

文章编号:0254-0096(2019)03-0715-09

# 超浅水浮式波浪能发电装置弹性系泊系统及水动力性能的数值与模型试验研究

黄 硕<sup>1~3</sup>, 盛松伟<sup>1~3</sup>, 游亚戈<sup>1~3</sup>, 张运秋<sup>1~3</sup>, 王振鹏<sup>1~3</sup>

(1. 中国科学院广州能源研究所, 广州 510640; 2. 广东省新能源和可再生能源研究开发与应用重点实验室, 广州 510640;  
3. 中国科学院可再生能源重点实验室, 广州 510640)

**摘 要:** 超浅水环境下浮式波浪能发电装置系泊系统性能的优劣直接影响装置在极限海况下的生存性和工作海况下的波浪能俘获性。针对波能装置运动特点和岛屿周边海域经济性开发的需要,设计一套适合超浅水环境的自动对浪型多点弹性系泊系统,并在系泊线中加入非线性弹性拉伸材料——高弹性索。首先以鹰式波浪能装置为系泊对象,给出混合高弹性索和聚酯纤维系泊系统2种设计方案,通过对比分析,发现高弹性索可有效降低锚泊线的最大张力和普通锚链的用量,减轻系泊系统重量。混合高弹性索系泊系统用于超浅水环境下的浮式波浪能装置更具优越性。在此基础上,对极限工况下混合高弹性索系泊鹰式和细长体波浪能装置水动力性能进行时域耦合和水池模型试验研究。研究表明混合高弹性索多点弹性系泊系统能满足一般浮式波浪能装置在浅水大漂移载荷等恶劣海况下对锚泊系统的要求。

**关键词:** 波浪能装置; 系泊系统; 弹性; 浅水; 水动力

**中图分类号:** O325/TK79 **文献标识码:** A

## 0 引 言

浮式波浪能发电装置通过系泊系统长期系留在恶劣的海洋环境中工作,其在抵抗极端风暴荷载、多设备协调、经济性等方面有独特要求。其对波浪能装置的适合程度以高、中、低来划分,主要是从保证装置的安全稳定性、高效俘获波能性及成本角度来考虑。该项研究开展较晚,至今尚未形成专门性规范,设计主要参考海洋平台及浮式生产储卸油装置(FPSO)系泊<sup>[1]</sup>,但波浪能装置系泊系统设计还有特殊要求。

由于需投放在波能密度较高的海域,对系泊系统及结构的抗浪性要求较高。往往较适合的投放位置存在明显的潮流<sup>[2]</sup>,系泊线处可能产生涡激振动,同时漂移流载荷会使装置不对浪,降低波能俘获效率及增加结构载荷,初始设计时潮流的影响需特别考虑。为减小电缆路由的连接长度及对环境的影响,装置经常会集群化密集布置,一方面使得

系泊系统对波或波群有动力响应,需将装置与系泊系统作为一个耦合运动系统来考虑。而波能装置通常由多个铰接或滑动副链接的浮体组成,靠浮体间的相对运动获能,这种运动也部分取决于系泊系统。另一方面使得系泊面积变小,单一装置及其系泊线的漂移受限以防止装置间及系泊线间的碰撞。这与FPSO等海洋平台的系泊面积不受限制及立管等最大允许漂移不同<sup>[3]</sup>。

浅水台风海况下,装置型深较大时(如本文水深28 m,极限有义波高9.07 m,装置型深14 m)的超浅水环境,如瞬时系泊张力过大会导致装置明显侧倾,这不但降低波能俘获效率,还可能使装置倾覆,降低生存性。综上所述,为限制波浪能装置在极限和作业海况时的漂移,避免电缆受到过大张力而损坏,系泊系统的设计要求有:1)高效波能俘获性。尽量使装置正对波浪,不能对入射波造成遮蔽,致使装置迎浪方向的波能有明显下降。2)稳定性。装置在浪、流、风的组合动力中,及在不同潮位中保

收稿日期: 2017-07-24

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(A类)(XDA13040203); 国家自然科学基金(51609232); 工信部高技术船舶科研项目-浮式保障平台工程(二期)工信部联装(201622)

通信作者: 黄 硕(1984—), 女, 博士、助理研究员, 主要从事波浪能装置水动力及系泊系统方面的研究。huangshuo@ms.giec.ac.cn

持正常浮态。3)生存性。在恶劣海况下无论是锚泊系统还是装置均不应导致巨大应力。4)经济性。及满足系泊区域的限定。系泊线应具有较小的极限张力、较短的长度、较小的漂移范围及较低的材料使用量。

本文针对上述设计要求,首先以鹰式波浪能装置为例<sup>[4,5]</sup>,从工程实际出发对系泊系统材料、尺寸、系泊系统布置和装置水动力性能进行分析。在超浅水海域,依靠系缆自身质量形成的悬链线效应很不明显,而使其系泊性能大为下降<sup>[6]</sup>,需要较长的系泊链,系泊系统将覆盖较大海域。超弹性索与钢锚链或其他低弹性人造纤维缆<sup>[7,8]</sup>相比,具有更大的强度-质量比,可降低系泊系统引起的浮体载荷;较低的轴向刚度,使之能适应浮体偏移导致的系缆伸长;较大的水平回复力,可减少浮体偏移量,但高弹性索在浅水中的适应性尚未得到充分研究。

