

基于系统仿真的常见构型半潜式钻井平台频域分析

陈博, 喻志勇, 吕勇, 李骁健

(兰州理工大学机电工程学院, 兰州 730050)

摘要: 通过频域分析, 对比 4 种常见构型的半潜钻井平台, 在一阶波激作用下的水动力性能, 为平台的选型提供系统全面的指导。使用 Ansys 建立平台的 1:1 湿表面模型, 基于水动力分析软件 Aqwa(Advanced quantitative wave Analysis) 进行数值模拟。表明纵浪对平台的纵、垂荡、纵摇影响较大, 横浪对平台的横、垂荡、横摇影响较大; 随着立柱数的增加垂荡响应增加明显; 立柱数增加, 纵荡、横荡、垂荡方向上的阻尼系数及附加质量和有所增加。得出了不能只考虑增加立柱数来提高平台的强度、刚度, 还应从其水动力性能方面综合分析, 型 2 平台不论是在拖航还是在作业工况下都有较好的水动力性能, 在设计时可以借鉴。

关键词: AQWA; 半潜式钻井平台; 频域分析; 水动力性能; 阻尼系数; 附加质量

中文分类号: TE5

文献标识码: A

Frequency Domain Analysis of Common Configuration Semi-submersible Drilling Platform Based on System Simulation

Chen Bo, Yu Zhiyong, Lv Yong, Li Xiaojian

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: Through frequency domain analysis, the hydrodynamic performance of 4 configurations of the semi-submersible drilling platform in comparison with that of the first order wave excitation, to provide a comprehensive system selection guidance. Numerical simulation is carried out based on the dynamic analysis software AQWA with in ANSYS establishing the 1:1 3D wet surface model. Simulation results show that longitudinal waves to surge, heaving and pitching motion impact a lot, beam seas on the platform of the sway, heave, roll motion affect so much larger; platform with the column number of the increased vertical heave response increased significantly; surge, sway, heave damping coefficient of vector direction and the added mass coefficient of algebraic increase. That can not only consider the increased number of columns to improve platform strength and stiffness, but also can take from hydrodynamic performance of comprehensive analysis in working conditions. At last, the type 2 of platform has better hydrodynamic performance, which is a reference designing.

Keywords: AQWA; Semi-submersible drilling platform; frequency domain analysis; hydrodynamic properties; damping coefficient; additional quality

引言

近半个世纪以来随着陆地上油气资源被大量开采, 陆地油气大量减少已经不能满足国民经济发展的需要。中国作为全球石油消费第二大国,

据统计 2020 年我国的原油对外依存度将超过 68.38%^[1]。我国南海是四大海上储存区, 钻井平台是海上油气开采的重要设备, 因此高性能的钻进

平台对我国油气乃至经济的发展具有战略意义。半潜式钻井平台以其诸多的优点成为现今最具发展潜力的平台之一，但是现有的半潜式钻井平台构型种类较多，选出水动力性能更加优异构型的半潜式钻井平台，对海上石油的开采效率及设备人员安全具有重要意义。目前，较全面系统的仿真分析已有构型半潜式钻井平台的论文较小，不能很好的为设计研发人员提供系统的全面的数据选型指导。同时不同构型的平台具有的水动力特性差别较大，仅凭经验、理论不能准确的判别不同平台之间的差异，所以文章采用综合系统的建模和数据计算进行评价为选型提供较准确的指导。

钻井平台运动响应预报主要有两种方法频域分析法和时域分析法^[2]。频域分析是对一阶波浪作用下的预报其精度较高，适合于在平台的设计初期提供理论的指导和参考；时域分析主要对平台进行非线性海况下与系泊系统的耦合作用的分析。文章限于篇幅，仅对常见构型的半潜式钻井平台进行频域对比、分析。综合现今常见构型的半潜式钻井平台，在平台浮体、立柱、横撑、吃水及一阶波激作用相同的条件下，通过数值计算对比、分析其六自由度上运动响应及平台的附加质量系数、阻尼系数，为平台的设计选型提供指导和参考。

