

基于 CAE 模型的船舶舱室自动识别高效算法

章志兵¹, 杨明润¹, 王丽荣², 陈有芳²

(1. 华中科技大学, 武汉 430074; 2. 中国船级社技术研究中心, 北京 100007)

摘要: **目的** 研究开发可高效、准确、自动识别 CAE 船舶舱室的算法。**方法** 通过设计网格拓扑关系和分析舱室的几何特征, 基于半边半面结构, 提出了半面封闭空间概念, 实现了半面扩展算法。利用半面扩展算法, 设计了全船 CAE 模型的舱室自动识别算法。**结果** 设计的 CAE 舱室自动识别算法高效、准确, 识别包含约 33 万个 CAE 单元的 18 万 t 大型散货船 CAE 模型中的所有舱室, 仅耗时 4 s。**结论** 算法应用于实际工程中, 验证了算法的高效性和准确性。该算法本质上是对三维模型中封闭空间的识别, 未来可应用于各类三维网格建模系统中。

关键词: 舱室; 封闭空间识别; 三维建模; 计算机辅助设计

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2020.04.020

中图分类号: U662.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-6457(2020)04-0160-06

An Efficient Algorithm for Automatic Identification of Ship Cabins Based on CAE Model

ZHANG Zhi-bing¹, YANG Ming-run¹, WANG Li-rong², CHEN You-fang²

(1. 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 research and develop an efficient, accurate and automatic identification algorithm for CAE ship cabin. Through design of topological relationship of a mesh and analysis on geometric characteristics of a cabin, based on the half-edge and half-face structure, the concept of half-face closed space was proposed, and the half-face expansion algorithm was realized. The algorithm of cabin automatic identification for whole ship CAE model was designed by the half-face expansion algorithm. An efficient and accurate automatic identification algorithm of CAE cabin was realized. It only took 4 s to identify all the cabins in the CAE model of 180,000 ton bulk carrier, which contained about 330,000 CAE units. The efficiency and accuracy of the algorithm are verified by its application in practical engineering. This algorithm is essentially to identify the closed space in 3D model, and it can be expected to be used in various 3D mesh modeling systems in the future.

KEY WORDS: cabin; closed space identification; 3D modeling; computer aided design (CAE)

船舶舱室识别是船舶设计的关键环节,是船舶有限元分析(CAE)和船舶结构性能校核(Structure Design Program, SDP)的基础^[1-2],因此,提高舱室识别效率和准确性,增强识别过程的自动性,对于船舶设计具有重大意义。

针对舱室识别问题,国内外学者研究提出了众多典型解决方案。单威俊等^[3-5]提出了“切分拼接”方法,首先利用自由边过滤舱室内部结构,再根据船舶相交结构的特征,定义一系列规则,将模型切分成一块块舱室面,最后将舱室面拼接成舱室空间。该方法具有

收稿日期: 2020-01-08

基金项目: 国家自然科学基金(51609089)

作者简介: 章志兵(1978—),男,博士,副教授,主要研究方向为汽车船舶CAD/CAM。

较高的自动性，但对船舶特征依赖性强，对于不同类型的船舶，需要定义不同的识别规则，并且经实验验证，识别准确率仅能达到 60%，需要大量的人工干预，才可做到准确识别全船的舱室，并且识别效率不高，以大型油船、散货船为例，识别船体中单个舱室即需要耗费 5 min。LEE S U 等^[6]采用自顶向下方法，利用分割面，进行布尔运算，将整个船体模型逐步切分，直至识别出所有舱室。该方法识别准确率高，但属于半自动方法，需要人工干预操作。在 4 万 t 的大型船舶上进行实验，表明该船体识别出所有舱室模型，需耗费约 1 h。KONINGH D 等^[7]提出一种新的模型切分方法，混合使用体与平面来划分船体模型，简化了舱室建模过程，提高了舱室识别准确率，但自动化程度不高，需要人工进行图形交互操作，导致效率难以有突破性提高。

