

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2025.01.013

海上浮式风机纵摇及其抑制研究进展

张继生,王军磊,李浩然,王芳宇

(河海大学港口海岸与近海工程学院,江苏 南京 210098)

摘要:梳理了风浪荷载单独作用与联合作用下浮式风机的纵摇响应规律,总结了调谐质量阻尼器、波浪能利用装置以及船用减摇设备等外加阻尼装置对浮式风机的减摇效果,揭示了不同减摇措施的作用机理,指出了各装置未来在控制策略、布置形式以及应用对象等研究中仍需要解决的问题。

关键词:浮式风机;纵摇;减摇;调谐质量阻尼器;波浪能利用装置;船用减摇设备

中图分类号:TV139.2;TM315 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-1980(2025)01-0103-08

Research progress on pitching and its suppression of floating offshore wind turbines

ZHANG Jisheng, WANG Junlei, LI Haoran, WANG Fangyu

(College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: This paper sorts out the effects of the individual and combined effects of wind and wave loads on the pitch of floating wind turbines. The anti-pitching effect of floating wind turbines with external stabilization devices such as tuned mass dampers, wave energy converters, and ship anti-rolling equipment are also explored. The mechanism of different anti-pitching measures is analyzed. Finally, this study indicates some problems that still need to be solved in future research of control strategy, arrangement form and application object.

Key words: floating offshore wind turbine; pitching; pitching suppression; tuned mass damper; wave energy converter; marine anti-rolling equipment

伴随着全球气候问题和能源危机问题的日益突出以及碳中和进程的不断推进,清洁能源在能源供应中的占比日益增大^[1]。风电作为优质可再生清洁能源,发展迅速,海上风电作为风电的重要分支,其发展备受关注。中国海上风能资源十分丰富且主要位于水深大于 50 m 的深远海海域,“由陆向海,由浅入深”成了风电发展的必经之路。传统固定式基础风机的成本随水深急剧增加,适用于深海的浮式风机由此诞生。

由于缺乏固定式基础支撑,浮式风机在风浪流联合作用下会产生复杂的六自由度运动响应,包括纵荡、横荡、垂荡、纵摇、横摇和艏摇。纵摇为浮式风机在上述荷载的纵倾力矩与结构自身恢复力矩综合作用下产生的围绕横轴的回转振荡运动。剧烈的纵摇运动会导致塔顶和叶尖处的振荡效应,在塔底和叶根处产生较大的弯矩和剪力^[2],增加零部件疲劳荷载并减小浮式风机使用寿命,而 15%运动幅度的抑制可将风机的使用寿命延长至 2 倍以上^[3];浮式风机纵摇引起的偏航会使气动荷载减小并产生功率振荡,减小浮式风机的发电效率^[4];极端海况下过大的纵摇运动会导致平台进水甚至倾覆,严重威胁浮式风机的自存安全^[5]。由此可见,对浮式风机纵摇的抑制十分必要,参考稳定装置在陆上风机的成功应用^[6],一个重要的减摇思路是引入提供减摇阻尼的各类减摇装置,通过对减摇装置参数的调节、布置形式的优化或施加主动控制以抑制浮式风机的纵摇。为更有效地实现纵摇抑制,本文对现阶段外荷载作用下浮式风机的纵摇响应规律及外加减摇设备对浮式风机的减摇研究现状进行总结归纳,为相关研究人员提供参考。

基金项目:江苏省自然科学基金青年基金项目(BK20220982);中国博士后科学基金面上项目(2023M740981)

作者简介:张继生(1979—),男,教授,博士,主要从事海洋可再生能源工程研究。E-mail:jszhang@hhu.edu.cn

引用本文:张继生,王军磊,李浩然,等.海上浮式风机纵摇及其抑制研究进展[J].河海大学学报(自然科学版),2025,53(1):103-110.

ZHANG Jisheng, WANG Junlei, LI Haoran, et al. Research progress on pitching and its suppression of floating offshore wind turbines [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2025, 53(1): 103-110.

1 浮式风机纵摇研究现状

风、浪、流联合作用使浮式风机处于复杂荷载状况之下,其纵摇响应的特点与外荷载密切相关。韩玉^[7]等发现与纯风纯浪工况相比,纯流载荷对纵摇的影响十分有限,所以本文仅探究风浪载荷对浮式风机纵摇的影响。

1.1 风和浪单独作用下的纵摇响应

浮式风机在将空气动能转化为电能的同时会受到显著的风荷载,Wang 等^[8]对 OC3 立柱式风机的动态响应进行了数值模拟,发现纯风作用下立柱式风机平均纵摇角会向下风向偏移,且这种偏移随气动荷载的减小而减小。Wang 等^[9]采用 Ansys/AQWA 对张力腿式风机进行了数值建模并分析了其动态响应,发现纯风工况下张力腿式风机表现出与立柱式风机相似的纵摇特性,即风荷载会使基础的纵摇平衡位置产生较大偏移,并在偏移位置处呈现小幅度振荡。

