

# 浅水流动计算中一阶有限体积法 Osher格式的实现

谭维炎 胡四一

(水利部南京水文水资源研究所 南京 210098)

**摘要** 近年来,一阶有限体积法Osher格式已在二维浅水明流的一批模型问题和应用实例中获得成功。本文首次讨论其算法实现的种种问题。核心是建立单元水力模型——阶梯流,在数学上可用一类特殊的黎曼问题来描述。将该问题化作气体动力学中的黎曼问题近似求解,然后对结果加以校正。还在理论分析和数值试验的基础上详细讨论了各种外部边界条件、内部边界和动边界的处理,构成完整的算法。

**关键词** 浅水流动 有限体积法 Osher格式 边界条件处理 黎曼问题

**分类号** TV133.2

文献[1]阐述了二维浅水流动计算中一阶有限体积法(FVM)Osher格式的原理及公式。文献[2]介绍了一批算例,并在中国及美国一些工程中应用得到成功。实践表明,因该格式系取自计算气体动力学,在应用到水流计算时有些环节需进行有别于气流的特殊处理。本文假定读者已熟悉该格式,而集中讨论其算法实现,其中有的技巧普遍适用于各种一阶FVM,有的则专门针对Osher格式。

## 1 网格、单元和节点

本算法既适用于有结构的网格,更宜于采用无结构网格。前者的单元排列有规则,容易确定单元间的毗邻关系(在二维情形常用二维数组表示),如矩形网格及一般曲线网格。后者

本文于1993年8月20日收到,1994年8月8日收到修改稿。

为任意不规则网格，比常用的有限元网格更一般。前者常用于几何简单的情形，而后者多用于地形复杂的天然水体。对河流，如能近似按地形和流网布置有结构网格，对提高数值求解效率和减小成果误差是有利的。

网格由三角形、四边形乃至任意多边形组成。为了更好地拟合地形及流场，可以混用三角形及四边形。例如，计算域的主要部份用四边形覆盖(因其计算量较小，计算稳定性较好)，用三角形镶成不规则计算域的边界。在混合组成有结构网格时，三角形单元可看作有一个边长为零的四边形。此外，为了计算宽度变化大的水道，作者还曾应用一种五节点四边形单元(图1)。在四边形最长边的中央加设一个节点，以便于由一个单元过渡为两个单元。上述各种单元的形状宜尽量规则，接近于等边三角形和正方形，且网格尺寸的过渡要光滑，以减小离散化误差。对一阶FVM和大尺寸单元，这是重要的。在很不规则时需进行特殊处理。

一阶FVM中各单元的几何参数(底高程 $Z_b$ )和水力参数(水位 $Z$ ，水深 $h$ 及 $x, y$ 方向流速 $u, v$ )均以单元平均值表示。它们在单元内的变化设为常数分布。因此，在确定了网格布置(包括确定各单元地面高程、面积、边长及其方向)后，网格节点对水流计算已无作用。 $h, u, v$ 的计算值可定位在各单元的形心，后者可看作单元的唯一节点。这种布置称为单元中心形式(cell-centered, 记作CC)。

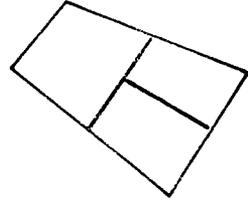


图1 五节点四边形单元  
Fig.1. Five-node quadrilateral cell

## 2 一阶FVM/Osher格式原理的简要回顾

FVM中分别对每一单元建立水量和动量平衡。单元平均水深和 $x, y$ 方向单宽流量的时间变率，在乘以单元面积后，应分别等于跨越单元各边输入的单宽流量和 $x, y$ 方向动量通量与边长的乘积的代数和(在动量平衡中还要考虑河床的水平反作用力及底摩阻的影响)。问题便归结为如何根据各单元的状态向量(其分量为 $h, hu$ 及 $h v$ )，推算跨越单元间公共边的流量及动量通量(它们组成的向量总称为数值通量)。可采用多种格式(如中心格式或各种逆格式)计算数值通量，Osher格式属高性能逆格式中的一种。

