海上风电钢管混凝土导管架荷载–结构耦合动力响应分析

王李吉[1],王宇航[2],尹禧龙[1],王雪迪[1],张礼贤[2*]
(1.上海勘测设计研究院有限公司,上海 200335; 2.重庆大学 土木工程学院,重庆 400045)

摘 要: 导管架支撑结构作为过渡水深海域(30~60 m)海上风电开发的主流基础形式,虽较单桩基础具有更优的结构刚度,但存在建造成本偏高的问题。本文提出一种钢管混凝土组合结构优化方案:通过对导管架角柱采用全截面填充混凝土,充分发挥钢-混凝土组合结构的材料协同作用,在保证结构刚度的前提下优化钢管壁厚,钢材整体用量可降低17.3%。首先建立角柱填充混凝土前后的有限元数值模型,对角柱填充混凝土后KK节点的承载力进行校核。结果表明,相较于传统纯钢结构,角柱填充混凝土后KK节点的承载力大幅提升。在此基础上,构建导管架海上风电支撑结构荷载-结构耦合数值计算模型,针对机组正常运行与极限停机两类工况开展时域耦合动力响应模拟。研究结果表明:正常运行工况下,相较于纯钢结构,钢管混凝土导管架的塔顶位移、基础纵荡与纵摇运动幅值均有所减小,仅机舱加速度略有增大;结构整体荷载响应波动幅度降低,抗疲劳性能更优。在极限工况下,钢管混凝土结构的动力响应与所受荷载均显著低于纯钢结构的动力响应与所受荷载,其结构安全储备更高。

关键词: 海上风电; 导管架基础; 钢管混凝土; 数值模拟; 荷载-结构耦合动力响应
中图分类号: TM614,P752 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671－9379(2026)08－0086－08
DOI: 10.13969/j.jzgjgjz.20250105001

Coupled Load-Structure Dynamic Response of Offshore Wind Power Concrete–Filled Steel Tubular Jackets

WANG Liji[1], *WANG Yuhang*[2], *YIN Xilong*[1], *WANG Xuedi*[1], *ZHANG Lixian*[2*]
(1. Shanghai Investigation, Design & Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200335, China; 2. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China)
*Corresponding author: Lixian.zhang@cqu.edu.cn

Abstract: Jacket support structures are a predominant foundation form for offshore wind power development in transitional water depths (30-60 m). Although they provide superior structural stiffness compared to monopile foundations, their construction costs remain relatively high. This study proposes an optimized concrete-filled steel tube (CFST) composite structural solution. By implementing full-section concrete filling in the jacket corner columns, the material synergy effect of steel-concrete composite structures is fully exploited, achieving optimized steel wall thickness (17.3% reduction in steel consumption) while maintaining structural stiffness. Firstly, finite element numerical analysis models with and without concrete-filled corner columns were established to verify the bearing capacity of KK joints after concrete filling. The results show that the bearing capacity is greatly improved compared with traditional pure steel structures after concrete filling in the corner columns. Subsequently, a coupled load-structure numerical

收稿日期:2025-01-05
基金项目:上海勘测设计研究院有限公司科技项目"海上风电钢-混凝土组合支撑结构的性能与设计方法研究"(2021FD(8)020)
作者简介:
王李吉(1989—),男,硕士,高级工程师,主要从事风电支撑结构设计方面的研究。E-mail:wangliji@sidri.com。
通信作者:
张礼贤(1993—),男,博士,助理研究员,主要从事海上风电开发利用方面的研究。E-mail:Lixian.zhang@cqu.edu.cn。

model for jacket-supported offshore wind turbines was developed to conduct time-domain coupled dynamic response simulations under both normal operation and extreme shutdown conditions. The results show that under normal operating conditions, the CFST jacket support structure exhibits reduced tower top displacement, foundation surge, and pitch motions compared to conventional steel structures, albeit with a slight increase in nacelle acceleration. The overall load response fluctuation amplitude decreases significantly, indicating improved fatigue resistance. Under extreme conditions, both dynamic responses and loads of the CFST structure are notably lower than those of the pure steel structure, indicating higher structural safety.

Keywords: offshore wind power; jacket foundation; concrete-filled steel tube; numerical simulation; load-structure coupled dynamic response

在全球能源结构持续转型、清洁能源需求不断攀升的背景下，海上风电作为极具发展潜力的可再生能源，其发展步伐持续加快[1]。我国高度重视海上风电开发，先后出台《风电发展“十三五”规划》[2]、《“十四五”可再生能源发展规划》[3]等一系列政策文件，为行业发展提供有力支撑，推动产业链不断完善、技术水平持续提升。目前，我国海上风电装机容量已位居全球首位，产业发展前景广阔[4]。随着海上风电开发范围由浅水区（水深≤30 m）逐步向30～60 m过渡水深拓展，导管架式海上风电支撑结构（图1）凭借其结构稳定性强、适用水深范围广等优势[5]，成为过渡水深海上风电项目的首选基础型式之一。



