

# 具有调谐惯容阻尼器的建筑结构减震设计\*

刘良坤<sup>1</sup>, 谭平<sup>2</sup>, 闫维明<sup>3</sup>, 周福霖<sup>2,3</sup>

(1. 东莞理工学院生态环境与建筑工程学院 东莞,523808)

(2. 广州大学工程抗震研究中心 广州,510405) (3. 北京工业大学建筑工程学院 北京,100124)

**摘要** 为提升传统调谐质量阻尼器(tuned mass damper,简称 TMD)应用的方便性,提出利用调谐惯容阻尼器(tuned inerter damper,简称 TID)对结构进行减震控制,推导了基底白噪声激励下建筑结构的 TID 最优阻尼参数和最优刚度参数的解析式以及无阻尼的位移方差解析式。分析表明,TID 最优参数与其安装的相邻楼层振型坐标差的平方有关,该值越大,控制效果越好。通过 3 个均匀结构和 1 个 12 层的非均匀结构模型分析表明:TID 对中层结构的控制效果较好,且对高阶振型控制优势明显;TID-TMD 混合控制方案在地震作用下的控制效果更明显,优于 TID,且总体上与多重 TMD 控制效果相近;TID-TMD 仅需在顶层安装 TMD,其余楼层安装 TID,减少了多重 TMD 控制高阶振型带来的空间占据、安装不便、质量过大等问题。

**关键词** 调谐质量阻尼器;惯容器;减震;最优;控制

**中图分类号** TU352.1; TH113.1

## 引言

对于调谐质量阻尼器,李春祥等<sup>[1]</sup>综述了其装置发展,并指出了一些需解决的问题。为了了解其阻尼特性,瞿伟廉等<sup>[2]</sup>推得了 TMD 的等效阻尼比。文献[3-6]给出了不同条件下的最优参数<sup>[1-4]</sup>表达式。考虑到 TMD 对频率较为敏感,文献[7-8]提出了单自由度结构多重调谐质量阻尼器(multiple tuned mass damper,简称 MTMD)控制。闫维明等<sup>[9]</sup>提出了双调谐液体柱形阻尼器。对于多自由度结构,Lin 等<sup>[10]</sup>和 Lee 等<sup>[11]</sup>给出了相应的参数设计以及位置确定的方法。为了控制多阶振型而安装多个 TMD 是不可行的,这与其安装和运行需要较大的空间且质量较大、安装不便有关。因此,需要找到一种相对简单但减震效果相当的装置。

惯容器作为一种具有两端加速度的质量原件,由 Smith<sup>[12]</sup>提出并进行了相应的实验<sup>[13]</sup>。实际上惯容器本身并没有耗能能力,需要与弹簧和阻尼器组合才能取得一定的耗能效果,目前此装置主要应用于汽车的减振<sup>[14-15]</sup>。Wang 等<sup>[16-17]</sup>将其应用到工程结构中,研究表明,合理的组合形式可有效地减小

结构振动。调谐惯容的减震研究主要有 Ikago 等<sup>[18]</sup>提出的调谐粘滞质量阻尼器(tuned viscous mass damper,简称 TVMD)以及 Lazar 等<sup>[19]</sup>提出的 TID。由于惯容器具有质量放大效应,其实际物理质量相比于 TMD 质量小得多,安装也相对方便。据此,笔者采用易于实现的 TID,推导其在多自由度结构中的控制参数设计公式及分析相应的控制效果。

## 1 TID 的基本特征

惯容器的实际物理模型主要 3 种:滚轴丝杠式、齿轮式及液压式。其中,第 1 种为笔者的研究对象,其实际模型<sup>[12]</sup>如图 1(a)所示,相应的力学模型如图 1(b)所示。对于惯容器来说,由于飞轮的转动,所产生的等效质量可达物理质量的几百倍<sup>[13]</sup>。

如图 1(b)所示,惯容器可表示成两端具有不同加速度质量元件,其数学模型为

$$f = b(\ddot{x}_{b_2} - \ddot{x}_{b_1}) \quad (1)$$

其中: $f$  为两端受力; $b$  为惯容器的放大质量(等效质量或惯容值); $\ddot{x}_{b_1}$ ,  $\ddot{x}_{b_2}$  为两端的加速度。

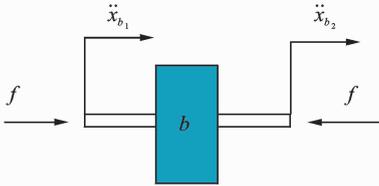
由于惯容器仅有质量属性,需与弹簧和阻尼器组合才能具备一定的减振耗能的能力。

\* 教育部创新团队资助项目(IRT13057);国家自然科学基金资助项目(51408142,51478129);广东省特支计划资助项目(2014TX01C141)

