

本文网址: <http://www.ship-research.com/cn/article/doi/10.19693/j.issn.1673-3185.03359>

期刊网址: www.ship-research.com

引用格式: 罗文俊, 李春通, 韦朋余, 等. 基于知识的船舶结构快速有限元建模方法 [J]. 中国舰船研究, 2024, 19(6): 35–44.
LUO W J, LI C T, WEI P Y, et al. Knowledge-based fast finite element modeling method for ship structures[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2024, 19(6): 35–44 (in Chinese).

基于知识的船舶结构 快速有限元建模方法



扫码阅读全文

罗文俊¹, 李春通^{2,3}, 韦朋余^{2,3,4}, 王德禹^{*2,3}

1 中远海运特种运输股份有限公司, 广东 广州 510623

2 上海交通大学 海洋工程全国重点实验室, 上海 200240

3 上海交通大学 海洋装备研究院, 上海 200240

4 中国船舶科学研究中心, 江苏 无锡 214028

摘要: [目的] 针对船舶结构有限元分析过程中创建有限元模型耗时且严重依赖工程师经验的问题, 提出一种基于知识和几何模型特征的快速有限元建模框架。[方法] 该方法充分利用 CAD 系统现有的模型数据, 通过模型特征实现 CAD 与 CAE 系统之间的模型数据共享。首先, 基于专家知识对 CAD 几何特征进行工程语义标记, 生成 CAD 信息模型; 然后, 基于构建的知识规则对 CAD 信息模型进行特征约简; 最后, 采用 XML 中性文件构建基于知识的数据传递和匹配方法, 将几何特征和属性信息与预先构建的 CAE 参数化模板进行匹配, 快速实现船舶结构的有限元建模。[结果] 以某 66000 DWT 散货船典型装载工况的舱段结构强度计算分析为例, 所提方法可以实现几何模型、边界条件等信息的自动提取、标记以及模型自动约简, 通过基于知识的特征匹配规则快速实现结构有限元建模及分析, 有效减少了数据传递过程中丢失并实现知识重用。[结论] 通过嵌入知识重用规则搭建的船舶结构快速有限元建模方法, 提高了 CAD 与 CAE 系统之间数据、信息、知识的转换效率, 在实际工程中具有良好的通用性和可扩展性。

关键词: 船体结构; 知识工程; 船舶设计; CAD/CAE; 有限元法

中图分类号: U661.4; U662.2; TP391.9

文献标志码: A

DOI: 10.19693/j.issn.1673-3185.03359

Knowledge-based fast finite element modeling method for ship structures

LUO Wenjun¹, LI Chuntong^{2,3}, WEI Pengyu^{2,3,4}, WANG Deyu^{*2,3}

1 COSCO Shipping Specialized Carriers Co., Ltd., Guangzhou 510623, China

2 State Key Laboratory of Ocean Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

3 Institute of Marine Equipment, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

4 China Ship Scientific Research Center, Wuxi 214028, China

Abstract: [Objective] As creating finite element models for the finite element analysis of ship structures is time-consuming and highly dependent on engineers' experience, this paper proposes a knowledge-based fast finite element modeling method to solve this problem. [Methods] The proposed method makes full use of the existing model data of the CAD system and shares model data between the CAD and CAE systems through model features. First, based on expert knowledge, the CAD geometric features are marked with engineering semantics to generate CAD information models. Second, the feature reduction of the CAD information model is carried out based on the constructed knowledge rules. Finally, the neutral file XML is used to construct a knowledge-based data transfer and matching method which allows the geometric features and attribute information to be matched with the pre-constructed CAE parameterized template, thereby speeding up the finite element modeling of the ship structure. [Results] Taking the structural strength analysis of a 66000 DWT bulk carrier under typical loading conditions as an example, this approach can realize the automatic extraction, labeling and model reduction of the geometric model, boundary conditions and other information, and quickly complete the finite element modeling and analysis of the structure through the knowledge-based feature matching rules, effectively reducing data loss in the transmission process and realizing the reuse of knowledge. [Conclusions] The proposed fast finite element modeling method with embedded knowledge reuse rules improves the conversion efficiency of data, information and knowledge between the CAD and CAE systems, and has good universality and expansibility in practical engineering.

Key words: hulls (ship); knowledge-based engineering; naval architecture; CAD/CAE; finite element method

收稿日期: 2023-05-09 修回日期: 2023-06-21 网络首发时间: 2023-12-13 15:13

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目 (26822212)

作者简介: 罗文俊, 男, 1994 年生, 硕士, 工程师。研究方向: 船舶结构力学, 知识工程。E-mail: luo.wenjun@coscoshipping.com

李春通, 男, 1988 年生, 博士, 助理研究员。研究方向: 知识工程, 非线性动力学, 船舶数字化智能设计。

王德禹, 男, 1961 年生, 博士, 教授, 博士生导师。研究方向: 船舶与海洋工程结构力学, 结构优化设计与可靠性分析, 结构极限强度与试验技术。E-mail: dywang@sjtu.edu.cn

*通信作者: 王德禹

0 引言

在创建离散化有限元模型时结构有限元分析占据了有限元分析 50%~80% 的工作量,因此能否快速且高质量创建有限元模型是实现快速有限元分析的关键所在^[1]。创建有限元模型的传统方法是先在设计阶段完成 CAD 模型的几何图纸,然后量取节点位置坐标后直接在 CAE 软件中手工创建几何模型和物理模型,最后根据个人经验划分网格和创建有限元求解方案,实现有限元建模。然而,随着船舶结构日益复杂,传统建模方式变得愈发繁琐且难以保证模型精度,极大降低了有限元分析的效率^[2]。而集成 CAD/CAE 异构系统,实现 CAD 模型快速高效地转化为有限元模型,则能够减少结构性能分析的准备时间,大幅提高船舶结构设计的效率。

对于 CAD/CAE 集成,设计数据的关联是其主要困难之一。产品形状设计阶段创建的 CAD 模型所包含的设计数据主要是满足产品功能要求,通常不考虑对有限元分析的影响。因此,设计数据传递到 CAE 系统时,仍需大量机械式重复性劳动,例如小特征去除、网格划分等,这些工作通常占据整个设计周期的 50% 时间^[3]。利用 STEP (CAD 通用文件格式)等中性文件的集成方法可以节省有限元模型的准备时间^[4]。Ma 等^[5]将 STEP/IGES(初始化图形交换规范)几何模型与 Bacon 脚本语言相关联,以实现有限元模型的快速构建。但将中性文件从 CAD 系统导入 CAE 系统后往往会出现几何关系错误和拓扑关系丢失,无法捕获模型的整个设计历史,导致后续大量的手工修复和耗时的网格划分工作。

