

# MPS 方法数值模拟二维楔形体入水问题<sup>†</sup>

陈翔<sup>‡</sup>, 饶成平, 万德成<sup>§</sup>

上海交通大学 船舶海洋与建筑工程学院 海洋工程国家重点实验室 高新船舶与深海开发装备协同创新中心, 上海 20040

**摘要:** 入水问题是船舶海洋工程中典型的流动问题。当船舶在恶劣海况中航行或海洋平台遭遇恶劣天气时, 结构物和水体之间往往会出现剧烈的砰击作用。砰击发生时, 伴随着结构物湿表面的变化、自由液面的翻卷、破碎等强非线性现象。本文采用本课题组自主开发的基于移动粒子半隐式法(Moving Particle Semi-Implicit Method, MPS)的求解器 MParticle-SJTU 对二维楔形体入水问题进行了数值模拟。本文选取了斜升角为 30 度的楔形体模拟其入水过程, 研究了不同粒子布置方式对于计算结果如垂向水动力和自由面变化的影响, 并与 MLM 砰击模型(Modified Logvinovich Model)的计算结果进行了比较, 吻合较好。在此基础上, 本文进一步研究了不同斜升角对计算结果(垂向水动力和自由面变化)的影响, 其中流动分离前的垂向水动力与 MLM 结果相近, 表明了 MPS 方法能有效地模拟入水问题。

**关键词:** MPS; 二维楔形体; 入水; 粒子布置; 不同斜升角.

## 1 引言

在船舶与海洋工程领域, 无论是船舶下水、船舶航行还是船舶停靠, 都会涉及到水对船体的砰击现象, 包括底部砰击、外张砰击和上浪砰击等。结构物入水冲击问题是底部砰击的一种, 是一个复杂的流固耦合问题。结构物在入水过程中会对水有冲击作用, 造成水的飞溅和向四周流动; 同时水又会对结构产生一定的反作用力, 施加给结构物。尤其是在结构物入水的初期阶段, 会产生比较大的入水冲击载荷, 造成结构变形或者破坏[1]。这种砰击现象作用的时间非常短, 但砰击力的幅值却很大, 因此危害性很大[2]。对于结构物入水流固耦合问题, 国内外学者开展了一系列的研究。

对于入水问题, 人们往往将船体模型简化成楔形体结构, 并通过理论和数值的方法对该问题进行了详细深入的研究。Wu[3]在 2006 年基于柯西定理和边界元法, 对两个楔形体同步常速入水问题进行了研究, 结果表明两楔形体之间的相互作用没有对波高带来明显变化, 但对压力分布有重大影响。Maki 等[4]在 2011 年采用水弹性理论研究了楔形体落入静止水中的作用, 该方法结合了计算流体力学和动态有限元技术, 能有效地预测

<sup>†</sup> 资助项目: 国家自然科学基金项目(51379125, 51490675, 11432009, 51411130131), 长江学者奖励计划(2014099), 上海高校特聘教授(东方学者)岗位跟踪计划(2013022), 工信部数值水池创新专项课题(201623-9).

<sup>‡</sup> 报告人: 陈翔, 男, 博士研究生, 研究方向: 无网格粒子法. E-mail: [792007267@qq.com](mailto:792007267@qq.com).

<sup>§</sup> 通讯作者: 万德成, 男, 博士, 教授, 研究方向: 计算流体力学, 数值波浪水池. E-mail: [dcwan@sjtu.edu.cn](mailto:dcwan@sjtu.edu.cn).

