

不同间距比下筏式波浪能转换装置的水动力性能研究

徐 鹏^{1,2}, 余芊慧¹, 陈炫宇¹, 张兆德³, 蒙古彬³

(1. 浙江海洋大学船舶与海运学院, 舟山 316022; 2. 上海交通大学船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200240;

3. 北部湾大学机械与船舶海洋工程学院, 钦州 535011)

摘 要: 针对双浮体筏式波浪能转换装置开展浮体间距参数优化研究, 系统探究规则波与不规则波作用下波长-浮体间距比对装置能量俘获性能及铰接受力的影响规律。通过运用数值模拟与模型试验方法, 揭示波长-浮体间距比对系统性能的作用机理。研究发现: 在规则波条件下, 系统能量捕获宽度比呈现显著波长相关性, 当波长-浮体间距比为0.25时达到峰值0.44, 较波长间距比0.063工况提升46.1%; 在不规则波条件下, 合理调整浮体间距可使连接处水平向铰接力降低约75%, 垂直向铰接力降低约25%, 从而有效提升装置服役寿命; 斜向入射波会导致能量捕获宽度比的非线性响应, 当入射角为15°时系统获得最优能量捕获宽度比, 较垂直入射工况提升22%。

关键词: 波浪能转换; 动力响应; 势流; 动力输出; 能量捕获; 筏式波浪能转换装置

中图分类号: TK79

文献标志码: A

0 引 言

随着能源日趋紧缺、地球环境逐步恶化等问题的出现, 世界各国对开发利用绿色环保的能源代替传统的化石能源达成共识^[1]。为此, 国家加大了对可再生能源的推广^[2]。而波浪能作为新兴的海洋清洁能源, 其开发和利用将是未来能源研究的重点^[3]。在波浪能领域, 筏式波浪能转换装置的理论研究较为深入, 开发的技术也较为成熟。

多浮体的筏式波浪能转换装置的能量转换效率受多种系统参数的影响^[4]。为此, 众多学者对其展开了各项研究。王璟等^[5]发现合理设计动力输出系统参数能有效提高装置性能; 王文胜等^[6]发现多浮体铰接式波浪能装置四向迎波设计可拓宽装置的最优俘获频带宽度; 刘常海等^[7]研究发现锁定控制响应时间常数对筏式波浪能装置的平均俘获功率有较大影响; 李彪等^[8]发现浮体的半径和吃水是重要的系统参数; 杨雪儿等^[9]揭示了筏式波浪能转换装置的动力输出系统的重要性; Stansby等^[10-12]研究了在时变海况下波浪能设备的能量转换效率; Abbasi等^[13]研究了非量维参数对筏式波浪能转换装置的影响。

对于传统筏式波浪能转换装置来说, 其捕获效率有限且运行带宽狭窄。而海洋环境中普遍存在的低频长周期波, 需要更大的模块尺寸来匹配波长并提高捕获效率, 这带来了一

定的安全挑战。同时, 还需考虑过长的浮体间距易因波浪带来的弯矩和剪切力增加而对装置和连接部分造成损坏。为此, 研究浮体间距对装置捕能以及其连接器的承受载荷显得尤为重要。本文旨在突破传统筏式波浪能转换装置捕获宽度比低、寻求最佳生存运营方式等海上实际工程应用问题。

1 筏式波浪能转换装置的数值计算模型

本文借助势流软件 AQWA^[14]开展一阶流体力学响应的数值模拟研究, 模拟过程中全面考虑附加质量、阻尼效应以及入射波和衍射波载荷的影响。如图1所示, 在 AQWA 软件中, 采用多个右手正交坐标系来精确描述两个相互连接浮体在波浪作用下的运动特性。其中, 初始坐标系 $O-xyz$ 作为通用参考系, 用于整体定位; 第二个坐标系 $O_1-x_1y_1z_1$ 固定于其中一个浮体上, 作为该浮体的局部参考系; 第三个坐标系 $O_2-x_2y_2z_2$ 则与另一个浮体保持相对静止, 用于描述其局部运动。通过这种多坐标系的设置清晰刻画浮体在波浪环境中的复杂运动状态, 为后续的分析提供可靠的数学基础。

本文将开展弱非线性时域模拟, 旨在估算在瞬时入射波面条件下所产生的非线性 Froude-Krilov 力和流体静力学力。通过三维线性衍射与辐射分析, 全面考虑多体之间的流体动力相互作用。在此基础上, 进一步引入二阶波浪载荷计算, 并借助二次传递函数(quadratic transfer function, QTF)矩阵进

收稿日期: 2025-01-14

基金项目: 国家自然科学基金(52301342); 广西科技重大专项(桂科 AA22068105)

通信作者: 蒙古彬(1979—), 男, 博士、教授级高级工程师, 主要从事海洋工程装备研发与安全评价技术方面的研究。zjymzb@163.com

行精确求解。由于附加质量 A 和流体动力阻尼 c 均具有频率相关性,因此在时域计算中,浮体运动系统的运动方程通过卷积积分的形式得以求解,从而确保计算结果的准确性和可靠性。

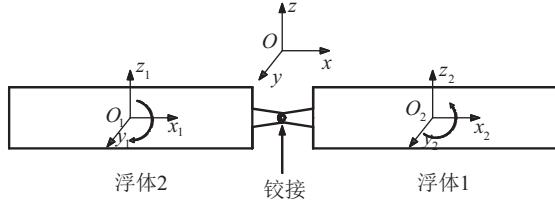


图1 双浮体在波浪中运动的坐标系

Fig. 1 Coordinate systems for motion of double floating body in waves

2 筏式波浪能转换装置的能量捕获宽度比

动力输出系统(power take-off, PTO)作为筏式波浪能转换装置的重要组成部分,是模型设计中极具挑战性的部分之一,其主要功能是将波浪能高效转化为电能。然而,在模型试验阶段,由于实际动力输出系统的复杂性,其通常不被纳入设计考量^[15-16]。为简化试验数据处理,部分学者提出动力输出系统的阻力转矩应遵循简单的控制规律,即采用线性阻尼模型,使动力输出系统中的转矩与两个浮体之间相对纵摇运动的角速度呈正比关系。本文借鉴了这一设计理念,通过设置铰接器中的阻尼来模拟动力输出系统的抗转矩,从而在试验中实现对能量转换过程的近似模拟。如图2所示,当两个浮体之间存在相对运动时,相邻浮体的相对纵摇角位移可定义为:

$$\theta = \theta_1 - \theta_2 \quad (1)$$

式中: θ_1, θ_2 ——左、右浮体的纵摇角位移,rad。

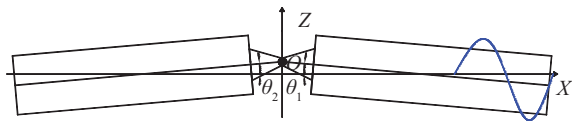


图2 双浮体能量捕获模型

Fig. 2 Double floating body energy harvesting model

铰接处的瞬间力矩可表达为:

$$M = -C \dot{\theta} \quad (2)$$

式中: C ——等效旋转阻尼, $N \cdot m \cdot s/rad$ 。

根据功率表达式,得到瞬时功率方程为:

$$\bar{P}_s = -M \dot{\theta} \quad (3)$$

假设两个浮体在规则波作用下的相对纵摇位移可表示为:

$$\dot{\theta}(t) = \zeta_0 \sin(\omega t) \quad (4)$$

式中: ζ_0 ——相对纵摇角速度的振幅, rad/s 。

设备在 T 周期内的平均功率可表示为:

$$\bar{P}_s = \frac{1}{T} \int_0^T C \zeta_0^2 \sin^2(\omega t) dt = \frac{1}{2} C \zeta_0^2 \quad (5)$$

根据线性波理论,入射波单位宽度的功率可表示为:

$$P_w = \frac{\rho g H^2}{16} \cdot \frac{g T}{4\pi} = \frac{\rho g^2 T H^2}{64\pi} \quad (6)$$

式中: H ——波高,m。

装置利用波能的效率可用能量捕获宽度比 η 表示:

$$\eta = \frac{\bar{P}_s}{d P_w} \quad (7)$$

式中: d ——筏式波浪能转换装置的单位宽度,m。

3 模型试验

3.1 试验模型以及场地布置

该模型试验在浙江海洋大学的拖曳水池中进行,其规格为 $130 m \times 6 m$,可调节不同的工作水深且最大水深可达 $4.1 m$ 。水池造波通过液压摇板生成,能够实现多种波浪频率和波高的组合,波浪频率范围为 $0.1 \sim 2.0 Hz$,最大波浪高度为 $0.35 m$ 。试验主要围绕两个浮体之间的相互作用展开,浮体模型的配置如图3所示。浮体之间的铰接处采用单自由度连接器,以精确模拟实际工况。为确保试验过程中模型的密封性和数据监测设备的安全性,浮体内部连接处均涂覆有环氧树脂。试验主要在波高为 $0.14 m$ 、波周期为 $1 \sim 4 s$ 条件下进行。表1总结了浮体模型的关键尺寸和参数。

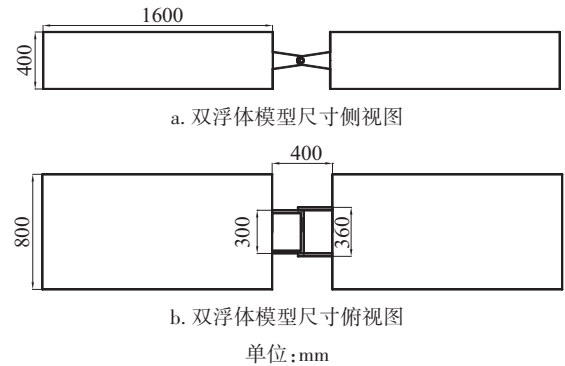


图3 双浮体模型

Fig. 3 Double floating body model

如图4所示,浮体模型的运动数据采集采用一套非接触式位移测量系统,该系统主要由6台高精度光学运动捕捉相机组成。在浮体模型表面特定位置安装被动式红外反光标记球作为运动捕捉点。这些相机通过捕捉和分析标记球的实时运动轨迹来精确获取目标物体在6个自由度上的运动姿态信息。系统的空间定位功能通过视觉光学定位相机与专业分析软件协同实现。借助系统提供的软件开发工具包,可实时获取目标物体的三维空间坐标数据,并通过与试验控制平台的集成实现对浮体运动响应的全面监测。这种非接触式运动捕捉方法具有较高的测量精度和空间分辨率,能有

效捕捉浮体在波浪作用下的复杂运动特征,可为后续的研究分析提供可靠的数据支持。

表1 试验模型基本参数

Table 1 Basic parameters of trial model

参数	数值	参数	数值
浮体特征长度 L/mm	1600	单浮体质量 m/kg	144.2
浮体宽度 W/mm	800	转动惯量 $I_{xx}/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	64.91
浮体高度 h/mm	400	转动惯量 $I_{yy}/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	54.07
浮体间距 d/mm	400	转动惯量 $I_{zz}/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	20.41
吃水深度 D/mm	120		

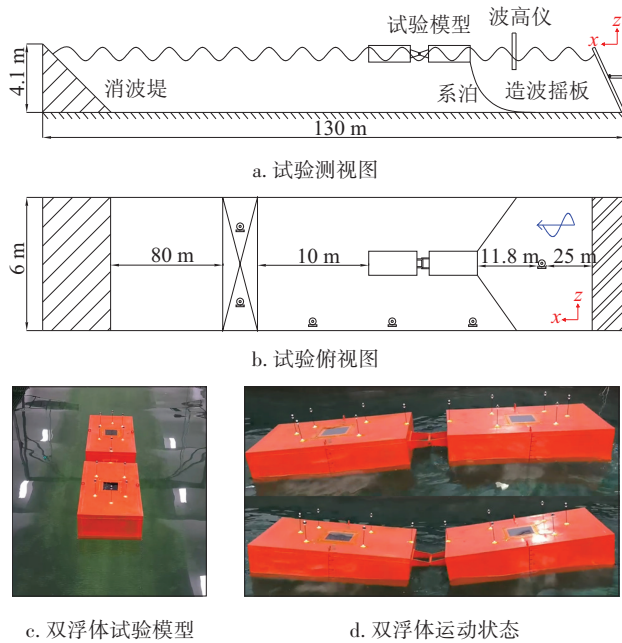


图4 试验布置

Fig. 4 Trial layout

3.2 模型验证

验证数值模拟结果的准确性是研究的关键环节。在基于势流求解器的模拟中,为进一步提升预测精度,引入额外的阻尼项。该阻尼项的引入需要依据模型试验中测得的浮体附加阻尼系数,从而确保数值模型能够更精准地贴近实际物理现象。本文所采用的数值模型是基于模型试验中的双浮体而建立的。在模型验证过程中,选取波高为 $H=0.14\text{ m}$,波周期分别为 1.42 s 、 1.67 s 和 2.00 s 的工况进行模拟。为了确保模拟效率,选取中等密度的网格划分,其网格密度为特征长度 L 的 $1/30$,并将时间步长设定为 $\Delta t = T/100 = 0.0142\text{ s}$ 。

