DOI：10.13245/j.hust.250218

30 MW漂浮式海上风机设计及动态响应分析

熊 智[1] 姜 萌[1] 夏文博[1] 施 伟[1,2,3] 柴 威[4] 李 昕[1,2,3]
(1．大连理工大学建设工程学部，辽宁 大连 116000；2．大连理工大学海岸与近海工程国家重点实验室，辽宁 大连 116000；3．大连理工大学宁波研究院，浙江 宁波 315016；4．武汉理工大学船海与能源动力工程学院，湖北 武汉 430063)

摘要 针对漂浮式多叶轮风机动态响应复杂、结构动力学特性研究不足的问题，为降低海上风电成本，提出30 MW超大型三叶轮漂浮式风机系统．以丹麦科技大学(DTU)30 MW三叶轮陆上风机为原型，结合参考UMaine VolturnUS-S(美国缅因大学开发的半潜式浮式平台)，按规范优化平台尺寸、压载及系泊参数；采用SESAM软件开展频域水动力分析与完整稳性验证，对6种典型工况进行风-浪-流耦合时域数值模拟，并与15 MW平台对比．结果表明：30 MW平台固有周期(垂荡27 s、纵摇37 s)符合挪威船级社(DNV)规范，幅值响应算子和一阶波浪力系数更优，动态响应幅值降低10%～20%，额定工况下发电功率显著提升，机舱加速度保持在0.3g以内，验证了该超大型三叶轮漂浮式风机的技术可行性．

关键词 漂浮式风机；半潜平台；耦合仿真；动态响应；水动力
中图分类号 TK8 **文献标志码** A **文章编号** 1671-4512(2026)10-0016-07

Design and dynamic response analysis of 30 MW floating offshore wind turbine

XIONG Zhi[1] *JIANG Meng*[1] *XIA Wenbo*[1] *SHI Wei*[1,2,3] *CHAI Wei*[4] *LI Xin*[1,2,3]
(1．Faculty of Infrastructure Engineering，Dalian University of Technology，Dalian 116000，Liaoning China；2．State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering，Dalian University of Technology，Dalian 116000，Liaoning China；3．Ningbo Institute of Dalian University of Technology，Ningbo 315016，Zhejiang China；4．School of Naval Architecture，Ocean and Energy Power Engineering，Wuhan University of Technology，Wuhan 430063，China)

Abstract To address the complex dynamic response of floating multi-rotor wind turbines and the insufficient research on their structural dynamic characteristics，and to reduce offshore wind power costs，a 30 MW ultra-large triple-rotor floating wind turbine system was proposed．Based on the prototype of the Technical University of Denmark (DTU) 30 MW triple-rotor onshore wind turbine and the configuration of the VolturnUS-S semi-submersible floating platform (independently developed by the University of Maine)，the platform dimensions，ballast conditions，and mooring system parameters were optimized in compliance with industry specifications．SESAM software was used for frequency-domain hydrodynamic analysis and intact stability verification．Wind-wave-current coupled time-domain numerical simulations were performed under 6 typical working conditions．Results show that the natural periods of the 30 MW platform (27 s for heave and 37 s for pitch) meet DNV specifications，delivering improved response amplitude operators and first-order wave force coefficients，with the dynamic response amplitude reduced by 10%～20%，with the dynamic response amplitude reduced by 10%～20%；the power generation is significantly improved under rated conditions，and the nacelle acceleration remains within 0.3g，verifying the technical feasibility of the ultra-large triple-rotor floating wind turbine．

Key words floating offshore wind turbine；semi-submersible；coupled simulation；dynamic response；hydrodynamics

在全球能源结构清洁化转型背景下，我国海上 风电资源丰富，作为实现"双碳"目标的关键手段[1]，

收稿日期 2025-05-13．
作者简介 熊 智(2000—)，男，硕士研究生；施 伟(通信作者)，教授，E-mail：weishi@dlut.edu.cn．
基金项目 国家自然科学基金资助项目(52371268)．

