文章编号: 1005-9865(2014)03-0008-06

浮式平台横荡运动对水下柔性立管涡激振动的影响

陈伟民,郑仲钦,郭双喜
(中国科学院力学研究所 流固耦合系统力学重点实验室,北京 100190)

摘 要: 由于深水浮式平台的运动幅度较固定式平台增大,其运动与下部立管的动力耦合变得更加明显。研究了上部平台运动对水下立管涡激振动的影响,基于有限元数值模拟,建立了与结构运动耦合的立管尾迹流场的涡激升力、流体阻力模型,进行了"平台运动-立管涡激振动"整体系统的动响应数值模拟,分析了平台横荡运动的幅值、频率等因素对水下立管涡激振动的影响。结果表明,上部平台的振动会在沿着立管展向传播的过程中被放大(称为响应放大);与不考虑平台运动相比,立管的动响应位移增大了多倍,而且振幅放大倍数随着模态阶数的降低而增大;平台横荡振幅越大,立管振动幅值也越大,但是振幅放大倍数的变化不明显。

关键词: 横荡; 流固耦合; 立管; 涡激振动
中图分类号: P751 **文献标识码:** A

Impact of floating top sway on the vortex-induced vibration of submarine riser

CHEN Wei-min, ZHENG Zhong-qin, GUO Shuang-xi
(Key Laboratory for Mechanics in Fluid Solid Coupling System, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: The dynamic coupling between floating top and submarine riser becomes more remarkable due to larger fluctuation amplitude of deeper water floating platform, compared to fixed platform in shallow water. The impacts of top end motion on riser vortex-induced vibration (VIV) are explored. A coupling hydrodynamic force approach, regarding vortex-induced lift force along with fluid drag force, is developed, which essentially depends on instantaneous movement of riser. Then the dynamic characters of the integrated system including both floating top end and a riser undergoing VIV are examined by means of finite element numerical simulations. The influences of the amplitude and frequency of platform sway on riser VIV are presented. An interesting phenomenon, called nonlinear amplification, is observed that the top end vibration may be amplified as propagating from top to bottom end along riser axial span. Our numerical results indicate that riser displacement, compared to the case without top movement, becomes larger. Moreover, nonlinear amplification would get more pronounced as the number of mode order falls. However, its value would not significantly change as sway amplitude of top end increases, though the absolute amplitude of riser displacement may get larger.

Key words: sway; fluid-solid coupling; riser; vortex-induced vibration

随着油气开采向深海的进军,水深的增加使得立管长度增加,由于结构的长径比大且柔度高,深水柔性立管的模态多为低频密集模态;而且,海流、波浪等环境流场的速度沿结构展长非均匀分布,导致立管的涡激振动呈现多模态参与、宽带随机性等复杂现象。另外,与以往潜海的固定式平台不同,深水平台多为浮式的,因此上部平台的运动幅度增大,使平台与水下立管之间的动力耦合作用加强[1-6],并引发一些新现象,比如新锁频区域、参数激励、非线性响应放大等[7-9]。研究表明,由于平台垂荡运动造成的立管动张力,立管涡激振

收稿日期: 2013-04-22
基金项目: 国家自然科学基金重点项目(11232012)
作者简介: 陈伟民(1967-),女,江苏南京人,副研究员,主要从事海洋立管涡激振动和工程结构的流固耦合研究。
E-mail: wmchen@imech.ac.cn

