

文章编号:1006-2467(2021)05-0497-08

DOI: 10.16183/j.cnki.jsjtu.2020.206

经典式 Spar 平台涡激运动与驰振特性的对比试验

张晨雅¹, 寇雨丰^{1,2}, 吕海宁^{1,2}, 肖龙飞^{1,2}, 刘明月^{1,2}

(1. 上海交通大学 海洋工程国家重点实验室, 上海 200240;

2. 三亚崖州湾深海科技研究院, 海南 三亚 572024)

摘要: 为研究经典式 Spar 平台的涡激运动和驰振特性,开展了平台在系泊状态下的水池模型试验,分析不同流速作用下 Spar 平台的横荡运动特性,并通过对比仅流、仅波浪与波流耦合工况试验结果,分析波流耦合作用对 Spar 平台涡激运动和驰振运动性能的影响.结果表明:高折合速度的海流使得 Spar 平台发生驰振运动,相比涡激运动,其振荡周期更长、振幅更大,且具有随机性.波流耦合作用不会改变 Spar 平台流致运动的具体模式,但是显著影响流致运动的幅值.

关键词: 单柱式平台; 涡激运动; 驰振; 模型试验; 海洋工程水动力学

中图分类号: P 751

文献标志码: A

Comparative Test of Characteristics of Vortex-Induced Motion and Galloping of Classic Spar Platform

ZHANG Chenya¹, KOU Yufeng^{1,2}, LÜ Haining^{1,2}, XIAO Longfei^{1,2}, LIU Mingyue^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Ocean Engineering, Shanghai Jiao Tong University,

Shanghai 200240, China; 2. SJTU-Sanya Yazhou Bay Institute of Deepsea

Science and Technology, Sanya 572024, Hainan, China)

Abstract: In order to study the characteristics of vortex-induced motion and galloping of the classic Spar platform, a model test with a mooring system is conducted in basin. The sway motion characteristics of the Spar platform at different current velocities are analyzed. By comparing the results in currents, waves, and wave-current coupled conditions, the coupling effects of current and wave on vortex-induced motion and galloping of the Spar platform are also studied. The results show that galloping is induced by the currents with high reduced velocities. Compared with the vortex-induced motion, the galloping phenomenon has a longer period, larger amplitude, and randomness. The coupling of current and wave would not change the mode of flow-induced motion, but it significantly affects the motion amplitude.

Key words: Spar platform; vortex-induced motion; galloping; model test; hydrodynamics of marine engineering

流体与钝体相互作用而诱导的钝体振动称为流致运动. 大型海洋平台的流致运动现象包括共振和

失稳模式两种不同形态,通常称为涡激运动和驰振. 涡激运动是一种由于钝体两侧的漩涡周期性交替脱

收稿日期:2020-07-01

基金项目:国家自然科学基金重点项目(52031006),国家自然科学基金青年科学基金项目(51909158),国家重点研发计划(2018YFC0309700)

作者简介:张晨雅(1996-),女,浙江省嘉兴市人,硕士生,从事海洋工程水动力学研究.

通信作者:寇雨丰,男,高级工程师,电话(Tel.):021-34207050;E-mail:kouyufeng@sjtu.edu.cn.

落而导致的周期性振荡运动,是一种自我激励且自我限制的响应形式,其振幅有限,有发生共振的流速范围,即“锁定”区间。

目前,针对 Spar 平台涡激运动问题,国内外学者^[1-4]已经从折合速度、流向角、雷诺数的影响规律、螺旋侧板的作用、对系泊系统及立管的影响等方面开展了大量的数值模拟与试验研究,探究涡激运动的发生原理、响应特征及抑制机理。在实际的海洋环境中,海洋平台受到风浪流的共同作用,2001 年 Neptune Spar 在飓风经过后的涡激运动响应使得工程界开始重视波浪对涡激运动的影响。Park 等^[5]发现在墨西哥湾典型环流和对应波浪共同作用下经典式 Spar 平台 Gulfstar 的涡激运动幅值相比单独流作用下稍小。Finnigan 等^[6]通过试验研究说明了波流耦合作用对 Truss Spar 涡激运动的影响与波浪等级、折合速度及浪流夹角等因素密切相关。另外,Gonçalves 等^[7]也发现波流耦合作用下 Monobr 平台涡激运动幅值变化与波浪参数相关。可见,波流耦合作用对平台涡激运动影响机制比较复杂,应根据 Spar 平台特定的设计进行专门的研究^[8]。

驰振是另一种流致运动现象,驰振发生于来流速度很大时,通常折合速度需大于 20^[9]。与涡激运动不同的是,驰振虽然也是自我激励但是没有自我限制。因为来流速度很大时,会产生较大的横向负阻尼,相比较而言,旋涡脱落产生的泄涡力可以不计。因此,发生驰振时,振动的幅值会随来流速度的增大而增大,且其振动频率会随来流速度的变化而变化。在相同阻尼比与质量比时,驰振的振幅远大于涡激运动的振幅。