1 理论基础

1.1 线性化

平台即使在一阶波浪力作用下自由液面的流场也是非线性的，因此在频域分析中直接求解平台的运动响应非常的困难，为了简化求解问题的难度，将风浪流载荷对平台引起运动响应线性化处理。一阶波激力的幅值与入射波的波幅成正比，平台的运动响应与入射波幅成正比。平台在一阶波激励作用下六自由度上的运动响应幅值算子为单位波高作用下平台的运动响应^[3]。

1.2 莫里森 (Morison) 理论

波浪对 $D/L < 0.2$ 小尺寸结构物的作用主要为粘滞效应和附加质量效应这是莫里森方程的基本假设，对于小尺寸结构物普遍适用，小尺寸结构物主要采用莫里森计算，如平台上的横撑。莫里森方程是以绕流理论为基础的半经验半理论公式，波浪的绕流力主要为绕流拖拽力和绕流惯性力是为主^[4]。在波浪载荷中 Morison 计算公式为：

$$F = k^2 (M - d \nabla C_a) \ddot{x} - k^2 d (C_a + I) \dot{x} + ikB(x - a) + f_c + f_b + f_g$$

式中， d 为海水密度； k 为入射波频率； B 为线性的粘滞阻尼矩阵； ∇ 为 Morison 单元的排水体积； C_a 为 3×3 的附加质量系数对角矩阵； f_c 为波动静水回复力； f_b 为波动浮力； f_g 为波动重力； a 为运动值幅； x 为入射波场的值幅； I 为 3×3 的单位矩阵； D 结构物横截面尺寸； L 波浪的波长。

1.3 三维势流理论

对于 $D/L > 0.2$ 大尺寸结构物，Morison 公式不在适用，此时浪场对海洋结构物作用影响明显^[5]，以绕射和辐射及衍射作用为主，此时主要基于三维势流理论。三维势流理论是研究海上平台在波浪作用下的理论基础，为了研究方便该理论假定海水为理想的流体即不可压缩，并且无旋转，均匀且无粘性的流体^[6]；自由表面波浪运动结构物的运动是微幅的，将流场中总的速度势分解为入射势、绕射势、辐射势^[7]。

2 频域数值模拟

2.1 系统的建模

系统仿真中，将分析的 4 中构型钻井平台看成一个整体，采用 SNSYS 分别自底而上的方法建模，对频域分析主要以三维势流理论为基础分析大结构物，小结构物以莫里森理论为辅。4 种构型平台的浮体、立柱、横撑都采用相同的尺寸及吃水深度。平台浮体和立柱采用 shell63 单元，横撑采用 pipe59 单元^[8]。基于 AQWA 软件对平台进行了一阶波浪力作用的频域分析，获得了平台的运

动响应幅值算子 RAO、附加质量系数曲线和阻尼系数曲线。水动力计算模型主尺度及平台质量见表 1。严格的控制参数使结果更具参考价值。

表 1 平台结构主尺度及质量			
名称	参数	尺度/m	质量/kg
浮体	长	101.23	
浮体	宽	18.60	
浮体	高	10.72	
立柱	长	18.51	
立柱	宽	18.51	
立柱	直径	2.15	
横撑	长	60.31	
平台	吃水	20.00	
型 1 平台	质量		5.156×10^7
型 2 平台	质量		5.879×10^7
型 3 平台	质量		6.455×10^7
型 4 平台	质量		7.454×10^7

2.2 平台三维湿表面模型

图 1 为论文所研究的 4 种常见构型半潜式钻井平台的三维湿表面模型，型 1 平台为 4 立柱平台，型 2 平台为 6 立柱平台，型 3 平台为 8 立柱平台，型 4 平台为四角立柱且四浮体的构型、尺寸相同。

