

钱志超, 陈洋洋, 谭平. 长周期地震动对广州塔 TMD 减震控制性能的影响[J]. 华南地震, 2018, 38 (4): 96–104. [QIAN Zhichao, CHEN Yangyang, TAN Ping. Effect of Long-Period Ground Motion on the Vibration Control Performance of TMD System of Canton Tower [J]. South China journal of seismology, 2018, 38(4): 96–104]

## 长周期地震动对广州塔 TMD 减震控制性能的影响

钱志超<sup>1,2,3</sup>, 陈洋洋<sup>1,2,3</sup>, 谭平<sup>1,2,3</sup>

(1. 广州大学工程抗震研究中心, 广州 510405; 2. 广东省地震工程与应用技术重点实验室, 广州 510405;  
3. 工程抗震减震与结构安全教育部重点实验室, 广州 510405)

**摘要:** 研究长周期地震动对广州塔 TMD 体系的影响及结构响应的时频分布规律。对国内现行规范反应谱长周期段进行延长, 选取 7 条地震动时程记录, 并补充 7 条长周期地震动时程记录作为输入样本, 研究不同周期的强震激励对超高耸结构 TMD 体系的影响。研究表明, 长周期成分的地震激励显著增加了超高耸结构的响应, 卓越周期在 2.341 s 至 6.425 s 的长周期地震动输入, 比卓越周期低于 1 s 的短周期地震动输入, 平均使结构桅杆顶的位移峰值与均方根值分别放大 125.49% 和 91.63%; 最优参数设计的 TMD 对短周期、长周期地震响应均起减震控制作用, 对 8 度长周期大震下主塔顶和桅杆顶的位移峰值控制降幅分别达到 28.61% 和 42.69%, 对相应的位移时程响应均方根值的控制降幅分别达到 32.56% 和 44.20%, TMD 体系的减震控制性能对地震动卓越周期具有一定鲁棒性; 对结构弱轴向的地震响应时程进行数值小波功率谱分析, 结果表明: 由于一般长周期地震动的卓越周期更接近广州塔结构弱轴向的二阶周期(2.888 s), 不仅增加了一阶振型的响应, 更显著加剧了以二阶振型为主的桅杆鞭梢效应, TMD 对该效应一定程度上起了抑制作用; 建议对周期大于 6 s 的超高耸结构 TMD 体系, 在按规范反应谱选取地震动之外, 应注意考虑长周期地震动的影响, 以更全面评估结构性能。

**关键词:** 长周期地震动; 广州塔; 调谐质量阻尼器; 小波变换

**中图分类号:** TU973.31

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1001-8662(2018)04-0096-09

**DOI:** 10.13512/j.hndz.2018.04.016

## Effect of Long-Period Ground Motion on the Vibration Control Performance of TMD System of Canton Tower

QIAN Zhichao<sup>1,2,3</sup>, CHEN Yangyang<sup>1,2,3</sup>, TAN Ping<sup>1,2,3</sup>

(1. *Earthquake Engineering Research & Test Center, Guangzhou University, Guangzhou 510405, China;*  
2. *Guangdong Provincial Key Laboratory of Earthquake Engineering and Applied Technology, Guangzhou 510405, China;* 3. *Key Laboratory of Earthquake Resistance, Earthquake Mitigation and Structural Safety, Ministry of Education, Guangzhou 510405, China;*)

**Abstract:** The present paper studies the effect of long-period ground motion on the TMD system of Canton Tower, as well as the distribution of its time-frequency response. The paper lengthened the long-period part of

**收稿日期:** 2018-10-09

**基金项目:** “广东特支计划” 科技创新领军人才(2014TX01C141); 广州市“珠江科技新星”(201610010159); 广东省自然科学基金(2016A030313544); 广东省教育厅创新团队项目(2016KCXTD016)。

