

Doi: 10.11840/j.issn.1001-6392.2021.05.008

系泊定位状态下半潜式浮体波浪爬升性能试验研究

李亚美¹, 刘义杰², 朱玉田¹, 刘钊¹

(1. 同济大学 机械与能源工程学院, 上海 201804; 2. 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, 上海 200240)

摘 要: 随着深海油气田的快速发展, 新兴的浮式生产系统, 尤其是半潜式平台, 由于具有性能优良、运动响应小、工作水深适用范围广、抗风浪荷载能力强等优点, 在工程实际中得到快速的发展。在半潜式平台设计过程中, 气隙和斜浪作用下的波浪爬升问题对其安全性能的影响至关重要。通过采用系泊定位状态下的四立柱半潜式平台进行波浪爬升实验, 对平台不同位置进行全方位的监测, 而后对测量数据进行分析, 得出关于海浪对半潜式平台气隙响应的影响和相关规律, 为半潜式平台的设计提供参考。

关键词: 半潜式平台; 系泊定位状态; 气隙; 斜浪; 波浪爬升

中图分类号: P751; U656.6

文献标识码: A

文章编号: 1001-6932(2021)05-0559-07

Experimental study on wave climbing performance of semi-submersible floating body undermooring position state

LI Yamei¹, LIU Yijie², ZHU Yutian¹, LIU Zhao¹

(1. School of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China;

2. State Key Laboratory of Ocean Engineering, School of Naval Architecture, Ocean & Civil Engineering,
Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: With the rapid development of deep water oil and gas fields, the new production system, especially the semi-submersible, has the advantages of good performance, small movement response, wide range of working water depth, resistance of wind and waves and strong load capacity. The influence of air-gap performance and wave climbing under the action of oblique waves on its safety performance is very important in the design of semi-submersible platform. Through the wave climbing experiment of a four-column semi-submersible platform in a mooring position state, omni-directional monitoring is carried out on different positions of the platform. Through the analysis of measured data, the influence of ocean waves on the air gap response of the semi-submersible platform and the related laws are obtained, providing a reference for the design of the semi-submersible platform.

Keywords: semi-submersible; mooring position state; air-gap; oblique waves; wave climbing

近年来, 各国海洋开发都已经陆续跨入深海领域, 传统的重力式平台和导管架平台因自重和造价随水深而大幅度增加, 已经不适应深海油气发展的要求。具有工作水深范围大、甲板可变载荷大, 以及集多种工作功能于一体等优点的新兴浮式生产系

统——半潜式平台, 在工程实际中得到了快速的发展和更加广泛的应用。

随着石油勘探开采向深海以及超深海发展, 平台的安全性受到了严峻挑战。在诸多的安全性指标中, 气隙性能是半潜式平台设计中一个关键问题,

收稿日期: 2021-01-01; 修订日期: 2021-04-22

作者简介: 李亚美 (1997—), 硕士研究生, 主要从事机械及海洋工程装备研究。电子邮箱: 18221292017@163.com

通讯作者: 朱玉田, 博士, 教授。电子邮箱: yutianzhu@tongji.edu.cn

<http://hytb.nmdis.org.cn>

气隙指的是海洋平台下层甲板至波面之间的垂向距离,是衡量平台甲板是否发生砰击的一个重要参数。此外,在平台设计时也要考虑立柱附近水体沿柱面的爬升现象,与气隙相比其非线性特征更强,机理更加复杂。气隙和波浪爬升问题直接影响平台系统的总体设计和经济投入。

由于波浪撞击主甲板和越浪等强非线性现象的发生可能引起平台结构的破坏甚至平台整体倾覆,因此在平台设计时,需保证下层甲板具有足够的高度以使波浪打不到甲板。但由于增加平台初始气隙的花费较高,且甲板的高度也受到自身质量和稳定性因素的制约,不能无限制地增大。大多数学者认为,增加甲板结构的局部强度以抵抗平台负气隙引起的波浪撞击更为经济、合理。故需了解平台易发生越浪和非线性撞击的位置、撞击强度等,以便在平台设计中合理布置甲板设备、加固局部位置的结构。因此,如何准确预报平台各处的气隙响应至关重要(闫发锁等,2015;单铁兵等,2012)。

