

浅水 FPSO 船型主尺度对运动和触底的研究

李欣 杨建民 肖龙飞

(上海交通大学, 海洋工程国家重点实验室)

摘 要

本文根据有关 FPSO 浅水效应的研究成果, 针对渤海 PL19-3 油田的工程开发而提出的 FPSO 主尺度设计方案, 增大了设计满载吃水和型宽, 提高了经济效益。本文利用时域模拟计算和模型试验等研究方法, 对 FPSO 两种方案在百年一遇风浪流组合环境条件中的运动响应, 是否触底等关系到系统安全和作业效率的重大技术问题进行了系统研究。本文的研究结果对 FPSO 的设计以及运动分析有一定的指导意义。

关 键 词: FPSO; 浅水; 船型主尺度; 触底

1 前 言

FPSO (Floating Production, Storage and Offloading System) 中文称为浮式生产储卸油装置, 兼具生产和储油的作用, 以其较高的商业价值而备受关注。近年来, FPSO 在海上油气田开发的应用发展迅速。我国在渤海海域拥有大面积的浅水深油田, 现有 4 艘 FPSO 正在服役, 今后几年中还有几艘即将投入使用^[1], 浅水域中的运动和安全问题, 越来越受到重视, 浅水效应对 FPSO 的影响, 使得在 FPSO 的设计和使用上都有新的突破^[2]。

本文研究的 30 万吨级 FPSO 系统是针对渤海 PL19-3 油田的工程开发而设计的, 原先的方案 A, FPSO 吃水达到 20 m 以上。应用浅水效应而新提出的主尺度优化设计方案 B, 在 FPSO 的主尺度, 载重量, YOKE 系泊系统的各个参数, 以及转塔等等都作了不同程度的优化, 可以大大提高经济效益。由于 FPSO 就位地点的海图水深相对较浅, 为 26.7 m, 且考虑百年一遇极端低水位后仅为 25.75 m, 所以 FPSO 在遭遇海域恶劣环境条件时的运动响应与系泊载荷问题就成为直接关系到系统安全和作业效率的重大技术问题。通过在上海交通大学风浪流水池进行模型试验和数值模拟, 确定两个方案下的 FPSO 在百年一遇环境条件下, 船底与海底之间的最小安全作业间隙, 评估两种方案的优劣, 为确定工程设计方案提供可靠依据。

本文采用模型实验和理论计算相结合的方法, 对两种船型方案 30 万吨级 FPSO 系统在百年一遇风浪流组合环境条件作用下的运动特性和安全性。

2 计算理论

2.1 三维势流理论^[3-4]

假设流体为理想流体, 并且为无旋流。在 Cartesian 坐标系中, 可以得到:

$$\begin{cases} q(\underline{x}, t) = \text{Re}\{u(\underline{x})e^{-i\omega t}\} \\ \zeta(\underline{x}, t) = \text{Re}\{\eta(\underline{x}, y)e^{-i\omega t}\} \\ \Phi(\underline{x}, t) = \phi(\underline{x})e^{-i\omega t} \end{cases} \dots\dots\dots (1)$$

式中, $u(\underline{x}) = \nabla \phi(\underline{x})$, ω 表示长峰波的频率, ζ 为自由表面起伏, q 为速度, Φ 为势函数, 下划线表示向量。线性化后的控制方程如下:

$$\Delta \phi(\underline{x}) = 0 \dots\dots\dots (2)$$

$$\text{自由表面条件: } \partial \phi(\underline{x}) / \partial z - \omega^2 \phi(\underline{x}) / g = 0 \dots\dots\dots (3)$$

$$\text{物面条件: } \partial \phi(\underline{x}) / \partial N = |\underline{v} \cdot \underline{n}| \dots\dots\dots (4)$$

$$\text{海底条件: } \partial \phi(\underline{x}) / \partial N = 0 \dots\dots\dots (5)$$