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

动与不计垂荡时相比，出现了更高阶模态振动，位移幅值增高约 10%，而剪力增幅达到 20% ~100%[7]。

关于平台和立管的耦合问题多见于上部平台动响应的研究中。通常有两种方法: 准静态法[10-13]和耦合法[4-6, 14-15]。准静态法把立管简化为集中质量的弹簧，主要考虑下部立管对平台的静恢复力，例如 Spanos[10]用一个简化的模型研究了立管刚度对 SPAR 平台总体运动响应的影响，将平台质量集中在重心处，用水平弹簧模拟立管和平台主体的相互作用。徐万海[14]考虑了张力腿的结构非线性，分析了两种不同张力腿模型—非线性梁和无质量弹簧模型，对平台动力响应的影响，指出采用不同的张力腿简化模型得到的平台动力响应明显不同。Ormberg[11]、Kim[12]和 Wichers[13]等研究了多种深海平台浮体与立管(系泊系统)的相互作用，比较了时域耦合和准静态两种方法，结果表明准静态法会低估系泊系统抵御环境载荷的能力。而耦合方法多对水下立管及其水动力进行了简化[14-18]，如采用 Morison 公式简化水动力，主要关注的是立管在波或流作用下的动响应，而对立管涡激振动的关注不多。Lee[16]采用线性弦线模拟张力腿，分析了平台纵荡下的张力腿动力响应，结果表明张力腿的振动模式与平台的运动模式类似，但是振幅会随着入射波周期的改变而变化。Tahar[17]应用 Bosman[18]提出的计算杨式模量的经验公式，计算了 SPAR 平台垂荡时系泊系统的响应，并将结果与线弹性系泊模型进行了对比，发现两种情况下的响应会差别很大。

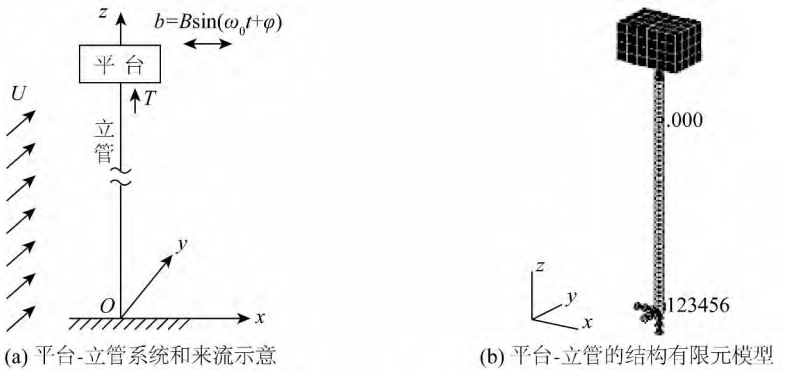
另外需要指出的是，不同的平台运动形式与下部立管的动力耦合机理是不同的。例如，平台的垂荡运动主要造成立管的动张力，使得立管的结构参数发生周期性的变化，而导致参数激励问题[7-8]；而立管的水平运动即横荡和纵荡会沿着立管展向往底部传播，并直接与立管涡激振动的横向运动相互耦合，而且平台运动边界还会造成新的非线性耦合现象。这里只考虑平台横荡与立管涡激振动的动力耦合。

首先，建立与结构运动相耦合的立管尾迹流场的涡激升力和流体阻力模型，进行基于有限元数值模拟的“平台运动-立管涡激振动”整体系统的动响应分析，研究平台运动与立管涡激振动的动力耦合规律，分析平台以不同振动幅值、激励频率运动时对水下立管模态位移、振动波的传播的影响。

1　平台横荡-立管涡激振动系统的动响应模型

1.1　结构模型

平台-立管系统模型如图 1 所示，其中图 1(a) 中坐标系原点固定于立管下端，假设来流沿 y 轴正方且流速为 U，平台沿 x 轴方向做简谐运动 $b(t) = B\mathrm{e}^{-\mathrm{i}\omega_0 t}$，其中，$B$，$\omega_0$ 分别为平台运动的振幅、频率。图 1(b) 为结构有限元模型，顶部平台采用体单元，立管采用 Eulor 梁单元; 为了消除大质量平台对整体系统稳定性的干扰，限制了平台绕 x，y，z 轴方向的转动; 由于平台与立管的单元类型不一样，在立管与平台的连接点处采用了多点约束(MPC) 设置，它允许在模型的不同自由度之间施加约束。



(a) 平台-立管系统和来流示意　　(b) 平台-立管的结构有限元模型

图 1　平台-立管系统示意

Fig. 1　The platform-riser system sketch

立管的动力平衡方程:

$$EI\frac{\partial^4 x(z,t)}{\partial z^4} - T\frac{\partial^2 x(z,t)}{\partial z^2} + c\frac{\partial x(z,t)}{\partial t} + m\frac{\partial^2 x(z,t)}{\partial t^2} = F(z,t) \tag{1}$$

式中: EI 为弯曲刚度，T 为预张力，c 为结构阻尼，m 为单位长度的结构质量，流体作用力 $F(z)$ 的具体表达将在下一节给出。立管两端的边界条件:

