

·学科进展·

# 受损船体剩余强度研究与风险分析及综合安全评估

郭昌捷 周炳焕

(大连理工大学,大连 116024)

**[摘要]** 重点介绍了受损船体剩余强度评估与预报(包括确定船舶危险破损状态,研究船舶破损进程中结构能力和载荷效应变化规律,建立破损结构响应和极限强度分析计算模式以及可靠性评估的动态模型,改进船舶极限承载能力计算方法),并介绍了老龄船舶剩余强度变化规律、评估指标及预报有效寿命期的方法。指出其延伸研究成果可为海事界制订风险规范、建立现代设计体系以及实施船舶综合安全评估提供理论基础和背景条件。

**[关键词]** 剩余强度,可靠性评估,极限承载能力,HOF, FSA

“船舶结构破损后剩余强度评估与预报”以及相依托的国际合作研究项目“受损船体极限强度分析与可靠性评估”,采取理论分析与实船计算相结合的研究方法。研究过程中始终注重现场调研与案例分析和实证相结合。根据研究目标、内容,使船舶结构力学与船舶静力学、可靠性理论交叉互补,密切注视并随时吸收工程和其他学科的研究成果,围绕拟解决的关键问题开展系统研究,提出新理论或新方法。

## 1 主要研究成果

### 1.1 对船舶极限承载能力简化计算方法的改进及工程应用

船舶结构破损后极限承载能力(即船体总纵极限弯矩)计算方法研究已成为当前船体结构强度理论和设计方法研究领域的热点,近期取得有益进展。在诸多理论和方法中,基于船体断面离散化模型的解析方法(或简化方法)由于简便易行,且有满意精度,已引起广泛重视。但其计算模型局限于传统的单壳、单底结构,对现代船舶结构形式及承载特点适用性较差。

理论研究和船舶破损实例分析表明,发生整体破坏者以大型油船、散货船和集装箱船居多,故结构

破损极限强度分析对此类船舶尤其重要。此类船舶在结构布局或结构形式方面具有如下特点:双层底、双舷侧,且设有顶边水舱或抗扭箱,这使得甲板及船底结构得到显著加强,从而提高了船体极限承载能力。

考虑到现代船舶结构布局和承载能力的上述特点,本项目研究对现有简化方法<sup>[1]</sup>及应力分布酌情做出改进,以便在计算中合理计入双层底和顶边水舱结构对船体极限强度的贡献。此即认为在中垂状态下仅当整个双层底中应力均为材料屈服极限时,船体才达到极限状态;类似地,中拱时只有顶边水舱区域应力均为屈服极限时,船体才达到极限状态。据此提出一种新的应力分布,以期更好地描述船体极限承载能力或极限强度<sup>[2-5]</sup>。

### 1.2 舰船纵向弯曲强度可靠性分析的动态模型

在舰船结构可靠性分析中,当前研究多基于静态模型,即忽略时间因素,将应力和强度均取为随机变量。显然这是一种理想化处理办法。事实上,舰船在营运或服役期内,一方面由于遭受腐蚀和各种损伤乃至破坏,船体结构抗力逐年降低;另一方面,主要控制载荷即静水和波浪弯矩最大值同时出现的概率不是很大,简单地用  $\max\{X_1\} + \max\{X_2\}$  代替  $\max\{X_1 + X_2\}$  过于保守。如此分析造成的后果是:对

国家自然科学基金资助项目。  
本文于2000年8月31日收到。

新设计船舶不利于结构总体性能的改善;对老龄舰船难以作出正确的维修、报废决策。

基于上述背景,本研究用动态模型代替静态模型,即把结构能力和要求皆看成随时间变化的随机过程,并对载荷组合作了简化处理,以动态模型与第二水平法相结合求解可靠性指数。通过对4条舰船分析表明,这种方法较静态模型能更好地反映实际情况,对在役舰船尤为适用<sup>[6]</sup>。

