

# 单桩基础海上风力机遭遇船舶撞击的动力响应分析

周红杰<sup>1</sup>, 李春<sup>1,2</sup>, 丁勤卫<sup>1</sup>, 郝文星<sup>1</sup>

(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:** 为研究单桩基础海上风力机遭遇船舶撞击的动力响应特性, 建立基于国内某单桩柱式的 3MW 风力机与船舶碰撞模型, 运用显式动力学理论并结合非线性有限元方法, 通过 LS-DYNA 模拟 5000t 船舶以不同速度撞击风力机过的动力响应过程。结果表明: 碰撞持续的时间和最大接触力随着速度的增加而增加; 碰撞结束后, 船舶回弹动能与初始动能之比随着速度的增加而减少, 但结构变形能与初始动能之比随着速度的增加而增加; 当船舶速度为 2 m/s 时, 碰撞主要为塑性碰撞, 撞深为 0.675 m, 塔顶风力机最大位移和加速度分别为 2.3 m 和 29 m/s<sup>2</sup>。

**关键词:** 单桩基础; 船舶碰撞; 动力响应; 海上风力机

中图分类号: P752; TM315

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2017)03-0173-06

## Dynamic characteristics analysis of offshore wind turbine with monopile foundation subjected to ship impact

ZHOU Hongjie<sup>1</sup>, LI Chun<sup>1,2</sup>, DING Qinwei<sup>1</sup>, HAO Wenxing<sup>1</sup>

(1. School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

2. Shanghai Key Laboratory of Multiphase Flow and Heat Transfer in Power Engineering, Shanghai 200093, China)

**Abstract:** In order to analyze the dynamic response characteristics of monopile wind turbine collision with ship, a 3MW wind turbine and ship collision model based on monopile was established. Based on explicit dynamical theory and nonlinear finite element method, simulation of the dynamic response of the wind turbine by 5000-t by the LS-DYNA at different impact speed was conducted. The results showed that: the duration of the collision and the maximum contact force increases with speed; after the collision, the ratio of the ship rebound kinetic energy to the initial kinetic energy decreases with the increase of speed, but the ratio of the structure deformation energy to the initial kinetic energy increases as the speed increases; When the ship speed is 2 m/s, the collision is mainly plastic collision, the collision depth is 0.675 m, and the top tower wind turbine maximum displacement and acceleration are 2.3m and 29 m/s<sup>2</sup>.

**Key words:** monopile foundation; ship collision; dynamic response; offshore wind turbine

## 1 研究背景

与陆上风能相比, 海上风能具有风切变小、风速高和不占用土地资源等优点<sup>[1-3]</sup>, 我国海上可开发利用的风能是陆地上的 3 倍, 近海可开发的风能总量约为 7.5 亿 kW<sup>[4]</sup>。世界各国对海上风电开发越来越重视, 海上风电场的数量将会越来越多。国家自然科学基金委员会于 2016 年 12 月 16 号新近发布的“2017 年度国家自然科学基金委员会与英国工程自

然科学研究理事会合作研究项目指南”, 将“近海可再生能源(Offshore Renewable Energy)”作为资助领域, 也从另一侧面说明了海上风能资源开发的重要性<sup>[5]</sup>。通常考虑安装、维修及风电设备的运输等因素, 这些风电场靠近繁忙的航道, 因此, 海上风力机在服役期内遭受船舶撞击的概率也随之增大。

海上风力机是一种典型顶部带有集中大质量的高耸结构, 如果支撑结构发生碰撞造成大变形很容易引起顶部叶片、轮毂和机舱强烈的动力响应, 并最

收稿日期: 2017-01-11; 修回日期: 2017-03-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(51676131、51176129)

作者简介: 周红杰(1992-), 男, 湖北鄂州人, 硕士研究生, 研究方向: 海上风力发电。

通讯作者: 李春(1963-), 男, 北京人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事动力机械及流体机械优化设计、风能利用等方面研究工作。

终导致整体结构失稳倒塌,其结果必然是灾难性的<sup>[6]</sup>。因此,研究船舶与海上风力机的碰撞过程,可为安全利用海上风能提供一定的技术支撑,具有重要的现实意义和工程应用价值。

