

内部带阻尼格栅的 TLD 减振性能试验研究

张蓝方¹, 张乐乐¹, 谢壮宁¹, 江毅²

(1. 华南理工大学亚热带建筑科学国家重点实验室, 广东 广州 510640;

2. 华南理工大学建筑设计研究院有限公司, 广东 广州 510640)

摘要: 采用有色噪声激励的调谐液体阻尼器(TLD)特性振动台试验,对 TLD 液面多点波高信号进行解耦分离,再采用不同识别方法获取液体晃动的模态参数,以含格栅的 TLD 为例研究了格栅稠度比、格栅位置、激励相对幅值对 TLD 阻尼性能的影响并和已有的线性化理论值进行比较。结果表明,有色噪声激励下的振动台试验方法能够快速准确地获得 TLD 减振性能参数;信号解耦分离方法、参数识别方法具有较高可靠性。在 TLD 内设置阻尼格栅能够不改变 TLD 频率、增大 TLD 阻尼比,且阻尼比分别随稠度比、相对激励幅值增加而增大,格栅的设置能够增加 TLD 高阶模态阻尼比,进而有助于抑制非线性响应。

关键词: 调谐液体阻尼器; 阻尼格栅; 振动台试验; 模态解耦; 参数识别

中图分类号: TU973.2⁺13; TU317⁺.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-4523(2022)03-0674-07

DOI:10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.2022.03.017

引言

近年来,超高层建筑的设计越来越倾向于更轻、更柔,其对风致振动更加敏感。不少建筑的结构顶部峰值加速度在《高层建筑混凝土结构设计技术规程》规定的 10 年重现期风作用下仍相对偏高,对峰值加速度的控制成了结构抗风设计的重要问题,并会进一步影响造价。

动力减振器(DVA)是一种常用在超高层建筑风振控制中的被动控制装置,将该装置的频率调谐至与结构频率相近以起到吸振控制作用。调谐质量阻尼器和调谐液体阻尼器(TLD)是两种常用于超高层风振控制的 DVA^[1-4]。其中,TLD 因构造相对简单、造价低,且可兼做消防水箱而受到越来越多的关注。TLD 的频率和阻尼比是与其减振性能相关的两个重要性能参数。TLD 频率与其构造尺寸、液深有关,而 TLD 阻尼主要来自于自由液面破碎、液体黏度以及液体与水箱壁面的摩擦^[5]。仅依靠上述几种耗能方式,TLD 所能提供的阻尼比远小于最优值,难以达到有效控制结构风致振动的效果,因此需要采取增大液体晃动耗能的措施,包括增加水箱壁面粗糙度、在 TLD 内设置耗能装置如阻尼网、格栅等,而增设耗能装置后包括系统的模态频率、阻尼和振型在内的 TLD 固有特性是 TLD 设计所关注的重要问题。

TLD 中液体晃动过程分析可采用理论分析、振动台试验和数值模拟方法^[6-8]。基于线性波浪理论可以获得简单平面形式(矩形和圆型)TLD 液体晃动频率和有无格栅时的模态阻尼比,TLD 液体晃动会呈明显非线性特征^[6],其性能参数的获取更多地是采用振动台试验方法^[7]。振动台试验则通常采用扫频方法获得液面峰值波高随频率变化曲线,进而确定 TLD 频率和等效阻尼比,但扫频方法需要进行多条不同频率正弦波激励加载,费时费力;同时扫频方法本质上是针对物理坐标系响应的直接识别方法、不能准确识别可能存在耦合系统的模态参数。故需要采用更为经济、高效、可靠的方法来研究 TLD 性能参数。

针对以上问题,本文采用一种基于有色噪声激励的水箱特性振动台试验方法,对测得的水箱液面多点响应信号进行解耦分离,再采用不同识别方法进行参数识别。对内部带阻尼格栅的矩形水箱的减振性能进行了详细的试验研究,分析了格栅位置、稠度比和相对激励幅值对水箱自振频率和模态阻尼比的影响并和基于线性理论的计算结果进行对比,验证所用方法的有效性和结果的可靠性。

1 TLD 振动台试验

1.1 试验模型

TLD 试验模型尺寸如图 1 所示,其中无阻尼格

栅 TLD(图 1(a))为带阻尼格栅 TLD(图 1(b))的试验对比组。TLD 模型净空尺寸 $L \times B \times h$ (长 \times 宽 \times 液深)为 $2.1 \text{ m} \times 0.64 \text{ m} \times 0.44 \text{ m}$,采用钢板和 PC 板制作,假定缩尺比为 1:10,各变量相似准则^[9]如表 1 所示。阻尼格栅共有两块,为不锈钢材质,如图 1(c)

