

RSFVMWQ-2D水动力模型数据交互接口研究

雷四华¹, 唐凌军², 吴巍¹, 张鹏程², 戈智诚²

¹南京水利科学研究院, 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京

²河海大学, 江苏 南京

收稿日期: 2021年9月6日; 录用日期: 2021年11月19日; 发布日期: 2021年12月9日

摘要

水动力模型I/O处理需占用大量时间, 对其数据交互接口研究, 优化系统I/O效率、降低人工干预、提高模型利用率, 具有广泛需求。本文简要给出了国内外几款水动力模型计算数据交互管理方式, 对其计算I/O处理接口进行了归纳; 介绍了RSFVMWQ-2D模型的数学方法、适用范围, 以及I/O数据内容、处理方法; 针对RSFVMWQ-2D模型研究了一套完整的数据库与计算文件之间数据自动交换组织处理方法, 开发了可视化操作界面, 该方法可适用于其他以数据文件进行I/O交互的模型, 具有较好的推广性。

关键词

二维水动力模型, 数据库, 数据交互, 接口处理

Study on Data Interaction Interface of RSFVMWQ-2D Hydrodynamic Model

Sihua Lei¹, Lingjun Tang², Wei Wu¹, Pengcheng Zhang², Zhicheng Ge²

¹State Key Laboratory of Hydrology Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing Jiangsu

²Hohei University, Nanjing Jiangsu

Received: Sep. 6th, 2021; accepted: Nov. 19th, 2021; published: Dec. 9th, 2021

Abstract

The I/O processing of hydrodynamic model takes a lot of time. There is a wide demand to study its data

作者简介: 雷四华(1973-), 男, 江西南昌人, 教授级高工, 研究方向: 水文水资源及水利信息化, Email: shlei@nhri.cn

文章引用: 雷四华, 唐凌军, 吴巍, 张鹏程, 戈智诚. RSFVMWQ-2D 水动力模型数据交互接口研究[J]. 水资源研究, 2021, 10(6): 609-616. DOI: 10.12677/jwrr.2021.106066

interaction interface, optimize the system I/O efficiency, reduce manual intervention and improve the utilization of the model. In this paper, several interactive management methods of hydrodynamic model calculation data at home and abroad are briefly given, and their calculation I/O processing interfaces are summarized. The mathematical method, application scope, I/O data content and processing method of RSFVMWQ-2D model are introduced. Aiming at RSFVMWQ-2D model, a complete set of data automatic exchange organization and processing method between database and calculation file is studied, and a visual operation interface is developed. This method can be applied to other models with I/O interaction based on data file, and has good popularization.

Keywords

Two Dimensional Hydrodynamic Model, Database, Data Interaction, Interface Processing

Copyright © 2021 by author(s) and Wuhan University.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 概述

数据输入输出(I/O)方式直接影响模型计算效率与推广应用便利性。具有对水流过程精细模拟特点的水动力模型,其数学模型基本方程决定其需要大量的计算条件作为数据输入。当前,许多水动力模型以软件系统模式进行配置与分发,在系统研发中均需要大量的模型数据 I/O 处理工作。

采用水动力学方法进行水流动态数值计算中,二维水动力模型常用于模拟开放空间的水流过程计算,或需要考虑横向扩散运动水流动态计算[1]。二维水动力模型计算控制条件复杂,开展计算前需进行繁杂的数据预处理,且需完整的地形条件资料,常与 GIS、RS 等技术进行有机结合,形成基础空间信息为模型计算服务。黄海等在综合分析欧美国家及国内研发的水动力软件产品进展基础上,认为我国水动力软件产品的研发还处于初期探索阶段,与国外的差距,主要不是在建立模型的方法上,而在于开发软件的系统性、集成性、通用性、界面以及开发工具、平台、数据库等方面,该系列差距严重制约了研究成果向应用的转化和推广[2]。

