

应用技术

基于三维几何模型的船舶扶强材自动理想化系统开发研究

李海静¹, 陈有芳², 王丽荣², 唐宜健², 胡丰梁², 章志兵¹

(1. 华中科技大学 材料科学与工程学院, 武汉 430074;

2. 中国船级社技术研发中心, 北京 100007)

摘要: **目的** 开发一套基于三维几何模型的船舶扶强材自动理想化系统。**方法** 针对船舶模型中扶强材截面形状、尺寸多变, 分布密度大, 进行结构规范计算时计算量大、计算条件复杂、人工计算难以涵盖全面的问题, 考虑扶强材的截面变化、依附结构与相交关系, 将船舶模型中的扶强材离散重组简化为单元梁, 并以单元梁为基本单位进行船体梁结构相关强度校核参数的快速自动计算。**结论** 通过扶强材自动理想化系统, 实现了对船舶扶强材间距等 13 项规范校核参数的快速自动计算, 提高了船舶规范校核精度, 缩短了船舶规范建模周期。

关键词: 船舶; 扶强材; 规范计算; 理想化系统; 单元梁

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2020.02.018

中图分类号: U662.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-6457(2020)02-0109-05

Automatic Idealization System of Ship Stiffener Based on Three-dimensional Geometric Model

LI Hai-jing¹, CHEN You-fang², WANG Li-rong², TANG Yi-jian², HU Feng-liang², ZHANG Zhi-bing¹

(1. School of Materials Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;

2. China Classification Society Technology R & D Center, Beijing 100007, China)

ABSTRACT: The paper aims to develop an automatic idealization system for ship stiffeners based on a three-dimensional geometric model. In view of the variable shape and size of the stiffeners in the ship model, and the large distribution density, the large calculation of structural rules, the complex calculation conditions, and the difficulties for manual calculations to cover comprehensive problems, considering the cross-section, the attachment structures and the intersection relationships, the stiffeners were reconstructed into unit beams to calculate relevant strength parameters of hull girder structures and hull stiffener plate structures with unit beam as the basic unit quickly and automatically. Through the automatic idealization system of stiffeners, fast and automatic calculation of 13 standard verification parameters such as the distance between stiffeners is realized, improving the accuracy of ship specification verification and shortening the cycle of ship specification design.

KEY WORDS: ship; stiffener; calculation of structural rules; idealization system; unit beam

疲劳失效是影响船舶寿命的重要因素,也是船舶结构设计中不容小觑的部分^[1]。目前普遍采用简化

计算的方式来校核船舶结构强度,按照评估范围不同,可分为局部结构计算、舱段结构计算与全船结构

收稿日期: 2019-12-24

基金项目: 国家自然科学基金(51609089)

作者简介: 李海静(1995—),女,硕士生,主要研究方向为船舶CAD/CAE集成。

通讯作者: 章志兵(1978—),男,博士,副教授,主要研究方向为汽车船舶CAD/CAE集成。

计算^[2-6]。校核时，面对数量庞大、截面形状尺寸多变、方向各异的筋结构，设计人员往往采用抽样法进行筋校核。这种方式受到计算数量、样本分布的制约，经验依赖度高，计算工作量大，效率低下，可靠性差。基于此，文中提出了一套船舶扶强材自动理想化系统，实现对分布密集、复杂多样的船舶扶强材的批量自动规范计算，降低校核的人工依赖性，提高校核准确性，从而提高船舶设计效率，保障设计质量。

1 扶强材理想化系统体系结构

文中所提出的船舶扶强材自动理想化系统隶属于船舶工程计算软件 Compass 3D 集成系统。该系统集 CAD 建模模块^[7-9]、SDR 数据管理模块^[10]、CAE 有限元分析模块^[11-12]、SDP 规范计算模块^[13]于一体，设计人员可以一站式完成船体建模、分析、校核的全过程，无需处理各子系统间的过渡，操作简洁，用户友好度高。

