

考虑挡板间水动力相互作用影响的 矩形 TLD 水箱阻尼比分析*

钟文坤, 吴玖荣, 孙连杨

(广州大学 广州大学-淡江大学工程结构灾害与控制联合研究中心, 广州 510006)

摘要: 利用能量耗散原理,推导出底部安装有多块垂直挡板和左右侧壁对称安装有多组水平挡板的矩形 TLD 水箱在正弦激励荷载下的线性阻尼比估算公式,通过引入速度势函数修正因子考虑了挡板间水动力相互作用的影响,对矩形水箱的阻尼比计算公式进行了修正.将考虑挡板间水动力相互作用影响与否得到的矩形水箱阻尼比计算结果与振动台试验结果进行了对比分析,研究表明:挡板间距较小时,挡板间的水动力相互作用对水箱的阻尼比影响较明显,不能忽视,而考虑此因素进行修正后得到的阻尼比与试验值较吻合,具有更高的估算精度.

关键词: 矩形 TLD 水箱; 能量耗散原理; 挡板; 线性阻尼比; 振动台试验; 水动力相互作用影响
中图分类号: O352 **文献标志码:** A **DOI:** 10.21656/1000-0887.410154

Damping Ratio Analysis of Rectangular TLD Tanks With Hydrodynamic Interaction Effects Between Baffles

ZHONG Wenkun, WU Jiurong, SUN Lianyang

(Guangzhou University-Tamkang University Joint Research Center for
Engineering Structure Disaster Prevention and Control,
Guangzhou University, Guangzhou 510006, P.R.China)

Abstract: The estimation formulas for linear damping ratios of rectangular TLD tanks equipped with bottom-mounted vertical baffles or symmetrically wall-mounted horizontal baffles were derived based on the energy dissipation principle under sinusoidal excitation. The formula for the damping ratio of the tank was revised through introduction of the velocity potential function correction factor to consider the hydrodynamic interaction effect between the baffles. Furthermore, several shaking table tests were conducted on a scaled-down rectangular TLD water tank to validate the proposed analytical model for damping ratio estimation. Comparisons between predicted and measured damping ratios show that, the hydrodynamic interaction effects between the baffles with small spacings could reduce the damping ratio of the rectangular water tank. The estimated damping ratio of the rectangular water tank has higher accuracy with the proposed method in view of hydrodynamic interaction effects between baffles.

Key words: rectangular TLD tank; energy dissipation principle; baffle; linear damping ratio; shaking table

* 收稿日期: 2020-05-27; 修订日期: 2020-06-16

基金项目: 国家自然科学基金(51925802;51778161)

作者简介: 钟文坤(1991—),男,博士生(E-mail: 1111816009@gzhu.edu.cn);

吴玖荣(1970—),男,教授,博士生导师(通讯作者. E-mail: jrwu@gzhu.edu.cn).

引用格式: 钟文坤, 吴玖荣, 孙连杨. 考虑挡板间水动力相互作用影响的矩形 TLD 水箱阻尼比分析[J]. 应用数学和力学, 2021, 42(1): 71-81.

test; hydrodynamic interaction effect

引言

现代高层建筑具有质量轻、柔度大、阻尼小等特性,使得风荷载成为影响其结构设计的控制荷载,为了降低结构的风振响应,可在结构上安装附加阻尼系统,以增加结构的能量耗散^[1-2]。调谐液体阻尼器(tuned liquid damper,又称为 TLD)作为一种有效的被动耗能减振装置,不仅具有造价低、结构简单、易于安装且控制性能良好等优势,还可以节省建筑空间,如结合高层建筑设计所必须的生活及消防水箱或室内游泳池等加以利用,在高层建筑风振控制中得到了广泛的应用。TLD 又分为矩形 TLD、圆柱形 TLD(又称为 TLCD)及 U 型 TLD^[3-4],为部分充满液体(通常是水)所组成的水箱,一般置于建筑物的顶部。当建筑受到风荷载发生摇晃时,水箱内的液体也随之晃动,振动的部分能量从结构转移到 TLD 中,TLD 再通过箱内液体在边界层的摩擦耗能而把能量耗散掉,进而达到减振作用。

由于水的黏滞性比较小,通过水箱边界层摩擦耗能所提供的阻尼比并不能满足 TLD 达到最佳调谐所需要的阻尼比值,因此可在水箱内部安置格栅、挡板、柱子等障碍物来提高能量耗散,进而达到增大水箱阻尼比的作用^[5]。Tait^[6]对内置有格栅的 TLD,利用势流理论与虚功原理等方法推导了其阻尼比估算公式,并分析了液体的晃动特性;Molin 等^[7]分析了内置于水箱中部不同尺寸形状的格栅对水箱阻尼比的影响,并利用线性势流理论对模型进行求解;Biswal 等^[8]利用势流理论并结合有限元方法,研究了内置有挡板与无挡板情况下,矩形水箱受正弦激励作用时液体晃动的特性,发现有挡板的水箱更能抑制液体的晃动;Cho 等^[9]对挡板的开孔率、浸没深度及位置等参数进行了研究;Nayak 等^[10]通过试验方法对矩形水箱中分别安置有底部垂直挡板、液面悬挂式挡板和底部浸没物块的晃动特性进行了研究,结果表明液面悬挂式挡板对水箱的阻尼比贡献最显著;Goudarzi 等^[11]分别推导了底部安装有两块垂直挡板和左右侧壁安装有一对水平挡板的矩形水箱线性阻尼比计算公式,同时还研究了两块垂直挡板的间距对矩形水箱阻尼比的影响,并利用振动台试验进行了验证;Love 等^[12]利用等效线性模型,推导了内置有多排十字立柱的矩形水箱阻尼比计算公式;钟文坤等^[13]利用能量耗散原理,推导了分别内置水平挡板和垂直挡板的矩形 TLD 水箱估算公式。

