

空间变化地震动下输电塔-线体系振动控制研究*

田利^{1,2}, 李宏男², 周海鹰³

(1. 山东大学土建与水利学院 济南, 250061) (2. 大连理工大学建设工程学部 大连, 116023)

(3. 中国电力科学研究院输变电工程研究所 北京, 100192)

摘要 在考虑输电线的几何非线性基础上,建立了输电塔-线体系的三维有限元计算模型。依据现行《电力设施抗震设计规范》,模拟生成了适合输电塔-线体系的多点地震动时程。利用质量、弹簧单元和阻尼单元模拟了调谐质量阻尼器,并对控制参数进行了优化。运用非线性时程分析方法,研究了多点地震激励对高压输电塔-线体系振动控制的影响。研究结果表明调谐质量阻尼器的减震效果显著,能够有效地减小输电塔的地震响应;仅考虑行波效应和多点激励对输电塔的减震效果影响较小,并且多点激励对输电塔的减震效果优于一致激励,但仅考虑相干效应减弱了输电塔的减震效果。

关键词 高压输电塔-线体系; 多点地震激励; 调谐质量阻尼器; 减震效果

中图分类号 TM726; TH762.2

1 问题的提出

高压输电塔-线体系是一种重要的生命线工程^[1],我国大部分输电线路需要穿越高烈度地震区,输电塔和输电线在地震作用下的破坏常有发生,这不仅严重影响人们的生产建设、生活秩序和抗震救灾工作,还会引发次生灾害,造成十分严重的经济损失^[2-3]。例如,1992年,Landers地震致使100多条输电线路不同程度损毁,导致洛杉矶电力供应短时瘫痪;1994年,美国Northridge地震,造成一批高压输电塔倾倒或损坏,110万用户失去供电;1995年,日本阪神大地震,有38条高压线路、446条配电线路损坏,总计约有20座输电塔塔身倾斜,另有部分线路的绝缘子震坏,震后当天有100万户停电;1999年,我国台湾集集地震对输电塔的破坏十分严重,造成345 kV高压输电塔大规模损坏,经济损失难以估计;2008年,四川汶川地震给电力设施造成了巨大的破坏^[4],据不完全统计:地震及余震导致110 kV线路倒塌20多基,局部破坏受损约16基;500 kV茂谭线8基、220 kV茂永线2基铁塔损毁,造成了巨大的经济损失。图1给出了汶川地震中输电塔和输电线破坏事例图。由此可以看出,现阶段加强输电线路的抗震减震研究,进一步提高我国电网在地震作用下的安全运行,具有重大的现实意义。



(a) 输电线拉断



(b) 输电塔倒塌

图1 汶川地震中输电塔和输电线破坏图

高压输电塔-线体系作为一种高柔结构,在各类动力荷载(如地震、风雨等)作用下,塔顶往往产生较大的位移和加速度,铁塔的振动又往往引起悬垂绝缘子体系、输电线的振动,反之亦然,形成一种相互激励和耦合的振动现象。因此在线路运行中,应尽量控制输电塔的振动,从而可以减小输电线的振动,避免输电塔-线体系在外荷载激励下形成共振或构

* 国家自然科学基金资助项目(51208285, 50638010);中国博士后科学基金资助项目(2012M521338);山东大学自主创新基金资助项目(2011GN051)。

收稿日期:2012-05-21;修改稿收到日期:2012-09-10

件振动疲劳损伤,提高输电塔-线体系运行的安全性和可靠性。国内外已有一些有关输电塔-线体系的振动控制研究成果,但大部分都集中在风振控制方面^[5-7],对于输电塔-线体系这种复杂结构的地震控制研究还比较少。由于高压输电塔-线体系的跨度一般都比较大,达到几百米甚至超过千米,各个点的地震动存在明显的差异。已有研究表明^[8],对于输电塔-线体系进行抗震分析时,需采用多点地震激励模型,而多点地震激励对输电塔-线体系振动控制的影响如何,目前还没有这方面的研究。现阶段被动减震控制技术应用相对较多,其中调谐质量阻尼器(tuned mass damper,简称 TMD)因其减震机理明确、效果明显、应用范围广等特点而被工程界广泛应用于高层建筑、高耸塔架等结构中。基于以上研究现状,笔者借助国际通用有限元软件 SAP2000,根据实际工程建立了输电塔-线体系三维有限元模型,依据《电力设施抗震设计规范》模拟生成了多点地震动时程,并对 TMD 控制参数进行了优化,研究多点地震输入对输电塔-线体系减震控制的影响,为进一

步研究和应用提供理论参考。

2 高压输电塔-线体系计算模型

根据某个实际输电线路,利用有限元软件 SAP2000 建立了输电塔-线耦合体系的三维有限元模型。试验结果证实^[9],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。本文建立的输电塔-线耦合三维有限元模型,如图 2 所示。研究表明,这种三塔四线模型能够反映输电塔-线体系的实际情况^[10]。输电线采用索单元,导线和地线型号分别为 $4 \times \text{LGJ-400/35}$ 型钢芯铝绞线和 LGJ-95/55 型钢芯铝绞线。这里考虑了导(地)线初始轴力和大变形效应的影响。输电塔底部 4 个节点的连接方式为固结,横担与导(地)线的连接方式为铰接,以达到对实际情况的模拟。

