

TLP 平台码头系泊运动响应及缆绳张力研究

刘 浩¹, 李春辉², 赵 南², 成 磊²

(1. 中海石油深海开发有限公司, 广东 深圳 518064; 2. 上海外高桥造船有限公司, 上海 200137)

摘 要: 张力腿平台 (Tension Leg Platform, TLP) 码头舾装时需要采用临时多点系泊方法实现码头系泊, 又因 TLP 平台立柱高度大、系统布置不同于传统平台, 有必要对其码头系泊运动响应和缆绳张力进行深入研究, 以确保 TLP 平台在码头舾装期间, 能够抵抗一定程度的不利气象条件。采用 AQWA 软件建立 TLP 平台码头系泊模型, 同时模拟了码头靠垫以及浮箱靠垫, 根据外高桥附近的气象、水文条件, 通过计算, 研究不规则波作用下的平台运动响应及缆绳张力, 并分析两者在向岸、离岸环境载荷下的变化规律。本研究对 TLP 平台码头安全系泊设计具有重要的参考意义, 为国内船厂 TLP 平台建造及码头舾装提供了重要理论依据和技术指导。

关键词: TLP; 码头系泊; 运动响应; 缆绳张力

中图分类号: TE95

文献标识码: A

文章编号: 1002-3682(2018)01-0047-07

doi: 10.3969/j.issn.1002-3682.2018.01.005

TLP 平台具有运动性能好、抗恶劣环境作用能力强、可移动和经济性好等特点, 在深海油气开采、生产和处理中具有广阔的发展前景。目前世界上在役和在建的张力腿平台近 30 座, 平台的生产区域从北海和墨西哥湾到西非沿海, 到东南亚海域, 已逐步扩展到全球各大海上石油产区^[1]。

不同于传统海洋油气平台, 正常作业时 TLP 平台采用张力腿系泊, 张力腿由 4 组张力筋腱组成, 上端固定在平台浮体上, 下端与水下桩基基础相连^[2]。码头舾装作业时, 需要采用临时多点系泊方法实现码头系泊。临时多点系泊系统布置需要考虑 TLP 平台立柱高度大等特殊结构特点, 要求平台运动响应和缆绳张力满足要求, 因此研究 TLP 平台码头系泊运动响应和缆绳张力具有重要的工程应用价值。

本文以工信部“500 m 水深油田生产装备 TLP 自主研发”科研项目设计的 TLP 平台参数为基础, 建立 TLP 平台码头系泊模型, 设计码头系泊方案, 通过对比不同系泊方案的平台运动响应和缆绳张力, 研究两者在向岸、离岸环境载荷下的变化规律, 指导 TLP 平台建造及码头舾装作业。

1 TLP 平台码头系泊模型

TLP 平台的主尺度如表 1 所示。码头长度 180 m。在 TLP 平台与码头之间垫靠驳船的主尺度为: 长 30.0 m, 宽 20.0 m, 型深 6.0 m, 吃水 4.0 m, 排水量 2 172.56 t。码头护舷采用型号 H1000 的超级鼓型橡胶护舷, 两股为一组, 长度 1 m, 单股压缩性能为受压力 57.9 t 时压缩 52.5%, 受压力 61.5 t 时压缩 55.5%。平台与驳船间设置 4 组长 6 m 直径 2 m 的圆筒形充气式护舷, 护舷单组最大反力 1 766 kN。

系泊方案如图 1、图 2 所示, 图 3 为 AQWA 中建立的系泊模型。平台下浮体与码头系泊需要 16 根直径 40 mm 钢丝绳 (编号: 1~16), 破断负荷约 1 158 kN; 平台与驳船系泊布置 6 根直径 70 mm 八股丙纶长丝 (编号: 17~22), 最小破断负荷 633 kN; 平台立柱甲板与码头系泊布置 8 根直径 80 mm 八股丙纶长丝 (编号: 23~30), 最小破断负荷 882 kN; 驳船与码头系泊需要 4 根直径 40 mm 钢丝绳 (编号: 31~34), 破断负荷

