DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.201801024

面向审核流程的船舶 CAD 系统建模方法研究

章志兵[1],毛祥新[1],孔海骄[1],孟凡冲[2],李巧敏[1],柳玉起[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: 为提高船舶 CAD 建模效率,同时为 CAE 分析和船体结构设计程序(SDP)校核提供通用数据模型,设计并开发了一套面向审核流程的船舶 CAD 系统. 首先考虑审核流程的需求,采用几何与数据相结合的方式描述船舶模型,所有船舶构件均采用无厚度的几何片体表示. 其次建立包含发布模型、设计主模型和工具模型的三层板架模型,以板架属性的形式记录板架及其附属结构的几何关系,并结合自定义结构导航树、通用三维建模软件 NX 装配树和特征树组织管理板架及其附属结构. 然后基于轻量化数据库 SQLite 设计面向全生命周期的标准库系统,用来存储和管理船舶标准数据,确保快速查询. 最后通过参数化建模与基于自定义特征技术的结构建模方法,快速生成船舶模型. 该系统具有较强的交互性和稳定性,建模效率高且模型数据量小;模型经过数据转换可直接进行 CAE 分析和 SDP 校核,避免重复设计;数据库技术的使用实现了 CAD、CAE 和 SDP 模块间的数据共享,解决了数据分散不一致的问题;自定义结构导航树符合专业船舶设计人员的使用要求.

关键词: 船舶 CAD;三维建模;审核流程;参数化建模;结构建模

中图分类号: U662.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2019)11-0138-06

System modeling method research of ship CAD for audit process

ZHANG Zhibing[1], MAO Xiangxin[1], KONG Haijiao[1], MENG Fanchong[2], LI Qiaomin[1], LIU Yuqi[1]

(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: To improve the efficiency of ship modeling and provide an original data model for CAE analysis and Structure Design Program (SDP) checking, a ship CAD system for the audit process is designed and developed. By considering the needs of the audit process, both the geometry and the data of the ship model are described, with all ship structures represented by zero-thickness sheet body. Besides, a three-laminated panel model including release model, master model and tool model is established to record the geometric relationship between the panel and its subsidiary structures in the form of panel attributes. The panel and its subsidiary structures are managed by combining the custom structure navigation tree and the assembly tree, the feature tree of the generic 3D modeling software NX. Furthermore, for storing and managing the ship's standard data and ensuring inquiry efficiency, a standard library system for the whole life cycle is designed based on a lightweight database named SQLite. Finally, the ship model is generated quickly by parametric modeling and structural modeling based on custom feature technology. It is verified that the system proposed in this paper has strong interactivity and stability, and the modeling efficiency is improved with smaller amount of data. After the data conversion, the CAD model can be used directly by CAE and SDP, thus avoiding repetitive design. The use of database technology achieves data sharing between CAD, CAE and SDP modules and solves the problem of data inconsistent and dispersion. The custom structure navigation tree meets the requirements of professional ship designers.

Keywords: ship CAD; 3D modeling; audit process; parametric modeling; structural modeling

船舶工业的快速发展,使得船舶 CAD 技术成为缩短设计生产周期、提高产品质量和降低总体成本的有效方法[1-2]. 目前使用较为广泛的船舶三维设计软件主要有 TRIBON、CATIA、IntelliShip、NX、FORAN 等[3]. TRIBON 虽解决了船舶设计中面临的主要问题,但其软件封闭性较强,三维图形的拓扑造型能力较弱[4];CATIA 自带的模板数量较少,并且没有标准数据库[5];IntelliShip 和 NX 生成的模型数据量较大,操作、存储不方便并且降低软件的运行速度[6];FORAN 在生成外壳时需要用户输入大量信息,建模效率低[7-8]. 另外,上述软件缺乏对 CAE 预处理和 SDP 校核的针对性,不满足审核流程的需求.

