

DOI:10.16198/j.cnki.1009-640X.2016.03.004

汪梅华, 张铭, 柳杨, 等. 基于 Roe 格式黎曼近似解的二维 FVM 模型[J]. 水利水运工程学报, 2016(3): 27-34. (WANG Meihua, ZHANG Ming, LIU Yang, et al. Two-dimension FVM model based on Riemann approximation for Roe format[J]. Hydro-Science and Engineering, 2016(3): 27-34.)

基于 Roe 格式黎曼近似解的二维 FVM 模型

汪梅华¹, 张 铭², 柳 杨², 乌景秀²

(1. 衢州市港航管理局, 浙江 衢州 324002; 2. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029)

摘要: 提出一种基于黎曼近似解 Godunov 格式的二维 FVM 模型求解口门区二维通航水力特性, 并采用 Roe 格式计算界面通量。采用水面坡度代表源项中压力项的作用, 有利于复杂地形条件计算的稳定性; 通过对斜底单元干湿特性的合理划分, 确保计算单元的水量和动量平衡及数值计算精度。利用该模型计算分析了衢江梯级塔底枢纽上下游口门区及引航段发电及泄洪条件下的通航水力特性, 结果表明 Roe 格式的有限体积方法计算复杂地形条件下的水流流场稳定性好、计算精度高, 为合理制定衢江梯级枢纽调度规则提供数据支持。

关 键 词: 山溪型航道; 有限体积法; Roe 格式; 二维水力计算模型

中图分类号: TV135.4

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2016)03-0027-08

金沙江、乌江、西江、衢江等为我国重要通航水运要道, 一大批通航枢纽已陆续建成并投入运行^[1-3]。西部航道具有显著的山溪型航道特征, 河道地形复杂, 水力特性敏感, 电站调峰或大坝泄洪对航运的影响十分突出, 枢纽瞬时下泄流量的快速改变恶化枢纽附近口门区、上下游引航道、连接段及下游航道通航水力学条件^[4-6], 对枢纽下游航运带来安全隐患。

本文提出一种基于黎曼近似解 Godunov 格式的二维 FVM 模型求解口门区二维通航水力特性, 并采用 Roe 格式计算界面通量。该模型源项中采用水面坡度代表压力项的作用, 避免了对底坡项的复杂处理, 有利于复杂地形条件下计算的稳定性; 通过对斜底单元干湿特性的合理划分, 实现水位和水深合理转换; 基于物理通量严格守恒, 确保计算单元的水量和动量平衡及数值计算精度^[9-11]。利用该模型计算了衢江塔底枢纽上下游口门区及引航段发电及泄洪条件下的通航水力特性。

1 Roe 格式的口门区二维水力计算模型

1.1 基本控制方程

基本控制方程采用正交直角坐标系下的浅水二维水动力学方程组。包括水流连续方程和 x, y 方向的水流动量方程, 可以表述为如下形式^[7-8]:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} = s_0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{U^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{UV}{h} \right) + gh \frac{\partial h}{\partial x} + gh(J_{fx} - J_{0x}) = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{UV}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{V^2}{h} \right) + gh \frac{\partial h}{\partial y} + gh(J_{fy} - J_{0y}) = 0 \quad (3)$$

收稿日期: 2015-03-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51209138; 51139001); 水利部公益性行业科研专项(201501007)

作者简介: 汪梅华(1969—), 男, 浙江衢州人, 高级工程师, 硕士, 主要从事港航管理工作。

E-mail: wangmeihua69@163.com

式中: h 为水深; U 和 V 分别为 x 和 y 方向单宽流量; $U = uh$, $V = vh$, u 和 v 分别为 x 和 y 方向流速; Z 为河底高程; J_{0x} 和 J_{0y} 为 x 和 y 方向底坡, $J_{0x} = -\frac{\partial Z}{\partial x}$, $J_{0y} = -\frac{\partial Z}{\partial y}$; J_{fx} 和 J_{fy} 分别为 x 和 y 方向摩阻坡降, $J_{fx} = \frac{n^2 u \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}}$, $J_{fy} = \frac{n^2 v \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}}$; s_0 为源项。

