

# STLP 平台水动力与运动性能 CFD 分析

安筱婷, 李奇, 万德成\*

(上海交通大学 船舶海洋与建筑工程学院 海洋工程国家重点实验室 高新船舶与深海开发装备协同创新中心, 上海 200240)

\*通信作者: dcwan@sjtu.edu.cn

**摘要:** 水下张力腿平台 (STLP) 作为海上风机的载体, 具有便于安装施工、作业状态下水线面面积较小、水动力性能优越等特点, 在海洋风能资源的开发中拥有着重要应用。本研究采用基于开源平台 OpenFOAM 开发的 CFD 水动力学求解器 naoe-FOAM-SJTU 对处于中等水深作业状态下的 STLP 运动响应进行数值模拟与研究。文中使用弹簧锚链模型模拟 STLP 的垂向系泊锁链系统, 模拟该平台在波浪环境下的运动响应情况。首先将 STLP 单自由度自由衰减 CFD 模拟结果与已有全耦合时域分析结果进行对比, 验证了求解器的准确性与可靠性。随后研究极端海况下 STLP 的运动响应情况。求解器可以计算各工况中的锚链受力情况, 并详细展示系泊系统与流场信息。研究说明 naoe-FOAM-SJTU 可以有效地模拟 STLP 在波浪环境下的水动力问题。

**关键词:** STLP; 锚链系统; naoe-FOAM-SJTU 求解器; 水动力

## 1 引言

近来, 海上风机已成为获取海上风能资源的一种新方式。在浅水中, 常用固定式平台支撑风机, 然而随着水深的增加, 环境中风力更强, 传统的固定式平台已不再适用, 浮式支撑平台是从经济角度考虑的另一种选择, 且具有可转移位置、重复使用等优点。TLP (Tension Leg Platform) 是一种常见的浮式平台, 它通常用绷紧系泊绳固定以抵抗波浪引起的运动, 因此可以减少风力发电机功率的变化并减轻对电网的影响。

与船舶不同, STLP 由于需要长期在特定海域作业, 需配备系泊系统辅助其定位。此外, 为保证风机正常运转, 结构物的运动幅度也不能太大, 这就要求 STLP 应该具有较好的位置保持 (Station-keeping) 能力<sup>[1]</sup>, 因而也需要性能良好的系泊系统与之匹配。

目前关于 TLP 平台优化设计的研究有许多, Bachynski 等提出了 TLP 风机在中等水深 (100m-200m) 的设计<sup>[2]</sup>。Bilgili 等为了评估平台运动、风机构件和张力腿的结构载荷, 使用

完全耦合的模拟对单柱 TLP 风机的设计参数进行了参数研究<sup>[3]</sup>。最近, GICON®SOF 设计<sup>[4][5]</sup>被用于水深 17~500m<sup>[4-5]</sup>, 高速均匀风场中。

虽然许多研究人员提出了可能的设计方案, 但 TLP 风机的设计仍然面临着一些挑战, 例如, 浮式风机的自稳运输及安装、二阶波浪力引起的疲劳损伤和极端响应等问题。

近年来, 随着计算机技术和数值方法的不断发展, 计算流体动力学(Computational Fluid Dynamics, 简称 CFD) 在船舶与海洋工程水动力学领域得到了普遍应用。刘远传<sup>[6]</sup>在已有的 naoe-FOAM-SJTU 求解器基础上开发出系泊系统计算模块 naoeFOAM-ms, 为系泊系统与浮式结构物建立了联系, 为分析二者的相互作用提供了途径。

本研究采用 naoeFOAM-ms 对处于中等水深作业状态下的 STLP 运动响应进行模拟。分别计算 STLP 单自由度自由衰减周期及波浪中的运动响应情况, 以验证本求解器模拟 STLP 在波浪环境下的水动力问题的有效性及准确性。

## 2 基本原理

### 2.1 控制方程

文中数值模拟基于不可压黏性流体, 其控制方程为:

$$\nabla \cdot \mathbf{U} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho \mathbf{U}}{\partial t} + \nabla(\rho(\mathbf{U} - \mathbf{U}_g)\mathbf{U}) = -\nabla p_d - \mathbf{g} \cdot \mathbf{x} \nabla \rho + \nabla(\mu \nabla \mathbf{U}) + \mathbf{f}_\sigma \quad (2)$$

式中,  $\mathbf{U}$  和  $\mathbf{U}_g$  分别表示流场速度和网格节点速度;  $p_d = p - \rho \mathbf{g} \cdot \mathbf{x}$  为流场动压力, 等于总压力减去静水压力;  $\mathbf{g}$ 、 $\rho$  和  $\mu$  分别为重力加速度、流场的密度和动力黏性系数。计算中, 采用有限体积法(FVM)对控制方程进行离散; 计算采用直接模拟法; 对于自由面的捕捉, 采用流体体积法(VOF); 计算中采用了动网格技术。

