



计算机应用研究
Application Research of Computers
ISSN 1001-3695, CN 51-1196/TP

《计算机应用研究》网络首发论文

题目: 面向国产超算平台的通用能源管网仿真计算模型
作者: 韩璞, 商建东, 薛飞, 谢景明, 王洪生, 王海
DOI: 10.19734/j.issn.1001-3695.2023.06.0299
收稿日期: 2023-06-20
网络首发日期: 2023-11-17
引用格式: 韩璞, 商建东, 薛飞, 谢景明, 王洪生, 王海. 面向国产超算平台的通用能源管网仿真计算模型[J/OL]. 计算机应用研究.
<https://doi.org/10.19734/j.issn.1001-3695.2023.06.0299>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

面向国产超算平台的通用能源管网仿真计算模型*

韩璞^{1,2,5}, 商建东^{1,2†}, 薛飞³, 谢景明², 王洪生², 王海⁴

(1. 郑州大学 计算机与人工智能学院, 郑州 450001; 2. 国家超级计算郑州中心, 郑州 450001; 3. 河南湃孚信息科技有限公司, 郑州 450001; 4. 同济大学 机械工程学院, 上海 200092; 5. 南阳理工学院 信息工程学院, 河南 南阳 473004)

摘要:为实现城市能源管网仿真软件的自主可控,基于国产异构高性能计算机“嵩山”超级计算平台,提出一种通用的城市能源管网仿真计算模型。通过优化管网中“非管”组件模型,提高了计算模型对国产异构并行计算机系统的适配性;将不同管网组件的计算过程进行封装,弱化了网络组件在仿真计算过程的依赖性,提升模型在工程实现上的可并行性。供水、燃气和热力三种场景的并行仿真实验,证明了计算模型在解决城市能源供给网络的仿真计算上具有一定的普适性;通过管网实测数据与仿真模型中模拟数据对比结果表明仿真管网压力的误差率在4%以下,其温度的误差率低于2%,同时也说明了提出的管网仿真计算模型在国产超算平台上具有良好的计算通用性。

关键词: 异构计算; 能源管网; 仿真模型; 流体网络; 并行计算**中图分类号:** TP308 **doi:** 10.19734/j.issn.1001-3695.2023.06.0299Universal computational model for energy supply network simulation
based on domestic supercomputer systemHan Pu^{1,2,5}, Shang Jiandong^{1,2†}, Xue Fei³, Xie Jingming², Wang Hongsheng², Wang Hai⁴

(1. School of Computer & Artificial Intelligence, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. National Supercomputing Center in Zhengzhou, Zhengzhou 450001, China; 3. Henan Paifu Information Technology Co., Ltd, Zhengzhou 450001, China; 4. School of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 5. School of Information Engineering, Nanyang Institute of Technology, Nanyang 473004, China)

Abstract: In order to realize the independent and controllable simulation software of urban energy pipeline network, this paper proposes a universal urban energy pipe network simulation calculation model based on the domestic heterogeneous high-performance computer "Songshan" supercomputing platform. It enhances the adaptability to domestic heterogeneous parallel computer systems by optimizing the model of the non-pipe component and simplifying its input and output parameters. Then, it encapsulates the calculation process of different pipe network components, which can reduce the computational dependency of each connected component in the simulation calculation process and improve the parallelism of the engineering implementation of the calculation model. Finally, it also proposes a parallel system solution for energy pipe network simulation with this simulation calculation model. The generality of the suggested computational model has been proved by simulation tests of three separate real pipeline networks for urban water, gas, and heat. The simulated pressure has an error rate of less than 4% and its temperature has an error rate of less than 2%, according to comparisons between the actual network measurements and the simulated data in the network simulation model. These results also show that the pipe network simulation model proposed in the paper provides excellent computational versatility on domestic supercomputing platforms

Key words: heterogeneous computing; energy supply networks; simulation model; fluid networks; parallel computing

0 引言

能源管道网络是现代城市基础设施中重要的组成部分,人们借助这种网络获取所需的水、燃气等能源物质^[1],但随着城市规模的不断扩张,能源管网的规模和形式也愈发庞大

和复杂,对这种隐匿于地下城市“动脉”的管理和维护工作也变得相当困难^[2]。通过仿真技术构建能源供给网络数值模型,为能源供应商们提供了一种高效的管网运行与监测手段^[3~5],目前较为流行的仿真工具多为一些国外商业软件^[6],如 SynerGEE^[7]、ATMOS SIM^[8]等。这些虽然软件系统能够实现

收稿日期: 2023-06-20; 修回日期: 2023-08-26 **基金项目:** 河南省重大科技专项(221100210600); 河南省重大科技专项(201400211000); 河南省重大科技专项(201400210100)

作者简介: 韩璞(1985-),男,河南南阳人,博士研究生,主要研究方向为流体数值仿真与高性能并行计算; 商建东(1967-),男,河南洛阳人(通信作者),国家超级计算郑州中心主任、教授,博导,博士,主要研究方向为高性能计算和计算优化(shangjiandong@zzu.edu.cn); 薛飞(1978-),男,河南郑州人,河南湃孚信息科技有限公司法人、技术总监,硕士,主要研究方向为管道流体数值仿真计算; 谢景明(1995-),男,河南南阳人,工程师,硕士,主要研究方向为高性能计算优化; 王洪生(1994-),男,山东滨州人,工程师,硕士,主要研究方向为先进编译技术、高性能计算; 王海(1976-),男,上海人,同济大学机械工程学院教师、副教授,博导,博士,主要研究方向为区域供热、城镇燃气输配。

对管道网络的建模、仿真,但它们具有一定的商业垄断性;另外,能源管网数据多数情况下属于涉密信息,长期将这些国外商业软件应用于国内能源供应领域,可能对国家能源安全产生一定的信息安全隐患,因此,设计和完善具有自主知识产权的能源管网仿真工具为维护国家和能源行业信息安全具有十分重要的意义。

为了突破国外商业软件的垄断和维护国家能源供应网络信息安全,国产化仿真系统软件也正在迎来巨大的发展。例如,在油气的长线传输仿真领域,以 RealPipe-Gas 为代表的天然气管网瞬态运行的通用仿真软件实现了天然气管道仿真技术的“自主可控”^[9]。然而,在能源管网仿真过程中,涉及大量的流体计算方程的求解^[10,11],这一过程需要耗费大量的计算资源辅助完成,传统计算机硬件在此类“计算密集型”的系统软件的性能提升方面存在很多限制^[5,12]。但高性能计算机和并行软件开发技术的发展,为提升管网仿真计算性能奠定了基础^[13]。杨周凡等人利用高性能计算中的异构计算方法在“嵩山”超级计算平台上证明了高性能计算机在管网仿真计算具有一定的优势^[14],然而,文献^[14]在“嵩山”计算机上仅针对城市供水管道网络,实现了管网的数值建模与仿真,其应用场景具有一定的局限性;同时实验中使用了非实际的供水场景算例,只完成仿真系统的计算性能方面的验证,也没有对仿真模型数值精度进行评价。

为了补足国产能源管网仿真软件短板和解决城市能源供给复杂场景的仿真计算问题,本文调研了城市多种能源供应网络仿真过程中的计算方法,结合国产超级计算平台这种异构硬件架构,在前期工作^[14]的基础上提出了一种适用于自来水、燃气和热力三种能源供给网络场景的通用能源管网仿真计算模型。该模型将网络中流体方程的求解与管网仿真系统逻辑分离,提高了模型的可拓展性;在王海等人提出的基于“网络元”的管网建模方法^[15]的基础上,通过重构管网组件类型,实现一种通用的管网仿真计算框架,增强了框架对异构计算平台的适应性。

