

# 无网格粒子法在液舱晃荡剧烈流动问题中的应用

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)

**摘要:** 随着我国对深海油气资源需求的日益增加, 越来越多的高新载液船舶(例如大型液化天然气船、浮式生产储油平台等)得以建造。当此类船舶航行于恶劣海况时, 将可能由舱内液体的剧烈晃动而引起船舶稳性的降低及舱壁结构的变形破坏。针对此剧烈流动问题, 本课题组基于改进的无网格半隐式移动粒子法(MPS), 自主研发了无网格粒子法求解器 MLParticle-SJTU。该求解器采用无奇点的核函数、混合源项的压力 Poisson 方程和基于邻居粒子不对称分布的自由面判断方法来抑制原始 MPS 方法中存在的数值压力振荡问题, 有助于实现对舱内液体运动及壁面砰击压力的精确预报。针对液舱结构的振动变形问题, 还在现有求解器 MLParticle-SJTU 的基础上进行了功能扩展, 开发了基于有限单元法(FEM)的结构分析模块。本文通过对标准试验算例的数值模拟, 验证了该求解器在分析液舱晃荡问题上的可靠性, 应用该求解器的流体分析模块分别考察了不同隔板结构形式对液体晃荡的抑制作用以及减摇液舱内的晃荡现象, 并基于该求解器的流固耦合分析功能研究了弹性舱壁在液体的砰击作用下产生的结构振动响应现象。

**关键词:** MLParticle-SJTU 求解器; 液舱晃荡; 粒子法; 半隐式移动粒子法(MPS); 有限单元法(FEM); 流固耦合

## Applications of Mesh-less Particle Method on the Simulations of Violent Sloshing Flow

ZHANG You-lin, WAN De-cheng

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

**Abstract:** As the increasing demands of deep-sea oil and gas resources, more and more advanced ships (eg. the liquid natural gas ship, floating production storage and offloading system, etc.) are manufactured. The sloshing phenomenon in these liquid carriers will take place and decrease the stability or even damage the containment structures of ships which sailing on rough sea. To numerically study this violent phenomenon, an in-house particle solver MLParticle-SJTU is developed based on the improved moving particle semi-implicit (MPS) method. In this solver, the non-singularity kernel function, the mixed source term for pressure Poisson equation and the accuracy detection method for free surface particles based on the asymmetric distribution of neighbor particles are employed to suppress the pressure oscillation of original MPS method. To investigate the structural deformation due to the sloshing impact loads, the solver MLParticle-SJTU is expanded with the

structural analysis module based on the finite element method. In this paper, the capability of present solver for sloshing problem is validated firstly by the simulation of benchmark test. Then, suppressing effects of rigid baffles to movement of the sloshing flow and sloshing phenomenon in an anti-rolling tank are numerically investigated by the solver. Besides, the feasibility of the solver is also presented by the simulation of the interaction between the sloshing flow and the responses of tank walls.

**Key words:** MLParticle-SJTU Solver, Sloshing, Mesh-less Particle Method, Moving Particle Semi-implicit (MPS), Finite Element Method (FEM), Fluid Structure Interaction (FSI)

## 0 引言

液舱晃荡是指在外部激励作用下部分装载的舱室内液体所产生的波动及其与舱壁结构的相互作用现象。在船舶与海洋工程领域,该现象广泛存在于载液船舶的整个运营周期内,并可能危害到船舱结构的安全及船舶的稳性。在过去的四十多年中,众多学者致力于该现象的强非线性特征研究。这些非线性特征包括自由面的演化过程中常伴随有晃荡波面的翻卷、破碎等剧烈变化现象,流体对舱壁结构的砰击载荷具有较强的不确定性,舱壁的在晃荡波的砰击载荷作用下可能引起非线性振动变形,构成舱壁的结构复合材料属性具备各向异性特征(LNG 船舱壁材料)等。这些非线性特征加剧了液舱晃荡问题复杂性,至今认为得到很完善的解决,科研人员仍需对该问题开展更深入的认识研究工作。

从船舶工程应用的角度来看,人们对液舱晃荡问题的研究主要集中在以下几个方面。首先、砰击压力的预报。由于舱壁结构的安全性与其所遭受的砰击压力关系密切,故而对砰击压力的预报是研究液舱晃荡问题的首要关注点。例如,在 Delorme 等<sup>[1]</sup>的研究中以压力的冲量为关注点,其认为该冲量是晃荡问题中的一个可重复的量。Kim 等<sup>[2]</sup>分析了砰击现象发生瞬间压力的上升趋势及持续时间,以便归纳形成压力信号的简化模型,用于 LNG 液舱壁面的强度评估。此外,更多的研究主要集中在对砰击压力峰值的分析。Bulian 等<sup>[3]</sup>在大量重复性的试验后通过统计分析的方法,研究了晃荡砰击压力的特征及其峰值不确定性。第二、液体晃荡的抑制作用。为了减少晃荡冲击波对舱壁结构的破坏,在载液船舶的设计建造中常采用不同形式的隔板来抑制舱内流体的剧烈运动,因而隔板的形式及其布置位置对晃荡的抑制效果吸引了众多研究人员的关注。例如: Eswaran 等<sup>[4]</sup>对三维矩形液舱在横荡激励下的晃荡现象进行数值计算,并分析了垂直隔板的减晃作用。Xue 和 Lin<sup>[5]</sup>采用 VOF 方法数值模拟二维和三维矩形液舱的晃荡问题,并分析环形隔板的减晃作用。Yin 等<sup>[6]</sup>基于 VOF 方法模拟带有垂直隔板的液舱晃荡问题,并分析了隔板参数对液体运动的影响。第三、舱室结构响应及其对晃荡现象的影响作用。例如, Lee 等<sup>[7]</sup>基于晃荡载荷评估了大尺度 LNG 液舱的强度。Zhang 等<sup>[8]</sup>考虑了液舱内弹性结构与晃荡波的相互耦合作用。第四、晃荡对船体运动的影响作用等。液舱内剧烈晃荡产生的力矩,一方面可能会降低船舶稳性,增加船舶运动幅度,严重时甚至导致船舶倾覆的危险;另一方面也可能会提高船舶的稳性,减小船舶在波浪上的运动幅度。Zhuang 等<sup>[9]</sup>通过同时考虑船在波浪上的自由运动及其与液舱内流的耦合分析了不同波浪条件下液舱内晃荡波表现及其对船舶运动的影响。

目前,人们采用了多种方法对上述液舱晃荡的关键问题进行研究。其中,数值仿真方法能够获取详细的流场信息,便于分析晃荡流动的演化过程,发现晃荡现象背后的物理机理,并为试验提供指导,故而赢得了广大科研人员的青睐。通常根据流场的空间离散方式,可将数值方法分为网格类和粒子类方法。虽然网格类方法已经广泛应用于液舱晃荡问题的数值模拟中,但由于自由面变化的复杂性,此类方法仍难以很好地描述真实的物理现象。相对而言,基于 Lagrange 体系的粒子类方法具有真实描述自由面剧烈变化的天然优势,研究人员采用此类方法在近年来取得了较多的研究成果。例如, Zhang<sup>[10][11]</sup>、Yang<sup>[12]</sup>、Tang<sup>[15]</sup>等采用无网格 MPS 方法数值模拟了 2D 及 3D 的数值晃荡问题,系统地考察了激励频率对液舱晃荡现象的影响。

本课题组基于 MPS 方法自主研发了无网格粒子法求解器 MLParticle-SJTU,通过在原始 MPS 方法的基础上对粒子模型的核函数、压力梯度模型及压力泊松方程的改进,结合基于流体粒子分布对称性的自由面判断方式,该求解器能够用于胜任船舶与海洋工程领域具备大自由液面变形的问题。例如,溃坝

波、涌潮波的演化问题，船舶或海洋平台结构在波浪中的大幅运动<sup>[16]</sup>、甲板上浪、入水砰击问题<sup>[17]</sup>等。此外，课题组采用该求解器对液舱晃荡剧烈流动问题开展了一系列的研究工作，本文主要针对课题组在此类问题上的相关研究成果进行介绍，包括 MPS 方法在三维液舱晃荡数值模拟中的可靠性验证研究、三维液舱内隔板的型式及布置方式对晃荡波运动和砰击载荷峰值的抑制效果研究、舱壁弹性对液舱晃荡现象的影响、液舱晃荡对调谐液体阻尼器运动的抑制作用。

## 1 数值方法

本文在采用无网格 MPS 方法求解器 MLParticle-SJTU 对液舱晃荡流动现象的数值模拟时，将舱内液体视为粘性不可压缩流体。数值计算的连续性方程和 N-S 方程分别为

$$\nabla \cdot \mathbf{V} = 0 \quad (1)$$

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

其中： $\rho$  为流体密度， $P$  为压力， $\mathbf{V}$  为速度向量， $\mathbf{g}$  为重力加速度向量， $\nu$  是运动粘性系数。在粒子法中，粒子的位置和其他物理量都是基于拉格朗日描述法表达的，因此不需要计算对流项。

此外，为了研究了舱壁的弹性对液舱晃荡现象的影响，本课题组还对既有版本的求解器 MLParticle-SJTU 进行扩展，基于 FEM 方法开发了结构响应分析模块。在对结构场进行分析时，控制结构单元运动变形的动力学方程为

$$\mathbf{M} \ddot{\mathbf{y}} + \mathbf{C} \dot{\mathbf{y}} + \mathbf{K} \mathbf{y} = \mathbf{F}(t) \quad (3)$$

$$\mathbf{C} = \alpha_1 \mathbf{M} + \alpha_2 \mathbf{K} \quad (4)$$

其中， $\mathbf{M}$ 、 $\mathbf{C}$ 、 $\mathbf{K}$  分别为结构的质量矩阵、瑞利阻尼矩阵、结构刚度矩阵， $\mathbf{F}$  是施加在结构上的时域变化外力（即：晃荡砰击载荷）， $\mathbf{y}$  是结构单元节点的位移矢量，系数  $\alpha_1$  和  $\alpha_2$  与结构的固有频率及阻尼比相关。