物体在入水过程中的变形。段文洋等[5]在 2013 年基于 MLM 砰击模型 (Modified Logvinovich Model) 研究有限宽度楔形剖面匀速入水受力问题。通过引入辅助物面扩展 MLM 计算方法适用范围,使其可以考虑流动分离对剖面受力的影响,并计算了垂向水动力在流动分离前、后随时间的变化。为了更好地阐释入水砰击的物理机制和获得更加接近实际的结果,人们也逐渐开始采用实验的手段对入水砰击问题进行研究。Tveitnes 等[6]在 2008 年对楔形体模型进行了常速入水实验研究,得到了不同斜升角下的随时间变化的砰击力、物体速度、附加质量等参数。El Malki Alaoui 等[7]在 2012 年对不同斜升角的圆锥体在不同定常速度下的入水问题进行了实验研究,得到了砰击作用力与速度平方成正比的结论。Hong 等[8]在 2012 年对改进的 Wigley 船舶进行了自由入水砰击实验,实验结果表明,砰击力与下落高度线性相关并且最大砰击力产生时间与下落高度无关。Kim 等[9]在 2014 年通过一系列实验研究了不同倾角下的楔形体入水,得到了不同测点的压力分布情况。

由于入水砰击问题常常伴有流体的飞溅、自由面破碎等非线性现象,近来采用无网格方法对其进行研究的学者也越来越多。Oger 等[10]在 2006 年采用光滑粒子流体动力学方法 (SPH) 模拟了二维楔形体的入水问题,将测点的砰击压力与实验值进行了对比,验证了方法的可行性,并且捕捉了入水过程的流场细节。Gu 等[11]在 2014 年同样采用 SPH 方法模拟了二维楔形体斜向入水的问题,分别研究了对称楔形体和非对称楔形体,得到了楔形体表面压力分布和瞬时流场,与实验对比一致。余谦和张怀新[12]在 2013 年基于大涡模拟的改进移动粒子半隐式法 (MPS),模拟了二维矩形体的入水砰击压力,与实验对比证明了该方法的正确性,然后模拟了不同斜升角的楔形体的匀速入水,并与实验结果进行了对比,验证了大涡模拟改进 MPS 法在砰击问题中的适用性。Khayyer 和 Gotoh[13]在 2015 年采用可压缩多相流的 MPS 方法,将模拟的入水冲击压力与实验值和单向流数值进行了对比,计算结果比单向流模拟更加接近实验值。Tang 等[14]在 2015 年分别采用 MPS 方法和重叠网格法模拟了带倾角的三维圆柱入水,将圆柱的重心位置变化与 SPH 方法、重叠网格法和实验进行了对比,得到了较好的一致性。

## 2 数值方法

移动粒子半隐式法 (MPS) 是一种基于拉格朗日法的无网格方法。与传统网格法不同,整个流场是由粒子表示,粒子携带流体的质量、速度等信息。因此, MPS 方法能有效地模拟自由面的大变形和非线性破碎的问题。Koshizuka 和 Oka[15]在 1996 年介绍了该方法,随后很多学者对该方法进行了改进 (Tanaka and Masunaga [16], Lee et al. [17], Zhang and Wan [18])。本文将对 MPS 方法的数学模型进行一些简单的介绍。

### 2.1 控制方程

对于不可压缩流体,在 MPS 方法中,控制方程包含质量和动量守恒方程,它们可以写成以下形式:

$$\frac{1}{\rho} \frac{D\rho}{Dt} = \nabla \cdot \mathbf{V} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{D\mathbf{V}}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \nu \nabla^2 \mathbf{V} + \mathbf{g} \quad (2)$$

□ 式中,  $\rho$  是流体密度,  $t$  是时间,  $\mathbf{V}$  是速度矢量,  $P$  是压力,  $\nu$  是运动粘性系数,  $\mathbf{g}$  是重力加速度矢量。

## 2.2 核函数

在 MPS 方法中, 核函数用以描述粒子间的相互作用。

$$W(r) = \begin{cases} \frac{r_e}{0.85r + 0.15r_e} - 1 & 0 \leq r < r_e \\ 0 & r_e \leq r \end{cases} \quad (3)$$

式中,  $r$  表示两个粒子间的距离,  $r_e$  表示粒子作用的半径。对于粒子数密度和梯度模型,  $r_e$  取 2.1 倍的  $l_0$ , 对于 Laplacian 模型,  $r_e$  取 4.0 倍的  $l_0$ ,  $l_0$  是相邻两个粒子的初始距离。