在三种不同能源供给网络场景中,文中通过系统模拟的管网压力、温度数值与实测数据的对比结果表明:多数观测点处的仿真与实际仪器测量数值误差低于 5%,证明了仿真计算模型具有良好的实用性。

1 “嵩山”计算平台与异构并行计算

“嵩山”超级计算机是国产新一代具有自主知识产权的异构计算机集群,沿用当前主流的高性能计算机“CPU+GPU”硬件架构,对高计算密度的应用程序的性能提升具有良好的辅助作用^[16,17]。“嵩山”超级计算机部署于国家超级计算郑州中心,其理论峰值计算能力 100PFlops,存储容量 100PB^[18];单个计算节点采用“一拖四”(一颗 CPU 和四颗 DCU)模式配备。“嵩山”超级计算平台在提供强大计算能力的同时,也为国家高性能信息计算发展和行业领域信息安全提供了有效的战略保障。

DCU, 全称“Deep Compute Unit”,是海光信息技术股份有限公司自主研发的一款类 GPU 国产计算加速卡,与 CPU 共同构建高性能计算机的硬件架构,也是“嵩山”计算平台中主要的加速设备。DCU 具有独立的硬件体系架构,通过 PCI-E 总线与 CPU 相连,内部有多个 CU(Compute Unit)构成计算单元阵列,接受 CPU 的调度,但程序在 DCU 上的运行则是可以独立运行,这为应用程序的并行计算提供了硬件支撑。图 1 是“嵩山”超级计算平台中单个节点的硬件架构,整个硬

件体系中包含四个 DCU 卡,每个 DCU 卡的计算单元阵列中包含 60 个 CU,DCU 上的指令处理器协调计算资源的调度和任务分配^[19]。计算节点中的各计算组件通过 PCI-E 总线进行数据和指令传输,系统中的计算任务由 CPU 进行控制。

为了充分利用图 1 中计算资源,传统编码和程序运行方式需要针对这种硬件架构重新改写。在“嵩山”计算机上,由于其硬件架构的特殊性,需要使用 HIP+MPI 编程模式,其中 HIP 提供了与 DCU 交互的编程接口(如 DCU 内存分配、数据传输以及核函数的启动等),MPI 则是一种线程间的通信机制和接口函数库,用于协调并发执行的线程间的同步和数据共享。

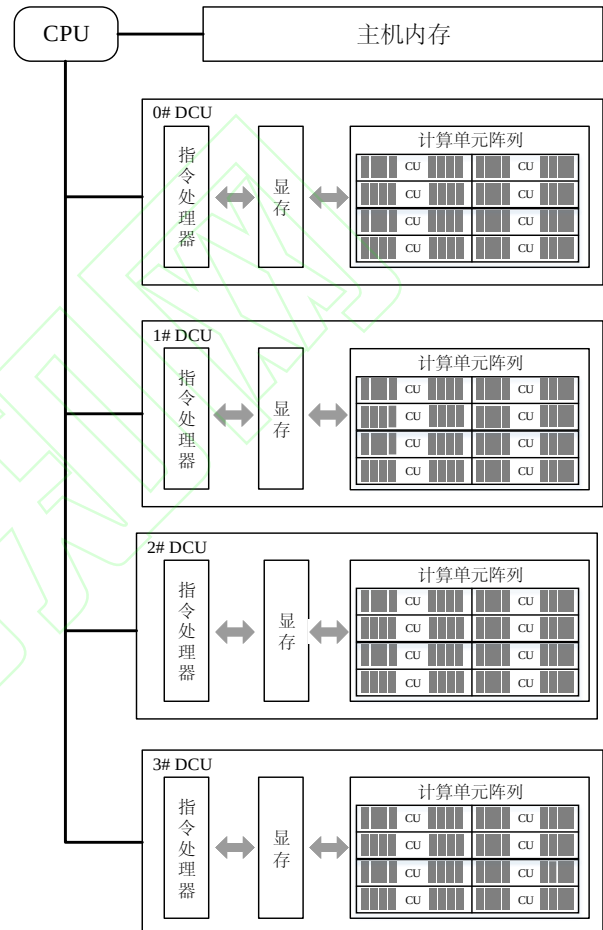


图 1 “嵩山”计算平台单节点硬件架构

Fig. 1 Architecture of a single computing device

与常规的 CUDA 编程模式^[20]相似,CPU+DCU 这种异构平台下的并行应用程序中代码被分成两部分:主机端代码和设备端代码。主机端的代码由 CPU 执行;而设备端代码则是以核函数的形式由 DCU 独立运行。如图 2 所示,左侧主机端代码中通过一系列 HIP 接口,调度和使用 DCU 上的计算资源,而右侧 DCU 中各个线程的执行,则是由预先设定的核函数负责。需要说明的是,图 2 右侧线程依据 HIP 编程模型的 thread-block-grid 组织结构,可以被组织成一维、二维或三维的模式,从而使得线程能够以类似空间结构的逻辑形式映射至不同的 CU 中,这与通用 GPU 编程方式相似,可以高效管理 DCU 中并发执行的线程。

2 管网模型与仿真系统计算架构

城市能源管网是一种结构复杂连通网络,网络由大量的输配管道、设备和连接件组成。因此,在构建管网仿真系统的过程中,需要对网络中的不同“组件”进行数值建模,并使

用以下三个控制方程进行描述。

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho\omega)}{\partial x} = 0 \\ \frac{\partial(\rho\omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho\omega\omega)}{\partial x} + \frac{\partial p}{\partial x} = -\frac{\lambda}{2} \frac{p\omega|\omega|}{d} - \rho g \sin \theta \\ \frac{\partial}{\partial t} \left[\left(e + \frac{\omega^2}{2} + gs \right) \rho A \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(h + \frac{\omega^2}{2} + gs \right) \rho \omega A \right] = -q \rho \omega A \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中的控制方程在多数管道网络模型中有着广泛的应用, 它们分别是连续方程(continuity equation)、质量方程(momentum equation)和能量方程(energy equation)。其中, ρ 为能量流体物质的密度, ω 为流体流动的速度, t 为时间, x 为空间坐标, p 为压力, λ 为管道摩擦系数, d 为管道直径, g 为重力加速度, θ 为管道的倾斜角度, A 为管道的横截面积, e 为比内能, q 为流量。这三个方程分别代表物理管网输送的能源物质在质量、能量上遵循基本的物理定律, 它们的具体推导过程 P. Wang 在文献[21]中进行了详细的说明, 而本文主要在“嵩山”计算机上对能源管网的并行仿真计算模型进行研究, 因此对具体的流体控制方程不再赘述。