文中利用一种新思路，将舱室抽象识别为三维模型中的封闭空间，基于半边半面模型，定义了封闭空间的方向。以此为基础，提出了时间复杂度 $O(n)$ (n 为模型中半面的数量) 的半面扩展算法，利用模型拓扑关系和空间坐标数值计算，可高效识别出种子半面所属的极小封闭空间。在半面扩展算法基础上，实现了高效的舱室自动识别算法。

1 半边半面模型

CHEN H, LI Guang-ming, DANOVARO E 等^[8-13]的研究表明，半边数据结构在三维模型的网格简化、模型切割方面具有良好的性能表现，并且易于拓展成紧凑性数据结构，在大规模模型处理中可节省较多的存储空间。DYEDOV V, RAY N 等^[14-16]的研究表明，半面数据结构在网格面细化、曲面重构方面具有良好的性能表现。为了提高舱室识别算法的可拓展性，在该算法中使用半边半面数据结构来表示几何元素，使该算法将来可融合于多种功能模块中。

一条无向边可拆分为两条方向相反的有向边。将有向边称为半边 (Half-edge)。同一条无向边拆分成的两条方向相反的半边互为伴随半边 (Accompany half edge)。

如图 1 所示，无向边 e 被拆分为 E_{h0} 和 E_{h1} 两条有向边， E_{h0} 和 E_{h1} 互为伴随半边。无向边 e 具有两个端点 v_0 和 v_1 。半边 E_{h0} 的起点为 v_0 ，终点为 v_1 ；半边 E_{h1} 的起点为 v_1 ，终点为 v_0 。

在半边模型基础上，可将一个无向面拆分为两个方向相反的有向面，有向面的方向根据组成该面的半边方向由右手定则确定。将有向面称为半面 (Half-face)。同一个无向面拆分成的两个方向相反的有向面互为伴随半面 (Accompany half face)。若半边 E_h 参与构成半面 F_h ，则称半面 F_h 包含半边 E_h 、半边 E_h 属于半面 F_h 。

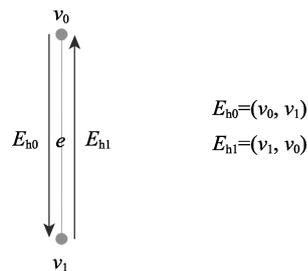


图 1 半边定义

Fig.1 Definition of half-edge

如图 2 所示，无向面 f 被拆分为 F_{h0} 和 F_{h1} 两个有向面 (为了图示清晰性，无向面 f 未在图中画出)， F_{h0} 和 F_{h1} 互为伴随半面。半边 $E_{h0}, E_{h2}, E_{h4}, E_{h6}$ 构成半面 F_{h0} ，属于半面 F_{h0} 。半边 $E_{h1}, E_{h3}, E_{h5}, E_{h7}$ 构成半面 F_{h1} ，属于半面 F_{h1} 。半面 F_{h0}, F_{h1} 的方向根据半边方向由右手定则确定。

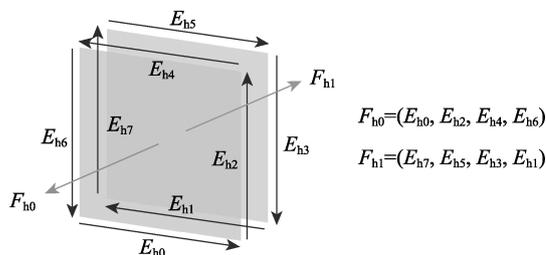


图 2 半面定义

Fig.2 Definition of half-face

张奇华等基于拓扑学原理，提出了“有向性”和“封闭性”的概念^[17]。在此基础上，结合半边半面模型，将封闭空间定义为由一组有向面围成的封闭区域，其中每个有向面的方向都指向该封闭区域内部。该定义相较于使用无向面定义封闭空间，具有以下优点：提供了一种统一的封闭空间特征，可利用该特征，设计更简洁高效的封闭空间识别算法；使得相邻的封闭空间之间不再存在公共面，使所有的封闭空间相互独立，从设计上降低数据结构耦合；利用组成封闭空间的有向面的方向，易于判断一个三维空间坐标是否处于封闭空间内部，提高算法可扩展性。

