

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.201902030

基于功率法的结构-TMD减震控制分析*

张尚荣¹, 肖建强¹, 刘芳兰¹, 周志兴¹, 谭平²

(1. 宁夏大学土木与水利工程学院, 宁夏银川 750021; 2. 广州大学工程抗震研究中心, 广东广州 510405)

摘要:建立了结构-TMD振动方程,推导出无控结构和带TMD受控结构基于功率表达的运动方程,分别解释并给出了各种功率表达参数的物理意义,推导出随机激励下结构耗能功率流均值的随机表达式,对比分析了基于功率法的结构-TMD优化方法与其他优化方法的优化分析结果,并对其减震控制效果进行了对比分析。结果表明,结构-TMD系统的参数可以通过耗能功率流随机分析方法所得均值进行优化,且通过功率法优化后,结构在减震效果上优于其他传统方法得到的结果,从耗能功率均值的随机分析和时程功率分析角度证明了TMD控制的有效性;TMD做功功率为负时对结构有控制效果,起吸收转移能量的作用,且功率幅值越大控制效果越好,做功功率为正时则相反。

关键词: 减震控制; 功率法; TMD; 参数优化

中图分类号: TU352.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2021)03-0573-06

The Research on Aseismic Effect of the Building Structure with TMD - based on Power Method

ZHANG Shangrong¹, XIAO Jianqiang¹, LIU Fanglan¹, ZHOU Zhixing¹, TAN Ping²

(1. School of Civil and Hydraulic Engineering, Ningxia University, Yinchuan 750021, China;

2. Earthquake Engineering Research and Test Center, Guangzhou University, Guangzhou 510405, China)

Abstract: The vibration equation of the structure-TMD was built and the power equations for the uncontrol structure as well as the structure with TMD were derived. The physical meanings of the parameters in different power expressions were explained, respectively. The random expression of the mean value of energy dissipation power flow of structures under stochastic excitation was deduced. The optimization analysis results of the structure-TMD optimization method based on the power method and other optimization methods which proposed by Den Hartog and Tsai were compared and analyzed, and the effect of seismic control was discussed. It is shown that the parameters of TMD-structure system can be optimized with average dissipation energy power, and the damping effects obtained by TMD-structure were better than those by other traditional methods. The effectiveness of TMD control was proved by stochastic analysis and time-history power analysis. Seismic effect existed if work power of TMD was negative value and the TMD played a role in energy absorption; moreover, the larger the power, the better the damping effects, while the opposite result would occur with the

* 收稿日期:2019-03-01;修回日期:2020-04-26

基金项目:国家自然科学基金项目(51608283)、“西部之光”人才引进培养计划(XAB2017AW09)、宁夏回族自治区自然科学基金(2019AAC03041)资助

作者简介:张尚荣(1984—),男,讲师,博士。主要从事结构减震控制方面的研究;E-mail:sr_zhang@nxu.edu.cn

positive power value.

Keywords: seismic control; power method; Tuned-Mass Damper; parameter optimization

引言

G.W.Housner^[1]于20世纪50年代提出了能量法,但直到近20年才有了快速发展。结构分析时,能量作为累积量,可定性分析结构的损伤情况,却不能真正反映结构的实际瞬时能量情况;尽管瞬时能量概念的提出,给出了瞬时能量与结构响应的关系,N.Hori等^[2]分析了地震瞬时能量与结构位移反应的关系,指明了瞬时输入能与评估结构损伤特性的有效性,不过其定义的瞬时输入能为半周期内的输入能量总和,并不能代表结构的真正瞬时能量,且没有给出动能,结构耗能等瞬时能量的表达形式。结构受地震激励的能量分析通常在时域中进行,而关于频域的能量分析也鲜有出现,不过在机械与噪声的能量分析中,功率流的提出解决了频域能量分析的问题,因为它同时考虑了结构的力和速度两个量值^[3],同时表示了能量对时间的微分,属于真正的瞬时能量。