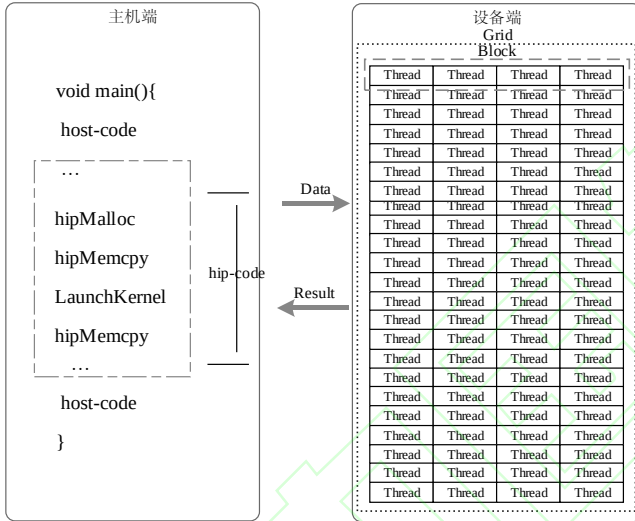


图2 异构编程模型

Fig. 2 Programming model for heterogeneous architecture

2.1 能源管网系统模型

文献[22~24]中已经证实基于“网络元”的对象化管网仿真建模方法的有效性。这些文献中, 将构成管网组件的各种模型实例化, 按照一定的计算顺序和逻辑完成整个能源管网的建模和水力方程的求解。再如王海等人也是采用这种方式, 基于传统计算机架构提出的 CAENAE-W^[25]系统, 实现了复杂水系统的仿真模拟。上述文献仅在纯 CPU 上进行了供水管网系统仿真模型的构建与验证工作, 受制于 CPU 硬件架构的计算能力有限, 上述系统模型无法对实际工业环境下多应用场景、大规模的能源管网系统实现大规模的仿真模拟。本文利用国产高性能计算集群算力优势, 结合并行计算、异构计算技术, 构建了多场景能源管网的大规模仿真计算模型, 有效拓展能源管网仿真软件在国产大科学装置上的应用。

文中将管网中的组件分成“管道”和“非管”两种组件, 其中管道采用了上述文献相同的模型和流体控制方程(式(1)), 使用一个包含管道的输入、输出、长度、倾斜夹角、粗糙度、压力、温度等参数的元组表示, 这些参数构成了管道模型的质量、动量和能量守恒方程^[26,27], 对于这些方程的求解计算需要耗费大量的计算资源, 这也是在管网仿真计算过程中采用并行计算方式的必要性; “非管”组件在仿真计算的过程中,

主要用于管道仿真结果的校验, 但由于其种类的多样性, 文中对其进行了简化。

图3根据管网拓扑图中节点间的关系, 简化了管网中“非管”组件模型的输入和输出, 使用统一的三元组(in_flow , out_flow , cnt_flow)表示每一个非管组件, 其中 in_flow 和 out_flow 代表与该组件连接的流入与流出的管道, 而 cnt_flow 则是所有与该非管组件相连的管道数量。

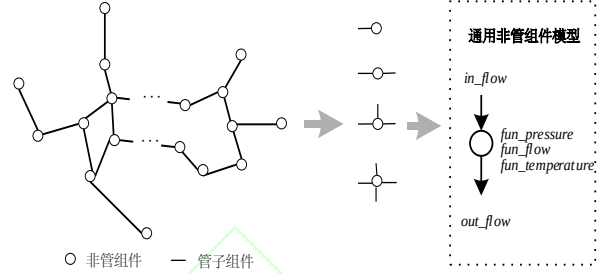


图3 通用非管模型

Fig. 3 Universal non-pipe model

根据管道模型中的流体控制方程, 非管组件模型在仿真计算过程中要对管子组件计算的结果进行校验, 其流量的约束条件如式(2)所示。

$$\begin{cases} \sum_{j=0}^{IN_CNT} m_{in,i}^k = \sum_{j=0}^{OUT_CNT} m_{out,j}^k \\ Degree(k) = IN_CNT + OUT_CNT \end{cases} \quad (2)$$

如果将整个管网拓扑视为一个无向连通图, 则式(2)中的 IN_CNT 和 OUT_CNT 分别代表第 k 个非管组件在拓扑图中的“出度”和“入度”, 其流入的流量质量 $m_{in,i}^k$ 应该与流出的流量质量 $m_{out,j}^k$ 是守恒的, $Degree(k)$ 为图中第 k 个节点的度。而在非管模型中, 流体压力的约束条件如式(3)所示。

$$p_{in,i}^k - \delta p_{out,j}^k = 0 \quad (3)$$

其中, $p_{in,i}^k$ 为第 k 个非管组件第 i 个进口处的压力, 而 $p_{out,j}^k$ 则是第 k 个非管组件第 j 个出口处的压力; $i \in [1, IN_CNT]$, $j \in [1, OUT_CNT]$, $\delta > 0$ 。在式(3)中引入了非管组件功能分类参数 δ , 通常情况下, 非管组件不仅具有连通功能, 它们还可以对流量、压力等参数进行调节的作用, 例如阀门、调压阀、泵等设备。通过设定非负参数 δ 不同的取值, 可以标注非管组件在管网中的分类属性。例如, 当 $\delta=1$ 时, 该组件为普通的连接管件; 如果 $0 < \delta < 1$ 时, 该组件被标注为加压器等增压设备。

另外, 对于燃气(可压缩流体)供应网络、城市热力等场景的仿真系统中, 管道中的流体温度采用式(1)中第三个能量公式进行计算, 而为了简化管网仿真计算, 在非管元件处的温度约束条件可以假设为进出口两端的温度相等, 可以表示为式(4):

$$T_{in,i}^k = T_{out,j}^k \quad (4)$$

其中, T 为温度, 而 in , out , i , j 和 k 与式(3)所代表的含义相同。

2.2 能源管网仿真并行计算模型

文中将能源管网中管道和非管组件作为仿真的最小计算单元, 并且大量的管道和非管组件的数值计算是完全相同的, 因此管网模型的仿真过程非常适合并行化。

为了保证管网组件的并行计算过程中管子与非管组件间的数据依赖, 在并行方案中需要考虑数据的同步问题。在原有的串行仿真计算逻辑中, 引入数据同步机制, 使得串行的计算过程并行化, 便可以借助高性能计算机在并行计算方面

的优势, 实现整个管网仿真模型计算过程的并发执行。在文中提出的仿真计算模型中, 将管网组件的计算过程封装在各种对象数据类型, 利用图 3 中标准的输入、输出参数, 将彼此相关的计算过程模块化和独立化, 各个组件对象在计算过程中, 通过周期性的数据交换, 实现整个系统的数据同步计算。

如图 4 所示, DCU 线程队列承载管网系统中所有组件的数值计算任务, 它们可以在不同的 DCU 设备上并发执行, 并将各自的计算结果和中间变量保存在设备显存中, 而整个仿真系统逻辑则是由主机端 CPU 控制, 通过周期性的主机内存和设备显存间的数据交换, 实现计算过程中数据的同步操作。图中共享内存属于主机内存的一部分, 它相当于不同 DCU 间的共享数据的缓冲区, CPU 控制整个缓冲区中数据的读写和数据在 DCU 设备间的传输, 具体并行的过程实现将在下节进行详细讨论。

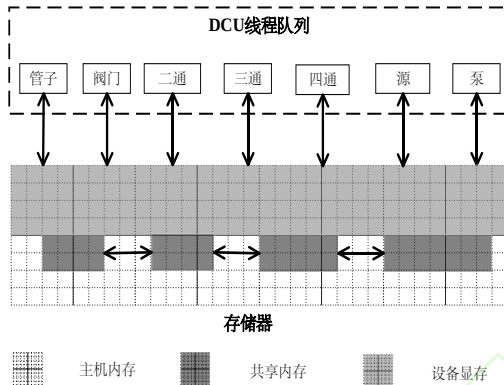


图 4 能源管网仿真计算架构

Fig. 4 Computational architecture for energy pipeline network simulation system

3 通用能源管网仿真系统模拟

上一节介绍了管网不同种类的组件数值模型, 通过对管网模型仿真计算过程的分析, 发现模型存在大量相同的管道和非管组件的数值计算, 因此在工程实现中可以将组件的数值计算过程进行统一封装, 使其可以独立运算, 这为整个在模拟系统的并发运行奠定基础。本节主要讨论管网仿真计算模型在工程应用的并行方案和具体实现。