## 2.3 梯度模型

本文中的梯度模型是通过作用域内粒子间的相对位置矢量的加权平均来获得。

$$\langle \nabla P \rangle_i = \frac{D}{n^0} \sum_{j \neq i} \frac{P_j + P_i}{|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|^2} (\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i) \cdot W(|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|) \quad (4)$$

式中,  $D$  是空间维数,  $n^0$  是初始的粒子数密度,  $\mathbf{r}$  是粒子的坐标矢量。

## 2.4 Laplacian 模型

$$\langle \nabla^2 \phi \rangle_i = \frac{2D}{n^0 \lambda} \sum_{j \neq i} (\phi_j - \phi_i) \cdot W(|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|) \quad (5)$$

$$\lambda = \frac{\sum_{j \neq i} W(|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|) \cdot |\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|^2}{\sum_{j \neq i} W(|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|)} \quad (6)$$

式中,  $\lambda$  是为了确保数值结果与扩散方程的解析解相一致。

## 2.5 压力 Poisson 方程

本文的压力 Poisson 方程采取了 Lee 等[17]在 2011 年改写的混合源项法。

$$\langle \nabla^2 P^{k+1} \rangle_i = (1-\gamma) \frac{\rho}{\Delta t} \nabla \cdot \mathbf{V}_i^* - \gamma \frac{\rho}{\Delta t^2} \frac{\langle n^* \rangle_i - n^0}{n^0} \quad (7)$$

式中,  $\gamma$  是一个 0 到 1 内可变的参数, 表示粒子数密度在源项中的比重,  $n^*$  是临时粒子数密度,  $\Delta t$  是时间步长。

## 2.6 自由面判断

Zhang 和 Wan[19]在 2012 年基于邻居粒子的不对称分布, 改进了自由面判断方法。

$$\langle \mathbf{F} \rangle_i = \frac{D}{n^0} \sum_{j \neq i} \frac{1}{|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|} (\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j) W(r_{ij}) \quad (8)$$

$$\langle |\mathbf{F}| \rangle_i > \alpha \quad (9)$$

$$\alpha = 0.9 |\mathbf{F}|^0 \quad (10)$$

式中,  $\mathbf{F}$  是代表邻居粒子不对称度的矢量,  $|\mathbf{F}|^0$  是初始值。

## 3 数值计算

### 3.1 不同粒子布置的楔形体入水

对于原始的 MPS 和 SPH 的建模, 一般是在空间中规则地布满背景粒子, 如图 1 所示, 然后将模型的外轮廓(黑线)放入背景粒子中, 位于轮廓线上和内部的背景粒子就会标记成模型粒子。这种粒子选择的方式对于规则的矩形物体能够快速建模, 但是对于楔形体这种带有斜边的物体, 会使斜边上的粒子布置呈阶梯状, 如图 2 所示。因此, 本文对楔形体边界粒子进行了重新布置, 保证斜边上的边界粒子均匀等距的分布, 如图 3 所示。本文选取了斜升角为  $30^\circ$ , 宽度为 0.6m 的楔形体, 研究不同边界粒子布置对其入水的影响。计算域长 3m, 高 1.5m, 水深 1m, 粒子间距 0.005m, 时间步长 0.0002s, 入水速度为常速 1m/s, 流体密度  $1000\text{kg/m}^3$ 。

