

贺辉, 谭平, 刘良坤. 考虑弯曲转角的框剪结构-TMD 减震体系数值优化设计[J]. 华南地震, 2017, 37 (2): 100-105. [HE Hui, TAN Ping, LIU Liangkun. Optimization Design of Frame Shear Structure - TMD System [J]. South china journal of seismology, 2017, 37(2): 100-105.]

考虑弯曲转角的框剪结构-TMD 减震体系 数值优化设计

贺辉¹, 谭平¹, 刘良坤²

(1. 广州大学工程抗震研究中心, 广州 510405; 2. 北京工业大学建筑工程学院, 北京 100124)

摘要: 提出了一种适用于框剪结构的 TMD 减震体系优化设计方法。将结构简化为连续-离散的悬臂梁模型, 该模型不但能体现结构的剪切变形, 而且能充分考虑结构弯曲变形产生的弯曲转角对 TMD 动力特性的影响。使用 Rayleigh-Ritz 法分析结构动力特性, 在此基础上, 基于结构的性能目标使用遗传算法对 TMD 体系进行数值优化设计。最后, 针对某框剪结构的 TMD 减震体系优化设计问题进行了研究, 研究结果证明了将 TMD 质量比作为优化参数的正确性。通过与传统 Den Hartog 参数对比发现, 此方法设计的 TMD 质量更小且控制效果更好。

关键词: 框剪结构; TMD; Rayleigh-Ritz 法; 层间位移角; 遗传算法

中图分类号: TU311.3

文献标志码: A

文章编号: 1001-8662 (2017) 02-0100-06

DOI: 10.13512/j.hndz.2017.02.016

Optimization Design of Frame Shear Structure-TMD System

HE Hui¹, TAN Ping¹, LIU Liangkun²

(1. Earthquake Engineering Research & Test Center, Guangzhou University, Guangzhou 510405, China;

2. School of Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: This paper proposes a simple and practical numerical optimization design method for frame shear structure-TMD system. Frame shear structure is simplified into a continuous cantilever beam with lumped parameter model. This model can not only simulate the structural lateral displacement reasonably, but also consider structural bending deformation. Structural natural vibration characteristics were analyzed by using Rayleigh-Ritz method. Optimal design of TMD based on the genetic algorithm, with the structural performance as

收稿日期: 2017-03-23

基金项目: 教育部创新团队研究发展计划(IRT13057)、国家自然科学基金(51208129; 51478129)、广州市属高校“羊城学者”首席科学家培养项目(1201541630)、“广东特支计划”科技创新领军人才(2014TX01C141)

作者简介: 贺辉 (1992-), 男, 硕士研究生, 主要从事结构振动控制研究。

E-mail: 937675375@qq.com.

通信作者: 谭平 (1973-), 男, 博士, 研究员, 博导, 主要从事结构抗震与减震控制研究。

E-mail: ptan@gzhu.edu.cn.

optimization objective. The methods applied to the optimum design of a frame shear structure-TMD damping system to reduce seismological response, and its numeral simulation analysis was conducted. The analysis results indicate this TMD numerical optimization method is very effective.

Keywords: Frame shear structure; TMD; Rayleigh-Ritz method; Story drift; Genetic Algorithm

0 前言

TMD 作为一种被动控制装置可以有效应用于结构振动控制^[1-2]。Den Hartog 给出了结构无阻尼情况下 TMD 的最优参数解析解^[3]。考虑主结构阻尼时, TMD 最优参数的解析解很难求解, Sadek 则通过数值方法求解了有阻尼体系 TMD 的最优参数^[4]。Rana 对 TMD 参数的研究表明使用简谐激励理论设计的 TMD 能有效控制结构的地震响应^[5]。我国学者李春祥采用数值迭代法给出了地震作用下的 TMD 最优参数实用设计表格^[6]。李创第等人基于结构动力可靠性约束对 TMD 进行了优化设计^[7]。谭平等采用虚拟激励法从能量角度分析了主结构能量响应最小时 TMD 质量比、频率比以及阻尼比的最优值^[8]。

