal of Building Structures, 2000, 21(1): 29-36(in Chinese).
- [17] 张文首, 李建俊, 林家浩. 多相位激励随机地震响应快速算法[J]. 计算结构力学及其应用, 1994, 11(3): 241-247.
Zhang Wenshou, Li Jianjun, Lin Jiahao. Fast algorithm of multi-excitation random seismic responses[J]. Computational Structural Mechanics and Applications, 1994, 11(3): 241-247(in Chinese).
- [18] 侯鹏, 彭世江. 大跨度空间结构在地震行波作用下的响应[J]. 工程结构, 2003, 23(5): 49-50.
Hou Peng, Peng Shijiang. Response of the long-span spatial structure under earthquake traveling wave excitation[J]. Engineering Structure, 2003, 23(5): 49-50(in Chinese).
- [19] 岳茂光, 王东升, 李宏男, 等. 近断层地震动作用下输电塔-导线体系反应分析[J]. 地震工程与工程振动, 2005, 25(4): 116-125.
Yue Maoguang, Wang Dongsheng, Li Hongnan, et al. Response of power transmission tower-cable system subjected to near-fault ground motions[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2005, 25(4): 116-125(in Chinese).
- [20] 李建俊, 林家浩, 张文首, 等. 大跨度结构受多点随机地震激励的响应[J]. 计算结构力学及其应用, 1995, 12(4): 445-452.
Li Jianjun, Lin Jiahao, Zhang Wenshou, et al. Responses of long-span structures subjected to arbitrarily coherent multi-point stationary random seismic excitations[J]. Computational Structural Mechanics and Applications, 1995, 12(4): 445-452(in Chinese).

收稿日期: 2006-06-09。

作者简介:

岳茂光(1973—), 博士研究生, 主要研究结构抗震, 结构多维地震动反应, ymg2004@126.com;

李宏男(1957—), 男, 博士后, 长江学者特聘教授, 主要研究结构抗震, 结构减震控制, 健康检测和损伤评估等。

(责任编辑 韩蕾)