

文章编号:1005-9865(2016)01-0117-07

深海半潜浮式生产平台关键理论与技术问题

张新曙^{1,2,3}, 尤云祥^{1,2,3}, 滕明清⁴

(1. 上海交通大学 船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200240; 2. 高新船舶与深海开发装备协同创新中心, 上海 200240; 3. 上海交通大学 海洋工程国家重点实验室, 上海 200240; 4. Sugar Land, TX, USA, 77479)

摘 要:深海半潜浮式生产平台 FPU (floating production unit) 是国际海洋油气资源开发的关键基础性装备。针对半潜浮式生产平台的技术特点, 系统阐述其各方面特性(包括: 总布置、系泊和立管、水动力性能、结构设计与分析等)及相关研究现状和未来发展趋势。并结合我国南海地理、水文和资源环境等特点, 对未来半潜浮式生产平台的开发提出了一些建议。

关键词:半潜浮式生产平台; 系泊系统; 立管系统; 水动力性能; 结构设计; 中国南海

中图分类号: P751 **文献标志码:** A **DOI:** 10.16483/j.issn.1005-9865.2016.01.015

Review of the key theories and technologies for the development of deep-sea semi-submersible floating production unit

ZHANG Xinshu^{1, 2, 3}, YOU Yunxiang^{1, 2, 3}, TENG Mingqing⁴

(1. School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 2. Collaborative Innovation Center for Advanced Ship and Deep-Sea Exploration, Shanghai 200240, China; 3. State Key Laboratory of Ocean Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 4. Sugar Land, TX 77479, USA)

Abstract: The research and development of floating production unit (FPU) is of strategic importance to oil and gas exploration in South China Sea and the sustainable development of China. Semi-submersible FPU is one of the most popular platforms adopted for deep water oil and gas exploration over the world. Owing to its unique characteristics and performance, we systematically introduce and analyze the key researches and developments of semi-submersible FPU over the past two decades, including general arrangement, global hydrodynamic performance, structural design and analyses, station-keeping and riser systems, etc. The future trend is also discussed in this paper. Based on previous research and development experiences, together with the background of geophysical, oil and gas reserves in South China Sea, we offer some suggestions on the future research and development of semi-submersible FPU for offshore oil and gas exploration.

Keywords: semi-submersible floating production unit; station-keeping; riser system; hydrodynamic performance; structural analyses; South China Sea

地球上海洋的总面积约为 3.6 亿平方公里, 约占地表面积的 71%, 海洋中不仅含有丰富的渔业、矿业资源, 而且蕴藏着大量的石油和天然气。到目前为止, 人类已探索和开发的海洋只有 10%, 其余 90% 的深海是未知的。我国拥有辽阔的海域面积, 其中南海已经探明的石油储量达 418 亿吨左右, 属于世界海洋油气的四大聚集中心之一, 被称为“第二个波斯湾”^[1]。这些石油、天然气资源若能全部被开发和利用, 我国今后百年的能源需求都可以得到满足。因此, 为缓解我国目前面临的能源短缺问题, 迫切需要大力开发中国南海的油

收稿日期: 2015-03-30

基金项目: 国家青年千人计划项目 (GKKQ0100010); 海洋工程国家重点实验室自主课题资助 (GKZD010063)

作者简介: 张新曙 (1977-), 男, 江苏无锡人, 博导, 国家青年千人计划学者, 主要从事深海装备研发及相关非线性力学问题研究。

E-mail: xinshuz@sjtu.edu.cn

气储备。

一般而言,海洋石油和天然气的开发需经历一个先钻探、后开采的过程。在前期的钻探过程中,需借助钻井平台(如海洋石油 981 等)携带钻井设备进入海洋进行油气钻井作业。根据作业水深的不同,可分为坐底式平台、自升式平台等主要用于浅海区域作业的钻井平台,以及可用于深海油气勘探的钻井船和半潜式钻井平台。通过钻井勘探发现存在油气资源后,需借助生产平台及采油立管进行油气开采。根据作业水深和功能的不同,油气生产平台通常可分为重力式平台、导管架平台、张力腿(tension leg platform, TLP)平台、深吃水立柱式(spar)平台、半潜浮式生产平台(semi-submersible),以及浮式生产储卸油系统(FPSO)等。

