

# 基于结构性能快速评估的舰船碰撞损伤剩余强度分析

潘卢毅 唐文勇 薛鸿祥 张圣坤

上海交通大学 船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200240

**摘要:** 从舰船结构强度分析领域的实际工程需要出发, 指出舰船结构性能快速评估的作用与意义, 结合多种计算机辅助结构设计软件, 探讨基于数值仿真的舰船结构性能快速评估方法, 同时搭建初步的快速评估系统框架。舰船结构碰撞损伤实例分析表明, 该快速评估系统可以同步快速分析各种碰撞损伤以及对应损伤状态下的结构剩余强度, 体现出基于结构性能快速评估技术的数值仿真方法在舰船损伤剩余强度评估领域的优势。

**关键词:** 数值仿真; 结构性能快速评估; 舰船碰撞损伤; 剩余强度

中图分类号: U661.43

文献标志码: A

文章编号: 1673-3185(2011)04-08-05

## Analysis of Collision Damaged Ship's Residual Strength Based on Fast Assessment of Structural Properties

Pan Lu-yi Tang Wen-yong Xue Hong-xiang Zhang Sheng-kun

School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

**Abstract:** As the requirement that actual project needs analyzing ship structural strength, we found that it is so necessary to do fast assessment for naval vessel structural properties. So based on numerical simulations by multiple kinds of computer aided softwares, we probed into the method of fast assessment and established a preliminary framework with the combination of a variety of CAE software. Ship collision damage analysis in this paper, for example, demonstrated the feasibility of this fast assessment system, which could sync quickly analyze all kinds of collision damage and corresponding damaged structural residual strength. All reflect the advantages of numerical simulation method, which based on fast assessment of structure, in the field of damaged ship's residual strength evaluation.

**Key words:** numerical simulation; fast assessment of structure; ship collision damage; residual strength

## 1 引言

在舰船结构性能分析领域, 广义直接设计方法正在逐步发展, 将舰船结构设计、分析与评估结合成一个完整的数据平台系统, 将船舶结构安全性评估的范围从完整结构扩展到存在损伤的结构, 从而提供全寿命周期内结构评估与维护的先进工具和手段<sup>[1]</sup>。

由于海上受损舰船的结构安全性直接关系到人员生命、货物安全和运营能力, 因此, 新型结构性能评估方法将重点应用于对舰船结构突发损伤

的快速评估、决策支持, 以提供紧急抢修维护, 保证舰船维持尽可能高的安全度和运营性能。在此情况下, 需要通过岸基或舰载电脑计算程序快速获得妥善处置措施的技术支持<sup>[2]</sup>。

发生结构破损的舰船剩余承载能力, 是影响受损舰船剩余生命力最重要的因素。根据结构性能快速评估的特点, 利用在实际工程领域有着广泛应用的可靠的 CAE 技术<sup>[3]</sup>, 本文构建了一种快速、准确并具备再评估能力的舰船结构性能快速评估系统, 并在碰撞破损舰船剩余强度分析中进行了实际应用。

收稿日期: 2010-09-16

基金项目: “十一五”海军预先研究项目

作者简介: 潘卢毅(1986-), 男, 硕士研究生。研究方向: 舰船结构性能数据库。E-mail: panluyi@sjtu.edu.cn

唐文勇(1970-), 男, 教授, 博士生导师。研究方向: 船舶结构力学。E-mail: wytang@sjtu.edu.cn

## 2 舰船结构性能快速评估

### 2.1 快速评估方法总原则

舰船结构性能快速评估的目的,是以快速、经济的方法得到海量的评估结果,覆盖舰船全寿命周期各项结构性能指标,并能快速应对舰船海上突发损伤。具体手段为,事先对目标舰船建立完备的能反映实际结构性能的全船数值仿真模型<sup>[4]</sup>,并依据实际运营情况设计最可能的舰船损伤模式,使用数值仿真方法预先模拟舰船在不同损伤下的结构性能。当舰船遭遇实际损伤时,即以此为依据,调用特征情况相近的模拟结果,或根据实际情况修改、调试数值模型,对舰船的结构损伤程度、剩余生存能力做出快速评估,并可根据评估结果及时提出现场抢救及后续维护的合理建议。