半潜式平台的设计阶段,气隙的预报较为复杂(单铁兵等,2011),目前还没有完善的方法可以准确计算出平台的气隙分布来满足设计的要求。实际海况下,各种波浪成分的非线性水动力相互作用将使瞬时波高显著增大,非线性波浪散射效应增强,采用线性的分析理论远不能满足计算精度的要求。而二阶散射方法虽能够提高计算精度,但相对于试验有时会低估波浪升高值(Sweetman et al, 2002)。完全非线性的求解方式虽能够较为精确地预报平台的气隙分布,但因其理论模型复杂,计算量巨大,以及平台与波浪之间、平台与对应锚链系统之间的耦合运动等大大增加了计算的难度。

当前对半潜式平台、气隙响应和非线性越浪的研究大多集中在模型试验方面,并成为新型海洋平台设计阶段水动力性能研究的重要环节,且大多数研究都是进行较为简单的圆柱波浪爬升试验(Mavrakos et al, 2004; Simos et al, 2006),但半潜式平台并非圆柱,故本文采用真实模型缩放的系泊定位状态的四立柱半潜式平台进行实验,并在半潜式平台的不同位置安装了12个浪高仪,对平台不同位置进行全方位的监测,而后通过对测量数据的分析,得到海浪对半潜式平台气隙响应的影响和相关规律。

1 半潜式浮体平台

1.1 半潜式浮体平台结构

试验所用的半潜式浮体由平台本体、立柱和下体浮箱组成(图1),在下体与立柱、立柱与立柱、立柱与平台本体之间还有一些支撑连接,平台采用系泊定位方式,故有6个自由度,表1列举了平台的参数。



图1 平台模型

表1 平台主尺度及重量属性

名称	实际值/m	模型值/m
下浮体长度	92.00	1.438
下浮体宽度	19.50	0.305
下浮体高度	10.00	0.156
立柱长度	19.50	0.305
立柱宽度	19.50	0.305
立柱高度	34.30	0.536
悬挂甲板距基线高	39.50	0.617
下甲板底部距基线高	47.00	0.734
中间甲板距基线高	50.60	0.791
主甲板距基线高	55.00	0.859
主甲板长度	84.85	1.326
主甲板宽度	92.00	1.438

模型试验中经常用到的相似判据有:雷诺数、傅汝德数、斯托哈数等。在海洋工程模型试验中,通常忽略或放弃黏性的影响,保持实体与模型之间的傅汝德数和斯托哈数相等,即满足两者的重力相似和惯性力相似,因此:

$$\frac{V_m}{\sqrt{gL_m}} = \frac{V_s}{\sqrt{gL_s}} \tag{1}$$

$$\frac{V_m T_m}{L_m} = \frac{V_s T_s}{L_s} \tag{2}$$

式中， V ， L ， T 分别是特征速度、特征尺度及特征周期，下标 m 及 s 分别表示模型和实体。根据上述相似法则，可以推导出模型与实体各种物理量之间的转换关系，表 2 列举了部分相关转换关系。

表 2 模型与实物各物理量之间的转换关系			
物理量	单位	符号	转换系数
角度	deg'	ϕ_s / ϕ_m	1
角速度	rad/s	ϕ'_s / ϕ'_m	$\lambda^{-1/2}$
时间	s	t_s / t_m	$\lambda^{1/2}$
周期	s	T_s / T_m	$\lambda^{1/2}$
频率	Hz	f_s / f_m	$\lambda^{-1/2}$

1.2 试验布置及工况

由于气隙是直接和垂荡运动性能相关的半潜式平台重要性能指标之一，故试验主要对半潜式平台测得的气隙数据进行分析，并用目前主流的运动和气隙响应的幅频响应算子（RAO）进行表征。试验中在平台不同位置安装了 12 个浪高仪用于监测相对波面升高，各浪高仪分别位于平台左舷中部，平台甲板中心，平台船尾中部，平台左后立柱前端的外侧、中间、内侧，平台左后立柱后端的内侧、中间、外侧，平台左后立柱内侧中间，平台左前立柱后端中间，以及平台右前立柱后端内侧，来监测气隙和上浪（图 2），图 2 中 y 轴方向表示平台左侧， x 轴方向表示平台前侧。

