文章编号：1672-3961(2025)02-0156-09 DOI：10.6040/j.issn.1672-3961.0.2023.284

基于摆臂浮子阵列的浮式平台稳性运动响应

董革[1]，黄淑亭[1,2]，王俊[1]，薛钢[1,3,4]，刘延俊[1,3,4]*
（1.山东大学海洋研究院，山东 青岛 266237；2.山东大学深圳研究院，广东 深圳 518057；3.山东大学机械工程学院，山东 济南 250061；4.高效洁净机械制造教育部重点实验室（山东大学），山东 济南 250061）

摘要：为解决浮式平台在环境复杂海域中的安全和工作性能问题，提出提高浮台稳性的措施。本研究将摆臂浮子式波浪能转换装置搭载到浮式平台上，建立摆臂浮子阵列与浮式平台的多体耦合水动力学模型，利用AQWA水动力仿真软件开展数值模拟和参数化分析，揭示摆臂浮子阵列与浮式平台稳性间的相互作用机理，获得摆臂浮子形状及数量、波浪周期对浮式平台稳性影响的作用规律，寻得最佳的摆臂浮子搭载方式。研究结果表明，搭载摆臂浮子后的浮式平台能更好地降低垂荡和纵摇的晃动幅度，半球型摆臂浮子相比圆柱和圆锥型摆臂浮子能明显地降低平台的纵摇幅度；摆臂浮子阵列数量的增加会逐渐降低平台垂荡和纵摇的晃动幅度；在给定波高、改变周期的情况下，搭载摆臂浮子后的浮式平台能明显降低平台垂荡和纵摇晃动幅度，但随着摆臂浮子数量的增加，平台稳性提高程度越不明显。因此，若只考虑平台稳性因素，可搭载少量的摆臂浮子降低成本，若考虑波浪能装置给平台供电因素，可搭载多量的摆臂浮子提高供能。

关键词：波浪能；摆臂浮子阵列；浮式平台；吸波减摇；AQWA仿真
中图分类号：P743 **文献标志码**：A
引用格式：董革，黄淑亭，王俊，等. 基于摆臂浮子阵列的浮式平台稳性运动响应[J]. 山东大学学报(工学版)，2025，55(2)：156-164.
DONG Ge，HUANG Shuting，WANG Jun，et al. The stable motion response of floating platform based on swing arm float array[J]. Journal of Shandong University（Engineering Science），2025，55(2)：156-164.

The stable motion response of floating platform based on swing arm float array

DONG Ge[1]，HUANG Shuting[1,2]，WANG Jun[1]，XUE Gang[1,3,4]，LIU Yanjun[1,3,4]*
（1. Institute of Marine Science and Technology，Shandong University，Qingdao 266237，Shandong，China；2. Shenzhen Research Institute of Shandong University，Shenzhen 518057，Guangdong，China；3. School of Mechanical Engineering，Shandong University，Jinan 250061，Shandong，China；4. Key Laboratory of High Efficiency and Clean Mechanical Manufacture of Ministry of Education（Shandong University），Jinan 250061，Shandong，China）

Abstract：In order to solve the problem of safety and working performance of floating platform in complex environment sea area，the measures to improve the stability of floating platform were put forward. The swing arm float wave energy conversion device was mounted on the floating platform，a multi-body coupled hydrodynamic model of the swing arm float array and the floating platform was established，and the AQWA hydrodynamic simulation software was used to carry out numerical simulation and parametric analysis to reveal the interaction mechanism between the swing arm float array and the stability of the floating platform，and the effect of the shape and number of swing arm floats and the wave period on the stability of the floating platform were obtained，and the optimal swing arm float carrying method was found. The results showed that the floating platform equipped with swing arm float could better reduce the sloshing amplitude，and the hemispherical swing arm float could significantly reduce the pitch amplitude of the platform compared with cylindrical and conical swing arm floats. The increase of the number of swingarm float arrays would gradually reduce the shaking amplitude of the platform. In the case of a given wave height and changing the period，the floating platform equipped with swing arm floats could significantly reduce the shaking amplitude，but with the increase of the number of swing arm floats，the improvement of platform stability was less obvious. Therefore，if only the stability of the platform was considered，a small number of swing arm floats could be equipped to reduce costs，and if the wave energy device was considered to

收稿日期：2023-11-14
基金项目：广东省基础与应用基础研究基金资助项目(2021A1515110687)；山东省自然科学基金重大基础研究资助项目(ZR2021ZD23)
第一作者简介：董革(1998—)，女，山东阳信人，硕士研究生，主要研究方向为海洋可再生能源装备研发。E-mail：dongge0717@163.com
*通信作者简介：刘延俊(1965—)，男，山东济南人，数授，博士生导师，博士，主要研究方向为海洋可再生能源、深海探测技术及装备开发。
E-mail：lyj111ky@163.com

supply power to the platform, a large number of swing arm floats could be equipped to improve energy supply.

Keywords: wave energy; swing-arm float array; floating platforms; wave absorption and roll reduction; AQWA simulation

0　引言

20 世纪 70 年代石油危机刺激了利用波浪能源的现代研究[1],随着全球对气候变化和二氧化碳水平上升的关注,可再生能源发电再次成为一个重要的研究领域。在可再生能源中,海浪提供了最高的能量密度[2],据估计,全球潜在的波浪能资源为 2 TW[3],我国沿岸和近海及毗邻海域的各类海洋能资源理论总储量约为 6.11×10^{11} kW,其中波浪能占比最大,约为 5.74×10^{11} kW[4],具有极大的开发潜力,被认为是最具有前途的海洋能源之一[5]。因此在目前波浪能技术的基础上实现创新与突破,开发储量丰富的波浪能,推进波浪能规模化、商业化利用,是有效缓解能源枯竭、电力供应紧缺的重要途经,是实现“碳达峰”与“碳中和”目标,加速我国能源转型,建设清洁低碳、安全高效能源体系的必经之路。