目前针对海洋平台的流致驰振现象研究并不多。Waals 等^[10]在开展多立柱平台拖曳试验研究涡激运动时观察到了驰振现象。Gonçalves 等^[11]发现立柱边缘倒角变化可以影响驰振发生的升力。Liang 等^[12]发现圆柱附加离盘在一定条件下可引起驰振现象,并且研究了分离盘长径比对圆柱涡激振动和驰振的影响。Lamas 等^[13]通过计算流体力学方法(CFD)和模型试验研究了张力腿平台发生驰振时的首摇响应,并发现驰振发生存在一个临界折合速度。

涡激运动和驰振不仅影响 Spar 平台的生产作业,还会加剧 Spar 平台立管和锚链的疲劳损坏,尤其在驰振情况下,平台过大的振幅对系泊系统产生很大的负荷,很可能造成严重的安全问题。而目前有关 Spar 平台驰振现象的研究非常缺乏。本文通过水池模型试验,研究不同流速作用下 Spar 平台的横荡运动特性,重点分析 Spar 平台的两种流致运动模

式,并进一步研究波流耦合作用对 Spar 平台涡激运动和驰振的影响。

1 试验方案

模型试验在上海交通大学海洋深水试验池进行,水池主体长 50 m、宽 40 m、深 10 m。水池具备模拟大范围风场、不规则波、典型垂向流速剖面深水流等深海复杂环境的能力及模拟船舶及海洋工程结构物水动力性能的能力。测量分析试验对象在深海环境条件作用下载荷、运动及结构动力响应等能力。

1.1 试验模型

研究对象为一座钻采储运一体的多功能平台,为经典式 Spar 平台型式,工作水深 1 500 m,排水量 174 598 t,直径 34.1 m,由硬舱、中间舱和软舱组成,外侧安装高度为 4.44 m 的螺旋侧板。试验中采用缩尺比 $\lambda=60$,除了保证模型与实型几何相似外,同时保证模型与实型的弗劳德数和斯特劳哈尔数相等。图 1 为试验模型,其主要参数见表 1。

该平台系泊系统由 9 根系泊缆(船链-聚酯缆-底链形式)组成,每组 3 根,共 3 组,编号为 1[#]~9[#]。各组系泊缆分别成 120° 间隔均匀布置,每组内系泊缆间隔 5°,如图 2 所示,图中角度为系泊缆的夹角 θ 。试验中对全水深系泊系统进行了截断设计,截断系泊系统的组成、导缆孔位置及系泊缆方向角与原系泊系统相同,船链的参数和预张力也保持不变,以原系统水平刚度为目标进行优化设计。截断设计的等效系泊系统与实际系泊系统刚度对比结果如图 3 所示,图中 x 为偏移, F 为回复力,吻合情况良好。

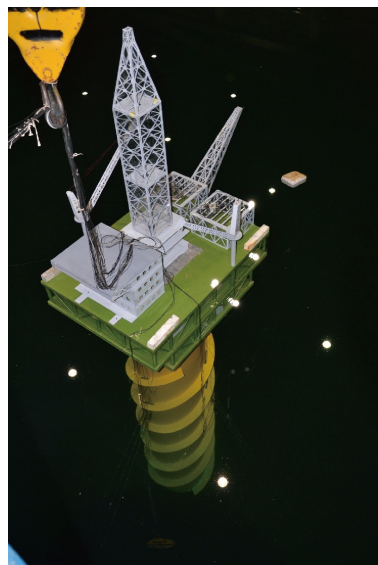


图 1 经典式 Spar 平台模型

Fig.1 Model of classic Spar platform

表 1 经典式 Spar 平台的主要参数
Tab.1 Main parameters of classic Spar platform

参数	实际值	模型值
直径/m	34.1	0.568
中央井尺寸/m	12.8	0.213
螺旋侧板高度/m	4.44	0.074
吃水/m	198.1	3.302
干舷/m	16.8	0.280
立柱总高度/m	214.9	3.582
总排水量/t	174 598	0.788 6
垂向重心高度/m	87.78	1.463
横摇惯性半径/m	75.1	1.252
纵摇惯性半径/m	75.2	1.253
首摇惯性半径/m	16.8	0.280

