



船舶结构碰撞试验及简化数值计算方法

卢安格 王子棠 孔祥韶 李樱 陈三桂 吴卫国

Ship structure collision experiments and simplified numerical calculation method

LU Ange, WANG Zitang, KONG Xiangshao, LI Ying, CHEN Sangui, WU Weiguo

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.03193>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

船舶舷侧与小型冰山碰撞数值模拟分析

Numerical simulation analysis of the collision between ship side and small iceberg

中国舰船研究. 2021, 16(5): 78–86 <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.02220>

双壳船体结构在楔形物撞击下的损伤特性试验及数值仿真分析

Test and numerical analysis on the damage characteristics of double-hull ship structures suffering head-on collision by a wedge indenter

中国舰船研究. 2019, 14(1): 89–94 <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.01452>

高强钢船体板架落锤冲击试验及数值仿真

Drop weight impact test and numerical simulation of high-strength steel hull grillage

中国舰船研究. 2018, 13(S1): 100–105 <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.01112>

考虑船位预测不确定性的船舶碰撞危险度计算方法

Ship collision risk calculation method considering uncertainty of ship position prediction

中国舰船研究. 2021, 16(1): 114–120 <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.01914>

船用钢板高频感应加热热源简化计算方法

Simplified calculation method for high frequency induction heating source of ship plate

中国舰船研究. 2018, 13(5): 18–24 <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.01130>

船舶复合材料螺旋桨模型试验的特殊性分析

Analysis on the particularity of model test for composite marine propellers

中国舰船研究. 2021, 16(2): 9–14 <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.01852>



扫码关注微信公众号, 获得更多资讯信息

本文网址: <http://www.ship-research.com/cn/article/doi/10.19693/j.issn.1673-3185.03193>

期刊网址: www.ship-research.com

引用格式: 卢安格, 王子棠, 孔祥韶, 等. 船舶结构碰撞试验及简化数值计算方法 [J]. 中国舰船研究, 2024, 19(2): 128–139.
LU A G, WANG Z T, KONG X S, et al. Ship structure collision experiments and simplified numerical calculation method [J]. Chinese Journal of Ship Research, 2024, 19(2): 128–139 (in Chinese).

船舶结构碰撞试验及简化数值计算方法



扫码阅读全文

卢安格¹, 王子棠¹, 孔祥韶^{*1}, 李樱², 陈三桂², 吴卫国³

1 武汉理工大学 船海与能源动力工程学院, 湖北 武汉 430063

2 中国舰船研究设计中心, 湖北 武汉 430064

3 武汉理工大学 绿色智能江海直达船舶与邮轮游艇研究中心, 湖北 武汉 430063

摘要: [目的] 采用流固耦合计算方法虽能较好地模拟船舶碰撞过程, 但计算时间较长, 为此, 提出一种简化的数值计算方法。[方法] 以某船的局部舱段为对象, 开展多工况水上碰撞试验。采用力传感器和基于高速摄影技术非接触测量的方法获得碰撞力及碰撞船的运动时程数据, 通过对碰撞接触力和加速度响应等数据进行分析, 并针对试验过程开展任意拉格朗日-欧拉(ALE)流固耦合数值计算分析, 提出将碰撞过程中水域对撞击船的影响简化为等效质量, 将对被撞船的影响简化为等效阻力, 以面力的形式作用于被撞船非撞击侧用以阻碍被撞船运动的简化方法, 然后基于此简化方法开展不涉及水域与结构耦合过程的数值计算。[结果] 结果显示, 采用简化计算方法得到的各工况的碰撞力峰值与试验值间的误差均在5%以内, 且该方法所需要的计算时长远小于ALE流固耦合算法。[结论] 所提简化数值计算方法可为实现船舶结构碰撞响应的高效计算提供一定的参考。

关键词: 模型试验; 数值仿真; 碰撞响应; 任意拉格朗日-欧拉流固耦合

中图分类号: U661.43

文献标志码: A

DOI: 10.19693/j.issn.1673-3185.03193

Ship structure collision experiments and simplified numerical calculation method

LU Ange¹, WANG Zitang¹, KONG Xiangshao^{*1}, LI Ying², CHEN Sangui², WU Weiguo³

1 School of Naval Architecture, Ocean and Energy Power Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China

2 China Ship Development and Design Center, Wuhan 430064, China

3 Green & Smart River-Sea-Going Ship Cruise and Yacht Research Center, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China

Abstract: [Objectives] Although the fluid-structure interaction calculation method can better simulate the ship collision process, it requires a longer calculation time. To address this problem, a simplified numerical calculation method is proposed. [Methods] The local cabin section of a ship is taken as the object to carry out water collision experiments under various operating conditions. Force sensors and non-contact measurement based on high-speed photography technology are used to obtain the collision force and motion time history data of the ship. The collision contact force and acceleration response data are then analyzed, and arbitrary Lagrange-Euler (ALE) coupled fluid-solid numerical computational analysis is carried out on the experimental process. The effect of the water on the impacting ship in the collision process is then simplified to the equivalent mass, and the effect on the impacted ship is simplified to the equivalent resistance, which acts on the non-impacting side of the impacted ship in the form of surface force to hinder the movement of the impacted ship. Numerical calculations that do not involve the water-structure coupling process are then carried out on the basis of the simplified method. [Results] The results show that the errors between the peak collision force and the experimental values for each condition obtained by the simplified calculation method are within 5%, and the calculation time required by this method is much smaller than that of the ALE fluid-structure interaction algorithm. [Conclusions] The proposed simplified numerical calculation method can provide useful references for realizing the efficient calculation of ship structure collision response.

Key words: model test; numerical simulation; collision response; arbitrary Lagrange-Euler (ALE) fluid-structure interaction

收稿日期: 2022-11-24 修回日期: 2023-01-19 网络首发时间: 2023-04-04 10:37

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52171318)

作者简介: 卢安格, 男, 1997年生, 硕士。研究方向: 舰船抗爆抗冲击。E-mail: luange@whut.edu.cn

孔祥韶, 男, 1983年生, 博士, 教授。研究方向: 舰船爆炸毁伤与防护。E-mail: kongxs@whut.edu.cn

*通信作者: 孔祥韶

0 引 言

船舶结构在受到碰撞载荷作用时的动态响应过程复杂, 涉及到材料结构的弹塑性变形乃至断裂失效等强非线性问题^[1-2]; 同时, 船体周围水域也会对碰撞过程中结构的响应产生显著影响, 故很难采用理论分析模型来得到准确的响应规律。

在船舶碰撞过程中, 为了探究周围水域对其的影响, 采用流固耦合计算方法^[3]能够较好地模拟碰撞过程, 但要花费大量的计算时间。另一种常用的方法是, 认为在碰撞过程中周围水域由于其黏性会粘附在撞击船和被撞船上, 然后以惯性力的方式影响碰撞结构的运动过程, 其在数值计算中是以附加质量的方式进行简化模拟^[4], 但想要精确计算碰撞过程中的附加质量值, 非常困难。Minorsky^[5]最早将附加质量概念引入船舶碰撞问题研究中, 但其提出的公式存在应用范围小的局限性。随后, Brown^[6]对 Minorsky 的方法进行改进, 扩大了经验公式的应用范围, 解决了碰撞位置、碰撞角度和碰撞速度的任意性问题, 提高了计算精度。Matora 等^[7]指出附加质量在碰撞过程中是随时间不断变化的, 不能用常量来表示, 横漂运动的附加质量变化范围为船体质量 m 的 40%~130%, 进退运动的附加质量变化范围为船体质量 m 的 2%~7%。Blok 等^[8]根据动量和能量提出了 2 种不同的等效附加质量, 并研究了碰撞结构的刚度对附加质量的影响。王自力等^[9-10]分析了应用附加质量模型来简化运动周围流体的影响, 其中附加质量根据经验公式选取, 以附加质量密度的形式增加到运动船体上。谭忠华^[11]采用木质船模试验和数值仿真的方法, 研究了周围水域对船舶碰撞中最大碰撞作用力的影响, 认为周围流场由于阻尼效应阻碍了碰撞运动, 这在一定程度上降低了接触力的大小, 降低范围约 2%~8%。叶剑平等^[12]对比分析了增加质量密度和增加质量点这 2 种附加质量施加方式, 发现采用增加质量点这种方式的计算结果与流固耦合方法更接近。张娅^[13]结合经验公式方法的应用范围, 提出了一种同时考虑流体定常阻力和流体惯性力的新的附加质量模型。Song 等^[14-15]在研究船舶的碰撞响应时, 是采取将被撞船周围的流场融入仿真、撞击船采用附加质量的处理方式。