英国 HR Walling Ford 公司提供的市政供水、雨污水、流域管理的专业模型软件解决方案 Info Works 产品,以及城市防洪系统解决方案 Flood Works,支持 ACCESS、SQL Server 和 Oracle 数据库,并支持数据以.CSV 文件导入/导出数据库,通过关联数据库管理系统,提供了交互式数据图形处理分析,这些数据 I/O 处理对于模型计算均是基本需求,是模型计算的基础[3]。

MIKE 相关模型从计算维度上划分,分别是基于一维非连续流方程的一维模型、基于二维浅水方程的二维模型和一、二维耦合模型,在模拟过程中主要以文件进行数据交换,包括断面文件、河道位置文件、河道连接文件、水工建筑物位置文件、边界文件、模型参数文件和时间序列文件等[4]。

HEC 是采用 Fortran 开发的开源代码程序,可编译为执行文件运行,在用户手册中给出了输入数据格式要求,各输入数据均采用输入文件形式,给定扩展名为 dat,模型从文件读取所需要的计算输入条件。SWMM 是采用 C++开发的开源代码程序,可编译为动态链接库或可执行程序,所需计算输入数据由扩展名为 inp 的文件提供,用户需按照说明组织该文件。

综上所述,国内外模型在计算数据交互处理中,目前仍有较多以数据文件方式进行 I/O 处理,部分已形成软件系统,采用数据库存储管理。作为模型计算所需的计算参数、边界条件等,目前均以数据库存储管理为主,若在计算过程与数据库进行交换,I/O 处理需占用大量计算时间,而采用集中进行前处理的模式,可有效降低模

型计算处理总时长,并能保证模型计算引擎的独立性。为此,研究一套可视化、便捷的模型计算与数据库交换接口具有现实意义。

2. 二维水动力模型

2.1. 数学模型

在水动力计算方面,有许多采用 Fortran 程序研发的模型库和应用,其程序结构清晰,内容完整精炼,可继承性好。同其他程序语言相比,利用 Fortran 进行开发时,数值计算方面不必采用过多底层开发技术即可达到较高效率,并能在较短时间掌握。继承现有模型库可避免对这些代码进行大量的改写工作,并可进一步自主研制补充完善各计算模块,实现计算优化,避免了大量复杂代码的分析。

本文以基于有限体积法及黎曼近似解的二维水流-水质模型(简称为 RSFVMWQ-2D 模型)作为二维水动力模型实例,对数据交互进行研究分析。

该模型为水平二维水流-水质数值计算模型,适用于浅水水体的水流及水质模拟,由水平二维水流模型 RBFVM-2D 扩建而成[5] [6] [7] [8]。模型应用守恒的二维非恒定流浅水方程组描述水流流动,并用二维对流-扩散方程描述污染物的输运扩散。应用有限体积法及黎曼近似解对耦合方程组进行数值求解,从而模拟出水体的水流过程和相应的污染物输运扩散过程。

在计算处理中,首先根据计算区域的天然地形并考虑已建或拟建水工建筑物及排污口的位置,用无结构网格(或结构网格)使计算区域离散化。然后逐时段用有限体积法对每一单元建立水量、动量和浓度平衡,确保其守恒性,用黎曼近似解计算跨单元的水量、动量和浓度的法向数值通量,保证计算精度。

模型主要特点有,① 模型设有 Osher、通量向量分裂(FVS)和通量差分裂(FDS)三种可选择的黎曼近似解[9];② 模型通过有限体积法的积分离散并利用通量的坐标旋转不变性把二维问题转化为一系列局部的一维问题进行解算;③ 其无结构网格可由四边形、三角形、或两者的混合组成。

2.2. 模型参数及输入资料组成

RSFVMWQ-2D 模型计算需要控制参数外,还需作为计算需求的输入资料,包括水流过程资料、污染物资料、地形资料等。RSFVMWQ-2D 模型通过数据文件获取计算参数及各输入资料,各变量的输入顺序及格式均需符合模型计算及读取顺序的要求。

