第48卷第1期
2008年1月

大连理工大学学报
Journal of Dalian University of Technology

Vol. 48, No. 1
Jan. 2008

船舶、土木工程

文章编号：1000-8608(2008)01-0090-05

初速度对被撞船舷侧结构影响

马　骏*，陶　亮

（大连理工大学 船舶工程学院，辽宁 大连　116024）

摘要：采用 ANSYS/LS-DYNA 建立了两船发生侧向对中垂直碰撞的非线性有限元模型，模型中考虑了材料非线性、几何非线性等因素；并以所建立的非线性有限元模型为基础，对被撞船舷侧结构碰撞性能进行了仿真研究，得到了碰撞力和能量随碰撞船位移变化的关系曲线，重点研究了碰撞船初速度的影响. 数值仿真结果表明，不同的碰撞船初速度会导致被撞船舷侧结构产生不同形式的变形和不同程度的损伤. 同时，通过仿真计算得到了某一确定碰撞情景下被撞船舷侧内、外壳破裂的临界速度，可以为海事部门制定海上限速避碰规则提供依据.

关键词：船舶碰撞；数值仿真；非线性有限元；结构损伤；临界速度

中图分类号：U661.42　　**文献标志码**：A

0　引　言

研究船舶碰撞力学和碰撞强度对被撞船结构的影响，不仅有利于海上生命安全，防止海洋环境污染，而且可以为规定航运繁忙区域中船舶的航速、操作规程以及解决海事纠纷提供依据.

船舶碰撞是船体结构在很短时间内，在巨大碰撞载荷作用下的一种复杂的非线性动态响应过程，碰撞中存在着大量的非线性问题，如材料非线性、几何非线性、接触非线性和运动非线性等. 不同于陆上的结构碰撞，船舶周围流体介质也参与了能量吸收，影响碰撞的过程和结果. 所有这些特点使船舶碰撞问题的研究相当复杂和困难. 尽管如此，经过几十年的努力，船舶碰撞的研究工作还是取得了很大的进步.

本文采用非线性有限元动态响应分析程序 ANSYS/LS-DYNA 对船舶碰撞问题进行建模和计算，获得碰撞力和能量随碰撞船位移变化的关系曲线，并研究碰撞船初速度对于被撞船舷侧结构碰撞性能的影响.

1　船舶碰撞仿真建模方法

在船舶碰撞的有限元分析中，可以采用 3 种不同的方法：流固耦合法、附加水质量法、等效船体梁法进行. 流固耦合法采用流体-结构耦合算法解决水-船体之间的相互作用，它能提供最准确的仿真计算结果. 附加水质量法是将水的作用根据经验公式以船体附加质量的形式加以考虑. 与流固耦合法相比，附加水质量法可以在很大程度上节约 CPU 的计算时间，并且可以得到相对满意的结果. 等效船体梁法是一种更加简化的仿真方法. 它将碰撞过程中未发生损伤变形的船体结构质量部分分离出来，以等效船体梁的方式加到碰撞区的结构有限元模型上. 流固耦合法和附加水质量法为了计入流体的影响，通常要建立整船模型，建模工作量十分繁重. 由于等效船体梁法对模型进行了大幅度的简化，意味着只需对所关心的部分，即碰撞区域进行详细建模，可以大大提高建模的工作效率和仿真计算速度. 如果能够处理好约束边界条件、有效碰撞区域尺度以及流场的影响，它将不失为一种很好的船舶碰撞仿真计算方法. 但是，等效船体梁法并不考虑流体-结构之间的相互作用，而考虑流体的影响是船舶碰撞仿真分析中一个非常重要的内容之一. 因此，本文采用等效船体梁法和附加水质量法相结合的方法进行建模.

收稿日期：2006-01-15；　**修回日期**：2007-10-12.
作者简介：马　骏*(1963-)，男，副教授.

通过非线性有限元动态响应分析程序可以获得精确的分析结果，它不仅能够计算碰撞区的结构损伤变形与碰撞力，而且还结合了外部机理的分析与计算，可以真实地仿真碰撞现象，能够部分代替实船碰撞试验，实现“虚拟碰撞”. 因此，非线性有限元动态响应分析程序是结构碰撞响应分析的一个强有力工具. 本文采用 ANSYS/LS-DYNA程序进行船舶碰撞数值仿真计算.

2　船舶碰撞仿真关键技术

2.1　材料模型和失效准则

材料的本构关系是影响碰撞仿真过程是否接近真实情况的重要因素.

