

导管架船撞损伤与剩余强度的结构有限元模拟与评估方法

任灏, 方辉, 魏鑫泽

引用本文:

任灏, 方辉, 魏鑫泽. 导管架船撞损伤与剩余强度的结构有限元模拟与评估方法[J]. 南方能源建设, 2021, 8(3): 26–33.

REN Hao, FANG Hui, WEI Xinze. [Structural Finite Element Simulation and Evaluation Method for Ship Collision Damage and Residual Strength of the Jacket](#)[J]. *Southern Energy Construction*, 2021, 8(3): 26–33.

相似文章推荐 (请使用火狐或IE浏览器查看文章)

Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)

[海上风机导管架基础灌浆连接段受力分析](#)

Analysis of Grouted Connection in Offshore Wind Turbine Jacket Foundation

南方能源建设. 2015(3): 80–85 <https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2015.03.016>

[海上风电导管架群桩施工技术的研究应用](#)

Research and Application of Jacket Multi-pile Structure Foundation Installation for Offshore Wind Power Engineering

南方能源建设. 2018, 5(2): 126–132 <https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2018.02.018>

[海上升压站裙桩型导管架基础设计分析](#)

Design Analysis of Offshore Substation with Skirt Pile Jacket Foundation

南方能源建设. 2018, 5(2): 93–98 <https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2018.02.013>

[海上升压站导管架基础的冲刷试验研究](#)

Study on Scour Test of Jacket Foundation for Offshore Substation

南方能源建设. 2018, 5(z1): 123–128 <https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2018.S1.022>

[砂质海床条件下海底电缆埋深研究](#)

Research on the Burial Depth of Submarine Cable in Sandy Seabed

南方能源建设. 2020, 7(3): 81–88 <https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2020.03.010>

导管架船撞损伤与剩余强度的结构有限元模拟与评估方法

任灏^{1,✉}, 方辉², 魏鑫泽²

(1. 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广州 510663;

2. 中国海洋大学 山东海洋工程重点实验室, 青岛 266100)

摘要: [目的] 海上风电基础结构船撞事故频发, 准确评估结构损伤后结构剩余强度成为风电场运维安全的重要技术。[方法] 针对广东海域实建导管架和船舶运行情况, 采用有限元方法模拟船舶质量、初速度、碰撞角度等不同组合情况下导管架基础船撞过程。[结果] 通过计算法, 得到不同工况下碰撞力时程和关键节点塑性应变, 获得了最大碰撞力与各撞击因素关联关系和典型节点损伤特征。[结论] 根据分析结果, 得到典型导管架局部结构船撞后剩余强度变化规律, 为实际工程中快速评估相关结构的船撞损伤提供技术支持。

关键词: 导管架; 碰撞力; 极限强度; 剩余强度

中图分类号: TK89; TM315

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2021)03-0026-08

开放科学(资源服务)二维码:



Structural Finite Element Simulation and Evaluation Method for Ship Collision Damage and Residual Strength of the Jacket

REN Hao^{1,✉}, FANG Hui², WEI Xinze²

(1. China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, China;

2. Shandong Province Key Laboratory for Ocean Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Abstract: [Introduction] The vessel collision of jacket foundation in an offshore wind farm in the South China Sea happens frequently. Under this circumstance, the accurate assessment of the residual strength after structural damage has become an important technology of the safety of wind farm operation and maintenance. [Method] Based on the actual jacket structure of a wind farm in the South China Sea and considering the actual ship operation situation in the sea area, this paper used the finite element software ABAQUS to simulate the ship collision damage process of jacket foundation under different combinations of ship mass, initial velocity and collision angle. [Result] By using the quasi static method, the time interval of the collision forces and the plastic strain contours of the key nodes under different working conditions are concluded. Besides, the relationship between the maximum impact forces and impact factors and typical characteristics of the damage are concluded. [Conclusion] Based on the analysis, the typical change laws of the residual strength after the ship collision of the jacket are concluded to provide technological support for rapid assessment of the collision damage of related structures in the actual engineering process.

Key words: jacket; collision forces; ultimate strength; residual strength

2095-8676 © 2021 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI. This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

近年来, 我国海上风电事业大力发展, 但是在

风电装备运行过程中, 船舶失控撞击风电基础结构的事故频发, 轻则导致结构局部凹陷, 重则导致结构整体变形, 严重影响结构的承载性能。2017年8月20日, 台风“天鸽”侵袭南海附近海域, 将大量船只卷入海上风电场, 造成风电基础设施严重损

收稿日期: 2021-06-11 修回日期: 2021-08-13

基金项目: 广东省促进经济发展专项基金“基于大数据的海上风电场支撑结构强度与疲劳实时评估研究”(粤自然资源合[2019]019)

