

铸造过程模拟软件前处理技术研究进展

崔雨薇¹, 潘 玥^{1,3}, 段志强¹, 刘 彬¹, 裴小龙¹, 陈利文¹, 侯 华^{1,3}, 赵宇宏^{1,2,4}

(1. 中北大学 材料科学与工程学院 教育部共建高性能铝/镁合金材料开发应用协同创新中心

新材料智能铸造先进成型山西省重点实验室, 山西 太原 030051)

(2. 北京科技大学 北京材料基因工程高精尖创新中心, 北京 100083)

(3. 太原科技大学 材料科学与工程学院, 山西 太原 030024)

(4. 辽宁材料实验室 材料智能技术研究所, 辽宁 沈阳 110004)

摘要: 前处理模块是铸造数值模拟软件的核心组成部分, 直接影响模拟的准确性与效率。本文对铸造模拟软件前处理技术进行了全面综述, 重点聚焦于几何建模、参数设置及核心的网格剖分技术。系统阐述了六面体网格、四面体网格及混合网格剖分方法的原理与发展历程, 并分析了各类算法在处理复杂铸件时的优劣势。最后, 指出了当前铸造软件前处理模块面临的关键挑战, 并对其未来的发展趋势进行了展望。

关键词: 铸造过程数值模拟; 前处理模块; 网格剖分方法

中图分类号: TG21; TP391.9

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2026)05-1348-15

1 引言

铸造是制造业中最古老、最常见和最重要的工艺之一, 有着广泛的应用领域。传统的铸造工艺^[1-2]依赖于大量的实验和经验准则, 不仅耗时耗力, 且难以保证产品质量的稳定性。随着计算机及相关科学的发展, 计算机模拟技术^[3-7]在铸造成型中的应用越来越受到关注, 铸造过程数值模拟技术^[8-9]得到了广泛的应用, 相关铸造过程模拟软件也随之出现。通过铸造数值模拟, 可以在虚拟环境中预测铸造过程中的流动、温度分布、应力分布等关键参数, 从而在实际生产前优化工艺参数、提高铸件质量、减少试错成本和时间。但模拟过程通常需要大量的计算资源, 对于大规模复杂铸件, 存在计算时间较长等问题。此外, 还面临模拟结果准确度受输入参数影响大、用户专业知识门槛高等挑战。

早期的铸造模拟工具主要依赖于有限差分方法^[10] (finite difference method)、有限元分析^[11] (finite element analysis) 和计算流体动力学^[12] (computational fluid dynamics)。这些工具能够模拟铸造过程中的流动、温度和应力分布, 但通常需要高度专业的知识和复杂的模型。从20世纪80年代开始, 出现了一批商业化的铸造模拟软件, 如 ProCAST^[13]、MAGMASOFT^[14]、NOVACAST^[15]、Flow-3D^[16]、华铸 CAE^[17]、FT-Star^[18] 和 EasyCast^[19] 等, 这些软件提供了用户友好的界面, 在科研及生产中得到了广

泛应用。随着时间的推移, 铸造模拟软件不断改进材料模型以及温度场、流动场及应力场等的计算模型^[20-24], 以更准确地预测铸件质量及铸造缺陷, 微观过程模拟^[25-27] 和多尺度模拟也得到了发展^[28]。随着计算能力的提高, 铸造模拟软件可以利用并行计算和高性能计算资源来加速模拟过程^[29-31], 使其更加高效, 并且现代铸造模拟软件越来越能够耦合多种物理场, 如热传导、流体流动、固体力学和化学反应, 这使得模拟更加真实和全面。近年来, 一些铸造模拟方法开始集成实时监控^[32-35] 和反馈功能, 允许制造商在铸造过程中进行实时调整, 以确保最终产品的质量。最新的趋势是将铸造模拟与云计算^[36-37] 和物联网^[38] 技术相结合, 以实现远程监控和数据分析, 从而提高生产效率和产品质量, 朝着智能化、集成化和自动化发展。

铸造数值模拟主要包括: 前处理、中间计算和后处理3个模块, 如图1所示。前处理模块是铸造模拟软件开发的基础, 涉及到几何建模、参数设置、网格剖分及优化等内容^[39], 前处理模块的质量直接影响后续铸造模拟的精度及速度。网格剖分是前处理模块的核心任务之一, 高质量的网格能够更准确地反映铸件的几何特征, 提高模拟结果的可靠性。早期的铸造模拟软件前处理模块需要用户手工创建模型, 包括铸件建模、模具建模和边界条件设置, 这些过程需要大量的时间和专业知识。随着三维建模软件的发展, 铸造模拟软件开始与这些软件集成, 使

收稿日期: 2025-05-07

基金项目: 国家自然科学基金 (52375394, 52275390, U23A20628, 52305429); 山西省重点研发计划 (202301050201004)

作者简介: 崔雨薇, 女, 1999年生, 中北大学材料科学与工程学院, 山西 太原 030051, E-mail: 1563265829@qq.com

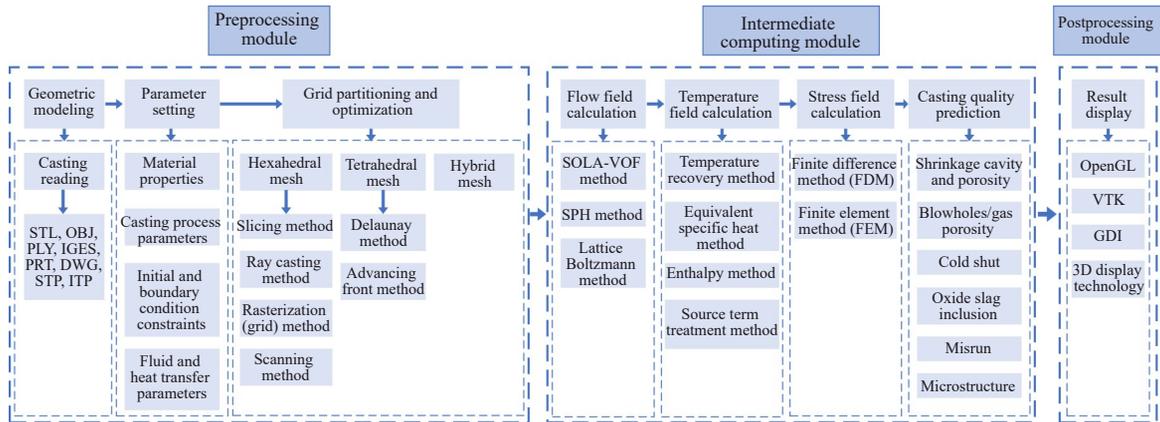


图1 铸造数值模拟系统组成示意图

Fig.1 Schematic diagram of casting numerical simulation system

用户能够更轻松导入几何模型。自动网格生成的算法^[40-45]也逐渐被引入前处理模块,这些算法可以根据铸件模型自动生成适用于铸造模拟的网格,减少了传统划分网格过程中需要用户手动选择几何模型、定义网格类型并设定模型区域而造成的工作量。随着技术的不断发展,前处理模块开始集成材料数据库^[46],使用户能够轻松选择合适的铸造材料,并设置相关的材料参数。目前的铸造模拟不仅涉及流体动力学,还包括热传导、材料变形等多种物理现象。将前处理模块与机器学习^[47-48]相结合也更有利于建立较完整的力学性能预测模型。一些铸造模拟软件前处理模块支持网格剖分并行处理^[49],以加速模拟过程,特别是对于大规模模拟任务。总之,铸造模拟软件前处理模块的发展经历了从手工建模到自动化、多物理模拟、用户友好界面、与机器学习相结合和并行处理的演进。这些改进使铸造模拟工程师能够更准确、高效地进行铸造模拟,帮助他们优化工艺以控制产品质量。

本文详细介绍了当前铸造过程模拟软件前处理的相关内容,并对前处理过程中网格剖分环节的不同方法进行了系统总结。根据不同网格类型的特点,深入探讨了相关方法的原理和发展历程。此外,本文还对前处理网格剖分领域的未来发展进行了探讨。

2 前处理模块任务

铸造软件前处理模块的主要任务是为铸造模拟提供准备工作,包括几何建模、参数设置、网格剖分及网格优化等。前处理是对铸件进行准确数值模拟的基础和前提,而网格剖分及优化又是其中的关键所在,直接影响到整个软件的实用性及模拟的准确性。

2.1 几何建模

几何建模是铸造模拟前处理中的一个关键步骤,它将设计好的铸件三维实体转换为可用于铸造模具制造和铸造工艺规划的数字模型。对于三维CAD模型,一般采

用 STL 文件格式^[50-53]输出,EasyCast 软件和 NOVACAST 软件都支持该文件格式。STL 文件由模型表面的三角形面片的三个顶点坐标和法向量组成。STL 格式采用将 CAD 模型近似为一组三角形的方法,可以将各种样条(如样条曲线、P 线、弧线、挤出和扫描)转换为简单或复杂的三角形网格。STL 文件一般分为 ASCII 格式和二进制格式,若铸件三维模型的 STL 文件为 ASCII 格式,则按行读取 STL 文件;若为二进制格式,则按文件字节数来循环读取 STL 文件。

STL 文件读取成功后,为了避免 STL 文件中出现缺失的孔洞的错误,导致后续结果出现较大误差的问题,前处理模块一般还会进行 STL 文件缺陷处理^[54-57]。常见的方法为射线法,首先,发出一簇射线穿透铸件三维模型,如图 2^[58]。如果某条射线穿过封闭环时造成交点不配对的情况,则判定铸件三维模型存在缺陷,并将缺陷所在网格的属性设为 0。接下来,需要判断缺陷所在网格周围 X、Y、Z 3 个方向上 6 个相邻网格的材质。如果某一方向上两个相邻网格的材质相同,则将缺陷所在网格的属性重置为相邻网格的材质编号。通过这种方法可以完成对铸件三维模型的 STL 文件的缺陷处理。

此外,常见的三维 CAD 模型格式还有 OBJ (wavefront .obj)文件格式^[59-60]、PLY (polygon file format)文件格式^[61]、IGES (initial graphics exchange specification)文件格式^[62]、PRT (part file)格式、DWG (drawing)格式、STP (standard for the exchange of product model data)格

