

MTLCDI 控制连体超高层建筑风振响应研究

王钦华¹, 吴华晓², 田华睿², 唐 意^{3,4}, 贾 彬¹

(1. 西南科技大学土木工程与建筑学院, 四川 绵阳 621010; 2. 汕头大学土木与环境系, 广东 汕头 515063;
3. 中国建筑科学研究院有限公司, 北京 100013; 4. 建筑安全与环境国家重点实验室, 北京 100013)

摘要: 将惯容元件与安装在连体超高层建筑各自原有的水箱串联组成多调谐液柱惯容阻尼器(MTLCDI), 用于控制连体超高层建筑的风振响应。MTLCDI 不仅发挥水箱供水和消防的功能, 还利用惯容元件的质量放大效应使其在实际质量较小的情况下有效控制主体结构的风致响应。建立了 MTLCDI 控制连体超高层建筑风振响应的非线性运动方程, 用等效线性化方法讨论该方程的解; 结合测压风洞试验, 以某一连体超高层建筑为工程实例分析 MTLCDI 的振动控制效果; 将 MTLCDI 控制效果与单、多调谐质量惯容阻尼器(TMDI, MTMDI)、单调谐液柱惯容阻尼器(TLCDI)的控制效果进行比较。结果表明: 与其他 3 种阻尼器相比, MTLCDI 能有效减小连体超高层建筑的风致加速度响应、脉动位移响应和层间位移角, 还兼具有效利用建筑物各自水箱和节省安装空间的优势。研究结果为连体超高层建筑风振控制设计提供参考。

关键词: 惯容元件; 多调谐液柱阻尼器; 连体超高层建筑; 风振控制; 风洞试验

中图分类号: TU311.3; TU973+.21 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-4523(2022)04-0976-13

DOI: 10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.2022.04.022

引 言

连体超高层结构作为一种复杂高层建筑类型, 不仅拥有优美的建筑外观、节省建筑所需的土地面积, 而且各塔楼之间的连接体(如高空连廊)能提供开阔的观光视野和独特的视觉效果, 因而其建筑形式得到广泛应用^[1]。按照塔楼与连接体的连接强弱可以分为柔性连接和刚性连接, 柔性连接是指连接体可以通过隔振支座或者阻尼器等装置与塔楼相连, 柔性连接克服了刚性连接产生的端部应力复杂以及整体结构扭转效应显著等缺点^[2-4]。因此, 在工程中有广泛的应用, 如吉隆坡的双子塔、北京当代 MOMA、重庆来福士广场等连体超高层建筑都采用柔性连接的形式。

目前, 国内外学者针对刚性和柔性连接体超高层建筑在动力荷载作用下结构的响应进行了深入研究^[5-7]。肖从真等^[8]对北京丽泽 SOHO 超高层双塔连体结构的 5 种连接方案进行抗震分析, 最终选择设置 4 座连桥将双塔“箍”成一个整体的方案。吴华晓等^[9]建立了强、弱连接双塔连体超高层风振响应的简化数学模型, 基于工程实例分析并对比了不同连接形式下的风振响应。研究表明: 强连接形式可以减小两栋建筑大多数风向角下的峰值加速度

响应。Lee 等^[10]分别研究了橡胶支座柔性和刚性连接对连体超高层建筑地震和风振响应的控制效果, 研究表明: 刚性连接在有些情况增加了结构的响应, 而橡胶支座柔性连接能减小结构的动力响应。Xu 等^[11]进一步建立了基于阻尼器柔性连接连体超高层建筑在地震作用下的结构分析模型, 并分析了在 El Centro 地震作用下结构的响应, 结果表明: 优化的阻尼器能够很好地控制连体建筑的地震响应。近几年, 基于惯容元件的阻尼器应用于控制建筑结构地震和风振响应的研究成为热点^[12-17]。该类阻尼器利用惯容元件机械原理实现表观质量放大, 可以在自身质量较小的情况下抑制超高层建筑的风振响应^[18-20]。Palacios-Quinonero 等^[20]研究了 TMDI 柔性连接的连体建筑在地震作用下的减震效果, 结果表明: TMDI 比传统的 TMD 有更好的减震性能和鲁棒性。本文作者分别对单及多调谐质量惯容阻尼器(TMDI, MTMDI)^[21-23]用于单体及连体超高层建筑抗风和抗震进行研究, 结果表明: 基于惯容元件的阻尼器有更好的减振(震)性能。Wang 等^[24]提出以建筑物的自带水箱取代 TMDI 中的质量块, 形成的单调谐液柱惯容阻尼器(TLCDI)不仅可以对主体结构振动响应进行控制, 还可以发挥水箱日常用水和消防功能。文献[25-26]将 TLCDI 应用于连体超高层建筑抗震和抗风研究。通常, 连体超高层建筑各

收稿日期: 2021-08-05; **修订日期:** 2021-10-03

基金项目: 四川省科技厅资助项目(2020JDTD0021, 2020YFG0183); 西南科技大学自然科学基金资助项目(21ZX7150); 建筑安全与环境国家重点实验室开放课题基金资助项目(BSBE2021-11)。

个塔楼都有各自的水箱,各个水箱与惯容元件组成的多调谐液柱惯容阻尼器(MTLCDI)对连体超高层建筑风振响应的控制效果还需要进一步探索。而且,对上述4种阻尼器(TMDI, MTMDI, TLCDI和MTLCDI)用于连体超高层建筑风振控制的效果缺乏系统的比较研究。

基于上述文献分析,本文首先建立了MTLCDI控制连体超高层建筑风振响应非线性运动方程,并讨论了其等效线性化方法的适用性;其次基于连体超高层建筑的风洞试验获得的风荷载时程,对MTLCDI控制连体超高层建筑风致加速度、脉动位移响应和层间位移角进行分析;最后,比较了4种阻尼器的控制效果,并对其进行讨论。

1 数学模型及等效线性化方法的验证

1.1 数学模型

在连体超高层建筑中安装MTLCDI,如图1(a)

$$\begin{aligned}
 & \begin{bmatrix} M_1 & 0 & 0 & 0 & \alpha_2 & 0 \\ 0 & M_2 & \alpha_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \alpha_1^T & m_{T,1} + b_1 & \rho A_1 B_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \rho A_1 B_1 & \rho A_1 L_1 & 0 & 0 \\ \alpha_2^T & 0 & 0 & 0 & m_{T,2} + b_2 & \rho A_2 B_2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \rho A_2 B_2 & \rho A_2 L_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{X}_1(t) \\ \ddot{X}_2(t) \\ \ddot{y}_1(t) \\ \ddot{u}_1(t) \\ \ddot{y}_2(t) \\ \ddot{u}_2(t) \end{Bmatrix} + \\
 & \begin{bmatrix} C_1 & 0 & \beta_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C_2 & 0 & 0 & \beta_2 & 0 \\ \beta_1^T & 0 & c_{T,1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2} \rho A_1 \xi_1 |\dot{u}_1(t)| & 0 & 0 \\ 0 & \beta_2^T & 0 & 0 & c_{T,2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2} \rho A_2 \xi_2 |\dot{u}_2(t)| \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{X}_1(t) \\ \dot{X}_2(t) \\ \dot{y}_1(t) \\ \dot{u}_1(t) \\ \dot{y}_2(t) \\ \dot{u}_2(t) \end{Bmatrix} + \\
 & \begin{bmatrix} K_{1,i \times i} & 0 & \gamma_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & K_{2,j \times j} & 0 & 0 & \gamma_2 & 0 \\ \gamma_1^T & 0 & k_{T,1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2\rho A_1 g & 0 & 0 \\ 0 & \gamma_2^T & 0 & 0 & k_{T,2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2\rho A_2 g \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} X_1(t) \\ X_2(t) \\ y_1(t) \\ u_1(t) \\ y_2(t) \\ u_2(t) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} P_1(t) \\ P_2(t) \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (1)
 \end{aligned}$$

式中 $\ddot{X}_1(t) \in \mathbb{R}^{i \times 1}$, $\ddot{X}_2(t) \in \mathbb{R}^{j \times 1}$ 分别为 $B^{(1)}$ 和 $B^{(2)}$ 风致绝对加速度列向量; $\ddot{y}_1(t)$, $\ddot{u}_1(t)$ 分别表示 TLCDI-1 容器绝对加速度和液体相对容器的加速度; $\ddot{y}_2(t)$, $\ddot{u}_2(t)$ 分别表示 TLCDI-2 容器绝对加速度和液体相对容器的加速度; $\dot{X}_1(t)$, $\dot{X}_2(t)$ 为相应的速度向量;

所示,该连体超高层建筑由 $B^{(1)}$ 和 $B^{(2)}$ 两栋建筑组成,分别有 i, j 层。两个连廊通过滑动支座分别与对应的 TLCDI 连接,每个 TLCDI 都包括 U 型容器、容器内液体、弹簧元件、阻尼元件和惯容元件总共五个部分。容器的横截面积、水平尺寸和质量分别为 A , B , M_c ; 液体总长度和密度分别为 L 和 $\rho = 997 \text{ kg/m}^3$, TLCDI 的总质量可记为 $m_T = \rho AL + M_c$ 。TLCDI 容器中间隔板水头损失系数 ξ 取决于隔板的开孔率。为了比较 MTLCDI 与其他阻尼器的减振效果,本文还讨论了安装 TLCDI, MTMDI (如图 1(b) 所示) 以及 TMDI 对连体超高层建筑的减振效果,未安装振动控制装置的原结构(OS)如图 1(c) 所示。