3.1 管网组件的封装

为了便于图 4 中的计算架构在工程中的实施, 本文优化和重定义了能源管网模型中各类组件的数据类型, 并根据“网络元”的管网组件数值建模方法^[22-25], 将组件的属性、数值方程(式(1))的求解过程封装在不同的类中。如图 5 所示, 上层不同的管网仿真系统基于下层组件库的组件类型支撑, 在仿真系统的初始化阶段, 根据管网拓扑实例化为对象, 然后 DCU 中线程可以独立完成每个组件对象的数值求解。

该计算模型将仿真系统计算逻辑与组件模型的数值计算过程分开, 上层逻辑中可以以并发的形式完成各种组件的计算, 下层计算过程的可以根据不同的流体控制方程进行定制, 从而增强了计算模型的普适性。

3.2 仿真计算过程实现

管网仿真计算过程可以分成三个阶段: 初始化、系统模型的参数校验与修正、网络模型的构建。其中系统模型的参数校验与修正包含大量的流体控制方程的反复求解, 直至仿真系统模型的压力与流量误差收敛为止。整个并行算法的实现过程如算法 1 所示, 算法输入包含管网拓扑、管网仿真的边界条件、收敛误差等信息; 而管网模型则是整个算法的结果。

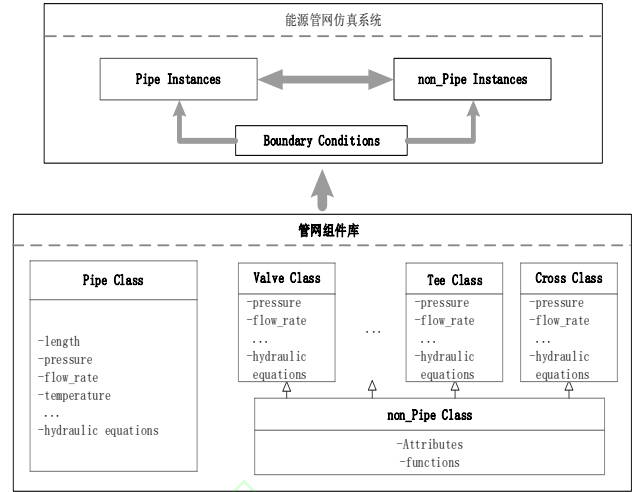


图 5 管网可编程组件

Fig. 5 Programmable components for energy network simulation

算法 1 能源管网仿真系统计算

输入: *conf_file*: 管网拓扑文件;

boundary_conditions: 仿真计算边界条件;

err_threshold: 精度误差阈值;

Max_times: 流体方程迭代求解次数上限。

输出: *Sim_sys*: 管网仿真模型。

- 导入网络拓扑文件 *conf_file*;
- 初始化网络组件到数组 *Compnets_array*;
- 设置计算边界条件和模型精度误差阈值;
- cnt* ← 0;
- obj_group*, *group_CNT* ← *Group_Componets*(*Compnets_array*);
- do
 - device_id* ← *get_device*();
 - Load_tasks*((*device_id*, *obj_group*[*i*]));
 - Synchronize_data*(*Compnets_array*);
 - Calculate_Error*();
 - cnt*++;
- while (*error* > *err_threshold* && *cnt* < *Max_times*)
- return *Sim_sys*

算法 1 的输入包含管网拓扑信息、管网供需边界条件和仿真计算误差收敛条件等, 而输出则是基于输入的边界条件下与实际管网等价的管网模型, 其中包含各类组件的压力、流量等数值状态。

上述算法运行于计算节点的主机端, 其中第(h)行的 *Load_tasks* 函数负责启动设备端的核函数, 核函数每次所需的数值也由主机端程序统一复制到设备显存中去。另外, 主机端程序的第(i)行 *Synchronize_data* 则是用于收集和同步各个设备计算结果。

整个算法中第(a)–(d)行是程序的初始化, 主要完成网络拓扑、边界条件的设置, 以及各个组件实例的构造; 第(e)行引入了一个组件分组操作 *Group_Componets*, 当管网计算的数据规模超过单个 DCU 的内存上限时, 该操作可以为第 h 行提供计算任务对应硬件分配参考; 第(f)–(l)行就是组件对象被加载到不同 DCU 上并行计算的过程, 其具体实现过程则是流体方程的求解(式(1)), 算法 1 中没有明确这些核函数的实现细节, 这些核函数的定义被封装在 3.1 节中各种组件类中, 工程实践中可以主机端程序可以直接将这些核函数加载至 DCU 上执行, 关于具体的并行任务的调度过程, 将在第 3.3 节中进行详细的说明; 经过(i)行的数据同步和(j)行误差的

计算, 整个程序在第(l)行中对本次迭代计算的结果进行评判, 并对是否需要进行下一次迭代作出判定; 而(m)行则是将符合误差精度要求的管网模型予以保存并作为算法输出返回。

3.3 面向超算平台仿真系统实施方案

超级计算平台采用高性能计算集群架构, 其强大的运算能力在提升能源管网模拟仿真系统的计算性能方面具有一定的优势。然而, 与传统计算设备相比, 能源管网仿真系统在超算平台的部署方案需要将 3.2 节的计算过程进行并行化处理, 使之适用于这种多处理、可并行的硬件物理架构。

算法 1 从宏观上介绍了“组件化”的管网计算模型是如何实现能源管网系统仿真。而文中 3.1 节提出的组件封装方案将仿真系统的逻辑过程和计算过程进行分离, 使算法 1 中的模拟计算过程可以在异构的高性能计算机并行执行。

图 6 可以看出, 管网仿真计算程序的热点为算法 1 中的循环体, 该部分的计算量与管网拓扑中的组件数量和每次迭代的误差有关。因此, 在仿真系统的并行方案中将计算任务的加载(算法 1 中 Load_Task 函数)进行并行化处理, 在 Load_Task 函数的调用中, 管网中每一个组件被映射为一个核函数, 这些核函数可以根据图 2 中所描述的异构计算设备进行分配, 从而实现多个管网组件对象水力计算在多个 DCU 加速卡上的并行执行。

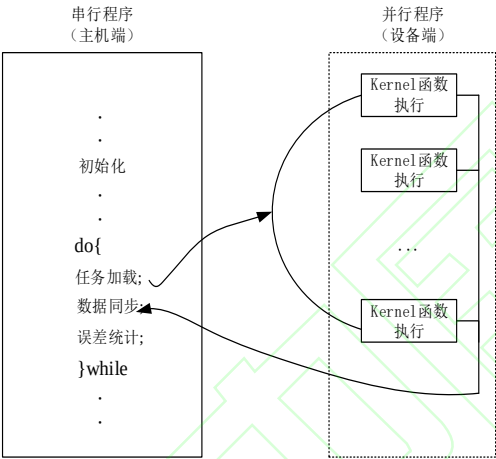


图 6 管网仿真并行方案

Fig. 6 Parallel programme for pipeline network simulation

4 仿真结果与分析

文中实验在“嵩山”超级计算机上完成, 其硬件配置在第 1 节中已经进行说明。所有仿真实验的编译和测试等工作在 CentOS-7.6 上使用 gcc-7.3.1 和 hipcc-4.0.1 进行。

4.1 实验方案与数据来源

为了验证前面章节中所提的计算模型在城市能源管网仿真上正确性和可行性, 文中选取三个实际能源供应场景。在完成仿真模型的数值建模后, 又在管网中加装一定数量的温度或压力测量仪器, 通过对比模型中相应观测点上的仿真数据, 验证文中所提模拟仿真计算模型的准确性和通用性。