目前,大多数 TMD 设计均是结构简化为不考虑弯曲变形的多质点剪切模型。但是,框剪结构的弯曲变形一般情况下是不可忽略的。鉴于此,本文将结构简化为连续-离散的动力模型,该模型不但能体现结构的剪切变形,而且能充分考虑结构弯曲变形产生的弯曲转角对 TMD 动力特性的影响。使用 Rayleigh-Ritz 法分析了结构动力特性,在此基础上,基于结构性能目标使用遗传算法对 TMD 进行数值优化设计。最后,针对某框剪结构 TMD 减震体系的优化设计问题进行了研究,研究结果验证了本文方法的有效性。

1 框剪结构的连续-离散动力模型

框剪结构的连续-离散动力模型如图 1 所示。假定弯曲型构件只考虑弯曲变形,剪切型构件只考虑剪切变形。图中 \bar{m}_i 、 $E_i I_i$ 以及 l_i 分别表示第 i 层的线性分布质量、弯曲型构件等效抗弯刚度与层高。 k_i 表示第 i 层剪切型构件剪切刚度, m_i 表示第 i 层的楼层质量, n 表示结构层数。

由于集中参数对悬臂梁边界条件影响较大,导致其理论推导较为繁琐复杂。本文采用 Rayleigh-Ritz 法对结构进行自振特性分析。Rayleigh-Ritz 法是一种缩减系统自由度的近似方法,将振型函数用一组相互独立且满足部分或全部几何物理边界条件

的函数 $\varphi_j(x)$ 的线性组合来表示:

$$\varphi(x) = \sum_{j=1}^N a_j \varphi_j(x) \quad (1)$$

根据文献 [9], 研究结构振型时, 令位移

$$v(x, t) = \varphi(x) \sin(\omega t) \quad (2)$$

则结构最大动能与势能

$$\begin{cases} T_{1\max} = \frac{1}{2} \omega^2 \sum_{i=2}^n \int_{l_{i-1}}^{l_i} \bar{m}_i \varphi^2(x) dx + \frac{1}{2} \omega^2 \sum_{i=1}^n m_i \varphi^2(x_i) \\ V_{1\max} = \frac{1}{2} \sum_{i=2}^n \int_{l_{i-1}}^{l_i} E_i I_i [\varphi''(x)]^2 dx + \frac{1}{2} [\Phi]^T [\tilde{K}] [\Phi] \end{cases} \quad (3)$$

式(3)中, “” 表示对 x 的二阶偏导,

$$\Phi = \begin{bmatrix} \varphi(x_1) \\ \varphi(x_2) \\ \vdots \\ \varphi(x_n) \end{bmatrix}, \tilde{K} = \begin{bmatrix} k_1+k_2 & -k_2 & & \\ -k_2 & k_2+k_3 & & \\ & & \ddots & -k_n \\ & & & -k_n & k_n \end{bmatrix} \quad (4)$$

设结构能量泛函 $L_1 = T_{1\max} - V_{1\max}$, 由能量守恒定律得

$$\frac{\partial L_1}{\partial a_j} = 0 \quad (j=1, 2, \dots, 2n, \dots) \quad (5)$$

联立(1)~(5)式, 可得出结构自振周期与振型函数。

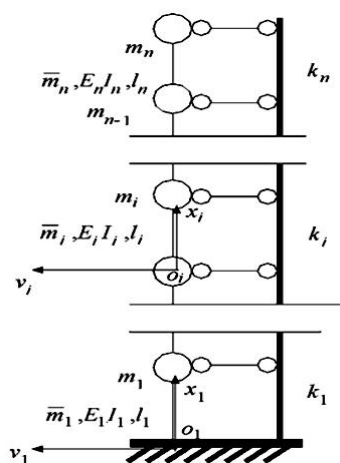


图1 连续-离散动力模型

Fig.1 Bending shear structure dynamic model

2 TMD 体系运动方程

不失一般性, 假定 TMD 安装于结构第 i 层用于控制结构第 r 阶振型位移。以结构 x_i 处 $\varphi_r(x)$ 为

基准将振型函数进行归一化处理。假定结构以单一形式 $\varphi_r(x)$ 振动, 则认为结构可简化为广义单自由度模型^[10-12]。令 $\Phi_r = [\varphi_r(x_1) \ \varphi_r(x_2) \ \cdots \varphi_r(x_n)]^T$, 结构参数可表示为:

$$\begin{cases} M = \sum_{i=2}^n \int_{l_{i-1}}^{l_i} \bar{m}_i \varphi_r^2(x) dx + \sum_{i=1}^n m_i \varphi_r^2(x_i) \\ K = \sum_{i=2}^n \int_{l_{i-1}}^{l_i} E_i I_i [\varphi_r''(x)]^2 dx + [\Phi_r]^T [\tilde{K}] [\Phi_r] \end{cases} \quad (6)$$

