

基于惯容阻尼器的相邻结构地震响应的 优化控制与对比研究

蒲武川¹,程滢¹,胡小昕²

(1. 武汉理工大学 土木工程与建筑学院,湖北 武汉 430070; 2. 中南建筑设计院股份有限公司,湖北 武汉 430014)

摘要:相邻建筑间引入消能阻尼器可有效控制结构振动响应,惯容阻尼器在相邻结构的振动控制中具有独特优势,但不同类型的惯容阻尼器的控制效果的差异有待深入研究。该文针对多层不等高相邻结构,以相邻柔性结构的位移和加速度为控制目标,对刚性结构响应进行约束的条件下,采用全局优化求解器确定控制装置的最优参数。分别采用黏弹性阻尼器(viscoelastic dampers, VED)、调谐惯容阻尼器(tuned inerter dampers, TID)和调谐黏滞质量阻尼器(tuned viscous mass dampers, TVMD)连接相邻结构,研究了结构周期比和阻尼器布置位置对结构动力响应的影响;对比 VED、TID 和 TVMD 的控制效果,提出了 TID 和 TVMD 的混合控制方案,并通过时程响应分析验证了优化方案的效果。结果表明,惯容阻尼器能实现对相邻结构地震响应的有效控制,所需阻尼参数显著小于 VED; TID 和 TVMD 混合控制相对于单一类型惯容阻尼器的优化方案的参数需求更大,但能更好地平衡柔性结构的位移和加速度的控制效果。

关键词:相邻结构;惯容阻尼器;振动控制;参数优化

中图分类号:TU448.11

文献标志码:A

Optimal control and comparative study of the seismic response of adjacent structures based on inerter dampers

PU Wuchuan¹, CHENG Gan¹, HU Xiaoxin²

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;

2. Central-South Architectural Design Institute Co., Ltd., Wuhan 430014, China)

Abstract: The implementation of dissipative dampers between adjacent buildings can effectively mitigate structural vibration responses, with inerter dampers offering distinct advantages for controlling coupled structures. However, the performance of different types of inerter dampers in adjacent buildings requires further investigation. This study aims to determine the optimal parameters of various control devices for multi-story adjacent structures. A global optimization solver is employed, with displacement and acceleration of the flexible structure as the primary control objectives, while constraining the response of the rigid structure. Three damper types, namely, viscoelastic dampers (VED), tuned inerter dampers (TID), and tuned viscous mass dampers (TVMD), are individually applied to adjacent structures to evaluate the influence of structural period ratio and damper placement on seismic response. The control efficacy of VED, TID, and TVMD is systematically compared, and a novel hybrid control scheme combining TID and TVMD is proposed. Time-history analysis confirms the effectiveness of the optimized design. Numerical results indicate that inerter dampers (TID and TVMD) significantly reduce the seismic response of adjacent structures while requiring considerably smaller damping parameters than VED. Although the hybrid TID-TVMD system demands higher parametric requirements than single-damper configurations, it achieves superior

收稿日期:2024-02-20; 修回日期:2024-04-23

基金项目:国家自然科学基金项目(52178504)

作者简介:蒲武川(1980—),男,教授,博士,主要从事结构抗震与振动控制研究。E-mail:puwuchuan@whut.edu.cn

balance in controlling both displacement and acceleration of the flexible structure.

Key words: adjacent structure; inerter damper; vibration control; parameter optimization

0 引言

城市现代化发展过程中,大量建筑密集建造。在相邻建筑间安装消能阻尼器,可以将相邻结构耦联为一个结构系统,阻尼器利用相邻建筑的变形差发挥消能作用,可以降低结构系统的地震响应,避免相邻结构的碰撞等不利影响^[1]。

早期的相关研究中大多采用金属或黏滞类阻尼器,利用相邻结构的变形和速度差实现阻尼器的耗能。朱宏平等^[2]和吴巧云等^[3-4]验证了连接 Maxwell 型黏滞阻尼器能够有效地减轻相邻结构的地震响应。刘绍峰等^[5]研究了质量比与刚度比对相邻结构的控制效果和阻尼器最优参数的影响。孙黄胜等^[6]提出以结构位移响应的均方差与连接阻尼比作为目标对连接阻尼器的参数进行优化。刘良坤等^[7]发现在3个相邻结构间连接 Kelvin 型阻尼器能够取得较好的控制效果。陈超起等^[8]发现同时连接金属阻尼器和黏滞阻尼器能有效地降低相邻结构的位移和加速度响应。李创第等^[9]提出使用响应功率谱二次正交化法求解相邻结构的响应。

相邻结构间除了存在变形和速度差,还存在较大的水平相对加速度,将具备动态负刚度效应和耗能增效等优越性能^[10-14]的加速度相关型惯容元件^[15]引入相邻结构亦具有较大优势。不少学者采用惯容阻尼器对相邻结构进行振动控制,从多方面开展了研究。BASILI 等^[16-17]提出使用弹簧阻尼惯容元件 (spring dashpot inerter elements, SDIE) 控制相邻单自由度系统的响应。DE DOMENICO 等^[18]采用多个调谐质量阻尼惯容器 (multiple tuned mass damper inerter, MTMDI) 系统连接相邻高层建筑,并根据位移和加速度响应评估其控制效果。WANG 等^[19]发现连接调谐液柱阻尼惯容器 (tuned liquid column damper inerter, TLCDI) 可以降低相邻建筑的峰值加速度,但不能显著降低层间位移。LU 等^[20]发现连接黏滞惯容质量阻尼器 (viscous inertial mass damper, VIMD) 能有效降低相邻结构的地震响应。SONG 等^[21]也发现调谐惯容阻尼器比传统黏滞阻尼器能更好地减轻相邻桥梁间的碰撞风险。

已有研究中通常采用单一类型的阻尼器对相邻建筑结构的地震响应进行控制,且缺乏针对惯容阻尼器布置位置等因素的影响分析。为此,本文以不等高相邻多层结构为对象,利用状态空间法建立阻尼器控制的相邻多自由度结构系统的运动方程,对白噪声激励下的系统进行参数优化分析。基于频域分析,利用有约束全局优化求解器搜索最优控制效果及对应的阻尼器参数。考虑黏弹性阻尼器 (viscoelastic dampers, VED)、调谐惯容阻尼器 (tuned inerter dampers, TID) 和调谐黏滞质量阻尼器 (tuned viscous mass dampers, TVMD)、TID 与 TVMD 混合等4种控制系统,分析了各自的最优布置方案。随后,对最优参数下的相邻结构系统进行地震时程响应计算,对比分析了耦联系统与无控结构的地震响应,为基于相邻结构减震控制的惯容系统设计提供参考。

