

台风-浪-流耦合作用下海上 10 MW 级特大型 风力机风荷载特性分析

柯世堂^{1,2}, 王 硕^{1,2}, 赵永发^{1,2}, 张 伟^{1,2}, 李 晔³

(1. 南京航空航天大学土木与机场工程系, 江苏 南京 211106;

2. 南京航空航天大学江苏省风力机设计高技术研究重点实验室, 江苏 南京 211106;

3. 上海交通大学海洋工程国家重点实验室, 上海 200240)

摘要: 为揭示海上台风-浪-流耦合作用下海上风力机的风荷载分布特性, 以广东外罗 10 MW 特大型风力机为研究对象, 采用 Model Coupling Toolkit (MCT) 建立中尺度 WRF-SWAN-FVCOM (W-S-F) 实时耦合模拟平台, 分析超强台风“威马逊”过境全过程海上风电场台风-浪-流的时空演变, 再结合中/小尺度嵌套方法分析了风力机风荷载分布特性与叶片-塔筒-波浪面之间的干扰效应, 提出了极端风况下海上风力机典型位置极值荷载模型。结果表明: 建立的中尺度 W-S-F 耦合平台能准确模拟台风、波浪和海流间的相互作用; 塔筒风荷载在叶片干扰段以横风向为主, 在波浪干扰段以顺风向为主, 并在低空波面附近表现出较强的脉动特征; A 位置叶片最安全而 B 位置最危险; T4 相位为海上风力机单桩基础强度设计的最不利相位, 基底剪力最大达 7.68×10^6 量级, 基底弯矩最大达 5.2×10^8 量级。

关键词: 风荷载分布; 台风-浪-流耦合模拟; 海上风力机; 中/小尺度嵌套; 干扰效应

中图分类号: TU312⁺.1; TK83 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-4523(2023)02-0299-12

DOI: 10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.2023.02.001

引 言

与陆上相比, 海上风力机运行环境更加恶劣, 承受复杂多变的风况与海况, 面临台风、巨浪、急流等极端复杂海洋环境的严峻挑战。尤其是台风过程中三者交互运动衍生出台风-浪-流耦合的复杂形态^[1-2], 由此导致的海上风力机风毁事故屡见不鲜^[3-6], 成为海上风电产业持续发展的技术瓶颈。

目前, 针对台风形成的极端海洋气候的研究主要依赖于数值模拟。其中, WRF 模式可考虑多物理过程模拟真实大气和地形下的风场, 是目前应用最广泛的台风研究与预报技术^[7]; 第三代海浪模式 SWAN 可模拟近岸波浪传播变形、风浪及涌浪, 在中国渤海^[8]、东海^[9]和南海^[10]的台风浪模拟中得到了大量验证; 有限体积海洋模式 FVCOM 具备模拟海湾、滩涂等复杂边界对于海流动力环境影响的能力, 广泛应用于海流运动的研究^[11]。然而, 台风、浪、流三者在交互运动中存在强烈的耦合作用: 台风掀起巨浪显著改变海表面粗糙度; 波浪辐射应力为海流流动提供驱动力; 海

流运动导致波浪传播变形。已有研究大多忽略了台风、浪、流三者间的反馈信息, 单一模式无法精确模拟台风过程中的特异性风场。

考虑到台风模拟网格分辨率为千米量级, 而风力机结构仅有百米量级, 若要准确模拟其结构表面的荷载分布状况, 则需提取厘米级以下的边界层网格信息, 此时上述中尺度模式将完全失效。小尺度 CFD 擅长模拟结构物附近的流体运动与压力波动, 被广泛应用于近海风力机风荷载分析^[12-16]。采用中/小尺度嵌套方法^[17-18]进行海上风力机台风场的降尺度模拟是解决该问题的新思路, 其中中尺度流场与小尺度结构的多层次网格嵌套、高精度传递、多时间尺度控制、跨尺度突变等问题的处理是关键。

鉴于此, 基于 MCT 建立中尺度 W-S-F 耦合模拟平台, 首先分析了“威马逊”过境中国南海, 广东外罗风电场中的台风-浪-流的时空演变特性; 其次, 结合小尺度 CFD 台风-浪-流数值水池分析了极端工况下风力机结构风荷载分布特性; 最后, 分析叶片-塔筒-波浪面之间的干扰效应, 并提出了海上风力机典型位置极值荷载模型。

收稿日期: 2021-06-26; **修订日期:** 2021-11-16

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (2017YFE0132000, 2019YFB1503700); 国家自然科学基金资助项目 (51761165022, 5207080548, 52211530086); 国家自然科学基金国际(地区)合作与交流项目 (52211530086)。

式中 H, T, L 和 d 分别为波浪的波高、周期、波长和静水深度; k 为波数; ω 为圆频率。

波高方程 $\eta(x, t)$ 为:

$$\eta = \frac{H}{2} \cos(kx - \omega t) + \frac{\pi H^2}{8L} \frac{\cosh(kd)}{\sinh^3(kd)} \cdot \cos[2(kx - \omega t)] [\cosh(2kd) + 2] \quad (2)$$

波浪水平向流速 u_{wx} 为:

$$u_{wx} = \frac{\pi H}{T} \frac{\cosh[k(z+d)]}{\sinh(kd)} \cos(kx - \omega t) + 0.75 \frac{\pi^2 H^2}{TL} \frac{\cosh[2k(z+d)]}{\sinh^4(kd)} \cos[2(kx - \omega t)] \quad (3)$$

波浪垂直向流速 u_{wz} 为:

$$u_{wz} = \frac{\pi H}{T} \frac{\sinh[k(z+d)]}{\sinh(kd)} \sin(kx - \omega t) + 0.75 \frac{\pi^2 H^2}{TL} \frac{\sinh[2k(z+d)]}{\sinh^4(kd)} \sin[2(kx - \omega t)] \quad (4)$$

海流速度沿水深分布据 1/7 指数率^[20]:

$$u_c = \begin{cases} v_c (\frac{z}{0.32d})^{1/7}, & 0 < \frac{z}{d} < 0.5 \\ 1.07v_c, & 0.5 < \frac{z}{d} < 1 \end{cases} \quad (5)$$

式中 v_c 为海流的水深平均流速。

水质点水平向速度根据波流共同作用下流速场

理论^[21]定义:

$$u_x = u_{wx} + u_c \quad (6)$$

波面以上的台风风速依据《建筑结构荷载规范》^[22]采用指数率梯度风定义:

$$U_x = U_{10} (\frac{z - \eta}{10})^\alpha \quad (7)$$

式中 U_{10} 为基本风速; α 为风剖面指数。

2 数值模拟

2.1 中尺度 W-S-F 模拟

模拟对象为 2014 年第 9 号台风“威马逊”, 最大风力等级达 17 级, 为建国以来登陆中国的最强台风^[23]。WRF 子模式模拟包含 7 月 16 日 6 时到 19 日 6 时台风登陆南海全过程。大气初始边界条件基于全球历史再分析 FNL 数据, 区域空间分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$ 。水平方向采用三层双向自嵌套 Arakawa C 网格, 其分辨率从外至内依次为 9 km (d01), 3 km (d02), 1 km (d03); 最高等压面取为 5000 Pa, 高度方向沿地形欧拉质量坐标系共设置 37 层网格, 其中 1000 m 以下设置 19 层。地图投影采用 Mercator 方案, WRF 模拟参数化方案如表 1 所示。

