

# 惯容-负刚度-阻尼伸臂体系减震性能增效研究

汪志昊<sup>1,2</sup>, 周宇翔<sup>1,2</sup>, 张静雯<sup>1,2</sup>, 程志鹏<sup>1,2</sup>

(1. 华北水利水电大学土木与交通学院, 河南 郑州 450045;

2. 河南省结构振动控制与健康监测工程技术研究中心, 河南 郑州 450045)

**摘要:** 为提升传统阻尼伸臂(CDO)体系的减震效果,基于惯容-刚度-阻尼三元被动减振理论,开展了惯容-负刚度-阻尼伸臂(INSO)体系减震性能增效研究。采用 Clough-Penzien 谱模型模拟平稳随机激励,利用增广状态空间建立结构-阻尼器-激励系统的运动方程;通过求解 Lyapunov 方程获得随机地震作用下结构响应的均方根值(RMS),基于结构最大有害层间位移角与加速度的多目标控制确定了 INSO 体系的最优参数;分析评估了典型实际地震作用下 INSO 体系的减震性能。结果表明:在 El-Centro 和 Kobe 地震波作用下,相比 CDO 体系,INSO 最优化体系降低了底层位移角 RMS 均值的 57.97%,以及顶层绝对加速度 RMS 均值的 36.99%,验证了多目标优化方法的有效性;相比单独引入惯容或负刚度单元,同时引入两种单元可进一步放大阻尼单元的位移,提升阻尼器耗能在地震输入能量的比值,实现 INSO 体系减震性能增效。

**关键词:** 高层建筑; 阻尼伸臂; 惯容; 负刚度; 减震性能

**中图分类号:** TU973<sup>+</sup>.31 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-4523(2024)02-0297-09

**DOI:** 10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.2024.02.012

## 引言

在超高层建筑结构中,具有良好抗侧移性能的伸臂结构体系占有重要地位<sup>[1]</sup>。然而,地震作用下结构仅设置伸臂加强层会产生刚度、内力突变,形成薄弱层<sup>[2]</sup>。针对这一问题,近年来融合消能减震技术的伸臂结构体系获得成功实践<sup>[3-6]</sup>。传统阻尼伸臂(CDO)体系在伸臂与外框架柱之间竖向安装黏滞阻尼器(VD),以充分利用两者之间相对较大的竖向变形实现耗能减震增效<sup>[7-10]</sup>。然而,外框架柱的刚度有限,CDO 体系难以达到满意的结构附加模态阻尼比<sup>[11]</sup>。

针对 CDO 体系的不足,基于负刚度控制的阻尼伸臂体系得到较快发展。研究表明:负刚度控制有助于放大阻尼器位移,实现耗能增效<sup>[12]</sup>。Wang 等<sup>[13]</sup>和 Sun 等<sup>[14]</sup>针对高层建筑在风和地震作用下的多灾害减震问题,开展了负刚度阻尼伸臂(NSDO)体系的优化设计研究。结果表明:相比于 CDO 体系,NSDO 体系能以更小的阻尼以及外框架柱刚度实现更优越的减振效果。具有负刚度效应的惯容元件的引入为阻尼器的耗能增效提供了新途径<sup>[15]</sup>,基于惯容阻尼器的伸臂(IDO)体系减震研究结果表明,惯容有效提升了伸臂体系的减震效果<sup>[16]</sup>。

受负刚度控制和惯容元件耗能增效作用的启

发, Ye 等<sup>[17]</sup>融合调谐惯容阻尼器(TID)与负刚度阻尼器(NSD)提升了 TID 对结构的减震性能; Wang 等<sup>[18]</sup>提出了一种新型调谐式惯容-负刚度阻尼器(TINSO)。与 TID 和调谐黏滞质量阻尼器(TVMD)相比, TINSO 有效降低了地震作用下结构的动力响应。

为进一步实现 CDO 体系的减震性能增效,本文基于惯容-刚度-阻尼的三元被动减振理论<sup>[19]</sup>,尝试将惯容、负刚度和阻尼单元并联组成惯容-负刚度-阻尼器(INSO)减震系统,提出了惯容-负刚度-阻尼伸臂(INSO)体系。首先,基于 Clough-Penzien 谱模型,推导增广状态空间,求解随机地震响应;然后,基于多目标优化方法确定了 INSO 体系的最优参数;最后,对比分析了 INSO 体系与 CDO, IDO 以及 NSDO 体系的减震效果,基于能量分析方法阐明了 INSO 体系的减震性能增效机理。

## 1 INSO 结构简化分析模型

INSO 结构简化分析模型如图 1 所示,核心筒结构视为均匀的 Bernoulli-Euler 梁,核心筒的抗弯刚度、单位长度质量和高度分别用  $EI$ ,  $m$  和  $H$  表示。伸臂的弯曲刚度假定为无穷大,伸臂长度为  $r$ ;伸臂安装位置为  $\alpha H$ ,其中  $\alpha$  为伸臂的位置系数,取值范围为  $0\sim 1$ ;外框架柱的轴向刚度用  $E_c A_c$  表示;伸臂

与地面之间的外框架柱等效为刚度为  $k_c = E_c A_c / (\alpha H)$  的弹簧。

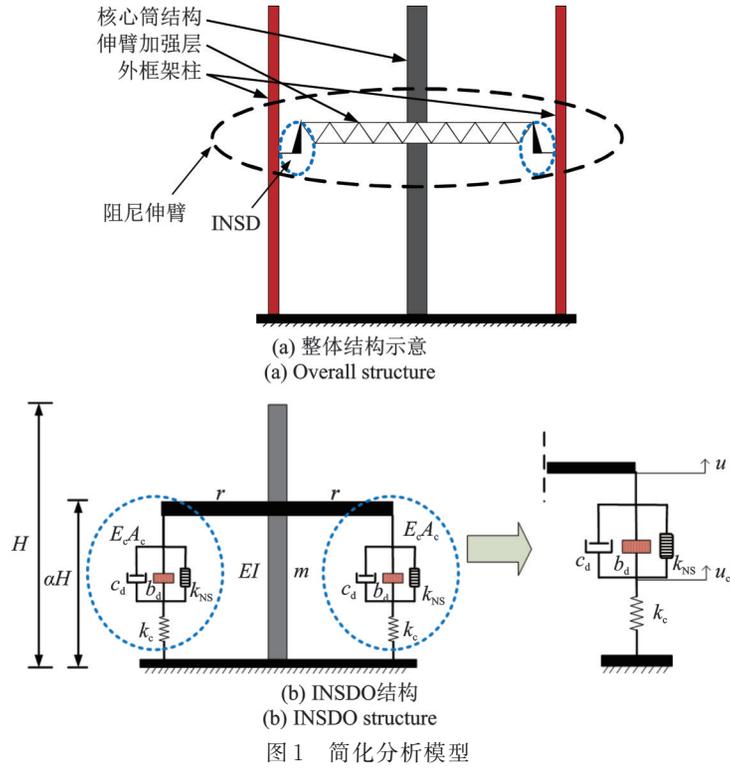


图 1 简化分析模型

Fig. 1 Simplified analysis model

INSD 结构由阻尼单元、惯容单元和负刚度单元并联而成,产生的等效力  $F_{\text{INSD}}$  可表示为:

