

一种控制高层结构随机地震反应的新策略

马涌泉, 邱洪兴

(东南大学土木工程学院, 江苏南京 210096)

摘要:以某高层剪切型钢框架结构为工程背景,提出 TMD 与 LRB 联合作用的 T-L 控制策略,利用非线性随机振动理论分别对无控制、TMD 控制和 T-L 控制 3 种控制结构的非线性运动方程进行等效线性化处理,利用复模态理论给出以第一振型表示的 3 种控制结构随机地震反应解析解的计算方法。研究表明:新提出的 T-L 控制策略比 TMD 控制更能显著降低结构位移、速度和加速度反应方差;新算法同样可用于求解 LRB 层间隔震高层结构随机地震反应。算例在 T-L 控制下的最大位移、速度和加速度反应方差比 TMD 控制下的分别降低了 29.3%、27.8% 和 31.6%。

关键词:高层结构; 振动控制; 调谐质量阻尼器; 铅芯橡胶支座; 复模态分析; 随机地震反应

中图分类号:O 324; TU 352.1

文献标志码:A

New strategy for controlling random seismic response of high-rise structure

MA Yong-quan, QIU Hong-xing

(College of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: Taking a high-rise shearing steel frame structure as engineering background, a new T-L control strategy combining the action of TMD and LRB was proposed. The nonlinear motion equations of three control structures, which included non-control, TMD control and T-L control, were equivalently linearized by nonlinear random vibration theory, respectively. The algorithm was given for obtaining the analytical solutions expressed in the first order vibration model of random seismic response for three control structures using complex mode theory, respectively. The results indicate that the T-L control strategy can more significantly reduce the displacement, velocity and acceleration response variance of high-rise structure than TMD control. The new algorithm can also be used to solve the random seismic responses of the high-rise structure with LRB storey-isolation. The peak displacement, velocity and acceleration response variance of the example are decreased by 29.3%, 27.8% and 31.6% in T-L control compared with TMD control, respectively.

Key words: high-rise structure; vibration control; tuned mass damper; lead rubber bearing; complex mode analysis; random seismic response

高层建筑结构因其刚度较小,在地震作用下容易产生较大的振动,严重影响结构的安全^[1-2]。被动控制作为一项有效的减震技术,在结构振动控制领域已被广泛运用^[3-4]。Kaynia 等^[5]通过在结构的顶层布设由质量块、弹簧和阻尼器组成的调谐质量阻尼器(tuned mass damper,简称 TMD),得出了 TMD 可以降低结构地震反应的结论;周福霖等^[6]提出的结构“层间隔震”技术的减震原理类似于 TMD,即将前者的隔震支座等同于后者的弹簧和阻尼器,将前

者的加层结构等同于后者的质量块;Sadek 等^[7]采用调节主结构前两阶振型的模态阻尼的方法对 TMD 的质量比、频率和阻尼比等参数进行了优化;Wang 等^[8]采用欧拉梁理论确立了横向和轴向的非线性控制方程,得到了 TMD 的刚体运动与高层结构的横向振动存在耦合以及能量在两者之间发生转移的结论。地震激励要达到其峰值可能仅需极短的时间,容易导致 TMD 出现反馈延迟,使其无法在瞬间给结构施加一个与结构振动方向相反的惯性力,进

收稿日期:2013-04-02

基金项目:国家“十二五”科技支撑计划资助项目(2012BAJ14B00);国家自然科学基金项目(51078077)

作者简介:马涌泉(1984-),男,博士研究生,主要从事结构振动及控制研究。E-mail: lemon9143@163.com。

而严重影响 TMD 的减震效果。对此可以在 TMD 与结构之间增设能够耗散欲传递给 TMD 地震能的缓冲设备。铅芯橡胶支座 (LRB) 可以当作缓冲设备。开展 TMD 与 LRB 联合控制 (简称 T-L 控制) 结构随机地震反应的求解工作具有重要意义。笔者提出以第一振型表示的结构随机地震反应解析解的计算方法。分别运用确定性算法与本文算法对一座 10 层剪切型钢框架结构进行随机地震反应对比分析,验证本文所提算法的可靠性。

1 运动方程的建立及求解

1.1 T-L 控制结构

本文设计的 T-L 控制结构体系的力学模型如图 1 所示。TMD 系统布置在结构顶层, TMD 系统与结

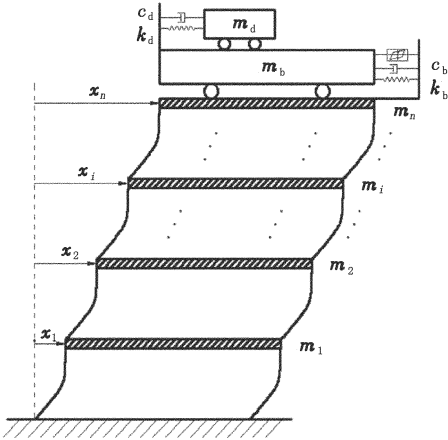


图 1 T-L 控制结构的力学模型

Fig.1 Mechanical model of T-L control structure

构顶层之间布设 LRB 滞回耗能层。结构、TMD 系统和 LRB 滞回耗能层的运动方程为

$$\begin{cases} \mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{x}} + \mathbf{K}\mathbf{x} + \mathbf{D}\mathbf{F}_b - \mathbf{H}(c_d\dot{x}_d + k_d x_d) = -\mathbf{M}\mathbf{r}\ddot{x}_g, \\ m_d(\ddot{x}_d + \ddot{x}_b + \ddot{x}_n) + c_d\dot{x}_d + k_d x_d = -m_d\ddot{x}_g, \\ m_b(\ddot{x}_b + \ddot{x}_n) + c_b\dot{x}_b + F_b - c_d\dot{x}_d - k_d x_d = -m_b\ddot{x}_g. \end{cases} \quad (1)$$

式中, $\mathbf{M}$ 、 $\mathbf{C}$ 和 $\mathbf{K}$ 分别为结构的质量、阻尼和刚度矩阵; $\mathbf{x}$ 为结构相对于地面的位移向量; $\mathbf{D}$ 为 LRB 位置向量; $\mathbf{F}_b$ 为 LRB 恢复力列向量; x_b 为 LRB 两端的相对切向位移; x_d 为 TMD 系统相对于 LRB 滞回耗能层的位移; m_b 、 c_b 和 k_b 分别为 LRB 滞回耗能层的质量、阻尼和刚度; $\mathbf{r}$ 为地震动引起的质量惯性力位置矩阵; $\mathbf{H}$ 为 TMD 位置向量; m_d 、 c_d 和 k_d 分别为 TMD 系统的质量、阻尼和刚度; $\ddot{x}_g$ 为地震动加速度。

其中

$$\mathbf{x} = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}^T, \mathbf{D} = \{0, 0, \dots, 1\}^T, \mathbf{H} = \{0, 0, \dots, 1\}^T,$$