### 2.2 造波理论及方法

波浪对于海洋工程结构物是至关重要的环境因素之一。造波采用基于 OpenFOAM 开发的开源代码包 waves2foam<sup>[7]</sup>进行求解。造波方式为通过改变速度入口边界条件从而产生波浪。文中的计算波浪为一阶不规则波, 使用的波浪谱为 JONSWAP。

一阶不规则波浪理论是一阶 Stokes 波的简单叠加, 例如沿  $x$  轴正向传播的长峰不规则波的波面升高:

$$\xi = \sum_{j=1}^N A_j \sin(\omega_j t - k_j x + \varepsilon_j) \quad (3)$$

式中,  $A_j$ ,  $\omega_j$ ,  $k_j$  和  $\varepsilon_j$  分别表示第  $j$  个单元波的波幅、圆频率、波数及随机相位角。波

幅与波谱关系及 JONSWAP 波谱公式分别为:

$$\frac{1}{2} A_j^2 = S(\omega_j) \Delta \omega \quad (4)$$

$$S(\omega) = 155 \frac{H_{1/3}^2}{T_1^4 \omega^5} \exp\left(\frac{-944}{T_1^4 \omega^4}\right) (3.3)^\gamma, \quad \gamma = \exp\left[-\left(\frac{0.191 \omega T_1 - 1}{2^{1/2} \sigma}\right)^2\right] \quad (5)$$

式中,  $H_{1/3}$  为有义波高,  $T_1$  为平均波浪周期,  $\gamma$  为峰值增强因子。

### 2.3 系泊系统求解方法

为了求解系泊系统, 使用 naoeFOAM-ms 模块, 目前该模块可以应用弹簧模型、悬链线模型、分段外推法和集中质量法求解系泊系统<sup>[6]</sup>。采用弹簧模型模拟 STLP 的垂向系泊系统, 该方法将系泊链锁简化为只考虑拉伸产生张力的弹簧, 忽略了链锁重量和流场力的影响, 适用于模拟 TLP 等平台在波浪上的运动响应。

该模型基本思想为: 根据胡克定律, 有:

$$F = k \Delta l \quad (6)$$

式中,  $F$  为计算得到的系泊链锁提供的系泊力, 方向由系泊点指向锚泊点;  $k$  为链锁的弹性系数, 由用户在配置文件中给定;  $\Delta l$  为链锁伸长量, 在程序中由系泊点与锚泊点的距离减去系泊链锁未拉伸长度得到。该模块通过将上一时刻系泊力添加到六自由度运动方程中, 实现下一时刻的浮体速度和位移的求解<sup>[7]</sup>。

## 3 计算模型设定

计算模型主要参考 Han 等<sup>[8]</sup>的文献, STLP 包括一个水下平台, 一个风机 (NREL-5MW)<sup>[9]</sup>与四对张紧式系泊锚链 (图 1)。水下平台模型见图 2。文中计算工况下垂直和水平浮筒完全淹没在平均海平面 (MSL) 下, 吃水 20m。由于本研究进行的是实尺度数值模拟, 没有来流, 雷诺数较小, 因此选用了 laminar 层流模拟, 忽略了结构物表面的边界层。STLP 的坐标系遵循右手螺旋法则, 原点 O 位于水线面中心, Z 轴正方向向上。

锚链系统主要参数如表 1 所示, 平台与 NREL-5MW 风机的主要参数如表 1 所示, 计算域布置如下: 计算网格如图 4 所示, 水下平台表面及附近的网格情况如图 5 和图 6 所示。本研究的网格基于 OpenFOAM 自带的 snappyHexMesh 求解器<sup>[10]</sup>生成, 通过对背景网格加密并捕捉出物面边界条件, 可以在较短时间内生成质量较高的网格。文中计算网格量约为 260 万左右, 计算时间步长 0.005s。