$$F_{\text{INSD}} = c_d(\dot{u} - \dot{u}_c) + b_d(\ddot{u} - \ddot{u}_c) + k_{\text{NS}}(u - u_c) \quad (1)$$

式中  $c_d, b_d$  和  $k_{\text{NS}}$  分别表示 INSD 减震系统的黏滞阻尼系数、惯容系数和负刚度系数;  $u$  和  $u_c$  分别表示伸臂端相对于地面和外框架柱的垂直位移。

## 2 INSDO 体系地震响应分析

### 2.1 运动方程

地震作用下 INSDO 体系的动力学方程可表示为:

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = F_{\text{ext}} + f \quad (2)$$

式中  $x = [u_1 \ \theta_1 \ \dots \ u_j \ \theta_j \ \dots \ u_n \ \theta_n]^T$  为结构位移矢量,其中,  $u_j$  和  $\theta_j$  分别表示第  $j$  个节点的位移和转角,  $u_n$  和  $\theta_n$  分别表示第  $n$  个节点的位移和转角;  $F_{\text{ext}}$  为地震作用向量;  $f$  为阻尼伸臂产生的附加力向量;  $M, K$  和  $C$  分别为核心筒结构的质量、刚度和阻尼矩阵。

阻尼矩阵用 Rayleigh 阻尼矩阵构造:

$$C = a_0 M + a_1 K \quad (3)$$

式中  $\begin{Bmatrix} a_0 \\ a_1 \end{Bmatrix} = \frac{2\xi_0}{\omega_i + \omega_j} \begin{Bmatrix} \omega_i \omega_j \\ 1 \end{Bmatrix}$ , 其中,  $\xi_0$  为振型阻尼比, 本文假定为 0.02,  $\omega_i$  和  $\omega_j$  为需要关注的频率。

地震作用下单元产生的等效单元节点力为:

$$F_{ej} = \frac{-m\ddot{u}_g L_0}{12} [6 \ L_0 \ 6 \ -L_0] \quad (4)$$

式中  $\ddot{u}_g$  为地震动加速度;  $L_0$  为所划分单元的长度,  $L_0 = H/n$ , 其中  $n$  为有限单元个数。

INSDO 体系产生的附加力向量  $f_{\text{INSDO}}$  可表示为:

$$f_{\text{INSDO}} = -2\Gamma F_{\text{INSD}} r \quad (5)$$

式中  $\Gamma = [0 \ \dots \ 1 \ \dots \ 0]^T$  为 INSDO 体系安装位置向量, 矩阵中“1”为伸臂的位置。

将  $u = r\Gamma^T x$  和式(1)代入式(5)可得:

$$f_{\text{INSDO}} = -2r\Gamma [c_d(r\Gamma^T \dot{x} - \dot{u}_c) + b_d(r\Gamma^T \ddot{x} - \ddot{u}_c) + k_{\text{NS}}(r\Gamma^T x - u_c)] \quad (6)$$

INSDO 体系的运动微分方程可表示为:

$$M_r \ddot{x}_r + C_r \dot{x}_r + K_r x_r = F_{\text{ext}} \quad (7)$$

其中:

$$M_r = \begin{bmatrix} M + \Gamma 2b_d r^2 \Gamma^T & -2b_d r \Gamma \\ -2b_d r \Gamma^T & -2b_d \end{bmatrix},$$

$$C_r = \begin{bmatrix} C + \Gamma 2c_d r^2 \Gamma^T & -2c_d r \Gamma \\ -2c_d r \Gamma^T & 2c_d \end{bmatrix},$$

$$K_r = \begin{bmatrix} K + \Gamma 2k_{\text{NS}} r^2 \Gamma^T & -2k_{\text{NS}} r \Gamma \\ -2k_{\text{NS}} r \Gamma^T & 2(k_c + k_{\text{NS}}) \end{bmatrix},$$

$$x_r = \begin{pmatrix} x \\ u_c \end{pmatrix} \quad (8)$$

### 2.2 状态空间方程

结构-阻尼器-地震激励耦合系统运动方程的状态空间形式为:

$$\dot{Z}_b = A_b Z_b + B_b P_b \quad (9)$$

$$Y_b = C_b Z_b + D_b P_b \quad (10)$$

其中:

$$\begin{aligned} Z_b &= \begin{pmatrix} x_r \\ \dot{x}_r \end{pmatrix}, A_b = \begin{pmatrix} 0 & I \\ -M_r^{-1}K_r & -M_r^{-1}C_r \end{pmatrix}, \\ B_b &= \begin{pmatrix} 0 \\ M_r^{-1} \end{pmatrix}, C_b = \begin{pmatrix} I & 0 \\ -M_r^{-1}K_r & -M_r^{-1}C_r \end{pmatrix}, \\ D_b &= \begin{pmatrix} 0 \\ M_r^{-1} \end{pmatrix}, P_b = \begin{pmatrix} F_{\text{ext}} \\ 0 \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (11)$$

假定地震动输入谱模型为 Clough-Penzien 模型,其谱密度函数可表示为<sup>[20]</sup>:

$$S_{\ddot{x}_g} = S_0 \frac{\omega_g^4 + 4\xi_g^2 \omega_g^2 \omega^2}{(\omega_g^2 - \omega^2)^2 + 4\xi_g^2 \omega_g^2 \omega^2} \times \frac{\omega^4}{(\omega_f^2 - \omega^2)^2 + 4\xi_f^2 \omega_f^2 \omega^2} \quad (12)$$