所示,每块格栅的宽度 l 为 0.64 m ,高度 b 为 0.7 m ,厚度为 0.002 m 。格栅的疏密程度用稠度比 S 来表示:

$$S = \frac{A_s}{A_T} \quad (1)$$

式中 A_s 为格栅实心部分面积, A_T 为格栅总面积。

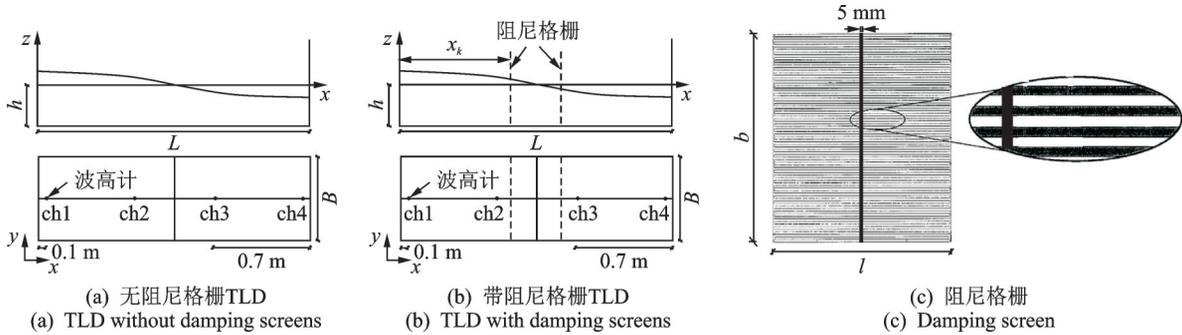


图 1 TLD 模型尺寸

Fig. 1 Model sizes of TLD

表 1 相似准则

Tab. 1 Similitude law

变量	缩尺比
长度	1:10
频率	$\sqrt{10}:1$
阻尼比	1:1

1.2 试验装置和施加激励

TLD 试验模型如图 2 所示,考虑到扫频方法效率低下的缺点,本文采用基于有色噪声激励的振动台试验方法来研究带阻尼格栅 TLD 的减振性能,试

验装置如图 3 所示。试验采用 4 个数字波高计来测量 TLD 内液体沿长边方向的自由表面高度(即波高)变化情况,采样频率为 100 Hz ,并采用加速度传感器测量振动台台面加速度,采样频率为 25 Hz 。为避免前一工况对后一工况试验结果的影响,每个工况均待 TLD 响应平稳后开始采样,采样时长为 5 min 。



(a) 无阻尼格栅 TLD
(a) TLD without damping screens



(b) 带阻尼格栅 TLD
(b) TLD with damping screens

图 2 TLD 试验模型

Fig. 2 Test models of TLD

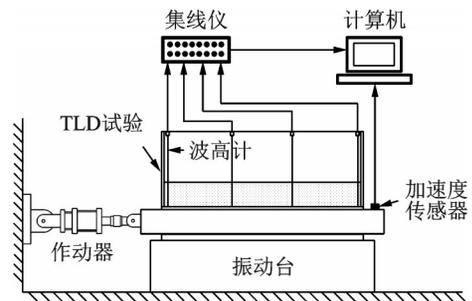


图 3 试验装置示意图

Fig. 3 Schematic of test apparatus

试验所使用振动台为 Servotest 公司生产的 3 向 6 自由度地震模拟振动台,该振动台系统加载模式为位移加载,不能直接对试验试件施加加速度激励,因此本文根据位移谱和加速度谱的关系,采用等效位移谱模拟生成的位移时程作为振动台系统所施加的激励,并沿着 TLD 试验模型长边方向进行单向加载。

假定在有色噪声带宽范围内,所施加位移激励功率谱为频率 f 的指数函数,则位移激励功率谱可表示为:

$$S_{FF}(f) = \begin{cases} \alpha f^\beta, & f \in [a, b] \\ 0, & f \notin [a, b] \end{cases} \quad (2)$$

式中 α 和 β 为由测试系统即振动台装置的加载方

式所决定的系数,本试验为位移加载模式,故 $\alpha=2\pi, \beta=-4$; a 和 b 为有色噪声带宽范围的下限和上限,根据试验水箱液体晃动频率的大致范围,取 $a=0.2$ Hz, $b=3$ Hz。采用随机模拟方法^[10-11]将频域表达的位移激励功率谱 $S_{FF}(f)$ 转化为时域表达的位移激励时程 $x(t)$,如下式所示:

$$x(t) = \sum_{N=N_a}^{N_b} \sqrt{2S_{FF}(N\Delta f)\Delta f} \cos(2\pi N\Delta ft + \varphi_N),$$

$$N_a = \text{int}(a/\Delta f), N_b = \text{int}(b/\Delta f),$$

$$\Delta f = 1/T \quad (3)$$

式中 Δf 为离散频率点的频率间隔, φ_N 为在 $[0, 2\pi]$ 区间内满足均匀分布的随机相位角, N 为离散化的位移激励功率谱线序列, T 为要模拟的样本时间。采用上述方法进行模拟得到位移激励的模拟结果如图4(a)所示,图4(b)为相应的功率谱密度,由图可见模拟的位移谱和目标谱吻合良好。

