

高性能 TLP 平台的优化设计与性能分析

陈博 喻志勇 李骁健 吕勇

兰州理工大学,兰州,730050

摘要: 根据现有 TLP 钻井平台的不足, 设计出性能更加优异的 TLP 平台, 为 TLP 平台的设计选型提供参考。借鉴第六代半潜式钻井平台结构设计方法, 结合垂荡板与 TLP 平台自身结构的优缺点进行分析设计; 采用水动力分析软件进行综合分析评价。在单位波高作用下, TLP 平台的垂荡响应受入射波的频率影响较大, 受浪向的影响较小, 而新平台有效的抑制了最大垂荡响应; 垂荡板结构使平台的垂荡固有周期减小; 新平台较原平台的垂向阻力增大约 1.769 倍; 新平台垂荡时间历程响应降幅值为 7.247m, 垂荡响应缩减比例达 60.74%。结果表明, 优化设计 TLP 平台思路方法合理, 新平台较原平台表现出了优秀的综合垂荡水动力性能, 具有一定的应用前景和价值。

关键词: TLP 平台; 优化设计; 性能分析; 垂荡结构; 水动力性能; 垂荡固有周期

中文分类号: TH122 文献标识码: A

Optimization design and performance analysis of high performance TLP platform

Chen Bo, YU Zhiyong, Li Xiaojian, Lv Yong

Lanzhou University of Technology, Lanzhou, 730050

Abstract: According to the deficiency of the existing TLP drilling platform, design TLP platform of excellent performance, to provide reference for the design and selection of TLP platform. To reference the structure design method of Sixth generation semi-submersible drilling platform, combination with heave Plate and TLP platform advantages and disadvantages to analysis and design; make a comprehensive analysis use the hydrodynamic analysis software. Obtain, under the action of the unit wave height, the heave response of TLP platform is greatly influenced by the frequency of the incident wave, less affected by wave direction, and the new platform can effectively restrain the maximum heave response; the natural period of the heave response of the platform is reduced by the heave plate structure; vertical resistance of a new type platform is about 1.769 times larger than the original platform; the time history response of the new platform is decline of 7.247m, the vertical response reduced by 60.74%. The results show that the optimization design of TLP platform is reasonable, compared with the original platform the new platform have excellent hydrodynamic performance, the new platform has the prospect and value of practical application.

Key words: TLP platform; optimization design; performance analysis; vertical structure; hydrodynamic performance; natural cycle of heave response

据统计已探明世界海洋石油资源储量约为 1-2 千亿吨, 我国南海已探明石油储量约为 300 亿吨。到 21 世纪中期海上石油资源将对我国经济的发展起来重要作用, 所以加紧海上石油成套设备的研发意义深远。现今张力腿平台(TLP)发展到了第二代^[1], 且发展缓慢^[2]。但 TLP 平台具有的特点是, 同半潜式钻井平台一样具有更小的水线面积^[3],

在 1500m 超深海域以内作业环境具有良好的抵御风浪的能力, 但当水深超过 1500m 锚链的重量继续增大严重影响到平台的性能^[4-5]。TLP 平台设计最主要的思想是使平台半顺应和半刚性^[6], 平台由浮体产生的浮力远大于平台的重力, 剩余浮力与锚链的预张力平衡来抵御风浪的作用^[7]。在较恶劣的海况下, 平台的升沉运动(垂荡)幅度较大, 使

平台张力腿等附属结构及海底固接结构被破坏的可能性大大增加^[8]。现今的钻井平台都按照 50 到 100 年一遇的极端海况设计，按照第二代 TLP 的结构特点，不能很好的满足条件要求，需设计出构型更加合理的平台，能较明显的提升平台的垂荡性能，进而降低平台的垂荡响应，对 TLP 平台的发展和油气开采有着积极意义。

文章根据现今半潜式钻井平台的优缺点，并结合 TLP 平台自身结构特点，设计了优化后的新 TLP 钻井平台。首先，在单位波高海况下对平台的垂荡水动力性能进行对比分析，然后在时域耦合条件下对平台综合垂荡性能进行综合对比分析。

