

地震作用下调谐黏滞质量阻尼器阻尼比增效效应 与优化设计研究

贺 辉¹, 郝霖霏², 谭 平², 游春华¹, 向 越²

(1. 湖南工学院土木与建筑工程学院, 湖南 衡阳 421002; 2. 广州大学土木工程学院, 广东 广州 510006)

摘要: 调谐黏滞质量阻尼器(Tuned Viscous Mass Damper, TVMD)是一种有效的被动惯容减震装置,本文针对地震作用下建筑结构 TVMD 阻尼比增效效应与优化设计展开研究。将 TVMD 对结构自身阻尼耗能功率的控制效果归纳为 TVMD 等效附加阻尼比,并基于随机振动理论推导了等效附加阻尼比的理论表达式。为了使 TVMD 更具实际应用价值,TVMD 理论上应取得比同阻尼系数的黏滞阻尼器(VD)更大的等效附加阻尼比,这一现象定义为 TVMD 阻尼比增效效应,并定义了阻尼比增效系数来量化评估阻尼比增效效应。将等效附加阻尼比和阻尼比增效系数均作为优化目标,提出了 TVMD 最优设计参数理论解。参数分析结果表明,本文解具有良好的稳定性和适用性,为了更高效地发挥阻尼比增效效应,推荐 TVMD 质量比不超过 0.3 或阻尼比不超过 0.1。以某七层标准钢框架结构作为工程算例展示了 TVMD 设计流程,并验证了本文解的有效性和优越性。算例分析结果表明,使用本文解设计 TVMD 能显著放大其阻尼元件变形,表现出了理想的阻尼比增效效应。与传统解相比,本文解还具有另一个明显优势,即保证 TVMD 的减震效果优于同阻尼系数的 VD,不存在减震效率问题。

关键词: 调谐黏滞质量阻尼器; 阻尼比增效效应; 等效附加阻尼比; 理论解

中图分类号: TU352.1; TU318 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-4523(2024)05-0812-10

DOI: 10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.2024.05.009

引 言

地震是危及建筑结构安全的主要自然灾害之一,振动控制技术能有效减轻结构地震破坏程度、提高结构安全性^[1-4]。调谐黏滞质量阻尼器(TVMD)是一种有效的被动惯容减震控制装置,近年来,其已成为国内外众多学者关注的焦点^[5]。TVMD 一般由惯容元件、刚度元件和阻尼元件组成,其中,惯容元件与阻尼元件并联后,再与刚度元件串联。根据其内部联结形式,潘超等^[6-8]将 TVMD 称为混联 II 型惯容减震系统。与传统质量元件不同的是,惯容元件的惯性力与其两端点之间的相对加速度成比例,可以得到远大于其物理质量的惯容系数,表现出显著的质量增效与负刚度效应,从而使添加惯容元件后的调谐质量减震装置大幅轻量化^[9]。

TVMD 作为一种典型的调谐类阻尼器,其减震性能与设计参数息息相关^[5]。Ikago 等^[10]基于定点理论提出了 TVMD 的最优设计参数理论解,并对 TVMD 的减震性能进行了小尺寸振动台试验验证。

Huang 等^[11]考虑简谐激励对线性与非线性阻尼 TVMD 进行了优化设计,研究表明,相对于线性阻尼 TVMD,非线性阻尼 TVMD 能获得相近甚至更好的减震效果,且激励幅值对其减震性能也会有影响。考虑到地震动的随机性,Chen 等^[12]基于高斯白噪声激励研究了 TVMD 的优化设计问题,研究发现,TVMD 能在更小的阻尼系数和物理质量前提下,获得与 TMD 类似甚至更好的减震效果,发挥了惯容元件的质量放大效应。Lu 等^[13]对连体结构-TVMD 体系进行了随机优化设计,得到了 TVMD 最佳布置方案及最优设计参数,研究结果表明 TVMD 是一种有效的连体建筑结构减震装置。从 TVMD 理论模型来看,相较于传统黏滞阻尼器(Viscous Damper, VD),TVMD 包含惯容元件与刚度元件,具备了调谐功能。由于惯容元件和刚度元件通常会使阻尼器工作原理更加复杂且造价更高,为了使其在工程应用中更具有实用价值,TVMD 理论上应取得比同阻尼系数的 VD 更好的减震效果。然而,He 等^[14]研究发现,使用传统定点理论解设计 TVMD 可能存在减震效果不及同阻尼系数的 VD

收稿日期: 2022-06-11; **修订日期:** 2022-10-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52378292);湖南省自然科学基金资助项目(2024JJ6198,2024JJ7120);湖南省教育厅科学研究项目(22B0858,23A0628);衡阳市科技创新项目(202250045150)。

的情况,暴露出传统优化设计方法的减震效率较低的问题。

鉴于此,本文将TVMD对结构自身阻尼耗能功率的减震效果归纳为等效附加阻尼比,并提出TVMD阻尼比增效效应来描述其减震效率。以减震效果和减震效率同时达到最优状态作为优化目标,提出TVMD的最优设计参数理论解。本文将从结构-TVMD体系理论模型、TVMD等效附加阻尼比理论表达式、阻尼比增效效应基本概念、阻尼比增效系数的定义以及TVMD的最优设计参数理论解等方面逐一展开研究。

1 结构-TVMD体系理论模型

1.1 体系运动方程

基于模态分解法将主结构简化为如图1所示的单一自由度模型^[12,14],则地震地面加速度 \ddot{x}_g 作用下的结构-TVMD体系运动方程可表示为:

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_T \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_T \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_1 & 0 \\ 0 & c_T \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_T \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 + k_T & -k_T \\ -k_T & k_T \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_T \end{Bmatrix} = - \begin{Bmatrix} m_1 \\ 0 \end{Bmatrix} \ddot{x}_g \quad (1)$$

式中 m_1, c_1 和 k_1 分别为主结构的质量、阻尼和刚度系数; m_T, c_T 和 k_T 分别为TVMD的惯容、阻尼和刚度系数; x_1 为主结构的位移响应; x_T 为TVMD惯容元件两端的相对位移响应。

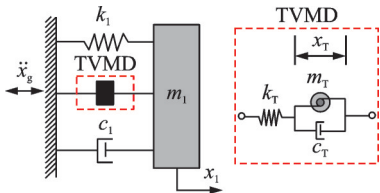


图1 单自由度结构-TVMD体系理论模型^[14]

Fig.1 Theoretical model of an SDOF primary structure system with a TVMD^[14]

为便于分析,定义系统参数如表1所示,并进一步将式(1)简化为以下形式:

表1 系统参数定义

Tab.1 Definition of system parameters

参数	定义
$\omega_1 = \sqrt{k_1/m_1}$	主结构振动频率
$\omega_T = \sqrt{k_T/m_T}$	TVMD频率
$\zeta_1 = c_1/(2m_1\omega_1)$	主结构阻尼比
$\zeta_T = c_T/(2m_1\omega_1)$	TVMD阻尼比
$\mu = m_T/m_1$	TVMD质量比
$\gamma = \omega_T/\omega_1$	TVMD频率比

