

# 基于 CFD/CSD 耦合分析的内置竖向挡板 TLD 高层建筑风振控制研究

孙连杨, 吴玖荣, 钟文坤, 傅继阳, 黄 鹏

(广州大学风工程与工程振动研究中心, 广东 广州 510006)

**摘要:** 调谐液体阻尼器(TLD)是高层建筑风振控制常用的阻尼器。纯水 TLD 系统的阻尼比较小,在其内部增设内置挡板,可显著增加其阻尼比而提高振动控制效果。本文基于计算流体力学(CFD)开源软件 OpenFOAM 对带竖向挡板的 TLD 系统内的液体晃荡进行 CFD 仿真,并以第三代风振控制 Benchmark 模型为计算实例,对其风致响应进行计算结构动力学(CSD)时程分析,在此基础上开发了基于 CFD/CSD 耦合作用的 TLD-高层建筑风振控制数值算法,对顶部设置带有竖向挡板的 TLD 系统的高层建筑的风振控制性能进行研究,分析了此类 TLD 系统对高层建筑风致响应的控制效率。不同重现期风荷载下的仿真结果表明,此类 TLD 系统对结构风致响应的控制效果显著。与实时混合实验的结果进行对比,验证了文中提出的数值算法具有较高的精确度。

**关键词:** 风振控制; 高层建筑; 内置竖向挡板 TLD; CFD/CSD 耦合作用分析

**中图分类号:** TU973.2<sup>+</sup>13 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-4523(2025)02-0292-10

**DOI:** 10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.2025.02.008

## CFD/CSD coupling numerical simulation on wind-induced vibration control of tall building and TLD system with built-in vertical baffles

SUN Lianyang, WU Jiurong, ZHONG Wenkun, FU Jiyang, HUANG Peng

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

**Abstract:** Tuned liquid damper (TLD) is a common type of passive damper system in high-rise buildings. However, the damping of a pure water TLD system is relatively small. Adding internal baffles can significantly increase its damping ratio, thereby improving its vibration control efficiency. In this study, a numerical simulation of liquid sloshing in a TLD system with vertical baffles is conducted using the open-source computational fluid dynamics (CFD) software OpenFOAM. The wind-induced response of the benchmark building for the third-generation wind-induced vibration control study is investigated using the computational structure dynamics (CSD) method. On this basis, the CFD/CSD coupling numerical simulation is conducted to evaluate the control efficiency on wind-induced vibration control of a tall building and a TLD system with built-in vertical baffles. The CFD/CSD coupling numerical simulation results show that the TLD system with three vertical baffles has a significant control effect on the wind-induced response of the benchmark building under dynamic wind loading with different return periods. The comparison with real-time hybrid test results also confirms that the proposed numerical algorithm in this paper has sufficient accuracy in estimating the wind-induced control efficiency.

**Keywords:** wind-induced vibration control; tall buildings; TLD with built-in vertical baffles; CFD/CSD coupling effect analysis

调谐液体阻尼器(tuned liquid damper, TLD)作为一种被动控制阻尼系统<sup>[1]</sup>,其减振机理为:TLD 在外激励作用下,通过其内部液体的晃荡,对水箱壁产生水平动压力,从而对其下部主体结构产生反作用的控制力。从能量角度来说,TLD 中因液体晃荡在侧壁和底部产生的摩擦力、外部激励下液体产生

的波浪破碎均能耗散下部结构振动产生的部分能量,从而减小被控结构的响应<sup>[2]</sup>。当 TLD 的晃荡频率调谐至与下部结构的频率一致时,可实现较好的减振效果<sup>[3]</sup>。TLD 具有容易安装、造价低、自动激活性能好、容易匹配调谐频率等优点<sup>[4]</sup>,众多学者针对 TLD 的风振响应控制问题展开了大量研究。

**收稿日期:** 2023-04-26; **修订日期:** 2023-07-10

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(52378497, 51925802);高等学校学科创新引智计划资助项目(D21021)

MODI等<sup>[5]</sup>首次提出利用调谐液体阻尼器来控制下部结构物的风致响应,TLD装置首次应用于Nagasaki机场指挥塔,其风致响应实际测试表明安装TLD后顶部位移反应减少35%~50%<sup>[6]</sup>。随后Shin Yokohama Prince酒店<sup>[7]</sup>在其顶部设置了30个TLD,实测表明TLD对此结构的风振控制作用十分明显。FUJINO等<sup>[8]</sup>通过试验研究了圆形TLD在频率调谐至与下部结构固有频率相等时,TLD系统的减振效果。张蓝方等<sup>[9]</sup>对内部带阻尼格栅的TLD减振性能进行了相关的试验研究,分析了格栅稠度比、格栅位置、激励相对幅值对TLD阻尼性能的影响。TAIT<sup>[10]</sup>将TLD系统等效线性化为TMD系统,给出了TLD系统初步设计的基本步骤。李宏男等<sup>[11]</sup>在大连国贸大厦结构顶层设置浅水TLD系统,数值计算结果表明,顶部设置TLD能有效减小该结构的风致响应。谭平等<sup>[12]</sup>对某26层的结构进行了脉动风激励下的结构动力仿真分析,发现经过优化设计的TLD能显著改善其减振性能。徐梓栋等<sup>[13]</sup>开展了大跨索承桥梁风致响应的流固耦合数值模拟,为具有流固耦合效应的TLD-高层建筑风致响应分析提供了一定的借鉴和参考。吴炳成<sup>[14]</sup>通过振动台试验研究了纯水及内置格栅的TLD系统的动力特性,用数值方法模拟研究了TLD系统对人行天桥的侧向减振作用。李书进等<sup>[15]</sup>对滚动碰撞式调制质量阻尼器的减振性能进行了试验研究,其试验结果对于TLD性能设计具有一定的参考价值。VARKICHAN等<sup>[16]</sup>分析了TLD系统对一个25层高层建筑的风振控制效果,并根据最佳质量比设计出TLD系统的尺寸和水深。HICKEY等<sup>[17]</sup>将TLD应用于高层模块化建筑,对其进行振动控制,结果表明,现有的振动控制技术可提升高层模块化建筑的最大可行性高度。