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

$$\begin{cases} x(0,t) = b(t) \\ \partial^2 x(0,t)/\partial z^2 = 0 \end{cases} \quad 和 \quad \begin{cases} x(L,t) = 0 \\ \partial^2 x(L,t)/\partial z^2 = 0 \end{cases} \tag{2}$$

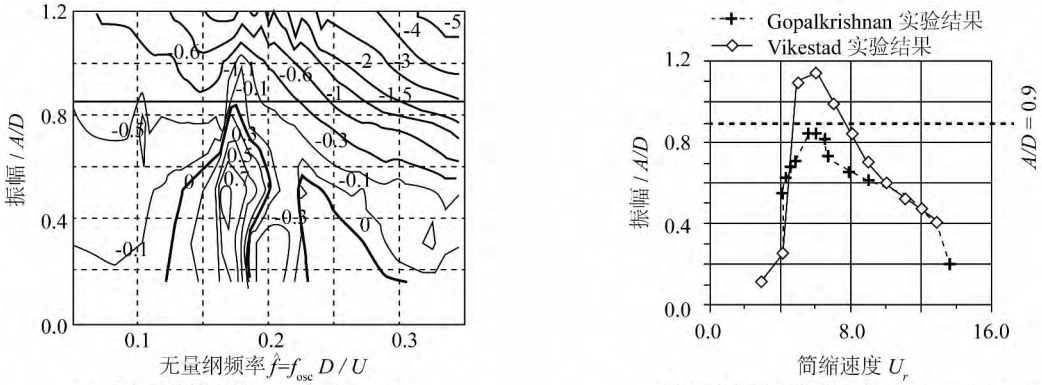
1.2 水动力模型

涡激振动中立管的尾迹流场涉及湍流和边界层等复杂问题，目前很难给出精确的涡激升力理论解，根据相关实验数据和规律观察，采用经验模型来描述涡激升力。式(1)右边的水动力 $F(z)$ 可以分为涡激升力 F_L 与流体阻力 F_D 两部分，其中阻力部分可以用 Morison 公式表示:

$$F_D = (1/2)C_D\rho_f D(U-\dot{x})|U-\dot{x}| + C_a(1/4)\pi D^2\rho_f(\dot{U}-\ddot{x}) + (1/4)\pi D^2\rho_f\dot{U} \tag{3}$$

式中: ρ_f，U 别为流体密度、速度; D 为立管外径; C_a，C_D 分别为附加质量和拖曳力系数，对于细长柔性立管，通常取 $C_a = 1.0$，$C_D = 1.1$。

为了获得尾迹流场中涡脱落产生的涡激升力表达式，对涡激升力在整个锁频阶段的变化规律、与结构运动的关系进行观察分析。Govardhan[19] 以等高线的形式给出了均匀流中，弹性支承圆柱受迫振动时的升力系数(C_L)实验结果(见图2(a)所示)，图中横、纵坐标分别为无量纲频率 $\hat{f} = f_{osc}D/U$、无量纲振幅 A/D，f_{osc} 为结构振动频率、A 为结构的振幅。从图2(a)可见，以 $C_L = 0$ 这条等高线(图中的黑粗线)为界，内部 $C_L > 0$，流体提供激励力; 外部 $C_L < 0$，升力等效为阻力; $C_L = 0$ 时，圆柱和流体之间没有能量交换，为理想锁频条件。Vikestad[20] 给出了低阻尼圆柱自由振动的幅值试验结果(见图2(b)所示)，对比图2(a)和图2(b)可见，实验给出的振幅响应规律基本一致，简缩速度范围约为 3.0~14.0，当 $U_r = 5.5$ 时振幅达到最大值; 但是最大幅的值略有不同，这里取两个实验结果的折中值，即 $A/D = 0.90$。



(a) 升力系数等高线 (Govardhan, 2004)　　(b) 锁频阶段圆柱震动响应 (Vikestad, 2000)