对推动能源绿色转型、促进经济发展和保障能源安全具有重要意义．漂浮式多叶轮风机通过多叶轮协同捕风，效率显著高于传统单叶轮机型．例如，Vestas 公司部署的 225 kW 四叶轮风机，尾流恢复更快，发电能力更强且更快达到额定功率[2]．Wang 等[3]的实验研究表明，双叶轮风机在相同风况下吸收风能的能力更出色．Chen 等[4]基于多种工况下的耦合仿真为漂浮双转子设计提供参考．然而，该类风机受多叶轮布局引发的载荷耦合、超大尺度导致的二阶波浪力激增等因素影响，风-浪-流联合动态响应远复杂于单叶轮风机．现有研究重功率轻结构动力学，制约了其安全应用与规模化．

此前，不少学者已在海上风电相关领域开展研究．Zeng 等[5]基于 ANSYS-Fluent 与 VOF 方法对比不同湍流/层流模型对波浪载荷和波面升高的预测效果．Wang 等[6]针对 10 MW 漂浮式风力机的钢质半潜式平台，提出系统设计流程和有效设计方法并提供内部应力数据；赵志新等[7]利用 OpenFast 全耦合模型，分析了 DTU 10 MW 与 NREL 5 MW 半潜漂浮式风机的动力响应差异．李寿图等[8]采用数值模型和正交实验，研究了双重翼型结构参数对直叶片垂直轴风力机大攻角下气动性能的影响．傅禹舜等[9]开展水池模型试验，揭示了聚焦波与 NREL 5 MW 单桩基础的相互作用规律．王燕等[10]采用大涡模拟与本征正交分解方法，研究不同大气稳定性对风力机尾流瞬态特性及结构演化的影响．郜志腾等[11]基于中尺度数值模式与风电场参数化模型，分析台风天气下沿海风电场风速、风向、风功率密度及湍动能的时空分布特征．刘一格等[12]通过建立更精准的尾流模型并优化控制策略，有效提升了风电场的输出功率．这些研究为海上风力机的设计优化、性能评估、结构安全分析及极端环境适应性等提供了重要支撑．

目前，针对漂浮式多叶轮风机在复杂海洋环境下的动态响应研究仍显不足．本研究以 DTU 30 MW 多叶轮风机为研究对象，重点分析非线性波浪载荷对其运动响应的影响，涵盖稳性、固有周期及频域水动力特性，并着重探讨额定作业海况下的时域响应与功率谱密度，以期为漂浮式多叶轮风机的优化设计与安全运行提供理论依据．

1　三叶轮漂浮式风机系统

1.1　参考风机及参考平台

本研究以三叶轮漂浮式风机系统为对象，其风机部分基于丹麦科技大学风能系提出的 DTU tri-rotor 30 MW[13]概念设计．该风机以 DTU 10 MW 参考风机[14]为基础，研究将其改造为漂浮式风机，下部支撑结构采用半潜式平台，其基础形式参考美国缅因大学的 UMaine VolturnUS-S 浮式平台[15]构型．

浮式平台设计参考了 DNV-OS-J103[16]等现行漂浮式风机平台设计参考标准．在将 15 MW 半潜浮式平台升级使其能够支撑 30 MW 风机的基础上，还须优化压载设计提供足够排水量并控制吃水深度．此外，漂浮式风机的稳定性面临重心升高及横倾力矩增加这两个主要的挑战．

风机平台升级初步设计常参考功率比例系数，但须综合考量稳定性、固有周期、结构强度、尺度及成本等复杂因素．初步设计后应迭代优化立柱间距、直径等关键参数，而非简单按比例放大．这种分阶段方法可在满足性能要求的同时，实现安全性、经济性与可靠性的平衡，后续通过结构分析和优化算法持续改进方案．图 1 展示了 30 MW 半潜漂浮式风机结构示意图，表 1 展示了 30 MW 和 15 MW 半潜漂浮式平台具体尺寸参数对比．

