

文章编号: 0253-2697(2012)02-0315-05

基于半物理仿真的新型浮式平台垂荡性能

雷 松¹ 岳前进¹ 张文首¹ 谢 彬² 喻西崇²

(1. 大连理工大学工业装备结构分析国家重点实验室 辽宁大连 116024; 2. 中国海洋石油总公司深水工程重点实验室 北京 100027)

摘要:为了评估一种新型浮式钻井生产储油装卸系统(FDPSO)概念设计中干式井口平台的垂荡性能,建立了系统的理论分析模型,并运用半物理仿真技术构筑了大比尺模型实验平台,用可控的电液伺服系统运动台模拟船体的垂荡,干式井口系统采用大比尺的物理模型。在简谐激励下理论模型的实验结果和数值结果的对比,证明了理论模型的合理性,符合工程实际。根据该理论模型对中国南海海况进行的数值分析结果表明,通过船外悬挂配重为干式井口平台的张紧立管系统提供张力的概念设计对船体的垂荡具有自动补偿作用,减小了干式井口平台的垂荡振幅。

关键词:FDPSO;干式井口;模型实验;半物理仿真;垂荡

中图分类号:TE852

文献标识码:A

Heave motion analysis of a new-style floater based on semi-physical simulation

LEI Song¹ YUE Qianjin¹ ZHANG Wenshou¹ XIE Bin² YU Xichong²

(1. State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China; 2. Key Laboratory of Deepwater Engineering, CNOOC, Beijing 100027, China)

Abstract: In order to evaluate the heave motion performance of a dry wellhead deck in the conceptual design of a new-style floating drilling production storage and offloading system (FDPSO), we established a theoretical model for the analysis of a complex tension system and constructed a large-scale experimental platform with a semi-physical simulation technique, which simulated the hull's heave motion on a motion platform controlled by an electro-hydraulic servosystem and applied a large-scale physical model to the dry wellhead system. The comparison between experimental and numerical results of the theoretical model under simple harmonic excitation proved the rationality of the model because they were in accordance with engineering reality. Results of the numerical analysis performed on the oceanic condition of the South China Sea with the theoretical model indicate that the conceptual design that tension is supplied to the riser system of a dry wellhead deck through the balance weight suspended on the outside of a hull is of automatic compensation to the hull's heave motion, which can reduce the heave motion amplitude of a dry wellhead deck.

Key words: floating drilling production storage and offloading system (FDPSO); dry wellhead; model test; semi-physical simulation; heave motion

探索深水油气田^[1-2]新的开发模式是海洋石油工程的一个重要课题,浮式钻井生产储油装卸系统(FDPSO)是为适应深水边远海油田作业环境而提出的新概念,它克服了传统深水油气田开发模式^[3]耗资巨大、开发周期长的缺点。SBM公司(Single Buoy Mooring, Inc)在1998年的深海工程技术会议上^[4]首次提出将张力腿平台(TLP)中运用的具有采油钻井功能的干式井口模块添加到船型浮式生产储油卸油装置(FPSO)的月池内,并通过外部悬挂配重为干式井口平台提供张力,把钻井塔架等主要荷载转移到船体之上,使FPSO扩展成为FDPSO,这种设计既利用了FPSO储油及甲板可变荷载大的特点,又利用了干式井口作业、维修方便,以及生产效率高的特点^[5],具有较好的应用前景。Pollack等^[6]从耐波性方面对FDPSO的

设计进行了水池船模试验来论证该方案的可行性,雷松等^[7]对这种设计的张紧立管系统动力特性进行了数值分析,而对连接张紧立管系统的干式井口平台的垂荡性能目前还没有相关研究。

半物理仿真又叫半实物仿真,是在航空航天、军事及汽车领域中常用的实验技术^[8],但在海洋工程领域目前应用还较少。吴海彬^[9]等用该技术对筒形基础平台沉浮问题进行了研究,张力^[10-11]等用该技术研究了调谐液体阻尼器和调谐质量阻尼器对导管架平台的减震效果,并取得了一定的成果,说明其在海洋工程领域有广阔的应用前景。

