

文章编号:1671-4229(2023)01-0086-09

内置垂直格栅矩形 TLD 水箱液体晃动特征的 CFD 数值模拟

孟庆恩¹, 邓梓泳², 吴玖荣^{2*}, 傅继阳²

(1. 广州市城市建设开发有限公司, 广东 广州 510623; 2. 广州大学 风工程与工程振动研究中心, 广东 广州 510006)

摘要: 为研究内置垂直格栅矩形 TLD(Tuned Liquid Damper)水箱在外加水平激励下液体的晃动特征,文章基于计算流体力学(Computational Fluid Dynamics,CFD)方法,建立了相应的 TLD 水箱模型,并利用 FLUENT 软件进行液体晃动的力学性能数值模拟。将文章 CFD 数值模拟结果与已有类似试验的实验数据进行对比分析,进一步验证了 CFD 数值模拟结果的正确性。研究表明:①随底部水平外激励幅值的增加,液体晃动非线性逐步加剧,液体晃动幅度、阻尼比增大,无量纲水平控制力最大值逐步减小;②把垂直格栅放置在液体一阶晃动模态的归一化最大振幅处,能够有效地抑制液体晃动的非线性现象,垂直格栅放置位置越靠近水箱中部,TLD 系统阻尼比越大;③随着 TLD 系统的水深比增大,内置垂直格栅构件的布置位置和尺寸相同时,TLD 系统的阻尼比逐渐减小。

关键词: 计算流体力学; TLD 系统; 内置格栅; 液体晃动; 阻尼比

中图分类号: TU 352

文献标志码: A

CFD Numerical simulation of the liquid sloshing characteristics of a rectangular TLD tank with vertical screens

MENG Qing-en¹, DENG Zi-yong², WU Jiu-rong^{2*}, FU Ji-yang²

(1. Guangzhou Urban Construction and Development Co. Ltd, Guangzhou 510623, China;

2. Research Center for Wind Engineering Vibration and Engineering Vibration, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China)

Abstract: The structural behavior of liquid sloshing in a rectangular Tuned Liquid Damper (TLD) water tank with built-in vertical screens under external horizontal excitation is investigated by Computational Fluid Dynamics (CFD) method, the mechanical properties of liquid sloshing are numerically simulated by FLUENT software. The CFD simulation results in this paper are also compared with the experimental data with a similar configuration of water tank with vertical screens, which further verifies the effectiveness of the proposed CFD numerical simulation method. The numerical simulation results show that with the increase in the amplitude of the horizontal external excitation at the bottom of the tank, the nonlinearity of the liquid sloshing gradually intensifies. Meanwhile the amplitude of wave height of free surface and damping ratio of TLD system increase, but the amplitude of non-dimensional horizontal control force gradually decreases. Setting the vertical screen at the location of the maximum amplitude of the first sloshing mode was found to effectively suppress the nonlinear phenomenon of liquid sloshing. The closer the vertical screen is placed near to the middle location of the wa-

收稿日期: 2022-01-24; 修回日期: 2022-09-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51925802, 51778161, 11972123);长隆装配式建筑相关技术研究资助项目

作者简介: 孟庆恩(1976—),男,工程师. E-mail:896849349@qq.com

*通信作者. E-mail:jrwuce@gzhu.edu.cn

引文格式: 孟庆恩, 邓梓泳, 吴玖荣, 等. 内置垂直格栅矩形 TLD 水箱液体晃动特征的 CFD 数值模拟[J]. 广州大学学报(自然科学版), 2023, 22(1): 86-94.

ter tank, the more value in the damping ratio of TLD system could produce. Numerical analyzed results show that the increase in water-depth ratio of TLD system could result in the decrease in the damping ratio of TLD system gradually.

Key words: CFD; TLD system; internal screen; water sloshing; damping ratio

随着现代社会的快速发展和我国人口的快速增长,城市用地变得日益紧张,为了有效利用空间和资源,一幢幢高楼大厦如雨后春笋般拔地而起。这些建筑变得更高、更轻,其结构刚度和结构阻尼变得更小,这放大了建筑物对外部激励(如风荷载、地震荷载)的敏感度,因此,需要额外的减振耗能装置来满足其安全性、可靠性和舒适性等要求^[1-4]。

调谐液体阻尼器(TLD)是一种被动控制的阻尼器,其减振机理是通过刚箱里液体的晃动,结构振动的能量被边界层液体的晃动所产生的摩擦力及强激励下产生的破碎而耗散掉,从而实现了对结构振动的控制。调谐液体阻尼器具有造价低、易于安装、多用途、维护方便和易于调节等优点,所以在结构振动控制中得到了越来越多的实际应用^[5]。Sun 等^[6]基于浅水波理论提出了 TLD 的计算模型,并进行了振动台实验验证;Yu 等^[7-8]通过试验研究了当激励幅值较大时 TLD 内水的晃动,将 TLD 建立为具有非线性刚度和阻尼的等效调谐质量阻尼器模型。Tait 等^[9-10]对内置格栅的 TLD 水箱进行了振动台试验,结果表明内置格栅是一种增加水箱系统阻尼的有效方法,并且用线性模型和非线性模型进行数值模拟,与实验结果进行比较,发现非线性模型可以更准确地描述自由液面的晃动情况,根据能量耗散频率响应曲线图求出阻尼比。Cassolato^[11]在配备不同倾斜角度格栅的 TLD 水箱上进行了实验,研究格栅倾角对固有阻尼和能量损耗的影响,通过对格栅角度的调节使固有阻尼达到一个最佳的效果。翟伟廉等^[12]在试验分析的基础上提出了一种 U 型水箱,并证实了 U 型水箱可作为高柔结构的风振反应控制装置。东南大学从液体晃动的动力效应等效原则出发,导出了晃动液体的等效力学模型^[13]。

