

DOI:10.3880/j.issn.1006-7647.2008.03.003

向家坝水利枢纽下泄非恒定流的数值模拟

王志力^{1,2}, 陆永军¹

(1. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210024; 2. 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098)

摘要 采用四点隐格式和改进的求解方法建立了向家坝枢纽下游 145 km 河段的非恒定流数学模型, 通过 2005 年实测的枯、中、洪水过程对模型进行验证。应用该模型模拟了向家坝日调节下泄非恒定流的传播过程, 分析了枢纽下游非恒定流的传播规律。模拟结果表明枢纽下游河段产生附加比降, 水位 ~ 流量关系呈绳套状, 且非恒定波发生横向变形。
关键词 向家坝水利枢纽 非恒定流 数值模拟 圣维南方程
中图分类号 :TV133.2 **文献标识码** :A **文章编号** :1006-7647(2008)03-0012-04

Numerical simulation of unsteady flow in Xiangjiaba Hydropower Project//WANG Zhi-li^{1,2}, LU Yong-jun¹ (1. *Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China*; 2. *State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing 210098, China*)
Abstract : Based on the improved 4-point implicated method, a one-dimensional unsteady flow model for a 145 km river section in the lower reaches of the Xiangjiaba Hydro Project is established and verified with field data during low, flood and average flow periods in 2005. This model is applied to simulate the propagation of unsteady flow in the Xiangjiaba Hydro Project, and some propagation principles are described : there is an additional gradient in the lower reaches of the project, the stage-discharge relation is a ropy curve, and transverse deformation occurs in the unsteady water wave.
Key words : Xiangjiaba Hydro Project ; unsteady flow ; numerical simulation ; Saint-Venant Equations

向家坝水利枢纽建成后, 由于电站的日调节泄流和大坝泄洪引起的非恒定流将改变下游河道的天然水流条件, 对大坝下游航道、港口、通航设施的正常使用以及船舶的安全航行将造成一定影响。特别是电站突然开启或关闭、大坝开闸泄洪等, 将在短时间内造成较大流量的变化, 数倍于基流的变动, 这种高瞬变流对山区河流通航水流条件及船舶通航水深的影响非常明显, 需明确枢纽下泄非恒定流的传播规律。针对这一特点, 本文采用四点偏心隐格式以及改进求解方法^[1]建立了向家坝水电站至泸州泸县水文局约 145 km 河段的一维非恒定流数学模型, 研究电站日调节非恒定流传播过程。

1 基本方程

描述河流非恒定流动的圣维南方程如下：
连续性方程

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q + Q_j \tag{1}$$

动量方程

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{Q}{A} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\beta Q^2}{2A^2} \right) + g \frac{\partial z}{\partial x} + g S_f = 0 \tag{2}$$

其中
$$S_f = \frac{Q|Q|}{K^2} \tag{3}$$

$$K = \frac{1}{n} A^{\frac{5}{3}} P^{-\frac{2}{3}} \tag{4}$$

式中： t 和 x 分别为时间和空间坐标； A 为过水断面面积； Q 为断面平均流量； q 为单位长度河道的旁侧入流； Q_j 为旁侧集中入流； β 为动量修正系数； z 为水位； S_f 为摩擦阻力项； K 为流量模数； n 为糙率； P 为湿周。

2 数值离散求解

2.1 四点偏心隐格式离散

圣维南方程的求解方法很多, 根据离散方法的不同, 有特征线法^[2]、有限差分法^[3]、有限元法^[4]和有限体积法^[5-7]等。各种离散方法都有着各自的优势, 本次模型采用广泛使用的四点偏心隐格式离散求解, 时空离散见图 1, 该格式具有较好的稳定性,