波浪荷载是浮式基础受到的最主要荷载之一,赵书晨^[10]采用 Ansys/AQWA 建立了气动-水动-系泊全耦合数值模型,分析了新型立柱式风机的动力特性,结果表明纯浪作用下其纵摇响应在静平衡位置附近产生波动。陈曦^[11]通过数值模拟发现不规则波作用下立柱式风机纵摇功率密度曲线的峰值主要位于波频与低频。曹菡^[12]通过分析半潜式风机在不同波浪入射角影响下的纵摇响应,发现纵摇幅值响应曲线存在两个峰值,分别对应 10 s 周期与纵摇固有周期,且与对称轴共线的波浪入射角会增大纵摇幅值。郑侃^[13]发现当浮式风机的基础结构存在对称性时,不同波浪入射角下沿对称轴方向上的响应幅值几乎相同。

1.2 风浪联合作用下的纵摇响应

在风浪联合作用下,风倾力矩与波浪倾覆力共同作用下的纵摇响应相比于单一荷载更为剧烈复杂。2014 年,Hu 等^[14]基于 FAST 建立全耦合数值模型,研究了风浪联合作用下半潜式风机的动力响应,发现受风荷载影响,风浪联合作用下纵摇曲线整体向下风向偏移。吴海涛等^[15]通过物理模型试验发现风荷载的加入会使半潜式风机的纵摇幅值成倍增大并使纵摇的平衡位置产生较大偏移。Meng 等^[16]通过波浪水槽试验和数值模拟发现 6 MW 立柱式风机在风浪联合作用下的纵摇规律与吴海涛等^[15]的研究结论一致。徐旭等^[17]利用 Ansys/AQWA 探究了 OC3 立柱式风机基础部分在外荷载下的稳定性问题,发现纵摇幅值对风速变化十分敏感。李修赫^[18]采用等效载荷法模拟空气动力载荷,发现风浪不共线会明显影响浮式平台纵摇的振荡范围。

除此之外,Hu 等^[14]通过对半潜式风机纵摇功率密度曲线的分析发现曲线存在位于低频与波频处的两个峰值,且于低频处出现纵荡-纵摇耦合,赵战华等^[19]自主研发的新型 6.2 MW 半潜式风机于低频处也出现类似的耦合现象。施伟等^[20]采用数值模拟分析了新型混凝土结构 OO-Star 半潜式风机的纵摇响应,发现风场可一定程度上减小平台纵摇固有频率附近的平台运动响应。Meng 等^[16,21]针对立柱式风机开展的物理模型试验研究同样发现了风荷载对纵摇低频部分的抑制作用。Wang 等^[9]的数值模拟结果表明,风荷载主要影响张力腿式风机的低频响应,纵荡-纵摇耦合现象明显,但耦合作用的影响明显小于环境激励。

2 基于外加设备的减摇改进研究进展

为实现对浮式风机纵摇的有效抑制,国内外学者围绕减摇阻尼装置的应用展开了各种尝试,按照装置种类主要分为调谐质量阻尼器(tuned mass damper,TMD)、波浪能利用装置以及船用稳定设备。

2.1 基于 TMD 的减摇改进

TMD 为一种附着在主要结构上的振动控制系统,由质量块、弹簧和阻尼器组成,在高楼以及桥梁的减振中已得到广泛应用,根据有无主动控制系统分为被动式 TMD 和主动式 TMD。主动式 TMD 使用一个可控制的执行器,直接将力施加于质量和结构上,可以在更宽的频带上运行并对结构的加速度产生更大的影响。

Lackner 等^[22]首次将 TMD 应用于浮式风机,并开发了 FAST-SC 代码,在后续研究^[23]中评估了被动式 TMD 对驳船式风机稳定性的影响,发现经过参数优化的被动式 TMD 对浮式风机的纵摇存在抑制作用,但减摇效果仅有 10%。Stewart 等^[24-25]使用遗传算法,针对被动式 TMD 在驳船式、立柱式和张力腿式基础上的参数进行了优化,得到了适用于不同基础的被动式 TMD 最佳参数,减摇效果得到显著提升。贺尔铭等^[26]建立了气动-水动-控制-TMD-结构完全耦合的驳船式风机动力学模型,并在后续研究^[27]中优化了被动式 TMD 的

质量比,发现当质量比从 0.5% 提高到 2% 时,纵摇最大抑制率从 20% 提高到 50%。蔡新等^[28]在驳船式风机机舱内配置被动式 TMD,通过数据模拟发现经遗传算法优化参数后的 TMD 可有效减摇。杨佳佳等^[29]针对被动式 TMD 运动行程过大的问题提出了阻尼限位策略、刚度限位策略及联合限位策略 3 种限位策略,研究了不同限位策略下 TMD 的减摇效果,发现当采用联合限位策略时,TMD 对平台纵摇的抑制率可达 60% 以上。Zhang 等^[30]通过物理模型试验将被动式 TMD 布置于半潜式浮式风机的机舱中,额定工况下对纵摇的抑制率可达 14.7%,进一步证实了被动式 TMD 的减摇效果。对于 TMD 安装位置及数量对减摇效果的影响,Si 等^[31]建立了五自由度耦合纵荡-垂荡-纵摇动力学模型,分别研究了安装在机舱中和平台上的被动式 TMD 纵摇抑制效果,结果表明安装在平台上的被动式 TMD 减摇效果更好。贺尔铭等^[32]基于欧拉-拉格朗日能量方程建立并验证了 11 自由度空间动力学简化模型,分别在立柱式风机基础和机舱内放置多重 TMD 和单个 TMD,结果表明多重被动式 TMD 安装位置与转动中心重合时减摇效果最好。Galán-Lavado 等^[33]研究了在驳船式风机中安装被动式 TMD 的数量与位置对减摇效果的影响,发现双 TMD 的布置可以达到更好的稳定效果且有利于结构自身的对称性,相较于机舱,将被动式 TMD 安装于基础上可使其获得更大的运动空间进而达到更优的减摇效果。