针对海上风力机受船舶撞击后的动力响应,国内外学者开展了相关研究。Ramberg<sup>[7]</sup>通过模拟油船在满载和空载情况下与导管架基础的管连接点和管腿位置进行侧面碰撞,分析导管架基础的局部屈曲特性;文献[8]应用非线性有限元分析程序 MSC Dytran 对三脚架基础抗撞特性进行了研究,得到了三角架基础的结构损伤特性及碰撞力-撞深和能量转化曲线,并讨论了撞击速度对计算结果的影响;Ding Hongyan 等<sup>[9]</sup>对重力式基础海上风力机遭受 5000t 船舶撞击进行数值模拟,分析了不同速度船舶撞击时塔顶的位移和重力式基础的塑性应变;Amdahl 等<sup>[10]</sup>应用有限元软件 LS-DYNA 模拟了船舶与海洋平台的碰撞过程,研究了船舶船首的损伤特性。目前,国内外已建近海上风力机的支撑结构有桩柱式基础、重力式基础、三脚架基础和导管架基础等,其中桩柱式基础占 65% 以上<sup>[11]</sup>,但针对桩柱式海上风力机碰撞后塔顶风力机动力响应和碰撞过程的研究较少,行驶中船的速度和质量对碰撞结果影响很大。因此,开展单桩柱式海上风力机与船舶碰撞的动力响应分析,对这类海上风力机安全设计与风险评估十分重要。

本文借鉴以上的研究经验,结合碰撞理论,通过有限元软件 LS-DYNA 对不同速度船舶与单桩柱式风力机碰撞的持续时间、接触力和风力机响应进行数值模拟分析,以期海上风力机采取有效的防护措施提供理论依据和实现途径。

## 2 碰撞分析模型

碰撞是瞬间完成的复杂物理过程,属于非线性动力问题,碰撞运动的微分方程可表示为<sup>[12-13]</sup>:

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = F + H \quad (1)$$

$$m\ddot{w}(t) + f(t) = 0 \quad (2)$$

式中:  $M$  为质量矩阵;  $C$  为阻尼矩阵;  $K$  为刚度矩阵;  $F$  为作用在结构上撞击力, N;  $H$  为沙漏力, N;  $\ddot{x}$  为  $t$  时刻的加速度,  $\text{m/s}^2$ ;  $\dot{x}$  为  $t$  时刻的速度,  $\text{m/s}$ ;  $m$  为船体质量, kg;  $\ddot{w}(t)$  为船体运动加速度,  $\text{m/s}^2$ ;  $f(t)$  为作用在船上的反弹力, N。

LS-DYNA 求解碰撞问题采用显示中心差分法,该方法适合模拟瞬间的动态变化现象,无须进行矩阵求逆和联立方程组,有效回避了因非线性引起

的收敛性问题<sup>[14]</sup>。

## 3 研究对象

### 3.1 桩柱式风力机

风力机选取国内某海上风电场,单机额定功率为 3MW,风力机及塔架详细参数见表 1。

表 1 海上风力机部件主要参数

部件	几何尺寸/m	质量/t	
叶片	2.4 × 44 × 4.2	11.2	
机舱	13 × 5 × 6.24	115	
轮毂	5 × 5	30	
塔架	上	(3 ~ 4) × 30	61
	中	(4 ~ 4.5) × 30	96
	下	4.5 × 15	80

桩柱式风力机上部结构包括 4 部分:塔架、轮毂、机舱和叶片,塔架底端直径为 4.5 m,顶端直径为 3 m,壁厚为 30 mm;桩柱式风力机下部为单柱式结构,桩长 50 m,桩基入土深度 38 m,桩直径 4.5 m,壁厚 35 mm。单桩柱式海上风力机模型如图 1 所示。

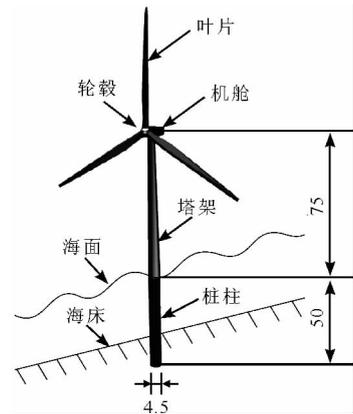


图 1 单桩柱式海上风力机模型(单位:m)

船舶与风力机碰撞的过程中,桩-土的作用主要在控制水平位移,由于目前缺少 3MW 海上风力机公开的详细设计及场地资料,所以无法较为准确地利用曲线法构建桩-土相互作用的弹塑性模型<sup>[15]</sup>。鉴于 DNV-OS-J101 规范中规定大型海上风力机在基于 ALS(Attainment Limit State) 设计时钢管桩在泥面处的水平位移一般控制在 20 mm 以下,这对于大型海上风力机高达 75 m 的塔架来说显然很小<sup>[16]</sup>。因此,本文将单桩柱式基础在泥面处假定为刚性约束,忽略水平侧移。为减少网格数、不影响计算精度又不失一般性,通过在塔架顶端施加集中质

