

风载荷对单柱式海上风力机船舶碰撞影响研究

余万, 丁勤卫, 李春, 周红杰, 叶舟

(上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海 200093)

摘要: 随着海上风能的开发与利用, 船舶与海上风力机的碰撞风险正逐渐上升。为此采用非线性有限元软件 LS-DYNA 模拟速度为 2m/s 质量为 5000 t 的船舶与 3 MW 单柱式海上风力机碰撞过程, 研究有、无风载荷及风载荷作用方向对风力机结构动力响应影响, 对比分析了碰撞力、塔顶位移、塔顶加速度以及撞击处塔架等效塑性应变。其结果表明: 风载荷对风力机船舶碰撞动力响应影响很大, 碰撞力相对差异约为 1%, 塔顶位移相对差异约为 10.9%, 塔顶加速度相对差异约为 17.5%, 撞击处等效塑性应变相对差异约为 3.05%; 海上风力机船舶碰撞动力响应在不同风载荷作用方向上有着很大的差异, 不同风载荷作用方向上最大与最小的碰撞力、塔顶位移、塔顶加速度以及撞击处等效塑性应变相对差异分别为 28.5%、57%、62.5% 以及 9.5%; 塔架纵向摆动随着风载荷的作用方向产生很大变化, 最大值为 0.505 m, 最小值为 0.0393 m。研究结果可为海上风力机抗碰撞防护性能研究及设计提供理论参考。

关键词: 有限元; 单柱式; 海上风力机; 船舶碰撞; LS-DYNA; 风载荷

中图分类号: TU473.1; TM315

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2017)05-0212-07

Research the influence of wind load on the collision of ship and monopile offshore wind turbine

YU Wan, DING Qinwei, LI Chun, ZHOU Hongjie, YE Zhou

(School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: With the development and utilization of offshore wind power, the collision risk between the ship and offshore wind turbine is gradually rising. Therefore, the nonlinear finite element LS-DYNA simulation software is used to simulate the collision process of a 5000 t ship at a speed of 2 m/s with a typical 3 MW monopile offshore wind turbine and to study the influence of the wind load on the collision between ship and monopile wind turbine. Through the analysis of collision force, displacement and acceleration of the top in tower and equivalent plastic strain at the tower, the result can be obtained as follow: the wind load on the wind turbine has great influence on dynamic response of collision; relative difference of the collision force, displacement and acceleration of the top in tower and equivalent plastic strain at the tower are about 1%, 10.9%, 17.5% and 3.05%, respectively. The direction of wind load has also great influence on dynamic response of collision; in the different direction of the wind load, the maximum and minimum of the collision force, displacement and acceleration of the top in tower and equivalent plastic strain at the tower are about 28.5%, 57%, 62.5% and 28.5%, respectively. In the different direction of the wind load, the maximum and minimum of longitudinal displacement are 0.505 m and 0.0393 m, respectively. The results of the study can provide theoretical reference to provide the offshore wind turbine in the collision.

Key words: finite element; monopile; offshore wind turbine; collision of ship; LS-DYNA; wind load

收稿日期: 2017-04-08; 修回日期: 2017-06-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(51676131、51176129); 上海市科学技术委员会项目(13DZ2260900)

作者简介: 余万(1994-), 男, 江西九江人, 硕士研究生, 研究方向: 动力机械优化设计、风能利用。

通讯作者: 李春(1963-), 男, 北京人, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向: 流体机械及工程、风能高效转换与应用及叶轮机械气动力学。

1 研究背景

风能是继水能之后的主要可再生能源,海上风能相比陆上风能有着巨大的优势:风况好、储量大、分布广以及不占用陆地资源等^[1-4]。近年来,随着海上风力机技术的快速发展,海上风电场数目逐步增加,但多数靠近海岸建设,因此海上风力机极有可能靠近航道,船舶与海上风力机的碰撞风险正在逐渐上升^[5-8]。为此,海上风力机抗碰撞性能研究对海上风力机防护设计有着重要的意义。

