

计及风浪流影响下并靠作业船体结构 响应分析

孙大维, 刘 昆, 高振国, 王正耀

(江苏科技大学 船舶与海洋工程学院, 江苏镇江 212003)

摘 要: [目的]为了解决穿梭油轮并靠作业中的碰撞安全问题,探索橡胶靠球装置对碰撞损伤的抑制与防护机制,指导海上油气装备防撞设计,[方法]基于非线性有限元方法,构建橡胶靠球碰撞模型,模拟并靠过程中的能量吸收与损伤响应,并与现有海上规范对比验证数值模型的有效性。结合风、浪、流等时变海洋环境载荷,建立“船-靠球-船”多体耦合动力学模型,分析环境扰动对船舶姿态、相对速度和碰撞入射角的影响,评估船体结构变形、靠球非线性缓冲特性及能量吸收效应。[结果]结果表明,橡胶靠球装置能显著降低碰撞力峰值,减小船舶和海上设施的损伤,并在不同工况下有效提高防撞性能。[结论]研究成果为海上油气装备防撞结构设计提供了理论依据和工程指导,有助于提高海上作业的安全性。

关键词: 并靠过程; 风浪流作用; 结构响应; 损伤特性; 有限元仿真

中图分类号: U661.4 **文献标志码:** A **【DOI】** 10.13788/j.cnki.cbgc.2026.08.07

Structural Response Analysis of Ship-to-Ship Operations Considering Wind, Wave and Current Effects

SUN Dawei, LIU Kun, GAO Zhenguo, WANG Zhengyao

(School of Naval Architecture and Ocean Engineering, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212003, Jiangsu, China)

Abstract: [Purpose] In order to solve the collision safety concerns in shuttle tanker side-by-side operations and investigate the damage mitigation and protective mechanisms of rubber fender devices, with the aim of informing the design of collision protection systems for offshore oil and gas equipment. [Method] A non-linear finite element model for the rubber fender is developed to simulate the energy absorption and damage response during the side-by-side mooring process. The model is validated against established offshore standards. Additionally, a multi-body coupling dynamic model, incorporating time-varying marine environmental loads such as wind, wave, and current forces, is established to examine the effects of environmental disturbances on the ship's attitude, relative velocity, and collision angle. The study also evaluates the structural deformation, non-linear buffering characteristics of the fender, and its energy dissipation effects. [Result] The results indicate that the rubber fender significantly reduces the peak collision forces, minimizes damage to both the vessels and offshore facilities, and enhances collision protection performance under various operational conditions. [Conclusion] The findings provide essential theoretical and practical guidance for the design of collision protection structures for offshore oil and gas equipment, contributing to improved safety in offshore operations.

Key words: side-by-side; wind-wave-current effect; structural response; damage characteristic; finite

收稿日期: 2025-12-23; 修回日期: 2026-03-04; 录用日期: 2026-03-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(52171311)

作者简介: 孙大维(2000—), 男, 硕士研究生。研究方向: 结构冲击动力学。

element simulation

0 引言

浮式生产储卸油装置 (Floating Production Storage and Offloading, FPSO) 等海上结构物, 是深远海油气资源开发的关键装备。开展并靠输送作业时, 穿梭油轮与FPSO主体结构之间存在潜在碰撞风险。一旦碰撞造成严重结构损伤, 将导致海上设施长期停产, 进而造成巨大的经济损失。尽管船舶及海上设施在设计与运营阶段均严格遵守安全规范, 但因恶劣海况、人为失误及设备故障等复杂因素, 碰撞事故仍难以避免。为减少碰撞所致的结构性破坏, 在船体间配置橡胶靠球装置是普遍采用的安全措施^[1-5]。然而, 碰撞事件中结构的动态响应机制呈现出高度的非线性, 并涉及多尺度、复杂物理场的耦合作用, 使得其解析与评估极为复杂。

针对此复杂问题, 学术界已展开广泛研究。如, TERNDROP等^[6]提出了船体结构碰撞损伤的概率计算模型, 为船体结构的风险定量评估奠定了基础。OZGUC^[7]围绕FPSO船体防撞装置的结构强度与损伤评估方法展开深入研究, 其研究成果可为FPSO并靠作业等高风险场景下的安全设计提供工程参考。FAN等^[8]提出评估钢靠球防护能力的简化解析模型, 能够高效预测在特定碰撞速度与质量条件下, 靠球的能量吸收性能与变形模式。FERNANDEZ等^[9]及PARK等^[10]分别研究了海上平台供应船 (Offshore Support Vessel, OSV) 与FPSO碰撞以及气囊式靠球在并靠作业中的防护效果。研究显示, 气囊靠球在不同碰撞速度下具有良好的能量吸收表现, 能在一定程度上缓解撞击造成的结构破坏。CHO等^[11]对实心橡胶靠球的研究进一步证实其在高速撞击下的稳定性与吸能能力, 并通过有限元仿真与物理压溃试验结果进行了验证。

然而, 现有研究仍存在一定的局限性。现有研究多集中于船对船或船对平台的刚体碰撞分析, 并未系统考虑风、浪和流等海洋环境载荷的时变影响^[12-14]。实船并靠作业时, 风浪流扰动会显著改变船体姿态、相对速度及碰撞入射角, 从而加剧结构动态响应。为此, 本文建立了包含气动橡胶靠球有限元模型, 准确表征其碰撞能量吸收机制, 并将其嵌入非线性显式动力学平台LS-DYNA中, 构建船-靠球-船并靠碰撞的场景仿真体系。对比数值模型与橡胶靠球规范要求的动能吸收特性, 验证其合理性, 进一步分析典型工况下船舶结构的耐撞性能, 为海上并靠作业的防护设计提供关键技术支撑。

1 数值模型及仿真验证

本文选取以超大型油轮 (Very Large Crude

Carrier, VLCC) 级浮式生产储卸装置FPSO和Aframax型油轮的典型并靠作业为背景。两船几何主尺度见表1, 其并靠水动力模型见图1。

表1 FPSO和Aframax几何主尺度

Tab. 1 Geometric Principal Dimensions of FPSO and Aframax Tanker

主尺度	FPSO	Aframax
船长 L_{pp}/m	320	230
船宽 B/m	58	42
吃水 T/m	20.8	15.0
排水量 t/t	205 086	115 000
重心垂向位置 K_G/m	18.6	15.0
横摇惯性半径/m	$0.40B$	$0.28B$
纵摇惯性半径/m	$0.25L$	$0.25L$
首摇惯性半径/m	$0.25L$	$0.25L$

