

基于 GPU 并行计算和 WebGIS 的 湛江蓄滞洪区洪水预报系统研究

陈丕翔^{1,2}, 叶志恒^{1,2}, 叶利娜^{1,2}, 王 扬^{1,2}

(1. 广东省水利水电科学研究院, 广州 510635;

2. 广东省水动力学应用研究重点实验室, 广州 510635)

摘要: 洪水预报所采用的数值模拟涉及大量计算, 模拟的结果需经多种专用软件处理后才能展示给用户, 操作繁琐, 无法满足蓄滞洪区防洪调度及应急抢险处置中迅速做出响应的需求。该文提出了基于 GPU 并行计算和 WebGIS 的洪水预报系统, 旨在提高洪水计算的效率, 延长预见期, 并实现洪水演进的可视化。该系统基于最新的 GPU 加速的计算方法, 利用 GPU 强大的浮点数运算能大幅提高洪水计算的效率, 结合 WebGIS 技术, 将水文—洪水演进模型的计算结果与水利底图无缝连接, 以图表、图像和动画等形式直观展示洪水演变过程, 使决策人员能直观地掌握蓄滞洪区洪水的演变过程, 可为湛江蓄滞洪区的调度运用和防洪抢险提供帮助。

关键词: GPU; WebGIS; 湛江蓄滞洪区; 洪水预报系统

中图分类号: P338 **文献标识码:** B **文章编号:** 1008-0112(2024)06-0069-04

1 概述

洪水预报是防洪工作中重要的非工程措施^[1], 精准的洪水预报可为洪水调度提供决策依据, 为区域内经济社会发展提供水安全保障。诸多学者对洪水预报系统进行研究, 目前流域洪水预报系统和水库洪水预报系统的研究较为丰硕, 付磊^[2]使用 VB.NET 语言, 构建了 B/S 模式的曲靖市水城水库洪水预报预警系统, 谢鸣超^[3]采用 PSO 和 DE 算法, 搭建了广西青狮潭流域洪水预警预报系统, 李晓东^[4]使用 Element UI 为前端页面框架, 采用 SSM 为后端项目开发框架, 设计开发了尼洋河流域洪水预报预警系统, 但目前针对蓄滞洪区洪水预报系统研究罕有。蓄滞洪区作为防洪工程体系中重要环节, 一旦启用, 将严重影响区域内人民的生命财产安全, 不可避免地涉及人员转移和洪水调度。因此快速的洪水影响预报和准确、直观的淹没范围是避免严重财产损失, 保护现有经济建设成果的关键。本文选取广东省湛江蓄滞洪区为研究对象, 基于 GPU 并行加速计算提高计算速率, 延长洪水预

见期, 采用 WebGIS 开发集洪水演进计算与动态展示于一体的洪水预报系统, 为流域防洪减灾和蓄滞洪区合理运用提供技术支撑。

2 区域概况

湛江蓄滞洪区是珠江流域唯一列入国家蓄滞洪区名录的蓄滞洪区^[5], 与北江飞来峡水利枢纽联合运用, 将包括广州在内的北江大堤保护区防御北江洪水的能力由 100 年一遇提高到 300 年一遇, 并使北江中下游堤围(如清远市的清东、清西、清城等)的防洪标准由 50 年一遇提高到 100 年一遇^[6]。

湛江蓄滞洪区位于广东省飞来峡水利枢纽下游约 10 km 的北江左岸^[7](见图 1), 涉及广东省清远市清城区及佛冈县, 上游建有大庙峡水文站^[8], 是省级重点水文站, 属二类精度水文站。湛江蓄滞洪区由沿湛江干流两岸分布的 17 条堤围组成, 分别为饭店围、江咀围、大厂围、林塘围、下岳围、天吉围、果园围、长布围、松塘围、叔伯塘围、踵头围、独树围、高桥围、良塘围、凤洲联围、白沙塘围和官路唇围, 其中,