图2 涡激振动的升力系数和响应振幅实验结果

Fig. 2 Experimental results of cylinder undergoing VIV

因为涡激振动锁频阶段的流体作用力与结构运动是非线性耦合的，假设涡激升力 F_L 为结构振动位移的多项式(见图3所示)，即:

$$F_L = (1/2)\rho_f DLU^2[C_{L0} + C_1(A/D) + C_2(A/D)^2 + C_3(A/D)^3] \tag{4}$$

式中: 振幅取值范围 $0 < A/D \leqslant 0.90$，升力系数 $C_L = C_{L0} + C_1(A/D) + C_2(A/D)^2 + C_3(A/D)^3$。以往的一些研究中，多将升力系数 C_L 定为一个常数，而式(4)考虑了锁频共振阶段的流体升力与结构运动的关联，因而升力系数并不是一个常数。分析式(4)中各项的作用，总体来说，常数项和线性项主要起激励振动的作用，两个高阶项(其中至少一项系数为负值)起到了非线性阻尼的作用，这样可以使得结构振动在达到一定幅值以后因为阻尼的增大而开始减小，从而模拟涡激振动的振幅自限制性。至于式中各个系数 C_{L0}、C_1、C_2 和 C_3 的具体值，则根据实验数据确定。

Gopalkrishnan[21] 通过实验用外推法得到了升力系数 C_L 及 (A/D) 与振动频率 f_{osc} 的关系(见图4所示)。这样，图3中的关键点 A、B、C 的坐标值就可以由图4中对应的实验曲线确定。例如，图4中的曲线①上的点(某一频率比下)对应图3中 C 点的横坐标 $A/D|_{C_L=0}$，曲线④上的点对应 A 点的纵坐标 $C_L|_{A/D=0}$; 再假设 B 点处切线斜率为0，就可建立联立方程组求解出式(4)中各个系数 C_{L0}、C_1、C_2、C_3 的具体值。

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

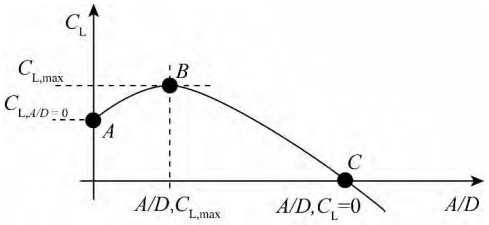


图 3　升力系数曲线示意

Fig. 3　Lift coefficient curve

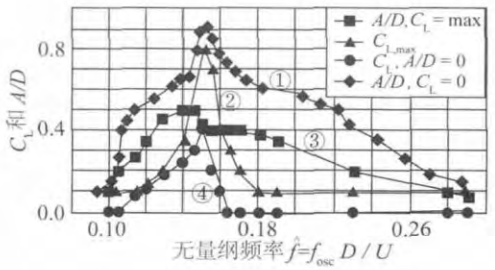


图 4　升力系数与振幅取值范围

Fig. 4　Plots lift coefficient, as well as amplitude, versus nondimensional frequency

另外，在利用有限元法进行立管在上述耦合水动力作用下的 VIV 数值模拟时，为便于程序的时域计算，采用升力做功等效法，将升力转化为结构速度的多项式，具体的过程详见文献 [22]。

2　平台横荡对立管运动的影响

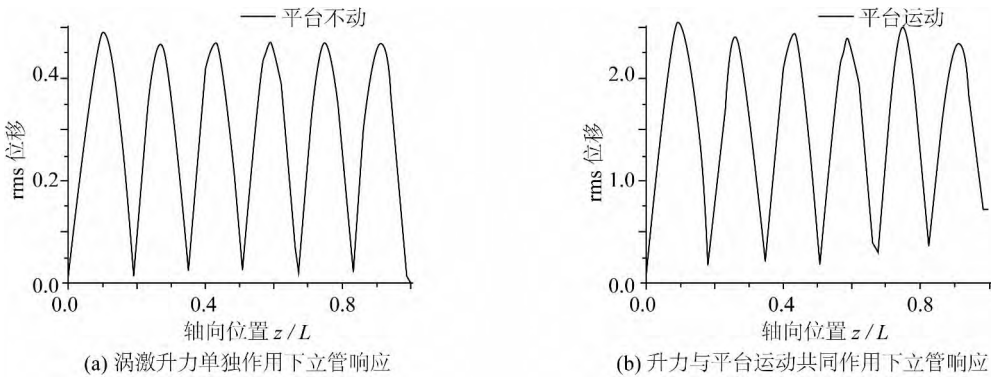
采用上述模型，首先对平台的横荡运动对立管涡激振动的影响进行考察; 然后分析平台的运动幅度、频率等参数对立管的响应幅值、振动波传播形式的影响。