Osher格式假定，在状态向量空间中，从计算单元的左状态向量到相邻单元的右状态向量，系通过一条唯一确定的和分段光滑的路径连续过渡。记路径的起点和终点为L及R，路径上的两个转折点为A及B，弧 $\widehat{LA}$ 、 $\widehat{AB}$ 、 $\widehat{BR}$ 分别与各族特征相对应。沿这些弧建立以黎曼不变量表达的特征关系，可确定A、B点的水力参数。按特征值的符号将通量分解成两部份，分别沿正、负特征传播。利用逆风原理，沿这三段弧对通量的雅可比矩阵进行积分，便可得到各种流态下的数值通量公式(见文献[1]表1给出的16种组合情况，本文不重复引用。但请注意，该表排版有误。第3列表头应为 $U_L > C_L$ ，第5列3行应为 $f(q_L) - f(q_{s1}) + f(q_A) - f(q_{s3}) + f(q_R)$ )。

顺便指出，尽管气动力学二维欧拉方程比浅水方程多一个能量方程，但因Osher格式把左、右状态间的间断近似处理为上述连续流，浅水能量方程是冗余的。但可证明，若增加此方程，这两个问题的方程和结果仍完全相同。

FVM的物理意义很明确,且因相邻单元间交换的水量和动量大小相等,方向相反,故守恒律时时处处成立,这不但避免了守恒误差,尤其适合于计算含间断(如水跃、涌潮)的流动。

### 3 单元水力模型和数值通量的计算

#### 3.1 浅水流动的单元水力模型和特殊黎曼问题

实现FVM的第一步是,根据流体力学知识建立所需的单元水力模型。

气动力学中单元气流模型表述为一个黎曼问题:给定某单元及其相邻单元的左、右状态向量 $q_L$ 及 $q_R$ ,  $q=(\rho, \rho u, \rho v)^T$ 。 $\rho$ 为气体密度,  $u$ 和 $v$ 为沿公共边外法向 $N$ 和切向 $T$ ( $N$ 和 $T$ 构成局部右手坐标系)的单元平均流速,要求对初始间断进行分解,确定解的时间变化过程。

浅水动力学中的单元水力模型,除需用 $h$ 代替 $\rho$ 以外,还需给定 $Z_B$ 。图2表示把明渠流概化成类似多级跌水的形式。在单元界面处,水流一般为阶梯流(水力学中沿水流方向地面突然抬升时称升阶流,反之称降阶流)。在数学上可表述为一个特殊的黎曼问题,与气体动力学黎曼问题的不同之处在于,需考虑底高程间断的影响。

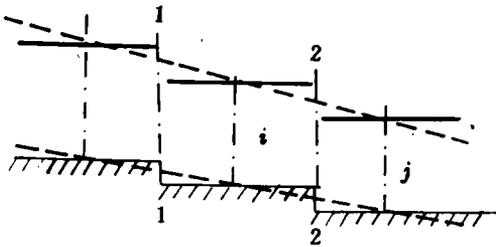


图2 单元水力模型

Fig. 2. Cell hydraulic model

对这一特殊黎曼问题,目前尚无简单实用的解。考虑到浅水流动计算中单元通常较大,而界面两侧水流混合的距离则相对较短,故可将单元界面向计算单元 $i$ 的内侧稍作位移(图3),改按平底模型来处理。于是,跌水问题变成了平底渠道上的瞬时溃坝问题。所带来的简化是不必像阶梯模型那样需考虑台阶的直立壁面上的动水压力,也不必像斜底模型那样需考虑底

