

波浪对船舶碰撞影响研究

宋 明, 马 骏*, 黄 一

(大连理工大学 船舶工程学院, 辽宁 大连 116024)

摘要: 船舶碰撞多发生在一些比较恶劣的海况下, 事实上碰撞过程是碰撞作用和外部环境荷载作用的耦合. 基于非线性有限元方法, 建立了考虑波浪作用的船舶碰撞模型, 对碰撞过程进行了数值仿真模拟. 将有无波浪存在下的碰撞结果进行了对比, 并分析了波浪波高以及波浪入射角度对被撞船舷侧结构的影响. 结果表明, 在一定情况下波浪对碰撞过程有不利的影响, 并从工程角度给出一些指导建议.

关键词: 船舶碰撞; 结构损伤; 数值仿真; 碰撞力; 能量; 波浪

中图分类号: U661.43 **文献标识码:** A **doi:** 10.7511/dllgxb201404010

0 引言

船舶碰撞是船舶营运中一种常见的海损事故, 轻者会引起船体结构破损, 重者可能导致人员伤亡、环境污染等灾难性的后果. 因此开展船舶碰撞研究对于保证航海安全和保护环境意义重大, 逐渐引起人们的高度关注. 许多学者对此问题进行了广泛研究和深入探讨, 近年来取得了重大成果^[1].

与船舶碰撞相关的要素有碰撞性质、碰撞强度、被撞船状况、环境条件, 以及结构承受碰撞的能力^[2]. Zhang^[3]基于刚体碰撞力学的一般理论, 分析了船舶碰撞过程中的能量耗散问题; 王自力等^[4]应用非线性有限元仿真方法研究了超大型油船双壳舷侧结构的碰撞性能, 分析了各个构件的损伤模式和吸能特性; 马骏等^[5]研究了初速度对被撞船舷侧结构的影响; Kitamura^[6]提出了数值仿真中一些不确定因素例如船体梁弯曲、被撞船速度等对结构耐撞性的影响.

船舶发生碰撞多是在一些比较恶劣的海况下, 船舶发生碰撞的同时往往要受到风、浪、流荷载的作用. 事实上碰撞过程是碰撞作用和外部环境荷载作用的耦合, 但是目前研究没有全面考虑碰撞时的环境条件. 本文首先通过公式计算作用于被撞船舶上的波浪荷载, 基于非线性有限元软件 ANSYS/LS-DYNA, 将波浪荷载做准静力方

法处理, 使其融入船舶碰撞数值仿真, 重点研究波浪参数(波高、周期, 以及入射角度)对船舶碰撞结构动力响应的影响.

1 作用于船舶上的波浪荷载

作用于船舶上的波浪荷载, 与波浪特性(波高、周期、波浪入射角度等)有关, 同时也与船舶本身尺度(船长、船宽、吃水深度)、载度(满载、半载、压载)和运动特性(横摇、纵摇、升沉)等有关. 建立作用于船舶上的波浪荷载计算公式, 将波浪荷载以平行于船身的纵向力和垂直于船身的横向力表示^[7].

横向力 F_x 计算公式如下:

$$F_x = xH(1 + \sqrt{|\sin \theta|})LDa_x \rho g \sin \theta \quad (1)$$

式中: x 为综合系数, 根据模型试验取值为 0.05; H 为入射波高; θ 为波浪入射角度(波向与船舶纵轴线夹角); a_x 为反映船舶横摇与波浪周期关系的参数, $a_x = \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \left(\frac{T_x}{T}\right)^2\right)^2 + 4\left(\frac{T_x}{T}\right)^2 \mu_x^2}}$, T 为

波浪周期, T_x 为横摇周期, μ_x 为船舶横摇无因次系数, $\mu_x = 0.3 \frac{W}{W_f}$, W 为船舶排水量, W_f 为满载排水量; D 为船舶吃水; L 为船舶垂线间长; ρ 为海水密度; g 为重力加速度.

