

基于功率法的桥梁-TMDI 系统减振性能研究

柴世宗^{1†} 蓝海涛²

(1. 中交特种工程有限公司, 武汉 430071)

(2. 中铁大桥局集团第四工程有限公司, 南京 210031)

摘要 探索一种新型的 TMDI 的布置方式, 来实现桥梁受地震荷载作用时的纵向振动控制. 首先对桥梁-TMDI 系统的受力模型进行简化, 并列出其功率平衡方程. 其次采用频域分析方法推导出主结构的位移响应谱, 再利用增广拉格朗日优化法进行参数设计. 最终从功率的角度揭示了 TMDI 系统在桥梁振动控制方面的技术优势, 探讨了桥梁周期和阻尼比对 TMDI 减振性能的影响.

关键词 桥梁, 地震, TMDI, 功率, 频域, 最优参数

中图分类号: TU352.1

文献标志码: A

Vibration Control of Bridge-TMDI System Based on Power Method

Chai Shizong^{1†} Lan Haitao²

(1. CCCC Special Engineering Technology Co., Ltd., Wuhan 430071, China)

(2. The 4th Co., Ltd, Zhongtie Major Bridge Engineering Group, Nanjing 210031, China)

Abstract Investigate a novel configuration of Tuned Mass Damper-Infinitesimal (TMDI) for achieving longitudinal vibration control of bridges under seismic loads. Firstly, simplify the mechanical model of the TMDI system installed on the bridge and present its power balance equation. Secondly, employ frequency domain analysis to derive the corresponding displacement spectrum of the main structure, followed by utilizing augmented Lagrange optimization method to design the parameters. Finally, elucidate the technical advantages of TMDI systems in controlling bridge vibrations from a power perspective and discuss how bridge period and damping ratio impact TMDI's vibration damping performance.

Key words bridges, earthquake, TMDI, power, frequency domain, optimal parameters

引言

众所周知, 桥梁作为交通路线的重要组成部分, 地震荷载会对它造成很大的危害. 一旦桥梁在地震作用下发生破坏, 便会造成大量的经济损失, 而且还会影响到抗震救灾工作的开展, 进一步造成更为严重的损失. 桥梁受地震荷载作用时, 可能会

产生过大的纵向位移, 从而对支座及伸缩缝造成不利影响, 更为严重的情况下可能会造成纵向落梁, 还可能会引起主梁与引桥和锚固墩的碰撞. 因此国内外许多学者为此做了大量的研究工作.

Tsai 与 Lee^[1] 利用粘滞阻尼器来抑制桥梁在地震荷载作用下的响应, 并推导出了粘弹性阻尼器的有限元公式. He^[2] 针对斜拉桥主梁纵向位移以

及塔底弯矩的控制问题,分析了可变刚度阻尼器的控制效果,结果表明:可变刚度阻尼器的控制效果较好.秦全顺和瞿伟廉^[3]针对天兴洲公铁两用斜拉桥,提出了液体粘滞阻尼器和MR阻尼器的混合控制方案.王蒂等^[4]研究了苏通大桥纵向振动控制方案,给出了阻尼器和弹性连接装置的对比结果.近些年来,一种被称为惯性器的新装置被开发出来,并且用于控制工程结构的振动响应.这种装置最早是由 Smith^[5]提出来的,它可以将线性运动转换为高速的转动来达到放大系统物理质量的目的.因此惯性器可以产生高于它的物理质量两个数量级的惯性力^[6].Marian 和 Giaralis^[7]提出将惯性器与传统的调谐质量阻尼器(TMD)结合起来形成调谐质量阻尼器惯性系统(TMDI),以减少结构的振动响应.Wen 等^[8]进一步比较和讨论了基于惯性的阻尼器 TID 和 TMDI 等装置在降低结构地震动方面的性能.Domenico 和 Ricciardi^[9]研究了基础隔震结构隔震层下方设置 TMDI,以提高抗震能力减小结构位移.他认为 TMDI 更高的鲁棒性降低了其对调谐频率和地震频率的敏感性,TMDI 特别适用于非线性基础独立结构.Xu^[10]采用 TMDI 来消减小跨度桥梁在涡激振动下产生的振动响应,TMDI 控制效果出色.Pietrosanti^[11]比较了位移方差最小化、加速度方差最小化和阻尼器消耗能量与总输入能量之比最大化为目标函数的三种参数设计方法,目的是了解如果采用不同的设计方法,TMDI 的优化参数是如何变化的.TMDI 还应用于电缆的振动控制^[12]、近海半潜式平台的波浪引起的振动^[13]和高层建筑物风致振动控制^[14].这些学者基于不同的优化准则,采用了数值搜索算法对特定结构中的 TMDI 系统进行了优化,使 TMDI 的控制效果达到最优.Lazar 等^[15]将惯性装置与阻尼和刚度元件结合起来,形成一个调谐惯性阻尼器(TID),并将其安装在建筑物相邻楼层之间,用于控制地震引起的振动.他还基于 Den Hartog 的调谐策略对产生正弦基底位移的结构进行研究,得出了一系列的调谐准则最终确定了 TID 系统的最优参数.Ikago^[16]提出了一种调谐粘滞质量阻尼器(TVMD)系统来减轻结构物的地震振动,同时他还推导了 SDOF 系统在谐波荷载激励下,TVMD 最优参数设计公式.从本质上讲,地震对结构的作用其实就是能量的转移和耗散的过程.当地震波输入到结构的能量小于