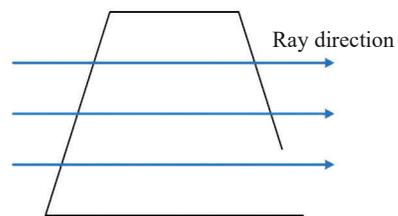


图2 射线法缺陷检测示意图

Fig.2 Schematic diagram of defect detection by gamma ray method^[58]

式和 IPT (inventor part file) 格式等。OBJ 文件主要包含模型的几何和材质信息,以文本形式存储,文件中包含三维模型的顶点信息、面信息、法向量信息、材质信息以及纹理坐标信息。OBJ 格式表示的几何信息不仅局限于三角形,也可以包括四边形和其他多边形。OBJ 文件中包含的有关模型材质和纹理映射的信息,这使得它适用于更复杂的渲染和可视化应用,但是 OBJ 文件格式不支持动画且不包含与材质、纹理和动画相关的高级功能。PLY 文件格式可以包含不仅限于三角形面片的多边形数据。同时,PLY 格式支持可选的法向量和颜色属性,以增强模型的表现力。但 PLY 文件格式也存在不包含文件元数据、不支持高级特性和不适合复杂场景等缺点。IGES 文件格式可以表示各种类型的几何数据,包括线、弧、圆、曲线、面和体等,它提供一个通用、开放和具有层次结构的方法,以便不同 CAD 系统之间能够交换和共享三维 CAD 数据,从而促进跨平台协作和互操作性,该文件格式为 ProCAST 软件和 NOVACAST 软件的可接受文件类型。但它也存在一些限制,例如不能有效地存储复杂的非几何数据(如材质、动画等)和可能导致文件较大的问题。PRT 格式的优点在于其强大的参数化建模能力,适合复杂的产品设计;DWG 格式是 AutoCAD 的标准文件格式,广泛用于建筑和工程设计;STP 格式符合国际标准(ISO 10303),适合于不同 CAD 系统之间的数据交换;IPT 格式由 Autodesk Inventor 生成,支持丰富的参数化设计,但上述几种格式存在文件规模较大、结构复杂,在处理大型装配体时速度较慢的问题,影响可读性与可操作性。综上,STL 文件格式由于其文件简单、支持广泛、渲染快速等成为比较常用的铸造模拟三维 CAD 模型格式,具体格式应根据不同应用和需求来进行选择。

2.2 参数设置

在进行铸造模拟前处理时,需要设置一系列参数来定义模拟的条件和要模拟的铸造过程。这些参数的设置对于模拟的准确性和可靠性至关重要。常见的铸造模拟前处理参数^[63]有:材料属性、铸造工艺参数、初始和边界条件约束^[64]、流体和热传递参数^[65]等。材料属性定义铸造过程中熔点、导热系数、热膨胀系数、机械性能等;铸造工艺参数指定铸造过程的浇注速度、冷却率、模具温度等;初始和边界条件约束确定模拟的初始条件和边界条件,包括温度、压力、速度等。对于参数获取,在进行热物性参数反求^[66]时,通常通过已知的实验数据(如温度变化和时间)来推导和计算热导率、热容量、密度、热膨胀系数等关键参数,以确保模拟的准确性;在实际模拟过程中,若使用 JMatPro 软件^[67]进行模拟,需要设定材料的化学成分、模拟温度范围、压力值等参数。同样,在使用 Pandat 软件^[68]进行模拟时,则需设置材料的组分数据、温度范围、压力、相平衡计算类型以及晶体结构数据等,以

便完成模拟过程。确保对这些参数进行精准设定,将有助于保证铸造模拟的准确性与可靠性,从而为铸造工艺的优化提供有力支持。模拟过程中参数设置将取决于具体的铸造模拟软件和模拟目标。

2.3 网格剖分及优化

网格剖分是前处理的一个重要组成部分,网格剖分的好坏不仅影响表征铸件模型的准确度^[69-72],而且影响后续数值计算解的收敛性,铸件的网格剖分质量是整个模拟过程工作准确高效的重要保证,对于整个铸造模拟软件的实用性具有决定性的影响。常见的网格主要包括:六面体网格^[73]、四面体网格^[74]和混合网格^[75]。它们在几何形状、网格生成难度、数值计算和计算效率等方面都存在一些区别,如表 1 所示。六面体网格一般适用于规则的几何体和需要高效计算的问题,四面体网格适用于不规则的复杂几何形状,混合网格适用于多尺度、多物理等复杂问题。在实际工程和数值模拟中,通常会根据问题的性质和复杂性来选择合适的网格类型。

3 网格剖分方法

3.1 六面体网格剖分方法

六面体网格是一种用于三维空间的网格剖分方法,它将三维几何区域分割为六面体元素,每个六面体元素都由六个矩形面或正方形面组成。六面体网格由于在计算精度、抗畸变程度、收敛速度及存储空间等方面相对于其他体网格具有显著优势^[76-77],一直被认为是理想的铸造模拟网格,受到学术界和工业届的一致认可,对六面体网格的研究也从未间断。

3.1.1 切片法

切片法作为最基础的六面体网格剖分方法,适用于规则且不含曲面的铸件。切片法的基本思想是将三维铸件沿 z 方向进行切片处理得到平面域,再沿 y 方向切割得到切割线,最后沿 x 方向切割得到中心点即完成了铸件的切割,其原理如图 3 所示^[58]。

具体实现方法为,首先确定切割平面方程:

$$Z_k = z_{\min} + (k - 1)d_z \quad (1)$$

其中 z_{\min} 和 d_z 分别为铸件模型在 z 方向上的初始面片位置和剖分步长, i, j, k 分别为 x, y, z 方向上的切割序号。通过将实体与 z 方向切割平面相交得到平面域,该平面域由许多条封闭的线段定义。

然后,在 y 方向上按照式(2)确定切割线,得到平面域的一条或若干条扫描线:

$$Y_j = y_{\min} + (j - 1)d_y \quad (2)$$

其中 y_{\min} 和 d_y 分别为铸件模型在 y 方向上的初始面片位置和剖分步长。沿 x 方向扫描所有扫描线,由此得到若干个中心点,其中 X_i 由式(3)确定。所述中心点表示为: (X_i, Y_j, Z_k) , 其中:

表1 六面体网格、四面体网格和混合网格比较
Table 1 Comparison between hexahedral mesh, tetrahedral mesh and hybrid mesh

Grid type	Hexahedral grid	Tetrahedral grid	Hybrid grid
Geometric shape	Composed of six adjacent faces, with a shape similar to a rectangular prism or a cube	Composed of a tetrahedral unit made up of four triangular faces	Composed of tetrahedral grids and hexahedral grids, with higher flexibility
Difficulty of grid generation	Low generation difficulty	Complex grid generation	Complex grid generation, requiring consideration of how to connect tetrahedral and hexahedral elements to maintain continuity
Numerical calculation	Better numerical stability, especially for issues such as fluid dynamics and heat conduction	Producing unstable elements possibly in some cases, requiring further refinement	Achieving a good balance in numerical calculations
Computational efficiency	Better computing resource utilization, fewer unnecessary elements, and higher computing efficiency	Requiring more elements to approximate complex geometric shapes, with lower computational efficiency	Depending on geometry complexity and problem nature

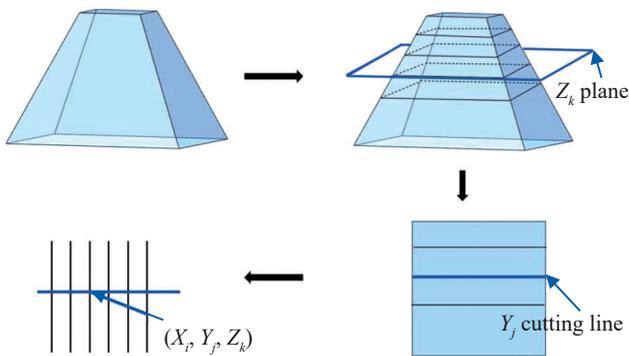


图3 切片法原理示意图

Fig.3 Schematic diagram of the principle of slicing^[58]

$$X_i = x_{\min} + (i - 1)d_x \quad (3)$$

其中 x_{\min} 和 d_x 分别为铸件模型在 x 方向上的初始面片位置和剖分步长。最后将所有中心点以立方体结构进行连接,由此得到同态剖分网格,从而完成对铸件三维模型的网格剖分。

清华大学的贾宝仟等人^[78]采用切片法实现了直角六面体网格全自动剖分技术;陈立亮等人^[79]研究了切片法中的3个关键技术,包括STL实体截面轮廓快速生成、容错处理以及网格信息的快速提取等;2004年,文曦和熊守美^[80]基于切片法对STL文件实现了非均匀网格划分。该方法在保证模拟精度的基础上,大大减少了网格数量。但上述方法在铸件边缘都存在锯齿状误差的情况。为了增强网格生成的自动化以及促进网格关于流场解的自适应生成,2006年庞盛永等^[81-82]完成了基于STL的cut cell笛卡尔网格算法,将其应用于后处理显示中,解决了可视化中的图像表面“锯齿”的问题。但自适应笛卡尔网格在处理复杂几何体和具有强烈变化的模型时可能存在网格质量限制、计算开销大、网格生成复杂和数值误差等缺

点。刘晶峰等人^[83]进一步实现了网格剖分容错处理技术,对于既定的铸件/铸型系统,其对应的STL数据文件即使存在一定的错误也可以顺利实施网格剖分,充分保证网格剖分的安全性和稳定性,图4为从动座铸件/铸型系统网格剖分实例^[82]。为了进一步提高网格质量,2010年毛红奎等人^[84]提出了边界切网格技术,解决了边界网格锯齿状误差的问题,对复杂铸件有良好的适应性。

中北大学本课题组的EasyCast铸造模拟软件中提出了一种基于边界网格投影的铸造模拟仿真网格剖分方法^[58],它的主要思路是:首先读取铸件三维模型的STL文件并进行缺陷处理,接着对铸件整体进行结构化网格剖分,对铸件进行内外网格区分得到边界网格,最后对边界网格进行投影处理,如图5。EasyCast是一套集三维实体造型文件接口、计算网格剖分、铸造过程仿真、铸造缺陷预测及结果显示为一体的集成软件系统,主要包括建模、充型分析、凝固分析和CAD等功能。与赵宇宏教授开发的基于多层次相场理论^[85]的综合仿真软件EasyPhase协同助力高性能金属材料研发及成型工艺优化。EasyPhase适用于相变过程中多尺度^[86]、多组元、多相、多晶粒、多物理场相互交叠的二维和三维微观组织形成和演化的计算模拟,可实现铸造到热处理^[87-89]到变形工艺