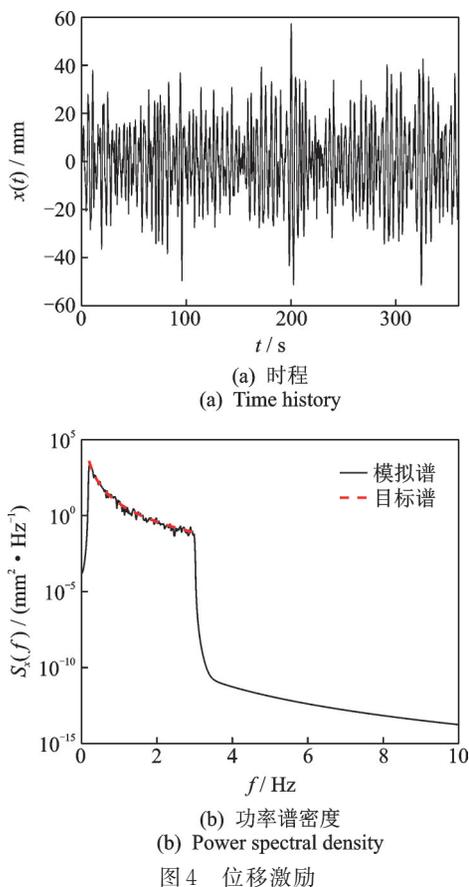


图4 位移激励

对位移激励时程求两次导数得相应的加速度激励时程,如图5所示。图5表明在0.2~3 Hz频率范围内,所施加激励的谱为白噪声谱。

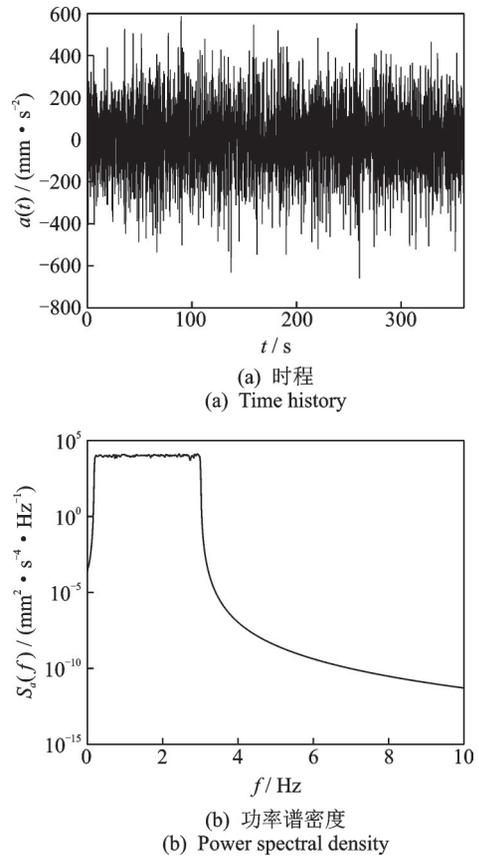


图5 加速度激励

Fig. 5 Acceleration excitation

1.3 试验工况

为研究带阻尼格栅TLD的减振性能进行了一系列试验,具体试验工况如表2所示。对随机模拟方法生成的位移激励进行调幅,并用 $\Lambda = \sigma_e/L$ 来衡量激励相对幅值的大小, σ_e 为位移激励时程均方根值。

1.4 TLD性能参数理论解

基于线性波浪理论可以得到典型平面形状的TLD固有特性。对于矩形平面水箱,其液体晃荡的第 j 阶频率为^[12]:

表2 试验工况

Tab. 2 Test cases

TLD类型	试验分组	格栅位置(x_k/L)	稠度比 S	相对激励幅值 Λ
无阻尼格栅	1	-	-	0.0012, 0.0018, 0.003
	2	0.4 & 0.6	0.33, 0.42, 0.55, 0.64, 0.76	0.003
带阻尼格栅	3	0.3 & 0.7, 0.25 & 0.75	0.42	0.003
	4	0.4 & 0.6	0.42	0.0012, 0.0018, 0.003, 0.0042, 0.0054, 0.006

$$f_j = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{j\pi g}{L} \tanh\left(\frac{j\pi h}{L}\right)} \quad (4)$$