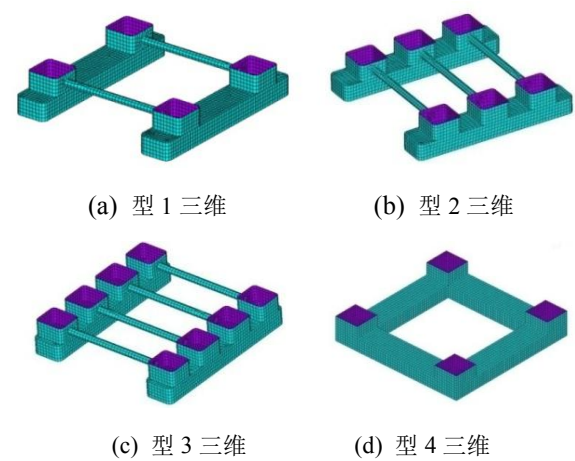


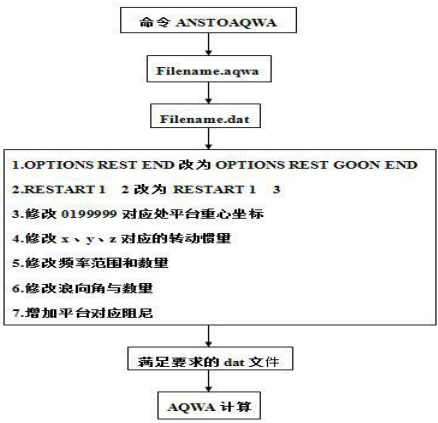
图 1 4 种常见构型半潜式钻井平台的三维湿表面模型

2.3 数值模拟流程

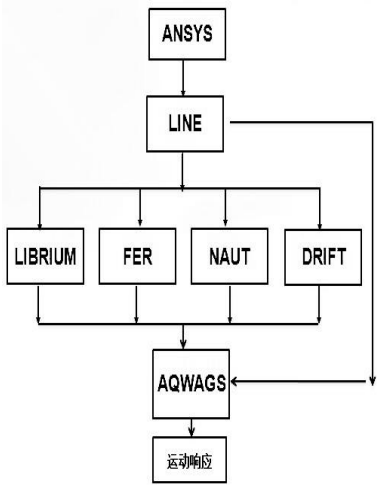
1) 在 ANSYS 中分别建立 4 种常见构型半潜式钻井平台的三维湿表面模型，模型的比例为 1:1，网格大小为 2m。

2) ANSYS 生成的数据进行编辑，将数据导入利用 AQWA 进行求解，步骤具体说明如下图(a)。

3) 后处理模块 AQWAGS 中得到平台的运动响应传递函数 RAO，平台阻尼系数曲线和附加质量系数曲线，该模块的工作原理如下图(b)。



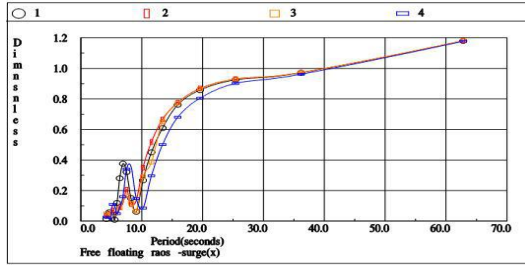
(a)



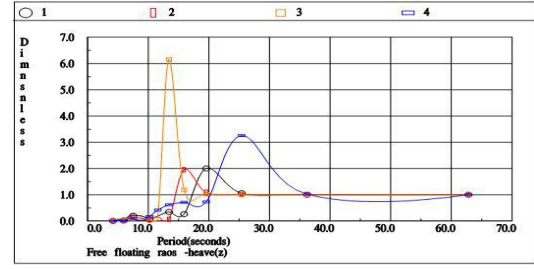
(b)

2.4 平台运动响应传递函数对比曲线

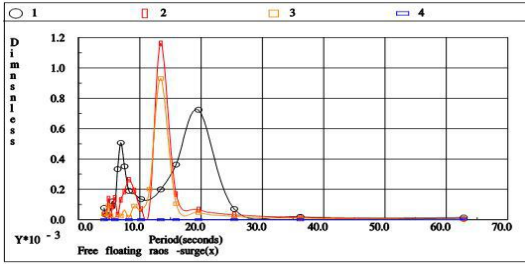
所有视图中 1、2、3、4 分别代表型 1、型 2、型 3、型 4 平台对应的数值。图 2 为浪向角为 0°和 90°时所研究四种构型半潜式平台的运动响应幅值算子，每幅图对应 4 条曲线对应 4 种构型的平台，且给出了平台六自由度方向上的运动响应传递函数对比曲线。