收稿日期: 2017-11-07

资助项目: 国家工信部高技术船舶科研项目——500 米水深油田生产装备 TLP 自主研发

作者简介: 刘 浩 (1989-), 男, 工程师, 主要从事石油平台结构方面研究. E-mail: liuhao14@cnooc.com.cn

(李 燕 编辑)

1 158 kN。

表 1 TLP 平台主尺度
Table 1 Principal dimension of TLP

项 目	尺寸/m	项 目	尺寸/m
平台总长	78.5	平台总宽	78.5
下浮体截面宽	8.5	下浮体截面高	8.5
立柱直径	19.5	立柱高度	56.5

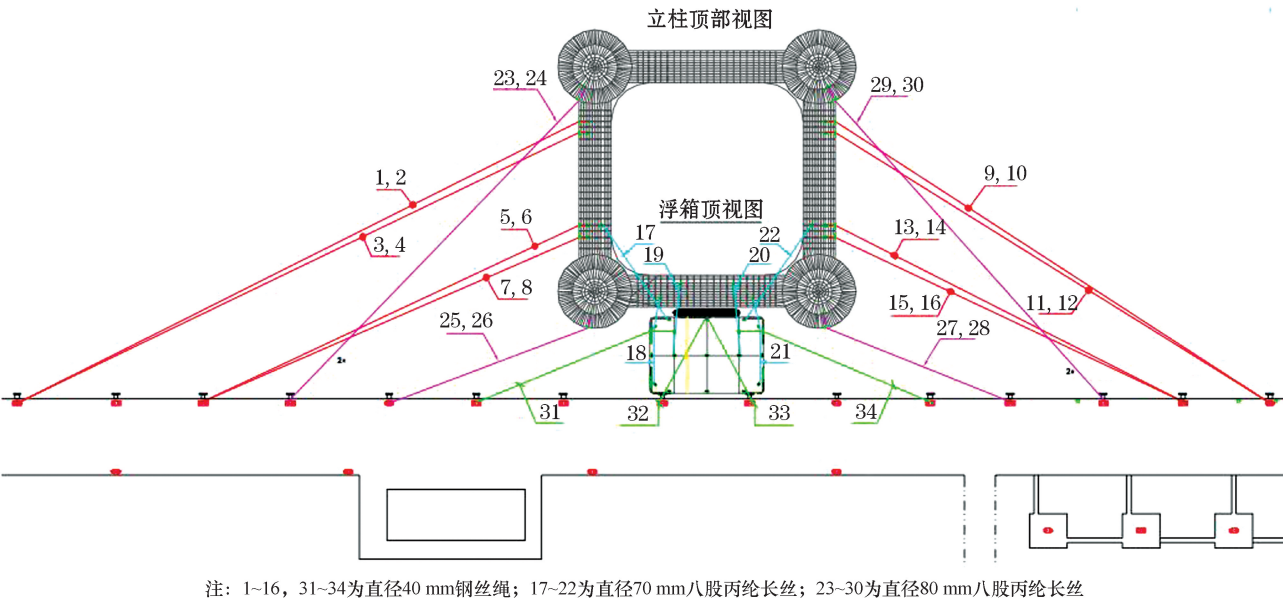


图 1 TLP 平台系泊方案俯视图
Fig.1 Top view of TLP mooring scheme

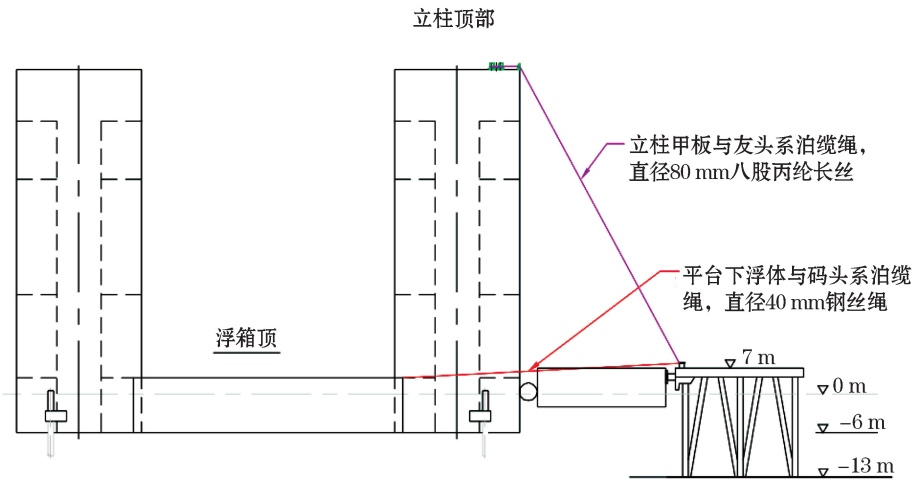