规范计算子系统用于部分三维模型建立后。在规范计算子系统中，板结构与筋结构被离散为子板与子筋单元，重组后构成基本计算单元。模型示意图如图 1 所示。

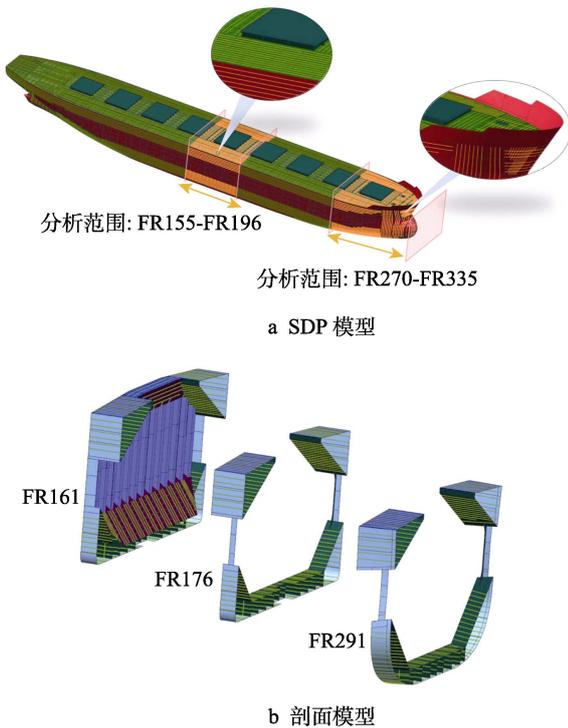


图 1 模型示意图
Fig.1 Model diagram

2 扶强材理想化系统功能设计

系统功能设计见图 2。

2.1 单元梁快速自动识别

扶强材，也称为加强筋，是为了增强船体金属板

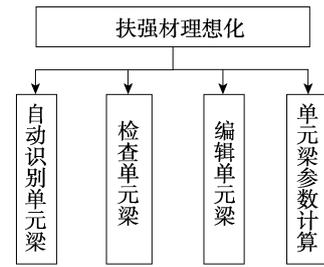


图 2 系统功能设计
Fig.2 Design of system function

结构的刚度和强度所引入的钢质船体结构材料^[14]。在船体三维模型中，加强筋依附于板架，由理论线、复线和筋三维模型组成，如图 3 所示。其中，复线用于规范计算；理论线反应了加强筋在 CAD 模型中的空间分布；筋三维模型则直观地呈现出该加强筋的空间形态，包括截面形状、截面尺寸、依附状况、倾斜角度等。

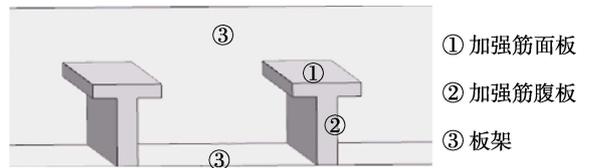


图 3 加强筋模型描述
Fig.3 Description of stiffener model

在经过预处理的目标船体模型中，原始的整段加强筋经过一定规则的切割，被离散为多段子筋，每个子筋都继承了其父筋的相关属性。将共用端点且该端点未终止于结构相交处的子筋集合记录为一个筋计算单元，称为单元梁，如图 4 所示。

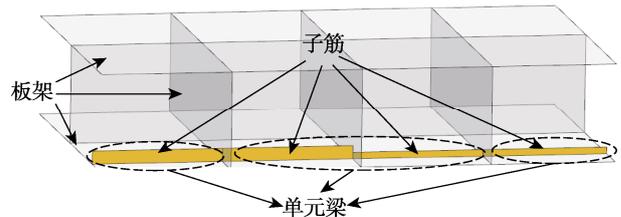


图 4 单元梁模型描述
Fig.4 Description of unit beam model

单元梁识别的总体流程如图 5 所示。① 步骤 1 为初始化子筋相交关系，提取分析范围内的全部子筋，按照依附板架对子筋进行分组，以分组为单位，对子筋、子筋端点进行编号，并记录子筋之间的相交关系；② 步骤 2 为识别可构成单元梁的子筋集合，以初始化分组为分析单位，首先任意获取一个子筋 (Curve1)，任取一侧端点 (Point11)，根据初始化相交关系，搜索到与其相连的子筋 (Curve2)，并判断相连子筋的非共用端点 (Point22) 是否与板架结构相交，如果相交，则该端终止，转到初始子筋的另一侧端点 (Point12) 继续进行上述操作，如果相连子筋的

