MPS 法高精度自由表面识别方法研究

王丽珠,蒋 勤*,张长宽
(河海大学 港口海岸与近海工程学院,江苏 南京 210098)

摘 要:为了提高粒子法即移动粒子半隐式法(Moving Particle Semi-implicit method, MPS 法)中自由表面粒子的识别精度,降低由粒子误判引起的非物理压力振荡,对 MPS 法的自由表面识别方法进行了改进。在原始自由表面判别标准的基础上增加辅助判别条件,提出 2 种新的自由表面判别法即压力判别法和填充率判别法。利用对静水问题和溃坝流问题的模拟计算,对比分析选用不同自由表面判别法得到的数值计算结果,揭示粒子识别精度对压力计算的重要影响。研究结果表明:新提出的压力判别法和填充率判别法可以有效地提高自由表面粒子的识别精度,减轻压力计算中的非物理压力振荡现象,从而提高压力计算的稳定性以及整体数值计算的模拟精度。

关键词:MPS 法; 自由表面粒子识别; 压力振荡; 数值精度

中图分类号:O351.2 **文献标识码**:A **文章编号**:1002-3682(2019)03-0165-11

doi:10.3969/j.issn.1002-3682.2019.03.001

引用格式: WANG L Z, JIANG Q, ZHANG C K. Study on the method for high-precision free surface identification in MPS method[J]. Coastal Engineering, 2019, 38(3): 165-175. 王丽珠, 蒋勤, 张长宽. MPS 法高精度自由表面识别方法研究[J]. 海岸工程, 2019, 38(3): 165-175.

在自由表面流运动模拟中,自由表面的识别与重构对数值计算的整体稳定性和模拟精度有着重要的影响[1-7]。移动粒子半隐式法(Moving Particle Semi-implicit method,MPS 法)作为一种拉格朗日粒子法,具有易处理大变形自由表面和不同介质交界面、控制方程中不包含对流项(理论上可以避免数值耗散)等优势。因此,近年来 MPS 法在自由表面流数值模拟研究中备受关注。在 Koshizuka 等[8-9]提出的原始 MPS 法中,自由表面的识别是基于自由表面处粒子数密度低于流体内部粒子数密度的特点,直接以粒子数密度作为变量,利用粒子数密度值的差异对比判别自由表面粒子的位置。在表征流体运动中,粒子位置随着流体的运动在时间和空间上不断变化,因此计算域内粒子的空间分布并不规则,特别是在模拟如波浪破碎等具有激烈的自由表面变形的流体运动时,粒子空间分布的不均匀性和不规则性尤为显著,从而致使学者们在采用原始的自由表面粒子识别方法时面临着严重的自由表面粒子误判问题。譬如:在流体内部,当某个粒子的粒子数密度计算值偏小时,该粒子可能会被误判为自由表面粒子。由于自由表面边界的压力(p)一般设为零,因此在计算流体粒子的压力梯度时,误判的自由表面粒子会引入明显的数值误差,诱发严重的非物理压力振荡问题,从而影响整个数值计算的准确性和稳定性。

关于如何提高自由表面粒子识别精度的问题,近年来一些学者在原始自由表面粒子判别方法的基础上,基于粒子分布的对称性[10-11]、邻域内粒子的个数[4]以及粒子分布的均匀程度[12]等特性,相继提出了几种辅助的判别方法。譬如:Tanaka 和 Masunaga[4]建议以目标粒子周围的相邻粒子个数为补充识别标准,来降低内部粒子的误判,该方法有效地改善了粒子误判问题,但是,当自由表面发生卷曲变形时,处于自由表面的粒子有可能无法被识别出来;Lee 等[13]考虑到核函数影响域在自由表面处被截断,致使自由表面粒子的位移

收稿日期:2019-05-20
资助项目:国家重点研发计划项目——水资源高效开发利用-长江口水沙变化与重大工程安全(2017YFC0405400);国家自然科学基金项目——波浪与淤泥质相互作用研究(51479056)
作者简介:王丽珠(1990-),女,博士研究生,主要从事无网格数值计算方法方面研究. E-mail: wanglizhu@hhu.edu.cn
* **通讯作者**:蒋 勤(1963-),男,教授,博士生导师,主要从事水动力环境数值模拟方面研究. E-mail: qjiang@hhu.edu.cn
(王 燕 编辑)

散度明显小于内部流体粒子的位移散度，提出了通过计算粒子的位移散度来降低自由表面粒子误判的辅助判别方法；Koh 等[14]提出了通过计算目标粒子被相邻粒子包围的弧度来识别自由表面粒子的弧度识别法(Arc method)，但该方法的主要缺点是弧度计算的过程比较复杂；Marrone 等[12]建议采用重正则化矩阵的特征值和粒子的法向矢量来识别自由表面粒子，但该方法的计算过程亦十分复杂。此外，还有一些其他的自由表面辅助判别方法，但其对粒子误判问题的改善效果不甚明显。例如：Khayyer 等[10]基于粒子分布的对称性建立的自由表面粒子辅助判别法，当流体运动十分复杂而引起粒子分布不规律时，粒子分布的对称性也会受到明显影响，因此利用粒子分布的对称性来改善粒子误判的效果会明显降低。为了减轻粒子误判的影响，一些学者引入了假想粒子的概念，如：Chen 等[2]提出的空气粒子法，以及 Tsuruta 等[15]提出的空间势粒子法。这两种方法可以在一定程度上弥补因自由表面粒子误判带来的误差，但是并未改善原始自由表面粒子判别法的粒子误判问题。

为了改善 MPS 法中自由表面粒子误判问题，提高其在模拟大自由表面流体力学问题中的计算精度，本文提出了 2 种改进的自由表面粒子识别方法：其一，在原始自由表面判别条件的基础上增加一个压力判别条件，即压力判别法(Pressure Value Identification method, PVI 法)；其二，在原始自由表面判别条件的基础上增加一个影响域内粒子填充率判别条件，即填充率判别法(Area Filling-rate Identification method, AFI 法)。首先，对静水压力问题模拟，阐明原始自由表面判别法引起的严重的非物理压力振荡问题，并通过对比分析本文提出的新方法与原始 MPS 法得到的计算结果，以证明新的自由表面判别法具有降低自由表面粒子误判率和提高压力模拟精度的效果。然后，对溃坝流运动的模拟结果分析，且与 Lobovský 等[16]的物理实验结果进行对比，证实新的自由表面判别法在模拟具有复杂自由表面变形的流体运动时，同样可以显著地提高自由表面粒子的识别精度，从而改善流体运动形态的模拟精度。