鉴于海上风力机和船舶建造成本高以及结构尺寸巨大导致海上风力机与船舶碰撞分析实验研究成本高,因此国内外研究人员多数采用非线性有限元仿真研究海上风力机与船舶碰撞过程及风力机抗撞性能。Ding Hongyan 等^[7]采用非线性有限元软件 ABAQUS 研究具有不同初始速度、质量为 5 000 t 的船舶与重力式海上风力机碰撞过程。Ren Nianxin 等^[8]采用非线性有限元 LS-DYNA 研究 2 000 t 船舶与 3 MW 单柱式海上风力机碰撞过程,为降低海上风力机结构动力响应,深入研究两种不同形状的防护装置在海上风力机上的应用对其抗撞性能的影响。Liu Chunguang 等^[9]采用非线性有限元软件 LS-DYNA 研究有、无防护装置以及不同材料性能的防护装置对风力机船舶碰撞过程的影响。文献[10]采用非线性有限元软件 MSC. Dytran 研究具有不同初始速度的 5 000 t 船舶与导管架式海上风力机侧向碰撞过程。文献[11]采用非线性有限元软件 LS-DYNA 研究不同船舶初始动量以及不同撞击角度对单柱式海上风力机与船舶碰撞过程的影响。

在海上风力机与船舶碰撞研究中,虽然考虑碰撞时船舶相关诸参数(质量、速度以及角度等)对近海风力机船舶碰撞过程的影响,但多数忽略近海风力机塔架与海床下土壤的相互作用以及未考虑环境载荷对风力机的作用。

在风力机与船舶碰撞过程中,对于塔架与土壤之间的作用国内外学者通常采用离散弹簧单元来描述^[11-12]。近海风力机在运行过程中主要受风-波-流载荷作用,其中波浪及海流载荷作用在风力机塔架部分,而风载荷作用在风力机叶轮和塔架部分^[13]。对于 5 MW 近海风力机,在平均风速下风力机所受最大风载荷约为 850 kN,波浪载荷最大约为 2.5 kN,波浪载荷相对于风载荷约为 0.29%;对于 3 MW 近海风力机塔架稍小于 5 MW 近海风力机,叶轮面积小于 5 MW 近海风力机,但最大波浪载荷相

对于最大风载荷还是很小,因此在近海风力机运行过程中,作用在风力机结构上的主要载荷是风载荷^[14]。Bela 等^[15]研究了海上风力机主要载荷即风载荷作用方向对海上风力机与船舶碰撞过程的影响,表明风载荷作用以及作用方向对海上风力机与船舶碰撞过程的影响很大,但考虑风载荷方向单一,同时没有表明风力机塔架撞击处的塑性变形程度而是简单地重点对比塔架塔顶最大位移评估风载荷方向对风力机结构动力响应的影响。

因此,本文采用非线性有限元软件 LS-DYNA 模拟速度为 2 m/s 的 5 000 t 船舶与 3 MW 单柱式海上风力机碰撞过程,研究有、无风载荷以及 9 种风载荷作用方向对风力机结构动力响应的影响;对比分析有、无风载荷作用以及不同风载荷作用方向对塔顶位移、塔顶加速度、碰撞力以及风力机撞击处等效塑性应变的影响。

2 计算模型

2.1 几何模型

本文研究对象为某 3 MW 单柱式海上风力机,基于 CAD 软件 UG 建立风力机整机模型,如图 1 所示。其中,叶片、机舱以及轮毂的总质量为 144.7 t,塔架 1、塔架 2 以及塔架 3 几何参数如表 1 所示。

根据已有海上风力机与船舶碰撞研究^[9, 17],本文选用 5 000 t 球鼻型船舶,其长度为 81.25 m,宽度为 14.45 m,高度为 6.4 m,如图 2 所示。

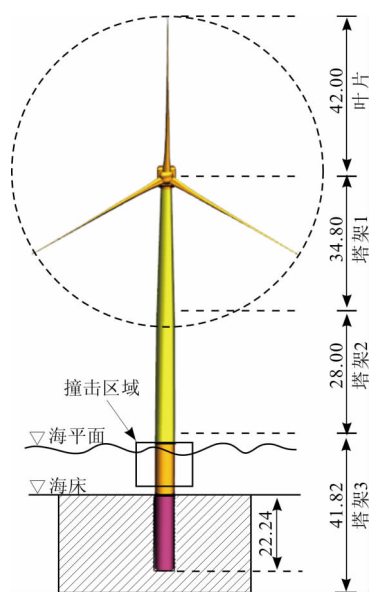


图1 单柱式海上风力机整机模型(单位:m)

2.2 有限元模型

图3为单柱式海上风力机塔架有限元模型;塔

架 1 部分网格尺寸大小为 0.6 m, 塔架 2 和塔架 3 部分网格尺寸大小为 0.4 m, 碰撞区域局部加密网格尺寸为 0.2 m。海上风力机机舱、轮毂及叶片对风力机塔架有着一定的影响, 为减小碰撞系统网格数从而节省仿真时间, 采用质量单元^[18] (element mass) 来描述风力机机舱、轮毂以及叶片对风力机塔架的作用和影响。