目前大多数学者对水箱 TLD 系统阻尼比的理论研究基本只考虑挡板或格栅等耗能装置本身的独立性或者其简单线性叠加作用,而忽略了其对液体晃动速度的影响,即水的动力相互作用对 TLD 系统阻尼比的影响。水在晃动时,具有较复杂的晃动特性^[14-15],从 Goudarzi 等^[11]得到的理论值与试验值对比情况来看,当增加挡板数量后,在挡板间距较小时,理论计算值明显大于试验测得值。显然,挡板间距较小时,挡板间的水动力相互作用对水箱系统的阻尼比影响较明显,用现有的理论往往会高估其阻尼比。

如何评估挡板间水动力相互作用对 TLD 阻尼比的影响,该方面的研究甚少。基于此,本文以一矩形 TLD 水箱系统为研究对象,假定水箱底部受到的外加激励为正弦激励,利用能量耗散原理,分别推导了底部安装有多块垂直挡板和左右侧壁对称安装有多组水平挡板的矩形水箱阻尼比估算公式;然后,通过引入速度势函数修正因子来考虑挡板间水动力相互作用的影响,对矩形水箱系统的阻尼比估算公式进行了修正;最后,结合振动台试验来验证所提出的理论计算模型的准确性。

1 基本理论

1.1 流体势流理论

假定 TLD 系统中的水是不可压缩、无黏性及无旋运动的理想流体,基于这一假设的前提可从以下两方面考虑:一方面对于应用在高层建筑抗风舒适度控制(风致加速度限值控制)的 TLD 系统而言,由于 TLD 系统底部受到的建筑物顶部所施加的外部激励(位移或加速度)幅值不大^[16],在这种情况下 TLD 内水的运动基本是处于线性运动状态,因此可以假定矩形 TLD 水箱中的水是不可压缩、无旋运动的;另一方面对于实际应用工程中内置有格栅、挡板等耗能装置的 TLD 系统,由水的黏性所提供的阻尼往往较小,可忽略不计^[6]。基于势流理论,对于理想运动的流体,由流体力学^[17]可知,水的速度势函数 $\phi(x, y, z, t)$ 满足 Laplace 方程:

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0. \quad (1)$$

忽略 y 方向,只考虑 x, z 两个方向的维度,如图 1 所示的矩形 TLD 水箱,水的运动还应满足如下的边界条件:

水箱侧壁 ($x = 0, x = L$):

$$u(x, z, t) = \frac{\partial \phi}{\partial x} \Big|_{x=0, x=L} = 0; \quad (2)$$

水箱底部 ($z = -h$):

$$w(x, z, t) = \frac{\partial \phi}{\partial z} \Big|_{z=-h} = 0; \quad (3)$$

对于自由液面的线性化边界层条件为

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} \Big|_{z=0} = \frac{\partial \eta}{\partial t}. \quad (4)$$

联立方程组(1)~(4),满足上述边界条件的速度势函数和自由液面波高函数可以表示为

$$\phi_n(x, z, t) = \frac{gA}{\omega_n} \frac{\cosh\left[\frac{n\pi(z+h)}{L}\right]}{\cos\left(\frac{n\pi h}{L}\right)} \cos\left(\frac{n\pi x}{L}\right) \cos(\omega_n t), \quad (5)$$

$$\eta_n(x, t) = A \cos\left(\frac{n\pi x}{L}\right) \sin(\omega_n t), \quad (6)$$

式中, g 为重力加速度, A 为第 n 阶模态下水箱侧壁的液面波高幅值, ω_n 为第 n 阶模态下水箱的晃动频率。

1.2 挡板的阻力计算

当水箱受到外部激励作用时,水箱水会产生晃动,根据 Morison 等^[18]的公式,水箱内的挡板 dz 段所受到的阻力 dF 可表示为

$$dF = \frac{1}{2} \rho C_d |v(x, z, t)| v(x, z, t) dz, \quad (7)$$

式中, $v(x, z, t)$ 为流向挡板的入射速度, ρ 为水的密度, C_d 为挡板的阻力系数,可进一步表示为^[17]

$$C_d = 8.0(KC)^{-1/3}, \quad (8)$$

$$KC = UT/l_b, \quad (9)$$

其中, U 为 $v(x, z, t)$ 的最大值, T 为水箱的晃动周期, l_b 为挡板的高度。

2 能量耗散原理

2.1 底部安装有垂直挡板的矩形 TLD 水箱阻尼比分析

只考虑 x, z 两个方向的维度,底部安装有多块垂直挡板的矩形水箱如图 2 所示.假定矩形 TLD 水箱底部受到的外部激励为正弦激励且液体是线性运动的,只考虑水箱的一阶振动模型并忽略挡板对水箱固有频率的影响,矩形水箱的阻尼比计算公式类似推导方法参照文献[13].