1 MPS 数值计算方法

在 MPS 法中，流体运动的控制方程采用拉格朗日形式的连续方程和动量方程来描述，具体表达形式为

$$\frac{1}{\rho}\frac{\mathrm{d}\rho}{\mathrm{d}t}+\nabla\cdot\boldsymbol{u}=0\ , \tag{1}$$

$$\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{u}}{\mathrm{d}t}=-\frac{1}{\rho}\nabla p+\nu\nabla^{2}\boldsymbol{u}+\boldsymbol{g}\ , \tag{2}$$

式中，$\boldsymbol{u}$ 是速度矢量，t 是时间，ρ 是流体的密度，p 是压强，ν 是流体的运动黏滞系数，$\boldsymbol{g}$ 是重力加速度。对于不可压缩流体，密度对时间的导数 $\mathrm{d}\rho/\mathrm{d}t$ 为零。

通过建立粒子与其相邻粒子间的相互作用关系，构建梯度($\nabla\phi$)、散度($\nabla^2\phi$)和拉普拉斯($\nabla\cdot\vec{\phi}$)离散算子模型：

$$\nabla\phi\,|_i=\frac{D_s}{n_0}\sum_{j\neq i}\frac{\phi_j-\phi_i}{|\,\boldsymbol{r}_j-\boldsymbol{r}_i\,|^2}(\boldsymbol{r}_j-\boldsymbol{r}_i)w(r_{ij})\ , \tag{3}$$

$$\nabla^2\phi\,|_i=\frac{2D_s}{n_0\lambda}\sum_{j\neq i}(\phi_j-\phi_i)w(r_{ij})\ , \tag{4}$$

$$\nabla\cdot\vec{\phi}\,|_i=\frac{D_s}{n_0}\sum_{j\neq i}\frac{(\vec{\phi}_j-\vec{\phi}_i)\cdot(\boldsymbol{r}_j-\boldsymbol{r}_i)}{|\,\boldsymbol{r}_j-\boldsymbol{r}_i\,|^2}w(r_{ij})\ , \tag{5}$$

式中，ϕ 指任意的一个标量；$\vec{\phi}$ 指任意的一个矢量；D_s 是数值计算模型的空间维度；本研究将建立一个垂向二维数值计算模型，故 D_s 取值为 2；$w(r_{ij})$ 为核函数；n_0 是初始粒子数密度；λ 是一个模型参数，定义为

$$\lambda=\frac{\sum_{j\neq i}|\,\boldsymbol{r}_j-\boldsymbol{r}_i\,|^2w(r_{ij})}{\sum_{j\neq i}w(r_{ij})}\ 。 \tag{6}$$

核函数(或称权重函数)是 MPS 法中最基本的数学模型，它以目标粒子与其相邻粒子间的距离远近来描述粒子间相互影响的程度。以此为基础，建立粒子间相互作用模型，实现对流体运动过程的数值求解。目前，最常用的核函数为 Koshizuka 和 Oka[8] 于 1996 年提出的标准核函数 $w(r_{ij})$：

$$w(r_{ij})=\begin{cases}\dfrac{r_e}{r_{ij}}-1 & 0\leqslant r_{ij}<r_e\\ 0 & r_e\leqslant r_{ij}\end{cases},\tag{7}$$

式中，r_e是目标粒子的影响域半径。参考以往的计算经验，对于梯度模型，本研究选取 $r_e=2.1l_0$，对拉普拉斯模型，选取 $r_e=3.1l_0$，l_0表示初始粒子空间距离，即粒子直径大小。

另外，MPS 法中的一个重要的衍生变量是粒子数密度 n，其在物理含义上与流体密度 ρ 是等价的。MPS 法通过控制流体的粒子数密度保持不变来实现流体的不可压缩条件。粒子数密度 n 是一个无量纲参数，表示目标粒子 i 在其影响域内与其相邻粒子的核函数值的累加，具体定义为

$$\langle n\rangle_i=\sum_{j\neq i}w(r_{ij})\ 。\tag{8}$$

类似于 SMAC(Simplified Marker and Cell)法，MPS 法采用映射法对离散后的控制方程进行分步求解。针对某一时步，整个模型求解的过程分为两步：第一步，对动量方程中除压力梯度项以外的所有项进行更新计算，得到一个临时的速度场和位移场；第二步，利用流体的不可压缩性和连续方程推导出压力泊松方程，通过求解压力泊松方程得到新的压力场，再利用动量方程的压力梯度项对第一步的临时速度场和位移场进行校正。对于压力泊松方程的源项，本研究采用 Tanaka 等[4] 推荐的以速度散度项为主体并结合了粒子数随时间变化项的表达形式：

$$\frac{1}{\rho_0}\nabla^2P=(1-\gamma)\frac{\langle\nabla\cdot u\rangle_i^*}{\Delta t}-\gamma\frac{1}{(\Delta t)^2}\frac{n_i^*-n_0}{n_0}\ ,\tag{9}$$

式中，γ 是混合系数，其值小于 1.0，合理的取值范围为 0.01～0.05。

为了减轻粒子的群聚效应，确保粒子之间以排斥力为主，Koshizuka 等[9] 建议在压力梯度算子中采用粒子邻域内的最小压力值代替其本来的压力值，压力梯度模型的表达式为

$$\nabla p\mid_i=\frac{D_s}{n_0}\sum_{j\neq i}\frac{(p_j-\hat{p}_i)}{|\boldsymbol{r}_j-\boldsymbol{r}_i|^2}(\boldsymbol{r}_j-\boldsymbol{r}_i)w(r_{ij}),\tag{10}$$

