

文章编号: 1006-2467(2007)09-1429-06

深水半潜式平台模型试验与数值分析

张 威, 杨建民, 胡志强, 肖龙飞

(上海交通大学 海洋工程国家重点实验室, 上海 200030)

摘 要: 以一座工作水深为 1.5 km 的深海半潜式钻井平台及其锚泊系统为例, 对其在 280 m 等效截断水深锚泊系统系泊下的 6 自由度运动和锚链受力进行模型试验研究, 缩尺比取为 1/70. 采用非线性时域耦合分析法对原深海半潜式钻井平台系统进行数值分析, 并将模型试验和数值分析结果进行比较. 结果表明: 等效截断水深锚泊系统在静力方面可较好地模拟全水深锚泊系统, 动力相似上的不足导致其锚链受力最大值与全水深锚泊系统的相差较大; 截断水深模型试验对全水深锚泊系统系泊下的半潜平台运动响应的预报较为可信, 而平台锚系的受力情况需辅以数值模拟进行研究.

关键词: 深水半潜平台; 锚泊系统; 运动响应; 混合模型试验; 耦合

中图分类号: U 661.73

文献标识码: A

The Experimental and Numerical Analysis for a Deep-water Semi-submersible Platform

ZHANG Wei, YANG Jian-min, HU Zhi-qiang, XIAO Long-fei

(State Key Lab. of Ocean Eng., Shanghai Jiaotong Univ., Shanghai 200030, China)

Abstract: This paper researched a truncated mooring system designed by the static-simulating principle. Taking a semi-submersible drilling platform moored in 1.5 km water depth as an example, a passive truncated model test with a truncated mooring system in 280 m water depth is run, with the model scale 1/70, 6 freedom motions and the mooring line tensions in the sea conditions are recorded. The full-depth model is studied through nonlinear time-domain coupling numerical method. Compared to the full-depth numerical results, it is concluded that static characteristics can be modeled quite well. Max values of the mooring line tensions do not quite match the full-depth's results, because of the disadvantage of dynamic simulation. As to the motion responses, the results of the truncated model test can be regarded as the forecast to the semi-submersible platform moored by the full-depth system, however, the mooring line tensions of the full-depth system should be studied with other methods (numerical analysis) together.

Key words: deep-water semi-submersible platform; mooring system; motion response; hybrid model test; coupling

深海浮式平台所处海洋环境和地质条件恶劣, 故其作业系统技术复杂、投资巨大. 严酷海洋环境下

的运动、受力以及甲板是否上浪等性能参数是决定和设计海洋平台结构及其系泊、立管等相关系统的

收稿日期: 2006-10-21

基金项目: 国家自然科学基金(50509015), 上海市科委重大基础研究课题(05DJ14001)资助项目

作者简介: 张 威(1981-), 男, 黑龙江牡丹江市人, 硕士生, 主要从事海洋平台水动力性能的研究. 杨建民(联系人), 男, 教授, 博士生导师,

电话(Tel): 021-62933079; E-mail: jmyang@sjtu.edu.cn.

重要依据^[1]. 在海洋工程水池中对海洋结构物进行的物理模型试验一直以来都作为获得这些重要数据的有效手段,但由于浮式平台工作水深的日渐加大和海洋工程水池尺度有限的矛盾,使深水浮式平台的水动力模型试验面临着新的挑战^[2]. 面对这一现状,国内外海洋工程界的学者们提出了混合模型试验方法来解决这一难题,此技术也被 ITTC 认为是最有前途的深海平台试验技术^[3,4]. 该方法基本思想为:先用深海平台模型数值计算在给定海洋环境条件下的运动和受力,由于悬链系泊缆的运动和受力会影响到平台的运动和受力,而系泊缆的长度又受到水池尺度的限制,在进行物理模型试验时,可将系泊缆截断,其截断处缆绳的运动可由专门办法根据理论计算结果进行模拟,这样可以用缩尺比较大的模型在水池中进行试验. 目前,混合模型试验方法主要有三种形式:

(1) 被动式混合模型试验方法,该方法仅采用被动式截断水深系统进行模型试验^[5,6].