收稿日期: 2024-01-18; 修回日期: 2024-03-19

项目基金: 广东省属科研机构稳定性支持专项资金院自设课题(编号: 2021L030)。

作者简介: 陈丕翔(1978-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事计算水力学及环境水力学研究工作。

清城区 12 宗、佛冈县 5 宗。17 条堤围形成狭长的大小不一的独立保护区, 可以实现分仓滞洪^[9]。湛江蓄滞洪区 22.0 m 高程(珠基, 下同)以下区域面积为 82 km², 容积为 4.44 亿 m³, 常住人口约 7.6 万人, 耕地面积为 0.53 万 hm²^[10]。

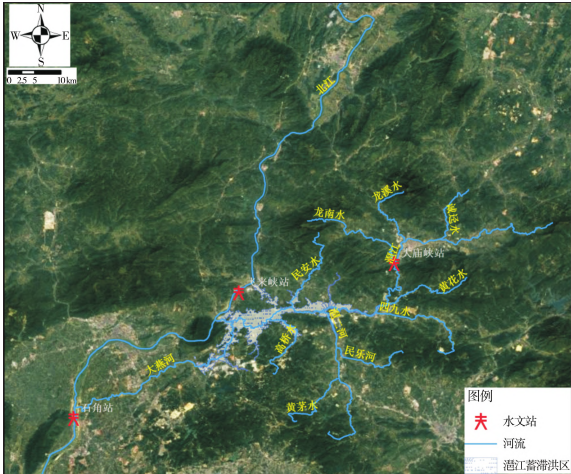


图 1 湛江蓄滞洪区位置示意

3 洪水预报系统总体设计

3.1 系统设计目标

根据预报降雨资料, 基于 GPU 加速和 WebGIS 开用户界面友好的洪水预报系统, 系统总体设计目标包括以下几点: ① 预报预警: 接入水文预报和洪水演进模型, 调用 GPU 加速计算模块, 加速洪水演进模拟计算, 延长预见期, 为预警预报提供分析基础; ② 仿真模拟: 构建北江、湛江流域可视化模型, 展示流域内地形地貌、自然河流水系、河道流场动态、洪水演进模型成果等内容, 满足仿真模拟和综合展示等需要; ③ 辅助决策: 根据模型提供的预警信息为用户提供调度辅助决策功能。

3.2 系统设计开发框架

湛江蓄滞洪区洪水预报系统主要集成了底层、平台层和应用层, 在各层次内包含若干子层和子模块(见图 2 所示)。

支撑层包括 GIS 系统、WebGIS 和 GPU 加速计算技术等, 为本系统提供软/硬件保障。

平台层主要包括模型平台和基础数据平台。基础数据平台由流域概况、气象信息、雨情信息、水情信息、工情信息和人口信息等组成。其中气象、雨情、水情和工情需接入对应数据库, 以便实时更新, 流域

概况和人口信息可根据实际情按需更新。水利专业模型层在系统后台运行, 以模型计算结果查询和使用为主。其中, 水利专业模型的计算和操作在经 GPU 加速算法的工作站进行, 并由经培训的专业人员负责。经工作站计算后的成果, 通过可视化模型结合基础数据、自然背景等信息, 直观展示湛江蓄滞洪区实时洪水演进过程。

应用层针对业务管理需求, 涵盖一张图、模型管理、洪水预报、风险预警、洪涝预演、调度预案“四预”管理和风险评估模块, 结合电脑 PC 端使用, 实现流域洪水预报管理的精准化和智慧化。

