

STAR-CD 在蓄滞洪区洪水演进中的应用研究

Application Research of STAR-CD on Flood Routing in Flood Storage and Detention Area

孙涛, 黄诗峰

中国水利水电科学研究院 遥感中心

Sun Tao, Huang Shi-feng

(Inst. of Water Resources and Hydropower Research of China, Beijing, China, 100044)

摘要: 本次研究采用先进的计算力学模拟软件 STAR-CD, 选取淮河典型蓄滞洪区作为研究对象, 结合水文、水文地质资料, 模拟蓄滞洪区启用后的洪水演进过程, 分析了不同时刻的 VOF、水深和水的流速。对于研究制定蓄滞洪区规划、设置、补偿应用、投资建设和运行管都有重要的参考意义, 从而在蓄滞洪区的应用中更好地体现“人与水和谐相处”的新时期治水理念。

关键词: 蓄滞洪区 计算流体力学 洪水演进 淮河

Abstract The author simulates the flood routing in typical flood storage and detention area, Huaihe River, with STAR-CD toolkit which is used to build computation fluid dynamics (CFD) model with the support of hydrological and hydrogeological data. Results analysis on Volume of Fluid (VOF), water depth and water velocity will play import role on the plan, set, construction, compensation and the management of flood storage and detention areas and will well demonstrate the new water control idea i.e., people in harmony with water.

Key words: Flood Storage and Detention Area, CFD, Flood Routing, Huaihe River

1 概述

洪涝灾害、水资源不足及水环境污染等三大问题是当前水利工作者面临的主要问题, 在这三大类研究中都涉及大量的数值模拟技术。国际上从八十年代开始发展起来的流体数值仿真技术结合了流体动力学和计算技术的最新进展, 应用计算流体力学 (CFD) 对难以进行实验的工况进行模拟, 用高度精确的计算方法求解水在各种工况下的流态。他们提倡全数字化概念, 建立了包括从详尽的流域地理信息、水文的历史数据、数字化预测、评估、决策系统。对几乎所有重要流域建立了即时更新的数据库系统。同时利用精确的三维流体仿真分析技术完善和发展了现有的经典的水位、灾害预测方法。这对提高灾害预报、水环境评估技术具有重要意义 [1]。

Computational Fluid Dynamics(CFD)是现代流行的一种模拟仿真技术。目前比较好的 CFD 软件有：STAR-CD、Fluent、CFX、Phoenics。STAR-CD 是当今国际上应用最广泛的流体分析软件包。它能够把现有的水力学计算方法提升到一个较精确且又理论化的高度。STAR-CD 软件在洪水行为数值模拟(包括河道洪水模拟、蓄滞洪区洪水演进数值模拟、溃坝洪水模拟等)、跨流域调水、水资源配置数值模拟以及水环境数值模拟等方面都可以发挥重要作用。国外, STAR-CD 在海岸、港口、船舶等方面有比较多的应用, 如模拟船舶在水中的运动; 模拟大坝泄洪、水闸放水等等, 可以比较清楚地反映出自由水面和水汽混合的状态; 也有用于湖泊、水库水质污染物扩散的速度分布模拟。目前国内在水利方面应用的还不多见。本次研究探讨其在蓄滞洪区洪水演进方面的应用, 分析其可行性和优势[2]。