**作者简介:** 钱志超(1993-), 男, 硕士研究生, 从事结构减震控制研究. **E-mail:** 1506957140@qq.com.

**通信作者:** 陈洋洋(1981-), 男, 副研究员, 主要从事非线性动力学、结构减震控制研究. **E-mail:** yychen@gzhu.edu.cn.

the current specification response spectrum of China Code for selection of seven seismic records. Seven more long-period seismic records were also added up as input samples to study the effect of different periods of strong earthquake excitation on super-slender building with TMD system. The results show that the long-period excitation significantly increases the seismic response of the super-slender structure. Compared to the short-period ground motions with predominant periods less than 1s, the long-period ground motions with predominant periods from 2.341s to 6.425s, enlarged the peak value and the root-mean-square of the displacement time histories respectively of the mast top respectively by 125.49% and 91.63%. Under 8-degree long-period earthquakes, the optimized TMD can suppress both short-period and long-period seismic responses. The TMD system enables reductions of peak displacement responses at the main tower top and the mast top respectively in 28.61% and 42.69%, enables reductions of root-mean-square of the root-mean-square displacement response at the main tower top and the mast top respectively in 32.56% and 44.20%, so the vibration control performance of TMD system has certain robustness to the predominant period of ground motion. The results of numerical wavelet power spectrum analysis on the seismic response time history of the key parts of the structure show that the TMD control on the first-order vibration mode is effective. Moreover, because many long-period predominant periods recorded are closer to the second-order period (2.932s) in the weak axial direction of Guangzhou tower structure, the whipping effect of mast dominated by this mode is significantly intensified, and TMD also inhibits the effect to a certain extent. It is suggested that the seismic performance of the TMD system of long-period structures with period longer than 6s, should be comprehensively evaluated by selecting different periods of ground motions.

**Keywords:** Long-period ground motion; Guangzhou tower; Tuned mass damper; Wavelet transform

## 0 引言

近年来,出现了越来越多长周期地震动致使大型结构破坏的事例,地震动的长周期成分主要依赖于震源和场地性质,其卓越周期更接近于高柔结构的低阶自振周期,因此许多学者和工程师关注长周期地震动对超高耸结构的抗震性能影响。现行建筑抗震设计规范<sup>[1]</sup>给出的地震影响系数曲线,其长周期部分不超过 6 s,对于广州塔这类自振周期大幅超出规范反应谱周期范围(6 s)的超高耸结构,仅根据规范选取的地震动难以综合评估结构的抗震能力。另一方面,随着调谐质量阻尼器(TMD)在超高耸结构中的应用日益广泛,如台北 101 大楼伦敦千禧桥<sup>[2]</sup>等,其在长周期地震动作用下的表现也受到关注。本文通过广州塔基准模型 TMD 减震控制体系在短、长地震动作用下的响应特性进行综合分析,构造其响应过程的小波功率谱,综合分析地震动周期对超高耸 TMD 体系的时频影响规律。

## 1 模型建立

考虑广州塔的基准模型<sup>[3]</sup>,如图 1 所示,模型由 37 个单元组成,共 38 个节点,其中下部 27 个单元为主塔部分,上部 10 个单元为桅杆部分,每个节点包含 2 个平动方向的自由度与 3 个转动方向的自由度,整个结构简化为 185 个自由度。为了进一步对模型进行缩聚以降低多工况分析的计算量,我们在 Guyan 静力缩聚法<sup>[4]</sup>的基础上,采用基于矩阵广义逆的动力缩聚移频迭代方法<sup>[5]</sup>,去除副自由度,通过缩聚矩阵的反复迭代逼近原始模型特性,降低对主自由度选择的限制,同时采用移频技术提高计算精度,通过改变移频量的大小使得降阶系统的动态特性逼近原系统的任意频段,最终得到基准模型缩聚后的动力学模型。表 1 列出了缩聚前后各结构模型的前 15 阶频率对比与对应的相对误差,从表 1 可以看到,缩聚模型各阶频率与基准简化模型的最大误差仅为 0.1051%,总体还原了原结构的基本特性。

经过上述缩聚处理,模型简化为具有 37 个质点的层模型,在结构第  $i$  质量点处连接 TMD 自由

度，则整个受控结构的运动方程为；

$$M\ddot{X}+C\dot{X}+KX=EF+F_{TMD} \tag{1}$$

式中： $X$ 、 $\dot{X}$ 、 $\ddot{X}$ 是系统各质点的位移，速度和加速度。 $M$ 、 $C$ 、 $K$ 是受控结构的质量，阻尼与刚度矩阵。 $F$ 是地震荷载矩阵， $E$ 是荷载位置矩阵， $F_{TMD}$ 是TMD对结构的作用力，如式(2)所示。

$$F_{TMD}=\begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ c_d(\dot{x}_d-\dot{x}_i)+k_d(x_d-x_i) \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \tag{2}$$

其中  $c_d$ 、 $k_d$  分别代表 TMD 的阻尼与刚度， $i$  为 27，代表 TMD 安装在主塔顶。当  $F_{TMD}$  为 0 时，体系退化为无控体系。

TMD 的参数设计参考 Rana R 等<sup>[9]</sup>的公式建议，按最优参数设计以调谐控制结构一阶模态，确定

参数为质量  $m_d = 1\ 200\ \text{t}$ ，刚度  $k_d = 541\ \text{kN/m}$ ，阻尼系数  $c_d = 2.04 \times 10^5\ \text{Ns/m}$ 。