收稿日期:2016-12-02;修回日期:2017-06-15



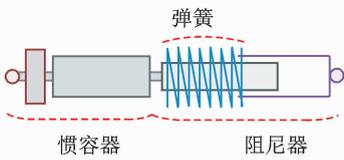
(a) 惯容器实际模型  
(a) The real model of the inerter



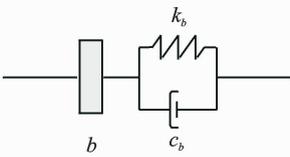
(b) 力学模型  
(b) Mechanical model

图 1 模型简图  
Fig. 1 Model diagram

图 2(a)为笔者采用的 TID,相应的力学模型如图 2(b)所示。TID 工作时基本原理与 TMD 类似,都属于调谐范畴,但 TID 与其连接的两端相对加速度有关。



(a) TID 构成简图  
(a) The composition diagram of TID



(b) TID 力学模型  
(b) The mechanical model of TID

图 2 TID 简图  
Fig. 2 TID diagram

## 2 建筑结构 TID 参数优化分析

### 2.1 运动方程

安装 TID 的结构如图 3 所示,当在  $i \sim i+1$  安装 TID 时,主结构的运动方程为

$$M\ddot{\mathbf{x}} + C\dot{\mathbf{x}} + K\mathbf{x} + f\Gamma_0 = -M\mathbf{I}\ddot{x}_g \quad (2)$$

其中:  $\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$ ;  $\mathbf{I} = [1, 1, \dots, 1]^T$ ;  $f = [f_{i,u}, f_{i,d}]^T$ ;  $M, K, C$  为原结构的质量、刚度和阻尼矩阵。

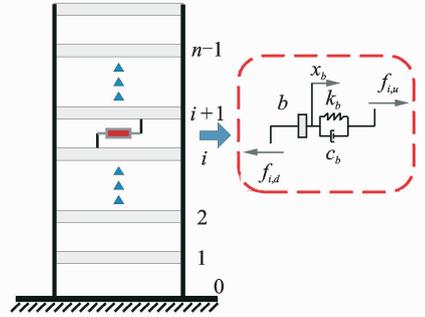


图 3 建筑结构的 TID 布置  
Fig. 3 TID distribution of building structure

当 TID 安放在底层 ( $0 \sim 1$ ) 时,  $i = 0$ , TID 的振动方程为

$$\begin{cases} b\ddot{x}_b + c_b(\dot{x}_b - \dot{x}_1) + k_b(x_b - x_1) = 0 \\ f_{0,u} = c_b(\dot{x}_1 - \dot{x}_b) + k_b(x_1 - x_b) \\ f_{0,d} = b\ddot{x}_b \\ \Gamma_0 = [1, 0, \dots, 0; 0, 0, \dots, 0]^T \end{cases} \quad (3)$$

当 TID 安放在  $i$  层 ( $i \sim i+1$ ) 时,  $i > 0$ , TID 的振动方程为

$$\begin{cases} b(\ddot{x}_b - \ddot{x}_i) + c_b(\dot{x}_b - \dot{x}_{i+1}) + k_b(x_b - x_{i+1}) = 0 \\ f_{i,u} = c_b(\dot{x}_{i+1} - \dot{x}_b) + k_b(x_{i+1} - x_b) \\ f_{i,d} = b(\ddot{x}_b - \ddot{x}_i) \\ \Gamma_0 = [0, 0, \dots, -1, \dots, 0; 0, 0, \dots, 0, 1, \dots, 0]_{2 \times n}^T \end{cases} \quad (4)$$

其中:  $-1$  对应第  $i$  个位置;  $1$  对应第  $i+1$  个位置。

### 2.2 TID 的参数设计与分析

若原结构阻尼矩阵  $C$  按瑞雷阻尼选取,令  $\mathbf{x} = \mathbf{O}\mathbf{q}$ , 取第  $j$  振型作为控制振型,则  $x_j = \varphi_j q_j$ , 代入式(2),得到传递函数为

$$H_{q_j} = \frac{Z_0}{Z_1 + Z_2} \quad (5)$$

其中:  $Z_0 = \alpha_j(-\eta - \lambda i\omega + u_b \omega^2)$ ;  $Z_1 = \eta \omega_j^2 + (\lambda \omega_j^2 + 2\omega_j \zeta_j \eta) i\omega - (\eta + u_b \omega_j^2 + u_b \eta \gamma_j + 2\omega_j \zeta_j \lambda) \omega^2$ ;  $Z_2 = -(\lambda + u_b \lambda \gamma_j + 2\omega_j \zeta_j \mu_b) i\omega^3 + u_b \omega^4$ 。

