

ICS 47.020.01

CCS U 07

T/CANSI

中国船舶工业行业协会团体标准

T/CANSI 195—2025

船舶结构 CAE 软件前后处理一般要求

General requirements for pre- and post-processing of CAE software for ship structures



2025-09-11 发布

2025-10-01 实施

中国船舶工业行业协会 发布

全国团体标准信息平台



目 次

前言	II
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
3.1	1
3.2	1
4 前处理一般要求	1
4.1 总体流程	1
4.2 导入几何模型	2
4.3 几何预处理	2
4.4 网格划分	3
4.5 导入网格模型	3
4.6 网格质量检查	4
4.7 材料属性定义	5
4.8 约束载荷定义	5
4.9 设定分析步信息	6
4.10 模型导出	6
5 后处理一般要求	6
5.1 总体流程	6
5.2 读取结果数据	6
5.3 结果显示	7

前 言

本文件按照GB/T 1.1-2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国船舶工业行业协会标准化分会提出。

本文件由中国船舶工业行业协会归口。

本文件起草单位：中国船舶科学研究中心、中国船级社、深海技术科学太湖实验室、中国船舶集团有限公司综合技术经济研究院。

本文件主要起草人：金建海、张浚哲、宋奕霖、胡杰鑫、王明皓、李巧平、毛紫浩、刘盛、殷涛。



船舶结构 CAE 软件前后处理一般要求

1 范围

本文件规定了船舶结构CAE软件的前处理一般要求和后处理一般要求。
本文件适用于指导船舶结构CAE软件的软件设计理念与软件使用方法。

2 规范性引用文件

本文件没有规范性引用文件。

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

前处理 **pre-processing**

在结构有限元分析中，为构建可计算模型所进行的一系列数据准备和模型建立活动。

注：前处理通常包括但不限于以下步骤：几何模型、几何预处理、网格划分、导入网格模型、网格质量检查、材料属性定义、设定约束与载荷、设定分析步信息和模型导出等。

3.2

后处理 **post-processing**

在结构有限元分析求解完成后，对计算结果数据进行提取、处理、可视化展示、解释与评估的过程。

注：后处理通常包括但不限于以下操作：读取求解结果文件、生成各种云图、生成矢量图、生成变形动画、生成曲线图等。

4 前处理一般要求

4.1 总体流程

船舶结构 CAE 软件前处理流程见图 1，主要包括模型导入、网格质量检查、材料属性定义、约束载荷定义、设定分析步信息和模型导出。其中，根据导入模型类型的不同，前处理流程会有所区别。对于几何模型，应进行几何预处理和网格划分后，进行后续操作。而对于网格模型，则可直接跳过几何预处理和网格划分步骤。

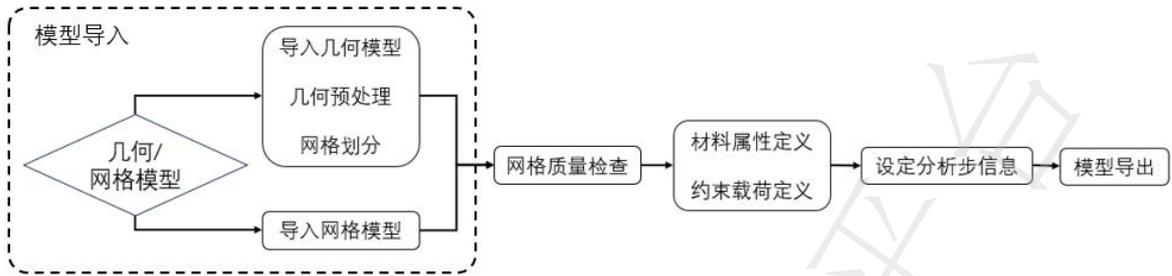


图1 船舶结构 CAE 软件前处理流程示意图

4.2 导入几何模型

几何模型导入应支持主流的几何模型格式，包括IGES、STEP、Parasolid、STL、DWG。在导入过程中，应检查文件格式是否支持。根据需要设置导入选项，例如文件单位、坐标系设置、是否自动修复几何问题等。文件中的单位应与CAE软件中的单位系统一致。如果不一致，应在导入过程中进行单位转换。