图 2 TLP 平台系泊方案侧视图
Fig.2 Side view of TLP mooring scheme

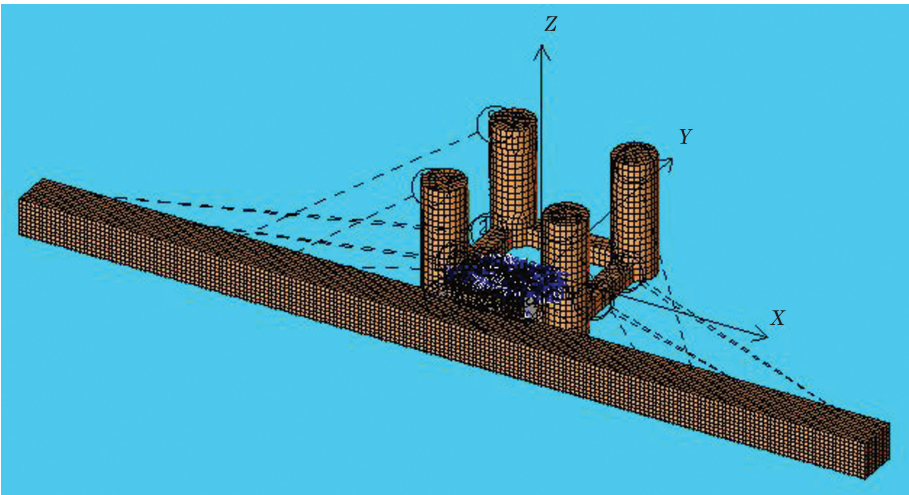


图 3 TLP 平台在 AQWA 中的系泊模型

Fig.3 The mooring model of TLP established by using AQWA

2 环境条件

外高桥造船有限公司码头条件良好,根据统计数据,平台正常舾装时,可能遭遇的最大风速为 10 级阵风,取其上限,即 28.4 m/s,最大流速 3 kn,即 1.54 m/s。码头水深 6 m,有义波高 0.5 m,谱峰周期 9.0 s,波浪谱为 JONSWAP 谱。环境载荷作用方向定义如图 4 所示,计算中风浪流组合条件见表 2,其中条件 1~5 为离岸横向载荷,条件 6~10 为向岸横向载荷,条件 11~16 为流向、浪向固定时不同角度风载荷时的组合工况。

