

文章编号: 0559-9350(2025)06-0771-09

基于国产 CPU/GPU 平台的水动力模型异构并行计算

南统超^{1,2,3}, 施睿^{1,4}, 于春水⁵

(1. 水灾害防御全国重点实验室, 江苏 南京 210024; 2. 河海大学 长江保护与绿色发展研究院, 江苏 南京 210024;
3. 河海大学 水利部水循环与水动力系统重点实验室, 江苏 南京 210024; 4. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029;
5. 北京云庐科技, 北京 100161)

摘要: 水动力模型具有物理意义明确、可靠性高等优点, 但其计算量大、算力要求高。鉴于先进计算芯片进口受阻, 国外 CUDA 软件平台也被禁用, 有必要基于国产 CPU/GPU 产业现状发展“多节点-多 GPU”异构并行计算方案。本研究基于国产硬件平台研发“多节点-多 GPU”大规模分布式异构并行计算水动力模型, 用于流域尺度二维浅水方程高效并行求解。通过三个算例检验了该模型的准确性、并行效率以及对亿级大模型的模拟能力。结果表明, 该模型计算准确, 并行加速效果显著, 可模拟溃坝、大尺度复杂地形等条件下水动力过程, 实现了对亿级网格洪水过程分钟级模拟。有望为我国洪水预报预警提供自主可靠的技术支撑, 为流域大模型、区域地下水模型等其他大型水动力模型的异构并行计算提供借鉴。

关键词: 偏微分方程求解; 水动力模型; 并行计算; 异构计算; 国产处理器; 洪水模拟

中图分类号: TV131.2

文献标识码: A

doi: 10.13243/j.cnki.slxb.20240326

1 研究背景

水动力模型通常使用有限差分、有限元或有限体积法等数值方法对控制方程(如 Saint Venant 方程、Boussinesq 方程等)进行离散求解, 从而模拟水流运动的水动力状态。相较于传统水文模型、数据驱动的统计模型等非水动力模型, 水动力模型以控制方程和内在物理规律为依据, 具有物理意义明确、精确度与可靠性高等突出优点, 广泛应用于地下水模拟^[1-2]、地表水-地下水耦合^[3]、复杂裂隙介质渗流模拟^[4]、水文气象耦合模拟与实时洪水预测等领域^[5-6]。然而, 这种模型计算量大, 对计算技术和硬件平台要求较高, 当网格较多时, 面临着计算消耗增加、效率下降甚至无法计算的问题。随着社会经济的发展, 水资源问题复杂度不断提高, 水资源管理与水灾害防御向着流域化、综合化、精细化、实时化方向发展^[7-8], 使用水动力模型时不可避免地面临模型尺度、分辨率、时效性、耦合过程(如环境、生态、社会、经济等)造成的计算量增长问题^[9-11]。在实际应用中, 水动力模型计算效率问题日益突出, 逐渐成为水动力模型应用的瓶颈。以洪水预报预警为例, 水动力模型需要快速、高精度的数值模拟来有效支持防洪减灾决策、救援疏散措施制定, 并提供整个区域风险点的完整水力要素信息及其变化过程, 详细反映区域地形、地貌特征, 这对于缺乏水文资料的流域以及地形复杂的城市区域尤为重要。此外, 水动力模型具有较强的扩展性, 易与泥沙模型、水质模型等耦合, 应用潜力巨大。

二维浅水方程的求解目前通常采用基于 Riemann 近似解的 Godunov 有限体积法。这种方法对连续和不连续水流条件都适用并保证求解的准确性和稳定性, 具有广泛的实用价值。但在模拟大尺度、高

收稿日期: 2024-06-01; 网络首发日期: 2025-01-03

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/11.1882.TV.20250103.1155.001>

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(42472307); 中央高校基本科研业务费项目(B240201058); 光合基金 A 类项目(202202049048)

作者简介: 南统超(1986-), 教授, 博士生导师, 主要从事地下水水动力学、数值模拟研究。E-mail: tcnan@hhu.edu.cn

分辨率的流域洪水演进过程时,由于研究范围大、计算网格单元数目多以及库朗数(Courant number)对步长的限制,需要大量计算资源和时间^[6]。而雨洪预报预警对计算精度与时效性的高标准,对洪水演进过程模拟提出了更高的算力要求。

高性能计算综合利用并行计算、高速网络和大容量存储等技术手段,以提供高效、高吞吐量、可扩展的计算能力。目前主流并行技术以 Open Multi-Processing (OpenMP) 和 Message Passing Interface (MPI) 为代表。OpenMP 适用于中央处理器(CPU)多线程或单路多 CPU 等内存共享的简单场景。大中型计算平台为了避免内存共享造成的通信开销和同步问题,大多使用非内存共享的 MPI 将多个 CPU 或图形处理器(GPU)组建为多路计算集群,是一种较为理想的大规模并行计算实现途径。吴俊香^[12]、江春波等^[13-14]利用 MPI 技术和基于 CPU 的计算机集群,对浅水方程进行了并行数值计算,验证了基于 MPI+CPU 并行系统的可扩展性和并行性。然而,随着 CPU 生产工艺水平趋近物理极限,单个 CPU 的性能提升难度越来越大,硬件成本和能耗也在不断提高。因此,依赖 CPU 的并行计算,性能提升趋缓,收益大打折扣。与此同时,GPU 制造技术显著进步为并行计算提供了新的动力。与功能全面的 CPU 不同,GPU 不适合复杂的逻辑运算,但专精于大量数组的算术运算(如图像渲染),其运算单元数量远超主流 CPU,对于大型数组算术运算等计算密集型任务的执行效率非常高。近年来,异构并行计算技术逐渐兴起,这种技术结合了 CPU 与 GPU、可编程门阵列(FPGA)等协处理器的优势,实现了更高效的并行计算。关于异构并行计算技术的发展历程,可以参考文献[15-16]。