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \mu \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_T \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} 2\zeta_1\omega_1 & 0 \\ 0 & 2\zeta_T\omega_1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_T \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \omega_1^2 + \mu\gamma^2\omega_1^2 & -\mu\gamma^2\omega_1^2 \\ -\mu\gamma^2\omega_1^2 & \mu\gamma^2\omega_1^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_T \end{Bmatrix} = - \begin{Bmatrix} 1 \\ 0 \end{Bmatrix} \ddot{x}_g \quad (2)$$

1.2 功率平衡方程

根据功率平衡原理,将主结构运动方程表示成功率形式^[15]:

$$W_K + W_P + W_D + W_T = W_I \quad (3)$$

式中 W_K 和 W_P 分别为主结构的动能和弹性势能功率; W_D 为主结构的自身阻尼耗能功率; W_T 为转移到TVMD系统的功率,简称转移功率; W_I 为地震输入功率。

将式(2)左右两侧同时乘以 \dot{x}_1 ,可得:

$$\begin{aligned} W_K &= \dot{x}_1 \dot{x}_1, W_P = \omega_1^2 x_1 \dot{x}_1, \\ W_D &= 2\zeta_1\omega_1 \dot{x}_1^2, W_I = -\dot{x}_g \dot{x}_1, \\ W_T &= (\mu\gamma^2\omega_1^2 x_1 - \mu\gamma^2\omega_1^2 x_T) \dot{x}_1 \end{aligned} \quad (4)$$

由式(4)可知,主结构的地震输入功率 W_I 部分转移至TVMD系统中,从而减小了其自身阻尼耗能功率 W_D ,进而可减少结构损伤。因此,本文将 W_D 作为主要性能评价指标之一,对TVMD进行减震性能评估与优化设计。

假定地震地面加速度 \ddot{x}_g 是强度为 S_0 的理想高斯白噪声,则 W_D 的均值可表示为:

$$E(W_D) = 2\zeta_1\omega_1 E(\dot{x}_1^2) \quad (5)$$

此时,可将主结构速度响应均方值表示为^[16]:

$$E(\dot{x}_1^2) = S_0 \int_{-\infty}^{\infty} |H_1(i\omega)|^2 d\omega \quad (6)$$

式中 ω 为地震动频率,则主结构速度频响函数可表示为:

$$H_1(i\omega) = \frac{\mu i\omega^3 + 2\zeta_T\omega_1\omega^2 - (\mu\gamma^2\omega_1^2)i\omega}{\Omega} \quad (7)$$

分母 Ω 可通过下式确定:

$$\begin{aligned} \Omega &= \mu\omega^4 - i\omega^3(2\mu\zeta_1\omega_1 + 2\zeta_T\omega_1) + \mu\gamma^2\omega_1^4 - \\ &\omega^2[\omega_1^2(\mu + \gamma^2\mu^2 + \gamma^2\mu + 4\zeta_1\zeta_T)] + \\ &i\omega[2\omega_1^3(\gamma^2\mu\zeta_T + \gamma^2\mu\zeta_1 + \zeta_T)] \end{aligned} \quad (8)$$

2 TVMD阻尼比增效效应

2.1 TVMD等效附加阻尼比

在建筑结构中安装TVMD,主要是为了增加结构的振动阻尼,达到控制结构地震响应的目的。TVMD减震效果越好,结构增加的阻尼也就越大,结构增加的这部分阻尼比可称为TVMD等效附加阻尼比 ζ_s 。为了推导 ζ_s 的理论表达式,可将结构-

TVMD 体系替换为一个阻尼比为 ζ_e 的等效结构,则等效结构的速度频响函数可表示为:

$$\bar{H}_1(i\omega) = \frac{i\omega}{\omega_1^2 - \omega^2 + 2i\zeta_e\omega_1\omega} \quad (9)$$

等效结构速度响应均方值可进一步表示为:

$$E(\bar{x}_1^2) = S_0 \int_{-\infty}^{\infty} |\bar{H}_1(i\omega)|^2 d\omega = \frac{\pi S_0}{2\zeta_e\omega_1} \quad (10)$$

为确保等效过程中主结构自身阻尼耗能功率 W_D 保持一致,存在^[17]:

$$E(\bar{x}_1^2) = E(x_1^2) \quad (11)$$

由此可得:

$$\zeta_e = \frac{\pi}{2\omega_1} \frac{1}{\int_{-\infty}^{\infty} |H_1(i\omega)|^2 d\omega} \quad (12)$$

其中:

$$\int_{-\infty}^{\infty} |H_1(i\omega)|^2 d\omega = \frac{\pi}{2\omega_1} \frac{\epsilon_4\gamma^4 + \epsilon_2\gamma^2 + \epsilon_0}{\kappa_4\mu^4 + \kappa_3\mu^3 + \kappa_2\mu^2 + \kappa_1\mu + \kappa_0} \quad (13)$$

其中:

$$\begin{aligned} \epsilon_4 &= \mu^2[(\mu^2 - \mu + 1)\zeta_T + \mu^2\zeta_1], \\ \epsilon_2 &= 2\mu\zeta_T[(2\zeta_1^2 + 2\zeta_1\zeta_T + \mu - 1)\mu + 2\zeta_1\zeta_T + 2\zeta_T^2], \\ \epsilon_0 &= \zeta_T(\mu^2 + 4\mu\zeta_1\zeta_T + 4\zeta_T^2), \\ \kappa_4 &= \gamma^4\zeta_1(\zeta_1 + \zeta_T), \kappa_3 = 2\gamma^2\zeta_1\zeta_T, \\ \kappa_2 &= \zeta_T[4\gamma^2\zeta_1^3 + 4\gamma^2\zeta_1^2\zeta_T + (\gamma^2 - 1)^2\zeta_1 + \gamma^4\zeta_T], \\ \kappa_1 &= 4\zeta_1\zeta_T^2[(\gamma^2 + 1)\zeta_1 + \gamma^2\zeta_T], \\ \kappa_0 &= 4\zeta_1\zeta_T^3 \end{aligned} \quad (14)$$

TVMD 等效附加阻尼比 ζ_s 可表示为等效结构阻尼比 ζ_e 与主结构阻尼比 ζ_1 的差值:

$$\zeta_s = \zeta_e - \zeta_1 = \frac{\kappa_4\mu^4 + \kappa_3\mu^3 + \kappa_2\mu^2 + \kappa_1\mu + \kappa_0}{\epsilon_4\gamma^4 + \epsilon_2\gamma^2 + \epsilon_0} - \zeta_1 \quad (15)$$

从上述 ζ_s 理论表达式的推导过程中不难发现, ζ_s 越大, TVMD 对主结构自身阻尼耗能功率 W_D 的控制效果越好。因此,为了让 TVMD 的减震效果更加显著, TVMD 优化设计应尽可能使 ζ_s 取最大值。

