

非线性-线性联合减震控制方法频谱特性分析*

王菁菁¹, 刘志彬¹, 李浩博², 岳洪滔²

(1. 广州大学土木工程学院 广州, 510006) (2. 湖南工业大学土木工程学院 株洲, 412000)

摘要 非线性质量阻尼器和线性质量阻尼器相联合的结构控制方法将非线性能量阱 (nonlinear energy sink, 简称 NES) 和调谐质量阻尼器 (tuned mass damper, 简称 TMD) 的特点集中于一个或一组装置中, 使其在具有较高减振性能的同时兼备较强的鲁棒性能。为研究单质量联合阻尼器和双质量联合阻尼器的减震性能, 在某 8 自由度主体结构顶层分别附加各类控制装置, 包括单联、双联、TMD 和 NES, 并在脉冲型荷载作用下对各控制装置进行参数优化, 考察其能量鲁棒性和频率鲁棒性。在地震作用下进行减震效果对比和频谱特性分析, 得出在反应谱曲线呈斜坡型时, 带有非线性特点的控制方法减震性能相对 TMD 较好。综合输入能量和频率变化两方面因素, 非线性-线性联合控制方法减震性能更优越。

关键词 结构控制; 联合控制; 地震作用; 频谱分析; 数值模拟

中图分类号 TU352.11; TH123⁺.4

引言

结构控制技术通过对控制装置所依附的结构施加被动或主动的作用力, 改变结构主体的刚度、质量和阻尼等, 以达到减小能量输入和加速能量消耗的目的^[1-2]。目前, 基础隔震、TMD 以及各类阻尼装置^[3]等结构控制技术已经被大量运用到实际工程之中。TMD 是应用最为广泛的被动控制技术之一, 远小于主体结构质量的 TMD 在运动过程中消耗大量能量^[4-8]。为了使结构响应有效减低, TMD 的自振频率被调至与主体结构相近, 但也因为如此, TMD 只在较窄的频率范围内运作良好。在连续地震作用下控制结构 TMD 的鲁棒性难以保持, 减震效果相对减弱^[9]。NES 是一种新型的被动控制方法。非线性能量阱由一个质量或一组质量组成, 通过阻尼单元和非线性的弹簧单元与主体结构相连, 使其产生本质非线性的回复力, 因此 NES 能够在较宽频带发挥控制作用^[10-12]。其中一型 NES 研究较多, 在一型 NES 的现象学模型中, NES 质量块通过立方刚度的弹簧单元和黏滞阻尼单元与主体结构相连。通过对某 2 层结构模型分别附加一型 NES 和 TMD 在地震作用下的响应对比可知, 当主体结构固有频率发生变化时, NES 仍表现卓越^[13], 但同时一型 NES 减震性能容易受到初始能量的影响, 在初

始能量不同时减震效果差别较大。

为解决上述问题, 笔者提出了将非线性和线性两类控制方法联合使用的结构控制方法, 使一个或一组装置同时具备 TMD 的线性特点和 NES 的非线性特点, 在脉冲型荷载作用下, 非线性-线性联合的控制方法展现出较强的能量鲁棒性和频率鲁棒性^[14]。刘良坤等^[15]对 TMD 与 NES 并联的控制方法利用复变量平均法和多尺度法进行了分析, 结果表明混合系统既拓宽了频带又降低了对初始能量的敏感性。

笔者在某 8 自由度主体结构模型上附加 TMD、一型 NES、单质量联合阻尼器和双质量联合阻尼器 4 种控制装置。首先在脉冲型荷载作用下进行参数优化, 考察了各控制方法的能量鲁棒性和频率鲁棒性。然后在 7 条实测地震作用下进行减震效果对比和分析, 并根据地震反应谱和系统频谱特性讨论各类控制方法的减震性能差异。

1 非线性-线性联合阻尼器

1.1 单质量联合阻尼器

单质量联合阻尼器 (简称单联) 在附加质量运动正负方向分别采用非线性和线性回复力-位移关系, 如图 1 所示, 是一种构造紧凑、占用空间相对较小的结构控制方法。单联在正方向上遵循 3 次方回复

* 国家自然科学基金资助项目 (51608190, 51741804, 51708205); 湖南省自然科学基金青年基金资助项目 (2018JJ3123)

收稿日期: 2018-01-11; 修回日期: 2018-09-07

力-位移关系,与一型 NES 相同;在负方向上遵循线性回复力-位移关系,与 TMD 相同,如图 2 所示。

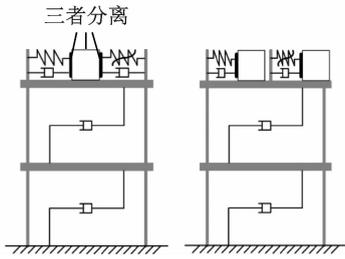


图 1 单质量(左)与双质量(右)联合阻尼器示意模型
Fig. 1 Phenomenological model of single-mass (left) and dual-mass damper systems (right)