为便于计算矩形水箱的能量耗散率,假设水箱底部无外部激励时,单块挡板以速度 $u(x, z, t)$ 在四周静止的液体中做周期为 T 的振荡运动,则单块挡板所做的功 W 为

$$W = \frac{1}{2} \rho C_d \int_{-h}^{-h+l_b} |u(x, z, t)| u(x, z, t) u(x, z, t) dz. \quad (10)$$

若矩形 TLD 水箱底部垂直安装有 n ($n = 1, 2, \dots$) 块挡板,则一个振荡周期 T 内水箱系统的能量耗散率 D 等于所有挡板做的功除以 T ^[18], 即

$$D = \frac{1}{T} \frac{1}{2} \rho C_d \sum_{i=1}^n \int_0^T \int_{-h}^{-h+l_b} |u(x, z, t)| u(x, z, t) u(x, z, t) dz dt. \quad (11)$$

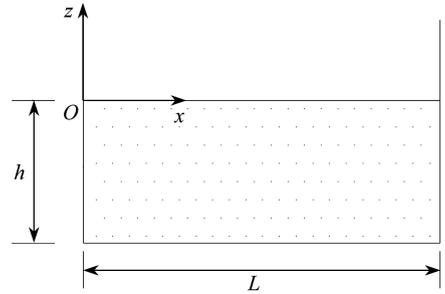


图 1 二维矩形水箱

Fig. 1 A 2D rectangular TLD tank

作用在垂直挡板上液体的相对水平速度可表示为

$$u(x, z, t) = \frac{\partial \phi}{\partial x} \Big|_{x=x_i} = -\omega_1 A_0 \frac{\cosh\left(\frac{\pi(z+h)}{L}\right)}{\sinh\left(\frac{\pi h}{L}\right)} \sin\left(\frac{\pi x_i}{L}\right) \cos(\omega_1 t), \quad (12)$$

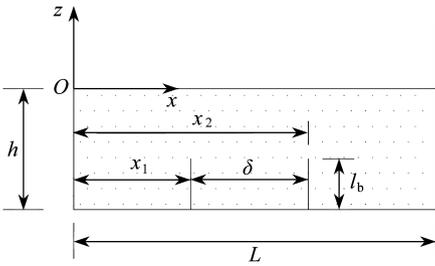


图2 底部安装有垂直挡板的矩形 TLD 水箱

Fig. 2 A rectangular TLD tank with vertical baffles

式中, A_0 为一阶模态下水箱侧壁的波高幅值. 令 $z = -h$, 代入式(12), 可得

$$u(x, z, t) = -U \cos(\omega_1 t), \quad (13)$$

$$U = \frac{A_0 \omega_1}{\sinh(\pi h/L)} \sin\left(\frac{\pi x_i}{L}\right). \quad (14)$$

将式(14)代入式(8), 可将垂直挡板的阻力系数 C_{dvi} 进一步表示为

$$C_{dvi} = 8 \left(\frac{2A_0 \pi \sin(\pi x_i/L)}{l_b \sinh(\pi h/L)} \right)^{-1/3}. \quad (15)$$

将式(12)代入式(11)中, 得

$$D = \frac{1}{2} \rho C_{dvi} \Theta_{vn} \kappa_v \varpi_v, \quad (16)$$

$$\Theta_{vn} = \sum_{i=1}^n \left| \sin\left(\frac{\pi x_i}{L}\right) \right| \sin^2\left(\frac{\pi x_i}{L}\right), \quad (17)$$

$$\kappa_v = \frac{(\omega_1 A_0)^3}{T} \int_0^T |\cos(\omega_1 t)| \cos^2(\omega_1 t) dt, \quad (18)$$

$$\varpi_v = \int_{-h}^{-h+l_b} \frac{\cos^3\left(\frac{\pi(z+h)}{L}\right)}{\sinh^3\left(\frac{\pi h}{L}\right)} dz. \quad (19)$$

分别再对式(18)、(19)进一步化简, 得

$$\kappa_v = \frac{4(\omega_1 A_0)^3}{3\pi}, \quad (20)$$

$$\varpi_v = \frac{L(e^{6\pi l_b/L} + 9e^{4\pi l_b/L} - 9e^{2\pi l_b/L} - 1)e^{-3\pi l_b/L}}{24\pi \sinh^3(\pi h/L)}. \quad (21)$$

在水箱内, 能量耗散率 D 等于液体动能和势能的衰减速率 $-\dot{E}^{[19]}$, 即

$$\dot{E} = -D = -2\xi_v \omega_1 E, \quad (22)$$

式中, E 为动能和势能的总和, 对于二维的矩形水箱且液体流动是线性的, 可表示为^[19]

$$E = \frac{1}{4} \rho g A_0^2 L. \quad (23)$$

水箱第一阶晃动频率 ω_1 的表达式为^[5]

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{g\pi}{L} \tanh\left(\frac{\pi h}{L}\right)}. \quad (24)$$

根据上述关系, 可得到底部安装有垂直挡板的矩形 TLD 水箱线性阻尼比 ξ_v 的计算公式:

$$\xi_v = \frac{4}{3} \tanh\left(\frac{\pi h}{L}\right) \varpi_v \sum_{i=1}^n \left| \sin\left(\frac{\pi x_i}{L}\right) \right| \sin^2\left(\frac{\pi x_i}{L}\right) C_{dvi} \frac{A_0}{L^2}. \quad (25)$$

由式(25)可以看出, 矩形水箱系统的阻尼比大小没有直接体现出与外激励荷载幅值、激频比的关系, 而是隐含在波高幅值 A_0 中. Tait^[6] 把矩形 TLD 水箱内晃动的液体视为弹簧-质量-阻尼体系, 建立了等效线性系统, 如图 3 所示, 并利用虚功原理推导了内置有格栅的矩形 TLD 水箱线性阻尼比计算公式, 由该方法得到的

阻尼比计算公式可直接体现出阻尼比与外激励荷载幅值、激频比的关系。为方便利用,参照此方法可对式(25)做进一步变换。

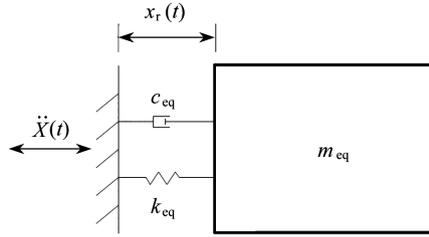


图3 矩形 TLD 水箱等效力学模型

Fig. 3 The equivalent mechanical model for the rectangular TLD tank

该系统在一阶模态下,运动方程为

$$m_{eq}\ddot{x}_r(t) + c_{eq}\dot{x}_r(t) + k_{eq}x_r(t) = -m_{eq}\ddot{X}(t), \quad (26)$$