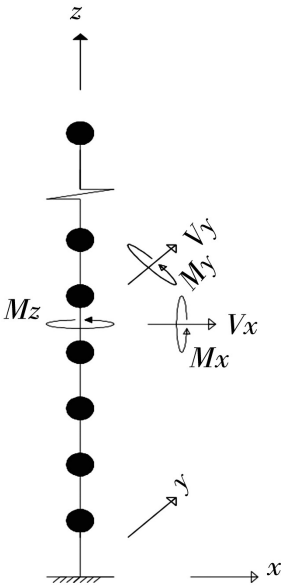


图 1 广州塔基准模型

Fig.1 The benchmark model of Canton Tower

表 1 使用动力缩聚移频迭代方法得到的模态频率结果

Table 1 Dynamic characteristics results obtained by dynamic condensation frequency shift iteration technology

模态/ (阶)	基准简化模型/ (Hz)	缩聚模型/ (Hz)	频率差/ (%)
1	0.110 391	0.110 392	0.000 7 %
2	0.158 71	0.158 715	0.003 1 %
3	0.346 254	0.346 297	0.012 4 %
4	0.368 837	0.369 232	0.107 2 %
5	0.399 433	0.399 609	0.044 1 %
6	0.460 505	0.460 564	0.012 8 %
7	0.484 972	0.485 055	0.017 0 %
8	0.738 06	0.738 117	0.007 8 %
9	0.902 589	0.903 007	0.046 2 %
10	0.997 152	0.997 948	0.079 8 %
11	1.037 282	1.038 364	0.104 3 %
12	1.121 818	1.122 704	0.079 0 %
13	1.243 609	1.244 046	0.035 1 %
14	1.503 082	1.504 132	0.069 8 %
15	1.726 098	1.727 912	0.105 1 %

2 地震动输入

结构按甲类建筑抗震设防考虑，模态阻尼比为 0.04<sup>[7-8]</sup>，在太平洋地震研究中心 PEER 数据库

选取 14 条地震动时程记录，其中 7 条为卓越周期在 1 s 以下的短周期地震记录，7 条为卓越周期在 2.341 s 至 6.425 s 不等的长周期地震记录，各地震动记录参数见表 2 所示，在一阶周期点处，规范

反应谱及各地震动平均反应谱曲线在统计意义上相符,在下面的分析中,本文选用上述的地震动

综合考虑长短周期地震动对于高耸结构地震响应的影响。

表 2 分析中所采用的地震动参数

Table 2 Ground motion parameters used in the analysis

序号	地震动名称	地震发生时间/年	数据来源测站	震级	卓越周期/s
1	Imperial Valley-06	1979	Delta	6.53	0.396
2	Landers	1992	Lucerne	7.28	0.16
3	Nenana Mountain_ Alaska	2002	Anchorage-K2-14	6.7	0.374
4	Denali_ Alaska	2002	TAPS Pump Station #12	7.9	0.827
5	Hector Mine	1999	LA-City Terrace	7.13	0.6
6	Hector Mine	1999	Los Angeles-1st & Figueroa	7.13	0.78
7	Hector Mine	1999	Los Angeles-Beverly Blvd & Virgil	7.13	0.24
8	Kobe_ Japan	1995	Sakai	6.9	4.096
9	Kocaeli_ Turkey	1999	Canakkale	7.51	3.052
10	Kocaeli_ Turkey	1999	Kutahya	7.51	3.449
11	Chi-Chi_ Taiwan	1999	CHY008	7.62	2.341
12	Chi-Chi_ Taiwan	1999	ILA008	7.62	4.965
13	Chi-Chi_ Taiwan-04	1999	TCU145	6.2	2.564
14	Chuetsu-oki_ Japan	2007	SIT008	6.8	6.425