(2) 被动截断 + 数值模拟方法. 该方法应用截断水深试验得到的数据和结果,在数值计算软件中进行数值重构和校验,然后数值外插到实际水深,计算得到实际全水深系统的动力特性^[7].

(3) 采用主动式模拟的混合模型试验方法^[8,9]. 主动式模拟,就是按水池所能模拟的水深,在池底应用一套实时计算机控制装置来替换每根系泊缆或立管的截断部分,如此进行模型试验,直接获得实际系统的动力特性. 但由于技术的复杂性,目前主动式混合模型试验方法的实现还仅在探索阶段.

区别于第 3 种主动式混合模型试验方法,第 1、2 种混合模型试验方法也统称为被动式混合模型试验方法. 虽然第 2 种被动截断 + 数值模拟的混合模型试验方法是目前普遍采用的方法,但它仍是以截断水深模型试验为基础,全水深系泊系统系泊下的海洋结构物在海洋环境中的响应情况由数值方法进行模拟. 因此,研究等效截断水深锚泊系统与原全水深系泊系统在性能上的差异,对等效水深锚泊系统的设计和被动式混合模型试验方法的改进有着重要的意义,也有助于主动式混合模型试验方法的探索. 本文以一座工作水深为 1.5 km 的深海半潜式钻井平台为例,在上海交通大学海洋工程水池中,对其在 280 m 等效截断水深锚泊系统系泊下的 6 自由度运动和锚链受力进行模型试验研究. 缩尺比取为 1/70. 采用非线性时域耦合分析法对原深海半潜式钻井平台系统进行数值分析. 比较模型试验与数值计算的结果,分析以该静力等效原则设计的等效截断

水深锚泊系统与原全水深系泊系统在性能上的差异,并对被动式混合模型试验方法进行研究.

1 模型试验

1.1 目标平台、环境条件与系泊系统

假设目标平台为工作在我国南海海域的深水半潜式钻井平台,工作水深 1.5 km. 表 1 为半潜平台作业及生存海洋环境的主要参数. 船型为双浮体、四立柱、箱型封闭式上平台,对称于中纵剖面及中横剖面. 平台主要参数:浮体 107 m × 18.0 m × 9.0 m;立柱 15.0 m × 15.0 m × 32.0 m;主甲板 80.0 m × 80.0 m;上甲板 80.0 m × 80.0 m;至主甲板高 50.0 m;甲板可变荷 7 500 t.

表 1 海洋环境主要参数

Tab.1 The main parameters of environment condition

海洋环境	有义波高/m	谱峰周期/s	风速/(m·s ⁻¹)	流速/(m·s ⁻¹)
作业	5	10	36	0.75
生存	16.5	19	52	0.75

半潜平台全水深锚泊系统采用 8 根组合式锚索,预张力 1.5 MN. 锚链上端为钢丝绳,下端为 K4 无档锚链,图 1 为锚泊系统布置形式示意图.

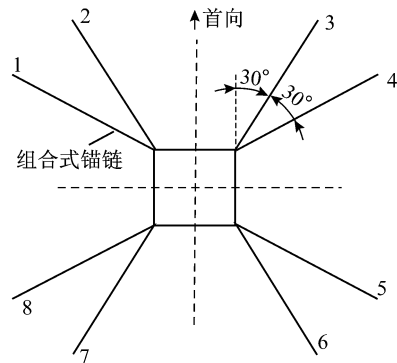


图 1 锚泊系统布置形式

Fig.1 The arrangement of mooring system

1.2 截断水深锚泊系统

依据上海交通大学海洋工程水池所能模拟的最大水深(4 m),并按照 1/70 的海洋工程界常规缩尺比,则须将原 1.5 km 水深锚泊系统在 280 m 处截断. 本次试验中,首先借助数值模拟手段,得到全水深系统的静回复力特性,然后依据静力等效原则重新设计一套等效截断水深锚泊系统(280 m 水深),以 1/70 缩尺比进行模型试验. 等效设计时主要考虑以下因素:

(1) 保证锚泊系统水平/垂向回复力特性一致.

