

8-19-2021

Co-simulation of Parallel Computing of Disc Temperature Distributed Parameter System Cooling Rate Control

Shengdong Gao

School of Mechatronics Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

Yu Xin

School of Mechatronics Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Co-simulation of Parallel Computing of Disc Temperature Distributed Parameter System Cooling Rate Control

Abstract

Abstract: Aiming at the problem of large number of grids and long computation time in numerical simulation of complex engineering problems, combining the User-defined Function (UDF) parallel computing principle with UDP (User Datagram Protocol) communication in Fluent, *the data transfer of the parallel calculation between Fluent and the visual simulation tool (Simulink) is completed by embedding UDF and S function in UDP communication. And the parallel calculation and simulation platform of the disk and billet gas impingement jet quenching is built. The serial and parallel calculation of the same model are carried out, and the comparative analysis of the numerical simulation results is completed. The reliability and effectiveness of the parallel computing simulation platform are verified, which provides a way of thinking for numerical calculation of complex engineering problems.*

Keywords

parallel computing, co-simulation, Fluent, Simulink, gas impact jet quenching

Recommended Citation

Gao Shengdong, Yu Xin. Co-simulation of Parallel Computing of Disc Temperature Distributed Parameter System Cooling Rate Control[J]. Journal of System Simulation, 2021, 33(8): 1839-1845.

盘坯温度分布参数系统冷速控制并行联合仿真

高胜东, 于鑫

(哈尔滨工业大学 机电工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 针对复杂工程问题数值模拟中网格数量多、计算耗时长的问题, 结合流体仿真软件(Fluent)中UDF(User-defined Function)并行计算原理与UDP(User Datagram Protocol)通讯, 通过嵌入UDP通讯的UDF与S函数完成了Fluent与可视化仿真工具(Simulink)之间并行计算的数据的传递, 搭建了盘坯气体冲击射流淬火并行计算仿真平台, 并对同一模型分别进行了串行与并行计算, 完成了数值模拟结果对比分析, 验证了并行计算仿真平台的可靠性和有效性, 可为复杂工程问题的数值计算提供思路。

关键词: 并行计算; 联合仿真; 流体仿真软件; 可视化仿真工具; 气体冲击射流淬火

中图分类号: TP391.9 文献标志码: A 文章编号: 1004-731X(2021)08-1839-07

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.20-0280

Co-simulation of Parallel Computing of Disc Temperature Distributed Parameter System Cooling Rate Control

Gao Shengdong, Yu Xin

(School of Mechatronics Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: Aiming at the problem of large number of grids and long computation time in numerical simulation of complex engineering problems, combining the User-defined Function (UDF) parallel computing principle with UDP (User Datagram Protocol) communication in Fluent, the data transfer of the parallel calculation between Fluent and the visual simulation tool (Simulink) is completed by embedding UDF and S function in UDP communication. And the parallel calculation and simulation platform of the disk and billet gas impingement jet quenching is built. The serial and parallel calculation of the same model are carried out, and the comparative analysis of the numerical simulation results is completed. The reliability and effectiveness of the parallel computing simulation platform are verified, which provides a way of thinking for numerical calculation of complex engineering problems.

Keywords: parallel computing; co-simulation; Fluent; Simulink; gas impact jet quenching

引言

随着工业的不断发展, 对金属热处理的要求也在不断提高, 传统的油淬、水淬已经无法满足零件热处理过程中精确控温的要求, 为此基于高速气体冲击射流的气体淬火方式应运而生。它是采用高速气体射流直接冲击零件毛坯表面的方式进行冷却, 可通过实时改变零件表面不同位置气体冲击射流

的流速, 来控制零件毛坯内部关键点的温降速率, 进而对零件毛坯的金相组织及性能进行控制。

从经济成本上考虑不能通过多次的试验获取数据信息, 而建模仿真作为实验研究的重要一环, 能够做到降低成本的同时得到可靠的数据。气体冲击射流换热过程的盘坯温度场是一个典型的分布参数系统, 具有非线性以及时滞性。与集中参数系统不同, 分布参数系统在状态空间具有无穷维度,

