

# 600 吨级船首部碰撞与结构响应研究

朱 强

(泰州市地方海事局 船检科, 江苏 泰州 225300)

**摘 要:**利用显式非线性有限元动态分析技术,对 600 吨船首部区域结构的碰撞特性进行了数值仿真研究。首先,采用流固耦合法对船舶碰撞的整个过程进行真实有效的仿真,获得被撞船的损伤变形、碰撞速度和碰撞力的时序结果。然后,采用附加质量法研究船首结构耐撞性能,对其结果进行比较。在此基础上,进一步考察了撞击参数(速度、角度等)对被撞船首部区域结构碰撞特性的影响。

**关键词:**流固耦合;附加质量;碰撞;损伤变形

**中图分类号:**U661.4

**文献标识码:**A

**文章编号:**1671-9891(2018)03-0029-07

## 0 引言

现实中船舶和流体是不可分的,当两船碰撞时会涉及周围流体对船体的影响。本研究首先采用流固耦合法对两船碰撞的整个过程进行真实有效的仿真,获得被撞船的损伤变形、碰撞速度、碰撞力的时序结果。然后采用附加质量法对其碰撞的结果进行比较。在此基础上,进一步考察撞击参数(速度、角度等)对被撞船首部区域结构耐撞性能的影响。

## 1 600 吨级船主要参数介绍

600 吨级船主要参数包括:总长约 70.00 m,设计水线长 64.50 m,型宽 8.70 m,型深 5.00 m,设计吃水 2.537 m,梁拱 0.15 m,满载排水量 640 t,肋距 0.50 m。该船基本结构如图 1 所示。

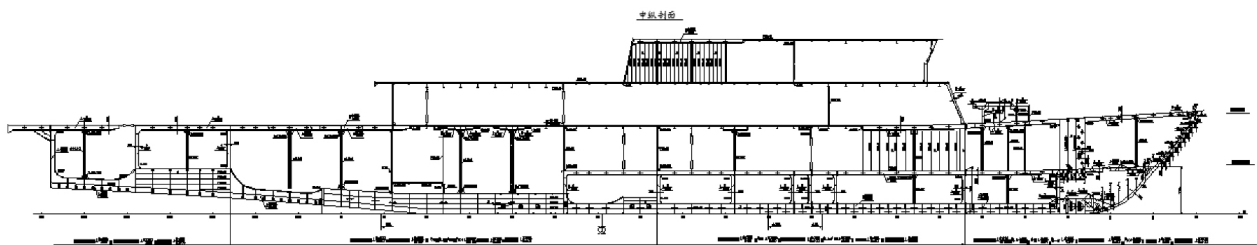


图 1 600 吨级船中纵剖面

## 2 碰撞结构的设置

**被撞船模型范围:**被撞船取全船有限元模型,其中目标撞击区域船首向后延伸至横舱壁且不小于 0.33 倍船长的纵向范围、内外舷板之间的横向范围、型深的垂向范围内的所有结构构件均应真实模拟,其他区域的板结构应在模型中予以表达。

**撞击船模型范围:**撞击船取全船有限元模型,其中船舶首部防撞舱壁向船首的纵向范围、船宽的横向范围、型深的垂向范围内的所有构件均应真实模拟,其他区域的板结构应在模型中予以表达。船舶有限元模型如图 2 所示。

撞击船的附连水质量取撞击船总重量的 0.05 倍。被撞船的附连水质量根据与撞击船的夹角大小确定。90°碰撞时,被撞船的附连水质量取被撞船总重量的 0.85 倍。船舶的重量分布和重心位置可以通过调整有限元模型中结构钢的相当密度的方法进行模拟和施加。<sup>[1]</sup>附连水质量可以通过调整船体结构外板的相当密度