假定地震激励为平稳白噪声过程,其双边谱密度值为  $S_0$ ,忽略主结构阻尼影响,由 James 公式<sup>[20]</sup>求得相应广义位移方差为

$$\sigma_{q_j}^2 = \frac{B_q}{A_q} \quad (6)$$

$$M_q = \pi S_0 \begin{bmatrix} -\eta u_b^3 \omega_j^4 \alpha_j^2 - \eta u_b \omega_j^2 \alpha_j^2 (1 + u_b \gamma_j) (\lambda^2 - \\ 2\eta u_b) + u_b^2 \eta^2 \omega_j^2 \lambda \alpha_j^2 - u_b \eta^2 \lambda \alpha_j^2 (\eta + u_b \omega_j^2 + \\ u_b \eta \gamma_j) (1 + u_b \gamma_j) \end{bmatrix}$$

$$N_q = \eta \omega_j^2 u_b \begin{bmatrix} \eta \lambda^2 \omega_j^2 (1 + u_b \gamma_j)^2 + \lambda^2 \omega_j^4 u_b - \\ \lambda^2 \omega_j^2 (\eta + u_b \omega_j^2 + u_b \eta \gamma_j) (1 + u_b \gamma_j) \end{bmatrix}$$

其中:  $\omega_j = \sqrt{K_j/M_j}$  为第  $j$  阶频率;  $M_j$  为第  $j$  阶振型质量;  $K_j$  为第  $j$  阶振型刚度;  $u_b = b/M_j$ ;  $\lambda = c_b/M_j$ ;  $\eta = k_b/M_j$ ;  $\alpha_j = \boldsymbol{\varphi}_j^T \mathbf{M} \mathbf{I} / M_j$ ;  $\gamma_j = (\varphi_{j,i+1} - \varphi_{j,i})^2$  为第  $j$  阶、第  $i+1$  与  $i$  层振型坐标差平方。

令式(6)中相应参数的导数为 0,即

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma_{q_j}^2}{\partial \lambda} = 0 \\ \frac{\partial \sigma_{q_j}^2}{\partial \eta} = 0 \end{cases} \quad (7)$$

得到最优阻尼参数和最优刚度参数分别为

$$\lambda_{opt} = \frac{\omega_j}{2} \sqrt{\frac{u_b^3 \gamma_j (3u_b \gamma_j + 4)}{(u_b \gamma_j + 1)^3}} \quad (8)$$

$$\eta_{opt} = \frac{\omega_j^2 u_b (u_b \gamma_j + 2)}{2(u_b^2 \gamma_j^2 + 2u_b \gamma_j + 1)} \quad (9)$$

根据  $\lambda = c_b/M_j = 2\mu_b \omega_b \zeta_b$ ,  $\eta = k_b/M_j = \mu_b \omega_b^2$ , 可将最优阻尼参数和最优刚度参数转化为频率比和阻尼比的形式

$$\begin{cases} \zeta_{b,opt} = \lambda_{opt} / (2\mu_b \omega_b) \\ f_{b,opt} = \sqrt{\eta_{opt} / \mu_b} / \omega_j \end{cases} \quad (10)$$

根据式(8)与式(9),得到主结构无阻尼时的最小位移方差为

$$\sigma_{q_j}^2 = \frac{\pi S_0 \alpha_j}{\omega_j^3} \sqrt{\frac{(3u_b \gamma_j + 4)}{u_b \gamma_j (u_b \gamma_j + 1)}} \quad (11)$$

由于  $\frac{(3u_b \gamma + 4)}{u_b \gamma (u_b \gamma + 1)}$  在  $u_b \gamma > 0$  时为减函数 ( $u_b \gamma > 0$  恒存在),要想减小结构的位移,提高质量比或提高振型标差值平方  $\gamma_j$  都有效。当质量比确定时,选择  $\gamma_j$  最大的位置安装 TID,其控制效果最好。此结论将作为笔者研究 TID 最佳位置确定的依据。若考虑主结构阻尼,第  $j$  振型位移方差为

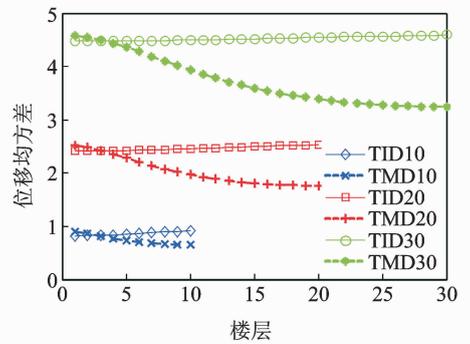
$$\sigma_{q_j}^2 = \int_{-\infty}^{\infty} |H_{q_j}|^2 S_0 d\omega \quad (12)$$

为了分析 TID 的减震性能,取阻尼比均为 0.02、层刚度均为  $2.5 \times 10^9$  N/m、层质量均为  $2.0 \times 10^6$  kg 的 3 个结构。第 1 个结构为 10 层,第 2 个结构为 20 层,第 3 个结构为 30 层,相应的基本周期分别为 1.19, 2.32 和 3.45 s。在分析 TID 减震性能过程中,用 TMD 作为对比,其频率比与阻尼比参数采用 Warburton<sup>[5]</sup> 基于白噪声激励的最优参数