收稿日期: 2020-05-29 修回日期: 2020-09-03

第一作者: 高胜东(1973-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为增材制造技术、熔体雾化技术及传热传质技术等。E-mail: sdgao@hit.edu.cn

很难采用解析法来进行求解。数值模拟的方法则成为这一问题的重要求解方法。Fluent 是常用的流体仿真软件, Matlab/Simulink 在控制系统仿真中十分出色, 盘坯温度场气冷过程控制的计算需要以上 2 个软件的协同仿真, 计算过程中 2 个软件需进行实时的数据交换。为保证计算的准确性, 网格数量需要足够多, 考虑到联合仿真的效率, 并提高 CPU 的利用率, Fluent 在计算时需采用并行计算的方式。

在诸多研究领域对计算机计算能力的需求越来越高, 求解问题也日益复杂化^[1], 单线程计算的计算能力已经远不能满足研究需求。任立波^[2]基于 Fluent 建立 CFD-DEM(Computational Fluid Dynamics-Digital Elevation Model)耦合并行算法求解了稠密颗粒两相流问题。金鑫禹^[3]基于 SIMPLER 算法建立了 CFD-DEM 并行计算耦合软件并对比了串行与并行计算的结果, 验证了其可行性。纪纬^[4]基于 GPU(Graphics Processing Unit)并行计算进行了三维非稳态温度场求解, 对网格数量较多的模型有着良好的加速效果。姜悦宁等^[5]对比了串行和并行计算的机翼 CFD 数值模拟结果, 得到了针对无人机整机的高效并行计算方法。Ninshu Ma^[6]通过 ACEXP(Accelerated Explicit Method)和 GPU 并行计算, 用 45 h 计算了 9 个钢板和 26 条焊缝的模型中的焊接变形和残余应力。

许多学者做过针对 Fluent 和 Simulink 的联合仿真研究。鲍文等^[7]基于 Winsock 网络编程实现了 Fluent 和 Matlab 的数据交流, 并建立了分布参数系统闭环控制快速原型的仿真平台。贺明艳等^[8]利用 Simulink 中 S 函数与 Fluent 的日志文件开发了两软件的接口, 并建立了燃料电池模拟系统的三维协同仿真平台。赵建军等^[9]为解决 Modelica 在建立气体轴承力学模型时遇到的问题, 基于 Winsock 通信技术开发了 Simulink 和 Fluent 的多个求解器的联合仿真接口。

本文结合 Fluent 和 Simulink 各自仿真的优点,

利用 Winsock 通信原理和 Fluent 中 UDF(User-defined Function)的并行计算原理, 实现了 Simulink 和 Fluent 之间的并行仿真分析, 建立了盘坯零件高速气体冲击射流淬火控制过程的并行计算仿真平台。为网格数量较多、计算时间较长模型的数值模拟, 提供了仿真思路, 并提高了仿真效率。

1 基于 Fluent 与 Simulink 联合仿真的并行计算原理

1.1 联合仿真数据交互原理

Simulink 软件和 Fluent 软件都为客户预留了接口用于二次开发。Fluent 提供了用户自定义函数 UDF, 其是由用户编写的程序, 可以连接到 Fluent 中运行, 在求解过程中调用 Fluent 定义的宏进行边界条件的修改、定义材料属性等各种自定义操作。在 Simulink 中 S 函数为用户提供了二次开发接口, 这为 Fluent/Simulink 联合仿真的实现奠定了基础。