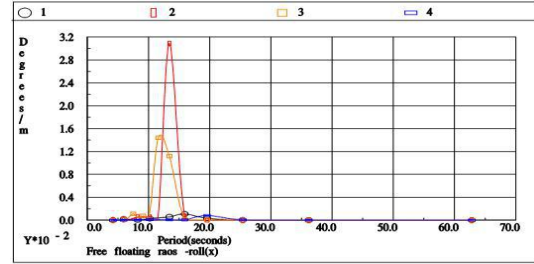
(a) 浪向角为 0°时纵荡



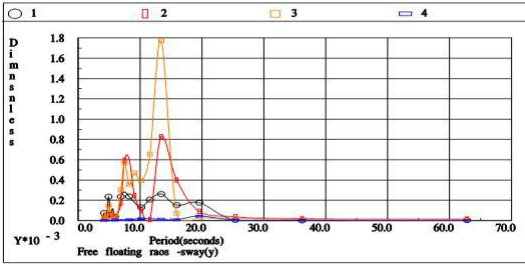
(f) 浪向角为 90°时垂荡



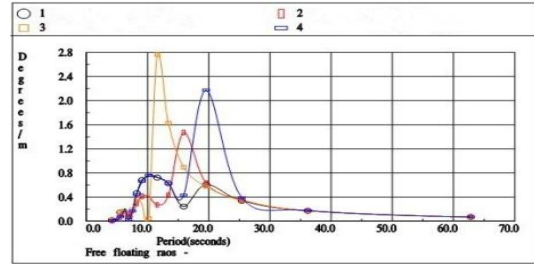
(b) 浪向角为 90°时纵荡



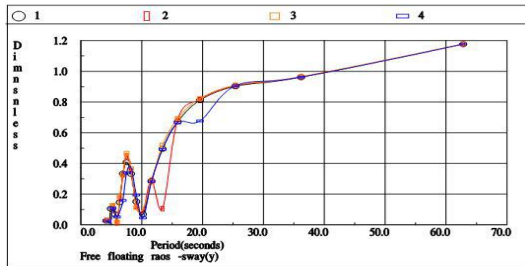
(g) 浪向角为 0°时横摇



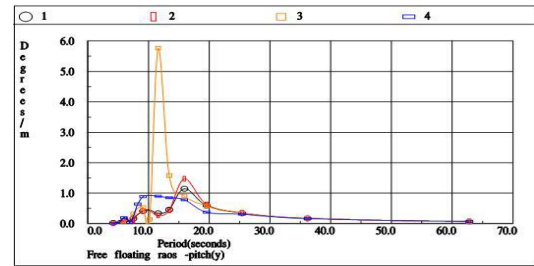
(c) 浪向角为 0°时横荡



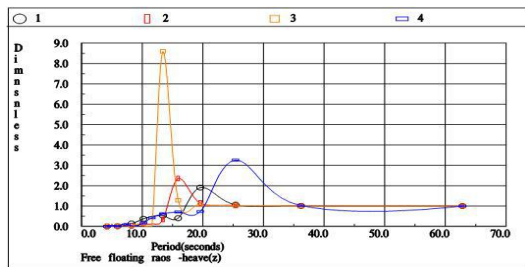
(h) 浪向角为 90°时横摇



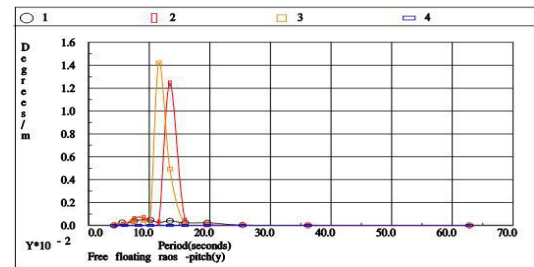
(d) 浪向角为 90°时横荡



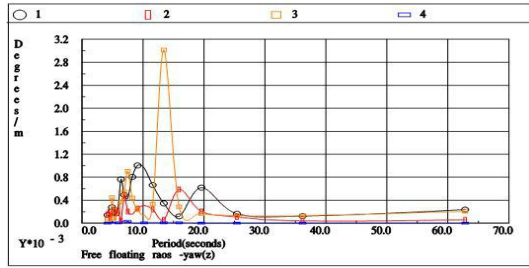
(i) 浪向角为 0°时纵摇



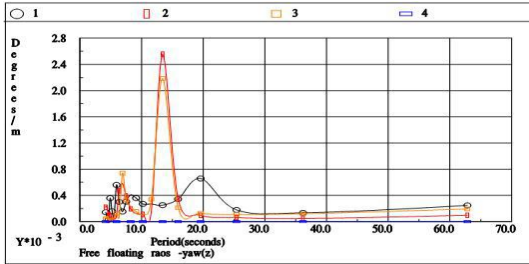
(e) 浪向角为 0°时垂荡



(j) 浪向角为 90°时纵摇运动响