图1　导管架式海上风电支撑结构

Fig. 1　Jacket offshore wind power supporting structures

SHI等[6]通过数值模拟方法，探究了不同建模参数下导管架海上风电动力响应规律，为导管架海上风电结构设计和安全评估提供了重要的理论依据。冯涌[7]对比分析了几种新型海上风电导管架基础过渡段的结构形式，通过参数分析和优化设计，提出了斜撑式过渡段方案。王建超[8]利用SACS软件对海上风电导管架基础进行疲劳参数敏感性分析，研究了应力集中系数计算方法、波浪谱、腐蚀等因素对导管架基础管节点疲劳寿命的影响。李柏林[9]研究了海冰碰撞下导管架海上风电动力响应特征，通过数值模拟分析了不同冰排厚度、漂移速度、撞击角度等因素对导管架结构冰力、位移、速度、加速度响应的影响。赵一凡等[10]通过有限元分析对比了四桶和三桶导管架基础的承载力特性，并研究了加载高度和方向对四桶导管架基础水平承载力的影响。王嘉其等[11]基于海洋实测数据和有限元模型，对平箱梁四桩导管架海上风电基础结构进行了优化设计，以降低建造成本并保证结构安全。王浩然等[12]探讨了七种桩土效应模拟方法对导管架海上风电结构动力特性的影响，并通过对比分析推荐使用Winkler地基梁模型（m法）进行结构动力特性模拟。REN等[13]对导管架海上风电不同荷载模拟方法进行了比较，旨在通过评估不同数值模型的计算效率，为现有工程数值计算方法提供指导。PAN等[14]基于完全耦合地震分析模型，研究了导管架海上风电塔架在地震作用下的动力学特性和结构响应，并设计了多调谐质量阻尼器（MTMD）来减轻地震响应。

传统纯钢导管架存在造价偏高、整体刚度不足、疲劳问题突出等缺陷。混凝土材料则具备抗疲劳性能好、结构稳定性强、造价低廉等优势[15]。将钢材与混凝土结合形成组合结构，可有效降低导管架工程造价，同时提升整体刚度。现阶段，钢管混凝土组合结构已在陆上风电场工程中得到广泛应用[16-17]。周扬等[18]深入研究了海上风电预应力钢管混凝土格构式塔架的动力特性，通过有限元建模分析了不同底部根开、角柱直径和壁厚、斜杆壁厚对塔架固有频率的影响，并探讨了参数变化对塔筒动力特性的影响规律。侯雯峪[19]开展了钢管混凝土海上风电基础受力性能分析，通过理论分析和数值模拟，分析了单桩和群桩的承载力、变形以及与土体相互作用，并验证了该类基础应用于海上风电工程的合理性与优越性。时成龙[20]针对传统钢质基础抗冲击能力不足的问题，提出了新型中空夹层钢管混凝土组合导管架，并结合摆锤冲击试验与有限元模拟，完成了基础抗冲击方案的设计与优化。宋丹[21]将防屈曲支撑与中空夹层钢管混凝土导管架相结合，利用ANSYS软件分析了该新型结构在极端冰荷载、强地震作用下的抗冰与抗震性能。

为解决传统纯钢导管架基础成本偏高的问题，本文结合钢管混凝土组合结构的优良力学性能，提出海上风电钢管混凝土导管架结构方案。采用有限元方法分析节点填充混凝土对角柱KK节点承载力的影响，并进一步搭建钢管混凝土与纯钢导管架风机的荷载-结构耦合数值模型，对比风浪联合作用下两类结构的动力响应规律，考察该钢管混凝土导管架方案的技术可行性。

1 理论背景

1.1 波浪荷载

工程中通常采用势流理论与莫里森方程计算海上风电支撑结构所承受的水动力荷载[22-23]。本文研究的导管架基础属于细长杆件结构，构件直径与波浪波长之比小于0.15，可忽略结构对周围流场的影响，因此可采用莫里森方程计算作用于构件上的波浪荷载。该方程将水动力荷载分为惯性力F_i与拖曳力F_d，根据规范[24]，惯性力系数C_m取1.60以及拖曳力系数C_d取0.65。

1.2 风荷载

本文基于经典叶素-动量理论[25]以及广义动态尾迹理论[26]计算作用于风电叶片以及塔筒上的风荷载。叶素-动量理论由Betz与Glauert分别基于叶素理论和动量理论研究分析得到：叶素理论将桨叶离散为若干二维翼型微段，对各微段气动力沿展向、周向积分，得到整支叶片的气动力；动量理论则结合动量方程、连续性方程，推导风机风轮拉力及拉力与诱导速度的关联关系。广义动态尾迹理论以拉普拉斯方程势流解为基础，求解轮毂平面的压力分布，再对控制方程做无量纲处理，并对压力场进行线性叠加计算。

1.3 钢管混凝土刚度假定

在正常使用荷载作用下，钢管混凝土构件处于弹性工作阶段，钢管对核心混凝土的套箍作用较弱，可不予考虑。此时钢管等效为钢筋混凝土结构中的纵向受力钢筋，与核心混凝土保持协同变形。根据钢管与核心混凝土的弹性变形协调条件[27]，得到钢管混凝土组合刚度计算公式为：