设结构位移 $v(x, t) = \varphi_r(x) z_1(t)$, 其中, $z_1(t)$ 表示结构 x_i 处相对于地面的位移。结构-TMD 无阻尼体系数学模型如图 2 所示, 图中, K_s 与 K_b 分别表示结构弯曲刚度与剪切刚度, m_i 和 k_i 表示 TMD 的质量与刚度系数, z_2 表示 TMD 相对于结构的位移, $\theta(t)$ 表示结构 x_i 处的弯曲转角。假定 $\theta(t) = \beta(x_i) z_1(t)$, 其中 $\beta(x_i)$ 表示结构 x_i 处的转角系数, 本文 $\beta(x_i) = \varphi_r'(x_i)$ 。设结构-TMD 无阻尼体系的总动能为 T ,

$$\begin{cases} M\ddot{z}_1 + m_i\ddot{z}_1 + m_i\ddot{z}_2 \cos(\beta z_1) + Kz_1 - m_i g \beta z_2 \cos(\beta z_1) = 0 \\ M\ddot{z}_2 + m_i\ddot{z}_1 \cos(\beta z_1) - m_i\beta\dot{z}_1^2 \sin(\beta z_1) + k_i z_2 - m_i g \sin(\beta z_1) = 0 \end{cases} \quad (11)$$

假定结构 r 阶振型阻尼比为 ζ_1 以及 TMD 阻尼比为 ζ_2 , 则结构阻尼系数可表示为 $C = 2\zeta_1 \omega_r M$, TMD 阻尼系数 $c_i = 2\zeta_2 \omega_r m_i$ 。其中, ω_r 表示结构第 r 阶振型

$$\begin{cases} M\ddot{z}_1 + m_i\ddot{z}_1 + m_i\ddot{z}_2 \cos(\beta z_1) + C\dot{z}_1 + Kz_1 - m_i g \beta z_2 \cos(\beta z_1) = -(M + m_i)\ddot{z}_g \\ M\ddot{z}_2 + m_i\ddot{z}_1 \cos(\beta z_1) - m_i\beta\dot{z}_1^2 \sin(\beta z_1) + C_i\dot{z}_2 + k_i z_2 - m_i g \sin(\beta z_1) = -m_i\ddot{z}_g \cos(\beta z_1) \end{cases} \quad (12)$$

同理, 不考虑结构弯曲转角, 即 $\beta=0$ 时, 结构-TMD 体系运动方程为:

$$\begin{cases} M\ddot{z}_1 + m_i\ddot{z}_1 + m_i\ddot{z}_2 + C\dot{z}_1 + Kz_1 = -M\ddot{z}_g \\ m_i\ddot{z}_2 + m_i\ddot{z}_1 + c_i\dot{z}_2 + k_i z_2 = -m_i\ddot{z}_g \end{cases} \quad (13)$$

3 基于结构性能目标的 TMD 优化设计流程

本文以位移作为结构性能评价指标, 提出基于结构性能目标的 TMD 优化设计流程如下:

(1) 建立位移反应谱。由地震加速度时程建立结构设计位移反应谱。

(2) 根据地震设防水准、结构的重要性等因素确定结构广义单自由度目标位移 ν_d 。

(3) 计算设计水平地震力。广义单自由度的目标位移确定后, 广义单自由度的设计水平地震力 $f_d = K\nu_d$ 。

(4) 以广义单自由度的设计水平地震力作为

总势能为 V , 有(以系统初始位置为零势能点)

$$\begin{cases} T = \frac{1}{2} M \dot{z}_1^2 + \frac{1}{2} m_i [(\dot{z}_1 + \dot{z}_2 \cos \theta)^2 + (\dot{z}_2 \sin \theta)^2] \\ V = \frac{1}{2} K z_1^2 + \frac{1}{2} k_i z_2^2 - m_i g z_2 \sin \theta \end{cases} \quad (7)$$

