

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2016.02.016

基于 CCHE 的塔什米里克引水枢纽 二维水流数值模拟

徐乐¹, 牧振伟¹, 李园园¹, 贾亚非²

(1. 新疆农业大学 水利与土木工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830052;

2. 美国密西西比大学 国家水科学及工程计算中心, 美国 密西西比州 牛津 38677)

摘要: 基于 CCHE 软件, 采用混合掺长紊流模型, 建立了新疆典型河流塔什米里克引水枢纽的二维水流数学模型。针对引水枢纽复杂地形边界的网格独特处理方式, 使模拟条件更加贴合实际。模型基于试验, 选取了引水枢纽典型流量工况下水流运动进行计算, 结果显示了引水枢纽附近的水流流态、流速、流线分布, 以及典型断面水面线特征, 皆与模型试验吻合良好。表明该数学模型中的零方程紊流模型(混合掺长模型)能够有效地计算低水头引水枢纽水流特性问题, 且具有一定的稳定性。

关键词: CCHE2D; 引水枢纽; 水流运动; 紊流模型; 数值模拟

中图分类号: TV61

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2016)02-0083-07

2D Numerical Simulation Model of Täschririck Diversion Project Based on CCHE

XU Le¹, MU Zhenwei¹, LI Yuanyuan¹, JIA Yafei²

(1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi, Xinjiang 830052, China;

2. National Center for Computational Hydroscience and Engineering, the University of Mississippi, Oxford, Mississippi 38677, USA)

Abstract: Numerical simulation of 2D model of Täschririck (typical river of Xinjiang) diversion project was developed based on CCHE in mixing length turbulence models. For the diversion hub with complex terrain boundary, unique approach of mesh optimization, detailed structure boundary with a better fitting was realized to reflect the real project boundary. The typical flow of diversion project was selected based on the model test. The calculation results showed the water flow regime, flow velocity, the flow line and the characteristics of typical section of the water line in the vicinity of the water diversion project was in good agreement with the experimental data. Calculation results indicated that the zero-equation turbulence model can effectively calculate the water flow behavior of the diversion project and has a certain stability.

Keywords: CCHE2D; diversion project; water flow; turbulence model; numerical simulation

低水头引水枢纽具备在汛期泄洪, 枯水期调控小流量保证引水的能力, 是目前解决我国水资源分布情况不均匀, 保证农业灌溉用水的有效途径。然而天然河道中低水头引水枢纽存在其复杂边界条件, 势必会改变河道水流结构。受复杂河道地形、商业软件计算模块本身限制性的影响, 使得学者大多

针对枢纽中布置有建筑物处的水流特性进行分区分区研究, 余金星^[1]、李天滕^[2]、樊晶晶^[3]、章晋雄^[4]等采用 FLUENT 软件在拦河闸闸门不同调度运行方式下对水流结构的影响进行了研究, 高伟^[5]、谷攀^[6]、戴文鸿^[7]等利用数值模拟分析了人工弯道水流特性^[8-11], 得到了相应结论同时解决了众多工程问

收稿日期: 2015-12-25

修稿日期: 2016-01-17

基金项目: 新疆维吾尔自治区国际科技合作计划资助项目(20136021)

作者简介: 徐乐(1990—), 女, 江苏常熟人, 硕士研究生, 研究方向为水力学及河流动力学。E-mail: 583960786@qq.com

通讯作者: 牧振伟(1973—), 男(回族), 河南南阳人, 教授, 主要从事水力学及河流动力学研究。E-mail: xjmzw@163.com

题。然而实际工程中水利枢纽的运行往往由多种水工建筑物(溢流堰、拦河闸、人工弯道、溃坝)联合运用,枢纽边界条件及其复杂,河道水流结构特点随之多变。而现有的多数商业计算流体力学软件对于天然河道明渠流计算采用多相流的形式,需要对各项流体进行设置,对于自由液面的处理,另需结合 VOF 等自由表面追踪方法处理自由液面流;对于原河道高低起伏的复杂地形需进行概化处理。而 CCHE 软件^[12-13]默认为自由液面边界,利用网格点属性调节建筑物边界条件性质以及固壁边界条件,其初始河床地形可由精确地形数据导入模块插值形成,特别对泥沙模拟时的河床可冲性具有针对性设定,对于河床糙率亦可精确至输沙粒径级配采用公式计算,相对而言,CCHE 软件用于模拟天然河道复杂地形(包含建筑物组合)的引水枢纽水沙运动具有一定优势。

