

增稠剂对调谐液体阻尼器阻尼比与频率的影响研究

罗 帅^{1,2,3}, 李寿英^{1,2,3}, 何书勇^{1,2,3}, 陈政清^{1,2,3}

(1. 湖南大学土木工程学院, 湖南长沙 410082; 2. 桥梁工程安全与韧性全国重点实验室, 湖南长沙 410082;
3. 湖南大学风工程与桥梁工程湖南省重点实验室, 湖南长沙 410082)

摘要: 调谐液体阻尼器 (tuned liquid damper, TLD) 是一种简单有效的被动型振动控制装置。通过在 TLD 中添加增稠剂的方式, 研究了液体黏性对 TLD 系统阻尼比与频率的影响规律。采用黏度计测试了增稠剂浓度与液体黏度的关系; 设计了矩形、圆形、圆环形和 U 形 4 种类型的 TLD 水箱, 在单向简谐激励振动台上进行了试验, 探究了增稠剂浓度、水箱水深比、外激励频率、相对激励幅值和放置时间等参数对 TLD 性能影响的规律; 进行了 TLD 系统的 CFD 数值仿真, 研究了水箱尺寸的影响。结果表明: 增加增稠剂浓度, 可以有效提高 TLD 的阻尼比, 且对 TLD 频率几乎没有影响; 水深比对 TLD 的频率和阻尼比影响较小; 外激励幅值和频率对 TLD 系统的频率和阻尼比影响不大, 但会显著改变液面波高; 添加增稠剂液体的 TLD 放置时间增长, 会导致 TLD 内液体黏性下降, 造成 TLD 阻尼比降低; 且随着放置时间增长, TLD 内部分液体挥发, 水深比减小, 进而发生 TLD 频率失谐的现象; 随着水箱尺寸减小, TLD 阻尼比逐渐变大, 当尺寸较大时, 阻尼比基本保持稳定。

关键词: 调谐液体阻尼器; 增稠剂; 阻尼比; 频率; 振动台试验; CFD 数值模拟

中图分类号: TU352.1; TU311.3 **文献标志码:** A **DOI:** 10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.202310035

Effect of thickener on damping ratio and frequency of tuned liquid damper

LUO Shuai^{1,2,3}, LI Shouying^{1,2,3}, HE Shuyong^{1,2,3}, CHEN Zhengqing^{1,2,3}

(1. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China; 2. State Key Laboratory of Bridge Safety and Resilience, Hunan University, Changsha 410082, China; 3. Hunan Provincial Key Laboratory of Wind and Bridge Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: Tuned Liquid Damper (TLD) is a simple and effective passive vibration control device. By adding thickening agents to the TLD, the effect of liquid viscosity on the damping ratio and frequency of the TLD system is studied. Firstly, the relationship between thickener concentration and liquid viscosity is measured by a viscometer. Then, rectangular, circular, circular and U-shaped TLD tanks are designed and tested on a unidirectional harmonic excitation vibration table. The influence of parameters on the performance of the TLD is analyzed, such as thickener concentration, water depth ratio of the tank, external excitation frequency, relative excitation amplitude and placement time. Finally, CFD numerical simulation of TLD system is carried out to study the influence of tank size. The results show that increasing the concentration of thickener can effectively improve the damping ratio of TLD, and has little effect on the frequency of TLD. Water depth ratio has little effect on frequency and damping ratio of TLD. The external excitation amplitude and frequency have little effect on the frequency and damping ratio of the TLD system, but can significantly change the liquid surface wave height. The TLD placement time of the thickener liquid increased, resulting in a decrease in the viscosity of the liquid in the TLD, resulting in a decrease in the damping ratio of the TLD, partial volatilization of the liquid in the TLD, and a decrease in the water depth ratio, resulting in a phenomenon of TLD frequency mismatch. As the size of the tank decreases, the TLD damping ratio gradually increases, and the damping ratio remains basically stable when the size is larger.

Keywords: tuned liquid damper; thickening agent; damping ratio; frequency; shaking table test; CFD numerical simulation

高层建筑频率低、阻尼小, 风振问题突出。调谐液体阻尼器 (tuned liquid damper, TLD) 作为一种简单有效的被动型减振装置, 具有构造简单、造价低、安装方便、易于维护等优点, 已在高层建筑减振中得到广泛应用。但是, 目前常用的纯水 TLD 自身阻尼

比非常低 (<1.0%), 远小于最优阻尼比, 难以达到理想的减振效果。

已有较多学者关注 TLD 自身阻尼比提升方法, 例如在水箱内增设格栅、挡板或浆柱等阻尼构件。TAIT 等^[1-3]建立了线性和非线性数学模型描述内置

格栅的水箱液体晃动,建立了一种考虑阻尼格栅能量耗散的线性等效力学模型,评价了内置格栅的 TLD 性能;ZHANG 等^[4]通过解耦分离 TLD 液面波高信号分析了格栅参数对 TLD 阻尼性能影响;CASSOLATO^[5]和 YU 等^[6]开展了振动台试验,对格栅进行了参数化分析。GOUDARZI 等^[7]基于速度势公式和线性波动理论,建立了有挡板的水动力阻尼比解析模型;ZHONG^[8]研究了安装挡板的矩形水箱的晃动机理,并利用实时混合实验评估了 TLD 的减振效果;JUNG 等^[9]研究了挡板高度对晃动的影响;EVANS 等^[10]分析了挡板位置对共振频率的影响。LOVE 等^[11]进行了内置立柱的 TLD 振动台试验;HUANG^[12]采用 CFD 数值模拟方法,分析了内置阻尼构件对 TLD 性能的影响规律。