收稿日期:2018-01-13

作者简介:朱强(1990—),男,江苏泰州人,泰州市地方海事局船检科初级办事员。

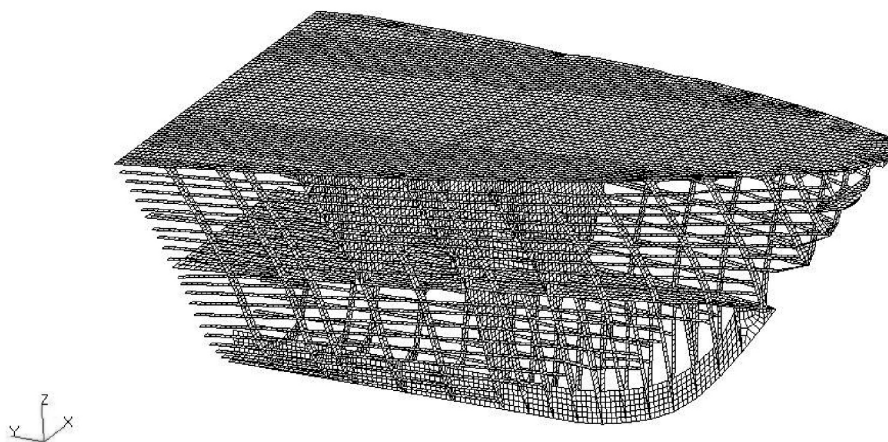


图2 600吨级船去掉外板后的结构

的方法进行模拟和施加。撞击船以速度  $V_0$  撞向被撞船。撞击位置取目标撞击区域内中间两横向强框架中线和纵向两强框架中线的交点。逐步调整  $V_0$  的大小,直至被撞船的外板破裂。<sup>[2]</sup>

材料采用线性强化弹塑性模型,考虑材料应变率敏感性,有关数据如下:材料密度  $7.85 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ;弹性模量  $2.10 \times 10^{11} \text{ Pa}$ ;屈服应力  $3.45 \times 10^8 \text{ Pa}$ ;泊松比;最大塑性失效应变 0.19;Cowper—Symonds 本构方程中两个常数为  $D=40.4$ ,  $q=5$ 。撞击区域的网格尺寸和单元失效应变按照 100 mm 来选取,其它区域的网格尺寸可适当加大。单元失效应变 0.19。<sup>[3]</sup>

碰撞过程中存在大量的接触问题,使用了主—从接触(Master-slave contact)和自身接触(Self-contact)。<sup>[4]</sup>在计算中考虑撞击船与被撞船之间的摩擦作用,动摩擦系数和静摩擦系数均定义为 0.3。边界条件考虑撞击船和被撞船均处于全自由状态。撞击船由于在垂直对中碰撞运动中主要是纵移(Surge),船体周围水的影响相对很小,所以直接采用附连水质量来加以处理。被撞船考虑周围水域影响,流场沿被撞船的宽度方向取 2 倍船宽,船长方向取 1.5 倍船长,高度方向取 2 倍吃水。<sup>[5]</sup>

### 3 碰撞方案

考虑流固耦合时,通过改变碰撞速度和角度确定具体碰撞方案。将其命名为方案 L,即船以 4 m/s 速度、90°正向撞击被撞船的首部区域,有限元模型如图 3 所示。

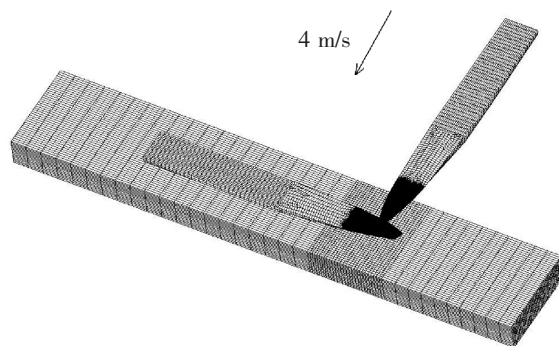


图3 方案 L:4 m/s 正向撞击(流固耦合)

基于附加质量法,通过改变碰撞速度和角度确定具体碰撞方案。具体包括四种,分别是方案 A、方案 B、方案 C、方案 D。方案 A 船速分别为 2 m/s(A1)、3 m/s(A2)、4 m/s(A3)和 5 m/s(A4),以 20°斜向撞击被撞船的首部区域;方案 B 船速分别为 2 m/s(B1)、3 m/s(B2)、4 m/s(B3)和 5 m/s(B4),以 45°斜向撞击被撞船的首部区域;方案 C 船速分别为 2 m/s(C1)、3 m/s(C2)、4 m/s(C3)和 5 m/s(C4),以 60°斜向撞击被撞船的首部区域;方案 D 船速分别为 2 m/s(D1)、3 m/s(D2)、4 m/s(D3)和 5 m/s(D4),以 90°正向撞击被撞船的首部区域,有限元模型如图 4 所示。