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} m_1 & & & \\ & m_2 & & \\ & & \ddots & \\ & & & m_{n-1} \\ & & & & m_n \end{bmatrix},$$
$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 & & & \\ -k_2 & k_2 + k_3 & -k_3 & & \\ & \ddots & \ddots & \ddots & \\ & & -k_{n-1} & k_{n-1} + k_n & -k_n \\ & & & -k_n & k_n \end{bmatrix},$$
$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 & & & \\ -c_2 & c_2 + c_3 & -c_3 & & \\ & \ddots & \ddots & \ddots & \\ & & -c_{n-1} & c_{n-1} + c_n & -c_n \\ & & & -c_n & c_n \end{bmatrix}.$$

LRB 的滞回恢复力特性采用双线性模型^[9]描述,如图 2 所示。其恢复力可表示为

$$F_b = A\eta k_b x_b + A(1 - \eta)k_b q \operatorname{sgn}(x_b). \quad (2)$$

式中, A 为 LRB 的个数; η 为 LRB 屈服后刚度与初始刚度之比; q 为 LRB 的屈服位移。

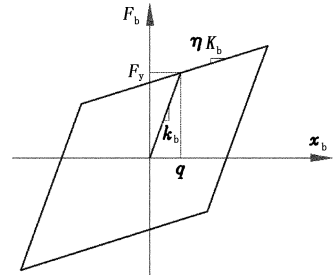


图 2 双线性滞回恢复力模型

Fig.2 Bilinear hysteretic restoring force model

Moon^[10] 通过试验及仿真分析指出:对于 27 ~ 35 层的多质点剪切型高层结构,其第一阶振型的地震反应对结构地震反应的贡献率为 85% 以上;对 10 ~ 26 层的多质点剪切型高层结构,其结构的地震反应按照第一阶振型振动。TMD 与 LRB 以联合控制结构的第一阶振型为目标,因此结构相对位移可以按照第一阶振型展开。令

$$\begin{cases} \mathbf{x} = \boldsymbol{\varphi} S, S = S(t), \\ \boldsymbol{\varphi} = \{\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n, \varphi_b\}. \end{cases} \quad (3)$$

将方程(3)代入方程(1),得到:

$$\begin{cases} \ddot{S} + 2\xi_1\omega_1\dot{S} + \omega_1^2 S - l\varphi_b(2\xi_d\omega_d\dot{x}_d + \omega_d^2 x_d) + h\varphi_n(A(1 - \eta)\omega_b^2 q \operatorname{sgn}(x_b) + A\eta\omega_b^2 x_b) = -a\ddot{x}_g, \\ \ddot{x}_d + 2\xi_d\omega_d\dot{x}_d + \omega_d^2 x_d + \varphi_b\ddot{S} = -\ddot{x}_g, \\ \ddot{x}_b - A(1 - \eta)\omega_b^2 q \operatorname{sgn}(x_b) - A\eta\omega_b^2 x_b + \varphi_n\ddot{S} = -\ddot{x}_g. \end{cases} \quad (4)$$

其中

$$\left\{ \begin{aligned} \omega_d &= \sqrt{\frac{k_d}{m_d}}, & \omega_b &= \sqrt{\frac{k_b}{m_b}}, \\ \xi_d &= \frac{c_d}{2\sqrt{k_d m_d}}, & \xi_b &= \frac{c_b}{2\sqrt{k_b m_b}}. \\ l &= \frac{m_d}{\sum_{i=1}^n m_i \varphi_i^2 + m_b \varphi_b}, \\ h &= \frac{m_b}{\sum_{i=1}^n m_i \varphi_i^2}, \\ a &= \frac{\sum_{i=1}^n m_i \varphi_i + m_b \varphi_b}{\sum_{i=1}^n m_i \varphi_i^2 + m_b \varphi_b^2}. \end{aligned} \right.$$

式中, ω_1, ξ_1 和 φ_i 分别为结构第一振型对应的自振频率、阻尼比和第 i 层元素值; ω_d 和 ξ_d 分别为 TMD 系统的自振频率和阻尼比; ω_b 和 ξ_b 分别为 LRB 的自振频率和阻尼比。

对非线性随机方程(4)进行等效线性化处理, $\text{sgn}(\dot{x}_b)$ 的等价线性表达式为

$$\text{sgn}(\dot{x}_b) = f_a \dot{x}_b, \quad (5)$$

依据非线性随机振动的等效线性化原理可得

$$f_a = \frac{E(\dot{x}_b \text{sgn}(\dot{x}_b))}{E(\dot{x}_b^2)} = \frac{1}{\sigma_{\dot{x}_b}} \sqrt{\frac{2}{\pi}}. \quad (6)$$

式中, $\sigma_{\dot{x}_b}$ 为 $\dot{x}_b$ 的根方差, 可通过等效线性化体系的随机反应分析确定。

按照上述等效线性化处理, 并假定:

$$\mathbf{x} = \{S, \tilde{x}\}^T \hat{\mathbf{F}} = -\ddot{x}_g \{a, 1\}^T,$$

$$\hat{\mathbf{M}} = \mu \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \varphi_b - \varphi_n & 1 \end{bmatrix},$$

$$\hat{\mathbf{C}} = \alpha \begin{bmatrix} 2\xi_1 \omega_1 & -2\xi_d \omega_d l \varphi_b + 2\xi_b \omega_b h \varphi_n \\ 0 & 2\xi_d \omega_d - 2\xi_b \omega_b \end{bmatrix},$$

$$\hat{\mathbf{K}} = \gamma \begin{bmatrix} \omega_1^2 & -\omega_d^2 l \varphi_b + \omega_b^2 h \varphi_n \\ 0 & \omega_d^2 - \omega_b^2 \end{bmatrix}.$$

式中, μ, α 和 γ 分别为 $\hat{\mathbf{M}}, \hat{\mathbf{C}}$ 和 $\hat{\mathbf{K}}$ 的相关系数。

可将方程(4)统一记为如下等效线性化方程:

$$\hat{\mathbf{M}}\ddot{\mathbf{x}} + \hat{\mathbf{C}}\dot{\mathbf{x}} + \hat{\mathbf{K}}\mathbf{x} = \hat{\mathbf{F}}(t). \quad (7)$$

由于方程(7)的阻尼矩阵元素由结构阻尼、TMD 系统阻尼和 LRB 黏滞阻尼 3 部分组成, 且质量矩阵 $\hat{\mathbf{M}}$ 和刚度矩阵 $\hat{\mathbf{K}}$ 均为非对称矩阵, 传统的实模态理论无法解耦该方程, 故利用复模态理论求解该方程。

$$\text{令 } \mathbf{u} = \{u_1, u_2, u_3, u_4\}^T = \{\dot{S}, \dot{\tilde{x}}, S, \tilde{x}\}^T,$$

$$\vec{\mathbf{M}} = \begin{bmatrix} 0 & \hat{\mathbf{M}} \\ \hat{\mathbf{M}} & \hat{\mathbf{C}} \end{bmatrix}, \quad \vec{\mathbf{K}} = \begin{bmatrix} -\hat{\mathbf{M}} & 0 \\ 0 & \hat{\mathbf{K}} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{f}(t) = -\ddot{x}_g \{0, 0, a, 1\}^T.$$

从而方程(7)可记为

$$\vec{\mathbf{M}}\dot{\mathbf{u}} + \vec{\mathbf{K}}\mathbf{u} = \mathbf{f}(t). \quad (8)$$

