

单桩基础海上风机受船撞击损伤和动力响应分析

郝二通¹, 柳英洲², 柳春光^{*1}

(1. 大连理工大学 建设工程学部, 辽宁 大连 116024;
2. 辽宁工程技术大学 建筑工程学院, 辽宁 阜新 123000)

摘要: 随着海上风机在服役期内被船舶撞击风险提高, 运用 LS-DYNA 软件进行了 5 000 t 船舶以 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 速度撞击单桩基础海上风机的数值仿真. 提出面积受损率描述海上风机单桩基础的受损程度, 分析了风机塔架易损位置的位移、加速度响应及剪力. 结果显示: 船舶正撞风机以塑性碰撞为主; 面积受损率能合理反映单桩基础在不同质量、速度、碰撞角度船舶撞击下的受损程度, 其与船舶动能具有一一对应关系; 风机塔架位移响应随塔架高度增加而增强, 加速度响应却减弱; 塔架顶部剪力最大值同底部一样均很大, 所以加强塔架顶部连接同加强底部连接一样重要.

关键词: 海上风机; 单桩基础; 碰撞; 面积受损率; 加速度; 剪力

中图分类号: TU473.1; TM614 **文献标识码:** A **doi:** 10.7511/dllgxb201405011

0 引言

截至 2012 年底, 全球已建海上风电场累计装机容量已达 5 117 MW, 我国占 389.6 MW, 仅次于英国(2 948 MW)和丹麦(921 MW). 伴随着海上风电场快速发展的同时, 风力发电机组(简称风机)在服役期内遭受船舶撞击风险也在提高, 而目前针对此方面的规范很少, 仅有 DNV-OS-J101、IEC 61400-3 中涉及一定建议. 因此, 研究海上风机遭受撞击时的损伤和动力响应对风机安全非常重要.

Ding 等^[1]对大型预应力桶型风机基础遭受 5 000 t 船舶撞击时的损伤进行了数值模拟; 李艳贞等^[2]将船体看作刚体, 考虑船速影响, 分析了导管架基础风机的抗侧撞性能和易损位置; Ramberg^[3]选用 $16 \times 10^4 \text{ t}$ 油船, 在满载和空载情况下分别与风机导管架基础的管连接点和管腿位置进行了侧面碰撞, 研究讨论了导管架基础的局部屈曲破坏和可能的整体破坏; 文献[4]、[5]通过不同质量船舶与风机基础侧面碰撞, 从结构的屈曲和稳定性方面对比了单桩基础、三脚架基础、导

管架基础及重力式基础的抗撞性. 目前国内外已建海上风电场基础形式有单桩基础、重力式基础、三脚架基础、导管架基础、承台式基础等, 其中单桩基础占 65% 以上^[6], 而针对单桩基础海上风机遭受船舶撞击后基础损伤及风机响应特征研究很少. 因此, 本文基于 LS-DYNA 软件, 选用速度 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的 5 000 t 船舶撞击单桩基础海上风机, 对单桩基础损伤程度进行定量分析, 对风机塔架易损位置进行位移、加速度响应及剪力分析, 为保证风机安全提供一定参考.

1 碰撞分析基本理论

碰撞是瞬态的复杂物理过程, 属于非线性动力问题, 碰撞运动方程可表示为^[7]

$$M\ddot{U} + C\dot{U} + KU = F \quad (1)$$

式中: M 为质量矩阵, C 为阻尼矩阵, K 为刚度矩阵, U 为位移向量, F 为外界作用力(主要指碰撞力), 考虑沙漏能效应时需要等式右端加沙漏能力 H .

LS-DYNA 求解碰撞问题采用显式中心差分法, 显式中心差分法优点是无须进行矩阵求逆和

收稿日期: 2013-12-26; 修回日期: 2014-07-10.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51178079); 国家自然科学基金重大研究计划资助项目(90915011); “九七三”国家重点基础研究发展计划资助项目(2011CB013605-4).

作者简介: 郝二通(1987-), 男, 博士生, E-mail: haoxindayyr@163.com; 柳春光*(1964-), 男, 教授, 博士生导师, E-mail: liucg@dlut.edu.cn.

联立方程组,有效回避了因非线性引起的收敛性问题;缺点是解的稳定性是有条件的,必须满足 Courant 准则,即时间步长必须小于由该问题求解方程性质所决定的时间步长临界值.

