

多自由度结构-串并联调谐质量阻尼器减震性能

王振洲, 安子凡, 曹黎媛, 李春祥

(上海大学力学与工程科学学院, 上海 200444)

摘要: 针对提出的串并联调谐质量阻尼器(TTMD)减震系统, 采用粒子群算法, 在频域内对多自由度结构-TTMD 系统进行优化分析。建立多自由度结构-TTMD 系统减震控制仿真分析模型, 分别考虑不同类型实际地震记录, 在时域内研究了 TTMD 对结构地震响应的控制效率, 并与相同总质量比的调谐质量阻尼器(TMD)进行比较。进一步考虑了结构刚度发生 10% 和 30% 退化的情况, 分析了 TTMD 系统对刚度退化结构的减震效果。数值结果表明, TTMD 系统减震性能和鲁棒性能优于 TMD 系统, 且具有阻尼需求小、安装简单、易于实现等优势, 是一种增强型减震系统。

关键词: 结构振动控制; 串并联调谐质量阻尼器; 刚度退化; 动力时程分析; 减震鲁棒性

中图分类号: TU352.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-4523(2024)02-0318-08

DOI: 10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.2024.02.014

引言

调谐质量阻尼器(Tuned Mass Damper, TMD)^[1] 减振体系, 通常由弹簧或吊索、质量块、阻尼装置组成, 安装于结构的特定位置, 比如高层建筑的顶部, 通过技术手段将其固有振动频率与结构的受控振型频率进行调谐。结构发生振动时, TMD 的惯性质量与结构的受控振型谐振, 以吸收结构受控振型的振动能量, 从而达到抑制整个受控结构振动的目的。TMD 在超高层建筑^[2]、大跨空间结构^[3]、大跨桥梁^[4] 的风振控制中已得到了广泛应用。然而, 值得注意的是, 只有当 TMD 频率被调谐至结构受控频率且外激励覆盖这个频率成分时才能充分发挥其控制的有效性^[5]。一旦 TMD 发生失调, 其控制有效性将明显下降。例如, 将 TMD 用于结构的地震反应控制中时, 由于地震中结构刚度的退化, 导致 TMD 的频率调谐失谐。为提高 TMD 用于结构减震的有效性和鲁棒性, 很多学者进行了相关研究^[6-8]: 如在 TMD 中引入非线性刚度和阻尼来改善其阻尼性能^[9]; 或增大 TMD 中质量块的质量并配置高阻尼橡胶支撑^[10]。多重调谐质量阻尼器(Multiple Tuned Mass Damper, MTMD)^[11-17] 由多个不同动力特性的小尺寸 TMD 组成, 可以适应更宽频带的外激励, 因此成为进一步改善鲁棒性的途径。

为了进一步探索一种更简单、紧凑、频带间隔更

宽、TMD 单元更少、有效性更高的调谐质量阻尼器, Yang 等^[18] 提出了一种串并联调谐质量阻尼器(Tuned Tandem Mass Dampers, TTMD)装置。本质上, TTMD 就是两个并联在结构上的 TMD 装置, 但两个 TMD 装置之间通过一个连接阻尼(link dashpot)相连。TTMD 通过上、下两个调谐质量块的相对运动以及两个质量块之间连接阻尼的耗能, 能够很大程度地克服单质量块调谐质量阻尼器的缺点。为了进一步研究 TTMD 与 TMD 对于多自由度高层建筑减震性能的差异及工程应用的可行性, 对其进行优化设计和减震控制仿真分析是必要的。本文以 10 层钢框架为结构模型, 使用粒子群算法对 TTMD 系统进行参数优化, 对多自由度结构-TTMD 系统进行减震性能分析。之后, 通过 MATLAB/Simulink 平台对多自由度结构-TTMD 系统进行减震控制仿真分析。通过对比研究, 进一步考察两种调谐质量阻尼器的减震机理和特点, 为其工程应用提供参考。

1 多自由度结构-TTMD 系统状态空间方程

串并联调谐质量阻尼器(TTMD)由两个质量块 m_1 和 m_2 组成, 每个质量块由一套弹簧和阻尼分别将其连接到结构上, 实际上就是两个并联在结构上的 TMDs, 两个 TMDs 之间又通过一个连接阻尼

相连,进而构成了一种串并联调谐质量阻尼器(TTMD)。将TTMD装置安放在建筑顶部楼层,多自由度(Multiple Degrees of Freedom, MDOF)结构-TTMD系统力学模型如图1所示。图1中, $m_{s_i}(i=1, \dots, n)$, m_1 和 m_2 分别代表MDOF结构的第*i*层、TMD1和TMD2的质量; $c_{s_i}(i=1, \dots, n)$, c_1 , c_2 和 c_T 分别代表MDOF结构的第*i*层、TMD1、TMD2和连接阻尼器各自的阻尼系数; $k_{s_i}(i=1, \dots, n)$, k_1 和 k_2 分别代表MDOF结构的第*i*层、TMD1和TMD2的刚度系数; $\ddot{x}_g(t)$ 为地震地面运动加速度; $x_{s_i}(i=1, \dots, n)$, x_1 和 x_2 分别代表MDOF结构的第*i*层、TMD1和TMD2相对地面的位移。