结构自身的耗散能力时结构是安全的,反之则会破坏.调谐惯性质量阻尼器 TMDI 作为一种有别于传统调谐质量阻尼器的减振装置,它对结构振动控制的过程本质上也是能量转移与耗散的过程.当地震荷载作用时,便会激发设置在主结构上的减振装置 TMDI 的运动,从而将主结构的部分能量传递给结构 TMDI,即能量通过 TMDI 的运动来消耗掉,从而减少主结构的能量.随着结构振动控制理论和实践应用的飞速发展,TMDI 作为新型的振动控制技术之一,被大家广泛关注.TMDI 对振动控制的有效性和优越性已经逐渐被大家接受.到目前为止,TMD 很少被应用在桥梁的纵向振动响应控制上.因为,如果选择 TMD 装置来对跨度较大的桥梁纵向振动响应进行控制时需要很大的质量块才能取得不错的减振效果,然而 TMD 的质量过大不利于在桥梁狭小的空间中安放.

为了解决这一问题,本文在前人的基础上,受调谐惯性质量阻尼器(TMDI)的启发探索出了一种新型的 TMDI 布置方式,来实现桥梁纵向振动控制.首先对桥梁—TMDI 系统的受力模型进行简化,并列出其功率平衡方程.其次采用频域分析方法推导出主结构的位移响应谱,再利用增广拉格朗日优化法进行最优参数设计.最终从功率的角度揭示了 TMDI 在桥梁振动控制方面的技术优势,探讨了桥梁周期和阻尼比对 TMDI 减振性能的影响.

1 桥梁—TMDI 系统

如图 1 所示,该装置由转向器、阻尼器、弹簧、质量块和惯性器五部分组成.当桥梁结构受到纵向地震荷载激励时,主梁的振动通过连接件和转向器传递给质量块和惯性器.转向器的作用是将主梁的

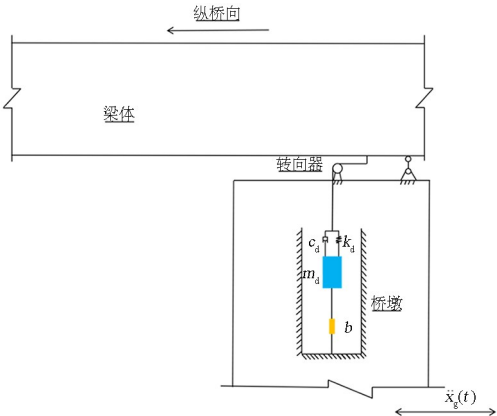


图 1 桥梁—TMDI 系统示意图
Fig. 1 Schematic of bridge-TMDI system

纵向振动转换为质量块的竖向振动,质量块下面设置惯性器,质量块和惯性器在竖直方向振动.这里的转向器是齿条驱动齿轮的机构.惯性器采用齿轮齿条式惯性器,这样主梁纵向振动的能量有一部分会被调谐惯性质量阻尼器吸收掉,从而达到抑制桥梁结构纵向振动的目的.

2 地震荷载激励的桥梁-TMDI 系统

本文依据力学原理将桥梁-TMDI 系统简化为如图 2 所示的单自由度结构-TMDI 系统,并基于单自由度结构-TMDI 系统的运动方程,得出该系统的功率平衡方程.因为功率综合考虑了传到结构上的力和速度两个量值,同时功率又是能量对时间的微分,因此和瞬时能量相比,更能准确地表示结构实时能量的流动和转移.

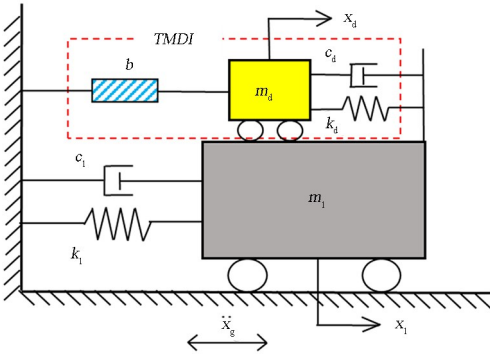


图 2 单自由度结构-TMDI 系统受地震激励
Fig. 2 Single degree of freedom structure-TMDI system excited by earthquake

2.1 运动方程

根据图 1 所示的惯性质量阻尼器 TMDI 的布置方式,将简支梁桥-TMDI 系统简化为单自由度结构-TMDI 系统.图 2 为简化之后的单自由度结构-TMDI 系统的力学模型,其运动方程为:

$$m_1 \ddot{x}_1 + c_1 \dot{x}_1 + k_1 x_1 + c_d (\dot{x}_1 - \dot{x}_d) + k_d (x_1 - x_d) = -m_1 \ddot{x}_g(t) \quad (1)$$

$$(m_d + b) \ddot{x}_d + c_d (\dot{x}_d - \dot{x}_1) + k_d (x_d - x_1) = -m_d \ddot{x}_g(t) \quad (2)$$

其中: m_1 、 c_1 、 k_1 分别为桥梁的质量、阻尼和刚度; m_d 、 c_d 、 k_d 、 b 为 TMDI 系统的质量、阻尼比、刚度和惯性质量参数; x_1 与 x_d 为桥梁和 TMDI 相对于地面的位移; $\ddot{x}_g(t)$ 为地震加速度.