1.2 模型求解

1.2.1 模型变换 采用数学坐标变化法将全局坐标系下的二维模型转换为局地坐标系中的一维模型, 将显著降低模型求解难度, 提高求解精度^[9-11]。基于守恒变量的浅水模型二维数值控制方程可表示为:

$$\frac{\partial \mathbf{Q}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{G}}{\partial y} = \mathbf{S} \quad (4)$$

$$\text{式中: } \mathbf{Q} = \begin{bmatrix} h \\ hu \\ hv \end{bmatrix}, \mathbf{F} = \begin{bmatrix} hu \\ hu^2 + gh^2/2 \\ huv \end{bmatrix}, \mathbf{G} = \begin{bmatrix} hu \\ huv \\ hv^2 + gh^2/2 \end{bmatrix}, \mathbf{S} = \begin{bmatrix} 0 \\ gh(S_{0x} - S_{fx}) \\ gh(S_{0y} - S_{fy}) \end{bmatrix}。$$

对任意复杂的区域布置三角形网格, 将 h , u 和 v 等变量定义在网格中心, 采用网格中心格式 (Cell-Centered, CC), 控制体即为网格单元。对方程 (4) 在控制体积上积分:

$$\iint_{\Omega} \frac{\partial \mathbf{Q}}{\partial t} d\Omega + \iint_{\Omega} (\nabla \cdot \mathbf{F}_c) d\Omega = \iint_{\Omega} \mathbf{S} d\Omega + \iint_{\Omega} (\nabla \cdot \mathbf{F}_d) d\Omega \quad (5)$$

式中: Ω 为控制体积区域。

由格林公式 $\iint_{\Omega} (\frac{\partial \mathbf{P}}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{Q}}{\partial y}) dx dy = \oint_{\partial\Omega} \mathbf{P} dy - \mathbf{Q} dx = \oint_{\partial\Omega} (\mathbf{P} \cos \alpha + \mathbf{Q} \sin \alpha) dl$ 得:

$$A_i \frac{\partial \mathbf{Q}}{\partial t} + \oint_{\partial\Omega} (\mathbf{F} \cos \alpha + \mathbf{G} \sin \alpha) dl = A_i S(\mathbf{Q}) + \oint_{\partial\Omega} (\tilde{\mathbf{F}} \cos \alpha + \tilde{\mathbf{G}} \sin \alpha) dl \quad (6)$$

$$\text{令 } \mathbf{F}_n = \mathbf{F} \cos \alpha + \mathbf{G} \sin \alpha, \text{ 则 } \mathbf{F}_n = \begin{bmatrix} hucos\alpha + hvsin\alpha \\ (hu^2 + gh^2/2) \cos \alpha + huv \sin \alpha \\ huv \cos \alpha + (hu^2 + gh^2/2) \sin \alpha \end{bmatrix}$$

方程 (6) 转换为:

$$A_i \frac{Q_i^{n+1} - Q_i^n}{\Delta t} + \sum_{j=1}^m F_{nj}(Q_i^n) l_j = A_i S_i(Q_i^n) \quad (7)$$

式中: A_i 为控制体面积; m 为控制体边数; j 为单元 i 的第 j 条边; l_j 为第 j 条边的边长。

$$\text{定义旋转矩阵 } \mathbf{T} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & \sin \alpha \\ 0 & -\sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix}, \text{ 及其逆矩阵 } \mathbf{T}^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix}, \text{ 利用欧拉方程的旋转变性, 将二维问题转化为一系列一维问题求解:}$$

$$\mathbf{T} \mathbf{F}_n(\mathbf{Q}) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & \sin \alpha \\ 0 & -\sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} hucos\alpha + hvsin\alpha \\ (hu^2 + gh^2/2) \cos \alpha + huv \sin \alpha \\ huv \cos \alpha + (hu^2 + gh^2/2) \sin \alpha \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} hU \\ hU^2 + gh^2/2 \\ hUV \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中: $U = u \cos \alpha + v \sin \alpha$, $V = -u \sin \alpha + v \cos \alpha$ 分别表示单元界面的局部法向和切向速度。令 $\bar{\mathbf{Q}} = \begin{bmatrix} \eta \\ hU \\ hV \end{bmatrix}$, $\mathbf{H} =$

$$\begin{bmatrix} hU \\ hU^2 + gh^2/2 \\ hUV \end{bmatrix}, \text{ 则 } \mathbf{F}_n = \mathbf{T}^{-1} \mathbf{H}(\bar{\mathbf{Q}})$$

