

浅水间断流动数值模拟研究进展

潘存鸿

(浙江省水利河口研究院,浙江 杭州 310020)

摘要 分析浅水方程的基本特性及其求解的困难,回顾国内外求解大尺度间断流动的关键技术问题,包括计算格式、守恒型控制方程中压力项与底坡源项的“和谐”处理方法,以及间断流动条件下的动边界模拟方法。

关键词 浅水间断流;数值模拟;计算格式;底坡源项;动边界

中图分类号 :TV131.4 **文献标识码** :A **文章编号** :1006-7647(2010)05-0077-08

Advances in numerical simulation of discontinuous shallow water flows//PAN Cun-hong(Zhejiang Institute of Hydraulics and Estuary, Hangzhou 310020, China)

Abstract :The basic characteristics of the shallow water equations and the difficulties for solving them were analyzed. The key techniques for solving large-scale discontinuous shallow water flows were reviewed, including the main computational schemes, the “well-balanced” method between pressure terms and source terms due to bottom topography in the conservative shallow water equations and the modeling technique of moving boundaries under discontinuous shallow water flows.

Key words : discontinuous shallow water flow; numerical simulation; computational scheme; source term due to bottom topography; moving boundary

涌潮、海啸、水跃、溃坝波、水闸突然开启和突然关闭而形成的间断流、浅水变形后的波浪等浅水间断流动的数值模拟具有较高的学术价值和广阔的实际应用背景,一直是计算水动力学的热点和难点之一。由于间断处存在水位、流速(流量)的突变,非线性效应很强,传统的数值计算方法求解间断问题常常失效。原因在于:传统的线性格式通常不能同时满足抑制虚假振荡和达到足够高精度的要求,要么数值黏性太大,产生过分耗散,计算结果将突变的物理量抹平,不能反映间断特性;要么数值黏性太小,产生虚假的数值振荡,甚至失稳。因此,模拟浅水间断流动时,要求计算格式既具有模拟大梯度流动(间断流动)的能力,又十分稳定。

本文分析了浅水方程基本特性及其求解的困难,介绍了求解间断的主要方法、底坡源项处理方法,以及间断流动条件下的动边界模拟方法。

1 双曲型方程的基本特性及其求解困难

浅水方程属双曲型偏微分方程。大多数双曲型

偏微分方程来自物理守恒定律,如质量守恒、动量守恒和能量守恒。因此,双曲型偏微分方程又称为双曲守恒律(hyperbolic conservation laws)。与椭圆形方程相比,双曲型方程在求解上既有优点,又存在困难。优点是信息以有限的速度传播;困难是即使在光滑的初始条件和光滑的边界条件下,在有限的时间内仍有可能产生间断解,即存在间断的“无中生有”特性。

几十年来,人们为准确求解激波(间断)已做了大量的工作。1960年Lax等^[1]从数学上证明:守恒型计算方法如果收敛的话,将收敛于方程的弱解。后来,Hou等^[2]证明了一个补充结论:若应用非守恒型计算方法得到的解包含激波,那么计算结果是错误的。对于虚假的非物理数值振荡,Godunov^[3]严格地证明了:如果采用精度大于一阶的线性计算方法,那么虚假的非物理数值振荡是不可避免的。Godunov的理论表明,即使对于线性问题,也必须应用非线性计算方法。综上所述,为准确求解激波的传播速度,必须应用守恒型计算方法。

基金项目 国家自然科学基金(10772163)、国家水体污染控制与治理科技重大专项(2009ZX07424-001)、浙江省重大科技计划(2007C13012);浙江省自然科学基金(Y5080219)

作者简介 潘存鸿(1963—)男,浙江宁波人,教授级高级工程师,博士,从事河口海岸水动力、泥沙、水环境研究。E-mail :panch@zjwater.gov.cn

数学上求解间断的第 1 个困难是:在解的间断处由于导数无定义,不满足经典意义上的偏微分方程。为此,引进了弱解的概念。弱解在光滑处满足偏微分方程,在通过间断处满足 1 组跳跃条件。另一个数学困难是弱解存在非唯一性。存在伪解(非物理解)的原因是:在方程推导过程中某些物理因素如流体的导热性等被忽略了,或做了一些假定,控制方程只是真实模型的近似。这样,必须强加一些附加条件来选择正确的物理解。事实上,许多守恒律系统可以得到这种条件,称之为“熵条件”。

由于有限差分离散依赖于泰勒级数展开的有效性,显然,在间断附近不满足解光滑条件,因此,应用有限差分方法在间断附近不能得到理想的数值结果。为此, Lax 和 Wendroff 提出了差分方程的守恒型计算方法(conservative method or conservation form)。下面以无黏性 Burgers 方程为例说明之^[4]。

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

初始条件为

$$u(0, x) = \begin{cases} 5 & x \leq 0 \\ 1 & x > 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中: u 为流速。

式(1)可写成等价的守恒形式:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{2} u^2 \right) = 0 \quad (3)$$

对式(1)进行差分离散,时间用前差,空间用迎风格式(这里为向后差分)则有

$$u_{i,n+1} = u_{i,n} - \frac{\Delta t}{\Delta x} u_{i,n} (u_{i,n} - u_{i-1,n}) \quad (4)$$

式中: i 为空间步; n 为时间步。

类似地,对式(3)离散得

$$u_{i,n+1} = u_{i,n} - \frac{\Delta t}{\Delta x} \left[\frac{1}{2} (u_{i,n})^2 - \frac{1}{2} (u_{i-1,n})^2 \right] \quad (5)$$