4.3 几何预处理

导入几何模型后，应对几何模型进行预处理检测，预处理检测的缺陷应至少包括表1所列内容。检测缺陷后应进行几何缺陷修补，修补要求见表2。

表1 预处理检测的缺陷内容

缺陷名	详细说明
重复面	遇到相同的面，其中一个将移除。两个面如果在规定的三维适配公差范围内，则应视为相同的面
狭长面	删除狭长面。狭长面指：1. 拥有极端高宽比的面：长度与宽度的比值通常 $> 50:1$ （工程经验阈值）。2. 面积占比极小的面：占相邻面的面积比例 $< 1\%$ （例如薄片状结构中的残余面）
开放边	删除开放边
几何干涉	检查组件和造型之间的干涉、零件间的干涉，以作后续处理
间隙检查	根据设置的间隙值检测组件和造型之间的间隙、零件间的间隙，以作后续处理

表2 几何缺陷修补要求

缺陷修补功能名	详细说明
连接边	合并多条简单边。连接（合并）面上可兼容的相邻的（比如连续的）边，可以选择要合并的边上的顶点或让该命令找到所有顶点
合并面	拥有公共边界的面合并成一个单面（注：合并的面的相邻边界需具有相同曲率）
缝合面	将相互连接而又各自独立的曲面缝合在一起，形成一个整体的曲面造型
填充间隙	设置缝隙边界相切的拟合连续性，设置公差幅度，将选中的实体间间隙填充
几何特征简化	识别孔洞、柱面、狭长面、小面、小边、自交面等几何特征，这些特征通常不适用于 CAE 仿真，可以进行适当的识别与清理
自动几何拓扑修复	对模型进行缺陷分析后，自动进行几何拓扑修复，能够实现面边间的间隙和重合顶点的自动修复

4.4 网格划分

网格划分时设置的参数应包含以下内容：

- a) 网格密度和单元尺寸：根据建模类型和分析类型，应有不同的要求。船体板架、舱壁等主承力结构中，网格尺寸通常控制在 200 mm~500 mm，加强筋腹板高度方向至少布置 3~6 个单元，面板宽度方向不少于 2 个单元，以保证一个屈曲半波长内跨越 ≥ 5 个单元。高应力区（肘板趾端、舱口角隅、基座焊缝等），应局部加密至 20 mm~50 mm；倒角、圆孔等几何突变区域至少布置 3 层单元，重要圆孔圆周方向不少于 8 层。抗爆/抗冲击分析：整舰模型采用 500 mm 左右壳单元，炸药附近或冲击波作用区域加密至 50 mm~100 mm，并在板厚方向布置不少于 3 层体单元。
- b) 单元类型和自适应划分：在 1D 网格可选择线单元，在 2D 网格可选择四边形单元，而在 3D 网格可选择四面体单元。常用单元类型如下表 3 所示。此外，程序应能够根据实体的类型自动进行相应的网格划分，并支持自适应划分，应接受“全局最大/最小尺寸”和“局部加密极限”两组参数，并支持壳单元（四边形优先）、实体六面体，并在自适应过程中保持单元类型一致或自动过渡。
- c) 几何边、面、体控制：网格划分应支持使用几何边、几何面、几何体对网格节点进行精细控制。在使用几何边进行控制时，可选线性、指数、正态等方式确定节点的分布，以满足不同区域的特定需求。使用几何面进行控制时，可通过设定网格尺寸变化率，控制网格尺寸从面边缘向内部的变化程度，以适应复杂流场的需求。在使用几何体进行控制时，可设定单元尺寸，并结合体网格尺寸变化率参数，生成过渡的网格以适应几何体内部的尺寸变化。

表 3 船舶 CAE 软件常用单元类型

单元名	详细说明
杆单元	2 节点直杆一维单元
梁单元	2 节点直梁单元，3 节点曲梁单元
膜单元	3 节点及 6 节点三角形单元、4 节点及 8 节点四边形单元
板单元	3 节点薄平三角形单元、4 节点薄平四边形单元、6 节点厚曲三角形单元以及 8 节点厚曲四边形单元
多层 6 节点或 8 节点板单元	\
二维实体单元	\
三维实体单元	\

4.5 导入网格模型

4.5.1 CAE 模型导入应包括 NASTRAN 软件的 BDF 格式、Abaqus 软件的 INP 格式、Ansys 软件的 CDB 格式等模型。软件的模型导入功能还应支持自定义格式的文件，通过定义特定的文件结构和数据格式，将自定义模型导入到 CAE 分析环境中，从而实现高度个性化的分析流程。

4.5.2 导入选项应包括但不限于：

- a) 单位系统，软件应允许用户可以根据实际工程需求选择合适的单位系统，如国际单位制（SI）或英制单位。
- b) 坐标系转换，在多软件协同分析中，模型的坐标系可能不一致。因此，软件应提供坐标系转换功能，允许用户将模型从一个坐标系转换到另一个坐标系，例如从全局坐标系转换到局部坐标系。