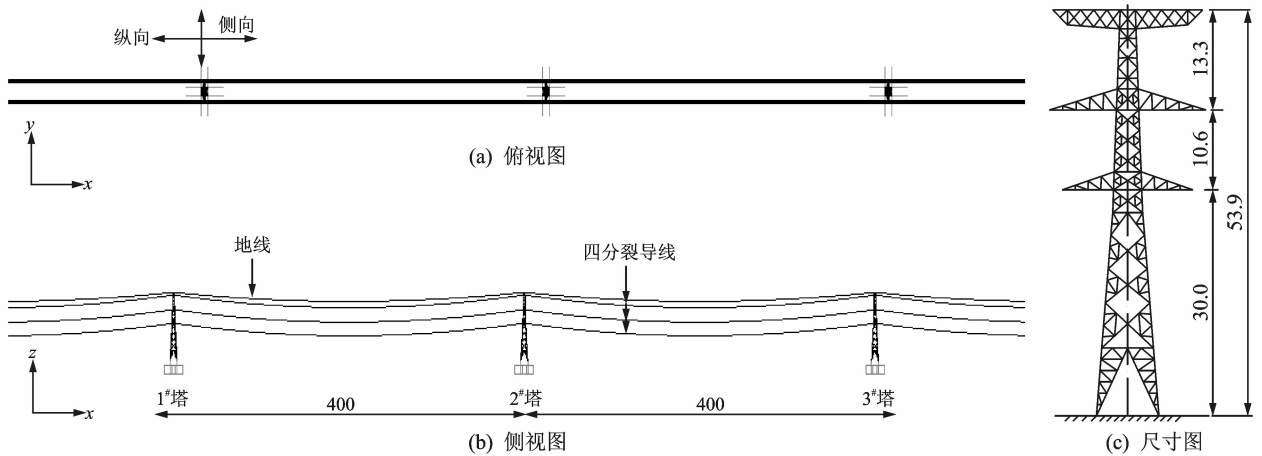


图 2 三塔四线耦合体系的三维有限元模型(单位:m)

3 分析方法

3.1 索的几何刚度矩阵

如图 3 所示,假设 t 时刻索单元两节点 i, j 承受 $T(t)$ 作用力,长度为 L ; $t + \Delta t$ 时刻地震作用下节点 i, j 承受节点力为 $F_i(t + \Delta t)$ 和 $F_j(t + \Delta t)$ 与 $T(t + \Delta t)$,索的两端有两个侧向位移 v_i 和 v_j ,达到了一个新的平衡状态,这里假定所有向上的力和位移为正。此时,满足力的平衡方程

$$\begin{bmatrix} F_i(t + \Delta t) \\ F_j(t + \Delta t) \end{bmatrix} = \frac{T(t + \Delta t)}{L} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_i \\ v_j \end{bmatrix} =$$

$$\mathbf{K}_{t+\Delta t}^G \begin{bmatrix} v_i \\ v_j \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中: $\mathbf{K}_{t+\Delta t}^G$ 为 $t + \Delta t$ 时刻索单元的几何刚度矩

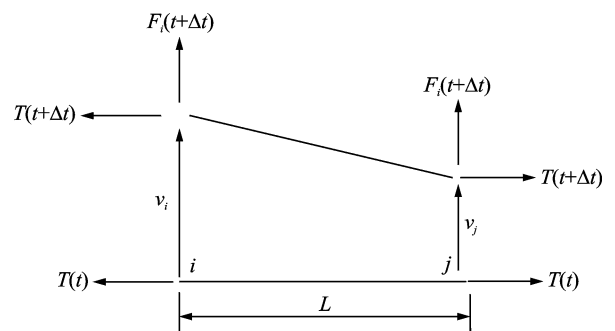


图 3 作用在索单元上的力

阵。由于地震是非平稳随机振动,并且输电塔在地震作用下的振动引起输电线连接输电塔端点的位移变化,进而使输电线的动张力发生变化,所以 $\mathbf{K}_{t+\Delta t}^G$ 是随时间改变的。

3.2 一致地震作用下体系求解方法

输电塔-线体系在一致地震作用下,考虑输电线随时间变化刚度矩阵的力平衡方程形式为

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}}_{t+\Delta t} + \mathbf{C}_{t+\Delta t}\dot{\mathbf{x}}_{t+\Delta t} + \mathbf{K}_{t+\Delta t}\mathbf{x}_{t+\Delta t} = -\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}}_g \quad (2)$$