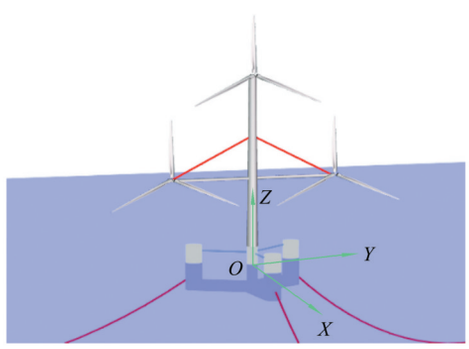


图 1　30 MW 半潜漂浮式风机示意图

表 1　30 MW 与 15 MW 半潜漂浮式风机平台参数

属性	15 MW	30 MW
内浮筒直径/m	5	10
内浮筒高度/m	35	70
外浮筒直径/m	6.25	12.50
外浮筒高度/m	35	70
底浮箱高度/m	7	14
底浮箱宽度/m	12.5	25.0
内外浮筒中心距/m	51.75	70.00
浮筒夹角/(°)	120	120

1.2　系泊

为适配升级后的半潜浮式平台，30 MW 漂浮式风机的系泊系统沿用 15 MW 半潜漂浮式风机的悬链线式系泊方式．该系泊系统采用 R3 无档锚链，系泊深度为 200 m；相较于 15 MW 机型，系泊线长

度由837.6 m增至1 000 m，直径由185 mm升级为245 mm，其未拉伸长度为966 m，轴向刚度达5 730 MN.

2　非耦合线性分析

漂浮式风机系统的动力学行为涉及结构、气动与水动力之间的非线性耦合，且实际运行中的风-浪-流载荷也具有显著非线性特征，因此须采用高保真非线性分析方法．本研究采用丹麦技术大学风能部门开发的HAWC2[17]软件进行数值模拟．该软件专为大型海上风机设计，可实现气动-水动-结构-伺服控制全耦合仿真，准确模拟运行过程中结构形变与气动载荷的耦合作用，其原理见图2．如图所示，入流风模型、水动荷载、土作为外部边界条件，分别通过气动、水动、土模型搭建HAWC2海上风机结构耦合模型．气动模型为转子、机舱、塔筒施加气动荷载，水动模型向支撑结构传递水动荷载，土模型输出基础土体荷载；转子与机舱的气动载荷进一步传递至传动系统，再输入控制系统的发电机与伺服系统．该系统具备双向耦合特性：伺服系统反向调控转子、机舱，传动系统也会对转子、机舱产生反向载荷作用，塔筒、支撑、基础等结构部件间同样存在载荷交互．在完成外部条件输入与各子模型建模后，可求解海上风机整机动态响应．

研究对30 MW与15 MW半潜漂浮式风机开展风机-塔筒-平台-系泊系统的耦合时域分析．空气动力学计算基于叶素动量理论(BEM)，并引入动态失速、偏斜入流等修正模型以提高精度；水动力载荷则通过势流理论或Morison方程计算．借助该全耦合仿真框架，本研究系统分析不同功率漂浮式风机在风浪联合载荷下的动态响应特性．

