

基于耗能增强型扭转电涡流阻尼器的相邻结构 减震优化研究

周俊^{1,2,3}, 禹争华⁴, 陈政清^{1,2,3}, 王文熙^{1,2,3†}, 韩成龙⁵, 黄豪^{1,2,3}, 华旭刚^{1,2,3}

(1. 湖南大学 桥梁工程安全与韧性全国重点实验室, 湖南长沙 410082;

2. 湖南大学 振动与冲击技术研究中心, 湖南长沙 410082;

3. 湖南大学 土木工程学院, 湖南长沙 410082;

4. 广西中交一公局平容高速公路有限公司, 广西贵港 537110;

5. 中铁建大桥工程局集团第四工程有限公司, 黑龙江哈尔滨 150096)

摘要: 城镇化的快速发展导致土地资源紧张, 易形成相邻间距较小的结构群, 在地震等动力荷载作用下可能引发相邻结构相对位移过大, 从而造成结构碰撞损伤. 本文提出了一种耗能增强型扭转电涡流阻尼器 (energy-dissipation enhanced torsional eddy current dampers, EDE-TECD) 用于相邻结构减震. 首先阐述了 EDE-TECD 的基本构造与运行机理; 基于齿轮齿条式速度放大装置, 得到 EDE-TECD 的阻尼系数估算公式; 建立了施加 EDE-TECD 的两相邻结构简化运动方程, 基于相邻结构最小阻尼比最大化优化准则, 采用数值搜索方法获取了在 EDE-TECD 连接下的两自由度相邻结构的最优惯质比和最优阻尼比, 并对最优惯质比的取值情况进行分析, 由此得到 EDE-TECD 实际应用时的最优参数设计流程; 此外, 对比相邻结构间分别连接 EDE-TECD 或线性黏滞阻尼器情况下的减震性能. 最后, 分析了结构刚度削弱对 EDE-TECD 减震性能的影响. 结果表明: 数值搜索下的最优惯质比可能存在负值; 增加惯质比并不能总是有利于提升结构的较小模态阻尼比; 在 10 组地震波测试下, 加装优化后的 EDE-TECD 能有效降低相邻结构在地震作用下的相对位移, 峰值减震率平均达到 64.79%, 比线性黏滞阻尼器高 8.42%; 在 El Alamo 地震波作用下, 结构在刚度削弱 10%~40% 时, EDE-TECD 的峰值减震率最大降幅仅为 6.29%, 结构仍能保持较好减震性能.

关键词: 振动控制; 相邻结构; 电涡流阻尼器; 参数优化; 地震响应

中图分类号: TU476.2

文献标志码: A

Optimization of vibration reduction for adjacent structures based on energy-dissipation enhanced torsional eddy current dampers

ZHOU Jun^{1,2,3}, YU Zhenghua⁴, CHEN Zhengqing^{1,2,3}, WANG Wenxi^{1,2,3†},

HAN Chenglong⁵, HUANG Hao^{1,2,3}, HUA Xugang^{1,2,3}

(1. State Key Laboratory of Bridge Engineering Safety and Resilience, Hunan University, Changsha 410082, China;

* 收稿日期: 2024-12-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52278304, 52025082), National Natural Science Foundation of China (52278304, 52025082); 湖南省科技创新计划资助项目 (2023RC3090), Hunan science and technology innovation plan (2023RC3090); 长沙市杰出创新青年培养计划资助项目 (kq2209009), Changsha Outstanding Innovative Youth Training Program (kq2209009); 湖南省交通科技项目 (202119), Hunan Provincial Transportation Science and Technology Project (202119)

作者简介: 周俊 (2001—), 男, 湖南邵阳人, 湖南大学博士研究生

† 通信联系人, E-mail: wxwang@hnu.edu.cn

2. Vibration and Shock Technology Research Center, Hunan University, Changsha 410082, China;
3. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;
4. Guangxi CCCC First Highway Bureau Pingrong Expressway Co., Ltd., Guigang 537110, China
5. The 4th Engineering Co., Ltd. of China Railway Construction Bridge Engineering Bureau Group, Harbin 150096, China)

Abstract: The rapid urbanization has led to a tightening of land resources, often resulting in structures with small spacing between adjacent buildings. Under dynamic loads such as earthquakes, this may cause excessive relative displacement between adjacent structures, potentially leading to collision-induced damage. This paper proposes an energy-dissipation enhanced torsional eddy current damper (EDE-TECD) for vibration reduction in adjacent structures. The basic structure and operational mechanism of the EDE-TECD are first explained. Based on a rack-and-pinion speed amplifying device, a damping coefficient estimation formula for the EDE-TECD is derived. A simplified motion equation for two adjacent structures with EDE-TECD applied is established, and using the optimization criterion of maximizing the minimum damping ratio between adjacent structures, a numerical search method is employed to obtain the optimal inertial mass ratio and damping ratio for the two-degree-of-freedom adjacent structure system with EDE-TECD. An analysis of the optimal inertial mass ratio is conducted, leading to a design process for the optimal parameters in the practical application of EDE-TECD. Additionally, the vibration reduction performance of adjacent structures with either EDE-TECD or linear viscous dampers is compared. Finally, the influence of structural stiffness degradation on the vibration reduction performance of EDE-TECD is studied. The results show that the optimal inertial mass ratio obtained through numerical search may be negative. Increasing inertial mass ratio does not always improve the damping ratio of the structure's lower modes. Under 10 sets of earthquake wave tests, the optimized EDE-TECD significantly reduces the relative displacement of adjacent structures under seismic action, with the peak vibration reduction rate averaging 64.79%, which is 8.42% higher than that of linear viscous dampers. And under the El Alamo earthquake wave, when the structure's stiffness is reduced by 10% to 40%, the maximum decrease in the peak damping rate of EDE-TECD is only 6.29%, and the structure can still maintain good damping performance.

Key words: vibration control; adjacent structures; eddy current damper; parameter optimization; damping performance

世界各国的城镇化进程在近几十年中取得了显著成就,然而,这一进程也导致了城市居住人口的急剧增加,使得城市土地资源愈加紧张,形成了间距较小的高层建筑物群^[1]. 这些邻近建筑物群易在地震等强动力荷载作用下,引发建筑物间较大的相对位移,存在相互碰撞的风险. 这种潜在碰撞风险不仅可能造成建筑物碰撞位置的局部损伤,严重时甚至会导致整个建筑物结构的坍塌^[2]. 对相邻建筑结构施加阻尼器,减小其相对位移是应对潜在碰撞风险的有效手段之一.

这种施加于两栋相邻结构之间的阻尼器被称为共享阻尼器. 目前,共享阻尼器主要以液体黏滞阻尼器(fluid viscous damper, FVD)和调谐质量阻尼器(tuned mass damper, TMD)等为基础^[3]. Patel等^[4]研

究了两个相邻结构之间加装以FVD为基础的共享阻尼器. 在谐波激励和真实地震激励条件下,以FVD为基础的共享阻尼器均能有效降低两栋相邻结构的独立动态响应. Abdullah等^[5]研究了在两栋相邻结构间施加共享调谐质量阻尼器(shared tuned mass damper, STMD)后对地震荷载的控制效果. 研究表明,采用STMD对相邻结构上部位移进行控制比采用两个结构单独安装TMD更有效. 但以TMD为基础的共享阻尼器,存在工作空间大的缺点;而以FVD为基础的共享阻尼器,也可能存在长期使用过程中的漏液失效风险. 这些潜在不足均会影响以TMD、FVD为基础的共享阻尼器在高层建筑结构减震领域中的应用.

