

DOI :10.3880/j.issn.1006-7647.2010.01.019

明满流过渡及跨临界流一维数值模拟

陈 杨¹,俞国青²

(1.长江科学院水力学所,湖北 武汉 430010;2.河海大学水利水电学院,江苏 南京 210098)

摘要 介绍了跨临界流及明满流在国外的研究进展,采用普雷斯曼格式辅以删减对流加速度项法和 Preissmann 狭缝法建立了一套能够处理缓流、急流、跨临界流和明满流的数学模型。为了验证所建模型的可行性,计算了多个具有解析解或试验结果的算例,结果表明吻合程度良好。

关键词 明满流交替 跨临界流 普雷斯曼格式 普雷斯曼狭缝 对流加速度项

中图分类号 :TV133.2 **文献标识码** :A **文章编号** :1006-7647(2010)01-0080-05

One-dimensional numerical simulation of transcritical flows and transition between free surface and pressurized flows//
CHEN Yang¹, YU Guo-qing² (1. Department of Hydraulics, Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China ;
2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract : Numerical simulation of one-dimensional unsteady flows in complicated systems such as long distance water transfer projects and urban storm sewer networks is of great significance for the practices in hydraulic engineering, among which the transcritical and free surface flows and the transition between free surface and pressurized flows are the two important issues. The overseas advances in the transcritical flows and the free surface-pressurized flows were reviewed. A mathematical model which could handle the subcritical flows, supercritical flows, transcritical flows, free surface flows and pressurized flows was established by use of the Preissmann scheme in conjunction with the reduced convective acceleration term method and the Preissmann slot assumption method. Extensive computations against analytical test cases or measured results have proved the validity of the proposed numerical model.

Key words : free surface-pressurized flow alternation ; transcritical flow ; Preissmann scheme ; Preissmann slot ; convective acceleration term

1 明满流及跨临界流研究现状

非恒定流是存在于自然界和工程问题中普遍的水力学现象,采用物理或数值模拟手段研究其运动规律具有重要的实际意义。对于诸如大型河网、灌溉系统、给排水管网、长距离调水工程等复杂系统,通过物理模型试验进行研究显然不太实际,只能通过数值模拟方法来研究。由于计算机资源的约束,输入原始资料的局限性,人们通常将上述问题简化成一维问题进行数值模拟。在非恒定流计算研究中,明满流过渡和跨临界流是 2 个重要的研究方向。

1.1 明满流研究现状

明满流也称明满交替水流,是一种出现在管道或封闭明渠中由明流变成满流(即有压流)或由满流变成明流的水力过渡现象,它在水工隧洞、水电站尾水洞及城市下水道中均可能发生。现有的明满流数值模拟方法主要有激波拟合法和激波捕捉法。

1.1.1 激波拟合法

激波拟合法(shock fitting method)将明流与满流看作 2 个流动区域,分别用明渠流和有压流的基本方程来进行描述,采用不同的数值方法分别处理有压流段和明流段。这种方法具有一些成功的例子,如 Song 等^[1]将管道的充满过程视作一个移动的激波向上游或下游推进,在计算明流和有压流时采用 2 个不同的数学模型来模拟,通过引入激波移动方程和交界面的特征线方程等求解。Wiggert^[2]通过引入一个移动界面及普雷斯曼狭缝(Preissmann slot)概念,利用特征线方法对明满流进行了研究。这种方法的缺点在于需要一套复杂的算法来追踪管道网络中明满流交界面的出现和位置,然后根据局部的流态在不同的求解程序之间转换。