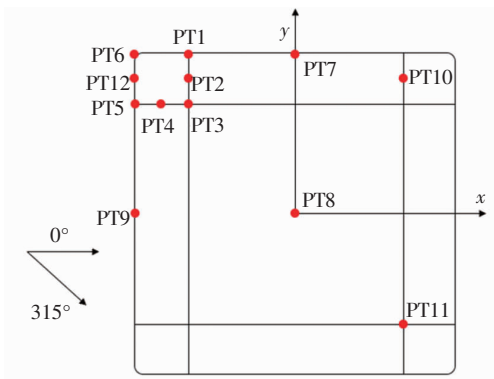


图 2 测量平台气隙的浪高仪的布置和编号

2 波浪爬升性能试验

试验分别测量了在作业和生存载况下， 0° 和 315° 不同入射角，以及不同波高周期作用下，上述

各点的相对波面升高（表 3），充分考虑了吃水、角度、波高和周期因素对响应的影响。试验所用半潜式生产平台在作业、生存载况下的设计初始气隙分别为 12.5 m、17 m，干舷分别为 17.3 m、21.8 m。

表 3 试验测量波的周期及波高

周期数	T/s	H/m
1	7.746	6.24
2	7.746	4.68
3	7.746	3.30
4	7.746	2.37
5	11.619	7.72
6	11.619	5.43
7	15.492	4.99

试验分为两个部分：第一部分是规则波测试，得到运动和气隙响应的幅频响应算子（RAO），绘制各测点在规则波下得到的频响函数（RAO）图形进行分析，规则波测试时分别选取生存和作业载况下的三个不同周期进行测试，但以此方式分析时周期并不连续；故第二部分是利用白噪声波进行分析，采用随机波进行测试，随机波采用目前较为主流的 JOHNSWAP 谱模型（霍发力，2014）。

2.1 试验数据采集和处理

试验中的测量控制系统位于拖车内。试验操作人员可以输入相应的波高和波周期，从而开展不同工况的试验。采集数据时，通过各种传感器和测量仪输出模拟信号，然后经过信号放大、模数转换后，将数据传输到采集计算机中，再通过专用处理分析软件进行分析处理，利用软件的滤波、光顺、消除异常点、信号缩放、数据通道组合等功能，得到时域统计分析结果汇总。

2.2 波浪爬升的位置特性

在 315° 斜浪作用下，对于作业和生存载况，通过 3 个不同周期（7.746 s，11.619 s，15.492 s），对每个周期进行不同波高的规则波测试，得到该半潜式生产平台不同位置相对的波面升高，进一步与入射波高相比，得到各位置相对波面升高的 RAO，即作业吃水下和生存吃水下规则波作用时的各点响应（图 3、图 4、表 4、表 5）。对比图 3 和图 4 可知，不同位置波面升高情况有较大不同。其中，在 315° 斜浪作用下：平台左后立柱前端外侧（PT1）、立柱后端内侧（PT5）、立柱前端中间（PT2）、立柱内侧中间（PT4）、立柱后端外侧（PT6）波面爬升较其他位置更为明显（图 3、图 4）。

