

文章编号:1005-9865(2016)02-0010-06

转角阻尼器对海洋平台-摇摆墙体系抗振分析

张纪刚,刘菲菲,韩永力,苏 锐

(1. 青岛理工大学 土木工程学院, 山东 青岛 266033; 2. 蓝色经济区工程建设与安全协同创新中心, 山东 青岛 266033)

摘 要:在海洋平台摇摆墙体系基础上,提出在海洋平台和摇摆墙之间刚性连接杆的铰接点处安装粘弹性转角阻尼器的减振措施,对海洋平台进行进一步减振控制。对粘弹性转角位移阻尼器的刚度和阻尼参数进行了优化分析,可知阻尼器的阻尼与刚度在结构减振中起到了十分重要的作用,且存在特定范围内的优化值。以 JZ20-2 北高点井口平台为例,利用 ANSYS 进行地震荷载作用和实测挤压冰荷载下的仿真分析,研究了粘弹性转角阻尼器在海洋平台和摇摆墙之间刚性连接杆铰接点处的不同安装方式,对比分析减振效果。结果表明,在该体系刚性连接杆的铰接点处安装粘弹性转角阻尼器能显著降低结构的振动反应,连接杆右侧安装粘弹性转角阻尼器的方式为减振效果最佳方式。

关键词:海洋平台;摇摆墙;粘弹性转角阻尼器;地震作用;冰荷载

中图分类号:TV3 **文献标志码:**A **DOI:**10.16483/j.issn.1005-9865.2016.02.002

Analysis of vibration performance of offshore platform with rocking wall system installing viscoelastic rotary dampers

ZHANG Jigang, LIU Feifei, HAN Yongli, SU Rui

(1. School of Civil Engineering, Qingdao Technological University, Qingdao 266033, China; 2. Collaborative Innovation Center of Engineering Construction and Safety in Shandong Blue Economic Zone, Qingdao 266033, China)

Abstract: This paper introduces the installation of the viscoelastic rotary dampers at the hinged points of rigid connection rods between the offshore platform and the rocking wall as the measure of vibration mitigation, which is based on the offshore platform-rocking wall system, for further vibration control of offshore platform. The stiffness and damping parameters of the viscoelastic rotary dampers are analyzed and optimized. The results show that damping and stiffness play a very important role in structural vibration dissipation, and that the optimum values for stiffness and damping parameters exist within a specific range. Taking the JZ20-2 north high offshore platform as an example, its simulation analysis is done under earthquake loads and in-situ measured push ice load using ANSYS, to study different installations of viscoelastic dampers at the hinged points of rigid connection rods between offshore platform and rocking wall, and the control effects are compared. The results show that the installation of viscoelastic rotary damper at the hinged points of the rigid connection rods can reduce significantly the vibration response of the structure, and that the installation of the viscoelastic rotary dampers at the right side of the rigid connection rods can have the best control effect.

Keywords: offshore platform; rocking wall; viscoelastic rotary damper; earthquake action; ice load

摇摆墙体系为工程界一种新型抗震结构,有学者进行了摇摆墙体系的抗震性能研究,认为摇摆墙能使原结构各层变形趋于一致,有效控制变形集中,可发挥结构整体抗震及耗能能力^[1-3]。TMD 对海洋平台的振动

收稿日期:2015-02-03

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51378271);中国博士后科学基金资助项目(2013M530307);山东省博士后创新项目专项资金资助项目(201302020)