在线性化的条件下, 可以将 ϕ 分解为绕射势, 散射势和辐射势[4]:

$$\phi = \phi_i + \phi_d + \sum_{j=1}^M \phi_{m_j} \dots\dots\dots (6)$$

式中, ϕ_i 为绕射势, ϕ_d 为散射势, ϕ_{m_j} 为物体运动引起的势。

选择合适的格林函数, 使它满足拉普拉斯方程, 线性自由面条件, 海底条件和辐射条件, 应用 FPSO 船体的边界条件, 可以计算出格林函数的数值解。积分方程可以简化为一系列的线性代数方程式。

散射势和物体运动引起的势可以通过式 (7) 求得:

$$\begin{pmatrix} \phi_d \\ \phi_{Rj} \end{pmatrix} = \frac{1}{4\pi} \iint_{S_B} \begin{pmatrix} \sigma_d \\ \sigma_R \end{pmatrix} G ds \dots\dots\dots (7)$$

其中 $(\sigma_d, \sigma_R)^T$ 是源强, 并分布在湿表面上。 S_B 为物体边界。

$(\sigma_d, \sigma_R)^T$ 由式 (8) 计算得到

$$\frac{1}{2} \begin{pmatrix} \sigma_d \\ \sigma_R \end{pmatrix} + \iint_{S_B} \begin{pmatrix} \sigma_d \\ \sigma_R \end{pmatrix} \frac{\partial G}{\partial n} ds = \begin{pmatrix} -\frac{\partial \phi_i}{\partial n}, n_j \end{pmatrix} \dots\dots\dots (8)$$

波浪引起的绕射势 ϕ_i 由式 (9) 求出

$$\phi_i = -\frac{Ag \cosh k(z+h)}{\omega \cosh kh} \exp[ik(x \cos \beta + y \sin \beta)] \dots\dots\dots (9)$$

式中: A ——波幅;

g ——重力加速度;

h ——水深;

k ——波数;

浪向 β 为波浪传播方向与 x 轴正方向的夹角。

$$\text{FPSO 的运动方程如下: } [C_{ij} - \omega^2(M_{ij} + \mu_{ij}) - i\omega\lambda_{ij}] \xi_j = f_{\omega i} \quad \dots\dots\dots (10)$$

其中 C_{ij} ——回复力系数矩阵;

M_{ij} ——质量矩阵;

μ_{ij} ——附加质量矩阵;

λ_{ij} ——阻尼矩阵。

μ_{ij} 和 λ_{ij} 的表达式为:

$$\mu_{ij} + i\lambda_{ij}/\omega = -\rho \int_{S_B} \phi_{Rj} n_i ds \quad \dots\dots\dots (11)$$

激励力 f_i :

$$f_{\omega i} = -i\rho\omega \int_{S_B} (\phi_l + \phi_d) n_i ds \quad \dots\dots\dots (12)$$

其中 $f_{\omega i}$ ($i=1,2,\dots,6$) 为波浪载荷, ($f_{\omega 1}, f_{\omega 2}, f_{\omega 3}$) 表示波浪力, ($f_{\omega 4}, f_{\omega 5}, f_{\omega 6}$) 为波浪力矩。

2.2 时域运动方程^[4]

FPSO 的运动方程为:

$$\sum_{j=1}^6 \left[(M_{ij} + \mu_{ij}) \ddot{x}_j(t) + \int_0^t K_{ij}(t-\tau) \dot{x}_j(\tau) d\tau + C_{ij} x_j(t) \right] = F_{wi}(t) \quad i=1,2,\dots,6 \quad \dots\dots\dots (13)$$

这里, $x_i(t)$ 为波频运动, M_{ij} 和 C_{ij} 分别为质量矩阵和静恢复力矩阵, μ_{ij} 为附加质量矩阵。 $K_{ij}(t)$ 为时延函数:

$$K_{ij}(t) = \frac{2}{\pi} \int_0^\infty \lambda_{ij}(\omega) \cos(\omega t) d\omega \quad \dots\dots\dots (14)$$