Clough-Penzien 谱模型的滤波方程为:

$$\ddot{x}_g(t) + 2\xi_f \omega_f \dot{x}_g(t) + \omega_f^2 x_g(t) = -\ddot{q}_g(t) - \omega(t) \quad (13)$$

$$\ddot{q}_g(t) + 2\xi_g \omega_g \dot{q}_g(t) + \omega_g^2 q_g(t) = -\omega(t) \quad (14)$$

式中  $S_0$  为输入白噪声  $\omega$  的谱密度常数;  $\omega_g$  和  $\xi_g$  为地基土的第一滤波参数;  $\omega_f$  和  $\xi_f$  为地基土的第二滤波参数;  $\omega(t)$  为基岩的白噪声激励;  $q_g(t)$  为第一滤波器的响应;  $\ddot{x}_g(t)$  为 Clough-Penzien 谱模型的地面加速度。

定义  $Z_g = [x_g \ q_g \ \dot{x}_g \ \dot{q}_g]^T$ , 式(13)和(14)用状态空间方程表示为:

$$\dot{Z}_g = A_g Z_g + B_g \omega(t) \quad (15)$$

$$\ddot{x}_0(t) = C_g Z_g \quad (16)$$

其中:

$$A_g = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -\omega_f^2 & \omega_g^2 & -2\xi_f \omega_f & 2\xi_g \omega_g \\ 0 & -\omega_g^2 & 0 & -2\xi_g \omega_g \end{bmatrix},$$

$$B_g = [0 \ 0 \ 0 \ 1]^T,$$

$$C_g = [-\omega_f^2 \ \omega_g^2 \ -2\xi_f \omega_f \ 2\xi_g \omega_g] \quad (17)$$

定义增广状态向量  $Z_a = [Z_b^T \ Z_g^T]^T$ , 结合式(9)~(17)可得结构-阻尼器-随机激励系统的状态空间方程:

$$\dot{Z}_a = A_a Z_a + B_a \omega(t) \quad (18)$$

$$Y_a = C_a Z_a \quad (19)$$

其中:

$$\begin{aligned} A_a &= \begin{bmatrix} A_b & B_b C_g \\ 0 & A_g \end{bmatrix}, \\ B_a &= \begin{bmatrix} 0 \\ B_g \end{bmatrix}, C_a = [C_b \ D_b C_g] \end{aligned} \quad (20)$$

协方差矩阵  $\Gamma_{Z_a} = E[(Z_a - \mu_{Z_a})(Z_a - \mu_{Z_a})^T]$ , 其中  $E$  表示数学期望,  $\Gamma_{Z_a}$  可通过 Lyapunov 方程

求解:

$$\dot{\Gamma}_{Z_a} = A_a \Gamma_{Z_a} + \Gamma_{Z_a} A_a^T + E_w \quad (21)$$

式中  $E_w = 2\pi B_a S_0 B_a^T$  为输入激励的协方差矩阵;  $\mu_{Z_a}$  为结构响应的平均值。

结构响应的协方差矩阵  $\Gamma_{Y_a}$  可表示为:

$$\Gamma_{Y_a} = \sqrt{C_a \Gamma_{Z_a} C_a^T} \quad (22)$$

由式(22)可得平稳随机激励下 INSDO 结构响应的均方根(RMS)值。

### 3 基于随机地震响应的参数优化

简化算例模型参数取自文献[21], 如表 1 所示。Clough-Penzien 谱模型参数为  $S_0 = 4.65 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}^3$ ,  $\omega_g = 15 \text{ rad/s}$ ,  $\xi_g = 0.6$ ,  $\omega_f = 1.5 \text{ rad/s}$ ,  $\xi_f = 0.6$ <sup>[22]</sup>。

INSDO 体系及外框架柱的无量纲参数表示为:

$$\begin{aligned} c &= \frac{c_d r^2}{H \sqrt{mEI}}, \mu = \sqrt{\frac{b_d r^2}{mH^3}}, \\ \eta &= \frac{k_{NS}}{k_c}, \beta = \frac{EI}{2E_c A_c r^2} \end{aligned} \quad (23)$$

式中  $c$  为无量纲阻尼系数;  $\mu$  为无量纲惯容系数;  $\eta$  为无量纲负刚度系数;  $\beta$  为无量纲外柱刚度比。

参数的优化范围为  $c \in (0, 0.5)$ ,  $\mu \in (0, 0.1)$ ,  $\eta \in (-0.7, 0)$ ,  $a \in (0, 1)$ 。

表 1 简化算例模型参数<sup>[21]</sup>

Tab. 1 Parameters of the simplified example model<sup>[21]</sup>

| 参数                                       | 取值                    |
|--|-----------------------|
| 核心筒抗弯刚度 $EI/(\text{N}\cdot\text{m}^2)$   | $1.47 \times 10^{13}$ |
| 单位长度质量 $m/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-1})$ | $1.08 \times 10^5$    |
| 高度 $H/\text{m}$                          | 200                   |
| 伸臂长度 $r/\text{m}$                        | 15                    |
| 无量纲外柱刚度比 $\beta$                         | 3                     |
| 有限单元个数 $n$                               | 60                    |

#### 3.1 单目标优化

本文考虑两个优化目标,即最大有害层间位移角与峰值加速度,其中有害层间位移角定义为<sup>[23]</sup>:

$$\phi_{h,j} = \frac{x_j - x_{j-1}}{L_j} - \theta_{j-1} \quad (24)$$

式中  $\phi_{h,j}$  为第  $j$  层的有害层间位移角;  $x_j$  为第  $j$  层的位移;  $x_{j-1}$  为第  $j-1$  层的位移;  $L_j$  为第  $j$  层的高度;  $\theta_{j-1}$  为第  $j-1$  层的层间刚体转动位移角。

优化目标的减振率定义为:

$$J_{\text{hd}} = \frac{\max(T_{\text{hd(INSDO)}})}{\max(T_{\text{hd(BS)}})} \quad (25)$$

$$J_{\text{ta}} = \frac{\max(T_{\text{acc(INSDO)}})}{\max(T_{\text{acc(BS)}})} \quad (26)$$

式中  $T_{hd}$  和  $T_{acc}$  分别为平稳随机激励下结构的有害层间位移角和加速度响应RMS;BS代表无控结构。

INSDO体系的最优参数采用广义模式搜索法<sup>[24]</sup>确定。由表2给出的不同优化目标下INSDO体系的最优参数可知,最大有害层间位移角与绝对加速度这两个优化目标存在明显竞争关系。