伤。目前,我国对海上风电基础结构船撞事故研究较少,针对海洋结构物碰撞的计算分析方法与规范不足,无法实施损伤结构的承载性能评估,导致后续工程的施工及运行维护无法进行,只得拆除损伤结构,造成大量的经济损失。因此,结构损伤与剩余强度评估成为海上风电场运维保障关键技术之一。本文以某海上风电场项目为依托,开展船撞事故后导管架结构损伤与剩余强度研究。

海上风电结构体积较大,4 MW 风机导管架基础泥面以上高度约 18 m,针对其碰撞问题的研究,采用现场试验或比例模型试验的成本较高,多采用理论或数值方法进行分析。李艳贞^[1]基于 5 000 t 船舶和桁架式导管架基础海上风机,采用非线性有限元动态响应分析程序 MAC.Dytran 以不同碰撞速度对导管架基础进行碰撞研究,得到结构局部损伤特性、碰撞力-凹陷位移曲线和能量转化形式特点。其次研究了一集装箱船侧正碰导管架风电基础,同时获得了两者损伤情况,比较了两者的各自能量吸收。其评估方法主要从能量转化来研究撞深曲线的变化特征,并未使用局部评估准则和进行其他工况下的模拟。郝二通^[2]利用有限元软件 LS-DYNA 进行船舶与单桩基础碰撞研究,从能量转化、最大碰撞力、基础损伤状态和风机动力响应等问题进行了探讨。首先介绍了碰撞能量转化形式,进而研究不同吨位、不同速度、不同角度对碰撞结果的影响,得出相应的结论。其次使用面积受损率来反映单桩基础的受损程度并应用计算受损区域和受损面积。Minorsky^[3]于 1959 年提出了米诺斯基关系曲线,根据能量守恒原理,给出钢材体积变形与碰撞冲击能之间的关系。Tabri 等^[4]将船舶运动方程对时间进行积分,提出一种用于模拟非对称船舶碰撞的计算模型,建立了碰撞力与碰撞位置、碰撞角度之间的关系。

针对结构损伤及剩余强度的研究,多采用有限元方法进行数值模拟分析。唐友刚等^[5]采用非线性有限元方法,考虑平台环境荷载及桩土作用,采用逐步加载的方式,演示了南海某导管架结构的失效倒塌过程,计算了结构的极限强度。王巍巍等^[6]采用 SACS 有限元分析软件中的倒塌分析模块,计算了导管架平台的极限承载力,提出了该模块下基本分析参数的设定方法。Li 等^[7]利用非线性有限

元分析软件 LS-DYNA,研究了损伤圆管剩余极限强度与侧向冲击能量耗散之间的关系,分析了管长、管径、管壁厚度及冲击能等参数对极限强度的影响。

本文以南海某海上风电场的导管架基础结构为例,建立有限元数值模型,考虑该海域船舶运行的实际情况,数值模拟船舶质量、初速度、碰撞角度等不同组合情况下,导管架基础的船撞损伤过程,阐明最大碰撞力与各撞击因素之间的关联关系,评估导管架船撞后的剩余强度。本文研究可以为实际工程中快速评估相关结构的船撞损伤提供技术支撑和参考依据。

1 结构模型和材料参数模型

1.1 导管架与船舶有限元模型

本研究采用单机容量为 4 MW 的南海某海上风电导管架基础结构,导管架有限元模型见图 1,导管架整体各段的几何参数在表 1 中列出。

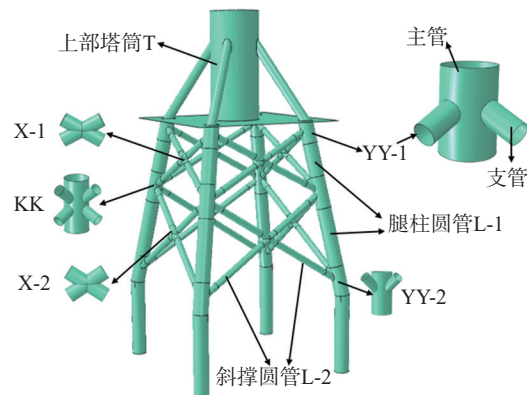


图 1 导管架有限元模型图

Fig. 1 Finite element model diagram of the jacket

表 1 导管架各部分尺寸统计表

Tab. 1 Statistical table of the size of each part of the jacket

名称	长度		直径		厚度	
	主管	支管	主管	支管	主管	支管
位置						
YY-1	2 323	1 029	2 700	800	55	26
KK	3 250	1 029	1 458	634	55	26
X	1 970	1 970	634	634	26	14
YY-2	3 000	1 029	1 458	634	55	26
L-1	—		1 400		26	
L-2	—		634		14	
T	10 829	9 638	4 500	1 500	55	26