波浪能技术发展至今,有关波浪能装置的发明专利超过 1 500 种[6],种类繁多、形式各异。振荡浮子式是目前研究最多的一类波浪能发电装置[7-8],主要原理是将浮子放置在海洋中,当波浪经过浮子时,浮子被迫振荡从海浪中提取能量,机械运动通过动力输出系统(power take-off, PTO)转化为电能[9],如美国的 PowerBuoy 装置[10],山东大学的“山大一号”漂浮式液压海浪发电装置[11],中国海洋大学的“海灵”号智能探测系统等[12],振荡浮子式波浪能装置具有布置灵活、易于阵列化扩展等优势[13],可有效提高捕能效率与电能输出稳定性,是海上平台电力供应的重要选择。

海上平台依据在海上支撑形式的不同,可分为固定式平台和漂浮式平台两类,漂浮式平台适应远海环境、作业效率较高,人们更加重视应用,例如养殖平台[14-15]、监测平台[16]、风电平台[17]、旅游平台等。将波浪能装置搭载到浮式平台上,与其他发电装置形成多能互补电源维持平台设备的正常运转,减少电力传输过程中的损失[18],降低自身成本,提高平台作业能力,工程实用价值高,应用前景广阔[19-20]。丹麦 WeptosA/S 公司研发的 WEPTOS 波浪发电装置包含一个角度可调的 V 型平台,其上排列布置了多个小型转子式浮子[21];文献[22]提出将 3 个摆式浮子和半潜式风机平台集成的 SFC(semi-submersible flap combination)装置;广州能源所研发的国内首座半潜式波浪能养殖多用途平台澎湖号搭载了 2 台共 120 kW 的鹰式波浪能浮子[23-24]。

稳性是关系到浮式平台安全和工作性能的重要特性。失稳倾覆是导致平台损毁的重要原因,平台自身运动也会对其搭载设备的工作效果产生影响。文献[25]对垂荡浮子与垂直轴风机 Spar 平台开展了研究,评估了环状浮子对风机平台运动的影响;文献[26]通过试验发现浮子和平台之间的相互作用可以减小平台的垂荡和横摇运动,减小幅度取决于 PTO 的阻尼;文献[27]采用数值与试验的方法,对比研究了具有单个垂荡浮子的 STC(spar torus combination)装置和具有 3 个摆式浮子的 SFC 装置的运动响应和获能;文献[28]研究了垂荡浮子与风机平台多浮体系统的水动力学特性,探究了浮子对平台运动的影响及浮子与平台间的遮蔽效应。

文献[29]提出并证实了可以采用垂荡浮子作为浮式风机的运动阻尼器降低浮子的垂荡运动幅值,并研究了垂向运动幅值最小和获能最大时的浮子 PTO 阻尼和刚度系数,但研究并未涉及其他自由度的运动;文献[30]对具有垂荡浮子、水平轴水轮机和风机的风浪流综合平台开展了水动力学响应与获能研究,得出了增加波浪能和潮流能装置可减小风机平台垂荡与纵摇运动,且总获能功率提高了 22%~45%的结论;文献[31]通过水槽试验证明,主动控制振荡水柱式波浪能装置可以有效减小平台的运动。

上述研究充分表明,波能转换装置(wave energy conversion, WEC)有助于减少浮式平台的运动幅度,但高效捕能的振荡浮子式波浪装置搭载浮式平台的稳性研究方面还有所欠缺。摆臂浮子作为振荡浮子的一种,将与浮式平台相集成,平台与摆臂浮子构成多浮体耦合动力学系统。在这个系统中,平台为波浪发电装置提供安装支撑,而波浪能发电装置吸收波浪,减少波浪场对平台的冲击,产生吸波减摇的效果。

摆臂浮子阵列-浮式平台系统的水动力学响应十分复杂,增加摆臂浮子阵列后,平台整体的水动力学特性发生了改变。在系统随波运动过程中,摆臂浮子在依托平台运动的同时,还会绕平台横杆做俯仰运动,并通过相对运动获能。所有浮子通过相互作用力共同作用在平台上,影响其运动响应,又

通过平台间接影响彼此的运动。因此,本研究主要针对波浪能转换装置对减小平台垂荡和纵摇运动的影响因素,提出将振荡浮子式波浪能发电装置集成在半潜式浮式平台上,探究摆臂浮子底面形状和数量、波浪参数对浮式平台稳性的影响,以适应复杂海况变化。采用基于边界元法开发的水动力软件 AQWA 开展相关研究,得到摆臂浮子及平台的水动力参数,根据数值模拟结果分析摆臂浮子阵列数量、波浪周期及摆臂浮子形状对平台稳性的影响特性。本研究能够为保障浮式平台长效稳定海上作业提供理论参考。

1 数学模型

本研究的摆臂浮子阵列-浮式平台系统主要由半潜式浮式平台和 3 套摆臂振荡浮子式波浪能转换装置组成,如图 1 所示。浮式平台通过系泊缆绳漂泊在布放海域,波浪能装置通过摆臂集成在浮式平台上,摆臂浮子作为捕能装置将波浪能转换为机械能,机械能通过液压系统转换为液压能,液压能通过液压马达转换为电能,对电能进一步处理后便可应用。在此过程中,摆臂浮子在波浪能转换装置中承担第一阶段的能量转换,若既可以捕获能量,又可减小平台的升沉和俯仰运动,则研究意义重大。

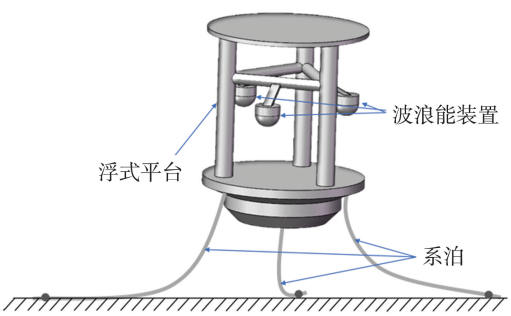


图 1 波浪能阵列-浮式平台系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of wave energy array floating platform system

1.1 理论基础

假设在势流理论中,流体均被假设成均匀、无旋、无粘、不可压缩的理想状态,提及的载荷均依据线性波浪理论,将所有系统视为一个浮体,根据牛顿第二定律,其动力学方程可以写作:

$$\boldsymbol{M}\ddot{\boldsymbol{\zeta}}(t)=F_{\text{hydro}}+F_{\text{c}}+F_{\text{PTO}}, \tag{1}$$