式中 L 为水箱沿液体晃荡方向长度(如图1(a)), h 为TLD内液体深度, g 为重力加速度。无阻尼格栅TLD仅通过液体的黏度耗散能量,所产生的阻尼比 ζ_w 为^[13]:

$$\zeta_w = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\nu}{\pi f}} \left(1 + \frac{h}{B}\right) \quad (5)$$

式中 ν 为液体的运动黏度, B 为TLD宽度。有格栅时的阻尼比与激励幅值和激励类型有关,当激励类型为白噪声时,阻尼格栅的理论阻尼比 ζ_s 为^[14]:

$$\zeta_s = C_l \sqrt{\frac{2}{\pi}} \tanh\left(\frac{\pi h}{L}\right) \Delta \Xi \frac{\sigma_r}{L} \quad (6)$$

其中,

$$\Delta = \frac{1}{3} + \frac{1}{\sinh^2(\pi h/L)} \quad (7)$$

$$\Xi = \sum_{k=1}^{n_s} \sin\left(\frac{\pi x_k}{L}\right)^3 \quad (8)$$

式中 σ_r 为流体晃动响应的均方根值, n_s 为TLD内部设置的阻尼格栅数量, x_k 为第 k 个格栅到水箱左侧壁面的距离, C_l 为与格栅稠度比 S 有关的损失系数。

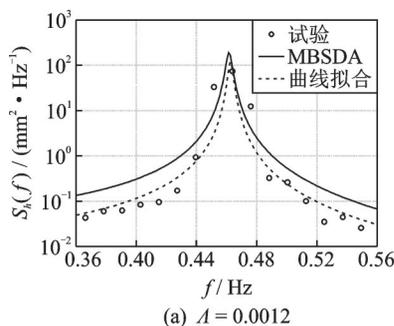
1.5 TLD性能参数识别方法

在进行TLD性能参数识别前,本文采用复数形式的二阶盲辨识(SOBI)方法^[15]对波高计测得的TLD耦合响应信号进行解耦。该方法先对TLD耦合响应信号进行复数化,再将复信号白化,对白化信号的延时相关矩阵进行联合对角化逼近,进而求得TLD的复振型矩阵 $\tilde{\Phi}$ 与复分离矩阵 $\tilde{B} = \tilde{\Phi}^{-1}$,最后由复分离矩阵 \tilde{B} 计算得到解耦后的各阶模态响应信号:

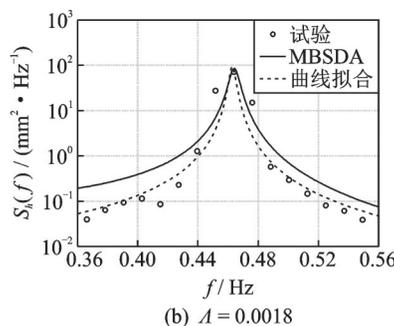
$$\tilde{q}(t) \approx \tilde{B} \tilde{x}(t) \quad (9)$$

式中 $\tilde{x}(t)$ 为TLD耦合响应信号的复信号。

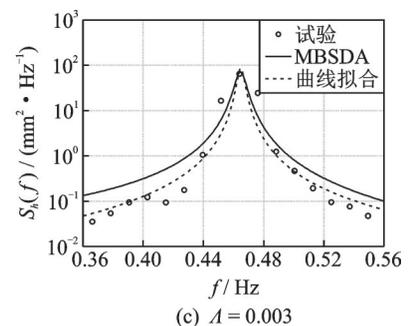
对于解耦后的模态响应信号,进行TLD性能参数识别,以求得TLD频率和阻尼比。参数识别方法采用改进贝叶斯谱密度法(MBSDA)和曲线拟合法。其中,MBSDA方法^[16]假设模态坐标下激励的功率谱密度函数为:



(a) $A=0.0012$



(b) $A=0.0018$



(c) $A=0.003$

图6 试验结果与参数识别结果对比

Fig. 6 Comparison of test results and parameter identification results

$$S_{p_j}(f) = S_0 \left(\frac{f}{f_j}\right)^\lambda \quad (10)$$

式中 S_0 为输入激励在TLD固有频率处的功率谱密度值, λ 为激励幂指数。这使得MBSDA方法既适用于白噪声激励,又适用于有色噪声激励的情况。对于平稳过程,在特定频率区段内,TLD响应功率谱密度的概率分布可近似为Chi-square分布,该分布可采用含有TLD性能参数的函数来表示,通过令TLD性能参数的后验概率密度函数最大化,使求得的参数结果达到最优。参数识别结果的不确定性通过后验变异系数(标准差除以最优解)来评估。