2 CAE 船舶舱室自动识别算法

舱室识别算法总流程如图 3 所示。

Step 1: 获取模型的所有 face 及 face 包含的 edge 元素。

Step 2: 建立 CAE 模型的拓扑关系，并创建半边半面数据结构存储拓扑关系。

Step 3: 取一个尚未被访问的半面作为种子半面；若不存在未被访问的种子半面，则结束。

Step 4: 识别种子半面所属的极小封闭空间。使用半面扩展算法，以种子半面为始，向相邻半面扩展，并递归执行该过程，识别出所有属于该封闭空

间的半面。

Step 5: 存储识别结果。以一个新的半面数组存储表示该封闭空间。回到 Step3, 递归地执行舱室识别过程。

Step 6: 采用半自动方式剔除船体外部空间。程序标识出半面数量最多的一个极小封闭空间, 用户可确认该空间为船体外部空间; 或用户手动点选船体外壳上的一个半面, 程序识别出该半面所属的极小封闭空间, 标识为船体外部空间。

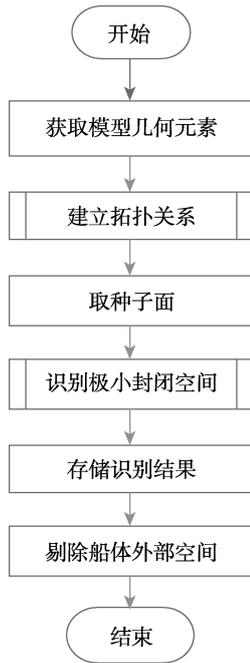


图3 舱室识别算法总流程
Fig.3 Flow of cabin identify algorithm

2.1 CAE 模型拓扑关系建立

船舶舱室是由一组面组成的封闭空间区域, 封闭空间的边界面构成流形拓扑, 因此要求在舱室识别过程中, 能够通过给定的面获取其边界线, 并通过边界线获取其连接的面, 即给定的面相邻的面。

在船舶 CAE 模型中, 曲线段已被离散为分段的直线段, 曲面已被离散为空间 2D 单元^[18], 可将空间 2D 单元视为 face, 则舱室为由一组 face 组成的封闭空间区域。

在文中舱室识别算法中, 需要建立的拓扑关系有: 半面与半边的包含关系; 半边与半边的伴随关系。

如图 4 所示, 半面 F_{h0} 包含半边 $E_{h0}, E_{h1}, E_{h2}, E_{h3}$; 半面 F_{h1} 包含半边 $E_{h4}, E_{h5}, E_{h6}, E_{h7}$; 半边 E_{h1} 与 E_{h5} 互为伴随半边, 并由此可推断出半面 F_{h0} 与半面 F_{h1} 相邻。

对于模型中每个空间 2D 单元表示的无向小平面, 创建两个方向相反的有向半面, 并创建每个半面包含的半边。

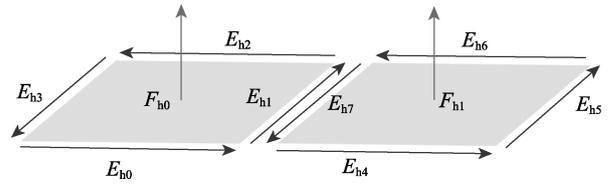


图4 CAE 模型拓扑关系示意图
Fig.4 Diagram of CAE model topology relationship

为了建立半边的伴随关系, 对每个半边的起点和终点构成的二元组 (Star point, end point) 进行编码, 使得二元组 (Star point, end point) 的编码与二元组 (End point, star point) 的编码互为相反数, 并且所有编码均不为 0。使用 Hash 表进行存储, 以二元组编码作为 Key, 以半边数组作为 Value。创建每个半边时, 设该半边的编码为 x , 则将该半边加入 Key 为 x 对应的 Value 半边数组中, 并在 Hash 表中查询半边编码为 $-x$ 的半边, 记录半边伴随关系。

2.2 半面扩展算法

半面扩展算法用于识别三维模型中由半面构成的封闭空间。算法根据一个种子半面, 识别出其相邻半面, 并保证了被选择的相邻半面与种子半面属于同一封闭空间。递归执行上述过程, 可识别出模型中与种子半面属于同一封闭空间的所有半面, 即构成该封闭空间的所有半面。

