

基于华铸 CAE 的液态成形模拟结果 CGNS 格式文件研究

李乐川 殷亚军 计效园 沈旭 李文 周建新
(华中科技大学材料成形与模具技术全国重点实验室)

摘要 提出了一种将 CGNS(CFD 通用标记系统)格式文件数据向液态成形模拟的流场格式数据转换的方法。首先,读取了 CGNS 文件中的空间拓扑数据,根据不同的网格类型分别读取;其次,读取了 CGNS 文件中的物理数据,包括温度、压力、液相等;最后,开发了基于华铸 CAE 软件的 CGNS 数据读取与可视化软件并进行测试。结果表明,该方法可成功读取 CGNS 格式文件并进行可视化。

关键词 CGNS 文件;液态成形;空间拓扑;流动模拟

中图分类号 TP311;O242 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2023.011.003

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



CGNS Format File of Simulation of Liquid Forming Based on InteCAST

Li Lechuan, Yin Yajun, Ji Xiaoyuan, Shen Xu, Li Wen, Zhou Jianxin
(State Key Laboratory of Materials Processing and Die & Mould Technology,
Huazhong University of Science and Technology)

Abstract: A method to convert CGNS file data to liquid forming simulation flow field data was proposed. Firstly, the spatial topology data in the CGNS file was read separately according to different grid types. Secondly, physical data, including temperature, pressure, liquid rate, etc. from CGNS files were read. Finally, CGNS data reading and visualization software based on CAE software was developed and tested. The results indicate that the method can succeed to read and visualize CGNS files.

Key Words: CGNS Files, Liquid Forming, Spatial Topology, Flow Simulation

数值模拟能够预测液态金属的充型凝固过程,不仅可减少试制次数与提高生产效率,还可以分析缺陷形成的原因,为生产工艺优化提供参考。其中,针对充型过程的数值模拟,研究者提出了很多具有高精度且兼顾计算速度的模拟方法,主要分有网格方法与无网格方法。对于金属液的流动过程模拟,一般采用有网格方法^[1]。美国 Los Alamos 实验室提出了 MAC(Marker and cell method)方法^[2],其基本的计算方法是:使用有限差分法生成网格,把动量守恒方程(即 N-S 方程)和质量守恒方程离散化处理,再把这两个公式合并成为一个与压力相关的泊松方程,反复迭代,最终求解出压力场和速度场的分布。美国明尼苏达州大学提出的压力连接方程的半隐式方法(Simple)^[3]可以用来计算非定域、不稳定速度场,计算结果能满足连续性方程、动量方程。其优点是可使速度场和压力场同时迭代,缺点在于计算效率较低。CGNS(CFD General Notation System)是美国波音公司和美国国家航空航天局(NASA)在 1994

年共同提出的一种通用流场格式文件。图 1 为 CGNS 网格着色图示例。

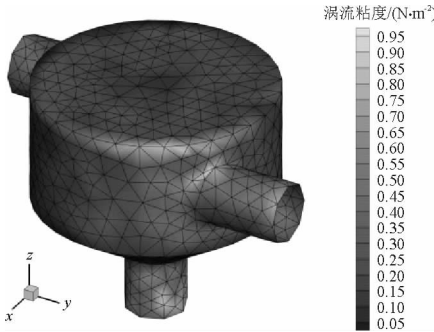


图 1 CGNS 网格着色图示例
Fig.1 Example of a CGNS grid coloring diagram

CGNS 系统自提出以来,也在不断地更新与扩展,以完善其功能。POIRIER D 等^[4-5]首次报道了一种新的数据传输格式——CGNS 格式,在此基础上系统地总结了 CGNS 数据标准自开创以来,在空气动力学与计算流体力学领域所取得的一系列进展。LEGENSKY S

收稿日期:2022-10-18;修改稿收到日期:2023-05-15
基金项目:“两机”重大专项基础研究资助项目(2017-VII-0008-0102)
第一作者简介:李乐川,男,2000 年出生,博士研究生,武汉(430074),E-mail:d202280401@hust.edu.cn
通信作者:周建新,男,1975 年出生,教授,武汉(430074),E-mail:zhoujianxin@hust.edu.cn
引用格式:李乐川,殷亚军,计效园,等. 基于华铸 CAE 的液态成形模拟结果 CGNS 格式文件研究[J]. 特种铸造及有色合金,2023,43(11):1 452-1 458.
LI L C, YIN Y J, JI X Y, et al. CGNS format file of simulation of liquid forming based on InteCAST[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(11):1 452-1 458.