本文中流体分析及结构响应分析的数学模型及其求解过程在课题组已发表文献<sup>[8][10]</sup>进行了详细说明，这里不再赘述。

## 2 粒子法在液舱晃荡中的应用

本文首先通过对已发表的试验算例进行数值模拟，验证该求解器在模拟三维液舱晃荡问题上的数值可靠性，研究了液舱内不同隔板布置方式对晃荡现象的抑制效果、液舱晃荡对调谐液体阻尼器运动的抑制作用。本课题组还对既有版本的求解器 MLParticle-SJTU 进行扩展，基于 FEM 方法开发了结构响应分析模块，研究了舱壁的弹性对液舱晃荡现象的影响。

### 2.1 三维液舱晃荡问题

本课题组基于求解器 MLParticle-SJTU 对液舱晃荡问题开展了系列研究，其中早期的工作主要为二维的数值仿真研究。随着课题组在 MPS 方法计算效率方面工作的深入开展，求解器 MLParticle-SJTU 具备多 CPU 并行计算<sup>[11]</sup>、基于 GPU 的并行加速<sup>[18]</sup>、重叠粒子加速<sup>[19]</sup>及多分辨率粒子加速<sup>[20]</sup>等功能，课题组杨亚强开展了一系列三维液舱晃荡问题的仿真工作。

#### 2.1.1 工况说明

本节基于 MLParticle-SJTU 求解器对浅水工况下矩形液舱在一系列横摇激励频率下的液舱晃荡进行数值模拟，并将计算结果与 Souto-Iglesias 等<sup>[19][22]</sup>的试验结果对比，验证求解器的正确性。

计算模型如图 1 所示，矩形液舱长为  $L=0.64$  m，宽为  $W=0.252$  m，高为  $H=0.14$  m，装载高度为  $d=0.03$

m. 液舱绕转动中心 O 做横摇运动，O 为舱底中部基线以下  $l=0.1$  m 处，具体位置如图所示。横摇激励方程为

$$\theta_x = \theta_1 \sin(\omega t) \quad (5)$$

式中，激励幅值  $\theta_1=6^\circ$ ，激励频率  $\omega=4.34$  rad/s，对应的激励周期  $T= 1.45$  s。

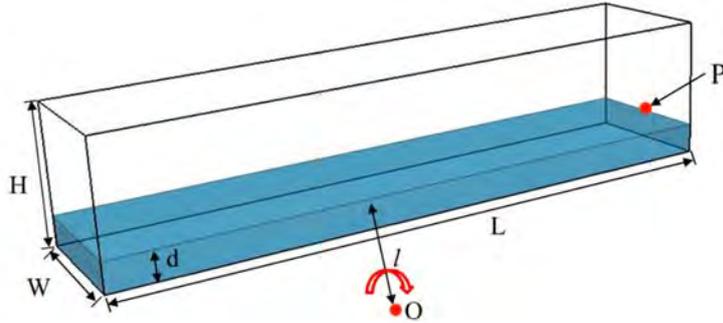


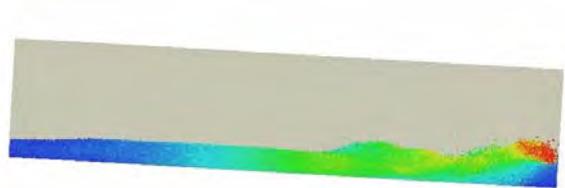
图1 计算模型示意图

### 2.1.2 结果分析

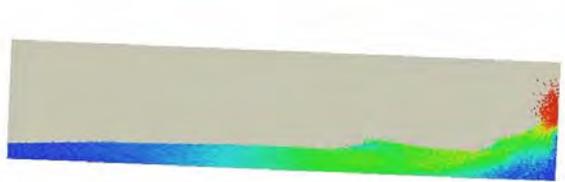
图 2 试验及仿真结果展示了不同时刻自由面的演变过程。由图可见，晃荡波在行进过程中出现了翻卷、破碎等现象，并在舱壁上发生了砰击和冲顶现象。自由面的变化十分剧烈，具有非线性特征。其中，图 2(a)为液舱内砰击现象发生时刻的自由面状态；图 2(b)展示了砰击过程中形成了沿壁面向上的射流；图 2(c)展示了壁面处的射流进一步发展，并在液舱顶部形成了第二次砰击，即冲顶现象；图 2(d)为液舱向左旋转到最大角度时晃荡波在行进中产生了翻卷破碎的现象。通过上述 4 组图的对比可见，在整个液舱晃荡过程中，数值模拟结果与试验结果均吻合较好，这说明 MLParticle-SJTU 能够较好地模拟液舱晃荡这一复杂的剧烈流动现象。



(a)  $t=(n+0.417)T$



(b)  $t=(n+0.472)T$



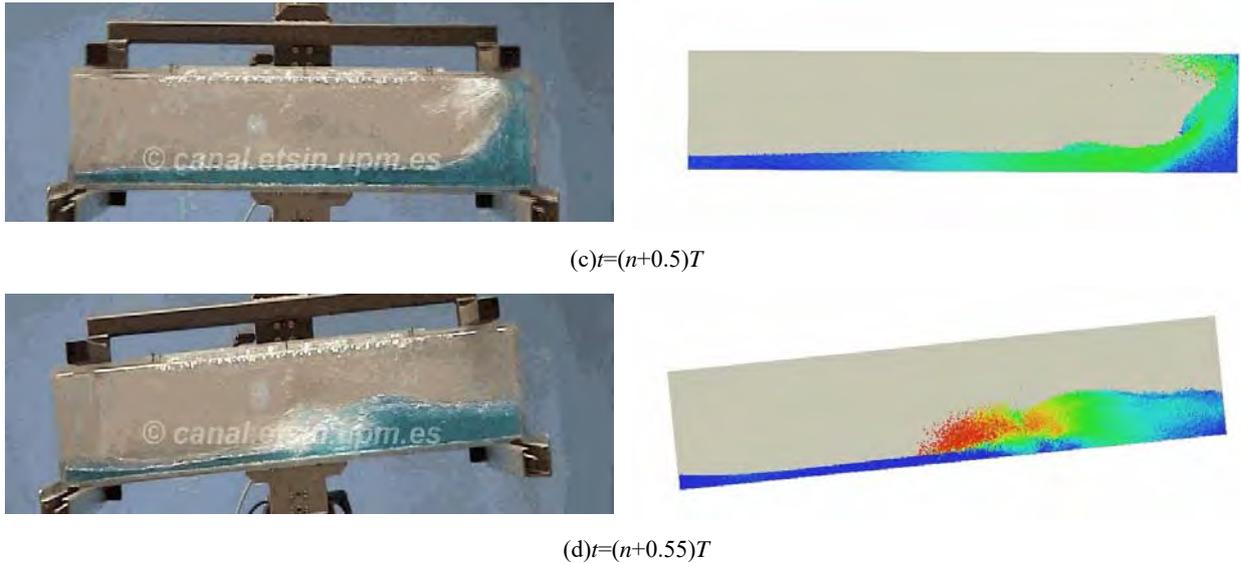


图2 激励频率为 4.34 rad/s 时不同时刻的自由面形状

## 2.2 隔板对三维液舱晃荡的抑制作用

在载液船舶的设计建造中，隔板常被用来抑制晃荡波的运动以及降低砰击载荷对舱壁的危害。然而，隔板的结构形式及其在三维空间内的布置位置都会影响其对晃荡现象的抑制效果。为考察隔板对晃荡的抑制效果，本课题组杨亚强应用 MPS 求解器 MLParticle-SJTU 对该问题进行了探讨研究。

### 2.2.1 工况说明

如图 3 所示，三维液舱的长  $L$ 、宽  $W$ 、高  $H$  分别为 0.8 m、0.35 m、0.5 m，舱内水深为  $d=0.25$  m，对应的充水率为 50%。在左侧舱壁设有三个压力监测点 P1、P2、P3，测点间距分别为  $h_1=0.0525$  m， $h_2=0.0625$  m， $h_3=0.125$  m。液舱计算域被离散为粒子形态的计算模型，初始粒子间距为 0.005 m，粒子总数为 750789，流体粒子总数为 532059，其他为边界粒子。计算的时间步长为  $2.5 \times 10^{-4}$  s。