深海半潜浮式平台(semi-submersible FPU)是深海油气勘探和开发的主要平台型式之一。半潜浮式平台根据其功能特点主要分为钻井平台、生产作业平台、海上安装平台和居住式平台等。其中,半潜浮式生产平台(见图 1)是各类半潜平台中科技含量最高、造价最贵的一种。近二十年来,半潜生产平台在墨西哥湾、欧洲北海以及巴西周边海域的深海油气开发中得到了广泛应用和飞速发展。从 1986 年欧洲北海第一座半潜浮式平台 Balmoral 投入作业到 2014 年 12 月美国 Chevron 公司宣布迄今世界上最大的深水半潜生产平台 Jack St. Malo 开采第一桶油,半潜生产平台在过去的三十多年中经历了一个不断创新、飞速发展的过程。从浅水到超深水,从小载荷到现今几万吨级的有效载荷,无论对平台浮体本身的设计还是相关系泊及采油立管(production riser)的研发等都带来了非常大的挑战。

相比其他浮式生产平台,如张力腿平台(TLP),深吃水立柱式(spar)平台和浮式生产储卸油系统(FPSO)等,半潜生产平台拥有安全系数高,甲板空间大(长宽可达 110 m/110 m),后期上部模块(topside)



图 1 半潜浮式生产平台示意
Fig. 1 Typical semi-submersible FPU

扩展性强等一系列优势。基于南海丰富的油气资源和特殊的海洋环境,半潜生产平台的研发对我国未来深海油气资源的开发具有极为重要的意义。

近年来我国对半潜钻井平台开展了一系列研究工作^[2],开发和建造了海洋石油 981、982 等钻井平台^[3],但国内对深海生产平台的研究尚处于起步阶段,对其开发理念和关键技术难点还需进一步深入研究。为此,对国际上最新的深海半潜生产平台研究现状作一系统回顾和总结,为今后在相关领域开展深入的机理性研究提供参考和技术支撑。

1 总体设计关键技术

1.1 浮体结构(floater)

一般而言,半潜钻井平台采用双浮箱型式(twin pontoon),而半潜生产平台多采用四立柱(column)加环型浮箱(ring pontoon)的型式,个别也有采用六立柱,这是区别半潜钻井平台与生产平台主要特点之一。平台甲板可采用桁架 Truss 结构(如美国 Murphy 公司的 Thunder Hawk 半潜生产平台,荷兰 Shell 公司的 Nakika 半潜生产平台等^[4])或箱型甲板(Deck box,如英国石油的 Atlantis 半潜生产平台,美国 Chevron 公司的 Jack St. Malo 半潜生产平台等)。桁架 Truss 型甲板的特点在于可以节省船体上部的用钢量,进而降低建造成本,而箱型甲板不仅可以提供额外的浮力储备,还能增加船体结构的总体强度。海洋平台甲板以上是上部结构(topside),根据功能主要分为生产模块、能源模块以及居住模块等。平台的总布置不仅包括对这些模块的划分,还涉及到各个舱室的合理分配以及平台甲板月池(moonpool)区域的优化设计等。平台主尺度的确定不仅要研究不同载况下的浮体稳性,同时还需满足立管设计对平台在风、浪、流下的总体运动,特别是垂向运动的要求。立管设计不仅需满足极限海况下的强度,同时还需达到一定疲劳寿命(通常为作业周期的 10 倍)。此外,研究在半潜平台立柱里设计可存储石油的舱室将是今后非常热门的课题之一。

1.2 系泊系统(station-keeping)