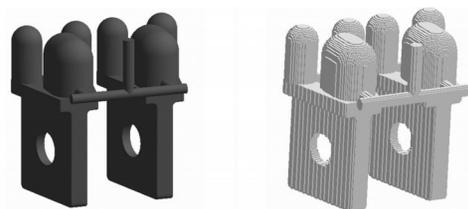


图4 从动座铸件/铸型系统网格剖分实例

Fig.4 Example of grid generation of driven seat casting/mold system^[82]

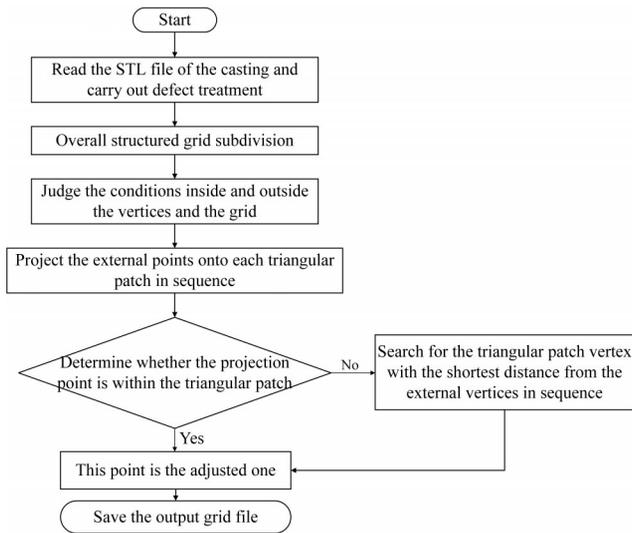


图5 基于边界网格投影的铸造模拟仿真网格剖分方法流程图
Fig.5 Flow chart of mesh generation method for casting simulation based on boundary grid projection^[58]

到缺陷预测全流程内在机理的微观阐述^[90],辅助新材料的设计与新工艺的研发。

该方法的关键是对边界网格的投影处理:从外部网格顶点向铸件三维模型的各个面片作垂线,并求出垂距,然后找出其中的最短垂距的垂足,并将该外部网格顶点投影至该垂足,从点A向各个三角面片作垂线,找到最短垂距对应的垂足作为其投影点,即点B。接着根据面积法判断该投影点是否在三角面片内部,若该点不在三角面片内部,则找距离它最短的三角面片的顶点,该点即为调整后的点;若该点在三角面片内部,则投影点即为调整后的点。EasyCast软件对常见隔板件进行了测试,网格剖分结果如图6^[58],可以发现该方法在应用于带斜面及圆弧面的复杂铸件时,能够最大限度地保留铸件结构信息,有效避免了铸件的斜度信息丢失,进而提高铸造CAE的模拟计算精度,对于铸造工艺的优化具有重要意义。

3.1.2 射线法

射线法也是一种应用广泛的六面体网格剖分方法,它的基本剖分步骤为:首先用平行于x(或者y、z)坐标轴的一簇射线来穿透STL文件记录的三维实体,接着求出射线与小三角形的交点坐标,并将坐标排序,最后根据交点所对应的三角形小平面的法向量来判断射线上某一段(相邻交点形成的线段)是否位于实体内,从而决定落在该线段上的网格单元材质属性,如图7。

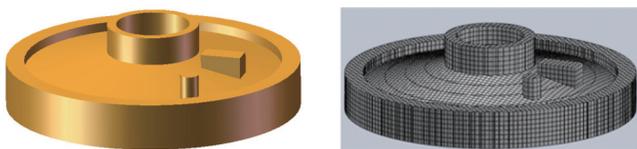


图6 隔板件网格剖分实例
Fig.6 Example of partition mesh^[58]

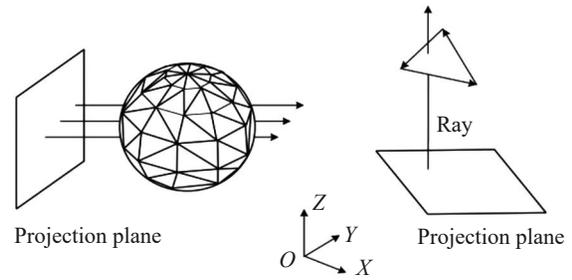


图7 射线法原理示意图
Fig.7 Schematic diagram of the principle of ray method

华中科技大学的周建兴等人^[91]采用射线法完成了网格的自动划分。戴鼎汉等人^[92]通过记录辅助点为基础,开发出了基于射线法的STL无锯齿变形六面体的网格自动剖分程序,该算法处理了铸件网格文件外表面锯齿化的问题,使剖分后的网格文件更加接近铸件实体。

3.1.3 栅格法

栅格法的基本原理是:首先,用一组不相交的栅格覆盖在物体之上,既可在栅格的规则点处布置节点,也可在栅格单元中随机布置节点;再对栅格和物体进行相交检测,保留完全或部分落在目标区域之内的栅格,删除完全落在目标区域之外的栅格;然后,对与物体边界相交的栅格进行调整、剪裁、再分解等操作,使其更准确地逼近目标区域;最后,对内部栅格和边界栅格进行栅格级的网格剖分,进而得到整个目标区域的六面体网格,如图8^[93]。

按照生成栅格的尺寸是否相同,栅格法可分为正则栅格法和四(八)叉树法两类,这两种算法的总体流程基本一致,最大差别在于正则栅格法采用尺寸相同的正则栅格覆盖目标区域,而四(八)叉树法采用可递归细分的变尺寸栅格来覆盖目标区域。与正则栅格法相比,四(八)叉树法是全面面向几何特征的,能够更好地协调网格生成精度与单元数量之间的平衡,因此应用更为广泛。八叉树网格剖分方法的核心思想是通过递归将三维空间划分为更小的立方体区域,以有效管理和处理复杂的三维物体。首先,根据目标模型的坐标极值定义一个包围盒,作为八叉树的根节点。接着,根包围盒会被递归地分割成八个子包围盒,每个子包围盒对应一个八叉树的子节点。每次分割后,会检查子包围盒是否完全位于目标模型之外或满足其他细分停止条件,如子包围盒过小或不包含模型部分。递归过程持续进行,直到所有子包围盒都符合停止条件,最终形成一个多层次的八叉树结构,

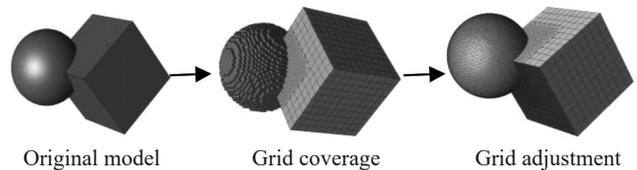


图8 栅格法原理示意图
Fig.8 Schematic diagram of the grid method^[93]

其中叶节点代表最小的细分区域,而较高层的节点则表示更大的空间区域。这种方法能够有效地减少不必要的计算,特别是当模型分布稀疏时,通过避免细分空白区域来提高计算效率,八叉树网格剖分方法具体终止条件见表2。Yerry等^[94]首先将四(八)叉树分解法引入到网格剖分领域,提出了一种全自动生成三维有限元网格的方法,该方法遵循八叉树编码技术的基本概念,并进行了特定修改以生成用户可控的网格文件,但这种方法存在计算量庞大且网格质量较差等问题。Löhner等^[95]以八叉树作为基本框架提出了并行化算法,大大提高了网格剖分速度。吴晓军等^[96]利用八叉树结构的编码特性,提出了一种将三维多边形网格模型离散成体素表示,纠正了Flooding算法在处理内部封闭空腔时产生的错误。殷亚军等^[97-98]和戴愿桥^[99]构建了八叉树网格细化与粗化网络模型,分别将凝固运动界面附近进行网格细化,而在其他区域使用粗化网格,既满足了模拟精度又节约了计算资源。并针对现有非均匀网格划分方法中算法繁琐、处理过程不够自动化、生成网格模型非均匀性差、算法适用性有限等缺陷,提出了一种基于八叉树的自适应非均匀网格划分算法。所取得的研究成果为铸造数值模拟中非均匀网格生成提供了重要参考,为铸件壁厚计算提供了新的研究思路。黄楚芸等^[100]为了提高非结构混合网格的生成效率并有效控制网格质量,提出了一种从树结构网格转换到非结构混合网格的方法及代码实现。刘星等^[101]基于八叉树网格提出了一种压裂复杂缝网面积估算模型,该模型将微地震事件分解为八叉树网格,并基于网格等效面积方法构建了三维复杂缝网面积等效模型,实现了在无重构缝网的情况下对缝网面积的高效估算。

为了使栅格法生成的网格文件更加贴合铸件,很多研究者提出了网格优化方法。Qian等^[102]开发了一种将非流形CAD组件转换为非结构化全六面体网格的自动鲁棒方法,该方法符合给定的b-代表(边界表示)并将尖锐特征保留,采用平滑和优化相结合的方法进一步提高了网格质量。2009年黄丽丽等^[103]分析了基于栅格法生成六面体网格的拓扑关系,提出了适合于六面体网格凸

特征边界单元的4种点插入新单元模式和5种边界插入新单元模式、适合于凹特征边界为直线或者曲率变化较小时的4种单元退化模式,以及适合于凹特征边界曲率变化较大时的3种单元插入与退化结合模式,提高了凹凸特征边界处的网格质量。2016年Huang等^[104]又提出了一种改进的基于栅格法的六面体单元网格自适应生成与再生算法,采用基于曲率的拉普拉斯平滑方法提高了边界单元的质量,保留了网格的边界特征。

3.1.4 扫掠法

扫掠法也是常见的六面体网格生成方法,它适用于各种不同形状的几何体,并且可以精确地控制网格的密度。扫掠法有4个关键步骤:生成源面四边形网格、投影到目标面、按固定步长逐层插值和连接节点。

