

文章编号: 1000-4750(2013)Suppl-0273-06

SMART-1 台阵地震动激励下输电塔线体系反应分析

田 利¹, 李宏男², 侯和涛¹

(1. 山东大学土建与水利学院, 山东, 济南 250061; 2. 大连理工大学建设工程学部, 辽宁, 大连 116024)

摘 要: 该文研究了 SMART-1 台阵多维多点地震激励下输电塔-线体系的反应。根据输电线路实际工程, 在考虑输电线的几何非线性基础上, 建立了输电塔-线耦联体系的三维有限元计算模型。选取了 SMART-1 台阵中不同方向上的多维多点地震动时程, 分别研究了不同折线角度下输电塔线体系多维一致和多维多点地震反应。研究结果表明: 不同夹角下输电塔-线体系在多维多点激励下的反应均大于多维一致激励下的反应, 但随着角度不同, 增大程度也不同, 尤其是输电线的竖向位移得到了强烈的放大。通过实际的多维多点地震动研究了输电线路不同角度下的反应, 对应角度不同, 输电线路受地震动多维多点效应影响不同。所获得的分析结果可为输电线路抗震设计提供参考。

关键词: 输电塔-线体系; SMART-1 台阵; 多维多点; 几何非线性; 地震反应

中图分类号: TU311.3 **文献标志码:** A **doi:** 10.6052/j.issn.1000-4750.2012.03.S091

RESPONSE ANALYSIS OF TRANSMISSION TOWER-LINE SYSTEM UNDER SMART-1 SEISMIC GROUND MOTION EXCITATION

TIAN Li¹, LI Hong-nan², HOU He-tao¹

(1. School of Civil and Hydraulic Engineering, Shandong University, Jinan, Shandong 250061, China;

2. Faculty of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China)

Abstract: The responses of a transmission tower-line system under multi-component multi-support excitations of SMART-1 seismic array are investigated. A three-dimensional finite element model of a transmission tower-line coupled system considering the geometric nonlinearity of a transmission line is established based on a practical engineering project. The multi-component multi-support seismic time history of SMART-1 seismic array is selected, and the responses of a transmission tower-line system with different unfold type angles under multi-component uniform and multi-component multi-support excitations are studied, respectively. The results show that the responses of a transmission tower-line system under multi-component multi-support excitations are larger than those under multi-component uniform excitations, but the increasing degrees vary with the change of angles, especially the vertical displacement of a transmission line is strongly amplified. The response of a transmission line is studied with different angles according to real multi-component multi-support seismic waves, and the multi-component multi-support earthquakes have different influences on a transmission line with different angles. The analysis results obtained could provide a reference for the aseismic design of transmission lines.

Key words: transmission tower-line system; SMART-1 seismic array; multi-component multi-support; geometric nonlinearity; seismic response

收稿日期: 2012-03-13; 修改日期: 2012-12-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(51208285); 中国博士后科学基金项目(2012M521338); 山东大学自主创新基金项目(2011GN051)

通讯作者: 田 利(1982-), 男, 山东枣庄人, 讲师, 博士, 主要从事大跨度结构抗震的研究(E-mail: tianl-007@163.com).

作者简介: 李宏男(1957-), 男, 辽宁沈阳人, 教授, 博士, 主要从事结构抗震、抗风和振动控制的研究(E-mail: hnli@dlut.edu.cn);

侯和涛(1972-), 男, 山东临沂人, 副教授, 博士, 主要从事钢结构防灾研究(E-mail: houhetao@163.com).

输电线路是电力系统的重要组成部分，它担负着输送和分配电能的任务，并联络各发电厂变电站使之有效运行。我国绝大多数输电线路要穿越高烈度地震区，地震导致的输电线路破坏情况极其严重^[1-3]。随着输电线路电压等级和输电容量的提高，输电塔的高度和线路的档距也极大的增加，其支座处受到的地震激励会因行波效应、部分相干效应和局部场地效应等因素而产生明显的空间变异性^[4-5]。因此，传统的基于均匀地面运动的抗震分析方法不一定能提供合理的分析结果，有必要考虑地震动空间变化效应对结构的影响；输电塔-线体系是空间耦合的连续结构体系，还应考虑地震动多维性对结构的影响。我国电力设施抗震设计规范^[6]中没有涉及地震动空间变化效应和多维性对输电线路影响的考虑，研究其反应规律对于提高输电线路的抗震设计十分重要。以往对于输电线路抗震研究均假设输电线路结构是直线型的，对于折线型输电线路的研究涉及甚少，但实际上受地形和输电线路设计等因素的影响，输电线路往往设置成不同夹角的折线型，因此研究不同夹角下的折线型输电塔线体系地震反应规律对于输电线路的抗震设计意义重大。