基于 NX 软件开发平台,使用 NX/Open MenuScript 和 NX/Open BlockUI Style 进行软件菜单和界面设计,利用 NX/Open API 语言模块进行船舶

收稿日期: 2018-01-04
基金项目: 国家自然科学基金(51609089)
作者简介: 章志兵(1978—),男,博士,讲师;
柳玉起(1966—),男,教授,博士生导师
通信作者: 柳玉起,E-mail:liuyq@mail.hust.edu.cn

CAD 系统开发[9-10]. 基于标准数据库[11]，通过结构建模和参数化建模方法，采用几何和数据相结合的方式描述船舶模型，使得模型数据量小且建模效率大大提高[12]. 同时面向审核流程，为 CAE 和 SDP 模块提供通用的原始数据模型，减少重复设计，实现数据共享.

1　船舶 CAD 系统体系结构

1.1　审核流程中各模块之间的关系

船舶审核流程主要包括船舶 CAD 建模、CAE 预处理、SDP 校核和性能计算 4 部分，4 者的关系如图 1. 其中，CAE 模块主要进行有限元网格划分和属性继承等，SDP 校核模块主要进行船舶规范计算，如识别腐蚀环境，计算腐蚀余量等. CAD 系统在整个审核流程中扮演模型创建与数据提供的角色，通过预处理转换，将 CAD 模型转换为 CAE 有限元分析模型和 SDP 校核模型.

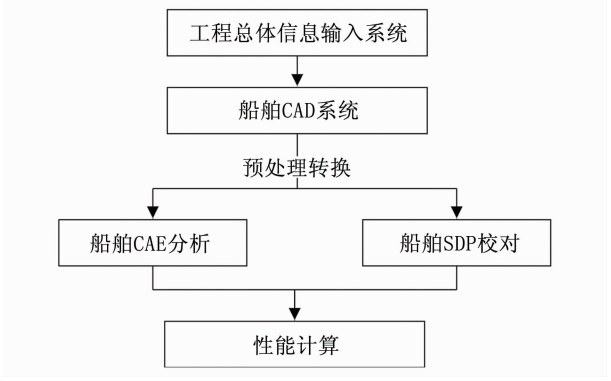

图 1　审核流程各模块关系

Fig. 1　Relationship between various modules of audit process

1.2　三层软件结构

系统采用分层设计原则，分为界面显示层、业务逻辑层和数据访问层，见图 2.

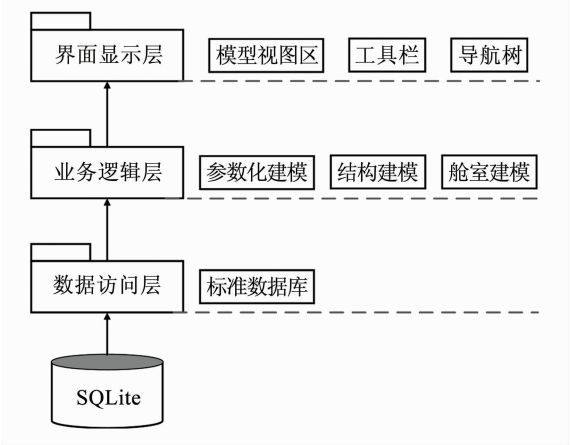

图 2　系统架构

Fig. 2　System framework

1）界面显示层 提供人机交互的途径，其中视图区显示当前建模模型；通过工具栏可快速进入各功能对话框界面，进行数据输入和参数设置；自定义结构导航树用来新建和管理板架结构.

2）业务逻辑层 主要由结构建模、参数化建模和舱室建模三部分组成，包括船舶外形、货舱区域建模、艏艉结构建模、骨材、开孔和面板等功能. 其主要负责处理用户输入的请求和数据，从数据库读取标准数据，完成船舶的几何建模与数据管理.

3）数据访问层 提供基于 SQLite 的标准库系统，主要包括材料库、型材库、肘板库和节点库，可通过 NX 图形化界面对船舶标准数据进行增删改查. 标准库面向审核流程的全生命周期，提供导入和导出功能，导出的数据可供 CAE 和 SDP 模块使用，保证数据的一致性.

2　船舶结构组织管理关系

船舶 CAD 模型由几何和数据两部分组成，几何是指板筋实体、板缝线、骨材理论线等，数据主要是指板筋属性和几何关联关系.