1 控制系统的动力方程

1.1 惯容阻尼器的力学模型

目前,研究人员已提出了多种形式的惯容器件。滚珠丝杠型惯容的工作原理和力学模型,见图1。该装置由滚珠螺杆、滚珠螺母、径向轴承、壳体和连接到滚珠螺母的飞轮组成,当两端点间存在相对加速度时,通过滚珠丝杠可以将飞轮的实际质量放大,形成几何倍数增长的惯性质量,并产生与相对加速度成比例的惯性力,惯性力与相对加速度的比值称为惯质系数 m_{in} ,具体的力学方程为

$$F = m_{in}(\ddot{u}_1 - \ddot{u}_2) \quad (1)$$

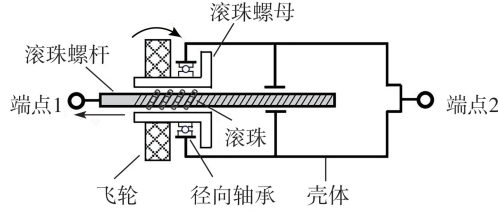
$$m_{in} = \left(\frac{2\pi}{l}\right)^2 I \quad (2)$$

式中: F 为出力; \ddot{u}_1 和 \ddot{u}_2 分别为两端点的加速度; l 为螺杆的导程; I 为飞轮的惯性矩。

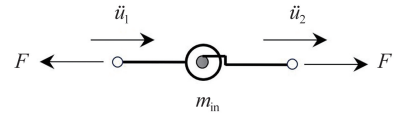
VED、TID 和 TVMD 这3种阻尼器的力学模型,给出了稳态响应下阻尼器及各单元的滞回曲线,见图2。由图可知,在惯容单元的作用下,TID 和 TVMD 的滞回曲线均呈负刚度效应,这与 VED 的滞回曲线有显著区别。



(a) 实物图



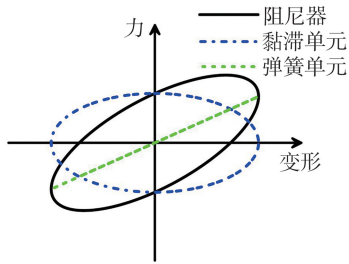
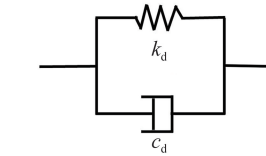
(b) 工作原理图



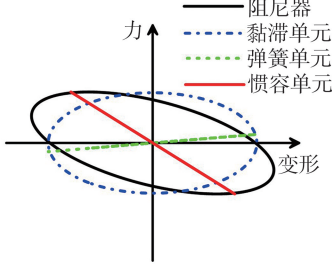
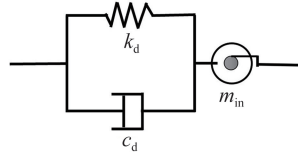
(c) 力学模型图

图1 滚珠丝杠型惯容

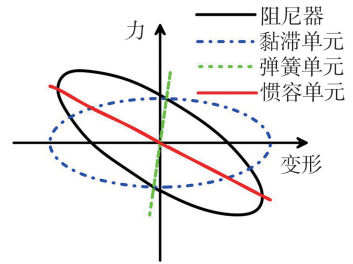
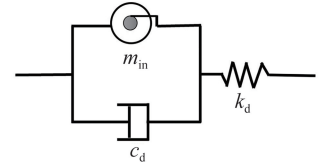
Fig. 1 Ball-screw inerter



(a) VED



(b) TID



(c) TVMD

图2 3种阻尼器的力学模型和滞回曲线

Fig. 2 Mechanical models and hysteresis curves of three types of dampers

1.2 耦合相邻结构的动力方程

将相邻多层结构简化为集中质量层剪切模型,考虑 VED、TID 和 TVMD 这 3 种阻尼器,其力学模型见图 3。3 种阻尼器可表示为黏滞单元(黏滞系数 c_d)、弹簧单元(刚度 k_d)和惯容单元(惯质系数 m_{in})的不同组合,3 种阻尼器的阻尼力如式(3)所示:

$$F_d = \begin{cases} k_d(u_R - u_L) + c_d(\dot{u}_R - \dot{u}_L) & \text{(VED)} \\ c_d(\dot{u}_d - \dot{u}_L) + k_d(u_d - u_L) = m_{in}(\ddot{u}_R - \ddot{u}_d) & \text{(TID)} \\ m_{in}(\ddot{u}_d - \ddot{u}_L) + c_d(\dot{u}_d - \dot{u}_L) = k_d(u_R - u_d) & \text{(TVMD)} \end{cases} \quad (3)$$

地震激励下耦合体系的运动方程如式(4)所示^[20]:

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = L_d F_d - M I_g \ddot{u}_g \quad (4)$$

式中: $M = \begin{bmatrix} M_L & O \\ O & M_R \end{bmatrix}$; $C = \begin{bmatrix} C_L & O \\ O & C_R \end{bmatrix}$; $K = \begin{bmatrix} K_L & O \\ O & K_R \end{bmatrix}$; $u = [u_L \ u_R]^T$ 。 M_L 和 M_R 、 C_L 和 C_R 、 K_L 和 K_R 分别为左、右两结构的质量矩阵、固有阻尼系数矩阵和刚度矩阵,下标 L 和 R 分别为左侧和右侧结构。 u_L 、 u_R 分别为两结构相对地面的位移; \ddot{u}_g 为地面加速度; O 为零矩阵。柔性结构的自由度数为 l ,刚性结构的自由度数为 r ,两结构自由度总数为 n 。此外, L_d 如式(5)所示:

$$L_d = \text{diag}(l_d); l_d = \begin{cases} 1, & i \leq r \\ 0, & r < i \leq l \\ -1, & l < i \leq n \end{cases} \quad (5)$$

