

有限体积法数学模型在开潭水利枢纽工程中的应用

包中进¹,汪德²

(1.浙江省水利河口研究院水工所 浙江 杭州 310020 ; 2.河海大学环境科学与工程学院 江苏 南京 210098)

摘要 结合开潭水利枢纽工程物理模型试验 ,进行不同疏浚方案洪水位变化情况的数学模型研究 . 针对开潭水利枢纽工程山溪性河道的特性 ,利用有限体积法构成的二维数值模型模拟其水流特性 , 根据计算结果对河道疏浚方案进行选择 . 结果表明 ,开潭水利枢纽上游 90°直线疏浚方案对降低上游洪水位的 效果较为明显 ,同时泄洪闸减少一孔是可行的 . 应用该模型 ,可以部分代替水工模型试验 ,进行水力要素的确定和建筑物布置的优化设计研究 ,降低试验成本 ,缩短试验周期 .

关键词 疏浚 ;数学模型 ;行洪能力 ;洪水位

中图分类号 :TV652 文献标识码 :A 文章编号 :1000-1980(2004)05-0565-04

开潭水利枢纽位于浙江省丽水市境内瓯江干流大溪上 ,坝址在丽水市区东南约 7 km 处的开潭村下游 , 功能以发电和改善城市环境为主 ,兼顾改善航运条件 . 电站总装机容量 3 × 16 MW ,多年平均发电量 13 161 万 kW · h . 坝址以上控制集雨面积 8 544 km² ,水库正常蓄水位 47.50 m ,相应正常库容 2 852 万 m³ .

通过建立物理模型和一维数学模型 ,证明开潭水利枢纽的兴建不会影响丽水市上游主城区的防洪能力 . 然而 ,鉴于靠近电站厂房的 18[#] ,19[#] 孔过流能力偏小 ,有关部门希望通过对闸室右岸上游的疏浚 ,增加泄洪 闸的泄流能力 ,从而进一步减轻上游城区的防洪压力 . 针对大范围(90°直线疏浚)和小范围(50°斜线疏浚)两 个疏浚方案 ,本文利用二维数学模型研究了疏浚的效果 ,分析疏浚方案对上游洪水位的影响 ,同时论证闸室 减少一孔的可行性 ,从而为工程布置的合理性提供科学依据 .

1 计算模型

1.1 控制方程^[1,2]

二维非恒定流的控制方程为浅水方程 ,即

∂ζ / ∂t + ∂(Hu) / ∂x + ∂(Hv) / ∂y = 0 (1)

∂(Hu) / ∂t + ∂(Hu²) / ∂x + ∂(Huv) / ∂y + gH ∂H / ∂x - fvH + g (u √(u² + v²) / C²) = E_x ∂²u / ∂x² + E_y ∂²u / ∂y² (2)

∂(Hv) / ∂t + ∂(Huv) / ∂x + ∂(Hv²) / ∂y + gH ∂H / ∂y + fuH + g (v √(u² + v²) / C²) = E_x ∂²v / ∂x² + E_y ∂²v / ∂y² (3)

H = h + ζ

式中 :ζ——水位 ;h——相对于平均基准面的水深 ;u ,v——x ,y 方向的流速分量 ;f——哥氏力系数 ;C—— Chezy 系数 ;E_x ,E_y——x ,y 方向的虚拟黏性系数 ;g——重力加速度 . 式(1)~ 式(3)可写成如下的守恒形式 :

∂q / ∂t + ∂f(q) / ∂x + ∂g(q) / ∂y = b(q) (4)

q = (ζ ,Hu ,Hv)^T f(q) = (Hu ,Hu² + (gH² / 2) ,Huv)^T

g(q) = (Hu ,Huv ,Hv² + (gH² / 2))^T

式中: $f(q)$ ——沿 x 方向的通量矢量; $g(q)$ ——沿 y 方向的通量矢量. $b(q)$ 可以写成

$$b(q) = \begin{bmatrix} fvH - g \frac{u \sqrt{u^2 + v^2}}{C^2} + \left(E_x \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + E_y \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \\ - fuH - g \frac{v \sqrt{u^2 + v^2}}{C^2} + \left(E_x \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + E_y \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \end{bmatrix}^T \quad (5)$$

