

# 双调谐液体柱形阻尼器及其基本动力性能\*

闫维明, 倪 铭, 王 瑾

(北京工业大学工程抗震与结构诊治北京市重点实验室 北京, 100124)

**摘要** 借鉴被动调谐质量阻尼器(tuned mass damper, 简称 TMD)和调谐液体柱形阻尼器(tuned liquid column damper, 简称 TLCD)各自的优缺点,结合土木工程结构减震装置的经济性和适用性,提出了一种双调谐液体柱形阻尼器(doubly tuned liquid column damper, 简称 DTLCD),建立了简谐激励作用下单自由度 DTLCD 控制体系(DTLCD-SDOF)的运动方程,推导了其动力反应放大系数。提出了针对 DTLCD 的调优策略及优化评价函数,通过相关算法获得 DTLCD-SDOF 系统的参数优化程序,并利用该程序得到了 DTLCD 的最优参数。具体分析了不同参数对 DTLCD 共振峰值和调频宽度的影响,并对阻尼器阻尼参数或受控结构频率发生变化后 DTLCD 的鲁棒性进行了评价。对 DTLCD, TMD, TLCD 及 DTMD 的有效性和鲁棒性进行了对比分析。理论与数值研究结果表明,DTLCD 的控制效果明显优于 TMD 和 TLCD,与 DTMD 效果相同,并且在主结构频率的摄动方面拥有更佳的鲁棒性。事实证明,DTMD 比 TMD 和 TLCD 更具工程适用性。

**关键词** 双调谐液体柱形阻尼器;双调谐质量阻尼器;优化设计;简谐激励;有效性;鲁棒性;振动控制

**中图分类号** TU317<sup>+</sup>.1; TU352.1

## 引 言

自从 1909 年 Frahm 提出 TMD 后,利用吸振器控制结构振动成为了一种常用的减振手段<sup>[1]</sup>。许多学者在 TMD 的基础上提出了很多不同类型的被动吸振器,包括多重调谐质量阻尼器(multiple tuned mass damper, 简称 MTMD)、调谐液体阻尼器(tuned liquid damper, 简称 TLD)以及 TLCD。由于被动吸振器能够有效地减低结构受到地震或风荷载所引起的反应,因此已有很多吸振器被安装在了各地的高耸建筑上,如美国纽约的 Citicorp Center、波士顿的 John Hancock Building 及澳大利亚的悉尼塔等<sup>[2]</sup>。此后,众多学者对各类被动吸振器进行了详细的研究<sup>[3-17]</sup>。结果表明,TLCD 虽然能够有效地降低结构的振动,但由于 TLCD 本身构造的限制,其控制效果不如 TMD 和 TLD,且控制效果和鲁棒性远不如 MTMD。但由于 TLCD 的水箱本身能够提供阻尼,其构造比 MTMD 更简单。结合 TLCD 和 MTMD 的特性,笔者提出一种 DTLCD 及其数值优化策略与方法,对参数影响分析、有效性和鲁棒性进行系统地研究,并对 DTLCD, TLCD,

TMD 和 DTMD 的有效性和鲁棒性的优劣进行对比分析。

## 1 DTLCD 理论模型及动力方程推导

DTLCD 是在传统的 TLCD 与主结构之间设置弹簧和阻尼的新型液体柱形阻尼器,由设置在主结构上的 U 形水箱以及连接水箱与主结构的滑动装置、弹簧和阻尼器构成。当主结构为单自由度时,DTLCD 与主结构的理论模型如图 1 所示。主结构的质量、刚度和阻尼分别为  $m_0$ ,  $k_0$  和  $c_0$ ;DTLCD 的质量、刚度和阻尼分别为  $m$ ,  $k_1$  和  $c_1$ ;DTLCD 的宽度为  $b$ ,水流运动方向总长度为  $L$ ;U 形水箱截面积为  $A$ ;  $x_0$ ,  $x_1$  和  $x_2$  分别为主结构位移、水箱位移和水沿水流方向位移;地面加速度为  $a_g$ 。