笔者在建立FDPSO船体和干式井口平台系统垂荡运动理论模型的基础上,运用半物理仿真实验技术验证该模型的合理性,并利用该模型针对中国南海海

基金项目:国家重大科技专项(2008ZX05026-06-02)资助。

第一作者及通讯作者:雷松,男,1982年12月生,2006年获大连理工大学工学学士学位,现为大连理工大学运载与力学学部在读博士研究生,主要从事海洋结构动力学研究。E-mail:leisong@mail.dlut.edu.cn

况进行数值模拟,对干式井口平台的垂荡性能进行评估。

1 实验设计

有关深水海洋工程结构的实验主要集中在水动力性能方面,目前主要有小比尺模型实验、原型现场实验、截断实验和混合实验 4 种方法^[12],其主要目的是评估整体结构在海洋环境荷载下的动力性能。对于 FDPSO 而言,船体月池内部的干式井口平台的垂荡性能影响钻井和采油的作业安全,是研究的重点(图 1),而船体结构的水动力性能与其他浮式结构相比并无特殊之处。为此,大连理工大学在实验室搭建了半物理仿真平台来研究干式井口平台的垂荡性能,其中船体的垂荡通过计算机控制的电液伺服运动虚拟仿真平台实现,不受传统水池实验中几何相似比(一般为 1:50~1:80)的限制,而干式井口平台则采用大比尺物理模型,以保持系统的动力相似特性。

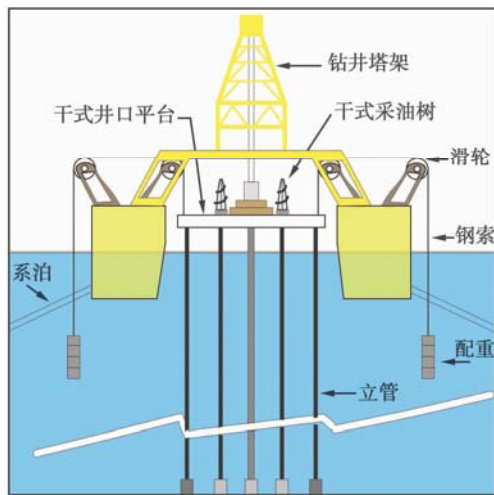


图 1 浮式钻井生产储油装卸系统(FDPSO)示意图

Fig. 1 Elevation view of FDPSO at center section

1.1 理论模型

在实际结构中船体运动与干式井口平台系统的运动是相互耦合的,实验设计中考虑到二者之间的质量相差较大,船体是排水量为万吨级的 FPSO,而干式井口平台系统只有上千吨重,因此进行适当简化,忽略了井口平台系统运动对船体运动的影响。在只考虑船体垂荡的情况下,根据结构的对称性,将 1/4 结构作为分析对象,其力学模型如图 2 所示。用弹簧模拟张紧立管系统的轴向刚度,其刚度大小与原立管的长度、材料弹性模量和截面面积有关,即

$$k = EA/L \quad (1)$$

式中: k 为弹簧刚度, N/m; E 为材料弹性模量, Pa; A 为材料截面面积, m^2 ; L 为原立管的长度, m。

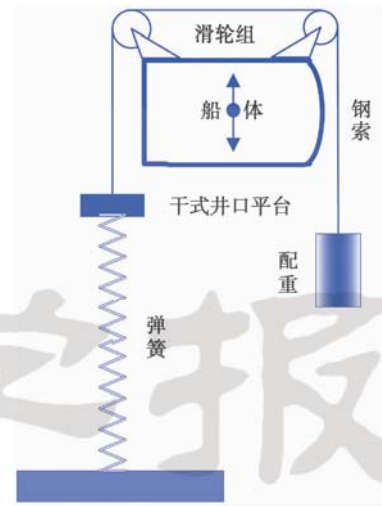


图 2 FDPSO 理论模型

Fig. 2 Sketch of FDPSO theoretical model

当在浅水($L < 300$ m)中时,一般忽略张紧立管的轴向变形,作为刚性体考虑。但从式(1)可以看出,当 L 增大时,张紧立管的轴向刚度减小,在深水特别是当 $L > 1000$ m 时,船体在波浪作用下垂荡引起的张紧立管轴向变形应当引起注意。如图 2 所示的系统动力方程为