基于以上问题，本文运用非线性时程分析方法，研究了多维多点地震动激励下不同折线型高压输电塔-线体系的地震反应。根据实际工程建立了不同角度的“折线型”输电塔-线体系有限元模型，考虑了输电线的几何非线性；由于地震对输电线路破坏最严重的是我国 1999 年台湾发生的集集地震，集集地震中输电塔-线体系破坏情况如图 1 所示。因此本文选取了 SMART-I 台阵中不同方向上的多维多点地震动时程；分别研究了不同折线角度下输电塔-线体系多维多点地震反应，分析总结了其反应规律。为折线型输电塔-线体系的抗震分析和设计提供理论依据。



图 1 集集地震中输电塔-线体系破坏图
Fig.1 Damage to transmission tower-line system in the Chi-Chi earthquake

1 结构模型

本文工程背景为我国某地区 220kV 输电线路

的一部分，塔体结构为总高 58.1m 的 SSJ 型耐张塔，基础底宽度与主塔顶宽度分别为 10.6m 和 1.8m，设置 6 处横担，杆塔以呼称高下面 3m 处为分界点分为 2 个均匀锥度段，向上逐渐收缩界面，全塔平面尺寸如图 2 所示。输电塔主杆件、斜杆和辅助材料分别采用 Q420 和 Q235 的角钢，其弹性模量为 206GPa。输电模式为四回路双分裂式导线布置，输电线共分 7 层，最上层是 JLB40-150 型地线，中间 3 层为双分裂 LGJ-400/35 型导线，下面 3 层为双分裂 LGJ-240/30 型导线。输电塔采用梁单元模拟，实验结果证实^[7]，按梁单元比按杆单元建模进行有限元计算结果与实验值较接近，因此输电塔构件选取具有弯曲刚度与剪切刚度的空间梁单元，而不采用桁架单元，从而更好地去模拟实际结构。底部 4 个节点采用固结连接，输电线采用索单元^[8]，绝缘子分别铰接于输电塔横担上，已达到对实际情况的模拟。输电线路的示意图见图 3 所示，使用国际通用有限元软件 SAP2000 建立了输电塔-线耦合体系的三维有限元模型，即“三塔四线模型”，包括三基

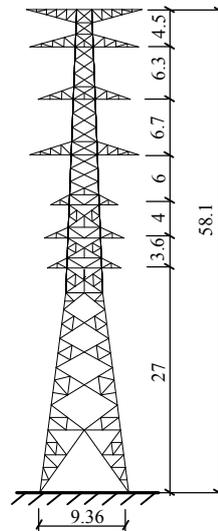


图 2 输电塔尺寸 /m
Fig.2 Transmission tower size

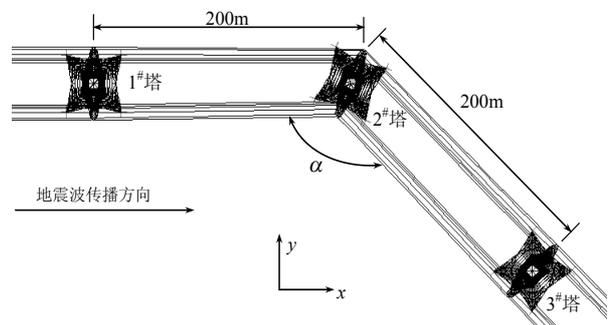


图 3 输电线路示意图
Fig.3 Schematic diagram of transmission line

输电塔(1#塔、2#塔和 3#塔)和四跨输电线,如图 4 所示。研究表明^[9],这种模型能够较好地反映输电线路的反应。输电线的档距均为 200m,假设 1#塔和 2#塔连线与 2#塔和 3#塔连线之间的夹角为 α ,输电线的编号从上至下分别为①、②、③、④、⑤、⑥和⑦。

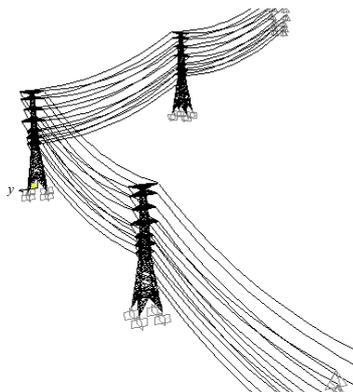


图 4 高压输电塔-线耦联体系三维有限元模型
Fig.4 Three-dimensional finite model of transmission tower-line system coupled system