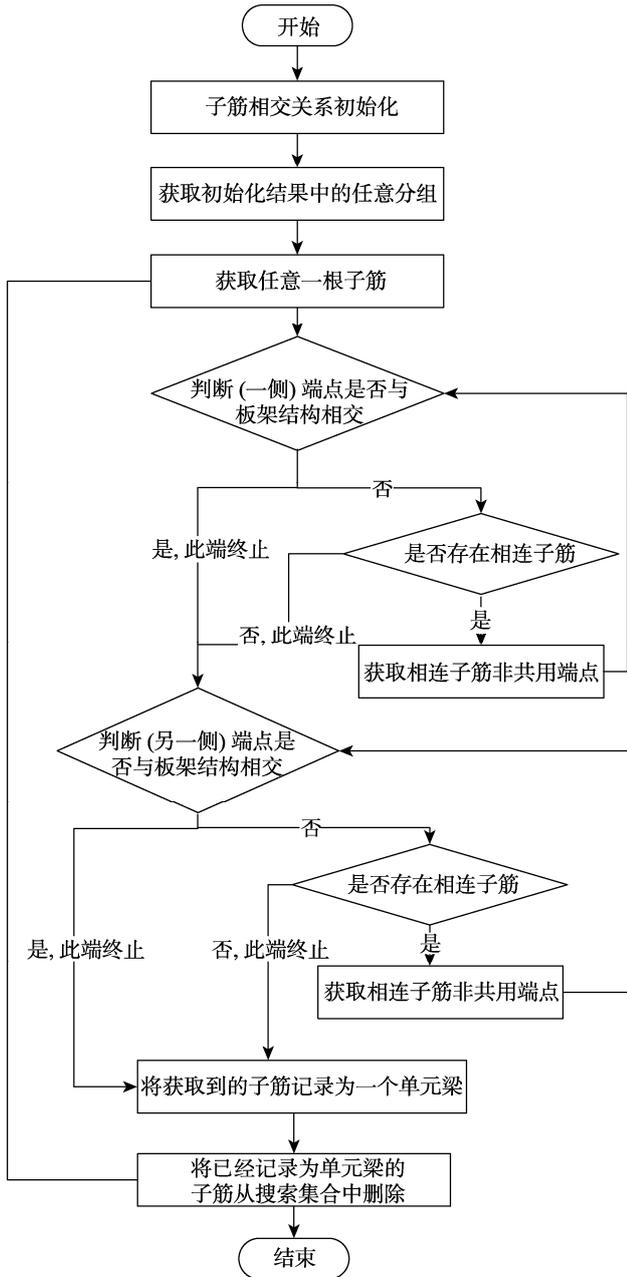


图 5 单元梁自动识别流程

Fig.5 Automatic recognition flowchart of unit beam

非共用端点 (Point22) 不与板架结构相交, 则以该点作为基点, 继续搜索相连子筋并进行板架相交性判断, 直至非共用端点与板架相交或者已经到达板边界, 如图 6 所示, 在这个过程中, 如果通过一个端点可以搜索到多个相连子筋, 则根据相连子筋与用于搜索的上层子筋的夹角进行筛选, 选择夹角最接近平角

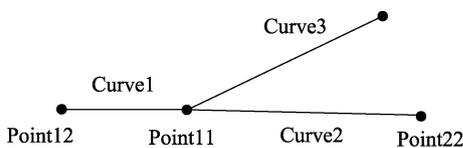


图 6 识别相连曲线示意图

Fig.6 Identifying connected curves

的子筋作为唯一的目标子筋; ③ 步骤 3 为搜索到的子筋集合记录相同的标识, 构成一个单元梁, 采用自定义数据对象进行存储, 当分析范围内所有的子筋都加入且只加入到唯一的单元梁后, 即完成了单元梁的快速自动识别, 通过单元梁的快速自动识别, 将离散后的加强筋重新组合简化为若干单元梁, 从而实现相关规范参数的快速准确计算。

2.2 船体梁结构强度校核参数分析

船体梁结构强度校核分析是以单元梁为单位对船体局部强度模型进行相关校核。对于加强筋而言, 需要校核的参数包含压力载荷计算点、弯曲应力载荷计算点、单元梁间距、带板与水平面夹角、单元梁两侧的舱室环境等共 13 项参数。下面以单元梁间距为例, 进行简要介绍。

