

基于全耦合时域运动模拟的 FPSO 艏摇失稳研究^{*}

刘亚柳¹ 陈迪郁^{2,3,4,5} 刘利琴^{1†} 黄郑鑫¹

(1. 天津大学 水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300354)

(2. 中交第二航务工程局有限公司, 武汉 430040)

(3. 长大桥梁建设施工技术交通行业重点实验室, 武汉 430040)

(4. 交通运输行业交通基础设施智能制造技术研发中心, 武汉 430040)

(5. 中交公路长大桥梁建设国家工程研究中心有限公司, 武汉 430040)

摘要 本文建立系泊浮体全耦合非线性六自由度方程,研究了规则波中 FPSO 的艏摇失稳现象. 将数值求解得到的平衡艏摇角与试验结果进行对比,验证了方程的准确性. 分析了艏摇失稳对 FPSO 运动响应的影响,研究了初始艏摇角、波陡对 FPSO 艏摇失稳和运动响应的影响. 结果表明:FPSO 在特定波长船长比下会发生艏摇失稳现象,作用在船体上的波浪载荷增大,从而引起较大的横摇和垂荡响应;波陡不会影响最终平衡艏摇角,但会影响艏摇达到平衡所需的时间以及运动响应幅值;初始艏摇角会影响 FPSO 最终达到的平衡位置和运动响应.

关键词 艏摇失稳, 数值模拟, 全耦合方程

中图分类号:U661.32

文献标志码:A

引言

船型浮式生产储卸油平台 FPSO 是集人员居住与生产指挥系统于一体的综合性大型海上石油生产基地. 相较于其他海上平台, FPSO 投产快、投资低、储油能力大,并具备海上自航能力与较强的抗风浪能力等优点. 目前世界上 FPSO 大多采用单点系泊系统,单点系泊系统将 FPSO 固定地系泊于海床上一,可随风浪流的作用进行 360 度全方位的自由旋转以规避风浪带来的破坏力,这种运动被称作风向标效应^[1]. 海上实践表明,当主导环境为涌浪时, FPSO 可能会失去艏摇控制,风向标效应失效. 在特定波长的规则波下,船体会在接近横浪的状态下平衡,导致作用在船体和系泊系统上的环境载荷显著增大,对 FPSO 上的生产作业活动产生不利影响,这种不可预测的艏摇角改变的现象被称作艏摇失稳现象.

目前国内外关于 FPSO 艏摇失稳的研究主要集中在模型试验和失稳机理分析. Liu 等^[2]通过模型试验发现在特定波长的规则波中 FPSO 会出现显著的艏摇失稳现象,并将大幅的艏摇运动解释为波浪漂移力和力矩的平衡. Munipalli 等^[3]通过模型试验研究了波陡对 FPSO 艏摇失稳现象的影响,并强调了发生大幅艏摇运动的工况下, FPSO 的横荡和艏摇加速度之间的联系. Yadav 等^[4]开展了规则波下的内转塔式 FPSO 的艏摇失稳试验,得到了 FPSO 的平衡艏摇角随波长的变化关系. Cho 等^[5]通过模型试验研究了内转塔式 FPSO 在规则波中的艏摇失稳现象,试验结果显示平衡艏摇角在特定波长下最大能达到 50°. 通过对平面运动方程组进行稳定性分析,得到了发生艏摇失稳的波长区间,结果与模型试验吻合较好. Bernitsas 等^[6]在船舶操纵方程和非线性系泊缆模型的基础上,建立了单点系泊船舶的水平面内运动(纵荡、横荡和艏摇)方

2021-06-17 收到第 1 稿,2021-08-11 收到修改稿.

^{*} 天津市交委项目(2018-b2)

[†] 通信作者 E-mail:liuliqin@tju.edu.cn

程组,方程中考虑了风、流和波浪漂移载荷等缓变激励载荷,通过局部摄动分析研究了单点系泊系统的渐进稳定性. Zangeneh 等^[7]将艏摇单自由度解耦方程中的横荡平均漂移力和艏摇平均漂移力矩展开为艏摇角的高次多项式,采用多尺度法推导的非线性方程的解析解,结果显示在特定波长的规则波下,由平均漂移力等效的非线性刚度项中的线性刚度系数由正变负是导致艏摇失稳现象发生的根本原因. 黄郑鑫等^[8,9]建立了 FPSO 艏摇单自由度非线性动力学方程,在规则波下研究内转塔式 FPSO 的艏摇失稳机理. 通过 Lyapunov 稳定性定理分析了平衡艏摇角随波长船长比的鞍结分岔现象. 进一步分析了横摇和纵摇阻尼、内转塔位置和载况对 FPSO 艏摇失稳的影响.