式中，$\hat{p}_i=\min\limits_{j\in J}(p_i,p_j)$，$J=\{j:w(r_{ij})\neq 0\}$ 。

2　自由表面判别方法

2.1　原始的自由表面判别法

与网格法中需要引入辅助的自由表面追踪方法相比，无网格粒子法的最大优势之一是可以自然简便地实现自由表面或者不同介质交界面的识别和重构。在 MPS 法中，自由表面处粒子的影响域被自由表面边界截断(图 1)，因此，其粒子数密度自然小于内部流体粒子的粒子数密度。根据自由表面粒子和流体内部粒子的粒子数密度的差别，原始的自由表面粒子的判别条件定义为

$$n_i<\beta n_0\ ,\tag{11}$$

式中，β 取值范围为 0.80～0.99，通常取 0.97[8]。为了与文中新的自由判别法的命名保持一致，本文将原始自由表面判别法称为粒

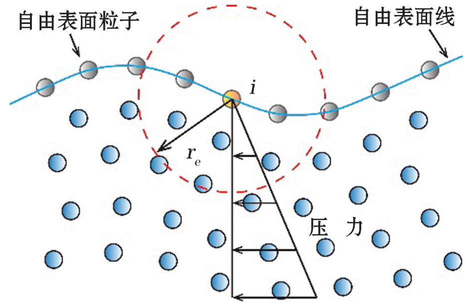


图 1　自由表面粒子识别示意图

Fig.1　A sketch map of free surface particle distribution

子数密度判别法(Particle Number Density Identification method,PNDI法)。

2.2 压力判别法

对于连续流体运动,其压力分布一般情况下是连续的。除了冲击压,流体运动过程中压力随时间的导数也是连续的。在数值计算中为保障数值计算的稳定性,时间步长须满足一定的计算条件(包括CFL常数条件、黏性扩散条件和最大允许时间步长条件等),所以每一时步的时间步长值通常都很小,这就意味着在一个时间步长内,对同一个粒子点而言,其压力的变化值不会很大。利用该特点,本文提出了识别自由表面粒子的压力判别法,即在原始的利用粒子数密度差异的自由表面判别条件的基础上,增加一个辅助压力判别条件,如图1所示。

根据动力学边界条件,自由表面上的粒子压力值为零,故而新增的压力判别条件定义为

$$p_i^k < p_{\mathrm{ref}}, \tag{12}$$

式中:p_i^k 表示 k 时步粒子 i 的压力值,p_{ref} 表示自由表面粒子识别的参考值,$p_{\mathrm{ref}}=\alpha_p \rho g l_0$。若粒子 i 的压力值小于该参考值,且满足原始自由表面判别条件(式(11)),则判定该粒子为自由表面粒子。而 p_{ref} 的大小与粒子尺度相关,本研究取从自由表面处向下一个粒子直径处的静水压力值作为参考值。α_p 为经验参数,其经验取值范围为0.5~1.5。

压力判别法的最大优势是原理简单,易于应用,直接利用上一时步计算得到的压力值,没有增加新的计算步骤,因此不会产生额外的计算成本。需要指出的是:压力判别法会受到压力场计算精度的影响,且不适合涉及负压的流体运动问题的模拟。

2.3 填充率判别法

除了压力判别法,本文提出了另外一种改进的自由表面识别方法,即填充率判别法。与压力判别法类似,该方法是在原始的自由表面判别条件的基础上,增加一个以粒子影响域被相邻粒子填充的百分比为变量的辅助判别条件。内部流体粒子影响域内相邻粒子分布和自由表面粒子影响域内相邻粒子分布如图2所示。

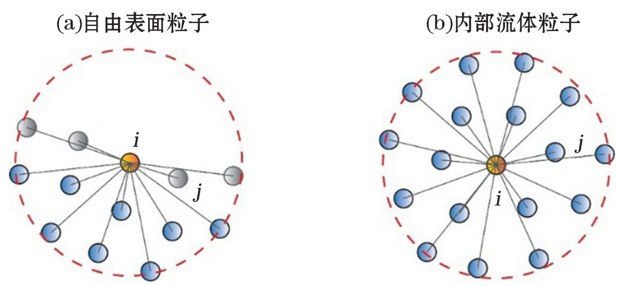


图2 目标粒子影响域内相邻粒子分布示意图

Fig.2 A sketch map of neighboring particle distribution in the influence domain of target-particles

根据目标粒子 i 影响域内相邻粒子的分布,可以计算出任意一个相邻粒子 j 与目标粒子 i 的线距离。然后,根据粒子间距对相互作用强度的影响,考虑一定的权重比例,最终可以计算得到所有相邻粒子与目标粒子的线距离之和,并将该物理参数定义为填充率 A:

$$A_i = \sum_{i \neq j} \frac{|r_j - r_i|}{l_0} w(r_{ij}) \qquad A_i < \alpha_A A_0, \alpha_A < 1.0, \tag{13}$$

式中:A_i 表示任意粒子 i 的填充率大小,A_0 为初始粒子均匀规则分布情况下内部流体粒子的填充率大小,α_A 为经验系数。

由图 2 可知，自由表面上的粒子影响域没有完全被相邻粒子覆盖，因此自由表面粒子的填充率必然小于内部流体粒子的填充率。填充率判别条件看似和粒子数密度判别条件相似，但是它通过融合粒子间的距离弱化了核函数对粒子间距的依赖强度，从而可以更加均衡地考虑所有相邻粒子的作用价值。

为了合理确定经验系数 α_A 的取值范围，经模型率定计算得出了当粒子均匀规则分布时，目标粒子影响域内粒子的个数 N 与相对粒子填充率 A/A_0 之间的关系曲线（图 3）。由图 3 可见，经验系数 α_A 的建议取值范围为 0.8～0.9。粒子的影响域半径 r_e 取为 $3.1l_0$（式(13)和式(7)），这样影响域内可以包含更多的有效粒子参与到填充率的计算，从而提高该判别法的识别精度。

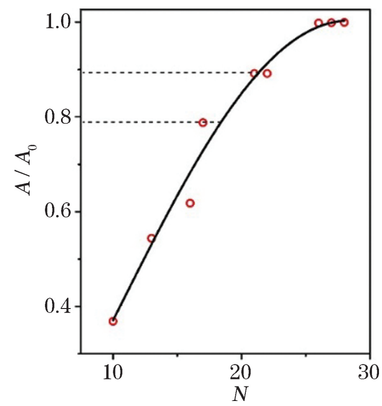


图 3　目标粒子影响域内相邻粒子个数（N）与相对粒子填充率（A/A_0）的关系

Fig.3　Relationship between the number of neighboring particles and the relative particle filling-rate A/A_0 in the influence domain of target-particles

