

浮式塔的动力计算

范 菊¹, 纪亨腾¹, 黄祥鹿¹

(1. 上海交通大学 船舶与海洋工程学院, 上海 200030)

摘要: 采用频域二阶摄动法研究了浮式塔在给定环境条件下的动力响应. 计算了浮式塔在不规则波上的一阶运动响应函数和运动谱以及张力谱, 同时进行了相应的模型试验. 由结果的比较可以看出, 试验结果与理论方法计算得到的结果吻合较好. 计算结果表明, 波浪的二阶作用对浮式塔的低频纵荡有影响. 计算结果与试验结果的比较说明频域二阶摄动法可以用于浮式塔的动力分析.

关键词: 浮式塔; 运动响应; 摄动方法; 模型试验

中图分类号: P752

文献标识码: A

文章编号: 0253- 4193(2001) 02- 0117- 07

1 引言

近年来深海和超深海油气开发已成为海洋开发的热点. 当前全球所消耗的油气中 30% 以上来自海底油田. 目前中等深度和浅海的开发技术已经成熟, 使得工程界对深海开发相当感兴趣. 在深海和超深海油气开发中, 深海平台的开发占有重要地位. 寻求一种高效、安全、经济的深海采油平台成了一个世界瞩目的问题. 由于深海自然环境条件严酷, 深海平台必须提供一个满足开采作业要求的环境. 常用于普通水深的固定式平台, 如半潜平台等难以达到要求. 为此近年来陆续出现了牵索塔、张力腿平台和柱型平台(spar platform) 等新的平台形式.

目前深海采油最常用的平台为张力腿平台和 20 世纪 90 年代中期才出现的柱型平台. 张力腿平台可用于 1 000 m 左右的水深, 但其结构复杂, 造价贵, 且对水深过于敏感, 庞大的重量和浮力及作用于其上的水动力载荷使其不适于更深的海域. 对于较深的水域及边际油田, 新兴的柱型平台已为人们广为关注, 但最大的缺点是它的锚链要承受较大的预张力.

尽管柱式平台在设计上已有创新, 与早期的平台相比在稳定性上有所突破, 但由于在稳定性方面的要求, 因此在柱式平台的基础上, 有人提出了一种新型、可靠且造价较低的海上采油平台——浮式塔. 浮式塔一般由甲板结构、起支撑作用的桁架结构、提供浮力和可变压载的浮式结构物、用于保持平衡的软张力腿系统及常规锚系组成. 这种浮式塔的优点在于它打破了

收稿日期: 2000- 04- 25; 修订日期: 2000- 06- 18.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(49776306).

作者简介: 范 菊(1970-), 女, 江苏省苏州市人, 讲师, 博士, 从事海洋结构物动力响应的研究.

传统的设计思想,将浮式结构置于水面下较深的位置,使波浪对其影响较小.在水面处只布置一些桁架结构,这使浮式塔所受的波浪力及力矩明显较其他采油平台小,因此运动响应相应减小,稳定性大大增加.目前国外 Lou 等^[1]对浮式塔进行了试验研究.国内李波等^[2,3]对浮式塔进行了理论计算,在频域内计算了有限水深时浮式塔对规则波的运动响应和所受的二阶定常波浪慢漂力,同时与半潜式平台和柱式平台的结果进行了比较,发现浮式塔的一阶运动响应函数及所受的二阶慢漂力都最小.

采油平台的稳定性对海上作业至关重要.由于平台在实际海浪环境中作业时受到风、浪、流外界的作用,产生摇荡运动,如运动幅度较大,将对平台正常操作产生影响,尤其在恶劣环境中稳定性差可能导致整个平台结构毁损或倾覆.当前浮式塔与其他各种平台形式相比,以其独特的结构,使平台的稳定性又提高到一个新的水平,因此对于浮式塔的研究将对海洋工程的发展具有重大的实际意义.

本文采用频域二阶摄动方法研究了浮式塔在给定环境条件下的动力响应.尽管二阶摄动方法在其他浮式结构物动力分析上已相当成功^[4~7],但用于浮式塔是否合适尚未与试验进行过比较.本文的目的是针对二阶摄动方法用于浮式塔动力分析的可用性进行考核.计算了一个具体的浮式塔结构在不规则波上的一阶运动响应函数、运动谱以及张力谱,同时进行了相应的模型试验.通过理论与试验的比较,考察二阶摄动方法用于分析浮式塔在波浪上的运动响应的可信性.