式(7)中, “ \cdot ” 表示对时间求导。设 Lagrange 函数

$$L = T - V \quad (8)$$

将 $\theta = \beta z_1$ 带入(6)与(7)式化简得

$$\begin{aligned} L = & \frac{1}{2} M \dot{z}_1^2 + \frac{1}{2} m_i \dot{z}_1^2 + m_i \dot{z}_1 \dot{z}_2 \cos(\beta z_1) + \frac{1}{2} m_i \dot{z}_2^2 - \frac{1}{2} K z_1^2 \\ & - \frac{1}{2} k_i z_2^2 + m_i g z_2 \sin(\beta z_1) \end{aligned} \quad (9)$$

代入 Lagrange 方程

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{z}} - \frac{\partial L}{\partial z} = 0 \quad (10)$$

求得结构-TMD 无阻尼体系自由振动方程为

对应振动频率, ω_i 表示 TMD 振动频率。则 TMD 频率比可表示为 $f = \omega_i / \omega_r$ 。同样可由 Lagrange 方程求得地震作用下结构-TMD 有阻尼体系运动方程为:

外激励幅值, 假定外激励为结构第 r 阶振型频率对应的简谐激励 $f_d e^{i\omega_r t}$, 运用遗传算法对 TMD 进行数值优化设计。

4 基于遗传算法的 TMD 最优参数求解

由于式(10)与式(11)理论求解比较复杂, 本文基于 MATLAB 平台使用 Runge-Kutta 法对其进行数值求解, 采用遗传算法对 TMD 进行数值优化设计。遗传算法(Genetic Algorithm, 简称 GA)是一类借鉴生物界的进化规律演化而来的优化搜索方法, 算法详细介绍见文献 [13]

假定简谐激励 $f_d e^{i\omega_r t}$ 作用下, 无控状态下结构第 i 层的位移响应为峰值为 $|Y_1|_{\max}$, TMD 控制下结构第 i 层的位移响应峰值为 $|Y_2|_{\max}$, 则遗传算法目标函数为:

$$G(Y) = \min \left(\frac{|Y_2|_{\max}}{|Y_1|_{\max}} \right) \quad (14)$$

以结构层间位移角限值 $[\sigma]$ 作为约束条件,即

$$\frac{\Delta v_{\max}}{l} \leq [\sigma] \quad (15)$$

5 算例

5.1 工程概况

为了验证本文方法的有效性,以某 20 层现浇钢筋混凝土框剪结构作为算例。建筑层高 3 m,总高度 60 m。结构平面布置:横向 5×4 m,纵向 5×4 m,结构总质量 1.06×10^4 t。结构每层分布质量 \bar{m} 取 1.08×10^5 kg/m,集中质量 $m=2.06 \times 10^5$ kg。每层剪力墙等效抗弯刚度 $EI=1.13 \times 10^{11}$ N·m²,框架剪切刚度 $K=3.13 \times 10^9$ N/m。结构顶层转角系数 $\beta=4.75 \times 10^{-3}$ 。假定 TMD 安装于结构顶层,用于控制结构横向第一阶振型,结构第一阶振型阻尼比 $\zeta_1=0.05$ 。采用 Etabs 软件建模如图 3 所示。用 Etabs 软件计算该结构基本周期为 1.03 s,用 Rayleigh-Ritz 法求得的简化模型基本周期为 0.99 s,二者误差为 3.89%,说明本文简化模型满足精度要求。