由图 1 的理论模型,可以建立主结构的动力方程为

$$m_0 \ddot{x}_0 + c_0 \dot{x}_0 + k_0 x_0 + c_1 (\dot{x}_0 - \dot{x}_1) + k_1 (x_0 - x_1) = -m_0 a_g \quad (1)$$

使水产生流动的力为水箱中的水沿水流动方向的总惯性力之和  $F_m = -[\rho A b (\ddot{x}_1 + \ddot{x}_2 + a_g) + \rho A (L - b) \ddot{x}_2]$ ,水流的恢复力  $F_R = 2\rho A g x_2$ ,阻尼

\* 国家自然科学基金资助项目(51378039; 91315301-03)  
收稿日期:2014-09-09;修回日期:2014-11-10

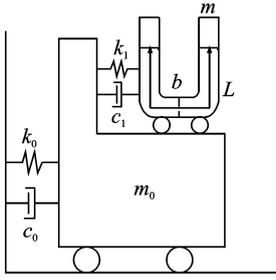


图1 单自由度结构 DTLCD 模型示意图  
Fig.1 DTLCD-single-degree-of-freedom system

力  $F_D = c_2 \dot{x}_2$ 。

水流的力平衡方程为

$$F_m = F_D + F_R \tag{2}$$

水箱与主结构的相互作用力平衡

$$c_1(\dot{x}_1 - \dot{x}_0) + k_1(x_1 - x_0) = -[\rho Ab(\ddot{x}_1 + \ddot{x}_2 + a_g) + \rho A(L - b)(\ddot{x}_1 + a_g)] \tag{3}$$

联立式(1)、式(2)和式(3)得

将上述无量纲参数代入式(5)整理后得

$$\begin{cases} -\omega^2 X_0 + \frac{2\zeta_0 \omega^2 i}{\gamma} X_0 + \frac{\omega^2}{\gamma^2} X_0 + (\frac{2\zeta_1 \mu_1 \lambda_1 \omega^2 i}{\gamma} + \frac{\mu_1 \lambda_1^2 \omega^2}{\gamma^2})(X_0 - X_1) = -A_g \\ -\mu_1 \omega^2 X_2 - \mu_2 \omega^2 X_1 + (\frac{2\zeta_1 \mu_1 \lambda_1 \omega^2 i}{\gamma} + \frac{\mu_1 \lambda_1^2 \omega^2}{\gamma^2})(X_1 - X_0) = -\mu_2 A_g \\ -\mu_1 \omega^2 X_1 - \mu_2 \omega^2 X_2 + (\frac{2\zeta_2 \mu_2 \lambda_2 \omega^2 i}{\gamma} + \frac{\mu_2 \lambda_2^2 \omega^2}{\gamma^2})X_2 = -\mu_1 A_g \end{cases} \tag{6}$$

整理式(6)得

$$\begin{pmatrix} B_{11} & B_{12} & 0 \\ B_{21} & B_{22} & B_{23} \\ 0 & B_{32} & B_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_0 \\ X_1 \\ X_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -A_g \\ -\mu_2 A_g \\ -\mu_1 A_g \end{pmatrix} \tag{7}$$

其中

$$\begin{aligned} B_{11} &= \omega^2 \left( -1 + \frac{2\zeta_0 i + 2\zeta_1 \mu_1 \lambda_1 i}{\gamma} + \frac{1 + \mu_1 \lambda_1^2}{\gamma^2} \right) \\ B_{12} &= B_{21} = -\omega^2 \left( \frac{2\zeta_1 \mu_1 \lambda_1 i}{\gamma} + \frac{\mu_1 \lambda_1^2}{\gamma^2} \right) \\ B_{22} &= \omega^2 \left( -\mu_2 + \frac{2\zeta_1 \mu_1 \lambda_1 i}{\gamma} + \frac{\mu_1 \lambda_1^2}{\gamma^2} \right) \\ B_{23} &= B_{32} = -\mu_1 \omega^2 \\ B_{33} &= \omega^2 \left( -\mu_2 + \frac{2\zeta_2 \mu_2 \lambda_2 i}{\gamma} + \frac{\mu_2 \lambda_2^2}{\gamma^2} \right) \end{aligned}$$