式中,$\boldsymbol{M}$ 为浮体质量矩阵,$\boldsymbol{\zeta}$ 为浮体的位移列向量,F_{hydro}为浮体受到的流体作用力,F_{c} 为机械约束力,F_{PTO}为浮体 PTO 力。

对浮体而言,其周围波场是由入射波、绕射波和辐射波叠加而成,基于边界元法思想和线性化 Bernoulli 方程得:

$$F_{\text{hydro}}=F_{\text{ex}}+F_{\text{R}}+F_{\text{hs}}, \tag{2}$$

$$F_{\text{ex}}=-\rho g\iint_S z\vec{n}\mathrm{d}S+\mathrm{i}\omega\rho\iint_S(\phi_{\text{I}}+\phi_{\text{D}})\vec{n}\mathrm{d}S, \tag{3}$$

$$F_{\text{R}}=\mathrm{i}\omega\rho\iint_S\phi_{\text{R}}\vec{n}\mathrm{d}S, \tag{4}$$

$$F_{\text{hs}}=\boldsymbol{K}_{\text{hs}}\boldsymbol{\xi}, \tag{5}$$

式中:F_{ex}是波浪激励力,即波浪入射力和绕射力的合力;F_{R} 是辐射力;F_{hs}是静水回复力;ϕ_{I} 为入射势;ϕ_{D} 为绕射势;ϕ_{R} 为辐射势;矩阵 $\boldsymbol{K}_{\text{hs}}$为静水回复力矩阵;$\boldsymbol{\xi}$ 为复值形式的浮体位移。

液压 PTO 系统在摆臂和平台连接处建模,此处具有阻尼系数特性,假设刚度为 0,则

$$F_{\text{PTO}}=B_{\text{PTO}}\{\dot{\theta}^2\}, \tag{6}$$

式中 $\dot{\theta}^2$ 为铰接连接处的角速度。

浮子与平台之间的连接为机械连接,可以用拉格朗日乘子算法进行解决,设约束矩阵为 $\boldsymbol{D}$,其在连接处满足位移连续性条件,即

$$\boldsymbol{D}\cdot\boldsymbol{\xi}=0。 \tag{7}$$

由于 2 个浮体铰接连接,仅能绕铰接点转动,一组浮体共存在 5 个约束,分别是在 x、y、z 方向上的平动位移,绕 y、z 轴转角,且在连接处满足连续位移条件,浮子运动响应通过刚体运动的平动和转动定理得到,即

$$\begin{cases}\varepsilon_{1x}+z_c\times\varepsilon_{1Ry}-y_c\times\varepsilon_{1Rz}=\varepsilon_{2x}+z_c\times\varepsilon_{2R}-y_c\times\varepsilon_{2Rz}\\ \varepsilon_{1y}+x_c\times\varepsilon_{1R}-z_c\times\varepsilon_{1Rz}=\varepsilon_{2y}+x_c\times\varepsilon_{2R}-z_c\times\varepsilon_{2Rz}\\ \varepsilon_{1z}+y_c\times\varepsilon_{1Ry}-x_c\times\varepsilon_{1Rz}=\varepsilon_{2z}+y_c\times\varepsilon_{2R}-x_c\times\varepsilon_{2R}\\ \varepsilon_{1Rx}=\varepsilon_{2Rx}\\ \varepsilon_{1Rz}=\varepsilon_{2Rz}\end{cases}, \tag{8}$$

则

$$\boldsymbol{D}=\begin{bmatrix}1&0&0&0&z_c&-y_c&-1&0&0&0&z_c&y_c\\0&1&0&z_c&0&x_c&0&-1&0&z_c&0&-x_c\\0&0&1&y_c&x_c&0&0&0&-1&y_c&x_c&0\\0&0&0&1&0&0&0&0&0&-1&0&0\\0&0&0&0&0&1&0&0&0&0&0&-1\end{bmatrix}。 \tag{9}$$

基于 Cummins 脉冲响应理论,可得到摆臂机械连接下各个浮体的时域运动方程,即

$$(\boldsymbol{M}_i+\boldsymbol{A}_{ii}(\infty))\ddot{\boldsymbol{\zeta}}_i+\int_0^t B(t-\tau)\zeta_i\mathrm{d}\tau+K_{\text{hs}i}\zeta_i+\boldsymbol{D}^{\text{T}}F_{\text{c}ij}=F_{\text{ex}i}+F_{\text{PTO}i}, \tag{10}$$

式中,$\boldsymbol{A}$ 为附加质量矩阵,$B(t-\tau)$ 为辐射脉冲响应函数。

通过上述方程可以求解摆臂浮子阵列–浮式平台耦合的运行状态。

1.2　建立 AQWA 仿真模型

本研究利用水动力仿真软件 AQWA 内置时域求解器计算波浪能阵列–浮式平台的运动响应，其计算结果的精确性已被大量理论及模型试验对比验证，仿真可靠性较高。细长杆件用莫里森单元建立，其余部分用面单元建立，根据计算的精度和计算耗费时间考虑，平台选取 1 m、摆臂浮子选取 0.5 m的网格作为本研究的计算网格。摆臂振荡浮子由上下两部分组成，浮子上半部分为圆柱形，下半部分为半球型，吃水线为两者的连接处。3 个摆臂振荡浮子采用圆周阵列布局方式，浮子之间夹角为 120°，搭载在浮式平台连接立柱的横梁处，系统的主要参数见表 1。

表 1　波浪能装置阵列–浮式平台主要参数

Table 1　Wave energy device array-main parameters of floating platform

平台直径/m	平台总高/m	平台吃水深度/m	平台质量/kg
18.0	21.5	8.5	25 000
浮子直径/m	**浮子总高/m**	**浮子吃水深度/m**	**浮子质量/kg**
2.8	2.4	1.4	4 279
摆臂长度/m		**摆臂与浮子之间夹角角度/(°)**	
4.0		30	

2　分析与讨论

2.1　摆臂浮子底面形状对浮式平台稳性的影响

为研究摆臂浮子底面形状对浮式平台稳性的影响，根据静置时浮子吃水线位置，将浮子分为上下两部分，上半部分为直径 2.4 m、高 1.0 m 的圆柱体，下半部分采用控制变量的方法，保持浮子总质量和外部尺寸不变，吃水深度为 1.4 m，选取圆锥、圆柱和半球 3 种形状，如图 2 所示。