2 运动方程

考虑地震动多点激励下的结构运动方程为:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M}_{aa} & \mathbf{M}_{ab} \\ \mathbf{M}_{ba} & \mathbf{M}_{bb} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{\mathbf{x}}_a \\ \ddot{\mathbf{x}}_b \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{C}_{aa} & \mathbf{C}_{ab} \\ \mathbf{C}_{ba} & \mathbf{C}_{bb} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\mathbf{x}}_a \\ \dot{\mathbf{x}}_b \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{K}_{aa} & \mathbf{K}_{ab} \\ \mathbf{K}_{ba} & \mathbf{K}_{bb} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{x}_a \\ \mathbf{x}_b \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{P}_b(t) \end{Bmatrix} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{x}_a = \{x_{a1}, \dots, x_{an}\}^T$ 为非支承点 n 维位移向量; $\mathbf{x}_b = \{x_{b1}, \dots, x_{bm}\}^T$ 为支承点 m 维位移向量; \mathbf{M}_{aa} 、 \mathbf{C}_{aa} 、 \mathbf{K}_{aa} 分别为结构非支承点的 $n \times n$ 维质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵; \mathbf{M}_{bb} 、 \mathbf{C}_{bb} 、 \mathbf{K}_{bb} 分别为结构支承点的 $m \times m$ 维质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵; \mathbf{M}_{ab} 、 \mathbf{C}_{ab} 、 \mathbf{K}_{ab} 分别为非支承点与支承点耦合的 $n \times m$ 维质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵; $\mathbf{P}_b(t)$ 为 m 维支承点处的反力向量。

由式(1)中的上式可得到关于未知运动向量 \mathbf{x}_a 、 $\dot{\mathbf{x}}_a$ 和 $\ddot{\mathbf{x}}_a$ 的动力平衡方程:

$$\mathbf{M}_{aa}\ddot{\mathbf{x}}_a + \mathbf{C}_{aa}\dot{\mathbf{x}}_a + \mathbf{K}_{aa}\mathbf{x}_a = -\mathbf{M}_{ab}\ddot{\mathbf{x}}_b - \mathbf{C}_{ab}\dot{\mathbf{x}}_b - \mathbf{K}_{ab}\mathbf{x}_b \quad (2)$$

采用集中质量模型,则有 $\mathbf{M}_{ab} = \mathbf{0}$; 由于阻尼矩阵 \mathbf{C}_{ab} 很难确定,因此阻尼力 $-\mathbf{C}_{ab}\dot{\mathbf{x}}_b$ 常被忽略; 式(2)变为:

$$\mathbf{M}_{aa}\ddot{\mathbf{x}}_a + \mathbf{C}_{aa}\dot{\mathbf{x}}_a + \mathbf{K}_{aa}\mathbf{x}_a = -\mathbf{K}_{ab}\mathbf{x}_b \quad (3)$$

式(3)就是求解地震地面运动作用下结构反应的位移输入模型。其中,式(3)右边的 \mathbf{x}_b 为需要输入的结构各支座处地面运动位移。根据文献^[10]的研究,

当前位移输入模型存在不容忽视的问题,本文采用文献^[11]中提出的适用于 SAP2000 的位移输入模型。

3 SMART-1 台阵及地震波

世界上第一座大型密集台阵是位于我国台湾地区的 SMART-1 台阵^[12](Strong Motion Array in Taiwan, Phase 1)。SMART-1 台阵设置于 1980 年 9 月,位于台湾东北部宜兰县罗东镇附近地区,测站呈 12 方位辐射排列,如图 5 所示。SMART-1 共由 37 个测站构成,包含一个中心点(C00)及 3 个同心圆;内圆 I、中圆 M、外圆 O 的半径分别 200m, 1000m 以及 2000m,每一个同心圆上等间隔设置 12 个测站。

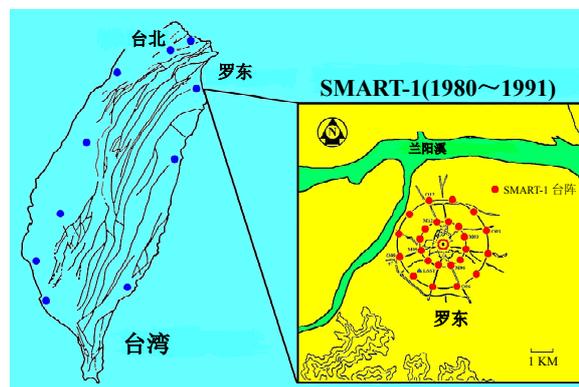


图 5 SMART-I 台阵位置示意
Fig.5 The location map of SMART-I, Taiwan

本文选取第 45 次地震的内圆多维多点地震动记录作为研究对象,根据地震波的传播方向,给出图 6 的示意图,选取了 I06-C00-I12、I06-C00-I01、I06-C00-I02 和 I06-C00-I03 这 4 条线各台站地震记录,对应折线型输电线路的夹角 α 分别为 180° 、 150° 、 120° 和 90° 。图 7 给出了 I06-C00-I1 的 NS、WE 和 DN 方向的地震动多维多点位移时程曲线。地震波传播方向如图 3 中的箭头所示。