3　数值模拟验算

3.1　静水压力问题

静水压问题的模拟是验证数值模型稳定性的经典算例之一。因此，首先，通过对静水压力的模拟计算，对比改进前和改进后的自由表面粒子判别方法的识别精度，然后证明本研究所提出的 2 种新的自由表面粒子判别方法（PVI 法和 AFI 法）以及 PVI 和 AFI 相结合的综合辅助判别法在改善粒子误判问题和非物理压力振荡问题上的有效性。不同自由表面判别法的具体计算条件如表 1 所示。

表 1　不同自由表面判别法的具体判别条件

Table 1　Identification criteria for different free-surface identification methods

自由表面判别法	判别条件	简　称
粒子数密度判别法	式(11)	PNDI 法
压力判别法	式(11)＋式(12)	PVI 法
填充率判别法	式(11)＋式(13)	AFI 法

3.1.1　计算条件

数值实验的计算条件：水槽宽度设为 0.4 m，高度设为 0.45 m，水深(h)取为 0.4 m(图 4)，在水槽底部的正中央处设置一个压力计算点 Q。初始粒子空间距离(l_0)设为 0.01 m，总计算粒子数为 2 152 个，其中流体粒子 1 600 个，最大允许时间步长 $\Delta t_{\max}$ 取为 0.001 s。流体密度 ρ 取水的密度 1 000 kg/m^3，同样地，流体的运动黏滞系数 ν 取为 10^{-6} m^2/s。

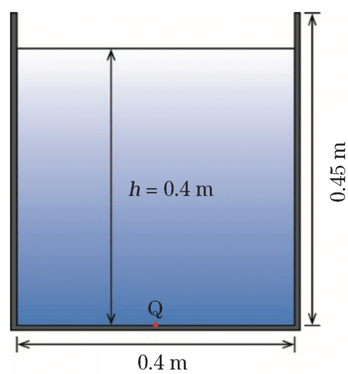


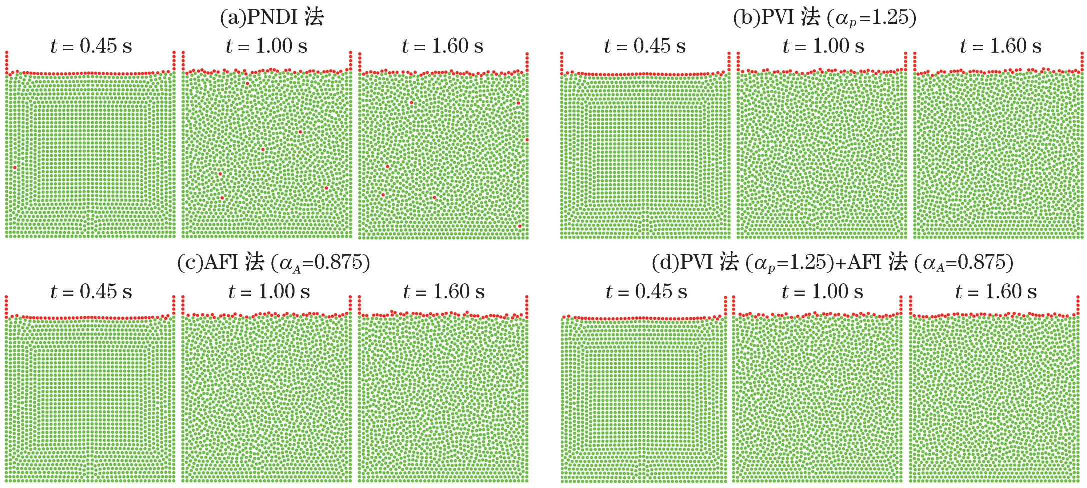
图 4　静水压力计算初始条件示意图

Fig.4　The initial conditions for the calculation of hydrostatic pressure

3.1.2　数值模拟结果

采用不同自由表面判别法得到的不同时刻(t 为 0.45 s，1.00 s 和 1.60 s)的自由表面粒子计算结果(图 5)表明：相较于原始的自由表面判别法，2 种新的判别法均可以显著提高自由表面粒子的识别精度。需要说明的是：在对静水问题的模拟中，当达到计算稳定状态时，流体粒子的速度和位移依然存在微小的扰动，这是由于 MPS 法自身固有的边界条件处理和离散算子的精度问题引起的一定程度的数值扰动。在静水数值模拟中，这

一状态可视为静止状态。由粒子数密度判别法即原始自由表面判别法(PNDI法)对应的自由表面粒子的识别情况(图5a)可见,在计算初期即 $t=0.45$ s时,流体粒子受数值扰动的影响较小,整体粒子空间分布比较均匀规则,只有边壁处的粒子受到局部干扰,故仅在靠近水槽左边界处出现了部分误判的自由表面粒子。随着模拟时间的推进,到 $t=1.00$ s和 $t=1.60$ s时,数值扰动已经从边界开始逐渐扩散到了整个计算域,诸多内部粒子被误判为自由表面粒子。由压力判别法(PVI法)对应的自由表面粒子识别结果(图5b,其中经验参数 α_p 取值为1.25)可见,红色标识的粒子集中出现于自由表面上,内部粒子被误判为自由表面粒子的情况得到了显著改善。由填充率判别法(AFI法)模拟得到的相应时刻的自由表面粒子的识别情况如图5c所示,其中,经验参数 α_A 取值为0.875,采用该方法(图5c)和采用PVI法(图5b)得到的模拟结果十分相似,这表明填充率判别法同样可以有效地提高自由表面粒子的识别精度。鉴于压力判别法直接利用前一时刻的压力值作为辅助判别条件,不会增加计算量,因此,在选用填充率判别法时,可以同时考虑压力判别条件,巩固自由表面粒子识别的正确率。由PVI和AFI相结合的综合辅助判别法对应的自由表面粒子识别结果(图5d)可知,将二者相结合的做法是可行的,并且自由表面的光滑度在一定程度上优于由其他3种自由表面粒子判别方法的结果。