如何准确并定量描述, 或者说模拟碰撞船体周围流体介质的作用, 是研究船舶碰撞问题的主要难点之一。目前, 针对船舶碰撞中的附加质量问题已有大量研究, 主要以经验公式为主, 试验

研究相对较少。因此, 本文拟以某船的局部舱段为研究对象, 开展多工况水上碰撞试验, 并针对试验过程开展流固耦合数值计算, 通过与试验数据进行对比分析, 验证数值计算方法的可靠性和精度。然后, 在此基础上提出将碰撞过程中水域对撞击船的影响简化为等效质量, 将对被撞船的影响简化为等效阻力, 以面力的形式作用于被撞船非撞击侧用以阻碍被撞船运动的简化方法。最后, 基于此简化方法开展不涉及水域与结构耦合过程的数值计算, 通过与试验数据和流固耦合方法结果进行对比, 验证简化计算方法的适用性, 为实现船舶结构碰撞响应高效计算提供一定的参考。

1 模型试验概述

1.1 试验装置

选取某舰船的部分舱段作为水上碰撞试验的被撞船模型。该舱段位于舰船中部, 其结构原型的主要参数如表 1 所示。该舱段共 5 层甲板, 内部包括一个核心舱室。基于原型的结构尺寸及布置形式, 在保证试验结果合理性以及可靠性的前提下开展缩比设计, 考虑缩比模型中舷侧板、甲板以及舱壁板厚的选取, 并按 1:6 的缩尺比进行设计。试验模型的舷侧外板为加筋板结构, 对碰撞区域外板结构上的肋骨进行比例设计, 而球扁钢形式的舷侧纵骨则以质量等效方式计入舷侧板厚上, 其质量等效公式为

$$n \cdot S_q = h \cdot t_d \tag{1}$$

式中: n 为球扁钢数量; S_q 为单个球扁钢横截面积; h 为舷侧板高度; t_d 为等效厚度。

表 1 舱段结构原型主要参数	
Table 1 Main parameters of cabin structure prototype	
参数	数值
长度/m	12.0
型宽/m	24.8
高度/m	17.0
吃水/m	10.0
肋骨间距/m	1.5

根据该型舰船舱室设备布置的特性, 通过调整压铁的布置来确保试验模型的浮态与实际结构一致。对试验模型的水下部分采用满焊焊接方式, 并进行水密处理。考虑到舱段模型整体的边界约束, 往舱段的两边分别延伸了一个横梁跨

距, 试验舱段模型沿船长方向对称, 如图 1 所示, 其主要参数如表 2 所示。试验模型由低碳钢 Q345 制成, 对不同板厚的试件开展准静态拉伸试验, 得到真实的应力-应变曲线如图 2 所示, 测试得到材料的力学性能如表 3 所示。

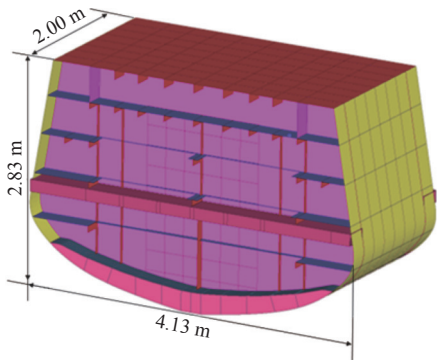


图 1 舱段结构碰撞试验模型
Fig. 1 The test model of cabin structure collision

表 2 试验模型主要参数
Table 2 Main parameters of test model

参数	数值	参数	数值
长度/m	2.00	结构重量/t	3.65
型宽/m	4.13	压载重量/t	3.58
高度/m	2.83	总重/t	7.23
吃水/m	1.67		

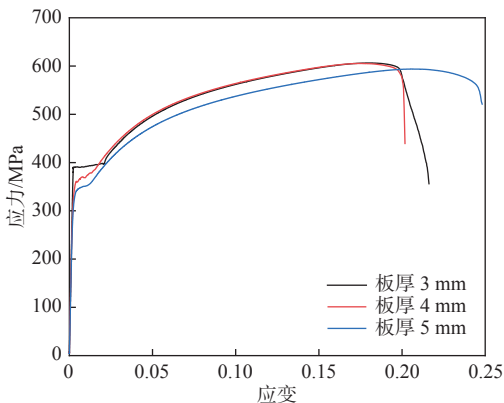


图 2 试件板材料的应力-应变曲线
Fig. 2 Stress-strain curves of specimen plate material

表 3 模型材料的力学性能
Table 3 Mechanical properties of model material

板厚/mm	杨氏模量/GPa	泊松比	屈服强度/MPa	断裂强度/MPa	密度/(kg·m ⁻³)
3	206	0.28	393	596	7850
4	206	0.28	368	592	7850
5	206	0.28	350	564	7850

设计的撞击船试验模型如图 3 所示, 其主要参数如表 4 所示。撞击船试验模型由钢质半球形

撞击头、三向力传感器和船体 3 个部分组成。船体为钢质船模, 船上布置有一定量的压铁, 以使整个撞击船正浮于水中; 船艏为钢质半球形撞击头, 通过三向力传感器与船体连接。船体上的吊耳连接钢丝绳, 并通过定滑轮与卷扬机共同组成加载装置, 为撞击船提供速度。

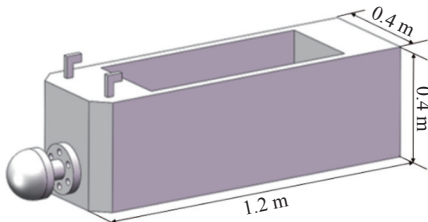


图 3 撞击船试验模型
Fig. 3 Test model of impact ship

表 4 撞击船主要参数
Table 4 Main parameters of impact ship

参数	数值	参数	数值
船长/m	1.2	结构重量/kg	133
型宽/m	0.4	传感器重量/kg	15
型深/m	0.4	撞击头重量/kg	12
吃水/m	0.31	总重/kg	160

1.2 试验测试

对撞击船靠近测试装置一侧布置便于追踪的标记点, 采用高速摄影系统进行直接观测, 如图 4 所示。在标记点附近固定直尺作为标距, 高速摄影仪拍摄下标记点完整的行程, 然后根据标距进行计算, 获得对应标记点的行程数据, 并对多个标记点的数据进行平均, 即可得到撞击船沿撞击方向的行程数据, 也就获取了撞击船在水上碰撞试验前、碰撞过程中以及碰撞后发生回弹阶段的运动状态。本次试验设置的采集频率为 500 帧/s。

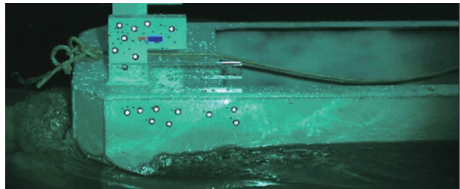


图 4 撞击船上标记点的布置情况
Fig. 4 Arrangement of marking points on the impact ship

为进行水上碰撞试验, 设计并制作了直径为 180 mm 的钢质半球形撞击头, 然后通过三向力传感器测量撞击船与试验舱段模型之间的碰撞接触力。三向力传感器的一端通过 6 个规格为 M20 的螺栓与钢质半球形撞击头连接, 另一端通过