(2) 保证锚泊系统的垂向力—位移特性一致.

(3) 保证具有代表性的锚泊缆的张力特性一致. 图2为全水深和所设计的截断水深系泊缆的形状对比,图3为水平回复力、垂向回复力与水平位移的关系拟合曲线.

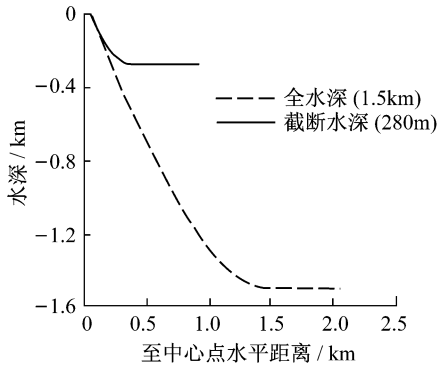


图2 全水深与截断水深系泊缆形状对比
Fig. 2 Shape of the full depth mooring line compared to truncation

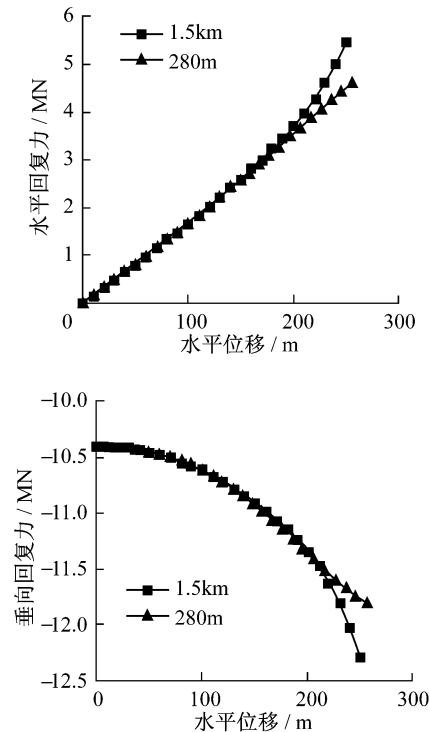


图3 水平、垂向回复力—水平位移特性曲线
Fig. 3 The horizontal restoring force—offset

1.3 模型试验

模型试验在上海交通大学海洋工程国家重点实验室中完成,其海洋工程水池主尺度为50 m×30 m,最大工作水深4 m,配有先进的造波、造流、造风系统,可以模拟风、浪、流各种海洋环境条件.通过大面积可升降假底,可根据试验要求改变水深.选取缩

尺比进行模型试验.模型试验分别进行了静水试验、规则波试验以及风、浪、流组合下的不规则波试验.试验中对以下内容进行了测量和分析:

- (1) 钻井平台在波浪中的6个自由度的运动,即:纵荡,横荡,垂荡,纵摇,横摇及首摇;
- (2) 每根锚链上端(连接钻井平台的一端)张力;
- (3) 风、浪、流环境条件参数.

2 数值计算

2.1 计算理论

以三维势流理论对半潜平台船体的附加质量、阻尼系数等水动力参数进行数值计算.对于正弦运动,半潜平台船体的运动方程可以写为:

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + D_1\dot{x} + D_2f(\dot{x}) + K(x)x = q(t, x, \dot{x})$$

$$M = m + A(\omega)$$

其中: M 为频域质量矩阵; m 为平台船体质量; A 为频域附加质量矩阵; C 为频域势流阻尼矩阵; D_1 为线性阻尼矩阵; D_2 为平方阻尼矩阵; f 为矢量函数; K 为以位移为函数的水静力刚度矩阵; x 为位移矢量; ω 为频率; q 为外力矢量.