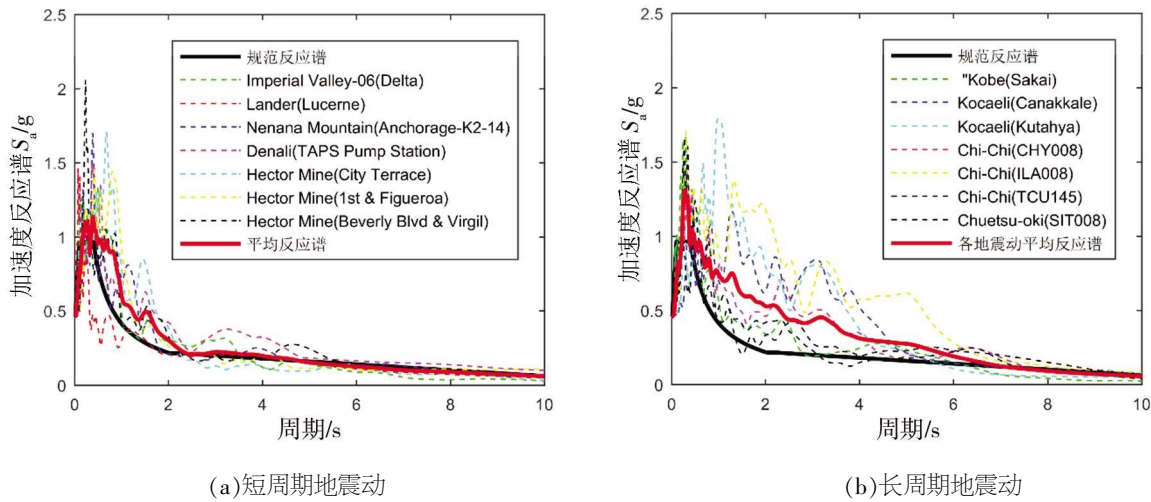


图 2 地震动记录反应谱

Fig.2 Response spectrum of seismic waves

3 地震响应分析

3.1 结构位移响应

应用 4 阶 Runge-Kutta 法计算方程(1),图 3 与图 4 分别给出主塔与桅杆在长、短周期地震动作用下相邻质点间位移,从图 3(a)与图 4(a)中可以看到,无论是无控体系还是 TMD 体系,长周期地震动显著放大了主塔在地震动作用下的变形;从图 3(b)与图 4(b)中可以看到,长周期地震动对

结构桅杆部分响应的放大作用更为明显。图 5 与图 6 例举了 Hector Mine(Los Angeles)地震动记录和 Kocaeli Turkey(Canakkale)地震动记录作为输入的响应时程。

表 3 与表 4 列出无控体系与 TMD 体系主塔顶与桅杆顶绝对位移时程响应的峰值和均方根值的对比。由表可见,对于无控体系,长周期地震动作用相比短周期地震动作用,主塔顶位移峰值与均方根值无明显差异,而桅杆顶位移峰值与均方

根值则分别放大了 125.49%和 91.63%。由此可见长周期地震动对于桅杆顶部的位移放大影响要更大, 同样, 对于 TMD 体系的分析结果, 也可见类

似规律。在大部分的地震动作用下, TMD 均起减震效果, 且对于响应时程均方根值的控制优于对峰值的控制。

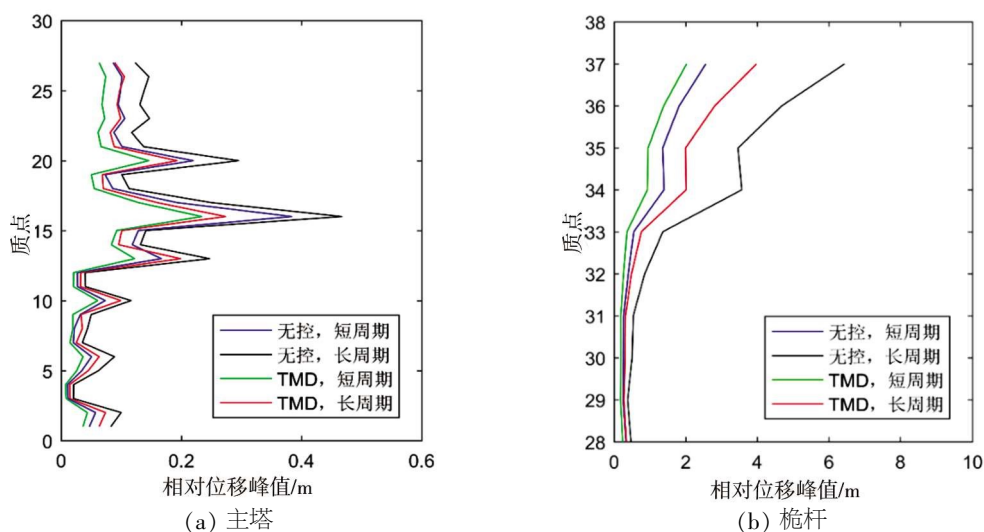


图3 不同地震动作用下结构各层的平均相对位移峰值对比

Fig.3 Comparison of the average relative displacement peak values of each particle under different ground motions