2 数值计算模型

2.1 风机和船舶选取

风机选取国内某海上风电场^[8],单机额定功率为 3 MW,风机组成及各部件主要参数见表 1;基础选用设计方案其中之一的单桩基础,单桩基础包括钢管桩和钢管过渡连接段,桩径 4.8 m,壁厚 45 mm,桩长 53 m,桩基入土深度 41 m,钢管桩桩顶露出水面 2~3 m,过渡连接段为变直径钢管,长 7.77 m.

表 1 海上风机部件主要参数

Tab. 1 Principal parameters of offshore wind turbine components			
部件	外形尺寸	质量/t	离水面高度/m
叶片	φ2.4 m×44 m×4.2 m	11.2	91.345
机舱	13 m×5 m×6.24 m	115	90.045
轮毂	φ5 m×5 m	28.5	90.045
塔架	上 (φ3.9~φ3.07 m)×32.1 m	57	87.545
	中 (φ4.5~φ3.9 m)×30.815 m	98	55.445
	下 φ4.5 m×14.86 m	80	24.630

表 2 各部件材料参数

Tab. 2 Material parameters of components									
部件	$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	E/GPa	ν	σ_0/MPa	E_t/MPa	β	C/s^{-1}	P	ϵ
船舶	7 850	206	0.30	235	1 180	0	40.4	5	0.34
桩基	7 850	206	0.28	345	763	0	40.0	5	0.31
塔架	7 850	206	0.28	345	763	0	40.0	5	0.31

考虑到远离碰撞区域的部件不参与碰撞,为提高计算效率,船身和船尾用刚体材料(* MAT_RIGID^[10])来模拟,风机的叶片、轮毂、机舱通过在塔架顶施加集中质量来代替.

2.3 风机和船舶有限元模型

船舶与风机碰撞过程中,桩土相互作用主要为水平作用,竖向桩侧摩擦力可忽略不计, p - y 曲线法^[12]在塑性区采用极限地基反力法,弹性区采用弹性地基反力法,适用于船舶与风机的碰撞研究,因此,桩土相互作用通过弹簧单元来模拟.各土层 p - y 曲线参数值见表 3,表中 ϵ_{50} 为进行原状样的不固结不排水压缩试验时,最大主应力差1/2

由于国内没有风机抗撞设计相关规范,根据挪威船级社规范 DNV-RP-C204 规定^[9],海洋工程结构应具备抵抗速度为 $2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的 5 000 t 船舶冲击,所以选用 5 000 t 级船舶,船舶总长 100 m、垂线长 96 m、型宽 10.6 m、型深 3.4 m,船艏型式为飞剪型.

2.2 材料模型

船艏、桩基及塔架材料均为低碳钢.在碰撞过程中材料应变率很大,而应变率提高将使材料内部发生一系列物理和化学变化,其力学特性应力-应变关系更复杂,屈服极限、瞬时应力、延性阻尼比等参数均有不同程度的变化,所以选取 LS-DYNA 提供的考虑应变率影响的非线性塑性材料模型(* MAT_PLASTIC_KINEMATIC^[10]).该模型表达式^[11]为

$$\sigma_y = \left[1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{C} \right)^{1/P} \right] (\sigma_0 + \beta E_p \epsilon_{\text{eff}}^p) \quad (2)$$

式中: σ_0 为初始屈服强度; C 和 P 为材料 Cowper Symonds 应变率参数; β 为可调参数,取 0 为塑性随动强化模型,取 1 为等向强化模型; E_p 为塑性强化模量, $E_p = E_t E / (E - E_t)$, E 和 E_t 分别为弹性模量和切线模量; ϵ_{eff}^p 为等效塑性应变.表 2 列出了船艏、桩基、塔架材料的主要参数.