其中: $\ddot{\mathbf{x}}_{t+\Delta t}$, $\dot{\mathbf{x}}_{t+\Delta t}$ 和 $\mathbf{x}_{t+\Delta t}$ 为体系的运动向量; \mathbf{M} 为输电线找形结束并具有初始刚度时体系的质量矩阵,这里忽略了体系质量矩阵随时间的变化; $\mathbf{K}_{t+\Delta t}$ 为体系刚度矩阵,是随体系不断变化而变化的; $\ddot{\mathbf{u}}_g$ 为地震加速度向量; $\mathbf{C}_{t+\Delta t}$ 为塔-线体系阻尼矩阵,由 Rayleigh 阻尼可以得到 $\mathbf{C}_{t+\Delta t} = \alpha\mathbf{M} + \beta\mathbf{K}_{t+\Delta t}$, 其中 $\mathbf{C}_{t+\Delta t}$ 是随体系刚度矩阵变化而变化的; α 和 β 为体系的质量矩阵系数和刚度矩阵系数,根据输电线和输电塔的第一频率及其相应阻尼比确定。

3.3 附加 TMD 的体系多点动力平衡方程

假设在体系上附加一个 TMD 系统,由于各输电塔支座处的地震波不同,对于体系用绝对位移建立动力方程,则体系和 TMD 的动力平衡方程分别为

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{x}} + \mathbf{K}\mathbf{x} - \{\mathbf{E}\}(c_t\dot{x}_t + k_tx_t) = -\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}}_g \quad (3)$$

$$m_t(\ddot{x}_t + \mathbf{E}^T\ddot{\mathbf{x}}) + c_t\dot{x}_t + k_tx_t = 0 \quad (4)$$

其中: \mathbf{M} , \mathbf{C} 和 \mathbf{K} 分别为体系的质量、阻尼和刚度矩阵; m_t , c_t 和 k_t 分别为 TMD 系统的质量、阻尼和刚度; \mathbf{x} 为体系各自由度的绝对位移列向量; x_t 为 TMD 系统相对于其作用自由度的位移; \mathbf{E} 为子结构的位置指示向量,相应于其作用自由度的分量为 1,其余的全为 0。

将式(2)与式(3)写成统一的表达式形式

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M}_{aa} & \mathbf{M}_{ab} & \mathbf{0} \\ \mathbf{M}_{ba} & \mathbf{M}_{bb} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & m_t\mathbf{E}^T & m_t \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{\mathbf{x}}_a \\ \ddot{\mathbf{x}}_b \\ \ddot{x}_t \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{C}_{aa} & \mathbf{C}_{ab} & \mathbf{0} \\ \mathbf{C}_{ba} & \mathbf{C}_{bb} & -\mathbf{E}c_t \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & c_t \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\mathbf{x}}_a \\ \dot{\mathbf{x}}_b \\ \dot{x}_t \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{K}_{aa} & \mathbf{K}_{ab} & \mathbf{0} \\ \mathbf{K}_{ba} & \mathbf{K}_{bb} & -\mathbf{E}k_t \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & k_t \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{x}_a \\ \mathbf{x}_b \\ x_t \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{P}_a \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \end{Bmatrix} \quad (5)$$

其中: \mathbf{M} , \mathbf{C} 和 \mathbf{K} 分别为体系的质量、阻尼和刚度矩

阵,其下标 aa , bb 和 ab 分别表示支座自由度、上部结构自由度和它们的耦合项; $\ddot{\mathbf{x}}_a$, $\dot{\mathbf{x}}_a$ 和 \mathbf{x}_a 为地面运动向量; $\ddot{\mathbf{x}}_b$, $\dot{\mathbf{x}}_b$ 和 \mathbf{x}_b 为结上部结构非支座节点运动向量; \mathbf{P}_a 为支座反力向量。

由式(5)中的第 2 式和第 3 式可得到关于未知运动向量的动力平衡方程

$$\mathbf{M}_{ba}\ddot{\mathbf{x}}_a + \mathbf{M}_{bb}\ddot{\mathbf{x}}_b + \mathbf{C}_{ba}\dot{\mathbf{x}}_a + \mathbf{C}_{bb}\dot{\mathbf{x}}_b - \mathbf{E}c_t\dot{x}_t + \mathbf{K}_{ba}\mathbf{x}_a + \mathbf{K}_{bb}\mathbf{x}_b - \mathbf{E}k_tx_t = 0 \quad (6)$$

$$m_t\mathbf{E}^T\ddot{\mathbf{x}}_b + m_t\ddot{x}_t + c_t\dot{x}_t + k_tx_t = 0 \quad (7)$$

采用集中质量模型,则有 $\mathbf{M}_{ba} = 0$; 一般情况下阻尼矩阵 \mathbf{C}_{ab} 很难确定,因此阻尼力常常被忽略,那么可将式(6)写成

$$\mathbf{M}_{bb}\ddot{\mathbf{x}}_b + \mathbf{C}_{bb}\dot{\mathbf{x}}_b + \mathbf{K}_{bb}\mathbf{x}_b - \mathbf{E}(c_t\dot{x}_t + k_tx_t) = -\mathbf{K}_{ba}\mathbf{x}_a \quad (8)$$

式(8)即为求解地面运动体系反应的位移输入模型。根据文献[11]的研究,当前位移输入模型存在不容忽视的问题,这里采用文献[12]中提出的适用于 SAP2000 位移输入模型。