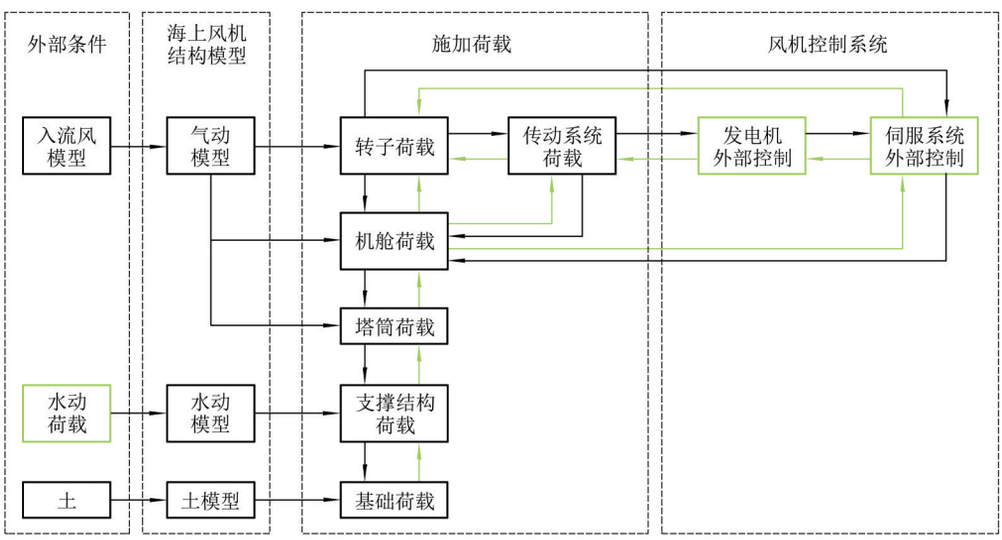


图2　HAWC2原理图

2.1　空气动力学

风机空气动力载荷可以根据叶素动量理论[18]进行计算．入流方向的速度为

$$V_{\mathrm{rel}}=\sqrt{(1-a)^2v_1^2+(\Omega r)^2(1+b)^2},\tag{1}$$

式中：a为轴向诱导因子；v_1为来流风速；b为切向诱导因子；Ω为旋转角速度；r为叶片根部与气动剖面之间的距离．入流角为

$$\phi=\arctan\frac{(1-a)v_1}{(1+b)(\Omega r)}.\tag{2}$$

叶片单元的升力$\mathrm{d}F_{\mathrm{L}}$和阻力$\mathrm{d}F_{\mathrm{d}}$计算表达式为

$$\mathrm{d}F_{\mathrm{L}}=\rho_{\mathrm{a}}V_{\mathrm{rel}}^2cC_{\mathrm{L}}\mathrm{d}r/2;\tag{3}$$

$$\mathrm{d}F_{\mathrm{d}}=\rho_{\mathrm{a}}V_{\mathrm{rel}}^2cC_{\mathrm{D}}\mathrm{d}r/2,\tag{4}$$

式中：ρ_{a}为空气密度；c为气动剖面的弦长；C_{L}为气动剖面的升力系数；C_{D}为气动剖面的阻力系数．推力$\mathrm{d}T$和力矩$\mathrm{d}Q$计算表达式为

$$\mathrm{d}T=\mathrm{d}F_{\mathrm{L}}\csc\phi+F_{\mathrm{d}}\sin\phi=\rho_{\mathrm{a}}V_{\mathrm{rel}}^2(C_{\mathrm{L}}\cos\phi+C_{\mathrm{D}}\sin\phi)c\mathrm{d}r/2;\tag{5}$$

$$\mathrm{d}Q=\mathrm{d}F_{\mathrm{L}}\csc\phi-F_{\mathrm{d}}\sin\phi=\rho_{\mathrm{a}}V_{\mathrm{rel}}^2(C_{\mathrm{L}}\sin\phi-C_{\mathrm{D}}\cos\phi)c\mathrm{d}r/2.\tag{6}$$

本研究不考虑不同风机之间的气动耦合关系，各风机建模只做简单叠加．

2.2　水动力学

在初步设计阶段，平台的水动力分析基于线性水动力学．辐射/衍射理论用于描述平台与波浪的相互作用；线性辐射/衍射理论用于求解流体域中的拉普拉斯方程，其解包括独立的速度势，代表入射、衍射和辐射波问题，这些问题在频率域中用频率相关的附加质量、阻尼和恢复系数表示．这些值

可以通过Cummins方程[19]计算时域模拟得到．以带系泊系统的单自由度系统为例，它的时域内运动方程可以写作

$$(M+\boldsymbol{A}_{\infty})\ddot{\vec{x}}(t)+\int_0^t \kappa(t-\tau)\dot{\vec{x}}(\tau)\mathrm{d}\tau+$$
$$\boldsymbol{C}\vec{x}(t)+\boldsymbol{K}(\vec{x}(t))=\vec{F}^{\mathrm{FK}}(t)+\vec{F}^{\mathrm{D}}(t)+$$
$$\vec{F}^{\mathrm{Aero}}(\vec{x}(\tau),\ \dot{\vec{x}}(t))+\vec{F}^{\mathrm{Drag}}(\dot{\vec{x}}(\tau),\ \ddot{\vec{x}}(t)),\qquad(7)$$

式中：M为附加质量；$\boldsymbol{A}_{\infty}$为无限频率处的附加质量矩阵；$\kappa(t-\tau)$为包括频率相关的附加质量和阻尼系数的滞后函数；$\boldsymbol{C}$为静水恢复矩阵；$\boldsymbol{K}(\vec{x}(t))$为由系泊系统贡献的非线性恢复矩阵；$\vec{F}^{\mathrm{FK}}$为Froude-Krylov力；$\vec{F}^{\mathrm{D}}$为散射力；$\vec{F}^{\mathrm{Aero}}$为作用在结构上的气动载荷；$\vec{F}^{\mathrm{Drag}}$为黏性阻尼力；$\vec{x}$为位移；$\dot{\vec{x}}(\tau)$为速度；$\ddot{\vec{x}}(t)$为加速度．

