

# 罐车防晃结构 SPH 模拟研究\*

黄志涛, 杨瑜, 邵家儒, 张月月

(重庆理工大学 机械工程学院, 重庆 400054)

**摘要:** 基于光滑粒子动力学 (SPH) 方法对罐车的行驶稳定性、晃荡抑制措施进行了研究. 首先模拟了矩形容器内的液体晃荡问题, 仿真结果与试验结果吻合良好, 表明 SPH 模型可以准确预测自由液面及容器壁面上的压力变化. 之后, 建立了二维椭圆形截面罐车模型, 分析了装载 93# 汽油的罐车在水平正弦激励或横摇激励作用下, 罐车壁面冲击压力和液体质心轨迹的变化情况. 结果表明, 无防晃结构时, 车内液体晃动剧烈, 结构的防晃效果会受外界激励形式的影响. 防晃结构的法线方向与来流方向的夹角越小, 则晃荡抑制效果越明显, 重心越稳定.

**关键词:** 罐车; 液体晃荡; 光滑粒子动力学; 稳定性; 外界激励

**中图分类号:** TH113.2

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.21656/1000-0887.400234

## 引 言

罐式汽车具有安全、高效、易于装卸等优点<sup>[1]</sup>, 经常用来运输易燃、易爆、有毒液体, 如石油、天然气、危险化学品等. 由于液体具有较强的流动性, 在运输过程中会发生晃荡并冲击罐车壁面, 影响罐车行驶的稳定性和安全性, 严重时会导致侧翻甚至爆炸. 因此, 分析罐车内液体晃荡现象, 研究罐车防晃结构, 保证罐车行驶的安全性和稳定性对于实现安全输运具有重要意义<sup>[2]</sup>.

在液体晃荡问题研究中, 数值模拟技术发挥了重要的作用, 目前常用网格法或粒子法进行仿真. 网格法中主要应用基于 Euler 法的有限差分法 (FDM)<sup>[3]</sup>、随机的 Euler-Lagrange 法 (ALE)<sup>[4]</sup> 等, 粒子类方法中主要应用 SPH 法<sup>[5]</sup>、移动粒子半隐式 (MPS) 法<sup>[6]</sup> 等.

龚国毅<sup>[7]</sup> 采用了 VOF 法模拟了棱形液舱的液体晃荡现象, 但当液面出现破碎, 形成液滴时, 会影响质量的守恒. 陈剑<sup>[8]</sup> 通过 FLUENT 软件建立了液体晃动的 CFD 模型, 研究了 Reuleaux 三角形截面的罐车在道路激励下的液体晃动现象, 但对椭圆形截面的罐车做液体晃荡研究. 目前有限差分法在处理自由液面强非线性变化时, 比如液面的破碎、重组等复杂液面变化时, 容易引起质量不守恒, 计算精度有待提高. 张凯凯<sup>[9]</sup> 采用 SPH 法和实验法对比模拟了矩形容器下, 不同载液深度对液体晃荡的影响, 发现 SPH 法能准确模拟液面变形.

在无网格的 SPH 法中, 系统的状态用一系列包含独自材料性质的粒子来描述, 而且各粒

\* 收稿日期: 2019-08-03; 修订日期: 2020-06-15

基金项目: 国家自然科学基金 (11602045); 重庆市技术创新与应用发展重大主题专项 (cstc2019jcsx-zdztzxX0028; cstc2019jcsx-zdztzxX0020)

作者简介: 黄志涛 (1993—), 男, 硕士生 (E-mail: 1304779121@qq.com);

邵家儒 (1986—), 男, 副教授, 博士 (通讯作者. E-mail: shaojiaru@cqut.edu.cn).

引用格式: 黄志涛, 杨瑜, 邵家儒, 张月月. 罐车防晃结构 SPH 模拟研究 [J]. 应用数学和力学, 2020, 41(7): 760-770.

子按照守恒控制方程的规律运动,相比于有限差分法,这种方法具有自适应性,在模拟液体强非线性问题时具有极大的优势<sup>[10]</sup>,Shao 等<sup>[11]</sup>应用改进的 SPH 方法模拟了二维矩形容器内的液体晃动现象,并采用加隔板的方式,有效抑制了液体晃动液面高度变化.刘谋斌等<sup>[12]</sup>应用改进的 SPH 方法模拟棱形液舱在横摇激励频率工况下的液体晃动行为,当在棱形液舱中间底部处增加隔板后,可以大幅减弱液体对舱壁的冲击作用,并有效地抑制舱内液体晃动.不同外界激励对罐车的晃动影响也不同,Toumi 等<sup>[13]</sup>建立数值模型研究液罐车做稳态转弯或换道时发现,产生的横摇激励严重影响了罐车的转向稳定性.庄园等<sup>[14]</sup>应用数值模拟方法对 FPSO 船舶运动与 LNG 液舱晃动耦合问题进行了研究,并分析了液舱内流体的剧烈晃动现象和舱壁的脉冲压力变化.张友林等<sup>[15]</sup>基于 MPS-FEM 耦合方法开发了流固耦合求解器,用溃坝泄洪验证了其正确性,并采用这种方法研究了刚性挡板和弹性挡板对液舱晃动的抑制效果.

已有关于液体晃动的研究,大多只着眼于自由液面的变化和壁面冲击力,对现在道路上常见的椭圆形截面的罐车及影响罐车侧翻的关键因素如质心的变化等研究较少.本文应用 SPH 方法建立了椭圆形截面的油罐车模型,分析了不同外界激励下罐车内的液面变化,监测了壁面冲击压力和质心变化,研究了几种结构的防晃效果,从而为罐车设计提供了指导.