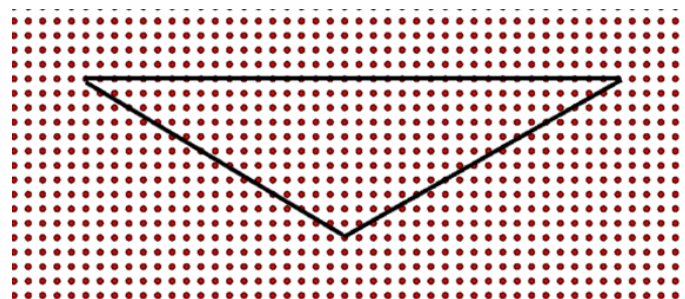


图 1 选择模型粒子

Fig.1 Selecting particles of model

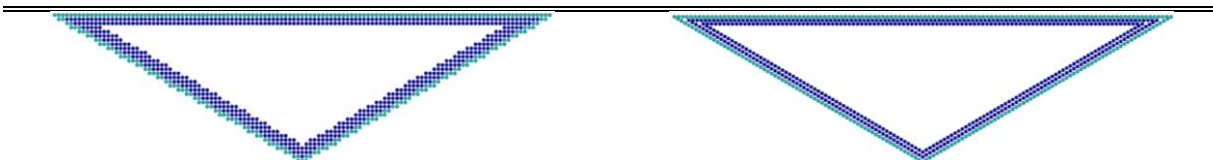


图 2 原始的粒子布置

Fig.2 The original arrangement of particles

图 3 改进的粒子布置

Fig.3 The modified arrangement of particles

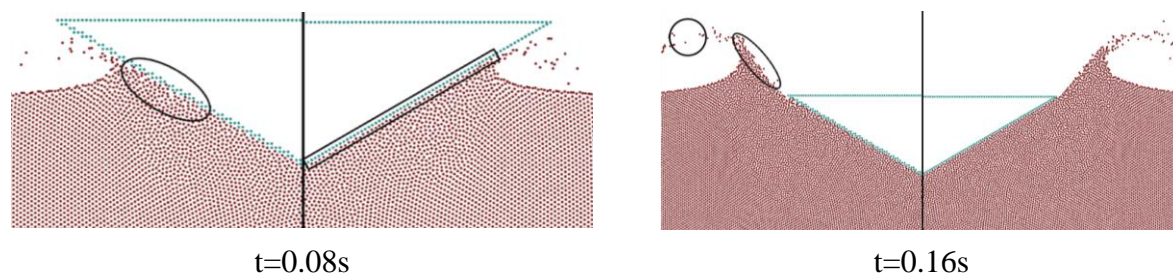


图 4 自由液面变化

Fig.4 The elevation of free surface

图 4 分别展示了流体沿斜边爬升和发生飞溅的自由液面，黑线左半部分是原始的粒子布置，黑线右半部分是改进的粒子布置。当流体沿楔形体爬升时，对于改进的粒子布置方式，流体粒子沿斜边布置十分均匀，与边界粒子形成了较好的对应关系。但对于原始的粒子布置方式，由于粒子的运动，斜边下部的流体粒子能较好地填充了阶梯的拐角，但是上部的粒子无法沿斜边光滑地爬升，会与边界粒子之间产生较大的空隙。当流动分离产生射流时，左半部分的射流表面的流体粒子比较杂乱，飞溅的粒子没有较好的连续性，而右半部分的射流表面比较光滑，飞溅粒子与未飞溅粒子之间存在连续性。对于沿楔形体斜边变化的自由液面，采用改进的粒子布置方式可以模拟得更加准确。

图 5 将本文计算结果与段文洋等[5]发表的基于 MLM 砰击模型(Modified Logvinovich Model)的结果进行了比较。在发生流动分离前，MPS 和 MLM 两者结果随时间的变化趋势一致，楔形体受到的垂向水动力随着入水过程逐渐增大。当楔形体的斜边完全被流体浸润，即发生流动分离前，垂向水动力达到最大值，流动分离发生的时间 MPS 和 MLM 基本相同。两种方法的垂向水动力值基本相近，MPS 模拟的结果略大，这是由于 MLM 基于无限流域的假设，而本文计算域是有限范围，当楔形体下落时，物体对水的砰击作用会传递到边界，边界则会反向挤压流体从而作用到物体上。从图中可以看到，由于流体粒子沿壁面的爬升不光滑，原始的粒子布置使得垂向水动力的数值振荡剧烈，并且越接近流动分离，与 MLM 的结果差距越大，而改进的粒子布置使垂向水动力变化更加平稳更接近 MLM 的结果。当发生流动分离后，根据段文洋等[5]的研究发现，当有限宽楔形体匀速入水发生流动分离后，短时间内喷溅射流始终沿一条辅助物面线上升，如图 7 所示。从图 8 中可以发现，MPS 计算流动分离以后的射流与水平面夹角大约为  $50^\circ$ ，这与段的研究结果一致。