快速评估系统基于数值仿真技术建立,应满足三大原则:

1) 快速可重复性。评估系统应能充分利用已有的数值仿真数据,以较小的改动进行再评估分析,快速获得多样全面的评估结果。

2) 工程准确性。进行快速评估的分析项目,可以利用数值仿真方法,在工程精度允许范围内进行合理的仿真分析。

3) 数据共享性。在各种数值仿真软件平台中获得的分析结果,能够彼此快速调用,从而可在不同的软件平台对不同舰船结构性能展开全流程协同性分析。

### 2.2 快速评估方法的实现

基于以上标准,本文通过二次开发搭建数据接口,将多种商业通用数值仿真软件串接起来,实现模型数据和分析结果共享,快速完成各个环节的舰船结构性能分析计算。

以 MSC/Patran 作为快速评估系统主平台,在 Tribon 中完成舰船的结构设计,通过二次开发软件,直接将 Tribon 模型导入到 Patran 中并自动生成舰船结构有限元分析模型,经由二次开发功能组件完善结构模型,作为后续快速评估系统中各环节的分析对象<sup>[5]</sup>。

在舰船结构分析、舰船结构损伤模拟时,为更真实地模拟整船实际受载情况,波浪载荷与惯性载荷,也采用数值仿真方法获得。在 SESAM 水动力计算软件中,基于三维势流理论计算舰船在波浪上的运动响应,通过 PCL 二次开发提取船体湿表面波浪载荷,并映射到 Patran 软件平台中的分

析模型上。采用惯性力平衡计算方法<sup>[6]</sup>,在单元节点自动施加惯性力,以平衡舰船在波浪上运动时的运动加速度,使舰船处于准静态平衡状态。

通常舰船的损伤形式可以分为累积性损伤及突发性损伤两种,前者包括腐蚀、疲劳等;后者包括碰撞和触礁、搁浅、爆炸、火灾等<sup>[7]</sup>。在快速评估系统中,累积性损伤使用 Nastran 进行静态线性分析,突发性损伤则涉及瞬态非线性问题,使用 Dytran 求解器分析。

最终,通过二次开发手段,可以将模型的损伤塑性变形及构件失效情况真实还原,用来进行后续分析<sup>[8]</sup>,比如 Dytran 中的多次损伤分析和 ABAQUS 中的剩余强度分析。

