

基于浅水波方程的水动力模型应用研究

阚飞¹, 胡其德², 朱飞鹏², 卢鑫¹, 吴星辰³

(1.四川省水利科学研究院, 成都 610072; 2.四川省都江堰水利发展中心东风渠管理处, 成都 610081; 3.成都禀证科技有限责任公司, 成都 610047)

摘要: 以都江堰东风渠灌区某段渠道为研究对象, 以守恒型圣维南方程作为天然河道一维非恒定流控制方程, 提出了灌区渠道断面几何形状快速变化条件下的变量空间重构方法, 推导了基于守恒型圣维南方程的 HLLC 求解器通量计算式。结果表明, 基于浅水波方程的水动力模型在灌区水流推演中具有较好的模拟性能和适应性, 不仅可为河网复杂区域的水动力数值模拟提供一种高精度、简便的方法, 还可实现对水网复杂区域水流演进的高效预测, 为水资源管理与调度提供参考。

关键词: 浅水波; 水动力模型; 灌区; 预演

中图分类号: TV133

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2023064

阚飞, 胡其德, 朱飞鹏, 等. 基于浅水波方程的水动力模型应用研究[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(Supp.1): 99-102.

KAN Fei, HU Qide, ZHU Feipeng, et al. Application of Hydrodynamic Model Based on Shallow Water Wave Equation[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(Supp.1): 99-102.

0 引言

科学的水资源调度对提升灌区水资源利用效率、提高农业灌溉效益具有重要意义^[1]。在需水量明确的条件下, 干渠渠首水量输配过程对灌区水资源分配及灌溉效率具有重要意义^[2]。开展灌区渠系水资源调度理论研究可以有效提升灌区工程管理及水资源管理水平, 对保障作物生产力和提高农业用水效率具有重要意义。

随着现代化农业的发展, 灌区监管能力提质增效的需求更加紧迫^[3-4]。水资源调度是在保障水利枢纽相对稳定的基础上, 依据区域水量和用水需求, 结合水利工程的运行和管理需求, 确定合理有效的水量分配方案并分发实施到具体用水户/单元的方法, 是落实水资源合理利用及综合管理的具体实施过程^[5]。渠系水资源调度的基础是水流演进模型的构建, 传统的水流演进研究方法主要包括水力学方法^[6]和水文学方法^[7]。对于灌区等天然河网、人工水系复杂的地区, 由于水利工程较多, 地形、地势复杂, 受人为扰动较为明显, 不完全符合产、汇流规律, 因此传统的水文

学方法适用性较差, 而水动力学方法侧重于模拟水流运动规律, 可以反映河网、渠道的细微差别, 模拟效果相对合理^[8]。

圣维南方程组是水动力控制方程的基础, 主要用于描述和求解非恒定流^[9]。Delis 等^[10]在明渠水流演进中采用圣维南方程进行隐式离散求解。Zoppou 等^[11]在城市供水模拟中采用圣维南方程进行显式离散求解。Delis 等^[10]在明渠流态研究中采用高阶隐式离散方法。Abbott 等^[12]采用有限差分法对浅水波方程进行离散, 未能有效解决间断水流问题。Jha 等^[13]采用 Godunov 格式的有限体积法, 利用 Riemann 求解器计算二维浅水波方程。Mingham 等^[14]采用近似的 Riemann 求解器求解浅水波方程。由于 HLL 近似 Riemann 求解器将波族简化为 2 个, 因此只适用于 2 个方程的一维系统^[15], 对间断波和剪切波的模拟精度较差。为了解决 HLL 求解器中波族缺失的问题, Toro 等^[16]提出了 3 波族模型的 HLLC 求解器^[17]。HLLC 求解器可扩充浓度组分方程, 为地形复杂、水网交错的浅水波方程构建及水动力模拟提供较好的解析条件^[18]。