以往学者关于 FPSO 艏摇不稳定性的研究主要集中在模型试验,或者采用单自由度方程进行失稳机理的分析. 没有充分考虑艏摇与其他自由度之间的耦合效应,与艏摇不稳定性有关的因素也尚未得到充分研究. 一般计算单点系泊系统的六自由度运动响应会将低频运动和高频运动拆分成两个方程分别计算,再将高频和低频运动相加. 本文充分考虑运动间的耦合效应,将低频运动和高频运动统一在全耦合时域方程中,编写程序求解 FPSO 六自由度运动响应,将数值模拟得到的艏摇平衡位置与模型试验结果进行对比,验证了全耦合时域方程的合理性以及数值模拟的准确性. 分析了艏摇失稳对运动响应的影响,并研究了波陡、艏摇角初始位置对 FPSO 艏摇失稳及运动响应的影响.

1 FPSO 六自由度全耦合时域运动方程

本文研究对象为一艘经典船型的内转塔式 FPSO,船体总长 $L_{OA} = 332.8\text{ m}$,垂线间长 $L_{PP} = 320\text{ m}$,型宽 $B = 60\text{ m}$,型深 $D = 29.5\text{ m}$,内转塔安装在艏垂线后 0.15 倍垂线间长的位置. 船体吃水 17 m,工作水深为 424 m,系泊半径 2000 m,系泊系统一共由 9 根系泊缆组成,每 3 根为一组,以 120° 为间隔呈放射性分布.

1.1 时域运动方程

为了描述浮体的六自由度运动,定义与大地固连的全局坐标系 $K_f = (x_f, y_f, z_f)$ 和与浮体固连的体坐标系 $K_s = (x_s, y_s, z_s)$,其中体坐标系的原点与浮体重心重合. 体坐标系的方位由全局坐标系经过

三次连续的旋转得到:先绕 z_s 轴旋转角度 ψ ,再绕着 y_s 旋转角度 θ ,最后绕着 x_s 轴旋转角度 φ . 坐标系描述如图 1 所示.

表 1 FPSO 主尺度参数
Table 1 Main parameters of FPSO

Term	Notation	Value
Draft	d	17 m
Displacement	Δ	262,430 T
Distance from center of gravity to after perpendicular	L_{CG}	170.366 m
Distance from center of gravity to baseline	V_{CG}	17.81 m
Distance from center of gravity to center of internal turret	L_{TC}	101.384 m
Radius of gyration around X axis	k_{xx}	19.618 m
Radius of gyration around Y axis	k_{yy}	73.724 m
Radius of gyration around Z axis	k_{zz}	74.342 m

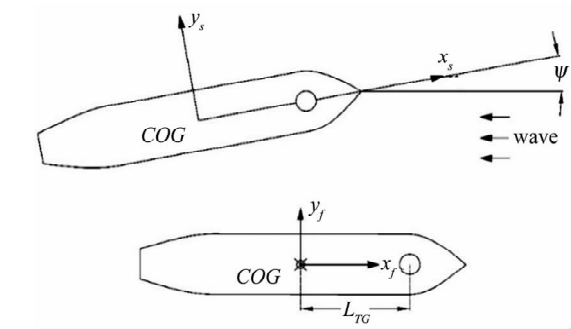


图 1 坐标系描述
Fig. 1 Description of coordinate systems

根据 Cummins^[10]提出的间接时域方法,将频域内附加质量及辐射阻尼通过卷积积分转换为迟滞函数进行计算. 迟滞函数的物理意义是对于之前时刻步运动的记忆效应,体现了过去的运动速度对当前运动的影响. 对于系泊附体,六自由度时域运动方程可表示为:

$$(m + A_\infty)T\ddot{X}(t) + CT\dot{X}(t) + KX(t) + \int_0^t R(t - \tau)TX(\tau)d\tau = F_w + TF_m \quad (1)$$

式中, $X = (x, y, z, \varphi, \theta, \psi)^T$ 是浮体在全局坐标系中的位置向量, x, y, z 是浮体的重心坐标. m 为质量矩阵, C 为除辐射阻尼外的线性阻尼矩阵, K 为静水回复刚度矩阵. F_w 为体坐标系下的波浪力, F_m 为全局坐标系下的系泊回复力, A_∞ 为无穷频率下的附加质量矩阵, R 为速度脉冲函数矩阵,其与辐射阻尼矩阵 B 和附加质量矩阵 A 的关系如下:

$$\begin{aligned} \mathbf{R}(t) &= \frac{2}{\pi} \int_0^\infty \mathbf{B}(\omega) e^{i\omega t} d\omega = \\ &\frac{2}{\pi} \int_0^\infty i\omega (\mathbf{A}(\omega) - \mathbf{A}_\infty) e^{i\omega t} d\omega \end{aligned} \tag{2}$$