基本控制参数有模拟时段总数、给定边界总数、使用单位类型(英制或公制)、打印频率(即计算输出频率,以模拟时段的倍数计)、单元边流量输出、是否模拟水质等。

水流过程线控制参数有,流量过程线、流速过程线、水位过程线、闸门开度过程线、水位~流量关系曲线等共 11 类,给出了各类过程线的数量。

时间及阈值控制参数有,模拟时段的每时段时长、计算时间步长、干旱单元的水深阈值、湿润单元的水深阈值等。

其他控制参数还有闸门公式和数值格式选择参数,边界条件数据、特定流量输出参数等。

水流过程资料有流量、水位、闸门开度等过程线数据,以及水位流量关系数据、水流计算初始条件的初值数据等。

用于计算污染物扩散水质分布的污染物控制参数及资料有,污染物控制参数、降解速率数据、污染物背景值、污染物边界条件、污染物过程线数据、污染物初值数据。其中,污染物控制参数主要有污染物边界条件的总数、水质模拟计算时步长、污染物扩散系数、污染物浓度过程线、点污染横向混和系数等。

详细参数及输入资料如表 1 所示。

Table 1. The table of RSFVMWQ-2D's input parameter and data**表 1.** RSFVMWQ-2D 模型参数及输入资料列表

序号	参数类别	主要内容	用途
1	基本控制参数	模拟时段总数、给定边界总数、使用单位类型(英制或公制)、打印频率(即计算输出频率,以模拟时段的倍数计)、单元边流量输出、是否模拟水质等。	对模型计算过程的主要控制参数
2	过程线数据控制参数	流量过程线总数、流速过程线总数、水位过程线总数、闸门开度过程线总数、水位~流量关系曲线总数、降雨过程线总数等。	指定模型计算中用了哪些过程线数据,及过程线的条数
3	时间及阈值参数	每时段时长、计算时间步长、干旱单元的水深阈值、湿润单元的水深阈值等。	控制模型的计算时间段,以及干湿变化控制
4	闸门公式和数值格式选择参数	内边界闸下出流公式选择、上下游边界处的闸下出流公式选择、法向通量公式选择、一阶二阶计算精度选择、风速、风向角等。	指定模型计算所采用的公式
5	特定流量输出参数	单元边节点	指定输出某一单元边的流量
6		边界条件所在边的节点号	指定边界
7	边界条件	边界条件类型:流量、水位~流量关系、水位、流速、急流、闸、堰、堤、桥涵、湿地支流、上下游处闸、上下游处堰	给出条件的类型,以便分别读取数据
8		过程线数据:流量过程、水位过程、闸门开度过程、急流边界水位过程、水位流量关系数据	按照时间过程给出要素系列值
9	初值数据	水位、X 方向流速分量、Y 方向流速分量	给定计算区域内各单元的初始值
10		模拟区内的节点总数、单元总数	模型计算处理范围及循环控制
11	地形数据文件	节点数据:节点的 X 坐标、Y 坐标	计算节点的空间位置
12		单元数据:组成单元的节点,单元的曼宁糙率系数、底高程	计算单元的空间位置及特性
13		污染物控制参数:污染物边界条件的总数、水质模拟计算时步长、污染物扩散系数、污染物浓度过程线数、点污染横向混和系数等	控制模型对污染物计算范围
14		污染物扩散参数:X 方向、Y 方向污染物的扩散系数	给定污染物扩散特性
15	污染物数据	降解速率数据	给定污染物降解特性
16		污染物背景值	计算范围内污染物原始值
17		污染物边界条件:污染物浓度过程、污染物浓度梯度	污染物进入计算范围的浓度过程
18		污染物初值数据	计算范围各单元污染物计算的初值

3. 计算交互数据接口

3.1. 数据文件交互

RSFVMWQ-2D 模型与数据文件进行输入输出交互,输入文件包括表 1 所述的参数及输入资料;输出以二维表形式文本存储,输出内容包括各单元中心坐标、水深、水位、流速、流向、各种污染物(COD, BOD, NH₃-N,

