

二维液舱的晃荡响应试验和数值模拟对比

贾孙宇

安徽理工大学, 机械工程学院, 安徽 淮南

收稿日期: 2022年10月20日; 录用日期: 2022年11月15日; 发布日期: 2022年11月24日

摘要

本文主要研究二维液舱晃荡响应的变化, 通过试验数据和数值模拟(OpenFOAM)两部分之间对比, 在壁面压力变化、左右两侧波高变化以及自由液面变化中可以得出, 在不同激励频率下的数值模拟结果与试验结果均能够较好吻合, 本研究所建立的液体晃荡数值模型能够精确地预测晃荡压力、波高以及自由液面变化的分布。

关键词

液舱晃荡, 动力响应, 数值模拟

Comparison of Sloshing Response Test and Numerical Simulation of 2D Rectangular Liquid Tank

Sunyu Jia

School of Mechanical Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui

Received: Oct. 20th, 2022; accepted: Nov. 15th, 2022; published: Nov. 24th, 2022

Abstract

This paper mainly studies the sloshing response of a two-dimensional liquid tank. By comparing the experimental data with the numerical simulation (OpenFOAM), it can be concluded that the numerical simulation results at different excitation frequencies are in good agreement with the experimental results. The numerical model of liquid sloshing established in this study can accurately predict the distribution of sloshing pressure, wave height and free surface changes.

Keywords

Liquid Sloshing, Dynamic Response, Numerical Simulation

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

液舱晃荡相关领域的研究方法和研究手段也日趋成熟。研究方法可分为：理论研究、试验研究和数值研究。

理论解是最完美的，得到的结果在实际工程问题中使用起来也最方便。对于液体晃动问题，只有少数几何形状和边界条件的问题极其简单或被简化来解析，而且大部分都是因为被简化了而大同小异。通常，当液舱内有结构或反骨架时，或者液体粘性较大，或者需要研究波浪的破碎机理。这时候就必须使用另外两种手段，即数值模拟和模型实验来研究液体悬空问题。

谭婕[1]通过试验研究发现，舱内液体晃荡在启动、稳定和衰减阶段呈现出不同特性。不同大小的振动幅值的改变对壁面压力阶段峰值的衰减具有微乎其微的作用。

对于储罐晃荡数值研究部分较为成熟，Kang [2]选取了三组代表性地震进行数值模拟并于实验结果做对比，具有良好的一致性。验证了能够预测真实动态流体响应的计算模型。

陈奕超[3]等人采用开源程序 OpenFOAM 建立的液体晃荡模型，与实际试验进行对比，利用验证后的数值模型研究了液体深度与液舱长度比为 0.15 和 0.33 两种工况下，矩形液舱在不同频率下的液体晃荡压力分布规律。最终得出了不同液体深度的晃荡冲击压力对频率的响应曲线呈现不同的规律，对其他试验具有指导意义。

唐彬[4]的研究对象是复杂的液舱以及真实的外部激励运动，结果总结得到二维矩形舱内液体在横摇激励下的晃荡荷载的空间分布、受横摇激励频率和幅值的影响以及受载液水平的影响规律。

金恒[5]等人用两个研究良好的强震被用来分析液舱在纵向和垂直方向的位移。在验证的基础上，捕捉自由液面运动和侧壁的高度，并检查晃动压力响应。结果表明，圆柱形液舱的 2D 剖面可以用来估计 3D 晃荡的最大响应，地震激励下的水运动符合晃荡的模式特征。

于曰旻[6]过理论分析、模型试验和数值模拟 3 种方法，在高载液率时，3 种不同的激励幅值下，长时间激励频率作用下，研究矩形液舱晃荡的一阶共振特性通基于势流理论得到了最低阶共振频率仅与液舱宽度和载液深度有关，与激励幅值无关。

Kim [7]的研究中有限差分法被用来模拟二维和三维液体容器中的振荡流动。结果显示，在冲击压力和整体流体运动方面与实验数据和其他计算结果有良好的一致性。

Celebi [8]研究了二维矩形液箱在激励作用下沿垂直曲线旋转运动情况下的非线性液体晃荡，同时考虑有无挡板情况。计算结果与理论解及实验结果比较，吻合较好。

通过上述文献可以得出，不同作者通过储液舱晃荡试验和数值研究之间的对比研究，数值模拟可以较好的反映试验研究。本文选取不同外激励频率和来展开，通过研究采集的数据和数值模拟(OpenFOAM)的数据进行对比研究。