液舱将在水平方向做平移运动，运动控制方程如下式：

$$x = A_x \sin(\omega t) \quad (6)$$

其中，激励振幅  $A_x=0.02$  m，激励角频率  $\omega=5.39$  rad/s。

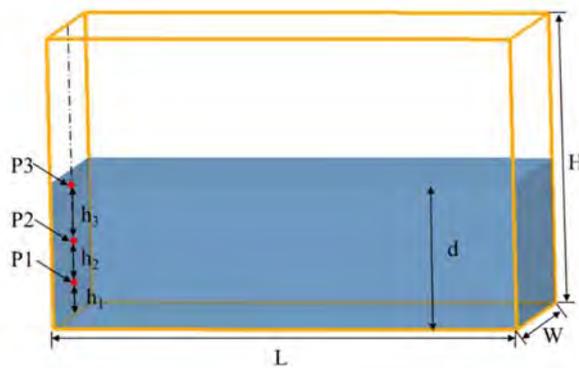


图3 三维矩形液舱尺寸示意图

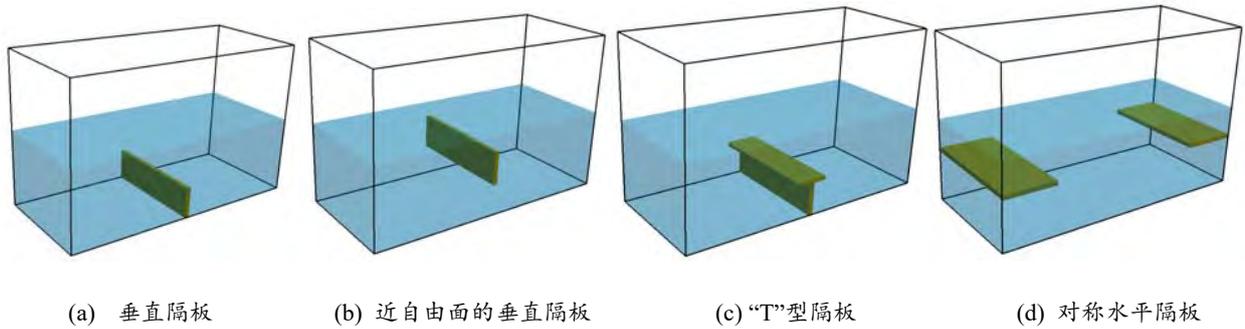
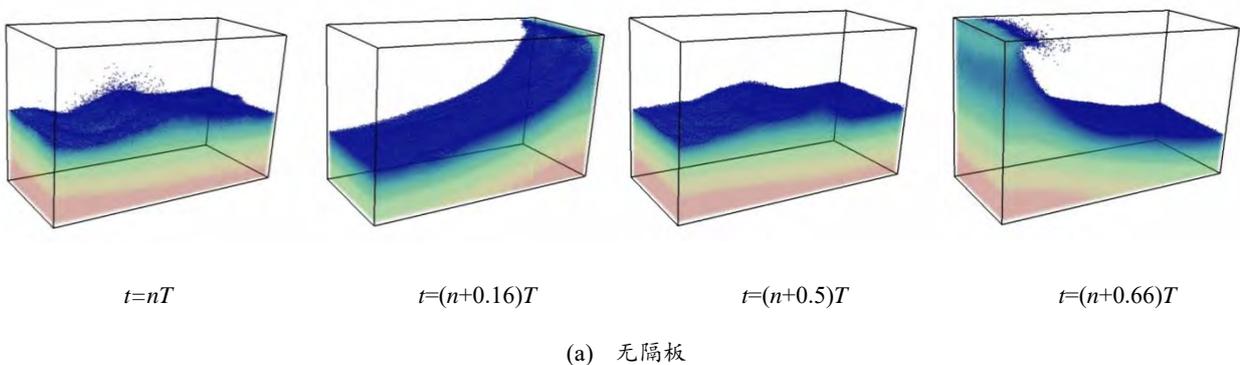


图4 不同型式的隔板示意图

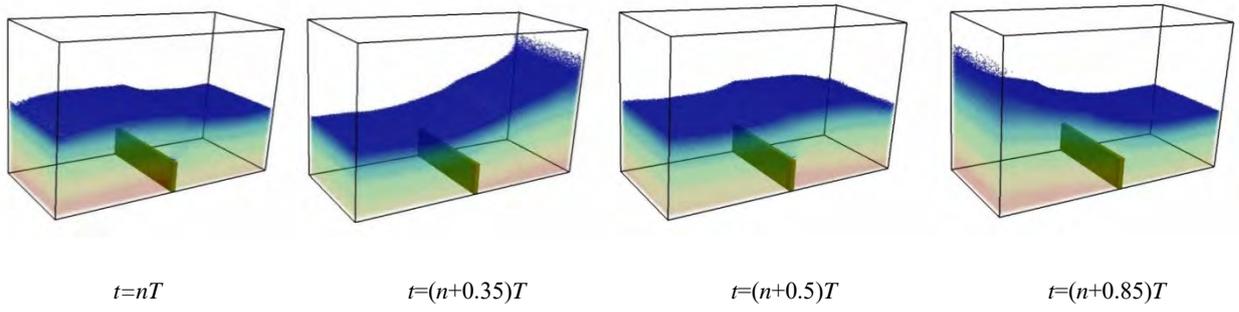
为了分析隔板的减晃作用，在图 3 所示的三维液舱内布置四种型式的隔板：固结底部的垂直隔板、近自由面的垂直隔板、“T”型隔板及对称水平隔板，隔板的具体型式和布置如图 4 所示。

### 2.2.2 结果分析

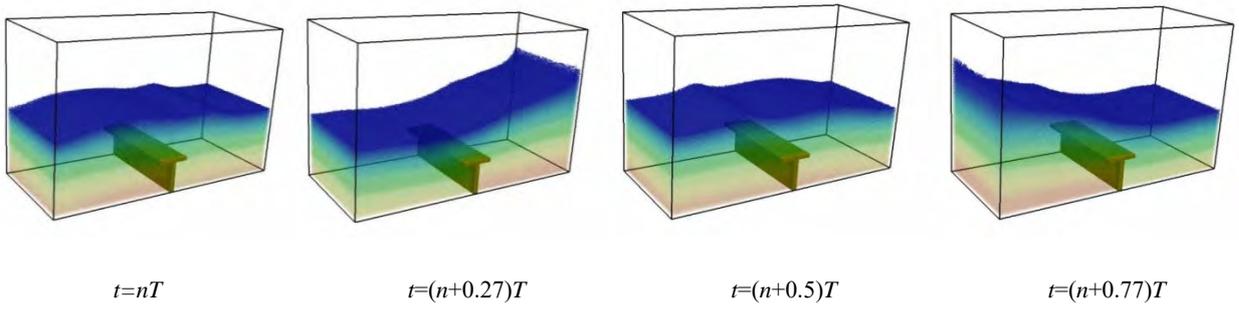
图 5 为设置不同型式隔板晃荡流体的自由面演化过程。由图 5(a)可见，液舱内未设置隔板时，晃荡幅度很大，晃荡液体的运动非常剧烈，出现波浪的冲顶现象。设置垂直隔板以后，由于液体的水平流动受到垂直隔板的阻碍作用，液体的动能减小，无冲顶现象产生，如图 5(b)。在晃荡过程中，波浪的砰击作用减弱，波浪的翻卷、破碎等强非线性流动现象消失。图 5(c)为设置“T”型隔板之后的流动状态，对比图 5(b)和图 5(c)，两者的自由面形状类似，然而图 5(c)的自由面爬高更小，这是由于“T”型隔板的腹板在阻碍流体的水平流动的同时，其面板减小了晃荡流体的垂向流动速度。这说明“T”型隔板的减晃效果更加明显。图 5(d)为设置近自由面垂直隔板之后晃荡流体的流动情况。可以看到隔板的存在影响了液体的流动，当波峰行进至隔板附近时，由于隔板的阻碍作用，晃荡波的上下两部分发生分离，波浪的下部速度减小，停留在隔板一侧，而波浪的上部速度较大，越过隔板，到达另一侧，形成射流水舌，与隔板另一侧的液体产生强烈的碰撞，形成卷破波，造成流场的紊动。和前两种隔板对比，设置近自由面处的垂直隔板以后，波浪的爬高更小，这说明自由面的垂直隔板能够更好地抑制晃荡幅度。这是由于相对于液舱底部的流体，自由面处的流体运动速度较大，动能更大，前两种隔板主要是抑制舱底液体，而近自由面隔板主要是抑制自由面处流体的流动。图 5(e)给出了带对称水平隔板的液舱晃荡的流场分布。可以发现，设置对称水平隔板以后，流场中会产生很多波高较小的晃荡波，这些晃荡波相互作用，导致能量的耗散，晃荡幅度下降。