1.2 有限体积法离散的基本原理^[3,4]

有限体积法的基本原理是将计算区域分割成四边形、三角形或四边形与三角形的混合区域,称为单元.单元的角点称之为结点.将方程(4)在每个单元上积分,得出离散方程,再数值求解.

定义矩阵: $F(q) = (f(q), g(q))^T$. 在单元 Ω 上对式(4)进行积分

$$\iint_{\Omega} \frac{\partial q}{\partial t} + \iint_{\Omega} F(q) d\Omega = \iint_{\Omega} b(q) d\Omega \quad (6)$$

根据 Green 积分定理,式(6)可以写成

$$\iint_{\Omega} \frac{\partial q}{\partial t} = - \int_S F(q) \cdot n dl + \iint_{\Omega} b(q) d\Omega \quad (7)$$

式中: S ——单元 Ω 的边界; n —— S 的外单元法向矢量; $F(q) \cdot n$ ——通过边界 S 的外向通量; dl ——微分长度单元.

假定物理量 q 和函数 $b(q)$ 在单元 Ω 内均匀分布,线积分用沿单元边界的通量来近似,则式(7)可以写成以下的离散形式:

$$A \frac{\partial q}{\partial t} = - \sum_{j=1}^m F_n^j(q) L^j + Ab(q) \quad (8)$$

式中: A ——单元 Ω 的面积; $F_n^j(q)$ ——通过单元边 j 的 q 的通量; L^j ——单元边 j 的长度; m ——单元 Ω 边的数目. 如何求得通过每条边的 q 的通量 $F_n^j(q)$ 是关键.

取出单元 Ω 进行分析,考虑 ab 边的外法向单位矢量 n 与 x 轴的夹角为 α (逆时针为正),则 $F_n(q)$ 与 x , y 方向的通量关系可以表示为

$$F_n(q) = f(q) \cos \alpha + g(q) \sin \alpha \quad (9)$$

式中 $f(q)$, $g(q)$ 分别为 x , y 方向的通量. 由于 $f(q)$ 与 $g(q)$ 的旋转不变性,即满足式(10)的关系

$$T(\alpha) F_n(q) = f[T(\alpha)q] = f(\bar{q}) \quad (10)$$

或

$$F_n(q) = T(\alpha)^{-1} f(\bar{q}) \quad (11)$$

式中 $\bar{q} = T(\alpha)q$, 即将 q 投影到法向 n 得到的矢量,其分量分别为沿单元边 ab 的法向和切向. 所以先将 q 转换成 $\bar{q}$, 再代入 f 得 $f(\bar{q})$. 将式(11)代入式(8),得无结构网格有限体积法离散的基本方程

$$A \frac{\partial q}{\partial t} = - \sum_{j=1}^m T(\alpha)^{-1} f(\bar{q}) L^j + Ab(q) \quad (12)$$

1.3 边界条件^[5]

本模型引入两种开边界条件,一为陆地边界条件,二为闸门内边界条件,分别说明如下.

a. 开边界条件. 考虑缓流流动,假定在边界处 q_L 是区域内的已知解, q_R 是边界处的未知解. (a) 下游水位已经给定,则水深 H_R 已知,流速 u_R 可用黎曼不变量关系求出

$$u_R = u_L + 2\sqrt{g}(\sqrt{H_L} - \sqrt{H_R}) \quad (13)$$

式中: u_L ——区域内已知流速; H_L ——区域内已知水深. (b) 单宽流量 q_R 给定, u_R 和 H_R 由式(13)和式(14)联立求解得出

$$q_R = u_R H_R \quad (14)$$

b. 陆地边界条件.

$$u_R = -u_L \quad H_R = H_L \quad (15)$$

c. 内部闸门边界条件. 闸门按内部边界条件处理,分全开启和局部开启,自由和淹没出流4种情况.