式中, \$\ddot{X}\$ 表示水箱底部外加激励的加速度, \$x_r\$ 表示等效质量块相对于水箱的位移,其等效质量、等效刚度和等效阻尼分别表示如下^[5]:

$$m_{eq} = \frac{8\rho bL^2}{\pi^3} \tanh\left(\frac{\pi h}{L}\right), \quad (27)$$

$$k_{eq} = \frac{8\rho g bL}{\pi^2} \tanh^2\left(\frac{\pi h}{L}\right), \quad (28)$$

$$c_{eq} = 2m_{eq}\omega_1\xi_{eq}, \quad (29)$$

其中, \$b\$ 为水箱宽度。对式(26)进一步化简,得

$$\ddot{x}_r(t) + 2\omega_1\xi_{veq}\dot{x}_r(t) + \omega_1^2x_r(t) = -\ddot{X}(t). \quad (30)$$

矩形水箱等效线性模型的相对水平位移幅值与侧壁液面波高幅值的关系为^[6]

$$A_0 = \Gamma x_0, \quad (31)$$

式中, \$\Gamma\$ 为模态参与因子,可表示为^[6]

$$\Gamma = \frac{4}{\pi} \tanh\left(\frac{\pi h}{L}\right). \quad (32)$$

把式(31)代入式(25),可得到底部安装垂直挡板的矩形 TLD 水箱等效线性阻尼比 \$\xi_{veq}\$:

$$\xi_{veq} = \xi_0 x_0, \quad (33)$$

$$\xi_0 = \frac{16}{3\pi} \tanh^2\left(\frac{\pi h}{L}\right) \varpi_v \sum_{i=1}^n \left| \sin\left(\frac{\pi x_i}{L}\right) \right| \sin^2\left(\frac{\pi x_i}{L}\right) C_{dvi} \frac{1}{L^2}, \quad (34)$$

式中, \$x_0\$ 为矩形 TLD 水箱对应的等效线性模型的相对水平位移幅值,可表示为^[20]

$$x_0 = \sqrt{\frac{2\mu^4 X_0^2}{(1-\mu^2)^2 + \sqrt{(1-\mu^2)^4 + (4\mu^3 \xi_0 X_0)^2}}}, \quad (35)$$

其中, \$X_0\$ 为激励位移幅值, \$\mu = \omega/\omega_1\$ 为激频比。

2.2 侧壁上对称安装有水平挡板的矩形 TLD 水箱阻尼比分析

同样地,只考虑 \$x, z\$ 两个方向的维度,假设条件与垂直挡板的一致,侧壁对称安装有多块水平挡板的矩形 TLD 水箱如图 4 所示。

推导方法类似 2.1 小节,可得到与外激励荷载幅值、激频比有关的侧壁对称安装有多块水平挡板的矩形水箱阻尼比估算公式:

$$\xi_{heq} = \frac{32}{9\pi^2} \tanh^2\left(\frac{\pi h}{L}\right) \sin\left(\frac{\pi l_b}{L}\right) \left(\cos^2\left(\frac{\pi l_b}{L}\right) + 2 \right) \frac{\sum_{i=1}^n \sinh^3\left(\frac{\pi z_i}{L}\right)}{\sinh^3\left(\frac{\pi h}{L}\right)} C_{dhi} \frac{x_0}{L}, \quad (36)$$

$$C_{dhi} = 8 \left(\frac{2A_0 \pi \sinh(\pi z_i/L)}{l_b \sinh(\pi h/L)} \right)^{-1/3}. \quad (37)$$

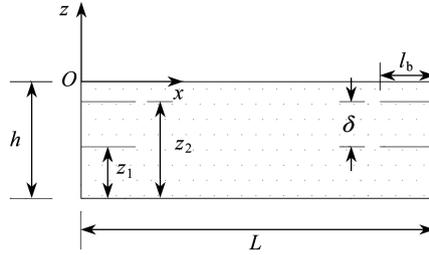


图4 侧壁安装水平挡板的矩形 TLD 水箱

Fig. 4 A rectangular TLD tank with horizontal baffles

3 考虑挡板间水动力相互作用影响矩形 TLD 水箱阻尼比分析

Faltinsen^[19]通过对作用在挡板上液体的速度势函数进行修正,来考虑挡板间水动力相互作用对附加质量系数的影响.当水平挡板的长度小于 $0.15L$ 且到水面的距离大于 $0.1L$,垂直挡板的上边缘到液面的距离大于 $0.2L$ 时,挡板对水箱固有频率的影响可以忽略不计,当超出该范围时,就需要考虑挡板对水箱固有频率的影响^[19].尽管在上述范围内可以忽略挡板对水箱固有频率的影响,即忽略由挡板引起的附加质量系数,但当两块或者更多挡板距离较近时,如图 5 所示,在液体晃动下,挡板间会存在强烈的水动力相互作用,进而会影响水箱的阻尼比.

基于此,本节利用类似的方法,对晃动液体的速度势函数进行修正,来考虑挡板间水动力相互作用对矩形水箱的阻尼比产生的影响.对应的水动力学问题相当于在无限流场中流体绕过一前一后放置的两块平板,假定平面内的挡板沿 x 轴方向有一强迫速度 V ,则沿 x 轴的远场流速可表示为^[19]

$$v = V \left[1 - \frac{|\delta + 0.577l_b|}{\sqrt{l_b^2 + (\delta + 0.577l_b)^2}} \right]. \quad (38)$$

现考虑第二块挡板,该挡板本身以强迫速度 V 振荡,且暴露在背景水流中,而该背景水流由前一块挡板所产生,背景水流流速为 v ,所以第二块挡板的流动问题相当于研究该挡板以 V 和 v 之差做强迫运动,可表示为^[19]

$$V_s = v - V = V \frac{|\delta + 0.577l_b|}{\sqrt{l_b^2 + (\delta + 0.577l_b)^2}}. \quad (39)$$

式(38)、(39)中, δ, l_b 分别为挡板间距和挡板高度.