在二维浅水方程求解方面,近年来单 GPU 计算及“单节点-多 GPU”并行计算取得了显著进展。许栋等^[17]采用有限体积法模拟洪水演进过程,并利用 GPU 并行计算实现了 GPU 单卡相对于 CPU 单核 112 倍的加速比。汪煜等^[18]构建了一套基于非结构网格的二维浅水方程数值模型,并使用三角网格对数字高程模型(DEM)进行剖分以适应不规则地形边界,在 GPU 上进行了加速计算。Xia 等^[19]、练继建等^[20]提出了一种基于非结构网格的二维浅水方程“单节点-多 GPU”模拟方法,采用多线程方法实现了“单节点-多 GPU”并行计算;冯新政等^[21]采用类似方案在 8 GPU 平台上进行流域地表径流的并行计算,取得了最高 5.77 的加速比。与现有的 CPU 多核并行和单 GPU 并行加速模拟方法相比,该方法对大尺度洪水演进过程动力学模拟的计算效率更高,但仍然不足以实现大规模实时洪水预报。

尽管基于“单节点-多 GPU”的并行路线在技术上是可行的,但支持的 GPU 数量非常有限,其性能提升严重依赖于 GPU 制造技术升级和先进 GPU 硬件获取。然而,目前先进计算 GPU(如美国英伟达公司 NVIDIA A100、H100 等产品)的研发与生产被国外垄断。由于外部环境变化,这些产品目前在國內已难以获得,而且这种困难可能会在未来相当长时间内持续存在,国内研发类似产品的企业也面临严峻制裁风险;软件层面,美国英伟达公司已禁止其 CUDA 软件生态用于第三方硬件。这些客观因素在事实上阻碍了我国“单节点-多 GPU”并行计算的发展。因此,为实现超高维模型在大量 GPU 上的并行计算,有必要发展“多节点-多 GPU”并行计算路线。作为多节点并行计算与多 GPU 并行计算两条技术路线的融合,“多节点-多 GPU”并行计算需要在多个节点之间进行大量数据传输和任务协调,如何降低并行计算中的性能损失、保证较高加速比是关键。Morales-Hernandez 等^[22]基于 MPI+CUDA 环境在美国橡树岭国家实验室 SUMMIT 超级计算机上实现了二维洪水模型“多节点-多 GPU”异构并行计算,但 64 个节点上加速比仅有 6 倍左右,并行效率不理想。

为了进一步发展水动力模型异构并行计算技术,加强我国水资源领域科研自主能力、提升洪水模拟与预警水平,本研究基于国产处理器(CPU/GPU)研发“多节点-多 GPU”大规模水动力模型分布式异构并行计算技术,对流域尺度二维浅水方程进行快速、并行求解,实现流域尺度高精度洪水演进过程的分钟级模拟,以期为防洪减灾的预报预警工作提供自主、可靠的技术支撑,同时为流域大模型、区域地下水模型等其他水动力模型的并行计算提供借鉴。

2 数值模型

2.1 控制方程 水动力模型采用的控制方程为深度平均的二维浅水方程,其矢量形式表示如下:

$$\frac{\partial \mathbf{Q}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{F}_x(\mathbf{Q})}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{F}_y(\mathbf{Q})}{\partial y} = \mathbf{S}_0(\mathbf{U}) - \mathbf{S}_f(\mathbf{U}) \quad (1)$$

式中 $\mathbf{U}$ 和 $\mathbf{Q}$ 分别为原始变量和守恒变量, 即:

$$\mathbf{U} = \begin{pmatrix} h \\ u \\ v \end{pmatrix}, \quad \mathbf{Q} = \begin{pmatrix} h \\ hu \\ hv \end{pmatrix} \quad (2)$$

$\mathbf{F}_x(\mathbf{Q})$ 及 $\mathbf{F}_y(\mathbf{Q})$ 分别为坐标轴方向的输运流量:

$$\mathbf{F}_x(\mathbf{Q}) = \begin{pmatrix} hu \\ hu^2 + \frac{1}{2}gh^2 \\ huv \end{pmatrix}, \quad \mathbf{F}_y(\mathbf{Q}) = \begin{pmatrix} hu \\ huv \\ hv^2 + \frac{1}{2}gh^2 \end{pmatrix} \quad (3)$$

$\mathbf{S}_0(\mathbf{U})$ 、 $\mathbf{S}_f(\mathbf{U})$ 分别为坡度源项和摩擦源项:

$$\mathbf{S}_0(\mathbf{U}) = \begin{pmatrix} i_0 \\ ghS_{0x} \\ ghS_{0y} \end{pmatrix}, \quad \mathbf{S}_f(\mathbf{U}) = \begin{pmatrix} 0 \\ C_f \|\mathbf{u}\| u \\ C_f \|\mathbf{u}\| v \end{pmatrix} \quad (4)$$

式中: t 为时间, s; x 与 y 为笛卡坐标系, m; h 为水深, m; u 和 v 为坐标轴方向上的流速, m/s; i_0 为净雨量, m/s; g 为重力加速度, m/s²; $S_{0x} = -\partial b / \partial x$ 及 $S_{0y} = -\partial b / \partial y$ 分别为两个坐标轴方向的坡度源项; b 为地面高程, m; $C_f = gn^2 h^{-1/3}$ 为地面摩擦系数; n 为曼宁系数, s/m^{1/3}; $\mathbf{u} = (u, v)^T$ 为速度向量; $\|\mathbf{u}\| = \sqrt{u^2 + v^2}$ 为流速向量的大小, m/s。式(1)–(4)是依赖时间的双曲型非线性偏微分方程组, 该方程组即使从连续的初始条件启动, 也可导致不连续解, 求解的稳定性也非常重要。