作者简介:张纪刚(1975-),男,山东沂水人,教授,主要从事结构振动控制方面的研究。E-mail: zhangjigang-hit@163.com

控制有一定作用,并在适当的频比和质量比条件下具有较好的减振效果,但是 TMD 减振系统受频率限制比较大,控制频域宽度很窄,只有当激励为窄带激励或结构的响应由基阶模态控制时,才有控制效果^[4-5]。Qiao Jin 等人利用 TLD 对导管架海洋平台进行抗震分析,并进行了试验研究和数值分析,结果表明 TLD 的晃动频率与平台的自然频率比值是控制抗震的关键因素,TLD 的水的质量与平台的质量比越大越有利于减震^[6]。但是由于其自身质量、冬季维护等限制,TMD 和 TLD 在海洋平台中的实际应用价值有限。Rujian Ma 等人提出将 ETMD 减振系统应用于海洋平台中,其原理是利用装置内部设备进行振动控制,结果表明 ETMD 减振系统在适当的频比和质量比条件下具有较好的减振效果,但是 ETMD 系统和 TMD 类似,受频率限制比较大,控制频域宽度很窄^[7]。海洋平台结构磁流变半主动智能控制技术是一种较好的方案,但是磁流变阻尼器是由油缸、套筒等组成,存在着漏油、渗油的问题,一旦出现问题将使其功能失效。并且,磁流变阻尼器存在时滞的问题^[8-9]。张纪刚等提出了基于摇摆墙体系的新型海洋平台结构,结果表明摇摆墙体系对海洋平台的动力反应有很好的减振效果^[10]。本文在此新型海洋平台-摇摆墙结构体系的基础上,提出在摇摆墙与平台之间的刚性连接杆铰接点处设置粘弹性转角位移阻尼器来进行减振。

1 海洋平台模型及转角阻尼器

1.1 平台概况

研究所选平台为 JZ20-2 型,导管架式,位于渤海辽东湾,1991 年建成投产,平台设计服役期 20 年,设计水深 15.5 m。平台由桩、导管架、导管架端帽及甲板结构组成,总高 24.8 m。平台导管架由四条腿桩组成,腿桩直径约 1.5 m,各腿桩双斜布置,结构斜面呈正四边形,导管架水下部分为两个水平层,标高分别为 EL.-15.5 m 和 EL.-3.5 m,导管架水上部分为两个水平层,标高分别为 EL.+5.85 m 和 EL.+10.0 m。桩穿过导管架腿打入土层,桩的直径是 1 060 mm,预计入土深度 60 m。JZ20-2 平台结构示意图如图 1 所示。

1.2 摇摆体系和粘弹性转角阻尼器

摇摆结构体系的减振不是利用结构本身的变形来耗散地震能量,而是放松结构体系约束构成摇摆构件,通过构件的摇摆,使之与原结构变形趋于一致,将变形集中在摇摆界面上,如果摇摆构件具有足够的刚度和强度,就可以使结构各层层间变形均匀,有效控制结构变形的集中,由此避免传统结构在变形时产生的屈服机制,发挥结构整体抗震及耗能能力。

关于粘弹性阻尼器,目前大部分工程中采用的多为直线拉压型,专用于控制转动自由度的阻尼器还比较少,近年来也有相关学者提出了多种新型转角阻尼器,具有不错的设计方案和动力学性能。周云等提出一种扇形铅粘弹性阻尼器^[11-12],见图 2,该类阻尼器既具有粘弹性材料的速度相关型特点,又具有金属阻尼器的大阻尼特性。将扇形转角阻尼器应用于海洋平台-摇摆墙体系中,不仅使平台结构各部位位移趋于一致,还能通过粘弹性阻尼器在铰接点处发挥自身优势,进一步消耗转动能量,有效减小海洋平台结构的振动反应。