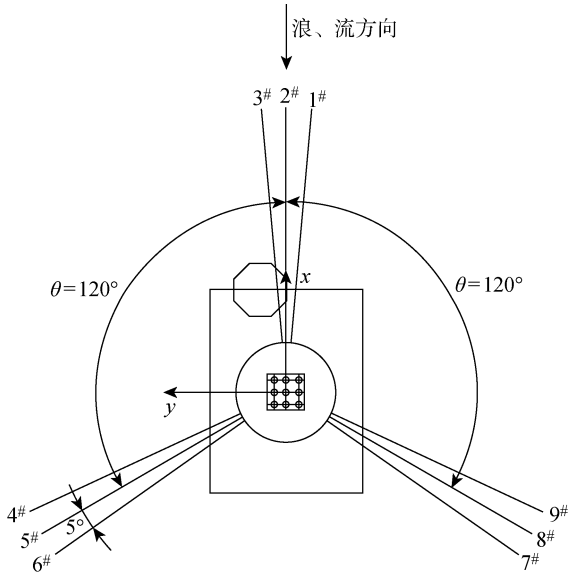


图 2 系泊系统平面布置
Fig.2 Layout of mooring system

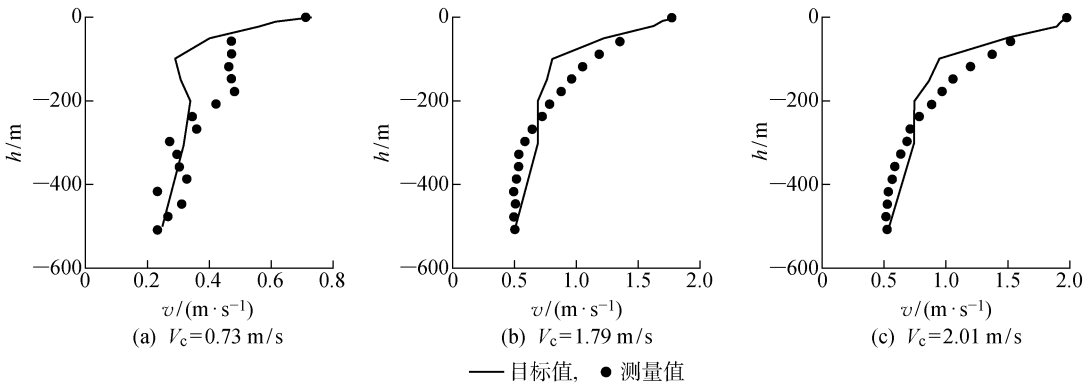


图 4 流剖面模拟结果
Fig.4 Simulation results of current profile

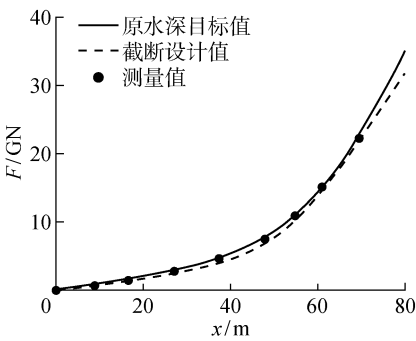


图 3 系泊系统水平刚度比较
Fig.3 Comparison of horizontal stiffness of mooring system

1.2 海况模拟

该平台目标作业海域为中国南海,环境条件较恶劣,试验中考虑了作业工况(一年一遇海况)和极端工况(百年及千年一遇海况).为了对比分析波浪与流的耦合作用,试验中不考虑风速影响,分别考虑了无流及有流耦合的波浪环境,如表 2 所示.

试验中模拟了南海一年一遇、百年一遇、千年一遇海况所对应的的海流剖面, V_c 分别为 0.73、1.79 及 2.01 m/s. 试验测得的流剖面与目标值吻合较好,如图 4 所示,图中 v 为流速, h 为水深. 试验中模拟的波浪谱与目标谱对比如图 5 所示, 图中 ω 为频

表 2 波浪和流的参数 Tab.2 Parameters of wave and current					
编号	有义波高 H_s/m	谱峰周期 T_p/s	谱峰 因子 γ	表层流速 $V_c/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	备注
1	8.7	12.3	2.6		一年一遇
2	8.7	12.3	2.6	0.73	一年一遇
3	15	17	3.55		百年一遇
4	15	17	3.55	1.79	百年一遇
5	18	22	4		千年一遇
6	18	22	4	2.01	千年一遇