在船舶结构中, 存在许多大跨度加筋板结构, 比如甲板、横向舱壁等, 板架上加强筋的分布、尺寸对板架强度的影响很大^[15]。单元梁间距是单元梁与其邻近两侧单元梁的垂直距离。由于船舶三维模型在转换过程中经过了多次切割, 剖面模型中存在许多碎边、悬臂边、不闭合区域, 如图 7 所示。如果采用直接搜索两侧单元梁求解的方式, 计算结果和计算速度都会受到影响。在校核误差允许的条件下, 最终采用等效简化的方式来计算单元梁间距。

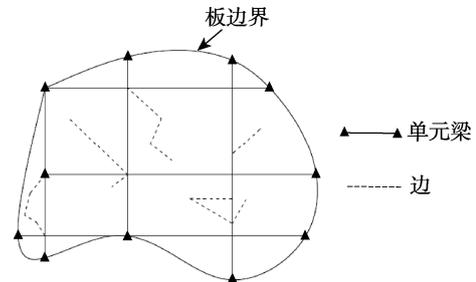


图 7 间距示意图

Fig.7 Pitch diagram

据单元梁端部形式, 将单元梁分为屈曲梁和非屈曲梁两类。其中, 由非屈曲梁、板相交缝围成的区域称作屈服板格; 由屈服梁、屈曲梁和板相交缝围成的区域称作屈曲板格。采用矩形等效的方法, 将非矩形板格等效为矩形板格, 如图 8 所示。分别在单元梁 B_1B_2 两端 (B_1, B_2) 搜索板格, 并获取到非矩形板格 1 和板格 2 的面积, 用板格面积除以单元梁跨距即可

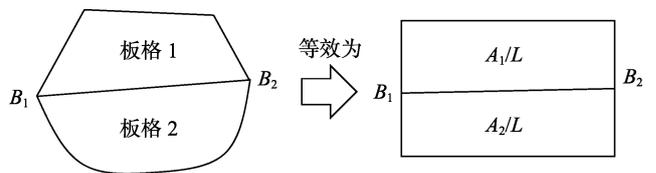


图 8 板格矩形等效示意图

Fig.8 Rectangle equivalent diagram of panel

计算出对应的等效间距。

采用矩形等效法简化后的理想化板格如图9所示。

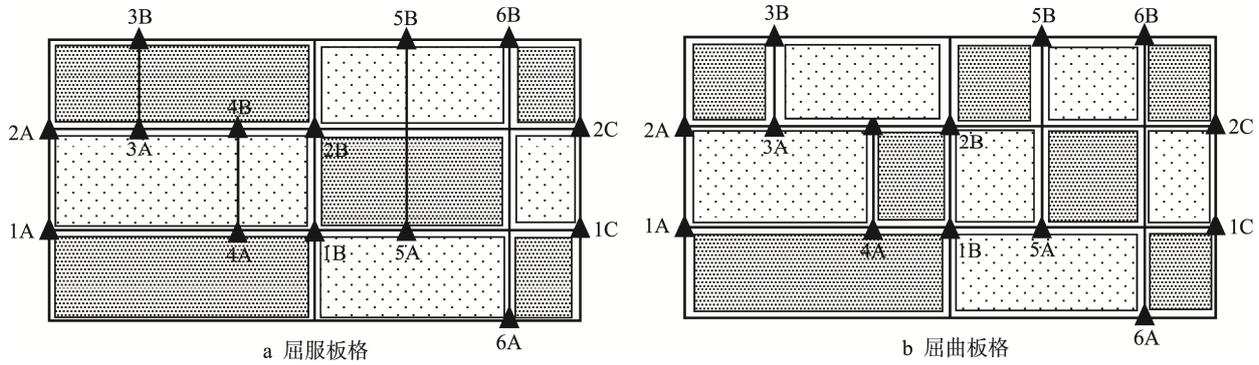


图9 理想化板格示意图

Fig.9 Diagram of idealized girder

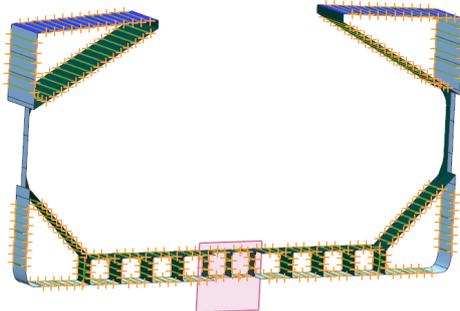
示。对每个结构板而言，只需要进行一次板格分组，即可计算出整个板架上所有单元梁之间的间距。