表 3 各土层 p - y 曲线参数值

Tab. 3 The p - y curves parameter values of different soils					
土层名称	厚度/m	有效密度/ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	内摩擦 角/($^\circ$)	不排水 剪切强度/ kPa	ϵ_{50}
淤泥质粉质黏土	18.99	8.4	—	12	0.04
粉质黏土	14.04	8.6	—	30	0.02
粉细砂	14.94	10.9	32	—	—

时的轴向应变,图 1 为海床处土弹簧本构模型.由于碰撞过程属于动力过程,弹簧需使用动力,故选取 LS-DYNA 提供的弹簧单元(* ELEMENT_DISCRETE^[10]),该单元动力 F_d 可通过放大因子

k 和静力 F_s 来表示：

$$F_d = \left(1 + k \frac{v}{v_0}\right) \cdot F_s \tag{3}$$

式中： v_0 为测试速度，取船舶速度； v 为碰撞过程中弹簧两端节点相对速度的绝对值； k 取 1.5。单桩基础碰撞区域进行网格细化，尺寸为 0.25 m，其余部分为 1 m，风机单元尺寸为 1 m，有限元模型见图 2。

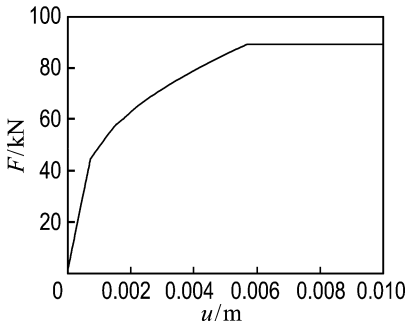


图 1 海床处土弹簧本构模型

Fig. 1 Constitutive model of soil spring at seabed

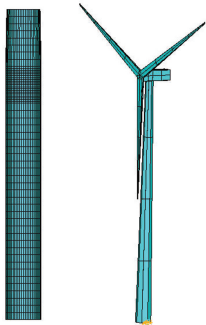


图 2 单桩基础及海上风机有限元模型

Fig. 2 FEM model of monopile foundation and offshore wind turbine

船体在运动过程中与水的相互作用通过附加质量法^[13]简化，附连水系数取 0.05^[14]。船艏通过壳单元建立，单元厚度为 20 mm，尺寸为 0.25 m，其有限元模型见图 3；船身和船尾通过实体单元建立，单元尺寸均超过了 1 m，通过改变船身和船尾密度来控制船舶重心和质量。

2.4 接触定义

为防止发生初始接触，船艏前端与钢管桩边缘留有 0.6 m 的间距。船艏与钢管桩接触选用 LS-DYNA 提供的自动面面接触 (* CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE^[10])，船艏自身接触为自动单面接触 (* CONTACT_

AUTOMATIC_SINGLE_SURFACE^[10])。接触时摩擦力 $F_y = \mu |f_s|$ ， f_s 为从节点法向接触力， μ 为摩擦因数，计算公式如下：

$$\mu = \mu_d + (\mu_s - \mu_d) e^{-D|v|} \tag{4}$$

式中： μ_d 为动摩擦因数， μ_s 为静摩擦因数， D 为衰减系数， v 为接触面间相对速度。钢材动、静摩擦因数^[15]取 0.2，衰减系数取 0。

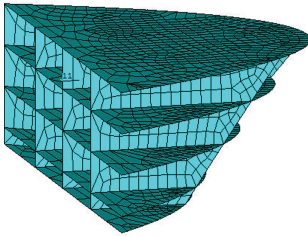


图 3 船舶有限元模型(剖视)

Fig. 3 FEM model of bow (perspective)

3 计算结果与分析

3.1 能量分析

船舶撞击风机过程中，船舶(包括附连水)动能转化为撞击船与风机的弹塑性变形能、船舶(包括附连水)的剩余动能、风机的动能、碰撞摩擦产生的滑移能^[16]及计算过程中由于沙漏现象损失的沙漏能^[16]。图 4 为 5 000 t 船舶以 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 速度撞击风机的能量变化曲线，0.3 s 时刻开始碰撞，滑移能和沙漏能此刻开始产生，滑移能增加至碰撞结束时刻(2.41 s)停止增加，沙漏能与总能之比始终小于 1.13%，说明有限元模型合理、计算结果准确。由于风机结构振动频率较低(基频