6 个 M20 螺栓与撞击船连接, 形成一个整体, 如图 5 所示。

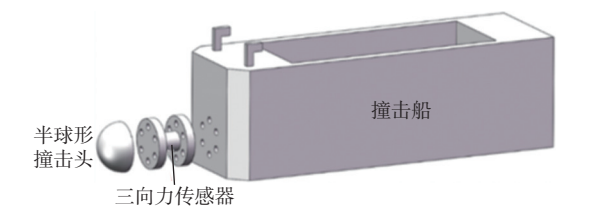
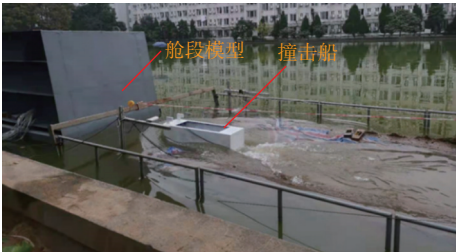


图 5 三向力传感器布置位置
Fig. 5 Layout position of triaxial force sensor

1.3 试验过程

水上碰撞试验包括撞击船模型、试验舱段模型、加载装置、测试设备以及数据采集系统。试验场地选为露天操纵水池, 场地布置如图 6 所示。试验舱段模型与撞击船均自由浮于露天水池, 保持撞击船的起始位置垂直于试验模型的舷侧方向且间隔 2 m。为保证撞击船能够准确地垂直撞击试验模型的碰撞位置, 在前期的试验准备过程中, 根据试验工况在试验舱段模型舷侧外板的碰撞位置处做上标记, 调整标记点位于定滑轮前 1 m 处, 并保证被撞船平行于滑轮所在水平杆。卷扬机、定滑轮以及钢丝绳组成水上碰撞试验的加载装置, 为了更好地给撞击船提供初始速度, 将卷扬机布置到垂直于试验舱段模型舷侧方向的水池边上。测试系统及数据采集系统均布置在正视于试验舱段模型横舱壁一侧的水池边上, 以方便高速摄影仪记录撞击船在整个碰撞过程中的运动状态。



(a) 实物图

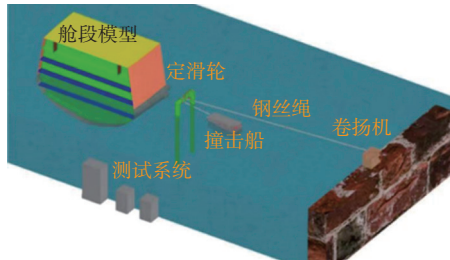


图 6 试验场地布置图
Fig. 6 Layout of test site

为准确记录碰撞过程中接触力的变化规律, 开展了多次碰撞试验, 碰撞速度控制在 0.6 m/s 左右。随后, 针对不同位置改变碰撞速度开展试验

测试, 试验工况如表 5 所示。后文中的 I-1, I-2, I-3 等表示针对相同碰撞位置开展的重复试验, 碰撞试验的碰撞位置如图 7 所示。图中, 弱肋位指试验舱段模型舷侧无肋骨的区域。

表 5 碰撞试验工况
Table 5 Collision test working conditions

工况编号	碰撞位置	碰撞速度/(m·s ⁻¹)
I	肋骨1	0.6
II	肋骨2	0.6
III	肋骨3	0.6
IV	肋骨1	0.8
V	弱肋位1	0.8
VI	弱肋位2	0.8

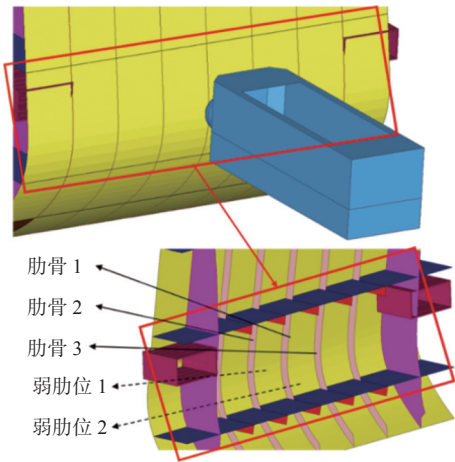


图 7 碰撞试验中的碰撞位置
Fig. 7 The collision position in collision test

2 试验结果及分析

2.1 撞击船加速度分析

为了获得各试验工况中撞击船的运动历程数据, 根据固定在撞击船上的标记点和标尺, 对高速摄影仪所拍摄的整个碰撞过程予以了分析, 如图 8 所示。从中可以发现, 在 210 ms 时刻发生碰撞之前, 撞击船的位移时程大致呈线性变化(红色曲线), 撞击船的速度在 0.6 m/s 附近波动(绿色曲线); 在 210 ms 左右发生碰撞时, 撞击船的速度明显降低, 在降为 0 之后发生了回弹, 回弹速度低于初始的碰撞速度。

当撞击船与舱段模型的碰撞位置在强肋位时, 碰撞过程约 15 ms。撞击船位移时程曲线的极值点表示撞击船的速度降为 0 的时刻, 因此, 选取该极值点时刻前 10 ms 和后 5 ms 的位移时程数据作为撞击船与舱段模型的碰撞过程, 并将撞击

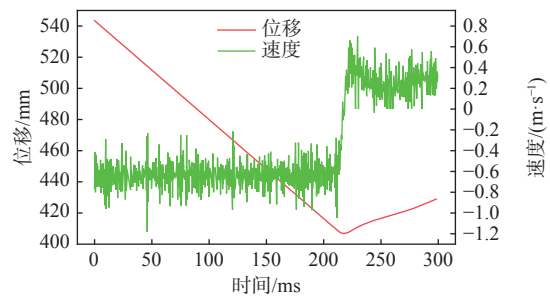


图 8 位移及速度历程数据
Fig. 8 Displacement and velocity history data

船位移时程曲线中极值点处的位移设为 0 位移进行数据分析。如图 9(a)所示,位移时程曲线呈现二次函数形式,这表示在碰撞过程中撞击船的运动状态可以近似为匀变速运动,采用二次多项式将其拟合为 $y = 0.035\ 3x^2 - 0.770\ 1x + 4.202\ 7$, 方差达 0.998 7, 拟合效果理想。

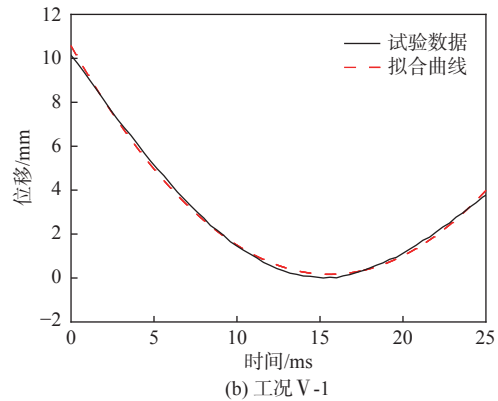
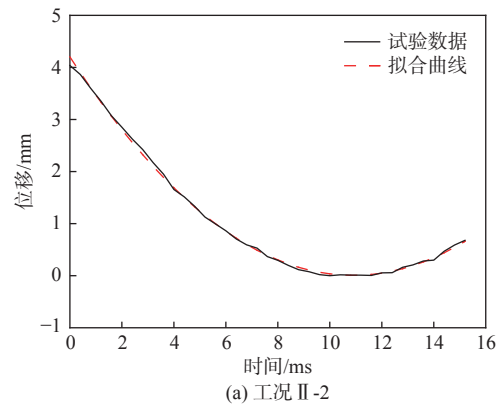


图 9 位移时程曲线及数据拟合曲线

Fig. 9 Displacement time-history curves and data fitting curves

但当撞击船与舱段模型的碰撞位置在弱肋位 1 和弱肋位 2 处时,由于该处的结构强度较弱,其舷侧结构将吸收较多的变形能,使得碰撞接触力响应时间增加,约达 25 ms。因此,对于碰撞位置为弱肋位的试验工况,可选取碰撞时刻前 15 ms 和后 10 ms 的位移时程数据进行分析。图 9(b)所示为试验工况 V-1 的位移时程数据,其拟合曲线为 $y = 0.042\ 9x^2 - 1.336\ 0x + 10.566\ 7$, 方差达 0.997 4, 拟合效果理想。

