

文章编号:1005-0523(2019)03-0104-07

典型地震波作用下海洋平台振动抑制研究

墨蕊娜

(华东交通大学理学院,江西 南昌 330013)

摘要:作为重要的海上作业装备,海洋平台抗震性能的优劣得到了广泛的关注。为了提高海洋平台的抗震能力,提出了拓展的调谐质量阻尼器(extended tuned mass damper,ETMD)控制方法,该方法将海洋平台和平台设备之间采用弹性阻尼联接,区别于传统海洋平台的设备刚性联接方式。通过建立含有ETMD抗震系统的海洋平台的有限元模型进行仿真实验研究。分别以海洋平台的低阶固有频率作为被控频率,对3种典型地震波载荷作用下海洋平台的抗震性能进行比较分析。仿真实验表明,在3种典型地震波的作用下,海洋平台的导管架、下层甲板、中层甲板和上层甲板的振动均能得到显著的抑制,振动平均减小率都在52.86%以上,海洋平台最大振动平均减小率在 x 方向可达89.91%,减振效果最明显。

关键词:内部调谐;海洋平台;振动抑制;被控频率;减振效果

中图分类号:P752

文献标志码:A

海洋平台的工作环境非常恶劣,若在地震作用下发生事故灾害,将产生严重后果,会造成巨大的人员和设备损失;因此,非常有必要研究海洋平台抗震性能。近年来,海洋结构振动控制方法受到众多研究者的重视^[1-4],研究者从不同的角度对振动控制方法进行了深入探究,在一定程度上解决了海洋结构物振动抑制问题,为进一步提高海洋平台在工作过程中的稳定性提供了方向。

在调谐质量阻尼器(TMD)的设计中应用耗能被动控制技术明显提升了阻尼器的减振效果^[5-10],这一技术也使阻尼器结构变得更简单、安装更容易、维护更方便。因其经济性、有效性而被广泛应用在各种机械的振动控制中。曹黎媛和李春祥^[11]设计出了一种新型调谐质量阻尼器(SDTMD)装置。该新装置(SDTMD)以TMD和双层调谐质量阻尼器(DTMD)为基础,它能更好控制振动,为以后设备振动控制的研究打开了新思路。杨双双、王建平等^[12]在钢桁桥的震动控制中应用了调谐质量阻尼器,钢桁桥的振动得到了很好的控制,而且增大质量控制效果更明显。闫安志和王丹丹^[13]在高层框架厂房中应用多重调谐质量阻尼器进行了地震载荷下的研究。多重调谐质量阻尼器限制了在地震发生时高层框架结构在角位移和角加速度上的振动。汪志昊和陈政清^[14]研发了具有优良阻尼特性的新型TMD装置,而且这一新型装置克服了传统调谐质量阻尼器(TMD)阻尼单元润滑油泄露的问题。国巍和李宏男等^[15]设计出一种新型的减震方法——共享调谐质量阻尼器(shared tuned mass damper,STMD)。这种新方法能有效解决临近附属结构之间设置连接粘滞阻尼器(viscous damper,VD)的减震效果差的问题。李春祥和张静怡^[16]以规范的风载荷为基础,建立了结构主动调谐质量阻尼器的动力方程,提出并解决了阻尼器的最优参数和有效性的评价问题。Jabary和Madabhushi^[17]进行了一系列岩土离心机试验,以研究TMD对经历动态土壤-结构相互作用(SSl)的多层摇摆框架结构响应的的影响。Marian和Giaralis^[18]通过应用调谐方法来推导给定附加质量和惯性的最佳TMDI参数,刚度和阻尼的闭合形式分析表达式,推导过程中结构的单自由度振动是由基本加速

收稿日期:2018-12-26

基金项目:国家自然科学基金项目(50575094)