纵向力 F_y 计算公式如下:

$$F_y = yH(1 + \sqrt{|\cos \theta|})BDa_y \rho g \cos \theta \quad (2)$$

式中： y 为综合系数，根据模型试验取值为 0.05； a_y 为反映船舶纵摇与波浪周期关系的参数， $a_y =$

$$\frac{1}{\sqrt{\left(1 - \left(\frac{T_y}{T}\right)^2\right)^2 + 4\left(\frac{T_y}{T}\right)^2 \mu_y^2}}, T_y \text{ 为纵摇周期}, \mu_y$$

为船舶纵摇无因次系数， $\mu_y = 0.3 \frac{W}{W_f}$ ； B 为船舶宽度。

2 碰撞数值仿真的关键技术

2.1 材料模型和失效准则

船舶碰撞是一个非线性动态响应过程。材料一般都要进入塑性流动阶段，而且在高应变率下具有明显的动力特性，屈服应力和拉伸强度随应变率的增加而增加，其碰撞区结构的材料本构关系是影响仿真结果的重要因素。因此，在船舶碰撞仿真中必须引入弹塑性模型，并且考虑应变率敏感性的影响。

本文采用 ANSYS/LS-DYNA 提供的塑性动态模型，其材料的本构关系由下式表达：

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

式中：初始屈服应力 $\sigma_0 = 0.235 \text{ GPa}$ ；塑性硬化模量 $E_p = E_h E / (E - E_h)$ ，弹性模量 $E = 210 \text{ GPa}$ ，硬化模量 $E_h = 1.18 \text{ GPa}$ ； $\dot{\epsilon}$ 为应变率； β 是硬化参数； ϵ_p^{eff} 为等效塑性应变； C 和 p 为 Cowper-Symonds 应变率系数，对于一般钢材 $C = 40.4$ ， $p = 5^{[8]}$ 。

使用 LS-DYNA 程序进行计算时，采用如下的准则作为判断单元失效的依据：在每一个时间积分步后，如果计算出的单元等效塑性应变 ϵ_p^{eff} 大于事先定义的单元最大塑性失效应变 $\epsilon_{p\text{max}}$ ，那么单元失效，则在以后的计算中该单元没有刚度，不再承受任何荷载。本文选取材料断裂真实应变 $\epsilon_{\text{true}} = 0.35^{[9]}$ 作为单元最大塑性失效应变 $\epsilon_{p\text{max}}$ 的值，从而以此为材料失效的判据。

2.2 接触定义

接触问题的处理是船体结构碰撞计算中重要而困难的部分。碰撞过程中，接触边界是不断变化的，计算中必须不断地对接触边界进行搜寻。在可能发生接触作用的结构之间定义接触面，接触面能有效地模拟相撞结构之间的相互作用，并允许结构之间连续不断的接触和滑动。一般接触定义有 3 种：面与面的主-从接触、离散点与面的主-从

接触和单面接触。

本文采用面与面的主-从接触算法。主-从接触面包括从面和主面，它们分别定义在船艏和舷侧上，碰撞开始前是互相分开的。在求解的每一时间步，检查从属节点的位置坐标，看它是否已经穿透主面，如果还没有穿透，则计算工作不受影响地继续进行；如果已经穿透，则在垂直于主面的方向上施加一作用力以阻止从属节点的进一步穿透。这个作用力就是接触力。另外考虑到部分构件由于屈曲变形会发生与自身接触，而在船艏内部与舷侧的内部结构上定义了单面接触。

2.3 流固耦合法

船舶碰撞属于一种典型的流固耦合现象。碰撞发生时，由于撞击荷载的巨大作用，船舶将发生局部变形和刚体运动，其周围的流场也会随之发生相应改变，这种流场的变化反过来又会影响到船体的运动和变形，这样层次的耦合，就形成了流体-结构相互作用的流固耦合问题。

将船体结构及其周围的流体作为一个整体来考虑，结构部分采用 Lagrange 求解技术，而流体部分则采用 Euler 求解技术，并通过耦合技术将结构和流体联系在一起，使它们发生相互作用，相互作用力的传递和转换是通过耦合面来实现的。耦合面是定义在船体外边面上的一个封闭性空间曲面，它的主要任务和作用就是在 Lagrange 求解器和 Euler 求解器之间传递作用力，对流体而言，耦合面是一个流动边界，而对船体结构而言，它是一直变化的约束荷载。

3 碰撞数值模型建立

本文模型取两艘排水量相当的 2 万吨级双层舷侧结构船舶为研究对象。船长为 161 m，船宽为 27.4 m，型深为 13.5 m，吃水为 8.5 m，装载状态为满载。碰撞前，假设被撞船处于静止状态，其纵中剖面垂直于撞击船的前进方向。撞击船船速取为 4 m/s，这是考虑到实际碰撞中撞击船的一般航速，以及在 4 m/s 航速下两船可以发生相互嵌入。碰撞位置设为被撞船的中部货舱区，货舱长度为 32 m。

考虑到船舶碰撞的局限性以及求解时间等因素，只细化了撞击船船艏部分和被撞船舷侧部分，其余区域简化成刚体。采用流固耦合模型，如图 1 所示，考虑到碰撞过程中撞击船的主要运动为纵荡，而被撞船的主要运动为横移，船体周围水对被撞船影响较大，对撞击船影响较小，故将被撞船周

围流场融入仿真, 撞击船采用附连水质量处理^[10]. 被撞船周围的流场宽度取为 4 倍船宽, 长度为 1.5 倍船长, 深度为 2 倍吃水^[11]. 流场的 4 个侧面以及底面施加无反射边界条件.

