

# 基于高性能计算的云原生超大规模压铸模拟技术

张伟, 李忠林, 张子珂, 孟少星, 郭志鹏

(北京适创科技有限公司, 北京 100081)

**摘要:** 针对新能源汽车一体化超大型压铸的发展和未来巨大需求, 亟需实现超大型压铸多物理场建模与超大规模高效高精度仿真计算, 本研究基于完全自主研发的自适应结构化网格剖分算法, 不可压缩格子玻尔兹曼热流体仿真求解器算法, 以及实验测量+一维反算的铸件-铸型界面换热系数模型, 研发了高性能云原生超大规模压铸模拟软件。计算案例结果表明: 自适应结构化网格在复杂几何建模场景更为优异, 对于一体式车身等超大型压铸件, 其计算规模和并行效率均突破了传统铸造仿真软件的计算能力瓶颈, 总体计算网格规模为1.22亿, 计算CPU核心数为96核时, 总计算时间仅为13 h 43 min。

**关键词:** 压铸模拟; 高性能计算; 云原生; 一体化超大型压铸

基于节能环保的要求, 新能源汽车与汽车轻量化是未来汽车的发展方向, 其铝压铸构件正向“大型化、复杂化、薄壁化、高性能化”的高端要求发展<sup>[1]</sup>。

“十四五”期间, 随着国内制造业进一步升级换代, 成规模的压铸企业在模拟仿真等数字化技术应用方面取得长足的进步<sup>[2-3]</sup>。但传统的铸造过程模拟仿真软件和技术, 受限于相对落后的底层求解器技术, 且多为本地化部署, 计算效率低下、计算规模受限、计算稳定性差, 在面对一体式车身等超大型压铸件时, 计算网格规模通常受限于计算机内存的限制, 造成模拟仿真的结果不够准确。因此研发基于超算云架构的求解器算法和模拟技术, 使压铸仿真不受计算机硬件的限制, 对一体式车身等超大型压铸件的研发和生产具有重要的现实意义。

## 1 底层仿真求解器算法

### 1.1 基于 GPU+CPU 异构并行的自适应结构化网格

超大型压铸仿真为典型的“流-热-固”多物理场耦合计算分析, 其所需网格规模通常以亿计量, 本研究中采用了GPU+CPU异构并行的块结构自适应多层网格局部加密算法<sup>[4]</sup>, 基于此算法架构, 实现了计算资源的并行分配和网格的动态划分, 在保证网格精度前提下, 可大幅降低总体网格规模, 提高计算效率。

如图1所示, 建立多层网格架构可通过特定加密判据自动构建网格尺寸的层级结构, 只在界面处或场变量变化快的地方使用细网格, 而在其他地方使用粗网格。从最粗层开始, 一旦建立细网格判据被满足, 网格则被划分。子网格通过将母网格二等分产生, 并采用集群算法对标记后的网格进行集群操作, 使其合并为一个“集群块”。每个集群块中的网格尺寸相同。网格标记过程重复执行直至到达最细层(即最顶层), 也就是无法再分的叶层。

通过以上网格架构方式, 可将整个计算域按照网格层不同的粗细粒度分解为多个负载均衡的集群块结构, 每个集群块结构由单个CPU核心负责计算, 块结构之间采用MPI进行消息交换。单个块结构内物理场数据映射到GPU单元上实现并行加速求

作者简介:

张伟(1988-), 男, 博士, 研究方向为高性能CAE算法和软件研发。电话: 15010283912, E-mail: w.zhang@supreium.com

中图分类号: TG249.2

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2023)04-0451-04

收稿日期:

2022-05-07 收到初稿,  
2022-06-13 收到修订稿。

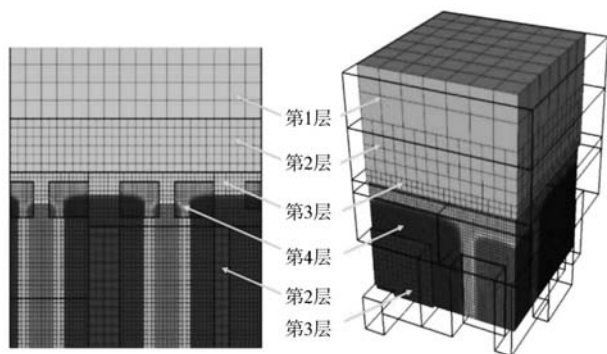


图1 块结构多层自适应局部加密网格架构

Fig. 1 Block-structure multi-layer adaptive mesh refinement scheme

解, 该架构可充分利用超级计算机单节点高速计算和节点间高速通讯的架构优势, 以及GPU高带宽、大吞吐量、大规模的数据流并行处理方面的优势。

## 1.2 格子玻尔兹曼流体力学求解器算法模型

流体仿真通常基于纳维尔斯托克斯 (Navier-Stokes) 方程采用不同的数值方法进行求解实现。SIMPLE等传统算法多受限于中等雷诺数流动, 对高速大紊流流体流动数值求解存在较大限制。本研究采用多重弛豫时间 (MRT) 的格子玻尔兹曼算法 (Lattice Boltzmann Method, LBM), 并结合流体体积函数模型 (volume of fluid, VOF) 实现了气液两相耦合的复杂流体流动的数值模拟, 同时结合大涡模拟湍流模型, 实现了雷诺数高达 $10^6$ 的流体流动模拟, 显著提升了超大规模复杂流体仿真的计算稳定性。本求解器算法<sup>[5]</sup>实现步骤如下。

(1) 构建LBGK基础求解器。LBGK基本计算过程如下步骤: ①对空间进行离散, 或读入计算网格模型数据; ②对速度用D3Q19模型进行离散; ③对时间离散采用显式欧拉方法; ④计算碰撞项; ⑤更新密度分布函数; ⑥更新速度和密度等宏观场量。

(2) 建立MRT模型。LBGK模型计算稳定性很低, 为提高计算过程稳定性, 本方法在LBGK模型基础上采用了MRT模型。LBGK为保证计算稳定, 需使得松弛时间小于0.5, 这个限制条件非常严苛, 大部分应用场景均为大雷诺数流动, 无法满足此稳定性条件。MRT模型原理为将密度空间的松弛时间转换至矩空间中, 然后对矩空间中多个松弛时间分量构成的松弛矩阵参数进行调整, 可大幅提升流动计算的稳定性。

(3) 构建大涡模拟湍流模型。为进一步提高求解器算法在大雷诺数条件下计算稳定性, 本方法采用亚格子SMA紊流模型, SMA模型对于松弛矩阵中主对角线元素做进一步处理以提升对湍流计算的稳定性。

(4) 构建VOF模型, 在压铸充型过程流体仿真中, 自由表面是熔融金属液和气体之间的界面, VOF模型是在气相和液相密度比大于 $10^3$ 时对于两相流的一种较好模型近似。

## 1.3 基于实验测量—一维反算的传热学求解算法

压铸过程冷却速率较快, 可达到 $10^2$  °C/s, 在这种快速冷却过程中精准计算并预测温度变化则主要取决于准确的铸件-铸型界面换热系数。换热系数模型描述极其复杂, 常表达为多变量的泛函形式, 但现有模型或商业软件的换热系数模型通常为零维 (常数) 或者是一维形式 (依赖于温度)。这种简化往往会极大地降低计算精度, 造成数倍甚至数十倍以上计算偏差。本研究采用的界面换热系数模型为一种基于实验测量和一维反算而建立的随空间、时间、铸件单元固相分数, 以及铸型表面温度变化的泛函模型<sup>[6-7]</sup>。其建立过程主要包括以下几个步骤: ①对模具铸型与铸件界面及不同深度位置单元进行实时测温; ②建立一维反算模型; ③基于所测温度反算换热系数模型参数; ④建立换热系数模型。通过该换热模型, 有效提升了凝固过程温度模拟的计算精度。

温度场傅里叶方程的数值求解采用中心差分格式对空间进行离散, 用二阶龙格库塔方法 (RK) 对时间进行离散。凝固过程潜热采用等价比热容方法<sup>[8]</sup>进行处理。在凝固阶段, 铸件和铸型之间采用上文建立的多维泛函形式的换热系数模型; 在开模阶段、分型面处铸型之间以及原铸件和铸型之间界面均设媒介为空气的强制对流换热模型; 在喷涂阶段、分型面处、铸型之间以及原铸件和铸型之间界面均设为媒介为脱模剂的强制对流换热模型; 在合模阶段, 原铸件和铸型之间界面设为媒介为空气的自然对流换热模型。

## 2 云原生高性能软件架构

### 2.1 云原生软件架构

传统压铸仿真技术多采用本地化部署方式, 其计算能力受限于本地服务器的硬件性能, 在面对超大型一体式压铸件上亿网格规模的模拟计算时无法发挥作用。本研究中, 基于三层网络架构开发了云原生<sup>[9]</sup>的超算仿真软件。①用户层, 用户在互联网环境下通过网页浏览器登录SaaS平台, 通过提交三维几何模型和工艺参数至SaaS平台层即可使用SaaS服务。②SaaS平台层, SaaS平台层为用户提供注册以及计算参数设置等业务的相关操作, 具体包括用户权限设置、典型案例展示、计算参数配置、计算任务提交、计算结果监控、仿真大数据远程可视化等。③计算层, 求解器程序部署在超级计算机计算节点上, 通过调用超算API即