表2 不同优化目标下INSDO体系的最优参数及相应的响应比值

Tab. 2 Optimal parameters and corresponding response ratios for INSDO system with different optimization objectives

| 参数       | 优化目标     |          |
|----------|----------|----------|
|          | 有害层间位移角  | 加速度      |
| $c$      | 0.00169  | 0.00401  |
| $\mu$    | 0.00974  | 0.00718  |
| $\eta$   | -0.69995 | -0.69922 |
| $\alpha$ | 0.9      | 0.1      |
| $R_{hd}$ | 0.2568   | 0.8515   |
| $R_{ta}$ | 0.6195   | 0.4253   |

注: $R_{hd}$ 和 $R_{ta}$ 分别为INSDO体系相对于BS体系的有害层间位移角和加速度比值。

### 3.2 多目标优化

多目标优化设计方法可以平衡两个不同优化目标之间的竞争。定义双响应目标 $J_{dual}$ 为:

$$J_{dual} = \zeta_1 J_{hd} + (1 - \zeta_1) J_{ta} \quad (27)$$

式中  $\zeta_1 \in (0, 1)$  为权重值,可根据性能需求进一步确定。本文假定两个优化目标同等重要,因此 $\zeta_1$ 取值为0.5。

表3给出了多目标优化下INSDO体系的最优参数及相应的响应比值。图2给出了基于单目标与多目标优化的INSDO结构有害层间位移角与加速度RMS包络图。综合图2和表2,3可知:相比单目标有害层间位移角优化设计,多目标优化设计在付出增大1.26%有害层间位移角的代价下,降低了4.43%加速度;相比单目标加速度优化设计,多目标优化设计在付出增大14.69%加速度的代价下,降低了58.21%有害层间位移角。可见,多目标优化方法较好地平衡了两种单目标优化设计之间的冲突。

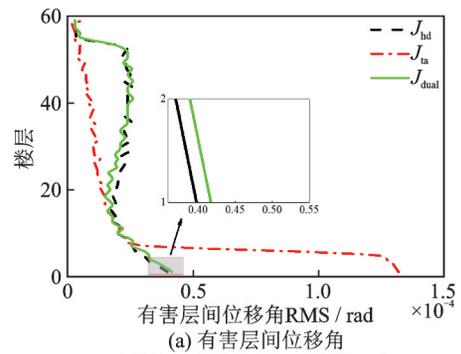
## 4 基于最优参数的INSDO体系有效性评估

CDO,IDO,NSDO和INSDO四种伸臂体系的参数如表4所示。

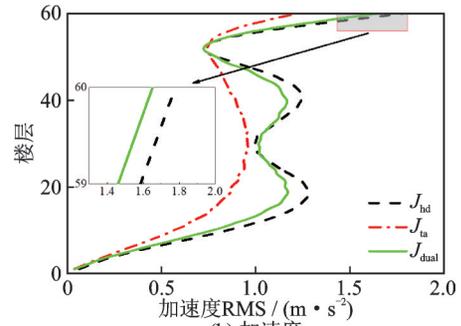
表3 多目标优化下INSDO体系的最优参数及相应的响应比值

Tab. 3 Optimal parameters and corresponding response ratios for INSDO system with multi-objective optimization

| 参数       | 取值       |
|----------|----------|
| $c$      | 0.00206  |
| $\mu$    | 0.00586  |
| $\eta$   | -0.69863 |
| $\alpha$ | 0.9      |
| $R_{hd}$ | 0.2694   |
| $R_{ta}$ | 0.5752   |



(a) Harmful inter-story drift ratio



(b) Acceleration

图2 基于单目标与多目标优化的INSDO结构响应RMS包络图

Fig. 2 RMS envelopes diagram of INSDO structure response based on single-objective and multi-objective optimization

表4 不同伸臂体系的参数

Tab. 4 Parameters for different outrigger systems

| 参数       | 伸臂体系    |         |          |          |
|----------|---------|---------|----------|----------|
|          | CDO     | IDO     | NSDO     | INSDO    |
| $c$      | 0.00206 | 0.00206 | 0.00206  | 0.00206  |
| $\mu$    | —       | 0.00586 | —        | 0.00586  |
| $\eta$   | —       | —       | -0.69863 | -0.69863 |
| $\alpha$ | 0.9     | 0.9     | 0.9      | 0.9      |

### 4.1 传递函数

由第3节可知,结构有害层间位移角峰值出现

在结构底部,而结构绝对加速度峰值出现在结构顶部。图 3 对比了四种伸臂体系的结构底层位移角与顶层加速度传递函数幅值。表 5 对比了 IDO, NSDO 和 INSDO 体系的传递函数模态幅值控制结果。综合图 3 和表 5 可知:相比 CDO, IDO 和 NSDO 体系, INSDO 体系分别降低了结构底层位移角传递函数第 1 阶模态幅值的 50.17%, 51.18% 和 0.11%, 以及结构顶层加速度传递函数第 2 阶模态幅值的 80.79%, 78.31% 和 6.92%。

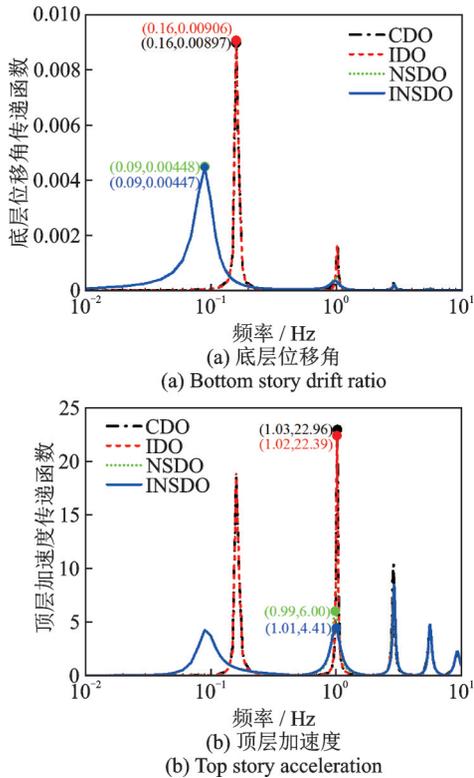


图 3 不同伸臂体系传递函数幅值对比

Fig. 3 Comparison of transfer function amplitudes for different outrigger systems