解式(7)得到结构与子质量的传递函数为

$$\begin{aligned} H_0(\omega) &= \frac{X_0}{A_g} = \frac{B_{12} B_{23} \mu_1 - B_{12} B_{33} \mu_2 - B_{23} B_{32} + B_{22} B_{33}}{B_{11} B_{23} B_{32} + B_{12} B_{21} B_{33} - B_{11} B_{22} B_{33}} \\ H_1(\omega) &= \frac{X_1}{A_g} = \frac{-B_{22} (B_{21} B_{33} + B_{11} B_{23} \mu_1 - B_{11} B_{33} \mu_2)}{B_{11} B_{23} B_{32} + B_{12} B_{21} B_{33} - B_{11} B_{22} B_{33}} \\ H_2(\omega) &= \frac{X_2}{A_g} = \frac{B_{21} B_{32} - B_{12} B_{21} \mu_1 + B_{11} B_{22} \mu_1 - B_{11} B_{32} \mu_2}{B_{11} B_{23} B_{32} + B_{12} B_{21} B_{33} - B_{11} B_{22} B_{33}} \end{aligned}$$

$$\begin{cases} m_0 \ddot{x}_0 + c_0 \dot{x}_0 + k_0 x_0 + c_1(\dot{x}_0 - \dot{x}_1) + k_1(x_0 - x_1) = -m_0 a_g \\ m_1 \ddot{x}_2 + m_2 \ddot{x}_1 + c_1(\dot{x}_1 - \dot{x}_0) + k_1(x_1 - x_0) = -m_2 a_g \\ m_1 \ddot{x}_1 + m_2 \ddot{x}_2 + c_2 \dot{x}_2 + k_2 x_2 = -m_1 a_g \end{cases} \tag{4}$$

其中： $m_1 = \rho Ab$ ； $m_2 = \rho AL$ ； $k_2 = 2\rho A g$ 。

对式(4)做 Laplace 变换可得

$$\begin{cases} m_0 X_0 s^2 + c_0 X_0 s + k_0 X_0 + c_1(X_0 - X_1) s + k_1(X_0 - X_1) = -m_0 A_g \\ m_1 X_2 s^2 + m_2 X_1 s^2 + c_1(X_1 - X_0) s + k_1(X_1 - X_0) = -m_2 A_g \\ m_1 X_1 s^2 + m_2 X_2 s^2 + c_2 X_2 s + k_2 X_2 = -m_1 A_g \end{cases} \tag{5}$$

为了将式(5)进行化简,引入无量纲化参数质量比、频率比和阻尼比,各参数表示如下

$$\begin{aligned} \mu_1 &= \frac{m_1}{m_0}, \mu_2 = \frac{m_2}{m_0}, \lambda_1 = \frac{\sqrt{k_1/m_1}}{\sqrt{k_0/m_0}} = \frac{\omega_1}{\omega_0}, \\ \lambda_2 &= \frac{\sqrt{k_2/m_2}}{\sqrt{k_0/m_0}} = \frac{\omega_2}{\omega_0}, \zeta_j = \frac{c_j}{2m_j \omega_j}, \gamma = \frac{\omega}{\omega_0} \end{aligned}$$

结构位移放大系数为

$$DMF = |H_0(\omega)|_{\omega_0^2} = H_0(\omega) \frac{\omega^2}{\gamma^2} \tag{8}$$

式(8)即为 DTLCD 控制下单自由度结构的动力放大系数。

## 2 DTLCD 调优策略及优化评价函数

传统 TLCD 与 TMD 的调优策略无异,会因主结构阻尼的有无而不同:当主结构不存在阻尼时,无论 TLCD 本身是否设置阻尼,TLCD 的最优参数均可利用定点理论得到,具体方法是将动力放大系数(DMF)- $\gamma$  图中的定点高度保持一致,并使之成为曲线上的极大值点;而当主结构有阻尼时,定点理论不再适用,这时只能利用数值方法通过优化函数寻找 TLCD 的最优参数。常用的优化函数<sup>[2]</sup>为