目前,关于建筑结构能量频域研究较少,朱宏平等^[4-5]将多高层房屋简化为带横梁的周期柱结构模型,分析了结构中弯曲波与纵向波的情况,其研究表明横梁的共振特性对结构的中波传播与功率流有很大影响,此外结构的阻尼有利地阻止了振动功率流的传播,但其研究借助噪声领域方法进行处理,计算相对复杂;T.T.Soong等^[6]用功率流的方法研究了TMD起最大控制效果时TMD的能量分配情况,但未给出结构功率流分析的具体方法。张琼等^[7]利用TMD对钢楼梯人致振动进行了控制,分析了钢楼梯在人-结构动力相互作用下的振动舒适度问题;侯纲领等^[8]提出了基础隔震(BIS)-调谐质量阻尼(TMD)的混合抗震结构,综合了BIS与TMD的优点,避免了BIS和TMD各自的内在缺陷,可以满足核电站的特殊抗震要求;李春祥^[9]以动力放大系数为目标,对高层建筑-TMD的控制与设计做了分析;秦丽等^[10]分析了不同优化方法的TMD控制效果,除了利用上述某一局部指标来分析TMD控制效果,也可采用更为合理且能够反映结构整体特性的自身耗能指标;一般来说结构自身耗能越大越容易损伤,那么可以通过增加耗能装置来消耗输入

能量,从而减少结构自身耗能。

本文提出带TMD集中质量体系减震效果的基于功率表达的分析方法,通过结构自身耗能功率均值作为TMD减振控制指标,对带TMD的结构参数进行优化,并进行控制效果分析。

1 结构-TMD运动方程

带TMD的结构假定为 n 层,在水平地震加速度 \ddot{x}_g 作用下,如图1所示。

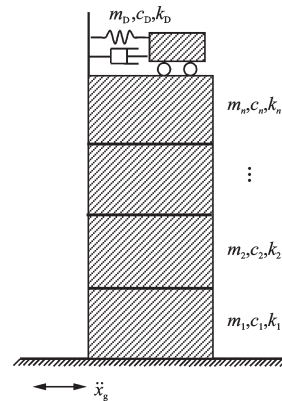


图1 结构-TMD示意

Fig.1 Structure-TMD diagram

则TMD结构体系运动方程可表示为^[11]:

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = I[c_D\dot{x}_D + k_D x_D] - ME\ddot{x}_g \quad (1)$$

$$m_D\ddot{x}_D + c_D\dot{x}_D + k_D x_D = -m_D I^T \ddot{x} - m_D \ddot{x}_g \quad (2)$$

式中, $x = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$ 为结构各质点相对于地面的位移; M, C, K 分别为结构的质量矩阵、阻尼矩阵与刚度矩阵; x_D 为TMD相对结构顶层的位移; m_D, c_D, k_D 分别为TMD系统的质量、阻尼系数与刚度; $I = [0, 0 \dots 1]^T$ 表示TMD的位置列向量; $E = [1, 1 \dots 1]^T$ 为单位列向量。

通常,TMD系统主要控制结构的第一阶振型,那么可取:

$$x = \Phi_1 q \quad (3)$$

式中, Φ_1 表示第一阶振型向量; q 表示广义坐标。

由式(3)代入式(1)和式(2)得:

$$\ddot{q} + 2\omega_1 \xi_1 \dot{q} + \omega_1^2 q = r [c_D \dot{x}_D + k_D x_D] - \eta_1 \ddot{x}_g \quad (4)$$

$$\ddot{x}_D + 2\omega_D \xi_D \dot{x}_D + \omega_D^2 x_D = -\beta^T \ddot{q} - \ddot{x}_g \quad (5)$$

其中, $\eta_1 = \frac{\Phi_1^T ME}{\Phi_1^T M \Phi_1}$ 为第一阶振型参与系数, $r =$

$$\frac{\Phi_1^T I}{\Phi_1^T M \Phi_1}, \beta = \Phi_1^T I, \text{若令 } -\ddot{x}_g = e^{i\omega t}, \text{取 } f = \frac{\omega_D}{\omega_1},$$

$$\lambda = \frac{\omega}{\omega_1}, \text{质量比 } \mu = \frac{m_D}{\Phi_1^T M \Phi_1}, \text{那么可以得到结构}$$