表 5 不同伸臂体系传递函数模态幅值控制结果

Tab. 5 Control results of transfer function modal amplitudes for different outrigger systems

| 传递函数幅值       | 降低幅度 $\lambda_1/\%$ |       |       |
|--------------|---------------------|-------|-------|
|              | IDO                 | NSDO  | INSDO |
| 底层位移角第 1 阶模态 | -1.01               | 50.06 | 50.17 |
| 顶层加速度第 2 阶模态 | 2.48                | 73.87 | 80.79 |

注:  $\lambda_1$  为 IDO, NSDO 和 INSDO 体系相对于 CDO 体系传递函数幅值降低的百分比。

#### 4.2 实际地震作用下结构减震效果分析

首先选取 El-Centro 和 Kobe 地震波进行分析, 加速度幅值调整为  $0.35g$ 。图 4 给出了两条地震波作用下不同伸臂体系的底层位移角时程比较。表 6 为两条地震波作用下结构底层位移角 RMS 控制结果。

实际地震作用下结构响应的 RMS 可表示为<sup>[25]</sup>:

$$a_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T_d} \int_0^{T_d} [a(t)]^2 dt} \quad (28)$$

式中  $a(t)$  为结构响应时程;  $T_d$  为地震持时。

综合图 4 和表 6 可知:相比 CDO, IDO 和 NSDO 体系, INSDO 体系分别降低了结构底层位移角 RMS 均值的 57.97%, 55.26% 和 4.32%。

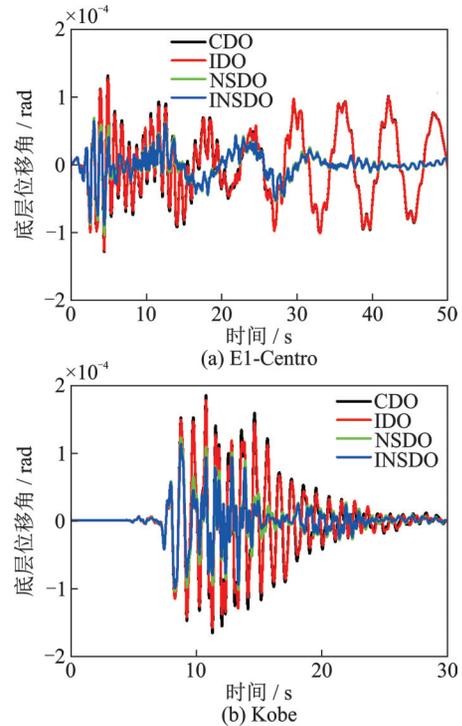


图 4 不同地震作用下各伸臂体系的底层位移角时程比较  
Fig. 4 Comparison of time-history curves of bottom story drift ratio of each outrigger system subjected to different seismic excitations

表 6 不同地震作用下结构底层位移角 RMS 控制结果

Tab. 6 Control results of structural bottom story drift ratio RMS subjected to different seismic excitations

| 地震波         | 降低幅度 $\lambda_2/\%$ |       |       |
|-------------|---------------------|-------|-------|
|             | IDO                 | NSDO  | INSDO |
| El-Centro 波 | 1.39                | 60.85 | 63.22 |
| Kobe 波      | 4.03                | 46.44 | 52.71 |
| 平均值         | 2.71                | 53.65 | 57.97 |

注:  $\lambda_2$  为 IDO, NSDO 和 INSDO 体系相对于 CDO 体系底层位移角 RMS 降低的百分比。

图 5 为两条地震波作用下 CDO, IDO, NSDO 和 INSDO 体系的顶层绝对加速度时程比较。表 7 给出了两条地震波作用下结构顶层绝对加速度 RMS 控制结果。综合图 5 和表 7 可知:相比 CDO, IDO 和 NSDO 体系, INSDO 体系分别降低了结构顶层绝对加速度 RMS 均值的 36.99%, 30.54% 和 3.11%。

由图 6 给出的不同阻尼器的阻尼力-位移滞回曲线对比结果可知:惯容和负刚度单元的同时引入

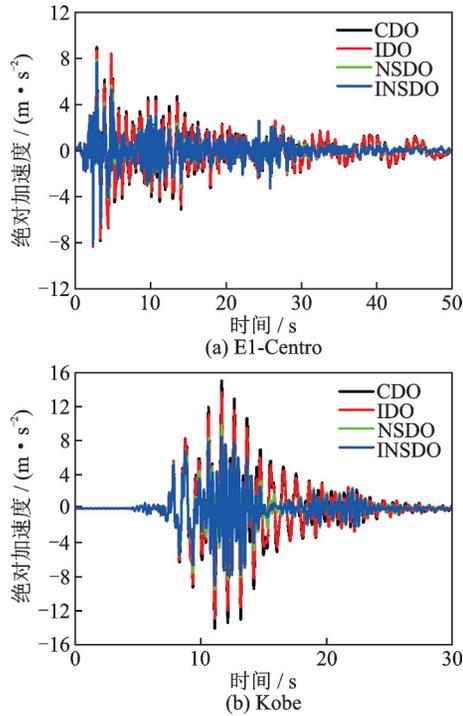


图5 不同地震作用下各伸臂体系的顶层绝对加速度时程比较  
Fig. 5 Comparison of time-history curves of top story absolute acceleration of each outrigger system subjected to different seismic excitations

表7 不同地震作用下结构顶层绝对加速度RMS控制结果  
Tab.7 Control results of structural top story absolute acceleration RMS subjected to different seismic excitations

| 地震波        | 降低幅度 $\lambda_3/\%$ |       |       |
|------------|---------------------|-------|-------|
|            | IDO                 | NSDO  | INSDO |
| E1-Centro波 | 4.65                | 34.37 | 37.13 |
| Kobe波      | 8.25                | 33.39 | 36.86 |
| 平均值        | 6.45                | 33.88 | 36.99 |

注： $\lambda_3$ 为IDO, NSDO和INSDO体系相对于CDO体系顶层绝对加速度RMS降低的百分比。

可进一步放大阻尼单元的位移,进而实现伸臂体系减震性能增效。

弹性结构动力方程可以用如下能量平衡方程表示<sup>[26]</sup>:

$$E_k + E_c + E_d + E_s = E_1 \quad (29)$$

式中  $E_k$ 为结构动能;  $E_c$ 为固有阻尼耗能;  $E_d$ 为阻尼器耗能;  $E_s$ 为弹性应变能;  $E_1$ 为地震输入能。其中,动能  $E_k$ 和弹性应变能  $E_s$ 只是相互转化。