其中, $\lambda_{ij}(\omega)$ 是频域里的阻尼系数矩阵。 $F_{\omega i}(t)$ 为 i 方向上的一阶波浪力, 可根据 Cummins(1962) 提出的脉冲响应方法与频域计算中得到的波浪力 $f_{\omega i}(\omega)$ 联系起来, 即设

$$F_{wi}(t) = \int_{-\infty}^t h_i(t-\tau) \eta(\tau) d\tau \quad \dots\dots\dots (15)$$

其中: $\eta(\tau)$ 为 τ 时刻的波形坐标, 当 $\eta(\tau) = \delta(\tau)$ 时, $F_{wi}(t) = h_i(t)$ 是脉冲响应。而 $h_i(t)$ 又与

频率响应互为 Fourier 变换, 即:

$$\begin{cases} f_{wi}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} h_i(t) e^{-i\omega t} dt \\ h_i(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} f_{wi}(\omega) e^{i\omega t} d\omega \end{cases} \dots\dots\dots(16)$$

若已知整个频率范围内的 $f_{wi}(\omega)$, 即可按上式求得 $h_i(t)$, 然后按波浪时历 $\eta(\tau)$, 据式(9)求得时域中的一阶波浪干扰力。

上述频域中的附加质量 $\mu_{ij}(\infty)$, 阻尼系数 $\lambda_{ij}(\omega)$ 以及波浪力 $f_{wi}(\omega)$ 均可通过线性三维势流理论应用源汇分布法计算得到。因此求解时域运动方程(13), 即可得到 FPSO 的波频运动时历。

3 研究对象和海洋环境条件

3.1 FPSO 主尺度

该 FPSO 原先的设计方案为 A 方案, 主尺度: $301 \times 58 \times 29.4 \times 20.4$, 最新提出的设计方案, 主尺度: $281 \times 65 \times 29.4 \times 22.0$, 具体参数对比见表 1。

表 1 A 方案 FPSO 主要参数

项目	符号	单位	方案 A	方案 B
总长	LOA	m	308.0	288.0
垂线间长	Lpp	m	301.0	281.0
型宽	B	m	58.0	65.0
型深	D	m	29.4	29.4
吃水	T	m	20.4	22.031
排水量	Δ	t	349430	384091.1
排水体积		m^3	340907	374723.0
浮心、重心纵向位置	XB,XG	m	2.82	-1.718
重心垂向位置	ZG	m	16.61	17.498
横稳性高	GM	m	7.2	9.084
纵稳性高	LGM	m	345.89	279.14
纵向惯性半径	Kyy	m	75.25	70.25
横向惯性半径	Kxx	m	17.75	19.74

从上表中各个参数的对比可以看出, 方案 B 加大了吃水和船宽, 相应排水量增加了很多。根据浅水效应^[5-6]的研究, 水深虽然很浅, 但是其运动相应亦减小, 而使碰底现象不易发生, 可以大大提高该 FPSO 的安全性和经济效应。

3.2 数值计算网格划分

建立 FPSO 的几何模型, 对外表面水下部分划分网格, 划分时因为 FPSO 左右对称, 所以只划分左舷部分即可。划分结果见图 1, A 方案整条船网格的数目共 459×2 个, B 方案整条船网格的数目共 432×2 个。