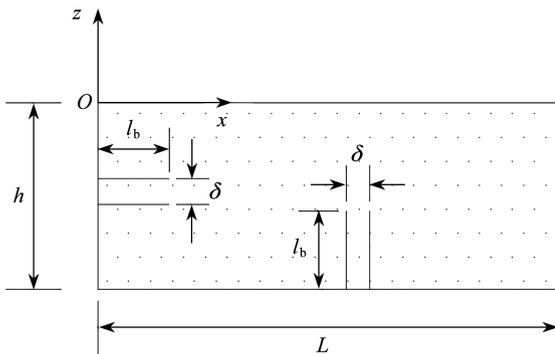
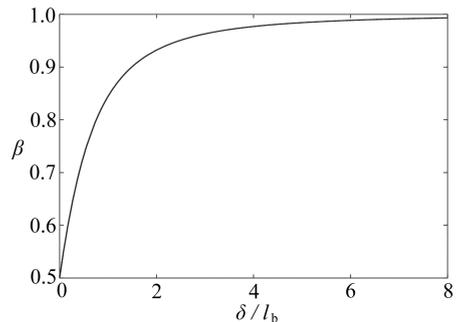


图5 挡板间水动力相互作用示例

Fig. 5 A example of hydrodynamic interaction between the baffles

图6 β 随 δ/l_b 变化的函数图像Fig. 6 Variation of β with δ/l_b

在液体晃动过程中挡板间的水动力作用是相互的,作用在第二块挡板上的液体速度会受到第一块挡板的影响,反之作用在第一块挡板上的液体速度也会受第二块挡板的影响,为此对作用在两块挡板上的液体速度同时进行修正.

考虑挡板间水动力相互作用的影响,引入速度势函数修正因子 β ,则作用在挡板上的液体速度势函数重新表示为

$$\phi'(x, z, t) = \phi(x, z, t)\beta, \quad (40)$$

$$\beta = \frac{|\delta/l_b + 0.577|}{\sqrt{1 + (\delta/l_b + 0.577)^2}}. \quad (41)$$

速度势函数修正因子 β 与 δ/l_b 的函数关系如图 6 所示.由图 6 可知,当 $\delta \geq 3l_b$ 时, β 的值接近于 1,此时挡板间几乎不存在水动力相互作用;而 $0 \leq \delta/l_b < 3$ 时,挡板间的水动力相互作用对 β 的值影响较大,在 $\delta/l_b = 0$ 处可减小至 0.5.

引入速度势函数修正因子 β 后,由式(8)、(9)可知,挡板间水动力相互作用对其阻力系数也存在影响,则垂直挡板与水平挡板的阻力系数可分别写为

$$C_{dvi} = 8 \left(\frac{2\beta A_0 \pi \sin(\pi x_i/L)}{l_b \sinh(\pi h/L)} \right)^{-1/3}, \quad (42)$$

$$C_{dhi} = 8 \left(\frac{2\beta A_0 \pi \sinh(\pi z_i/L)}{l_b \sinh(\pi h/L)} \right)^{-1/3}. \quad (43)$$

式(42)和式(43)的波高幅值 A_0 为理论预测值,考虑到阻力系数为实验性的经验系数,一般由试验确定,所以对于后述挡板阻力系数值,采用试验测得的波高幅值加以推算.由于试验中已存在水动力相互作用影响,可不再对式(42)和式(43)进行修正.

把式(40)代入式(5)和式(11)并重新化简,可得到考虑挡板间水动力相互作用后,矩形 TLD 水箱修正后的线性阻尼比估算公式.

对于底部安装有垂直挡板的矩形 TLD 水箱,阻尼比修正为

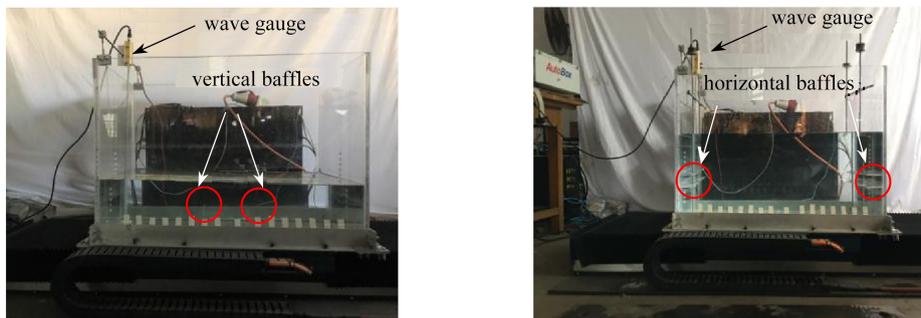
$$\xi'_{veq} = \frac{16}{3\pi} \tanh^2\left(\frac{\pi h}{L}\right) \varpi_v \sum_{i=1}^n \left| \sin\left(\frac{\pi x_i}{L}\right) \right| \sin^2\left(\frac{\pi x_i}{L}\right) \beta^3 C_{dvi} \frac{x_0}{L^2}. \quad (44)$$

同理,对于侧壁上对称安装有水平挡板的矩形 TLD 水箱,阻尼比修正为

$$\xi'_{heq} = \frac{32}{9\pi^2} \tanh^2\left(\frac{\pi h}{L}\right) \sin\left(\frac{\pi l_b}{L}\right) \left(\cos^2\left(\frac{\pi l_b}{L}\right) + 2 \right) \frac{\sum_{i=1}^n \sinh^3\left(\frac{\pi z_i}{L}\right)}{\sinh^3\left(\frac{\pi h}{L}\right)} \beta^3 C_{dhi} \frac{x_0}{L}. \quad (45)$$

4 振动台试验

为了验证本文所推导的公式的准确性,利用振动台进行了一系列的试验研究,如图 7 所示.