如图5所示,当波高为 0.14 m ,波周期分别为 1.42 s 、 1.67 和 2.00 s 时,含有附加阻尼系数的数值模拟所计算出的双浮

体相对纵摇角度与模型试验数据呈现出高度的一致性。此外,为进一步验证该数值模型的可靠性,选用张媛等^[17]带系泊系统的双浮体模型进行数值模拟计算,并选取其中的一系列数值模拟结果进行验证对比。在对比验证中,选取波高为 0.14 m ,PTO 阻尼为 $100\text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}/\text{rad}$,波周期分别为 1.25 s 、 1.42 s 、 1.67 和 2.00 s 的工况。如图6所示,相对纵摇角度运动幅值

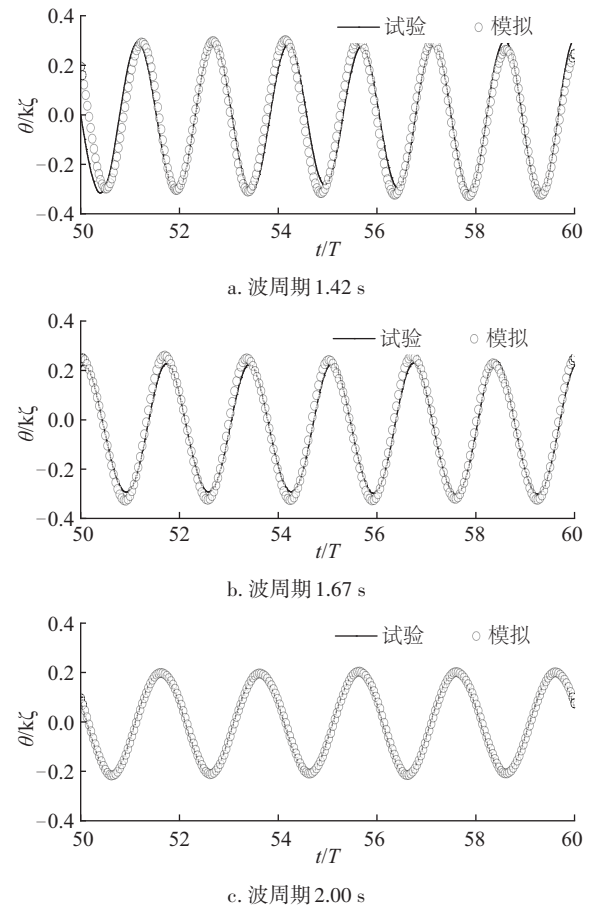


图5 波高为 0.14 m 时数值模拟与试验结果的相对纵摇运动响应

Fig. 5 Relative pitch motion response of numerical simulation and trial results when wave height is 0.14 m

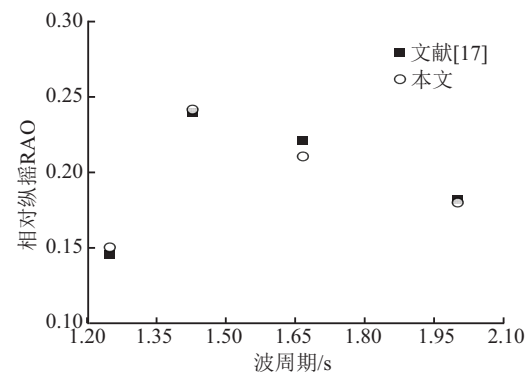


图6 相对纵摇RAO数值模拟结果对比

Fig. 6 Comparison of numerical simulation results of relative pitch RAO

响应算子(response amplitude operator, RAO)结果对比表明,两者之间具有良好的一致性,这为后续的计算分析提供了有力支撑。

4 数值计算结果分析

4.1 规则波下不同间距对双浮体的能量捕获宽度比的影响

双浮体结构由前浮体和后浮体组成,其水动力性能对波浪能转换装置的整体性能具有显著影响。因此,本文首先在时域计算中对其水动力特性进行评估。在模拟中,选取的波高为 $H=0.10$ m,波长范围为 $0.676 \leq \lambda/L \leq 24.2$,同时所选用的PTO 阻尼值为 $630.3 \text{ N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}/\text{rad}$ 。本研究的时域计算基于二阶 Stokes 波理论展开。其中, λ 表示波长, k 表示波数, L 表示单个浮体的特征长度。具体的模拟工况如表 2 所示。

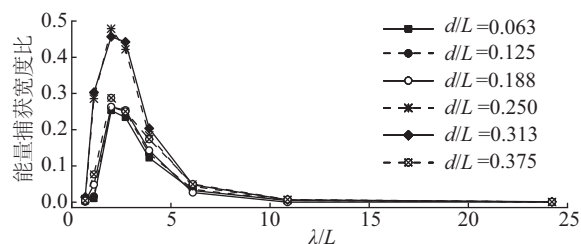
表 2 数值模拟基本参数

Table 2 Basic parameters of numerical simulation

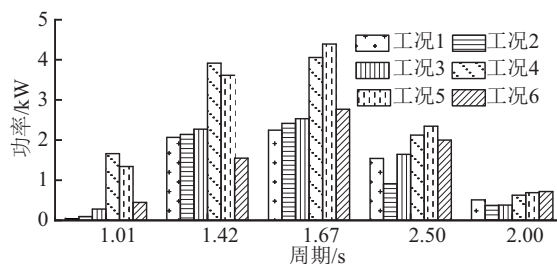
工况	波高/m	波周期/s	波向/(°)	间距比 d/L
1	0.10	0.83~5.00	0	0.063
2	0.10	0.83~5.00	0	0.125
3	0.10	0.83~5.00	0	0.188
4	0.10	0.83~5.00	0	0.250
5	0.10	0.83~5.00	0	0.313
6	0.10	0.83~5.00	0	0.375