1 枢纽概况

新疆喀什地区盖孜河塔什米里克渠首工程位于盖孜河出山口以下规划的三级引水枢纽中第一级引水枢纽,位于疏附县塔什米里克乡境内,距喀什市 80 km。工程始建于 1961 年,经过多年运行后于 2001 年 2 月进行改建,改建后的枢纽运行仍然存在问题,目前欲进行二次改扩建。该枢纽为弯道式引

水枢纽,按苏联费尔干式渠首设计原理设计,构造物主要有:人工弯道、进水闸(4 孔)、冲沙闸(6 孔)、泄洪闸(原 8 孔,新增 4 孔,共 12 孔)、等组成。该枢纽工程设计洪水标准为 30 年一遇,相应洪峰流量为 806 m³/s。校核洪水标准为 100 年一遇,相应洪峰流量为 1 194 m³/s,工程设计引水流量为 60 m³/s,加大引水流量为 70m³/s。

2 物理模型试验

鉴于枢纽二次改扩建的需要,根据引水枢纽工程河段的水沙特性、枢纽设计特点以及模型试验条件,模型试验采用整体定床变态模型,模型长 24 m,宽 12.5 m,模型试验比尺见表 1。模型试验放水流量由 100 年一遇的校核洪水标准到日常水流流量的 8 个流量级别,观察了不同流量级别的水流流态、泄洪能力、引水能力等水力特性以及相应流量下保证引水的闸门运行方式。试验采用量水堰进行进出口流量控制,采用高速摄像机及数码相机进行水面流态观测记录,采用旋桨流速仪进行断面流速测定。本文主要研究引水枢纽附近水流运动,与物理模型试验进行对比分析,故数值模拟截取了整体模型的局部 TD01 ~ TD05 断面(枢纽上下游断面)进行还原模拟分析研究。模型试验布置图及数模研究截取断面如图 1 所示。数模选取模拟范围放大图如图 2 所示。

表 1 变态模型比尺

平面几何比尺 λ_l	垂直几何比尺 λ_h	几何变态率 D_t	流速比尺 λ_v	流量比尺 λ_Q	水面坡降比尺 λ_j	时间比尺 λ_t	河床糙率尺 λ_n
80	40	2.0	6.32	20224	0.5	12.66	1.29