根据挪威船级社规范 (DNVGL-OS-A101) 规定^[8], 采用典型船只计算碰撞能量时, 船艏撞击动能不得小于 11 MJ, 船舶碰撞能量计算公式如下:

$$E = \frac{1}{2} (M + m)v^2 \quad (1)$$

式中: M 是船舶满载质量 (t); m 是船舶附加质量 (t); v 是碰撞速度 (m/s)。对于单机容量 6 MW 的风电基础结构, 结合南海海域过往船只情况, 并考虑实际结构产生的凹陷损伤, 在分析船体结构弹塑性材料和结构内部分布特征的基础上, 选用一艘满载质量为 3 000 t 的散货船, 该散货船的具体尺寸见表 2。

表 2 船舶尺寸统计表

Tab. 2 Statistical table of ship dimensions m

总长	型宽	型深	空载吃水	满载吃水
81	13.6	6.9	2.6	5.6

在工程领域常见的船舶碰撞问题中, 碰撞损伤部位多为船艏, 为提高计算效率, 简化船体模型, 采用飞剪型船艏型式, 单元类型为壳单元 (S4R 和 S3R), 如图 2 (a) 所示, 采用 Tie 约束连接内部板壳结构, 如图 2 (b) 所示。设置船身与船尾为刚体, 采用 MPC 约束与船艏截面连接, 如图 2 (c) 所示。船舶整体结构有限元模型如图 2 (d) 所示。

材料本构关系采用 DNVGL-RP-C208^[9] 规范中

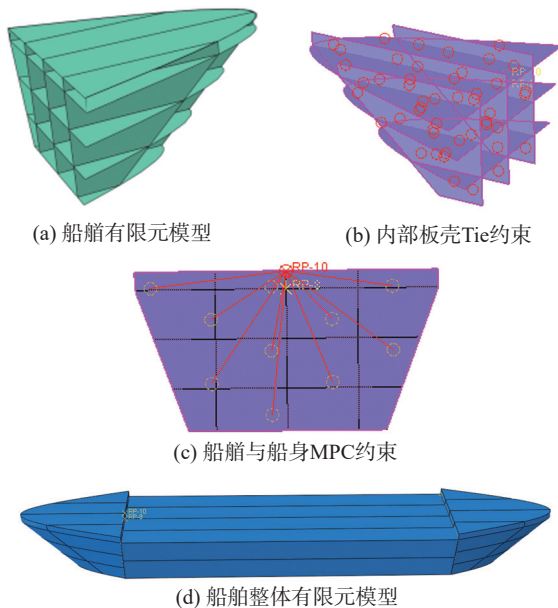


图 2 船体结构有限元模型

Fig. 2 FEM model of the ship structure

推荐的弹塑性硬化模型, 具有线弹性和屈服平台的幂次硬化模型参数。材料屈服满足下式:

$$f = \sigma_{eq} - \sigma_f(\varepsilon_p) = 0 \quad (2)$$

式中: σ_{eq} 为材料的 Mises 等效应力 (Pa); σ_f 为材料的等效应力 (Pa)。材料硬化满足 Hollomon 幂次硬化准则, 应力应变关系为:

$$\sigma_f(\varepsilon_p) = \begin{cases} \sigma_{yield2} & \text{if } \varepsilon_p \leq \varepsilon_{p,y2} \\ K [\varepsilon_p + \left(\frac{\sigma_{yield2}}{K}\right) - \varepsilon_{p,y2}]^n & \text{if } \varepsilon_p > \varepsilon_{p,y2} \end{cases} \quad (3)$$

式中: ε_p 为材料的等效应变; σ_{yield2} 为硬化开始时的应力; $\varepsilon_{p,y2}$ 为硬化开始时的等效塑性应变; K 和 n 为硬化系数, n 取值为 0.166。根据海上风电场工程的实际情况, 导管架结构采用低碳钢 S355, 船舶材料采用 S235, 具体的材料参数见表 3 和表 4。

表 3 低碳钢 S355 规范中提议钢属性的平均参数

Tab. 3 Proposed average parameters of steel properties in the mild steel S355 specification

σ_{prop}/MPa	$\sigma_{yield1}/\text{MPa}$	$\sigma_{yield2}/\text{MPa}$	$\varepsilon_{p,y1}$	$\varepsilon_{p,y2}$	K/MPa
384.0	428.4	439.3	0.004	0.015	900

表 4 低碳钢 S235 规范中提议钢属性的平均参数

Tab. 4 Proposed average parameters of steel properties in the mild steel S255 specification

σ_{prop}/MPa	$\sigma_{yield1}/\text{MPa}$	$\sigma_{yield2}/\text{MPa}$	$\varepsilon_{p,y1}$	$\varepsilon_{p,y2}$	K/MPa
285.8	318.9	328.6	0.004	0.02	700