2.2 功率平衡方程

在式(1)两边同时乘以相对速度 \dot{x}_1 可得^[17]:

$$m_1 \dot{x}_1 \ddot{x}_1 + c_1 \dot{x}_1 \dot{x}_1 + k_1 x_1 \dot{x}_1 + c_d (\dot{x}_1 - \dot{x}_d) \dot{x}_1 + k_d (x_1 - x_d) \dot{x}_1 = -m_1 \ddot{x}_g \dot{x}_1 \quad (3)$$

$$S_K + S_D + S_P + S_T = S_I \quad (4)$$

定义: $S_K = m_1 \dot{x}_1 \ddot{x}_1$ 为结构的动能功率, $S_D = c_1 \dot{x}_1 \dot{x}_1$ 为结构的耗能功率, $S_P = k_1 x_1 \dot{x}_1$ 为结构的弹性功率, $S_T = c_d (\dot{x}_d - \dot{x}_1) \dot{x}_1 + k_d (x_d - x_1) \dot{x}_1$ 为 TMDI 转移的功率, $S_I = -m_1 \ddot{x}_g(t) \dot{x}_1$ 为输入功率. 根据(4)式可知,结构设置 TMDI 装置之后,其部分功率被 TMDI 转移使得结构的功率减小.

3 TMDI 的最优参数

为方便计算,定义两个参数 μ 和 β ,其中 $\mu = m_d/m_1$ 为 TMDI 质量块 m_d 与质量 m_1 之比, $\beta = b/m_1$ 为惯性器的质量参数 b 与质量 m_1 之比. 在当前的研究中, TMDI 的参数有 μ 、 β 、 ω_d 、 ξ_d , 其中 ω_d 和 ξ_d 分别表示 TMDI 系统的自振圆频率与阻尼比. 最优的 TMDI 参数的设计包括两个步骤: 首先, 选择出合适的质量比 μ 、 β . 其次, 基于 μ 、 β 找出最优的 ω_d 、 ξ_d . 为获得最优的 ω_d 和 ξ_d , 本文提出了一种新的参数优化设计方法, 该方法是将频域分析法与增广拉格朗日乘子法综合在一块的方法.

3.1 单自由度结构-TMDI 系统的频域响应

$$m_1 \ddot{x}_1 + c_1 \dot{x}_1 + k_1 x_1 = -m_1 \ddot{x}_g(t) + F_T \quad (5)$$

$$F_T = c_d (\dot{x}_d - \dot{x}_1) + k_d (x_d - x_1) \quad (6)$$

$$(b + m_d) \ddot{x}_d + c_d (\dot{x}_d - \dot{x}_1) + k_d (x_d - x_1) = -m_d \ddot{x}_g(t) \quad (7)$$

其中, 加速度 $\ddot{x}_g(t)$ 采用虚拟激励法构造虚拟加速度^[18]:

$$\ddot{x}_g(t) = \sqrt{S_{\ddot{x}_g}(\omega)} e^{i\omega t} \quad (8)$$

将式(8)代入式(5)、式(7)可得:

$$m_1 \ddot{x}_1 + c_1 \dot{x}_1 + k_1 x_1 = -m_1 \sqrt{S_{\ddot{x}_g}(\omega)} e^{i\omega t} + F_T \quad (9)$$

$$(b + m_d) \ddot{x}_d + c_d (\dot{x}_d - \dot{x}_1) + k_d (x_d - x_1) = -m_d \sqrt{S_{\ddot{x}_g}(\omega)} e^{i\omega t} \quad (10)$$

式(9)可变形为:

$$m_1 \ddot{x}_1 + 2m_1 \omega_1 \zeta_1 \dot{x}_1 + \omega_1^2 m_1 x_1 - m_1 \sqrt{S_{\ddot{x}_g}(\omega)} e^{i\omega t} + 2m_d \omega_d \zeta_d (\dot{x}_d - \dot{x}_1) + \omega_d^2 m_d (x_d - x_1) \quad (11)$$

式中: ω_1 、 ξ_1 分别为单自由度结构的自振圆频率和阻尼比。

式(11)两边同时除以 m_1 , 并令 $\mu = m_d/m_1$ 则:

$$\ddot{x}_1 + 2\omega_1\xi_1\dot{x}_1 + \omega_1^2x_1 = -\sqrt{S_{\ddot{x}_g}(\omega)}e^{i\omega t} + 2\mu\omega_d\xi_d(\dot{x}_d - \dot{x}_1) + \omega_d^2\mu(x_d - x_1) \quad (12)$$

令 $\theta = b/m_d$, 然后方程式(10)两边同时除以 m_d 则变形为式(13):

$$(1+\theta)\ddot{x}_d + 2\omega_d\xi_d(\dot{x}_d - \dot{x}_1) + \omega_d^2(x_d - x_1) = -\sqrt{S_{\ddot{x}_g}(\omega)}e^{i\omega t} \quad (13)$$

可令:

$$\ddot{v} = \ddot{x}_d - \ddot{x}_1; \dot{v} = \dot{x}_d - \dot{x}_1; v = x_d - x_1$$