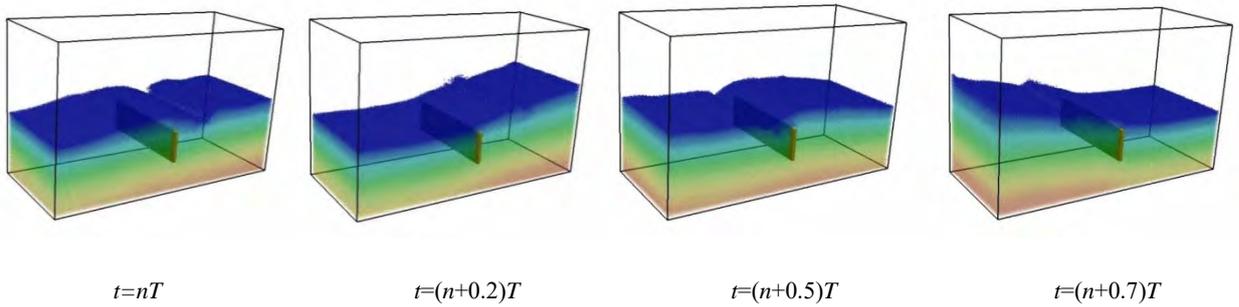
(a) 无隔板



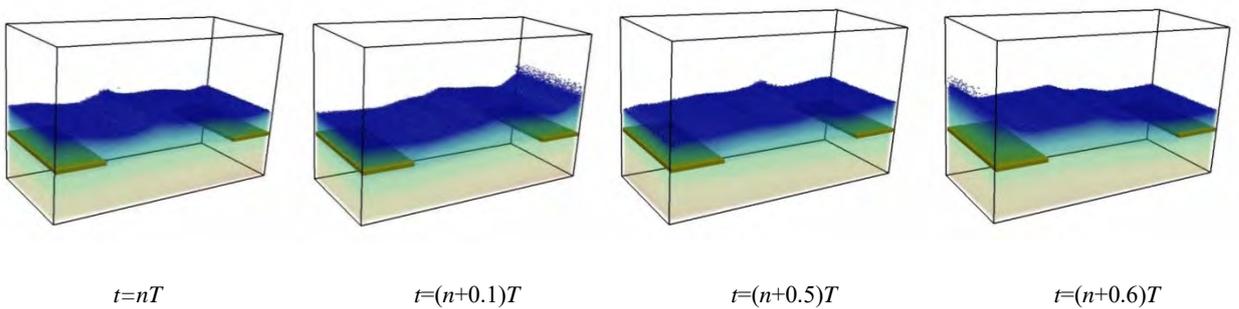
(b) 垂直隔板



(c) “T”型隔板



(d) 近自由面的垂直隔板



(e) 对称水平隔板



图5 设置不同型式的隔板前后流场分布情况

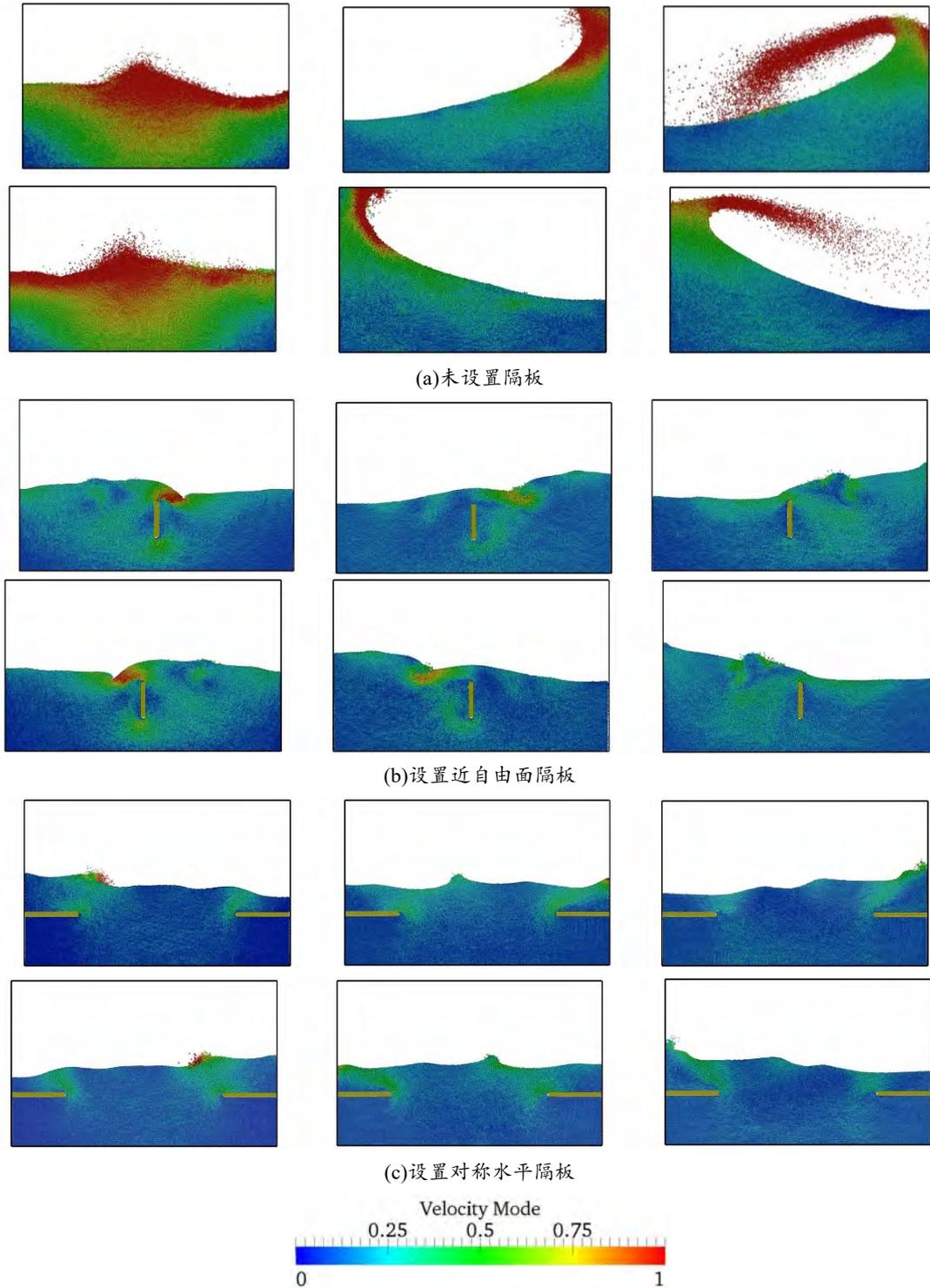


图6 三种工况下的流场分布

图 6 给出了不带隔板、设置近自由面垂直隔板和对称水平隔板三种工况下晃荡的自由面变化和流场分布。对比三种工况的自由面变化情况，可以看到，未设置隔板时，晃荡流体的流动非常剧烈，设置两类隔板之后，晃荡大幅度减小。对比三种工况下的速度场可以看出，图 6(a)中未设置隔板时，晃荡流体的运动速度较大。设置两种隔板之后，流体粒子高速运动的红色区域基本消失。这表明，两种隔板能够较好地阻碍晃荡流体的运动，垂直隔板减小了液体的水平运动速度，而对称水平隔板减小了液体的竖直运动速度。从图 6(b)和图 6(c)中可以看出自由液面处垂直隔板的顶端和底端附近以及对称水平隔板的末

端附近流体的运动速度较大。这是由于在近自由面垂直隔板的底端边界和对称水平隔板的末端边界处产生了涡结构，同时，在近自由面垂直隔板的顶端界面处，由于自由液面的碰撞或破碎也形成了形状不规则的涡结构。这些涡结构造成隔板周围流场的紊乱，消耗了流体的能量。

由上述可知，隔板减晃作用的机理主要体现在阻碍了流体的运动，减小了流体的动能，使流体没有足够的能量撞击壁面，因此拍击压力减小，晃荡幅度减小；在隔板末端周围，晃荡液体会产生一些涡结构和剧烈的水流碰撞，导致流体能量的耗散；此外，隔板改变了整个系统的共振频率，使得激励频率偏离共振频率，从而影响了流体的运动响应。

### 2.3 考虑流固耦合影响的晃荡问题

随着人类对油气资源的需求日益增加，越来越多大型的载液船舶得以建造。然而，液舱尺寸的增大通常伴随着舱壁结构固有频率的降低。当结构固有频率降低到与船舶的运动频率相同的量级时，舱壁结构将在舱内液体的晃荡冲击载荷作用下激发出明显的振动响应，甚至发生结构破坏等危险。由此看来，在进行载液船舶的设计时需要充分考虑液体的晃荡现象与结构响应之间的关系。

#### 2.3.1 工况说明

本文基于 Lagrange 体系下的 MPS-FEM 耦合方法数值模拟舱壁弹性对液舱晃荡晃荡现象的影响。液舱模型如图 7 所示，矩形液舱长为  $L=0.9\text{ m}$ ，高为  $H=0.508\text{ m}$ ，装载高度为  $d=0.093\text{ m}$ ，对应的装载高度舱长比  $d/L=0.0103$ ，为浅水工况。在舱壁左侧自由液面处设置一压力监测点 S1，舱壁中点处设置位移测点 S2。液舱将绕转动中心 O 点做简谐横摇运动，其中 O 点为舱底中点处。横摇激励幅值  $\theta_1=4\text{ degree}$ ，激励角频率  $\omega$  取值在  $3.8519\text{ rad/s}$ ，对应的激励周期为  $T=0.85T_N=1.6312\text{ s}$ ，此处  $T_N$  为相应装载液深下的液舱固有频率。流体及结构场分析具体参数如表 1 所示，计算工况如表 2 所示。其中，Case A 的舱壁为刚性，Case B-I 通过改变舱壁的弹性模量考察结构弹性对液舱晃荡现象的影响。

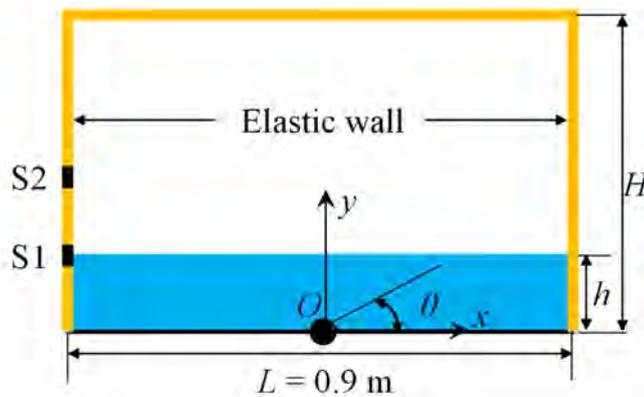


图7 液舱模型示意图

表 1. 流体及结构场计算参数

流体参数	值	结构参数	值
液体密度 ( $\text{kg/m}^3$ )	998	结构密度 ( $\text{kg/m}^3$ )	1800
运动粘性系数 ( $\text{m}^2/\text{s}$ )	$1 \times 10^{-6}$	壁厚(m)	0.002
重力加速度 ( $\text{m/s}^2$ )	9.81	舱壁单元数	254
粒子间距 (m)	0.002	质量阻尼系数 $\alpha_1$	0.0128
粒子总数	25351	刚度阻尼系数 $\alpha_2$	$5.01 \times 10^{-7}$