图 5a 所示为三维网格模型的局部示例, 图 5b 展示了该示例在二维视角下的半面扩展过程, 即以空间内一个半面为起始, 逐渐向周围半面搜索扩展, 直至搜索出该空间内的所有半面。

图 5c 所示为半面扩展过程的一个详细示例。在本例中, 以半面 F_{h0} 为种子半面, 识别出其相邻半面中与 F_{h0} 处于同一封闭空间的半面 $F_{h1}, F_{h2}, F_{h3}, F_{h4}$ 。递归执行半面扩展过程, 以半面 F_{h1} 为种子半面, 识别出半面 F_{h5}, F_{h6}, F_{h7} ; 以半面 F_{h2} 为种子半面, 识别出半面 F_{h8} 和 F_{h9} ; 以半面 F_{h3} 为种子半面, 识别出半面 F_{h10} 和 F_{h11} ; 以半面 F_{h4} 为种子半面, 识别出半面 F_{h12} 。不断递归执行此过程, 直到识别出该封闭空间的所有半面为止。

种子半面在一个半边处可能存在多个相邻半面, 针对该情况, 文中提出了“半面匹配规则”。根据该规则, 给定种子半面及其一条半边, 可识别出种子半面在该半边处相邻的所有半面, 并选择一个匹配的相邻半面, 该半面与种子半面属于同一个封闭空间。在下文中, 将该过程称为“半面匹配过程”。

如图 5d 和 5e 所示, 从不同视角可看出半面 F_{h2} 与 F_{h13} 均与半面 F_{h0} 相邻, 但以半面 F_{h0} 为种子半面进行半面扩展时, 通过半面匹配规则判断, 半面 F_{h2} 与 F_{h0} 处于同一极小封闭空间, 故扩展到半面 F_{h2} 而没有扩展到半面 F_{h13} 。