1.1.2 激波捕捉法

激波捕捉法(shock capturing method)已得到广泛应用,它基于 Preissmann 狭缝技巧。假定在封闭管

作者简介 陈杨(1981—),男,湖北嘉鱼人,工程师,硕士,从事计算水力学、水工水力学研究。E-mail :cyang0520@163.com

道段顶端添加一条假想的开口狭缝,当出现有压流时,自由水面升高到狭缝内,有压流的压力用狭缝内的水头表示。这样做使得人们可利用一套统一的方程组描述明流和满流。1964年Cunge等^[3]通过在封闭管道顶端假定添加一条假想的开口狭缝,从而能够用明渠流方程组来模拟有压流段的流动。Garcia-Navarro等^[4]采用了一种基于TVD方法的隐式时间积分法成功模拟了管网及渠网中的恒定流或非恒定流。Trajkovic等^[5]进行了圆形断面管道出现明满流和缓急流过渡的试验研究,并采用MacCormack格式模拟了这2种过渡水流,数值计算结果与实验结果吻合良好,但对于某些情况会出现数值振荡现象,而且受显式格式的局限性影响,时间步长必须取得较小才能得到满意的结果。近年来,基于Preissmann狭缝法的数值模型开始越来越多地应用于下水道系统的模拟^[6-7],而且一些商业软件都已开始纳入这种方法,如Mouse(丹麦水利研究所开发的城市给排水管网水动力学和水质模拟模型),HydroWorks(英国Wallingford软件公司开发的城市雨污水集水系统水文水动力及水质泥沙模型软件)。

国内的明满流研究是随着20世纪80年代以后进行瞬变流研究的学者越来越多而逐渐兴起。丁振华等^[8]对水电站尾水洞过渡过程明满流统一用有压非恒定流方法进行模拟,对有压状态引用空气的状态方程来处理,当这种方法应用于以明流状态为主的长距离复杂输水道时将显得比较复杂。李辉等^[9]、樊红刚等^[10]利用Preissmann狭缝技巧将明渠流与管道流用统一的数学方程来描述,并采用统一的特征隐式格式求解,成功应用在电站的动态仿真计算以及尾水洞顶优化设计中。杨开林^[11]研究了明渠结合有压管调水系统中的水力瞬变,对有压流动采用了Preissmann狭缝法求解。

1.2 跨临界流研究现状

跨临界流是水利工程实践中经常面临的问题,通常出现在灌溉系统和山区河流以及城市中的下水道系统中,也有可能出现在固定和动态的水工结构中,例如闸门的动态操作就会引起激波,即静止的或移动的水跃。

目前,计算区域内流态发生转变的模拟方法可以分为2种:一种是激波拟合法,这种方法通过引入附加方程(相容方程和特征线方程)间断点的位置及其移动速度这2个附加变量以及内部移动边界需要的合适边界条件,然后联立求解。尽管这种方法物理上合理,但是算法结构复杂,还有当系统中同时有2种类型间断(如跨临界流和明满流过渡)时,该方

法往往难以模拟。因此,激波拟合法很少用于商业软件中。另一种是激波捕捉法,很多模型都是根据这种通用方法采用各种不同的格式构建而成的,例如MacCormack格式^[12],MESH格式^[13]和间断Galerkin有限单元法^[14]等。激波捕捉法要求模型必须基于守恒型方程组构建而成,这使得MacCormack格式颇为盛行。Hsu等^[15]利用经典的溃坝问题、带有解析解的正负激波问题验证了MacCormack格式在跨临界流模拟中的表现。尽管MacCormack格式为了修平振荡必须添加人工黏性,而且由于受到稳定性条件的限制,它的时间步长必须取得较小,但是它能够轻易捕捉到诸如急流到缓流突变的水力间断。

近年来,恒定跨临界流作为跨临界流中的一个研究方向,不少研究者对此予以了关注。如果流态为完全急流或缓流,可以用常微分方程求解器轻松求解。如果流态为跨临界流,情况将变得复杂得多,一种方法是先判断控制断面而后分段求解;另一种方法是基于激波捕捉法对圣维南方程组的应用。Macdonald等^[16]将激波捕捉法用于一维恒定流方程求解上,格式的激波捕捉特性使得该方法能够自动捕捉水跃。Macdonald等^[17-18]通过反问题的构建,即通过给定的水深和流量来决定底坡,提出了很多实例的解析解,如非棱柱形渠道、非均匀底坡、缓急流过渡等。这些算例可以作为恒定流模型和非恒定流模型的基准解,用来检验数值格式的精度。