浮式海洋生产平台,一般来讲,必须相对固定在海上某一位置,不能让它随风、浪、流任意漂移,因此需要有一套系泊装置(station-keeping system,如图 2 所示)来保证浮体在海洋环境中相对停留在某一作业区域。由此可见,系泊系统的设计在平台的总体概念设计中占有极为重要的位置^[5]。浅水半潜生产平台的系泊一

般采用钢链(steel chain)或钢链-钢缆(steel wire rope)-钢链型式,而在深水环境下,为减轻系泊缆的重量,提高平台有效载荷,近年来半潜 FPU 多采用钢链-尼龙缆(polyester rope)-钢链的系泊型式,如 Thunder-Hawk, Blind-Faith, Jack St. Malo 等半潜平台。同时,深水系泊多采用张紧或半张紧的型式,躺地的钢链一般只有 100~200 m,这也是区别于浅水系泊的主要特点。作为 Fiber rope 材料中的一种,近几年尼龙缆在深水油气平台开发中得到了相当广泛的应用,其主要优点在于重量轻,但其材料本身的物理特性具有很强的非线性,尼龙缆安装前后其材料刚度随时间、预张力、位移不断变化(见图 3),这种非线性给平台的运动预报和系泊缆张力估算带来了非常大的挑战。2010 年前后,多家国际石油公司和美国船级社开展一项专门研究尼龙缆静态和动态刚度性能的工业界联合项目(joint industry project),并做了一系列材料测试和分析,研究结果被写入美国 ABS 船级社指导性文件^[6-7],但这方面的研究还有待继续深化,特别是对于静态刚度和动态刚度的离散仍有太多不确定性因素,能否基于材料特性发展一种连续刚度模型是非常值得研究的内容。通常,由于立管系统的不对称性及平台周围海底地形的变化,系泊系统一般都采用不对称的分布形式来平衡立管的不对称载荷,不对称系泊缆对平台设计和优化提出了更高的要求。

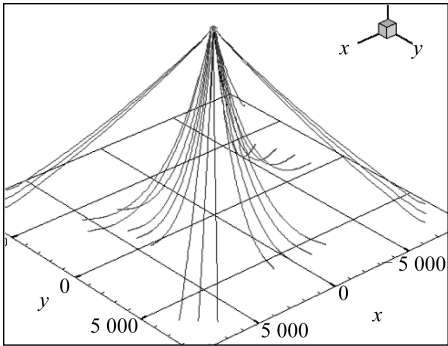


图 2 系泊和立管系统

Fig. 2 Station-keeping and riser systems in deep water

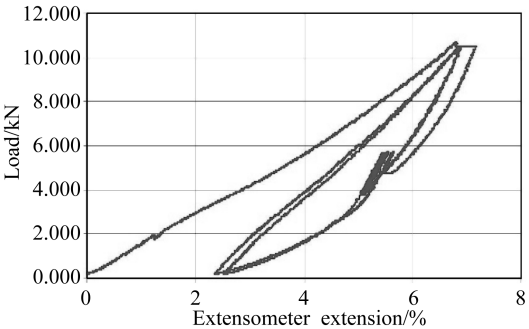


图 3 尼龙缆材料刚度特性曲线

Fig. 3 Stiffness of a polyester fiber rope

1.3 立管系统(riser system)

采油树是采油系统的重要组成部分,根据采油树是否与海水直接接触,可以将其分为干式采油树和湿式采油树。湿树(wet tree)半潜平台一般采用钢悬链线立管 SCR(steel catenary riser)系统连接海底采油树进而开采海底油气,但 SCR 在着地点(touch down point, TDP)容易发生疲劳破坏^[8],如何提高立管的疲劳寿命是半潜平台开发中的难点问题之一。近年,随着惰性波浪型钢立管(lazy wave steel riser, LWSR)技术的日趋成熟^[9],半潜生产平台项目也逐渐开始采用 LWSR。LWSR 最大的特点在于使用额外的浮力设备最大限度的将着地点的运动和立管在平台上悬挂处(hang-off point)的运动分隔开(如图 4 所示,弓形段为浮力设备作用区),从而减小着地点载荷,提高局部疲劳寿命。立管的动力特性和平台的运动密切相关,如何考虑平台、系泊缆、立管之间的非线性耦合并对此进行系统优化将是非常重要的研究课题。