## 1 SPH 方法理论

### 1.1 控制方程

Lagrange 描述下的流体控制方程是由一系列的偏微分方程组成,SPH 形式的控制方程为

$$\frac{d\rho_i}{dt} = \sum_j m_j \mathbf{v}_{ij} \cdot \nabla_i W_{ij}, \quad (1)$$

$$\nabla_i W_{ij} = \frac{\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j}{r_{ij}} \frac{\partial W_{ij}}{\partial r_{ij}}, \quad (2)$$

$$\frac{d\mathbf{v}_i}{dt} = - \sum_j m_j \left( \frac{p_i}{\rho_i^2} + \frac{p_j}{\rho_j^2} \right) \nabla_i W_{ij} + \sum_j \frac{4m_j(\mu_i + \mu_j)\mathbf{x}_{ij} \cdot \nabla_i W_{ij}}{(\rho_i + \rho_j)^2(x_{ij}^2 + 0.01h^2)} \mathbf{v}_{ij} + \mathbf{g}, \quad (3)$$

其中, $\rho$  为流体密度, $t$  为时间, $m$  为粒子质量, $\mathbf{v}$  为粒子速度矢量, $\mathbf{v}_{ij} = \mathbf{v}_i - \mathbf{v}_j$ , $W$  为光滑函数,梯度  $\nabla W$  与粒子  $i$  相关, $p$  为压强, $\mu$  为动力黏性系数, $h$  为光滑长度, $\mathbf{x}$  为粒子位置, $\mathbf{g}$  为重力加速度, $r_{ij}$  为粒子  $r_i$  与粒子  $r_j$  之间的距离.

传统的 SPH 方法在处理粒子支持域被截断的问题时,不能准确地重构二次线性函数,导致计算精度和稳定性降低.本文采用密度修正和核梯度修正改进的 SPH 方法<sup>[11]</sup>,通过恢复核函数在粒子分布不均匀区域的归一化性质对密度进行修正,使密度趋近于初始密度,核梯度修正可表示如下:

$$\nabla_i^{\text{new}} W_{ij} = \mathbf{L}_i \nabla_i W_{ij}, \quad (4)$$

$$\mathbf{L}_i = \left[ \sum_j \begin{pmatrix} \mathbf{x}_{ji} \frac{\partial W_{ij}}{\partial \mathbf{x}_i} & \mathbf{y}_{ji} \frac{\partial W_{ij}}{\partial \mathbf{x}_i} \\ \mathbf{x}_{ji} \frac{\partial W_{ij}}{\partial \mathbf{y}_i} & \mathbf{y}_{ji} \frac{\partial W_{ij}}{\partial \mathbf{y}_i} \end{pmatrix} V_j \right]^{-1}, \quad (5)$$

其中  $\mathbf{x}_{ji} = \mathbf{x}_j - \mathbf{x}_i$ ,  $\mathbf{y}_{ji} = \mathbf{y}_j - \mathbf{y}_i$ ,  $V_j = \frac{m_j}{\rho_j}$ .

改进的 SPH 法具有二阶精度,易于实施且不改变传统 SPH 程序的计算框架.

## 1.2 边界理论

在 SPH 法中,由于固壁边界上或邻近边界处粒子被截断,支持域不连续,边界只受边界内部粒子作用,致使计算结果不可靠.本文应用改进的耦合动力学边界处理方法<sup>[16]</sup>,用两种类型的虚粒子来处理边界问题,第一类虚粒子设置在固定边界上,对内部粒子施加边界排斥力,防止内部粒子穿透;第二类虚粒子分布在边界邻域内,该粒子初始时刻就设置好,这些粒子与相对应的实粒子具有相同的密度和压力,但速度方向相反.这两种粒子有效提高了边界区域的计算精度,且防止了粒子非物理穿透边界.

## 1.3 质心变化计算公式

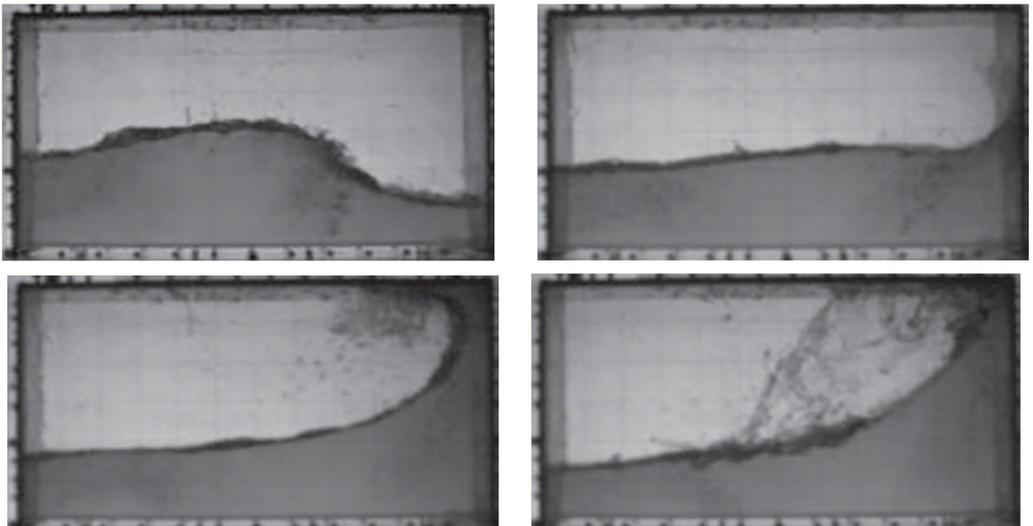
罐车在受到强迫运动时,液体晃动会引起质心发生变化,产生倾覆力矩使罐车发生侧翻,所以研究液体的质心变化可以衡量罐车的稳定性.液体质心相对于罐体的质心  $x$  轴和  $y$  轴坐标计算公式可以表示如下:

$$\begin{cases} x(t) = \frac{\sum_{i=1}^{n_{pr}} (x_i - x_0) A_i}{\sum_{i=1}^{n_{pr}} A_i}, \\ y(t) = \frac{\sum_{i=1}^{n_{pr}} (y_i - y_0) A_i}{\sum_{i=1}^{n_{pr}} A_i}, \end{cases} \quad (6)$$

其中,  $(x_i, y_i)$  为第  $i$  个粒子的坐标位置,  $(x_0, y_0)$  为罐体中轴线上最低位置的坐标位置,  $x(t)$ ,  $y(t)$  为  $t$  时刻液体质心的横向和纵向坐标,  $A_i$  为液体单元面积,  $n_{pr}$  为粒子个数.

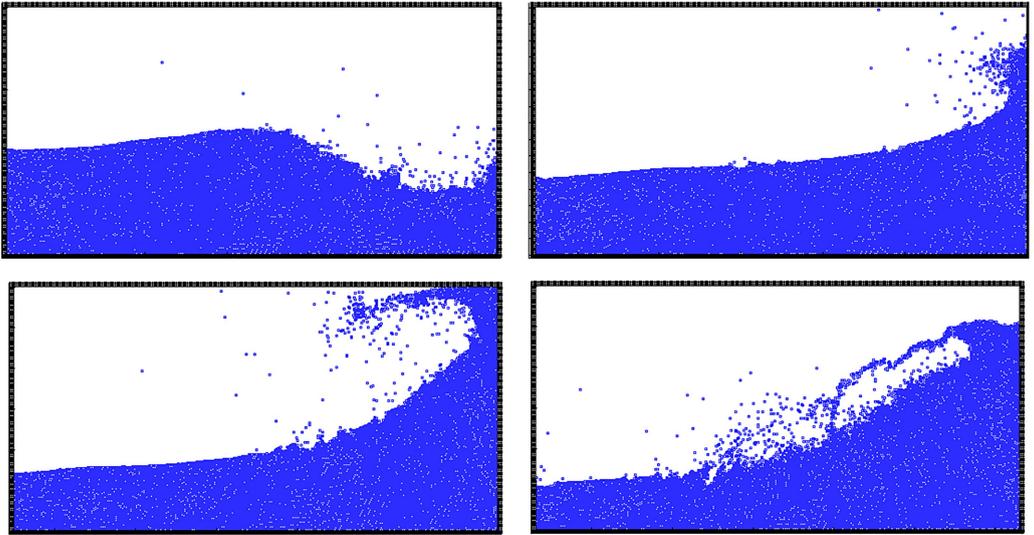
## 2 验证模型

本算例通过低载液率水平横荡共振晃动液面模拟验证 SPH 方法的有效性.



(a) 0.1T, 0.2T, 0.3T, 0.4T 时刻的实验结果<sup>[17]</sup>

(a) Experimental results at 0.1T, 0.2T, 0.3T, 0.4T<sup>[17]</sup>

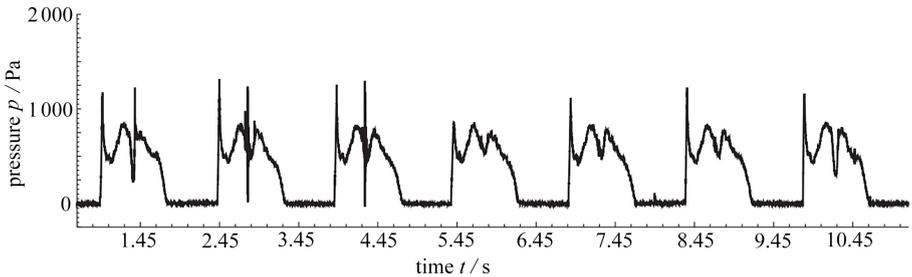


(b) 0.1T, 0.2T, 0.3T, 0.4T时刻的 SPH 结果

(b) SPH results at 0.1T, 0.2T, 0.3T, 0.4T

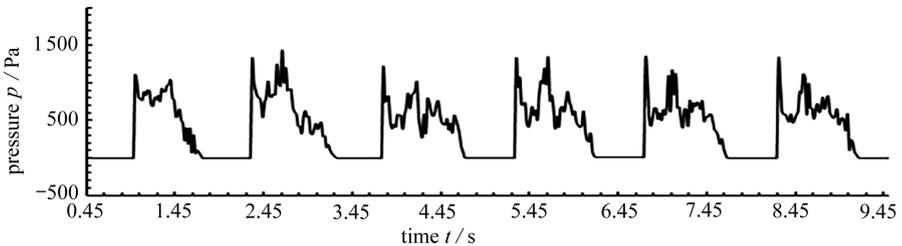
图 1 实验法<sup>[17]</sup>与数值模拟结果对比

Fig. 1 Comparison between SPH and experimental results



(a) 实验法<sup>[17]</sup>

(a) The experimental method<sup>[17]</sup>



(b) SPH 方法

(b) The SPH method

图 2 实验法<sup>[17]</sup>和 SPH 法压力变化对比

Fig. 2 Comparison of pressure changes between the experimental method and the SPH method

