

三峡永久船闸输水系统输水特性研究

王玲玲,高飞

(河海大学水利水电工程学院,江苏南京 210098)

摘要 利用等时段的特征线法数值模拟三峡永久船闸输水系统不补水工况下的输水特性,得出了输水管道沿程各节点水头及流量的变化规律.计算结果与物模成果吻合良好,充分证明了该方法在船闸输水特性的模拟中具有较高的精度和可靠性.成果可作为制定船闸运行方案的依据.

关键词 三峡水利工程;永久船闸;输水系统;特征线法

中图分类号 :U641.3+2 **文献标识码** :A **文章编号** :1000-1980(2002)04-0096-04

长江三峡工程永久双线五级船闸的总水头 113 m,年通过能力 5 000 万 t,是当今世界上闸室及闸、阀门数量最多、水头最高、线路最长、运行情况最复杂、规模最大的船闸工程.同时,各级船闸的组合运行工况极为复杂.因此,必须对三峡永久船闸工程输水系统在不同应用条件下的水力特性进行全面的模拟研究,为运行方案的制定提供依据.

1 输水管道一维水力学数值模拟

三峡船闸输水系统的流体运动可简化为一维非恒定有压管流.

1.1 非恒定有压管流的控制方程

a. 运动方程:

$$\frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} + g \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{f}{2D} V |V| = 0 \tag{1}$$

式中: H ——水头; V ——管道断面平均流速; D ——管径; f ——达西-维斯巴哈摩擦系数; x,t ——空间坐标和时间坐标.

b. 连续方程:

$$\frac{a^2}{g} \frac{\partial V}{\partial x} + V \left(\frac{\partial H}{\partial x} - \sin \alpha \right) + \frac{\partial H}{\partial t} = 0 \tag{2}$$

式中: a ——管道内水击波的传播速度,对不同管道取值大约在 1 000 ~ 1 200 m/s 范围; α ——管道与水平线的夹角,当中心线高程沿距离 x 增加时为正.

1.2 数值离散方法——特征线法

控制方程(1)(2)组成的偏微分方程组,可采用特征线法数值求解,详见文献[1].应用该方法最终可得出时间-空间域上的显式迭代格式:

$$C^+ : \left. \begin{aligned} V_P - V_R + \frac{g}{a} (H_P - H_R) + \frac{g}{a} V_R \sin \alpha (t_P - t_R) + \frac{f}{2D} V_R |V_R| (t_P - t_R) &= 0 \\ X_P - X_R &= (V_R + a) (t_P - t_R) \end{aligned} \right\} \tag{3}$$

$$C^- : \left. \begin{aligned} V_P - V_S - \frac{g}{a} (H_P - H_S) - \frac{g}{a} V_S \sin \alpha (t_P - t_S) + \frac{f}{2D} V_S |V_S| (t_P - t_S) &= 0 \\ X_P - X_S &= (V_S - a) (t_P - t_S) \end{aligned} \right\} \tag{4}$$

式中 C^+ 和 C^- 分别表示图 1 中的 RP 和 SP 线,下标 A,B,C 表示上一时间段即 t 时刻的节点,其水头和流速值均为已知; R,S 点水力参数值可由 A,B,C 点内插得, P 节点为 C 节点下一时段即 $t + \Delta t$ 时刻的值.故管道任意内部节点的水头和流速都可由方程(3)和(4)联立求解得到.

1.3 边界条件

- a. 管道进口(或出口)边界:管道进、出口通常作为水位已知边界,利用式(4)可求得该边界流速(量)值,用式(3)可求下游边界流速(量)值。
- b. 管径变化处:设在第*i*根管的第*n*个节点与第*i*+1根管的第1个节点之间,管径发生变化,则根据两相邻节点间的水量连续性条件并不计局部水头损失,可求得两相邻节点的水头与流量。
- c. 多管交叉连接点:略去局部水头损失,根据连续性条件即进、出该节点的流量平衡,可推求各交叉管道邻近交叉点的节点水头及流量值。
- d. 阀门井:将阀门井分解为一个井和一个阀门分别处理。在计算过程中,将该门井视为主廊道上的一个竖直的交叉管道进行计算。

2 计算管段与节点的剖分

三峡永久船闸任意一级输水系统的不补水运行方式均可概化为图 2。由于船闸的输水管道首、末级与中间各级的长度及管径变化情况均有较大差别,将五级船闸的 1、2 级输水管道(管长分别为 412 m 及 528 m),剖分成 10 个管段即 11 个节点,中间各级管道管长 533 m,剖分为 12 个管段,末级管长 1 603 m,剖分为 22 个管段。各级管道剖分中沿程第 5 节点均为门井节点,第 6 节点均为阀门节点,两者相距 2.0 m。为采用等时段特征线法,通过试算即微调管道中的波速 a_i (初值取为 1 100 m/s),在保证各管段都采用相同的时间步长的条件下,对剖分后的各级管段利用下式试算其上所应布置的计算节点数 N_i 。输水管道沿程阻力系数参考有关文献①中所提供的数值。

$$\Delta t = \frac{L_i}{(V_i + a_i)N_i}$$

式中 L_i 为各管段的管长。

选择表 1 所示的计算工况进行模拟计算,部分计算结果见图 3。

表 1 上游 175.00 m、下游 62.00 m 工况各闸室运行条件

Table 1 Operation scheme of each gate chamber		
闸室编号	最高水位/m	最低水位/m
1	175.0	152.4
2	152.4	129.8
3	129.8	107.2
4	107.2	84.6
5	84.6	62.0