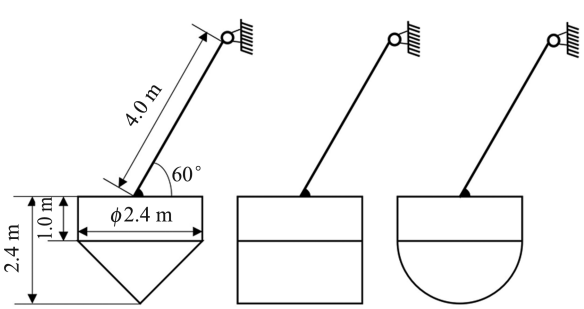


图 2　不同底面形状摆臂浮子

Fig.2　Swinging arm floats with different bottom shapes

在规则波波高 1.96 m、周期 7 s 时，浮式平台做周期性运动，因此待运动稳定后截取 30 s。不同底面形状的摆臂浮子波浪能装置对浮式平台垂荡方向位移影响的时程曲线如图 3 所示，s 为垂荡位移，t 为时间。

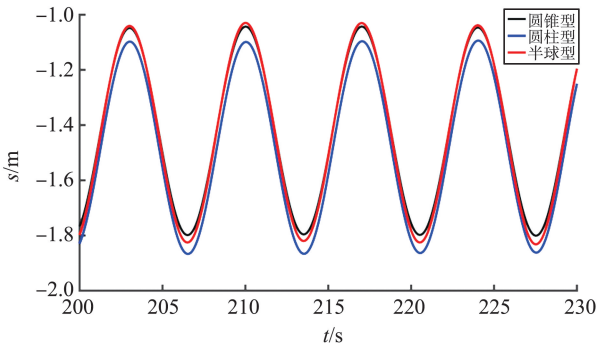


图 3　浮式平台垂荡运动位移时程曲线

Fig.3　Time history curve of heave motion displacement of floating platform

从图 3 可以看出，浮台垂荡位移几乎同时到达峰值，且峰值大小相差无异。不同底面形状的摆臂浮子波浪能装置对浮式平台纵摇方向位移影响的时程曲线如图 4 所示，从图 4 可以看出，浮台纵摇位移幅值相差较大。

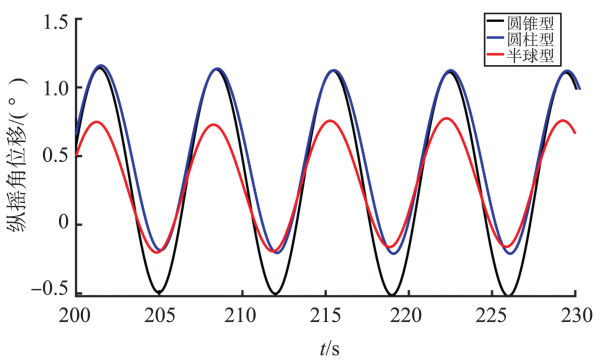


图 4　浮式平台纵摇运动位移时程曲线

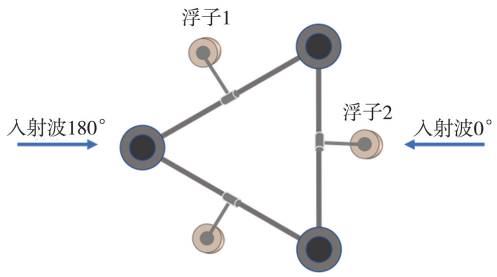
Fig.4　Time history curve of pitch motion displacement of floating platform

总体来说，摆臂浮子底面形状对浮式平台的垂荡运动位移影响不大，但对平台纵摇方向的运动有所影响，半球型浮子明显优于圆锥型和圆柱型浮子，纵摇幅值减小了 63.6%、55.5%。由于浮子体积和质量远远小于平台，改变浮子直径、吃水深度比也不会对平台造成太大影响，因此，此方面不做过多研究，后续研究可以继续采用底面形状为半球型的摆臂浮子。

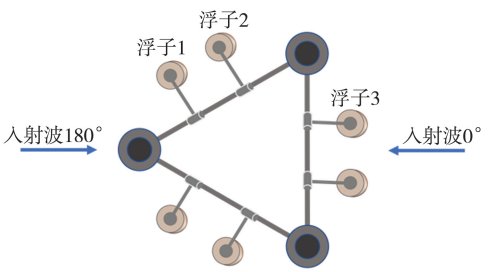
2.2　摆臂浮子阵列数量对浮式平台稳性的影响

单一的浮子式波浪能发电装置成本较高且不能很好地吸收单位海域内的波浪能，而阵列化布置在提高电能转换效率的同时极大地降低发电成本。因此，为研究摆臂浮子阵列数量对浮式平台运动稳

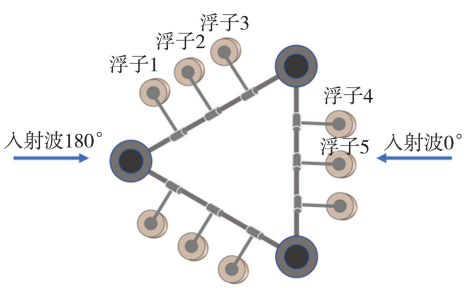
性的影响,保持摆臂浮子参数一致,建立 3 种阵列方式,为保证平台受力稳定,同时增加各侧摆臂浮子数量,如图 5 所示。由于浮子对称布置,相对位置的摆臂浮子受力一致,所以只分析不同位置摆臂浮子及平台的运动特性。