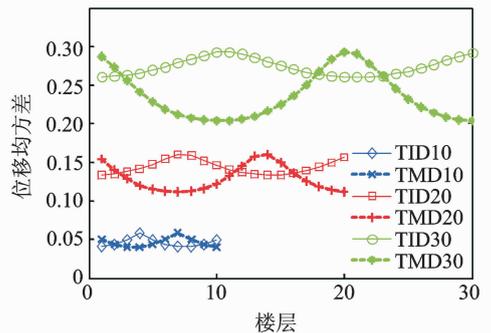
$$\begin{cases} f_{t,opt} = \sqrt{\frac{1 - 0.5\mu}{1 + \mu}} \\ \zeta_{t,opt} = \sqrt{\frac{\mu(1 - 0.25\mu)}{4(1 - 0.5\mu)(1 + \mu)}} \end{cases} \quad (13)$$

取 TMD 的质量比为 0.01, TID 的质量比为 0.05(由于惯容器的放大作用,其实际物理质量非常小。若质量放大 100 倍,那么此名义质量比取 0.05,实际质量仅为 TMD 质量的 1/20)。通过变换 TID 安装的楼层位置以及 TMD 的安装位置(1~ $n$ ),得到基底白噪声为单位 1 时前 4 阶振型位移均方差的变化曲线,如图 4 所示(为方便分析,取谱密度为单位 1,此时不考虑响应单位)。从第 1 振型可以看出, TID 安装在底层的控制效果较好,其位移均方差最小,好于安装在底层的 TMD 的控制效果;但随着安装位置层数的提高, TMD 的控制效果大幅提高,位移均方差迅速减小,而 TID 控制效果则逐渐下降,位移均方差有增大趋势。出现这种情况的原因是 TMD 的控制效果与其振型坐标有关。振型坐标绝对值越大,控制效果越明显,而 TID 则与其振型坐标差的平方值有关,此值越大,控制效果越好。

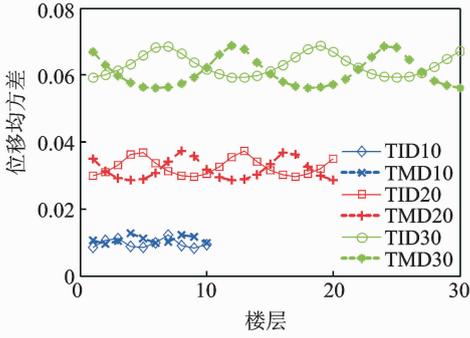
从这 3 个结构可以看出,结构层数越多, TID 的控制效果越差(各层间振型坐标差的平方值分配越小),远低于 TMD 的控制效果,这表明其更适合于中高层结构的振动控制。从图 4(b), 4(d)可以看



(a) 第1振型  
(a) The 1st mode

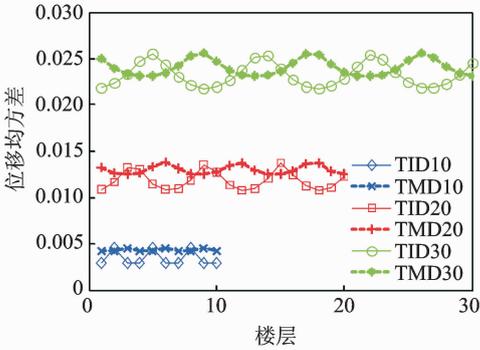


(b) 第2振型  
(b) The 2nd mode



(c) 第3振型

(c) The 3rd mode



(d) 第4振型

(d) The 4th mode

图4 前4阶振型位移均方差

Fig.4 The first four orders modal displacement variance

出,这种情况会随着振型阶数的提高而逐渐改善,且阶数越高,更多的安装位置可使TID控制效果好于TMD。总的来说,与TMD相比,第4阶振型TID的整体控制效果都最好,第3阶则相近,第2阶相对差于TMD,第1阶则远不如TMD。

### 3 建筑结构TID减震分析

为了进行多阶振型的控制,安装多个TID是必要的,其相应的运动方程为

$$\mathbf{M}_z \ddot{\mathbf{y}} + \mathbf{C}_z \dot{\mathbf{y}} + \mathbf{K}_z \mathbf{y} = -\mathbf{M}_z \mathbf{I}_z \ddot{x}_g \quad (14)$$