流体域时间步长 (s)	$2 \times 10^{-4}$	结构场时间步长 (s)	$2 \times 10^{-4}$
-------------	--------------------	-------------	--------------------

表 2. 计算工况

Cases	A	B	C	D	E	F	G	H	I
Young's modulus (GPa)		80	70	60	50	40	30	20	10

### 2.3.2 结果分析

图 8 为晃荡波对具有不同弹性模量的舱壁产生撞击前后时刻的自由面及舱壁变形演变过程。当考虑舱壁的弹性效应时，液舱内的晃荡现象相较刚性舱壁存在明显的不同。例如：随着舱壁弹性模量的降低，壁面撞击现象发生的时刻有所延迟，如图 B2~I2 所示；晃荡波对壁面产生撞击时，舱壁结构将产生变形，流体粒子的部分动能转换为舱壁的弹性变形势能，进而导致晃荡波面沿舱壁爬升的高度有所降低，如图 B4~I4 所示；在舱壁弹性回复力的作用下，沿舱壁爬升的波面在水平方向产生了反弹现象。

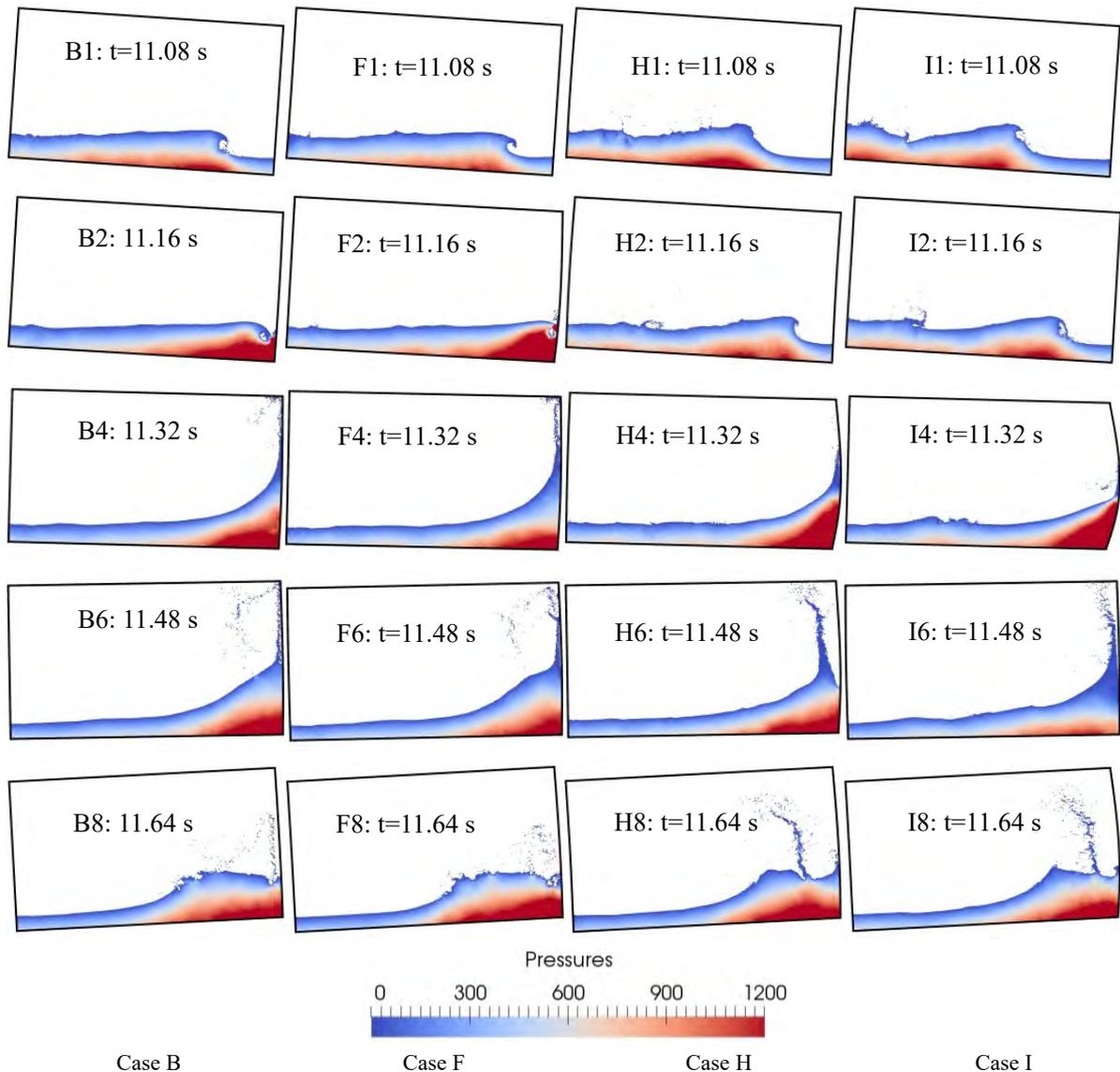


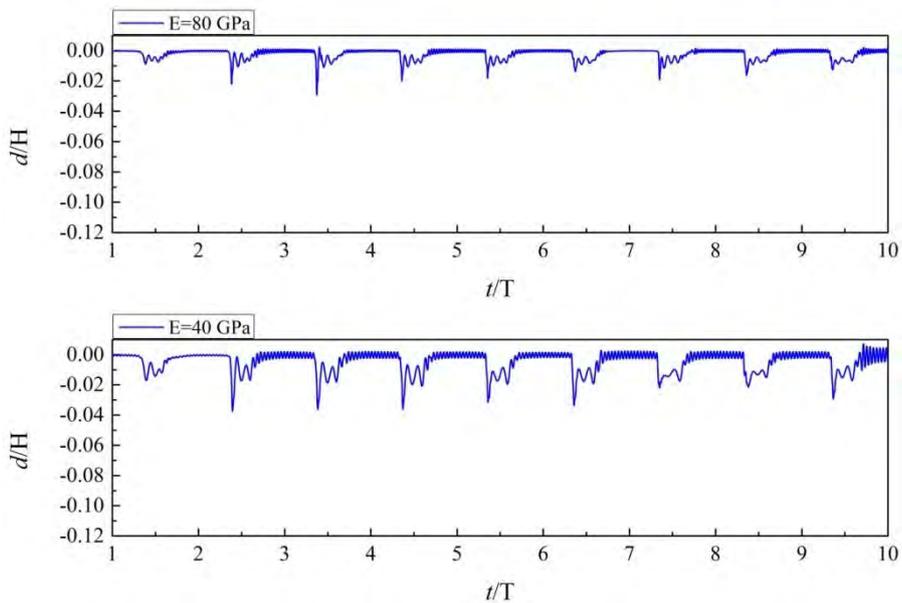
图8 不同弹性模量的舱壁变形及自由面演化过程

图 9 为液舱左侧舱壁中点 S2 处位移响应无量纲时历曲线。其中， $d$  为舱壁的横向振动位移， $H$  为横舱壁高度， $t$  为时间， $T$  为激励周期。幅值的负值表示振动方向指向坐标系  $x$  轴反方向，即指向左侧舱壁的外部。由图中可见，不同弹性模量的横舱壁位移曲线具有相似的振动特征。首先，结构响应呈现周期性偏离平衡位置的较大幅值振动，其振动响应的周期与液舱的横摇激励周期一致。此类振动响应可能由舱壁结构所受晃荡波的横向砰击作用引起。此外，结构响应还呈现围绕初始平衡位置的小幅值、小周期振动现象。此类振动响应由舱壁结构自身的弹性回复力引起。

图 10 为横舱壁中点 S2 处横向振动幅值随结构弹性模量变化趋势曲线，该曲线的数据点是通过对上图 9 中各弹性模量对应的振动响应曲线第 2-10 周期内的振动幅值取统计平均而得到。由该趋势曲线可见，在晃荡波的砰击作用下横舱壁的振动幅值随结构弹性模量的减少而增大。

图 11 为舱壁上测点 S1 处所受砰击压力时历曲线。其中，图 11(a) 为刚性舱壁所受载荷，图 11(b-e) 为弹性舱壁所受载荷。由图可见，舱壁为刚性时砰击压力信号呈现“church roof shape”形态，并与 Souto-Iglesias 所发表的试验结果数据吻合良好，说明了该求解器在模拟液舱晃荡现象及其产生的砰击压力方面具有较好的可靠性。由图 11 (b-e) 可见，当考虑结构的弹性效应时，舱壁所受砰击压力信号的形态发生了变化。一方面，弹性舱壁所受压力的峰值有所降低；另一方面，随着结构弹性模量的降低砰击现象持续过程中压力曲线呈现较为剧烈的振荡。

此外，本文还考察了结构弹性模量的变化对横舱壁处砰击现象的发生时刻( $t_{\text{impact}}$ )及持续时间( $\Delta t$ )所产生的影响，如图 13 所示。其中，关于砰击现象的发生时刻( $t_{\text{impact}}$ )及其持续时间( $\Delta t$ )的定义如图 12 所示。由图 13 可见，考虑结构弹性时，随着弹性模量的降低液舱内砰击现象发生的时刻逐渐延迟，砰击现象持续的时间逐渐增加。