表 1 单柱式海上风力机塔架几何参数

部件	几何尺寸			标高
	直径	厚度	长度	
塔架 1	5.0 ~ 3.0	0.030	34.80	34 ~ 68.8
塔架 2	5.5 ~ 5.0	0.036	28.00	6 ~ 34
塔架 3	5.5	0.050	41.84	-35.84 ~ 6

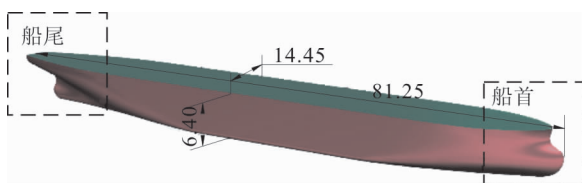


图 2 船舶建模 (单位: m)

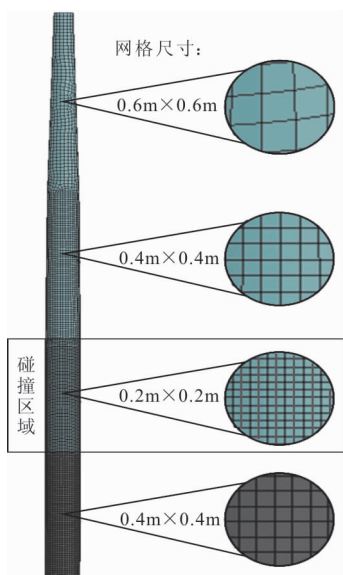


图 3 塔架有限元模型

船舶船首有限元模型如图 4 所示, 船舶壁面网格尺寸为 0.4 m; 船舶甲板网格靠近船舶壁面网格尺寸小为 0.4 m, 其他网格尺寸较大, 约为 1.2 m。

2.3 材料模型

在船舶碰撞问题中以及现有风力机碰撞研究中, 对于船舶及风力机塔架材料低碳钢通常采用随动塑性模型 (* MAT_PLASTIC_KINEMATIC), 较为真实地模拟材料特性^[11-12, 19-21]。因此, 本文船舶和风力机采用随动弹塑性模型^[22], 其屈服应力计算表

达式为^[18-20]:

$$\sigma_y = \sigma_0 + \frac{EE_t}{E - E_t} \varepsilon_p \quad (1)$$

式中: σ_0 为初始屈服应力, Pa; E 为弹性模量, Pa; E_t 为切线模量, Pa; ε_p 为等效塑性应变。

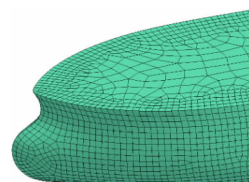


图 4 船舶船首有限元模型

碰撞过程是复杂的非线性动力响应过程, 因此必须考虑材料的动力特性对碰撞过程的影响, 材料采用考虑与应变率相关的 Cowper - Symonds 模型^[22], 模型本构方程为:

$$\frac{\sigma'_0}{\sigma_y} = 1 + \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{D} \right)^{1/p} \quad (2)$$

式中: $\dot{\varepsilon}$ 为塑性应变率; σ'_0 为塑性应变率为 $\dot{\varepsilon}$ 时的动屈服应力; D 及 p 为应变率常数。

表 2 为单柱式海上风力机塔架以及船舶材料参数^[11-12]。

表 2 材料参数

参数	塔架	船舶
密度 $\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	7850	7850
弹性模量 E / GPa	206	206
切线模量 E_t / MPa	763	1180
初始屈服应力 σ_0 / MPa	345	235
泊松比 ν	0.3	0.3
应变率常数 D / s^{-1}	40.4	40.4
应变率常数 p	5	5
塑性失效应变 ε	0.31	0.34

3 计算方法

碰撞动力方程为^[23-24]:

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = F^{\text{ex}} \quad (3)$$

式中, x 、 $\dot{x}$ 及 $\ddot{x}$ 分别为位移矢量、速度矢量及加速度矢量; M 为质量矩阵; C 阻尼矩阵; K 为刚度矩阵; F^{ex} 为合外力矢量。

3.1 接触选取及摩擦力计算

LS-DYNA 软件对于接触 - 碰撞的处理主要采用 3 种算法: 节点约束法、分配参数法以及对称罚函数法。节点约束法是最早采用的接触算法, 因算法的复杂性, 后仅用于固连界面; 分配参数法对节点的