表 1 WRF 模式物理方案参数设置

Tab. 1 Parameter setting of physical schemes of WRF

WRF 参数	主区域(d01)	嵌套区域(d02)	嵌套区域(d03)	模拟区域示意图
水平分辨率	9 km	3 km	1 km	
积分时间步长	30 s			
微物理过程方案	Kessler			
长波辐射	RRTM			
短波辐射	Dudhai			
近地面层方案	MYNN			
陆面过程方案	Noah			
边界层方案	MYNN2.5			
积云对流方案	Kain-Fritsch			

FVCOM, SWAN 共用一套非结构化网格。对近岸和水深变化剧烈处网格进行加密, 最小网格间距为 200 m, 最大网格间距为 10 km, 网格总数约为 7.5 万, 网格划分如图 4 所示。

SWAN 子模式海浪谱频率范围为 0.04~1 Hz 并离散为 100 个频段, 风速数据来自 WRF 子模式计算结果, 并考虑白帽耗散、底摩擦、波破碎及波-波非线性作用等物理过程; FVCOM 子模式采用 σ 坐标系, 沿高度方向设置 15 层网格。初始海温采用 NECP 提供的 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 分辨率全球日平均海表温度 RTG_SST, 潮位开边界使用 CHINATIDE 提取。

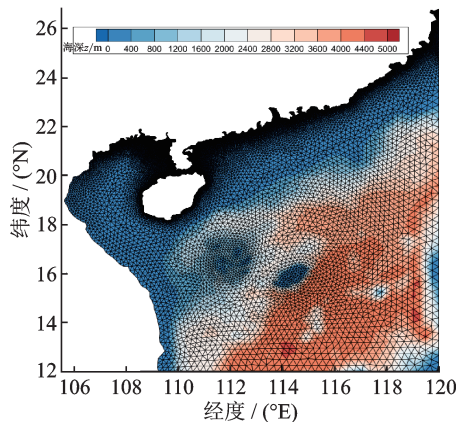


图 4 海域网格划分示意图

Fig. 4 Schematic diagram of sea area meshing

2.2 W-S-F 模拟有效性验证

表2给出了W-S-F平台、单WRF模式与日本气象台(JMA)台风路径对比结果。相比JMA最佳路径,单WRF模式与W-S-F平台模拟的台风移动路径均略偏北。单WRF模式的平均误差为43.85 km,而W-S-F的平均误差为25.21 km,W-S-F耦合平台对于台风路径的模拟精度提高了42.51%,最小误差仅有12.16 km。

以AVISO发布的Jason-2卫星波高遥感数据作为验证资料,图5给出了W-S-F平台波高模拟验证示意图。由图5可知:相比单一SWAN模式,W-S-F平台模拟结果与JASON-2卫星数据更加吻合,尤其在大波高区间具有更高的模拟精度,可验证中尺度W-S-F耦合平台模拟结果的有效性。

2.3 中尺度模拟结果分析

图6给出了台风登陆广东时台风-浪-流耦合模拟结果示意图。由图6可知:台风在移动过程中风

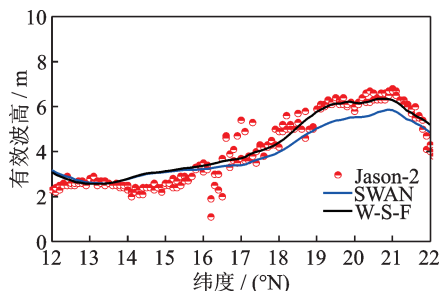


图5 波高验证示意图

Fig. 5 Wave height verification diagram

场围绕台风眼呈逆时针旋,且后眼壁区域风速大于前眼壁;波高的空间分布呈现“月牙状”,台风眼附近形成小浪区而在右侧形成大浪区;海流场对风场的响应存在显著的滞后性和偏右性,海流围绕台风眼后方逆时针流动,右侧流速显著大于左侧,且在台风眼右后方出现流速较大的回流区;在海南和广东登陆时,由于近岸浅水效应导致波高迅速降低,海流流速显著加快。

表2 台风路径模拟误差对比结果

Tab. 2 Comparison results of typhoon path simulation errors

模拟时间/h	台风移动路径/km			台风移动路径图
	JMA/WRF	JMA/W-S-F	WRF/W-S-F	
12	36.33	43.08	48.50	
18	69.86	62.72	34.45	
24	47.26	15.56	31.78	
30	55.42	19.78	44.94	
36	28.88	12.16	23.74	
42	51.94	14.90	35.70	
48	14.44	17.39	32.12	
54	51.12	21.93	39.44	
60	39.44	19.39	33.82	
平均误差	43.85	25.21	36.05	

图7给出了外罗风电场台风过境时的台风、浪、流时程曲线。由图7可知:基本风速随台风过境不同阶段呈现M型变化规律,基本风速最大值为45.54 m/s,出现在台风后眼壁区域(55 h);波浪与海流随台风场的响应具有一定滞后惯性,波高最大值为8.85 m;海流流速最大值为2.408 m/s。

2.4 小尺度CFD模拟

图8给出了海上风电场中风速最大时的台风剖面及湍流剖面。由图8可知:由W-S-F耦合平台输出结果拟合风剖面指数为0.091,而规范^[22]定义A类地貌的对应值为0.12,且同一高度处台风场的风速与湍流度数值明显高于A类良态风场。

已有研究表明:叶片完全遮挡塔筒时,风力机体系抗风性能处于最不利停机位^[24]。CFD模拟的入流边界选自W-S-F平台中风速最大时的台风-浪-流参数,工程概况如表3所示。

2.5 CFD网格划分

表4给出了不同网格方案下的参数对比。由表4可知:随着网格数的增加,网格质量逐渐增高,波高误差和网格歪斜度呈现逐渐减小趋势。方案四和方案五表明:随网格数量增加测点压力系数变化很小,方案五已达到网格无关条件,选取网格总数为3590万的方案。