曲线拟合法与MBSDA方法采用相同的模态激励功率谱密度函数假设,解耦后的模态响应信号和模态激励的功率谱密度的关系为:

$$S_{q_j}(f) = |h_j(f)|^2 S_{p_j}(f) \quad (11)$$

式中 $S_{q_j}(f)$ 为第 j 阶模态响应 $\tilde{q}_j(t)$ 的功率谱密度, $S_{p_j}(f)$ 为第 j 阶模态气动力 $p_j(t)$ 的功率谱密度, $h_j(f)$ 为TLD频率响应函数。根据模态响应信号的功率谱密度,可以采用最小二乘法局部拟合出TLD频率和阻尼比。

2 试验结果分析

2.1 无阻尼格栅

分别在 $A=0.0012, 0.0018, 0.003$ 三种不同相对激励幅值作用下,进行无阻尼格栅TLD振动台试验,对试验测得的TLD中液面波高信号进行模态解耦后再分别采用MBSDA方法和曲线拟合法进行参数识别,得到 S_0, λ , TLD频率 f_j 和阻尼比 ζ_j 。将参数识别结果代入式(10)和(11),在TLD一阶模态频率附近,得到无阻尼格栅TLD的试验结果与参数识别结果对比如图6所示。

由图可知,在白噪声激励作用下,液面波高功率谱密度曲线与线性系统响应谱曲线明显不同,液面波高功率谱曲线呈现明显非线性特征,这种特征出现在后续所有试验结果中。采用线性化方法对试验

结果进行分析可知, MBSDA方法和基于最小二乘法的曲线拟合方法的识别结果存在差异, 其原因在于MBSDA方法偏向于关注峰值局部偏差大小, 而曲线拟合法则更强调控制整体偏差的大小。根据式(4)计算内部未设置阻尼格栅 TLD 一阶模态频率的理论值为 0.46 Hz, 由图可知频率识别结果与理论值吻合较好, 说明两种方法识别频率的准确性。且 TLD 频率随相对激励幅值 Δ 增加无明显变化。

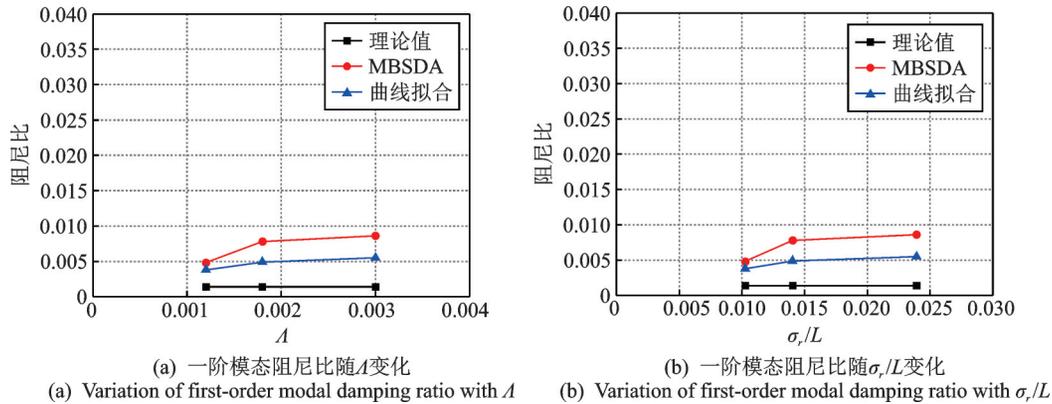


图7 一阶模态阻尼比识别结果与理论值比对

Fig. 7 Comparison of first order damping ratio identification results with theoretical values

2.2 阻尼格栅的影响

对带阻尼格栅的 TLD 进行了 3 组不同试验, 分别研究不同稠度比 ($S=0.33, 0.42, 0.55, 0.64, 0.76$)、格栅设置位置 ($x_k/L=0.4$ & $0.6, 0.3$ & $0.7, 0.25$ & 0.75)、相对激励幅值 ($\Delta=0.0012, 0.0018, 0.003, 0.0042, 0.0054, 0.006$) 对 TLD 减振性能的影响。

无阻尼格栅 TLD 试验阻尼比识别结果与相对激励幅值 Δ , 相对响应 σ_r/L 的关系分别如图 7(a) 和 (b) 所示, 理论值根据式(5)计算得到。由图可见一阶模态阻尼比的试验识别结果大于理论值, 这是由于理论值只考虑了液体黏度对阻尼的贡献, 未考虑 TLD 试验模型内部壁面摩擦对阻尼的增大作用。MBSDA 方法识别阻尼比大于曲线拟合方法, 且识别结果分别随 $\Delta, \sigma_r/L$ 增加而略增大。