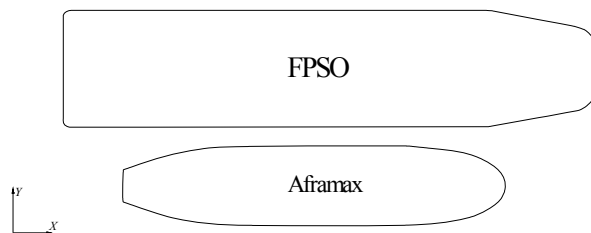


图1 双船并靠水动力模型

Fig. 1 Hydrodynamic Model of Side-by-Side Moored FPSO and Aframax Tanker

1.1 水动力模型验证

FPSO作为国际标准船型, 其船模具有丰富的试验数据, 因而常用于验证船舶水动力性能。基于势流理论, 结合大量流场测量试验数据, 建立船体在波浪运动响应数值模型, 对比商用水动力分析软件AQWA数值计算结果与试验数据, 以验证数值仿真的可靠性。

在数值模拟中, 入射激励波浪为5阶Stokes波, 角频率范围为 $0.33 \text{ rad/s} \sim 1.02 \text{ rad/s}$, 等间距划分为20个频率点, 在不同频率规则波的激励下, 计算FPSO的运动响应振幅算子 (Response Amplitude Operators, RAOs)。FPSO在不同波浪频率下的纵荡、垂荡与纵摇响应对比见图2。结果表明, 本文构建的数值模型能够较为准确地模拟FPSO在不同入射角波浪作用下的多自由度运动响应, 其在高频与低频区间的数值结果与文献中试验结果总体一致, 可以较好地反映实际物理过程, 从而验证了AQWA在复杂海洋环境下开展水动力分析的有效性^[15]。

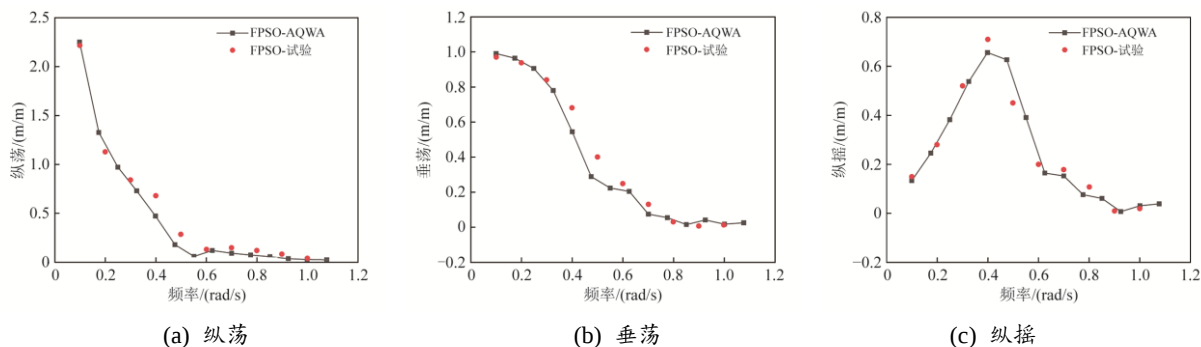


图2 FPSO在不同波浪频率下纵荡、垂荡与纵摇 RAOs 对比

Fig. 2 Comparison of Surge, Heave and Pitch RAOs of FPSO Under Different Waves Frequencies

1.2 橡胶靠球模型与试验验证

橡胶靠球利用材料的变形特性,在船舶碰撞过程中通过变形吸收船舶撞击产生的能量,降低船舶撞击力,最大限度地减少船舶损伤,起到消能缓冲的作用。橡胶靠球呈椭圆状,由橡胶外层、轮胎帘布层及橡胶内层3个部分组成。材料组合设计兼顾了强度、韧性与耐久性,有效克服单一材料的局限性,保证了船舶并靠作业的安全性,其所述结构见图3。

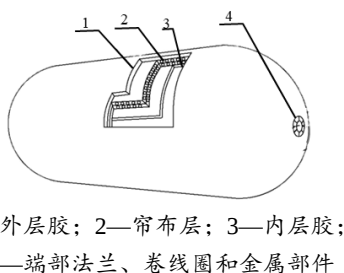


图3 橡胶靠球基本结构

Fig. 3 Basic Structural Configuration of Rubber Fender

为深入评估橡胶靠球在船舶碰撞过程中的缓冲与能量吸收性能,基于LS-DYNA建立了等尺寸非线性有限元模型。橡胶靠球结构采用四边形壳单元建模,在兼顾计算效率的同时准确捕捉薄壁橡胶结构在碰撞过程中的大变形行为。靠球初始环境温度设为300 K,大气压100 kPa,空气密度 1.204 kg/m^3 ,内部初始内压50 kPa。橡胶材料视为各向同性材料,本构模型选取适用于中等大应变的*MAT_BLATZ-KO_RUBBER模型,该模型仅输入剪切模量即可近似描述可压缩橡胶的力学特性。靠球内部通过*AIRBAG_SIMPLE_AIRBAG_MODEL定义气囊,实现内压随气囊体积的动态变化。为降低计算复杂度,简化模型仅保留加载面和承载面,且定义为刚体材料。靠球、刚性墙和支撑面之间相互作用采用自动面-面接触定义,接触静摩擦系数取为0.20,动摩擦系数设置为0.15。静态压载数值仿真模型见图4。

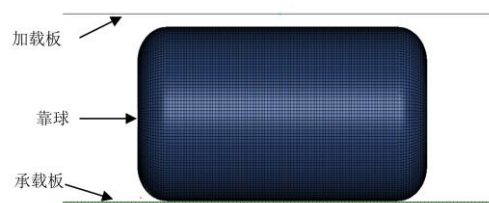


图4 橡胶靠球静态压载数值仿真模型

Fig. 4 Numerical Simulation Model of Rubber Fender Under Static Compression Loading

为了确保数值模型的可信度,本文开展了橡胶靠球的仿真结果与规范对比。依据GB/T 21482—2019《船舶与海上技术充气橡胶靠球》,选取尺寸为 $2500 \text{ mm} \times 5000 \text{ mm}$ 的充气80型靠球为对比对象,测得50%变形量工况下的靠球内压、反力及吸能特性。