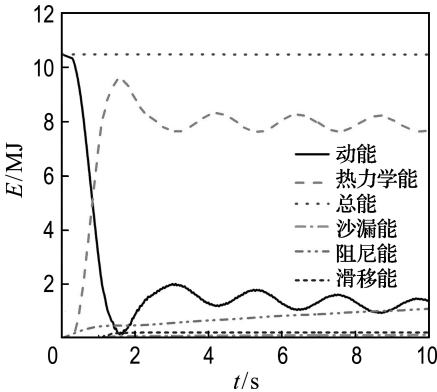


图 4 船舶与海上风机碰撞能量曲线

Fig. 4 Energy curves of ship-offshore wind turbine collision

$f=0.233\ 58\ \text{Hz}$), 风机结构阻尼采用 $C=a \cdot M$ ($a=2\xi/\omega, \xi$ 为结构阻尼比, 钢材取 $0.02; \omega$ 为角频率). 图中动能曲线在碰撞开始后迅速下降直至碰撞结束, 此时船舶速度已降低为零, 随后动能曲线开始回弹振荡且逐渐降低, 主要由风机获得动能后在阻尼作用下振动造成 (阻尼能曲线同时上升). 热力学能曲线升降与动能曲线升降刚好相反, 正确反映了能量的转换.

3.2 碰撞力分析

图 5 为 $5\ 000\ \text{t}$ 船舶以 $2\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 速度与风机发生正撞时的碰撞力时程曲线, 船舶与风机单桩基础 $0.30\ \text{s}$ 开始发生碰撞, 碰撞力从 $0.30\ \text{s}$ 到 $0.33\ \text{s}$ 增长基本是线性, 该阶段碰撞属于弹性碰撞, 主要为弹性变形; $0.33\ \text{s}$ 到 $1.08\ \text{s}$, 碰撞力每隔一段时间都会略微下降, 说明构件已开始受损, 直至 $1.08\ \text{s}$ 达到最大值 $11.72\ \text{MN}$, 该阶段可看作弹塑性碰撞; $1.08\ \text{s}$ 后, 曲线出现显著非线性波动特征, 每一次曲线下降都代表船艏或单桩基础局部破坏, 该阶段为塑性碰撞, 变形以塑性变形为主. 对比各阶段碰撞持续时间可知, 塑性碰撞持续时间要明显高于弹性碰撞和弹塑性碰撞时间, 所以 $5\ 000\ \text{t}$ 船舶以 $2\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 速度与风机发生正撞主要是塑性碰撞; 整个碰撞持续时间 t 为 $2.11\ \text{s}$, 与风机周期 T 比值为 0.49 , 比值可为准静态分析取放大因子^[17]提供参考.

图 5 中所用船艏为飞剪型, 而船艏形式一般有飞剪型和球鼻型 (球鼻突出型、船柱突出型和平齐型), 船艏形式主要影响碰撞接触面积, 通常接触面积越大, 碰撞力峰值越大, 碰撞时间越短, 这与冲量定量也是一致的^[18].

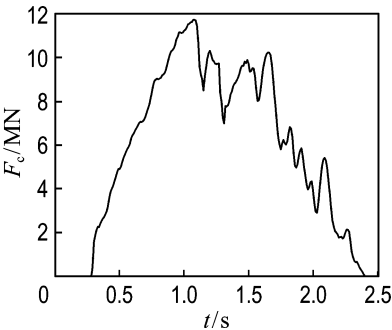


图 5 碰撞力时程曲线

Fig. 5 Time-history curve of collision-force

3.3 单桩基础损伤分析

3.3.1 单桩基础面积受损率 针对单桩基础几何形状规则以及材料区别于钢筋混凝土等性质, 提出面积受损率 δ 来描述风机被撞后单桩基础的受损程度:

$$\delta = \frac{A(\sigma \geq \sigma_0, t_{\text{start}} \leq t \leq t_{\text{end}})}{A_t} \times 100\% \quad (5)$$

式中: A 为碰撞后单桩基础 (钢管桩和钢管过渡连接段) 屈曲总面积, σ 为结构 von Mises 等效应力, σ_0 为材料屈服强度, $t_{\text{start}}, t_{\text{end}}$ 分别为碰撞开始和结束时刻, A_t 为单桩基础总面积.

3.3.2 单桩基础受损率分析 为分析碰撞角度对风机单桩基础面积受损率影响, 定义船舶速度方向与钢管桩撞击点切线方向夹角为碰撞角度 (见图 6).