低碳钢等材料的力学性能在动、静态载荷下最显著的差异在于其屈服极限有明显提高，瞬时应力随应变率的提高而提高，屈服也随之出现滞后现象，这就是所谓的应变率效应. 实验表明：对于大多数金属材料，应变率对屈服极限有明显影响，对于较高应变率(大约 $10^{-2}\ s^{-1}$)情况，动力屈服极限比静力屈服极限(应变率为 $10^{-3}\ s^{-1}$)高 2～3 倍[1]. 本文采用 Cowper-Symonds 本构方程来考虑屈服应力与应变率的关系：

$$\frac{\sigma_y}{\sigma_0}=1+\left[\frac{\dot{\varepsilon}}{C}\right]^{1/p} \tag{1}$$

式中：σ_y 表示动态屈服应力；初始屈服应力用 σ_0 来表示，取 2.35×10^8 Pa；$\dot{\varepsilon}$ 为塑性应变率；C 和 p 均为 Cowper-Symonds 应变率系数，从材料的单轴动态拉伸试验或动态纯剪切试验得到，对于一般钢材 C 为 40.4，p 为 5[2].

使用 LS-DYNA 程序进行计算时，程序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 大于事先定义的单元最大塑性失效应变 ε_{pmax}，那么单元失效，则在以后的计算中该单元没有刚度，不再承受任何载荷. 本文选取材料断裂真实应变 $\varepsilon_{true}=0.35$[3] 作为单元最大塑性失效应变 ε_{pmax}的值，从而以此作为材料失效的判据.

2.2　接触的定义

在碰撞仿真中，接触是一个比较复杂的问题，在计算开始前，要对结构有可能发生的接触现象有所把握，做到没有遗漏；其次，由于接触计算耗时多，为了缩短计算时间，要尽量避免定义不可能发生的接触. 本文采用主-从面接触算法. 主-从接触面包括从面和主面，它们分别定义在船首和船侧上，碰撞开始前是相互分开的. 对于主-从面接触问题，要根据网格大小，正确选取主面和从面，使从面的网格比主面的更密.

2.3　网格尺寸

在非线性有限元动态仿真中，由于涉及到了非线性问题，有限元模型网格的大小对计算结果有很大影响. 一般而言，网格越密，计算结果越接近实际情况；网格越粗，相对来说刚度越大，计算结果会高于实际情况. 因此，在船舶碰撞仿真中，对于发生大应变的碰撞接触区域应该采用非常精密的网格. 但是，网格越密，单元越多，单元临界时间步长就会越小，这样会大大增加计算时间. 因此，对于非碰撞区采用较粗的网格. 本文的碰撞有限元模型，对于与碰撞船首接触一侧的双层舷侧结构进行了网格细化，除此以外，采用了较粗的网格.

2.4　被撞船附加水质量

附加水质量主要用以反映船体和流体之间的作用，它的大小取决于相撞船舶的型线特征、碰撞历程等，精确的计算是相当复杂和困难的. 本文采用经验公式考虑流体对被撞船的作用，Minorsky[4] 假定横漂运动的船体附加质量：

$$m_{yy}=0.4m \tag{2}$$

式中 m 是船体质量.

3　船舶碰撞仿真模型

通过对实船碰撞事故的调查可以发现，两船发生侧向碰撞的情况占绝大多数，而两船发生对中碰撞对于被撞船来说是极其危险的. 因此，本文研究的是两船发生侧向对中碰撞的情景，如图 1 所示.

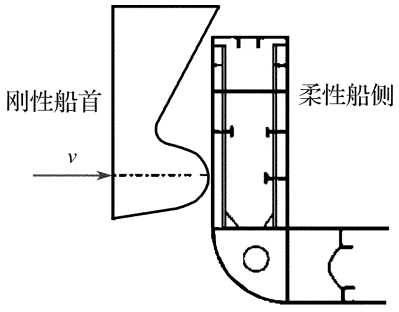

图 1　船舶侧向碰撞模型

Fig. 1　Schematic of ship side collision

碰撞船是带有球鼻首的 5680TEU 集装箱船，被撞船是双壳结构的 VLCC. 其主尺度见表 1.