2.3　稳性

平台的完整稳性分析在SESAM中的HydroD模块进行，结果如图3所示．恢复力矩曲线和横倾力矩曲线有两个交点角，恢复力矩与横倾力矩在0°至第二交角范围内曲线下面积比为258%，大于标准要求的130%．该设计满足DNV对完整稳性的要求．

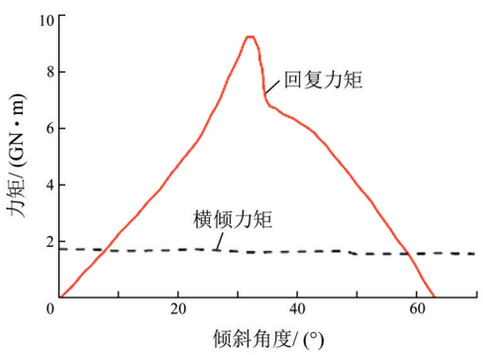


图3　稳性分析结果

2.4　设计工况

针对30 MW半潜漂浮式风机系统，开展六自由度运动响应的时域-频域耦合分析．风与波浪方向均设为0°，波浪谱采用Jonswap谱．风-浪联合荷载与风机结构的耦合通过HAWC2实现，结构黏性阻尼基于Sesam计算并分别拟合至两台风机的数值模型中．各工况模拟时长为4 600 s，为消除瞬态效应，时域与频域分析均剔除前1 000 s数据．时域模拟所用设计工况见表2，湍流风由Mann湍流风生成器生成．

表2中：LC1为规则波、定常风；LC2为不规则波、定常风；LC3为不规则波、湍流风；LC4为不规则波、湍流风；LC5为不规则波、湍流风；LC6为不规则波、湍流风．

表2　设计工况

计算工况	波高/m	周期/s	风速/(m·s^{-1})	湍流度
LC1	6.0	10.0	8.0	—
LC2	6.0	10.0	8.0	—
LC3	6.0	10.0	8.0	0.11
LC4	6.0	10.0	11.4	0.11
LC5	6.0	10.0	18.0	0.11
LC6	15.0	19.2	47.5	0.11

3　结果和讨论

3.1　固有周期

漂浮式风机系统的固有周期一般由自由衰减测试得到．测试结果表明：15 MW与30 MW漂浮式风机平台纵荡、横荡方向固有周期分别为143 s和114 s；垂荡方向固有周期分别为20 s和27 s；横摇、纵摇方向固有周期分别为28 s和37 s；艏摇方向固有周期分别为91 s和132 s．30 MW漂浮式风机在六自由度上的固有周期均满足DNV[20]规范要求，且普遍低于常见波浪周期范围．进一步的特征频率分析显示，塔筒F-A(顺风向)与S-S(横风向)方向的固有频率分别为0.265 Hz与0.276 Hz，介于风机0.1 Hz和0.3 Hz频率之间，且未与二者影响范围重叠．说明该半潜漂浮式风机的结构设计能够有效规避一阶波浪荷载、转子1倍旋转频率与转子3倍旋转频率效应诱发的结构共振风险．

3.2　频域水动力对比

幅值响应算子(RAOs)反映浮式平台在单位波浪力下的运动幅值，体现了平台抵抗波浪荷载的能力．图4展示了30 MW半潜浮式平台在0°波浪入射角下纵荡、垂荡与纵摇方向的RAO曲线．在纵荡方向上，30 MW平台的RAO峰值频率高于15 MW平台，且峰值更小．在频率低于0.035 Hz及0.045～0.080 Hz范围内，30 MW平台的RAO值大于15 MW平台；其余频率区间内则小于15 MW平台．在垂荡方向上，30 MW与15 MW平台的RAO均呈现双峰特征，且30 MW平台的两个峰值频率均低于15 MW平台．在频率低于0.04 Hz范围内，30 MW平台的RAO值高于15 MW平台；在其他频率范围内，其RAO值则普遍较低．在纵摇方向上，30 MW半潜浮式平台的RAO峰值频率低于15 MW平台．在频率小于0.035 Hz范围内，30 MW平台的RAO值较高；在其他频段内，其RAO值则普遍

较低.