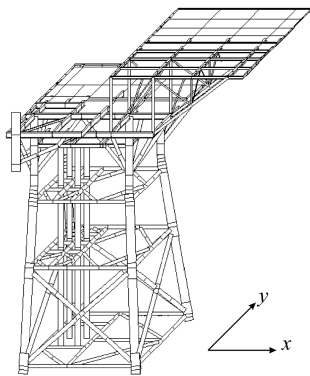


图 1 JZ20-2 北高点井口平台结构示意
Fig. 1 Model of JZ20-2 platform

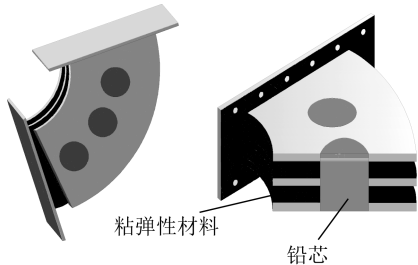


图 2 扇形铅粘弹性阻尼器
Fig. 2 Sector lead viscoelastic damper

1.3 ANSYS 有限元模型

模型分析采用 ANSYS 软件的有限元程序,将海洋平台模拟为三维空间桁架结构,杆件单元采用

BEAM188 单元,将层间质量简化为质量单元采用 MASS21 单元,单元杆件之间均为刚性连接。海洋平台与摇摆墙之间的刚性杆采用 LINK8 单元,为简便分析,摇摆墙采用与导管相同单元,即亦使用 BEAM188 单元,摇摆墙与地面之间为铰接。根据研究成果,摇摆墙直径取为导管架直径的 4 倍,即 4.8 m,此时摇摆墙构件具有足够的刚度和质量。结构体系简化示意图如图 3 所示。根据经典的粘弹性材料的开尔文模型,铰接点处设置粘弹性阻尼器应用 COMBIN14 单元,阻尼器的单元属性为垂直于纸面的 ROTZ 方向单自由度抗扭转模型,在阻尼器处提供抵抗变形的扭矩,仅在刚性杆右端施加转角阻尼器的模型如图 4 所示。

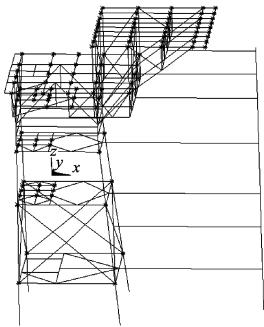


图 3 海洋平台有限元模型

Fig. 3 The finite element model of offshore platform

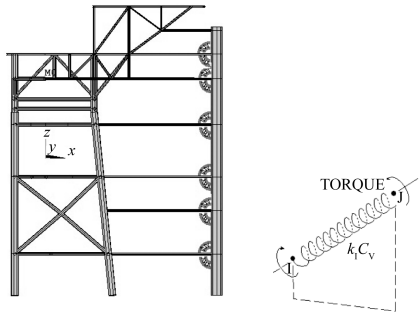


图 4 刚性杆右端施加转角阻尼器的海洋平台模型

Fig. 4 Offshore platform model with rotary damper applied to the right corner of the rigid rods

2 荷载工况

JZ20-2 导管架式海洋平台位于渤海,而该地区位于 8 度地震区,IV 类场地,海床地震地面运动加速度为 400 gal(大震)。JZ20-2 北高点井口平台结构的动力分析主要考虑天津波,天津波时程曲线如图 5 所示。根据瑞利阻尼公式 $[C] = \alpha[M] + \beta[K]$,其中 $\alpha = \frac{2\zeta\omega_1\omega_2}{\omega_1 + \omega_2}$, $\beta = \frac{2\zeta}{\omega_1 + \omega_2}$,在平台结构进行 ANSYS 分析时质量阻尼系数 α 取 0.308 13,刚度阻尼系数 β 取 0.003 54。

另一方面,JZ20-2 平台位于渤海辽东湾,冬季常结冰。在高纬度海区,如我国的渤海和黄海北部,海冰也是一个不容忽视的动力荷载,是海洋平台的主要控制荷载。冰荷载采用实测挤压破坏冰力时程,时程长度为 96 s,采样时间间隔为 0.096 s,实测挤压冰力时程如图 6 所示。