本研究采用守恒型圣维南方程作为天然河道一维非恒定流控制方程, 基于 Godunov 格式, 提出了灌区渠道断面几何形状快速变化条件下的变量空间重构方法, 推导了基于守恒型圣维南方程的 HLLC 求解器通量计算方法, 为河网复杂区域的水动力数值模拟提供一种高精度、简便的方法。

收稿日期: 2023-02-24 修回日期: 2023-03-01

基金项目: 四川省水利厅科技专项东风渠梁江堰水资源智能化调配与智慧水网构建关键技术研究(川水科 2020019 号); 四川省水利厅科技专项四川省水利信息资源整合共享关键技术应用研究(2022-17-2060499); 四川省区域创新合作项目时敏敏感的空地通算网络关键技术与应用(2022YFQ0090)

作者简介: 阚飞(1996-), 男, 工程师, 硕士, 主要研究方向为水利信息化、水文水资源等。E-mail: 331209314@qq.com

©《灌溉排水学报》编辑部, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议

1 模型简介

1.1 控制方程

以守恒型圣维南方程作为控制方程。由于灌区渠系结构复杂、断面形状各异，渠道水流常存在急缓流交替的现象。因此，以守恒形式的圣维南方程作为控制方程能够对间断水流的有限体积 Godunov 格式进行离散求解。

1.2 数值方法

1) 离散方法

采用 Godunov 型有限体积法对控制方程进行离散，时间离散采用显式欧拉格式推进。

2) 通量计算方法

通量计算采用 HLLC 格式的近似黎曼求解器进行求解。

HLLC 求解器在 HLL 求解器 2 波族的基础上增加了中间波，中间波的波速为 S_* 。HLLC 通量表达式如下。

$$F_{i+1/2}^{\text{HLLC}} = \begin{cases} F_L & , 0 < S_L \\ F_{*L} = F_L + S_L(U_{*L} - U_L) & , S_L \leq 0 \leq S_* \\ F_{*R} = F_R + S_R(U_{*R} - U_R) & , S_* \leq 0 \leq S_R \\ F_R & , 0 > S_R \end{cases}, \quad (1)$$

式中： F_L 和 F_R 分别为界面左侧和右侧通量； U_{*L} 和 U_{*R} 分别为中间波的左侧和右侧变量，为待求变量； F_{*L} 和 F_{*R} 分别为中间波左侧和右侧通量； S_L 和 S_R 分别为界面左侧和右侧波速。

$$S_L = u_L - q_L a_L, S_R = u_R + q_R a_R, \quad (2)$$

式中： u_L 和 u_R 分别为界面左侧和右侧流速； a_L 和 a_R 分别为界面左侧和右侧重力波的波速； q_K ($K=L, R$) 的表达式如下：

$$q_K = \begin{cases} \sqrt{\frac{(\bar{h}_* + h_K)\bar{h}_*}{2h_K^2}}, \bar{h}_* > h_K \\ 1 & , \bar{h}_* \leq h_K \end{cases}, \quad (3)$$

式中： \bar{h}_* 为中间波精确水深 h_* 的估计值，采用下式估算：

$$\bar{h}_* = \frac{a_{TR}^2}{g}, \quad a_{TR} = \frac{1}{2}(a_L + a_R) - \frac{1}{4}(u_R - u_L), \quad (4)$$

式中： a_{TR} 是基于界面左、右两侧均为稀疏波的假定对重力波波速 a 的估计值。

为了计算界面通量，还需要 U_{*L} 和 U_{*R} 。引入如下假设：

$$A_{*L} = A_{*R} = A_*, \quad Q_{*L} = Q_{*R} = Q_*, \quad S_* = \frac{Q_*}{A_*}, \quad (5)$$

经求解可得：

$$A_* = \frac{Q_R - Q_L + S_L A_L - S_R A_R}{S_L - S_R}, \quad (6)$$

$$Q_* = \frac{S_L Q_R - S_R Q_L + S_L S_R (A_L - A_R)}{S_L - S_R}, \quad (7)$$

$$S_* = \frac{S_L Q_R - S_R Q_L + S_L S_R (A_L - A_R)}{Q_R - Q_L + S_L A_L - S_R A_R}. \quad (8)$$