T 为全局坐标系 $\mathbf{K}_f = (x_f, y_f, z_f)$ 和体坐标系 $\mathbf{K}_s = (x_s, y_s, z_s)$ 之间的转换矩阵,其表达式如下:

$$\mathbf{T} = \begin{pmatrix} \cos \psi & \sin \psi & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\sin \psi & \cos \psi & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \tag{3}$$

与一般的刚体运动方程相比,本文通过转换矩阵 T 来考虑船摇对纵荡和横荡的影响.一般计算单点系泊系统的六自由度运动响应会将低频运动和高频运动拆分成两个方程分别计算,再将高频和低频运动相加.本文将低频运动和高频运动统一在全耦合时域方程中.对于纵荡、横荡和船摇 3 个自由度,BV-NR493 规范^[11]提供了一种评估阻尼的方法,对于单点系泊系统:

- (1)浮体拖曳力所致的阻尼成分包含在其所受的流载荷中,其与浮体相对速度的平方成正比.
- (2)慢漂阻尼反映浮体相对速度对其所受二阶波浪载荷的影响,一般通过计算二阶波浪载荷对其速度的导数得到,可采用水动力软件计算得到.
- (3)立管以及系泊缆所致的阻尼可通过动力计算或者全耦合分析考虑.经验上,单点系泊系统所致的低频线性阻尼系数可取:

$$\begin{aligned} C_{xx} &= 0.01m \sqrt{\frac{g}{L_{PP}}} \\ C_{yy} &= 0.02m \sqrt{\frac{g}{B}} \\ C_{\psi\psi} &= 0.083L_{PP}^2 C_{yy} \end{aligned} \tag{4}$$

式中, C_{xx} 、 C_{yy} 和 $C_{\psi\psi}$ 分别为纵荡、横荡和船摇自由度上的线性阻尼系数, m 为浮体质量.根据式(4)计算得到的低频线性阻尼系数 C_{xx} 、 C_{yy} 和 $C_{\psi\psi}$ 如表 2 所示.由于本文研究中不存在浮体航速和流,不用考虑拖曳力所致阻尼以及慢漂阻尼,故方程(1)中的线性阻尼矩阵 \mathbf{C} 只包括附加黏性阻尼和系泊系统所致的低频线性阻尼系数.

浮体垂荡、横摇和纵摇 3 个自由度上的运动受系泊系统的影响较小,其阻尼成分主要包括辐射阻

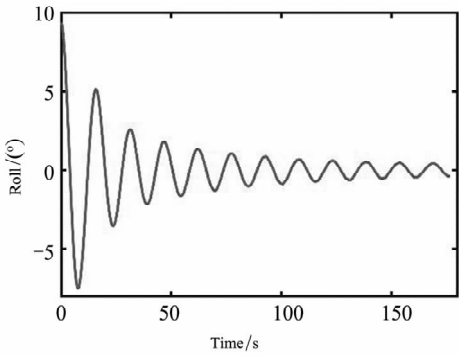
尼和舭龙骨等结构引起的附加黏性阻尼两部分^[12].

表 2 系泊系统所致的低频线性阻尼系数

Table 2 Low-frequency linear damping coefficient caused by mooring system

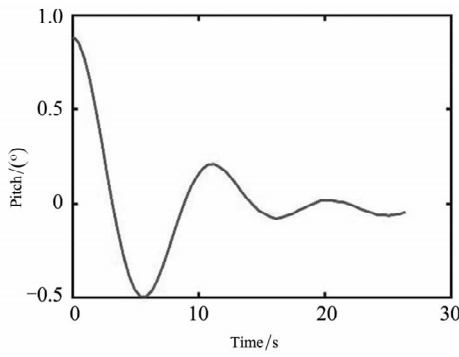
Low - frequency linear damping coefficients	Value
C_{xx}	$4.636 \times 10^5 \text{ kg/s}$
C_{yy}	$2.141 \times 10^6 \text{ kg/s}$
$C_{\psi\psi}$	$1.820 \times 10^{10} \text{ kgm}^2/\text{s}$

附加黏性阻尼由自由衰减试验测得的总阻尼减去固有频率对应的辐射阻尼得到.由于横摇自由度上的辐射阻尼较小,自由衰减测得的阻尼可全部视为附加黏性阻尼.横摇和纵摇的总阻尼由静水中的自由衰减试验获取,分给定横摇和纵摇初始倾角,记录自由衰减曲线如图 2 所示,得到横摇和纵摇总阻尼.由于纵摇自由衰减曲线只包含 3 个有效半周期,会使得到的附加黏性阻尼偏大,为了得到更保守的结果,本文最终所取的横摇和纵摇的附加黏性阻尼所占临界阻尼比 C_{roll} 和 C_{pitch} 分别为 9.3% 和 5%.