传统的TLD系统仅依靠水的自身黏性来提供控制系统的阻尼,此类TLD系统阻尼较小,不能有效地抑制下部结构的振动。为克服这一缺点,结合TLD系统自身内部结构设计的特点,可在其内部设置耗能构件如格栅、挡板、立柱等提高TLD系统的阻尼。以往学术界针对纯水TLD系统的性能研究较为活跃,但对于具有各类内置耗能构件TLD系统的力学性能和动力特征的分析,以及此类TLD-高层建筑风振控制的研究较少涉及。而且以往对于纯水TLD系统的力学性能分析,基本采用基于速度势的势流理论分析方法。该方法可以得到纯水TLD系统在小振幅液体晃荡时的理论解析解,但难以得到大振幅下液体非线性晃荡或各晃荡模态非线性耦合效应较强情况下的精确解析解。因此采用数值模拟方法,如基于有限体积法的计算流体动力学

(computational fluid dynamics,CFD)算法,可以较为有效地模拟TLD系统中液体晃荡的非线性问题。当分析TLD-下部结构的风振控制时,由于还需要对下部结构进行基于计算结构动力学(CSD)的时程动力分析,因此就要考虑两种不同物理场(高层建筑作为固体的风致振动,以及TLD中的液体晃荡)流固耦合效应的CFD/CSD耦合分析,类似的研究还较少。

本文利用自编的结构动力学时程分析程序,通过CFD开源软件OpenFOAM的应用程序接口,开发了考虑流固耦合效应的CFD/CSD耦合算法,对顶部设置有竖向挡板TLD系统的高层建筑的风振控制性能进行相关研究。以建筑结构第三代风振控制Benchmark模型为例,设计了与之对应的内置竖向挡板TLD系统,并采用本文提出的CFD/CSD耦合分析算法,模拟分析了在不同重现期风荷载作用下,内置竖向挡板的TLD对下部结构的风致振动控制性能。

## 1 CFD/CSD耦合分析原理

### 1.1 TLD系统减振原理

主体结构在风荷载作用下,调谐液体阻尼器中的液体会随着建筑物的响应而产生晃荡。液体在晃荡过程中产生的波浪会对水箱侧壁产生动压力,动侧压力和惯性力共同构成对下部结构的控制反力 $F_{TLD}$ 。为了使TLD发挥最优的控制作用,液体的晃荡频率应接近于下部结构的自振频率。

液体的晃荡频率与水深以及水箱的外形尺寸有关,因此通过适当调节相关的水箱参数可以达到调频的目的<sup>[18]</sup>。此外,控制力大小还与TLD系统的阻尼有关,在纯水水箱内部增加挡板、格栅等措施可以提高液体晃荡的阻尼,增强TLD系统的耗能作用和对下部结构的减振效果<sup>[19]</sup>,本文首先将在底部中间设置单块竖向挡板TLD形式的模拟仿真分析与已有文献的实时混合实验结果进行对比,验证数值仿真的精确度,随后将垂直挡板数量增加至3个,进一步分析挡板数量对TLD系统阻尼比以及对下部结构顶部风致响应控制效果的影响<sup>[20]</sup>。图1给出了顶部安装内置挡板TLD系统的高层建筑结构简化计算模型,采用集中多质点模拟各楼层质量,柱梁及剪力墙等构件提供各楼层侧向刚度和阻尼。因此,对顶部设有TLD的结构,其动力方程可表示为:

$$M\ddot{X} + C\dot{X} + KX = F(t) + HF_{TLD} \quad (1)$$

式中, $M$ 、 $K$ 和 $C$ 分别为下部结构的质量矩阵、刚度

矩阵和阻尼矩阵;  $\ddot{X}$ 、 $\dot{X}$  和  $X$  分别为结构的加速度、速度和位移响应向量;  $F(t)$  为作用在主体结构的风荷载向量;  $H$  为 TLD 系统的位置向量;  $F_{\text{TLD}}$  为内置竖向挡板的 TLD 系统中液体晃荡产生的控制反力。常见的多自由度体系运动方程数值求解方法有中心差分法、Runge-Kutta 法、Newmark- $\beta$  法、Houbolt 法、Wilson- $\theta$  法和精细积分等方法, 本文采用 Newmark- $\beta$  法计算求解。

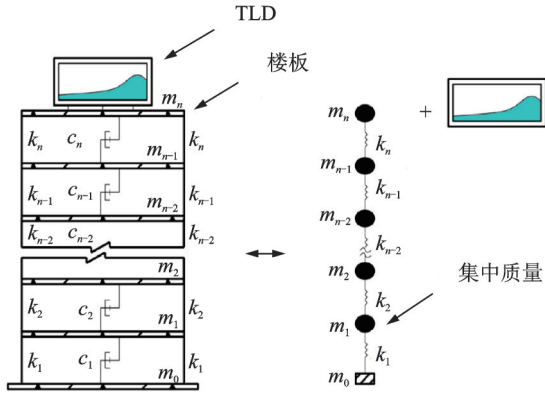


图 1 安装有 TLD 系统的结构模型简化图

Fig. 1 Simplified structure model with TLD system

## 1.2 OpenFOAM 中 TLD 内液体晃荡 CFD 模拟与下部结构风致振动响应分析的实时耦合算法

CFD 是采用数值计算方法对液体流动和传热等物理现象进行仿真的一门学科。采用 CFD 数值模拟方法原则上可以求解各种液舱形状及任意内部耗能构件布置、任意装载深度和各种激励下 TLD 中液体晃荡的问题, 具有应用范围广, 应用成本低等优点, 是除理论分析、现场实测和风洞实验的另一种重要分析手段。OpenFOAM (open field operation and manipulation) 是目前 CFD 领域内广泛流行的开源软件, 是在 Linux 平台下基于 C++ 的面向对象技术开发的计算流体力学开源软件包, 开源的特性使其方便进行二次开发, 具有很好的灵活性<sup>[21]</sup>, 本文即利用其 OpenFOAM 应用程序接口, 开发考虑流固耦合效应的 CFD/CSD 耦合算法。

interFoam 是 OpenFOAM 中可用来模拟液体晃荡的动力求解器<sup>[22]</sup>, 液体晃荡问题的关键技术在于要模拟液气两种流体的界面, 由于 TLD 中的液体界面处于实时变化状态, 在模拟过程中必须不断捕捉界面。interFoam 中使用体积分数 (volume of fluid, VOF), 引入相分数  $\alpha$  表示流体在某个网格单元内的比例, 通过求解相方程实现液体晃荡自由表面的追踪<sup>[23]</sup>。在计算域中若  $\alpha=1$ , 表示此网格单元全为液体; 若  $\alpha=0$ , 表示此网格单元充满空气; 如果  $\alpha$  介于 0 和 1 之间, 则表示为气液混合网格单元。通过追踪