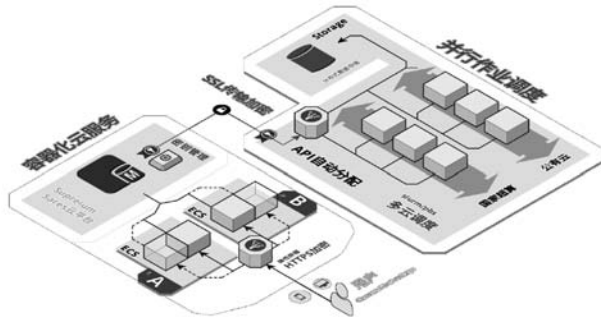


图2 基于超算的云原生压铸仿真软件架构

Fig. 2 Supercomputer based cloud-native die-casting simulation software architecture

可使用集群计算资源。用户执行的计算服务均以隔离方式提交至集群上单个或多个计算节点上进行计算。

## 2.2 三维场仿真数据可视化

CAE场仿真原始结果数据量巨大，常达到上百GB甚至上TB数据。本研究中，先通过等值面提取将体数据转化为点云或三角网格表达的面数据，然后将面数据通过数据过滤+数据压缩处理，缩减至原文件体积的1%以下，大幅提高数据传输效率。数据传递采用流式传输，将点云、三角网格数据更平滑地流送到客户端，减少加载时的卡顿。在客户端解压数据时采用多线程解压，解码效率可根据CPU核心数提升对应的倍数。另外，为保障各主流操作系统和浏览器数据兼容性，采用C++/WebAssembly编译三维渲染引擎。

## 3 一体式车身等超大型压铸仿真应用案例

一体式车身等超大型压铸件的模拟仿真对计算机软硬件都提出了更高的要求。本软件针对超大型压铸件的结构和工艺特点，通过底层算法的突破，从根本上解决了基于PC的传统模拟仿真技术计算规模严重受限的问题。本软件先后应用于国内多个汽车公司超大型压铸结构件的研发设计仿真中，目前部分产品已进入量产阶段。

如图3所示的一体式车身仿真案例，为便于比较分析计算网格规模对计算效率的影响，采用静态网格剖分策略，即对型腔区域全部采用均一网格尺寸进行网格划分。当最小网格尺寸为1.0 mm，总体计算网格规模为1.22亿，计算CPU核心数为96核时，总计算时间仅为13 h 43 min。表1展示了同等模型和工艺条件下，不同网格精度所对应的计算时间和计算资源。在较高网

表1 不同计算网格规模对应的计算时间对比  
Table 1 Comparison for the computation time with different grid sizes

| 网格大小/mm | 网格总量/亿 | 型腔网格数/亿 | 使用核数/核 | 计算时长         |
|---------|--------|---------|--------|--------------|
| 0.4     | 5.56   | 2.62    | 192    | 106 h 31 min |
| 0.7     | 2.80   | 0.96    | 192    | 22 h 10 min  |
| 0.7     | 2.80   | 0.96    | 96     | 57 h 34 min  |
| 1       | 1.22   | 0.31    | 96     | 13 h 43 min  |

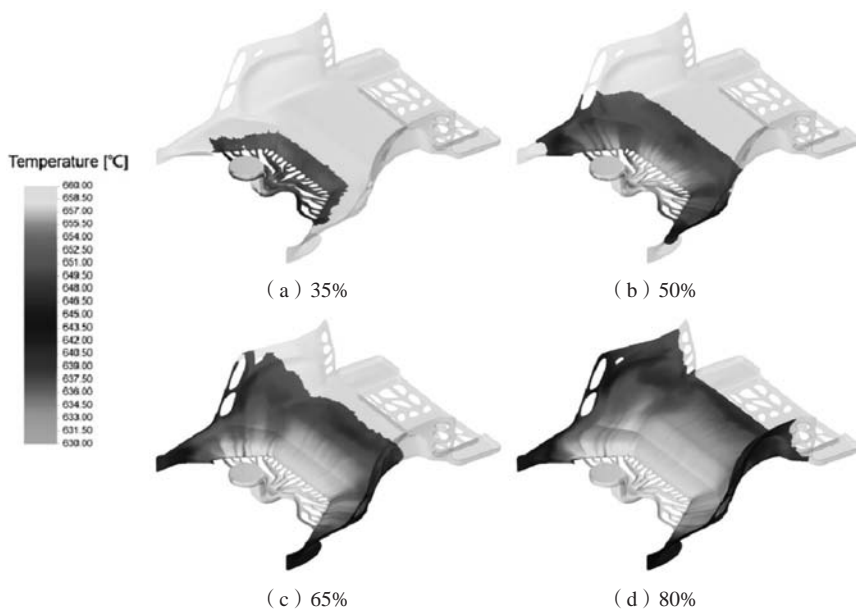


图3 一体式车身充型过程温度场分布

Fig. 3 Thermal distributions of the unibody casting during cavity-filling simulation with different fl