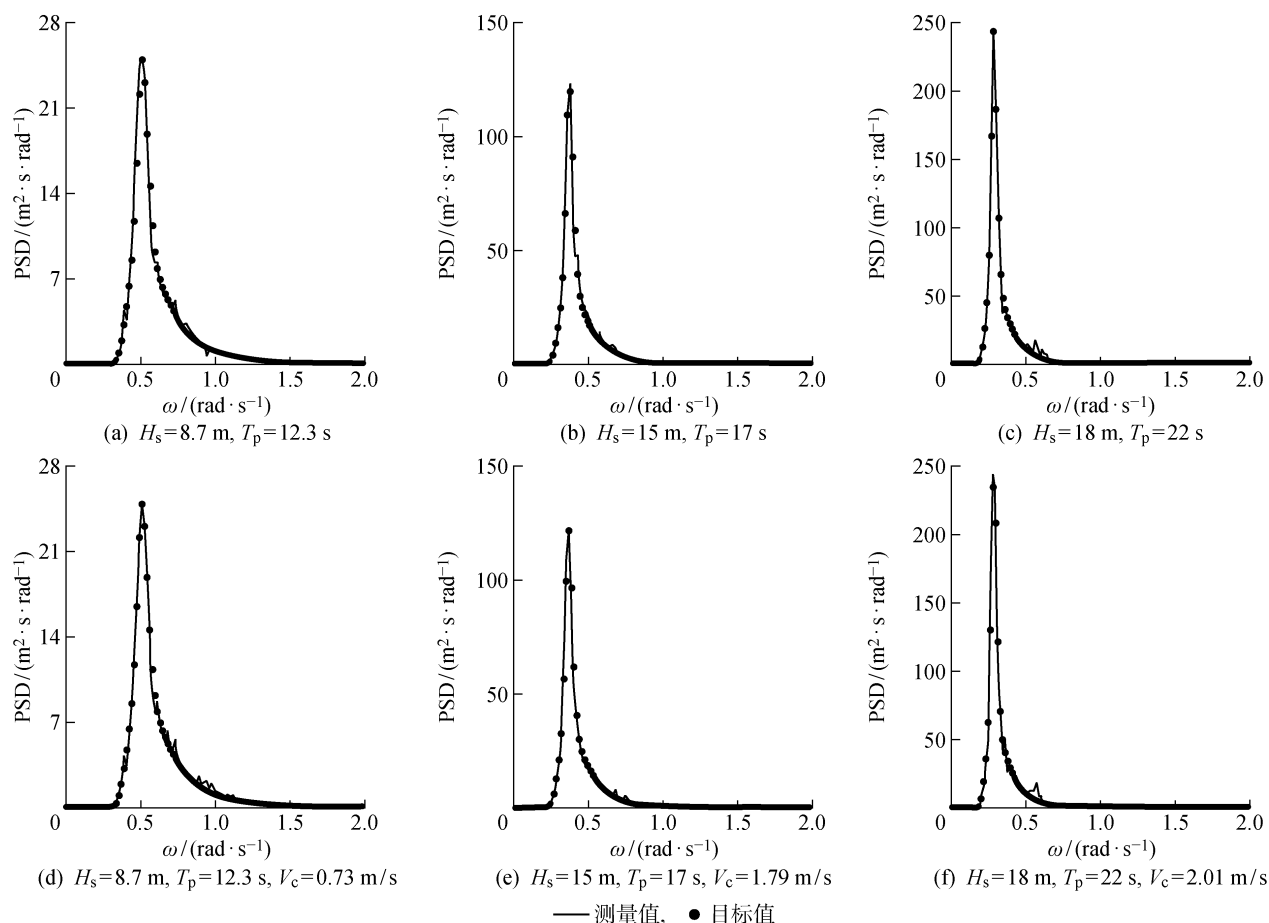


图5 波浪谱模拟结果

Fig. 5 Simulation results of wave spectrum

率, PSD 为功率谱密度, 波浪模拟精度达到试验要求。

1.3 试验内容

本文主要研究流和波浪作用下经典式 Spar 平台的运动特性差异, 因此设置了模型分别在流、不规则波以及波流耦合工况下的不同试验。来流方向与波浪方向一致, 均为 180° 。试验中测量了平台的 6 自由度运动、加速度以及锚链力等参数, 采样频率为 25 Hz。不规则波试验的有效测量时间对应原型大于 3 h。

2 分析方法

Spar 平台的流致运动现象主要表现为水平面内的运动, 即沿流向的纵荡、垂直于流向的横荡以及首摇, 其中横荡运动最为显著。

2.1 折合速度

在流致运动的研究中, 通常将来流速度转换为一个无量纲参数, 即折合速度:

$$U_r = \frac{uT}{D} \quad (1)$$

式中: u 为来流速度, 本文中取表层流速; T 为平台横荡固有周期, 经静水衰减试验测得固有周期模型值并换算得到 $T=433.4$ s, 在 Spar 平台横荡运动的典型固有周期范围内^[14]; D 为平台的特征尺寸, 针对 Spar 平台取其直径 34.1 m。

试验中 3 种流速对应的折合速度分别为 9.3、22.8、25.5。Spar 平台发生涡激运动的折合速度区间一般为 $2.5 \sim 12.5$ ^[1], 因此, 0.73 m/s 的流速在涡激运动的流速区间内, 而 1.79 m/s 与 2.01 m/s 不在涡激运动区间内, 且离开较远。

2.2 最大响应幅值和标称响应幅值

研究流致运动的振荡幅度时, 通常定义无量纲振幅进行表示。以横荡响应为例, 最大响应幅值及标称响应幅值分别为

$$\left(\frac{A}{D}\right)_{\max} = \frac{[Y(t)_{\max} - Y(t)_{\min}]}{2D} \quad (2)$$

$$\left(\frac{A}{D}\right)_{\text{nom}} = \frac{\sqrt{2}\sigma[Y(t)]}{D} \quad (3)$$

式中: A 为横荡幅值; t 为时间; $Y(t)$ 为横荡时历; σ 为标准差。

3 结果与分析

3.1 不同流速下 Spar 平台流致运动形态差异

3 种不同流速下的横荡及纵荡响应幅值如表 3 所示. 平台的横荡响应幅值普遍比纵荡幅值大, 约为两倍, 横荡运动较为剧烈. 通常研究认为, Spar 平台在锁定区间内的涡激运动响应较大且比较稳定, 而在 U_r 超过 9~10 后, 涡激运动幅值不再保持锁定状态, 且会逐渐减小^[1,3]. 但从表 3 可知, Spar 平台在高流速作用下 ($U_r=22.8, 25.6$) 的纵荡、横荡幅值都比低流速作用下 ($U_r=9.3$) 更大, 这与已知的涡激运动幅值变化规律不相符.