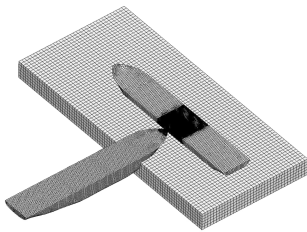


图 1 流固耦合模型

Fig. 1 Fluid-structure coupling model

波浪荷载的作用按准静力方法处理, 即忽略波浪的动力效应. 波浪力通过静力等效原则转化为船舶舷侧水线以下相应的节点压力变化. 本文中只考虑被撞船受波浪作用, 因此波浪入射角度定义为波向与被撞船纵轴线夹角.

4 算例分析

4.1 波浪对碰撞结果的影响

取波浪入射角为 90° , 即船横浪, 波高 3 m, 周期 8 s 工况与无波浪工况对比. 图 2 为碰撞力随着撞深的变化曲线, 碰撞力曲线表现出很强的非线性特征, 在碰撞过程的不同阶段船体结构出现了不同程度的卸载现象. 碰撞力的每一次卸载都代表了某种构件的失效或破坏. 在整个碰撞过程中, 曲线有两个明显峰值, 当撞深达到 1.57 m 时, 曲线出现第一个峰值, 代表外壳开始发生破裂; 当撞深达到 3.78 m 时, 曲线出现第二个峰值, 表示内壳开始发生破裂. 对比有无波浪情况下的碰撞力-撞深曲线, 可以看出在撞深达到 3.34 m 前, 碰撞力几乎一致, 当撞深超过 3.34 m 后, 有波浪情况下碰撞力较无波浪情况略微增大, 这是由于无波浪情况下的撞击船在碰撞力的作用下, 速度下降得快, 对被撞船的作用相对减小. 有波浪情况最大撞深为 4.33 m, 无波浪情况最大撞深为 4.26 m. 双层舷侧结构的碰撞分析是以内壳破裂作为极限条件, 内壳发生破裂时的撞深为极限撞深, 从曲线上可以看出有无波浪情况下的极限撞深几乎相同, 而有波浪情况下的最大撞深大于无波浪情况, 可以推论出如果无波浪情况下撞击船的最大撞深即将达到极限撞深, 内壳还未发生破裂, 那么在遭遇 3 m 高的横浪被撞船的内壳

就会发生破裂. 这是由于波浪力的作用推动被撞船靠近撞击船, 使撞深增大, 严重地危害了被撞船舷侧结构的安全性.

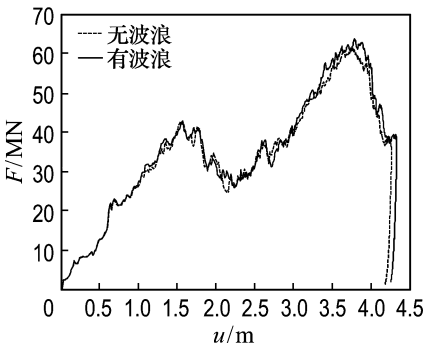
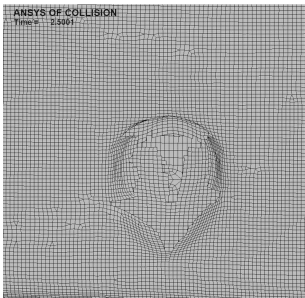


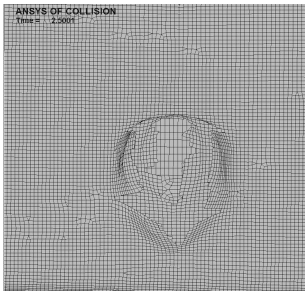
图 2 有无波浪作用下碰撞力-撞深曲线

Fig. 2 Contact force-penetration curve with or without wave load

图 3 为有无波浪情况下在碰撞 2.5 s 时刻的舷侧损伤变形图, 可以明显看出有横浪作用时的内壳损伤较大. 这是由于波浪力推动被撞船靠近撞击船, 使得撞深增大, 船艏与内壳板接触面积增大, 导致舷侧内壳损伤严重. 可见, 当船舶发生碰撞时, 横浪的作用对舷侧耐撞性是非常不利的, 在实际横浪中航行时, 应当更加小心以防发生碰撞事故.