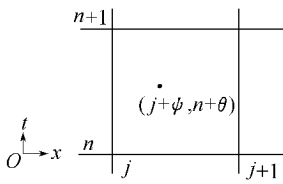


图1 时空离散网格

能够满足计算的要求,离散为

$$f = \theta [\psi f_{j+1}^{n+1} + (1 - \psi) f_j^{n+1}] + (1 - \theta) [\psi f_{j+1}^n + (1 - \psi) f_j^n] \quad (5)$$

$$\frac{\partial f}{\partial t} = \psi \frac{f_{j+1}^{n+1} - f_{j+1}^n}{\Delta t} + (1 - \psi) \frac{f_j^{n+1} - f_j^n}{\Delta t} \quad (6)$$

$$\frac{\partial f}{\partial x} = \theta \frac{f_{j+1}^{n+1} - f_j^{n+1}}{\Delta x} + (1 - \theta) \frac{f_{j+1}^n - f_j^n}{\Delta x} \quad (7)$$

式中: f 为离散变量,如 A, Q 等;上标 $n, n+1$ 为时间标识;下标 $j, j+1$ 为空间标识; Δt 和 Δx 分别为时间和空间步长; θ 为隐式求解系数; ψ 为偏心系数。

将式(5)~(7)代入方程(1)可以得到离散的连续性方程:

$$\begin{aligned} & \frac{\psi}{\Delta t} (A_{j+1}^{n+1} - A_{j+1}^n) + \frac{1 - \psi}{\Delta t} (A_j^{n+1} - A_j^n) + \\ & \frac{\theta}{\Delta x} (Q_{j+1}^{n+1} - Q_j^{n+1}) + \frac{1 - \theta}{\Delta x} (Q_{j+1}^n - Q_j^n) - \\ & \theta [\psi q_{j+1}^{n+1} + (1 - \psi) q_j^{n+1}] - (1 - \theta) [\psi q_{j+1}^n + \\ & (1 - \psi) q_j^n] - \theta Q_{j,j}^{n+1} - (1 - \theta) Q_{j,j}^n = 0 \end{aligned} \quad (8)$$

将式(5)~(7)代入方程(2)可以得到离散的动量方程:

$$\begin{aligned} & \frac{\psi}{\Delta t} \left(\frac{Q_{j+1}^{n+1}}{A_{j+1}^{n+1}} - \frac{Q_{j+1}^n}{A_{j+1}^n} \right) + \frac{1 - \psi}{\Delta t} \left(\frac{Q_j^{n+1}}{A_j^{n+1}} - \frac{Q_j^n}{A_j^n} \right) + \\ & \frac{\theta}{\Delta x} \left[\frac{\beta_{j+1}^{n+1}}{2} \left(\frac{Q_{j+1}^{n+1}}{A_{j+1}^{n+1}} \right)^2 - \frac{\beta_j^{n+1}}{2} \left(\frac{Q_j^{n+1}}{A_j^{n+1}} \right)^2 \right] + \\ & \frac{1 - \theta}{\Delta x} \left[\frac{\beta_{j+1}^n}{2} \left(\frac{Q_{j+1}^n}{A_{j+1}^n} \right)^2 - \frac{\beta_j^n}{2} \left(\frac{Q_j^n}{A_j^n} \right)^2 \right] + \\ & \frac{\theta g}{\Delta x} (z_{j+1}^{n+1} - z_j^{n+1}) + \frac{(1 - \theta) g}{\Delta x} (z_{j+1}^n - z_j^n) + \\ & \theta g [\psi S_{f,j+1}^{n+1} + (1 - \psi) S_{f,j}^{n+1}] + \\ & (1 - \theta) g [\psi S_{f,j+1}^n + (1 - \psi) S_{f,j}^n] = 0 \end{aligned} \quad (9)$$

离散格式的稳定性条件^[8]为

$$\frac{\psi - \frac{1}{2}}{C_r} + \left(\theta - \frac{1}{2} \right) \geq 0 \quad (10)$$

其中 $C_r = \frac{\Delta t}{\Delta x} C = \frac{\Delta t}{\Delta x} \left(\sqrt{\frac{gA}{B}} \pm U \right)$

式中: C_r 为克朗数; A 为过水断面面积; B 为河宽; U 为断面平均流速。当 $\psi > 1/2$ 且 $\theta > 1/2$ 时离散方程具有无条件稳定性。