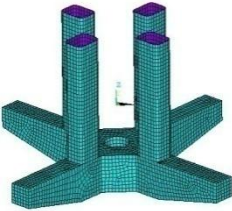
1 平台优化设计

TLP 钻井平台在海洋环境中受到波浪激励的作用，其在空间内存在六个自由度。六自由度中往复、过大的横荡、纵荡会产生疲劳破坏；由于 TLP 平台结构特点，横摇、纵摇、艏摇对平台的影响较小；垂荡是钻井平台最重要的性能参数之一，过大的垂荡不仅会引起平台较大的深沉运动而影响正常作业，还会引起其它耦合运动的增大，严重影响到平台的正常作业安全，所以抑制 TLP 平台垂荡运动具有重要的意义^[9-10]。现今半潜式钻井平台多采用垂荡板结构来增加垂荡辐射阻尼，从而抑制垂荡响应；且应用较为成熟，但采用垂荡板结构会使平台的垂荡固有周期变化，增大了垂荡共振的发生^[11]。在较恶劣的海况下垂荡板结构的作用较小，鉴于此文章总结和垂荡板结构的优点，设计出了新的 TLP 钻井平台结构，如图 1 所示。既实现了垂向辐射阻力的增大，同时让平台在向上运动时带动更多质量的海水，等于增加了平台整体质量，实现在相同激励条件下减小平台加速度的目的。限于篇幅，文章主要对平台的垂荡性能进行分析评价，且水动力分析理论基础不做介绍。

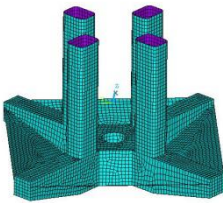
波浪载荷作用下平台的运动方程：

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + D_1 f(x') + K(x)x = F \quad (1)$$
 式中： M 为质量矩阵； C 为阻尼矩阵； D_1 为线性阻尼； f 为速度矢量函数； K 为刚度矩阵； x 为位移矩阵； F 为外力。

基于上述分析的新平台和原平台采用相同的结构参数，时域耦合分析平台都为 12 根锚链布置，同时波浪谱为统一的 JONSWAP 及完全相同其它环境参数。平台结构主尺度如表 1。



(a) 原模型



(b) 优化模型

图 1 设计与分析模型

Fig.1 Design and analysis model

表 1 平台结构主尺度

Tab.1 Main dimension of platform structure

名称	参数	尺度/m
浮体	长	38.00
浮体	宽	8.00
浮体	高	7.00
立柱	长	16.00
立柱	宽	7.00
立柱	高	48.00
立柱	间距	30.00
立柱倒角	半径	1.00
平台	吃水	30.00

2 垂荡水动力分析

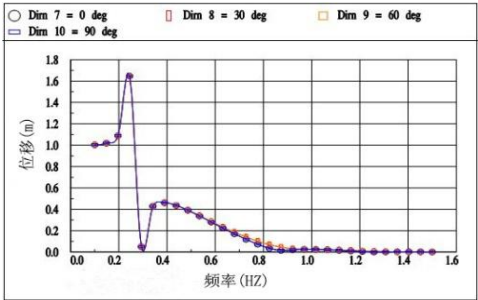
由牛顿运动定律推出平台在规则波中的运动控制方程：

$$\sum_{j=1}^6 m_{ij} \eta_{ij}'' + \sum_{j=1}^6 C_{ij} \eta_{ij}' + \sum_{j=1}^6 k_{ij} \eta_{ij} = \sum_{j=1}^6 F_{ij} + F_m \quad (i=1,2,3,4,5,6) \quad (2)$$

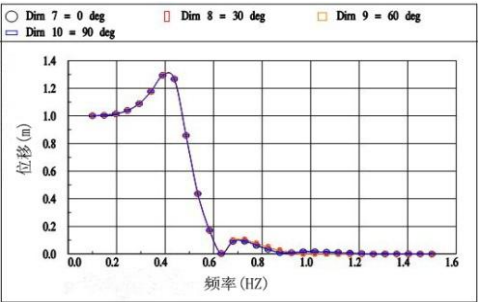
式中： η_{ij} 、 η_{ij}' 、 η_{ij}'' 分别表示平台自由度方向上的位移、速度、加速度； m_{ij} 为平台质

量和附加质量； C_{ij} 为作用于平台上的势能阻尼和粘性阻尼； K_{ij} 为平台刚度； F_{ij} 为作用于平台的粘滞阻尼和线性波浪力和其他形式的力； F_m 为平台及其附属设备的自重。