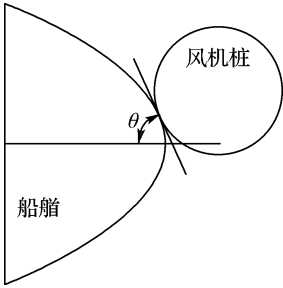


图 6 碰撞角度示意图

Fig. 6 Diagram of collision angle

表 4 为不同质量、速度、碰撞角度撞击后风机单桩基础的面积受损率. 对比工况 1、2、3 可知, 单桩基础面积受损率随船舶质量增加而提高. 对比工况 4、3、5, 发现船舶速度增加也提高单桩基础面积受损率, 且提高速率更快. 为了分析桩基面积受损率与船舶质量、速度关系, 本文多次尝试不同质量和速度但动能相同的船舶与风机碰撞, 发现桩基面积受损率几乎一样. 例如速度 $4\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的 $500\ \text{t}$ 船舶和速度 $2\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的 $2\ 000\ \text{t}$ 船舶分别撞击风机, 桩基面积受损率分别为 3.11% 和 3.16% . 所以可认为正撞时面积受损率与船舶初始动能存在一一对应关系, 但同时也发现两者并不是线性关系. 对比工况 3、6、7 发现, 随着碰撞角度减小, 桩基面积受损率也在降低, 主要原因是碰撞角度减小使分解到桩基碰撞点法向动能瞬间减小.

由以上分析可知, 面积受损率能正确反映单

桩基础受撞后的受损区域和受损面积,定量描述了风机的受损程度,为风机抗撞性能设计和受损维修方案提供了参考.同时,根据规范 DNV-RP-C204,风机应具备抵抗速度为 $2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的 $5\,000\text{ t}$ 船舶冲击,所以建议当风机受损面积超过 93 m^2 (面积受损率为 14.70%) 时,应及时进行维修与防护,这一值也应根据经验及配合塔顶机舱允许最大加速度值进行调整.

表 4 各种工况下单桩基础的面积受损率

Tab. 4 Damage rate of area of monopile foundation in different operating conditions

工况	质量/t	速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	碰撞角度/($^\circ$)	面积受损率/%
1	1 000	2	90	1.57
2	3 000	2	90	7.04
3	5 000	2	90	14.70
4	5 000	1	90	1.92
5	5 000	3	90	34.18
6	5 000	2	66	9.89
7	5 000	2	42	4.05

3.4 风机响应分析

3.4.1 位移和加速度响应分析 由于风机塔架连接点相对薄弱,定义风机 3 节塔架(上、中、下,见表 1)节点分别为 A、B、C.图 7 为碰撞过程中 A、B、C 三点的位移响应时程曲线,从箭头所指局部放大图可知,三点振动起始时间并不相同,三点依次滞后,说明碰撞时传递给塔架的应力波向上传递,且 A 点起振方向与 B、C 点相反,主要由塔顶质量过大导致;0.30 s 到 2.41 s 时间段内,由于处于碰撞阶段,风机基础处于损伤变化阶段,所以节点离碰撞点越近,其位移响应越不规律;碰撞结束后(2.41 s 后),风机振动属于有阻尼自由振动,从图 7 中可计算出振动周期为 4.44 s ,与风机初始状态周期 4.28 s 相比,周期增大,说明结构已损伤,刚度明显减小;从整个振动过程观察可知,节点离碰撞点越远,位移响应也越大,节点 A 最大值达 2.12 m ,同时也发现,节点 A、B、C 振动并非对称,主要由于撞击是在风机基础单侧,基础受损也不对称.

图 8 为风机塔架 A、B、C 三点的加速度响应时程曲线,从图中可发现离碰撞点越远,塔架节点加速度响应越弱,说明应力波在向塔顶传播过程

中逐渐耗散,不过塔顶节点 A 加速度依旧能达到 $20.84\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$.

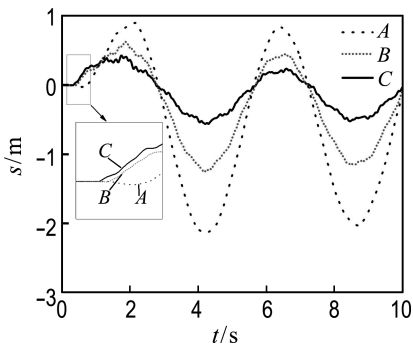


图 7 塔架位移响应时程曲线

Fig. 7 Time-history curves of tower displacement response

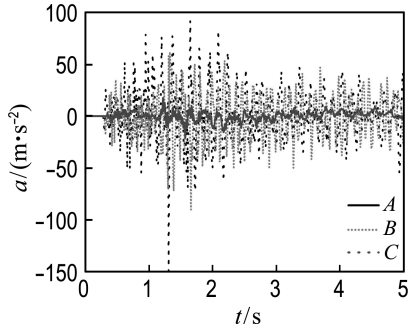


图 8 塔架加速度响应时程曲线

Fig. 8 Time-history curves of tower acceleration response

从图 7 和图 8 振动情况可看出,碰撞过程中,节点离碰撞点越远,振动趋于稳定速度越快;相反,节点离碰撞点越近,振动趋于稳定速度越慢.但一般在碰撞结束后,塔架基本很快就趋于稳定了.