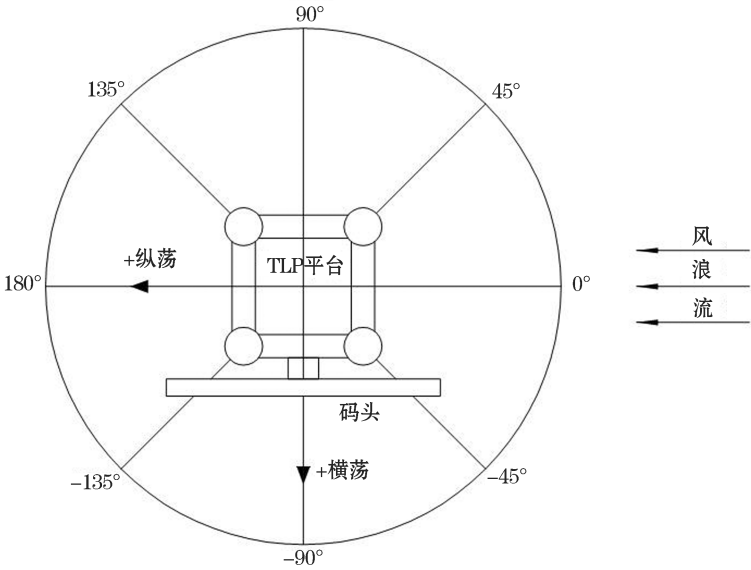


图 4 环境载荷作用方向示意图

Fig.4 A sketch map of the direction of environmental loads

表 2 环境载荷组合条件
Table 2 Combination conditions of environmental loads

序 号	风向/°	流向/°	浪向/°
1	0	90	90
2	45	90	90
3	90	90	90
4	135	90	90
5	180	90	90
6	−135	90	90
7	−90	90	90
8	−45	90	90
9	0	180	180
10	45	180	180
11	90	180	180
12	135	180	180
13	180	180	180
14	−135	180	180
15	−90	180	180
16	−45	180	180

3 计算方法

船舶系泊在码头上,由护舷、缆绳约束在泊位处,护舷与缆绳对船舶的约束是非线性的^[3],同时船舶还要受到风、浪、流的联合作用^[4],这是复杂的非线性问题,需要采用时域理论方法求解^[5-6]。

当波浪式不规则波的时候,如果系泊船舶中心点波面瞬时高度为 $\zeta(t)$,则在二阶波近似下,整个系泊船体上的瞬时波力和力矩可以写作:

$$F_i(t) = F_i^{(1)}(t) + F_i^{(2)}(t)。$$
 (1)

至于广义的一阶波力 $F_{i(t)}^{(1)}$ 和二阶波力 $F_{i(t)}^{(2)}$,可以按照随时间变化的波力的脉冲响应函数和海浪波面高函数的卷积来算得:

$$F_i^{(1)}(t) = \int_0^t h_i^{(1)}(t - \tau) \zeta(\tau) d\tau，$$
 (2)

$$F_i^{(2)}(t) = \int_0^t \int_0^\tau h_i^{(2)}(t - \tau_1, t - \tau_2) \zeta_{(\tau_1)} \zeta_{(\tau_2)} d\tau_1 d\tau_2。$$
 (3)

式(2),(3)中, $h_i^{(1)}(t)$, $h_i^{(2)}(t_1, t_2)$ 分别为时域中的一阶、二阶脉冲响应函数,能够按照频域内线性和二次方传递函数经傅里叶变换来获得:

$$h_i^{(1)}(t) = \text{Re} \left(\frac{1}{\pi} \int_0^\infty H_i^{(1)}(\omega) e^{i\omega t} d\omega \right), \quad (4)$$

$$h_i^{(2)}(t_1, t_2) = \text{Re} \left(\frac{1}{2\pi^2} \int_0^\infty \int_0^\infty H_i^{(2)}(\omega_1, \omega_2) e^{i(\omega_1 t_1 + \omega_2 t_2)} d\omega_1 d\omega_2 \right). \quad (5)$$

式(4),(5)中, $H_i^{(1)}(\omega)$ 是频域中的线性传递函数,表示单元长度振幅波浪影响下系泊船体上的一阶波激振力; $H_i^{(2)}(\omega_1, \omega_2)$ 是频域中的平方传递函数,表示单元长度振幅波浪两频率波影响下系泊船体上的二阶波激振力。

如果将 t 时刻第 j 个模型状态下系泊船舶的位移表示成 $\xi_j(t)$, 速度表示成 $\dot{\xi}(t)$, 那么系泊船舶因为运动而引起的总的辐射势 $\Phi(x, t)$ 可以表示为

$$\Phi(x, t) = \sum_{j=1}^6 \left(\dot{\xi}_j(t) \varphi_j + \int_{-\infty}^t \dot{\xi}(\tau) (t - \tau) d\tau \right). \quad (6)$$

可以使用对系泊船舶表面压力进行的积分计算辐射势所引起的波力。那么第 k 个方向上的广义的波浪力 $F_k(t)$ 可表示为

$$F_k(t) = \iint_{S_b} \rho \frac{\partial \phi}{\partial t} n_k dS = \sum_{j=1}^6 m_{kj} \ddot{\xi}(t) + \int_{-\infty}^t \xi_j(\tau) K_{kj}(t - \tau) d\tau. \quad (7)$$