附加说明，在以下的所有视图中记 1、2 分别表示原平台、新平台对应参数曲线。不同浪向角下 TLP 平台垂荡水动力性能分析如图 2 与表 2，垂荡固有周期如表 3，阻尼、附加质量如图 3 及对应数值统计如图 4。



(a) 原平台



(b) 新平台

图 2 不同浪向角下 TLP 平台垂荡水动力性能曲线

Fig.2 Hydrodynamic performance curve of TLP platform under different wave direction

由图 2 可知，原平台和新平台的垂荡响应受波浪的频率影响较大，而波浪频率对新平台的垂荡响应影响较不敏感。

表 2 不同浪向角下平台在单位波高作用下的垂荡响应数值

Tab.2 The platform in the unit height under heave response under different wave direction

名称	Max(m)	Mean(m)
----	--------	---------

浪向角 0 度(原平台)	1.646	0.2644
浪向角 30 度(原平台)	1.645	0.2702
浪向角 60 度(原平台)	1.649	0.2701
浪向角 90 度(原平台)	1.646	0.2644
浪向角 0 度(新平台)	1.294	0.3576
浪向角 30 度(新平台)	1.293	0.3577
浪向角 60 度(新平台)	1.294	0.3578
浪向角 90 度(新平台)	1.295	0.3577

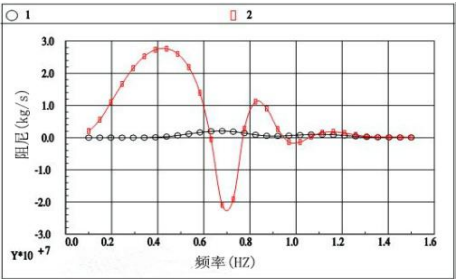
分析表 2 可得，浪向角从 0 度变化到 90 度，原平台和新平台在单位波高作用下的垂荡响应最大值、均值变化都较小，根据 TLP 平台结构特点 0 到 90 度的浪向角能反应出平台在 0 到 360 度浪向角下的垂荡响应情况，可知 TLP 平台的垂荡响应几乎不受浪向角的影响；4 个浪向角下，原平台垂荡响应最大值的均值约为 1.647m，新平台的垂荡响应最大值均值约为 1.294m，较原平台减小了 0.3530m，减小比约为 21.13%，说明优化的理论思路正确可行。

表 3 平台垂荡响应固有周期

Tab.3 Natural period of heave response

名称	原平台	新平台
固有垂荡周期(s)	26.1	15.0

分析表 3 可得，原平台的垂荡固有周期约为 26.1s，新平台的垂荡固有周期约为 15.0s。TLP 平台的垂荡响应的最大值与入射波浪频率、平台垂荡响应固有周期有关，当入射波的频率靠近平台的垂荡固有频率时易引起共振的发生。因为平台采用平行或是斜型垂荡板结构易使平台的垂荡固有周期变化，海浪能量峰值频率约为 10s，使新平台更易引起共振的发生，垂荡结构使垂荡固有周期减小，提出可在新平台上增加悬浮水箱，来增加平台的整体质量而减小平台的固有频率，进而有效的提高平台的垂荡固有周期，减小垂荡共振的发生，进而提升平台的性能。



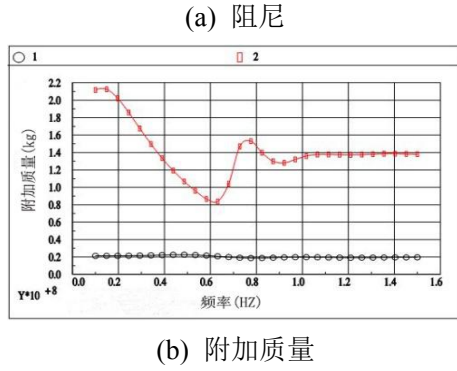


图 3 垂荡阻尼与附加质量

Fig.3 Damping and additional mass

表 4 平台垂荡阻尼与附加质量统计

Tab.4 The statistics of platform heave damping and additional mass

名称	Max	Mean
原平台阻 (kg/s)	2.060×10^6	6.480×10^5
新平台阻 (kg/s)	2.766×10^7	6.286×10^6
原平台附加质量(kg)	2.254×10^7	2.032×10^7
新平台附加质量(kg)	2.126×10^8	1.402×10^8