扫掠法首先需要创建源面的四边形网格,这个源面通常是几何体的一个表面,可以是一个多边形或矩形,这个四边形网格将成为生成六面体网格的基础。接着将源面网格投影到目标面上,目标面通常是源面的相邻层,这个投影操作确保了在扫描过程中相邻层之间的连续性。然后,在相邻的目标面之间,以固定的步长进行插值操作。这意味着在每一层中,生成一个新的平面或曲面,与前一层的目标面平行,但在空间中位置逐渐上移。最后在每一层中,通过连接相邻平面上的节点、边和面来生成六面体网格的节点和元素,这些连接操作确保了六面体的连续性和完整性。扫掠法根据源面和目标面是否单一又可以分为:一对一扫掠法、多对一扫掠法和多对多扫掠法^[105],具体区别见图9及表3。

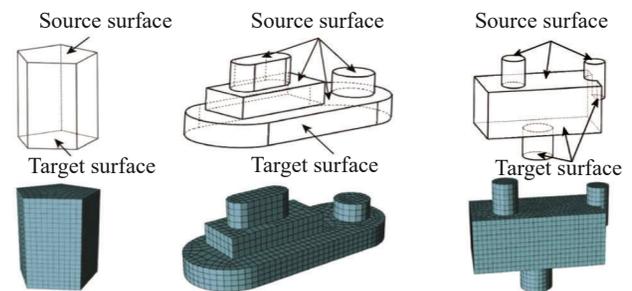


图9 3种不同类型的扫掠体

Fig.9 Three different types of swept bodies^[105]

表2 八叉树网格剖分方法终止条件

Table 2 Termination conditions for octree mesh generation method

Termination condition	Description
Number of triangular patches within the unit	When the number of triangular patches within a node is less than the set threshold (such as 5 to 10), stop the recursion to avoid excessive refinement
Shared vertices of triangular patches within the unit	When multiple triangular patches share the same vertex, stop the recursion to avoid infinite recursion
Normal vector angle of triangular patches within the unit	When the normal vector angle of triangular patches is small (cosine value 0.85 to 0.95), stop the recursion to avoid meaningless refinement

表 3 3 种扫掠法比较

Table 3 Comparison of three sweeping methods

Sweeping method	One-on-one sweeping method	Many-to-one sweeping method	Many-to-many sweeping method
Principle	Decompose the original geometric body into several swept bodies, and then map each source surface to a target surface to generate a one-to-one relationship. Then, within each swept body, determine the positions of internal mesh nodes through the projection method to generate hexahedral meshes	Decompose the model into multiple one-to-one swept bodies, where multiple source surfaces can be mapped to a single target surface to reduce complexity. Each one-to-one sweep body adopts a method similar to the one-to-one sweep method inside	Decompose the swept body into multiple pairs of one-to-one swept bodies or one-to-one swept bodies, and then generate the swept mesh
Applicability	Simple swept body with a single source surface and a single target surface	Swept body with multiple source surfaces and a single target surface	Complex swept body with multiple source planes and multiple target planes
Efficiency	Lower computational complexity and the most efficient	Requiring more calculations compared with the one-to-one sweeping method	The most complex, requiring more computing resources and time

近年来扫掠法也受到了人们的广泛研究。1996 年 Lai 等^[106]通过平面求交算法来逐层生成内部节点,极大地减少了网格畸变,并允许多个连通表面扫向单个目标,多个不连通表面扫向单个目标,多个不连通表面扫向多个不连通目标,但该方法对于复杂铸件适应性较差。同年,Blacker^[107]开发了 Cooper Tools,通过交叉、压印等方法对源面和目标面进行处理,进而生成六面体网格,但该方法对于复杂铸件无法有效生成网格文件。1998 年 Knupp 等^[108]提出了两种鲁棒且高效的内节点布置方法,将低层内部节点向高层投影生成内部节点,并进行光滑处理。该方法对于可平移、可旋转和可伸缩的几何图形具有适用性,但对于复杂铸件,仍无法避免网格质量差的问题。2004 年 Roca 等^[109]提出了一种将给定网格映射到目标曲面上的新算法,该方法中的投影是通过在曲面的参数空间之间定义的仿射映射的最小二乘近似来实现的。但该算法不适合凹面和多连接面情况。2011 年 Ruiz-Gironés 等^[110]通过沿扫描方向投影节点和印迹面将几何图形分解为多个子体来进行扫掠处理,并引入了挤压几何计算域的新概念,此外还提出了一个三阶段过程来改进分解过程中创建的内部节点的位置。2013 年曾卓等^[111]提出一种基于 Roca 算法内部节点定位的新算法,改进后的扫掠法可以处理源面和目标面都是复杂曲面,变截面轮廓的扫掠体,且生成的网格质量有所提高。2015 年 Cai 等^[112]采用调和函数将网格从源表面映射到目标表面。对于凸、凹或多连通曲面,该方法可以在目标表面上生成网格质量良好的全四边形网格,从而避免了昂贵的平滑算法,但该方法耗时严重。2019 年 Wu 等^[113-114]提出了一种全局多轴扫描网格生成方法,该方法可以对

由不同扫描方向的扫描体组成的实体模型鲁棒地生成六面体网格。

3.2 四面体网格剖分方法

四面体网格是一种离散化的三维空间表示方法,它将三维空间分割成许多小的四面体单元。每个四面体由 4 个顶点定义,这种数据结构非常适合表示复杂几何体的内部结构。四面体网格在各种科学和工程应用中发挥着重要作用,包括但不限于有限元分析、流体动力学仿真、医学图像处理、三维建模和可视化等领域^[115-123]。铸造数值模拟中常见的四面体网格生成方法主要有: Delaunay 方法和前沿推进法。

3.2.1 Delaunay 方法

Delaunay^[124]方法是计算几何学和计算机图形领域中的一种重要技术,用于将点集分割成不重叠的三角形,以便进行相关分析与模拟。Delaunay 三角剖分也是目前主流的通用全自动网格生成方法之一。Delaunay 三角剖分的概念是由俄罗斯数学家 Boris Delaunay 在 1934 年首次提出,他的研究主要集中在将点集合转化为满足一组特定条件的三角形集合上,以便在各种应用中更容易地处理和分析空间数据。

Delaunay 三角剖分有两个十分重要的性质分别是最大空圆性质和最大化最小角性质。其中最大空圆性质的含义是在 Delaunay 三角剖分中,每个三角形的外接圆都不包含点集中的任何点,如图 10a 所示。这个性质确保了生成的三角形不会包含多余的点,从而确保了剖分的准确性和无冗余性。同时通过使外接圆尽可能大,可以确保生成的三角形尽可能接近于等边三角形,这有助于减小三角形的长宽比,提高数值稳定性。最大化最小角

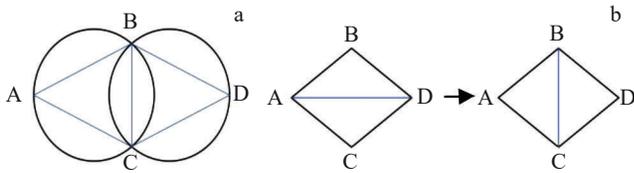


图10 Delaunay三角剖分性质示意图

Fig.10 Schematic diagrams of triangulation properties: (a) maximum empty circle properties in Delaunay triangulation; (b) Delaunay triangulation maximization minimum angle property

性质的含义是指在Delaunay三角剖分过程中,尽量使生成的三角形中的最小角度尽可能大,如图10b所示。具体来说,这个性质确保了在Delaunay三角剖分中,没有任何一个三角形的角度太小,这对许多应用非常重要,因为小角度的三角形可能会引发数值不稳定性和误差。

Adrian Bowyer和David Watson于1981年提出了经典的Bowyer-Watson算法^[125],该算法在三维空间上的基本思想是:首先建立一个可以包含所有点的超级四面体,依次将所有的三维点逐个插入到四面体网格中,选中一个点,找出其外接球包含此节点的所有四面体单元,删除这些单元,形成一个包含插入节点的空腔,将该插入节点与空腔的每个表面相连形成新的四面体网格,之后对剩余其他点重复上述过程,完成四面体网格剖分。在此基础上,Fabri Andreas和Pion Sylvain表明增量Delaunay插入算法^[126]可以更高效地实现三维空间上的四面体网格剖分。Marot等^[127]提出了并行化的增量Delaunay插入算法,用于生成给定点集的3D Delaunay三角测量,通过简单的专用数据结构、点的高效排序以及插入算法的优化使实现的速度提高了3倍。但传统的Delaunay三角剖分方法在处理曲面模型时无法保证模型曲面边界的完整性,为解决这一问题Lee等^[128]提出了一种用于处理曲面边界的Delaunay三角剖分方法,该方法可以使曲面的边界尽可能多的表示,但应用在三维模型的处理中,想要获得相同的结果较为困难。针对上述问题,Joe^[129]在1991年提出了名为GEOMPACK的软件,该软件的思想是将三维模型分解为多个简单多边形或凸多边形,在每个分解后多边形的基础上进行Delaunay三角剖分,但该方法在三维模型的分解上较为困难。Weatherill等^[130]针对此问题提出了一种有效的解决方法,该方法在计算顶点的Delaunay三角剖分后,首先恢复输入线段,然后在第二阶段重建面。Guan等^[131]采用上述方法,仅使用了较少Steiner点完成了对三维模型的约束Delaunay三角剖分。Si等^[132]通过保护三角剖分中锐角点的方式,以更少的Steiner点完成了更精细化的三维约束Delaunay三角剖分,同时该方法应用在著名的Tetgen软件上。Jamin等^[133]在2015年提出了一种在给定初始的四面体划分模型上,可以通过在坏的外接球体中心引入新的

顶点来连续地改进四面体网格模型的方法。Hu等^[134]提出了一个强大的约束Delaunay三角化(CDT)网格生成器,能够处理广泛的几何形状,包括自交的非流形物体。它不对输入做假设,具有较高的灵活性。Diazi等^[135]提出了一种针对约束受限的Delaunay四面体网格划分算法,使用基于间接几何谓词的浮点实现来隐式表示Steiner点,这种新方法极大地简化了网格剖分的实现过程,消除了几何操作中对特殊公差的需求,以汽车轮毂模型为例,网格剖分结果如图11所示。最近Erkoç等^[136]提出了一种分治算法,通过将三维网格划分为小块并使用二维三角剖分闭合边界,结合Delaunay法生成四面体网格,最终合并得到完整的四面体化结果,该方法减少了Delaunay法在处理大规模网格生成任务时的内存问题,提高了处理速度。