(a) 无波浪



(b) 有波浪

图 3 2.5 s 时刻有无波浪舷侧损伤变形

Fig. 3 Damaged and deformed side shell with or without wave load at the 2.5 s moment

4.2 波高对碰撞结果的影响

选取波浪入射角度为 90° , 波高和周期以及按照式(1)和(2)计算作用于被撞船舶上的波浪荷载大小如表 1 所示.

表 1 波浪参数

Tab. 1 The parameters of wave

H/m	T/s	F_x/kN	F_y/kN
1.5	6.0	-883.2	0
2.5	7.5	-2 668.8	0
3.5	8.5	-5 247.0	0

图 4 为不同波高下的碰撞力随撞深变化曲线. 从图中可看出, 在碰撞初期, 波高对碰撞力的影响很小, 随着撞深增大, 1.5 m 波高下的碰撞力低于其他两种情况, 而 2.5 m 波高和 3.5 m 波高下的碰撞力值相近; 但随着波高增大, 最大撞深明显增大. 可见, 当波高达到一定高度后, 波高对碰撞力值的影响很小, 但是对于最大撞深影响很大. 在遭遇大波浪恶劣环境下, 如果被撞船处于横浪中发生碰撞, 将会是非常危险的.

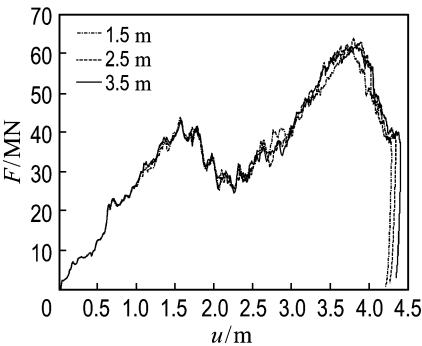


图 4 不同波高下碰撞力-撞深曲线

Fig. 4 Contact force-penetration curve under different heights of the wave

4.3 波浪入射角度对碰撞结果的影响

在波浪波高为 3 m, 周期为 8 s 条件下, 分别选取入射角度为 0° , 即船顺浪, 45° , 即船斜浪, 90° , 即船横浪等进行研究. 作用于被撞船舶上的波浪荷载大小如表 2 所示.

表 2 波浪荷载

Tab. 2 The wave load

$\theta/^\circ$	F_x/kN	F_y/kN
0	0	1 221.8
45	-2 487.9	795.2
90	-3 822.6	0

图 5 为波浪不同入射角度下的碰撞力随着撞

深变化的曲线, 根据撞深和结构损伤机理, 可以将整个碰撞过程分为 3 个部分.

(1) 撞深为 $0 \sim 2.20 \text{ m}$, 0° 入射的波浪作用下的碰撞力曲线出现明显不同, 这是由于被撞船只受纵向波浪力作用, 相当于被撞船具有前进速度, 导致外壳破裂受到影响.

(2) 撞深为 $2.20 \sim 3.78 \text{ m}$, 此阶段碰撞力大小基本一致, 这是由于此时撞击船舶处于内外壳之间, 船舶接触的舷侧构件几乎是一致的.

(3) 撞深大于 3.78 m , 此阶段内壳开始发生破裂, 入射角度为 0° 的最大撞深最小, 仅为 4.09 m , 因为波浪力作用推动被撞船前进, 使得撞击船舶受到切向作用力, 船舶变形, 吸能增大、动能减小, 故撞深减小显著. 由于入射 45° 时的波浪力作用可分解为横向力和纵向力, 从图中可看出入射 45° 时的碰撞力曲线基本与 90° 曲线一致, 这是由于船斜浪时受到的波浪横向力远远大于波浪纵向力. 波浪入射 90° 时的碰撞最大撞深最大.

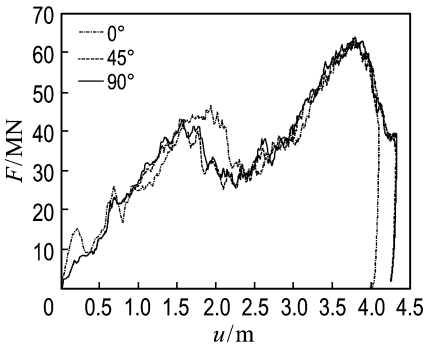


图 5 不同波浪入射角度下碰撞力-撞深曲线

Fig. 5 Contact force-penetration curve at different incident angles of the wave

5 结 论

(1) 通过对波浪作用下的船舶碰撞结果分析, 发现一定情况下波浪对碰撞过程有不利影响.