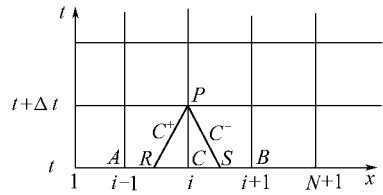


图 1 特征线法计算简图

Fig.1 Calculation scheme of characteristic line method

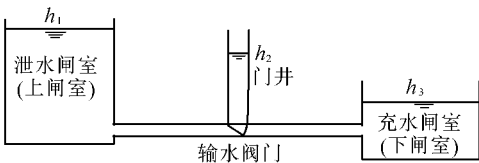


图 2 三峡船闸不补水运行概化图

Fig.2 Schematic diagram of ship lock operation

3 计算成果及成果分析

利用以上算法编制软件对任意管段数及节点数的输水系统进行数值模拟,可求得管道沿程各节点的水头及流量(或流速)。图 3(a)为上游引航道向 1 闸室的输水过程,图中上、下闸室分别指引航道及 1 闸室。由图 3(a)可见,1 闸室水位由 152.4 m 缓慢上升到 175 m;图 3(b)为 2 闸室向 3 闸室的输水过程,上、下闸室水位分别由 152.4 m 和 107.2 m 同步升降。图中还给出了输水管道从上游向下游依次排列的各节点水头变化过程线,图 3(a)中绘出了管道沿程 11 个主要节点的水头变化过程,图 3(b)中绘出了 13 个节点的水头变化过程,第 6 节头均为阀门节点。输水阀门开启时间均为 60 s,当上、下闸室水位差为 2 m 时,阀门再以 60 s 关闭。表 2 为该工况主要水力学参数的数模与物模成果对比情况。