基于中性平台的集成方法可有效减少几何关系错误和拓扑关系丢失情况,常用于优化迭代设计。林垚等^[6]基于 NX 商业软件创建 CAD/CAE 模型预处理功能,辅助用户将 CAD 模型快速转换为有限元模型。Tornincasa 等^[7]采用 Matlab Simulink 作为中性平台驱动 CAD 模型更新和 CAE 仿真。张红旗等^[8]开发了一个中性平台,致力于解决协同设计模式下 CAD/CAE 异构数据的自动处理与转换问题。王丽荣等^[9]基于 NX 商业软件定制开发船舶结构有限元建模系统,实现三维几何模型自动转化为有限元模型。李春通等^[10]基于 NX 商业软件开发集装箱船绑扎桥参数化 CAD 模型与知识规则相结合的多目标优化平台,通过共享特征参数将设计和仿真模型关联起来。基于中性平台的 CAD/CAE 系统交互虽然有利于产品优化设计,

但通常需定制开发。另外,通过开发数据接口形成集成软件框架也是一种当前较为流行的解决方案。Park 和 Dang^[11]提出一个使用脚本程序编程接口实现集成 CAD/CAE 的软件框架,但框架搭建过程需开发大量接口程序,使异构系统的模型之间的互操作性和交换变得复杂。

CAD 与 CAE 系统之间的模型转换需基于专业知识传递设计意图。有限元分析所需的理想化模型、高质量离散网格以及合理的求解方案,都离不开专业知识,包括模型约简规则、网格划分经验、特殊场景的边界条件等。船舶结构的设计和分析过程涉及复杂多样的领域知识,基于知识的管理和重用可以有效提高设计效率和质量。

与大多数采用解析船舶结构几何模型数据和拓扑信息的集成方法不同,本文将提出一种基于知识和几何模型特征的快速有限元建模框架。该框架基于构建的船舶结构几何模型的典型特征,基于专家知识对 CAD 模型进行工程语义标记,使设计师能够有选择地标记和提取所需几何实体及特征信息(材料属性、边界条件等)。通过构建的 CAE 参数化模板库自动创建有限元模型和完成有限元分析,以便充分体现工程人员的设计和分析意图。通过构建包含语义特征标记信息的中性文件,将领域知识抽象为规则(几何模型简化规则、CAE 分析模板等),有效建立设计和分析模型之间关联,以适应行业未来发展的需求。

1 基于知识的快速有限元建模框架

基于知识的快速有限元建模框架开发流程如图 1 所示。通过 XML 中性文件以及基于知识的逻辑描述语言,对整体框架中涉及的数据、信息和知识进行层次化表达,实现设计和分析不同模块之间的知识转移;采用语义变量和参数值表达工程语义信息并标注几何特征;通过几何特征的关键点坐标在设计和分析模块中的一致性实现信息集成;知识表达是由语义变量和语义操作符组成的逻辑描述句,通过匹配语义信息和几何特征实现全过程的知识集成。

整个框架的各个核心模块都包含数据、信息和知识的层次转移。数据主要包括设计数据和分析数据,分别对应 CAD 模型和有限元模型的特征参数。其中,设计数据是采用商业软件 NX 构建的中性格式几何模型,而分析数据与框架中 CAE 参数化模板有关。设计模块包括主尺度、舱室、构件设计等信息,分析模块包括材料、网格、载荷、约束等信息。为更好地支持该框架,构建了

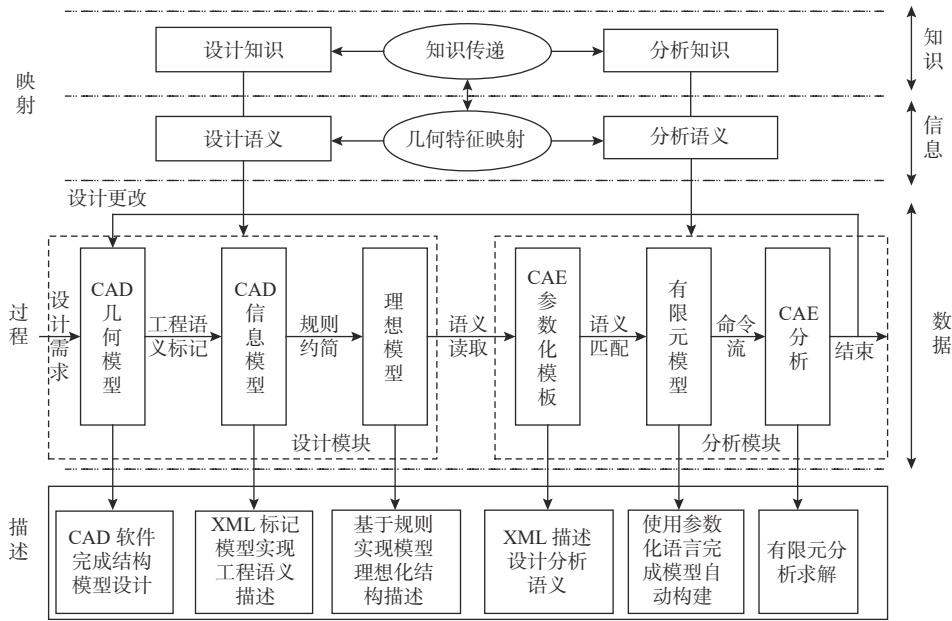


图 1 基于知识的 CAD/CAE 集成框架流程

Fig. 1 The knowledge-based CAD/CAE integration framework

知识库和一系列知识规则，其中包含 CAD 模型参数信息库、模型约简规则、网格划分规则、参数化有限元分析模板等。易于编写和维护的可扩展标记语言 XML 用来标记和传递语义信息。保证整体框架功能实现的关键步骤如下：

- 1) 基于知识对 CAD 模型进行工程语义标记与提取，实现模型几何数据转化为信息数据（包含材料属性、拓扑类型、加强筋种类、边界条件和载荷类型等信息的数据）；
- 2) 构建基于知识和特征的理想模型约简规则，减少模型转换过程中产生的信息丢失；
- 3) 基于 XML 中性文件完成异构系统之间的特征映射，通过基于知识的特征匹配规则和基于语义的 CAE 参数化模板建立快速有限元建模的定制化流程，在异构系统之间创建数据管道，实现几何模型数据设计、有限元分析的全流程集成。

2 快速有限元建模实现方法

2.1 语义标记和提取

基于特征的标记技术来支持 CAD/CAE 异构模型之间信息转换可以支持结构的快速设计。例如，Attene 等^[12]开发的“ShapeAnnotator”系统，通过引入注释将形状语义附加到几何特征上，为 3D 模型建立有用的语义注释。Flotyński 等^[13]提出了一种定制交互式 3D 内容的新方法，该方法利用语义 web 技术来实现 3D 场景的概念化和泛化表示。工程语义标记和匹配包括 3 个阶段，即语义定义、语义标记与关联、语义提取与匹配，如图 2 所示。采用 C++ 语言对 NX 商业软件二次开