注:红色粒子代表被识别出的自由表面粒子;绿色粒子表示内部粒子,包括流体粒子和墙粒子

图5 采用不同自由表面判别法得到的不同时刻($t=0.45$ s,$t=1.00$ s和 $t=1.60$ s)的自由表面粒子识别情况

Fig.5 Free-surface particle recognitions by using different free surface identification methods and at different instants ($t=0.45$ s, $t=1.00$ s and $t=1.60$ s)

采用不同自由表面判别法得到的 $t=0.45$ s,$t=1.00$ s和 $t=1.60$ s时刻的压力场的计算结果如图6所示。由图6a可知,由于自由表面粒子的误判、部分流体内部粒子被赋予自由表面边界条件,即 $p=0$,压力分布中出现奇异点,并且其周围粒子的压力计算也受到明显的影响,这说明自由表面粒子的误判会降低整个压力场计算的精度。相反,采用改进的自由表面判别法后,压力场的计算精度明显得到了提高,得到的整体压力分布也更加合理(图6b,图6c和图6d)。对比结果证明:自由表面判别方法的识别精度对压力计算的准确度有着重要的影响。然而,鉴于MPS法本身的特点,由离散算子和边界处理产生的误差会导致数值计算达到稳定态后仍然存在一定的数值波动,因此采用压力判别法(PVI法)和填充率判别法(AFI法)后依然残留部分压力振荡现象,如 $t=1.00$ s时刻的底部压力值与 $t=1.60$ s时刻的计算结果存在略微不同。另外,对比采用PVI和AFI相结合的综合辅助判别法(图6d)与PVI法(图6b)和AFI法(图6c)对应的压力场分布可知,采用PVI和AFI相结合的综合辅助判别法(图6d)和采用AFI法(图6c)得到的压力场分布更加接近。结果表明,当采用PVI和AFI相结合的综合辅助判别法时,填充率判别条件(AFI)占主导地位。

由采用不同自由表面判别法计算得出的水槽底部Q点处的静水压力历时曲线(图7)可知:当只采用粒子数密度判别条件时,Q点处的压力随时间变化曲线存在严重的非物理压力振荡现象;相比之下,无论采用压力判别法还是采用填充率判别法,压力计算中的非物理压力振荡问题均得以显著改善,数值压力振荡的幅度明显减小。

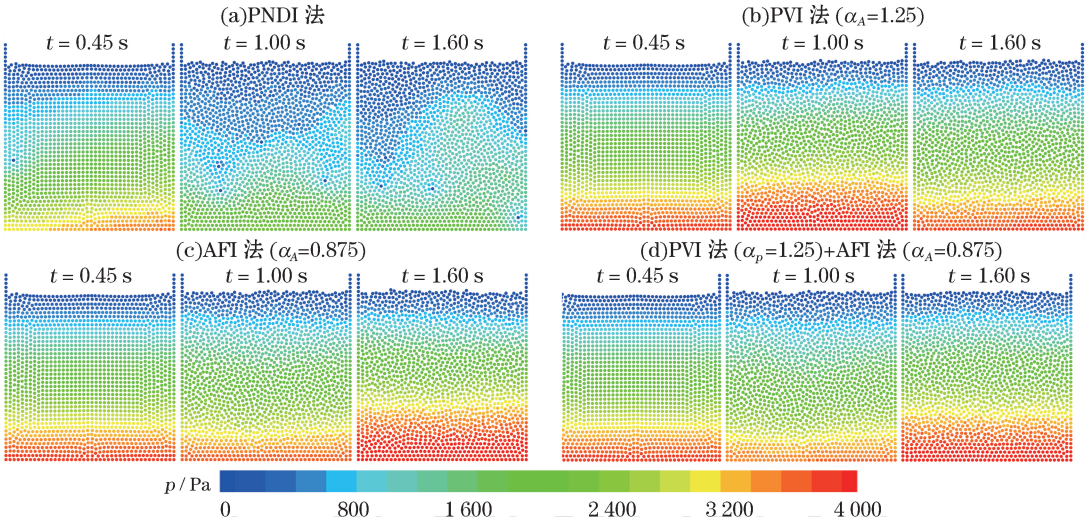


图 6　采用不同自由表面判别法得到的不同时刻(t=0.45 s，t=1.00 s 和 t=1.60 s)的压力场分布

Fig.6　Distributions of pressure field obtained by different free surface identification methods and at different instants (t=0.45 s, t=1.00 s and t=1.60 s)

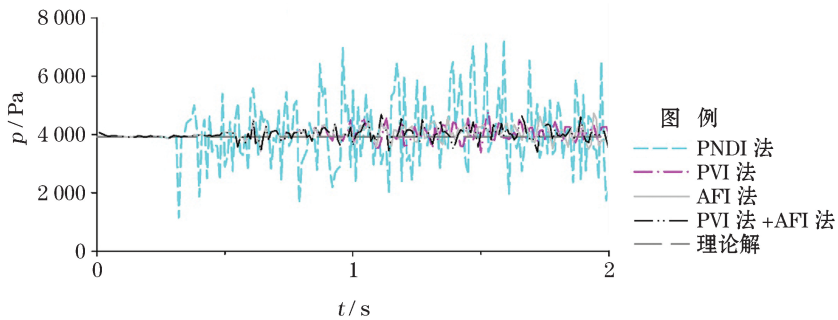


图 7　不同自由表面判别法的 Q 点处静水压力历时曲线

Fig.7　Time histories of calculated hydrostatic pressure with time obtained by using different free surface identification methods at the position Q

本文采用不同经验参数 α_p 和 α_A 计算了 Q 点处压力的相对误差 E_p(表 2)，E_p 的定义：

$$E_p = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} \frac{|p_i - p_a|}{p_a}, \tag{14}$$

式中：p_i 表示 Q 点的压力数值计算结果，p_a 表示压力理论值。由表 2 可知：整体上，计算压力相对误差 E_p 的值约为 0.03，这表明经验参数的取值不会对数值计算的收敛性产生显著影响。

表 2　不同经验系数 α_p 和 α_A 得到的 Q 点压力相对误差(E_p)

Table 2　Relative errors of the pressure at the position Q calculated by using different α_p and α_A

参数值	α_p			α_A		
	1.25	1.00	0.75	0.875	0.850	0.825
E_p	0.029 7	0.029 5	0.031 5	0.029 1	0.031 2	0.029 3