4 种减振方案仅考虑控制主体结构弱轴方向的响应,因此 $B^{(1)}$ 和 $B^{(2)}$ 可分别简化成 i 和 j 个自由度的线性系统,MTLCDI 控制连体超高层建筑风致振动的运动微分方程为:

$\dot{y}_1(t)$, $\dot{u}_1(t)$, $\dot{y}_2(t)$, $\dot{u}_2(t)$ 为相应的速度; $X_1(t)$, $X_2(t)$ 为相应的位移向量, $y_1(t)$, $u_1(t)$, $y_2(t)$, $u_2(t)$ 为相应的位移; $P_1(t) \in \mathbb{R}^{i \times 1}$ 和 $P_2(t) \in \mathbb{R}^{j \times 1}$ 分别为作用在 $B^{(1)}$ 和 $B^{(2)}$ 各层的气动力时程向量,可由同步测压风洞试验获得。式(1)质量矩阵各项可表示为:

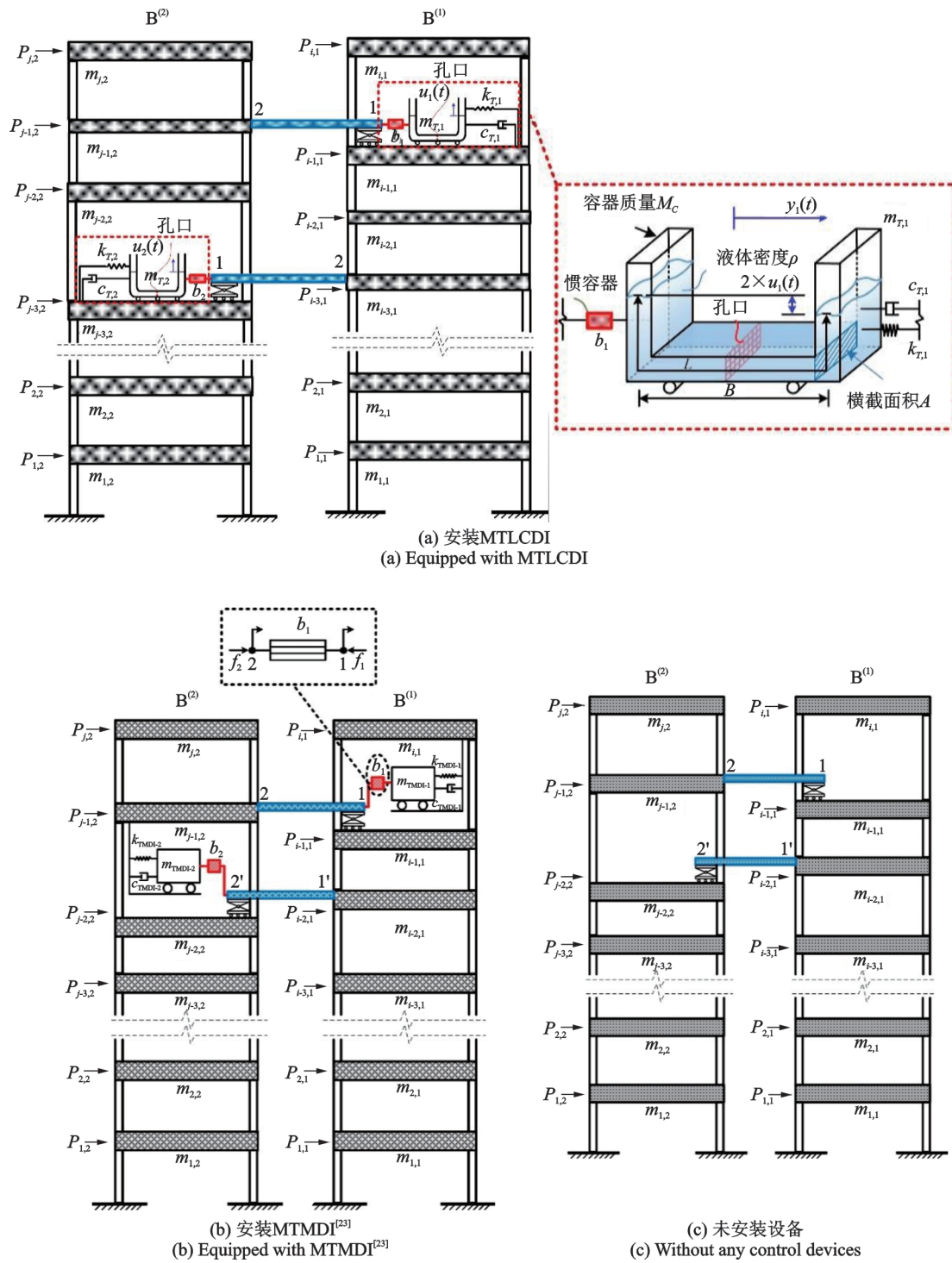


图1 连体超高层建筑结构示意图

Fig. 1 Schematic diagrams of linked high-rise buildings

$$\begin{aligned}
 M_1 &= M_1^s + b_2 \mathbf{1}_{n_1, i \times 1} \mathbf{1}_{n_1, i \times 1}^T, \\
 M_2 &= M_2^s + b_1 \mathbf{1}_{n_2, j \times 1} \mathbf{1}_{n_2, j \times 1}^T, \\
 \alpha_1 &= -b_1 \mathbf{1}_{n_2, j \times 1}, \\
 \alpha_2 &= -b_2 \mathbf{1}_{n_1, i \times 1}
 \end{aligned} \quad (2)$$

式中 $M_1^s \in \mathbb{R}^{i \times i}$, $M_2^s \in \mathbb{R}^{j \times j}$ 分别为原结构 $B^{(1)}$ 和 $B^{(2)}$ 的质量矩阵, 可由结构有限元分析模型获得; $\mathbf{1}_{n_1, i \times 1} \in \mathbb{R}^{i \times 1}$ 表示第 n_1 个元素等于1, 其余元素为零的列向量, 下文其余类似符号同义; b_1 和 b_2 分别为惯容元件1和2的惯容系数; n_1 和 n_2 分别表示惯容元件

2和1相应的柔性连接固结点与 $B^{(1)}$ 和 $B^{(2)}$ 连接的楼层; 上标 T 表示向量或矩阵的转置运算符。在图1(a)中, $m_{T,1}$ 和 $m_{T,2}$ 分别表示 TLCDI-1 和 TLCDI-2 总质量。

方程(1)刚度矩阵各项表示为:

$$\begin{aligned}
 K_1 &= K_1^s + k_{T,1} \mathbf{1}_{t_1, i \times 1} \mathbf{1}_{t_1, i \times 1}^T, \\
 K_2 &= K_2^s + k_{T,2} \mathbf{1}_{t_2, j \times 1} \mathbf{1}_{t_2, j \times 1}^T, \\
 \gamma_1 &= -k_{T,1} \mathbf{1}_{t_1, i \times 1}, \\
 \gamma_2 &= -k_{T,2} \mathbf{1}_{t_2, j \times 1}
 \end{aligned} \quad (3)$$

式中 $\mathbf{K}_1^s \in \mathbb{R}^{i \times i}$ 和 $\mathbf{K}_2^s \in \mathbb{R}^{j \times j}$ 分别为原结构 $B^{(1)}$ 和 $B^{(2)}$ 的刚度矩阵,可由结构有限元分析模型获得; $k_{T,1}$ 和 $k_{T,2}$ 分别为 TLCDI-1 和 TLCDI-2 的弹簧元件的刚度; t_1 和 t_2 分别表示 TLCDI-1 和 TLCDI-2 弹簧和阻尼元件与 $B^{(1)}$ 和 $B^{(2)}$ 连接作用的层数。

方程(1)阻尼矩阵中各项可表示为:

$$\begin{aligned} \mathbf{C}_1 &= \mathbf{C}_1^s + c_{T,1} \mathbf{1}_{n_1, i \times 1} \mathbf{1}_{n_1, i \times 1}^T, \\ \mathbf{C}_2 &= \mathbf{C}_2^s + c_{T,2} \mathbf{1}_{n_2, j \times 1} \mathbf{1}_{n_2, j \times 1}^T, \\ \beta_1 &= -c_{T,1} \mathbf{1}_{n_1, i \times 1}, \\ \beta_2 &= -c_{T,2} \mathbf{1}_{n_2, j \times 1} \end{aligned} \quad (4)$$

式中 $c_{T,1}$ 和 $c_{T,2}$ 分别为 TLCDI-1 和 TLCDI-2 的阻尼元件阻尼, $\mathbf{C}_1^s \in \mathbb{R}^{i \times i}$ 为 $B^{(1)}$ 原阻尼矩阵,按下式^[27]计算:

$$\begin{aligned} \mathbf{C}_{1,i \times i}^s &= (\boldsymbol{\Phi}_1^T)^{-1} \mathbf{C}_{\text{mod}} (\boldsymbol{\Phi}_1)^{-1}, \\ \mathbf{C}_{\text{mod}}(k, k) &= 2\xi_{1,k} \omega_{1,k} (\boldsymbol{\varphi}_{1,k}^T \mathbf{M}_{1,i \times i}^s \boldsymbol{\varphi}_{1,k}), \\ k &= 1, 2, \dots, i \end{aligned} \quad (5)$$