相分数, 对  $\alpha$  进行后处理可以获得液体晃荡的自由液面波高。因此, 不可压缩液体晃荡模型共包含 3 个控制方程, 即连续性方程、动量方程和相方程, 分别表示为:

$$\nabla \cdot U = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho U}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U U) - \nabla \cdot [\nu (\nabla U + \nabla U^T)] = -\nabla p_{\text{rgh}} - g h \nabla \rho + \sigma \kappa \nabla \alpha \quad (3)$$

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + U \cdot \nabla \alpha = 0 \quad (4)$$

式中,  $U$  为流体速度矢量;  $t$  为时间;  $\rho$  和  $\nu$  分别为水的密度和黏度; OpenFOAM 求解器使用伪动压  $p_{\text{rgh}}$  求解 RANS 方程, 定义  $\nabla p_{\text{rgh}} = p - \rho g h$ ,  $\nabla p_{\text{rgh}}$  无实际物理意义, 为数值处理的产物,  $p$  为压力,  $g$  为重力加速度,  $h$  为网格单元体心的位置矢量;  $g h \nabla \rho$  为重力项;  $\sigma \kappa \nabla \alpha$  为表面张力, 其中  $\sigma$  为表面张力系数,  $\alpha$  为相分数,  $\kappa$  为气液交界处的曲率。

为了实现 TLD 液体晃荡与下部主体结构风致振动的 CFD/CSD 耦合分析, 有两个关键点需单独加以处理。第一, 每个 CFD 仿真时间步的 TLD 系统水平控制力反  $F_{\text{TLD}}$  求解; 第二, 如何将下部主体结构的加速度激励传至液体晃荡的 TLD 系统。针对第一个问题, OpenFOAM 中的 interFoam 求解器在执行计算时, 通过应用 OpenFOAM 自带的 function-Object 框架下的 forces 函数, 在控制文件 controlDict 中指定 TLD 系统中与主体结构运动方向平行的两个竖向侧面的边界名称, 即可得到在各时间步对应的控制力反  $F_{\text{TLD}}$ 。

为模拟结构顶部加速度对上部 TLD 系统的外加激励, 可选用 OpenFOAM 中 fvOptions 的 tabulatedAccelerationSource 选项, 它通过读取加速度数据文件来引入下部结构顶部对 TLD 系统的外加激励, 从而激发水箱中液体的晃荡。即通过在动量方程中增加源项来模拟下部结构对 TLD 系统的激励, 表示为:

$$\frac{\partial \rho U}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U U) - \nabla \cdot [\nu (\nabla U + \nabla U^T)] = -\nabla p_{\text{rgh}} - g h \nabla \rho + \sigma \kappa \nabla \alpha + F_s \quad (5)$$

式中,  $F_s$  为源项, 表示流体由于加速度激励而产生的惯性力。

在 OpenFOAM 软件中引入 fvOptions 模块, 采用 Newmark- $\beta$  动力时程算法, 获得每个对应时间步建筑物顶部的风致加速度响应  $A_{\text{top}}$ 。在 TLD 系统内部液体晃荡的 CFD 模拟仿真时, 此顶部加速度响应对于 TLD 系统的底部外加激励, 可通过在 OpenFOAM 开源软件的动量方程中添加源项的方式, 传递至 interFoam 求解器中求解 TLD 系统中液体的晃

荡及相应控制反力  $F_{TLD}$ 。然后反馈叠加到 Newmark- $\beta$ 法右端的风荷载时程数据中,以更新每个时间步作用于结构的外加荷载,随后进行下一步的响应计算,实现 CFD 与 CSD 的相互耦合分析。按此步骤循环直至仿真结束,即可完成内置挡板 TLD-结构系统的风振控制时程分析,整个计算流程如图 2 所示。

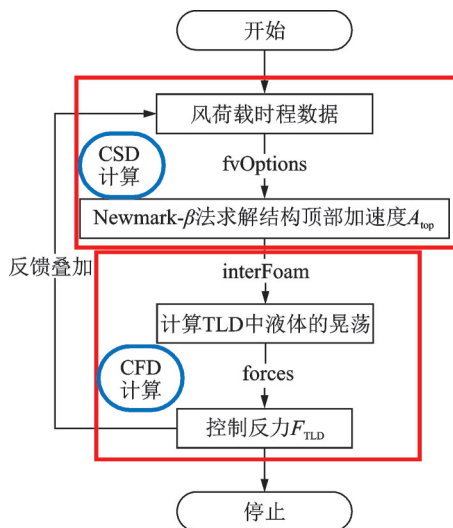


图 2 OpenFOAM 中 TLD 中液体晃荡-结构风致振动耦合分析流程图

Fig. 2 Flowchart of coupling analysis of liquid sloshing in TLD and wind-induced vibration of building structure

## 2 TLD 中液体晃荡 CFD 仿真分析的模型验证

为了验证 OpenFOAM 中 interFoam 求解器模拟液体晃荡所得到的水箱侧壁处动压力的合力结果的准确性,本文首先将 CFD 仿真结果与 XUE 等<sup>[24]</sup>的水箱内液体晃荡的实验结果进行对比。

XUE 等<sup>[24]</sup>实验中 TLD 水箱的长度、宽度和水深分别为 570、310 和 180 mm。有一块竖向挡板位于水箱底部中心,高度为 100 mm,厚度为 6 mm。水箱底部受到水平简谐位移运动的激励:  $x(t) = a \cos(\omega t)$ ,其中  $a$  和  $\omega$  分别为水箱底部运动的振幅和相应的频率,水箱中液体晃荡的一阶固有圆频率  $\omega_1 = 6.403 \text{ rad/s}$ ,在 XUE 等<sup>[24]</sup>所述的实验中,外加底部激励频率为  $\omega = 0.88\omega_1$ , $a$  取值为 0.01 m。水箱的右侧壁中部安装三个压力传感器,用来监测  $P_1$ 、 $P_2$  和  $P_3$  测点的动压,这三个测点离水箱底的高度分别为 65、105 和 185 mm。