定义相邻结构的状态向量为

$$z_a = [u \ \dot{u}]^T \quad (6)$$

输出向量设置为相邻结构各自的位移、速度和加速度:

$$y_a = [u \ \dot{u} \ \ddot{u}]^T \quad (7)$$

结合式(6)和式(7)可得状态空间方程为

$$\begin{cases} \dot{z}_a = A_a z_a + B_{a1} \ddot{u}_g + B_{a2} F_d \\ y_a = C_a z_a + D_{a1} \ddot{u}_g + D_{a2} F_d \end{cases} \quad (8)$$

式中: $A_a = \begin{bmatrix} O & I \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{bmatrix}$; $B_{a1} = \begin{bmatrix} O \\ -I_g \end{bmatrix}$; $B_{a2} = \begin{bmatrix} O \\ -M^{-1}L_d \end{bmatrix}$; $C_a = \begin{bmatrix} I & O \\ O & I \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{bmatrix}$; $D_{a1} = \begin{bmatrix} O \\ O \\ -I_g \end{bmatrix}$;

$D_{a2} = \begin{bmatrix} O \\ O \\ -M^{-1}L_d \end{bmatrix}$; I 为单位矩阵; I_g 为地震动的位置矩阵。

采用结构的均方响应来评价控制装置的减震效果^[19], z_a 的均方矩阵表示为

$$\Gamma_{z_a} = E[z_a z_a^T] \tag{9}$$

由于采用了零均值的白噪声激励,故系统响应不受时间影响,表示响应协方差的 Lyapunov (李雅普洛夫) 方程为

$$A_a \Gamma_{z_a} + \Gamma_{z_a} A_a^T + B_a 2\pi S_0 B_a^T = 0 \tag{10}$$

由此得到结构输出响应的均方矩阵为

$$\sigma = \sqrt{C_a \Gamma_{z_a} C_a^T} \tag{11}$$

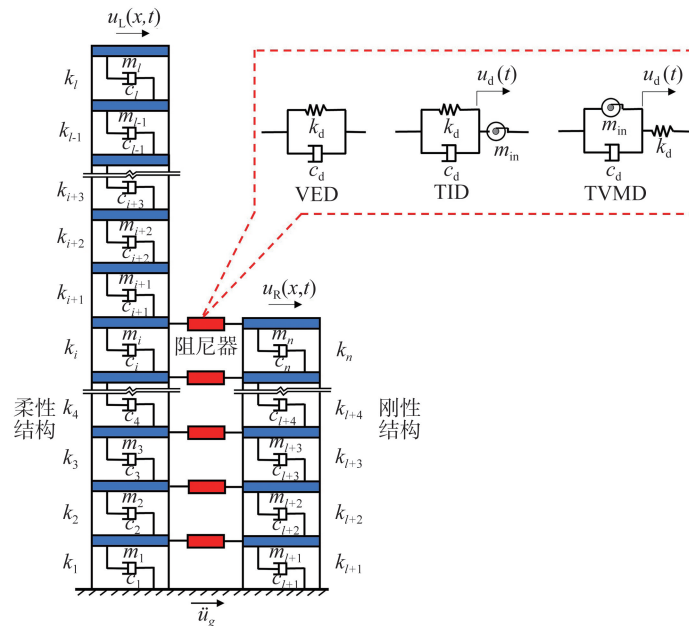


图 3 通过阻尼器连接的相邻多层结构的简化模型

Fig. 3 Simplified model of adjacent multi-story structures connected by dampers

2 阻尼器的参数优化分析

2.1 性能指标的设定

为了描述阻尼器对相邻结构动力响应的影响,引入 3 个无量纲参数,即惯性质量比 μ_{in} 、阻尼系数比 λ_d 和弹簧刚度比 κ_d ,分别定义为

$$\mu_{in} = \frac{m_{in}}{m_1} \tag{12a}$$

$$\lambda_d = \frac{c_d}{c_1} \tag{12b}$$

$$\kappa_d = \frac{k_d}{k_1} \tag{12c}$$

式中: m_1 、 c_1 和 k_1 分别为柔性结构的层质量、阻尼系数和抗侧刚度。

为了定量评估控制效果,将安装阻尼器的控制结构与无控结构的均方响应的比值定义为控制比,控制比越小代表控制效果越好。选取位移和加速度作为控制目标,定义第 i 层位移控制比 $R_{d,i}$ 和加速度控制比 $R_{a,i}$ 分别为

$$R_{d,i}(\mu_{in}, \lambda_d, \kappa_d) = \frac{\sigma_{d,i}}{\sigma_{d0,i}} \quad (13a)$$

$$R_{a,i}(\mu_{in}, \lambda_d, \kappa_d) = \frac{\sigma_{a,i}}{\sigma_{a0,i}} \quad (13b)$$

式中: $\sigma_{d0,i}$ 和 $\sigma_{d,i}$ 分别为无控结构和控制结构的第 i 层位移的均方根; $\sigma_{a0,i}$ 和 $\sigma_{a,i}$ 分别为对应的加速度均方根。

2.2 优化策略

当存在多个性能指标时,不同的性能目标之间通常存在冲突,很难获得全局最优解。因此,有必要根据各性能指标的重要性制定合理的控制策略。一般可先选出拟进行最优控制的性能目标,对其他指标设定限值,再通过计算实现选定目标的最优控制。

本文将柔性结构的响应作为控制目标,其综合减震性能目标函数如式(14)和式(15)所示:

$$J_d: \begin{cases} \text{Minimizing } R_{d,L} \\ \text{Subject to } (R_{d,R}, R_{a,L}, R_{a,R}) \leq R_{lim} \end{cases} \quad (14)$$

$$J_a: \begin{cases} \text{Minimizing } R_{a,L} \\ \text{Subject to } (R_{d,L}, R_{d,R}, R_{a,R}) \leq R_{lim} \end{cases} \quad (15)$$

式中: J_d 和 J_a 分别为针对位移和加速度的优化策略; R_{lim} 为其他响应指标的控制比的限值。

本文分别以柔性结构顶层位移控制比 $R_{d,L}$ 和绝对加速度控制比 $R_{a,L}$ 作为优化目标,取 $R_{lim} = 1$ 。全局优化求解器的参数约束范围设定如下: 惯质比 μ_{in} 为 0.1~10, 阻尼系数比 λ_d 为 0.1~10, 刚度比 κ_d 为 0.001~1。