图7给出了两条地震波作用下各伸臂体系的能量比  $E_d/E_1$ 。表8为两条地震波作用下各伸臂体系的能量比控制结果。综合图7和表8可知:相比CDO, IDO和NSDO体系, INSDO体系将能量比均值分别提高了45.88%, 39.96%和2.79%。

鉴于具有长周期、高能量特征的近断层脉冲型地震动对高层建筑的破坏程度更大<sup>[27]</sup>,为进一步评

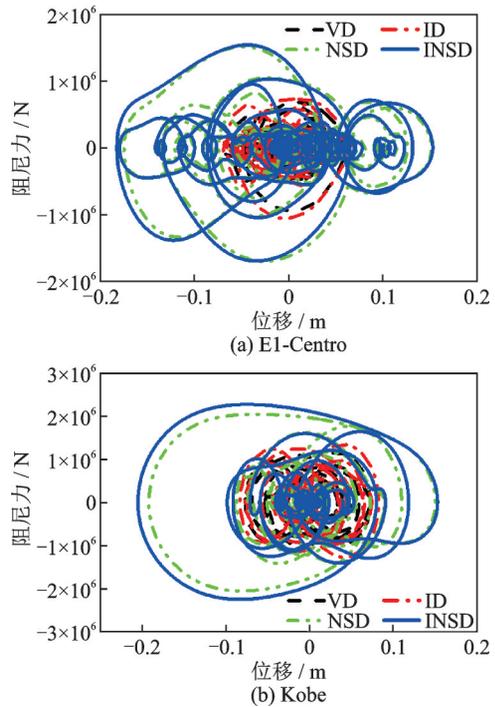


图6 不同地震作用下各阻尼器的阻尼力-位移滞回曲线对比  
Fig. 6 Comparison of damping force-displacement hysteretic curves of each damper subjected to different seismic excitations

估INSDO体系在不同地震波作用下的减震性能,从FEMA-P695中选取了28条近场地震动<sup>[28]</sup>,各条地震动的加速度谱如图8所示。

图9为28条近场地震动作用下不同伸臂体系有害层间位移角与峰值加速度的包络图。表9进一

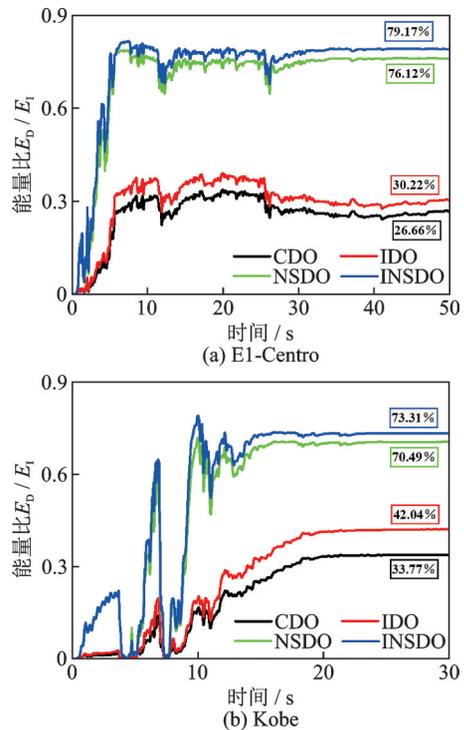


图7 不同地震作用下各伸臂体系的能量比  
Fig. 7 Energy ratios of each outrigger system subjected to different seismic excitations

表 8 不同地震作用下各伸臂体系的能量比控制结果

Tab. 8 Control results of energy ratios of each outrigger system subjected to different seismic excitations

| 地震波         | 提升幅度 $\lambda_4/\%$ |       |       |
|-------------|---------------------|-------|-------|
|             | IDO                 | NSDO  | INSDO |
| El-Centro 波 | 3.56                | 49.46 | 52.21 |
| Kobe 波      | 8.27                | 36.72 | 39.54 |
| 平均值         | 5.92                | 43.09 | 45.88 |

注:  $\lambda_4$  为 IDO, NSDO 和 INSDO 体系相对于 CDO 体系能量比提升的百分比。

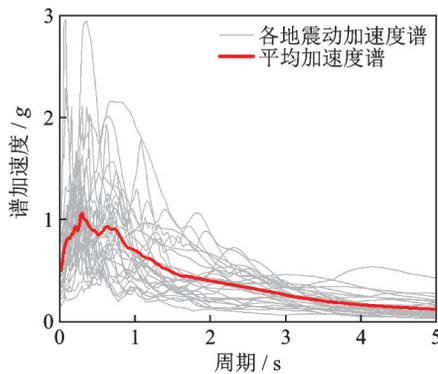
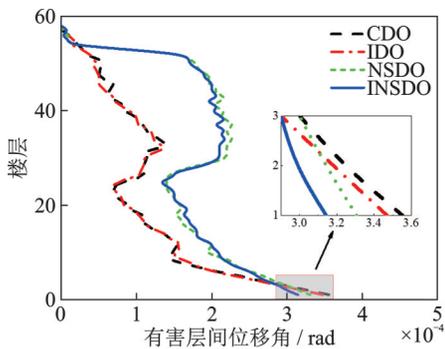


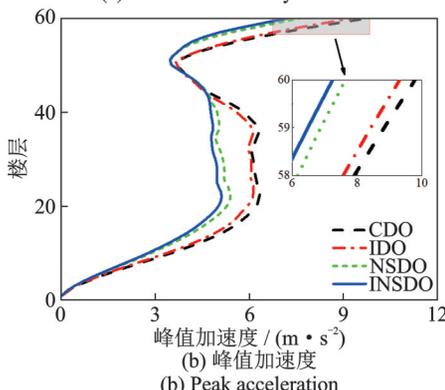
图 8 各条地震动的加速度谱

Fig. 8 Acceleration spectrum of each ground motion

步给出了 28 条近场地震动作用下不同伸臂体系的平均响应控制结果。综合图 9 和表 9 可知: 相比 CDO, IDO 和 NSDO 体系, INSDO 体系分别降低了



(a) Harmful inter-story drift ratio



(b) Peak acceleration

图 9 选定地震作用下各伸臂体系的平均响应包络图

Fig. 9 Average response envelope diagrams of each outrigger system under selected seismic excitations