等^[6]描述了自 2000 年 1 月以来 CGNS 目前的进展,如何利用这一进展以及 CGNS 的未来方向。RUMSEY C 等^[7]总结了 CGNS 数据标准自创立以来的发展过程与最新的研究进展。

CGNS 数据格式标准确立以来,已被多次证明具有极高的规范性与稳健性,可以满足计算流体力学中不同计算平台间的数据转换需要。POINOT M 等^[8]将 CFD 数据规范过程与其他软件技术(如网格或数据类型)进行比较,发现 CGNS 标准是一种有用的数据规范、交换或存储方法。针对 CGNS 格式的性能与稳健性的测试,PAKALAPATI P 等^[9]给出了一个基于 CGNS 格式扩展的并行输入输出性能的基准测试结果,发现借助于 CGNS 标准的开发带来的标准化和稳健的格式,使得数值模拟的各个阶段之间能够交换信息。基于 CGNS 格式,目前已经有众多的 CFD 网格处理与模拟计算软件采用此标准。梁益华等^[10]总结了基于 CGNS 的数据标准和软件实现的主要方法与流程,介绍了 CGNS 标准的几个关键组成部分:ADF 分层数据结构、SIDS 数据标准等。IEPAN H 等^[11]提出了一种基于 CGNS 系统的涡轮叶片优化数据模型,专门用于解决 OPALE 项目的需求,以实现涡轮叶片的智能工艺优化。POINOT M 等^[12]提出了一种基于 XML/CGNS 求解器的对于计算流体力学中多约束流动场表面的检测方法。LEI G D 等^[13]研究了基于 CGNS 应用程序接口和有限体积法在非结构化的混合网格计算求解中的应用。郝嘉^[14]提出了一种基于 CGNS 标准的自动处理航空 CFD 计算数据的技术,并最终开发出了计算数据自动处理软件。BENOIT C 等^[15]开发了一种新的开源计算流体动力学模拟前处理工具——Cassiopee,可以对网格进行自适应的生成与布尔运算,以及对网格的表面处理与优化。PERRELL E 等^[16]针对多物理场模拟计算的需求,开发了一套名为 elsA 的 CFD 解算器,在该解算器中,CGNS 标准帮助解算器为 CFD 计算定义一组完整且一致的参数。BORM O 等^[17]建立了一种面向密度计算的模块化多物理仿真平台——MOSAIC 平台。研究者在关于 CGNS 标准的推广与应用方面进行了大量的研究,取得了诸多成果,但是关于 CGNS 文件标准在液态成形领域的应用尚未见报道。

在数值模拟结果的显示与分析方面,CHEN L W 等^[18]使用 ProCast 软件将适配器环铸件的挤压铸造数值模拟结果进行后处理显示,包括温度分布与固液相分布。李静怡等^[19]使用 EsayCast 软件对镁合金隔板低压铸造的模拟结果中的凝固缩孔疏松分布进行了处理和分析。顾涛等^[20]通过对数值模拟结果的分析,增加了浇注系统的过滤网,并改进了冒口冷铁的位置。黄进

等^[21]利用华铸 CAE 软件对铝合金的充型压力、凝固组织、缩松缺陷等模拟结果进行分析,优化了生产工艺,取得了较好的应用效果。因此,数值模拟结果的准确性与通用性对于数值计算与工艺的分析优化十分重要。

本研究针对结构化网格与非结构网格在 CGNS 文件中数据存储方式的不同,提出一种将其中的空间拓扑数据与物理数据通过一定的处理与规范化过程,来输出为可以被更一般的模拟计算软件与三维后处理软件所使用的文件格式,包括国际主流的模拟仿真软件 Fluent、Comsol 等。基于华铸 CAE 软件进行后处理开发,实现 CGNS 文件与液态成形模拟中所使用的充型流动数据文件的传输功能,以满足液态成形模拟计算与后处理需求,旨在促进液态成形数值模拟结果的可迁移性和通用性。

1 CGNS 文件空间拓扑数据读取

1.1 结构化网格读取

结构化网格的主要特点是网格区域内全部的点都有与其相同的相邻单位。由于其相邻的特性,它可以很容易地使不同的区域在外部边界处进行拟合,这种网格类型适合使用有限差分方法进行计算流体力学和网格表面应力应变等方面的计算。在结构化网格中,各类数据都是分不同的维度进行存储的,例如,对于三维结构化网格来说,其坐标数据与物理数据都是在 i, j, k 3 个维度进行记录。因此,只需要正确找到每个维度下的数据数量并依次进行填充,就可以使得其 3 个维度下的索引与其空间位置完全对应。

在 CGNS 文件中,结构化网格的拓扑数据存储在不同的 Zone 中,每个 Zone 中存储着对应区域的网格数据信息,其中详细信息及其组织方式已经详细描述。整个文件的网格信息就是由这些不同区域的信息汇总而成。需要注意的是,结构化网格中不同区域之间有几何的连接性关系,即不同区域之间会存在一些共有的点与面,划分不同的 Zone 是为了方便对于不同的材质和界面添加不同的物性参数,便于模拟计算。对于结构化网格来说,每一个 Zone 所存储的坐标索引数据具有空间上的独立性,即单独输出也可以获得空间拓扑结构完整的网格结构,因此在读取输出时可以根据需要选择指定的 Zone,也可方便地对于特定位置的网格数据进行修改。

图 2 为具有规则六面体与不规则六面体的结构化网格对比图。六面体分布不规则的结构化网格的特点在于有很多的曲面,网格分布是随机的。在这样的情况下无法直接得到 3 个维度的坐标数量,从而对坐标序列