图9为台风-浪-流数值水池网格划分示意图。网格划分采用混合网格离散形式,将整个计算域分

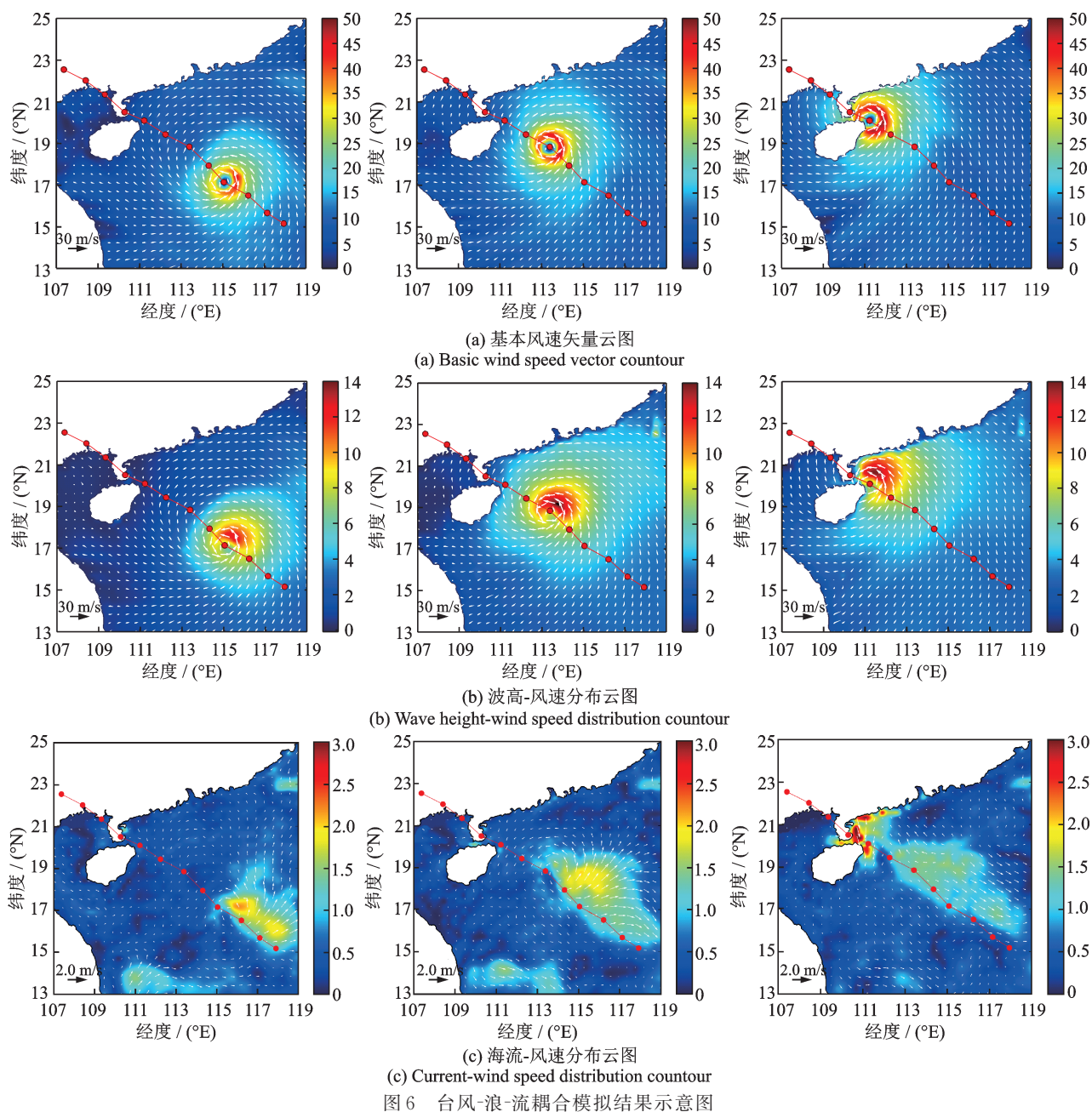


Fig. 6 Schematic diagram of simulation results of typhoon-wave-current coupling

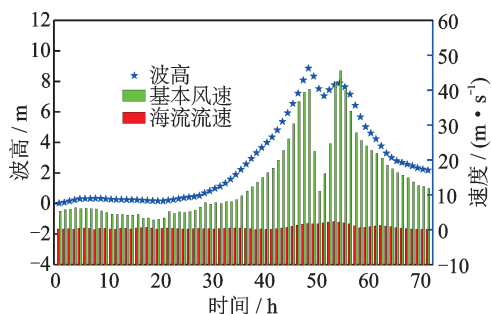


Fig. 7 Time-history curve of typhoon, wave and current

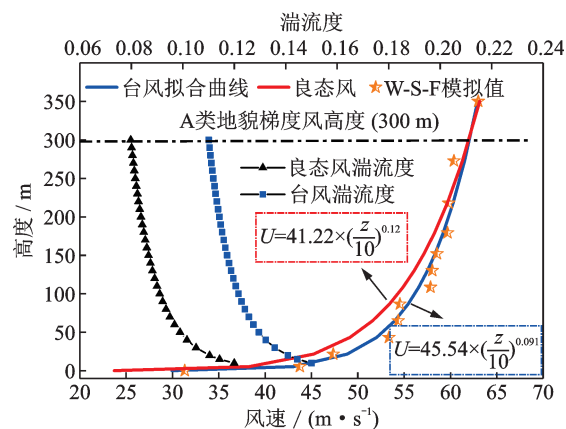


Fig. 8 Typhoon profile and turbulence profile

为内外两个部分。核心加密区采用四面体非结构化网格,风力机结构壁面第一层网格高度取为0.002 m,渐变率为1.1, y^+ 值范围在30~50。外围区域较为规整,采用六面体结构化网格,近波面网

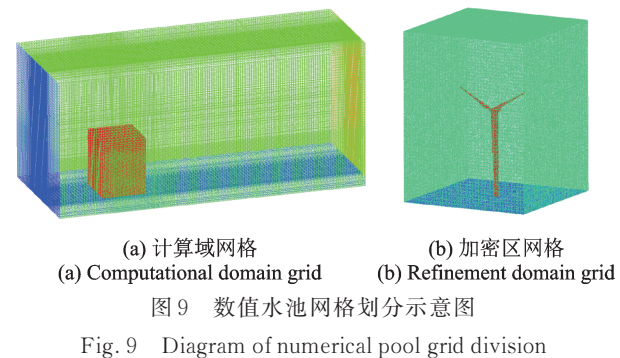
格分辨率取为 $\Delta x=L/150$, $\Delta y=H/10$, $\Delta z=H/30$ 。

表 3 工程概况表
Tab. 3 Project overview

参数名称	数值	海上风力机工况布置图	参数名称	数值
波高/m	7.89		塔筒高度/m	150.0
周期/s	9.23		塔顶半径/m	3.6
波长/m	126.73		塔底半径/m	4.5
基本风速/(m·s ⁻¹)	45.54		基础半径/m	4.5
风剖面指数	0.091		轮毂半径/m	3.2
海流流速/(m·s ⁻¹)	2.16		叶片长度/m	95.0
水深/m	28.12		叶尖预弯/m	4.5
风-浪-流夹角/(°)	0		机舱尺寸/m ³	24×8×8

表 4 网格无关性验证
Tab. 4 Grid independence verification

网格方案	网格总数/万	网格质量	网格歪斜度	波高误差/%	迎风面测点压力系数
一	913	0.14	0.96	—31.50	0.96
二	1324	0.36	0.85	—13.70	0.91
三	1993	0.44	0.8	—5.10	0.85
四	2783	0.51	0.75	—2.40	0.83
五	3590	0.58	0.73	—1.80	0.82



2.6 CFD 模拟有效性验证

图 10 给出了风力机未干扰段平均风压与规范曲线对比示意图。分析可知,台风场作用下风力机未干扰段塔架平均压力系数与规范^[22]沿环向分布规律基本一致,仅在背风区和侧风面的负压极值区略小于规范值,可验证 CFD 模拟的有效性。