量来代替风力机的叶片、轮毂、机舱的质量。对碰撞区域的网格进行加密,尺寸为0.3 m,其余部分为1 m,桩柱式风力机有限元模型如图2所示。

### 3.2 船舶

根据风电场海域的实际情况,选用较为常见的散货船,船首型式为球鼻型,其排水量为3 182 t,主要尺寸参数如表2,模型如图3所示。

表2 船舶主尺度参数表

总长	型宽	型深	吃水
88	10.6	3.4	2.6

由于国内没有风力机抗撞设计相关规范,根据挪威船级社规范 DNV - RP - C204 规定<sup>[17]</sup>,海洋上的工程结构应能抵抗 5 000 t 船舶速度为 2 m/s 的冲击。为了更好地分析风力机受到船舶撞击后的动力响

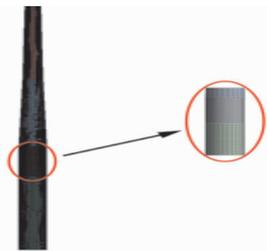


图2 桩柱式风力机有限元模型(单位:m)

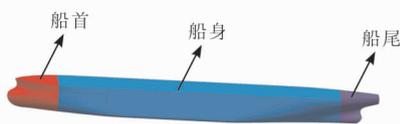


图3 碰撞船舶模型

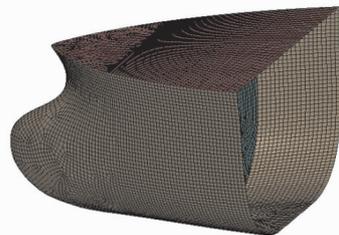


图4 船首有限元模型

## 4 数值计算模型

### 4.1 材料本构模型

船首、单桩柱式基础及风力机塔架材料均为低碳钢,在碰撞过程中材料应变率很大,所以碰撞分析中必须考虑材料应变率的影响。LS - DYNA 提供的非线性弹塑性材料模型(\* MAT\_PLASTIC\_KINEMATIC)<sup>[23]</sup>基于 Cowper - Symonds<sup>[24]</sup>关系式建立,能够很好地模拟冲击载荷下的金属材料,其表达式为:

$$\sigma_y = \left[ 1 + \left( \frac{\dot{\varepsilon}}{C} \right)^{1/p} \right] (\sigma_0 + \beta E_p \varepsilon_{eff}^p) \quad (3)$$

式中:  $\sigma_y$  为极限屈服应力, Pa;  $\sigma_0$  为初始屈服应力, Pa;  $C$  和  $p$  为材料应变率常数,对于一般钢材  $C = 40.5$ ,  $p = 5$ ;  $\beta$  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, Pa;  $\varepsilon_{eff}^p$  为塑性应变率。风力机塔架、单柱式基础和船首的材料参数如表3所示。

失效准则是判断单元发生断裂的关键,当单元的等效塑性应变超过定义的极限塑性应变时,单元

发生断裂失效。失效应变取决于材料的物理特性及有限单元网格的属性,为了使计算的失效情况与实际塔架失效的情况一致,取  $\varepsilon = 0.34$  为失效应变<sup>[25]</sup>。

应,本文选取 5 000 t 的船舶分别以 1、2、3 和 4 m/s 的速度与单桩柱式风力机进行碰撞模拟。碰撞船舶主要分为 3 个部分:船首、船身和船尾,通过控制船身及船尾的密度来控制船舶整体的重心和质量。

在船舶与塔架碰撞的过程中,船舶与海水的相互作用不可忽略。一般的解决办法是建立流固耦合模型或附加质量模型<sup>[18-19]</sup>,船舶 - 海水相互作用的耦合计算需要耗费大量的计算时间,此外附加质量法也得到了众多学者的验证和认可<sup>[20-22]</sup>,故本文船舶与水的相互作用选用附加质量法,船舶与塔架发生正面碰撞,附加水质量系数选取 0.05。

船首通过壳单元模拟,单元厚度为 20 mm,单元尺寸为 0.3 m,船身和船尾单元尺寸为 1 m,为清楚显示网格划分,本文给出参与碰撞船首的有限元模型,如图4所示。