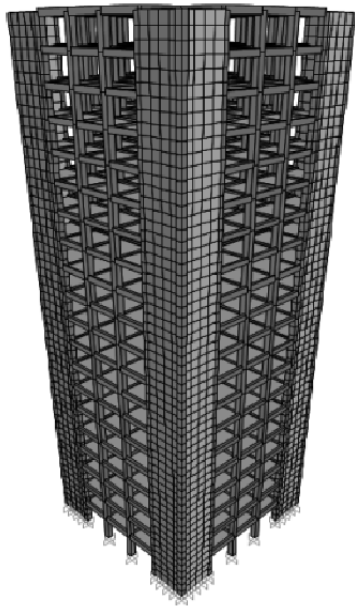


图3 算例模型图

Fig.3 Diagram of simulation example

本文根据工程实际情况选取人工地震波以及 ELcentro 波作为地震输入,以此来评判 TMD 控制效果。其中,人工地震波加速度谱密度采用 Kanai-Tajimi 谱^[15-16]:

$$S_a(\omega) = \frac{\omega_g^4 + (2\zeta_g \omega_g \omega)^2}{(\omega_g^2 - \omega^2)^2 + (2\zeta_g \omega_g \omega)^2} S_0 \quad (16)$$

式(16)中, S_0 表示谱强度因子, ζ_g 和 ω_g 分别表示地基土的阻尼比与卓越频率。时间包络函数取为:

$$g(t) = \begin{cases} (t/T_1)^2 & 0 < t \leq T_1 \\ 1 & T_1 < t \leq T_2 \\ \exp[-c(t-T_2)] & T_2 < t \leq T_d \end{cases} \quad (17)$$

式(17)中, c 为衰减系数, T_1 与 T_2 分别表示主振平稳段开始与结束时间。

现考虑地震设防烈度为 8 度, C 类场地,设计地震分组为第一组,由文献[17]取, $\omega_g=17.95$ rad/s, $\zeta_g=0.72$, $S_0=14.56$ cm²/(rad·s³), $T_1=0.8$ s, $T_2=7.0$ s, $c=0.35$,按照三角级数法生成的地震加速度时程曲线如图 4 所示。由人工波生成的结构位移反应谱如图 5 所示,由图 5 易见,本文模型的目标位移 $v_d=0.01$ m。

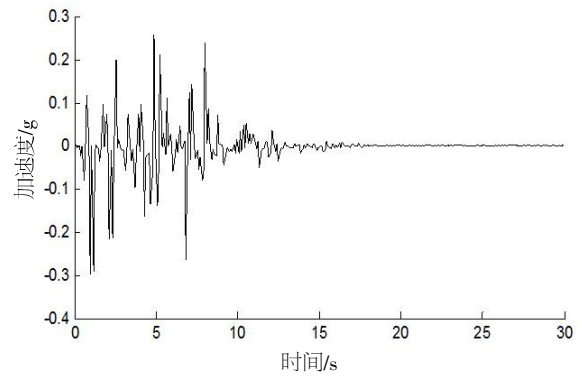


图4 人工地震波

Fig.4 Artificial seismic wave

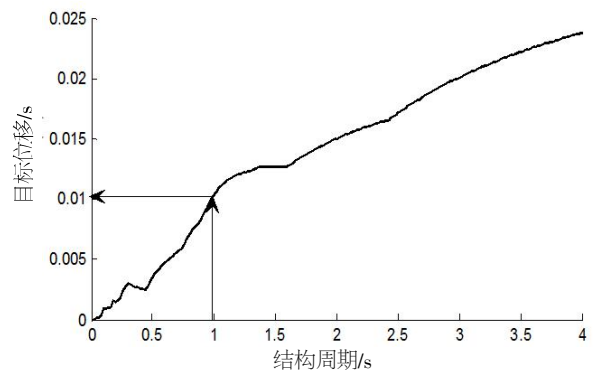


图5 结构位移反应谱

Fig.5 The response spectrum of structural displacement

5.2 TMD 谐波响应分析

在求解 TMD 最优参数前,首先验证考虑结构弯曲转角的必要性。假定结构阻尼比为 0,使用 Den Hartog 参数对 TMD 进行设计。以结构顶点位移响应峰值作为评价指标,计算出谐波 $f_d e^{i\omega_d t}$ 作用

下, 结构转角系数与结构位移响应之间的关系如图 6 所示。从图 6 中可以看出, 随着转角系数 β 值的不断增大, TMD 对结构位移响应峰值的控制存在相对较为稳定的“平台段”以及变化剧烈的

“振荡段”。本文算例的转角系数位于“振荡段” $[0.004, 0.005]$ 内, 在此区间并非 TMD 质量比越大, 其控制效果就越好。因此, 本文建议将 TMD 质量比作为遗传算法优化参数之一。