发，以对话框形式对特征信息（属性、边界条件编号、句柄等工程语义信息）进行标记，为 XML 中性文件中工程语义信息与几何特征之间的映射创建条件。工程语义定义的内容包括材料属性、分析类型、网格类型及大小、板厚、加强筋的类型及参数、载荷和约束条件、分析结果等。几何特征语义标记过程是模型特征和功能的集合，工程语义关联是将与模型有关属性（设计意图、部件功能及有限元分析信息）封装到同一个主模型中，从而使计算机系统理解模型设计的工程意义。语义匹配是将工程语义和几何特征句柄同时作为属性附加到几何模型的特征（点、线、面等）上，其中属性由名称和值组成，可以避免语义匹配过程中遍历几何模型的所有特征。

为避免分析模块中手动输入命令流重构有限元模型，需要完成两方面的工作：1) 采用通用的 CAD 中性文件（例如 STEP 文件）交换和匹配模型的几何边界信息，其中包含一系列用于模型约简的知识规则；2) 创建 XML 中性文件，将其作为信息匹配过程中语义和几何特征之间的桥梁。通过中性文件，将几何特征提取的关键点坐标与基于知识的 CAE 参数化模板（包括所有与有限元分析相关的预处理、计算和后处理信息）进行匹配，自动生成命令流。

2.2 几何模型约简

船舶结构 CAD 模型除必要的几何信息外，还包含焊接坡口、焊孔等工艺信息，以及细小构件、小孔等对于有限元分析影响可忽略的信息。这些信息都是结构有限元分析的冗余信息，需要在有

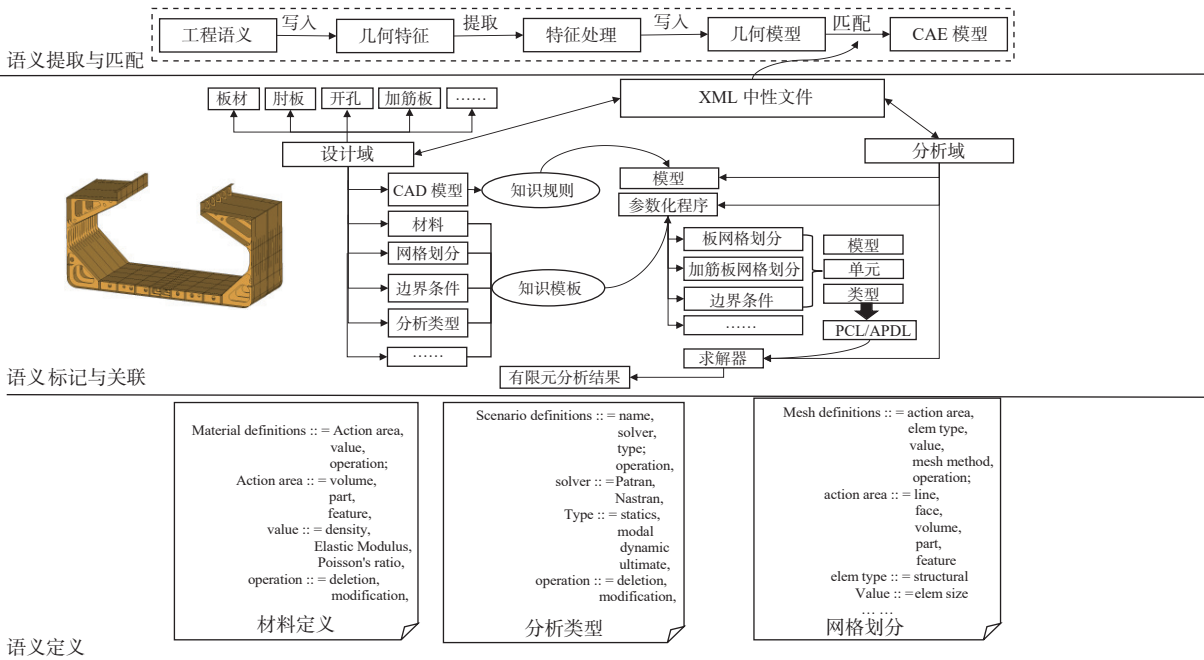


图 2 基于特征的语义标记和匹配
Fig. 2 Feature-based semantic markup and matching

限元建模前进行约简。此外，船舶结构设计与分析一般需要借助复杂的领域知识，包括设计规范、设计案例、制造工艺和专家经验等^[14]。基于知识工程 (knowledge-based engineering, KBE) 的技术路线，如图 3 所示，包括了知识获取、知识表达和知识推理 3 大关键技术。其中，知识获取的来源主要包括设计规范、文献手册、专家经验等；知识表示是通过计算机可识别的方式对知识进行描述；知识推理通常包含基于规则和案例的推理方法。在构建工程语义标记模型之前，首先构建包括模型信息表、板材信息表、型材信息表、开孔信息表、模型简化规则库等的一系列数据库，这些数据库通过自主开发的程序嵌入到整个系统中。

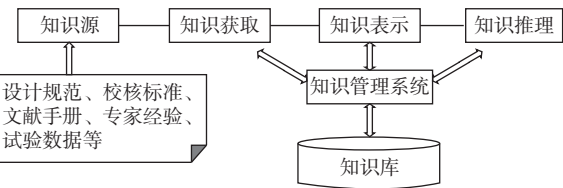


图 3 KBE 产品设计流程
Fig. 3 KBE product design process

近年来，研究人员针对船舶结构设计开发了许多知识集成和重用方法，旨在充分利用 CAD 系统现有的模型数据，最大限度地实现 CAD 与 CAE 系统之间的模型数据共享^[14-15]。基于 KBE 理论，利用船舶 CAD 系统中的几何模型数据和语义标记的特征属性信息构建几何模型约简规则，对几何模型进行结构简化和细节编辑。模型约简的知识规则主要针对 CAE 分析影响可以忽略的构件 (例如小板、孔、小型加强筋等)，而对构件删除的

位置会适当地予以刚度补偿，例如调整板厚。
图 4 所示为基于 KBE 和特征的船舶结构几何模型约简流程。对于几何模型约简，首先要保持原有结构的主要特性 (例如强度)，尤其是局部结构强度，但即使经验丰富的工程师也很难一次约简就能获取满足分析要求的有限元模型；其次，要考虑模型约简的计算成本，而评估模型计算成本需先根据 CCS 规范^[16]明确结构分析的要求和建模范围 (考虑到构件分类的便利性，本文选择板架结构作为基本单元，其中材料、截面、开孔信息作为区域/分段模型属性中的共性部分)；然后，通过语义和特征句柄遍历船舶结构中每个组件的特征属性；最后，基于约简规则和特征属性值进行模型约简。