$$\begin{cases} (m_1 + m_2) \frac{d^2 x_2}{dt^2} + c \frac{dx_2}{dt} + kx_2 = 2m_1 \frac{d^2 x_0}{dt^2} + 2kx_0 \\ x_1 = 2x_0 - x_2 \end{cases} \quad (2)$$

式中: x_0 为船体垂荡位移, m; x_1 为干式井口平台垂荡位移, m; x_2 为配重垂荡位移, m; m_1 为干式井口平台质量, kg; m_2 为配重质量, kg; c 为阻尼系数, $N \cdot s/m$ 。

若不采用外部悬挂配重的设计,而是将干式井口平台直接连接在船体甲板上,则船体在海洋环境作用下的垂荡及摇摆运动会直接传递到干式井口平台上,势必影响干式井口平台的安全,不能满足钻井和采油作业的需求。

1.2 相似关系设计

确定模型与原型之间的相似关系是实验设计的关键问题,目前结构动力实验确定相似关系常用的方法有量纲分析法和方程式分析法^[13]。对于本实验运用运动方程式相似的分析方法,实验模型的动力方程用原型物理量和相似比表示为

$$\begin{cases} \frac{S_m(m_1 + m_2)S_{x_2}}{S_t^2} \frac{d^2 x_2}{dt^2} + c \frac{S_{x_2}}{S_t} \frac{dx_2}{dt} + S_k S_{x_2} kx_2 = \frac{S_m S_{x_0}}{S_t^2} 2m_1 \frac{d^2 x_0}{dt^2} + S_k S_{x_0} 2kx_0 \\ S_{x_1} x_1 = S_{x_0} 2x_0 - S_{x_2} x_2 \end{cases} \quad (3)$$

式中: S_m 为质量比; S_x 为变形比; S_k 为刚度比; S_t 为时间比。

本实验中保持原型和模型的惯性力和弹性恢复力相似,即满足 $S_t = \sqrt{S_m/S_k}$ 。变形比 S_x 不一定等于几何比,可方便选取模型的相似比,最后制定的模型和原型之间的相似换算关系如表1所示。其中船体垂荡位移 x_0 为实验系统的输入,而干式井口平台位移 x_1 和配重位移 x_2 是实验中需要测量的物理量(和船体垂荡位移具有相同的相似比)。

表1 模型各物理量的相似比

物理量	干式井口平台 1/4 质量/kg	配重质量 /kg	弹簧刚度 ($\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$)	船体垂荡 位移/m	时间/s
原型	840 000	2 200 000	8 490 000	—	—
模型	8.1	22	4 000	—	—
相似比	1/100 000	1/100 000	1/2 122.5	1/100	1/8.868