1.3 模型集成

基于 Websevice API 系统集成技术，通过数据接口对接的方式，完成平台端与模型服务端的数据交互。模型的数据接口包括水文数据接口、渠系拓扑网络关系数据接口、河道断面地形数据接口、模型参数接口、模拟结果数据接口。

模型的运行方式分为 2 种，第一种为定时启动计算，第二种为平台请求启动。定时启动指模型按照设定的间隔时间，此时间可以与监测数据更新时间同步，读取当前最新监测数据，启动计算；平台请求启动指平台发出请求命令，模型管理程序收到请求命令后，读取当前最新监测数据或人工设定的边界数据，启动计算。

2 应用案例研究

东风渠灌区是都江堰灌区的核心组成部分，地处成都平原腹地，承担成都、眉山市 20 个县（区）的输供水和水安全保障任务，同时承担向黑龙潭灌区、龙泉山灌区农田输水的任务，在全省水安全保障及水利高质量发展中有着重要作用。

选取东风渠灌区走马河进口（0+000）至梁江堰枢纽闸（45+558.64）为研究区域，该区域存在“渠系水网结构不明、输配水流程尚未明晰、闸群调度没有可靠的决策辅助”的问题。研究区域全长 45.56 km，设有自动监测水位站 22 个，区间重点干支渠、水闸等信息如表 1 和表 2 所示。

2.1 断面处理

由于研究区工程体系较为复杂，结合模型特征及现有水利数据现状，在勘测断面、沿程高程、渠道、水闸、堰等进行了以下处理。

提取勘测断面的河道部分，对断面按一个微小高度进行垂向微分，计算从底部到顶部的各项几何属性积分值，如过流面积、水面宽度、压力等。

表 1 研究区域重点干支渠信息

序号	干支渠	位置	序号	干支渠	位置
1	三岔堰	0+667	14	清水河	25+020.0
2	柏木河	1+532.0	15	皮家堰	25+215.0
3	五斗口	1+530.0	16	红旗渠	31+932.0
4	黄鹤堰	4+859.0	17	晨光支渠	34+024.0
5	徐堰河	7+462.0	18	团结渠	37+180.0
6	红塔堰	10+022.0	19	南北大道排洪渠	37+493.0
7	丰收堰	13+742.0	20	天王堰	38+122.0
8	新胜支渠	15+108.0	21	红光右支渠	38+160.0
9	向阳支渠	15+108.0	22	龙池堰	42+077.0
10	乌龙堰	17+194.0	23	漏沙堰	44+041.0
11	永兴支渠	23+505.0	24	金牛支渠	45+164.0
12	友爱支渠	23+976.0	25	苏坡支渠	45+324.0
13	沱江河	25+015.0	26	摸底河	45+522.0

表 2 研究区域重点水闸信息

序号	水闸	位置(桩号)	设计流量
1	五斗口枢纽闸	1+558.75	237
2	聚源枢纽闸	7+484.52	237
3	新胜支渠闸	15+108.0	8
4	永兴支渠闸	23+540.66	12
5	两河口枢纽闸	25+035.82	120
6	团结枢纽闸	37+272.11	120
7	梁江堰枢纽闸	45+558.64	120

考虑到断面勘测数量和沿程的高程点位并非一一对应，且沿程高程点数明显多于断面勘测数，因此有必要对渠道的沿程高程分布进行特别处理。根据模型中设置的单元长度，对其高程和节点位置上的断面几何属性值进行分段拉格朗日插值，最大限度保证模型数据的真实性和勘测数据的可用性。

由于研究段沿途分渠众多，缺乏各分渠的断面勘测资料，最终考虑以节点源项的形式体现。根据提供的分渠水量、水位的对应关系，定制了通过闸前水位和分渠流量关系线的源项处理方式，确保了非定常计算过程中的各分渠点的正确配水。