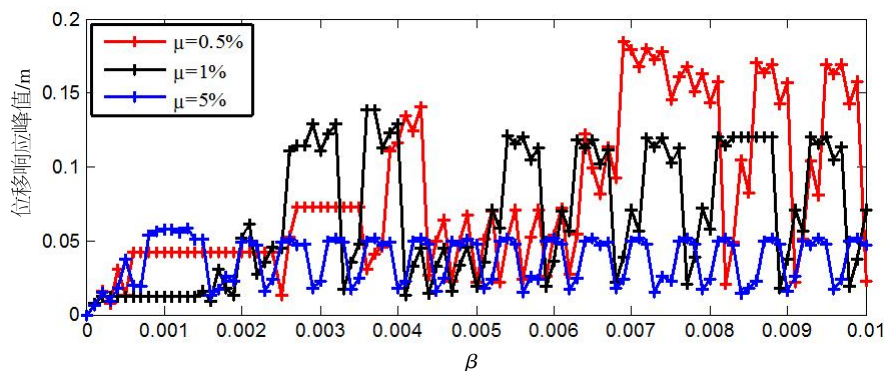


图 6 结构顶点位移响应峰值与结构转角系数关系曲线

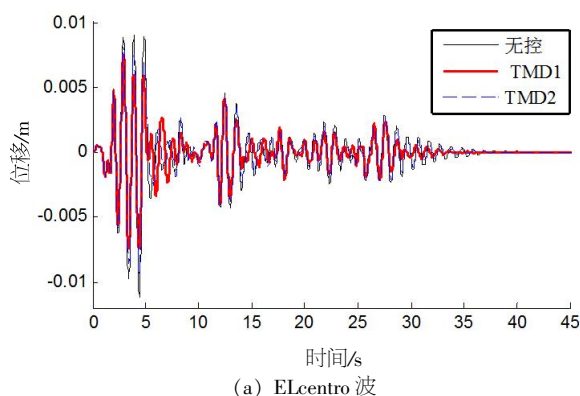
Fig.6 The relationship between the peak value of the top displacement response and bending angle coefficient

5.3 TMD 最优参数求解

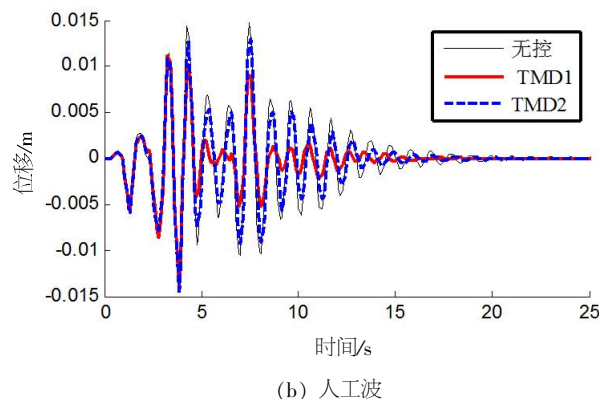
使用遗传算法对 TMD 最优设计参数进行求解, 其中, TMD 阻尼比与频率比分别取为 $[0 \ 0.2]$ 与 $[0.8 \ 1.2]$, TMD 质量比取 $[0 \ 0.05]$ 。遗传算法中各参数分别取为: 种群大小 80, 遗传 60 代, 交叉概率 0.7, 变异概率 0.1。根据我国《框剪建筑混凝土结构技术规程》(JGJ 3-2010)^[14] 取 $\Delta\nu_{\max}/l \leq 1/800$ 。求解出 TMD 最优频率比 $f_{\text{opt}}=0.869$ 与最优阻尼比 $\zeta_{2\text{opt}}=0.090$, 与之对应的 TMD 最优质量比 $\mu=0.045$ 。