2 滞洪区概况

蓄滞洪区主要是指河堤外洪水临时贮存的低洼地区及湖泊等, 其中多数历史上就是江河洪水淹没和蓄洪的场所, 它是防洪体系重要的组成部分。在我国一些大江大河的不同河段, 都有一些防洪用的蓄滞洪区。中国长江、黄河、淮河、海河流域中下游平原地区共有 97 个国家级蓄滞洪区, 总面积约 $3.5 \times 10^4 \text{ km}^2$, 人口 1700 万。新中国成立以来, 这些蓄滞洪区在几十年的防洪抗旱工作中, 发挥了重大的、不可替代的作用。国家共启用蓄滞洪区近 500 次, 平均一年拦蓄洪水 9 次, 拦蓄洪水总量达 $1230 \times 10^8 \text{ m}^3$, 为缓解重点地区和重点城市的防洪压力起到了重要作用, 避免了洪灾损失的扩大。现在, 蓄滞洪区的作用也越来越突出。但是, 蓄洪区的发展也存在着较多的问题。比如蓄滞洪区运用不规范, 管理薄弱问题及运用后的补偿、区内生态和水资源问题等日益凸显。反映到技术层面上, 一个很重要的原因就是对于洪水在蓄滞洪区内的演进的研究尚不够, 尤其造成对蓄滞洪区受灾补偿缺少足够的技术支持[3]。

淮河流域在我国经济和社会发展中占有极其重要的地位。在地形、气候等多种因素影响下, 历史上淮河经常发生洪水, 近期的 1991 年和 2003 年淮河流域连续发生 2 次特大规模洪水, 都给人民的生命财产造成重大损失。“一定要把淮河治理好!” 至今仍作为淮委会的委训, 体现了多代国家领导人对淮河洪水的极大关注。1991 年和 2003 年淮河的两次大洪水都启用了蒙洼蓄滞洪区(图 1), 所以此次模拟研究选取它作为典型的研究区。蒙洼蓄洪区总面积 180.4 km^2 , 涉及安徽省阜南、颍上两县 75 个行政村、近 15 万人。自 1952 年建成以来, 先后 11 年 13 次蓄滞洪水。王家坝是淮河蒙洼行蓄洪区的主要控制工程, 建于 1953 年, 共 13 孔, 每孔净宽 8m, 设计流量为每秒 $1334 - 1626 \text{ m}^3$, 设计蓄洪水位 27.66m, 相应蓄洪量 $7.2 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。分洪闸门顶高程 29.0m, 在闸门顶部加了 0.30m 高的活动叠梁, 当王家坝水位超过 29.3m 时, 闸门顶部将自动漫溢过流。



图 1 蒙洼蓄滞洪区及王家坝控制工程

3 模型研究

3.1 建模分析

模型主要是模拟蓄滞洪区行、蓄洪时洪水演进,研究其运动规律,模拟仿真不同时段洪水淹没范围、速度,从而为洪水调度、防洪及避险迁安预案的建立提供依据。STAR-CD 是真正的三维网格计算软件,模型的建立包括研究区域的概化、曲面造型及二维模型的生成、三维网格的实现和边界和初始条件的设定。

在蓄滞洪区形态及地形模拟的基础上,要分析蒙洼蓄滞洪区内有关地质、地形地貌资料,DEM(Digital Elevation Model)及相关的 GIS 资料,按照相关软件要求格式进行处理;模型区域概化后,建立二维表面模型。二维模型经过修正和检验后可作为生成三维模型的模板;根据计算要求,选择生成三维网格的大小、数量及形状。对于生成的模型原型设定边界、初始条件及计算条件后,经过网格、边界等计算检验后完成模型检验、修正,完成模型建立工作[4]。在完成数字地理模型及三维网格计算模型的基础上,可以将计算结果与 GIS 结合,利用 GIS 的强大的空间分析功能,为洪水演进提供空间决策支撑。

3.2 模型建立

蒙洼蓄滞洪区内地形虽然较为平坦,但面积较大,加之避水庄台点状分布,用手工绘制模型底面造型难度较大。所以采用 CAD 生成区域表面模型,再基于 STAR-CD 形成计算网格。泄洪三维仿真模型的建立包括区域地形数字化表征、模型区三维曲面及面实体生成、三维面单元生成、三维体单元构造。