在网格数量较多模型的仿真计算中为了提高效率, 缩短仿真的时间, 应尽量减少数据文件的读写, 网络通信则能够为两软件提供高效稳定的数据传输。UDP(User Datagram Protocol)协议数据传输简单, 传输效率高, 在数据交互中有着广泛的应用。UDP 网络通信中的客户端和服务端无需经过连接, 服务器创建好套接字后, 把本地套接字的地址(IP 地址和本地端口)绑定到该套接字。可采用 `recvfrom` 接收来自客户端的数据, 也可以 `sendto` 发送数据给客户端, 最后关闭套接字即可; 客户端创建套接字后, 也可以调用 `sendto` 和 `recvfrom` 来做数据的收发。因此采用 UDF 和 S 函数中嵌入 UDP 通讯用于收发数据的形式可进行数据交互。通过嵌入 UDP 通讯的 UDF 实时提取 Fluent 计算中的盘坯温度数据并发送到 Simulink 中进行射流流速的实时控制, 然后 Simulink 通过嵌入的 UDP 的 S 函数将流速数据发送给 Fluent, UDF 接收数据并将得到的流速加载到边界条件上继续循环迭代计算。由于客户端不可以主动从服

务器接收数据, 服务器只有在接收到数据时才会保留客户端的地址信息, 所以 Fluent 在接收数据时为服务端, 发送数据时为客户端, 同理 Simulink 也是如此。协同仿真流程如图 1 所示。

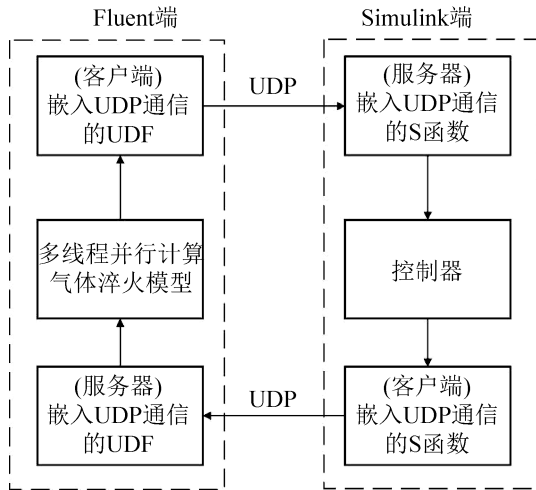


图 1 数据交互原理图

Fig. 1 Schematic diagram of data interaction

1.2 Fluent 的 UDF 并行计算原理

与串行计算不同, Fluent 并行计算是通过同时调用多个并行求解器来计算一个复杂的模型, 其包括单机并行和联机并行两种方式。并行计算的过程中, Fluent 会将计算域划为不同的分区, 并将每个分区的数据分配给不同的计算节点。每个计算节点会在自己的节点上执行相同的程序。主机进程自身不包含任何网格信息, 其主要作用在于从 Fluent 接受命令并传递给计算节点 0, 从而传递给其他计算节点。反之, 其他计算节点需要传递数据时也通过计算节点 0 收集, 并将自身的数据一同发送到主机节点^[10]。Fluent 并行计算命令传递结构图如图 2 所示, 图中箭头方向为数据和命令的传递方向, 在 UDF 的编译过程中可以使用不同的标识符对不同的节点进行界定, 以此来为不同的计算节点执行包括建立通讯、打开文件等命令, 为并行计算的接口建立提供帮助。