### 1.3 老龄船舶总纵剩余强度评估和预报

在营运或服役过程中,船体不可避免地会产生多种缺陷或受到不同程度的损伤,严重时可能危及船体安全的潜在威胁,降低船体可靠性,导致营运性能变坏,甚至造成全损。

本研究基于案例分析和实证研究,对老龄船舶剩余强度随船龄变化规律进行了研究,提出对受损船体剩余强度评估和预报的方法。即在实船现场测得剩余厚度并对其统计分析,据此进行船体剩余强度评估和预报;并根据求得的蚀耗率结合破损现状预报船舶继续营运或服役的有效寿命期。通过对现行船舶数值分析表明方法是可行的,并得出一些有价值的结论<sup>[7]</sup>。

### 1.4 二阶二次矩法在受损船体剩余强度可靠性分析中的应用

首先建立受损船体结构模型及相应失效函数,继而用二阶二次矩法进行结构可靠性分析。实船计算分析表明,该方法较一阶二次矩法更精确有效<sup>[8]</sup>。

### 1.5 开展国际合作与学术交流并取得有益进展

#### (1)理想单元法

关于理想单元法,国内外学术界也早有所闻。但真正了解或实际运用者恐怕并不多。作者在同美国船级社(ABS)共同研究过程中,有幸较多地了解并实际运用该方法和程序软件对几条大型船舶进行了大量的工程计算,有关情况简介如下:

#### (i)定义和适用范围

理想单元法英文名称为 Idealized Structural Unit Method (ISUM)。其概念由 Ueda 和 Rashed (1974, 1984)提出,而基于 ISUM 的应用程序软件 ALPS 则由 Paik (1995b)研制成功。ALPS (Analysis of Large Plated Structures)是非线性有限元分析软件,当前已开发出3种类型的应用程序,分别为:

ALPS/HULL 该程序可以有效地计算船体逐步破坏 (Progressive Collapse)特性,其优点是在极限强度计算中能同时考虑船体梁剖面所有可能载荷成分,包括垂直弯矩、水平弯矩、垂直剪力、水平剪力

和扭矩以及局部压力的综合影响(图1)。

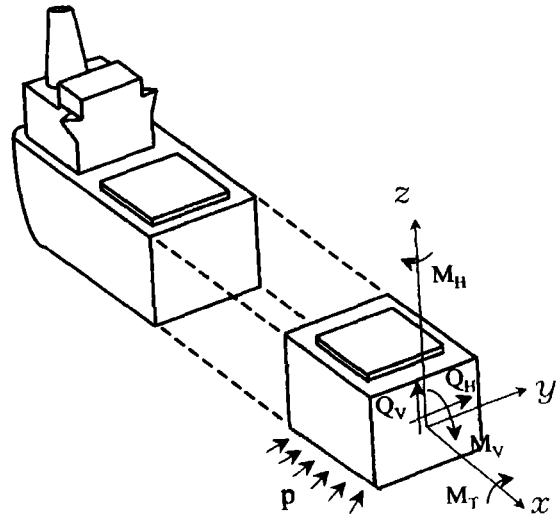


图1 船体梁剖面载荷成分

ALPS/SCOL 该程序可计算船舶结构遭遇碰撞或搁浅意外事件时的惯性力,程序涉及压碎和延性撕裂特性,同时考虑结构元件的屈曲和屈服。

ALPS/GENERAL 该程序适宜计算一般板结构,诸如由板和梁-柱组成的海上和陆上结构物的逐步破坏特性。

#### (ii)ALPS 程序的优点

该程序尤其适用于大型现代船舶。其优点是:结构模型化简单易行。计算模型一般可只取1个强框架(强肋骨间距)之间的分段,如图2所示。2个横剖面节点数一般为50×2左右;单元数约为60—70。当熟练后,一条船数据准备可在2—3h内完成。此数据准备工作量大体与前述简化算法相当。