DO)浓度、水温及盐度等，以及指定单元边的流量。

RSFVMWQ-2D 模型以数据文件为接口其优势主要有：

- 1) 文件内容紧凑，占用空间少，节省计算机资源；
- 2) 计算模型软件一次性读取数据文件，数据 I/O 处理效率高；
- 3) 模型开发人员不必掌握数据库建设、存储管理等其他计算机技术，仅需掌握数据文件处理，以便其集中开展模型研究；
- 4) 模型迁移便利，仅需对数据文件及模型软件进行迁移。

然而，仅采用数据文件为接口，也存在较多劣势，主要有：

- 1) 文件内容结构极为复杂，不适合人工重复编辑组织；
- 2) 雨水情、水质等实时采集数据，目前均以数据库存储，缺少与这些数据库对接方法；
- 3) 模型计算不能数据随到随处理用于日常应用软件服务。

以上分析可知，RSFVMWQ-2D 模型各计算参数及输入资料均以数据文件为接口，且全部参数及大部分资料集总在同一数据文件，对数据内容组织结构、排列顺序、数据类型等严格要求，在用于一次性的研究模拟具有较明显优势，但在以系统开发频繁用于模拟分析时，其前期数据处理工作量对于应用人员将无法承受。

3.2. 数据库存储与交互

为了发挥数据文件接口优势、避免其劣势，满足系统开发与日常应用需求，有必要建立参数及数据资料存储数据库，并开展与数据文件交互接口研究。

1) 参数及输入资料与模型关系分析

模型参数及输入资料采用面向对象模型进行关系表存储设计，模型计算与参数、输入资料之间复用关系可通过图 1 描述。

图 1 中，RSFVMWQ-2D 模型计算引擎为核心，经装配计算单元地形网格，并对内外边界设置后，形成模型实例。以模型实例为基础，通过进一步装配控制参数、内外边界条件及初始条件，即可开展计算。其中边界设定与边界条件存在对应关系，均为计算单元边的属性。边界条件与初始条件(计算单元初始值)可称为模型计算输入，控制参数称为计算方案。

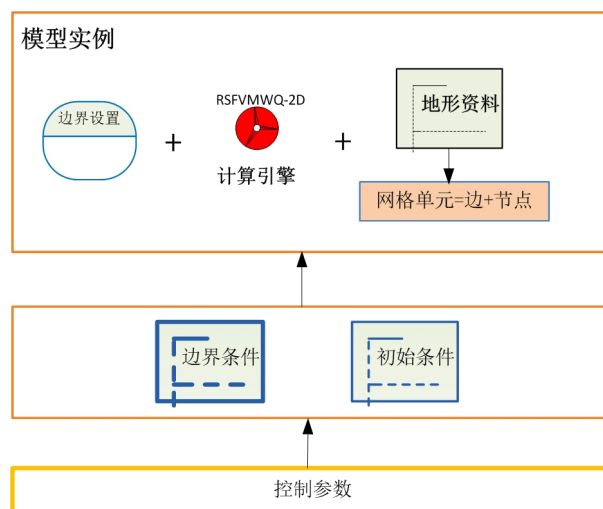


Figure 1. Schematic diagram of composition relationship between model and input and output data

图 1. 模型与输入输出数据组成关系示意图

2) 参数及输入资料存储组织

RSFVMWQ-2D 模型计算启动时按顺序读取计算方案及边界条件与初始值, 依照模型数据处理过程, 对参数及输入资料进行存储组织, 相应地建立数据库表 57 张, 统称为模型专用数据库。

在该专用数据库所涉及的对象中可划分为 3 类, 分别是计算单元、模型边界、计算方案。

计算单元相关数据库表有节点信息表、单元信息表、初值信息表等。

模型边界对应的数据库表分别有, 边界基本信息表(水流边界 8 张, 水质边界 1 张)、边界条件过程线信息表(水位流量过程线 18 张, 水质过程线 12 张)等。