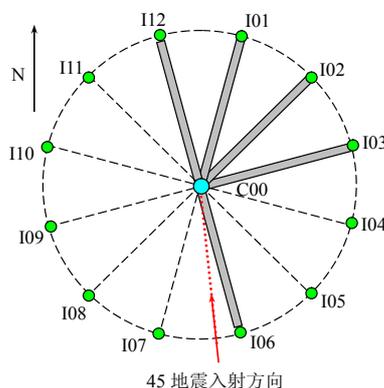


图 6 第 45 次地震示意图
Fig.6 Event 45 of SMART-1, Taiwan

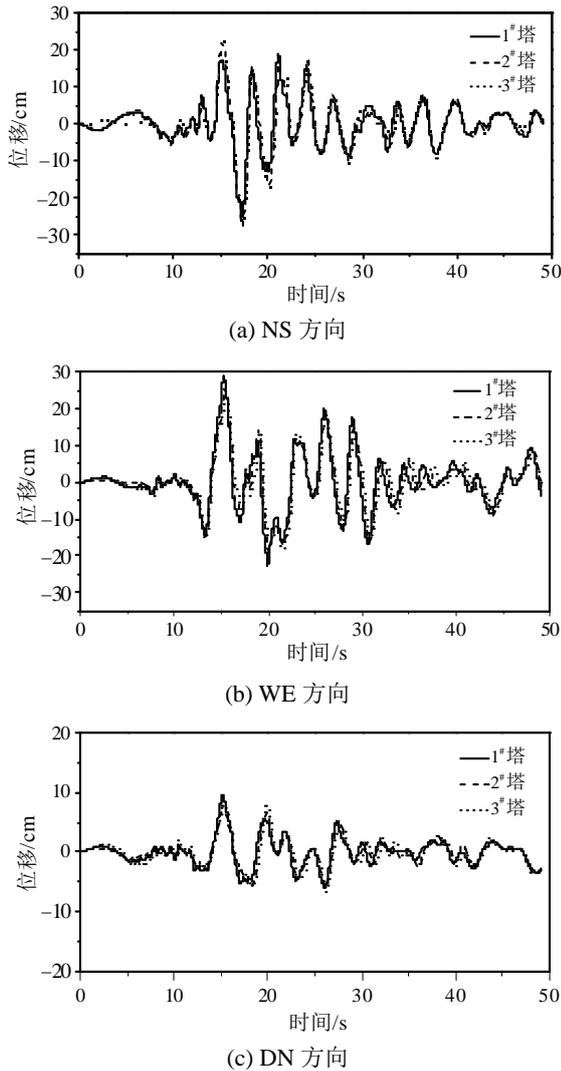


图7 SMART-1 台阵多维多点位移时程曲线
Fig.7 Multi-component multi-support displacement time histories of SMART-1 array

4 数值分析与讨论

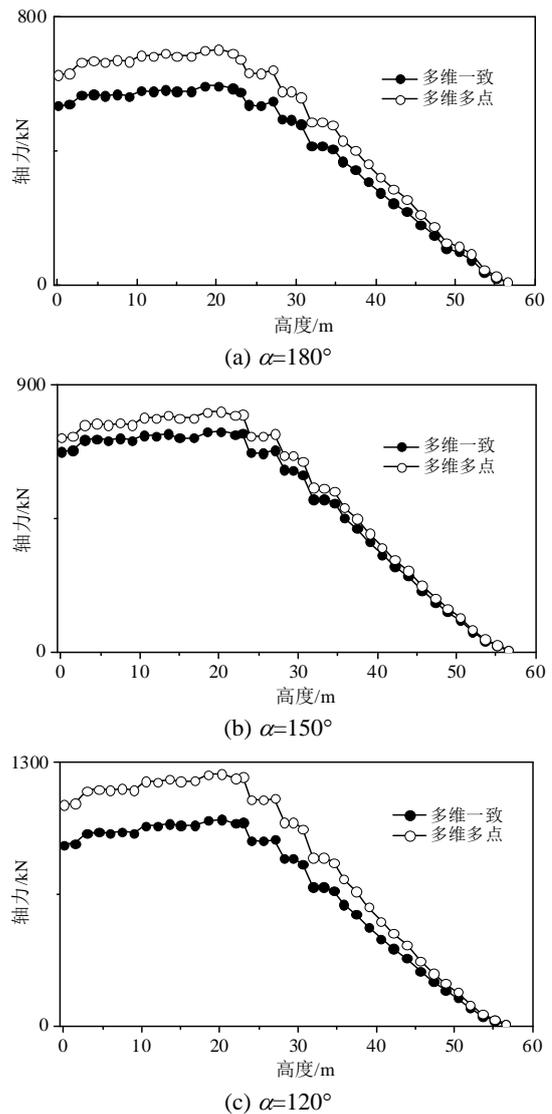
为了研究多维多点地震动对输电塔-线耦联体系地震反应的影响,对图4所示的输电塔-线耦联体系施加多维多点地震激励,采用有限元软件SAP2000进行空间变化地震动作用下的非线性时程反应分析,时程分析中采用Hilber-Hughes-Taylor逐步积分法,其中输电塔和输电线的阻尼比分别取为0.02和0.01。分别研究了折线型输电线路的不同夹角,即 $\alpha=180^\circ$ 、 150° 、 120° 和 90° 这4种情况下,在SMART-1台阵多维一致和多维多点地震动激励下输电塔-线体系的地震反应。

