

风浪异向下大型风力机动力学响应及非线性特征研究

王海生¹, 李志昊¹, 缪维跑¹, 李 春^{1,2}

(1. 上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海 200093; 2. 上海市动力工程多相流动与传热重点实验室, 上海 200093)

摘 要:为探究风、浪不同入射角对风力机塔架动力学响应及其混沌特性影响,以 DTU 10 MW 近海单桩式风力机为研究对象,采用相图法及最大 Lyapunov 指数对风、浪异向下风力机塔架振动信号展开混沌特征分析。结果表明:塔顶前后向位移几乎不随波浪入射角改变而变化,塔顶侧向位移受波浪入射角影响较大;塔架弯矩随塔架高度增加而逐渐减小,且受波浪入射角影响较大;随着风速增大,塔顶侧向加速度波动剧烈程度逐渐降低,不同海况塔架前后向加速度波动差异较小;随着波浪入射角变化,各海况加速度最大 Lyapunov 指数均大于零,混沌特征明显。尤以湍流风速 11.4 m/s、有义波高 3.5 m 时,在风波夹角为 60°与 210°时塔顶前后向及侧向加速度的最大 Lyapunov 指数最大,此时风力机塔顶稳定性较差。

关 键 词:风浪异向;单桩式风力机;动力学响应;混沌特性;Lyapunov 指数

中图分类号:TK83

文献标识码:A

DOI:10.16146/j.cnki.rndlge.2023.06.019

[引用本文格式]王海生,李志昊,缪维跑,等.风浪异向下大型风力机动力学响应及非线性特征研究[J].热能动力工程,2023,38(6):166-173. WANG Hai-sheng, LI Zhi-hao, MIAO Wei-pao, et al. Dynamic response and nonlinear characteristics of large wind turbine under wind-wave anisotropy[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2023, 38(6):166-173.

Dynamic Response and Nonlinear Characteristics of Large Wind Turbine under Wind-wave Anisotropy

WANG Hai-sheng¹, LI Zhi-hao¹, MIAO Wei-pao¹, LI Chun^{1,2}

(1. School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai, China, Post Code:200093;
2. Shanghai Key Laboratory of Multiphase Flow and Heat Transfer in Power Engineering, Shanghai, China, Post Code:200093)

Abstract: In order to investigate the effect of different incidence angles of wind and waves on the dynamic response of wind turbine tower and its chaotic characteristics, the DTU 10 MW offshore monopile wind turbine was used as the research object. The phase diagram method and the maximum Lyapunov exponent were used to analyze the chaotic characteristics of wind and wave anisotropic wind turbine tower vibration signals. Results show that the fore-aft displacement of the tower top hardly changes with the wave incidence angle, and the side-side displacement of the tower top is greatly affected by the wave incidence angle. The tower bending moment decreases gradually with the increase of tower height and is influenced by the wave incidence angle greatly; with the increase of wind speed, the fluctuation amplitude of the side-side acceleration of the tower top decreases gradually, and the fluctuation difference of fore-aft acceleration of the tower top in different sea states is small; with the change of wave incidence angle, the maximum Lyapunov exponent of acceleration in each sea state is greater than zero, and the chaotic char-

收稿日期:2022-04-15; 修订日期:2022-06-02

基金项目:国家自然科学基金项目(51976131, 52006148, 52106262);上海市“科技创新行动计划”地方院校能力建设项目(19060502200)

Fund-supported Project: National Natural Science Foundation of China (51976131, 52006148, 52106262); Shanghai University Science and Technology Innovation Action Plan Local University Capacity Building Project(19060502200)

作者简介:王海生(1997-),男,上海理工大学硕士研究生。

通讯作者:李 春(1963-),男,上海理工大学教授。

acteristics are obvious. Especially when the turbulent wind speed is 11.4 m/s and wave height is 3.5 m, the maximum Lyapunov exponents of the fore-aft and side-side accelerations of the tower top are the largest when the wind wave angle is 60° and 210°, and the stability of the wind turbine tower top is poor at this time.