一般情况下, Spar 平台发生涡激运动时, 横荡的幅值和周期较规律, 且响应的能量集中于横荡固

有频率附近, 图 6(a) 中 Spar 平台的横荡运动时历和响应谱满足这一规律, 可见其在 0.73 m/s 的流速作用下产生了典型的涡激运动现象 (图中 ω_n 为固有频率). 但根据图 6(b) 和 6(c) 中的时历曲线和响应谱可知, 在 1.79 m/s 和 2.01 m/s 的流速作用下,

表 3 Spar 平台在流作用下的运动响应幅值
Tab. 3 Response amplitudes of Spar platform in currents

U_r	横荡		纵荡	
	$(\frac{A}{D})_{\max}$	$(\frac{A}{D})_{\text{nom}}$	$(\frac{A}{D})_{\max}$	$(\frac{A}{D})_{\text{nom}}$
9.3	0.094 8	0.049 0	0.074 9	0.029 1
22.8	0.491 4	0.252 6	0.253 5	0.122 4
25.6	0.510 9	0.278 3	0.208 9	0.089 9

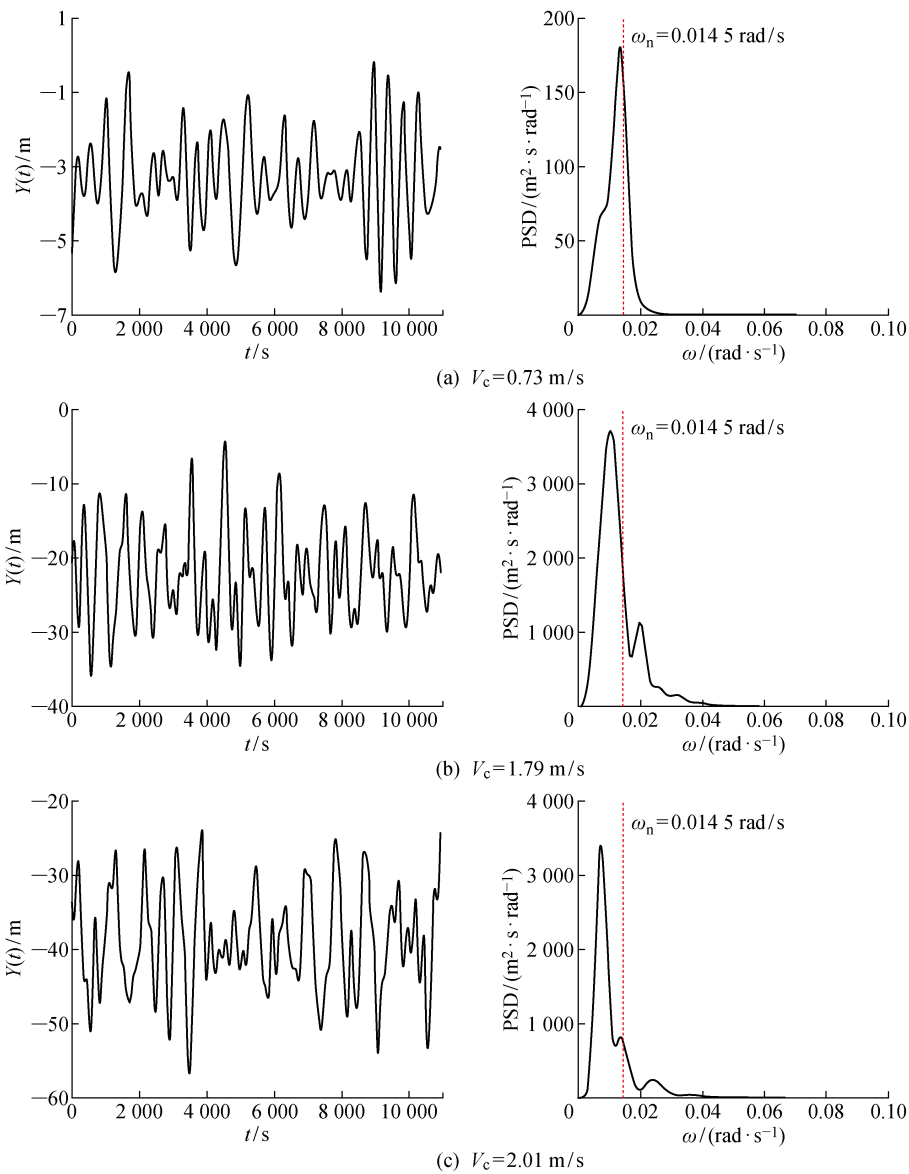


图 6 Spar 平台在流作用下的横荡运动响应时历曲线和响应谱
Fig. 6 Time series and power spectrums of Spar platform in currents

该 Spar 平台的横荡响应幅值虽然很大,但是幅值大小和周期的变化并不规律,表现出随机性,且响应能量集中于比固有频率($\omega_n=0.0145\text{ rad/s}$)更低的范围,随着折合速度增大,响应幅值增大且响应频率减小.可见,在折合速度超出涡激运动锁定区间的高流速作用下,平台发生了显著的运动响应,但响应特征与典型的涡激运动不同,结合其折合速度、响应幅值及响应频率特点判断,这种横荡属于弛振现象.相比涡激运动,弛振运动响应幅值和周期具有随机性、幅值更大及响应频率更低的特征.