3.2.2 前沿推进法

前沿推进法是一种用于计算机几何和有限元网格生成的数值模拟技术,常用于生成复杂几何形状的高质量三角形或四面体网格。该方法最早由George Paul Louis和Seveno Eric提出^[137]。前沿推进法的主要思想是通过将网格的区域边界作为初始前沿,根据一定的计算规则向计算域内部推进来逐步构建网格,直到区域内部全部填充完毕。

前沿推进法的基本流程主要有两步,分别是区域边界离散化和前沿更新。区域边界离散化的作用是确保生成的网格边界与实际几何特征和边界条件相匹配,从而提高数值模拟的准确性与可靠性。在二维平面区域中,区域边界离散化后对应的边界是一个首尾相连线段的集合,在三维模型中,区域边界离散化后对应的是相互连接的三角面片的集合。确定好前沿边界后,就需要从前沿开始,根据前沿各线段的位置关系和推进规则生成新节点,并与前沿线段连接得到新的单元,并更新前沿中的线段,通过不断重复上述操作,直到前沿为空时结束,完成整个网格剖分。以二维平面区域作为示例,具体的前沿推进法网格剖分流程如图12所示。

在前沿推进法的基础上,Löhner^[138]等提出了以二维前沿推进法为基本框架的并行化算法,大大提高了网格剖分速度。Cuillère^[139]在1998年提出了一种三维参数化

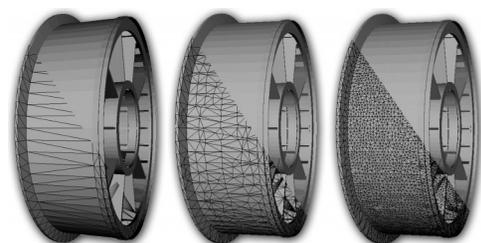


图11 汽车轮毂模型网格剖分结果图

Fig.11 Grid division results of automobile wheel hub model^[135]

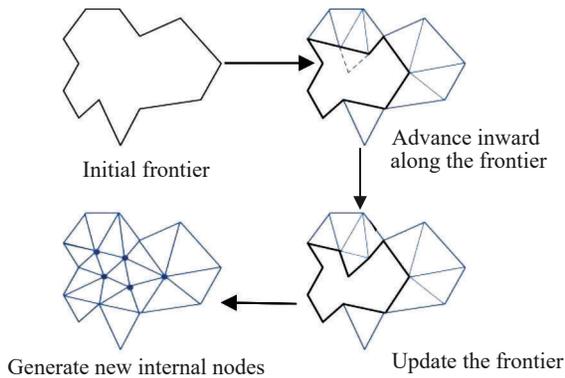


图 12 前沿推进法网格剖分流程图

Fig.12 Grid section flow chart of frontier propulsion method

曲面自动三角测量的自适应方法,首先由曲面参数方程推导出用来描述过程畸变程度的解析式,然后使用前沿推进法对参数域上的网格进行剖分,再将其映射到曲面上,形成最终的曲面网格。这种方法对映射畸变程度的度量更为准确,但是在通用性上有一定不足。不久之后, Tilch 等^[140]又将前沿推进法扩展到了三维,进一步提升了网格剖分速度。Adamoudis 等^[141]针对前沿推进法无法对细小区域完成网格剖分的问题,提出了一种修复算子以便在标准前沿推进法完成后成功离散这些区域,从而提高困难和复杂几何形状的网络生成过程的鲁棒性。Lo 等^[142]在 2013 年提出了一种基于前沿推进法的动态网格生成方法,其设计了一种对内存需求较低的简单区域划分方法,通过区域划分缩小搜索范围,并使用一种动态网格的推进方法,降低测试时间,加快网络的生成,但该方法网格的可控性一般。马新武等^[143]利用区域分解法对表面的三角面片进行分组,建立拓扑关系,然后确定特征点和特征面来生成网格,这种方法生成的网格质量仍然取决于曲面上原有面片的分布和质量,有一定的局限性,而且实现过程较为繁琐。在 2018 年,谢倩茹等^[144]提出了一种基于约束前沿推进法的三维有限元网格生成算法,其主要思想是利用背景网格提高网格单元的可控性,避免网格单元生成时验证有效性的计算量,从而快速生成高质量的三维有限元网格,图 13 显示了对兔子模型的剖分效果。Zhou 等^[145]针对在使用前沿推进法进行网格剖分的过程中需要进行域分解而导致计算效率较低的问题,提出了一种无需域分解的高效并行网格剖分方法,极大提高了网格生成的速度。最近 Ma 等^[146]在前沿推进法的基础上,结合基于空间填充曲线的域分解方法、分布式重叠森林方法以及一直并行最大独立集算法,提出了一种全新的前沿推进算法,在数学上保证了生成网格的精度,同时在并行处理方面,将算法的最大可扩展 CPU 数提升到 2000。

前沿推进法的主要优势在于可以根据已有节点来同

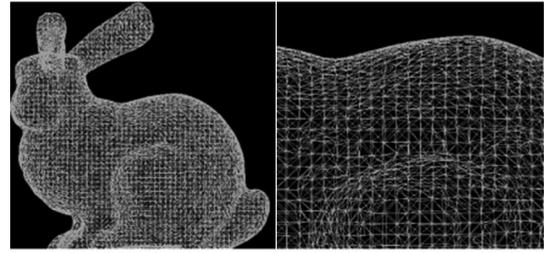


图 13 兔子模型网格剖分示意图

Fig.13 Grid division diagrams of rabbit model^[144]

时生成新节点和新单元,以及从边界开始向内生成网格。一方面,根据已有节点来同时生成新节点和新单元使新节点的位置可以根据已存在单元的几何特性进行调整,且同时生成新节点和新单元使节点的位置和相邻单元的拓扑结构可以直接相互影响,这种紧密的耦合性使得在生成新节点时可以更好地控制单元的质量。另一方面,从边界开始向内生成网格可以有限保证边界附近的网格质量,提高了数值模拟的准确性。前沿推进法的主要难点在于数据结构的设计上,基于前沿推进法所设计的数据结构必须同时满足多个需求,一方面要考虑推进规则的完整性,前沿数据结构需要包括推进规则的信息,以指导新节点和新单元的生成;另一方面,在生成新单元时要进行大量的相交判断和距离判断,以确保生成的单元不会相互交叉,并且满足一定的质量标准,在设计数据结构时需要尽可能减少执行判断的次数以提升剖分效率。

除此之外,四面体网格剖分方法还有基于八叉树的四面体网格剖分方法^[147-148]以及基于深度学习的网格剖分方法。其中基于八叉树的四面体网格剖分方法有两种方式,一种是利用正四面体代替传统八叉树中的正六面体作为树的根节点进行递归空间划分,另一种是在传统八叉树方法所得到的六面体网格的基础上进行进一步转化,变为四面体网格。基于深度学习的四面体网格剖分方法一般通过神经网络输出对应模型的预测网格剖分结果,之后使用真实的网格剖分结果对预测的网格剖分结果进行相似度计算,从而不断优化模型输出的效果。其中 Zhang 等^[149]提出了 MeshingNet,这是一种基于 ANN 的自适应网格细化方法。Papagiannopoulos 等^[150]开发了一种基于递归 ANN 的 2D 网格生成算法。Chen 等^[151]将网格生成任务视为一个优化问题,以边界曲线作为输入,采用结构化网络学习潜在的网格生成规则。Soman 等^[152]利用生成式对抗网络(GAN)进行网格生成。相比传统网格生成方法,基于深度学习的网格生成方法在保证网格生成精度的同时,极大提高了网格生成的计算效率。

3.3 混合网格剖分方法

混合网格剖分方法是一种用于离散化和分割复杂几何区域的数值方法,该方法结合了不同类型的网格,如四

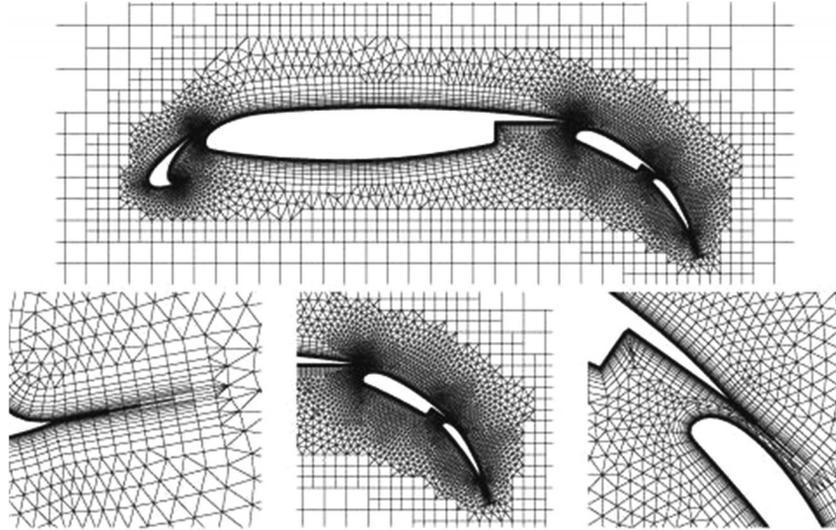


图14 机翼网格模拟图

Fig.14 Simulation diagram of wing grid^[152]

表4 主流铸造模拟软件使用网格类型对比

Table 4 Comparison of mesh type of main casting simulation software

Grid type	Software
Tetrahedral grid	ANSYS Fluent, COMSOL Multiphysics, and ProCAST
Hexahedral grid	ANSYS Fluent, COMSOL Multiphysics, Magmasoft, NOVACAST, FLOW-3D, EasyCast, Huazhu CAE, and FT-Star
Hybrid grid	ANSYS Fluent, COMSOL Multiphysics, and ProCAST

面体网格与六面体网格,以更好地适应复杂模型的几何特征。

基于上述网格剖分思想,Sang等人^[153]提出了一种非结构化多层混合网格,用于模拟二维和三维构型周围的复杂流场。该方法在模型内部使用六面体网格对模型进行剖分,在模型表面复杂处采用四面体网格对模型进行耦合,机翼网格模拟图如图14所示^[152];黄楚芸等人^[154]提出了一种由八叉树网格到非结构混合网格的转换方法,该方法在转变过程中考虑了各种网格单元,并在实际网格划分中可以自适应地将不同类型的网格进行连接;王可可^[155]采用前沿推进法在模型表面生成非结构四边形网格,之后通过上下层非结构四边形网格的相互连结来构建模型内部的非结构六面体网格;Luo等^[156]设计了一种类似的用于复杂几何形状的混合网格生成方法,首先在模型表面生成半结构化的四面体网格,然后使用基于四叉树的方法生成模型内六面体网格,之后移除六面体网格与四面体网格重叠区域,最后将移除后的空白区域通过四面体网格进行填充。