根据蓄滞洪区特点,将其概化为一个底面凸凹不平,形状类似煎锅般的容器,“煎锅”底面是蒙洼蓄滞洪区真实地形表面,上部是开口的平面,容器的周边由一定高度的堤岸组成。

关键是“锅底”的构造，要能尽量模拟真实蓄滞洪区内的地形。整体方案是使用三维 CAD 工具 Unigraphics(UG)生成表面 CAD 数据，再现蓄滞洪区地形。使用 UG 生成边界范围内的三维曲面，这个曲面是不闭合的。根据模型特点模拟堤防，需将曲面在 Z 方向拉伸(10m 可以满足建模需要)。将生成的三维表面导入 PROSURF 中做面单元。共有 1197 个节点，形成

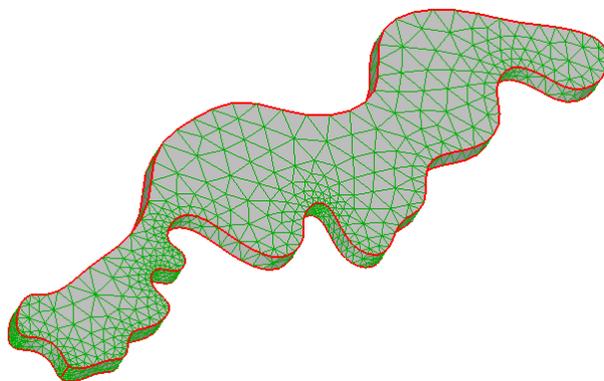


图 2 蒙洼蓄滞洪区三维面单元

2792 个面三角单元(图 2)。

使用向导生成计算体单元，生成模板网格后，用模板网格生成计算域内的网格体单元。可以生成多面体单元(Trimmed Cell Mesh)和四面体单元(Tetra Cell Mesh)，前者在模拟计算较大面积区域时更易收敛。根据研究区和洪水演进特点，此处我们首先在全局选用较大的长度，生成疏松网格。再在洪水计算真正涉及的区域(10m 高度以内)，进一步细化。图 3 是生成的粗疏体多面体网格，网格长度为 100m，共生成网格 203218 个。生成的体网格经过检查，全部满足计算要求。

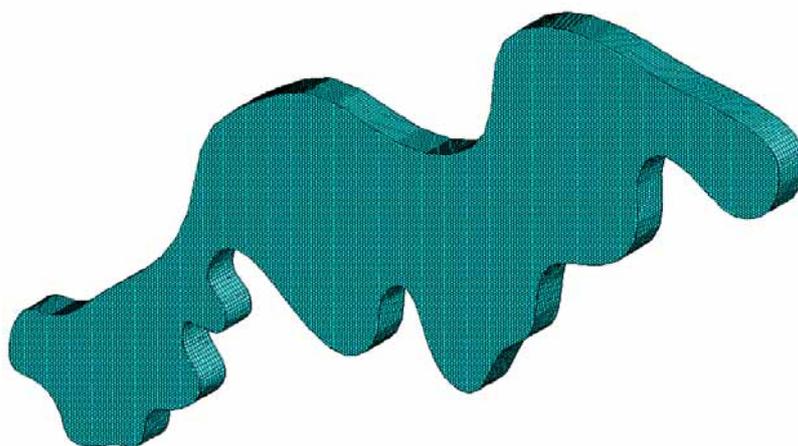


图 3 蓄滞洪区体单元示意图

将生成的粗网格在 Z 方向进行细化。保持网格在水平方向的大小(约 100m), Z 方向 10m 分成 16 份, 单元网格厚度分别为 1m(上部 4 层单元)和 0.5m(下部 12 层单元), 共有单元 290426 个。