(a) 3摆臂浮子阵列–浮式平台



(b) 6摆臂浮子阵列–浮式平台

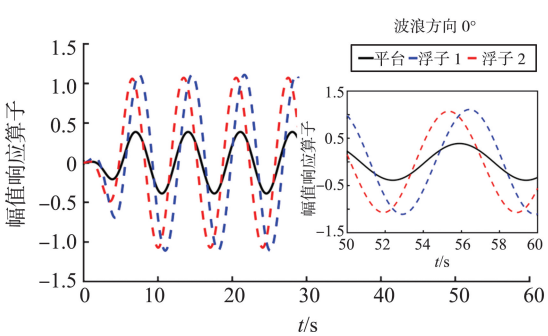


(c) 9摆臂浮子阵列–浮式平台

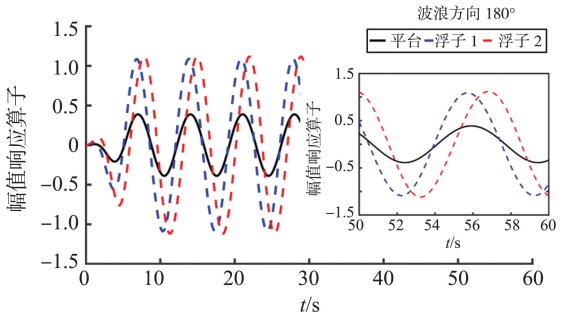
图 5 3 种摆臂浮子阵列布放方式

Fig.5 Three deployment methods of swing arm float arrays

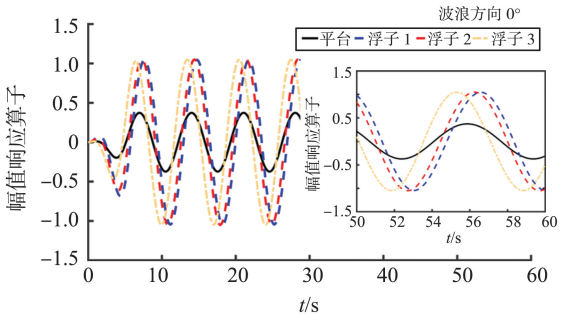
在波浪波高 1.96 m、周期 7 s 波况时,3 种阵列布放方式两个波向(0°和 180°)幅值响应算子(ratio of amplitudes output, RAO)垂荡运动的时域计算结果如图 6 所示。



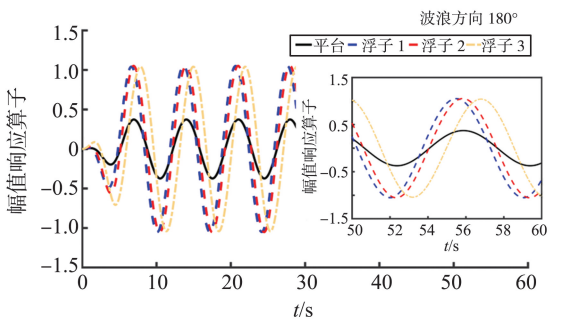
(a) 3 摆臂浮子阵列 – 浮式平台



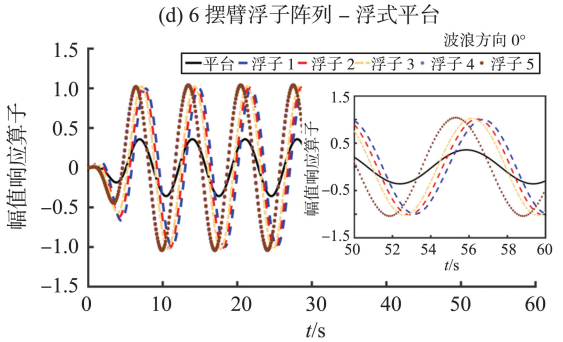
(b) 3 摆臂浮子阵列 – 浮式平台



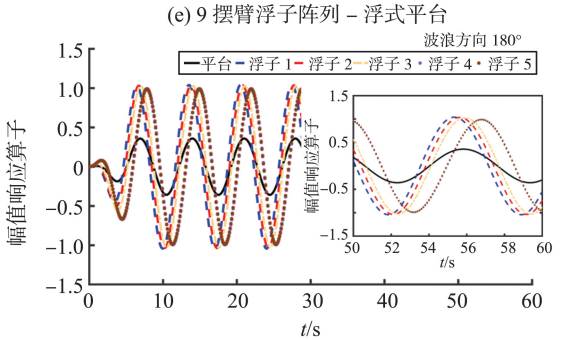
(c) 6 摆臂浮子阵列 – 浮式平台



(d) 6 摆臂浮子阵列 – 浮式平台



(e) 9 摆臂浮子阵列 – 浮式平台



(f) 9 摆臂浮子阵列 – 浮式平台

图 6 摆臂浮子及平台垂荡幅值响应算子时程曲线

Fig.6 Time history curve of oscillation amplitude response operator for swing arm float and platform

由图 6 可以看出,不管是波向 0°还是波向

180°，摆臂浮子与平台的运动几乎同相，靠近来波一侧的摆臂浮子大幅度提前达到位移峰值，与平台运动峰值几乎一致，这两个来波方向对平台运动位移影响不大，因此，可以只分析一侧来波方向的运动响应，下面皆是从波浪方向 0°分析。

在图 6（a）、（b）中，平台幅值响应算子为 −0.388 4~0.388 6，浮子幅值响应算子，浮子 1>浮子 2；在图 6（c）、（d）中，平台幅值响应算子为 −0.372 9~0.373 1，浮子幅值响应算子，浮子 2>浮子 3>浮子 1；在图 6（e）、（f）中，平台幅值响应算子为 −0.358 6~0.358 7，浮子幅值响应算子，浮子 4>浮子 5>浮子 3>浮子 2>浮子 1。

摆臂浮子阵列对平台 RAO 幅值影响对比如图 7 所示。

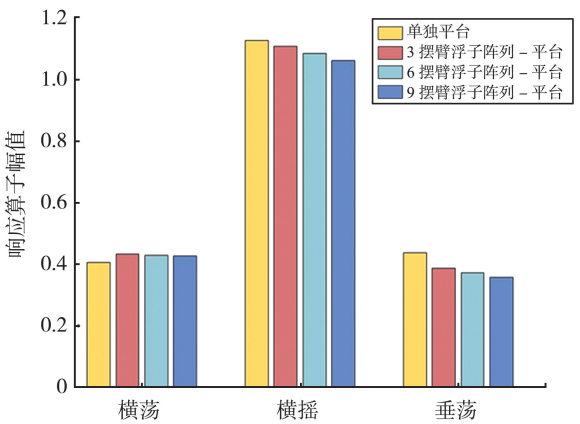


图 7　摆臂浮子阵列对平台 RAO 幅值影响对比

Fig.7　Comparison of theinfluence of swinging arm float array on platform RAO amplitude