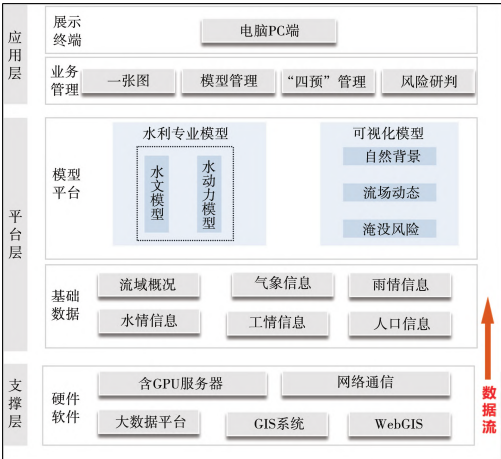


图 2 系统设计开发框架示意

4 关键技术

4.1 水文洪水演进模型建立

4.1.1 水文预报模型建立方法

湛江蓄滞洪区地处湿润地区, 蓄满产流是该流域主要产流方式, 且以地表径流为主。基于上述结论, 本研究通过三水源新安江模型进行水文预报^[11-12], 并大庙峡水文站为节点, 建立大庙峡断面水文预报模型和大庙峡~湛江河口区间水文预报模型。

1) 大庙峡站洪水预报模型范围为大庙峡站以上的整个流域。大庙峡站洪水预报的输入断面是流域区间, 输出断面是大庙峡站。采用相关水文资料对模型进行率定、检验。

2) 湛江区间洪水预报模型范围为大庙峡站以下至湛江与北江的交汇口。本次洪水预报中, 移用大庙峡站新安江模型参数构建湛江区间的新安江模型, 并根据流域特点和集雨面积的不同对部分参数进行了修正。

4.1.2 洪水演进模型建立方法

洪水演进模型上边界北江选取在飞来峡水利枢纽, 滘江选取在新塘村附近, 下边界北江取在石角水文站断面, 模拟区域覆盖滘江蓄滞洪区 22.0 m 以下等高线范围 (见图 3)。模型采用三角形网格进行离散, 共剖分为约 16 万个网格。模型参照《珠江流域蓄滞洪区建设与管理规划报告》的分洪运用方案, 各围区的分洪应用中, 以江口圩的水位超过分洪应用阈值时, 各围区破围分洪。