进行组装。

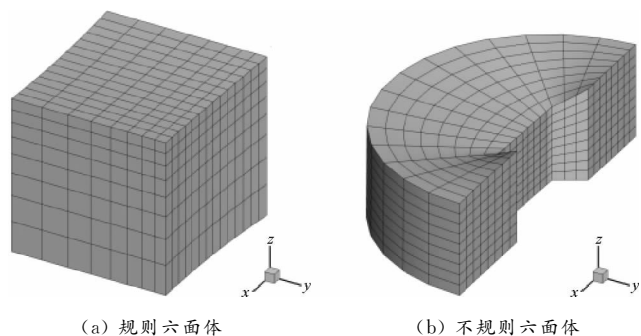


图 2 2 种结构化网格对比图

Fig.2 Comparison of different structured meshes

对于有规则六面体的结构化网格来说,由于网格的数据存储在不同的 Zone 中,在每一个 Zone 中,数据在 i, j, k 3 个维度(对应 x, y, z 3 个方向)上存储,且彼此相互垂直,因此已知 3 个维度上的索引就可以通过位移确定某一个网格。只是对于一个未知的网格文件来说,每个维度下坐标数量的信息是未知的,因此读取的关键在于找出每个维度下的坐标数量。针对于此,设计了一套算法,具体流程如下:①调用库函数直接读取总坐标序列,并筛选出其中的有效点;②将有效点按照 x 坐标值排序,此处按照 x 方向排序是为了后续处理相同 x 坐标值下的分类数据;③遍历按照 x 坐标值排好序的坐标,找到 x 坐标值相同的数据,视为一簇数据,并获取每一簇数据的坐标数量;④在 x 坐标值相同的一簇数据中,对于 y 的坐标值进行二次排序;⑤同理,在每一簇 x 坐标中的每一簇 y 坐标中,对于其 z 坐标值进行三次排序;⑥至此,成功获取了 i, j, k 3 个维度的坐标数量,因此可以对于记录有效坐标序列的一维数组进行再组装;⑦由于此时的三维数组是按照几何规则存储的,因此可以很容易地获取其坐标索引;⑧将已获取的规则序列的坐标数值与坐标索引进行整合并输出。

上述算法的关键是通过搜寻共面坐标来找出 3 个维度的坐标数量,然后对坐标序列进行组装,并合并输出。这个算法只针对于具有规则六面体的结构化网格,而对于六面体不规则的结构化网格,上述算法就无法正确输出。

针对具有不规则六面体的结构化网格,又提出了一种基于邻近点搜寻的网格构建算法,见图 3。具体算法流程如下:①调用库函数直接读取总坐标序列,并筛选出其中的有效点;②分别建立存储线段数据、面数据、单个网格数据的数组,用来存储这些基本元素;③遍历所有的坐标,在每一个坐标点上时,寻找与这个点在 x, y, z 3 个方向上正负两边最邻近的点;④再次遍历所有的坐标,在每一个坐标点上时,读取包含这个坐标的所有线段,并且对不同方向的线段进行排列组合;⑤在完

成了一次网格构建后,将网格信息记录在建立好的数组中;⑥当生成所有网格后,输出所有的坐标值以及在记录网格的数组中每个网格对应的坐标索引即可完成构建。

对比可知,针对规则六面体的三维数据重组方法较为简单且读取速度快,但是范围受限;而针对不规则六面体的基于邻近点搜索方法复杂且读取速度慢,但是应用范围比较广,该方法对于具有规则六面体的结构化网格同样适用。

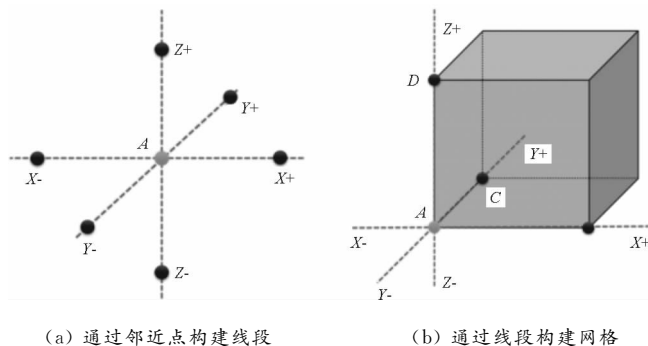


图 3 基于邻近点构建线段与网格示意图

Fig.3 Schematic diagram of line segment and grid construction based on adjacent points

1.2 非结构化网格读取

与结构化网格相比,非结构化网格是指网格点的相邻单元不相同的网格类型。也就是说,如果网格划分方法不相同,内部点相互连接的网格数目也不同。非结构化网格通常比较复杂,网格类型与连接方式也多样化,这样的网格形式在一些复杂的模拟计算案例中可以得到很高的计算精度。由于它并不是按照固定方式构建网格,因此可以关注模拟对象中特定的区域。