Key words: wind and wave anisotropy, monopile wind turbine, dynamic response, chaotic characteristic, Lyapunov exponent

引 言

可再生能源中,风能因其储量丰富、分布广泛及经济效益好成为最具潜力的清洁能源^[1]。我国风电场多建于近海浅水区域,较之内陆,该区域风力机塔架不仅承受空间非均匀及时域非定常的湍流风影响,还将受不规则波浪载荷联合作用,导致风力机在役环境较为复杂^[2]。因此,研究海上风力机在风、浪载荷共同作用下的动力学响应十分重要。

现阶段,国内外诸多学者针对风、浪载荷联合作用下风力机结构响应展开了很多研究。李刚强等人^[3]研究风波联合作用对风力机塔架顶端振动位移及塔底载荷的影响,对比发现,较陆上风力机塔顶位移幅值增加,塔架承受较大的疲劳载荷,波浪对海上风力机塔架的影响不可忽略。Banerjee 等人^[4]研究基于 Von Karman 湍流风谱模型及 P-M 非线性波浪谱的风、波浪载荷联合作用下 5 MW 风力机的动力学响应,发现风载荷对塔架位移有决定性作用,而波浪载荷对其加速度及塔顶旋转效应影响较大。Rezaei 等人^[5]基于梁单元建立 5 MW 风力机模型,分析变阻尼对风波耦合作用下风力机疲劳寿命的影响,研究表明,海上风力机疲劳寿命随阻尼增加呈线性增长的趋势。Velarde 等人^[6]通过湍流风谱及线性波浪模拟承载载荷,开展的 10 MW 海上单桩风力机疲劳可靠性分析结果表明,为保证风力机安全运行,其疲劳设计因子最小为 3。徐建源等人^[7]利用数值模拟与现场实测手段研究了海上风力机结构动力响应和动态特性,研究发现,在风波联合作用下风力机旋转力矩非平稳变化,进而对整机稳定性有一定影响。

有关风、浪载荷下风力机结构响应研究尚存不足:(1) 海况条件均为风、浪同向入射,但现有研究表明,较之风、浪同向,风、浪入射方向不一致在海上

风力机运行期间更为普遍^[8];(2) 针对风、浪异向研究多集中于漂浮式风力机,鲜见对近海固定单桩式风力机动力学研究,且仅考虑了部分角度下风、浪异向对风力机影响,而非全角度;(3) 非定常气动载荷及不规则波浪载荷使风力机运动响应呈现非线性特征,但常规方法无法分析其内在运动特性。基于此,本文以单桩式 DTU 10 MW 风力机为研究对象,模拟风、浪异向下超大型风力机动态响应,研究不同入射角度湍流风和不规则波作用下其运动响应规律,并对振动信号展开非线性特征识别。

1 研究对象与仿真模型

以单桩式 DTU 10 MW 风力机为研究对象,主要参数如表 1 所示^[9]。

海上大型单桩式风力机结构模型如图 1 所示, X 为塔架前后向, Y 为侧向。

表 1 DTU 10 MW 风力机参数
Tab. 1 Parameters of DTU 10 MW wind turbine

参数	数值
功率/MW	10
轮毂直径/m	5.6
风轮直径/m	178.3
塔架高度/m	115.6
轮毂高度/m	119
塔架质量/kg	6.3×10^5
额定转速/ $r \cdot \min^{-1}$	9.6
切入风速/ $m \cdot s^{-1}$	3
额定风速/ $m \cdot s^{-1}$	11.4
切出风速/ $m \cdot s^{-1}$	25
风轮质量/kg	2.3×10^5
机舱质量/kg	4.5×10^5

2 环境载荷

为准确模拟风力机在役环境,采用 NREL 开发

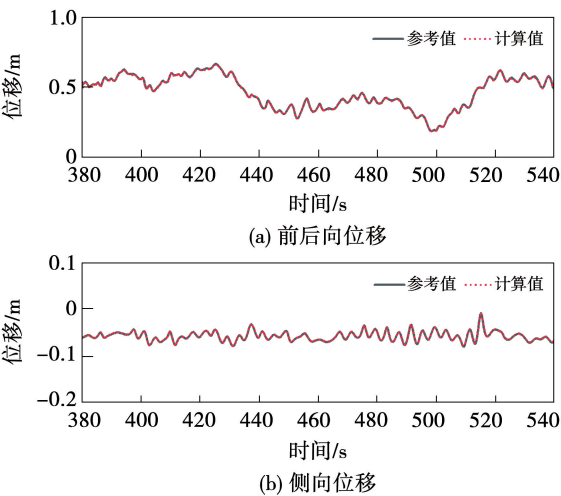


图4 塔顶位移动态响应对比

Fig.4 Comparison of dynamic responses for tower top displacement

4 结果与分析

为研究不同风、浪入射方向对风力机动态响应影响,定义4种海况:风速为8,11.4 m/s 湍流风及与之对应有义波高为3.5,6 m 波浪组合。假设湍流风以0°方向入射保持不变,而波浪以10°为间隔顺时针旋转至360°(0°)。风载荷与波浪载荷均属于低频载荷,Kaimal 湍流风谱模型激励频率接近于0 Hz,风载荷作用于风轮平面,进而引发塔架振动。波浪载荷主要集中于0.1 Hz附近,波浪载荷作用于入水段。风、浪入射角度如图5所示,具体海况参数如表2所示。