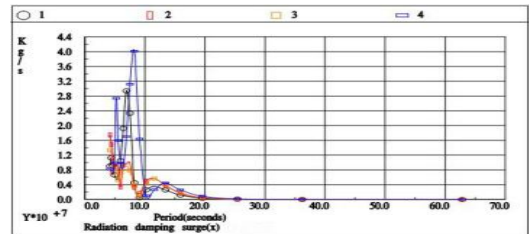
(k) 浪向角为 0°时的首摇



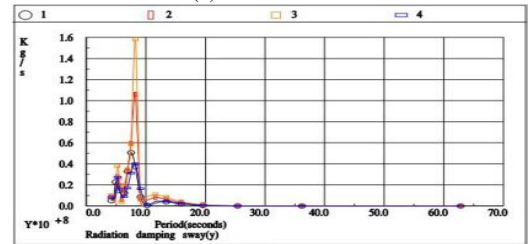
(l) 浪向角为 90°时的首摇

图 2 浪向角为 0°和 90°时平台的运动响应幅值算子

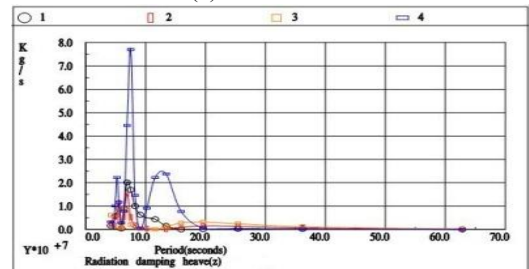
图 3 为 4 种构型的平台阻尼系数对比曲线，限于篇幅文中仅给出了沿纵荡、横荡、垂荡方向的阻尼系数曲线，每幅图有 4 条曲线对应 4 种构型的平台，平台的阻尼系数反应了平台的水动力性能，为评价平台的性能提供参考。



(a) 沿纵荡方向



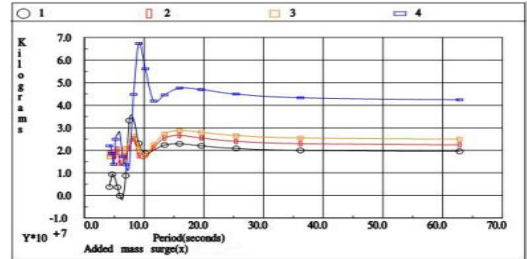
(b) 沿横荡方向



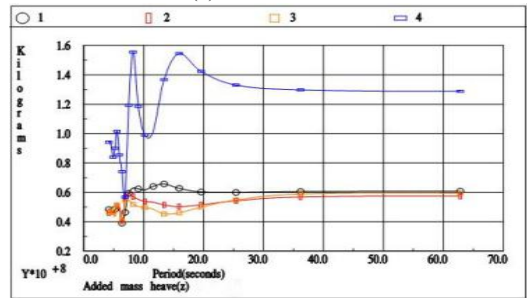
(c) 沿垂荡方向阻尼

图 3 平台阻尼系数对比曲线

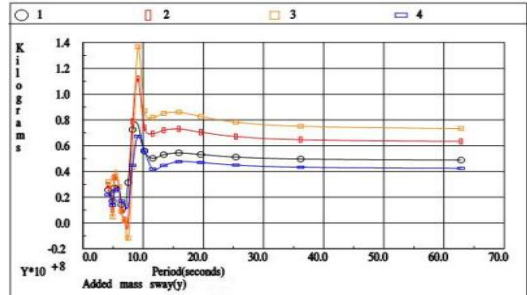
图 4 为 4 种构型平台附加质量系数对比曲线，限于篇幅文中仅给出了沿纵荡、横荡、垂荡方向的附加质量系数曲线，每幅图有 4 条曲线对应 4 种构型的平台。