2.3 全楼层布置阻尼器

建立 10 层与 5 层相邻结构的分析模型(图 3), 设定 5 层结构的层质量和层刚度分别为 240 t 和 500 kN/mm, 1 阶自振周期为 0.48 s。10 层结构的层质量为 280 t; 层刚度设为变量, 位于 130 ~ 1451 kN/mm 区间, 对应的 10 层结构 1 阶自振周期 $T_{L,1}$ 为 5 层结构 1 阶周期 $T_{R,1}$ 的 1.2~3.0 倍(周期比增量为 0.2)。通过对 10 层结构设定不同的周期, 分析相邻结构周期比的影响。

考虑在相邻结构的全楼层连接, 根据式(14)、式(15)所示优化策略, 获得不同周期比下最优控制比及对应的阻尼器参数。图 4 和图 5 分别给出了 J_d 和 J_a 优化策略下的结果。在 J_d 优化策略下, 随着周期比的增加, 柔性结构顶层位移控制比降低, 即控制效果更好。这是由于随着周期比增加, 相邻结构响应差增大, 阻尼器能更充分发挥作用。总体上, TVMD 和 TID 的控制效果均优于 VED, TVMD 和 TID 所能达到的最优控制比相当。最优控制下的阻尼系数比 λ_d 随周期比的增加而逐渐增大, TID 所需的阻尼系数比最大, VED 次之, TVMD 最小。TVMD 和 TID 的惯质比 μ_{in} 随周期比增加而增大, TID 的惯质比需求大于 TVMD。

J_a 优化策略下, 柔性结构顶层加速度的控制比随周期比先降低而后增加。在周期比接近 1 时, 相邻两结构的响应差较小, 阻尼器不能充分发挥作用。随着周期比增加到 2 时, 柔性结构顶层加速度控制比最低, 此时 TID 的控制效果优于 TVMD, 且两者均优于 VED。TID 的惯质比 μ_{in} 和阻尼系数比 λ_d 均大于 TVMD。当周期比接近 3 时, 计算发现柔性结构 2 阶振型的加速度传递系数高于 1 阶振型的传递系数, 2 阶振型的贡献显著增加, 导致结构的加速度响应控制效果降低。

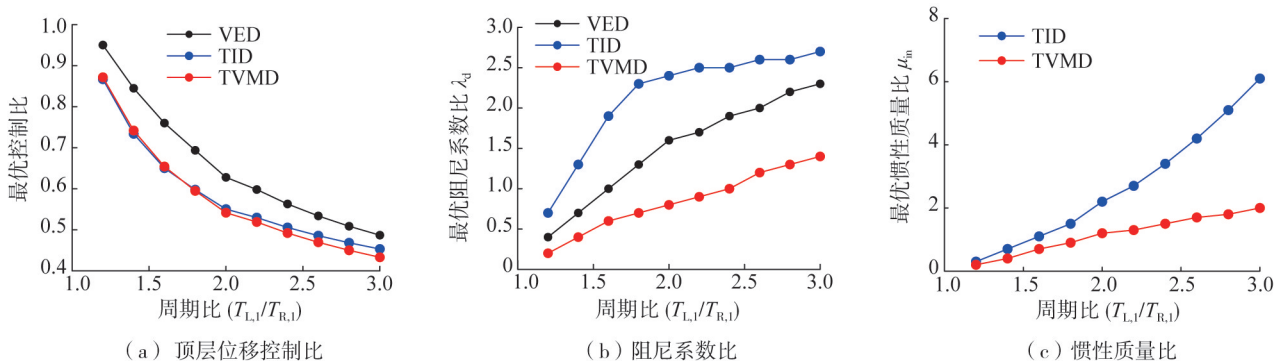


图 4 基于 J_d 策略的不同周期比下的优化结果

Fig. 4 Optimization results based on different period ratios with J_d optimization strategy

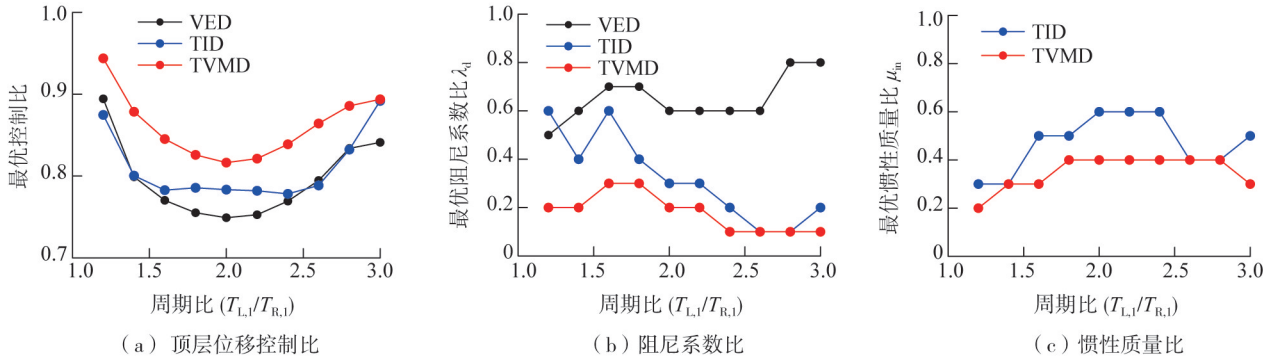


图 5 基于 J_a 策略的不同周期比下的优化结果

Fig. 5 Optimization results based on different period ratios with J_a optimization strategy

当相邻结构周期比为 2 时,在全楼层连接阻尼器,求得 3 种阻尼器的控制比及单元参数,见表 1。 J_d 优化策略下,TVMD 的控制效果最好,TID 次之,两者分别较 VED 的控制效果提升了 13.73%、12.33%。 J_a 优化策略下,TID 和 TVMD 的控制比为 0.749、0.783,较 VED 的控制比提升了 8.24%、4.04%。

表 1 相邻结构全楼层连接时的优化结果

Table 1 Optimization results for full-story arrangement scheme of adjacent structures

优化策略	位置	阻尼器	μ_{in}	λ_d	κ_d	控制比	降低率/%
J_d	第 5、4、3、2、1 层	VED	—	1.6	0.001	0.628	—
		TID	2.2	2.4	0.003	0.551	12.33
		TVMD	1.2	0.8	1.000	0.542	13.73
J_a	第 5、4、3、2、1 层	VED	—	0.6	0.001	0.816	—
		TID	0.6	0.3	0.017	0.749	8.24
		TVMD	0.4	0.2	0.022	0.783	4.04