(a)横摇自由衰减曲线

(a) Free decay curve of roll



(b)纵摇自由衰减曲线

(b) Free decay curve of pitch

图 2 船模自由衰减曲线

Fig. 2 Free decay curves of roll and pitch

表3 横摇和纵摇临界阻尼比
Table 3 Critical damping ratios of roll and pitch

Damping component	Roll	Pitch
Total damping	9.3%	24.7%
Radiation damping	0	17.84%
Additional viscous damping	9.3%	6.86%

基于三维势流理论,在频域内计算 FPSO 的水动力参数. 由于 HydroD 无法考虑到舭龙骨带来的附加黏性阻尼影响,需要在软件中手动设置附加黏性阻尼. 计算得到在波浪频率范围 0.2 ~ 2 rad/s 内的附加质量矩阵、辐射阻尼矩阵、一阶波浪力、平均漂移力等参数.

采用 MATLAB 编写解程序求解系泊浮体的六自由度全耦合时域运动方程(1),基于 HydroD 计算静水力系数、水动力系数和波浪载荷传递函数,基于准静态多段式悬链线理论计算当前位置下的系泊载荷,代入方程通过四阶 Runge-Kutta 方法数值求解下一时刻的速度和位移, MATLAB 程序计算流程框图如图 3 所示.

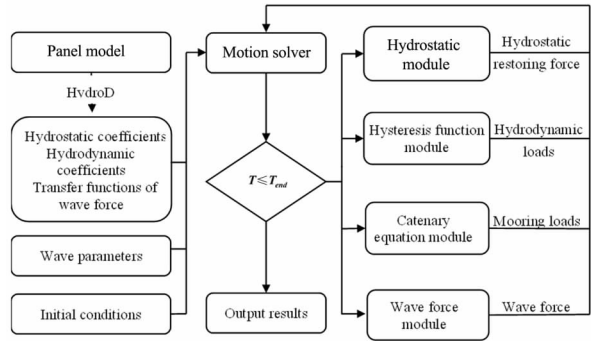


图3 MATLAB 程序计算流程框图
Fig. 3 Calculation flowchart of numerical simulation

1.2 对比验证

模型试验在国家海洋技术中心海洋动力环境实验室中开展,模型缩尺比为 1: 80. 模型试验要满足基本的相似理论. 根据流体力学中的相似理论,模型和实体应该满足以下三个相似条件,即:

(1) 几何相似

模型和实体大小不同,但形状完全相同.

(2) 运动相似

模型和实体在流体中运动时,其对应点处在任意瞬间的同类物理量如流体的速度、加速度等都有相同的比例.

(3) 动力相似

流体作用于模型和实体上的各种力相互成比例,包括重力、惯性力、黏性力和表面张力等.

根据 1: 80 的缩尺比,在满足了几何相似、运动相似和动力相似的条件下进行模型试验,由于水池中的水是淡水,而原型需要在海水中作业,海水与淡水的密度比 $\gamma_w = 1.025$.

由于试验水池水深的限制,对系泊缆进行等效截断设计,使截断前后系泊系统的静态与动态特性以及浮体总体性能均保持一致. 模型及系泊系统布置如图 4 和图 5 所示.

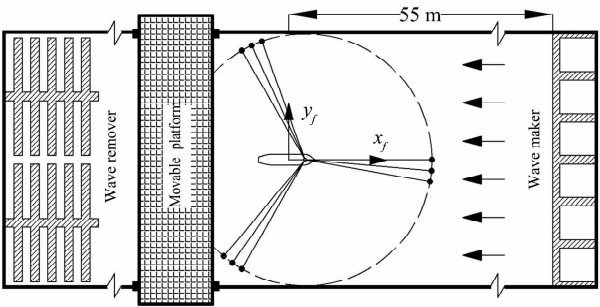


图4 模型布置图
Fig. 4 Model layout

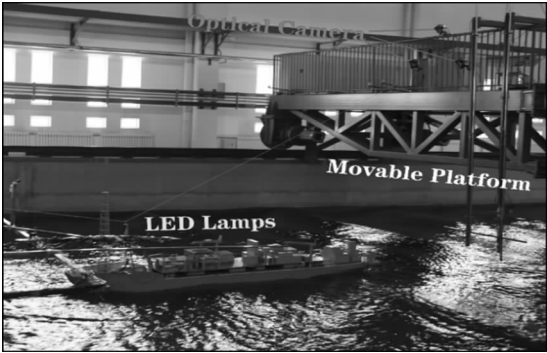


图5 试验安装图
Fig. 5 Photo of test installation

根据 ITTC 推荐规程及指引中关于耐波性试验的建议,选取规则波的波长船长比 λ/L_{pp} 的范围为 0.5 ~ 1.5,并控制波陡 H/λ 一致为 1/50,试验工况如表 4 所示. 基于运动方程(1),计算相同海况下的平衡艏摇角,与试验结果的对比如图 6 所示.