混合网格剖分方法的优点在于它们允许在不同几何区域中使用最合适的网格类型,从而提高了数值模拟的精确性和效率^[157]。这对于处理具有复杂几何形状的问题非常有用,因为传统的结构化网格在这些情况下可能会导致不必要的复杂性。但混合网格剖分方法通常需要

高级的算法和数据结构来管理不同类型的网格,并确保它们正确连接。

目前主流的铸造数值模拟软件有ProCAST、NOVACAST、ANSYS Fluent、COMSOL Multiphysics、Magmasoft、EasyCast、华铸CAE、FT-Star以及FLOW-3D等,它们使用的网格类型见表4。

4 结语

前处理模块是铸造过程模拟软件的重要组成部分,其中的网格剖分及优化更是一个非常重要的研究领域,网格的质量直接影响了整个软件的实用性及模拟的准确性。本文系统介绍了前处理模块的发展历程及其主要任务,重点对比分析了各种网格剖分方法的优缺点,并探讨了前处理模块在铸造模拟中的关键作用。虽然铸造软件前处理技术仍面临如何提高复杂铸件的网格质量以及如何如何在网格精度和计算效率之间找到平衡等挑战,但其发展前景充满了潜力:

1) 网格拓扑优化方法。针对复杂铸件的网格质量较差的问题,网格拓扑优化方法能够通过调整网格的拓扑结构来提高网格质量,特别是在复杂铸件中,优化后的网格可以更好地适应几何特征,减少数值误差。未来的研究可以探索更加高效的拓扑优化算法,以应对多物理场耦合模拟中的复杂需求。

2)并行计算与高性能计算的应用。针对大型复杂铸件前处理模块计算效率低的问题,未来的研究可以进一步优化并行算法,将并行计算和高性能计算在网格剖分中得到充分应用。提升大规模复杂铸件模拟的计算效率。

3)基于深度学习的网格剖分方法。随着人工智能技术的发展,基于深度学习的网格剖分方法逐渐成为研究热点。通过训练神经网络模型,可以自动生成高质量的网格,并优化网格剖分过程。未来的研究可以探索如何将深度学习与传统的网格剖分方法结合,进一步提升网格生成的自动化水平和精度。

总之,前处理模块的研究和优化对于提高铸造模拟的准确性和实用性具有重要意义。随着计算技术的不断发展,铸造模拟软件将朝着智能化、集成化和自动化的方向发展,为铸造工艺的优化提供更为强大的支持。

参考文献 References

- [1] Sun Xiaoping(孙晓平), Zhao Yuhong(赵宇宏), Chen Liwen(陈利文) et al. *Special Casting & Nonferrous Alloys*(特种铸造及有色合金)[J], 2022, 42(4): 446
- [2] Wang Yichang(王一唱), Yuan Lingyang(袁灵洋), Yang Lei(杨磊) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2023, 52(11): 3954
- [3] Zhao Yuhong, Liu Kexin, Hou Hua et al. *Materials & Design*[J], 2022, 216: 110555
- [4] Zhao Yuhong(赵宇宏). *Atomic-Scale Computer Simulation for Alloy During Early Precipitation Process*(合金早期沉淀过程的原子尺度计算机模拟)[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2003
- [5] Zhao Y H, Zhang B, Hou H et al. *Journal of Materials Science & Technology*[J], 2019, 35(6): 1044
- [6] Zhao Yuhong(赵宇宏). *Simulation for the Materials Microstructure Evolution in Phase Transformation Process*(材料相变过程微观组织模拟)[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2010
- [7] Xun Menghua(寻梦华), Luo Heli(骆合力), Han Shaoli(韩少丽) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2023, 52(7): 2559
- [8] Li Jingyi(李静怡), Zhao Yuhong(赵宇宏), Chen Liwen(陈利文) et al. *Special Casting & Nonferrous Alloys*(特种铸造及有色合金)[J], 2021, 41(5): 588
- [9] Hou Hua(侯华), Jin Yuchun(靳玉春), Zhao Yuhong(赵宇宏) et al. *Liquid Forming Process and CAD*(液态成型工艺及CAD)[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2012
- [10] Chorin A J. *Computational Fluid Mechanics*[J], 1968, 22(104): 17
- [11] Brezzi F, Fortin M. *Mixed and Hybrid Finite Element Methods* [M]. New York: Springer-Verlag, 1991
- [12] Brackbill J U, Kothe D B, Zemach C. *Journal of Computational Physics*[J], 1992, 100(2): 335
- [13] Li Ri(李日). *Foundry Process Simulation ProCast from Introduction to Mastery*(铸造工艺仿真ProCast从入门到精通)[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2010
- [14] Wang Leilei(王磊磊). *The 10th National Annual Conference on Lost Mold and V-process Casting*(第十届全国消失模与V法铸造学术年会)[C]. Beijing: Chinese Mechanical Engineering Society, 2011: 205
- [15] *Foundry*(铸造)[J], 2000, 49(3): 184
- [16] Jia Xiaogang(贾小刚), Zhuang Weihuan(庄炜煊), Zhang Dongya(张东亚) et al. *China Offshore Platform*(中国海洋平台)[J], 2024, 39(5): 13
- [17] Yin Yajun(殷亚军), Liu Zhenwei(刘振伟), Zhang Yongjia(张勇佳) et al. *Special Casting & Nonferrous Alloys*(特种铸造及有色合金)[J], 2023, 43(10): 1297
- [18] Li Xiaoxi(李晓希), Zheng Weigang(郑卫刚). *Hot Working Technology*(热加工工艺)[J], 2012, 41(11): 72
- [19] Song Chunli(宋春丽), Pei Xiaolong(裴小龙), Chen Liwen(陈利文) et al. *Special Casting & Nonferrous Alloys*(特种铸造及有色合金)[J], 2023, 43(6): 794
- [20] Li Xiaobin(李晓宾), Liu Xinjiang(刘新江), Jiang Zongying(姜宗营). *Hot Working Technology*(热加工工艺)[J], 2014, 43(1): 88
- [21] Chen Deping(陈德平), Chen Ying(陈营), Luo Jianshe(罗建设) et al. *Foundry Technology*(铸造技术)[J], 2019, 40(10): 1086
- [22] Zhao Yu(赵瑜). *Journal of Panzhihua University*(攀枝花学院学报)[J], 2020, 37(5): 42
- [23] Huang Meixia(黄美霞). *Special Casting & Nonferrous Alloys*(特种铸造及有色合金)[J], 2022, 42(3): 398
- [24] Zhao Y H, Xin T Z, Tang S et al. *MRS Bulletin*[J], 2024, 49: 613
- [25] Zhao Yuhong, Xing Hui, Zhang Lijun et al. *Acta Metallurgica Sinica(English Letters)*[J], 2023, 36: 1749
- [26] Xin T Z, Zhao Y H, Mahjoub R et al. *Science Advances*[J], 2021, 7(23): eabf3039
- [27] Xin T Z, Tang S, Ji F et al. *Acta Materialia*[J], 2022, 239: 118248
- [28] Liu Baicheng(柳百成), Xu Qingyan(许庆彦), Xiong Shoumei(熊守美) et al. *Journal of Mechanical Engineering*(机械工程学报)[J], 2003(10): 53
- [29] Jia Qizhong(贾启忠). *Research on Parallel Calculation and Visualization for Heat Transfer of Slab/Mould in Continuous Casting*(连铸板坯/结晶器传热并行计算及其可视化)[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2009
- [30] Li Hailong(李海龙), Chen Fayuan(陈发源), Ji Xiaoyuan(计效园) et al. *Computer Integrated Manufacturing Systems*(计算机集成制造系统)[J], 2021, 27(4): 1072
- [31] Chen Zhizheng(陈志铮). *Research on a CPU-GPU Based Parallel Algorithm for Thermal Stress Model of Continuous Casting Steel*(基于CPU-GPU异构下连铸热应力场模型并行算法的研究)[D]. Shenyang: Northeastern University, 2022
- [32] Lu Z Q, Ren N, Xu X W et al. *Communication Engineering*[J], 2023, 2: 34
- [33] Peng Min(彭敏). *Journal of Liaoning University of Technology, Natural Science Edition*(辽宁工业大学学报,自然科学版)[J],