方程(7)转换为:

$$A_i \frac{Q_i^{n+1} - Q_i^n}{\Delta t} + \sum_{j=1}^m T^{-1} H(\bar{Q}) l_j = A_i S_i(Q_i^n) \quad (9)$$

算法的核心就是如何求解法向数值通量 $H(\bar{Q})$, 即需要求解方程:

$$\frac{\partial \bar{Q}}{\partial t} + \frac{\partial H(\bar{Q})}{\partial x} = 0 \quad (10)$$

$$\text{初始值满足: } \bar{Q}(x^n, 0) = \begin{cases} \bar{Q}_L, & x^n < 0 \\ \bar{Q}_R, & x^n > 0 \end{cases}.$$

由此, 界面法向数值通量 $H(\bar{Q})$ 求解成为二维水流模拟求解的关键。

1.2.2 法向数值通量求解 Roe 格式通量求解方法是基于特征理论提出的一种高精度间断求解法。首先构造一下线性系数矩阵, 该矩阵须满足 3 个条件: 双曲型、连续型和守恒型^[12]。方程(10)可写成:

$$\frac{\partial \bar{Q}}{\partial t} + J' \frac{\partial \bar{Q}}{\partial x} = 0 \quad (11)$$

式中: J' 为修改过的 Jacobian 矩阵。

J' 矩阵的特征值和相应的特征向量用平均值形式表示, 可以由界面每条边两边的量 h_L, u_L, v_L 和 h_R, u_R, v_R 表示, 满足上述 3 个条件。

$$\tilde{u} = \frac{\sqrt{h_R} u_R + \sqrt{h_L} u_L}{\sqrt{h_R} + \sqrt{h_L}}, \quad \tilde{v} = \frac{\sqrt{h_R} v_R + \sqrt{h_L} v_L}{\sqrt{h_R} + \sqrt{h_L}}, \quad \tilde{c} = \sqrt{\frac{g(h_R + h_L)}{2}} \quad (12)$$

$$J' = \frac{dH(\bar{Q})}{d\bar{Q}} = \begin{bmatrix} \frac{dH_1}{d\bar{Q}_1} & \frac{dH_1}{d\bar{Q}_2} & \frac{dH_1}{d\bar{Q}_3} \\ \frac{dH_2}{d\bar{Q}_1} & \frac{dH_2}{d\bar{Q}_2} & \frac{dH_2}{d\bar{Q}_3} \\ \frac{dH_3}{d\bar{Q}_1} & \frac{dH_3}{d\bar{Q}_2} & \frac{dH_3}{d\bar{Q}_3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ \tilde{c}^2 - \tilde{u}^2 & 2\tilde{u} & 0 \\ -\tilde{u}\tilde{v} & \tilde{v} & \tilde{u} \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$\text{该矩阵的特征值分别是: } \tilde{\lambda}_1 = \tilde{u} + \tilde{c}, \quad \tilde{\lambda}_2 = \tilde{u} - \tilde{c}, \quad \tilde{\lambda}_3 = \tilde{u} \quad (14)$$

$$\text{相应的右特征向量: } \boldsymbol{\gamma}_1 = (1, \tilde{u} + \tilde{c}, \tilde{v})^T, \quad \boldsymbol{\gamma}_2 = (1, \tilde{u} - \tilde{c}, \tilde{v})^T, \quad \boldsymbol{\gamma}_3 = (0, 0, 1)^T \quad (15)$$

以 $\boldsymbol{\gamma}_1, \boldsymbol{\gamma}_2, \boldsymbol{\gamma}_3$ 为基向量, ΔQ 的特征分解为:

$$\Delta Q = Q_R - Q_L = \sum_{j=1}^3 \alpha_j \boldsymbol{\gamma}_j \quad (16)$$

即:

$$\begin{cases} \Delta h = h_R - h_L = \alpha'_1 + \alpha'_2 \\ \Delta(hu) = h_R u_R - h_L u_L = \alpha'_1(\tilde{u} + \tilde{c}) + \alpha'_2(\tilde{u} - \tilde{c}) \\ \Delta(hv) = h_R v_R - h_L v_L = \alpha'_1 \tilde{v} + \alpha'_2 \tilde{v} + \alpha'_3 \tilde{v} \end{cases} \quad (17)$$