2.2 数值方法 本研究参考文献[22]采用 Godunov 有限体积法对控制方程进行离散, 采用结构化网格以便并行程序进行区域分解。对整个计算区域进行离散后, 单个计算单元的积分形式可以表达为:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} \mathbf{Q} d\Omega + \int_{\partial\Omega} (\mathbf{F}\mathbf{n}) d\partial\Omega = \int_{\Omega} \mathbf{S}_0 d\Omega - \int_{\Omega} \mathbf{S}_f d\Omega \quad (5)$$

式中: Ω 为单个计算单元; $\partial\Omega$ 为计算单元的边界; $\mathbf{F} = (\mathbf{F}_x, \mathbf{F}_y)^T$ 为流量向量; $\mathbf{n} = (n_x, n_y)^T$ 为单位法向矢量; n_x 和 n_y 为沿坐标轴方向的法向量分量。对于二维规则网格, 穿过单元边界的流量由下式计算:

$$\int_{\partial\Omega} (\mathbf{F}\mathbf{n}) d\partial\Omega = \sum_{k=1}^4 \mathbf{F}_k(\mathbf{Q}_-, \mathbf{Q}_+) \mathbf{n}_k l_k \quad (6)$$

式中: 下标 k 为单元边界的序号; 下标 “+” 和 “-” 分别表示该边的坐标轴正向一侧和负向一侧; $\mathbf{F}_k(\mathbf{Q}_-, \mathbf{Q}_+)$ 为边 k 的黎曼流量; $\mathbf{Q}_-$ 和 $\mathbf{Q}_+$ 分别为边界两侧重建的守恒变量; $\mathbf{n}_k$ 为该边的法向量; l_k 为该边的长度。每一时间步上, 采用一阶显式欧拉格式对变量进行更新:

$$\mathbf{Q}^{(j+1)} = \mathbf{Q}^{(j)} - \frac{\Delta t}{\Delta A} \sum_{k=1}^4 \mathbf{F}_k(\mathbf{Q}_-, \mathbf{Q}_+) \mathbf{n}_k l_k + \Delta t (\mathbf{S}_0^{(j)} - \mathbf{S}_f^{(j)}) \quad (7)$$

式中: Δt 为时间步长; ΔA 为计算单元的面积; 上标 j 为计算时间步数。计算时间步长主要由库朗数控制, 参考 LeVeque^[23] 的研究取库朗数为 0.5。采用 Harten – Lax – van Leer (HLL) 近似黎曼求解器^[24–25], 穿过计算单元边界的流量计算公式如下:

$$\mathbf{F}(\mathbf{Q}_-, \mathbf{Q}_+) = \begin{cases} \mathbf{F}(\mathbf{Q}_-), & s_- \geq 0 \\ \mathbf{F}^*(\mathbf{Q}_-, \mathbf{Q}_+), & s_- < 0 \\ \mathbf{F}(\mathbf{Q}_+), & s_+ \leq 0 \end{cases} \quad (8)$$

式中过渡区流量 $\mathbf{F}^*(\mathbf{Q}_-, \mathbf{Q}_+)$ 计算公式如下:

$$\mathbf{F}^*(\mathbf{Q}_-, \mathbf{Q}_+) = \frac{s_+ \mathbf{F}(\mathbf{Q}_-) - s_- \mathbf{F}(\mathbf{Q}_+) + s_- s_+ (\mathbf{Q}_+ - \mathbf{Q}_-)}{s_+ - s_-} \quad (9)$$

式中 s_- 和 s_+ 为计算单元边界两侧的波速并由下式计算：

$$\begin{cases} s_- = \min(u_-^n - \sqrt{gh_-}, u_s - c_s) \\ s_+ = \max(u_+^n + \sqrt{gh_+}, u_s + c_s) \end{cases} \quad (10)$$

式中： u_-^n 、 u_+^n 为计算单元边界两侧的法向速度； $u_s = (u_-^n + u_+^n)/2 + (\sqrt{gh_-} - \sqrt{gh_+})$ ； $c_s = (u_-^n - u_+^n)/4 + (\sqrt{gh_-} + \sqrt{gh_+})/2$ 。对于干单元的情况，波速可以用下式计算^[26-27]：

$$\begin{aligned} \text{边界正向一侧为干单元: } & \begin{cases} s_- = u_-^n - \sqrt{gh_-} \\ s_+ = u_+^n + 2\sqrt{gh_-} \end{cases} \\ \text{边界负向一侧为干单元: } & \begin{cases} s_- = u_-^n - 2\sqrt{gh_+} \\ s_+ = u_+^n + \sqrt{gh_+} \end{cases} \end{aligned} \quad (11)$$

2.3 并行策略与计算平台 基于 GPU 的水动力并行计算已经有较多讨论^[17,19-21]，这些研究大多基于美国英伟达公司的 CUDA 并行计算平台实现。Morales-Hernandez 等^[22]在美国 SUMMIT 超级计算机上实现的“多节点-多 GPU”并行计算也是基于 CUDA 实现的。CUDA 依靠英伟达系 GPU 硬件运行，而通过模拟层在第三方 GPU 硬件上运行 CUDA 已遭到英伟达禁止。考虑到当前国产 CPU 和 GPU 单体算力性能较弱、无法使用 CUDA 的实际情况，本研究提出一种适用于国产 CPU 和 GPU、基于“多节点-多 GPU”架构(图 1)的大规模分布式异构并行计算技术，以弥补单卡性能劣势。