对于给定的初始条件(式(2)),式(4)和式(5)得到完全不同的计算结果。由此可见,对于不同形式的双曲型偏微分方程,在光滑解区它们互相等价,当存在间断时将得到不同的数值结果。一般地,只有采用守恒型方程,才可能得到正确的解。

此外,数值求解上还存在另一个困难。式(3)还可写成另一种守恒型形式:

$$\frac{\partial u^4}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{4}{5} u^5 \right) = 0 \quad (6)$$

然而,对式(6)应用同样的离散方法,计算结果不同于式(3)的结果。

为避免上述错误的计算结果,必须遵循下述原则:从物理守恒律得到的守恒形式的偏微分方程(如

式(3))应是数值离散的控制方程。通过数学变换得到的其他形式的守恒型方程或非守恒型方程可以得到正确的光滑解;当存在间断时,将得到错误的解。

2 间断模拟方法

浅水间断流动数值模拟首先是间断的准确模拟。在大尺度模型中,间断模拟方法可分为激波装配法和激波捕捉法。用激波装配法模拟间断,认为间断没有厚度,作为微分方程的广义解,间断前、后的流速和水深满足 Rankine-Hugoniot 条件。该方法的优点是间断处满足熵条件,故可认为得到的解是唯一物理解,但它的缺点是要求流场结构已知,而事实上大多数情况下流场事先未知。另外,在间断形成初期或消失阶段,因边界、地形等因素的变化,常常出现间断“时有时无”的现象,这给“装配”也带来困难。近 10 年来,随着计算机技术的迅速发展,为激波捕捉法提供了条件。激波捕捉法在间断区和非间断区统一应用同一计算格式,无需对间断区做特别的处理,但要求计算网格较密且计算格式具有模拟大梯度流动的能力。

几十年来,随着计算方法的改进,目前已有很多计算方法能模拟浅水间断流,主要有:① MacCormack 格式;② TVD 格式;③ Godunov 型格式;④ Boltzmann 模型方法:BGK 格式和 KFVS 格式;⑤ ENO 和 WENO 格式;⑥ 间断有限元 DG 格式;⑦ 时空守恒元和解元方法。

2.1 MacCormack 格式

MacCormack 格式耗散低,具有捕获激波的能力,计算简单且具有二阶精度的差分格式,因此其被广泛用来求解欧拉方程。然而,经典的 MacCormack 格式在激波附近数值解常产生伪振荡^[5],因此,应用 MacCormack 格式求解间断流动时一般需进行改进,在实际计算中引入限制函数,使改进型的 MacCormack 格式具有 TVD 特性(称为 TVD-MacCormack (或 MacCormack-TVD) 格式)。MacCormack 格式及其改进型格式已应用于模拟浅水间断流动^[6-10]。

2.2 TVD 格式

1983 年 Harten^[11]提出了一类高分辨率不振荡的 TVD (total variation diminishing, 总变差缩减) 格式。在时刻 t_n 一维差分解的总变差定义为每个空间网格上解的变化的绝对值之和,即

$$TV(u_n) = \sum_i |u_{i,n} - u_{i-1,n}|$$

一个格式具有 TVD 性质的含义是:在没有外力(方程中非齐次项和边界条件)作用的条件下,差分

解的总变差不会随时间增大,即 $TV(u_{n+1}) \leq TV(u_n)$ 。因总变差不会增大,在间断附近不会产生虚假振动,且对间断有高分辨率。理论上已证明 TVD 格式属保单调格式,即若 t_n 时的解单调,则 t_{n+1} 时的解亦单调。

TVD 格式最早应用于求解空气动力学中的欧拉方程,以后推广应用到求解浅水间断流动。20 世纪 80 年代后期以来国内开始应用 TVD 格式求解浅水间断流动^[12],90 年代以来得到广泛的应用^[13-17]。

2.3 Godunov 型格式

1959 年 Godunov 在博士论文中提出利用 Riemann 解求解双曲型方程的格式。Godunov 格式的基本思想是将各离散点上的值看做该值在离散点邻域内的平均值,即将离散值看成某台阶函数。于是,在离散点之间构成一系列间断,形成一系列 Riemann 问题,该间断在经过 Δt 时段传播以后,各离散点上的值再次使用其邻域内的平均值,并重复进行相同步骤^[18]。

在 Godunov 格式中,应用准确 Riemann 解求解单元界面的数值通量,由于非线性,需迭代求解。为简化计算,后来发展了许多求 Riemann 解的近似方法^[19-20],如 Osher 及 HLL 方法^[21],Roe^[22]方法等。

自从 Godunov 格式提出以来,其得到不断改进, van Leer^[23]发展了二阶精度 Godunov 格式。因为 Godunov 型格式具有模拟大梯度流动和自动捕捉激波的能力,在计算流体力学中得到了广泛应用。1981 年,Marshall 等^[24]首次应用 Riemann 解求解浅水流动方程。最近 10 余年来,基于 Riemann 解的 Godunov 型格式求解浅水流动方程的研究成果逐渐增多,从一维发展到二维,成为目前求解浅水大梯度流动最流行的计算方法^[25-33]。

2.4 Boltzmann 模型方法 :BGK 格式和 KFVS 格式

Boltzmann 模型方法,特别是在 1954 年提出的 BGK(bhatnagar-gross-krook) Boltzmann 模型方法,最早应用于模拟气体流动。20 世纪 90 年代中后期以来,徐昆^[34-35]将原来应用在气动中的基于 Boltzmann 方程的模型方法用于求解浅水方程。后来, Ghidaoui 等^[36]以及邓家泉^[37]进行了推广应用,并证明了 BGK 格式的解满足熵条件。上述模型因通量计算中没有考虑底坡项的作用,因此计算格式不具有“和谐性”。鉴于重力对水流运动的影响与水流变量如水深、流速的空间梯度同阶,2002 年徐昆在分子分布函数中考虑了重力对分子速度变化的影响,得到了和谐的 KFVS(kinetic flux vector splitting)模型^[38]和 BGK 模型^[39]。潘存鸿等^[40]建立了无结构三角形网格下空间二阶精度的二维浅水数值模型,并得到了