由图 7 可知，增加波浪能转换装置的数量，影响平台晃动最大的垂荡和横摇 2 个影响因素的运动幅度都会减少，其中平台的垂荡稳性提高最为明显，9 摆臂浮子阵列−平台相比单独平台横摇稳性提高了 6.2%，垂荡稳性提高了 22.0%。增加波浪能转换装置导致平台的横荡稳性降低，但装置数量增加，横荡受影响因子变小，因此可以通过增加波浪能转换装置数量提高平台的稳性。

2.3　波浪周期对浮式平台稳性的影响

为了进一步探究波浪周期对摆臂浮子阵列−浮式平台稳性的影响，结合上述研究结果，为寻找规律简短运算，选取 3 摆臂浮子阵列−浮式平台，设置波高 1.96 m 不变，周期取 5、6、7、8 和 9 s 的波浪进行研究，分析 5 种波浪工况下平台的运动性能，截取稳定运动后的连续 20 s 进行分析。

不同波浪周期下平台垂荡运动位移时程曲线如图 8 所示。由于浮式平台受到系泊和本身重力影响，导致受波浪力后，结构吃水深度下移 0.56 m 左右。平台垂荡幅值随着波浪周期的增大而增大，位置修订后，5~9 s 周期的垂荡幅值分别为 0.16、0.22、0.29、0.37、0.45 m，在短周期阶段，平台垂荡运动幅值增大幅度明显，总之，波浪周期越短，平台垂荡运动越稳定。

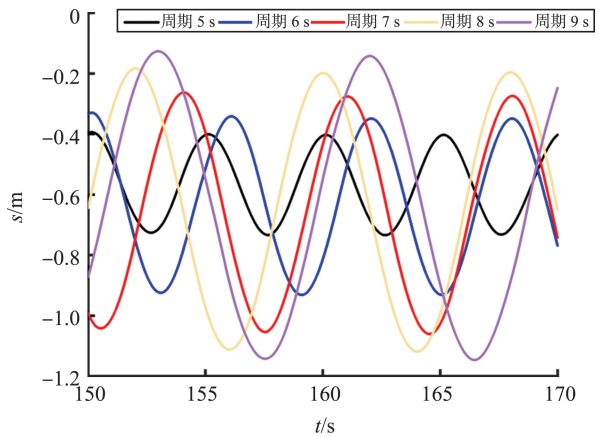


图 8　不同波浪周期下平台垂荡运动位移时程曲线

Fig.8　Displacement of platform heave motion under different wave periods

不同波浪周期下平台纵摇运动位移时程曲线如图 9 所示，可以看出平台纵摇呈周期性变化，随着波浪周期的增大，摆动幅度先增大后减小周期 6 s 时达到摆动最大幅度 1.89°，平台摆动中轴线与原始位置成一定夹角，且随着周期的增大夹角逐渐减小，在短周期阶段，平台受波浪激励力影响较大，平台摆动一直未经过原始位置，也就是说波浪周期越长，平台的左右晃动越稳定。

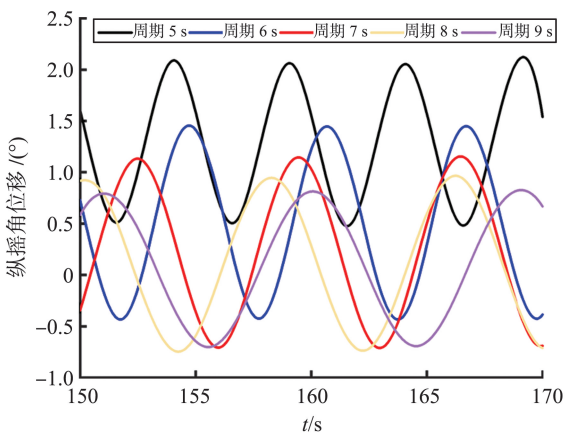


图 9　不同波浪周期下平台纵摇运动位移时程曲线

Fig.9　Time history curves of platform pitch motion displacement under different wave periods

浮式平台垂荡位移幅值如表 2 所示。从表 2 可以看出，在该波高下，不同浮子阵列的浮式平台垂荡位移幅值均随波浪周期的增大呈现出逐渐增大的变化规律，短周期下变化更为明显，如无波浪能发电装置下，浮台在波浪周期 5~9 s 的垂荡幅值分

别是 0.35、0.60、0.79、0.92、1.02 m。同周期下,浮子阵列数量越多,平台的垂荡幅值越小,如在周期 5 s 和 9 s 时,9 浮子阵列的平台相比单独浮台的垂荡幅值分别减少了 22.0%、1.9%,也就是说周期越长,摆臂浮子阵列数量的影响优势越不明显。

表 2 浮式平台垂荡位移幅值

Table 2 Floating platform heave displacement amplitude

浮子个数	垂荡位移幅值/m				
	周期 5 s	周期 6 s	周期 7 s	周期 8 s	周期 9 s
0	0.35	0.60	0.79	0.92	1.02
3	0.33	0.59	0.78	0.93	1.01
6	0.30	0.56	0.76	0.92	1.00
9	0.27	0.55	0.75	0.91	0.99

浮式平台纵摇角位移幅值如表 3 所示。从表 3 可以看出,在该波高下,无波浪能发电装置的浮式平台纵摇角位移幅值随着波浪周期的增大呈现出先增大后减小再增大的变化规律;增加浮子阵列的浮式平台均呈现出先增大后减小的变化规律,浮式平台均在 7 s 时达到最大晃动幅值。总体来看,增加摆臂浮子阵列数量可以有效减少平台晃动幅度,在波浪周期 5~9 s 内,9 摆臂浮子阵列的平台相比单独平台的横摇晃动幅值分别减少了 24%、25%、34%、21%、30%,由此可见摆臂浮子阵列可以更好地应对波浪周期的变化。

表 3 浮式平台纵摇角位移幅值

Table 3 Floating platform pitch displacement amplitude

浮子个数	纵摇角位移幅值/(°)				
	周期 5 s	周期 6 s	周期 7 s	周期 8 s	周期 9 s
0	1.01	1.10	1.21	0.92	0.97
3	0.79	0.94	0.92	0.84	0.75
6	0.78	0.86	0.84	0.80	0.70
9	0.76	0.82	0.79	0.73	0.68