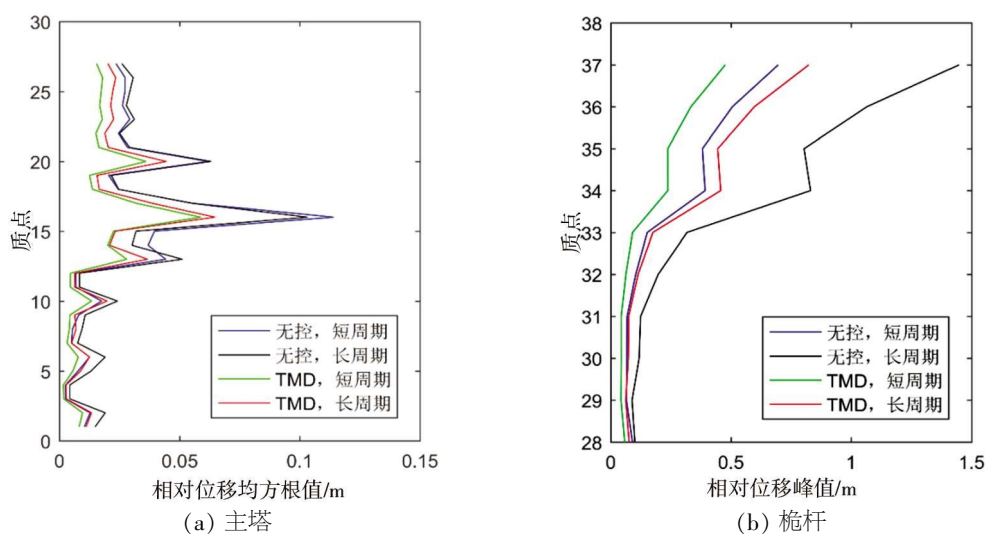


图4 不同地震动作用下结构各层的平均相对位移均方根值对比

Fig.4 Comparison of the average root mean square of relative displacement of each particle under different ground motions

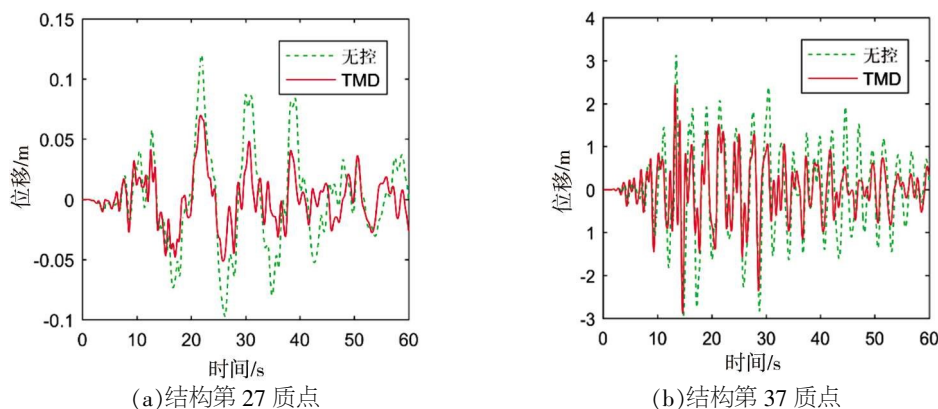


图5 Hector Mine 地震动作用下结构第27与37质点相对位移响应时程图

Fig.5 The relative displacement histories of structures at 27<sup>th</sup> and 37<sup>th</sup> mass under Hector Mine wave excitation

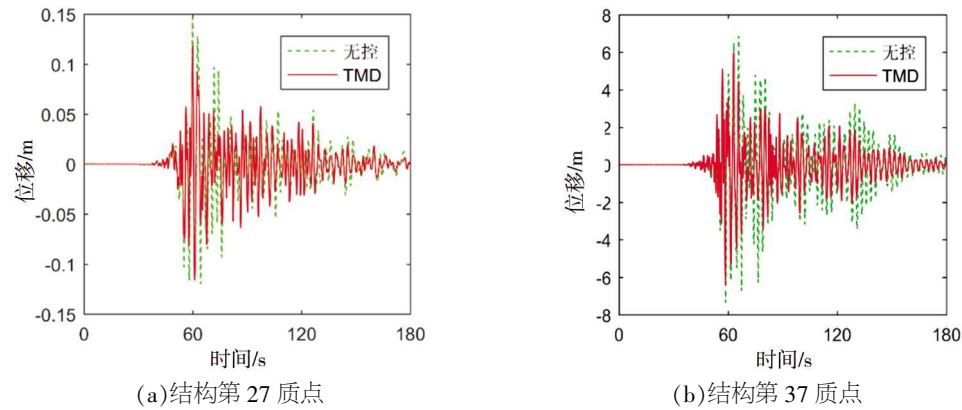


图 6 Kocaeli Turkey 地震动作用下结构第 27 与 37 质点相对位移响应时程图

Fig.6 The relative displacement histories of structures at 27<sup>th</sup> and 37<sup>th</sup> mass under Kocaeli Turkey wave excitation