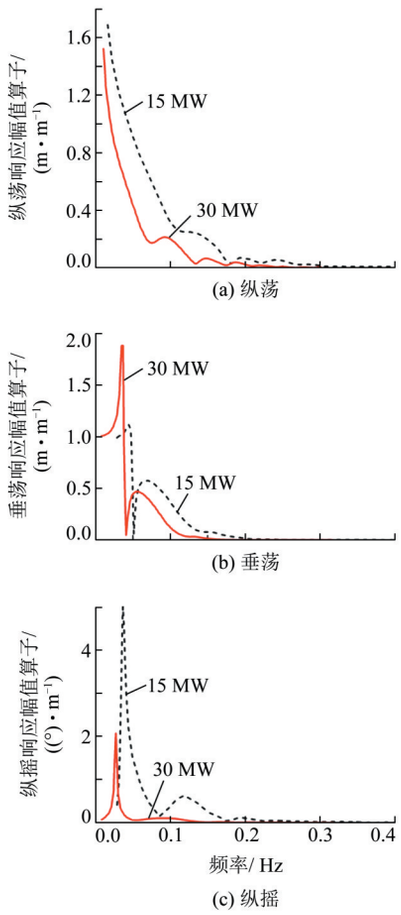


图4　15 MW和30 MW漂浮式风机幅值响应算子

总体而言，在运动响应方面，30 MW平台在纵荡、垂荡和纵摇三个自由度上的RAO更小，表现出更优的运动性能．这表明：在相同海况下，30 MW平台的波激运动幅值更小，具有更好的稳性表现．其主要是因为：**a**．30 MW风机相较15 MW风机结构尺寸与质量更大，因此受到更强的波浪激励力，但同时也增大了系统惯性，运动幅值因而减小；**b**．30 MW半潜浮式平台具有更优的水动力性能，通过优化结构形式与浮筒布局，其波浪荷载抵抗能力得到提升．

两平台一阶波浪力系数如图5所示．鉴于平台对称性，仅给出0°入射角下纵荡、垂荡与纵摇方向的一阶波浪力(矩)传递函数曲线．基于不同波浪方向的计算结果，可得如下结论．

a．在垂荡方向，一阶波浪力传递函数随波浪入射频率的增加而减小，随之又增大后减小，直至趋近于零．

b．在纵荡、纵摇方向，30 MW半潜浮式平台所受一阶波浪力(矩)的变化趋势较为相似，均在波浪高频下产生多个峰值．

c．各方向上，30 MW风机的波浪激励力均显著高于15 MW风机，主要源于其更大尺度．然而，它的纵荡与纵摇RAO值更低，反映出30 MW平台具有更优的水动力性能．

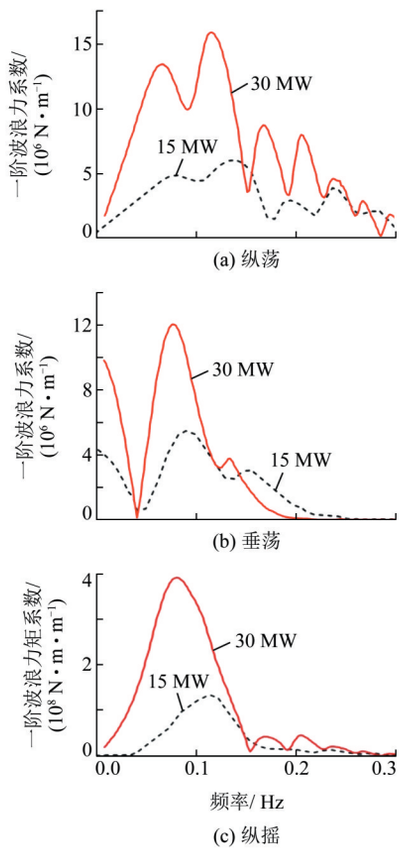


图5　15 MW和30 MW半潜浮式平台一阶波浪力(矩)系数

3.3　时域响应

表3展示了各工况下两漂浮式风机系统在平台纵荡、垂荡、纵摇三个自由度方向的统计值、发电功率的平均值及机舱水平方向加速度的最大值．平台纵荡运动响应值和系泊系统的等效刚度直接相关，从表中可以看到30 MW漂浮式风机在所有工况下的纵荡响应平均值和最大值均比15 MW漂浮式风机小，因为前者所配备的系泊线的轴向刚度更大且张紧程度更高．