图 8 给出部分工况一阶模态功率谱密度的试验结果与参数识别结果的对比。由图可知参数识别结果与试验结果吻合良好, 说明两种参数识别方法的可靠性。与图 6 相比可知, 带阻尼格栅 TLD 一阶模态频率无明显变化, 说明在 TLD 内设置阻尼格栅不会改变 TLD 一阶模态频率, 且频率不随相对激励幅值变化而改变。

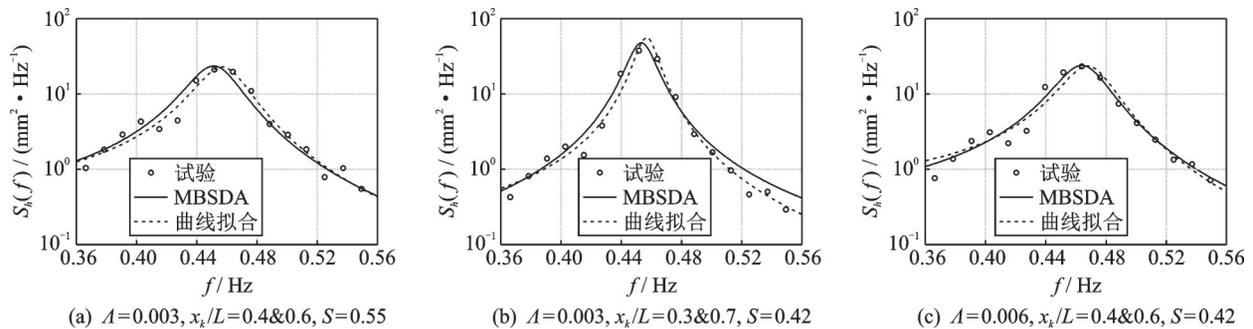


图8 试验结果与参数识别结果对比

Fig. 8 Comparison of test results and parameter identification results

首先考虑稠度比 S 对 TLD 一阶模态阻尼的影响, 取 $x_k/L=0.4$ & $0.6, \Delta=0.003$, 参数识别结果如图 9 所示。由图可见, 在 TLD 中设置格栅能够增大一阶模态阻尼比, 且阻尼比随 S 增加而增大。在本组参数下, 两种不同参数识别方法得到的模态阻尼比较为接近, 当 $S < 0.5$ 时, 参数识别结果略大于理论值; 当 $S > 0.5$ 时, 参数识别结果小于理论值且两者的差别随 S 的增大而增大。

进一步考虑相对激励幅值 Δ 对一阶模态阻尼比的影响 (固定取 $x_k/L=0.4$ & $0.6, S=0.42$), 参数识

别结果如图 10(a) 所示。阻尼比与相对响应 σ_r/L 的关系如图 10(b) 所示。由图可见, 阻尼比有分别随 $\Delta, \sigma_r/L$ 的增大而增大的趋势, 且当 $\Delta \geq 0.003, \sigma_r/L \geq 0.006$ 时, 两种识别方法得到的结果和理论结果较为接近; 在 $\Delta < 0.003, \sigma_r/L < 0.006$ 时, 两种方法的结果均大于理论值, 且 MBSDA 得到的结果最大, 采用理论值可能会低估 TLD 的阻尼值。

在 $S=0.42, \Delta=0.003$ 时, 考察格栅位置对液体晃动的模态阻尼比的影响结果如图 11 所示。图中同时给出前两阶模态阻尼比随格栅相对位置变化的

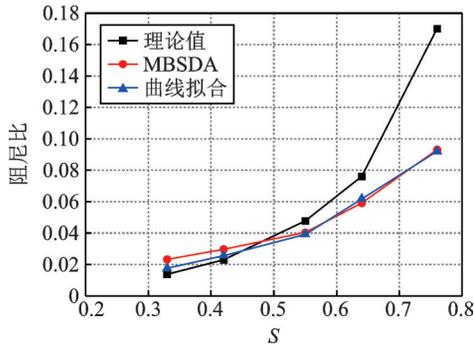
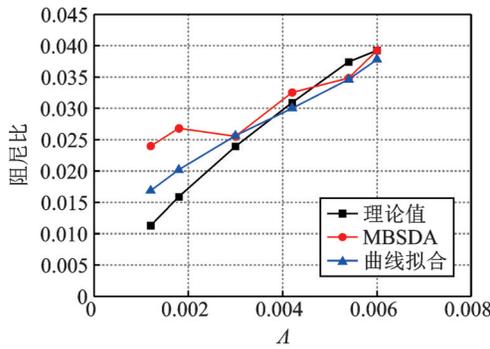