通过各闸的设计调度规则，转化为特定水位-流量对应关系，从而控制闸前水位和过闸流量。根据前期调研资料，目前渠道沿程的闸门主要以全开或全关的方式运行。根据这一特点，开发了闸门动态启闭模块，实现了在计算过程中闸门在不同时段的自动开启或关闭，为后续的调度方案模拟提供技术保障。

2.2 算例分析

选取 2021 年 9 月 12 日 19 时 20 分—9 月 13 日 23 时 55 分、2021 年 9 月 15 日 0 时 5 分—9 月 15 日 23 时 45 分、2021 年 9 月 17 日 0 时 5 分—9 月 17 日 23 时 55 分、2021 年 9 月 19 日 0 时 15 分—9 月 19 日 23 时 30 分、2021 年 10 月 2 日 14 时 20 分—10 月 3

日 5 时 35 分共 5 个时段的演进过程进行模拟及验证。

选取的模拟对象为聚源节制闸（位于初始断面 7+495.0 处），由于聚源节制闸为研究区域起始断面后的第一个主干渠枢纽闸，与起始流量有较强的关联性，可通过分析模拟值与实测值及其与初始流量的拟合关系来分析模型的可靠度。采用模拟值与实测值的均方根误差（*RMSE*）来评价模型的可靠度。

由表 3 可知，2021 年 9 月 12 日 19 时 20 分—9 月 13 日 23 时 55 分的聚源节制闸模拟值、实测值的拟合效果较好。2021 年 9 月 13 日 10 时后，模拟值与起始流量的拟合程度较好，但较聚源走马河实测流量偏高。*RMSE* 为 3.5，实测值的标准偏差为 8.6，模型性能良好。2021 年 9 月 15 日 0 时 5 分—9 月 15 日 23 时 45，模拟值与实测值及起始流量的一致性较强，*RMSE* 为 2.99，实测值的标准偏差为 7.1，模型性能良好。对于 2021 年 9 月 17 日 0 时 5 分—9 月 17 日 23 时 55 分，相比于其他时段，该时段拟合效果不佳，但与起始流量的一致性较强，*RMSE* 为 3.65，实测值的标准偏差为 7.85，模型性能良好。对于 2021 年 9 月 19 日 0 时 15 分—9 月 19 日 23 时 30 分，模拟值与实测值及起始流量的一致性较强。*RMSE* 为 2.78，实测值的标准偏差为 6.79，模型性能良好。对于 10 月 2 日 14 时 20 分—10 月 3 日 5 时 35 分的模型验证结果，*RMSE* 为 2.59，实测值的标准偏差为 5.47，模型性能良好。

表 3 模拟结果误差分析

序号	模拟日期	实测值标准偏差	<i>RMSE</i>
1	2021 年 9 月 12 日	8.633 2	3.485 6
2	2021 年 9 月 15 日	7.125 1	2.990 9
3	2021 年 9 月 17 日	7.853 3	3.651 7
4	2021 年 9 月 19 日	6.792 8	2.778 5
5	2021 年 10 月 2 日	5.468 1	2.587 1

3 结论

基于浅水波方程的水动力模型在灌区水流推演中具有较好的模拟能力和适应性，不仅可为河网复杂区域的水动力数值模拟提供一种高精度、简便的方法，还可实现对水网复杂区域水流演进的高效预测，为水资源管理与调度提供参考。

(作者声明本文无实际或潜在利益冲突)

参考文献:

- [1] 马颖卓. 加快灌区现代化改造与节水技术应用 促进黄河流域生态保护和高质量发展—访中国工程院院士康绍忠[J]. 中国水利, 2021(17): 4-7.
- [2] 莫明珠, 刘明忠, 董祚, 等. 多分水口渠道的水流演进方法研究[J]. 中国农村水利水电, 2020(2): 56-62.