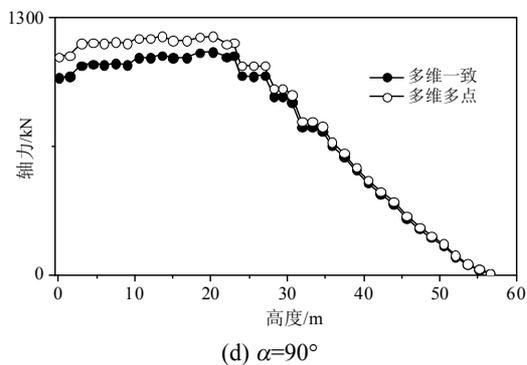
4.1 输电塔的地震反应分析

为了研究多维多点地震动对折线型输电塔-线体系地震反应的影响,计算了体系在不同夹角,即

$\alpha=180^\circ$ 、 150° 、 120° 和 90° 这4种情况下输电塔的反应,并总结其反应规律。

图8给出了折线型输电塔-线体系不同夹角对应的转角塔在多维多点和多维一致地震激励下输电塔的不同高度处主材单元轴力最大值的变化曲线。由图8可以看出,多维一致地震激励下输电塔的轴力随着夹角的变小而增大,变化程度较大。这是由于夹角的减小导致输电塔受力的不平衡,在地震作用下的反应更显著。不同夹角下输电塔在多维多点地震激励下的主材轴力均大于多维一致地震激励下的;随着折线型输电塔线体系夹角 α 的变化,增大程度也不同,分别增大了17%、7%、22%和11%。由此可见,输电塔的主材轴力反应受折线型输电线路夹角影响较大,并且忽略地震动的多维多点效应会低估输电塔的轴力反应,最大低估为22%,此时折线型输电塔-线体系的夹角为 120° 。因此,对于折线型输电塔-线体系,在计算输电塔的地





(d) $\alpha=90^\circ$

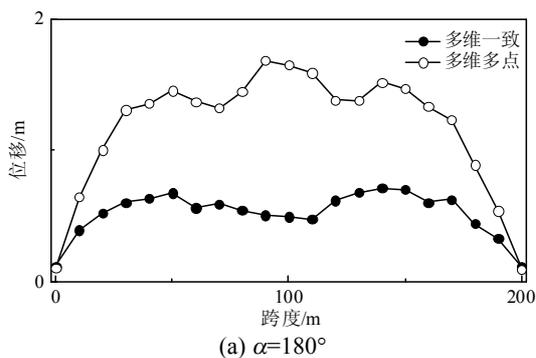
图 8 输电塔线体系不同角度下输电塔的轴力
Fig.8 Axial forces of transmission tower under different angles of transmission tower-line system

震反应时,不可以忽略折线型输电塔-线体系夹角以及地震动多维多点效应的影响。

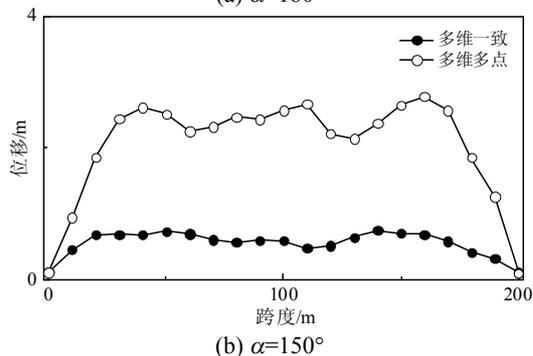
4.2 输电线的地震反应分析

为了研究多维多点地震动对折线型输电塔-线体系地震反应的影响,计算了体系在不同夹角,即 $\alpha=180^\circ$ 、 150° 、 120° 和 90° 这 4 种情况下输电线的反应,并总结其反应规律。