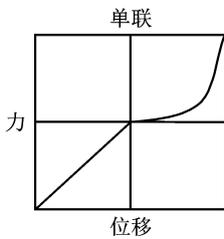


图 2 单联回复力-位移关系
Fig. 2 Force-displacement relationships of single-mass damper

单联运动方程为

$$\begin{cases} m_a \ddot{u}_a + c_a \dot{u}_a + k_{asN} u_a^3 = -m_a \ddot{x}_{host \cdot abs} & (u_a \leq 0) \\ m_a \ddot{u}_a + c_a \dot{u}_a + k_{asT} u_a = -m_a \ddot{x}_{host \cdot abs} & (u_a > 0) \end{cases} \quad (1)$$

其中: m_a 为附加质量; C_a 为附加质量的黏滞阻尼系数; k_{asN} 和 k_{asT} 分别为附加质量非线性和线性刚度系数; u_a 为附加质量相对于主体结构位移; $x_{host \cdot abs}$ 为主体结构绝对位移。

1.2 双质量联合阻尼器

双质量联合阻尼器(简称双联)使用 2 个附加质量(见图 1),包括 1 个非线性质量(即一型 NES)和 1 个线性质量(即 TMD)。两者不直接接触,同时与主体结构发生相互作用。

2 个附加质量的运动方程分别为

$$m_{aT} \ddot{u}_{aT} + c_{aT} \dot{u}_{aT} + k_{aT} u_{aT} = -m_{aT} \ddot{x}_{host \cdot abs} \quad (2)$$

$$m_{aN} \ddot{u}_{aN} + c_{aN} \dot{u}_{aN} + k_{aN} u_{aN}^3 = -m_{aN} \ddot{x}_{host \cdot abs} \quad (3)$$

其中: m_{aT} 和 m_{aN} 分别为双联中 TMD 和 NES 的质量; c_{aT} 和 c_{aN} 分别为 TMD 和 NES 的黏滞阻尼系数; k_{aN} 和 k_{aT} 分别为 TMD 和 NES 的刚度系数; u_{aT} 和 u_{aN} 分别为 TMD 和 NES 相对于主体结构的位移。

2 控制参数

2.1 优化条件

为考察所提出两类联合阻尼器的减振性能,笔

者将单联、双联以及用于对比的一型 NES 和 TMD 分别置于同一主体结构顶层,并采用相同优化方法对各质量阻尼器控制参数进行优化。优化在 Matlab 中通过建立 Simulink 模型进行。所采用主体结构为 8 层钢框架结构^[16],首层高为 3.9 m,其他层高为 3.3 m。简化为 1 个 8 自由度层串模型,使用 State-space 模块模拟。各层质量为 2.3×10^5 kg,刚度为 3.9×10^8 N/m,模态阻尼比为 0.02,前 3 阶自振周期分别为 0.83,0.29 和 0.17s。优化采用脉冲型荷载,通过设置初始运动条件施加,使各质量(包括主体结构和控制装置)具有 0.25 m/s 的初始速度。优化目标为使各控制系统中主体结构顶层位移 10 s 内均方根达到最小值。当控制装置附加质量越大时,其减振效果越显著,但考虑到实际结构中空间和装置体量的限制,控制装置质量均取为主体结构质量的 3%,即 5.52×10^4 kg。各控制装置采用相同大小黏滞阻尼,参考 TMD 最优阻尼计算方法^[17],为 9×10^4 (N·s)/m。

2.2 优化结果

单联待优化参数为线性和非线性刚度系数,通过依次计算不同线性与非线性刚度系数组合下的结构响应(顶层位移均方根)进行选择。优化结果如图 3 所示,最优线性和非线性刚度系数分别为 1.34×10^6 N/m 和 1×10^9 N/m³(图中圆点所示)。

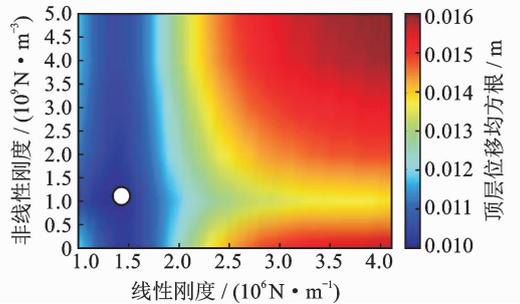


图 3 单联刚度优化结果
Fig. 3 Optimization of single-mass damper

双联中总附加质量为 5.52×10^4 kg,线性和非线性质量各占 50%,两质量阻尼特性相同,因此每个质量的黏滞阻尼系数均为 4.5×10^4 (N·s)/m,总和为 9×10^4 (N·s)/m。待优化参数为线性质量和非线性质量的刚度系数,优化结果见图 4,最优线性质量和非线性质量刚度系数分别为 3×10^6 N/m 和 5×10^8 N/m³(图中圆点所示)。