坡 $S_0$ 的影响。记单元 $i$ 的左状态向量 $q_L=(h_L, h_L u_L, h_L v_L)^T=(h_i, h_i u_i, h_i v_i)^T$ ,相邻单元 $j$ 的右状态向量 $q_R=(h_R, h_R u_R, h_R v_R)^T$ 。考虑到水流连续性,知

$$h_R = Z_j - Z_{B_i}, \quad u_R = h_j u_j / h_R, \quad v_R = v_j \quad (1)$$

#### 3.2 用Osher格式计算跨越单元边界的数值通量

有了 $q_L$ 、 $q_R$ 以后,选用Osher格式来确定跨越单元边界、沿 $N$ 方向输出的数值通量向量 $f_{LR}$ 。其第一个分量 $f_{CR}(1)$ 表示输出流量,  $f_{LR}(2)$ 表示输出的 $N$ 方向动量(对流项与压力项之和),  $f_{LR}(3)$ 为输出的 $T$ 方向动量。如上所述,它们可根据流态从文献[1]表1中选择适当的公式,在计算出过渡状态 $q_{s1}$ ,  $q_{s2}$ 后,代入物理通量表达式 $f(h, hu^2 + gh^2/2, huv)^T$ 中便得数值通量。

要说明的是,历史上Osher格式有两种形式:O形式及P形式,分别由Osher提出和Pandolfi所修改。这两种形式的差别在于状态空间中由 $q_L$ 至 $q_R$ 的积分路径中,和特征值对应的三段弧的顺序是相反的(P形式的路径见图4)。相应地,导出的数值通量公式不同(文献[1]表1

考虑到浅水流动计算中单元通常较大,而界面两侧水流混合的距离则相对较短,故可将单元界面向计算单元 $i$ 的内侧稍作位移(图3),改按平底模型来处理。于是,跌水问题变成了平底渠道上的瞬时溃坝问题。所带来的简化是不必像阶梯模型那样需考虑台阶的直立壁面上的动水压力,也不必像斜底模型那样需考虑底

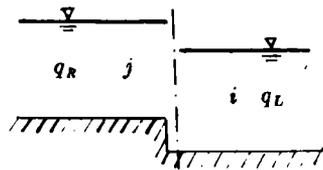


图3 化阶梯为平底

Fig. 3. Change a stair into flat bottom

对应于P形式)，而结果亦略有差别。据文献中的分析和数值检验，P形式的性能略优。特别是当准确解连续时，P形式给出的数值通量是准确的。作者比较了两者的公式以后认为，对常见的流态，P形式的数值通量公式只需计算一次物理通量，而O形式则需三次。这就是本文推荐采用P形式的原因。

为本文后面应用方便起见，列出P形式的Osher格式中沿三段弧的特征关系如下：

$$\text{沿 } \overline{LA} \quad u_L + 2c_L = u_A + 2c_A, \quad v_L = v_A \quad (2)$$

$$\text{沿 } \overline{AB} \quad u_A = u_B, \quad h_A = h_B \quad (3)$$

$$\text{沿 } \overline{BR} \quad u_B - 2c_B = u_R - 2c_R, \quad v_B = v_R \quad (4)$$

记黎曼不变量  $\phi_L = u_L + 2c_L$ ,  $\phi_R = u_R - 2c_R$ , 可得

$$u_A = u_B = (\phi_L + \phi_R)/2, \quad h_A = h_B = (\phi_L - \phi_R)^2/(16g) \quad (5)$$

### 3.3 Osher格式的数值性能

上述平底单元水力模型将流场概化为鱼鳞状分布的静水池。它能否准确模拟实际流动？为了简化，仅以矩形断面明渠均匀流(图2)为例加以剖析。从平底河道恒定流的动量方程

$$-\frac{\partial}{\partial x}(hu^2 + \frac{g}{2}h^2) = ghS_f \quad (6)$$

出发， $S_f$ 为摩阻比降。暂设跨越*i*单元上、下游断面1

和2输入、输出的对流项能准确估算且达平衡(如采用中心格式或简单逆风格式)，从而(6)式左边第一项可略去。应用Osher格式计算左边压力项，并设相邻单元水位差和地面高差较水深小得多，通过推导(其过程从略)，在忽略高阶项后，可得到均匀流公式  $S_0 = S_f$ ，这说明在上述条件下本算法的计算结果能准确模拟连续流动。