作者简介:墨蕊娜(1981—),女,讲师,硕士,主要研究方向为海洋能开发。

度和抑制力的响应幅度激发的。曹忠民和赖恒力等^[19]根据对比不同因素下试件的滞回曲线、骨架曲线及延性变化,分析钢绞线间距、预应力水平和轴压比等因素对加固柱抗震性能的影响。尽管 TMD 减振效果明显,但也有局限性,需要额外增加附加物,在技术实现上不经济且困难大。海洋平台属重大工程,其技术密集,造价高昂,环境恶劣复杂,事故灾害后果严重,亟需拓展 TMD 控制技术在海洋平台结构控制中的应用。

在振动控制中调谐质量阻尼器受到了广泛关注和研究,但这一阻尼器在多方面还存在问题。针对这些问题,本文拓宽了 TMD 控制技术的内涵,提出采用平台的压缩机、钻井设施、飞机起降设施等内部设备作为调谐质量阻尼器。把海洋平台内部所具有的工作设备作为调谐质量阻尼器来控制振动的方法称为拓展的调谐质量阻尼器(extended tuned mass damper, ETMD)。在典型地震波作用下研究海洋平台的抗震性能,首先依据动力学有限元分析原理,建立了海洋平台有限元基本方程;其次以海洋平台的有限元模型为基础应用 APDL 语言构建了含有 ETMD 减振系统的减振模型;最后研究海洋平台 ETMD 减振系统的性能时把平台振动的低阶固有频率当做被控频率。

1 海洋平台内部调谐抗震模型建立

传统海洋平台的设备连接方式的特点是海洋平台与设备之间为刚性联接,在恶劣载荷工况下,平台设备不能起到耗能减振的作用。海洋平台和平台设备之间采用弹性阻尼联接,见图 1 所示。扩展调谐质量阻尼器(ETMD 减振系统)主要把压缩机、钻井设施、飞机起降设施等平台工作必须的设备、装置作为质量体。ETMD 系统的优势在于平台处于恶劣环境所载荷作用时 ETMD 减振系统可以不额外增加平台负载而对平台进行振动能量的消耗。在恶劣载荷工况下,平台设备可以起到调谐质量阻尼器的耗能减振的作用。

以中国南海某海洋采油平台为原型,该平台为钢质导管架平台,有 3 层甲板(上层甲板、下层甲板和中层甲板)和 6 根导管架桩腿。图 2 是海洋平台有限元模型,模型是在 ANSYS 软件下通过编程建立的。在有限元仿真分析中,海洋平台与设备的连接通过 ANSYS 的质量单元、弹簧和阻尼器单元来模拟。

表 1 所示为海洋平台振动时的固有频率值(有限元软件里的模态分析功能可以给出)。在振动模拟时取前三阶作为低阶固有频率。在设计扩展调谐质量阻尼器时参数的选择对振动的控制效果尤其重要。要使