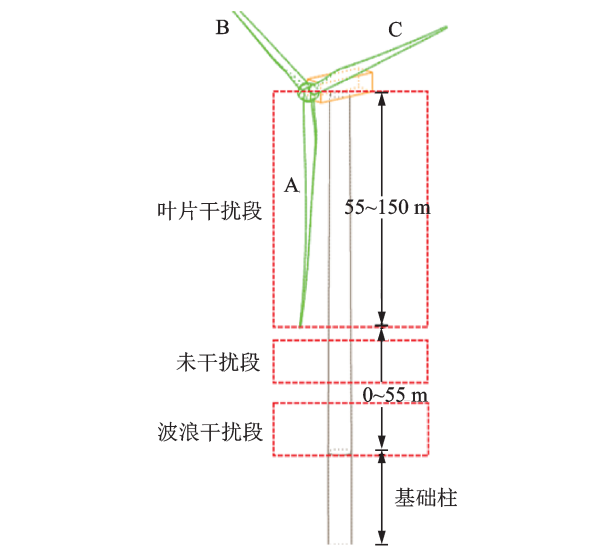
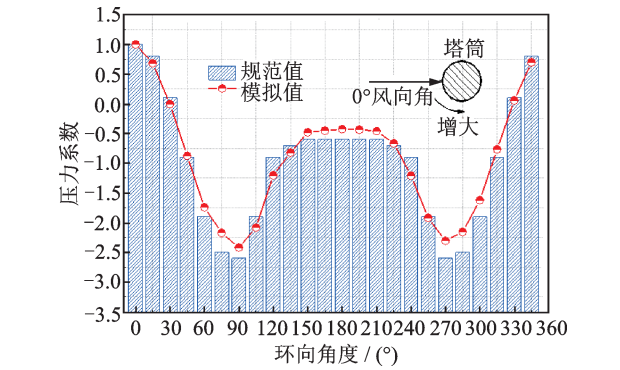


图 10 未干扰段平均风压与规范曲线对比示意图
Fig. 10 The average wind pressure in the undisturbed section is compared with the standard curve

3 风荷载特性分析

3.1 塔筒荷载分布

图 11 定义了风力机塔筒和叶片局部坐标系示意图,其中 X 向为顺风向风荷载, Y 向为横风向风荷载, Z 向为轴向风荷载。

将塔筒从下至上平均分为 15 段,每段 10 m,分别为 Cy1~Cy15。图 12 给出了风荷载沿塔筒高度分布箱视图,图中左右边界线为该段塔筒风荷载最值,矩形左、右沿代表概率分布为 25%,75% 的荷载值,标签数值为模拟时间内风荷载均值。分析可知: Cy1~Cy5 分段风荷载受波浪起伏干扰影响较大,但随高度增加影响作用逐渐减弱;顺风向风荷载分别在 Cy15, Cy12 达到正、负最值,横风向风荷载分别在 Cy10, Cy7 分段达到正、负最值,并在 Cy12 与 Cy13 分段出现顺风向负值风荷载。叶片干扰段以横风向风荷载为主,波浪干扰段以顺风向风荷载为主。

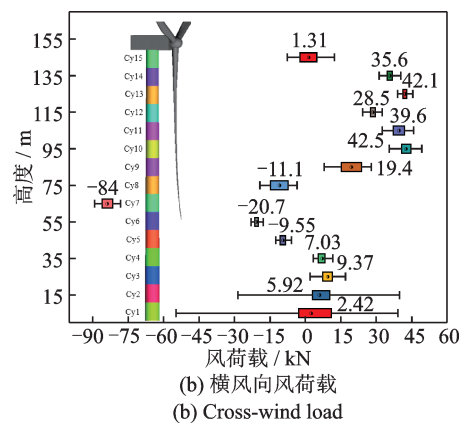
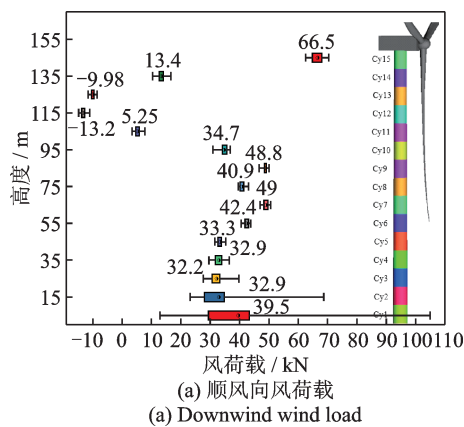
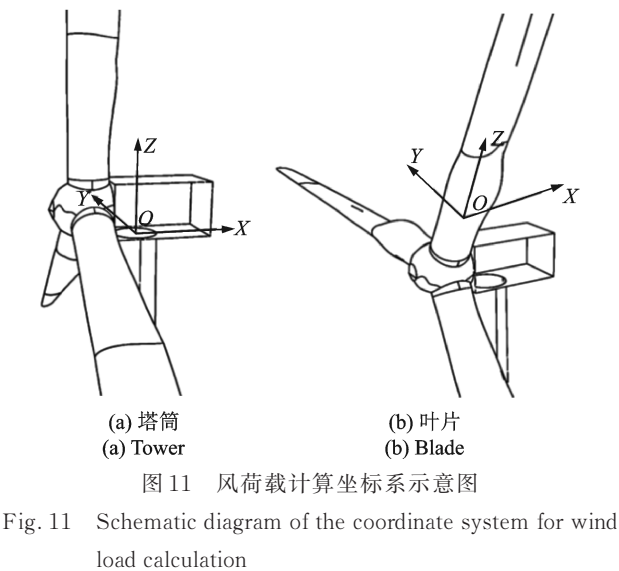


图 12 塔筒风荷载沿高度分布示意图

Fig. 12 Diagram of distribution of wind load along height of tower

3.2 干扰效应分析

为探究波浪面起伏对塔筒风荷载的干扰效应,图 13 给出了波浪面干扰段塔筒风荷载时程曲线。由图 13 可知:低空波面附近塔筒(Cy1~Cy2)所受风荷载受波浪起伏的干扰表现出较强的脉动特征,气流略过波峰产生加速效应导致顺风向风荷载出现“峰刺”激增现象,最大瞬时风荷载可达 108 kN;横风向风荷载表现为无明显规律的正负交替。

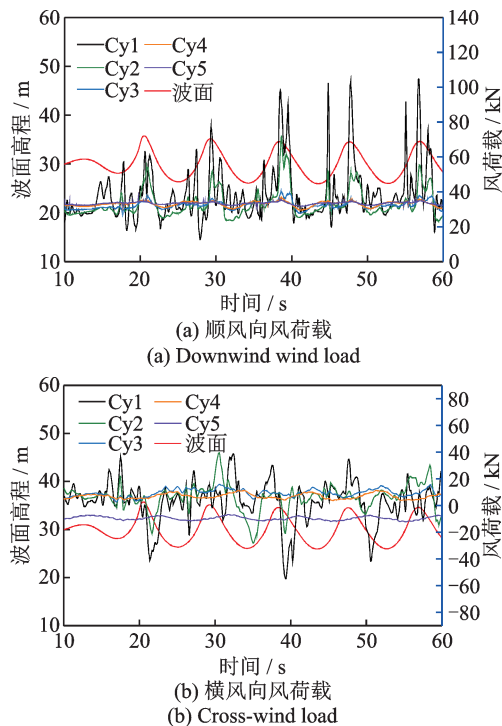


图 13 波浪干扰段塔筒风荷载时程曲线

Fig. 13 Time-history curve of wind load of tower in the interference section of wave surface