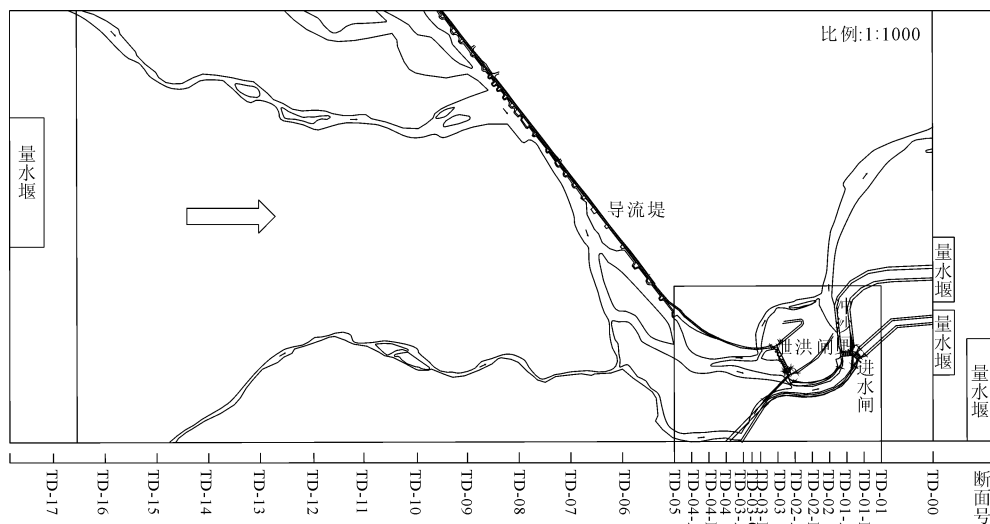


图 1 盖孜河塔什米里克引水枢纽工程整体模型布置

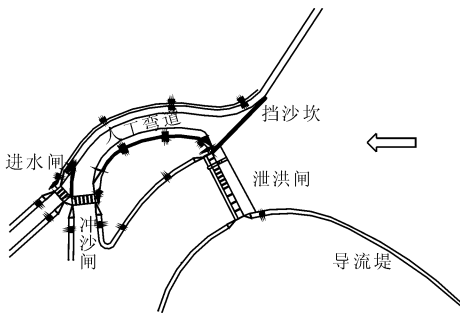


图 2 引水枢纽数模局部截面图

3 数值模拟方法

CCHE 模型是由美国密西西比大学水科学与工程计算中心研发的针对自由水面、泥沙输移、地形地貌改变、近海岸风浪、溃坝洪水以及对化学污染物输移与水质评价模拟的一款集成型数学模型。该系统主要由图形界面 (CCHE - GUI)、数学模型和网格生成器 (CCHE - MESH) 组成。即能模拟河流、湖泊、河口及近海的水流与泥沙输移的动态交互过程,也可以模拟和评估水工建筑物在河流中的作用。CCHE2D 模型采用隐式时间推进有效元素法 (Efficient Element Method), 水流模型采用交错网格求解连续方程式的水位,用速度校正法求解系统方程,干湿点的处理采用移动边界法处理。

3.1 控制方程

与大多数水流模拟采用 $k - \epsilon$ 双方程紊流模型不同,本文选取紊流模型为零方程涡黏模型中的混合掺长模型,该模型能够在满足精度需求的条件下,减少方程运算量,且保证运行快速稳定。模型求解垂线平均控制方程:

连续方程:

$$\frac{\partial Z}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

动量方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -g \frac{\partial Z}{\partial x} + \\ \frac{1}{h} \left[\frac{\partial(h\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(h\tau_{xy})}{\partial y} \right] - \frac{\tau_{bx}}{\rho h} + f_{Cor}v \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -g \frac{\partial Z}{\partial y} + \\ \frac{1}{h} \left[\frac{\partial(h\tau_{yx})}{\partial x} + \frac{\partial(h\tau_{yy})}{\partial y} \right] - \frac{\tau_{by}}{\rho h} + f_{Cor}v \end{aligned} \quad (3)$$

式中: u 和 v 为垂线平均流速分别在 x 和 y 方向上的分量; g 为重力加速度; Z 为水面高程; ρ 为水密度; h 为当地水深; f_{Cor} 为 Coriolis 科氏力系数; τ_{xx} 、 τ_{yx} 、

τ_{yy} 为垂线平均雷诺应力; τ_{bx} 和 τ_{by} 为河床切应力。

3.1.1 紊流闭合

式(2) 和式(3) 中的雷诺应力可以由 Boussinesq 假定来计算,即:

$$\tau_{xx} = 2\nu_t \frac{\partial u}{\partial x} \quad (4)$$

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} = \nu_t \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \quad (5)$$

$$\tau_{yy} = 2\nu_t \frac{\partial v}{\partial y} \quad (6)$$

3.1.2 紊流黏性模型

CCHE2D 模型有两个零方程紊流黏性模型。一个是垂线平均的抛物线型模型,另一个是垂线平均混合掺长模型。本研究采用的混合掺长模型中紊流黏性 ν_t 可以由下式计算:

$$\nu_t = \bar{l}^2 \sqrt{2 \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \bar{U}}{\partial z} \right)^2} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \bar{l} = \frac{1}{h} \int_k z \sqrt{\left(1 - \frac{z}{h} \right)} dz = kh \int_0^1 \lambda \sqrt{1 - \lambda} d\lambda \approx \\ 0.267kh \end{aligned} \quad (8)$$