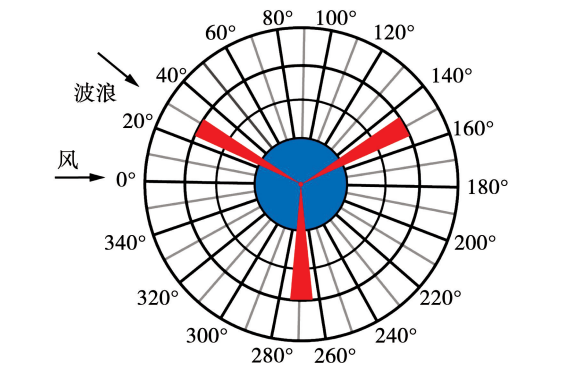


图5 风、浪入射角度示意图

Fig.5 Schematic diagram of wind-wave incidence angle

4.1 波浪不同入射方向下风力机动力学响应

4.1.1 塔顶位移

不同海况下塔顶前后向及侧向位移峰值极坐标

分布如图6及图7所示。

表2 海况参数			
Tab.2 Sea condition parameters			
海况	湍流风/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	有义波高/m	周期/s
1	8.0	3.5	7.9
2	8.0	6.0	12.5
3	11.4	3.5	7.9
4	11.4	6.0	12.5

由图6可知,4种海况下塔顶前后位移峰值极坐标分布图近似O形,无明显凸起及凹陷,可发现其受波浪入射角影响较小。其中,海况1及海况2塔顶前后位移峰值极坐标分布图棱角更多,而海况3和海况4塔顶前后位移峰值极坐标分布图更圆润。因此,塔顶前后位移峰值受波浪入射角影响较小,且随着风和波浪载荷的增大,波浪入射角的影响更小。此外,海况1和2塔顶前后峰值极坐标分布图更接近,海况3及4更为接近,由此可见,相较波浪载荷风载荷为塔顶前后位移的控制载荷。

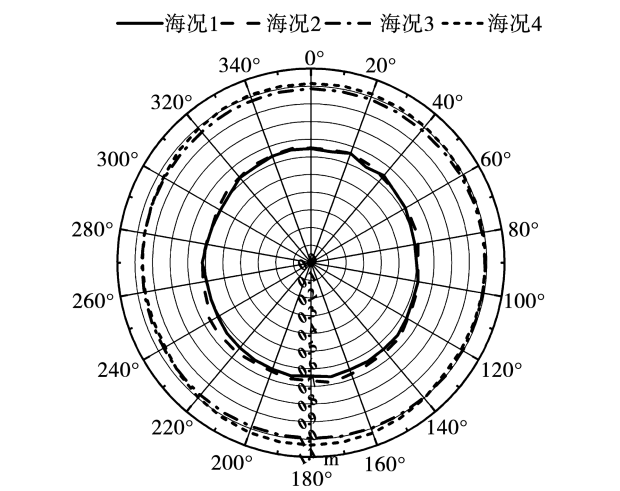


图6 塔顶前后向位移峰值曲线

Fig.6 Peak curve of fore-aft displacement of tower top

由图7可知,4种海况下塔顶侧向位移峰值极坐标分布图近似∞形,受波浪入射角方向影响较大。4种海况均于不同波浪入射角下塔顶侧向位移峰值达到最大。海况1~4塔顶侧向位移分别于入射角为260°,280°,270°及90°时峰值最大,分别为0.367,0.406,0.368及0.438 m。而海况1和2塔顶侧向位移峰值于波浪入射角160°时达到最小,海况3和4则于入射角为180°时最小,分别为0.194,

0.179,0.121 及 0.118 m。相较最小值,最大值分别增大 89.2% ,126.8% ,205.0% 及 271.2%。因此,塔顶侧向位移峰值受波浪入射方向影响显著,且塔顶侧向位移峰值受风载荷影响更剧烈。