(a) 闸门全开启自由出流

$$Q_g = CB_g H_c^{3/2} \quad (16)$$

(b) 闸门全开启淹没出流

$$Q_g = C_s B_g h \sqrt{2g\Delta H}$$

(17)

(c) 闸门局部开启自由出流

$$Q_g = C_g B_g G_o \sqrt{2gH_g}$$

(18)

(d) 闸门局部开启淹没出流

$$Q_g = C_{gs} B_g G_o h \sqrt{2g\Delta H}$$

(19)

$$H_g = H_e - G_o/2$$

$$\Delta H = H_e - h$$

式中: C ——闸门全开启自由出流流量系数; C_s ——闸门全开启淹没出流流量系数; C_g ——闸门局部开启自由出流流量系数; C_{gs} ——闸门局部开启淹没出流流量系数; G_o ——闸门开度; B_g ——闸孔净宽; H_e ——闸底堰上水头; h ——闸下水位与闸底堰的高差。

2 模拟计算

2.1 工程概况

开潭水利枢纽建筑物主要由泄洪闸、船闸、发电厂房和升压站组成。工程平面布置见图 1。泄洪闸总净宽 228 m, 共有 19 孔。闸孔底板高程为 36.0 m, 与现状河床底高程接近。两个疏浚方案分别为 (a) 50°斜线疏浚方案, 泄洪闸上游 300 m 斜线范围内均疏浚至 36.00 m 高程; (b) 90°直线疏浚方案, 上游约 1000 m 沿 19# 孔边墩 90°直线, 河道高程均疏浚至 36.00 ~ 37.00 m 高程。

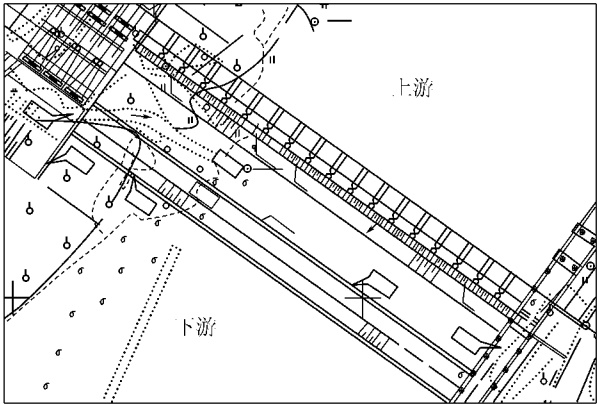


图 1 开潭枢纽布置

Fig.1 Plan view of Kaitan hydraulic complex

表 1 计算组次

Table 1 Series of calculation

组次	频率 P /%	流量 ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	下游水位 /m	开启孔数	疏浚方案
1				19	50°斜线疏浚
2	2	12900	50.48	18	90°直线疏浚

2.2 计算工况

数学模型主要

对 18 孔和 19 孔泄洪闸运行时上下游共 3.4 km 范围的流场进行计算, 计算组次见表 1。

2.3 模型主要参数

本次模型计算范围: 下游取 700 m, 上游取 2 750 m, 共形成 3 882 个四边形单元, 4 110 个结点。进口边界和出口边界均为 19 个单元, 计算网格见图 2。