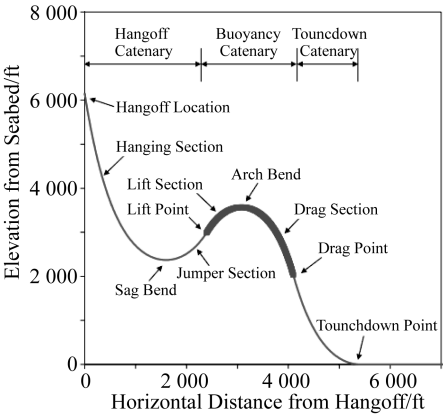


图 4 惰性波浪型钢立管示意

Fig. 4 Sketch of a lazy-wave steel catenary riser (LWSR)

1.4 干树(dry tree)半潜浮式平台

近十年国际海洋工程界一直在探索干树半潜平台概念^[10]。一方面,研究如何将平台的垂向运动(heave和pitch)减到最低;另一方面也在不断研究立管张紧器 Tensioner 技术使立管可以承受较大的垂向运动。美国 HOE 公司^[11]提出了一种双立柱(paired column)的半潜平台概念,即在平台的四个角上分别使用两个立柱取代传统的单个立柱的布置,而平台的上部结构则坐落在四个近立柱上。挪威的 Kavaner 公司也提出了新的深吃水(吃水 40 m 左右)半潜概念包括新的立管张紧器 Tensioner 技术^[12]。Xu^[13]通过对半潜平台立

柱与浮箱连接处结构的优化,使平台 15 秒处的垂荡 RAO 减小到 0.2,从而提高了平台在波浪中的垂向运动性能。最近,罗勇等^[14]提出了一种将平台立柱和甲板分离的概念(平台上部结构通过桁架坐落在浮箱上,增加平台固有运动周期提高运动性能,而无需增加甲板面积和重量),并对其运动性能进行了研究和分析。上述这些对于干树半潜的研究给今后我国深海干树平台的研究提供了一些思路。同时,鉴于目前世界上还没有一种成熟的干树半潜平台,如果我国能率先研制出该类平台,势必会极大推动我国高端海洋工程产业的创新和发展。

2 水动力特性研究

半潜浮式生产平台的水动力特性研究涉及风载、流载和波浪载荷的计算^[15],六个自由度的总体运动分析,流致涡激运动(vortex induced motion, VIM)分析,气隙(air gap)以及波浪抨击(wave slamming)的计算等。水动力性能研究的手段包括数值计算、模型实验和实船测量,通常结合前两种手段开展一些前期的预研。一般来讲,涉及大尺度结构物在波浪频率范围内的线性运动多可借助势流或线性波浪理论求解,如果把重点转向结构物的二阶低频慢漂运动,通常的研究手段亦或基于二阶水波理论。然而忽略流体黏性和边界层的影响的假设未必适用于大幅度的非线性陡波^[16],这时波浪黏性慢漂力的比重逐渐增大,为此需发展一套黏性波浪理论和方法,然而目前这方面的理论研究成果较少。