通过对混合高弹性索系泊系统和聚酯纤维系泊系统在浅水中的特性分析,为浮式波浪能装置设计优化的系泊系统。之后采用数值计算和模型试验的方法对珠海万山海域 50 年一遇海况下混合高弹性索系泊鹰式(宽体)和细长体装置水动力性能和系泊缆载荷开展研究。数值计算包括频域水动力性能和浮体/锚链时域耦合分析。模型试验包括装置静水衰减试验,白噪声试验和风浪流不规则波试验。

## 1 环境条件与数值模型

### 1.1 环境条件

环境条件基于极限波浪及其对应的风和流,设计系泊半径小于 100 m,台风海况为珠海市万山海域 50 年一遇的风浪,对应 10 年一遇的流。具体设计参数如表 1 所示,其中风速为海平面以上 10 m 位置的 1 小时平均风速,水深 28 m。海浪谱采用 JONSWAP 谱。

表 1 极限环境条件

Table 1 Extreme environmental conditions				
项目	参数	数值	项目	数值
波浪	有义波高/m	9.07	表层流速/m·s <sup>-1</sup>	1.10
	谱峰周期/s	14.3	流 中间流速/m·s <sup>-1</sup>	0.63
	谱峰因子	1.336	底层流速/m·s <sup>-1</sup>	0.00
项目		数值		
1 h 平均风速/m·s <sup>-1</sup>		40.7		

### 1.2 数值模型

基于三维势流理论,采用 BV 船级社开发的 HydroStar 和 ARINE 软件,开展频域水动力计算和时域船体/系泊缆耦合数值分析。浮体在各种环境载荷作用下的动力学方程表示为:

$$[M+\mu]\ddot{\mathbf{x}} + [\lambda]\dot{\mathbf{x}} + [B_1]\dot{\mathbf{x}} + [B_2]f(\dot{\mathbf{x}}) + [c]\mathbf{x} = \mathbf{q}(t, \mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}) \quad (1)$$

式中,  $[M]$ 、 $[M_A]$ ——浮体质量矩阵和附加质量矩阵;  $[\lambda]$ 、 $[B_1]$ 、 $[B_2]$ 、 $[c]$ ——辐射阻尼矩阵、线性阻尼矩阵、二次阻尼矩阵和恢复力刚度矩阵;  $\mathbf{x}$ ——浮体六自由度运动矢量;  $\dot{\mathbf{x}}$ ——速度矢量;  $\ddot{\mathbf{x}}$ ——加速度矢量;  $f_i(\dot{\mathbf{x}}) = \dot{\mathbf{x}}_i|\dot{\mathbf{x}}_i|$ ——单元矢量函数;  $\mathbf{q}(t, \mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}})$  为激振力矢量表达如式(2)所示:

$$\mathbf{q}(t, \mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}) = F_{(1)} + F_{(2)} + F_{\text{moor}} + F_w + F_c \quad (2)$$

式中,  $F_{(1)}$ ——1 阶波浪力;  $F_{(2)}$ ——2 阶波浪力;  $F_{\text{moor}}$ ——系泊线张力;  $F_w$ 、 $F_c$ ——风载荷与流载荷以气动系数表达<sup>[9]</sup>:

$$F_w = \frac{1}{2}\rho_{\text{air}}S_tC_wV_w^2, F_c = \frac{1}{2}\rho_wL_{\text{BP}}T_dC_cV_c^2 \quad (3)$$

式中,  $\rho_{\text{air}}$ 、 $\rho_w$ ——空气和海水密度;  $V_w$ 、 $V_c$ ——风速与流速;  $C_w$ 、 $C_c$ ——风力和流力系数;  $S_t$ 、 $L_{\text{BP}}$ 、 $T_d$ ——装置受风面积、垂线间长和吃水。

采用间接时域分析法,即先在频域计算中应用面元法求解边界积分方程,得到每个面元上的速度势,然后根据伯努利方程,得到每个面元上的水动力压力,沿浮体表面积分,得到浮体水动力参数,如附加质量、阻尼、1 阶波浪激励力和 2 阶波浪激励力包括平均漂移力和低频力,通过中场公式<sup>[10]</sup>求得,采用全 QTF 法计算低频波浪载荷。通过 IFFT 方法将计算结果从频域变为时域<sup>[11]</sup>。

时域运动方程为:

$$[M+M_A]\ddot{\mathbf{x}} + [B_1]\dot{\mathbf{x}} + [B_2]f(\dot{\mathbf{x}}) + [c]\mathbf{x} + \int_0^t h(t-\tau)\dot{\mathbf{x}}(\tau)d\tau = \mathbf{q}(t, \mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}) \quad (4)$$

式中,  $h(t-\tau)$ ——系统的延迟函数。

### 1.3 水动力模型

水动力计算中,浮体坐标系原点位于装置基线上,与中纵剖面及中横剖面相交,  $X$  轴-正向指向装置北侧。0°和 90°浪向分别定义为波浪沿  $X$  轴和  $Y$  轴正向传播。系泊对象为 100 kW 鹰式波浪能装置<sup>[5]</sup>如图 1 所示该装置采用一基多体式设计,即在 1 个

波浪能半潜母船(支撑主体)上安装双向 4 个波浪能俘获浮体,装置前后完全对称。其重心坐标为 (0.00, -0.01, 4.85) m, 回转半径为 (8.04, 9.97, 11.19) m, 吃水 13 m, 排水体积为 4027 t。水动力计算不考虑波浪能俘获浮体与支撑主体的相对运动,波浪能俘获浮体处于向下的极限位置。