图 3 为 TLD 中液体晃荡 CFD 模拟仿真所建立的计算域网格模型,采取六面体结构化网格,最小网格尺寸为 0.005 m。在 OpenFOAM 控制文件 contr-

olDict 中,在 TLD 水箱右侧对应的三个压力传感器位置处,设置 probes 提取压力  $p$ ,以便与实验值进行对比,计算时间步长为 0.01 s。

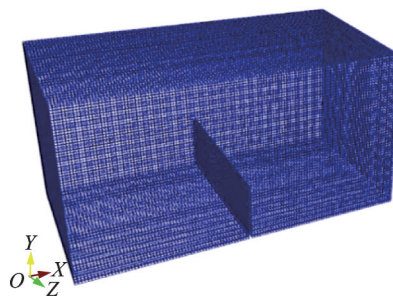
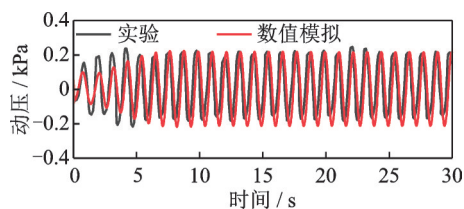


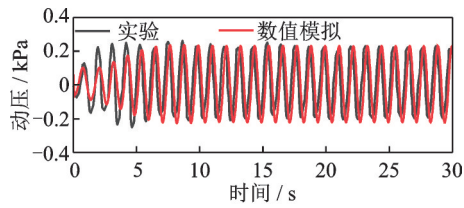
图 3 CFD 网格模型

Fig. 3 CFD grid model

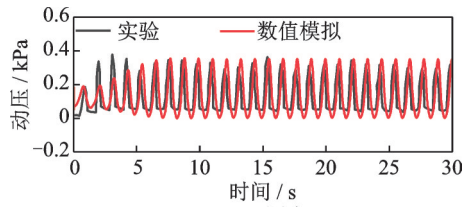
图 4 分别列出了  $P_1$ 、 $P_2$  和  $P_3$  测点的实验与 interFoam 模拟仿真分析得到的动压时程的对比。 $P_1$  和  $P_2$  测点位于初始水面以下,随着简谐激励下液体的晃荡,动压时程曲线类似为简谐曲线,波动范围约为  $[-0.2, 0.2]$  kPa。 $P_3$  测点位于初始水面以上,当液体晃荡的波高所在位置超过测点位置时动压为正值,低于测点位置时动压则为 0,动压在 0~0.4 kPa 范围内波动。同时可以看出,水箱内液体的晃荡约在 5 s 时开始稳定,三个测点的动压时程曲线的 CFD 模拟值与实验值均吻合度较高,因此本文选用的 interFoam 模块对于 TLD 液体晃荡及水平控制力模拟具有较高的精度。



(a)  $P_1$  测点  
(a) Measuring point  $P_1$



(b)  $P_2$  测点  
(b) Measuring point  $P_2$



(c)  $P_3$  测点  
(c) Measuring point  $P_3$

图 4 实验<sup>[24]</sup>与 CFD 数值模拟的动压时程对比

Fig. 4 Comparison of dynamic pressure time-histories between experiment<sup>[24]</sup> and CFD numerical simulation

### 3 TLD-结构系统模型参数确定

对于顶部设置内置竖向挡板 TLD 高层建筑的风振控制分析,本文选取建筑结构风振控制第三代 Benchmark 模型为实例进行计算<sup>[25]</sup>。此 Benchmark 模型为一座 76 层 306 m 高的钢筋混凝土建筑,其横截面在建筑物两个主轴方向为对称布置,如图 5 所示,结构的高宽比为  $306.1 \text{ m}/42.5 \text{ m}=7.3$ ,因此该结构属于风敏感建筑物。

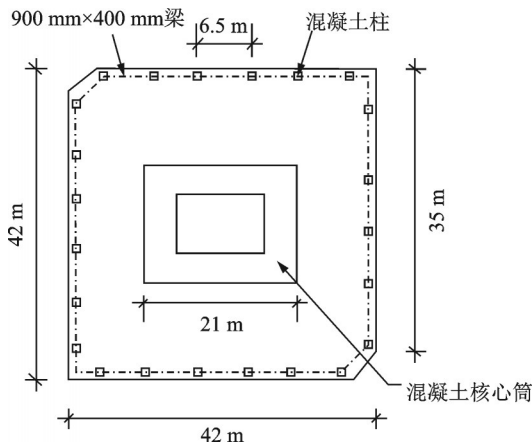


图 5 Benchmark 模型横截面

Fig. 5 The cross section of Benchmark model

Benchmark 模型结构的侧向前五阶自振频率分别为 0.16、0.765、1.992、3.79 和 6.395 Hz, 10 年、50 年、100 年重现期风速对应的风荷载作用时结构各振型的阻尼比分别取为 1.5%、3% 和 4%<sup>[25]</sup>。为了简化结构的动力响应计算,将此结构简化为 76 个集中质量节点的“糖葫芦串”模型,简化后的模型如图 6 所示。本文将对横风向荷载作用下主体结构的横

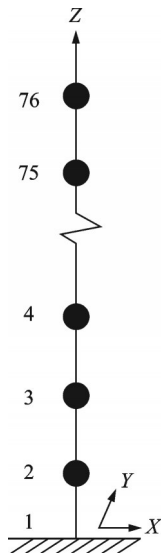


图 6 简化结构模型图

Fig. 6 Simplified structure model diagram

风向响应进行分析。建筑物与横风向荷载方向对应的质量矩阵、侧向刚度矩阵、横风向风荷载时程依据文献[25]的数据取值。阻尼矩阵按照瑞利阻尼的方式构造。

假设 Benchmark 模型顶部设置带内置挡板的 TLD 系统,其尺寸确定遵循 TLD 中液体晃荡频率与主体结构第一阶自振频率相等的原则,即  $f_{\text{TLD}} = f_1 = 0.16 \text{ Hz}$ ,综合 Benchmark 模型的长度和宽度,最终选取 TLD 的长度  $L$  为 24 m。TLD 水深值  $h$  的计算公式为:

$$f_{\text{TLD}} = \frac{\sqrt{\frac{\pi g / \tanh(h/L)}{L}}}{2\pi} \quad (6)$$

计算得到  $h$  值为 8.14 m。

TLD 系统宽度  $b$  的计算公式为:

$$b = \frac{\gamma M^* \pi^3}{8\rho L^2 \tanh(\pi h/L)} \quad (7)$$

式中,  $\gamma$  为 TLD 与主体结构的一阶广义质量比,一般在 1% 至 5% 之间;  $M^*$  为下部主体结构的一阶广义质量。为了验证本文提出的基于 CFD/CSD 耦合分析的内置竖向挡板 TLD 高层建筑风振控制算法的正确性,本文  $\gamma$  取值与文献[20]实验部分相一致,取为 4.67%。据此 TLD 的宽度  $b$  为 15 m。因此 TLD 的长度、宽度和水深分别取为 24、15 和 8.14 m。为使 TLD 系统达到预定的阻尼比,其底部中间位置设置单块垂直挡板,挡板高度经计算取为 1.6 m<sup>[25]</sup>。为控制 CFD 模拟仿真的网格数量,减少 CFD 模拟仿真的时间,同时方便与文献[25]的实验结果相比较,CFD/CSD 耦合分析时, TLD-结构系统的长度缩尺比取 1:40,即  $L_{\text{scale}}:L_{\text{full}} = 1:40$ 。根据式(6)可知时间缩尺比  $T_{\text{scale}}:T_{\text{full}} = 1:\sqrt{40}$ ,因此根据动力相似关系,速度缩尺比应为  $V_{\text{scale}}:V_{\text{full}} = 1:\sqrt{40}$ ,对应的加速度缩尺比  $A_{\text{scale}}:A_{\text{full}}$  为 1:1,即

$$\frac{A_{\text{scale}}}{A_{\text{full}}} = \frac{V_{\text{scale}}/T_{\text{scale}}}{V_{\text{full}}/T_{\text{full}}} = 1 \quad (8)$$

质量缩尺比  $M_{\text{scale}}:M_{\text{full}}$  满足:

$$\frac{M_{\text{scale}}}{M_{\text{full}}} = \frac{\rho_{\text{scale}} L_{\text{scale}}^3}{\rho_{\text{full}} L_{\text{full}}^3} = \left(\frac{L_{\text{scale}}}{L_{\text{full}}}\right)^3 = \left(\frac{1}{40}\right)^3 \quad (9)$$

式中,  $\rho_{\text{scale}}:\rho_{\text{full}}$  为密度缩尺比。

侧向刚度缩尺比  $K_{\text{scale}}:K_{\text{full}}$  满足:

$$\frac{K_{\text{scale}}}{K_{\text{full}}} = \frac{M_{\text{scale}} A_{\text{scale}} / L_{\text{scale}}}{M_{\text{full}} A_{\text{full}} / L_{\text{full}}} = \left(\frac{L_{\text{scale}}}{L_{\text{full}}}\right)^2 = \left(\frac{1}{40}\right)^2 \quad (10)$$

控制力缩尺比  $F_{\text{scale}}:F_{\text{full}}$  满足:

$$\frac{F_{scale}}{F_{full}} = \frac{M_{scale}}{M_{full}} \cdot \frac{A_{scale}}{A_{full}} = \left(\frac{L_{scale}}{L_{full}}\right)^3 = \left(\frac{1}{40}\right)^3 \quad (11)$$

#### 4 TLD液体晃荡-下部结构风致振动的CFD/CSD耦合仿真模拟

在对建筑结构风振控制Benchmark模型进行风荷载作用下的时程动力分析前,需首先获得其在不同重现期设计风速下对应的顺风向和横风向风荷载时程。由于Benchmark模型高306 m,高宽比为7.3,依据文献[25]的分析结果,原有结构横风向风致响应比顺风向响应大,更不容易满足居住者对风致加速度响应的舒适度要求。因此本文仅考虑对横风向进行风振控制,横风向风荷载时程采用文献[25]的测力模型风洞实验结果。风洞实验采用的长度缩尺比为1:400,速度缩尺比为1:3,因此时间缩尺比为1:133,测力风洞实验数据采样频率为1000 Hz。Benchmark设计原型所在位置对应的10 m高度处平均风速为13.5 m/s,对应风洞实验缩尺模型在此缩尺高度(10/400=0.025 m)对应的平均风速为4.5 m/s。

本文假设Benchmark原型位于广州市D类地貌区,则结构原型10年、50年和100年重现期对应的10 m高度处平均风速分别为11.22、14.49和15.87 m/s,则与Benchmark模型风洞实验<sup>[25]</sup>对应的速度缩尺比分别为1:2.49、1:3.22和1:3.53,与各重现期设计风速对应的风荷载时程步长 $\Delta t$ 如表1第3列数据所示。

表1 不同重现期设计风速对应的时间步长

Tab.1 Time steps associated with design wind speeds for different return periods

重现期	时间缩尺比	原型 $\Delta t/s$	CFD/CSD仿真分析缩尺 $\Delta t/s$	总步数
10年	1:160.6	0.1606	0.0254	3736
50年	1:124.2	0.1242	0.0197	4831
100年	1:113.3	0.1133	0.0179	5296

采用CFD/CSD耦合分析方法,对内置竖向挡板TLD的Benchmark模型进行风振控制分析时,缩尺后的TLD系统长度、宽度和水深分别为0.6、0.375和0.2 m,缩尺后的竖向挡板高度为0.04 m。其CFD网格模型如图7所示,选择六面体单元划分网格,最小网格尺寸为0.005 m,计算时间步长按照第3节所述的时间缩尺比 $1:\sqrt{40}$ 选用表1中第4列数据取值。计算时长与原型10 min对应,则对应不同重现期设计风速的CFD/CSD仿真模拟的步数如

表1第5列所示,对应的CFD/CSD模拟时长分别为94.89、95.17和94.80 s。

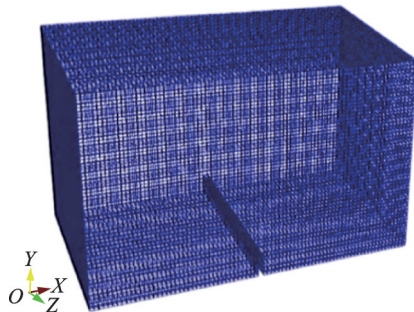


图7 Benchmark顶部TLD系统网格划分

Fig.7 Grid partition of the TLD system at the top of Benchmark model

在不同重现期设计风速(10年和50年)对应的横风向荷载作用下,采用如图2所示的CFD/CSD耦合模拟分析方法,对内置竖向挡板TLD的Benchmark模型进行了风振控制性能分析,相关的计算结果通过相似比换算为原型结构,所得到的分析结果如下所示。

##### 4.1 10年重现期设计风速下风振控制性能分析

在10年重现期风速对应的横风向荷载作用下,结构顶部的加速度、位移响应的风振控制效果如图8所示。从图8(a)可以看出,受控前加速度响应的峰值约为 $0.18 \text{ m/s}^2$ ,受控后的峰值约为 $0.14 \text{ m/s}^2$ ,下降了约22%。从图8(b)中可以看出位移响应的峰值也同样降低。