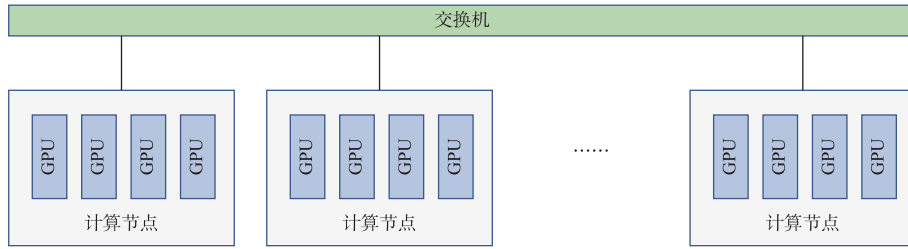


图 1 可实现大量 GPU 并行的“多节点-多 GPU”异构计算平台结构

这项技术以开源 MPI 并行程序为基础，执行节点之间以及芯片之间的协调任务，同时在开源程序 HIP 基础上构建 GPU 接口实现前述水动力学大模型对国产 GPU 的并行计算支持，从而实现对国产 CPU/GPU 异构并行计算平台的适配。MPI 是一种基于消息传递的并行编程方案^[26]，其核心是“进程”，每个进程都是一个独立的任务执行者。MPI 允许在多个计算节点之间进行通信和数据交换，使用“发送-接收”模式来传递消息，即一个进程将消息发送给另一个进程，然后等待响应，这种通信方式避免了共享内存的使用，减少了同步和竞态条件的产生。设计求解二维浅水方程的 MPI 并行算法必须考虑两个关键问题：(1)选择恰当的区域分解策略，将区域 Ω 分解成多个子区域并分配给不同的进程；(2)选择合适的通信结构，通过尽可能低的成本实现通信。在任意结构化网格上，执行 Godunov 有限体积法需要知道该结点上、下、左、右四个相邻结点上的信息。本模型采用结构化网格对区域 Ω 尽可能进行平均分配，并通过 MPI 联系不同子区域，架构设计如图 2 所示。

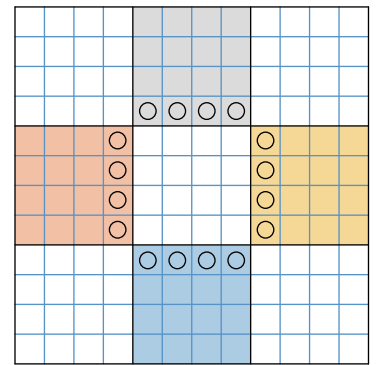


图 2 MPI 的区域分解示意图(空心圆表示中间子区域计算时需要获取的相邻结点信息)

本研究采用了通用国产 X86 计算服务平台，其具备超百万核心通用计算资源、超万片异构加速卡、通用计算节点突破万台，具有高核心、高内存带宽、低延迟网络通信及大容量存储资源等特征。每个计算节点配置如下：CPU 为国产某处理器 7185(32 核，64 线程，主频 2.5 GHz)，GPU 为国产计算芯片，内存 128 GB，网络带宽 200 Gb/s。CPU 主要负责模型初始化、任务分解与逻辑运

算, 而计算任务主体由 GPU 完成。程序由 C 语言编写, 编译时需要分别依次编译 GPU 的 HIP 接口代码和 MPI 代码, 计算任务提交采用 SLURM 作业调度系统。

3 算例分析

3.1 理想模型中的精度验证 模型与程序的正确性是计算效率的基础。本研究在有限体积法求解浅水方程(非并行)代码^[28-31]基础上增加了并行计算功能, 即“多节点-多 GPU”异构并行计算部分(MPI+GPU)。本节的主要目的在于通过两个经典算例着重对 MPI+GPU 异构并行功能进行测试, 包括在国产 CPU/GPU 平台上 MPI 模块是否能够正确地处理通信和数据交换、GPU 模块是否能够正确完成浅水方程求解计算、计算过程稳定性三个方面, 从而确保模型的可行性、可靠性和一致性。

3.1.1 一维溃坝算例 本算例为水力学计算领域广泛应用的一维溃坝水流基准算例^[17,32-33]。考虑一平直均匀河道, 长度 2000 m, 坡度 $S_0=0$, 摩阻 $S_f=0$ 。河道 1000 m 处有一低坝, 上游水深为 10 m, 下游水深为 3 m, 溃坝前上、下游均为静水, 计算网格单元尺寸为 4 m。在大坝垮塌瞬间, 坝上、下游形成非恒定急变流-不连续波。下游因流量增加水位迅速上涨, 形成涨水顺波向下游传播, 上游则因下泄流量突然增加水位急剧下降形成降水逆波向上游传播。溃坝 50 s 时的瞬时水深线和流速的精确解和数值解如图 3 所示。可以看出, 并行和非并行数值解高度一致, 且水深和流速与解析模型获得的精确解吻合较好, 未见数值振荡, 在间断波附近存在轻微数值弥散(可通过提高数值模型剖分精度进行抑制^[33]), 表明计算程序并行功能执行正常、精度较高。