几何模型约简规则主要是表达式和“if then”判断规则，例如小肘板的存在对有限元分析结果不会产生较大的影响，可以通过与板材面积相关的规则予以判断和删除。

2.3 基于知识的多层传递

随着船舶大型化和多功能化，对船舶结构设计的 CAD 与 CAE 系统之间的数据、信息、知识的共享和重用的要求也越来越高。在基于 CAD 与 CAE 软件的模型转换过程中，知识的可访问性和携带的信息量一般较低，需要人工交互来重建传输中丢失的信息和知识。但由于专业性强、二次开发的门槛高以及 CAD 系统本身的封闭性，很难构建具有通用性的转换机制，因此本文提出了基于知识的多层传递方法，如图 5 所示。首先，通

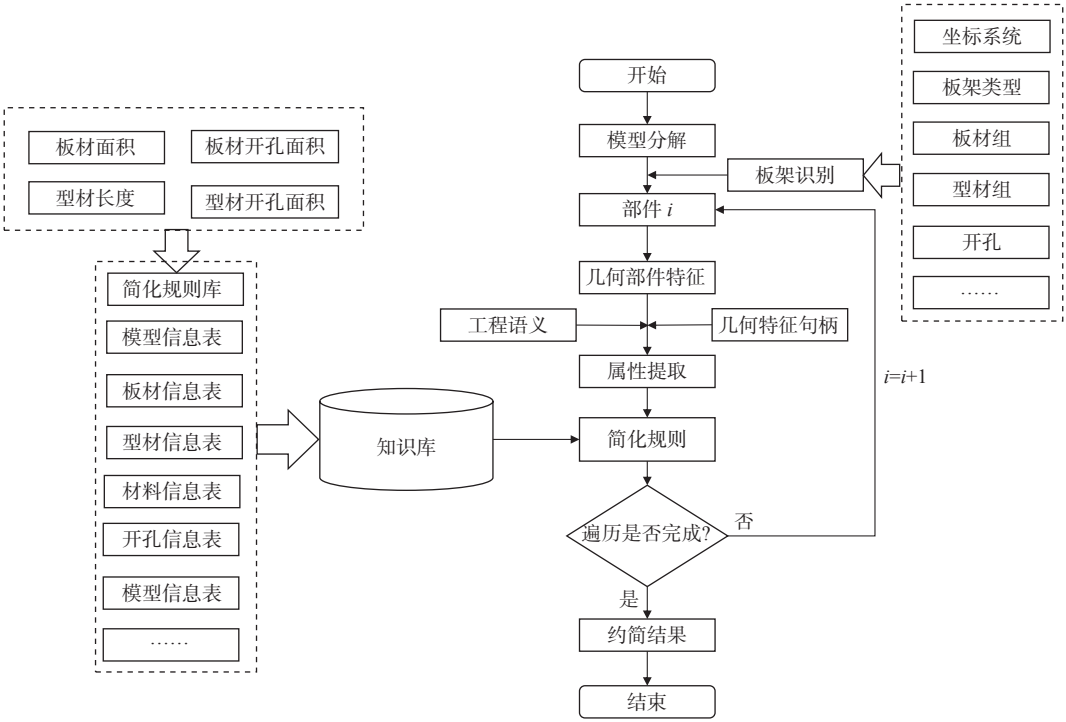


图 4 基于知识和特征的几何模型约简流程

Fig. 4 Flow chart of geometric model simplification based on knowledge and features

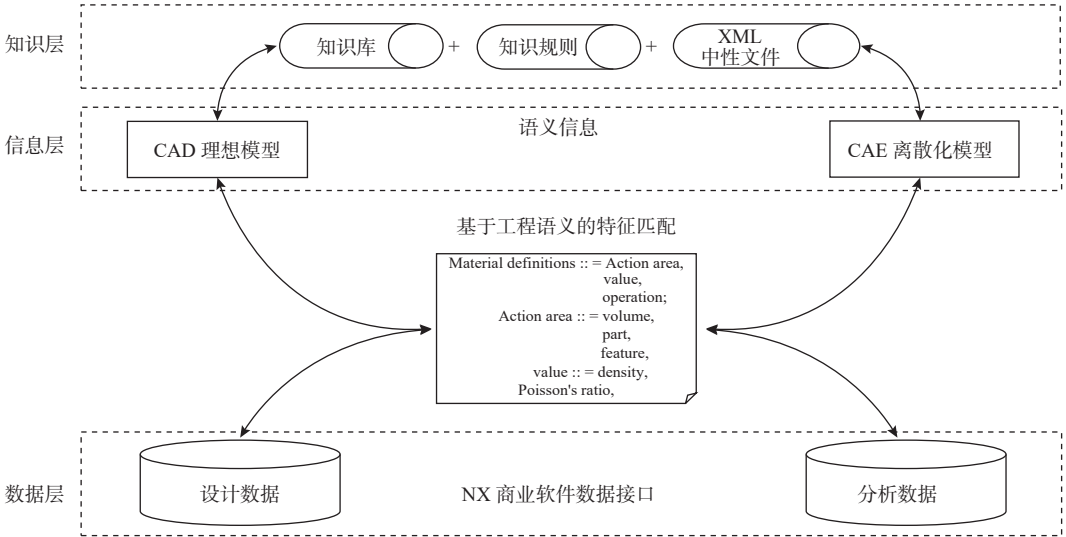


图 5 数据、信息和知识的多层传递过程

Fig. 5 Multi-layer transfer process of data, information and knowledge

过 NX 商业软件数据接口将 CAD 模型转换为中性文件格式, 然后将简化的几何特征数据传输到有限元软件中。其中, XML 中性文件为数据层、信息层和知识层之间的关联和匹配载体, 独立于特定商业软件环境。

2.4 快速有限元建模

大多数工程设计人员认为有限元中最耗时的部分是离散化模型的创建过程, 而且非常依赖工程师的经验^[7]。图 6 所示为本文提出的基于知识的有限元建模快速生成方案, 包括两个重要部分: 1) 构建以知识重用为目标的 CAE 参数化模

板, 包括所有与有限元分析相关的前处理、计算和后处理信息; 2) 基于 XML 中性文件完成几何特征、属性信息与参数化模板的匹配。参数化模板包括对具有相同特征构件的有限元分析过程的规范化格式描述。将命令流中的可变信息部分(例如载荷、边界条件、材料属性、网格类型等)由一系列的模板子元素表示, 其中将可变信息的位置设置为子元素根节点, 以便更新 CAD 模型时, 可以快速驱动生成新的命令流。