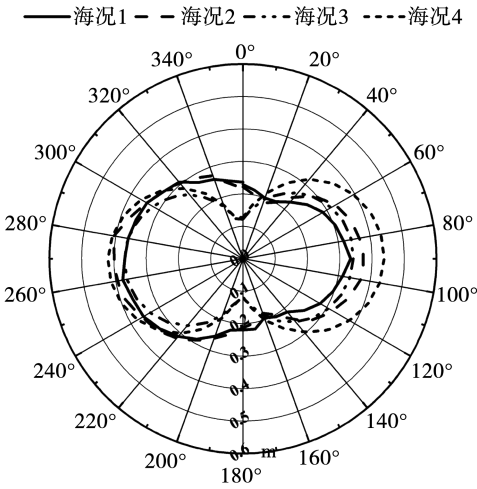


图 7 塔顶侧向位移峰值曲线

Fig. 7 Peak curve of side-side displacement of tower top

综上,随风及波浪载荷增大,不同入射方向塔顶前后向及侧向位移受到不同程度影响,受风载荷影响更大,且在大多数入射角下塔顶前后向及侧向位移峰值均随风、浪载荷增大而增大,但随着湍流风及波浪入射角达到特定角度,风、浪载荷较小的海况对

塔顶前后向及侧向位移峰值影响相对较大。因此,湍流风及波浪入射角方向也是影响近海风力机动力学响应的重要因素。当湍流风及波浪载荷达到特定角度时,可考虑偏航降低风力机动力学响应。

4.1.2 塔架弯矩

图 8 为波浪不同入射方向下塔架侧向及前后向弯矩峰值随塔架高度的变化情况。由图可知,任一海况塔底侧向及前后向弯矩最大,沿塔架高度弯矩逐渐降低。同一塔架高度下侧向及前后向弯矩峰值随波浪入射角分别呈波浪状及近扁平状。

对比不同海况下塔架侧向弯矩,随风及波浪载荷增大,不同入射方向塔架前后向及侧向弯矩响应受到不同程度影响。在环境载荷影响下 4 种海况弯矩均出现两个相对峰值,对应入射角分别为 90° 及 270°,这是因为波浪载荷作用方向与塔架侧向运动方向一致或相反。海况 1 塔架弯矩较为集中,可知在环境载荷下塔架运动响应较为稳定,其他海况弯矩分布较分散,变化幅度较大。结合 4 种海况可知,海况 1 与海况 3 在风波载荷夹角为 270°时塔基弯矩峰值最大分别为 2.20×10^5 与 2.19×10^5 kN · m,而海况 2 与海况 4 最大塔基弯矩为 3.17×10^5 和 3.24×10^5 kN · m。由此可见,较之湍流风载荷,波浪载荷对塔架弯矩影响更大。