2.2 TVMD 阻尼比增效系数

相较于 VD 而言, TVMD 包含惯容元件与刚度元件,具备了调谐功能。由于惯容元件和刚度元件通常会使阻尼器工作原理更加复杂且造价更高,为了使其工程应用更具有实用价值, TVMD 理论上应取得比同阻尼系数的 VD 更大的等效附加阻尼比,这一现象可定义为 TVMD 阻尼比增效效应。为了

量化评估阻尼比增效效应,定义 TVMD 的阻尼比增效系数 G 为:

$$G = \zeta_s - \zeta_T \quad (16)$$

式中 ζ_T 不仅是 TVMD 的阻尼比,也等于同阻尼系数的 VD 提供给结构的等效附加阻尼比(如表 1 所示)。因此, G 大于零时,相较于 VD 而言, TVMD 能提供给结构更大的等效附加阻尼比,减震效果更佳,表现出理想的阻尼比增效效应。而 $G < 0$ 时, TVMD 的减震效果弱于同阻尼系数的 VD,此时使用惯容元件会降低阻尼器耗能减震效果,存在明显的减震效率问题,无法展现出 TVMD 应有的阻尼比增效效应。因此,为了使 TVMD 的工程应用更加高效合理, TVMD 优化设计应在确保 G 大于零的前提下进行。

3 TVMD 最优设计参数

3.1 最优设计参数理论解

为了确保 G 大于零,保障 TVMD 的减震效果优于同阻尼系数的 VD,展现出合理的阻尼比增效效应,本文以阻尼比增效系数 G 作为优化目标,对 TVMD 进行优化设计。同时,为了使 TVMD 对主结构自身阻尼耗能功率的控制效果达到最优,选取 TVMD 频率比 γ 与质量比 μ 作为优化参数,则存在以下关系式:

$$\frac{\partial G}{\partial \gamma} = \frac{\partial \zeta_s}{\partial \gamma} = 0, \quad \frac{\partial G}{\partial \mu} = \frac{\partial \zeta_s}{\partial \mu} = 0 \quad (17)$$

显然, TVMD 设计参数满足上述关系式时,其减震效果与减震效率能同时达到最优状态。为求解 TVMD 最优设计参数理论解,假定主结构阻尼为零($\zeta_1=0$),由式(15)和(16)可得 G 的解析表达式为:

$$G = \frac{\mu^2\gamma^4\zeta_T}{\mu^4\gamma^4 + \mu^3\gamma^2(2-\gamma^2) + \mu^2(\gamma^2-1)^2 + 4\zeta_T^2(1+\mu\gamma^2)} - \zeta_T \quad (18)$$

通常情况下质量比 μ 会被提前确定^[10],所以 TVMD 优化设计也是确定其频率比与阻尼比的过程。将式(18)代入式(17),整理可得 TVMD 的最优频率比 γ_{opt} 和最优阻尼比 ζ_{Topt} 分别为:

$$\begin{aligned} \gamma_{opt} &= \sqrt{\frac{1}{\mu} \left(\frac{1}{\sqrt{1-2\mu}} - 1 \right)}, \\ \zeta_{Topt} &= \frac{\sqrt{2-3\mu + (\mu-2)\sqrt{1-2\mu}}}{2} \end{aligned} \quad (19)$$

观察式(19)可以发现,为了保证 TVMD 的各物理参数均为实数,本文提出的 TVMD 最优设计参数

理论解仅在 $\mu < 0.5$ 的情况下成立。此外,由于理论解是基于无阻尼主结构推导而来的,因此有必要分析主结构阻尼对 TVMD 最优设计参数的影响规律。

3.2 参数分析

考虑主结构阻尼的影响,对 TVMD 最优设计参数进行如图 2 所示的分析验证,图中数值解为穷举法计算结果。可以看出,不考虑主结构阻尼 ($\zeta_1 = 0$) 时,理论解与数值解基本一致,验证了本文推导的 TVMD 最优设计参数理论解的正确性。 γ_{opt} 和 ζ_{Topt} 均与质量比 μ 呈正相关关系,这是因为 μ 越大,转移功率 W_T 理论上就越大,这就要求 TVMD 有足够大的刚度和阻尼系数来消耗 W_T 。从图 2 中还可以观察到, $\mu \leq 0.3$ 时,主结构阻尼比 ζ_1 对 TVMD 最优设计参数的影响较小。例如 $\mu = 0.3$ 且 $\zeta_1 \neq 0$ 时, ζ_{Topt} 理论解与数值解相差小于 1.4%, γ_{opt} 的理论解与数值解差距也不超过 2.3%。由于一般情况下 μ 较小 (通常 $\mu \leq 0.3$)^[12],因此可认为对于有阻尼主结构而言,本文推导的 TVMD 最优设计参数理论解也具有较好的适用性。 $\mu > 0.3$ 时,随着 μ 的进一步增大, γ_{opt} 对 ζ_1 的增大变得敏感, γ_{opt} 理论解的误差也会不断增加,可能导致使用理论解设计的 TVMD 无法达到或接近其最优工作状态。

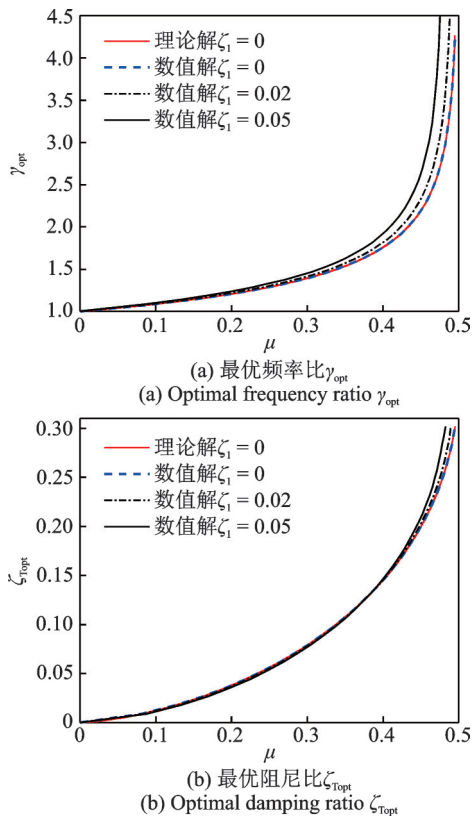


图 2 TVMD 最优设计参数分析验证

Fig. 2 Verification and analysis results of TVMD optimal design parameters

为了进一步检验根据本文理论解设计的 TVMD 的工作性能,以等效附加阻尼比 ζ_s 和阻尼比增效系数 G 作为评价指标,对 TVMD 的减震效果与效率进行如图 3 所示的对比分析。图中,为便于展示 TVMD 阻尼比增效效应,将横坐标设置为 ζ_T 。从图 3 中可以看出, $\mu > 0.3$ 且 $\zeta_1 \neq 0$ 的情况下,虽然 γ_{opt} 和 ζ_{Topt} 与理论解的误差较大,但使用理论解设计的 TVMD 工作性能依然接近其最优状态,再次验证了本文所提理论解良好的稳定性和适用性。