规范数据和仿真模拟得到的反力-位移关系见图5。

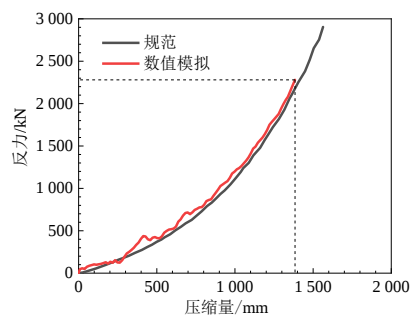


图5 静态压载下靠球反力时程曲线

Fig. 5 Time History of Fender Reaction Force Under Static Ballasting

结果显示,靠球静态压载数值仿真的靠球压缩量达到1384.3 mm,即压缩变形率达到55.4%,此时靠球的反力达到2280.2 kN。规范中橡胶靠球在压缩量达到55.0%时,反力大小约为2200.0 kN,二者误差为3.6%。因仿真计算模型将靠球简化为纯橡胶体,未考虑层间分层影响,橡胶充气靠球的刚度与实际

存有偏差, 导致仿真略有差异。但整体误差仍小于5%, 数值模型能够较为准确地描述橡胶充气靠球的力与变形特性, 验证模型的可靠性与适用性。

2 风浪流条件下并靠工况模拟

在验证模型可靠性的基础上, 将进一步应用于考虑风、浪和流作用的典型并靠作业场景仿真中, 以分析模拟实际海况下的碰撞响应特性。本文基于三维势流理论, 对双船在不同风浪流角度下的典型海况进行频域水动力性能计算, 并在时域内开展耦合运动模拟, 且将船舶并靠过程的水动力特性作为碰撞响应输入的前置条件。

2.1 水动力运动幅值响应

实际并靠场景海域为无限航区, 本文设置水深为500 m。通过对不同间距和并靠角度条件下的运动响应分析可知, 运动响应幅值曲线的整体变化趋势基本一致。因此, 在保持两船平行并靠的情况下, 两船最小间距恒定为4 m, 分析双船系统在0.025 Hz~0.250 Hz频率范围内, 0°、45°、90°、135°和180°这5种浪向下船舶六自由度运动响应幅值随波浪周期的变化规律。波向示意图见图6, 不同浪向下Aframax型油轮的运动响应幅值曲线见图7。从整体响应特性来看, 船舶在横荡和横摇的RAOs随入射波频率的变化曲线表现出高度重合性。当波浪入射角度90°时, 船舶整体运动响应达到峰值。故在并靠碰撞分析过程中, 选取风浪流角度为90°为危险工况。

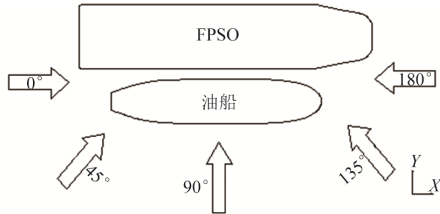


图6 FPSO与Aframax波向示意图
Fig. 6 Schematic Diagram of Wave Headings for FPSO and Aframax

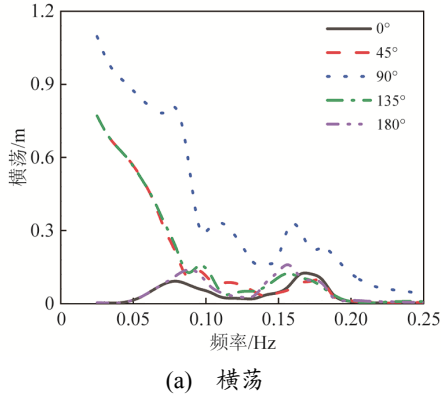


图7 不同浪向下Aframax运动响应幅值
Fig. 7 Sway and Roll RAOs of Aframax Tanker Under Different Wave Headings

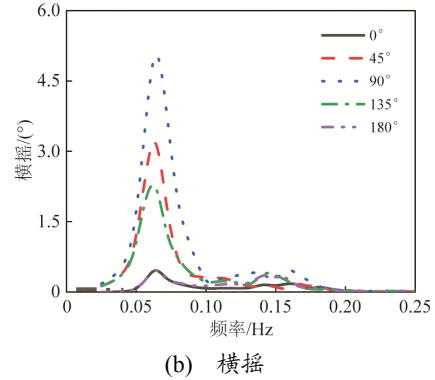


图7 不同浪向下Aframax运动响应幅值(续)
Fig. 7 Sway and Roll RAOs of Aframax Tanker Under Different Wave Headings (Continued)

2.2 海洋环境参数

选取波浪荷载为联合北海波浪项目(Joint North Sea Wave Project, JONSWAP)谱不规则波, 谱峰因子 γ 取值为3.3, 有义波高设定为1.25 m, 谱峰周期为5.8 s; 风荷载采用挪威石油局风谱(Norsk Petroleum Direktorat, NPD), 平均风速为7.90 m/s; 海表面流速设定为1.54 m/s(见表2)。为考虑最不利工况, 保持风、浪和流的方向均一致。

表2 极端海况环境条件参数

风速/(m/s)	流速/(m/s)	波浪	
		有义波高/m	谱峰周期/s
7.9	1.54	1.25	5.8

2.3 风浪流时域分析

利用ANSYS-AQWA基于时域数值模拟方法, 对不同并靠角度下两船的运动响应进行分析。时域计算场景为Aframax油船向FPSO平台并靠作业, 两船在并靠作业时均处于航行状态, 设定初始航速均为1.531 m/s, 并靠速度为0.2 m/s^[16], 叠加至航行方向的速度为1.544 m/s, 两船初始间距为3 m。环境计算工况持续时间为600 s, 时间步长为0.1 s。选取被补给船以5°、10°和15°的并靠角度接近补给船, 将并靠过程中船舶的最大横荡速度和横摇速度叠加, 作为危险工况输入条件, 用于后续碰撞分析。90°工况下Aframax型船舶在不同并靠角度条件下横荡和横摇速度时域运动响应曲线见图8。结果表明, 横荡运动总体呈现为先上升后下降, 最终趋于稳定的趋势, 横摇值在区间内震荡。当并靠角为5°时, 船体姿态接近平行, 横向压力梯度小, 难以形成持续的水动力作用, 黏性阻尼使得能量耗散, 最终横荡速度收敛至0。当并靠角增大到10°和15°时, 两船之间形成明显挤压流和压力梯度, 横向水动力与黏性阻尼达