一阶振型广义位移的传递函数与 TMD 相对结构顶层的位移传递函数为:

$$h(\omega) = \frac{1}{d} [(\eta_1 + \mu \Phi_1^n) f^2 - \eta_1 \lambda^2 + 2\xi_D(\eta_1 + \mu \Phi_1^n) f \lambda i] \quad (6)$$

$$h_D(\omega) = \frac{1}{d} [1 + (\eta_1 \Phi_1^n) \lambda^2 + 2\xi_1 \lambda i] \quad (7)$$

其中,

$$d = \omega_1^2 \{ f^2 - (1 + \mu(\Phi_1^n)^2) f^2 E \lambda^2 - \lambda^2 + \lambda^4 - 4\xi_D \xi_1 f E \lambda^2 + 2[\xi_1 \lambda (f^2 E - \lambda^2) + \xi_D f E \lambda - (1 + \mu(\Phi_1^n)^2) \xi_D f E \lambda^3] i \}$$

2 TMD 功率方程推导

无 TMD 控制结构在地震作用下的运动方程:

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = -ME\ddot{x}_g \quad (8)$$

对式(8)两边同时乘以 \dot{x}^T , 得到功率方程:

$$\dot{x}^T M \ddot{x} + \dot{x}^T C \dot{x} + \dot{x}^T K x = -\dot{x}^T M E \ddot{x}_g \quad (9)$$

定义动能功率: $P_k = \dot{x}^T M \ddot{x}$; 耗能功率: $P_d = \dot{x}^T C \dot{x}$; 弹性功率: $P_s = \dot{x}^T K x$; 地震输入功率: $P_1 = -\dot{x}^T M E \ddot{x}_g$ 。

若对式(1)两边同时乘以 \dot{x}^T 也可导出带 TMD 结构的功率方程, 类似地, 容易得到带 TMD 结构的动能功率, 耗能功率, 弹性功率, 地震输入功率, 在此不再赘述; 其中 TMD 对结构的做功功率可表示为:

$$P_{TMD} = \dot{x}^T I [c_D \dot{x}_D + k_D x_D] \quad (10)$$

令 $x = \Phi q$, 对于无控结构, 即方程(8)可写成振型广义坐标方程:

$$\ddot{q}_n + 2\omega_n \xi_n \dot{q}_n + \omega_n^2 q_n = -\eta_n \ddot{x}_g \quad (11)$$

令 $M_n = \Phi_n^T M \Phi_n$, $K_n = \Phi_n^T K \Phi_n$, $C_n = \Phi_n^T C \Phi_n$

式中, $\omega_n = \sqrt{\frac{K_n}{M_n}}$, $\xi_n = \frac{C_n}{2M_n \omega_n}$ 为相应第 n 阶振型频率及第 n 阶振型阻尼比。

假定水平地震动加速度 $\ddot{x}_g = e^{i\omega t}$, 那么第 n 振型广义位移的传递函数为:

$$H_{q_n}(\omega) = \frac{-\eta_n}{\omega_n^2 + 2i\omega \omega_n \xi_n - \omega^2} \quad (12)$$

式中, η_n 为第 n 振型参与系数, 相应第 n 阶振型速度传递函数:

$$H_{\dot{q}_n}(\omega) = i\omega H_{q_n}(\omega) \quad (13)$$

那么第 n 振型结构的耗能功率的传递函数为

$$H_{P_n}(\omega) = \sqrt{C_n} H_{\dot{q}_n}(\omega)。$$

无控结构的第 n 阶振型耗能功率均值表示为:

$$E_n(P_d) = \sigma_{p_n}^2 = \int_{-\infty}^{\infty} |H_{P_n}(\omega)|^2 S_{\ddot{x}_g}(\omega) d\omega = \int_{-\infty}^{\infty} \omega^2 C_n |H_{q_n}(\omega)|^2 S_{\ddot{x}_g}(\omega) d\omega \quad (14)$$

式中, $|H_{P_n}(\omega)|^2 S_{\ddot{x}_g}(\omega)$ 为第 n 阶耗能功率谱密度; P_d 为耗能功率, 表示如下:

$$P_d = \dot{x}^T C \dot{x} = \sum_{n=1}^m \dot{q}^T \Phi_n^T C \Phi_n \dot{q} = \sum_{n=1}^m \dot{q}^T C_n \dot{q} = \sum_{n=1}^m (\dot{q} \sqrt{C_n})^T (\sqrt{C_n} \dot{q}) \quad (15)$$