$q(t, x, \dot{x}) = q_{wi} + q_{wA}^{(1)} + q_{wA}^{(2)} + q_{cu} + q_{ext}$
 q_{wi} 为风拖曳力, $q_{wA}^{(1)}$ 为一阶波浪力, $q_{wA}^{(2)}$ 为二阶波浪力, q_{cu} 为流作用力, q_{ext} 为波浪漫漂阻尼、特定力、系泊系统提供的定位回复力等其他外力.

在得到了半潜平台船体各水动力参数及外载荷确定的情况下,应用 Cummins 脉冲理论,便可对目标平台船体进行时域分析.考虑到深海平台锚泊系统的动力响应较显著,与平台的耦合作用较强,此次分析中对目标平台船体及锚系进行时域耦合分析.耦合运动方程为

$$R_I(x, \ddot{x}, t) + R_D(x, \dot{x}, t) + R_S(x, t) = R_E(x, \dot{x}, t)$$

式中, $R_I(x, \ddot{x}, t)$ 、 $R_D(x, \dot{x}, t)$ 、 $R_S(x, t)$ 、 $R_E(x, \dot{x}, t)$ 分别为惯性力矢量、阻尼力矢量、内力矢量、外力矢量.

惯性力矢量为

$$R_I(x, \ddot{x}, t) = M_s(x)\ddot{x}$$

其中, M_s 为半潜平台系统(平台船体及锚泊系统)质量矩阵,包括结构的质量和水利质量.

阻尼力矢量为

$$R_D(x, \dot{x}, t) = C_s(x)\dot{x}$$

其中, C_s 为系统阻尼矩阵,包括内结构阻尼和水利力阻尼.

$R_S(x, t)$ 的计算基于单元的每一瞬时的应力状态, $R_E(x, \dot{x}, t)$ 包括重力和浮力、锚链与海底作用力、

海洋环境力和特定力.

处理这类问题,已经有些较为成熟的专业软件可以应用.由挪威船级社(DNV)出品的船舶与海洋结构物分析软件 SESAM 功能强大,其模块 Deep C 专门针对平台及锚系的耦合问题进行求解,被证明分析结果可信度较高.本次分析中采用此软件作为数值分析的工具.

2.2 模型建立及求解

建立深海半潜式钻井平台船体在1.5 km 工作水深的水动力模型,包括用来模拟水面以下平台形状的湿表面模型和模拟平台质量的质量模型,以及以 Morison 理论来计算的 Morison 模型.平台的湿表面部分被近似为大量的面积元,在面积源上均匀分布了源汇强度,通过源汇表征了流场速度势的分布.图 4 为半潜平台船体的水动力模型示意图.应用三维势流理论对半潜平台船体水动力模型进行求解,求得平台在单位波浪下的频域运动响应和附加质量、阻尼系数等水动力参数.利用频域分析的结果,对半潜平台及其系泊系统进行非线性时域耦合分析,图 5 为非线性时域耦合分析模型.耦合方程为非线性微分方程,采用动态时域积分,对平台和锚泊系统的求解在每一时间步中同时进行,充分考虑到平台船体及系泊系统之间的相互作用.