3.2 波浪对 Spar 平台涡激运动的影响

为研究波浪对 Spar 平台涡激运动的影响,考虑一年一遇海况参数,研究比较仅流($V_c=0.73\text{ m/s}$),仅波浪($H_s=8.7\text{ m}$, $T_p=12.3\text{ s}$)以及两者耦合作用的 3 种工况,横荡运动幅值如表 4 所示,横荡时历曲线和响应谱见图 7.由于横荡响应谱中波频部分能量极小可忽略,因此响应谱只取低频部分.

由表 4 可见,平台在一年一遇波浪作用下的横荡运动幅值略小于流单独作用下的数值,而在波流耦合海况下的幅值成倍增大,大于仅流和仅波浪作

用下的幅值之和.

从图 7 时历曲线可知,平台在仅波浪或波流耦合作用下横荡运动的幅值和周期较规律,横荡运动模式与仅流作用下的情况相似.从横荡运动响应谱来看,虽然波流耦合作用下响应谱峰值明显大于仅流或仅波浪工况,但 3 种工况下响应峰值频率都在横荡固有频率附近.这说明平台在一年一遇海况的波流耦合作用下仍然产生涡激运动现象,与仅受海流作用下的情况一致,波流耦合作用并没有改变平台涡激运动的振荡模式.

表 4 一年一遇流、波浪及波流耦合作用下平台横荡幅值
Tab. 4 Sway amplitudes in 1-year current, wave, and wave-current coupled condition

工况	横荡	
	$\left(\frac{A}{D}\right)_{\max}$	$\left(\frac{A}{D}\right)_{\text{nom}}$
流($V_c=0.73\text{ m/s}$)	0.094 8	0.049 0
波浪($H_s=8.7\text{ m}$)	0.076 0	0.036 5
波流耦合($H_s=8.7\text{ m}$, $V_c=0.73\text{ m/s}$)	0.207 1	0.112 4

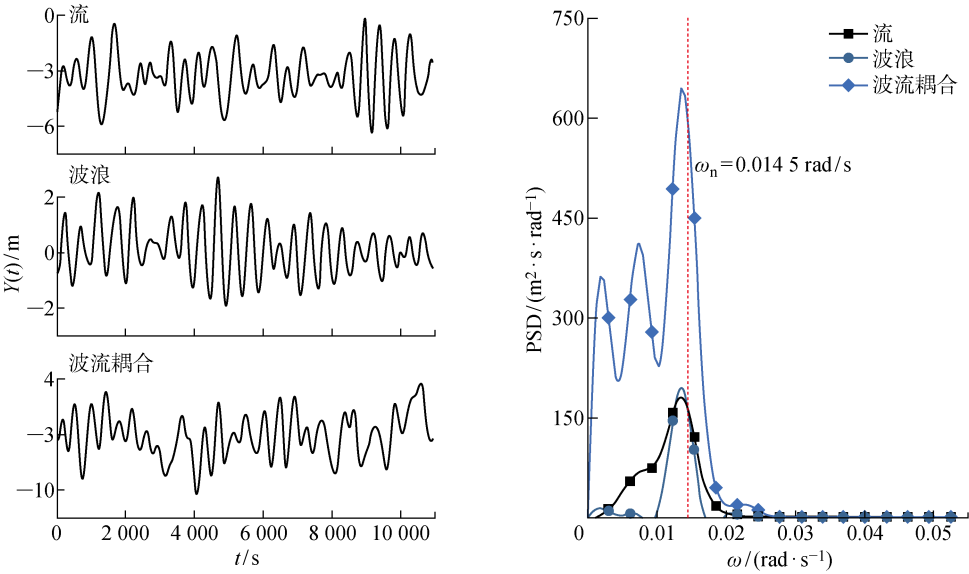


图 7 一年一遇流、波浪及波流耦合作用下平台横荡运动时历和响应谱

Fig. 7 Time series and power spectrums of sway in 1-year current, wave, and wave-current coupled condition

值得注意的是,在本组对比工况中,波流耦合作用下该平台涡激运动幅度显著增大,这是折合速度、波浪参数、平台型式及系泊系统等多种因素耦合导致的.波流耦合作用对 Spar 平台涡激运动幅值的影响机制比较复杂,但毋庸置疑,波浪显著改变了流场形态,必然导致平台涡激运动响应幅值的变化.

3.3 波浪对 Spar 平台弛振运动的影响

为研究波浪对 Spar 平台在高流速下弛振运动

的影响,试验中分别考虑了百年一遇海况、千年一遇海况参数,比较平台在仅流、仅波浪及两者耦合作用下平台的横荡运动响应,横荡响应幅值如表 5 所示,时历曲线和响应谱见图 8.