格精度即最小网格尺寸为0.7 mm, 总体计算网格规模为2.8亿, 计算CPU核心数为192核时, 总计算时间为22 h 10 min, 仍然在可接受时间范围内。

## 4 结论

(1) 基于GPU+CPU异构并行的自适应结构化网格, 在保证网格精度前提下大幅降低了总体网格规模, 并提高了计算效率。

(2) 基于MRT的格子玻尔兹曼算法, 结合VOF模

型实现了气液两相耦合的复杂流体流动的数值模拟, 同时结合大涡模拟湍流模型, 实现了雷诺数高达 $10^6$ 的流体流动模拟, 显著提升了超大规模复杂流体仿真的计算稳定性。

(3) 一体式车身仿真总体计算网格规模为1.22亿, 计算CPU核心数为96核时, 总计算时间仅为13 h 43 min, 该结果表明: 本研究从根本上解决了基于PC的传统模拟仿真技术计算规模严重受限的问题。

### 参考文献:

- [1] 王利刚, 李军. 我国汽车轻量化材料“十三五”时期发展回顾及未来展望 [J]. 新材料产业, 2020 (6): 25-30.
- [2] 张伟, 方健儒, 熊守美, 等. 奔腾B50离合器壳体压铸模冷却系统优化 [J]. 铸造, 2013, 62 (3): 191-195.
- [3] YANG H M, PU Z M, GUO Z P, et al. A study of metal/die interfacial heat transfer behavior of vacuum die cast pure copper [J]. China Foundry, 2020, 17 (3): 6.
- [4] 张昂, 郭志鹏, 蒋斌, 等. 合金凝固组织和气孔演变相场模拟研究进展 [J]. 中国有色金属学报, 2021, 31 (11): 2976-3009.
- [5] MENG S, ZHANG A, GUO Z, et al. Phase-field-lattice Boltzmann simulation of dendrite motion using an immersed boundary method [J]. Computational Materials Science, 2020, 184: 109784.
- [6] 郭志鹏, 熊守美, 曹尚铤, 等. 铝合金压铸过程铸件/铸型界面换热行为的研究 I. 实验研究和界面换热系数求解 [J]. 金属学报, 2007 (11): 1149-1154.
- [7] 郭志鹏, 熊守美, 曹尚铤, 等. 铝合金压铸过程铸件/铸型界面换热行为的研究 II. 工艺参数对界面换热的影响 [J]. 金属学报, 2007 (11): 1155-1160.
- [8] 周建兴, 刘瑞祥, 陈立亮, 等. 凝固过程数值模拟中的潜热处理方法 [J]. 铸造, 2001 (7): 404-407.
- [9] 张国生. 基于无服务器架构的云原生应用软件研究 [J]. 中国电子科学研究院学报, 2022, 17 (2): 155-161.

# High-Performance-Computing Based Cloud-Native Ultra Large-Scale Die Casting Simulation Software

ZHANG Wei, LI Zhong-lin, ZHANG Zi-ke, MENG Shao-xing, GUO Zhi-peng  
(Supreium Technologies Co., Ltd., Beijing 100081, China)

### Abstract:

With increasing needs of unibody die casting for development of new energy automobile, it is paramount to develop large-scale multi-physics simulation software. In the work, a high-performance-computing based cloud-native die casting simulation software was developed for ultra-large scale die castings, in which a block-structure adaptive mesh refinement (AMR) scheme, a lattice Boltzmann method (LBM) based CFD solver for thermal fluids, and an interfacial heat transfer coefficient model between metal and die were implemented. It is shown within simulation case that, the AMR scheme was more suitable for complex geometry cases, and for the ultra-large scale castings the computing performance of the cloud-native was more robust than traditional PC-based. The elapsed time was 823 min with computation cost of 96 threads for total grids number of 0.122 billion, and the total calculation time was only 13 h 43 min.

### Key words:

die casting simulation; high-performance computing; cloud native; unibody ultra-large die casting