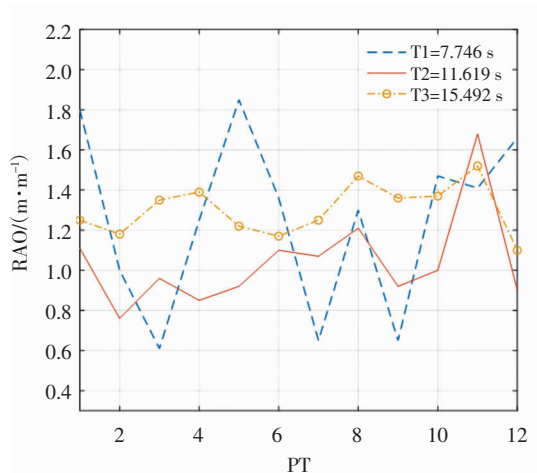


图3 作业吃水下规则波作用时各点响应图

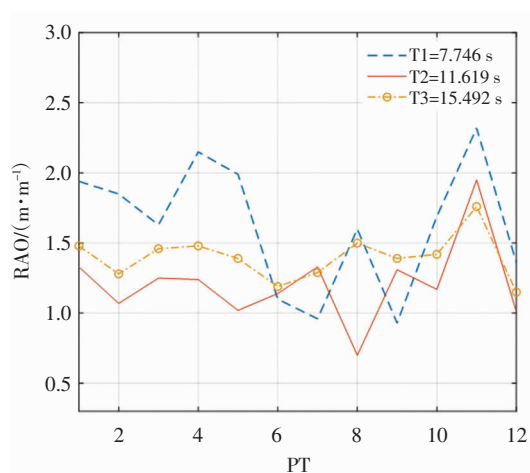


图4 生存吃水下规则波作用时各点响应图

表4 作业吃水下规则波作用时各点的响应表

T/s	PT1	PT2	PT3	PT4	PT5	PT6	PT7	PT8	PT9	PT10	PT11	PT12
7.746	1.80	1.00	0.61	1.25	1.85	1.36	0.65	1.30	0.65	1.47	1.41	1.66
11.619	1.11	0.76	0.96	0.85	0.92	1.10	1.07	1.21	0.92	1.00	1.68	0.90
15.492	1.25	1.18	1.35	1.39	1.22	1.17	1.25	1.47	1.36	1.37	1.52	1.10

表5 生存吃水下规则波作用时各点的响应表

T/s	PT1	PT2	PT3	PT4	PT5	PT6	PT7	PT8	PT9	PT10	PT11	PT12
7.746	1.94	1.85	1.63	2.15	1.99	1.1	0.96	1.60	0.93	1.69	2.32	1.36
11.619	1.33	1.07	1.25	1.24	1.02	1.14	1.33	0.70	1.31	1.17	1.95	1.01
15.492	1.48	1.28	1.46	1.48	1.39	1.19	1.29	1.50	1.39	1.42	1.76	1.15

对平台左后立柱各点的 RAO 进行比较可知：对于短周期波，从平台左后立柱前端外侧（PT1）到立柱前端中间（PT2）再到平台左后立柱前端内侧（PT3）的 RAO 逐渐减小，即波面爬升的剧烈程度逐渐减小；而对于长周期波，从平台左后立柱前端外侧（PT1）到立柱前端中间（PT2）再到平台左后立柱前端内侧（PT3），RAO 先减小后增大，即波面爬升的剧烈程度先减小后增大。同样，从平台左后立柱后端内侧（PT5）到平台左后立柱内侧中间（PT4）再到平台左后立柱前端内侧（PT3），作业吃水下，短周期波的 RAO 逐渐减小，长周期波的 RAO 逐渐增大；生存吃水下，短周期波的 RAO 先减小后增大，长周期波的 RAO 先增大后减小（图 3、图 4）。而从左后立柱后端内侧（PT5）到平台左后立柱后端中间（PT12）再到立柱后端外侧（PT6），作业吃水下，短周期波的 RAO 逐渐减小，而长周期波的 RAO 先减小在增大；生存吃水下的 RAO 均为先减小后增大，且三点中在平台左后立柱后端中间（PT12）处 RAO 最小。

围绕 315°斜浪方向，部分点的气隙响应具有对称性。如平台左后立柱前端外侧（PT1）和后端

内侧（PT5）、平台左舷中部（PT7）和平台船尾中部（PT9）的气隙响应和规律都十分相似，故位置上对称的两点其响应也相似。而平台左后立柱前端中间（PT2）和平台左后立柱内侧中间（PT4）虽然位置对称，但其响应不对称，后者的 RAO 较前者略高，即平台内部靠上的点的 RAO 相对更高。

从表 4 和表 5 可知，在相同波浪周期下，生存吃水下规则波作用时各点响应高于作业吃水下的响应。T = 7.746 s、11.619 s 和 15.492 s 时，生存吃水与作业吃水在各点的响应平均差分别为 0.37、0.17 和 0.09，可见周期越大，生存吃水和作业吃水下规则波作用时的响应差别越小。