目前,国内外对 TLD 的研究大多数以试验为主,但是开展试验的成本高、时间长。计算流体力学(CFD)的基本特征是数值模拟和计算机实验,它从基本物理定理出发,在很大程度上替代了耗资巨大的流体动力学实验设备,在科学研究和工程技术中产生了巨大的影响。基于此,本文采用 CFD 方法,建立内置垂直格栅矩形 TLD 水箱进行

数值模拟,通过改变激励幅值、格栅所在位置和水深比,从水箱侧壁波高、底部水平控制力、阻尼比等分析内置垂直格栅矩形 TLD 水箱的晃动特征。

1 矩形水箱箱内液体晃动的 CFD 数值模拟

计算流体力学(Computational Fluid Dynamics, CFD),是采用离散化的数值方法对流体运动和力学特征进行数值模拟和分析的一个流体力学学科分支,所有 CFD 问题的求解过程都可用图 1 表示^[14]。

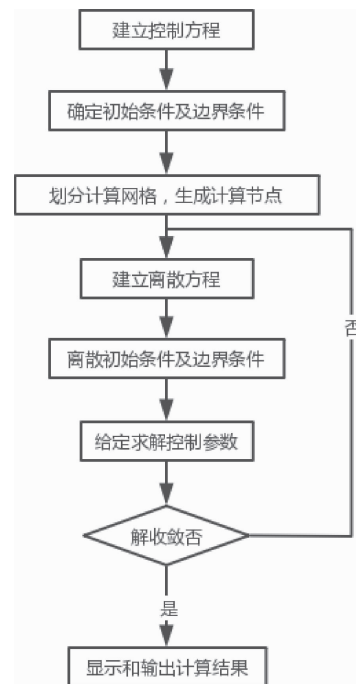


图 1 CFD 求解流程图

Fig. 1 Solution chart of CFD algorithm

流体流动一般要遵循相应的物理守恒定律,基本的守恒定律包括:质量守恒定律、动量守恒定律和能量守恒定律。对于水箱内液面晃动这类没有热交换发生的流动,则可不考虑能量守恒定律。

对于不可压缩流体,在非惯性坐标系下质量守恒方程为

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

其中, u, v, w 分别为 x, y, z 方向的速度; x, y, z 为流体质点的空间位置。

对于不可压缩流体, 在非惯性坐标系下动量方程为

$$\rho \frac{du}{dt} = -\nabla p + \rho g + \nabla \cdot 2\mu S + \nabla(\lambda \nabla \cdot u) - \rho(\mathbf{a}_R + \dot{\boldsymbol{\omega}} \times \mathbf{R} + \boldsymbol{\omega} \times \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{R} + 2\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{u}) \quad (2)$$

其中, \mathbf{a}_R 为移动牵连加速度, 即非惯性坐标系相对于惯性坐标系的位移加速度; $\dot{\boldsymbol{\omega}} \times \mathbf{R}, \boldsymbol{\omega} \times \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{R}$ 分别为转动牵连加速度和转动牵连向心加速度, 即流体质点相对于非惯性坐标系转动产生的加速度; $2\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{u}$ 为科氏加速度; S 为式(3)。

$$S = \begin{bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \\ \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) & \frac{\partial v}{\partial y} & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \\ \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) & \frac{\partial w}{\partial z} \end{bmatrix} \quad (3)$$

描述湍流运动的方程组是不封闭的, 本文 CFD 模拟中采用 RNGk- ε 湍流模型对方程组进行封闭。控制方程是一系列微分方程组, 要得到解析解比较困难, 目前均采用数值方法得到其满足实际需要的数值模拟解^[14]。本文用到的商用软件 FLUENT 采用的是有限体积法, 进行计算区域的离散和控制方程的离散。FLUENT 提供了多相流模型 (Volume of Fluid, VOF) 来追踪液体自由表面晃动的情况^[15]。

本文模拟的是内置格栅 TLD 水箱中液体的晃动, 内置格栅的性能模拟是关键。FLUENT 中提供了多孔介质跳跃 (porous jump) 边界, 它可用于模拟速度和压降特性均为已知的多孔介质。由内置格栅引起的压降可以表达为

$$\Delta p = C_l \frac{\rho v^2}{2} \quad (4)$$

其中, C_l 为压力损失系数。

最后利用 User Defined Function (UDF) 接口程序模拟对水箱施加的激励, 即可实现内置格栅的矩形水箱液体晃动模拟。

2 模型验证

为了验证 FLUENT 对内置格栅 TLD 水箱液体晃动模拟的可行性, 本文采用 Tait 等^[10] 对一个内置格栅 TLD 水箱进行振动台试验所得的实验数据

进行对比分析。水箱在水平激励方向上的长度 L 为 966 mm, 高度为 480 mm, 宽度为 360 mm, 水深为 119 mm, 格栅的板条宽度与板条间隔比 $S = 0.42$, 2 个格栅分别放置在 $0.4L$ 和 $0.6L$ 处 (图 2), 振动台的水平位移为

$$X = A \sin(\omega t) \quad (5)$$

$$\omega = 2\pi f \quad (6)$$

$$\beta_w = f/f_w \quad (7)$$

$$f_w = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\pi g \tanh\left(\frac{\pi h}{L}\right)}{L}} \quad (8)$$

其中, A 为振幅 (模型验证取 $A/L = 0.005, 0.016, 0.031$); ω 为外加激励对应的频率; 模型验证时 $\beta_w = 1.01$; f_w 为基于线性势流理论得到的水箱中液体一阶晃动频率。

