

新型变阻尼式 TMD 的力学性能试验研究

赵 祥¹, 高永苗¹, 周铁钢¹, 李万琴², 丁怡洁¹

(1. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 青海省高原绿色建筑与生态社区重点实验室, 青海 西宁 810008)

摘要: 研发了一种新型变阻尼式 TMD, 阐述了它的构造设计及工作原理, 通过对其进行的力学性能试验, 研究了与该减震装置组成成分相关的三个参数(质量、刚度和液体黏度)变化时对其力学性能的影响。试验结果表明: 当该减震装置组成部分相应的刚度、质量和液体黏度增大时, 该减震装置对结构施加的等效阻尼力也随之增大, 而且其在大震时对结构的减振效果更好。接着利用遗传算法, 对该减震装置的阻尼系数, 频率比, 限制位移(相对结构的最大许可位移)等参数进行了优化分析, 并得出了它们的最优取值。最后, 为了研究该变阻尼式 TMD 对结构的减震效果, 利用 Simulink 工具对未安装和安装该变阻尼式 TMD 的弹性单自由度结构进行了仿真分析; 仿真结果表明: 该变阻尼式 TMD 能够很好的控制结构的加速度和位移响应, 且随着地震动幅值的增大, 它的减震效果也逐渐增大, 这与力学性能试验的结果较好吻合。

关键词: 变阻尼式 TMD; 力学性能试验; 遗传算法; Simulink 仿真; 减震效果

中图分类号: TU352.1; TU317.1; TU311.41

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2020)06-0797-09

Mechanical performance test and parameter optimization of a new variable damping TMD

ZHAO Xiang¹, GAO Yongmiao¹, ZHOU Tiegang¹, LI Wanqin², DING Yijie¹

(1. School of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;

2. The Key Lab of Plateau Building and Eco-community in Qinghai, Xining 810008, China)

Abstract: In this paper, a new type of variable damp TMD is developed. Its structure design and working principle are described. Through mechanical properties test, the effects of three parameters (mass, stiffness and liquid viscosity) related to the components of the damping device on its mechanical properties are studied. Test results show that when the corresponding stiffness, mass and liquid viscosity of the components of the damping device increase, the equivalent damping force exerted by the damping device on the structure will also increase, and the effect of the damping device on the structure will be better in large earthquakes. Then, the parameters such as damping coefficient, frequency ratio and limited displacement (maximum allowable displacement relative to the structure) of the damping device are optimized and analyzed by genetic algorithm, and their optimal values are obtained. Finally, in order to study the effect of the variable damp TMD on the structure, Simulink tool is used to simulate and analyze the elastic single-degree-of-freedom structure which is not installed or installed with the variable damp TMD. Results show that the variable damp TMD can control the acceleration and displacement response of the structure well, and with the increase of the amplitude of the ground motion, its damping effect increases gradually, which is in good agreement with the results of the mechanical properties test.

Key words: variable damping TMD; mechanical test; genetic algorithm; Simulink simulation; damping effect

调谐质量阻尼器(Tuned Mass Damper, 简称 TMD)由质量块、弹簧和阻尼系统组成, 通过调整 TMD 的自振频率, 使其接近主体结构的被控频率, 当主体结构受迫振动时, TMD 随之产生与主体结构相反的运动并施加反作用力于主体结构, 输入结构的振动能量通过调谐质量阻尼器逐步消散,

从而控制结构的振动^[1]。目前, 关于 TMD 在抗风方面的研究也取得了一系列的研究成果。Mcnamara 等^[2]采用单自由度结构模型, 基于等效阻尼比的概念研究了 TMD 在高层建筑中的抗风问题; Gu 等^[3]通过数值研究表明 TMD 能够有效地降低大跨度桥梁的风致振动。就 TMD 在减小结构地震

收稿日期: 2020-06-16

修改稿日期: 2020-11-16

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金资助项目(51708446); 青海省高原绿色建筑与生态社区重点实验室开放基金计划资助项目(KLKJF-2018-007); 陕西省重点研发计划项目重点产业创新链(群)(2020ZDLNY06-03)

第一作者: 赵 祥(1975—), 男, 博士, 副教授, 主要从事结构振动控制研究。E-mail: 441937590@qq.com

通信作者: 高永苗(1995—), 女, 硕士研究生, 主要从事结构振动控制研究。E-mail: 345273078@qq.com

响应方面,国内外学者也进行了许多数值分析和试验研究。Wirsching 和 Yao^[4]基于 5 层和 10 层的钢框架结构,首次验证了 TMD 控制结构地震响应的有效性。随后, Dong、Ohno、Jagadish、袁俊和王虎长等^[5-10]人均研究了 TMD 对地震反应的控制效果,结果表明 TMD 能够有效地降低结构的地震反应。TMD 的基本理论已经成熟,但是 TMD 在工程中的应用仍有许多问题需要面对,比如说, TMD 质量的选取,弹簧刚度 K 的大小以及阻尼比的确定等。这些问题就涉及 TMD 参数的优化分析处理。针对这些问题,国内外专家学者进行了广泛地研究。Den Hartog 等^[11]通过分析在正弦激励下无阻尼结构的动力响应,建立了 TMD 最优参数的解析式, Warburton^[12]以列表的形式给出了在特定质量比下,结构在各种外界激励下各参数的优化计算公式。尽管 TMD 能够有效地降低结构的振动响应,但是其最大的局限性是仅适合于窄频带的外部激励,当因某种原因主结构的自振频率同 TMD 自振频率产生偏离时,则 TMD 将会担当放大器的角色,使得主结构的振动响应增大。研究者们尝试着将非线性弹簧引入 TMD 以改善它的窄频带特性。Roberson^[13]研究了无阻尼非线性动力吸振器,分析发现非线性弹簧的存在能够加宽动力吸振器的调谐带宽;部分学者通过在主结构中装设多个频率不同的 TMD 子结构(MTMD),分别控制不同频段的外界激励以改善 TMD 的调谐频带。另外李春祥等^[14]人也对 DTMD、MTMD 的动力特性、设计参数、敏感性等进行了研究。刘纲等^[15]采用改进了的 NSGA-II 算法分析在阻尼器个数保持不变情况下的最优布设位置。