$$\frac{\partial \bar{U}}{\partial z} = C_m \frac{U^*}{kh} \quad (9)$$

其中 C_m 取值为 2.34375。

3.2 模型网格划分与边界条件

3.2.1 网格划分

模型结构大致较为规则,因此计算区域网格划分采用矩形结构化网格。其结构化网格生成方法有两种形式:代数方法和数值方法。初次网格生成采用两边界代数网格生成法,对枢纽建筑物周围及复杂边界采用局部网格加密处理,考虑到计算精度以及质量问题,使用数值网格生成法 RL 正交网格(带光滑函数)进行网格二次优化。优化后的网格正交偏离度和平滑度(计算网格质量的两个综合评价指标)明显得到改善(尤其是图 3(b)中所标示处较为明显)。该模型计算域网格节点单元共计 69 768 个,图 3 为优化前后枢纽网格示意图。

由图 3 可以看出,优化后的网格虽然没有优化前网格数量多,密度大,但优化后的网格相对比较平滑,正交性较好。当网格偏离正交的程度有所降低以及平滑度均匀性较好时,可提高网格整体质量,有利于水流运动的模拟计算。

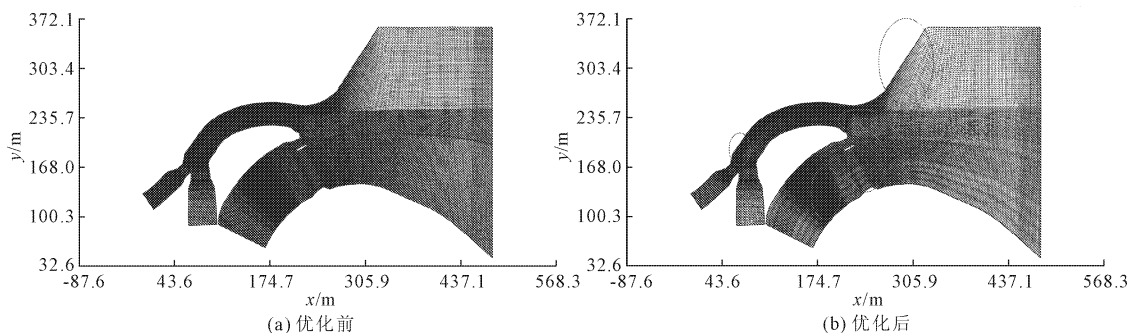


图 3 优化前后枢纽网格示意图

3.2.2 闸墩及闸门的网格处理

在低水头引水枢纽工程中,往往离不开闸墩、闸门、溢流堰及导流堤等水工建筑物,有些建筑物则可以通过高程局部设置来体现。若通过设定高程来体现阻水功能有一个特点,高程由上到下会产生一个梯度,例如闸墩这样一个矩形墩的设定,设定高程之后实际产生的是一个上小下大的梯形台,自然会影 响水流实际过流能力。此时,为弥补此类建筑物设定失真方面的不足,模型提供另一种设定方法,即通过设定局部网格点属性来实现。网格点根据其属性分为三类:内部点、边界点、和外部点。内部点在研究区域内部,参与计算,也叫有效计算点;边界点在研究区域边界上,起到阻水作用,网格计算将绕过边界区域继续计算;外部点在研究区域外部,不参与计算,也叫无效计算点。本文将闸墩处局部网格点属性设定为网格边界点,即边界从上至下是一个均匀不透水边界,除此边界外的所有点都参与计算,以满足实际过水需求。闸门全关模式时也使用该网格属性,此边界为不透水边界。

3.2.3 初始河床高程的设定及优化

初始河床的设定是网格文件建立后的基础第一步,也是体现模拟河床形态真实度的重要指标,可使模拟结果更贴合实际。模型采用实测地形点(.xyz)文件导入后进行三角形插值后形成初始河床。引水枢纽工程有区别于天然河段,其河道中有部分特定建筑物,因此需要在建筑物边界附近使用大量的数据点,以便能更好地突出建筑物地形。另外,在模型自动地形插值中会遇到偏离预定插值形状的现象,人工弯道进口挡沙坎以及弯道内地形相对偏离较大,需对这些细部结构做出局部适当优化。