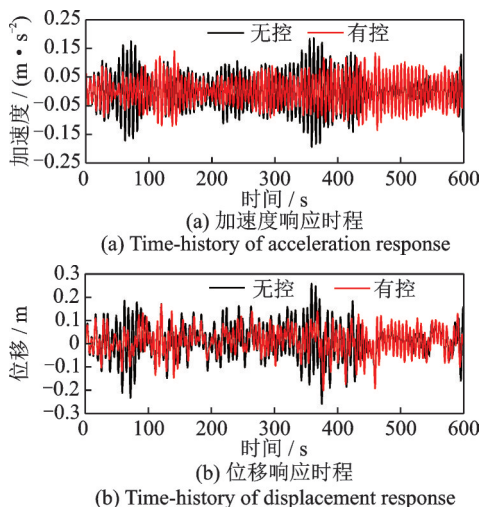


图8 10年重现期下的结构顶部风致响应时程

Fig.8 Time-history of wind-induced response at the top of structure with 10-year return period

表2列出了结构在无控和有控情况下,各类响应的均方根值以及TLD的控制效率。加速度的控制效率为15.73%,位移和速度的控制效率分别为

表 2 10年重现期下TLD的控制效率

Tab. 2 Control efficiency of TLD (10-year return period)

响应类别	加速度/ ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ )	位移/m	速度/ ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )
无控	0.0623	0.0757	0.0646
有控	0.0525	0.0597	0.0507
减振控制效率	15.73%	21.14%	21.52%

21.14%和21.52%，速度和位移的控制效率高于加速度的控制效率。

## 4.2 50年重现期设计风速下风振控制性能分析

表3列出了50年重现期风速对应的横风向风荷载下，结构顶部风致响应均方根值的对比。从表3中可以看出，顶部设置内置挡板TLD系统后，位移和速度的控制效率分别为24.05%和24.24%，高于风致加速度的控制效率。

表 3 50年重现期下TLD的控制效率

Tab. 3 Control efficiency of TLD (50-year return period)

响应类别	加速度/ ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ )	位移/m	速度/ ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )
无控	0.1267	0.1493	0.1312
有控	0.1034	0.1134	0.0994
减振控制效率	18.39%	24.05%	24.24%

图9为50年重现期风速对应的横风向荷载下，结构顶部风致响应的对比分析。从图9(a)可以看出，受控前加速度响应的峰值约为 $0.36 \text{ m/s}^2$ ，受控后的峰值约为 $0.27 \text{ m/s}^2$ ，下降了约25%。从图9(b)可以看出，结构受控前的位移峰值约为0.4 m，顶部设置内置挡板TLD系统后，位移峰值约为0.3 m，减小了25%。

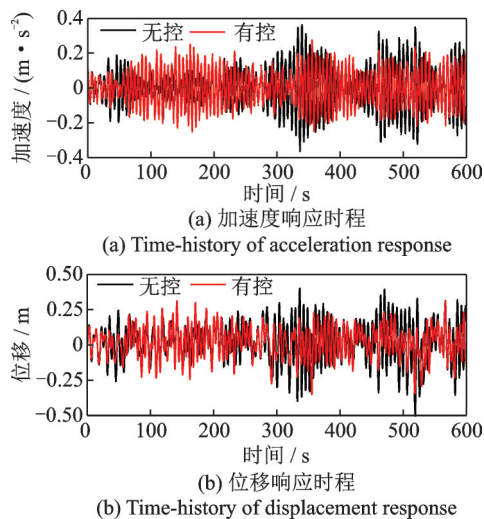


图9 50年重现期下的结构顶部风致响应时程

Fig. 9 Time-history of wind-induced response at the top of structure with 50-year return period

## 4.3 CFD/CSD耦合分析与实时混合实验对比

为了验证本文所提出的CFD/CSD耦合算法对TLD内液体晃动-结构风致振动流固耦合效应模拟结果的精度，将本文数值模拟结果与已有文献[20]的实时混合实验进行对比。不同重现期风速荷载作用下，上述带内置挡板TLD-Benchmark模型结构顶部风致响应均方根值对比如表4所示。

表 4 CFD/CSD耦合数值模拟与实时混合实验<sup>[20]</sup>对比Tab. 4 Comparison between CFD/CSD coupling numerical simulation and real-time hybrid experiment<sup>[20]</sup>

重现期	响应类型	加速度/ ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ )	位移/m	速度/ ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )
10年	模拟值	0.0525	0.0015	0.0080
	实验值	0.0518	0.0015	0.0080
	误差	1.33%	0%	0%
50年	模拟值	0.1034	0.0028	0.0157
	实验值	0.0899	0.0041	0.0178
	误差	13.06%	31.71%	11.80%
100年	模拟值	0.1117	0.0033	0.0177
	实验值	0.1221	0.0034	0.0198
	误差	8.52%	2.94%	10.61%

从表4可以看出，在10年重现期风速对应的横风向荷载作用下，CFD/CSD耦合数值模拟结果与实验结果最接近，其中位移响应和速度响应与实验结果一致，加速度响应的均方根值与实验值仅相差1.33%。100年重现期的模拟结果也比较理想，位移响应的模拟值与实验值的误差仅为2.94%，加速度和速度响应的模拟值与实验值的误差分别为8.52%和10.61%。50年重现期时，除了位移值的误差较大，加速度和速度的误差分别为13.06%和11.8%。因此采用本文基于OpenFOAM开发的CFD/CSD耦合分析算法，评估带内置竖向挡板TLD高层建筑的风振控制性能，具有较高的精确度，是对现有TLD-结构风振控制算法的有益补充。

## 4.4 垂直挡板个数对TLD液体晃动-下部结构风致振动的减振效果分析

为了进一步提高TLD系统的阻尼比，提升其对下部结构风致响应的控制效果，建立了底部有3块垂直挡板的TLD系统。该系统与前述的TLD系统相比，不改变挡板的高度，只增加挡板数量。3块垂直挡板的位置与TLD长度之比分别为0.3、0.5和0.7。图10为与之对应的网格划分模型，网格单元形式和最小网格尺寸均与图7所示模型保持一致。

图11为在底部中心设置1块垂直挡板和底部设

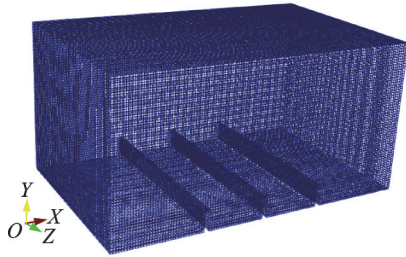


图 10 设置 3 块垂直挡板的 TLD 系统网格划分

Fig. 10 Grid partition of TLD system with 3 vertical baffles

置 3 块垂直挡板的水箱侧壁无量纲液面波高自由衰减曲线,得到底部中心设置单块垂直挡板的 TLD 系统阻尼比为 0.75%,设置 3 块垂直挡板 TLD 系统的阻尼比为 1.19%,阻尼比提高约 37%。