在非结构化网格中,所有的数据都是以一维的方式进行存储的,即每一种数据都只存储在一个数组中,因此,每一个数据都有唯一不重复的索引。这样的存储方式对于单个数据的简单读取较为方便,但另一方面,当需要读取少量数据时,由于不确定每个数据的具体位置,往往需要输出数组中的所有数据,然后进行选择,这就造成了一定的数据冗余。

与结构化网格不同的是,在 CGNS 文件中,非结构化网格的网格拓扑信息存储在 Zone 之下的子节点 Section 中,一般非结构化网格只有一个 Zone,但是在一个 Zone 中包含了所有记录块非结构块信息的 Section 节点,每个 Section 节点包含以下几个子节点:Section_name、element_type、istart、iend 等。Section_name 记录了当前 Section 的名称,作为区别其他 Section 的标记;element_type 记录了此 Section 的网格中基本元素的网格类型,常见的基本元素的网格类型主要

包括 TRI_3(三角面片)、TETRA_4(四面体网格)、HEXA(六边形面片)等,也有包含多种网格类型的混合网格;istart 和 iend 记录了网格中基本元素(element)的起始索引和终止索引。正确读取这些节点就可以准确地表达每一个 Section 的数据信息。

非结构化网格的不同区域之间的几何关系与结构化网格也有不同,见图 4。由图 4a 可知,结构化网格中每个 Zone 之间都有确定的几何连接性关系,可以实现“无缝贴合”。相比之下,非结构化网格中的每个 Section 之间是独立的,不存在几何上的确定连接关系,见图 4b。

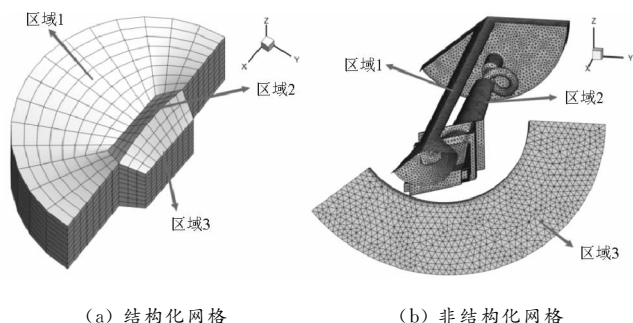


图 4 结构化网格与非结构化网格不同区域之间关系示意图

Fig.4 Schematic diagram of the relationship between different regions of structured grid and unstructured grid

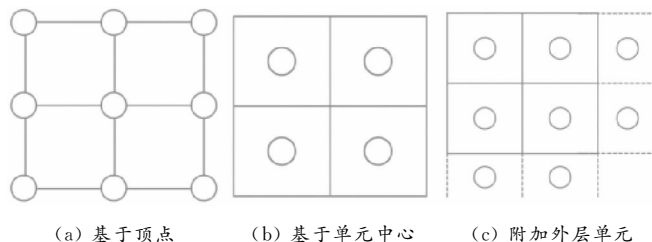
由于空间结构的复杂性与坐标索引的任意性,非结构化网格的读取过程较为复杂。基于对非结构化网格的数据结构解析,需要考虑如何准确地获取每个不同类型的 Section 的坐标数值数据与坐标索引数据。另外,还要避免数据冗余的问题:即对于每一个 Section 来说,由于坐标索引的跨度很大,如果每读取一个坐标就要输出所有的坐标值,就会导致数据冗余,读取速度十分缓慢(因为总坐标量可能有几十万或几百万)。解决方法是根据基本元素的所有坐标索引找到其中最大与最小的索引,然后只需要输出这一部分的数据即可。针对以上问题,设计如下算法:①调用相关库函数,获取文件中每个 Section 的数据信息与标签信息,包括其名称、Section 数量、基本元素的起始与终止索引、网格类型等;②获取最大坐标索引,并以此为范围来获取文件的总坐标序列,筛选出有效点;③遍历每一个 Section,并判断其网格类型,并根据此来选择不同的获取基本元素索引的方式;④以四面体网格为例,若判断出此 Section 的网格类型为四面体网格,那么可以判断出一个基本元素(即四面体网格)所需的坐标为 4 个,并调用库函数获取此 Section 下的所有的坐标索引;⑤以四面体网格为例,将所获得的所有坐标索引进行排序,获取其中的最大索引、最小索引与索引数量。然后在总坐标序列中查找到在最大最小索引区间之内的坐标数据,并输

出;⑥最后输出基本元素索引区间内(即 istart、iend 之间)的坐标索引,由于当前输出的坐标数据并非总坐标数据,因此需要在输出时使每个坐标索引减去在此 Section 中读取的最小坐标索引。上述方法可以有效避免数据冗余的问题。在读取效率提升方面,其可以将读取时间复杂度由 $O(n^3)$ 降低至 $O(n^2)$ 。

2 CGNS 文件物理数据读取

在 CGNS 文件中,物理数据是进行流动场计算后的结果^[14],这一部分数据是反应流动过程特性最主要的数据。正确读取这一部分数据对于后续的模拟计算与后处理显示都十分重要^[15]。