近年来,电涡流阻尼器(eddy current damper,

ECD)作为一种新型的速度型阻尼器,由于其具备无机械摩擦、持久耐用和稳定性好等优点,逐渐受到关注^[6-7]. ECD主要由导体和产生磁场的磁体组成,当导体在磁场中发生相对运动时,会在导体中感应出涡流,而涡流与磁场之间的相互作用会产生洛伦兹力^[8-12],这种运作机理与FVD类似. 由于高层建筑结构大多具有速度低、质量大的特点,因此在将ECD直接应用于高层建筑结构减震时,通常需要较大的阻尼系数. 在这种情况下,配备速度放大装置^[13-14]的扭转电涡流阻尼器^[15-16](torsional eddy current damper, TECD)相较于其他类型的ECD,更适用于速度较低的高层建筑结构减震需求. 因此,本文在TECD的基础上,结合速度放大装置,提出了耗能增强型扭转电涡流阻尼器(energy-dissipation enhanced torsional eddy current damper, EDE-TECD),用于相邻结构减震. 其中,TECD主要负责产生阻尼,而速度放大装置则主要通过放大TECD的转速来增强TECD的耗能能力.

本文首先介绍了所提出的EDE-TECD的基本构造与运行机理;基于齿轮齿条式速度放大装置,提出了EDE-TECD的阻尼系数估算公式;随后,建立了安装EDE-TECD的相邻结构简化运动方程,基于最小阻尼比最大化的优化准则和数值搜索方法,得到了两自由度相邻结构在不同频率比与质量比下的最优惯质比和最优阻尼比,并对最优惯质比的取值情况进行分析,由此得到EDE-TECD实际应用时的最优参数设计流程;此外,开展了加装优化后的EDE-TECD的相邻结构减震性能分析,并与线性黏滞阻尼器进行了对比;最后,分析了结构刚度削弱对EDE-TECD减震性能的影响.

1 耗能增强型扭转电涡流阻尼器

1.1 EDE-TECD的基本构造与运行机理

本文提出的EDE-TECD主要由TECD与齿轮齿条式速度放大装置两部分组成,如图1所示. EDE-TECD可结合连廊构造进行布置,其示意如图2所示.

其中,TECD由导磁管、导体管、永磁体和磁钢架组成;速度放大装置由齿条、齿轮A、齿轮B、齿轮C、传动轴X和传动轴Y组成.

结合连廊构造进行布置的EDE-TECD在两栋相邻结构间的运行机理如下:结构a与结构b通过连廊相连,悬臂连廊一端固接于结构a,另一端通过牛腿

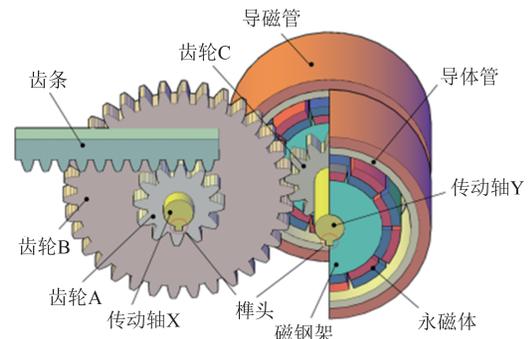


图1 EDE-TECD的基本构造

Fig.1 The basic structure of EDE-TECD

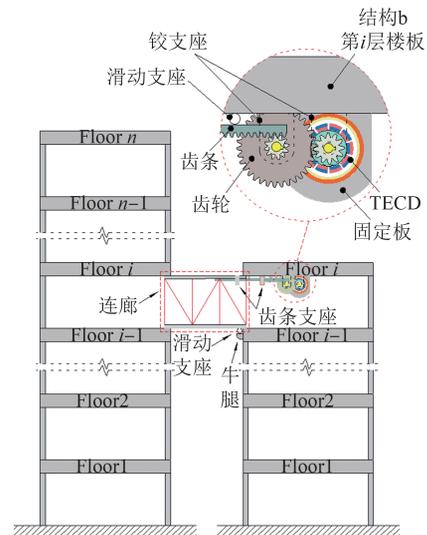


图2 EDE-TECD在两栋相邻结构间的安装示意

Fig.2 The installation diagram of EDE-TECD between two adjacent structures

和滑动支座铰支于结构b. EDE-TECD通过齿轮齿条将结构a与结构b的相对直线运动(即齿条的平动)转化为齿轮A的转动,并传递到与齿轮A相固接的传动轴X上;而传动轴X通过榫头构造又与齿轮B固接,带动齿轮B转动;齿轮B通过与齿轮C的理想啮合,带动齿轮C转动,并传递到与齿轮C相固接的传动轴Y上;而传动轴Y通过榫头构造与磁钢架固接,带动磁钢架转动. 在磁钢架转动过程中,导体管与磁场发生相对运动而产生涡流,这些涡流与永磁体产生的磁场相互作用,产生洛伦兹力(即磁阻力).

由图2可以看出,齿条铰支于滑动支座和齿条支座上;传动轴X与传动轴Y均铰支于结构b的第*i*层楼板;导磁管固接于固定板上;而固定板固接于结构b的第*i*层楼板. 此外,通过齿条支座与滑动支座的铰接,齿条只能相对齿轮A进行平动,这样确保了结构a与结构b的相对直线运动顺利转化为齿轮A

的转动。

1.2 速度放大装置的机理

TECD若直接用于控制高层建筑结构的运动,阻尼器尺寸往往较大且耗能密度小.本文采用齿轮齿条式速度放大装置,用于提升TECD的工作转速,以达到减小TECD的尺寸以及增大耗能密度的作用.齿轮齿条式速度放大装置结构简单,传力直接,如图3所示。

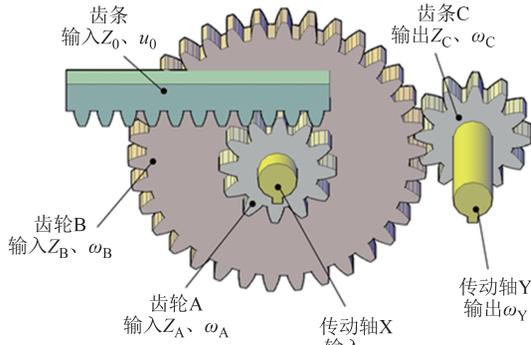


图3 速度放大装置的基本构造

Fig.3 The basic structure of velocity amplification device

图3所示的齿轮结构中,齿条的输入速度为 u_0 ,齿数为 Z_0 ;齿轮A的角速度为 ω_A ,齿数为 Z_A ;齿轮B的角速度为 ω_B ,齿数为 Z_B ;齿轮C的角速度为 ω_C ,齿数为 Z_C ;传动轴X的角速度为 ω_X ;传动轴Y的角速度为 ω_Y .其速度放大机理如下:

首先,通过齿条与齿轮A的啮合,将两相邻结构的相对直线运动转化为齿轮A的转动,可得到齿轮A转动一圈所需的时间。

$$t_1 = \frac{u_0}{Z_A \cdot d_0} \quad (1)$$

式中: t_1 为齿轮A转动一圈需要的时间; d_0 为齿条上齿的齿距。

由此,可得到齿轮A的角速度为:

$$\omega_A = \frac{2\pi}{t_1} = \frac{2\pi d_0 Z_A}{u_0} \quad (2)$$

而齿轮B与齿轮A均与传动轴X固接,故三者角速度相等,则有:

$$\omega_B = \omega_X = \omega_A = \frac{2\pi d_0 Z_A}{u_0} \quad (3)$$

接着,齿轮B与齿轮C通过理想啮合,同一时间里二者转动的齿数相等,因此

$$\omega_B Z_B = \omega_C Z_C \quad (4)$$

$$\omega_C = \frac{Z_B}{Z_C} \omega_B = \frac{2\pi d_0 Z_A Z_B}{u_0 Z_C} \quad (5)$$

最终,齿轮C与TECD均与传动轴Y固接,三者

角速度相等,可得到:

$$\omega_T = \omega_Y = \omega_C = \frac{2\pi d_0 Z_A Z_B}{u_0 Z_C} \quad (6)$$

式中: ω_T 为TECD中的角速度. TECD中的角速度 ω_T 由齿轮A的角速度 $2\pi d_0 Z_A / u_0$ 放大为 $(2\pi d_0 Z_A Z_B) / (u_0 Z_C)$,因此,可得出速度放大装置的放大系数计算公式。

$$k = \frac{\omega_T}{\omega_A} = \frac{\frac{2\pi d_0 Z_A Z_B}{u_0 Z_C}}{\frac{2\pi d_0 Z_A}{u_0}} = \frac{Z_B}{Z_C} \quad (7)$$

式中: k 为放大系数。

此外,参考华旭刚等^[16]研究中的式(13),可得到放大之后的EDE-TECD扭转阻尼系数的估算公式。

$$c_E = k \times c = 0.25\pi\sigma L t_c \frac{Z_B}{Z_C} \frac{p\alpha}{360} \cdot \left(D - 2m_T \right)^3 \left(\frac{B_{re} t_m}{\mu_m (t_m + t_a + t_c)} \right)^2 \quad (8)$$

式中: c_E 为EDE-TECD的扭转阻尼系数; c 为TECD的扭转阻尼系数; σ 为导体管的电导率; L 为TECD的长度; D 为TECD的直径; p 为永磁体个数; α 为弧形永磁体角度; m_T 为联合厚度,即为空气间隙、导体管和导磁管的总厚度; t_c 为导体管的厚度; t_a 为空气间隙的厚度; B_{re} 为剩余磁通密度; t_m 为永磁体的厚度; μ_m 为永磁体的相对磁导率。

为明确速度放大装置对EDE-TECD耗能能力的影响,图4给出了TECD与EDE-TECD的滞回曲线.其中,TECD的各项参数参考华旭刚等^[16]研究中的模型参数.表1给出了滞回曲线中EDE-TECD的各项参数。

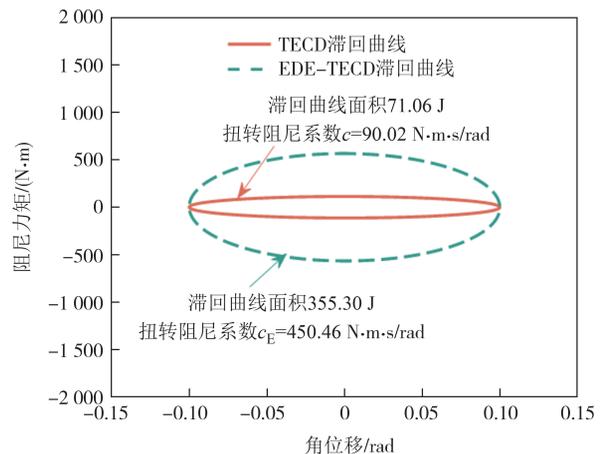


图4 TECD与EDE-TECD的滞回曲线

Fig.4 Hysteresis curves of TECD and EDE-TECD

表1 滞回曲线中EDE-TECD的各项参数

Tab.1 The parameters of EDE-TECD in the hysteresis curve

参数	符号	数值
导体管的电导率/(MS·m ⁻¹)	σ	56.7
TECD的长度/mm	L	90.0
TECD的直径/mm	D	80.0
导体管的厚度/mm	t_c	3.5
永磁体个数/个	p	20.0
弧形永磁体角度/(°)	α	16.0
联合厚度/mm	m_T	8.0
空气间隙的厚度/mm	t_a	0.5
剩余磁通密度/T	B_{re}	1.4
永磁体的厚度/mm	t_m	12.0
永磁体相对磁导率	μ_m	1.0
齿轮B齿数	Z_B	50.0
齿轮C齿数	Z_C	10.0

从图4可以看出,EDE-TECD的滞回曲线面积为355.30 J;TECD的滞回曲线面积为71.06 J.即当速度放大系数 $k=Z_B/Z_C=5$ 时,滞回曲线面积由TECD的71.06 J放大到EDE-TECD的355.30 J,由此可以说明,速度放大装置不仅可以提升TECD的转速,还可以提高其耗能能力.

2 EDE-TECD在相邻结构减震中的最优参数研究

2.1 EDE-TECD的运动方程及其数值解

物体在旋转时所表现出的惯性特性称为物体的惯质效应,该效应与物体的质量分布、形状和旋转速度有关.当EDE-TECD工作时,其内部产生的惯质效应不可忽略.因此,为简便计算,将EDE-TECD的动力学模型简化为线性黏滞阻尼器和惯质单元.此外,为便于分析,将两自由度动力学模型用弹簧振子模型表示,且忽略主结构阻尼,加装了EDE-TECD的两相邻建筑结构的简化力学模型如图5所示.可以看出,两相邻建筑结构均被单独简化成单自由度,结构a和结构b的质量分别用 m_a 和 m_b 表示,刚度分别用 k_a 和 k_b 表示,而 m_i 和 c_d 分别表示以EDE-TECD为基础的共享阻尼器的惯质系数和线性阻尼系数.线性阻尼系数 c_d 可由下式进行计算.

$$c_d = \frac{c_E}{R_A^2} \quad (9)$$

式中: c_E 为EDE-TECD的扭转阻尼系数; R_A 为齿轮A的半径.

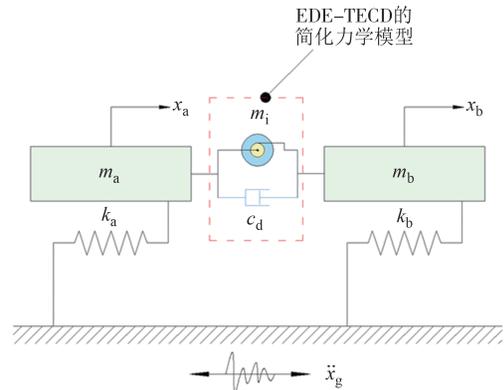


图5 加装EDE-TECD的两相邻建筑结构简化力学模型

Fig.5 The simplified mechanical model of two adjacent building structures equipped with EDE-TECD

惯质系数 m_i 可由下式进行计算(以传动轴Y为基准轴):

$$m = \frac{J_T^Y}{R_Y^2}, m_i = m + m_g \quad (10)$$

式中: m 为传动轴Y上除齿条外的等效质量; J_T^Y 为传动轴Y上的总转动惯量; R_Y 为传动轴Y的半径; m_g 为齿条的质量.各齿轮的转动惯量可通过转动惯量平行轴定理和角速度比折算到传动轴Y,由此可得到 J_T^Y ,如下式所示:

$$J_T^Y = \frac{1}{2} M_A \frac{R_A^4}{R_Y^2} + \frac{1}{2} M_B \frac{R_B^4}{R_Y^2} + \frac{1}{2} M_C \frac{R_C^4}{R_Y^2} + \frac{1}{2} M_X \frac{R_X^4}{R_Y^2} + \frac{1}{2} M_Y R_Y^2 \quad (11)$$

式中: R_B 、 R_C 、 R_X 分别为齿轮B、齿轮C、传动轴X的半径; M_A 、 M_B 、 M_C 、 M_X 和 M_Y 分别为齿轮A、齿轮B、齿轮C、传动轴X和传动轴Y的质量.