对根据各试验工况数据拟合得到的位移时程曲线进行 2 次微分,即可得到撞击船的拟合加速度。根据图 8 中的红色曲线,选取碰撞时刻前 15 ms 的位移时程数据进行分析,求导得到该时间段内的平均速度,由于该时间段内位移-时间曲线的斜率基本不变且临近碰撞瞬间,故将得到的平均速度作为瞬时碰撞速度。典型的碰撞工况下撞击船的瞬时碰撞速度以及拟合加速度如表 6 所示。

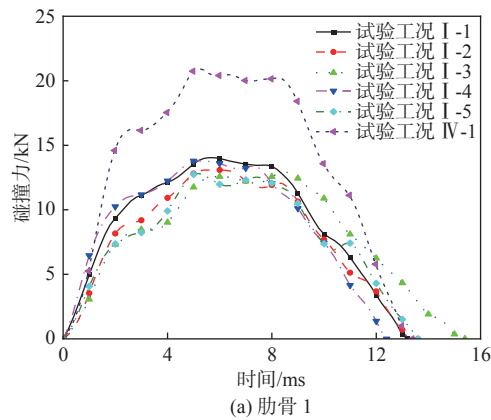
表 6 各工况下的瞬时碰撞速度及拟合加速度
Table 6 Instantaneous collision velocity and fitting acceleration under each working condition

工况编号	拟合函数方差	瞬时碰撞速度/(m·s ⁻¹)	拟合加速度/(m·s ⁻²)
I-1	0.990 3	0.562	0.086 6
I-2	0.991 7	0.530	0.083 9
II-1	0.993 4	0.604	0.080 1
II-4	0.997 3	0.686	0.091 3
III-1	0.988 8	0.589	0.087 5
III-2	0.991 8	0.631	0.097 4
IV-1	0.999 3	1.031	0.098 4
V-2	0.999 0	0.813	0.083 0

2.2 碰撞接触力分析

根据不同的碰撞位置,整理得到各工况下试验结果的碰撞接触力响应数据如图 10 所示。从中可以看出,当撞击船与舱段模型的碰撞位置在肋骨处时,接触力持续时间均在 15 ms 左右;而当碰撞位置在弱肋位时,接触力持续时间在 25~40 ms 之间,碰撞接触力在碰撞过程中是先逐步增加直至达到峰值,随后降至 0。典型碰撞工况下撞击船与舱段模型的碰撞接触力响应峰值如表 7 所示。

考虑到肋骨 2 和肋骨 3 这 2 个碰撞位置的试验工况存在对称性,将这 2 个碰撞位置处碰撞速度相近的工况数据进行了整理分析,如图 11 所示。从中可以看到,一致性良好。



(a) 肋骨 1

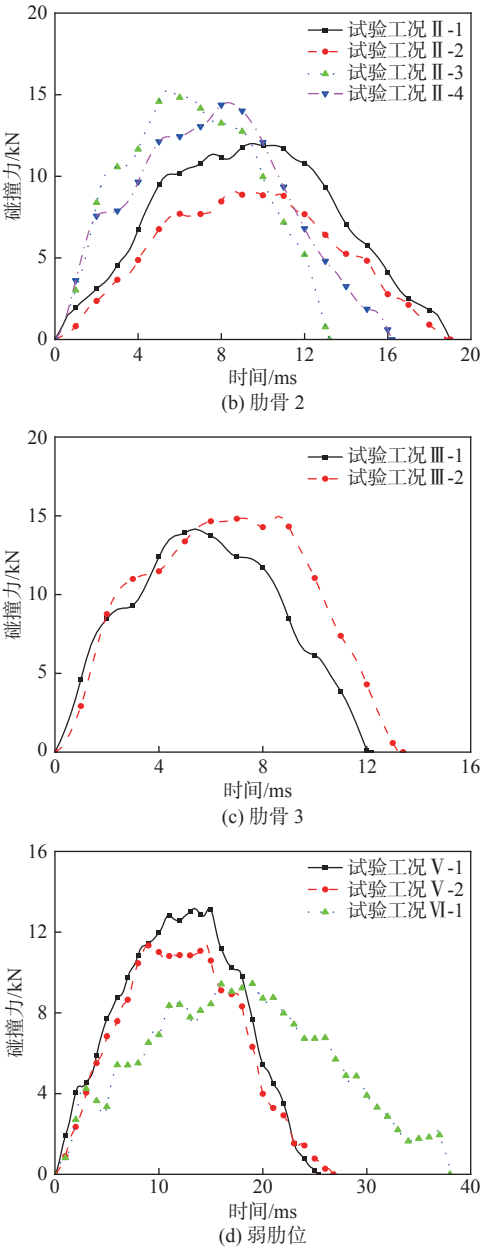


图 10 各工况下不同碰撞位置处的碰撞力响应数据
Fig. 10 Impact force response data at different collision positions under each working condition

表 7 各工况下的碰撞力响应峰值 Table 7 Peak values of impact force response under each working condition			
工况编号	碰撞位置	瞬时碰撞速度/(m·s ⁻¹)	碰撞力峰值/kN
I -1	肋骨1	0.562	14.04
I -2	肋骨1	0.530	13.09
II -1	肋骨2	0.604	12.00
II -4	肋骨2	0.686	14.51
III -1	肋骨3	0.589	14.16
III -2	肋骨3	0.631	14.98
IV -1	肋骨1	1.031	20.98
V -2	弱肋骨1	0.813	11.42

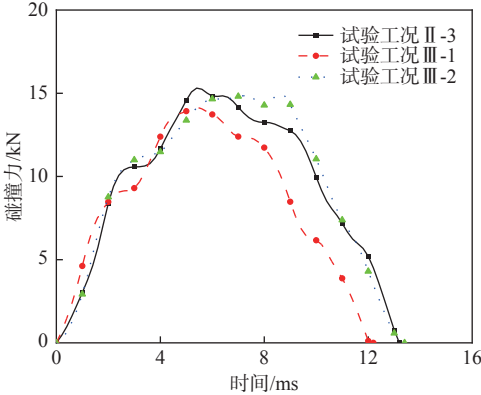


图 11 对称碰撞位置处的接触力响应对比
Fig. 11 Comparison of contact force response at symmetrical collision position

2.3 水域对撞击船的影响

根据前文整理得到的各试验工况下撞击船与舱段模型的接触力响应以及撞击船的加速度,再结合牛顿第二定律,即可得到实际碰撞试验过程中的等效质量。其要表达的意义为:当等效质量的撞击船在空气中撞击试验舱段时,其接触力响应与实际质量大小撞击船在水中撞击时的接触力响应一致。

$$F = m_{eq} \cdot a \tag{2}$$

式中: F 为试验测试得到的撞击船与舱段模型的碰撞接触力峰值; a 为试验测试得到的撞击船的拟合加速度; m_{eq} 为等效质量。

本文碰撞试验中的整个撞击物(包括撞击船、三向力传感器、钢制半球形撞击头)总重 160 kg,表 8 展示了各试验工况下的等效质量。本文所提等效质量为仅与撞击物质量相关的参数,其不与碰撞速度和撞击部位相关。因此,为减小水域环境因素对试验数据的影响,将各试验工况数据进行了平均分析,得到平均等效质量为 156.6 kg (图 12),而试验中实际撞击物的质量为 160 kg,这表示周围水域对撞击物的运动呈现减弱的作用,即降低了撞击载荷输入,降低比例约为 2.1%。

3 碰撞过程中流固耦合数值计算分析

本节将采用有限元数值计算程序 LS-DYNA 和 ALE 算法模拟碰撞响应过程。根据文献 [16],采用 8 倍板厚的网格尺寸进行建模。依据标准 GB/T228.1-2010,对不同板厚的材料进行力学性能试验,得到试验试件的材料参数,然后使用结构材料模型(*MAT_MODIFIED PIECEWISE LINEAR PLASTICITY),设置各板厚的真实应力-应变曲线,因撞击船前段的半球形撞击头和力传感器均