为了适应不同物理条件下的模拟计算需求,结构化网格中的物理数据分为 3 种情况,即:顶点处、单元中心、单元中心并附加外层单元处物理数据,见图 5。



(a) 基于顶点 (b) 基于单元中心 (c) 附加外层单元

图 5 3 种物理数据类型示意图

Fig.5 Schematic diagram of different physical data types

在物理数据位于坐标顶点处的情况下,物理数据的分布较简单,其位置与网格点的位置相同,因此物理数据数量与网格点数量相同,索引范围也相同。此时物理数据类型为 Vertex;在物理数据位于单元中心处的情况下,若是二维面片,物理数据位于四边形的 4 个环绕的网格点所确定的单元中心。若是三维网格,物理数据位于六面体的 8 个环绕的网格点所确定的单元中心。因此,在单一维度下,物理数据的数量总是比网格点的数量小 1,索引范围也小 1。此时物理数据的类型为 CellCenter;在物理数据位于有外层数据的单元中心处时,由于有最外层数据,即结构化网格外所附加的物理数据存在,且其所依据的“单元”并非真实存在,因此外层数据的位置并不是真正的单元中心,它的真正位置和单元中心外的其他网格位置的值有关。外层的物理数据也并不作为单独的实体进行存储,而是将物理数据的范围扩展到包括外层的单元之中。

在非结构化网格中,物理数据的分布形式与结构化网格中基本相同。不同点在于非结构化网格中仅有前两类物理数据,不存在位于有外层数据的单元中心处的物理数据。而对于在顶点处的和在单元中心处的物理数据来说,非结构化网格的不同在于所有的数组都是一维的,因此也只有 1 个索引,这与三维结构数组的 3 个

索引有所不同。在顶点处的物理数据与网格坐标以相同的索引存储;在单元中心处的物理数据,存储索引即为坐标索引的 $1/N$, N 为每个基本单元所需的网格点数量。3 种类型的物理数据的详细比较见表 1。

表 1 3 种类型的物理数据特点比较

Tab.1 Characteristics comparison of different types of physical data

类型	顶点处	单元中心	有外层数据的单元中心
与顶点位置相同	是	否	否
与网格点数量相同	是	否	否
物理数据类型	Vertex	CellCenter	-
是否真正单元中心	-	是	否

2.1 基于顶点数据

由于基于顶点的物理数据数量与坐标数量相同,因此其输出方式与坐标数据的输出方式大致相同。在结构化网格读取过程中,对于坐标的索引进行了更改,使得直接读取出的物理数据无法正确对应到每一个顶点的坐标上。为了保证正确的对应关系,需要对索引进行关联处理,即在每次改变空间拓扑数据索引的时候,也同步改变物理数据,这可保证两者数据的一一对应关系。例如,读取的初始坐标索引为 $[coord_1, coord_2, coord_3 \cdots, coord_{100}]$,初始物理数据索引为 $[flow_1, flow_2, flow_3 \cdots, flow_{100}]$,首先进行初始索引标记,保证开始的索引一一对应。然后,当对于坐标索引进行筛选、排序等操作时,对物理数据的索引采取相同的操作。当操作完成后,会得到一个新的坐标索引 $[coord_new_1, coord_new_2, coord_new_3 \cdots, coord_new_{100}]$,在这个新的坐标索引中,当读到指定的索引时,根据之前的标定,获取与其下标相同的对应物理数据的索引即可。

在非结构化网格的读取过程中,虽然没有改变每个坐标的索引,但是会改变起始与终止索引,输出特定的索引区间,因此每个顶点的索引都会变化,只需要按照相同的规律改变每个顶点所对应的物理数据索引即可,详细修改方式见图 6。

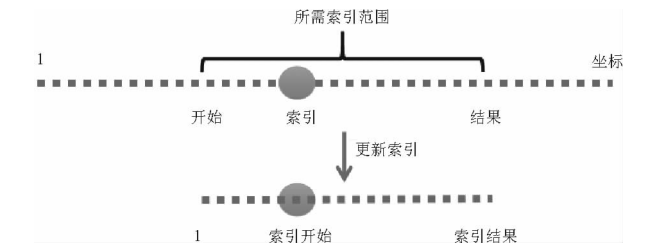


图 6 基于顶点的非结构化网格的物理数据读取示意图
Fig.6 Schematic diagram of physical data reading for unstructured grid based on vertices

2.2 基于单元中心数据

当物理数据基于单元中心时,它的数量与顶点数量

并不相同,而是与基本元素的数量相同,即一个物理数据对应一个网格单元。对于结构化网格来说,这样的读取是容易的,由于此时的物理数据实际上基于每个六面体,那么每个维度上的物理数据数量就比网格顶点数量小 1,只需要将 3 个维度上的坐标数量分别减 1,就是每个维度上的物理数据数量。如某个结构化网格的三个维度上坐标数量分别为 15、9、9,则 3 个维度物理数据的数量分别为 14、8、8。只需要按照此数量建立三维数组并进行读取,就可以与已有的空间拓扑数据正确对应。