使用力学中的定律,即可获得时域下系泊船舶的运动方程:

$$\sum_{j=1}^6 \left\{ (M_{kj} + m_{kj}) \ddot{\xi}(t) + \int_{-\infty}^t \xi(\tau) K_{kj}(t - \tau) d\tau + B_k[\dot{\xi}(t)] + C_{kj} \xi_j(t) \right\} = F_k(t) + G_k(t), \quad (8)$$

式中, M_{kj} , C_{kj} 是和频域理论相同含义的系泊船舶广义质量和恢复力系数; $B_k[\dot{\xi}(t)]$ 是系泊船舶的黏性阻尼方程; $G_k(t)$ 是非线性的系泊约束造成的力; $F_k(t)$ 是波浪激振力。

本文采用多体水动力学软件 AQWA 建立 TLP 平台仿真分析模型,主要应用 AQWA LINE 和 AQWA NAUT 模块,计算非线性时域下平台运动响应,计算中阻尼系数取 5%。

4 运动响应分析

横向载荷作用下,浪向和流向均为 90° ;纵向载荷作用下,浪向和流向均为 180° 。采用 AQWA 软件进行平台 3 h 短期预报,浮体间及码头驳船间的水动力系数已根据水池模型试验做了相应的减少,以较好地模拟真实工况。同时护舷的受力状态良好,有效地抵抗了平台及驳船运动作用力的影响。横向载荷和纵向载荷作用平台运动响应短期预报结果见表 3,横向载荷作用下平台运动响应时程曲线见图 5,纵向载荷作用下平台运动响应时程曲线见图 6。

表 3 横向纵向载荷下平台运动响应

Table 3 The motion responses of TLP under transverse and longitudinal loads

方 案	横摇/ $^\circ$	纵摇/ $^\circ$	艏摇/ $^\circ$	横荡/m	纵荡/m	垂荡/m
横向载荷	0.6	0.8	0.8	1.3	1.5	1.5
纵向载荷	0.8	1.1	0.4	1.8	0.4	1.5