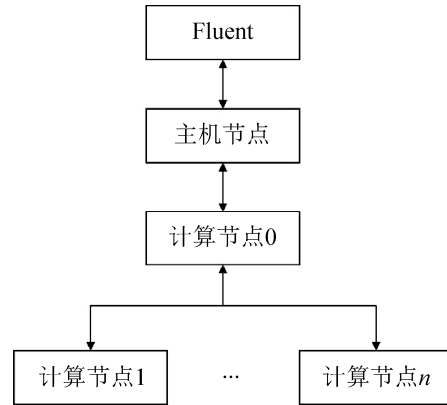


图 2 Fluent 并行计算命令传递结构图

Fig. 2 Structure chart of command transfer in fluent parallel computing

2 Fluent 和 Simulink 并行计算协同仿真的实现

2.1 基于嵌入 UDP 通讯的 S 函数的 Simulink 的接口实现

Simulink 在数据通讯的过程中, 要在服务器与客户端之间进行切换, 因此采用在控制器两端分别插入嵌入 UDP 通信的 S 函数的形式进行数据的收发, 数据的接收端绑定端口地址, 用于处理 Fluent 发送的数据。而数据的发送端为客户端, 无需绑定端口地址。并以此为基础按照 S 函数的编写格式, 嵌入 UDP 通讯。Socket 初始化部分需要写在 mdlStart 函数中, Sendto 和 Recvfrom 函数写在 mdlOutputs 函数中, 关闭套接字则写在 mdlTerminate 函数中。循环计算不断地与 Fluent 交换数据。编译好的 S 函数需要调用 MEX 命令编译生成动态链接库文件, Simulink 方可调用。

2.2 基于嵌入 UDP 通讯的 UDF 的 Fluent 的接口实现

UDF 可以用 C 语言和 Fluent 中定义的宏进行编译。由于进行 UDP 通讯, 所以采用编译型 UDF, 适合用来解决复杂的工程问题。在 UDF 中定义许多宏, 这些宏分别在 Fluent 循环计算的不同时间被调用。

UDF 在嵌入 UDP 通讯时,可以分为 3 步进行。首先对于 Socket 的初始化部分,可以调用在 Fluent 不参与迭代计算的宏进行处理。其次, Fluent 在接收数据时,作为服务器,需要绑定端口地址,处于阻塞状态直到接收客户端的数据。结合 Fluent 并行原理可知,并行计算中 UDF 分为主机节点和若干计算节点,可以调用不同的标识符使不同的节点运行不同的程序。为避免端口地址重复绑定所造成的端口占用,需要用主机节点标识符,将端口地址绑定在主机节点上进行计算。在绑定端口地址时,采用参与 Fluent 循环计算的宏来绑定端口地址,会造成端口占用的错误,可采用端口地址加入计数器的方式来解决,且端口地址的绑定需在接收数据之前完成。最后,采用 Fluent 中 monitor 进行温度的提取并调用 Sendto 发送给 Simulink 服务器,并关闭套接字。结合前述创建的数据交互接口,绘制并行计算联合仿真的流程图,如图 3 所示。