计算方案对应的数据库表有, 计算时间及方案布局参数表、过程线选定参数、公式选择参数表, 以及污染物降解速率信息表、背景值信息表等。

3) 数据交互处理流程

数据交互处理的目的是将各来源数据及时整理成符合模型计算需要的格式数据, 过程线数据主要来源于实时雨水情数据库[10]的河道、堰闸、水库等水位、流量数据库表, 计算单元、模型边界基本信息、计算方案等均在模型专用数据库存储。

交互处理流程包括实时雨水情数据库至模型专用数据库、模型专用数据库至模型计算控制文件, 以及模型计算成果至模型专用数据库等过程, 处理方式可采用后台处理, 或根据计算方案提交时机进行交互处理。在模型计算单元及模型边界配置基础上, 对后台处理时机、处理方式等进行设置, 后台处理可采用定时或即时等方式实施。数据库交换处理流程如图 2。

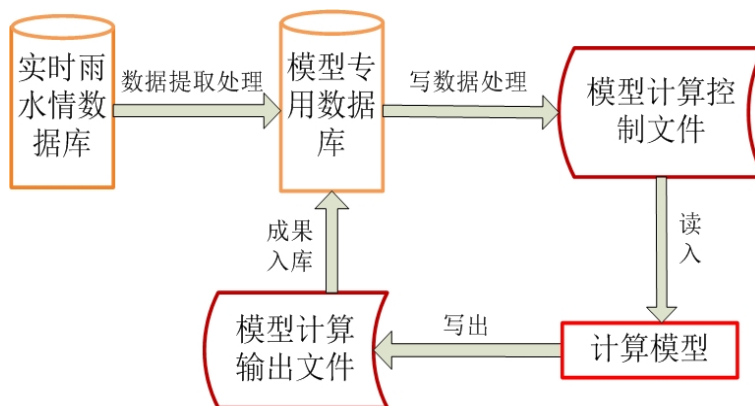


Figure 2. The flow chart of model interaction data processing

图 2. 模型交互数据处理流程图

4. 软件模块实例

该数据接口处理模块实例采用 Java 及 JavaScript 开发, 利用标签页对模型计算控制文件进行分类, 各分类标签以文本框显示各相关数据项, 依据模型实例可设置默认初值。在该软件模块辅助下, 按照模型实例计算场景, 可快速完成各边界条件数据接口处理模块定制。

前端人机交互界面处理中应用 1 个 tab 控件, 4 个标签条, 分别显示控制参数、过程线数据、时间及阈值参数、公式及数据格式参数等内容, 标签页中各输入框有对输入数据格式的提示信息, 且利用 JavaScript 实现了初步的数据验证, 不符合条件的数据将无法提交, 并给出弹窗进行提示。交互界面如图 3 所述。

后端数据处理采用 Java 数据库连接(JDBC), Java 输入输出流分别与数据库及文件进行交互通信, 使用 Tomcat 作为 Java 网络服务器, 并通过后端 Servlet 建立与前端交互通信。

Figure 3. Data interface interactive processing interface

图 3. 数据接口交互处理界面

5. 小结

二维水动力 RSFVMWQ-2D 模型能模拟多种水流及水质状态，包括非恒定流或恒定流、缓变流或急变流、渐变流或间断流、激波，以及非稳态或稳态污染物输移、渐变或突变的污染物分布等，内外边界可计算闸、堰、桥、涵、堤等水工建筑物水流过程，具有广泛的应用方向与应用场景。

模型应用场景决定了数据交互处理工作量，一个具有闸、堰、涵等多种类型复杂边界的应用场景，将大幅度增加数据交互处理工作量。提供一套程序化数据交互处理接口，能较大提高模型计算参数及输入资料的前期处理效率，降低模型参数及数据配置出现错误的风险。

在该研究中，全面梳理了 RSFVMWQ-2D 模型输入输出文件内容及数据格式，建立了一套模型计算数据库及交换处理的接口程序，在实时雨水情数据库与模型计算控制文件之间实现桥梁互通，为 RSFVMWQ-2D 模型推广应用提升了便利性。