3.2.4 边界条件

模型设置了一个进口边界和三个出口边界,进口边界采用进口总流量(恒定流),出口边界设定为

水面高程,壁面采用无滑移条件,对于自由液面的处理,CCHE 软件默认为自由液面,无需另外设置。

3.2.5 计算工况

模型试验模拟了工程 100 年、50 年、30 年、20 年、10 年、5 年、1 年一遇及日常流量下的洪水等 8 种工况,相对应流量分别为 $Q = 1\ 194\ \text{m}^3/\text{s}$ 、 $Q = 966\ \text{m}^3/\text{s}$ 、 $Q = 806\ \text{m}^3/\text{s}$ 、 $Q = 684\ \text{m}^3/\text{s}$ 、 $Q = 343\ \text{m}^3/\text{s}$ 、 $Q = 257\ \text{m}^3/\text{s}$ 、 $Q = 133\ \text{m}^3/\text{s}$ 、 $Q = 80\ \text{m}^3/\text{s}$,其中 100 年一遇洪水流量为校核洪水流量,30 年一遇洪水流量为设计洪水流量。试验通过测量、观察、分析出大中流量下引水枢纽的泄洪能力、以及小流量下保证引水时的闸门运行方式,得到相关结论。数学模型选取了其中比较典型的校核洪水标准以及设计洪水标准下相对应的流量 $Q = 1\ 194\ \text{m}^3/\text{s}$ 、 $Q = 806\ \text{m}^3/\text{s}$ 两种工况下水流运动进行计算分析。

4 计算结果分析

4.1 水流流态

在流量为 $Q = 806\ \text{m}^3/\text{s}$ 工况下泄洪闸 1[#] ~ 3[#] 闸门全关,其余 4[#] ~ 12[#] 闸门全开,冲沙闸及进水闸全开。校核流量工况下运行方式三个闸闸门全开。水流自上游主河槽向下流,流态基本稳定、均匀。当水流流经人工弯道进口和泄洪闸前,来自左右岸主河槽的两股大流量水流相互汇合碰撞,水流在此处发生紊乱,水流汇合后继续以分流形式下泄:其中一股水流流进人工弯道,由于弯道进口处有挡沙坎存在,水流翻越挡沙坎进入弯道,进入弯道后的水流水面出现凹岸高凸岸低的水位差,在弯道进口凹岸和出口凸岸均出现分离流^[10],所谓分离流即由于弯道凹凸岸出现了水面负比降使流速逐渐脱离边壁产生水流分离流动。曾有学者提到用 r_{cp}/b (r_{cp} 为弯道曲率半径, b 为河宽)判断分离流出现的可能性,若 r_{cp}/b 值越小,则出现弯道分离流的可能性越大。显

然,在弯道出口凸岸处的曲率半径很小,故分离流较为明显。流经弯道末端,水流继续产生分流,一部分水流进入进水闸,另一部分由冲沙闸流走,水流流经进水闸和冲沙闸后水流湍急、流速增加,一段距离后逐渐恢复平稳。另一股水流经泄洪闸下泄,通过闸室后的水流由于闸墩以及关闭的闸门束窄过水断面,改变了原有的水流流态,从而使闸前后水流流态紊乱,关闭闸门附近区域有回流漩涡存在。急流下闸墩受冲刷严重,给后期工程运行造成一定影响,是否可考虑在今后改建工程中适当减少闸孔数量,增大闸孔净宽,以改善闸前水流流态,降低洪水来临建筑物受冲刷的风险。