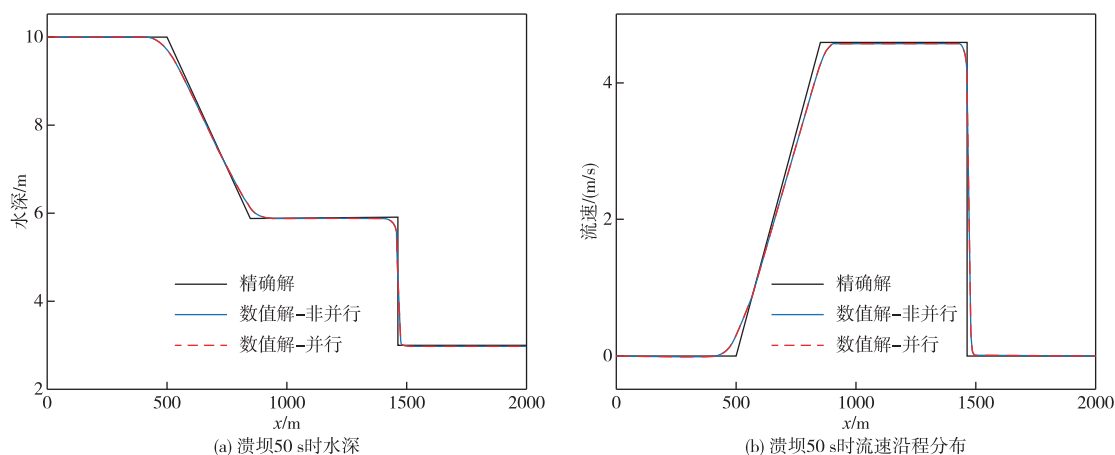


图 3 一维溃坝算例的水深和流速对比

3.1.2 二维部分溃坝算例 本算例为一个部分溃坝二维算例, 参考了 Fennema 等^[34-35]的实验设置: 部分水坝或水闸突然打开导致上游水体溃决, 形成一道向下游扩散的洪水波, 洪水波的前端呈现出明显的激波特征。由于初始条件存在不连续性, 这对数值求解提出了较高要求。图 4(a)展示了模型计算区域几何形状, 计算区域的长和宽均为 200 m, 溃口宽度为 75 m。计算网格采用边长为 5 m 的正方形剖分, 每行和每列均有 40 个单元格。模拟期总时为 7 s, 共分为 7000 个时间步, 时间步长为 0.001 s。上游水体的初始水深为 10 m, 下游水体的初始水深为 5 m, 计算区域的曼宁系数 n 取 0。该算例不使用并行计算也可进行模拟, 获得 $t=7$ s 时的水深见图 4(b), 与文献[34]中的结果共同作为并行版计算结果的参照。为了验证 MPI+GPU 代码的正确性, 将计算区域分割为 4 行、4 列, 共 16 个子区域, 分配给 16 个进程, 通过 4 个节点调用 16 块 GPU 卡进行异构并行计算, 所得 $t=7$ s 时的水深见图 4(c)。比较图 4(b)(c)中的结果可以发现, 在计算误差范围内两者高度一致, 而且与文献[34]吻合, 表明 MPI+GPU 并行计算功能得到了正确执行。本研究中未出现求解器崩溃, MPI+GPU 模块表现出了优异的稳定性。