除了以上这些方法外,近年来还出现了一种删减对流加速度项法(reduction of convective acceleration term)。这种方法由Havno等^[19]在1985年首先提出,Djordjevic等^[20]对删减对流加速度项法提出了改进措施,将Kutija^[21]采用的将对流加速度项完全删去改成了在该项前面乘上一个关于弗劳德数的函数,即在缓流情况下为1.0,接近急流时逐渐减小至0,由此得到的计算结果通过与MacDonald^[17-18]的基准解相比较,证实这种方法能够准确预报缓、急流的转换位置,跃后水深结果也较为准确。

目前,非恒定明渠水流或压力管流的分析已有长足的进步,但两者数学模型的建立和发展则各自独立,仅能适用于其对应的水流流态范围。因此,建立一个可以同时适用于非恒定明渠水流及压力管流的数学模型,对于诸如长距离输水工程及下水道管网系统等的工程设计和运用具有重要意义。本文针对一维非恒定流中的明满流以及跨临界流展开研究,旨在建立一套能够对明满流和跨临界流采用统一的Preissmann方法求解的数学模型。

2 数学模型

2.1 基本方程

一维明渠非恒定流基本方程组(又称圣维南方程组)由连续方程和动量方程所组成,本文选用以水位 Z 和流量 Q 为基本变量的形式 在无旁侧入流的情况下,该方程组为

$$\frac{\partial Z}{\partial t} + \frac{1}{B} \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \tag{1}$$

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

式中: Z 为水位; t 为时间; B 为水面宽度; Q 为流量; x 为沿程距离; A 为过水断面面积; g 为重力加速度; S_f 为摩阻坡降。

对于有压管道而言,假设在管道顶部存在 1 条非常窄的缝隙,该缝隙既不增加管道的截面积也不增加水力半径(图 1)。由于假定管道通气条件良好,因此在洞顶不会卷入空气,不能模拟负压力和卷入空气泡现象,可能造成部分管段压力模拟误差。选择缝隙宽度应使 $B_{sl} = gA/a^2$ (A 为管道截面积, a 为水锤波波速)。一旦管道充满水时,明渠流动方程确定的水位 Z 就是作用在那一点的测压管水头 H 。所以可以用上述方程组作为基本方程组统一描述无压流和有压流,计算所得的 Z 对于无压流是断面水位,而对于有压流则为断面处相对于某一基准面的测压管水头。

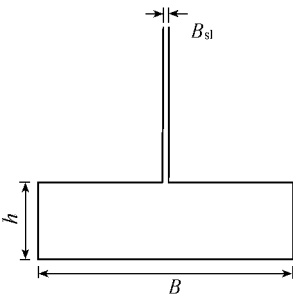


图 1 Preissmann 狭缝示意图

2.2 删减对流项法

为了能够模拟跨临界流,国外学者进行了许多尝试,在许多方法中能够兼顾计算效率和准确性的方法有 Havno 等^[19]提出的删减对流加速度项方法,他首先提出了 2 点假定:① Fr 接近 1 时,逐渐删减动量方程中的惯性项;②忽略实际的流态,算法采用缓流情况边界条件结构,即渠道每一端都有 1 个边界条件。

式(2)中的第 2 项可展开为 $\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) = Q \frac{\partial u}{\partial x} + u \frac{\partial Q}{\partial x}$,经 Kutija 等^[21]证实当 Fr 接近 1 时删去 $Q \frac{\partial u}{\partial x}$

项后的急流模拟计算结果明显优于删去 $u \frac{\partial Q}{\partial x}$ 项的

计算结果 而且,对于删去 $Q \frac{\partial u}{\partial x}$ 项的圣维南方程组,由其特征线所确定的求解所需边界条件恒为上游 1 个边界条件,下游 1 个边界条件,该简化方程组离散后可用同一算法结构求解,即在急流情况下仍能运用缓流型算法结构,如缓流情况下 Preissmann 格式和 Abbott-Ionescu 格式的求解方法——追赶法,从而大幅度提高计算效率。但是,由于该方法求解的是不完整的圣维南方程,计算精度会有所降低。