3 应用实例

基于NX11.0平台，使用C++语言开发上述船舶扶强材自动理想化系统，并在以油船和散货船为代表的船型三维模型上进行测试。测试结果表明，在不同

纵向位置处，扶强材自动理想化系统均可快速、准确地输出剖面中所有筋的校核参数分析结果。

图10是180000DWT散货船FR176位置处剖面模型的扶强材自动理想化系统计算结果示意图。其中，模型的结构建模公差为2.0mm。在Intel(R) Core(TM) i5-6400、CPU 2.70 GHz、8 G内存的测试机上



a 自动理想化示意图

操作功能		参数属性输入窗口																																																													
<ul style="list-style-type: none"> 双層縱桁_Y5880.00-P.3 <ul style="list-style-type: none"> Plate Stiffner 雙層縱桁_Y9240.00-P.4 <ul style="list-style-type: none"> Plate Stiffner 雙層縱桁_Y12600.00-P.5 <ul style="list-style-type: none"> Plate Stiffner 雙層縱桁_Y15960.00-P.6 <ul style="list-style-type: none"> Plate Stiffner 雙層縱桁_Y-2520.00-S.7 <ul style="list-style-type: none"> Plate Stiffner 雙層縱桁_Y-5880.00-S.8 <ul style="list-style-type: none"> Plate Stiffner <ul style="list-style-type: none"> SS_48 SS_52 SS_49 SS_50 雙層縱桁_Y-9240.00-S.9 <ul style="list-style-type: none"> Plate Stiffner 雙層縱桁_Y-12600.00-S.10 <ul style="list-style-type: none"> Plate Stiffner 雙層縱桁_Y-15960.00-S.11 <ul style="list-style-type: none"> Plate Stiffner 頂翼內向縱隔板_Y0-C.1 <ul style="list-style-type: none"> Plate Stiffner 頂翼內向縱隔板_Y3400-P.2 <ul style="list-style-type: none"> Plate Stiffner 	<table border="1"> <thead> <tr> <th>屬性</th> <th>值</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>名稱</td><td>SS_50</td></tr> <tr><td>剖面形狀及尺寸</td><td>FB150.0*13.0</td></tr> <tr><td>材料</td><td>AH32</td></tr> <tr><td>腐蝕增量t_c[mm]</td><td>3.0</td></tr> <tr><td>屈曲邊</td><td><input type="checkbox"/></td></tr> <tr><td>完整跨距[m]</td><td>2.730</td></tr> <tr><td>有效彎跨距b_{dj}[m]</td><td>0.000</td></tr> <tr><td>有效剪跨距h_r[m]</td><td>0.000</td></tr> <tr><td>屈曲左間距s₁[mm]</td><td>645.0</td></tr> <tr><td>屈曲右間距s₂[mm]</td><td>590.0</td></tr> <tr><td>屈曲左間距s₁[mm]</td><td>645.0</td></tr> <tr><td>屈曲右間距s₂[mm]</td><td>590.0</td></tr> <tr><td>端點1[m]</td><td>(144.070,-5.880,1.880)</td></tr> <tr><td>端點1邊界條件</td><td>剛固</td></tr> <tr><td>端點2[m]</td><td>(141.340,-5.880,1.880)</td></tr> <tr><td>端點2邊界條件</td><td>剛固</td></tr> <tr><td>壓力計算點[m]</td><td>(142.705,-5.880,1.880)</td></tr> <tr><td>船體梁彎曲力計算點(屈曲)[m]</td><td>(142.705,-6.030,1.880)</td></tr> <tr><td>船體梁彎曲力計算點(屈曲)[m]</td><td>(141.340,-5.880,1.880)</td></tr> <tr><td>抗彎效率</td><td>1.000</td></tr> <tr><td>抗剪效率</td><td>1.000</td></tr> <tr><td>帶板名稱</td><td>PL_雙層縱桁_Y-5880.00-S.8_19</td></tr> <tr><td>帶板與水平面的夾角α[deg]</td><td>90.000</td></tr> <tr><td>腹板與帶板夾角φ</td><td>90.000</td></tr> <tr><td>兩側板格</td><td>EPP1,EPP5</td></tr> <tr><td>同側船室</td><td>SWBTSS WBT</td></tr> <tr><td>異側船室</td><td>SWBTSS WBT</td></tr> <tr><td>無應變相關結構</td><td><input type="checkbox"/></td></tr> <tr><td>前翼節點形式</td><td></td></tr> <tr><td>后翼節點形式</td><td></td></tr> </tbody> </table>	屬性	值	名稱	SS_50	剖面形狀及尺寸	FB150.0*13.0	材料	AH32	腐蝕增量t _c [mm]	3.0	屈曲邊	<input type="checkbox"/>	完整跨距[m]	2.730	有效彎跨距b _{dj} [m]	0.000	有效剪跨距h _r [m]	0.000	屈曲左間距s ₁ [mm]	645.0	屈曲右間距s ₂ [mm]	590.0	屈曲左間距s ₁ [mm]	645.0	屈曲右間距s ₂ [mm]	590.0	端點1[m]	(144.070,-5.880,1.880)	端點1邊界條件	剛固	端點2[m]	(141.340,-5.880,1.880)	端點2邊界條件	剛固	壓力計算點[m]	(142.705,-5.880,1.880)	船體梁彎曲力計算點(屈曲)[m]	(142.705,-6.030,1.880)	船體梁彎曲力計算點(屈曲)[m]	(141.340,-5.880,1.880)	抗彎效率	1.000	抗剪效率	1.000	帶板名稱	PL_雙層縱桁_Y-5880.00-S.8_19	帶板與水平面的夾角α[deg]	90.000	腹板與帶板夾角φ	90.000	兩側板格	EPP1,EPP5	同側船室	SWBTSS WBT	異側船室	SWBTSS WBT	無應變相關結構	<input type="checkbox"/>	前翼節點形式		后翼節點形式	