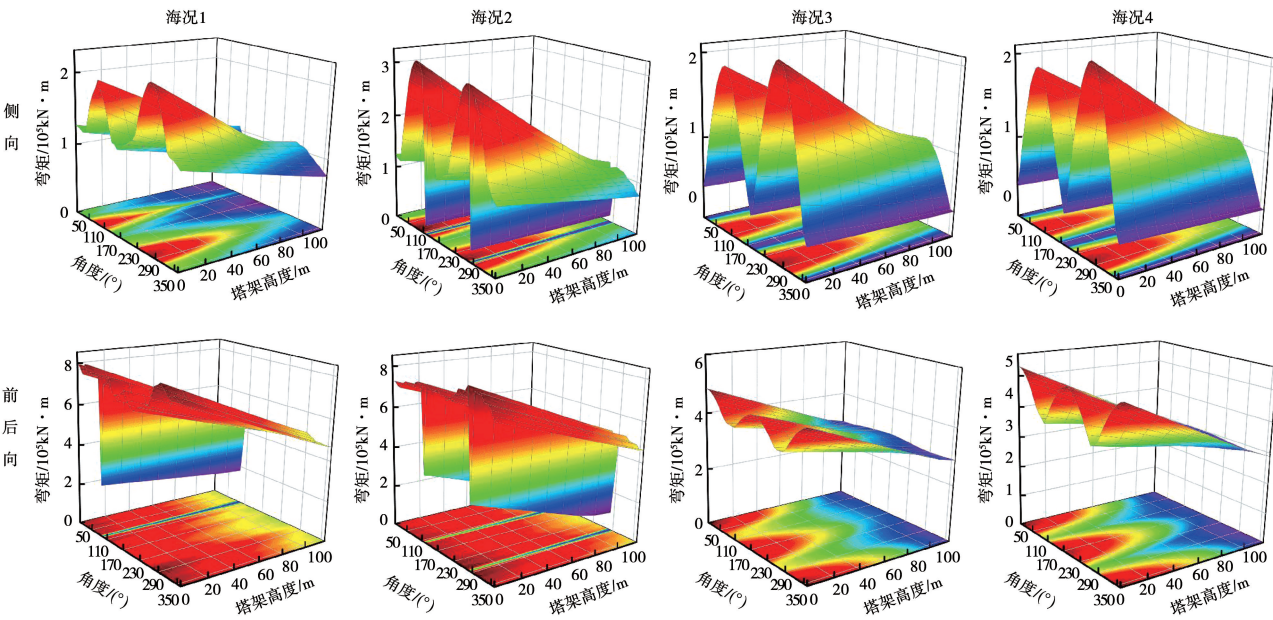


图 8 塔架弯矩分布

Fig. 8 Bending moment distribution of tower

对比塔架前后向弯矩可知,海况 1 与海况 2 弯矩最大值位于 290°附近;其他海况湍流风与波浪载荷同向作用时弯矩最大,当波浪载荷与风载荷夹角为 260°时弯矩最小。不同海况下塔架前后向弯矩最大值分别为 8.32×10^5 , 8.24×10^5 , 4.85×10^5 及 5.31×10^5 kN · m。由海况 1 ~ 4 可知,当波浪载荷一致时,随湍流风增强塔架前后向弯矩减小且高速湍流风对前后向弯矩有抑制作用,可见风载荷为塔架前后向弯矩的控制载荷。

4.1.3 塔顶前后向及侧向加速度

随着风力机大型化,高耸结构塔架因刚度减小在其运行环境下易产生形变。其中,塔顶加速度为反映塔顶振动重要特征指标。不同海况各角度下风力机塔顶前后向加速度及侧向加速度峰值时域曲线如图 9 所示。

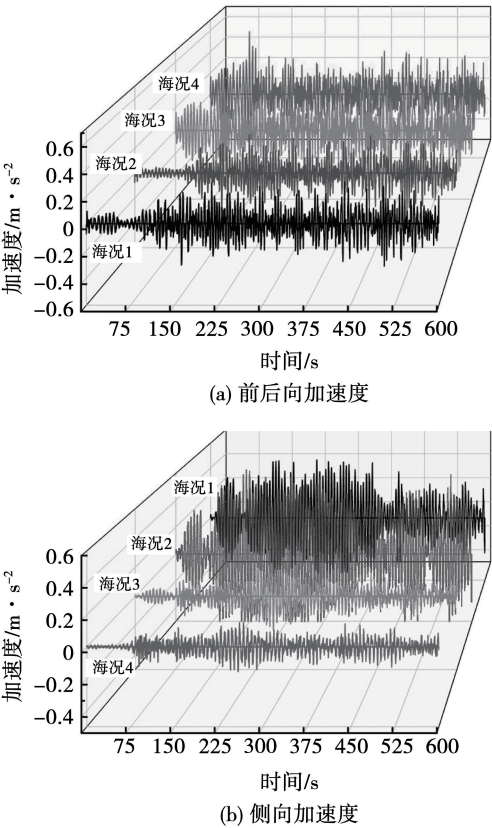


图 9 塔顶加速度时域曲线

Fig.9 Time domain curve of tower top acceleration

海况 1 ~ 4 塔顶加速度峰值时域曲线对应角度分别为 280°, 270°, 170° 及 180°。由图可知,海况 1, 2 与海况 3, 4 在前后向及侧向加速度均有一定差异。0 ~ 75 s 前两种海况较其他海况塔顶前后向加速度峰值差异较大。对比海况 1 与海况 2 在前 75 s

内加速度变化趋势可知,波浪载荷对塔架前后向加速度有抑制作用。75 s 后 4 种海况下塔架前后向加速度峰值相近,其中前两种海况标准差为 0.09 m/s²,海况 3 与海况 4 分别为 0.13 与 0.14 m/s²。可知,后者塔架前后向加速度波动趋势更为剧烈。

不同海况塔顶侧向加速度峰值差异较大。海况 1 ~ 4,数值依次为 0.47, 0.63, 0.21 及 0.15 m/s²,随着风速增大塔顶侧向加速度有减小趋势,且海况 1 与海况 2 侧向加速度标准差为其他海况的 5 倍,可知塔顶侧向加速度受风载荷影响较大,波浪载荷对其影响较小。