3.4.2 剪力分析 由于塔顶机舱、轮毂等质量非常大,风机受撞击时极易脱落,加之塔架与基础顶连接也很关键,对塔顶和塔底(基础顶)进行剪力分析很重要.图 9 为塔架顶部和底部剪力时程对比曲线,由图可知,塔顶剪力时程曲线振荡频率要明显高于塔底,主要是由于向上传递的应力波与到达塔顶向下传递的应力波叠加所致,而到达塔顶向下传递的应力波传到塔底时已经很弱;对比塔架顶部和底部剪力最大值,发现顶部剪力最大值(1.81 MN)与底部剪力最大值(2.07 MN)相差并不很大,且均出现在碰撞时间段内($0.3\sim 2.41\text{ s}$),所以加强塔架顶部的连接同加强底部连接一

样很重要.

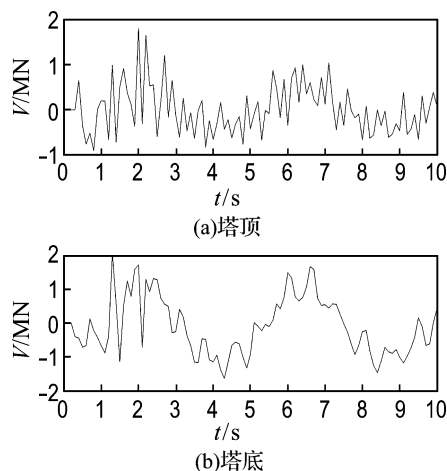


图 9 塔架剪力时程曲线

Fig. 9 Time-history curves of tower shearing force

4 结 论

(1) 5 000 t 船舶以 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 速度与单桩基础风机发生正撞时以塑性碰撞为主, 弹性碰撞、弹塑性碰撞、塑性碰撞持续时间分别为 0.03 s、0.75 s、1.33 s.

(2) 面积受损率能合理反映单桩基础在不同质量、速度、碰撞角度船舶撞击下的受损程度, 其与船舶动能具有一一对应关系, 但同时也发现两者并不是线性关系, 具体关系仍需根据大量数值分析和实际情况确定. 面积受损率能为风机抗撞性能设计和受损维修方案提供一定参考.

(3) 风机塔架位移响应随塔架高度增加而增强, 加速度响应随塔架高度增加而减弱.

(4) 风机塔架顶部剪力最大值同底部剪力最大值均很大, 所以加强塔架顶部连接同加强底部连接一样很重要.

参考文献:

- [1] DING Hong-yan, ZHU Qi, ZHANG Pu-yang. Dynamic simulation on collision between ship and offshore wind turbine [J]. *Transactions of Tianjin University*, 2014, **20**(1):1-6.
- [2] 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, 254-255.
- LI Yan-zhen, HU Zhi-qiang, ZOU Zao-jian.

Structural dynamic response analysis of an offshore wind turbine stricken by a ship in lateral direction [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2010, **29**(10): 122-126, 254-255. (in Chinese)