2. 试验研究

2.1. 试验流程

图 1 为本试验研究具体流程图，第一步将试验研究所用的二维矩形储液舱平稳的固定在六自由度运动平台上，其次计算机向六自由度平台输出试验所需要的外激励运动信号，外激励信号分为 13 组简谐激励，由六自由度运动平台带动二维矩形储液舱产生相应运动，与此同时，四支压力传感器和两支波高仪传感器开始工作进行数据采集并将数据收集传回计算机，试验完成后对所收集的数据分析及处理，整个试验过程进行录像。接下来将从试验载体、试验装置、试验环境和其对应的研究作用展开叙述。

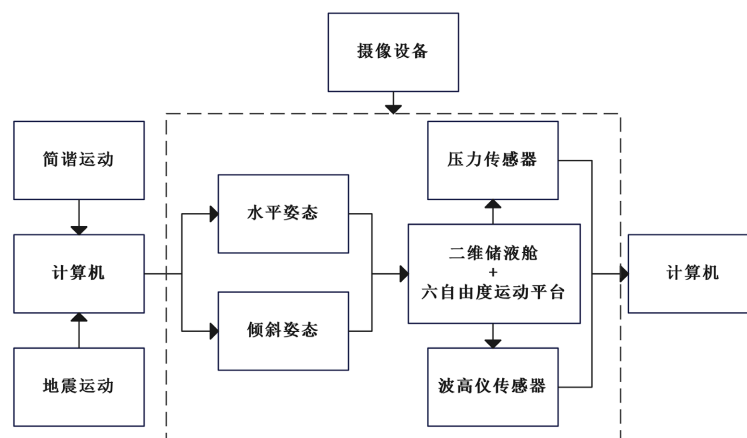


Figure 1. Diagram of the practical teaching system of automation major
图 1. 自动化专业实践教学体系图

2.2. 试验载体

2.2.1. 液舱

为了保证试验模型强度以及便于储液舱晃荡试验时的观察，本研究试验选用厚度为 10 mm 的高透明亚克力板制成的二维矩形储液舱。如图 2 所示，此二维矩形储液舱的长 $L = 0.58$ m，高 $H = 0.6$ m，宽 $W = 0.1$ m。通过试验发现，当水深过深时，晃荡过程会造成较大的冲击以及溶液的溢出，还会引入较大的非线性波，会对试验结果造成影响，因此本研究试验采取的液体深度为 $h = 0.36$ m，即占整个液舱容积 60%，同时为了方便试验现象的观察以及试验过程的录制，对溶液加入绿色荧光粉进行染色。

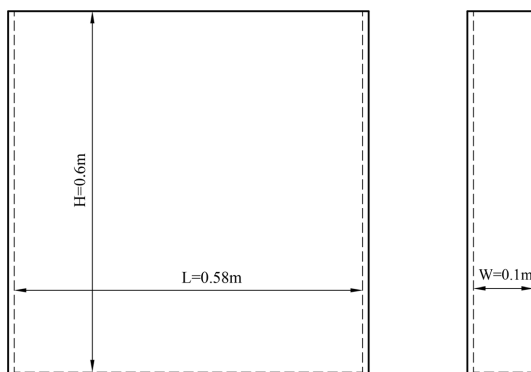


Figure 2. Schematic diagram of two-dimensional liquid tank
图 2. 二维液舱示意图

2.2.2. 平台载体

平台载体如图 3 所示，六自由度运动平台的运动控制系统中，伺服控制电动机把驱动过程中的能量转换这一环节省去了，使伺服电机在运动过程中能够更高效地产生力和力矩，六自由度平台它具有更小的体积小、更快速的响应、同时操作简单，使用方便、成本低等众多优点，不需要复杂的配管系统等优点，因此被用于模拟一些复杂的模拟运动中。



Figure 3. 六自由度平台
图 3. Six-DOF platform

2.3. 试验装置

选取型号为 NYH1001 微型压力传感器共 4 支。试验研究中给四支压力传感器编号为 P1、P2、P3、P4。四支压力传感器两支安装在储液舱上部，两支安装在储液舱下部，P1、P3 距离液舱底部为 0.3 m，P3、P4 分别距离液舱底部为 0.08m，在储液舱中的具体位置如图 4 所示。压力传感器的作用是为了收集二维矩形储液舱晃动过程中壁面压力变化。