对于非结构化网格来说,由于每个网格对应一个物理数据,因此只需在输出 N 个坐标索引的同时,输出 1 个物理数据即可, N 为基本元素所需的索引数量,图 7 为输出物理数据索引的示意图。

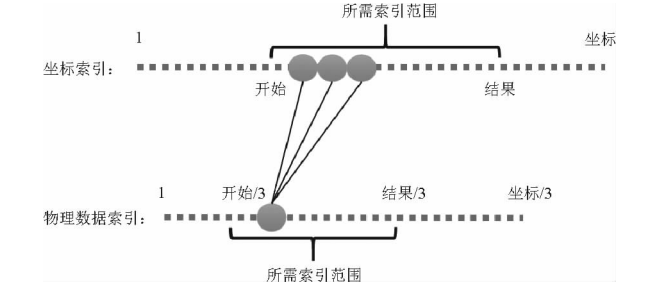


图 7 基于单元中心的非结构化网格物理数据索引输出示意图
Fig.7 Schematic diagram of physical data index output of unstructured grid based on cell center

3 软件开发与系统测试

基于华铸 CAE 软件对上述算法进行集成与封装,文件读取软件以及三维显示模块的开发,最后使用 CGNS 文件实例对该软件进行测试。

3.1 文件读取模块

本研究基于 Windows 的 MFC 界面开发工具^[22]开发了用于读取 CGNS 文件以及可以满足一些个性化输出需求的软件。

图 8 为读取文件的基本流程。首先打开目标文件,判断其是结构化网格或非结构化网格,如果是结构化网格,就读取其 Zone 的数量,之后从第 1 个 Zone 开始循环。读取空间拓扑数据,然后进行处理并输出。读取物理数据,判断物理数据的类型,再根据特定的类型进行物理数据处理与输出。一次循环结束后,判断 Zone 是否达到最大,如果未达到,从下一个 Zone 开始相同的流程,如果已达到,则跳出循环。如果是非结构化网格,就读取其 Section 的数量,之后从第 1 个 Section 开始循环。读取该 Section 的网格类型,然后根据条件语句进入该网格类型下的数据读取。在 1 个 Section 读取结

束后,判断是否到达最大的 Section,如果未到达,继续进行下 1 个 Section 的读取,如果已到达,则跳出循环。最后将所有数据合并输出为 dat 格式的文件。

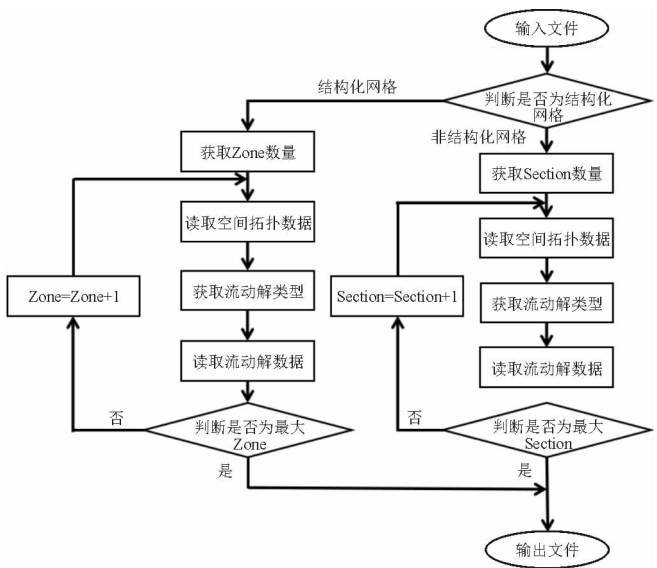


图 8 读取文件基本流程示意图
Fig.8 Flow chart of reading files

用户可以首先输入文件名,来打开指定的 CGNS 文件,在打开后,可以点击“文件主要信息”,来获取文件网格类型、其中每个块的类型、名称、网格数量等详细信息。点击“检测存在的物理数据”可以检测到文件中存在的物理数据,然后选择具体要输出的物理数据。此外,不仅可以输出所有的文件数据,还可以输出指定区域的数据,以满足用户的个性化需求。最后,可将数据输出为 dat 文件,以供三维显示软件显示与后处理。

3.2 三维显示模块

三维显示模块的功能是能够正确识别所生成的数据文件,并且将其进行显示。图 9 为三维显示软件界面示意图。该三维显示软件是基于 VTK^[23] 所开发的后处理软件。