定义方程(8)的特征矩阵 $\mathbf{B}(\lambda)$ 满足:

$$\mathbf{B}(\lambda) = \lambda \vec{\mathbf{M}} + \vec{\mathbf{K}}.$$

令 $|\mathbf{B}(\lambda)| = |\lambda \vec{\mathbf{M}} + \vec{\mathbf{K}}| = 0$, 则其特征根方程为

$$\det \mathbf{B}(\lambda) = 0. \quad (9)$$

由方程(9)可求得 4 个特征值 $\lambda_i (i = 1, 2, 3, 4)$ 。与每个 λ_i 相对应的左、右特征向量方程为

$$(\mathbf{B}(\lambda_i))^T \mathbf{W}_i = 0, \quad \mathbf{B}(\lambda_i) \mathbf{V}_i = 0. \quad (10)$$

由此求得每个 λ_i 的左、右特征向量为

$$\left\{ \begin{aligned} \mathbf{W}_i &= \{W_{1i}, W_{2i}, W_{3i}, W_{4i}\}^T = \{L, \lambda_i, R, 1\}^T, \\ \mathbf{V}_i &= \{V_{1i}, V_{2i}, V_{3i}, V_{4i}\}^T = \{\lambda_i, G, 1, J\}^T. \end{aligned} \right. \quad (11)$$

其中

$$\left\{ \begin{aligned} L &= \frac{(-\varphi_b + \varphi_n) \lambda_i^3}{\lambda_i^2 + 2\xi_1 \omega_1 \lambda_i + \omega_1^2} - q(1 - \eta) F_y, \\ R &= \frac{(-\varphi_b + \varphi_n) \lambda_i^2}{\lambda_i^2 + 2\xi_1 \omega_1 \lambda_i + \omega_1^2} - q(1 - \eta) F_y, \\ G &= \frac{-\varphi_b \lambda_i^3}{\lambda_i^2 + 2\xi_d \omega_d \lambda_i + \omega_d^2} + \frac{\varphi_n \lambda_i^3}{\lambda_i^2 + 2\xi_b \omega_b \lambda_i + \eta \omega_b^2} - q(1 - \eta) F_y, \\ J &= \frac{-\varphi_b \lambda_i^2}{\lambda_i^2 + 2\xi_d \omega_d \lambda_i + \omega_d^2} + \frac{\varphi_n \lambda_i^2}{\lambda_i^2 + 2\xi_b \omega_b \lambda_i + \eta \omega_b^2} - q(1 - \eta) F_y. \end{aligned} \right.$$

T-L 控制结构体系的特征值矩阵和左、右特征向量矩阵可分别表示为

$$\left\{ \begin{aligned} \boldsymbol{\lambda} &= \text{diag}[\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4], \\ \mathbf{W} &= [W_1, W_2, W_3, W_4]^T, \\ \mathbf{V} &= [V_1, V_2, V_3, V_4]^T. \end{aligned} \right.$$

引入复模态变换

$$\mathbf{u} = \mathbf{V} \boldsymbol{\tau} \quad (12).$$

考虑矩阵 $\mathbf{W}, \mathbf{V}$ 的正交性, 方程(9)可解耦为

$$\dot{\boldsymbol{\tau}} - \boldsymbol{\lambda} \boldsymbol{\tau} = \mathbf{F}(t). \quad (13)$$

其中

$$\left\{ \begin{aligned} \mathbf{F}(t) &= \mathbf{F}_i(t) = \mathbf{O} \mathbf{W}_i^T \mathbf{f}(t), \\ \mathbf{O} &= \text{diag}[m_1^{-1}, m_2^{-1}, m_3^{-1}, m_4^{-1}]. \end{aligned} \right.$$

由于荷载向量 $\mathbf{f}(t)$ 具有零均值, 从而广义激励 $\mathbf{F}(t)$ 也具有零均值, 其协方差函数矩阵为

$$\mathbf{C}_F(\kappa) = E(\mathbf{F}(t)(\bar{\mathbf{F}}(t + \kappa))^T) = \mathbf{O}\mathbf{W}^T\mathbf{C}_f(\kappa)\bar{\mathbf{W}}\mathbf{O}^T. \quad (14)$$

式(13)的分量形式为

$$\ddot{u}_i - \lambda_i u_i = F_i(t) = \mathbf{O}_i \mathbf{W}_i^T \mathbf{f}(t). \quad (15)$$

其平稳解为

$$\begin{cases} u_i(t) = \int_0^\infty F_i(t - \xi)(l_i(\xi) - h_i(\xi))d\xi, \\ l_i(\xi) - h_i(\xi) = e^{\lambda_i \xi}, i = 1, 2, 3, 4. \end{cases}$$

故模态反应 τ_i 与 τ_j 的互协方差函数为

$$\begin{aligned} E(\tau_i(t)\bar{\tau}_j(t + \kappa)) &= \int_0^\infty \int_0^\infty (l_i(\xi) - h_i(\xi)) \times \\ E(F_i(t - \xi)\bar{F}_j(t + \kappa - \rho)) &(\bar{l}_j(\rho) - \bar{h}_j(\rho))d\xi d\rho. \end{aligned}$$

模态反应向量 $\boldsymbol{\tau}$ 的协方差函数矩阵为

$$\mathbf{C}_\tau(\kappa) = E(\boldsymbol{\tau}(t)(\bar{\boldsymbol{\tau}}(t + \kappa))^T) = \int_0^\infty \int_0^\infty (\mathbf{l}(\xi) - \mathbf{h}(\xi)) \cdot (\mathbf{C}_F(t + \kappa - \rho))(\bar{\mathbf{l}}(\rho) - \bar{\mathbf{h}}(\rho))d\xi d\rho.$$

其中

$$\mathbf{l}(\xi) - \mathbf{h}(\xi) = \text{diag}[l_i(\xi) - h_i(\xi)], i = 1, 2, 3, 4.$$

根据求得的协方差矩阵 $\mathbf{C}_\tau(\kappa)$ 并结合方程(12),可得出系统反应的协方差函数矩阵为

$$\begin{cases} E(\mathbf{u}(t)(\bar{\mathbf{u}}(t + \kappa))^T) = \mathbf{V}\mathbf{C}_\tau(\kappa)\bar{\mathbf{V}}^T, \\ E(\dot{\mathbf{u}}(t)(\bar{\dot{\mathbf{u}}}(t + \kappa))^T) = \mathbf{V}\mathbf{C}_\tau(\kappa)\bar{\mathbf{V}}^T. \end{cases} \quad (16)$$