分析表 4 可得，新优化的平台由于采用了斜型的垂荡板结构，阻尼的最大值、均值显著提高，阻尼的正负与方向有关，附加质量的正负与所选取的边界条件有关。阻尼最大值，约增加了 13.43 倍；阻尼均值，约增加了 9.701 倍，有效降低了瞬时垂向速度增大的情况。附加质量是平台对水作用力的反作用力的一种表现，在平台整体结构满足强度的前提下，较大的附加质量能提升平台的整体性能；分析原平台和新平台可知，新平台的附加质量最大值、均值分别是原平台的 9.432 倍、6.900 倍，从附加质量角度很好的反应了新平台抵御海浪载荷的作用。由垂向阻尼、附加质量能很好的表明新平台具有优良的垂荡水动力性能。

3 时域耦合分析

平台浮体的时域耦合运动控制方程：

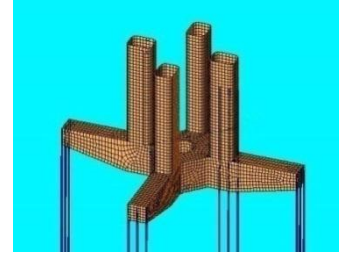
$$(M_{kj} + m_{kj})\ddot{\xi}_j(t) + \int_0^t \xi_j(\tau) K_{kj}(t-\tau) d\tau + B_{kj}\dot{\xi}_j(t) + C_{kj}\xi_j(t) = F_j(t) + G_j(t) \quad (j=1,2,3,4,5,6) \quad (3)$$

$$F_j(t) = F_{wind} + F_i^{(1)} + F_i^{(2)} + F_{exc} \quad (4)$$

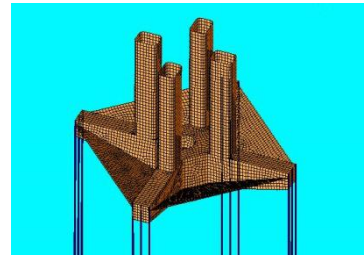
式中： M_{kj} 为广义质量； C_{kj} 为恢复力系数； B_k 为系泊阻尼； $G_j(t)$ 为锚链引起的非线性

力； $F_j(t)$ 为激振力； F_{wind} 为风拖拽力； $F_i^{(1)}$ 为一阶波浪力； $F_i^{(2)}$ 为二阶波浪力； F_{exc} 为其他外力。

时域耦合分析主要分析了平台的垂向阻力如图 5 与表 5，垂向加速度如图 6 与表 6，时间历程垂荡响应如图 7 与表 7 及图 8，时域耦合分析模型如图 4。



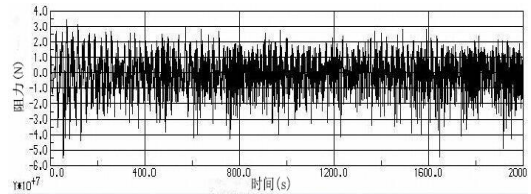
(a) 原平台



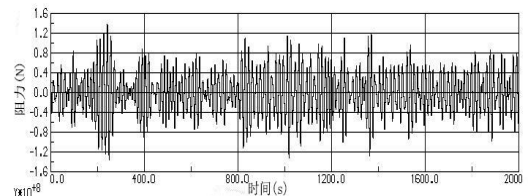
(b) 新平台

图 4 时域耦合分析模型

Fig.4 Time domain coupled analysis model



(a) 原平垂向阻力



(b) 新平台垂向阻力

图 5 时域耦合平台垂向阻力

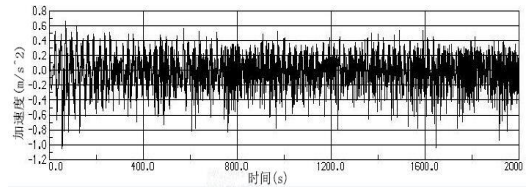
Fig.5 Vertical resistance of time domain coupled platform