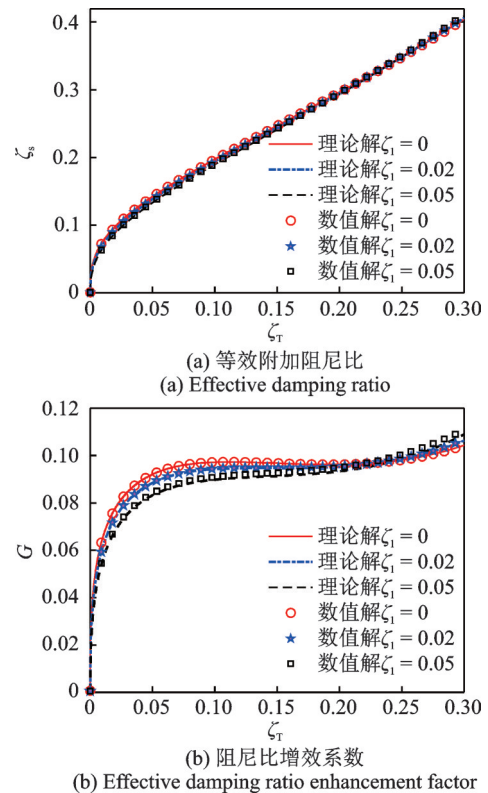


图 3 TVMD 工作性能对比分析

Fig. 3 Contrastive analysis of TVMD working performance

从图 3(a) 中不难发现, ζ_1 对 ζ_s 的影响较小,表明主结构阻尼对 TVMD 减震效果的影响不大。然而,如图 3(b) 所示, ζ_1 对 G 的影响较为显著。 $\zeta_T \leq 0.22$ 时, G 与 ζ_1 呈负相关关系,即增大主结构阻尼会削弱 TVMD 的阻尼比增效效应。但是, $\zeta_T > 0.22$ 时, G 与 ζ_1 呈正相关关系,此时增大主结构阻尼对增强 TVMD 的阻尼比增效效应是有益的。由以上分析结果可知, $\zeta_T > 0.22$ 时,将 TVMD 与其他耗能装置组合使用是合理的,并且能在提高 TVMD 减震效率的前提下,进一步加强对结构自身阻尼耗能功率的控制效果。

结合图 2(b) 和图 3 可以发现,随着 μ 和 ζ_T 的增大, ζ_s 和 G 均增大,说明增大 TVMD 的质量和阻尼能有效提升其工作性能。然而, $\zeta_T > 0.1$ 或 $\mu > 0.3$ 时,继续增大 ζ_T 和 μ 无法明显改善 TVMD 阻尼比增

效应。因此,从主结构自身阻尼耗能功率的角度出发,为了更高效地发挥 TVMD 阻尼比增效效应,本文推荐 TVMD 的质量比 μ 不超过 0.3 或阻尼比 ζ_T 不超过 0.1。

观察图 3(b) 可以发现, ζ_1 和 ζ_T 取不同值时, G 均大于零,说明使用本文所提理论解设计的 TVMD 可确保 G 大于零,保证 TVMD 的减震效果优于同阻尼系数的 VD,不存在减震效率问题。从 G 的定义也可以看出,阻尼比增效效应本质上描述的是 TVMD 的减震效率问题。以使用理论解设计的 TVMD 为例, $\zeta_1 = 0.02$ 且 $\zeta_T = 0.10$ 时, $G = 0.095$,表明相对于同阻尼系数的 VD 而言,TVMD 的等效附加阻尼比从 0.1 提高到了 0.195,此时可认为其减震效率提升了 95%。

3.3 理论解对比分析

Ikago 等^[10]基于传统定点理论推导的 TVMD 最优设计参数理论解为:

$$\begin{aligned} \gamma_{\text{opt}} &= \sqrt{\frac{1}{1-\mu}}, \\ \zeta_{T\text{opt}} &= \frac{\mu}{2} \sqrt{\frac{3\mu}{(1-\mu)(2-\mu)}} \end{aligned} \quad (20)$$

为便于描述,将式(20)称为 TVMD 最优设计参数传统解。为了进一步展示本文理论解的优越性,将本文解与传统解进行了对比分析,结果如图 4 和 5 所示。从图 4 中可以看出,最优频率比 γ_{opt} 的本文解与传统解均与质量比 μ 成正比,且本文解大于传统解。类似地,最优阻尼比 $\zeta_{T\text{opt}}$ 的本文解与传统解也与 μ 呈正相关关系,但随着 μ 的增大,本文解会小于传统解。

图 5 对比分析了不同理论解时 TVMD 的工作性能。从图 5(a) 中可以看出, $\mu \leq 0.1$ 时,使用本文解设计 TVMD 的等效附加阻尼比 ζ_s 与传统解基本一致,说明二者对主结构自身阻尼耗能功率的控制效果差别不大。 $\mu > 0.1$ 时,相较于传统解,本文解

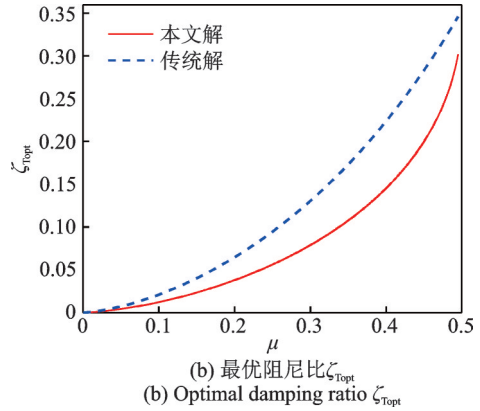
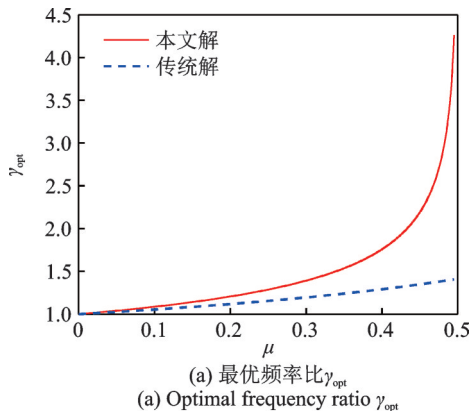


图 4 TVMD 最优设计参数与理论解的对比分析

Fig. 4 Contrastive analysis of the theoretical solution with TVMD optimal design parameters