(1) 压缩刚度：

$$(EA)_e = E_a A_a + E_c A_c \tag{1}$$

(2) 弯曲刚度：

$$(EI)_e = E_a I_a + 0.6 E_c I_c \tag{2}$$

(3) 剪切刚度：

$$(GA)_e = G_a A_a + G_c A_c \tag{3}$$

式中：E_a与E_c分别钢管和混凝土的弹性模量；A_a与A_c分别为钢管和混凝土的截面面积；I_a与I_c分别为钢管和混凝土的截面惯性矩；G_a与G_c分别为钢管和混凝土的剪切模量。

2 模型简介与节点有限元分析

2.1 风电机组模型

本文选用IEA 15 MW海上风电机组模型作为研究对象，该机组模型由美国可再生能源实验室、丹麦技术大学、美国缅因大学等单位联合研发，采用变速变桨控制策略，配备直驱式发电机，机组详细参数如表1所示。

表1 IEA 15 MW海上风电机组参数[28]

Table 1 Parameters of IEA 15 MW offshore wind power

参数	取值
额定发电功率	15 MW
切入、额定、切出风速	3.00 m·s^{-1}，10.59 m·s^{-1}，25.00 m·s^{-1}
转子直径	240.00 m
轮毂高度	150.00 m
轮毂直径	7.94 m
塔基高度	15.00 m
塔基直径	10.00 m

2.2 导管架模型与KK节点应力分析

文中所选取的导管架海上风电支撑结构模型取自广东省阳江市某海域实际模型，模型水深为40 m，水面上风电基础高度为15 m(图2)。本文重点探究钢管混凝土导管架和纯钢导管架的动力性能差异，导管架基础与海床固接。传统纯钢导管架基础的用钢量为1 281.3 t，角柱的钢管壁厚与直径随水深的增加而增加。在对导管架支撑结构进行优化时，对导管架四根角柱进行全截面填充混凝土，角柱外直径保持不变(图3)，统一将钢管壁厚调整为0.04 m。优化后钢管混凝土导管架总用钢量降至1 092.0 t，相较传统纯钢结构，钢材用量减少17.3%。

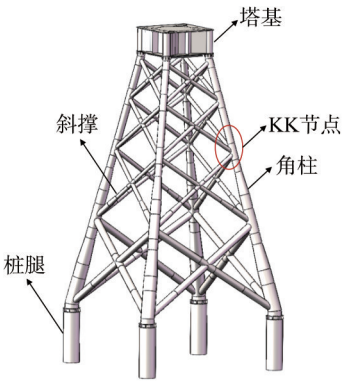
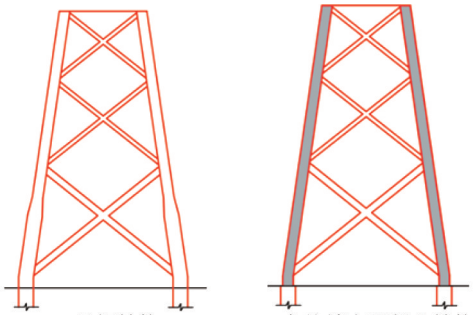


图2 海上风电导管架基础整体示意图

Fig. 2 Schematic diagram of offshore wind power jacket foundation

针对KK节点开展有限元静力分析，对比角柱填充混凝土前后的承载能力。模型边界条件设置为：主管施加外荷载，四根支管采用铰接约束，其中两支支管受拉、两支支管受压。两种形式的KK节点承载力分析结果如图4～5所示，由图可知：当主管端部荷载达到279 kN时(图4)，纯钢主管发生屈曲，出现塑性破坏；而同荷载作用下，钢管混凝土节点整体应力水平较低，未发生破坏。继

