

风浪联合发电系统水动力学研究进展¹⁾周斌珍* 胡俭俭* 谢彬[†] 丁波寅** 夏英凯[†] 郑小波[†] 林志良[†] 李晔^{†,2)}

*(哈尔滨工程大学船舶工程学院, 哈尔滨 150001)

[†](上海交通大学船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200240)

**(澳大利亚阿德莱德大学机械工程学院, 澳大利亚阿德莱德 5005)

摘要 随着化石能源枯竭和全球变暖等环境问题的日益严重, 海洋可再生能源(海上风能、波浪能和潮流能)成为研究热点. 为了有效开发海洋可再生能源, 降低成本, 多种能源综合开发成为现阶段的趋势. 海上风能与波浪能结合具有广阔的应用前景, 联合发电系统不断创新. 水动力性能是联合发电系统与波浪相互作用的重要基础. 本文简要介绍多种应用在联合发电系统上的水动力学数值模拟方法, 包括线性频域、线性时域、势流非线性方法, 以及基于 Navier-Stokes 方程的黏性方法, 对现有文献的水动力学数值模拟方法进行综述, 从计算效率和精度方面分析其优缺点, 且进一步阐述水动力控制优化的技术原理与实验技术主要科研难点, 为联合发电系统的水动力设计提供依据. 得到以下主要结论: 从计算效率上看, 线性频域方法最优, 其次为线性时域、势流非线性、黏性方法, 从计算精度上看, 与前者恰好相反; 综合考虑计算效率和精度, 采用考虑黏性修正的势流方法来研究是一个切实可行的方案; 模型实验方法和优化控制技术目前还不够成熟, 尚处于探索阶段.

关键词 海上风能, 波浪能, 风浪联合发电系统, 水动力学, 优化控制

中图分类号: TK71, P741 文献标识码: A doi: 10.6052/0459-1879-19-202

RESEARCH PROGRESS IN HYDRODYNAMICS OF WIND-WAVE COMBINED POWER GENERATION SYSTEM¹⁾Zhou Binzhen* Hu Jianjian* Xie Bin[†] Ding Boyin** Xia Yingkai[†] Zheng Xiaobo[†] Lin Zhiliang[†] Li Ye^{†,2)}

*(College of Shipbuilding Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

[†](School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

**(School of Mechanical Engineering, University of Adelaide, Adelaide 5005, Australia)

Abstract With the increasing environmental problems such as depletion of fossil energy and global warming, marine renewable energy (offshore wind energy, tidal energy and wave energy) has become a research hotspot. In order to effectively develop marine renewable energy and reduce costs, comprehensive development of multiple energy sources has become a trend at this stage. The combination of offshore wind energy and wave energy has broad application prospects, and the combined power generation system continues to innovate. Hydrodynamic performance is an important basis for the interaction of combined system with waves. This paper introduces briefly a variety of hydrodynamic numerical simulation methods for combined power generation systems, including linear frequency domain, linear time domain,

2019-07-25 收稿, 2019-11-05 录用, 2019-11-16 网络版发表.

1) 国家自然科学基金中英国国际合作重点项目 (51761135012, 51761135013), 国家自然科学基金项目 (11872248) 和科技部国际合作项目 (SQ2017YFGH001115) 资助.

2) 李晔, 教授, 主要研究方向: 海上可再生能源. E-mail: ye.li@sjtu.edu.cn.

引用格式: 周斌珍, 胡俭俭, 谢彬, 丁波寅, 夏英凯, 郑小波, 林志良, 李晔. 风浪联合发电系统水动力学研究进展. 力学学报, 2019, 51(6): 1641-1649

Zhou Binzhen, Hu Jianjian, Xie Bin, Ding Boyin, Xia Yingkai, Zheng Xiaobo, Lin Zhiliang, Li Ye. Research progress in hydrodynamics of wind-wave combined power generation system. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2019, 51(6): 1641-1649

potential flow nonlinear method, and viscous method based on Navier-Stokes equation. The numerical simulation method is reviewed, and its advantages and disadvantages are analyzed from the aspects of computational efficiency and precision. The technical principle and main research difficulties of hydrodynamic control optimization and experiments are further elaborated, which provides a basis for the hydrodynamic design of the combined power generation system. The main conclusions are as follows. Firstly, from the perspective of computational efficiency, the linear frequency domain method is optimal, followed by linear time domain, potential flow nonlinearity, and viscous method. From the perspective of computational accuracy, it is the opposite of the former. Secondly, considering the computational efficiency and precision, it is a feasible solution to study the potential flow theory considering viscosity correction. Thirdly, at present, model experiment method and optimal control technology are not mature and still in the exploratory stage.

Key words offshore wind energy, wave energy, wind-wave combined power generation system, hydrodynamics, optimal control

引 言

海洋可再生能源, 主要包括海上风能、波浪能和潮流能, 具有远大的开发前景^[1]. 图 1 ~图 3 分别给出了各装置代表图, 图 1 为西门子 Gemasa 海上风机装置图, 图 2 为 Power Buoy 波浪能装置图, 图 3 为 SeaGen 型 1.2 MW 潮流能发电装置图. 近二十年来, 海洋可再生能源的开发利用受到了全球范围的高度重视. 党的“十九大”报告明确提出要提高海洋资源开发能力, 国家《可再生能源中长期发展规划》指出要积极推进海洋能开发利用技术, 这不仅有利于发展海洋经济、降低排放并改善环境, 而且对管控和建设远离大陆的海岛有重大的战略意义.

波浪能和潮流能与目前比较成熟的海上风能相比, 他们的转换和利用技术处于初步发展阶段, 但21世纪以来, 在节能减排意识的推动下进入了快速发展时期. 尽管发展程度不同, 海上风能和波浪能、潮流能所面临的海洋环境是大同小异的.

