

基于 MPS 方法模拟被动式减摇水舱的晃荡

文潇, 张友林, 万德成*

(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 200240)

*通信作者: dcwan@sjtu.edu.cn

摘要: 船舶六自由度运动中, 横摇对船舶的安全性影响十分严重。船舶在设计建造时, 常采用减摇装置来降低横摇运动对船舶安全的危害。其中, 减摇水舱因其结构简单、经济、便于养护, 且在低航速和无航速情况下仍能发挥作用而得到广泛应用。为研究其减摇特性, 采用基于半隐式移动粒子 MPS 方法开发的 MLParticle-SJTU 求解器, 对三维矩形被动式减摇水舱的晃荡进行了数值模拟。首先, 进行了减摇水舱和舱内液体晃荡在外界激励下耦合运动的模拟, 并将模拟结果与空舱横摇情况进行对比, 证明了减摇水舱的减摇效果。然后, 将减摇水舱横摇角的历时变化曲线与实验结果进行对比, 验证了 MPS 方法的适用性与可靠性。最后, 分析了减摇力矩与外界激励力矩之间的相位差, 解释了减摇水舱的工作原理。

关键词: MPS; MLParticle-SJTU 求解器; 减摇水舱; 晃荡

1 引言

在海上航行过程中, 船舶会在风、浪、流的联合作用下产生六自由度摇荡运动, 这对船舶的适航性、安全性, 以及船上设备和人员的工作会产生很大影响。而横摇运动又是最常见的船舶运动, 也是最危险的运动模式和船舶倾覆的最主要原因。因此, 人们一直以来都在不断寻找抑制船舶横摇运动的方法, 并且研究设计出了许多船舶减摇装置, 比如艏龙骨、减摇鳍和减摇水舱^[1]。其中, 减摇水舱已有 100 多年的发展历史, 是一种十分有效的减摇装置。它的原理是船舶横摇运动时, 水舱剧烈晃荡, 舱内的水作往复运动并冲击水舱内壁面, 产生周期性的减摇力矩, 抑制横摇。与其他减摇装置相比, 减摇水舱的优势在于自动化、低成本、易维修, 并且能在任何航速下发挥作用。

对减摇水舱的研究, 最重要的是减摇效果的预测。但由于减摇水舱工作时, 内部流体晃荡呈现出强烈的非线性自由面现象, 理论方法只在某些特定条件下适用^[2], 以往的大部分研究需借助实验方法。Bouscasse 针对含不同介质矩形减摇液舱的减摇特性, 开展了理论

和实验研究^[3-4],得到了减摇液舱的运动特性和能量耗散机制。然而,实验研究成本高、周期长,并且只能得到局部流场信息。近年来,随着 CFD 和高性能计算的兴起,数值方法越来越多地被引入到减摇水舱相关的研究中。Van Daalen^[5]基于传统的 VOF(Volume of Fluid)网格方法模拟了矩形和 U 型两种减摇水舱的晃荡,得到了与实验基本吻合的晃荡高度、横摇力矩幅值和相位等。Bulian^[6]采用无网格 SPH(Smoothed Particle Hydrodynamics)方法预测了矩形减摇水舱在不同外界激励频率和激励幅值下的减摇效果。Zhang 等^[7]利用 MPS(Moving Particle Semi-implicit)方法模拟了二维液舱晃荡,得到了与 Level-set 方法相比更好的结果。

本研究采用课题组自行开发的无网格 MPS 方法求解器 MLParticle-SJTU,模拟了三维被动式矩形被动式减摇水舱的晃荡,并对减摇效果进行预测。该求解器在 Koshizuka^[8]提出的原始 MPS 方法基础上进行了一系列改进^[9-12],不仅提高了数值计算的稳定性,而且改善了无网格方法中普遍存在的压力振荡问题。目前,该求解器已成功应用于液舱晃荡^[7,18]、流固耦合^[13]、浮体运动^[14-15]等问题的研究中,并且针对 MPS 方法计算量大的缺点,开发了多分辨率粒子技术^[16]和重叠粒子技术^[17]。