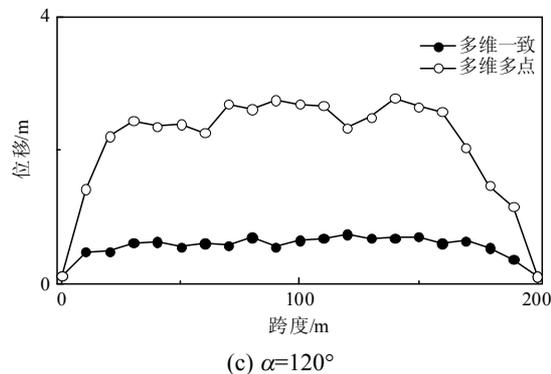
图 9 给出了折线型输电塔-线体系不同夹角对应的输电线在多维多点和多维一致地震激励下的输电线竖向位移最大值变化曲线。由图 9 可得,多维一致地震激励下输电线的竖向位移随着夹角的变化较小;不同夹角下输电线在多维多点地震激励下的竖向位移均大于多维一致地震激励下的,反应得到强烈地放大;随着夹角 α 的变化,增大程度也不同,分别为 136%、271%、273%和 100%。由此



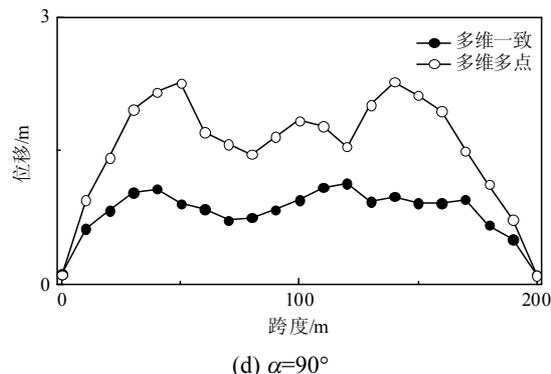
(a) $\alpha=180^\circ$



(b) $\alpha=150^\circ$



(c) $\alpha=120^\circ$



(d) $\alpha=90^\circ$

图 9 输电塔线体系不同角度下输电线的竖向位移
Fig.9 Vertical displacements of transmission lines under different angles of transmission tower-line system

可见,对于折线型输电塔-线体系,忽略地震动的多维多点效应会严重地低估输电线的竖向位移反应,最大低估为 273%,此时折线型输电线路的夹角为 120° 。

图 10 给出了折线型输电塔-线体系不同夹角对应的输电线在多维多点和多维一致地震激励下的各层张力最大值变化曲线。由图 10 可得,顶层的地震反应最小,这是由于体系中的顶层为地线,地线的质量和横截面尺寸较小。除了顶层地线以外,输电线轴力随着其所在层高度的减小而减小,即第 ②层导线轴力最大,第 ⑦层导线轴力最小;中间 3 层输电线轴力变化较大,最下面 3 层输电线轴力变化不明显。这是因为随着高度的增加,塔身的位移增大,从而导致输电线的轴力变大。由图 10 进一步可以得到,多维一致地震激励下输电线的张力随着夹角的变化较小;不同夹角下输电线在多维多点地震激励下的张力均大于多维一致地震激励下的;随着夹角 α 的变化,增大程度也不同,分别为 12%、43%、57%和 25%。由此可见,对于折线型输电塔-线体系,忽略地震动的多维多点效应会低估输电线的张力,最大低估为 57%,此时折线型输电线路的夹角为 120° 。