(a) 垂直挡板

(b) 水平挡板

(a) The system with vertical baffles

(b) The system with horizontal baffles

图 7 振动台测试装置

Fig. 7 Configurations of the shaking table test system

试验中的振动台为小型电机振动台,台面尺寸为,(长)0.6 m×(宽)0.6 m;试验中的矩形 TLD 水箱尺寸为,(长)0.8 m×(宽)0.5 m×(高)0.6 m,该水箱由有机玻璃制作而成,厚度为 1 cm;试验中的挡板也为有机玻璃制作而成,厚度为 0.5 cm,高度为 6 cm.振动台对水箱底部施加的激励为正弦位移激励 $x = X\sin(\omega t)$, X 为位移激励幅值,激励的频率为 $\omega = \omega_1$.挡板间距大小可以通过调节螺母来任意控制.矩形 TLD 水箱自由液面的波高利用电容式数字波高仪采集,采样频率为 100 Hz,波高仪放置在距水箱左侧壁 1.5 cm 处.

矩形 TLD 水箱的阻尼比可以通过自由液面波高的衰减曲线得到,对应的计算公式为^[21]

$$\xi = \frac{1}{2\pi j} \ln \frac{u_i}{u_{i+j}}, \quad (46)$$

式中, u_i 和 u_{i+j} 分别为第 i 和第 $i+j$ 周期下的波高幅值.

图 8 给出了试验中其中两种工况下归一化的波高 η/η_{\max} 衰减曲线.

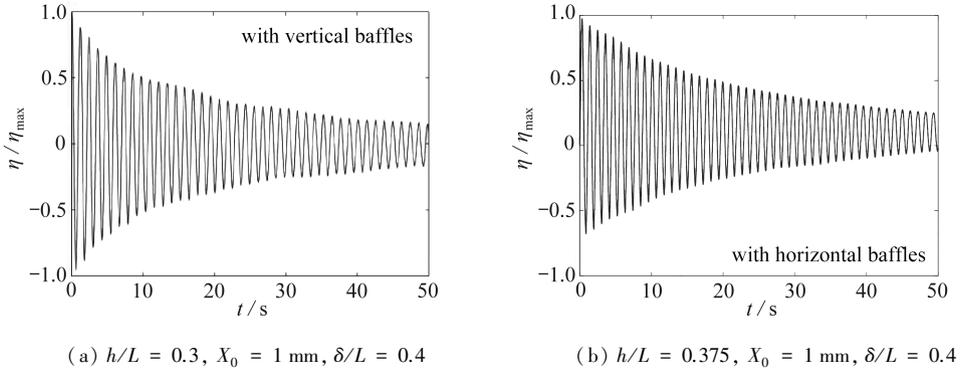


图 8 归一化的自由液面波高衰减曲线

Fig. 8 Typical free vibration time histories of normalized sloshing wave heights

5 结果分析

尽管与实际工程中由格栅、挡板等耗能装置所提供的阻尼相比,水自身的黏性所引起的黏滞阻尼较小,可忽略不计,但对于小缩尺比的水箱,水的黏滞阻尼影响却比较大^[11].为提高理论的估算效果,可把水的黏滞阻尼值一并计入水箱的总阻尼值中,水的黏滞阻尼比计算公式为^[22]

$$\xi_w = \left(\frac{1}{2h} \right) \sqrt{\frac{\nu}{2\omega_n}} \left(1 + \frac{2h}{b} + \alpha_{sc} \right), \quad (47)$$

式中, ν 为水的黏度, b 为水箱的宽度, α_{sc} 为水的表面光滑因子,通常取 1.在以下结果对比中,理论计算的水箱阻尼比值均包含由水的黏滞性所产生的阻尼比值.

5.1 底部安装有垂直挡板的矩形 TLD 水箱阻尼比分析

试验中,以矩形 TLD 水箱底部安装有两块垂直挡板为例,分别开展了水深比 h/L 为 0.3,激励幅值 X_0 为 0.5 mm 和 1 mm,挡板间距 δ/L 为 0.05, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8 的几种工况;水深比 h/L 为 0.375,激励幅值 X_0 为 0.5 mm 和 1 mm,挡板间距 δ/L 为 0.05, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7 几种工况下水晃动的研究.理论与试验的对比结果如图 9 所示.

由图 9 可以看出,在 $\delta/L \leq 0.2$ 时,不考虑挡板间水动力相互作用影响即直接利用式(33)计算的阻尼比会远大于试验测得的值,在 $\delta/L = 0.05$ 处,可达到两倍以上,而考虑挡板间水动力相互作用影响,引入速度势函数修正因子 β 对式(33)进行修正后,即利用式(44)计算的值与试验测得的值较接近;在 $\delta/L > 0.2$ 时,随挡板间距变大,水动力相互作用影响也越来越小;在 $\delta/L \geq 0.4$ 后,挡板间的水动力相互作用几乎不存在,即利用式(33)和式(44)计算的值具有一致性.随两块挡板在水箱中部逐渐向水箱左右两侧移动时,即挡板间距逐渐增大,挡板间水动力相互作用影响逐渐变小,水箱的阻尼比在 $\delta/L = 0.2$ 处达到最大值,利用式(44)计算的值与试验测得的值具有同样的趋势.