令 $Q_j^{n+1} = Q_j^n + \Delta Q$, $h_j^{n+1} = h_j^n + \Delta h$, $z_j^{n+1} = z_j^n + \Delta h$, $A_j^{n+1} = A_j^n + B_j^n \Delta h$, 代入离散方程式(8)和式(9)中,并对其中的非线性项进行线性化,整理可以得到如下方程:

连续性方程

$$a_j \Delta h_j + b_j \Delta Q_j + c_j \Delta h_{j+1} + d_j \Delta Q_{j+1} = p_j \quad (11)$$

动量方程

$$e_j \Delta h_j + f_j \Delta Q_j + g_j \Delta h_{j+1} + w_j \Delta Q_{j+1} = r_j \quad (12)$$

式中: $a_j, b_j, c_j, d_j, p_j, e_j, f_j, g_j, w_j, r_j$ 均为离散系数; h 为水深。

2.2 改进的求解方法

在求解离散方程式(11)和式(12)时,传统算法为扫描算法^[3],即假设流量变化量和水位变化量存在线性关系,然后代入式(11)和式(12)中循环扫描计算。文献[1]通过增补结点流量平衡方程,直接解耦流量和水位,构造三对角追赶矩阵求解。该方法避免迭代计算,守恒性和稳定性较好,尤其适用于有往复流受潮汐影响的河段计算,具体过程如下:

根据式(11)和式(12)可以得到

$$\Delta Q_j = M_{1,j} + M_{2,j} \Delta h_j + M_{3,j} \Delta h_{j+1} \quad (13)$$

$$\Delta Q_{j+1} = N_{1,j} + N_{2,j} \Delta h_j + N_{3,j} \Delta h_{j+1} \quad (14)$$

往前递推,可得到

$$\Delta Q_{j-1} = M_{1,j-1} + M_{2,j-1} \Delta h_{j-1} + M_{3,j-1} \Delta h_j \quad (15)$$

$$\Delta Q_j = N_{1,j-1} + N_{2,j-1} \Delta h_{j-1} + N_{3,j-1} \Delta h_j \quad (16)$$

在结点 j 处根据质量守恒有

$$\begin{aligned} & N_{2,j-1} \Delta h_{j-1} + (N_{3,j-1} - M_{2,j}) \Delta h_j - \\ & M_{3,j} \Delta h_{j+1} = M_{1,j} - N_{1,j-1} \end{aligned} \quad (17)$$

加入边界条件得到三对角离散方程组^[1]。

3 一维溃坝波模拟

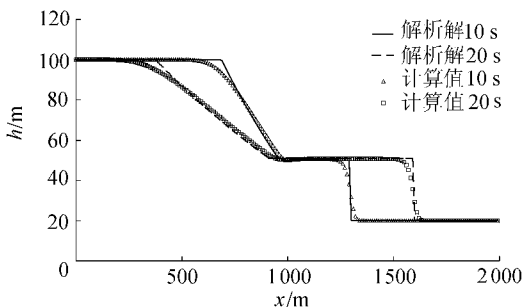
为了验证计算模型和程序的可靠性,通过有解析解的一维 Stoker 溃坝对模型进行验证。计算区域为长 2000 m 的矩形河道,中间有一挡水闸,上游水深 100 m,下游水深 20 m,网格长度 $\Delta x = 10$ m,时间步长 $\Delta t = 1.0$ s。计算坝体突然全部溃决时渠道内溃坝波的演进过程。图 2 给出了 $t = 10$ s, 20 s 时水深和流速计算值与 Stoker 解析解的比较。从图 2 可以看出,计算值与解析解在波值与波传播速度方面都吻合良好,验证了模型的可靠性。