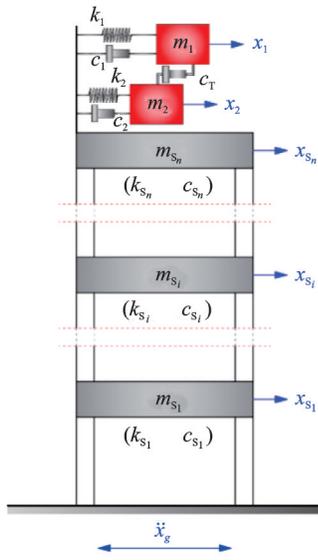


图1 多自由度结构-TTMD系统的力学模型

Fig.1 Mechanical model of the MDOF structure-TTMD system

MDOF结构-TTMD系统的动力方程为:

$$\bar{M}\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = -\bar{M}E\ddot{x}_g \quad (1)$$

式中 $x = [x_{s_1} \dots x_{s_n} x_1 x_2]^T$, \dot{x} 和 \ddot{x} 分别为 x 对时间 t 的一阶导数和二阶导数; $E = [1 \dots 1]_{1 \times (n+2)}^T$; \bar{M} 和 M, C, K 分别为MDOF结构-TTMD系统的 $(n+2) \times (n+2)$ 维质量、阻尼、刚度矩阵,具体表示为:

$$\bar{M} = M = \begin{bmatrix} M_s & 0_{n \times 2} \\ 0_{2 \times n} & M_T \end{bmatrix}, M_T = \begin{bmatrix} m_1 & \\ & m_2 \end{bmatrix}_{2 \times 2};$$

$$C = \begin{bmatrix} C_{n \times n} & C_{n \times 2} \\ C_{2 \times n} & C_T \end{bmatrix}, C_T = \begin{bmatrix} c_1 + c_T & -c_T \\ -c_T & c_2 + c_T \end{bmatrix},$$

$$C_{n \times 2} = C_{2 \times n}^T = \begin{bmatrix} 0_{1 \times (n-1)} & -c_1 \\ 0_{1 \times (n-1)} & -c_2 \end{bmatrix}^T,$$

$$C_{n \times n} = C_s + \begin{bmatrix} 0_{(n-1) \times (n-1)} & 0_{(n-1) \times 1} \\ 0_{1 \times (n-1)} & c_1 + c_2 \end{bmatrix};$$

$$K = \begin{bmatrix} K_{n \times n} & K_{n \times 2} \\ K_{2 \times n} & K_T \end{bmatrix}, K_T = \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \end{bmatrix},$$

$$K_{n \times 2} = K_{2 \times n}^T = \begin{bmatrix} 0_{1 \times (n-1)} & -k_1 \\ 0_{1 \times (n-1)} & -k_2 \end{bmatrix}^T,$$

$$K_{n \times n} = K_s + \begin{bmatrix} 0_{(n-1) \times (n-1)} & 0_{(n-1) \times 1} \\ 0_{1 \times (n-1)} & k_1 + k_2 \end{bmatrix};$$

其中,0为零矩阵,下标为其行数 \times 列数;

$$M_s = \begin{bmatrix} m_{s_1} & & \\ & \ddots & \\ & & m_{s_n} \end{bmatrix},$$

$$K_s = \begin{bmatrix} k_{s_1} + k_{s_2} & -k_{s_2} & & & & \\ -k_{s_2} & k_{s_2} + k_{s_3} & -k_{s_3} & & & \\ & & \ddots & \ddots & \ddots & \\ & & & -k_{s_{n-1}} & k_{s_{n-1}} + k_{s_n} & -k_{s_n} \\ & & & & -k_{s_n} & k_{s_n} \end{bmatrix},$$

M_s 和 K_s 分别为MDOF结构的质量和刚度矩阵。

采用Rayleigh阻尼假设,MDOF结构的阻尼矩阵为:

$$C_s = \alpha M_s + \beta K_s \quad (2)$$

$$\text{式中 } \alpha = \frac{2\omega_{s_1}\omega_{s_2}(\xi_{s_1}\omega_{s_2} - \xi_{s_2}\omega_{s_1})}{\omega_{s_2}^2 - \omega_{s_1}^2}, \beta = \frac{2(\xi_{s_2}\omega_{s_2} - \xi_{s_1}\omega_{s_1})}{\omega_{s_2}^2 - \omega_{s_1}^2};$$

ω_{s_1} 和 ξ_{s_1} 分别为MDOF结构第1阶振型的固有频率和阻尼比; ω_{s_2} 和 ξ_{s_2} 分别为MDOF结构第2阶振型的固有频率和阻尼比。

地震作用下MDOF结构-TTMD系统的状态空间方程为:

$$\dot{X} = A_{TT}X + B_{TT}\ddot{x}_g \quad (3)$$

$$\text{式中 } X = [X^T \dot{X}^T]^T; \dot{X} = [\dot{X}^T \ddot{X}^T]^T; A_{TT} =$$

$$\begin{bmatrix} 0_{(n+2) \times (n+2)} & I_{n+2} \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{bmatrix}; B_{TT} = \begin{bmatrix} 0_{(n+2) \times 1} \\ -M^{-1}\bar{M}E \end{bmatrix}; \text{其中,}$$