$$Z = \min\{\max[DMF]\} \tag{9}$$

对于 TLCD,要先找出不同的频率比和阻尼比

下的 DMF 最大值,再从中找到最小的一个,其对应的参数即是最优参数。需要指出的是,这种针对 TLCD 的调优策略却不宜用在 DTLCD 上。因为 TLCD 的寻优对象只有 U 形水箱的阻尼比和频率比,但 DTLCD 中却有相对质量比  $\mu'$  (水流总长度  $L$  与水平段长度  $b$  的比值)、各自的阻尼比 ( $\zeta_1$  和  $\zeta_2$ ) 以及频率比 ( $\lambda_1$  和  $\lambda_2$ ),共 5 个寻优对象,利用上面的优化函数难于实现调优。因此,针对 DTLCD 多参数的特点,笔者提出了一种基于峰值的调优策略和优化函数。

一般来说,对吸振器有效性(控制效果)的评价包含两个因素:共振峰值和调频宽度。由  $n$  重吸振器控制下单自由度结构的 DMF- $\gamma$  图可知,DMF- $\gamma$  曲线上存在  $n+1$  个峰值点,而峰值的大小即是各类吸振器的共振峰值,两端峰值之间的宽度决定各类吸振器的调频宽度。因此,把这些峰值用  $P_{\max}(n)$  来表示,并根据这些峰值定义以下的优化评价函数<sup>[7]</sup>

$$P_1 = \sum_{s=1}^n \left[ \sum_{r=1}^n \frac{P_{\max}(r)}{n} - P_{\max}(s) \right]^2 \quad (10)$$

$$P_2 = \sum_{r=1}^n \frac{P_{\max}(r)}{n} \quad (11)$$

$$P = P_1 + P_2 \quad (12)$$

其中:式(10)为使各峰值之间相差最小的优化评价函数;式(11)为使各峰值的均值最小的优化评价函数;式(12)中的  $P$  值为两函数之和,当且仅当  $P_1$  和  $P_2$  均为最小值时,即  $P$  为最小值时,此时 DTLCD 的各参数为最优参数。

对于 DTLCD-SDOF(单自由度, single degree of freedom,简称 SDOF)系统,其位移放大系数响应曲线具有 3 个共振峰值,即  $n=3$ 。

利用这个优化评价函数,笔者通过 Matlab 软件编写了 DTLCD 系统的参数优化程序,并利用该程序探索得到了 DTLCD 的最优参数。

### 3 DTLCD 基本参数分析

#### 3.1 DTLCD 调优分析前提及最优参数

不失一般性,在利用程序寻找 DTLCD 最优参数之前,给定结构阻尼比  $\zeta_0=0.02$ ,DTLCD 总质量比  $\mu=0.05$ ,定义  $m_1$  和  $m_2$  的相对质量比  $\mu'=\mu_2/\mu_1$  (即宽高比  $L/b$ )。综合考虑分析耗时和优化参数的实际可操作性,对参数寻优的范围进行了限制,阻尼比的范围限制在  $0\sim 0.3$  之间。

在以上的分析前提下,利用程序探索得到了 DTLCD 的全局最优参数  $\mu' = 2.82, \zeta_1 = 0, \zeta_2 = 0.26, \lambda_1 = 1.6, \lambda_2 = 0.89$ 。

下面具体各参数的分析将以此全局最优参数为参照点,比较某个参数固定后得到的条件最优参数。全局最优参数是全部参数 ( $\mu', \zeta_1, \zeta_2, \lambda_1$  和  $\lambda_2$ ) 都参与搜寻后得到的最优参数,与之相对应,条件最优参数则是固定某个参数后搜寻到的最优参数,所以条件最优参数可能和全局最优参数下得到的某些结论相冲突,但并不是说条件最优参数就没有意义,它可以描述某个参数对于 DTLCD 系统的影响。

#### 3.2 水箱的阻尼比 $\zeta_1$

在待优化的 5 个参数中,下层 TLCD 的阻尼比  $\zeta_1$  有其独特的作用和特征,对 DTLCD 的有效性有较大的影响。图 2 给出了不同阻尼比和质量比下主结构 DMF 最大值随  $\zeta_1$  变化的趋势。