表 5 时域耦合垂向阻力数值统计

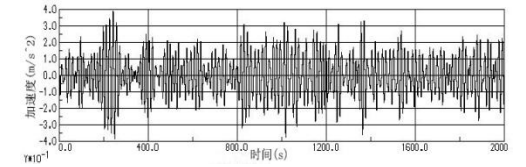
Tab.5 Vertical resistance numerical statistics

of time domain coupled			
名称	Min (/ 10^5 N)	Max (/ 10^5 N)	Mean (/ 10^5 N)
原平台	-436.9	343.0	0.4848
新平台	-1357	1377	0.8573

在时域耦合条件下的时间历程垂向阻力，能很好的反应现实海洋环境中平台垂向受到的阻力大小。由表 5 可知，新平台的垂向阻力最小值较原平台提升 3.106 倍，最大值提升 4.015 倍，整段 2000s 时间段内平均增大 1.769 倍。阻力的增大，能有效减小瞬时由于波浪引起的垂向激力的增大。



(a) 原平台垂向加速度



(b) 新平台垂向加速度

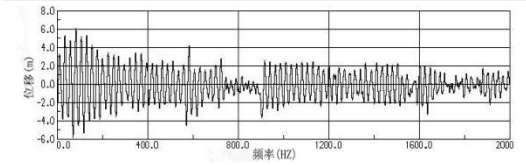
图 6 时域耦合垂向加速度

Fig.6 Vertical acceleration of Time domain coupled

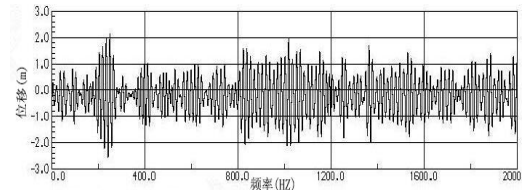
表 6 时域耦合垂向加速度数值

Tab.6 Vertical acceleration value of time domain coupled

名称	Min (m/s^2)	Max (m/s^2)
原平台垂向加速度	-1.056	0.6633
新平台垂向加速度	-0.3853	0.3910



(a) 原平台垂荡响应



(b) 新平台垂荡响应

图 7 时域耦合下时间历程垂荡响应

Fig.7 Time history heave response of time

domain coupled
表 7 时域耦合下时间历程垂荡响应数值
Tab.7 Numerical value of time history heave response of time domain coupled

名称	Min (m)	Max (m)	Mean (m)
原平台垂荡响应	-5.852	6.079	-0.1015
新平台垂荡响应	-2.557	2.127	-0.1977

分析图 6 与表 6 可知，新平台的垂向加速度最小值由 1.056 m/s^2 减小到了 0.3853 m/s^2 ，加速度减小了 0.6707 m/s^2 减小比例为 63.51%；最大值由 0.6633 m/s^2 减小到了 0.3910 m/s^2 ，减小幅度为 0.2723 m/s^2 减小比为 41.05%。TLP 平台的垂向加速度是时刻变化的，但在每一小段时间内，较小的加速度值可使该段时间历程内的垂向位移更小。由表 7 与图 7 可知，原平台的最小垂荡位移为 5.852m，而新平台的垂荡位移最小值为 2.557m，实现最小值降幅 3.295m，最大值降幅为 3.952m；整段降幅值为 7.247m，垂荡响应缩减比例 60.74%，实现了优异的耦合垂荡性能。

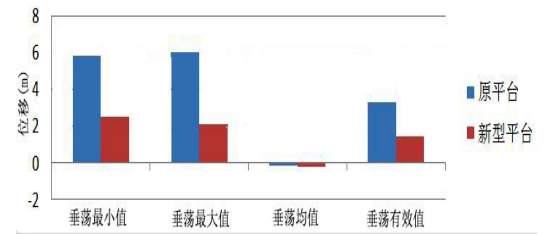


图 8 垂荡响应对比图

Fig.8 Heave response contrast diagram

4 结论

(1)由垂荡水动力分析得出，在单位波高作用下，TLP 平台的垂荡响应受入射波的频率影响较大，受浪向的影响较小，且新平台有效的抑制了最大垂荡响应，降低了由于过大垂荡而引起安全事故的发生，新平台实现了垂向阻尼和附加质量几何倍数的增大。