一型 NES 和 TMD 各有 1 个待优化参数,为各自刚度系数。优化后一型 NES 的刚度系数为 3×10^8 N/m³,TMD 刚度系数为 3×10^6 N/m。

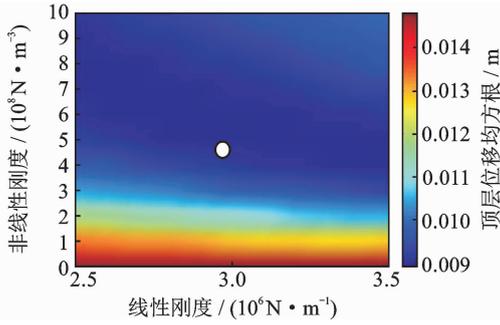


图 4 双联刚度优化结果

Fig. 4 Optimization of dual-mass damper

3 脉冲型响应分析

3.1 能量鲁棒性

图 5 对比了在优化脉冲型荷载(其初始速度为 0.25 m/s)作用下无控系统、TMD 系统、一型 NES 系统、单联系统以及双联系统的顶层位移响应。通

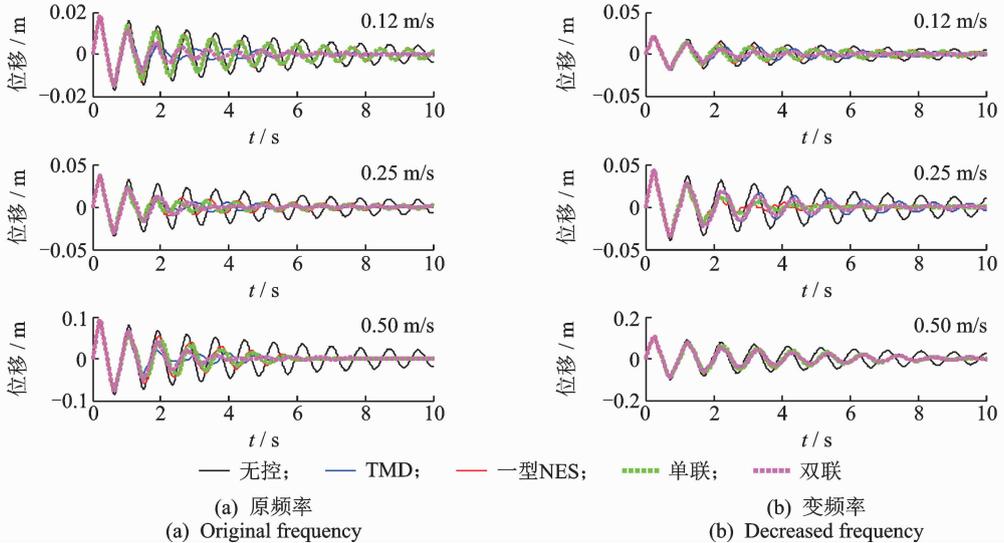


图 5 原频率和变频率系统在不同初始速度时顶层位移

Fig. 5 Top story displacements of systems of different frequencies under various initial velocities

3.2 频率鲁棒性

降低主体结构频率可用于模拟结构因发生破坏刚度下降所导致结构特性的变化^[18]。当主体结构基本频率降低 25% 时, TMD 与主体结构不再调谐, 不能有效形成共振机制而导致控制能力退化。可观察到, 在 3 种初始速度作用下, TMD 系统响应接近无控系统, 在 4 种方法中控制性能最弱。当初始速度为 0.25 和 0.5 m/s 时, 一型 NES 减振能力最强, 这是由于输入能量使附加质量产生足够的回复力, 此时控制装置的非线性越强越能适应主体结构频率的变化。而在 0.12 m/s 初始速度作用下, 非线性程