被动式 TMD 虽然能有效减小风机纵摇,但存在对结构受控频率波动过于敏感、稳定性差的缺点。相较于被动式 TMD,主动式 TMD 已被证实具有更强且更稳定的阻尼性能,且可有效改进风速变化下被动式 TMD 抑制率呈现的“V”形分布与实际的 Weibull 分布不一致的缺点。Lackner 等^[23]、Stewart 等^[34]分别研究了主动式和被动式 TMD 对驳船式风机稳定性的影响,发现采用 H_∞ 多变量环路设计的主动控制器可减少 30% 以上的纵摇负载,但会增大 TMD 的运动行程并减小有功功率。Hu 等^[35]为驳船式风机配置了机舱主动式 TMD,相较于被动式 TMD,基于线性二次型调节器的主动式 TMD 可以进一步减小风机的纵摇和负荷。贺尔铭等^[32]通过线性二次型调节器对多重 TMD 施加主动控制力形成混合质量阻尼器,结果表明相比于被动控制,主被动综合控制对纵摇的抑制效果可提高 20%。Wu 等^[36]设计了使用加速度反馈比例-积分-微分控制的主动式 TMD,发现该控制器对驳船式风机的减摇效果优于线性二次型调节控制器。无论是否对 TMD 施加主动控制,TMD 本身附加质量大、行程远、控制频带窄的缺点都限制其在浮式风机上的推广应用。对此,Hu 等^[37]将已广泛用于各种机械系统的惯性仪与被动式 TMD 结合,提出了一种应用于驳船式风机的半主动式 TMD 控制系统,结果表明,该控制系统能有效抑制高风速工况下浮式风机产生的纵摇。Sarkar 等^[38]将 TMD 与惯容器引入浮式风机的纵摇控制中,发现惯容器可以通过放大质量在某种程度上解决 TMD 质量与行程过大的难题。梁翌华^[39]将磁流变阻尼器加入被动式 TMD 中,实现了驳船式风机的半主动式结构控制,可以有效减小塔架的纵摇角度。此外,为了改进传统线性 TMD 的振动控制性能,在 TMD 中引入非线性因素(如非线性能量阱)成为了新思路,胡俊灿^[40]提出了基于非线性能量阱的 TMD 混合控制方法,该控制方法综合了非线性能量阱减振频带宽和 TMD 初始能量敏感性小的优点,减摇效果更好。

2.2 基于波浪能利用装置的减摇改进

波浪能发电装置(wave energy converter, WEC)理论上可以通过吸收能量降低来自波浪的额外动力,并引入恢复力矩和额外的浮力阻尼减小浮式风机的运动响应和疲劳负荷。而这种结合带来的 WECs 和浮式风机之间的相互作用也使得整个系统变得复杂。Pérez 等^[41]对风能-波浪能联合利用平台的早期设想中便提到新增的 WECs 很可能会与浮式基础相互影响,使浮式风机的倾斜角度超过设计极限。胡天鸣^[42]将 3 个波浪能发电浮子安置在浮式风机平台的立柱外侧,发现波浪能发电浮子会改变结构的固有特性并使其在短周期波浪作用下的纵摇响应增大。高琅等^[43]将振荡式 WECs 列阵布置在 OC4 浮式风机平台的三立柱之间,发现规则波作用下,WECs 会增大浮式风机在特定波频区间的纵摇运动,且过大的浮子尺寸会加剧这种效果。

为了更好地利用 WECs 的阻尼作用,学者们针对 WECs 与浮式风机的布置形式、尺寸及连接方式展开了广泛研究。Muliawan 等^[44]将两个轴对称的单点式 WEC 安装到立柱式风机上,有效减小了立柱式风机在额定风速下纵摇的最大值及标准差,并可提高低风速下风机的发电功率。梁妹婷^[45]参考 Peiffer 等^[46]提出的风能-波浪能联合利用装置,将单个单点式 WEC 使用张紧式锚链柔性连接至 WindFloat 浮式风机的三立柱中间,发现在不同波周期及波高波浪作用下,WEC 与浮式风机结合体的纵摇幅值均小于浮式风机原型,从能量角度分析,WEC 吸收平台运动范围内的波浪能必然可以增加平台的稳定性,印证并解释了 Peiffer 等^[46]的研究。周孟然^[47]将环形 WECs 通过滑轮滑道与张力腿式基础连接,WECs 在横摇与纵摇自由度的运动量偏移