无控结构的总耗能功率均值为:

$$E(P_d) = \sum_{n=1}^m \int_{-\infty}^{\infty} \omega^2 C_n |H_{q_n}(\omega)|^2 S_{\ddot{x}_g}(\omega) d\omega \quad (16)$$

类似地, 对于带 TMD 的建筑物结构, 当考虑 TMD 控制第一振型时, 可取被控结构其第一阶耗能功率均值来表示:

$$E_{TMD}(P_{d1}) = \int_{-\infty}^{\infty} \omega^2 C_1 |H_{q_1}(\omega)|^2 S_{\ddot{x}_g}(\omega) d\omega \quad (17)$$

将式(6)代入式(17)得:

$$E_{TMD}(P_{d1}) = \int_{-\infty}^{\infty} \omega^2 C_1 |h(\omega)|^2 S_{\ddot{x}_g}(\omega) d\omega \quad (18)$$

定义带 TMD 的结构耗能功率均值减震系数为:

$$\rho = \frac{E_{TMD}}{E_1} = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \omega^2 C_1 |h(\omega)|^2 S_{\ddot{x}_g}(\omega) d\omega}{\int_{-\infty}^{\infty} \omega^2 C_1 |H_{q_1}(\omega)|^2 S_{\ddot{x}_g}(\omega) d\omega} \quad (19)$$

上式可用来评价 TMD 的减震效果, 表示带 TMD 的结构与无控制结构耗能功率均值的一阶比值。

3 基于功率法的 TMD 参数优化

功率同时具有力与速度两方面的性质, 又可表示能量变化快慢, 因此, 利用功率法分析结构的减震效果比能量法更加合理。另外, 上述推导考虑随机地震作用的影响, 所得到的结构耗能功率均值具有统计意义, 因此从随机的角度来分析结构的能量耗散情况, 消除了能量在随机方面应用的限制。

假定某结构为 20 层钢结构, 层质量为 20 t, 层剪

切刚度为 3×10^4 kN/m, 阻尼比为 0.02。根据文献 [12] 取二类场地, 设防烈度为 8 度, 第二组, 地震动谱密度 $S_0 = 50.276 \text{ cm}^2/\text{s}^3$, 同时假定地震动为平稳白噪声激励。利用功率法进行优化, 具体结果见表 1, 鉴于 TMD 主要控制一阶振型, 取一阶振型对应的顶层位移方差、绝对加速度与结构耗能功率均值做对比。

表 1 给出了采用白噪声作为输入的功率法优化结果, 与经典的 J.P. Den Hartog^[13] 和 H.C. Tsai 等^[14] 的优化公式所得结果作了对比。经分析可发现, 采

用功率法的最优频率比刚好在 Den Hartog 和 Tsai 的最优频率比之间, 而最优阻尼比则在三者中最小; 当观察最优参数对应的顶层位移方差、顶层加速度方差以及耗能功率均值时, 在质量比为 0.01、0.03、0.05 中, 采用功率法得到的指标数值基本上都为最小值。这一分析结果表明, 若采用一阶振型的耗能功率均值作为优化目标是可取的, 并且上述结果也说明了利用功率法优化 TMD 参数, 可得到较好的减震效果。

表 1 不同优化方法结果对比

Table 1 Comparison of the results of different optimization methods

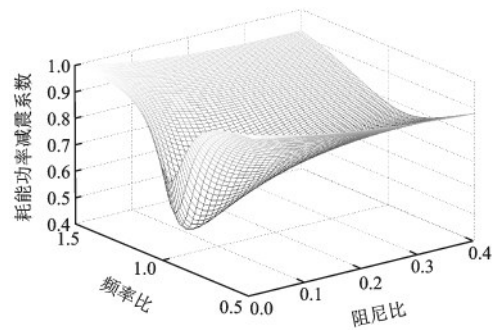
质量比	优化方法	最优频率比	最优阻尼比	顶层位移方差/m		耗能功率均值/w
				有控	无控	
0.01	Den Hartog ^[13]	0.990	0.060	0.020 7		$4.391 2 \times 10^3$
	Tsai ^[14]	0.983	0.064	0.012 3	0.024 5	$2.608 5 \times 10^3$
	功率法	0.989	0.050	0.012 1		$2.570 2 \times 10^3$
0.03	Den Hartog ^[13]	0.971	0.102	0.008 7		$1.808 5 \times 10^3$
	Tsai ^[14]	0.956	0.108	0.008 7	0.024 5	$1.829 8 \times 10^3$
	功率法	0.970	0.086	0.008 6		$1.792 9 \times 10^3$
0.05	Den Hartog ^[13]	0.952	0.127	0.007 3		$1.497 2 \times 10^3$
	Tsai ^[14]	0.930	0.139	0.007 3	0.024 5	$1.523 0 \times 10^3$
	功率法	0.952	0.110	0.007 3		$1.486 2 \times 10^3$