过对比可知, 4 类质量阻尼器经过优化后具有极强的减振性能, 在 4 个周期内(约 3s)可将位移降至其最大值的 1/4 以下, 四者控制能力相当。

图 5 同时考察当减小和增大脉冲型荷载时及主体结构基本频率降低 25% 时各控制装置的减振效果, 即对输入能量大小变化和频率变化的鲁棒性。当作为激励的初始速度降至 0.12 m/s 时, TMD 系统和双联系统减振性能与优化荷载时相比几乎没有变化, 其中 TMD 系统为完全线性系统, 响应变化和减振比例不受荷载大小影响。而一型 NES 系统与单联系统控制性能明显退化, 其中一型 NES 由于非线性更强, 对输入能量依赖更大, 响应也较单联系统更大。考虑到荷载减小时, 无控系统本身响应很小, 且一型 NES 和单联仍具备一定的减振能力, 不会对结构安全造成过大影响。当初始速度升至 0.5 m/s 时, 可以观察到与 0.12 m/s 初始速度时相似的情况, 不同的是, 此时一型 NES 系统和单联系统响应在约 5 s 时已减至与 TMD 系统和双联系统相近的水平, 且此后响应仅存在微小幅值的振动。

度越大的质量阻尼器等效线性刚度越小, 产生的回复力也远小于线性程度更大的质量阻尼器, 因此一型 NES 系统的响应大于两类联合阻尼器系统的响应。在两类联合阻尼器中, 单联较双联控制能力更强, 结合主体结构频率无变化时的响应可知, 两者中单联更接近一型 NES, 频率鲁棒性更强, 双联更接近 TMD, 能量鲁棒性更强。

4 地震响应分析

为考察各类质量阻尼器在地震作用下的控制性能, 笔者对 Pacific Earthquake Engineering Research

Center(PEER)网站^[19]下载的 7 条实测地震波作用下的结构响应进行了分析,表 1 列出了 7 条地震记录的特性,地震峰值加速度(peak ground acceleration,简称 PGA)范围为 0.47 m/s² (1 号)至 2.34m/s² (7 号)。地震加速度的大小对应输入结构的能量大小,各控制装置在不同峰值加速度地震作用下的减震性能可在

一定程度上反映其能量鲁棒性。同时,考虑到各地震波频率成分各异,主体结构频率的轻微变化有可能激发地震响应的巨大改变,因此笔者还对主体结构频率下降 25%时各系统的减震性能,即频率鲁棒性进行了考察。表 1 同时列出了各地震作用下无控系统在原频率时和频率下降 25%时的顶层位移峰值。

表 1 地震记录特性及无控系统响应

Tab. 1 Earthquake properties and responses of uncontrolled system

编号	地震	PEER 编号	持时/s	PGA/ (m · s ⁻²)	无控系统/mm	
					原频率	75%频率
1	Kern	RSN13_KERN_PAS180	77.25	0.47	27.43	39.71
2	Kern	RSN13_KERN_PAS270	77.35	0.52	54.24	47.55
3	Kern	RSN12_KERN_PEL_PEL180	70.00	0.58	35.29	59.08
4	Lomaprieta	RSN736_LOMAP_A09227	39.05	1.03	50.20	129.73
5	Tabas	RSN138_TABAS_BOS-L1	35.00	1.03	62.62	50.59
6	Lomaprieta	RSN737_LOMAP_AGW000	60.00	1.66	40.91	66.90
7	Lomaprieta	RSN739_LOMAP_AND340	39.75	2.34	55.07	61.55

图 6 绘制了原频率时各控制系统与无控系统顶层位移峰值和均方根的比值。如图所示,在主体结构频率保持不变时,各控制装置均可达到较好的减震效果,其中 3 号、7 号 2 条地震作用下,各控制系统与无控系统的响应比值均在 0.6 以下,减震效果显著。4 种控制方法中,一型 NES 由于非线性最强,能量鲁棒性较差,在能量各异的地震作用下减震性能较其他方法较弱。当不考虑一型 NES 系统时,除以上提到的 2 条地震外,TMD 系统、单联系统和双联系统还在 1 号、2 号、5 号和 6 号等 4 条地震作用下响应均方根比值小于 0.6 或略超过 0.6。两类联合控制方法响应峰值与 TMD 接近,在大多数地震作用下减震性能与 TMD 相当。

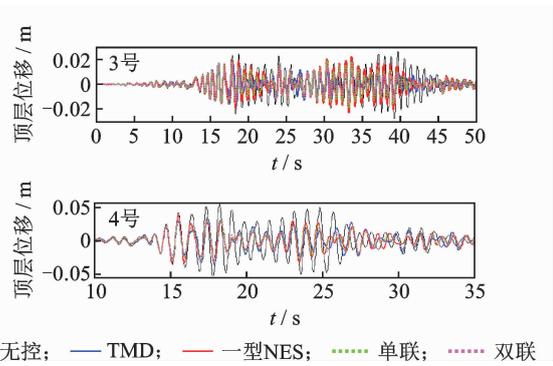


图 7 3 号和 4 号地震作用下各系统的顶层位移
Fig. 7 Top story displacements under earthquake No. 3 and No. 4