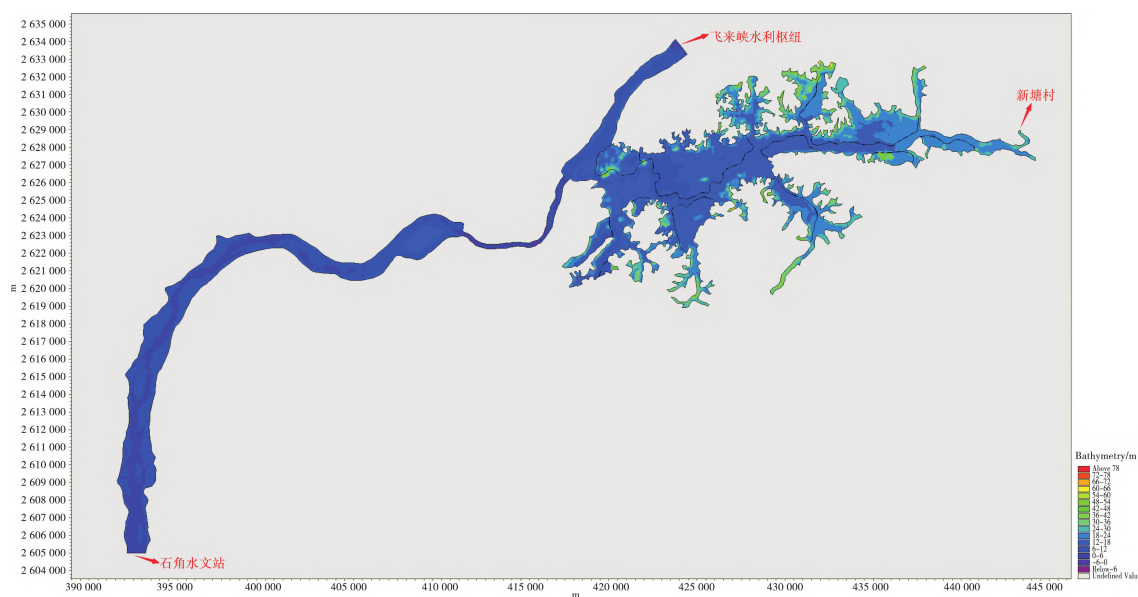


图 3 水动力模型范围示意

4.2 GPU 加速计算

本次模型采用 CUDA Fortran 语言实现 GPU 加速的并行计算。由于 GPU 处理器控制逻辑较为简单, 不能单独对整个计算流程进行处理, 所以本次 GPU 加速并行计算在 CPU 与 GPU 的异构平台上进行, 两个处理器互相配合进行计算任务处理, 其中 GPU 主要进行计算任务, CPU 负责处理逻辑事务及串行运算。在计算过程中, CPU 作为主要领导, 负责产生和交付多线程任务, 而 GPU 作为计算任务的执行者, 将任务分配至 GPU 硬件的计算单元中进行计算, 两者进行必要的信息传递, 完成整个计算流程。

执行计算任务时, 先使用 CPU 对参数进行初始化, 包括网格属性、边界条件、糙率数等数据的读取。再将每个计算网格上的参数复制分配到 GPU 的相应显存中, 设置相关参数运行预先编写好的 GPU 端数据处理核函数, 随后开始计算过程。当需要进行结果

水文模型与洪水演进模型采取“松散”方式进行耦合。主要通过 ADO(Active Database Object)数据访问技术读取数据库的水情信息, 作为边界条件或源项引入洪水演进模型实现耦合计算。水文模型预报滘江蓄滞洪区相关的水情信息分别存入水情数据库, 通过 ADO 访问水情数据库, 读取洪水演进模型所需的实时数据和预报数据, 生成洪水演进模型的边界条件文件, 最后由洪水演进模型进行计算。

输出时, 再将计算网格上的参数同步复制到 CPU 中进行结果输出。

4.3 WebGIS 可视化场景模拟

集成水利部 L1 级 DEM 和 DOM 数据, 结合广东省智慧水利一期“一张图”基础水利地图和公开数据, 构建北江、滘江 2.5 维空间地理模型, 展现区域内地形地貌、自然河流水系, 包括重点河流、堤防、水闸等工程周边自然场景、水利工程上下游及河道流场动态, 满足仿真模拟和综合展示等需要。

5 系统功能实现

5.1 GPU 并行加速计算实现

模型计算模拟时长为 5 d, 时间步长为 30 min, 分别采用 CPU 为 1 核、2 核、4 核、8 核和 GPU 为 RTX1050、RTX3080 并行计算, 用以测试计算效率。

测试表明, CPU 常规工况下, 当采用 1 核计算时, 计算时长为 4 h 50 min; 当采用 2 核计算时, 计算时长为

4 h 10 min; 当采用 4 核计算时, 计算时长为 3 h 55 min; 当采用 8 核计算时, 计算时长为 3 h 45 min。GPU 并行计算工况下, 当采用 RTX1050 计算时, 计算时长为 58 min; 当采用 RTX3080 计算时, 计算时长为 25 min。

CPU 常规计算工况下, 2 核、4 核和 8 核计算时长相较于单核 CPU 计算时长分别降低了 13.79%、18.97% 和 22.41%, 可见多核 CPU 计算比单核计算效率更高。当采用双核计算时, 计算时长降低率最大, 随着 CPU 核心的增多, 计算时长降低率变小, 表明高性能 CPU 对计算效率的提高有限。GPU 并行加速工况下, RTX1050 和 RTX3080 并行计算相较于单核 CPU 计算时长分别降低了 80.00% 和 91.38%, 可见采用 GPU 并行加速计算能有效提高计算效率, 大幅度地减小了计算时长。相同并行计算工况下, 采用 RTX3080 显卡相较于 GTX1050 显卡并行计算时长减小了 56.70%, 表明采用高性能显卡能大幅度提高并行计算效果(见图 4)。本次计算服务器采用 RTX3080 显卡并行计算, 相较于传统计算模式, 计算效率提高了 11.6 倍, 大幅度提高了模型预见性。