1.2 TMD 控制结构

TMD 控制结构体系的力学模型如图 3 所示。

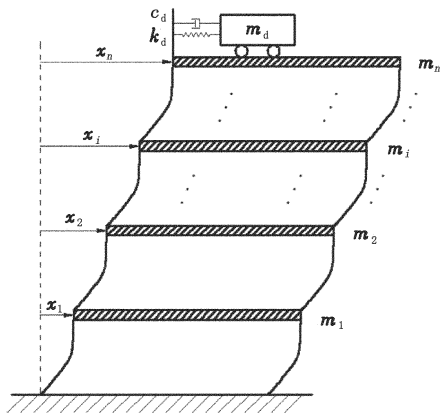


图 3 TMD 控制结构的力学模型

Fig. 3 Mechanical model of TMD control structure

TMD 布置在结构顶层,其运动方程可描述为

$$\begin{cases} \mathbf{M}\ddot{\tilde{\mathbf{x}}} + \mathbf{C}\dot{\tilde{\mathbf{x}}} + \mathbf{K}\tilde{\mathbf{x}} - \tilde{\mathbf{H}}(c_d\dot{\tilde{x}}_d + k_d\tilde{x}_d) = -\mathbf{M}\mathbf{r}\ddot{x}_g, \\ m_d(\ddot{\tilde{x}}_d + \ddot{x}_n) + c_d\dot{\tilde{x}}_d + k_d\tilde{x}_d = -m_d\ddot{x}_g. \end{cases} \quad (17)$$

其中

$$\tilde{\mathbf{x}} = \{\tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \dots, \tilde{x}_n\}^T, \mathbf{H} = \{0, 0, \dots, 1\}^T.$$

式中, $\tilde{\mathbf{x}}$ 为结构相对于地面的位移向量; $\tilde{x}_d$ 为 TMD 系统相对于结构顶层的位移。

结构相对位移按第一振型展开,令

$$\begin{cases} \tilde{\mathbf{x}} = \tilde{\boldsymbol{\varphi}}\tilde{S}, \\ \tilde{S} = \tilde{S}(t), \\ \tilde{\boldsymbol{\varphi}} = \{\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n\}. \end{cases} \quad (18)$$

将式(18)代入式(17),得

$$\begin{cases} \ddot{\tilde{S}} + 2\tilde{\xi}_1\tilde{\omega}_1\dot{\tilde{S}} + \tilde{\omega}_1^2\tilde{S} - \tilde{l}\varphi_n(2\tilde{\xi}_d\omega_d\dot{\tilde{x}}_d + \omega_d^2\tilde{x}_d) = -\tilde{a}\ddot{x}_g, \\ \ddot{\tilde{x}}_d + 2\tilde{\xi}_d\omega_d\dot{\tilde{x}}_d + \omega_d^2\tilde{x}_d + \tilde{\varphi}_n\tilde{S} = -\ddot{x}_g. \end{cases} \quad (19)$$

其中

$$\tilde{l} = \frac{m_d}{\sum_{i=1}^n m_i \tilde{\varphi}_i^2}, \tilde{a} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i \tilde{\varphi}_i}{\sum_{i=1}^n m_i \tilde{\varphi}_i^2}.$$

方程(19)可统一记为如下等效线性化方程:

$$\tilde{\mathbf{M}}\ddot{\tilde{\mathbf{x}}} + \tilde{\mathbf{C}}\dot{\tilde{\mathbf{x}}} + \tilde{\mathbf{K}}\tilde{\mathbf{x}} = \tilde{\mathbf{F}}(t). \quad (20)$$

其中

$$\tilde{\mathbf{x}} = \{\tilde{S}, \tilde{x}_d\}^T, \tilde{\mathbf{F}} = -\ddot{x}_g\{\tilde{a}, 1\}^T,$$

$$\tilde{\mathbf{M}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \tilde{\varphi}_n & 1 \end{bmatrix},$$

$$\tilde{\mathbf{C}} = \begin{bmatrix} 2\tilde{\xi}_1\tilde{\omega}_1 & -2\tilde{\xi}_d\omega_d\tilde{l}\tilde{\varphi}_n \\ 0 & 2\tilde{\xi}_d\omega_d \end{bmatrix},$$

$$\tilde{\mathbf{K}} = \begin{bmatrix} \tilde{\omega}_1^2 & -\omega_d^2\tilde{l}\tilde{\varphi}_n \\ 0 & \omega_d^2 \end{bmatrix}.$$

采用复模态理论求解方程(20),令

$$\tilde{\mathbf{u}} = \{\tilde{u}_1, \tilde{u}_2, \tilde{u}_3, \tilde{u}_4\}^T = \{\tilde{S}, \tilde{x}_d, \tilde{S}, \tilde{x}_d\}^T,$$

$$\tilde{\tilde{\mathbf{M}}} = \begin{bmatrix} 0 & \tilde{\tilde{\mathbf{M}}} \\ \tilde{\tilde{\mathbf{M}}} & \tilde{\tilde{\mathbf{C}}} \end{bmatrix},$$

$$\tilde{\tilde{\mathbf{K}}} = \begin{bmatrix} -\tilde{\tilde{\mathbf{M}}} & 0 \\ 0 & \tilde{\tilde{\mathbf{K}}} \end{bmatrix},$$

$$\tilde{\tilde{\mathbf{f}}}(t) = -\ddot{x}_g\{0, 0, \tilde{a}, 1\}^T.$$

从而方程(20)可记为

$$\tilde{\tilde{\mathbf{M}}}\ddot{\tilde{\mathbf{u}}} + \tilde{\tilde{\mathbf{K}}}\tilde{\mathbf{u}} = \tilde{\tilde{\mathbf{f}}}(t). \quad (21)$$

定义方程(21)的特征矩阵 $\tilde{\mathbf{B}}(\tilde{\lambda})$ 满足

$$\tilde{\mathbf{B}}(\tilde{\lambda}) = \tilde{\lambda}\tilde{\tilde{\mathbf{M}}} + \tilde{\tilde{\mathbf{K}}}.$$

$$\text{令 } |\tilde{\mathbf{B}}(\tilde{\lambda})| = |\tilde{\lambda}\tilde{\tilde{\mathbf{M}}} + \tilde{\tilde{\mathbf{K}}}| = 0, \text{ 则其特征根方程为 } \det \tilde{\mathbf{B}}(\tilde{\lambda}) = 0. \quad (22)$$

由式(22)即可求得 4 个特征值 $\tilde{\lambda}_i (i = 1, 2, 3, 4)$ 。与每个 $\tilde{\lambda}_i$ 相对应的左、右特征向量方程为

$$(\tilde{\mathbf{B}}(\tilde{\lambda}_i))^T \tilde{\mathbf{W}}_i = 0, \tilde{\mathbf{B}}(\tilde{\lambda}_i) \tilde{\mathbf{V}}_i = 0. \quad (23)$$

由此求得每个 $\tilde{\lambda}_i$ 的左、右特征向量为

$$\begin{cases} \tilde{\mathbf{W}}_i = \{ \tilde{W}_{1i}, \tilde{W}_{2i}, \tilde{W}_{3i}, \tilde{W}_{4i} \}^T = \{ \tilde{L}, \tilde{\lambda}_i, \tilde{R}, 1 \}^T, \\ \tilde{\mathbf{V}}_i = \{ \tilde{V}_{1i}, \tilde{V}_{2i}, \tilde{V}_{3i}, \tilde{V}_{4i} \}^T = \{ \tilde{\lambda}_i, \tilde{G}, 1, \tilde{J} \}^T. \end{cases} \quad (24)$$