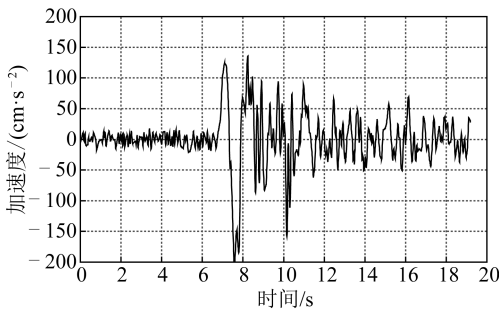


图 5 天津波时程

Fig. 5 Tianjin earthquake wave

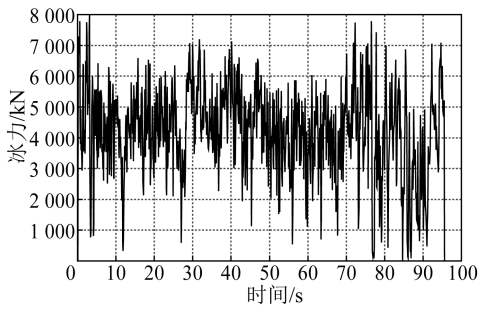


图 6 挤压冰力曲线

Fig. 6 Push ice loads

3 转角阻尼器参数设计

根据结构动力学的有关知识,对于粘弹性转角阻尼器的参数设计,主要考虑刚度和阻尼系数两个方面。对于刚度来说,通过正弦波扫频可知海洋平台结构的基频在 0.788 Hz 左右,质量为 1 006 t,由频率的计算公式 $\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$ 可知,结构的侧向刚度为 24.7×10^3 kN/m,由结构动力学知识可计算出其结构阻尼比为 $\zeta = 2\%$,则阻尼系数取为 $c = 1.99 \times 10^5$ N · s/m。对于阻尼器的阻尼系数优化,可以先采用大幅变量进行试算,将阻尼器阻尼系数 C_H 分别取为 $2\pi \times 1.99$, $2\pi \times 19.9$, $2\pi \times 199$, $2\pi \times 1990$, $2\pi \times 19\,900$ N · m · s/θ,结果见表 1、图 7。由

此可知阻尼的存在可以有效减小结构的地震反应,随着阻尼器阻尼系数的增大,结构的位移反应会持续减小,但当阻尼系数超过一定界值后,结构位移反应的减小幅度越来越小,几乎趋于稳定。而且考虑到阻尼系数越大,工程应用中的造价越高,且对减振效果的贡献有限,因此初步可取 $2\pi\times1\,990\text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}/\theta$ 作为阻尼器的理想阻尼系数。

表 1 天津波作用下下层甲板最大位移和阻尼器阻尼关系

Tab. 1 Maximum displacement of lower deck with different damper dampings under Tianjin wave					
$C_H/(\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}\cdot\theta^{-1})$	$2\pi\times1.99$	$2\pi\times19.9$	$2\pi\times199$	$2\pi\times1\,990$	$2\pi\times19\,900$
$D_{\max}/\text{m}$	0.093 215	0.098 523	0.088 487	0.028 108 6	0.013 015

然后,采用控制变量法进行其刚度系数的优化,保持阻尼器阻尼系数为 $2\pi\times1\,990\text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}/\theta$ 不变,分别取阻尼器转动刚度为结构侧向刚度 2π 倍的 1%、5%、10%、15%、20%,天津波作用下下层甲板最大位移和阻尼器刚度关系计算结果见表 2。由此可以看出,体系的自振频率随着阻尼器刚度的增大而增大,尽管刚度越大,阻尼器的输出力越大,但是增大的阻尼器刚度并没有给体系的地震位移反应带来实质性的减小,而且地震反应的动力系数处于较高水平,体系地震反应不稳定,易发生共振现象,因此可将阻尼器的刚度取为 10%,即 $15.52\times10^4\text{ kN}\cdot\text{m}/\theta$ 。

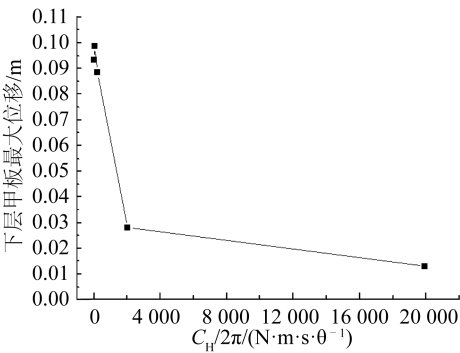


图 7 天津波作用下下层甲板最大位移和阻尼器阻尼关系

Fig. 7 Maximum displacement of the lower deck with different damper dampings under Tianjin wave