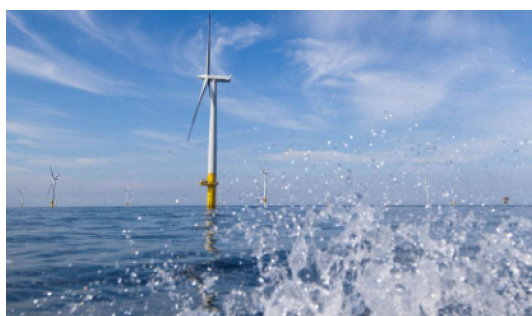


图1 西门子 Gemasa 海上风机^[2]

Fig. 1 Offshore wind turbine of siemens Gemasa^[2]



图2 Power Buoy 波浪能装置^[3]

Fig. 2 Power Buoy wave energy device^[3]



图3 SeaGen 型 1.2 MW 潮流能发电装置^[4]

Fig. 3 Sea Gen 1.2 MW tidal energy device^[4]

海洋可再生能源的开发需要有效利用各种自然资源, 且降低安装成本, 这使得多种能源的综合开发成为势在必行的趋势. 将新的装置安装在现有的支撑结构和传输基础上, 可以有效减少成本. 在和

海上风能结合方面,与潮流能相比,波浪能具有一定优势,比如风资源丰富的地点通常波浪资源也丰富.将波浪能装置与海上风机平台结合具有诸多好处^[5-6]:首先,因为二者共享海洋空间,所以可以提高单位海域的能量产出;其次,二者共享系泊系统、电力基础设施和其他组件,因此,可以提高整体的经济效率;第三,海上风电波动性、间歇性、不规则性强、稳定性差,波浪能相对风能更稳定,因此,二者联合发电系统与单独的风电系统相比,可以减少其不工作的小时数;此外,由于波浪能装置吸收了海上风机平台附近的波浪能,改变了局部波浪场,在布置合理的情况下能有效地保护风机免受强浪冲击.

海上风能和波浪能的综合利用尚处于初级阶段.现有的研究资料主要集中在对风能和波浪能的能源综合利用评估方面^[7-8]和传输电网的开发方面^[9].另外一些文献集中在风波结合装置设计方面^[10],如挪威远洋能源公司开发了一种轻量的三角形半潜浮式平台 W2Power,在平台上方安装两台相对转向的风机,并在平台三边下方悬吊多个点吸式波能装置,总发电功率可达 10 MW,其中风机功率 7 MW,波浪能装置功率 3 MW (图 4)^[11];丹麦波能机构开发的 Wave Star 将波浪能装置安装在呈星形三个方向放射的固定式风机基础上,通过摆臂式浮子的上下运动带动一内置发电机实现电能转换^[12] (图 5).诸多学者开展了海上浮式风机气动性能的理论 and 模型试验研究^[13-15].本文主要关注风浪联合发电系统的水动力数值方法、实验方法以及优化控制技术.

将波浪能装置与海上风机平台结合,涉及到多浮体水动力问题的诸多方面,举例来说,在数值模



图4 挪威的W2Power^[11]

Fig. 4 W2Power in Norway^[11]

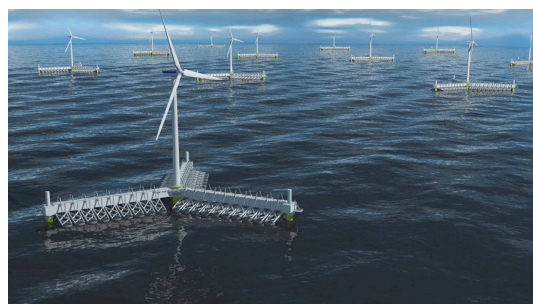


图5 丹麦的Wave Star^[12]

Fig. 5 Wave Star in Denmark^[12]

拟方面,主要可分为线性方法、势流非线性方法和黏性方法^[16],线性方法又可分为频域和时域方法.而实验方法也各不相同.为更能系统地研究风浪联合发电系统的力学特性,结合现有文献,本文将简要介绍各种数值方法的基本理论、适用范围,从计算效率和计算精度方面对各种数值方法的优缺点进行对比分析,给出综合性的建议,为联合发电系统的水动力设计提供依据.另一方面,本文简单地阐述了水动力控制优化的技术原理与实验方法面临的主要科研难点,进一步为联合发电系统的水动力设计提供支撑.

1 势流方法

1.1 线性频域方法

势流方法可简单分为势流线性频域方法、线性时域方法和非线性方法.线性势流方法是目前多浮体水动力学中应用最广泛的方法,多浮体与波浪相互作用的水动力模型广泛采用边界元方法.

线性势流理论假设流体无旋、无黏、且不可压缩.在此假设下,流体力学基本方程大大简化.在此基础上,线性势流理论通过假定波幅和结构物运动幅值都是小量的情况下,将非线性边界条件进行摄动展开,自由水面和物面边界条件分别在平均自由水面和平均物面上满足.其中频域方法求解的是周期稳态问题,所求解的物理量与时间无关,因此计算速度很快,适用于风浪联合发电系统的初始优化设计.