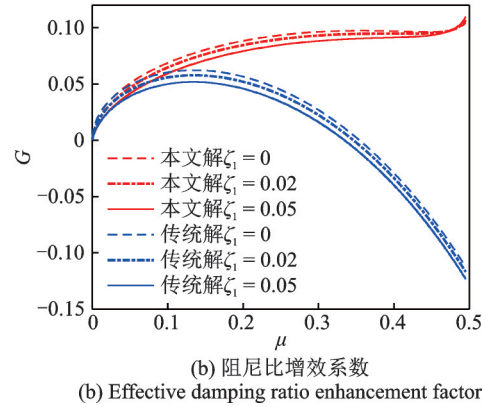
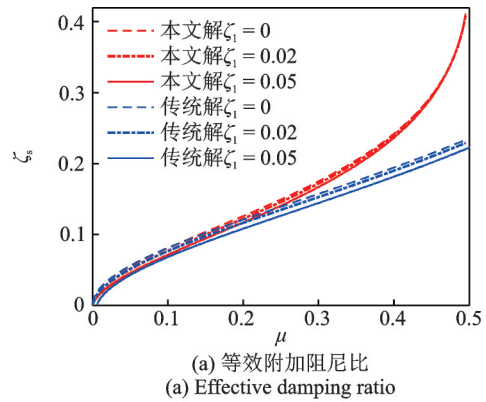


图 5 不同理论解设计的 TVMD 工作性能对比分析

Fig. 5 Contrastive analysis of the working performance of TVMD designed by different theoretical solutions

设计的 TVMD 能获得更大的 ζ_s ,且随着 μ 的进一步增大,二者的差距会越来越显著。因此,可认为使用本文解设计的 TVMD 减震效果优于传统解,且随着 μ 的增大,本文解在减震效果方面的优势会越来越明显。

通过观察图 5(b) 可以发现,使用本文解设计 TVMD 的阻尼比增效系数 G 大于传统解,且随着 μ 的增大,二者的差距会变得更加显著。结合图 4(b) 可知,这是因为相对于传统解,本文解能在 TVMD 自身阻尼比 $\zeta_{T\text{opt}}$ 较小的情况下,达到更大的 ζ_s ,从而

获得更大的阻尼比增效系数,体现出更好的减震效率。随着 μ 的增大,使用传统解设计的 TVMD 阻尼比增效系数 G 会先增大后减小。需要特别注意的是,使用传统解设计的 TVMD 可能会使其 G 值小于零,此时 TVMD 的减震效果弱于同阻尼系数的 VD,暴露出明显的减震效率问题。而使用本文解设计的 TVMD 能保证 G 大于零,不存在减震效率问题。

根据以上分析结果可知,本文解能在 TVMD 自身阻尼系数最小的情况下,获得最大的等效附加阻尼比,从而达到最优的阻尼比增效效应。因此,使用本文解设计 TVMD 能使其减震效果和减震效率均达到最优状态。值得一提的是,与传统解相比,本文解还具有另一个明显优势,即保证 TVMD 减震效果优于同阻尼系数的 VD,不存在减震效率问题。

4 工程算例

以某七层钢框架结构作为工程算例^[18],展示 TVMD 设计流程,并从地震时程响应角度验证本文所提 TVMD 最优设计参数理论解的有效性。算例结构数值模型如图 6 所示,图中,TVMD 的质量比取为 0.2,结构各阶模态阻尼比均为 0.02。通常情况下,为了使 TVMD 安装方便且减震效果突出,可将其安装在结构底层^[19-20]。假定 TVMD 安装在结构底层用于控制结构一阶模态响应,此时地震地面加速度 \ddot{x}_g 作用下的结构-TVMD 体系运动方程可表示为:

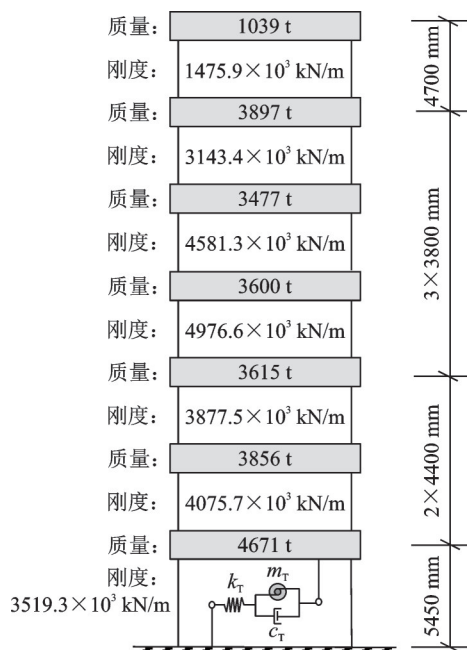


图 6 七层钢框架结构数值模型示意图

Fig. 6 Schematic diagram of the numerical model of a 7-story steel frame structure

$$M\ddot{\mathbf{u}}(t) + C\dot{\mathbf{u}}(t) + K\mathbf{u}(t) = -M\mathbf{I}\ddot{x}_g(t) + F_{TVMD} \quad (21)$$

式中 M, C 和 K 分别为主结构 $n \times n$ 维质量、阻尼和刚度矩阵,本文 $n=7$; $\ddot{\mathbf{u}}(t), \dot{\mathbf{u}}(t)$ 和 $\mathbf{u}(t)$ 分别为主结构 $n \times 1$ 维加速度、速度和位移响应向量; \mathbf{I} 为 $n \times 1$ 维单位向量; F_{TVMD} 为 TVMD 提供给主结构的 $n \times 1$ 维控制力,可表示为:

$$F_{TVMD} = \{-k_T(u_1 - x_T), 0, \dots, 0\}^T \quad (22)$$

需要注意的是,此处 u_1 表示结构底层位移动应。由此可得 TVMD 运动方程为:

$$m_T \ddot{x}_T + c_T \dot{x}_T = k_T(u_1 - x_T) \quad (23)$$

类似地,将式(21)左右两侧同时乘以 $\dot{\mathbf{u}}(t)$,可得系统各部分功率表达式为:

$$\begin{aligned} W_K &= \dot{\mathbf{u}}^T(t) M \ddot{\mathbf{u}}(t), W_P = \mathbf{u}^T(t) K \dot{\mathbf{u}}(t), \\ W_D &= \dot{\mathbf{u}}^T(t) C \dot{\mathbf{u}}(t), W_I = -M \mathbf{I} \ddot{x}_g(t) \dot{\mathbf{u}}(t), \\ W_T &= -F_{TVMD} \dot{\mathbf{u}}(t) \end{aligned} \quad (24)$$

假定使用本文解与传统解设计的 TVMD 分别为 TVMD1 和 TVMD2,设计结果如表 2 所示。同时,为了研究阻尼比增效效应,假定与 TVMD1 和 TVMD2 阻尼系数相同的黏滞阻尼器分别为 VD1 和 VD2,二者均安装在结构底层。值得一提的是,

表 2 减震装置设计结果与结构一阶模态参数分析结果

Tab. 2 Design results of different damping devices and analysis results of structural first modal parameters