4.2 混沌特征分析

混沌为确定性系统长期依赖初始条件产生的不可预测及随机性运动现象^[14]。相图法^[15]可定性分析混沌现象,采用可反映数据一般相关性且对数据量要求较小的 FNN(False nearest neighbors) 函数获取延迟时间 τ 及嵌入维数 m ,将风力机塔顶动力学响应信号时间序列嵌入至三维相空间完成相空间重构,通过时间序列相图可反映非线性系统运动规律。其中,混沌吸引子为系统中不稳定轨迹初始值的集合,局部排斥在其内全部运动形式体现不稳定性,整体吸引在其外一切运动形式体现稳定性^[16]。为定量描述系统振动信号是否具混沌特征,通常引入 Lyapunov 指数 λ 进行表征,其本质为相空间中相邻两条轨迹随时间收敛或发散速率。 λ 大于零表示系统具有混沌特征,且 λ 数值越大表明混沌特性越明显,反之则无混沌特性。

风力机塔顶振动随风速及波浪载荷不同体现出较为明显的随机性,为此基于混沌理论对不同海况及不同角度下风力机动力学响应进行非线性分析,采用相图法及最大 Lyapunov 指数对其振动信号展开混沌特性识别。

不同海况下风力机塔顶前后向及侧向加速度时间序列最佳延迟时间 τ 如表 3 所示。

表 3 最佳延迟时间(τ /s)

Tab.3 Optimal delay time (τ /s)

方向	海况 1	海况 2	海况 3	海况 4
侧向	20	21	17	10
前后向	15	15	14	13

图 10 与图 11 为塔架前后向及侧向加速度在不同海况下的混沌相图。由图可知,不同海况下塔顶

加速度动力学特性不同,与之对应的相图形态各异。

图 10(a) 与图 10(b) 均以最佳延迟时间 $\tau = 15$ s 重构相。可看出,相图中极少数轨迹缠绕形成“果核”状,其余轨迹杂乱不规则分散在外围。图 10(c) 与图 10(d) 随着风速增加,外围散乱且不规则轨迹逐渐向内圈发展,被限制在有限的区域内,最终形成“团絮状”结构。不同海况重构相图清楚表明了混沌吸引子的存在,可判定不同海况影响下塔顶前后向加速度具有混沌特征。

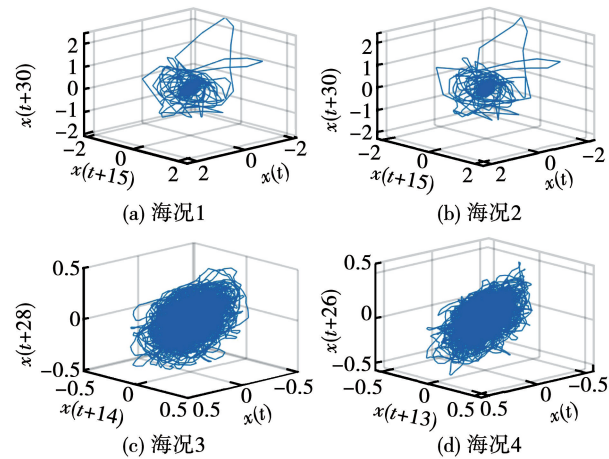


图 10 塔架前后向加速度混沌相图

Fig. 10 Chaotic phase diagram of tower fore-aft acceleration

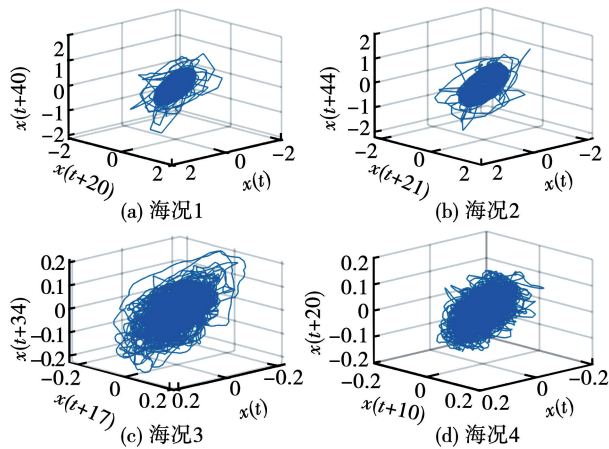


图 11 侧向加速度混沌相图

Fig. 11 Chaotic phase diagram of side-side acceleration

从图 11 可发现,在不同海况下风力机塔顶侧向加速度相图轨迹围绕一个或多个中心点反复缠绕现象,说明塔架侧向加速度同样存在混沌吸引子,表明塔架侧向加速度时间序列具有一定混沌特征。海况