其中

$$\begin{cases} \tilde{L} = \frac{\tilde{\varphi}_n \tilde{\lambda}_i^3}{\tilde{\lambda}_i^2 + 2\xi_1 \omega_1 \tilde{\lambda}_i + \omega_1^2}, \\ \tilde{R} = \frac{\tilde{\varphi}_n \tilde{\lambda}_i^2}{\tilde{\lambda}_i^2 + 2\xi_1 \omega_1 \tilde{\lambda}_i + \omega_1^2}, \\ \tilde{G} = \frac{\tilde{\varphi}_n \tilde{\lambda}_i^3}{\tilde{\lambda}_i^2 + 2\xi_d \omega_d \tilde{\lambda}_i + \omega_d^2}, \\ \tilde{J} = \frac{\tilde{\varphi}_n \tilde{\lambda}_i^2}{\tilde{\lambda}_i^2 + 2\xi_d \omega_d \tilde{\lambda}_i + \omega_d^2}. \end{cases}$$

TMD 控制结构体系的特征值矩阵和左、右特征向量矩阵可分别表示为

$$\begin{cases} \tilde{\mathbf{\Lambda}} = \text{diag}[\tilde{\lambda}_1, \tilde{\lambda}_2, \tilde{\lambda}_3, \tilde{\lambda}_4], \\ \tilde{\mathbf{W}} = [\tilde{W}_1, \tilde{W}_2, \tilde{W}_3, \tilde{W}_4]^T, \\ \tilde{\mathbf{V}} = [\tilde{V}_1, \tilde{V}_2, \tilde{V}_3, \tilde{V}_4]^T. \end{cases} \quad (25)$$

引入复模态变换

$$\tilde{\mathbf{u}} = \tilde{\mathbf{V}} \tilde{\boldsymbol{\tau}}. \quad (26)$$

考虑矩阵 $\tilde{\mathbf{W}}$ 与 $\tilde{\mathbf{V}}$ 的正交性,式(26)可解耦为

$$\tilde{\boldsymbol{\tau}} - \tilde{\mathbf{\Lambda}} \tilde{\boldsymbol{\tau}} = \tilde{\mathbf{F}}(t). \quad (27)$$

其中

$$\begin{cases} \tilde{\mathbf{F}}(t) = \tilde{\mathbf{F}}_i(t) = \tilde{\mathbf{O}} \tilde{\mathbf{W}}^T \tilde{\mathbf{f}}(t), \\ \tilde{\mathbf{O}} = \text{diag}[\tilde{m}_1^{-1}, \tilde{m}_2^{-1}, \tilde{m}_3^{-1}, \tilde{m}_4^{-1}]. \end{cases}$$

$$\tilde{m}_i = \tilde{\mathbf{W}}_i^T \tilde{\mathbf{M}} \tilde{\mathbf{V}}_i.$$

协方差函数矩阵为

$$\mathbf{C}_{\tilde{\mathbf{F}}}(\tilde{\kappa}) = E(\tilde{\mathbf{F}}(t)(\tilde{\mathbf{F}}(t + \tilde{\kappa}))^T) = \tilde{\mathbf{O}} \tilde{\mathbf{W}}^T \mathbf{C}_{\tilde{\mathbf{f}}}(\tilde{\kappa}) \tilde{\mathbf{W}} \tilde{\mathbf{O}}^T. \quad (28)$$

式(27)的分量形式为

$$\tilde{u}_i - \tilde{\lambda}_i \tilde{u}_i = \tilde{F}_i(t) = O_i \mathbf{W}_i^T \mathbf{f}(t). \quad (29)$$

其平稳解为

$$\begin{cases} \tilde{u}_i(t) = \int_0^\infty \tilde{F}_i(\tilde{\xi}) \tilde{l}_i(\tilde{\xi}) d\tilde{\xi}, \\ \tilde{l}_i(\tilde{\xi}) = e^{\tilde{\lambda}_i \tilde{\xi}}, i = 1, 2, 3, 4. \end{cases}$$

故模态反应 $\tilde{\tau}_i$ 与 $\tilde{\tau}_j$ 的互协方差函数为

$$E(\tilde{\tau}_i(t) \tilde{\tau}_j(t + \tilde{\kappa})) = \int_0^\infty \int_0^\infty E(\tilde{F}_i(t - \tilde{\xi}) \tilde{F}_j(t + \tilde{\kappa} - \tilde{\rho})) \tilde{l}_i(\tilde{\xi}) \tilde{l}_j(\tilde{\rho}) d\tilde{\xi} d\tilde{\rho}. \quad (30)$$

模态反应向量 $\tilde{\boldsymbol{\tau}}$ 的协方差函数矩阵为

$$\mathbf{C}_{\tilde{\boldsymbol{\tau}}}(\tilde{\kappa}) = E(\tilde{\boldsymbol{\tau}}(t)(\tilde{\boldsymbol{\tau}}(t + \tilde{\kappa}))^T) = \int_0^\infty \int_0^\infty \tilde{\mathbf{L}}(\tilde{\xi}) \times$$

$$(\mathbf{C}_{\tilde{\mathbf{F}}}(t + \tilde{\kappa} - \tilde{\rho})) \tilde{\mathbf{L}}(\tilde{\rho}) d\tilde{\xi} d\tilde{\rho}. \quad (31)$$

其中

$$\tilde{\mathbf{L}}(\tilde{\xi}) = \text{diag}[\tilde{l}_i(\tilde{\xi})], i = 1, 2, 3, 4.$$

根据求得的协方差矩阵 $\mathbf{C}_{\tilde{\boldsymbol{\tau}}}(\tilde{\kappa})$ 并结合方程(27),可得出系统反应的协方差函数矩阵为

$$\begin{cases} E(\tilde{\mathbf{u}}(t)(\tilde{\mathbf{u}}(t + \tilde{\kappa}))^T) = \tilde{\mathbf{V}} \mathbf{C}_{\tilde{\boldsymbol{\tau}}}(\tilde{\kappa}) \tilde{\mathbf{V}}^T, \\ E(\tilde{\mathbf{u}}(t)(\tilde{\mathbf{u}}(t + \tilde{\kappa}))^T) = \tilde{\mathbf{V}} \mathbf{C}_{\tilde{\boldsymbol{\tau}}}(\tilde{\kappa}) \tilde{\mathbf{V}}^T. \end{cases} \quad (32)$$

1.3 无控制结构

无控制结构体系的运动方程为

$$\mathbf{M} \ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{C} \dot{\mathbf{x}} + \mathbf{K} \mathbf{x} = -\mathbf{M} \mathbf{r} \ddot{x}_g. \quad (33)$$

将式(18)按第一振型展开,得

$$\ddot{S} + 2\xi_1 \omega_1 \dot{S} + \omega_1^2 S = -b \ddot{x}_g. \quad (34)$$