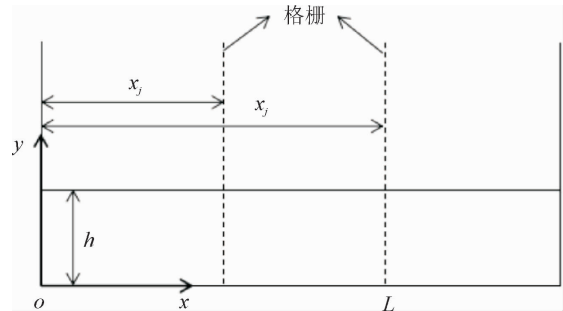


图 2 内置格栅 TLD 水箱二维图

Fig. 2 Two-dimensional diagram of TLD tank with screens

数值模拟前需要建立相应的 TLD 模型 (图 3), 并且进行网格划分, 把 mesh 文件导入 FLUENT 中, 然后设置好湍流模型、边界条件、UDF 和时间步长等。

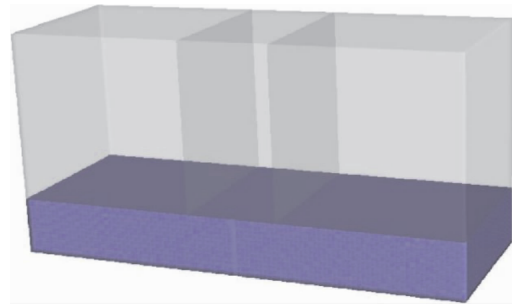


图 3 模型三维图

Fig. 3 Three-dimensional diagram of model

图 4 为在外加激励作用下箱内水体晃动稳定后, TLD 水箱侧壁处随时间变化的无量纲波高 (η') 和无量纲水平控制力 (F'_{sw}) 的 CFD 模拟值和实验值相互比较图。其中, $\eta' = \eta/h$, η 是某一时刻水箱侧壁处自由液面高度; h 为箱内液体高

度; F'_{sw} 是水箱液体晃动对左右壁面产生的反作用力合力。

$$F'_{sw} = \frac{F_{sw}}{\rho L b h A \omega^2} \quad (9)$$

从图 4 可以看出, FLUENT 数值模拟结果与实验结果较为吻合, 说明可以用 FLUENT 来模拟内置格栅 TLD 水箱液体的晃动效应。

3 内置垂直格栅 TLD 水箱振动特性分析

为了探讨底部激励幅值变化、格栅所在位置和水深比对内置垂直格栅 TLD 水箱振动特性的影响, 设置如表 1 所示的多种数值模拟分析工况。

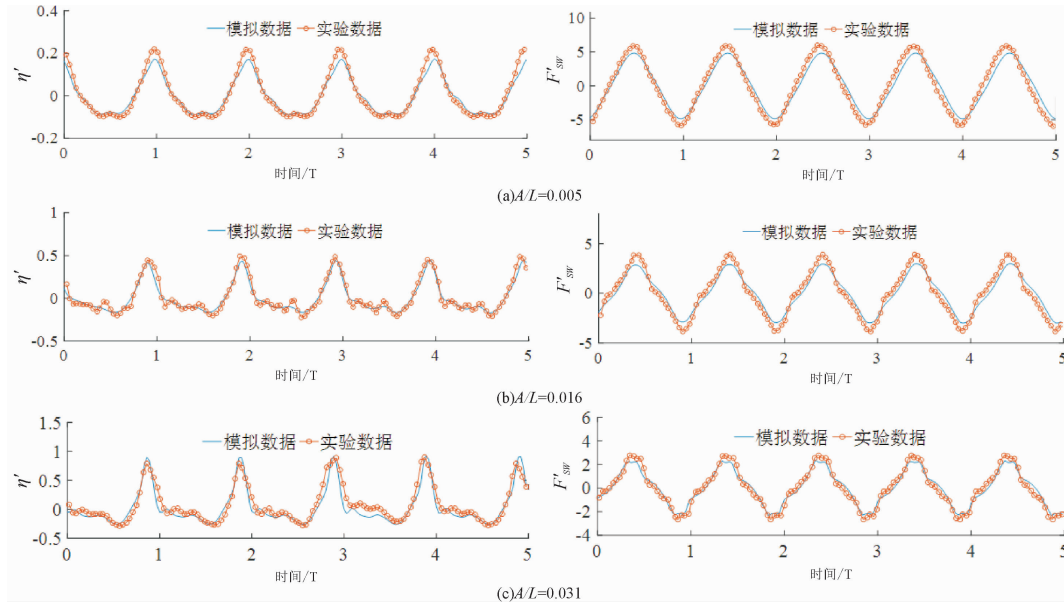


图 4 无量纲侧壁波高和无量纲水平控制力时程曲线

Fig. 4 Non-dimensional wave height of free surface and non-dimensional horizontal control force

表 1 模拟计算工况设置

Table 1 Configuration of numerical simulation cases

模拟分组	水箱尺寸 ($L \times B \times H$)/mm	水深比 (h/L)	格栅位置	A/L	β_w
1	966 × 360 × 480	0.123	0.4L, 0.6L(1)	0.005, 0.010, 0.016, 0.021, 0.031	1.01
2	966 × 360 × 480	0.123	0.4L, 0.6L(1)/0.3L, 0.7L(2)/0.25L, 0.75L(3)	0.005, 0.016	1.01
3	966 × 360 × 480	0.123, 0.15, 0.2, 0.25, 0.3	0.4L, 0.6L(1)	0.010	1.01

注: 格栅在 $x_i = 0.4L$ 和 $x_i = 0.6L$ 的位置组合用(1)表示, 格栅在 $x_i = 0.3L$ 和 $x_i = 0.7L$ 的位置组合用(2)表示, 格栅在 $x_i = 0.25L$ 和 $x_i = 0.75L$ 的位置组合用(3)表示