三种实验场景分别来自于我国江西省某县城的供水管网(Water Model)、浙江某地燃气管网(Gas Model)和我国西北地区某城市中一个行政区的热力网络(Thermal Model)。它们详细参数如表 1 所示。表 1 中管子数量和非管组件的数量之和代表管网的规模, 它与仿真模型的计算量密切相关; 观测点的数量是在实际场景下人为设置的物理测量仪器的数量, 这些观测点用于核对管网模型的仿真精度。

表 1 测试管网模型

Tab. 1 Testing models of energy pipelines networks				
名称	管子数量	非管数量	观测点数量	对比指标
Water Model	1875	1876	115	压力
Gas Model	2177	1876	31	压力
Thermal Model	1211	991	63	温度/压力

4.2 仿真结果对比与分析

根据图 4 和图 5 中管网并行仿真计算方案和数据同步方法, 将表 1 中的三个管网模型在 CPU+DCU 架构的计算节点上完成相应的能源管网系统仿真实验。仿真过程中, 不同的能源供需参数(压力、流量等)作为管网模型边界条件, 随机选取了某一时刻, 将观测点上仿真数值与实际仪器测量数值进行对比, 并按照式(5)计算两者的误差率(Deviation Rate, DR)。

$$DR(t) = \frac{|Sim_V_t^k - Mea_V_t^k|}{Mea_V_t^k} \times 100\%$$

(5)

其中, DR(t)为时刻 t 第 k 个观测点处的仿真数值误差率, $Sim_V_t^k$ 与 $Mea_V_t^k$ 分别代表模型仿真数值和测量值。本节中将从表 1 中三个场景中, 随机采集某个时间管网观测点出的观测数值, 通过对比仿真结果, 计算对应的误差率, 评价文中所提方法在解决管网仿真计算中的有效性。

4.2.1 供水管网(Water Model)仿真结果对比

在供水管网的仿真实验中, 文中选取了该网络在 2021 年 7 月 10 日上午 7:30 的工况水流压力进行对比。图 7 是该时段 115 个水压观测点上实测水压数值与仿真水压, 可以看出仿真压力与实测压力的数值变化趋势基本一致, 而各观测点上的误差率的变化如图 8 所示。从图 8 中可以看出, 仿真模型在多个观测点处的误差率 4% 左右。

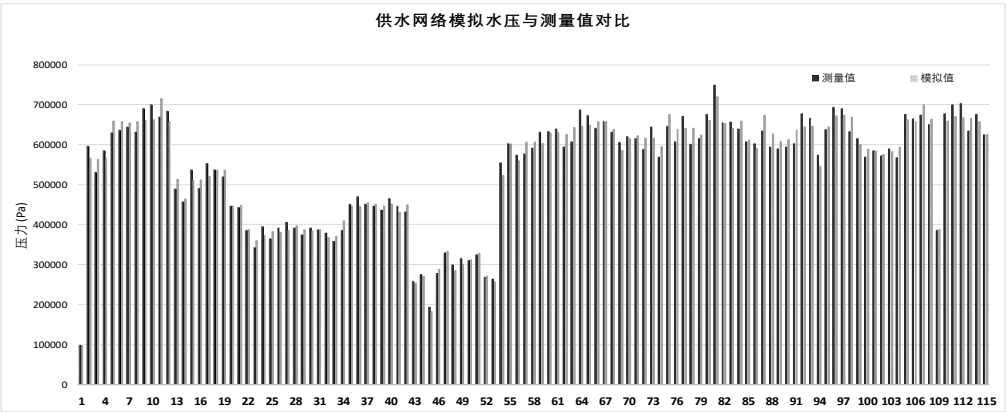


图 7 供水管网仿真压力与实际测量值对比(2021.7.10 7:30)

Fig. 7 Simulated pressure comparison of water model at 7:30 AM on July 10 2021

4.2.2 燃气网络(Gas Model)仿真结果对比

燃气管网仿真实验中,文中将 2022 年 9 月 26 日上午 11:30 的管网数据进行对比实验。图 9 是该时刻 31 个观测点的燃气压力对比,从图中可以看出,除少数观测点以外,其他多数观测点仿真数值与实际测量值基本一致,其误差率如图 10 所示。从图 10 中误差率的变化可以看出,多数燃气管网观测点上仿真模型与实际测量数值相近,其误差率均低于 2%,说

明文中提供的管网仿真计算模型具有较高的准确性。

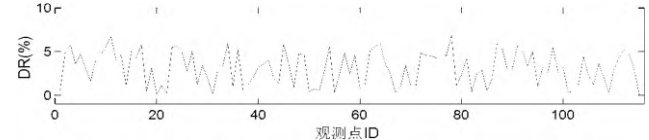


图 8 供水管网压力仿真数值误差率(2021.7.10 7:30)

Fig. 8 Water pressure DR at 7:30 AM on July 10 2021

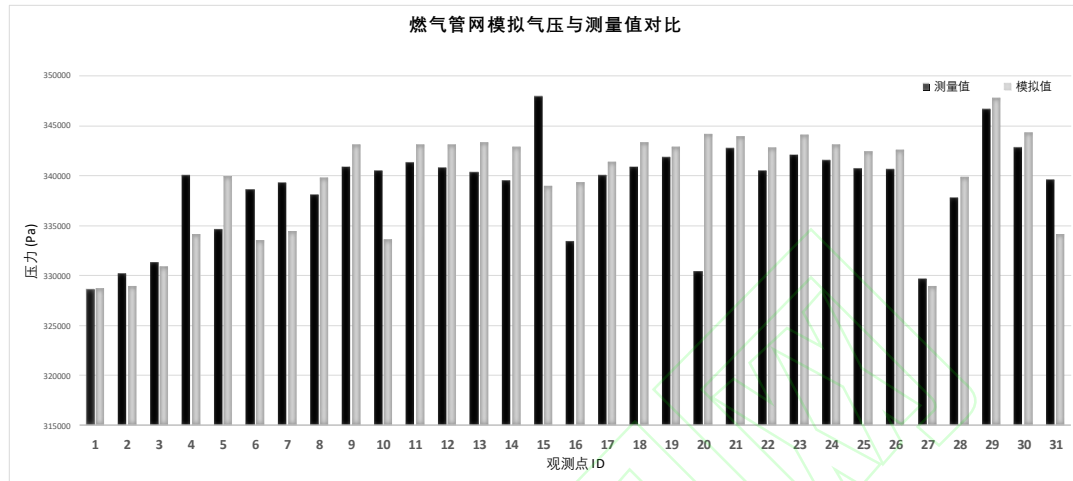


图 9 燃气管网压力仿真数值与实际测量值对比(2022.9.26 11:30)

Fig. 9 Simulated pressure comparison of Gas Model at 11:30 AM on Sep. 26 2022

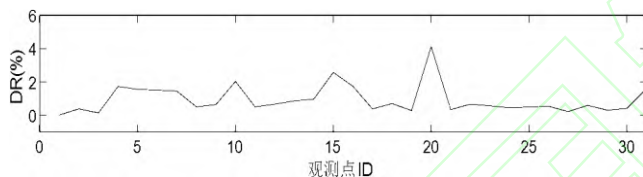


图 10 燃气管网压力仿真数值误差率(2022.9.26 11:30)