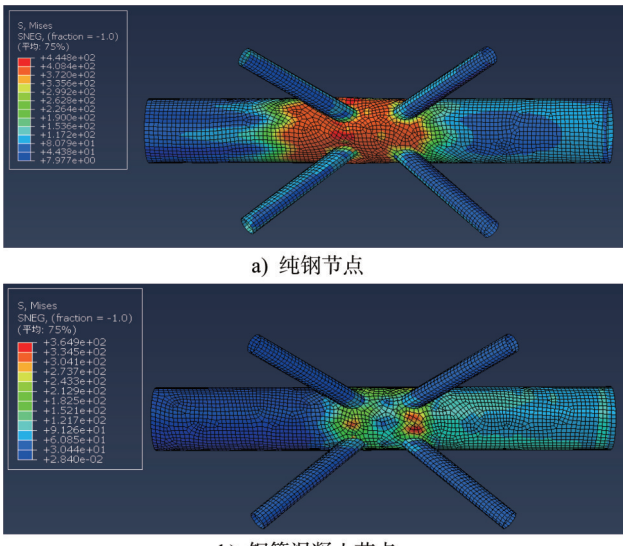


a) 纯钢结构　　b) 角柱填充混凝土结构

图3　纯钢与钢管混凝土导管架基础示意图

Fig. 3　Schematic diagram of jacket foundation with steel and CFST members

续对钢管混凝土节点加载，直至荷载达到1 006 kN时（图5），节点发生冲剪破坏。



a) 纯钢节点

b) 钢管混凝土节点

图4　纯钢与钢管混凝土KK节点应力分布（单位：MPa）

Fig. 4　Stress distribution of steel and CFST KK-joint（unit：MPa）

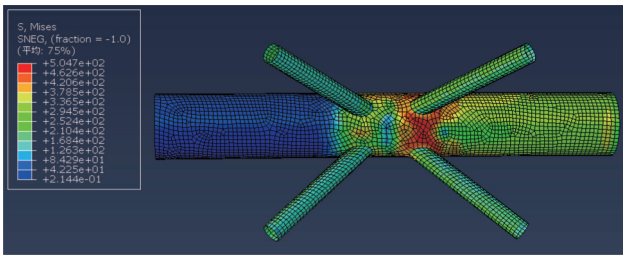


图5　钢管混凝土KK节点应力分布（单位：MPa）

Fig. 5　Stress distribution of CFST KK-joint（unit：MPa）

分析结果表明，在导管架易损节点及杆件内部填充混凝土，可显著提升节点承载力与结构抗疲劳性能；同时可优化钢管壁厚、减少钢材用量，实现结构降本增效。该技术能够突破传统纯钢导管架局部易屈曲、疲劳寿命偏低、建设成本偏高的技术瓶颈，可为海上风电工程的安全、经济建设提供技术支撑。

2.3　一体化数值模拟流程与工况定义

结合前文钢管混凝土刚度假定，建立钢管混凝土导管架支撑结构的弹性数值模型。本研究团队开展了钢管混凝土导管架海上风电物理模型试验研究，试验结果表明，钢管混凝土导管架阻尼比为3%，纯钢导管架阻尼比为1%。基于莫里森方程分别构建两类导管架的水动力计算模型，结合IEA 15 MW风电机组空气动力学模型与伺服控制系统模型，建立纯钢与钢管混凝土导管架海上风电的一体化耦合数值分析模型（图6）。

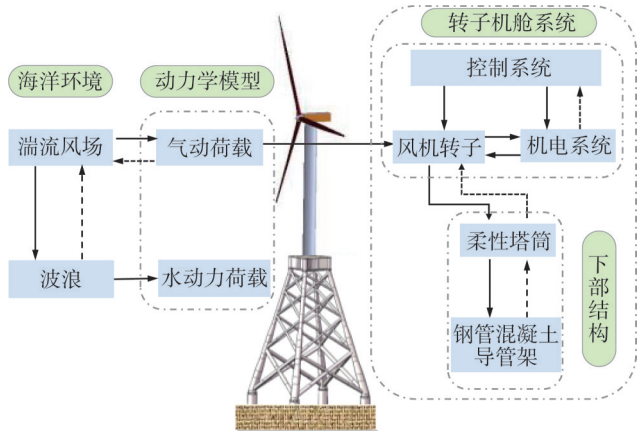


图6　海上风电钢管混凝土导管架荷载-结构数值计算模型

Fig. 6　Numerical load-structure coupling model for offshore wind power CFST jacket

结合我国近海实际海洋环境条件，划分四类计算工况，涵盖机组正常运行与极限停机状态。单次模拟总时长设置为800 s，为消除瞬态效应影响，剔除前200 s时程数据。每种工况采用三组不同随机种子数开展模拟计算，最终取三组结果的平均值作为统计数据，保障数据准确性。具体工况参数如表2所示。

表2　计算工况

Table 2　Calculation cases

工况	风速/（m·s^{-1}）	湍流度	波高/m	周期/s	备注
LC1	8.00	0.12	1.25	5.5	低于额定风速
LC2	10.59	0.12	2.00	7.2	额定风速
LC3	18.00	0.12	5.00	9.0	高于额定风速
LC4	28.00	0.12	6.70	12.1	停机

3 两类导管架耦合动力响应对比分析

基于建立的一体化耦合数值模型，开展风浪联合作用下海上风电导管架的时域动力响应计算，重点对比纯钢与钢管混凝土结构的塔顶位移、机舱加速度、塔基与泥面线剪力、基础纵荡及纵摇响应差异。图7为额定风速下海上风电纯钢与钢管混凝土导管架机舱加速度与塔基剪力时程曲线对比。

基于时域数值模拟结果进行最大值、标准差与相对误差统计，开展海上风电纯钢与钢管混凝土导管架的动力响应对比。选取海上风电纯钢导管架的动力响应数据作为基准值，计算海上风电钢管混凝土与纯钢导管架动力响应的相对误差。