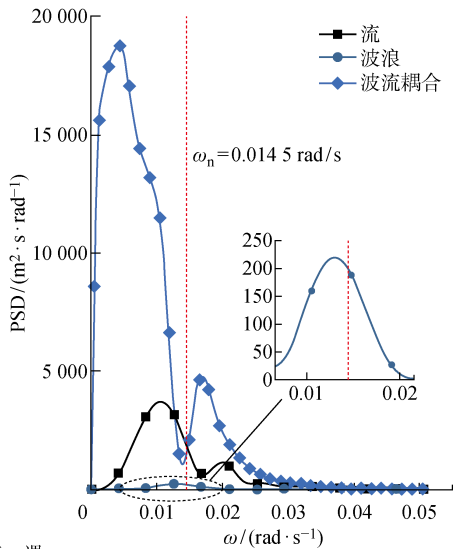
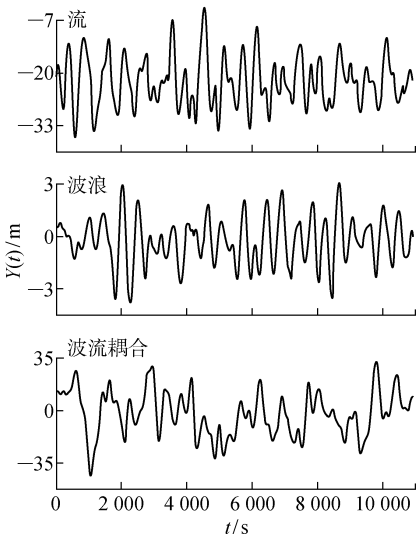
根据表 5 结果,平台在波浪单独作用下的横荡幅值很小.在百年一遇、千年一遇海况对应流速单独作用下横荡最大响应幅值均在 0.5 左右.而在波流耦合海况下横荡幅值急剧增大,分别达到了 1.1、

1.5,明显大于通常的海洋平台涡激运动幅度(不大于 0.5).

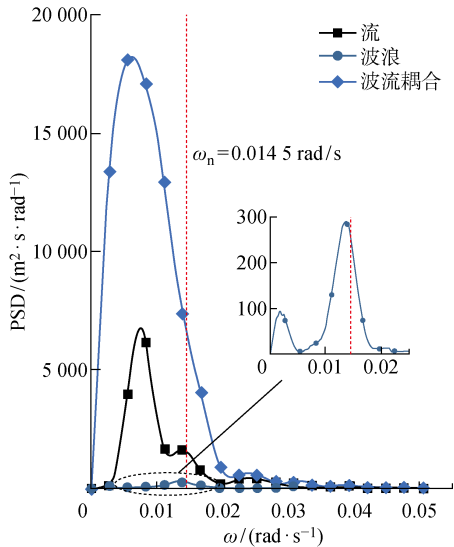
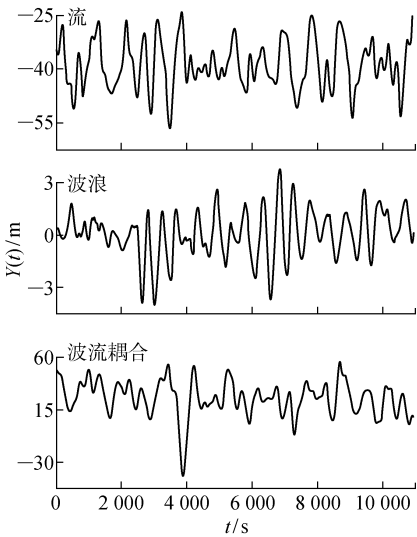
对比分析图 8 时历曲线,平台在波浪单独作用下的横荡运动周期性较强、幅值很小. 而平台在百年一遇、千年一遇海况的流或波流耦合作用下的横荡运动幅值变化大、不规律,具有随机、大幅值的特点. 在横荡响应谱中,波浪单独作用下的响应峰值小,峰值频率仍然为横荡固有频率,但在仅流作用下的响应峰值增大,峰值频率明显小于横荡固有频率,在波流耦合作用下的响应峰值更大,且峰值频率更小,在仅流或波流耦合作用下的能量都集中在比固有频率更低的频率范围内. 平台在百年一遇、千年一遇海况的波流耦合作用下的横荡运动模式,与仅受海流作用下的情况一致,是流作用占主导的驰振运动,波流

表 5 高海况流、波浪及波流耦合作用下平台横荡幅值
Tab.5 Sway amplitudes in current, wave, and wave-current coupled condition of rough sea state

工况		横荡	
		$\left(\frac{A}{D}\right)_{\max}$	$\left(\frac{A}{D}\right)_{\text{nom}}$
百年一遇	流($V_c=1.79\text{ m/s}$)	0.491 4	0.252 6
	波浪($H_s=15\text{ m}$)	0.115 6	0.056 8
	波流耦合($H_s=15\text{ m}$, $V_c=1.79\text{ m/s}$)	1.129 2	0.611 1
千年一遇	流($V_c=2.01\text{ m/s}$)	0.510 9	0.278 3
	波浪($H_s=18\text{ m}$)	0.151 8	0.060 8
	波流耦合($H_s=18\text{ m}$, $V_c=2.01\text{ m/s}$)	1.529 5	0.608 9