广泛的应用^[41]。

Boltzmann 模型方法的出发点是利用 Chapman-Enskog 展开法,由 Boltzmann 方程的矩获得宏观的守恒律,如浅水方程,根据宏观守恒律与 Boltzmann 方程之间的关系,可以将宏观变量的差分方程表示为 Boltzmann 方程差分模式的矩的形式来求解。

KFVS 模型是在 BGK 模型中不考虑 Boltzmann 方程碰撞项的简化模型,相应地, KFVS 模型没有计及二阶项(即黏性项)的作用。事实上,对于天然河流、海岸等大尺度研究水域,二阶项的作用很小, KFVS 模型已足够满足研究精度,且其计算量仅为 BGK 模型的 $1/2 \sim 1/3$ ^[40]。

与传统方法相比, Boltzmann 模型方法具有许多优点和长处^[42]。如以 BGK-Boltzmann 方程为基础的数值模型满足熵条件,从而避免出现非物理解^[43]。

近几年来, Boltzmann 模型方法在浅水间断流动数值模拟中应用日益增多^[44-48]。

2.5 ENO 和 WENO 格式

1986 年 Harten^[49]提出了无振荡格式(non-oscillatory)的概念,接着提出了本质无振荡(essentially non-oscillatory, ENO)格式的方案和方法^[50-53]。

为避免高阶有限体方法等线性格式采用固定模板所产生的非物理数值振荡, ENO 格式利用牛顿插值多项式的遗传性质,通过逐次计算逼近解函数的牛顿插值多项式的差商来选择对应于最光滑多项式的模板,从而尽可能地避免在所选择的模板中包含间断。ENO 格式存在计算量大等缺点^[54],为此 Lui 等^[55]对 ENO 格式进行改进,提出了 WENO(weighted ENO)格式。其主要思想是:不是选择其中一种模板,而是利用所谓模板的凸组合。WENO 格式弥补了 ENO 格式的不足,从而得到了更为广泛的应用。

从 20 世纪 90 年代后期以来, ENO 和 WENO 格式已广泛应用于浅水间断流的数值模拟^[56-62]。

2.6 间断有限元 DG(discontinuous Galerkin)格式

间断有限元方法是 1973 年由 Reed 等^[63]首先提出来的,并应用于求解中子输运方程,但这种方法长期以来一直没有得到很好的研究和应用。直到 20 世纪 80 年代后期和 90 年代, Cockburn 和 Shu 等结合 Runge-Kutta 方法将间断有限元方法推广到非线性一维守恒律方程和方程组以及高维守恒律方程和方程组,并给出了部分关于收敛性的理论证明,此后这一方法才引起人们的注意,并开始应用于计算流体力学领域^[64]。

一般的有限元方法难以合理地处理间断解,因为它的出发点是基函数的统一性。间断有限元方法

具备通常有限元方法的弱解特点,它既采用有限元方法的弱解变分形式,又采用单元上的插值逼近,同时允许在时间和空间离散时存在间断。该方法插值基函数的采用与单元分析要求计算单元之间的输运,因而与通常的有限元方法不同,单元之间的连接更加复杂和精细^[65]。间断有限元方法不但保持了通常有限元方法的优点,并且还具有以下优点:能够显式求解;容易实现并行算法;具有很好的稳定性,满足 L^2 稳定性和熵相容性^[66]。

间断有限元方法的缺点是程序设计比较复杂。但随着计算条件的不断改善,间断有限元方法能够较容易地把求解二维问题的方法推广到三维问题,实现自适应算法和并行算法。近几年来,间断有限元方法已开始应用于浅水间断流的模拟^[67-71]和对流扩散方程^[72-73]。今后,间断有限元方法与其他方法的结合可能是求解间断解的新的发展方向^[74]。

2.7 时空守恒元和解元方法(CE/SE法)

1995年Chang^[75]提出一种新的数值方法——时空守恒元和解元方法(简称CE/SE法)。该方法无论从概念上还是从构造方法上都与传统的数值方法有区别,它把时间与空间完全统一同等对待,并从守恒积分型方程出发,通过设立守恒元和解元,使局部和全局都严格保证满足物理意义上的守恒律。另外,该方法把流场变量及其空间导数均作为变量同时求解,这样与传统的差分格式相比,在相同的网格点数的情况下其格式精度可以更高,同时更便于精确地满足边界条件。张增产等^[76-77]对该方法进行了改进和优化,使其更有利于离散与求解,同时易于编程。目前,该方法已应用于浅水方程和对流扩散方程的求解^[78-79]。

3 底坡源项的处理

浅水流动方程与多方气体流动方程相似,因此,浅水间断类似于气体动力学中的激波。如果不考虑底坡效应和摩阻作用,则无源项的浅水流动方程类似于气体动力学中的欧拉方程,早期的相关工作大多针对齐次浅水流动方程,直接移植气体动力学中成熟的计算方法^[20,24,80]。

与气体动力学相比,浅水流动模拟的最大特点是计算中如何考虑床底变化。如前所述,模拟间断流动时控制方程必须采用守恒型方程,二维浅水流动方程 x 方向动量方程的守恒形式为

$$\frac{\partial hu}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(hu^2 + \frac{1}{2} gh^2 \right) + \frac{\partial huv}{\partial y} = -gh(S_{bx} + S_{fx}) \quad (7)$$