到动态平衡，使系统维持非零的稳定横荡速度。90°风、浪和流下Aframax型油轮在不同并靠角度下的最

大运动速度幅值见表3。

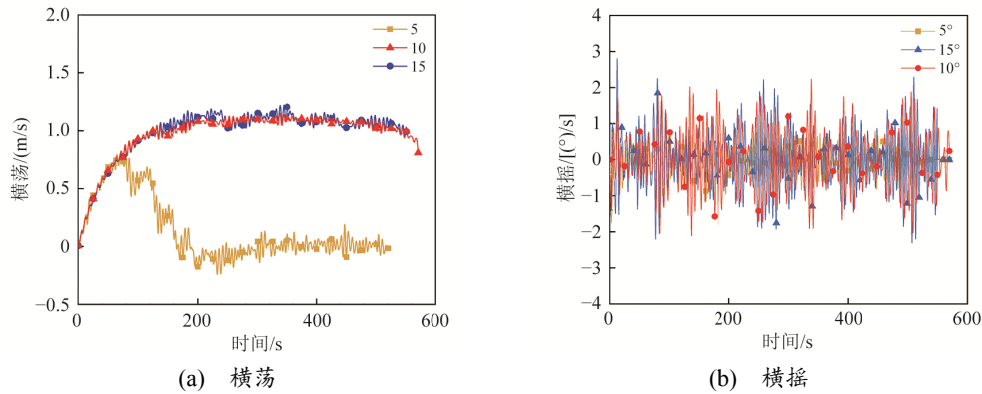


图 8 90°风浪流工况下不同并靠角度 Aframax 运动响应

Fig. 8 Sway and Roll Motion Responses of Aframax Tanker at Different Berthing Angles Under 90° Environmental Condition

表 3 不同并靠角度 Aframax 运动响应极值

Tab. 3 Extreme Values of Aframax Motion Responses at Different Berthing Angles

风、浪、流 方向/(°)	角度/(°)	横荡/ (m/s)	横摇/ [(°)/s]
90	5	0.798	1.079
90	10	1.219	2.306
90	15	1.241	2.809

2.4 并靠场景布置

以相同场景下AWQA水动力分析结果为依据，借助非线性动力学软件LS-DYNA，计算输出考虑了大角度极限工况船间水动力干扰的两船载荷特性。建立不同并靠角度的旁靠场景，并引入橡胶靠球有限元模型，将两船相对运动幅值的极值设为初始状态，给出考虑环境以及水动力影响下的靠球压力及

压缩量情况。

对撞击船采用简化处理，Aframax模型采用满载总重量作用于质心方式进行外船体建模。撞击船和被撞船均采用4节点壳单元建模。遵循国际航运协会规范PIANC（2024）^[16]指南并结合并靠两船的排水量，选用尺寸为3 300 mm×6 500 mm的80型大型靠球。沿舷侧结构表面等间距布置3组橡胶靠球，其中，2组采用单个竖向与横向靠球垂直放置构成T型组合，首部位置设置单独竖向靠球，整体靠球沿船长方向等间距布置，以复现工程装配情形，既可以保证足够缓冲范围，又避免布置过密导致资源浪费。并靠场景中具有5个气动橡胶靠球的整体有限元模型见图9，被补给船以不同角度的并靠作业有限元场景见图10。

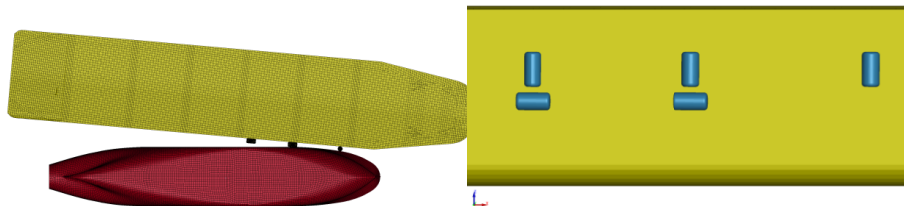


图 9 并靠场景整体有限元模型

Fig. 9 Global Finite Element Model of Side-by-Side Berthing Scenario

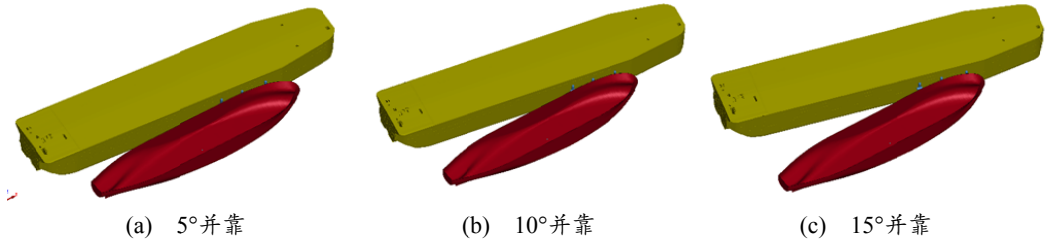


图 10 不同并靠角度场景有限元模型

Fig. 10 Finite Element Models for Different Berthing Angle Scenarios

为准确模拟两船并靠过程中靠球与舷侧及内部构件的接触关系, 避免计算出现结构穿透, 在船舶与靠球之间设置面-面接触, 法向选用硬接触, 各接触面摩擦系数设置为0.3。由于靠球与舷侧接触面曲率相对靠球型线变化不大, 可将靠球的缓冲吸能过程近似视为2个平面间沿Y向的压载过程; 仅约束橡胶靠球两端近似法兰处节点Z向位移, 确保边界条件与实际工况一致。由于船首与靠球之间存在较大的刚度差异, 本文中船体材料采用高强钢, 仅使用板壳单元模拟船体结构及内部支撑构件。考虑其塑性力学性能对应变率的敏感性, 采用Cowper-Symonds本构模型来描述其结构的应变率效应。具体材料参数见表4^[17]。

表4 船体材料参数

Tab. 4 Material Parameters of Hull Structure

材料	密度 $\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$	弹性模量 E/MPa	屈服强度 σ_0
36A	7 850	2.1×10^5	355
泊松比	C	P	
0.3	3 200	5	