2 数值方法

2.1 控制方程

对于黏性不可压缩流体,流体运动的控制方程包括连续性方程和动量方程,在拉格朗日描述下,可写成如下形式:

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

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

其中, ρ 为流体密度, P 为压力, \mathbf{V} 为速度向量, \mathbf{f} 为体积力,主要为重力, ν 为运动黏性系数, t 为时间。无网格方法控制方程的主要特征在于方程左侧时间导数项以物质导数形式给出,不需要计算对流项,减少了数值耗散。

2.2 核函数

在 SPH 方法中,核函数直接包含在微分算子的离散格式中,要求核函数二阶光滑。而在 MPS 方法中,核函数只是反映粒子间距对粒子相互作用的权重模型,不要求光滑,因此核函数的选择范围更广。本研究选用 Zhang 等^[9]采用的核函数,它的特点是无奇点,计算更加稳定,形式如下

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

其中, r 表示粒子之间的距离, r_e 表示粒子相互作用域的半径, 对于不同的模型 r_e 的可以取不同的值。

2.3 梯度模型

MPS 方法中的梯度模型主要用来离散动量方程中的压力梯度项, 形式如下

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

其中, D 为空间维数, n^0 为初始粒子数密度, \mathbf{r} 为粒子坐标, i, j 为粒子编号。采用上式的压力梯度模型可保证粒子间作用力始终为斥力, 更符合实际物理规律。

2.4 Laplacian 模型

采用由非定常扩散问题推导得到的 Laplacian 模型, 由 Koshizuka^[8]给出, 形式如下

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

其中, λ 为修正系数, 用来修正数值结果, 使之接近扩散方程解析解:

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

2.5 不可压缩条件

MLParticle-SJTU 求解器采用混合源项的压力泊松方程, 该方法由 Tanaka^[11]提出, 后由 Lee^[12]改写成如下形式:

$$\langle \nabla^2 P^{n+1} \rangle_i = (1 - \gamma) \frac{\rho}{\Delta t} \nabla \cdot \mathbf{V}_i^* - \gamma \frac{\langle n^* \rangle_i - n^0}{n^0} \quad (6)$$

其中, γ 为系数, 一般取 0.01.

2.6 自由面判断

MLParticle 求解器采用基于粒子对称性的自由面判断方法^[9-10]。定义如下矢量:

$$\langle \mathbf{F} \rangle_i = \frac{D}{n^0} \sum_{j \neq i} \frac{1}{|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|} (|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|) W(r_{ij}) \quad (7)$$

其中 \mathbf{F} 表示粒子不对称度。流体内部粒子分布均匀, \mathbf{F} 较小; 自由面附近粒子只分布在一侧, \mathbf{F} 较大。因此, 当粒子的 \mathbf{F} 满足

$$\langle \mathbf{F} \rangle_i > \alpha \quad (8)$$

即可判定为自由面粒子, α 为一参数, 本研究取 $\alpha = 0.9|\mathbf{F}^0|$, 其中 $|\mathbf{F}^0|$ 为初始时刻自

由面粒子的 $|F|$ 。

2.7 减摇水舱运动方程

减摇水舱在外界激励下作单自由度横摇运动时，其运动方程可根据刚体动力学方程推导得到，形式如下

$$I_{\text{system}} \cdot \ddot{\phi} = T_{\text{gravitation}} + T_{\text{excitation}} + T_{\text{friction}} + T_{\text{fluid-tank}} \quad (9)$$

其中， I_{system} 为整个系统的惯性矩，包括水舱及其附属物， $\ddot{\phi}$ 为水舱横摇加速度， $T_{\text{gravitation}}$ 为水舱自身重力产生的力矩， $T_{\text{excitation}}$ 为外界激励产生的力矩， $T_{\text{fluid-tank}}$ 为液体晃荡对水舱的力矩， T_{friction} 为系统固有阻尼力矩， $T_{\text{friction}} = -K \cdot \text{sign}(\dot{\phi}) - B \cdot \dot{\phi}$ ， $K = 0.540 \text{ N} \cdot \text{m}$ 为干阻尼系数， $B = 0.326 \text{ N} \cdot \text{m}$ 为线性阻尼系数。