屬性	值																																																														
名稱	SS_50																																																														
剖面形狀及尺寸	FB150.0*13.0																																																														
材料	AH32																																																														
腐蝕增量t _c [mm]	3.0																																																														
屈曲邊	<input type="checkbox"/>																																																														
完整跨距[m]	2.730																																																														
有效彎跨距b _{dj} [m]	0.000																																																														
有效剪跨距h _r [m]	0.000																																																														
屈曲左間距s ₁ [mm]	645.0																																																														
屈曲右間距s ₂ [mm]	590.0																																																														
屈曲左間距s ₁ [mm]	645.0																																																														
屈曲右間距s ₂ [mm]	590.0																																																														
端點1[m]	(144.070,-5.880,1.880)																																																														
端點1邊界條件	剛固																																																														
端點2[m]	(141.340,-5.880,1.880)																																																														
端點2邊界條件	剛固																																																														
壓力計算點[m]	(142.705,-5.880,1.880)																																																														
船體梁彎曲力計算點(屈曲)[m]	(142.705,-6.030,1.880)																																																														
船體梁彎曲力計算點(屈曲)[m]	(141.340,-5.880,1.880)																																																														
抗彎效率	1.000																																																														
抗剪效率	1.000																																																														
帶板名稱	PL_雙層縱桁_Y-5880.00-S.8_19																																																														
帶板與水平面的夾角α[deg]	90.000																																																														
腹板與帶板夾角φ	90.000																																																														
兩側板格	EPP1,EPP5																																																														
同側船室	SWBTSS WBT																																																														
異側船室	SWBTSS WBT																																																														
無應變相關結構	<input type="checkbox"/>																																																														
前翼節點形式																																																															
后翼節點形式																																																															