液舱长  $L = 0.6 \text{ m}$ , 高度  $H = 0.3 \text{ m}$ , 载液深度  $h = 0.12 \text{ m}$ , 液舱做  $\eta = \eta_A \sin((2\pi/T)t)$  的简谐横荡运动, 晃荡幅值  $\eta_A = 0.05 \text{ m}$ . 图 1 显示了外界激励周期为  $1.3 \text{ s}$  时, 同一周期中 4 个典型时刻  $0.1T \sim 0.4T$  的自由液面变化. 由图可知, SPH 方法可以模拟自由液面的翻卷、破碎、重组

等大变形运动,SPH 结果(图 1(b))与 Kishev 等<sup>[17]</sup>的实验结果(图 1(a))吻合良好.图 2 给出了外界激励周期为 1.5 s,在左侧壁水深 0.1 m 处的压力曲线变化.对比 0~10 s 内的压力变化,发现 SPH 计算结果与 Kishev 等<sup>[17]</sup>的实验结果吻合良好,准确反映了不同情况下的压力变化趋势.结果表明,SPH 模型可以有效地模拟液体晃荡波形,并准确预测固壁上的压力变化.

### 3 计算模型

#### 3.1 模型参数

油罐车的外形尺寸为长轴  $a = 0.9$  m,短轴  $b = 0.6$  m,载液率 50%,深 0.3 m.压力监测点位于  $h = 0.2$  m 的右处壁面上(如图 3).油罐车装载 93#汽油,密度为  $750 \text{ kg/m}^3$ ,运动黏度为  $0.63 \text{ mm}^2/\text{s}$ .无隔板、安装两块  $0.18 \text{ m} \times 0.012 \text{ m}$  的水平隔板、安装一块  $0.25 \text{ m} \times 0.012 \text{ m}$  的竖直隔板,3 种模型汽油粒子个数分别为 24 090,24 095,24 333,初始模型粒子间距 3 mm,计算时间步长  $1.0 \times 10^{-4} \text{ s}$ .

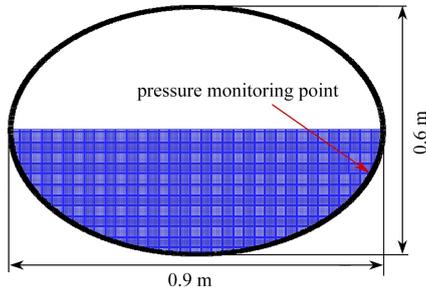


图 3 无隔板罐车模型示意图

Fig. 3 The model diagram for a tank truck without baffles

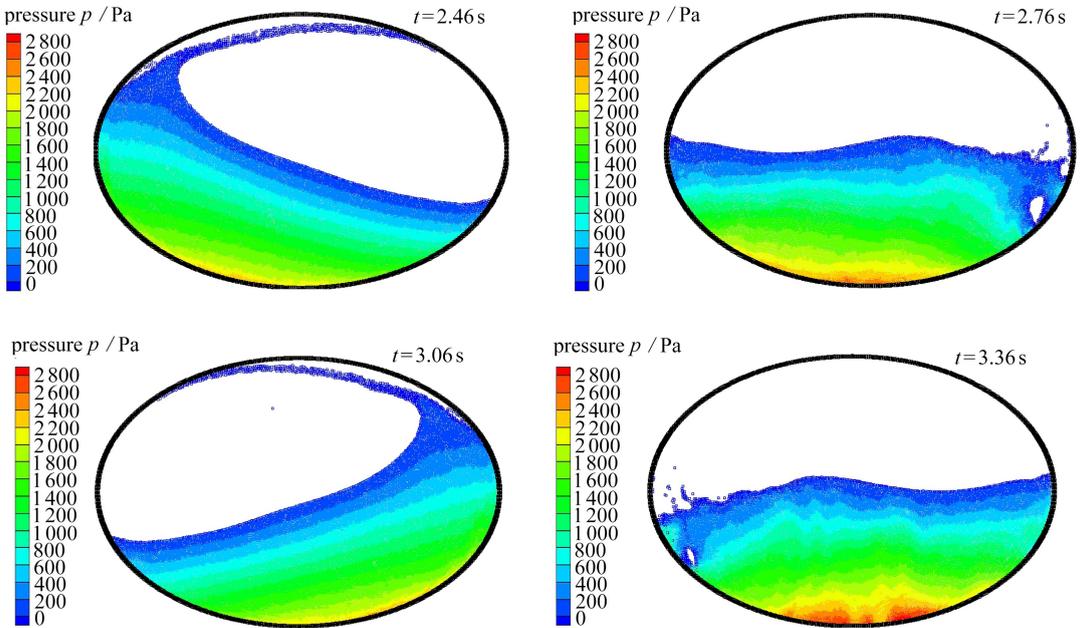


图 4 没有隔板时 2.46,2.76,3.06,3.36 s 时刻的压力云图变化

Fig. 4 Pressure nephograms at 2.46, 2.76, 3.06, 3.36 s without baffles

注 为了解释图中的颜色,读者可以参考本文的电子网页版本,后同.

### 3.2 不同形式的隔板对水平正弦激励的影响

本例中外界激励为  $x = A\sin(2\pi ft)$ ,  $A = 0.05 \text{ m}$ ,  $f = 0.81 \text{ Hz}$ . 如图4, 当罐车受横向正弦激励时, 罐内液体也会发生周期性的左右晃动. 液体沿着壁面上升明显, 达到一定高度由于重力作用回落至液面, 液体出现了较大的破碎、翻卷、重组变化, 但罐内液体的压力云图层次分明.