引入表2所示的无量纲参数,将运动方程转化为无量纲形式.

对于图5所示的两自由度系统,其运动方程为:

表2 无量纲参数

Tab.2 Dimensionless parameters

无量纲参数符号	公式	定义
μ	$\mu=m_i/m_a$	两相邻结构质量比
β	$\beta=m_i/m_a$	惯质比
ω_a	$\omega_a = \sqrt{k_a/m_a}$	结构a的频率
ω_b	$\omega_b = \sqrt{k_b/m_b}$	结构b的频率
ζ_{ab}	$\zeta_{ab}=c_d/2m_a\omega_a$	系统的等效阻尼比
r	$r=\omega_b/\omega_a$	两主结构的频率比
λ	$\lambda=\omega/\omega_a$	外荷载与结构a的频率比

注: ω 为外荷载频率.

$$\begin{bmatrix} m_a + m_i & -m_i \\ -m_i & m_b + m_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_a \\ \ddot{x}_b \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_d & -c_d \\ -c_d & c_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_a \\ \dot{x}_b \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_a & 0 \\ 0 & k_b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -m_a \\ -m_b \end{bmatrix} \ddot{x}_g \quad (12)$$

式中: \ddot{x}_g 为地震加速度,该运动方程可简化为式(13),如下所示:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{X}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{X}} + \mathbf{K}\mathbf{X} = \mathbf{D}_s\ddot{x}_g \quad (13)$$

式中,

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} m_a + m_i & -m_i \\ -m_i & m_b + m_i \end{bmatrix}, \mathbf{C} = \begin{bmatrix} c_d & -c_d \\ -c_d & c_d \end{bmatrix}, \quad (14)$$

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} k_a & 0 \\ 0 & k_b \end{bmatrix}, \mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \end{bmatrix}, \mathbf{D}_s = \begin{bmatrix} -m_a \\ -m_b \end{bmatrix}$$

引入状态向量 \mathbf{z} ,状态向量 \mathbf{z} 定义如下:

$$\mathbf{z} = \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ \dot{x}_a \\ \dot{x}_b \end{bmatrix} \quad (15)$$

将式(13)整理加速度项可得:

$$\ddot{\mathbf{X}} = \mathbf{M}^{-1}(-\mathbf{C}\dot{\mathbf{X}} - \mathbf{K}\mathbf{X} + \mathbf{D}_s\ddot{x}_g) \quad (16)$$

由此,将运动方程转换为状态方程,

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_a \\ \dot{x}_b \\ \ddot{x}_a \\ \ddot{x}_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{K}_{2 \times 2} & -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{C}_{2 \times 2} & & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ \dot{x}_a \\ \dot{x}_b \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \mathbf{M}^{-1} & \mathbf{D}_s \end{bmatrix} \ddot{x}_g \quad (17)$$

即有,

$$\dot{\mathbf{z}} = \mathbf{A}\mathbf{z} + \mathbf{B}\mathbf{D}_s\ddot{x}_g \quad (18)$$

式中,

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_n & \mathbf{I}_n \\ -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{K} & -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{C} \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_n \\ \mathbf{M}^{-1} \end{bmatrix} \quad (20)$$

由此将原本运动方程的二阶微分方程转换为一阶方程,式中 $n=2$, $\mathbf{0}_n$ 表示 2×2 零矩阵, \mathbf{I}_n 表示 2×2 单位矩阵, \mathbf{A} 为两自由度系统的 4×4 矩阵.将状态矩阵 \mathbf{A} 进行特征值求解,可得到,

$$|\mathbf{A} - \lambda\mathbf{I}| = 0 \quad (21)$$

将式(21)通过求解展开可得到特征值的表达式为两对不同的共轭复数根,如式(22)所示.

$$\lambda_{m,m+1} = -\omega_m \zeta_m \pm i\omega_m \sqrt{1 - \zeta_m^2}, m = 1, 3 \quad (22)$$

式中: ω_1 和 ω_3 分别为系统的两阶模态频率; ζ_m 为系统的模态阻尼比, ζ_1 和 ζ_3 分别为系统的两阶模态阻尼

比,为了方便后续讨论,将 ζ_1 和 ζ_3 中较小的模态阻尼比定义为 ζ_{\min} ,反之较大的模态阻尼比定义为 ζ_{\max} .

图6给出了 $\mu=0.5$ 、 $r=1.5$ 时,随着 ζ_{ab} 与 β 变化,两自由度系统的两阶模态阻尼比中较小的模态阻尼比 ζ_{\min} 总是存在极大值,且这一极大值与 ζ_{ab} 和 β 的取值有关.因此,可以说明在 μ 和 r 取值一定时,存在某一 ζ_{ab} 和 β 使得系统的较小模态阻尼比 ζ_{\min} 达到最大值.

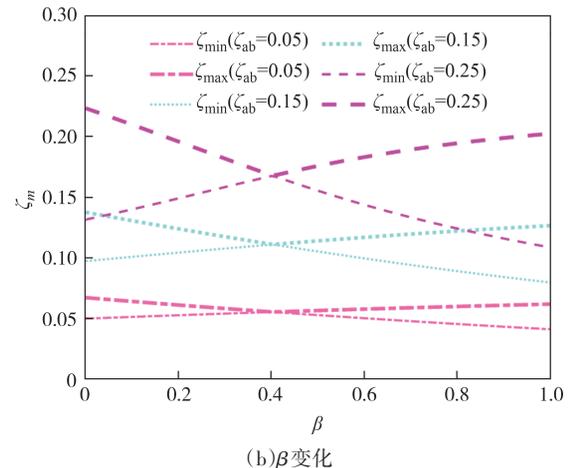
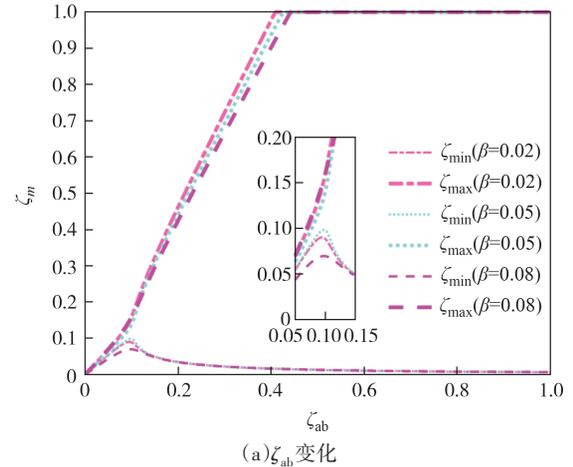


图6 ζ_{ab} 和 β 变化时系统的模态阻尼比

Fig.6 The modal damping ratio of the system when ζ_{ab} and β change

2.2 最优参数的数值搜索与分析

采用直接穷举法对最优参数进行搜索,数值搜索的目标函数可用下式表示,

$$\max_{\beta, \zeta_{ab}} (\min[\zeta_1, \zeta_3]) \quad (23)$$

该目标函数以 β 和 ζ_{ab} 为自变量,经过数值搜索,得到 ζ_1 和 ζ_3 二者之间较小阻尼比的最大值,并将此时得到最大值时的自变量 β 和 ζ_{ab} 取为最优惯质比 β_{opt} 和最优阻尼比 ζ_{abopt} . β 和 ζ_{ab} 的搜索区间分别为 $[-0.2, 0.10]$ 和 $[0, 2]$,搜索步长均为0.001.