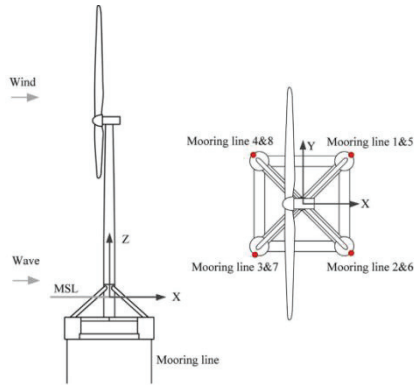


图 1 STLP 示意图

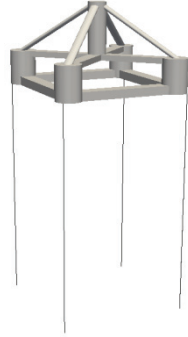


图 2 水下平台示意图

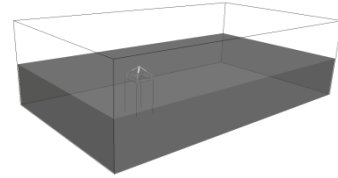


图 3 计算域布置示意图

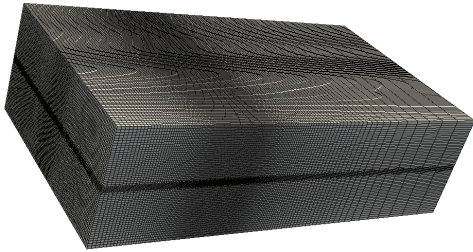


图 4 计算网格

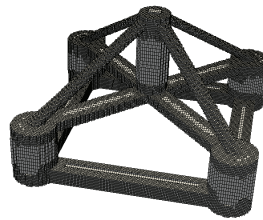


图 5 水下平台表面网格

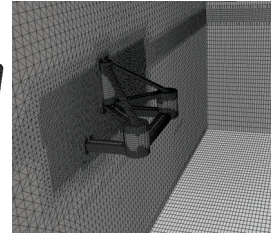


图 6 水下平台附近网格

计算工况如表 3 所示，此工况为风机的生存条件，水深 100m。在时域模拟<sup>[8]</sup>中，湍流风场使用 Kaimal 谱，此海况下风机状态为关闭状态。为简化模拟，文中也将风机设定为关闭状态，将风场视为定常场，模拟中用风载荷采用作用在 STLP 重心处的定常力进行替代。

表 1 系泊系统主要参数

特性	数值
锚链线数量	8
导缆孔与中心距离(m)	32.78
锚链线直径(m)	0.127
单位长度质量(kg/m)	116.074
等效轴向刚度(N)	2.5E9
锚链线长度(m)	80

表 2 平台与 NREL-5MW 风机的主要参数

特性	数值
立柱直径(m)	6.5
竖直浮筒直径, 高度, 间距(m)	9.0,12.0,40.0
水平浮筒宽度, 高度(m)	5.0,3.0
平台重量(kg)	2.7342E6
平台关于质心的横摇/纵摇/首摇转动惯量(kg·m <sup>2</sup> )	7.818E8/7.818E8/1.359E9
运行阶段的平台重心(m)	(0,0,-16.75)
运行阶段的平台浮心(m)	(0,0,-14.08)
运行阶段的水线面面积 (m <sup>2</sup> )	51.45
风机的重心(m)	(-0.2,0.0,64.0)
转子, 毂帽直径(m)	126,3
转子/机舱/塔/毂帽质量(kg)	110000/240000/347460/56780
机舱关于首摇轴的转动惯量(kg·m <sup>2</sup> )	2607890
塔高度(m)	87.6m
塔底直径和厚度(m)	6,0.027
塔顶直径和厚度(m)	3.87,0.019

表 3 计算波浪工况

工况	极端海况
平均风速(m/s)	49
有义波高(m)	14.4
谱峰周期(s)	13.3
等效风力(N)	(7.74E5,0,0)

## 4 自由衰减及 STLP 水动力性能计算

### 4.1 STLP 自由衰减验证

为验证求解器的准确性与可靠性, 首先对 STLP 的单自由度自由衰减进行模拟, 由于平台的对称性, 纵荡周期与横荡周期一致, 横摇周期与纵摇周期一致。在自由衰减试验中, 固定风机叶片, 将 STLP 从某一设定值释放, 通过自由衰减的时历曲线计算平台的固有周期。各自由度自由衰减时历曲线如图 7 所示。计算结果与时域模拟<sup>[8]</sup>中自由衰减实验及耦合模态分析结果比较见表 4, 其中, Free decay 为使用 FAST 代码进行的全耦合时域模拟结果, BModes 为有限元模态分析结果, Error 是相对于 BModes 结果而言的。

表 4 STLP 运动的固有周期

模态	naoe-FOAM-SJTU	FAST*	BModes*	Error*
纵荡(s)	29.73	31.30	30.41	2.24%
横荡(s)	29.73	31.30	30.41	2.24%
垂荡(s)	1.32	1.33	1.32	0%
横摇(s)	1.92	3.23	2.78	30.94%
纵摇(s)	1.92	3.23	2.78	30.94%
首摇(s)	18.32	20.01	18.87	2.91%