发生断裂失效。失效应变取决于材料的物理特性及有限单元网格的属性,为了使计算的失效情况与实际塔架失效的情况一致,取  $\varepsilon = 0.34$  为失效应变<sup>[25]</sup>。

表3 各部件的材料参数

部件	$\rho /$ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	$E /$ GPa	$\nu$	$\sigma_0 /$ MPa	$E_t /$ MPa	$\beta$	$C /$ $\text{s}^{-1}$	$p$	$\varepsilon$
船首	7850	206	0.30	235	1180	0	40.4	5	0.34
桩基	7850	206	0.28	345	763	0	40.0	5	0.34
塔身	7850	206	0.28	345	763	0	40.0	5	0.34

### 4.2 接触定义

在接触过程中,接触界面是不断变化的,由于接触计算耗时较多,为缩短计算时间,要尽量避免定义不可能发生的接触。本文采用主 - 从接触面方法,主、从接触面分别定义在船首和塔架上,为防止发生初始碰撞,船首前端与塔架边缘的距离设置为 2m。对船首和可能与之发生接触的壁面采用 LS - DYNA 提供的自动面面接触,防止船体与塔架相互穿越。

碰撞过程中船首与塔架接触时摩擦力为:

$$F_y = \mu |f_x| \quad (4)$$

式中:  $f_s$  为节点法向接触力, N;  $\mu$  为摩擦系数, 计算公式如下:

$$\mu = \mu_d + (\mu_s - \mu_d) e^{-D|v|} \quad (5)$$

式中:  $\mu_d$  为动摩擦系数;  $\mu_s$  为静摩擦系数;  $D$  为衰减系数;  $v$  为接触面间相对速度, m/s。船首和桩柱式风力机塔架之间动、静摩擦系数取 0.2, 衰减系数取  $0^{[26]}$ 。

## 5 结果与分析

### 5.1 能量分析

船舶撞击塔架的过程中, 船舶初始动能(包括

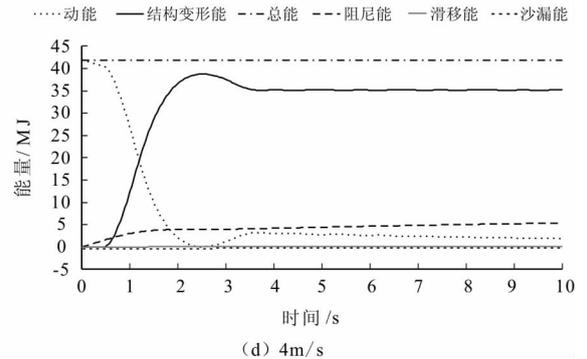
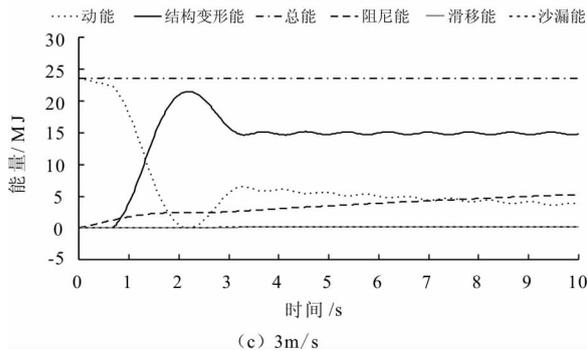
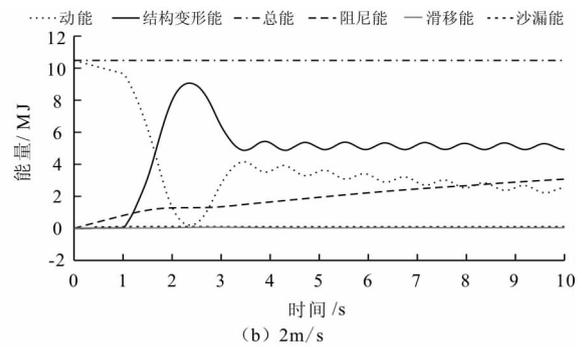
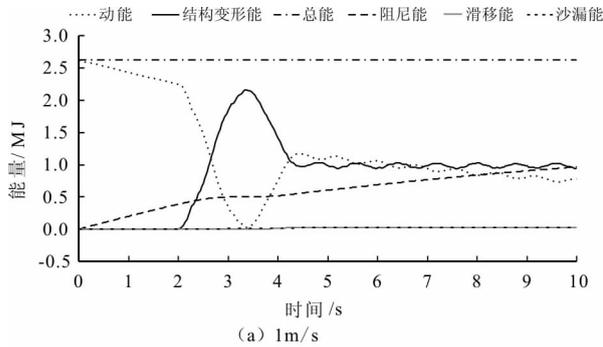