为进一步了解 TMD 最优参数和减震效果, 取 Kanai-Tajimi 地震动谱模型, 场地类别、分组与上述相同, 地基过滤器的固有频率和阻尼比分别为 $\omega_g = 15.71 \text{ rad/s}$ 、 $\xi_g = 0.72$, 平稳过滤 Gauss 白噪声谱强度 $S_0 = 50.276 \text{ cm}^2/\text{s}^3$ 。将耗能功率均值减震系数作为优化目标, 得到质量比为 0.01 时 TMD 参数分布情况如图 2 所示。

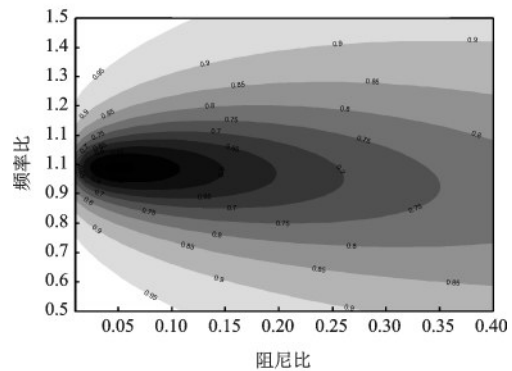
分析图 2 可知, TMD 系统的频率比与阻尼比分布相对均匀, 存在最优参数: 最优频率比为 0.99, 最优阻尼比为 0.05。从耗能功率均值减震系数来看, 越接近 TMD 最优参数, 其控制效果越好; 当取最优参数时, 其减震系数为 0.49, 因此采用功率法优化后的参数, 可以有效地减少结构自身耗能功率, 保障结构安全。

4 基于功率法 TMD 减震效果分析

基于功率法的随机分析结果表明 TMD 具有较好的减震控制效果。取质量比为 0.01 时的最优参数值, 并取二类场地, 8 度设防, 0.2g 的 El-Centro 波、



(a) 三维图



(b) 等值图

图 2 TMD 参数分布情况

Fig.2 TMD parameter distribution

Taft波和人工波进行功率时程分析,进一步探讨带TMD结构的时域功率情况。

图3给出了输入功率与耗能功率的时程分析。在能量分析中,输入能量是时间的累积量,输入功率是真正的瞬时能量。在图3中,输入功率有正有负,这表明地震动对结构做功并不完全为正功,在适当情况下对减少结构的输入能也有贡献,这与文献[15]的分析结果相似。另外,通过观察带TMD

的高层结构输入功率与耗能功率的响应情况可以看出,在El-Centro波激励下,0~7 s过程中TMD控制效果不明显,7~30 s控制效果逐渐显现,与无控结构的输入功率相比,有较好的控制作用;从人工波激励的功率时程情况可以看出,在中间段控制效果较好;Taft地震动激励下的控制效果略差。

TMD的控制效果可以通过观察结构的耗能功率进行分析,也可利用TMD做功功率情况来反映。TMD控制效果好则结构自身耗能功率少,此时TMD做功功率幅值大且数值为负(对结构做负功,吸收能量);TMD控制效果差结构耗能功率大,此时TMD做功功率幅值小且可能为正(对结构做正功,释放能量)。图3(a)所示为El-Centro波地震动作用下的结构自身耗能功率情况,在0~6 s时结构自身耗能功率在前4个峰值处略放大,在图4(a)中对应峰值附近,TMD做功功率出现正值,即对结构释放能量,起反作用,TMD对结构控制效果较差;而在5~15 s时,图3(a)中结构自身耗能功率有较大幅度的减小,结合图4(a)可知,该段时间内TMD做功功率为负且数值较大,TMD吸收能量,控制效果较好;在15~30 s时,图4(a)中TMD做功功率主要出现负值,但结构输入功率较小,与无控结构相比,带TMD的结构耗能功率已经降至较低水平,即使TMD做功出现正值,这时的影响也较小。Taft波激励下,TMD做功功率情况如图4(b)所示,在地震动中后期,TMD做功出现较多正功率分量,而在此段时间内,图4(a)El-Centro地震动出现的较多负功率分量,比较两种情况的耗能功率,也就不难发现在该时段Taft波减震效果略差的原因。限于篇幅,对于人工波激励下,结构控制效果对比分析不再赘述。