(2)TLP 平台的垂荡板结构会改变平台的垂荡固有周期，为了避免共振的发生，可以在平台浮体处增加水箱结构来增大平台整体的质量，来降低平台的垂荡固有频率进而增大垂荡固有周期，远离波浪能量密集范围带，大大降低发生共振的风险。

(3)时域耦合分析能模拟真实海况下

TLP 平台的性能,较原平台新平台的垂向阻力增大约 1.769 倍,降低了波激合力,使垂向加速度减小,与设计思路的结果吻合,表明方法思路正确。

(4)从时域耦合下,新平台垂荡时间历程响应降幅值为 7.247m,垂荡响应缩减比例达 60.74%说明优化的模型设计合理。

(5)结合单位波高下平台的水动力分析,结合时域耦合分析,得出优化设计的 TLP 思路方法合理,较原平台表现出了优秀的综合垂荡水动力性能,新结构的 TLP 具有实际应用的前景和价值,且可为 TLP 平台的初期设计选型提供参考。

参考文献:

- [1] JAKSIC V, O'SHEA R, CAHILL P. Dynamic response signatures of a scaled model platform for floating wind turbines in an ocean wave basin[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2015, 373(2035): 20140078.
- [2] 岳吉祥, 綦耀光, 肖文生,等. 深水半潜式钻井平台钻机选型[J]. 石油勘探与开发, 2009, 36(6):776-783.
Yue Ji Xiang, Qi Yao Guang, Xiao Wen Sheng, et al. Type selection of deepwater semi-submersible drilling rig [J]. petroleum exploration and development, 2009, 36 (6): 776-783.
- [3] 童波. 半潜式平台系泊系统型式及其动力特性研究[D]. 上海交通大学, 2009.
Tong Bo. Study on the type and dynamic characteristics of mooring system of semi submersible platform [D]. Shanghai Jiao Tong University, 2009.
- [4] REZA A, SEDIGHI H M. Nonlinear vertical vibration of tension leg platforms with homotopy analysis method[J]. Advances in Applied Mathematics and Mechanics, 2015, 7(03): 357-368.
- [5] 杨冠声. 张力腿平台非线性波浪载荷和运动响应研究[D]. 天津大学, 2003.
Yang Guan Sheng. Study on nonlinear wave loads and motion response of tension leg platform [D]. Tianjin University, 2003.
- [6] 吴家鸣. 不同类型张力腿平台的主要结构特征与技术特点[J]. 海洋科学, 2014, 38(4):101-108.
Wu Jia Ming. The main structural features and technical characteristics of different types of tension leg platform [J]. Marine Sciences, 2014, 38 (4): 101-108.
- [7] 谷家扬, 杨建民. 平台运动影响下张力腿涡激振动特性研究[J]. 船舶力学, 2015(6):677-689.
Gu Jia Yang, Yang Jian min. Study on vortex induced vibration characteristics of the tension leg under the influence of platform motion [J]. ship mechanics, 2015 (6): 677-689.
- [8] ZHOU B Z, WU G X. Resonance of a tension leg platform excited by third-harmonic force in nonlinear regular waves[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2015, 373(2033): 20140105.
- [9] 曾晓辉, 沈晓鹏, 徐本和,等. 张力腿平台的水动力及结构力学问题[C]// 度海洋工程学术会议. 2003:429-433.
Ceng Xiao Hui, Shen Xiao Peng, Xu Ben He, et al. The water power and structural mechanics of the tension leg platform [C]// degree ocean engineering academic conference. 2003:429-433.
- [10] 何景异. 深海平台内波运动响应研究[D]. 上海交通大学, 2008.
He Jing Yi. Study on. wave motion response of deep-sea platform [D].Shanghai Jiao Tong University, 2008.
- [11] MILLS T R J, CHEN C Y. Deep draft semi-submersible offshore floating structure: US, US20070224000[P]. 2007.

作者简介: 陈博, 女, 1965 年生。兰州理工大学机电工程学院研究生导师、高级工程师。主要研究方向为石油机械。喻志勇, 男, 1990 年生。兰州理工大学机电工程学院硕士研究生。李骁健, 女, 1990 年生。兰州理工大学机电工程学院硕士研究生。吕勇, 男, 1991 年生。兰州理工大学机电工程学院硕士研究生。

基金项目: 兰州理工大学高水平科研项目培育基金