图5 5 000 t 船舶以不同初始速度碰撞能量变化曲线

由图5可知,以动能开始减少为碰撞初始时刻,以动能不再增加为碰撞结束时刻,将图5(a)、(b)、(c)、(d)中碰撞结束时间减去初始碰撞的时间可得碰撞持续的时间分别为2.26、2.44、2.68、3.30 s,即随着船舶速度的增加,碰撞持续时间在缓慢地增加。

由图5(b)5 000 t 船舶以 2 m/s 速度正面撞击单柱式风力机平台的能量变化曲线可知,滑移能和沙漏能在 1.0 s 时开始产生,说明此刻开始发生碰撞,到 3.43 s 时滑移能不再增加说明船舶与塔架分离,碰撞结束;当系统动能回弹后达到峰值时,此时动能主要由船舶、风力机及塔架的振动产生,之后由于风力机和塔架振动动能逐渐衰减;结构变形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。附连水质量)转化为船舶和塔架的弹塑性变形能、动能、碰撞摩擦产生的滑移能、由于沙漏现象产生的沙漏能以及塔架在自身阻尼(外界阻尼复杂且不影响研究目的)作用下振动产生的阻尼能。在计算过程中,一般认为当沙漏能小于总能量的 5% 时证明结果可靠<sup>[24]</sup>。

本文对 4 个算例中的能量数据进行分析,可知模拟的沙漏能始终低于总能量的 1.5%,说明有限元模型合理及计算结果准确。图5为 5 000 t 船舶以不同速度与桩柱式海上风力机碰撞后的能量变化曲线。

的转换。

为清晰反映能量转换,将图5中部分数据进行整理。表4为在不同速度下船舶与桩柱式风力机碰撞结束后动能和结构变形能及其与初始动能的百分比。

表4 碰撞结束后回弹动能与结构变形能

初始速度/ (m · s <sup>-1</sup> )	初始动能/ MJ	回弹动能		结构变形能	
		能量值/ MJ	百分比/ %	能量值/ MJ	百分比/ %
1	2.625	1.17	44.57	0.97	36.95
2	10.5	4.17	39.71	4.88	46.48
3	23.625	6.52	26.46	14.6	61.79
4	42	3.22	7.67	35.2	83.82

由表4可知,碰撞结束后,船舶回弹动能与初始动能之比随着速度的增加而减少,但结构变形能与初始动能之比随着速度的增加而增加,在船舶以4 m/s 速行驶时,只有7.67%初始动能转化为回弹动能,此时结构变形能占比高达83.82%。主要原因是结构发生塑性变形,碰撞逐渐由弹性碰撞过渡到塑性碰撞,并且随着初始动能的增加,塔架的结构变形能也大幅增加。

## 5.2 接触力分析

图6为5000t船舶在不同速度下的接触力曲线,并标出了最大接触力,由于船舶的行驶速度不同造成碰撞的时间点不同,为了更好地观察和分析接触力曲线,以速度4m/s行驶的船舶为准,将接触起点调至同一点。

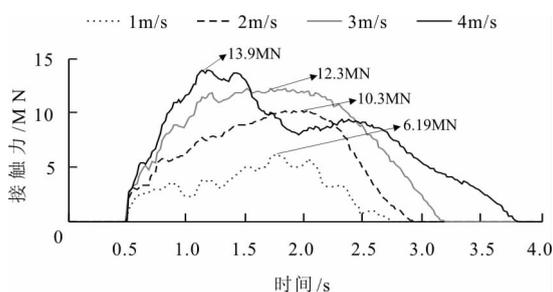


图6 不同速度船舶撞击接触力曲线

由图6可知,碰撞初始阶段不同速度船舶的接

触力曲线基本重合,此时船舶碰撞属于弹性碰撞,随着船舶行驶速度的增加,接触力曲线迅速分开,曲线的非线性波动特征也逐渐显著,接触力曲线每一次波峰到波谷的过程就有力的卸载,代表船首构件和塔架的变形或受损;当船舶以4 m/s 行驶时接触力在1.5~1.9 s 卸载最为显著,且在1.9~2.6 s 内接触力并没有减小,说明此时塔架发生了极大的变形,大量初始动能转化为塔架的结构变形能,与表4分析的数据一致。