4 多点地震动的模拟

综合考虑各种随机模型的特点,选用 Clough 和 Penzien 建议的修正过滤白噪声模型,给出的地面加速度功率谱密度函数为

$$S(\omega) = \frac{\omega_g^4 + 4\xi_g^2\omega_g^2\omega^2}{(\omega_g^2 - \omega^2)^2 + 4\xi_g^2\omega_g^2\omega^2} \cdot \frac{\omega^4}{(\omega_f^2 - \omega^2)^2 + 4\xi_f^2\omega_f^2\omega^2} S_0 \quad (9)$$

其中: S_0 为谱强度因子; ω_g 和 ξ_g 为场地的卓越频率和阻尼比; ω_f 和 ξ_f 为可模拟地震动低频分量能量变化的参数。文献[13]给出了与《电力设施抗震设计规范》相对应的修正过滤白噪声模型参数。

笔者采用文献[14]给出的相干模型,该模型取前人研究的模型在各次地震中相干值的平均值,具有较高的使用价值,相干函数表达式为

$$|\gamma_{jk}(i\omega, d_{jk})| = \exp[-a(\omega)d_{jk}^{b(\omega)}] \quad (10)$$

其中: $a(\omega) = a_1\omega^2 + a_2$; $b(\omega) = b_1\omega + b_2$; $a_1 = 1.678 \times 10^{-5}$; $a_2 = 1.219 \times 10^{-3}$; $b_1 = -5.5 \times 10^{-3}$; $b_2 = 0.7674$ 。

按照工程要求,根据 GB50260-96《电力设施抗震设计规范》^[15] 确定加速度反应谱及其参数。地面峰值加速度 a_{\max} 可选取规范中参照的设计基本地震加速度值。不考虑局部场地土条件影响时,假设分

析的输电线路位于 III 类场地土(相当于中软土),按照抗震设防烈度为 9 度,可得到场地指数 $\mu = 0.4$,周期 $T_g = 0.65 - 0.45\mu^{0.4} = 0.34$ s。假设结构各个输电塔支座处的反应谱曲线均相同,峰值加速度为 $0.4g$ 。

选取视波速 $v_{app} = 500$ m/s,模拟出各个支座的地震波输入时程,将模拟的地震波作为地面运动输入,即为多点激励;将模拟的 1[#] 塔支座的地震时程作为所有支座的输入时程对结构进行分析,即为一致激励;在一致激励的基础上,仅考虑行波效应,即所有支座仍具有相同的地震输入,但这种输入在各支座间存在时间上的差异,此即为行波法激励;将仅考虑相干效应的输入定义为相干法激励。图 4 给出了人工模拟的各个输电塔支座处的地震动加速度时程曲线。本文还选取了 El Centro 波(1940 年 5 月 18 日),分别考虑一致激励和行波法激励,其加速度时程如图 5 所示。

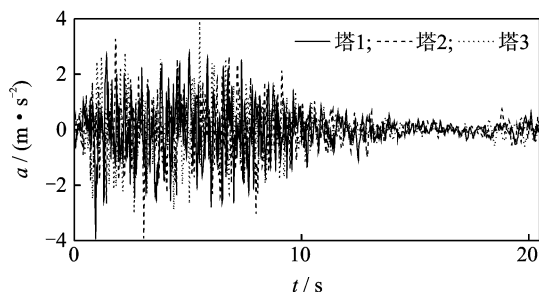


图 4 模拟的多点地震动加速度时程曲线

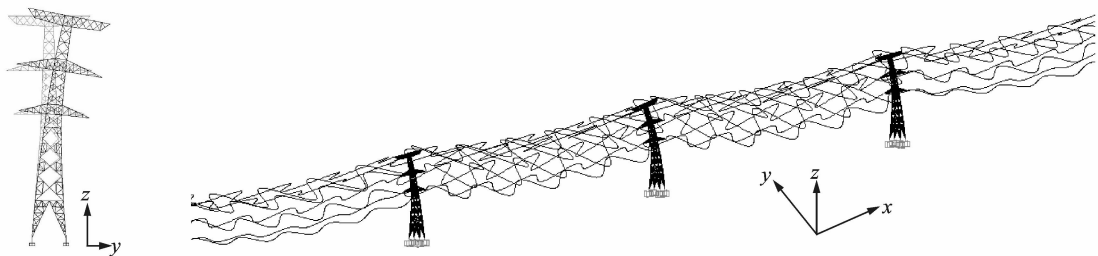


图 6 单塔和塔-线体系 1 阶振型

表 1 单塔与塔-线体系的 TMD 优化参数

类型	M_1^*/kg	ω_d/Hz	m_{tmd}/kg	$K_{\text{tmd}}^{\text{opt}}/(\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	$C_{\text{tmd}}^{\text{opt}}/(\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1})$
单塔	3 718	1.86	186	21 902	444
塔-线体系	18 261	1.72	913	85 632	1 945