在实际两相邻结构中,质量大的结构频率往往比质量小的结构频率小.表3给出了质量比 μ 分别取0.5、0.7、1.0,频率比 r 取1.1~2.0(取值间隔为0.1)的最优参数.从表3可以看出,在某些质量比 μ 和频率比 r 取值下,最优惯质比 β_{opt} 的取值可能为负,但是目前还无法制造出负惯质元件,因此需要对最优惯质比 β_{opt} 取值为负的情况进行更详细研究.

表3 不同质量比和频率比下的最优参数

Tab.3 The optimal parameters under different mass ratios and frequency ratios

频率比 r	质量比 $\mu=0.5$		质量比 $\mu=0.7$		质量比 $\mu=1.0$	
	β_{opt}	ζ_{abopt}	β_{opt}	ζ_{abopt}	β_{opt}	ζ_{abopt}
1.1	0.019 0	0.032 5	0.010 5	0.041 0	-0.004 5	0.049 5
1.2	0.031 5	0.067 0	0.013 0	0.083 0	-0.016 5	0.097 5
1.3	0.039 0	0.103 0	0.010 0	0.124 0	-0.033 0	0.143 5
1.4	0.041 5	0.138 5	0.003 0	0.164 5	-0.052 5	0.186 0
1.5	0.040 5	0.174 0	-0.008 0	0.203 5	-0.074 0	0.226 0
1.6	0.036 0	0.209 0	-0.021 0	0.240 0	-0.096 0	0.262 5
1.7	0.029 0	0.241 5	-0.035 5	0.274 0	-0.118 0	0.296 0
1.8	0.020 5	0.273 5	-0.051 0	0.305 5	-0.139 5	0.326 0
1.9	0.011 0	0.304 0	-0.066 5	0.336 0	-0.160 5	0.353 0
2.0	0.000 0	0.333 0	-0.082 0	0.363 0	-0.180 0	0.379 0

为研究负惯质对 ζ_{min} 的影响,图7($\mu=1.0, r=1.3$ 时) ζ_{min} 的等高线显示, ζ_{ab} 保持不变时, ζ_{min} 随 β 的增加先升后降,有且只有一个最大值.且当阻尼比为数值搜索出来的最优阻尼比时,此时 ζ_{min} 达到最大时的最优惯质比小于0,目前实际设计中无法达到.而当实际所能达到的惯质比从0逐渐增加时, ζ_{min} 的取值反而慢慢下降.即增加惯质并不总对提升结构较小模态阻尼比有利.例如,在图7中,当 $\zeta_{ab}=0.143 5, \beta$ 从0增加到0.05时, ζ_{min} 约从0.08降至0.06.

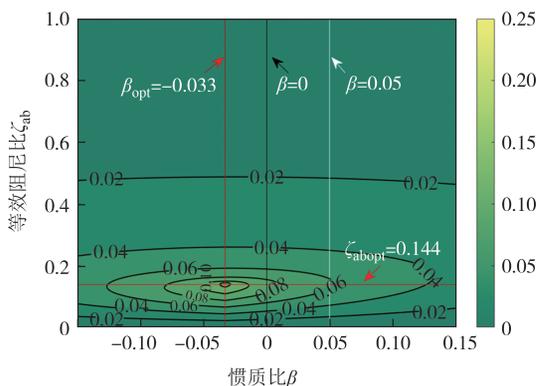
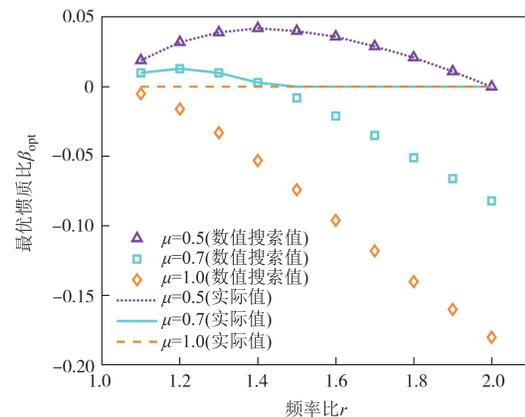


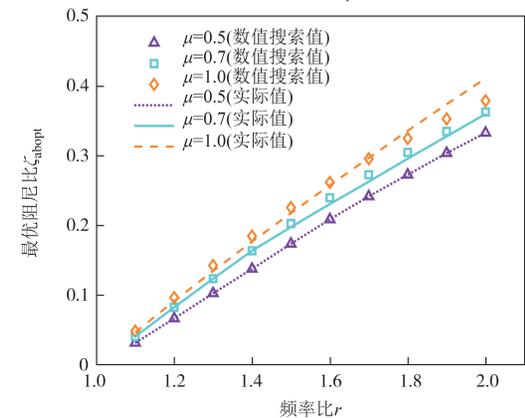
图7 $\mu=1.0, r=1.3$ 时较小模态阻尼比变化

Fig.7 The variation of the lower modal damping ratio when $\mu=1.0$ and $r=1.3$

图8给出了数值搜索出来的最优参数和实际可以达到的最优参数的对比.图9则给出了数值搜索下或实际最优参数取值下所能达到的最大 ζ_{min} .从图8(a)可以看出, $\mu=0.5$ 时,最优惯质比 β_{opt} 随着频率比 r 的增大,出现先增大后减小的趋势,且其取值均大于0,最优惯质比、最优阻尼比的数值搜索取值均与其实际取值相重合.而当质量比 $\mu=0.7, r>1.5$ 时,最优惯质比 β_{opt} 的数值搜索值小于0,但实际上不能达到.故当质量比 $\mu=0.7, r>1.5$ 时,最优惯质比 β_{opt} 实际取值为0,此时实际最优阻尼比随之发生改变,如图8(b)所示.尤其是当 $\mu=1.0, r$ 为1.1~2.0时,数值搜索的最优惯质比 β_{opt} 均小于0,即此时的实际最优惯质比 β_{opt} 均为0.由图8(b)可以看出,此时的实际最优阻尼比取值与数值搜索下最优阻尼比取值差距并不大,因此为简便工程使用,可取数值搜索下最优阻尼比作为设计值.而由图9可以看出,实际最优参数取值下的最大 ζ_{min} 取值小于数值搜索取值.因此,在EDE-TECD的最优参数分析中,需考虑实际的最优 ζ_{min} 取值,而不能取其数值搜索下的值.