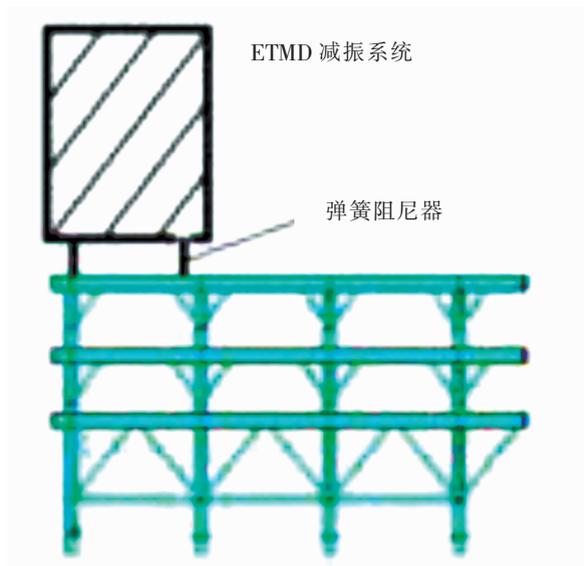


图 1 海洋平台设备的弹性安装

Fig.1 Flexible installation of offshore platform equipment

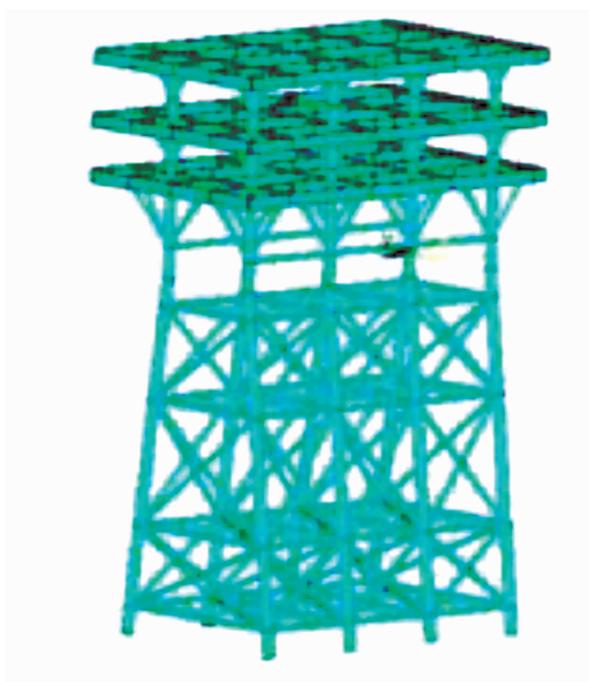


图 2 海洋平台有限元模型

Fig.2 Finite element model of offshore platform

ETMD 减振系统能更高效控制振动必须对减振系统和海洋平台的质量比、固有频率比和阻尼比这 3 个参数进行选择。3 个合理的参数才会协助 ETMD 系统达到最佳的振动控制效果。表 2 所列有限元仿真过程减振效果最明显的参数。

表 1 海洋平台的低阶固有频率

Tab.1 Low order natural frequencies of offshore platforms

阶数	频率/Hz
1	0.792 3
2	0.805 2
3	0.961 5

表 2 ETMD 减振系统参数

Tab.2 ETMD damping system parameters

质量比 μ	固有频率比 λ	阻尼比 ξ
0.584 2	0.923 5	0.291 7
0.532 7	0.751 0	0.326 6
0.481 7	0.684 3	0.281 3

2 海洋平台动力学有限元方程

海洋平台在实际的工作中不仅受到静载荷的作用,还常受到动载荷的作用,两种载荷的本质区别在于动载荷是变化的。在动载荷的作用下,海洋平台结构上的相应位移、所受应力和具有的应变不仅是空间位置的函数,而且随时间变化。故进行动力学有限元分析时,首先要将海洋平台连续的弹性体离散成多个有限单元,然后分析各个单元,建立各节点力与节点的位置、速度、加速度之间的关系。海洋平台的动载激励 $p(t)$ 包括作用在海洋平台的动载激励 $p_f(t)$,海洋平台的惯性力 $p_T(t)$ 和阻尼力 $p_c(t)$,即

$$p(t) = p_f(t) + p_T(t) + p_c(t) \quad (1)$$

把平台分解成很多体积元,每一体积元为 $dv = dx dy dz$,各体积元上的惯性力所做虚功为

$$dw = -\sigma(t)^{*eT} N^T \rho N \ddot{\delta}(t)^e dx dy dz \quad (2)$$

式中: $\sigma(t)^{*eT}$ 是单元应力; N^T 是相应单元的形函数; $\ddot{\delta}(t)^e$ 是单元节点的加速度。

整个单元上的惯性力所做的虚功为

$$W_T = - \iiint \sigma(t)^{*eT} N^T \rho N \ddot{\delta}(t)^e dx dy dz \quad (3)$$

作用在各节点的惯性力所做虚功为

$$W_p = \sigma(t)^{*eT} P_T(t)^e \quad (4)$$

根据虚功原理,把各单元内分布的惯性力等效到各节点上,等效惯性力与单元力的关系为

$$P_T(t)^e = - \iiint N^T \rho N dx dy dz \ddot{\delta}(t)^e = -M^e \ddot{\delta}(t)^e \quad (5)$$