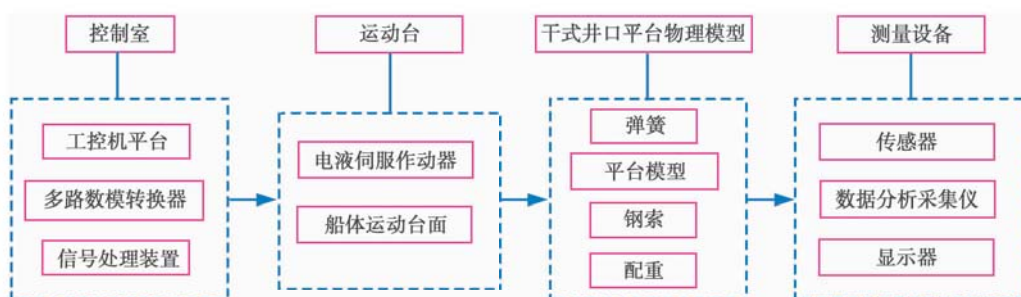


图3 实验平台主要组成部分关系

Fig. 3 Component relationships of experimental device

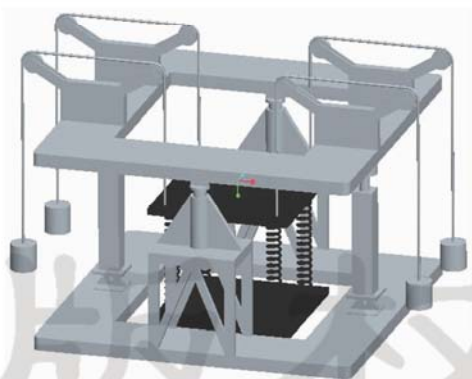


图4 实验模型设计效果图

Fig. 4 The design of test model

2 实验情况

2.1 实验工况

中国南海某海域十年一遇的海洋环境参数:水深 1 500 m,风速 20.8 m/s,流速 1.3 m/s,波浪采用 JON-SWAP 谱^[14],有义波高为 6.2 m,谱峰周期为 12 s,波峰因子取 3.3。船体响应功率谱与波浪谱之间存在如下关系^[15]:

1.3 实验平台简介

实验平台主要由 4 部分组成,如图 3 所示。控制室内的工控机是以一台带有 DS1104PPC 控制器板的 PVI/2GHz 的工业控制计算机作为硬件平台;软件开发平台采用 Matlab/Simulink,完成船体运动的数值仿真并转换为数字信号。工控机平台产生的数字信号传入数模转换器,数模转换器与信号处理装置输入端连接,信号处理装置输出端与船体运动台中的电液伺服作动器连接。船体运动台和物理模型的设计如图 4 所示,船体运动台通过电液伺服作动器的同步运动来模拟船体的简谐垂荡。这种设计使实验对象更加明确,力学原理清晰。因此,基于半物理仿真原理建立的实验平台是研究这类海洋工程结构的一种有益尝试。

$$S_q(\omega) = |H(\omega)|^2 S(\omega) \quad (4)$$

式中: $S_q(\omega)$ 为响应功率谱密度, m^2/s ; $|H(\omega)|$ 为响应幅值算子; $S(\omega)$ 为波浪谱密度, m^2/s 。

根据船型参数笔者使用 ANSYS-AQWA 程序确定 FDPSO 船体在正常作业工况下的垂荡响应功率谱如图 5 所示。由图 5 可以看出,船体垂荡响应的能量主要为 0.06~0.1 Hz。由此制定船体垂荡为简谐运动时的实验工况如表 2 所示。