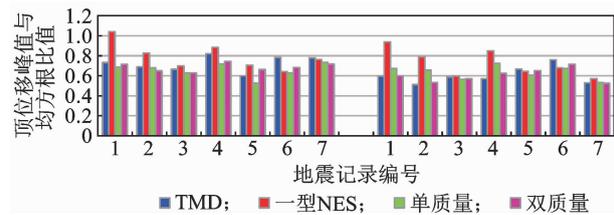


图 6 原频率系统在地震作用下顶层位移峰值(左)与均方根(右)比值
Fig. 6 Peak (left) and root-mean-square (right) response ratios of systems of original frequency under seismic excitations

图 7 显示了 3 号和 4 号地震作用下各系统的顶层位移响应时程。由于地震持时较长,前后段结构响应微小,图中时程只截取了响应显著的时间区间。对应图 6 可知,4 号地震作用下各控制方法减震性能接近,3 号地震作用下 TMD 系统和双联系统响应明显小于一型 NES 系统和单联系统。这种差异

可以通过输入能量大小进行解释,由优化荷载作用下各系统位移响应(图 5)可知,无控系统顶层位移峰值约为 0.05 m,4 号地震作用下,无控系统顶层位移峰值与之接近,即此时输入能量适中,带有非线性的控制方法减震性能与线性控制方法相当。而 3 号地震作用下,无控系统顶层位移峰值远小于优化时的响应峰值,非线性较强的控制方法,尤其是一型 NES 的等效线性刚度与主体结构刚度相差较大,无法有效形成共振机制,减震性能不如线性控制方法。

图 8 显示了 7 条地震作用下,当主体结构频率下降 25%时 TMD 系统、一型 NES 系统、单联系统和双联系统与无控系统的顶层位移峰值比和均方根比值。此时减震性能的整体趋势表现为 TMD 在所有控制方法中退化最为严重,除 4 号、5 号、6 号地震作用下 TMD 系统均方根响应与其他控制系统接近以外,在剩余的 4 条地震作用下,TMD 系统的均方根响应明显大于其他控制系统响应,甚至超过对

能量最为敏感的一型 NES 系统,原因为 TMD 与频率下降的主体结构不再调谐,控制性能显著减弱。综合原频率和变频率时的结构响应可知,同时具有线性和非线性特点的单联和双联较 TMD 和一型 NES 能够更好地兼顾输入能量和主体结构频率的变化,通过脉冲型荷载优化得到的控制装置在地震作用下亦展现出优越的减震性能。

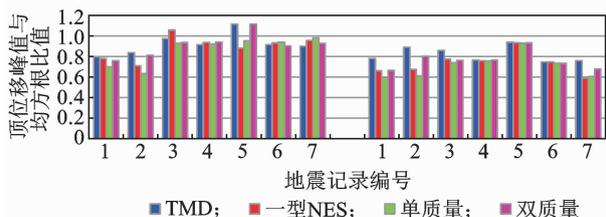


图8 变频率系统在地震作用下顶层位移峰值(左)与均方根(右)比值

Fig. 8 Peak (left) and root-mean-square (right) response ratios of systems of decreased frequency under seismic excitations

5 频谱分析

5.1 地震反应谱分类

由地震响应可以看出,不同地震作用下各控制方法的减震性能存在差异,对于同一种控制方法,减震效果也存在较大区别。通过分析图6中原频率时各控制系统的响应比值得到,TMD在大多数地震作用下减震效果优于具有非线性特点的控制装置,尤其是完全非线性的一型NES,这是由于TMD的线性特点使其控制性能不受响应大小的限制。但在6号和7号地震作用下,一型NES和两类联合质量阻尼器系统的响应峰值均小于TMD系统。图9根据这一特点绘制了在结构自振频率附近的地震位移反应谱,反应谱图中同时还对无控系统的第1阶自振频率(1.176 6 Hz,图中粗实线)和TMD系统的第1、第2阶自振频率(1.056 9 Hz和1.336 2 Hz,图中粗虚线)进行了标注。主体结构附加质量后自由度增加,原第1阶频率变为原频率上下的2阶频率,高阶频率变化不明显。对于完全非线性的一型NES和具有部分非线性的两类联合质量阻尼器,由于自振频率可变,附加装置后结构的第1、第2阶频率变化介于无控系统和TMD系统频率之间。图9(a)中绘制了以上提到的2条地震(带有非线性的质量阻尼器减震性能较好)的位移反应谱,反应谱呈现斜坡特点,无控系统第1阶频率处响应明显小于TMD系统第1阶频率处响应。图9(b)绘制了除此之外的5条地震(TMD减震性能较好)的位移反应谱,反应谱呈一字型,在所示频