- [3] Ramberg H F. High energy ship collisions with bottom supported offshore wind turbines [D]. Trondheim: Norwegian University of Science and Technology, 2011.
- [4] Dalhoff P, Biehl F. Ship collision, risk analysis-emergency systems-collision dynamics [C] // *Copenhagen Offshore Wind*. Hamburg: Germanischer Lloyd Windenergie GmbH, 2006.
- [5] Biehl F, Lehmann E. Collisions of ships with offshore wind turbines: calculation and risk evaluation [C] // *Offshore Wind Energy*. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2006.
- [6] 王国粹, 王伟, 杨敏. 3.6 MW 海上风机单桩基础设计与分析[J]. *岩土工程学报*, 2011, **33**(S2): 95-100.
- WANG Guo-cui, WANG Wei, YANG Min. Design and analysis of monopile foundation for 3.6 MW offshore wind turbine [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2011, **33**(S2): 95-100. (in Chinese)
- [7] 白金泽. LS-DYNA 3D 理论基础与实例分析[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- BAI Jin-ze. *Basic Theory and Example Analysis of LS-DYNA 3D* [M]. Beijing: Science Press, 2005. (in Chinese)
- [8] 上海勘察设计研究院. 东海大桥海上风电场工程可行性研究报告[R]. 上海: 上海勘察设计研究院, 2006.
- Shanghai Investigation Design & Research Institute. Feasibility study report of Donghai bridge offshore wind farm [R]. Shanghai: Shanghai Investigation Design & Research Institute, 2006. (in Chinese)
- [9] Det Norske Veritas. DNV-RP-C204 Design Against Accidental Loads [S]. Norway: DNV, 2004.
- [10] Gladman B. *LS-DYNA Keyword User's Manual - Vol. I - Version 971* [M]. Livermore: Livermore Software Technology Corporation, 2007.
- [11] 石少卿, 康建功, 汪敏, 等. ANSYS/LS-DYNA 在爆炸与冲击领域内的工程应用[M]. 北京: 中国建

- 筑工业出版社, 2011.
- SHI Shao-qing, KANG Jian-gong, WANG Min, *et al.* **Engineering Application of ANSYS/LS-DYNA in Field of Explosion and Shock Waves** [M]. Beijing: China Building Industry Press, 2011. (in Chinese)
- [12] API R P. 2A - WSD Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms - Working Stress Design [S]. Washington D C: American Petroleum Institute, 2000.
- [13] 王自力, 蒋志勇, 顾永宁. 船舶碰撞数值仿真的附加质量模型[J]. 爆炸与冲击, 2002, **22**(4):321-326.
- WANG Zi-li, JIANG Zhi-yong, GU Yong-ning. An added water mass model for numerical simulation of ship/ship collisions [J]. **Explosion and Shock Waves**, 2002, **22**(4):321-326. (in Chinese)
- [14] Petersen M J. Dynamics of ship collisions [J]. **Ocean Engineering**, 1982, **9**(4):295-329.
- [15] 同济大学土木工程防灾国家重点实验室. 南京长江第四大桥船舶撞击动力分析研究 [R]. 上海: 同济大学, 2007.
- State Key Laboratory of Disaster Risk Reduction in Civil Engineering of Tongji University. Dynamic research of the fourth Nanjing Yangtze river bridge subjected to ship impact [R]. Shanghai: Tongji University, 2007. (in Chinese)
- [16] Hallquist J O. **LS-DYNA Theory Manual** [M]. Livermore: Livermore Software Technology Corporation, 2006.
- [17] Gjerde P, Parsons S J, Igbenabor S C. Assessment of jack-up boat impact analysis methodology [J]. **Marine Structures**, 1999, **12**(4-5):371-401.
- [18] 颜海泉. 桥梁船撞有限元仿真分析 [D]. 上海: 同济大学, 2004.
- YAN Hai-quan. FEM simulation analysis of ship-bridge collision [D]. Shanghai: Tongji University, 2004. (in Chinese)

Damage and dynamic response analyses of offshore wind turbine with monopile foundation subjected to ship impact

HAO Er-tong¹, LIU Ying-zhou², LIU Chun-guang^{*1}

(1. Faculty of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. College of Civil Engineering and Architecture, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China)

Abstract: With the increase of the risk of offshore wind turbine stricken by a ship during the service period, offshore wind turbine with monopile foundation impacted by a 5 000 t ship at $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ is numerically simulated by using LS-DYNA. Damage rate of area, describing the damage degree of monopile foundation for offshore wind turbine, is proposed. The displacement and acceleration response and shearing force of vulnerable point at tower are analyzed. The analytical results indicate that the plastic collision is major part for ship-offshore wind turbine collision; damage rate of area can reasonably reflect the damage degree of monopile foundation stricken by a ship with different masses, velocities and collision angles, and there is a monogamy between damage rate of area and kinetic energy of ship; the displacement response is enhanced with increase of tower height, but acceleration response is reduced; the maximum shearing force at the top of tower is as large as that at the bottom. Therefore, it is equally important to take safety measures to strengthen the top of tower as it is to the bottom.

Key words: offshore wind turbine; monopile foundation; collision; damage rate of area; acceleration; shearing force