图8以及表3分别为海上风电纯钢导管架与钢管混凝土导管架在正常运行与极端工况下塔顶位移、机舱加速度与基础运动的最大值与标准差对比。表中相对误差R_E的计算公式为：

$$R_E=\frac{X_{CFST}-X_S}{X_S}\times 100\% \tag{4}$$

式中：X_{CFST}与X_S分别为钢管混凝土与纯钢导管架响应标准差。

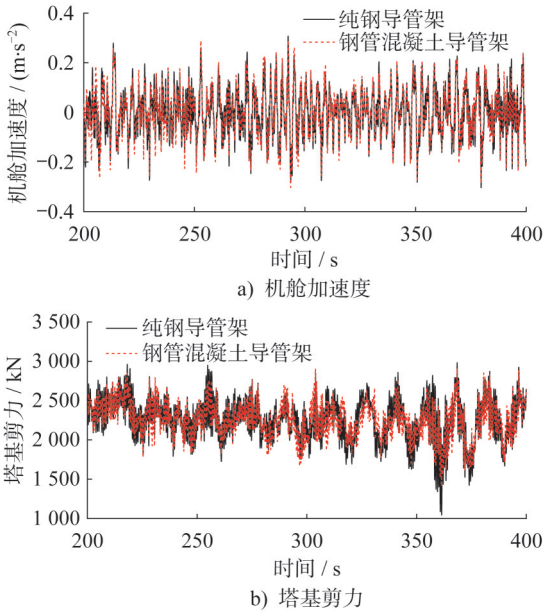


图7 额定风速下机舱加速度与塔基剪力时程曲线

Fig. 7 Time-history curves of nacelle acceleration and tower base shear force under rated wind speed

由图8与表3可知，正常运行工况下，塔顶位移在额定风速下最大，随着入流风速超过额定风速，风电机组开

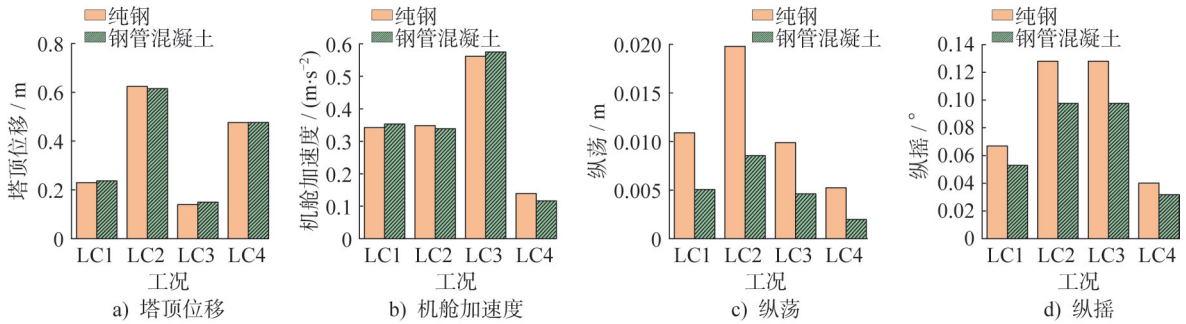


图8 纯钢与钢管混凝土导管架运动最大值对比

Fig. 8 Comparison of maximum motion values between steel and CFST jacket

表3 海上风电纯钢与钢管混凝土导管架运动响应对比

Table 3 Comparison of motion response between offshore wind power steel and CFST jacket

工况	类型	塔顶位移/m		机舱加速度/(m·s^{-2})		基础纵荡/m		基础纵摇/°	
		标准差	相对误差R_E	标准差	相对误差R_E	标准差	相对误差R_E	标准差	相对误差R_E
LC1	纯钢	0.029	8.0%	0.089	6.9%	0.001	−53.7%	0.005	−17.1%
	钢管混凝土	0.032		0.095		0.000		0.004	
LC2	纯钢	0.055	−5.6%	0.093	2.5%	0.001	−58.0%	0.009	−26.2%
	钢管混凝土	0.052		0.096		0.001		0.007	
LC3	纯钢	0.038	1.6%	0.137	2.5%	0.001	−54.6%	0.007	−22.2%
	钢管混凝土	0.039		0.141		0.001		0.005	
LC4	纯钢	0.022	−26.6%	0.049	−27.0%	0.001	−63.4%	0.003	−43.9%
	钢管混凝土	0.016		0.036		0.000		0.002	

启变速变桨策略，作用于轮毂处的推力变小使得塔顶运动逐渐减小。而对于机舱加速度而言，在高于额定风速工况下，由于转子开启变桨以及变速控制，机舱加速度的波动显著增加。导管架基础纵荡以及纵摇运动受轮毂推力影响，额定风速(LC2)下基础的纵荡以及纵摇运动较大。

钢管内填充混凝土后，可显著提升钢管的抗压刚度与整体抗弯刚度，从而提高整体结构的承载力；加之钢管混凝土导管架阻尼比(3‰)高于纯钢导管架阻尼比(1‰)，因此在额定风速下运行时，相比于纯钢导管架基础，钢管混凝土导管架基础的塔顶运动最大值与标准差有所降低。以标准差为例，海上风电纯钢与钢管混凝土导管架的塔顶运动分别为0.055与0.052，海上风电钢管混凝土导管架的塔顶运动相比于纯钢导管架的塔顶运动下降了5.6%。在低于额定风速与高于额定风速工况下，海上风电钢管混凝土导管架的塔顶运动有一定上升，标准差分别增长8.0%与1.6%。而对于机舱加速度，钢管混凝土导管架相比于纯钢导管架结构响应略有增加。由于导管架基础在填充混凝土后整体抗弯刚度明显增强，在正常运行工况下基础的纵荡以及纵摇运动均有明显降低。