其中:  $\mathbf{y} = [\{x_{b_i}\}_{m \times 1}; \{x_i\}_{n \times 1}]^T$ ;  $\mathbf{I}_z = [[1, 1, \dots, 1]_{1 \times m}, [1, 1, \dots, 1]_{1 \times n}]^T$ ; 对于  $i=0$ , 相应位置的1变为0即可,其余不变;  $\mathbf{M}_z =$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M}_{z11} & \mathbf{M}_{z12} \\ \mathbf{M}_{z21} & \mathbf{M}_{z22} \end{bmatrix}; \mathbf{M}_{z11} = (\text{diag}[b_1, b_2, b_3, \dots, b_m])_{m \times m}; \\ \mathbf{M}_{z12} = [\dots, -b_1, \dots, -b_2, \dots, -b_3, \dots]_{m \times n}; \mathbf{M}_{z21} = \mathbf{M}_{z12}^T; \mathbf{M}_{z22} = \mathbf{M} + (\text{diag}[\dots, b_1, \dots, b_2, \dots, b_3, \dots, b_m, \dots])_{n \times n}; \mathbf{K}_z = \begin{bmatrix} \mathbf{K}_{z11} & \mathbf{K}_{z12} \\ \mathbf{K}_{z21} & \mathbf{K}_{z22} \end{bmatrix}; \mathbf{K}_{z11} = (\text{diag}[k_{b_1}, k_{b_2}, k_{b_3}, \dots, k_{b_m}])_{m \times m}; \mathbf{K}_{z12} = [\dots, -k_{b_1}, \dots, -k_{b_2}, \dots, -k_{b_3}, \dots, -k_{b_m}, \dots]_{m \times n}; \mathbf{K}_{z21} = \mathbf{K}_{z12}^T; \mathbf{K}_{z22} = \mathbf{K} + (\text{diag}[\dots, k_{b_1}, \dots, k_{b_2}, \dots, k_{b_3}, \dots, k_{b_m}, \dots])_{n \times n}。$$

$\mathbf{K}_{z12} = [\dots, -k_{b_1}, \dots, -k_{b_2}, \dots, -k_{b_3}, \dots, -k_{b_m}, \dots]_{m \times n}$ ;  $\mathbf{K}_{z21} = \mathbf{K}_{z12}^T$ ;  $\mathbf{K}_{z22} = \mathbf{K} + (\text{diag}[\dots, k_{b_1}, \dots, k_{b_2}, \dots, k_{b_3}, \dots, k_{b_m}, \dots])_{n \times n}$ 。

$\mathbf{C}_z$  与  $\mathbf{K}_z$  的构造形式相同。需要注意的是,当在  $i \sim (i+1)$  安装TID时,质量矩阵  $\mathbf{M}_z$  中的  $b_i$  位置为  $i$ ,刚度矩阵  $\mathbf{K}_z$  的  $k_{b_i}$  位置为  $i+1$ ; 当  $i=0$  时,  $\mathbf{M}_z$  中的一  $b_i$  项为0,其余不变。

具有TID或TMD的减震结构都属于非经典阻尼体系的范畴,此时振型分解法已不适用。采用复模态法进行随机响应计算。

$$\text{令 } \mathbf{z} = \begin{Bmatrix} \mathbf{y} \\ \dot{\mathbf{y}} \end{Bmatrix}, \mathbf{M}_e = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_z & \mathbf{M}_z \\ \mathbf{M}_z & \mathbf{0} \end{bmatrix}, \mathbf{K}_e = \begin{bmatrix} \mathbf{K}_z & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & -\mathbf{M}_z \end{bmatrix}, \mathbf{P}(t) = -\mathbf{M}_z \mathbf{I}_z \ddot{x}_g, \text{则状态方程形式为}$$

$$\mathbf{M}_e \dot{\mathbf{z}} + \mathbf{K}_e \mathbf{z} = \begin{Bmatrix} \mathbf{P}(t) \\ \mathbf{0} \end{Bmatrix} \quad (15)$$

此时特征方程为

$$[\mathbf{M}_e \lambda + \mathbf{K}_e] \Phi = \mathbf{0} \quad (16)$$

其中:  $\Phi = [\Phi_i, \Phi_i^*]$ , 为复特征向量;  $\Phi_i = \begin{Bmatrix} \varphi_i \\ \varphi_i \lambda_i \end{Bmatrix}$ ;

$\Phi_i^* = \begin{Bmatrix} \varphi_i^* \\ \varphi_i^* \lambda_i^* \end{Bmatrix}, i = 1, 2, \dots, r; r = n + \kappa; \kappa$  为控制装置数目。

令复模态质量  $a_i = \Phi_i^T \mathbf{M}_e \Phi_i, a_i^* = \Phi_i^{*T} \mathbf{M}_e \Phi_i^*$ ; 复模态刚度为  $b_i = \Phi_i^T \mathbf{K}_e \Phi_i, b_i^* = \Phi_i^{*T} \mathbf{K}_e \Phi_i^*$ ; 复特征值为  $\lambda_i = -b_i/a_i, \lambda_i^* = -b_i^*/a_i^*$ 。用复模态表示状态量并代入式(17)得到结构响应,经傅里叶变换求得传递矩阵为

$$\mathbf{H}(i\omega) = \sum_{j=1}^r \left( \frac{\varphi_j \varphi_j^T}{a_j(i\omega - \lambda_j)} + \frac{\varphi_j^* \varphi_j^{*T}}{a_j^*(i\omega - \lambda_j^*)} \right) \quad (17)$$