减震装置名称	设计依据	参数	取值
TVMD1	阻尼比增效效应(本文解)	质量比 μ	0.200
		惯容系数 m_T/t	3.640×10^4
		频率比 γ	1.206
		刚度系数 $k_T/(kN \cdot m^{-1})$	3.014×10^6
		阻尼比 ζ_T	0.0378
		阻尼系数 $c_T/(kN \cdot s \cdot m^{-1})$	1.039×10^5
TVMD2	定点理论(传统解)	质量比 μ	0.200
		惯容系数 m_T/t	3.640×10^4
		频率比 γ	1.118
		刚度系数 $k_T/(kN \cdot m^{-1})$	2.589×10^6
		阻尼比 ζ_T	0.0645
		阻尼系数 $c_T/(kN \cdot s \cdot m^{-1})$	1.773×10^5
VD1	与 TVMD1 阻尼系数相同	阻尼系数 $c_T/(kN \cdot s \cdot m^{-1})$	1.039×10^5
VD2	与 TVMD2 阻尼系数相同	阻尼系数 $c_T/(kN \cdot s \cdot m^{-1})$	1.773×10^5
—	—	结构一阶模态质量/t	1.820×10^5
—	—	结构一阶模态周期/s	0.833

注:计算结构模态质量前需将模态进行归一化处理。

由于TVMD最优设计参数理论解是基于单自由度结构推导而来的,使用模态分解法计算结构模态质量前需将模态进行归一化处理^[19]。由表2可知,在质量比相等的情况下($\mu=0.2$),相对于TVMD2而言,TVMD1的刚度系数增大了14.10%,阻尼系数减小了70.64%,这与图4的计算结果是一致的。

为了更直观地展示TVMD对结构自身阻尼耗能功率的控制效果与阻尼比增效效应,选取一组白噪声地震动^[8]和两组经典地震记录^[21](1940 El Centro N-S分量和1952 Taft N-S分量)作为输入,进行时程响应分析,结果如图7~10所示。

图7表示结构自身阻尼耗能功率 W_D 的时程,可以看出,TVMD和VD均展现出了较好的控制效果。表3整理了结构自身阻尼耗能功率均值减震率分析结果。以白噪声地震动为例,VD1,VD2,TVMD1和TVMD2控制下的结构 W_D 均值减震率分别为62.91%,73.41%,74.79%和69.31%,显然TVMD1的控制效果最佳。相较于VD1,TVMD1

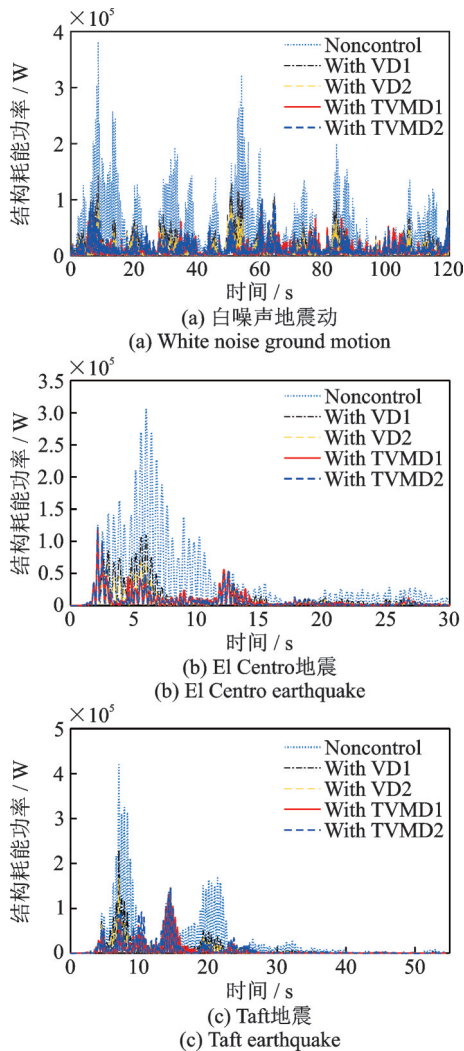


图7 地震激励下结构自身阻尼耗能功率时程
Fig. 7 Time-history of the dissipation power response of the structural inherent damping under seismic excitations

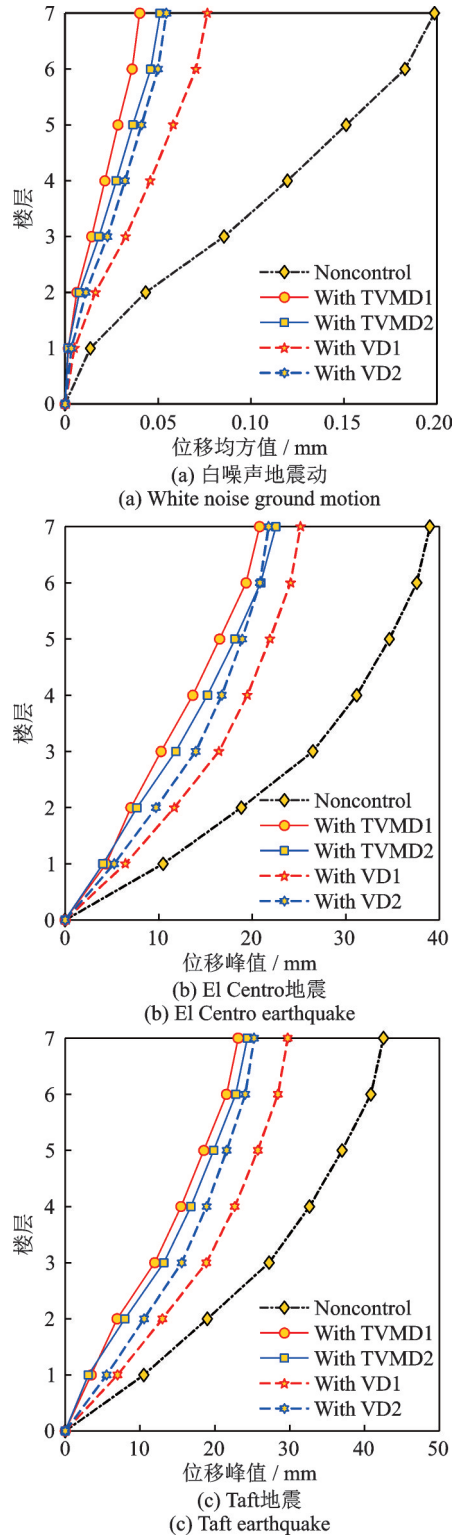


图8 地震激励下结构楼层位移响应
Fig. 8 Floor displacement response of the primary structure under seismic excitations

的控制效果提升了11.88%,表现出优良的阻尼比增效效应和减震效率。需要注意的是,TVMD2减震效果稍弱于VD2,无法体现出TVMD应有的阻尼比增效效应,一定程度上暴露出其减震效率问题。