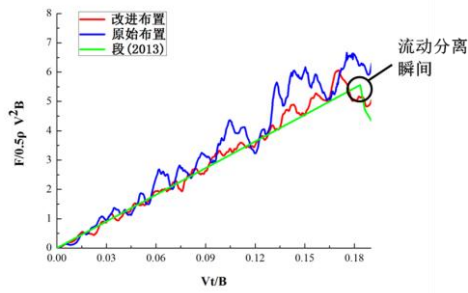


图 5 与 MLM 结果比较

Fig.5 Comparisons with MLM results

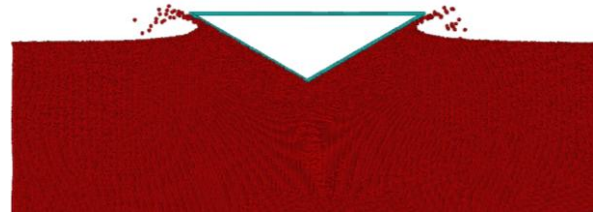


图 6 流动分离瞬间图

Fig.6 The instant of flow separation

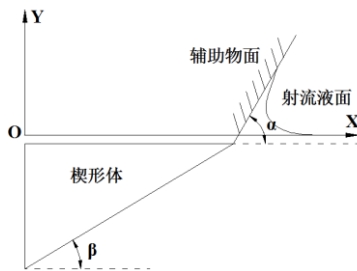


图 7 流动分离后引入辅助物面线

Fig.7 Fiction body surface introduced after flow separation

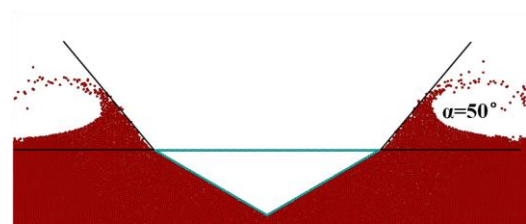


图 8 流动分离后的自由液面

Fig.8 The free surface after flow separation

### 3.2 不同斜升角的楔形体入水

本文采用改进的粒子布置方式建立了三种不同斜升角的楔形体模型，斜升角分别为  $30^\circ$ 、 $45^\circ$  和  $60^\circ$ ，模型的高度均为  $0.2\text{m}$ ，其他参数均与上节中的参数相同。

斜升角为  $30^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $60^\circ$  时，自由液面随时间的变化分别如图 9、10、11 所示。当  $t=0.02\text{s}$  时，楔形体的底部进入水面，流体开始沿斜边爬升，池底的压力场平整并未被入水冲击压力所影响。当  $t=0.08\text{s}$  时，楔形体大部分进入水中，所有楔形体的两侧压力都具有良好的对称性，其中斜升角  $30^\circ$  的压力值最大。并且斜升角为  $60^\circ$  的楔形体流体粒子沿斜边爬升过程中只有较少流体产生飞溅， $30^\circ$  的楔形体飞溅最为明显。此时位于楔形体正下方的池底压力场出现了跳跃，入水的砰击作用对于流体的挤压使得池底的水压不再是静水压力。 $t=0.18\text{s}$  时，流动分离发生，斜升角越小的楔形体，其射流越细越长，流体的飞溅越明显。