基金项目

基本科研业务费专项资金项目(Y521019)。

参考文献

- [1] 陈鹏宇. 城市洪涝一维二维耦合模型与系统开发研究[D]: [硕士学位论文]. 济南: 山东大学, 2016.
CHEN Pengyu. Study on one dimensional and two dimensional coupling model and system development of urban flood. Master's Thesis. Ji'nan: Shandong University, 2016.
- [2] 黄海, 关见朝, 张磊, 王天宇. 安澜模拟系统的构建与应用[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2021, 19(1): 173-182+188.
HUANG Hai, GUAN Jianzhao, ZHANG Lei, and WANG Dayu. Construction and application of cross-scale all-dimensional environment simulation system. Journal of China Institute of Water Resource and Hydro-Power Research, 2021, 19(1): 173-182+188. (in Chinese)
- [3] 黄士力, 金惠英, 周凡, 冯泾, 潘崇伦. 面向数据驱动应用的水务信息一体化数据组织与管理[J]. 水利水文自动化, 2008(3): 1-5.
HUANG Shili, JIN Huiying, ZHOU Fan, FENG Jing, and PAN Chonglun. Data organization and management for data-driven oriented water affairs information integration. Automation in Water Resources and Hydrology, 2008(3): 1-5. (in Chinese)
- [4] 王世旭. 基于 MIKE FLOOD 的济南市雨洪模拟及其应用研究[D]: [博士学位论文]. 济南: 山东师范大学, 2015.
WANG Shixu. The study of simulation and application of rainwater and flood based on MIKE FLOOD model in Ji'nan City. Ph.D. Thesis. Ji'nan: Shandong Normal University, 2015. (in Chinese)

- [5] 赵棣华, 沈福新, 颜志俊, 卢恭和. 基于有限体积法及 FDS 格式的感潮河段二维泥沙冲淤模型[J]. 水动力学研究与进展 (A 辑), 2004, 19(1): 98-103.
ZHAO Dihua, SHEN Fuxin, YAN Zhijun, and LU Gonghe. A 2-D sediment transport model based on the FVM with FDS for tidal rivers. *Journal of Hydrodynamics*, 2004, 19(1): 98-103. (in Chinese)
- [6] 龚春生, 姚琪, 赵棣华, 吴云海, 丰茂武. 浅水湖泊平面二维水流-水质-底泥污染模型研究[J]. 水科学进展, 2006, 17(4): 496-501.
GONG Chunsheng, YAO Qi, ZHAO Dihua, WU Yunhai, and FENG Maowu. Plane 2-D flow-water quality-sediment pollution couple model in shallow lake. *Advances in Water Science*, 2006, 17(4): 496-501. (in Chinese)
- [7] 赵棣华, 李褪来, 陆家驹. 长江江苏段二维水流-水质模拟[J]. 水利学报, 2003(6): 72-77.
ZHAO Dihua, LI Tilai, and LU Jiaju. 2-D depth-averaged flow-pollutions model for Jiangsu reaches in Yangtze River. *Shuili Xuebao*, 2003(6): 72-77. (in Chinese)
- [8] LIU, L., WANG, J., ZHANG, Y., TANG, K., and MA, T. Coupling characteristics between bubble and free surface in a shallow water environment. *Ocean Engineering*, 2021, 237: 109577.
- [9] 许仁义, 汪凌翔, 王远见, 方浩川, 王俊贤, 戴惠东. 浅水方程源项处理的研究进展[J]. 人民黄河, 2021, 43(7): 35-40+83.
XU Renyi, WANG Lingxiang, WANG Yuanjian, FANG Haochuan, WANG Junxian, and DAI Huidong. Research progress on source term treatment of shallow water equation. *Yellow River*, 2021, 43(7): 35-40+83. (in Chinese)
- [10] 中华人民共和国水利部. SL323-2011 实时雨水情数据库表结构与标识符[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2011.
Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. SL323-2011 structure and identifier for real-time hydrological information. Beijing: China Water & Power Press, 2011. (in Chinese)