3.1 激励幅值变化对内置垂直格栅 TLD 水箱振动特性的影响

采用 FLUENT 软件对分组 1 的工况进行数值模拟计算, 从无量纲波高、无量纲水平控制力和阻尼比 3 个方面, 分析外加水平激励幅值对内置垂直格栅 TLD 水箱振动特性的影响。

TLD 水箱的阻尼比可以通过自由液面波高的衰减曲线得到, 对应公式^[16]为

$$\xi = \frac{1}{2\pi j} \ln \frac{u_i}{u_{i+j}} \quad (10)$$

其中, u_i 和 u_{i+j} 分别是第 i 和第 $i+j$ 周期下的波高幅值。

Tait^[17] 建立了一个带格栅 TLD 系统的等效线性力学模型, 在正弦激励下带格栅 TLD 系统的等效线性阻尼比为

$$\xi_{eq} = C_l \frac{16}{3\pi^2} \tanh^2\left(\frac{\pi h}{L}\right) \Delta \Xi \frac{x_r}{L} \quad (11)$$

$$\Delta = \left(\frac{1}{3} + \frac{1}{\sinh^2\left(\frac{n\pi h}{L}\right)} \right) \quad (12)$$

$$\Xi = \sum_{j=1}^{ns} \sin\left(\frac{n\pi x_j}{L}\right)^3 \quad (13)$$

其中, x_j 为水箱液体晃动的响应均方根。

图 5(a)和 5(b)分别为内置格栅位置为 $0.4L$ 和 $0.6L$,水深比 $h/L=0.123$ 时的无量纲侧壁波高和无量纲水平控制力时程曲线。从图 5(a)中可以明显看出,无量纲侧壁波高随着外激励幅值的增大而增大,外激励幅值越大液体晃动得越剧烈。

随着外激励幅值的增大,液体晃动的非线性行为也越明显。液体晃动程度加大,相对应的水平控制力也增加,但是从图 5(b)可以看到水平控制力与 TLD 最大惯性力的比值反而减小了。当 $A/L=0.005$ 和 $A/L=0.010$,外激励幅值较小,无量纲水平控制力曲线比较符合线性振动特征。继续增加外激励幅值,无量纲水平控制力曲线就开始呈现非线性振动的特征。从图 6(a)~图 6(e)可以看出,随着外激励幅值的增大,液体晃动除了一阶固有频率占主导,其他高阶频率参与占比逐渐增大,所以液体晃动的非线性越来越明显。

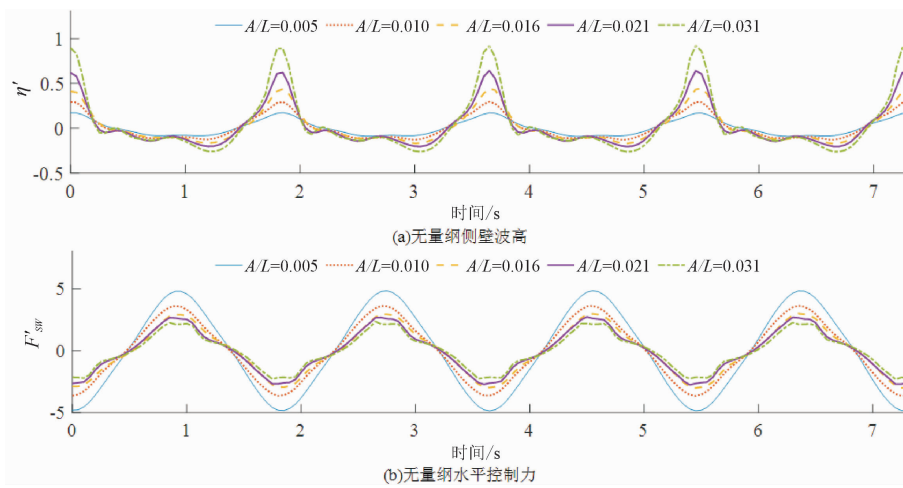


图 5 $h/L=0.123$ 时不同外激励幅值对应的无量纲侧壁波高和无量纲水平控制力时程曲线

Fig. 5 Non-dimensional wave height of free surface and non-dimensional horizontal control force resulting from various bottom excitation amplitudes ($h/L=0.123$)

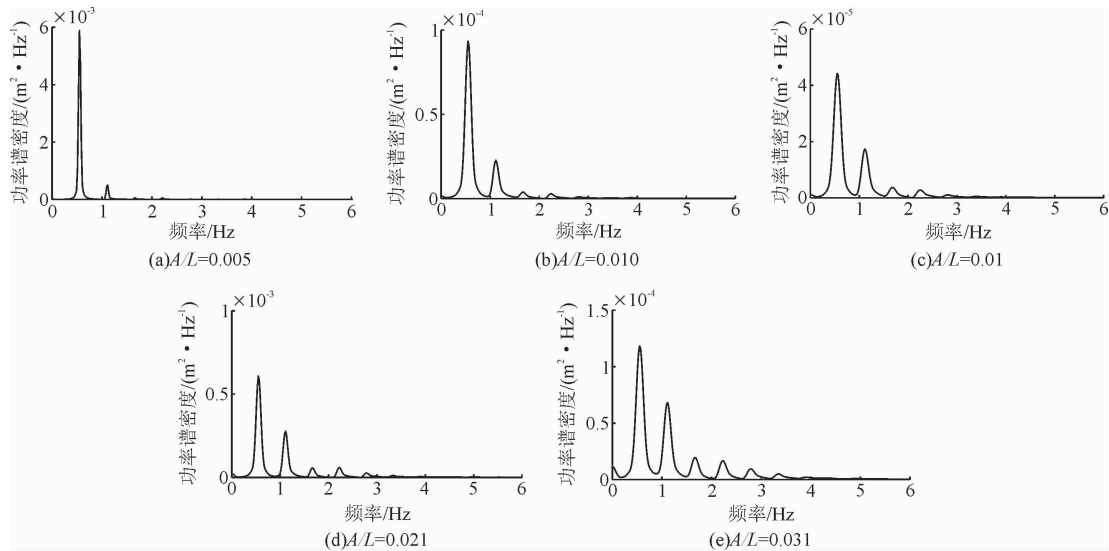


图 6 $h/L=0.123$ 时不同外激励下的侧壁波高功率谱密度图

Fig. 6 Power spectral density of wave height of free surface resulting from various bottom excitation amplitudes ($h/L=0.123$)