对平台的纵摇运动起到抑制作用。李宇萌^[48]将4个点吸收式WECs与半潜式平台相结合,发现正常海况下WECs可有效抑制半潜式平台的纵摇,极端海况下会增加平台自存稳定性。周斌珍等^[49]研究了风能-波浪能混合利用装置之中WECs列阵的不同尺寸及布置对浮式风机运动响应的影响,结果表明WECs列阵可有效抑制浮式风机纵摇,且其抑制效果随着WECs直径与吃水比的增大而增大。Kamarlouei等^[50]提出了一种同心阵列的WECs布置方案,将波浪能转换器通过杠杆外臂与浮式平台连接,从而提供更大的减摇力矩。模型试验结果表明,在风浪联合作用下,WECs与外臂的结合可有效抑制纵摇。

除以上对单个WEC或多个WECs布置形式优化外,通过主动控制来协调WECs在动力输出与运动抑制上的性能也成了研究热点。Zhu等^[51]设计了安装在半潜式风机浮筒内的振荡水柱型WECs,发现应用主动控制的波浪能转换器能在利用波浪能的同时更有效地抑制浮式平台运动。Si等^[52]提出了一种由半潜式风机和3个单点式WECs组成的混合发电平台,数值模拟发现弹簧阻尼控制能够以降低发电功率为代价缓解浮式风机的纵摇运动。Chen等^[53]提出了一种由半潜式风机和3个垂荡式WECs组成的新型混合平台,研究了将WECs与不同的动力输出控制方案相结合的可行性,结果表明bang-bang主动控制使平台的纵摇减小了17.1%。Zhu等^[54]将受控悬挂漂浮WECs系统与半潜式风机相结合,通过实时控制WECs的动力输出,提出了一种具有预测能力的最优半主动控制方法,可减小浮式基础16%的纵摇幅值。

2.3 基于船用稳定设备的减摇改进

船舶作为一种成熟的海上浮式运载工具,受风浪影响时剧烈的摇动对船舶的适航性、安全性以及设备正常工作均有不利影响,目前船舶的减摇技术已经趋于成熟,发展较为成熟的船舶减摇装置主要包括舳龙骨、减摇水舱、减摇鳍、减摇舵、减摇陀螺等^[55]。浮式风机作为海上浮式建筑物,与船舶具有相似性,关于船用减摇设备于浮式风机上的应用也得到了国内外学者的广泛研究。

减摇水舱本质是调谐液体阻尼器(tuned liquid damper, TLD),是一个部分充水的水舱。当受到外力时TLD中的液体就会开始晃动,并产生反作用力,从而减少外力的影响。晃动产生的反作用力幅值与TLD中的水质量成正比,晃动现象的固有频率取决于液体高度和储罐的内部尺寸^[56],TLD自身的阻尼耗能主要受内部液体的黏滞性和内部流体的波浪破碎以及格栅布置等因素的影响^[57]。Ha等^[58]利用数值模拟方法,借助TLD控制立柱式风机浮筒结构的纵摇运动,通过对有无TLD立柱式风机运动响应的模拟分析,发现TLD可以有效抑制立柱式风机的纵摇,且减摇效果随着TLD层数的增多而增强。鉴于TLD摇动频率的复杂性与安装位置的局限性,一种具有U形等截面管状水箱并在管道中间增加液体运动阻尼隔栅的调谐液柱阻尼器(tuned liquid column damper, TLCD)更适用于浮式风机。Zhang等^[59]将TLCD布置在立柱式风机的机舱内,基于多体公式和欧拉-拉格朗日方程建立了浮式风机的17自由度气动-液压-伺服-弹性模型,发现均匀截面的TLCD通常比非均匀截面的减摇效果好,在波浪频率接近于纵摇固有频率时TLCD的阻尼效果更佳。驳船式基础依赖其较大的水线面惯性矩实现稳定,其水平尺寸远大于垂直尺寸,为TLCD提供了充足的安装空间。Yin^[60]利用拉格朗日方法推导了用于驳船式风机摇动和TLCD液体晃动相互作用的控制方程,评估了TLCD对驳船式风机在随机激励下的减摇性能,发现通过Den Hartog方法^[61]对参数优化后的TLCD可以起到显著的减摇作用。调谐液体多柱阻尼器(tuned liquid multi-column damper, TLMCD)是一种受TLCD启发的新型结构阻尼装置,Coudurier等^[62]比较了不同参数TLMCD与多个TLCD列阵的减摇效果,发现TLMCD在波浪工况下的稳定性更好,在纵摇抑制效果上优于多个TLCD列阵。Xue等^[63]提出了一种由三液柱和底部连接管组成的TLMCD,通过物理模型试验分析了规则波作用下半潜式风机基础模型中的纵摇阻尼,发现TLMCD在共振频率附近具有最好的阻尼效果,其中2.0%的液体质量比可以使最大纵摇运动减小10.84%。