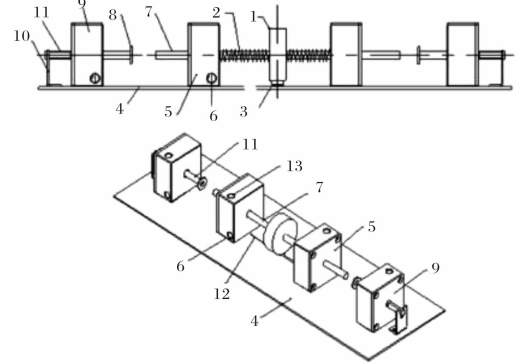
总体来看, TMD 安装便捷、性能可靠且减震效果显著,将其用于结构的减震控制中是可行的。但目前国内外专家学者关于 TMD 的研究大多数聚焦在 TMD 的位置、数量、参数等方面的理论研究,进而忽略了从 TMD 装置本身的改进来提高其工作性能,并且针对 TMD 减震控制方面的力学性能试验研究有所欠缺。因此,本文提出一种新型的变阻尼式 TMD 减震控制装置,并对该 TMD 装置的相关参数进行了力学性能试验,利用遗传优化算法,对该 TMD 的阻尼系数,频率比,限制位移等参数进行了优化分析,并同传统 TMD 进行了对比分析;同时采用 MATLAB 软件中的 Simulink 工具箱建立了主系统-变阻尼式 TMD 减震体系的仿真计算模型,并对一弹性单自由度结构进行了仿真分析。结果表明在不同地震作用下该变阻尼式

TMD 具有很好的减震效果。

1 变阻尼式 TMD 的设计

1.1 变阻尼式 TMD 的构造及工作原理

针对当前传统 TMD 的不足之处,设计并制作了一种新型变阻尼式 TMD,如图 1 所示,腔体示意图如图 2 所示。



(1) 质量块 (2) 弹簧 (3) 牛眼轴承 (4) 底板 (5) 腔体 (6) 出油口 (7) 丝杠 (8) 挡板 (9) 腔体 2 (10) 挡板 2 (11) 丝杠 2 (12) 导轨 (13) 进油口

图 1 变阻尼式 TMD 结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of TMD

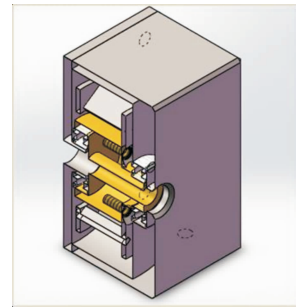


图 2 腔体示意图

Fig. 2 Schematic picture of Cavity

该装置包括质量块、弹簧、牛眼轴承、底板、腔体 1、出油口、丝杠 1、挡板 1、腔体 2、挡板 2、丝杠 2、导轨和进油口等部分。丝杠 1 与质量块两侧固定连接,质量块通过牛眼轴承与导轨相接;质量块的导向工作由导轨和丝杠 1 完成,牛眼轴承具有滑动作用,确保质量块能够顺畅的左右滑动;质量块和腔体 1 通过丝杠 1 相连,导杆上装有刚度为 K 的弹簧,通过调节质量块的质量 M 和弹簧的刚度 K 可以实现变阻尼式 TMD 的调谐,进而达成对主体结构的减振控制;腔体 1 和腔体 2 用来装液体,腔体内部设置扇叶,螺母连接扇叶和丝杠,同时丝杠也有改变运动方向的作用,即质量块水平运动通过丝杠变为竖向转动,扇叶通过螺栓和轴承固定在一块,而轴承则套装在丝杠上,从而可实现扇叶的转动,扇叶在液体中的转动用来消耗主体结构

传递来的能量, 进而起到为 TMD 提供阻尼的作用; 腔体上设了进油口与出油口 2 个孔洞, 可以实现液体的更换; 初始状态下, 丝杠 1 和丝杠 2 间的间隔距离为 u_c , 该距离为位移临界阈值, 当减震装置的位移小于 u_c 时, 只有腔体 1 提供阻尼, 当位移大于 u_c 时, 丝杠 1 移动到丝杠 2 处, 并且通过挡板 1 带动丝杠 2 一起转动, 此时腔体 1 与腔体 2 共同提供阻尼; 挡板 2 起支撑丝杠 2 的作用。

该装置的工作原理可叙述为: 由于外界环境的激励, 质量块产生水平振动, 从而压缩弹簧, 而弹簧经过腔体和底板相接, 进而将质量块振动导致的惯性力通过上述弹簧的弹性恢复力反作用于主体结构, 可以对结构的振动起到一定的控制作用, 使结构的动力响应得到衰减; 同时, 质量块的水平振动由丝杠变为扇叶的竖向转动, 而腔体内充满阻尼介质, 可以对阻尼器实现滞回耗能; 阻尼介质在腔体内部流动时与扇叶之间产生相互作用, 使介质的动能转化为热能, 从而消耗地震输入的能量, 而该装置转化动能为热能的主要途径为液体的摩擦耗能。

1.2 新型变阻尼式 TMD 阻尼系数推导

对于变阻尼式 TMD 的阻尼力可理解为: 在外荷载作用下, 质量块的水平运动将带动叶轮以一定角速度在腔体内旋转, 而叶轮扇叶的左右两侧将产生压力差, 使得液体在扇叶与腔体的间隙中流动, 从而产生阻尼力, 其阻尼系数可根据流体力学相关理论来进行推导。

对于扇叶与腔体之间的流体流动问题, 与两平行板之间的流体流动问题相似, 故可借鉴其推导原理来进行分析。从腔体和扇叶所形成的间隙流场取一微元体如图 3 所示。

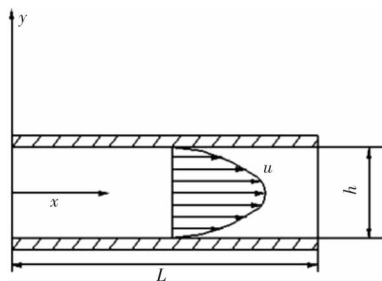


图 3 间隙中的微元体

Fig. 3 Microelement in the gap

对该微元体列沿 X 方向的平衡方程, 可得

$$\frac{dp}{dx} = \frac{d\tau}{dy} \quad (1)$$

其中, p 为压强, τ 为剪应力, dp/dx 沿 X 方向为常数, 则

$$\frac{dp}{dx} = \frac{\Delta p}{l} \quad (2)$$

其中, Δp 为两平行板间进口与出口压力差, l 为扇叶的宽度。在间隙流动中, 流体的流速和剪应力关于间隙中面对称, 同时由式 (1) 和式 (2) 可得

$$\tau = \frac{\Delta p}{l} x \quad (3)$$

腔体内部阻尼介质的本构方程为:

$$\tau = k \dot{\gamma}^\eta \quad (4)$$

其中: k 为稠度系数, $\dot{\gamma}$ 为剪切应变率, η 为流动指数。当 $\eta < 1$ 时, 该阻尼介质为剪切稀化流体; 当 $\eta > 1$ 时为剪切稠化流体; 当 $\eta = 1$ 时, 为牛顿流体。由式 (3)~(4), 又有边界条件 $y = \pm \frac{h}{2}$; $u = 0$ 可得

$$u = \int_{|y|}^{\frac{h}{2}} \dot{\gamma} dy \quad (5)$$

故流过两平板的流体的流量为

$$Q = 2 \int_0^{\frac{h}{2}} u b dy = 2b \int_0^{\frac{h}{2}} \dot{\gamma} y dy \quad (6)$$