式中 $\boldsymbol{\Phi}_1, \xi_{1,k}$ 和 $\omega_{1,k}$ 分别为 $B^{(1)}$ 的模式矩阵、第 k 阶

阻尼比和自振频率; $\boldsymbol{\varphi}_{1,k}$ 为 $B^{(1)}$ 第 k 阶模态。同理, $B^{(2)}$ 的阻尼矩阵 $\mathbf{C}_2^s \in \mathbb{R}^{j \times j}$ 参照式(5)。

在建立 MTLCDI 控制连体超高层建筑的运动方程(1)后, TLCDI, MTMDI 和 TMDI 控制连体建筑风致运动方程可由运动方程(1)退化获得,例如:删除方程(1)与 MTLCDI 中液体自由度的对应行和列项;质量、刚度、阻尼矩阵与方程(2)~(5)表达一致,相关参数取 MTMDI 对应的参数,即可获得 MTMDI 对应的运动方程。

式(1)中液体阻尼项 $\frac{1}{2} \rho A_1 \xi_1 |\dot{u}_1(t)|$ 和 $\frac{1}{2} \rho A_2 \xi_2 |\dot{u}_2(t)|$ 为非线性形式,假设 $\dot{u}_1(t), \dot{u}_2(t)$ 分布符合零均值高斯过程,对该非线性项进行等效线性化,等效阻尼系数 c_{eq} 可表达为^[24,28-29]:

$$c_{\text{eq},1} = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \rho A_1 \xi_1 \sigma_{\dot{u}_1}, c_{\text{eq},2} = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \rho A_2 \xi_2 \sigma_{\dot{u}_2} \quad (6)$$

式中 $\sigma_{\dot{u}}$ 为容器内液体速度 $\dot{u}(t)$ 的标准差。

将式(6)代入式(1)得:

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} \mathbf{M}_1 & 0 & 0 & 0 & \alpha_2 & 0 \\ 0 & \mathbf{M}_2 & \alpha_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \alpha_1^T & m_{T,1} + b_1 & \rho A_1 B_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \rho A_1 B_1 & \rho A_1 L_1 & 0 & 0 \\ \alpha_2^T & 0 & 0 & 0 & m_{T,2} + b_2 & \rho A_2 B_2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \rho A_2 B_2 & \rho A_2 L_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{\mathbf{X}}_1(t) \\ \ddot{\mathbf{X}}_2(t) \\ \ddot{y}_1(t) \\ \ddot{u}_1(t) \\ \ddot{y}_2(t) \\ \ddot{u}_2(t) \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{C}_1 & 0 & \beta_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{C}_2 & 0 & 0 & \beta_2 & 0 \\ \beta_1^T & 0 & c_{T,1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_{\text{eq},1} & 0 & 0 \\ 0 & \beta_2^T & 0 & 0 & c_{T,2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_{\text{eq},2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\mathbf{X}}_1(t) \\ \dot{\mathbf{X}}_2(t) \\ \dot{y}_1(t) \\ \dot{u}_1(t) \\ \dot{y}_2(t) \\ \dot{u}_2(t) \end{Bmatrix} + \\ & \begin{bmatrix} \mathbf{K}_{1,i \times i} & 0 & \gamma_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{K}_{2,j \times j} & 0 & 0 & \gamma_2 & 0 \\ \gamma_1^T & 0 & k_{T,1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2\rho A_1 g & 0 & 0 \\ 0 & \gamma_2^T & 0 & 0 & k_{T,2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2\rho A_2 g \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{X}_1(t) \\ \mathbf{X}_2(t) \\ y_1(t) \\ u_1(t) \\ y_2(t) \\ u_2(t) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{P}_1(t) \\ \mathbf{P}_2(t) \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \end{aligned} \quad (7)$$

式(7)缩写成:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{X}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{X}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{X}(t) = \mathbf{P}(t) \quad (8)$$

对式(8)等号两边进行傅里叶变换,MTLCDI 控制超高层建筑位移和加速度响应频响函数矩阵分别为^[30]:

$$\mathbf{H}_D(\omega) = [-\omega^2 \mathbf{M} + i\omega \mathbf{C} + \mathbf{K}]^{-1} \quad (9)$$

$$\mathbf{H}_A = -\omega^2 \mathbf{H}_D(\omega) \quad (10)$$

与 TLCDI 控制系统相比,MTLCDI 非线性更强。因此,在文献[26]的基础上^[26],进一步验证等效线性化方法对 MTLCDI 控制系统的适用性。

1.2 等效线性化方法验证

采用表1所给的优化参数,由数值方法求解非线性微分方程(1)和等效线性化后的方程(7),对比两种方法的计算结果,验证等效线性化方法的适用性。图2是非线性方法和等效线性化方法计算的 $B^{(1)}$ 和 $B^{(2)}$ 顶层总体位移响应时程在 90° 风向角(横风向)下的比较。

从图2中可以看出两种方法计算的总体位移时程响应几乎一致。为了进一步比较这两种方法的误差,随机选用 MTLCDI 的 100 组参数,计算两种方法相对误差的期望值 δ_{err} ,其定义为^[26]:

表 1 四种惯容元件的阻尼器的最优参数

Tab. 1 Optimal parameters of four types of the inerter-based dampers

参数	TMDI	MTMDI		TLCDI	MTLCDI	
		TMDI-1	TMDI-2		TLCDI-1	TLCDI-2
质量比 μ	0.10%(211 t)	0.034%(71.5 t)	0.03%(37.1 t)	0.026%(55.6t)	0.078%(162.9 t)	0.016%(20.4 t)
惯容比 β	1.49%(3127 t)	0.91%(1910 t)	2.27%(2810 t)	3.96%(8311 t)	0.48%(1007 t)	6.28%(7765 t)
频率比 ν	102%	90%	110%	89%	116%	73%
阻尼比 ζ	20.0%	20.0%	20.0%	37.0%	12%	33%
水头损失系数 ξ	—	—	—	1577.60	1537.36	855.10
液柱长度 L/m	—	—	—	14.90	4.22	18.821
容器横截面 A/m^2	—	—	—	29.52	13.67	14.72

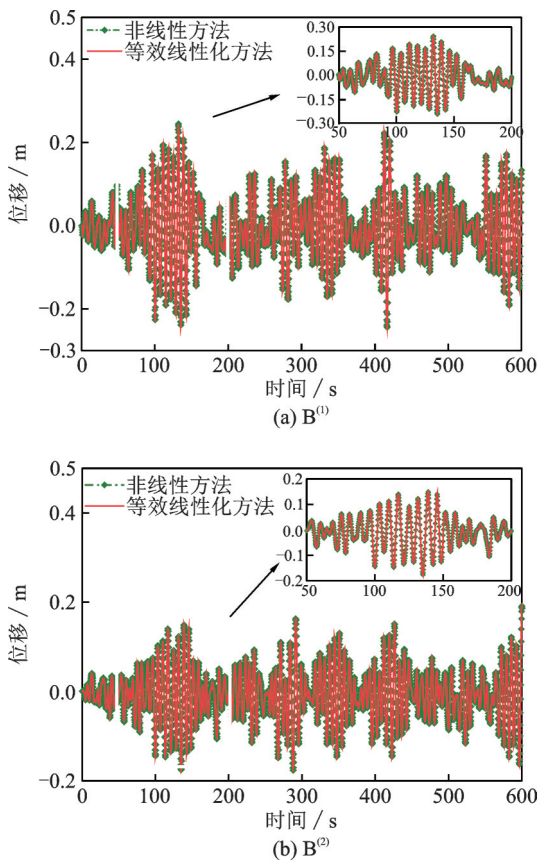


图 2 B⁽¹⁾和B⁽²⁾的顶层位移时程在 90°风向角下的比较

Fig. 2 Comparisons of the time histories of the displacement responses of the top storey of B⁽¹⁾ and B⁽²⁾ at 90° wind direction

$$\delta_{\text{err}} = E(\delta_i), \delta_i = \frac{\sigma_{Z_i}^N - \sigma_{Z_i}^L}{\sigma_{Z_i}^N}, i = 1, 2, \dots, 100 \quad (11)$$

式中 δ_i 为第 i 组参数两种计算方法的相对误差； $\sigma_{Z_i}^N, \sigma_{Z_i}^L$ 分别为第 i 组参数下非线性方法和等效线性化方法计算的响应的标准差。表 2 给出了 0°风向角（顺风向）和 90°风向角风致加速度和总体位移响应标准差的相对误差的期望值。表 2 表明这两种方法的计算结果相对误差的期望值小于 0.2%。根据图 2 和表 2 的结果，证明了等效线性化方法求解

MTLCDI 控制结构风致响应微分方程的适用性。

表 2 0°和 90°风向角下 δ_{err} 的值

Tab. 2 Values of δ_{err} at wind directions of 0° and 90°

顶层响应	$\delta_{\text{err}}/\%$	
	B ⁽¹⁾	B ⁽²⁾
加速度(0°)	0.10	0.14
位移(0°)	0.01	<0.01
加速度(90°)	0.03	0.03
位移(90°)	<0.01	<0.01