单浮体的频域运动方程如下^[17]

$$\left[-\omega^2 (\mathbf{M} + \mathbf{a}(\omega)) - i\omega (\mathbf{B} + \mathbf{b}(\omega)) + (\mathbf{K} + \mathbf{C}) \right] \mathbf{X}(\omega) = \mathbf{F}(\omega) \quad (1)$$

其中, ω 为波浪圆频率, $\mathbf{M}$ 为浮体质量矩阵, $\mathbf{a}(\omega)$ 为浮体附加质量矩阵, $\mathbf{b}(\omega)$ 为浮体辐射阻尼矩阵, $\mathbf{B}$, $\mathbf{K}$,

C 分别为阻尼矩阵、刚度矩阵和恢复力矩阵, $X(\omega)$ 为浮体位移, $F(\omega)$ 为浮体所受激振力。

由于线性频域方法较为成熟, 目前基于势流线性频域方法研究多浮体运动的方法较多, 如大多数水动力商业软件, WAMIT, AQWA 和 HydroSTAR 等。也有不少科研机构的分析, 比如, 勾莹^[18]采用高阶边界元方法, 利用快速多极子技术, 分别对频域里线性规则波与多个刚性浮体相互作用和弹性浮体相互作用产生的绕射和辐射问题进行了理论研究和数值模拟。Liu 等^[19]采用常数边界元法, 开发了多浮体水动力线性频域计算方法, 并形成了一个开源代码, 该频域程序采用了先进的格林函数计算方法和并行计算技巧, 因此计算效率和精度高。

同时, 线性频域方法也被广泛应用于波浪能装置与平台集成系统的优化设计。如 De Backer 等^[20]对垂荡式波浪能浮子与平台结合的两种布置方案进行了优化设计。Kelly 等^[21]提出32个振荡水柱式波浪能装置与漂浮式 V 型平台结合, 采用频域方法进行数值模拟, 并与实验结果进行了对比, 由于未考虑非线性以及黏性影响, 数值结果与实验结果差别较大, 尤其是在平台纵摇共振频率附近。Hyebin 等^[22]对垂荡式波浪能浮子与风机平台集成系统的多浮体耦合水动力特性进行了分析, 其中波浪能浮子部分采用了黏性修正, 研究了不同波浪频率、入射角度情况下浮子对平台的运动影响, 以及浮子与平台的遮蔽效应。Zhang 等^[23]提出大型模块化浮式平台, 由铰链连接的多个平台模块和嵌入式的多个波浪能装置组成, 开展了该系统的优化分析, 研究表明嵌入式波浪能装置可以减小平台的运动, 并得到了最优的刚度和阻尼系数的组合。

1.2 线性时域方法

频域方法只适用于计算周期稳态问题, 无法处理瞬变问题, 在应用上受到很多限制。而时域分析方法考虑了时间项的影响, 可以对结构物的运动响应进行实时预报, 在应用上具有很大的自由度。

时域方法分为直接时域和间接时域方法, 由于直接时域方法计算量相对较大, 目前大部分的多浮体运动响应分析都是通过间接时域方法求得, 即对频域下附加质量、辐射阻尼和激振力进行傅氏变换, 求得时域下的附加质量、迟滞函数和波浪作用力, 在时域内建立多浮体结构运动响应的数值模型, 求得结构的时域运动方程得到结构物的运动响应。该方法计算简便快捷, 目前, 绝大多数的水动力

商业软件中的时域方法都是基于该方法, 如 WAMIT, AQWA, HydroSTAR, SEASAM 等软件, 并受到广泛应用。

浮体的时域运动方程通过对式(1)做逆傅里叶变换得到^[17]

$$(M + a(\infty)) \ddot{X}(t) + \int_0^t k(t - \tau) \dot{X}(\tau) d\tau + B\dot{X}(t) + (K + C)X(t) = F(t) \quad (2)$$

其中, $a(\infty)$ 为无穷频率下的附加质量, $k(t)$ 为辐射脉冲响应方程。

以上公式用于将频域计算结果转化为时域结果。应用这种方法的主要计算量体现在卷积项上, 直接计算的话会占用相当可观的计算资源。由于卷积项是线性的, 因此可以用另外的线性定常系统代替, 如用转换方程和状态空间系统^[24]。应用状态空间系统替代时, 主要在时域上对卷积项和频域上的对应项进行近似。Babarit 等^[25]提出一种时域方法, 可应用于多个浮体, 并和实验结果吻合良好。

利用间接时域方法, O'Cathain^[26]求解牛顿欧拉方程, 模拟了铰接驳式的波浪能装置的运动响应。唐友刚等^[27]建立筏式波浪发电装置多浮体水动力模型, 利用软件 AQWA 研究多浮体水动力相互作用对发电装置浮体单元水动力系数的影响。多种不同形式的波浪能装置被提出与海上风机平台结合, 实现多能源互补。如美国 Banister 等在 WindFloat 半潜式平台的基础上, 通过加入不同形式的波浪能装置(振荡水柱式^[28]、振荡浮子式^[29]和悬挂摆式^[30]波能装置), 设计出3种新颖的风浪能混合利用系统。Muliawan 等^[31]使用 SIMO/TDHMILI3D 线性时域软件, 研究了 Spar 式风机平台与垂荡式波浪能浮子组成形成的 STC 装置, 在不规则波作用下, 波浪能浮子对平台运动和系泊受力的影响。Wan 等^[32-33]对此装置在生存海况下(风机和波浪能装置都停止工作)的两种状态进行数值和实验研究, 即 Spar 平台和浮子在原静水面上一同运动、Spar 平台和浮子下沉一定深度后一起运动, 研究表明, 对于状态 II, 由于非线性较小, 线性时域结果与实验结果吻合良好, 对于状态 I, 由于出现波浪抨击等强非线性现象, 线性时域结果与实验结果存在差别。Michailides 等^[34-35]开发的 SFC 概念, 将半潜风机平台和 3 个摆式波能装置结合, 文中将线性时域方法与试验结果进行了对比分析。Li 等^[36]提出 Spar 风机平台与波浪能、潮流能集成系统, 通过研究表明, 波浪能和潮流能装置的