I 为单位矩阵,下标为其阶数。则各输出目标如表1所示。

2 多自由度结构-TTMD系统减震优化

2.1 优化目标函数与性能评价指标

根据状态空间方程可以导出MDOF结构-TTMD系统在地震动输入下结构位移和各质量块冲程的传递函数:

$$G_s(s) = C_{TTs}(sI_{2n+4} - A_{TT})^{-1}B_{TT} + D_{TTs} \quad (4)$$

$$G_{i1}(s) = C_{TT1}(sI_{2n+4} - A_{TT})^{-1}B_{TT} + D_{TT1} \quad (5)$$

$$G_{i2}(s) = C_{TT2}(sI_{2n+4} - A_{TT})^{-1}B_{TT} + D_{TT2} \quad (6)$$

$$G_{i2-i1} = C_{TTc}(sI_{2n+4} - A_{TT})^{-1}B_{TT} + D_{TTc} \quad (7)$$

令 $s = i\omega$,并引入变量: $\omega_1 = \sqrt{k_1/m_1}$, $\omega_2 =$

表 1 MDOF 结构-TTMD 系统状态空间方程各输出目标
Tab.1 Outputs of state-space equations of the MDOF structure-TTMD system

输出目标	输出方程
结构位移	$X_s = C_{TTs}X + D_{TTs}\ddot{x}_g$, 其中: $C_{TTs} = [I_n \quad 0_{n \times (n+4)}], D_{TTs} = 0_{n \times 1}$
TMD1 冲程	$y_{t1} = C_{TT1}X + D_{TT1}\ddot{x}_g$, 其中: $C_{TT1} = [0_{1 \times (n-1)} \quad -1 \quad 1 \quad 0 \quad 0_{1 \times (n+2)}],$ $D_{TT1} = 0$
TMD2 冲程	$y_{t2} = C_{TT2}X + D_{TT2}\ddot{x}_g$, 其中: $C_{TT2} = [0_{1 \times (n-1)} \quad -1 \quad 1 \quad 0 \quad 0_{1 \times (n+2)}],$ $D_{TT2} = 0$
连接阻尼器位移	$y_{t2-t1} = C_{TTc}X + D_{TTc}\ddot{x}_g$, 其中: $C_{TTc} = [0_{1 \times (n-1)} \quad -1 \quad 1 \quad 0 \quad 0_{1 \times (n+2)}],$ $D_{TTc} = 0$
绝对加速度	$a = C_{TTa}X + D_{TTa}\ddot{x}_g$, 其中: $C_{TTa} = [-M^{-1}K \quad -M^{-1}C],$ $D_{TTa} = E - M^{-1}ME$

注: $X_s = [x_{s_1} \quad \dots \quad x_{s_n}]^T$; $a = [a_{s_1} \quad \dots \quad a_{s_n} \quad a_1 \quad a_2]^T$; $y_{t1} = x_1 - x_{s_1}$, $y_{t2} = x_2 - x_{s_2}$; $y_{t2-t1} = x_2 - x_{t1}$; $a_{s_i} = \ddot{x}_g + \ddot{x}_{s_i}$ ($i = 1, \dots, n$); $a_1 = \ddot{x}_g + \ddot{x}_1, a_2 = \ddot{x}_g + \ddot{x}_2$

$\sqrt{k_2/m_2}$, $\omega_T = (\omega_1 + \omega_2)/2$, $\xi_1 = c_1/(2m_1\omega_1)$, $\xi_2 = c_2/(2m_2\omega_2)$, $\xi_T = c_T/[2(m_1 + m_2)\omega_T]$, $\mu_1 = m_1/\sum_{i=1}^n m_{s_i}$, $\mu_2 = m_2/\sum_{i=1}^n m_{s_i}$, $\mu = \mu_1 + \mu_2$, $\eta = m_1/m_2$, $f_1 = \omega_1/\omega_{s_1}, f_2 = \omega_2/\omega_{s_1}$

定义 MDOF 结构-TTMD 系统减震性能评价指标:

结构位移:

$$R_s = \|G_s(i\omega)\|_2 / \|G_{s0}(i\omega)\|_2 \quad (8)$$

TMD1 冲程:

$$R_{t1} = \|G_{t1}(i\omega)\|_2 / \|G_{s0}(i\omega)\|_2 \quad (9)$$

TMD2 冲程:

$$R_{t2} = \|G_{t2}(i\omega)\|_2 / \|G_{s0}(i\omega)\|_2 \quad (10)$$

连接阻尼器位移:

$$R_{t2-t1} = \|G_{t2-t1}(i\omega)\|_2 / \|G_{s0}(i\omega)\|_2 \quad (11)$$

式中 $\|G_{s0}(i\omega)\|_2$ 为未受控制 MDOF 结构的结构位移传递函数的 H_2 范数。

定义 TTMD 优化目标函数(对两质量块质量比 η 、TMD1 频率比 f_1 、TMD2 频率比 f_2 、TMD1 阻尼比 ξ_1 、TMD2 阻尼比 ξ_2 和连接阻尼比 ξ_T 进行优化), 即最优参数评价准则为:

$$\min.L_s = \min.L_s, \text{ s.t. } L_{lb} \leq L \leq L_{ub} \quad (12)$$

式中 $L = [\eta \quad f_1 \quad f_2 \quad \xi_1 \quad \xi_2 \quad \xi_T]$, L_{lb} 为参数取值