为了便于分析, 假定本文方法所设计的 TMD 为 TMD1, 使用 Den Hartog 参数设计的 TMD 为

TMD2, TMD2 的质量比取为 0.09。图 7 表示地震作用下结构的位移响应时程, 相对于 TMD2 而言, TMD1 处于更好的控制状态。以人工波作用下的结构位移响应均方差为例, 结构无控状态下的位移响应均方差为 $2.1 \times 10^{-3} \text{m}$, TMD2 控制下结构位移响应均方差为 $1.8 \times 10^{-3} \text{m}$, 控制效果为 14.29%。TMD1 控制下结构位移响应均方差为 $1.4 \times 10^{-3} \text{m}$, 控制效果为 33.33%, 较 TMD2 提高了 19.04%。值得注意的是, TMD1 的质量比相对于 TMD2 减小了 50%, 控制效果反而比 TMD2 好。这也说明了本文将 TMD 质量比作为优化参数的正确性, 同时也验证了本文所提方法的有效性。



(a) Elcentro 波



(b) 人工波

图 7 地震作用下结构的位移响应时程

Fig.7 The time history of structural displacement response under earthquake

6 结语

本文提出了一种适用于框剪结构的 TMD 减震

体系优化设计方法, 该方法考虑框剪结构弯曲变形产生的转角对 TMD 动力特性的影响, 使用 Rayleigh-Ritz 法分析了结构动力特性, 在此基础

上,基于结构的性能目标使用遗传算法对 TMD 体系进行数值优化设计。以 1 栋 20 层框剪结构-TMD 减震系统优化设计作为算例,验证了本文方法的有效性。得到以下结论:

(1) 基于结构性能目标结合遗传算法提出了一种适用于框剪结构的 TMD 减震体系数值优化设计方法,该方法充分考虑结构弯曲变形产生的转角对 TMD 动力特性的影响。

(2) 考虑结构弯曲转角时,TMD 质量比越大其控制效果不一定越好。因此,本文建议将 TMD 质量比也作为 TMD 优化设计参数之一。

(3) 对于本文算例,使用本文方法设计的 TMD1 比传统参数设计的 TMD2 质量更小且控制效果更好。其中,TMD2 质量比为 0.09,TMD1 质量比为 0.045,较 TMD2 减小了 50%。但是,TMD1 的控制效果较 TMD2 提高了 19.04%。

参考文献:

- [1] 周福霖. 工程结构减震控制[M]. 北京:地震出版社, 1997.
- [2] 王肇民. 高耸结构振动控制[M]. 上海:同济大学出版社, 1997.
- [3] Den Hartog J P. Mechanical Vibration [M]. NY: McGraw Hill, 1956.
- [4] Sadek F.M, Ohraz B.T, Aylor A.W. A method of estimating the parameters of tuned mass dampers for seismic applications [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1997, 26 (6): 617-635.
- [5] Rana R, Soog T.T.Parametric study and simplified design of tuned mass damper [J]. Engineering Structures, 1998, 20: 193-204.
- [6] 李春祥.地震作用下框剪建筑 TMD 控制研究与设计[J]. 上海交通大学学报, 1999, 33 (6): 746-749.
- [7] 李创第,黄天立,李墩,等.带 TMD 的结构基于动力可靠性约束的优化设计[J]. 地震工程与工程振动, 2004, 24 (6): 121-125.
- [8] 谭平,潘兆东,王磊,等.基于能量原理的 TMD 系统减震性能分析[J]. 桂林理工大学学报, 2012, 32 (3): 335-341.
- [9] 王光远. 应用分析动力学[M]. 北京:人民教育出版社, 1981.
- [10] R.克拉夫, J.彭津,王光远,等. 结构动力学[M]. 北京:高等教育出版社, 2006.
- [11] 刘晶波,杜修力. 结构动力学[M]. 北京:机械工业出版社, 2005.
- [12] 梁兴文. 结构抗震性能设计理论与方法[M]. 北京:科学出版社, 2011.
- [13] 王磊,谭平,赵卿卿. 随机结构-TMD 优化设计与概率密度演化研究[J]. 振动工程学报, 2015, 28 (2): 285-290.
- [14] 广东省建筑设计研究院. JGJ 3-2010 框剪建筑混凝土结构技术规程[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2011.
- [15] 朱位秋. 随机振动[M]. 北京:科学出版社, 1992.
- [16] 杨庆山,田玉基. 地震地面运动及其人工合成[M]. 北京:科学出版社, 2014.
- [17] 薛素铎,王雪生,曹资. 基于新抗震规范的地震动随机模型参数研究[J]. 土木工程学报, 2003, 36 (5): 5-10.