3 数值计算

为验证 MLParticle-SJTU 求解器的适用性与可靠性，对三维矩形被动式减摇水舱在外界激励下的晃荡进行了数值模拟。减摇水舱结构尺寸与水深和 Bouscasse^[4]实验装置一致(图1)。水舱为单自由度，沿固定轴作横摇运动，横摇轴平行于水舱宽度方向，轴心位于水舱长度方向中心，高度方向距底面 470 mm 位置处。水舱后部固定一导轨，与水舱一起作横摇运动。一定质量的滑块在电机驱动下沿导轨作往复运动，是引起水舱横摇运动的外界激励，滑块位移函数为 $\xi = -0.1 \sin(\omega_0 t)$ ， $\omega_0 = 3.26 \text{ s}^{-1}$ 为整个水舱系统固有频率。滑块对水舱的作用体现在式 (9) 右端的横摇激励力矩 $T_{\text{excitation}}$ ，该力矩可通过滑块的受力分析得到。

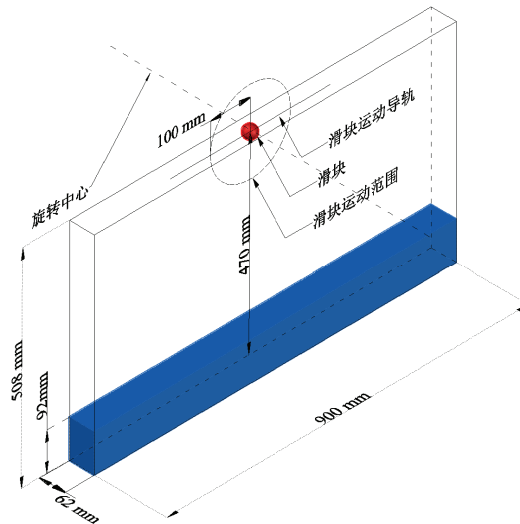


图1 减摇水舱示意图

数值模拟中相关参数与实验保持一致^[4](表 1)。

表 1 数值模拟参数

| 参数 | 数值 |
|--|------------------|
| 流体密度/(kg · m ³) | 998 |
| 流体运动黏度/(m ² · s ⁻¹) | 10 ⁻⁶ |
| 重力加速度/(m · s ⁻²) | 9.8 |
| 水舱惯性矩/(kg · m ²) | 26.9 |
| 滑块质量/kg | 4.978 |
| 粒子间距/m | 0.004 |
| 计算时间步长/s | 0.0002 |