为探究“塔影效应”对塔筒风荷载的干扰,图 14 给出了塔筒沿高度方向的典型截面压力云图。由图

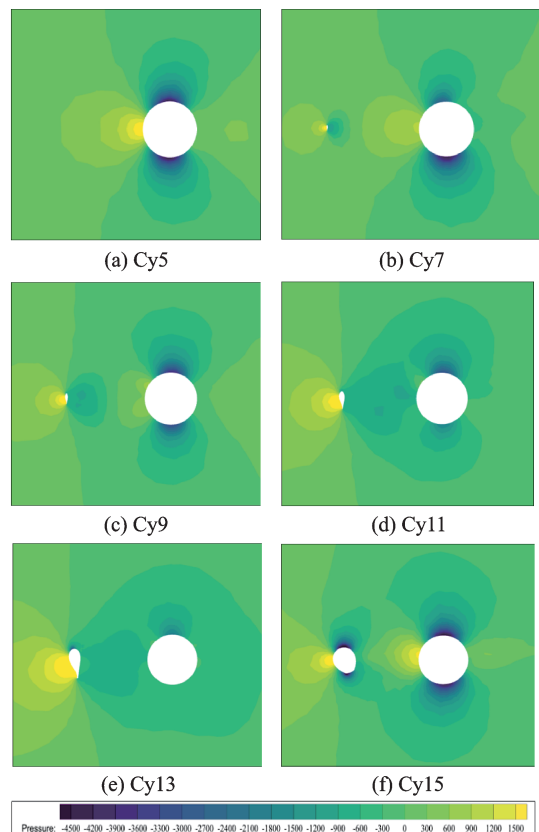


图 14 塔筒周围典型截面压力分布云图

Fig. 14 Countours of pressure distribution around typical section of tower

14可知:未干扰段塔筒附近压力场沿0°入流角呈现对称分布;随叶片遮挡面积的增大,塔筒与叶片之间的正压区域逐渐缩小,至Cy11分段正压区域消失。Cy13段塔筒周围已无正压区域,叶片与塔筒迎风面之间形成局部负压增幅区,且塔筒背风面压强大于迎风面导致其在顺风向出现负值荷载。

湍动能TKE(Turbulent Kinetic Energy)是单位质量流体的湍流脉动动能,是衡量湍流混合能力的重要指标,其表达式如下:

$$TKE = \frac{1}{2} (\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2}) \tag{8}$$

式中 u', v', w' 分别为 x, y, z 方向的脉动风速。

图15给出了塔筒沿高度方向典型截面湍动能分布云图。由图15可知:来流风经过叶片产生湍动能增幅区,在叶片上下边缘处湍动能值较大,背风面湍动能值较小。Cy11与Cy15截面的叶片和塔筒之间风场湍动能数值较大,导致压力场压力梯度较大;Cy13截面塔筒附近湍动能数值较小,导致该分段塔筒风荷载脉动特征相对较弱。

3.3 叶片荷载分布

图16给出了各叶片风荷载分布箱视图。由图16可知:顺/横风向风荷载沿叶展方向的变化较一致,均呈现先增大后减小的变化规律;顺/横风向风

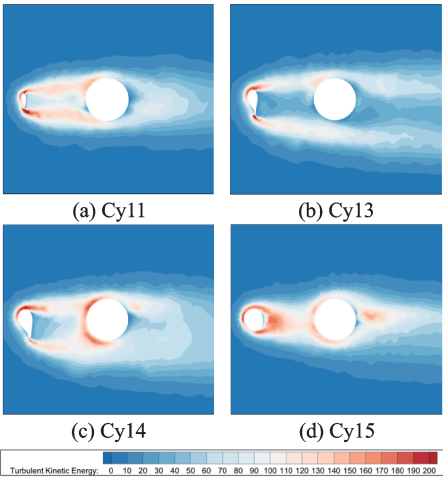


图 15 叶片干扰段典型截面湍动能分布云图

Fig. 15 TKE distribution on typical sections of blade interference

荷载最大值分别出现在距叶根21 m,13 m处,两者最小值均出现在叶尖位置,且横风向风载在叶尖附近接近于零;相比叶片A和C,叶片B在下半段风荷载表现出较强的脉动特征。“塔影效应”对塔筒风荷载干扰效应较强而对叶片干扰较弱。

图17给出了叶片B,C附近流场的湍动能分布云图。由图17可知:来流风经过叶片产生湍动能增幅区,在叶片上下边缘处湍动能值较大,在远流场区域,湍动能逐渐耗散减小。相比叶片C,叶片B在叶根附近具有更大的湍动能值,导致其风荷载表现出