如图 6 所示, 种子半面为 F_{hseed} , 半面 F_{hseed} 的指

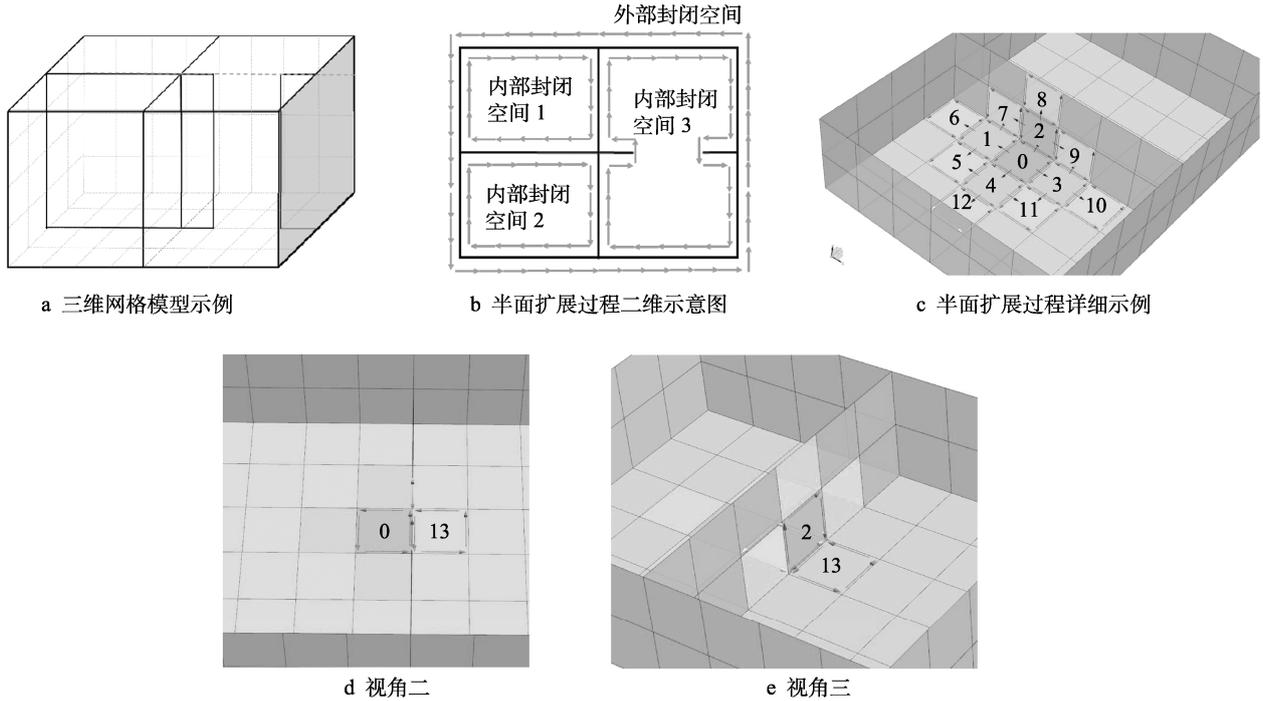


图 5 半面扩展算法示意图
Fig.5 Diagram of half-face expansion algorithm

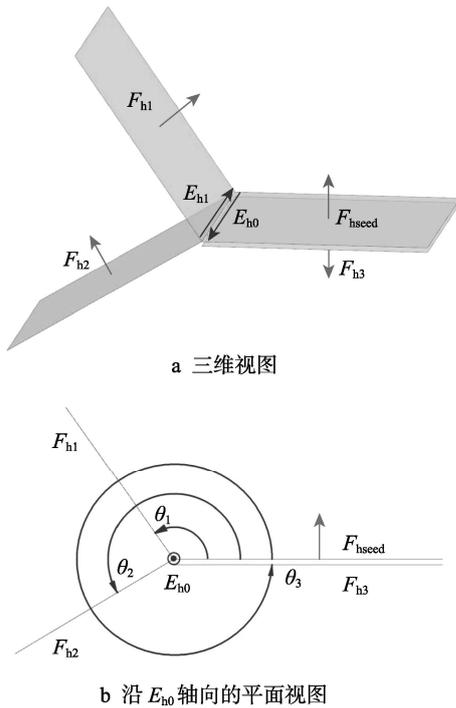


图 6 半面匹配规则示意图
Fig.6 Diagram of half-face matching rule

定半边为 E_{h0} 。半边 E_{h0} 的伴随半边 E_{h1}, E_{h2}, E_{h3} (为了图示清晰性,半边 E_{h2}, E_{h3} 未在图中画出) 所属的半面分别为 F_{h1}, F_{h2}, F_{h3} , 共 3 个半面, 这些半面称为半面 F_{hseed} 在半边 E_{h0} 处的相邻半面, 其中半面 F_{h3} 为种子半面 F_{hseed} 的伴随半面。如图 6b 所示, 以半边 E_{h0} 为轴, 按照半面 F_{hseed} 的方向, 从半面 F_{hseed} 到半面 F_{h1}, F_{h2}, F_{h3} 的有向角分别为 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$, 角度值

的范围为 $(0, 2\pi]$ 。

半面匹配规则描述如下: 对于给定的半面半边二元组 (F_{hseed}, E_{h0}) , 其中半面 F_{hseed} 为种子半面, E_{h0} 为 F_{hseed} 的一条半边, 半面集合 FH 中的所有半边 F_{hi} 均为半边 E_{h0} 关联的半边所属的半面。其中集合 FH 一定不为空集, 因为种子半面 F_{hseed} 的伴随半面必定属于集合 FH 。以半边 E_{h0} 为轴, 按照 F_{hseed} 方向从半面 F_{hseed} 到集合 FH 中半面 F_{hi} 的有向角为 θ_i , 则种子半面 F_{hseed} 在半边 E_{h0} 处的匹配半面为最小有向角 θ_j 对应的半面 F_{hj} 。半面 F_{hj} 与种子半面 F_{hseed} 处于同一封闭空间。