当然，还要考虑离散化误差的影响。在以上所述的Osher格式实现中，有两类误差。一类是用单元平均底高和水力要素代替实际的斜底和水力要素分布，此误差随单元尺寸缩小而趋于零，是我们所熟悉的正常情况。另一类误差则来自在计算数值通量时用局部平底模型代替阶梯形水底模型(即采用(1)式)，而且相邻单元分别计算输出通量时所采用的概化平底高程不同。在平底概化前后，流量通量  $h_R u_R$  值保持不变，法向动量通量中的水压力项加台阶水平反力项也保持不变，唯有对流项将放大(或缩小)，其倍比等于流速的放大倍比(即与水深成反比)。因此，对流项需要特殊处理，使之在平底概化后保持原值不变。

### 3.4 对流项的处理

首先要注意，在FVM中由于应用了高斯公式，需计算的是沿*N*方向输出的对流项。无论流入流出，该项均取正值，应采用表达式  $hu^2$ 。

如上所述，在采用(1)式时，在两相邻单元中，水深较浅者对流项计算偏小，另一个则偏大，给动量守恒带来了误差。以图2所示的明渠均匀流来说，上游断面1输入对流项偏小，下游断面2输出对流项偏大，其代数和总是偏小。其后果是使计算流速比准确值偏小，效果同于数值粘性。如果不修正对流项的处理，就需要减小所采用的糙率值。这已为作者所进行的

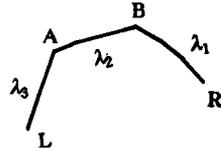


图4 P形式的积分路径

Fig.4. Integral path in P-form scheme

数值试验所证实, 但这样的处理显然不能令人满意。一般来说, 当弗汝德数较大(对流项在动量通量中所占比重较大)时, 对流项的误差会影响到流场的计算。

特别是, 当  $h_j \gg h_i$  时, (1)式中的流速放大倍比远大于1, 导致浅水单元  $i$  的计算流速放大很多, 显然不合理。

严格来说, 应根据阶梯流理论来计算跨单元公共边的数值通量, 而不采用局部的平底概化。阶梯流虽然是一个经典的流体力学问题, 但历经数十年的研究未能给出简单实用的解析解。因此, 作者在进行局部平底概化的同时, 采取以下两项补救措施:

(1)在计算跨越公共边的数值通量时, 只对底高程较低的那个单元按照前述方法计算一次。如果两单元底高程相同, 可以只计算单元编号较小的那个, 对剩下的单元, 只需对流量通量加一个负号, 而法向对流项及切向动量通量则不变, 但压力项处理要小心。根据对前一单元用 Osher 格式算出的界面水深  $h_A$ , 推求相应的水位, 再按后一单元的底高计算静水压力。显然, 由于数值通量只计算了一次, 相邻单元间交换的数值通量相互抵消, 使格式具守恒性, 同时也节省了计算量。

(2)对所计算的单元来说, 右状态  $q_R$  所相应的对流项由  $h_j u_j^2$  变为  $h_j u_j u_R$ , 因此, 在用 Osher 格式计算出  $f_{LR}$  后, 在  $f_{LR}(2)$  上加修正值  $h_j u_j (1 - h_j / h_R)$ 。

文献[1]、[2]的算例及其他工程实例表明, 即使水下地形起伏很大, 上述处理也能给出满意的结果。

### 3.5 特殊的单元水力模型

上述模型系供一般场合使用。实际问题计算中往往还需要建立一些特殊的单元水力模型。以下列举其中有代表性的几个情况:

(1)相邻单元的水位均高于底高中的大值, 但至少有一个水深极浅(如几厘米)。通过单元界面的流量以按堰流公式计算更为合适。

(2)相邻单元之一的水位低于另一个的底高, 由高单元进入低单元的通量可按跌水处理。

(3)相邻单元界面处为闸堰时, 可采用相应的水力学公式计算通量。

(4)单元界面处为允许漫溢但不致溃决的高出两侧地面的路基。当两侧水位均低于路面时按固壁处理, 反之则按宽顶堰公式计算。

(5)单元界面处为能因漫顶而溃决的土堤。当一侧水位高于堤顶时, 调用某个溃坝模型, 并在全溃后按一般内部界面处理。

(6)单元界面处的土堤在接近某个临界水位时人工爆破使之部份分洪。可采用设计决口的水位流量关系。

其中情况(3)~(6)可称为计算域的内部边界。所有模型在确定交换流量后, 不难根据水力学知识给出动量通量。

## 4 边界条件处理

FVM的边界条件处理, 与有限差法(FDM)相比, 有两个特点: (1) FDM的边界条件通常给定在边界点处, 而FVM则除给定在计算域的边界以外, 还可以给定在边界单元形心, 后者