综合上式以及边界条件可得

$$Q = \frac{mbh^{\frac{2m+1}{m}}}{2(m+1)} \cdot \left(\frac{\Delta p}{2kl}\right)^{\frac{1}{m}} \quad (7)$$

Q 为阻尼缝隙的总流量, 等于单位时间内一侧叶片扫过的扇面面积与叶片宽度的乘积:

$$Q = \frac{1}{2} (R^2 - r^2) \omega l \quad (8)$$

则流体的阻尼力

$$F = \Delta P A_p \quad (9)$$

故

$$F = 2klA_p \left[\frac{(m+1)(R-r)l}{mbh^{\frac{2m+1}{m}}} \right]^m \omega^m \quad (10)$$

式中, l 为扇叶宽度; b 为扇叶厚度; r 为转轴直径; R 为扇叶顶端至转轴中心半径; $\omega = 2\pi v/s$ 为叶轮转动角速度, 其中 v 为阻尼器的速度, s 为丝杠的行程; h 为阻尼缝隙宽度。

因此, 可得变阻尼式 TMD 中的阻尼系数 c 为

$$c = 2klA_p \left[\frac{2\pi(m+1)(Rr)l}{smbh^{\frac{2m+1}{m}}} \right]^m \quad (11)$$

1.3 变阻尼式 TMD 系统减震原理

变阻尼式 TMD 的工作原理如图 4 所示, x 、 x_d 分别为主系统和阻尼器相对于地面的位移值, 设 $u = x_d - x$ 为阻尼器相对于主系统的位移, 则变阻尼式 TMD 的运动方程为

$$m_d \ddot{u} + c_d \{\dot{u}\}^\eta + k_d u = m_d (\ddot{x} + \ddot{x}_g) \quad (12)$$

$$F_e(t) = -m_d (\ddot{u} + \ddot{x} + \ddot{x}_g) \text{ 或 } F_e(t) = c_d \{\dot{u}\}^\eta + k_d u \quad (13)$$

其中, $F_e(t)$ 为 TMD 附加给平台的等效阻尼力, \ddot{x}

为变阻尼式 TMD 系统所在楼层相对于地面的加速度; m_d 、 k_d 、 c_d 分别为变阻尼式 TMD 系统的质量、刚度和阻尼系数; 其中 $c_d = \begin{cases} c_1^*, & u \leq u_e \\ c_2^*, & u > u_e \end{cases}$, u_e 为临界位移; η 为流动指数, 当 $\eta=1$ 时, 该变阻尼式 TMD 系统为线性系统, 否则为非线性系统; x_d 为变阻尼式 TMD 系统相对于地面的位移. 由式 (12) 可知, 当变阻尼式 TMD 系统相对于结构的位移小于等于临界位移 u_e 时, 该变阻尼式 TMD 系统提供一种控制力; 当变阻尼式 TMD 系统相对于结构的位移大于临界位移 u_e 时, 该变阻尼式 TMD 系统将提供另外一种控制力, 以控制结构的地震响应, 使其降至所需状态.

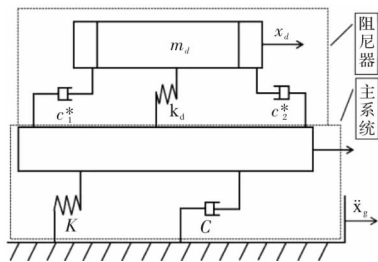


图 4 变阻尼式 TMD 系统减震原理图

Fig. 4 Variable damping TMD system damping principle diagram

2 变阻尼式 TMD 的力学性能试验

2.1 试验概况

新型变阻尼式 TMD 的各部分可分别加工, 然后通过简单组装即可成型. 为了研究该变阻尼式 TMD 的质量、刚度和液体的黏度这三个参数对它的力学性能的影响, 设计了 7 组变阻尼式 TMD, 它们的具体参数如表 1 所示. 并将其置于 WS-Z50 小型精密振动台上进行动力特性测试及振动台试验. 如图 5 所示, 试验中的测点共有 2 处, 第一测点采用电荷加速度传感器置于振动台台面处, 第二测点采用 ICP 加速度传感器置于 TMD 质量块上.

表 1 阻尼器各参数组合表

Tab. 1 Damper parameters

编号	质量块/kg	弹簧刚度/ $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$	液体组合
S1	0.5	22	100 cs+350 cs
S2			100 cs+500 cs
S3			350 cs+500 cs
S4	0.5	44	100 cs+350 cs
S5		88	100 cs+350 cs
S6	0.25	22	100 cs+350 cs
S7	1		

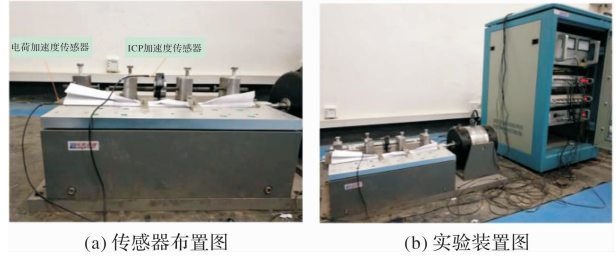


图 5 新型变阻尼式 TMD 性能试验图

Fig. 5 The new variable damping TMD performance test diagram

选取加速度峰值为 50 gal 的白噪声作为激励沿 X 方向输入, 扫频时间为 30 s, 采样频率为 1 000 Hz, 以获得 7 组变阻尼 TMD 的自振频率, 而阻尼比则采用半功率带宽法来确定, 计算公式如下.

$$\zeta = \frac{f_2 - f_1}{2f} \times 100\% = \frac{\Delta f}{2f} \times 100\% \quad (14)$$

其中, f 为装置的自振频率; f_1 、 f_2 为相应自振频率两侧自振频率对应幅值的 $1/\sqrt{2}$ 倍时的扰动频率. 得到 7 组 TMD 的自振频率和相应的阻尼比如表 2 所示. 然后再选取加速度峰值分别为 70 gal、100 gal、200 gal、300 gal、400 gal、500 gal 的 Kobe 波, 按照公式 (13) 测定 7 组变阻尼式 TMD 的等效阻尼力.