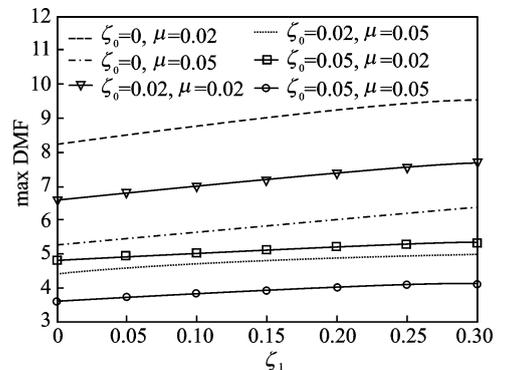


图 2  $\zeta_1$  变化趋势图

Fig. 2 Trends of  $\zeta_1$

由图 2 可知,DTLCD 在主结构阻尼比分别为 0,0.02,0.05 和吸振器总质量比分别为 0.02,0.05 时,最大的 DMF 峰值都随着  $\zeta_1$  的增大而单调增大,即最大的 DMF 峰值在  $\zeta_1=0$  时取值最小,主结构的动力反应最小。6 条曲线相同的单调性证明,对于不同阻尼比的受控结构和不同质量比的 DTLCD, $\zeta_1$  的影响是一致的。

另外,由图 2 中的 6 条曲线可知,在主结构阻尼比和吸振器总质量比分别相同时,主结构阻尼比对最大 DMF 峰值的影响更大,相比质量比增大对最大 DMF 峰值的降低,其效果更加明显。但这是吸振器设计中的不可控因素,增大吸振器总质量比能够接近于主结构阻尼比增大的效果,这是设计中可以做到的。

总之,无论主结构阻尼比和 DTLCD 总质量比

取何值,DTLCD 系统  $\zeta_1$  的全局最优参数均为零,而吸振器总质量比增加后其减振效果不如主结构阻尼比的增加,这两个规律与双重调谐质量阻尼器(doubly tuned mass damper,简称 DTMD)是极为一致的,而在 TLCD 上则没有体现。

### 3.3 水流的阻尼比 $\zeta_2$

$\zeta_2$  对 DTLCD 系统的影响见表 1。表 1 中均为固定  $\zeta_2$  后程序找到的条件最优参数,其中第 6 行为全局最优参数。

表 1 随  $\zeta_2$  变化的条件最优参数

Tab. 1 Conditional optimal parameters change with  $\zeta_2$

$\mu'$	$\zeta_1$	$\zeta_2$	$\lambda_1$	$\lambda_2$	maxDMF
4.50	0.3	0	1.98	2.68	5.450 6
4.50	0.3	0.05	1.98	2.71	5.451 0
4.59	0	0.10	2.00	0.92	5.088 4
3.44	0	0.15	1.74	0.92	4.782 0
3.36	0	0.20	1.74	0.90	4.524 7
<b>2.82</b>	<b>0</b>	<b>0.26</b>	<b>1.60</b>	<b>0.89</b>	<b>4.417 9</b>
2.60	0	0.30	1.54	0.88	4.508 7
2.44	0	0.35	1.50	0.88	4.627 6
2.24	0	0.40	1.44	0.86	4.730 3

由表 1 可以看到, $\zeta_2$  以步长 0.05 由 0 增加到 0.4 的过程中,其他参数呈现出一起单调变化的规律。当  $\zeta_2$  分别为 0 和 0.05 时,两者的条件最优参数十分接近,最大 DMF 峰值也相差不多,可以说明较小的  $\zeta_2$  对 DMF 的影响都十分接近,也不是全局最优参数的取值范围。但是在  $\zeta_2$  从 0.1 增加的 0.4 的过程中,其他参数则表现出一致的变化规律, $\mu'$ ,  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  随之单调递减, $\zeta_1$  则一直为 0,最大 DMF 峰值经历了一个先降低到最小值后增大的过程。