本文选用的删减对流加速度项法具体做法为在部分对流加速度项 $Q \frac{\partial u}{\partial x}$ 前乘上 1 个折减系数 α :

$$\alpha = \begin{cases} 1 & Fr \leq Fr_1 \\ 1 - \left(\frac{Fr - Fr_1}{Fr_2 - Fr_1} \right)^2 & Fr_1 < Fr < Fr_2 \\ 0 & Fr \geq Fr_2 \end{cases} \tag{3}$$

其中: Fr 为图 2 所示 4 个临近计算点的 Fr 数的平均值; Fr_1 和 Fr_2 为可供调试的常数,如 $Fr_1 = 0.9$, $Fr_2 = 1.15$ 。由于这 4 个点中 $n+1$ 时间层的 2 个点的 Fr 数为未知变量,所以需要对 α 值迭代,迭代的初值选为 n 时间层 2 个点的平均值,实际运用证实,对 α 迭代 1 次即可得到稳定的解。

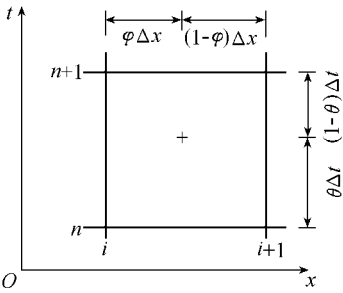


图 2 Preissmann 隐式差分格式示意图

2.3 方程离散及求解方法

本文选用了明渠流模拟中应用非常广泛的 Preissmann 隐式有限差分格式(图 2)离散以上控制方程。Preissmann 格式的完整形式如下:

$$f = \theta [\varphi f_{i+1}^{n+1} + (1 - \varphi) f_i^{n+1}] + (1 - \theta) [\varphi f_{i+1}^n + (1 - \varphi) f_i^n] \tag{4}$$

$$\frac{\partial f}{\partial t} = \frac{1}{\Delta t} [\varphi (f_{i+1}^{n+1} - f_{i+1}^n) + (1 - \varphi) (f_i^{n+1} - f_i^n)] \tag{5}$$

$$\frac{\partial f}{\partial x} = \frac{1}{\Delta x} [\theta (f_{i+1}^{n+1} - f_i^{n+1}) + (1 - \theta) (f_{i+1}^n - f_i^n)] \tag{6}$$

式中: f 为因变量; θ, φ 分别为时间和空间权重因子, $0 \leq \theta \leq 1, 0 \leq \varphi \leq 1$, 本文取 $\theta = 1.0, \varphi = 0.5$; f_i^n

为 f 在点 $(i\Delta x, n\Delta t)$ 处的值; $\Delta x, \Delta t$ 分别为距离和时间间隔。

令 $f_i^{n+1} = f_i^n + \Delta f$, 将式(4) ~ (6) 代入方程(1)(2)并经线性化后均可得如下线性差分方程组:

$$A_{1i}\Delta Z_i + B_{1i}\Delta Q_i + C_{1i}\Delta Z_{i+1} + D_{1i}\Delta Q_{i+1} = E_{1i} \tag{7}$$

$$A_{2i}\Delta Z_i + B_{2i}\Delta Q_i + C_{2i}\Delta Z_{i+1} + D_{2i}\Delta Q_{i+1} = E_{2i} \tag{8}$$

式中: $A_{1i}, B_{1i}, C_{1i}, D_{1i}, E_{1i}, A_{2i}, B_{2i}, C_{2i}, D_{2i}, E_{2i}$ 为时间步长 Δt 内第 i 断面差分方程的系数; $\Delta Z_i, \Delta Z_{i+1}$ 分别为第 i 和第 $i+1$ 断面在 Δt 时间内的水位增量; $\Delta Q_i, \Delta Q_{i+1}$ 分别为第 i 和第 $i+1$ 断面在 Δt 时间内的流量增量。