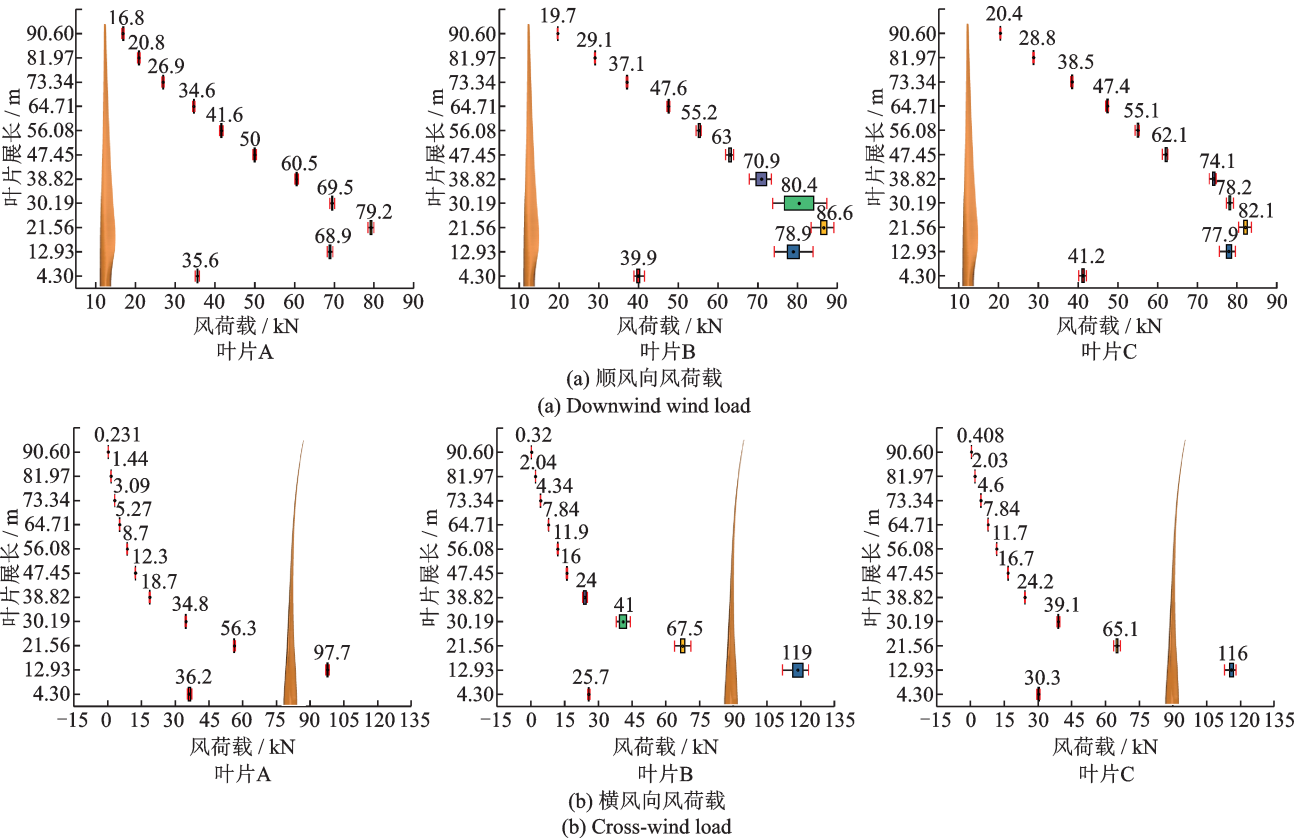


图 16 叶片风荷载分布示意图

Fig. 16 Diagram of windward load distribution on blades

更强的脉动特性。

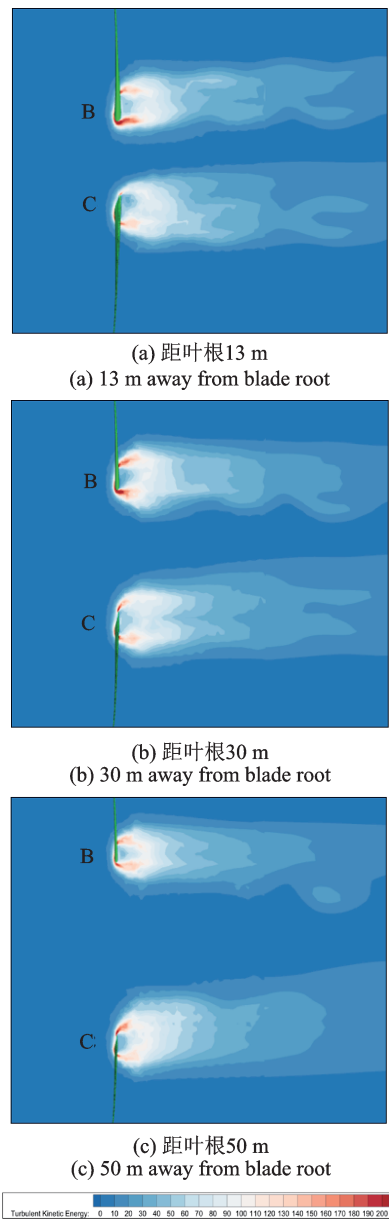


图 17 叶片 B,C 典型截面湍动能分布云图
Fig. 17 Countours of turbulent kinetic energy distribution on typical sections of blade B and C

图 18 给出了风力机叶根风荷载箱视图,图中上下三角形为荷载最值,圆点为模拟时间内风荷载均

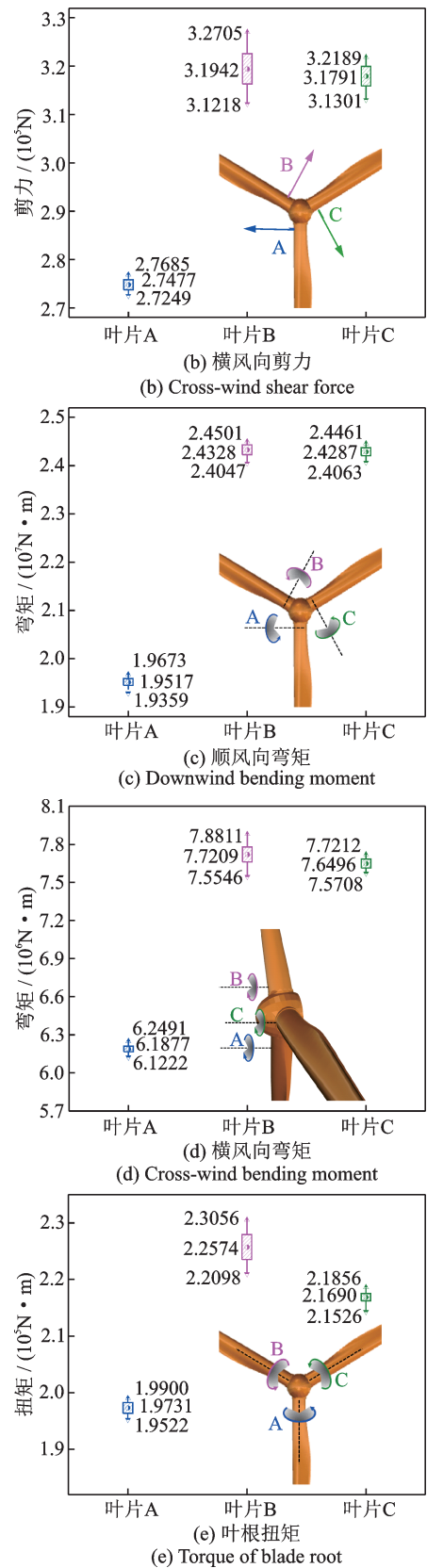
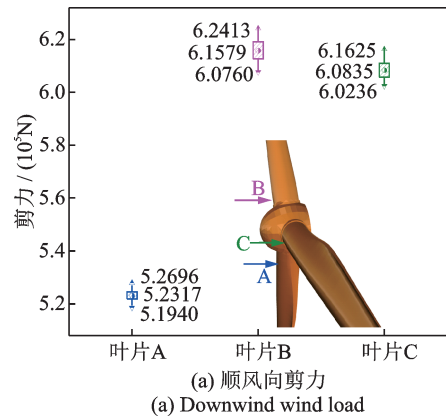


图 18 叶根风荷载箱视图
Fig. 18 Diagram of wind load at blade root

值,箭头代表作用力方向。由图 18 可知:顺风向风荷载占主导地位,顺风向叶根剪力约为横风向的两倍,最大值达到 6.24×10^5 量级;顺风向叶根弯矩约为横风向的三倍,最大值达到 2.45×10^7 量级;叶根

扭矩值仅为 2.31×10^5 量级。叶片 A 位置低, 风速小, 所受风荷载最小且脉动特性最弱, 为最安全叶片; 叶片 B 所受风荷载略大于叶片 A 与 C 且脉动特性最强, 为最危险叶片。

3.4 极值荷载

图 19 给出了风轮及塔筒根部极值荷载示意图。由图 19 可知: 风轮荷载主要集中在轴向推力与风轮转矩, 轴向推力达到 1.71×10^6 量级; 三个叶片的侧向力与偏航力矩接近内力平衡状态, 合力量级较小。塔筒根部风荷载集中在顺风向, 而横风向风荷载减小一个量级; 顺风向剪力达到 2.3×10^6 量级, 顺风向弯矩达到 3.16×10^8 量级, 扭矩数值极小, 可忽略不计。