式中: u 和 v 分别为 x 和 y 方向的流速; g 为重力加

速度; h 为水深; S_{fx} 为摩阻项; S_{bx} 为底坡源项, $S_{bx} = \frac{\partial b}{\partial x}$; b 为床底高程。

与守恒型控制方程不同,非守恒型控制方程中的重力项在守恒型控制方程中被拆成压力项和底坡源项之和,即

$$gh \frac{\partial z}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{2} gh^2 \right) + gh \frac{\partial b}{\partial x} \quad (8)$$

式中: z 为水位。

因此,求解守恒型非平底浅水方程时,需对压力项和底坡源项做特殊处理,要求控制方程离散后方程左端的压力项与方程右端的底坡源项之和始终满足式(8),使得压力项与底坡源项达到“和谐”,即在静水条件下始终保持流速为零、水位为常数的计算结果^[36]。

所谓“和谐”格式,对于与 i 单元相邻的所有 j 单元,若在 n 时刻满足

$$\begin{cases} h_{i,n} + b_i = h_{j,n} + b_j = z \\ (u,v)_{i,n} = (u,v)_{j,n} = 0 \end{cases} \quad (9)$$

则要求推得 $n+1$ 时刻

$$\begin{cases} h_{i,n+1} + b_i = z \\ (u,v)_{i,n+1} = 0 \end{cases} \quad (10)$$

20世纪90年代以来,已有学者致力于非平底浅水流动方程和圣维南方程求解的研究,取得了丰硕的成果。大多数处理方法中,保持“和谐”的基本思路是底坡源项的离散形式与压力项相同。

Zhao等^[81]、谭维炎等^[82]将床底地形概化为阶梯状,假设在计算单元内为平底,从而底坡项为零。为了弥补底坡项为零引起的误差,需将单元界面处的计算通量按照水深进行修正,这种方法适合于地形变化平缓水域的水流模拟。

Bermudez等^[83]首先针对一维圣维南方程应用迎风方法处理底坡源项,以后推广到二维情形^[84-85],而后Burguete等^[86]、Brufau等^[87]和Guinot等^[88]对该方法进行了改进和完善。Jenny等^[89]提出了考虑源项的Rankine-Hugoniot-Riemann求解器;Smolarkiewicz等^[90]应用MPDATA(multidimensional positive definite advection transport algorithm)方法处理底坡源项;Greenberg等^[91]、LeVeque^[92]将浅水方程中的底坡源项处理与水波传播算法相结合;王志力等^[93]用特征分解方法处理底坡源项;Hubbart等^[94]、Tomas等^[95]、Mohammadian等^[96]也用不同方法处理了底坡源项。

Zhou等^[97]提出了水面梯度法(简称SGM法),该方法在单元界面上用水位代替水深进行数据重构,处理简单,是目前较为流行的底坡源项处理方

潘存鸿等^[28-29]、Hui 等^[98]提出了水位床底法(简称 WLTF 法),尽管 WLTF 法和 SGM 法的思路、控制方程均不同,但本质相同,因此计算结果也相同。WLTF 法在概念上更简单,并能在理论上解释 SGM 法的误差性质及其大小^[98]。事实上,为满足“和谐”条件,除应用 SGM 法或 WLTF 法外,还要求方程左端的压力项与方程右端的底坡源项采用同样的方法离散。

对于无结构三角形网格,建立“和谐”格式要比一维或二维四边形网格困难得多,Audusse 等^[99]建立了以三角形节点为控制体中心的“和谐”格式;潘存鸿等分别应用控制方程变换法^[100]和静水压力变换法^[40]建立了以三角形单元为控制体的“和谐”格式。近年来,各种“和谐”方法得到了广泛的应用^[101-103]。

4 间断流动条件下的动边界模拟

应用浅水数值模型求解实际问题时,常常遇到动边界(即干湿边界)问题,如感潮水域潮汐涨落引起的水陆边界变化、溃坝波和洪水波的漫滩(堤)过程、波浪在滩地上爬高等。一般地,在计算域中动边界范围不大、水流不存在间断的情况下,常用的动边界处理方法大多能满足工程精度要求,但在模拟溃坝波、涌潮以及波浪在浅滩上的传播变形时,由于干底占整个计算域的比例较高,同时波前峰到达时水位、流速变化梯度极大,缓、急流同时存在并相互转化,波前峰间断处也是动边界发生之处。常用的大多数动边界处理方法往往不能准确模拟上述复杂的水流现象,甚至计算失稳。鉴于干底 Riemann 解具有模拟动边界条件下间断流的能力,近年来,基于近似 Riemann 解的动边界处理方法已应用于间断流情况下干湿边界的模拟^[104-106]。潘存鸿等^[107-108]应用准确干底 Riemann 解模拟溃坝、涌潮等间断流动情况下的动边界问题,在间断捕捉、水量守恒等方面取得了较好的结果。

5 结 语

通过最近 10 余年国内外学者的努力,一、二维浅水间断流动数值模拟取得了突破性的进展,解决了数学模型中间断模拟、底坡源项处理、间断流动条件下的动边界模拟等关键技术问题,已经达到了较为成熟的应用阶段,宏观问题的三维间断流动数值模拟是浅水间断流动数值模拟下阶段研究的主要方向之一。

参考文献:

- [1] LAX P D, WENDROFF B. System of conservation laws[J]. Comm Pure Appl Math, 1960, 13: 217-237.
- [2] HOU T Y, LEFLOCH P. Why non-conservative scheme converge to the wrong solutions: error analysis[J]. Math of Comput, 1994, 62: 497-530.
- [3] GODUNOV S K. Finite difference methods for the computation of discontinuous solutions of the equations of fluid dynamics[J]. Mat Sb, 1959, 47: 271-306.
- [4] HUI W H. Computational fluid dynamics for inviscid flows[R]. Hong Kong: University of Science and Technology, 2001.
- [5] 汪迎春. 溃坝水流二维演进模型[D]. 南京: 河海大学, 2001.
- [6] GARCIA-NAVARRO P, ALCRUDE F, SAVIRON J M. 1-D open channel flow simulation using TVD-MacCormack scheme[J]. J of Hydraul Eng, 1992, 118: 1359-1372.
- [7] TSENG M H. Two-dimensional shallow water flows using TVD-MacCormack scheme[J]. J Hydr Res, 2000, 38(2): 123-131.
- [8] VINCENT S, CALTAGIRONE J-P, BONNETON P. Numerical modeling of bore propagation and run-up on sloping using a MacCormack TVD scheme[J]. J Hydr Res, 2001, 39(1): 41-49.
- [9] 王志刚, 汪德, 赖锡军, 等. 下游为干河床的溃坝水流数值模拟[J]. 水利水运工程学报, 2003(2): 18-23.
- [10] TSENG M H. The improved surface gradient method for flows simulation in variable bed topography channel using TVD-MacCormack scheme[J]. Int J Numer Meth Fluids, 2003, 43(1): 71-91.
- [11] HARTEN A. High resolution Schemes for hyperbolic Conservation laws[J]. J Comput Phys, 1983, 49: 357-393.
- [12] 胡四一, 谭维炎. 用 TVD 格式预测溃坝洪水波的演进[J]. 水利学报, 1989, 20(7): 1-11.
- [13] 赵棣华, 谭仁忠, 谭维炎. 长江口南支河段悬移质含沙量计算模型[J]. 泥沙研究, 1990(2): 54-62.
- [14] 王如云. 浅水波方程的 TVD 有限差分数值模拟[J]. 海洋与湖沼, 1991, 22(2): 115-123.
- [15] 王嘉松, 倪汉根, 金生. 二维溃坝波传播和绕流特性的高精度数值模拟[J]. 水利学报, 1998, 29(10): 1-6.
- [16] 钟德钰, 彭杨, 张红武. 多沙河流的非恒定一维水沙数学模型及其应用[J]. 水科学进展, 2004, 15(6): 706-710.
- [17] 杜珊珊, 薛雷平. 长江口北支涌潮的一维数值模拟[J]. 上海水务, 2006, 22(2): 44-47.
- [18] 苏铭德, 黄素逸. 计算流体力学基础[M]. 北京: 清华大学出版社, 1997: 214.
- [19] 谭维炎. 计算浅水动力学: 有限体积法的应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 1998.