下界, L_{ub} 为参数取值上界。

2.2 减震优化分析

选用 10 层钢框架为 MDOF 结构模型^[19], 结构基本参数如表 2 所示。结构的第 1, 2 阶振型固有频率为 $\omega_{s_1} = 3.1076$ rad/s, $\omega_{s_2} = 8.2673$ rad/s, 对应振型阻尼比为 $\xi_1 = \xi_2 = 0.02$ 。根据 TTMD 最优评价准则, 如图 2 所示, 采用粒子群算法, 对 TTMD 的频域特性进行参数优化与数值研究, 并与 TMD 进行比较。图 2 中, V_{max} 为粒子最大速度, ω_{start} 和 ω_{end} 分别为初始和迭代至最大次数时的惯性权重, C_1 和 C_2 为学习因子。研究参数和优化参数取值范围如下: 质量块总质量比为 $0.001 \leq \mu \leq 0.05$ ($\Delta\mu = 0.001$); 优化参数取值下界为 $L_{lb} = [0.0001 \quad 0.01 \quad 0.01 \quad 0 \quad 0 \quad 0]$; 优化参数取值上界为 $L_{ub} = [1 \quad 2 \quad 2 \quad 0.9999 \quad 0.9999 \quad 0.9999]$ 。

表 2 10 层钢框架结构基本参数

Tab.2 Structural parameters of the 10-storey steel frame

楼层	层质量 m_s/kg	层刚度 $k_s/(10^3 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1})$
1	179000	62.47
2	170000	52.26
3	161000	56.14
4	152000	53.02
5	143000	49.91
6	134000	16.79
7	125000	43.67
8	116000	40.55
9	107000	37.43
10	98000	34.32

图 3 给出了在不同装置(TTMD 或 TMD)控制下, 结构位移控制有效性和装置质量块冲程随质量块总质量比 μ 的变化趋势。其中, $\min.R_s$ 和 R_q ($q = t, t1, t2, t2 - t1$) 值越小, 则分别代表控制装置对结构位移控制有效性越高、质量块冲程和连接阻尼器位移越小。由图 3 可知, 质量块总质量的增大能够显著提高 TTMD 对结构位移控制的有效性, 但随着质量块总质量的增大, 控制有效性会趋于饱和。质量块总质量相同时, TTMD 的控制有效性优于 TMD, 并且这种优势随着质量块总质量的增大而增大, 当 $\mu > 0.02$ 后, 控制有效性优势趋于饱和。由图 3(b) 可以看出, TTMD 系统中质量块的冲程要大于 TMD, 并且连接阻尼器位移也要大于 TMD 阻尼器位移。但相较于 TMD 大尺寸质量块, TTMD 中质量块尺寸的减小很大程度上为其本身和连接阻尼器让出了振动空间。