通过求解式(17)可得系数 $\alpha'_1, \alpha'_2, \alpha'_3$ 。其中, $\alpha'_1 = \frac{(h_R u_R - h_L u_L) - \tilde{\lambda}_2(h_R - h_L)}{2\tilde{c}}$; $\alpha'_2 = (h_R - h_L) -$

$$\alpha'_1; \alpha'_3 = (h_R v_R - h_L v_L) - \tilde{v}(h_R - h_L)。$$

则两单元公共边的数值通量可表示为:

$$H(\bar{Q}) = \frac{1}{2}(H(Q_L) + H(Q_R)) - \frac{1}{2} \sum_{j=1}^3 \alpha'_j |\tilde{\lambda}_j| \gamma_j \quad (18)$$

1.3 模型定解条件

边界条件一般分为开边界和固壁边界,开边界又可分为流量边界、水位边界和自由边界。对于边界问题,数模计算处理的实质上是:根据边界类型和边界上的已知条件求得边界的水力要素($u_{\perp,R}$, $u_{//,R}$, h_R),进而求得界面上的数值通量,再参与整个区域的数值计算,以获取整个计算区域的数值解。

根据特征线理论,浅水方程的黎曼不变量为:

$$R^- = u_{\perp} + 2\sqrt{gh}, R^+ = u_{\perp} - 2\sqrt{gh} \quad (19)$$

式中: R^- 和 R^+ 分别为界面右侧和左侧值。黎曼不变量 R^- 和 R^+ 沿着 $dx/dt = u_{\perp} + \sqrt{gh}$ 和 $dx/dt = u_{\perp} - \sqrt{gh}$ 守恒。由于边界被设置为边右侧,因此 R^- 被用于求解边界值,即

$$u_{\perp,L} + 2\sqrt{gh_L} = u_{\perp,R} + 2\sqrt{gh_R} \quad (20)$$

式中: $u_{\perp,R}$ 和 h_R 为边界值。根据式(20)及已知边界条件,即可求得边界上水力要素,再进行界面通量计算,以获得最终数值解。

(1) 水位边界。当已知边界水位 z_R 时,需要求流速 $u_{\perp,R}$ 。即 z_R 已知,水深 $h_R = z_R - z_{b,F}$,即可根据式(20)导出流速计算表达式:

$$u_{\perp,L} = -2\sqrt{gh_L} + u_{\perp,R} + 2\sqrt{gh_R} \quad (21)$$

(2) 流量边界。当已知流量 Q 时,边界条件处理较为复杂。首先要根据断面总流量,按断面面积分配各边的流量(图1), $Q_i = A_i Q/A$,单宽流量 $q_i = Q_i/L_i$,其中, $A = \sum A_i$,求得单宽流量 q_i 后,根据如下方程组可获得右边界值:

$$\begin{cases} q_i = h_{R,i} u_{R,i} \\ u_{R,i} = u_L + 2\sqrt{g}(\sqrt{h_L} - \sqrt{h_R}) \end{cases} \quad (22)$$

式(22)可整理为式(23)所示的非线性方程:

$$h_{R,i} = [(u_{L,i} + 2\sqrt{gh_{L,i}}) - q_i/h_L]^2/4g \quad (23)$$

本文采用牛顿迭代法求解方程。

(3) 固壁边界处理。对于固壁处(如水槽壁面),用无滑移边界条件求解水力要素,即 $h_R = h_L$, $u_R = u_L$,这里需要注意的是:物理上,由于固壁不参与水流质量交换,因此将该处水流连续方程界面通量设为0。此外,镜像法在固壁边界处理中也得到应用。

1.4 斜底单元

假定 i 单元格3个顶点位置坐标及高程依次为 (x_1, y_1, z_1) , (x_2, y_2, z_2) 和 (x_3, y_3, z_3) 。以 h 和 η 分别表示单元格水深和水位,设定 $z_1 \leq z_2 \leq z_3$ 。若 $\eta \leq z_1$,则 $h = 0$;若 $z_1 < \eta \leq z_2$ (图2(a)),则 $h = \frac{(\eta - z_1)^3}{3(z_2 - z_1)(z_3 - z_1)}$;若 $z_2 < \eta \leq z_3$ (图2(b)),则 $h = \frac{\eta^2 + \eta z_3 - 3\eta z_1 - z_3 z_2 + z_1 z_2 + z_1^2}{3(z_3 - z_1)}$;若 $z_3 < \eta$ (图2