3.3 计算方案

模拟蒙洼蓄滞洪区在王家坝闸开闸放水泄洪期间的洪水演进过程。分析包括洪水的速度、洪水范围、淹没水深等一系列水情要素随时间的变化过程。设计方案模拟王家坝最大泄洪流量时洪水在蓄滞洪区内的运移情况。将整个蓄滞洪区周围按 10m 作为计算时的水位高度极值, 选取一个单元长度(约 100m), 上部 4 个单元作为水量入口。入口速度在水平和垂直两个方向上为 1.5m, 垂向速度 0.5m。整个入口面积上的瞬时流量约 $1600\text{m}^3/\text{s}$ 。模拟时假定蓄滞洪区内最初没有重流体的存在, 在这种情况下, 模拟水在充满空气, 上部是一个大气压, 不停进水时重流体 - 水在区内和空气交接, 在空气阻力和自身重力及地形影响下的运移过程。出口位于蓄滞洪区的另一端, 如果水量过大, 水体也会越过堤岸, 比较接近真实情况。因为洪水运移时的 Reynolds 数较大, 从数学模型上应用紊流情形下的自由表面模型。

3.4 初始和边界条件

选定计算分析的特征类型为紊态、自由表面分析。在蓄滞洪区设立四类边界, WALL 边界、INLET 边界、OUTLET 边界和 PRESSURE 边界。首先将整个外边界设置成 WALL 边界, 然后在王家坝设立洪水进口 INLET 边界、在蓄滞洪区出口处设定流量的出口的 OUTLET 边界, 表面设置为 1 个大气压的压力 PRESSURE 边界, 同时考虑到一定程度的地表下渗作用。蓄滞洪区内的水体流动较快, 速度随时间不停变化。计算中打开紊流项, 选取高雷诺数的计算模式 (K-Epsilon/High Reynolds Number) [5]。

3.5 计算及结果分析

在计算前, 对解析模型及计算算法进行设定。方程涉及变量包括速度 U、V、W; 气压 P; 粘滞性 Viscosity; Turb.KE 和 Turb.Diss。采用已知条件下的一阶差分变化梯度算法(CG), 最小残差设为 0.01。设计总运算时间为 48 小时, 计算时段为 10s, 每一个时段时间保持固定。设置最大的 COURANT NUMBER 为 20, 选用双精度计算模式, 保证有效收敛。输出 PST 和 PSTT 文件, PSTT 文件输出步长为 60s, 输出参数为速度和自由表面 VOF。运行模型计算, 得到各时段的 VOF、速度场及水深分布。