2 船舶碰撞海上风电基础分析

2.1 工况设置

船舶在水中的实际航行过程中, 其运动特性主要表现为横荡与纵荡, 其中: 船舶纵荡对撞击影响较大。为提高计算效率, 在模拟船舶撞击导管架结构时, 将水对船体的作用简化为附连水的质量, 综合各项标准, 取含附连水船舶质量为设计船体满载质量的 1.05 倍^[8]。根据公路桥涵设计手册, 摩擦系数取 0.2^[10], 接触为硬接触, 导管架采用底部固支约束。数值模拟采用显式有限元分析软件 ABAQUS/Explicit, 碰撞部位选择 KK 节点 (见图 1), 设置船舶质量、撞击速度和碰撞角度不同组合的工况, 如表 5 所示。

2.2 碰撞力分析

导管架遭受船舶撞击后, 整体结构发生形变, 撞击局部出现不同程度的凹陷, 某些薄弱部位甚至

表 5 计算工况统计表

Tab. 5 Statistical table of calculation conditions

编号	船舶质量/t	撞击速度/ ($m \cdot s^{-1}$)	碰撞角度/ $(^\circ)$
1	500	3	90
2	500	4	90
3	1 000	2	90
4	1 000	3	90
5	1 000	4	90
6	1 000	5	90
7	2 000	2	90
8	2 000	3	90
9	2 000	4	90
10	2 000	5	90
11	3 000	3	90
12	3 000	4	90
13	1 000	3	50
14	1 000	3	70
15	2 000	3	50
16	2 000	3	70

会发生断裂。在各国关于碰撞问题的规范中, 常以碰撞力的方式量化碰撞过程, 本文在各国碰撞力经验公式的基础上, 依据南海某风电场导管架遭受破

撞的实际情况, 提取不同组合工况下的碰撞力, 如图 3 所示。

图 3 (a) 和 (b) 分别给出撞击速度为 3 m/s 和 4 m/s 时不同质量船舶碰撞力的曲线图, 可以看出: 碰撞时间随船舶质量增大而增大, 最大碰撞力出现的时间点无明显规律。图 3 (c) 和 (d) 分别给出船舶质量为 1 000 t 和 2 000 t 时不同撞击速度的碰撞力曲线图, 由图可知, 碰撞时间随撞击速度增大而增大, 并且船舶质量越大, 曲线波动越快, 表现为导管架结构震荡频率越高。图 3 (e) 和 (f) 分别是相同撞击速度下质量为 1 000 t 和 2 000 t 的船舶以不同角度撞击 KK 节点的碰撞力曲线图, 发现船舶碰撞时间与碰撞角度无明显相关关系, 同样碰撞角度下, 2 000 t 船舶碰撞的撞击力曲线波动更快。

图 4 (a)、(b) 和 (c) 分别给出最大碰撞力与船舶质量、撞击速度和碰撞角度的关系曲线图, 由图 4 (a) 和 (b) 可知, 最大碰撞力分别与质量的 1/2 次方和撞击速度均呈线性正相关关系, 与 AASHTO 规范公式^[11]和欧洲规范公式^[12]中关于最大碰撞力与质量和撞击速度的关系变化趋势一致。从图