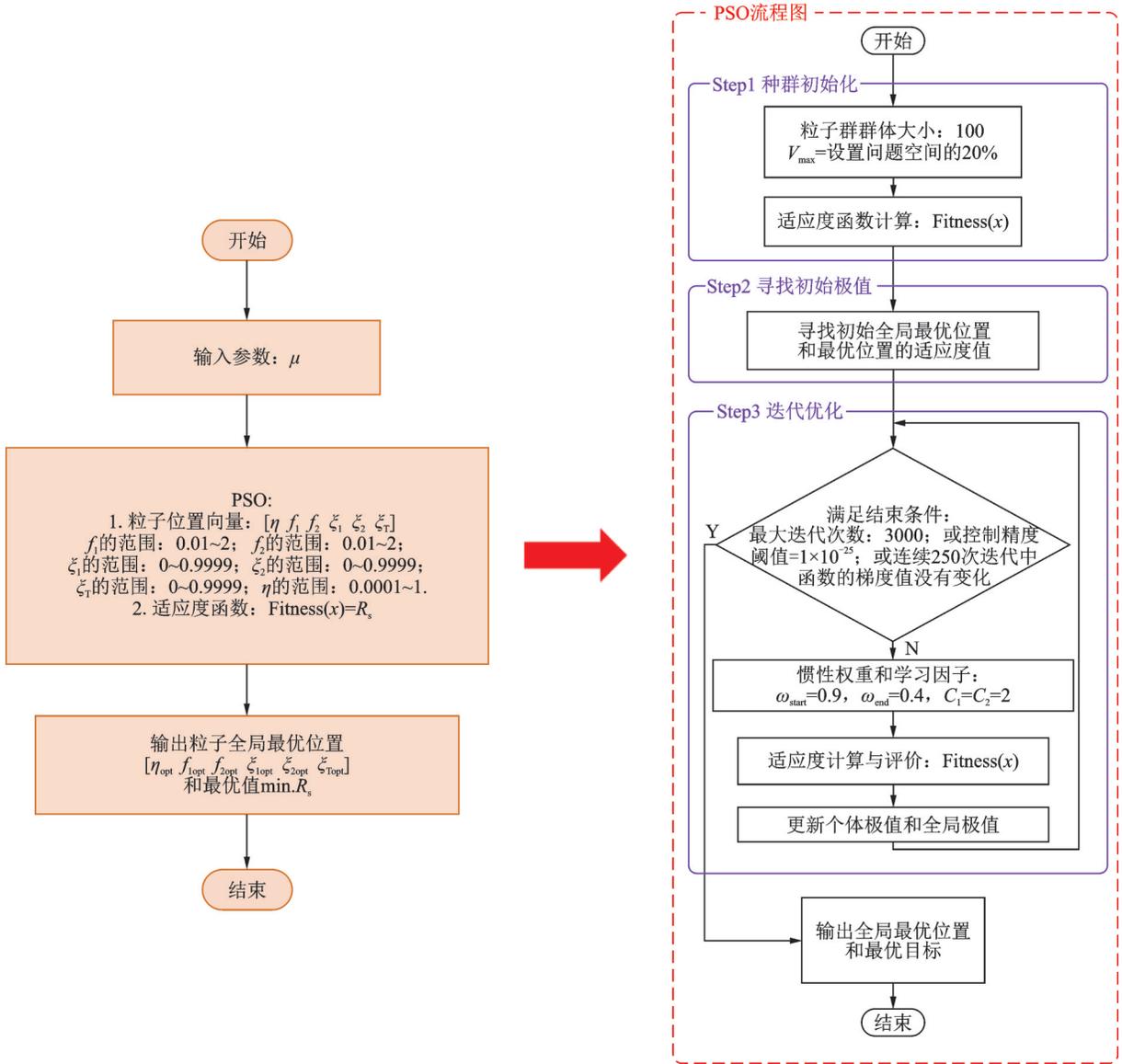


图 2 粒子群优化流程图

Fig. 2 Flow chart of Particle Swarm Optimization (PSO)

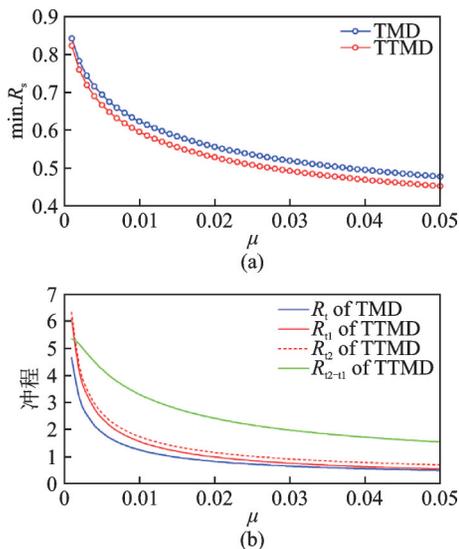


图 3 各减震性能评价指标随 μ 变化趋势图

Fig. 3 Variation tendencies of evaluation indexes of the seismic resistant performance with μ

图 4 给出了 TTMD 处于最优状态下,两质量块质量比 η 、刚度系数和阻尼系数随着质量块总质量比 μ 的变化趋势。由图 4(a)可知,质量块总质量不同会影响质量块质量的分配方案,所以针对不同 μ 采用不同的质量分配方案能够充分发挥 TTMD 控制的有效性。由图 4(b)可知,最优状态下 TTMD 和 TMD 两个控制系统对刚度总需求有所差异,但当 $\mu \leq 0.03$ 时,其差异并不明显。与此同时,TTMD 各 TMD 对应的刚度需求要远小于单个 TMD 的刚度需求,所以 TTMD 装置在制作过程中显然对提供刚度的配件要求要远低于 TMD。同时图 4(c)显示出两装置对阻尼系数的需求差异,其中在最优状态时,TTMD 控制系统两质量块对应的阻尼系数 $c_1 = c_2 = 0$,系统的阻尼完全由两质量块之间的连接阻尼 c_T 提供。这一性

质很大程度上简化了 TTMD 控制装置的制作。值得指出的是,提高质量块质量能显著提高 TMD 整体性能,但同时增大了阻尼需求。具有较大阻尼系数的构件在工程应用中很难实现。而在相同 μ 情况下, TTMD 系统的连接阻尼系数小于同等总质量 TMD 的阻尼系数的 1/2,极大地降低了对阻尼的需求,从而很大程度上降低了对阻尼技术的要求和成本,有利于系统装置的实现。

综上所述,合理的质量分配使得 TTMD 对结构位移控制的有效性要高于 TMD,同时各质量块对提供刚度的配件要求更低,并显著降低了整个系统对阻尼的需求,使得 TTMD 相较于 TMD 更容易实现。

3 多自由度结构-TTMD 系统减震控制仿真分析

为了进一步验证频域分析结果,选取上述 10 层钢框架模型作为案例模型,建立 Simulink 数值仿真模型。考虑 3 条具有不同动力特性的近场脉冲、近场无脉冲和远场地震波(基本参数如表 3 所示),分别对 TMD 和 TTMD(设计参数如表 4 所示)控制下的多自由度结构进行时程分析。分别选取结构各层位移和加速度的峰值作为结构响应量化指标,定义