式中: $M^e = - \iiint N^T \rho N dx dy dz$ 。

海洋平台结构上的等效惯性力为

$$P_T(t) = -M \ddot{\delta}(t) \quad (6)$$

式中: M 是海洋平台总质量矩阵。

根据虚功原理也可求出各单元内的等效节点阻尼力

$$P_c(t)^e = - \iiint N^T \mu N dx dy dz \dot{\delta}(t)^e = -C^e \dot{\delta}(t)^e \quad (7)$$

式中: C^e 为各单元阻尼矩阵; μ 为阻尼系数。

海洋平台整个结构上节点的等效阻尼力为

$$P_c(t) = -C^e \dot{\delta}(t) \tag{8}$$

式中: C 为总体阻尼矩阵。

海洋平台有限元法基本动力学方程如式(9)

$$M\ddot{\delta}(t) + C\dot{\delta}(t) + K\delta(t) = P_f(t) \tag{9}$$

通过确定式(9)中的参数,并进行求解,就可以获取海洋平台有限元模型节点的位移、速度和加速度等物理量。

3 地震波的选择及调整

在海洋平台仿真研究时,假设海洋平台分别工作在世界著名的 Taft 波、EI-Centro 波、宁河波 3 种典型地震波下。用时程分析法来研究 ETMD 减振系统对海洋平台在 3 种地震载荷作用下的减振效果。3 种地震波的强弱与加速度成正比,见图 3~图 5。地震载荷是以加速度的形式作用于海洋平台,分别对应地震波的常遇烈度、设防烈度和罕遇烈度,表 3 给出了加速度的峰值。

根据表 3,设防烈度按 9 度考虑,地震波的最大加速度取 410 gal。根据式(10)调整其余各时刻地震波的幅值:

$$a = \frac{A_{\max}}{A'_{\max}} a' \tag{10}$$

式中: a 为调整后地震载荷加速度的幅值; A_{\max} 为选定的加速度峰值; a', A'_{\max} 为选用原记录地震波的加速度与峰值。

表 3 烈度对应加速度峰值

Tab.3 Intensity corresponding to peak acceleration gal

烈度分类	7 度	8 度	9 度
常遇烈度	35~45	10~85	140~170
设防烈度	100~125	200~250	400~500
罕遇烈度	210~250	350~450	550~620