由此形成如图 1 所示舰船结构性能快速评估系统,满足快速可重复性、工程准确性和数据共享性三大原则。

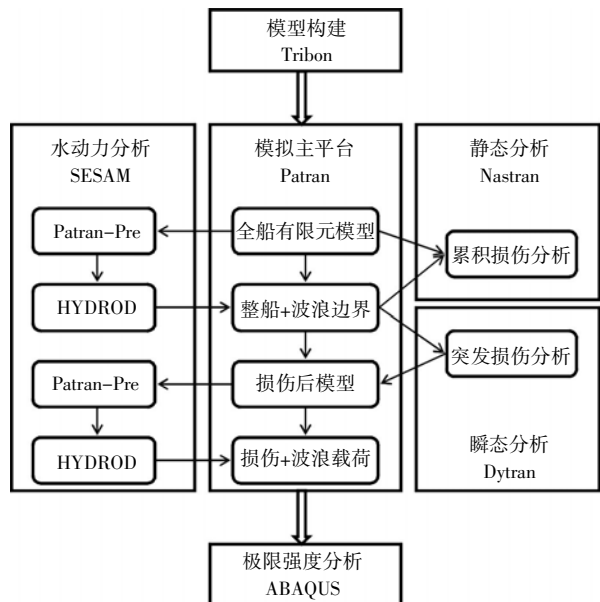


图1 舰船结构性能快速评估系统

Fig.1 Fast evaluation system of naval vessel structure

## 3 舰船碰撞损伤剩余强度快速评估实例

利用舰船结构性能快速评估系统,可以自由地设计多种舰船碰撞损伤模式,对舰船运营期间可能遭遇的碰撞损伤后的剩余强度做出快速评估。具体在碰撞损伤剩余强度分析中的体现就是,自动生成有限元模型、碰撞模拟与极限强度分析数据共享,以及批量产生分析结果。

### 3.1 舰船剩余强度衡准

剩余强度因子法,是一种通过比较完整态舰船极限强度和损伤态舰船极限强度来定量判定舰

船损伤后剩余结构强度的方法, 剩余强度因子可以定义如下<sup>[9]</sup>:

$$RIF = \frac{M_{\text{damage}}}{M_{\text{intact}}} \quad (1)$$

式中,  $M_{\text{damage}}$  是损伤舰船的极限承载弯矩;  $M_{\text{intact}}$  是完整舰船的极限承载弯矩。

所以, 对舰船结构剩余强度的研究, 包含了对完整舰船和损伤舰船结构极限强度的研究。目前, 以 Smith 方法为理论基础, 以商业有限元软件为分析手段的舰船剩余强度数值仿真已经取得令人满意的结果<sup>[10]</sup>。

### 3.2 舰船碰撞损伤剩余强度数值仿真

快速评估系统分析舰船碰撞损伤剩余强度的特点在于, 通过二次开发, 使用数值仿真软件完成各环节的计算, 实现分析结果与模型的共享, 从而可以连续完成舰船碰撞分析和该碰撞发生后的极限强度数值仿真分析。具体仿真流程见图 2。

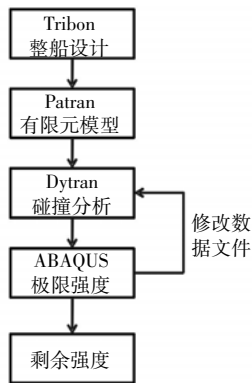


图2 舰船碰撞损伤剩余强度数值仿真流程  
Fig.2 Numerical simulation process of collision damaged ship residual strength

#### 1) 模型生成

舰船模型首先在 Tribon 中完成详细设计, 选取其 XML 文件, 通过二次开发接口在 Patran 中自动生成全船有限元模型 (图 3), 并使用二次开发模块, 完成网格划分、自动分组、材料创建, 单元属性赋值。

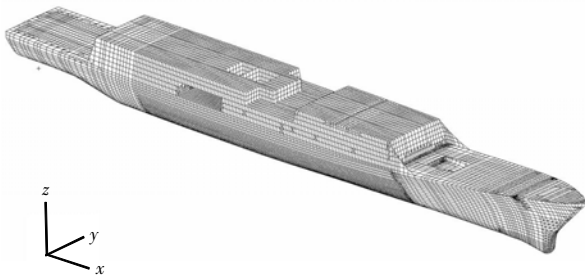


图3 目标舰船全船有限元模型  
Fig.3 Global FEM model of the target ship

#### 2) 碰撞分析

自动导入生成的模型, 共有节点 28 763 个, 板单元及梁单元 43 221 个, 其中, 使用板单元模拟船体板、各层甲板、舱壁和上层建筑外板等; 使用梁单元模拟加强筋, 用质量点模拟船舶排水量 3 500 t 时的吃水和重心位置。另将船首部分作为撞击部, 使用刚性材料 (Rigid) 建模, 赋予撞击部整船的质量, 模拟目标舰船被同型船从舷侧成 90° 撞击。根据 1999 年雅典国立科技大学 Servis 和 Samuelides 的研究<sup>[11]</sup>, 在船体湿表面水线附近使用质量点 (40% 全船质量) 模拟附连水质量见图 4。模型的材料为弹塑性材料, 应力应变曲线见图 5, 考虑材料强化效应, 无应变速率强化。失效模式为最大塑性应变失效, 最大失效塑性应变为 0.18。