Fig. 10 Gas Pressure DR at 11:30 AM on Sep. 26 2022

4.2.3 热力管网(Thermal Model)仿真结果对比

相对前两种能源供给输配网络,热力管网模型相

对较为复杂,整个网络有供水网络和回水网络两部分组成,同时文中不仅对供水管网和回水管网的压力进行比较,还对管网的温度也进行误差对比。文中选用 2022 年 2 月 23 日 21:50 的工况数据与仿真管网模型进行对比。

图 11 为热力供水网上各观测点仿真与实测水压的对比情况,图中仿真压力的整体变化趋势与实际测采集压力的变化趋势基本相符,而两者的误差率如图 12 所示,观测点上的误差率均在 5% 以下。

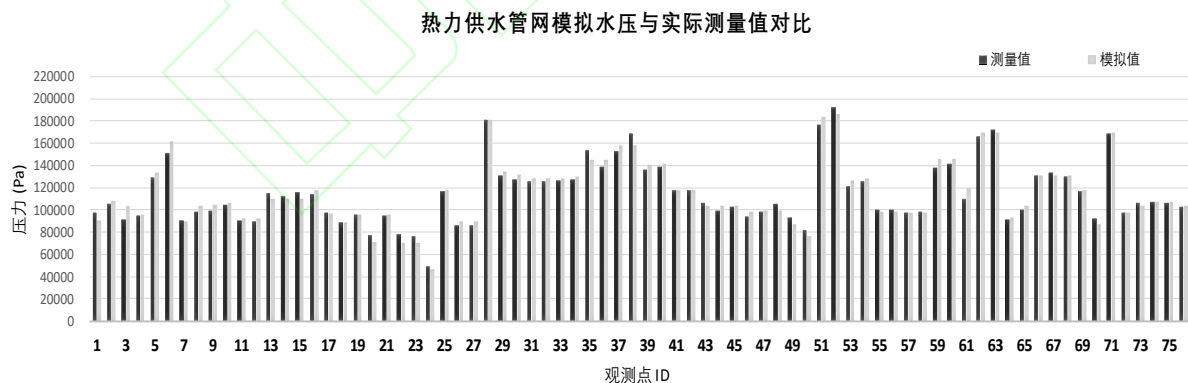


图 11 热力管网压力仿真数值与实际测量值对比(2022.2.23 21: 50)

Fig. 11 Simulated pressure comparison of thermal model at 21:50 PM on Feb. 23 2022

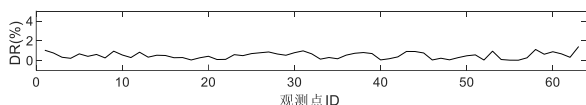


图 12 热力管网压力仿真数值误差率(2022.2.23 21:50)

Fig. 12 Water pressure DR of thermal model at 21:50 PM on Feb. 23 2022

图 13 为该热力管网的供水网络温度对比情况,图中可以看出,仿真温度与实际测量温度存在一定的差别,但由于图中温度计量单位为开尔文(K),从图 14 中误差率来看,其误差范围仅为 2% 左右。

整体来看,热力管网的模拟结果与实测数值基本一致,

5 计算模型部署与应用

在第 4 节中通过三种不同的能源管网模型的仿真计算结果与实际管网压力、温度等计量设备的测量数值的对比,可以证明文中提出的计算模型方法在实际的工程应用中具有一

定的可行性。本节通过介绍部署在国产超级计算平台上对国内某城市工业园区的燃气管网(CGN)的模拟仿真过程，进一步证明文中所提管网仿真计算模型在解决实际行业需求方面的应用价值。

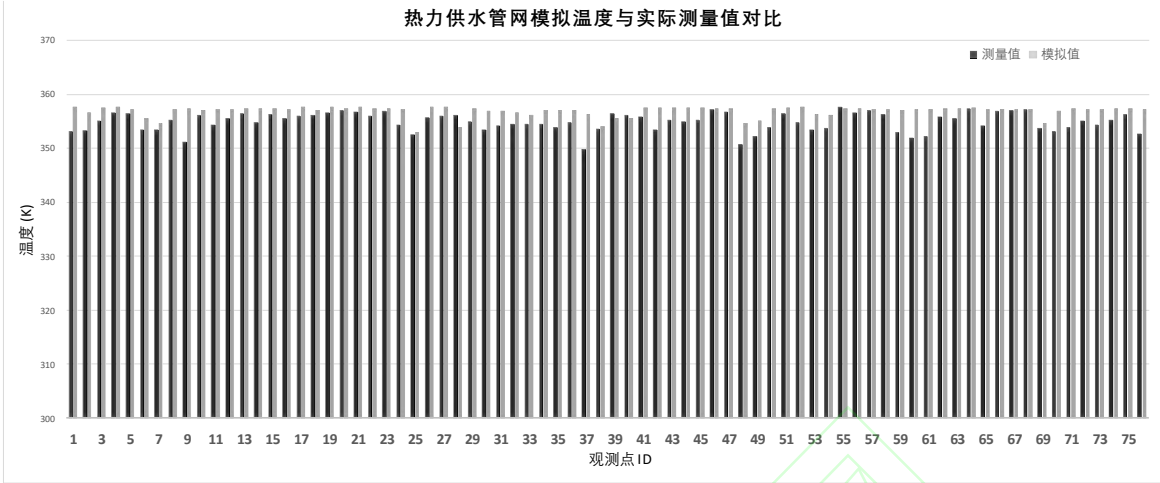


图 13 热力供水管网温度仿真数值与实际测量值对比(2022.2.23 21:50)

Fig. 13 Simulated temperature comparison of the supply network at 21:50 PM on Feb. 23 2022

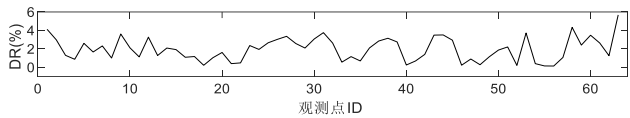


图 14 热力供水管网温度仿真数值误差率(2022.2.23 21:50)

Fig. 14 Temperature DR of supply water network at 21:50 PM on Feb. 23 2022

整个仿真计算过程可以分成管网建模、仿真计算和可视化三个阶段，其中文中的计算方法主要应用于第二阶段的工作。数值仿真计算之前需要对整个管网拓扑进行建模，模型中包含各类网络组件的参数(如管道长度、管径、摩阻等)和管网边界条件的设置；然后，将模型导入仿真系统以后，对象化后的网络组件的计算被分派至不同的 DCU 上并发完成；当计算结束后，仿真系统将仿真结果(管道压力、流量)交由可视化系统予以呈现。

本节模拟的燃气管网涵盖 200 多平方公里的城市行政区域，燃气用户 30 余万户，管网总长度在 1800 公里以上。文中实验构建一个由 32817 个网络组件的燃气管网模型，其中包括 10 个气源(输入)和 1444 个用户(输出)，模型的详细信息如表 2 所示，而这些组件的拓扑关系如图 15 所示，图中区域按照燃气供应压力分成了高、中、低三种区域，左边青绿色区域为高压区域，其代表管网的骨干供应网络，中间和右下青色区域为中压区域，右上紫色区域为低压区域，服务于燃

气的终端用户。

表 2 CGN 管网拓扑信息

Tab. 2 Configuration information of CGN									
组件种类	二通	三通	四通	管道	气源	用户	调压站	阀门	堵头
数量	2032	4469	11	16536	10	1444	4	5783	2528
									32817



图 15 CGN 管网拓扑

Fig. 15 Topology of CGN

数值模型中定义了整个网络的物理特性，而在仿真计算开始前，网络模拟计算还需要设置管网模型的边界条件：源和终端用户上的压力、流量和温度等初始值。鉴于文中篇幅表 3 列出部分气源和用户的初始的压力、温度和流量值。

表 3 CGN 管网仿真计算边界条件

Tab. 3 Boundary conditions for CGN pipeline network simulation computations									
组件类型	序号	压力(Pa)	温度(K)	流量(Kg/s)	组件类型	序号	压力(Pa)	温度(K)	流量(Kg/s)
气源 (门站)	1	283985	296.14	0.506271	终端 用户	33	101325	300	0.000186
	2	282755	306.1	0.54752		34	101325	300	0.000339
	3	101325	300	0		232	101325	300	0.000202
	4	397680	297.07	2.027544		233	101325	300	0.000134
	5	403135	289.32	2.448321		...			
	6	283385	300	0.243765		...			
	7	101325	300	0.215471		...			
	8	101325	300	0		...			
	9	168375	294.68	0.621508		...			
	10	101325	300	0		...			