4.2 水流流速

图4为不同工况下流速分布云图,由图4分析可知水流自上游流下,左右岸的主河槽内流速较边滩大,当水流流至弯道进口与泄洪闸前交汇处,来自

左右岸的两股水流发生交汇碰撞而改变原有流态,水流流速在此区域内有所减小。水流进入弯道后流速呈现凹岸流速大于凸岸流速,弯道进口凹岸流速小于凸岸,弯道内和出口凹岸流速大于凸岸(见图4),更好地解释了弯道环流影响下的水流流速重分布规律。在设计流量 $Q = 806 \text{ m}^3/\text{s}$ 时,由于泄洪闸1#~3#闸门关闭,束窄了过水断面,水流通过旁边的闸孔后立即扩散,关闭闸门前后出现了回流区域。设计流量工况下模型试验中回流范围与实际水流现象相符。另外,由两种工况下流速分布云图可以直观看出,在人工弯道末端冲沙闸1#~2#闸门(左岸起)前区域附近水流流速较小,由于弯道此处的曲率半径过小且闸前水流折冲现象严重,若水流中挟带大量泥沙,由于流速突然降低,很有可能造成闸前泥沙淤塞,对工程运行造成一定影响,这一现象应当引起工程设计者极大关注。

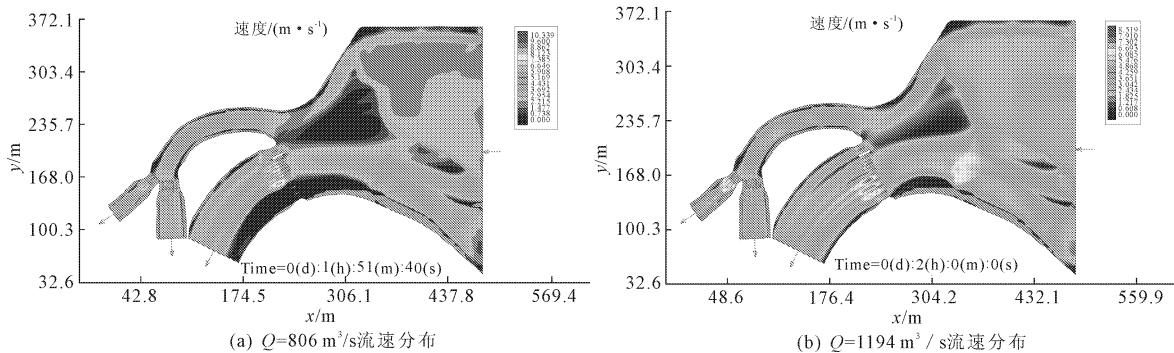


图4 不同工况下引水枢纽流速分布云图

表2、表3为不同工况下引水枢纽上下游典型断面的流速计算值与模型试验值比较,结果表明:无论在设计流量还是校核流量工况下典型断面流速的计算值与试验值吻合较好,趋势基本一致,误差在6%以内。泄洪闸前后最大流速值出现在3#~4#闸处,故3#~4#闸墩受水流冲刷严重。弯道水流流速呈现出中间流速大于两岸流速,其流速核心(最大流速)出现位置的转移速度则依赖于弯道形态、地形和水流等条件。结果显示模型计算值普遍小于试验值,分析误差产生原因:由于模型试验上、下游断面、弯道断面与闸室断面的材料差别,故糙率有所差别,在数学模型中糙率设置中采取综合糙率值,与实际相比较糙率偏大,从而计算速度较小。

模型按原设计方案给定的进水闸与冲沙闸底板高程相同为1 643.20 m。进水闸前设置一道高程高出闸底板高程1 m的挡沙坎,此时,水流翻过挡沙坎

经进水闸后流态紊乱,流速矢量波动较大,考虑将进水闸底板高程抬升至与闸前挡沙坎齐平后的流速矢量明显较之前均匀流畅,进水闸前后水流流态得到改善,说明进水闸闸底板高程增加的方案更有利于水流运动。

4.3 水面线

图5显示不同工况下数值计算与模型试验实测的水面线,由图5对比分析:计算值与实测值得出的水面线趋势基本一致,计算值比试验值略大,经分析认为出口水面高程的设定(取左右岸水面高程平均值)是影响计算结果的原因,对比显示右岸水面线均高于左岸,水流进入闸室以及人工弯道,上、下游水面波动性较强。由于建筑物的存在,突然束窄了过水断面或阻挡了水流去向,致使水流在闸前或弯道进口以及进水闸进口的挡沙坎前,水面呈现壅高的趋势。