率范围内响应变化较平缓。绘制时对反应谱进行了归一化处理,即增大或缩小各反应谱使其均值为1,以便更清楚地观察各条地震的频谱规律。

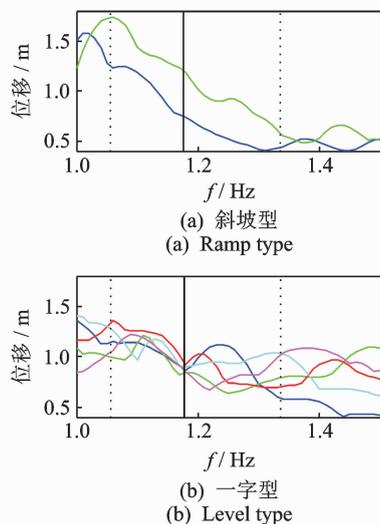


图9 斜坡型及一字型地震位移反应谱

Fig. 9 Ramp and level type seismic displacement spectrum

5.2 频率成分分析

上述地震反应谱与不同控制方法减震性能之间的规律可通过对位移响应做频率成分分解进行解释。将整个频谱划分为3个部分:小于1.1 Hz(第1部分)、1.1~1.25 Hz(第2部分)和大于1.25 Hz(第3部分),各部分频谱划分标注于图10中。无控系统第1阶频率属于第2部分,TMD系统第1、第2阶频率分别属于第1和第3部分。图10对优化脉冲型荷载作用下原频率时各系统的顶层位移响应按3个部分频率范围进行分解,并选择耗能效率最高的2.5~5 s进行对比。无控系统以其第1阶频率振动,因此可观察到第2部分频率成分显著大于第1、第3部分。TMD系统与无控系统相比第1、第3部分频率成分增加,与其第1、第2阶自振频率对应。带有非线性的控制系统中,第2部分频率成分最多,第1部分频率成分较小,且非线性程度越高(如一型NES)第1部分频率成分越小,单联系统的频率成分分布更接近一型NES系统,双联系统更接近TMD系统。根据各部分频率成分对总响应的贡献可知,在各控制系统中,线性系统的响应大小主要依赖于第1和第3部分地震反应谱的大小,非线性系统的响应大小主要依赖于第2和第3部分地震反应谱的大小。对于图10所示的斜坡型反应谱,第1部分频率范围对应的位移响应大于第2部分,因此TMD系统响应大于非线性控制系统;而对于图10所示的一字型反应谱,各部分频率范围对应的位移响应差别较小,此时地震作用的输入能量大小是影响各控制方法减震性能的主要因素。

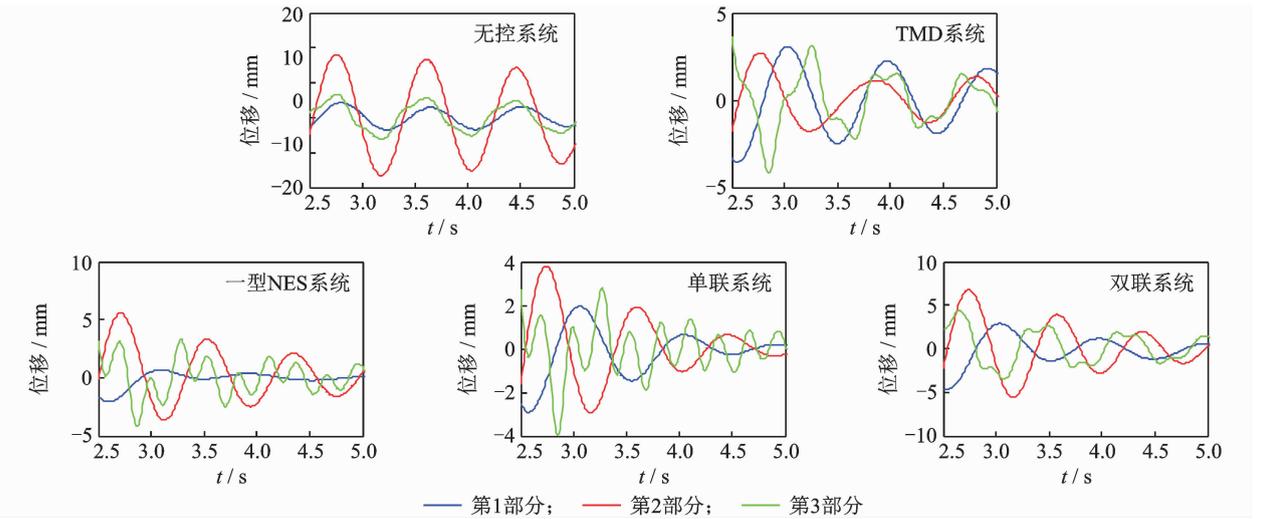


图 10 各系统位移响应频率成分

Fig. 10 Frequency components of displacement responses

图 11 为各系统结构响应在无控系统第 1 阶频率附近的小波变换图。小波变换图中阴影深浅对应振动的大小,各控制系统小波阴影明显浅于无控系统,即振动显著小于无控系统。图 11 还对无控系统第 1 阶频率和 TMD 系统第 1、第 2 阶频率位置进行了标注。无控制系统与 TMD 系统为线性系统,小波图中所示振动主要集中在各自自振频率处。一型 NES 系统为完全非线性系统,振动无明显固定频率,部分集中于无控系统第 1 阶频率处,且向高频区