图 7 是在 $h/L=0.123$ 时,不同水平外激励幅值下用 Tait 公式法和 CFD 模拟结果的衰减曲线法

求得的 TLD 阻尼比。

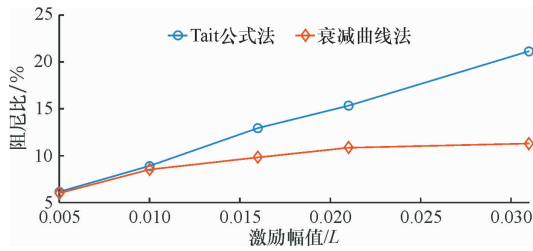


图 7 $h/L=0.123$ 时不同外激励幅值对应的 TLD 阻尼比
Fig.7 Damping ratio of TLD resulting from various bottom excitation amplitudes ($h/L=0.123$)

从图 7 可以看出,两种方法求得的 TLD 阻尼比都是随着外激励幅值的增大而增大的。在 TLD 水箱尺寸、格栅尺寸和内置格栅位置相同的情况下,更大的外激励会激发出 TLD 水箱更大的阻尼比。当 $A/L=0.005$ 和 $A/L=0.010$ 时,两种方法求得的阻尼比相差不大,随着外激励幅值的增大,

两者相差得越来越多,在 $A/L=0.031$ 时相差约 46%。这是因为外激励幅值的增大,导致液体晃动的非线性现象愈加明显,Tait 公式法是在线性模型下推导的,所以外激励幅值越大,两种方法求得的阻尼比值相差越大。

3.2 格栅位置对内置垂直格栅 TLD 水箱振动特性的影响

采用 FLUENT 软件对分组 2 对应的工况进行数值模拟,图 8(a)和图 8(b)分别为 $A/L=0.005$ 和 $A/L=0.016$ 时,内置格栅处于 3 种不同位置时,由 CFD 模拟得到的无量纲侧壁波高和无量纲水平控制力时程曲线。从图 8 可以看出格栅位置越靠近水箱中部,无量纲侧壁波高和无量纲水平控制力越小,即液体晃动幅度越小,但对于上述 3 者对应的工况,相互之间的差别不大。

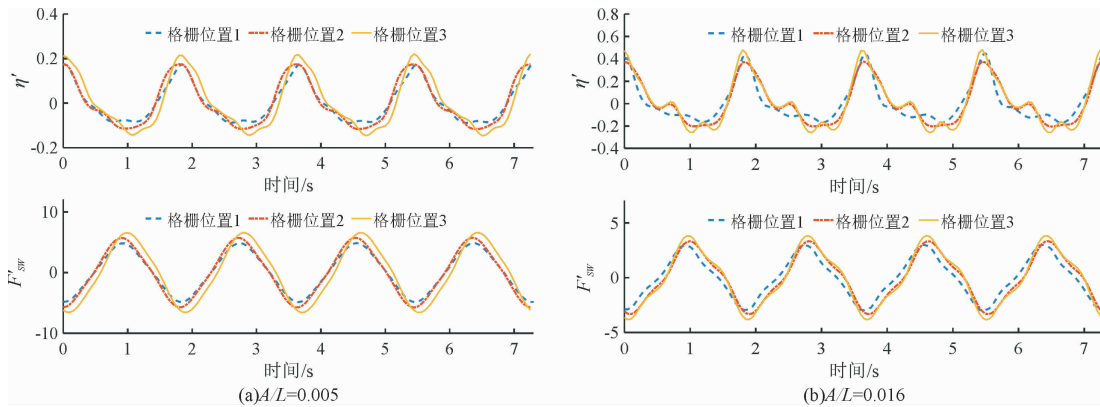


图 8 无量纲侧壁波高和无量纲水平控制力时程曲线

Fig. 8 Non-dimensional wave height of free surface and non-dimensional horizontal control force

图 9 展示了使用线性波浪理论计算的前三阶线性晃动模态下沿水箱长度的归一化速度值。模拟分组 2 中,格栅位置 1 对应图 9 中的 Case 2A,格栅位置 2 对应 Case 2B,格栅位置 3 对应 Case 2C。

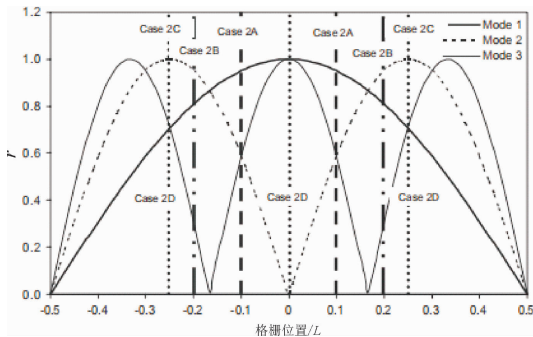


图 9 前三阶线性晃动模态下沿水箱长度的归一化速度值和格栅位置^[10]

Fig.9 Normalized velocity of water sloshing of the first three modes and the location of screens inside the tank