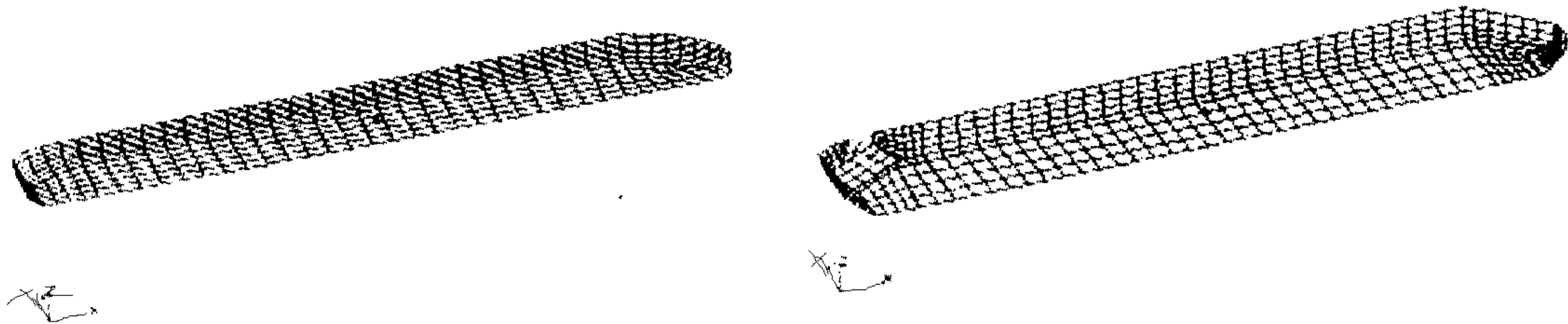


图 1 FPSO 的网格划分

3.3 运动的时域模拟

给定风浪流和水深等环境条件, 对 FPSO 单点系泊系统在风浪流下的运动进行时域模拟, 选择四个最容易发生碰底的参考点, 即平行中体的起止点, 计算四点距海底的距离来判断 FPSO 是否碰底, 并与试验结果进行对比。

3.4 模型试验

模型试验内容包括在百年一遇环境条件下 FPSO 满载工况, 研究不同水深, 即不同水深吃水比时, 两种方案 FPSO 的运动性能, 并寻找船底与海底最小作业间隙。

3.5 环境条件

由于 FPSO 试验模型分别在不同缩尺比下建造, 所以海洋环境条件的模拟工作将依照两种不同缩尺比 ($\lambda = 66$ 和 $\lambda = 68$) 进行。

海洋环境条件的模拟完全按照给定要求进行。选取最不利的百年一遇环境条件组合: 同向风和浪与横流组合, 在这个组合条件下, FPSO 的垂向运动最为剧烈, 对于是否碰底的安全性最为不利, 因此, 用于研究 FPSO 的垂向运动性能以及船底与海底的作业间隙。

百年一遇海况风浪流的组合如下: 流速 1.78 m/s , 流向 90° , 定常风速 27.5 m/s , 风向 180° 。

波浪采用 JONSWAP 谱, $\gamma = 2.912$, 有义波高 5.2 m , 谱峰周期 9.1 s , 所选用的目标谱公式如下:

$$S(f) = \alpha H_s^2 T_p^{-4} f^{-5} \exp \left[-1.25 (T_p f)^{-4} \right] \gamma^{\exp \left[-(T_p f - 1)^2 / 2 \sigma^2 \right]}$$

式中,

$$\begin{aligned} S(f) &= \text{谱密度}(\text{m}^2\text{s}) \\ H_s &= \text{有义波高}(\text{m}) \\ f &= \text{波频}(\text{Hz}) \\ f_p &= \text{谱峰频率}(\text{Hz}) = 1/T_p \\ T_p &= \text{谱峰周期}(\text{Sec}) \\ \gamma &= \text{谱峰因子} \end{aligned}$$