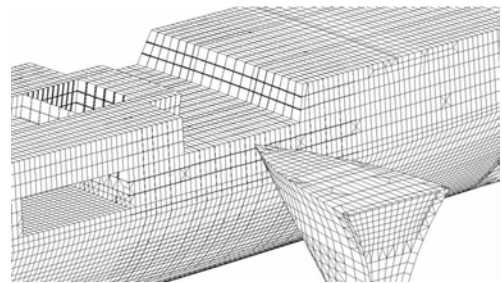


图4 碰撞模型及附连水质量点  
Fig.4 Model of collision and mass points of surrounding water

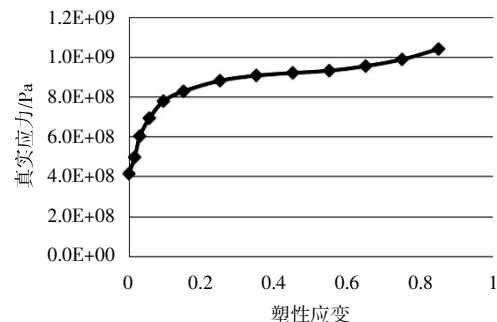


图5 钢材真实应力与塑性应变关系曲线  
Fig.5 Steel real stress-strain relationship

通过直接修改 Dytran 生成的 dat 计算文件中的关键数据完成两个损伤工况 (表 1) 的碰撞模拟后, 使用自行编制的 PCL 程序, 读取记录节点位移的 rpt 文件, 将完整模型的单元节点进行偏移, 并除去失效单元, 获得损伤舱段模型见图 6。

表1 碰撞模拟工况  
Tab.1 Cases of collision simulation

工况	速度/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	撞击角度/ $^{\circ}$	持续时间/s
1	5.14	90	0.84
2	2.57	90	1.21

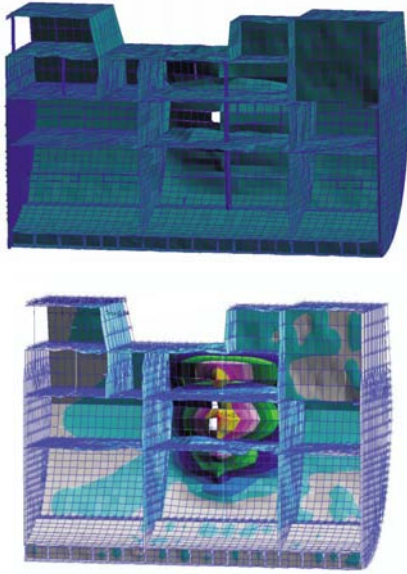


图 5 工况 1 中舱段变形结果与损伤舱段模型  
Fig.5 Damage result and damaged midship model of case 1

### 3) 极限强度分析

截取船中剖面惯性矩最小部分中舱段区域为目标舱段,通过 bdf 文件导入 ABAQUS,直接生成带有材料设置、单元属性和梁单元偏置的舱段分析模型。材料属性如下:在弹性阶段,弹性模量  $E$  为  $2.1E11$ ,泊松比为 0.3;在塑性阶段,材料真实应力与塑性形变关系曲线由钢材单向拉伸试验得到,如图 7 所示;材料延展破坏应变(fracture strain)设置为 0.85,三向应力比(stress triaxiality)设置为 0.33;不考虑应变速率效应<sup>[12]</sup>。