对一阶FVM来说是自然的。(2) FVM中边界条件处理的目的是计算出跨越边界的数值通量,此后边界单元和内部单元的计算全同。FDM的边界差分格式则直接计算边界点的变量值。

文献[1]对边界条件的处理比较简略,有时会遇到问题,给边界附近乃至远离边界处的计算流场带来可观误差。同时,水流和气流的边界条件处理往往不同。本文拟对此作一较全面的讨论,给出各种补充修正公式。

#### 4.1 陆地边界

固壁处法向流速为零,故 $f_{LR}(1)=0$ ,由法向动量平衡

$$f_{LR}(2)=h_L u_L |u_L| + g h_L^2 / 2 \quad (7)$$

对光滑固壁, $f_{LR}(3)=0$ 。值得注意的是上式右边第一项。因单元形心不在边界上, $u_L$ 一般不为零,如水流与边界可能有交角,甚至直接冲击陆岸形成反射,该对流项表示对静水压力的修正:当 $u_c > 0$ 时增压,反之则减压。实际算例表明,对扩散或收缩水流,若不考虑该项,计算可能失稳。

此法与文献[1]所述镜像反射虚拟单元法不同。后者既较费事又不合理,其实质是把陆地边界作为水边界来处理,而此时静压假设不成立,在固壁处破坏了动量平衡。计算气动力学中常数值外插固壁压力,显然缺乏物理依据。

#### 4.2 给定水位过程的开边界

急流的处理很简单,因其下游水力要素完全由上游决定。以下讨论缓流的情况。

(1) 平移法。水位给定在边界单元形心处。将该处的物理通量 $f(q_L)$ 移到边界处

$$\begin{aligned} f_{LR}(1) &= h_L u_L \\ f_{LR}(2) &= h_L u_L^2 + g(h_L^{n+1})^2 / 2 \\ f_{LR}(3) &= \begin{cases} 0 & (\text{入流}) \\ h_L u_L v_L & (\text{出流}) \end{cases} \end{aligned} \quad (8)$$

式中 $h_L$ 、 $u_L$ 为已知 $t_n$ 时边界单元形心值, $h_L^{n+1}$ 为给定的 $t_{n+1}=t_n+\Delta t$ 时的水深。此法十分简单,在有的情况(平移误差不大时)仍可应用。

(2) 输出特征法。水位给定在边界点。文献[1]利用沿输出特征黎曼不变量相等的条件,得

$$u_R + 2\sqrt{g h_R} = u_L + 2\sqrt{g h_L} \quad (9)$$

右边为 $t_n$ 时边界单元形心处已知值。将给定 $t_{n+1}$ 时的 $h_R$ 代入上式解出 $u_R$ ,便可应用Osher格式计算边界处数值通量。此法也较简单,缺点是上式中隐含地引入了边界处平底、光滑的假设,且实际上将水位给定在边界外极薄虚拟单元的形心处。此外,计算出的边界单元形心水位不等于给定水位。

(3) 相容条件法。文献[3]引入相容条件:边界处的数值通量等于R点的物理通量

$$f_{LR}(q_L, q_R) = f(q_R) \quad (10)$$

由文献[1]中表1知

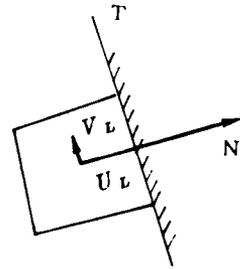


图5 陆地边界  
Fig.5. Land boundary

$$f_{LR}(q_L, q_R) = \begin{cases} f(q_A) & (u_L > 0) \\ f(q_B) & (u_L < 0) \end{cases} \quad (11)$$

由以上两式得  $f(q_R) = f(q_A)$  或  $f(q_B)$ , 从而

$$q_R = \begin{cases} q_A & (u_L > 0) \\ q_B & (u_L < 0) \end{cases} \quad (12)$$