- [3] 胡雅琪, 吴文勇. 中国农业非常规水资源灌溉现状与发展策略[J]. 中国工程科学, 2018, 20(5): 69-76.
- [4] 蔡晓莉, 韦顺凡. 农业节水灌溉现状及其发展趋势[J]. 中国农村水利水电, 2009(8): 20-21.
- [5] 邓坤, 张璇, 杨永生, 等. 流域水资源调度研究综述[J]. 水利经济, 2011, 29(6): 23-27, 70.
- [6] 张大伟, 权锦, 马建明, 等. 应用 Godunov 格式模拟复杂河网明渠水流运动[J]. 应用基础与工程科学学报, 2015, 23(6): 1 088-1 096.
- [7] 赖正清. 平原河网区分布式水文建模与水文模拟研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2017.
- [8] 付晓花, 董增川, 韩锐, 等. 复杂河网地区气候-水文-水动力耦合模型模拟[J]. 水资源保护, 2023, 39(3): 162-169.
- [9] 王浩骅, 管光华, 肖昌诚. 一维圣维南方程差分数值算法中稀疏矩阵求解方法比较及优选研究[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(3): 116-124.
- [10] DELIS A I, SKEELS C P, RYRIE S C. Implicit high-resolution methods for modelling one-dimensional open channel flow[J]. Journal of Hydraulic Research, 2000, 38(5): 369-382.
- [11] ZOPPOU C, ROBERTS S. Catastrophic collapse of water supply reservoirs in urban areas[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1999, 125(7): 686-695.
- [12] ABBOTT M B, DAMSGAARD A, RODENHUIS G S. System 21, "jupiter" (a design system for two-dimensional nearly-horizontal flows)[J]. Journal of Hydraulic Research, 1973, 11(1): 1-28.
- [13] JHA A K, AKIYAMA J, URA M. First- and second-order flux difference splitting schemes for dam-break problem[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1995, 121(12): 877-884.
- [14] MINGHAM C G, CAUSON D M. High-resolution finite-volume method for shallow water flows[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1998, 124(6): 605-614.
- [15] TORO E F, GARCIA-NAVARRO P. Godunov-type methods for free-surface shallow flows: A review[J]. Journal of Hydraulic Research, 2007, 45(6): 736-751.
- [16] TORO E F, SPRUCE M, SPEARES W. Restoration of the contact surface in the HLL-Riemann solver[J]. Shock Waves, 1994, 4(1): 25-34.
- [17] TORO E F. The HLLC Riemann solver[J]. Shock Waves, 2019, 29(8): 1 065-1 082.
- [18] 孙万光, 杨海滔, 杨斌斌, 等. 基于 HLLC 近似 Riemann 求解器的天然河道水流运动模拟[J]. 中国农村水利水电, 2022(2): 12-19.

Application of Hydrodynamic Model Based on Shallow Water Wave Equation

KAN Fei¹, HU Qide², ZHU Feipeng², LU Xin¹, WU Xingchen³

(1. Sichuan Research Institute of Water Conservancy, Chengdu 610072, China; 2. Sichuan Dujiangyan Dongfeng Canal Management Office, Chengdu 610081, China; 3. Chengdu Bingzheng Technology Co., Ltd., Chengdu 610047, China)

Abstract: Takes a section of Dujiangyan Dongfeng Irrigation Area as the research object, The conservative Saint Venant equation is used as the control equation of one-dimensional unsteady flow in natural river channel. Based on Godunov format, a variable space reconstruction method is proposed under the condition of rapid change of channel section geometry in the irrigation area. The flux calculation formula of HLLC solver based on the conservative Saint Venant equation is derived and applied. The results show that the model has good simulation ability and adaptability in the water flow evolution in the irrigation area, It not only provides a high-precision and simple method for numerical simulation of hydrodynamic forces in complex areas such as irrigation areas, but also can realize reasonable and efficient prediction of water flow evolution in complex areas such as irrigation areas, providing strong support for water resource management and scheduling.

Key words: shallow water wave; hydrodynamic model; irrigation area; preview

责任编辑: 韩 洋