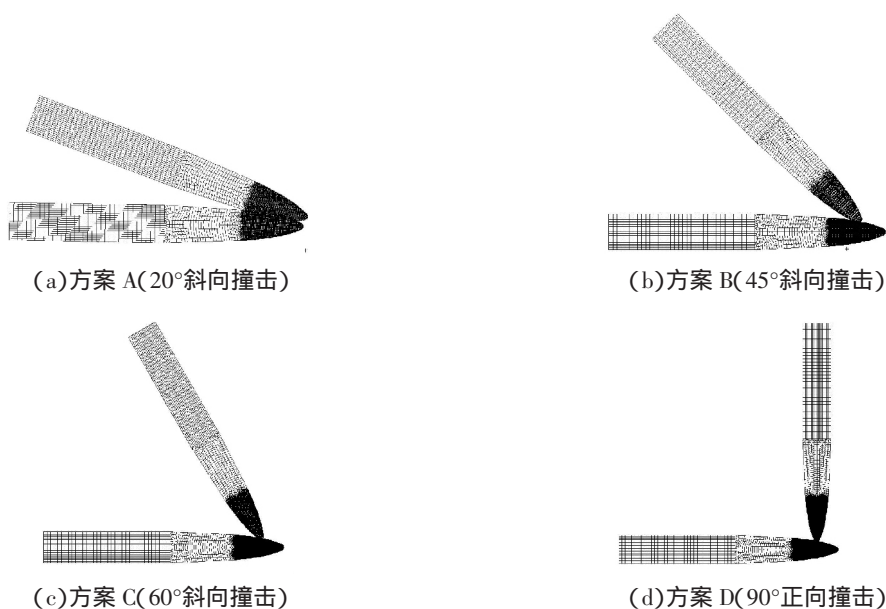


图4 撞击首部区域的碰撞方案(附加质量法)

#### 4 方案 L(流固耦合法)与方案 D3(附加质量法)耐撞性能比较

##### 4.1 应力分布与损伤变形

图5为方案L(流固耦合法)与方案D3(附加质量法)碰撞后被撞船首部区域的损伤变形图。从图5可得出以下结论。第一,直接发生碰撞的局部区域在撞击瞬间超出许用应力,但瞬态应力不作为船舶破损的依据。第二,结构的损伤变形基本上集中在撞击区域,碰撞损伤具有局部性。在撞击船的直接撞击下,被撞船的船体外板、甲板、横舱壁、舷侧纵骨和舷侧肋骨等都发生了一定程度的变形。第三,当600吨船以90°正向撞击被撞船的首部区域时,被撞船的舷侧外板和内部结构出现破损情况。