3.2　溃坝流体运动问题

溃坝问题是水利工程中重要的研究课题之一，也是大变形自由表面流运动研究中的经典算例。在溃坝流运动过程中，水体运动速度快，水流结构复杂，自由表面变形剧烈。因此，溃坝流运动的模拟是验证新自由

表面识别法的有效性的合适算例。

3.2.1　数值计算条件

溃坝流运动模拟的初始计算条件示意图如图 8 所示。数值实验条件与 Lobovský 等[16]的物理实验条件基本保持一致。初始时刻，水块长度 L 为 0.6 m，高度 H 为 0.3 m。与 Lobovský 等[16]物理实验不同的是，该数值计算模拟中无闸门，实现了水块在模拟开始时瞬间坍塌。设初始粒子空间距离 l_0 为 0.005 m，总计算粒子数为 10 128 个，其中流体粒子 7 200 个，最大允许时间步长 Δt_{max} 设为 0.001 s。

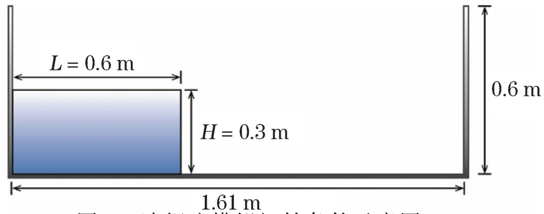
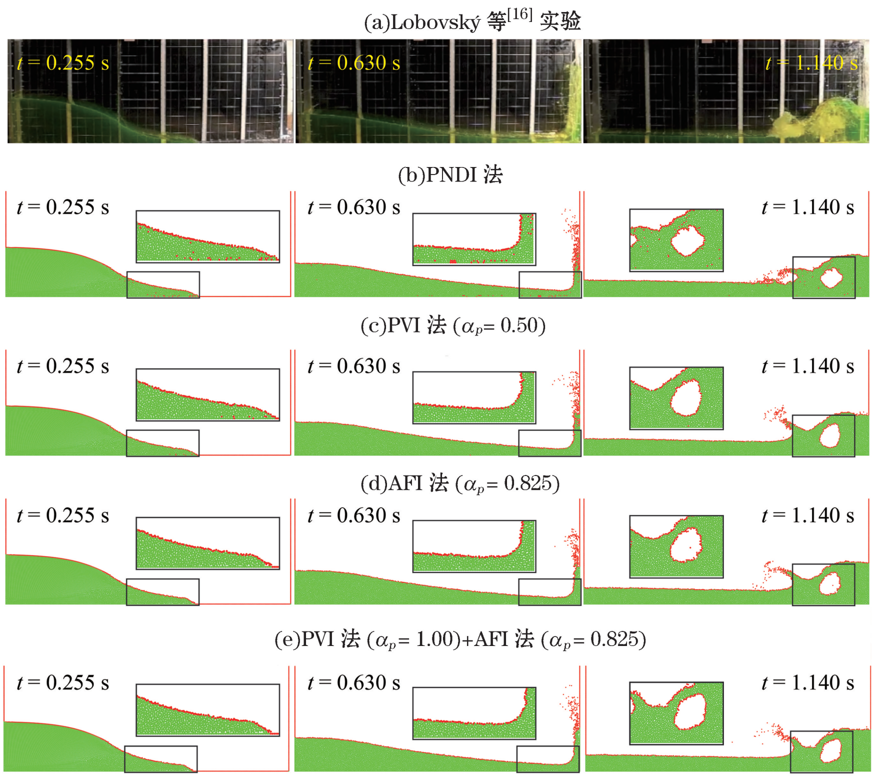


图 8　溃坝流模拟初始条件示意图

Fig.8　The initial conditions for the simulation of dam-breaking flow

3.2.2　自由表面识别精度验算

为了验证所提出的自由表面粒子识别方法的可靠性，本文给出了分别采用粒子数密度判别法（PNDI 法）、压力判别法（PVI 法）、填充率判别法（AFI 法）以及 PVI 和 AFI 相结合的综合辅助判别法，在 t=0.255 s，t=0.630 s 和 t=1.140 s 三个代表性时刻，得到的溃坝流运动过程中自由表面粒子的分布情况（图 9）。首先，借助 Lobovský 等[16]的物理实验影像结果（图 9a），对比了数值模拟的流体运动形态（图 9b～图 9e）。对比结果表明：采用 MPS 数值模型得到的流体运动形态和实验结果基本吻合。另一方面，误判现象严重的局部区域放大图清晰地呈现了原始自由表面判别法造成的自由表面粒子误判问题，诸多误判的自由表面粒子出现在流体内部（图 9b）。除此之外，在 t=1.140 s 时刻，模拟得到的水舌撞击水体后形成的水柱形态与实验结果偏差较大。而由采用 PVI 法获得的流体运动形态及自由表面识别情况（图 9c，其中经验参数 α_p 取 0.50）可见，自由表面以及 t=1.140 s 时水体翻卷过程中形成的空洞都被很好地再现出来。尽管如此，t=0.255 s 时的局部放大图显示有少许内部粒子被误判为自由表面粒子。采用 PVI 法的模拟结果（图 9c）表明：在溃坝流运动中，压力



注：红色粒子代表被识别出的自由表面粒子；绿色粒子表示内部粒子，包括流体粒子和墙粒子

图 9　采用不同自由表面判别法时溃坝流模拟过程中自由表面粒子的识别情况

Fig.9　Free surface particle identifications in the simulation of dam-breaking flow by using different free surface identification methods

判别法可以很好地改善对内部流体粒子的误判，但是，当流体运动特别激烈时，PVI 法的识别精度会受到一定的影响。由采用 AFI 法得到的数值模拟结果(图 9d，其中经验参数 α_A 取 0.825)可知，流体内部几乎没有出现被误判为自由表面粒子的红色粒子。另外，对比采用 AFI 法(图 9d)和 PVI 法(图 9c)的结果可见，在对激烈的流体运动模拟中，对于防止内部粒子被错误地识别为自由表面粒子，填充率判别条件的改善效果要优于压力判别条件。然而，PVI 和 AFI 相结合的综合辅助判别法对应的流体运动形态和自由表面判别结果(图 9e)显示，同时考虑 PVI 和 AFI 的辅助判别条件时得到的模拟结果最好，流体的运动形态与实验结果也十分吻合。结合静水模拟结果可知，当同时考虑压力判别条件和填充率判别条件时，自由表面的识别主要取决于填充率判别条件。因此，在 PVI 和 AFI 相结合的综合辅助判别法(图 9e)中，填充率判别条件中的经验参数 α_A 取为 0.825，而压力判别条件中的经验参数 α_p 取为 1.00，适当放宽了压力判别条件对自由表面粒子的约束。