现有的研究表明,横摇、纵摇和升沉三个自由度的阻尼对艏摇平衡位置有较大的影响^[8]. 由于模型排水量太大,难以进行升沉自由衰减试验,因此缺乏升沉阻尼数据. 纵摇自由衰减曲线只包含

3 个有效半周期,数值计算采取的纵摇阻尼可能与模型试验存在差异.这都可能导致数值模拟所得到的平衡位置与试验存在一定差异.模型试验结果与数值模拟结果基本吻合,验证了全耦合方程的合理性和数值模拟的准确性,该数学模型可以准确预测 FPSO 的平衡船摇角.

表 4 试验工况
Table 4 Test matrix

Sea No.	λ/L_{pp}	Wave height (prototype)/m	Wave period (prototype)/s	Wave height (model)/mm	Wave period (model)/s
1	0.50	3.20	10.12	40.00	0.36
2	0.67	4.29	11.73	53.63	1.31
3	0.83	5.31	13.05	66.38	1.46
4	1.00	6.40	14.32	80.00	1.60
5	1.17	7.49	15.49	93.63	1.73
6	1.33	8.51	16.52	106.38	1.85
7	1.50	9.60	17.54	120.00	1.96

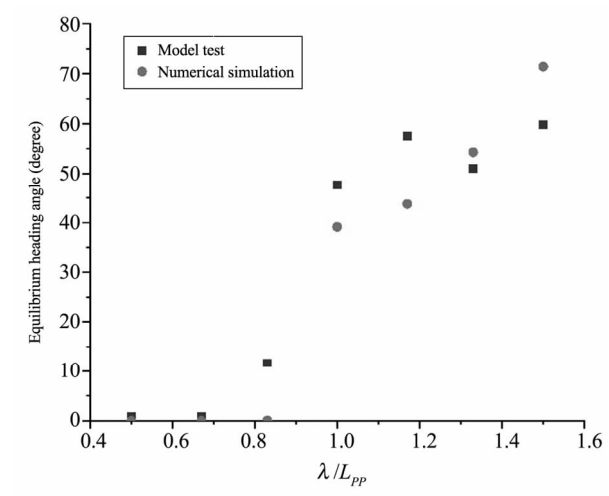


图 6 数值模拟与模型试验结果对比
Fig. 6 The comparison of equilibrium yaw angles between numerical simulation and model tests

2 时域运动响应分析

2.1 船摇失稳后的六自由度响应分析

根据全耦合时域求解程序,计算 FPSO 在波陡 H/λ 为 1/50, λ/L_{pp} 分别为 0.85、1.03 和 1.64 下的规则波中,初始船摇角 ψ_0 为 0° 时的六自由度响应,计算时间步长为 0.1 s,总时长为 3 h.结果如表 5 和图 7 所示.表 5 中,垂荡和横摇数值代表运动幅值,船摇数值代表平衡位置,本节中的表格均使用此定义.

表 5 不同 λ/L_{pp} 下的运动响应
Table 5 Motion responses under different λ/L_{pp}

λ/L_{pp}	Heave /m	Roll /($^\circ$)	Yaw /($^\circ$)
0.85	0.540	0.004	-0.046
1.03	1.455	1.274	40.005
1.64	5.261	6.692	76.095