注:“位置”中数字代表阻尼器连接的楼层,第 5、4、3、2、1 层表示第 5、4、3、2、1 层均连接阻尼器。

2.4 不同楼层布置方案的对比

已有研究表明^[4-5],全楼层连接并不一定是最优方案,有必要对不同的楼层连接方案进行对比分析。以周期比为 2 的工况为例,通过枚举分析法分别得出在 J_d 和 J_a 优化策略下,3 种阻尼器对应的最优布置方案的前 4 名,结果见表 2。

表 2 柔性结构顶层响应控制的最优布置方案

Table 2 Optimal arrangement schemes for controlling displacement of top story of flexible structure

策略	阻尼器	排序	位置	μ_{in}	ξ_d	κ_d	$R_{d,10}$	$R_{a,10}$	
J_d	VED	1	第 5 层	—	3.9	0.001	0.606	0.888	
		2	第 5、2 层	—	3.2	0.001	0.612	0.880	
		3	第 5、4 层	—	2.2	0.001	0.615	0.877	
		4	第 5、3 层	—	2.7	0.001	0.616	0.876	
	TID	1	第 5 层	—	6.1	5.8	0.001	0.537	0.868
		2	第 5、2 层	—	4.9	4.9	0.002	0.541	0.852
		3	第 5、4 层	—	3.4	3.4	0.001	0.543	0.853
		4	第 5、3 层	—	4.0	4.1	0.003	0.544	0.845
	TVMD	1	第 5 层	—	2.6	2.1	1.000	0.536	0.935
		2	第 5、2 层	—	2.3	1.7	1.000	0.537	0.909
		3	第 5、3 层	—	1.9	1.4	1.000	0.538	0.879
		4	第 5、4 层	—	1.6	1.3	1.000	0.537	0.913
J_a	VED	1	第 3 层	—	3.2	0.001	0.720	0.808	
		2	第 4、3 层	—	1.3	0.001	0.696	0.811	
		3	第 4、2 层	—	1.6	0.001	0.697	0.811	
		4	第 4 层	—	2.1	0.001	0.690	0.816	
	TID	1	第 3 层	—	2.9	2.1	0.089	0.657	0.736
		2	第 4、3 层	—	1.2	0.8	0.034	0.646	0.743
		3	第 4、2 层	—	1.4	0.8	0.040	0.652	0.743
		4	第 4 层	—	1.8	1.0	0.052	0.652	0.749
	TVMD	1	第 4 层	—	1.4	0.7	0.083	0.663	0.779
		2	第 5、4 层	—	0.6	0.3	0.034	0.655	0.779
		3	第 5 层	—	1.1	0.6	0.058	0.642	0.780
		4	第 5、4、3 层	—	0.5	0.2	0.025	0.653	0.782

对比表1和表2可知,全楼层连接阻尼器对柔性结构顶层位移和加速度的控制效果均非最优。高楼层的响应差通常较大,将阻尼器布置在高楼层时效率更高。当阻尼器只布置在第5层时,对柔性结构顶层的位移控制效果最好。将TID和VED布置在第3层或将TVMD布置在第4层时对柔性结构顶层的加速度控制效果最好。3种阻尼器的最优的4种布置方案的控制效果差距仅约1%,但所需的阻尼器参数却存在较大差距。综合对比控制效果和阻尼器的参数,推荐仅在第5层布置阻尼器作为顶层位移控制的最优方案,仅在第4层布置阻尼器作为顶层加速度控制的最优方案。

此外,对比TVMD和TID的优化结果,可以看出将TVMD布置在第5层对柔性结构顶层位移控制效果最优,TID布置在第4层时所需的惯质比和阻尼系数比均显著小于布置在第3层,虽然此时柔性结构顶层加速度控制效果并非最优,但二者的控制比差距仅约1%。考虑阻尼器参数需求以及对位移和加速度的协同控制,提出将TVMD和TID同时分别布置在第5层和第4层,通过分析验证该混合控制方案的效果。

表3对比了混合控制方案与仅在第5层(J_d 优化方案)或第4层(J_a 优化方案)布置的控制效果。采用 J_d 优化策略,混合控制对柔性结构顶层控制效果最好,TVMD和TID次之,分别较VED的位移控制比降低12.82%、11.62%、11.42%。但TVMD所需的阻尼系数比为2.1,较VED所需阻尼系数比下降了46.15%,TID和混合控制所需阻尼系数比均大于VED,分别增加了48.72%、2.56%。 J_a 优化策略下,TID对柔性结构顶层加速度控制效果最好,TVMD和混合控制的效果次之,控制比分别较VED降低了8.24%、4.53%、4.67%。同样,TVMD的阻尼系数比为0.7,TID的阻尼系数比为1.0,分别较VED降低了66.67%、52.38%,混合控制的阻尼系数比较VED增大了42.86%。

表3 混合控制与单类阻尼器控制的优化结果

Table 3 Optimization results for hybrid control scheme and single type damper scheme

策略	位置	阻尼器	μ_{in}	λ_d	κ_d
J_d	第5层	VED	—	3.9	0.001
	第5层	TID	6.1	5.8	0.001
	第5层	TVMD	2.6	2.1	1.000
	第5,4层混合	TVMD、TID	2.0、7.8	0.2、3.8	1.000、0.002
J_a	第4层	VED	—	2.1	0.001
	第4层	TID	1.8	1.0	0.052
	第4层	TVMD	1.4	0.7	0.083
	第5,4层混合	TVMD、TID	0.2、4.0	0.2、2.8	1.000、0.002

注:第5,4层混合表示在第5层和第4层分别布置TVMD和TID。

由表3可知, J_d 优化策略下,混合控制的柔性结构顶层的位移控制比和加速度控制比均低于TVMD。在 J_a 优化策略下,混合控制对柔性结构的加速度控制效果不如TID,但其位移控制比远低于TID或TVMD方案。结果表明,混合控制能更均衡地控制柔性结构的位移和加速度,更好地提升结构系统的抗震性能。