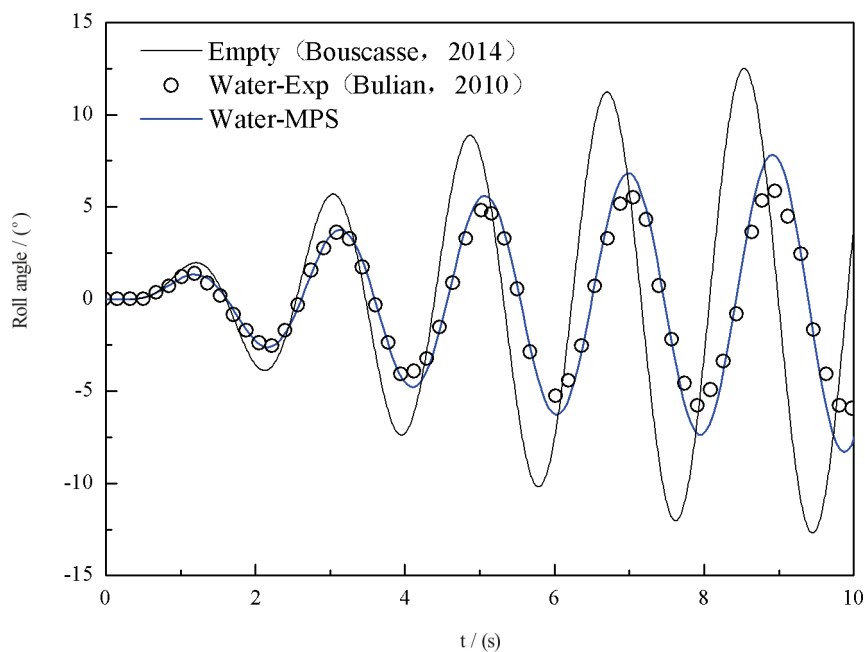


图 2 减摇水舱横摇角历时变化曲线

图 2 为空舱与减摇水舱横摇角历时变化曲线。空舱系统为完全刚体系统，无液体晃动，其运动方程可通过去掉式 (9) 右端 $T_{\text{fluid-tank}}$ 项得到。因此，对空舱横摇运动的预测只需对此二阶非线性微分方程进行求解。空舱运动的计算结果表明，受到外界激励后，空舱横摇幅度随时间增加而迅速增大。为验证求解器准确性，对于减摇水舱的横摇运动，分别将 MPS 计算结果与文献中实验结果^[6]进行了比较。水舱横摇幅值较小时(0°~4°)，MPS 计算结果与实验完全吻合。但随着横摇幅值增大，MPS 计算结果会稍高于实验结果，这是因为采用的单相流模拟，更适用于水舱横摇幅值较小，水与空气界面单一的情况。横摇幅值较大时，

晃荡剧烈，空气容易卷入到液体中，而这是单相流 MPS 难以模拟的。由于气液间剧烈能量交换会引起一定的能量耗散，所以实验中水舱动能比数值模拟结果相比较小，横摇幅值也较小。与空舱相比，减摇水舱的横摇幅值明显降低，验证了其减摇作用，并且横摇周期变长，横摇运动变得缓慢。

图 3 显示了单个周期内水舱与滑块的运动。当减摇水舱转动到平衡位置，横摇角为 0° 时，滑块运动到接近最大位移处($t=14T_0$, $t=14T_0+1/2T_0$)；当减摇水舱转动到最大转动角时，滑块又接近其平衡位置($t=14T_0+1/4T_0$, $t=14T_0+3/4T_0$)。减摇水舱与滑块运动之间始终存在接近 90° 的相位差。由于水舱内部液体晃荡与水舱运动相比约 90° 的相位迟滞^[3]，所以液体晃荡与滑块运动相位差约为 180° ，表明液体晃荡对水舱的力矩和外界激励力矩的方向相反，相互抵消，是一种减摇力矩，这也是减摇水舱的工作原理。