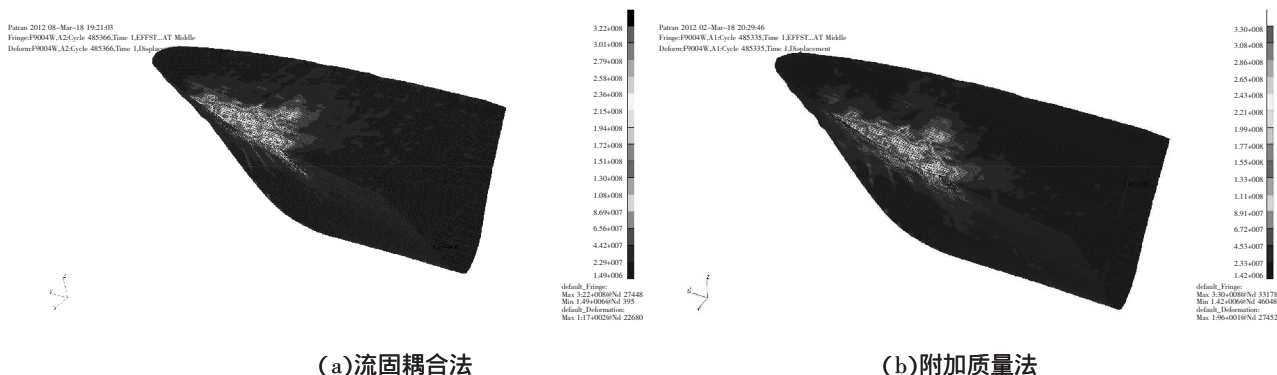


图5 不同方案下的被撞船首部应力分布与损伤变形云

各方案下被撞船的变形或破损情况如表1所示。从表1中可以看出:舷侧外板发生破损后内部构件的碰撞能力较差,而撞深继续增加时与其相邻的强肋骨发生破损变形。方案L(流固耦合法)中被撞船的损伤变形范围最大为0.25 m<sup>2</sup>,破损出现在舷侧外板、强肋骨、舷侧纵骨等主要结构上,其他构件发生变形而未破损;方案D3(附加质量法)中被撞船的损伤变形范围最大为0.26 m<sup>2</sup>,仍能够保证首部的安全性。就损伤模式而言,采用流固耦合法不仅可以对船舶碰撞的整个过程进行真实有效的仿真,而且能够获得被撞船的碰撞力、能量转换和吸收的时序结果,并能够对各具体构件的损伤变形过程进行跟踪分析。仿真计算的成功实现证明了该方法的可行性,但也是一个最复杂的方法,建模工作量大,计算CPU时间长。而附连水质量法排除了占用大量CPU时间的流体与结构耦合计算,使仿真计算的时间大大减少。通过以上计算与分析可以得出,采用附加质量法和流固耦合法就损伤程度而言两者差别不大。

表 1 被撞船变形或破损情况

方案	破损位置	破损范围/ $\text{m}^2$	最大变形/ $\text{m}$
L(90-4)	舷侧外板、强肋骨、舷侧纵骨	0.25	—
D3(90-4)	舷侧外板、强肋骨、舷侧纵骨	0.26	—

#### 4.2 碰撞速度

方案 L(流固耦合法)与方案 D3(附加质量法)采用 600 吨级船以  $90^\circ$  正向撞击被撞船的过程中两船的速度变化情况如图 6 所示。从图中可以看出,计算终止时撞击船的速度减小,这意味着撞击船将有动能损失;而被撞船的速度有所增加,则表明碰撞开始后的相当一段时间内,被撞船的运动响应才有所体现,即被撞船也吸收了部分动能。通过计算可以得出以下结论。首先, L(流固耦合法)方案下撞击船的速度由  $4 \text{ m/s}$  降为  $2.5 \text{ m/s}$ ,被撞船在撞击部位处的速度由  $0 \text{ m/s}$  增加为  $1.2 \text{ m/s}$ 。其次, D3(附加质量法)方案下撞击船的速度由  $4 \text{ m/s}$  降为  $2.4 \text{ m/s}$ ,被撞船在撞击部位处的速度由  $0 \text{ m/s}$  增加为  $1.3 \text{ m/s}$ 。不管从撞击船还是被撞船,通过方案 L(流固耦合法)与方案 D3(附加质量法)计算得到的速度变化曲线比较接近,误差控制在  $10\%$  以内。