增加使得风机平台纵荡与纵摇方向运动减小, 同时使总功率提高 45%。

通常情况下, 线性势流理论假设下的边界元方法可以很好地应用到较平静的海况下, 与实验结果和黏性方法结果也有较好的吻合, 但当海浪较大或极限海况情况下, 泄涡等现象发生, 线性假设遭到严重破坏, 计算结果出现较大偏差。与线性频域方法相比, 虽然线性时域方法可以处理瞬态问题, 但线性理论始终仅适用于波浪波幅和物体的运动尺度相对于物体的特征尺度或波长较小时, 当超过此范围时将不再适用。此时, 需要考虑非线性数值方法。

基于线性势流理论的边界元方法的最大优势是其计算速度。与黏性方法相比, 边界元方法要快出许多倍。然而当浮体数量增多时, 边界元方法所需的计算资源也急剧增加。因此, 当平台上装载的波浪能浮子较多时, 计算时间和内存需求会迅速增加, 此时需要采用一些快速计算方法, 如快速多极子^[18]、快速傅里叶变换^[37]等方法加速计算。

1.3 势流非线性方法

势流非线性方法的边界条件在瞬时水面和物面上满足, 因此, 每一时刻都要实时更新自由水面和物面网格, 与上述线性方法比, 计算量和内存要求大大增加。

单浮体的刚体运动方程为^[17]

$$M\ddot{X}(t) + B\dot{X}(t) + KX(t) = F_L(t) + F_G \quad (3)$$

其中, $F_L(t)$ 为流体作用力, F_G 为物体的重力, 流体的恢复力已包含在 $F_L(t)$ 中。

目前基于势流非线性理论研究多浮体运动响应的文献较少。Ma 和 Yan^[38]利用准静态有限元法模拟了单色波和双色波与 Spar 平台、单色波与一个和两个 Wigely 船的耦合运动问题。Shivaji 和 Sen^[39]研究了 FPSO 与 Shuttle 浮体间不同连接条件下浮体间的相对运动。Feng 和 Bai^[40]采用高阶边界元方法建立了波浪与漂浮双浮体作用的开敞水域全非线性数值模型, 解决了多浮体非线性波浪力的准确计算和运动方程的解耦问题。Wan 等^[41]采用非线性势流方法结合黏性修正阻尼力的方法模拟了 STC 装置在生存海况下的出入水问题, 与实验结果吻合良好。

大多数关于三维完全非线性数值模型的应用仅限于单浮体, Bai 和 Eatock Taylor^[42]利用高阶边界元方法结合分区技术对规则波与漂浮均匀圆柱和变截面圆柱的相互作用问题进行了模拟研究; Zhou

等^[43-44]基于高阶边界元法, 采用入散射波分离技术, 建立了开敞水域波浪与单浮体完全非线性作用的三维数值模型, 并模拟了倒圆台、张力腿平台的高频共振问题。

应用势流非线性方法计算多浮体运动问题时, 随着网格数量的增加, 对计算资源的要求急剧增加。因此, 该方法多用于计算大风大浪等极限海况下海工建筑物的响应和所受载荷。对于风浪联合发电系统, 目前尚未有应用势流非线性方法进行模拟的。

2 黏流方法

浮体在真实海洋环境中运动时, 存在黏性摩擦、湍流、边界层分离等黏性效应。在风浪联合发电系统中, 波浪能装置, 尤其是振荡浮子式波浪能装置, 属于小尺度物体, 并且通常在共振频率下共振, 流体黏性对其运动和功率影响较大, 不可忽略。因此, 需要采用考虑黏性的数值理论来研究。

从实际角度出发, 求解 N-S 方程有两种方法。第一种直接数值模拟 (DNS) 精确求解湍流, 第二种则通过雷诺时均 (RANS) 或大涡模拟 (LES) 等模型近似求解。对于由风机平台和波浪能装置组成的多浮体系统对计算量要求很高, 因此第二种方法更加适合。基于有限元法和有限体积法成为了主要手段。

与之前提到的势流方法不同, 黏性方法充分考虑黏性和气液两相的影响。这使其成为模拟大风大浪极限海况的有力方法。另外黏性方法保持了完全非线性。黏性方法的另一个优势是可以描述气流的运动, 在近岸环境下, 气流对设备运动的影响通常较大。黏性方法求解单浮体的刚体运动方程与势流非线性方法相同, 参见式 (3)。

随着计算机技术的发展, 黏性方法已被用于研究波浪与多浮体系统的相互作用, 可考虑多浮体共振时的黏性效应。Sauder 等^[45]通过 OpenFOAM 软件对底部固定的海上终端与旁靠系泊的 LNG 运输船间距内部的水体共振现象进行模拟。Yu 和 Li^[46]利用基于 RANS 的 Star-CCM 软件, 研究了一种双体点吸式波浪装置的水动力学特性。McComb 和 Lawson^[47]结合边界元法和黏性方法, 形成了一种计及黏性效应并可用于任意几何形状的多浮体系统的数值计算工具, 并针对一种双体点吸式波浪能装置进行了研究。Ren 等^[48]利用 $k-\varepsilon$ 湍流模型对风浪同时作用下 TLP 5 MW 风机平台在工作工况和极端海况下进行了数值模拟, 并与实验结果吻合较好。Shi 等^[49]通过 Flow-

3D 软件对垂荡式圆锥底波浪能装置的水动力性能进行优化设计,并与实验结果吻合良好. Zhang 等^[50]通过Star-CCM+软件对兼作振荡浮子式波浪能发电装置的浮式防波堤的防波性能和发电性能进行了研究.