表 8 各试验工况下的测试数据以及等效质量
Table 8 Test data and equivalent mass under each test working conditions

工况编号	碰撞力峰值/kN	拟合加速度/(m·s ⁻²)	等效质量/kg
I-1	14.04	0.086 6	162.2
I-2	13.09	0.083 9	155.9
I-3	12.90	0.084 6	152.5
I-4	13.80	0.089 5	154.3
I-5	12.82	0.081 1	158.1
II-1	12.00	0.080 1	149.8
II-2	10.70	0.070 7	151.3
II-3	15.31	0.093 2	164.2
II-4	14.51	0.091 3	158.9
III-1	14.16	0.087 5	161.8
III-2	14.98	0.097 4	153.7
IV-1	20.98	0.098 4	158.2
V-1	14.01	0.085 8	153.8
V-2	11.42	0.083 0	156.6
VI-1	9.50	0.060 1	158.1

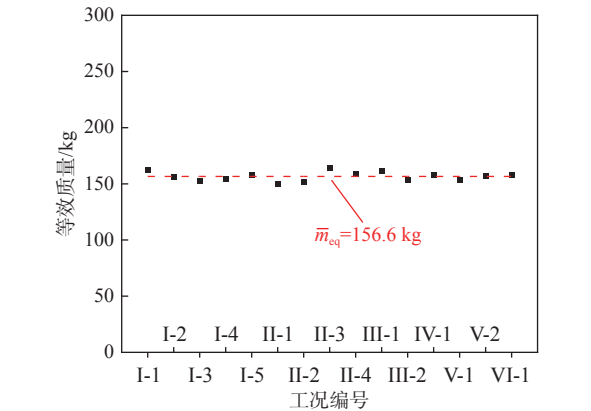


图 12 各试验工况下的等效质量及平均等效质量
Fig. 12 Equivalent mass and average equivalent mass under each test working condition

为实心铸铁,故将撞击船设置为刚体;采用空白材料模型(*MAT_NULL)对周围水域进行模拟,水的密度取为 $\rho=1\,000\text{ kg/m}^3$,随后采用Gruneisen状态方程进行描述^[17-18]。

$$P=\frac{\rho C^2\mu\left[1+\left(1-\frac{\gamma_0}{2}\right)\mu-\frac{\alpha}{2}\mu^2\right]}{\left[1-\left(S_1-1\right)\mu-S_2\frac{\mu^2}{\mu+1}-S_3\frac{\mu^3}{\left(\mu+1\right)^2}\right]}+\left(\gamma_0+\alpha\mu\right)E\tag{3}$$

式中: P 为压力; C 为冲击速度 v_s -质点速度 v_p 曲线的截距; μ 为体积变化率; S_1 , S_2 和 S_3 为 v_s - v_p 曲线斜率的系数; γ_0 为Gruneisen常数; α 为 γ_0 的一阶体积修正; E 为单位体积内能。参考文献[19],给出相关参数的取值为: $C=0.148\text{ cm}/\mu\text{s}$, $S_1=$

1.75 , $S_2=S_3=0$, $\gamma_0=0.493\,4$ 。

定义撞击船与被撞船之间为自动面面接触,船体自身接触为自动单面接触^[20-21],撞击船与被撞击船碰撞接触以及船体自身接触的动摩擦系数取为0.2,静摩擦系数取为0.18^[22-23]。对船体结构划分Lagrange型网格,对水域划分ALE型网格,计算模型如图13所示。

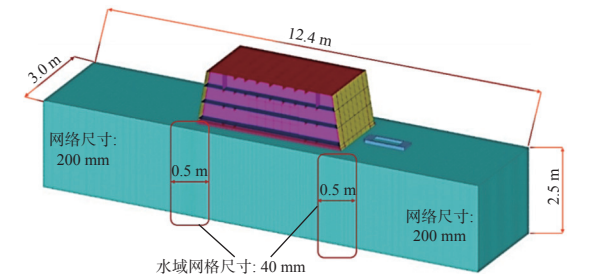
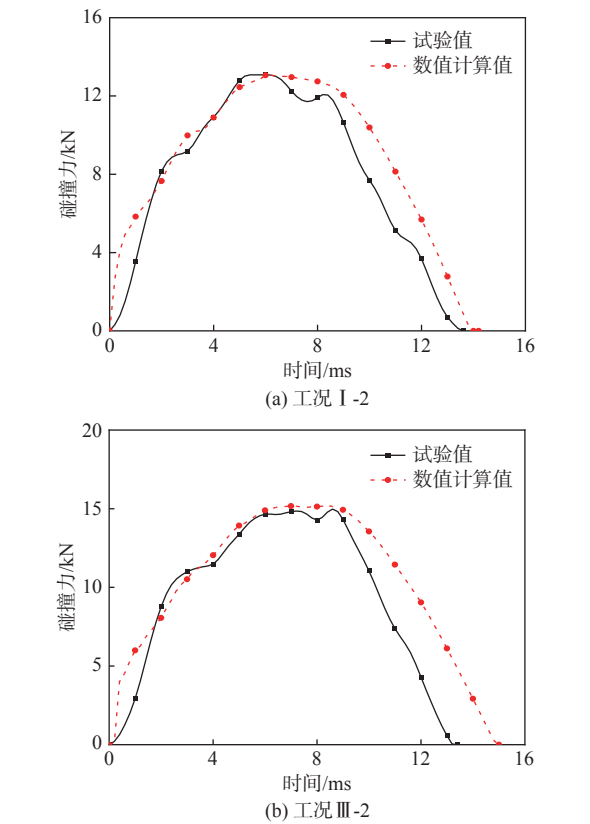


图 13 碰撞过程中流固耦合的数值计算模型
Fig. 13 Numerical calculation model of fluid-structure interaction in collision process

选取不同碰撞位置工况中最接近平均等效质量的试验工况进行数值计算分析,包括工况I-2,III-2,IV-1和V-2。将各数值计算结果与对应的试验数据进行对比分析,如图14所示,可以发现,数值计算结果能够准确描述接触力峰值以及碰撞持续时间。各工况下的碰撞接触力响应峰值及碰撞持续时间如表9所示。从中可以发现,针对碰撞接触力响应峰值的误差均在4%以内,验证了采用数值计算方法对碰撞试验过程进行计算的可靠性。



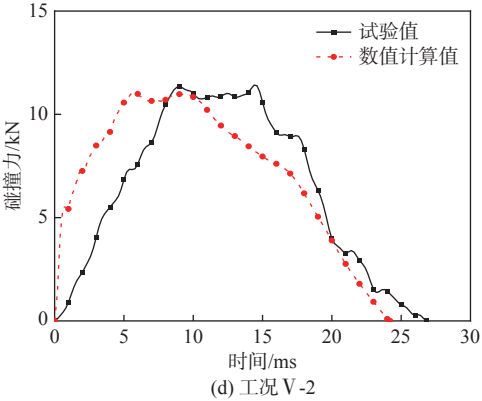
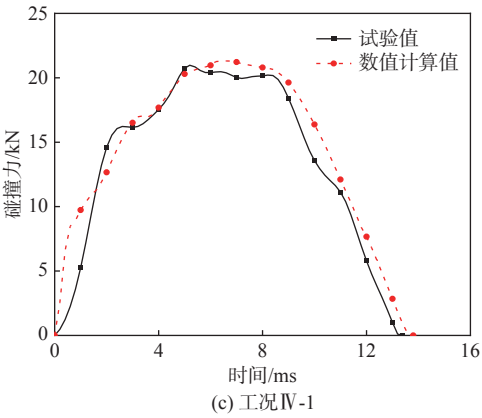


图 14 部分试验工况下 ALE 数值计算结果与试验值的对比
Fig. 14 Comparison between ALE numerical calculation results and test values under some test working conditions

表 9 部分试验工况下的数值仿真计算值
Table 9 Numerical simulation calculation value of some test working conditions

工况编号	碰撞力峰值/kN		误差/%
	试验值	数值计算值	
I-2	13.09	13.07	-0.15
III-2	14.98	15.20	1.47
IV-1	20.98	21.31	1.57
V-2	11.42	11.07	-3.06