图 3 展示了主结构动力放大系数在不同的  $\zeta_2$  下随频率比  $\gamma$  变化的曲线,参数皆取自表 1 中的条件最优参数。

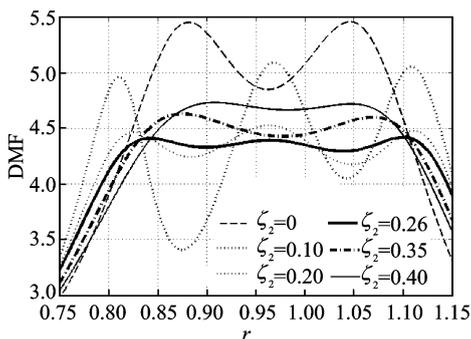


图 3 不同  $\zeta_2$  下的主结构响应曲线

Fig. 3 Frequency response curves of structure for different  $\zeta_2$

由图 3 可以看到,在  $\zeta_2$  过大或者过小时( $\zeta_2 = 0, 0.35, 0.40$ ),DMF 曲线都只有 2 个峰值,这是因为当阻尼比过大会抑制 DTLCD 中水流与水箱之间的共振,使其不能很好地耗散主结构的振动能量; $\zeta_2$  过小使得  $\zeta_1$  又过大,共振和能量耗散也被抑制了。另外,当 DMF 曲线为两峰值时其调频宽度都小于三峰值时的调频宽度,说明调频宽度对阻尼比的变化也是比较敏感的。在  $\zeta_2$  增大过程中,当  $\zeta_2$  小于全局最优值时,峰值大幅降低到最小值,峰值对较小的  $\zeta_2$  更敏感;当  $\zeta_2$  大于全局最优值时,峰值缓慢增加,较大的  $\zeta_2$  对峰值影响较小,这是因为较大的阻尼比对总体振动的抑制要优于较小的阻尼比。

总之,当  $\zeta_2 \leq 0.1$  时不同的阻尼比对峰值的影响十分接近,而在  $\zeta_2 > 0.1$  时其他条件最优参数会随着  $\zeta_2$  的增大单调变化,过大或是过小的  $\zeta_2$  都无法有效地抑制主结构的共振和能量的耗散,调频宽度也无法达到最优效果。因此,存在一个最优的  $\zeta_2$  使得 DMF 峰值最小。

### 3.4 相对质量比 $\mu'$ (宽高比 $L/b$ )

相对质量比  $\mu'$  的实质是水流总长度  $L$  与水平段长度  $b$  的比值,这个比值不能过小,否则会造成 U 型管竖向长度不足,进而水柱晃动使得竖管中出现完全无水的现象,这将破坏 U 型水箱中水运动的计算模型,从而达不到设计预定的减振效果。

$\mu'$  对 DTLCD 系统的影响见表 2。表 2 中均为固定  $\mu'$  后程序找到的条件最优参数,由于上面提到的原因,故表中的  $\mu'$  由 2 递增至 7,其中第 3 行为全局最优参数。

表 2 随  $\mu'$  变化的条件最优参数表

Tab. 2 Conditional optimal parameters change with  $\mu'$

$\mu'$	$\zeta_1$	$\zeta_2$	$\lambda_1$	$\lambda_2$	maxDMF
2.00	0	0.30	1.50	1.02	5.401 2
2.50	0	0.30	1.55	0.92	4.704 5
<b>2.82</b>	<b>0</b>	<b>0.26</b>	<b>1.60</b>	<b>0.89</b>	<b>4.417 9</b>
3.00	0	0.24	1.65	0.88	4.523 8
3.50	0.04	0.20	1.78	0.90	4.593 9
4.00	0.08	0.18	1.90	0.90	4.666 9
4.50	0.12	0.16	2.01	0.91	4.720 2
5.00	0.14	0.14	2.11	0.91	4.765 3
5.50	0.16	0.12	2.21	0.91	4.822 7
6.00	0.19	0.12	2.31	0.91	4.860 5
6.50	0.22	0.12	2.40	0.91	4.903 1
7.00	0.24	0.10	2.49	0.92	4.940 3