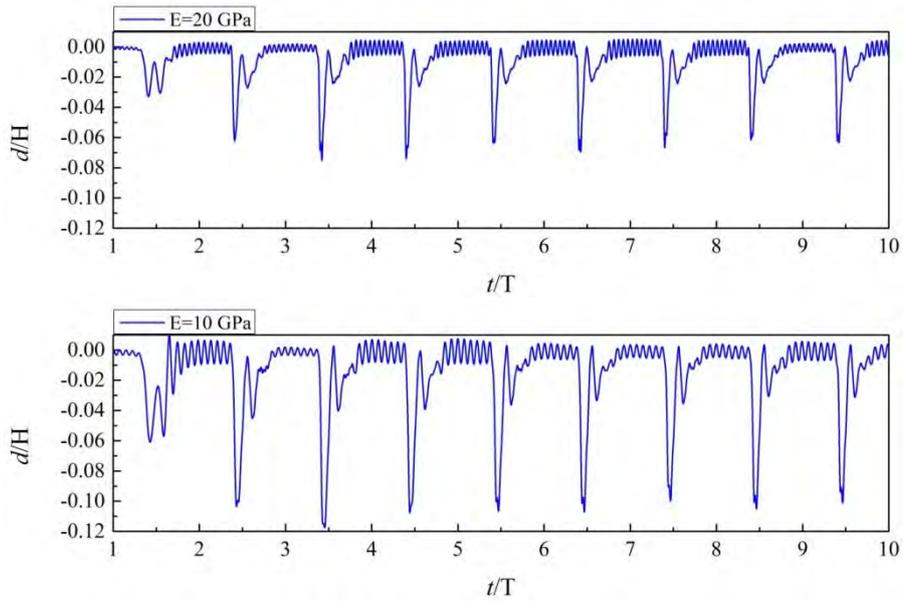


图9 横舱壁中点 S2 处振动响应无量纲时历曲线

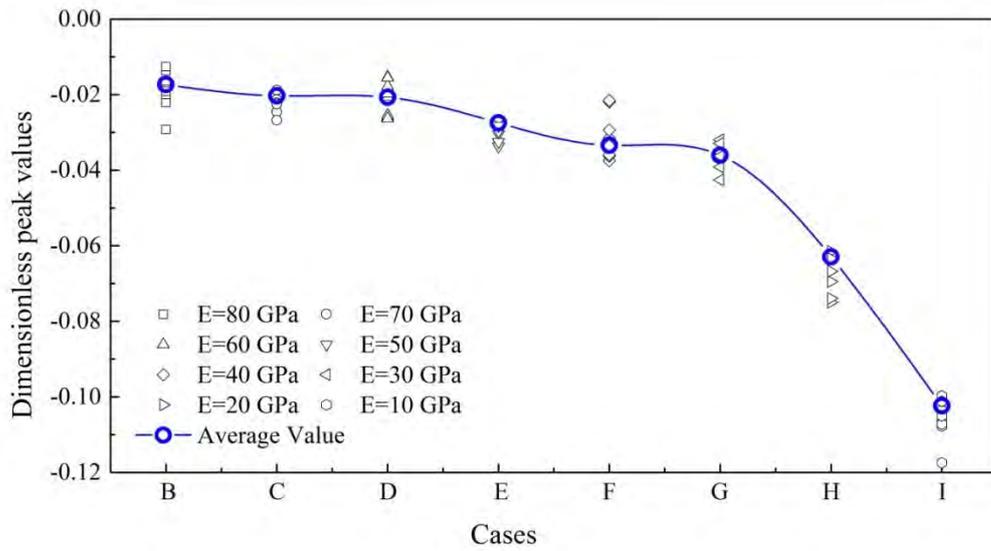


图10 横舱壁振动幅值随舱壁弹性模量变化趋势曲线

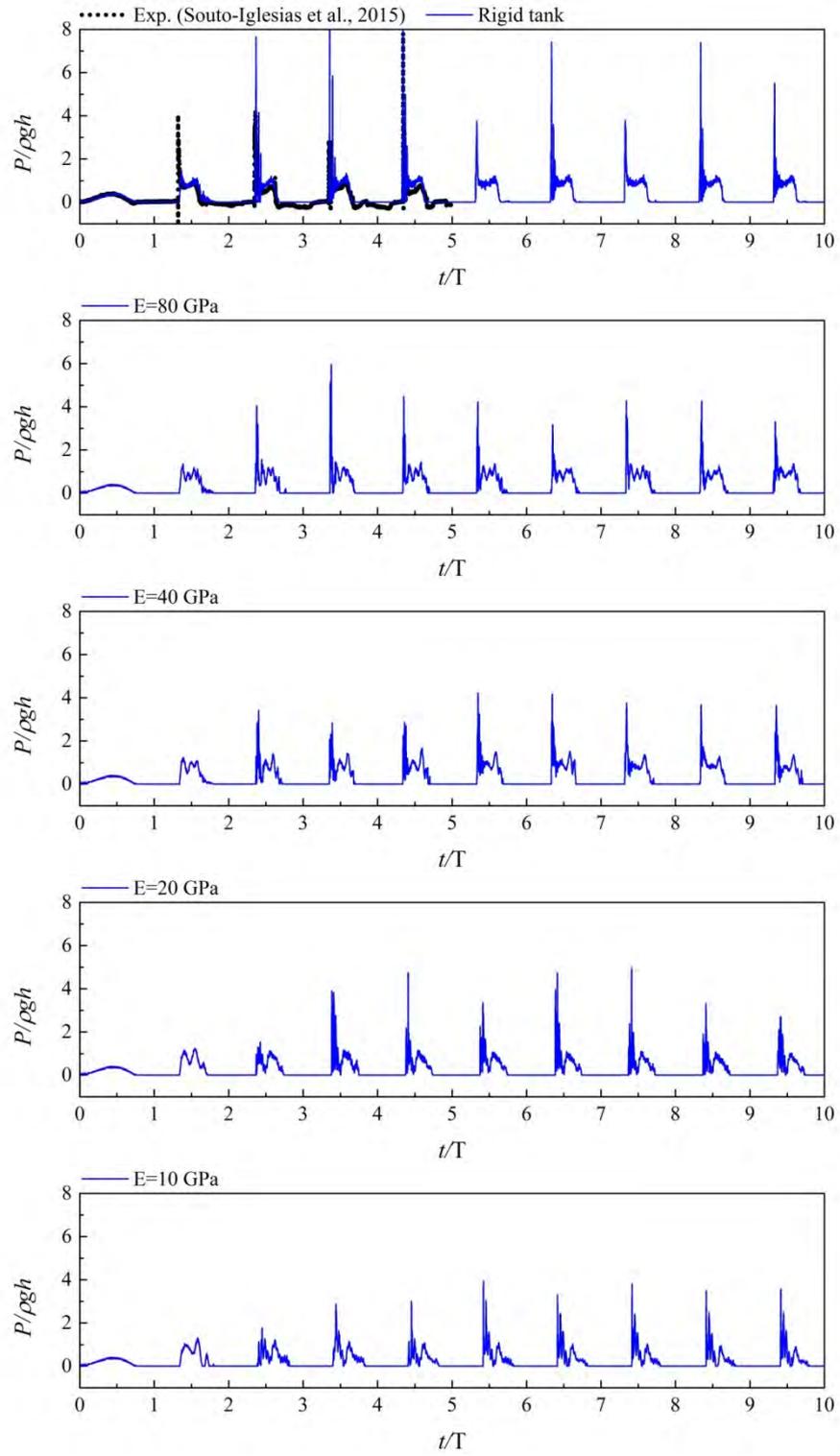


图11 不同弹性模量的舱壁所受无量纲碎击压力时历曲线

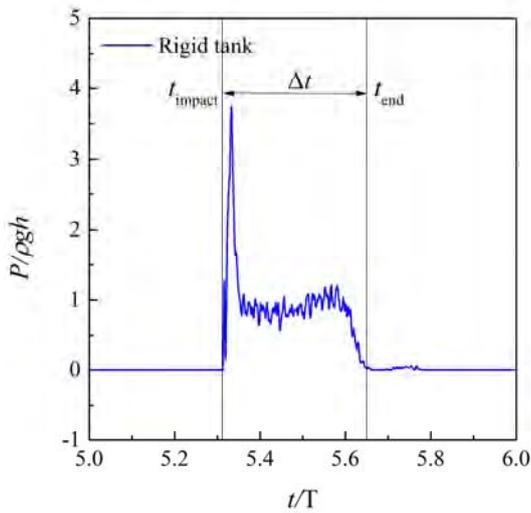


图12 舱壁所受砰击载荷信号

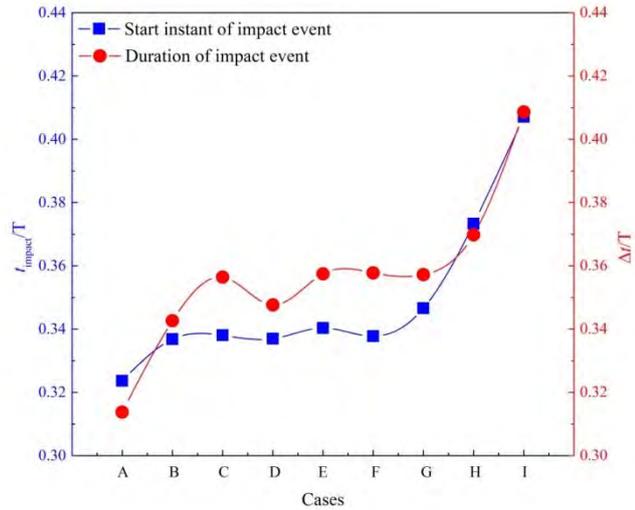


图13 舱壁砰击现象的发生时刻及持续时间随结构弹性模量变化曲线

通过本节研究结果可见，液体晃荡现象在弹性液舱内表现出与刚体液舱内不同的现象。舱壁弹性将影响晃荡砰击现象发生及持续的时间、砰击压力的峰值大小及其脉冲信号的形态。同时，晃荡砰击载荷引起了结构的非线性振动，其振动幅值与结构弹性模量相关，其主控振动频率与晃荡激励频率及结构固有频率相关。