3 仿真结果与讨论

按照第2节的基本设置及场景配置, 在LS-DYNA非线性有限元分析中, 共考虑6种并靠情

况, 具体见表5。首先, 从计算结果中得到了合力-时间和吸收能量-时间的关系。在LS-DYNA模拟中, 吸收能量是根据应变能自动计算的, 应变能是单元中应力和应变的函数, 其表示为

$$W = \int \sigma(\varepsilon) d\varepsilon \quad (1)$$

式中: W 为材料吸收的能量; ε 为任意应变; $\sigma(\varepsilon)$ 为应变所对应的应力。

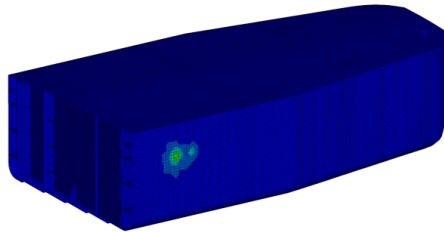
表5 FPSO 不同并靠工况

Tab. 5 Different Berthing Conditions of FPSO

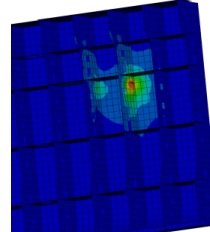
工况	并靠角度/(°)	橡胶靠球
1	5	未装配
2		装配
3	10	未装配
4		装配
5	15	未装配
6		装配

3.1 碰撞力与能量吸收分析

图11数值模拟显示, 在未配备橡胶靠球的情况下, FPSO船体舷侧发生了显著的局部损伤, 表现为外板及肋骨明显屈曲; 而当在舷侧布设5个橡胶靠球后, 未观察到明显的结构破坏, 仅出现局部轻微屈曲变形, 说明靠球对船体结构具有有效的防护作用。



(a) 侧视图



(b) 横截面视图

图11 并靠碰撞时无橡胶靠球的FPSO船体结构损坏

Fig. 11 Structural Damage to FPSO Hull Without Rubber Fenders During Side-by-Side Collision

图12对比了有无橡胶靠球2种工况下, 船舶碰撞时的撞击力-时程曲线。通过比较冲击力峰值和冲击持续时间, 发现对于未安装橡胶靠球的情况, 撞击力迅速上升至1.06 s时的峰值为6.49 MN, 随后急剧下降至0, 整个作用过程持续0.57 s; 对于安装了橡胶靠球的情况, 碰撞的峰值撞击力为4.43 MN, 发生于1.68 s, 较无靠球时降低了31.7%, 且碰撞持续时间大幅延长至3.76 s。由此可见, 橡胶靠球能够显著降低峰值撞击力并延长撞击作用时间, 有效提升了两船在并靠过程中的抗撞性能。

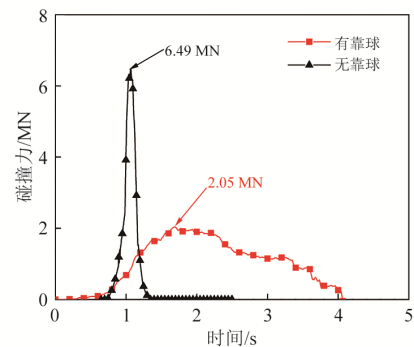


图12 5°并靠角度下有无靠球碰撞力-时程曲线对比图

Fig. 12 Comparison of Impact Force-Time Histories Curves with and Without Rubber Fenders at a Berthing Angle of 5°

在5°碰撞角度下,油轮船体与FPSO有无橡胶靠球时吸收能量随时间的变化见图13。在有橡胶靠球情况下,被撞船FPSO船体吸收的能量由184.00 kJ下降至5.17 kJ,橡胶靠球吸收了绝大部分能量,保证被撞船船体结构不发生重大损坏。由此表明,其在延缓冲击过程中的能量吸收能力更具优势。

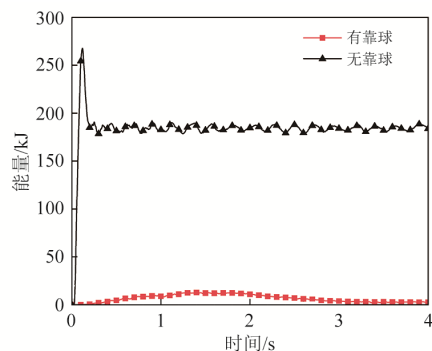
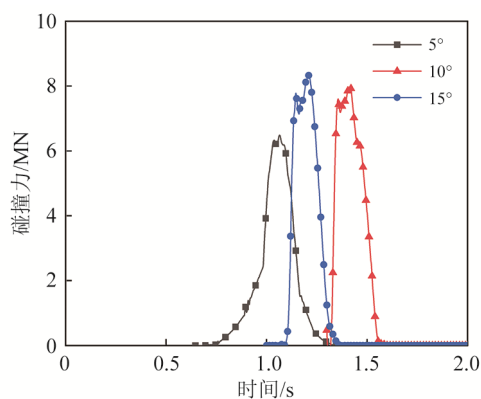


图 13 5°碰撞场景下 FPSO 有无靠球吸收能量-时间变化

Fig. 13 Time History of Energy Absorbed by FPSO Under with and without Rubber Fenders at a Berthing Angle of 5°

不同并靠角度被撞船内能与能量吸收情况见图14。结果表明,随着撞击角度由5°增加至15°,靠球吸能逐渐增加,靠球吸能占比已达95%以上,在15°下吸收能量最大为22.99 MJ。对于被撞船而言,其内能在各工况下很小,可见当撞击后的能量传递到被撞船时已经耗散。由此表明,靠球的主要作用是吸收能量并分散冲击力,进而有效耗散撞击带来的巨大能量。



(a) 无橡胶靠球撞击船舶

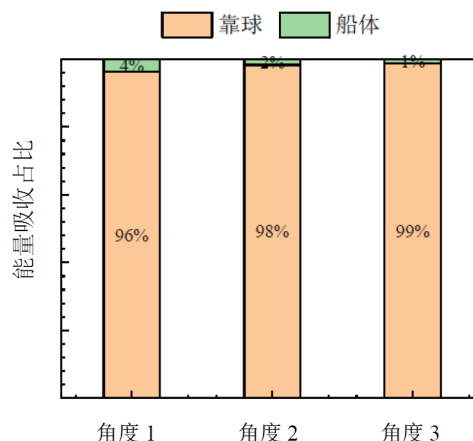
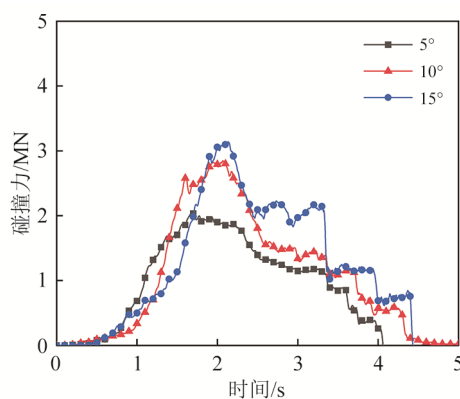