如图 7a 所示,筏式波浪能转换装置的能量捕获宽度比与波长密切相关。随着波长的变化,能量捕获宽度比呈先增加后减小的趋势。当波长与浮体长度的比值(λ/L)约为 2.0(即单个浮体的长度恰好等于波长的一半)时,能量捕获宽度比趋于最佳。然而,一旦偏离这一条件,双浮体的能量捕获宽度比将显著下降。这可归因于以下两个方面:当波长较短时,波浪能转换装置分布在多个波长上,导致能量分布均匀化,从而使能量捕获宽度比降低;而当波长较长时,所有浮体被包含在同一个波长内,双浮体的相对纵摇运动减弱,最终导致能量捕获宽度比降低。因此,最佳波频范围通常位于这两个极端之间的中间值,此时能够实现能量捕获宽度比的最大化。为优化筏式波浪能转换装置的尺寸,建议其设计尺寸与当地海域的典型波长保持 2:1 的比例。

此外,浮体间距也对双浮体的能量捕获宽度比有显著影响。如图 7b 所示,双浮体系统的能量捕获宽度比呈现显著的单峰变化趋势。当浮体间距比 $d/L=0.25$ 时,能量捕获宽度比达到峰值,为 0.44,这揭示了浮体间距通过水动力相互作用对附加质量与辐射阻尼参数产生的非线性影响机制。具体而言:当浮体间距过小($d/L<0.25$)时,相邻浮体间强烈的流



a. 能量捕获宽度比



b. 在不同周期下的功率

图 7 不同间距比下双浮体在不同周期下的能量捕获宽度比和功率

Fig. 7 Energy harvesting width ratio and power of double floats with different spacing ratios in different periods

体力耦合会导致纵摇运动相位失配,显著降低相对运动幅度。数值结果表明,在波长特征长度比 λ/L 约为 2.0 时, $d/L=0.25$ 工况的能量捕获宽度比较 $d/L=0.063$ 工况提升了 46.1%。此外,过短的浮体间距引起的运动频率升高可能超出能量转换系统的频带响应范围,导致能量捕获下降。当浮体间距过大($d/L>0.25$)时,系统会呈现两个独立单浮体的运动特征,此时波场透射率增加^[18],而更多的波浪透射则会显著减少波浪能量的捕获,同时也会削弱浮体的动态响应,从而降低其能量捕获宽度比。例如,当 λ/L 约为 2.0 时,浮体间距比 $d/L=0.25$ 的能量捕获宽度比较 $d/L=0.375$ 增加了 39.9%。值得注意的是,实现最大能量捕获宽度比的波浪条件与每个波浪周期产生最大功率的最佳波浪条件并不一致。

如图 8 所示,当双浮体间距较小时,会增加流体在浮体间窄缝中的运动频率,使得波浪能量在该区域集中并辐射,从而显著增加浮体纵摇方向的辐射阻尼。相反,当双浮体间距较大时,浮体间流体的相互作用减弱,导致流体的辐射阻尼相对较小。当双浮体间距较小时,浮体间的流体相互作用较强,流体的惯性效应显著增强,进而导致双浮体纵摇方向的附加质量增大。相反,当双浮体间距较大时,浮体间的流体相互作用减弱,流体的惯性效应相对较小,附加质量也随之减小。当双浮体间距较小时,由于流体的惯性效应和阻尼效应均显著增大,纵摇方向的波激动力也随之增大。相反,当双浮体间距较大时,浮体间的流体相互作用减弱,流体的惯性效应和阻尼效应相对较小,纵摇波激动力也会相应减小。