$$\alpha = \frac{0.0624}{0.230 + 0.0336\gamma - 0.185/(1.9 + \gamma)}$$

$$\sigma = \begin{cases} 0.07 & f \leq f_p \\ 0.09 & f > f_p \end{cases}$$

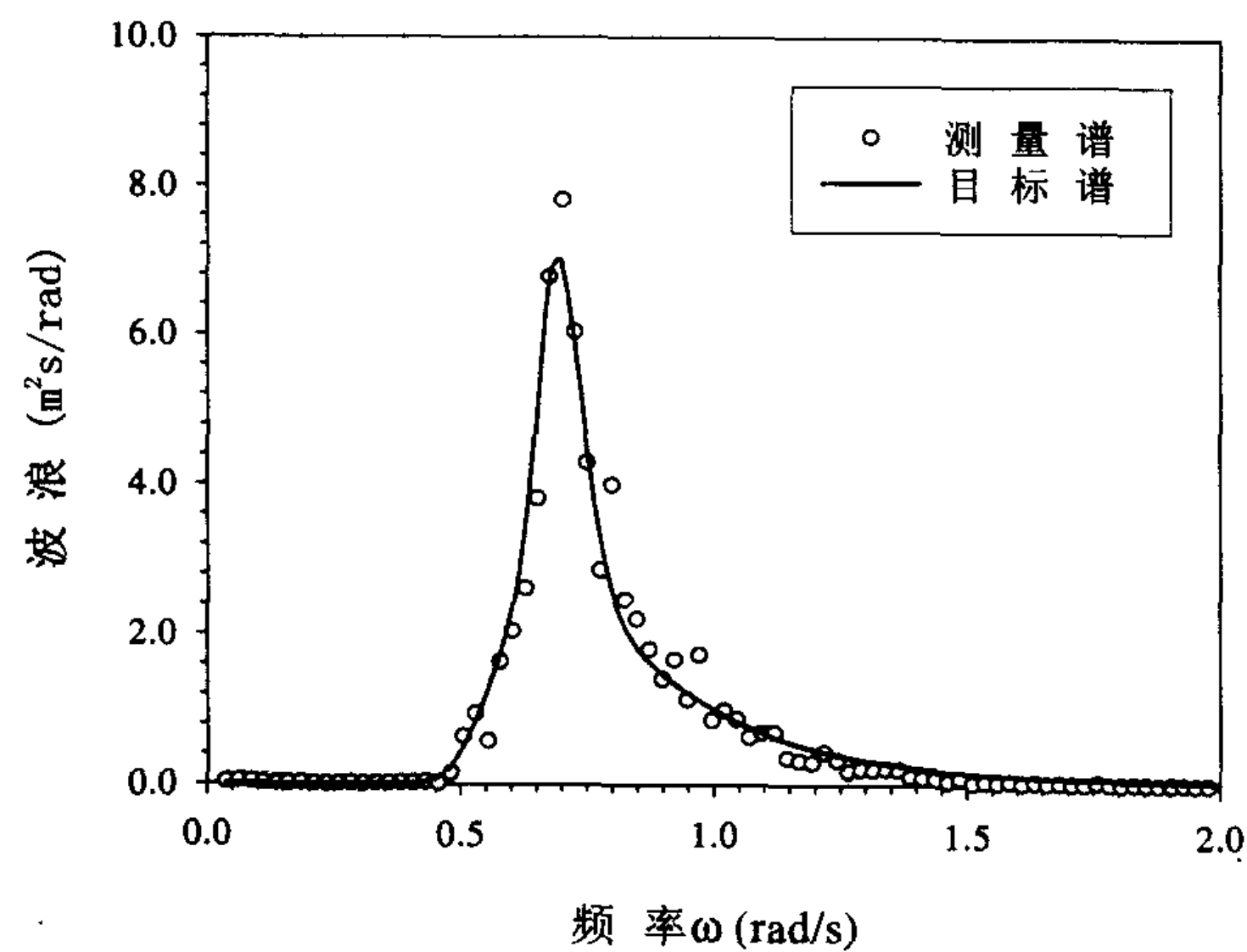
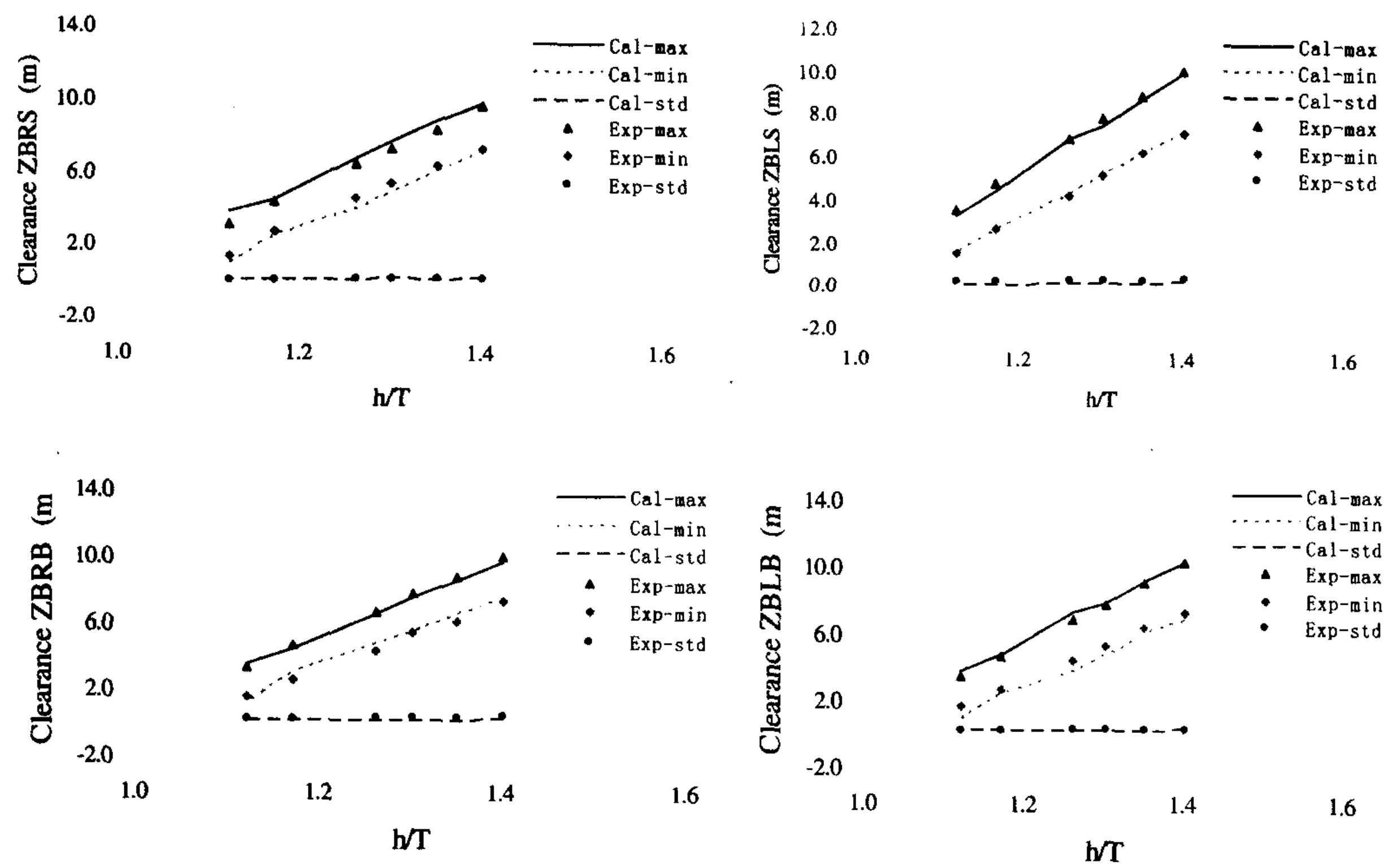