图 10 和图 11 分别是 $A/L=0.005$ 和 $A/L=0.016$ 外加激励时格栅处于不同位置的侧壁波高功率谱密度图。在外激励较小($A/L=0.005$)的情况下,格栅位置对于液体晃动非线性的影响不大,液体晃动主要以基本晃动频率控制为主。当外激励较大($A/L=0.016$)时,对比图 11(a)~图 11(c),格栅位置为 Case 2A 工况时液体晃动的高阶频率项参与占比要比格栅位置为 Case 2B 和 Case 2C 工况对应的要大,这表明把格栅放置在归一化速度值相对较大的位置,能有效地抑制水箱的非线性响应,因为格栅压力损失与速度的平方成正比关系。把格栅放置在某一模态下归一化速度值最大处,即可造成这一模态下最大的速度损失及相对较大的阻尼比。

图 12 为 $A/L=0.005$ 和 $A/L=0.016$ 时,采用 Tait 公式法和 CFD 模拟结果的衰减曲线法求得的

格栅处于不同位置对应的 TLD 系统阻尼比。两种方法求得的阻尼比均随着格栅放置位置远离水箱中心而减小。从图 9 可以看出,在水箱中心位置,第一阶晃动模式下归一化速度值是最大,若液体晃动以第一阶频率参与占比为主,那么放置格栅

位置越接近水箱中心, TLD 阻尼比越大。上述两种方法求得的阻尼比较接近,只有在 $A/L = 0.016$ 、格栅位置编号为 1 (Case 2A 工况) 时相差较大,其原因可能因为此情况下液体晃动的非线性最为明显。

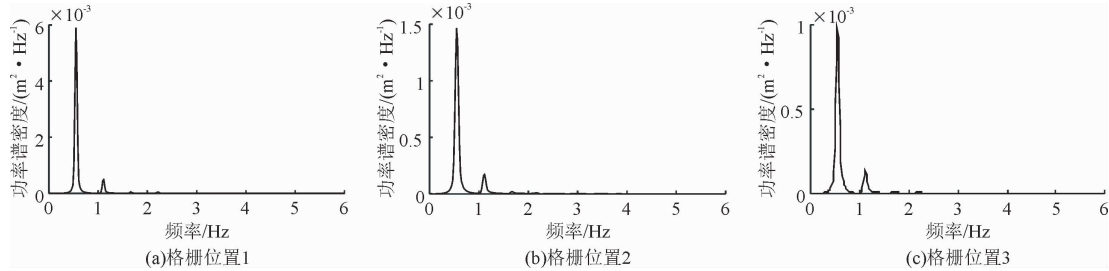


图 10 $A/L=0.005$ 时不同格栅位置的侧壁波高功率谱密度图

Fig. 10 Power spectral density of wave height of free surface at different screen locations ($A/L = 0.005$)

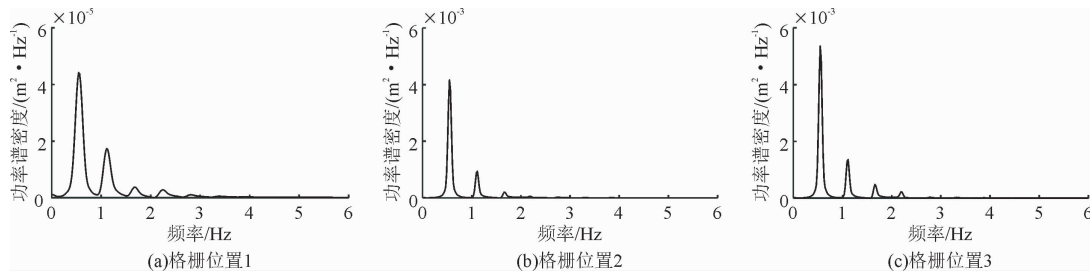


图 11 $A/L=0.016$ 时不同格栅位置的侧壁波高功率谱密度图

Fig. 11 Power spectral density of wave height of free surface at different screen locations ($A/L = 0.016$)

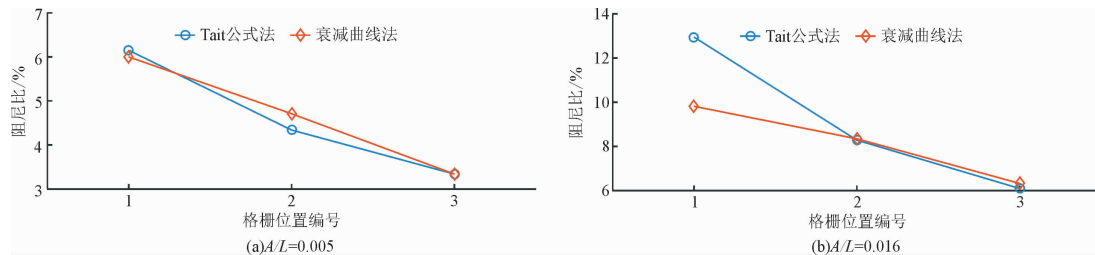


图 12 $A/L = 0.005$ 和 $A/L = 0.016$ 时不同格栅位置对应的 TLD 阻尼比

Fig. 12 Damping ratios of TLD systems with different screen locations when $A/L = 0.005$ and $A/L = 0.016$

3.3 水深比对内置垂直格栅 TLD 水箱振动特性的影响

用 FLUENT 软件对分组 3 对应的分析工况进行了数值模拟。图 13 是 $A/L = 0.010$ 时 5 种不同水深比对应的无量纲侧壁波高和无量纲水平控制力时程曲线。从图 12 可以看出,随着水深比的增大,晃动周期越来越短。水深比从 0.123 增加至 0.30,无量纲侧壁波高最大值逐步降低,且降低的幅度越来越小, $h/L = 0.25$ 和 $h/L = 0.30$ 时的无量纲侧壁波高几乎相等。无量纲水平控制力的变化趋势与无量纲侧壁波高基本一致。