由表 2 可知, $\mu'$  自 2 以步长 0.5 增加到 7 的过

程中,其他参数随之单调变化,其中  $\zeta_1$  和  $\lambda_1$  是单调递增, $\zeta_2$  和  $\lambda_2$  是单调递减,最大 DMF 峰值则经历了降低到最小值后再逐步增大的过程。另外,在  $\mu'$  大于 2.5 之后,最大 DMF 值都能很好地控制在 5 以下,只有  $\mu'=2$  时为 5.401 2,说明对于 DTLCD 来说,过小的相对质量比会对控制效果造成不良影响,这与 TLD 的规律不同,因为 TLD 要求宽高比  $L/b$  的比值越小越好,而 DTLCD 则要求一个适当的相对质量比。

图 4 给出了主结构的动力放大系数在不同的  $\mu'$  下的变化,参数皆取自表 2 中的条件最优参数。

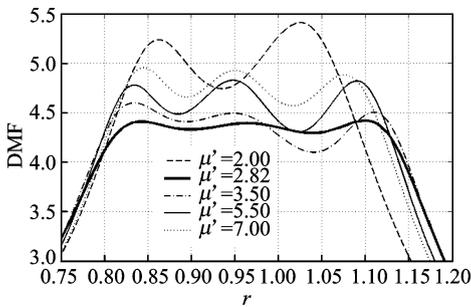


图 4 不同  $\mu'$  下的主结构响应曲线

Fig. 4 Frequency response curves of structure for different  $\mu'$

由图 4 可知,在  $\mu'$  由 2 增加到最优值 2.82,再增加到 7 的过程中,当  $\mu'$  小于最优值时峰值下降速度很快;但  $\mu'$  大于最优值时,峰值的增长则相对缓慢。另外,在  $\mu'=2$  时,DMF 曲线值有 2 个峰值,说明  $\mu'$  偏小时不利于水流与 U 型管之间的共振,造成无法有效耗散主结构的振动能量,控制效果变差。而当  $\mu'=3.5$  时,DTLCD 的控制效果相对全局最优参数来说增大的并不多,其调配宽度甚至还大一点,这说明在某些特殊的情况下,比全局最优参数稍大一点的相对质量比仍然能够很好地控制主结构振动。

总之,与 TLCD 中宽高比  $L/b$  越小越好不同,DTLCD 需要一个适当的相对质量比使得 DMF 峰值最小,且过小的相对质量比会使得 DTLCD 的控制效果大大降低。

## 4 DTLCD 鲁棒性分析

### 4.1 DTLCD 阻尼系数的变动

TLCD 系统中的阻尼通常取决于管道中不同开洞率的隔板以及不同密度的液体,不同密度的液体在通过开洞率不同的隔板时会产生不同的阻尼。但

是,灌注液体密度容易发生变化,导致 TLCD 系统提供的阻尼比发生变化。因此,笔者以全局最优参数为基准等倍变化,比较 DTLCD 阻尼系数变动后的控制效果。由于阻尼系数与阻尼比成正比,所以文中直接以无量纲化参数阻尼比为研究对象。另外,全局最优参数中 TLCD 与主结构之间的阻尼比为 0,因此可以不设置阻尼器,故阻尼比的变动只涉及到 U 型管本身的阻尼比  $\zeta_2$  变化。

由图 5 可知,以全局最优参数为基准,阻尼比在 0.6~1.8 倍范围内,DTLCD 的控制效果仍然维持在较优的水平,主结构的反应也没有被过度放大。对于 0.2 $\zeta_2$  与 3.0 $\zeta_2$ ,后者明显控制效果好于前者,说明 DTLCD 在阻尼系数变动方面的鲁棒性上,对阻尼系数降低更为敏感,控制效果也由此变得较差,而对阻尼系数的变大则能维持在可接受的范围。

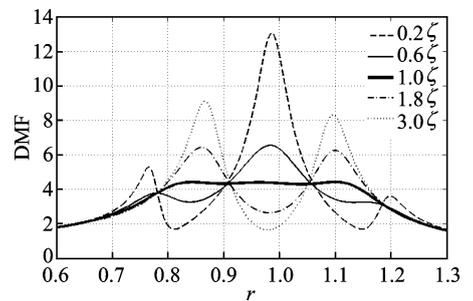


图 5 阻尼比变动情况下的主结构响应曲线

Fig. 5 Frequency response curves of structure for different damping ratio of DTLCD