4 水域对被撞船的影响分析

水域流场对被撞船的影响, 采用等效阻力形式的附加惯性力进行描述。为合理模拟等效阻力的影响, 考虑将其设置到被撞船碰撞位置的另一舷侧, 以面力的形式施加到舷侧外板上。对于低速船, 结合流体对船舶的摩擦阻力, 引入了系数 A 以及撞击船与被撞船的质量比。

$$f_{eq} = (C_f + \Delta C_f) \cdot \frac{1}{2} \rho v^2 S \cdot A \cdot \sqrt{\frac{m_1}{m_2}} \tag{4}$$

式中: f_{eq} 为等效阻力; C_f 为光滑阻力系数, 文献 [24] 给出了不同油漆情况、不同类型 14 条船

在自航试验时所得的摩擦阻力, 取为 0.001 4; ΔC_f 为摩擦阻力系数, 针对一般船舶, 我国取为 0.000 4; ρ 为水的密度, 取为 1 000 kg/m³; v 为船舶运动速度; S 为船舶湿表面积; A 为系数; m_1 为撞击船质量; m_2 为被撞船质量。

为讨论撞击船与被撞船的质量比这一参数对等效阻力的影响(其大致呈 1/2 次关系), 开展了系列数值仿真计算, 用以验证式(4)的可靠性。选用了较简单的研究对象来开展水域影响参数分析及简化的计算方法研究。被撞船模型船长 11.5 m, 船宽 3 m, 型深 2 m, 吃水 1.2 m, 沿船长方向布置有 5 个横舱壁, 包括 4 层甲板; 被撞船结构各板材的板厚均为 14 mm, 采用 8 倍厚网格建模, 网格尺寸为 100 mm, 网格总数为 23 824, 如图 15 所示。撞击头选用某型船的球鼻艏, 长 1.2 m, 宽 0.9 m, 高 1.2 m, 网格尺寸为 20 mm, 网格总数为 5 751, 如图 16 所示。

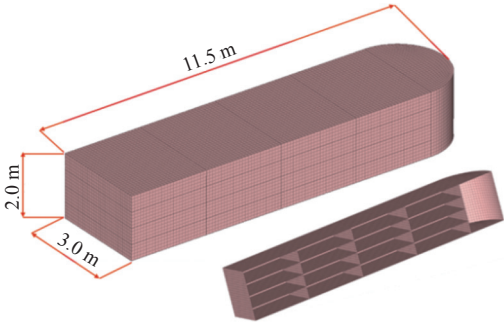


图 15 被撞船数值模型
Fig. 15 Numerical model of collided ship

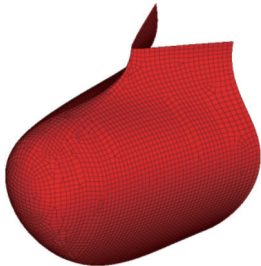


图 16 球鼻艏结构数值模型
Fig. 16 Numerical model of bulbous bow structure

考虑到被撞船的质量为 40 t, 故设置了 8, 10, 16 和 20 t 这 4 种撞击船质量, 质量比分别为 1/5, 1/4, 2/5 和 1/2, 碰撞速度选取 1.0 和 1.5 m/s, 共计 8 种计算工况, 如表 10 所示。对于球鼻艏撞击被撞船的舱壁肋位, 采用第 3 节中提到 ALE 算法开展数值计算, 其模型如图 17 所示。

根据流体对低速船舶的摩擦阻力公式, 初步估算出各工况的流体摩擦力, 随后调整各计算工况施加的等效阻力 f_{eq} 值, 以面力的形式施加到舷侧外板上, 如图 18 所示, 以使开展简化数值计算

表 10 简化分析模型数值计算工况

Table 10 Numerical calculation working conditions of simplified analysis model

工况号	撞击船质量/t	碰撞速度/(m·s ⁻¹)
1	8	1.0
2	8	1.5
3	10	1.0
4	10	1.5
5	16	1.0
6	16	1.5
7	20	1.0
8	20	1.5

表 11 简化分析模型数值计算的接触力响应峰值

Table 11 Peak value of contact force response in numerical calculation of simplified analysis model

工况号	碰撞力峰值/kN			f_{eq}/N
	ALE算法	不施加等效阻力	施加等效阻力	
1	1 832.17	1 813.04	1 832.28	140
2	2 274.60	2 258.80	2 274.96	200
3	1 928.74	1 905.26	1 928.32	150
4	2 359.38	2 337.98	2 359.22	225
5	2 113.08	2 075.97	2 113.06	200
6	2 554.18	2 509.91	2 555.01	275
7	2 198.01	2 145.81	2 199.07	240
8	2 658.92	2 597.13	2 657.78	290

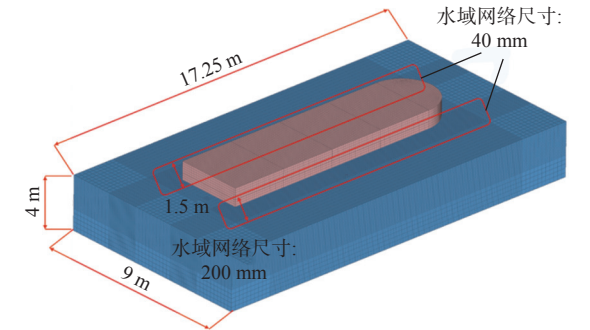


图 17 简化分析模型的 ALE 数值计算模型

Fig. 17 ALE numerical calculation model of simplified analysis model

得到的碰撞接触力峰值与对应的由 ALE 算法得到的碰撞接触力峰值间的误差尽可能小。通过大量的数值计算,统计得到各计算工况下的 f_{eq} 值如表 11 所示。

整理上述工况下的等效阻力,得到拟合曲线如图 19 所示。从中可见,当撞击船以相同的碰撞速度撞击相同部位时,其等效阻力及撞击船与被撞船的质量比呈现一定的规律,图中质量比 $\dot{m} = m_1/m_2$ 。随后,进一步对其进行了 1/2 次函数拟合分析,得到等效阻力与质量比的关系,其中拟合函数与数值仿真数据的相关系数 R^2 分别达 0.991 和 0.993,呈现良好的相似性。因此,可以视为“等效阻力”与撞击船和被撞船的质量比呈 1/2 次方关系。

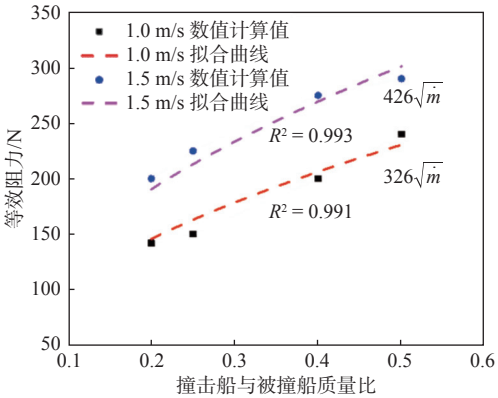


图 19 等效阻力与质量比关系拟合曲线

Fig. 19 Fitting curves of the relationship between equivalent resistance and mass ratio

综上所述,将撞击船与被撞船的质量比作为等效阻力的影响因素是合理的。分析上述数值计算模型以及所开展的试验,发现试验中部分工况下的速度在 1 m/s 附近,且碰撞区域多为强肋位,因此通过上述 1 m/s 系列仿真计算结果,将系数 A 取为 5.42,并用于后续针对复杂舱段水上碰撞试验的简化数值计算中,对应的等效阻力根据式(5)计算。

$$f_{eq} = 5.42(C_f + \Delta C_f) \cdot \frac{1}{2} \rho v^2 S \cdot \sqrt{\frac{m_1}{m_2}} \quad (5)$$