目前黏性方法的最大劣势在于对计算要求太高,尤其是对于风浪联合发电系统,当波浪能装置个数增加时,网格数量增加,计算效率急剧降低.因此,通常应用黏性方法分析极限海况下(大风大浪)风浪联合发电系统的生存能力.

3 实验与优化控制

波浪能实验技术目前比较成熟,主要在波浪水池中完成,如 Chen 等^[51]开展双共振点吸式波浪能装置的水动力实验; Xu 等^[52]开展了双浮体点吸式波浪能装置在正常工况和极端海况下的水动力实验. 物理模型均根据傅汝德数相似选取缩尺比.

海上风机实验主要在风浪流等多功能水池进行. 由于同时涉及到海上结构物的水动力和风机的气动力问题,使得物理模型实验面临诸多挑战^[53]. 近年来,针对海上风机,开展了一系列实验,但仍存在很多不足,始终处在探索阶段. Nielsen 等^[54]基于 1:47 缩尺比,在 Marintek 对 5 MW Spar 式漂浮式风机进行了水池模型试验. Cermelli 等^[55]在 WindFloat 平台的第一阶段进行了 1:67 缩尺比的模型试验. 由于傅汝德数缩尺比下雷诺数不匹配的影响,导致模型叶轮轴向推力值比目标值小,于是用圆盘来代替叶片以得到足够的叶轮推力. 这种方法只考虑了叶轮轴向推力,忽略了风机其他空气载荷的试验策略,为不匹配低雷诺数下的浮式风机水池模型试验提供了一个解决的参考方法. Shin^[56]在 Ocean Engineering Wide Tank 开展了 OC3-Hywind 浮式风机的 1:128 模型试验,并且使用了模型叶片,取代了前人使用的推力圆盘. 近来, University of Maine 开展了一系列基于 1:50 缩尺比的浮式风机水池模型试验,包括 Spar 型、半潜型和 TLP 型^[57-59]. Huijs 等^[60]在荷兰 MARIN 水池开展了 GustoMSC Tri-Floating concept 浮式风机 1:50 的模型试验,提出了在傅汝德缩尺的模型风速下具有更好的 C_t 和 C_p 空气动力性能的新模型叶片,且该试验中应用了控制并进行了相关阐述.

风浪联合发电装置实验与海上风机实验相同,主要在风浪流等多功能水池进行. 由于和海上风机模型实验面临的挑战相似,目前对风浪联合系统开

展的模型试验相对较少. 挪威科技大学提出了 STC (spar tours combination)^[33]、SFC (semisubmersible wind energy and flap-type wave energy converter)^[34-35] 风浪联合发电系统的概念,并在 MARINTEC 的拖曳水池中开展了缩尺比的模型试验,其中风机采用轴向推力相似的原则进行设计. 与海上风机模型实验相同,风浪联合发电系统中的风机模型需要根据雷诺数相似进行重新设计,或者采用其他新型的实验技术解决傅汝德数和雷诺数不匹配的问题.

联合发电系统的优化与控制对提高波浪能装置浮体水动力的能量转化效率起着决定性的作用,特别是在不规则变化的风浪环境中. 同时,浮体对波浪能的有效吸收及拦截将大大减少周边海上风机的水动力载荷. 浮体控制的基本工作原理如下. 发电系统中的波浪能动力输出装置在转化波浪能为电能的同时,对与其耦合的浮体施加了一个作用力(控制力),以协调浮体的动态响应. 为了使浮体更有效地吸收入射波中携带的能量,浮体应在控制力的协调下产生特定理想运动,以拦截入射波的传播. 据 Falnes^[61]基于线性势流理论的推导,浮体的特定理想运动需满足两个基本条件以达到能量吸收最大化: (1) 浮体的速度需与入射波对浮体施加的压力成相同的振荡相位,这意味着浮体与入射波形成共振; (2) 浮体振荡产生的顺流辐射波与入射波所抵消.

在实时变化的风浪环境下,以上最优能量吸收控制理论在实际控制系统中的实现面临着以下科研挑战: (1) 为使浮体与频率实时改变的入射波形成共振,波能动力输出装置需实现“反应式控制”,从而兼具发电机与驱动器的功能,这将大大提高装置的制造难度及成本^[61]; (2) 出于不规则波的随机变化特性,入射波对浮体的施力情况需要进行预测^[62]. 其预测结果的精度对控制效果有着直接影响^[63]; (3) 此控制理论基于线性水动力模型,对高海况下的非线性模型并不适用^[62]; (4) 浮体需要在至少两个自由度下振动(垂荡+纵荡或纵摇),才能更有效地吸收入射波能^[64]. 在多浮体情况下(常见于风浪联合发电系统阵列),所需控制的自由度成倍数增长且相互耦合,这将大大增加控制系统的复杂性及造价^[61].

基于以上诸多技术难点,现阶段更具应用潜力的科研方向为更实现为简单有效的次优控制^[65]. 以控制方式为例,“被动控制”系统比“反应式控制”受到业绩学者更为广泛的关注^[62]. “被动控制”系统又可分为“相位控制”与“被动载荷”. “相位控制”旨在强制

浮体系统与入射波形成共振，通常由机械制动系统实现，其在理想状态下能量转化效率接近“反应式控制”的效率。然而“相位控制”的非线性特征及控制鲁棒性需要进行更深入的研究认证，以实现更高的应用价值^[66]。另一方面，“被动载荷”只考虑发电装置与水动力阻抗的实时匹配，在机理上简单可靠容易实现。然后，“被动载荷”的发电效率与对浮体的可控性远低于“反应式控制”与“相位控制”，这很大程度上限制了其应用价值^[62]。