3 优化控制系统的地震响应分析

3.1 结构顶层响应对比分析

基于前述分析得到的优化布置方案,对耦联系统进行地震响应时程分析。时程分析中采用ATC-63地震动^[22],包括22条远场地震动、14条近场脉冲型地震动和14条近场非脉冲型地震动,各条地震动的加速度峰值均调幅到0.4g。

图6给出了VED、TID、TVMD和混合控制下柔性结构顶层的位移和加速度的控制比。由图可知, J_d 优化策略下,TID、TVMD和混合控制下柔性结构顶层的位移控制比相近。 J_a 优化策略下,TID对柔性结构顶层的加速度控制效果最好。不论 J_d 还是 J_a 优化策略,惯容型阻尼器的控制效果均优于VED。图7给出了全部地震动得到的结构响应的均值和方差,由于地震动的随机性,导致地震作用下的控制效果略低于理论分析得到的最优控制效果,但总体能实现理论分析得到的最优控制目标。

以RSN1602地震动为例,图8和图9展示了无控、VED、TID、TVMD和混合控制5种情况下,柔性结构顶层的位移和加速度响应的时程曲线。由图可知,TID、TVMD和混合控制下,柔性结构顶层位移和加速度均有显著降低。虽然刚性结构的峰值响应降低幅度不如柔性结构显著,但仍有一定程度的减小。总体而言,与VED相比,惯容阻尼器对相邻多层结构的控制效果更好。

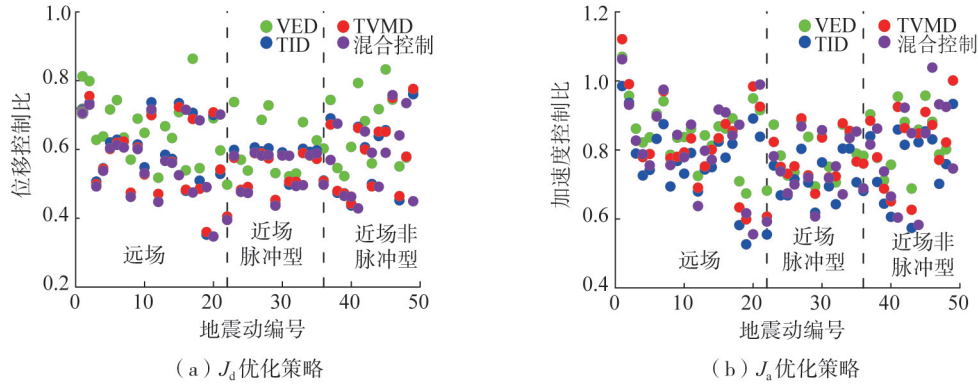


图 6 地震作用下柔性结构顶层响应

Fig. 6 Seismic response of the top story of flexible structure

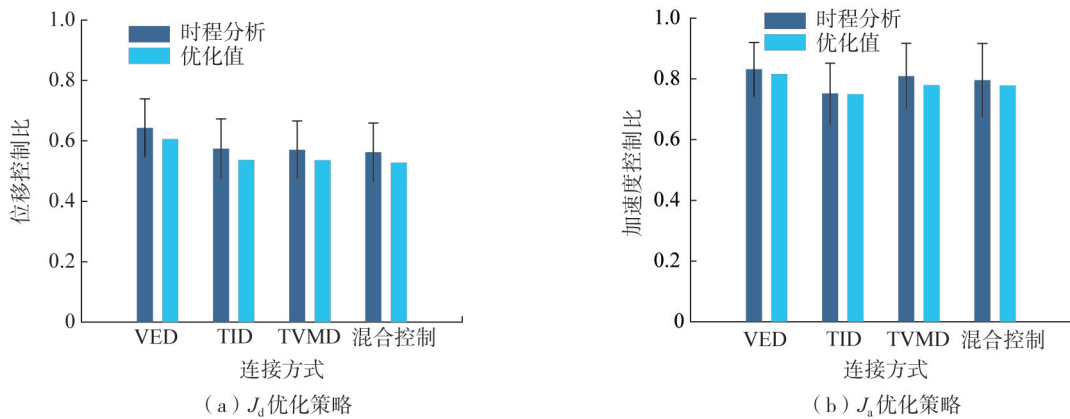


图 7 柔性结构顶层的地震响应均值与理论优化值的对比

Fig. 7 Comparison of the mean and optimized seismic responses of the top story of flexible structure

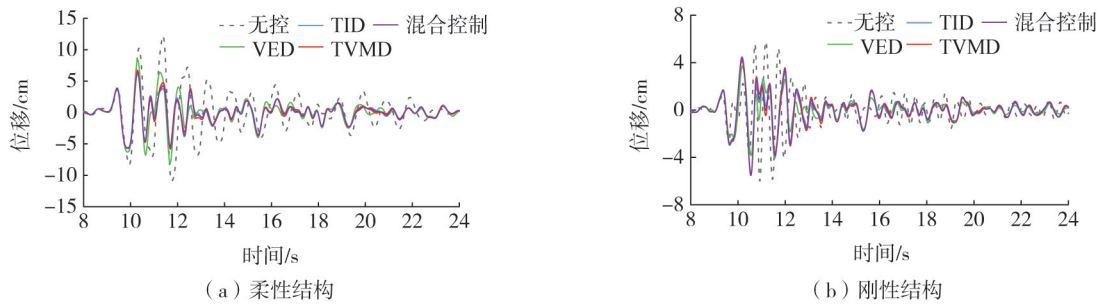


图 8 基于 Jd 优化策略的相邻结构顶层位移时程曲线

Fig. 8 Displacement time history curves of the top story of adjacent structures with Jd optimization strategy

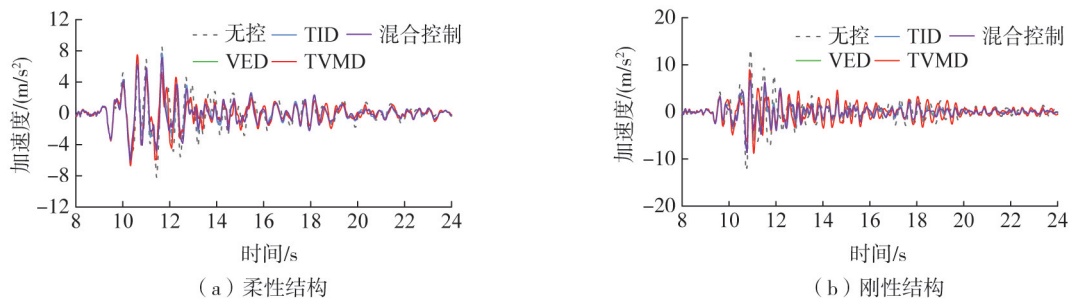


图 9 基于 Ja 优化策略的相邻结构顶层加速度时程曲线

Fig. 9 Acceleration time history curves of the top story of adjacent structures with Ja optimization strategy