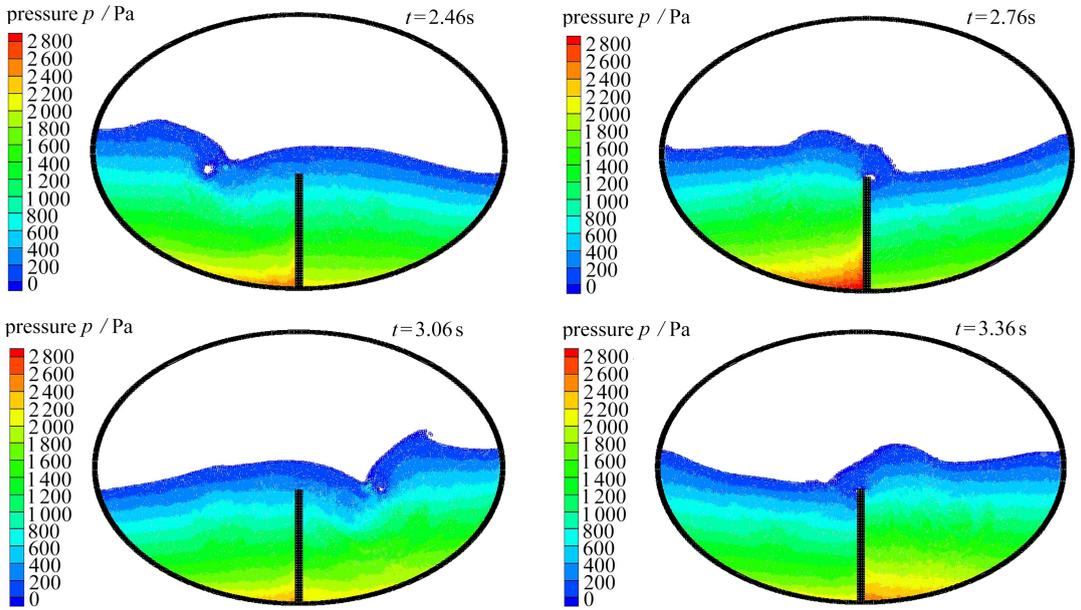


图5 安装竖直隔板后 2.46, 2.76, 3.06, 3.36 s 时刻的压力云图变化

Fig. 5 Pressure nephograms at 2.46, 2.76, 3.06, 3.36 s with a vertical baffle

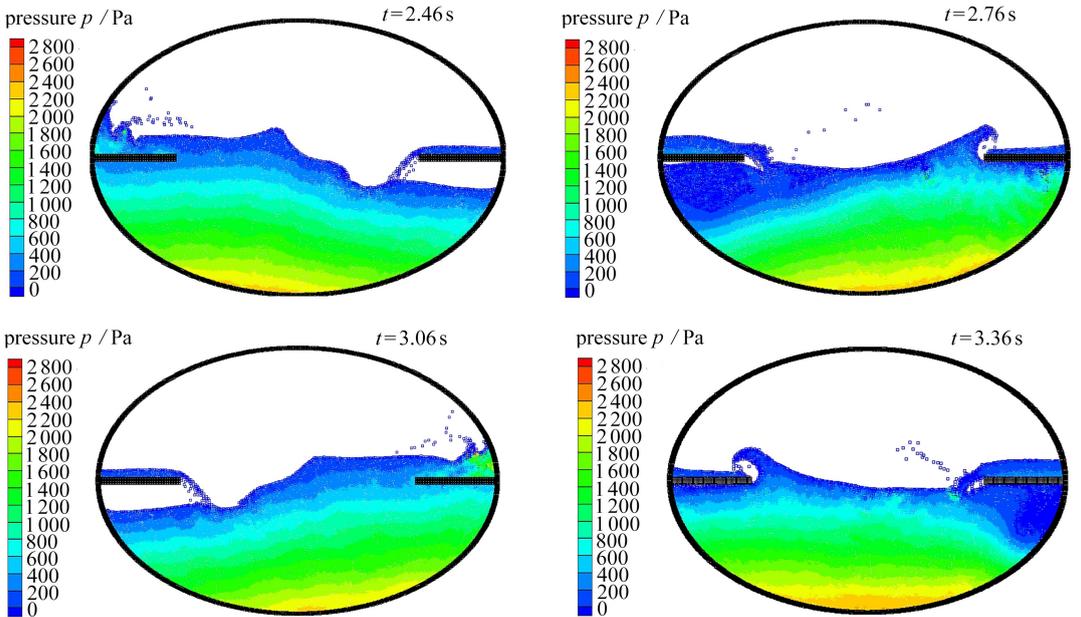


图6 安装水平隔板后 2.46, 2.76, 3.06, 3.36 s 时刻的压力云图变化

Fig. 6 Pressure nephograms at 2.46, 2.76, 3.06, 3.36 s with 2 horizontal baffles

如图 5,在罐车底部安装竖直隔板后,液体被分隔开,减弱了液体对壁面的冲击力,几乎不再沿着壁面上升,而在竖直隔板左右周期性的形成空腔,压力出现一定振荡.当罐车向右运动时,液体由于隔板的阻碍作用,隔板左侧的液体压力会比隔板右侧压力高.