在极端工况下风电机组停机，波浪荷载对海上风电导管架的动力响应影响占比增加，由于钢管混凝土导管架基础刚度相比于传统钢结构导管架基础刚度明显增加，塔顶运动、机舱加速度与基础运动响应均有明显的降低。以塔顶运动为例，相比于纯钢结构，钢管混凝土导管架的塔顶运动标准差降低26.6%。

图9与表4分别为不同工况下纯钢与钢管混凝土导管架轮毂推力、塔基剪力与泥面线剪力的最大值与标准差对比。由图9与表4可知，在正常运行工况下，轮毂推力、塔基剪力与泥面线剪力较大，且在额定风速下达到最大。而在极端工况下，导管架荷载主要受波浪荷载控制。同时由于波浪荷载主要作用于导管架基础位置，波浪荷载对泥面线剪力的影响相比于对轮毂推力与塔基剪力的影响更大。

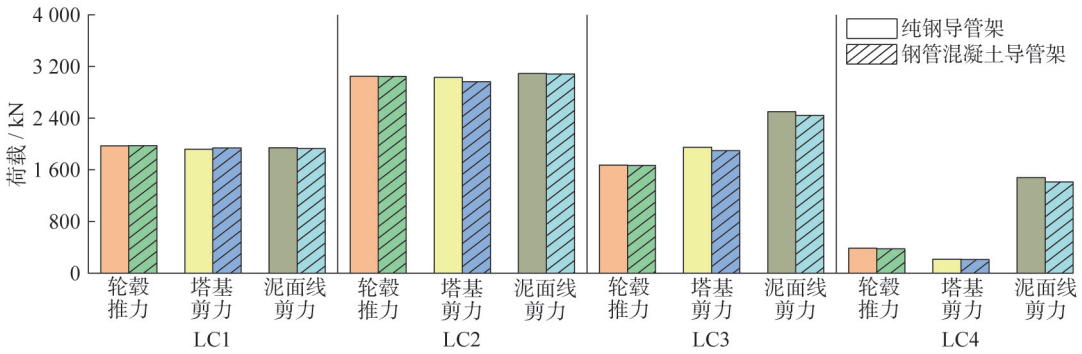


图9　纯钢与钢管混凝土导管架荷载最大值对比

Fig. 9　Comparison of maximum load value between steel and CFST jacket

表4　海上风电纯钢与钢管混凝土导管架荷载响应对比

Table 4　Comparison of load response between offshore wind power steel and CFST jacket

工况	类型	轮毂推力		塔基剪力		泥面线剪力	
		标准差/kN	相对误差 R_E	标准差/kN	相对误差 R_E	标准差/kN	相对误差 R_E
LC1	纯钢	54.78	0.6%	143.77	−3.9%	153.55	−6.4%
	钢管混凝土	55.08		138.19		143.71	
LC2	纯钢	141.83	−5.7%	221.04	−6.6%	246.66	−7.2%
	钢管混凝土	133.71		206.45		228.84	
LC3	纯钢	81.35	−0.8%	258.82	−9.1%	412.95	−5.2%
	钢管混凝土	80.72		235.28		391.65	
LC4	纯钢	22.29	−23.9%	62.47	−28.5%	496.63	−0.5%
	钢管混凝土	16.97		44.65		494.14	

角柱填充混凝土可有效降低结构所受荷载。在正常运行工况下，钢管混凝土导管架的轮毂推力、塔基剪力、泥面线剪力标准差较纯钢结构导管架的轮毂推力、塔基剪力、泥面线剪力标准差分别降低5.7%、6.6%、7.2%。标准差可反映荷载波动的剧烈程度，该结果说明组合结构荷载波动更小，抗疲劳性能显著提升。在极限停机工况下，与纯钢导管架相比，钢管混凝土导管架的轮毂推力、塔基剪力标准差降幅分别达23.9%、28.5%。其原因

在于：极端工况下，钢管混凝土导管架基础运动相比于纯钢导管架基础运动幅度更小，而塔基剪力、泥面线剪力等受基础运动影响较大，进而海上风电钢管混凝土导管架表现出较小的结构荷载。

4 结论

本文基于传统纯钢结构导管架海上风电基础，提出一种钢管混凝土导管架海上风电基础方案，开展了角柱填充混凝土的KK节点有限元分析，随后构建了海上风电纯钢导管架与钢管混凝土导管架的耦合数值计算模型，开展了风浪联合作用下海上风电钢管混凝土导管架结构的一体化耦合数值计算。得到的结论如下：

（1）角柱内填充混凝土可有效提升结构承载力与抗疲劳性能，并通过优化管壁厚度减小钢材用量，实现降本增效，本文中角柱内填充混凝土后钢材用量降低了17.3%，可为后续的导管架海上风电基础设计提供参考。

（2）耦合数值分析结果表明：钢管混凝土导管架在正常运行时，相较于纯钢导管架，其塔顶位移、基础纵荡和纵摇运动有所降低，但机舱加速度略有增加，且整体结构的荷载响应和动力响应波动程度有所减小，显示出更好的抗疲劳性能；在极端工况下，钢管混凝土导管架海上风电运动和荷载响应均显著低于纯钢导管架海上风电运动和荷载响应，表明前者具有更高的结构安全性。