(a) 最优惯质比 β_{opt}



(b) 最优阻尼比 ζ_{abopt}

图8 数值搜索下最优参数与实际最优参数的对比

Fig.8 Comparison between the optimal parameters from numerical search and the actual optimal parameters

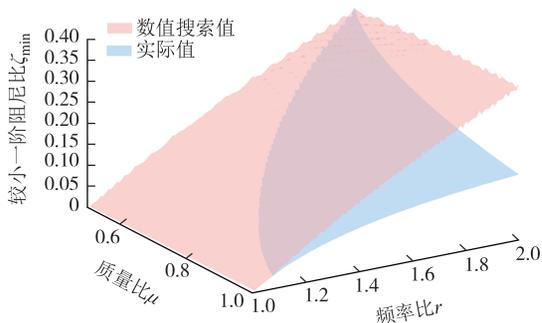


图9 数值搜索或实际最优参数取值下的最大 ζ_{\min}
Fig.9 Maximum ζ_{\min} under the optimal parameters from numerical search or actual optimal parameters

因此,为了将EDE-TECD应用于实际工程中,其最优参数可以参考表3进行设计,若出现惯质比为负的情况,可视惯质比为0.若实际工程中不能精确获得本文所给出的参数值,可根据表3中的值进行线性插值.图10给出了EDE-TECD实际应用时的最优参数设计流程.

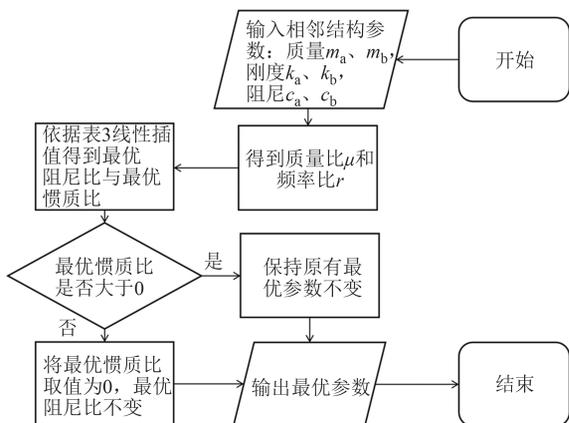


图10 EDE-TECD 最优参数设计流程
Fig.10 Optimal parameter design process of EDE-TECD

3 EDE-TECD 在地震作用下的响应分析

3.1 两栋相邻结构与 EDE-TECD 的参数

为验证上述所得的最优参数是否有效,本文基于图5与式(12)所示的运动方程,对加装了最优参数设计下的EDE-TECD的两相邻结构在地震下的减震性能进行了分析.表4给出了图5中两相邻结构与EDE-TECD的各项参数.考虑到在实际结构中必然存在结构阻尼,而结构阻尼的机理较为复杂,难以确定其具体数值,因此本文将结构a和结构b的结构阻尼比均定为0.005.需要说明的是,由于两结构的阻尼比取值较小,根据单自由度有阻尼自振频率计算公式[式(24)]两者的误差可以忽略不计,因此在计

算最优参数时,使用的两自由度系统频率为无阻尼自振频率.

$$\omega_d = \omega \sqrt{1 - \zeta^2} \approx \omega \quad (24)$$

式中: ω_d 为有阻尼自振频率; ω 为无阻尼自振频率.

表4 两相邻结构与EDE-TECD的参数
Tab.4 Parameters of two adjacent structures and EDE-TECD

参数	单位	取值
m_a	kg	2.00×10^5
m_b	kg	1.00×10^5
k_a	N/m	2.00×10^5
k_b	N/m	1.96×10^5
c_a	N·s/m	2.00×10^3
c_b	N·s/m	1.40×10^3
μ	—	0.50
r	—	1.40
β_{opt}	—	0.041 5
ζ_{abopt}	—	0.138 5
m_i	kg	8.30×10^3
c_d	N·s/m	5.54×10^4

注:“—”表示该参数是一个无量纲参数,没有单位.

3.2 EDE-TECD 减震性能研究

选取Cape地震波和El Alamo地震波,将其用于两相邻结构地震响应分析.在数值计算时,将所选取的地震波的加速度最大幅值调整为 $0.1g$ (g 为重力加速度,取 9.81 m/s^2),随后将调幅后的地震波输入结构的基底,通过四阶Runge-Kutta积分方法对式(12)进行求解,时间步长取为 0.01 s .图11给出了Cape地震波和El Alamo地震波的加速度时程和两栋相邻结构分别加装了优化后的EDE-TECD与线性黏滞阻尼器在地震作用下的相对位移.

对所得到的相对位移进行加装阻尼器的减震率计算.其中减震率分为峰值减震率和均方根(root of mean square, RMS)减震率,其计算公式分别如式(25)、式(26)所示:

$$R_{Pi} = \frac{D_{Pu} - D_{Pdi}}{D_{Pu}} \quad (i = 1, 2) \quad (25)$$

$$R_{Ri} = \frac{D_{Ru} - D_{Rdi}}{D_{Ru}} \quad (i = 1, 2) \quad (26)$$

式中: R_{P1} 、 R_{R1} 分别为两相邻结构加装线性黏滞阻尼器后的峰值减震率和RMS减震率; R_{P2} 、 R_{R2} 分别为两相邻结构加装EDE-TECD后的峰值减震率和RMS减震率; D_{Pu} 、 D_{Ru} 分别为无阻尼器作用下两相邻结构在地震作用下的峰值相对位移和RMS相对位移; D_{Pdi} 、 D_{Rdi} 分别为加装线性黏滞阻尼器的两相邻结构