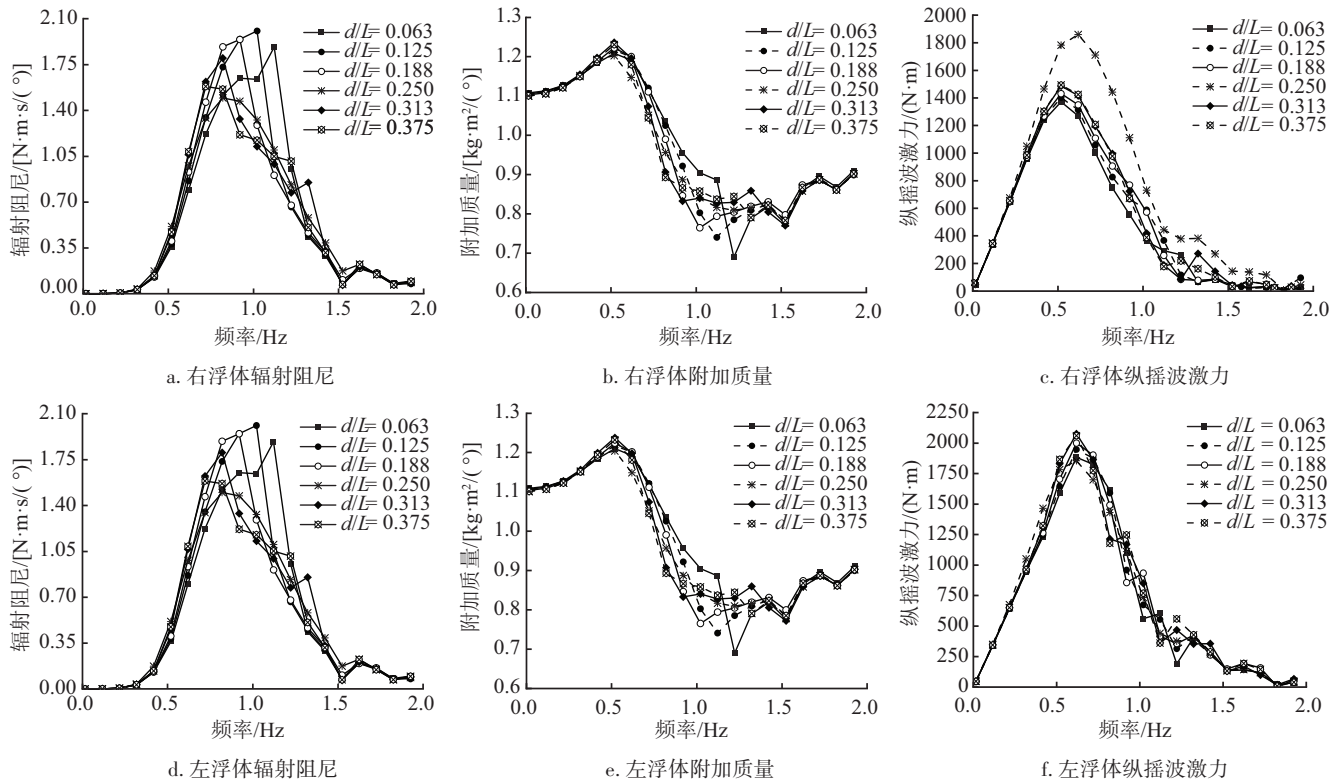


图8 不同间距比下双浮体的频域分析

Fig. 8 Frequency domain analysis of double floats for different spacing ratios

4.2 不规则波下不同间距对双浮体的能量捕获宽度比及铰接载荷的影响

在实际海洋环境中,波浪通常呈现出具有特定频谱的随机状态。本节旨在评估不规则波浪条件下,不同间距双浮体的运动响应。具体的工况设置如表3所示。波谱 $S(f)$ 是一种用于定量描述不同波成分对波浪能量贡献的重要工具,其单位为 $\text{m}^2\cdot\text{s}$,通常通过对测量到的随机波列进行傅里叶变换分析获得。为了更清晰地描述随机波浪的统计特征,波谱中引入了若干关键参数(例如波高和波长等)。 H_s (也称为有效波高)是所有测量波高值按大小顺序排列,取其中最大的1/3部分波高的平均值; $H_{1/10}$ 是取其中最大的1/10部分波高的平均值;而 H_{AVG} 是所有波高的平均值。与这些波高特征值相对应的波周期分别为 T_p 、 $T_{1/10}$ 和 T_{AVG} 。

表3 数值模拟基本参数

Table 3 Basic parameters of numerical simulation

工况	有效波高/m	有效周期/s	波向/(°)	间距比 d/L
IR1	0.10	1.42	0	0.063
IR2	0.10	1.42	0	0.125
IR3	0.10	1.42	0	0.188
IR4	0.10	1.42	0	0.250
IR5	0.10	1.42	0	0.313
IR6	0.10	1.42	0	0.375

在本文中,不规则波浪是基于 JONSWAP 频谱生成的^[19],其表达式为:

$$S(\omega) = 319.34 \frac{H_s^2}{T_p^4 \omega^5} \left[\frac{1948}{(T_p \omega)^4} \right]^{3.3} \exp \left[\frac{(0.159 \omega T_p - 1)^2}{2\sigma^2} \right] \quad (8)$$

式中: H_s ——有效波高,m; T_p ——有效周期,s; σ ——谱宽参数,当 $\omega < \omega_p$ 时, $\sigma = 0.07$,当 $\omega \geq \omega_p$ 时, $\sigma = 0.09$,其中, ω_p 为峰值频率,rad/s。

为确保波浪条件的准确模拟并验证不规则波数值模拟时间步长的合理性,选取谱峰周期 $T_p = 1.42$ s和有效波高 $H_s = 0.10$ m的波浪参数进行模拟。图9展示了在1440个重复周期下计算域内不规则波的模拟结果,模拟效果令人满意。

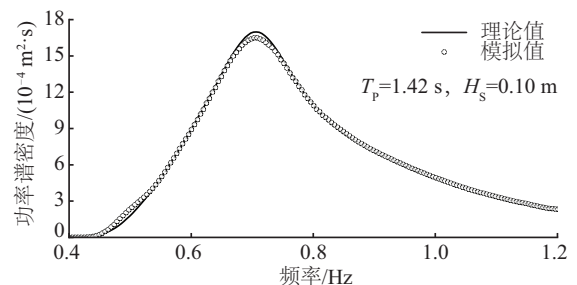


图9 不规则波的理论波谱和生成波谱的比较

Fig. 9 Comparison between theoretical and generated wave spectra for irregular waves

如图10所示,在纵摇运动响应方面,浮体间距比

$d/L=0.25$ 时的功率谱最大,这一结果与 4.1 节的讨论一致,此处不再赘述。值得注意的是,如图 11 所示,双浮体之间的垂直向和水平向铰接力功率谱的变化趋势与纵摇运动响应功率谱表现出一定的相似性。然而,在不同工况下,水平向铰接力功率谱明显小于垂直向铰接力功率谱。这种差异可归因于波浪在海洋中主要表现为垂直方向的上下运动,这种运动是波浪能量的主要来源。筏式波浪能转换装置的设计初衷正是为高效捕捉这种垂直方向的能量,其在垂直方向上的运动能更有效地将波浪能转化为机械能,进而转化为电能。因此,铰接处需承受较大的垂直力,以实现波浪能的有效转换。

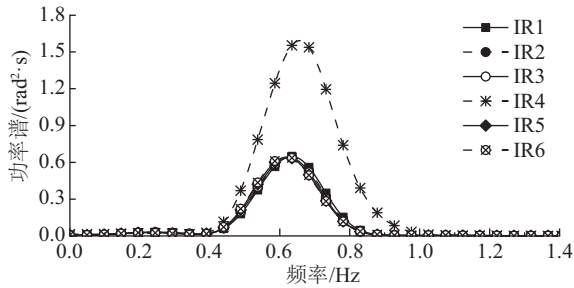
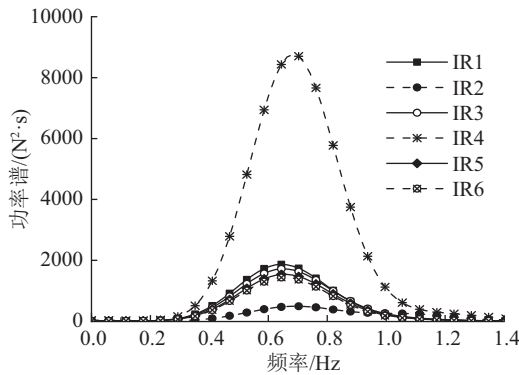
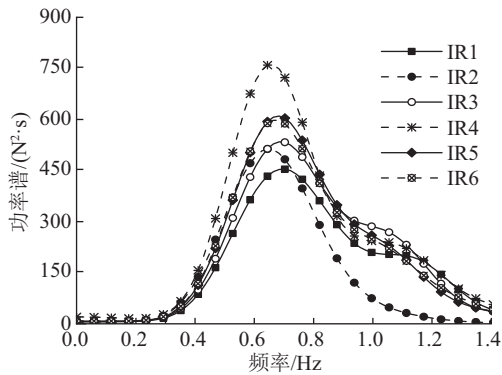