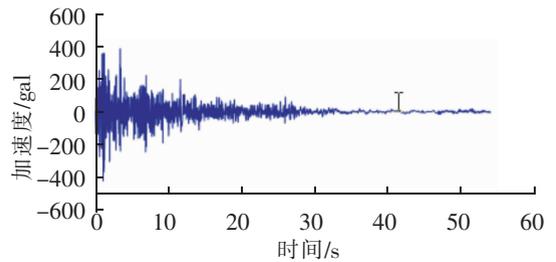


图 3 EI-Centro 地震波
Fig.3 EI-Centro seismic wave

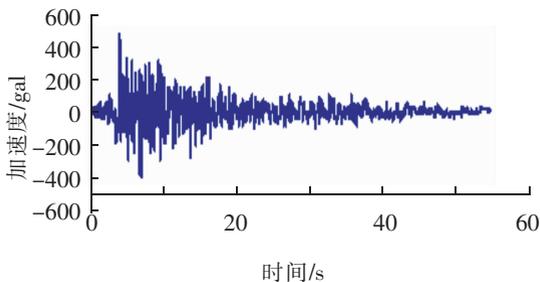


图 4 Taft 地震波
Fig.4 Taft seismic wave

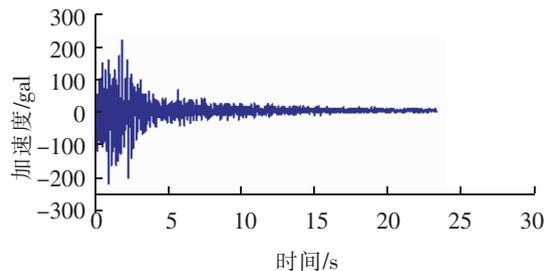


图 5 宁河地震波
Fig.5 Ninghe earthquake wave

4 海洋平台抗震性能分析

分别对应有和没有 ETMD 减振系统的两类海洋平台模型进行了两种有限元仿真研究。分析时被控频率设定为海洋平台前三阶固有振动频率,按 9 度罕遇地震波考虑,在海洋平台有限元模型的不同方向上分别输入上述 3 种典型地震波载荷的加速度,进行海洋平台的动态响应分析,获取了海洋平台节点的位移和海洋平台的部分测点。同时经过上述的动态响应分析也得到了海洋平台部分节点的位移响应时称曲线,见图 6 所示。统计有限元分析结果发现 ETMD 减振系统能够减小海洋平台导管架和甲板等位置的振动位移,减小率如表 4 所示。将海洋平台的关键结构位置作为绘图的横坐标,海洋平台振动位移的平均减小率作为纵坐标,分别绘制在 3 种典型地震波作用下振动平均减小率对比图,图 7~图 8 给出了海洋平台在相互垂直的 3 个方向上平均减振效果。

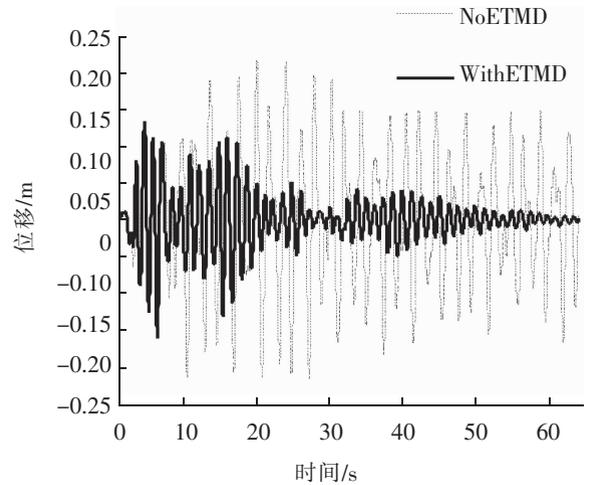


图 6 节点 218 在宁河地震波载荷下的位移响应时称曲线
Fig.6 The displacement response of Node 268 under the seismic wave load in Ninghe

表 4 有 ETMD 减振系统的海洋平台各关键结构的振动位移平均减小率

Tab.4 Average reduction rate of vibration displacement of key structures for offshore platforms with ETMD damping system %

海洋平台的 结构名称	EI-Centro 地震波			Taft 地震波			宁河地震波		
	x 方向	y 方向	z 方向	x 方向	y 方向	z 方向	x 方向	y 方向	z 方向
导管架	54.86	61.97	66.54	77.13	76.86	72.72	87.55	52.59	86.67
下层甲板	44.63	51.43	62.52	71.26	73.11	77.88	89.13	76.99	85.67
中层甲板	47.78	57.88	63.00	73.20	77.12	77.13	91.08	77.96	86.43
上层甲板	47.94	51.55	63.06	72.75	75.75	76.92	91.87	78.65	86.02
整体平均	48.80	55.71	63.78	73.59	75.71	76.16	89.91	71.55	86.20

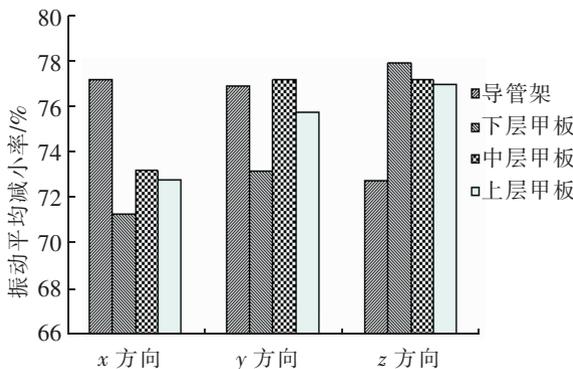


图 7 Taft 地震波载荷下海洋平台振动平均减小率对比图
Fig.7 Comparison of average vibration reduction rates of offshore platforms under Taft seismic loading