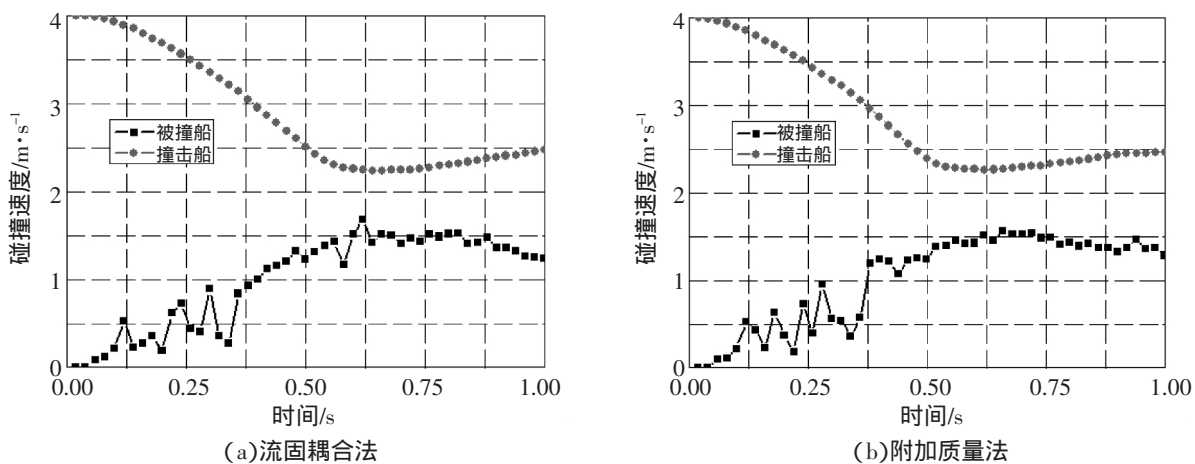


图 6 不同方案下的撞击船与被撞船速度变化曲线

#### 4.3 碰撞力

图 7 表示了方案 L(流固耦合法)与方案 D3(附加质量法)两种不同方案下船舶发生碰撞时的碰撞力时间历程曲线。从图中可以看出,在碰撞过程中,结构出现了多次卸载现象,碰撞力具有很强的非线性特性,两条曲线变化趋势基本一致。在 L(流固耦合法)方案下最大碰撞力达到  $3.0 \times 10^6 \text{ N}$ , D3(附加质量法)方案下最大碰撞力达到  $3.3 \times 10^6 \text{ N}$ 。可以预见,舷侧结构还有一定的抵抗能力,碰撞力存在一定的潜力,但随着碰撞的继续,舷侧板的破裂口会不断加大,将不可避免地致使船舱进水,从而使抵抗力失去意义。因而,碰撞力超过其能够承受的最大值时,将导致船舶进水进而倾覆。

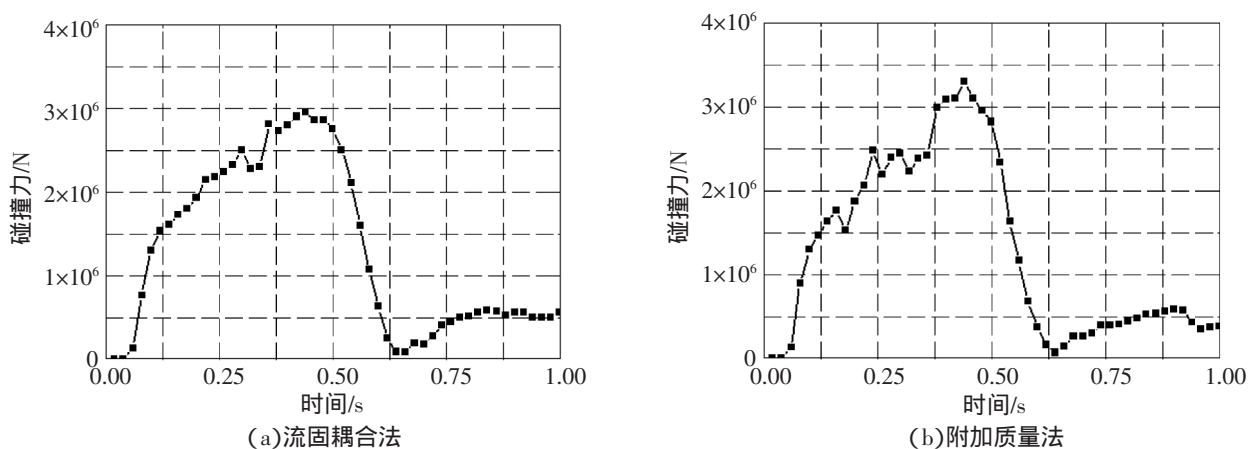


图 7 撞击船与被撞船碰撞力变化曲线

5 基于附加质量法的不同方案下的耐撞性能分析

5.1 应力分布与损伤变形

当 600 吨船以不同角度撞击被撞船首部区域时,被撞船的变形范围随着撞击速度的增加而变大。通过整体和局部应力图 5 可以发现,撞击船分别以 2 m/s、3 m/s、4 m/s 和 5 m/s 撞击被撞船时,被撞船的舷侧外板和内部结构出现不同程度的破损情况,如表 2 所示。

表 2 被撞船变形或破损情况

方案	破损位置	破损范围/ m <sup>2</sup>	最大变形/ m
A1	—	—	0.13
A2	—	—	0.16
A3	—	—	0.20
A4	—	—	0.23
B1	—	—	0.19
B2	—	—	0.23
B3	舷侧外板、强肋骨、舷侧纵骨	0.15	—
B4	舷侧外板、强肋骨、舷侧纵骨	0.18	—
C1	—	—	0.22
C2	—	—	0.30
C3	舷侧外板、强肋骨、舷侧纵骨	0.20	—
C4	舷侧外板、强肋骨、舷侧纵骨	0.25	—
D1	—	—	0.26
D2	—	—	0.36
D3	舷侧外板、强肋骨、舷侧纵骨	0.26	—
D4	舷侧外板、强肋骨、舷侧纵骨	0.34	—