例如在图示 6b 中, θ_1 为最小有向角, 根据该规则种子半面 F_{hseed} 在半边 E_{h0} 处所匹配的半面为 F_{h1} 。

如 3.1 节所述, 在舱室识别算法总流程中, 使用半面扩展算法识别出种子半面所属的封闭空间。半面扩展算法流程如图 7 所示。

Step 1: 新建一个半面数组, 表示种子半面所属的封闭空间, 用于存储识别出的半面。

Step 2: 新建一个半面队列。在半面扩展算法执行过程中, 该队列中的半面状态为: 已被识别出属于当前封闭空间, 但尚未执行以该半面为种子半面的半面匹配过程。

Step 3: 将种子半面加入队列尾部, 并标记为已访问。

Step 4: 判断队列是否为空。若队列为空, 则半面扩展算法过程结束; 否则继续执行半面扩展算法。

Step 5: 从队列首部取一个半面作为种子半面,

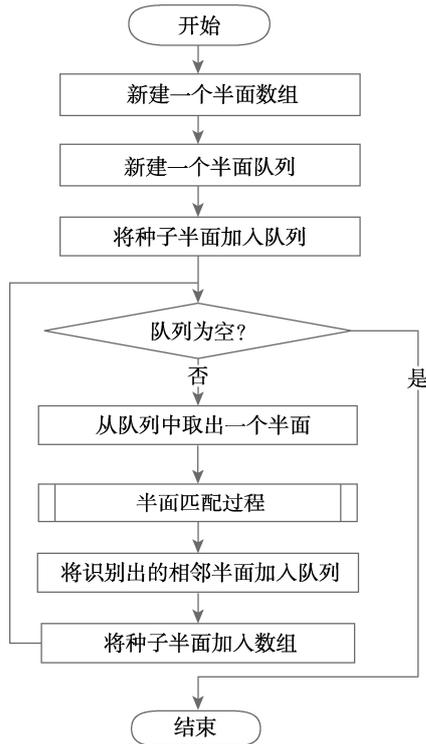


图7 半面扩展算法流程

Fig.7 Flow of half-face expansion algorithm

并从队列中将其删除。

Step 6: 执行半面匹配过程。根据半面匹配规则, 识别出种子半面相邻的、尚未被访问的、属于同一封闭空间的半面。

Step 7: 将 Step 6 中识别出的半面加入半面队列, 后续作为种子半面递归地执行半面匹配过程。将其标记为已访问, 防止后续被重复加入队列, 导致冗余计算。

Step 8: 将 Step 5 中取的种子半面加入表示该封闭空间的半面数组。回到 Step 4, 递归地执行半面扩展过程。

分析可知, 在识别过程中, 对模型中的每个半面, 仅进行了常数访问; 由于船舶模型中任何半面包含的半边仅有常数个, 且任何半边的伴随半边仅有常数个, 故半面匹配过程耗时为 $O(1)$, 所以舱室识别过程的时间复杂度为 $O(n)$, 已达渐进最优, 其中 n 为模型中半面的总个数。

3 应用实例

在 NX11.0 平台上, 以 C++ 语言实现文中的 CAE 舱室自动识别算法, 并使用多种船体模型进行测试。测试计算机 CPU 为 Intel Core i5-6400 2.70 GHz, 内存容量为 8 GB, 操作系统为 64 位。

图 8 所示为一个 18 万 t 大型散货船 CAE 模型, 图 9 所示是对该模型的舱室识别结果。该模型共有 CAE 单元 329 509 个, 识别结果共有 1190 个封闭空间。

经多次重复测试, 测量算法中“建立拓扑关系”、“识别舱室”两部分的耗时情况, 测量结果为: 建立拓扑关系耗时约 3.2 s; 识别舱室耗时约 0.5 s, 总耗时约 4 s。

分析测试结果可以发现, 建立 CAE 模型拓扑关系过程耗时较多, 因为该过程涉及大量的内存申请、赋值操作, 且半边查找总过程平均情况时间复杂度为 $O(n)$, 最坏情况时间复杂度为 $O(n \log n)$ (其中 n 为模型中半边的总个数); 识别舱室过程耗时较短, 因为仅仅涉及数值计算和数据结构的调用, 且该过程时间

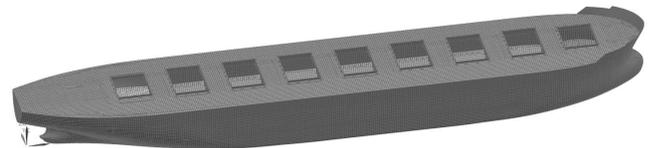


图8 18万t大型散货船CAE模型示意图
Fig.8 Diagram of CAE model for 180,000 tons large bulk carrier