图8对比了不同工况下结构的楼层位移响应,图中,白噪声地震动作用下仅统计结构位移响应均方值,El Centro和Taft地震作用下计算结构位移响

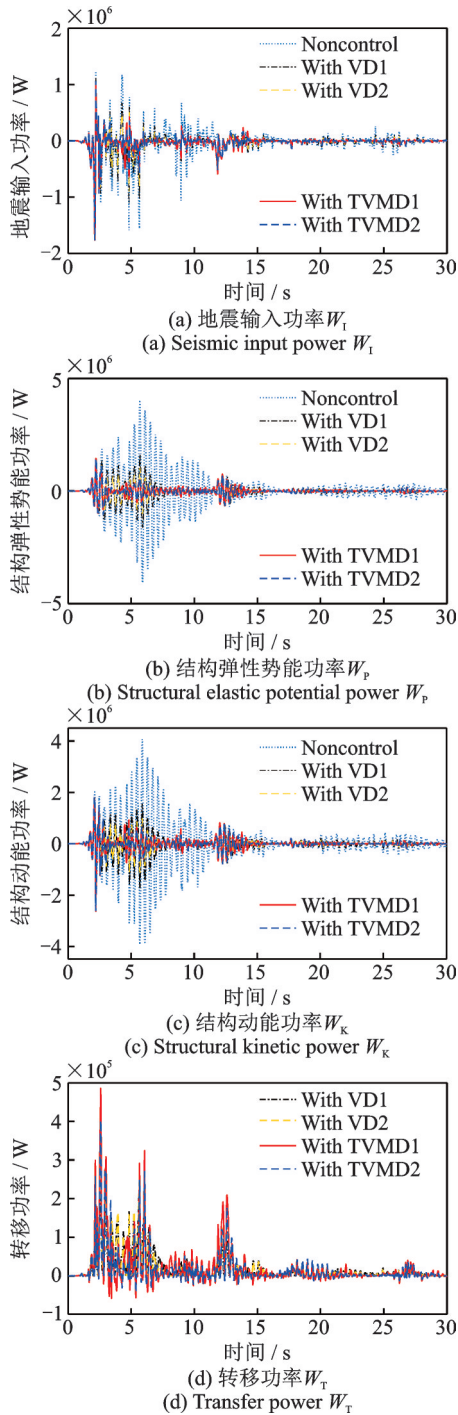


图 9 El Centro地震作用下体系功率时程响应

Fig. 9 Time-history of system power response under the El Centro earthquake

应峰值。可以观察到,TVMD1的减震效果最好且明显优于VD1,而TVMD2与VD2的减震效果接近。综合图7和8的分析结果可知,传统解设计的TVMD可能存在减震效率问题,本文解设计的TVMD减震效果更佳且展现出了优良的阻尼比增效效应,不存在减震效率问题,验证了本文解的有效性和优越性。

以El Centro地震记录为例,从体系功率响应的角度分析TVMD的减震机理,结果如图9所示。从

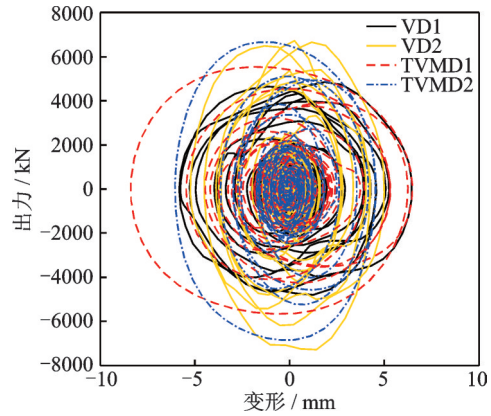


图 10 El Centro地震作用下阻尼元件力与变形曲线
Fig. 10 Relationship between force and deformation of damping element under the El Centro earthquake

表 3 结构自身阻尼耗能功率均值减震率分析结果

Tab. 3 Analysis results of the average mitigation ratio for the dissipation power response of the structural inherent damping

减震装置名称	均值减震率/%		
	白噪声地震动	El Centro地震	Taft地震
TVMD1	74.79	77.17	71.63
TVMD2	69.31	76.72	64.60
VD1	62.91	65.67	60.90
VD2	73.41	76.95	71.37

注:均值减震率=(减震装置控制下的结构响应均值-无控状态下的结构响应均值)/无控状态下的结构响应均值。

图9中可以看出,TVMD能有效降低主结构的地震输入功率 W_1 。此外, W_1 部分转移至TVMD系统中,不仅能减小结构自身阻尼耗能功率 W_D ,还能有效控制结构弹性势能功率 W_P 和结构动能功率 W_K ,进而减少结构损伤。相较于TVMD2而言,TVMD1的转移功率 W_T 更大,这是TVMD1减震效果更好的主要原因之一。需要注意的是,VD的转移功率 W_T 大于零,而TVMD的 W_T 可能小于零,说明地震作用下不仅存在结构向TVMD转移功率的现象,同时TVMD也可能向结构转移功率。这是因为TVMD惯容元件与刚度元件仅具备能量转移功能,在转移的能量无法完全流入其阻尼元件的情况下,会反向流回结构中,从而导致 W_T 小于零。换言之,如果TVMD设计不当,导致其 W_T 大部分时间小于零,则TVMD无法有效耗散结构振动能量,甚至可能会放大结构地震响应(例如结构在12s时刻 W_P 和 W_K 的响应),这使得TVMD优化设计成为其实现实际工程应用的关键环节之一。显然,使用本文解优化设计的TVMD转移功率最大且大部分时间大于零,减震效果显著。

为进一步研究 TVMD 的耗能效率,图 10 给出了 El Centro 地震作用下不同减震装置阻尼元件的力与变形曲线。从图 10 中可以看出,相较于 VD2, TVMD2 阻尼元件变形并没有明显放大,表明传统解设计的 TVMD 无法显著改善其耗能效率。而 TVMD1 阻尼元件的最大变形相比于 VD1 增大了 23.22%,说明使用本文解设计的 TVMD 能很好地提高其阻尼元件耗能效率,展现出合理的阻尼比增效效应,兼顾了减震效果与减震效率。上述分析结果也侧面反映出,本文解能在 TVMD 自身阻尼系数最小的情况下获得最好的减震效果,从而达到理想的阻尼比增效效应,解决了传统解可能存在的减震效率问题,使得 TVMD 更具实际工程应用价值。

5 结 论

(1) 将 TVMD 对结构自身阻尼耗能功率的控制效果归纳为 TVMD 等效附加阻尼比,并推导了 TVMD 等效附加阻尼比的理论表达式,由此提出了阻尼比增效效应的基本概念,并定义了阻尼比增效系数。

(2) 提出了 TVMD 最优设计参数理论解,该解仅在质量比 $\mu < 0.5$ 的情况下成立。分析结果表明,本文解具有良好的稳定性和适用性,且为了更高效地发挥 TVMD 阻尼比增效效应,本文推荐 TVMD 质量比不超过 0.3 或阻尼比不超过 0.1。

(3) 本文解能在 TVMD 自身阻尼系数最小的情况下获得最大的等效附加阻尼比,从而达到最优的阻尼比增效效应。因此,使用本文解设计的 TVMD 能极大地提高其阻尼元件耗能效率,展现出合理的阻尼比增效效应,兼顾了减震效果与减震效率。与传统解相比,本文解还具有另一个明显优势,即保证 TVMD 的减震效果优于同阻尼系数的 VD,不存在减震效率问题。