表 9 选定地震作用下各伸臂体系的平均响应控制结果

Tab. 9 Control results of average response of each outrigger system under selected seismic excitations

| 结构响应      | 降低幅度 $\lambda_5/\%$ |       |       |
|-----------|---------------------|-------|-------|
|           | IDO                 | NSDO  | INSDO |
| 底层有害层间位移角 | 2.34                | 6.95  | 11.55 |
| 顶层峰值加速度   | 4.81                | 21.92 | 25.99 |

注:  $\lambda_5$  为 IDO, NSDO 和 INSDO 体系相对于 CDO 体系响应降低的百分比。

结构底层最大有害层间位移角均值的 11.55%, 9.21% 和 4.60%, 以及结构顶层峰值加速度均值的 25.99%, 21.18% 和 4.07%。

## 5 结 论

(1) 基于控制随机地震作用下结构最大有害层间位移角与加速度的多目标优化方法确定了 INSDO 体系的最优参数, 通过实际地震作用下 INSDO 体系的减震效果验证了方法的有效性。

(2) 传递函数分析结果表明: 相比 CDO, IDO 和 NSDO 体系, 基于最优参数的 INSDO 体系分别降低了结构第 1 阶模态底层位移角传递函数幅值的 50.17%, 51.18% 和 0.11%, 以及结构第 2 阶模态顶层加速度传递函数幅值的 80.79%, 78.31% 和 6.92%。

(3) 在 El-Centro 和 Kobe 地震波作用下, 相比 CDO, IDO 和 NSDO 体系, 基于最优参数的 INSDO 体系分别降低了结构底层位移角 RMS 均值的 57.97%, 55.26% 和 4.32%, 以及结构顶层绝对加速度 RMS 均值的 36.99%, 30.54% 和 3.11%。

(4) 在所选的 28 条近场地震动作用下, 相比 CDO, IDO 和 NSDO 体系, 基于最优参数的 INSDO 体系分别降低了结构底层最大有害层间位移角均值的 11.55%, 9.21% 和 4.60%, 以及结构顶层峰值加速度均值的 25.99%, 21.18% 和 4.07%。

(5) INSD 减振系统通过融合惯容单元和负刚度单元的优势, 实现了阻尼单元位移的进一步放大, 有效提升了 INSD 阻尼耗能与地震输入能量的比值, 实现了 INSDO 体系的减震性能增效。

## 参考文献:

[1] 黄信, 朱旭东, 胡雪瀛, 等. 不对称收进框架-核心筒-伸臂高层结构抗震性能分析与设计[J]. 建筑结构学报, 2020, 41(增刊 2): 349-356.  
Huang Xin, Zhu Xudong, Hu Xueying, et al. Performance-based seismic analysis and design of asymmetric vertical setback high-rise structure with frame-core tube-

- outrigger system[J]. *Journal of Building Structures*, 2020, 41(Sup2): 349-356.
- [2] 丁洁民, 王世玉, 吴宏磊. 黏滞阻尼伸臂桁架在超高层结构中的应用研究[J]. *建筑结构学报*, 2016, 37(增刊1): 48-54.  
Ding Jiemin, Wang Shiyu, Wu Honglei. Application research of viscous damping outrigger truss in super high-rise building[J]. *Journal of Building Structures*, 2016, 37(Sup1): 48-54.
- [3] 杨青顺, 甄伟, 陆新征, 等. 带端部阻尼器伸臂桁架的抗震性能试验研究[J]. *工程力学*, 2018, 35(2): 47-58.  
Yang Qingshun, Zhen Wen, Lu Xinzhen, et al. Experimental study on the seismic performance of damped outriggers[J]. *Engineering Mechanics*, 2018, 35(2): 47-58.
- [4] 解琳琳, 陈越, 李爱群, 等. 防屈曲可更换伸臂桁架弦杆抗震性能试验研究[J]. *工程力学*, 2022, 39(3): 96-103.  
Xie Linlin, Chen Yue, Li Aiqun, et al. Experimental research on seismic performance of buckling restrained replaceable chord in outrigger[J]. *Engineering Mechanics*, 2022, 39(3): 96-103.
- [5] 朱亚宁, 林楷奇, 蒋庆, 等. 牺牲-耗能型伸臂桁架的设计和试验研究[J]. *工程力学*, 2019, 36(2): 104-113.  
Zhu Yaning, Lin Kaiqi, Jiang Qing, et al. Design and experimental study of a sacrificial-energy dissipation outrigger[J]. *Engineering Mechanics*, 2019, 36(2): 104-113.
- [6] 周颖, 李宏拙, 邢丽丽. 混合控制消能减震伸臂桁架上海中心抗震性能研究[J]. *振动与冲击*, 2016, 35(21): 188-195.  
Zhou Ying, Li Hongmiao, Xing Lili. Aseismic performance of Shanghai center with hybrid control energy dissipation outriggers[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2016, 35(21): 188-195.
- [7] Smith R J, Willford M R. The damped outrigger concept for tall buildings[J]. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 2007, 16(4): 501-517.
- [8] 薛建阳, 罗峥, 隋葵, 等. 位移放大大型黏滞阻尼伸臂桁架减震效果及动力试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2022, 43(7): 21-31.  
Xue Jianyang, Luo Zheng, Sui Yan, et al. Seismic mitigation effect and dynamic test study of displacement-amplified viscously-damped outrigger[J]. *Journal of Building Structures*, 2022, 43(7): 21-31.
- [9] 汪志昊, 陈政清. 高层建筑加强层粘滞阻尼系统的优化分析[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2010, 37(9): 7-11.  
Wang Zhihao, Chen Zhengqing. Optimization analysis of the outrigger damping system for high-rise building[J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2010, 37(9): 7-11.
- [10] 谭平, 方创杰, 王磊, 等. 新型消能伸臂体系的动力可靠度[J]. *西南交通大学学报*, 2014, 49(1): 33-38.  
Tan Ping, Fang Chuangjie, Wang Lei. Dynamic reliability of novel damped outrigger system[J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2014, 49(1): 33-38.
- [11] Wang M, Nagarajaiah S, Sun F F, et al. Dynamic characteristics and responses of damped outrigger tall buildings using negative stiffness[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2020, 146(12): 04020273.
- [12] 方国威, 孙天威, 彭凌云, 等. 具有负刚度特征的半周摩擦阻尼装置的开发及应用研究[J]. *振动工程学报*, 2021, 34(2): 347-356.  
Fang Guowei, Sun Tianwei, Peng Lingyun, et al. Development and application of half-cycle friction damping device with negative stiffness characteristic[J]. *Journal of Vibration Engineering*, 2021, 34(2): 347-356.
- [13] Wang M, Nagarajaiah S, Sun F F. Optimal design of supplemental negative stiffness damped outrigger system for high-rise buildings resisting multi-hazard of winds and earthquakes[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2021, 218: 104761.
- [14] Sun F F, Wang M, Nagarajaiah S, et al. Multi-objective optimal design and seismic performance of negative stiffness damped outrigger structures considering damping cost[J]. *Engineering Structures*, 2021, 229: 111615.
- [15] 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.
- [16] 刘良坤, 潘兆东, 谭平, 等. 旋转惯容阻尼伸臂控制体系减震性能研究[J]. *建筑结构学报*, 2021, 42(2): 37-45.  
Liu Liangkun, Pan Zhaodong, Tan Ping, et al. Research on damping performance of damped outrigger control system with rotation inertia damper[J]. *Journal of Building Structures*, 2021, 42(2): 37-45.
- [17] Ye K, Nyangi P. H<sub>∞</sub> optimization of tuned inerter damper with negative stiffness device subjected to support excitation[J]. *Shock and Vibration*, 2020, 2020(5): 7608078.
- [18] Wang H, Gao H, Li J, et al. Optimum design and performance evaluation of the tuned inerter-negative-stiffness damper for seismic protection of single-degree-of-freedom structures[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2021, 212: 106805.
- [19] 陈政清. 三元被动减振理论与它的一种实现方式——电涡流轴向阻尼器[M]. 北京: 高等教育出版社, 2016: 40.  
Chen Zhengqing. The Theory of Ternary Passive Vibration Reduction and Its Realization-Eddy Current Axial Damper[M]. Beijing: Higher Education Press, 2016: 40.