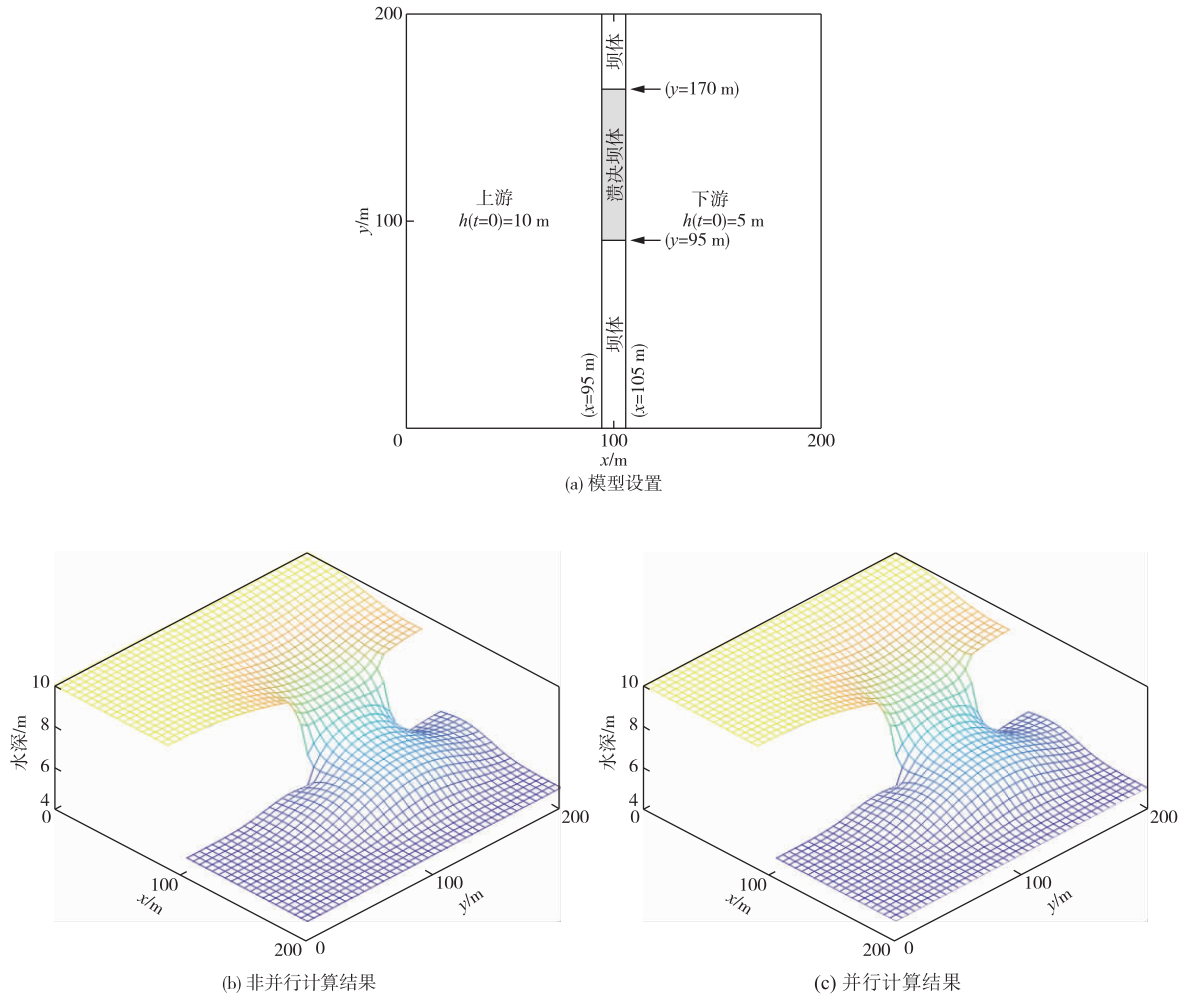


图4 二维溃坝模型及 $t=7$ s 时的模拟结果验证

3.2 大型水动力模型并行效率分析 为了进一步验证上文模型的有效性并分析其计算效率, 本节选取了一座新建的大型水库(庄里水库)所在流域作为模拟对象, 测试前述水动力模型在国产 CPU/GPU 异构并行计算平台的计算效率。庄里水库位于山东省枣庄市境内, 2015 年开工建设, 2020 年投入使用, 流域面积为 746 km^2 , 其中坝址以上流域面积为 319.77 km^2 。曼宁糙率系数为流域水动力模型主要参数, 可根据土地利用资料设定合理的初始值并通过率定过程进行优化^[36]。模型 DEM 分辨率为 7 m , 网格剖分 4012 行、4714 列(见图 5(a)), 初始糙率为 $0.04 \text{ s/m}^{1/3}$, 模拟期为 1 h , 时间步长为 0.5 s , 全流域上模拟期内发生 50 mm 均匀降雨。水库中初始水深取兴利水位并记为 0 m 。模拟期末(1 h 后)的水深分布计算结果见图 5(b)。定义加速比 $R = T_1/T_k$ (T_1 为模型单个节点上的计算耗时, T_k 为模型在 k 个节点上的并行计算耗时), 本算例计算时间和加速比结果如图 6 所示。从图中可以看出: 本异构并行模型具有较强的并行扩展性, 增加计算节点的数量可以有效地降低计算时间; 加速比随着计算节点的数量增加而稳定提高。本算例中, 使用 200 个节点可以使计算时间降至 3 min 左右(200 s), 实现洪水演进过程的分钟级模拟。

美国橡树岭国家实验室基于 SUMMIT 计算机发布的 TRITON 同样采用结构化网格和区域分解策略, 但采用了与本研究不同的 MPI+CUDA 并行方案, 最终在 64 个计算节点上仅达到 6 倍加速比。拖累其加速比性能的主要因素是 MPI 通信与输入/输出造成的固定时间开销(累计大于 14 min ; 见文献[22]中图 7)。与之相比, 本研究基于数据传输能力更强的国产 CPU/GPU 异构平台, 同时在软件方面强化了数据交换, 在类似应用场景下 MPI 与输入/输出时间开销累计低于 1 min , 只用 7 个节点即达到了 6 倍加速比, 表明本研究中并行计算模型和平台的有效性。

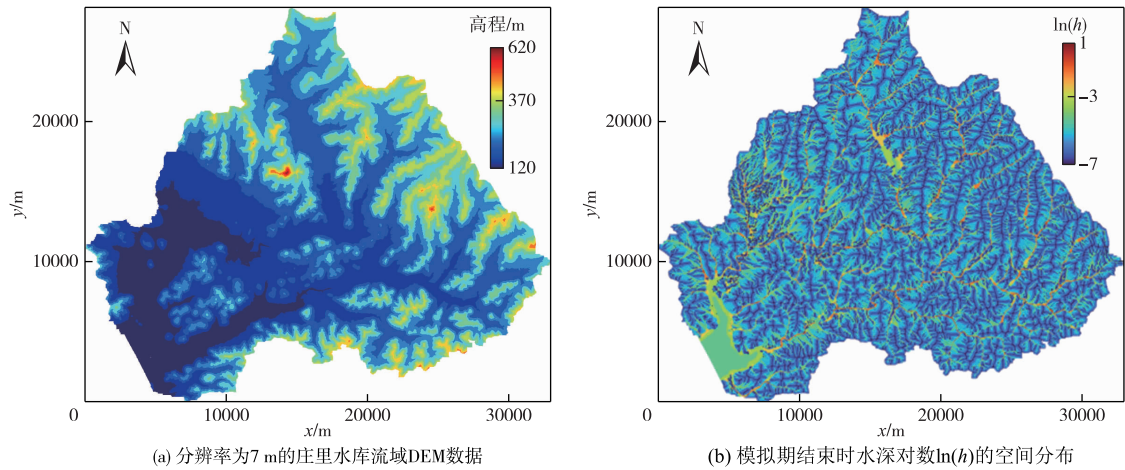
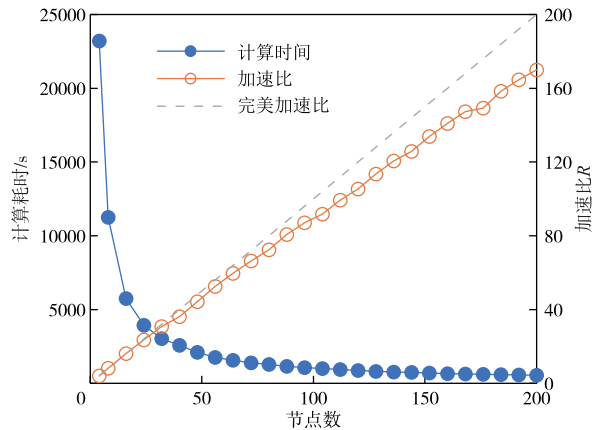
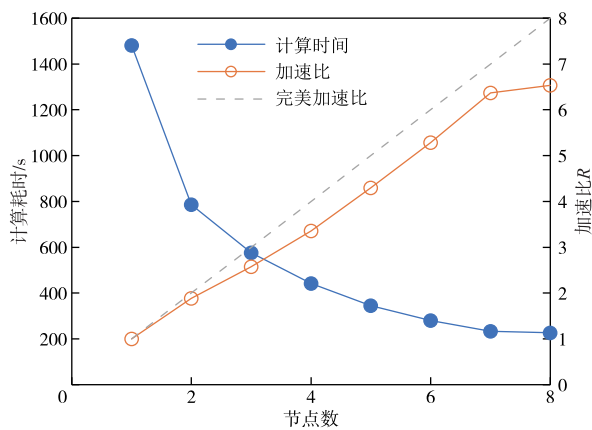