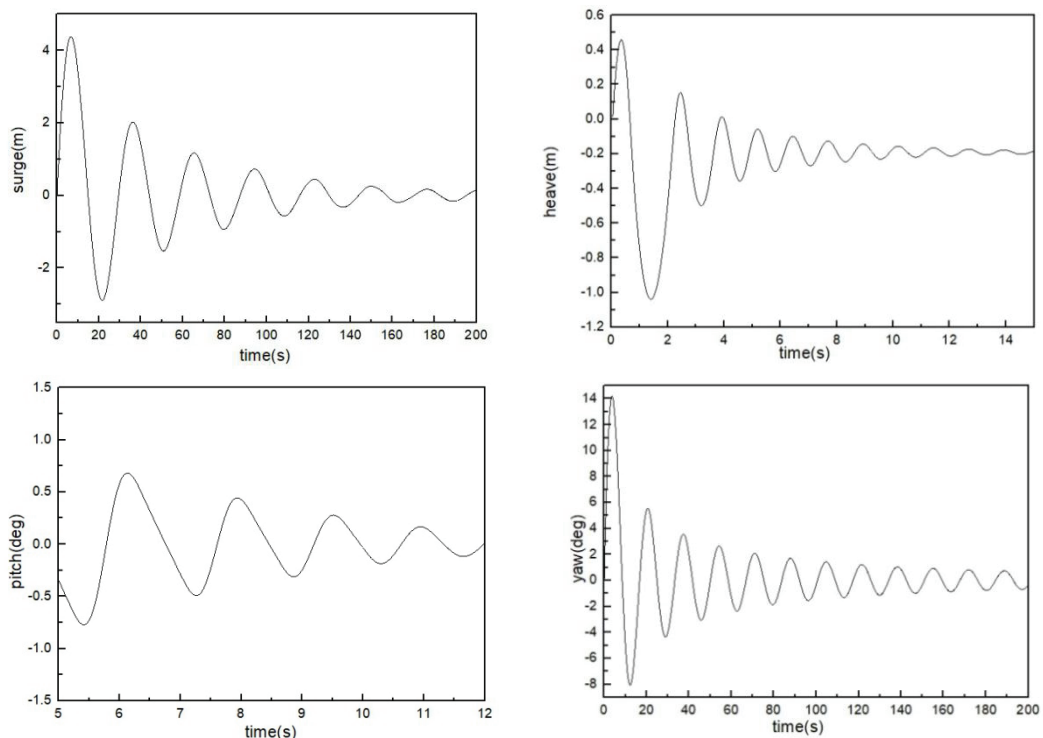


图 7 自由衰减运动时历曲线

由表 4 可知,使用 naoe-FOAM-SJTU 的模拟结果与自由衰减实验及耦合模态分析结果基本吻合,除横摇、纵摇外,误差均在 3%以内,横摇、纵摇固有周期值偏差较大的原因是本文采用的风机模型对于各旋转轴的转动惯量与时域模拟<sup>[8]</sup>中不同。该模拟结果说明本求解器可以准确模拟 STLP 平台的运动。经验设计标准建议:横荡和纵荡的固有周期应大于 25s,垂荡、横摇与纵摇的固有周期应小于 3.5s<sup>[11]</sup>。由表 4 可知:纵摇、横摇与首摇运动的固有频率低于典型波浪频率,而横摇、纵摇与垂荡运动的固有频率高于典型波浪频率,因此文中的 STLP 可以避免风浪载荷引起的共振。

#### 4.2 波浪场中的 STLP 水动力运动响应结果

为了研究波浪作用下的 STLP 的运动响应特性，研究平台的各自由度运动、对于塔底座的 y 向弯矩、4 号锚链（迎浪）的张力等时历曲线及能量谱，并与全耦合时域模拟结果进行对比。由于结构及外载荷的对称性，不讨论横荡、横摇及首摇的运动响应。模拟结果如图 8 至图 12 所示。