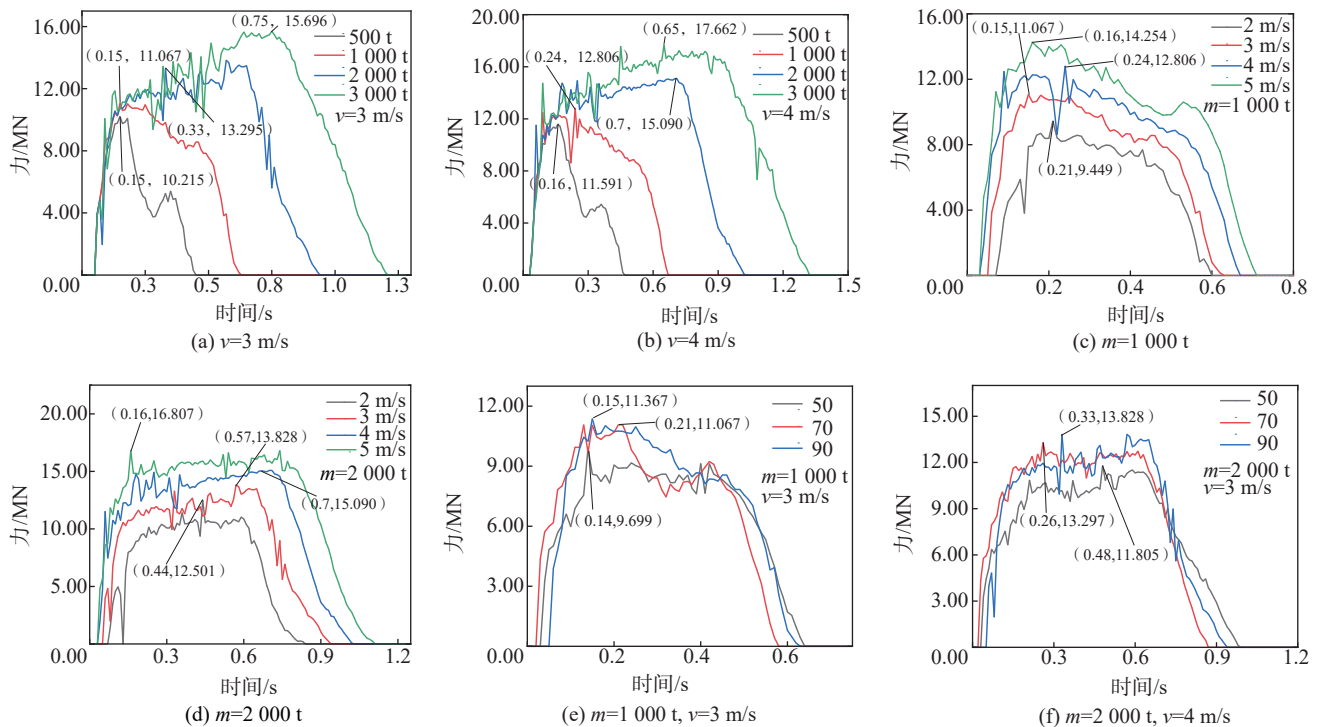


图 3 不同组合工况下碰撞力曲线图

Fig. 3 Curves of collision forces under different combined working conditions

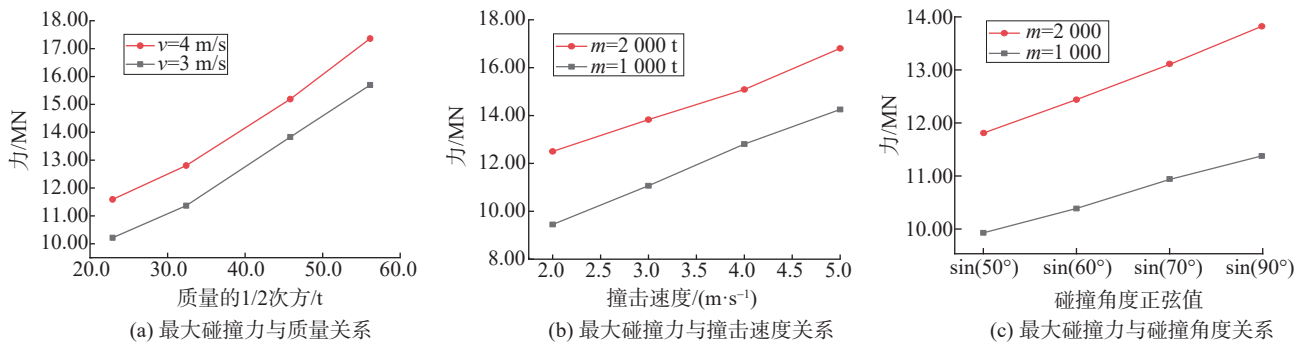


图 4 不同变量下碰撞力变化曲线

Fig. 4 Curves of collision forces under different variables

4 (c) 可以看出，最大碰撞力与碰撞角度正弦值也呈线性正相关关系。

2.3 损伤分析

图 5 (a) 给出导管架遭受到船舶撞击后的 Mises 云图，可以看出，最先变形部位出现在与船舶直接接触的局部，即受撞击的 KK 节点。从图 5 (b) 可以看出，节点处出现明显的凹陷，与此同时，沿撞击方向导管架侧面桁架受挤压作用，变形效果比其他侧面更为显著。从图 5 (c) 可以看出，损伤导

管架应力较大的部位主要集中在受碰撞的管面周围，同时其他各节点均出现不同程度的应力集中现象。应力集中主要发生在管节点接缝处，其中：沿撞击方向导管架侧面桁架下部 X 节点应力变形较大，是影响整体极限承载力的关键部位。