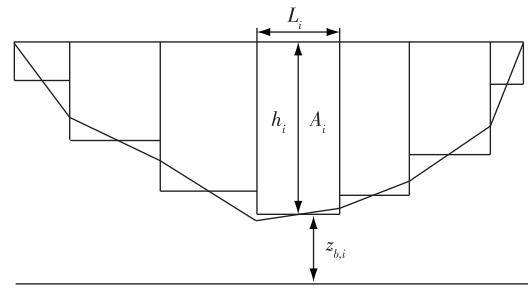


图1 断面流量分配示意

Fig. 1 Schematic diagram of section flow distribution

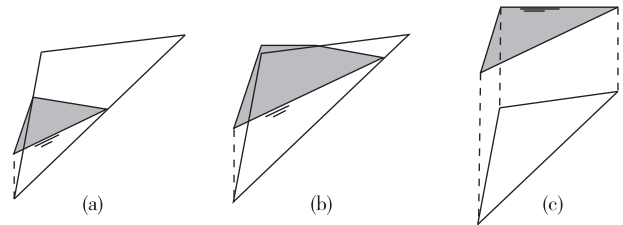


图2 斜底单元模型

Fig. 2 Sloping bottom unit model

(c)), 则 $h = \eta - z_c$, $z_c = \frac{z_1 + z_2 + z_3}{3}$ 。

1.5 源项处理

方程(4)中的源项包括底坡项和摩阻项^[11]。源项处理精度影响模型计算收敛稳定性。

对于底坡项,本文采用 DFB 方法处理:

$$\frac{\Delta t}{\Omega} \int_{\Omega} S_0 d\Omega = \frac{\Delta t}{\Omega} \begin{bmatrix} 0 \\ \sum_{j=1}^3 0.5gh_j^2 n_x \Delta l \\ \sum_{j=1}^3 0.5gh_j^2 n_y \Delta l \end{bmatrix} \quad (24)$$

采用算子分裂法处理摩阻项。在对方程(4)求解时,先不考虑摩阻项影响,直接计算单元格流速与水深值,然后采用半隐式格式对其进行处理:

$$u = \frac{1}{1 - \Delta t \tau} \hat{u}, \quad v = \frac{1}{1 - \Delta t \tau} \hat{v} \quad (25)$$

式中: $\hat{u}$ 和 $\hat{v}$ 为摩阻项处理前的单元流速; u 和 v 为摩阻项处理后的单元流速。 $\tau = -gn^2 \sqrt{(\hat{u})^2 + (\hat{v})^2} \times (\hat{h})^{-4/3}$ 。

1.6 时间步长

模型在时间上的离散采用显式格式。为保证模型稳定性,时间步长的选取需满足 CFL (Courant-Friedrichs-Levy) 线性稳定性条件。采用如下公式确定每一计算时间步长。

$$\Delta t \leq \min_i \left(\frac{R_i}{2 \max_j (\sqrt{u^2 + v^2} + c)_{ij}} \right) \quad (26)$$

式中: R_i 表示 i 单元格形心到 3 个顶点中的最小距离; c 表示波速。

2 模型应用

2.1 衢江梯级概况

衢江航运开发工程自上而下分 6 个梯级开发建设,分别为塔底枢纽、安仁铺枢纽、红船豆枢纽、小溪滩枢纽、游埠和姚家枢纽。塔底水利枢纽工程位于衢州市城区下游衢江与乌溪江汇合口下游约 350 m、沈家高速公路桥上游约 300 m 处的衢江河段。坝址集水面积 8 162 km²,多年平均径流量 92.44 亿 m³。正常蓄水位 59.5 m,正常库容 2 080 万 m³,电站装机 4×4 MW,多年平均发电量 6 314 万 kW·h。

塔底枢纽主要建筑物有:橡胶坝、充排水泵房、船闸、泄洪冲砂闸及电站厂房等。工程布置自左至右:5 跨橡胶坝,每跨净长 85 m,设计坝高 5.25 m;1 孔船闸上闸首,净宽 12 m;2 孔泄洪冲砂闸,每孔净宽 12 m;充排水泵房尺寸 34.45 m×14.5 m(长×宽);电站主厂房尺寸 54.3 m×16 m(长×宽)。