- 2022, 42(2): 98
- [34] Dang Hao(党浩). *Design of Adaptive Adjustment and Monitoring System For Horizontal Continuous Casting Billet Drawing Parameters of Cast Iron Based on CCD Temperature Measurement*(基于CCD测温的铸铁水平连铸拉坯参数自适应调整及监控系统设计)[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2022
- [35] Zai Hongbin(宰红斌), Jiang Tao(蒋涛), Li Haifeng(李海峰) et al. *Special Casting & Nonferrous Alloys*(特种铸造及有色合金)[J], 2023, 43(9): 1307
- [36] Liu Yabin(刘亚宾), Yang Jun(杨军), Chang Tao(常涛). *China Foundry Machinery & Technology*(中国铸造装备与技术)[J], 2020, 55(2): 61
- [37] Long Wenyuan(龙文元), Gong Jie(龚杰), Song Guojin(宋国金). *Special Casting & Nonferrous Alloys*(特种铸造及有色合金)[J], 2021, 41(5): 638
- [38] Zhou Jianxin(周建新), Yin Yajun(殷亚军), Ji Xiaoyuan(计效园) et al. *Foundry*(铸造)[J], 2021, 70(2): 160
- [39] Lin Genghao(林庚浩), Ma Tianbao(马天宝), Ning Jianguo(宁建国). *Chinese Journal of Computational Mechanics*(计算力学学报)[J], 2011, 28(S1): 199
- [40] Huang Xiangdong(黄向东). *Information & Computer*(信息与电脑)[J], 2019(13): 74
- [41] Liu Z W, Chen J J, Xia Y F et al. *Engineering Computations*[J], 2021, 38(10): 3995
- [42] Luo Q B. *Engineering with Computers*[J], 2021, 38(S2): 1021
- [43] Chen Zhongjie(陈中杰), Tian Jianhui(田建辉), Hu Guangchu(胡光初) et al. *Computer and Modernization*(计算机与现代化)[J], 2022(3): 91
- [44] Chen Zhiming, Liu Yong. *Journal of Computational Physics*[J], 2023, 491: 112384
- [45] Chen Zhongjie(陈中杰). *Automatic Mesh Generation and Thermal-Mechanical Coupling Analysis of Complex Structural Component*(复杂构件网格自动生成及热力耦合分析研究)[D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2022
- [46] Shu Chao(舒超), Pan Ziwen(潘梓文), Chen Zhi(陈陟) et al. *Chinese Journal of Rare Metals*(稀有金属)[J], 2022, 46(5): 607
- [47] Hao Yongzhi(郝永志), Zhao Haidong(赵海东), Lin Jiahua(林嘉华). *Special Casting & Nonferrous Alloys*(特种铸造及有色合金)[J], 2019, 39(8): 859
- [48] Pei Xiaolong, Zhao Yuhong, Chen Liwen et al. *Materials & Design*[J], 2023, 232: 112086
- [49] Gao Xiang(高翔). *Study on MPI-based Parallel Technology of Gas-Liquid Two-Phase Flow During Mold Filling Process*(基于MPI的铸造充型过程气液两相流动并行技术研究)[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2019
- [50] Morente Antoine, Goyal Aashish, Wachs Anthony. *Fluids*[J], 2023, 8(3): 86
- [51] Jiang Shurui(姜书瑞), Kong Yi(孔怡), Tian Yue(田越) et al. *Chinese Journal of Radio Science*(电波科学学报)[J], 2021, 36(2): 231
- [52] Ge Xiao(葛啸), Shi Tingchun(史廷春), Yue Xiuyan(岳秀艳). *Manufacturing Technology & Machine Tool*(制造技术与机床)[J], 2021(11): 16
- [53] Luo Guoping(罗国平). *Research on Algorithm of Triangular Surface Mesh Generation of Complex Casting Based on STL File*(基于STL文件的复杂铸件表面三角形网格生成算法研究)[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2020
- [54] Niu Xumiao(牛旭苗), Fang Yi(方漪). *Journal of Qingdao University, Natural Science Edition*(青岛大学学报, 自然科学版)[J], 2015, 28(3): 54
- [55] Chen Ping(陈萍), Zhang Zhengyan(张争艳), Li Guojin(黎国进) et al. *Journal of Hubei University of Technology*(湖北工业大学学报)[J], 2012, 27(4): 12
- [56] Zhao Meili(赵美利), Yang Jing(杨晶), Mao Hongkui(毛红奎) et al. *System Simulation Technology*(系统仿真技术)[J], 2008(1): 35
- [57] Li Jiangfeng(李江峰), Zhong Yueshan(钟约先), Li Diansheng(李电生). *Machinery Design & Manufacture*(机械设计与制造)[J], 2002(2): 40
- [58] Cui Yuwei(崔雨薇), Zhao Yuhong(赵宇宏), Pei Xiaolong(裴小龙) et al. *Special Casting & Nonferrous Alloys*(特种铸造及有色合金)[J], 2024, 44(5): 614
- [59] Lu Zhiwei(鲁志伟). *Tetrahedral Mesh Generation for Finite Element Calculation*(适用于有限元计算的四面体网格的生成)[D]. Qingdao: Qingdao University, 2013
- [60] Zhou Haojie(周豪杰). *Research on Complex Target FDTD Mesh Generation and Optimization*(复杂目标FDTD网格生成及剖分优化研究)[D]. Xi'an: Xidian University, 2018
- [61] Dai Yuanqiao(戴愿桥), Liao Dunming(廖敦明), Chen Tao(陈涛) et al. *Foundry Week 2017*(中国铸造活动周论文集)[C]. Suzhou: Chinese Mechanical Engineering Society, 2017: 5
- [62] Zha Le(查乐), Zhu Renchuan(朱仁传). *29th National Symposium on Hydrodynamics*(第二十九届全国水动力学研讨会论文集(上册))[C]. Zhenjiang: Journal of Hydrodynamics Editorial Board, 2018: 7
- [63] Wei Fang(魏芳), Hou Min(侯敏), Hou Jiwei(侯继伟) et al. *Aerospace Manufacturing Technology*(航天制造技术)[J], 2014(4): 47
- [64] Guo Qingwei, Hou Hua, Wang Kaile et al. *npj Computational Materials*[J], 2023, 9: 185
- [65] Xu Xiaotao, Song Zhuo, Wang Kaile et al. *Journal of Materials Science & Technology*[J], 2025, 219: 307
- [66] Wang Yongzhen(王永振), Li Lechuan(李乐川), Ying Yajun(殷亚军) et al. *Materials for Rail Transportation System*(轨道交通材料)[J], 2023, 2(2): 7
- [67] Dai Yujie(代玉杰). *Heat Treatment Technology and Equipment*(热处理技术与装备)[J], 2023, 44(4): 58
- [68] Wu Yuechun(武月春), Chen Jingchao(陈敬超), Peng Ping(彭平) et al. *Hot Working Technology*(热加工工艺)[J], 2014, 43(12): 103

- [69] Peng L, Nianhua W, Yi L *et al.* *Journal of Physics: Conference Series*[J], 2022, 2280: 012045
- [70] Lin Genghao(林庚浩), Ma Tianbao(马天宝), Ning Jianguo(宁建国). *Chinese Journal of Computational Mechanics*(计算力学学报)[J], 2011, 28(S1): 199
- [71] Cao Liu(曹流), Liao Dunming(廖敦明), Zhou Cong(周聪) *et al.* *Special Casting & Nonferrous Alloys*(特种铸造及有色合金)[J], 2015, 35(11): 1163
- [72] Huang Xiaodong, Du Qungui, Ye Bangyan. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*[J], 2006, 19(3): 330
- [73] Peng Wei(彭威). *Research on Key Technology for Hexahedral Mesh Generation of 3D Solid and Software Development*(三维实体六面体网格生成关键技术研究及软件开发)[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2011
- [74] Duczek S, DuVigneau F, Gabbert U. *Finite Elements in Analysis and Design*[J], 2016, 121: 18
- [75] Zhang Qingyu(张庆玉), Nie Yufeng(聂玉峰), Ma Xiao(马啸). *2022 China Earth Science Joint Academic Conference*(2022年中国地球科学联合学术年会论文集)[C]. Online Conference, China Geophysics Society, 2022: 37
- [76] Huang Jing(黄劲), Jiang Tengfei(江腾飞), Bao Hujun(鲍虎军). *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*(计算机辅助设计与图形学学报)[J], 2015, 27(8): 1354
- [77] Guan Zhenqun(关振群), Song Chao(宋超), Gu Yuanxian(顾元宪) *et al.* *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*(计算机辅助设计与图形学学报)[J], 2003(1): 1
- [78] Jia Baoqian(贾宝仟), Liu Baicheng(柳百成). *Hot Working Technology*(热加工工艺)[J], 1996(6): 27
- [79] Chen Liliang(陈立亮), Liu Ruixiang(刘瑞祥), Lin Hantong(林汉同). *Special Casting & Nonferrous Alloys*(特种铸造及有色合金)[J], 1999(S1): 149
- [80] Wen Xi(文曦), Xiong Shoumei(熊守美). *Foundry*(铸造)[J], 2004(10): 810
- [81] Pang Shengyong(庞盛永), Chen Liliang(陈立亮), Liu Ruixiang(刘瑞祥) *et al.* *China Mechanical Engineering*(中国机械工程)[J], 2006(S1): 219
- [82] Pang Shengyong(庞盛永). *Research on STL Based CutCell Cartesian Grid Generation Algorithm and its Application*(基于 STL 的 CutCell 笛卡尔网格生成算法及应用)[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2006
- [83] Liu Jingfeng(刘晶峰), Li Hongyou(李洪友), Fang Jiancheng(方建成). *Journal of Huaqiao University, Natural Science*(华侨大学学报, 自然科学版)[J], 2008(3): 327
- [84] Mao Hongkui(毛红奎), Mao Weimin(毛卫民), Hou Hua(侯华). *Foundry Technology*(铸造技术)[J], 2010, 31(9): 1237
- [85] Zhao Y H. *MGE Advances*[J], 2024, 30(4): 1
- [86] Zhao Yuhong. *npj Computational Materials*[J], 2023, 9: 94
- [87] Chen Longqing, Zhao Yuhong. *Progress in Materials Science*[J], 2022: 124: 100868
- [88] Zhang Jianbao, Wang Haifeng, Kuang Wangwang *et al.* *Acta Materialia*[J], 2018, 148: 86
- [89] Kuang Wangwang, Wang Haifeng, Li Xin *et al.* *Acta Materialia*[J], 2018, 159: 16
- [90] Zhao Y H, Zhang B, Hou H *et al.* *Journal of Materials Science & Technology*[J], 2019, 35(6): 1044
- [91] Zhou Jianxing(周建兴), Liu Ruixiang(刘瑞祥), Chen Liliang(陈立亮) *et al.* *Foundry Technology*(铸造技术)[J], 2001, 22(1): 15
- [92] Dai Dinghan(戴鼎汉), Hou Hua(侯华), Wang Zhong(王忠) *et al.* *Foundry Technology*(铸造技术)[J], 2009, 30(6): 808
- [93] Yu Changhua(于长华), Xiong Min(熊敏), Fang Wei(方维) *et al.* *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*(计算机辅助设计与图形学学报)[J], 2016, 28(6): 943
- [94] Yerry M A, Shephard M S. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*[J], 1984, 20(11): 1965
- [95] Löhner Rainald. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*[J], 2001, 51(6): 663
- [96] Wu Xiaojun(吴晓军), Liu Weijun(刘伟军), Wang Tianran(王天然). *Journal of Graphics*(工程图学学报)[J], 2005(4): 1
- [97] Yin Yajun(殷亚军). *Research on the Microstructure Simulation of the Alloy Solidification Based on Phase Field Method by the Octree Mesh Technology*(基于八叉树网格技术的相场法金属凝固过程组织模拟的研究)[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2013
- [98] Yin Yajun(殷亚军), Li Yangdong(李阳东), Tu Zhixin(涂志新) *et al.* *CIESC Journal*(化工学报)[J], 2016, 67(11): 4732
- [99] Dai Yuanqiao(戴愿桥). *The Research and Application of Adaptive Meshing Algorithm of Pre-casting Processing Based on Octree*(基于八叉树的铸造前处理自适应网格划分算法研究及应用)[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2019
- [100] Huang Chuyun(黄楚芸), Cai Qingdong(蔡庆东). *Physics of Gases*(气体物理)[J], 2023, 8(1): 68
- [101] Liu Xing(刘星), Qiu Jian(邱建), Chen Zuo(陈作) *et al.* *Petroleum Drilling Techniques*(石油钻探技术)[J], 2024, 52(6): 117
- [102] Qian J, Zhang Y J. *Engineering with Computers*[J], 2012, 28(4): 345
- [103] Huang Lili(黄丽丽), Zhao Guoqun(赵国群). *China Mechanical Engineering*(中国机械工程)[J], 2009, 20(21): 2603
- [104] Huang L L, Zhao G Q, Wang Z L *et al.* *Advances in Engineering Software*[J], 2016, 102: 49
- [105] Wang Rui(王瑞), Gao Shuming(高曙明), Wu Haiyan(吴海燕). *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*(计算机辅助设计与图形学学报)[J], 2020, 32(5): 693
- [106] Lai M W, Benzley S E, Sjaardema G *et al.* *Proceedings of the 5th International Meshing Roundtable. Albuquerque*[C]. New Mexico: Sandia National Laboratories, 1996: 217
- [107] Blacker T. *Proceedings of the 5th International Meshing Roundtable*[C]. Heidelberg: Springer, 1996: 13
- [108] Knupp P M. *International Meshing Roundtable Conference*[C]. Albuquerque: Sandia National Labs, 1998: 505
- [109] Roca X, Sarrate J, Huerta A. *Proceedings of the 13th*