计算模型的具体参数为: 立管外径 $D = 0.500$ m，内径 $d = 0.445$ m，长度为 500 m。材料结构密度 $\rho_s = 7.8\times10^3$ kg/m^3，抗弯刚度 $EI = 3.8\times10^9$ Nm^2，结构阻尼 0.03。立管预张力 $T = 6.8\times10^7$ N，来流速度 $U = 1.0$ m/s。

2.1　与不考虑平台运动的结果对比

为了考察平台运动的影响，取两种计算状态: 1) 立管上只单独作用涡激升力，上部的平台固定不动; 2) 立管上作用有涡激升力，同时上部平台沿水平方向(x 轴) 做振幅为 1 m 的简谐振动，平台振动频率与立管的固有频率一致。从数值计算的结果来看，当平台的振动频率和立管的固有频率一致时，立管的运动响应大于其它平台运动频率情况。考虑到立管的安全性分析主要关注较危险的情况，即动响应较大的情况，所以这里将平台的振动频率设置为与立管的固有频率一致。

典型的立管位移(注: 以下的位移均用半径无量纲化，即 x/D) 数值模拟结果见图 5，为代表性起见，这里仅给出振动频率与立管 6 阶模态频率一致的结果。从图中可以看到，平台横荡作用下立管动响应 rms(均方根) 位移最大值约为 2.60，而平台固定不动时静止时立管 rms 位移最大值只有 0.48，也就说由于上部平台的运动，会增大立管的动响应幅度。另外，图 5(b) 中沿着立管的展向位移响应的 6 个位移峰值均大于 2.3，而在平台处的端点($z/L = 1.0$) 的位移仅为 0.75，这表明立管的位移响应超过了平台本身运动的幅值，这里称之为响应放大现象。这种现象的发生，主要是由于立管上端(与平台联接处) 的运动，即运动的端部边界条件造成的。



(a) 涡激升力单独作用下立管响应　　(b) 升力与平台运动共同作用下立管响应

图 5　平台运动对立管响应的影响对比

Fig. 5　Response comparison between platforms with and without top end motion

2.2　平台振荡频率的影响

计算了平台振动、涡激升力的频率与立管 1 ~ 24 阶固有频率一致时，立管的振动响应，图 6 给出了一些

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

典型模态的 rms 位移。从图 6 可以看出，总体来说，随着激振频率的增大（模态阶数增高），立管响应逐渐减小，即模态阶数越低，响应放大倍数越大；而且低阶模态的响应形式主要为驻波，几乎观察不到行波，但是随着激振频率的增大，高阶响应中的行波效应变得更加明显。这是因为模态阻尼随着模态阶数增高而增大，所以模态响应的衰减加快，顶部平台运动带动的立管振动在沿着立管轴线方向往底部传播过程中，很容易衰减而不能到达立管底端，因此造成高阶响应中行波的出现。