4 讨论

4.1 水动力数值方法对比分析

通过以上各种数值方法的对比分析，可以看出，针对不同的问题，应结合计算效率和计算精度，选用不同的数值计算方法。表1中给出了4种不同数值计算方法在计算效率和计算精度上的对比，等级越高(星号越多)，表示计算效率越高、计算精度越高。从计算时间上来说，线性频域方法计算效率最高，但只适用于稳态问题；其次是线性时域方法，适用于瞬态问题，若计算同样的稳态问题，计算精度与频域方法相同，若计算瞬态问题，计算精度更高；势流非线性方法由于每一时刻需要在瞬时面上重新建立矩阵方程并求解，因此，计算效率远低于前两者，但由于考虑到物面和自由水面的非线性，对于非线性较强(极端海况)的问题，计算精度更高；黏性方法同时考虑了非线性和黏性的影响，因此计算效率最低，但计算精度最高。

需要根据问题不同来选择不同的数值模型。若考虑正常工况下，风浪联合系统的优化设计问题，可采用线性频域方法。若考虑非稳态情况下的优化设计问题，需要采用线性时域方法，如非定常风、瞬态波等情况。对于线性频域和时域方法，当浮体个数较多时，需考虑采用加速算法。当波浪波幅和物体的运动尺度响度与物体的特征尺度或波长相比较非小量时，线性理论不再适用，需要采用势流非线性方法进行计算，如大风大浪等极限海况。

势流理论忽略了流体的黏性，当流体黏性较重要，如求解小尺度物体(振荡浮子式波浪能装置)时，需要采用黏性方法进行计算。虽然黏性方法计算精度高，但由于其计算效率很低，尤其对于风浪联合系统这类网格数量很多的问题，只有当计算极端海况、流体黏性特别重要的算例时，才采用黏性方法直接计算。综合考虑计算效率和计算精度，采用考虑黏

性修正的势流理论来研究是一个切实可行的方案，其中黏性修正需要通过黏性方法或者实验结果得到^[67]。

表1 不同水动力数值方法对比表
Table 1 Comparison of different hydrodynamic numerical methods

Numerical methods	Time unit of measurement	Calculation efficiency	Calculation accuracy
linear frequency-domain	second	*****	*
linear time-domain	minute	***	**
nonlinear potential	day	**	***
viscous method	week	*	*****

4.2 优化控制的可能性及挑战

优化控制技术对提高联合发电系统的水动力性能尤为关键。最优能量吸收理论的实现面临着诸多技术难点，不论是对控制硬件或是对控制算法的要求。因此优化控制方法受到业界学者更为广泛的关注。控制是一个极为复杂的研究课题，在本文中不做详述，旨在让读者了解控制方法对联合发电系统水动力设计优化的支撑作用。

4.3 实验方法探索

物理模型实验是验证数值模型准确性和检验装置可靠性的重要手段。但风浪联合发电系统由于同时涉及到结构物的水动力以及风机的气动力，使得物理模型实验面临诸多挑战。模型实验的相似比选取对结果的影响较大，海洋平台和波浪能装置采用傅汝德数相似选取模型缩尺比，风机需要根据雷诺数相似来选取风机尺寸，但实验中很难满足。由于傅汝德数缩尺下雷诺数不匹配的影响，模型试验不能很好的反映真实海况中联合发电系统的特性，目前这方面的实验技术还不成熟，仍处在探索阶段，需要进一步寻找新型的实验方法解决上述问题。

参 考 文 献

1 Bahaj AS. Generating electricity from the oceans. *Renewable Sustainable Energy Review*, 2011, 15(7): 3399-3416
2 <https://www.siemensgamesa.com/en-int>
3 Edwards KA, Mekhiche M. Ocean power technologies powerbuoy: System-level design. *Development and Validation Methodology*, 2014
4 <http://www.seageneration.co.uk/>