此时式(12)与式(13)可变形为:

$$\ddot{x}_1 + 2\omega_1\xi_1\dot{x}_1 + \omega_1^2x_1 = -\sqrt{S_{\ddot{x}_g}(\omega)}e^{i\omega t} + 2\mu\omega_d\xi_d\dot{v} + \omega_d^2\mu v \quad (14)$$

$$x_1(\omega) = H(\omega)\sqrt{S_{\ddot{x}_g}(\omega)} = \frac{-1 - [2i\omega\mu\omega_d\xi_d + \omega_d^2\mu]X^{-1}}{-\omega^2 + 2i\omega\omega_1\xi_1 + \omega_1^2 - (1+\beta/\mu)\omega^2X^{-1}[2i\omega\mu\omega_d\xi_d + \omega_d^2\mu]}\sqrt{S_{\ddot{x}_g}(\omega)} \quad (18)$$

其中: $X = -\omega^2(1+\theta) + 2i\omega\omega_d\xi_d + \omega_d^2$.

3.2 增广拉格朗日优化法

$$\min x_1(\omega) = H(\omega) \cdot \sqrt{S_{\ddot{x}_g}(\omega)} \quad (19)$$

$$\text{S. t } h(\omega) = \max x_1(\omega) - \max x_2(\omega) = 0 \quad (20)$$

式中: $H(\omega)$ 为频率响应函数; $h(\omega)$ 为约束条件; $\max x_1(\omega)$ 表示在区间 $(0, \omega_1)$ 内的最大值; $\max x_2(\omega)$ 表示在区间 (ω_1, ω_0) 内的最大值, ω_0 为某一频率值且 $\omega_0 > \omega_1$.

优化问题的增广拉格朗日函数为:

$$L(\omega, \lambda, \delta) = \tilde{y}(\omega) + \lambda h(\omega) + \frac{\delta}{2}h^2(\omega) \quad (21)$$

式中: λ 为初始拉格朗日乘子; δ 为正的惩罚系数。

4 桥梁—TMDI 系统的地震响应分析

桥梁的频率为 18.973rad/s、阻尼比为 0.02、质量为 100t、刚度取 3.6×10^7 N/m. 与传统的调谐质量阻尼器 TMD 类似的是, 为使 TMDI 系统获得较好的减振效果, 首先要预设质量参数. TMDI 的质量参数 μ 为附加质量 m_d 与主结构的质量 m_1 之比, 质量参数 β 为惯性装置的参数 b 与主结构的质量 m_1 之比. 为了研究 TMDI 对地震波作用下的桥

$$(1+\theta)\ddot{x}_d + 2\omega_d\xi_d\dot{v} + \omega_d^2v = -\sqrt{S_{\ddot{x}_g}(\omega)}e^{i\omega t} \quad (15)$$

联立式(14)与式(15)并将其写成矩阵形式:

$$\dot{\mathbf{M}}\ddot{\mathbf{y}} + \dot{\mathbf{C}}\dot{\mathbf{y}} + \dot{\mathbf{K}}\mathbf{y} = \dot{\mathbf{F}} \quad (16)$$

其中:

$$\mathbf{y} = [x_1, v]^T;$$

$$\dot{\mathbf{F}} = [-\sqrt{S_{\ddot{x}_g}(\omega)}e^{i\omega t}, -\sqrt{S_{\ddot{x}_g}(\omega)}e^{i\omega t}]^T;$$

$$\dot{\mathbf{M}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \theta+1 & \theta+1 \end{bmatrix}; \dot{\mathbf{K}} = \begin{bmatrix} \omega_1^2 & -\omega_d^2\mu \\ 0 & \omega_d^2 \end{bmatrix};$$

$$\dot{\mathbf{C}} = \begin{bmatrix} 2\xi_1\omega_1 & -2\mu\xi_d\omega_d \\ 0 & 2\omega_d\xi_d \end{bmatrix}.$$

对式(16)进行 Fourier 变换可得:

$$\mathbf{Y}(\omega) = [-\omega^2\dot{\mathbf{M}} + i\omega\dot{\mathbf{C}} + \dot{\mathbf{K}}]^{-1}\dot{\mathbf{F}}(\omega) \quad (17)$$

主结构的位移响应:

梁结构的控制效果, 选用 1940 年美国加州南部的埃尔森特罗记录到的 EI centro 波作为外激励, 该波持时 30s, 峰值加速度为 0.2m/s². 其傅里叶图如图 3 所示. 可以看出, EI centro 波所包含的频率较宽, 主要分布在 0~6Hz, 属于较为普遍的地震波频带范围。

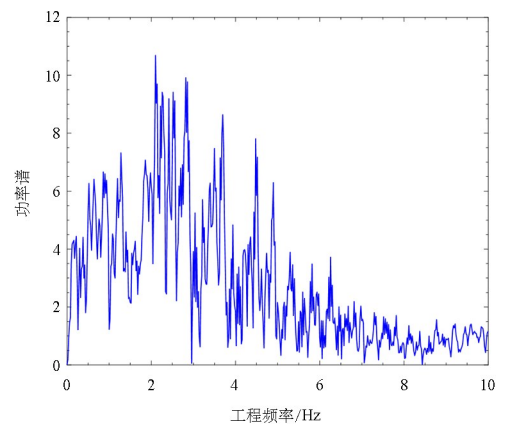


图3 频谱图

Fig. 3 Frequency spectrum of ground motion

5 桥梁—TMDI 系统的功率响应分析

TMDI 最优参数的选取步骤为: 首先预设质量参数 $\mu=0.005$ 、 $\beta=0.05$, 然后采用本文提出的最优参数设计法获得的 TMDI 最优频率值 $\omega_d=59.6454$ 、最优阻尼比 $\xi_d=0.4931$. 为了有效地进行对比分