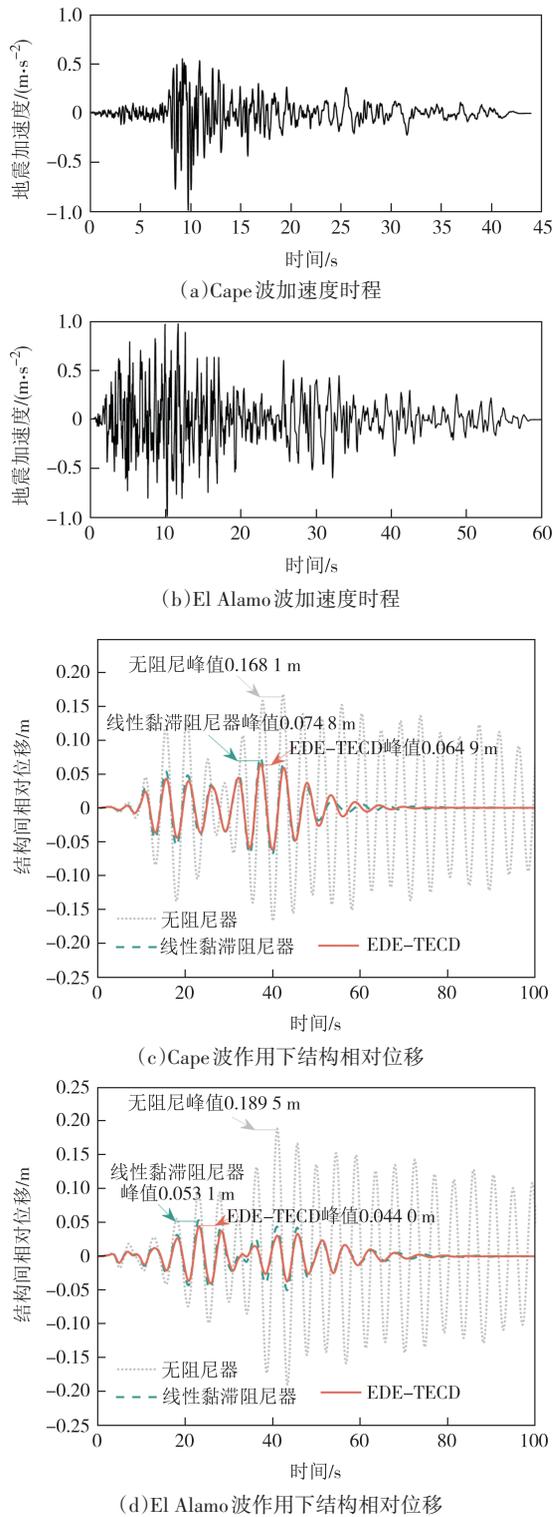


图 11 Cape 波和 El Alamo 波的加速度时程及其作用下两相邻结构的相对位移

Fig.11 Acceleration time histories of Cape and El Alamo waves and the relative displacement between two adjacent structures under their action

在地震作用下的峰值相对位移和 RMS 相对位移； D_{Pd2} 、 D_{Rd2} 分别为加装 EDE-TECD 的两相邻结构在地震作用下的峰值相对位移和 RMS 相对位移。

由图 11(c)可以得到,两相邻结构在 Cape 波作用下, $D_{Pd1}=0.1681\text{ m}$, $D_{Pd1}=0.0748\text{ m}$, $D_{Pd2}=0.0649\text{ m}$,得到两相邻结构在 Cape 波作用下的峰值减震率 $R_{p1}=55.50\%$ 、 $R_{p2}=61.39\%$ 。由图 11(d)可以得到,两相邻结构在 El Alamo 波作用下, $D_{Pd1}=0.1895\text{ m}$, $D_{Pd1}=0.0531\text{ m}$, $D_{Pd2}=0.0440\text{ m}$,计算得到在 El Alamo 波作用下两相邻结构的峰值减震率分别为 $R_{p1}=71.98\%$ 、 $R_{p2}=76.78\%$ 。可以看出,安装阻尼器后能显著减小相邻结构在地震作用下的相对位移,且在最优参数设计下,加装 EDE-TECD 的效果优于加装线性黏滞阻尼器。

为了避免选取地震波的特殊性,将其他额外 10 条地震波作为基底激励也输入两相邻结构中,表 5 给出了这 10 条额外地震波的相关信息,图 12 给出了两相邻结构在这 10 条额外地震波作用下的相对位移及减震率。从图 12 可以看出,加装 EDE-TECD 后的相邻结构能大幅降低其在地震作用下的相对位移。其平均峰值减震率达到 64.79%,比线性黏滞阻尼器的平均峰值减震率 56.37% 高了 8.42 个百分点;加装 EDE-TECD 后的平均 RMS 减震率达到 73.98%,比线性黏滞阻尼器平均 RMS 减震率 70.03% 高了 3.95 个百分点。

表 5 10 条额外地震波的相关信息

Tab.5 The relevant information of 10 additional earthquake waves

地震波号码	地震波名称	发生国家	年份	震级
1	Borrego	美国	1968	6.6
2	Chi-Chi	中国	1999	7.6
3	Duzce	土耳其	1999	7.2
4	El Centro	美国	1940	7.1
5	Kobe	日本	1995	7.3
6	San Fernando	美国	1971	6.6
7	Taft	美国	1930	5.8
8	Northern Calif-03	美国	2003	6.6
9	Kern County	美国	1952	7.3
10	Borrego Mtn	美国	1968	6.5

3.3 结构刚度削弱对 EDE-TECD 减震性能的影响研究

结构在地震或长期使用过程中可能会出现刚度下降的现象,这种现象可能导致根据初始刚度设计的 EDE-TECD 最优参数不再适用于刚度削弱后的结构。本节考虑两栋相邻结构不同刚度削弱的情况,研究了刚度削弱效应对 EDE-TECD 抗震性能的影响。两相邻结构与 EDE-TECD 参数同表 3。刚度削弱程度定义如下:

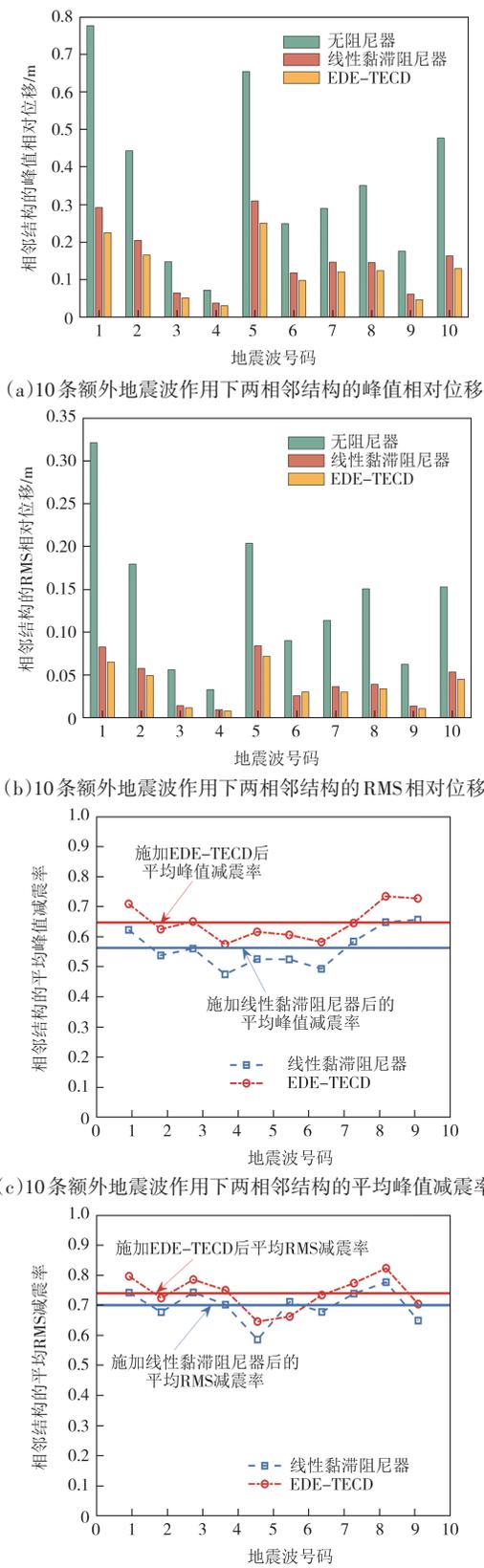


图 12 10条额外地震波作用下两相邻结构的相对位移及其平均减震率

Fig.12 The relative displacement and average damping rate of two adjacent structures under the influence of 10 additional earthquake waves

$$R_k = \frac{k_s - k_E}{k_s} \quad (27)$$

式中: R_k 为刚度削弱程度; k_s 为结构震前刚度; k_E 为结构震后刚度.