工程语义标记几何特征后, 可通过属性及特征句柄提取相应几何模型关键点的坐标值, 进而获取点、线、面和实体之间的拓扑关系。对于载

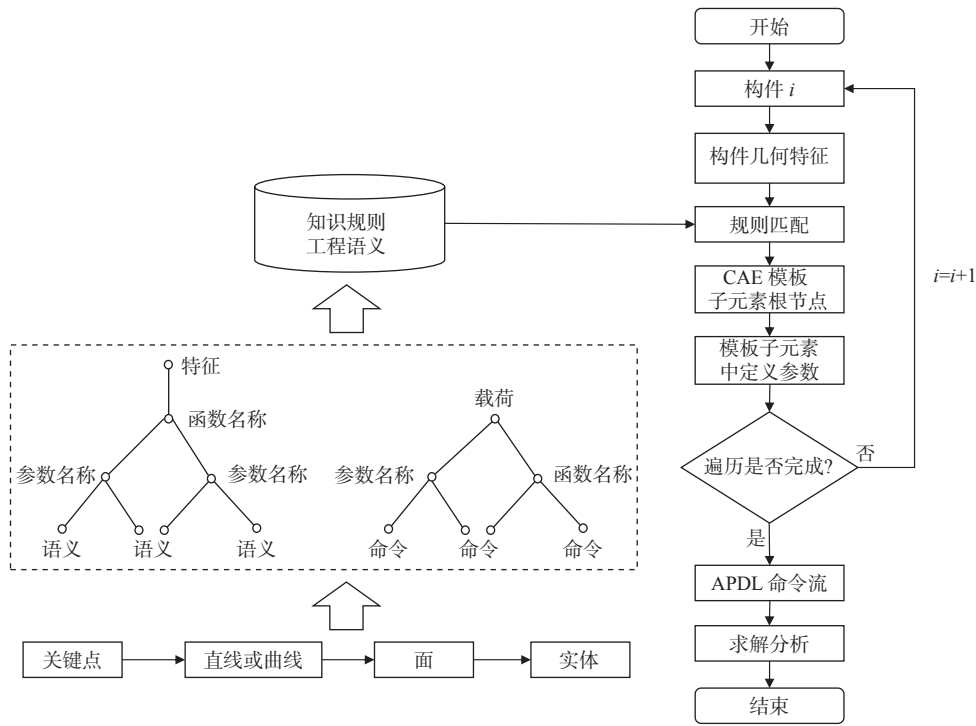


图 6 有限元建模智能生成方案流程
Fig. 6 Flow chart of intelligent generation scheme for finite element modeling

荷、边界条件、材料属性、网格类型划分定义等，均采用先定义参数变量再定义参数化有限元分析片段的方式。其中，“ParamName”为参数名称，其下的“Command”节点对应分析命令，在 Command 中记录参数化的命令片段。在子元素的选择和匹配过程中，嵌入基于知识规则的推理方法，以保证模型匹配的准确性。通过语义匹配参数化模板文件中的语义变量，将语义变量值都替换为语义标记文件对应的变量值，从而实例化模板中的参数。

3 案例研究

研究以某 66 000 DWT 散货船典型装载工况下舱段结构强度计算分析为例，其主尺度和特征参数如表 1 和表 2 所示，典型货舱段中横剖面主要几何特征如图 7 所示(图中单位: mm)。假设船体梁结构为完全的弹塑性材料, AH 材料屈服应力 390 MPa, 杨氏模量 2.06×10⁵ MPa, 泊松比 0.3, 密度 7.85 g/cm³。选择本案例的目的是因为中横剖面的结构较复杂, 可以充分验证所提语义标记、有限元仿真方案快速生成方法的适用性。

语义标记主要涉及到载荷、边界条件及几何特征参数的标注和识别。在集成框架开发过程中, 首先, 将语义信息内嵌到模型的特征属性中; 然后, 将完整语义信息导出至 XML 中性文件, 为多重标注提供支持。属性的标记通过在 NX 商业软件中开发对应的接口程序来实现, 语义信息的定义基于特征选择, 将“语义类、语义属性以及语

表 1 目标船的主尺度	
Table 1 Principal particulars of the object ship	
参数	数值
总长/m	192.60
垂线间长/m	190.12
型宽/m	36.00
型深/m	17.00
结构吃水/m	12.20
结构方形系数	0.90

表 2 目标船主要细节	
Table 2 Main details of the object ship	
板名称	AH板厚/mm
主甲板	23
舷侧外板	14 , 14.5, 15.5
舱口围板	20
外底板	14, 16
舳部外板	15
顶边舱斜板	13, 13.5, 14, 18
底边舱斜板	18
内底板	19, 19.5
实肋板	11.5

义关系”进行实例化, 再根据设计意图为几何模型特征属性赋值。通过语义标记将分析属性(坐标矢量、运算类型、静力学分析、动力学分析等)、载荷大小及类型、边界条件、材料属性等添加到