表 2 天津波作用下阻尼器刚度和下层甲板最大位移关系

Tab. 2 Maximum displacement of lower deck with different damper stiffness under Tianjin wave					
K_H	1%	5%	10%	15%	20%
$D_{\max}$	0.029 329	0.028 854	0.028 108 6	0.027 162 5	0.027 122

4 应用安装分析

取天津波作用下刚性杆两端为铰接、设置转角阻尼器时结构变形图做对比,如图 8 所示,可以明显看到,设置转角阻尼器时的结构变形得到了很好的控制,侧向位移得到了有效的减小。

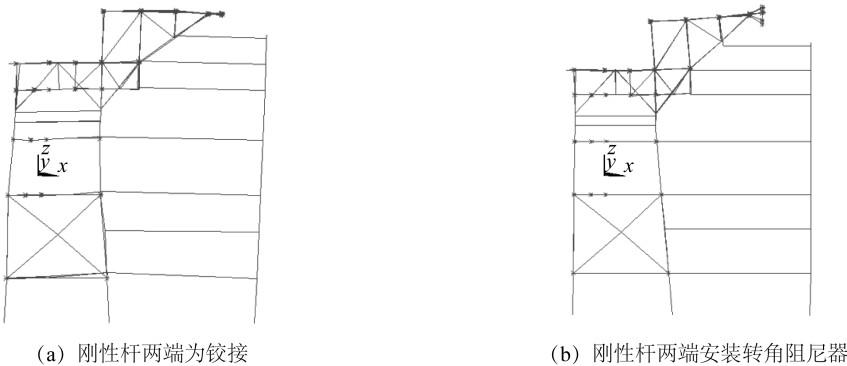


图 8 天津波作用下结构变形比较

Fig. 8 Comparison of structural deformation under Tianjin wave

为了进一步分析其实际应用价值,取水面上上层甲板、下层甲板两处作为研究对象,通过 ANSYS 分析后得到分析结果见表 3。基于摇摆墙—海洋平台体系的减振原理,摇摆墙与海洋平台之间的刚性连接杆两端采用铰接时,就可以很好的降低结构的动力反应。

通过表 3 可以看出在刚性杆右端安装粘弹性转角阻尼器可以有效降低海洋平台结构的动力反应,下层甲板的最大位移反应在两种荷载作用下分别降低了 72.14%、70.44%。如果在刚性杆的两端均设置转角阻尼器,则平台结构的最大位移和最大加速度均会得到明显的减小,下层甲板的最大位移反应在两种荷载作用下分别降低了 84.98%、72.84%,但最大加速度反应反而会被放大。

对于左端安装转角阻尼器的情况,可以看出由于转角阻尼器与海洋平台结构之间的结合,使得原有的摇摆墙减振原理失效,基本没有效果,而且只在所有刚性杆左端设置转角阻尼器在实际中难以实施,因为连接杆左端的所有转角阻尼器由于其倾斜角度不一样,所安装的粘弹性转角阻尼器尺寸型号会有较大差异,导致造价提高,所以对于此种情况予以舍弃。

综上考虑,连接杆右端设置转角阻尼器效果最好,加速度不被放大,同时所安装转角位移阻尼器型号一致,能节省造价。刚性杆右端安装粘弹性转角阻尼器时下层甲板处在天津波作用和 push 冰荷载下的最大位移反应时程与原始平台之间的对比如图 9 所示,可以看出其减振效果明显。