后续将进一步构建基于非线性有限元方法的海上风电钢管混凝土导管架数值计算模型，深入考察风浪联合作用下钢管混凝土导管架的极限荷载以及疲劳性能，并深入开展海上风电钢管混凝土导管架的物理模型试验探究，对数值模型结果进行验证。

参考文献：

[1] 王立忠，王立林，洪义，等. 海上风电技术发展趋势[J]. 能源工程，2024，44(6)：3-12. DOI：10.16189/j.nygc.2024.06.001.
WANG Lizhong, WANG Lilin, HONG Yi, et al. Offshore wind power technology development trends [J]. Energy Engineering, 2024, 44(6): 3-12. DOI: 10.16189/j.nygc.2024.06.001.(in Chinese)

[2] 国家能源局. 风电发展“十三五”规划[R/OL]. 2016-11-16. https://www.gov.cn/xinwen/2016-11/30/5140637/files/2bf9f0e12d00443fb99aea2753a5de5a.pdf.
National Energy Administration. Wind power development in the 13th five-year plan[R/OL]. 2016-11-16. https://www.gov.cn/xinwen/2016-11/30/5140637/files/2bf9f0e12d00443fb99aea2753a5de5a.pdf.(in Chinese)

[3] 国家发展改革委员会，国家能源局，财政部，等. “十四五”可再生能源发展规划[R/OL]. 2022-06-01. https://zfxxgk.nea.gov.cn/1310611148_16541341407541n.pdf.
National Development and Reform Commission, National Energy Administration, Ministry of Finance, et al. Renewable energy development in the 14th five-year plan[R/OL]. 2022-06-01. https://zfxxgk.nea.gov.cn/1310611148_16541341407541n.pdf.(in Chinese)

[4] WFO. Global offshore wind report [R/OL]. 2024-04-22. https://wfo-global.org/wp-content/uploads/2024/04/WFO-Report-2024Q1.pdf.

[5] WEI Z W, SHI H D, CAO F F, et al. Study on the power performance of wave energy converters mounted around an offshore wind turbine jacket platform[J]. Renewable Energy, 2024, 221: 119786. DOI:10.1016/j.renene.2023.119786.

[6] SHI W, PARK H, HAN J, et al. A study on the effect of different modeling parameters on the dynamic response of a jacket-type offshore wind turbine in the Korean Southwest Sea[J]. Renewable Energy, 2013, 58: 50-59. DOI:10.1016/j.renene.2013.03.010.

[7] 冯涌. 海上风机导管架基础新型过渡段优化设计研究[D]. 杭州：浙江科技大学，2024.
FENG Yong. Research on optimization design of new transition sections for offshore wind turbine conduit foundations[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Science and Technology, 2024.(in Chinese)

[8] 王建超. 波浪作用下导管架式基础体系动力响应与疲劳特性分析[D]. 大连：大连海事大学，2023.
WANG Jianchao. Dynamic response and fatigue characteristics analysis of jacket foundation system under wave action[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2023.(in Chinese)

[9] 李柏林. 海冰碰撞风机导管架结构的动力特征研究[D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学，2023.
LI Bolin. Study on dynamic characteristics of wind turbine jacket structure in the sea ice collision[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2023.(in Chinese)

[10] 赵一凡，张才亮，栾富豪，等. 深水海上风机吸力桶导管架基础承载特性[J]. 中国海洋平台，2024，39(3)：15-20. DOI:10.12226/j.issn.1001-4500.2024.03.20240303.
ZHAO Yifan, ZHANG Cailiang, LUAN Fuhao, et al. Bearing characteristics of suction bucket jacket foundation for deepwater offshore wind turbines [J]. China Offshore Platform, 2024, 39(3): 15-20. DOI:10.12226/j.issn.1001-4500.2024.03.20240303.(in Chinese)

[11] 王嘉其，王宝来，刘旭东. 导管架式海上风机基础结构优化设计[J]. 船舶，2023，34(5)：47-56. DOI:10.19423/j.cnki.31-1561/u.2023.05.047.
WANG Jiaqi, WANG Baolai, LIU Xudong. Structural optimization design of jacket offshore wind turbine infrastructure[J]. Ship & Boat, 2023, 34(5): 47-56. DOI: 10.19423/j.cnki.31-1561/u.2023.05.047.(in Chinese)

[12] 王浩然，马婷婷，蔡玮镇. 导管架式海上风机动力特性桩土效应研究[J]. 建筑结构，2022，52(增刊1)：2468-2473. DOI:10.19701/j.jzjg.22S1560.

WANG Haoran, MA Tingting, CAI Weizhen. Pile-soil effect study on dynamic characteristics of jacket offshore wind turbine[J]. Building Structure, 2022, 52(Suppl.1): 2468-2473. DOI:10.19701/j.jzjg.22S1560.(in Chinese)

[13] REN C, AOUES Y, LEMOSSE D, et al. Comparative study of load simulation approaches used for the dynamic analysis on an offshore wind turbine jacket with different modeling techniques[J]. Engineering Structures, 2021, 249: 113308. DOI:10.1016/j.engstruct.2021.113308.