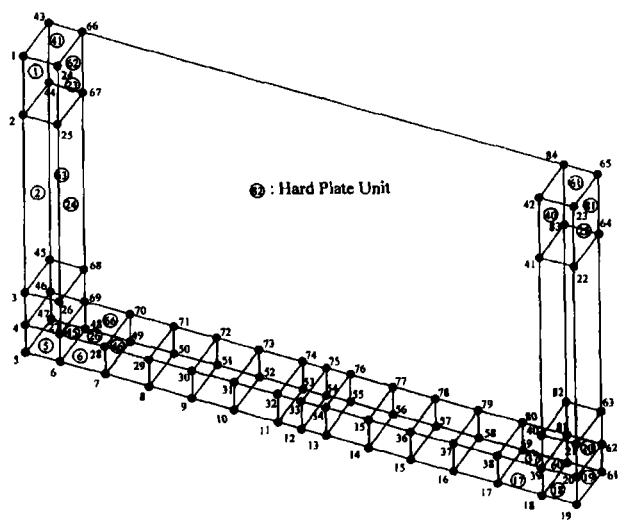


图2 ALPS/HULL 在相邻横向强框架之间的分段模型

计算效率较高。就所计算的大型油船或大开口多用途船而言,在微机上运行1种工况一般只需20—30 min。

计算结果具有可接受的精确度。为了考察本程序的精确度,DUT和ABS利用本程序、ANSYS以及简化算法进行了并行计算,并随时对程序进行多次改进和修正。结果表明,本程序的精确度是满足工程要求的。

对结构破损极限强度分析具有特殊优越性。当结构遭遇碰撞、搁浅或其他破损后,仍以原来完整结构为基础,只须将破损部位的构件改成虚单元即可。如此,破损结构与完整结构可共用同一计算模型,大大减少了数据准备工作量。

(iii) ALPS采用的理想单元

包括6种理想单元:

理想梁-柱单元(Idealized beam-column unit)

理想非加筋板单元(Idealized unstiffened plate unit)

理想加筋板格单元(Idealized stiffened panel unit)

理想裂口/接触单元(Idealized gap/contact unit [for the ALPS/SCOL only])

硬单元(Hard unit)

虚单元(Virtual unit)

综上所述,理想单元法及程序软件具有模型简单、计算效率高、适应性强和精度满意的优点。在受损船体极限强度评估中,不失为一种理想的非线性有限元分析法。

(2) 概率破损模型

结构遭遇破损属于非常状态,即应进行风险分析。风险(Risk)系指事故的发生频率和后果严重性的组合乘积。概率破损模型显然更为合理,但目前国内外有关研究尚不多见。美国 Kurt Crake and Alan Brown (Dept. of Ocean Engineering, Massachusetts Institute of Technology) 研制出“A Probabilistic Assessment of Ship Damage in Collision/ Grounding Events”以及相应程序软件 DAMAGE,可给出合理的概率破损模型。

上述概率破损模型、理想单元法有着广泛的应用前景。通过国际间合作与交流,使我们接触到学科前沿,加快了研究进度、提高了学术水平。

## 2 研究成果科学意义及其延伸

近期国内在船舶破损极限强度研究方面取得了

诸多可喜进展和成果,为改进现行船舶设计、提高航运安全提供了理论背景和技术条件。事实上,当前许多船级社已经或正在将受损船体极限剩余强度评估引入到规范和设计程序中。此举将明显改进船舶及海工结构物的安全性,提高其经济效益和社会效益。

然而实船破损统计表明,所有船舶灾难事故中,大约80%是由于人为和组织失误酿成的,而由结构失效造成的事故不足12%。这使得国际海事界开始特别重视人为和组织因素 HOF(Human and Organizational Factors)课题研究,提出了实施风险分析(Risk Analysis)与综合安全评估 FSA(Formal Safety Assessment)的战略思想。震惊全国的“大舜号”海难事件,导致200多人葬身大海。现已查明,该船失事的致命原因是遭遇恶劣海况和气候条件下,决策失误加一连串人为操纵不当。尽管航运业是一项充满风险的行业,但在国际海事界,研究船舶安全的传统方法是针对完整船体、理想工况,即在安全域内考察、评估船舶安全,没有或缺乏关于船舶设计及营运管理过程中人为失误的风险分析,因而不能预报风险,尤其不能提出降低或避免重大海损事故的有效措施。这就使得看似“安全”的船舶,实际上隐藏着诸多潜在危险,同时又缺乏有效的应急响应措施。总之,传统工程科学研究没有与管理科学有机结合,使船舶安全领域的科学研究事倍功半。船舶设计部门和航运界有关人士应该认真反省现行船舶设计概念与航运安全管理水平的科学性以及相关科学研究的方针策略。