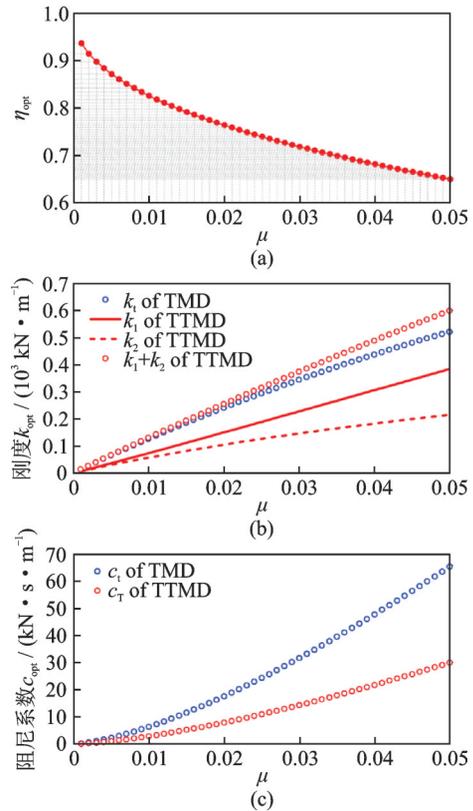


图4 最优参数随 μ 的变化趋势图

Fig. 4 Variation tendencies of the optimal parameters with μ

控制装置减震效果的评价标准:控制效率=(无控结构响应量化指标-有控结构响应量化指标)/无控结构响应量化指标。控制效率数值越大,则代表控制系统减震效果越好。

表3 地震波基本参数

Tab. 3 Basic parameters of seismic waves

地震波	年份	记录站	震级	PGA	调后 PGA/g	采样间隔/s	属性
Imperial Valley	1979	El Centro Array 6 [#]	6.53	0.447g	0.4	0.005	近场脉冲
Mammoth Lakes	1980	Convict Creek	5.91	0.233g	0.4	0.005	近场无脉冲
San Fernando	1971	San Onofre-So Cal Edison	6.61	0.0131g	0.4	0.005	远场

表4 控制系统设计参数

Tab. 4 Design parameters of the control systems

控制系统	μ	η	$k_1/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-1})$	$k_2/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-1})$	$c_1/(\text{kN}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1})$	$c_2/(\text{kN}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1})$	$c_T/(\text{kN}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1})$
TMD	0.02	—	240.7933	—	17.5983	—	—
TTMD	0.02	0.7634	149.9971	104.5943	0	0	7.9025

图5给出了在近场脉冲、近场无脉冲和远场地震作用下无控、设置 TMD 控制系统和设置 TTMD 控制系统的多自由度结构各楼层的相对地面位移和绝对加速度峰值。本案例模型是一个长周期结构,当遇到频率成分与结构基频接近的远场地震波(San Fernando)时,TMD 与 TTMD 都能够有效地控制结构的位移(分别平均减小了 50% 和 52%)。

而当遇到具有较多高频成分的近场无脉冲地震波(Mammoth Lakes)时,调谐质量阻尼器对结构的控制效果明显下降,其中在 TMD 和 TTMD 控制下结构的位移分别平均减小 32% 和 36%。同时,调谐质量阻尼器经历了第一个结构位移峰值后,开始发挥作用。然而,因近场脉冲地震波(Imperial Valley)中长周期速度脉冲会较早到达,这种滞后特性降低了

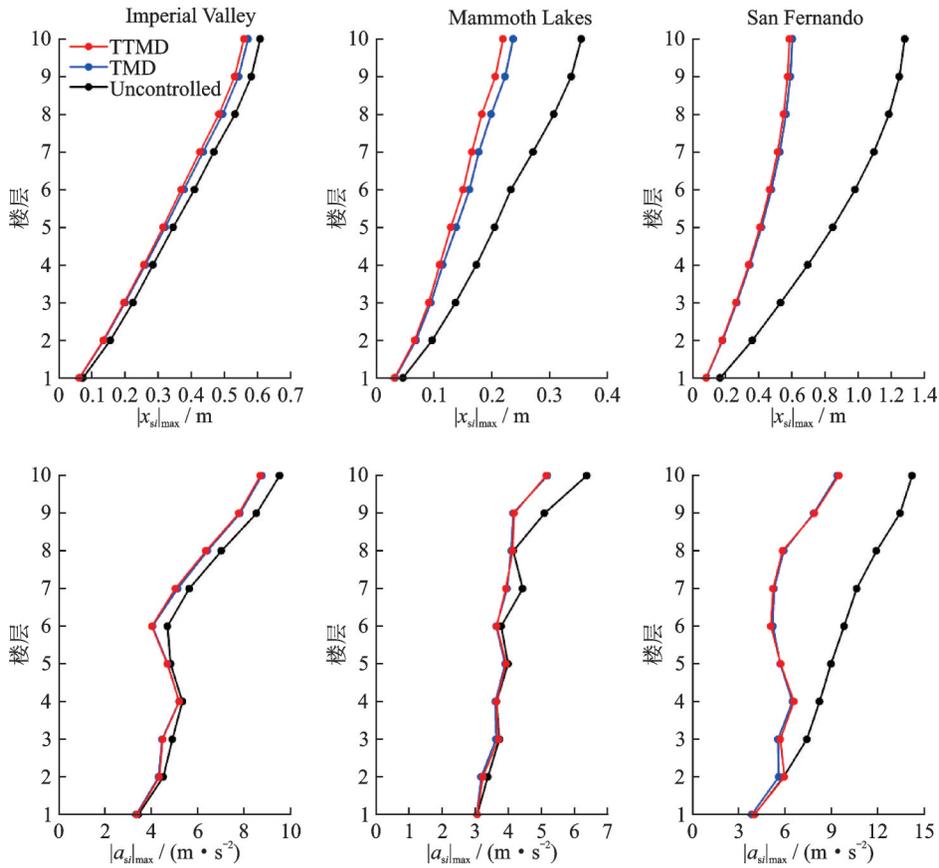
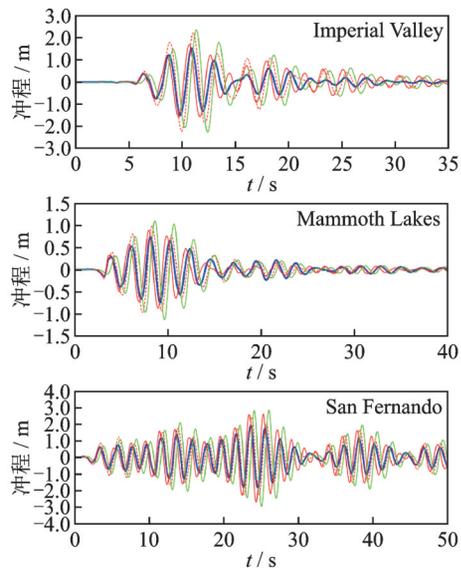