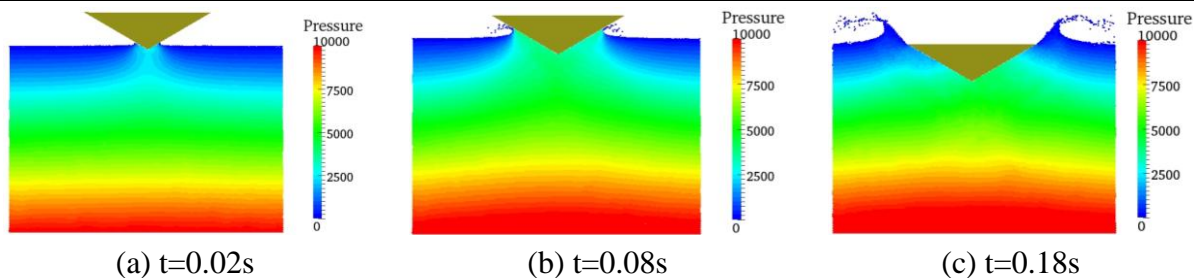


图 9 斜升角 30° 楔形体砸击自由液面变化

Fig.9 The elevation of free surface when deadrise angle is 30°

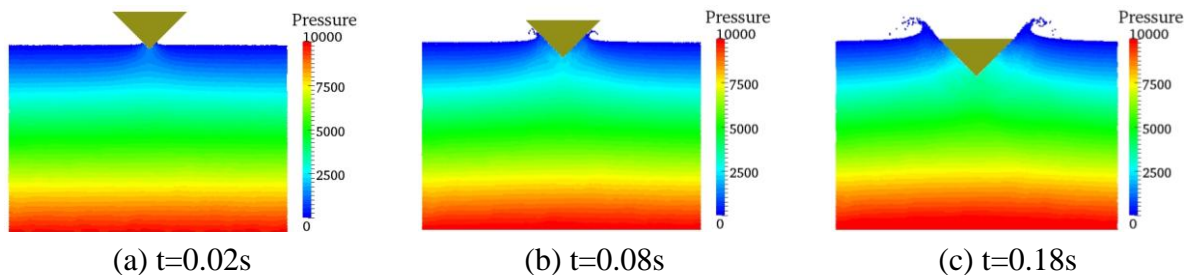


图 10 斜升角 45° 楔形体砸击自由液面变化

Fig.10 The elevation of free surface when deadrise angle is 45°

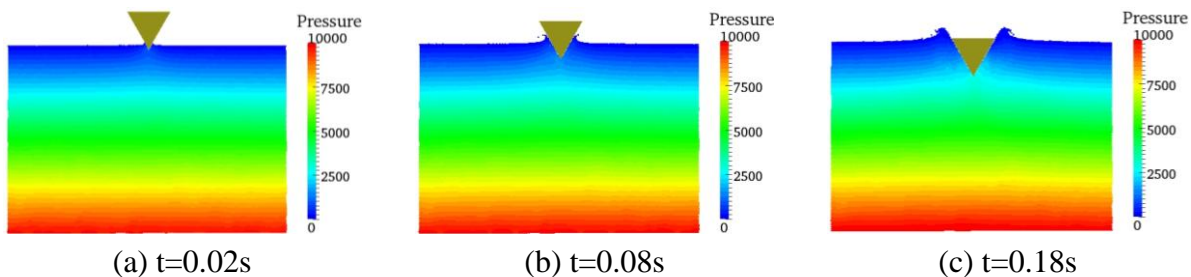


图 11 斜升角 60° 楔形体砸击自由液面变化

Fig.11 The elevation of free surface when deadrise angle is 60°

表 1 比较了不同斜升角流动分离前的垂向水动力，并与 MLM 结果进行了对比。无论是 MPS 方法还是 MLM 方法，两者的趋势相同，斜升角越小则楔形体受到的垂向水动力越大。MPS 方法的结果比 MLM 方法略大，如上文所述，这是因为考虑计算效率，MPS 无法做到真正意义上的无限水域，如图 9-11 图所示，当楔形体入水时，物体对液体的砸击挤压会造成池底压力的增大。总体上，MPS 可以较好地预测出楔形体的匀速入水问题，估算流动分离前的垂向水动力，并适用于各种斜升角的楔形体。

表 1 垂向水动力  $F/\rho V^3 t$

Tab.1 The vertical force  $F/\rho V^3 t$

斜升角(°)	MPS	MLM
30	15.40	15.1
45	4.17	4.2
60	1.17	1.08

## 4 结论

本文采用 MPS 方法对二维楔形体入水问题进行了数值模拟。在原始粒子布置方法基础上,提出了改进的粒子布置方式,并对两种布置方式的楔形体入水进行了模拟,结果表明改进的粒子布置方式能更加精确地模拟入水砰击过程的自由液面变化,并且缓解数值振荡。文中我们讨论了不同斜升角楔形体入水过程的自由液面变化和垂向水动力,并与 MLM 砰击模型的结果进行了对比且吻合得较好,证明了 MPS 在模拟匀速楔形体入水问题上具有较好的精度。