3.2 全楼层响应对比分析

图 10 给出了无控、VED、TID、TVMD 和混合控制 5 种情况下,柔性结构与刚性结构在 ATC-63 地震作用下的楼层的相对位移、层间位移和最大加速度的平均值的竖向分布。由图 10(a)、(b)可知,在 Jd 优化策

略下,连接阻尼器后柔性结构各层位移均得到降低,上部楼层位移控制效果更明显。各楼层层间位移也均得到控制,低楼层的层间位移控制效果更好。相比之下,VED对刚性结构的位移控制效果优于惯容阻尼器,且刚性结构所有层的加速度均有显著降低,由于阻尼器布置在刚性结构顶层,刚性结构顶层的位移下降幅度小于第4层,从而导致刚性结构顶层的层间位移会增大。

由图10(b)、(c)、(d)可知,在 J_a 优化策略下,柔性结构和刚性结构的加速度和位移均有所减小,但位移的降低率不如 J_d 优化方案显著。与理论分析结果相同的是,混合控制相较TID和TVMD控制更能平衡柔性结构的位移和加速度,且这种效果对低楼层同样有效。此外,无论是哪种优化策略,柔性结构和刚性结构的位移和加速度响应均有明显的降低,这意味着所提出的优化策略是有效的。

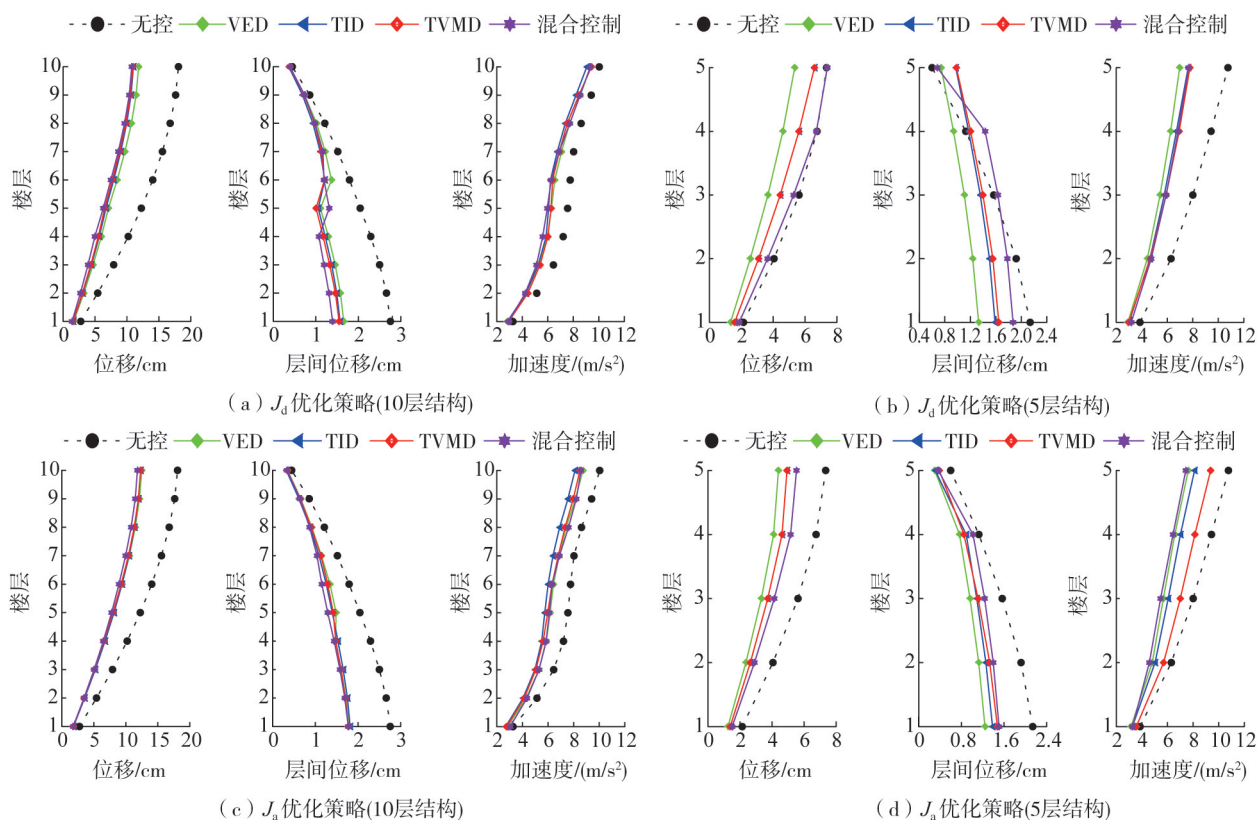


图10 控制结构的楼层响应的竖向分布对比

Fig. 10 Comparison of vertical distribution of story responses of control structures

4 结论

本研究针对不等高相邻结构系统,通过理论分析和数值计算的方式比较了VED、TID、TVMD和混合控制(TID与TVMD)4种控制方法对相邻多自由度结构的控制效果。得出以下结论:

1) 提出了以刚性结构顶层位移和加速度不增大为约束,最小化柔性结构顶层的位移或加速度的优化策略,该策略可以在2个结构的动力响应控制方面取得平衡。通过理论计算,得到了VED控制、TID控制、TVMD控制和TID/TVMD混合控制4种方案的最优控制比以及对应的参数配置。

2) 不同周期比下相邻结构的最优控制效果和控制参数存在较大差异。随着周期比的增大,柔性结构顶层位移更易实现控制;柔性结构顶层的加速度控制比随周期比呈现先降低后增加的趋势。

3) 在高楼层布置阻尼器对柔性结构的响应控制更好,位移控制和加速度控制的最优布置位置并不相同。TVMD对结构的位移控制效果较好,TID对结构加速度的控制效果较好。混合控制能较好地平衡柔性结构的位移和加速度,但所需的参数较TID和TVMD单独控制会有所增加。总体而言,惯容阻尼器对柔性结构的控制效果优于VED。