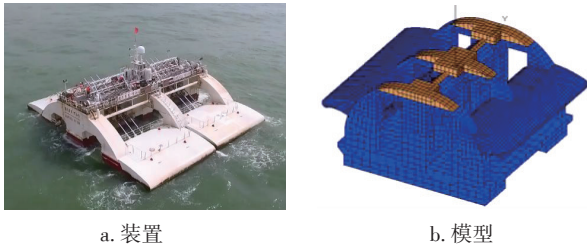


图1 鹰式波浪能装置和面元模型

Fig. 1 Sharp Eagle WEC and hydrodynamic model

## 2 数值模拟

### 2.1 系泊线材料选择

常规系泊线材料如铁锚链,若要增加储备系泊力,需增加躺链长度,占用更宽广的海域;如减小预张力,需减小悬链线跨距,增加躺链的相对长度,则浮体飘曳范围变大,不利于稳性<sup>[8]</sup>。为减少设计矛盾,本文系泊线部分采用高弹性索如图 2 所示。该材料是一种具有超高非线弹性的人工合成缆绳,每组由多根较细的弹性索组成,单根破断力为 1.225 t。

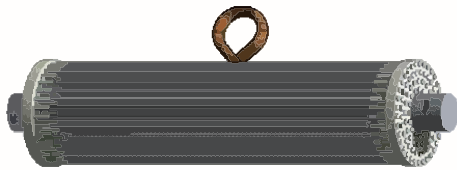


图2 SUPERFLEX D26高弹性索

Fig. 2 SUPERFLEX D26

从图 3 的 SUPERFLEX D26 高弹性索单根拉力曲线 ( $T_N$  和  $S_N$  分别为应变和应力)中可看出,其高弹性段随着拉力的变化而出现明显的拉伸变形,可有效吸收浮体动能,减小锚泊系统的极限载荷。ARINE 无法模拟非线弹性系泊线,数值模拟中将弹性索等效为分段线性弹簧,其截面刚度  $EA$  分别为 3539 和 26194 N。对聚酯缆和钢链等常规材料,根据 API 规范,安全系数可取 1.67。由于高弹性索单根失效产生的经济损失小于增加冗余所产生的费用,单根失效的概率又很小,因此安全系数暂取

1.0。未来可根据实际经济效益适当增加弹性缆绳数量,提高安全系数。

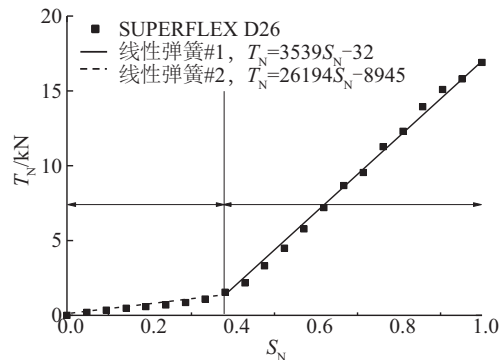


图3 SUPERFLEX D26单根拉力曲线

Fig. 3 Stiffness of SUPERFLEX D26

### 2.2 初始设计

系泊系统布置形式及系泊线组成如图 4 所示。为满足装置对浪性要求,艏摇恢复力矩要尽可能的小,系泊系统采用三点系泊。每根系泊线从下到上由海底锚链、重块锚链、高弹性索、浮筒及上部锚链组成,系泊线初始参数的设置依据多成分锚泊线方程计算得到。

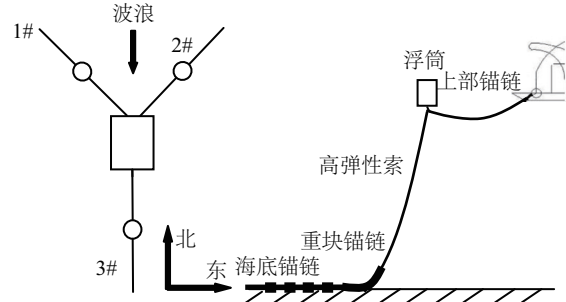


图4 系泊系统布置形式及系泊线组成

Fig. 4 Mooring system and positioning

加入海底锚链及重块锚链是防止起锚,加入上部锚链为防止装置撞击浮筒。因高弹性索是多根细缆组合在一起,应始终保持张紧状态,以防止系统松弛后细缆间的碰撞摩擦发生破坏疲劳,需加载有足够浮力的浮筒,提供系泊系统刚度,使得上部锚链具有一定的预张力及减小系泊系统的极限张力。首部的 2 根系泊线与装置中纵剖面成 45° 夹角,承受大部分系泊力,尾部 1 根为 0° 夹角,主要起限位作用。海底锚链长 40 m,重块锚链长 40 m,湿重 1410 kg/m,上部链长 25 m,锚链外径均为 0.062 m,浮筒净浮力 30000 kg。锚点坐标分别为



(96.5, 85.1, -28.0) m, (-96.5, 85.1, -28.0) m 和 (137.5, 0, -28.0) m。

由于 0°~90°浪向下尾锚线系泊线 3#受力始终小于首锚的受力,只需首锚系泊力满足安全要求,尾锚线自然满足。而 45°浪向(风浪流同向)为最危险工况,主要系泊线 2#单根受力,设计如满足该工况安全要求,其他工况自然满足。通过准静态分析,得到系泊线 2#的最大张力、装置运动及高弹性索锚泊系统初步设计方案如表 2 所示。方案 4 中系泊线 2#最大张力约等于最小破断力,满足设计要求,再增加弹性索根数及长度会造成材料冗余浪费。