令

$$\tilde{\mathbf{u}} = \{\tilde{u}_1, \tilde{u}_2\}^T = \{\tilde{S}, \tilde{S}\}^T,$$

$$\tilde{\mathbf{M}} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 2\xi_1 \omega_1 \end{bmatrix}, \tilde{\mathbf{K}} = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & \omega_1^2 \end{bmatrix},$$

$$\tilde{\mathbf{f}}(t) = -\ddot{x}_g \{0, b\}^T.$$

则式(34)可描述为式(21)的形式,由式(21)的特征根方程可求得 2 个特征值 $\tilde{\lambda}_i$ 为

$$\tilde{\lambda}_1 = \tilde{\lambda}_2 = -\xi_1 \omega_1 + j\sqrt{1 - \xi_1^2} \omega_1, j = \sqrt{-1}.$$

对于每个特征值 $\tilde{\lambda}_i$ 可求得

$$\begin{cases} \tilde{\mathbf{W}}_i = \tilde{\mathbf{V}}_i = \{\tilde{\lambda}_i, 1\}^T, \\ \tilde{m}_i = 2\tilde{\lambda}_i + 2\xi_1 \omega_1, i = 1, 2. \end{cases}$$

从而可按照式(26)~(32)的步骤计算系统反应的协方差函数矩阵。

2 随机地震反应分析

2.1 地震激励计算模型

当采用过滤白噪声对应的 Kanai-Tajimi 模型^[11]作为地震加速度谱密度函数时,其形式可表示为

$$Q(\omega) = \frac{1 + 4\xi_g^2(\omega/\omega_g)^2}{[1 - (\omega/\omega_g)^2]^2 + 4\xi_g^2(\omega/\omega_g)^2} Q_0. \quad (35)$$

令

$$\vartheta = \xi_g \omega_g, v = \omega_g \sqrt{1 - \xi_g^2}, I = -\vartheta + zv,$$

$$U = \frac{\omega_g^2 + 4\vartheta^2}{8\vartheta} - z \frac{\omega_g^2 - 4\vartheta^2}{8v}, z = \sqrt{-1}.$$

对于 T-L 控制结构可求得广义激励 $\mathbf{F}(t)$ 的协方差函数矩阵为

$$\mathbf{C}(\kappa) = 2\pi Q_0 \mathbf{Y}(Ue^{I|\kappa|} + \overline{U}e^{\overline{I}|\kappa|}). \quad (36)$$

其中

$$\mathbf{Y} = \mathbf{U}_{ij} = \mathbf{O} \mathbf{W}^T \mathbf{T} \tilde{\mathbf{W}} \tilde{\mathbf{O}}^T,$$

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a^2 & a \\ 0 & 0 & a & 1 \end{bmatrix}.$$

对于 TMD 控制结构可求得广义激励 $\tilde{\mathbf{F}}(t)$ 的协方差函数矩阵为

$$\mathbf{C}(\bar{\kappa}) = 2\pi Q_0 \tilde{\mathbf{Y}}(Ue^{I|\bar{\kappa}|} + \bar{U}e^{\bar{I}|\bar{\kappa}|}). \quad (37)$$

其中

$$\tilde{\mathbf{Y}} = \tilde{\mathbf{U}}_{ij} = \tilde{\mathbf{O}}\tilde{\mathbf{W}}^T\tilde{\mathbf{T}}\tilde{\mathbf{W}}\tilde{\mathbf{O}}^T,$$

$$\tilde{\mathbf{T}} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \bar{a}^2 & \bar{a} \\ 0 & 0 & \bar{a} & 1 \end{bmatrix}.$$

对于无控制结构可求得广义激励 $\tilde{\mathbf{F}}(t)$ 的协方差函数矩阵为

$$\mathbf{C}(\bar{\kappa}) = 2\pi Q_0 \tilde{\mathbf{Y}}(Ue^{I|\bar{\kappa}|} + \bar{U}e^{\bar{I}|\bar{\kappa}|}). \quad (38)$$

其中

$$\tilde{\mathbf{Y}} = \tilde{\mathbf{U}}_{ij} = \tilde{\mathbf{O}}\tilde{\mathbf{W}}^T\tilde{\mathbf{T}}\tilde{\mathbf{W}}\tilde{\mathbf{O}}^T,$$

$$\tilde{\mathbf{T}} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \bar{a}^2 \end{bmatrix}.$$

2.2 随机地震反应的求解

对于如式(18)所示的广义激励 $\mathbf{F}(t)$ 的协方差函数矩阵,可求得

$$\begin{cases} C_{ij}^T(\kappa) = E(\tau_i(t)\bar{\tau}_j(t+\kappa)) = \vartheta_{ij}e^{I\kappa} + \mathbf{v}e^{\bar{I}\kappa} + \varepsilon e^{\bar{\lambda}_j\kappa}, \\ C_{ij}^T(\kappa) = E(\tau_i(t)\bar{\tau}_j(t+\kappa)) = \vartheta'_{ij}e^{I\kappa} + \mathbf{v}'_{ij}e^{\bar{I}\kappa} + \varepsilon'_{ij}e^{\bar{\lambda}_j\kappa}. \end{cases} \quad (39)$$

其中

$$\vartheta_{ij} = a_{ij}U\left(\frac{1}{\bar{\lambda}_j - I} + \frac{1}{\lambda_i + I}\right),$$

$$\mathbf{v}_{ij} = a_{ij}\bar{U}\left(\frac{1}{\bar{\lambda}_j - \bar{I}} + \frac{1}{\lambda_i + \bar{I}}\right),$$

$$\varepsilon_{ij} = a_{ij}\left(U\left(\frac{1}{\bar{\lambda}_j + I} - \frac{1}{\lambda_j - I}\right) + \bar{U}\left(\frac{1}{\bar{\lambda}_j + \bar{I}} - \frac{1}{\lambda_j + \bar{I}}\right)\right),$$

$$\vartheta'_{ij} = a_{ij}UI\left(\frac{\lambda_i}{\lambda_i + I} - \frac{\bar{\lambda}_j}{\lambda_j - I}\right),$$

$$\mathbf{v}'_{ij} = a_{ij}\bar{U}\bar{I}\left(\frac{\lambda_i}{\lambda_i + \bar{I}} - \frac{\bar{\lambda}_j}{\lambda_j - \bar{I}}\right),$$

$$a_{ij} = \frac{2\pi Q_0 U_{ij}}{\lambda_i + \bar{\lambda}_j},$$

$$\varepsilon'_{ij} = -\bar{\lambda}_j^2 \varepsilon_{ij}, i, j = 1, 2, 3, 4.$$

以此可求得 T-L 控制结构体系各质点相对于地面运动的位移、速度和加速度反应方差为

$$\begin{cases} E(x_i^2) = \varphi_i^2 E(I^2) = \varphi_i^2 E(u_3^2) = \\ \varphi_i^2 \sum_{k=1}^4 \sum_{l=1}^4 V_{3l} C_{lk}^T(0) \bar{V}_{3k}, \\ E(\dot{x}_i^2) = \varphi_i^2 E(\dot{I}^2) = \varphi_i^2 E(u_1^2) = \\ \varphi_i^2 \sum_{k=1}^4 \sum_{l=1}^4 V_{1l} C_{lk}^T(0) \bar{V}_{1k}, \\ E(\ddot{x}_i^2) = \varphi_i^2 E(\ddot{I}^2) = \varphi_i^2 E(\ddot{u}_1^2) = \\ \varphi_i^2 \sum_{k=1}^4 \sum_{l=1}^4 V_{1l} C_{lk}^T(0) \bar{V}_{1k}. \end{cases} \quad (40)$$