表 2 不同工况下泄洪闸闸室断面流速值比较

断面位置	闸孔号	设计流量 $Q = 806 \text{ m}^3/\text{s}$ 时流速/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$		误差 1/%	校核流量 $Q = 1\,194 \text{ m}^3/\text{s}$ 时流速/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$		误差 2/%
		计算值	试验值		计算值	试验值	
泄洪 闸前	2	—	—	—	4.38	4.51	-2.88
	4	—	—	—	4.76	4.94	-3.64
	6	2.80	2.91	-3.78	3.92	4.04	-2.97
	8	3.00	3.12	-3.85	3.03	2.91	4.12
	10	2.71	2.77	-2.17	2.62	2.62	0.00
	12	3.00	2.93	2.39	3.12	3.13	-0.32
泄洪 闸中	2	—	—	—	5.32	5.61	-5.16
	4	—	—	—	5.83	6.13	-4.89
	6	4.76	5.04	-5.56	5.00	5.18	-3.47
	8	5.06	5.30	-4.53	5.11	4.97	2.81
	10	4.80	5.03	-4.57	4.70	4.50	4.44
	12	5.05	4.84	4.16	4.76	5.05	-5.74
泄洪 闸后	2	—	—	—	6.89	6.85	0.58
	4	2.55	2.41	5.81	7.55	7.41	1.89
	6	6.89	6.51	5.84	6.41	6.11	4.68
	8	6.83	6.57	3.81	6.04	5.73	5.13
	10	6.11	6.33	-3.48	5.18	5.46	-5.12
	12	6.09	6.33	-3.79	5.61	5.94	-5.56

注:表中“—”代表闸门关闭处或水深小,其流速值接近零无法精确测得。

表 3 不同工况下枢纽上下游典型断面测点流速比较

断面号	测点号	设计流量 $Q = 806 \text{ m}^3/\text{s}$ 时流速/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$		误差 1/%	校核流量 $Q = 1\,194 \text{ m}^3/\text{s}$ 时流速/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$		误差 2/%
		计算值	试验值		计算值	试验值	
泄 X-01	1	0.60	0.59	1.69	7.98	8.45	-5.56
	2	3.52	3.72	-5.11	7.29	7.52	-3.06
	3	7.07	7.50	-5.73	4.33	4.54	-4.63
	4	6.90	7.24	-4.70	4.04	4.24	-4.72
泄 X-02	1	3.91	4.09	-4.40	4.25	4.39	-3.19
	2	3.67	3.57	2.80	4.72	4.78	-1.26
	3	3.78	3.57	5.88	4.50	4.72	-4.66
	4	3.93	4.01	-2.00	3.40	3.56	-4.49
弯 W-00	1	3.41	3.41	0.00	3.76	3.97	-5.29
	2	3.39	3.53	-2.72	3.98	4.20	-5.24
	3	3.17	3.34	-5.09	3.75	3.91	-4.09
弯 W-02	1	4.78	4.97	-3.82	4.95	5.22	-5.17
	2	5.33	5.63	-5.32	5.04	5.21	-3.26
	3	4.72	5.02	-5.98	4.94	5.03	-1.79

5 结 论

(1) CCHE2D 模型运用于新疆典型河流引水枢纽水流数值模拟,选取盖孜河塔什米里克引水枢纽

为研究对象,模拟典型流量下的水流运动,得到了水流流态、流速、水深、水面线等计算结果,并结合水工模型试验实测值作对比分析,结果显示计算得到的水流参数和模型试验值吻合度较好。