在验证等效线性化方法的适用性后，可由式(7)获得 B⁽¹⁾和 B⁽²⁾的响应时程，其峰值响应定义为：

$$\hat{X} = \bar{X}(t) \pm g\sigma_X \quad (12)$$

式中 $\bar{X}(t)$ 和 σ_X 分别为选取样本响应时程的期望和标准差，峰值因子 $g=3.0$ [31]。

2 工程实例分析

2.1 工程实例及其风洞试验简介

本文对位于中国东南沿海城市某连体超高层建筑进行了风致响应分析。该建筑的主要物理特征如下：B⁽¹⁾和 B⁽²⁾ 分别有 59 层和 55 层；总质量分别有 209868 t 和 123648 t。该连体建筑的平面图和轴侧图分别如图 3(a)和(b)所示。图 3 表明 x 轴是弱轴，结构最不利动力响应容易出现在水平侧移刚度较弱的方向 [22]，仅讨论 4 种装置对 x 轴向上的动力响应控制效果。

在汕头大学风洞实验室对 B⁽¹⁾和 B⁽²⁾ 进行同步多点测压风洞试验，试验模型比例采用 1:300。根据《建筑结构荷载规范》(GB 50009—2012) [32]，试验模拟了 B 类风场；初始风向角如图 3(a)所示，风向角沿逆时针方向间隔 15°，从 0°到 345°共进行 24 个风向角风洞试验，风洞试验相关信息详见文献 [22-23]。

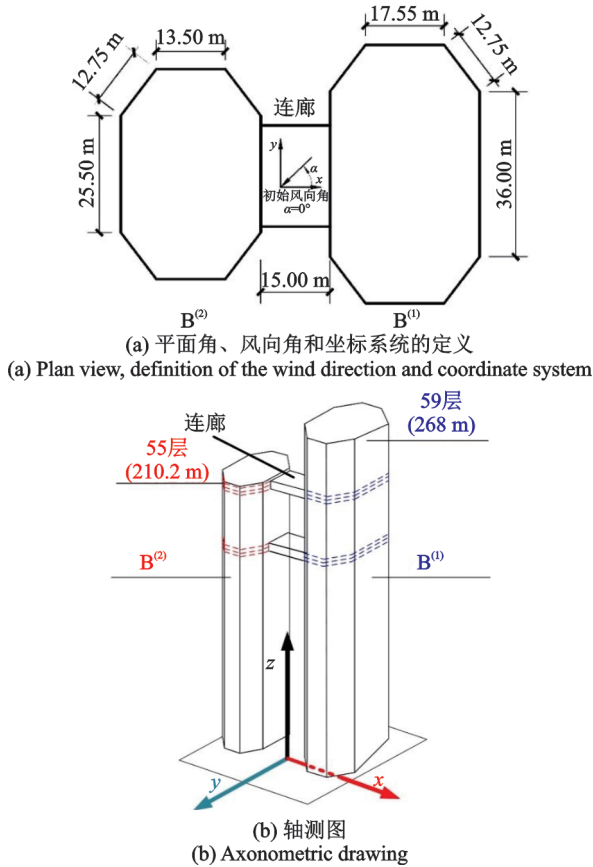


图3 连体建筑示意图

Fig. 3 Sketch of the linked buildings

$$\begin{cases}
 \text{minimize} & f_1(\mu_1, \beta_1, \nu_1, \zeta_{c1}, \xi_1, L_1, A_1, \mu_2, \beta_2, \nu_2, \zeta_{c2}, \xi_2, L_2, A_2) = \max(|\ddot{X}_1(t)|) \\
 & f_2(\mu_1, \beta_1, \nu_1, \zeta_{c1}, \xi_1, L_1, A_1, \mu_2, \beta_2, \nu_2, \zeta_{c2}, \xi_2, L_2, A_2) = \max(|\ddot{X}_2(t)|) \\
 & f_3(\mu_1, \beta_1, \nu_1, \zeta_{c1}, \xi_1, L_1, A_1, \mu_2, \beta_2, \nu_2, \zeta_{c2}, \xi_2, L_2, A_2) = \text{std}(|X_1(t)|) \\
 \text{s.t.} & \mu_1 \in [0, 0.25\%], \beta_1 \in [0, 4\%], \nu_1 \in [1\%, 10], \\
 & \zeta_{c1} \in [0, 40\%], \xi_1 \in [10, 4000], L_1 \in [0.1, 50], A_1 \in [0.1, 60], \\
 & \mu_2 \in [0, 0.25\%], \beta_2 \in [0, 7\%], \nu_2 \in [1\%, 10], \\
 & \zeta_{c2} \in [0, 40\%], \xi_2 \in [10, 4000], L_2 \in [0.1, 50], A_2 \in [0.1, 60]
 \end{cases} \quad (13)$$

式中参数约束范围的确定过程参考文献[26]。使用MATLAB内置函数‘gamultiobj’求解此多目标优化问题,将优化后的解集(最优个体的集合)绘制三维Pareto前沿(如图4所示)。基于点到面最远距离的策略,在Pareto前沿选择膝点(knee point)作为MTLCDI权衡3个目标的最合适点。4种控制方案选择的最合适点对应参数列于表1。

2.3 风致加速度控制效果分析

本节分别讨论了4种控制装置下连体超高层建筑加速度响应的频响函数、时程及加速度响应峰值的减小效果。计算风致加速度响应时的风速为38.80 m/s(10年重现期),前3阶阻尼比取1.5%,其余阶阻尼比的确定参见文献[27]。根据式(10)计算

2.2 四种基于惯容元件阻尼器的优化参数

在寻找最优MTLCDI控制 $B^{(1)}$ 和 $B^{(2)}$ 风致响应过程中共有18个待定参数,分别是TLCDI- h ($h=1, 2$)的安装楼层数、连廊连接楼层、质量比 $\mu_h = M_{C,h}/M_h$ (M_h 是 $B^{(1)}$ 和 $B^{(2)}$ 总质量)、惯容比 $\beta_h = b_h/M_h$ 、频率比 $\nu_h = \frac{\omega_{T,h}}{\omega_{s,h}} = \sqrt{\frac{k_{T,h}}{m_{T,h}}} / \omega_{s,h}$ ($\omega_{T,h}$, $\omega_{s,h}$ 分别为TLCDI的频率及相应建筑的基频)、阻尼比 $\zeta_{c,h} = \frac{c_{T,h}}{2m_{T,h}\omega_{T,h}}$ 、水头损失系数 ξ_h 、液柱总长度 L_h 和容器横截面积 A_h 。其中安装楼层数和连廊刚节点连接楼层数受限于结构的实际设计,其对应具体参数如下:TLCDI-1安装在 $B^{(1)}$ 的第46层,对应连廊刚节点连接到 $B^{(2)}$ 的第55层;TLCDI-2安装在 $B^{(2)}$ 的第53层,对应连廊刚节点连接到 $B^{(1)}$ 的第44层。余下参数的确定可视为带约束多目标优化问题求解过程。对于超高层建筑,风致加速度往往是影响超高层建筑舒适度的最主要因素之一^[33],因此本文以 $B^{(1)}$ 和 $B^{(2)}$ 的加速度峰值和 $B^{(1)}$ 的位移标准差为3个优化目标。上述多目标优化问题的数学表达如下式:

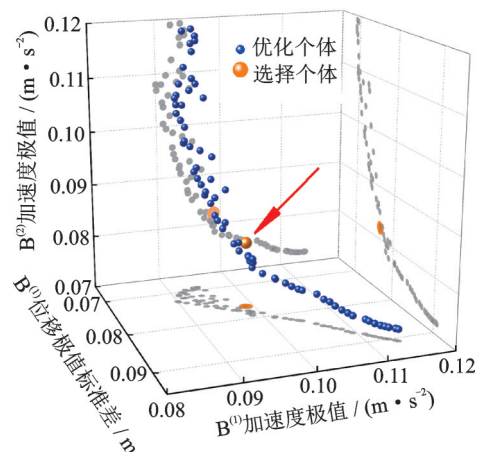


图4 MTLCDI最优个体的Pareto前沿

Fig. 4 Pareto front corresponding to the parameter optimization of MTLCDI

了激励力作用在 $B^{(1)}$ 和 $B^{(2)}$ 的顶层时,顶层的加速度响应的频响函数。从图 5(a)可以看出,4 种方案都能明显降低 $B^{(1)}$ 的加速度频响函数在第 1 阶自振频率附近的峰值,而 MTLCDI 对其高阶(第 2,3 阶)自振频率附近的峰值也起到明显的降低作用。图 5 (b)表明 4 种方案都能有效降低 $B^{(2)}$ 加速度频响函数的前 3 阶固有频率附近的峰值,且 MTLCDI 对峰值的减小幅度优于其余控制方案。