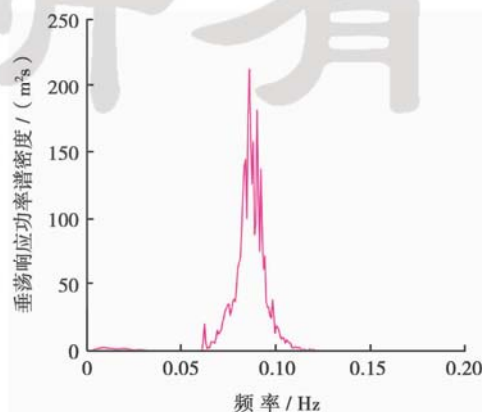


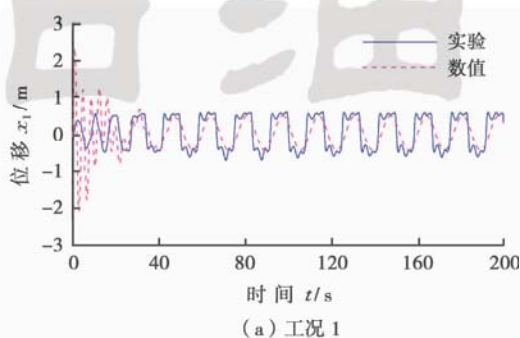
图5 FDPSO 垂荡响应谱曲线

Fig. 5 Heave response spectrum of FDPSO

表 2 简谐实验工况

Table 2 Experimental condition in harmonic form

工况号	原型振幅/m	实验振幅/mm	原型频率/Hz	实验频率/Hz
1	5	50	0.06	0.41
2	5	50	0.07	0.48
3	5	50	0.08	0.55
4	5	50	0.09	0.62
5	5	50	0.10	0.69



2.2 实验结果与分析

为了验证理论模型的正确性,把运动台简谐激励下测量的干式井口平台垂荡曲线按相似比换算回原型后,与数值计算结果进行了对比,如图 6 所示(以工况 1 和工况 2 为例)。数值解由动力方程式(2)按照逐步积分法求得。从图 6 可以看出,动力系统稳定后的实验结果和数值结果基本吻合,曲线的周期基本相同,实验的幅值略高于数值结果。这可能是由于运动台系统的原因,实际输出频率存在一定的误差,略低于指定的激励频率。

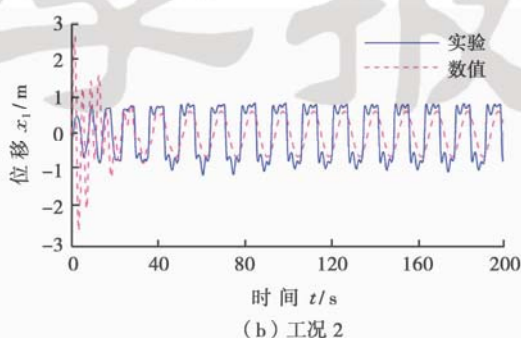


图 6 干式井口平台垂向位移数值结果和实验结果的对比

Fig. 6 Comparison of numerical result with test result in dry wellhead deck heave motion

表 3 整理了 5 种简谐工况下干式井口平台垂荡的幅值,在船体垂荡振幅同为 5m 的情况下,干式井口平台垂荡振幅随船体垂荡运动频率的增大而增大,从 0.06 Hz 时的 0.45 m 增大到 0.10 Hz 时的 1.27 m,但远小于船体的垂荡幅值。从共振的角度来看,这是因为动力方程式的固有频率为 0.27 Hz,当激励频率接近固有频率时,振幅增大,因此在这种 FDPSO 设计时,还应注意干式井口平台系统与船体的共振问题。

表 3 实验结果

Table 3 Result of the model test

工况号	1	2	3	4	5
干式井口平台垂荡实验值/mm	4.5	6.3	7.9	10.1	12.7
干式井口平台垂荡原型值/m	0.45	0.63	0.79	1.01	1.27

从对实验结果的分析可以看出,实验采用的理论模型是合理的,在深海中张紧立管的轴向变形是不可忽略的。若不考虑立管的轴向变形,即弹簧刚度无限大,则干式井口平台与海底基础为刚性连接。图 2 为理想的动滑轮系统,当配重位移 x_2 为船体位移 x_0 的两倍时,干式井口平台不会发生垂荡运动,但这显然不符合工程实际。

3 真实海况的数值模拟

3.1 船体的垂荡时程

船体在随机波浪作用下的垂荡位移时程响应,可

根据其响应功率谱密度由三角级数叠加法^[16]生成。其公式为

$$x_0(t) = \sqrt{2\Delta\omega} \sum_{j=1}^N \sqrt{S_q(\omega_j)} \cos(\omega_j t + \phi_j) \quad (5)$$

式中: $\Delta\omega$ 为等分频率区间的宽度, rad/s; N 为频率区间的等分总数,一般取值范围为 80~100; $\omega_j = j\Delta\omega$, 为第 j 个等分区间的中心频率, rad/s; ϕ_j 为 $[0, 2\pi]$ 均匀分布的随机变量。