图5 庄里水库 DEM 数据及模拟期结束时水深的空间分布



为了进一步测试对超高维模型的并行计算能力，在庄里水库 7 m 分辨率模型的基础上，通过插值将模型分辨率提升至 2 m，使网格变为 14 042 行、16 499 列，网格总数超过 2.2 亿。由于网格规模远超单节点处理能力，本算例的测试从 4 节点开始，作为加速比测试基准并设置其加速比为 4，测试结果如图 7 所示。结果表明，在超 2.2 亿网格点的情况下，国产 CPU/GPU 系统的 MPI 与输入/输出时间开销与前相当，在 200 个计算节点、800 个 GPU 支持下实现了分钟级(546 s)降雨-径流模型的高效计算，并行加速比超过了 160，表现出了优秀的扩展性。流域尺度洪水分钟级模拟的实现，意味着流域洪水演进及不同雨洪情景的实时模拟，在防洪调度实践中能够更快速、更详细地获得洪水演进和淹没信息，提升防洪减灾、水库实时调度技术水平，有效降低生命财产损失。

4 结论与展望

本研究基于国产 CPU/GPU 分布式异构并行计算平台，建立了基于 Godunov 有限体积法和结构化网格的大规模二维水力学数值模型，并通过 MPI、HIP 等程序编程实现对国产 CPU/GPU 的适配。通过三个复杂度依次提高的算例，检验了该模型的准确性、并行效率以及对亿级以上大模型的模拟能力。结果表明，该模型可以准确模拟溃坝、大尺度复杂地形等条件下的水动力过程，同时计算速度提升显著。以庄里水库为例，通过使用“多节点-多 GPU”异构并行计算，实现了对亿级网格洪水演进过程的分钟级模拟，展现了该模型在大规模分布式异构并行计算方面的潜力。

异构并行模型通过优化并行和数据传递流程，大幅降低通信和输入/输出时间耗用，在高分辨率和大规模网格模拟中表现出巨大的性能优势。流域尺度洪水分钟级模拟意味着在防洪调度实践中能够更

快速、更详细地获得洪水演进和淹没信息,在防洪减灾、水库实时调度中具有重要意义。通过模拟大规模洪水演进及不同洪水情景,提升洪水预报预警、防洪调度优化、防洪设施规划、应急演练的技术水平,可为洪水预警、防洪调度等国家重大需求提供技术支撑,同时为流域大模型及区域地下水模型等其他水动力大模型的并行计算发展提供借鉴。本研究立足于国产 CPU/GPU 平台,旨在推动我国洪水模拟技术自主创新、降低对外技术依赖,为提升我国在水资源领域科研自主能力、实现科技自立自强提供支撑。本研究基于国产 CPU/GPU 平台发展的异构并行框架,不仅适用于洪水过程的浅水方程求解,还可应用于水文气象、泥沙淤积、地表水-地下水交互等领域的复杂动力系统模拟,需在后续工作中拓展应用范围并在工程实践中进一步验证其稳定性。

注:为推动国产超算应用于水力计算发展,本研究将相关代码开源共享,读者可联系第一作者(邮箱:tcnan@hhu.edu.cn)及第三作者(邮箱:csyu@multisimtech.com)获取,或开源网站下载(https://www.researchgate.net/publication/387140150_GPUCPU)。

参 考 文 献:

- [1] BEAR J. Dynamics of Fluids in Porous Materials[M]. New York: American Elsevier Publishing Company, 1972.
- [2] 薛禹群,谢春红. 地下水数值模拟[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [3] 朱金峰,刘悦忆,章树安,等. 地表水与地下水相互作用研究进展[J]. 中国环境科学, 2017, 37(8): 3002-3010.
- [4] VISWANATHAN H S, AJO-FRANKLIN J, BIRKHOLZER J T, et al. From fluid flow to coupled processes in fractured rock: recent advances and new frontiers[J]. Reviews of Geophysics, 2022, 60(1): e2021RG000744.
- [5] LIN N, EMANUEL K, OPPENHEIMER M, et al. Physically based assessment of hurricane surge threat under climate change[J]. Nature Climate Change, 2012, 2(6): 462-467.
- [6] 侯精明,张兆安,马利平,等. 基于 GPU 加速技术的非结构流域雨洪数值模型[J]. 水科学进展, 2021, 32(4): 567-576.
- [7] 夏军,占车生,曾思栋,等. 长江模拟器的理论方法与实践探索[J]. 水利学报, 2022, 53(5): 505-514.
- [8] 杨桂山,陈建池,张奇,等. 长江中游通江湖泊江湖关系演变及其效应与调控[M]. 北京: 科学出版社, 2021.
- [9] 徐宗学,叶陈雷. 城市暴雨洪涝模拟: 原理、模型与展望[J]. 水利学报, 2021, 52(4): 381-392.
- [10] 黄国如,陈文杰,喻海军. 城市洪涝水文水动力耦合模型构建与评估[J]. 水科学进展, 2021, 32(3): 334-344.
- [11] 阎沁琳,杜二虎,郑春苗. 城市洪涝灾害应急疏散模拟及其效率-公平权衡分析[J]. 水科学进展, 2023, 34(3): 409-416.
- [12] 吴俊香. 二维浅水波方程组的并行算法研究[D]. 南京: 河海大学, 2007.
- [13] 江春波,安晓谥,张庆海. 二维浅水流动的有限元并行数值模拟[J]. 水利学报, 2002(5): 65-68.
- [14] 江春波,陈立秋,张庆海. 浅水流动的并行计算[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2002(11): 1548-1551.
- [15] 邬江兴,祁晓峰,高彦钊. 异构计算并行编程模型综述[J]. 上海航天, 2021, 38(4): 1-11.
- [16] 黄国如,陈志威,曾博威. 城市洪涝模型及 CPU-GPU 异构并行计算技术研究进展[J]. 水利学报, 2023, 54(6): 654-664.
- [17] 许栋,徐彬, PAYET D, 等. 基于 GPU 并行计算的浅水波运动数值模拟[J]. 计算力学学报. 2016, 33(1): 114-121.
- [18] 汪煜,侯精明,张兆安,等. 基于非结构网格的洪水演进过程中 GPU 加速数值模型研究[J]. 水动力学研究与进展(A 辑), 2021, 36(4): 557-566.
- [19] XIA X, LIANG Q, MING X. A full-scale fluvial flood modelling framework based on a high-performance integrated hydrodynamic modelling system (HiPIMS)[J]. Advances in Water Resources, 2019, 132: 103392.
- [20] 练继建,马利平,张大伟,等. 一种基于非结构网格的二维洪水过程多 GPU 模拟方法: CN202211368197.5 [P]. 2023-06-13.
- [21] 冯新政,张大伟,徐海卿,等. 基于多 GPU 数值框架的流域地表径流过程数值模拟[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2024, 22(1): 48-55.
- [22] MORALES-HERNANDEZ M, SHARIF M B, KALYANAPU A, et al. TRITON: A multi-gpu open source 2D hydrodynamic flood model[J]. Environmental Modelling & Software, 2021, 141: 105034.