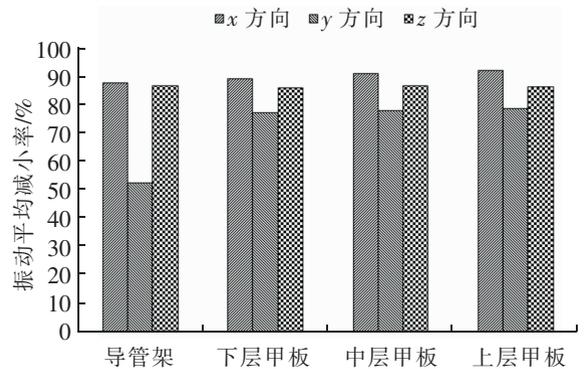


图 8 宁河地震波载荷下海洋平台振动平均减小率对比图
Fig.8 Comparison of average vibration reduction rates of offshore platforms under seismic wave loads in Ninghe

分析可知:

1) EI-Centro 地震波作用下,海洋平台的导管架、下层甲板、中层甲板和上层甲板的振动平均减小率分别为 61.12%,52.86%,56.22%和 54.18%;海洋平台在 x,y 和 z 三个垂直方向上的振动平均减小率分别是 48.80%,55.71%和 63.78%。

2) Taft 地震波作用下,海洋平台的导管架、下层甲板、中层甲板和上层甲板的振动平均减小率分别为 75.57%,74.08%,75.82%和 75.14%;海洋平台在 x,y 和 z 三个互相垂直的方向上的振动平均减小率分别是 48.80%,75.71%,76.16%;海洋平台在 x,y 和 z 三个相互垂直方向上振动的平均减小率分别是 73.59%,55.71%和 63.78%。

3) 宁河地震波作用下,海洋平台的导管架、下层甲板、中层甲板和上层甲板的振动平均减小率分别为 75.60%,83.93%,85.12%和 85.51%;在 x,y 和 z 三个垂直方向上海洋平台的振动平均减小率分别为 89.91%,71.55%和 86.20%。

在恶劣地震载荷作用下,由于 ETMD 减振系统可以起到调谐质量阻尼器的作用,且不额外增加平台负载,对平台设备可以进行振动能量的消耗,故可以有效降低海洋平台的导管架、下层甲板、中层甲板和上层甲板的振动,从而提高海洋平台的抗震性能。

5 结论

对 3 种典型地震波载荷下的海洋平台进行有限元仿真实验表明,以海洋平台的低阶固有频率作为被控频率,ETMD 减振系统使海洋平台在地震作用下的振动显著减小,应用 ETMD 减振系统能够明显提升海洋平台的抗震性能。在 3 种典型地震波作用下,海洋平台的导管架、下层甲板、中层甲板和上层甲板的振动均能得到显著的抑制,最大和最小振动平均减小率分别为 83.93%和 52.86%;在 x,y,z 三个垂直方向上海洋平台的最大减振率能达到 89.91%。

参考文献:

- [1] 魏震. 基于海洋平台-双摇摆柱结构体系的抗冰抗震弹塑性分析[D]. 青岛:青岛理工大学,2016.
- [2] 吕悦军,彭艳菊,唐荣余,等. 我国海洋平台抗震标准若干问题探讨[J]. 地球物理学进展,2008,23(2):443-449.
- [3] 王兴国,周晶,翟刚军,等. 导管架海洋平台结构的抗震模糊优化设计[J]. 船舶力学,2003,7(4):65-72.
- [4] 王兴国,周晶,康海贵. 基于最优设防烈度的导管架海洋平台抗震设计[J]. 哈尔滨工业大学学报,2003,35(5):553-556.
- [5] 汪志昊,郜辉,张闯,等. 摆式调谐质量阻尼器频率调节新方法[J]. 振动工程学报,2016,29(6):1062-1069.
- [6] 陈兵兵,徐赵东,朱一强,等. 加入粘弹性阻尼器的高楼桅杆风振响应分析[J]. 华东交通大学学报,2014,31(5):77-85.
- [7] 黄秀金,何立东,黄文超. 半主动笼式调谐质量阻尼器控制转子振动的研究[J]. 航空动力学报,2015(12):2882-2887.
- [8] KWON S. Development of vibration mitigation method for a railway station using a tuned-mass-dampered platform[J]. Journal of The Korean Society of Hazard Mitigation,2016,16(2):77-82.
- [9] CATERINO N,GEORGAKIS C T,SPIZZUOCO M,et al. Design and calibration of a semi-active control logic to mitigate structural vibrations in wind turbines[J]. Smart Structures and Systems,An International Journal,2016,18(1):75-92.
- [10] MRABET E,GUEDRI M,ICHCHOU M,et al. New approaches in reliability based optimization of tuned mass damper in presence of uncertain bounded parameters[J]. Journal of Sound and Vibration,2015,355:93-116.
- [11] 曹黎媛,李春祥. 基于刚度连接双层调谐质量阻尼器的性能[J]. 振动与冲击,2016,35(15):173-177.
- [12] 杨双双,王建平,赵志波,等. 基于调谐质量阻尼器的装配式钢桁桥振动控制研究[J]. 兵器装备工程学报,2017,38(8):50-53.
- [13] 闫安志,王丹丹. 地震作用下高层框架厂房的多重调谐质量阻尼器扭转振动控制[J]. 工业建筑,2014,44(1):14-18.
- [14] 汪志昊,陈政清. 永磁式电涡流调谐质量阻尼器的研制与性能试验[J]. 振动工程学报,2013,26(3):374-379.
- [15] 国巍,李宏男,柳国环. 共享调谐质量阻尼器(STMD)在附属结构减震中的应用[J]. 工程力学,2009,26(5):202-208.
- [16] 李春祥,张静怡. 结构最优主动调谐质量阻尼器风致振动控制的研究[J]. 地震工程与工程振动,2007,27(5):160-165.

- [17] JABARY R N, MADADHUSHI S P G. Tuned mass damper effects on the response of multi-storied structures observed in geotechnical centrifuge tests[J]. *Soil Dynamics And Earthquake Engineering*, 2015, 77: 373–380.
- [18] MARIAN L, GIARALIS A. The tuned mass-damper-inerter for harmonic vibrations suppression, attached mass reduction, and energy harvesting[J]. *Smart Structures and Systems, An International Journal*, 2017, 19(6): 665–678.
- [19] 曹忠民, 赖恒力, 邱荣文, 等. 预应力钢绞线网加固 RC 柱抗震性能影响因素研究[J]. *华东交通大学学报*, 2018, 35(4): 15–20.

Study on Vibration Suppression of Offshore Platform under Typical Earthquake Wave

Mo Ruina

(School of Basic Science, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: The offshore platform is an important equipment for offshore operations and the seismic performance of offshore platforms has received extensive attention. An extended method of tuned mass damper (ETMD) control was proposed to improve the seismic performance of offshore platforms. The elastic damping was used to connect offshore platform and platform equipment, which is different from the rigid connection of traditional offshore platform equipment. The finite element model of offshore platform with ETMD system was simulated. Taking the low-order natural frequencies of offshore platforms as controlled frequencies, the seismic performance of offshore platforms under three typical seismic loads was compared and analyzed. The simulation results showed that under the action of three typical seismic waves, the vibration of jacket, lower deck, middle deck and upper deck of offshore platform can be significantly suppressed, and the average reduction rate of vibration was more than 52.86%. The maximum vibration average reduction rate of offshore platform could reach up to 89.91% in the X direction, and the vibration reduction effect was the most obvious. The application of ETMD damping system can significantly improve the seismic performance of offshore platforms.

Key words: internal tuning; offshore platform; vibration suppression; controlled frequency; damping effect