如图 6,在罐车上安装水平隔板后,隔板阻碍了液面沿壁面上升,液体周期性的冲击左右两块隔板,在隔板下方周期性的形成空腔,隔板上方的液体由于重力作用回落至底部液体中,隔板下方的液体压力云图呈均匀变化.

罐车受到横向正弦激励时,监测点的压力变化曲线如图 7 所示.由图可知,压力呈周期性变化,当没有隔板时,曲线呈“h”形,冲击压力峰值会达到 3 000 Pa.若增加水平隔板,壁面压力峰值会达到 2 500 Pa.其中,由于水平挡板阻挡液面上升,造成压力峰值两侧监测点压力波动较大.若增加竖直隔板,则压力变化更平缓,压力峰值也在 1 600 Pa 以内,说明竖直隔板更能有效降低壁面冲击压力.

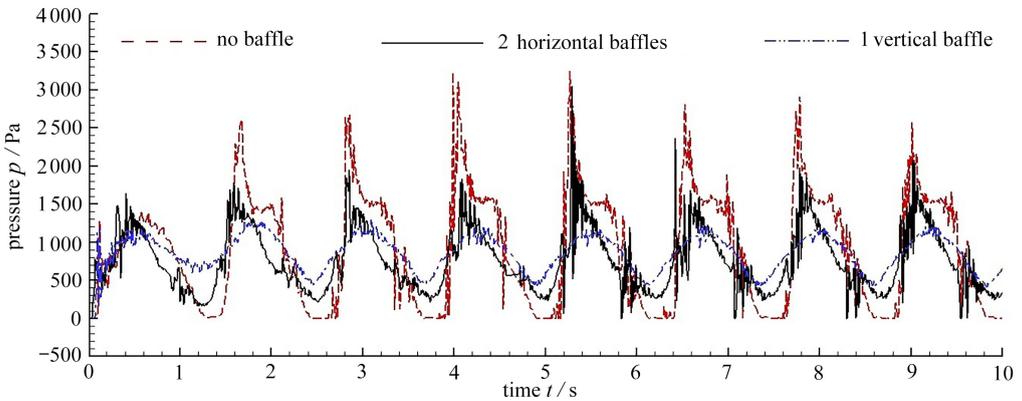


图 7 壁面冲击压力变化

Fig. 7 Variations of the wall impact pressure

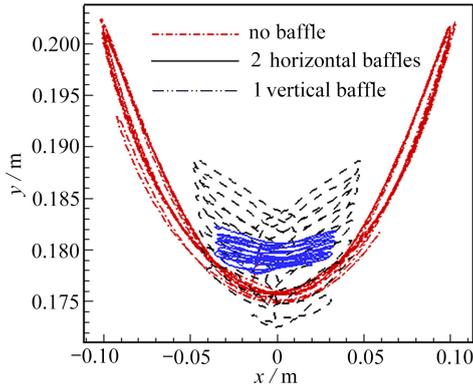


图 8 液体质心轨迹变化

Fig. 8 Barycenter trajectories of the liquid body

液体质心轨迹变化如图 8 所示,当汽车受到横向正弦激励后,质心轨迹呈左右对称分布,没有隔板时液体质心轨迹变化范围大,质心较高,不稳定.当增加隔板后,液体质心轨迹变化范围明显缩小,相比于增加横向隔板,增加竖直隔板更有利于降低质心,保证罐车行驶的稳定性的.

### 3.3 不同形式的隔板对横摇激励的影响

本例中外界激励为横摇运动,转轴位于罐体最低处,激励运动方程为  $\theta = \theta_0 \sin(\omega t)$ ,  $\theta_0$  为最大转角,取  $\theta_0 = 0.1 \text{ rad}$ ;  $\omega$  为角速度,  $\omega = 4.1418 \text{ rad/s}$ .对无隔板、一块竖直隔板和两块横向隔板 3 种模型进行数值模拟,压力云图变化与水平正弦激励相似.对比 3 种工况下监测点的壁面冲击压力变化曲线(如图 9),发现冲击压力呈周期性变化,当没有隔板时,压力变化曲线呈双峰形,第一个峰值是由于罐车横摇运动,液体冲击壁面造成的,第二个峰值是由于液体到达此处,液面不断升高造成的,压力峰值会达到 2 000 Pa.若增加水平隔板,由于左右挡板作用,压力在出现峰值两侧波动会比较大,压力峰值和增加竖直隔板的峰值差不多,为 1 600 Pa,但竖直隔板压力曲线更平稳.

质心轨迹变化如图 10 所示,由图可知,没有隔板时,质心轨迹变化较乱,不稳定;当增加竖直或横向隔板后,可明显降低轨迹  $x$  轴方向的变化,而增加竖直隔板更能降低液体质心高度,更有利于罐车的稳定行驶.