图 14 不同并靠角度被撞船及靠球能量吸收占比

Fig. 14 Energy Absorption Ratios of Struck Vessel and Rubber Fenders at Different Berthing Angles

并靠角度增大,所受风浪流影响增强,其撞击速度也同时增大。并靠过程中不同角度下合力与时间的关系见图15。结果表明,随着船舶速度的增加,碰撞力呈现逐步增大的趋势。在安装防撞装置后,最大撞击力显著降低,峰值出现明显下降。在角度5°、10°和15°时,最大撞击力的减小幅度分别为68.41%、66.43%和66.95%。此趋势表明,尽管靠球在不同角度下均能有效削减冲击力,但其减幅随角度增大而逐渐减弱,说明并靠角度对靠球的缓冲效能具有一定影响。



(b) 有橡胶靠球撞击船舶

图 15 不同并靠角度下 Aframax 与 FPSO 碰撞力-时间关系曲线

Fig. 15 Impact Force-Time Histories Between Impacting Aframax and Struck FPSO at Different Berthing Angles

并靠过程中,不同并靠角度吸收能量与时间变化关系见图16。研究结果表明,当在FPSO舷侧设置橡胶靠球时,被撞船的能量吸收分别在5°、10°和15°时降低了95.22%、95.14%和95.44%。被撞船的能量吸收变化趋势并非严格连续,主要源于不同并靠角

度下接触区域的差距,可能会导致能量变化存在波动。但整体趋势明确,在配备橡胶靠球后被撞船吸收的能量均远远低于未配备靠球时的情况。这证明橡胶靠球能有效分担碰撞能量,减轻被撞船船体损伤,对结构耐撞性具有重要意义。

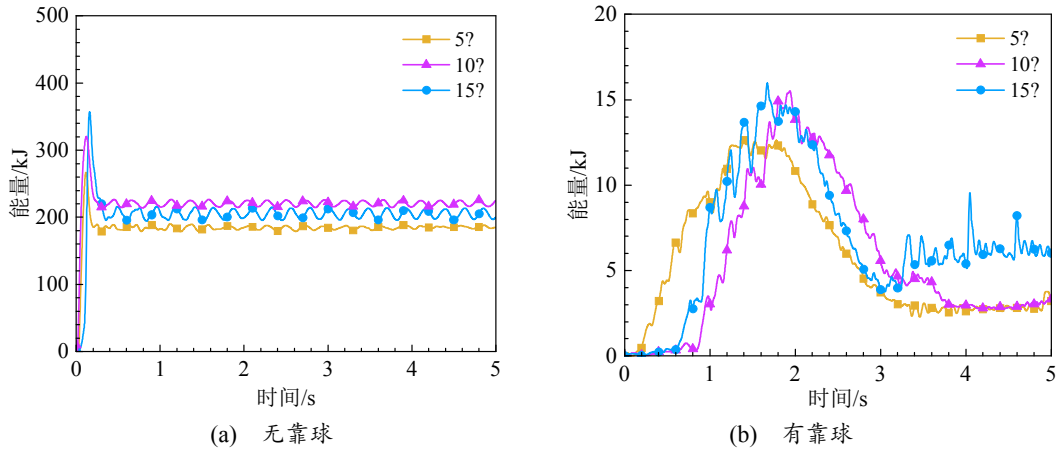


图 16 不同并靠角度下的被撞船 FPSO 内能变化曲线

Fig. 16 Time Histories of Internal Energy of Struck Vessel FPSO at Different Berthing Angles

3.2 船体结构响应

防撞装置的压溃深度能够反映其变形损伤程度, 对其后续的维修与更换具有重要的工程与经济意义。不同并靠角度下 FPSO 船体的结构响应, 以及装置在

最大变形状态下的云图见图 17。图 17 统计了不同角度下受撞区域的最大应力值。严重应力主要集中在受撞船体舷侧双层舱壁外侧, 无靠球下的典型响应表现为显著的局部变形。