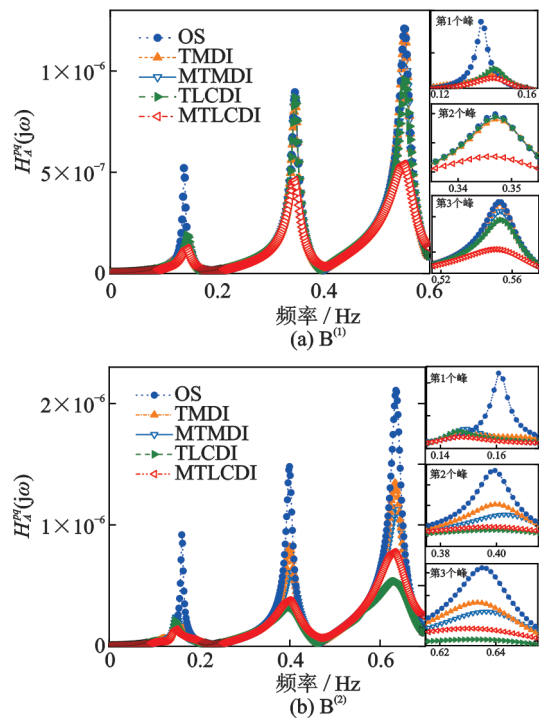


图 5 顶层加速度响应频响函数

Fig. 5 Frequency response function of the acceleration responses of the top storey

根据式(7)可求得连体超高层建筑的风致加速度响应。图 6(a)和(b)分别给出了 $B^{(1)}$ 和 $B^{(2)}$ 顶层在 270° 风向角(横风向)的加速度时程,图 6(a)和(b)表明 4 种减振方案都能减小 $B^{(1)}$ 和 $B^{(2)}$ 的加速度响应,且对 $B^{(2)}$ 的控制效果更显著。

获得结构的加速度时程响应后,根据式(12)计算结构的加速度峰值响应。图 7(a)和(b)分别是 $B^{(1)}$ 和 $B^{(2)}$ 顶层风致加速度峰值随风向角的变化情况。图 7(a)表明 4 种减振方案都能大幅度降低 $B^{(1)}$ 在所有风向角下顶层的加速度的峰值,且控制效果基本一致。在没有安装控制装置情况下, $B^{(1)}$ 在 90° 和 270° 风向角下的加速度峰值最大,其数值约为 0.16 m/s^2 ,安装 MTLCDI 后在这两个风向角下风致加速度峰值分别减至 0.09 m/s^2 和 0.10 m/s^2 。图 7(b)表明 4 种方案均能显著减小 $B^{(2)}$ 在所有风向角下的加速度响应,其中 MTLCDI 减小幅度最大;在没安装控制装置时, $B^{(2)}$ 加速度峰值在 0° (顺风向)、 90° 和

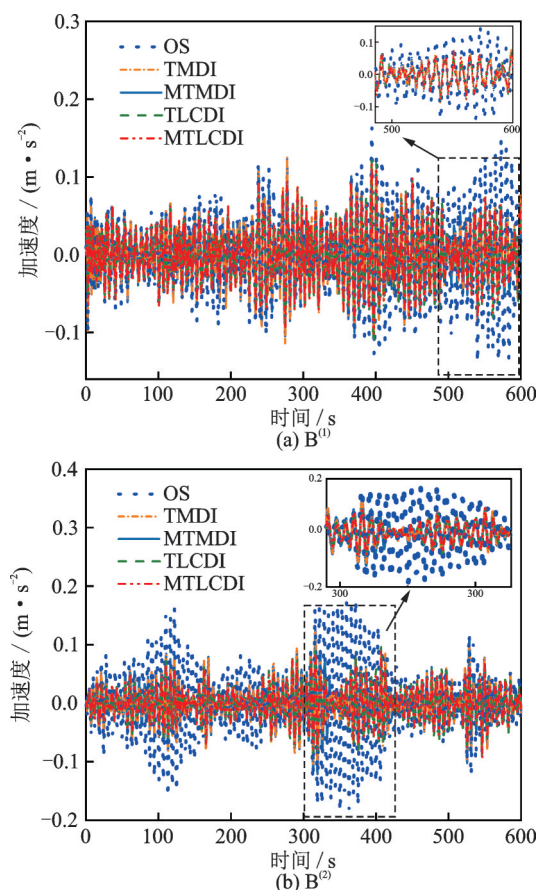


图 6 270° 风向角下顶层加速度响应时程

Fig. 6 Time histories of the acceleration responses of the top storey at 270° wind direction

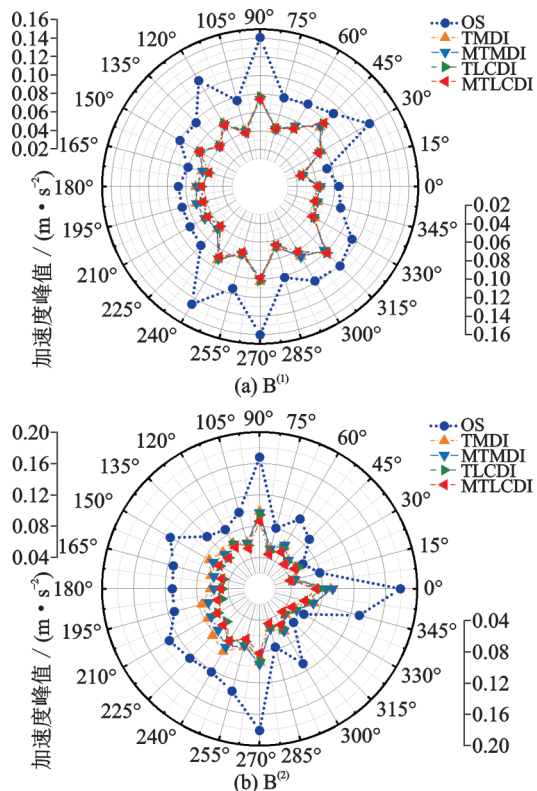


图 7 顶层风致加速度随风向角变化

Fig. 7 Variations of peak wind-induced acceleration with wind directions from 0° to 345°

270°风向角下达到最大,其值接近 0.18 m/s²,安装 MTLCDI后在这 3 个风向角下风致加速度峰值分别减至 0.07, 0.09, 0.08 m/s²。

为了定量分析 4 种控制方案的减振效果,定义了减振因子 F_v :

$$F_v = \frac{R_{OS} - R_E}{R_{OS}} \times 100\%$$

(14)

式中 R_{OS} 和 R_E 分别表示连体超高层建筑安装减振

装置前和后的响应峰值。由式(14)计算的 $B^{(1)}$ 和 $B^{(2)}$ 顶层加速度峰值在 3 个典型风向角下的减振因子列于表 3。表 3 表明 4 种振动控制方案都能使 $B^{(1)}$ 和 $B^{(2)}$ 风致峰值加速度从无控制状态的 0.16~0.18 m/s²减小到 0.09~0.10 m/s²,减振因子最大可达约 60%。此外,对比 3 个典型风向角下的 $B^{(1)}$ 和 $B^{(2)}$ 减振因子,4 种阻尼器对 $B^{(2)}$ 的峰值加速度控制效果优于对 $B^{(1)}$ 的控制效果。

表 3 典型风向角下 $B^{(1)}$ 和 $B^{(2)}$ 顶层风致加速度的减振因子

Tab. 3 Reduction factor of wind-induced acceleration of the top storey of $B^{(1)}$ and $B^{(2)}$ at typical wind directions

风向角/ (°)	建筑	$R_{OS}/$ ($m \cdot s^{-2}$)	$R_{MTLCDI}/$ ($m \cdot s^{-2}$)	$F_{v, MTLCDI}/$ %	$R_{TLCDI}/$ ($m \cdot s^{-2}$)	$F_{v, TLCDI}/$ %	$R_{MTMDI}/$ ($m \cdot s^{-2}$)	$F_{v, MTMDI}/$ %	$R_{TMDI}/$ ($m \cdot s^{-2}$)	$F_{v, TMDI}/$ %
0	$B^{(1)}$	0.08	0.06	25.0	0.06	25.0	0.06	25.0	0.06	25.0
	$B^{(2)}$	0.18	0.07	61.1	0.08	55.6	0.08	55.6	0.09	50.0
90	$B^{(1)}$	0.16	0.09	43.8	0.10	37.5	0.09	43.8	0.10	37.5
	$B^{(2)}$	0.17	0.09	47.1	0.09	47.1	0.10	41.2	0.10	41.2
270	$B^{(1)}$	0.16	0.10	37.5	0.10	37.5	0.10	37.5	0.10	37.5
	$B^{(2)}$	0.18	0.08	55.6	0.09	50.0	0.09	50.0	0.09	50.0

图 8(a)和(b)分别给出了连体超高层建筑在 0°和 270°风向角下峰值加速度沿楼层的变化规律。图 8 表明 4 种减振方案对 $B^{(1)}$ 和 $B^{(2)}$ 的各层的峰值加速

度都能起到明显的控制效果。在 0°和 270°风向角, MTLCDI 和 TLCDI 对 $B^{(2)}$ 加速度控制效果相比于 MTMDI 和 TMDI 稍显优势,而对 $B^{(1)}$ 控制效果无明显区别。