- [20] TORO E F. Shock-capturing methods for free-surface shallow flow[M]. Chichester : John Wiley & Sons , 2001 :173-198.
- [21] HARTEN A , LAX P D , van LEER B. On upstream differencing , differencing and Godunov-type schemes for hyperbolic conservation-law[J]. SIAM Rev ,1983 ,25(1) 35-61.
- [22] ROE P L. Approximate riemann solvers , parameter vectors and difference schemes[J]. J Comput Phys ,1981 ,43(2) :357-371.
- [23] van LEER B. Towards the ultimate conservative difference scheme II : monotonicity and conservation combined in a second order scheme[J]. J Comput Phys ,1974 ,14 361-370.
- [24] MARSHALL E , MENDEZ R. Computational aspects of the random choice method for shallow water equations[J]. J Comput Phys ,1981 ,39 :1-21.
- [25] 谭维炎 , 胡四一. 二维浅水流动的一种普适的高性能格式(有限体积 Osher 格式) [J]. 水科学进展 ,1991 ,12(3) : 154-161.
- [26] 胡四一 , 谭维炎. 一维非恒定明流计算的兰种高性能差分格式[J]. 水科学进展 .1991 ,12(1) :11-21.
- [27] 王如云. 浅水涌波数值模拟的 Roe 平均法[J]. 计算物理 ,2000 ,17(1/2) :199-203.
- [28] 潘存鸿 , 林炳尧 , 毛献忠. 一维浅水流动方程的 Godunov 格式求解[J]. 水科学进展 ,2003 ,14(4) 430-436.
- [29] 潘存鸿 , 林炳尧 , 毛献忠. 求解二维浅水流动方程式的 Godunov 格式[J]. 水动力学研究与进展 :A 辑 ,2003 ,18(1) :16-23.
- [30] 白玉川 , 许栋 , 王玉琦 , 等. 二维溃坝波遇障碍物的水流泥沙数值模拟[J]. 水利学报 ,2005 ,36(5) 538-543.
- [31] 于普兵. 二维浅水水流数值模拟技术研究 :无结构网格有限体积法[D]. 南京 :南京水利科学研究院 ,2006.
- [32] 王立辉. 溃坝水流数值模拟与溃坝风险分析研究[D]. 南京 :南京水利科学研究院 ,2006.
- [33] 潘存鸿. 三角形网格下求解二维浅水方程的和谐 Godunov 格式[J]. 水科学进展 ,2007 ,18(2) 204-209.
- [34] XU Kun. Gas-kinetic scheme for unsteady compressible flow simulation[C]//DECONINCKY H. 29th Computational Fluid Dynamics. Belgium :Von Karman Institute for Fluid Dynamics Lecture Series ,1998.
- [35] XU Kun. Unsplitting BGK-type schemes for the shallow water equations[J]. International Journal of Modern Physics C , 1999 ,10(4) 505-516.
- [36] GHIDAOU M S , DENG J Q , GRAY W G , et al. A Boltzmann based model for open channel flows[J]. Int J Numer Meth Fluids ,2001 ,35(4) 449-494.
- [37] 邓家泉. 二维明渠非恒定水流 BGK 数值模型[J]. 水利学报 ,2002 ,33(4) :1-7.
- [38] 徐昆 , 潘存鸿. 求解非平底一维浅水方程的 KFVS 格式[J]. 水动力学研究与进展 :A 辑 ,2002 ,17(2) :140-147.
- [39] XU Kun. A well-balanced gas-kinetic scheme for the shallow-water equations with source terms[J]. J Comput Phys ,2002 , 178 533-562.
- [40] 潘存鸿 , 徐昆. 三角形网格下求解二维浅水方程的 KFVS 格式[J]. 水利学报 ,2006 ,37(7) 858-864.
- [41] 潘存鸿 , 鲁海燕 , 于普兵 , 等. 钱塘江二维涌潮数值模拟及其应用[J]. 浙江水利科技 ,2008(2) 4-8.
- [42] 邓家泉. 以波尔兹曼方程建立明渠水流模型的理论基础[J]. 人民珠江 ,2000(6) 4-9.
- [43] XU Kun , MARTINELLI L , JAMESON A. Gas-kinetic finite volume methods , flux-vector splitting and artificial diffusion [J]. J Comput phys ,1995 ,120 48-65.
- [44] DENG Jia-quan , GHIDAOU M S. A Boltzmann based mesoscopic model for contaminant transport in flow system [J]. Advances in Water Resources ,2001 ,24 531-550.
- [45] ZHANG S Q , GHIDAOU M S , GRAY W G , et al. A kinetic flux vector splitting scheme for shallow water flows[J]. Advances in Water Resources ,2003 ,26 635-647.
- [46] 鲍远林 , 周晓阳. 移动边界的有限体积 KFVS 方法在一维溃坝波计算中的应用[J]. 水利学报 ,2005 ,36(12) : 1470-1475.
- [47] QUE Yin-tik , XU Kun. The numerical study of roll-waves in inclined open channels and solitary wave run-up[J]. Int J Numer Meth Fluids ,2006 ,50(9) :1003-1027.
- [48] 潘存鸿 , 鲁海燕 , 曾剑. 钱塘江涌潮特性及其数值模拟[J]. 水利水运工程学报 ,2008(2) :1-9.
- [49] HARTEN A. On high-order accurate interpolation for non-oscillatory shock capturing scheme , in Oscillation Theory [C]//DAFERMOS C. Computation and Methods of Compensated Compactness. New York : Springer-Verlag , 1986 :71-105.
- [50] HARTEN A , ENGQUIST B , OSHER S , et al. Some results on uniformly high order accurate essentially non-oscillatory scheme[J]. Applied Numerical Mathematics ,1986 ,2 :347-377.
- [51] HARTEN A , OSHER S. Uniformly high order accurate essentially non-oscillatory schemes : I [J]. SIAM J Numer Ana ,1987 ,24 279-309.
- [52] HARTEN A , ENGQUIST B , OSHER S , et al. Uniformly high order accurate essentially non-oscillatory schemes : III [J]. J Comput Phys ,1987 ,71 231-303.
- [53] HARTEN A. ENO schemes with subcell resolution[J]. J Comput Phys ,1989 ,83 :148.
- [54] 刘儒勋 , 舒其望. 计算流体力学的若干新方法[M]. 北京 : 科学出版社 ,2003 95.
- [55] LUI X D , OSHER S , CHAN T. Weighted essentially nonoscillatory schemes[J]. J Comput Phys ,1994 ,115 :200-212.
- [56] 蔡启富 , 郑邦民. 溃坝洪水波在天然梯级水库中的传播[J]. 水电能源科学 ,1997 ,15(4) :12-16.
- [57] VUKOVIC S , SOPTA L. ENO and WENO schemes with the