以质量为 1 000 t 的船舶为例，图 6 给出不同撞击速度下受撞击 KK 节点以及导管架变形最大侧面下部 X 节点的等效塑性应变云图。

图 6 (a) ~图 6 (d) 分别表示不同撞击速度下

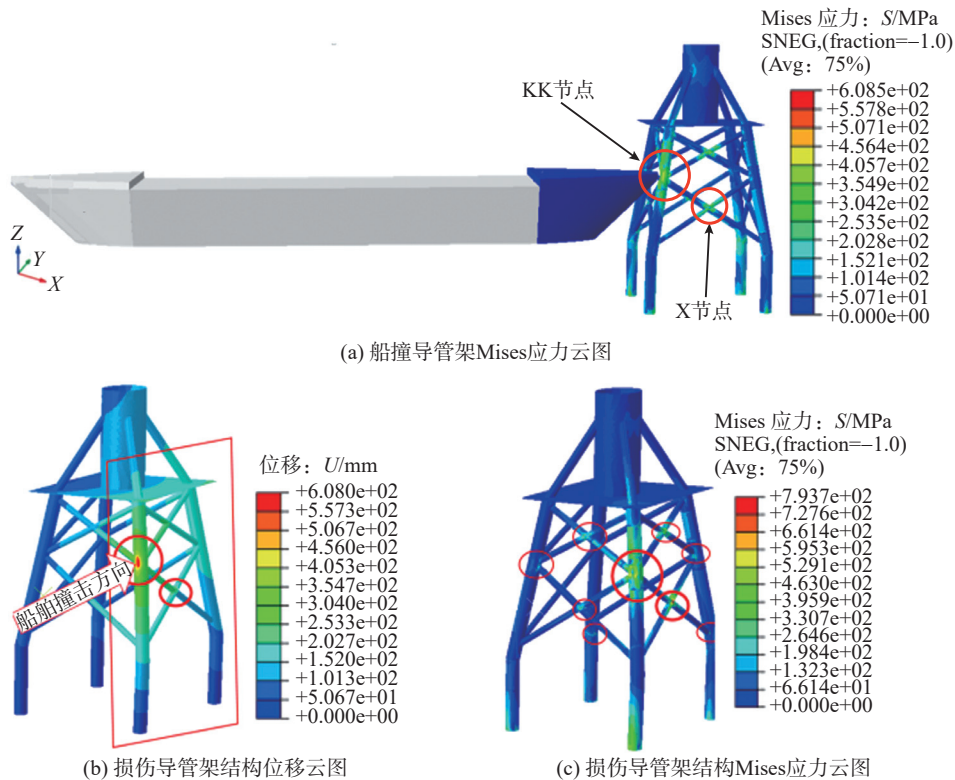


图 5 船舶撞击导管架结构响应

Fig. 5 Response of jacket structure after ship collision

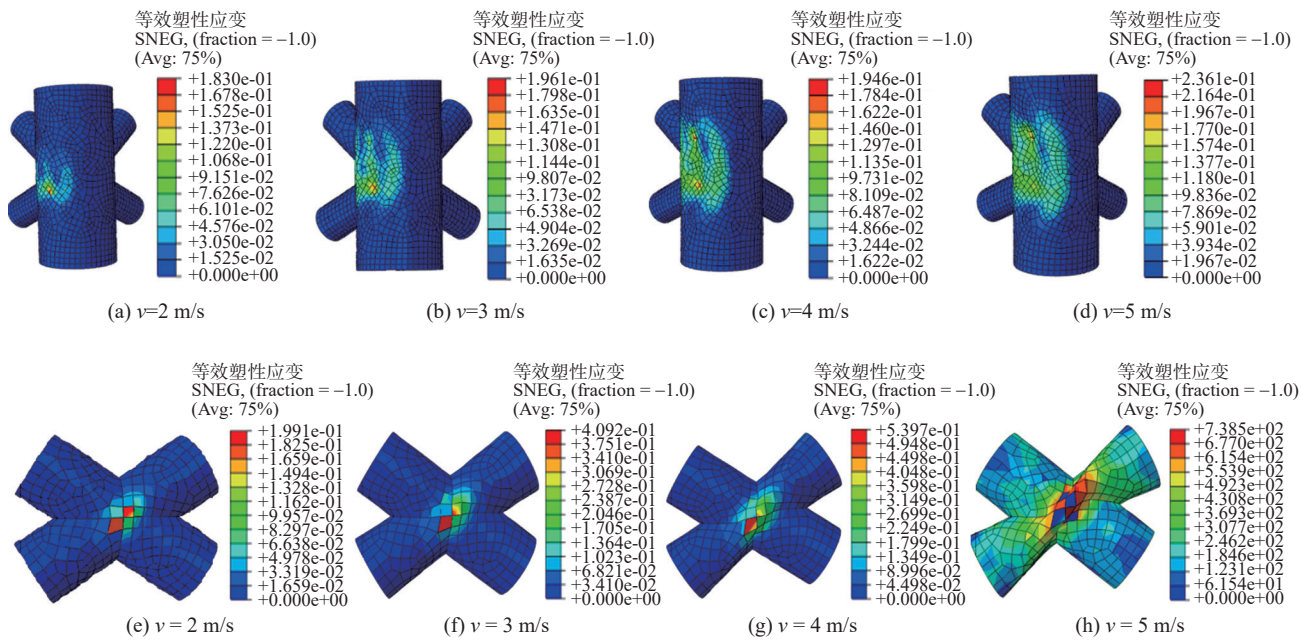


图 6 不同撞击速度下导管架 KK 节点与 X 节点等效塑性应变云图

Fig. 6 Equivalent plastic strain nephogram of KK node and X node of the jacket under different impact velocities

遭受撞击 KK 节点的等效塑性应变云图, 图 6 (e)~图 6 (h) 分别表示不同撞击速度下变形最严重 X 节点的等效塑性应变云图。由 KK 节点等效塑性应力云图可知, 撞击速度越大, 局部塑性应变越大, 凹陷面积越大, 凹坑越深。由 X 节点等效塑性应变云图可知, 船舶撞击速度越大, 该节点挤压作用越明显, 当速度达到 4 m/s 时, 该节点处出现单元失效, 实际工况中表现为节点断裂。