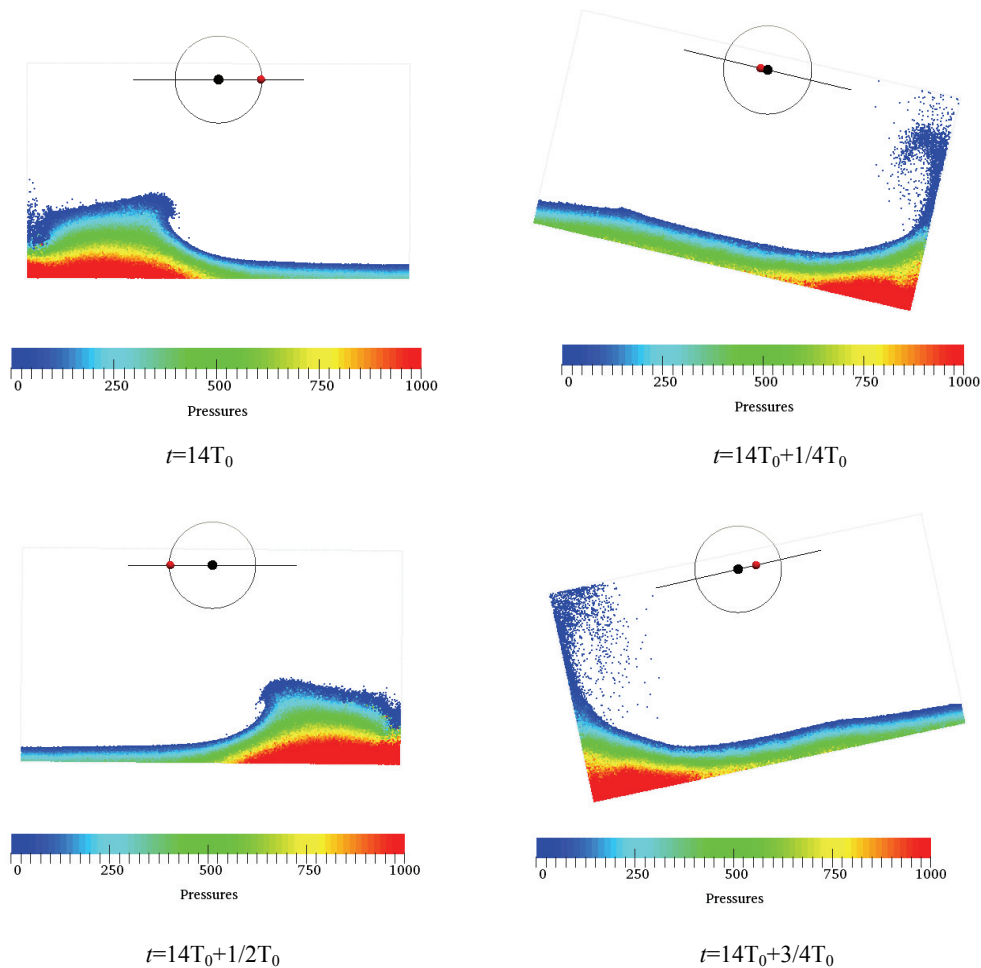


图 3 单周期内减摇水舱与滑块的运动

4 结论

本研究采用课题组自主开发的无网格 MPS 方法求解器 MLParticle-SJTU, 对三维矩形被动式减摇水舱在外界激励下的晃荡进行了数值模拟。结果表明, 在外界激励幅值 100 mm, 激励频率等于减摇水舱固有频率的条件下, 减摇水舱的横摇运动幅值与空舱相比明显降低, 具有很好的减摇效果。MPS 计算结果与实验结果基本吻合, 验证了 MPS 方法在减摇水舱问题上的适用性。当水舱横摇幅值较大时, MPS 计算的水舱横摇角稍高于实验结果, 这是因为单相流模拟忽略了气液间剧烈能量交换带来的能量耗散, 引起水舱动能与实际情况相比稍大, 所以后续还会进行两相流模拟研究。对滑块运动和水舱运动的相位差进行了分析, 结果表明液体晃荡对水舱的减摇力矩与外界激励力矩存在 180° 的相位差, 互相抵消, 这解释了减摇水舱的工作原理。

致谢

本工作得到国家自然科学基金项目(51379125, 51490675, 11432009, 51579145)、长江学者奖励计划(T2014099), 上海高校东方学者特聘教授岗位跟踪计划(2013022), 上海市优秀学术带头人计划(17XD1402300), 上海市船舶工程重点实验室基金项目(K2015-11), 以及工信部数值水池创新专项 VIV/VIM 项目(2016-23/09) 的资助。在此一并表示衷心感谢。