为了提高减摇性能,学者们将半主动控制策略与TLCD结合,Karimi等^[64]在塔筒顶部放置了一个可控的TLCD,并通过鲁棒 H_{∞} 控制器进行调控,经数值模拟发现该方法可有效减小塔柱顶端的纵摇。Coudurier等^[65]基于拉格朗日方法建立了TLCD与浮式风机的耦合模型,考虑被动TLCD单一水头损失系数的局限性,开发了基于线性二次型调节器的限幅最优控制算法,进一步抑制了结构纵摇。Fath等^[66]为了提高TLMCD的减摇性能,将由3个相互连通的液柱构成的TLMCD集成到半潜式平台,并在3个液柱之间安装允许液体流动的半主动流量控制阀,研究了DBG、VBG和bang-bang 3种控制算法对TLMCD的控制效果,结果表明直接以纵摇为控制目标的VBG控制器的减摇效果最好,且增加TLMCD的质量比和截面比可以有效改善平台稳定性能。Hochrainer等^[67]开发了调谐液柱气体阻尼器(tuned liquid column gas damper, TLCGD),可以通

过改变气压来调节 TLCD 的频率,近年来被广泛用于海洋结构的稳定控制。Nazokkar 等^[68]评估了半主动液柱气体阻尼器在 DBG、VBC 和 bang-bang 控制算法控制下对浮式风机摇动的控制效果,发现其减摇效果优于传统 TLCD,且 DBG 算法在 3 种半激活方法中表现最优。

除减摇水舱外,减摇陀螺在浮式风机上的应用也得到初步研究。减摇陀螺主要利用高速旋转的转子在进动作用下产生的陀螺力矩实现对纵摇的抑制,其减摇能力主要与转子转动惯量、转速和进动角速度有关^[69]。根据有无进动角控制系统,减摇陀螺分为主动式减摇陀螺与被动式减摇陀螺。Fenu 等^[70]在一种梅花型浮动平台上安装 128 个 ISWEC 装置(一种利用陀螺力矩的波浪能发电装置),结果表明该减摇装置可以在增加产能的同时有效减小平台 37% 的纵摇角度。Palraj 等^[71]将主动式减摇陀螺安装在装有静态塔筒的驳船式基础上,探究减摇陀螺在 3 种转子转速下的减摇性能,结果表明该驳船式基础在减摇陀螺高转速作用下,规则波中的最大纵摇减小率为 55%,不规则波中的最大纵摇减小率为 54%。在此基础上,Palraj 等^[72]将动态风机加装在静态塔筒基础上,分析了减摇陀螺在不同风机转速下的减摇效果,结果表明减摇陀螺对纵摇以及由于叶片旋转而加剧的横摇均有良好的抑制作用。

3 研究展望

本文详细阐述了风浪荷载作用下浮式风机的纵摇响应机理以及将外加减摇设备应用于浮式风机的研究现状,得益于学者们的广泛研究,外加减摇设备对纵摇的抑制取得了初步成效,但依旧存在很多问题,未来关于外加减摇设备对浮式风机的减摇研究应从以下方面开展:

a. TMD 是一种可有效抑制浮式风机纵摇的设备,但被动式 TMD 存在质量大、运动行程远、控制频带窄等问题,而以纵摇为反馈的主动控制系统并未有效解决被动式 TMD 行程大的问题,目前以阻力间接控制的半主动式 TMD 具有较大应用潜力。

b. WECs 的阻尼作用可以有效抑制浮式风机的纵摇,但在设计中需注意结合实际波浪荷载对其布置形式、尺寸及连接方式进行合理优化以保证结构阻尼的对称性与减摇效果最大化,且针对不同的基础形式,相同 WECs 布置方式的减摇效果也存在显著差异;目前对于 WECs 减摇作用的研究主要集中于理论推导与数值模拟,亟须开展更多物理模型试验验证其可行性;WECs 与浮式平台的连接方式对两者间的耦合运动存在影响,应进一步探究其连接刚度对减摇效果的影响。

c. 由于 TLD 所需安装空间较大,目前在驳船式和半潜式风机上的应用居多,在立柱式和张力腿式风机上的应用有待进一步开展;对于减摇陀螺在浮式风机上的应用还处于初步研究阶段,对于被动式减摇陀螺在除驳船外其他基础形式的浮式风机上的应用效果有待进一步研究;针对其他船用减摇设备如零航速减摇鳍、减摇挡板^[73]等在浮式风机上的应用效果有待深入探究。

参考文献:

[1] 贡力,董洲全,贾治元,等. 水利行业低碳技术研究热点与前沿趋势[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(4):1-9. (GONG Li, DONG Zhouquan, JIA Zhiyuan, et al. Low carbon technology research hotspots and frontier trends in the water conservancy industry[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2023,51(4):1-9. (in Chinese))

[2] YANG Jiawen, HE Erming, HU Yaqi. Dynamic modeling and vibration suppression for an offshore wind turbine with a tuned mass damper in floating platform[J]. Applied Ocean Research, 2019, 83: 21-29.

[3] OU Jinping, LONG Xu, LI Qiusheng, et al. Vibration control of steel jacket offshore platform structures with damping isolation systems[J]. Engineering Structures, 2007, 29(7): 1525-1538.