- c) 网格细化等级，对于一些复杂模型，用户可能需要在导入时对网格进行细化或优化。软件应提供网格细化等级的设置选项，允许用户根据分析精度要求调整网格密度，从而在保证计算精度的同时，优化计算效率。

4.6 网格质量检查

4.6.1 网格质量对计算精度和稳定性有很大的影响，应使用至少五种检查指标来衡量网格中单元的质量，检查对象应包括平面单元和体单元，得出结果应以直方图或表格的形式展现。质量检查的参数应满足表4的要求。

表4 网格质量指标

网格质量检查指标	详细说明
Aspect Ratio (长宽比)	单元最长边与最短边（或高宽比）的比值 理想范围：应小于10，理想值为1（即正方形或等边三角形） 长宽比过大可能导致计算结果误差较大
Skew (扭曲度)	单元实际形状与理想形状（如等边三角形、正方形）的偏离程度 理想范围：应小于0.5 扭曲度高表明网格单元不规则，导致计算误差增加
Jacobian (雅克比)	映射单元从实际空间到自然坐标系时的雅可比矩阵行列式，衡量单元扭曲程度 理想范围：应接近1。对于三角形网格，理想值通常在0.5到1之间 过低的低雅克比值表示单元形状不理想
Min Angle (最小角度)	理想范围：应大于30° 角度过小可能导致网格扭曲
Max Angle (最大角度)	理想范围：应小于135° 角度过大可能导致网格扭曲

4.6.2 在网格质量检查中，除了常见的长宽比、扭曲度、雅克比等指标外，还应对网格的拓扑结构和几何一致性进行检查。应对自由节点、重复单元、奇异网格以及一二维单元匹配进行检查：

- a) 自由节点检查，自由节点是指未被任何单元连接的节点。
- b) 重复单元检查，在网格中存在两个或多个完全相同的单元，它们可能具有相同的节点连接、形状和位置。
- c) 奇异网格检查：奇异网格是指几何形状或拓扑结构不符合常规要求的单元，例如零面积单元、零体积单元或退化单元（如三角形的两条边重合）。
- d) 一二维单元匹配检查：在一维和二维单元的连接处，应确保单元之间的几何和拓扑结构匹配。

4.6.3 对于不满足上述检查标准的低质量的网格，应对其进行网格修补。修补方法包括：

- a) 通过移动网格节点的位置，优化单元的形状和角度。
示例：对于长宽比过大的单元，可通过调整节点位置使其更接近正方形或等边三角形。
- b) 网格细化，在低质量网格区域增加更多的单元，通过细化网格来改善单元形状和尺寸。
示例：对于长宽比过大或角度不理想的单元，可通过细化网格减少单个单元的尺寸，降低误差。
- c) 网格粗化，在某些情况下，网格过于密集可能导致单元质量下降。通过合并相邻单元，减少网格数量，可改善网格质量。

- d) 重新划分网格，对于大面积或复杂的低质量网格区域，通过重新生成网格，可以优化整个区域的网格质量。
 - e) 调整网格拓扑结构，通过改变网格的拓扑结构，可改善网格质量。
- 示例：将三角形单元转换为四边形单元，或将四面体单元转换为六面体单元。

4.7 材料属性定义

4.7.1 软件应当具备完善的材料库功能，包括系统材料库、自定义材料库和本地材料库，用户可以根据需要自由选择或自定义添加所需的材料数据。在给模型赋予材料属性时，应当能够通过材料库快速进行赋值操作，提高工作效率。常用的船舶 CAE 软件材料库应至少包括钢材、铝合金、不锈钢、复合材料、铜合金。

4.7.2 船舶 CAE 软件材料属性应当涵盖以下内容：

- a) 杨氏模量、泊松比、剪切模量、质量密度、抗拉强度、抗压强度、屈服强度、热膨胀系数、导热系数、比热以及材料结构阻尼等常见属性。除了这些通用属性外，材料库还应当包含各向同性材料、正交各向异性材料和复合材料等特殊材料的属性设置。
- b) 材料库还应当支持对材料数据进行管理和组织，例如对材料参数的编辑、导入和导出功能，以及对材料属性进行分类和搜索，使用户能够方便地管理和使用各类材料数据。
- c) 对不同单元类型单元的属性赋值也有所区别。梁单元通常用于模拟细长结构，如船舶的框架、梁和柱。梁单元的材料属性赋值需要考虑以下特点：截面积、惯性矩、惯性积、惯性半径、材料属性。壳单元用于模拟薄壁结构，如船舶的船体、甲板和舱壁。壳单元的材料需要考虑厚度和材料属性。实体单元用于模拟三维体积结构，如船舶的结构部件、机械部件等。实体单元的材料属性赋值需要考虑材料属性。
- d) 对于复合材料或层合材料，用户可以定义材料的层合结构，包括每层的材料类型、厚度和方向。