根据欧盟 2000 年 DEXTREME 项目中的全船数值方法分析的设置,导入后的分析舱段两端面所有节点使用联接(coupling)方式与端面形心连接(图 7),并在两个刚性端面的重心处,分 100 步逐步添加总量为 0.5 弧度的垂向弯曲边界(图 8),以模拟在总纵弯曲状态下舱段逐步崩溃的过程,获得危险剖面弯矩与转角之间的关系。

进行舰船碰撞损伤后极限强度计算时,直接使用碰撞分析所获得的碰撞损伤后目标舰舱段模型(图 9~图 10)作为分析目标。

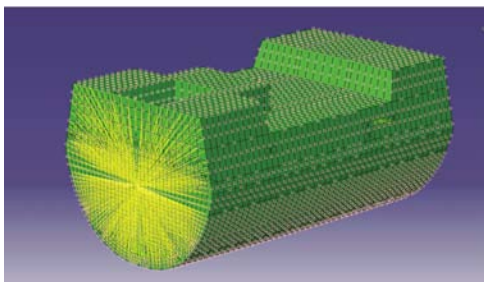


图 7 导入 ABAQUS 中的分析中舱段模型  
Fig.7 Analysis model of midship in ABAQUS

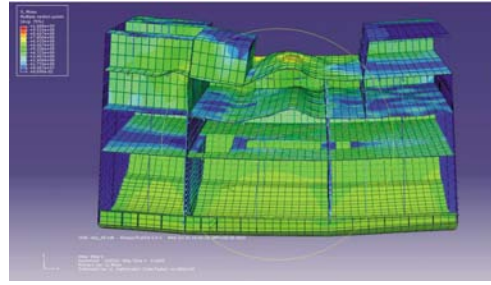


图 8 分析舱段完整状态下中垂工况下极限弯曲变形  
Fig.8 Ultimate bending deformation of intact analysis model in sagging

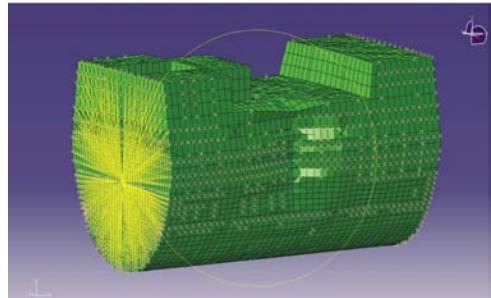


图 9 目标舰船碰撞损伤下舱段分析模型  
Fig.9 Target ship damaged model in collision

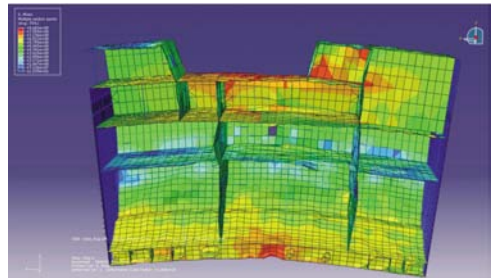


图 10 含碰撞损伤分析舱段工况 1 中拱工况下极限弯曲变形  
Fig.10 Ultimate bending deformation in hogging of damaged analysis model

### 4) 剩余强度

根据上文分析得到目标舰船完整态及碰撞损伤工况的极限强度(表 2),由式(1)可获得不同碰撞损伤下的舰船剩余强度(图 11,表 3)。

表 2 分析剖面极限强度  
Tab.2 Ultimate strength of analysis section

	分析剖面极限强度( $10^6 \text{ N}\cdot\text{m}$ )		
	完整船体	工况 1	工况 2
中垂	-1983.45	-634.68	-676.05
中拱	2083.68	1728.36	1565.52