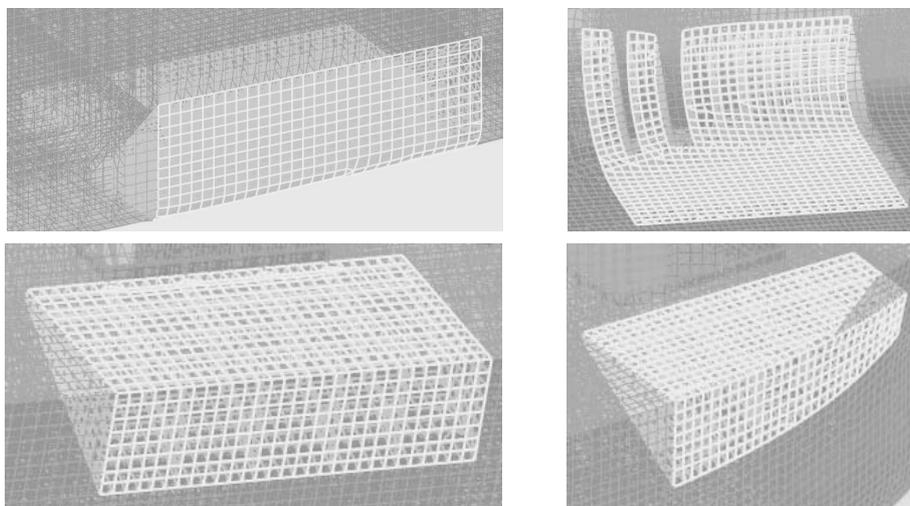


图9 大型散货船CAE模型舱室识别结果示意图

Fig.9 Diagram of CAE model cabin identification results for large bulk carriers

复杂度为 $O(n)$ (其中 n 为模型中 face 的总个数)。从算法复杂度角度可证明该识别算法的高效性。

对比测试使用 NX 系统内置的船舶模块中的舱室识别功能。该功能需要选择种子点,一次识别种子点所在的单个舱室,使用二次开发方式利用该功能循环识别出所有舱室,并使用计时工具仅累积测量识别过程的耗时,排除其他因素影响。利用上述模型重复测试,结果表明,识别出所有舱室耗时约 180~200 s。

测试结果表明,该算法效率较高,18 万 t 大型散货船 CAE 模型的舱室识别仅耗时 4 s;识别准确率较高,所有 CAE 舱室都已准确识别,无遗漏部分、无多余部分。

4 结语

提出了一种半面扩展算法,并基于此提出了 CAE 舱室自动识别算法。经实际工程项目应用检验表明,算法具有很高的效率和准确性;算法可拓展性强,在该算法基础上,易于拓展出船舶舱室的相关功能,例如,识别舱室边界构件和内部构件、识别舱室中的型材、舱室合并等。该算法可广泛应用于船舶 CAE 系统中,提供舱室相关构件的高效、准确的识别功能。本质上,该算法是对三维模型中封闭空间的识别,可预期在未来应用于各类三维建模系统中。

参考文献:

- [1] 周士春. 船舶与海洋工程产品舱室设计的发展现状分析[J]. 船舶工程, 2010(S1): 12—14.
ZHOU Shi-chun. The Analysis of Current Development of the Vessel and Offshore Accommodation Design[J]. Ship Engineering, 2010(S1): 12—14.
- [2] 刘朕明, 孙森. 船舶舱室参数化设计的方法研究与软件实现[J]. 船舶, 2017, 28(2): 27—31.
LIU Zhen-ming, SUN Miao. On Parametric Design and Program of Ship Cabins[J]. Ship & Boat, 2017, 28(2): 27—31.
- [3] 单威俊, 许方, 陈坤坤, 等. 海洋结构与船舶有限元模型空间识别方法[J]. 舰船科学技术, 2014(5): 25—30.
SHAN Wei-jun, XU Fang, CHEN Kun-kun, et al. Research on Spaces Detection Methods of Offshore Structure and Ship FEM Model[J]. Ship Science and Technology, 2014(5): 25—30.
- [4] 单威俊, 李锋, 蒲海, 等. 船舶模型边界网格单元识别技术研究[J]. 计算机工程与设计, 2008, 29(10): 2652—2654.
SHAN Wei-jun, LI Feng, PU Hai, et al. Research on Boundary Elements of Ship Model Identification Techniques[J]. Computer Engineering and Design, 2008, 29(10): 2652—2654.
- [5] 单威俊, 陈坤坤, 许方, 等. 基于 MSC. Patran 的舱室识别程序开发[J]. 船海工程, 2014, 43(2): 77—80.
SHAN Wei-jun, CHEN Kun-kun, XU Fang, et al. Development of the Cabin Recognition Program Based on MSC. Patran[J]. Ship & Ocean Engineering, 2014, 43(2): 77—80.
- [6] LEE S U, ROH M I, CHA J H, et al. Ship Compartment Modeling Based on a Non-manifold Polyhedron Modeling Kernel[J]. Advances in Engineering Software, 2009, 40(5): 378—388.
- [7] KONINGH D, KOELMAN H, HOPMAN H. A Novel Ship Subdivision Method and Its Application in Constraint Management of Ship Layout Design[J]. Journal of Ship Production and Design, 2011, 27(3): 137—145.
- [8] CHEN H, YIN G, ZHANG J. A Real Time Mesh Simplification Algorithm Based on Half-edge Collapse[C]// 2008 Chinese Control and Decision Conference, IEEE, 2008: 1896—1899.
- [9] LI Guang-ming, TIAN Jie, ZHAO Ming-chang, et al. A New Mesh Simplification Algorithm Combining Half-edge Data Structure with Modified Quadric Error Metric[C]// Object Recognition Supported by User Interaction for Service Robots, IEEE, 2002, 2: 659—662.
- [10] LI J F, CHEN Y B, WANG M S, et al. Half-edge Collapse Simplification Algorithm Based on Angle Feature[C]// 2015 International Conference on Automation, Mechanical Control and Computational Engineering, Atlantis Press, 2015.
- [11] LIU X, DONG L, LU D. Three Dimensional Stratum Modeling and a Fast Algorithm for Arbitrary Cutting Based on Half-edge Structure[C]// 2009 International Conference on Computational Intelligence and Software Engineering, IEEE, 2009: 1—4.
- [12] DANOVARO E, DE F L, MAGILLO P, et al. The Half-edge Tree: A Compact Data Structure for Level-of-detail Tetrahedral Meshes[C]// International Conference on Shape Modeling and Applications (SMI'05), IEEE, 2005: 332—337.
- [13] DANOVARO E, DE FLORIANI L. Half-Edge Multi-Tessellation: A Compact Representation for Multi-Resolution Tetrahedral Meshes[C]// 3DPVT, 2002: 494—499.
- [14] DYEDOV V, RAY N, EINSTEIN D, et al. AHF: Array-based Half-facet Data Structure for Mixed-dimensional and Non-manifold Meshes[J]. Engineering with Computers, 2015, 31(3): 389—404.
- [15] ZHAO X. Mesh Refinement and High-order Reconstruction for Finite Element Methods on Unstructured Meshes[D]. New York: Stony Brook University, 2016.
- [16] RAY N. High-order Surface Reconstruction and Its Applications to Surface Integrals and Surface Remeshing[D]. New York: Stony Brook University, 2013.
- [17] 张奇华, 邬爱清. 随机结构面切割下的全空间块体拓扑搜索一般方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(10): 2043—2048.
ZHANG Qi-hua, WU Ai-qing. General Methodology of Spatial Block Topological Identification with Stochastic Discontinuities Cutting[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(10): 2043—2048.
- [18] 章志兵, 林洋, 王丽荣, 等. 基于 NX 的船舶有限元前处理系统研究[J]. 江苏船舶, 2018, 35(3): 8—12.
ZHANG Zhi-bing, LIN Yang, WANG Li-rong, et al. Research of Ship Finite Element Preprocessing System Based on NX[J]. Jiangsu Ship, 2018, 35(3): 8—12.