加速度和速度施加约束,不允许从节点穿透主表面及壁面反弹,仅用于滑动界面;对称罚函数法是最常用的算法,其原理简单:每一计算时间步判断节点是否存在穿透,没有则不做任何处理,有则在接触间引入一个较大的界面接触力,其大小与接触深度和接触刚度成正比,成为罚函数值,其物理意义也就是在接触间定义一个法向弹簧限制接触穿透^[25-26]。

单柱式海上风力机与船舶碰撞过程中,船舶和风力机自身接触采用自动单面接触(automatic single surface),船首与风力机采用面面接触(contact automatic surface to surface)。为防止初始接触造成非正常接触关系,船首与单柱式海上风力机壁面初始间隔为 0.94 m。碰撞接触时,面面接触时的摩擦力为^[22]:

$$F_f = \mu |f_n|$$

(4)

式中: f_n 为法向接触力, N; μ 为摩擦系数, 计算公式定义为:

$$\mu = \mu_d + (\mu_s - \mu_d)e^{-k|V|}$$

(5)

式中: μ_d 为动摩擦系数; μ_s 为静摩擦系数; k 为衰减系数; V 为接触面相对速度。对于钢材动、静摩擦系数取 0.2, 衰减系数取 0^[9]。

3.2 边界条件

对于海床下塔架与土壤相互作用采用塔架侧面弹簧单元(element discrete)及底面固定约束(fix support),图 5 为土壤-桩系统示意图,塔架侧面弹簧底面固定。

通过方程(6)可计算得到弹簧阻尼系数^[9]:

$$c = 4D\rho v_s$$

(6)

式中: D 为塔架直径, m; ρ 为土壤密度, kg/m³; v_s 为土剪切波速, m/s。

为考虑应变率效应,LS-DYNA 提供简单方法,该方法通过扩大因子 k 和静态作用力 F_{static} 放大得到动态作用力 $F_{dynamic}$ ^[25]:

$$F_{dynamic} = (1 + k \frac{v}{v_0}) F_{static}$$

(7)

式中: k 为扩大因子, 取 1.5; v 为节点相对速度, m/s; v_0 为运动速度, 取值为 2 m/s。

4 结果与分析

4.1 风载荷作用对比

本文采用风场中风力机机舱处风载荷测量值^[15]如表 3 所示,机舱处风载荷坐标轴定义以及风载荷方向如图 6 所示,并对比该作用方向下与无风载荷作用下海上风力机受船舶碰撞动力响应。

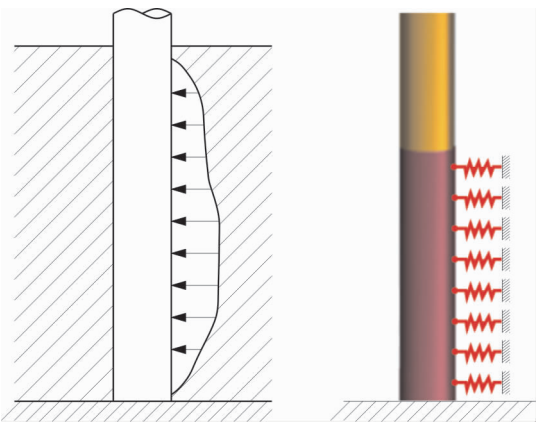


图 5 土壤-桩系统示意图

表 3 风载荷 kN

F_x	F_y	F_z
-586	38.9	-78.5

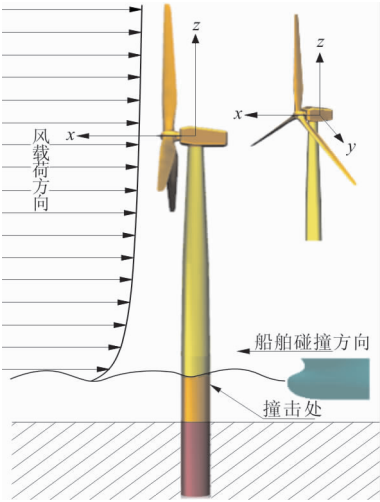


图 6 风载荷作用方向示意图

图 7(a)、(b)及(c)所示分别为在有、无风载荷作用下船舶与风力机碰撞作用力、碰撞方向(x 轴)上塔架塔顶位移及加速度随时间变化曲线。

由图 7(a)可知,船舶碰撞初始碰撞作用力线性急剧增大,该过程风力机撞击处主要发生弹性形变;之后相对缓慢增大到最大值并逐渐减小,变化曲线呈现非线性波动特征,该过程撞击处主要产生塑性变形。相对于无风载荷作用下,有风载荷作用下船舶最大碰撞作用力较大,前者为 3.015 MN,后者则为 3.044 MN。在时间 $t = 1.9$ s 之前,有风载荷作用下的船舶碰撞力大于无风载荷作用下船舶碰撞力;时间 $t = 1.9$ s 之后有、无风载荷作用时,船舶碰撞力大小对比与之前相反。