表 3 主塔顶绝对位移响应

Table 3 The absolute displacement drift of the tower top

序号 (短周期地震动)	位移峰值/m		TMD 控制效果	位移均方根值/m		TMD 控制效果
	无控	TMD		无控	TMD	
1	0.98	0.58	41.05%	0.30	0.19	37.09%
2	1.51	1.14	24.73%	0.62	0.31	49.26%
3	1.92	1.01	47.43%	0.52	0.27	48.52%
4	3.13	1.90	39.07%	0.71	0.32	54.63%
5	1.50	0.91	39.04%	0.44	0.25	44.85%
6	2.76	1.62	41.30%	1.04	0.49	52.93%
7	1.64	1.06	35.53%	0.52	0.33	36.14%
平均值	1.92	1.17	38.31%	0.59	0.31	46.20%

序号 (长周期地震动)	位移峰值/m		TMD 控制效果	位移均方根值/m		TMD 控制效果
	无控	TMD		无控	TMD	
8	0.70	0.93	-34.06%	0.18	0.17	6.23%
9	2.68	1.70	36.71%	0.60	0.33	45.81%
10	1.57	1.26	19.39%	0.32	0.23	29.47%
11	1.87	1.18	37.14%	0.58	0.39	32.12%
12	2.84	1.90	33.05%	0.61	0.46	25.08%
13	2.57	1.09	57.68%	0.60	0.34	42.92%
14	1.51	0.75	50.36%	0.39	0.21	46.29%
平均值	1.96	1.26	28.61%	0.47	0.30	32.56%

表 4 桅杆顶绝对位移响应

Table 4 The absolute displacement drift of the mast top

序号 (短周期地震动)	位移峰值/m		TMD 控制效果	位移均方根值/m		TMD 控制效果
	无控	TMD		无控	TMD	
1	10.96	7.14	34.85%	2.99	1.91	36.11%
2	7.14	5.78	19.10%	1.88	1.18	37.08%
3	11.35	7.14	37.02%	2.44	1.36	44.22%
4	12.05	7.39	38.70%	2.47	1.45	41.42%
5	6.96	4.94	29.05%	2.00	1.30	35.16%
6	11.13	7.85	29.45%	3.95	2.19	44.54%
7	8.78	6.53	25.59%	2.68	1.79	32.94%
平均值	9.77	6.68	30.54%	2.63	1.60	38.78%

序号 (长周期地震动)	位移峰值/m		TMD 控制效果	位移均方根值/m		TMD 控制效果
	无控	TMD		无控	TMD	
8	13.89	5.91	57.43%	3.32	1.56	53.05%
9	34.15	18.66	45.35%	6.41	4.02	37.30%
10	24.19	20.60	14.84%	5.45	3.39	37.74%
11	23.45	10.07	57.09%	5.07	2.82	44.33%
12	25.53	15.90	37.70%	6.72	3.75	44.13%
13	20.78	11.33	45.49%	4.38	2.33	46.75%
14	12.24	7.23	40.94%	3.96	2.13	46.07%
平均值	22.03	12.82	42.69%	5.04	2.86	44.20%

3.2 结构响应的小波功率谱分析

在地震荷载作用过程中，结构的响应动能在各阶模态上的分布情况是时刻改变的，因此，本文应用离散数值小波变换<sup>[9]</sup>构造位移时程响应功率谱，分析结构体系分别在长短周期地震动作用下的时频响应规律。

图 7 与图 8 例举了 Hector Mine(Los Angeles) Kocaeli Turkey (Canakkale)地震动作用下结构响应的小波功率谱，采用灰度表达小波功率谱幅值分布。对比图 7(a、c)与图 8(a、c)，在短周期 Hector Mine 地震动作用下，主塔顶的响应能量主要分布在结构的一阶模态附近，高阶模态的动能快速地消散；在长周期 Kocaeli\_ Turkey 地震动作用下，主塔顶能量在频域上的分布更广，更多的分布在弱轴向二阶频率附近，这是由于 Kocaeli\_ Turkey 地震动的卓越周期更靠近该二阶频率。

从图 7(b、d)与图 8(b、d)可知，桅杆的响应在二阶模态上更为剧烈，这是由于桅杆的子结构固有频率更接近结构的二阶频率，所以该频率是鞭梢效应的主要贡献模态，所以，桅杆顶的地震响应能量更多的分步在二阶模态附近。所以，应注

意到长周期地震动对桅杆鞭梢效应的不利影响。由于主塔 TMD 是针对一阶模态调谐，所以在长周期地震动作用时，由于二阶模态的活跃，主塔 TMD 的调谐效果受到一定影响。类似的，对其余地震动响应的分析结果也有不同程度的相似规律，这里不做赘述。