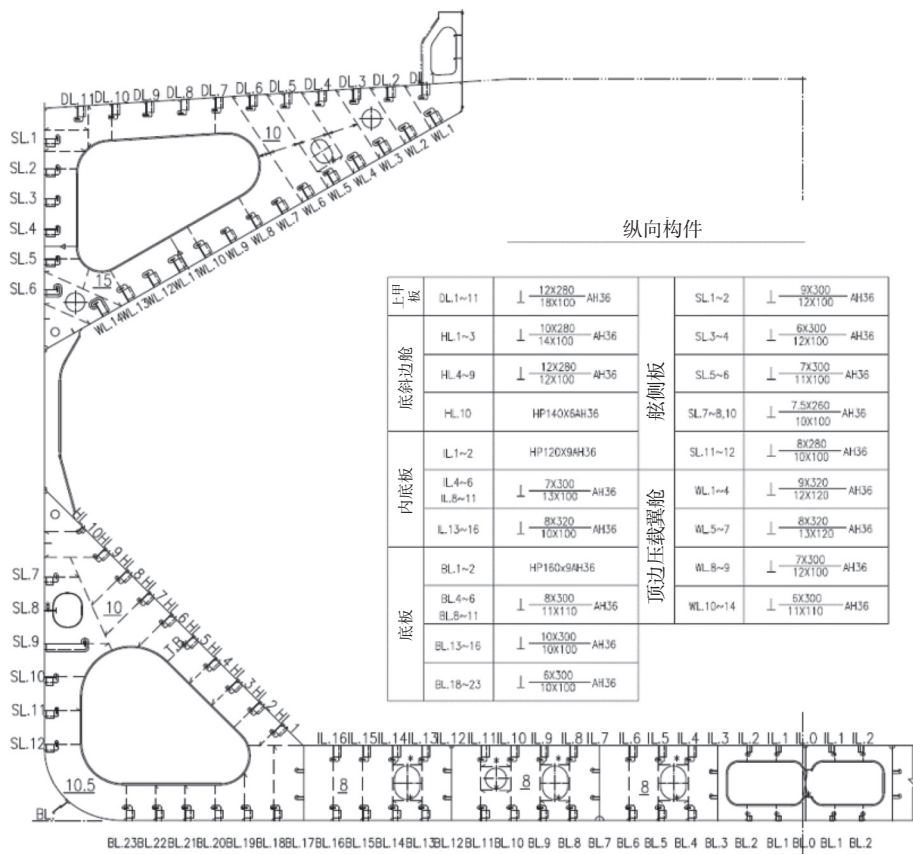


图 7 66000 DWT 散货船货舱段中横剖面图

Fig. 7 The transverse midship section for cargo hold of a 66000 DWT bulk carrier

设计特征中,使计算机系统在工程意义层面上“理解”设计模型。此外,各部件或特征的功能、装配关系、约束条件等信息,对分析中正确处理载荷与边界条件也具有重要指导作用。

XML 工程语义表中存储了解决问题类型(边界条件、载荷类型等)、工程语义(例如特征功能、行为、厚度、材料)和相关几何信息(结构特征、板材、型材、关键点坐标、装配等)。通过对设计任务进行分类来定制设计-分析模板,即提取目标结构、边界条件、几何模型等信息的基础数据。上述基础数据将显示为标注界面的“标签”控件,如图 8 所示。设置载荷类型基础数据的

变量值包括体载荷、面载荷、集中载荷、自由度约束等,在程序开发过程中可以通过控件菜单和下拉列表进行表达。在基于特征的工程语义标记和提取过程中,基于几何特征句柄的唯一实现读取和存储特征的语义信息,通过包含语义标记类型的预定义模板,生成目标格式的中性标记文件。以载荷和约束为例,将载荷、边界条件及几何特征分别作为子元素进行编号,每个元素都包含“Feature_id”和“Support_id”两个属性。其中,“Feature_id”对应施加了载荷或边界条件几何特征的编号,“Support_id”对应施加载荷或约束的编号。通过这两个属性值,实现 XML 文件中工程

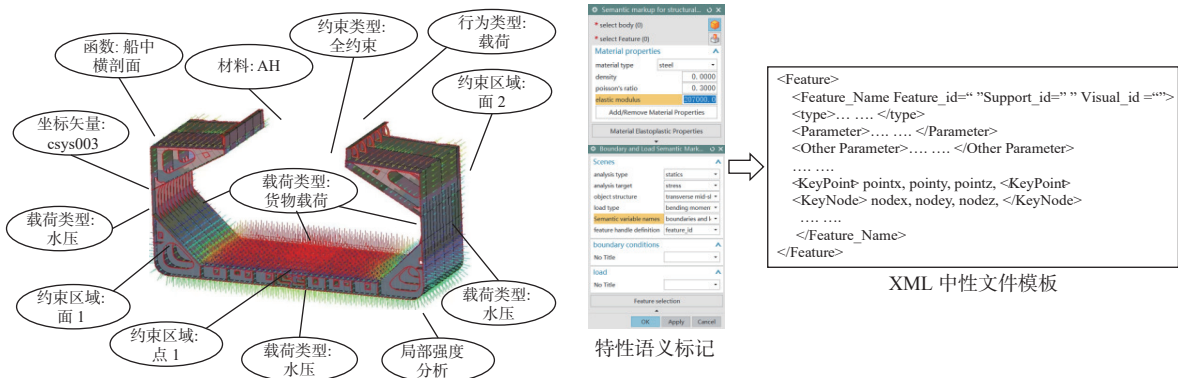


图 8 船中横剖面的工程语义标记

Fig. 8 Engineering semantic markings for the transverse midship section

语义信息与几何特征之间的映射。

对几何模型中细节特征进行识别与删除的目的是建立适合于有限元分析的模型。为保证模型约简的合理性,需要引入有限元分析的专家知识和经验。模型约简的实现原理可以表述如下:

- 1) 从结构设计模型的工程语义标记信息中提取相关几何模型的特征信息;
- 2) 基于知识规则对几何模型进行细节编辑、特征简化及删除;
- 3) 依据构件特征类型实现构件编号的自动重命名和单元属性、材料属性和网格属性等信息的自动关联。

考虑到船体结构包含数目巨大且复杂的板材和型材,在模型约简过程中,可以根据板材的面积来判断和删除对不影响有限元分析结果的小构件。另外,板材的面积值可根据具体情况进行调整,例如删除开孔后会导致板材的有效面积增加的情况。为提高计算的可靠性,需要调整板材的厚度。型材开孔的简化类似于板材。模型约简方法以知识规则的形式存储在规则库中。以板厚调整算法为例,可按以下公式计算^[16]:

$$T_{\text{new}} = \frac{S_{\text{plate}} \times T_{\text{old}}}{S_{\text{New_plate}}}$$

式中: T_{new} 表示去掉孔后的板厚; T_{old} 表示原始板厚; S_{plate} 表示原始板面积; $S_{\text{New_plate}}$ 表示去掉孔后的板面积。

元素包含曲面板架、平面板架、折角板架 3 个

子元素,如图 9 所示。以平面板架为例,其构件有板材、型材、面板、支柱、肘板等,在平面板架 XML 模型之中,分别由 PlateGroup, StiffenerGroup, FaceplateGroup, PillarGroup 以及 BracketGroup 予以表示。其中, PlateGroup 和 StiffenerGroup 为构成平面板架的主要元素。PlateGroup 由子元素 Material, MaterialSide, Offset 和 Plate 组成。其中, Material 用于定义板材中板的材质, MaterialSide 定义板厚朝向和板厚偏移量等。板架边界“Boundary”元素包含 Limit, SimpleContour 和 DetailedContour 子元素,用这 3 类子元素定义板架边界信息。其中, Limit 元素通过 ModelRef 元素定义的拓扑关系予以描述,也可以直接采用几何信息描述。

船体分段经过模型约简后,需要进一步形成基于语义标记的快速有限元建模方案,其关键技术是构建基于 XML 中性文件的特征匹配算法及参数化模板库。将工程语义提取几何特征的关键点坐标与构建的参数化模板进行匹配,再根据关键点选择曲线或者直线,进而建立几何模型面或体,并生成完整的有限元分析命令流。

首先,建立参数化模板库,将具有相同分析特征的一类部件的有限元分析过程由标准化格式表达,供重复使用。参数化模板库主要有 3 种形式: 1) 数值参数化,定义材料的材料属性值、划分网格的网格尺寸、施加载荷的载荷大小和方向等; 2) 有限元特征参数化,包括单元类型、待查看的分析结果名称等; 3) 特征参数化,特征标识参数