波高仪传感器选取型号为 LG-2 共两支。试验研究对两支波高仪传感器命名为 W1、W2。两支波高仪传感器安装垂直固定在液舱底部正上方且距离液舱壁面 1cm 处位置。波高仪传感器在二维矩形储液舱中的具体位置如图 4 所示。波高仪传感器的作用是为了收集维液舱晃动过程中左右两侧波高的变化。

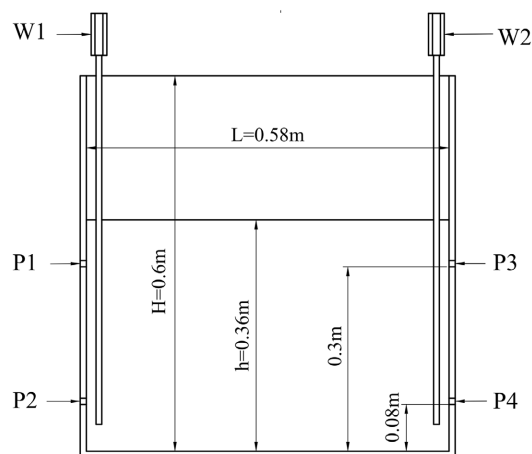


Figure 4. Sensor location diagram
图 4. 传感器位置示意图

试验研究中选用的录像是型号为 iPhone11 的设备，所用规格为 4K 60f，其摆放位置在二维矩形储液舱的正前方。

2.4. 外部激励运动

试验研究中运动为简谐运动。对于简谐运动，运动方程为：

$$S = A \sin \omega t \quad (1)$$

式中：

A ——幅值(mm)；

ω ——外部激励频率(rad/s)；

t ——晃荡时间(s)。

其中：

$A = 0.002 \text{ m}$ ；

$t = 30 \text{ s}$

通过试验研究可知，在晃荡过程中，一阶晃荡占据主导地位，二阶晃荡的影响最多只有一阶晃荡的十分之一，三阶晃荡更小，所以本实验研究只考虑一阶晃荡。试验研究中简谐运动频率共取 13 组，分别为 $\omega_1 = 6.543 \text{ rad/s}$ 、 $\omega_2 = 6.743 \text{ rad/s}$ 、 $\omega_3 = 6.843 \text{ rad/s}$ 、 $\omega_4 = 6.863 \text{ rad/s}$ 、 $\omega_5 = 6.880 \text{ rad/s}$ 、 $\omega_6 = 6.918 \text{ rad/s}$ 、 $\omega_7 = 6.943 \text{ rad/s}$ 、 $\omega_8 = 6.968 \text{ rad/s}$ 、 $\omega_9 = 6.993 \text{ rad/s}$ 、 $\omega_{10} = 7.043 \text{ rad/s}$ 、 $\omega_{11} = 7.143 \text{ rad/s}$ 、 $\omega_{12} = 7.343 \text{ rad/s}$ 、 $\omega_{13} = 7.543 \text{ rad/s}$ 。

3. 二维矩形液舱晃荡数值模拟

选用的软件为 OpenFOAM，开源的计算流体软件 OpenFOAM 就是这样一款新出现却又发展极其迅速的软件，它的代码是完全开放的，给广大用户提供了很大的使用自由，能够依据需要来优化数值算法，还能根据特定的问题来修改求解器，此外还有很多类型的边界条件，使得其在处理问题时具有相当大的灵活性。

3.1. 流程

二维矩形储液舱在平面沉降下的晃荡响应数值模拟在 OpenFOAM 软件中进行，首先在 OpenFOAM 中画出模型尺寸建立合适的网格，模型尺寸和上章节中试验模型保持一致。选择与实验研究中传感器相同位置设置检测点，再进行晃荡模拟实验，主要测量收集液面变化，两侧壁面波高以及壁面压力变化。最后导出数值模拟结果与试验结果进行验证。具体流程如下图 5 所示：