### 参考文献

- [1] 张智. 基于 CFD 技术的三维楔形体入水砰击试验与数值预报研究[硕士学位论文]. 天津: 天津大学, 2013.
- [2] 张岳青. 结构物入水冲击响应的试验研究及应用[博士学位论文]. 西安: 西北工业大学, 2015.
- [3] Wu G X. Numerical simulation of water entry of twin wedges. *Journal of Fluids and Structures*, 22, 99-108, 2006.
- [4] Maki K J, Lee D H, Troesch A W, Vlahopoulos N. Hydroelastic impact of a wedge-shaped body. *Ocean Engineering*, 38: 621-629, 2011.
- [5] 段文洋, 朱鑫, 倪阳, 俞圣杰. 考虑流动分离的有限宽楔形剖面匀速入水受力分析. *船舶力学*, 17(8): 911-919, 2013.
- [6] Tveitnes T, Fairlie-Clarke A C, Varyani K. An experimental investigation into the constant velocity water entry of wedge-shaped sections. *Ocean Engineering*, 35: 1463-1478, 2008.
- [7] El Malki Alaoui A, Nêne A, Tassin A, Jacques N. Experimental study of coefficients during vertical water entry of axisymmetric rigid shapes at constant speeds. *Applied Ocean Research*, 37: 183-197, 2012.
- [8] Hong S Y, Kim Y S, Kyoung J H, Hong S W, Kim Y H. Experimental Study on Impact Loads Acting on Free-falling Modified Wigley. *International Journal of Ocean System Engineering*, 2(3): 151-159, 2012.
- [9] Kim K H, Lee D Y, Hong S Y, Kim B W, Kim Y S, Nam B W. Experimental Study on the Water Impact Load on Symmetric and Asymmetric Wedges. *Proceedings of the Twenty-fourth (2014) International Ocean and Polar Engineering Conference, Busan, Korea, 2014.*
- [10] Oger G, Doring M, Alessandrini B, Ferrant P. Two-dimensional SPH simulations of wedge water entries. *Journal of Computational Physics*, 213: 803-822, 2006.
- [11] Gu H B, Qian L, Causon D M, Mingham C G, Lin P. Numerical simulation of water impact of solid bodies with vertical and oblique entries. *Ocean Engineering*, 75: 128-137, 2014.
- [12] 余谦, 张怀新. 改进的移动粒子半隐式法模拟楔形体入水砰击[J]. *海洋工程*, 31(6): 9-15, 2013.
- [13] Khayyer A, Gotoh H. A Multi-Phase Compressible-Incompressible Particle Method for Water Slamming. *Proceedings of the Twenty-fifth (2015) International Ocean and Polar Engineering Conference, Hawaii, USA, 2015.*
- [14] Tang Z Y, Wang J H, Zhang Y L, Wan D C. Numerical Investigation of 3D Water Entry Based on IMPS Method and Overset Method. *Proceedings of 3rd International Conference on Violent Flows, Osaka, Japan, 2015.*
- [15] Koshizuka S, Oka Y. Moving-particle semi-implicit method for fragmentation of incompressible fluid. *Nuclear Science and Engineering*, 123 (3): 421-434, 1996.
- [16] Tanaka M, Masunaga T. Stabilization and smoothing of pressure in MPS method by Quasi Compressibility. *Journal of Computational Physics*, 229 (11): 4279-4290, 2010.
- [17] Lee B H, Park J C, Kim M H, Hwang S C. Step-by-step improvement of MPS method in simulating violent free-surface motions and impact loads. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 200 (9-12): 1113-1125, 2011.
- [18] Zhang Y X, Wan D C. Comparative study of MPS method and level-set method for sloshing flows.



---

Journal of Hydrodynamics, 26 (4): 577-585, 2014.

[19] Zhang Y X, Wan D C. Numerical Simulation of Liquid Sloshing in Low-Filling Tank by MPS. Journal of Hydrodynamics, 27: 100-107, 2012.