[4] 刘格梁,胡志强,段斐. 海上浮式风机在支撑平台运动影响下的气动特性研究[J]. 海洋工程, 2017, 35(1): 42-50. (LIU Geliang, HU Zhiqiang, DUAN Fei. Research about influence of supporting platform's motions on aerodynamics of offshore floating wind turbine [J]. The Ocean Engineering, 2017, 35(1): 42-50. (in Chinese))

[5] TIAN Haonan, SOLTAINI M N, NIELSEN M E. Review of floating wind turbine damping technology[J]. Ocean Engineering, 2023, 278: 114365.

[6] RAHMAN M, ONG Z C, CHONG W T, et al. Performance enhancement of wind turbine systems with vibration control: a review [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, 51: 43-54.

[7] 韩玉. 半潜式海上风机平台运动响应与时域系泊分析[D]. 大连:大连理工大学,2021.

- [8] WANG Han, HU Zhiqiang, MENG Xiangyin. Dynamic performance investigation of a spar-type floating wind turbine under different sea conditions[J]. China Ocean Engineering, 2018, 32(3): 256-265.
- [9] WANG Teng, JIN Hui, WU Xiaoni. Coupled dynamic analysis of a tension leg platform floating offshore wind turbine[J]. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 2020, 142(1): 011901.
- [10] 赵书晨. 新型 Spar 浮式风机气动-水动-系泊全耦合数值分析[D]. 大连: 大连理工大学, 2021.
- [11] 陈曦. 海上浮式风机系统在波浪上的运动响应分析[D]. 上海: 上海交通大学, 2018.
- [12] 曹菡. 海上风机半潜型浮式基础水动力性能研究[D]. 天津: 天津大学, 2012.
- [13] 郑侃. 风浪联合作用下半潜式浮式风机结构响应及故障分析[D]. 大连: 大连理工大学, 2018.
- [14] HU Zhiqiang, LI Liang, WANG Jin, et al. Dynamic responses of a semi-type offshore floating wind turbine during normal state and emergency shutdown[J]. China Ocean Engineering, 2016, 30(1): 97-112.
- [15] 吴海涛, 张亮, 马勇, 等. 半潜式海上浮式风力机平台随机响应特性分析[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2014, 42(5): 111-115. (WU Haitao, ZHANG Liang, MA Yong, et al. Stochastic response characteristics analysis of semisubmersible platform for floating offshore wind turbine[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Nature Science Edition), 2014, 42(5): 111-115. (in Chinese))
- [16] MENG Long, HE Yanping, ZHAO Yongsheng, et al. Dynamic response of 6 MW spar type floating offshore wind turbine by experiment and numerical analyses[J]. China Ocean Engineering, 2020, 34(5): 608-620.
- [17] 徐旭, 丁刚, 姚文娟. 风浪流荷载下基于 AQWA 的海上 Spar 型浮式基础稳定性分析[J]. 长江科学院院报, 2022, 39(5): 145-152. (XU Xu, DING Gang, YAO Wenjuan. Stability analysis of offshore Spar floating foundation platform under wind wave current load based on AQWA[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2022, 39(5): 145-152. (in Chinese))
- [18] 李修赫. 海上漂浮式风力发电机系统动态特性研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2020.
- [19] 赵战华, 范亚丽, 匡晓峰, 等. 半潜式浮式风机耦合动力响应特性试验研究[J]. 中国造船, 2022, 63(1): 198-206. (ZHAO Zhanhua, FAN Yali, KUANG Xiaofeng, et al. Experimental research on coupling dynamic response of semi-submersible floating offshore wind turbine[J]. Shipbuilding of China, 2022, 63(1): 198-206. (in Chinese))
- [20] 施伟, 薛瑞宁, 侯晓彬, 等. 10 MW 级半潜漂浮式风机的动力响应[J]. 船舶工程, 2021, 43(10): 1-9. (SHI Wei, XUE Ruining, HOU Xiaobin, et al. Dynamic response on 10 MW semisubmersible floating offshore wind turbine[J]. Ship Engineering, 2021, 43(10): 1-9. (in Chinese))
- [21] DUAN Fei, HU Zhiqiang, NIEDZWECKI J M. Model test investigation of a spar floating wind turbine[J]. Marine Structures, 2016, 49: 76-96.
- [22] LACKNER M A, ROTE A M. Passive structural control of offshore wind turbines[J]. Wind Energy, 2011, 14(3): 373-388.
- [23] LACKNER M A, ROTE A M. Structural control of floating wind turbines[J]. Mechatronics, 2011, 21(4): 704-719.
- [24] STEWART G, LACKNER M. Determining optimal tuned mass damper parameters for offshore wind turbines using a genetic algorithm[C]//Proceedings of the 50th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition. Nashville: AIAA, 2012: 376.
- [25] STEWART G, LACKNER M. Offshore wind turbine load reduction employing optimal passive tuned mass damping systems[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2013, 21(4): 1090-1104.
- [26] 贺尔铭, 胡亚琪, 张扬. 基于 TMD 的海上浮式风力机结构振动控制研究[J]. 西北工业大学学报, 2014, 32(1): 55-61. (HE Erming, HU Yaqi, ZHANG Yang. Structural vibration control of offshore floating wind turbine based on TMD[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2014, 32(1): 55-61. (in Chinese))
- [27] HE Erming, HU Yaqi, ZHANG Yang. Optimization design of tuned mass damper for vibration suppression of a barge-type offshore floating wind turbine[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment, 2017, 231(1): 302-315.
- [28] 蔡新, 张洪建. 基于 TMD 控制的浮式风力机稳定性研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2021, 49(1): 70-76. (CAI Xin, ZHANG Hongjian. Stability study of floating wind turbine based on TMD control[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021, 49(1): 70-76. (in Chinese))
- [29] 杨佳佳, 贺尔铭, 姚文旭, 等. 抑制海上浮式风力机振动的 TMD 限位策略研究[J]. 振动与冲击, 2020, 39(15): 18-24. (YANG Jiajia, HE Erming, YAO Wenxu, et al. TMD limited position strategy for vibration suppression of floating offshore wind turbines[J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39(15): 18-24. (in Chinese))
- [30] ZHANG Hang, WEN Binrong, TIAN Xinliang, et al. Experimental study on mitigating vibration of floating offshore wind turbine using tuned mass damper[J]. Ocean Engineering, 2023, 288: 115974.