2 理论

本文采用边界元法对浮式塔进行势流计算.计算出浮体在各频率结点上的附加质量、阻尼系数以及波浪干扰力.该方法考虑了有限水深(对无限水深同样适用).对于波浪二阶慢漂力,应用 Pinkster 的近场方法:

$$\begin{aligned} \vec{F}^{\lambda(2)} = & \int_{\Gamma_0} \frac{1}{2} \rho g (\eta^{(1)} - \zeta^{(1)})^2 \vec{n} d\Gamma + \bar{\alpha}^{(2)} \iint_{s_0} -\rho \Phi_1^{(1)} \vec{n} ds + \\ & \iint_{s_0} -\rho \left[\frac{1}{2} \Delta \Phi^{(1)2} + \overline{P_0 P}^{(1)} \Phi_1^{(1)} \right] \vec{n} ds + \iint_{s_0} -\rho (\Phi_{wi}^{(2)} + \Phi_{li}^{(2)}) \vec{n} ds, \quad (1) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \vec{M}^{\lambda(2)} = & \int_{\Gamma_0} \frac{1}{2} \rho g (\eta^{(1)} - \zeta^{(1)})^2 (\vec{r}_0 \times \vec{n}) d\Gamma + \bar{\alpha}^{(2)} \iint_{s_0} -\rho \Phi_1^{(1)} (\vec{r}_0 \times \vec{n}) ds + \\ & \iint_{s_0} -\rho \left[\frac{1}{2} \Delta \Phi^{(1)2} + \overline{P_0 P}^{(1)} \Phi_1^{(1)} \right] (\vec{r}_0 \times \vec{n}) ds + \\ & \iint_{s_0} -\rho (\Phi_{wi}^{(2)} + \Phi_{li}^{(2)}) (\vec{r}_0 \times \vec{n}) ds, \quad (2) \end{aligned}$$

式中, \vec{n}_0 为浮体内法线方向; s_0 为浮体平均湿表面; Γ_0 是水线; \vec{r}_0 为浮体表面各点坐标; $\bar{\alpha}^{(2)}$ 为浮体一阶角位移; $\overline{P_0 P}^{(1)}$ 为浮体上各点的一阶位移; $\Phi_{wi}^{(2)}$ 、 $\Phi_{li}^{(2)}$ 分别为二阶波浪入射势与绕射势.

动力计算采用频域摄动方法.在频域内,对于浮式塔运动如不计方程中流体反力的非线性,认为质量、附加质量、阻尼以及恢复力都为线性,即假设浮体的运动方程为线性,非线性体

现在外干扰, 即波浪力方面, 浮式塔的运动方程可表为如下形式:

$$[A] \begin{bmatrix} \bar{x} \\ \bar{y} \\ \bar{z} \\ \bar{\alpha} \\ \bar{\beta} \\ \bar{\gamma} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{X}_w \\ \bar{Y}_w \\ \bar{Z}_w \\ \bar{M}_{wx} \\ \bar{M}_{wy} \\ \bar{M}_{wz} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中, $\bar{X}_w, \bar{Y}_w, \bar{Z}_w, \bar{M}_{wx}, \bar{M}_{wy}$ 以及 \bar{M}_{wz} 为波浪力对浮式塔 6 个运动自由度上提供的力(矩); $\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}, \bar{\alpha}, \bar{\beta}, \bar{\gamma}$ 分别为浮式塔的纵荡、横荡、垂荡、横摇、纵摇和首摇的运动;

$$[A] = -[a]\omega^2 + [b]i\omega + [c], \quad (4)$$

其中 $[a]$ 为质量矩阵; $[b]$ 为阻尼矩阵; $[c]$ 为恢复力矩阵.

采用摄动法摄动至二阶, 可得一阶和二阶运动方程. 二阶方程可求得慢荡的结果. 对于二阶问题, 运动为一对频率的函数. 方程中的恢复力项, 由流体静力学方法算出, 具体的理论方法可参考文献[5].

3 模型试验概述

为了校核理论计算的可靠性, 在上海交通大学海洋工程国家重点实验室水池进行了模型试验. 实验室的海洋工程水池主要尺度为长乘宽乘水深: 50 m × 30 m × 6 m. 可模拟风、浪、流各种海洋环境条件, 并能根据试验要求改变水深. 本次试验所用的水池主要设备如下:

(1) 造波系统. 配有一套双推板大功率的液压造波机, 能产生规则波和不规则波的长峰波, 最大波高可达 0.6 m.