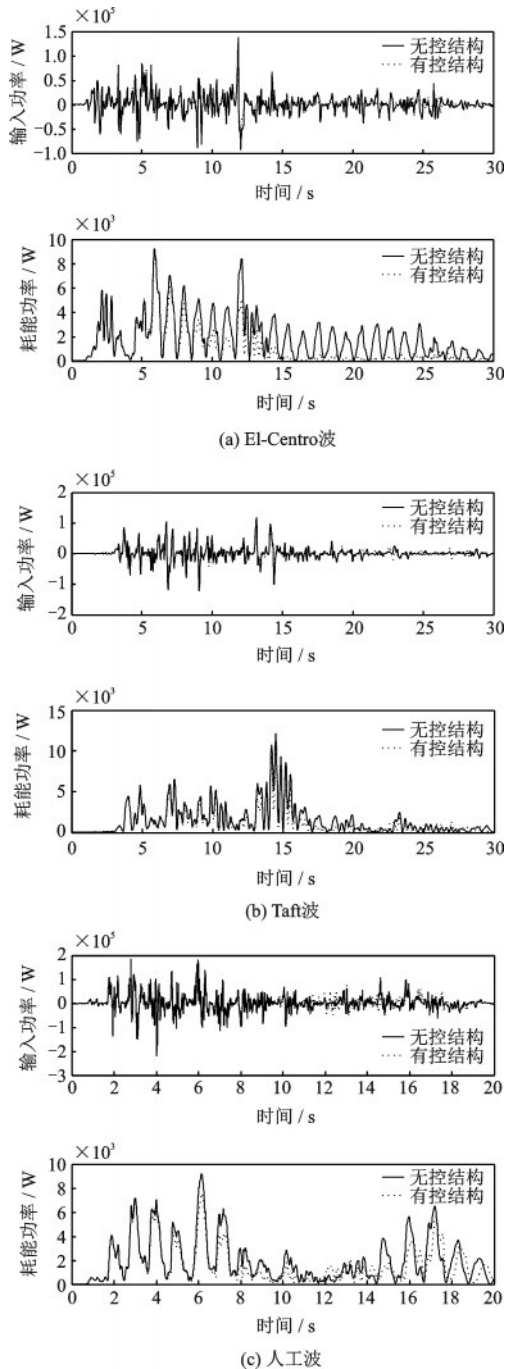


图3 输入功率与耗能功率分析

Fig.3 Analysis of input power and dissipation power

5 结论

(1)耗能功率均值表示结构的整体统计量,相对于顶层位移方差等局部指标更具统计意义,并且可以借此作为判断控制装置的有效性。

(2)TMD系统的参数可以通过耗能功率均值来优化,并从耗能功率均值的随机角度证明TMD控制的有效性。时程功率分析进一步论证了随机分析的有效性,且在地震结构初期TMD效果不理想,但中后期具有较好的控制效果。