- [31] SI Yulin, KARIMI H R, GAO Huijun. Modelling and optimization of a passive structural control design for a spar-type floating wind turbine[J]. *Engineering Structures*, 2014, 69: 168-182.
- [32] 贺尔铭, 熊波, 杨佳佳. 基于 TMD-HMD 的海上浮式风力机主被动综合振动控制[J]. *机械工程学报*, 2020, 56(3): 73-79. (HE Erming, XIONG Bo, YANG Jiajia. Study on active-passive integrated vibration control of offshore floating wind turbine based on TMD-HMD[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2020, 56(3): 73-79. (in Chinese))
- [33] GALÁN-LAVADO A, SANTOS M. Analysis of the effects of the location of passive control devices on the platform of a floating wind turbine[J]. *Energies*, 2021, 14(10): 2850.
- [34] STEWART G M, LACKNER M A. The effect of actuator dynamics on active structural control of offshore wind turbines[J]. *Engineering Structures*, 2011, 33(5): 1807-1816.
- [35] HU Yaqi, HE Erming. Active structural control of a floating wind turbine with a stroke-limited hybrid mass damper[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2017, 410: 447-472.
- [36] WU Xinlu, WANG Wancheng. Active structure control of floating wind turbine using PID controller[C]// *Proceedings of 2022 IEEE/IAS Industrial and Commercial Power System Asia*. Shanghai: IEEE, 2022: 783-789.
- [37] HU Yinlong, WANG Jianing, CHEN M Z Q, et al. Load mitigation for a barge-type floating offshore wind turbine via inerter-based passive structural control[J]. *Engineering Structures*, 2018, 177: 198-209.
- [38] SARKAR S, FITZGERALD B. Vibration control of spar-type floating offshore wind turbine towers using a tuned mass-damper-inerter[J]. *Structural Control and Health Monitoring*, 2019, 27(1): e2471.
- [39] 梁翌华. 基于 ARL 算法的海上漂浮式风机半主动结构减载控制研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2018.
- [40] 胡俊灿. 含 ETMD、TMD-NES 的漂浮式风力机结构稳定性控制分析[D]. 西安: 西安理工大学, 2019.
- [41] PÉREZ C, IGLESIAS G. Integration of wave energy converters and offshore windmills[C]// *Proceedings of the 4th International Conference on Ocean Energy (ICOE)*. Dublin: OES, 2012: 562-571.
- [42] 胡天鸣. 一种浮式风浪能混合利用系统设计研究[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2020.
- [43] 高琅, 朱良生, 王磊, 等. 垂荡式波浪能装置与风机平台集成系统水动力性能研究[J]. *广东造船*, 2022, 41(3): 17-21. (GAO Lang, ZHU Liangsheng, WANG Lei, et al. Hydrodynamic performance of hybrid system of heaving wave energy converter and wind turbine platform[J]. *Guangdong Shipbuilding*, 2022, 41(3): 17-21. (in Chinese))
- [44] MULLAWAN M J, KARIMIRAD M, GAO Zhenhua, et al. Extreme responses of a combined spar-type floating wind turbine and floating wave energy converter (STC) system with survival modes[J]. *Ocean Engineering*, 2013, 65: 71-82.
- [45] 梁姝婷. 风机浮式基础和波浪能浮子运动性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2015.
- [46] PEIFFER A, RODDIER D, AUBAULT A. Design of a point absorber inside the WindFloat structure[C]// *Proceedings of the 30th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*. Rotterdam: American Society of Mechanical Engineers, 2011: 247-255.
- [47] 周孟然. 新型浮式风能-波浪能集成结构风浪耦合分析[D]. 大连: 大连理工大学, 2017.
- [48] 李宇萌. 基于半潜平台的新型风浪能联合利用装置的耦合动力响应研究[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2022.
- [49] 周斌珍, 王珣, 胡俭俭, 等. 浮式风机平台与多波浪能浮子混合系统的运动响应和发电性能研究[C]// *第三十一届全国水动力学研讨会论文集: 下册*. 北京: 海洋出版社, 2020: 791-796.
- [50] KAMARLOUEI M, GASPARD J F, CALVARIO M, et al. Experimental study of wave energy converter arrays adapted to a semi-submersible wind platform[J]. *Renewable Energy*, 2022, 188: 145-163.
- [51] ZHU Hongzhong, HU Changhong, 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*, 2020, 25(3): 667-674.
- [52] SI Yulin, CHEN Zhen, ZENG Weijian, et al. The influence of power-take-off control on the dynamic response and power output of combined semi-submersible floating wind turbine and point-absorber wave energy converters[J]. *Ocean Engineering*, 2021, 227: 108835.
- [53] CHEN Zhen, YU Jiarui, SUN Jili, et al. Load reduction of semi-submersible floating wind turbines by integrating heaving-type wave energy converters with bang-bang control[J]. *Frontiers in Energy Research*, 2022, 10: 929307.
- [54] ZHU Hongzhong. Optimal semi-active control for a hybrid wind-wave energy system on motion reduction[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2023, 14(1): 75-82.
- [55] 陈少楠. 船舶陀螺减摇装置设计及控制研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2012.
- [56] 刘韦宏. 储液罐液体晃荡动力分析与动水压力影响特性研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2020.
- [57] 窦朋, 王志东, 凌宏杰, 等. 调谐液体阻尼器对多层多模态平台结构的运动控制研究[J]. *振动与冲击*, 2023, 42(14): 30-