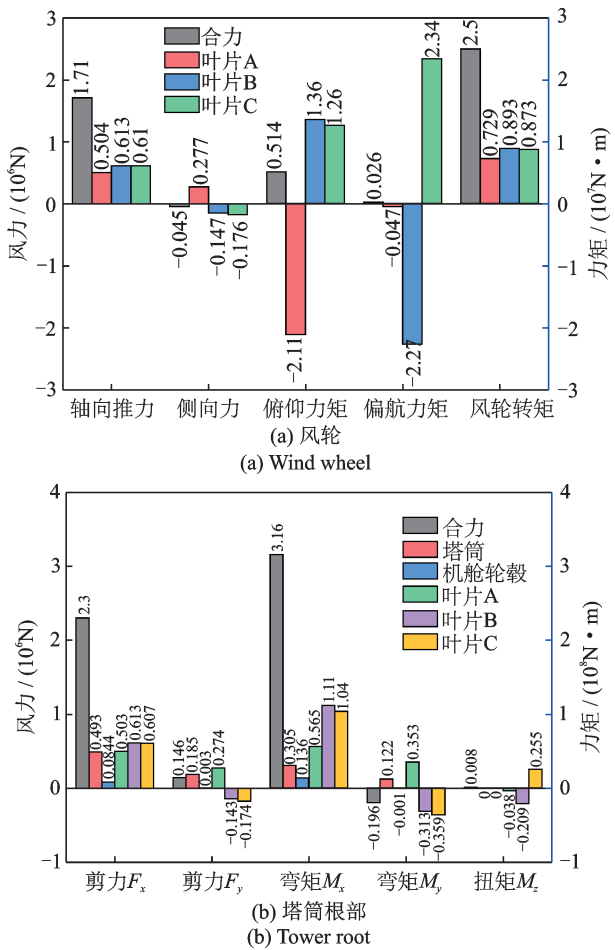


图 19 风轮及塔筒根部极值荷载示意图

Fig. 19 Schematic diagram of extreme load at the wind wheel and root of tower

图 20 给出了不同波浪相位下基础柱荷载极值示意图。由图 20 可知: 基底剪力与根部弯矩最大值均出现在 T4 相位, 为海上风力机单桩基础强度设计的最不利相位。基底剪力最大达到 7.68×10^6 量级, 其中水动荷载占主体; 基底弯矩最大达到 5.2×10^8 量级, 其中风荷载占主体。基底扭矩比弯矩值小三个量级, 且基本为上部机体风荷载所致, 水动荷载对

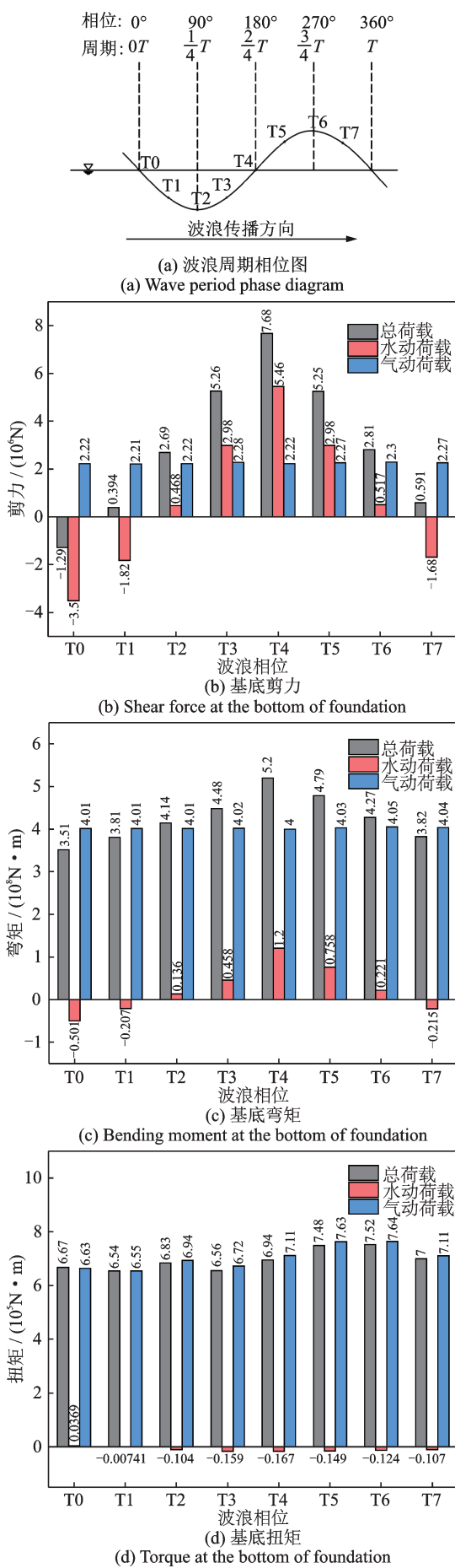


图 20 不同波浪相位下基础柱荷载极值柱状图

Fig. 20 Histograms of extremum loads of the foundation pile under different wave phases

基底扭矩的贡献极小,可忽略不计。

4 结 论

基于建立的W-S-F实时耦合模拟平台,提炼了台风“威马逊”过境时外罗海上风电场的台风、浪、流参数,并采用中/小尺度嵌套的降尺度方法模拟并分析了台风-浪-流极端工况下最不利停机位风力机结构风荷载分布特性;主要结论如下:

(1)建立的W-S-F耦合平台可准确模拟台风过程中台风、波浪与海流的时空分布与演化特性,台风路径的模拟精度较单WRF模式提高了42.51%;

(2)塔筒在叶片干扰段以横风向风荷载为主,而在波浪干扰段以顺风向风荷载为主,低空波面附近塔筒所受风荷载受波浪起伏的干扰表现出较强的脉动特征,风荷载存在“峰刺”激增现象;

(3)叶片上风荷载以顺风向风为主导,且沿叶展方向呈现先增大后减小的变化规律;A位置叶片最安全而B位置叶片最危险;

(4)T4相位为海上风力机单桩基础强度设计的最不利相位,基底剪力最大达到 7.68×10^6 量级,其中水动荷载占主体,基底弯矩最大达到 5.2×10^8 量级,其中风荷载占主体。

参考文献:

- [1] Lyddon Charlotte E, Brown Jennifer M, Nicoletta Leonardi, et al. Quantification of the uncertainty in coastal storm hazard predictions due to wave-current interaction and wind forcing [J]. *Geophysical Research Letters*, 2019, 46(24): 14576-14585.
- [2] Hu Yu, Yang Jian, Charalampous Baniotopoulos, et al. Dynamic analysis of offshore steel wind turbine towers subjected to wind, wave and current loading during construction[J]. *Ocean Engineering*, 2020, 216: 108084.
- [3] 王海龙. 风力发电工程技术丛书 风电场台风灾害防护[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2017: 115-140.
Wang Hailong. Wind Power Engineering Technology Series Wind Farm Typhoon Disaster Prevention[M]. Beijing: China Water Power Press, 2017: 115-140.
- [4] Hallowell S T, Myers A T, Arwade S R, et al. Hurricane risk assessment of offshore wind turbines[J]. *Renewable Energy*, 2018, 125: 234-249.
- [5] Utsunomiya T, Sato I, Yoshida S, et al. Dynamic response analysis of a floating offshore wind Turbine during severe typhoon event[C]. ASME 2013, International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. 2013; V008T09A032.
- [6] 王振宇, 张彪, 赵艳, 等. 台风作用下风力机塔架振动