(2) 消波系统. 在造波机的对岸设有消波滩, 借以吸收波能而防止产生反射波.

(3) 水深调节系统. 大面积可升降假底能使水深在 0 ~ 5 m 间调节.

(4) 拖车系统. 横跨水池配有大跨度 XY 方向拖车, 最大速度为 1.0 m/s.

(5) 配有各类测试仪器和数据自动采集及实时分析系统.

3.1 模型尺寸

根据试验的条件, 在制作模型时将浮式塔的一些部分进行了适当修改, 如将张力腿的刚度增加. 一般浮式塔周围有一些辅助的锚链系统, 这里为了试验方便, 未考虑辅助锚链系统. 图 1 为浮式塔实体示意图.

模型按缩尺比 $\lambda = 24$ 进行模拟制造. 表 1 为浮式塔实体和模型的主要尺度.

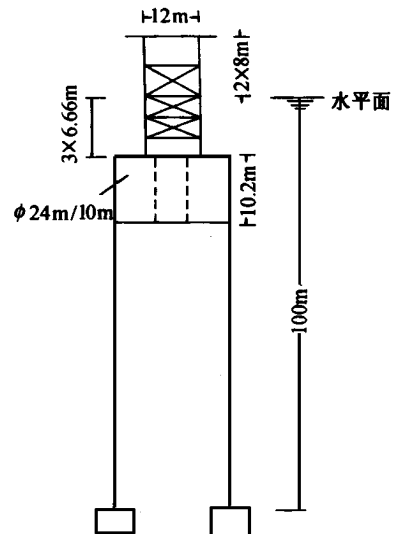


图 1 浮式塔实体示意图

表 1 浮式塔的主要尺度

	实体		模型	
	实体	模型	实体	模型
甲板离水面高度/m	16	0.667	平台总重/t	2 980
浮体截面(环柱型尺寸)/m	外径 24, 内径 10	外径 1, 内径 0.4167	平台排水量/t	4 061
环柱型浮体高度/m	10.2	0.425	系索数量	4
平台吃水/m	30.2	1.258		

3.2 试验工况

浮式塔的实体对应水深为 100 m, 相应模型的水深为 4.17 m. 水深的模拟采用可调节升降的假底. 试验波谱采用 P-M 谱, 可表示为

$$S(\omega) = \frac{H_s T_z}{8\pi^2} \left(\frac{\omega T_z}{2\pi} \right)^{-5} \exp \left[- \frac{1}{\pi} \left(\frac{\omega T_z}{2\pi} \right)^4 \right], \quad (5)$$

式中, H_s 为有义波高; T_z 为跨零周期. 浮式塔的试验工况如表 2 所示.

表 2 模型试验工况表

工况号	波浪形式	浪向(°)	有义波高/m		跨零周期/s	
			实体	模型	实体	模型
1	P-M 谱	0	2.4	0.1	8.8	1.8
2	P-M 谱	0	3.6	0.15	9.5	1.94

3.3 测试方法

3.3.1 主要测试仪器

非接触式光学 6 个自由度测量仪用于测量模型在波浪中 6 个自由度的运动. 测量范围为纵荡 ± 0.8 m, 横荡 ± 0.8 m, 升沉 ± 0.4 m, 纵摇 $\pm 45^\circ$, 横摇 $\pm 45^\circ$, 首摇 $\pm 45^\circ$. 测量误差为满量程的 0.2%. 电阻式浪高仪(2 个)用于测定波浪参数, 其量程为 ± 30 cm, 线性度小于 0.3%. 单分力仪(4 个)用于测量系索张力, 其量程为 50 kg, 线性度小于 0.5%.

3.3.2 试验数据采集及处理

试验数据采用计算机实时采样系统来采集各种试验数据, 并对试验数据进行频谱及统计分析. 采样速度为 20 次/s. 试验采样时间为 10 min, 相当于实体时的 49 min.

4 计算结果与试验的比较及讨论

本文计算了一阶动力响应、运动谱和张力的谱, 这里对运动给出了一阶纵荡响应和纵荡谱. 波谱采用试验测得值. 为了计算方便, 理论分析按实体进行计算, 模型试验结果按比例换算到实体的相应试验结果. 试验中采用 P-M 波谱, 共两种工况(表 2). 在理论分析中为了减小误差, 尽可能与试验的结果一致, 计算中的波谱采用由现场实际测量分析得出的波谱数值, 其波谱分别如图 2, 图 3 所示.