2.3 波浪爬升的波幅特性

当 T = 11.619 s 时，PT1 到 PT2 的响应一致，平台上各点的 RAO 在不同的吃水下与波高表现的关系不同：

（1）在作业吃水下，各点的响应 RAO 均随着波高的减小而增加（图 5、表 6）。

（2）在生存吃水下，大部分点的响应 RAO 随着波高的增加而增加，但 PT5、PT8、PT11 呈现相反趋势（图 6、表 7）；可以看出在不同的吃水下，

平台各点的响应随波长的变化大致呈现相反的规律，但也有不同。

(3) 从表 6 和表 7 可知，在相同波浪高度下，生存条件下各点响应高于作业条件下的响应。H =

7.72 m 和 5.43 m 时，生存条件与作业条件在各点的响应平均差分别为 0.17 和 0.10，可见当 T = 11.619 s 时，波高越小，生存条件和作业条件下的响应差别越小。

表 6 各点作业条件下不同波长对应的响应表 (周期 T = 11.619 s)

H/m	PT1	PT2	PT3	PT4	PT5	PT6	PT7	PT8	PT9	PT10	PT11	PT12
7.72	1.11	0.76	0.96	0.85	0.92	1.10	1.07	1.21	0.92	1.00	1.68	0.90
5.43	1.17	0.83	1.05	0.92	0.97	1.13	1.14	1.29	1.00	1.12	1.72	0.93

表 7 各点生存条件下不同波长对应的响应表 (周期 T = 11.619 s)

H/m	PT1	PT2	PT3	PT4	PT5	PT6	PT7	PT8	PT9	PT10	PT11	PT12
7.72	1.33	1.07	1.25	1.24	1.02	1.14	1.33	0.70	1.31	1.17	1.95	1.00
5.43	1.32	0.98	1.10	1.04	1.06	1.12	1.29	1.18	1.22	1.10	2.13	0.97

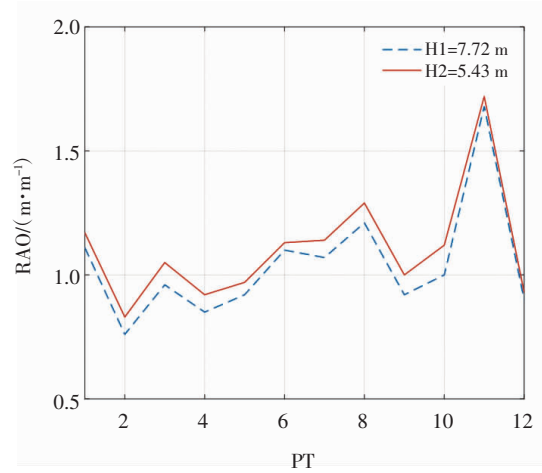


图 5 作业条件下各点的响应图(周期 T = 11.619 s)

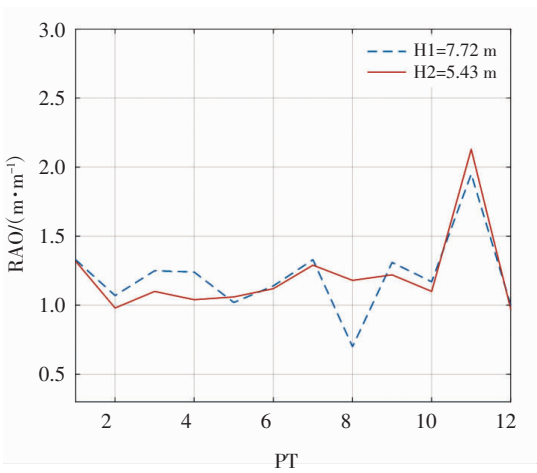


图 6 生存条件下各点的响应图(周期 T = 11.619 s)

当 T = 7.746 s 时，各点在生存和作业条件下响应随波高的变化趋势不尽相同 (图 7、图 8、表 8、表 9)。

(1) 各点在生存和作业条件下响应随波高的变化趋势有相似的规律。在作业吃水下，各点除平台

左舷中部 (PT7)、平台船尾中部 (PT9)、平台右前立柱后端内侧 (PT11) 外，均是波高最小时响应最大 (图 7、表 8)；在生存吃水下，大部分点均是在波高最小时响应最大，但也有不少点有所偏差 (图 8、表 9)。