图 14 为 $A/L = 0.010$ 时不同水深比对应的侧

壁波高功率谱密度图,对比分析发现,随着水深比的增大,液体晃动的高阶频率项参与占比逐渐减小,在水深比 $h/L = 0.20$ 及以上时,液体晃动主要以第一阶晃动频率控制为主。从无量纲侧壁波高时程曲线也可观察到这一规律,随着水深比的增大,两者的时程曲线越来越接近线性振动特征。

CFD 模拟曲线图 15 是通过波高衰减曲线进行功率谱变换得到的 TLD 一阶固有频率,另一条曲线的一阶固有频率是根据线性势流理论推导得出。可以看出,随着水深比的增大, TLD 一阶固有频率增大。两种方法求得的固有频率基本相等,进一步证明了 CFD 模拟的可行性。

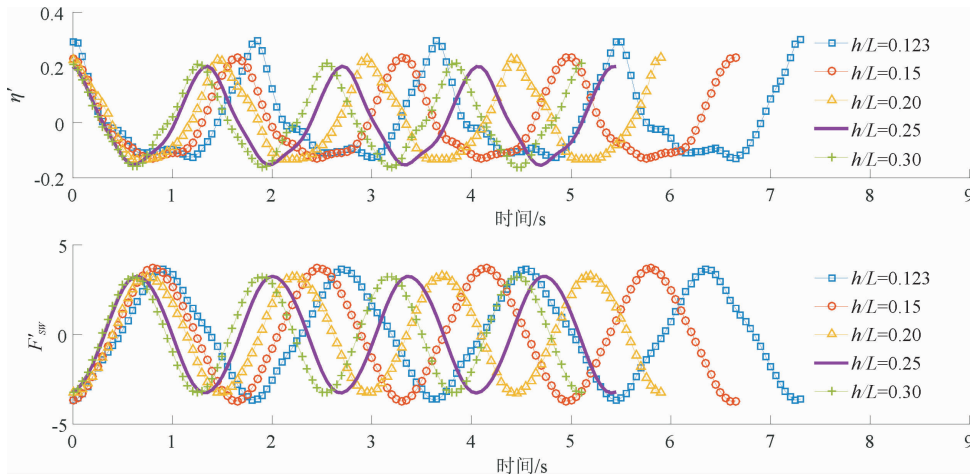


图 13 $A/L = 0.010$ 时不同水深比对应的无量纲侧壁波高和无量纲水平控制力时程曲线

Fig. 13 Non-dimensional wave height of free surface and non-dimensional horizontal control force for the cases with different water-depth ratios ($A/L = 0.010$)

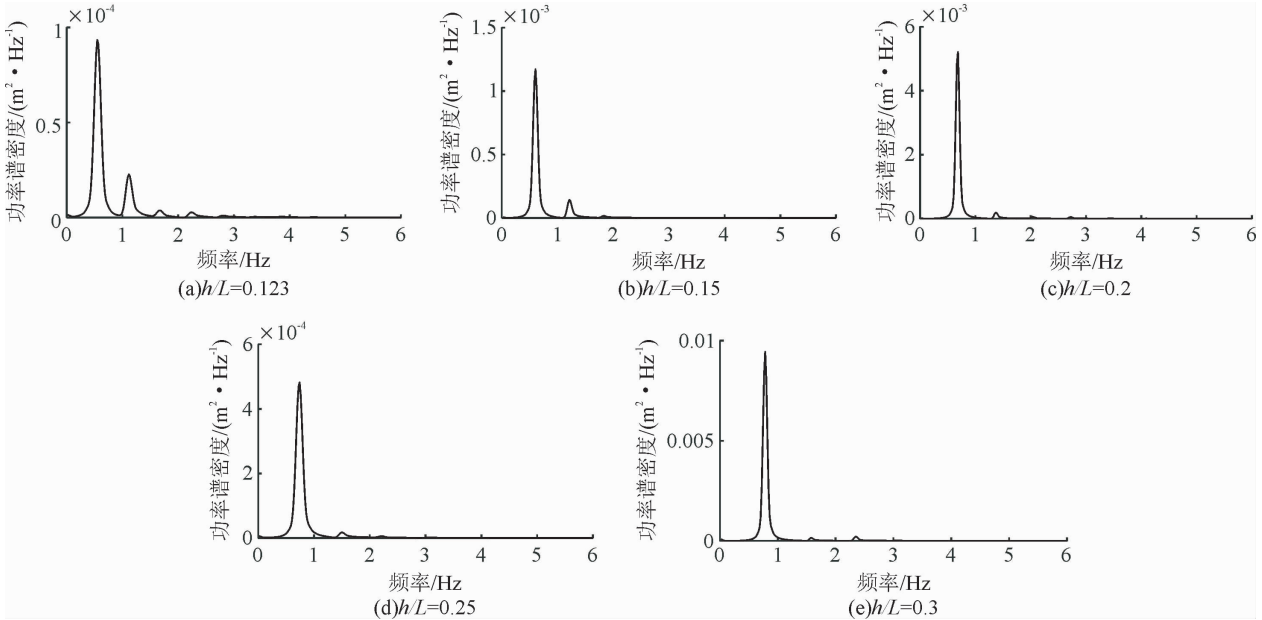


图 14 $A/L = 0.010$ 时不同水深比对应的侧壁波高功率谱密度图

Fig. 14 Power spectral density of wave height of free surface for the cases with different water-depth ratios ($A/L = 0.010$)

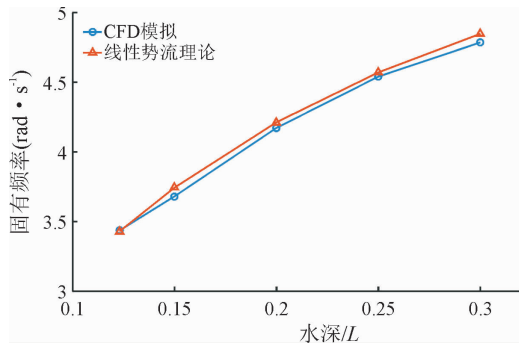


图 15 不同水深比对应的 TLD 一阶固有频率

Fig. 15 First order natural frequency of TLD corresponding to different water depth ratio