下面为理论计算的浮式塔运动幅值响应算子、运动谱、张力谱与试验结果的比较. 计算中莫里森公式中的系数 C_m 取 1.2, C_d 取 0.025. 在一阶运动的动力计算中, 阻尼项采用兴波阻尼. 考虑横摇阻尼太小, 故额外增加了一部分阻尼, 其阻尼系数取 0.15.

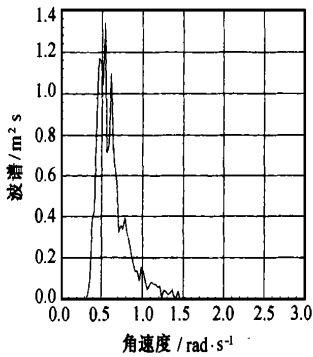


图2 波谱(工况 1)

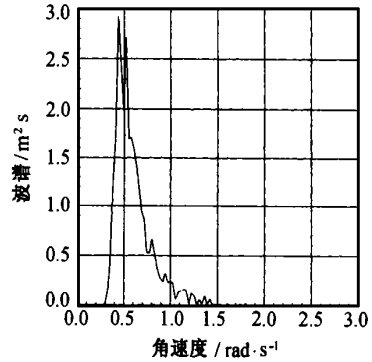


图3 波谱(工况 2)

4.1 浮式塔运动幅值响应算子的比较

图4和图5为两种工况下的一阶响应. 图中的圆点为模型试验测得的结果, 实线为理论计算结果.

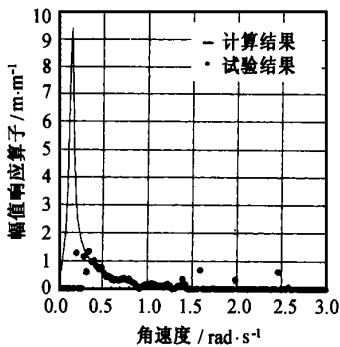


图4 纵荡运动幅值响应算子(工况 1)

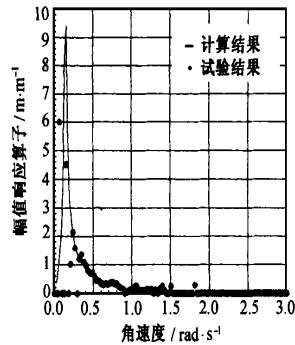


图5 纵荡运动幅值响应算子(工况 2)

对于结果的比较, 由于波谱范围外的结果相关性差, 故应比较波谱范围内的结果. 从图中可以发现, 在波谱范围内理论计算的幅值响应算子与试验分析的结果非常吻合.

4.2 运动谱及张力谱的比较

由频域理论可计算出运动的二阶传递函数, 将其与波谱进行积分, 可得运动谱. 对于张力谱, 由于张力腿的张力主要受垂荡影响, 而垂荡运动的二阶量为一小量, 故计算张力谱时只考虑张力腿张力的一阶量. 图6至图9为两种工况下的运动谱以及张力腿的张力谱.

图6, 图7为纵荡谱与试验结果的比较. 可以看出, 试验结果与理论计算得到的结果非常吻合. 包括纵荡谱低频峰值的大小及位置都与试验结果相当符合. 由纵荡谱的比较图, 可以发现浮式塔的纵荡谱有两个峰值, 其中较大的峰值处于波频范围, 这部分是由一阶波浪力引起的, 而较小的峰值处于低频范围, 是由二阶波浪力引起的. 纵荡谱存在低频峰值说明波浪的二阶作用对浮式塔的低频纵荡有影响.

图8, 图9为张力腿的张力谱与试验结果的比较, 可以看出两者吻合性较好. 另外, 由图可以观察到浮式塔张力腿的张力谱存在一个峰值, 处于波频范围内. 由于张力腿的张力主要受

垂荡影响, 垂荡的二阶量为一小量, 故张力腿的张力主要受一阶波浪力作用.