(1) VOF 分析

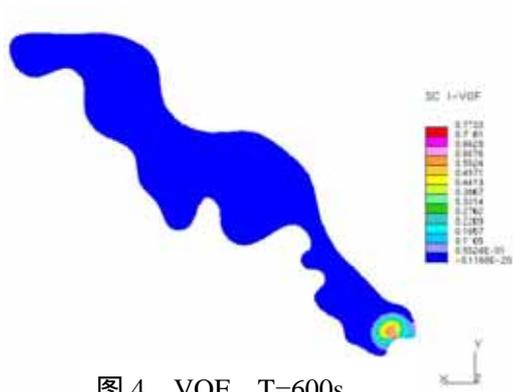


图 4 VOF T=600s

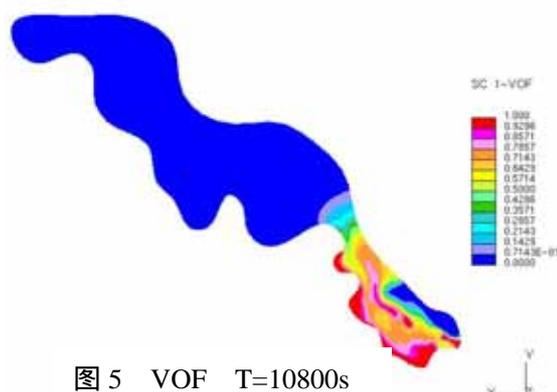


图 5 VOF T=10800s

从结果看(图 4-图 7), 在开闸放水的前期, 水流先是在放水口附近呈线性的扩散, 随着

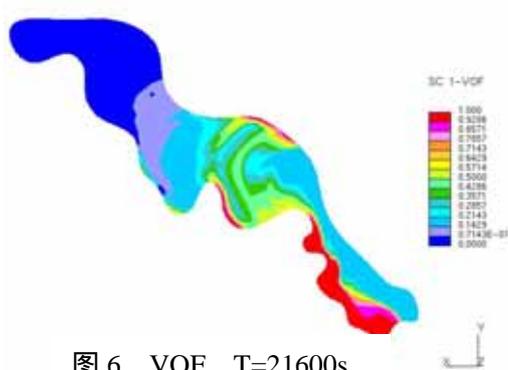


图 6 VOF T=21600s

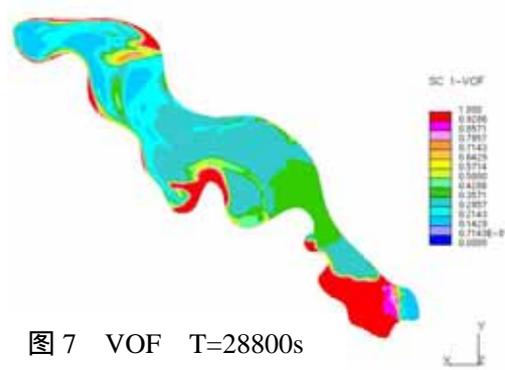


图 7 VOF T=28800s

水量增加, 水头锋面开始向前方移动, 在前进方向上呈近弧状向各个方向推进, 由于此处地势较为平坦, 地形对水流并没有明显的影响。水流从出口向四周逐渐衰减, 随着泄水时间的增加, 水流运动在两侧的推进速度要大于前进速度, 在 600s 时水流侧锋就移动到堤岸, 堤岸处水量会累积, 形成小规模的水壅, 此时水流会沿着堤岸向前运动或者向后方折回, 而前部的水头锋面则保持着较低的水位持续向前推进。前方水流移动到蓄洪区的最窄部位时, 水流推进放缓, 这也使得蓄滞洪区上游方向区域泄水不畅, 对应着沿河道及蓄洪区的中间部分单元内水量增加, 颜色转向砖红和紫红。在水体运移过程中, 微地形的变化对水流在蓄滞洪区内的分配起到了一定的作用。整体来看, 单元格内的水量保持在 0.1-0.3 的单元占 60% 以上, 一直保持到水头锋面行进到蓄滞洪区另一侧出口。而 VOF 值大于 0.8 以上的区域集中分布在沿河道一侧的堤岸及泄水出口附近, 但是所占面积相对较小。

(2) 流速分析

从时间上来看, 瞬时合速度(水平和垂直合成)的最大值刚开始呈增加趋势, 超过 10m/s, 泄水 10 分钟时局部达到 15.78m/s, 这只是在距离泄水口不远处的剖面上, 这是由于分洪初期水头前方阻力较小, 水流在后方推力作用下有一个起步加速的过程, 但这种趋势的范围很小; 随着泄水时间的延长, 前方速度逐渐放缓, 局部速度最大 5m/s 左右。在区域范围上,

整个蓄滞洪区内水流速度多在 0.2-2.0m/s 内变动。模拟的王家坝泄水口处速度较大，在蓄滞洪区内部速度大的区域多集中在低洼处及水流拐弯处；对于蓄滞洪区内的狭窄区，速度先是有减小趋势，随后又略有增加。另外，在堤岸处由于水流受阻，速度一般较小，会断续出现一些水位滞流区，但在有的地方由会产生一些旋流。在垂直方向上，水层上表面和水流底面速度也有一定的差别，以泄水 5h 后 水流速度分布场为例，可以看出，两者在狭窄区域的速度都较大，仅次于泄水区，但过后一直到水头锋面处速度都相对较小；另一方面底面水流相对平静，速度较上表面的小，进出狭窄区域的速度变化也较小，同时在沿河一侧的堤岸处有较大的区域接近零流速。部分地段出现水流回旋现象，表现为水流的折射、回退及发散。这在随河道拐弯较明显的一侧堤岸处及蓄滞洪区内的狭窄区域都有体现。