析将 TMDI 系统和 TMD 系统的质量比 μ 均设置为定值 0.005, TMDI 系统的参数 β 取为 0 即 $\beta=b=0$, 此时 TMDI 系统退化为 TMD 系统. 当质量比 $\mu=0.005$ 时, 采用 DH 优化法对 TMD 系统进行优化. 图 4 为无控结构、TMD 控制和 TMDI 控制时桥梁的位移时程响应对比图. 图 5 为无控结构、TMD 控制和 TMDI 控制时桥梁的速度时程响应对比图. 图 6 为无控结构、TMD 控制和 TMDI 控制

时桥梁的加速度时程响应对比图. 可以看出, 增加了惯性装置后 TMD 系统的振动控制效果明显提升, 但不论是 TMD 系统还是 TMDI 系统在地震动的初始阶段控制效果都不明显.

TMDI 系统的功率响应如图 7 所示, 正如图中所示, 各个功率在 0~20s 内占据一定成分, 在 20s 后则迅速衰减并逐渐趋于零. 探究其原因主要是: EI centro 波在初始阶段脉冲运动强烈, 桥梁结构的位移、速度和加速度响应在 0~20s 内比较大, 20s 后迅速衰减. 此外, 桥梁结构的动能功率、弹性能功率和输入能功率都出现了负值. 这是因为地震力做负功引起的. 文献[19]也对此做出了解释. 桥梁设置 TMDI 系统后, 其耗能功率、动能功率、弹性能功率和输入能功率均有不同程度的减小, 相比于 TMD 系统附加了惯性装置的 TMDI 系统能够转移结构更多的功率, 能够进一步提高桥梁的抗震性能. 对比图 7 中 TMDI 系统对各种功率的控制效果后发现, 对于不同的功率, TMDI 系统的控制效果不同. 这是因为 TMDI 系统对桥梁的位移、速度和加速度的减振效果不同而引起的.