4 向家坝下泄非恒定流的计算

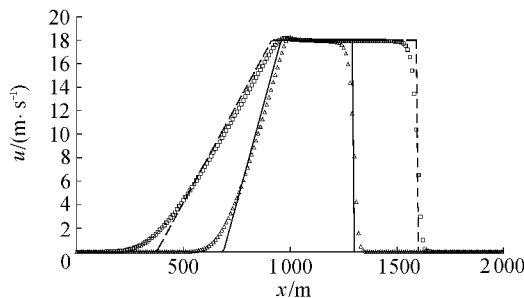
本次计算的范围为向家坝水电站至泸州泸县水文站,全长约 145 km,共分为 208 个计算断面,滩段和弯曲河段断面间距较小,顺直河段断面间距较大,断面最大间距 1100 m,最小间距 190 m。该河段属于山区性河流,比降较大,存在多处险滩,水流急,流态紊乱。

4.1 模型的验证

分别对枯水、中水和洪水的实测资料进行验证。枯水时采用 2005 年 3 月 15 日至 4 月 15 日的实测资料进行验证;中水和洪水均采用 7 月 1 日至 8 月 25 日的实测资料验证。沿程各水尺位置见图 3。糙



(a) 水深沿程变化



(b) 流速沿程变化

图2 一维溃坝波水深和流速计算值与解析解的比较

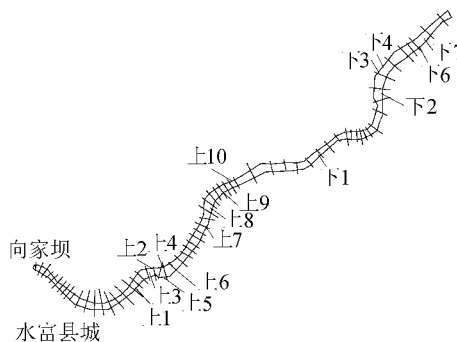
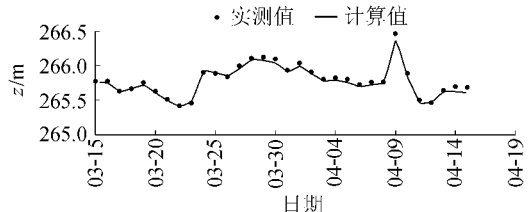
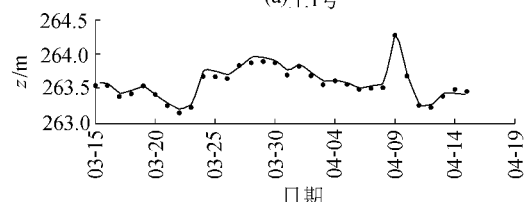


图3 水尺位置

率根据水位的不同采用不同的值,除个别河段之外,糙率总体上是枯水较大、洪水较小,介于 0.030 ~ 0.045 之间。计算边界条件为:上游给定流量过程,下游泸州给定水位~流量关系。图4和图5分别给出了枯水和中洪水时上1号、上7号水尺的水位验证情况,可以看出计算水位和实测水位吻合较好,说

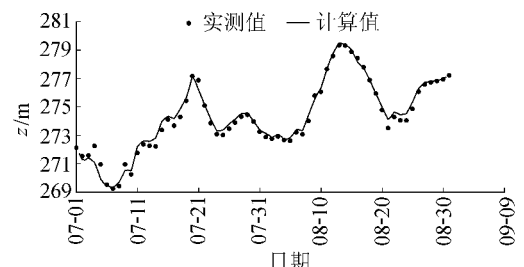


(a) 上1号

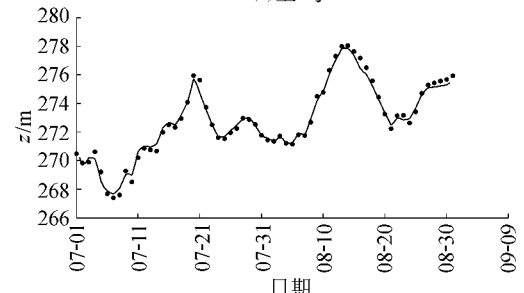


(b) 上7号

图4 枯水水位验证



(a) 上1号



(b) 上7号

图5 中洪水水位验证

明模型能够较好地模拟该河段的非恒定流过程。

4.2 非恒定流的传播计算

为分析向家坝日调节下泄非恒定流的传播规律,对向家坝的日调节下泄过程进行模拟计算。下泄过程为台阶形,从 8:00 开始下泄流量逐渐增大,至 18:00~20:00 用电高峰时下泄流量最大,之后流量逐渐减小,最大流量为 5 589 m³/s,最小流量为 1 200 m³/s,日流量最大变幅 4 389 m³/s。横江和岷江汇流分别为 150 m³/s 和 700 m³/s,下游泸州采用 2005 年实测的水位~流量关系。