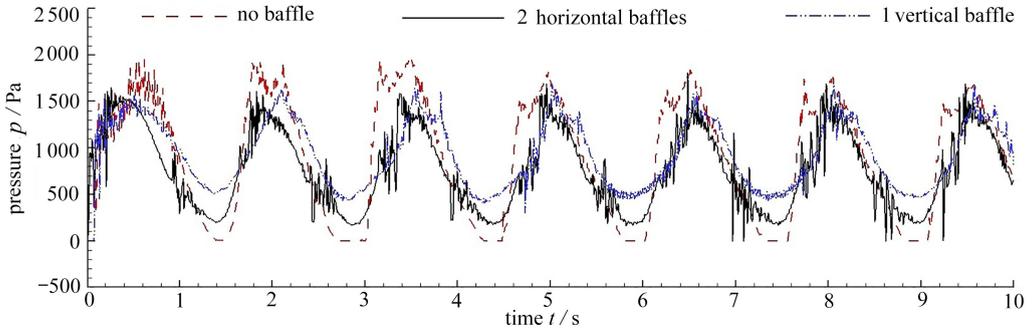


图 9 壁面冲击压力变化

Fig. 9 Variations of the wall impact pressure

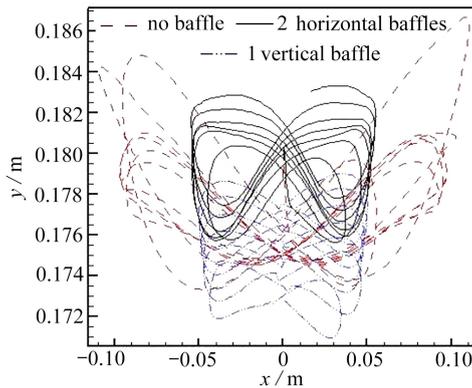


图 10 液体质心轨迹变化

Fig. 10 Barycenter trajectories of the liquid body

### 3.4 不同高度隔板对横摇激励的影响

本算例模拟了载液率为 50%,液深 0.3 m,隔板高为 0.15, 0.20, 0.25, 0.30 m 时,横摇激励对液体晃荡的影响.监测点的压力变化曲线如图 11 所示,由图可知,随着隔板高度的增加,峰值压力越小,晃荡趋于稳定时,0.30 m 的隔板抑制效果最好,压力峰值在 1 000 Pa 左右.液体质

心轨迹变化如图 12 所示,由图可知,隔板高度越高,液体质心轨迹越低,当隔板为 0.30 m 时,抑制效果最好,液体轨迹质心高度为 0.175 m 左右.综上可知,随着隔板高度的增加,抑制效果越明显,更有利于罐车的稳定行驶.

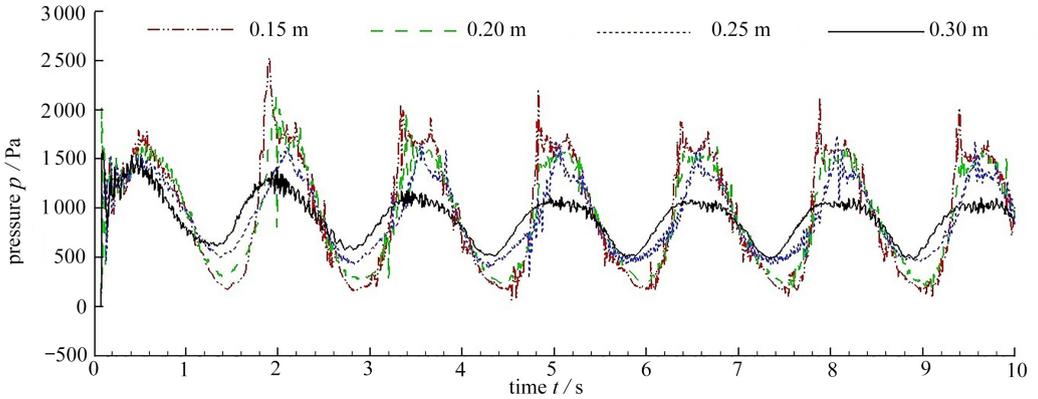


图 11 壁面冲击压力变化

Fig. 11 Variations of the wall impact pressure

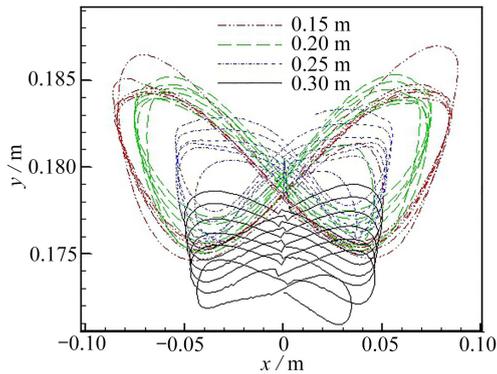


图 12 液体质心轨迹变化

Fig. 12 Barycenter trajectories of the liquid body

## 4 结 论

本文应用 SPH 方法对罐车液体晃荡及防晃措施进行了研究,在矩形容器液体晃荡模拟中,得到的自由液面变化及固壁压力变化均与试验结果吻合良好,这表明本文模型能够准确预测强非线性液体晃荡问题.之后,分析了水平正弦激励和小幅度的横摇激励下,罐车装载 50% 汽油时,不同形式的隔板对液体晃荡的影响,结果表明自由状态下,容器内液体晃荡剧烈,壁面压力峰值较高,增加不同防晃结构后,液体晃荡能够得到一定抑制.通过监测压力和质心轨迹发现,防晃隔板的防晃效果受外界激励形式的影响较大,在设置时应让防晃结构的法线方向与来流方向的夹角尽可能小,这样晃荡抑制效果越明显,重心越稳定,更有利罐车平稳行驶.

## 参考文献 (References):

- [1] 张海涛, 孙蓓蓓, 陈建栋. 基于自由液面预测的非线性液体晃动问题的数值模拟[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2014, 44(2): 277-282. (ZHANG Haitao, SUN Beibei, CHEN Jiandong.)