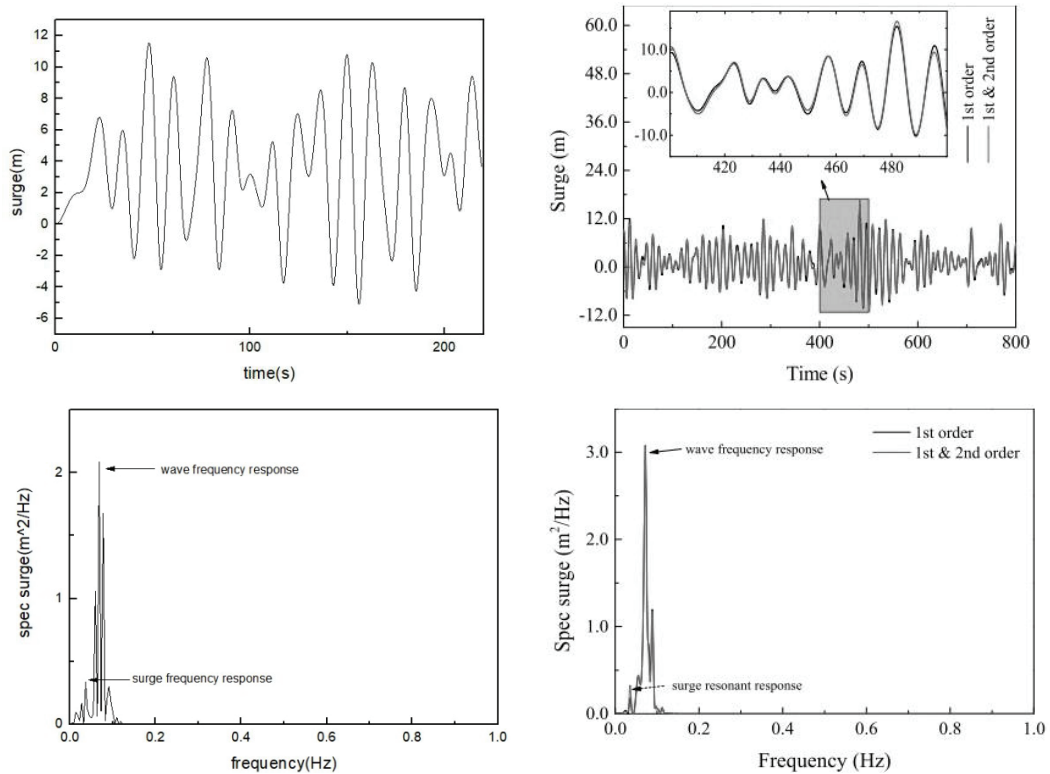


图 8 STLP 在极端海况下的纵荡运动时历与 FFT 结果（左：naoe-FOAM-SJTU，右：全耦合时域模拟）

由图 8 可知，STLP 在极端海况下纵荡响应中，波浪频率响应占主要成分，另外纵荡频率响应也较为明显。这一特性与全耦合时域分析结果是一致的。在 CFD 模拟中，波浪的各阶成分均考虑在内，而全耦合时域分析中最多只考虑到波浪二阶载荷，因此可以看出，相比于全耦合时域分析结果，CFD 模拟结果中小峰值成分更多，能量更分散，对应于 JONSWAP 谱谱峰周期的频率能量更小。虽然纵荡运动的固有周期与波浪频率范围较为接近，纵荡共振响应仍然不大，同时与全耦合时域分析结果对比可知，即使在有义波高相对较高的极端海况下，高阶波浪荷载对于纵荡运动的影响依然很小。此外，该海况下 STLP 纵荡运动时历中可以看到明显的漂移，运动的平衡位置不在 0 处，这是典型的波浪二阶平均漂移力的作用。

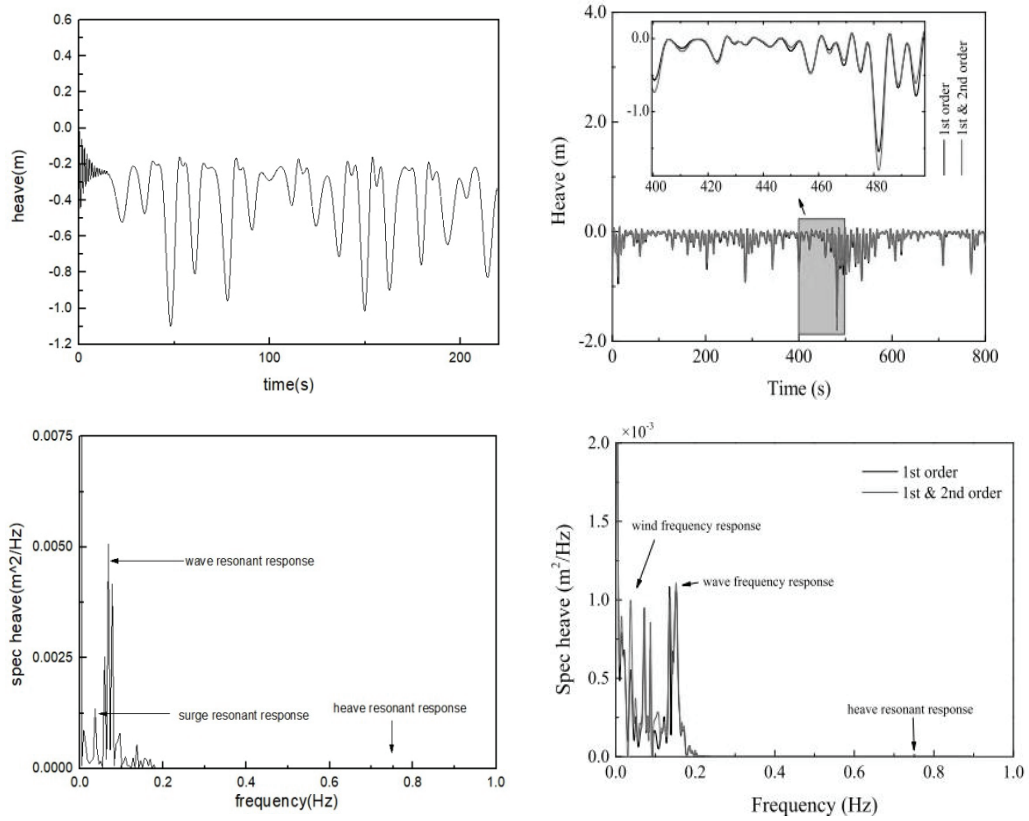


图9 STLP在极端海况下的垂荡运动时历与FFT结果(左: naoe-FOAM-SJTU, 右: 全耦合时域模拟)

由图9可知, STLP在极端海况下的垂荡响应中, 波浪频率响应占主要成分, 另外纵荡频率响应也较为明显, 这是由于STLP初始状态为直立, 因此垂荡运动会与纵荡运动相耦合。在垂荡固有频率处可以观测到垂荡响应成分, 但其幅值很小。此外, 垂荡运动的平衡位置在静水面以下, 该现象是因为张力腿锚链系统的自身特点。