注:响应值为最大值

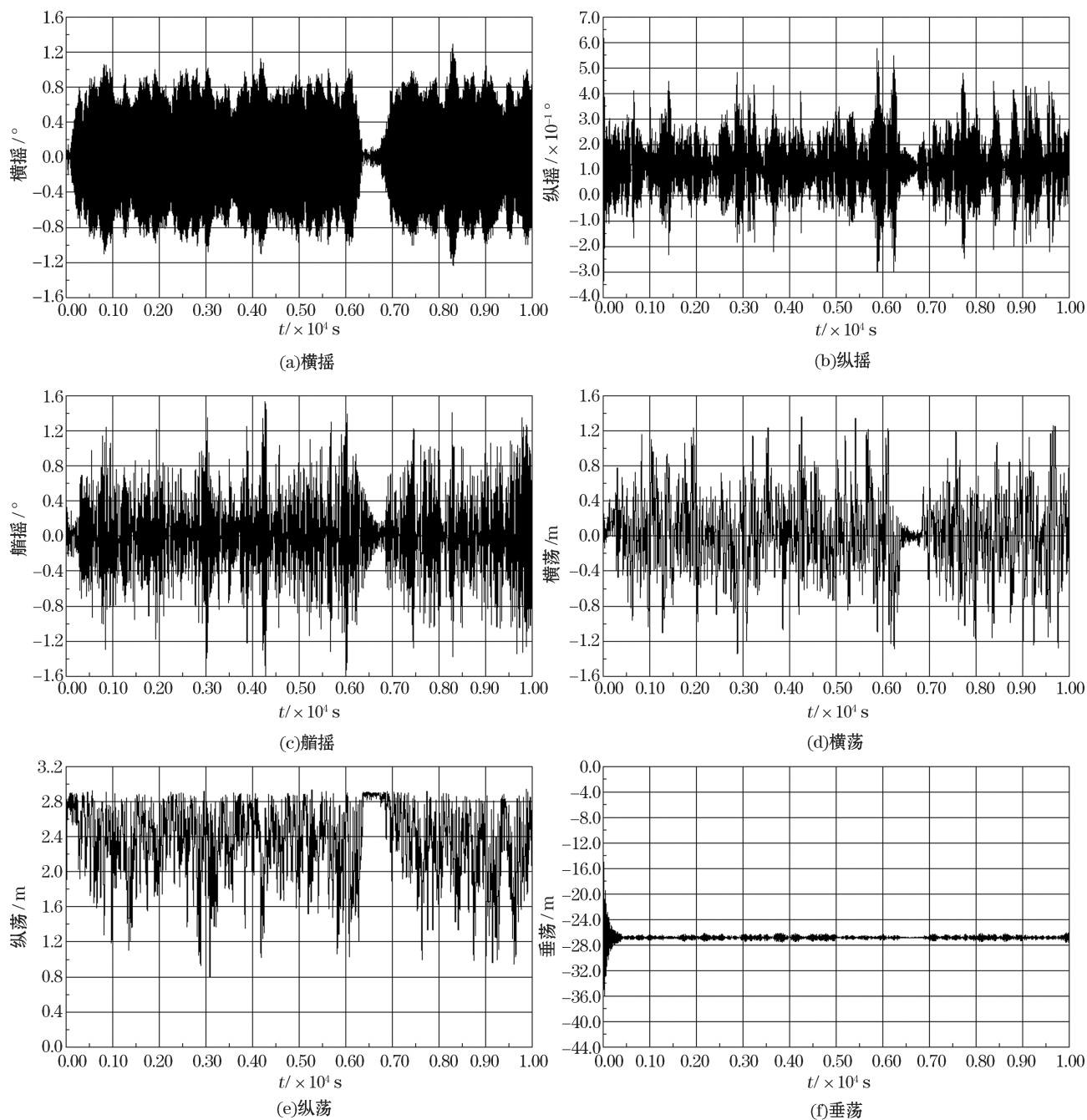


图5 横向载荷作用下 TLP 平台运动响应时程曲线

Fig.5 Time history curves of the TLP motion responses under transverse loads

计算结果表明:横向载荷作用下,平台纵荡和艏摇运动相应较大,大约是纵向载荷作用下 2~4 倍;从图中可以看出,纵向载荷作用下平台横荡的运动相应是横向载荷作用下的 1.4 倍左右;此外,纵向载荷工况下,平台的横摇、纵摇运动响应更为显著,即表示 TLP 平台的运动响应更容易受到纵向载荷的影响。