表 2 45°浪向系泊线 2#张力,高弹性索方案

Table 2 Tension of line 2# in heading 45°, superflex mooring system

方案	长/ m	数量/ 根	最小 破断力/t	最大 位移/m	最大 张力/t
1	10.40	240	293.9	28.3	345.5
2	10.45	260	318.4	28.1	363.3
3	12.31	220	269.4	25.3	283.4
4	12.31	240	293.9	25.1	297.2
5	12.31	260	318.4	25.0	310.2

### 2.3 系泊线材料影响

以锚链代替弹性索,以聚酯缆代替上部锚链。海底锚链长取 150 m,悬挂链长 20 m。系泊方案及系泊线 2#张力计算结果见表 3,发现需使用 270 m 以上的聚酯缆和 150 m 长的海底锚链才能满足规范设计要求,其系泊线长度和系泊半径远大于高弹性索方案,装置最大位移也明显增大。因此加入高弹性索不仅可减少普通锚链的用量,有效减小系泊线长度,且更适用于浅水较小系泊半径的区域。

表 3 45°浪向系泊线#2 张力,聚酯缆方案

Table 3 Tension of line 2# in heading 45° polyester mooring system

方案	长/m	直径/m	许用 张力/t	最大 位移/m	最大 张力/t
1	290	0.151	315.0	28.7	265.6
2	250	0.151	315.0	32.9	339.0
3	270	0.151	315.0	32.6	312.5

### 2.4 时域动态分析

通过对初始设计方案进行动态响应研究,调整初始设计尺寸。时域模型中采用随机波浪结合稳态风和流。系泊线 2#张力动态结果如表 4 所示。系泊线 2#最大张力 289.5 t,小于初始设计得到的 297.2 t,而弹性索破断力为 293.9 t。由于弹性索安全系数取 1.0,此方案满足安全要求。产生了一定的起锚力的原因是由于系泊链的动力效应所引起,而起锚力最大为 5.5 t,小于拖曳锚的重量(有一定的承受垂向提升力的能力),因此不会产生起锚现象。锚根据具体的海底土壤环境可选择拖曳锚、重力锚、吸力锚等。系泊系统在波浪和海流不同入射方向下的风标性如图 5 所示,可看出系泊系统具有良好的自动对浪特性,使装置吸波浮体绝大部分正对波浪,高效俘获波能。

表 4 系泊线 2#张力动态结果

Table 4 Tension of mooring line 2# on top position

极值/t	浪向/(°)				
	0	30	45	60	90
最大张力	209.2	285.6	289.5	271.8	263.0
起锚力	1.2	3.3	3.9	4.4	5.5

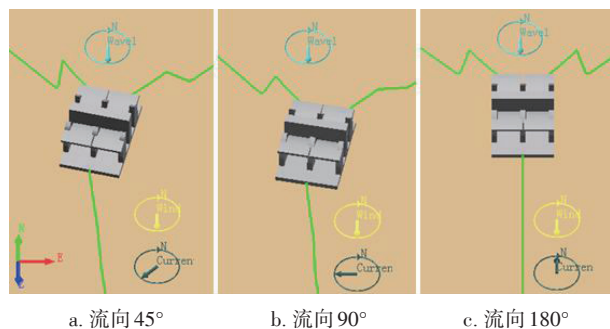


图 5 系泊系统在浪流不同向下的风标性

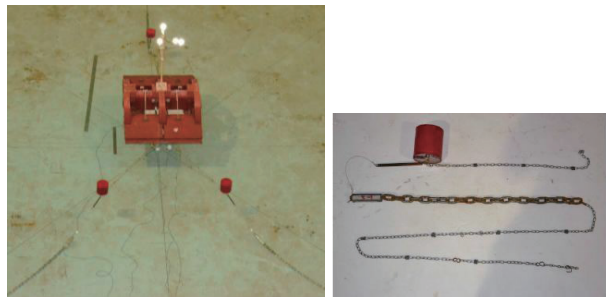
Fig. 5 Weathervane of mooring system in wave and current form different angle

## 3 模型试验验证及分析

### 3.1 模型试验

为验证混合高弹性索多点弹性系泊系统极浅水下的有效性,对鹰式(宽体)波能装置开展模型试验研究,本试验在上海交通大学海洋工程水池进行。根据装置主要尺度、环境条件和试验设施,选定实体和模型之间缩尺比为  $\lambda=42$ 。忽略粘性的

影响,保持实体与模型之间的  $Fr$  和  $St$  数相等,满足两者的重力相似和惯性相似<sup>[12]</sup>。实验中采用高压喷水造流系统和轴流鼓风机造风系统模拟表 1 环境条件,应用单分力传感器测量系泊缆上的载荷和非接触式 6 自由度运动采集系统来测量静水衰减试验、白噪声试验及风浪流试验中装置的运动。试验水深为 0.667 m,采样频率为 50 Hz,采样时间大于 28.5 min(对应实际时间 3 h)。系泊系统如图 6 布置,由于高弹性索尺度限制,试验中不能直接应用,因此保持高弹性索段轴向刚度和总长度不变,以 O 型



a. 系泊系统模型

b. 系泊线构型

图6 鹰式装置混合高弹性索弹性系泊系统模型及系泊线构型

Fig. 6 Model of Sharp Eagle WEC with superflex mooring system and mooring line configuration