① 南京水利科学研究院,三峡双线连续五级船闸总体运行水力学试验研究,1995 年 11 月。

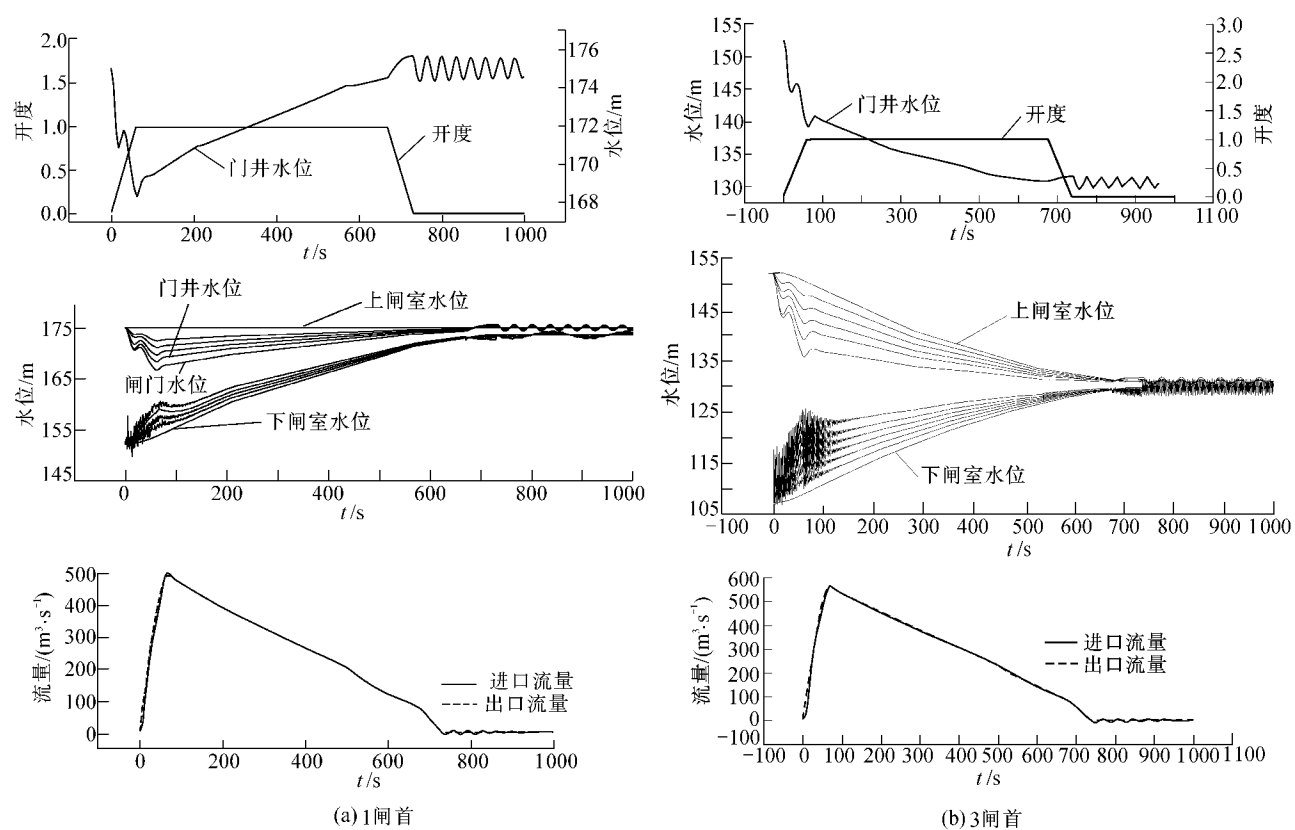


图 3 沿程压力及流量计算成果

Fig.3 Numerical results of pressure and flow rate

表 2 上游 175.00 m、下游 62.00 m 工况部分数模与物模成果对照

Table 2 Comparison of numerical results and experimental results

闸首	开门时间/s	$Q_{\max}/(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$		$U_{\max}/(\text{m} \cdot \text{min}^{-1})$		运行时间/s	
		数模	物模	数模	物模	数模	物模
1	60	503.2	491.3	2.75	2.84	791.9	812.0
2	60	567.7	523.9	3.26	3.02	745.0	769.0

注： $Q_{\max}$ 、 $U_{\max}$ 分别表示输水管道中的最大泄流量及闸室最大水位上升速度。

从图及表中可以看出,输水阀门开启过程中,门井水位立即下降,并出现振荡,同时阀门前各节点水头值均同时起伏震荡,流量急剧增加。门后各节点压力脉动强烈,但幅值较小。阀门全开之后,沿程各节点的压力脉动均逐渐消失,上、下游相邻闸室水头差及管道流量线性减少。在阀门关闭过程中,门井水位抬高,沿程各节点压力出现小幅脉动。关闭后,上闸室与门井之间出现流量及水位的来回振荡。从表 2 可看出,数模计算的关键水力学参数与物模较为接近,数模的最大流量稍大于物模结果,而运行时间则稍小于物模结果。这一误差可能是物模的比尺效应和数模的线性插值误差共同造成的。另外,由图 3 还可看出,输水阀门提前关闭还可能造成输水量不足,从而导致输水结束时,上、下两闸室水位不同,闸首阀门不能平压开启,这在引航道向闸室输水时尤为明显。

4 结 论

本文采用等时段的特征线法数值模拟三峡工程永久船闸输水系统不补水运行方式下的输水特性,模拟结果与物理模型试验结果较为一致,该算法可用以计算任一级闸室在各种不同的运行方式下输水管道中流速及压力的变化过程,也可用于其它类似的复杂有压管道的流动特性模拟中,计算结果可为进一步的空化空蚀研究及船闸运行方案的确定提供依据。

参考文献

[1] 王树人. 水击理论与水击计算[M]. 北京: 清华大学出版社, 1981. 27 ~ 29.

Water conveyance characteristics of ship lock in TGP

WANG Ling-ling , GAO Fei

(College of Water Conservancy and Hydropower Engineering , Hohai Univ. , Nanjing 210098 , China)

Abstract : The characteristic line method is used to simulate the characteristics of the water conveyance system of the ship lock in the Three-Gorges Project. The unsteady variation processes of water head and discharge are obtained. The calculated results are in good agreement with experimental results , providing a basis for determination of schemes of ship lock operation.

Key words : Three-Gorges Project ; ship lock ; water conveyance system ; characteristic line method

· 简讯 ·

国家自然科学基金委员会工程与材料学部
水利学科前沿研讨会在河海大学召开

2002 年 5 月 23 ~ 24 日由国家自然科学基金委员会工程与材料学部水利学科组织 , 在河海大学召开了“ 土体变形新理论与大型工程实践对比研究 ” 前沿研讨会. 来自浙江大学、同济大学、大连理工大学、西安理工大学、清华大学、上海交通大学、南京水利科学研究院和河海大学等 10 多所大专院校和科研院所的 50 多位专家和教授参加了会议. 国家自然科学基金委员会工程与材料学部水利学科主任李万红教授出席了会议, 清华大学沈珠江院士、河海大学殷宗泽教授和刘汉龙教授主持了会议. 会前由 3 位主持人编辑了 2 本会议交流材料《土体变形新理论与大型工程实践对比研究 1/2》《立项建议汇编》和《土体变形新理论与大型工程实践对比研究 2/2》《相关基金项目成果和进展汇编》. 会上, 通过 25 块展板展示和交流了近几年来土力学与工程领域国家自然科学基金资助项目研究的丰富成果. 10 多位专家作了立项建议发言, 代表们进行了广泛而认真的讨论.

(周云东供稿)