1 与海况 2 塔顶侧向加速度时间序列相图大部分轨迹被限制在一定区域内,少数轨迹在尾部进行发散;海况 3 与海况 4 相图表现出的混沌吸引子轨迹向内收缩较为集中,说明此时塔顶侧向加速度时间序列具备混沌特性,且较之海况 1 及海况 2,其混沌特性较强。

综上,塔顶前后向及侧向加速度动力学响应表现出非完全周期性与非随机性,具有一定混沌特性。为进一步研究各海况下湍流风载荷与波浪载荷射入角对其混沌特性影响,以 10° 为间隔,计算不同海况下风力机塔顶前后向及侧向加速度响应的最大 Lyapunov 指数随角度变化趋势,结果如图 12 所示。

由图 12 可知,不同海况下塔顶前后向及侧向加速度时间序列的最大 Lyapunov 指数波动无规则,但其均大于零,表明风力机塔顶动力学响应具有混沌特征。海况 3 在风波夹角为 60° 与 210° 时塔顶前后向及侧向加速度 λ 达到峰值,分别为 0.160 7 与 0.160 1,表明该角度下其混沌特性最显著,塔架稳定性较弱。当风波夹角为 280° 时,海况 2 塔顶侧向加速度 λ 为 0.001 2,说明其混沌特性最弱。

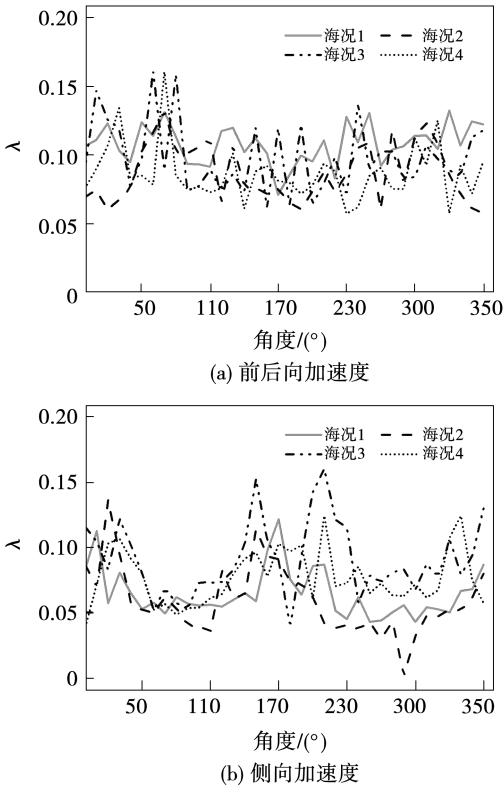


图 12 塔架加速度最大 Lyapunov 指数

Fig. 12 The maximum Lyapunov exponent of tower acceleration

5 结 论

以 DTU 10 MW 近海单桩式风力机为研究对象,基于叶素动量理论利用开源软件 FAST 求解风载荷,通过 Morison 方程计算波浪载荷,研究风、浪异向下风力机动态响应特性,并采用相空间重构与最大 Lyapunov 指数定性定量分析风力机动力学响应的混沌特性。结论如下:

(1) 风、浪异向下不同海况塔顶前后位移峰值极坐标分布近“O”形,此时波浪载荷入射角对其影响较小;而波浪载荷入射角对塔架侧向位移影响较为剧烈,海况 1~4 塔顶位移峰值分别于入射角为 260°,280°,270°及 90°时达到最大。其中,海况 4 最大值差异最大,侧向位移峰值为 0.438 m,夹角为 180°时位移最小,约为 0.118。

(2) 风力机塔架弯矩随塔架高度逐渐降低,同一海况下风、浪夹角对塔架侧向弯矩的影响大于前后向。塔架侧向弯矩对波浪载荷较为敏感,而风载荷对塔架前后向弯矩影响较大。

(3) 风力机塔架前后向加速度在 0~75 s 表现出较大差异性,较之海况 1 与海况 2,其他海况塔顶加速度幅值变化更大。海况 1 及海况 2 塔架侧向加速度标准差为其他海况的 5 倍,前者塔顶侧向加速度波动更为剧烈、稳定性较差。