弹簧和钢丝代替模拟,系泊缆其他部分应用锚链和重块模拟。

### 3.2 鹰式装置频域运动分析

频域数值计算中,是否考虑流体的粘性阻尼效应得到  $0^\circ$  和  $45^\circ$  浪向下浮体运动的幅值响应算子(RAO)并与白噪声模型试验结果进行对比如图 7。发现固有频率附近数值和试验得到的垂荡和横摇峰值差别较大,这说明粘性效应对装置垂荡和横摇运动影响明显。因此采用试验中测得的粘性阻尼见表 5,重新进行频域数值计算,可看出数值计算和模型试验结果吻合较好,从而说明数值计算结果是准确的。1 阶波浪激励力引起装置的波频运动,系泊系统对装置波频运动影响非常小。原因在于数值计算时 JONSWAP 波浪谱中的波浪周期都小于 25 s,而系泊系统的水平面内运动的固有周期都大于 25 s 如表 5 所示。鹰式装置垂荡和横摇 RAO 峰值均发生在固有周期(分别为 25.6 s 和 17.3 s)处,而纵摇峰值周期为 6.2 s,远小于纵摇固有周期 46.1 s,固有周期很好的避开了波浪周期,使得装置在极限海况下波频运动对大部分波浪不响应。横摇和纵摇最大峰值分别为  $5.3^\circ$  和  $2.58^\circ$ ,横摇运动较为剧烈。

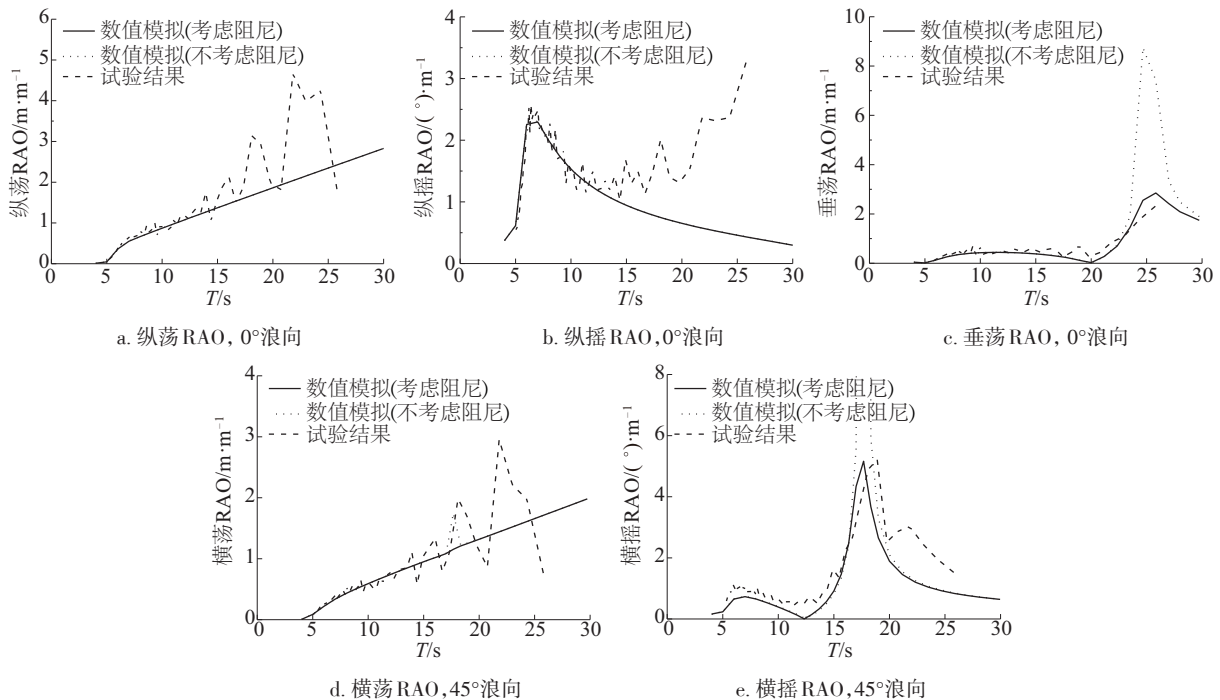


图7 鹰式(宽体)装置运动RAO

Fig. 7 Motion RAO of Sharp Eagle WEC

在高频范围内,试验与数值结果存在差别,这是由于白噪声试验交谱分析过程中,还涉及到相干性系数的问题。相干性系数越高表示响应与输入的联系越紧密,而相干性系数低的点不能很好的反映出响应与输入的联系,其结果的准确性也相应受到影响。所以试验得到的 RAO 与频域计算得到的 RAO 在某段相干性系数较高的频域段吻合得不错,而在相干性系数较低的频域段有一定误差,因此试验结果也是合理的。

### 3.3 风浪流作用下鹰式装置系泊力和运动分析

根据在水池模型试验中测得的衰减曲线得出装置阻尼系数  $d_{\xi}$ 、固有周期  $T_n$  和流力系数  $C_c^i$  如表 5 所示,对数值计算中的环境载荷进行修正,重新进行时域动态分析,以确保数值计算的输入参数与水池试验的参数尽可能的相似。粘性阻尼定义为  $d = d_{\xi} d_c$ ,  $d_c = 4\pi(\mathbf{M} + \mathbf{M}_A)/T_n$ ,  $d_c$  是临界阻尼。根据试验测得的流力  $F_c$  和流速  $V_c$ , 计算得到相应角度下流力系数为  $C_c^i = F_c^i/(V_c^i)^2$  ( $i=0^\circ, 30^\circ, \dots, 90^\circ$ )。由于水池造波能力限制,测得最大有义波高为 8.77 m,谱峰周期为 13.5 s。