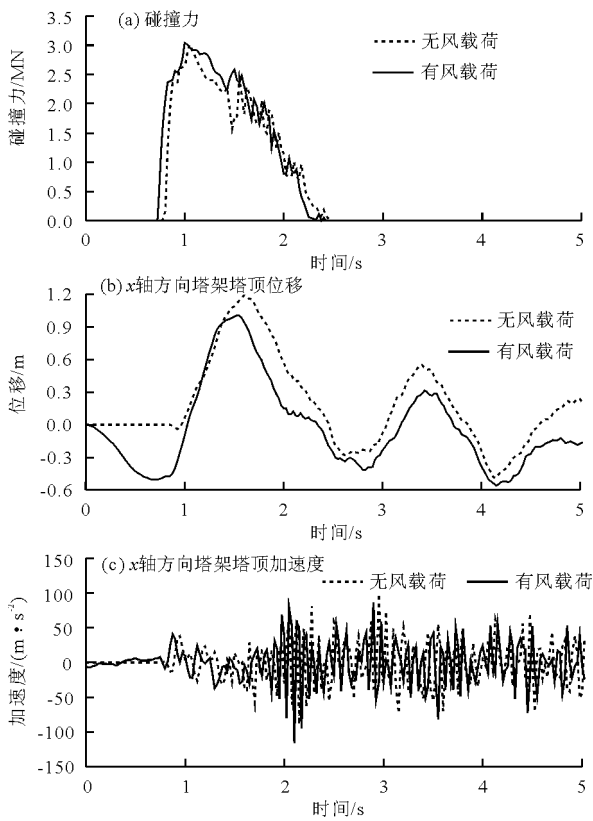


图7 动力响应分析对比

由图7(b)可知,无风载荷作用下风力机塔架塔顶位移在船舶碰撞之前保持不变;在船舶碰撞风力机接触瞬间,塔架塔顶由于惯性作用在碰撞方向(x 轴方向)产生负向小位移摆动后因巨大碰撞力作用逐渐向正方向摆动直到最大值1.19 m,后向 x 轴负向摆动,随着时间变化塔架塔顶摆动位移逐渐减小。

有风载荷作用下,在船舶接触风力机之前,塔架塔顶因风载荷作用产生 x 轴负向摆动至-0.503 m;船舶接触风力机之后,塔架逐渐产生 x 轴正方向的位移至最大值1.06 m并向 x 轴负方向摆动,随着时间变化塔架摆动逐渐减小。有、无风载荷作用下船舶碰撞风力机塔架塔顶位移有着很大的不同。

图7(c)为风力机塔架塔顶加速度随时间变化情况,无论有、无风载荷作用其变化都很大。在船舶接触风力机之前,无风载荷作用下的塔架塔顶加速度保持为零;而有风载荷作用下的塔架塔顶加速度先负后正,主要原因为初始时间风力机塔架受到风载荷作用塔架产生负向位移如图7(b)所示,当塔架产生负向位移时必然存在正向恢复力,随着负向位移增大,正向恢复力逐渐增大直到大于风载荷作用时塔架产生正向加速度,此时塔架负向摆动速度减小,因此在图7(b)中短时间内($t = 0 \sim 0.7$ s)呈现

“S”型位移变化。在无风载荷作用下,船舶碰撞风力机塔架塔顶在时间 $t = 2.9$ s前后有着最大值 98.7 m/s^2 ;有风载荷作用下,塔架塔顶加速度在时间 $t = 2.1$ s前后有着最大值为 116 m/s^2 ;有、无风载荷作用影响着塔顶最大加速度大小和产生时间。

有、无载荷作用对风力机船舶碰撞作用力、塔架塔顶位移和加速度有着很大的影响,必然对于风力机撞击处塑性变形有着很大的影响,无风载荷作用时风力机塔架撞击处最大等效塑性应变为0.0558,有风载荷作用时塔架撞击处最大等效塑性应变为0.0575,比无风载荷作用时增大3.05%。