表 2 TMD 装置的自振频率和阻尼比

Tab. 2 The vibration frequency and damping ratio of the TMD device

TMD 装置名称	自振频率		阻尼比
	计算值/ Hz	实测值/ Hz	
S1	1.06	0.97	0.015
S2	1.06	0.97	0.018
S3	1.06	0.97	0.024
S4	1.49	1.46	0.015
S5	2.11	1.95	0.015
S6	1.49	1.26	0.015
S7	0.75	0.68	0.015

2.2 试验结果及分析

由图 6 可以看出, 在 Kobe 波作用下, TMD 装置的等效力响应区间与实际地震输入基本一致, 在加载前 10 s 内, 由于地震加速度较小, 等效阻尼力也很弱; 当时间处于 10~25 s 区间时, 等效力出现响应并达到峰值, 由于 Kobe 波在 15.17 s 时加速度达到了峰值, 此时 TMD 最大等效力也出现在 15 s 左右; 随着地震波强度减弱, TMD 等效力也随之逐渐减小并趋于平稳直至地

震激励结束. 当地震输入加速度峰值分别为 70 gal、100 gal、200 gal、300 gal、400 gal、500 gal 时, 测得 S4 变阻尼式 TMD 的等效阻尼力峰值分别为 0.633 3 N、1.026 9 N、1.214 6 N、2.584 2 N、3.328 1 N、3.452 5 N, 由此可知, 变阻尼式 TMD 在地震波的作用下, 等效阻尼力随地震加速度峰值增大而增大. 图 7 为 7 组变阻尼式 TMD 的等效阻尼力随地震加速度变化的关系图. 通过上述图表可知: 在相同加速度峰值的地震作用下, 当变阻尼式 TMD 的液体组合黏度, 刚度和质量增大时, 其等效阻尼力也随之增大, 且随着地震加速度峰值的增加, 它们的等效阻尼力增长幅度也相应增大, 这表明该变阻尼式 TMD 在大震时减振效果更好.

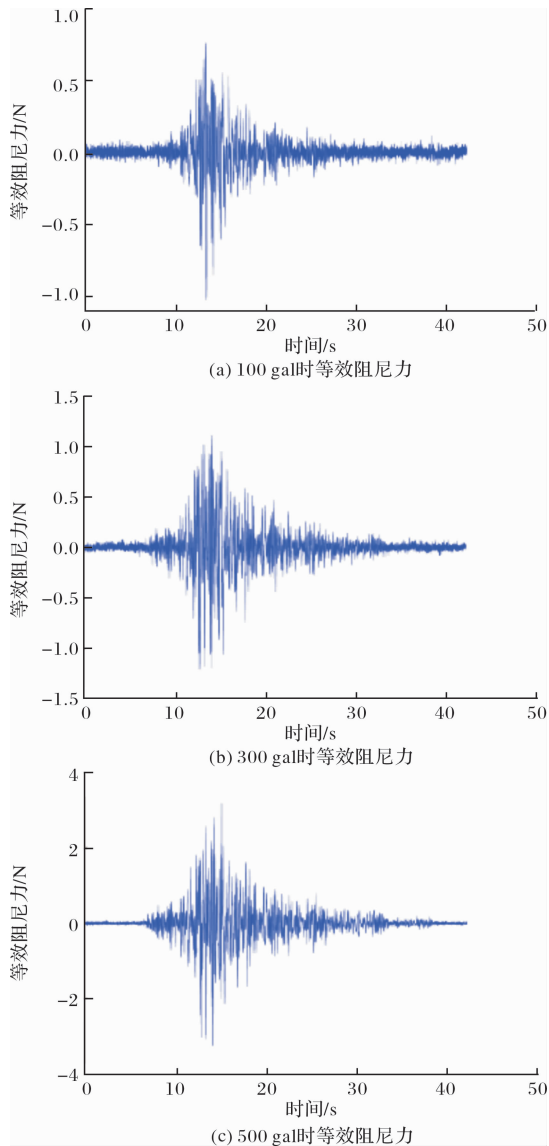


图 6 编号为 S4 的变阻尼式 TMD 的等效阻尼力时程曲线
Fig. 6 The equivalent damping force time history curve of the TMD S4

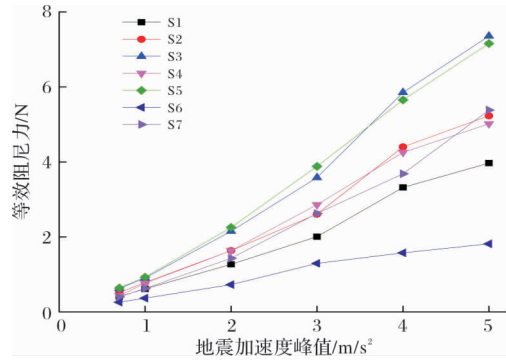


图 7 变阻尼式 TMD 等效阻尼力随地震加速度峰值变化图

Fig. 7 TMD Equivalent Damping Force with Earthquake Acceleration Peak Change Diagram

3 基于遗传算法的变阻尼式 TMD 控制体系的参数优化

3.1 遗传算法优化分析

为了研究变阻尼式 TMD 的阻尼系数 c^* 、频率比 f 和限制位移 D (相对于主系统的最大位移值) 等参数对受控系统的动力响应的影响规律, 并寻找最优值, 以获取对受控系统的最佳控制效果. 采用遗传算法, 选取受控系统的最大位移作为优化目标函数, 即:

$$J = \max(x) \quad (15)$$

其中, J 为目标函数值, x 为地震作用下主系统的位移响应.

本文的目标函数可定义适应度函数为

$$\begin{aligned} \min_{f, \xi, D} J(f, c^*, D) \\ s. \quad t.: c_{\min}^* \leq c^* \leq c_{\max}^* \\ f_{\min} \leq f \leq f_{\max} \\ D_{\min} \leq D \leq D_{\max} \end{aligned} \quad (16)$$

取单自由度主系统的参数为: 单位质量, 周期 2.6 s, 阻尼比 0.05, 分析模型如图 8 所示.