[14] PAN Z X, LIU Y Z, WANG W H, et al. Evaluating effectiveness of multiple tuned mass dampers for vibration control of jacket offshore wind turbines under onshore and seafloor earthquakes [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2023, 22(4): 1045-1063. DOI: 10.1007/s11803-023-2207-7.

[15] 王宇航, 徐浩然, 周绪红, 等. 预应力中空夹层钢管混凝土构件拉-压滞回性能试验研究[J]. 建筑钢结构进展, 2025, 27(3): 12-21. DOI:10.13969/j.jzgjgjz.20231008001.
WANG Yuhang, XU Haoran, ZHOU Xuhong, et al. Experimental study on tensile-compressive hysteretic performance of prestressed concrete-filled double-skin steel tubular members[J]. Progress in Steel Building Structures, 2025, 27(3): 12-21. DOI:10.13969/j.jzgjgjz.20231008001.(in Chinese)

[16] 李欢欢. 风机塔筒不同抗剪连接件矩形钢管混凝土束剪力墙抗震性能研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2023.
LI Huanhuan. Study on the seismic performance of rectangular steel tube concrete bundle shear walls with different shear connectors of wind turbine towers[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2023.(in Chinese)

[17] 闻洋, 吴夏至, 熊林, 等. 两种新型钢管混凝土格构式风电塔架节点损伤机理对比分析[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2023, 50(1): 69-77. DOI:10.16339/j.cnki.hdxbzkb.2023007.
WEN Yang, WU Xiazhi, XIONG Lin, et al. Comparative analysis on damage mechanism of two new types of concrete filled steel tubular lattice wind turbine tower joints [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2023, 50(1): 69-77. DOI: 10.16339/j.cnki.hdxbzkb.2023007.(in Chinese)

[18] 周扬, 骆光进, 李晓艳, 等. 海上风电机组预应力钢管混凝土格构式塔架动力特性分析[J]. 船舶工程, 2022, 44(增刊2): 112-115. DOI:10.13788/j.cnki.cbgc.2022.S2.22.
ZHOU Yang, LUO Guangjin, LI Xiaoyan, et al. Dynamic characteristics analysis of prestressed concrete-filled steel tubular lattice tower of offshore wind turbines [J]. Ship Engineering, 2022, 44(Suppl.2): 112-115. DOI:10.13788/j.cnki.cbgc.2022.S2.22.(in Chinese)

[19] 侯雯峪. 基于钢管混凝土桩的海上风电基础受力性能研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2013.
HOU Wenyu. Research on the mechanical properties of concrete filled steel tube pile foundation on the sea for wind power[D]. Shenyang: Northeastern University, 2013.(in Chinese)

[20] 时成龙. 海上风机中空夹层钢管混凝土组合导管架基础冲击试验研究与破坏机理分析[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2024.
SHI Chenglong. Experimental study and failure mechanism analysis of impact test of offshore wind turbine concrete filled double skin steel tube composite jacket foundation [D]. Qingdao: Qingdao University of Technology, 2024.(in Chinese)

[21] 宋丹. 基于防屈曲支撑的导管架大型风机抗冰、抗震性能研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2023.
SONG Dan. Research on anti-icing and seismic performance of large wind turbines in conduit frame based on anti-buckling support[D]. Qingdao: Qingdao University of Technology, 2023.(in Chinese)

[22] 李玉成, 滕斌. 波浪对海上建筑物的作用[M]. 2版. 北京: 海洋出版社, 2002.
LI Yucheng, TENG Bin. Wave action on maritime structures [M]. 2nd ed. Beijing: Ocean Press, 2002.(in Chinese)

[23] FALTINSEN O M. Sea Loads on Ships and Offshore Structures [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1993.

[24] API RP 2A-WSD Recommended practice for planning, designing and constructing fixed offshore platforms—Working stress design[S].

[25] LEDOUX J, RIFFO S, SALOMON J. Analysis of the blade element momentum theory [J]. SIAM Journal on Applied Mathematics, 2021, 81(6): 2596-2621. DOI: 10.1137/20m133542x.

[26] LI Z G, GAO Z Y, CHEN Y Y, et al. Unsteady dynamic load and output performance of the rotor using the dynamic wake theory [J]. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, 2024, 46(1): 7257-7273. DOI:10.1080/15567036.2020.1752858.

[27] 马欣伯, 张素梅. 各国规程关于圆钢管混凝土构件刚度计算方法的介绍与比较[J]. 工业建筑, 2004, 34(2): 75-78. DOI:10.13204/j.gyjz2004.02.022.
MA Xinbo, ZHANG Sumei. Introduction and comparison of calculation methods of the stiffness of concrete-filled circular steel tubes in different codes [J]. Industrial Construction, 2004, 34(2): 75-78. DOI: 10.13204/j.gyjz2004.02.022.(in Chinese)

[28] GAERTNER E, RINKER J, SETHURAMAN L, et al. Definition of the IEA15-Megawatt offshore reference wind turbine [R]. Golden: National Renewable Energy Lab. (NREL), 2020: 44.