由图6中4 m/s 船舶撞击接触力曲线可知,船舶与风力机塔架0.50s开始发生碰撞,接触力从0.50 s到0.54 s 增长基本是线性的,该阶段属于弹性碰撞,主要为弹性变形;0.54 s到1.20 s 接触力每隔一段时间都会略微下降,直到1.20 s 达到最大值13.9 MN,该阶段为弹塑性碰撞;1.20 s后曲线出现明显的非线性波动特征,直到3.80 s 碰撞结束,该阶段为塑性碰撞,塔架变形以塑性为主。对比分析各阶段碰撞持续的时间可知,塑性碰撞持续的时间(2.60 s)明显高于弹性碰撞(0.04 s)和弹塑性碰撞(0.66s)。

## 5.3 不同速度撞击塔架的应力云图

图7为4种不同速度撞击下塔架碰撞区域的应力云图。截取的云图为碰撞船舶动能最小时碰撞区域的正视图。

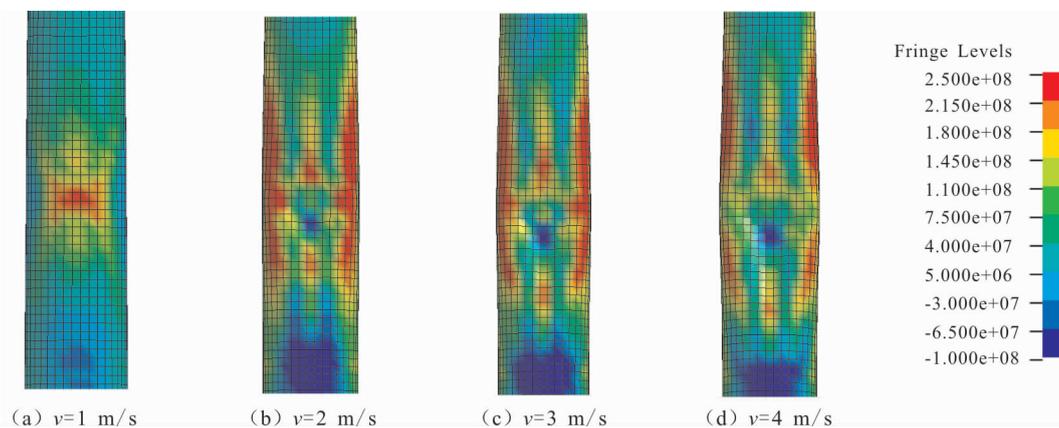


图7 不同撞击速度下塔架结构应力云图

由图7可知,撞击速度越大,结构的损伤越严重。当撞击速度在1 m/s时,塔架结构没有发生明显的凹陷变形,而当撞击速度在2 m/s及以上时,塔架发生了明显的变形。由图7(c)和(d)可知,撞击速度4 m/s时塔架的变形大于3 m/s,但总体上应力集中区域较小,说明此刻通过塔架变形对应力进行了一定的释放。

## 5.4 塔顶风力机及塔架响应分析

桩柱式海上风力机的整机稳定性主要表现为塔顶位移、加速度响应及碰撞区的弯曲变形。塔顶位移太大会引起风轮叶片旋转过程中的不稳定;加速度过大会诱发机舱内部件大幅振动导致失稳;碰撞区变形过大将导致塔架断裂倒塌。因此,分析塔顶风力机及塔架的响应对保障风力机安全运行显得尤

为重要。

图8为船舶在速度为2 m/s的情况下与桩柱式海上风力机碰撞后塔架顶端风力机、撞击点、撞击点对面的加速度、位移、速度性能曲线,以船舶行驶的方向为x轴正方向。

由图8(a)可知,撞击点加速度最先达到最大值 $38.6 \text{ m/s}^2$ ,反映了塔架结构的固有耐撞性;塔顶加速度总体上小于撞击点对面的加速度,方向上相反,最大值分别为 $29$ 、 $32 \text{ m/s}^2$ 。

由图8(b)可知,塔顶发生位移的时刻最晚,这

与实际的情况一致;碰撞结束后,塔架的撞深为撞击点与撞击点对面的位移之差,塔架撞深为 $0.675 \text{ m}$ ;塔顶最大位移为 $2.3 \text{ m}$ 。

由图8(c)可知,塔顶受碰后的速度最大为 $4.28 \text{ m/s}$ ,然后在阻尼的作用下缓慢减小,撞击点的速度在碰撞时迅速增大到 $2.2 \text{ m/s}$ ,然后减小到与撞击点对面的速度相同,之后以相同的趋势波动并减小。需要特别指出的是,风力机基础在速度 $2 \text{ m/s}$ 的船舶撞击下,结构未发生断裂倒塌,但塔架发生了明显的变形,需要进行检修和修复。