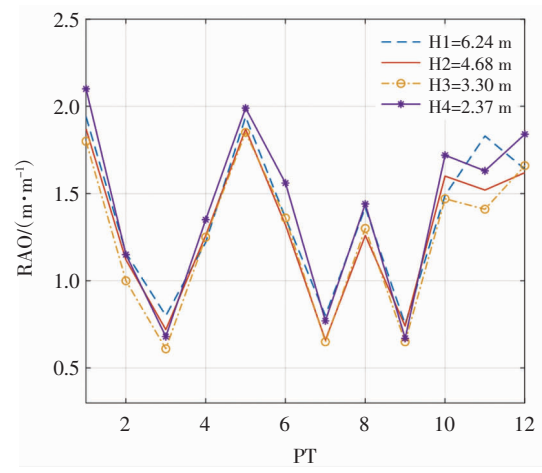


图 7 作业条件下各点的响应图 (周期 T = 7.746 s)

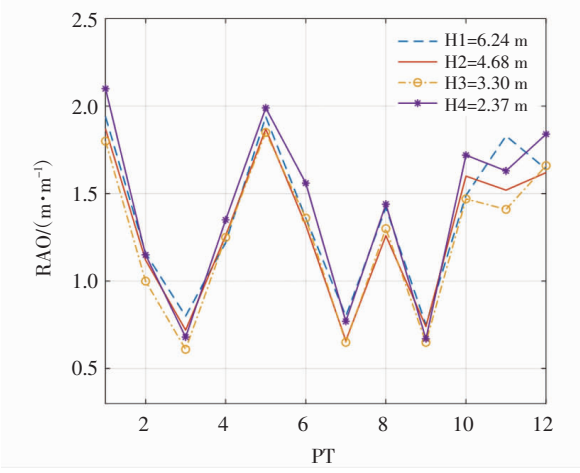


图 8 生存条件下各点的响应图 (周期 T = 7.746 s)

表 8 各点作业条件下不同波长对应的响应表 (周期 $T = 7.746 \text{ s}$)

H/m	PT1	PT2	PT3	PT4	PT5	PT6	PT7	PT8	PT9	PT10	PT11	PT12
6.24	1.94	1.16	0.8	1.22	1.94	1.36	0.8	1.42	0.75	1.49	1.83	1.64
4.68	1.87	1.12	0.72	1.26	1.87	1.32	0.66	1.26	0.74	1.6	1.52	1.62
3.30	1.80	1.00	0.61	1.25	1.85	1.36	0.65	1.30	0.65	1.47	1.41	1.66
2.37	2.10	1.15	0.68	1.35	1.99	1.56	0.77	1.44	0.67	1.72	1.63	1.84

表 9 各点生存条件下不同波长对应的响应表 (周期 $T = 7.746 \text{ s}$)

H/m	PT1	PT2	PT3	PT4	PT5	PT6	PT7	PT8	PT9	PT10	PT11	PT12
6.24	1.73	1.69	1.30	1.98	1.57	1.08	0.84	1.68	0.84	1.50	1.78	1.23
4.68	1.78	1.73	1.35	2.05	1.70	1.05	0.83	1.52	0.85	1.46	1.77	1.28
3.30	1.94	1.85	1.63	2.15	1.99	1.10	0.96	1.60	0.93	1.69	2.32	1.36
2.37	2.02	1.79	1.62	2.14	2.11	1.09	0.87	1.64	0.87	1.81	2.17	1.39

(2) 各点在生存和作业条件下响应随波高的变化趋势有不同的规律。在作业吃水下,大部分点在波高为 3.3 m 时响应达到最小值,波高从高到低时响应未呈现出递增的规律(图 7、表 8);而在生存吃水下,大部分点在波长为 6.24 m 时,响应达到最小值,波长从高到低响应大致呈现出递增的规律(图 8、表 9)。

(3) 从表 8 和表 9 可知,在相同波浪高度下,生存条件下各点响应高于作业条件下的响应。 $H = 6.24 \text{ m}$ 、 4.68 m 、 3.3 m 和 2.37 m 时,生存条件与

作业条件在各点的响应平均差分别为 0.07、0.15、0.37 和 0.22,可见当 $T = 7.746 \text{ s}$ 时,随波高减小,生存条件和作业条件下的响应平均差呈先增大后减小的趋势。