利用设计单位一维模型的有关计算成果作为模型验证参考资料。验证时通过对主槽、边滩等不同糙率的调整, 使数学模型的计算成果同设计单位的成果基本一致。

2.4 计算成果分析

根据计算成果, 进行以下分析。

a. 疏浚方案对洪水位的影响分析。上游采取疏浚措施后, 对上游洪水位的降落有一定的作用, 尤其是上游 90°直线疏浚方案的作用更加明显一些。相对于 50°斜线疏浚方案, 上游桩号 1-500 处洪水位降低了 16 ~ 20 cm, 桩号 2-250 处洪水位降低了 17 ~ 18 cm, 桩号 2-750 处洪水位降低了 16 ~ 17 cm。

b. 疏浚方案对 19# 孔泄流的影响分析。从流速分布来看, 不论采取哪个疏浚方案, 水流的主流均在闸室左侧, 通过 19# 孔的流速非常小。对于 50°斜线疏浚方案, 按计算流速 0.71 m/s 计算, 通过 19# 孔的流量仅 120 m³/s 左右, 远小于中间孔的过流量 700 m³/s 左右, 即仅为中间孔的



图 2 计算网格

Fig.2 Meshes for computation

1/6,说明受河势的影响,该孔的泄流作用不大;对于90°直线疏浚方案,通过19#孔的流量有所增加,流速从原来的0.71 m/s增加到1.52 m/s.

c. 减少闸孔孔数的可行性分析.在同一疏浚方案下,闸室减少1孔(即最右侧19#孔),设计工况下上游洪水位基本上没有变化,计算水位壅高值不大,在桩号0-750处水位壅高2 cm,在桩号1-500以上水位壅高仅1~2 cm.另外,从19#孔的流速分布来看,该孔的过流作用不大.因此,从行洪角度来看,泄洪闸减少1孔是可行的.

综上所述,通过数学模型的技术分析,上游90°直线疏浚方案对降低上游洪水位的效果较为明显,同时泄洪闸减少一孔是可行的.

3 结 论

本文利用有限体积法构成的二维数值模型模拟开潭水利枢纽工程的水流特性.根据计算结果,对河道疏浚方案进行了选择.应用该模型,可以部分代替水工模型试验进行水力要素的确定和建筑物布置的优化设计研究,降低试验成本,缩短试验周期.

参考文献:

- [1] 汪德. 计算水力学(理论与应用)[M]. 南京: 河海大学出版社, 1990. 165—167.
- [2] 谭维炎. 计算浅水动力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1998. 146—172.
- [3] ZHAO D H, TABIOS Q Q III, SHEN H W. RBFVM-2D model, river basin two-dimensional flow model using finite volume method: program documentation[R]. Berkeley: University of California, 1995.
- [4] OSHER S, SOLOMONE F. Upwind difference scheme for hyperbolic systems of conservation laws[J]. Mathematical Computation, 1982, 38: 339—374.
- [5] ZHAO D H, SHEN H W, TABIOS G Q III, et al. Finite-volume two-dimensional unsteady-flow model for river basins[J]. Journal of Hydraulic Engineer, ASCE(Bol 120), 1994(7): 863—883.

Application of finite volume model to Kaitan hydraulic complex

BAO Zhong-jin¹, WANG De-guan²

(1. Hydraulic Engineering Department, Zhejiang Research Institute
of Hydraulics and Estuary, Hangzhou 310020, China;

2. College of Environmental Science and Engineering, Hohai Univ., Nanjing 210098, China)

Abstract :In combination with the physical model test for the Kaitan hydraulic complex, a study was made on the numerical model for flood water level variation under different dredging alternatives. In consideration of the characteristics of mountainous stream in the project, a 2-D finite volume numerical model was employed to simulate the flow pattern upstream and downstream of the hydraulic complex. The optimal dredging scheme was determined according to the result of computation. The calculated result showed that the dredging scheme along the straight line with an angle of 90° was very effective for lowering the upstream flood water level, and it was feasible to reduce one hole on the flood gate. The numerical model can partly replace the physical modeling for determining hydraulic parameters and optimizing the layout of the hydraulic structure. With the model, the cost and period of experiments may be reduced, and the model is of certain applicable value to similar projects.

Key words :dredging; numerical model; flood carrying capacity; flood water level