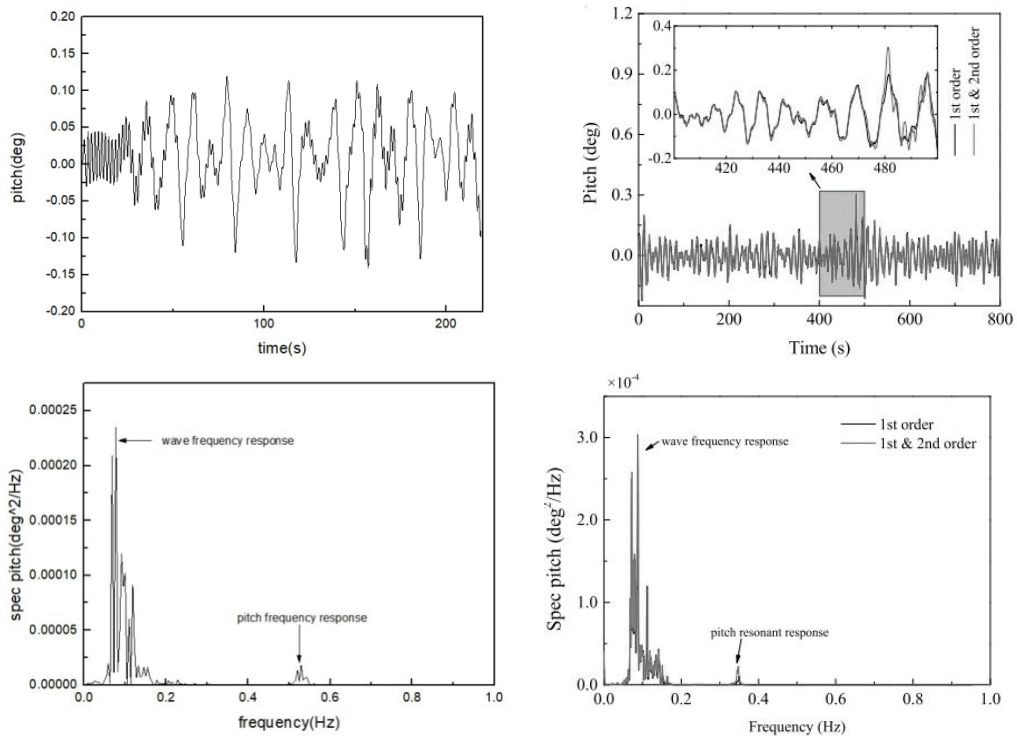


图 10 STLP 在极端海况下的纵摇运动时历与 FFT 结果（左：naoe-FOAM-SJTU，右：全耦合时域模拟）

由图 10 可知，STLP 在极端海况下的纵摇响应中，波浪频率响应占主要成分，纵摇共振响应也清晰可见，对比 CFD 结果和全耦合时域分析结果可知，高阶波浪荷载使得纵摇共振响应成分增大，因此，在极端海况下，纵摇运动易受高阶波浪荷载影响。

由图 8 至图 10 可知，STLP 平面外的运动（纵摇、垂荡）幅值较小，近似于刚性，平面内运动（纵荡）幅值较大，近似于顺应式。这是因为张力腿预张力平衡了剩余浮力，使张力腿时刻处于受拉的绷紧状态；而 STLP 主体是直立的浮筒结构，其所受波浪力的水平方向分力较垂直方向大，因而在平面内具有柔性特点<sup>[12]</sup>。