(4) 如果 TVMD 设计不当,可能导致其转移功率大部分时间小于零,则 TVMD 无法有效耗散结构振动能量,甚至可能会放大结构地震响应,这使得 TVMD 优化设计成为其实现实际工程应用的关键环节之一。时程分析结果表明,使用本文解优化设计的 TVMD 转移功率最大且大部分时间大于零,减震效果显著。

参考文献:

- [1] Soong T T, Dargush G F. Passive Energy Dissipation Systems in Structural Engineering[M]. New York: John Wiley & Sons, 1997.
- [2] 欧进萍. 结构振动控制: 主动、半主动和智能控制[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [3] Housner G W, Bergman L A, Caughey T K, et al. Structural control: past, present, and future[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1997, 123(9): 897-971.
- [4] Spencer B F Jr, Nagarajaiah S. State of the art of structural control[J]. Journal of Structural Engineering, 2003, 129(7): 845-856.
- [5] Ma R, Bi K, Hao H. Inerter-based structural vibration control: a state-of-the-art review[J]. Engineering Structures, 2021, 243: 112655.
- [6] 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.
- [7] 潘超, 张瑞甫, 王超, 等. 单自由度混联 II 型惯容减震体系的随机地震响应与参数设计[J]. 工程力学, 2019, 36(1): 129-137. PAN Chao, ZHANG Ruifu, WANG Chao, et al. Stochastic seismic response and design of structural system with series-parallel-II inerter system[J]. Engineering Mechanics, 2019, 36(1): 129-137.
- [8] 潘超, 韩笑, 张瑞甫, 等. 耗能增效惯容系统的自适应权重粒子群优化[J]. 振动工程学报, 2022, 35(5): 1233-1241. PAN Chao, HAN Xiao, ZHANG Ruifu, et al. Adaptively weighted particle swarm optimization for damping enhanced inerter system[J]. Journal of Vibration Engineering, 2022, 35(5): 1233-1241.
- [9] Cao Liyuan, Li Chunxiang. A high performance hybrid passive base-isolated system[J]. Structural Control and Health Monitoring, 2022, 29(3): e2887.
- [10] 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.
- [11] Huang Z W, Hua X G, Chen Z Q, et al. Optimal design of TVMD with linear and nonlinear viscous damping for SDOF systems subjected to harmonic excitation[J]. Structural Control and Health Monitoring, 2019, 26(10): e2413.
- [12] Chen H T, Tan P. Optimal design of TVMD with linear and nonlinear viscous damping subjected to white-noise excitation[J]. Structural Control and Health Monitoring, 2021, 28(4): e2694.
- [13] 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.

- [14] He H, Tan P, Hao L F, et al. Optimal design of tuned viscous mass damper for acceleration response control of civil structures under seismic excitations[J]. *Engineering Structures*, 2022, 252(7):113685.
- [15] 李祥秀,谭平,刘良坤,等.基于功率法的TMD系统参数优化与减振性能分析[J].*振动与冲击*, 2014, 33(17):6-11.
LI Xiangxiu, TAN Ping, LIU Liangkun, et al. Parametric optimization and aseismic performance of a TMD system based on power method[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2014, 33(17):6-11.
- [16] Crandall S H, Mark W D. *Random Vibration in Mechanical Systems*[M]. New York: Academic Press, 1963: 127-139.
- [17] 贺辉,谭平,林松伟,等.随机地震作用下TMD等效附加阻尼比研究[J].*振动与冲击*, 2022, 41(1): 107-115.
HE Hui, TAN Ping, LIN Songwei, et al. Equivalent additional damping ratio of TMD under random earthquake[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2022, 41(1): 107-115.
- [18] 张瑞甫,吴明瑞,周方圆,等.利用惯容隔震系统的结构层间隔震研究[J].*世界地震工程*, 2020, 36(4): 8-16.
ZHANG Ruifu, WU Mingrui, ZHOU Fangyuan, et al. Research on mid-story isolation of structure using inerter isolation system[J]. *World Earthquake Engineering*, 2020, 36(4): 8-16.
- [19] Shen W, Niyitangamahoro A, Feng Z, et al. Tuned inerter dampers for civil structures subjected to earthquake ground motions: optimum design and seismic performance[J]. *Engineering Structures*, 2019, 198: 109470.
- [20] Lazar I F, Neild S A, Wagg D J. Using an inerter-based device for structural vibration suppression[J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2014, 43(8): 1129-1147.
- [21] 谭平,兰李,贺辉,等.悬吊结构体系优化设计及减震性能研究[J].*建筑科学与工程学报*, 2021, 38(1):51-60.
TAN Ping, LAN Li, HE Hui, et al. Optimal design and damping performance research of suspension structural system[J]. *Journal of Architecture and Civil Engineering*, 2021, 38(1): 51-60.

Effective damping ratio enhancement effect and optimal design of tuned viscous mass damper under seismic excitations

HE Hui¹, HAO Lin-fei², TAN Ping², YOU Chun-hua¹, XIANG Yue²

(1.College of Civil and Architecture Engineering, Hunan Institute of Technology, Hengyang 421002, China;

2.School of Civil Engineering, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China)

Abstract: Tuned viscous mass damper (TVMD) is widely recognized as one of the promising inerter-based devices. This study focused on investigation of the effective damping ratio enhancement effect and optimal design of TVMD for building structures under seismic excitations. The TVMD control performance for the structural inherent damping energy dissipation power was regarded as an effective damping ratio added to the primary structure. Further, a theoretical expression of the TVMD effective damping ratio was derived based on the random vibration theory. To make the application of TVMD more valuable, TVMD was expected to obtain a larger effective damping ratio compared to the viscous damper (VD) with the same damping coefficient, which was defined as the effective damping ratio enhancement effect. The effective damping ratio enhancement factor was introduced for the quantitative evaluation of the enhancement effect on the damping ratio. Both the effective damping ratio and the effective damping ratio enhancement factor were considered as optimization objectives, and a closed-form solution of TVMD optimum design parameters was therefore proposed. Analysis results showed that the proposed closed-form solution had an excellent applicability and stability. The TVMD mass ratio and damping ratio were recommended to be less than 0.3 and 0.1, respectively, for the sake of the best efficiency of the damping ratio enhancement effect. A 7-story steel benchmark model was taken as an engineering example to illustrate the TVMD optimal design process and to verify the validity and superiority of the proposed closed-form solution. It was found that the deformation of the damping element for TVMD designed by the proposed closed-form solution was amplified remarkably, demonstrating the desired effective damping ratio enhancement effect. Most importantly, compared to the traditional closed-form solution, the best advantage of the proposed closed-form solution is to ensure that TVMD control performance is better than VD with the same damping coefficient, regardless of control efficiency problem.

Key words: tuned viscous mass damper; effective damping ratio enhancement effect; effective damping ratio; closed-form solution

作者简介:贺辉(1992—),男,博士,讲师。E-mail:937675375@qq.com。

通讯作者:谭平(1973—),男,博士,研究员。E-mail:ptan@gzhu.edu.cn。