随着近年来深海半潜和张力腿平台设计吃水不断增加(吃水 35 米以上),流致涡激运动(VIM)已成为制约深吃水半潜平台发展的一个难点问题,其最大的涡激运动幅度 A/D 可达 0.5~0.6(其中 A 为横向涡激运动幅度, D 为用于无量纲化的平台尺度),这给系泊和立管的强度和疲劳带来了非常大的影响^[17-18]。Olaf 等^[19]基于模型实验分析研究了多立柱平台的流致运动。Martin 和 Rijken^[20]通过模型实验研究了波浪对 VIM 的影响,他们的研究表明波浪对 VIM 的影响很小。Zou 等^[21]分别在 UC Berkely 的拖曳水池和荷兰的 Marin 波浪水池对双柱式半潜平台概念做了不同尺度的 VIM 实验,研究发现模型尺度比对 VIM 实验结果的影响较小。Kim 等^[22-23]使用 DES 模型对多柱式平台 VIM 运动时的流场进行了计算和模拟;Xu 等^[24]对 HVS 半潜平台的 VIM 运动做了研究并比较了模型实验和 CFD 计算结果,证实立柱和浮箱交界处的凸起结构(blister)可破坏柱后尾涡的形成,进而对流致 VIM 运动起到一定的抑制作用(各方向 A/D 减小到 0.2)。然而,目前还缺乏有效可靠的 VIM 抑制方法。

半潜平台在极限波浪下的总体大幅度运动、气隙、波浪抨击等强非线性问题也是平台研发中需要全面考虑的重要部分。这些问题既涉及到平台的总体一阶及高阶运动响应,也和波浪的非线性聚焦(nonlinear focusing)、局部的波浪爬高(run-up)以及平台在极限风、浪、流环境下的强非线性运动密切相关。平台在波浪中的一阶动力响应可根据经典势流理论结合格林函数法或者 Rankine 源法(RPM)计算^[25-26],而其二阶传递函数 QTF 的计算需要对自由面进行网格划分和截断^[25,27-28],计算量比一阶运动大得多,为此又发展出了一些近似估算理论^[29]。然而,这些现有的方法都是基于小幅度运动假设,未必适用于极端恶劣海况下的平台大幅度强非线性运动。一方面,摄动小参数的假设及所得到二阶传递函数不适用于大幅度波浪情况;另一方面,流体黏性引起的慢漂力将不可忽略,同时波浪破碎导致的拖曳力将明显增强。

因此,有必要发展一种可以考虑这种非线性效应的时域方法,用于精确模拟上述非线性物理过程,评估外部载荷对平台运动带来的影响。

另外,处于波浪中的单个或多个物体有时在特定条件下会发生所谓的 wave trapping 的共振现象^[30],而对于由多个立柱和浮箱组成的深吃水半潜平台虽然没有严格的 wave trapping,却可能发生 near-trapping。英国牛津大学的 Grice 等^[31]研究了半潜平台

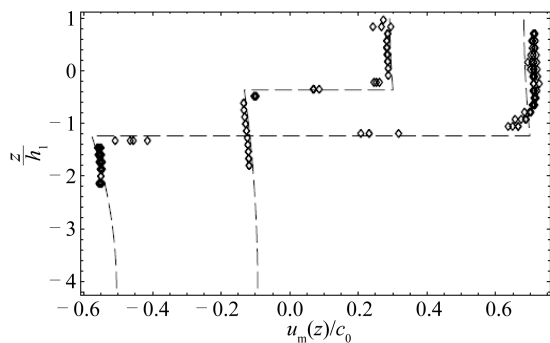


图 5 内孤立波交界面处上下层流体速度分布

Fig. 5 Velocity profile of an internal solitary wave at an interface

在波浪中发生 near-trapping 时周围流场和波高的分布,研究表明当 near-trapping 发生时,平台周围的波浪升高加剧,这会使得平台的气隙快速减小,甚至导致波浪对甲板结构的剧烈抨击。

鉴于我国南海特有的海洋环境,在平台的研发过程中还需考虑海水密度分层而引起的内孤立波对平台、系泊以及采油立管的影响^[32-34]。内孤立波在其波峰上下形成方向相反的高速剪切流^[35](如图 5 所示),该剪切流无论对平台稳性还是运动响应都会产生非常大的影响,因此研究大幅度内孤立波的诱导速度场特性及其对深海结构物的影响机理都非常重要。