- Numerical simulation of nonlinear liquid sloshing problems based on forecast of free surface [J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2014, **44**(2): 277-282. (in Chinese)
- [2] 赵树恩, 赵灵鹤. 汽车罐车横向运动液体晃动动力学特性模拟[J]. *应用数学和力学*, 2014, **35**(11): 1259-1270. (ZHAO Shuen, ZHAO Linghe. Dynamic simulation of liquid sloshing characteristics for tank trucks in lateral movement[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2014, **35**(11): 1259-1270. (in Chinese))
- [3] FRANDSEN J B. *Sloshing Motions in Excited Tanks*[M]. Academic Press Professional, Inc, 2004.
- [4] SOULI M, ZOLESIO J P. Arbitrary Lagrangian-Eulerian and free surface methods in fluid mechanics[J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2001, **191**(3/5): 451-466.
- [5] LUCY L B. A numerical approach to the testing of the fission hypothesis[J]. *The Astronomy Journal*, 1977, **82**(12): 1013-1024.
- [6] KOSHIZUKA S, OKA Y. Moving-particle semi-implicit method for fragmentation of incompressible fluid[J]. *Nuclear Science and Engineering: the Journal of the American Nuclear Society*, 1996, **123**(3): 421-434.
- [7] 龚国毅. 基于VOF和浸入边界法的液舱晃荡的数值模拟[D]. 硕士学位论文. 广州: 华南理工大学, 2013. (GONG Guoyi. Numerical simulation of tank sloshing based on volume of fluid and immersed boundary method[D]. Master Thesis. Guangzhou: South China University of Technology, 2013. (in Chinese))
- [8] 陈剑. 道路激励下罐式汽车液固耦合动力学性能研究[D]. 硕士学位论文. 南京: 东南大学, 2012. (CHEN Jian. The dynamics of liquid-structure interaction for tank vehicle subjected to road excitation[D]. Master Thesis. Nanjing: Southeast University, 2012. (in Chinese))
- [9] 张凯凯. 基于SPH方法的液舱内液体晃动分析及防晃研究[D]. 硕士学位论文. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016. (ZHANG Kaikai. Analysis and research of the liquid sloshing and sloshing suppression in tanks based on SPH method[D]. Master Thesis. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016. (in Chinese))
- [10] LIU G R, LIU M B. 光滑粒子流体动力学: 一种无网格粒子法[M]. 韩旭, 杨刚, 强洪夫, 译. 长沙: 湖南大学出版社, 2005. (LIU G R, LIU M B. *Smooth Particle Hydrodynamics: a Meshless Particle Method*[M]. HAN Xu, YANG Gang, QIANG Hongfu, transl. Changsha: Hunan University Press, 2005. (Chinese version))
- [11] SHAO J R, LI H Q, LIU G R, et al. An improved SPH method for modeling liquid sloshing dynamics[J]. *Computers & Structures*, 2012, **100/101**: 18-26.
- [12] 刘谋斌, 周冉, 邵家儒. 棱形液舱内液体晃荡问题的SPH数值模拟[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2014, **42**(3): 257-261. (LIU Moubin, ZHOU Ran, SHAO Jiaru. Numerical simulation of liquid sloshing in a prismatic tank with SPH method[J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2014, **42**(3): 257-261. (in Chinese))
- [13] TOUMI M, BOUAZARA M, RICHARD M J. Impact of liquid sloshing on the behaviour of vehicles carrying liquid cargo[J]. *European Journal of Mechanics A: Solids*, 2009, **28**(5): 1026-1034.
- [14] 庄园, 万德成. FPSO船与低充水率下LNG液舱晃荡耦合运动的数值模拟[J]. *应用数学和力学*, 2016, **37**(12): 1378-1393. (ZHUANG Yuan, WAN Decheng. 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. (in English)
- [15] 张友林, 陈翔, 万德成. 基于 MPS-FEM 耦合方法对比研究刚性与弹性挡板对液舱晃荡的抑制作用[J]. *应用数学和力学*, 2016, **37**(12): 1359-1377. (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 [J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2016, **37**(12): 1359-1377. (in English))
- [16] LIU M B, SHAO J R, CHANG J Z. On the treatment of solid boundary in smoothed particle hydrodynamics[J]. *Science China Technological Sciences*, 2012, **55**(1): 244-254.
- [17] KISHEV Z R, HU C, KASHIWAGI M. Numerical simulation of violent sloshing by a CIP-based method[J]. *Journal of Marine Science and Technology*, 2006, **11**: 111-122.

## Numerical Simulation of Sloshing-Mitigating Structures in Tank Trucks With the SPH Method

HUANG Zhitao, YANG Yu, SHAO Jiaru, ZHANG Yueyue  
(College of Mechanical Engineering, Chongqing University of Technology,  
Chongqing 400054, P.R.China)

**Abstract:** Based on the smooth particle hydrodynamics (SPH) method, the stability of the tank truck and the mitigating effects of different baffles were studied. Firstly, the liquid sloshing pressure in a rectangular container was simulated with results in agreement with experimental ones, to validate the effectiveness and accuracy of the SPH model. Secondly, a 2D elliptic tank truck model was established, which was filled with 93# gasoline. The impact pressure on the tank wall and the trajectory of the liquid barycenter were analyzed under different horizontal sinusoidal excitations and roll excitations. The results show that, the liquid sloshing is violent with no mitigating baffle, and the mitigating effects of the baffle will be influenced by the forms of external excitations. When the angle between the normal direction of the mitigating baffle and the inflow is small, the stability of the tank truck will be improved.

**Key words:** tank truck; liquid sloshing; SPH; stability; external excitation

**Foundation item:** The National Natural Science Foundation of China(11602045)