5.2 调谐质量阻尼器有限元模拟

如图 7 所示,TMD 由质量块 M 、弹簧 K 和阻尼 C 组成,其中阻尼 C 采用阻尼器 C_m 与弹簧 K_m 串联方式的 Maxwell 计算模型,见图 8。利用 Maxwell 模型来模拟 TMD 中的阻尼 C ,设 Maxwell 模型中

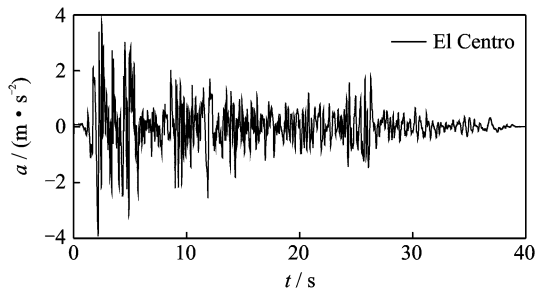


图 5 El Centro 波加速度时程曲线

5 调谐质量阻尼器优化及有限元模拟

5.1 调谐质量阻尼器参数优化

本文选用支撑式附加 TMD 系统。采用文献 [16-18] 所叙述的方法,对该结构的 TMD 参数进行优化选取,文中符号的意义: f_1 为第 1 阶频率; λ_1 为 TMD 调谐频率与 f_1 优化比值; $f_{\text{tmd}}^{\text{opt}}$ 为 TMD 优化频率; M_1^* 为第 1 阶模态质量; μ 为 TMD 质量与 M_1^* 比值; m_{tmd} 为 TMD 的质量; $\xi_{\text{tmd}}^{\text{opt}}$ 为 TMD 的优化阻尼比; $C_{\text{tmd}}^{\text{opt}}$ 为 TMD 的优化阻尼系数; $K_{\text{tmd}}^{\text{opt}}$ 为 TMD 的优化刚度。利用数值搜索方法 [16-18],取 $\mu = 0.05$,得到优化的 TMD 参数 $\lambda^{\text{opt}} = 0.929$, $\xi_{\text{tmd}}^{\text{opt}} = 0.11$ 。输电塔的 1 阶振型如图 7 所示, $f_1 = 1.86$ Hz;塔-线体系平行于横担方向,以塔振动为主的 1 阶振型如图 6 所示, $f_1 = 1.72$ Hz。TMD 的优化参数见表 1。

C_m 与 K_m 的位移为 d_c 和 d_k ,可以表达为

$$f_d = K_m d_k = C_m \dot{d}_c \quad (11)$$

$$d = d_k + d_c \quad (12)$$

其中: d 为 i, j 两点变形差。当 K_m 取值足够大时(取 $K_m = 10^3 C_m$), d_k 足够小,则 $d = d_c$ 。此时, $f_d = C_m \dot{d}$,这里 C_m 就是 TMD 阻尼 C 。

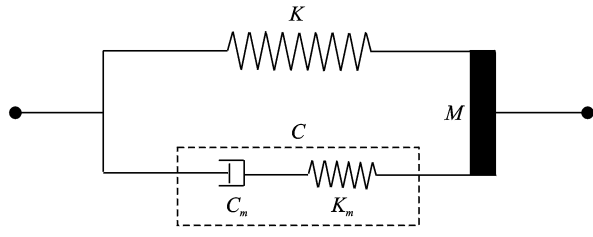


图 7 TMD 的模拟示意图

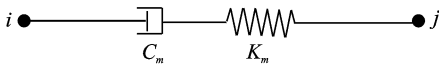


图 8 Maxwell 模型示意图

6 数值计算与分析

为了研究 TMD 减震装置对单塔和塔-线体系的控制效果以及地震动空间变化效应对输电塔-线体系减震控制的影响,对图 2 中的单塔和输电塔-线体系有限元模型进行了分析。分别采用人工波和 El Centro 波对单塔和塔-线体系在无控与有控的情况下进行了计算与分析。这里,减振效果取减振系数 β_R 来表示

$$\beta_R = \frac{\sigma_c}{\sigma_o} \quad (13)$$

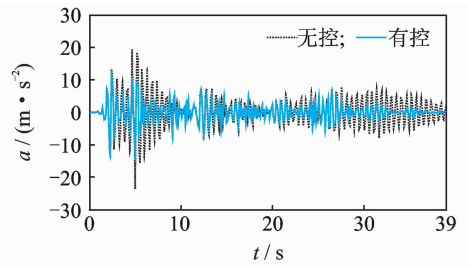
其中: σ_c 和 σ_o 分别定义为结构有控和无控时反应的方差。

文中 β_a 、 β_d 和 β_f 分别表示为加速度减振系数、位移减振系数和轴力减振系数。另外,选取塔顶加速度、位移和塔底轴力的峰值在有控时相对于无控时的减小率作为研究对象。