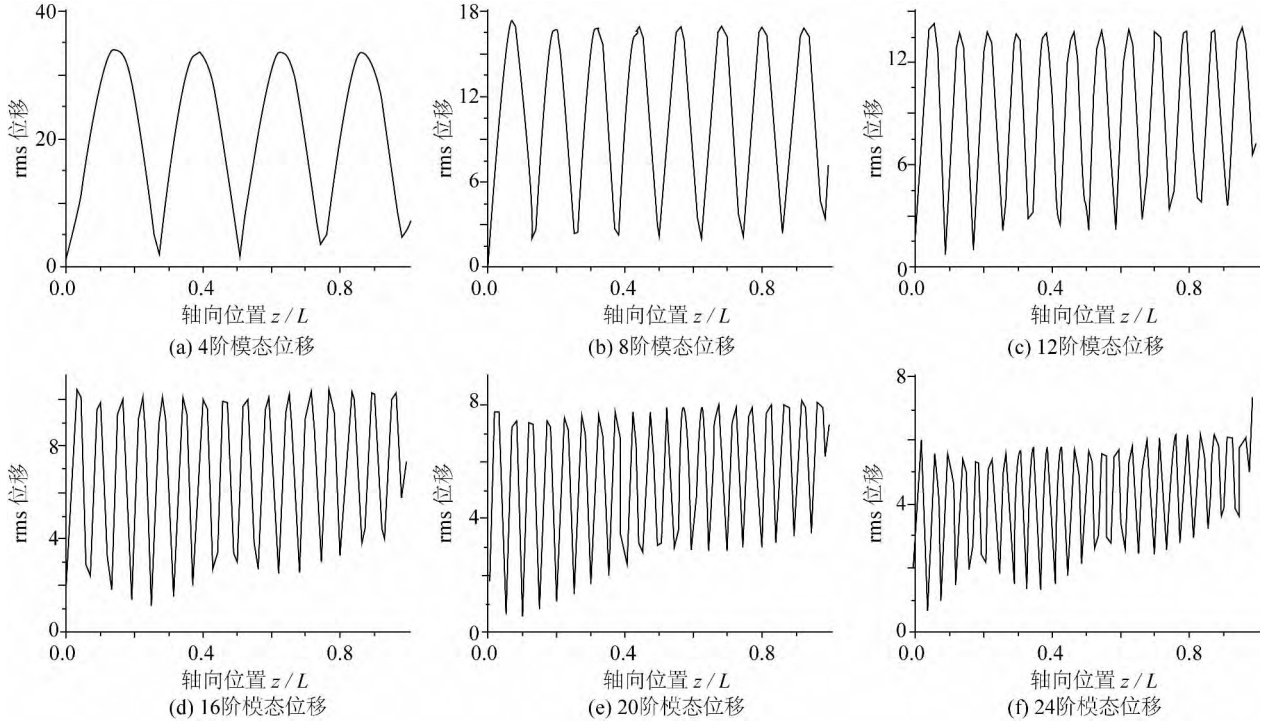


图 6 立管不同模态的 rms 位移响应

Fig. 6 Modal rms displacement responses of riser undergoing VIV along with top end motion

2.3 平台振荡幅度的影响

平台的振动幅度是影响立管响应的另一个重要参数，事实上，如果表示成无量纲形式，该参数类似于 KC 数，即 $KC = 2\pi B/D$。计算了当平台振动频率保持不变，平台振幅从 $B/D = 1 \sim 10$ 变化时，立管响应与平台振幅的比值，图 7 给出了一些典型结果（取频率与立管的 6 阶固有频率 ω_6 一致）。

比较图 7 中几幅图的位移可见，平台振幅越大，立管振动位移也随之增大，例如最大 rms 位移从 $B/D = 1$ 时的 2.6 增大到 $B/D = 10$ 时的 26.5；但是，观察最大位移与平台振幅的比值 A/B，即立管响应放大的倍数（见图 8），该值只是在 2.5 左右浮动，表明平台振幅对立管振幅放大倍数的影响不明显。

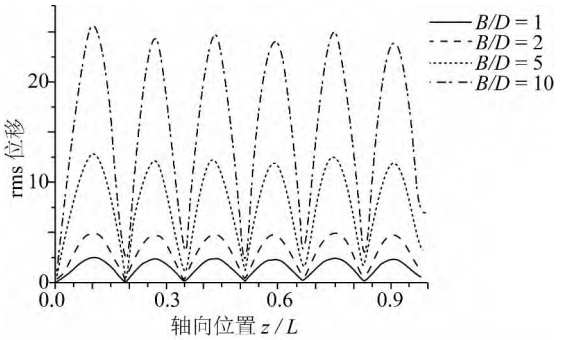


图 7 不同平台振荡幅度下的立管振动位移

Fig. 7 Rms displacement of riser undergoing different amplitudes of top motion

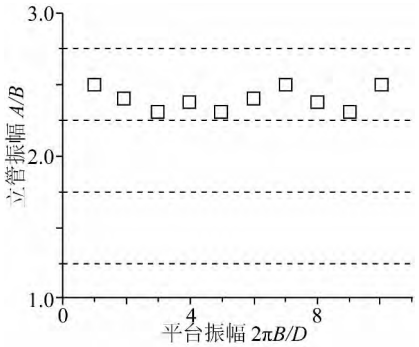


图 8 KC 数对响应放大倍数的影响

Fig. 8 Effect of KC number on amplification factor

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

3 结　语

研究了平台横荡对水下立管涡激振动的影响，基于有限元数值模拟，建立了与结构运动相耦合的立管尾迹流场的涡激升力模型，进行了“平台运动-立管涡激振动”整体系统的动响应数值模拟。结果表明，上部平台的振动会在沿着立管展向传播的过程中被放大，即由于平台运动和立管涡激振动的非线性耦合，立管的响应出现了振幅放大现象; 与不考虑平台运动相比，立管的动响应位移增大了多倍。根据平台横荡运动的幅值、频率等影响参数的数值模拟结果，得到如下结论:

1) 随着模态阶数的增加，立管响应的位移会减小，而且振幅放大倍数也会减小; 低阶模态的响应形式主要为驻波，但是随着激振频率的增大，高阶响应中行波效应变得更加明显;

2) 平台横荡振幅越大，立管振动振幅也越大，但是平台横荡振幅对立管位移放大倍数的影响不明显。

参考文献:

[1] Heurtier J M, Buhan L, Fontaine E. Coupled dynamic response of moored FPSO with risers [C] //Proceedings of the Eleventh International Offshore and Polar Engineering Conference. 2001: 17-22.

[2] Stansberg C T, Ormberg H, Oritsl O. Challenges in deep water experiments: Hybrid approach [J]. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 2002, 124: 91-96.

[3] 娄　敏，董文乙，王　腾. 浮式装置升沉及横荡运动下海洋立管动力响应研究 [J]. 中国海洋平台，2010，25(4): 14-18. (LOU Min, DONG Wen-yi, WANG Teng. Study on dynamic response of marine riser in floating system with pitch and sway motions [J]. China Offshore Platform, 2010, 25(4): 14-18. (in Chinese))

[4] 谷家扬，吕海宁，杨建民，随机波浪中张力腿平台耦合运动及系泊系统特性研究 [J]. 海洋工程，2012，30(4): 42-48. (GU Jia-yang, LV Hai-ning, YANG Jian-min. Studies on coupling dynamic response and characteristics of mooring system of TLP in stochastic waves [J]. The Ocean Engineering, 2012, 30(4): 42-48. (in Chinese))

[5] Tahara A, Kim M H. Hull/mooring/riser coupled dynamic analysis and sensitivity study of a tanker-based FPSO [J]. Applied Ocean Research, 2003, 25: 367-382.

[6] Chen X H, Ding Y, Zhang Y. Coupled dynamic analysis of a mini TLP: Comparison with measurements [J]. Ocean Engineering, 2006, 33: 93-117.

[7] 王东耀，凌国灿. 在平台振荡条件下 TLP 张力腿的涡激非线性响应 [J]. 海洋学报，1998，20(5): 119-128. (WANG Dong-yao, LING Guo-can. Vortex-induced nonlinear vibration of TLP tethers under circumstances of platform oscillation [J]. ACTA Oceannologica SINICA, 1998, 20(5), 119-128. (in Chinese))

[8] 雷　松，张文首，赵　岩，等. FDPSO 立管涡激振动响应分析 [J]. 工程力学，2010，27(S1): 294-298. (LEI Song, ZHANG Wen-shou, ZHAO Yan, et al. Influence of heave motion on vortex-induced vibration of FDPSO risers [J]. Engineering Mechanics, 2010, 27 (S1): 294-298. (in Chinese))

[9] Garrett D L. Coupled analysis of floating production systems [J]. Ocean Engineering, 2005, 32: 802-816.

[10] Spanos P D, Ghosh R, Finn L D. Coupled analysis of a spar structure: Monte Carlo and statistical linearization solutions [J]. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 2005, 127(1): 11-16.

[11] Ormberg H, Fylling I J, Larsen K, et al. Coupled analysis of vessel motions and mooring and riser system dynamics [C] // Proceedings of the 16th international conference on OMAE. 1997: 91-100.

[12] Kim M H, Arcandra T, Kim Y B. Variability of spar motion analysis against various design methodologies/parameters [C] // Proc 20th Offshore Mech Artic Eng. Conf. 2001: OMAE01-OFT1063.

[13] Wichers J E W, Voogt H J, Roelofs H W, et al. DeepStar-CTR 4401 Benchmark Model Test [R]. Technical Report No. 16417-1-OB, MARIN, Netherlands. 2001.