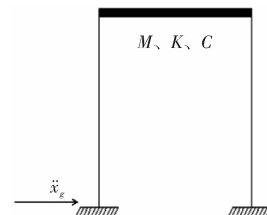


图 8 计算分析模型图

Fig. 8 Computational analysis model diagram

参考 Den Hartog^[11] 给出的单自由度结构 TMD 最优频率比和阻尼表达式, 取频率比的下限值 f_{\min} 和上限值 f_{\max} 分别为 0.1 和 1.2, 阻尼系数的下限值 c_{\min}^* 和上限值 c_{\max}^* 分别为 0 和 4; 限制位移

的下限值 D_{\min} 和上限值 D_{\max} 分别为 0 m 和 1.0 m; 质量比 μ 分别为 0.01、0.02、0.05、0.1、0.2、0.3、0.4. 地震动输入采用加速度峰值为 0.4 g 的 El-Centro 波, 时长为 54 s. 用遗传算法进行计算

时, 初始种群取为 40 个, 遗传代数为 200 代, 交叉概率为 0.8, 变异概率为 0.05. 同时引入传统 TMD, 并作对比分析, 计算结果分别如表 3 和 4 所示.

表 3 变阻尼式 TMD 优化结果

Tab. 3 Optimization results of variable damping TMD

质量比	阻尼系数 c_1^*	阻尼系数 c_2^*	频率比 f	阻尼器限制位移 D/m	受控系统位移最大值/ m		减震效果
					有控	无控	
0.01	1.698 9	2.427 0	1.029	0.531	0.298		0.06
0.02	1.798 1	2.982 3	1.027	0.429	0.279		0.12
0.05	1.975 6	3.136 0	1.021	0.51	0.228		0.28
0.10	2.067 7	3.279 6	0.954	0.565	0.171	0.317	0.46
0.20	2.327 1	3.441 3	0.922	0.442	0.133		0.58
0.30	2.409 0	3.535 2	0.865	0.412	0.117		0.63
0.40	2.844 2	3.842 1	0.862	0.239	0.107		0.66

表 4 传统 TMD 优化结果

Tab. 4 Optimization results of traditional TMD

质量比	阻尼系数 c^*	频率比 f	位移最大值/ m		减震效果
			有控	无控	
0.01	0.002 9	1.029	0.298		0.06
0.02	0.011 9	1.027	0.285		0.10
0.05	0.043 6	1.005	0.247		0.22
0.10	0.111 3	0.922	0.206	0.317	0.35
0.20	0.250 4	0.864	0.174		0.45
0.30	0.432 6	0.853	0.152		0.52
0.40	0.668 5	0.865	0.136		0.57

3.2 参数优化结果及分析

图 9 是最优个体收敛进程图, 由图中可以看出, 该算法能够在较短的进程内趋近于最优值, 能够从侧面反映出算法的稳定性和收敛性较好. 从表 3 和表 4 可以看出, 变阻尼式 TMD 和传统 TMD 的优化结果同质量比的影响较大, 随着质量比的增加, 最优减震效果显著增强, 且变阻尼式 TMD 的减震效果高于传统 TMD; 同时两者的最优频率比均呈现逐渐减小趋势, 但变化范围均处于 1 附近, 两种 TMD 的阻尼系数均随着质量比的增大呈现逐渐增大的趋势, 同时, 变阻尼式 TMD 的最优阻尼系数 c_1^* 均小于最优阻尼系数 c_2^* .

图 10 为不同质量比下, 变阻尼式 TMD 与传统 TMD 对受控系统的最优减震效果的对比图. 由图中可知, 随着质量比的增加, 两种型式 TMD 减震效果逐渐增强, 当质量比较小时, 两种型式 TMD 的减震效果比较接近, 且均较小, 由表 3 和表 4 可知, 当质量比为 0.01 时, 两种型式 TMD 减震效果均仅有 6%; 随着质量比的增加, 变阻尼式 TMD 的减震优势则逐渐凸显出来, 较传统

TMD 而言, 变阻尼式 TMD 的减震效果可提高 15% 左右; 随着质量比的增加, 最优减震效果增长的趋势逐渐降低, 虽然质量比越大减震效果越明显, 但是质量比过大, 势必造成子结构的质量增加, 这将给施工造成不便. 当质量比为 0.1 时, 10 图中出现拐点, 最优减震效果的增加趋势逐渐趋近于平缓, 综合考虑, 建议取阻尼器的最优质量比为 0.1 为佳.

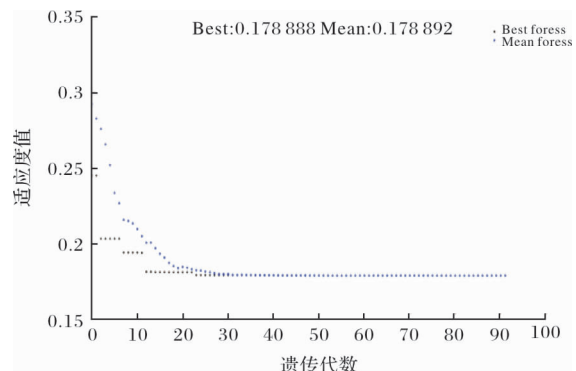


图 9 遗传算法迭代图

Fig. 9 Genetic algorithm iterative graph

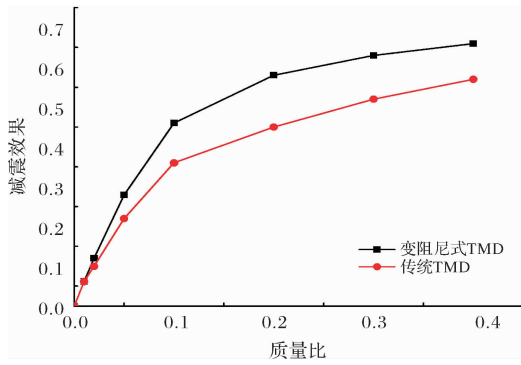


图 10 两种 TMD 优化结果对比图

Fig. 10 Comparison of optimization results between traditional TMD and variable damping TMD

图 11 为质量比为 0.1 时, 受控系统的位移最大值与变阻尼式 TMD 的限制位移的关系变化图, 由图中可以看出, 随着限制位移的增加, 主系统的最大位移呈现先降低后增加, 最后呈现平直段的现象, 这表明随着限制位移的增加, 变阻尼式 TMD 对受控系统的位移最大值的减震效果呈现先增加后降低的趋势, 平直段主要是由于限制位移超过变阻尼式 TMD 运动的最大位移所致. 因此, 存在一个最佳限制位移, 使得变阻尼式 TMD 的减震效果达到最优, 在对变阻尼式 TMD 设计制作之前, 应对其进行数值分析, 将其最优限制位移寻找出来.