表 5 试验中测得的固有周期、阻尼系数和流力系数						
Table 5 Damping coefficients, natural period and current coefficients measured by experiments						
项目	纵荡	横荡	垂荡	纵摇	横摇	艏摇
$T_n/s$	110.4	114.3	25.6	46.1	17.4	55.7
$d_{\xi}$	0.200	0.145	0.069	0.135	0.074	0.187
项目	浪向 $0^\circ$		浪向 $45^\circ$		浪向 $90^\circ$	
$C_{cx}^i/N \cdot (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})^{-2}$	$1.68 \times 10^5$		$9.05 \times 10^5$		0.00	
$C_{cy}^i/N \cdot (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})^{-2}$	0.00		$1.98 \times 10^5$		$8.79 \times 10^4$	

不同浪向下,系泊线张力和装置运动的时历统计数值与试验的对比结果如表 6 所示。研究发现  $0^\circ$  风浪流作用时,首部系泊线 1#和 2#起主要作用,数值计算的张力最大值、平均值和均方差与试验值吻合得较好。由于系泊线 1#和 2#是对称布置,所以数值计算得到的张力值是一致的。而试验中,由于系泊线 1#和 2#预张力无法调整到完全一致,在试验中会产生偏差,导致系统运动的不对称。可看到试验中由于系泊系统预张力的不对称,导致宽体装置在  $0^\circ$  环境载荷时出现了横荡和艏摇运动,而数值计算中横荡和艏摇值均为零。

表 6 鹰式装置运动和系泊线张力数值与试验对比  
Table 6 Experimental and numerical tensions and displacement of Sharp Eagle WEC

浪向	极值	系泊线张力/kN					
		系泊线 1#		系泊线 2#		系泊线 3#	
		试验	数值	试验	数值	试验	数值
$0^\circ$	最大	1937	1625	1661	1625	449	512
	平均	255	401	229	401	30	47
	方差	161	174	142	174	56	36
$45^\circ$	最大	3168	3162	249	269	344	1501
	平均	452	742	56	82	96	290
	方差	366	447	32	28	45	155
$90^\circ$	最大	2505	2621	230	811	1186	1748
	平均	512	495	29	81	347	345
	方差	310	281	26.0	64	122	176
浪向	极值	装置运动位移					
		纵荡/m		垂荡/m		纵摇/( $^\circ$ )	
		试验	数值	试验	数值	试验	数值
$0^\circ$	最大	24.9	21.1	3.5	3.5	15.2	21.3
	平均	12.6	12.5	0.1	0.0	2.1	0.3
	方差	3.1	2.5	1.1	0.8	3.4	4.5
$45^\circ$	最大	14.3	9.0	23.9	28.0	34.6	38.2
	平均	5.6	5.4	15.7	18.4	21.9	22.4
	方差	2.3	1.8	2.3	2.4	4.4	4.0
$90^\circ$	最大	4.3	8.2	34.0	27.8	9.8	11.8
	平均	1.8	-1.1	22.4	17.3	1.3	0.6
	方差	0.7	1.8	2.8	3.0	2.0	3.6

$45^\circ$  风浪流作用时,系泊线 1#和 3#起主要作用,试验和数值计算得到的系泊线 1#的张力统计值吻合得较好。尾部系泊线 3#,试验值和数值计算有一定的误差。原因在于,尾部有很长的一段躺底锚链,试验中躺底锚链与底部有摩擦作用,当装置发生运动时,弹性索以底部重块为中心旋转,只需转过较小的角度和较小的横荡位移就能提供足够的艏摇回复力矩和横荡回复力。而在数值计算中,未考虑躺底段锚链与底部的摩擦作用,整个锚链以锚泊点为中心旋转,装置需要较大的艏摇角和横荡位移才能提供足够的艏摇回复力矩和横荡回复力。试验中的艏摇角和横荡位移要小于数值计算的值,与上述分析一致。



环境载荷为  $90^\circ$  时, 与  $45^\circ$  类似, 起主要作用的还是系泊线 1# 和 3#。试验测得系泊线 1# 的张力的统计值和数值计算吻合得较好。系泊线 3# 锚链同样是因为躺底段锚链与底部摩擦使得试验值和计算值存在误差。纵荡、横荡、垂荡、纵摇和横摇的最大值分别为 24.9 m、34.0 m、4.0 m、 $14.7^\circ$  和  $9.8^\circ$  (艏摇最大值  $34.6^\circ$  不是运动幅值, 是由于三点系泊,  $45^\circ$  浪向时平衡位置下就会有超过  $20^\circ$  的艏摇初始角度), 装置垂荡和摇荡运动幅度较小, 浮态正常。

如图 8 试验过程可看出在极限环境条件下会发生甲板上浪现象, 但鹰式装置甲板上无过高上层建筑和装备, 获能浮体也已停止工作下沉固定, 基体大部分都沉入水下避险, 因此不会对装置结构造成较大损坏。混合弹性索系泊系统能够满足超浅水恶劣海况下装置的定位要求, 系泊系统的弹性几乎是全由高弹性索提供, 因此不必增加锚链的长度。



图 8 极限海况下鹰式装置与系泊系统动态响应  
Fig. 8 Dynamic response of mooring system in extreme condition

### 3.4 弹性系泊系统在细长体波浪能装置上的适用性验证

为验证混合高弹性索弹性系泊系统对其他特征外形的波能装置的适用性, 本文选取一个典型的细长体装置 (筏式装置如海蛇<sup>[13]</sup>) 长 85 m、宽 3.5 m、吃水 1.75 m、水上高 1.75 m。由于篇幅所限, 细长体装置系泊系统的数值计算过程从略 (粘性阻尼如表 7), 仅给出其优化后的系泊系统设计方案如表 8 所示。首部的 2 根系泊线 1# 和 2# 与装置中纵剖面成  $70^\circ$  夹角, 尾部系泊线 3# 为  $0^\circ$  夹角如图 9 所示。锚链外径为 0.062 m。系泊线锚点坐标为  $(-147.7, 269.7, -28.0)$  m,  $(-147.7, -269.7, -28.0)$  m 和  $(283.0, 0.0, -28.0)$  m。首部 1#(2#) 高弹性索数量为 180 根, 尾部 3# 为 150 根。