图 5 多自由度结构各楼层位移和加速度峰值响应

Fig. 5 Peaks of the displacement and acceleration of each floor in the MDOF structure

其对结构位移峰值的控制效果,所以 TMD 和 TTMD 控制下结构的位移分别平均减小了 8% 和 10%。由此可见,调谐质量阻尼器的控制效果对地震频率成分比较敏感,而相较于 TMD,TTMD 合理的质量分配使得其抑制频带^[18]宽于 TMD,其在远离结构基频的地震作用下控制效果要优于 TMD。在对结构加速度控制方面,TTMD 和 TMD 的控制效果基本相同。与此同时,在总质量相同的情况下,TTMD 的每个质量块质量要远小于 TMD 的质量块,所以如图 6 所示,TTMD 质量块的冲程和连接阻尼器位移要稍小于 TMD。但较小的质量块尺寸足以弥补增大的空间需求。相较于过大阻尼需求带来的技术难点,TTMD 对阻尼的需求仅为 TMD 的 45%,使得其在制作过程中更简单且更经济。

表 5 给出了结构刚度无退化(0%)、退化 10%、退化 30% 时 TMD 和 TTMD 控制系统对顶层位移的控制效率。结构刚度退化会导致结构频率的变化,从而导致 TMD 和 TTMD 的控制效率整体下降。特别是当面对频率成分与原结构基频接近的远场地震波(San Fernando)时,TMD 和 TTMD 对结构位移控制的效率显著降低,其中 TMD 控制效率的减小量明显要大于 TTMD,特别是当结构刚



— y_{t1} of TMD — y_{t1} of TTMD — y_{t2} of TTMD — y_{t2-t1} of TTMD

图 6 TTMD 质量块冲程时程曲线

Fig. 6 Time-history responses of strokes of the TTMD

度退化 30% 时,TMD 出现了失调现象。当面对近场脉冲地震(Imperial Valley)时,刚度退化后结构的第 2 阶自振频率接近地震频率成分,导致控制效率反而有所增加,由于速度脉冲到达比较早,TTMD 和 TMD 对结构位移峰值的控制效果增强不明显。整体而言,相较于 TMD,TTMD 具有更高的

鲁棒性以适应结构频率的变化。

表5 结构刚度无退化(0%)、退化5%、退化10%时TTMD对顶层位移的控制效率

Tab. 5 Top floor's displacement control effectiveness of the TTMD for the structure with 0%, 10%, and 30% stiffness degradations

刚度退化	Imperial Valley		Mammoth Lakes		San Fernando	
	TMD	TTMD	TMD	TTMD	TMD	TTMD
0%	6.04%	8.05%	33.12%	38.08%	52.91%	54.28%
10%	7.03%	8.76%	23.41%	26.06%	17.54%	23.58%
30%	7.86%	9.06%	13.48%	15.51%	-1.05%	2.08%

4 结论

本文使用粒子群算法对TTMD系统进行参数优化,分别从结构位移控制的有效性,质量块冲程、最佳质量分配、最优刚度和阻尼系数等方面对MDOF结构-TTMD系统进行减震性能分析。通过MATLAB/Simulink平台,在时域内研究了TTMD对结构加速度和位移的地震响应控制效率,并与相同总质量比的TMD的控制效率进行了比较,得到如下的主要结论:

(1)当质量块总质量相同时,由于合理的质量分配,使得TTMD对结构位移控制有效性高于TMD。

(2)在最优状态下,TTMD只需一个连接阻尼,且其阻尼系数仅为同等质量块质量的TMD的1/2,从而很大程度上降低了对阻尼技术和成本的要求,有利于系统装置的可实现性。

(3)在不同类型地震作用下,TTMD面对外激励变化的鲁棒性要高于TMD。

(4)结构发生刚度退化时,TTMD面对结构频率变化的鲁棒性要高于TMD。

因此,TTMD系统的减震性能优于TMD系统;而且,TTMD系统控制装置更易于实现,是一种增强型减震系统。

参考文献:

- [1] Rana R, Soong T T. Parametric study and simplified design of tuned mass dampers [J]. *Engineering Structures*, 1998, 20(3):193-204.
- [2] 翁大根,黄斐俊,周志光,等.某超高层建筑电涡流TMD的减震分析[J].*地震工程与工程振动*, 2014, 34(增刊1): 815-821.
- Weng Dagen, Huang Feijun, Zhou Zhiguang, et al.

Seismic analysis of a super high-rise building with an eddy-current tuned mass damper[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Dynamics*, 2014, 34(Sup1): 815-821.