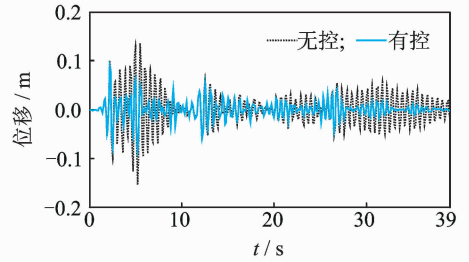
6.1 单塔的减震效果分析

根据 4.1 节选定的单塔 TMD 优化参数,对单塔设与未设 TMD 进行了地震反应分析,地震波选用 El Centro 波和人工波。单塔无控和有控的塔顶节点加速度时程、位移时程和塔底轴力时程反应比较见图 9 和 10。对于单塔,选用 El Centro 波激励时,其减震效果: $\beta_a = 0.292$, $\beta_d = 0.244$, $\beta_f = 0.254$; 选用人工波激励时,其减震效果: $\beta_a = 0.488$, $\beta_d = 0.369$, $\beta_f = 0.385$ 。从图中可以得到,在 El Centro 波激励下,塔顶加速度、位移和塔底轴力的峰值分别减小了 39%, 45% 和 29%; 在人工波激励下,塔顶加速度、位移和塔底轴力的峰值分别减小了 27%, 50% 和 32%。

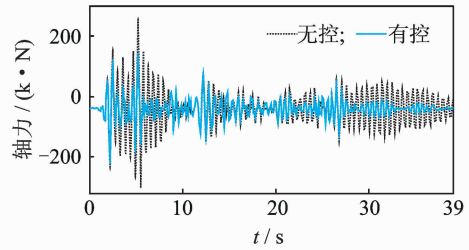
由上述分析表明, TMD 减震装置对单塔有显著的控制效果, 反应峰值得到了很大的削弱, 利用 TMD 对单塔进行一阶模态优化控制时, 可以得到理想的效果。



(a) 塔顶节点加速度时程

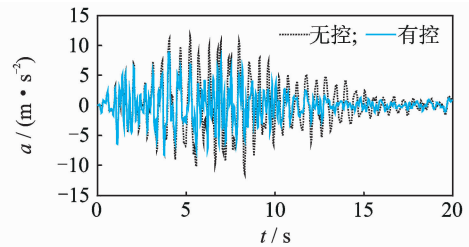


(b) 塔顶节点位移时程

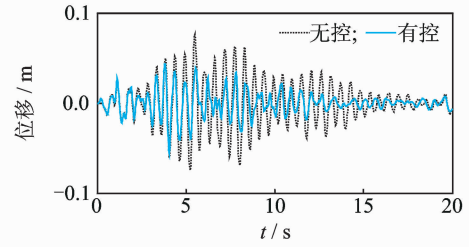


(c) 塔底主材轴力时程

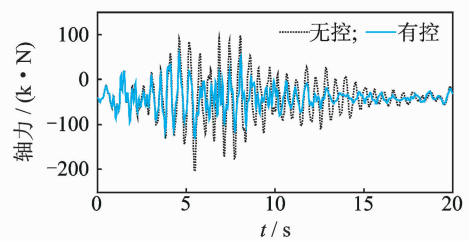
图 9 El Centro 波激励下塔无控与有控反应比较



(a) 塔顶节点加速度时程



(b) 塔顶节点位移时程



(c) 塔底主材轴力时程

图 10 多点波激励下塔无控与有控反应比较

6.2 输电塔-线体系的减震效果分析

根据上节选定的塔-线体系 TMD 优化参数,对塔-线体系进行了设与未设 TMD 地震反应分析,地震波选用 El Centro 波和人工波。图 11 和 12 分别给出了 El Centro 波和人工波的一致激励下 2[#] 塔设与未设 TMD 控制的塔顶节点的加速度时程、位移时程和塔底轴力的时程反应比较。由图 11 可以得到在 El Centro 波激励下,加速度、位移和轴力的峰值分别减小了 29%,30%和 24%;由图 12 可以得到在人工波激励下,加速度、位移和轴力的峰值分别减小了 25%,43%和 20%。

El Centro 波和人工波激励下 2[#] 塔的控制效果如表 2 和表 3 所示。由表中可得,安装调谐质量阻尼器后,一致激励下输电塔的加速度减震效果很好,可以减小塔-线体系的相互激励和耦合振动现象;一致激励下输电塔的位移减震效果较好,如此导(地)线的位移也随之减小,有利于塔-线体系的安全运行;同时,输电塔的轴力也得到控制,对于输电塔的安全是有利的。