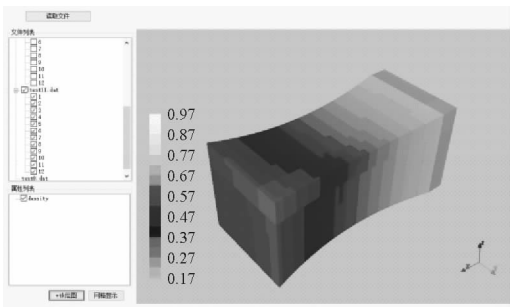
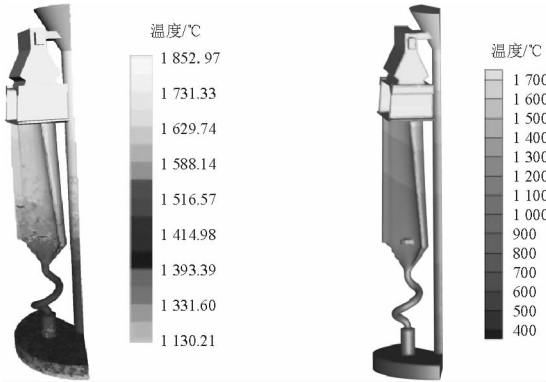


图 9 三维显示软件运行示意图
Fig.9 Schematic diagram of 3D display software operation

3.3 文件读取功能测试

将高温合金单晶叶片模拟结果文件导入程序后,首先检测网格类型,检测出其为非结构化网格。再检测所包含的变量类别,可以发现其包含了 x 、 y 、 z 坐标数据与温度场数据。然后检测文件的区域数量,并分别检测每个区域内的顶点数量与基本元素数量。读取每个网格的网格类型可知,该文件中包含多种类型网格。因此,每个不同的区域都要选择不同的读取策略,依次判断并读取。高温合金单晶叶片模拟结果见图 10。可以看出,三维显示结果与 tecplot 软件显示结果一致。



(a) 在三维显示模块中的结果图 (b) 在 tecplot 软件中的结果图
图 10 高温合金单晶叶片模拟结果
Fig.10 Simulation results of superalloy single crystal blades

当读取不同时刻的 CGNS 文件时,就可以得到该涡轮叶片铸件定向凝固过程中的温度变化过程。图 11

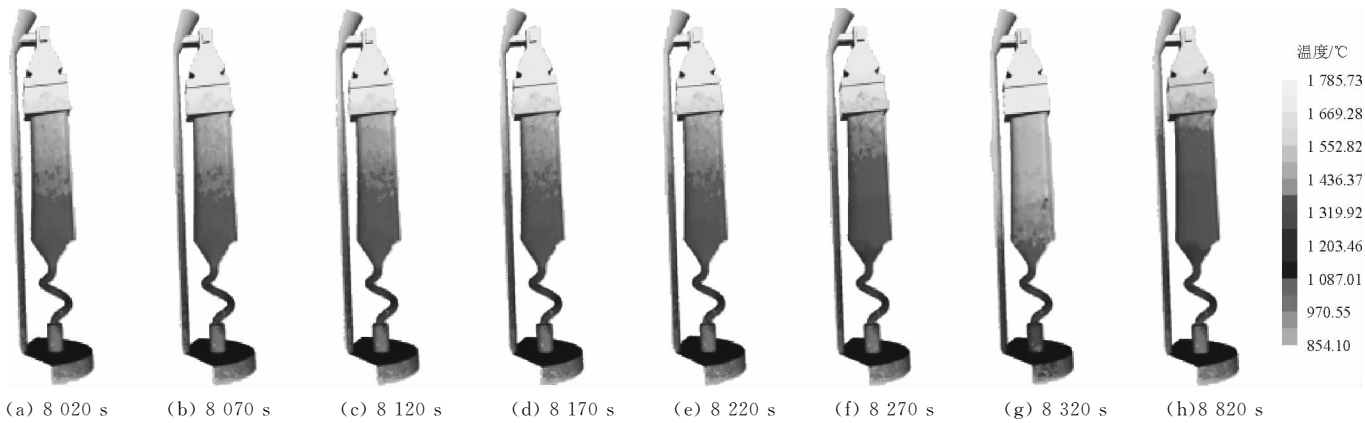


图 11 涡轮叶片铸件定向凝固过程中 8 个时刻的温度变化示意图
Fig.11 Schematic diagram of temperature variation of turbine blade castings at different moments during directional solidification

为该铸件定向凝固过程中 8 个时刻的温度变化示意图。

4 结 论

解析了 CGNS 标准的底层结构,提出了针对 CGNS 文件中结构化网格数据与非结构化网格数据的不同读取方法,基于华铸 CAE,开发了数据读取软件,实现了文件读取与三维显示。