5 舱段碰撞响应简化数值计算分析

针对复杂舱段开展典型工况下的简化数值计算,水域流场对撞击船的影响采用等效质量的方式模拟,通过等效阻力形式的附加惯性力,模拟周围水域对被撞船运动的阻碍作用。其中,等效阻力的施加方式如图 20 所示,对于设置于试验模型水下部分的舷侧部分,其方向与撞击方向相反。在碰撞试验中,其湿表面积 $S = 26.85 \text{ m}^2$,根

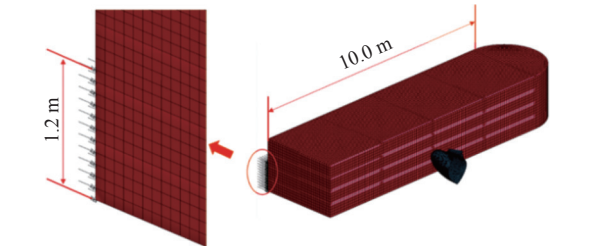


图 18 简化分析模型的等效阻力施加方式

Fig. 18 Application method of equivalent resistance of simplified analysis model

据式(5), 计算得到的典型工况下的等效阻力如表 12 所示。

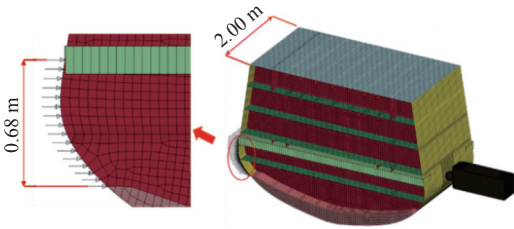


图 20 舱段模型的等效阻力施加方式
Fig. 20 Application method of equivalent resistance of cabin model

表 12 典型工况对应的等效阻力
Table 12 Equivalent resistance corresponding to typical working conditions

工况编号	碰撞速度/(m·s ⁻¹)	等效阻力/N
I -2	0.530	5.51
Ⅲ-2	0.631	7.82
Ⅳ-1	0.854	14.33
V -2	0.813	12.99

将试验工况 I -2、Ⅲ-2、Ⅳ-1 和 V -2 中的结构碰撞接触力响应数值计算结果与上述 ALE 仿真计算和试验结果进行对比, 结果如图 21 所示。从中可以发现, 当采用简化数值计算方法时, 撞击船与舱段结构的碰撞接触时间较长, 同时碰撞力峰值时刻靠后, 但碰撞力峰值相近。

在水上碰撞试验过程中, 撞击船的初始动能将转化为撞击船与被撞船的剩余动能、被撞船的

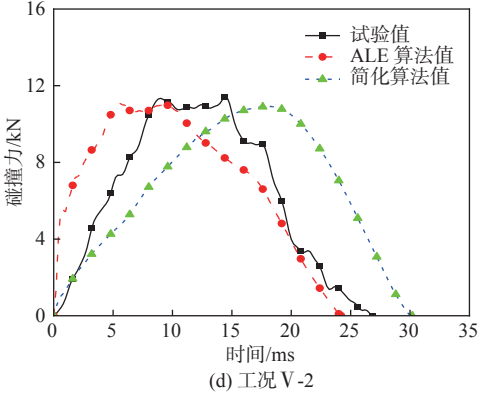
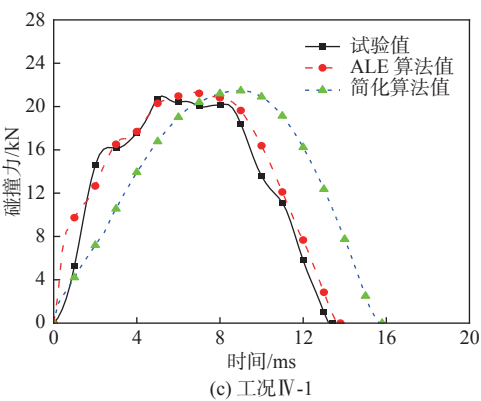


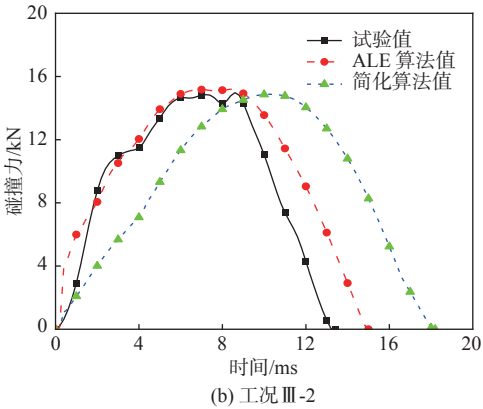
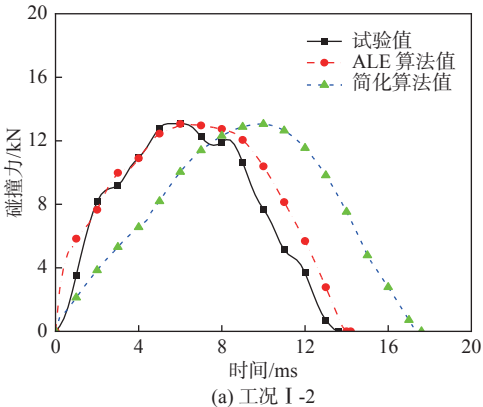
图 21 典型工况中碰撞力响应对比
Fig. 21 Comparison of impact force response under typical working conditions

塑性变形能以及周围水域吸收的内能等, 其中水域的存在则会消耗系统内部的能量; 而采用简化数值计算方法时, 将周围流场的影响效应以外力的形式施加到被撞船上, 使系统内的能量转化成撞击船的初始动能, 外部能量转化为撞击船与被撞船的剩余动能以及被撞船的塑性变形能, 因此, 该系统内部的转化能量要高于实际的碰撞试验, 其使碰撞接触时间长于实际试验, 并使达到峰值的时刻延后。

采用简化数值计算方法可以模拟周围流场对被撞物运动状态的影响, 同时舱段结构的碰撞接触力响应峰值也与实际试验值相近。表 13 为典型工况下采用不同方法得到的碰撞力峰值。从中可以看出, 采用简化计算方法得到的碰撞力峰值与试验值间的误差均在 5% 以内。

表 13 典型工况下采用不同方法时的碰撞力响应峰值
Table 13 Peak value of impact force response under typical working conditions with different methods

工况编号	碰撞力峰值/kN		误差/%	碰撞力峰值/kN		误差/%
	试验值	ALE算法值		简化计算值		
I -2	13.09	13.07	-0.15	13.05		-0.31
Ⅲ-2	14.98	15.20	1.47	14.88		-0.67
Ⅳ-1	20.98	21.31	1.57	21.46		2.29
V -2	11.42	11.07	-3.06	10.92		-4.38



采用本节所提简化数值计算方法不需要建立详细的水域网格单元,将水域的影响分别以等效质量和等效阻力的形式进行模拟分析,能够极大地缩减数值计算时间。提取上述数值计算分析中同一工况下 ALE 算法的计算时间和简化数值计算方法的 CPU 计算时间进行了比较,具体如表 14 所示。

表 14 两种方法计算时长对比
Table 14 Comparison of calculation duration of two methods

计算时长/s		降低率/%
ALE算法	简化计算方法	
9 694	260	97

6 结 论

本文以某试验舱段为被撞船模型,针对不同碰撞位置和碰撞速度开展了水上碰撞试验,重点分析了撞击船的运动历程以及撞击船与试验舱段模型的碰撞接触力响应数据,并在此基础上分析了水域对撞击船和被撞船的影响,提出了不建立水域网格单元的简化数值计算方法,主要得到如下结论:

- 1) 通过整理试验测试所得的碰撞力响应数据以及撞击船加速度数据,得到了各试验工况下撞击船的等效质量,结果显示周围水域对撞击物的运动呈现减弱作用,也即降低了撞击载荷输入,降低比例约为 2.1%。
- 2) 分别采用 ALE 流固耦合算法和简化数值计算方法针对复杂舱段碰撞试验开展的数值仿真计算显示,采用这 2 种数值仿真方法均能合理、有效地得到碰撞过程中结构的碰撞力响应,但采用简化数值计算方法所需要的计算时长远小于 ALE 流固耦合算法,降低比例约为 97%。
- 3) 本文所采用的等效阻力的简化数值计算方法有一定的局限性,仅验证了低速碰撞情况,今后还需开展深入的研究。

参考文献:

[1] 刘昆,王自力,张延昌,等.基于全耦合技术的船体结构碰撞性能研究[J].船舶力学,2015,19(5): 574-581.
LIU K, WANG Z L, ZHANG Y C, et al. Collision behavior of structural analysis in ship collisions based on full-coupling technology[J]. Journal of Ship Mechanics, 2015, 19(5): 574-581 (in Chinese).