- [3] Lee Y R, Kim H S, Kang J W. Seismic response control performance evaluation of tuned mass dampers for a retractable-roof spatial structure [J]. *International Journal of Steel Structures*, 2021, 21: 213-224.
- [4] 王浩,邹仲钦,茅建校,等.基于压重块型TMD的大跨度斜拉桥减震控制[J].*振动工程学报*, 2018, 31(3): 391-398.
- Wang Hao, Zou Zhongqin, Mao Jianxiao, et al. Seismic control of a long-span cable-stayed bridge using TMD-type counterweight [J]. *Journal of Vibration Engineering*, 2018, 31(3): 391-398.
- [5] 李春祥,刘艳霞,王肇民.质量阻尼器的发展[J].*力学进展*, 2003, 33(2): 194-206.
- Li Chunxiang, Liu Yanxia, Wang Zhaomin. A review on mass dampers [J]. *Advances in Mechanics*, 2003, 33(2): 194-206.
- [6] Chang J C H, Soong T T. Structural control using active tuned mass damper [J]. *Journal of the Engineering Mechanics Division*, 1980, 106(6): 1091-1098.
- [7] Chang C C, Yang H T Y. Control of buildings using active tuned mass dampers [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 1995, 121(3): 355-366.
- [8] Shi Weixing, Shan Jiazeng, Lü Xilin. Modal identification of Shanghai World Financial Center both from free and ambient vibration response [J]. *Engineering Structures*, 2012, 36: 14-26.
- [9] Roberson R E. Synthesis of a nonlinear dynamic vibration absorber [J]. *Journal of the Franklin Institute*, 1952, 254(3): 205-220.
- [10] De Angelis M, Perno S, Reggio A. Dynamic response and optimal design of structures with large mass ratio TMD [J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2012, 41(1): 41-60.
- [11] Jangid R S. Optimum multiple tuned mass dampers for base-excited undamped system [J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 1999, 28(9): 1041-1049.
- [12] Li Chunxiang. Performance of multiple tuned mass dampers for attenuating undesirable oscillations of structures under the ground acceleration [J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2000, 29(9): 1405-1421.
- [13] Li Chunxiang. Optimum multiple tuned mass dampers for structures under the ground acceleration based on DDMF and ADMF [J]. *Earthquake Engineering and*

- Structural Dynamics, 2002, 31(4): 897-919.
- [14] Wang Hao, Tao Tianyou, Cheng Huaiyu, et al. A simulation study on the optimal control of buffeting displacement for the Sutong Bridge with multiple tuned mass dampers[J]. Journal of Zhejiang University- SCIENCE A, 2014, 15(10): 798-812.
- [15] Lin C C, Lin G L, Chiu K C. Robust design strategy for multiple tuned mass dampers with consideration of frequency bandwidth[J]. International Journal of Structural Stability and Dynamics, 2017, 17(1): 1750002.
- [16] 汪权, 袁加伟, 王肖东, 等. 地震作用下高层结构分布式多重调谐质量阻尼器振动控制研究[J]. 应用力学学报, 2018, 35(6): 1214-1219.
- Wang Quan, Yuan Jiawei, Wang Xiaodong, et al. Distributed multiple tuned mass dampers for vibration control of tall buildings under earthquakes[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2018, 35(6): 1214-1219.
- [17] Zhang X, Han Q, Bi K M, et al. An improved multi-mode seismic vibration control method using multiple tuned mass dampers[J]. Advances in Structural Engineering, 2022, 25(4): 804-819.
- [18] Yang Yunzhi, Li Chunxiang. Performance of tuned tandem mass dampers for structures under the ground acceleration[J]. Structural Control and Health Monitoring, 2017, 24(10): e1974.
- [19] Hadi M N S, Arfiadi Y. Optimum design of absorber for MDOF structures[J]. Journal of Structural Engineering, 1998, 124(11): 1272-1280.

Seismic performance of tuned tandem mass dampers for MDOF structures

WANG Zhen-zhou, AN Zi-fan, CAO Li-yuan, LI Chun-xiang

(School of Mechanics and Engineering Science, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

Abstract: Directed at the proposed earthquake reduction system, named the tuned tandem mass dampers (TTMD), the optimized analysis of the multi-degree-of-freedom (MDOF) structure-TTMD system has been investigated in frequency domain by the particle swarm optimization. The seismic simulation of the MDOF structure-TTMD system has been established under earthquakes. Considering different types of seismic records, the control efficiency of TTMD for the structural seismic responses was analyzed in the time domain and compared to that of the tuned mass damper (TMD) with the equal total mass ratio. Further taking into account the structural stiffness of the -10% and -30% degradations, the earthquake reduction behaviors of TTMD were scrutinized for the seismic responses of the structure with the stiffness degradation. It is found in terms of numerical results that the TTMD outperforms the TMD in seismic performance and robustness. Likewise, the TTMD has a drastically reduced damping demand, thus being an enhanced earthquake reduction system.

Key words: structural vibration control; tuned tandem mass dampers; stiffness degradation; dynamic time-history analysis; earthquake attenuation robustness

作者简介: 王振洲(1996—),男,硕士研究生。E-mail: 1669311996@qq.com。

通讯作者: 曹黎媛(1991—),女,博士,讲师,硕士生导师。E-mail: caoly@shu.edu.cn。