参 考 文 献

- [1] 黄伟明,唐玉龙,宁林祥,等. MAC 方法及其在铸造充型模拟中的应用[J]. 铸造技术, 2020, 41(10): 930-934.
- [2] MCKEE S, TOMÉ M F, FERREIRA V G, et al. The MAC method[J]. Computers & Fluids, 2008, 37(8): 907-930.
- [3] LIEN F S. A pressure-based unstructured grid method for all-speed flows[J]. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 2000, 33(3): 355-374.
- [4] POIRIER D, ALLMARAS S, MCCARTHY D, et al. The CGNS System[A]. 29th AIAA, Fluid Dynamics Conference[C]. American, 1998.
- [5] POIRIER D, BUSH R, COSNER R, et al. Advances in the CGNS Database Standard for Aerodynamics and CFD[A]. 38th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit[C]. American, 2000.
- [6] LEGENSKY S, EDWARDS D, BUSH R, et al. CFD General Notation System (CGNS)-Status and Future Directions[A]. 40th AIAA Aerospace Sciences Meeting & Exhibit[C]. American, 2002.
- [7] RUMSEY C, WEDAN B, HAUSER T, et al. Recent Updates to the CFD General Notation System(CGNS)[A]. 50th AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition[C]. American, 2012.
- [8] POINOT M, RUMSEY C L, MANI M. Impact of CGNS on CFD Workflow[A]. 34th AIAA Fluid Dynamics Conference and Exhibit[C]. American, 2004.
- [9] PAKALAPATI P, HAUSER T. Benchmarking Parallel I/O Performance for Computational Fluid Dynamics Applications[A]. 43rd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit[C]. American, 2005.
- [10] 梁益华, 白文, 朱朝, 等. CFD 数据交换标准及其软件实现[J]. 航空计算技术, 2002, 32(2): 15-19.
- [11] IEPAN H, GUIBAULT F, VALLET M, et al. CGNS Based Data Model for Turbine Blade Optimization[A]. 43rd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit[C]. American, 2005.
- [12] POINOT M, MONTREUIL E, HENAU E. Checking CFD Interfaces in a Multi-Disciplinary Workflow with an XML/CGNS Compiler[A]. 43rd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit[C]. American, 2005.
- [13] LEI G D, LIU G, MING P, et al. CGNS Data Format used for a 2D/3D Finite Volume Unstructured Grid Flow Solver[A]. First International Multi-Symposiums on Computer and Computational Sciences(IMSCCS'06)[C]. American, 2006.
- [14] 郝嘉. 基于 CGNS 的航空 CFD 计算数据自动处理技术的设计与实现[D]. 北京: 北京交通大学, 2013.
- [15] BENOIT C, PÉRON S, LANDIER S. Cassiopee: a CFD pre-and post-processing tool[J]. Aerospace Science and Technology, 2015, 45(1): 272-283.
- [16] PERRELL E, POWER G, ROBINSON C. A Modular Conjugate Heat Transfer Capability for the Wind-US CFD Code[A]. 48th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition[C]. American, 2010.
- [17] BORM O, BALASSA B, BARTHMES S, et al. Demonstration of an Aerodynamic Design Process for Turbomachines Using Open Source Software Tools[A]. Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air[C]. American, 2010.
- [18] CHEN L W, LI J Y, ZHAO Y H, et al. Numerical simulation and optimization of indirect squeeze casting process[J]. Engineered Science, 2020, 13(2): 65-70.
- [19] 李静怡, 赵宇宏, 陈利文, 等. 镁合金隔板铸件低压铸造工艺数值模拟[J]. 特种铸造及有色合金, 2021, 41(5): 588-592.
- [20] 顾涛, 张帅鑫, 刘化峰, 等. 转子支架铸造工艺设计与数值模拟[J]. 特种铸造及有色合金, 2020, 40(6): 629-632.
- [21] 黄进, 张勇佳, 殷亚军, 等. 基于华铸 CAE 的航空发动机铝合金传动件铸造数值模拟与工艺优化[J]. 特种铸造及有色合金, 2019, 39(8): 846-849.
- [22] 张弦弦, 朱全松. 基于 MFC 软件界面设计的视觉优化[J]. 兵工自动化, 2016, 35(12): 38-39.
- [23] 漆晓峰, 陆鑫达. 基于 VTK 的 CFD 数据可视化 Grid Service 设计和实现[J]. 计算机工程, 2005, 31(3): 195-197.

(编辑:刘晨辉)

空客公司拟首次 3D 打印航空器起落架零部件

据英国 aero-mag 网报道,近日,英国航空航天技术研究所(ATI)启动名为“起落架工业突破(I-Break)”的研发项目,投资 2 250 万英镑。该项目由空中客车公司牵头,参与工作的有 15 家企业、研究机构和院校,将首次在全世界 3D 打印航空器起落架零部件。

I-Break 项目由 4 个工作包组成:WAAM3D 公司负责研发电弧 3D 打印生产速度提高的工业化、高完整性结构应用的微观结构和力学性能控制、在线无损探伤的产业化、在升级版 RoboWAAM 系统上生产相应尺寸和复杂程度的原型零部件;克兰菲尔德大学主要负责研究新的 WAAM 工艺和解决方案,并对关键合金的沉积进行验证;斯特拉斯克莱德大学主要负责创新的在线探伤技术;PeakNDT 公司是一家高性能常规和相控阵超声仪器制造企业,也负责在线无损探伤技术研究。

采用 3D 打印工艺航空器起落架零部件,可以缩短航空器上市时间,提高产品质量,减少 20% 的二氧化碳排放,该项目研发工作计划将于 2026 年前完成。全世界航空器起落架零部件制造工艺将逐步从锻造转变到 3D 打印。

(摘自中国有色网)