代入式(2)、式(3)得  $h_R = h_A = h_B$ ,  $u_R = u_A = u_B$ , 并再次导出(9)式。因此, 方法(2)和(3)是一致的(事实上, 只要利用向量式(10)中第一式, 其余两式自然成立)。而且, 在由(9)式求出  $q_R$  后, 可利用(10)式直接计算  $f_{LR}$ , 不必再借助于Osher格式。

(4)完全特征法。上述三种简单边界处理在某些算例中获得成功, 但作者将它应用于涨落潮迅猛的钱塘江河口却遭到失败。边界单元水力要素计算误差大, 甚至导致涨潮期整个计算流场不合理(退潮期的结果尚可)。究其原因在于忽略了边界处底坡、底摩阻及水位变率的影响, 因而只适用于光滑平底河床及边界处水流接近均匀流的情况。如果说在退潮期底坡  $S_0$  与摩阻比降  $S_f$  符号相同,  $S_0 - S_f$  值较小, 甚至可以忽略的话, 那么, 在涨潮期由于  $S_0$  与  $S_f$  符号相反, 加上涨潮率大于落潮率, 必须考虑水流的非恒定性。作者采用完全特征法处理后获得成功。

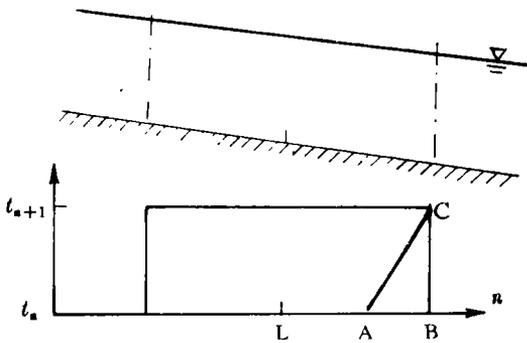


图6 给定水位的开边界  
Fig. 6. Open boundary with water level given

边界单元有关符号见图6。水位给定在边界处。考虑法向水流, 流速记为  $u$ , 在  $n-t$  平面上通过  $t_{n+1}$  时边界点C 向后作特征线AC

$$dn/dt = u + \sqrt{gh} \quad (12)$$

该特征与  $t = t_n$  交于A点,  $t_n$  时边界单元形心L点的  $h_L$  及  $u_L$  已知, 边界点B的  $h_B$  由边界条件给定。暂设  $t_n$  时  $u_B$  已知, 在  $\Delta t$  很小时, 可根据B点的输出特征坡度确定A点位置。由L及B点的  $h$  及  $u$  线性内插得  $h_A$  及  $u_A$ 。记输出黎曼不变量  $\phi = u + 2\sqrt{gh}$ 。沿AC对输出特征方

程积分, 得

$$\phi_c = \phi_A + g \Delta t \left[ S_0 - \frac{S_{fA} + S_{fC}}{2} \right] \quad (13)$$

上式中唯一未知量  $u_c$  可用预测校正法求出: 先设  $S_{fC} = S_{fA}$ , 由上式解出  $u_c$  预测值, 计算  $S_{fC}$  后代入上式得  $u_c$  校正值。对显格式, 边界法向通量  $f_{LR} = f(q_B)$ , 而  $u_c$  存贮起来作为下一时段的  $u_B$ 。