学者们针对液体黏性对 TLD 晃动的影响进行了研究。CASE 等^[13]将边界层近似技术应用于驻波分析,认为层流边界层中的黏性耗散是产生阻尼的主要原因;SCARSI^[14]进行了理论分析和试验测试,发现了矩形水箱的黏性阻尼可以降低液体的晃动响应;ZOU 等^[15]通过试验研究了液体黏性对横摇晃动性能的影响,发现随着黏性的增加,峰值压力减小,上升时间延长;AN 等^[16]利用圆环形 TLD 对吊索进行减振,比较研究了水和甲基硅油的减振性能,结果表明:增加黏性有利于吊索减振。研究人员也总结了考虑黏性的 TLD 阻尼比解析公式,ABRAMSON^[17]给出了圆形 TLD 阻尼比的经验公式,认为 TLD 阻尼比与圆形水箱半径、水深及黏度等参数有关;MIEDA 等^[18]认为圆形 TLD 阻尼比由水箱底部、顶部和侧面三部分阻尼比叠加而成,并给出了每部分的解析计算公式。

已有针对液体黏性影响的研究,液体一般采用硅油、甘油或葵花籽油等^[19-20],成本较昂贵。为此,本文采用价格更低的增稠剂来增加纯水的黏性,研究增稠剂对 TLD 固有特性的影响规律。首先测试了 2 类增稠剂对纯水黏性的影响;然后制作了 4 种类型的 TLD(圆形、矩形、圆环形、U 形),进行振动台试验,对液体黏性、水深比、激励频率比、激励幅值、放置时间等参数对 TLD 性能影响的规律进行了研究;并通过 CFD 数值模拟研究了 TLD 尺寸的影响。

1 增稠剂浓度与液体黏度关系测试

在查阅相关文献的基础上,选取了国药海藻酸钠和国药羧甲基纤维素钠两种增稠剂。其中,海藻酸钠^[21](SA)是一种存在于褐藻类植物以及细菌中的亲水性天然多糖,其分子结构如图 1(a)所示,SA 为白色或淡黄色粉末,极易溶于水形成黏稠状的溶液。羧甲基纤维素钠^[22](CMC-Na)是纤维素依次经

过碱化、氯乙酸化处理之后生成的一种纤维素基羧甲基醚类衍生物,其分子结构如图 1(b)所示。CMC-Na 为白色或者淡黄色的粉末,易溶于水,其水溶液具有一定的黏度,除此之外可用于制作建筑消防环保灭火剂^[23]和钢结构的防火涂料^[24],对结构灭火有积极作用。利用电子天平称量 SA 和 CMC-Na,配置不同浓度的溶液,采用数显旋转黏度计测量溶液黏度。试验所需化学试剂为海藻酸钠(SA)、羧甲基纤维素钠(CMC-Na),两种试剂均为国药集团化学试剂有限公司生产,其规格为分析纯。所需试验器材为精度 0.01 g、量程 600 g 的电子天平,力辰科技公司生产的 NDJ-8S 式旋转型黏度计,以及容量为 1000 mL 的烧杯。

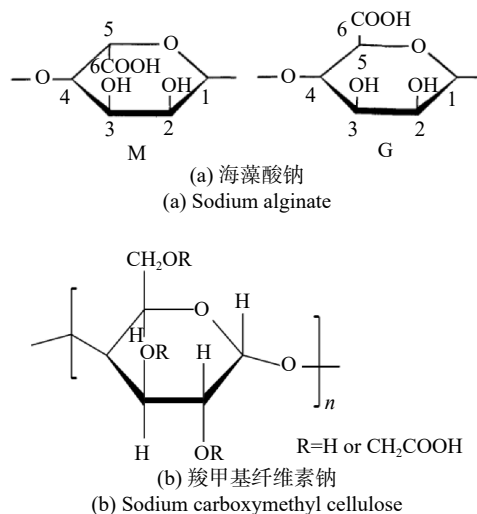


图 1 增稠剂分子结构式

Fig. 1 Thickener molecular structure formula

试验时,配置 10 kg 水,称取一定重量的增稠剂,充分溶解后取出一部分倒入 1000 mL 烧杯,选取合适量程的转子,安装在黏度计上,进行仪器整平,升降转子,直至转子液面标志与液面相平,打开开关,选择对应转子和适当转速,开始测量,待数据稳定后读取液体黏度,黏度计测试方法如图 2 所示。



图 2 黏度计测试示范

Fig. 2 Viscometer testing demonstration

试验测量了 0%~1.0% 浓度增稠剂水溶液的黏

度, 结果如图 3 所示。由图 3 可知, 随着增稠剂浓度增加, 液体黏度有明显增加。在浓度小于 0.4% 时, 2 种增稠剂水溶液的黏度基本相同; 当浓度大于 0.4% 时, CMC-Na 水溶液的黏度明显大于 SA。增稠剂浓度为 1.0% 时, SA 水溶液黏度为 $152 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, 而 CMC-Na 水溶液黏度高达 $635 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, 约为 SA 的 4 倍。这说明 CMC-Na 对提高液体黏度的作用更加明显, 主要原因是 CMC-Na 通过分子结构中的羧甲基和羟基与水分子形成氢键, 从而使水分子在分子间形成网状结构, 增加了液体黏度^[22]。

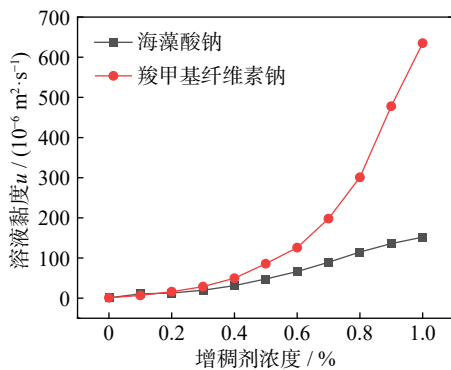


图 3 黏度测试结果

Fig. 3 Viscosity test results

2 试验概况

2.1 试验模型及测量装置

试验采用矩形、圆形、圆环形和 U 形 4 种类型的 TLD 模型, 如图 4 所示, 具体尺寸列于表 1, 水箱材料为亚克力板, 壁厚设置为 0.5 cm。

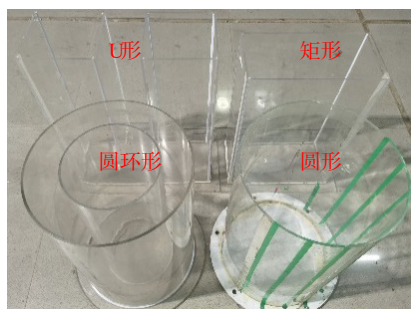


图 4 水箱模型

Fig. 4 Test models of water tank

采用单向简谐位移振动台(如图 5 所示)进行试验, 振动台平面尺寸为 $70 \text{ cm} \times 70 \text{ cm}$, 单向位移通过调整偏心轮半径, 可实现 $0 \sim 4.0 \text{ cm}$ 的位移调整, 满足试验所需的小振幅位移。采用无接触式视频位移测量系统 (VEDIO GAGUE) 对液面运动时程进行测量, 如图 6 所示, 其测量原理为: 通过摄像头捕捉水箱液面的特征点, 运用图像处理技术得到液面的波高时程曲线。