39. (DOU Peng, WANG Zhidong, LING Hongjie, et al. Motion control of a multi-layer multi-modal platform structure with a tuned liquid damper[J]. Journal of Vibration and Shock, 2023, 42(14): 30-39. (in Chinese))
- [58] HA Minho, CHEONG C. Pitch motion mitigation of spar-type floating substructure for offshore wind turbine using multilayer tuned liquid damper[J]. Ocean Engineering, 2016, 116: 157-164.
- [59] ZHANG Zili, HØEG C. Dynamics and control of spar-type floating offshore wind turbines with tuned liquid column dampers[J]. Structural Control and Health Monitoring, 2020, 27(6): e2532.
- [60] YIN S H. Roll motion mitigation of a barge-type floating wind turbine under random excitation using a tuned liquid column damper[J]. Journal of the Chinese Institute of Engineers, 2023, 46(3): 197-207.
- [61] DEN HARTOG J P. Mechanical vibrations[M]. New York: McGraw-Hill, 1985.
- [62] COUDURIER C, LEPREUX O, PETIT N. Modelling of a tuned liquid multi-column damper: application to floating wind turbine for improved robustness against wave incidence[J]. Ocean Engineering, 2018, 165: 277-292.
- [63] XUE Mian, DOU Peng, ZHENG Jinhai, et al. Pitch motion reduction of semisubmersible floating offshore wind turbine substructure using a tuned liquid multicolumn damper[J]. Marine Structures, 2022, 84: 103237.
- [64] KARIMI H R, ZAPATEIRO M, LUO Ningsu. Semiactive vibration control of offshore wind turbine towers with tuned liquid column dampers using H_{∞} output feedback control[C]//Proceedings of 2010 IEEE International Conference on Control Applications. Yokohama: IEEE, 2010: 2245-2249.
- [65] COUDURIER C, LEPREUX O, PETIT N. Passive and semi-active control of an offshore floating wind turbine using a tuned liquid column damper[J]. IFAC-PapersOnLine, 2015, 48(16): 241-247.
- [66] FATH A, AZADI Y E, EGHTEHAD M. Semi-active vibration control of a semi-submersible offshore wind turbine using a tuned liquid multi-column damper[J]. Journal of Ocean Engineering and Marine Energy, 2020, 6(3): 243-262.
- [67] HOCHRAINER M J, ZIEGLER F. Control of tall building vibrations by sealed tuned liquid column dampers[J]. Structural Control and Health Monitoring, 2006, 13(6): 980-1002.
- [68] NAZOKKAR A, DEZVAREH R. Vibration control of floating offshore wind turbine using semi-active liquid column gas damper[J]. Ocean Engineering, 2022, 265: 112574.
- [69] YAP Z H, TANG C H H, KANG H S, et al. Roll motion compensation by active marine gyro stabiliser[J]. Indian Journal of Geo-Marine Sciences, 2022, 50(11): 922-929.
- [70] FENU B, ATTANASIO V, CASALONE P, et al. Analysis of a gyroscopic-stabilized floating offshore hybrid wind-wave platform[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2020, 8(6): 439.
- [71] PALRAJ M, RAJAMANICKAM P. Motion control of a barge for offshore wind turbine (OWT) using gyro stabilizer[J]. Ocean Engineering, 2020, 209: 107500.
- [72] PALRAJ M, RAJAMANICKAM P. Motion control studies of a barge mounted offshore dynamic wind turbine using gyro stabilizer[J]. Ocean Engineering, 2021, 237: 109578.
- [73] 何良德, 黄挺, 李俊龙, 等. 大型浮体水动力响应特性数值模拟及减摇措施[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51(4): 97-107. (HE Liangde, HUANG Ting, LI Junlong, et al. Numerical simulation of hydrodynamic response and anti-rocking measures of the large floating structure[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2023, 51(4): 97-107. (in Chinese))

(收稿日期: 2023-09-23 编辑: 熊水斌)