代入  $\mathbf{P}(i\omega) = -\mathbf{M}_z \mathbf{I}_z \ddot{x}_g(i\omega)$ , 得到

$$\mathbf{h}(i\omega) = -\sum_{j=1}^r \left( \frac{\varphi_j \varphi_j^T}{a_j(i\omega - \lambda_j)} + \frac{\varphi_j^* \varphi_j^{*T}}{a_j^*(i\omega - \lambda_j^*)} \right) \mathbf{M}_z \mathbf{I}_z \quad (18)$$

其中:  $\mathbf{h}(i\omega)$  为一列向量。

假定输入系统的地震动随机激励谱密度为  $S_{\ddot{x}_g}(\omega)$ , 结构振动响应功率谱为

$$\mathbf{S}_{yy}(\omega) = \mathbf{h}(i\omega) \mathbf{h}^*(i\omega) S_{\ddot{x}_g}(\omega) \quad (19)$$

相应的结构响应均方差为

$$\sigma_{yy} = \int_{-\infty}^{\infty} \mathbf{S}_{yy}(\omega) d\omega \quad (20)$$

TID对低阶振型控制效果不及TMD,但高阶振型具有优势。笔者提出的TID-TMD混合控制方案可综合发挥这两种装置的优势。假定某非均匀结

构为 12 层,1 层质量为 604 900 kg,2~11 层质量为 584 300 kg,12 层质量为 532 700 kg。1 层刚度为  $1.366 \times 10^9$  N/m,2~3 层刚度为  $1.046 \times 10^9$  N/m,3~12 层刚度为  $0.995 3 \times 10^9$  N/m。假定阻尼比为 0.02,采用 Rayleigh 阻尼矩阵,前 3 阶圆频率分别为 5.38,15.99 和 26.25 rad/s。假定控制前 3 阶振型,相应的控制方案及参数如表 1 所示。其中:TID 和 TMD 的安装位置根据各阶振型差平方及振型坐标绝对值<sup>[21]</sup>确定;最优参数根据式(10)和式(13)计算。

表 1 装置最佳位置

Tab. 1 Optimum locations for equipment

方案	振型 1		振型 2		振型 3	
	位置	$u$	位置	$u$	位置	$u$
TID	1~2	0.1	8~9	0.1	5~6	0.05
TMD	12	0.01	4	0.01	3	0.01
TMD-TMD	—	—	8~9	0.05	5~6	0.05
混合控制	—	—	7~8	0.05	—	—
	12	0.01	—	—	—	—

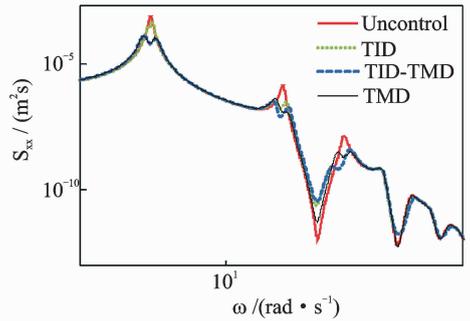
—表示未安放

对于高阶振型,表 1 中 TID 的质量比随着振型的提高而降低,TID\_TMD 的情况也类似。随机分析时采用文献[22]的数据,谱密度  $S_0 = 4.65 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-3} / \text{rad}$ ,其余参数为  $\omega_g = 15.0 \text{ rad/s}$ ;  $\xi_g = 0.6$ ;  $\omega_k = 1.5 \text{ rad/s}$ ;  $\xi_k = 0.6$ 。

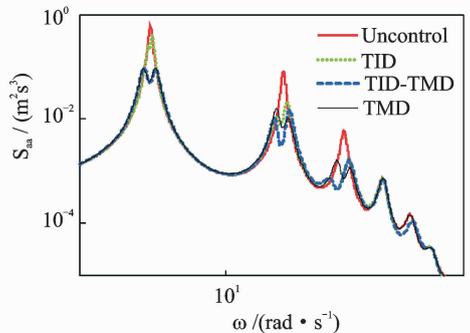
输入地震功率谱模型为

$$S_{\ddot{x}_g} = \frac{[1 + 4\xi_g^2(\omega/\omega_g)^2] S_0}{[1 - (\omega/\omega_g)^2]^2 + 4\xi_g^2(\omega/\omega_g)^2} \times \frac{(\omega/\omega_k)^4}{[1 - (\omega/\omega_g)^2]^2 + 4\xi_g^2(\omega/\omega_g)^2}$$