- [20] Wen Y K, Gomez F, Li D X, et al. Generalized optimal design of multiple tuned inerter dampers for control of MDOF structures under stochastic seismic excitation [J]. *Structural Control and Health Monitoring*, 2022, 29(1): e2853.
- [21] 刘裕禄, 魏树利, 王建. 设置消能伸臂的高层建筑结构地震反应控制研究[J]. *建筑结构学报*, 2020, 41(增刊2): 86-95.  
Liu Yulu, Wei Shuli, Wang Jian. Study on seismic response control of high-rise building structures with damped-outrigger system[J]. *Journal of Building Structures*, 2020, 41(Sup2): 86-95.
- [22] 刘良坤, 潘兆东, 谭平, 等. 消能伸臂体系简化算法及控制效果研究[J]. *振动工程学报*, 2020, 33(6): 1131-1140.  
Liu Liangkun, Pan Zhaodong, Tan Ping, et al. The simplified algorithm and control effects of the damped outriggers system[J]. *Journal of Vibration Engineering*, 2020, 33(6): 1131-1140.
- [23] Fang C J, Spencer B F Jr, Xu J Q, et al. Optimization of damped outrigger systems subject to stochastic excitation[J]. *Engineering Structures*, 2019, 191: 280-291.
- [24] Xu J Q, Spencer B F Jr, Lu X L, et al. Optimization of structures subject to stochastic dynamic loading[J]. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 2017, 32(8): 657-673.
- [25] 韩建平, 周伟. 基于汶川地震记录的地震动强度指标与 SDOF 体系响应的相关性[J]. *土木工程学报*, 2010, 43(增刊1): 10-15.  
Han Jianping, Zhou Wei. Correlation between ground motion intensity indices and SDOF system responses based on the data of Wenchuan earthquake [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2010, 43(Sup1): 10-15.
- [26] Morales-Beltran M, Turan G, Yildirim U, et al. Distribution of strong earthquake input energy in tall buildings equipped with damped outriggers [J]. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 2018, 27(8): e1463.
- [27] 江义, 杨迪雄, 李刚. 近断层地震动向前方向性效应和滑冲效应对高层钢结构地震反应的影响[J]. *建筑结构学报*, 2010, 31(9): 103-110.  
Jiang Yi, Yang Dixiong, Li Gang. Effects of forward directivity and fling step of near-fault ground motions on seismic responses of high-rise steel structure[J]. *Journal of Building Structures*, 2010, 31(9): 103-110.
- [28] Heintz J A. FEMA P-695 quantification of building seismic performance factors[R]. Washington D. C.: Federal Emergency Management Agency, 2009.

## Seismic mitigation enhancement of damped outrigger system based on inerter and negative stiffness

WANG Zhi-hao<sup>1,2</sup>, ZHOU Yu-xiang<sup>1,2</sup>, ZHANG Jing-wen<sup>1,2</sup>, CHENG Zhi-Peng<sup>1,2</sup>

(1. School of Civil Engineering and Communication, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450045, China; 2. Engineering Technology Research Center for Structural Vibration Control and Health Monitoring of Henan Province, Zhengzhou 450045, China)

**Abstract:** To enhance the seismic mitigation performance of conventional damped outrigger (CDO) system, this study investigates the seismic performance improvement of inerter-negative stiffness damped outrigger (INSDO) system, which is based on the three-element passive mitigation system consisted of inerter, stiffness and damper. The Clough-Penzien spectrum model is adopted to simulate stationary stochastic seismic excitation, and the motion equations of the structure-damper-excitation system are then expressed utilizing augmented state space method. The root-mean-square (RMS) of the structural response under stochastic excitation is calculated via the solution of Lyapunov equation, and optimal parameters of INSDO system are determined by multi-objective optimization method based on maximum harmful inter-story drift and acceleration control. The seismic performance of INSDO system under typical natural seismic records is further evaluated. Results indicate that compared with the CDO system, the optimum INSDO system can reduce the bottom average story drift RMS by 57.97% and the top average absolute acceleration RMS by 36.99% under El-Centro and Kobe excitations, which further verifies the effectiveness of multi-objective optimization method. Compared to the introduction of inerter or negative stiffness element alone, the combination of two kinds of element can further amplify the displacement of the damping element, and realize the seismic performance enhancement of INSDO system by improving the energy dissipation ratio of damper and seismic input energy.

**Key words:** tall building; damped outrigger; inerter; negative stiffness; seismic mitigation

**作者简介:** 汪志昊(1980—),男,博士,教授,博士生导师。E-mail: wangzhihao@ncwu.edu.cn。