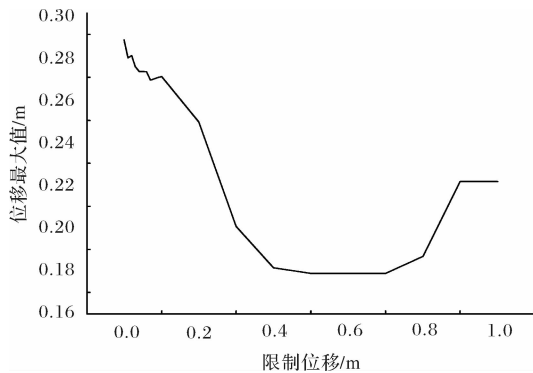


图 11 限制位移与优化效果图

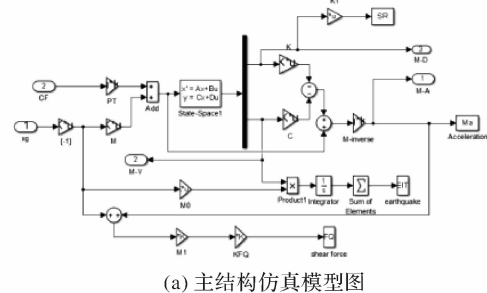
Fig. 11 Limit displacement and optimization effect diagram

4 变阻尼式 TMD 控制体系 Simulink 仿真模拟分析

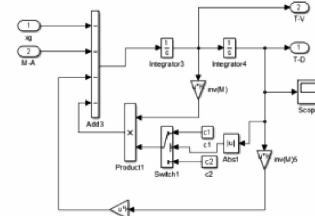
4.1 Simulink 仿真建模

数值分析采用的模型为一单自由度结构模型, 假设主系统的质量为 1 kg, 基本周期为 2.6 s, 阻尼比为 0.05, 变阻尼式 TMD 的参数采用上述质量比为 0.1 时的各项最优参数, 即最优频率比 f 为 0.954, 最优阻尼系数 c_1^* 为 $2.0677 \text{ N}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$, 最优阻尼系数 c_2^* 为 $3.2796 \text{ N}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$, 最优限制位移 D 为 0.565 m. 变阻尼式 TMD 减震体系 Simulink 仿真模型如图 12 所示, 该模型由主系统

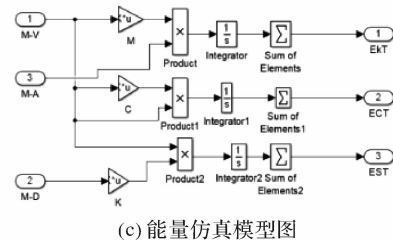
模块, 变阻尼式 TMD 模块, 控制力模块和能量模块四大子系统构成. 输入 \ddot{x}_g , CF 分别表示为地震加速度和被动控制力; 输出 M-A, M-V, M-D 分别为主系统相对于地面的加速度, 速度和位移; T-V 和 T-D 分别为变阻尼式 TMD 相对主系统的速度和位移; ETT 为变阻尼式 TMD 所转移能量; EKT, EST 和 ECT 分别是主系统的动能、应变能和阻尼耗能. 选用 El-Centro 波作为输入的地震波激励, 其加速度峰值分别设置为 0.07 g, 0.2 g 和 0.4 g, 最后对比分析主系统在变阻尼式 TMD 的减振控制作用(有控状态)下和无 TMD 的控制(无控状态)下的动力响应和能量变化.



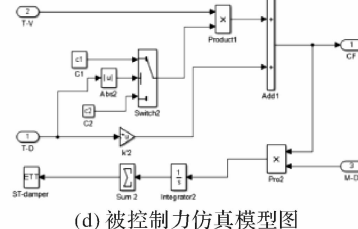
(a) 主结构仿真模型图



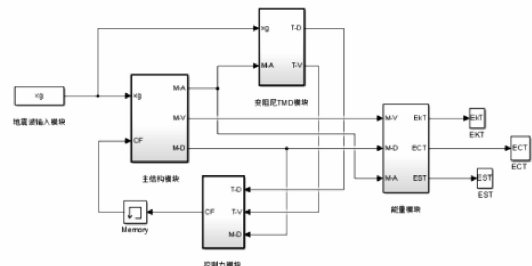
(b) 变阻尼式TMD仿真模型图



(c) 能量仿真模型图



(d) 被控制力仿真模型图



(e) 结构-变阻尼TMD式主模型图

图 12 Simulink 模型图

Fig. 12 The main model of the SDOF damping system

4.2 仿真结果及分析

由图 13 可知, 该变阻尼式 TMD 能够很好的控制主系统的位移和加速度响应. 但是在地震动作用前期, 变阻尼式 TMD 的控制效果不是特别明显, 这主要是由于在前 5 s 作用下, 该变阻尼式 TMD 并没有启动, 对主系统的控制效果不明显. 从图 14 中可知, 随着地震动幅值的增大, 主系统的位移和加速度均呈现增大的趋势, 且两线段间的竖直距离呈现同样的变化规律, 这表明, 随着地震动幅值的增加, 该变阻尼式 TMD 对主系统的减震效果逐渐增大; 同时, 即使在小震作用下, 变阻尼式 TMD 的减震效果也能达到 20% 作用, 这充分体现了该变阻尼式 TMD 的优越性. 变阻尼式 TMD 在不同地震动幅值作用下的减震效果如表 5~6 所示. 由表 5~6 可知, 变阻尼式 TMD 能够有效地降低主系统在地震作用下的动力响应, 且能够取得较好地减震控制效果. 当地震动的加速度幅值分别为 0.07 g、0.2 g、0.4 g 时, 结构的位移分别降低了 19%、30%、46%; 此时, 变阻尼式 TMD 对主系统的加速度的减振效果分别为 22%、34%、42%.