总体来看,摆臂浮子阵列化可以更好地帮助平台应对波浪场波浪周期变化,采取适量的浮子数量可以保证浮式平台的平稳运行和波浪能装置的最大捕能效率。

3 结论

本研究利用水动力仿真软件 AQWA 对摆臂浮子阵列-浮式平台稳性进行研究,探究了摆臂浮子形状和数量、波浪对浮式平台运动特性的影响规律,得到以下结论。

(1)不同摆臂浮子底面形状会改变浮式平台的运动规律,半球型、圆锥型和圆柱型摆臂浮子对浮式平台垂荡方向的运动影响不大,主要是影响纵摇方向的运动。其中半球型摆臂浮子明显优于圆锥型和圆柱型摆臂浮子,相较而言,纵摇幅值分别减小了 63.6%、55.5%。由于摆臂浮子的体积和质量远远小于浮式平台,改变浮子直径、吃水深度比不会对平台造成太大的影响,因此后续研究可以继续采用底面形状为半球型的摆臂浮子。

(2)波浪方向 0°和 180°时,摆臂浮子与平台的运动几乎同相,且对浮式平台运动特性没有太大影响。浮式平台搭载摆臂浮子波浪能转换装置后,平台横荡 RAO 幅值略微提高,但随着摆臂浮子数量的增加而减小;平台横摇 RAO 幅值降低,且随着摆臂浮子数量的增加而减小;平台垂荡 RAO 幅值明显降低,且随着摆臂浮子数量的增加而减小。其中 9 摆臂浮子阵列-浮式平台相比单独浮台的平台横摇和垂荡稳性分别提高了 6.2%和 22.0%。

(3)波浪周期也会对不同摆臂浮子阵列-浮式平台的稳性产生影响,波浪周期越长,平台垂荡幅度越大,搭载波浪能转换装置阵列后,平台垂荡幅度减小,但波浪周期越长,浮子阵列的优势越不明显;平台纵摇幅度随着波浪周期的变长,先增大后减小,在周期 7 s 时达到顶峰,搭载波浪能转换装置后,平台纵摇幅度明显减小。搭载摆臂浮子的浮式平台能更好地应对波浪周期的变化,明显降低了浮式平台的运动幅度,尤其在平台纵摇运动方面,9 摆臂浮子-平台相比单独平台能提高平台纵摇稳性 20.0%左右,甚至能达到 34.0%。

本研究表明利用摆臂浮子阵列波浪能装置可有效提高浮式平台的稳性,为后续主动控制调节平台稳性及实际布放提供理论参考。

参考文献:

[1] SALTER H. Wave power[J]. Energy Review, 1974, 249(5459): 720-724.

[2] CLÉMENT A, MCCULLEN P, FALCAO A, et al. Wave energy in Europe: current status and perspectives[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2002, 6(5): 405-431.

[3] THORPE W. A brief review of wave energy[R]. London, UK: A Report Produced for the UK Department of Trade and Industry, 1999.

[4] 史宏达, 王传崑. 我国海洋能技术的进展与展望[J]. 太阳能, 2017(3): 30-37.
SHI Hongda, WANG Chuankun. Progress and prospect of ocean energy technology in China[J]. Solar Energy, 2017(3): 30-37.

[5] 刘延俊, 武爽, 王登帅, 等. 海洋波浪能发电装置研究进展[J].山东大学学报(工学版), 2021, 51(5): 63-75.
LIU Yanjun, WU Shuang, WANG Dengshuai, et al. Research progress of ocean wave energy converters[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2021, 51(5): 63-75.

[6] 刘延俊, 贾瑞, 张健. 波浪能发电技术的研究现状与发展前景[J]. 海洋技术学报, 2016, 35(5): 100-104.
LIU Yanjun, JIA Rui, ZHANG Jian. Research status and prospect of the wave power generation technology[J]. Journal of Ocean Technology, 2016, 35(5): 100-104.

[7] 李明伟, 任俊卿, 赵玄烈, 等. 环形阵列波浪能装置水动力特性的数值研究[J]. 水动力学研究与进展, 2021, 36(1): 77-84.
LI Mingwei, REN Junqing, ZHAO Xuanlie, et al. Numerical investigation on hydrodynamic performance of annular array of wave energy converters[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2021, 36(1): 77-84.

[8] 胡缘, 杨绍辉, 何宏舟, 等. 半潜式多浮体波浪能发电装置的水动力性能分析[J]. 水力发电学报, 2019, 38(9): 91-101.
HU Yuan, YANG Shaohui, HE Hongzhou, et al. Hydrodynamic performance analysis of semi-submersible multibody wave power plant[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2019, 38(9): 91-101.

[9] 刘颖昕. 高效稳定的波浪能液压 PTO 装置设计及控制策略研究[D]. 济南: 山东大学, 2021.
LIU Yingxin. Research on design and control strategy of hydraulic power take-off for an efficient and stable wave energy converter[D]. Jinan: Shandong University, 2021.

[10] LEHMANN M, KARIMPOURA F, GOUDEYB C A, et al. Ocean wave energy in the United States: current status and future perspectives[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 74: 1300-1313.

[11] 彭建军. 振荡浮子式波浪能发电装置水动力性能研究[D]. 济南: 山东大学, 2014.
PENG Jianjun. Study on hydrodynamic performance for oscillating floater buoy wave energy converter[D]. Jinan: Shandong University, 2014.

[12] 平丽. 振荡浮子式波能转换装置性能的研究[D]. 大连:大连理工大学, 2005.
PING Li. Investigation on the performance of the oscillating buoy wave power device[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2005.

[13] 路晴, 史宏达. 中国波浪能技术进展与未来趋势[J]. 海岸工程, 2022, 41(1): 1-12.
LU Qing, SHI Hongda. Progress and future trend of wave energy technology in China[J]. Coastal Engineering, 2022, 41(1): 1-12.

[14] 陈坤鑫,盛松伟,张亚群,等.海工型渔业养殖网箱技术现状与发展趋势[J]. 新能源进展, 2020, 8(5): 440-446.
CHEN Kunxin, SHENG Songwei, ZHANG Yaqun, et al. Technology status and development trend of ocean engineering aquaculture cage[J]. Advances in New and Renewable Energy, 2020, 8(5): 440-446.