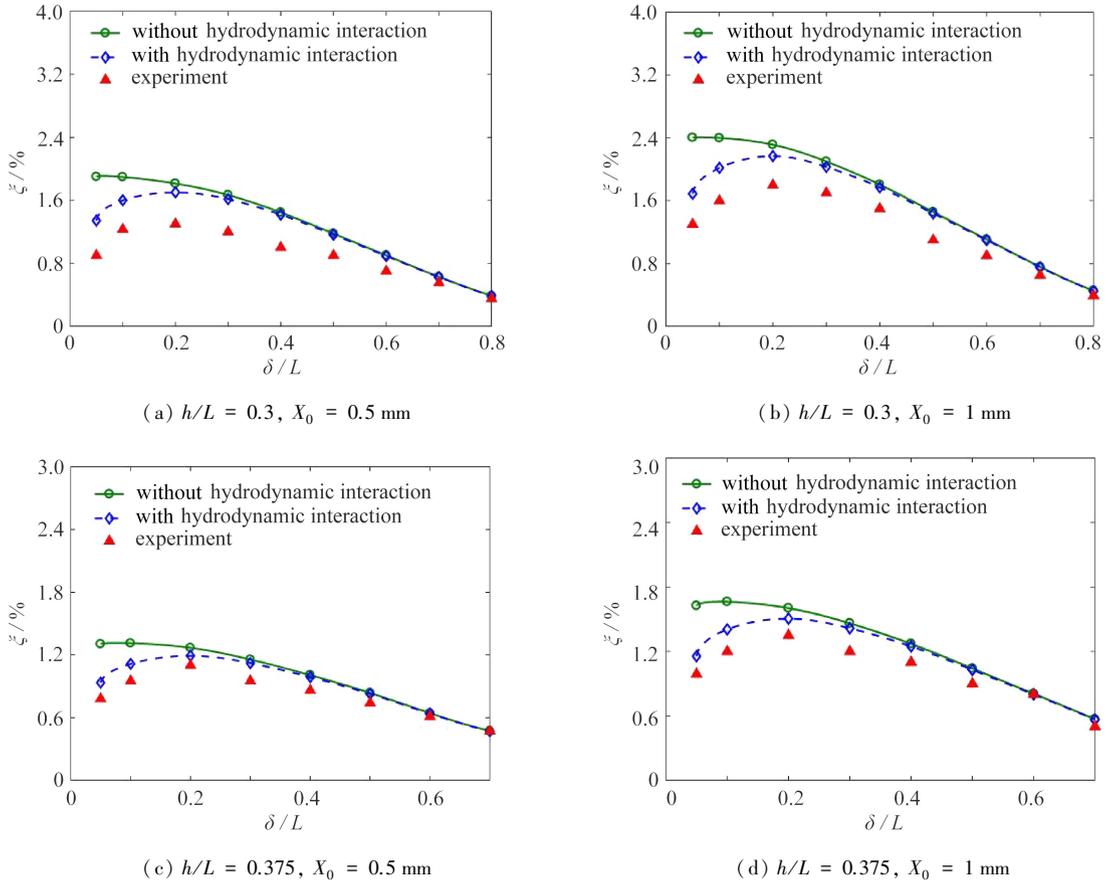


图 9 随挡板间距变化的矩形 TLD 水箱线性阻尼比的试验值与预测值比较图(带垂直挡板)

Fig. 9 Comparison of measured and predicted linear damping ratios of rectangular TLD tanks with different spacings between vertical baffles

5.2 侧壁上对称安装有水平挡板的矩形 TLD 水箱阻尼比分析

试验中,以矩形 TLD 水箱侧壁对称安装有两块水平挡板为例,分别开展了水深比 h/L 为 0.4,激励幅值 X_0 为 0.5 mm 和 1 mm,挡板间距 δ/L 为 0.05,0.075,0.1,0.15,0.2,0.25 几种工况下水晃动的研究.理论与试验的对比结果如图 10 所示.

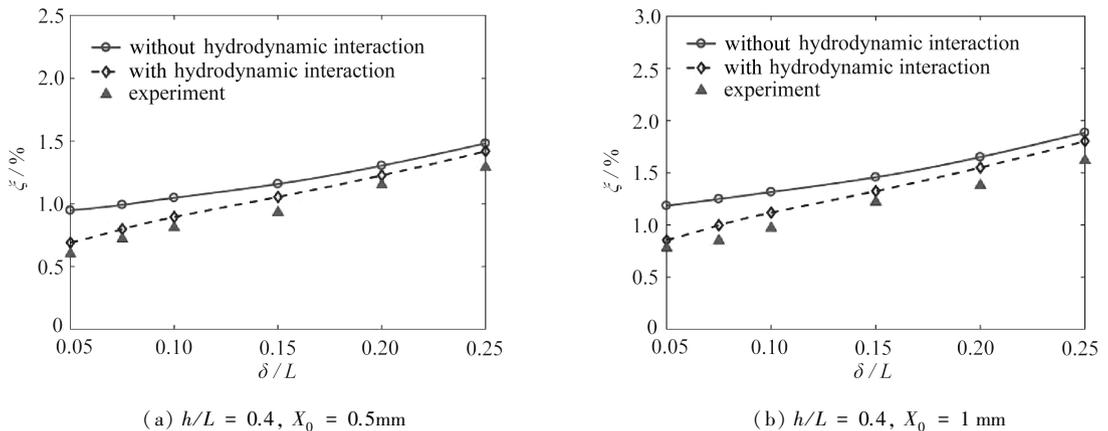


图 10 随挡板间距变化的矩形 TLD 水箱线性阻尼比的试验值与预测值比较图(带水平挡板)

Fig. 10 Comparison of measured and predicted linear damping ratios of rectangular TLD tanks with different spacings between horizontal baffles