5.2 碰撞速度

撞击船的初始速度分别为 2 m/s、3 m/s、4 m/s 和 5 m/s,而被撞船碰撞前处于静止状态(速度为零)。从表 3 中可以看出,计算终止时撞击船的速度变化比较大,这意味着撞击船将有很大的动能损失,而被撞船的速度有所增加,这表明碰撞开始后相当一段时间内被撞船的运动响应才有所体现,即被撞船也吸收了部分动能。在船舶碰撞过程中,撞击船的动能损失将主要转化为被撞船舷侧结构的塑性变形能。

表 3 撞击船与被撞船速度变化(单位/ m·s<sup>-1</sup>)

方案	撞击船		被撞船	
	初始速度	结束速度	初始速度	被撞区域结束速度
A1	2	1.6	0	0.2
A2	3	2.6	0	0.3
A3	4	3.7	0	0.3
A3	5	4.4	0	0.4
B1	2	1.1	0	0.5
B2	3	1.8	0	0.7
B3	4	2.8	0	1.0
B3	5	3.4	0	1.2
C1	2	1.0	0	0.7
C2	3	1.8	0	1.0
C3	4	2.4	0	1.3
C3	5	3.1	0	1.6
D1	2	0.6	0	0.5
D2	3	1.7	0	1.0
D3	4	2.4	0	1.3
D3	5	3.0	0	1.7

### 5.3 碰撞力(以方案 A 为例)

图 8 反映了两船在不同速度以  $20^\circ$  斜向发生碰撞时的碰撞力时间历程曲线。从图中可以看出,两船在碰撞过程中,船体结构出现了多次卸载现象,并且碰撞力具有很强的非线性特性。这个碰撞力既可以看成是撞击船的冲击力,也可以看成是被撞船的抵抗力,但其变化趋势主要还是由被撞船的舷侧结构和损伤变形所决定的。

可以看出,在 A1 方案下最大碰撞力达到  $0.9 \times 10^6$  N, A2 方案下最大碰撞力达到  $1.3 \times 10^6$  N, A3 方案下最大碰撞力达到  $1.1 \times 10^6$  N, A4 方案下最大碰撞力达到  $1.5 \times 10^6$  N。随着碰撞载荷的迅速增加,船体外板变形不断增大,碰撞力曲线上的峰值时刻为舷侧外板抵御撞击船的时刻,之后有一个卸载过程,在碰撞运动的过程中,撞击船继续作用舷侧肋骨,舷侧肋骨参与作用同样会引起两船之间碰撞力的增加,因此出现了碰撞力曲线的剧烈波动。