4.2 不同风载荷方向对比分析

风载荷作用对风力机船舶碰撞有着很大的影响,包括碰撞力、塔架塔顶位移及加速度和风力机撞击处等效塑性应变。为进一步研究风载荷作用方向对风力机受船舶碰撞动力响应的影响,定义如图8所示风载荷作用方向,风载荷作用方向角度分别为: 0° 、 22.5° 、 45° 、 67.5° 、 90° 、 112.5° 、 135° 、 157.5° 以及 180° ,即对比分析9种不同风载荷作用方向对风力机船舶碰撞过程影响。

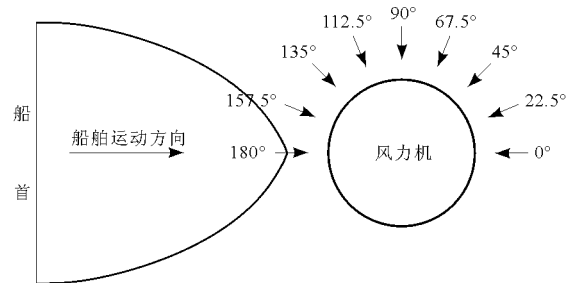


图8 风载荷作用方向定义

在不同风载荷作用方向时海上风力机与船舶碰撞过程中最大碰撞力、塔顶碰撞方向上最大位移、塔顶碰撞方向上最大加速度以及撞击处最大等效塑性应变如表4及图9所示。

表4 不同风载荷作用方向下塔架动力响应对比

风载荷方向/ $^\circ$	最大碰撞力/MN	塔顶最大位移/m	塔顶最大加速度/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$	最大等效塑性应变
0	3.044	1.00	116	0.0575
22.5	3.070	1.01	104	0.0565
45	3.83	1.06	84.3	0.0551
67.5	3.76	1.15	104	0.0556
90	3.69	1.23	91.4	0.0553
112.5	3.78	1.34	105	0.0532
135	3.30	1.44	100	0.0525
157.5	3.06	1.48	108	0.0530
180	2.98	1.57	137	0.0528

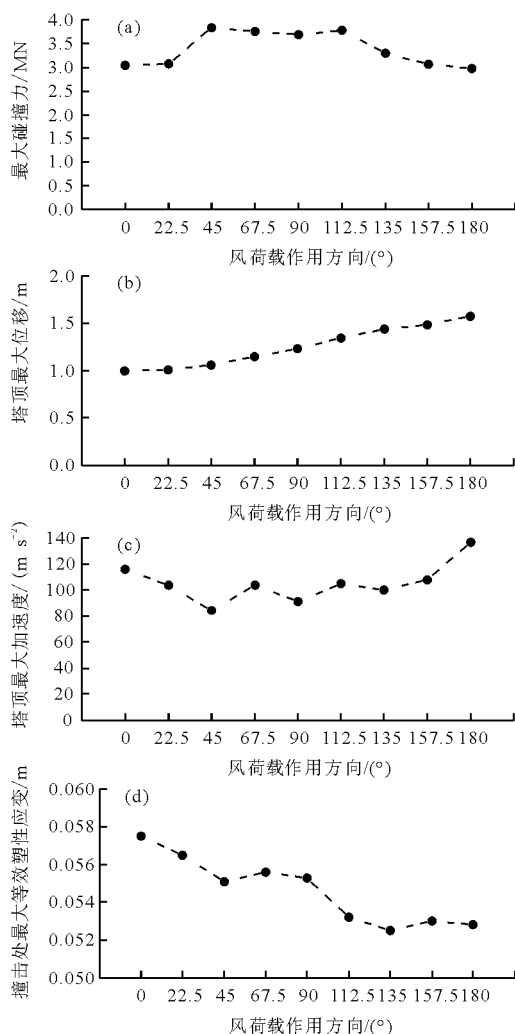


图9 不同风载荷作用方向动态响应

由表4及图9可知,随着风载荷方向角度的增大,船舶最大碰撞作用力先增大后减小,风载荷作用方向45°时最大为3.83 MN,风载荷作用方向为180°时最小为2.98 MN。塔顶碰撞方向上最大位移随着风载荷方向角度的增大而增大,风载荷作用方向为0°时最小为1.06 m,风载荷作用方向为180°时最大为1.57 m。随着风载荷作用方向角度增大,塔顶碰撞方向上最大加速度整体趋势为先减小后增大,风载荷作用方向45°时最小为84.3 m/s²,风载荷作用方向180°最大为137 m/s²。随着风载荷作用方向角度增大,撞击处最大等效塑性应变整体为下降趋势,风载荷作用方向0°时最大为0.0575,风载荷作用方向为135°时最小为0.0525。