- 响应研究[J]. *太阳能学报*, 2013, 34(8): 1434-1442.
- Wang Zhenyu, Zhang Biao, Zhao Yan, et al. Dynamic response of wind turbine under typhoon[J]. *Acta Ener-giae Solaris Sinica*, 2013, 34(8): 1434-1442.
- [7] Tian Jiyang, Liu Ronghua, Ding Liuqian, et al. Evaluation of the WRF physical parameterisations for typhoon rainstorm simulation in southeast coast of China[J]. *Atmospheric Research*, 2021, 247: 105130.
- [8] 高成志, 郑崇伟. SWAN模式对西行台风所致台风浪的模拟分析[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2018, 39(7): 1158-1164.
GAO Chengzhi, ZHENG Chongwei. Analysis of typhoon waves caused by westbound path typhoons[J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2018, 39(7): 1158-1164.
- [9] 魏凯, 沈忠辉, 吴联活, 等. 强台风作用下近岸海域波浪-风暴潮耦合数值模拟[J]. *工程力学*, 2019, 36(11): 139-146.
WEI Kai, SHEN Zhonghui, WU Lianhuo, et al. Coupled numerical simulation on wave and storm surge in coastal areas under strong typhoons [J]. *Engineering Mechanics*, 2019, 36(11): 139-146.
- [10] Xu Yu, Wang Zhifeng. Response of surface ocean conditions to typhoon Rammasun[J]. *Journal of Coastal Research*, 2017(80): 92-97.
- [11] Zhang Zhuo, Chen Changsheng, Song Zhiyao, et al. A FVCOM study of the potential coastal flooding in ap-onagansett bay and clarks cove, Dartmouth Town (MA)[J]. *Natural Hazards*, 2020, 103: 2787-2809.
- [12] Fang Yuan, Duan Lei, Han Zhaolong, et al. Numerical analysis of aerodynamic performance of a floating offshore wind turbine under pitch motion [J]. *Energy*, 2020, 192: 116621.
- [13] Seo Junwon, Schaffer William, Head Monique, et al. Integrated FEM and CFD simulation for offshore wind turbine structural response [J]. *International Journal of Steel Structures*, 2019, 19(4): 1112-1124.
- [14] Jost Eva, Lutz Thorsten, Krämer Ewald. A parametric CFD study of morphing trailing edge flaps applied on a 10 MW offshore wind turbine [J]. *Energy Procedia*, 2016, 94: 53-60.
- [15] 练继建, 贾娅娅, 王海军. 台风作用下2.5 MW风力机风荷载特性研究[J]. *太阳能学报*, 2018, 39(3): 611-618.
Lian Jijian, Jia Yaya, Wang Haijun. Numerical simulation for characteristics of wind loads of 2.5 MW wind turbine under typhoon[J]. *Acta Ener-giae Solaris Sinica*, 2018, 39(3): 611-618.
- [16] Pan L, Shi Z, Xiao H. Parameter design and optimization for camber of vertical axis offshore wind turbine using CFD[J]. *Journal of Ocean Engineering and Marine Energy*, 2020, 6(4): 1-19.

- [17] Ke Shitang, Yu Wenlin, Cao Jiufa, et al. Aerodynamic force and comprehensive mechanical performance of large wind turbine during typhoon based on WRF/CFD nesting[J]. Applied Science, 2018, 8: 1982.
- [18] Ke Shitang, Xu Lu, Wang Tongguang. Aerodynamic performance and wind-induced responses of large wind turbine systems with meso-scale typhoon effects[J]. Energies, 2019, 12(19): 3696.
- [19] 董志, 詹杰民. 基于 VOF 方法的数值波浪水槽以及造波、消波方法研究[J]. 水动力学研究与进展 A 辑, 2009, 24(1): 15-21.
- Dong Zhi, Zhan Jiemin. Comparison of existing methods for wave generating and absorbing in VOF-based numerical tank[J]. Journal of Hydrodynamics A, 2009, 24(1): 15-21.
- [20] 邹志利, 严以新. 海岸动力学[M]. 四版. 北京: 人民交通出版社, 2009: 94-95.
- Zou Zhili, Yan Yixin. Coastal Dynamics [M]. Fourth Edition. Beijing: China Communications Press, 2009: 94-95.
- [21] 李玉成. 波浪与水流共同作用下的流速场[J]. 海洋工程, 1983(4): 12-23.
- Li Yucheng. Velocity field for interacting waves and currents[J]. The Ocean Engineering, 1983(4): 12-23.
- [22] 建筑结构荷载规范: GB 50009—2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- Load code for the design of building structures: GB 50009—2012 [S]. Beijing: China Building Industry Press, 2012.
- [23] 伍志元, 蒋昌波, 邓斌, 等. 基于 WRF-SWAN 耦合模式的台风“威马逊”波浪场数值模拟[J]. 海洋科学, 2018, 42(9): 64-72.
- WU Zhiyuan, JIANG Changbo, DENG Bin, et al. Simulation of extreme waves generated by typhoon Rammasun (1409) based on coupled WRF-SWAN model[J]. Marine Sciences, 2018, 42(9): 64-72.
- [24] KE S T, YU W, WANG T G, et al. Wind loads and load-effects of large scale wind turbine tower with different halt positions of blade [J]. Wind and Structures, 2016, 23(6): 559-575.

Wind load characteristics of 10 MW-level super-large offshore wind turbine under the coupling effect of typhoon-wave-current

KE Shi-tang^{1,2}, WANG Shuo^{1,2}, ZHAO Yong-fa^{1,2}, ZHANG Wei^{1,2}, LI Ye³

(1.Department of Civil and Airport Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China; 2.Jiangsu Key Laboratory of Hi-Tech Research for Wind Turbine Design, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China; 3.State Key Laboratory of Ocean Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: Offshore wind turbine is a technological commanding height in wind power industrial development in future and it faces more complicated extreme wind environments compared with onshore wind turbine. To disclose wind load distribution characteristics of wind turbine under typhoon-wave-current coupling effect on the sea, a 10MW-level super-large offshore wind turbine in Wailuo Wind Farm, Guangdong is chosen as a research object and a real-time meso-scale WRF-SWAN-FVCOM (W-S-F) coupling simulation platform is constructed by using Model Coupling Toolkit (MCT). The spatial-temporal evolution of typhoon-wave-current in the offshore wind farm in the whole landing process of the super typhoon “Ramason” is analyzed. Next, wind load characteristics of wind turbines and interference effect among blade, tower and wave surface are analyzed by combining the meso-micro scale nesting method. The extreme load model at typical positions of offshore wind turbine under extreme wind conditions is proposed. Results demonstrate that the constructed meso-scale W-S-F coupling platform can simulate interactions among typhoon, wave and current accurately. Wind loads on the tower are mainly transversal in the section within the blade interference, and are downward in the section within wave interference. Moreover, strong pulsation features are observed near the low-altitude wave surface. Blade at position A is the safest, while blade at position B is the most dangerous. T4 is the most adverse phase for single pile foundation strength design of the offshore wind turbine. At T4 phase, the maximum base shear reaches the 7.68×10^6 magnitude and the maximum base bending moment reaches the 5.2×10^8 magnitude.

Key words: wind load distribution; typhoon-wave-current coupling simulation; offshore wind turbine; meso-micro scale; interference effect

作者简介: 柯世堂(1982—),男,博士,教授。电话:(025)84891595;E-mail: keshitang@163.com。