基于 PVI 法，采用不同经验参数 α_p 得到的溃坝流运动形态及自由表面的计算结果(图 10，α_p 分别为 0.25，0.50，0.75 和 1.00)表明：当采用不同的经验参数时，水舌形态会略有不同(t＝1.140 s)，但整体流体运动形态并未产生明显的变化。当 α_p 设为 0.25 时(图 10a)，即选取较为严格的压力判别条件时，自由表面粒子的识别精度相较于原始的粒子数密度判别法对应的模拟结果有了显著提高。尽管如此，仍有部分内部粒子被错误地识别为自由表面粒子，如 t＝0.255 s 时，水舌前沿水槽底部区域出现少许误判的自由表面粒子。对比不同经验参数 α_p 对应的模拟结果可知：减小 α_p 能进一步改善粒子误判问题，但效果并不突出。因此，综合考虑自由表面粒子的识别精度及流体运动形态的模拟精度，在溃坝流等激烈流体运动模拟中，压力判别条件中的经验参数 α_p 的取值范围建议选为 0.50～0.75。

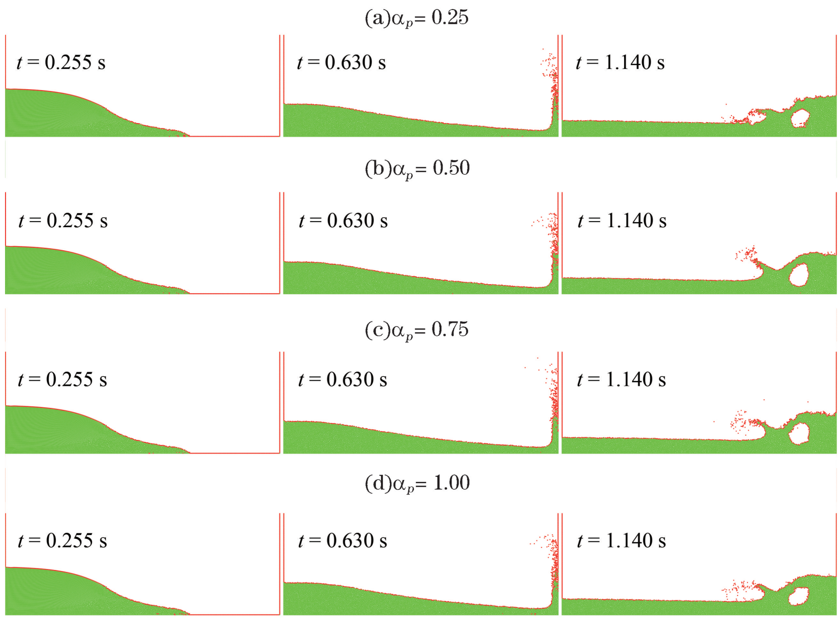


图 10　基于压力判别法(PVI 法)采用不同经验参数 α_p 得到的自由表面粒子识别情况

Fig.10　Free surface particle identifications by using the Pressure Value Identification (PVI) method with different empirical parameter α_p

基于 AFI 法，由采用不同经验参数 α_A 得到的溃坝过程中的流体运动形态及自由表面识别情况(图 11，α_A 分别为 0.800，0.825，0.850 和 0.875)可知：对于不同的经验参数 α_A，自由表面形态和流体运动过程中水体翻卷形成的空洞，都很好地得到了再现；其次，α_A 的取值对自由表面粒子的识别精度的影响微弱，当 α_A 为 0.800，0.825 和 0.850 时均能有效地避免内部粒子的误判(图 11a，图 11b 和图 11c)。同样，综合考虑对自由表面粒子的识别精度和流体运动形态的模拟精度，在对溃坝流等激烈流体运动模拟中，填充率判别中的经验参数 α_A 的取值范围建议选为 0.825～0.850。

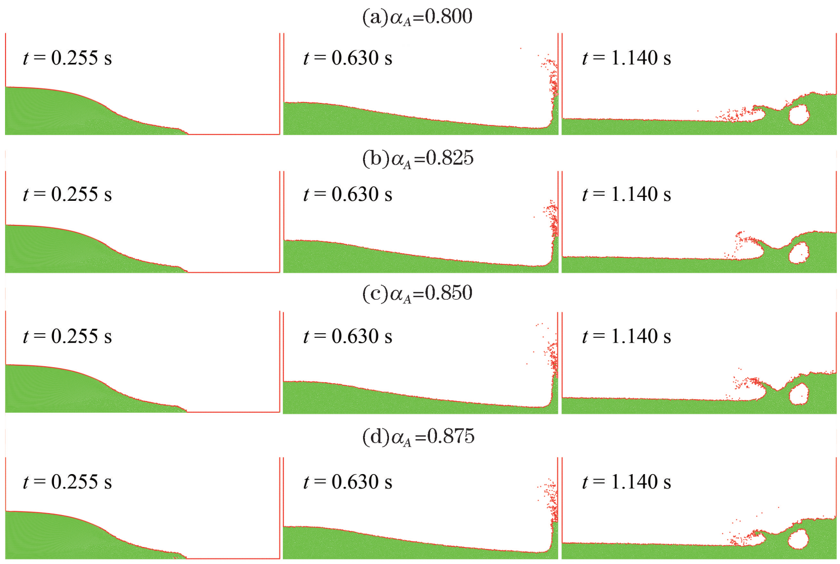


图 11 基于填充率判别法(AFI 法)采用不同的经验参数 α_A 得到的自由表面粒子识别情况

Fig.11 Free surface particle identifications by using the Area Filling-rate Identification (AFI) method with different empirical parameter α_A