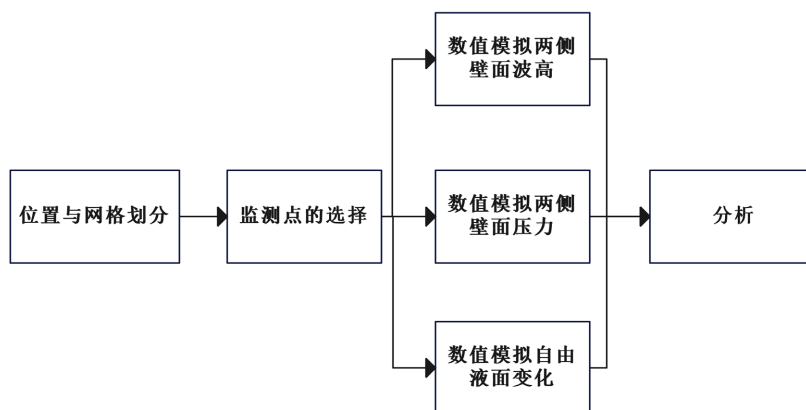


Figure 5. Numerical simulation flow chart
图 5. 数值模拟流程图

3.2. 监测点选取

为了与试验结果准确对比，数值模拟中所用的尺寸与试验研究中储液舱保持一致，液位也同样是 0.36 m，且监测点位置与试验研究中的一样，如表 1 所示。水平姿态下，数值模拟出二维矩形储液舱坐标规划可视化的网格划分示意图如图 6 所示。

Table 1. System resulting data of standard experiment

表 1. 标准试验系统结果数据

监测点名称	检测点位置
P1	(-0.29, 0.3, 0)
P2	(-0.29, 0.08, 0)
P3	(0.29, 0.3, 0)
P4	(0.29, 0.08, 0)
W1	(0.28, 0, 0)~(0.28, 0.6, 0)
W2	(0.28, 0, 0)~(0.28, 0.6, 0)