由图表中还可以得到,行波法激励对塔-线体系的减震效果有一定的影响,但影响很小,可以忽略不计。在 El Centro 波的行波法激励下,加速度、位移

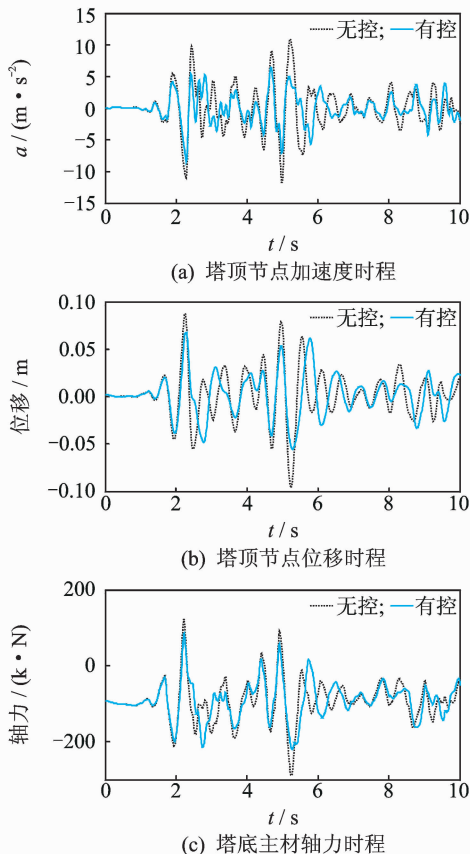


图 11 El Centro 波激励下 2[#] 塔无控与有控反应比较

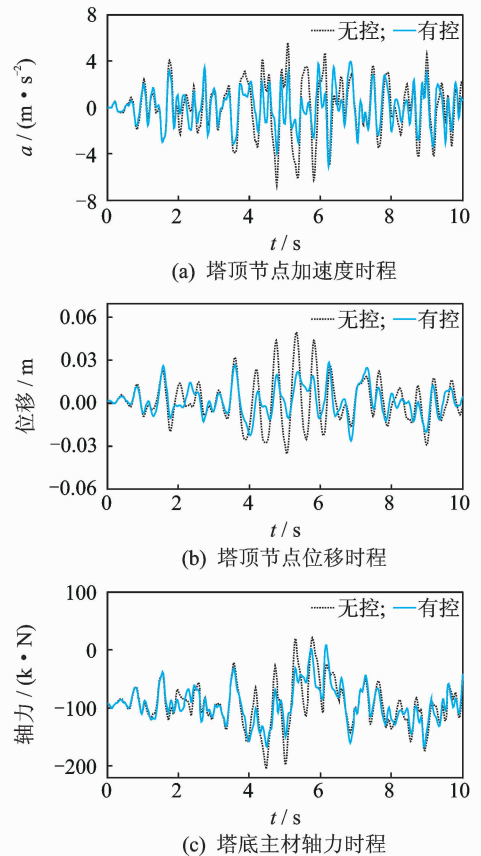


图 12 多点波激励下 2[#] 塔无控与有控反应比较

表 2 El Centro 波激励下 2[#] 塔的减震效果

工况	β_a	β_d	β_n
一致激励	0.46	0.72	0.78
仅考虑行波效应激励	0.49	0.68	0.76

表 3 人工波激励下 2[#] 塔的减震效果

工况	β_a	β_d	β_n
一致激励	0.50	0.45	0.72
仅考虑行波效应激励	0.46	0.40	0.68
仅考虑相干效应激励	0.51	0.50	0.76
多点激励	0.45	0.44	0.68

和轴力的峰值分别减小了 25%,18%和 12%;在人工波的行波法激励下,加速度、位移和轴力的峰值分别减小了 20%,34%和 17%,行波效应对于加速度和轴力峰值减小的影响可以忽略,但对于位移峰值减小的影响不容忽视。相干法激励对塔-线体系的减震效果有一定的影响,削弱了减震效果。在人工波的相干法激励下,加速度、位移和轴力的峰值分别减小了 27%,16%和 14%,相干效应对加速度的峰值减小影响甚微,但对于位移和轴力峰值减小的影响很大,应该引起重视。多点激励对塔-线体系的减震效果均优于一致激励。在此情况下,加速度、位移

和轴力的峰值分别减小了30%,30%和18%,说明了多点激励下对峰值减小不同于一致激励情况下。

由上述分析表明,TMD减震装置对塔-线体系有较好的控制效果,但不如单塔的控制效果显著,这是由于塔和线的耦合相互影响所致,并且塔-线之间的连接较柔也有影响。

7 结 论

根据输电线路的实际工程,建立了输电塔-线耦联有限元模型,对调谐质量阻尼器参数进行了优化,根据《电力实施抗震设计规范》模拟生成了多点地震动时程,分析了调谐质量阻尼器减震控制装置对单塔和塔-线耦联体系的减震效果,研究了地震动空间变化效应对塔-线体系振动控制的影响。通过以上的计算结果,可以得到以下结论。

1) 调谐质量阻尼器减震控制装置对单塔有很好的控制效果,显著地降低了输电塔的加速度、位移和轴力峰值。

2) 调谐质量阻尼器减震控制装置对塔-线体系有较好的控制效果,但控制效果不如单塔,这与塔-线耦合作用以及塔-线之间的柔性连接有关;控制后,输电塔在地震作用下相对于地面的位移和加速度得到减小,有利于减小输电塔的塔头和输电线的耦合振动。

3) 行波效应对塔-线调谐质量阻尼器控制的减震效果没有明显不利影响,相干效应对塔-线体系调谐质量阻尼器控制的减震效果有一定的不利影响,同时考虑行波效应和相干效应共同作用对塔-线体系调谐质量阻尼器减震效果优于一致激励情况下,这种工况更接近于实际情况。

参 考 文 献

[1] 杨靖波,李正,江俊. 输电线路铁塔导线耦合振动动力特性探究[J]. 振动、测试与诊断, 2008, 28(2): 147-150.
Yang Jingbo, Li Zheng, Jiang Jun. Dynamic characteristics of wind-induced coupled vibration between conductor and tower of transmission line[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2008, 28(2): 147-150. (in Chinese)

[2] 李宏男,胡大柱,黄连壮. 地震作用下输电塔体系塑性极限状态分析[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(24): 192-199.