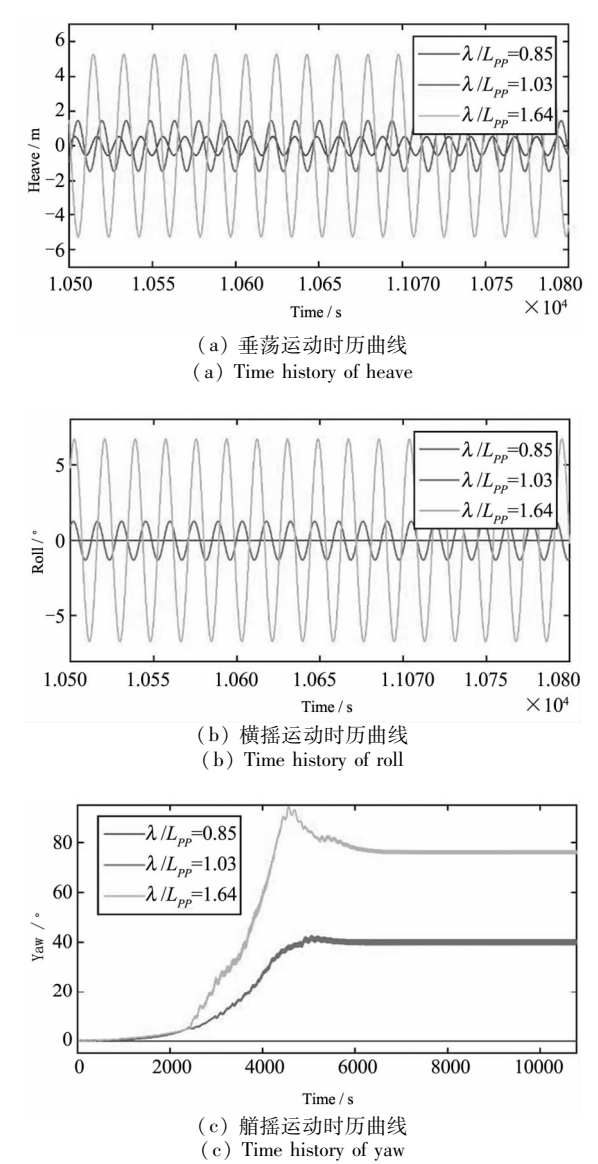


图 7 FPSO 在不同 λ/L_{pp} 下的运动响应
Fig. 7 Motion responses under different λ/L_{pp}

结果表明,随着平衡船摇角的增加,作用在 FPSO 上的环境载荷增加,垂荡和横摇的响应幅值也显著增加.因此船摇不稳定的发生会对 FPSO 的生产活动产生不利影响.

2.2 波陡对船摇失稳的影响

下面分析波陡对船摇失稳过程中 FPSO 的运动响应的影响.计算 FPSO 在 λ/L_{pp} 为 1.03,波陡

H/λ 分别为 1/30、1/40、1/50 和 1/60, ψ_0 为 0° 时的运动响应,结果对比如表 6 和图 8 所示.

表 6 不同波陡下的运动响应

Table 6 Motion responses under different wave steepness

Wave steepness	Heave /m	Roll / $(^\circ)$	Yaw / $(^\circ)$
1/30	2.430	2.131	39.955
1/40	1.817	1.593	39.955
1/50	1.455	1.273	39.955
1/60	1.210	1.059	39.955

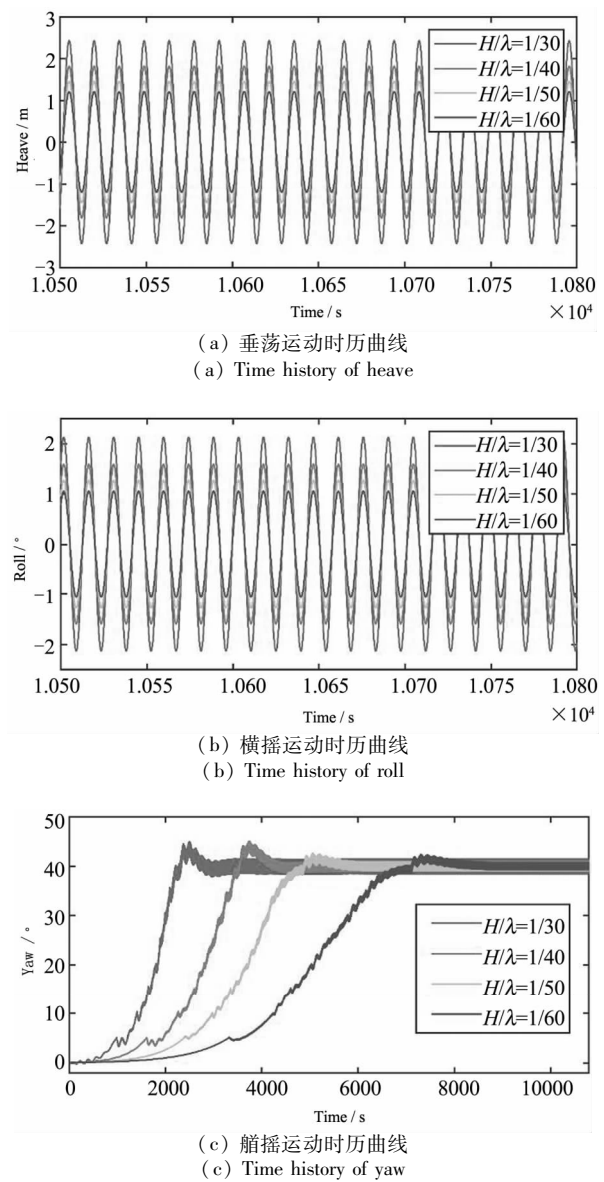


图 8 FPSO 在不同波陡下的规则波中的六自由度响应
Fig.8 Motion responses under different wave steepness

由结果可见,随着波陡增大,艏摇失稳达到平衡所需的时间变短,但不会影响最终的平衡艏摇角.此外,由于更大的波陡意味着更大的一阶波浪载荷,故从图中可明显看出,更大的波陡对应着更

大的垂荡和横摇稳态响应幅值.