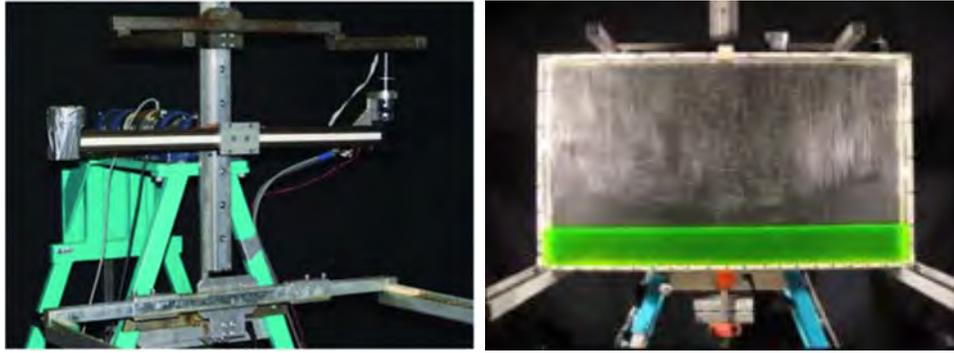
## 2.4 被动减摇液舱内的晃荡问题

随着人们对液舱晃荡问题越来越多的关注，近年来被动减摇液舱在船舶与海洋工程领域得到越来越多的应用。本文研究了一种典型的被动减摇液舱内的晃荡现象，该减摇机构被称为调谐液体阻尼器(TLD)，其主要组成部分是一个含某一深度液体的单自由度液箱。当液箱在外界激励下发生横摇运动时，内部液体会产生晃荡，对液箱内壁面产生周期性的拍击。通过调节内部液体的晃荡频率，可以将这种拍击转化为对液箱横摇运动的抑制作用，称为调谐液体阻尼器 TLD 的减摇阻尼效应。本文利用课题组自研软件 MLParticle-SJTU 中的流场分析模块，研究带自由面的 TLD 在外界激励下的运动响应，确定不同工况下 TLD 阻尼效应的大小，并与文献中已有的实验和 SPH 结果进行比较。

### 2.4.1 工况说明

本文的计算模型参数与 Souto-Iglesias 等<sup>[23][24]</sup>使用的实验装置保持一致。实验系统的主要工作部分为液舱和支撑平台，其中支撑平台主要由滑块和滑轨组成。滑块及其运动轨道如图 14 (a)所示。初始时刻，轨道水平安装并绕固定于支架上的轴承旋转。系统工作时，通过滑块沿轨道的周期性往复运动来驱动液舱的横摇运动。长、高、厚分别为 900 mm、508 mm、62 mm 的液舱相对轨道静止，只能绕支架上的固定轴做单自由度旋转运动。旋转轴心距液舱内底面垂直高度为 470 mm。液舱内填充 92 mm 深的水，液体密度为  $1 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ，运动粘度系数为  $1.01 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ 。

本文数值计算中采用的二维模型如图 15 所示，计算条件与实验相同。滑块运动作为液舱运动的激励条件，其幅值为  $A=100 \text{ mm}$ ，运动频率  $\omega = 0.9 \omega_0$ 。其中，系统固有频率  $\omega_0=3.263 \text{ rad/s}$ 。



(a) 滑块及滑轨系统 (b) 液舱

图14 实验模型

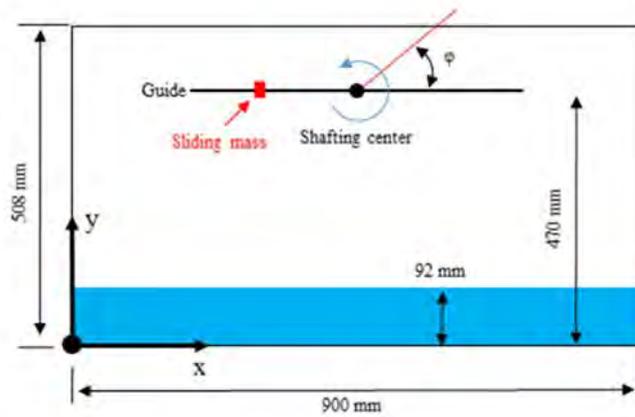
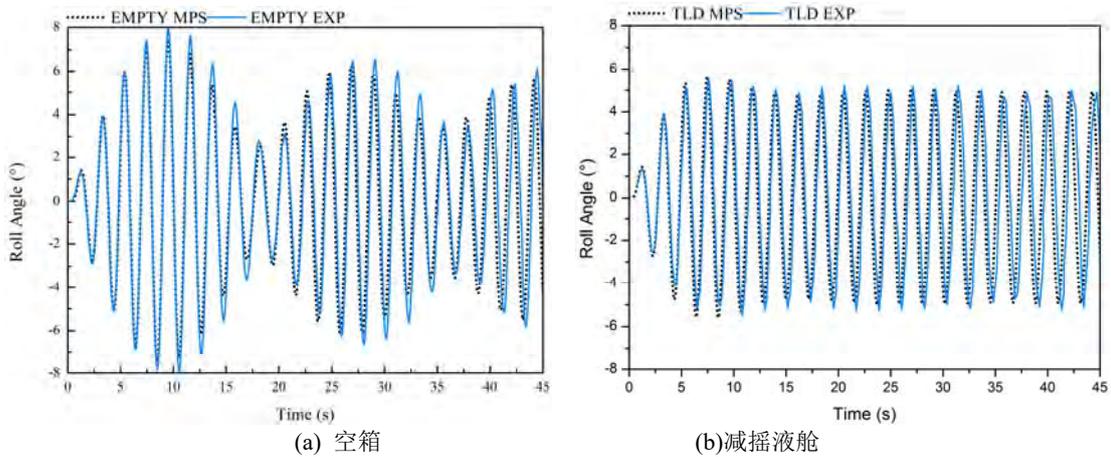


图15 计算模型

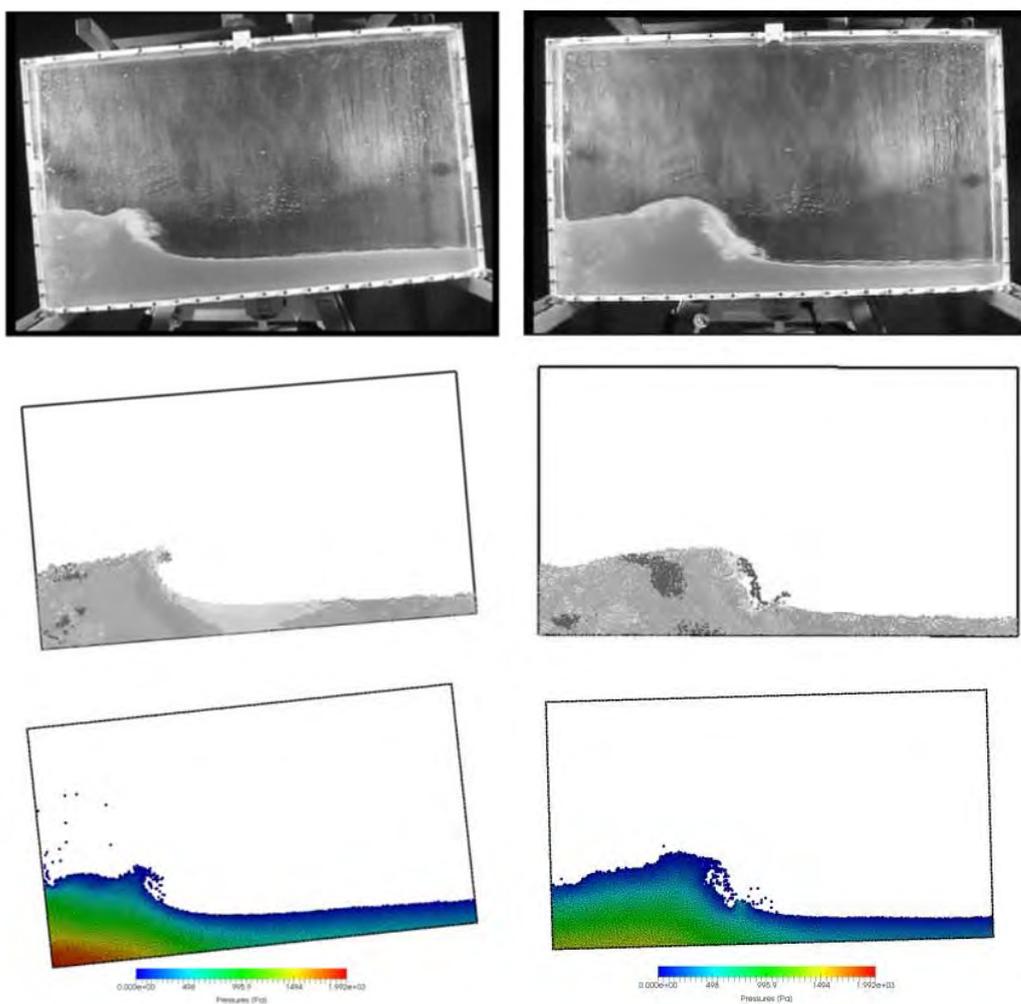
### 2.4.2 结果分析

本文分别考察了空箱时和载液时液舱的横摇运动响应，液舱横摇角时历曲线如图 16 所示。空箱时，矩形舱横摇角曲线呈现明显的差拍现象，这是由滑块激励频率与空箱系统固有频率不同所引起。在整个差拍现象周期内，矩形舱的运动能够产生幅值为  $8^\circ$  的较大转角，即系统运动的危险状态。此外，矩形舱的运动呈现不稳定现象，例如运动的最大横摇角幅值与最小横摇角之间的差异可达  $6^\circ$ 。而在充水后的减摇液舱中，差拍现象不再明显，横摇角的幅值被控制在  $5^\circ$  左右且随时间变化很小，运动更加稳定。