根据日调节特点,给定下泄流量过程重复计算,直至下游流量过程在每天相同时刻为常数。图6给出不同时刻沿程流量的变化,从图6中可以看出流量变化线向下游逐渐集中,最大流量由上游至下游逐渐减小,最小流量由上游至下游逐渐增大,流量日变幅逐渐衰减,沿程平均衰减率为 19 m³/s/km。图7给出了坝下、宜宾、李庄和泸州的水位和流量变化过程,可以看出下游河段水位变幅较大,其中坝下水位变幅为 4.97 m/d,至泸州水位变幅仍有 1.17 m/d 非恒定波传播较快,至宜宾需要 2h 左右,至李庄需要 4h 左右,至泸州需要 13h 左右,平均传播速度为 11 km/h。

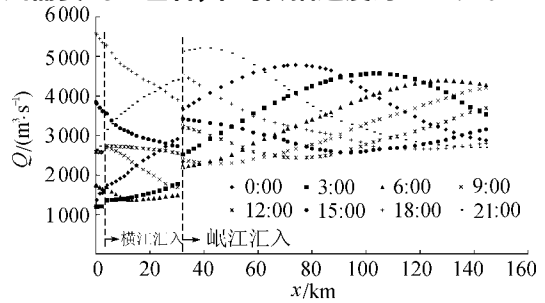


图6 不同时刻流量沿程变化

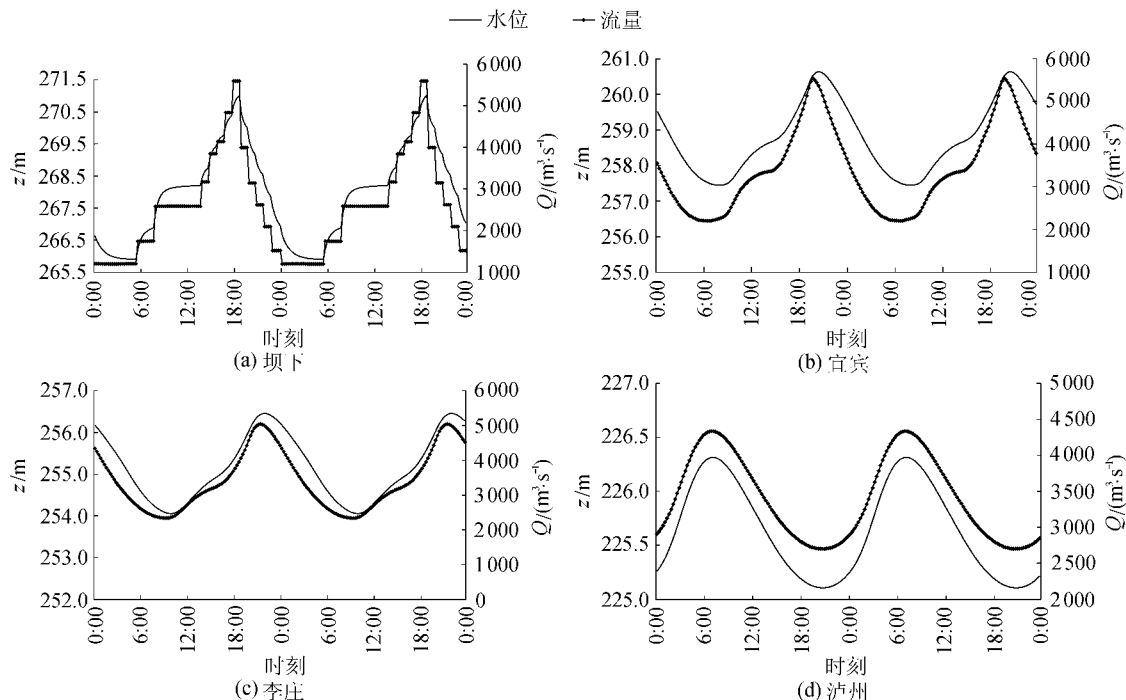


图 7 坝下、宜宾、李庄和泸州的水位过程及流量过程

图 8 为李庄的水位 ~ 流量关系,可以看出水位 ~ 流量关系呈逆时针绳套状,这主要是由于枢纽下泄的非恒定波在传播过程中产生了附加比降^[9],即上游流量增加时,产生正向附加比降,相同水位时流量增大;上游流量减小时,产生负向附加比降,相同水位时流量减小。由于非恒定波产生的附加比降,还造成了非恒定波的横向变形,即涨水波被压缩变陡,落水波被拉伸变缓。由图 7 可以看出坝下涨水历时 13.5 h,落水历时 10.5 h,而非恒定波传播至泸州后涨水历时 10 h,落水历时 14 h。从水位和流量非恒定波的比较可以看出,两者并不同步,流量非恒定波的传播速度较水位非恒定波提前 45 min 左右。

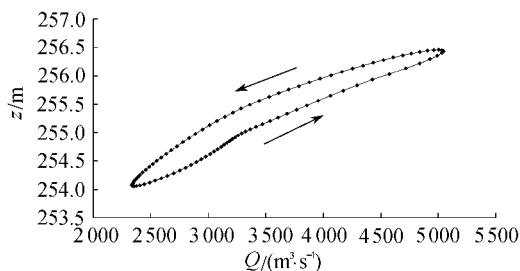


图 8 李庄水位 ~ 流量关系

5 结 语

采用四点偏心隐格式和改进的求解方法,建立了向家坝下游 145 km 河段的一维非恒定流数学模型,通过 2005 年实测的枯水、中水和洪水过程对模型进行了验证。应用模型对日调节非恒定流计算,计算结果表明 ①向家坝下泄的日调节非恒定波传播