顺便指出, 这里考虑底坡等的影响是出于确定右状态之需要, 类似于传统的一维特征边界格式。这与本文使用平底模型和通过控制体通量平衡计算边界单元并不矛盾。

#### 4.3 给定单宽流量过程的开边界

(1)输出特征法。流量给定在边界处(或边界外极薄虚拟单元的形心)。将给定的

$Q_B = h_B u_B$  代入(9)式作为  $Q_R = h_R u_R$ , 得

$$Q_B/h_B + 2\sqrt{gh_B} = u_L + 2\sqrt{gh_L} = \phi_L \quad (14)$$

由上式迭代解出  $h_B$ , 再计算  $u_B = Q_B/h_B$ 。为了避免迭代, 用  $c = \sqrt{gh}$  代入上式可导出

$$2c_B^3 - \phi_L c_B^2 + g Q_B = 0 \quad (15)$$

可用一元三次方程的求根公式计算出  $c_B$ 。

(2)完全特征法。可仿照给定水位的情形迭代计算  $h_c$  及  $u_c$ 。此二法的优缺点亦同前。

#### 4.4 边界切向流速的确定

根据特征理论, 入流边界处应给定切向流速, 而出流边界处它应由计算确定。但前者因无实测资料而难以给定, 通常只好假定为零, 而后者虽可算出, 但对域外来说该边界成了入流边界又不得不假定为零。因此, 不论入流流出, 通常都假定切向流速为零。但若边界处水面扩散或缩窄, 水深与流速沿边界分布不均匀, 切向流速实际上非零。硬性规定其为零会导致边界对输出波产生虚假反射, 在边界附近数值解产生虚假波动, 其影响可能深入域内。因此, 边界线要选在流场均匀处, 且与流线近似正交。

#### 4.5 动边界

Osher 格式具有单调性, 在满足数值稳定性的柯朗条件的前提下, 除物理规律(指方程中的非齐次项及边界条件)所决定的变化外, 数值解不会产生虚假的振荡。这不但适于计算间断解, 也利于处理动边界, 因为在水深极浅时不会因振荡而出现负水深。具体办法是: 规定一个很小的临界水深(如1mm), 作为陆地单元的水深。于是, 计算便可对整个固定域进行, 遇到某个单元及其四周均为陆地单元时跳过即可, 不必专门追踪动边界的位置。

## 5 讨 论

理论分析及数值试验均证实本算法确具有下列优点: 通用性(适合各种流态、复杂地形及边界条件); 守恒性; 符合特征理论的逆风性; 单调性, 无虚假振荡且能以高分辨率自动捕捉间断; 健全性(不含需人工调整的数值控制专用参数)。当然, 其他高性能格式大也都具有这些优点。据有关文献分析, Osher 格式还具有若干独特的优点(包括边界格式与内部格式及特征格式一致), 不再赘述。

近年来, 一阶 FVM/Osher 格式已被作者及其同事们应用于多种类似的实际问题, 均收到满意的效果。这些问题包括: 感潮河口(长江)潮流计算; 尼山水库溃坝洪水演进和漫滩; 永定河小清河分洪区排洪; 强涌潮河口(钱塘江)涌潮计算; 美国某河流的整治等。本文是理论分析和这些应用经验的总结, 希望能对推广应用这一算法有所裨益。

### 参 考 文 献

- 1 谭维炎, 胡四一. 二维浅水流动的一种普适的高性能格式. 水科学进展. 1991, 2(3): 154~161
- 2 谭维炎, 胡四一. 计算浅水动力学的新方向. 水科学进展. 1992, 3(4): 310~318
- 3 H Decomick, et al. Consistent Boundary Conditions for Cell-centered Upwind Finite Volume Solvers: K W Morton et al. eds. Numerical Methods for Fluid Dynamics. Clarendon, 1988: 464~470

# Implementation of First-order Finite-volume Osher Scheme in Shallow-water Flow Computation

Tan Weiyang and Hu Siyi

*(Nanjing Institute of Hydrology and Water Resources, Nanjing 210098)*

**Abstract:** In recent years, the first-order finite-volume Osher scheme has been applied with success to a dozen model problems and practical cases involving two-dimensional shallow-water open flows. This paper discusses for the first time relevant techniques in its algorithmic implementation. A kernel lies in the setup of a cell hydraulic model-step flow, which can be described mathematically by a special type of Riemann problem. It can be solved approximately by reducing to a standard Riemann problem in gas dynamics, and correcting the results accordingly. Based on theoretical analysis and numerical tests, a detailed description is also given about various types of outer, inner and moving boundary treatments, so that a complete and practical algorithm has been formed.

**Key words:** shallow-water flow; finite-volume method; Osher scheme; boundary condition procedure; Riemann problem.

---

欢迎对本刊论文进行讨论, 讨论稿请寄本刊编辑部。