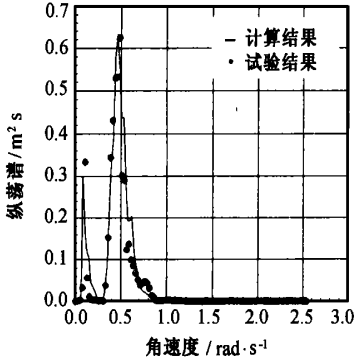


图 6 纵荡谱(工况 1)

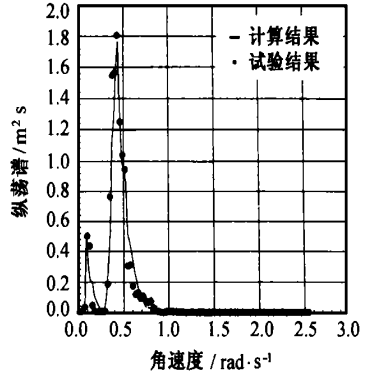


图 7 纵荡谱(工况 2)

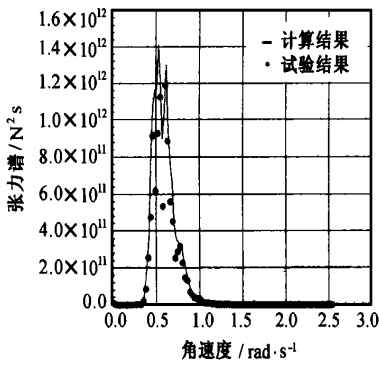


图 8 张力腿的张力谱(工况 1)

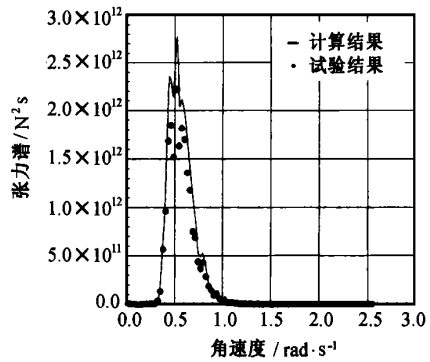


图 9 张力腿的张力谱(工况 2)

5 结论

- (1) 理论计算得到的结果与相应的试验结果吻合得较好.
- (2) 纵荡谱的低频峰值说明波浪的二阶作用对浮式塔的低频纵荡有影响.
- (3) 频域二阶摄动方法可以用于浮式塔的动力分析.

参考文献:

- [1] LOU Jack Y K, RACINE F, XU, Fred Y F, et al. Floating jacket—A new concept for the design of a floating production, storage and offloading platform in deep water[A]. 27th Annual Offshore Technology Conference[C]. Houston, Texas, USA, 1995.
- [2] LI Bo, JI Chur-qun, LI Jun. A new concept of deep water production, storage system[A]. Proceedings of OMAE' 99[C]. Newfoundland, Canada, 1999.
- [3] 李 波. 新型采油平台——浮式塔的一阶动力响应及二阶定常慢漂力[D]. 上海: 上海交通大学, 1999.
- [4] CHEN Xiaohong, HUANG Xiang-lu. The motion and mooring line loads of a moored semi-submersible in waves[A]. Proceedings of OMAE' 97[C]. Yokohama, Japan, 1997. 235~ 241.
- [5] CHEN Xiaohong, HUANG Xiang-lu. Motion response of a semi-submersible platform in waves[A]. Proceedings of

ISOPE[C]. Los Angeles, California, USA, 1996.

- [6] 陈小红, 黄祥鹿. 单点系泊海洋资料浮标的动力分析. 中国造船, 1995, (3): 1~ 8.
- [7] 范 菊, 陈小红, 季春群. 转塔系泊油轮的动力分析[J]. 上海交通大学学报, 2000, 34(1): 152~ 156.
- [8] 鲍莹斌. 中等水深轻型张力腿平台的研究[D]. 上海: 上海交通大学, 1999.

Dynamics of a floating tower

FAN Ju¹, JI Heng-teng¹, HUANG Xiang-lu¹

(1. School of Naval Architecture & Ocean Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

Abstract: The perturbation method is applied to investigate the dynamics of a floating tower under irregular waves in the frequency domain. Ratio amplitude operator and spectra of surge and tension of the floating tower are calculated. At the same time the corresponding model tests are carried out in the State Key Laboratory of Ocean Engineering, Shanghai Jiaotong University. From the comparison, it can be found that the calculated results agree well with the test results. The results show that the second order wave force has an effect on the slow oscillation of the floating tower in surge direction. The perturbation method can be used to analyze the dynamics of a floating tower.

Key words: floating tower; motion response; perturbation method; model test