2.1　板架组织管理关系

板架几何对应着 NX 中的片体（Sheet Body）. 板架（除外壳和甲板外）通常会以其他板架为边界而生成. 如果边界板架与正在创建的板架不在同一 Part 下，则需要使用 NX 的 Wave 参数关联技术将前者关联到后者所在的 Part，形成一个副本，导致模型数据量增大. 而如果将所有的板架都放在同一 Part 节点下，一个板架的更新将会导致其他板架的更新，严重降低建模效率. 另外，板架采用自定义特征技术创建，除 Sheet Body 之外，还包括创建过程中产生的中间对象，如曲线、基准平面等，而这些中间对象是 CAE 和 SDP 模块所不需要的.

为解决上述问题，系统建立 3 层板架模型：设计主模型、发布模型和工具模型，3 者通过类型值区分，其关系见图 3，括弧内数字表示类型值.

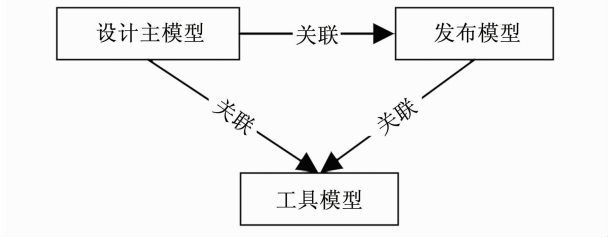

图 3　板架模型关系

Fig. 3　Relationship between panels

1）设计主模型 采用 NX 最新的自定义特征技术创建的板架特征（Panel），为参数化驱动模型，是其他板架模型的设计源头. 可编辑修改其参数，在未断开关联的情况下可自动引起其他模型更新，其类型属性值为 1，在视图中默认被隐藏.

2）发布模型 这是最终发布给 CAE 和 SDP 模块使用的板架模型. 每次新建设计主模型时，在结构板 Part 下新建二级装配节点，然后使用 NX 的 Wave 参数关联技术，将主模型中的 Sheet Body 关联该节点下，形成发布模型，类型属性值为 2. 仅在设计主模型创建时才会生成对应的发布模型，所有的板架附属结构都将在发布模型上生成，见图 4.

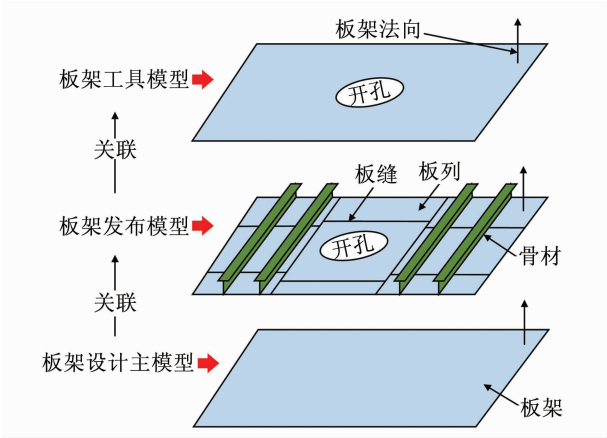

图 4 3 种板架模型

Fig. 4 Three kinds of panel model

3）工具模型 当船舶结构要使用其他板结构做输入对象时，使用 NX 的 Wave 参数关联技术将后者关联到前者所在的 Part. 因为这些关联之后的板架结构只是用来辅助其他结构设计，并不参与 CAE 分析和 SDP 校核，所以称为工具模型，类型属性值为 3. 工具模型可从主模型或发布模型关联产生，在视图中默认被隐藏.

系统通过自定义结构树、NX 装配树和特征树共 3 种导航树来管理板架结构. 结构树按船体结构索引，分为型线、主船体、上层建筑及甲板室、其他区域四个部分；装配树表征装配关系；特征树展现建模历史，且结构树下的板架节点通过设计主模型与发布模型一一对应，3 种导航树之间的关系见图 5. 所有的设计主模型都存放在结构板. prt 下，避免创建板架时的 Wave 参数关联问题；每个板架发布模型存放在不同的装配节点下，可与设计主模型断开关联，避免关联更新，提高建模效率；工具模型存放在对应的发布模型节点下. 如图 5 中所示，结构板. prt 下 Panel(1)“外板_C. 1”为设计主模型，外板_C. 1. prt 下的 Linked Body“外板_C. 1”为发布模型，而 Linked Body“舱壁板_S. 3′1”则为工具模型. 单击结构树下的主甲板_C. 1 节点，主甲板. prt 特征树中的 Linked Body“主甲板_C. 1”高亮显示.