[2] 郭桐桐,张爱锋,俞白兮.基于 LS-DYNA 的带球封头耐压结构深海碰撞仿真[J].船舶力学,2021,25(2): 210-219.

GUO T T, ZHANG A F, YU B X. Underwater collision simulation of the pressure hull with spherical head based on LS-DYNA[J]. Journal of Ship Mechanics, 2021, 25(2): 210-219 (in Chinese).

[3] 王自力,顾永宁.船舶碰撞动力学过程的数值仿真研究[J].爆炸与冲击,2001,21(1): 29-34.
WANG Z L, GU Y N. Numerical simulations of ship/ship collisions[J]. Explosion and Shock Waves, 2001, 21(1): 29-34 (in Chinese).

[4] 江华涛,顾永宁.整船碰撞非线性有限元仿真[J].上海造船,2002(2): 16-21.
JIANG H T, GU Y N. Numerical simulation of ship-ship collision[J]. Shanghai Shipbuilding, 2002(2): 16-21 (in Chinese).

[5] MINORSKY V U. An analysis of ship collisions with reference to protection of nuclear power plants[J]. Journal of Ship Research, 1959, 3(2): 1-4.

[6] BROWN A J. Collision scenarios and probabilistic collision damage[J]. Marine Structures, 2002, 15(4/5): 335-364.

[7] MOTORA S, FUJINO M, SUGIURA M, et al. Equivalent added mass of ship in the collision[J]. Journal of the Society of Naval Architects of Japan, 1969, 1969 (126): 141-152.

[8] BLOK J J, BROZIUS L H, DEKKER J N. The impact loads of ships colliding with fixed structures[C]//Off-shore Technology Conference. Houston, Texas, 1983.

[9] 王自力,顾永宁.撞击参数对双层舷侧结构碰撞响应的影响[J].船舶工程,2000(6): 13-16.
WANG Z L, GU Y N. Influence of impact condition on behavior of double side structure in collision[J]. Ship Engineering, 2000(6): 13-16 (in Chinese).

[10] 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 Z L, JIANG Z Y, GU Y N. An added water mass model for numerical simulation of ship/ship collisions[J]. Explosion and Shock Waves, 2002, 22(4): 321-326 (in Chinese).

[11] 谭忠华.船舶碰撞机理的数值仿真与试验研究[D].武汉:武汉理工大学,2012.
TAN Z H. Numerical simulation and experimental study on ship collision mechanism[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2012 (in Chinese).

[12] 叶剑平,刘俊杰,万正权,等.潜艇受撞数值仿真的附加质量模型[J].船舶力学,2013,17(5): 513-521.
YE J P, LIU J J, WAN Z Q, et al. Added mass model for numerical simulation of submarine collision[J]. Journal of Ship Mechanics, 2013, 17(5): 513-521 (in Chinese).

[13] 张娅.船舶碰撞过程中的附加质量研究[D].武汉:武汉理工大学,2016.
ZHANG Y. The added mass research in the process of ship collision[D]. Wuhan: Wuhan University of Techno-

- logy, 2016 (in Chinese).
- [14] SONG M, KIM E, AMDAHL J, et al. A comparative analysis of the fluid-structure interaction method and the constant added mass method for ice-structure collisions [J]. *Marine Structures*, 2016, 49: 58–75.
- [15] SONG M, MA J, HUANG Y. Fluid-structure interaction analysis of ship-ship collisions[J]. *Marine Structures*, 2017, 55: 121–136.
- [16] LIU B, VILLAVICENCIO R, ZHANG S, et al. A simple criterion to evaluate the rupture of materials in ship collision simulations[J]. *Marine Structures*, 2017, 54: 92–111.
- [17] 张军, 蔡晓伟, 宣建明, 等. 弹体穿越冰水混合物流动过程的数值模拟 [J]. *弹道学报*, 2020, 32(3): 35–40.
- ZHANG J, CAI X W, XUAN J M, et al. Numerical simulation of flow filed of projectile passing through ice water mixture[J]. *Journal of Ballistics*, 2020, 32(3): 35–40 (in Chinese).
- [18] 刘东. 基于流固耦合方法的船撞桥梁冲击响应分析 [D]. 成都: 西南交通大学, 2020.
- LIU D. Impact response analysis of ship-pier collision based on fluid-structure coupling method[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2020 (in Chinese).
- [19] TREVINO T. Applications of arbitrary Lagrangian-Eulerian (ALE) analysis approach to underwater and air explosion problems[D]. Monterey: Naval Postgraduate School, 2018.
- [20] MARINATOS J N, SAMUELIDES M S. Towards a unified methodology for the simulation of rupture in collision and grounding of ships[J]. *Marine Structure*, 2015, 42: 1–32.
- [21] 肖桃云, 王涛. 三峡库区船舶碰撞能量损失方法的研究 [J]. *中国舰船研究*, 2008, 3(5): 25–31.
- XIAO T Y, WANG T. Energy loss during ship-ship collisions in the Sanxia reservoir[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2008, 3(5): 25–31 (in Chinese).
- [22] ZHANG A, SUZUKI K. Dynamic FE simulations of the effect of selected parameters on grounding test results of bottom structures[J]. *Ships and Offshore Structures*, 2006, 1(2): 117–125.
- [23] SHI Y C, HAO H, LI Z X. Numerical derivation of pressure-impulse diagrams for prediction of RC column damage to blast loads[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2008, 35(11): 1213–1227.
- [24] 盛振邦, 刘应中. 船舶原理-下册 [M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2004.
- SHENG Z B, LIU Y Z. Ship principle[M]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press, 2004 (in Chinese).

相关论文

- [1] 胡艺, 丁仕风, 周利, 等. 船舶护舷结构抗碰撞动态模拟 [J]. 中国舰船研究, 2022, 17(6): 261–270.
<http://www.ship-research.com/cn/article/doi/10.19693/j.issn.1673-3185.02421>
- [2] 杨碧野, 黄志刚, 刘宁, 等. 船舶舷侧与小型冰山碰撞数值模拟分析 [J]. 中国舰船研究, 2021, 16(5): 78–86. <http://www.ship-research.com/cn/article/doi/10.19693/j.issn.1673-3185.02220>
- [3] 蔡伟, 朱凌, 毕璐泽. 浮冰碰撞下船体板塑性动力响应预测方法 [J]. 中国舰船研究, 2021, 16(5): 95–100. <http://www.ship-research.com/cn/article/doi/10.19693/j.issn.1673-3185.02217>
- [4] 蔡伟, 朱凌. 冰碰载荷下船体板弹塑性动力响应分析 [J]. 中国舰船研究, 2020, 15(6): 155–161. <http://www.ship-research.com/cn/article/doi/10.19693/j.issn.1673-3185.01804>
- [5] 张新宇, 曹俊伟, 骆伟, 等. 双壳船体结构在楔形物撞击下的损伤特性试验及数值仿真分析 [J]. 中国舰船研究, 2019, 14(1): 89–94. <http://www.ship-research.com/cn/article/doi/10.19693/j.issn.1673-3185.01452>
- [6] 刘敬喜, 崔濛, 龚榆峰. 船舶碰撞仿真失效准则比较 [J]. 中国舰船研究, 2015, 10(4): 79–85.
<http://www.ship-research.com/cn/article/doi/10.3969/j.issn.1673-3185.2015.04.012>
- [7] 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. <http://www.ship-research.com/cn/article/doi/10.3969/j.issn.1673-3185.2015.03.010>