4 结论

- (1)运用基于矩阵广义逆的动力缩聚移频迭代方法获得的广州塔缩聚模型，可以较好地还原原结构的基本特性，同时降低了大规模分析的工作量。
- (2)长周期地震动显著增加了超高耸结构的响应，最优参数设计的 TMD 对短周期、长周期地震响应均起减震控制作用，控制性能对地震动卓越周期具有一定鲁棒性
- (3)由于一般长周期地震动的卓越周期更接近广州塔结构弱轴向的二阶周期，显著加剧了以二阶振型响应，建议对周期大于 6 s 的超高耸结构 TMD 体系，在按规范反应谱选取地震动之外，应注意考虑长周期地震动的影响，以更全面评估结构性能。

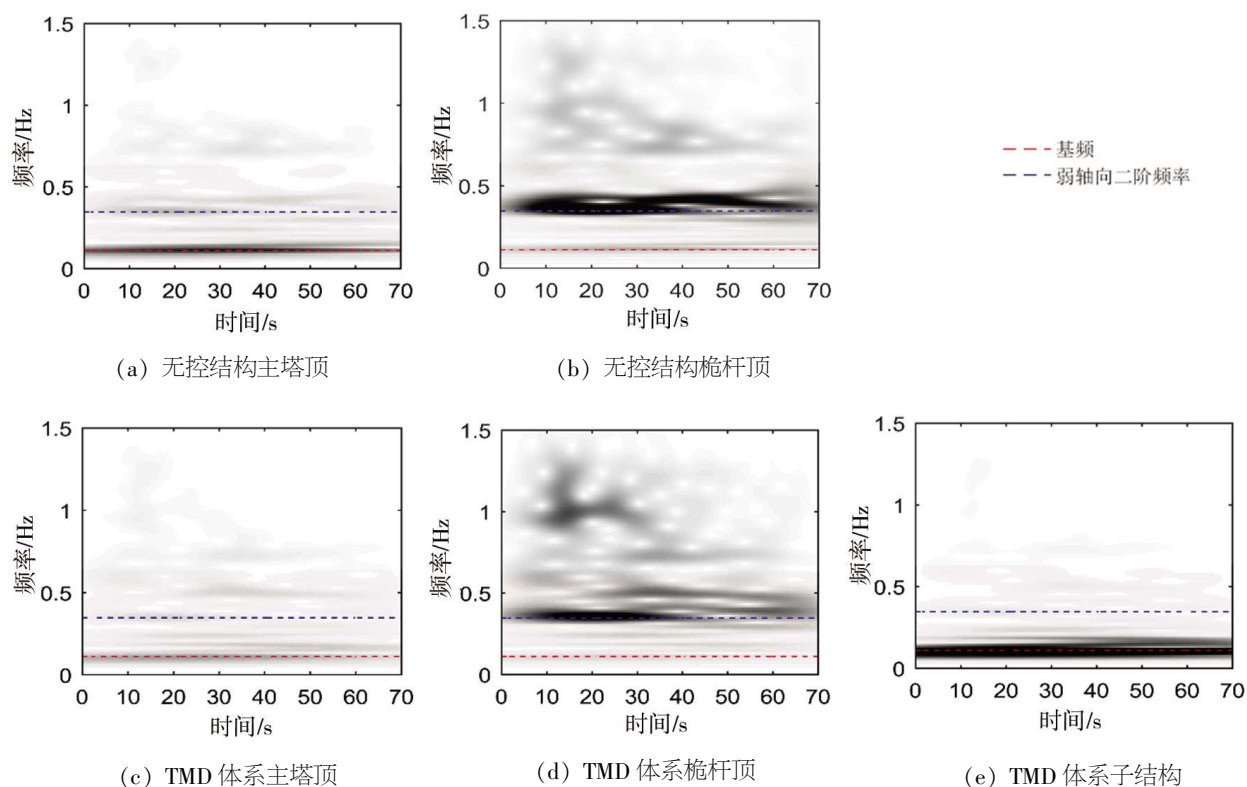


图7 Hector Mine 地震动记录作用下的位移响应小波功率谱

Fig.7 Numerical wavelet transform spectrum for displacement response under the Hector Mine wave excitation.