2.4 波浪爬升的周期特性

取平台左后立柱前端外侧(PT1)、平台左后立柱前端内侧(PT3)、平台左后立柱后端内侧(PT5)平台左舷中部(PT7)、平台船尾中部(PT9)、平台右前立柱后端内侧(PT11)的响应点观察其响应时历,如图 9 (a) — (f) 所示,通过对

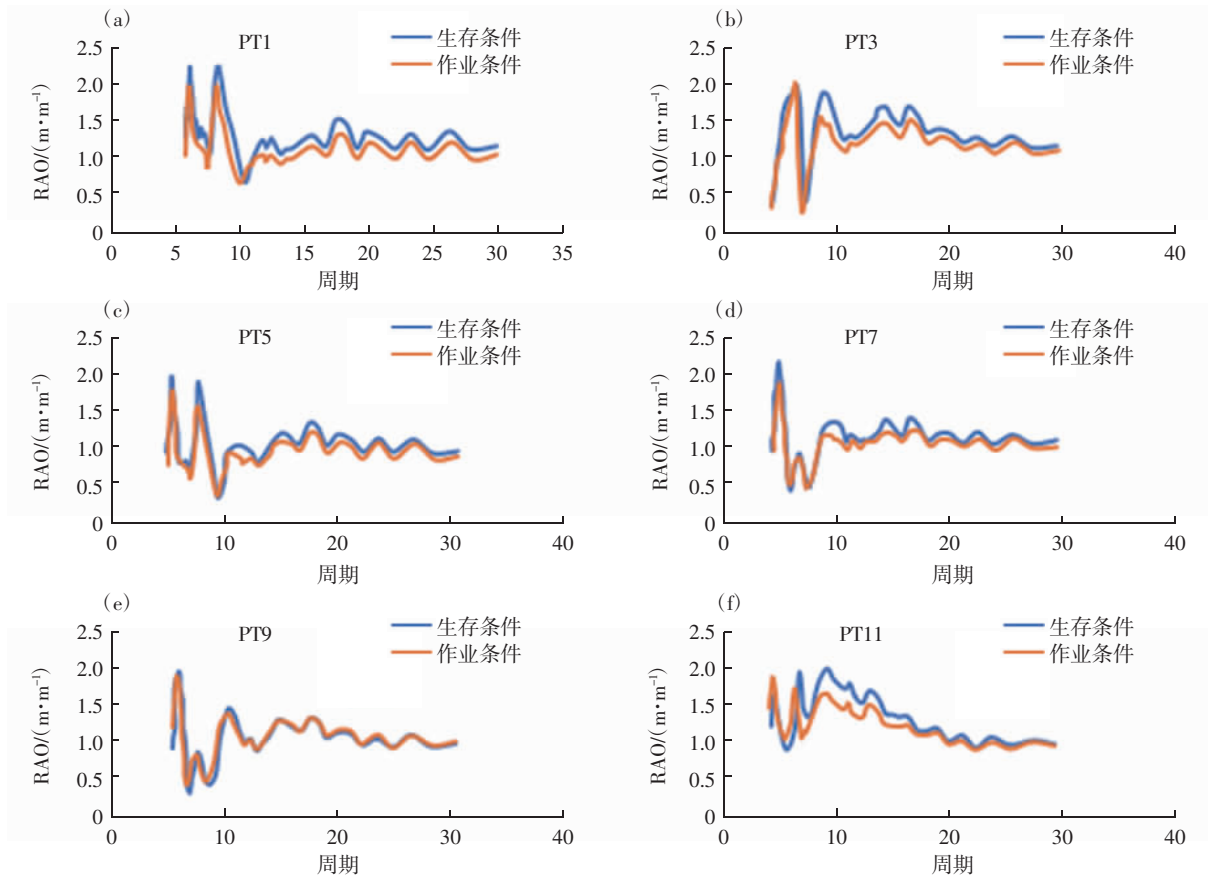


图 9 关键点时历响应图

比可知: PT1 和 PT5 相似,在周期为 10 之前有两个波峰,这是由于 PT1 和 PT5 关于平台对角线对称; PT7 和 PT9 前面的波形相似,有一个波峰两个波谷。

响应随周期性逐渐变化的趋势也有所不同: PT1、PT5 和 PT7 从周期为 10 开始响应逐渐趋于稳定,在 $RAO=1$ 时左右摆动,而 PT3、PT9 和 PT11 则是在周期达到 20 之后才开始趋于稳定。