因为板架几何在 CAD 模型中以 Sheet Body 显示，所以需要将其属性记录到板架几何中，便于后续模块使用，板架主要属性见表 1. 板架几何不含厚度和材料属性，厚度和材料属性记录在板列对象中.

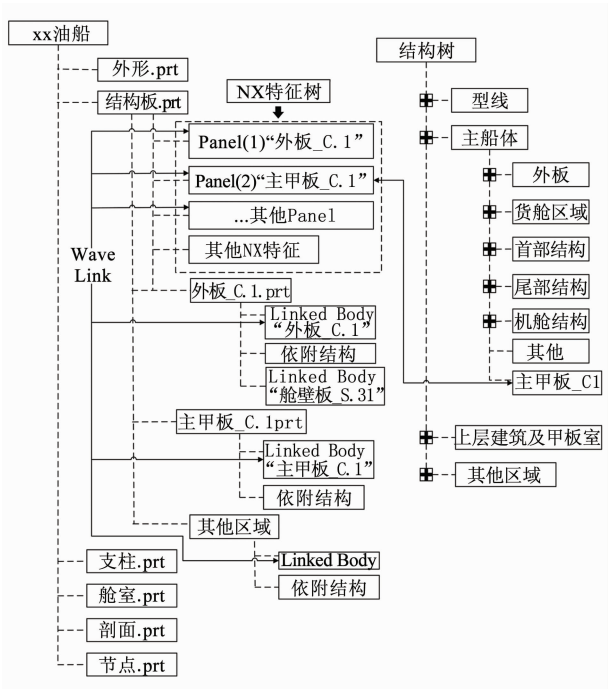

图 5 3 种导航树之间的对应关系

Fig. 5 Correspondence between three navigation trees

表 1 板架主要属性

Tab. 1 Main attributes of panel

属性名称	含义
ID	使用 GUID 表示，是板架唯一标识
名称	板架的名称
对象类型	属性值为 101_0，表示板架
板架类型	主模型，发布模型，工具模型
水密性	与舱室边界相关的板为水密板，其他板为非水密板
板厚方向	板厚度方向与板架面法向的关系，如图 6
附属结构	包含多个属性组，每组对应一种附属结构 ID 的集合

图 6 板厚度方向与板架面法向的关系

Fig. 6 Relationship between panel thickness direction and panel surface normal

基于以上设计，在模型预处理转换时，通过对象类型和板架类型可确定板架发布模型，通过板架的附属结构属性组可获取该板架上所有的附属结构.

2.2 板架附属结构组织关系

板架附属结构主要有板列、骨材、面板、开孔和节点. 板列是带有不同属性的面(Face)，骨材和面板是带有属性的线，其中面板可当做骨材处理；开孔实际是根据草图拉伸得到实体，用实体修剪板架片体而来；节点在视图中是个带有属性的点. 下面主要介绍板列和骨材的几何和数据管理方式.

在拟合曲面生成板架时，曲率变化较大的地方会出现分片缝，如图 7(b). 划分板在产生板列(Plate)的同时还会产生板缝，其中分片缝和板缝对应 NX 中的边，如图 7(c). 板列是为了对同一板架结构赋予不同的材料(Material)和厚度(Thickness)属性，而板缝和分片缝的存在会影响 CAE 网格划分的质量，在 CAE 分析阶段应该消除[13]. 因此，板列具有材料和厚度等属性数据，板缝和分片缝具有各自对应的标识，供 CAE 分析识别. 图 7 是带有分片缝的板架及板列示意图，其中 P 为 Plate，M 为 Material，T 为 Thickness.