(a) 空箱 (b) 减摇液舱

图16 液舱横摇运动的时历曲线



(a)  $T/T_0=8.66$  时刻

(b)  $T/T_0=8.85$  时刻

图17 波形对比 (上: 实验; 中: SPH 方法; 下: MPS 方法)

将本文数值仿真得到的自由面瞬时波形分别与实验和 SPH 方法得到的结果进行对比 (如图 17), 可见本文 MPS 方法得到的自由面形状和实验更加吻合。此外, 由 MPS 方法得到的压力场分布比 SPH 结果更为光滑。

综合上述对比数据可见, 本文数值计算的结果和实验的结果基本一致, 说明了本课题组的 MPS 求解器在减摇液舱内的晃荡问题中是具有较好的可靠性。基于此, 本课题组将针对减摇液舱的液舱晃荡问题开展进一步详细的研究工作。

#### 4 结论

本文首先总结了人们在探究液舱晃荡这一剧烈流动现象时所关心的几个关键问题, 分析了无网格粒子法在此类问题研究中的优势, 介绍了本课题组基于改进的无网格 MPS 方法开发的求解器 MLParticle-SJTU 在液舱晃荡关键问题中的应用成果, 主要包括:

- 对三维标准算例进行数值模拟, 得到与试验一致的结果, 说明了该求解器在研究液舱晃荡问题时具有较好的可靠性。
- 通过在三维液舱内布置 4 种不同型式的隔板, 对比分析了隔板型式及其布置位置对晃荡波运动和砰击载荷峰值具有不同的抑制效果。指出隔板减晃作用的机理一方面在于隔板附近涡结构的

形成导致流体能量的耗散，另一方面隔板的存在改变了整个系统的共振频率，使得激励频率偏离共振频率，从而到达抑制晃荡现象剧烈程度的效果。

- 研究了舱壁弹性对液舱晃荡现象的影响，得到了与刚性液舱内晃荡现象不同的结果。例如，随着舱壁弹性的降低，液舱内砰击现象发生的时间有所延迟，砰击现象持续时间增加。横舱壁所受砰击压力的峰值减弱，压力脉冲信号具有更明显的振荡性。舱壁结构也因砰击压力而产生了非线性的振动响应，其振动幅值随结构弹性模量的降低而增加，其振动型式主要表现为激励频率的振动和舱壁结构固有频率的振动。
- 数值研究了减摇液舱内的晃荡现象，得到了与试验相吻合的液舱运动规律及自由面演化状态。由上述可知，无网格粒子法求解器 MLParticle-SJTU 能够很好地模拟自由面剧烈流动问题，应用于液舱晃荡这一复杂现象中关键问题的研究。

## 致谢

本文工作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)资助。在此一并表示衷心感谢。

## 参考文献

- [1] Delorme L., Colagrossi A., Souto-Iglesias A., Zamora-Rodriguez R., and Botia-Vera E. A set of canonical problems in sloshing, Part I: Pressure field in forced roll - comparison between experimental results and SPH [J]. *Ocean Eng.*, 2009, 36: 168–178.
- [2] Kim Y., Kim S. Y., and Yoo W. J. Statistical evaluation of local impact pressures in sloshing [C]. *Proceedings of the Twentieth International Offshore and Polar Engineering Conference*, Beijing, China, 2010, 223–230.
- [3] Bulian G., Botiavera E., and Souto-Iglesias A. Experimental sloshing pressure impacts in ensemble domain: Transient and stationary statistical characteristics [J]. *Physics of Fluids*, 2014, 26(3): 132-143.
- [4] Eswaran M., Saha U. K., and Maity D. Effect of baffles on a partially filled cubic tank: Numerical simulation and experimental validation [J]. *Computers & Structures*, 2009, 87(3): 198-205.
- [5] Xue M. A., and Lin P. Numerical study of ring baffle effects on reducing violent liquid sloshing [J]. *Computers & Fluids*, 2011, 52: 116-129.
- [6] Yin C. H., Wu J. W., and Wan D. C. Numerical study on liquid sloshing in three-dimensional rectangular tanks with different filling rates and fixed baffle [C]. *Proceedings of the 24th International Offshore and Polar Engineering Conference*, Hawaii, United States, 2014, 381-391.
- [7] Lee C. S., Cho J. R., Kim W. S., Noh B. J., Kim M. H., and Lee J. M. Evaluation of sloshing resistance performance for LNG carrier insulation system based on fluid-structure interaction analysis [J]. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 2015, 5(1): 1-20.
- [8] Zhang, Y. L., Chen, X., and Wan D. C. An MPS-FEM Coupled Method for the Comparative Study of Liquid Sloshing Flows Interacting With Rigid and Elastic Baffles [J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2016, 37(12): 1359-1377.
- [9] Zhuang Y., and Wan D. C. Numerical Study on Coupling Effects of FPSO Ship Motion and LNG Tank Sloshing in Low-Filling Conditions [J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2016, 37(12): 1378-1393.
- [10] Zhang Y. X., and Wan D. C. Apply MPS method to simulate liquid sloshing in LNG tank [C]. *Proceedings of the 22nd International Offshore and Polar Engineering Conference*, Rhodes, Greece, 2012, 381-391.
- [11] Zhang Y. X., Yang Y. Q., Tang Z. Y., and Wan D. C. Parallel MPS method for 3D liquid sloshing [C].

Proceedings of the 24th International Offshore and Polar Engineering Conference, Busan, Korea, 2014, 257-264.

- [12] Yang Y. Q., Zhang Y. X., Tang Z. Y., and Wan D. C. Numerical simulations of 3D liquid sloshing flows by MPS method [C]. The Eleventh ISOPE Pacific/Asia Offshore Mechanics Symposium, Shanghai, China, 2014, 192-197.
- [13] Yang Y. Q., Tang Z. Y., Zhang Y. L., and Wan D. C. Investigation of excitation period effects on 2D liquid sloshing by MPS method [C]. The 25th International Offshore and Polar Engineering Conference, Kona, Hawaii, USA, 2015, 891-897.
- [14] Yang Y. Q., Tang Z. Y., Li H. Z., and Wan D. C. Numerical simulation of 3D sloshing flows in a rectangular tank by MPS method [C]. The 9th International Workshop on Ship and Marine Hydrodynamics, Glasgow, UK, 2015.
- [15] Tang Z. Y., Zhang Y. L., and Wan D. C. Numerical study of sloshing in baffled tanks by MPS [C]. Proceedings of the 25th International Ocean and Polar Engineering Conference, Hawaii, USA, 2015, 937-944.
- [16] Zhang Y. L., Tang Z. Y., and Wan D. C. Numerical Investigations of Waves Interacting with Free Rolling Body by Modified MPS Method [J]. International Journal of Computational Methods, 2016, 13(4): 1641013-1- 1641013-14.
- [17] Zhang Y. L., Tang Z. Y., and Wan D. C. Simulation of Water Entry of a Free-falling Wedge by Improved MPS Method [C]. Proceedings of the Twenty-sixth International Ocean and Polar Engineering Conference Rhodes, Greece, June 26-July 1, 2016, 220-227.
- [18] 李海州, 唐振远, 万德成. 三维自由面流动模拟中 GPU 并行计算技术[C]. 海洋工程, 2016, 34(5): 20-29.
- [19] Tang Z. Y., Zhang Y. L., and Wan D. C. Numerical simulation of 3D free surface flows by overlapping MPS [J]. Journal of Hydrodynamics, 2016, 28(2): 306-312.
- [20] Tang Z. Y., Zhang Y. L., and Wan D. C. Multi-Resolution MPS Method for Free Surface Flows [J]. International Journal of Computational Methods, 2016, 13(4): 1641018-1-1641018-17.
- [21] Souto-Iglesias A., Pérez-Rojas L., and Zamora-Rodríguez R. Simulation of anti-roll tanks and sloshing type problems with smoothed particle hydrodynamics [J]. Ocean Engineering, 2004, 31(8-9): 1169-1192.
- [22] Souto-Iglesias A., Delorme L., Pérez-Rojas L., and Abril-Pérez S. Liquid moment amplitude assessment in sloshing type problems with smooth particle hydrodynamics [J]. Ocean Engineering, 2006, 33(11-12): 1462-1484.
- [23] Bouscasse B, Colagrossi A, Souto-Iglesias A, and Cercos-Pita J. L. Mechanical energy dissipation induced by sloshing and wave breaking in a fully coupled angular motion system. I. Experimental investigation [J]. Physics of Fluids, 2014, 26(3):033103-1-033103-21.
- [24] Bouscasse B, Colagrossi A, Souto-Iglesias A, and Cercos-Pita J. L. Mechanical energy dissipation induced by sloshing and wave breaking in a fully coupled angular motion system. II. Experimental investigation [J]. Physics of Fluids, 2014, 26(3): 033103-1-033103-22.