(a) 百年一遇



(b) 千年一遇

图 8 高海况流、波浪及波流耦合作用下平台横荡运动时历和响应谱
Fig.8 Time series and power spectrums of sway in current, wave, and wave-current coupled condition of rough sea state

耦合作用并没有改变平台弛振运动的振荡模式,而使得横荡幅值显著增大、响应频率降低。

4 结论

本文针对经典式 Spar 平台,考虑一年一遇、百年一遇和千年一遇海况,开展水池模型试验,研究不同流速下平台的两种流致运动模式,以及波流耦合作用对流致运动的影响,得到以下结论:

(1) 在高折合速度($U_r = 22.8, 25.5$)的流速作用下, Spar 平台会发生比涡激运动振荡频率更低、振幅更大,且随机性更强的弛振运动,这是由于流作用下负阻尼所导致的不稳定的横荡运动。

(2) 波流耦合作用不会改变平台涡激运动或弛振的流致运动模式,但会显著改变流致运动的响应幅值。在本文所研究的输入条件下,波流耦合既增大了 Spar 平台在较低折合速度下的涡激运动幅值,也增大了 Spar 平台在高折合速度下的弛振运动幅值。

参考文献:

- [1] FUJARRA A L C, ROSETTI G F, DE WILDE J, *et al.* State-of-art on Vortex-Induced Motion: A comprehensive survey after more than one decade of experimental investigation[C]// **Proceedings of the 31th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering**. Rio de Janeiro: OMAE, 2012: 561-582.
- [2] GAO W, ZHU W, DONG L, *et al.* A study of Spar-FPSO VIM phenomenon and its influence to mooring system[C]// **Proceedings of the 21th International Offshore and Polar Engineering Conference**. Rhodes: ISOPE, 2016: 1067-1074.
- [3] 孙洪源, 黄维平, 李磊, 等. 基于实验的浮式圆柱体涡激运动研究[J]. **振动与冲击**, 2017, 36(3): 93-97.
SUN Hongyuan, HUANG Weiping, LI Lei, *et al.* Tests for vortex induced motions of a floating cylinder[J]. **Journal of Vibration and Shock**, 2017, 36(3): 93-97.
- [4] 何佳伟, 赵伟文, 万德成. 带螺旋侧板的 Spar 平台涡激运动数值模拟[J]. **中国舰船研究**, 2019, 14(4): 74-84.
HE Jiawei, ZHAO Weiwen, WAN Decheng. Numerical simulation of vortex induced motion for Spar platform with helical strakes[J]. **Chinese Journal of Ship Research**, 2019, 14(4): 74-84.
- [5] PARK Y C, ANTONY A, MOIDEEN H, *et al.* Gulfstar-VIM and mooring chain fatigue[C]// **Pro-**

- ceedings of the Annual Offshore Technology Conference**. Houston: Offshore Technology Conference, 2015: 4577-4620.
- [6] FINNIGAN T, IRANI M, VAN DIJK R. Truss Spar VIM in waves and currents[C]// **Proceedings of the 24th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering**. Halkidiki: OMAE, 2005: 475-482.
- [7] GONÇALVES R T, FUJARRA A L C, ROSETTI G F, *et al.* Mitigation of vortex-induced motion (VIM) on a monocolumn platform: Forces and movements[J]. **Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering**, 2010, 132(4): 041102.
- [8] IRANI M, PERRYMAN S, BREWER J, *et al.* Vortex induced motions of the Horn Mountain Truss Spar[C]// **Proceedings of the 27th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering**. Estoril: OMAE, 2008: 967-973.
- [9] BLEVINS R D. Flow-induced vibration[M]. New York: Van Nostrand Reinhold, 1990.
- [10] WAALS O J, PHADKE A C, BULTEMA S. Flow induced motions of multi column floaters[C]// **Proceedings of the 26th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering**. San Diego: OMAE, 2007: 669-678.
- [11] GONÇALVES R T, GAMBARINE D M, MOMENTTI A M, *et al.* Experimental study on flow-induced vibration of floating squared section cylinders with low aspect ratio: Part II—Effects of rounded edges[C]// **Proceedings of the 35th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering**. Busan: OMAE, 2016: 54813.
- [12] LIANG S P, WANG J S, HU Z M. VIV and galloping response of a circular cylinder with rigid detached splitter plates[J]. **Ocean Engineering**, 2018, 162: 176-186.
- [13] LAMAS F, RAMIREZ M A M, FERNANDES A C. Yaw galloping of a TLWP platform under high speed currents by analytical methods and its comparison with experimental results[C]// **Proceedings of 36th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering**. Trondheim: OMAE, 2017: 61909.
- [14] 董艳秋. 深海采油平台波浪载荷及响应[M]. 天津: 天津大学出版社, 2005: 76.
DONG Yanqiu. Wave loads and response of the oil-extraction platform in deep ocean[M]. Tianjin: Tianjin University Press, 2005: 76.

(本文编辑:陈晓燕)