求得 TMD 控制结构体系各质点相对于地面运动的位移、速度和加速度反应方差为

$$\begin{cases} E(x_i^2) = \tilde{\varphi}_i^2 E(I^2) = \tilde{\varphi}_i^2 E(\ddot{u}_3^2) = \\ \tilde{\varphi}_i^2 \sum_{k=1}^4 \sum_{l=1}^4 \bar{V}_{3l} C_{lk}^T(0) \bar{V}_{3k}, \\ E(\dot{x}_i^2) = \tilde{\varphi}_i^2 E(\dot{I}^2) = \tilde{\varphi}_i^2 E(\ddot{u}_1^2) = \\ \tilde{\varphi}_i^2 \sum_{k=1}^4 \sum_{l=1}^4 \bar{V}_{1l} C_{lk}^T(0) \bar{V}_{1k}, \\ E(\ddot{x}_i^2) = \tilde{\varphi}_i^2 E(\ddot{I}^2) = \tilde{\varphi}_i^2 E(\ddot{u}_1^2) = \\ \tilde{\varphi}_i^2 \sum_{k=1}^4 \sum_{l=1}^4 \bar{V}_{1l} C_{lk}^T(0) \bar{V}_{1k}. \end{cases} \quad (41)$$

求得无控制结构体系各质点相对于地面运动的位移、速度和加速度反应方差为

$$\begin{cases} E(x_i^2) = \tilde{\varphi}_i^2 E(I^2) = \tilde{\varphi}_i^2 E(\ddot{u}_2^2) = \\ \tilde{\varphi}_i^2 \sum_{k=1}^2 \sum_{l=1}^2 \bar{V}_{3l} C_{lk}^T(0) \bar{V}_{3k}, \\ E(\dot{x}_i^2) = \tilde{\varphi}_i^2 E(\dot{I}^2) = \tilde{\varphi}_i^2 E(\ddot{u}_1^2) = \\ \tilde{\varphi}_i^2 \sum_{k=1}^2 \sum_{l=1}^2 \bar{V}_{1l} C_{lk}^T(0) \bar{V}_{1k}, \\ E(\ddot{x}_i^2) = \tilde{\varphi}_i^2 E(\ddot{I}^2) = \tilde{\varphi}_i^2 E(\ddot{u}_1^2) = \\ \tilde{\varphi}_i^2 \sum_{k=1}^2 \sum_{l=1}^2 \bar{V}_{1l} C_{lk}^T(0) \bar{V}_{1k}. \end{cases} \quad (42)$$

3 新算法合理性的验证

利用本文算法和林家浩^[12]提出的确定性算法对 T-L 控制结构进行了随机地震反应分析。

算例是一座 10 层的剪切型钢框架结构,地震烈度为 8 度,建在 I 类场地土上,层高为 4.0 m,层间剪切刚度 $k_i = 2.3 \text{ GN} \cdot \text{m}^{-1}$,层间质量为 $m_i = 1.1 \text{ kt}$,结构基本周期为 $T_1 = 1.815 \text{ s}$,基本频率 $\omega_1 = 3.372 \text{ s}^{-1}$,阻尼比 $\xi_1 = 4.5\%$; TMD 参数为: $m_d = 51.5 \text{ t}$, $l = 0.582$, $k_d = 1.173 \text{ MN} \cdot \text{m}^{-1}$, $c_d = 116.2 \text{ kN} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$; LRB 参数为:初始刚度 $k_b = 29.7 \text{ kN} \cdot \text{mm}^{-1}$,屈服后

刚度 $\eta k_b=2.97\text{ kN}\cdot\text{mm}^{-1}$, 阻尼比 $\xi_b=3.3\%$, 屈服位移 $q=2.2\text{ cm}$, 屈服强度比 $F_0=7\%$, 隔震层质量 $m_b=109\text{ kg}$; 按 I 类场地分析, 地震动模型参数为: 谱强因子 $Q_0=6.60\text{ cm}^2\cdot\text{s}^{-3}$, $\omega_g=15\text{ s}^{-1}$, $\xi_g=0.60$ 。

该算例的各楼层基本振型见表 1。

表 1 各楼层的基本振型

Table 1 Basic vibration model of each storey			
楼层	基本振型	楼层	基本振型
5	0.819	10	1.000
4	0.721	9	0.992
3	0.592	8	0.971
2	0.437	7	0.939
1	0.258	6	0.892

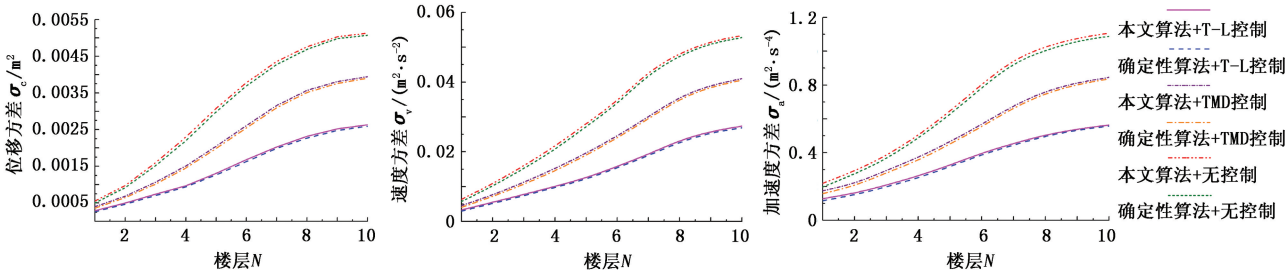


图 4 不同算法得到的地震反应方差

Fig. 4 Seismic response variances by different algorithms

4 随机地震反应分析

4.1 算例

某 30 层剪切型钢框架结构公寓, 地震烈度为 8 度, 建在 I 类场地上, 层高 3.5 m, $k_i=2.1825\text{ GN}\cdot\text{m}^{-1}$, $m_i=1.1739\text{ kt}$, $T_1=2.316\text{ s}$, $\omega_1=1.872\text{ s}^{-1}$, $\xi_1=5\%$ 。TMD 装置参数为: $m_d=68.2\text{ t}$, $l=0.628$, $k_d=1.286\text{ MN}\cdot\text{m}^{-1}$, $c_d=155.3\text{ kN}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$; LRB 参数为: $k_b=32.6\text{ kN}\cdot\text{mm}^{-1}$, $\eta k_b=3.26\text{ kN}\cdot\text{mm}^{-1}$; $\xi_b=3.5\%$, $q=2.5\text{ cm}$, $F_0=8\%$, $m_b=126\text{ kg}$; 按 I 类场地分析, 地震动模型参数为: $Q_0=6.60\text{ cm}^2\cdot\text{s}^{-3}$, $\omega_g=15\text{ s}^{-1}$, $\xi_g=0.60$ 。