3 结 论

为了有效地提高 MPS 法对自由表面的识别精度,降低由自由表面粒子误判引起的数值压力振荡,提出了 2 个新的适用于粒子法的自由表面判别方法,即压力判别法(PVI 法)和填充率判别法(AFI 法),并通过模拟分析静水压力问题和溃坝运动问题,证明了这 2 种方法的可行性和适用性,具体结论:

1)采用原始判别法(PNDI 法)得到的静水模拟计算结果揭示了自由表面粒子识别精度对压力计算精度及稳定性有着重要影响。

2)不同自由表面判别法对应的静水模拟结果的对比证明了压力判别法(PVI 法)和填充率判别法(AFI 法)可以显著提高自由表面粒子的识别精度,同时有助于减轻压力计算中的非物理压力振荡。

3)溃坝流问题的模拟分析结果表明了新的自由表面判别法均可以有效提高溃坝流等具有激烈自由表面变形的流体运动的模拟精度,并且 AFI 法对提高自由表面粒子识别精度的效果要优于 PVI 法,而同时考虑 PVI 和 AFI 的综合辅助判别法对自由表面粒子识别精度的改善效果最好。

4)相比于静水模拟中的自由表面粒子识别,溃坝流模拟中对自由表面粒子约束条件的需要更为严格。对于相对激烈的流体运动,压力判别法(PVI 法)中的 α_p 建议取值范围为 0.50~0.75,而填充率判别法(AFI 法)中的 α_A 建议取值范围为 0.825~0.850,实际上,α_p 和 α_A 的具体取值需要结合实际算例情况而定。

参考文献(References):

[1] GOTOH H, KHAYYER A. Current achievements and future perspectives for projection-based particle methods with applications in ocean engineering[J]. Journal of Ocean Engineering & Marine Energy, 2016, 2(3): 251-278.

[2] CHEN X, XI G, SUN Z G. Improving stability of MPS method by a computational scheme based on conceptual particles[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2014, 278: 254-271.

[3] LEE B H, PARK J C, KIM M H, et al. Step-by-step improvement of MPS method in simulating violent free-surface motions and impact-loads[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2011, 200(9/12): 1113-1125.

[4] TANAKA M, MASUNAGA T. Stabilization and smoothing of pressure in MPS method by quasi-compressibility[J]. Journal of Computational Physics, 2010, 229(11): 4279-4290.

[5] GOTOH H，SAKAI T. Key issues in the particle method for computation of wave breaking[J]. Coastal Engineering，2006，53(2/3)：171-179.

[6] WANG L Z，JIANG Q，ZHANG C K，et al. Improvements of MPS for reducing numerical pressure oscillation in the dam break simulation[J]. Advances in Water Science，2018，29(1)：89-99. 王丽珠，蒋勤，张长宽，等. 对 MPS 法在溃坝模拟中数值压力振荡问题的改进[J]. 水科学进展，2018，29(1)：89-99.

[7] CHEN X，ZHANG Y L，WAN D C. Developments of the MPS method and its applications on hydrodynamics problems[J]. Journal of Harbin Engineering University，2018，39(6)：955-972. 陈翔，张友林，万德成. MPS 方法研究进展及其在船舶水动力学问题中的应用[J]. 哈尔滨工程大学学报，2018，39(6)：955-972.

[8] KOSHIZUKA S，OKA Y. Moving-particle semi-implicit method for fragmentation of incompressible fluid[J]. Nuclear Science & Engineering，1996，123(3)：421-434.

[9] KOSHIZUKA S，NOBE A，OKA Y. Numerical analysis of breaking waves using the moving particle semi-implicit method[J]. International Journal for Numerical Methods in Fluids，1998，26(7)：751-769.

[10] KHAYYER A，GOTOH H，SHAO S D. Enhanced predictions of wave impact pressure by improved incompressible SPH methods[J]. Applied Ocean Research，2009，31(2)：111-131.

[11] ZHANG Y X，WAN D C，HINO T. Comparative study of MPS method and level-set method for sloshing flows[J]. Journal of Hydrodynamics(Ser. B)，2014，26(4)：577-585.

[12] MARRONE S，COLAGROSSI A，LE TOUZÉ D，et al. Fast free-surface detection and level-set function definition in SPH solvers[J]. Journal of Computational Physics，2010，229(10)：3652-3663.

[13] LEE E，MOULINEC C，XU R，et al. Comparisons of weakly compressible and truly incompressible algorithms for the SPH mesh free particle method[J]. Journal of Computational Physics，2008，227(18)：8417-8436.

[14] KOH C，GAO M，LUO C. A new particle method for simulation of incompressible free surface flow problems[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering，2012，89(12)：1582-1604.

[15] TSURUTA N，KHAYYER A，GOTOH H. Space potential particles to enhance the stability of projection-based particle methods[J]. International Journal of Computational Fluid Dynamics，2015，29(1)：100-119.

[16] LOBOVSKÝ L，BOTIA-VERA E，CASTELLANA F，et al. Experimental investigation of dynamic pressure loads during dam break[J]. Journal of Fluids and Structures，2014，48：407-434.

Study on the Method for High-Precision Free Surface Identification in MPS Method

WANG Li-zhu，JIANG Qin，ZHANG Chang-kuan

(*College of Harbor，Coastal and Offshore Engineering，Hohai University*，Nanjing 210098，China)

Abstract：In order to improve the accuracy of free surface particle recognition in Moving Particle Semi-implicit (MPS) method and to reduce the non-physical pressure oscillation caused by particle misrecognition，some modifications are made of the identification of free surface in the MPS method. By appending auxiliary recognition provisions on the basis of original identification criteria，two new methods are proposed for the free surface identification：one is the Pressure Value Identification method and the other is the Area Filling-rate Identification method. For comparing and analyzing the calculation results obtained by these two methods and understanding the influences of particle recognition accuracy on pressure calculation，the hydrostatic water and dam-breaking flow problems are simulated. The results indicate that the two methods proposed above can effectively increase the accuracy of free surface particle identification and reduce the non-physical pressure oscillation in numerical calculation，thus improving the stability of pressure calculation and the simulation precision of overall numerical calculation.

Key words：MPS method；free surface particle identification；pressure oscillation；numerical precision

Received：May 20，2019