根据图 5 所示的船体垂荡响应功率谱计算的船体垂荡时程如图 7。为了尽可能模拟工程实际,计算总时长为 5 000 s。

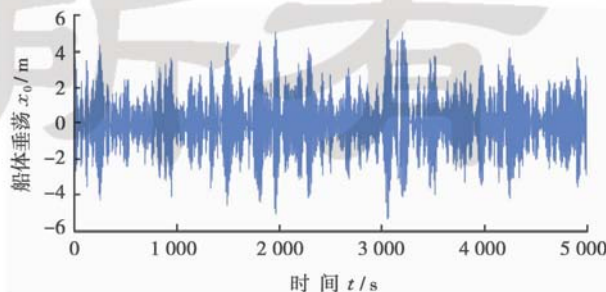


图 7 南海海况下 FDPSO 船体垂荡时程曲线

Fig. 7 Heave time history curve of FDPSO hull in South China Sea

3.2 干式井口平台的垂荡时程

把式(5)代入式(2),假定在每一积分步长内 $x_0(t)$ 是线性变化的,可按照线性荷载精细积分格式^[17]求出干

式井口平台的精确数值解如图8所示。从时程曲线的统计结果比较,船体垂荡的最大值为5.767 m,标准差为1.560 m(图7),而干式井口平台垂荡最大值为2.106 m,标准差为0.696 m(图8)。由此可见,通过外部悬挂配重的设计大大减小了干式井口平台的垂荡运动振幅。

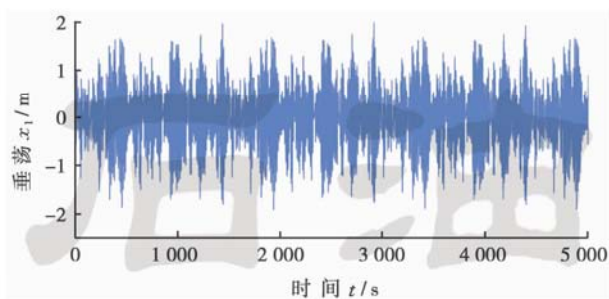


图8 南海海况下干式井口平台的垂荡时程曲线

Fig. 8 Heave time history curve of dry wellhead deck in South China Sea

4 结 论

从一种新型浮式钻井生产储油装卸系统的概念设计出发,提出了因船体垂荡引起的干式井口平台的垂荡问题,并建立了系统的理论模型;运用半物理仿真的方法搭建了模型实验平台,通过简谐加载实验验证了理论模型的合理性。利用该理论模型针对南海海况进行的数值计算表明:FDPSO通过滑轮系统连接的外部配重为干式井口平台的张紧立管系统提供张力的设计,使得干式井口平台运动和船体运动相对独立,减小了干式井口平台的垂荡运动振幅,利于采油和钻井作业,解决了船型浮体垂荡性能不理想而采油钻井作业又对垂荡要求较高的矛盾,具有工程应用的前景。