- International Meshing Roundtable*[C]. Heidelberg: Springer, 2004: 169
- [110] Ruiz-Gironés E, Roca X, Sarrate J. *Advances in Engineering Software*[J], 2011, 42(9): 700
- [111] Zeng Zhuo(曾卓), Chen Jiaxin(陈家新). *Computer Engineering and Applications*(计算机工程与应用)[J], 2013, 49(2): 219
- [112] Cai S Y, Tautges T J. *Engineering with Computers*[J], 2015, 31(3): 439
- [113] Wu H Y, Gao S M, Wang R et al. *Procedia Engineering*[J], 2017, 203: 414
- [114] Wu H Y, Gao S M, Wang R et al. *Engineering with Computers*[J], 2019, 35(3): 1121
- [115] Zhang Shigang(张仕刚), Xie Yaoqin(谢耀钦), Bao Shanglian(包尚联). *Chinese Journal of Medical Imaging Technology*(中国医学影像技术)[J], 2004(5): 786
- [116] Zhang Lu(章鲁), Li Sanli(李三立). *Journal of Shanghai Jiaotong University, Medical Science*(上海交通大学学报, 医学版)[J], 2005(11): 90
- [117] Ding Mei(丁妹). *Automatic Mesh Generation in Geometrical Construction of Virtual Surgical*(虚拟手术几何建模中网格自动生成技术的研究)[D]. Qingdao: Qingdao University, 2005
- [118] Lou Yuping(楼玉萍), Chen Xin(陈欣). *Bulletin of Science and Technology*(科技通报)[J], 2010, 26(4): 618
- [119] Qian Weidong(钱卫东), Wu Chengcai(吴成才), Leng Wenhao(冷文浩) et al. *Ship Science and Technology*(舰船科学技术)[J], 2011, 33(3): 39
- [120] Deng Daren(邓达人), Meng Chunlin(孟春玲), Feng Minshan(冯敏山) et al. *Journal of Medical Biomechanics*(医用生物力学)[J], 2017, 32(5): 442
- [121] Ma Yuzheng(马玉政). *Research on Tetrahedral Meshing Algorithm and Virtual Surgical Cutting*(四面体网格划分算法研究及虚拟手术切割)[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2022
- [122] Yue Guoxuan(岳国璇). *High-Precision Calculation of Complex Gravity Field Based on Adaptive Finite Element Method with Tetrahedron*(基于四面体自适应有限元复杂重力场的高精度计算)[D]. Changsha: Central South University, 2022
- [123] Zhen Jianjing(郑建靖). *Some Issues on Dynamic Unstructured Grid Generation for Parallel CFD Simulation*(面向并行计算流体动力学模拟的非结构动网格生成的若干问题研究)[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016
- [124] Delaunay B. *Bulletin de l'Académie des Sciences de l'Union des Républiques Soviétiques Socialistes*[J], 1934, 7: 793
- [125] Bowyer A. *The Computer Journal*[J], 1981, 24(2): 162
- [126] Fabri A, Teillaud M. *10e Colloque National en Calcul des Structures*[C]. France: CSMA, 2011: 6
- [127] Marot C, Pellerin J, Remacle J F. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*[J], 2019, 117(9): 967
- [128] Lee D T, Lin A K. *Discrete & Computational Geometry*[J], 1986, 1(3): 201
- [129] Joe B. *Advances in Engineering Software and Workstations*[J], 1991, 13(5-6): 325
- [130] Weatherill N P, Hassan O. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*[J], 1994, 37(12): 2005
- [131] Guan Z Q, Song C, Gu Y X. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*[J], 2006, 68(2): 192
- [132] Si H, Gärtner Klaus. *Proceedings of the 14th International Meshing Roundtable DBLP*[C]. Berlin: Springer, 2005: 147
- [133] Jamin C, Alliez P, Yvinec M et al. *ACM Transactions on Mathematical Software*[J], 2015, 41(4): 1
- [134] Hu Y X, Schneider T, Wang B L et al. *ACM Transactions on Graphics*[J], 2020, 39(4): 117
- [135] Diazi Lorenzo, Panozzo Daniele, Vaxman Amir et al. *ACM Transactions on Graphics*[J], 2023, 42(6): 1
- [136] Erkoç Z, Güdükbay U, Si H. *Engineering with Computers*[J], 2024, 40(2): 867
- [137] George Paul Louis, Seveno Eric. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*[J], 1994, 37(21): 3605
- [138] Löhner R, Camberos J, Merriam M. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*[J], 1992, 95(3): 343
- [139] Cuillière J C. *Computer-Aided Design*[J], 1998, 30(2): 139
- [140] Tilch R, Tabbal A, Zhu M et al. *Engineering Computations*[J], 2008, 25(1-2): 28
- [141] Adamoudis L D, Koini G, Nikolos I K. *Advances in Engineering Software*[J], 2012, 54: 49
- [142] Lo S H. *Computers & Structures*[J], 2013, 123: 15
- [143] Ma Xinwu(马新武), Zhao Guoqun(赵国群), Wang Fang(王芳). *Chinese Journal of Computational Mechanics*(计算力学学报)[J], 2015, 32(2): 250
- [144] Xie Qianru(谢倩茹), Geng Guohua(耿国华). *Application Research of Computers*(计算机应用研究)[J], 2018, 35(7): 2200
- [145] Zhou Q Y, Wang Q Q, Yu Z F. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*[J], 2022, 123(8): 4391
- [146] Ma C D, Huang J Z, Luo H et al. *Computer Physics Communications*[J], 2025, 310: 109535
- [147] Luan Ru(栾茹), Bai Baodong(白保东), Xie Dexin(谢德馨). *Journal of Shenyang University of Technology*(沈阳工业大学学报)[J], 1999(5): 409
- [148] Li Chunkai(李春开), Pang Mingyong(庞明勇). *Microcomputer Information*(微计算机信息)[J], 2010, 26(24): 174
- [149] Zhang Z Y, Wang Y X, Jimack P K et al. *Computational Science-ICCS 2020*[C]. Cham: Springer, 2020: 186
- [150] Papagiannopoulos A, Clausen P, Avellan F. *Neural Networks*[J], 2021, 136: 152
- [151] Chen X H, Li T J, Wan Q et al. *Engineering with Computers*[J], 2022, 38(5): 4409
- [152] Soman S, Mehendale N. *Neural Computing and Applications*[J], 2024, 36(4): 1805
- [153] Sang Weimin, Li Fengwei. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*[J], 2007, 53(7): 1107
- [154] Huang Chuyun(黄楚芸), Cai Qingdong(蔡庆东). *Physics of Gases*(气体物理)[J], 2023, 8(1): 68

- [155] Wang Keke(王可可). *The Study and Application of MPFA Algorithm Based on Unstructured Hexahedral Grid System*(非结构六面体网格 MPFA 算法研究及应用)[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2017
- [156] Luo H, Spiegel S, Löhner R. *Aiaa Journal*[J], 2010, 61(11): 2639
- [157] Huai Yang(淮洋), Yao Bing(姚冰). *Electronic Test*(电子测试)[J], 2021(14): 55

Research Progress on Pre-treatment Techniques of Casting Process Simulation Software

Cui Yuwei¹, Pan Yue^{1,3}, Duan Zhiqiang¹, Liu Bin¹, Pei Xiaolong¹, Chen Liwen¹, Hou Hua^{1,3}, Zhao Yuhong^{1,2,4}

(1. MOE Jointly Collaborative Innovation Center for High-Performance Al/Mg Based Materials, Shanxi Key Laboratory of Intelligent Casting and Advanced Forming for New Materials, School of Materials Science and Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

(2. Beijing Advanced Innovation Center for Materials Genome Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

(3. School of Materials Science and Engineering, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China)

(4. Institute of Materials Intelligent Technology, Liaoning Academy of Materials, Shenyang 110004, China)

Abstract: The pre-processing module is a core component of casting numerical simulation software, directly influencing the accuracy and efficiency of simulations. This paper presented a comprehensive review of pre-processing techniques in casting simulation, with a specific focus on geometric modeling, parameter configuration, and the pivotal mesh generation techniques. The principles and evolutionary history of hexahedral, tetrahedral, and hybrid meshing methods were elaborated. Furthermore, the strengths and limitations of various algorithms in handling complex castings were analyzed. Finally, the paper identified key challenges currently facing pre-processing modules and outlined future development trends.

Key words: numerical simulation of casting process; pre-treatment module; meshing generation techniques

Corresponding author: Zhao Yuhong, Ph. D., Professor, MOE Jointly Collaborative Innovation Center for High-Performance Al/Mg Based Materials, Shanxi Key Laboratory of Intelligent Casting and Advanced Forming for New Materials, School of Materials Science and Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, P. R. China, E-mail: zhaoyuhong@nuc.edu.cn