- exact conservation property for one-dimensional shallow water equations[J]. J Comput Phys 2002 ,179 :593-621.
- [58] CRNJARIC-ZIC N , VUKOVIC S , SOPTA L. Balanced finite volume WENO and central WENO schemes for the shallow water and the open-channel flow equations[J]. J Comput Phys , 2004 , 200 :512-548.
- [59] CRNJARIC-ZIC N , VUKOVIC S , SOPTA L. Extension of ENO and WENO schemes to one-dimensional sediment transport equations[J]. Computers & Fluids , 2004 , 33 :31-56.
- [60] XING Yu-long , SHU Chi-wang. High order finite difference WENO schemes with the exact conservation property for the shallow water equation[J]. J Comput Phys , 2005 , 208 :206-227.
- [61] 郭永涛 , 魏文礼 . 基于 ENO 格式的一维溃坝水流数值模拟[J]. 西安理工大学学报 2005 2(3) 293-295.
- [62] 杨国丽 , 魏文礼 , 郭永涛 . 基于 WENO 格式的一维溃坝波的数值计算[J]. 西安理工大学学报 2006 2(4) 435-437.
- [63] REED N H , HILL T R. Triangle mesh methods for the Neutron transport equation[R]. Los Alamos :Los Alamos Scientific Laboratory , Report LA UR-73-479 , 1973.
- [64] COCKBURN B , SHU C W. The local discontinuous Galerkin method for time-dependent convection-diffusion systems[J]. SIAMJ Numer Anal , 1998 , 35(6) 2440-2463.
- [65] 史宏达 , 刘臻 . 溃坝水流数值模拟研究进展[J]. 水科学进展 2006 , 17(1) :129-135.
- [66] 蔚喜军 , 周铁 . 流体力学方程的间断有限元方法[J]. 计算物理 2005 22(2) :108-116.
- [67] AIZINGER V , DAWSON C. Discontinuous Galerkin methods for two-dimensional flow and transport in shallow water[J]. Advances in Water Resources , 2002 , 25 :67-84.
- [68] GIRALDO F X , HESTHAVEN J S , WARBURTON T. Nodal high-order discontinuous Galerkin methods for the spherical shallow water equation[J]. J Comput Phys , 2002 , 181 :499-525.
- [69] FAGHERAZZI S , RASETARINERA P , HUSSAINI M Y , et al. Numerical solution of the dam-break problem with a discontinuous Galerkin method[J]. J of Hydraul Eng , 2004 , 130(6) :532-539.
- [70] SCHWANENBERG D , HARMS M. Discontinuous Galerkin finite-element method for transcritical two-dimensional shallow water flow[J]. J of Hydraul Eng 2004 , 130(5) 412-421.
- [71] DAWSON C , WESTERINK J J , FEYEN J C , et al. Continuous , discontinuous and coupled discontinuous Galerkin finite element methods for the shallow water equations[J]. Int J Numer Methods in Fluids , 2006 , 52 :63-88.
- [72] COCKBURN B , SHU C W. The local discontinuous Galerkin method for time-dependent convection-diffusion systems[J]. SIAMJ Numer Anal , 1998 , 35 :2440-2463.
- [73] 杨继明 . 对流占优对流扩散方程的间断有限元(DG) 解法[J]. 湖南工程学院学报 : 自然科学版 2006 , 16(1) :67-69.
- [74] XU Kun. Discontinuous Galerkin BGK method for viscous flow equations : one-dimensional system[J]. SIAM J Sci Comput , 2004 25(6) :1941-1963.
- [75] CHANG S C. The method of space-time conservation element and solution element : a new approach for solving the Navier Stokes and Euler equations[J]. J Comput Phys , 1995 , 119 :295-324.
- [76] 张增产 , 沈孟育 . 改进的时空守恒元和解元方法[J]. 清华大学学报 : 自然科学版 , 1997 , 37(8) :65-68.
- [77] 张增产 , 沈孟育 . 用时空守恒方法求带源项及刚性源项的守恒率方程[J]. 清华大学学报 : 自然科学版 , 1998 , 38(11) :87-90.
- [78] CHANG Sin-chung , WANG Xiao-yen , TO Wai-ming. Application of the space - time conservation element and solution element method to one-dimensional convection-diffusion problem[J]. J Comput Phys 2000 , 165 :189-215.
- [79] 张永祥 , 陈景秋 . 用守恒元和解元法数值模拟二维溃坝洪水波[J]. 水利学报 2005 36(10) :1-8.
- [80] GLAISTER P. Approximate riemann solutions of the shallow water equation[J]. J Hydraul Res , 1988 26(3) 293-306.
- [81] ZHAO D H , SHEN H W , TABIOS III G Q , et al. Finite-volume two-dimensional unsteady-flow model for river basins [J]. J of Hydraul Eng , 1994 , 120(7) :863-883.
- [82] 谭维炎 , 胡四一 . 浅水流动计算中一阶有限体积法 Osher 格式的实现[J]. 水科学进展 , 1994 , 14(4) :262-270.
- [83] BERMUDEZ A , VAZQUEZ M E. Upwind methods for hyperbolic conservation laws with source terms[J]. Computers & Fluids , 1994 23(8) :1049-1071.
- [84] BERMUDEZ A , DERVIEUX A , DESIDERI J A , et al. Upwind schemes for the two-dimensional shallow water equations with variable depth using unstructured meshes[J]. Comput Methods Appl Mech Eng , 1998 , 155 :49-72.
- [85] BRUFAU P , VAZQUEZ-CENDON M E , GARCIA-NAVARRO P. A numerical model for the flooding and drying of irregular domains[J]. Int J Numer Methods in Fluids , 2002 39 :247-275.
- [86] BURGUETE J , GARCIA-NAVARRO P. Efficient construction of high-resolution TVD conservative schemes for equations with source terms : application to shallow water flows[J]. Int J Numer Methods in Fluids , 2001 , 37 :209-248.
- [87] BRUFAU P , GARCIA-NAVARRO P. Unsteady free surface flow simulation over complex topography with a multidimensional upwind technique[J]. J Comput Phys , 2003 , 186 :503-526.
- [88] GUINOT V , SOARES-FRAZAO S. Flux and source term discretization in two-dimensional shallow water models with

porosity on unstructured grids[J]. Int J Numer Methods in Fluids ,2006 ,50 309-345.

[89] JENNY P , MULLER B. Rankine-hugoniot-riemann solver considering source terms and multidimensional effects[J]. J Comput Phys ,1998 ,145 575-610.

[90] SMOLARKIEWICZ P K ,MARGOLIN L G. MPDATA :a finite-difference solver for geophysical flows[J]. J Comput Phys , 1998 ,140 459-480.

[91] GREENBERG J M ,LEROUX A Y. A well-balanced scheme for the numerical processing of source terms in hyperbolic equations[J]. SIAM Numer Anal ,1996 33(1) :1-16.

[92] Le VEQUE R J. Balancing source terms and flux gradients in high-resolution Godunov methods : the quasi-steady wave-propagation algorithm[J]. J Comput Phys , 1998 ,146(1) : 346-365.