由图 10 可知,水平挡板间距 δ/L 在 0.05~0.2 范围内,不考虑挡板间的水动力相互作用影响所估算的阻尼比值明显大于考虑挡板间的水动力相互作用影响所估算的值,在 $\delta/L = 0.05$ 处,可达到 40%左右,两者之

间的差值随挡板间距的增大而减小;考虑挡板间的水动力相互作用影响所估算的值与试验测得的值比较接近,说明了式(45)在挡板间距较小时具有较好的估算效果.水平挡板间距 δ/L 在大于 0.2 后,考虑挡板间的水动力相互作用影响与否所估算的阻尼比值都与试验测得的值吻合得较好,说明随着水平挡板间距逐渐增大,挡板间的水动力相互作用影响越来越小.随着水平挡板间距增大,矩形 TLD 水箱的阻尼比也增大,但是,若水平挡板距离自由液面很近时,在水的晃动过程中将会出现砰击等非线性现象,会导致本文所推导的公式失效.

6 结 论

通过以上分析可知,对于内置有多块垂直挡板或者水平挡板的矩形 TLD 水箱,在挡板间距较小的情况下,挡板间的水动力相互作用对水箱阻尼比的影响较明显,不可忽视.采用现有的理论,往往会高估水箱的线性阻尼比,而本文通过引入速度势函数修正因子来考虑挡板间水动力相互作用的影响,对矩形 TLD 水箱的阻尼比计算公式进行修正后,得到的值与振动台试验测得的值较接近,在挡板间距较小时,能较好地估算水箱的阻尼比.

参考文献(References):

- [1] ELIAS S, MATSAGAR V, DATTA T K. Along-wind response control of chimneys with distributed multiple tuned mass dampers[J]. *Structural Control and Health Monitoring*, 2019, **26**(1): e2275.
- [2] HEMMATI A, OTERKUS E, KHORASANCHI M. Vibration suppression of offshore wind turbine foundations using tuned liquid column dampers and tuned mass dampers[J]. *Ocean Engineering*, 2019, **172**: 286-295.
- [3] ALTUNISIK A C, YETISKEN A, KAHYA V. Experimental study on control performance of tuned liquid column dampers considering different excitation directions[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2018, **102**: 59-71.
- [4] FEI Z, JINTING W, FENG J, et al. Control performance comparison between tuned liquid damper and tuned liquid column damper using real-time hybrid simulation[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2019, **18**(3): 695-701.
- [5] WARNITCHAI P, PINKAEW T. Modelling of liquid sloshing in rectangular tanks with flow-dampening devices [J]. *Engineering Structures*, 1998, **20**(7): 593-600.
- [6] TAIT M J. Modelling and preliminary design of a structure-TLD system[J]. *Engineering Structures*, 2008, **30**(10): 2644-2655.
- [7] MOLIN B, REM F. Inertia effects in TLD sloshing with perforated screens[J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2015, **59**: 165-177.
- [8] BISWAL K C, BHATTACHARYYA S, SINHA P K. Dynamic characteristics of liquid filled rectangular tank with baffles[J]. *Journal of the Institution of Engineers*, 2003, **84**: 145-148.
- [9] CHO I H, KIM M H. Effect of dual vertical porous baffles on sloshing reduction in a swaying rectangular tank [J]. *Ocean Engineering*, 2016, **126**: 364-373.
- [10] NAYAK S K, BISWAL K C. Fluid damping in rectangular tank fitted with various internal objects: an experimental investigation[J]. *Ocean Engineering*, 2015, **108**: 552-562.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 钟文坤, 吴玖荣. 内置有挡板的矩形水箱阻尼比估算方法比较分析[J]. 工程力学, 2020, **37**(6): 100-109. (ZHONG Wenkun, WU Jiurong. Comparative analysis on estimation methods for damping ratio of rectangular water tank with baffles[J]. *Engineering Mechanics*, 2020, **37**(6): 100-109. (in Chinese))
- [14] 李远飞. 在一个半无穷柱体上的非标准 Stokes 流体方程的二择一问题[J]. 应用数学和力学, 2020, **41**(4): 406-419. (LI Yuanfei. Phragmén-Lindelöf type results for non-standard Stokes flow equations around semi-infinite

- cylinder[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2020, **41**(4): 406-419.(in Chinese))
- [15] 吴锋, 钟万勰. 关于《保辛水波动力学》的一个注记[J]. 应用数学和力学, 2019, **40**(1): 1-7.(WU Feng, ZHONG Wanxie. A note on *Symplectic Water Wave Dynamics*[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2019, **40**(1): 1-7.(in Chinese))
- [16] KRABBENHOFT J. Shallow water tuned liquid dampers: modeling, simulation and experiments[D]. PhD Thesis. Denmark: Technical University of Denmark, 2011.
- [17] 张兆顺, 崔桂香. 流体力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2015.(ZHANG Zhaoshun, CUI Guixiang. *Fluid Mechanics*[M]. Beijing: Tsinghai University Press, 2015.(in Chinese))
- [18] MORISON J R, JOHNSON J W, SCHAAF S A. The force exerted by surface waves on piles[J]. *Journal of Petroleum Technology*, 1950, **2**(5): 149-154.
- [19] FALTINSEN O M. *Sloshing*[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2008.
- [20] CASSOLATO M R, LOVE J S, TAIT M J. Modelling of a tuned liquid damper with inclined damping screens [J]. *Structural Control and Health Monitoring*, 2011, **18**(6): 674-681.
- [21] 刘晶波, 杜修力. 结构动力学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.(LIU Jingbo, DU Xiuli. *Structural Dynamics* [M]. Beijing: China Machine Press, 2005.(in Chinese))
- [22] MILES J W. Surface-wave damping in closed basins[J]. *Mathematical and Physical Sciences*, 1967, **297**(1451): 459-475.