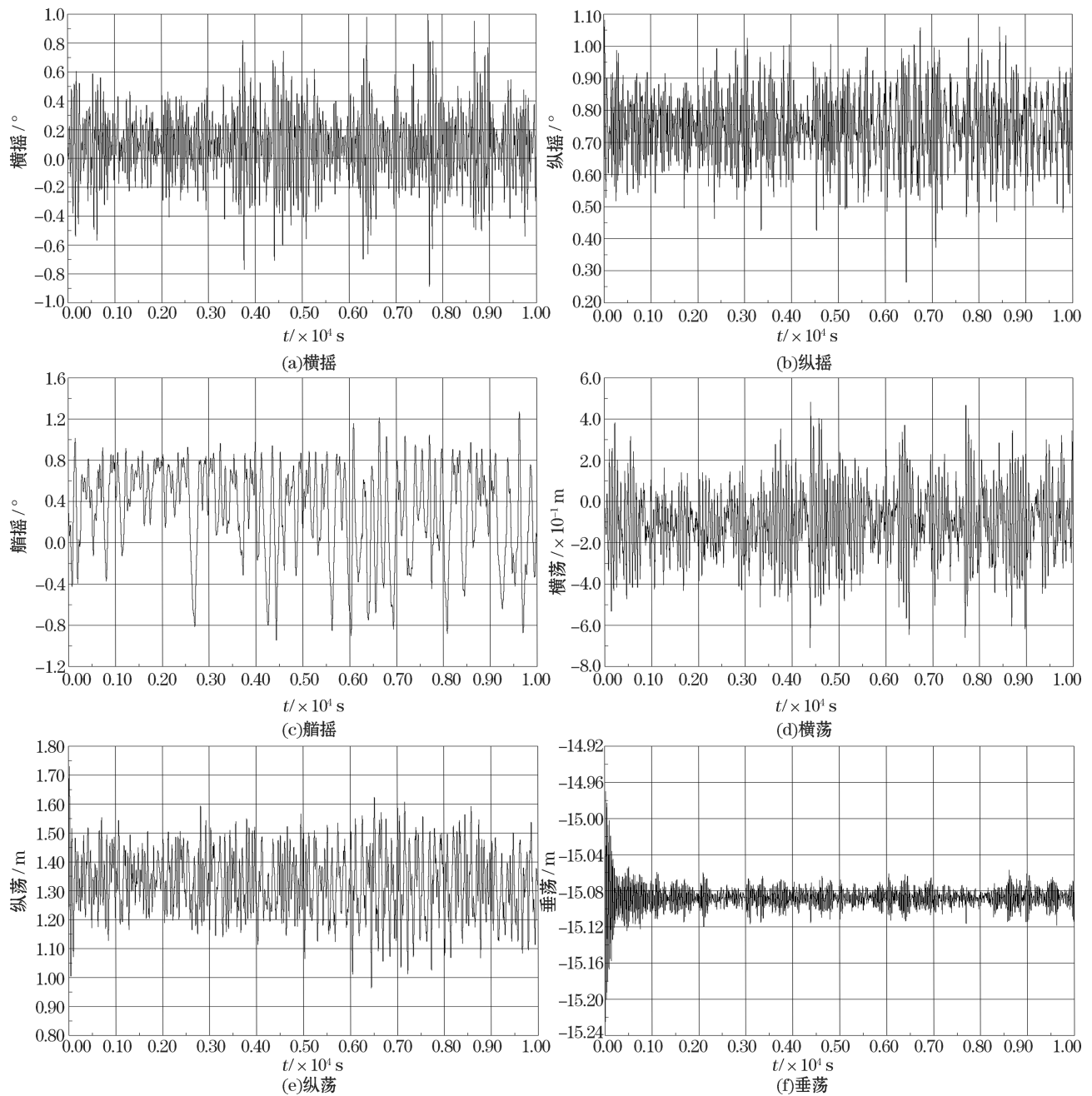


图 6 纵向载荷下平台运动响应时程曲线

Fig.6 Time history curves of the TLP motion responses under longitudinal loads

5 缆绳张力分析

TLP 平台码头系泊时,在横向载荷和纵向载荷下,缆绳张力计算结果详见表 4。该处码头水域为优良的避风港,环境条件良好,风力及波浪力较小,对平台的运动响应影响较小,因此尼龙绳的安全系数选取较小值进行计算分析。从计算结果可知在横向载荷工况下,缆绳张力远小于缆绳本身的破断拉力,且较理想地呈现

均布状态。在纵向载荷工况下, 缆绳 1~8, 25, 26, 31 和 32 号缆绳的张力皆大于 700 kN, 但是虑及各缆绳的安全系数: 钢丝绳取 1.23, 直径 70 mm 的 8 股尼龙缆取 1.87, 直径 80 mm 的 8 股尼龙缆取 1.22, 各根缆绳在此工况下并不会发生断裂的极端现象, 但是由于缆绳的最小安全系数小于 1.5, 因此缆绳还是面临较高的拉力风险。

表 4 离岸横向载荷下两种系泊方案的缆绳张力计算结果

Table 4 Mooring line tensions of the two TLP mooring schemes under offshore transverse loads

缆绳 编号	横向载荷作用下 缆绳张力/kN	纵向载荷作用下 缆绳张力/kN	缆绳 编号	横向载荷作用下 缆绳张力/kN	纵向载荷作用下 缆绳张力/kN
1	72	833	18	58	315
2	74	845	19	63	340
3	85	856	20	7	24
4	98	873	21	9	26
5	104	902	22	14	29
6	116	913	23	132	626
7	123	925	24	143	640
8	138	936	25	131	702
9	12	6	26	157	725
10	10	6	27	24	57
11	14	8	28	28	66
12	14	10	29	45	73
13	16	12	30	49	88
14	18	14	31	209	733
15	19	15	32	226	745
16	22	18	33	78	131
17	56	308	34	90	142