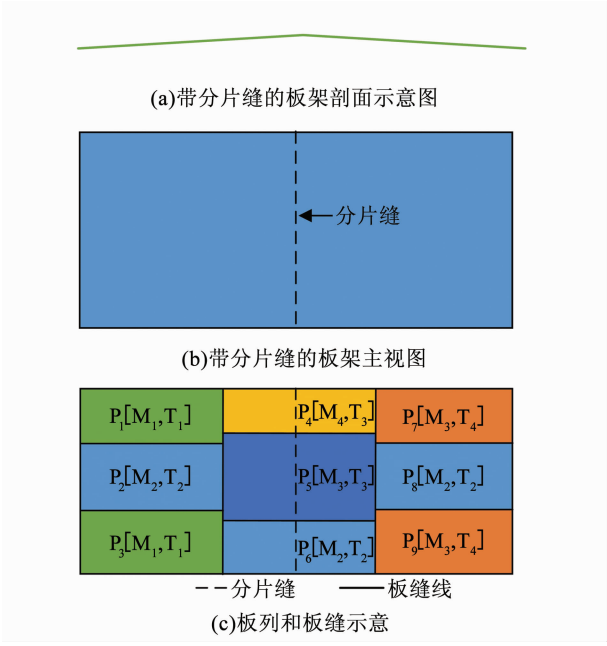

图 7　板列和板缝

Fig. 7　Plates and seams

如图 7(c)，板列属性记录在 Face 上，不同板列可具有不同的材料和厚度属性，水密性和板厚方向从被划分的板架继承而来，不可修改. 板列主要属性见表 2.

表 2　板列主要属性

Tab. 2　Main attributes of plate

属性名称	含义
板架 ID	板列依附板架的 ID
水密性	同板架，见表 1
材料 ID	包括材料等级和类型，以 GUID 表示
厚度	板列厚度
板厚方向	同板架，见图 8

骨材由几何和数据两部分组成，几何包括三维实体和理论线两部分. 其中，三维几何只用来在 CAD 模型做显示，为减小模型数据量，用 Sheet Body 表示. CAE 和 SDP 真正需要的是理论线，数据记录在理论线中.

划分板和开孔都会引起板架更新，板架上存在大量骨材特征，如果骨材关联于板架，那么所有骨材也随之更新，严重降低建模效率. 因此，采用消参和自定义特征相结合的方法创建骨材，骨材创建过程见图 8.

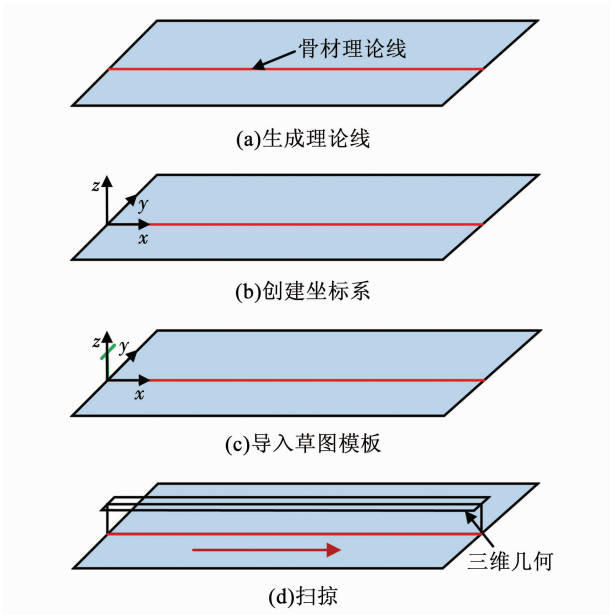

图 8　骨材创建过程

Fig. 8　Process of stiffener creation

1)首先定义理论线并消参，见图 8(a)，消参可保证理论线与板架没有关联关系.

2)在理论线起点创建坐标系，见图 8(b). 型材库中草图模板均放置在坐标系的 *yoz* 面，默认以理论线起点处板架面法向为 *z* 轴(可由用户指定)，起点处理论线切向为 *x* 轴，两者右手定则得到的方向作为 *y* 轴.

3)导入草图模板到步骤 2)中坐标系，如图 8(c).

4)以草图为截面，理论线为引导线进行扫掠生成骨材实体，见图 8(d).

骨材数据主要是骨材的材料和型材属性，记录在理论线中，提供接口供 CAE 和 SDP 模块获取，骨材主要属性信息见表 3.