较远,可影响至泸州,非恒定波的平均传播速度约为 11 km/h;②水位日变幅大、衰减慢,坝下水位变幅为 4.97 m/d,泸州水位变幅为 1.17 m/d;③枢纽下泄的非恒定波在传播过程中产生附加比降,因而断面的水位 ~ 流量关系呈逆时针绳套状;④非恒定波发生横向变形,即涨水波被压缩变陡,落水波被拉伸变缓。

参考文献:

- [1] 耿艳芬. 城市雨洪的水动力耦合模型研究与应用[D]. 大连: 大连理工大学, 2006.
- [2] 付典龙, 傅春. 一维圣维南方程组的特征线法[J]. 南昌大学学报, 2006, 28(4): 386-389.
- [3] 王新宏, 张强, 杨方社. Preissmann 隐式差分格式在渭河下游洪水演进计算中的应用[J]. 西北水力发电, 2003, 19(1): 31-4.
- [4] 王志力, 耿艳芬, 金生. 安康枢纽下游非恒定流数学模型研究[J]. 长江科学院院报, 2005, 22(5): 4-7.
- [5] 苏铭德, 徐昕, 朱锦林, 等. 数值模拟在钱塘江涌潮分析中的应用: I 数值计算方法[J]. 力学学报, 1999, 31(5): 521-533.
- [6] 耿艳芬, 王志力, 金生. 一维浅水方程的高精度 GODUNOV 格式[J]. 水动力学研究与进展: A 辑, 2005, 20(4): 507-512.
- [7] 李元亚. 高坝瞬时泄洪对坝下游船舶航行及码头影响的数字模拟[J]. 水利水运工程学报, 2006(2): 31-7.
- [8] LYB D, GOODWIN P. Stability of a general Preissmann scheme[J]. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 1987, 113(1): 16-28.
- [9] 乐培九, 王永成. 电站日调节泄流对下游航运影响及其防治措施[J]. 水道港口, 2004, 25(5): 52-58.

(收稿日期 2007-08-20 编辑 骆超)