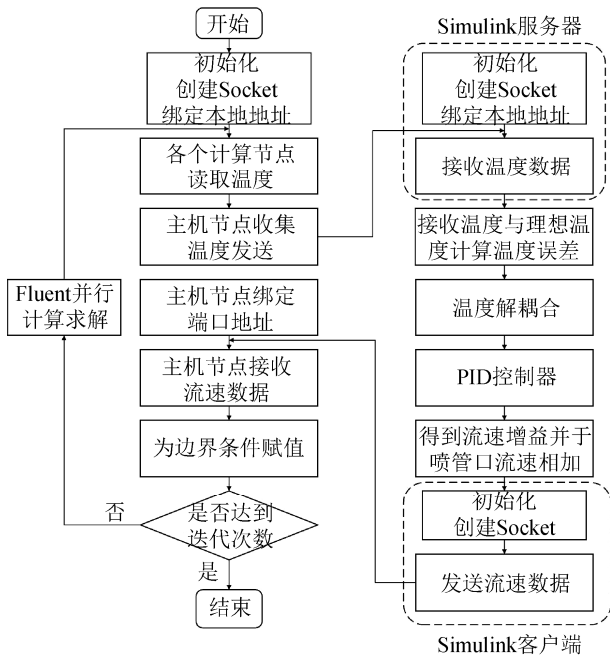


图 3 并行联合仿真数据传递流程

Fig. 3 Data transfer process of parallel co-simulation

3 串行与并行数值仿真

本文主要针对联合仿真并行计算的建立方法进行讨论,建立盘坯零件气体冲击射流淬火仿真的

模型,如图 4 所示,并以此仿真模型为基础讨论 Fluent/Simulink 联合仿真串行、并行的计算效率和可靠性。

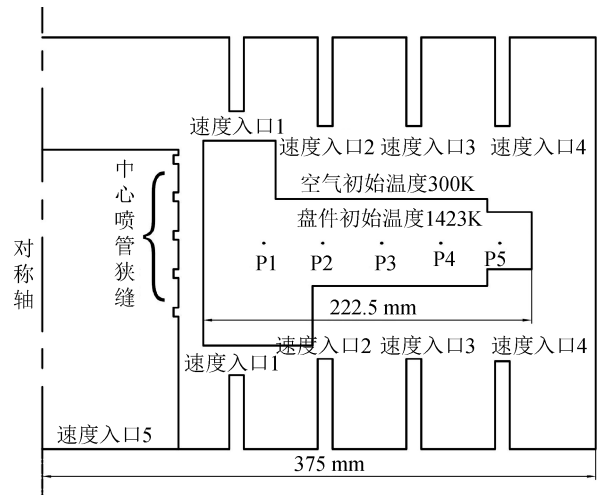


图 4 气体冲击射流淬火仿真模型(P1-P5 为温度监测点)

Fig. 4 Simulation model of gas impinging jet quenching (P1-P5 is the temperature monitoring point)

设置 FLUENT 仿真初始条件:各速度入口的射流初始速度,盘坯初始温度,射流气体的初始温度。仿真时,通过对监测点 P1-P5 的温度监测,计算出各监测点的实时降温速率,与预设值对比,然后不断地修改各速度入口的流速,进而来控制盘坯的冷却过程。

在 Simulink 中搭建 PID(Proportion Integral Differential)控制器和用于收发数据的 S 函数模块。联合仿真控制结构图如图 5 所示,由于各个监测点间存在耦合关系,需要对其进行解耦。并分别采用 PID 控制的方式改变 Fluent 中的边界条件,即射流气体的流速,再提取监测点温度,以实现闭环控制。

基于上述搭建的气体淬火仿真平台,分别对仿真模型进行了串行和并行的计算,并对仿真的耗时进行了对比。采用的计算机为戴尔工作站,物理内存为 256 GB, CPU 核心数为 20 核。进行串行和并行计算时,采用的网格数量及其它边界条件均一致。仿真参数及仿真耗时如表 1 所示,可以看出在仿真过程的耗时上,串行计算要远远大于并行计算。

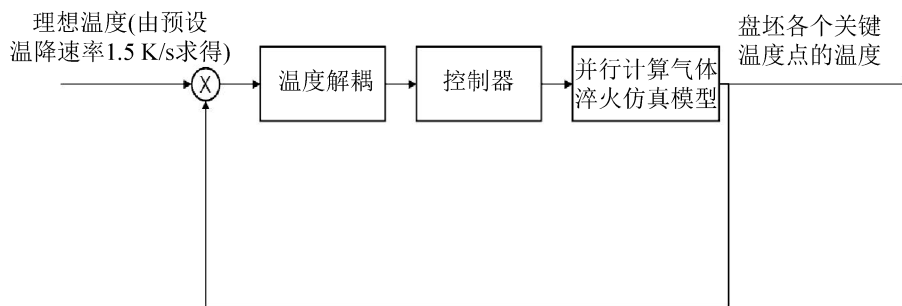


图 5 联合仿真控制结构图

Fig. 5 Co-Simulation control structure diagram

表 1 联合仿真串行计算与并行计算耗时对比

Tab. 1 Time consuming comparison of serial and parallel co-simulation

类别	网格数量	仿真时间/s	线程数	联合仿真总耗时/min
串行	165 395	180	2	947
并行	165 395	180	18	69

为更加直观的观测计算结果,当 Fluent 设置为并行计算后,盘件在仿真时间进行到 50 s 时的温度分布如图 6 所示。

为验证并行计算的结果的准确性,图 7 中给出了各个监测点串行计算与并行计算各监测点的温降曲线的对比图。

从图 7 中可以看出,串行计算与并行计算中温降速率趋势一致,但存在最大为 60 K 的误差,这是由于 Fluent 在分区并行计算过程中,区域之间的数据交换和参与计算的顺序存在随机性,从而导致结果出现了误差^[11]。从图 8 串行与并行计算结果中可以看出,串行和并行计算各个监测点的温降速率基本也趋于一致。