表 1 水箱尺寸

Tab. 1 Main dimensions of water tanks

形状	L/cm	B/cm	R/cm	H/cm
矩形	30	15	—	45
圆形	—	—	15	45
圆环形	—	—	15(9)	45
U形	40	15	—	45

注: 圆环形 15(9) 表示圆环外半径 15 cm, 内半径 9 cm。



图 5 振动台

Fig. 5 Vibration table



(a) 控制系统
(a) Control system



(b) 摄像头
(b) Camera

图 6 无接触式视频位移计

Fig. 6 Non-contact video displacement meter

2.2 试验工况

采用 SA 和 CMC-Na 两种增稠剂, 主要分析增稠剂浓度、水深比、相对激励幅值和外激励频率比、放置时间等参数影响。增稠剂浓度从 0% 到 1.0%, 水深比从 30% 到 80% (对于 U 形 TLD, 水深取 15~35 cm), 相对激励幅值取 0.5%、1.0% 和 1.5%, 外激励频率比为 0.8~1.2。在分析增稠剂浓度时, 水深比取 50% (对于 U 形 TLD, 水深取 25 cm); 分析水深比影响时, 增稠剂浓度取 0.8%。详细工况如表 2 所示。

表2 试验工况

Tab. 2 Test cases

增稠剂种类	增稠剂浓度	水深比	外激励频率比	相对激励幅值	放置时间
CMC-Na、SA	0%~1.0%、 0.80%	50%、 30%~80% (15~35 cm)	0.8、0.9、0.95、1.0、1.05、1.1、1.2	0.5%、1.0%、1.5%	60 d

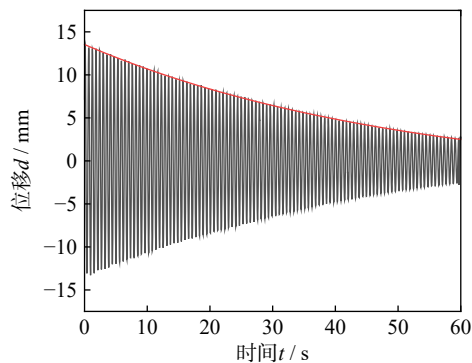
2.3 模型动力参数识别

采用自由振动衰减方法识别 TLD 的频率和阻尼比。利用振动台进行激励,使 TLD 系统产生振动,待其平稳后,停止激励,使其做自由衰减振动。通过无接触式视频位移测量系统,记录液面波高时程曲线,识别得到系统的频率和阻尼比。自由振动衰减识别阻尼比为:

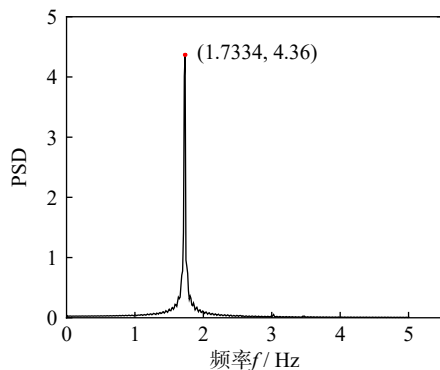
$$\xi = \frac{1}{2m\pi} \ln \frac{A_n}{A_{n+m}} \quad (1)$$

式中, A_n 表示结构第 n 周振动的振幅; A_{n+m} 表示结构第 $(n+m)$ 周振动的振幅; m 表示自由振动周期数。

图 7 给出了圆形水箱纯水 TLD 在水深比为 50%、相对激励幅值为 0.5%、外激励频率比为 0.9 时的时程曲线、频谱曲线和自由衰减拟合曲线。从图 7 中看出,记录得到的时程曲线接近对数衰减曲线,识别方法较为精确。



(a) 自由衰减时程拟合
(a) Free decay time history fitting



(b) 频谱分析
(b) Frequency spectrum analysis

图 7 圆形纯水 TLD 自由衰减时程及频谱分析

Fig. 7 Free decay time history and frequency spectrum analysis of circular pure water TLD

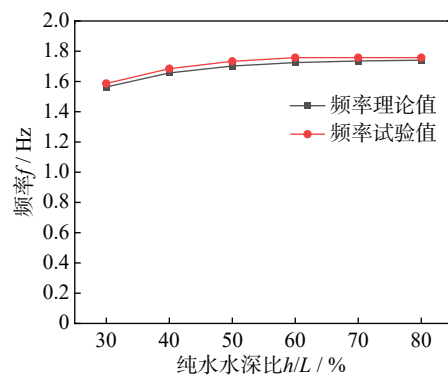
为了验证模型试验参数识别的准确性,进行 30%~80% 水深的圆形纯水 TLD 试验,识别其频率和阻尼比,与 BAUER 推导的圆形水箱圆频率公式^[25]及 ABRAMSON 推导的含黏性项的阻尼比公式^[17]进行对比。圆形 TLD 的频率及阻尼比公式为:

$$\omega_c = \sqrt{\frac{1.84g}{a} \tanh \frac{1.84h}{a}} \quad (2)$$

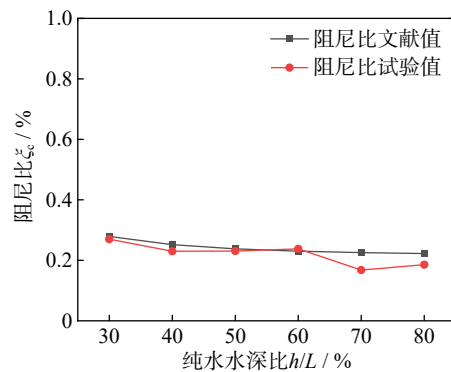
$$\xi_c = \frac{2.89}{\pi} \sqrt{\frac{u}{a^{3/2}g^{1/2}}} \left[\frac{0.318}{\sinh \frac{1.84h}{a}} \left(\frac{1 - \frac{h}{a}}{\cosh \frac{1.84h}{a}} + 1 \right) + 1 \right] \quad (3)$$