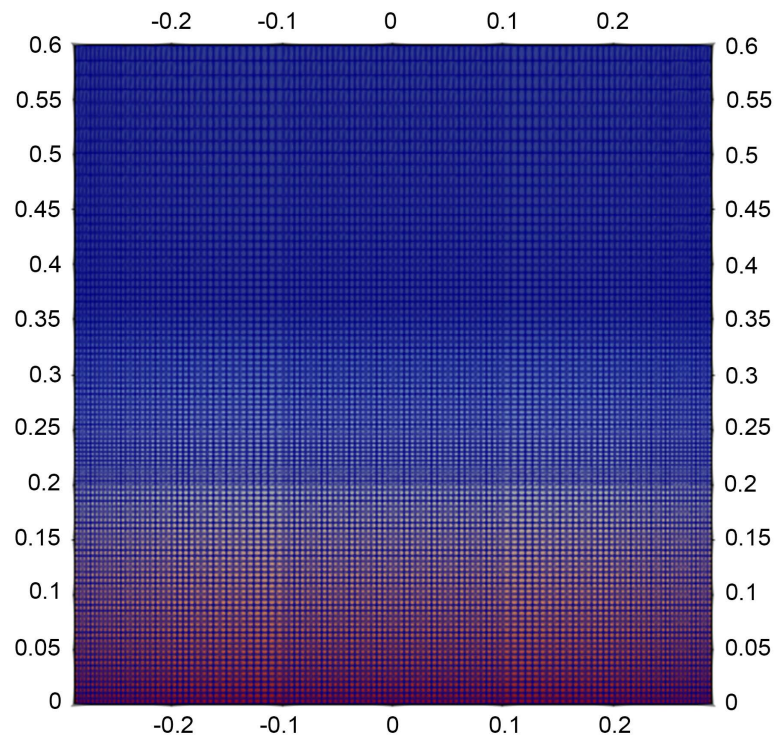


Figure 6. Schematic diagram of liquid tank grid

图 6. 液舱网格示意图

4. 试验研究结果和数值模拟结果对比验证

4.1. 壁面压力

当频率为 $\omega_5 = 6.880 \text{ rad/s}$ 时，壁面压力的对比如图 7 所示。

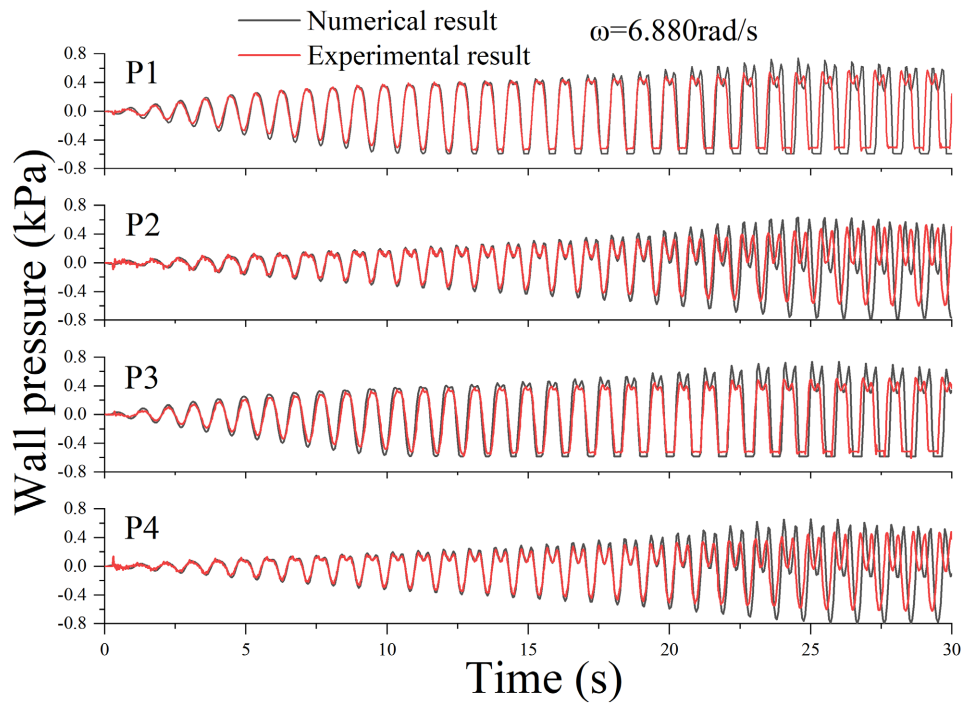


Figure 7. Wall pressure contrast
图 7. 壁面压力对比

4.2. 壁面波高

当频率为 $\omega_5 = 6.880 \text{ rad/s}$ 时，壁面波高变化的对比如图 8 所示。

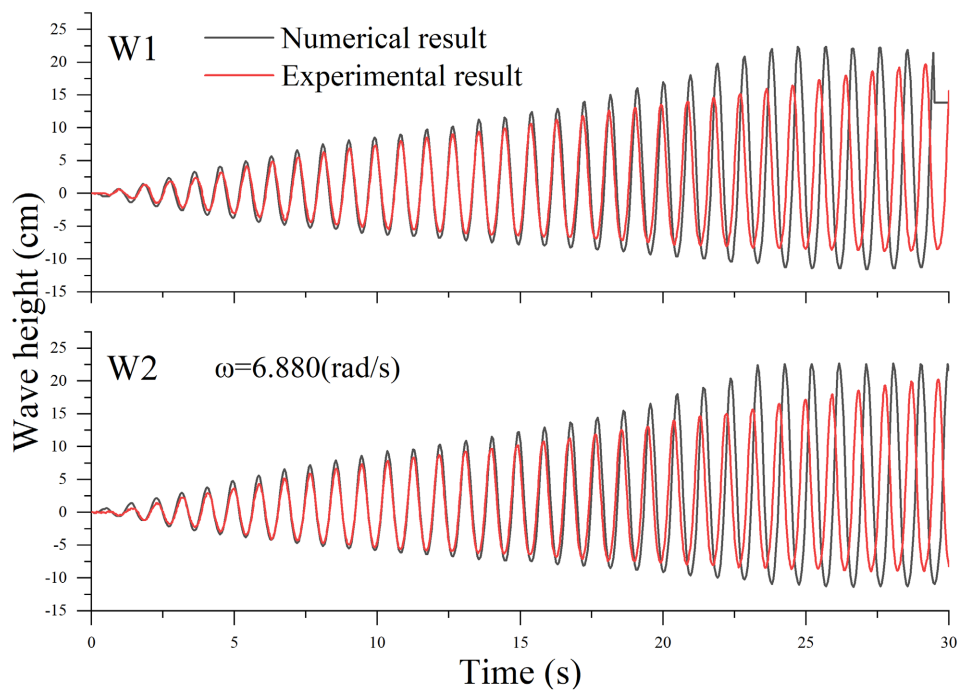


Figure 8. Wave height contrast
图 8. 波高对比

4.3. 自由液面

当频率为 $\omega_5 = 6.880 \text{ rad/s}$ 时，自由液面变化的对比如图 9 所示。

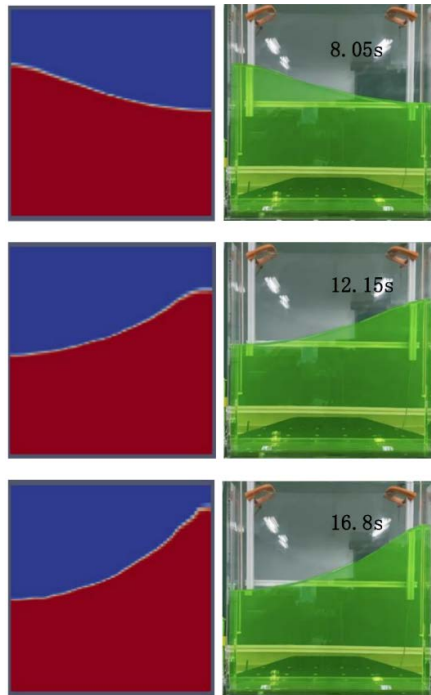


Figure 9. Free liquid level contrast
图 9. 自由液面对比

5. 试验总结

试验通过研究采集的数据和数值模拟的数据进行对比，通过选取不同外激励频率和来展开，可以得到以下结论：

- 1) 通过试验数据和数值模拟之间对比，在壁面压力变化、左右两侧波高变化以及自由液面变化中可以得出，在不同激励频率下的模型计算结果与试验结果均能够较好的一致性。
- 2) 在壁面压力变化对比中，数值模拟结果和试验结果在后几秒钟会出现一定的相位差，在波高变化对比中且随着时间的增加，数值模拟结果会略大于试验结果，这是因为本次数值模拟研究中未考虑液体的粘性和可压缩性。总体来说，数值模拟结果符合预期结果。
- 3) 过研究采集的数据和数值模拟(OpenFOAM)的数据进行对比研究，表明本研究建立的液体晃荡数值模型能够精确地预测晃荡压力、波高以及自由液面变化分布。

参考文献

- [1] 谭婕, 张崇伟, 宁德志. 基于连续小波变换的液体非线性晃荡分析[C]//中国力学学会流体力学专业委员会. 2019年全国工业流体力学会议论文集. 2019: 26-30.