图 9 为 180 s 时盘坯剖面温度云图,其温度分布也基本一致。由于在盘坯的气体冲击射流淬火过程中,盘坯的温度场是典型的具有时滞性的分布参数系统,而 PID 控制对其的控制效果有限,后续的研究中需通过多次计算来进行参数的调节,从而搭建更加有效的控制器。而并行计算的实现可以大大的降低盘坯气体冲击射流淬火过程的仿真周期,为盘坯高速气体射流淬火过程的控制奠定基础。

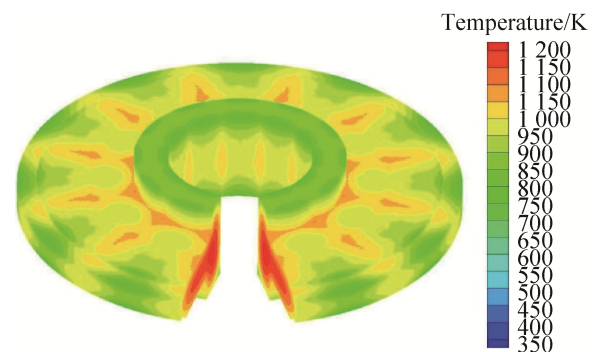
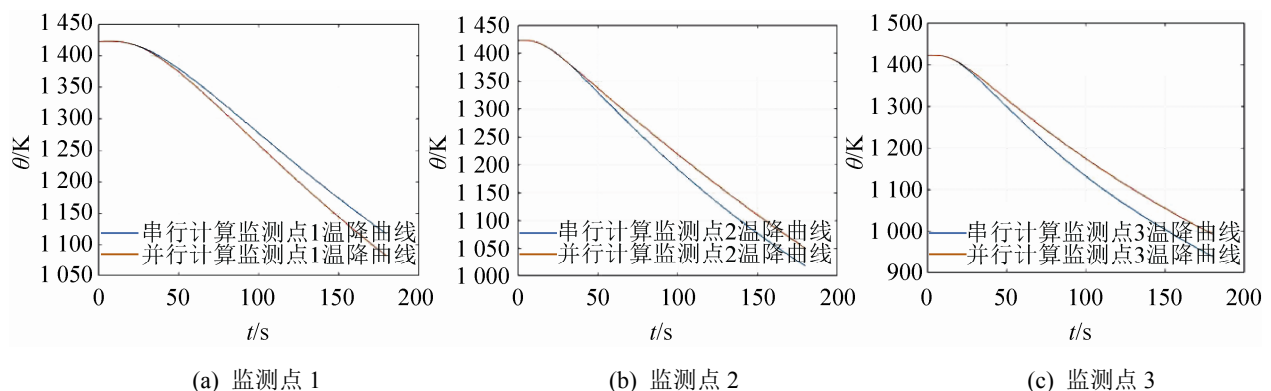