式中, g 表示重力加速度; a 表示水箱半径; h 表示水箱液体深度; u 为液体的运动黏度,对于纯水,其值为 $u=1.145 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ 。

将振动台试验测得的频率和阻尼比试验结果分别与文献 [25] 和 [17] 进行对比,如图 8 所示。由图 8 可知,频率识别较为精确,阻尼比除个别有误差外,与理论值也接近,说明本文试验方案可行。



(a) 频率
(a) Frequency



(b) 阻尼比
(b) Damping ratio

图 8 参数识别结果对比

Fig. 8 Comparison between test results and those from literature

3 试验结果与讨论

本文分析了多个影响 TLD 性能的参数, 如增稠剂浓度、水深比、激励幅值、激励频率和时间等, 并在各个工况下对比分析矩形、圆形、圆环形和 U 形 TLD 性能。

3.1 增稠剂浓度的影响

图 9 给出了 4 种类型的 TLD 的频率及阻尼比随增稠剂浓度的变化规律。从图 9 中可以看出, 随着增稠剂浓度增加, 4 类 TLD 频率基本保持稳定; TLD 阻尼比均增加, 其中, U 形和圆环形 TLD 增加更为明显, 分别从纯水时的 1.60% 和 0.75% 增加到 1.0% 浓度 CMC-Na 水溶液的 14.18% 和 14.81%。比较 2 类增稠剂效果, CMC-Na 比 SA 增加阻尼比作用更为明显, 这主要是因为相同浓度下, 前者能够给水溶液提供更高的黏度。

图 10 给出了水箱内液体黏度对 TLD 阻尼比影响曲线。从图 10 中可以看出, 随着黏度增加, 4 类 TLD 阻尼比均大致以相同趋势增加, 即随着液体黏度增加, 增长逐渐变缓。液体在同一黏度下, 圆环形和 U 形阻尼比大致相等, 矩形次之, 圆形 TLD 的阻尼比最小。

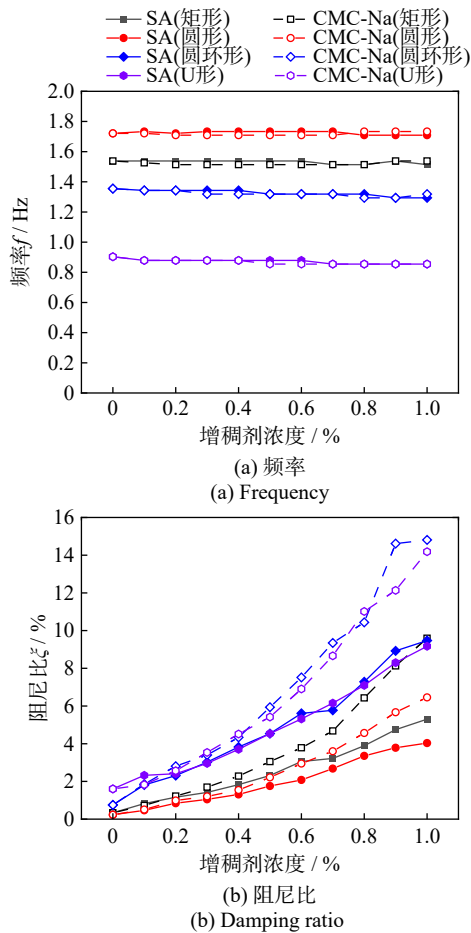


图 9 增稠剂浓度对 TLD 频率和阻尼比的影响规律

Fig. 9 Effect of thickener concentration on the frequency and damping ratio of TLD

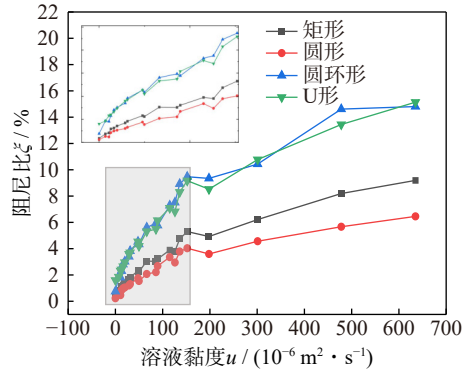


图 10 黏度对 TLD 阻尼比的影响规律

Fig. 10 Effect of viscosity on damping ratio of TLD

3.2 TLD 水深比的影响

图 11 给出了增稠剂浓度为 0.8% 时, 矩形、圆形、圆环形和 U 形 TLD 频率及阻尼比随水深比的变化规律, 其中, 矩形、圆形和圆环形 TLD 中的水深比在 30%~80%, U 形 TLD 水深在 15~35 cm。从图 11 中可以看出, 矩形、圆形和圆环形 TLD 的频率随水深比增加而增加, 且随着水深比增加逐渐变缓; 而阻尼