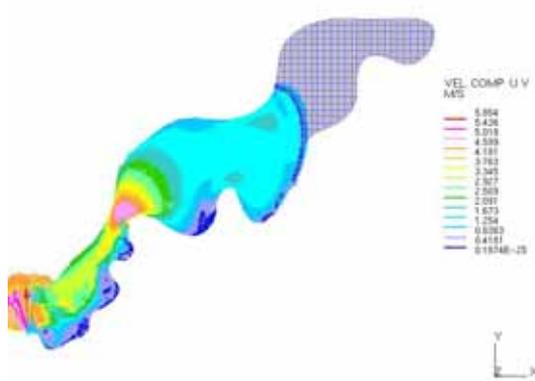


图 8 T=5h 上表面水流速度分布场

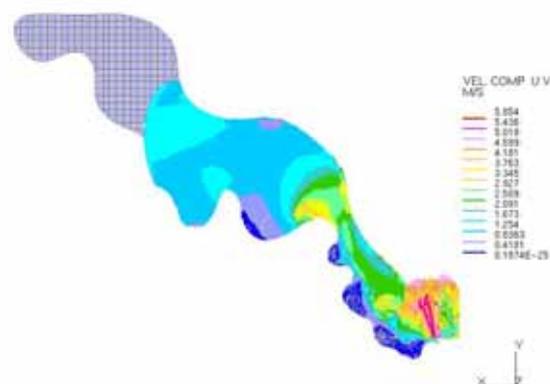


图 9 T=5h 下表面水流速度分布场

(3) 水深分析

根据过水锋面和剖面上的 VOF 分布，可以看出不同时段、不同位置的水深情况。总的来看，在泄水过程中，由于整个蓄滞洪区面积较大，同时模拟的泄水量又不是太大，全区的大部分地区水深都在 0.5-1.0m 以内。在泄水区附近由于水流的瞬间进入还来不及扩散到附近，水深达 2-3m 左右；另外，在局部地势低洼处及沿河道一侧挡水堤岸处，水流受阻，水深也会达到 2.0m 以上。

4 结论与建议

本次研究将基于 CFD 计算技术的 STAR-CD 应用拓展延伸至蓄滞洪区洪水演进问题的研究中，并形成了集数据前后处理、GIS 系统应用、模型模拟计算、动画演示和基于 GIS 的分析等多种功能于一体的一套完整的模拟应用过程，为蓄滞洪区洪水调度、水灾风险评估及管理信息系统提供一个新思路。

鉴于计算速度，本次研究仅模拟了淮河王家坝最大开闸放水时，洪水在蓄滞洪区内的演进情况。总体计算结果表明基于水动力学模型的洪水数值模拟，能够较好地模拟洪水的泛滥过程，揭示洪水自然特征的空间变化，模拟计算结果能够提供淹没水深、淹没历时、流速以

及到达时间等水情要素。但在计算中仍存在着一些潜在的问题。比如模型对蓄滞洪区的概化不完全合理，对于已有水体很难进行很好地考虑，蓄滞洪区水体的自然消耗也不容易给出；同时计算区域材质的影响，包括地面的实际下渗率及堤岸处（淮河大堤多是土堤）的水流及水力损失等；对于自然及建筑等人为因素的影响的处理也只能通过模型的单元位置及高程来考虑；另外，对于模型区的模拟难于找到充足的资料来检验和验证，目前只能作为实际工程和防洪调度的参考方案。

5 参考文献

- [1] <http://www.hhu.edu.cn/hhunews/shownews.asp?ID=119>。
- [2] 西迪阿特公司，STAR-CD 流体分析软件包算例分析报告，CD-adapco 中国办事处，2001 年 12 月。
- [3] 山西水利网，水利部蓄滞洪区安全与建设指导纲要，<http://sxwater.gov.cn/home/details.asp?articleid=245&flage=0>。
- [4] 西迪阿特公司，STAR-CD 基础培训教程，CD-adapco，JAPAN，2005 年 4 月。
- [5] 饶邦彦，熔融还原燃烧流场分析模拟，硕士论文，2001。