表 3 碰撞损伤下舰船剩余强度  
Tab.3 Residual strength of damaged ship

剩余强度	工况 1	工况 2
中垂	0.32	0.34
中拱	0.83	0.75

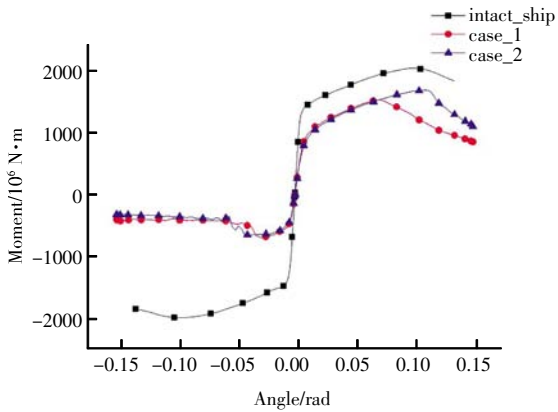


图 11 目标舰船极限承载能力曲线

Fig.11 Ultimate bearing capacity curve of target ship

## 4 结 论

舰船结构性能快速评估系统,实质是通过对各种结构设计、分析通用软件的联合运用,快速、准确并最大化地将数值仿真技术引入到舰船结构性能分析的各个环节中。本文基于此系统方法,利用二次开发技术,在完成舰船结构设计模型之后,实现了舰船有限元分析模型自动生成、损伤模式批量模拟、损伤模型再评估分析等。通过数据共享,在同一个框架内完成舰船碰撞数值仿真与对应碰撞损伤后的剩余强度数值分析,并能批量分析不同的损伤模式,较好地解决了数值有限元技术在舰船结构性能分析应用中建模耗费高、运算耗时大的问题。

本文提出的舰船结构性能快速评估系统,以及自行开发的多种通用软件平台数据接口,还能应用于舰船之外的其他结构性能快速评估中。

### 参考文献:

[1] PAIK J K, MELCHERS R E, eds. Condition assessment of

aged structures [M]. Cambridge, UK: Woodhead Publishing Limited, 2008: 54-287.

- [2] 陈晨. 船舶应急服务(ERS)介绍[J]. 中国水运, 2008, 9(9): 5-7.
- [3] 吴广明. CAE在船舶结构设计中的应用及展望[J]. 中国舰船研究, 2007, 2(6): 30-34.
- [4] 陈庆强, 朱胜昌, 郭列, 等. 用整船有限元模型分析方法计算舰船的总纵强度[J]. 船舶力学, 2004, 8(1): 79-85.
- [5] 刘瑞东, 唐文勇, 刘俊, 等. 基于三维结构设计与分析软件平台的舰船结构性能快速评估[J]. 舰船科学技术, 2009, 31(5): 9-14.
- [6] 刘俊, 汪庠宝, 韩继文. 运用 NASTRAN 进行波浪载荷作用下船体强度分析[J]. 上海交通大学学报, 2005, 39(5): 711-714.
- [7] 陈铁云, 王德禹, 黄震球. 船舶结构终极承载能力[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2005: 1-14.
- [8] 冯刚, 朱锡, 张振华. 水下爆炸载荷作用下受损加肋圆柱壳的剩余屈曲强度计算[J]. 海军工程大学学报, 2004, 16(4): 97-101.
- [9] FANG C, DAS P K. Hull girder ultimate strength of damaged ships [C]// Proceedings of the 9th Symposium on Practical Design of Ships and Other Floating Structures. Luebeck-Travemuende, Germany, 2004: 309-316.
- [10] GUEDES S, LUIS R M, NIKOLOV P I, et al. Benchmark study on the use of simplified structural codes to predict the ultimate strength of a damage ship hull [J]. International Ship Progress, 2008, 55: 87-107.
- [11] DIMITRIS P, SERVIS M S. Ship collision analysis using finite elements [C]// Safer Europol Spring Meeting. Nantes, 1999: 1-29.
- [12] VOUDOURIS G, SERVIS D P, SAMUELIDES M. Ultimate load calculations Finite Element Analysis [R]. DEXTREMEL Project (Contract No. BRPR-CT97-513), Document Ref.No. DTR-4.3-NTUA-11.00, 2000.