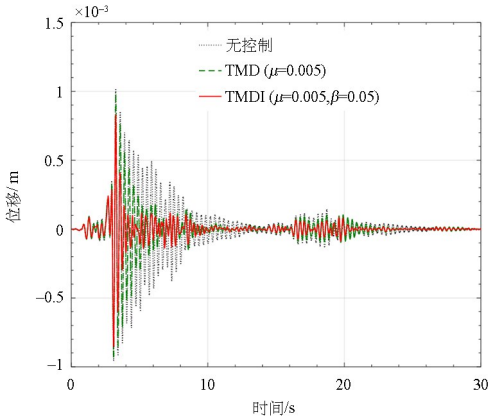


图 4 位移时程响应
Fig. 4 Displacement time history response

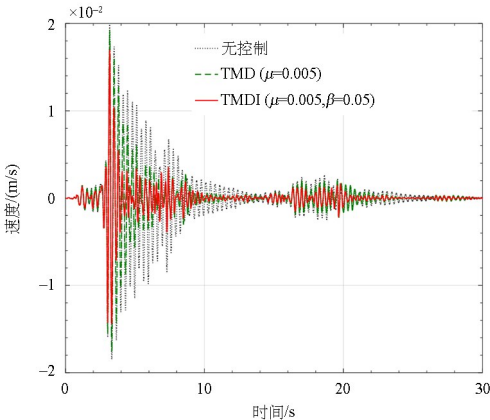


图 5 速度时程响应
Fig. 5 Speed time history response

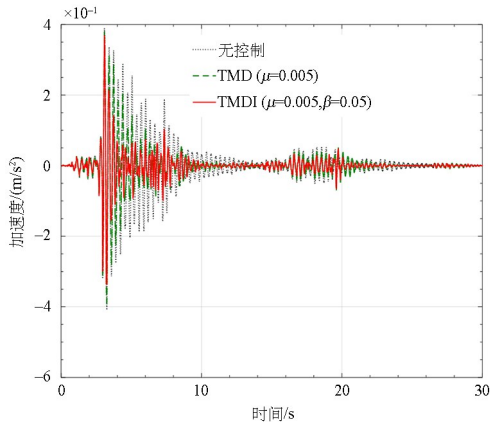


图 6 加速度时程响应
Fig. 6 Acceleration time history response

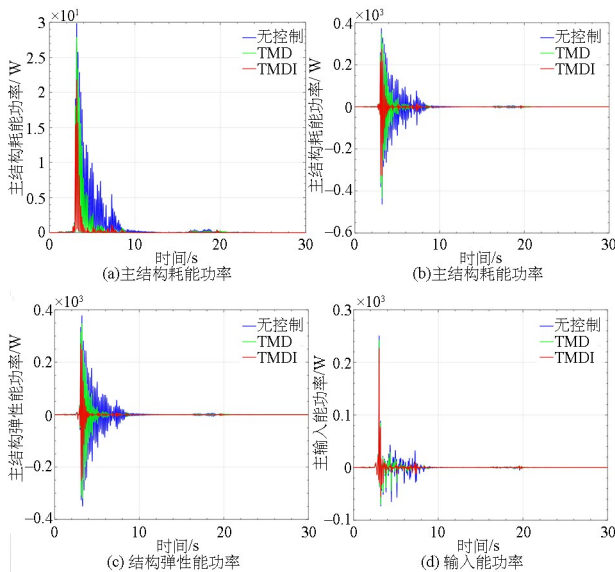


图 7 主结构功率响应对比
Fig. 7 Main structure power response comparison

5.1 桥梁周期的影响

假定桥梁结构周期变化范围为 1~10s, 质量为 100t, 阻尼比为 0.02. 为了更全面地说明桥梁结构安装 TMDI 前后其耗能功率随周期变化的情况, 在此引入了平均耗能功率这一指标. 采用 Kanai-Tajimi 地面加速度谱作为随机振动模型:

$$S_{x_g}(\omega) = \frac{\omega_g^4 + 4\zeta_g^2 \omega_g^2 \omega^2}{(\omega^2 - \omega_g^2)^2 + 4\zeta_g^2 \omega_g^2 \omega^2} S_0$$

其中:谱强度 $S_0=0.078$ 、场地的圆频率 $\omega_g=15.71$ 、场地阻尼比 $\xi_g=0.72$ 。

桥梁结构的耗能功率平均值随周期的变化规律如图 8 所示. 与无控制情况相比桥梁设置 TMD ($\mu=0.005$ 、 $\beta=0.0$) 后,周期在 $0\sim0.6$ s 时,其耗能平均功率值并无变化. 桥梁周期在 $0.6\sim4.7$ s 内变化时, TMD 系统在一定程度上确实能够降低桥梁的平均耗能功率. 桥梁的周期在 $4.7\text{ s}\sim10$ s 时,用 TMD 系统来降低桥梁的耗能功率平均值时,效果并不理想. 当惯性装置介入工作以后即 TMDI 系统的质量参数设置为 $\mu=0.005$ 、 $\beta=0.05$ 时,桥梁周期在 $0\sim0.87$ s 内变化时, TMDI 控制下的桥梁耗能功率平均值较 TMD 控制下的耗能功率平均值有放大现象,桥梁周期在 $0.87\text{ s}\sim10$ s 时, TMDI 可以将 TMD 控制下的桥梁耗能功率平均值下降 50% 左右. 这说明 TMDI 系统除了对特别刚性的结构(周期小于 0.87 s)之外,都有较好的减振效果.

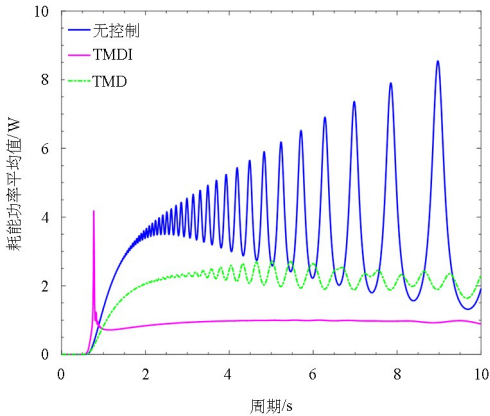


图 8 桥梁耗能功率平均值随周期的变化图
Fig. 8 The change of the average value of bridge energy consumption power with period

5.2 桥梁阻尼比的影响

桥梁的周期在 $1\text{ s}\sim10$ s 内变化时,分别考虑阻尼比 ξ_1 为 0.01 、 0.03 、 0.05 ,当 TMDI 质量参数 $\mu=0.005$ 、 $\beta=0.05$ 时,分析桥梁在 EI centro 地震波作用下其阻尼比对各种功率响应的影响. 当阻尼比不同时,安装有 TMDI 系统的主结构各种功率响应的峰值如图 9~图 11 所示. 可以看出,桥梁的阻尼比对输入能的最大功率值影响很小,而且桥梁的输入功率最大值随阻尼比的增大而减小;桥梁的阻尼比对耗能功率影响比较大,而且随着阻尼比的

增大耗能功率也增大;TMDI 系统转移能功率的峰值随阻尼比的增大而减小,但是桥梁自振周期在 $0.87\text{ s}\sim10$ s 内,阻尼对转移能功率峰值的影响比较小. 原因是当桥梁结构的周期在 $0.87\text{ s}\sim10$ s 时, TMDI 系统的吸振能力强,桥梁自身耗散的能量比较少.