由于采用了删减对流加速度项法, 求解所需边界条件恒为上游 1 个边界条件, 下游 1 个边界条件, 故对所得方程系统的求解均可采用效率较高的追赶法。

3 算 例

算例 1(明满流交替): 该算例描述的是矩形断面顶端的 1 条封闭渠道, 相关的几何及物理参数如下^[22] 宽度 $W_{ch} = 0.51$ m, 高度 $h_{ch} = 0.148$ m, 长度 $L = 10$ m, 底坡坡度 $S_0 = 0$, 曼宁系数 $n = 0.012$ 。初始条件: $A(x, 0) = 0.06528$ m², $Q(x, 0) = 0$ m³/s。边界条件: 在 $x = 0$ 处, 水位变化如图 3 所示。

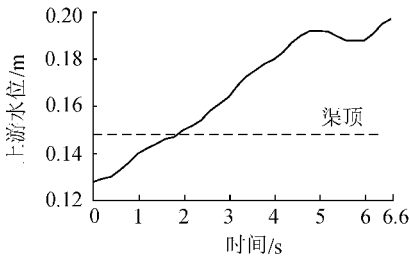


图 3 上游边界水位变化曲线

将计算所得沿程测压管水头及 3.5 m 处测压管水头历时曲线绘于图 4 和图 5(所选计算参数为空间步长 $\Delta x = 0.25$ m、时间步长 $\Delta t = 0.1$ s, $B_{sl} = 0.005$ m、时间权重因子 $\theta = 1.0$ 、空间权重因子 $\varphi = 0.5$), 由图 5 可知, 计算结果与实验结果及 MacDonald 计算结果吻合程度较好。由计算参数选定过程可知: 减小 Δx 或提高 θ 的值能够显著消除计算中出现的振荡; 减小狭缝宽度可以修平明满流分界面满流侧的小幅振荡, 但 3.5 m 处测压管水头历时曲线的满流部分震荡幅度略增。

算例 2(急流算例): 矩形断面渠道, 渠道全长 $L = 100$ m, 渠道断面宽度 $B = 10$ m, 流量 $Q = 20$ m³/s, 曼宁系数 $n = 0.03$ 。边界条件: 上游入流为

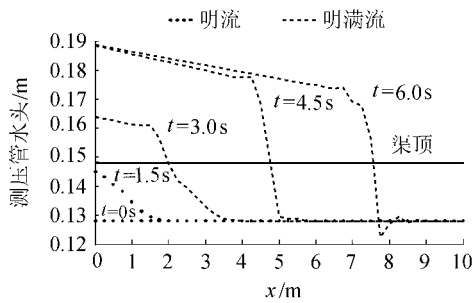


图 4 典型时刻沿程测压管水头线

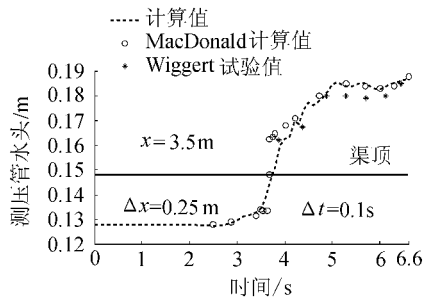


图 5 $x = 3.5$ m 处测压管水头随时间变化曲线
急流, 水深为 $\hat{y}(0)$, 下游出流也是急流, 河床底坡由式(9)给定^[18]:

$$S_0(x) = \left(1 - \frac{4}{g\hat{y}(x)^3}\right)\hat{y}'(x) + \frac{9}{2500[\hat{y}(x)]^2}\left(\frac{1}{5} + \hat{y}(x)\right)^{3/4} \tag{9}$$