3 结论

通过对真实比例缩放的半潜式平台模型进行不同角度的波浪爬升试验,测得了平台不同位置的气隙响应数据,得到了海浪对半潜式平台气隙响应结论如下:

(1) 不同位置波面升高情况有较大不同,其中,在 315° 斜浪情况下:平台左后立柱前端外侧 (PT1)、后端内侧 (PT5)、前端中间 (PT2)、内侧中间 (PT4)、后端外侧 (PT6) 波面爬升较其他位置更为明显,而在 0° 随浪情况下,左后立柱后端外侧 (PT6)、左前立柱后端中间 (PT10)、左后立柱后端中间 (PT12)、平台甲板中心 (PT8)、右前立柱后端内侧 (PT11) 波面爬升较其他位置更明显;此外,围绕浪向,左后立柱外侧点的气隙响应具有对称性。气隙的这一特性对半潜式平台在作业和生存时的风险规避有着很强的指导意义。针对作业平台不同区域的气隙强弱可以对半潜式平台的安全区进行等级划分。

(2) 气隙响应与吃水也有很大关系:在给定波高不同周期的规则波作用下,生存吃水下的各点响应平均差要高于作业吃水,且随着周期的增大,响应平均差减小。在较大周期 (11.619 s) 波浪作用下,生存吃水下的各点响应平均差要高于作业吃水,随波高的减小,响应平均差减小;但在较小周期 (7.746 s) 的作用下,波高越小,生存条件和作业条件下的响应平均差呈先增大后减小的趋势。在半潜式平台的实际工况当中,可以利用这一特性,通过调节平台吃水来减少恶劣环境对于平台设备的损伤。

(3) 气隙响应与波浪周期的关系:在小周期时,气隙响应 RAO 随周期变化而发生较大变化,随着周期的增大,气隙响应趋于稳定,在一定范围内波动。响应与周期关系的探究有助于进一步建立气隙同外界激励之间的物理模型。值得一提的是,本次实验仅针对波浪作用下的激励响应进行探究,后续可以增加风浪流的耦合,建立一个完整的激励模型。

(4) 除波浪周期之外,波陡也是波浪非线性的主要表征参数,波高和波陡成正比例关系,故可得气隙响应与波陡的关系:在较大周期 (11.619 s) 的作业吃水下,各点的响应 RAO 随着波陡的减小而增加;生存吃水下,各点的响应 RAO 随着波陡的增加而减小。在小周期 (7.746 s) 时,波陡最小,响应最高。

参 考 文 献

- 闫发锁,杨慧,沈鹏飞,等,2015. 极限波浪下半潜平台气隙和波浪爬升的统计分析[J]. 哈尔滨工程大学学报, 36(2): 143-146.
- 单铁兵,杨建民,李欣,等,2012. 深海平台立柱周围波浪非线性爬升研究进展[J]. 海洋工程, 30(1): 151-160.
- 单铁兵,杨建民,李欣,2011. 半潜式平台气隙性能的研究进展[J]. 中国海洋平台, 26(2): 1-7.
- 霍发力,2014. 水深对半潜式平台水动力性能及波浪载荷的影响[J]. 船舶工程, 36(2): 1-5.
- 王世明,李泽宇,于涛,等,2019. 多能互补海洋能集成发电技术研究综述[J]. 海洋通报, 38(3): 241-249.
- SWEETMAN B, WINTERSTEIN S R, MELING T S, 2002. Airgap Prediction From Second-order Diffraction And Stokes Theory[J]. International Journal of Offshore & Polar Engineering, 12 (3): 184-188.
- MAVRAKOS S A, CHATJIGERGIU I K, GRIGORPOULOS G, et al, 2004. Scale Experiments For the Measurement of Motions And Wave Run-Up On a TLP Model, Subjected to Monochromatic Waves[C]// International Offshore and Polar Engineering Conference; ISOPE 2004.
- SIMOS A N, FUJARRA A, SPARANO J V, et al, 2006. Experimental Evaluation of the Dynamic Air Gap of a Large-Volume Semi-Submersible Platform[C]//International Conference on Offshore Mechanics & Arctic Engineering.

(本文编辑:崔尚公)