表 3　骨材主要属性

Tab. 3　Main attributes of stiffener

属性名称	含义
骨材 ID	板架唯一标识，使用 GUID 表示
板架 ID	骨材依附板架的 ID
材料 ID	从材料库读取，以 GUID 表示
型材 ID	从型材库读取，以 GUID 表示
对象类型	属性值为 102_0，表示骨材
腹板方向	骨材腹板朝向
端部属性	表示骨材的端部是否削斜
锚点	骨材截面与理论线的相对位置，如图 9

图 9 为骨材锚点示意图,以骨材截面所在的平面为基准平面,定义理论线起点到终点的方向为理论线方向,图中⊗表示理论线方向指向纸内. 截面相对于理论线的位置就是锚点的取值,如图 3 个锚点值分别为左、中、右.

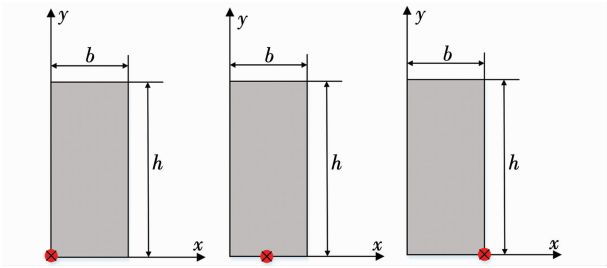

图 9 骨材锚点示意

Fig. 9 Diagram of stiffener anchor

以底边舱横隔板为例,板架及其附属结构的模型见图 10. 图 10(a)是使用开孔功能在板架上创建孔结构,图 10(b)是使用系统划分板功能创建板列和板缝结构,图 10(c)是使用系统的面板功能在孔周围创建面板结构,图 10(d)是使用系统骨材功能生成骨材结构.

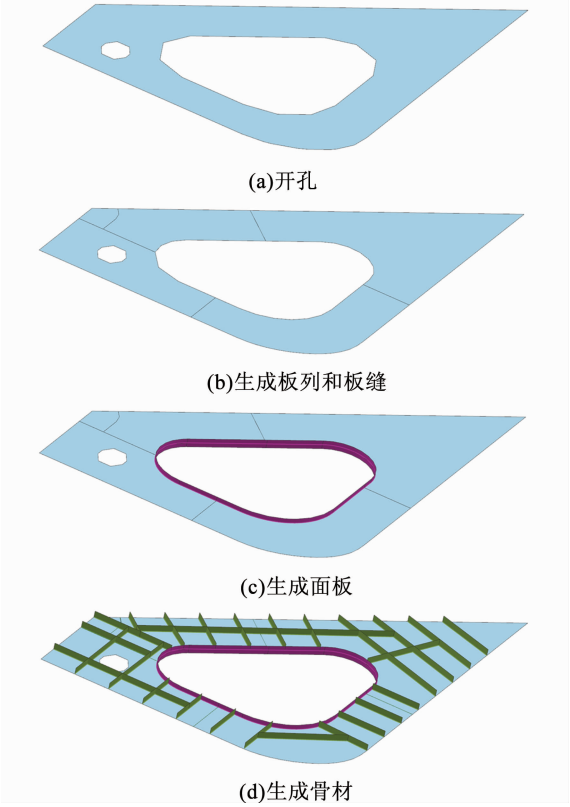

图 10 板架及其附属结构

Fig. 10 Panel and its subsidiary structures

基于上述板架附属结构组织管理方式,通过板架的附属结构属性组可获取该板架上所有的骨材、板列等结构. 在模型预处理转换阶段,将所需几何和数据关联到 CAE 和 SDP 模块形成对应分析模型,结合标准数据库完成船舶的分析和校核工作.

3 船舶 CAD 系统应用实例

传统的机械设计中,主要采用自底向上的设计方法,即先设计零件,然后进行装配,最后得到复杂的模型. 而对于船舶设计等复杂工程领域,往往采用自顶向下的设计方法,先从模型的整体出发然后不断细化,最后进行零部件详细设计[14-15],系统的建模流程见图 11.

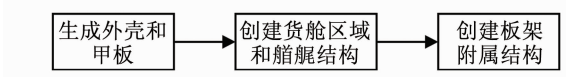

图 11 建模流程图

Fig. 11 Flow chart of modeling

图 12 是利用本船舶 CAD 系统对 318000DWT 超大型油轮进行建模的过程. 图 12(a)是利用系统型表面功能生成外壳和甲板. 图 12(b)是利用系统参数化建模功能生成货舱区域和艏艉结构,局部细节如图 12(c). 图 12(d)是利用结构建模功能创建板架附属结构后完整 CAD 模型的局部细节图.