其中

$$\hat{y}(x) = \left(\frac{4}{g}\right)^{1/3}\left\{1 - \frac{1}{4}\exp\left[-4\left(\frac{x}{100} - \frac{1}{2}\right)^2\right]\right\} \tag{10}$$

$$\hat{y}'(x) = \left(\frac{4}{g}\right)^{1/3}\frac{1}{50}\left(\frac{x}{100} - \frac{1}{2}\right)\exp\left[-4\left(\frac{x}{100} - \frac{1}{2}\right)^2\right] \tag{11}$$

式中: $\hat{y}(x), \hat{y}'(x)$ 分别为水深函数和水深函数的导数; g 为重力加速度; x 为沿程距离; $S_0(x)$ 为底坡函数。

该问题的解(沿程水深)由式(10)给定并如图 6 所示。

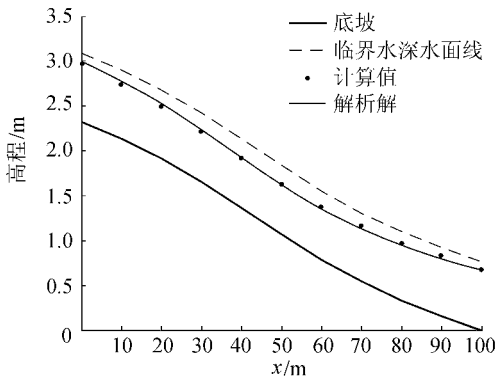


图 6 急流算例水面线计算结果对比

利用删减对流加速度项法模拟此算例,需要在下游补充 1 个虚拟边界条件,为了尽量减小不合实际的下游边界条件对整个计算域的影响,按照 Kutija^[21] 的建议,下游边界设为自由出流水位流量关系。另外,根据对比计算可知,上游选择流量为边界条件,其结果优于选用水位边界条件,由图 6 可知计算值与解析解吻合程度较好。所选取计算参数为 $\Delta x = 10\text{ m}$, $\Delta t = 10\text{ s}$,总计算时间为 $1\,000\text{ s}$,对 α 仅迭代 1 次, $Fr_1 = 0.9$, $Fr_2 = 1.15$,时间权重因子 $\theta = 1.0$,空间权重因子 $\varphi = 0.5$ 。

算例 3(跨临界流) 梯形断面渠道, $L = 1\,000\text{ m}$, $B = 10\text{ m}$,水面宽 $T = 10 + 2\hat{y}$ ($\hat{y}$ 为水深),湿周 $P = 10 + 2\sqrt{2}\hat{y}$, $Q = 20\text{ m}^3/\text{s}$, $n = 0.02$ 。边界条件:上游入流为缓流;出流为急流,水深 $h_{\text{下}} = 1.349\,963\text{ m}$,河床底坡由式(12)给定^[17]:

$$S_0(x) = \left(1 - \frac{400[10 + 2\hat{y}(x)]}{g[10 + \hat{y}(x)]^3\hat{y}(x)^3}\right)\hat{y}'(x) + 0.16 \frac{[2\hat{y}(x)\sqrt{2} + 10]^{4/3}}{[10 + \hat{y}(x)]^{10/3}\hat{y}(x)^{10/3}} \quad (12)$$

该问题的解析解(沿程水深)由式(13)给定并如图 7 所示。

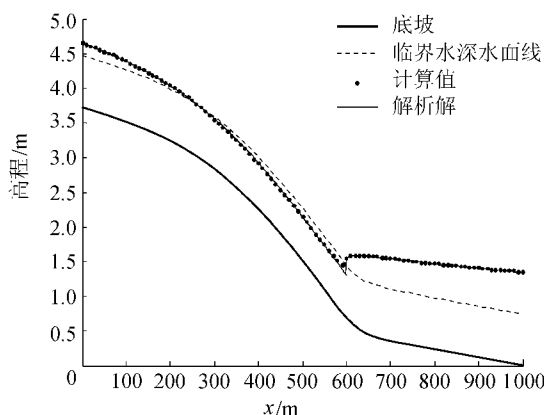


图 7 跨临界流算例水面线计算结果对比

计算参数选取为 $\Delta x = 10\text{ m}$, $\Delta t = 10\text{ s}$,总计算时间为 $1\,000\text{ s}$,对 α 仅迭代 1 次;时间权重因子 $\theta = 1.0$,空间权重因子 $\varphi = 0.5$ 。经综合比较后,选定 $Fr_1 = 0.9$, $Fr_2 = 1.15$,计算结果如图 7 所示,结果显示缓流到急流的转变模拟较准确,水跃位置与解析解仅相差 Δx_0 。