(4) 不同海况各角度下塔架前后向及侧向加速度时间序列最大 Lyapunov 指数均大于零,表明其具有一定混沌特征。不同海况下其混沌吸引子轨迹相图形态存在差异性。当风、浪以特定角度联合作用时,风力机塔架前后向及侧向加速度混沌特性显著,塔架稳定性降低。

参考文献:

[1] WANG Bo,XU Zi-fei,LI Chun,et al. Hydrodynamic characteristics of forced oscillation of heave plate with fractal characteristics based on floating wind turbine platform[J]. Ocean Engineering, 2020,212:107621.1-107621.9.

[2] 黄致谦,丁勤卫,李 春. 三种漂浮式风力机调谐质量阻尼器稳定性控制研究[J]. 振动与冲击,2019,38(21):112-119,147.

HUANG Zhi-qian,DING Qin-wei,LI Chun. TMD's control effect on stability of three kinds of floating wind turbine[J]. Journal of Vibration and Shock,2019,38(21):112-119,147.

[3] 李钢强,赵登利,刘建爽. 波浪对海上大型风力机筒形塔架的影响[J]. 可再生能源,2020,38(5):630-634.

LI Gang-qiang,ZHAO Deng-li,LIU Jian-shuang. Effects of the wave on the tubular tower of offshore horizontal axis wind turbine[J]. Renewable Energy Resources,2020,38(5):630-634.

[4] BANERJEE A,CHAKRABORTY T,MATSAGAR V,et al. Dynamic analysis of an offshore wind turbine under random wind and wave excitation with soil-structure interaction and blade tower coupling[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering,2019,125:105699.1-105699.17.

[5] REZAEI R,FROMME P,DUFFOUR P. Fatigue life sensitivity of monopile-supported offshore wind turbines to damping[J]. Renewable Energy,2018,123:450-459.

[6] VELARDE J,KRAMHØFT C,SØRENSEN J D,et al. Fatigue reliability of large monopiles for offshore wind turbines[J]. International Journal of Fatigue,2020,134:105487.

[7] 徐建源,祝 贺. 风波联合作用海上风力机动态特性分析[J]. 中国电机工程学报,2010,30(5):120-124.

XU Jian-yuan,ZHU He. Dynamic characteristic analysis of offshore wind turbine under combined wind and wave action[J]. Proceedings of the CSEE,2010,30(5):120-124.

[8] FISCHER T,RAINEY P,BOSSANYI E,et al. Study on control concepts suitable for mitigation of loads from misaligned wind and waves on offshore wind turbines supported on monopoles[J]. Wind Engineering,2011,35(5):561-574.

[9] VELARDE J,BACHYNSKI E E. Design and fatigue analysis of monopile foundations to support the DTU 10 MW offshore wind turbine[J]. Energy Procedia,2017,137:3-13.

[10] LAINO D J,HANSEN A C. User's guide to the wind turbine aerodynamics computer software AeroDyn[R]. TCX-9-29209-01, Salt Lake City:University of Utah,2002.

[11] JONKMAN B J,BUHL M L. TurbSim user's guide[R]. Colorado:National Renewable Energy Laboratory,2005.

[12] 王树青,梁丙臣. 海洋工程波浪力学[M]. 青岛:中国海洋大学出版社,2013.

WANG Shu-qing,LIANG Bing-chen. Wave mechanics for ocean engineering[M]. Qingdao:China Ocean University Press,2013.

[13] YANG Yang,BASHIR M,LI Chun,et al. Mitigation of coupled wind-wave-earthquake responses of a 10 MW fixed-bottom offshore wind turbine[J]. Renewable Energy,2020,157:1171-1184.

[14] 盛昭瀚,马军海. 非线性动力系统分析引论[M]. 北京:科学出版社,2001.

SHENG Zhao-han,MA Jun-hai. Introduction to nonlinear dynamic system analysis[M]. Beijing:Science Press,2001.

[15] 金宁德,高忠科. 非线性信息处理技术[M]. 天津:天津大学出版社,2017.

JIN Ning-de,GAO Zhong-ke. Nonlinear information processing techniques[M]. Tianjin:Tianjin University Press,2017.

[16] 王兴元. 复杂非线性系统中的混沌[M]. 北京:电子工业出版社,2003.

WANG Xing-yuan. Chaos in a complex nonlinear system[M]. Beijing:Publishing House of Electronics Industry,2003.