图 10 不同间距比下纵摇运动响应功率谱

Fig. 10 Power spectra of pitch motion response for different spacing ratios



a. 垂直向铰接力功率谱

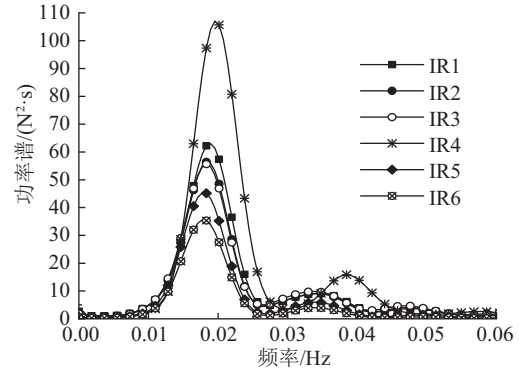


b. 水平向铰接力功率谱

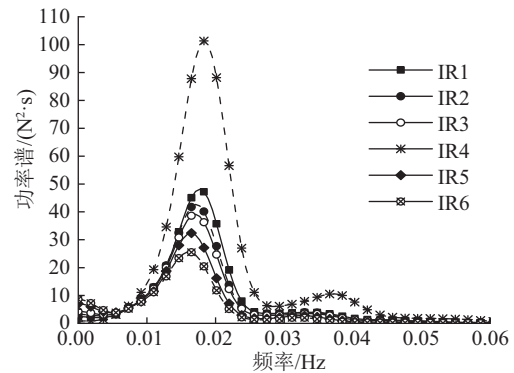
图 11 不同间距比下铰接力功率谱

Fig. 11 Power spectra of hinge loads for different spacing ratios

如图 12 所示,不同浮体间距下的系泊力功率谱变化趋势与双浮体纵摇运动响应功率谱表现出一定的相似性。然而,右端系泊张力功率谱略高于左端。这种差异可能源于波浪作用下装置的垂荡、纵荡和横荡等运动响应在不同侧的表现存在差异。这种差异可能是由波浪能量分布的不均匀性导致的,进而影响到两侧系泊拉力。因此,浮体相对于波浪的相对位置可能会发生偏离,导致波浪对浮体的作用力在不同侧产生差异,从而造成两侧系泊拉力的不同。



a. 右端系泊力功率谱



b. 左端系泊力功率谱

图 12 不同间距比下左右两侧系泊张力功率谱

Fig. 12 Power spectra of mooring tension of left and right sides for different spacing ratios

4.3 不同浪向对双浮体的能量捕获宽度比及铰接载荷的影响

在实际海洋环境中,波浪的入射方向通常并是具有多向性的。因此,本节重点探讨斜波入射对筏式波浪能转换装置性能的影响。由于筏式波浪能转换装置在设计上具有对称性(如图 13 所示),波浪方向由 0° 到 60° 入射作用到浮体一侧。表 4 详细列出了数值模拟的基本参数。通过这种方法,可在不同波浪入射角下全面评估筏式波浪能转换装置的能量捕获宽度比以及所受铰接载荷,从而为复杂海洋环境下的实际应用提供有价值的参考。

如图 14 所示,在不同来波方向下,双浮体的能量捕获宽度比呈现出先增大后减小的趋势。当来波方向为 15° 时,能量捕获宽度比达到最大值。这与通常认为的筏式波浪能转

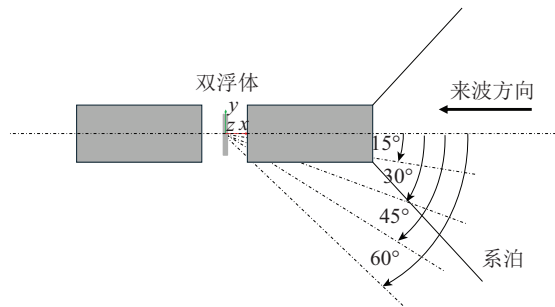


图 13 不同来波方向的示意

Fig. 13 Schematic diagram of different incoming wave directions

表 4 数值模拟基本参数

Table 4 Basic parameters of numerical simulation

工况	波高/m	周期/s	波向(间隔 15°)/(°)	间距比 d/L
DW1	0.14	1.42	0~60	0.063
DW2	0.14	1.42	0~60	0.125
DW3	0.14	1.42	0~60	0.188
DW4	0.14	1.42	0~60	0.250
DW5	0.14	1.42	0~60	0.313
DW6	0.14	1.42	0~60	0.375

换装置在顺浪情况下(来波方向为 0°)能量捕获宽度比最高的观点有所不同。其原因在于,当波浪以斜角度入射时,装置不仅受到波浪的垂直力,还会受到水平力的作用。这种复合力作用使得装置产生更复杂的运动,包括纵摇和横摇。而在顺浪情况下,波浪主要提供沿装置长度方向的力,其运动相对较为单一,不如斜浪情况下的运动复杂和剧烈。此外,双浮体前端两侧系泊、后端不系泊的设计使得浮体在斜浪入射时能够获得更大的自适应性,从而增加浮体的运动范围和能量捕获宽度比。