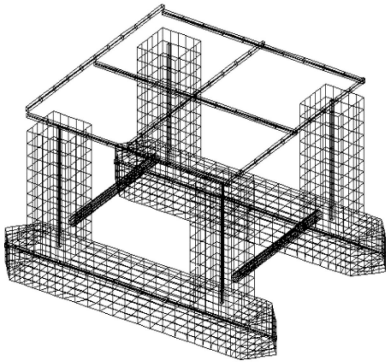


图 4 半潜平台水动力模型

Fig. 4 Hydrodynamic model of the platform

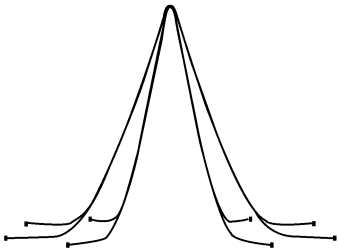


图 5 非线性耦合分析模型

Fig. 5 The nonlinear coupled analytical model

3 结果及分析

表 2 所示为半潜平台在作业状态下的运动响应和导缆孔处锚链拉力的试验与计算结果,风、浪、流同向,均为 180°.图 6 所示为半潜平台在作业状态下的试验与数值分析得到的运动响应谱.由图可见,两种方法得到的运动响应谱吻合较好.图中: $S_x(\)$ 、 $S_z(\)$ 、 $S(\)$ 分别为纵荡、垂荡和纵摇的谱密度函数.垂荡运动的响应峰值出现在 $\omega = 0.5 \text{ rad/s}$ 附近,纵摇运动在波频范围上仅有很小的响应,其峰值出现在极低的角频率范围内.而水平纵荡运动在模型试验和数值分析的结果中都表现出了较明显的低频运动特性.

由表 2 可见,模型试验和数值分析对平台运动响应和锚链力平均值的预报吻合良好,而锚链力标准差的试验值和计算值存在一定的差别.究其原因,本次试验的截断水深锚泊系统的设计是基于静力等效原则,系统的动力特性与原全水深锚泊系统本身存在一定差别,导致这两套锚泊系统表现出来的动态效果有所差别.这一情况在生存海洋环境下会表现得更为明显.

表 3 为半潜平台在生存状态下迎风、迎浪、迎流的响应情况.由表可见,类似于作业状态,在生存海洋环境下,模型试验和数值分析对于平台的运动响应的预报仍吻合良好.不同于作业海洋环境,生存海洋环境下的锚链力平均值的试验值和计算值产生了一定差别.这是因为在生存状态下,平台产生了很大

表 2 作业状态下模型试验与数值分析结果的比较

Tab. 2 Results of the experimental and numerical analysis in the operating condition

统计量	纵荡/m		垂荡/m		纵摇/(°)		锚链力/MN	
	试验	计算	试验	计算	试验	计算	试验	计算
平均值	- 92.00	- 92.37	- 0.20	- 0.02	0.40	0.53	1.896	1.916
最小值	- 101.5	- 104.99	- 1.65	- 1.12	- 2.09	- 1.93	1.619	1.697
最大值	- 84.74	- 83.52	1.29	1.06	3.10	2.85	2.266	2.125
标准差	4.17	3.71	0.36	0.28	0.84	0.72	0.096	0.056

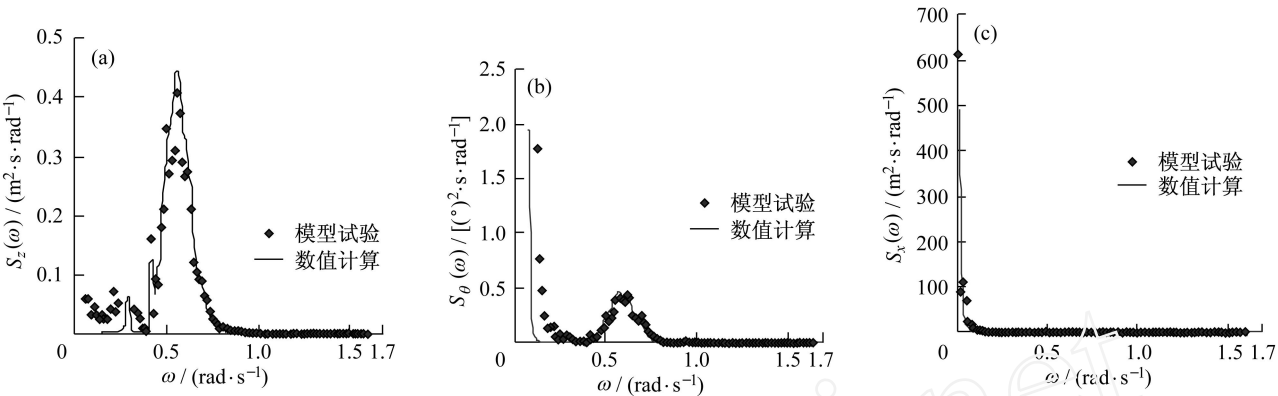


图 6 作业状态下半潜平台运动响应谱

Fig. 6 The motion response spectra of the platform in operating condition

表 3 生存状态下模型试验与数值分析结果的比较

Tab. 3 Results of the experimental and numerical analysis in the survival condition