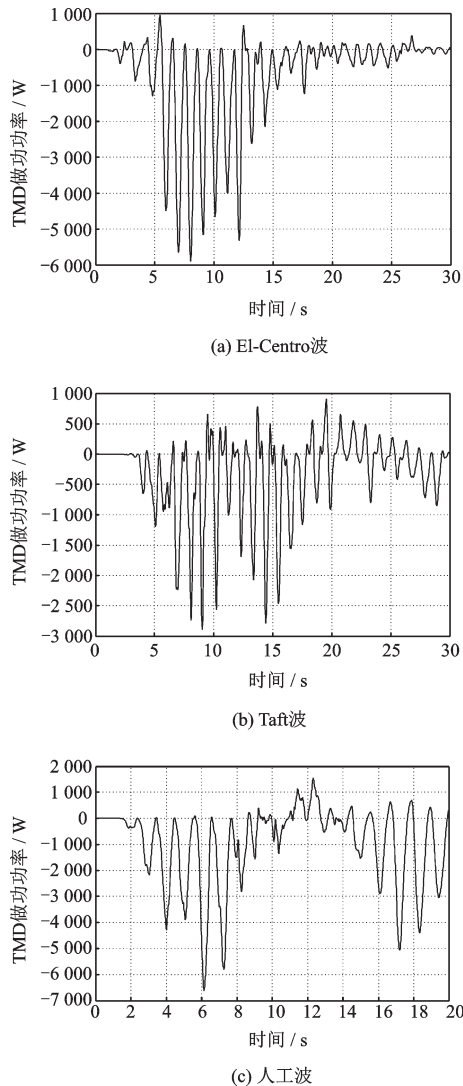


图4 TMD对结构的做功功率

Fig.4 The making power of TMD to structure

(3)通过TMD做功功率与结构耗能功率分析表明,TMD做功功率为负时对结构有控制效果,表现为吸收能量,且功率幅值越大控制效果越好;而TMD做功功率为正时则相反。

参考文献:

[1] Housner G W. Limit design of structures to resist earthquakes[C] // Proceedings of the 1st World Conference Earthquake Engineering. Berkeley, California: [s. n.], 1956, 5:1-13.
 [2] Hori N, Inoue N. Damaging properties of ground motions and prediction of maximum response of structures based on momentary energy response [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2002, 31 (9) :

1657-1679.

[3] 严济宽. 振动功率流的一般表达式及其测量方法[J]. 噪声与振动控制, 1987(1):25-30.
 Yan J K. General expression and measure method of vibration power flow [J]. Noise and Vibration Control, 1987(1):25-30. (in Chinese)
 [4] 朱宏平, 唐家祥. 多高层结构的振动功率流[J]. 噪声与振动控制, 1994(6):2-6.
 Zhu H P, Tang J X. Vibration power flow in high-rise buildings [J]. Noise and Vibration Control, 1994 (6) : 2-6. (in Chinese)
 [5] 朱宏平, 唐家祥. 高层建筑结构的波传播及其振动功率流[J]. 华中理工大学学报, 1995, 23(3):78-81.
 Zhu H P, Tang J X. The wave propagation and vibration power flow in high-rise buildings [J]. Journal of Huazhong University of Technology, 1995, 23 (3) : 78-81. (in Chinese)
 [6] Soong T T, Dargush G F. Passive energy dissipation systems in structural engineering [M]. New York: John Wiley & Sons, 1997.
 [7] 张琼, 陈凯, 杜永峰, 等. 基于人体动力学模型钢楼梯振动舒适度及其控制研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2018, 38(1):153-160.
 Zhang Q, Chen K, Du Y F, et al. Vibration serviceability and control research of a steel stair based on body-dynamic model [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2018, 38(1):153-160. (in Chinese)
 [8] 侯纲领, 吴灵枢, 李孟, 等. 设有基础隔震-TMD的双层安全壳核电站结构抗震性能研究[J]. 建筑结构学报, 2018, 39(增1):52-59.
 Hou G L, Wu L Sh, Li M, et al. Seismic performance of BIS-TMD structure of nuclear power plants with double containments [J]. Journal of Building Structures, 2018, 39(Sup1):52-59. (in Chinese)
 [9] 李春祥. 地震作用下高层建筑TMD控制研究与设计[J]. 上海交通大学学报, 1999, 33(6):746-749.
 Li Ch X. TMD control research and design of tall buildings subjected to seismic excitation [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 1999, 33(6) : 746-749. (in Chinese)
 [10] 秦丽, 李业学, 徐福卫. TMD对结构地震响应控制效果的研究[J]. 世界地震工程, 2010, 26(1):202-206.
 Qin L, Li Y X, Xu F W. Research on control effectiveness of TMD to structural seismic response [J]. World Earthquake Engineering, 2010, 26 (1) : 202-206. (in Chinese)

(本文责编:池营营)

(下转第585页)