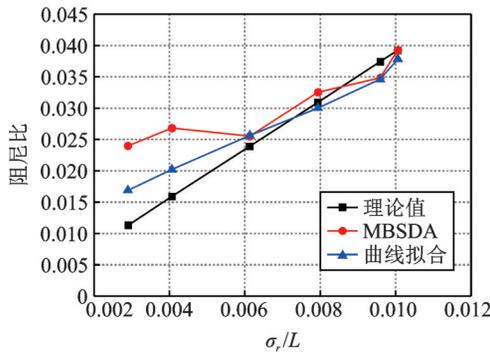
图 9 一阶模态阻尼比随稠度比 S 变化 ($\Lambda=0.003$)

Fig. 9 Variation of first-order modal damping ratio with solidity ratio S ($\Lambda=0.003$)



(a) 一阶模态阻尼比随 A 变化

(a) Variation of first-order modal damping ratio with A



(b) 一阶模态阻尼比随 σ_r/L 变化

(b) Variation of first-order modal damping ratio with σ_r/L

图 10 一阶模态阻尼比识别结果与理论值对比

Fig. 10 Comparison of the identified first order damping ratio with theoretical values

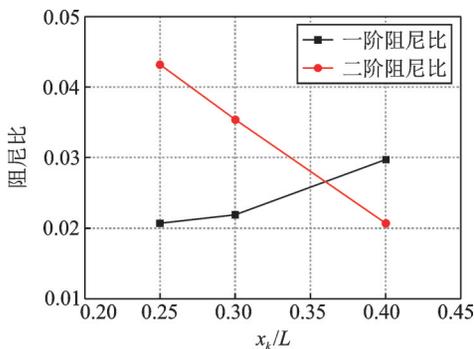


图 11 TLD 阻尼比与格栅设置位置的关系

Fig. 11 Relationship between TLD damping ratio and the screen position

影响。由图可见,随着格栅设置位置靠近二阶振型,一阶模态阻尼比减小,二阶模态阻尼比增大。

下面结合图 12 和液面速度的晃动模态说明以上影响规律。图 12 为采用线性波浪理论计算的前两阶模态的归一化速度幅值 Ω 沿 TLD 长边方向变化曲线。当格栅位置处于 $x_k/L=0.4$ & 0.6 时,一阶模态归一化速度幅值 Ω 大于二阶模态,随着格栅位置变化,一阶模态 Ω 变小,二阶模态 Ω 变大,当格栅位置处于 $x_k/L=0.25$ & 0.75 时,一阶模态 Ω 小于二阶模态,格栅上的压力损失与速度的平方成正比,因此随着格栅位置变化,阻尼格栅对一阶模态的抑制作用变小,对二阶模态的抑制作用变大。

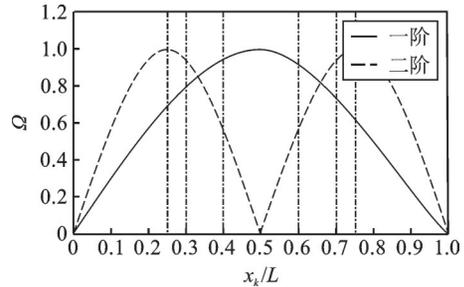


图 12 前两阶归一化流体速度与 TLD 中阻尼格栅的位置

Fig. 12 The first two order normalized fluid velocity and the positions of damping screens in TLD

3 结 论

由本文研究可得以下结论:

(1) 采用基于有色噪声激励下的水箱特性振动台试验方法、复二阶盲辨识信号分离和多种参数识别方法校核能够快速获得可靠的 TLD 减振性能参数。

(2) 在 TLD 内设置阻尼格栅不改变 TLD 频率,但能增加 TLD 阻尼比,且 TLD 一阶模态阻尼比随稠度 S 比增加而增大,当 $S < 0.5$ 时,参数识别结果略大于理论值;当 $S > 0.5$ 时,参数识别结果小于理论值且两者的差别随 S 的增大而增大。

(3) TLD 一阶阻尼比有分别随相对激励幅值、相对响应的增大而增大的趋势,且当 $\Lambda < 0.003, \sigma_r/L < 0.006$ 时,采用理论值可能会低估 TLD 的阻尼值。

(4) TLD 中阻尼格栅设置位置对 TLD 各阶模态阻尼比大小有影响,随着格栅设置位置靠近二阶振型,一阶模态阻尼比减小,二阶模态阻尼比增大,有助于抑制非线性响应,从而提高 TLD 的可控性与可靠性。

参考文献:

[1] Tamura Y, Fujii K, Ohtsuki T, et al. Effectiveness of tuned liquid dampers under wind excitation [J]. Engi-