3 浮体结构特性研究

为了保证深海平台的结构完整,需对平台进行在位分析、装船分析、干拖和湿拖分析等。实际工程设计中,根据经验选择几个具有代表性和最危险的工况对平台结构进行计算分析。

半潜平台需设计能抵御每个工况下的功能载荷和环境载荷。功能载荷包括不变载荷和可变载荷。不变载荷指的是载荷的大小、位置 and 方向不随时间改变。相反,可变载荷的大小、位置 and 方向会随时间而改变。环境载荷包括风、浪、流等载荷。在总体分析中,平台的轻船重和可变载荷从重量控制报告中选取。在实际分析中,单一的结构模型一般不能包含所有的结构细节,所有的相关工况需组合。由于这样的结构模型太大,包含的工况太多,会给计算以及后处理带来困难。所以,平台结构分析一般分为总体强度分析和局部强度分析。

尽管现行的常规半潜平台结构设计和分析方法日趋成熟,一些已被工业界广泛采用,然而深海半潜平台的结构设计和分析依然存在许多难点,概括如下:

- 1) 考虑到现代半潜生产平台尺寸更大,随着向深水发展,环境条件更恶劣等诸多特点,研究设计人员需在现行方法的基础上找出更为高效、精确的方法。
- 2) 总体强度分析在结构分析中有着举足轻重的作用,而其中设计波高的确定最为关键,目前设计波高的选择中人为参与的因素过多,如何从理论上给出确定的方法是今后研究的一个重要方向。
- 3) 疲劳问题是半潜平台不能回避的主要问题。在一些关键连接处,铸钢件广泛应用。然而,如何优化铸钢外形以减少疲劳损伤仍然是需要深入研究的课题。
- 4) 深海结构可靠性研究。

4 深海半潜平台建造、运输和安装

深海生产平台的研制不仅需要优越的设计,同时还涉及后续的建造、运输、安装。建造的初步阶段是一个将基本设计转化为详细设计的过程,一般情况下,平台的详细设计主要依托船厂将基本设计进一步具体化。船厂建造过程中通常采用前期分段建造,后期组装并合拢的模式。平台建造后可通过干拖(dry tow)的方式运到作业港口加装上部模块及调试。为此,在基本设计时就需进行干拖、湿拖运输的可行性分析,包括多体的稳性和非线性水动力耦合分析等。

在平台浮体完成与上部结构的对接后可湿拖(wet tow)到海上作业地,然后进行系泊和立管系统的安装和调试。系泊、立管系统的安装过程非常复杂,通常需借助另外的多艘半潜重吊起重船(heave lift vessel,如荷兰 Heerema 公司的 Balder、Tialf 等半潜起重船^[36]),无人水下作业器 ROV 等来完成锚链系统和立管系统在海底的定位和对接。

5 结 语

在我国研制、开发和建造深水海洋油气生产平台对我国南海油气资源的开发和海洋工程产业的科学持续发展具有极为深远的战略意义。国际上从 20 世纪 90 年代初对半潜浮式生产平台已经开展了大规模的研发工作并积累了相当多的工程经验。在研制深海半潜浮式生产平台过程中需解决一系列关键技术问题,国内外许多学者对这些问题开展了一些研究并仍在不断探索,对这些问题的研究和发展现状作了一个回顾,以期今后的工作做一些参考。

致谢:感谢陈科博士、陈敏和胡晓峰在论文准备过程中给予的帮助。

参考文献:

- [1] 董艳秋. 深海采油平台波浪载荷及响应.[M] 天津:天津大学出版社, 2005. (DONG Yanqiu. Loads and response of deep water drilling platforms in waves [M]. Tianjin: Tianjin University Press, 2005. (in Chinese))
- [2] 刘海霞. 深海半潜式钻井平台的发展[J]. 船舶, 2007(3):6-10. (LIU Haixia. The development of deep water drilling semi-submersible [J]. Ship & Boat, 2007(3):6-10. (in Chinese))
- [3] 海洋石油 981 深水半潜式钻井平台[ED/OL]. http://baike.baidu.com/link?url=NwzxpzkZnsrjumuPRCyor4fadHn1XyjTg8tWDpyrcwHb9vNm8ZgHofQ8SUnA0wlr85_86jGu61piJ8vwyc3eq, 2015-01-20.
- [4] Nakika oil and gas fields, United States of America[ED/OL]. http://www.offshore-technology.com/projects/na_kika/, 2015-01-20.
- [5] FALTINSEN O M. Sea loads on ships and offshore structures[M]. NY: University of Cambridge, 1993.
- [6] KWAN C T, DEVLIN P, TAN P, et al. Stiffness modeling, testing, and global analysis for polyester mooring[C]//Proceeding of 31th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. 2012.
- [7] American Bureau of Shipping. Guidance notes on the application of fiber rope for offshore mooring[S]. USA: Houston, ABS, 2011.
- [8] RAJIV K A, MARCIO M M, STEINAR K. Development and qualification of alternative solutions for improved fatigue performance of deepwater steel catenary risers[C]//Proceeding of 26th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering. 2007.
- [9] SENRA S F, MOURELLE M M, ANDRADE E Q. Challenges faced in the design of SLWR configuration for the pre-salt area [C]//Proceeding of 30th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. 2011.
- [10] LU J Y, HANSEN V L, VITERI M, et al. Deepwater dry tree semi technology readiness perspectives of operator and classification society[C]//Proceedings of the Offshore Technology Conference. 2013.
- [11] ZOU J, POLL P, RODDIER D, et al. VIM testing of a paired column semi-submersible[C]//Proceeding of 32th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. 2013.
- [12] ZENG J, WANVIK L, KANG C H. A project oriented and technology robust dry tree semi concept[C]//Proceedings of the Offshore Technology Conference. 2013.
- [13] XU Q. A new semisubmersible design for improved heave motion, vortex-induced motion and quayside stability[C]//Proceeding of 30th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. 2011.
- [14] 罗勇, 高巍, 申辉, 等. 新型深水干树半潜平台选型及总体性能分析研究[J]. 中国造船, 2013, 54(S2): 30-39. (LUO Yong, GUO Wei, SHEN Hui, et al. New deep water dry-tree semi-submersible[J]. Shipbuilding of China, 2013, 54(S2): 30-39. (in Chinese))
- [15] 刘应中, 缪国平. 高等流体力学[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2000. (LIU Yingzhong, MIAO Guoping. Advanced fluid dynamics[M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2000. (in Chinese))
- [16] BERTHELSEN P A, BAARHOLM R, PA'KOZDI C, et al. Viscous drift forces and responses on a semi-submersible platform in high waves[C]//Proceedings of the 28th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. 2009.
- [17] XIA J, DAS P, KARUNAKARAN D. A parametric design study for a semi/SCR system in Northern North Sea[J]. Ocean Engineering, 2008, 35:1686-1699.
- [18] YANG H Z, LI H J. Sensitivity analysis of fatigue life prediction for deepwater steel lazy wave catenary risers[J]. Science China Technological Sciences, 2011, 54(7): 1881-1887.
- [19] OLAF J W, AMAL C P, BULTEMA S. Flow induced motions of multi column floaters[C]//Proceedings of the 26th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering. 2007.
- [20] MARTIN B, RIJKEN O. Experimental analysis of surface geometry, external damping and waves on semi-submersible vortex induced motions[C]//Proceeding of 31th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. 2012.
- [21] ZOU J, POLL P, ANTONY A, et al. VIM model testing and VIM induced mooring fatigue of a dry tree paired column semisubmersible platform[C]//Proceedings of the Offshore Technology Conference. 2014.
- [22] KIM J, MAGEE A, YEOH K, et al. CFD simulation of flow-induced motions of a multi-column floating platform [C]// Proceeding of 30th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. 2011.
- [23] TAN J H C, MAGEE A, KIM J, et al. CFD simulation for vortex induced motions of a multi-column floating platform [C]// Proceeding of 32th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. 2013.