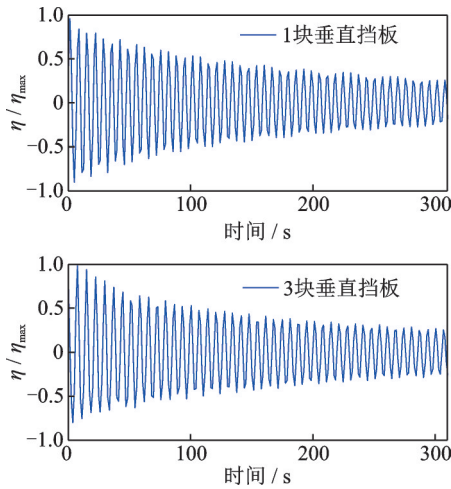
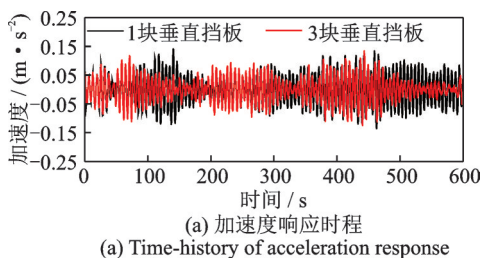


图 11 波高自由衰减曲线

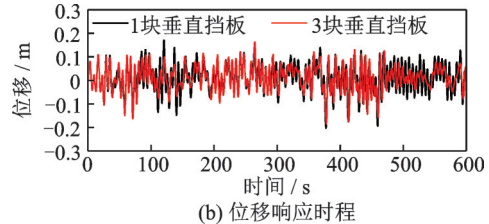
Fig. 11 Free decay curves of the wave height

图 12 和 13 分别列出了 10 年和 50 年重现期风速对应的横风向荷载作用下,不同垂直挡板数量的 TLD 系统对下部结构风致响应控制作用的对比。

表 5 列出了 10 年和 50 年重现期风速对应的横风向荷载作用下,底部布置 3 块垂直挡板的 TLD 系统的结构顶部风致响应均方根值。可以看出,增加了挡板数量的 TLD 系统可以进一步降低结构顶部的风致响应。与底部设置单块垂直挡板相比,10 年重现期风速下底部设置 3 块垂直挡板的 TLD 系统对加速度的减振效率提高了 14.45%,对位移和速度的减振效率分别提高了 5.94% 和 11.30%;50 年重现期风速下,底部设置 3 块垂直挡板的 TLD 系统对



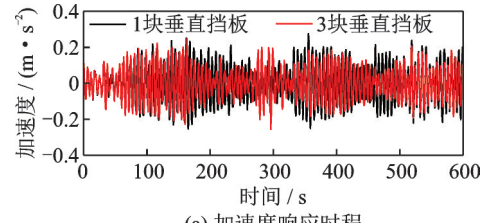
(a) Time-history of acceleration response



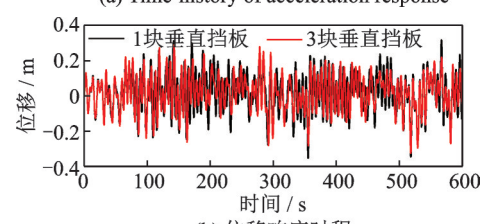
(b) Time-history of displacement response

图 12 10 年重现期下不同挡板个数的 TLD 系统作用下的结构顶部风致响应时程

Fig. 12 Time-history of wind-induced response at the top of structure with different baffles in TLD system (10-year return period)



(a) Time-history of acceleration response



(b) Time-history of displacement response

图 13 50 年重现期下不同挡板个数的 TLD 系统作用下的结构顶部风致响应时程

Fig. 13 Time-history of wind-induced response at the top of structure with different baffles in TLD system (50-year return period)

表 5 不同挡板个数的 TLD 系统对控制效率的影响

Tab. 5 The effect of baffle numbers on the control efficiency of TLD system

重现期	响应类型	加速度/ (m·s <sup>-2</sup> )	位移/m	速度/ (m·s <sup>-1</sup> )
10 年	1 块挡板	0.0525	0.0597	0.0507
	3 块挡板	0.0435	0.0552	0.0434
	提高的减振效率	14.45%	5.94%	11.30%
50 年	1 块挡板	0.1034	0.1134	0.0994
	3 块挡板	0.0897	0.1059	0.0884
	提高的减振效率	10.81%	5.02%	8.38%

加速度、位移和速度的减振效率分别提高了 10.81%、5.02% 和 8.38%。

## 5 结 论

本文基于开源软件 OpenFOAM 对带挡板 TLD 系统内的液体晃荡进行 CFD 仿真,同时对下部主体

结构的风致动力响应采用同步的CSD时程分析,通过运用OpenFOAM应用程序接口,开发了考虑CFD/CSD耦合效应的内置挡板TLD-高层建筑风振控制性能评估的数值算法。以第三代风振控制Benchmark模型为例,对比和分析了其在不同重现期风速对应的横风向荷载作用下,内置竖向挡板-Benchmark模型的风振控制效率,通过与已有文献的实时混合实验对比,验证了本文提出算法的准确性和有效性。由本文可以得到如下主要结论:

(1)经初步优化设计的内置竖向挡板TLD系统对Benchmark模型的风振振动具有较为显著的控制作用。本文提出的TLD系统在10年重现期和50年重现期下的横风向荷载作用下,对速度和位移响应的控制效果优于对加速度响应的控制效果。100年重现期对应风荷载作用下,对结构的加速度和速度的控制效果优于对位移的控制效果。

(2)本文基于OpenFOAM开发的CFD/CSD耦合分析算法,与实时混合实验相比具有较高的精确度。表明采用本文提出的CFD/CSD耦合算法评估带内置竖向挡板TLD高层建筑的风振控制性能,可以得到合理可靠的结构风振控制响应结果。

(3)相同挡板高度条件下,设置3块垂直挡板与底部中心设置单块垂直挡板的TLD系统相比,阻尼比增大约37%,耗能作用增强,下部结构的顶部风致响应进一步得到控制,对加速度响应控制效果的提高水平优于对速度和位移响应控制效果的提高水平。