[93] 王志力 , 耿艳芬 , 金生. 具有复杂计算域和地形的二维浅水流动数值模拟[J]. 水利学报 ,2005 36(4) :1-9.

[94] HUBBART M E ,GARCIA N P. Flux Difference Splitting and the Balancing of Source Terms and Flux Gradients[J]. J Comput Phys ,2000 ,165 89-125.

[95] TOMAS CR ,NIETO F ,MACARENA G M. A flux-splitting solver for shallow water equations with source terms[J]. Int J Numer Methods in Fluids ,2003 42 23-55.

[96] MOHAMMADIAN A , ROUX D Y L. Simulation of shallow flows over variable topographies using unstructured grid[J]. Int J Numer Methods in Fluids ,2006 ,52 473-498.

[97] ZHOU J G ,CAUSON D M ,MINGHAM C G ,et al. The surface gradient method for the treatment of source terms in the shallow-water equations[J]. J Comput Phys ,2001 ,168 1-25.

[98] HUI W H ,PAN Cun-hong. Water level-bottom topography formulation for the shallow-water flow with application to the tidal bores on the Qiantang river[J]. Computational Fluid Dynamics Journal ,2003 ,12(3) 549-554.

[99] AUDUSSE E ,BRISTEAU M O. A well-balanced positivity preserving" second-order " scheme for shallow water flows on unstructured meshes[J]. J Comput Phys ,2005 206 311-333.

[100] PAN Cun-hong , DAI Shi-qiang , CHEN Sen-mei. Numerical simulation for 2D shallow water equations by using Godunov-type scheme with unstructured mesh [J]. Journal of Hydrodynamics : Ser B ,2006 ,18(4) 475-480.

[101] 于守兵. 计算二维浅水方程中静水压力项与底坡项的积分平衡法[J]. 水利水电科技进展 ,2009 ,29(4) :32-35.

[102] 刘刚 , 金生. 基于修正 Roe 格式的有限体积法求解二维浅水方程[J]. 水利水运工程学报 ,2009(3) 29-33.

[103] 王昆 , 金生 , 冯志强 , 等. 基于和谐性离散格式求解带源项的二维浅水方程[J]. 水动力学研究与进展 :A 辑 , 2009 24(5) 535-546.

[104] SLEIGH P A , GASKELL P H , BERZINS M , et al. An unstructured finite-volume algorithm for predicting flow in rivers and estuaries[J]. Computers & Fluids ,1998 ,27(4) : 479-508.

[105] BRUFAU P , VAZQUEZ-CENDON M E , GARCA-NAVARRO P. A numerical model for the flooding and drying of irregular domain[J]. Int J Numer Meth Fluids ,2002 39 247-275.

[106] BRUFAU P , GARCA-NAVARRO P , VAZQUEZ-CENDON M E. Zero mass error using unsteady wetting-drying conditions in shallow flows over dry irregular topography[J]. Int J Numer Meth Fluids ,2004 45 :1047-1082.

[107] 潘存鸿 , 林炳尧 , 毛献忠. 浅水问题动边界数值模拟 [J]. 水利水运工程学报 ,2004(4) :1-7.

[108] 潘存鸿 , 于普兵 , 鲁海燕. 浅水动边界的干底 Riemann 解模拟[J]. 水动力学研究与进展 :A 辑 ,2009 ,24(3) : 305-312.

(收稿日期 2009-11-20 编辑 :高建群)

(上接第 76 页)

[4] 张仪萍 , 俞亚南 , 张士乔 , 等. 沉降预测中的灰色模型理论与 Asaoka 法[J]. 系统工程理论与实践 ,2002(9) :141-144.

[5] 方宝. 星野法在某软基段沉降预测中的应用[J]. 科技创新导报 ,2009(17) 53-54.

[6] 梅国雄 , 宰金珉 , 殷宗泽 , 等. 沉降 ~ 时间曲线呈 S 形的证明及其应用 :从一维固结理论角度[J]. 岩土力学 , 2004 25(1) 20-22.

[7] 朱志铎 , 周礼红. 软土路基全过程沉降预测的 Logistic 模型应用研究[J]. 岩土工程学报 ,2009 31(6) :965-969.

[8] 余闯 , 刘松玉. 路堤沉降预测的 Gompertz 模型应用研究 [J]. 岩土力学 ,2005 ,26(1) :82-86.

[9] 王伟 , 卢廷浩. 基于 Weibull 曲线的软基沉降预测模型分析[J]. 岩土力学 ,2007 28(4) :803-806.

[10] 赵明华 , 龙照 , 邹新军. 路基沉降预测的 Usher 模型应用研究[J]. 岩土力学 ,2008 29(11) :2973-2976.

[11] 李社文. 广义 Usher 模型的建立及其在油田生产中的应用[J]. 新疆石油地质 ,2001 22(2) :133-135.

[12] 许小健 , 张金轮. 基于并行优选策略的差分进化算法 [J]. 厦门理工学院学报 ,2009 ,17(3) :73-78.

[13] 金菊良 , 杨晓华 , 丁晶. 基于实数编码的加速遗传算法 [J]. 四川大学学报 :工程科学版 ,2000 32(4) :20-23.

[14] STORN R , PRICE K. Differential evolution :a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous space [J]. Journal of Global Optimization ,1997 ,11(4) 341-359.

[15] 许小健 , 涂芬芬 , 黄小平 , 等. 差异演化算法在 Van Genuchten 方程参数优化估计中的应用[J]. 合肥工业大学学报 :自然科学版 ,2008 31(11) :1863-1866.

(收稿日期 2009-11-17 编辑 :方宇彤)