域延伸。单联系统与一型 NES 系统接近,但低频区域振动略大于一型 NES 系统。双联系统中可以观察到 2 个频率处的振动,其中较高频振动介于无控系统第 1 阶频率和 TMD 系统第 2 阶频率之间,是振动的主要成分。通过小波变换可验证响应频率成分分析所得到的结果,即非线性-线性联合的控制方法使系统振动频率介于 TMD 系统和一型 NES 系统之间,单联和双联兼备非线性和线性控制方法的特点。

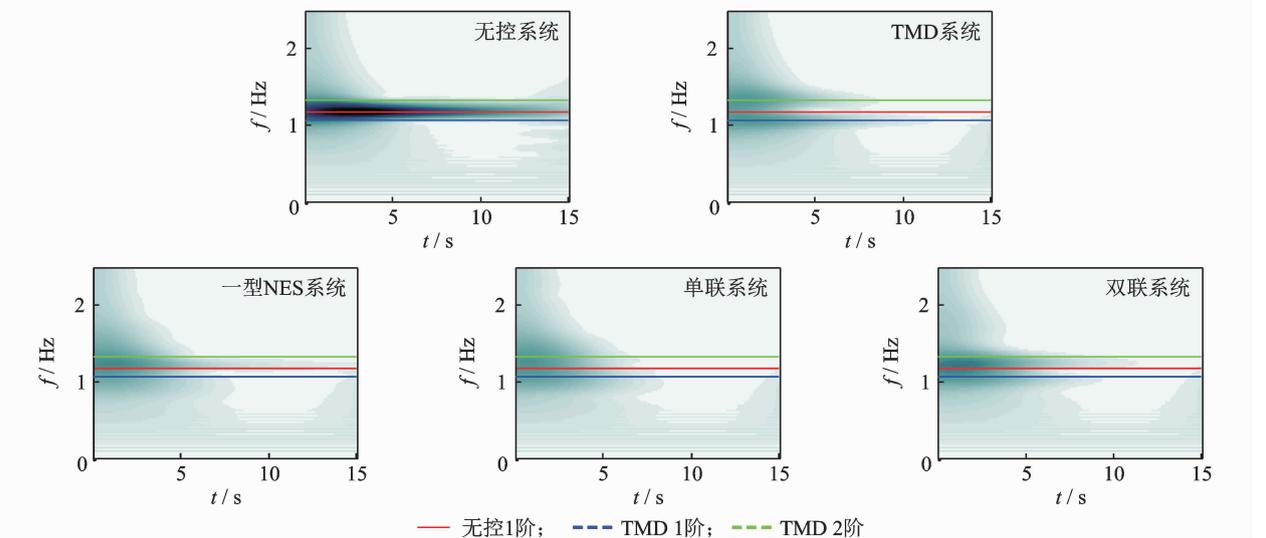


图 11 各系统结构响应小波变换

Fig. 11 Wavelet transforms of structural responses

6 结 论

1) 将非线性和线性结构控制方法相结合,得到了单质量联合阻尼器和双质量联合阻尼器两类联合

控制方法。通过脉冲型荷载优化得到的各控制装置在 7 条实测地震作用下同样能够有效减小结构响应。综合输入能量大小和主体结构频率变化两方面因素,两类联合质量阻尼器较完全线性和完全非线性的控制方法减震性能更加优越。

2) 通过对地震位移反应谱、响应频率成分和小波变换分析可知,当地震反应谱在系统振动频率附近呈斜坡型时,TMD的减震效果相对非线性控制方法较差。此时应优先选择带有非线性的控制方法,尤其是兼备频率鲁棒性和能量鲁棒性的单质量联合阻尼器和双质量联合阻尼器两类联合控制方法。