2.3 艏摇角初始位置对艏摇失稳的影响

根据本课题组之前关于 FPSO 艏摇稳定性分析结果^[8],在特定的规则波浪中,FPSO 具有多个平衡艏摇角.计算 FPSO 在波陡 H/λ 为 1/50, λ/L_{pp} 为 1.95 下的规则波中, ψ_0 分别为 0° 和 35° 时的运动响应,结果对比如表 7 和图 9 所示.

表 7 不同初始艏摇角下的运动响应

Table 7 Motion responses with different initial yaw angles

Initial yaw angle	Heave /m	Roll / $(^\circ)$	Yaw / $(^\circ)$
0°	4.352	0.031	2.233
35°	6.345	5.578	81.280

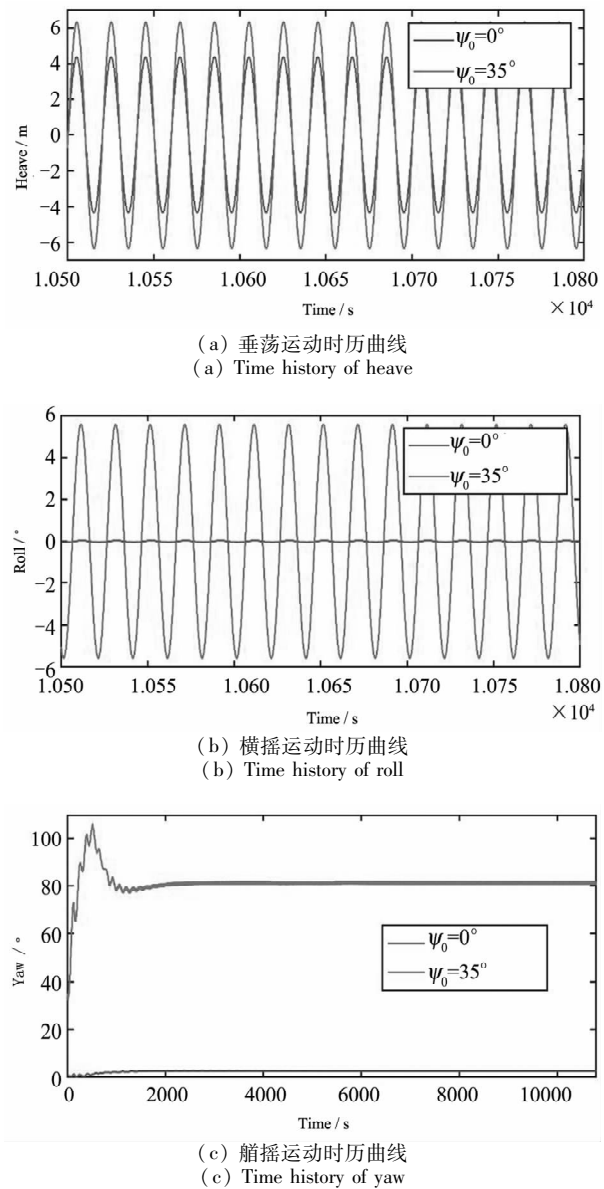


图 9 不同初始位置下的 FPSO 的六自由度响应
Fig.9 Motion responses under different initial yaw angle

从图9中可以看出,当 $\psi_0 = 0^\circ$ 时,FPSO处在迎浪的初始条件下,此时系统可以保持艏摇稳定,而当 $\psi_0 = 35^\circ$ 时,FPSO会发生艏摇失稳,平衡艏摇角为 80.9° ,垂荡和横摇的稳态响应幅值均大于 $\psi_0 = 0^\circ$ 时的稳态响应幅值.故对于存在多个平衡点的工况,艏摇角初始位置会影响平衡艏摇角以及垂荡和横摇稳态运动响应幅值.

3 结论

本文研究了FPSO在规则波中的艏摇不稳定性现象.建立了系泊浮体六自由度全耦合运动方程,通过与模型试验进行对比,验证了方程的准确性.分析了发生艏摇失稳对运动响应的影响,并研究了波陡、艏摇角初始位置对FPSO艏摇失稳及运动响应的影响.可以得出以下结论:

(1) 在 $0.5L_{pp} \sim 1.5L_{pp}$ 范围内,模型试验与数值模拟得到的平衡艏摇角具有较好的一致性,验证了数值方法的准确性.