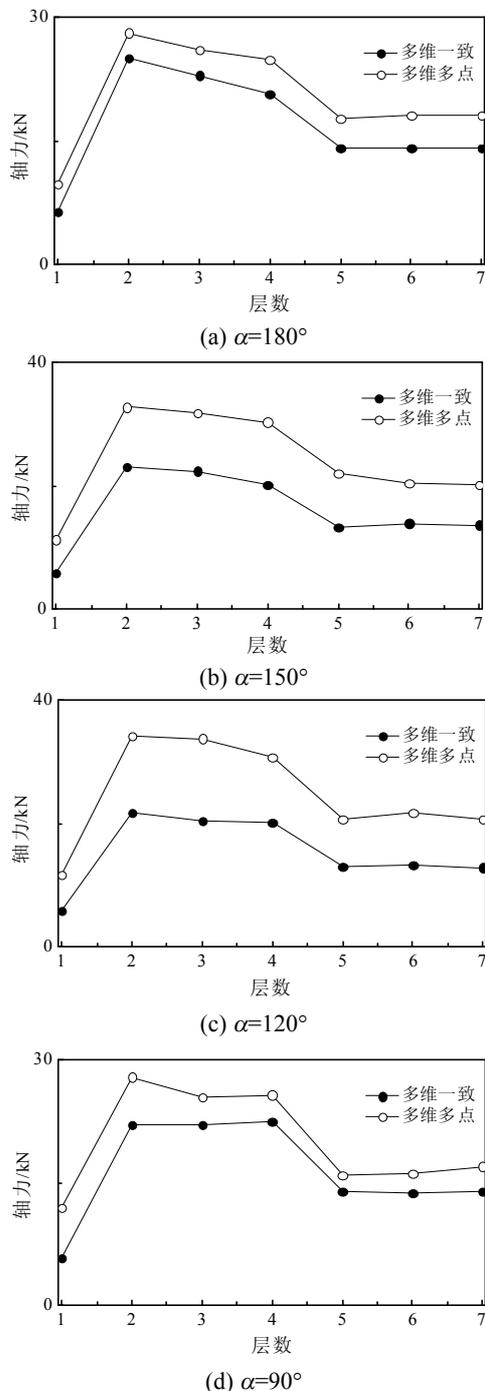


图 10 输电塔线体系不同角度下输电线的张力
Fig.10 Tension forces of transmission lines under different angles of transmission tower-line system

5 结论

本文从数值计算的角度出发,运用非线性时程分析方法,研究了多维多点地震动激励下输电塔-线体系的地震反应。根据实际工程建立了不同角度的“折线型”输电塔-线体系有限元模型,考虑了输电线的几何非线性;选取了 SMART-I 台阵中不同方向上的多维多点地震动时程,分别研究了不同折

线角度下输电塔-线体系多维多点地震反应。根据以上的分析,可以得到如下结论:

(1) 折线型输电塔-线体系中输电塔的地震反应随着夹角的变小而增大,变化程度较大。因此不可忽略夹角变化对输电塔地震反应的影响。

(2) 对于折线型输电塔-线体系的输电塔,不同夹角下输电塔在多维多点地震激励下的反应均大于多维一致激励,考虑地震动多维多点效应对输电塔的影响十分必要。

(3) 折线型输电塔-线体系中输电线的地震反应随着夹角的不同,变化较小。可以忽略夹角变化对输电线地震反应的影响。

(4) 对于折线型输电塔-线体系的输电线,考虑地震动的多维多点效应,输电线的竖向位移得到强烈地放大;忽略地震动的多维多点效应会低估每层输电线的张力反应。

因此,为了保证折线型输电线路的地震安全性,应该考虑地震动的多维多点效应及角度的变化。

参考文献:

- [1] 李宏男,王前信.大跨越输电塔体系的动力特性[J].土木工程学报,1997,30(5):28-36.
Li Hongnan, Wang Qianxin. Dynamic characteristics of long-span transmission lines and their supporting towers [J]. China Civil Engineering Journal, 1997, 30(5): 28-36. (in Chinese)
- [2] 谢强,李杰.电力系统自然灾害的现状与对策[J].自然灾害学报,2006,15(4):126-131.
Xie Qiang, Li Jie. Current situation of natural disaster in electric power system and countermeasures [J]. Journal of Natural Disasters, 2006, 15(4): 126-131. (in Chinese)
- [3] 尹荣华,李东亮,刘戈林,翟桐.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, Zhai Tong. Seismic damage and analysis of power transmission towers [J]. World Earthquake Engineering, 2005, 21(1): 51-54. (in Chinese)
- [4] 李宏男.结构多维抗震理论[M].北京:科学出版社,2006:417-434.
Li Hongnan. Theoretical analysis of structures to multiple earthquake excitations [M]. Beijing: Science Press, 2006: 417-434. (in Chinese)
- [5] 杨庆山,刘文华,田玉基.国家体育场在多点激励作用下的地震反应分析[J].土木工程学报,2008,41(2):35-41.
Yang Qingshan, Liu Wenhua, Tian Yuji. Response analysis of national stadium under specially variable earthquake ground motions [J]. China Civil Engineering Journal, 2008, 41(2): 35-41. (in Chinese)

(参考文献[6]-[12]转第283页)

δ 为变形量; δ_{\max} 为变形量的最大值;
 ζ 为无量纲极径; η 为槽深变化相对幅度;
 μ 为介质的动力粘度; φ 为无量纲极角;
 χ 为一阶滑移边界条件下可压缩性修正系数;
 Λ 为可压缩性参数。

参考文献:

- [1] Gad-el-Hak M. The fluid mechanics of micro devices—The freeman scholar lecture [J]. Transactions of the ASME, Journal of Fluids Engineering, 1999, 121(1): 5—33.
- [2] Gad-el-Hak M. Flow physics in MEMS [J]. Mecanique and Industries, 2001, 2(4): 313—341.
- [3] Kassner M E, Nemat-Nasser S, Suo Z, et al. New directions in mechanics [J]. Mechanics of Materials, 2005, 37(2/3): 231—259.
- [4] Beskok A, Karniadakis G E, Trimmer W. Rarefaction and compressibility effects in gas micro flows [J]. Journal of Fluids Engineering, 1996, 118(5): 448—456.
- [5] 张宝忠, 肖敏. 内置式机械密封变形分析与计算[J]. 机械设计与制造, 2003, (1): 62—63.
 Zhang Baozhong, Xiao Min. Analysis and calculation of inside mechanic seal deformation [J]. Machinery Design & Manufacture, 2003, (1): 62—63. (in Chinese)
- [6] 顾永泉. 机械端面密封[M]. 东营: 石油大学出版社, 1994.
 Gu Yongquan. Mechanical face seal [M]. Dongying: University of Petroleum Press, 1994. (in Chinese)
- [7] 张书贵, 顾永泉. 机械密封变形的研究[J]. 石油大学学报(自然科学版), 1992, 16(2): 48—53.
 Zhang Shugui, Gu Yongquan. Study on the deformation of mechanical face seal [J]. Journal of the University of Petroleum, China, 1992, (2): 48—53. (in Chinese)
- [8] Stolarski T A, Xue Y. [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part J: Journal of Engineering Tribology, 1998, 212(4): 279—290.
- [9] 王美华, 董勋. 人字形螺旋槽机械密封热变形及力变形[J]. 流体工程, 1992, 20(5): 34—38.
 Wang Meihua, Dong Xun. Thermal and mechanical deformations of herringbone spiral groove mechanical seal [J]. Fluid Engineering, 1992, 20(5): 34—38. (in Chinese)
- [10] 丁雪兴, 陈德林, 张伟政, 俞树荣, 杜兆年. 螺旋槽干气密封微尺度流动场的近似计算及其参数优化[J]. 应用力学学报, 2007, 24(3): 425—428.
 Ding Xuexing, Chen Delin, Zhang Weizheng, Yu Shurong, Du Zhaonian. Approximate calculation and parameters optimization for micro-scale flow field in spiral grooved gas seal [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2007, 24(3): 425—428. (in Chinese)
- [11] 丁雪兴, 蒲军军, 韩明君, 等. 基于二阶滑移边界的螺旋槽干气密封气膜刚度计算与分析[J]. 机械工程学报, 2012, 47(23): 119—124.
 Ding Xuexing, Pu Junjun, Han Mingjun, et al. Calculation and analysis of gas film stiffness in the spiral groove gas seal based on the second order slip boundary [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 47(23): 119—124. (in Chinese)
- [12] 丁雪兴. 干气密封螺旋槽润滑气膜的稳、动态特性研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2008.
 Ding Xuexing. Spiral groove gas seal lubrication film stability dynamic characteristics [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2008. (in Chinese)

(上接第 278 页)

- [6] GB 50260-96, 电力设施抗震设计规范[S]. 北京: 1996.
 GB 50260-96, Code for design of seismic of electrical installations [S]. Beijing: China Planning Press, 1996. (in Chinese)
- [7] 邓洪洲, 陈晓明, 屠海明, 等. 江阴大跨越输电塔模型实验研究[J]. 建筑结构学报, 2001, 22(6): 31—35.
 Deng Hongzhou, Chen Xiaoming, Tu Haiming, et al. Experimental study on model of Jiangyin long span transmission tower [J]. Journal of Building Structures, 2001, 22(6): 31—35. (in Chinese)
- [8] 沈世钊, 徐崇宝, 赵臣. 悬索结构设计[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997: 67—80.
 Shen Shizhao, Xu Chongbao, Zhao Chen. Design of suspension cable structure [M]. Beijing: China Building Industrial Press, 1997: 67—80. (in Chinese)
- [9] Tian L, Li H N, Liu G H. Seismic response of power transmission tower-line system subjected to spatially varying ground motions [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2010, Article ID 587317: 1—20.
- [10] 柳国环, 李宏男, 林海. 结构地震响应计算模型比较与分析[J]. 工程力学, 2009, 26(2): 10—15.
 Liu Guohuan, Li Hongnan, Lin Hai. Comparison and evaluation of models for structural seismic responses analysis [J]. Engineering Mechanics, 2009, 26(2): 10—15. (in Chinese)
- [11] 柳国环, 李宏男, 国巍, 田利. 求解结构地震响应位移输入模型中存在问题的一种新解决方法[J]. 工程力学, 2010, 27(9): 55—62.
 Liu Guohuan, Li Hongnan, Guo Wei, Tian Li. A new method for solving problem of current displacement input model for calculating structural seismic responses [J]. Engineering Mechanics, 2010, 27(9): 55—62. (in Chinese)
- [12] Hao H, Oliveira C S, Penzien J. Multiple-station ground motion processing and simulation based on SMART-1 array data [J]. Nuclear Engineering and Design, 1989, 111: 293—310.