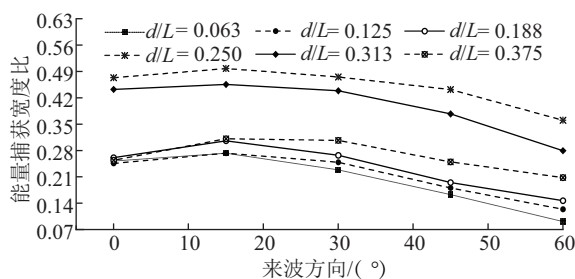


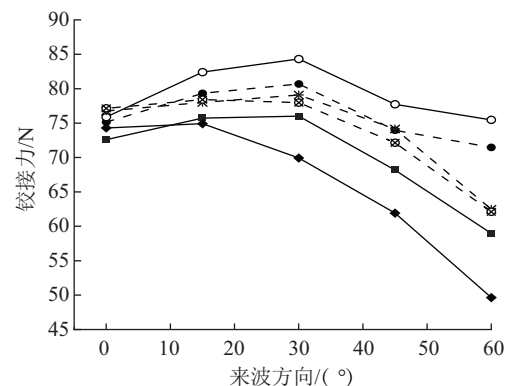
图 14 不同来波方向下不同间距比之间的能量捕获宽度比

Fig. 14 Energy harvesting width ratio between different spacing ratios for different incoming wave directions

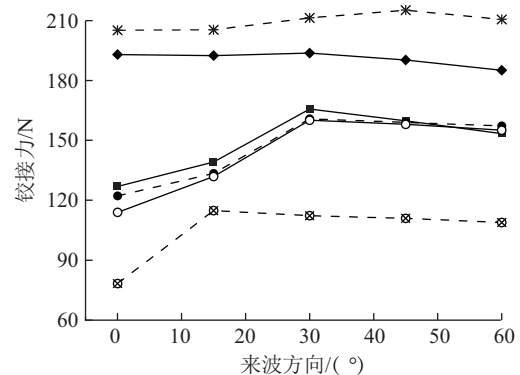
在顺浪情况下,波浪力的方向较为单一,系泊系统对纵摇运动的约束作用可能不如斜浪情况下显著。随着来波方

向的逐渐增大,单侧系泊可能无法有效调整双浮体的位置,导致系泊张力分布不均匀。在大角度斜浪状态下,波浪能量分布不如正向波浪均匀,这使得筏式波浪能转换装置难以均匀地捕获波浪能量,从而影响能量捕获宽度比。不同浮体间距在不同来波方向下的能量捕获宽度比变化趋势与 4.1 节的讨论结果一致。

如图 15 所示,在不同来波方向下,各工况的垂直向铰接力均大于水平向铰接力,这一现象在斜浪条件下尤为显著。这是由于不同方向的波浪与双浮体之间的相互作用更为复杂。波浪的斜向入射会导致装置受力不均,进而影响装置的运动响应,最终使得垂直向铰接力大于水平向铰接力。值得注意的是,在所有工况下,水平向铰接力的峰值均出现在浪向角为 30° 时,而垂直向铰接力则呈现出随浪向角的增大逐渐增大的趋势。这一现象与能量捕获宽度比的变化趋势存在差异,可归因于随着浪向角的逐渐增大,铰接处所受波浪载荷的范围扩大,导致水平向和垂直向铰接力均逐渐增大。然而,当浪向角持续增大时,双浮体的运动幅度逐渐减弱,水平向铰接力也随之减小。相比之下,垂直向铰接力由于持续受到波浪传播的上下运动影响,其值能够保持在一个较高的稳定水平。



a. 水平向铰接力



b. 垂直向铰接力

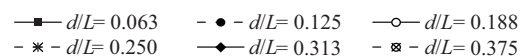


图 15 不同来波方向下不同间距比之间的铰接力

Fig. 15 Hinged loads between different spacing ratios for different incoming wave directions

5 结 论

本文对不同间距和不同波浪条件下的筏式波浪能转换装置的能量捕获宽度比与铰接载荷进行了综合评估。建立了双浮体筏式波浪能转换装置的动力学模型,并通过验证后的模型在时间域中求解了多体系统的运动方程。模型考虑了双浮体在规则波、不规则波以及不同来波方向下的能量捕获宽度比与铰接载荷的影响。采用等效线性阻尼来模拟 PTO 系统,并通过物理模型试验对数值模拟的准确性进行验证,得到如下主要结论:

1) 筏式波浪能转换装置的能量捕获宽度比与波长密切相关,存在一个最佳波长使能量捕获宽度比最大化。当波长的一半等于单个浮体的特征长度(λ/L 约为 2.0)时,能量捕获宽度比最高。能量捕获宽度比随浮体间距的增加先增大后减小,在浮体间距比 $d/L=0.25$ 时达到峰值,能量捕获宽度比为 0.44。适当的浮体间距可优化水动力相互作用,从而提高能量捕获宽度比。

2) 在不规则波条件下,双浮体之间的垂直向和水平向铰接力功率谱变化趋势与纵摇运动响应功率谱表现出一定的相似性。然而,水平向铰接力功率谱明显小于垂直向铰接力功率谱。这主要是由于波浪主要表现为垂直方向的上下运动,而水平方向的运动相对较小。

3) 在不同来波方向下,双浮体的能量捕获宽度比并非线性变化,而是呈现出先增大后减小的趋势。当来波方向为 15° 时,能量捕获宽度比达到最大值。这表明一定角度的斜波入射可以适当提高能量捕获宽度比。在所有工况下,垂直向铰接力均大于水平向铰接力。水平向铰接力的峰值通常出现在浪向角为 30° 时,而垂直向铰接力则随着浪向角的增大而逐渐增大。

本文采用简化的动力输出阻尼模型,忽略了液压系统实际冲程和压力限制的影响。虽评估了不同间距比下筏式波浪能转换装置的能量捕获宽度比,但未全面考虑结构尺寸、吃水和系泊配置等系统参数对装置捕能的影响。后续研究将聚焦完整动力输出系统对能量转换效率的影响,深入探讨不同间距比下的系泊配置和结构优化,并开展更多不规则波浪条件下的试验研究。

[参考文献]

- [1] 周逸伦, 张亚群, 盛松伟, 等. 振荡水柱式波浪能供电浮标水动力学性能研究[J]. 太阳能学报, 2023, 44(3): 298-303.
ZHOU Y L, ZHANG Y Q, SHENG S W, et al. Study on hydrodynamic performance of oscillating water column wave energy-powered buoy [J]. Acta energiae solaris sinica, 2023, 44(3): 298-303.
- [2] QIU S Q, LIU K, WANG D J, et al. A comprehensive

review of ocean wave energy research and development in China [J]. Renewable and sustainable energy reviews, 2019, 113: 109271.