(2) 随着平衡艏摇角和波陡的增加,升沉和横摇的响应幅度显著增加.波陡不影响最终平衡艏摇角,但会影响艏摇达到平衡所需的时间.

(3) 对于具有多个平衡点的海况,初始艏摇角影响FPSO最终达到的平衡位置和运动响应.

参 考 文 献

- 李俊,杨建民,肖龙飞. 转塔位置对FPSO水动力性能的影响. 海洋工程, 2005(4): 9~14 (Li J, Yang J M, Xiao L F. Effect of turret location on the hydrodynamic performance of turret moored FPSO. *Ocean Engineering*, 2005(4): 9~14 (in Chinese))
- Liu F, Bown D T, Fang J. Yawing of turret-moored monohull vessels in response to regular waves. *Journal of Ship Research*, 1999, 43(3): 135~142
- Munipalli J, Thiagarajan K P. Effect of wave steepness on yaw motions of a weathervaning floating platform// Proceedings of the 16th Australasian Fluid Mechanics Conference, 2007: 1007~1011
- Yadav A, Varghese S, Thiagarajan K P. Parametric study of yaw instability of a weathervaning platform// Proceedings of the 16th Australasian Fluid Mechanics Conference, 2007: 1012~1015
- Cho S K, Sung H G, Hong S Y. Study of the behavior of turret moored floating body// Proceedings of the 23th International Society of Offshore and Polar Engineers Conference, 2013: 892~898
- Bernitsas M M, Papoulias F A. Stability of single point mooring systems. *Applied Ocean Research*, 1986, 8(1): 49~58
- Zangeneh R, Thiagarajan K P. Heading instability analysis of FPSOs. Proceedings of the 25th International Society of Offshore and Polar Engineers Conference, 2015: 1461~1469
- 黄郑鑫,刘利琴,刘亚柳,等. 规则波中内转塔式FPSO艏摇失稳研究. 中国造船, 2021, 62(2): 55~67 (Huang Z X, Liu L Q, Liu Y L, et al. Research on yaw instability of turret moored FPSO in regular waves. *Ship Building of China*, 2021, 62(2): 55~67. (in Chinese))
- Huang Z X, Liu L Q, Garg A, et al. Research on heading instability of turret moored FPSO by the nonlinear method// Proceedings of the 30th International Society of Offshore and Polar Engineers Conference, China, 2020: 1103~1109
- Cummins W E. The impulse response function and ship motions. David Taylor Model Basin Washington D C, 1962
- BV NR 493, Classification of Mooring System for Permanent Offshore Units. 2012
- 陈金忠. 基于FPSO运动响应分析的系泊系统风险识别研究. 天津: 天津大学, 2018 (Chen, J Z. Research on risk identification of mooring system based on FPSO motion response analysis. Tianjin: Tianjin University, 2018 (in Chinese))

RESEARCH ON YAW INSTABILITY OF FPSO BASED ON FULLY COUPLED TIME-DOMAIN SIMULATION*

Liu Yaliu¹ Chen Diyu^{2,3,4,5} Liu Liqin^{1†} Huang Zhengxin¹

(1. *Tianjin University, State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin 300354, China*)

(2. *CCCC second harbor engineering company, Wuhan 430040, China*)

(3. *Key Laboratory of Large-span Bridge Construction Technology, Wuhan 430040, China*)

(4. *Research and Development Center of Transport Industry of Intelligent Manufacturing Technologies
of Transport Infrastructure, Wuhan 430040, China*)

(5. *CCCC Highway Bridge National Engineering Research Centre Co. Ltd, Wuhan 430040, China*)

Abstract In order to study the yaw instability of FPSO in regular waves, nonlinear fully coupled 6-DOF motion equations of moored floating body are established and solved numerically. The accuracy of equation is verified by comparing equilibrium yaw angles calculated by numerical simulation with model test. The influence of yaw instability on motion responses is studied. The influences of initial yaw angle and wave steepness on yaw instability and motion responses are also studied. The results show that the FPSO may lose the weathervane effect at particular wavelength to ship length ratio, and this increases the wave loads acting on the hull which arouse greater responses in roll and heave. The wave steepness doesn't affect the final equilibrium yaw angle. However, it affects the time required to reach equilibrium and the response amplitude. The initial yaw angle affects the final equilibrium position and motion response of the FPSO.

Key words yaw instability, numerical simulation, fully coupled equation

Received 17 June 2021, revised 11 August 2021.

* The project supported by Tianjin Municipal Transportation Commission Project (2018-b2).

† Corresponding author E-mail: liuliqin@tju.edu.cn