[15] 徐杰,韩立民,张莹.我国深远海养殖的产业特征及其政策支持[J]. 中国渔业经济, 2021, 39(1): 98-107.
XU Jie, HAN Limin, ZHANG Ying. Industrial characteristics and policy support of China′s deep sea aquaculture[J]. Chinese Fisheries Economics, 2021, 39(1): 98-107.

[16] 王项南,张原飞,郭毅,等.潮流能和波浪能发电装置移动测试平台: 中国, CN111007331A.2020[P]. 2020-05-08.

[17] SOULARD T, BABARIT A. Numerical assessment of the mean power production of a combined wind and wave energy platform[C]// ASME 2012 31st International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. Rio de Janeiro, Brazil: OMAE, 2012: 83606.

[18] GASPAR J F M, THIEBAUT F, et al. Compensation of a hybrid platform dynamics using wave energy converters in different sea state conditions[J]. Renewable Energy, 2021, 177: 871-883.

[19] KAMARLOUEI M, GASPAR J F, CALVARIO M, et al. Experimental analysis of wave energy converters concentrically attached on a floating offshore platform[J]. Renewable Energy, 2020, 152: 1171-1185.

[20] PARK J C, WANG C M. Hydrodynamic behaviour of floating polygonal platforms under wave action[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2021, 9(9): 923.

[21] PECHER A, KOFOED J P, LARSEN T. Design specifications for the Hanstholm WEPTOS wave energy converter[J]. Energies, 2012, 5(4): 1001-1017.

[22] MICHAILIDES C, GAO Z, MOAN T. Experimental study of the functionality of a semisubmersible wind turbine combined with flap-typewave energy converters[J]. Renewable Energy, 2016, 93: 675-690.

[23] 廖静. 珠海“澎湖号”网箱平台:让养殖走向深远海[J]. 海洋与渔业, 2019, 307(11): 63-64.
LIAO Jing. Zhuhai " Penghu " cage platform: let aquaculture to the far-reaching sea[J]. Ocean and Fishery, 2019, 307(11): 63-64.

[24] 盛松伟,王坤林,吝红军,等.集波浪能和太阳能发电于

一体的半潜式深海养殖网箱: 中国, CN201610365276.9.2016[P]. 2018-09-28.

[25] CHENG Z, WEN T R, ONG M C, et al. Power performance and dynamic responses of a combined floating vertical axis wind turbine and wave energy converter concept[J]. Energy, 2019, 171: 190-204.

[26] KAMARLOEI M, GASPAR J F, CALVARIO M, et al. Experimental analysis of wave energy converters concentrically attached on a floating offshore platform [J]. Renewable Energy, 2020: 1171-1185.

[27] GAO Z, WAN L, MICHAILIDES C, et al. Numerical modelling and analysis of combined concepts of floating wind turbines and wave energy converters [C]// International Conference on Offshore Renewable Energy, Glasgow, UK:[s.n.], 2014.

[28] LEE H, POGULURI S K, BAE Y. Performance analysis of multiple wave energy converters placed on a floating platform in the frequency domain[J].Energies, 2018, 11(2): 406.

[29] BORG M, COLLU M, BRENNAN F P. Use of a wave energy converter as a motion suppression device for floating wind turbines[J]. Energy Procedia, 2013, 35: 223-233.

[30] LI L, GAO Y, YUAN Z, et al. Dynamic response and power production of a floating integrated wind wave and tidal energy system[J]. Renewable Energy, 2017, 116: 412-422.

[31] ZHU H, HU C, SUEYOSHI M, et al. Integration of a semisubmersible floating wind turbine and wave energy converters: an experimental study on motion reduction [J]. Journal of Marine Science and Technology, 2019, 25: 667-674.

(编辑:郭少华)

(上接第155页)

ZHANG Yan, LI Ning, YU Haiming, et al. Study on the influence of temperature stress on the strength of fractured rock mass [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(Suppl. 1): 2660-2668.

[28] 薛守义, 刘超. 断续节理岩体弹性断裂理论研究[J]. 山东建筑大学学报, 2011, 26(1): 44-49.
XUE Shouyi, LIU Chao. Study on elastic fracture theory of interruption jointed rock mass [J]. Journal of Shandong Jianzhu University, 2011, 26(1): 44-49.

[29] 弓满峰. 均匀温度场中矩形薄板屈曲的差分解[D]. 大连: 大连理工大学, 2002.
GONG Manfeng. Difference decomposition of buckling of rectangular thin plates in uniform temperature field [D].Dalian: Dalian University of Technology, 2002.

[30] 弓满锋, 喻永声, 梅芳. 矩形薄板热屈曲应力的数值分析[J]. 汕头大学学报(自然科学版), 2004, 19(4): 44-48.
GONG Manfeng, YU Yongsheng, MEI Fang. Numerical study for thermal buckling stress problem of the thin rectangular plate [J]. Journal of Shantou University (Natural Science Edition), 2004, 19(4): 44-48.

[31] 黄达, 金华辉, 黄润秋. 拉剪应力状态下岩体裂隙扩展的断裂力学机制及物理模型试验[J]. 岩土力学, 2011, 32(4): 997-1002.
HUANG Da, JIN Huahui, HUANG Runqiu. Mechanism of fracture mechanics and physical model test of rocks crack expanding under tension-shear stress[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(4): 997-1002.

[32] 中国航空研究院. 应力强度因子手册[M]. 北京: 科学出版社, 1981: 30-31.

[33] 戴俊. 岩石动力学特性与爆破理论[M]. 2版. 北京: 冶金工业出版社, 2013: 48-51.

[34] 张明明. T应力对岩石断裂韧性及裂纹起裂的影响[D]. 成都: 西南石油大学, 2017.
ZHANG Mingming. The infuence of T-stress on rock fracture toughness and crack initial angle[D].Chengdu: Southwest Petroleum University, 2017.

[35] ASHBY M F, HALLAM NÉE, COOKSLEY S D. The failure of brittle solids containing small cracks under compressive stress states[J]. Acta Metallurgica, 1986, 34(3): 497-510.

(编辑:宋艳)