- [2] Kang, T.W., Yang, H.-I. and Jeon, J.-S. (2019) Earthquake-Induced Sloshing Effects on the Hydrodynamic Pressure Response of Rigid Cylindrical Liquid Storage Tanks Using CFD Simulation. *Engineering Structures*, **197**, Article No. 109376. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109376>
- [3] 陈奕超, 薛米安, 彭天成, 苑晓丽, 朱爱蒙. 液体晃荡压力分布规律 OpenFOAM 模拟研究[J]. 大连理工大学学报, 2019, 59(4): 400-408.

-
- [4] 唐彬. 二维矩形舱晃荡现象的实验与数值对比研究[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2014.
- [5] Heng, J., Song, R.Y. and Liu, Y. (2020) Sloshing Motion in a Real-Scale Water Storage Tank under Nonlinear Ground Motion. *Water*, **12**, Article No. 2098. <https://doi.org/10.3390/w12082098>
- [6] 于曰旻. 高载液率下矩形液舱晃荡的的 1 阶共振[J]. 船舶工程, 2022, 44(6): 61-64+169.
- [7] Kim, Y. (2001) Numerical Simulation of Sloshing Flows with Impact Load. *Applied Ocean Research*, **23**, 53-62. [https://doi.org/10.1016/S0141-1187\(00\)00021-3](https://doi.org/10.1016/S0141-1187(00)00021-3)
- [8] Celebi, M.S. and Akyildiz, H. (2002) Nonlinear Modeling of Liquid Sloshing in a Moving Rectangular Tank. *Ocean Engineering*, **29**, 1527-1553. [https://doi.org/10.1016/S0029-8018\(01\)00085-3](https://doi.org/10.1016/S0029-8018(01)00085-3)