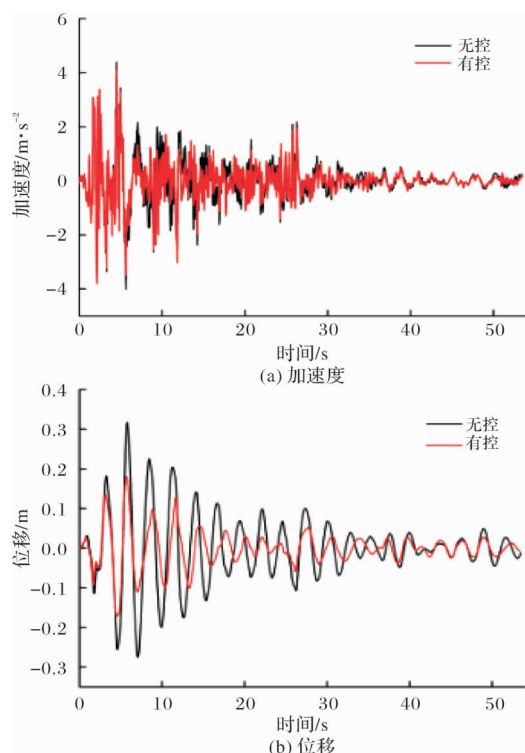


图 13 0.4 g 地震作用下结构的响应曲线

Fig. 13 Response curve of structure under the effect of the 0.4 g earthquake

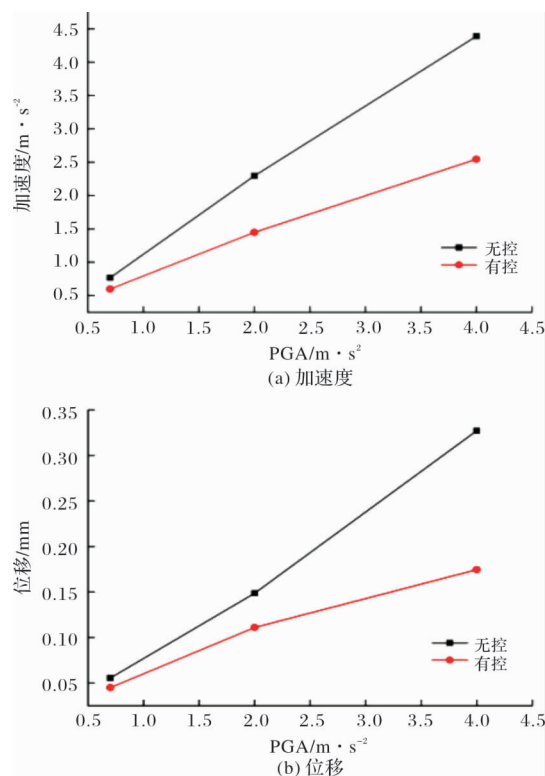


图 14 响应峰值曲线图

Fig. 14 Comparison of displacement and acceleration amplitude under seismic response

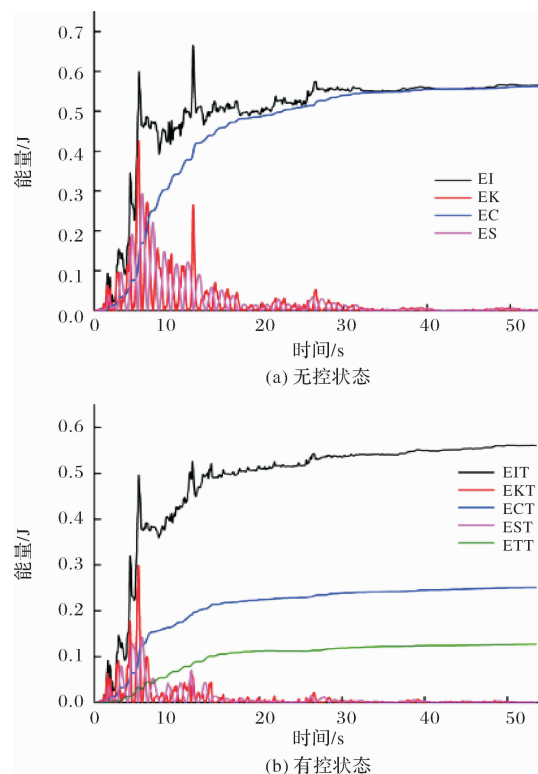


图 15 0.4 g 作用下能量平衡示意图

Fig. 15 Structural energy balance diagram under 0.4 g EI-Centro wave

表 5 不同幅值下位移减震效果(m)

Tab. 5 Displacement damping effect under different amplitudes/m

	0. 07 g	0. 2 g	0. 4 g
无控	0.055 6	0.158 6	0.317 2
有控	0.044 9	0.111 0	0.171 1
减震效果/%	19	30	46

表 6 不同幅值下加速度减震效果(m/s²)

Tab. 6 Acceleration damping effect under different amplitudes (m/s²)

	0. 07 g	0. 2 g	0. 4 g
无控	0.767 9	2.194 1	4.388 2
有控	0.598 9	1.448 1	2.545 2
减震效果/%	22	34	42

在不同幅值的 El-Centro 波的激励下，无控状态和有控状态下主系统的能量平衡示意图如图 15 所示。由图可知，对于弹性单自由度系统而言，主系统在地震作用下吸收的能量，转化为动能，应变能，阻尼耗能，其中动能和应变能仅参与受控结构的能量转换，但并不耗散地震能量，主系统的能量主要依靠阻尼耗散。当主系统附加上变阻尼式 TMD 后，可明显看到地震输入至主系统的能量得到减少，这主要是因为主系统由原来的单纯依靠自身阻尼消耗能量，转变成依靠自身阻尼和变阻尼式 TMD 两种方式来消耗能量，故结构的各能量成分得到减少，从而保护了主系统。

5 结论

本文在传统 TMD 的基础上研发了一种新型变阻尼式 TMD，对其进行了力学性能试验，基于遗传算法对该减震装置的相关参数进行了优化计算，并与传统 TMD 进行了对比分析，最后利用 Matlab/Simulink 工具箱对一弹性单自由度结构体系进行了减振仿真分析，得到了以下结论：

(1) 力学性能试验表明：当变阻尼式 TMD 的质量保持不变时，该减震装置对主系统输出的等效阻尼力随着装置的刚度和液体黏度的增大而增大；随着地震动幅值的增加，其等效阻尼力增长幅度也相应增大，故该减震装置在大震时的减振效果更好。