- [23] LEVEQUE R J. Finite Volume Methods For Hyperbolic Problems[M]. New York: Cambridge University Press, 2002.
- [24] HARTEN A. On a class of high-resolution total-variation-stable finite-difference schemes[J]. SIAM Journal on Numerical Analysis, 1984, 21(1): 1-23.
- [25] TORO E F. Shock-capturing Methods for Free-surface Shallow Flows[M]. Wiley, 2001.
- [26] CAUSON D M, INGRAM D M, MINGHAM C G, et al. Calculation of shallow water flows using a Cartesian cut cell approach[J]. Advances in Water Resources, 2000, 23(5): 545-562.
- [27] 张林波, 迟学斌, 莫则尧, 等. 并行计算导论[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.
- [28] YU C, DUAN J. Two-dimensional hydrodynamic model for surface-flow routing[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 140(9): 1-13.
- [29] YU C, DUAN J. Simulation of surface runoff using hydrodynamic model[J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2017, 22(6): 04017006.
- [30] YU C, DUAN J. Two-dimensional depth-averaged finite volume model for unsteady turbulent flow[J]. Journal of Hydraulic Research, 2012, 50(6): 599-611.
- [31] DUAN J G, YU C, DING Y. Numerical simulation of sediment transport in unsteady open channel flow[J]. Advances in Water Science, 2004, 15(2): 165-172.
- [32] LIANG D, FALCONER R A, LIN B. Comparison between TVD-MacCormack and ADI-type solvers of the shallow water equations[J]. Advances in Water Resources, 2006, 29(12): 1833-1845.
- [33] 魏文礼, 郭永涛, 王纪森. 一维溃坝洪水波的高精度数值模拟[J]. 计算力学学报, 2007(3): 362-364.
- [34] FENNEMA R J, CHAUDHRY M H. Explicit methods for 2-D transient free surface flows[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1990, 116(8): 1013-1034.
- [35] ALCRUDO F, GARCIA-NAVARRO P. A high-resolution Godunov-type scheme in finite volumes for the 2D shallow-water equations[J]. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 1993, 16(6): 489-505.
- [36] 张大伟, 权锦, 马建明, 等. 基于 Godunov 格式的流域地表径流二维数值模拟[J]. 水利学报, 2018, 49(7): 787-794, 802.

Hydrodynamic modeling via heterogeneous parallel computing on domestic CPU/GPU platform

NAN Tongchao^{1,2,3}, SHI Rui^{1,4}, YU Chunshui⁵

(1. National Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Nanjing 210024, China;

2. Yangtze Institute for Conservation and Development, Hohai University, Nanjing 210024, China;

3. Key Laboratory of Hydrologic-Cycle and Hydrodynamic-System of Ministry of Water Resources, Hohai University, Nanjing 210024, China;

4. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 5. Beijing Yunlu Technology Ltd., Beijing 100161, China)

Abstract: Hydrodynamic models have advantages such as clear physical meaning, high precision and reliability, but they also have higher computational requirements and more need for computing power. Given the restless international environment, it is necessary to develop a “multi-node, multi-GPU” heterogeneous parallel computing scheme based on domestically-produced CPU/GPUs. This study developed a “multi-node, multi-GPU” large-scale distributed hydrodynamic model on heterogeneous parallel computing platform based on domestically-produced devices, for fast solving the two-dimensional shallow water equations at the watershed scale. Through three examples of increasing complexity, the accuracy, parallel efficiency, and simulation capability of large-scale models with hundreds of millions of grids were investigated. The results show that the proposed model can accurately simulate the hydrodynamic process under conditions such as dam break and large-scale complex terrain; the parallel acceleration effect is significant, achieving minutes-level fast simulation of flood processes on hundreds of millions of grids. It is expected to provide independent and reliable technical support for China’s flood forecasting and early warning, and provide reference for parallel computing of other hydrodynamic models such as large-scale basin models and regional groundwater models.

Keywords: partial differential equations; hydrodynamic models; parallel computing; heterogeneous computing; domestic processors; flood simulation

(责任编辑: 王 婧)