- 5 Astariz S, Perez-collazo C, Abanades J, et al. Co-located wave-wind farms: Economic assessment as a function of layout. *Renewable Energy*, 2015, 83: 837-849
- 6 Cradden L, Kalogeri C, Barrios IM, et al. Multi-criteria site selection for offshore renewable energy platforms. *Renewable Energy*, 2016, 87: 791-806
- 7 Veigas M, Iglesias G. Wave and offshore wind potential for the island of Tenerife. *Energy Conversion and Management*, 2013, 76: 738-745
- 8 Veigas M, Iglesias G. A hybrid wave-wind offshore farm for an island. *International Journal of Green Energy*, 2014, 12: 570-576
- 9 Stoutenburg ED, Jenkins N, Jacobson MZ. Power output variations of collocated offshore wind turbines and wave energy converters in California. *Renewable Energy*, 2010, 35(12): 2781-2791
- 10 Pérez-Collazo C, Greaves D, Iglesias G. A review of combined wave and offshore wind energy. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2015, 42(42): 141-153
- 11 Pelagic Power AS. W2Power web Page. 2011
- 12 Wave Star AS. Wave Star energy web page. Wave Star AS, 2012
- 13 陈嘉豪, 胡志强. 半潜式海上浮式风机气动阻尼特性研究. *力学学报*, 2019, 51(4): 1255-1265 (Chen Jiahao, Hu Zhiqiang. Study on aerodynamic damping of semi-submersible floating wind turbines. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2019, 51(4): 1255-1265 (in Chinese))
- 14 李国强, 张卫国, 陈立等. 风力机叶片翼型动态试验技术研究. *力学学报*, 2018, 50(4): 751-765 (Li Guoqiang, Zhang Weiguo, Chen Li, et al. Research on dynamic test technology for wind turbine blade airfoil. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2018, 50(4): 751-765 (in Chinese))
- 15 刘利琴, 郭颖, 赵海洋等. 浮式垂直轴风机的动力学建模、仿真与实验研究. *力学学报*, 2017, 49(2): 299-307 (Liu Liqin, Guo Ying, Zhao Haixiang, et al. Dynamic modeling, simulation and model tests research on the floating VAWT. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2017, 49(2): 299-307 (in Chinese))
- 16 许鑫, 杨建民, 李欣等. 海洋工程中多浮体系统的水动力研究综述. *中国海洋平台*, 2014, 29(4): 1-9 (Xu Xing, Yang Jianmin, Li Xin, et al. Review of the research on multi-body system hydrodynamics. *China Offshore Platform*, 2014, 29(4): 1-9 (in Chinese))
- 17 李玉成, 滕斌. 波浪对海上建筑物的作用. 北京: 海洋出版社, 2002 (Li Yucheng, Teng Bin. *Wave Action on Marine Structures*. Beijing: China Ocean Press, 2002 (in Chinese))
- 18 勾莹. 快速多极子方法在多浮体和水弹性问题中的应用. [博士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2006 (Gou Ying. The fast multipole method and its application to the multiple floating bodies and hydroelasticity. [PhD Thesis]. Dalian: Dalian University of Technology, 2006 (in Chinese))
- 19 Liu YY, Yoshida S, Hu CH, et al. A reliable open-source package for performance evaluation of floating renewable energy systems in coastal and offshore regions. *Energy Conversion and Management*, 2018, 174: 516-536
- 20 De Backer G, Vantorre M, Beels C, et al. Power absorption by closely spaced point absorbers in constrained conditions. *IET Renewable Power Generation*, 2010, 4(6): 579-591
- 21 Kelly T, Dooley T, Campbell J, et al. Comparison of the experimental and numerical results of modelling a 32-oscillating water column (OWC), V-shaped floating wave energy converter. *Energies*, 2013, 6: 4045-4077
- 22 Hyebin L, Sunny P, Yoon B. Performance analysis of multiple wave energy converters placed on a floating platform in the frequency domain. *Energies*, 2018, 11(2): 406
- 23 Zhang HC, Xu DL, Zhao H, et al. Energy extraction of wave energy converters embedded in a super-scale modularized floating platform. *Energy*, 2018, 158: 317-329
- 24 Taghipour R, Perez T, Moan T. Hybrid frequency-time domain models for dynamic response analysis of marine structures. *Ocean Engineering*, 2008, 35(7): 685-705
- 25 Babarit A, Mouslim H, Clément A, et al. On the numerical modelling of the nonlinear behaviour of a wave energy converter//28th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, Hawaii, USA, 2009
- 26 O'Cathain M, Leira BJ, Ringwood JV, et al. A modelling methodology for multi-body systems with application to wave-energy devices. *Ocean Engineering*, 2008, 35: 1381-1387
- 27 唐友刚, 赵青, 黄印等. 筏式波浪能发电装置浮体水动力相互作用与能量俘获研究. *海洋技术学报*, 2016, 35(4): 87-92 (Tang Yougang, Zhao Qing, Huang Yin, et al. Study on hydrodynamic interaction and energy capture for raft wave energy converter. *Ocean Technology*, 2016, 35(4): 87-92 (in Chinese))
- 28 Peiffer A, Roddier D, Aubault A. Design of a point absorber inside the WindFloat structure//30nd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, Rotterdam, The Netherlands, June 19-24, 2011
- 29 Aubault A, Alves M, Sarmiento A, et al. Modeling of an oscillating water column on the floating foundation WindFloat//30nd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, Rotterdam, The Netherlands, June 19-24, 2011
- 30 Antoine P, Dominique R. Design of an oscillating wave surge converter on the windfloat structure//4th International Conference on Ocean Energy, Dublin, October 17, 2012
- 31 Muliawan MJ, Karimirad M, Moan T. Dynamic response and power performance of a combined spar-type floating wind turbine and coaxial floating wave energy converter. *Renewable Energy*, 2013, 50: 47-57
- 32 Wan L, Gao Z, Moan T. Experimental and numerical study of hydrodynamic responses of a combined wind and wave energy converter concept in survival modes. *Coastal Engineering*, 2015, 104: 151-169
- 33 Wan L, Gao Z, Moan T, et al. Comparative experimental study of the survivability of a combined wind and wave energy converter in two testing facilities. *Ocean Engineering*, 2016, 111: 82-94
- 34 Michailides C, Gao Z, Moan T. Experimental study of the functionality of a semisubmersible wind turbine combined with flap-type wave energy converters. *Renewable Energy*, 2016, 93: 675-690
- 35 Michailides C, Gao Z, Moan T. Experimental and numerical study of the response of the offshore combined wind/wave energy concept SFC in extreme environmental conditions. *Marine Structures*, 2016, 50: 35-54
- 36 Li L, Gao Y, Yuan ZM, et al. Dynamic response and power production of a floating integrated wind, wave and tidal energy system. *Renewable Energy*, 2018: 412-422