(2) 参数优化分析表明：随着质量比的增加，该减震装置的最优频率比逐渐降低，而最优阻尼系数则逐渐增大。在质量比相同的情况下，随着限制位移的增大，该变阻尼式 TMD 的对结构的减震效果是先增大后降低的。

(3) 仿真计算结果表明：该变阻尼式 TMD 能够

很好的控制结构的加速度和位移响应，且随着地震动幅值的增大，变阻尼式 TMD 的减震效果也增大。

参考文献 References

- [1] 李晓玮,施卫星. 人行天桥 MTMD 减振控制的鲁棒性研究[J]. 结构工程师,2012, 28(4): 7-12.
LI Xiaowei, SHI Weixing. Research on robustness of vibration control of pedestrian bridges using multi degree of freedom passive tuned mass-dampers[J]. Structure Engineers, 2012, 28(4) : 7-12.
- [2] MCNAMARA R J. Tuned mass dampers for building [J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 1977, 103(9): 1785-1798.
- [3] GU M, XIANG H. Optimization of TMD for suppressing buffeting response of long-span bridges[J]. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 1992, 42(1-3):1383-1392.
- [4] WIRSCHING P H, YAO J T P. Safety design concepts for seismic structures[J]. Computers & Structures, 1973, 3(4):809-826.
- [5] DONG R G. Vibration-absorber effect under seismic excitation [J]. Journal of the Structural Division, 1976, 102 (10): 2021-2031.
- [6] OHNO S, WATARI A, SANO I. Optimum tuning of the dynamic damper to control response of structures to earthquake ground motion [C]//Proc. 6th World Conf. on Earthq. Eng. India: New Delli: [s. n.],1977, 3: 157-161.
- [7] JAGADISH K S, PRASAD B K R, RAO P V. The inelastic vibration absorber subjected to earthquake ground motions[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 1979, 7(4):317-326.
- [8] 薛建阳,翟磊,闫春生. 高层转运站结构的动力分析及振动控制研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版),2015,47(4):477-481.
XUE Jianyang, ZHAI Lei, YAN Chunsheng. Dynamic analysis and research on vibration control of high-rise transfer station structures[J]. J. of Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition),2015,47 (4):477-481.
- [9] 袁俊,王虎长,胡建民,等. 1 000 kV 大跨越输电线路钢管塔风振响应及振动控制研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版),2014,46(3):360-366.
YUAN Jun, WANG Huchang, HU Jianmin, et al. Wind-induced dynamic response and vibration control of steel tubular tower in the 1000 kV large span crossing transmission line[J]. J of Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition),2014,46(3):360-366.

(下转第 839 页)

- 抗倒塌能力研究[A]//第12届高层建筑抗震技术交流会,北京:[s.n.],2009:46-57.
- SHI Wei, YE Lieping, LU Xingzheng. Study on the collapse-resistant Capacity of RC Frames with Different Seismic Fortification Levels [A]//12th seismic resistant meeting of high rise building, Beijing:[s.n.], 2009,46-57.
- [10] Fib (CEB-FIP). Displacement-based seismic design of reinforced concrete buildings[R]. Bulletin 25. Sprint-Stuttgart;Digital-Druck. 2003.
- [11] Massumi, Tasnimi A. SAATCIOGLUM A, Prediction of seismic overstrength in concrete moment resisting frames using incremental static and dynamic analysis[C]// Proc. 13th WCEE. Canada: Vancouver; IAEE. 2004.
- [12] HUMMAR J, L, RAGOZAR M A. Concept of overstrength in seismic design[C]// Proc. 11th WCEE. Mexico: Acapulco. IAEE. 1996.
- [13] 杨文侠,李春燕,顾强. Y形偏心支撑钢框架 SAP2000 非线性分析模型[J]. 兰州理工大学学报, 2011, 36(6):1-4.
- YANG Wenxia, LI Chunyan, GU Qiang. The SAP2000 nonlinear analysis model of eccentrically braced steel frame with Y-links [J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2011, 36(6): 1-4.
- [14] BOORE D M, JOYNER W B, FUMAL T E. Equations for estimating horizontal response spectra and peak accelerations from western North America earthquakes[J]. A summary of recent work, Seismological Research Letters. 1997, 68 (1):128-153.
- [15] BAKER J, W. Vector-valued ground motion intensity measures for probabilistic seismic demand analysis, [D]. Stanford: Stanford University. 2005.
- [16] BAKER J, W, CORNELL C, A,. Spectral shape, epsilon and record selection[J]. Earthquake Engineering. & Structural Dynamics, 2006,34(10):1193-1217.
- [17] QKAZAKI, Arce G. Experimental study of local buckling, overstrength, and fracture of link in eccentrically braced frames [J]. Journal of Structural Engineering. 2005, 131(10): 1526-1535.
- (编辑 桂智刚)

(上接第 805 页)

- [10] 成伟民,尚鹏,闫春生,等. 多层转运站结构的振动控制与加固分析[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版),2015,47(1):82-86.
- CHENG Yimin, SHANG Peng, YAN Chunsheng. Analysis on vibration control and repair of truck and coal transporting trestle[J]. J. of Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2015, 47(1): 82-86.
- [11] DEN Hartog J P. Mechanical vibrations[M]. 4th ed. NY: Mc Graw Hill, 1956.
- [12] WARBURTON G B. Optimum absorber parameters for various combinations of response and excitation parameters [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 1982, 10(3):381-401.
- [13] ROBERSON R E. Synthesis of a non-linear dynamic vibration absorber [J]. Journal of Franklin Institute, 1952, 254(3):205-220.
- [14] 李春祥. 多重调谐质量阻尼器最优动力特性的趋势[J]. 上海交通大学学报, 2002, 36(11):1652-1655.
- LI Chunxiang. Trend of optimal dynamic characteristics of multiple tuned mass dampers [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2002, 36(11): 1652-1655.
- [15] 刘纲,杨溥,彭闯. 基于多目标遗传算法的阻尼器抗震加固方案研究[J]. 建筑结构学报, 2016, 37(S1): 55-61.
- LIU Gang, YANG Pu, PENG Chuang. Research on seismic strengthening scheme with damper using multi-objective genetic algorithm [J]. Journal of Building Structures, 2016, 37(S1): 55-61.
- [16] RANA R, SOONG T T. Parametric study and simplified design of tuned mass dampers[J]. Engineering Structures, 1998, 20(3):193-204.
- (编辑 吴海西 沈 波)