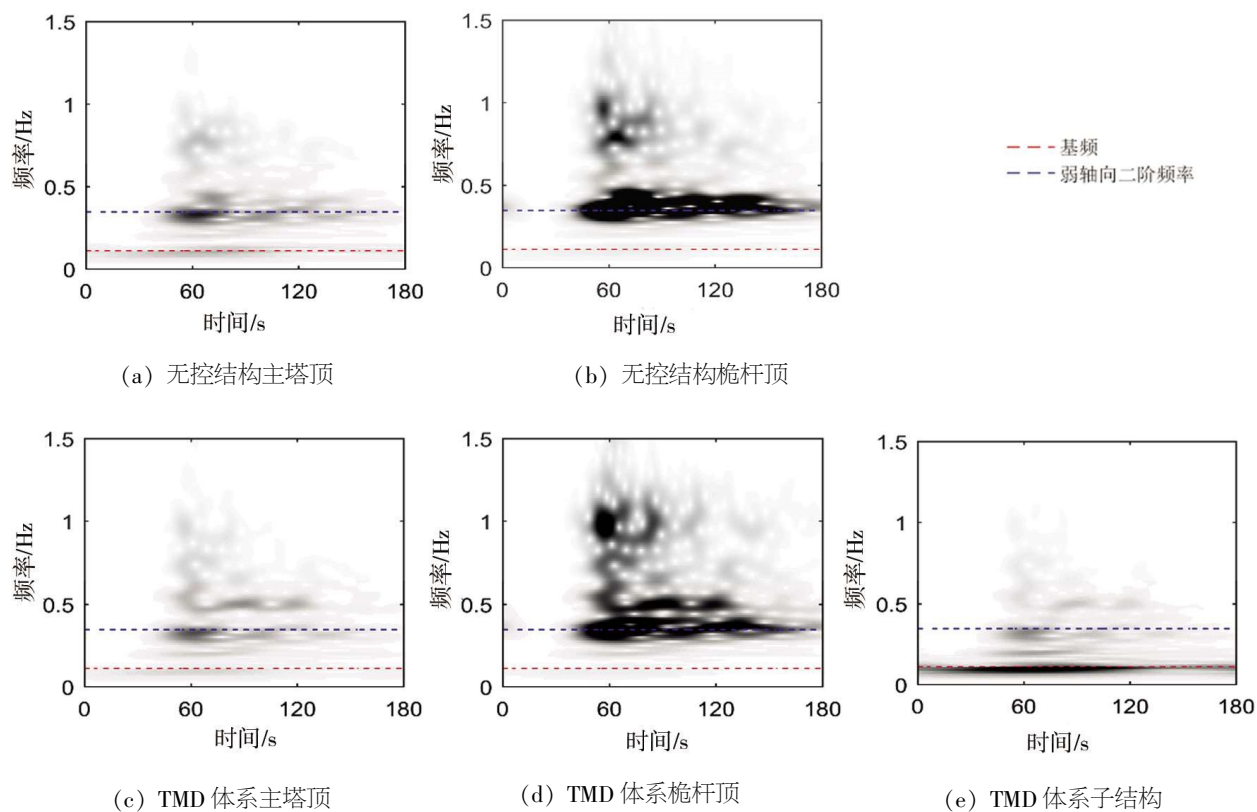


图8 Kocaeli Turke 地震动记录作用下的位移响应小波功率谱

Fig.8 Numerical wavelet transform spectrum for displacement response under the Kocaeli Turke wave excitation.



## 参考文献:

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB50011—2010 建筑抗震设计规范[S]北京:中国建筑工业出版社,2010.
- [2] Lee C L,Chen Y T,Chung L L,et al. Optimal design theories and applications of tuned mass dampers [J]. Engineering Structures,2006,28(1):43-53.
- [3] Ni,Y.Q.,Xia,Y.,Lin,W.,et al. Shm benchmark for high - rise structures:a reduced -order finite element model and field measurement data [J]. Smart Struct. Syst,2012,10(4-5):411-426.
- [4] Guyan R J. Reduction of stiffness and mass matrices[J]. Aiaa Journal,1965,3(2):380-380.
- [5] Qu Z Q,Shi Y,Hua H. A reduced -order modeling technique for tall buildings with active tuned mass damper [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics,2010,30(3):349-362.
- [6] Rana R,Soong T T. Parametric study and simplified design of tuned mass dampers [J]. Engineering Structures,1998,20(3):193-204.
- [7] Chen W H,Lu Z R,Lin W,et al. Theoretical and experimental modal analysis of the Guangzhou New TV Tower [J]. Engineering Structures,2011,33 (12):3628 - 3646.
- [8] Li Q S,Fang J Q,Jeary A P,et al. Evaluation of wind effects on a supertall building based on full - scale measurements [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics,2015,29(12):1845-1862.
- [9] 成礼智. 小波与离散变换理论及工程实践[M]. 清华大学出版社,2005.