参 考 文 献

- [1] 庞雄,申俊,袁立忠,等.南海珠江深水扇系统及其油气勘探前景[J].石油学报,2006,27(3):11-15.
Pang Xiong, Shen Jun, Yuan Lizhong, et al. Petroleum prospect in deep-water fan system of the Pearl River in the South China Sea[J]. Acta Petrolei Sinica, 2006, 27(3): 11-15.
- [2] 张功成,米立军,屈红军,等.全球深水盆地群分布格局与油气特征[J].石油学报,2011,32(3):369-378.
Zhang Gongcheng, Mi Lijun, Qu Hongjun, et al. A basic distributional framework of global deepwater basins and hydrocarbon characteristics[J]. Acta Petrolei Sinica, 2011, 32(3): 369-378.
- [3] 谢彬,张爱霞,段梦兰.中国南海深水油气田开发工程模式及平台选型[J].石油学报,2007,28(1):115-118.
Xie Bin, Zhang Aixia, Duan Menglan. Engineering mode and platform selection for deepwater oil field development in South China Sea[J]. Acta Petrolei Sinica, 2007, 28(1): 115-118.
- [4] Poldervaart L, Mong H, Wanvik L. FPSO: an FPSO with drilling for complete stand alone deep water development; proceedings of Deep Offshore Technology Conference, New Orleans, Nov 17-19, 1998[C]. [S. l.]: Curran Associates Press, 1998.
- [5] Poldervaart L, Pollack J. A dry tree FPSO unit for Brazilian waters; proceedings of the Annual Offshore Technology Conference, Houston, May 6-9, 2002[C]. [S. l.]: OTC, 2002.
- [6] Pollack J, Naciri M, Poldervaart L. The tension leg deck from drawing board to numerical design tools; proceedings of the 2000 Offshore Mechanics and Arctic Engineering Conference, New Orleans, Feb 14-17, 2000[C]. [S. l.]: American Society of Mechanical Engineers, 2000.
- [7] 雷松,张文首,岳前进,等. FPSO 张力系统的非线性动力分析[J].中国造船,2010,51(3):138-144.
Lei Song, Zhang Wenshou, Yue Qianjin, et al. Research on non-linear vibrations of FPSO's tension system[J]. Shipbuilding of China, 2010, 51(3): 138-144.
- [8] 单家元,孟秀云,丁艳.半实物仿真[M].北京:国防工业出版社,2008.
Shan Jiayuan, Meng Xiuyun, Ding Yan. Hardware-in-loop simulation[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008.
- [9] 吴海彬,朱世强,陈鹰.基于半物理仿真的桶形基础平台沉浮过程研究[J].仪器仪表学报,2002,23(6):635-637.
Wu Haibin, Zhu Shiqiang, Chen Ying. Research of hardware-in-the-loop simulation for offshore platform with bucket foundation on raising and lowering[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2002, 23(6): 635-637.
- [10] 岳前进,张力,刘小惠,等.调谐液体阻尼器(TLD)附加阻尼力的量测[J].土木工程学报,2008,41(6):22-26.
Yue Qianjin, Zhang Li, Liu Xiaohui, et al. Measurement of the supplementary damping force of tuned liquid dampers[J]. China Civil Engineering Journal, 2008, 41(6): 22-26.
- [11] 张力,岳前进,张文首,等.基于半物理实验系统的调谐质量阻尼器等效阻尼力测量[J].海洋工程,2009,27(1):28-32.
Zhang Li, Yue Qianjin, Zhang Wenshou, et al. Measurement of equivalent damping force of TMD based on semi-simulation experimental testing system[J]. The Ocean Engineering, 2009, 27(1): 28-32.
- [12] Chakrabarti S K. Handbook of offshore engineering; vol. II [M]. Amsterdam: Elsevier, 2005.
- [13] 林皋,朱彤,林蓓.结构动力模型试验的相似技巧[J].大连理工大学学报,2000,40(1):1-8.
Lin Gao, Zhu Tong, Lin Bei. Similarity technique for dynamic structural model test[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2000, 40(1): 1-8.
- [14] Wilson J F. Dynamics of offshore structures[M]. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc, 2003.
- [15] Journée J M J, Massie W W. Offshore hydromechanics [M]. Delft: Delft University of Technology, 2001.
- [16] Scanlan R H, Sachs K. Earthquake time histories and response spectral [J]. Journal of the Engineering Mechanics Division, 1974, 100(4): 635-655.
- [17] 张亚辉,林家浩.结构动力学基础[M].大连:大连理工大学出版社,2007:40-42.
Zhang Yahui, Lin Jiahao. Fundamentals of structural dynamics [M]. Dalian: Dalian University of Technology Press, 2007: 40-42.

(收稿日期 2011-09-17 改回日期 2011-12-21 责任编辑 王 秀)