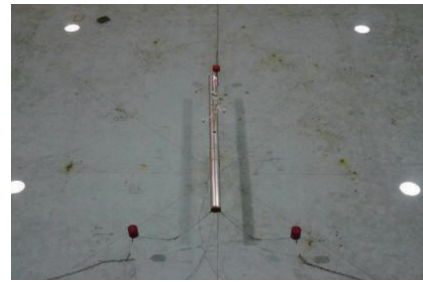


图 9 细长体波浪能装置混合高弹性索弹性系泊系统模型

Fig. 9 Model of slender WEC with superflex mooring system

表 7 试验中测得的固有周期和阻尼系数

Table 7 Damping coefficients and natural period measured by experiments

项目	纵荡	横荡	垂荡	纵摇	横摇	艏摇
$T_n/s$	59.60	192.89	3.18	2.68	7.65	33.60
$d_\xi$	0.153	0.507	0.07	0.139	0.019	0.157

表 8 细长体波浪能装置系泊系统详细参数

Table 8 Parameters of mooring system of the slender WEC

分段	长度/ m	湿重/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1}$	破断力/t
海底锚链	200.0	106.5	522
重块锚链 1#(2#)	50.0	1212.0	522
重块锚链 3#	25.0	1212.0	522
高弹性索 1#(2#)	8.9	24.0	220(180 根)
高弹性索 3#	12.3	24.0	184(150 根)
浮筒 1#(2#)	—	净浮力 30 t	—
浮筒 3#	—	净浮力 18 t	—
上部锚链 1#(2#)	15.0	106.5	522
上部锚链 3#	30.0	106.5	522

风浪流  $0^\circ$  时首部系泊线 1# 和 2# 起主要作用, 受到  $45^\circ$  和  $90^\circ$  环境载荷作用时, 系泊线 1# 和 3# 系泊线起主要作用, 数值计算和模型试验得到的系泊线张力以及细长体装置时历运动统计值吻合较好, 如表 9 所示。存在误差的原因一方面由于试验中系泊线 1# 和 2# 预张力无法调整到完全一致, 导致系统的不对称, 装置出现了较大的横荡、横摇和艏摇运动, 另一方面由于细长体首部两根系泊线有长度为 200 m 的躺底锚链段且水深较浅, 躺底段锚链与底部的摩擦作用对系泊系统有很大的影响。装置水平运动幅度满足系泊半径小于 100 m 的要求,

垂荡和摇荡运动幅度较小,浮态正常。

表9 细长体装置运动位移和系泊线张力数值与试验对比

Table 9 Experimental and numerical tensions and displacement of slender WEC							
浪向	极值	系泊线张力/kN					
		系泊线 1#		系泊线 2#		系泊线 3#	
		试验	数值	试验	数值	试验	数值
0°	最大	259	356	266	356	129	63
	平均	100	211	105	211	35	52
	方差	18	28	23	28	19	1
45°	最大	649	621	119	243	160	122
	平均	144	279	66	145	62	82
	方差	65	80	8	18	21	6
浪向	极值	装置运动位移					
		纵荡/m		垂荡/m		纵摇/(°)	
		试验	数值	试验	数值	试验	数值
0°	最大	29.3	24.7	10.5	0.0	5.0	6.0
	平均	19.8	16.1	0.0	1.4	0.0	0.0
	方差	3.4	1.8	35.9	31.0	1.4	1.1
45°	最大	8.4	8.6	35.9	31.0	4.8	6.0
	平均	1.8	4.8	28.9	28.0	0.0	0.0
	方差	2.1	1.1	2.2	1.5	1.4	1.1

## 4 结 论

超浅水(水深较浅且装置型深较大)台风海况下由于受到大漂移载荷、水深和系泊半径的限制,采用无弹性单一系泊线材料的传统系泊系统不适用于浮式波浪能装置的系泊,因此提出一种适用于超浅水环境的弹性系泊系统。采用数值计算和模型试验的方法,研究超浅水极限海况下鹰式(宽体)和细长体波浪能装置的弹性锚泊系统和水动力性能。数值计算包括频域水动力和浮体/锚链时域耦合分析。模型试验包括静水衰减试验、白噪声试验和风浪流条件下不规则波试验。得出以下结论:

1)采用三点系泊具有良好的自动对浪性,在接近自由水表面与海底间加入非线性高弹性索并与锚链、重块及浮筒等构成混合式系泊线(系泊线拥有足够的弹性蓄能容量)。通过与采用常规聚酯缆的系泊线设计相比,采用混合高弹性索系泊线设计形式能够大大减小系泊半径和系泊线长度,降低锚

泊线的最大张力,降低普通锚链的用量,减轻系泊系统重量。更适用于浅水环境较小系泊半径的区域。

2)频域水动力数值计算得到 0°、45°和 90°浪向下鹰式装置六自由度运动 RAO,并和白噪声试验结果进行比较,二者吻合较好。鹰式装置垂荡和横摇 RAO 峰值均发生在固有周期(分别为 25.6 s 和 17.3 s)处,而纵摇峰值周期为 6.2 s 远小于纵摇固有周期 46.1 s,固有周期很好的避开了波浪周期。横摇和纵摇最大峰值为 5.3°和 2.6°,横摇运动较为剧烈。系泊系统对装置波频运动影响非常小。