4) 以柔性结构顶层响应为目标获得的优化方案,可以使柔性结构全楼层响应均得到不同程度降低,但刚性结构部分楼层的层间位移可能增加。

参考文献:

- [1] MAISON B F, KASAI K. Dynamics of pounding when two buildings collide[J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 1992, 21(9): 771-786.
- [2] 朱宏平, 梁露. 两相邻结构地震响应被动优化控制的比较研究[J]. *工程力学*, 2005, 22(增刊1): 183-187.
ZHU Hongping, LIANG Lu. Comparative study of passive optimum control for reducing seismic responses of adjacent structures[J]. *Engineering Mechanics*, 2005, 22(Sup. 1): 183-187. (in Chinese)
- [3] 吴巧云, 朱宏平, 陈楚龙. 连接 Maxwell 模型的两相邻结构非线性地震反应分析[J]. *工程力学*, 2015, 32(9): 149-157.
WU Qiaoyun, ZHU Hongping, CHEN Chulong. Nonlinear seismic response analysis of two adjacent structures connected using the Maxwell model[J]. *Engineering Mechanics*, 2015, 32(9): 149-157. (in Chinese)
- [4] 吴巧云, 朱宏平, 陈旭勇. 基于性能的相邻结构间 Maxwell 阻尼器优化布置研究[J]. *振动与冲击*, 2017, 36(9): 35-44.
WU Qiaoyun, ZHU Hongping, CHEN Xuyong. Performance-based optimal arrangement of Maxwell dampers between two adjacent structures[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2017, 36(9): 35-44. (in Chinese)
- [5] 刘绍峰, 施卫星. 相邻结构连接阻尼器的最优设计参数[J]. *地震工程与工程振动*, 2007, 27(5): 166-172.
LIU Shaofeng, SHI Weixing. Optimal design parameters of adjacent structures linked by damper[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Dynamics*, 2007, 27(5): 166-172. (in Chinese)
- [6] 孙黄胜, 陈士海, 施卫星. 黏滞阻尼器连接相邻结构减震优化分析[J]. *世界地震工程*, 2010, 26(1): 207-211.
SUN Huangsheng, CHEN Shihai, SHI Weixing. Optimal design of viscous dampers connecting adjacent structures[J]. *World Earthquake Engineering*, 2010, 26(1): 207-211. (in Chinese)
- [7] 刘良坤, 谭平, 闫维明, 等. 三相邻结构的减震效果分析[J]. *振动与冲击*, 2017, 36(15): 9-15, 28.
LIU Liangkun, TAN Ping, YAN Weiming, et al. Aseismic control effect analysis for three adjacent structures[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2017, 36(15): 9-15, 28. (in Chinese)
- [8] 陈超起, 裴星洙. 附加位移和速度相关型阻尼器的相邻结构减震性能研究[J]. *建筑科学*, 2018, 34(7): 29-34.
CHEN Chaoqi, PEI Xingzhu. Seismic vibration control performance analysis of adjacent structures with displacement-related dampers and velocity-related dampers[J]. *Building Science*, 2018, 34(7): 29-34. (in Chinese)
- [9] 李创第, 杨雪峰, 李宇翔, 等. 组合体结构随机地震响应的简明解法[J]. *地震工程与工程振动*, 2023, 43(1): 24-33.
LI Chuangdi, YANG Xuefeng, LI Yuxiang, et al. Concise solution for the stochastic ground motion response of composite structures[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Dynamics*, 2023, 43(1): 24-33. (in Chinese)
- [10] 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. (in Chinese)
- [11] MA R S, BI K M, HAO H. Inerter-based structural vibration control: A state-of-the-art review[J]. *Engineering Structures*, 2021, 243: 112655.
- [12] 潘超, 刘媛, 张瑞甫, 等. 惯容减震系统性能成本控制解析设计方法[J]. *建筑结构学报*, 2022, 43(11): 107-116.
PAN Chao, LIU Yuan, ZHANG Ruifu, et al. Performance-cost design method of inerter system based on closed-form formulae[J]. *Journal of Building Structures*, 2022, 43(11): 107-116. (in Chinese)
- [13] 谢丽宇, 班鑫磊, 康建飞, 等. 基于模态参与消减的直连拉索连接惯容系统的简易算法[J]. *地震工程与工程振动*, 2022, 42(6): 104-113.
XIE Liyu, BAN Xinlei, KANG Jianfei, et al. Study on a simple design method for direct connected cable inerter system based on modal participation cancellation[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Dynamics*, 2022, 42(6): 104-113. (in Chinese)
- [14] 鲁正, 周超杰, 陈芸菲. 双调谐颗粒惯容系统的减震控制研究[J]. *地震工程与工程振动*, 2022, 42(6): 35-43.
LU Zheng, ZHOU Chaojie, CHEN Yunfei. Study on vibration control of double-tuned particle inerter system[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Dynamics*, 2022, 42(6): 35-43. (in Chinese)
- [15] 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.
- [16] BASILI M, DE ANGELIS M, PIETROSANTI D. Modal analysis and dynamic response of two adjacent single-degree-of-freedom systems linked by spring-dashpot-inerter elements[J]. *Engineering Structures*, 2018, 174: 736-752.
- [17] BASILI M, DE ANGELIS M, PIETROSANTI D. Defective two adjacent single degree of freedom systems linked by spring-dashpot-inerter for vibration control[J]. *Engineering Structures*, 2019, 188: 480-492.
- [18] DE DOMENICO D, QIAO H S, WANG Q H, 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 and Special Buildings*, 2020, 29(14): e1781.
- [19] WANG Q H, QIAO H S, 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.
- [20] LU L, XU J Q, ZHOU Y, et al. Viscous inertial mass damper (VIMD) for seismic responses control of the coupled adjacent buildings[J]. *Engineering Structures*, 2021, 233: 111876.
- [21] SONG J, BI K M, XU K, et al. Seismic responses of adjacent bridge structures coupled by tuned inerter damper[J]. *Engineering Structures*, 2021, 243: 112654.
- [22] KIRCHER C A, HEINTZ J A. Overview and key concepts of the ATC-63 methodology[C]//*Proceeding of 2008 ASCE-SEI Structures Congress, Vancouver, B. C., 2008: 1-10.*