对于垂荡响应，30 MW风机的垂荡响应平均值在各工况下均高于15 MW风机，主要是因为模型计入系泊系统后静吃水增加所致．在非极限工况下，两者垂荡响应平均值较为接近；而在极限工况下，30 MW风机垂荡响应平均值最大，这是由于该工况波浪频率0.052 Hz接近30 MW平台RAO峰值区．表明30 MW平台在极端波浪下的抗运动性能相对较低，但整体响应仍处于合理范围．

可从表3中看出：在考虑的六个工况中有五个工况下两风机系统的纵摇平均值及最大值是十分接

近的，其中在小于额定风速工况下，30 MW风机纵摇值略小．

从发电功率对比来看，30 MW风机的输出显著优于15 MW风机．尽管30 MW平台的C55系数远大于15 MW平台，但其三个叶轮所受总推力更大，且轮毂高度更高．各工况下，两风机的机舱水平加速度平均值均保持在0.3g以内，满足IEC[21]标准要求，处于安全运行范围内．

表3　15 MW和30 MW半潜浮式平台纵荡、垂荡、纵摇、发电功率、机舱加速度统计

时域响应	统计值	LC1		LC2		LC3		LC4		LC5		LC6	
		15 MW	30 MW	15 MW	30 MW	15 MW	30 MW	15 MW	30 MW	15 MW	30 MW	15 MW	30 MW
纵荡/m	最大值	15.44	6.97	16.05	7.12	17.47	7.46	23.91	10.77	17.15	7.18	27.68	14.42
	平均值	14.66	6.19	14.64	6.19	14.39	5.97	20.33	9.14	13.92	6.08	13.66	5.65
	标准差	0.66	0.47	0.48	0.3	1.24	0.66	1.42	0.7	1.28	0.46	6.08	3.34
垂荡/m	最大值	1.47	1.39	2.03	1.19	2.06	1.23	2.62	1.16	4.06	1.26	11.28	5.60
	平均值	0.40	0.62	0.45	0.62	0.45	0.63	0.52	0.58	0.43	0.63	0.20	0.79
	标准差	0.78	0.34	0.48	0.19	0.50	0.21	0.57	0.20	1.08	0.19	3.48	1.72
纵摇/(°)	最大值	2.97	2.36	3.36	2.48	3.35	2.69	6.15	3.67	3.49	2.40	6.10	4.79
	平均值	2.19	1.99	2.19	1.98	2.12	1.92	4.37	2.99	1.80	1.86	1.52	1.57
	标准差	0.54	0.24	0.32	0.14	0.46	0.23	0.52	0.25	0.47	0.19	1.03	1.03
平均发电功率/MW	平均值	6.86	12.6	6.79	12.6	6.66	12.30	15.50	29.70	15.46	31.65	0.27	—
机舱加速度/($m\cdot s^{-2}$)	最大值	0.47	0.79	1.04	1.25	1.28	1.31	1.83	1.17	1.70	1.13	1.85	1.48

4　结论

a．与15 MW平台相比，新设计的30 MW半潜浮式平台在幅值响应算子、一阶波浪力系数方面具有更好的水动力性能．

b．30 MW平台具有良好的完整稳性，其六自由度固有周期符合相关规范．

c．在考虑的6个工况下，30 MW半潜漂浮风机的运动响应值均在合理范围内且普遍小于15 MW风机，30 MW平台具有良好的运行和生存性能．

本研究针对30MW的漂浮式平台进行了初步设计，满足周期、稳性、运动响应等要求，下一步将针对典型海洋环境，开展平台的优化设计，在满足规范要求的基础上，进一步优化平台尺寸，为工程设计提供参考．