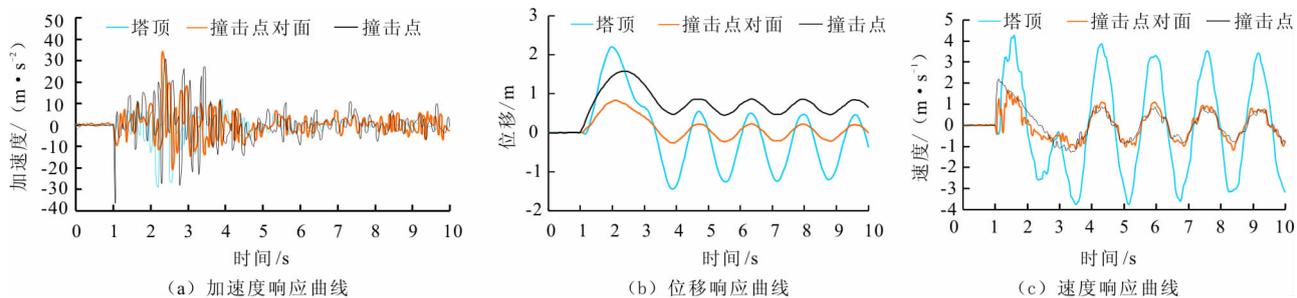


图8 船舶2 m/s速度下塔顶、碰撞点、撞击点对面的碰撞响应性能曲线

## 6 结论

(1) 5 000 t 船舶与单桩柱海上风力机碰撞持续的时间和碰撞过程的最大接触力随着船舶行驶速度增加而增加;碰撞结束后,船舶回弹动能与初始动能之比随着速度的增加而减少,但结构变形能与初始动能之比随着速度的增加而增加。

(2) 在船舶以 $2 \text{ m/s}$ 的速度撞击单桩柱海上风力机时,弹性碰撞、弹塑性碰撞、塑性碰撞持续时间分别为 $0.04$ 、 $0.66$ 、 $2.60 \text{ s}$ ;接触力在塑性碰撞阶段发生了显著地下降,说明此刻产生了极大的变形,撞深为 $0.675 \text{ m}$ ;塔顶的最大速度为 $4.28 \text{ m/s}$ ,最大位移为 $2.3 \text{ m}$ ,最大加速度为 $29 \text{ m/s}^2$ 。

### 参考文献:

[1] Pantaleo A M, Pellerano A, Ruggiero F, et al. Feasibility study of off-shore wind farms: an application to Puglia region[J]. *Solar Energy*, 2005, 79(3): 321-331.  
 [2] 丁勤卫,李春,周国龙,等. 陆海风力机动态响应对比[J]. *动力工程学报*, 2016, 36(1): 65-74.  
 [3] 王徽,黄成力. 海上风力发电技术[J]. *上海节能*, 2007(1): 23-26.  
 [4] 李春,叶舟,高伟,等. 现代陆海风力机计算与仿真[M]. 上海:上海科学技术出版社, 2012: 1-3.  
 [5] 2017年度国家自然科学基金委员会与英国工程与自然科学研究理事会合作研究项目指南. [EB/OL]. (2016

-12-16) [2016-12-28]. <http://www.nsf.gov.cn/publish/portal0/tab87/info53494.htm>.

[6] 广信. 船舶与浮式海洋平台碰撞的动力响应研究[D]. 镇江:江苏科技大学, 2015.  
 [7] Ramberg H F. High energy ship collisions with bottom supported offshore wind turbines [D]. Trondheim: University of Science and Technology, 2011.  
 [8] 福萍. 船舶与海洋平台碰撞响应与结构损伤分析[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学, 2011.  
 [9] Ding Hongyan, Zhu Qi, Zhang Puyang. Dynamic simulation on collision between ship and offshore wind turbine [J]. *Transactions of Tianjin University*, 2014, 20(1): 1-6.  
 [10] Amdahl J, Johansen A. High energy ship collision with jacket legs [J]. *International Society of Offshore and Polar Engineers Conference*, 2001(4): 17-22.  
 [11] 王国粹,王伟,杨敏. 3.6MW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.  
 [12] 门建兵,蒋健伟,王树有. 爆炸冲击数值模拟技术基础[M]. 北京:北京理工大学出版社, 2015.  
 [13] Abrate S. Impact engineering of composite structures [M]. Vienna: Springer-Verlag, 2011.  
 [14] 白金泽. LS-DYNA 3D理论基础与实例分析[M]. 北京:科学出版社, 2005.  
 [15] 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. (下转第185页)