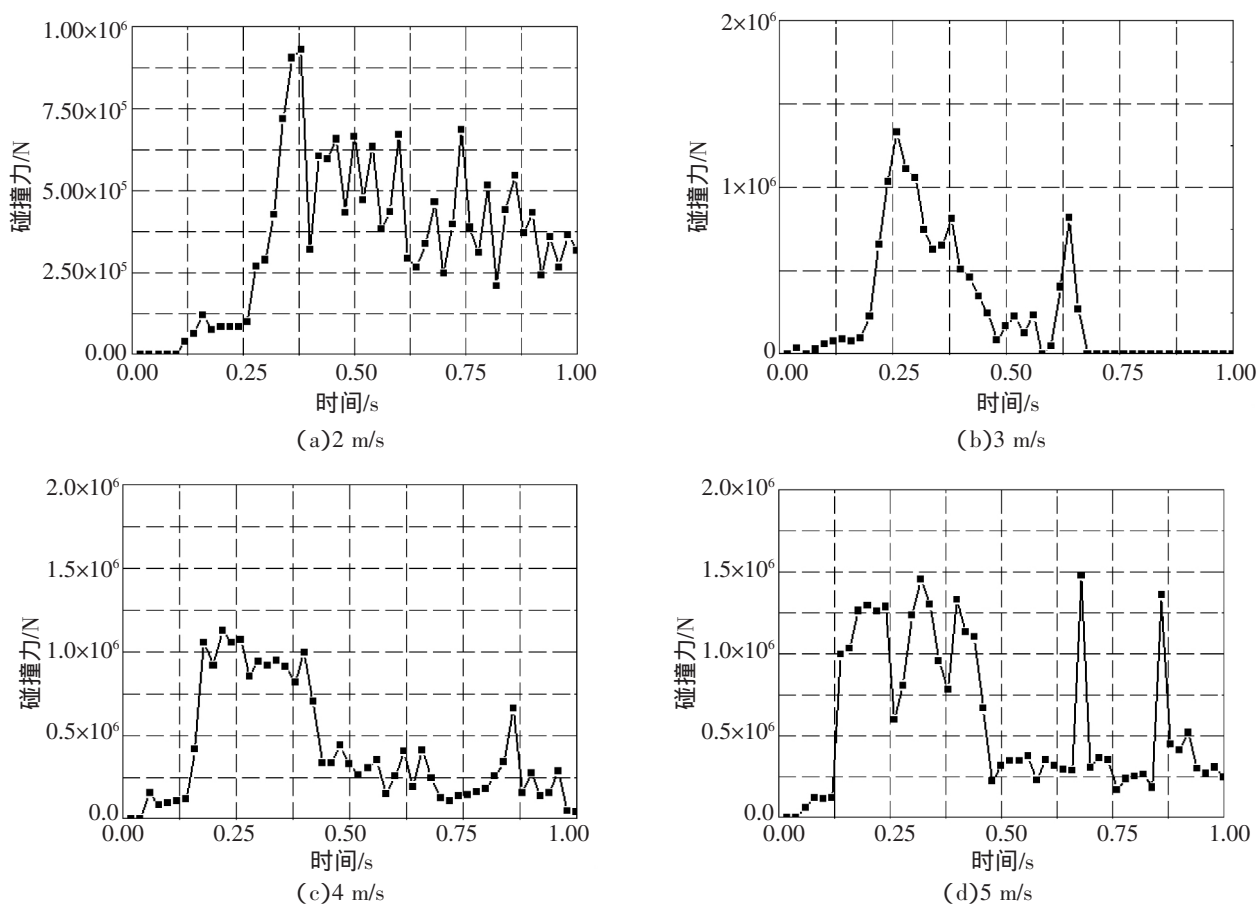


图 8 方案 A 不同速度下的撞击船与被撞船碰撞力变化曲线

## 6 结束语

两船相撞时,其周围的流体会对船体产生明显的影响。本研究利用显式非线性有限元动态分析技术,对 600 吨船首部区域结构的碰撞特性进行了数值仿真研究,并基于流固耦合法和附加质量法的不同方案,进行了耐撞性能对比分析,考察了撞击参数对被撞船首部区域结构碰撞特性的影响。由以上仿真数据和分析结果,可以得出主要如下结论:

第一,研究船首部结构的碰撞是一个复杂的瞬态响应过程,用非线性有限元技术可以对其进行成功的数值仿真,并可计算出每一具体构件直至失效的损伤变形过程。

第二,舷侧结构的碰撞损伤变形具有非常明显的局部性,损伤区域的大小和形状主要取决于撞头与撞击角度。

第三,采用流固耦合法不仅可以对船舶碰撞的整个过程进行真实有效的仿真,而且能够获得被撞船的

碰撞力、能量转换和吸收的时序结果。

第四,在船舶碰撞过程中,撞击船的动能损失将主要转化为被撞船舷侧结构的塑性变形能。第五,撞击参数对 600 吨船首部被撞区域的碰撞特性的影响是多方面、多层次的。

#### 参考文献:

- [1]Paik J K ,Petersen P T. Modeling of the mechanics in ship collisions[J]. Ocean Engineering,1996,(2):107-142.
- [2]胡志强,崔维成.船舶碰撞研究机理与耐撞性结构设计研究综述[J].船舶力学,2005,(2):131-142.
- [3]王自力,顾永宁.船舶碰撞研究的现状和趋势[J].造船技术,2000,(4):7-12.
- [4]Zhang Sheng-ming. The mechanics of ship collisions[D].Denmark:Technical University of Denmark,1999.
- [5]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.

(责任编辑 顾力豪)

## Study on Bow Collision and Structural Response of a 600-ton Ship

ZHU Qiang

(Dept. of Ship Inspection, Taizhou Local Maritime Safety Administration, Taizhou 225300, China)

**Abstract:** The study of numerical simulation of collision characteristics of a 600-ton ship's bow is carried out by using explicit nonlinear finite element dynamic analysis. Firstly, the fluid-solid coupling method is used to simulate the whole process of ship collision, as a result of which the time series results of damage deformation, collision velocity and collision force are obtained. Then the added mass method is used to study the crashworthiness of the bow structure and the results are compared. On this basis, the impact of collision parameters (velocity, angle, etc.) on collision characteristics of the bow of the collided ship is further investigated.

**Key words:** fluid-solid coupling; added mass; collision; damage deformation