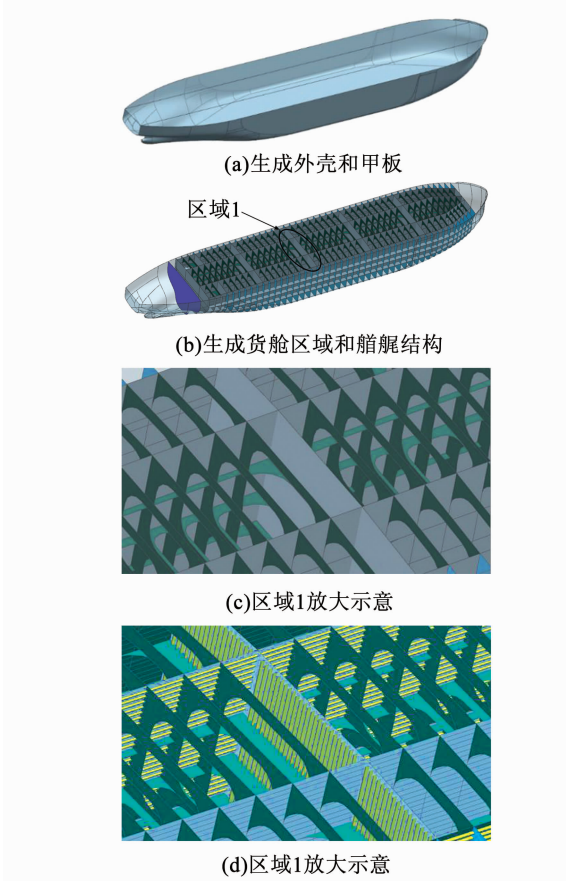

图 12 318000DWT 超大型邮轮建模示例

Fig. 12 Modeling example of 318000DWT VLCC

4 结 论

1)本文采用几何与数据相结合的方法描述船舶模型,充分考虑审核流程其他模块需求,设计并开

发了一套船舶 CAD 系统，在完成船舶 CAD 建模的同时，为 CAE 分析和 SDP 校核提供通用数据模型，避免模型重复设计.

2）采用无厚度的几何片体表示船舶构件并提出三层板架模型，有效的降低模型数据量 ，提高建模效率.

3）采用消参与自定义特征相结合的骨材设计方法，有效的提高模型更新速度.

4）使用船舶结构为索引设计结构导航树，有效的对板架结构进行管理，符合船舶设计人员的使用习惯.

5）基于 SQLite 设计面向全生命周期的数据库，实现审核流程各模块的数据共享，解决数据分散不一致的问题.

参考文献

[1] 管官，林焰，纪卓尚. 基于知识的船体结构快速设计及优化[J]. 船舶力学，2017，21(4)：472. DOI:10.3969/j.issn.1007－7294.2017. 04. 012
GUAN Guan，LIN Yan，JI Zhuoshang. Knowledge-based quick design and optimization for hull structure[J]. Journal of Ship Mechanics，2017，21(4)：472. DOI:10.3969/j.issn.1007－7294.2017.04.012

[2] 武文元. 基于工程数据库的主船体 CAD 系统设计与实现[D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学，2013
WU Wenyuan. Design and implementtation of a main hull cad system based on engineering database[D]. Harbin:Harbin Institute of Technology，2013

[3] 李岩. 船舶三维设计平台关键技术研究[D]. 大连：大连理工大学，2010
LI Yan. Key technology research of ship 3D dedign platform[D]. Dalian：Dalian University of Technology，2010

[4] 倪海参. 主流船舶设计 CAD 软件间船体结构数据交换方法的研究[D]. 上海：上海交通大学，2012
NI Haishen. Transformation of ship panel structure data among principal ship CADs[D]. Shanghai：Shanghai Jiao Tong University，2012