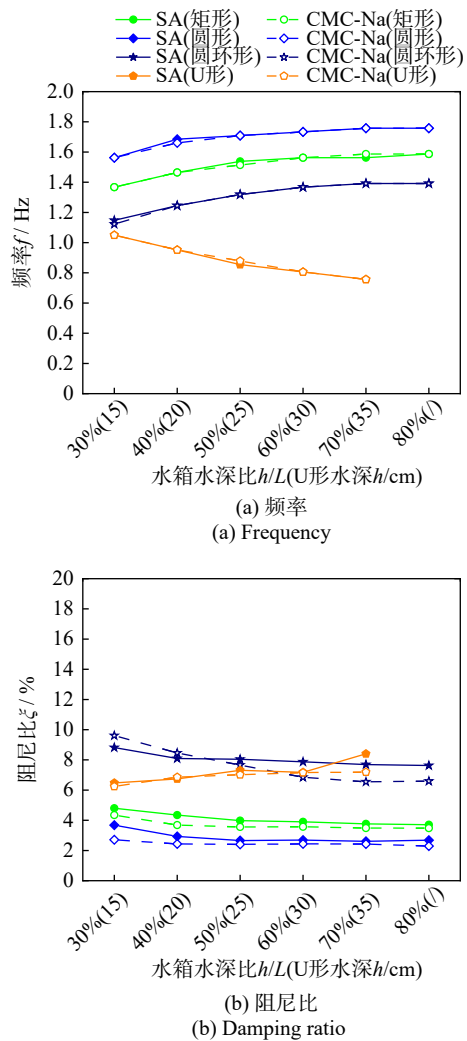


图 11 水深比对 TLD 频率和阻尼比的影响规律

Fig. 11 Effect of water depth ratio on the frequency and damping ratio of TLD

比随水深比的增加略微下降。U 形 TLD 的频率和阻尼比变化规律则与上述 3 种类型的 TLD 相反,即随着水深比增加,U 形 TLD 的频率缓慢下降,而阻尼比逐渐增加。在同一水深比下,4 种形式 TLD 的频率和阻尼比也有区别:圆形 TLD 频率大于矩形,圆环形次之,U 形的 TLD 频率最小;对于阻尼比,圆环形和 U 形 TLD 明显大于矩形和圆形 TLD。

3.3 外部激励的影响

试验外部激励主要考虑振动台激励幅值和激励频率两方面影响,激励幅值通过调整偏心轮运动半径得到,主要分析线性晃动。激励幅值取振动方向水箱尺寸的 0.5%、1.0% 和 1.5%,激励频率包括 0.8 到 1.2 倍基频。

(1) 激励幅值

图 12 给出了 SA 溶液和 CMC-Na 溶液浓度为 0.8%、振动台相对位移为 0.5%、1.0% 和 1.5% 时,4 种类型 TLD 的频率、阻尼比及无量纲波高随外激励振幅的变化规律。其中,无量纲波高定义为波高值与水深的比值。从图 12 中可以看出,线性晃动时,随着激励幅值增加,4 种类型 TLD 的频率和阻尼比基本保持不变;矩形和圆形 TLD 的无量纲波高随着激励幅值的增加增长明显,而圆环形和 U 形无量

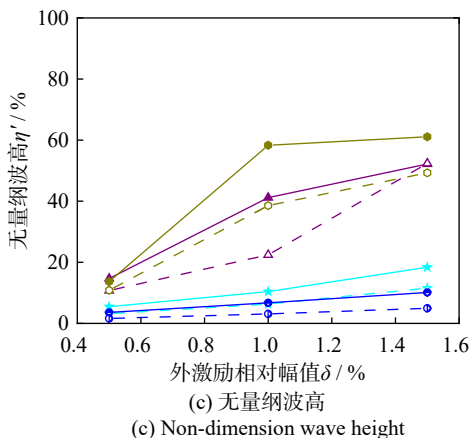


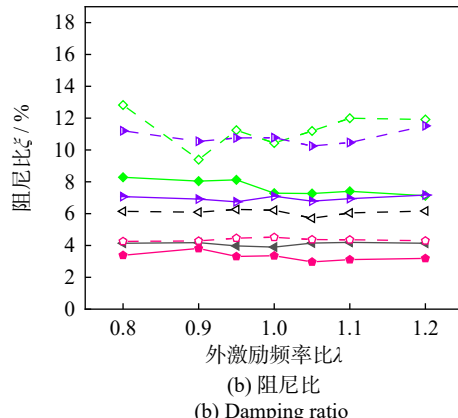
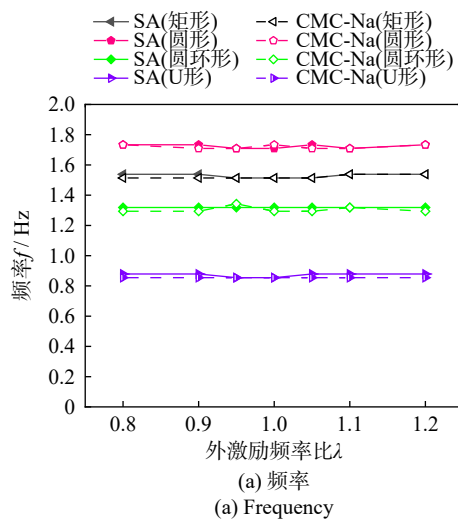
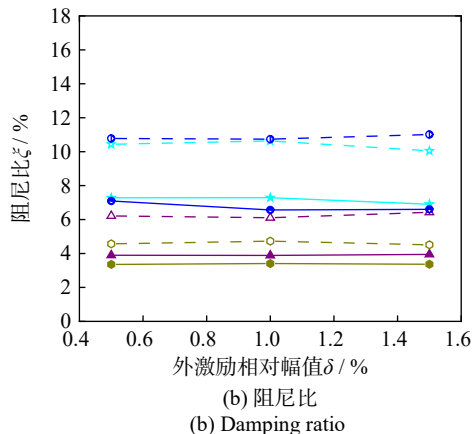
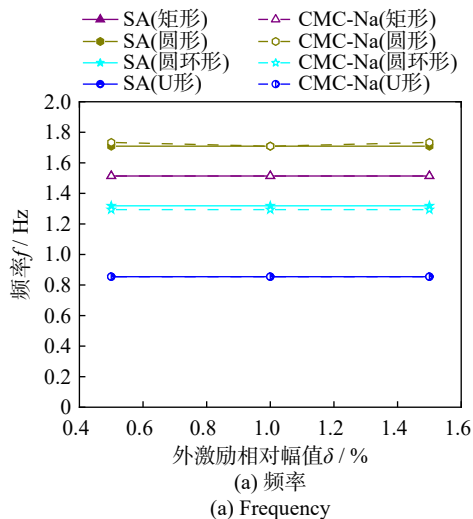
图 12 外激励相对幅值对 TLD 性能影响规律