图 16 为 $A/L = 0.010$ 时用 Tait 公式法和 CFD 模拟结果的衰减曲线法求得的不同水深比下的带垂直格栅 TLD 系统阻尼比值。不难看出,随着水深比的增大,在水箱尺寸、格栅尺寸、格栅放置位置、外加水平激励相同的情况下,两种方法求得的阻尼比均是成下降的趋势,说明纯水提供的阻尼是有限的,内置格栅 TLD 系统的阻尼主要通过液体晃动时由于格栅构件存在的耗能来实现。所以在设计 TLD 水箱的时候要找到合适的水深比,从而达到有经济效益和发挥 TLD 最大作用的双重目的。

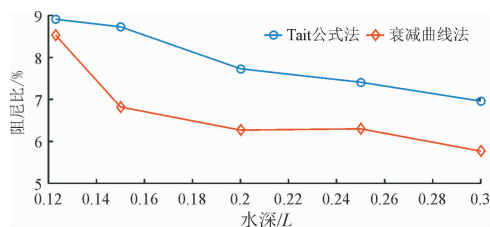


图 16 $A/L = 0.010$ 时不同水深比对应的 TLD 阻尼比

Fig. 16 TLD damping ratios of TLD systems for the cases with different water-depth ratios ($A/L = 0.010$)

4 结 论

本文基于计算流体力学(CFD),用 FLUENT 软件对内置垂直格栅 TLD 水箱内液体晃动的振动特征进行数值模拟与分析,得到如下结论:

(1)通过与已有的实验结果进行比较,表明用 FLUENT 软件能够较好地实现对内置格栅 TLD 水箱液体晃动的数值模拟。

(2)当水平外加激励的频率与内置垂直格栅的 TLD 系统中液体晃动的第一阶频率接近时,随着外激励幅值的增加,液体晃动非线性逐步加剧,液体晃动幅度增大,无量纲水平控制力最大值逐步减小,阻尼比随水平外加激励的幅值呈现非线性增大现象, A/L 由 0.005 增大到 0.031,阻尼比增大近 88.3%。阻尼比大小对比本文研究的算例可达 5% ~ 10% 左右。

(3)把格栅放置在液体晃动模态下归一化最大速度值处,能够有效地抑制液体晃动的非线性现象。格栅放置位置越靠近水箱中部,内置垂直格栅构件的 TLD 系统阻尼比越大,格栅位置靠近水箱中心的阻尼比约是远离水箱中心的 2 倍。

(4)随着 TLD 系统的水深比增大,内置格栅构件的布置相同时,TLD 系统的阻尼比逐步减小,出于对工程经济效益的考虑,设计时可以寻求合适的水深比。

参考文献:

- [1] Suthar S J, Jangid R S. Design of tuned liquid sloshing dampers using nonlinear constraint optimization for across-wind response control of benchmark tall building[J]. Structures, 2021, 33(1/2/3):2675-2688.
- [2] Alhaddad W, Halabi Y, Xu H, et al. A comprehensive introduction to outrigger and belt-truss system in skyscrapers[J]. Structures, 2020, 27:989-998.
- [3] Solari, Giovanni. Wind loading of structures: Framework, phenomena, tools and codification[J]. Structures, 2017,12: 265-285.
- [4] 黄鹏. 基于 CFD 的内置阻尼装置 TLD 振动特性参数化分析[D]. 广州:广州大学,2020.
- [5] 吴炳成. 格栅矩形水箱 TLD 振动特性及在结构减振中的应用[D]. 长沙:湖南大学,2015.
- [6] Sun L M, Fujino Y, Koga K. A model of tuned liquid damper for suppressing pitching motions of structures[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 1995, 24(5):625-636.
- [7] Yu J K. Non-linear characteristics of tuned liquid dampers[D]. Seattle: University of Washington, 1997.
- [8] Yu J, Wakahara T, Reed D A. A non-linear numerical model of the tuned liquid damper[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 1999, 28(6):671-688.
- [9] Tait M J. The performance of one-dimensional and two-dimensional tuned liquid dampers[D]. London: The University of Western Ontario,2004.
- [10] Tait M J, Damatty A, Isyumov N, et al. Numerical flow models to simulate tuned liquid dampers (TLD) with slat screens [J]. Journal of Fluids and Structures, 2005, 20(8): 1007-1023.
- [11] Cassolato M R. The performance of a tuned liquid damper equipped with inclined and oscillating damping screens[D]. Hamilton: McMaster University, 2007.
- [12] 瞿伟廉,李肇胤. U 型水箱对高层建筑和高耸结构风振控制的试验和研究[J]. 建筑结构学报, 1993, 14(5):37-44.
- [13] 蔡丹绎,李爱群,程文褰. 调频液体阻尼器(TLD)的等效力学模型研究[J]. 地震工程与工程振动, 1998, 18(1): 80-87.
- [14] 唐家鹏. FLUENT14.0 超级学习手册[M]. 北京:人民邮电出版社,2013.
- [15] 尚春雨,赵金城. 用 FLUENT 分析刚性容器内液面晃动问题[J]. 上海交通大学学报,2008,4(6):953-956.
- [16] 刘晶波,杜修力. 结构动力学[M]. 北京:机械工业出版社,2005.
- [17] Tait M J. Modelling and preliminary design of a structure-TLD system[J]. Engineering Structures, 2008, 30(10):2644-2655.

【责任编辑:孙向荣】