图 2 波浪测量谱与目标谱的比较

波浪谱的模拟结果如图 3 所示



3 改进方案后垂向间隙统计值随水深变化曲线

图 3 为平行中体在船底的四个顶点与海底的垂向间隙的最大值、最小值和方差，随水深吃水比的变化曲线，ZBRS、ZBLS、ZBRB 和 ZBLB 分别代表船尾右侧、船尾左侧、船首右侧和船首左侧点。图中试验结果和计算结果统计值的结果吻合良好；该 FPSO 在水深吃水比最小达 1.12 时，经历百年一遇风浪横流的环境条件下，最小垂向间隙仍有 1.0m。因此，即使水深仅为 24.6m，FPSO 也不会碰底，可以安全作业。

对于满载吃水 20.4 m 的方案 A，考虑 4 个水深：28.6 m、25.75 m、23.9 m 和 22.9 m，水深吃水比分别为 1.40、1.26、1.17、1.12；对于满载吃水 22.0 m 的方案 B，考虑 6 个水深：30.8 m、29.7 m、

28.6 m、27.7 m、25.75 m 和 24.6 m，水深吃水比分别为 1.40、1.35、1.30、1.26、1.17、1.12。

4 计算与试验结果分析

4.1 碰底结果分析

本文对 B 方案进行了详细的计算与试验，主要关注其是否碰底，即船底与海底的间隙。

4.2 运动的计算和试验结果

表 2 FPSO 垂荡运动随水深吃水比变化对比

方案A 垂荡 (m)						方案B 垂荡 (m)					
水深/水深吃水比		最大值	最小值	平均值	方差	水深/水深吃水比		最大值	最小值	平均值	方差
22.9/1.12	实验值	0.43	-0.78	-0.03	0.15	24.6/1.12	实验值	0.38	-0.47	-0.02	0.12
	计算值	0.48	-0.58	0.00	0.13		计算值	0.48	-0.61	0.00	0.12
23.9/1.17	实验值	0.44	-0.90	-0.02	0.14	25.75/1.17	实验值	0.44	-0.45	0.04	0.12
	计算值	0.45	-0.58	0.00	0.12		计算值	0.38	-0.48	0.00	0.11
25.75/1.26	实验值	0.36	-0.82	-0.04	0.13	27.7/1.26	实验值	0.42	-0.54	-0.02	0.13
	计算值	0.42	-0.64	0.00	0.12		计算值	0.33	-0.57	0.00	0.11
28.6/1.4	实验值	0.49	-0.61	-0.02	0.15	30.8/1.4	实验值	0.42	-0.53	-0.04	0.14
	计算值	0.46	-0.67	0.00	0.12		计算值	0.40	-0.55	0.00	0.11

表 3 FPSO 横摇运动随水深吃水比变化对比

方案A 横摇 (deg)						方案B 横摇 (deg)					
水深/水深吃水比		最大值	最小值	平均值	方差	水深/水深吃水比	deg	最大值	最小值	平均值	方差
22.9/1.12	实验值	1.60	-2.00	0.03	0.37	24.6/1.12	实验值	1.22	-0.90	0.05	0.29
	计算值	1.39	-1.38	0.00	0.39		计算值	1.43	-1.48	0.00	0.40
23.9/1.17	实验值	2.40	-1.13	0.03	0.34	25.75/1.17	实验值	1.08	-0.96	0.04	0.24
	计算值	1.05	-1.13	0.00	0.30		计算值	1.23	-1.04	0.00	0.30
25.75/1.26	实验值	1.90	-1.38	-0.01	0.35	27.7/1.26	实验值	1.00	-1.03	0.02	0.28
	计算值	1.66	-1.86	0.00	0.45		计算值	1.68	-1.32	0.00	0.34
28.6/1.4	实验值	1.38	-1.49	0.10	0.38	30.8/1.4	实验值	0.97	-0.93	0.00	0.26
	计算值	1.39	-1.41	0.00	0.29		计算值	1.09	-1.18	0.00	0.27

表 4 FPSO 纵摇运动随水深吃水比变化对比

方案A 纵摇 (deg)						方案B 纵摇 (deg)					
水深/水深吃水比	deg	最大值	最小值	平均值	方差	水深/水深吃水比	deg	最大值	最小值	平均值	方差
22.9/1.12	实验值	0.27	-0.27	-0.01	0.08	24.6/1.12	实验值	0.30	-0.24	-0.02	0.07
	计算值	0.30	-0.25	0.00	0.07		计算值	0.28	-0.27	0.00	0.07
23.9/1.17	实验值	0.29	-0.34	-0.04	0.09	25.75/1.17	实验值	0.31	-0.33	-0.02	0.10
	计算值	0.35	-0.29	0.00	0.08		计算值	0.30	-0.27	0.00	0.08
25.75/1.26	实验值	0.53	-0.42	0.02	0.11	27.7/1.26	实验值	0.50	-0.43	-0.01	0.13
	计算值	0.41	-0.33	0.00	0.10		计算值	0.40	-0.42	0.00	0.11
28.6/1.4	实验值	0.54	-0.55	0.00	0.15	30.8/1.4	实验值	0.56	-0.56	-0.01	0.17
	计算值	0.53	-0.52	0.00	0.14		计算值	0.58	-0.57	0.00	0.15