表1 碰撞模型船体的主尺度和装载情况

Tab. 1 Main scale and loading of ship collision model

船舶	L/m	B/m	H/m	d/m	装载情况
碰撞船	279.9	40.3	24.1	12.0	满载
被撞船	333.5	58.0	31.0	21.0	满载

以被撞船的舷侧结构作为研究对象，对被撞船的一个舱段进行了详细建模. 碰撞位置位于该舱段舷侧中部. 舱段结构材料采用塑性动态模型来模拟. 该舱段的两侧舱壁材料采用刚性材料. 被撞船其他结构以弹性梁来表示[5]. 碰撞前，被撞船处于静止状态. 对于碰撞船，用一个具有初始速度的刚性撞头来表示，撞头具有碰撞船整船的质量. 之所以采用刚性球鼻首撞头，是出于以下考虑：

(1)被撞船的舷侧结构碰撞性能是研究对象；

(2)相撞船舶吨位相差不大时，撞击船首的刚度一般要远远超过被撞船的舷侧结构.

碰撞仿真模型包括29 498个四边形壳单元，6 274个梁单元和38 749个节点，如图2所示.

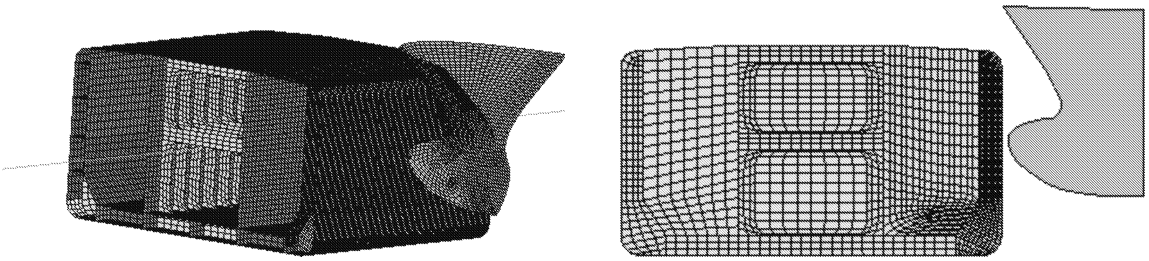

图2 船舶碰撞仿真有限元模型

Fig. 2 FE model of a ship-ship collision

4 船舶碰撞仿真结果分析

4.1 碰撞力-碰撞船位移曲线

图3是船舶碰撞过程中两船之间的碰撞力随碰撞船位移变化的曲线. 碰撞力曲线能够直接地反映船舶结构的碰撞刚度，该曲线会同损伤变形形式及其时序结果可以对船舶结构的碰撞特性进行综合分析.

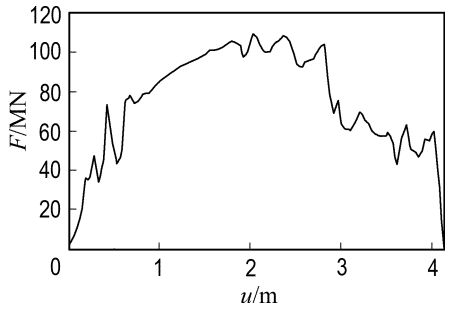

图3 碰撞力-碰撞船位移曲线

Fig. 3 Curve of collision force-displacement

观察图3可以发现，碰撞力曲线具有很强的非线性特征，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.

4.2 被撞船舷侧结构损伤变形吸收的能量

被撞船吸收的能量主要指的是被撞船舷侧结构由于塑性变形所产生的变形能. 图4是被撞船的能量吸收-碰撞船位移关系曲线.

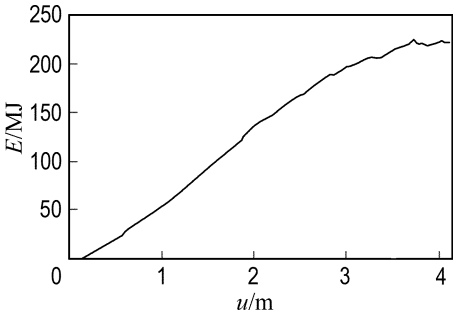

图4 能量吸收-碰撞船位移关系曲线

Fig. 4 Curve of absorbed energy-displacement

从图4可以发现，在碰撞的初始阶段，变形能随碰撞船位移的增加几乎呈线性变化. 然而，随着碰撞船首的不断深入，变形能的增加趋势趋缓. 对于这种现象可以用碰撞力随碰撞船位移变化的关系曲线来解释. 从对应的图3碰撞力曲线可以看到，从碰撞开始到碰撞船位移达到2.0 m这段过程中，碰撞力随碰撞船位移不断增加，所以这期间变形能增加比较快. 然而，碰撞船在碰撞力的作用下，速度开始下降，对被撞船的作用减小. 碰撞力在碰撞船位移达到2.8 m后开始减小，虽然在以后的过程中碰撞力的大小有所起伏，但总的趋势是随着碰撞船位移的增加而减小，从而导致变形能增加趋缓.