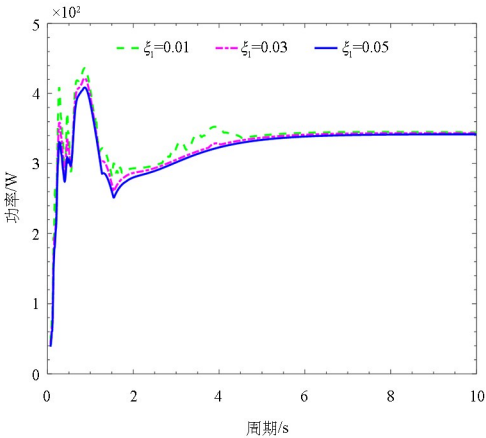


图 9 输入能最大功率对比
Fig. 9 Maximum input power comparison

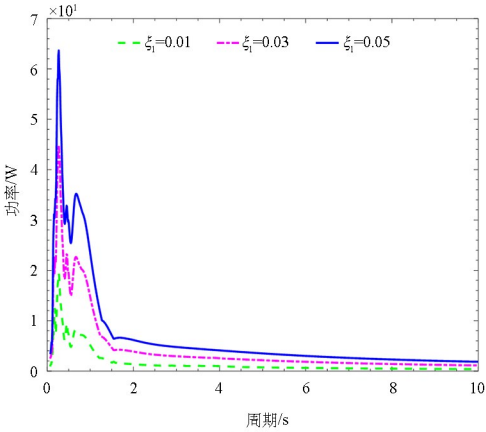


图 10 耗能最大功率对比
Fig. 10 Maximum power consumption comparison

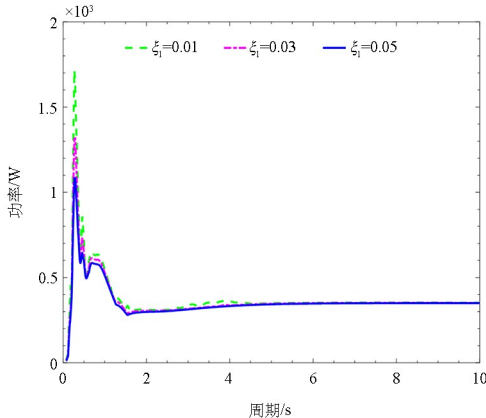


图 11 转移能最大功率对比
Fig. 11 Transfer energy maximum power comparison

图 12~图 14 为耗能功率、TMDI 转移能功率和总输入能功率三者之间的相对值曲线。图 12 显示,耗能功率占输入能功率的比例随着桥梁结构阻尼比的增大而呈现出上升的趋势。图 13 表明,自振周期小于 0.87s 时,TMDI 转移能功率占总输入能

的比例随着阻尼比的增大而减小,而自振周期 0.87s~10s 时,阻尼比的变化对 TMDI 转移能功率占总输入能的比例影响很小。阻尼比不同时,TMDI 转移能功率占结构耗能功率的比例如图 14 所示。当桥梁阻尼比增大时 TMDI 转移能功率占结构耗能功率的比例减小。这说明桥梁阻尼比增大,地震动的能量主要由结构自身来耗散,TMDI 的贡献相对较小。此外对于不同的阻尼比,TMDI 转移能功率占结构耗能功率的比例随着周期的增大呈现出增加的趋势。这也表明周期越大 TMDI 的减振效果越好。

6 结论

本文首先对受纵向地震激励的桥梁-TMDI 系统进行简化,得到了单自由度结构-TMDI 系统的受力模型。列出了单自由度结构-TMDI 系统的功率平衡方程,从功率的角度研究了桥梁附加 TMDI 后,受地震激励时的减振效果。采用频域分析方法列出了主结构的位移响应谱,再利用增广拉格朗日优化法进行最优参数设计。结合 TMDI 最优参数来分析桥梁结构受地震荷载作用下的能量和功率响应,并与无控结构进行了比较,而且进一步考虑了桥梁周期和阻尼比对 TMDI 减振效果的影响。研究结果表明:

(1)当结构自振频率与地震波的主要频率相近时,结构的各功率的峰值普遍较大。且 TMDI 系统除了对特别刚性的结构(周期小于 0.87s)之外,都有较好的减振效果。

(2)在质量比较小的情况下($\mu=0.005$),TMD 系统增设了惯性质量装置后,获得了更优的减振效果。

(3)TMDI 系统对耗能功率、动能功率、弹性能功率及输入能功率的控制效果均有不同。

(4)桥梁的阻尼比对输入能的最大功率值影响很小,而且桥梁的输入功率最大值随阻尼比的增大而减小;桥梁的阻尼比对耗能功率影响比较大,而且随着阻尼比的增大耗能功率也增大。

(5)当桥梁阻尼比增大时 TMDI 转移能功率占结构耗能功率的比例减小。

参考文献

[1] TSAI C S, LEE H H. Seismic mitigation of bridges

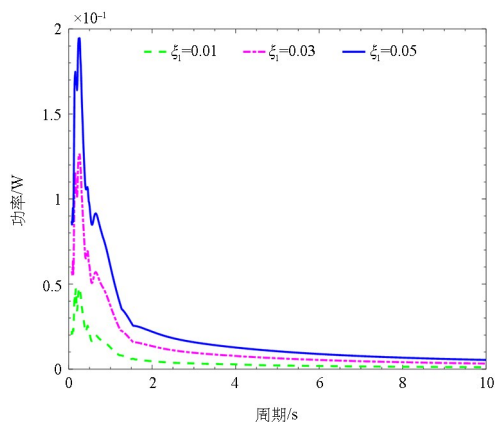


图 12 耗能最大功率与输入能最大功率的比例
Fig. 12 The ratio of the maximum power consumption to the maximum power input