4.8 约束载荷定义

4.8.1 在设定约束步骤中，除了基本的固定约束外，还应包括对称约束和约束方程等设定方法。

4.8.2 在设定载荷步骤中，应考虑到模型所受到的不同类型的载荷，以确保仿真计算结果的准确性和可靠性。常用的船舶 CAE 载荷包括力、压力、扭矩、速度、加速度、温度、内发热、热量、热流量、对流、辐射、重力、离心力、弯矩、热效应、恒定载荷和可变载荷等。

4.8.3 设定载荷时还应考虑到负载的时间和频率特性。

4.8.4 施加载荷时，应考虑以下内容：

- a) 数值来源（应能溯源）；
- b) 空间分布（作用在哪、怎么插值）；
- c) 方向与坐标系（随船体还是随地球）；
- d) 时间/频率特性（静载、瞬态、周期、随机）；
- e) 组合与工况（与哪些载荷叠加、安全系数）。

示例：对于集中力 Force。来源：规范公式（IACS Rec. 34 风浪载荷）、CFD 积分、模型试验。分布：集中力作用于吊机底座节点；分布力以面压形式作用于外板。方向：随船体坐标系（x-纵向，y-横向，z-垂向）。时间：准静态（装卸货）；瞬态。组合：与重力、惯性力组合；安全系数 $\gamma = 1.2$ （极限状态）。

4.9 设定分析步信息

在对载荷边界进行定义后，需要设置分析类型，基础分析类型应至少包括静力分析、模态分析、动力学分析。各类型分析步详细信息如表 5 所列。

表 5 分析步信息

分析步类型	详细说明
静力分析	应包含时间、增量、输出参数信息。
模态分析	应包含特征向量正规化、模态阶数、起止频率、转换点数、输出参数信息。
动力学分析	应包含稳态动力学和瞬态动力学分析。

4.10 模型导出

前处理数据交换格式应采用 INP (input) 文本文件格式，为 ASCII (American Standard Code for Information Interchange) 文本格式，扩展名为 .inp。也应支持常见 CAE 软件的模型格式，应包括且不限于：BDF 文件格式、CDB 文件格式。

5 后处理一般要求

5.1 总体流程

后处理的流程包括读取结果数据和结果展示、结果分析。在进行后处理时，CAE 软件应制定统一的后处理数据读取标准，包括统一的后处理文件格式和结果形式。

5.2 读取结果数据

5.2.1 在进行后处理前，应解析与 CAE 软件相对应的求解计算结果文件，读取结果数据文件中的节点位移、应力、应变等相关数据，并将其有效地存储在内存中。

5.2.2 后处理文件应符合下列要求：

- a) 求解结果数据采用 HDF5 文件结构。
- b) 求解结果数据中应注明有限元分析软件的版本信息。
- c) 求解结果数据应包含部件 (Parts) 数据、装配 (Assembly) 数据和分析求解 (Steps) 数据三部分内容。其中，部件数据、装配数据是模型数据的输出，分析求解数据是分析结果数据的输出。
- d) 在 HDF5 文件中，求解结果数据的各部分内容均采用树状结构进行组织。
- e) 本文件中未涉及的数据元素，可在遵循 HDF5 文件格式要求的基础上自行扩展。

5.2.3 解析求解计算结果文件是一个关键的环节，按照预定的格式和结构提取所需的数据，包括节点的几何信息、位移向量、应力张量和应变张量等。

5.2.4 读取并存储结果数据在内存中的，提取特定节点或单元的数据，并进行进一步的计算、分析和可视化展示。

5.2.5 解析结果数据文件，对数据进行必要的清理和处理，去除异常值或不合理的数据，进行数据插值以填补缺失的数据点，将单元积分点应力外推至节点。

5.3 结果显示

5.3.1 在结果展示阶段，应提供丰富多样的可视化形式，包括曲线图和云图等。曲线图可以显示节点位移随时间的变化曲线，或者展示应力随空间位置的变化曲线等。可以根据需求选择不同的曲线类型和颜色。云图部分，软件应允许用户选择在有限元模型上展示节点位移、应力分布等结果，通过调整云图的颜色、透明度等属性。

5.3.2 除了曲线图和云图，软件应提供动画展示、应力云图、变形图等其他形式的可视化效果。