(2) 对比有无波浪作用下的碰撞结果, 可见横浪对被撞船舷侧外壳板破裂和吸能影响极小, 但是波浪横向力的作用导致内壳板最大碰撞力较无波浪时有所提高, 撞深增大, 舷侧内壳结构损伤更加严重. 假设无波浪环境下, 最终被撞船内壳处于临界破裂状态, 那么在遭遇横浪时, 被撞船的内壳将会发生破裂, 这是非常危险的.

(3) 当被撞船处于横浪中时, 考虑波高的影响, 随着波高的增大, 推动被撞船靠近撞击船的波浪横向力增大, 碰撞撞深增加, 将导致被撞船舷侧

结构损害更严重。

(4)考虑波浪入射角度对船舶碰撞的影响,可见,顺浪对被撞船舷侧外壳破裂影响显著,最大撞深减小;横浪主要对被撞船舷侧内壳影响较大,造成最大撞深增加。故船舶在横浪中行驶时,更应该注意碰撞问题。

参考文献:

- [1] 许文辉,姚熊亮,杨 博,等. 传统双层舷侧结构的碰撞数值仿真研究[J]. 船舶, 2010, **21**(5):18-22.
XU Wen-hui, YAO Xiong-liang, YANG Bo, *et al.* Numerical simulations of traditional double-sided structure in collision [J]. **Ship & Boat**, 2010, **21**(5):18-22. (in Chinese)
- [2] 祁恩荣,崔维成. 船舶碰撞和搁浅研究综述[J]. 船舶力学, 2001, **5**(4):67-80.
QI En-rong, CUI Wei-cheng. A state-of-the-art review on ship collision and grounding [J]. **Journal of Ship Mechanics**, 2001, **5**(4):67-80. (in Chinese)
- [3] Zhang S M. The mechanics of ship collision [D]. Kgs. Lyngby: Technical University of Denmark, 1999.
- [4] 王自力,顾永宁. 超大型油船双壳舷侧结构的碰撞性能研究[J]. 中国造船, 2002, **43**(1):58-63.
WANG Zi-li, GU Yong-ning. Study on behavior of double-sided structure of VLCC in collisions [J]. **Shipbuilding of China**, 2002, **43**(1):58-63. (in Chinese)
- [5] 马 骏,陶 亮. 初速度对被撞船舶舷侧结构影响[J]. 大连理工大学学报, 2008, **48**(1):90-94.
MA Jun, TAO Liang. Effect of initial velocity on structure of collided ship [J]. **Journal of Dalian**

- University of Technology**, 2008, **48**(1):90-94. (in Chinese)
- [6] Kitamura O. FEM approach to the simulation of collision and grounding damage [J]. **Marine Structures**, 2002, **15**(5):403-428.
- [7] 孟祥瑞,高学平,张文忠,等. 波浪作用下船舶系缆力的计算方法[J]. 天津大学学报, 2011, **44**(7):593-596.
MENG Xiang-wei, GAO Xue-ping, ZHANG Wen-zhong, *et al.* A calculation method of mooring force induced by wave [J]. **Journal of Tianjin University**, 2011, **44**(7):593-596. (in Chinese)
- [8] Kitamura O. Comparative study on collision resistance of side structure [J]. **Marine Technology**, 1998, **34**(2):1-4.
- [9] 高 震. 船舶碰撞数值仿真技术与 FPSO 船侧耐撞结构研究[D]. 上海:上海交通大学, 2003.
GAO Zhen. Research on numerical simulations of ship collisions and characteristics of FPSO ship side structure in collision [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2003. (in Chinese)
- [10] 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 Zi-li, GU Yong-ning. Numerical simulations of ship/ship collisions [J]. **Explosion and Shock Waves**, 2001, **21**(1):29-34. (in Chinese)
- [11] 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)

Study of effect of wave on ship collision

SONG Ming, MA Jun*, HUANG Yi

(School of Naval Architecture, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: Ship collision often takes place under the severe sea conditions. In fact, collision process is the coupling of contact force and external environmental load. Based on the non-linear finite element method, ship collision model considering the effect of wave is built, and the collision process is simulated numerically. The results of collision under conditions with or without wave are compared and the influence on side structure by the wave heights and incident angle of the wave is analyzed. The results of simulation indicate that wave has negative effects on ship collision, and some guidance and suggestions are given from the viewpoint of engineering.

Key words: ship collision; structure damage; numerical simulation; contact force; energy; wave