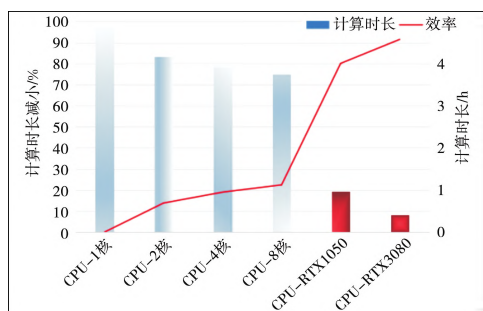


图 4 不同工况下计算效率对比示意

5.2 WebGIS 洪水演进过程实现

系统基于 WebGIS 应用的计算机软件, 实现了最基础的图形数据显示、缩放等功能。通过流域洪水演进过程仿真, 反映流域河道中洪峰及区域淹没的演进过程, 得到洪水可能的影响范围、水深流速场等水力过程等特征数据。用户能够对各洪水淹没区域的淹没水深、淹没面积、淹没历时、洪水流速、洪水到达时间等信息进行空间查询(见图 5)。实现对洪水河道演进、蓄滞洪区淹没范围和淹没深度等致灾后果进行可视化模拟。汛期可为人口转移决策、抗洪抢险、蓄滞洪区调度等提供可视化的判定, 非汛期可用于蓄滞洪区启复盘, 并进行优化调度方案的编制。

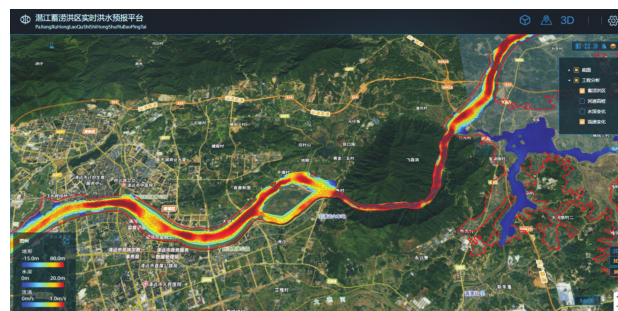


图 5 滙江蓄滞洪区洪水预报系统示意

6 结语

本文利用 GPU 并行计算技术, 显著提高了计算效率, 解决了蓄滞洪区洪水模拟效率低、耗时长的问题, 提高了模型预见性。采用 WebGIS 将三维可视化模型和洪水模拟模型相融合, 构建了滙江蓄滞洪区实时洪水预报系统, 为北江及滙江蓄滞洪区的洪水管理, 包括防洪方案的制定、防洪设施管理、蓄滞洪区的合理调度运用、抗洪抢险等提供支持支撑。

本文所使用的 GPU 加速技术仅仅是单卡加速, 在处理百万级以上网格规模的问题时计算性能还具有一定的局限性, 如何将 GPU 多卡并行计算技术与云计算技术相融合, 并应用于洪水预报系统, 进一步延长洪水预报的预见期是下一步研究方向。

参考文献:

- [1] 席小康, 宋淑红, 李凯娟. 基于中国洪水预报系统的渭河拓石站洪水预报[J]. 陕西水利, 2021(7): 51-53, 56.
- [2] 付磊. 小流域山洪灾害不同历时临界雨量确定模式研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2020.
- [3] 谢鸣超. 基于新安江模型的洪水预报系统设计与实现[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2018.
- [4] 李晓东. 尼洋河流域洪水预报预警系统研究与实现[D]. 林芝: 西藏农牧学院, 2023.
- [5] 韩智娟. 滙江蓄滞洪区建设与管理初探[J]. 广东水利水电, 2016, (10): 59-61.
- [6] 刘达, 黄本胜, 刘中峰等. 珠江流域滙江蓄滞洪区湿地化建设模式及对蓄滞洪的影响分析[J]. 中国防汛抗旱, 2023, 33(11): 28-32.
- [7] 郑伟坤. 滙江蓄滞洪区水利工程规划设计探析[J]. 中华建设, 2021(7): 114-115.
- [8] 卢真建. 基于 MIKE 模型的滙江水面线计算分析[J]. 中国农村水利水电, 2019(10): 6-11.

(下转第 79 页)

water resources development, lack of water supply sources for users, imperfect water transmission and distribution equipment, the regional strategic plan of “rain and flood priority, regeneration supplement, seawater pilot and groundwater emergency reserve” was put forward, a comprehensive utilization system of water resources was formed, which was “multi-water overall planning, salt and water coordination, innovation and saving, demonstration and driving”, a “blue-green, intensive and economical, efficient and practical, safety resilience” water supply network was constructed, water resources was fully utilized, which solved the bottleneck of the shortage of municipal miscellaneous use and river landscape water in the area, greatly improved the urban living environment and met the people’s needs for a beautiful environment. It was conducive to promoting the construction of the national pilot demonstration zone in Shenzhen, and at the same time, the comprehensive utilization strategy scheme and utilization system with coastal characteristics were formed, which provided ideas and technical references for the comprehensive development and utilization of water resources in other coastal cities.

Keywords: water resources; environmentally improved ; high quality development of water conservancy; water supply network; pilot demonstration area



(上接第 72 页)

[9] 庞春华, 冯伟添. 湛江蓄滞洪区总体布置与堤线选择探讨[J]. 广东水利电力职业技术学院学报, 2023, 21(2): 28-31.

[10] 刘达, 黄本胜, 刘中峰, 等. 大型蓄滞洪区移民安置与绿色发展模式研究[J]. 水利发展研究, 2023, 23(4): 58-61

[11] 包为民. 新安江模型参数的自动率定[J]. 河海大学学报, 1986(4): 22-30.

[12] 段胜武, 佟志军. 基于 GIS 的饮马河流域洪水预报系统设计与实现[C]//中国环境科学学会. 2014 中国环境科学学会学术年会(第三章), 2014: 6.

(本文责任编辑 马克俊)

Research on Flood Forecasting System for Pajiang River Flood Storage and Detention Area Based on GPU Parallel Computing and WebGIS

CHEN Pixiang^{1,2}, YE Zhiheng^{1,2}, YE Lina^{1,2}, WANG Yang^{1,2}

(1. Guangdong Research Institute of Water Resources and Hydropower, Guangzhou 510635, China;
2. Guangdong Key Laboratory of Hydrodynamics Research, Guangzhou 510635, China)

Abstract: The numerical simulation used in flood forecasting involves a large amount of calculations, and the simulation results need to be processed by various specialized software before they can be displayed to users. The operation is cumbersome and cannot meet the requirements of rapid response in flood control scheduling and emergency response in flood storage and detention areas. This article proposes a flood forecasting system based on GPU parallel computing and WebGIS, aiming to improve the efficiency of flood calculation, extend the foresight period, and achieve visualization of flood evolution. The system is based on the latest GPU accelerated calculation method, utilizing the powerful floating-point operation of GPU to greatly improve the efficiency of flood calculation. Combined with WebGIS technology, the calculation results of the hydrological flood evolution model are seamlessly connected with the hydraulic base map, and the flood evolution process is visually displayed in the form of charts, images, and animations, enabling decision-makers to intuitively grasp the evolution process of floods in flood storage and detention areas, Provide assistance for the operation and flood control of Pajiang River Flood Storage and Detention Area.

Keywords: GPU; WebGis; Pajiang River flood storage and detention area; flood forecasting system