参　考　文　献

[1] 中共中央国务院．关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见[EB/OL]．[2025-03-25]．https://www.gov.cn/zhengce/2021-10/24/content_5644613.htm．

[2] VAN DER LAAN M P，ANDERSEN S J，RAMOS GARCÍA N，et al．Power curve and wake analyses of the Vestas multi-rotor demonstrator[J]．Wind Energy Science，2019，4(2)：251-271．

[3] WANG Z Y，TIAN W，OZBAY A，et al．An experimental study on the aeromechanics and wake characteristics of a novel twin-rotor wind turbine in a turbulent boundary layer flow[J]．Experiments in Fluids，2016，57(9)：150．

[4] CHEN S Q，WANG K，WEN Y H，et al．Fully coupled dynamic analysis of novel floating dual-rotor wind turbines[J]．Physics of Fluids，2025，37：017114．

[5] ZENG X M，SHI W，MICHAILIDES C，et al．Comparative experimental and numerical study of wave loads on a monopile structure using different turbulence models[J]．China Ocean Engineering，2021，35(4)：554-565．

[6] WANG S S，XING Y H，BALAKRISHNA R，et al．Design，local structural stress，and global dynamic response analysis of a steel semi-submersible hull for a 10 MW floating wind turbine[J]．Engineering Structures，2023，291：116474．

[7] 赵志新，李昕，王文华，等．超大型和大型半潜浮式海上风力机动力响应对比[J]．海洋工程，2020，38(2)：101-110．

[8] 李寿图，何坤雲，岳念西，等．双层翼型直叶片垂直轴风力机动态气动特性研究[J]．华中科技大学学报(自然科学版)，2024，52(7)：145-150．

[9] 傅禹舜，施伟，张松浩，等．强非线性波作用下海上

风机动力特性模型试验研究[J]. 南方能源建设，2023，10(4)：11-17.

[10] 王燕，周永泽，柴永奋，等. 大气稳定性对风力机尾流影响的大涡模拟研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版)，2023，51(11)：165-172.

[11] 郜志腾，张军，李岳，等. 极端天气对风电场局地风环境的影响[J]. 华中科技大学学报(自然科学版)，2024，52(7)：106-112.

[12] 刘一格，赵振宙，刘岩，等. 考虑尾流二次偏转效应的串列风力机尾流优化[J]. 华中科技大学学报(自然科学版)，2025，53(10)：126-132.

[13] HAWC2. DTU 30 MW tri-rotor wind turbine[EB/OL]. [2025-03-25]. http://www. hawc2. dk/download/hawc2-model.

[14] BAK C，ZAHLE F，BITSCHE R，et al. The DTU 10 MW reference wind turbine[EB/OL]. [2025-03-25]. https://backend. orbit. dtu. dk/ws/portalfiles/portal/556-45274/The_DTU_10 MW_Reference_Turbine_Christian_Bak.pdf.

[15] ALLEN C K，VISCELLI A，DAGHER H J，et al. Definition of the UMaine VolturnUS-S reference platform developed for the IEA wind 15-megawatt offshore reference wind turbine，NREL/TP 5000-76773 [R]. Golden：National Renewable Energy Laboratory，2020

[16] DNV. DNV—OS J103—2013 Design of floating wind turbine structures[S]. Høvik： Det Norske Veritas，2013.

[17] LARSEN T J，HANSEN A M. How 2 HAWC2，the user's manual， Risoe-R-1597[R]. Roskilde： Technical University of Denmark，2007.

[18] MANWELL J F， MCGOWAN J G， ROGERS A L. Wind energy explained：theory，design and application [M]. Chichester：Wiley，2009.

[19] CUMMINS W E. The impulse response function and ship motions[C]// Proc of the Conference on Naval Hydrodynamics. Washington： Naval Studies Board，2010：1-18.

[20] DNVGL. DNVGL—RP—C205—2014 Environmental conditions and environmental loads[S]. Høvik：Det Norske Veritas Germanischer Lloyd，2014.

[21] International Electrotechnical Commission. IEC 61400—3—2—2025 Wind energy generation systems，part 3-2：design requirements for floating offshore wind turbines [S]. Geneva： International Electrotechnical Commission，2025.