模拟仿真计算过程中，各实例化的组件的水力求解任务被分配到不同的 DCU 并发执行，并周期性的校验模型收敛误差，当计算结果达到收敛标准后计算结束，并对仿真的结果进行可视化处理。仿真计算的结果中包含所有组件的水力工况状态，如管道的连接件的压力、流量温度，以及管道的压力分布和流量分布等。表 4 包含管道组件的两个端口的压力、温度和流量的仿真计算结果；而表 5 中则是非管组件的仿真计算结果，它们按照端口的数量分别列出，其中三通只有 3 个端口，而二通和减压阀等组件的端口数量是 2。

表 4 CGN 管网管道组件仿真计算结果
Tab. 4 Simulation results of pipelines for CGN

组件类型	序号	Port1			Port2		
		压力(KPa)	温度(K)	流量(m³/s)	压力(KPa)	温度(K)	流量(m³/s)
管子	1	166.82	290	0.0004	166.82	290	0.0004
	2	166.82	290	0.0199	166.82	290	0.0199
	...						
	21	282.88	290	0.0262	282.88	290	0.0262
	22	166.97	290	0.0512	166.97	290	0.0512
	...						
	755	283.00	290	0.0698	283.00	290	0.0698
	756	282.88	290	0.0129	282.87	290	0.0129
	...						

表 5 CGN 管网非管组件仿真计算结果
Tab. 5 Simulation results of non-pipelines for CGN

组件类型	序号	Port1			Port2			Port3			Port4		
		压力(KPa)	温度(K)	流量(m³/s)	压力(KPa)	温度(K)	流量(m³/s)	压力(KPa)	温度(K)	流量(m³/s)	压力(KPa)	温度(K)	流量(m³/s)
四通	1	282.89	290	0.0000	282.89	290	0.0005	282.89	290	0.0002	282.89	290	-0.0007
	...						...						
	5	282.96	290	0.0741	282.96	290	-0.0680	282.96	290	-0.0409	282.96	290	0.0347
	6	282.93	290	-0.0161	282.93	290	0.0011	282.93	290	-0.0140	282.93	290	0.0290
三通	...						...						
	1	166.82	290	0.0005	166.82	290	0.0000	166.82	290	-0.0004	-	-	-
	...												
	2985	400.08	290	1.5704	400.08	290	0.2483	400.08	290	-1.8188	-	-	-
二通	2986	399.23	290	-0.0168	399.23	290	0.0139	399.23	290	0.0024	-	-	-
	...						...						
	...												
	3	282.80	290	0.0001	282.80	290	-0.0001	-	-	-	-	-	-
调压阀	4	282.88	290	-0.0005	282.88	290	0.0005	-	-	-	-	-	-
	...						...						
	1578	283.03	290	-0.0791	283.03	290	0.0791	-	-	-	-	-	-
	1579	396.66	290	-0.4889	396.66	290	0.4889	-	-	-	-	-	-
...	...						...						
	1	396.36	290	0.4634	283.14	290	0.4634	-	-	-	-	-	-
	...						...						
...	4	399.00	290	0.8122	283.34	290	0.8122	-	-	-	-	-	-
	...						...						

上述表格中的数据可以使用通过可视化工具进行表示，图 16 为管网在当前边界条件下的稳态压力。从图中可以看出，红黄色左侧网络属于高压区域的压力明显高于中低压区域；同时，越接近网络的末端区域，其压力也随着减小。

6 结束语

本文针对城市能源供应网络，提出了一种并行的通用仿真计算模型。模型中将复杂管网流体计算过程进行类型封装，弱化了管网组件的仿真计算过程的依赖性，并结合“嵩山”超级计算机平台，赋予模型良好的可并行性，提高了管网仿

真系统在高性能计算平台上的运算性能。
三种能源输配管网场景在“嵩山”超级计算平台的实验可以证明，文中提出的计算模型在管网仿真应用领域具有较强的通用性，为能源管网仿真软件的“自主可控”奠定了基础，也为国内能源供应企业提供了安全、可靠的仿真件计算工具和实验环境。

尽管文中针对能源输配管网提出的仿真模型和计算方法基本上可以为多数能源行业提供较高精度的网络仿真工具，但为了充分发挥高性能计算机仿真计算方面的优势，在提升和优化模型计算性能等方面还有一定的研究空间。

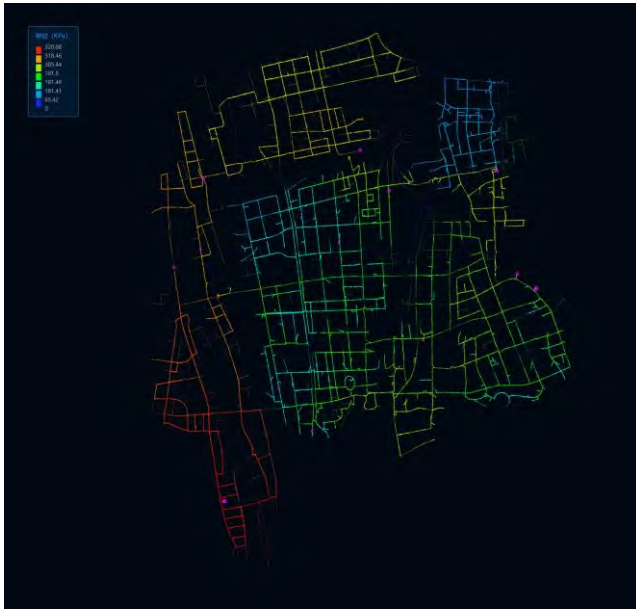


图 16 CGN 仿真压力分布图

Fig. 16 Simulation pressure distribution of CGN

参考文献:

- [1] 万冬桂. 城市地下管网建设和管理浅析 [J]. 未来城市设计与运营, 2022, No. 6 (06): 65-67. (Wan Donggui. Analysis of construction and management of urban underground pipe network [J]. Future City Studies. 2022, No. 6 (06): 65-67.)
- [2] 雷雄伟. 城市地下管网隐患调查实践与探讨 [J]. 城市勘测, 2018 (S1): 56-58. (Lei Xiongwei. Practice and Discussion on Hidden Danger Investigation of Urban Underground Pipe Network [J]. Urban Geotechnical Investigation & Surveying. 2018 (S1): 56-58.)
- [3] W. J. Turner, P. S-J. Kwon, P. A. Maguire. Evaluation of a gas pipeline simulation program [J]. Mathematical and Computer Modelling, 1991, 15 (7).
- [4] 王英竹. 二次供水系统水力模拟与节能降耗研究 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2021.
- [5] 乔帆, 杨光, 李业强等. 基于仿真计算的城市管网爆管事件关阀策略 [J]. 煤气与热力, 2023, 43 (03): 11-15. (Qiao Fan, Yang Guang, Li Yeqiang. Valve Closing Strategy for Pipe Burst Event in Urban Pipe Network Based on Simulation Calculation [J]. Gas & Heat, 2023, 43 (03): 11-15.)
- [6] 陈国群, 郑建国, 柳建军等. 油气管网仿真技术现状与展望 [J]. 油气储运, 2014, 33 (12): 1278-1281. (Chen Guoqun, Zheng Jianguo, Liu Jianjun, Peng Shiyao, Zhang Ming, et al. Current situation and outlook of oil and gas pipeline network simulation technology [J]. Oil & Gas Storage and Transportation. 2014, 33 (12): 1278-1281.)
- [7] 贾筱东. SynerGEE Gas 模拟仿真软件的应用与发展 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2017, 37 (14): 88-89. (JIA Xiaodong. Application and Development of SynerGEE Gas Simulation Software [J]. China Petroleum and Chemical Standard and Quality, 2017, 37 (14): 88-89.)
- [8] 王建国. ATMOS 模拟仿真系统在天然气管道的应用 [J]. 天然气技术, 2008, No. 10 (04): 42-44+79. (Wang Jianguo. Application of ATMOS Simulation System in Natural Gas Pipeline [J]. Natural Gas Technology and Economy. 2008, No. 10 (04): 42-44+79.)
- [9] 郑建国, 陈国群, 宋飞等. 大型天然气管网仿真模型及其求解技术研究 [J]. 系统仿真学报, 2012, 24 (6): 1339-1344. (Zheng Jianguo, Chen Guoqun, Song Fei. Research on Simulation Model and Solving Technology of Large Scale Gas Pipe Network [J]. Journal of System Simulation. 2012, 24 (6): 1339-1344.)
- [10] 李长俊, 张员瑞, 贾文龙等. 大型天然气管网系统在线仿真方法及软件开发 [J]. 油气储运, 2022, 41 (06): 723-731. (Li Changjun, Zhang Yuanrui, Jia Wenlong, et al. Online simulation method and software development of large-scale natural gas pipeline network system [J]. Oil & Gas Storage and Transportation. 2022, 41 (06): 723-731.)
- [11] 李春奇, 袁献忠, 李俊等. 天然气管网动态仿真三种隐式差分法对比研究 [J]. 西安石油大学学报: 自然科学版, 2023, 38 (01): 145-149. (Li Chunqi, Yuan Xianzhong, Li Jun et al. Comparison of Three Implicit Difference Methods for Dynamic Simulation of Natural Gas Pipeline Network [J]. Journal of Xi'an Shiyou University: Natural Science Edition, 2023, 38 (01): 145-149.)
- [12] Carter R, Denton G. Parallel Computation For Simulation Users And Simulation Developers [J]. Pipeline Simulation Interest Group, 2011.
- [13] 谢兴勇, 谭飞, 黄启益. 基于高性能计算的仿真平台建设运维策略探讨 [J]. 数字技术与应用, 2021, 39 (09): 98-102. (Xie Xingyong, Tan Fei, Huang Qiyi. Discussions on the Design Strategies of Numeric Simulation Platform Based on the High Performance Computing [J]. Digital Technology & Application. 2021, 39 (09): 98-102.)
- [14] 杨周凡, 韩林, 李冰洋等. 基于“嵩山”超级计算机系统的大规模管网仿真 [J]. 计算机工程, 2022, 48 (09): 155-161. (Yang Zhoufan, Han Lin, Li Bingyang, et al. Large-Scale Pipeline Network Simulation Based on "Songshan" Supercomputer System [J]. Computer Engineering. 2022, 48 (09): 155-161.)
- [15] 王海, 王海鹰, 周海珠. 多热源环状管网的面向对象水力计算方法 [J]. 浙江大学学报: 工学版, 2012, 46 (10): 1900-1909. (Wang Hai, Wang Haiying, Zhou Haizhu. Analysis of multi-sources looped-pipe network based on object-oriented methodology [J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science. 2012, 46 (10): 1900-1909.)
- [16] Bakhoda A, Yuan G L, Fung W W L, et al. Analyzing CUDA workloads using a detailed GPU simulator [C]// 2009 IEEE international symposium on performance analysis of systems and software. IEEE, 2009: 163-174.
- [17] 谢景明, 胡伟方, 韩林等. 基于“嵩山”超级计算机系统的量子傅里叶变换模拟 [J]. 计算机科学, 2021, 48 (12): 36-42. (Xie Jingming, Hu Weifang, Han Lin, et al. Quantum Fourier Transform Simulation Based on "Songshan" Supercomputer System [J]. Computer Science. 2021, 48 (12): 36-42.)
- [18] 谢浩山, 刘晓楠, 赵晨言等. 基于“嵩山”超级计算机系统下 HHL 算法的模拟实现 [J]. 计算机科学 2023 (1): 1-10. (Xie Haoshan, Liu Xiaonan, Zhao Chenyan, et al. Simulation Implementation of HHL Algorithm Based on Songshan Supercomputer System [J]. Computer Science. 1-10.)
- [19] 杨小艺, 赵荣彩, 王洪生等. 面向 DCU 非一致控制流的编译优化 [J]. 计算机应用: 2023 (1): 1-12. (Yang Xiaoyi, Zhao Rongcai, Wang Hongsheng et al. Compilation optimizations for inconsistent control flow on DCU [J/OL]. Journal of Computer Applications. 2023. 1-12)
- [20] Duc K V. High-Performance Computing with CUDA [J]. Journal of the Japan Society for Computational Engineering & Science, 2010, 15: 2421-2426.
- [21] Wang P, Ao S, Yu B, et al. An efficiently decoupled implicit method for complex natural gas pipeline network simulation [J]. Energies, 2019, 12 (8): 1516.

- [22] Hai W, Xiaojing L, Weiguo Z. Transient flow simulation of municipal gas pipelines and networks using semi implicit finite volume method [J]. *Procedia Engineering*, 2011, 12: 217-223.
- [23] 杨怀磊, 曾思美, 王万东, 等. 三维煤气管网仿真系统设计与实践 [J]. *中国安全科学学报*, 2011, 21 (01): 43-49. (Yang Huailei, Zeng Simei, Wang Wandong, *et al.* Design and Realization of Gas Pipeline Network 3D-virtual Reality System Based on GIS [J]. *China Safety Science Journal*. 2011, 21 (01): 43-49.)
- [24] 郝兴. 油气管网仿真建模软件架构设计及关键技术研究 [D]. 大庆: 大庆石油学院, 2010. Daqing Petroleum Institute. 2010.)
- [25] 王海, 李铮伟. 复杂水系统分析引擎 CAENAE-W: 原理、开发及验证 [J]. *暖通空调*, 2021, 51 (01): 16-22. (Wang Hai, Li Zhengwei. Complex water system analysis engine CAENAE-W: Principle, development and verification [J]. *Heating Ventilating & Air Conditioning*. 2021, 51 (01): 16-22.)
- [26] Peng Wang, Shangmin Ao, Bo Yu, Dongxu *et al.* An Efficiently Decoupled Implicit Method for Complex Natural Gas Pipeline Network Simulation [J]. *Energies*, 2019, 12 (8) .
- [27] Kim Sangmin, Choi Keunsang, Jung Jaehoon. Improvement of CFD code for two-phase flow with boiling and natural convection for evaluation of core-catcher cooling performance in OpenFOAM [J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2023, 408.