(a) 沿横荡方向



(b) 沿纵荡方向



(c) 沿垂荡方向

图 4 平台附加质量系数对比曲线

3 数值计算结果对比分析

利用 AQWA 数值计算了 4 中常见构型半潜式钻井平台，在一阶波浪作用下的频域特性。得出了浪向角为 0°、90°时单位波高作用下，沿六个自由度上平台的运动响应的极值；阻尼系数及附加质量系数数值计算极值。

分析表 2 可得，当浪向角为 0°时，平台的构型对纵荡响应影响较小，但对垂荡、纵摇响应影响较大；当浪向角为 0°时，横荡、横摇、首摇几乎不受其影响，数值略有偏差主要原因是，平台受到波浪

的辐射、衍射的作用。

分析表 3 可知,当浪向角为 90°时,4 种构型的平台横荡响应极值趋于同一值,平台的构型对横荡响应影响较小;垂荡和横摇极值差异明显,说明当浪向角为 90°时平台的构型对垂荡及横摇影响较大;纵荡、纵摇、首摇极值较小,说明浪向角为 90°时几乎对纵荡、纵摇、首摇响应没有影响。

表 2 浪向角为 0°时单位波高作用下平台的运动响应计算结果

名称	极值/m					
	纵荡	横荡	垂荡	纵摇	横摇	首摇
型 1 平台	1.18	0.0026	1.19	1.21	0.0031	0.0101
型 2 平台	1.18	0.0082	2.90	1.49	0.0312	0.0059
型 3 平台	1.18	0.0179	8.52	5.80	0.0141	0.0302
型 4 平台	1.18	0.0052	3.31	0.98	0.0009	0.0000

表 3 浪向角为 90°时单位波高作用下平台的运动响应计算结果

名称	极值/m					
	纵荡	横荡	垂荡	纵摇	横摇	首摇
型 1 平台	0.0742	1.18	2.01	0.0005	0.78	0.00063
型 2 平台	0.0298	1.18	1.98	0.0122	1.45	0.00259
型 3 平台	0.1173	1.18	6.25	0.0141	2.78	0.00219
型 4 平台	0.0000	1.18	3.41	0.0000	2.14	0.00000

通过比较纵荡阻尼系数极值,型 3 平台具有较小的阻尼,能够较好的满足拖航的工况;而型 4 平台阻尼较大不适合拖航前往新的井位。由横荡阻尼系数极值可知型 1、4 平台具有较小的横荡阻尼,而增加立柱的型 2、3 平台的横荡阻尼增加明显。型 1、2、3 平台的垂荡阻尼较小,而型 4 平台的阻尼较大。综合以上分析,较小的立柱及浮体数量能够很好的减小平台的阻尼。在满足平台强度、刚度的情况下,设计平台时要优先考虑使用较少的立柱数、浮体数及横撑,使阻尼尽可能的减小,进而减小平台的运动响应。

在设计平台时要尽可能的减小附加阻尼,附加阻尼小的减小平台对海水的阻碍作用力较小,进而平台获得小的海水反作用力。要尽可能的增加附加质量,附加质量的增加平台在相同的作用力下获得的加速度就较小,在作用时间相同的情

况下,平台的速度小,进而平台的运动响应小。

综上表格分析得,在相同的海况条件下型 4 平台在作业条件下具有一定的优势,但是不适合拖航。型 2 平台在拖航、作业工况下,其水动力性能较好构型较为合理。

表 4 阻尼系数数值模拟计算结果

名称	极值/(10 ⁷ kg/s)			
	纵荡	横荡	垂荡	矢量和
型 1 平台	2.98	5.01	2.01	6.17
型 2 平台	1.79	10.5	1.51	10.76
型 3 平台	1.36	15.8	1.01	15.89
型 4 平台	4.01	3.91	7.54	9.39