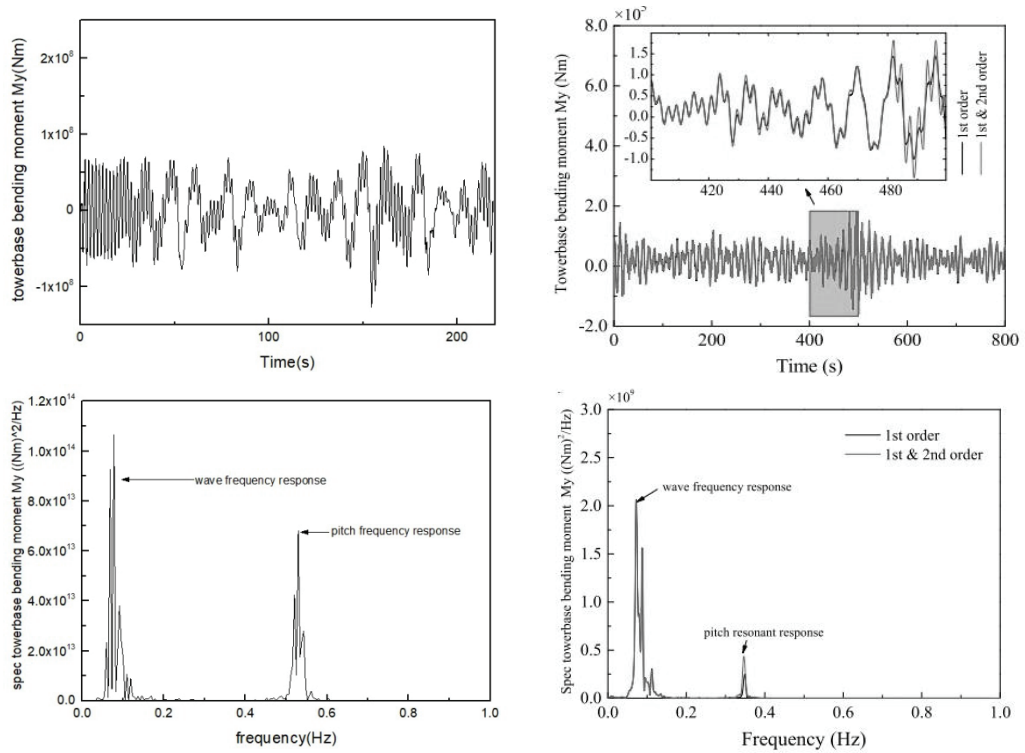


图 11 STLP 在极端海况下 y 向弯矩时历与 FFT 结果 (左: naoe-FOAM-SJTU, 右: 全耦合时域模拟)

由图 11 可知,根据 STLP 在极端海况下运动时对于塔底座的 y 向弯矩能量谱结果可知:波浪频率响应占主要成分,纵摇共振响应也明显可见。对比 CFD 结果和全耦合时域分析结果可知,波浪高阶成分使弯矩能量谱中的纵摇共振成分增加。这是因为高阶波浪载荷引起了更大的纵摇运动,使得转子的重量对弯矩贡献更大。

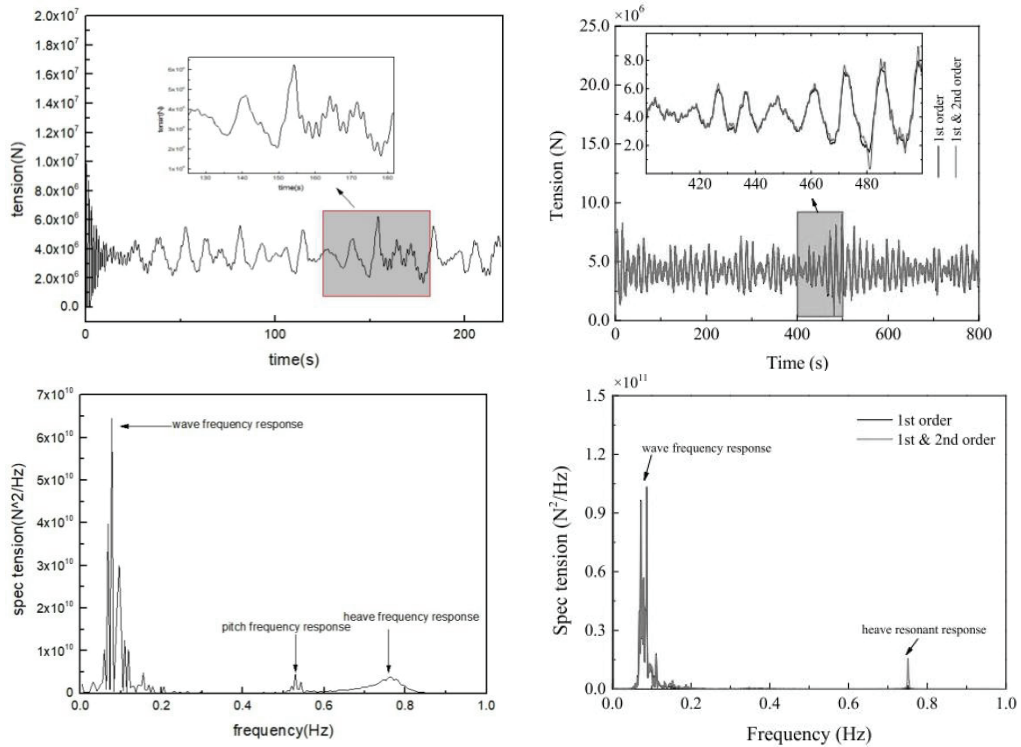


图 12 STLP 在极端海况下的锚链张力时历与 FFT 结果（左：naoe-FOAM-SJTU，右：全耦合时域模拟）

锚链 4 位于迎浪面，图 12 为锚链 4 的张力时历及其能量谱，可知其主要成分为波浪频率响应、纵摇及垂荡频率成分。而全耦合时域分析结果中只有波浪频率成分与垂荡成分。

由图 8 至图 11 的 CFD 模拟结果中出现的小幅频率成分及图 12 中纵摇成分可知，相对部分势流理论结果，CFD 结果更加细致，同时可以显示出流场图像（图 13）。