4 结 论

以一维非恒定流中的 2 个重要研究方向——明满流交替及跨临界流的数值模拟为对象,通过采用 Preissmann 隐式有限差分方法,结合 Preissmann 狭缝假定以及删减对流加速度项法,建立了能够同时模拟明满流交替和跨临界流的数学模型。经明满流过

渡水流以及跨临界流等算例的应用计算,将结果与前人试验结果或解析解进行比较,结果显示均吻合良好,表明该模型可用于明满流交替及跨临界流的数值模拟计算分析工作中。

参考文献:

- [1] SONG C C S, CARDLE J A, LEUNG K S. Transient mixed-flow models for storm sewers [J]. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 1983, 109(11): 1487-1498.
- [2] WIGGERT D C. Transient flow in free-surface, pressurized systems [J]. Journal of the Hydraulics Division, 1972, 98(1): 11-27.
- [3] CUNGE J A, WEGNER M. Integration numerique des equations d'ecoulement de Barre de Saint-Venant par un schema implicite de differences finies: Application au cas d'une galerie tantot en charge, tantot a surface libre [J]. La Houille Blanche, 1964(1): 33-99.
- [4] GARCIA-NAVARRO P, ALCRUDE F, PRIESTLEY A. An implicit method for water flow modelling channels and pipes [J]. Journal of Hydraulic Research, 1995, 32(5): 721-742.
- [5] TRAJKOVIC B, IVETIC M, CALOMINO F. Investigation of transition from free surface to pressurized flow in a circular pipe [J]. Water Science and Technology, 1999, 39(9): 105-112.
- [6] JI Z. General hydrodynamic model for sewer/channel network systems [J]. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 1998, 124(3): 307-315.
- [7] CAPART H, SILLEN X, ZECH Y. Numerical and experimental water transients in sewer pipes [J]. Journal of Hydraulic Research/De Recherches Hydrauliques, 1997, 35(5): 659-672.
- [8] 丁振华, 许景贤. 导流洞改作发电尾水洞过渡过程中明满流的数学模型 [J]. 水利学报, 1996(9): 1-10.
- [9] 李辉, 陈乃详. 具有明满交替流动的三峡右岸地下电站的动态仿真 [J]. 清华大学学报: 自然科学版, 1999, 39(11): 29-31.
- [10] 樊红刚, 陈乃详. 明满混合瞬变流动仿真计算分析 [J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2000, 40(11): 63-66.
- [11] 杨开林. 明渠结合有压管调水系统的水力瞬变计算 [J]. 水利水电技术, 2002, 33(4): 5-9.
- [12] GARCIA-NAVARRO P, ALCRUDE F, SAVIRON J M. 1-D open-channel flow simulation using TVD-McCormack scheme [J]. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 1992, 118(10): 1359-1369.
- [13] MESELHE E A, SOTIROPOULOS F, HOLLY F M J. Numerical simulation of transcritical flow in open channels [J]. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 1997, 123(9): 774-783.