图 6 盘件的三维温度云图

Fig. 6 Three dimensional temperature cloud chart of disk



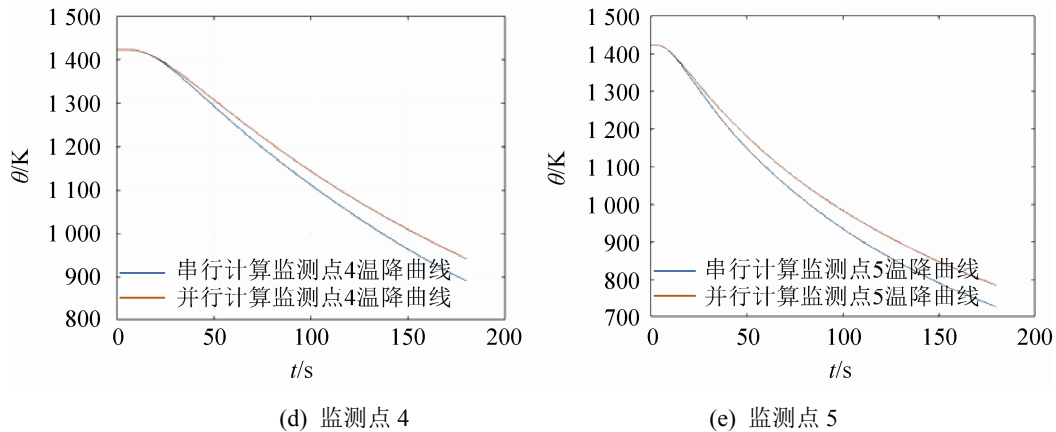


图7 各监测点串行计算与并行计算的温降曲线的对比

Fig. 7 Comparison diagram of temperature drop curves of serial and parallel calculation for each monitoring point

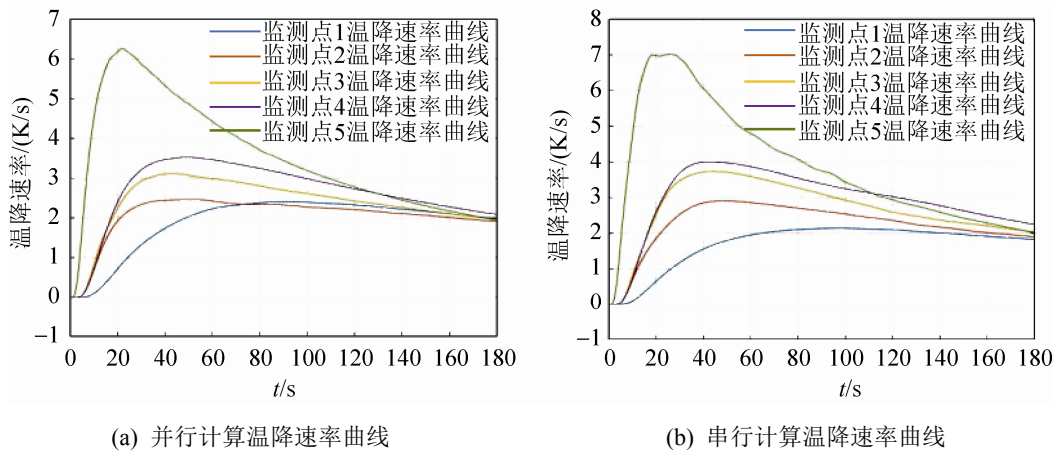


图8 串行计算与并行计算各监测点温降速率对比

Fig. 8 Comparison of temperature drop rate of monitoring points by serial and parallel calculation

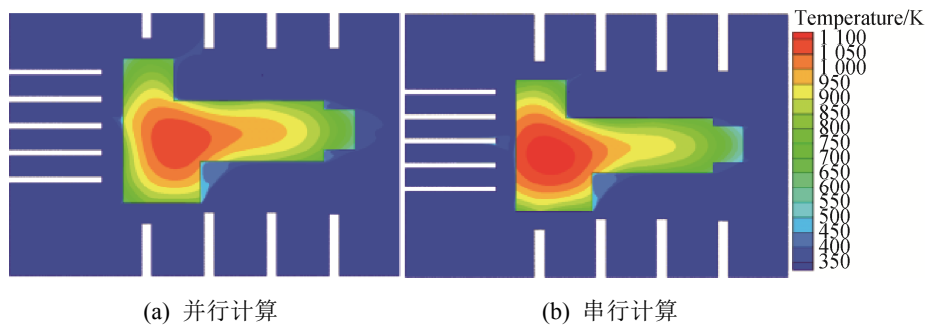


图9 串行计算与并行计算180 s时盘坯剖面温度云图

Fig. 9 Temperature cloud chart of 180 s in serial and parallel computing

4 结论

综上所述可以看出, Fluent/Simulink 联合仿真并行求解方法, 对于网格数量较多、需计算时间较长模型的联合仿真计算, 可以在一定程度上缩短仿真计算时间, 提高仿真效率, 同时保证仿真计算的