2.4 风致位移控制分析

本节分别讨论了 4 种控制装置对 $B^{(1)}$ 和 $B^{(2)}$ 位移频响函数、总体位移响应、脉动位移响应峰值和层间位移角的控制效果。位移计算前 3 阶阻尼比选取 3%,其余阶阻尼比与加速度分析时的一致,且计算 $B^{(1)}$ 和 $B^{(2)}$ 的风致位移响应时设计风速为 50.8 m/s (50 年重现期)。根据式(9),计算了激励力作用在 $B^{(1)}$ 和 $B^{(2)}$ 的顶层时,顶层的位移频响函数,如图 9 所示。图 9(a)表明 4 种控制方案仅对 $B^{(1)}$ 位移频响函数在第 1 阶自振频率对应的峰值有明显降低作用,而对高阶峰值减振效果并不明显;图 9(b)表明 4 种控制方案均能显著减小 $B^{(2)}$ 前 3 阶自振频率附近位移频响函数的峰值,其中 TLCDI 的效果最优。

根据式(7)计算出结构的风致总体位移响应。图 10(a)和(b)分别是 30°风向角下(该风向角下的 $B^{(1)}$ 位移最大), $B^{(1)}$ 和 $B^{(2)}$ 总体位移响应时程。图 10 表明 4 种方案都减小 $B^{(1)}$ 和 $B^{(2)}$ 的总体位移响应。

风致总体位移响应由平均值和脉动部分组成,而被动控制装置并不会对结构位移响应的平均值产

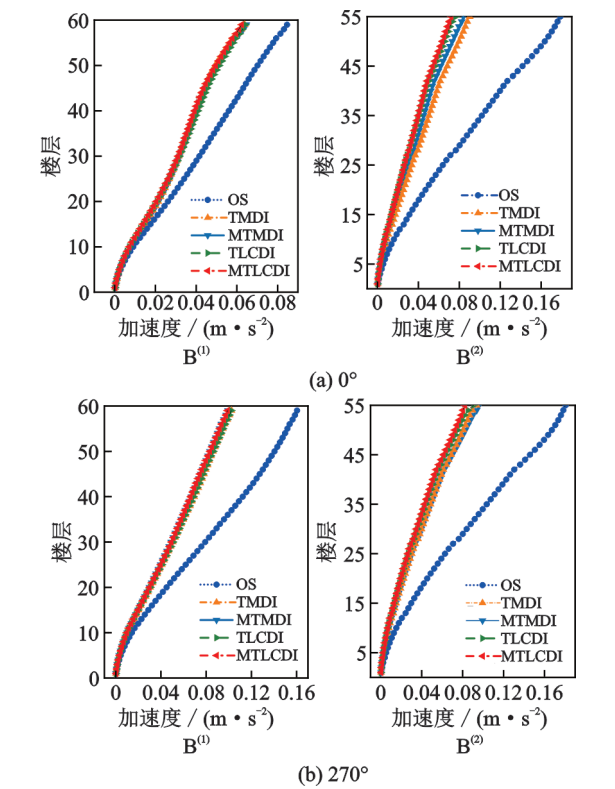


图 8 风致加速度峰值在 0°和 270°风向角沿楼层高度变化规律

Fig. 8 Variations of peak values of wind-induced acceleration with the height of buildings at 0° and 270° wind directions

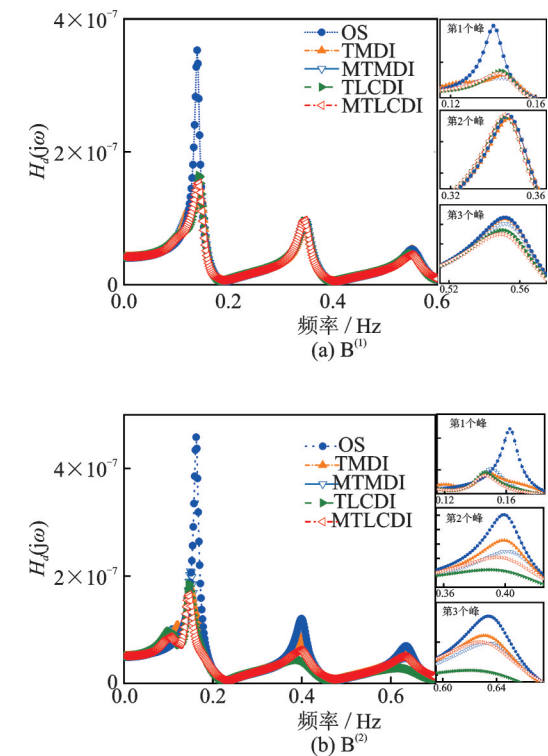


图 9 顶层位移频响函数

Fig. 9 Frequency response function of displacement of the top storey

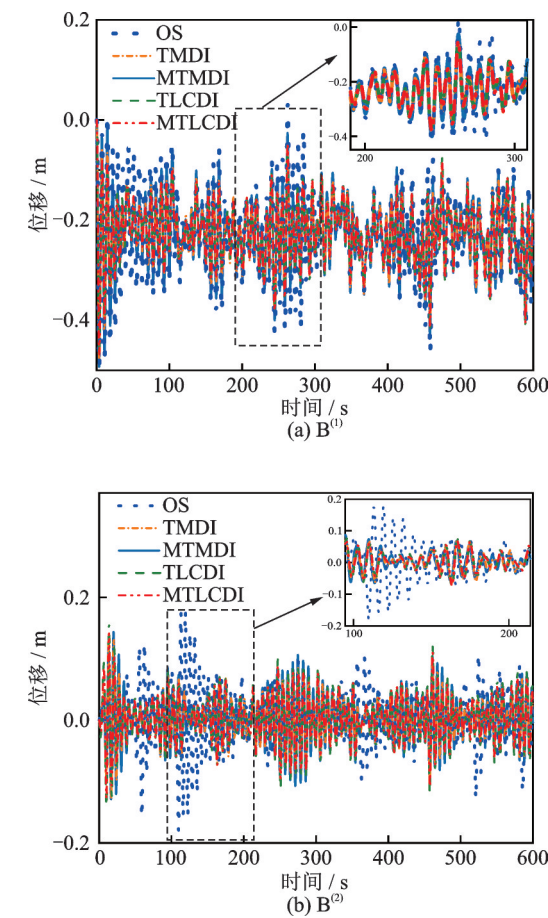


图 10 30°风向角下 B⁽¹⁾顶层和 B⁽²⁾顶层总体位移响应时程

Fig. 10 Time histories of displacement responses of the top storey of B⁽¹⁾ and B⁽²⁾ at 30° wind direction

生影响^[18,23,27,34],因此下面讨论 MTLCDI 对结构风致脉动位移响应的控制效果。由式(12)可得脉动位移响应部分峰值为 $g\sigma_{x_0}$ 。

图 11(a)和(b)分别为 B⁽¹⁾和 B⁽²⁾顶层脉动位移响应峰值随 24 个风向角的变化规律。图 11(a)表明 4 种控制方案均能减小 B⁽¹⁾所有风向角下的脉动位移峰值,且控制效果接近。图 11(b)给出了 B⁽²⁾位移脉动响应峰值随风向角的变化规律。从图 11(b)中可以看出 4 种控制方案能减小 B⁽²⁾绝大部分风向角下脉动位移部分峰值,其中 MTLCDI 略有优势;但在部分风向角(如 30°, 120°, 240°, 330°)下,安装减振设备后脉动位移峰值反而增大,这个现象出现的原因是安装阻尼器设备的建筑通过连廊对另外一栋建筑施加了推力或者拉力,当 B⁽²⁾的运动方向与推力或者拉力同向时,减振装置起到了增大 B⁽²⁾位移的作用^[23]。

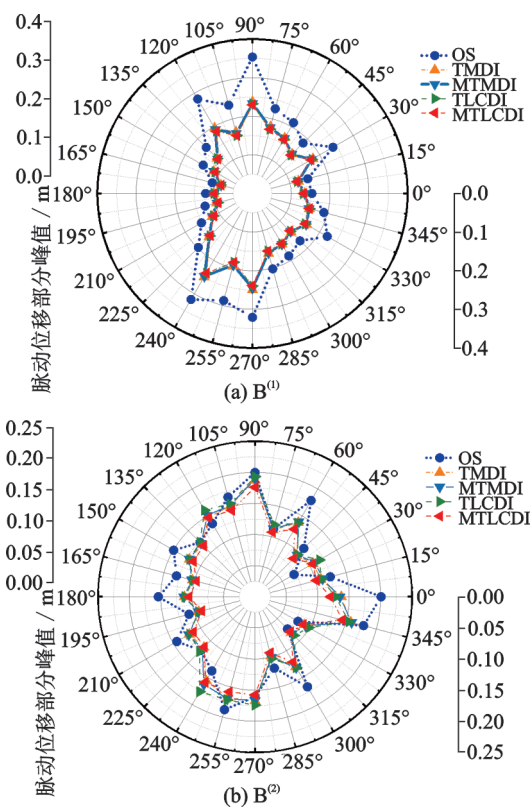


图 11 B⁽¹⁾和 B⁽²⁾顶层脉动位移峰值随风向角变化

Fig. 11 Variations of peak values of wind-induced fluctuating displacement of the top storey of B⁽¹⁾ and B⁽²⁾ at wind directions from 0° to 345°