3)时域耦合数值分析得到极限海况风浪流方向一致下鹰式装置运动和系泊系统张力统计值,并和不规则波浪试验结果比较。数值计算结果和模型试验结果较为一致。装置纵荡、横荡、垂荡、纵摇和横摇的最大值分别为 24.9 m、34.0 m、4.0 m、14.7°和 9.8°,装置垂荡和摇荡运动幅度较小。

4)鹰式装置在超浅水极限海况下浮态正常,运动稳定。从试验过程也可看出,虽然此时会发生甲板上浪现象,但装置甲板上无过高上层建筑和装备,波能俘获体也已停止工作下沉固定,基体大部分都沉入水下避险,因此不会对结构造成很大损坏。系泊系统弹性几乎全由高弹性索提供,没必要增加锚链长度。

5)混合高弹性索弹性系泊系统对其他特征外形如细长体波能装置的适用性也得到验证。因此,该设计形式能满足一般浮式波能装置在极浅水恶劣海况下对锚泊系统的要求。

## [参考文献]

- [1] Johanning L, Smith G H, Wolfram J. Mooring design approach for wave energy converters[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment, 2006, 225: 159—174.
- [2] Johanning L, Smith G H, Wolfram J. Measurements of static and dynamic mooring line damping and their importance for floating WEC devices[J]. Ocean Engineering, 2007, 34(14-15): 1918—1934.
- [3] Harris, R E, Johanning L, Wolfram J. Mooring systems for wave energy converters: A review of design issues and choices[A]. Proceedings of the International Conference on Marine Renewable Energy [C], Blyth,



- UK, 2004.
- [4] Sheng Sougwei, You Yage, Wang Kunlin, et al. Research and Development of Sharp Eagle Wave Energy Converter [A]. 6th International Conference on Ocean Energy [C], Halifax, Canada, 2014.
- [5] 盛松伟, 张亚群, 王坤林, 等. 鹰式装置“万山号”总体设计概述[J]. 船舶工程, 2015, 37(1): 10—14.
- [5] Sheng Songwei, Zhang Yaquin, Wang Kunlin, et al. General design of the shape eagle device "Wanshan" [J]. Ship Engineering, 2015, 37(1): 10—14.
- [6] Fitzgerald J, Bergdahl L. Including moorings in the assessment of a generic offshore wave energy converter: A frequency domain approach [J]. Marine Structures, 2008, 21(1): 23—46.
- [7] 郭小天, 张 亮. 潮流发电装置弹性锚泊设计[J]. 应用科技, 2013, 40(3): 6—9.
- [7] Guo Xiaotian, Zhang Liang. The elastic mooring design of tidal current generation power device [J]. Applied Science and Technology, 2013, 40(3): 6—9.
- [8] Fonseca N, Pascoal R, Morais T, et al. Design of a mooring system with synthetic ropes for the FLOW wave energy converter [A]. 28th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering [C], Hawaii, USA, 2009.
- [9] OCIMF. Prediction of Wind and Current Loads on VLCCs [S]. 2nd Edition, England: Oil Companies International Marine Forum, 1994.
- [10] Dai Yishan, Chen Xiaobo, Duan Wenyang. Computation of low-frequency loads by the middle-field formulation [A]. 20th International Workshop on Water Waves and Floating Bodies [C], Longyearbyen, Norway, 2005.
- [11] Chen Xiaobo. Hydrodynamics in offshore and naval applications [R]. HydroStar Theory Background, 2004.
- [12] 杨建民, 肖龙飞, 盛振邦. 海洋工程水动力学试验研究 [M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2008.
- [12] Yang Jianmin, Xiao Longfei, Sheng Zhenbang. Experimental study on hydrodynamics of offshore engineering [M]. Shanghai: Publishing House of Shanghai Jiao Tong University, 2008.
- [13] Retzler C. Measurements of the slow drift dynamics of a model pelamis wave energy converter [J]. Renewable Energy, 2006, 31(2): 257—269.

## NUMERICAL AND MODEL RESEARCH ON FLEX MOORING SYSTEM AND HYDRODYNAMIC PERFORMANCE OF FLOATING WAVE ENERGY ONVERTER IN ULTRA-SHALLOW WATER

Huang Shuo<sup>1-3</sup>, Sheng Songwei<sup>1-3</sup>, You Yage<sup>1-3</sup>, Zhang Yunqiu<sup>1-3</sup>, Wang Zhengpeng<sup>1-3</sup>

(1. Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China;

2. CAS Key Laboratory of Renewable Energy, Guangzhou 510640, China;

3. Guangdong Provincial Key Laboratory of New and Renewable Energy Research and Development, Guangzhou 510640, China)

**Abstract:** The performance of mooring system directly affects the survival and wave energy capture of floating wave energy conversion (WEC) in ultra-shallow water under typhoon sea state. In order to design an effective and economical flex mooring system for floating WEC, the effects of the mooring parameters on the performance of the superflex mooring system and the polyester one were investigated according to the initial design plans given in advance. The optimal superflex mooring system was developed on the basis of the static analysis results combined with the coupled calculations in time domain. Then, model test are adopted to investigate the hydrodynamic performance of Sharp Eagle and slender WECs with flex mooring system in survival sea-state. It is observed that the present superflex design is reliable and effective.

**Keywords:** wave energy conversion; mooring system; flexible; shallow water; hydrodynamics