4.3　碰撞船初速度的影响

为了研究碰撞船的初速度对被撞船舷侧碰撞性能的影响，分别取不同的碰撞船初速度进行研究(见表 2).

表 2　碰撞试验情况明细表

Tab. 2　The list of experiments of ship-ship collisions

$v_0/(\mathrm{m}\cdot\mathrm{s}^{-1})$	$m/10^7$ kg	$E/10^8$ MJ
2	5.40	1.08
4	5.40	4.32
6	5.40	9.72
8	5.40	1.73
10	5.40	2.70

通过仿真试验，得到的碰撞力曲线的比较结果如图 5 所示.

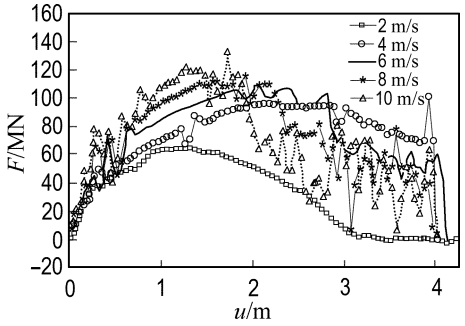

图 5　不同速度下碰撞力-碰撞船位移关系曲线

Fig. 5　Collision force-displacement curves at different velocities

通过观察可以发现，图 5 中的碰撞力曲线变化规律表现出几个明显的特征：碰撞速度较大时，比如速度为 4、6、8、10 m/s 等情况，碰撞力非线性的特征比较明显；碰撞速度为 2 m/s 时，曲线比较光顺，非线性特征不明显.

图 6 是速度不同情况下的能量吸收的仿真试验结果曲线. 由图可以发现，碰撞船初速度在4～10 m/s 时，被撞船的变形能变化趋势以及数值上都比较相似. 其主要原因是当碰撞初速度达到一定值时，被碰船的损伤区域大小、变形形式及损伤程度都比较接近，所以变形能差别不大. 值得关注的是，变形能最大值出现在 6 m/s 的情况，而不是 10 m/s. 因此，当被撞船体损伤变形程度相当时，并不是碰撞初速度越大，被撞船的变形能越大.

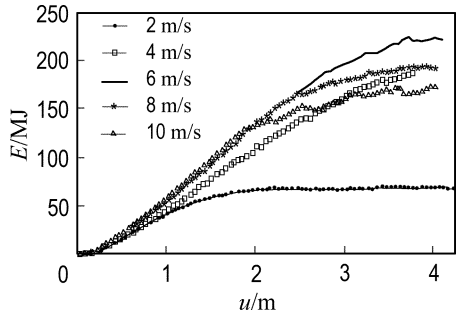

图 6　不同速度能量吸收-碰撞船位移关系曲线

Fig. 6　Absorbed energy-displacement curves at different velocities

2 m/s 的碰撞情景与其他情景有区别. 其原因主要是在碰撞速度和碰撞初始动能较小情况下，整个碰撞过程无论是船体的运动，还是船体的损伤变形情况，都与其他碰撞情景有很大的不同，这一点可以从图 5 中看出.

如果碰撞船速度在 2～10 m/s 变化，其他碰撞情景不变时，可以对碰撞结果做出预测. 假设碰撞船速度为 3 m/s，则被撞船的变形能变化曲线应该在 2 m/s 和 4 m/s 两条曲线之间. 随后所做的试验也证实了这样的判断.

另外可以发现，3 m/s 情况下的能量吸收曲线处于 2 m/s 和 4 m/s 之间. 当碰撞船位移为 3.4 m左右时，3 m/s 情况时的被撞船的变形能大约是 2 m/s 情况的 2.5 倍. 这主要是加强构件的压溃和侧向挤压变形引起的. 将 3 m/s 时的变形能和 4 m/s 时相比较可以得到，两种情况下被撞船产生的变形能也存在一定的差距.

通过对被撞船舷侧结构应力图的观察可知，碰撞过程中当其他碰撞参数都不变的情况下，对于碰撞船来说存在这样一个速度，一旦超过该速度，外壳将发生破裂. 由于外壳发生破裂后，碰撞船首会与舷侧的加强构件发生直接接触，这与外壳未发生破裂之前的舷侧结构损伤机理有所区别. 因此，可以将这个临界速度称为外壳破裂临界速度.