- [3] 曹雪玲, 叶寅, 黄圳鑫, 等. 垂荡波浪能转换装置的动态特性分析[J]. 太阳能学报, 2025, 46(1): 222-228.
CAO X L, YE Y, HUANG Z X, et al. Analysis of dynamic characteristics of heave-motion wave energy conversion device [J]. Acta energiae solaris sinica, 2025, 46(1): 222-228.
- [4] WANG L G, WU S X, HUANG T H, et al. On improving the wave-to-wire efficiency of a two-body hinge-barge wave energy converter [J]. Ocean engineering, 2023, 278: 114388.
- [5] WANG J, WANG S Q, JIANG Q D, et al. Effect of different raft shapes on hydrodynamic characteristics of the attenuator-type wave energy converter [J]. China ocean engineering, 2023, 37(4): 645-659.
- [6] 王文胜, 姜家强, 盛松伟. 一种多浮体铰接式波浪能装置的运动分析与俘获特性研究[J]. 太阳能学报, 2023, 44(2): 218-223.
WANG W S, JIANG J Q, SHENG S W. Study on motion response and power capture characteristics of hinged multiple floating bodies wave energy converter [J]. Acta energiae solaris sinica, 2023, 44(2): 218-223.
- [7] 刘常海, 曾亿山, 高文智, 等. 筏式波浪能发电装置锁定控制参数影响研究[J]. 太阳能学报, 2022, 43(3): 74-79.
LIU C H, ZENG Y S, GAO W Z, et al. Influence of parameters on efficiency of latching control for raft-type wave power generation devices [J]. Acta energiae solaris sinica, 2022, 43(3): 74-79.
- [8] LI B, SUI F F, YANG B S. An efficient multi-factor geometry optimization based on motion analysis and resonance response for hinged double-body floating wave energy converter [J]. Science progress, 2020, 103(3): 0036850420950151.
- [9] 杨雪儿, 彭伟, 张颖男, 等. 不同动力输出系统下多浮体波浪能转换装置性能研究[J]. 中国舰船研究, 2024, 19(4): 113-121.
YANG X, PENG W, ZHANG Y N, et al. Performance study of a multi-body floating wave energy converter with different power take-off systems [J]. Chinese journal of ship research, 2024, 19(4): 113-121.
- [10] LIAO Z J, GAI N, STANSBY P, et al. Linear non-causal optimal control of an attenuator type wave energy converter M4[J]. IEEE transactions on sustainable energy, 2020, 11(3): 1278-1286.
- [11] LIAO Z J, STANSBY P, LI G. A generic linear non-causal

- optimal control framework integrated with wave excitation force prediction for multi-mode wave energy converters with application to M4[J]. *Applied ocean research*, 2020, 97: 102056.
- [12] LIAO Z J, STANSBY P, LI G, et al. High-capacity wave energy conversion by multi-float, multi-PTO, control and prediction: generalized state-space modelling with linear optimal control and arbitrary headings [J]. *IEEE transactions on sustainable energy*, 2021, 12(4): 2123-2131.
- [13] ABBASI A, GHASSEMI H. Numerical results of the dynamic response and capture factor of the two-raft-type WEC [J]. *Energy conversion and management*, 2024, 303: 118176.
- [14] ANSYS. Aqwa user's manual release 17.0 [Z]. USA, Ansys inc, 2016.
- [15] MOURA PAREDES G, PALM J, ESKILSSON C, et al. Experimental investigation of mooring configurations for wave energy converters [J]. *International journal of marine energy*, 2016, 15: 56-67.
- [16] REZANEJAD K, GUEDES SOARES C. Enhancing the primary efficiency of an oscillating water column wave energy converter based on a dual-mass system analogy [J]. *Renewable energy*, 2018, 123: 730-747.
- [17] ZHANG Y, CHEN X Y, XU P, et al. Performance of a raft-type wave energy converter with diverse mooring configurations [J]. *Journal of marine science and engineering*, 2023, 11(12): 2352.
- [18] 王树齐, 王晋, 姜庆典. 两节筏式波浪能发电装置水动力性能研究[J]. *舰船科学技术*, 2023, 45(15): 91-96.
- WANG S Q, WANG J, JIANG Q D. Research on hydrodynamic characteristics of the two-raft-type wave energy converter [J]. *Ship science and technology*, 2023, 45(15): 91-96.
- [19] CHEN Z F, ZHOU B Z, ZHANG L, et al. Performance evaluation of a dual resonance wave-energy convertor in irregular waves [J]. *Applied ocean research*, 2018, 77: 78-88.

STUDY ON HYDRODYNAMIC PERFORMANCE OF RAFT-TYPE WAVE ENERGY CONVERTER WITH DIFFERENT SPACE RATIO

Xu Peng^{1,2}, Yu Qianhui¹, Chen Xuanyu¹, Zhang Zhaode³, Meng Zhanbin³

(1. School of Naval Architecture and Maritime, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316022, China;

2. State Key Laboratory of Ocean Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

3. College of Mechanical and Marine Engineering, Beibu Gulf University, Qinzhou 535011, China)

Abstract: Focusing on the optimization of the spacing parameters of a dual-float wave energy conversion (WEC) device, systematically investigating the influence of the wavelength-to-float spacing ratio on the energy harvesting performance and hinge loads under both regular and irregular wave conditions. Through the application of numerical simulation and model trial methods, the working mechanism of the wavelength-to-float spacing ratio on system performance is revealed. The findings indicate that under regular wave conditions, the energy harvesting width ratio of the system exhibits a significant wavelength dependency, reaching a peak value of 0.44 when the wavelength-to-float spacing ratio is 0.25, which is a 46.1% increase compared to the case with a ratio of 0.063. Under irregular wave conditions, appropriately adjusting the float spacing can reduce the horizontal hinge load at the connection joint by approximately 75% and the vertical hinge load by about 25%, thereby effectively enhancing the service life of the device. Oblique incident waves induce a nonlinear response in energy harvesting width ratio, and the system achieves the optimal energy harvesting width ratio when the incident angle is 15°, which is a 22% improvement compared to the case of vertical incidence.

Keywords: wave energy conversion; dynamic response; potential flow; power takeoffs; energy harvesting; raft-type wave energy converter