结构响应谱密度如图 5 所示。显然,多重 TID 控制对顶层位移和绝对加速度的控制情况基本一致。总体来看,第 1 阶控制效果较差,第 2 阶控制效果更好,第 3 阶则最好,这与前面的分析相近;多重 TMD 对前 3 阶振型均有较好的控制效果;TID-TMD 混合控制的效果与多重 TMD 接近,且阶数越高,效果相对越好。相比于多重 TID,由于 TID-TMD 对第 2 阶振型采用了两个质量比为 0.05 的 TID 控制,且设置于控制效果最佳的前两个位置,因此第 2 阶响应的控制效果好于单纯采用质量比为 0.1 的多重 TID 的情况,而第 3 阶由于采用相同质量比 0.05 的 TID,两者控制效果基本一致。由图 5 可知,TID-TMD 明显可以达到多重 TMD 的控制效果,虽然 TID-TMD 中对高阶控制的 TID 质量比均为 0.05,但考虑到惯容器的放大作用,其实际物理质量是很小的。如图 2 所示,TID 可以制成杆状,故



(a) 顶层位移谱密度  
(a) Top displacement



(b) 顶层绝对加速度谱密度  
(b) Absolute top acceleration

图 5 结构响应谱密度

Fig. 5 PSD of the structure response

安装方便、占据空间小。因此,TID-TMD 除第 1 振型采用 TMD 控制外,高阶振型采用 TID 控制具有一定的工程意义。

为了进一步分析多重 TID 及 TID-TMD 在实际地震作用下的控制效果,取峰值为 0.2g 的 Kobe 和 El Centro 地震记录作为地面运动激励。由图 6 可知:多重 TID 在 Kobe 地震作用下对绝对加速度的控制效果较好,但在 7~10 层效果不佳,对位移的整体控制也较差;相比于多重 TID,多重 TMD 与 TID-TMD 整体控制效果略好,减震效果相近且在位移控制上几乎无差别;但在加速度控制上,控制效果除 6~9 层和 1~2 层外,TID-TMD 的控制效果更好些,不过总体上相近。

在 El Centro 地震作用下,这 3 种控制方案的效果明显改善。在位移控制方面,多重 TID 控制效果最差,多重 TMD 与 TID-TMD 减震效果接近,接近顶层的控制上 TID-TMD 略好;绝对加速度控制上,多重 TID 控制效果相比于其他控制效果略差,多重 TMD 与 TID-TMD 整体上减震效果接近,在部分楼层略有差异。