参 考 文 献

- [1] Yao J T P. Concept of structural control[J]. Journal of Structural Engineering-ASCEE, 1972, 98(7): 1567-1574.
- [2] 周福霖, 工程结构减震控制[M]. 北京: 地震出版社, 1997: 3-10.
- [3] Sadek F, Mohraz B, Taylor A W, et al. A method of estimating the parameters of tuned mass dampers for seismic applications[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 1997, 26: 617-635.
- [4] Eason R P, Sun C, Dick A J, et al. Attenuation of a linear oscillator using a nonlinear and a semiactive tuned mass damper in series[J]. Journal of Sound and Vibration, 2013, 332(1): 154-166.
- [5] Abe M, Fujino Y. Dynamic characterization of multiple tuned mass dampers and some design formulas[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamic, 2010, 23(8): 813-835.
- [6] Yamaguchi H, Harnpornchai N. Fundamental characteristics of multiple tuned mass dampers for suppressing harmonically forced oscillation[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamic, 1993, 22: 51-62.
- [7] Soto B R, Ruiz S E. Influence of ground motion intensity on the effectiveness of tuned mass dampers[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamic, 1999, 28: 1255-1271.
- [8] Wierschem N E, Spencer Jr B F, Bergman L A, et al. Numerical study of nonlinear energy sinks for seismic response reduction[C] // The 6th International Workshop on Advanced Smart Materials and Smart Structures Technology. Dalian; [s. n.], 2011: 25-26.
- [9] 包超, 杜永峰, 徐天妮, 等. 基于地震响应的结构鲁棒性定量分析方法[J]. 振动、测试与诊断, 2017, 37(1): 120-125.
- Bao Chao, Du Yongfeng, Xu Tianni, et al. Study of structural robustness analysis method based on seismic response[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2017, 37(1): 120-125. (in Chinese)
- [10] Wang J, Wierschem N E, Spencer Jr B F. Numerical and experimental study of the performance of a single-sided vibro-impact track nonlinear energy sink[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2016, 45: 635-652.
- [11] Wang J, Wierschem N E, Spencer Jr B F. Experimental study of track nonlinear energy sinks for dynamic response reduction[J]. Engineering Structures, 2015, 94: 9-15.
- [12] Wang J, Wierschem N E, Spencer Jr B F. Track nonlinear energy sink for rapid response reduction in building structures[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2015, 141(1): 04014104.
- [13] 王菁菁, 浩文明, 吕西林. 轨道非线性能量阱阻尼对其减振性能的影响[J]. 振动与冲击, 2017, 36(24): 23-29.
- Wang Jingjing, Hao Wenming, Lü Xilin. The influence of the nonlinear energy sink damping on the vibration reduction performance [J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(24): 23-29. (in Chinese)
- [14] Wang Jingjing, Liu Zhibin, Hao Wenming, et al. Combined linear and nonlinear structural control strategies for seismic response mitigation[C] // The 13th International Workshop on Advanced Smart Materials and Smart Structures Technology. Tokyo; [s. n.], 2017: 22-23.
- [15] 刘良坤, 谭平, 闫维明, 等. 一种 NES 与 TMD 的混合控制方案研究[J]. 工程力学, 2017, 34(9): 64-72, 82.
- Liu Liangkun, Tan Ping, Yan Weiming, et al. Analysis of a hybrid scheme comprised of nonlinear energy sink and tuned mass damper [J]. Engineering Mechanics, 2017, 34(9): 64-72, 82. (in Chinese)
- [16] 王亚楠, 李慧, 杜永峰. TMD-基础隔震混合控制体系在近场地震作用下的能量响应与减震效果分析[J]. 振动与冲击, 2014, 33(4): 204-209.
- Wang Yanan, Li Hui, Du Yongfeng. Energy response and anti-vibration effect analysis for a base-isolated structure with TMD under near-field earthquake[J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(4): 204-209. (in Chinese)
- [17] Tsai H C, Lin G C. Optimum tuned-mass dampers for minimizing steady-state response of support-excited and damped structures[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 1993, 22(11): 957-97.
- [18] 安东亚, 汪大绥, 周德源, 等. 高层建筑结构刚度退化与地震作用响应关系的理论分析[J]. 建筑结构学报, 2014, 35(4): 155-161.
- An Dongya, Wang Dasui, Zhou Deyuan, et al. Theoretical analysis about relationship between seismic response and structural stillness degradation of high-rise building[J]. Journal of Building Structures, 2014, 35(4): 155-161. (in Chinese)
- [19] Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER). 2008 PEER next generation attenuation (NGA) database[EB/OL]. [2015-06-20]. <http://peer.berkeley.edu/nga>



第一作者简介:王菁菁,女,1986年11月生,讲师、硕士生导师。主要研究方向为结构控制技术与非线性结构控制。曾发表《Track nonlinear energy sink for rapid response reduction in building structures》(《Journal of Engineering Mechanics》2015, Vol. 141, No. 1)等论文。
E-mail: wangjj@hut.edu.cn