统计量	纵荡/m		垂荡/m		纵摇/(°)		锚链力/MN	
	试验	计算	试验	计算	试验	计算	试验	计算
平均值	- 237.93	- 235.63	0.36	0.21	- 0.64	- 0.54	3.110	3.311
最小值	- 269.99	- 262.19	- 9.13	- 9.53	- 5.87	- 4.83	2.725	1.384
最大值	- 217.18	- 221.63	8.96	8.34	4.88	5.65	3.480	5.420
标准差	10.37	8.74	2.41	2.43	1.43	1.47	0.084	0.521

的水平位移.在如此大的位移下,截断水深锚泊系统与全水深锚泊系统的水平回复力—位移特性曲线和垂向力—水平位移特性曲线拟合度存在一定的发散现象(见图3),导致了锚链力的平均值存在一定差异.而从锚链力标准差这一数据可以看出,1.5 km全水深锚泊系统在生存海洋环境下发生了强烈的动力响应,截断水深(280 m)锚泊系统表现出了与全水深(1.5 km)锚泊系统完全不同的动力特性,这便是由于以静力等效原则设计的截断水深锚泊系统在

动力相似方面的缺陷所造成的.

图7为平台在生存状态下的运动响应谱.由图可见,生存状态下的运动响应谱数值远大于作业状态下的运动响应谱数值.平台在垂向运动(垂荡)上产生了共振现象.纵摇运动响应峰值出现在 $\omega = 0.3 \text{ rad/s}$ 附近的频率范围内,表现出了更多波频运动性质.水平运动(纵荡)仍然在极低的频率范围内产生明显的响应.平台运动响应的模型试验与数值分析结果吻合良好.

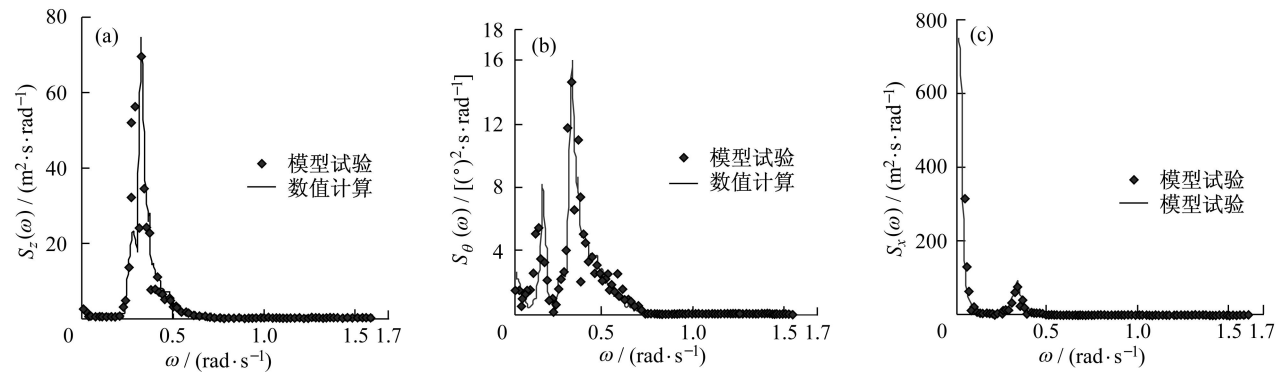


图 7 生存状态下半潜平台运动响应谱

Fig. 7 The motion response spectra of the platform in the survival condition

4 结 论

本文以一座预想工作在我国南海、工作水深1.5 km的深海半潜式钻井平台为例,对280 m等效截断水深系泊系统系泊下的半潜平台进行模型试验,对原1.5 km全水深系泊系统系泊下的半潜平台进行数值计算.在分析对比了模型试验和数值计算结果后,得到了以下结论:

(1) 280 m等效截断水深系泊系统在静力方面可以较好地模拟原1.5 km全水深系泊系统和其系泊下的半潜平台的运动.