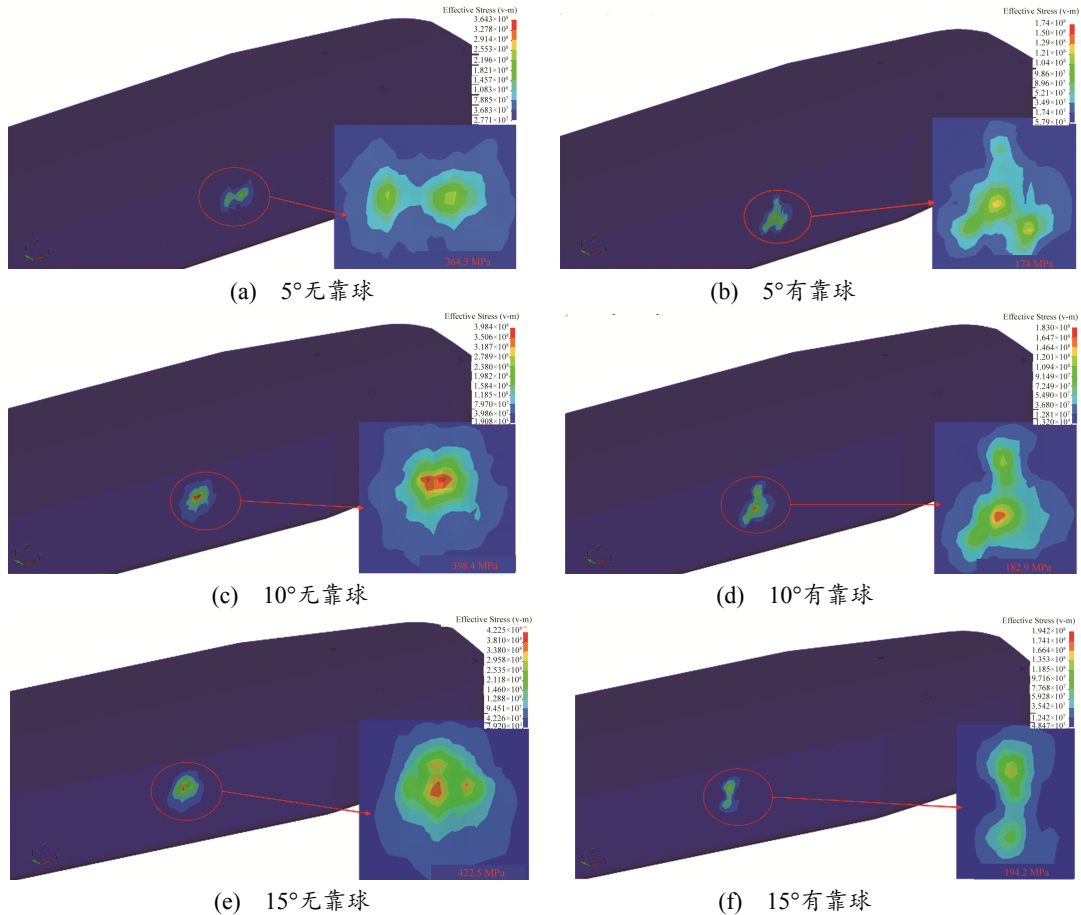


图 17 不同并靠角度下有无靠球结构损伤图

Fig. 17 Structural Damage with and without Fenders at Different Berthing Angles

防撞装置的压溃深度时程曲线见图 18, 结合应力和变形图表明, 压溃深度在碰撞初期迅速上升至

峰值, 随后因橡胶的弹性恢复作用而回弹。通过量化局部撞深, 对受撞区域的损伤模式进行评估。在

并靠角度 $5^{\circ}\sim 15^{\circ}$ 中, 靠球最大压缩量由1 181 mm增加至1 863 mm, 其主要原因是并靠角度增大, 接触范围由较宽面接触趋向更集中的线接触或点接触, 接触面积减小, 导致更强的应力集中, 从而表现出更大的压缩变形。

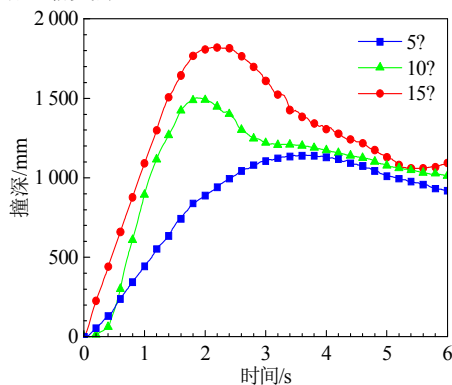


图 18 防撞装置压溃深度-时程曲线

Fig. 18 Time History of Crushing Depth of Collision Protection Device

3.3 靠球变形特征

从变形机理来看, 防撞装置的整体响应大部分由橡胶的弹性变形组成。橡胶在冲击过程中持续变形并吸收绝大部分能量, 可有效阻止船体进一步压入。结果表明, 随着船舶碰撞速度的增加, 防撞装置的压入深度显著增大, 损伤程度进一步加剧。安装橡胶靠球的优势不仅体现在撞击船对船体的损伤程度方面, 还体现在最大撞深上。

不同并靠角度下受撞靠球的局部变形情况见图

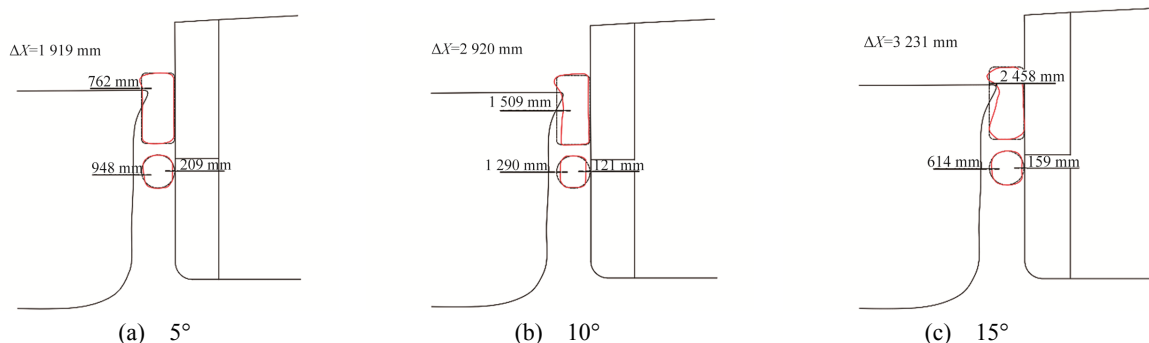


图 20 不同并靠角度下受撞靠球局部变形图

Fig. 20 Local Deformation of Impacted Fender at Different Berthing Angles

4 结论

本文系统评估了配备橡胶靠球的FPSO与穿梭油轮在并靠作业中的防撞性能。通过对比橡胶靠球的物理压缩试验, 建立相应的数值模型, 验证了数值模型的有效性。进一步考虑风浪流环境载荷影响下的并靠过程, 将 5° 、 10° 和 15° 典型并靠工况下的船舶水动力响应作为输入值, 研究并分析靠球对船

19和图20。黑色虚线框表示橡胶靠球在撞击前的初始形状, 红色实线代表撞击后的变形形态。通过参数 $\Delta X=X_1+X_2+X_3$ 对靠球的总变形量化, 对比并靠角度对形变的影响。结果表明, 随着并靠角度的增加, 受撞靠球局部总变形更为明显。在分析的3个角度中, 变形最大的均出现位于中间位置的立式靠球, 在受舷侧边缘挤压作用下呈现中心内凹特征; 而横式靠球由于两侧船体外形平滑, 其挤压变形相对对称。FPSO船体损伤则主要表现为局部区域的集中破坏。由此可见, 并靠角度对靠球与船体的受力与变形模式具有显著的影响。随着角度增大, 靠球的局部非对称变形愈加显著, 导致船体局部损伤的集中化。这表明随着船舶初始动能的增加, 撞击深度也随之增加, 从而靠球的变形量进一步增加。在大角度并靠时, 接触面积缩小导致应力集中, 从而表现出更大的压溃深度, 这表明在高角度靠泊作业中应增加靠球布置密度以确保安全裕度。