[5] 卢永进，宋一淇，吴盛. CATIA V6 船舶三维设计关键技术研究[C]//2017 年数字化造船学术交流会议论文集，北京：中国造船工程学会，2017：44
LU Yongjin，SONG Yiqi，WU Sheng. Key technology research of ship 3D design on CATIA V6[C]//Proceedings of Digital Shipbuilding Academic Exchange Conference in 2017，Beijing：Chinese Society of Naval Architecture and Marine Engineering，2017：44

[6] ROH M I，LEE K Y. An initial hull structural modeling system for computer-aided process planning in shipbuilding[J]. Advances in Engineering Software，2006，37(7)：457

[7] ROH M I，LEE K Y. Generation of the 3D CAD model of the hull structure at the initial ship design stage and its application[J]. Computers in Industry，2007，58(6)：539

[8] 张凯，谢承福，涂跃红，等. FORAN 软件在船舶总体设计中的应用[J]. 中国舰船研究，2009，4(4)：76. DOI:10.3969/j.issn.1673－3185.2009.04.016
ZHANG Kai，XIE Chengfu，TU Yuehong，et al. Application of FORAN to the geberal design for ships[J]. Chinese Journal of Ship Research，2009，4(4)：76. DOI:10.3969/j.issn.1673－3185.2009.04.016

[9] 吴小康，徐家文. 利用 UG 动态装配实现数控电解加工过程模拟[J]. 哈尔滨工业大学学报，2009，41(11)：258. DOI:10.3321/j.issn:0367－6234.2009.11.062
WU Xiaokang，XU Jiawen. Simulation on numerically controlled electrochemical maching based on UG dynamin assemble[J]. Journal of Harbin Institute of Technology，2009，41(11)：258. DOI:10.3321/j.issn:0367－6234.2009.11.062

[10] 王磊，李浙昆，谭毅，等. UG/Open API 对 UG 二次开发技术研究[J]. 机电产品开发与创新，2007，19(5)：105. DOI:10.3969/j.issn.1002－6673.2006.05.042
WANG Lei，LI Zhekun，TAN Yi，et al. The study of secondary development of UG by the UG/open API[J]. Development & Innovation of Machinery & Electrical Products，2007，19(5)：105. DOI:10.3969/j.issn.1002－6673.2006.05.042

[11] 周泽云，向阳霞，邹渝，等. 基于 SQLite 数据库的装备数据采集系统设计[J]. 四川兵工学报，2014，35(11)：60. DOI:10.11809/scbgxb2014.11.018
ZHOU Zeyun，XIANG Yangxia，ZOU Yu，et al. Design of equipment data acquisition system based on SQLite[J]. Journal of Sichuan Ordnance，2014，35(11)：60. DOI:10.11809/scbgxb2014.11.018

[12] 赵东，孔慧敏. 参数化技术在舰船结构设计中的应用[J]. 舰船科学技术，2006，28(6)：131
ZHAO Dong，KONG Huimin. The application of the parametric design on hull structure[J]. Ship Science And Technology，2006，28(6)：131

[13] 林垚，张少雄，王丽荣，等. 基于 NX 的船舶 CAD/CAE 模型预处理[J]. 船海工程，2017，46(1)：41. DOI:10.3963/j.issn.1671－7953.2017.01.010
LIN Yao，ZHANG Shaoxiong，WANG Lirong，et al. Study on model preparation from CAD to CAE based on NX for ship structures[J]. Ship & Ocean Engineering，2017，46(1)：41. DOI:10.3963/j.issn.1671－7953.2017.01.010

[14] 彭辉. 船体三维建模应用技术研究[D]. 哈尔滨：哈尔滨工程大学，2008
PENG Hui. Study on ship hull three dimensional modeling application technology[D]. Harbin:Harbin Engineering University，2008

[15] 张继春，徐斌，杨建国，等. 内燃机数字原型系统的研究与应用[J]. 哈尔滨工业大学学报，2007，39(7)：1159. DOI:10.3321/j.issn:0367－6234.2007.07.038
ZHANG Jichun，XU Bin，YANG Jianguo，et al. Study on internal combustion engine numeric prototype system[J]. Journal of Harbin Institute of Technology，2007，39(7)：1159. DOI:10.3321/j.issn:0367－6234.2007.07.038

（编辑　苗秀芝）