- neering Structures, 1995, 17(9): 609-621.
- [2] 瞿伟廉, 陈妍桂. TLD对珠海金山大厦主楼风振控制的设计[J]. 建筑结构学报, 1995, 16(3): 21-28.
Qu Weilian, Chen Yangui. Design of wind vibration control for main building of Jinshan building in Zhuhai by TLD[J]. Journal of Building Structures, 1995, 16(3): 21-28.
- [3] 李爱群, 瞿伟廉. 南京电视塔风振的混合振动控制研究[J]. 建筑结构学报, 1996, 17(3): 9-17.
Li Aiqun, Qu Weilian. Research on mixed vibration control of Nanjing TV Tower[J]. Journal of Building Structures, 1996, 17(3): 9-17.
- [4] Li H N, Yi T H, Jing Q Y, et al. Wind-induced vibration control of Dalian International Trade Mansion by tuned liquid dampers[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2012, 2012: 1-21.
- [5] Miles J W. Surface wave damping in closed basins[J]. Proceedings of the Royal Society of London, Series A: Mathematical and Physical Science, 1967, 297: 459-475.
- [6] Tait M J, Damatty A A E, Isyumov N, et al. Numerical flow models to simulate tuned liquid dampers (TLD) with slat screens[J]. Journal of Fluids & Structures, 2005, 20(8): 1007-1023.
- [7] Reed D, Yu J, Yeh H, et al. Investigation of tuned liquid dampers under large amplitude excitation[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1998, 124(4): 405-413.
- [8] Chen B F, Yang H K, Wu C H, et al. Numerical study of liquid mixing in microalgae-farming tanks with baffles [J]. Ocean Engineering, 2018, 161(1): 168-186.
- [9] Heo J S, Lee S K, Park E, et al. Performance test of a tuned liquid mass damper for reducing bidirectional responses of building structures [J]. The Structural Design of Tall and Special Buildings, 2009, 18(7): 789-805.
- [10] Shinozuka M, Jan C M. Digital simulation of random processes and its applications [J]. Journal of Sound & Vibration, 1972, 25(1): 111-128.
- [11] Li Y, Kareem A. Simulation of multivariate random processes: hybrid DFT and digital filtering approach [J]. Journal of Engineering Mechanics, 1993, 119(5): 1078-1098.
- [12] Lamb H. Hydrodynamics [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1932.
- [13] Sun L M. Semi-analytical modelling of tuned liquid damper (TLD) with emphasis on damping of liquid sloshing[D]. Tokyo: University of Tokyo, 1991.
- [14] Tait M J. Modelling and preliminary design of a structure-TLD system[J]. Engineering Structures, 2008, 30(10): 2644-2655.
- [15] Zhang L L, Xie Z N, Yu X F. Method for decoupling and correction of dynamical signals in high-frequency force balance tests [J]. Journal of Structural Engineering, 2018, 144(12): 04018216.
- [16] 潘浩然, 谢壮宁. 改进贝叶斯谱密度法及其在超高层结构振动模态参数识别中的应用[J]. 建筑结构学报, 2016, 37(12): 27-32.
Pan Haoran, Xie Zhuangning. Modified Bayesian spectral density approach and its application to modal parameter identification of super-tall building [J]. Journal of Building Structures, 2016, 37(12): 27-32.

Experimental study on vibration reduction performance of tuned liquid dampers with damping screens

ZHANG Lan-fang¹, ZHANG Le-le¹, XIE Zhuang-ning¹, JIANG Yi²

(1.State Key Laboratory of Subtropical Building Science, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;

2.Architectural Design and Research Institute Co. Ltd., South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: Shaking table tests of TLD characteristics excited by colored noise are conducted and multi-point wave height signals of TLD are decoupled and then identified to obtain modal parameters of liquid sloshing by different methods. Taking TLD with screens as an example, the effects of the solidity ratio, screen position and relative excitation amplitude on damping performance of TLD are studied in detail, and experimental results are compared with linearized theoretical values. The results show that the shaking table test under colored noise excitation can obtain damping performance parameters of TLD quickly and accurately, and the signal decoupling method and parameter identification methods are highly reliable. The frequency of TLD with screens is not be changed and the damping ratio raises with increase of solidity ratio and relative excitation amplitude. Moreover, screens can increase the damping ratio of higher-order modes of TLD, which aids to suppress the nonlinear response.

Key words: tuned liquid dampers; damping screens; shaking table tests; modes decoupling; parameter identification

作者简介: 张蓝方(1991—),女,博士研究生。电话:13922420051;E-mail:zlfhfu@163.com。

通讯作者: 谢壮宁(1963—),男,教授。电话:13660372789;E-mail:znxie@scut.edu.cn。