准确性。这一方法可为需采集大量理论计算数据的复杂工程问题提供更快速的解决方案。

参考文献:

- [1] 徐艺峰, 李健, 王杰, 等. 基于天河二号超算的网格无关性及并行研究[J]. 计算机工程与设计, 2018,

- 39(7): 2036-2041.
Xu Yifeng, Li Jian, Wang Jie, et al. Grid Independence and Parallel Study Based on Tianhe II Supercomputing[J]. Computer Engineering and Design, 2018, 39(7): 2036-2041.
- [2] 任立波. 稠密颗粒两相流的 CFD-DEM 耦合并行算法及数值模拟[D]. 济南: 山东大学, 2015.
Ren Libo. A Parallel CFD-DEM Coupling Model and Numerical Simulation of Dense Particulate Two-phase Flows[D]. Jinan: Shandong University, 2015.
- [3] 金鑫禹. 基于区域分解法的 CFD-DEM 耦合软件改进[D]. 长春: 吉林大学, 2015.
Jin Xinyu. The Improvement of Coupling Software of CFD-DEM Based on the Domain Decomposition Method[D]. Changchun: Jilin University, 2015.
- [4] 纪纬. 基于 GPU 并行加速的高速飞行目标实时红外仿真技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
Ji Wei. GPU Accelerated Real-time Infrared Characteristic Simulation of High-speed Flying Object[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015.
- [5] 姜悦宁, 贾宏光, 厉明. 基于多核并行计算的无人机 CFD 数值模拟[J]. 计算机工程与应用, 2018, 54(7): 221-225.
Jiang Yuening, Jia Hongguang, Li Ming. CFD Numerical Simulation of Unmanned Aerial Vehicle based on Multi-core Parallel Computation[J]. Computer Engineering and Applications, 2018, 54(7): 221-225.
- [6] Ma N. An Accelerated Explicit Method with GPU Parallel Computing for Thermal Stress and Welding Deformation of Large Structure Models[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology (S0268-3768), 2016, 87: 2195-2211.
- [7] 鲍文, 李伟鹏, 常军涛, 等. 基于 FLUENT/MATLAB 接口的分布参数系统闭环控制仿真[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(11): 2851-2854.
Bao Wen, Li Weipeng, Chang Juntao, et al. Closed-loop Control Simulation Technology of Distributed Parameter System Based on FLUENT/MATLAB Interface[J]. Journal of System Simulation, 2008, 20(11): 2851-2854.
- [8] 贺明艳, 周苏, 黄自萍, 等. 基于 SIMULINK/FLUENT 的 PEMFC 系统的协同仿真[J]. 系统仿真学报, 2011, 23(1): 38-43.
He Mingyan, Zhou Su, Huang Ziping, et al. SIMULINK/FLUENT Collaborative Simulation for PEM Fuel Cells[J]. Journal of System Simulation, 2011, 23(1): 38-43.
- [9] 赵建军, 骆雪芹. 基于 Modelica 技术与 Fluent 的气浮运动平台联合仿真[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2014, (5): 96-99.
Zhao Jianjun, Luo Xueqin. Co-Simulation of Ultra-precision Motion Stage Based on Modelica and Fluent[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2014, (5): 96-99.
- [10] FLUENT 6.2 UDF Manual[Z]. Fluent Inc.2005.1: 1.12-1.14. <http://www.ansys.com>.
- [11] 吕振华, 刘赛. 枪弹穿甲过程仿真的有限元接触模型与分区并行计算误差特性[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2017, 57(5): 483-490.
Lü Zhenhua, Liu Sai. Finite Element Contact Modeling Method and Error Characteristics of Partitioned Parallel Computations for Bullet Penetration Simulations[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology ed, 2017, 57(5): 483-490.