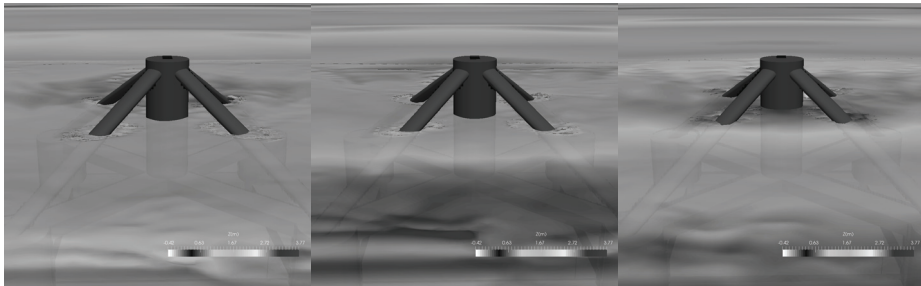


图 13 极端海况下瞬时流场

## 5 结论

本研究对一座 STLP 平台的自由衰减运动进行了 CFD 模拟，并将结果与全耦合时域分

析结果对比,发现二者基本吻合;其后对极端海况下 STLP 运动响应、弯矩及锚链张力进行了 CFD 模拟,并与全耦合时域分析结果对比,二者基本一致,说明 naoe-FOAM-SJTU 可以有效地模拟 STLP 在波浪环境下的运动问题。

综上,该 STLP 能有效避免波浪频率上的共振,并具有平面外运动近似于刚性,平面内运动近似于顺应式的特点;STLP 在波浪环境下的运动、弯矩及锚链张力的主要成分是波浪频率响应及共振响应,同时在能量谱中也能各自由度运动的耦合运动;极端海况下高阶波浪荷载对于纵荡运动的影响很小,纵摇运动易受高阶波浪荷载影响。通过分析能量谱结果可知,相对部分势流理论结果,CFD 结果更加细致,同时可以显示出流场图像。

### 致谢

本工作得到国家自然科学基金项目(51490675, 11432009, 51579145)、长江学者奖励计划(T2014099),上海高校东方学者特聘教授岗位跟踪计划(2013022),上海市优秀学术带头人计划(17XD1402300),以及工信部数值水池创新专项 VIV/VIM 项目(2016-23/09)资助。在此一并表示衷心感谢。

### 参考文献

- 1 Faltinsen, O. Sea loads on ships and offshore structures. Vol. 1. Cambridge:Cambridge University Press. 1993: 257-265
- 2 Bachynski E E, Moan T. Design considerations for tension leg platform wind turbines ☆[J]. Marine Structures, 2012, 29(1):89-114.
- 3 Bilgili M, Yasar A, Simsek E. Offshore wind power development in Europe and its comparison with onshore counterpart[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2011, 15(2):905-915.
- 4 Adam F, Steinke C, Dahlhaus F, et al. GICON-TLP for wind turbines - Validation of calculated results[C]// Isope. 2013.
- 5 Dahlhaus F, Großmann J. Tank Test Results and Numerical Prediction of Structural Response of an innovative TLP for Offshore Wind Turbines[C]// Offshore Technology Conference. 2015.
- 6 刘远传.浮式结构物系泊系统数值分析模块 naoeFOAM-ms 开发[D]. 上海交通大学, 2014.
- 7 Jacobsen N G, Fuhrman D R, Fredsøe J. A wave generation toolbox for the open - source CFD library: OpenFoam®;[J]. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 2012, 70(9):1073-1088.
- 8 Han Y, Le C, Ding H, et al. Stability and dynamic response analysis of a submerged tension leg platform for offshore wind turbines[J]. Ocean Engineering, 2017, 129:68-82.
- 9 Jonkman, J., Butterfield, S., Musial, W., Scott, G., 2009. Definition of a 5-MW Reference Wind Turbine for Offshore System Development. National Renewable Energy Laboratory (NREL), Golden, CO
- 10 OpenFOAM. Mesh generation with the snappyHexMesh utility,2013. Available from:<http://www.openfoam.org/docs/user/snappyHexMesh.php#x26-1510005.4>
- 11 Bachynski E E, Moan T. Design considerations for tension leg platform wind turbines [J]. Marine Structures,

2012, 29(1):89-114.

12 丁曼. 深水延伸式张力腿平台水动力性能及张力腿受力分析[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2012.

## **CFD numerical analysis of hydrodynamic and kinematic performances of a STLP**

AN Xiao-ting, LI Qi, WAN De-cheng<sup>\*</sup>

(Collaborative Innovation Center for Advanced Ship and Deep-Sea Exploration, State Key laboratory of Ocean Engineering, School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, 200240, China)

<sup>\*</sup>Corresponding author: dewan@sjtu.edu.cn

**Abstract:** As the carrier of the offshore wind turbine, the submerged tension leg platform (STLP), has important applications in the development of marine wind energy resources. In this paper, the numerical simulation on the STLP motion response under medium water depth and operation phase is established using hydrodynamics solver naoe-FOAM-SJTU based on the open-source OpenFOAM. In this paper, the spring model is used to simulate the vertical mooring system of STLP to simulate the motion response of STLP. Firstly, the single-freedom-motion CFD simulation results are compared with the existing fully-coupled time-domain analysis results to verify the accuracy and reliability of the solver. Secondly, the motion response of STLP under extreme sea conditions is studied. The solver can calculate the force of mooring lines and display the flow field information. This study shows that naoe-FOAM-SJTU can effectively simulate the hydrodynamic responses of STLP under wave conditions.

**Key words:** STLP; mooring system; naoe-FOAM-SJTU solver; hydrodynamics.