2.2 计算模型

基于 GSI 平台,生成研究河段衢江衢州段地形 DEM,并结合塔地枢纽设计成果,塔底枢纽上下游模拟范围距坝址分别约 3.3 和 4.5 km。

2.3 模型验证

本文所研究对象塔底枢纽为衢江航运开发工程(衢州段)4 座枢纽的第 1 座梯级。为了验证本文构建数学模型的精度,对安仁铺、红船豆和小溪滩三座枢纽进行了相应工况的数值模拟计算,并与相应物理模型试验成果进行对比。结果表明,本文构建的数值模型具有较可靠的模拟精度。对比成果见表 1。

表 1 模型验证结果对比
Tab. 1 Comparison between model validation results

枢纽	上游水位/m	下游水位/m	流量/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	枢纽运行方式	最大横向流速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	
					数值计算	物模观测
安仁铺	53.5	48.5	451.6	电站满发	0.05	0.09
	53.5	50.2	1 117.0	机组满发,泄洪闸泄洪	0.11	0.18
红船豆	47.0	40.5	420.0	电站满发	0.04	0.04
	47.0	42.0	1 215.0	电站满发,均匀开启中间 5 孔泄洪闸	0.07	0.12
小溪滩	39.1	34.5	445.0	电站满发	0.14	0.10
	40.2	36.0	1 383.0	电站满发,4 孔闸门局开	0.30	0.22

3 数值模拟与结果分析

3.1 计算工况

共设计了 3 组计算工况,枢纽上、下游控制水位及枢纽运行方式见表 2。

表 2 塔底枢纽计算工况
Tab. 2 Simulation working conditions of Tadi hydrojunction

工况	重现期/a	上游水位/m	下游水位/m	流量/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	枢纽运行方式
1	—	56.50	54.50	370	电站满发
2	—	57.50	55.50	1 060	4 台机组满发,泄洪闸泄洪
3	—	58.20	56.20	1 500	4 台机组满发,泄洪闸泄洪
4	—	58.50	57.50	2 880	电站停,泄洪闸开,橡胶坝塌落
5	5	61.22	60.22	6 820	电站停,泄洪闸开,橡胶坝塌落
6	10	61.87	60.87	8 250	电站停,泄洪闸开,橡胶坝塌落
7	20	61.53	61.53	9 630	电站停,泄洪闸开,橡胶坝塌落
8	50	62.35	62.35	11 400	电站停,泄洪闸开,橡胶坝塌落
9	100	63.18	63.18	13 600	电站停,泄洪闸开,橡胶坝塌落

3.2 下游口门区流场特征及分析

为定量分析各工况流速情况,对塔底枢纽下游航道和引航道布置了 8 个监测点,监测点布置见图 3;工况 1~9 的 8 个监测点的流速计算值见表 3。可以看出:由于电站布置在右岸,离下游引航道较远,工况 1~3 电站满发以及泄洪闸泄洪时,口门区附近测点(A2,A3,A4,A5,A8)的纵向流速小于 2.0 m/s,横向流速小于 0.3 m/s,满足通航要求。当洪水重现期超过 10 年,橡胶坝塌落泄洪时,口门区横向流速超过 0.3 m/s,部分测点纵向流速超过 2.0 m/s,不能满足通航要求。图 4 为工况 9 的流场分布。

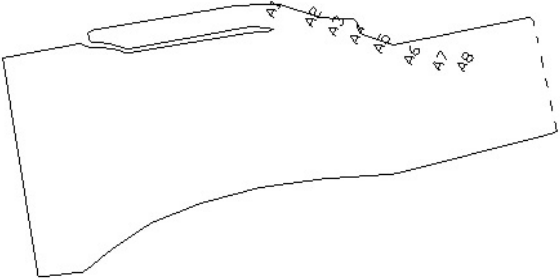


图 3 塔底枢纽下游测点布置
Fig. 3 Downstream measuring points of Tadi hydrojunction

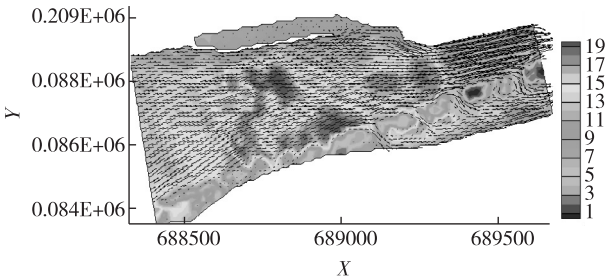


图 4 下游流场分布(工况 9)
Fig. 4 Distribution of downstream flow field (case 9)