鉴于上述,后继研究宜将已有研究成果深入并延伸,重视融入管理科学理论和技术,使工程科学与管理科学有机结合,瞄准风险中的安全问题,重点研究在船舶设计和营运管理中人为因素风险分析和综合安全评估的基础理论和实施方法以及质量管理与控制有关策略,同时提出应急响应和降低风险措施的决策建议<sup>[9]</sup>。

在船舶设计、航运安全管理和船舶检验规范中应用 HOF 和 FSA,即可通过风险评估和费用/受益评估,尽可能全面合理地使规范-设计-营运-检验的所有方面有机配合,从而使船舶现实安全水平和经济效益达到完美的结合。

可以相信,后继研究成果在船舶设计和航运管理实践中具有重要意义和实用价值。据此,海事界终将实现对海难事故采取合理预报、主动控制的事前预防式处理方法。亦即使船舶在其全寿命期内的

功能、可靠性及鲁棒性等如同人的健康一样,时刻处于有效控制之中。最终形成一个完全的涉及海事界和航运界有关各方的安全化,实现航运更安全、海洋更清洁的目标,把一个更加安全而且经济有效的航运业奉献给国际社会。

### 参 考 文 献

- [1] Paik J K, Mansour A E. A Simple Formulation for Predicting the Ultimate Strength of Ships. *Journal of Marine Science and Technology*, 1995(1):52—56.
- [2] 郭昌捷,周炳焕,唐翰岫. 受损船体极限强度分析与可靠性评估. *中国造船*, 1998, 4(143):49—56.
- [3] Guo Changjie, Zhou Binghuan. Ultimate Strength Analysis and Reliability Assessment for Damaged Hull. *Selected Papers of the Chinese Society of Naval Architects and Marine Engineers, Supplement of Shipbuilding of China*, 1998—1999, 13:81—90.
- [4] 祁恩荣,崔维成. 破损船体非对称弯曲极限强度分析及可靠性评估. *中国造船*, 2000, 2(149):41—48.
- [5] 祁恩荣,崔维成. 船舶碰撞和搁浅后剩余强度可靠性评估. 船舶力学学术委员会首届船舶与海洋工程结构力学学术讨论会, 江西九江, 中国造船编辑部. 1999.
- [6] 唐翰岫,郭昌捷. 舰船纵向弯曲强度可靠性分析的动态模型. *大连理工大学学报*, 1997, 4(32):459—462.
- [7] 郭昌捷,周炳焕. 营运船舶总纵剩余强度评估与预报. *大连理工大学学报*, 1998, 4(38):414—418.
- [8] 桂洪斌,郭昌捷. 二阶二次矩法在船舶结构可靠性分析中的应用. *大连理工大学学报*, 1998, 4(38):493—494.
- [9] 向阳,朱永峨. 风险分析与综合安全评估. *中国船检*, 1999, 12:34—35.

## RESIDUAL STRENGTH STUDY FOR DAMAGED HULL AND RISK ANALYSIS & FORMAL SAFETY ASSESSMENT

Guo Changjie      Zhou Binghuan

(Dalian University of Technology, Dalian 116024)

**Abstract** The residual strength assessment and prediction are studied in the project, including the determination of risk failure scenario, the change law of structural capacity and load effects in the damage of ship structure, the models for structural response and ultimate strength analysis, and dynamic model of reliability assessment. In addition, the project has improved calculation method of ship ultimate load-bearing capacity, and studied the change law, assessment criteria of residual strength, and method of predicting lifetime for aging ships. The valuable conclusions have been obtained by a large number of engineering calculations. The project and its extended results can provide theory foundation and background condition to make risk rule and modern design system, and implement risk analysis and formal safety assessment for the marine. The results will improve design quality and shipping safety of ship and offshore and enhanced society and economic benefits.

**Key words** residual strength, reliability assessment, ultimate load-bearing capacity, HOF, FSA