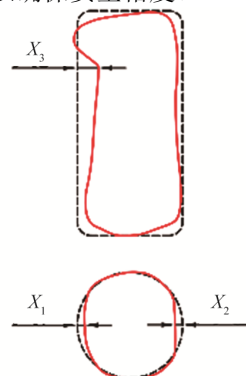


图 19 靠球变形量示意图

Fig. 19 Schematic Diagram of Fender Deformation

体碰撞的结构响应, 评估不同并靠角度下靠球的防撞性能。基于上述研究, 主要得出以下4点结论:

1) 本文建立的气囊式橡胶靠球模型, 构建了船-靠球-船并靠场景, 对比数值模型与橡胶靠球规范要求的动能吸收特性, 验证其模型的合理性。

2) 水动力计算分析表明, 风浪流 90° 方向下为最不利方向, 横荡与横摇速度显著增大, 导致更高

的初始碰撞速度。将此水动力结果引入碰撞分析, 有助于更加真实地反映工程作业场景。

3) 橡胶靠球显著改善碰撞船舶的整体抗撞性能。开展FPSO与Aframax级穿梭油轮的并靠碰撞模拟。无靠球时FPSO船体出现明显屈曲与局部破坏, 而布设5个靠球后结构未发生显著损伤。不同并靠角度下, 靠球均能吸收绝大部分碰撞能量, 有效削弱能量传递并显著降低受撞船体的破坏程度。

4) 并靠角度影响靠球变形模式与能量耗散特性。随并靠角度增大, 接触区域逐渐减小, 导致应力集中增强, 靠球可削减局部破坏程度和穿透深度。

本文方法可为船舶碰撞安全性评价提供量化分析工具, 用于校核配备橡胶靠球的船舶在不同碰撞工况下的结构可靠性, 并为靠球设计及船舶防护方案制定提供参考依据。

参考文献:

- [1] WANG W, FENG A C. Coupled Transfer and Shielding Effects for Two Side-by-Side Vessels Connected by Mooring Line[J]. *Physics of Fluids*, 2025, 37(6): 067103.
- [2] 程世明, 韩越, 金杨, 等. 养殖工船海上旁靠补给系统设计及水动力性能[J]. *船舶工程*, 2024, 46(5): 1-5.
CHENG S M, HAN Y, JIN Y, et al. Design and Hydrodynamic Performance of Offshore Side-by-Side Replenishment System for Aquaculture ship[J]. *Ship Engineering*, 2024, 46(5): 1-5.
- [3] LU K, CHEN X J, GAO Z, et al. Initial Response Mechanism and Local Contact Stiffness Analysis of the Floating Two-Stage Buffer Collision-Prevention System under Ship Colliding[J]. *Advances in Structural Engineering*, 2021, 24(10): 2227-2241.
- [4] 耿力智, 诸云鹏, 闻鸣, 等. 15 000 TEU 舾装集装箱船舶防台系泊方案[J]. *船舶工程*, 2025, 47(8): 51-58.
GENG L Z, ZHU Y P, WEN M, et al. Typhoon Mooring Scheme for 15 000 TEU Outfitting Container Ships[J]. *Ship Engineering*, 2025, 47(8): 51-58.
- [5] 王瑾, 杨献鹏, 孙华斌, 等. 系泊船舶动力响应特性试验研究[J]. *船舶工程*, 2024, 46(1): 58-64.
WANG J, YANG X P, SUN H B, et al. Experimental Study on Dynamic Response Characteristics of Moored Ships[J]. *Ship Engineering*, 2024, 46(1): 58-64.
- [6] TERNDROP PEDERSEN P, ZHANG S M. On Impact Mechanics in Ship Collisions[J]. *Marine Structures*, 1998, 11(10): 429-449.
- [7] OZGUC O. Structural Damage of Ship-FPSO Collisions[J]. *Journal of Marine Engineering & Technology*, 2019, 18(1): 1-35.
- [8] FAN W, YUAN W C, CHEN B S. Steel Fender Limitations and Improvements for Bridge Protection in Ship Collisions[J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2015, 20(12): 06015004.
- [9] FERNANDEZ J M, VAZ M A, CYRINO J C R. Numerical Study on the Collision of Platform Supply Vessel and Floating Production Storage and Offloading Platform[J]. *Ships and Offshore Structures*, 2022, 17(7): 1485-1497.
- [10] PARK D M, KWON Y J, NAM H S, et al. An Experimental Study of Wave Impact Pressure on an FPSO Bow under Head Sea Conditions[J]. *Ocean Engineering*, 2022, 249: 110993.
- [11] CHO S R, LE D N C, JEONG J H, et al. Development of Simple Design-Oriented Procedure for Predicting the Collision Damage of FPSO Caisson Protection Structures[J]. *Ocean Engineering*, 2017, 142: 458-469.
- [12] 丁仕风, 胡艺, 周利, 等. 基于流固耦合下的船舶护舷结构数值模拟[J]. *船舶工程*, 2024, 46(增刊 1): 427-431.
DING S F, HU Y, ZHOU L, et al. Numerical Simulation of Ship Guard Structure Based on Flow-Solid Coupling[J]. *Ship Engineering*, 2024, 46(Suppl. 1): 427-431.
- [13] SUN L, YANG X Q, BU S X, et al. Analysis of FPSO Motion Response Under Different Wave Spectra[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2023, 11(7): 1467.
- [14] 李云军, 黄辉东, 赵夕滨, 等. 船舶结构有限元模型及应力场的快速重构与可视化[J]. *船舶工程*, 2025, 47(增刊 1): 300-306.
LI Y J, HUANG H D, ZHAO X B, et al. Rapid Reconstruction and Visualization of Ship Structure Finite Element Model and its Stress Field[J]. *Ship Engineering*, 2025, 47(Suppl. 1): 300-306.
- [15] XU X S, SAHOO P, EVANS J, et al. Hydrodynamic Performances of FPSO and Shuttle Tanker During Side-by-Side Offloading Operation[J]. *Ships and Offshore Structures*, 2019, 14(Suppl. 1): 292-299.
- [16] PIANC. PIANC Fender Guidelines 2024: Guidelines for the Design, Manufacturing and Testing of Fender Systmes 2024 [R]. 2024.
- [17] CHO H R, KIM H J, PARK S M, et al. Effect of Solid Rubber Fenders on the Structural Damage Due to Collisions Between a Ship-Shaped Offshore Installation and an Offshore Supply Vessel[J]. *Ships and Offshore Structures*, 2023, 18(7): 1037-1059.