表3 塔底枢纽下游引航道流速

Tab.3 Flow velocity analysis of downstream approach channel of Tadi hydrojunction (m · s⁻¹)

工况 编号	流速 分量	单元格编号							
		A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8
1	纵向	0.907	0	0	0.043	0.100	1.159	0.353	0.281
	横向	-0.223	0	0	-0.027	0.051	0.460	0.252	0.021
2	纵向	1.565	0	0.272	0.470	0.524	2.062	0.561	0.615
	横向	0.055	0	-0.020	-0.173	0.079	1.049	0.536	0.091
3	纵向	1.848	-0.030	0.486	0.721	0.748	2.267	0.646	0.776
	横向	0.159	0.029	0	-0.202	0.045	1.156	0.571	0.105
4	纵向	2.873	0.014	0.994	1.235	1.338	3.121	2.409	1.256
	横向	0.317	0.001	0.077	-0.278	0.008	0.473	-0.134	0.144
5	纵向	4.367	0.030	1.724	2.016	2.296	4.447	3.389	2.192
	横向	0.667	-0.084	0.226	-0.300	-0.085	0.756	-0.198	0.280
6	纵向	4.794	0.035	1.878	2.214	2.551	4.867	3.755	2.483
	横向	0.759	-0.094	0.257	-0.304	-0.103	0.806	-0.260	0.325
7	纵向	5.702	0.045	2.169	2.603	3.060	5.815	4.635	3.079
	横向	0.943	-0.115	0.318	-0.314	-0.137	0.888	-0.424	0.417
8	纵向	5.940	0.053	2.320	2.816	3.347	6.057	4.749	3.359
	横向	1.002	-0.126	0.352	-0.318	-0.172	0.974	-0.397	0.341
9	纵向	4.692	0.040	1.878	2.248	2.610	4.625	3.556	2.603
	横向	0.784	-0.099	0.274	-0.275	-0.117	0.784	-0.293	0.361

4 结 语

山区航道水力特性敏感,大坝泄洪或电站调峰会恶化通航枢纽口门区流态,给通航带来安全隐患。本文提出了一种基于 Roe 格式通量计算的有限体积法数值求解口门区二维通航水力计算模型,对多种设计工况下的通航水流条件进行了计算。结果表明该模型具有较高模拟精度,水流流场图合理,相应的流速计算成果可用以指导制定合理的枢纽调度方案,为船舶安全通航调度提供支持。

参 考 文 献:

- [1] 卢有麟,周建中,王浩,等. 三峡梯级枢纽多目标生态优化调度模型及其求解方法[J]. 水科学进展, 2011, 22(6): 780-788. (LU You-lin, ZHOU Jian-zhong, WANG Hao, et al. Multi-objective optimization model for ecological operation in Three Gorges cascade hydropower stations and its algorithms[J]. Advances in Water Science, 2011, 22(6): 780-788. (in Chinese))
- [2] 周作茂,陈野鹰,杨忠超,等. 双线船闸引航道水力特性数值模拟[J]. 水利水运工程学报, 2013(4): 67-72. (ZHOU Zuo-mao, CHEN Ye-ying, YANG Zhong-chao, et al. Numerical simulation of hydraulic characteristics of a double-line locks approach channel[J]. Hydro-Science and Engineering, 2013(4): 67-72. (in Chinese))
- [3] 欧阳硕,周建中,周超,等. 金沙江下游梯级与三峡梯级枢纽联合蓄放水调度研究[J]. 水利学报, 2013, 44(4): 89-95. (OUYANG Shuo, ZHOU Jian-zhong, ZHOU Chao, et al. Research on impounding dispatch for the lower cascade reservoir in Jinsha River and Three Gorges cascade[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44(4): 89-95. (in Chinese))
- [4] 杨文俊,孙尔雨,杨伟,等. 三峡水利枢纽工程非恒定流通航影响研究 I: 上、下引航道[J]. 水力发电学报, 2006, 25(1): 45-49. (YANG Wen-jun, SUN Er-yu, YANG Wei, et al. Research of the influence of unsteady flow produced by operation of TGP on navigation I: Upper and lower approach channels[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2006, 25(1): 45-49. (in Chinese))