3 船撞后导管架风电整体剩余强度分析

导管架遭受船舶撞击时, 结构整体发生弹性变形, 船舶与结构分离后, 导管架弹性势能转化为动能, 由于存在结构阻尼, 导管架运动表现为前后衰减震荡。在有限元计算中, 为提高计算效率, 通过施加阻尼器的形式实现导管架动能衰减, 达到自然稳定状态, 分析结果见图 7。

选择不同组合工况下动态衰减后的损伤应力状态, 导入下一步分析中, 采用准静态方法求解损伤结构的剩余强度。准静态方法需要应用结构的非线性运动方程求解, 计算公式如下:

$$[M]\{\ddot{u}\} = \{P\} - \{I\} \quad (4)$$

式中: $[M]$ 为质量矩阵; $\{\ddot{u}\}$ 为加速度矩阵; $\{P\}$ 为荷载矩阵; $\{I\}$ 为内力矩阵。图 8 给出拟合极限强

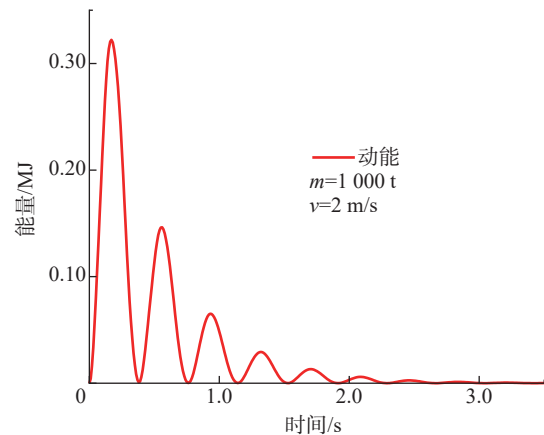


图 7 导管架损伤结构能量衰减曲线图

Fig. 7 Energy attenuation curve of jacket damage structure

度曲线, 曲线图的横纵坐标比例为 22.5 MN/m, 当曲线图相邻两点连线与力轴夹角达到 70° 时, 认为该点强度值为结构极限强度。

由表 6 可知, 相同撞击速度下, 导管架剩余强度随船舶质量的增大而降低; 相同船舶质量下, 导管架剩余强度随撞击速度增大而降低; 相同初始动能下, 船舶质量和速度组合工况不同时, 导管架剩余强度存在较小的差距。当船舶动能相同, 碰撞角度分别为 50°、60° 和 70° 时。损伤导管架的剩余强度基本一致; 与正向撞击相比, 导管架剩余强度在

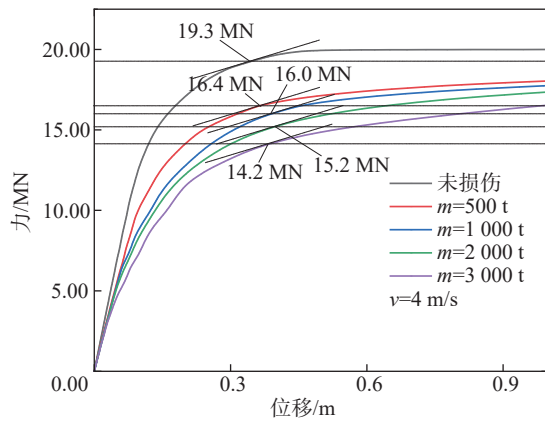


图8 不同质量船舶以4 m/s速度撞击导管架剩余强度曲线图

Fig. 8 Remaining strength curve of jacket when ships of different masses impact at 4 m/s

表6 不同损伤状态导管架剩余强度统计表(v 表示船舶撞击速度, m 表示船舶质量, α 表示碰撞角度)

Tab. 6 Statistical table of jacket residual strength in different damage states

(v represents ship impact speed, m represents ship mass, α represents the impact angle)

工况设置	船舶动能(含附连水质量)/MJ	极限(剩余)承载力/MN	降幅/%
未损伤	—	19.3	—
$v=3$ m/s	$m=500$ t	2.36	13.47
	$m=1\ 000$ t	4.73	15.54
	$m=2\ 000$ t	9.45	16.58
	$m=3\ 000$ t	14.18	19.17
$v=4$ m/s	$m=500$ t	4.2	15.03
	$m=1\ 000$ t	8.4	17.1
	$m=2\ 000$ t	16.8	21.24
	$m=3\ 000$ t	25.2	26.42
$m=1\ 000$ t	$v=2$ m/s	2.1	11.92
	$v=3$ m/s	4.73	15.03
	$v=4$ m/s	8.4	16.58
	$v=5$ m/s	13.13	18.13
$m=2\ 000$ t	$v=2$ m/s	8.4	14.51
	$v=3$ m/s	9.45	15.54
	$v=4$ m/s	16.8	21.24
	$v=5$ m/s	26.25	29.02
$m=1\ 000$ t	$\alpha=50^\circ$	4.73	16.06
	$\alpha=60^\circ$	4.73	16.06
	$\alpha=70^\circ$	4.73	16.06
	$\alpha=90^\circ$	4.73	15.03
$m=2\ 000$ t	$\alpha=50^\circ$	9.45	17.1
	$\alpha=60^\circ$	9.45	17.1
	$\alpha=70^\circ$	9.45	17.1
	$\alpha=90^\circ$	9.45	15.54