- [24] XU Q, KIM J, BHAUMIK T, et al. Validation of HVS semi- submersible VIM performance by model test and CFD [C]// Proceeding of 31th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. 2012.
- [25] LEE C H. WAMIT theory manual [R]. Dept. of Ocean Eng., MIT, 1995: MIT Report 95-2.
- [26] ZHANG X, BANDYK P, BECK R F. Seakeeping computations using double-body basis flow [J]. Applied Ocean Research, 2010, 32(4): 471-482.
- [27] KIM M H, YUE D K P. The complete second-order diffraction solution for an axisymmetric body, Part 2. Bichromatic incident waves and body motions [J]. Journal of Fluid Mechanics, 1991, 211: 557-593.
- [28] MATOS V L F, SIMOSB A N, SPHAIER S H. Second-order resonant heave, roll and pitch motions of a deep-draft semi-submersible: Theoretical and experimental results [J]. Ocean Engineering, 2011, 38: 2227-2243.
- [29] NEWMAN J N. Second-order, slowly-varying forces on vessels in irregular waves [C]//Proceedings of the International Symp on Dynamics of Marine Vehicles and Structures in Waves. 1974: 182-186.
- [30] MCIVER P, NEWMAN J N. Trapping structures in the three-dimensional water-wave problem [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2003, 484: 283-301.
- [31] GRICE J R, TAYLOR P H, EATOCK TAYLOR R. Near-trapping effects for multi-column structures in deterministic and random waves [J]. Ocean Engineering, 2013, 58: 60-77.
- [32] ZHANG X, BANDYK P. On two-dimensional moonpool resonance for twin bodies in a two-layer fluid [J]. Applied Ocean Research, 2013, 40: 1-13.
- [33] ZHANG X, BANDYK P. Two-dimensional moonpool resonances for interface and surface-piercing twin bodies in a two-layer fluid [J]. Applied Ocean Research, 2014, 47: 204-218.
- [34] ZHANG X, YOU Y, CHOI W. An experimental and numerical study of internal solitary wave in a two-layer fluid of finite depth [J]. Submitted, 2016.
- [35] CAMASSA R, CHOI W, MICHALLET H, et al. On the realm of validity of strongly nonlinear asymptotic approximations for internal waves [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2006, 549(6): 1-23.
- [36] Heerema Marine Contractors [ED/OL]. <http://www.heerema.com>, 2015-01-20.

~~~~~  
(上接第 79 页)

- [13] 宁德志, 滕斌, 刘珍, 等. 无限水深聚焦波完全非线性数值模拟 [J]. 海洋工程, 2008, 26(4): 27-34. (NING Dezhi, TENG Bin, LIU Zhen, et al. Fully nonlinear numerical simulation of focused waves in infinite water-depth [J]. The Ocean Engineering, 2008, 26(4): 27-34. (in Chinese))
- [14] DRAZEN D. Laboratory studies of nonlinear and breaking surface waves [D]. San Diego: University of California, 2006.
- [15] LONGUET-HIGGINS M S. Breaking waves in deep or shallow water [C]//Proceedings of the 10th Conf. on Naval Hydrodynamics Office of Naval Research. 1974: 597-605.
- [16] LOEWEN M R, MELVILLE W K. Microwave backscatter and acoustic radiation from breaking waves [J]. Journal of Fluid Mechanics, 1991, 224: 601-623.
- [17] DRAZEN D A, MELVILLE W K, LENAIN L. Inertial scaling of dissipation in unsteady breaking waves [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2008, 611: 307-332.
- [18] TIAN Z, PERLIN M, CHOI W. Energy dissipation in two-dimensional unsteady plunging breakers and an eddy viscosity model [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2010, 655: 217-257.