4.2 模态分析

通过对该高层建筑进行模态分析, 提取出各楼层第 1 阶自振频率, 如表 2 所示。

4.3 结果分析

建立无控制、TMD 控制、T-L 控制 3 种控制工况的计算模型。采用本文提出的算法分别对 3 种控制工况下的高层公寓进行了随机地震反应分析, 得到高层公寓的位移、速度和加速度的反应方差, 见图 5。

由图 5 可以看出, TMD 控制与 T-L 控制较无控

利用两种算法得到 T-L 控制、TMD 控制和无控制结构的各楼层的位移、速度和加速度反应方差如图 4 所示。

由图 4 可以看出, 新算法算得的 T-L 控制、TMD 控制和无控制结构的各楼层地震反应方差与确定性算法的计算结果非常接近, 本文算法的计算结果稍微偏大, 其结果偏安全和保守, 因此本文提出的求解 T-L 控制、TMD 控制和无控制高层结构随机地震反应的方法是合理、可靠和有效的。同时也可以看出, T-L 控制比 TMD 控制更能显著降低高层结构的随机地震反应。

制工况相比, 前两种控制工况下的位移、速度和加速度反应方差均得到了显著降低; T-L 控制在抑制公寓位移、速度和加速度反应方差方面比 TMD 控制更有效, 前者的最大位移、速度和加速度反应方差比后者分别降低了 29.3%、27.8% 和 31.6%。可见 T-L 控制与 TMD 控制相比, 前者对结构位移、速度和加速度反应的减震效果更好。

表 2 各楼层的第 1 阶振型

Table 2 The first order vibration model of each storey

楼层	基本振型	楼层	基本振型
15	0.780	30	1.000
14	0.747	29	0.997
13	0.715	28	0.994
12	0.679	27	0.988
11	0.637	26	0.981
10	0.597	25	0.971
9	0.563	24	0.959
8	0.521	23	0.944
7	0.480	22	0.928
6	0.440	21	0.913
5	0.396	20	0.895
4	0.354	19	0.876
3	0.309	18	0.855
2	0.262	17	0.834
1	0.226	16	0.810

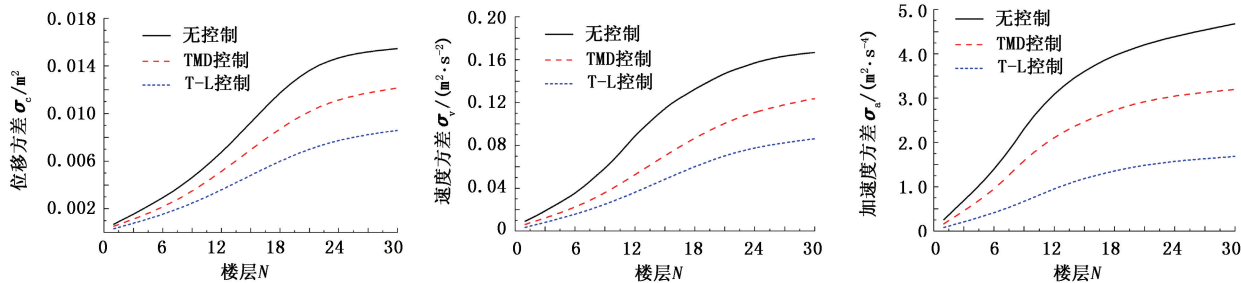


图 5 三种控制工况的各楼层地震反应方差

Fig. 5 Each storey seismic response variances under three control conditions

4.4 新算法的推广

对于采用“层间隔震”技术的高层结构,按照本文设计的 T-L 控制结构体系,应在隔震层上部结构与隔震层之间增设 LRB 滞回耗能保护层,将这种新型结构体系命名为 LRB 层间隔震高层结构。当该结构按第一振型展开后,其运动方程均为两自由度方程,可以参照本文提出的求解结构随机反应解析解的算法对结构进行随机地震反应分析,从而使本文算法更加具有推广价值。

5 结 论

(1) 新算法可以求解 T-L 控制、TMD 控制和无控制高层结构的随机地震反应,其计算结果与确定性算法的结果非常接近,新算法的结果偏安全;也可用于求解 LRB 层间隔震高层结构的随机地震反应,因而具有良好的推广价值。

(2) 新提出的 T-L 控制策略和 TMD 控制均能降低高层结构的位移、速度和加速度反应方差,但 T-L 控制的减震效果比 TMD 控制的要显著。本文算例在 T-L 控制下的最大位移、速度和加速度反应方差比 TMD 控制下的分别降低了 29.3%、27.8% 和 31.6%。

参考文献:

[1] ZEMP R, LLERA J C, ROSCHKE P. Tall building vibration control using a TM-MR damper assembly: experimental results and implementation[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2011, 40(3): 257-271.

[2] POURSHA M, KHOSHNOUDIAN F, MOGHADAM A S. A consecutive modal pushover procedure for nonlinear static analysis of one-way unsymmetrical-plan tall building structures[J]. Engineering Structures, 2011, 33(9): 2417-2434.

[3] 李扬, 李自力, 张艳. 不同类型场地对隔震储罐地震反应的影响[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2008, 32(5): 108-113.

LI Yang, LI Zi-li, ZHANG Yan. Influence of different

types of sites on seismic response of base-isolated liquid storage tank[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2008, 32(5): 108-113.

[4] TAKEWAKI I, FUJITA K, YAMAMOTO K, et al. Smart passive damper control for greater building earthquake resilience in sustainable cities[J]. Sustainable Cities and Society, 2011, 1(1): 3-15.

[5] KAYNIA A M, BIGGS J M, VENEZIANO D. Seismic effectiveness of tuned mass dampers[J]. Journal of the Structural Division, 1981, 107(8): 1465-1484.

[6] 周福霖, 张颖, 谭平. 层间隔震体系的理论研究[J]. 土木工程学报, 2009, 42(8): 1-8.

ZHOU Fu-lin, ZHANG Ying, TAN Ping. Theoretical study on story isolation system[J]. China Civil Engineering Journal, 2009, 42(8): 1-8.

[7] SADEK F, MOHRAZ B, TAYLOR A W, et al. A method of estimating the parameters of tuned mass dampers for seismic applications[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1997, 26(6): 617-636.

[8] WANG A P, FUNG R F, HUANG S C. Dynamic analysis of a tall building with a tuned-mass-damper device subjected to earthquake excitations[J]. Journal of Sound and Vibration, 2001, 244(1): 123-136.

[9] KALPAKIDIS I V, CONSTANTINOU M C, WHITTAKER A S. Modeling strength degradation in lead-rubber bearings under earthquake shaking[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2010, 39(13): 1533-1549.

[10] MOON K S. Sustainable structural engineering strategies for tall buildings[J]. The Structural Design of Tall and Special Buildings, 2008, 17(5): 895-914.

[11] SCHENK C A, PRADLWARTER H J, SCHUELLER G I. On the dynamic stochastic response of FE models[J]. Probabilistic Engineering Mechanics, 2004, 19(1): 161-170.

[12] 林家浩. 随机地震响应的确定性算法[J]. 地震工程与工程振动, 1985, 5(1): 89-94.

LIN Jia-hao. Determinately arithmetic of stochastic seismic response[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1985, 5(1): 89-94.