- 37 姜胜超. 波浪作用下船舶运动与液舱内流体晃荡的耦合数值分析. [博士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2013 (Jiang Shengchao. Numerical simulation on coupled effect between ship motion and liquid sloshing under wave action. [PhD Thesis]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013 (in Chinese))
- 38 Ma QW, Yan S. QALE-FEM numerical modeling of non-linear interaction between 3D moored floating bodies and steep waves. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 2009, 78: 713-756
- 39 Shivaji GT, Sen D. Time domain simulation of side-by-side floating bodies using a 3D numerical wave tank approach. *Applied Ocean Research*, 2016, 58: 189-217
- 40 Feng XY, Bai W. Hydrodynamic analysis of marine multibody systems by a nonlinear coupled model. *Journal of Fluids and Structures*, 2017, 70: 72-101
- 41 Wan L, Greco M, Lugni C, et al. A combined wind and wave energy-converter concept in survival mode: Numerical and experimental study in regular waves with a focus on water entry and exit. *Applied Ocean Research*, 2017, 63: 200-216
- 42 Bai W, Eatock Taylor R. Fully nonlinear simulation of wave interaction with fixed and floating flares structures. *Ocean Engineering*, 2009, 36: 223-236
- 43 Zhou BZ, Wu GX, Teng B. Fully nonlinear wave interaction with freely floating non-wall-sided structures. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 2015, 50: 117-132
- 44 Zhou BZ, Wu GX. Resonance of a tension leg platform excited by third harmonic force in nonlinear regular waves. *Philosophical Transactions of the Royal Society A-Mathematical Physical and Engineering Sciences*, 2015, 373: 20140105
- 45 Sauder T, Kristiansen T, Ostman A. Validation of a numerical method for the study of piston-like oscillations between a ship and a terminal // Proceedings of the Twentieth International Offshore and Polar Engineering Conference, Beijing, China, June, 2010
- 46 Yu Y, Li Y. Reynolds-Averaged Navier-Stokes simulation of the heave performance of a two-body floating-point absorber wave energy system. *Computers & Fluids*, 2013, 73: 104-114
- 47 McComb C, Lawson M, Yu YH. Combining multi-body dynamics and potential flow simulation methods to model a wave energy converter // Proceedings of the 1st Marine Energy Technology Symposium, Washington, April 10-11, 2013
- 48 Ren NX, Li Y, Ou JP. Coupled wind-wave time domain analysis of floating offshore wind turbine based on Computational Fluid Dynamics method. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 2014, 6(2): 023106
- 49 Shi HD, Han Z, Zhao CY. Numerical study on the optimization design of the conical bottom heaving buoy convertor. *Ocean Engineering*, 2019, 173: 235-243
- 50 Zhang HM, Zhou BZ, Vogel C, et al. Hydrodynamic performance of a floating breakwater as an oscillating-buoy type wave energy converter. *Applied Energy*, 2020, 257: 113996
- 51 Chen ZF, Zhou BZ, Zhang L, et al. Experimental and numerical study on a novel dual-resonance wave energy converter with a built-in power take-off system. *Energy*, 2018, 165: 1008-1020
- 52 Xu QL, Li Y, Yu YH, et al. Experimental and numerical investigations of a two-body floating-point absorber wave energy converter in regular waves. *Journal of Fluids and Structures*, 2019, 102613
- 53 段磊, 李晔. 漂浮式海上大型风力机研究进展. 中国科学: 物理学力学天文学, 2016, 46(12): 124703 (Duan Lei, Li Ye. Progress of recent research and development in floating offshore wind turbines. *Sci Sin-Phs Mech Astron*, 2016, 46(12): 124703 (in Chinese))
- 54 Nielsen FG, Hanson TD, Skaare B. Integrated Dynamic Analysis of offshore floating wind turbines. Hydro Oil & Energy, Hamburg, Germany, 2006
- 55 Cermelli C, Aubault A, Roddier D, et al. Qualification of a semi-Submersible floating foundation for multi-Megawatt wind turbines. offshore technology Conference, Houston, USA, 2010
- 56 Shin H. Model test of the OC3-hywind floating offshore wind turbine // Proceedings of the Twenty-first International Offshore and Polar Engineering Conference, Maui, HI, USA, ISOPE, 2011: 361-367
- 57 Martin HR, Kimball RW, Viselli AM, et al. Methodology for wind/wave basin testing of offshore floating wind turbines // Proceedings of the ASME, 31st International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, Rio de Janeiro, Brazil, 2012
- 58 Koo B, Goupee AJ, Lambrakos K, et al. Model tests for a floating wind turbine on three different floaters // Proceedings of the ASME, 31st International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, Rio de Janeiro, Brazil, 2012
- 59 Goupee AJ, Koo B, Kimball RW, et al. Experimental Comparison of Three Floating Wind Turbine Concepts // Proceedings of the ASME, 31st International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, Rio de Janeiro, Brazil, 2012
- 60 Huijs F, de Ridder EJ, Savenije F. Comparison of model tests and coupled simulations for a semi-submersible floating wind turbine // Proceedings of the ASME, 33rd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, San Francisco, California, USA, 2014
- 61 Falnes J. Ocean Waves and Oscillating Systems: Linear Interactions Including Wave-Energy Extraction. Cambridge University Press, 2002
- 62 Ringwood JV, Bacelli G, Fusco F. Energy-maximizing control of wave-energy converters: The development of control system technology to optimize their operation. *IEEE Control Systems Magazine*, 2014, 34: 30-55
- 63 Fusco F, Ringwood JV. Short-term wave forecasting for real-time control of wave energy converters. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2010, 1: 99-106
- 64 Ding B, Sergiienko N, Meng F, et al. The application of modal analysis to the design of multi-mode point absorber wave energy converters. *Ocean Engineering*, 2019, 171: 603-618
- 65 Scruggs JT, Lattanzio SM, Taflanidis AA, et al. Optimal causal control of a wave energy converter in a random sea. *Applied Ocean Research*, 2013, 42: 1-15
- 66 Babarit A, Celement AH. Optimal latching control of a wave energy device in regular and irregular waves. *Applied Ocean Research*, 2006, 28: 77-91
- 67 Chen ZF, Zhou BZ, Zhang L, et al. Performance evaluation of a dual resonance wave-energy convertor in irregular waves. *Applied Ocean Research*, 2018, 77: 78-88