(下转第 94 页)

和灌溉双重功能的暗管设计与参数却鲜有研究。显然,这与特定的条件,例如作物种类、气象、土壤、水文地质条件有关。此外,出口控制设施在不同的作物之间、在不同的季节之间如何调控,也需要进一步研究。同时,在少雨地区,地下渗灌可能带来表土的盐碱化问题,如何解决此类问题也是应用WRSIS的关键。

c. 在水质处理系统方面,湿地规模与控制区域内农田面积、灌溉施肥制度的关系,湿地水处理效果、水文及环境效应等也是需要深入研究的。

d. 在附属设施方面,目前灌溉水泵的启闭主要是根据地下水位来调控的,如果结合土壤的墒情监测进行控制也需要深入研究。

e. 在系统的效果方面,该系统的水文、水质处理、水资源利用效率、环境与生态效应等与系统的布置形式、系统在区域上的分布密度等的关系,需要深入研究。

致谢 武汉大学茆智院士对本文提供了指导 美国俄亥俄州立大学 Larry C Brown 教授为本文提供了资料,特此致谢。

参考文献：

[1] 王修贵,茆智,李新建.改善河流水质的农业水管理措

(上接第 84 页)

[14] SCHWANENBERG D, HARMS M. Discontinuous Galerkin finite-element method for transcritical two-dimensional shallow water flows [J]. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 2004,130(5) :412-421.

[15] HSU S M, LIU T M. Assessment of MacCormack scheme in transcritical flow computation [C]//BABOVIC V. Hydroinformatics '98. Proceedings of the Third International Conference on Hydroinformatics. Copenhagen, Denmark : Taylor & Francis,1998 :1375-1381.

[16] MacDONALD I, BAINES M J, NICHOLS N K, et al. A new method for the computation of steady open-channel transcritical flow [C]//Hydro 2000. London, Local Organizing Committee of the XXV Congress. Proceedings of the Congress-International Association for Hydraulic Research. Netherlands, 1995 :561-566.

[17] MacDONALD I, BAINES M J, NICHOLS N K, et al. Analytic benchmark solutions for open-channel flows [J]. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 1997,123(11) :1041-1045.

[18] MacDONALD I, BAINES M J. Comparison of some steady state Saint-Venant solvers for some test problems with analytic solutions [R]. Reading, England :Department of Mathematics, University of Reading, U. K., 1995.

施[C]//水利部国际合作与科技司.河流生态修复技术研讨会论文集.北京 :中国水利水电出版社,2005 :60-65.

[2] ALLRED B J, BROWN L C, FAUSEY N R, et al. Water table management to enhance crop yields in a wetland reservoir subirrigation system [J]. Applied Engineering in Agriculture, 2003,19(4) :407-421.

[3] BAKER B J, ALLRED B J, LUCKEYDOO L M, et al. Ohio wetland reservoir subirrigation system (WRSIS) preliminary results [C]//Proceedings of the Eighth International Symposium. Sacramento. California USA :ASAE Publication, 2004 :89-98.

[4] LUCKEYDOO L M, FAUSEY N R, BROWN L C, et al. Early development of vascular vegetation of constructed wetlands in northwest Ohio receiving agricultural waters [J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2002,88 :89-94.

[5] ZUCKER L A, BROWN L C. Agricultural drainage :water quality impacts and subsurface drainage studies in the midwest [EB/OL]. [2009-03-20]. <http://ohioline.osu.edu/b871/index.html>.

[6] SKAGGS R W. Drainmod reference report [EB/OL], [2009-03-20]. http://www.bae.ncsu.edu/soil_water/drainmod/manuals.html.

(收稿日期 2009-02-19 编辑 马敏峰)

[19] HAVNO K, BRORSEN M, REFSGAARD J C. Generalized mathematical modelling system for flood analysis and flood control design [C]//STANBURY J E A. Papers Presented at the 2nd International Conference on the the Hydraulics of Floods & Flood Control. Cambrige, England :BHRA, 1985 :301-306.

[20] DJORDJEVIC S, PRODANOOVIC D, WALTERS G A. Simulation of transcritical flow in pipe/channel networks [J]. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 2004, 130 (12) :1167-1178.

[21] KUTIJA V. On the numerical modeling of supercritical flow [J]. Journal of Hydraulic Research, 1993,31(6) :841-858.

[22] MacDONALD I. The numerical solution of free surface/pressurized flow in pipes [D]. Reading, England :Department of Mathematics, University of Reading, U. K., 1992.

(收稿日期 2009-01-19 编辑 方宇彤)