分析表 4 可知随着平台的立柱数的增加,平台纵荡、横荡、垂荡方向的阻尼系数极值的矢量和增加且增加较为明显,纵荡阻尼系数和垂荡阻尼系数极值有所减小且较不明显,而横荡阻尼系数极值增加明显;型 4 平台的阻尼纵荡系数和垂荡系数极值最大,横荡阻尼系数极值最小。

表 5 附加质量系数数值模拟计算结果

名称	极值/(10 ⁷ kg)			
	纵荡	横荡	垂荡	代数和
型 1 平台	7.81	3.52	6.62	17.95
型 2 平台	11.3	2.53	6.01	19.84
型 3 平台	13.7	2.58	5.51	21.79
型 4 平台	6.61	6.56	15.6	28.77

分析表 5 可知随着平台的立柱数的增加,纵荡附加质量系数极值增加且较明显,垂荡附加质量系数极值减小较不明显,横荡阻尼系数极值变化不明显,平台纵荡、横荡、垂荡方向的附加质量极值的代数和增加且增加较为明显;型 4 平台沿纵荡、横荡、垂荡方向的附加质量极值的代数和最大。

表 6 附加阻尼系数极值与附加质量系数极值的算数比

名称	型 1	型 2	型 3	型 4
比值	0.97	0.54	0.73	0.33

分析表 6 可知型 4 平台具有最小的附加阻尼系数极值与附加质量系数极值的算数比,型 2

平台在型 1、2、3 台中附加阻尼系数极值和与附加质量系数极值和的算数比最小。

4 结论

文章利用了 AQWA 水动力软件进行数值计算,系统的仿真了在一阶波浪力作用下,4 种常见构型的半潜式钻井平台的系列水动力特性。数值计算得出了平台的运动响应幅值算子 RAO,附加阻尼系数曲线,附加质量系数曲线。通过对比分析,得出了以下结论:

(1) 在双浮体的半潜式钻井平台当中,随着立柱数量的增加,浮体的垂荡响应增加较为明显,与浪向同方向的摇荡运动增加较为明显,所以不能只追求增加平台的立柱数量来增加平台的强度、刚度,还要考虑到平台在波浪中的水动力特性;

(2) 构型 4 半潜式钻井平台,在相同的作业海况下,不论是在垂荡还是在横摇运动响应都较小,在设计时可以做为一个参考,但是在拖航工况下,要考虑使用拖船运载;

(3) 当浪向角为 0° 时,纵荡和纵摇值较大,当浪向角为 90° 时横荡和横摇值较大,由此可知当浪向角由 0° 增加到 90° ,纵荡及纵摇响应减小而横荡及横摇响应增大;

(4) 提出了附加阻尼系数与附加质量系数极值和的算数比方法,用比值来作为设计平台的辅助参考,但是此方法有待改进,将极值改为均值、方差较好;

(5) 采用系统仿真的分析方法,结合以上的分析,笔者建议采用构型 2 的半潜式钻井平台较为合理,平台的立柱数量适中满足强度、刚度的要求且在拖航状态下具有较好的运动性能,在相同的海况下平台的水动力性能较好,平台的作业工况限制更加宽松,进而提高平台的作业时间而提高产量。

参考文献

[1] 张祺. 中国石油进口依存度问题研究 [D]. 武汉大

学,2013:2-5.

[2] 李彬彬. 新型深吃水多立柱平台的水动力与运动响应研究 [D]. 哈尔滨工业大学,2011:10-30.

[3] 张威. 深海半潜式钻井平台水动力性能分析 [D]. 上海交通大学,2006:6-21.

[4] 王月. 半潜式钻井支持平台在不规则波中的时域耦合分析 [J]. 船舶工程,2015,37(8):89-93.

[5] 董慎言,孙伯起. 规则波中半潜平台运动响应的三维势流理论预报 [J]. 中国造船,1986,86(2):1-5.

[6] Cruz A. M., Krausmann E. Damage to offshore oil and gas facilities following hurricanes Katrina and Rita [J]. An over view Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2008, 21: 620-626.

[7] 史琪琪. 深水锚泊半潜式钻井平台运动及动力特性研究 [D]. 上海交通大学,2011:30-43.

[8] 宋长智. 半潜平台结构强度及全寿命强度可靠性研究 [D]. 大连理工大学,2013:11-31.