(2) 以静力原则设计的等效水深锚泊系统在动力相似方面的缺陷,导致平台锚链受力标准差较全水深系泊系统存在一定差异.在生存海洋环境下这种差异表现得尤为明显,致使两种系泊系统系泊下的锚链受力最大值存在较大的差异,而锚链受力最大值是锚链设计选型的最重要参数之一.

综上所述,混合模型试验方法对此深海半潜式平台运动响应与锚链力平均值的预报与数值计算的结果吻合良好.截断水深锚泊系统在静力上可以较好地模拟全水深锚泊系统.锚泊系统的动力问题对于平台运动及锚链的受力有着重要的影响,若能在动力相似上有所突破,混合模型试验方法的应用前景将更加广泛,结果更令人信服.

参考文献:

- [1] Stansberg C T, Ormberg H, Oritsland O. Challenges in deep water experiments: Hybrid approach [J]. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 2002, 124: 90 - 96.
- [2] 张火明, 杨建民, 肖龙飞. 深海海洋平台混合模型试验技术与进展[J]. *中国海洋平台*, 2004, 19(5): 1 - 6.
ZHANG Huo-ming, YANG Jian-min, XIAO Long-fei. A view on the hybrid model test technique for deep sea platform [J]. *China Offshore Platform*, 2004, 19(5): 1 - 6.
- [3] Stansberg C T, Oritsland O, Kleiven G. Verideep: Reliable methods for laboratory verification of mooring and stationkeeping in deep water [C]// *Proceedings of the Annual Offshore Technology Conference*. Houston, TX, USA: Offshore Technology Conference, 2000: 683 - 693.
- [4] Ormberg H, Baarholm R, Stansberg C T. Time-domain coupled analysis of deepwater TLP, and verification against model tests [C]// *Proceedings of the International Offshore and Polar Engineering Conference*. Honolulu, HI, United States: International Society of Offshore and Polar Engineers, 2003: 145 - 152.
- [5] Chen X, Zhang J, Johnson P. Studies on the dynamics of truncated mooring line [C]// *Proceedings of the International Offshore and Polar Engineering Conference*. Seattle, WA, USA: International Society of Offshore and Polar Engineers, Golden, CO, USA, 2000: 94 - 101.
- [6] Astrup O C, Nestegard A, Ronass M, *et al.* Coupled analysis strategies for deepwater spar platforms [C]// *Proceedings of the International Offshore and Polar Engineering Conference*. Stavanger: International Society of Offshore and Polar Engineers, 2001: 449 - 456.
- [7] Moxnes S, Larsen K. Ultra small scale model testing of a FPSO ship [C]// *Proceedings of the International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*. Fairfield, NJ, USA: OMAE, 1998: 381 - 392.
- [8] 李润培, 谢永和, 舒志. 深海平台技术的研究现状与发展趋势[J]. *中国海洋平台*, 2003, 18(3): 1 - 5.
LI Run-pei, XIE Yong-he, SHU Zhi. A review on the technical development of deep water offshore platform [J]. *China Offshore Platform*, 2003, 18(3): 1 - 5.
- [9] 范菊, 黄祥鹿. 深海几何形单柱式平台的运动分析[J]. *上海交通大学学报*, 2007, 41(2): 172 - 176.
FAN Ju, HUANG Xiang-lu. The analysis of the motion of a geometric spar in deep water [J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2007, 41(2): 172 - 176.

上海交通大学学报

国家期刊奖百种重点期刊

中国高校精品科技期刊

欢迎投稿

欢迎订阅