脉动位移响应部分减振因子 F_v 同样如式(14)所示。3 个典型风向角下, B⁽¹⁾和 B⁽²⁾顶层脉动位移响应峰值的减振因子如表 4 所示。在 0° 风向角, B⁽²⁾顶层减振因子在 4 种控制方案中均大于 30%, 对应脉动位移峰值从 0.20 m 减小到 0.13 m; 而 B⁽¹⁾减振系数仅有 13% 左右, 对应脉动位移峰值从 0.15 m 减

小到 0.13 m。在 30°风向角,由于 $B^{(2)}$ 的未控制时的脉动位移很小(0.07 m),安装控制装置并通过弹簧、阻尼元件与 $B^{(1)}$ 连接后,受到 $B^{(1)}$ 的影响其位移响应反而增加了。在 270°风向, $B^{(1)}$ 的减振系数均接近于 25%,对应顶层脉动位移峰值从 0.32 m 减小到 0.24 m。

表 4 典型风向角下 $B^{(1)}$ 和 $B^{(2)}$ 顶层风致脉动位移部分峰值减振因子

Tab. 4 Reduction factor of peak values of wind-induced fluctuating displacement of the top storey of $B^{(1)}$ and $B^{(2)}$ at typical wind directions

风向角 (°)	建筑	$R_{OS}/$ m	$R_{MTLCDI}/$ m	$F_{v, MTLCDI}/$ %	$R_{TLCDI}/$ m	$F_{v, TLCDI}/$ %	$R_{MTMDI}/$ m	$F_{v, MTMDI}/$ %	$R_{TMDI}/$ m	$F_{v, TMDI}/$ %
0	$B^{(1)}$	0.15	0.13	14.2	0.13	14.2	0.13	12.2	0.13	12.2
	$B^{(2)}$	0.20	0.12	40.2	0.13	36.0	0.14	32.6	0.14	32.6
30	$B^{(1)}$	0.24	0.17	27.2	0.18	26.1	0.18	26.7	0.18	26.7
	$B^{(2)}$	0.07	0.11	-47.9	0.12	-65.4	0.11	-53.8	0.11	-53.8
270	$B^{(1)}$	0.32	0.24	25.7	0.24	25.3	0.25	23.5	0.25	23.5
	$B^{(2)}$	0.16	0.16	1.9	0.17	-8.3	0.17	-3.8	0.17	-3.8

图 12(a)和(b)分别给出了 180°(顺风向)和 270°风向角下,连体建筑脉动位移响应峰值沿楼层高度的变化情况。图 12 表明在这两个风向角下,4 种控制方案都能有效减小 $B^{(1)}$ 和 $B^{(2)}$ 各层的脉动位移峰值,且减振效果几近一致。

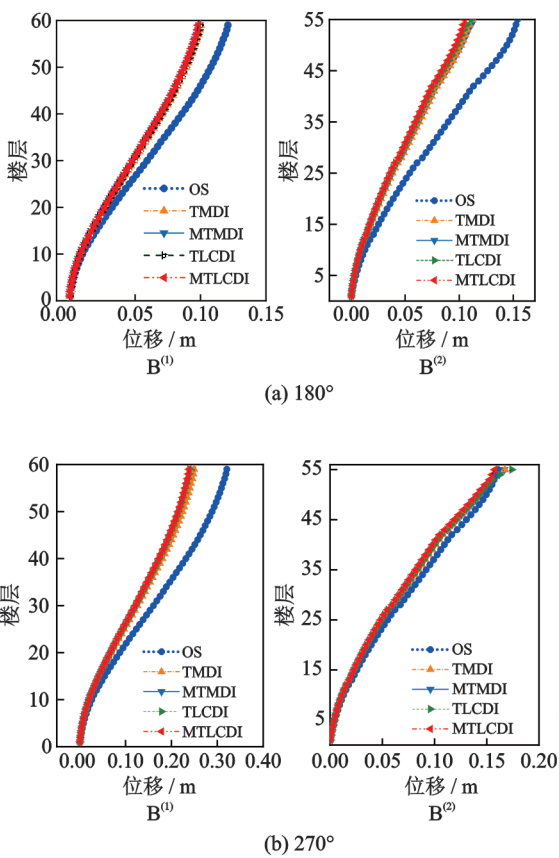


图 12 风致脉动位移峰值在 180°和 270°风向角沿楼层高度变化规律

Fig. 12 Variation of peak values of wind-induced fluctuating displacement with the height of buildings at 180° and 270° wind directions

为了避免建筑的位移响应过大影响结构的正常使用,《高层建筑混凝土结构技术规程》建议了其层间位移角的限值^[35]。图 13(a)和(b)分别给出了 180°和 270°风向角下,连体建筑层间位移角沿楼层高度的变化情况。图 13 表明在这两个风向角下,4 种控制方案都能有效减小 $B^{(1)}$ 和 $B^{(2)}$ 各层的层间位移角,使其几乎都处于建议值 1/500 以下,且控制效果几近一致。

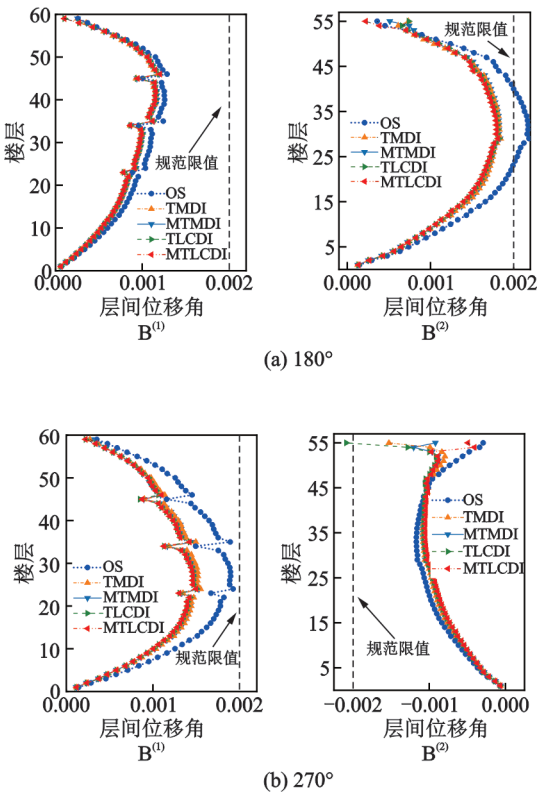


图 13 层间位移角在 180°和 270°风向角沿楼层高度变化规律

Fig. 13 Variation of storey drift ratio with the height of buildings at 180° and 270° wind directions

3 结 论

本文建立了MTLCDI控制连体超高层建筑的风致响应非线性数学模型,验证了等效线性化方法的适用性,通过一个工程实例对MTLCDI减振效果进行分析,并与其他3种阻尼器的控制效果进行比较,得到以下结论。

(1) 加速度响应方面:4种振动控制方案都能大幅度减小 $B^{(1)}$ 和 $B^{(2)}$ 在24个风向角下的加速度峰值响应,且对 $B^{(2)}$ 的控制效果较好,MTLCDI的减振性能稍显优势,如在 270° 风向角,MTLCDI使得 $B^{(1)}$ 顶层峰值加速度响应从 0.16 m/s^2 降低到 0.10 m/s^2 ,对应减振因子为37.5%; $B^{(2)}$ 峰值加速度响应从 0.18 m/s^2 降低到 0.08 m/s^2 ,对应减振因子为55.6%。

(2) 位移响应方面:4种控制方案都能减少 $B^{(1)}$ 在所有风向角和 $B^{(2)}$ 在大部分风向角的下脉动位移响应部分峰值。同时,4种控制方案在典型风向角下都能控制建筑的层间位移角,使其几乎都满足规程建议值。

总的来说,MTLCDI比其他3种基于惯容元件的阻尼器控制连体超高层建筑风致响应的控制效果略好,且MTLCDI采用分布布置,节省了单个TLCDI安装空间和减小施工难度;此外,MTLCDI系统中的液体部分在实际工程应用可被设计成消防水箱或游泳池等设施,兼具实用性和经济性。

参考文献:

- [1] 严从志. 超高层建筑的纽带-连体结构[Z]. 结构小站, 2020.
- [2] 甄伟, 张磊, 张龔华, 等. 多塔连体高层建筑连接控制方法研究[J]. 建筑结构, 2019, 49(18): 49-54.
Zhen Wei, Zhang Lei, Zhang Yanhua, et al. Study on connective control method of multi-tower conjoined high-rise building [J]. Building Structure, 2019, 49 (18): 49-54.
- [3] 林超伟, 王兴法, 向凯, 等. 含柔性连接体的连体-多塔超高层结构设计[J]. 建筑结构, 2017, 47(24): 1-5.
Lin Chaowei, Wang Xingfa, Xiang Kai, et al. Design of multi-tower super high-rise structure with flexible connection structure [J]. Building Structure, 2017, 47 (24): 1-5.
- [4] 范绍芝, 侯家健. 连体高层建筑结构研究综述[J]. 建筑结构, 2009, 39(S2): 1-6.
- [5] Song J, Tse K, Tamura Y, et al. Aerodynamics of closely spaced buildings: with application to linked buildings [J]. Journal of Wind Engineering Industrial Aerodynamics, 2016, 149: 1-16.
- [6] Song J, Tse K T. Dynamic characteristics of wind-excited linked twin buildings based on a 3-dimensional analytical model [J]. Engineering Structures, 2014, 79: 169-181.
- [7] 包世华, 王建东. 大底盘多塔楼连体结构的振动计算和动力特性[J]. 建筑结构, 1997 (6): 40-44.
- [8] 肖从真, 杜义欣, 康志宏, 等. 丽泽SOHO双塔复杂连体超限高层结构体系研究[J]. 建筑结构学报, 2016, 37(2): 11-18.
- [9] 吴华晓, 王钦华, 雷伟, 等. 强、弱连接对双塔连体超高层建筑风振响应的影响研究[J]. 振动与冲击, 2021, 40(13): 247-254.
Wu Huaxiao, Wang Qinhua, Lei Wei, et al. Effects of strong and weak connection on wind-induced response of twin-tower connected super high-rise buildings [J]. Journal of Vibration and Shock, 2021, 40 (13) : 247-254.
- [10] Lee D G, Kim H S, Ko H. Evaluation of coupling-control effect of a skybridge for adjacent tall buildings [J]. The Structural Design of Tall Special Buildings, 2012, 21(5): 311-328.
- [11] Xu Y L, He Q, Ko J. Dynamic response of damper-connected adjacent buildings under earthquake excitation [J]. Engineering Structures, 1999, 21(2): 135-148.
- [12] 赵志鹏, 张瑞甫, 陈清军, 等. 基于减震比设计方法的惯容减震结构分析 [J]. 工程力学, 2019, 36(S1): 125-130.
Zhao Zhipeng, Zhang Ruifu, Chen Qingjun, et al. Analysis of structures with inerter systems based on the response mitigation ratio design method [J]. Engineering Mechanics, 2019, 36(S1): 125-130.
- [13] 薛松涛, 康建飞, 谢丽宇. 用于结构减震控制的拉索式惯容系统跨层布置优化研究[J]. 动力学与控制学报, 2020, 18(5): 72-78.
Xue Songtao, Kang Jianfei, Xie Liyu. Study on optimization of cross-layer-bracing inerter system for structural

- seismic response control [J]. *Journal of Dynamics and Control*, 2020, 18(5): 72-78.
- [14] 张瑞甫, 曹嫣如, 潘超. 惯容减震(振)系统及其研究进展[J]. *工程力学*, 2019, 36(10): 8-27.
- Zhang Ruifu, Cao Yanru, Pan Chao. Inerter system and its state-of-the-art [J]. *Engineering Mechanics*, 2019, 36(10): 8-27.
- [15] Marian L, Giaralis A. Optimal design of a novel tuned mass-damper-inerter (TMDI) passive vibration control configuration for stochastically support-excited structural systems [J]. *Probabilistic Engineering Mechanics*, 2014, 38: 156-164.
- [16] Pietrosanti D, De Angelis M, Basili M J E E. Optimal design and performance evaluation of systems with Tuned Mass Damper Inerter (TMDI)[J]. *Earthquake Engineering Structural Dynamics*, 2017, 46(8): 1367-1388.
- [17] De Domenico D, Ricciardi G. Optimal design and seismic performance of tuned mass damper inerter (TMDI) for structures with nonlinear base isolation systems[J]. *Earthquake Engineering Structural Dynamics*, 2018, 47(12): 2539-2560.
- [18] Wang Q, Qiao H, De Domenico D, et al. Wind-induced response control of high-rise buildings using inerter-based vibration absorbers [J]. *Applied Sciences*, 2019, 9(23): 5045.
- [19] Wang Q, Qiao H, Li W, et al. Parametric optimization of an inerter-based vibration absorber for wind-induced vibration mitigation of a tall building [J]. *Wind Structures*, 2020, 31(3): 241-253.
- [20] Palacios-Quinonero F, Rubió-Massegú J, Rossell J M, et al. Design of inerter-based multi-actuator systems for vibration control of adjacent structures [J]. *Journal of the Franklin Institute*, 2019, 356(14): 7785-7809.
- [21] De Domenico D, Qiao H, Wang Q, et al. Optimal design and seismic performance of Multi-Tuned Mass Damper Inerter (MTMDI) applied to adjacent high-rise buildings [J]. *The Structural Design of Tall Special Buildings*, 2020, 29(14): e1781.
- [22] Zhu Z, Lei W, Wang Q, et al. Study on wind-induced vibration control of linked high-rise buildings by using TMDI[J]. *Journal of Wind Engineering Industrial Aerodynamics*, 2020, 205: 104306.
- [23] 王钦华, 雷伟, 祝志文, 等. 单重和多重调谐质量惯容阻尼器控制连体超高层建筑风振响应比较研究[J]. *建筑结构学报*, 2021, 42(4): 25-34.
- Wang Qinhu, Lei Wei, Zhu Zhiwen, et al. Comparison of mitigation effects on wind-induced response of connected super-high-rise buildings controlled by TMDI and MTMDI[J]. *Journal of Building Structures*, 2021, 42(4): 25-34.
- [24] Wang Q, Tiwari N D, Qiao H, et al. Inerter-based tuned liquid column damper for seismic vibration control of a single-degree-of-freedom structure[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2020, 184: 105840.
- [25] Wang Q, Qiao H, De Domenico D, et al. Seismic response control of adjacent high-rise buildings linked by the Tuned Liquid Column Damper-Inerter (TLCDI) [J]. *Engineering Structures*, 2020, 223: 111169.
- [26] Wang Q, Tian H, Qiao H, et al. Wind-induced vibration control and parametric optimization of connected high-rise buildings with tuned liquid-column-damper-inerter[J]. *Engineering Structures*, 2021, 226: 111352.
- [27] Giaralis A, Petrini F. Wind-induced vibration mitigation in tall buildings using the tuned mass-damper-inerter [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2017, 143(9): 04017127.
- [28] Xu Y L, Samali B, Kwok K. Control of along-wind response of structures by mass and liquid dampers [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 1992, 118(1): 20-39.
- [29] Sonmez E, Nagarajaiah S, Sun C, et al. A study on semi-active Tuned Liquid Column Dampers (sTLCDs) for structural response reduction under random excitations[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2016, 362: 1-15.
- [30] Wang Q, Qiao H, De Domenico D, et al. Seismic performance of optimal Multi-Tuned Liquid Column Damper-Inerter (MTLCDI) applied to adjacent high-rise buildings [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2021, 143: 106653.
- [31] Davenport A G. Gust loading factors [J]. *Journal of the Structural Division*, 1967, 93(3): 11-34.
- [32] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑结构荷载规范: GB 50009—2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- MOHURD. Load code for the design of building structures: GB 50009—2012[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012.
- [33] Burton M D, Kwok K C, Abdelrazaq A. Wind-induced motion of tall buildings: designing for occupant comfort [J]. *International Journal of High-rise Buildings*, 2015, 4(1): 1-8.
- [34] Dai J, Xu Z-D, Gai P-P. Tuned mass-damper-inerter control of wind-induced vibration of flexible structures

- based on inerter location [J]. *Engineering Structures*, 2019, 199: 109585.
- [35] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 高层建筑混凝土结构技术规程: JGJ 3—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- MOHURD. Technical specification for concrete structures of tall building: JGJ 3—2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011.

Mitigation effects of MTLCDI on wind-induced responses of linked high-rise buildings

WANG Qin-hua¹, WU Hua-xiao², TIAN Hua-rui², TANG Yi^{3,4}, JIA Bin¹

(1.School of Civil Engineering and Architecture of Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China;

2.Department of Civil and Environmental Engineering, Shantou University, Shantou 515063, China;

3.China Academy of Building Research, Beijing 100013, China;

4. State Key Laboratory of Building Safety and Built Environment, Beijing 100013, China)

Abstract: The research integrates inertial elements with water tanks to develop inerter-based multi-tuned liquid column dampers (MTLCDI) for mitigating wind-induced vibration of linked high-rise buildings. MTLCDI not only exploits functions of the water tanks installed on each high-rise building for daily water supply and firefighting, but also utilizes mass amplification effects of inertial elements for wind-induced vibration control. Non-linear governing differential equations of motion are formulated to model MTLCDI controlling wind-induced responses of linked high-rise buildings, and the equivalent linear method is verified to solve the non-linear equations. Linked high-rise buildings are adopted as a case to investigate the control effects of MTLCDI on the buildings excited by wind loads obtained from wind tunnel tests. The mitigation effects of optimal MTLCDI installed on the linked high-rise buildings are compared with those of three other devices (i.e., TMDI, MTMDI, and TLCDDI). It is found that MTLCDI is more effective to reduce wind-induced acceleration, fluctuating displacement, and inter-story drift ratio of the buildings. Besides, MTLCDI also takes advantage of the water tanks and saving installation space of each building. These findings can be useful for the wind-induced vibration control design of linked high-rise buildings.

Key words: inerter; multi-tuned liquid column dampers; linked high-rise buildings; wind-induced vibration control; wind tunnel tests

作者简介: 王钦华(1979—),男,博士,副教授。E-mail: gbqhwang@swust.edu.cn。

通讯作者: 唐 意(1978—),男,博士,研究员。E-mail: tangyi@cabrtech.com。