非正向撞击情况下降幅较大。

4 结论

本文以南海某海上风电场的导管架基础结构为例,基于ABAQUS有限元数值计算方法,模拟了船舶质量、初速度、碰撞角度等不同组合情况下导管架基础的船撞损伤过程,分析了导管架损伤状态,评估了导管架船撞后损伤结构的剩余强度,得出如下研究结论:

1) 船撞时间随船舶质量或撞击速度的增大而增大,导管架受撞击部位出现较大断裂损伤之前,最大撞击力与船舶质量的1/2次方、船舶初速度以及碰撞角度的正弦值均呈线性正相关关系。

2) 导管架遭受到船舶撞击后,沿撞击方向侧面桁架变形最为明显,该侧面桁架下部X节点最先出现断裂损伤,进一步影响了整体结构的极限承载力。

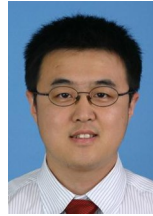
3) 损伤结构承载力随船舶质量或撞击速度的增大而降低,与撞击角度不存在明显的相关关系。

参考文献:

- [1] 李艳贞. 船舶与海上风电碰撞的数值仿真研究[D]. 上海:上海交通大学,2010.
LI Y Z. Numerical simulation study of offshore wind turbine sricken by ship [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2010.
- [2] 郝二通. 海上风电机组结构抗船撞及抗震性能研究[D]. 大连:大连理工大学,2016.
HAO E T. Structural performance studies on offshore wind turbine subjected to ship impacts and earthquakes [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2016.
- [3] MINORSKY V U. An analysis of ship collision with reference to protection of nuclear power ships [J]. Journal of Ship Research, 1959, 3(2): 208-214.
- [4] TABRI K, VARSTA P, MATUSIAK J. Numerical and experimental motion simulations of nonsymmetric ship collisions [J]. Journal of Marine Science and Technology, 2010, 15(1): 87-101.
- [5] 唐友刚,朱龙欢,李焱,等. 南海某导管架海洋平台倒塌分析[J]. 海洋工程,2016,34(2):105-110.
TANG Y G, ZHU L H, LI Y, et al. Pushover analysis on a jacket offshore platform in the South China Sea [J]. The Ocean Engineering, 2016, 34(2): 105-110.
- [6] 王巍巍,周雷,张传杰,等. 基于SACS倒塌分析的导管架平台极限承载力分析[J]. 广州化工,2017,45(6):142-

- 144+147.
WANG W W, ZHOU L, ZHANG C J, et al. Study on ultimate bearing capacity calculation of jacket platform from SACS collapse analysis [J]. Guangzhou Chemical Industry, 2017, 45 (6):142-144+147.
- [7] LI R X, YANAGIHARA D, YOSHIKAWA T. Axial compressive residual ultimate strength of circular tube after lateral collision [J]. International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, 2018, 11(1):396-408.
- [8] DNV GL AS. Offshore standard safety principles and arrangements: DNVGL-OS-A101 [S]. Norway: DNV GL AS, 2015.
- [9] DNV GL AS. Determination of structural capacity by non-linear finite element analysis methods: DNVGL-RP-C208 [S]. Norway: DNV GL AS, 2016.
- [10] 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 Prevention in Civil Engineering, Tongji University. Dynamic analysis of ship collision on the Fourth Nanjing Yangtze River Bridge [R]. Shanghai: Tongji University, 2007.
- [11] American Association of State Highway and Transportation Officials. Guide Specification and Commentary for Vessel Collision Design of Highway Bridges: AASHTO GVCB AMD-2009 [S]. Washington: AASHTO, 2009.
- [12] VROUWENVELDER A. Design for ship impact according to Eurocode1, Part2. 7 [M]. London: Routledge, 1998.

作者简介:



任灏 (通信作者)

1980-, 男, 山东潍坊人, 高级工程师, 水工结构工程专业工学博士, 主要从事电厂水工结构和海上风电基础设计研究工作 (e-mail) renhao@gedi.com.cn。

任灏

方辉

1980-, 男, 山东青岛人, 教授, 固体力学工学博士, 主要是从事大型海工结构物设计理论研究 (e-mail) fanghui@ouc.edu.cn。

(责任编辑 李辉)