Li Hongnan, Hu Dazhu, Huang Lianzhuang. Plastic limit analysis of the transmission tower system subjected to earthquake action [J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(24): 192-199. (in Chinese)

[3] 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)

[4] 于永清,李光范,李鹏,等. 四川电网汶川地震电力设施受灾调研分析[J]. 电网技术, 2008, 32(11): T1-T6.
Yu Yongqing, Li Guangfan, Li Peng, et al. Investigation and analysis of electric equipment damage in Sichuan power grid caused by Wenchuan earthquake [J]. Power System Technology, 2008, 32(11): T1-T6. (in Chinese)

[5] 杨靖波,李正. 输电线路钢管塔微风振动及其对结构安全性的影响[J]. 振动、测试与诊断, 2007, 27(3): 208-211.
Yang Jingbo, Li Zheng. Breeze vibration of transmission steel tubular tower and its effects on structure safety [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2007, 27(3): 208-211. (in Chinese)

[6] 邓洪州,朱松晔,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): 60-65.
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): 60-65. (in Chinese)

[7] 柳国环,李宏男. 高压输电塔-线体系风致动力响应分析与优化控制[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(19): 131-137.
Liu Guohuan, Li Hongnan. Analysis and optimization control of wind-induced dynamic response for high-voltage transmission tower-line system [J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(19): 131-137. (in Chinese)

[8] 田利,李宏男,黄连壮. 多点激励下输电塔-线体系的侧向地震反应分析[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(16): 108-114.
Tian Li, Li Hongnan, Huang Lianzhuang. Lateral response of transmission tower-line system under multiple support excitations [J]. Proceeding of the CSEE, 2008, 28(16): 108-114. (in Chinese)

[9] 邓洪州,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)
- [10] Tian Li, Li Hongnan, Liu Guohuan. Seismic response of power transmission tower-line system subjected to spatially varying ground motions [J] Mathematical Problems in Engineering, 2010, Article ID 587317.
- [11] 柳国环,李宏男,国巍.求解结构地震响应位移输入模型存在的问题及其 AMCE 实效对策[J].计算力学学报,2009,26(6):862-869.
Liu Guohuan, Li Hongnan, Guo Wei. Existing problem of displacement input model for calculating structural responses under earthquake ground motion and its an actual effective solution method called AMCE [J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2009, 26(6): 862-869. (in Chinese)
- [12] 柳国环,李宏男,国巍,等.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, et al. A new method for solving existing problem of current displacement input model for calculating structural seismic responses[J]. Engineering Mechanics, 2010, 27(9): 55-62. (in Chinese)
- [13] 田利,李宏男.基于《电力设施抗震设计规范》的地震动随机模型参数研究[J].防灾减灾工程学报,2010,30(1):17-22.
Tian Li, Li Hongnan. Parameter Study on Seismic Random Model Based on Code for Design of Seismic of Electrical Installations[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2010, 30(1): 17-22. (in Chinese)
- [14] 屈铁军,王君杰,王前信.空间变化的地震动功率谱的实用模型[J].地震学报,1996,18(1):55-62.
Qu Tiejun, Wang Junjie, Wang Qianxin. Practical models of power spectrum on spatial correlative ground motion[J]. Acta Seismologica Sinica, 1996, 18(1): 55-62. (in Chinese)
- [15] 中华人民共和国电力工业部. GB 50260—96 电力设施抗震设计规范[S].北京:中国计划出版社,1996.
- [16] 李春祥.地震作用下高层建筑 TMD 控制研究与设计[J].上海交通大学学报,1999,33(6):746-749.
Li Chunxiang. TMD control research and design of tall building subjected to seismic excitation[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 1999, 33(6): 746-749. (in Chinese)
- [17] 李春祥,刘艳霞.地震作用下高层建筑 TMD 控制优化设计[J].同济大学学报,1999,27(3):287-291.
Li Chunxiang, Liu Yanxia. Tuned mass damper control optimum design of tall buildings under earthquake [J]. Journal of Tongji University, 1999, 27(3): 287-291. (in Chinese)
- [18] 李春祥,刘艳霞,熊学玉. TMD 系统最优参数的实用设计方法[J].工业建筑,1999,29(1):30-34.
Li Chunxiang, Liu Yanxia, Xiong Xueyu. The practicable design method of the optimal parameters of TMD system[J]. Industrial Construction, 1999, 29(1): 30-34. (in Chinese)



第一作者简介:田利,男,1982年11月生,博士、讲师。主要研究方向为结构抗震及振动控制。曾发表《多点激励下输电塔-线体系的侧向地震反应分析》(《中国电机工程学报》2008年第28卷第16期)等论文。

E-mail: tianl-007@163.com