- [5] HU Ya-an, ZHANG Rui-kai, LI Yun, et al. Prototype trial run of four-step operation mode of TGP lock under impounded level 156 m during completion stage[C]// Proceedings of 16th IAHR-APD & 3rd IAHR-ISHS: Advances in Water Resources and Hydraulic Engineering, 2009: 1924-1933.
- [6] HU Ya-an, ZHANG Rui-kai, LI Yun, et al. Research on improving the traffic capacity of Three Gorges ship lock by optimizing the conveyance mode[J]. Bulletin-International Navigation Association, 2008(131): 19-29.
- [7] 沙海飞, 周辉, 吴时强, 等. 坝身泄洪水气两相流二维数值模拟[J]. 水动力学研究与进展(A辑), 2007, 22(3): 311-316. (SHA Hai-fei, ZHOU Hui, WU Shi-qiang, et al. 2-D numerical simulation of two-phase flow from surface outlet into plunge pool[J]. Journal of Hydrodynamics(SerA), 2007, 22(3): 311-316. (in Chinese))
- [8] 宋利祥, 周建中, 王光谦, 等. 溃坝水流数值计算的非结构有限体积模型[J]. 水科学进展, 2011, 22(3): 373-377. (SONG Li-xiang, ZHOU Jian-zhong, WANG Guang-qian, et al. Unstructured finite volume model for numerical simulation of dam-break flow[J]. Advances in Water Science, 2011, 22(3): 373-377. (in Chinese))
- [9] LIANG Qiu-hua, BORTHWICK A G L. Adaptive quadtree simulation of shallow flows with wet-dry fronts over complex topography[J]. Computers & Fluids, 2009, 38(2): 221-344.
- [10] 姚仕明. 三峡葛洲坝通航水流数值模拟及航运调度系统研究[D]. 北京: 清华大学, 2006. (YAO Shi-ming. Numerical simulation of navigable flow conditions and development of shippings dispatching system for the Three Gorges & Gezhouba Projects[D]. Beijing: Tsinghua University, 2006. (in Chinese))
- [11] 岳志远, 曹志先, 李有为, 等. 基于非结构网格的非恒定浅水二维有限体积数学模型研究[J]. 水动力学研究与进展: A辑, 2011, 26(3): 359-366. (YUE Zhi-yuan, CAO Zhi-xian, LI You-wei, et al. Unstructured grid finite volume model for two-dimensional shallow water flows[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2011, 26(3): 359-366. (in Chinese))
- [12] 艾丛芳, 金生. 基于非结构网格求解二维浅水方程的高精度有限体积方法[J]. 计算力学学报, 2009, 26(6): 900-905. (AI Cong-fang, JIN Sheng. Solution of the 2D shallow water equations using the high-resolution finite-volume method on unstructured meshes[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2009, 26(6): 900-905. (in Chinese))

Two-dimension FVM model based on Riemann approximation for Roe format

WANG Mei-hua¹, ZHANG Ming², LIU Yang², WU Jing-xiu²

(1. Quzhou Port & Shipping Bureau, Quzhou 324002, China; 2. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: Based on Riemann approximation for the Godunov format, a two dimensional FVM model is developed for simulating the navigable hydraulic characteristics of the entrance area, and the interface flux is computed using the Roe format. By using the slope of water surface to reflect the effects of pressures instead of the source term, the stability calculation can be carried out in the complex terrain conditions. The rational division of dry and wet characteristic unit sloping bottom is made to ensure the water mass and momentum balance and numerical calculation accuracy of the calculated units. The navigable hydraulic characteristics of upper and lower entrance areas of the Tadi hydrojunction of the Qujiang River cascade and the conditions of electro-generation and flood release are calculated by this model. The simulation and analysis results show that the finite volume method of the Roe format can calculate the flow field stability under the complex terrain conditions and has a high precision of calculation, which can provide the data supports for the Qujiang cascade hydrojunction in drawing up reasonable rules and regulations in the future.

Key words: stream channel; finite volume method; Roe scheme; two-dimensional hydraulic calculation model