对于双壳油船来说，内壳破裂会导致油泄漏，从而造成货物损失、环境污染，是需要避免的. 因此，可以将造成舷侧内壳破裂的碰撞船初速度定义为另一个临界速度. 为了区别于上述的外壳破裂临界速度，可以把这个临界速度称为内壳破裂临界速度.

船舶发生侧向对中碰撞时，假定碰撞位置如图 7 所示. 图中 A 表示碰撞船首撞在两个横框架之间，B 表示直接正撞在横框架上，C 表示撞在舷侧纵桁与横框架的交叉处.

通过对 3 种不同碰撞位置的情景进行仿真计算得到导致舷侧壳体发生破裂的碰撞船最小初速

度. 对于上述碰撞情景,外壳破裂临界速度在2～3 m/s(3.88～5.82 kn)范围内,内壳破裂临界速度在4 ～5 m/s(7.76～9.70 kn)范围内.

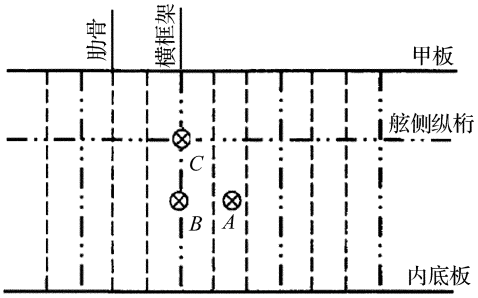

图7 撞击部位

Fig. 7 Impact location

5 结 论

(1)在船舶航速范围内,低速和高速碰撞相比较,碰撞力曲线和能量吸收曲线变化趋势差别较大,而高速情况下两类曲线(碰撞力曲线和能量吸收曲线)的变化趋势十分接近,因此,碰撞船速度的影响不能忽略.

(2)当被撞船体损伤变形程度相当时,并不是碰撞初速度越大,被撞船的变形能越大,对于本论文所讨论的碰撞情景,变形能最大值出现在6 m/s的情况,而不是10 m/s.

(3)对于碰撞船速度较高的情况,两船接触以后,撞击的现象更为显著,因而非线性特征十分明显;而在碰撞船速度较低情况时,两船的作用主要以相互挤压为主,因此碰撞力曲线较为光顺.

(4)对于确定的碰撞情景,存在两个临界速度,即外壳破裂临界速度和内壳破裂临界速度. 内壳破裂是船舶碰撞的一种重要的失效形式,确定碰撞船的内壳破裂临界速度不仅可以为船舶结构设计提供重要的参考依据,而且可以为海事部门制定海上限速避碰规则提供帮助,所以,在船舶碰撞仿真中,确定内壳破裂临界速度是十分有意义的.

参考文献:

[1] 廖其红,黄宏成,薛 量. 薄壁钢结构碰撞性能仿真中的材料模型研究[J] 机械设计与研究,2001,**17**(4):64-66

[2] KITAMURA O. Comparative study on collision resistance of side structure [J]. **Marine Technol**, 1998, **34**(2):293-308

[3] 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

[4] MINORSKY V U. An analysis of ship collision to protection of nuclear powered plant [J]. **J Ship Res**, 1959, **3**(2):1-4

[5] SERVIS D, SAMUELIDES M, LOUKA T, *et al*. Implementation of finite-element codes for the simulation of ship-ship collisions [J]. **J Ship Res**, 2002, **46**(4): 239-247

Effect of initial velocity on structure of collided ship

MA Jun*, TAO Liang

(School of Naval Archit., Dalian Univ. of Technol., Dalian 116024, China)

Abstract: A non-linear finite element model of side collision of ship was built to study the side structure collision characteristics by the code of ANSYS/LS-DYNA. The factors such as non-linearity of material, non-linearity of geometry were taken into account in this model. By the research on collision simulations, the curves of relation between energy and displacement of colliding ship, crashworthiness and displacement of colliding ship were obtained. The effect of initial velocity of colliding ship in ship collision is discussed. The results by numerical simulation show that colliding ship with different velocities has great effect on calculation time as well as on distortion of ship side structure in different styles and extents. At the same time, based on the result of calculation, the critical velocities made both on outer-plate and inner-plate crack of collided ship at this scene are attained, which can offer references for shipping busy field.

Key words: ship collision; numerical simulation; non-linear finite element; structure damage; critical velocity