[14] 徐万海，曾晓辉，吴应湘. 深水张力腿平台与系泊系统的耦合动力响应 [J]. 振动与冲击，2009，28(2): 145-150. (XU Wan-hai, ZENG Xiao-hui, WU Ying-xiang. Coupled dynamic responses of the tension leg platform and tendon in deep-water [J]. Vibration and Impact, 2009, 28(2): 145-150. (in Chinese))

[15] LI Bin-bin, OU Jin-ping, TENG Bin. Fully coupled effects of hull, mooring and risers model in time domain based on an innovative deep draft Multi-Spar [J]. China Ocean Engineering, 2010, 24(2): 219-233.

(下转第 27 页)

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

参考文献:

[1] International standard 13628-5, Petroleum and natural gas industries —Design and operation of subsea production systems –Part 5: Subsea umbilicals [S]. 2002.

[2] YUE B, DAVID W, YU W W. Lazy wave SCR on turret moored FPSO [C] //2H Offshore Inc. 2011.

[3] YANG He-zhen, LI Hua-jun. Sensitivity analysis of fatigue life prediction for deepwater steel lazy wave catenary risers [J]. Technological Sciences, 2011, 54(7): 1881-1887.

[4] LI S C. Dynamic response of deepwater catenary catenary riser [C] //2H Offshore Inc. 2011.

[5] 黄维平，李华军. 深水开发的新型立管系统——钢悬链线立管(SCR) [J]. 中国海洋大学学报，2006，36(5): 775-780. (HUANG Wei-ping, LI Hua-jun. A new type of deepwater riser in offshore oil & gas production: the steel catenary riser, SCR [J]. Journal of Ocean University of China, 2006, 36(5): 775-780. (in Chinese))

[6] 梁　辉. 深水开发中的 SCR 立管系统 [J]. 中国造船，2008. (LIANG Hui. Steel catenary riser in deepwater [J]. Shipbuilding of China, 2008. (in Chinese))

[7] 傅俊杰，杨和振. 深海钢悬链立管触地点动力响应分析 [J]. 海洋工程，2009，27(2): 36-40. (FU Jun-jie, YANG He-zhen. Dynamic response analysis of a deepwater steel catenary riser at the touchdown point [J]. The Ocean Engineering, 2009, 27(2): 36-40. (in Chinese))

[8] 郭海燕，高秦岭，王小东. 钢悬链线立管与海床土体接触问题的 ANSYS 有限元分析 [J]. 中国海洋大学学报，2009，39(3): 521-525. (GUO Hai-yan, GAO Qin-ling, Wang Xiao-dong. Finite element analysis of steel catenary riser/soil contact problem by ANSYS [J]. Journal of Ocean University of China, 2009, 39(3): 521-525. (in Chinese))

[9] OrcaFlex Manual: Version 9.5a [M]. UK: [s. n.], 2006.

(上接第 13 页)

[16] Lee H H, Wang P W. Analytical solution on the surge motion of tension-leg twin platform structural systems [J]. Ocean Engineering, 2000, 27: 393-415.

[17] Tahar A, Kim M H. Coupled-dynamic analysis of floating structures with polyester mooring lines [J]. Ocean Engineering, 2008, 35(17-18): 1676-1685.

[18] Bosman R L M, Hooker J. Elastic modulus characteristics of polyester mooring ropes [C] // Proceedings of the Annual Offshore Technology Conference. 1999: 1246-1251.

[19] Govardhan R, Williamson C H K. Critical mass in vortex-induced vibration of a cylinder [J]. European Journal of Mechanics B/Fluids, 2004, 23: 17-27.

[20] Vikestad K, Vandiver J K, Larsen C M. Added mass and oscillatory frequency for a circular cylinder subjected to vortex-induced vibrations and external disturbance [J]. Journal of Fluids and Structures, 2000, 4: 1071-1088.

[21] Gopalkrishnan R. Vortex induced forces on oscillating bluff cylinders [D]. MA, USA: MIT, Cambridge, 1993.

[22] Chen W M, Li M, Zheng Z Q, et al. Dynamic characteristics and VIV of deepwater riser with axially varying structural properties [J]. Ocean Engineering, 2012, 42(2012): 7-12.

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net