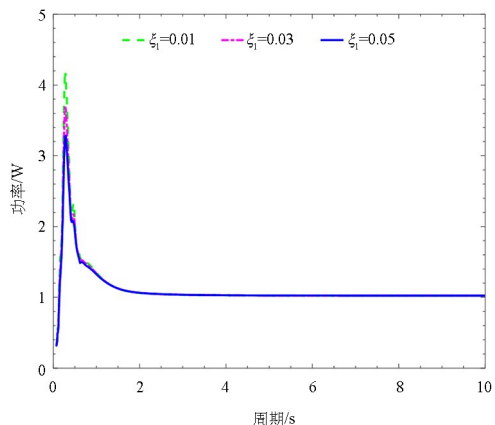


图 13 转移能最大功率与输入能最大功率的比例
Fig. 13 The ratio of the maximum power of transfer energy to the maximum power of input energy

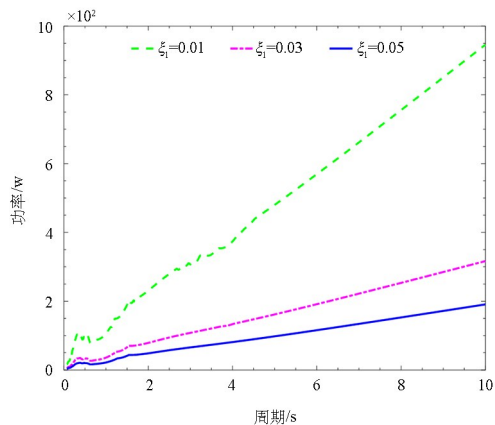


图 14 转移能最大功率与耗能最大功率的比例
Fig. 14 The ratio of the maximum power of transfer energy to the maximum power of energy consumption

- by using viscoelastic dampers [J]. *Computers & Structures*, 1993, 48(4): 719–727.
- [2] HE W L, AGRAWAL A K, MAHMOUD K. Control of seismically excited cable-stayed bridge using resetting semiactive stiffness dampers [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2001, 6(6): 376–384.
- [3] 秦顺全, 瞿伟廉. 天兴洲公铁两用斜拉桥主梁纵向地震、列车制动及行车移动荷载响应的混合控制[J]. *桥梁建设*, 2008, 38(4): 1–4+9.
- QIN S Q, QU W L. Hybrid control of longitudinal vibration responses in deck of tianxingzhou rail-cum-road cable-stayed bridge caused by earthquake, train braking and vehicle moving loads [J]. *Bridge Construction*, 2008, 38(4): 1–4+9. (in Chinese)
- [4] 王蒂, 黄平明. 超大跨度斜拉桥纵向减震耗能塔、梁连接装置研究[J]. *郑州大学学报(工学版)*, 2008, 29(4): 112–115+144.
- WANG D, HUANG P M. Research on deck-tower connection of super long-span cable-stayed bridge [J]. *Journal of Zhengzhou University (Engineering Science)*, 2008, 29(4): 112–115+144. (in Chinese)
- [5] SMITH M C. Synthesis of mechanical networks: the inerter [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2002, 47(10): 1648–1662.
- [6] PAPAGEORGIOU C, SMITH M C. Laboratory experimental testing of inerters [C]//*Proceedings of the 44th IEEE Conference on Decision and Control*. New York: IEEE, 2005: 3351–3356.
- [7] MARIAN L, GIARALIS A. Optimal design of a novel tuned mass-damper-inerter (TMDI) passive vibration control configuration for stochastically support-excited structural systems [J]. *Probabilistic Engineering Mechanics*, 2014, 38: 156–164.
- [8] WEN Y K, CHEN Z Q, HUA X G. Design and evaluation of tuned inerter-based dampers for the seismic control of MDOF structures [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2017, 143(4): 04016207.
- [9] DE DOMENICO D, RICCIARDI G. Optimal design and seismic performance of tuned mass damper inerter (TMDI) for structures with nonlinear base isolation systems [J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2018, 47(12): 2539–2560.
- [10] XU K, BI K M, HAN Q, et al. Using tuned mass damper inerter to mitigate vortex-induced vibration of long-span bridges: analytical study [J]. *Engineering Structures*, 2019, 182: 101–111.
- [11] PIETROSANTI D, DE ANGELIS M, BASILI M. Optimal design and performance evaluation of systems with Tuned Mass Damper Inerter (TMDI) [J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2017, 46(8): 1367–1388.
- [12] SUN L M, HONG D X, CHEN L. Cables interconnected with tuned inerter damper for vibration mitigation [J]. *Engineering Structures*, 2017, 151: 57–67.
- [13] MA R, BI K, HAO H. Mitigation of heave response of semi-submersible platform (SSP) using tuned heave plate inerter (THPI) [J]. *Engineering Structures*, 2018, 177: 357–373.
- [14] GIARALIS A, PETRINI F. Wind-induced vibration mitigation in tall buildings using the tuned mass-damper-inerter [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2017, 143(9): 04017127.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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+17.
- LI X X, TAN P, LIU L K, 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+17. (in Chinese)
- [18] 李锦华, 柴世宗, 张耀, 等. 基于频域分析方法的梁-TMDI 系统的振动控制研究 [J]. *振动与冲击*, 2021, 40(11): 94–100.
- LI J H, CHAI S Z, ZHANG Y, et al. Vibration control of beam-TMDI system based on frequency domain analysis method [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2021, 40(11): 94–100. (in Chinese)
- [19] 田启强. 地震动作用下结构能量反应研究及能量法应用初步 [D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2010.
- TIAN Q Q. Energy calculation of structural response and its preliminary application under seismic excitation [D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2010. (in Chinese)