由上可知,最大碰撞力最大即风载荷作用方向45°时塔架塔顶位移、塔顶加速度以及撞击处最大塑性应变不是最大;相对于风载荷作用方向0°时,风载荷作用方向为22.5°、45°、67.5°、90°、112.5°、135°以及157.5°的最大碰撞力较大但撞击处等效

塑性应变较小,其原因可能为风载荷作用使得塔架产生y轴方向的摆动位移,图10为不同风载荷作用方向下塔架塔顶y轴方向(纵向)摆动位移最大值曲线图。

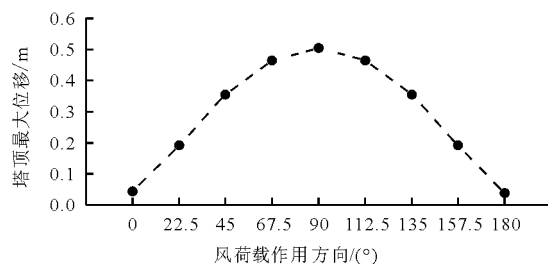


图10 不同风载荷作用方向塔顶y轴方向位移最大值

图10表明,在风载荷作用方向为22.5°、45°、67.5°、90°、112.5°、135°以及157.5°时风力机塔架在y轴方向上摆动位移很大,此时船舶碰撞不仅造成塔架碰撞方向的摆动和撞击处的塑性变形,而且造成y方向的摆动;随着风载荷作用方向的增大,纵向摆动最大位移先增加后减小;风载荷作用方向90°时风载荷完全作用在塔架y轴方向,此时塔架塔顶最大摆动位移最大。

5 结论

采用非线性有限元软件LS-DYNA研究单柱式海上风力机在有、无风载荷作用下5 000 t船舶以2 m/s速度碰撞,进一步考虑风载荷作用方向对风力机船舶碰撞的影响;对比分析有、无风载荷以及不同风载荷作用方向下风力机结构动力响应,可得如下结论:

(1)风载荷对风力机与船舶碰撞动力响应影响很大。有风载荷作用下船舶风力机碰撞力大于无风载荷作用,两种情况下塔架塔顶位移及加速度有着很大的差异;对于风力机与船舶碰撞力,有风载荷作用下相对无风载荷作用下大29 kN,相对差异约为1.0%;对于风力机塔架塔顶碰撞方向位移,有风载荷作用下相对于无风载荷作用下小0.13 m,相对差异约为10.9%;对于风力机塔架塔顶加速度,有风载荷作用下相对于无风载荷作用下大17.3 m/s²,相对差异约为17.5%;对于风力机撞击处等效塑性应变,有风载荷作用下为0.0575,无风载荷作用下为0.0558,相对差异增加约为3.05%。

(2)海上风力机与船舶碰撞结构动力响应在不同风载荷作用方向上有着很大的差异。风载荷作用方向45°时,风力机船舶碰撞作用力最大为3.83 MN,风载荷作用方向180°时最小为2.98 MN,相对

差异约为 28.5% ; 风载荷作用方向 180° 时, 塔架塔顶碰撞方向上正向位移最大 1.57 m, 在风载荷作用方向 0° 时最小为 1.00 m, 相对差异约为 57% ; 在风载荷作用方向 180° 时, 塔架碰撞方向上加速度最大 137 m/s^2 , 在风载荷作用方向 45° 时最小 84.3 m/s^2 , 相对差异约为 62.5% ; 风载荷作用方向 0° 时, 风力机碰撞处等效塑性应变最大为 0.0575, 风载荷作用方向 135° 时最小为 0.0525, 相对差异为 9.5% 。

(3) 不同风载荷作用方向下, 船舶碰撞不仅造成塔架碰撞方向的摆动和撞击处的塑性变形, 而且造成塔架纵向的摆动。随着风载荷作用方向的增大, 纵向摆动最大位移先增加后减小, 最大值为 0.505, 最小值为 0.0393。

参考文献:

- [1] 布兰登·福克斯. 风电并网: 联网与系统运行[M]. 机械工业出版社, 2015.
- [2] 高月文, 李春, 叶舟, 等. 海上风力机桩柱式结构动力响应分析[J]. 上海理工大学学报, 2013, 35(6): 591–595.
- [3] 丁勤卫, 李春, 叶柯华, 等. 风波浪对多平台阵列复试风力机 Spar 平台运动特性的影响[J]. 农业工程学报, 2016, 32(21): 223–229.
- [4] 李德源, 刘胜祥, 张湘伟. 海上风力机塔架在风浪联合作用下的动力响应数值分析[J]. 机械工程学报, 2009, 45(12): 46–52.
- [5] Dai Lijuan, Ehlers S, Rausand M, et al. Risk of collision between service vessels and offshore wind turbines[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2013, 109(109): 18–31.
- [6] Ramberg H F. High energy ship collisions with bottom supported offshore wind turbines [J]. Department of Marine Technology, 2012.
- [7] Ding Hongyan, Zhu Qi, Zhang Puyang, et al. Dynamic simulation collision between ship and offshore wind turbine[J]. Transactions of Tianjin University, 2014, 20(1): 1–6.
- [8] Ren Nianxin, Ou Jinping. A crashworthy device against ship – OWT collision and its protection effects on the tower of offshore wind farms [J]. China Ocean Engineering, 2009, 23(4): 593–602.
- [9] Liu Chunguang, Hao Ertong, Zhang Shibo. Optimization and application of a crashworthy device for the monopile offshore wind turbine against ship impact[J]. Applied Ocean Research, 2015(51): 129–137.
- [10] 李艳贞, 胡志强, 邹早建. 海上风电站遭遇船舶侧向撞击时的结构动力响应分析[J]. 振动与冲击, 2010, 29(10): 122–126.
- [11] 郝二通, 柳英洲, 柳春光. 海上风机单桩基础受船舶撞击的数值研究[J]. 振动与冲击, 2015, 34(3): 7–13.
- [12] Samsonovs A, Giuliani L, Zania V. Soil structure interaction in offshore wind turbine collisions [C]//Proceedings of the 9th International Conference on Structural Dynamics, Eurodyn 2014. European Association for Structural Dynamics, 2014: 3651–3658.
- [13] 高月文, 李春, 叶舟, 等. 风波浪多环境海上漂浮式风力机张力腿平台动态特性[J]. 水资源与水工程学报, 2014, 25(2): 91–97.
- [14] 盛振国, 任慧龙, 甄春博, 等. 基于时域载荷的海上风力机基础结构疲劳分析 [J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2014, 42(4): 96–100.
- [15] Bela A, Sourne H L, Buldgen L, et al. Ship collision analysis on offshore wind turbine monopile foundations [J]. Marine Structure, 2017, 51: 220–241.
- [16] 杜鹏飞. 3MW 单桩式风电机塔架结构设计[D]. 上海: 上海交通大学, 2010.
- [17] Hao Ertong, Liu Chunguang. Evaluation and comparison of anti-impact performance to offshore wind turbine foundations: Monopile, tripod, and jacket [J]. Ocean Engineering, 2017, 130: 218–227.
- [18] Gladmn B. LS – DYNA keyword user's manual – Vol. I – Version 971 [M]. Livermore: Livermore Software Technology Corporation, 2007.
- [19] 肖波, 鹿道凡. 船桥碰撞问题的有限元仿真分析 [J]. 船海工程, 2011, 40(1): 143–146 + 151.
- [20] 潘晋, 张敏, 许明财. 桥梁防船撞钢套箱的碰撞力快速估算 [J]. 振动与冲击, 2014, 33(8): 66–71.
- [21] 潘晋, 张小强, 许明财, 等. 船 – 桥梁浮式钢套箱碰撞数值模拟中的流场处理方法对比研究 [J]. 振动与冲击, 2016, 35(7): 124–151.
- [22] Gladmn B. LS – DYNA keyword user's manual – Vol. II – Version 971 [M]. Livermore: Livermore Software Technology Corporation, 2007.
- [23] 何勇, 金伟良, 张爱晖, 等. 船桥碰撞动力学过程的非线性数值模拟 [J]. 浙江大学学报(工学版), 2008, 42(6): 1065–1070.
- [24] 葛亮, 田正东, 袁利毫. 气垫船碰撞冲击动力学响应三维数值模拟 [J]. 中国舰船研究, 2015, 10(3): 57–62.
- [25] Hallquist J O. LS – DYNA Theory Manual [M]. Livermore: Livermore Software Technology Corporation, 2006.
- [26] 李裕春, 时党勇, 赵远. ANSYS 11.0/LS – DYNA 基础理论与工程实践[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008.