变化的温度梯度且整体温度范围发生变化时,在温度影响剔除前,低温和高温有损各组的第三阶曲率模态范数均分别与低温无损一组的第三阶曲率模态范数有一定的差值,但这些差值的均值大小与损伤程度没有直接关系。在温度影响剔除后,低温和高温有损各组与无损一组的差值均值大小同损伤程度呈正相关性。

### 3 结 论

通过分析温度影响剔除前后不同温度条件下和各种损伤工况下简支梁桥的曲率模态范数,可以得出以下结论:

(1)温度影响是梁式桥损伤识别过程中具有显著影响的因素之一。

(2)通过综合分析前三阶差值均值的大小,可以判断出梁式桥结构是否存在损伤。如果有不同损伤情况下的样本数据,经过温度影响剔除后对比它们的差值均值大小,在一定程度上能够进行相对损伤程度的判断。

本文研究的数值模型是比较简单的单箱型截面简支梁桥,没有考虑沿梁垂直方向的温度梯度,对于结构复杂的梁式桥,温度对模态参数的影响较为复杂,有待进一步的研究。

#### 参考文献:

[1] Alampalli S. Influence of in-service environment on modal parameters[C]//. Proceeding of the 16th International Modal Analysis Conference (IMAC), Santa Barbara, 1998;

111-116.

- [2] 许永吉,朱三凡,宗周红. 环境温度对桥梁结构动力特性影响的试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2007, 27(6): 119-123.
- [3] 焦志钦,胡利平,韩大建. 温度对桥梁动力特性的影响研究[J]. 科学技术与工程, 2010, 10(31): 7685-7689.
- [4] 樊可清,倪一清,高赞明. 大跨度桥梁模态频率识别中的温度影响研究[J]. 中国公路学报, 2006, 19(2): 67-73.
- [5] Pandey A K, Biswas M, Samman M M. Damage detection from changes in curvature mode shapes [J]. Journal of Sound and Vibration, 1991, 145(2): 321-332.
- [6] 侯立群,李宏伟,冷志鹏,等. 桥梁实测频率的温度影响分析[J]. 公路工程, 2011, 36(4): 4-7.
- [7] 姚昌荣,李亚东. 大跨度桥梁健康监测过程中的温度影响研究[J]. 华东交通大学学报, 2008, 25(2): 25-28.
- [8] Kullaa J. Elimination of environmental influences from damage-sensitive features in a structural health monitoring systems [C] // . In: Fu-Kuo Chang (Ed.), Structural Health Monitoring - the demands and Challenges. Boca Raton, FL: CRC Press. 2001, 742-749.
- [9] 李苗,黄天立,任伟新. 温度影响下基于主成份分析和模态柔度的结构异常检测[J]. 振动与冲击, 2011, 30(5): 83-87.
- [10] 吴森,韦灼彬. 基于主成份残差的结构损伤识别方法[J]. 公路交通科技, 2011, 28(7): 113-117.
- [11] Deraemaeker A, Reynders E, De Roeck G, et al. Vibration based structural health monitoring using output-only measurement under changing environment [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2008, 22(1): 34-56.

(上接第178页)

[16] Det Norske Veritas. Design of offshore wind turbine structures DNV-OS-J101[S]. Norway: DNV, 2011.

[17] Det Norske Veritas. Design against accidental loads DNV-RP-C204[S]. Norway: DNV, 2004.

[18] 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.

[19] 姜华,王君杰,贺拴海. 钢筋混凝土梁桥船舶撞击连续倒塌数值模拟[J]. 振动与冲击, 2012, 31(10): 68-73.

[20] 郝二通,柳英洲,柳春光. 海上风机单柱基础受船舶撞击的数值研究[J]. 振动与冲击, 2015, 34(3): 7-13.

[21] Pelersen M J. Dynamics of ship collisions [J]. Ocean Engineering, 1980, 9(4): 295-329.

[22] 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): 123-126.

- [23] Gladman B. LS-DYNA keyword user's manual [M]. Livermore: Livermore Software Technology Corporation, 2007.
- [24] 石少卿,康建功,王敏,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.
- [25] 任年鑫. 海上风力机气动特性及新型浮式系统 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
- [26] 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.