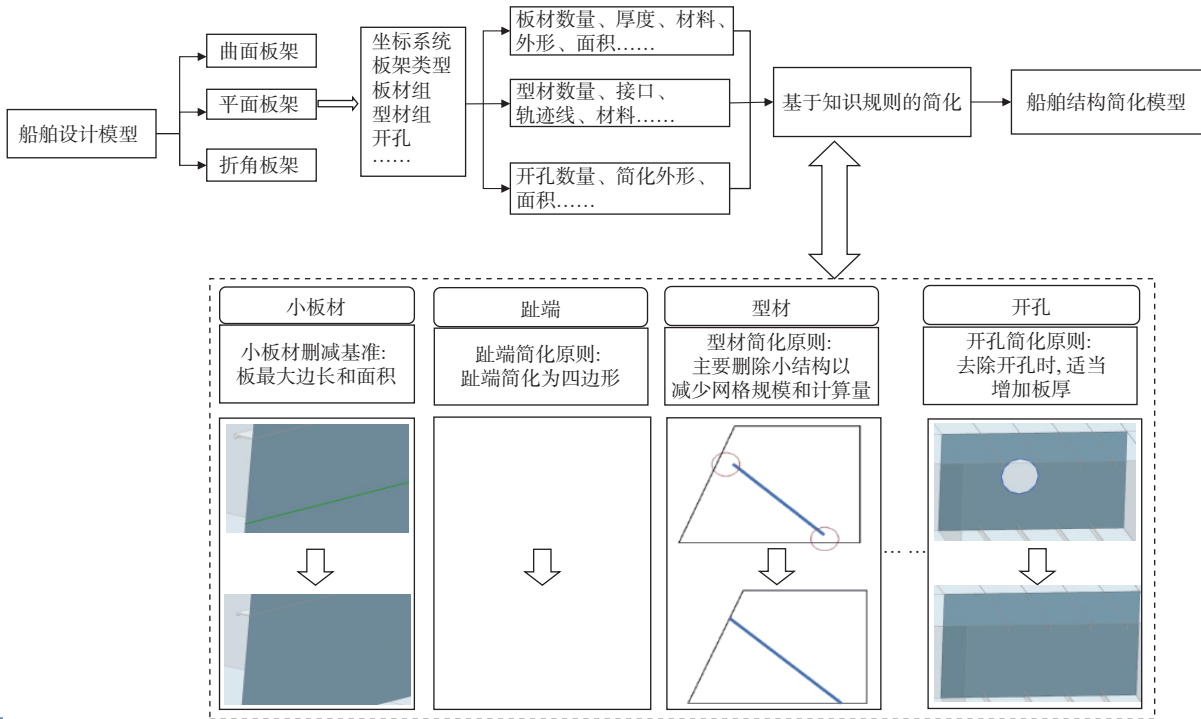


图 9 KBE 模型简化实现过程

Fig. 9 Implementation process for KBE model simplification

化便于定义和修改几何特征上的载荷和边界条件。

然后,对结构相似的部件的 CAE 模板进行轻微修改,实现有限元分析过程的快速构建。本文采用 XML 语言对参数化模板进行架构化表达,使其具有层次清晰和可扩展性好的优点。对载荷、边界条件、材料、网格划分、分析结果等进行工程语义标记,其名称作为模板片段的元素根节点。Command 元素记录参数化的有限元分析命令片段,该命令片段定义命令流中除参数外的多个节点,以适应不同的有限元分析软件。若设计者采用 ANSYS 有限元分析,则系统仅需处理操

作所有节点名称为 Apdl_Command 的节点即可。

如图 10 所示,针对某 66 000 DWT 散货船典型的装载工况开展舱段结构强度计算分析,在模型外板施加水压,货舱内施加货物载荷。以有限元分析软件 ANSYS 的 APDL 命令流为例,图中给出了定义船中载荷的 CAE 模板片段。从上面的代码片段可以看出,只需将模板中对应的参数替换为工程语义中标记的几何特征的数值、关键字或参数,以及关键点的坐标值,即可生成新的有限元分析命令流,进而实现结构的快速有限元建模及分析,结果如图 11 所示。

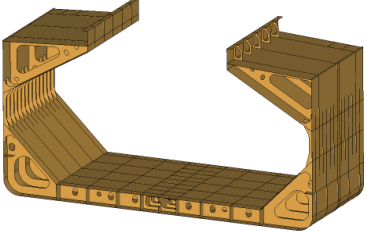
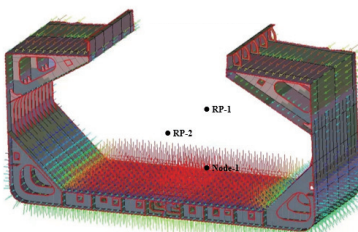
几何模型	关键点标记和特征映射	有限元模型
	<pre><PlanePanel ObjId="BULKCH-BHD24" DataType="891" Instance="AsDefined" Tightness="WaterTight"> <Extent> <Min X="1.0176000000E005" Y="-1.1342135732E004" Z="0.0000000000E000"/> <Max X="1.2721000000E005" Y="1.1342135732E004" Z="1.3004576200E004"/> </Extent> <CoordSys> <Origin X="1.2720000000E005" Y="0.0000000000E000" Z="0.0000000000E000"/> <Waxis X="1.0000000000E000" Y="0.0000000000E000" Z="0.0000000000E000"/> <Uaxis X="0.0000000000E000" Y="1.0000000000E000" Z="0.0000000000E000"/> </CoordSys> ... </PlanePanel></pre>	
<pre>For Section Sub Stiffener_Shape3D (PlanePanel As ShipPlanePanelType, iGrp%, iStif%) Dim nUv&, Uv# 0, CoordSys#0), ArrDat(3) As Variant, InstanceS, np& 0, I% InstanceS = PlanePanel. Instance Call CoordSysType_to Array (PlanePanel. CoordSys, CoordSys 0) ArrDat(1) = CoordSys() with PlanePanel.StiffenerGrp (iGrp).Stiffener (iStif) End with End Sub For Hole Sub Hole_Ship3D(PlanePanel As ShipPlanePanelType, iGrp%, iHole%)Dim CoordSys#0), nUv&, Uv# 0, Rxy# 0, InstanceS ... End with End Sub</pre>	<pre><Name> <ParamName><ApdiCommand>*set, ParamName, Value </ApdiCommand> <OtherCommand>.....</OtherCommand> ... </ParamName> <ParamName> <ApdiCommand>*set, ParamName,Value </ApdiCommand> <OtherCommand>... ..</OterCommand> ... </ParamName> ... <Command> <ApdiCommand>... ..</ApdiCommand> ... <Command> <Name></pre>	<pre>finish /clear /prep7 setmidship45,423735.000 ... et,1,beam189 mp,ex,1,2e11 mp,prxy,1,0.3 ... SECOFFSET,CENTSECDATA,0.1,0.1,0. 2,0.01,0.01,0.008,0,0,0,0,0 k,, k,,,3*3 ... !!!!Constraint esll,s esel,s Allsel.all ...</pre>