图 13 给出了 El Alamo 地震波作用下不同结构刚度削弱程度对减震性能的影响.可以看出,在 El Alamo 地震波作用不同刚度削弱程度下,EDE-TECD 的减震性能均未发生明显降低,且都优于线性黏滞阻尼器.在 El Alamo 地震波作用下,当刚度削弱程度 $R_k=0.1$ 、 0.3 时,EDE-TECD 的峰值减震率分别为 70.49%、76.25%,略低于刚度削弱前的峰值减震率 76.78%;而当刚度削弱程度 $R_k=0.2$ 或 0.4 时,EDE-TECD 的峰值减震率还略高于震前.即在 El Alamo 地震波作用下,结构在刚度削弱 10%~40% 时,EDE-TECD 的峰值减震率最大降幅仅为 6.29%,由此可以说明加装了 EDE-TECD 的结构在刚度削弱后仍能保持较好的减震性能.

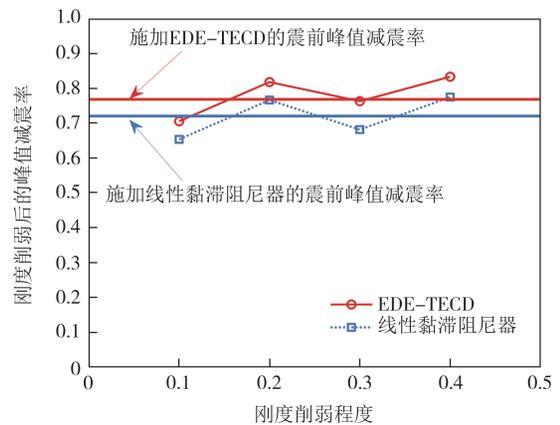


图 13 El Alamo 地震波作用下不同刚度削弱程度对减震性能的影响

Fig.13 Impact of different stiffness reduction levels on damping performance under the El Alamo earthquake wave

4 结论

本文针对相邻结构减震问题,在 TECD 的基础上集成齿轮齿条式速度放大装置,提出了一种耗能增强型扭转电涡流阻尼器(EDE-TECD).基于速度放大装置,推导出 EDE-TECD 的阻尼系数估算公式.建立了施加 EDE-TECD 的两相邻结构简化运动方程.得到两相邻结构在 EDE-TECD 连接下的最优惯质比和最优阻尼比,并对最优惯质比的取值情况进行分析.主要结论如下:

1) 基于最小阻尼比最大化优化准则与数值搜索

方法得出 EDE-TECD 的理论最优惯质比可能存在负值。

2) 增加惯质并不总对提升结构的较小模态阻尼比有利。同时,将负惯质比取 0 时,其实际最优阻尼比取值与理论最优阻尼比取值相差不大,但较小一阶阻尼比的实际取值与理论取值存在较大差异。

3) 加装优化后的 EDE-TECD 的两相邻结构在地震作用下的相对位移显著降低。其中,相对位移平均峰值减震率达到 64.79%,比线性黏滞阻尼器提高了 8.42 个百分点;而相对位移 RMS 减震率则达到 73.98%,比线性黏滞阻尼器高出 3.95 个百分点。

4) 在 El Alamo 地震波作用下,结构在刚度削弱 10%~40% 时,EDE-TECD 的峰值减震率最大降幅仅为 6.29%,说明结构仍具备较好的减震性能。

参考文献

- [1] XU Y L, HE Q, KO J M. Dynamic response of damper-connected adjacent buildings under earthquake excitation [J]. *Engineering Structures*, 1999, 21(2): 135-148.
- [2] POLYCARPOU P C, KOMODROMOS P. On poundings of a seismically isolated building with adjacent structures during strong earthquakes [J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2010, 39(8): 933-940.
- [3] 国巍, 李宏男, 柳国环. 共享调谐质量阻尼器 (STMD) 在附属结构减震中的应用 [J]. *工程力学*, 2009, 26(5): 202-208.
GUO W, LI H N, LIU G H. Shared mass damper (STMD) used to reduce the seismic response of secondary systems [J]. *Engineering Mechanics*, 2009, 26(5): 202-208. (in Chinese)
- [4] PATEL C C, JANGID R S. Dynamic response of identical adjacent structures connected by viscous damper [J]. *Structural Control and Health Monitoring*, 2014, 21(2): 205-224.
- [5] ABDULLAH M M, HANIF J H, RICHARDSON A, et al. Use of a shared tuned mass damper (STMD) to reduce vibration and pounding in adjacent structures [J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2001, 30(8): 1185-1201.
- [6] 李亚峰, 李寿英, 王健钟, 等. 齿轮齿条式电涡流阻尼器的力学性能研究 [J]. *土木工程学报*, 2020, 53(3): 44-50.
LI Y F, LI S Y, WANG J Z, et al. Study on mechanical properties of eddy current damping-rack and gear damper [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2020, 53(3): 44-50. (in Chinese)
- [7] WANG L K, NAGARAJAIAH S, SHI W X, et al. Study on adaptive-passive eddy current pendulum tuned mass damper for wind-induced vibration control [J]. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 2020, 29(15): e1793.
- [8] 霍朝煜. 非线性电涡流阻尼减震结构抗震性能数值研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2022.
HUO C Y. Numerical study on seismic performance of the structures attached with nonlinear eddy current dampers [D]. Changsha: Hunan University, 2022. (in Chinese)
- [9] 肖潇. 基于电涡流阻尼器的结构振动控制理论及试验研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2021.
XIAO X. Theoretical and experimental study of structural vibration control based on eddy current dampers [D]. Changsha: Hunan University, 2021. (in Chinese)
- [10] 田静莹. 电涡流阻尼器参数分析及应用 [D]. 长沙: 湖南大学, 2016.
TIAN J Y. Parameter analysis and application of eddy current dampers [D]. Changsha: Hunan University, 2016. (in Chinese)
- [11] 张弘毅. 永磁电涡流阻尼器非线性力学特性及其在结构减振中的应用 [D]. 长沙: 湖南大学, 2021.
ZHANG H Y. Nonlinear dynamic characterization of the eddy current damper with permanent magnets and its application in structural vibration reduction [D]. Changsha: Hunan University, 2021. (in Chinese)
- [12] 黄智文. 电涡流阻尼器理论研究及其在桥梁竖向涡振控制中的应用 [D]. 长沙: 湖南大学, 2016.
HUANG Z W. Theoretical study of eddy current damper and its application in vertical vortex-induced vibration control of bridges [D]. Changsha: Hunan University, 2016. (in Chinese)
- [13] 杨坤. 一种外接式阻尼器位移放大装置: CN204385942U [P]. 2015-06-10.
YANG K. An external displacement amplifying device for dampers: CN204385942U [P]. 2015-06-10. (in Chinese)
- [14] BERTON S, BOLANDER J E. Amplification system for supplemental damping devices in seismic applications [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2005, 131(6): 979-983.
- [15] WANG S, CHEN Z Q, WANG W X, et al. A novel enhanced torsional eddy current damper for fixed-axis rotation control of rigid bodies [J]. *Structural Control and Health Monitoring*, 2024, 2024(1): 9922305.
- [16] 华旭刚, 黄豪, 王文熙, 等. 速度放大型电涡流扭矩阻尼器的缓速性能研究 [J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2025, 52(1): 1-11.
HUA X G, HUANG H, WANG W X, et al. Study on buffering performance of a speed amplified composite tube eddy current torque damper [J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2025, 52(1): 1-11. (in Chinese)