表 2、3 和 4 分别列出两个方案中，FPSO 在不同的水深时的垂荡、横摇和纵摇运动，计算和试验结果的统计值。由表中可以看出，两个方案的计算结果与实验结果基本吻合；不同水深下，百年一遇风浪和横流组合作用时，FPSO A 以及 FPSO B 的垂荡和纵摇运动幅值均随水深减小而明显减小；特别是纵摇，在水深吃水比从 1.4 减到 1.12 时，纵摇幅值从 0.6°减小到 0.3°左右；横摇运动幅值随水深变化不明显，原因可能在于：随着水深减小，一方面，船的首摇角增大，横摇运动有加剧趋势，而另一方面，船自身水动力特性的变化使得横摇运动有减小趋势。FPSO B 和 FPSO A 在相同的水深吃水比时，FPSO B 在吃水和船宽均增大的情况下，运动相对 FPSO 稍有减小，符合浅水效应的规律；在该海域极端浅水位水深 25.75m 下，满载 FPSO B 相对于满载 FPSO A，吃水与船宽均增加了，而垂荡、横摇和纵摇这 3 个垂向运动，比满载 FPSO A 亦相差不大。

5 结 论

(1) 不同水深下, 百年一遇风浪和横流组合作用时, FPSO A 以及 FPSO B 的垂荡和纵摇运动幅值均随水深减小而明显减小。

(2) 方案 B 中 FPSO 增大了船宽、吃水和载重量, 在经历百年一遇风浪横流的环境条件下, 即使水深吃水比最小达 1.12 也没有发生碰底现象。

(3) 应用浅水效应对 FPSO 主尺度的改进可以达到预期的效果, 增大了载重量, 提高了经济效益。

参 考 文 献

- 1 赵耕贤. 浮式生产储油船(FPSO)设计. 上海造船, 2002, (2): 4~8。
- 2 杨建民, 肖龙飞等. 浅水不规则波浪中油轮运动研究. 海洋工程, 2000, (18) 3: 25~29
- 3 F. Blandeau, M. Francois, S. Malenica and X.B.Chen, Bureau Vertas(1999). Linear and Non-Linear Wave Loads on FPSOs. Proceedings of the Ninth(1999) International Offshore and Polar Engineering Conference Brest, France, 252~258
- 4 刘应中, 缪国平. 船舶在波浪上的运动理论. 上海交通大学出版社, 1987.
- 5 Xin Li, Jianmin yang and Longfei Xiao. Motion Analysis on a Large FPSO in Shallow Water. Proceedings of the Thirteenth (2003) International Offshore and Polar Engineering Conference. PP235~239.
- 6 李欣, 杨建明等. 渤海油田潜水软刚臂系泊 FPSO 触底分析. 海洋工程, 2004, 22 (2): 51~57。

Study on the Main Particulars of Shallow Water FPSO for the Influence in Motions and Touching Sea Bottom

Li Xin Yang Jianmin Xiao longfei

(Shanghai Jiao Tong University, The State Key Laboratory of Ocean Engineering)

Abstract

This paper presents a study on the hydrodynamic characteristics of different FPSOs by using 3D potential theory and time-domain simulation based on the research achievements in shallow water effect of FPSO. The occurrences of touching sea bottom are also predicted. The comparison shows good agreements between numerical results and the model test data. The above research is available for the design and analysis of FPSO.

Key words: FPSO; Shallow water; main particulars; touching sea bottom

作 者 简 介

李 欣 女, 1975 年生, 在读博士, 上海交通大学海洋工程国家重点实验室

杨建民 男, 1958 年生, 教授、博士生导师, 上海交通大学海洋工程国家重点实验室

肖龙飞 男, 1973 年生, 博士, 上海交通大学海洋工程国家重点实验室