整体而言,这 3 种控制方案虽然对 Kobe 地震

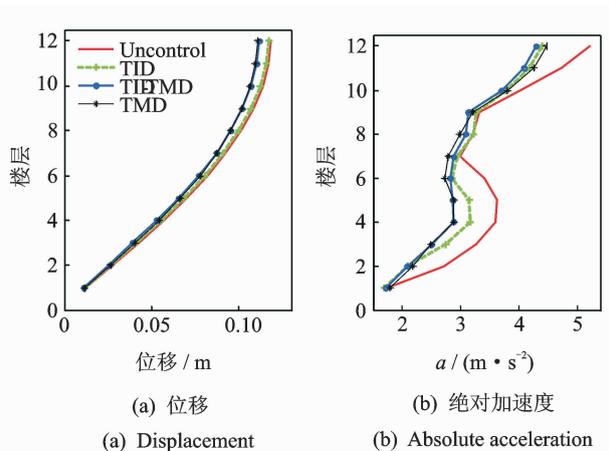


图6 Kobe作用下各层响应

Fig. 6 The floor response of the structure under Kobe excitation

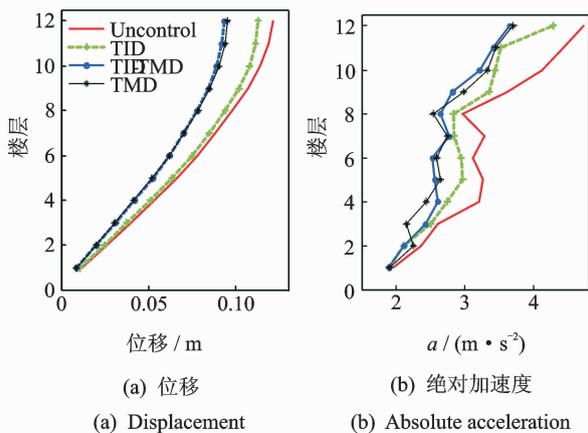


图7 El Centro作用下各层响应

Fig. 7 The floor response of the structure under El Centro excitation

作用有控制效果,但对位移的控制并不明显,但对El Centro地震作用的控制效果大有改善。这与调谐控制需要在激励初期经历几次循环后起减震作用有关。

## 4 结论

1) TID最优参数与控制相邻楼层的振型坐标差的平方有关,该值越大,控制效果也相对越好。

2) TID对中低层结构的控制效果较好,且高阶振型控制优势明显。

3) TID-TMD对地震控制效果更明显,优于多重TID,且与多重TMD控制效果相近。

4) TID-TMD可以消除TID在低阶控制的劣势,同时由于仅需在顶层的安装TMD,其余楼层安装TID,这样减少了单纯采用多重TMD控制高阶

振型带来的空间占据、安装不便及质量过大等问题,具有工程意义。

## 参 考 文 献

- [1] 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 mass dampers[J]. Advances in Mechanics, 2003, 33 (2): 194-206. (in Chinese)
- [2] 瞿伟廉,陶牟华. 五种被动动力减振器对高层建筑脉动风振反应控制的实用设计方法[J]. 建筑结构学报, 2001 (2): 29-34.  
Qu Weilian, Tao Muhua. Practical design method for effect of five kinds of passive dynamic absorbers on fluctuation wind-induced vibration response control of tall buildings[J]. Journal of Building Structure, 2001 (2): 30-34. (in Chinese)
- [3] Den Hartog J P. Mechanical vibrations[M]. 4th ed. New York: McGraw-Hill,1956:79-121.
- [4] 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.
- [5] Warburton G B. Optimum absorber parameters for various combinations of response and excitation parameters[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 1982, 10(3): 381-401.
- [6] Hoang N, Fujino Y, Warnitchai P. Optimal tuned mass damper for seismic applications and practical design formulas[J]. Engineering Structures, 2008, 30: 707-715.
- [7] Xu K, Igusa T. Dynamic characteristics of multiple substructures with closely spaced frequencies [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 1992, 21(12):1059-1070.
- [8] Igusa T, Xu K. Vibration control using multiple tuned mass dampers[J]. Journal of Sound & Vibration, 1994, 175(4):491-503.
- [9] 闫维明,倪铭,王瑾. 双调谐液体柱形阻尼器及其基本动力性能[J]. 振动、测试与诊断, 2016, 36(6): 1175-1182.  
Yan Weiming, Ni Ming, Wang Jin. Fundamental dynamic characteristics of double tuned liquid column damper for suppressing harmonically forced oscillations [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2016, 36(6): 1175-1182. (in Chinese)
- [10] Lin C C, Wang J F, Ueng J M. Vibration control identification of seismically excited m. d. o. f. structure-

- ptmd systems [J]. *Journal of Sound & Vibration*, 2001, 240(1):87-115.
- [11] Lee C L, Chen Y T, Chung L L, et al. Optimal design theories and applications of tuned mass dampers [J]. *Engineering Structures*, 2006, 28(1): 43-53.
- [12] Smith M C. Synthesis of mechanical networks: the inerter[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2002, 47(10): 1648-1662.
- [13] Papageorgiou C, Smith M C. Laboratory experimental testing of inerters[C] // *Decision and Control, 2005 European Control Conference CDC-ECC'05 44th IEEE Conference*. [S. l.]: IEEE, 2005: 3351-3356.
- [14] Hu Yinlong, Chen M Z Q, Shu Zhan. Passive vehicle suspensions employing inerters with multiple performance requirements[J]. *Journal of Sound & Vibration*, 2014, 333(8): 2212-2225.
- [15] Shen Yujie, Chen Long, Yang Xiaofang, et al. Improved design of dynamic vibration absorber by using the inerter and its application in vehicle suspension[J]. *Journal of Sound & Vibration*, 2016, 361:148-158.
- [16] Wang Fucheng, Chen Chengwei, Liao Minkai, et al. Performance analyses of building suspension control with inerters[C] // *46th IEEE Conference on Decision and Control*. New Orleans, LA: [s. n.], 2007: 3786-3791.
- [17] Wang Fucheng, Hong Minfeng, Chen Chengwei. Building suspensions with inerters[J]. *Journal of Mechanical Engineering Science*, 2010, 224(8): 1605-1616.
- [18] Ikago K, Saito K, Inoue N. Seismic control of single-degree-of-freedom structure using tuned viscous mass damper[J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2012, 41(3):453-474.
- [19] Lazar I F, Neild S A, Wagg D J. Using an inerter-based device for structural vibration suppression[J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2013, 43(8): 1129-1147.
- [20] 庄表中,梁以德,张佑启. 结构随机振动[M]. 北京:国防工业出版社,1995: 222-223.
- [21] 背户一登. 结构振动控制[M]. 马立新,李孜,译. 北京:机械工业出版社,2011: 61-69.
- [22] Zhang Wenshou, Xu Youlin. Dynamic characteristics and seismic response of adjacent buildings linked by discrete dampers [J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 1999, 28(10):1163-1185.



**第一作者简介:**刘良坤,男,1988年5月生,博士。主要研究方向为结构振动控制。曾发表《TMD控制系统的相位及控制效果分析》(《振动与冲击》2015年第34卷第11期)等论文。

E-mail: liuhaikunlzlg@163.com

**通信作者简介:**谭平,男,1973年9月生,研究员、博士生导师。主要研究方向为结构振动控制。

E-mail: ptan@foxmail.com