表 3 分析结果
Tab. 3 The analysis results

荷载工况	下层甲板		上层甲板		
	最大位移/m	最大加速度/(m·s ⁻²)	最大位移/m	最大加速度/(m·s ⁻²)	
天津波	原始平台	0.100 229	4.732 37	0.221 165	8.254 1
	连接杆两端铰接	0.051 712 9(48.4%)	3.788 62(19.94%)	0.069 971 3(68.36%)	5.169 44(37.37%)
	右端安装转角阻尼器	0.028 108 6(72.14%)	3.904 57(17.49%)	0.032 514 8(85.3%)	5.684 5(31.13%)
	两端安装转角阻尼器	0.015 247 2(84.98%)	8.706 13(-83.97%)	0.019 724 3(91.08%)	11.803 5(-43%)
	左端安装转角阻尼器	0.100 823(*)	4.744 82(*)	0.222 45(*)	8.280 59(*)
push 冰	原始平台	0.136 197	41.349 7	0.192 043	27.070 2
	连接杆两端铰接	0.070 211 8(48.45%)	36.034 2(12.85)	0.088 805 2(53.76%)	25.707 5(5.03%)
	右端安装转角阻尼器	0.040 262 3(70.44%)	30.271 9(26.79%)	0.039 409 2(79.64%)	16.114(40.47%)
	两端安装转角阻尼器	0.036 992 8(72.84%)	26.210 9(36.61%)	0.031 230 3(83.74%)	11.742(56.62%)
	左端安装转角阻尼器	0.135 844(*)	43.856 4(*)	0.192 854(*)	26.792 3(*)

(注:括号内为减振效果,* 表示没有效果)

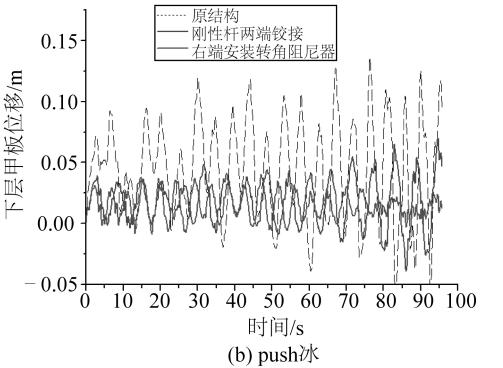
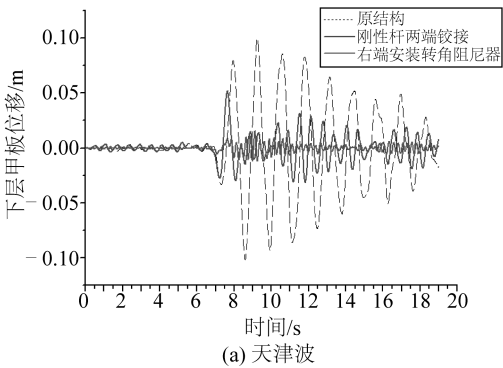


图 9 不同工况下层甲板位移反应比较

Fig. 9 Comparison of the displacement response of the lower deck in different conditions

5 结 语

通过对海洋平台-摇摆墙体系中摇摆墙铰接点处安装粘弹性转角阻尼器进行有限元分析,并对阻尼器参数进行初步优化计算,得出如下结论:

1)在摇摆墙与海洋平台之间刚性杆的铰接点处安装转角阻尼器对海洋平台摇摆墙体系的减振性能具有显著效果,单纯调节阻尼器的刚度对结构的减振效果不明显;同时可以根据实际情况调节阻尼器阻尼以达到最好的消能减振效果。由于分析采用 ANSYS 模型,与实体海洋平台有差异,所以关于阻尼器的具体参数,可以在实际工程中进行具体的优化计算。

2)刚性杆两端均安装转角阻尼器时对位移减振效果最好,但加速度反应增大。由于平台杆件较为复杂,连接杆左端处安装转角阻尼器的难度较大,且型号大小不一致,造价较高,需要进行比较深入的优化。因此,在实际施工中连接杆右端安装转角阻尼器对平台体系的位移和加速度都有较好的减振效果,为最佳方案。

3)在海洋平台-摇摆体系上安装转角阻尼器是一种较为可行的方案,具有良好的应用空间,粘弹性转角阻尼器在海洋平台中的具体安装方式及经济效益等还有待进一步研究。

参考文献:

- [1] 周颖,吕西林.摇摆结构及自复位结构研究综述[J].建筑结构学报,2011,32(9):1-10. (ZHOU Ying, LV Xilin. State-of-the-art on rocking and self-centering structures[J]. Journal of Building of Structures, 2011, 32(9):1-10. (in Chinese))
- [2] 曹海韵,潘鹏,叶列平,等.混凝土框架摇摆墙结构体系的抗震性能分析[J].建筑科学与工程学报,2011,28(1):64-69. (CAO Haiyun, PAN Peng, YE Lieping, et al. Seismic performance analysis of RC frame rocking-wall structure system[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2011, 28(1):64-69. (in Chinese))
- [3] 曲哲,和田章,叶列平.摇摆墙在框架结构抗震加固中的应用[J].建筑结构学报,2011,32(9):11-19. (QU Zhe, WADA Akira, YE Lieping. Seismic retrofit of frame structures using rocking wall system[J]. Journal of Building of Structures, 2011, 32(9):11-19. (in Chinese))
- [4] 陆建辉,彭临慧,李华军.海上结构被动TMD振动控制及参数优化[J].青岛海洋大学学报,1999,29(4):733-738. (LU Jianhui, PENG Linhui, LI Huajun. Offshore structures TMD passive vibration control and parameter optimization[J]. Journal of Ocean University of Qingdao, 1999, 29(4):733-738. (in Chinese))
- [5] 嵇春艳.调谐质量阻尼器对海洋平台的减振效果分析[J].海洋技术,2005,24(2):114-120. (JI Chunyan. Analysis of tuned mass damper's damping effect on offshore platforms [J]. Marine Technology, 2005, 24(2):114-120. (in Chinese))
- [6] QIAO Jin, XIN Li, NING Sun, et al. Experimental and numerical study on tuned liquid dampers for controlling earthquake response of jacket offshore platform[J]. Marine Structures, 2007, 20(4):238-254.
- [7] MA Rujian, ZHANG Haiting, ZHAO Dong. Study on the anti-vibration devices for a model jacket platform[J]. Marine Structures, 2010, 23(4):434-443.
- [8] 嵇春艳,万乐坤,尹群.海洋平台磁流变阻尼器控制技术研究[J].海洋工程,2008,26(3):27-32. (JI Chunyan, WAN Lekun, YIN Qun. Study on magnetorheological fluid damper vibration control for offshore platforms based on fuzzy control strategy[J]. The Ocean Engineering, 2008, 26(3):27-32. (in Chinese))
- [9] 杨飏,欧进萍.导管架式海洋平台模型结构磁流变阻尼隔震数值分析[J].应用基础与工程科学学报,2007,15(2):183-188. (YANG Yang, OU Jinping. Numerical analysis of jacket offshore platform model Isolation structure with MR damper[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2007, 15(2):183-188. (in Chinese))
- [10] 张纪刚,嵇焕雯,江志伟.基于摇摆墙体系的新型海洋平台振动控制研究[J].土木工程学报,2012,45(增刊2):151-155. (ZHANG Jigang, ZHUO Huanwen, JIANG Zhiwei. Research on vibration control of new ocean platform based on rocking-wall system[J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(supplement 2):151-155. (in Chinese))
- [11] 周云,徐昕,邹征敏,等.扇形铅粘弹性阻尼器的设计及数值仿真分析[J].土木工程与管理学报,2011,28(2):1-5. (ZHOU Yun, XU Xin, ZOU Zhengmin, et al. Design and numerical simulation analysis of sector lead viscoelastic damper[J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2011, 28(2):1-5. (in Chinese))
- [12] 徐昕,周云,吴从晓.扇形铅粘弹性阻尼器性能的有限元分析研究[J].防灾减灾工程学报,2012,32(4):444-451. (XU Xin, ZHOU Yun, WU Congxiao. Finite element analysis and study on performance of sector lead viscoelastic damper[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2012, 32(4):444-451. (in Chinese))