6 结 语

本文以 TLP 平台码头系泊系统为例, 建立多浮体混合带缆系泊系统, 进行系泊计算分析, 得出以下结论: TLP 平台的纵荡运动响应更易受到横向载荷的影响, 平台横荡运动响应更多受纵向载荷的影响; TLP 码头系泊时, 纵向载荷更易导致平台的横摇和纵摇; 相较于横向载荷工况, 在纵向载荷作用下, 平台的系泊缆绳经受更大的拉力, 缆绳面临更大的破断风险; 纵向载荷工况下, 平台缆绳的内部张力分布呈现出不规则分布状态。为确保平台的码头系泊时的运动响应和缆绳内部的张力能满足 TLP 平台的设计要求, 需要对纵向载荷工况下的系泊方案和缆绳安全校核开展更加细致的研究。

参考文献 (References):

- [1] LI Y F. Study of the present situation and exploration of the offshore oil and gas resources[J]. China Chemical Trade, 2005(35): 67-72. 李宇峰. 对世界海洋油气资源现状及勘探的研究[J]. 中国化工贸易, 2015(35): 67-72.
- [2] YANG X W, FAN H H. Analysis of TLP structure and its overall performance[J]. China Petroleum Machinery, 2008, 36(5): 70-72. 杨雄文, 樊洪海. TLP 平台结构型式及其总体性能分析[J]. 石油机械, 2008, 36(5): 70-72.
- [3] CHEN G, WU X Y. Analysis for the ability for deep-water semi-submersible drilling platform to resist typhoon at pier[J]. Naval Architecture and Ocean Engineering, 2012(2): 7-15. 陈刚, 吴晓源. 深水半潜式钻井平台码头抗台风系泊计算分析[J]. 船舶与海洋工程, 2012(2): 7-15.
- [4] SUO H Q. Numerical simulation of mooring ship in the front of wharf with wave wind and flow[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2014. 索华侨. 风浪流作用下码头前系泊船舶运动响应的数值模拟[D]. 广州: 华南理工大学, 2014.
- [5] YU L, WANG J. Dynamic analysis of the 3D mooring system on semisubmersible platform in deep water[J]. China Offshore Platform, 2007, 22(6): 34-37. 余龙, 王娟. 半潜式平台深水锚泊系统三维时域动力分析[J]. 中国海洋平台, 2007, 22(6): 34-37.
- [6] CHEN P, MA J, YANG Q S, et al. Coupled-dynamic response investigation of taut-wire mooring systems semi-submersible platform [J]. Journal of Dalian Maritime University, 2013, 39(1): 65-69. 陈鹏, 马骏, 杨青松, 等. 深水半潜平台张紧式系泊系统耦合动力响应研究[J]. 大连海事大学学报, 2013, 39(1): 65-69.

Study on Motion Response and Mooring Line Tension of the Mooring Tension Leg Platform (TLP) at the Wharf

LIU Hao¹, LI Chun-hui², ZHAO Nan², CHENG Lei²

(1. CNOOC Deepwater Development Ltd., Shenzhen 518064, China;

2. SHANGHAI WAIGAOQIAO Shipbuilding Co. Ltd., Shanghai 200137, China)

Abstract: The method of temporary multi-point mooring is needed for the Tension Leg Platform (TLP) to realize the mooring at the wharf during its outfitting. Besides, because the TLP has a high upright column and needs a mooring line arrangement different from the traditional platform, it is necessary to make a detailed study on the motion response and mooring line tension of the mooring TLP at the wharf in order to ensure that the TLP is able to resist a certain degree of adverse weather conditions during its outfitting at the wharf. In this paper, a model of TLP mooring at the wharf is established by using AQWA software and both the dock and the floating box cushions are simulated. Based on meteorological and hydrological conditions nearby Waigaoqiao of Shanghai, the motion response and mooring line tension of the TLP are calculated under the case of irregular wave action and the variations of both of them under onshore and offshore environmental loads are analyzed. This study has important reference significance for the design of TLP safe mooring at the wharf and provides important theoretical basis and technical guidance for the TLP construction and wharf outfitting in the domestic shipyards.

Key words: TLP; mooring at the wharf; motion response; mooring line tension

Received: November 7, 2017