参考文献

- 1 Dong Meihua, Ma Rujian, Zhao Dong. Research progress of ship anti-rolling technology . Journal of University of Jinan, 2008, 22(2): 183-188 (in Chinese)
- 2 Demirbilek Z. Energy dissipation in sloshing waves in a rolling rectangular tank—I. Mathematical theory . Ocean Engineering, 1983, 10(2): 347-358
- 3 Bouscasse B, Colagrossi A, Souto-Iglesias A, et al. Mechanical energy dissipation induced by sloshing and wave breaking in a fully coupled angular motion system. I. Theoretical formulation and numerical investigation . Physics of Fluids, 2014, 26(3): 033104-251
- 4 Bouscasse B, Colagrossi A, Souto-Iglesias A, et al. Mechanical energy dissipation induced by sloshing and wave breaking in a fully coupled angular motion system. II. experimental investigation . Physics of Fluids, 2014, 26(3): 033103-84
- 5 Van Daalen E F G, Kleefsman K. et al. Anti-roll tank simulations with a volume Of fluid (VOF) based Navier-Stokes solver . Twenty-Third Symposium on Naval Hydrodynamics, Val de Reuil, France, 2001: 457-473
- 6 Bulian G, Souto-Iglesias A, Delorme L, et al. Smoothed particle hydrodynamics (SPH) simulation of a tuned liquid damper (TLD) with angular motion . Journal of Hydraulic Research, 2010, 48(extra): 28-39
- 7 Zhang Yuxin, Wan Decheng. Comparative study of MPS method and level-set method for sloshing flows . Journal of Hydrodynamics, 2014, 26(4): 577-585
- 8 Koshizuka S, Oka Y. Moving particle semi-implicit method for fragmentation of incompressible fluid . Nuclear Science and Engineering, 1996, 123: 421-434
- 9 Zhang Yuxin, Wan Decheng. Apply MPS method to simulate liquid sloshing in LNG tank . Proceedings of the Twenty-second International Offshore and Polar Engineering Conference, Rhodes, Greece, 2012: 381-391
- 10 Zhang Yuxin, Wan Decheng. Numerical simulation of liquid sloshing in low-filling tank by MPS . Chinese Journal of Hydrodynamics, 2012, 27(1): 100-107

- 11 Tanaka M, Masunaga T. Stabilization and smoothing of pressure in MPS method by Quasi-Compressibility . Journal of Computational Physics, 2010, 229: 4279-4290
- 12 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 . Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2011, 200(9-12): 1113-1125
- 13 Zhang Youlin, Chen Xiang, Wan Decheng. An MPS-FEM coupled method for the comparative study of liquid sloshing flows interacting with rigid and elastic baffles . Applied Mathematics and Mechanics, 2016, 37(12): 1359–1377
- 14 Zhang Youlin, Wan Decheng. Numerical study of interactions between waves and free rolling body by IMPS method . Computers and Fluids, 2017, <https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2017.03.019>
- 15 Zhang Youlin, Tang Zhenyuan, Wan Decheng. Numerical investigations of waves interacting with free rolling body by modified MPS method . International Journal of Computational Methods, 2016, 13(04): 1641013
- 16 Tang Zhenyuan, Zhang Youlin, Wan Decheng. Multi-resolution MPS method for free surface flows . International Journal of Computational Methods, 2016, 13(04): 1641018
- 17 Tang Zhenyuan, Zhang Youlin, Wan Decheng. Numerical simulation of 3D free surface flows by overlapping MPS, Journal of Hydrodynamics, 2016, 28(2): 306-312
- 18 Chen Xiang, Wan Decheng, Huang Wenhua. Numerical simulation of effects of two different baffles on liquid sloshing by MPS method . Proceedings of the Twenty-sixth International Ocean and Polar Engineering Conference, Rhodes, Greece, 2016: 931-938

Three-dimensional numerical simulation of passive rectangular anti-roll tank by MPS method

WEN Xiao, ZHANG You-lin, WAN De-cheng*

(Collaborative Innovation Center for Advanced Ship and Deep-Sea Exploration, State Key Laboratory of Ocean Engineering, School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

*Corresponding author: dcwan@sjtu.edu.cn

Abstract: In the present paper, our in-house meshless solver MLParticle-SJTU, based on the improved MPS (moving particle semi-implicit) method, is employed to simulate the three-dimensional liquid sloshing in the passive rectangular anti-roll tank and investigate its damping characteristic. The roll motion amplitude of anti-roll tank, obtained from MPS simulation, largely decreases compared with empty tank, confirming the damping characteristic of anti-roll tank. The MPS results show good agreement with the experimental results in literature, validating the applicability and reliability of MPS method in researches on anti-roll tank. Furthermore, the phase difference between the damping moment and the external excitation moment is analyzed, and the anti-roll principle can be explained by the phase difference.

Key words: MPS; MLParticle-SJTU solver; Anti-roll tank; Sloshing.