b 計算結果示意图

图10 180000DWT散货船FR161剖面自动理想化计算结果

Fig.10 Automatic idealization calculation result of FR161 section of 180000DWT bulk carrier

测试发现,剖面模型中共 220 个单元梁、每个单元梁 13 项参数的计算过程共耗时约 15 s。

4 结论

主要研究了基于三维几何模型的船舶扶强材自动理想化系统。本系统可对船舶三维模型中分布密集、截面多变、依附情况复杂、人工难以计算的扶强材规范校核参数进行快速自动的理想化计算。结果表明,本系统可以快速准确地计算出船舶剖面模型中所有扶强材的压力载荷计算点、弯曲应力载荷计算点、间距、两侧的舱室环境等共 13 项规范校核参数,解决了人工校核的多项不便,有效提高了船舶加强筋结构校核的精度和效率。

参考文献:

- [1] 闫晋辉,蔡斯渊,王德禹. 船舶结构典型节点的优化分析[J]. 舰船科学技术, 2011, 33(11): 51—55.
YAN Jin-hui, CAI Si-yuan, WANG De-yu. Optimization Analysis for the Typical Details of Ship Structures[J]. Ship Science and Technology, 2011, 33(11): 51—55.
- [2] LI Zhi-yuan, JONAS W R, GAUTE S. Time-domain Fatigue Assessment of Ship Side-shell Structures[J]. International Journal of Fatigue, 2013(55): 276—290.
- [3] ABS, Guide for the Fatigue Assessment of Offshore Structures[S].
- [4] 胡伟成. HCSR 直接计算船体梁载荷研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2013.
HU Wei-cheng. Hull Girder Loads in the Direct Strength Analysis of HCSR[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2013.
- [5] YANG Peng, GU Xue-kang. Discussion of Some Important Parameters in Fatigue Loading Calculation for Ship Structural Design[J]. Journal of Ship Mechanics, 2012, 16(6): 658—667.
- [6] IACS, Common Structural Rules for Bulk Carriers and Oil tanks[S].
- [7] 罗辉,林庆忠,章志兵,等. 基于 NX 的船舶型线三维参数化建模系统构建[J]. 船海工程, 2018, 47(5): 42—46.
LUO Hui, LIN Qing-zhong, ZHANG Zhi-bing, et al. A 3D Parametric Modeling System of Ship Hull Lines Based on NX[J]. Ship & Ocean Engineering, 2018, 47(5): 42—46.
- [8] 章志兵,毛祥新,孔海骄,等. 面向审核流程的船舶 CAD 系统建模方法研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2019, 51(11): 138—143.
ZHANG Zhi-bing, MAO Xiang-xin, KONG Hai-jiao, et al. System Modeling Method Research of Ship CAD for Audit Process[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2019, 51(11): 138—143.
- [9] 罗兰,章志兵,孟凡冲,等. 基于特征替换的船体结构批量参数化建模方法[J]. 船舶工程, 2018, 40(7): 113—118.
LUO Lan, ZHANG Zhi-bing, MENG Fan-chong, et al. Parametric Modeling Method Based on Feature Replacement for Batch Modeling of Hull Structure[J]. Ship Engineering, 2018, 40(7): 113—118.
- [10] 章志兵,邓建坤,孟凡冲,等. 船舶集成设计系统的模型管理方法及转换方法研究[J]. 精密成形工程, 2018, 10(6): 128—134.
ZHANG Zhi-bing, DENG Jian-kun, MENG Fan-chong, et al. Methods for Model Management and Transformation of Ship Integrated Design System[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2018, 10(6): 128—134.
- [11] 章志兵,殷威,王丽荣,等. 考虑理想化过程的船舶有限元属性继承方法[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2018, 46(7): 84—88.
ZHANG Zhi-bing, YIN Wei, WANG Li-rong, et al. Ship FEM Attribute Inheritance Method Considering Model Idealization Procedure[J]. Journal of Huazhong University of Science & Technology (Natural Science Edition), 2018, 46(7): 84—88.
- [12] 章志兵,林洋,王丽荣,等. 基于 CAD 模型的船舶有限元建模方法[J]. 船海工程, 2018, 47(5): 27—31.
ZHANG Zhi-bing, LIN Yang, WANG Li-rong, et al. Ship FEM Modeling Method Based on CAD Platform[J]. Ship & Ocean Engineering, 2018, 47(5): 27—31.
- [13] 章志兵,尚云飞,孟凡冲,等. 基于 NX 平台的船舶板区域识别算法研究[J]. 精密成形工程, 2018, 10(5): 148—153.
ZHANG Zhi-bing, SHANG Yun-fei, MENG Fan-chong, et al. Ship Plate Area Recognition Algorithm Based on NX Platform[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2018, 10(5): 148—153.
- [14] SATISH KUMAR Y V, MUKHOPADHYAY M. Finite Element Analysis of Ship Structures Using a New Stiffened Plate Element[J]. Applied Ocean Research, 2000, 22(6): 361—374.
- [15] 乔迟,张世联. 大跨度加筋板架优化设计研究[J]. 舰船科学技术, 2015, 37(8): 23—26.
QIAO Chi, ZHANG Shi-lian. Optimization Design of Large-span Stiffened Panel[J]. Ship Science and Technology, 2015, 37(8): 23—26.