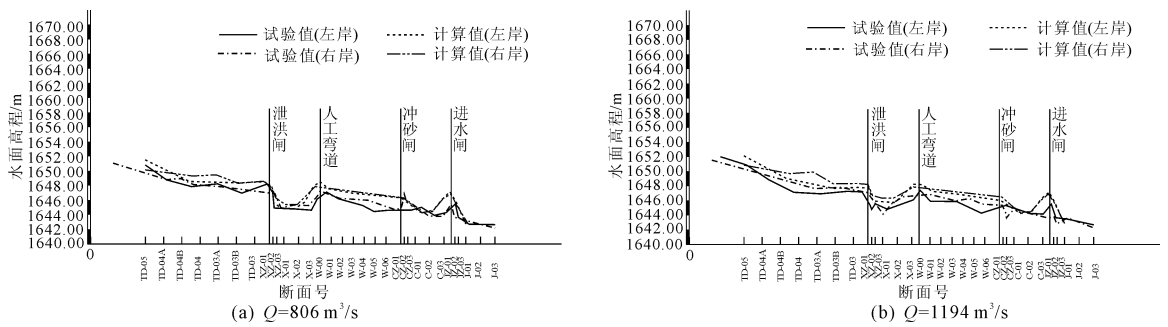


图5 不同工况下各典型断面水面线计算值与试验值比较

(2) CCHE2D 模型中的混合掺长紊流模型(零方程模型)能够很好地模拟引水枢纽二维水流运动,相比于广泛运用的 $k-\epsilon$ 双方程紊流模型,其运算控制方程数量减少,继而在运算大量网格时减少了很大部分运算量,在满足计算精度的同时提高了计算效率。

(3) 天然河道中低水头引水枢纽由于其边界条件的复杂性,故在数值模拟中建筑物网格边界处理以及河床初始地形的仿真处理尤为重要,其直接关系到模拟结果的真实性与可靠性,该软件自带网格处理模块在模拟复杂地形复杂边界的水流运动中显现出一定优势。

参考文献:

- [1] 余金鑫,陈虹.拦河闸引水口三维流场数值模拟[J].水利与建筑工程学报,2007,5(1):25-27.
- [2] 李天滕,赵涛,王世兴.某拦河闸式渠首闸门调度及运行方式的数值模拟研究[J].水利与建筑工程学报,2015,13(1):79-83.
- [3] 樊晶晶,王海军,毛舒娅,等.平板闸门小开度闸后水流特性数值模拟[J].南水北调与水利科技,2012,10(2):124-128.
- [4] 章晋雄,吴一红,张东,等.高水头平面闸门动水关闭的水动力特性数值模拟研究[J].水力发电学报,2013,32(5):184-189.
- [5] 高伟,杨中华.弯道水流特性和数值模拟方法研究进展[J].水电能源科学,2009,27(1):112-115.
- [6] 谷攀,牟献友,张万锋,等.弯道取水口表层水流速度场数值模拟[J].内蒙古农业大学学报(自然科学版),2011,32(3):219-221.
- [7] 戴文鸿,苗伟波,高嵩,等.弯道水流运动及床面变形数值模拟研究进展[J].南水北调与水利科技,2014,12(3):121-126.
- [8] 廖灵芝,赵涛,刘威.不同坡降影响下弯道式引水渠首水流三维数值模拟研究[J].水利与建筑工程学报,2012,10(3):83-87.
- [9] 魏文礼,吕彬,赵小军,等.弯道水流的两步隐式算法研究[J].水动力学研究与进展,2011,26(4):399-405.
- [10] 董耀华.弯道水流的基本特性及数值模拟[J].长江科学院院报,1996,13(1):25-29.
- [11] 吴华莉,陈翠霞,金中武,等.基于 Fluent 的连续弯道水流三维数值模拟[J].武汉大学学报(工学版),2013,46(5):599-603.
- [12] 李园园,牧振伟,孙阳平,等.基于 CCHE 模型的石门子渠首弯道水沙数值模拟[J].水资源与水工程学报,2014,25(6):207-209.
- [13] Yafei Jia, Tingting Zhu, Mustafa S. Altinakar. Potential Impacts of Radioactive Contamination on Drinking Water in Collinear Reservoirs Using CCHE2D Model[C]//Proceedings of BIT's 3rd International Congress of Environment - 2013. China, Xi'an, 2013.