#### 参考文献:

- [1] JAFARI M, ALIPOUR A. Methodologies to mitigate wind-induced vibration of tall buildings: a state-of-the-art review[J]. *Journal of Building Engineering*, 2021, 33: 101582.
- [2] KONAR T, GHOSH A D. Flow damping devices in tuned liquid damper for structural vibration control: a review[J]. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 2021, 28(4): 2195-2207.
- [3] ZHANG Z L. Numerical and experimental investigations of the sloshing modal properties of sloped-bottom tuned liquid dampers for structural vibration control[J]. *Engineering Structures*, 2020, 204: 110042.
- [4] COLUCCI F, DE SIMONE M C, GUIDA D. TLD design and development for vibration mitigation in structures[C]//*New Technologies, Development and Applications II*. Cham: Springer, 2020: 59-72.
- [5] MODI V J, SUN J L C, SHUPE L S, et al. Suppression of wind-induced instabilities using nutation dampers [J]. *Proceedings of the Indian Academy of Sciences*, 1981, 4(4): 461-470.
- [6] TAMURA Y, FUJII K, OHTSUKI T, et al. Effectiveness of tuned liquid dampers under wind excitation [J]. *Engineering Structures*, 1995, 17(9): 609-621.
- [7] TAMURA Y, KOHSAKA R, NAKAMURA O, et al. Wind-induced responses of an airport tower-efficiency of tuned liquid damper[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1996, 65(1-3): 121-131.
- [8] FUJINO Y, PACHECO B M, CHAISERI P, et al. Parametric studies on tuned liquid damper (TLD) using circular containers by free-oscillation experiments[J]. *Doboku Gakkai Ronbunshu*, 1988, 1988(398): 177-187.
- [9] 张蓝方,张乐乐,谢壮宁,等. 内部带阻尼格栅的TLD减振性能试验研究[J]. *振动工程学报*, 2022, 35(3): 674-680.  
ZHANG Lanfang, ZHANG Lele, XIE Zhuangning, et al. Experimental study on vibration reduction performance of tuned liquid dampers with damping screens [J]. *Journal of Vibration Engineering*, 2022, 35(3): 674-680.
- [10] TAIT M J. Modelling and preliminary design of a structure-TLD system[J]. *Engineering Structure*, 2008, 30(10): 2644-2655.
- [11] 李宏男,井秦阳,王立长,等. 利用浅水水箱作为阻尼器的大连国贸大厦减振控制研究[J]. *计算力学学报*, 2007, 24(6): 733-740.  
LI Hongnan, JING Qinyang, WANG Lichang, et al. Wind-induced vibration control of Dalian International Trade Center using tuned liquid dampers[J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2007, 24(6): 733-740.
- [12] 谭平,尹飞,黄东阳,等. 内置挡板调谐液体阻尼器的减振性能研究[J]. *广州大学学报(自然科学版)*, 2011, 10(4): 41-45.  
TAN Ping, YIN Fei, HUANG Dongyang, et al. Study on performance of a new TLD with embedded baffles[J]. *Journal of Guangzhou University (Natural Science Edition)*, 2011, 10(4): 41-45.
- [13] 徐梓栋,王浩,刘震卿. 大跨索承桥梁流线型钢箱梁抖振响应流固耦合数值模拟[J]. *振动工程学报*, 2023, 36(1): 179-187.  
XU Zidong, WANG Hao, LIU Zhenqing. Buffeting numerical simulation of streamlined steel box girder of long-span cable-supported bridge using fluid-structural interaction[J]. *Journal of Vibration Engineering*, 2023, 36(1): 179-187.
- [14] 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.  
WU Bingcheng. Vibration properties of rectangular tuned liquid dampers with submerged nets and its appli-

- cation to structural vibration control[D]. Changsha: Hunan University, 2015.
- [15] 李书进,孙磊,余桓,等. 滚动碰撞式调制质量阻尼器减振性能试验研究[J]. 振动工程学报, 2020, 33(5): 861-868.
- LI Shujin, SUN Lei, YU Huan, et al. Experimental study on the vibration control performance of pounding tuned rotary mass damper[J]. Journal of Vibration Engineering, 2020, 33(5): 861-868.
- [16] VARKICHAN N T, SANDEEP T N. Effective control of response of a building under wind vibration using tuned liquid dampers[J]. International Research Journal of Engineering and Technology, 2019, 6(4): 5248-5253.
- [17] HICKEY J, BRODERICK B, FITZGERALD B, et al. Mitigation of wind induced accelerations in tall modular buildings[J]. Structures, 2022, 37: 576-587.
- [18] WARNITCHAI P, PINKAEW T. Modeling of liquid sloshing in rectangular tanks with flow-dampening devices[J]. Engineering Structures, 1998, 20(7): 593-600.
- [19] WU J R, ZHONG W, FU J, et al. Investigation on the damping of rectangular water tank with bottom-mounted vertical baffles: hydrodynamic interaction and frequency reduction effect[J]. Engineering Structures, 2021, 245: 112815.
- [20] 钟文坤. 内置挡板 TLD 系统力学性能及 TLD-高层建筑风振控制优化研究[D]. 广州: 广州大学, 2022.
- ZHONG Wenkun. Research on the mechanical property of TLD with internal baffles and optimization design of vibration control for wind-induced tall buildings[D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2022.
- [21] JASAK H. OpenFOAM: open source CFD in research and industry[J]. International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, 2009, 1(2): 89-94.
- [22] LARSEN B E, FUHRMAN D R, ROENBY J. Performance of interFoam on the simulation of progressive waves[J]. Coastal Engineering Journal, 2019, 61(3): 380-400.
- [23] MING P J, DUAN W Y. Numerical simulation of sloshing in rectangular tank with VOF based on unstructured grids[J]. Journal of Hydrodynamics, 2010, 22(6): 856-864.
- [24] XUE M A, ZHENG J H, LIN P Z, et al. Experimental study on vertical baffles of different configurations in suppressing sloshing pressure[J]. Ocean Engineering, 2017, 136: 178-189.
- [25] YANG J N, AGRAWAL A K, SAMALI B, et al. Benchmark problem for response control of wind-excited tall buildings[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2004, 130(4): 437-446.

---

第一作者: 孙连杨(1995—),女,博士研究生。

E-mail:sunly@e.gzhu.edu.cn

通信作者: 吴玖荣(1970—),男,博士,教授。

E-mail:jrwuce@gzhu.edu.cn