Fig. 12 Effect of excitation relative amplitude on TLD performance

纲波高的增加趋势相对平缓。在同一激励幅值下,矩形和圆形的波高大于圆环形和 U 形。总体而言,TLD 线性晃动时,振动台激励幅值只影响 TLD 波高,而 TLD 系统的频率和阻尼比不显著改变。

(2) 激励频率

图 13 给出了 SA 溶液和 CMC-Na 溶液浓度为 0.8%、振动台激励频率与 TLD 系统固有频率比为 0.8、0.9、0.95、1.0、1.05、1.1、1.2 时,4 种类型 TLD 的频率、阻尼比和无量纲化波高随激励频率的变化规



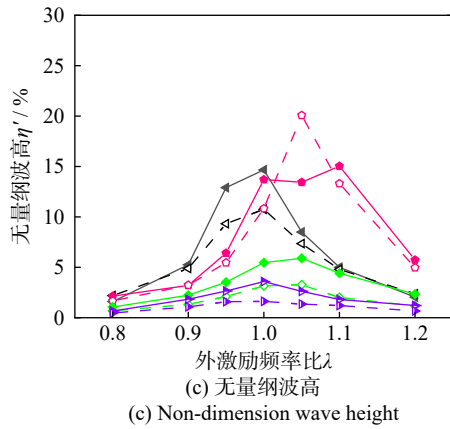


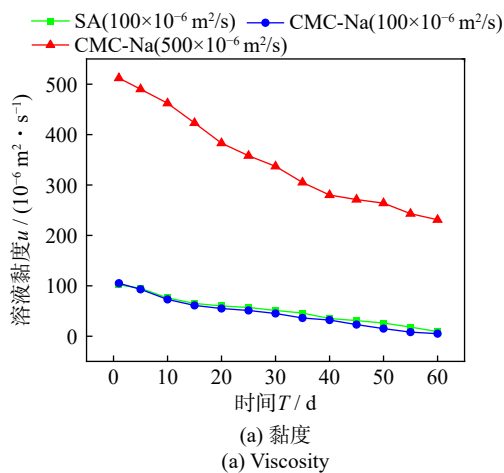
图 13 外激励频率比对 TLD 性能影响规律

Fig. 13 Effect of excitation frequency ratio on TLD performance

律。从图 13 中可以看出, 激励频率比在共振频率附近变化时, 4 种类型 TLD 的频率基本保持不变, 阻尼比除个别变化较大外也大致平稳, 而波高在共振频率附近出现最大值。总体而言, 线性晃动时外激励频率几乎不影响 TLD 系统频率和阻尼比, 但为增大晃动效应, 达到最优减振效果, 应将 TLD 频率调谐至结构固有频率附近。

3.4 增稠剂放置时间的影响

化学试剂需要考虑其时效性, 配置 SA 溶液 ($100 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$)、CMC-Na 溶液 ($100 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$) 和 CMC-Na 溶液 ($500 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$) 3 种溶液, 室温下对其黏度和剩余率进行了 60 天的连续测量。图 14 给出了上述三种液体黏度和剩余率随时间的变化规律。从图 14 中可以看出, 随着时间增加, 三种增稠液体黏度均呈现下降趋势, 同一类型的增稠剂, 液体黏度越高越容易保持持久性能, 而黏度低的增稠液体会降低为与纯水相当的黏度值; 不同类型的增稠剂, 液体黏度下降趋势大致一致; 随时间增加, 水箱内的液体会挥发, 不同的增稠剂对挥发性能影响不大, 液体挥发将引起 TLD 水深比变化, 从而导致 TLD 系统频率失谐。



(a) 黏度
(a) Viscosity

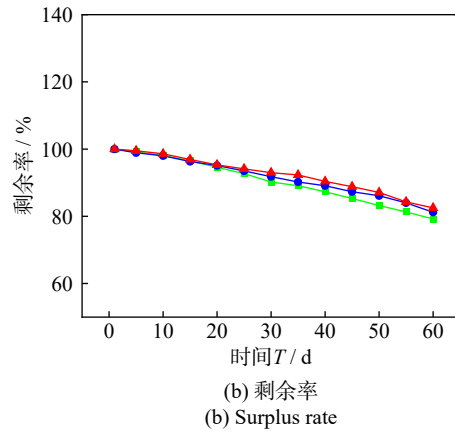


图 14 时间对 TLD 性能影响规律

Fig. 14 Effect of time on TLD performance

4 CFD 数值仿真研究

4.1 无关性验证

一般而言, 网格尺寸和时间步长越小, 数值模拟计算的结果越精确, 但是这势必会降低计算效率。为了均衡计算效率及计算精确度, 有必要进行网格无关性验证和时间步长无关性验证, 以确定最合适的网格尺寸和时间步长。本文以矩形 TLD 模型进行验证, 网格尺寸分别取 20.0、10.0、5.0、1.0 mm; 时间步长分别取 0.01、0.005 和 0.001 s。

分别对比不同网格尺寸或者不同时间步长的阻尼比计算结果, 验证结果如表 3 所示。由表 3 可知, 网格尺寸和时间步长越小, TLD 阻尼比 ξ 仿真值越趋近稳定。网格尺寸 5.0 mm 和 1.0 mm 结果基本一致, 因此网格尺寸取为 5.0 mm; 时间步长 0.005 s 和 0.001 s 结果基本一致, 时间步长取为 0.005 s。

表 3 无关性验证结果

Tab. 3 Independence verification results

网格尺寸/mm	阻尼比 ξ / %	时间步长/s	阻尼比 ξ / %
20.0	0.43	0.01	0.37
10.0	0.36	0.005	0.32
5.0	0.32	0.001	0.30
1.0	0.31		