图 10 船舶结构快速有限元建模的实现过程

Fig. 10 Implementation process for fast finite element modeling of ship structure

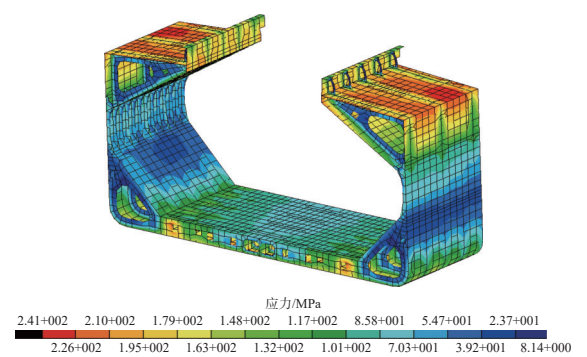


图 11 商业有限元软件分析结果

Fig. 11 Analysis results via commercial finite element software

4 结 论

针对船舶结构有限元分析过程中创建离散化

模型耗时且严重依赖工程师经验的问题,本文提出了一种基于知识和几何模型特征的快速有限元建模框架。通过在 CAD 与 CAE 异构系统之间创建数据管道,实现了几何模型数据设计、有限元分析的全流程集成。经过工程实例计算分析,得到以下结论:

- 1) 所提基于知识和几何模型特征的快速有限元建模框架,可通过特征匹配实现 CAD 与 CAE 系统之间数据、信息、知识分层表达和集成传递。
- 2) 基于 XML 语言构建的包含 CAD 建模及 CAE 分析所需的所有参数信息的中性数据模型,可用于解决基于特征的语义知识的关联,以及 CAD 模型与有限元模型转换的问题。
- 3) 通过嵌入知识重用规则,搭建船舶结构快

速有限元建模方法, 可实现 CAD 与 CAE 对象模型之间的互操作性, 具有良好的通用性和可扩展性。

参考文献:

- [1] 杜臣勇, 张治, 陈海天. 面向航天产品研发的 CAD/CAE 集成技术浅析 [J]. 微型机与应用, 2009: 20–24.
DU C Y, ZHANG Z, CHEN H T. Analysis of CAD/CAE integration technology for aerospace product development[J]. Microcomputer & Its Applications, 2009: 20–24 (in Chinese).
- [2] 朱苏. 基于中间平台的船舶 CAD/CAE 模型转换研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2011.
ZHU S. The study on based middle platform for ship FEM transformation of CAD/CAE[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2011 (in Chinese).
- [3] HAN Y S, LEE J, LEE J, et al. 3D CAD data extraction and conversion for application of augmented/virtual reality to the construction of ships and offshore structures[J]. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 2019, 32(7): 658–668.
- [4] XIA Z H, WANG Q F, WANG Y J, et al. A CAD/CAE incorporate software framework using a unified representation architecture[J]. *Advances in Engineering Software*, 2015, 87: 68–85.
- [5] MA Y, NIU W T, LUO Z J, et al. Static and dynamic performance evaluation of a 3-DOF spindle head using CAD-CAE integration methodology[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2016, 41: 1–2.
- [6] 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): 41–44.
LIN Y, ZHANG S X, WANG L R, et al. Study on model preparation from CAD to CAE based on NX for ship structures[J]. *Ship & Ocean Engineering*, 2017, 46(1): 41–44 (in Chinese).
- [7] TORNINCASA S, BONISOLI E, DI MONACO F. Virtual prototyping through multisoftware integration for energy harvester design[J]. *Journal of Intelligent Materials Systems and Structures*, 2013, 25(14): 1705–1714.
- [8] 张红旗, 陈帝江, 王锐, 等. 雷达结构协同设计中的 CAD/CAE 数据自动处理与转换技术 [J]. 机械与电子, 2009(12): 39–41.
ZHANG H Q, CHEN D J, WANG R, et al. Automatic processing and conversion technology of CAD/CAE data in radar structure collaborative development system[J]. *Machinery & Electronics*, 2009(12): 39–41 (in Chinese).
- [9] 王丽荣, 陈有芳, 章志兵, 等. 基于 NX 平台的船舶结构有限元快速建模系统 [C]//第十五届中国 CAE 工程分析技术年会论文集. 上海: 中国力学学会产学研工作委员会, 2019: 65–68.
WANG L R, CHEN Y F, ZHANG Z B, et al. Finite element rapid modeling system of ship structure based on NX platform[C]//Proceedings of the 15th China CAE Engineering Analysis Technology Annual Conference. Shanghai, China: The Industry, University and Research Work Committee of the Chinese Society of Mechanics, 2019: 65–68 (in Chinese).
- [10] LI C T, WANG D Y. Multi-objective optimisation of a container ship lashing bridge using knowledge-based engineering[J]. *Ships and Offshore Structures*, 2019, 14(1): 35–52.
- [11] PARK H S, DANG X P. Structural optimization based on CAD-CAE integration and metamodeling techniques [J]. *Computer-Aided Design*, 2010, 42(10): 889–902.
- [12] ATTENE M, ROBBIANO F, SPAGNUOLO M, et al. Characterization of 3D shape parts for semantic annotation[J]. *Computer-Aided Design*, 2009, 41(10): 756–763.
- [13] FLOTYŃSKI J, WALCZAK K. Customization of 3D content with semantic meta-scenes[J]. *Graphical Models*, 2016, 88:23–39.
- [14] LI C T, WANG D Y. Knowledge-based engineering-based method for containership lashing bridge optimization design and structural improvement with functionally graded thickness plates[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*, 2018, 233(3): 760–778.
- [15] POKOJSKI J, SZUSTAKIEWICZ K, WOŹNICKI Ł, et al. Industrial application of knowledge-based engineering in commercial CAD/CAE systems[J]. *Journal of Industrial Information Integration*, 2022, 25: 100255.
- [16] 中国船级社. 钢制海船入级规范 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2019.
China Classification Society (CCS). Rules and regulations for the construction and classification of sea-going steel ships[S]. Beijing: China Communications Press, 2019 (in Chinese).
- [17] SUN W, MA Q Y, CHEN S. A framework for automated finite element analysis with an ontology-based approach [J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2009, 23(12): 3209–3220.