4.2 模型验证

为了研究 TLD 尺寸对性能影响规律, 本文利用 FLUENT 软件进行数值模拟, 建立矩形 TLD 水箱模型, TLD 尺寸与前述试验水箱相同, 设置不同液体黏度进行仿真并与试验结果比对。FLUENT 求解器设置^[12]具体为: 采用压力基、隐式和瞬态求解, 通过编译 UDF 文件, 给 TLD 施加外部激励, 利用 VOF 多相流模型捕捉气液交界面, 图 15 为水箱仿真模型。

图 16 给出了不同液体黏度下, 矩形水箱阻尼比的模拟结果与试验值的比较, 从图 16 中可以看出, 不同液体黏度下, 试验结果均与模拟结果吻合较好。

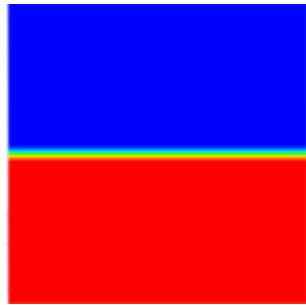


图 15 水箱仿真模型

Fig. 15 Water tank simulation model

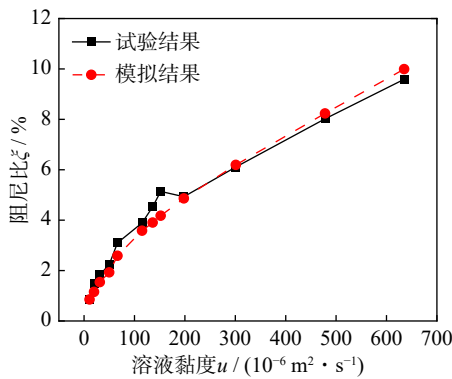


图 16 黏度验证结果

Fig. 16 Viscosity verification result

4.3 模拟工况及结果分析

仿真模拟工况如表 4 所示。

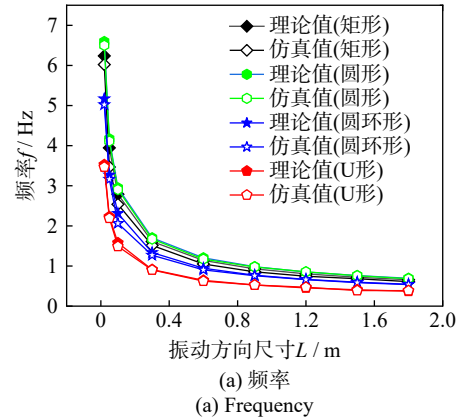
表 4 仿真模拟工况

Tab. 4 Simulation cases

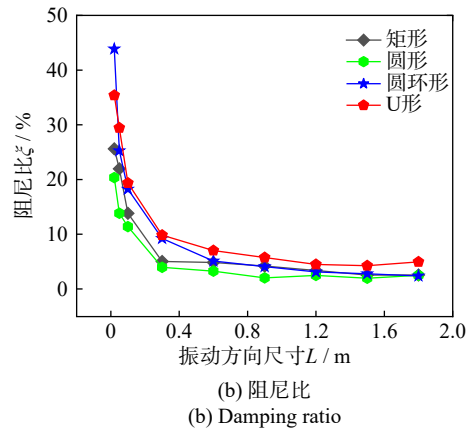
振动方向 尺寸/cm	液面水深/ cm	振动方向 尺寸/cm	液面水深/ cm	振动方向 尺寸/cm	液面水深/ cm
2	1	30	15	120	60
5	2.5	60	30	150	75
10	5	90	45	180	90

图 17 为给定液体黏度下, 4 种类型 TLD 尺寸模拟结果。从图 17 中可以看出, 随着尺寸增加, TLD 的频率和阻尼比仿真值均下降; 在尺寸较小时, 频率和阻尼比相当大, 这是受表面张力影响, 并在文献 [26] 中得到了试验验证; 各种尺寸下, 频率仿真值均能与纯水理论计算值吻合良好。上述仿真结果表明: 液体黏度不影响 TLD 固有频率, 同一液体黏度下, 随着尺寸增加, TLD 阻尼比有下降趋势。因此, 采用增加黏度方式增加 TLD 阻尼比时, 要合理选择水箱尺寸。

除此之外, 还对比了振动台试验与 CFD 仿真的水箱特征液面曲线, 以矩形和圆形水箱举例, 特征液面曲线如图 18 和图 19 所示。从图 18 和图 19 可以



(a) 频率
(a) Frequency

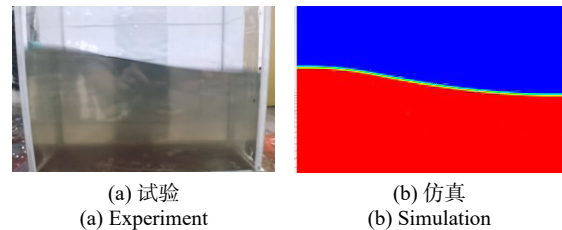


(b) 阻尼比
(b) Damping ratio

图 17 尺寸模拟结果

Fig. 17 Dimensional simulation result

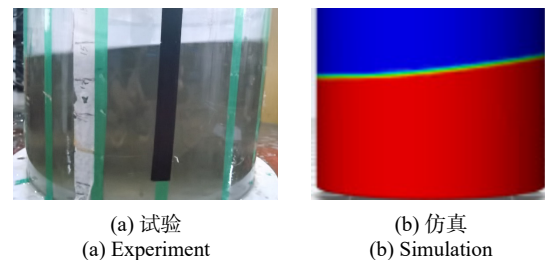
看出, 2 种水箱液面曲线基本一致, 说明 CFD 数值计算能够很好地反映小振幅下的水箱晃动响应。



(a) 试验
(a) Experiment (b) 仿真
(b) Simulation

图 18 矩形水箱液面曲线对比

Fig. 18 Comparison of liquid level curve of rectangular tank



(a) 试验
(a) Experiment (b) 仿真
(b) Simulation

图 19 圆形水箱液面曲线对比

Fig. 19 Comparison of liquid level curve of circular tank

5 结论

采用振动台试验和 CFD 数值模拟方法, 研究了增稠剂对 4 种类型的 TLD 系统频率和阻尼比的影响

规律,探讨了多个参数对 TLD 性能提升的影响,主要得到如下结论:

(1) 增稠剂能够有效增加 TLD 系统的阻尼比,且对频率几乎没有影响,因此增稠剂是一种提升 TLD 性能的有效方法。但是部分增稠剂时效性不高,放置 2 个月后,液体黏性降低明显,就本文选用的 2 类增稠剂而言,羧甲基纤维素钠性能明显优于海藻酸钠,因此选用合适的增稠剂尤为重要。

(2) TLD 水深比变化,对 TLD 频率和阻尼比影响较小;外激励的幅值和频率对 TLD 频率和阻尼比均影响较小,但对液体晃动波高影响显著;随着水箱尺寸增加,TLD 阻尼比降低,在尺寸相当小时,阻尼比增加明显。

(3) 不同类型的 TLD 系统受参数变化影响趋势一致。随着增稠剂浓度提高,4 种类型 TLD 阻尼比均有明显提升,但是提升幅度不同,圆环形和 U 形更为明显;随着水深比增加,矩形、圆形和圆环形 TLD 阻尼比频率提高,阻尼比降低,而 U 形 TLD 频率下降,阻尼比提高。

参考文献:

- [1] TAIT M J, EL DAMATTY A 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.
- [2] TAIT M J, ISYUMOV N, EL DAMATTY A A. Performance of tuned liquid dampers[J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 2008, 134(5): 417-427.
- [3] TAIT M J, EL DAMATTY A A, ISYUMOV N. An investigation of tuned liquid dampers equipped with damping screens under 2D excitation[J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2005, 34(7): 719-735.
- [4] ZHANG L F, ZHANG L L, XIE Z N, 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.
- [5] CASSOLATO R M. The performance of a tuned liquid damper equipped with inclined and oscillating damping screens[D]. Hamilton: McMaster University, 2007.
- [6] YU L T, XUE M, ZHENG J H. Experimental study of vertical slat screens effects on reducing shallow water sloshing in a tank under horizontal excitation with a wide frequency range[J]. *Ocean Engineering*, 2019, 173: 131-141.
- [7] GOUDARZI M A, SABBAGH-YAZDI S R, MARX W. Investigation of sloshing damping in baffled rectangular tanks subjected to the dynamic excitation[J]. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2010, 8(4): 1055-1072.
- [8] ZHONG W K. Research on the mechanical property of TLD with internal baffles and optimization design of vibration control for wind-induced tall buildings with TLD system[D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2022.
- [9] JUNG J H, YOON H S, LEE C Y, et al. Effect of the vertical baffle height on the liquid sloshing in a three-dimensional rectangular tank[J]. *Ocean Engineering*, 2012, 44: 79-89.
- [10] EVANS D V, MCIVER P. Resonant frequencies in a container with a vertical baffle[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1987, 175: 295-307.
- [11] LOVE J S, HASKETT T C. Nonlinear modelling of tuned sloshing dampers with large internal obstructions: damping and frequency effects[J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2018, 79: 1-13.
- [12] 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.
HUANG P. CFD-based parametric analysis on vibration characteristics of TLD system with internal damping devices[D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2020.
- [13] CASE K M, PARKINSON W C. Damping of surface waves in an incompressible liquid[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1957, 2(2): 172-184.
- [14] SCARSI G. Natural frequencies of viscous liquids in rectangular tanks[J]. *Meccanica*, 1971, 6(4): 223-232.
- [15] ZOU C F, WANG D Y, CAI Z H. Effects of boundary layer and liquid viscosity and compressible air on sloshing characteristics[J]. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 2015, 7(4): 670-690.
- [16] AN Y H, WANG Z Z, OU G, et al. Vibration mitigation of suspension bridge suspender cables using a ring-shaped tuned liquid damper[J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2019, 24(4): 04019020.
- [17] ABRAMSON H N. The Dynamic behavior of liquid inmoving containers: NASA SP-106[R]. 1966.
- [18] MIEDA T, ISHIDA K, JITU K, et al. An experimental study of viscous damping in sloshing mode of cylindrical tanks[C]//SMiRT 12, 1993.
- [19] BULIAN G, SOUTO-IGLESIAS A, DELORME L, et al. Smoothed particle hydrodynamics (SPH) simulation of a tuned liquid damper[J]. *Journal of Hydraulic Research*, 2010, 48(Sup1): 28-39.
- [20] PIRNER M, URUSHADZE S. Liquid damper for suppressing horizontal and vertical motions: parametric study[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2007, 95(9-11): 1329-1349.
- [21] 李海宁. 海藻酸钠浓溶液的性能研究[D]. 青岛: 青岛大学, 2012.
LI Haining. Study on properties of sodium alginate concentrated solution[D]. Qiangdao: Qingdao University, 2012.
- [22] 郝超月. 羧甲基纤维素钠水凝胶的制备及其应用[D]. 天津: 天津大学, 2018.
HAO C Y. Preparation and application of sodium carboxymethylcellulose based hydrogel[D]. Tianjin: Tianjin University, 2018.
- [23] 柳国军. 一种建筑消防用环保灭火剂的制备方法: CN106110559A[P]. 2016-11-16.
- [24] 蔡娟. 具有优异防火隔热性能的钢结构防火涂料及其制备方法: CN111040522A[P]. 2020-04-21.
- [25] BAUER H F. Fluid oscillations in the containers of a space vehicle and their influence on stability[R]. Marshall Flight Center, 1964.
- [26] 孙北松. 基于吸热塔气弹模型的微型 TLD 风振控制试验研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2020.
SUN B S. Experimental investigation on the mitigation of wind-induced vibration of solar tower by tiny TLD based on aeroelastic test model[D]. Changsha: Hunan University, 2020.

第一作者: 罗 帅(1998—), 男, 硕士研究生。

E-mail: 13684133002@163.com

通信作者: 李寿英(1977—), 男, 博士, 教授, 博士生导师。

E-mail: shyli@hnu.edu.cn