### 4.2 主结构频率的变动

传统 TMD 鲁棒性差主要体现在两点,调频宽度小以及对主结构参数变化十分敏感。由于 TLCD 的原理与 TMD 一致,所以 TLCD 也有同样的鲁棒性问题。DTLCD 系统在 TLCD 与主结构之间加入弹簧后,形成双调谐的效果,其固有频率在主结构的共振峰值附近分散开来,因此即使主结构频率发生改变,DTLCD 仍能发挥作用,从而缓解因固有频率变动带来的控制效果的降低。一般来说,固有频率的变化相当于刚度的变化,图 6 为主结构刚度成倍变化后的 DTMD 的控制效果。

由图 6 可知,以原刚度为基准的 DMF 曲线,在刚度衰减时峰值偏向左侧,在刚度增大时峰值偏向右侧,这与 DTMD 的规律是一致的,与 MTMD 相反。但无论刚度是衰减还是增大,都经历了由三峰逐渐变为单峰、峰值增加、调频宽度减小的过程,这个过程与众多吸振器是一致的。

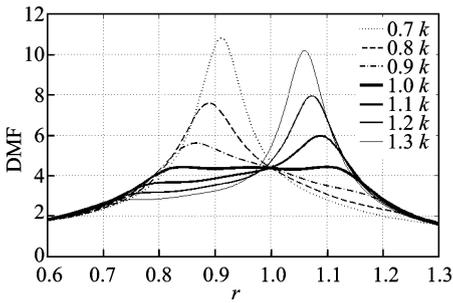


图6 主结构刚度变化后的响应曲线

Fig. 6 Frequency response curves of structure for different stiffness

## 5 DTLCD 与 TLCD 的性能比较

本节将对不同吸振器的有效性及鲁棒性进行比较。比较对象中各吸振器的主结构与前面 DTLCD 主结构的基本动力特性相同。各吸振器的参数均为程序探索得到的全局最优参数,其中 TLCD 的参数如下:质量比为 0.05;阻尼比为 0.13;频率比为 1.04;相对质量比为 1.214。TMD 的参数如下:质量比为 0.05;阻尼比为 0.14;频率比为 0.963 5。DTMD 为双调谐质量阻尼器,即主结构上有 2 个串联的质量块,其参数如下:相对质量比为 0.13;阻尼比为 0 和 0.24;频率比为 1.01 和 0.89。图 7 是 4 种吸振器与原结构的控制效果比较。

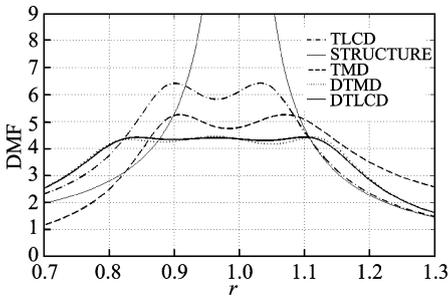


图7 4种吸振器与原结构的控制效果比较

Fig. 7 Frequency response curves of structure for four different mass dampers

由图 7 可知,与原结构相比,TMD 将主结构的共振峰值降低到了 5.2 左右,调频宽度大约为 0.16。由于宽高比  $L/b$  的限制,TLCD 将主结构的共振峰值降低到了 6.5 左右,调频宽度大约为 0.14,控制效果比 TMD 要差。DTLCD 与 DTMD 两者的曲线基本相同,控制效果比 TLCD 和 TMD 大大提高,共振峰值为 4.4,比 TLCD 降低 32.3%,比 TMD 降低 15.4%,调频宽度为 0.3,比 TLCD 增大 114.3%,

比 TMD 增大 87.5%,其控制效果显著。由此可见,DTLCD 和 DTMD 的共振峰值和调频宽度基本一致,且曲线基本重合,这是由两者的理论模型相近造成的。总之,双调谐吸振器的控制效果要优于单调谐吸振器。

对于吸振器,其鲁棒性体现在经过最优优化调谐后其控制效果在种种变化因素的作用下仍然能够维持稳定。图 8 为主结构动力放大系数最大值随吸振器中单个 TMD 阻尼系数变化的曲线,变动的基准均为对应吸振器的全局最优参数,故 1.0 倍处的动力放大系数最大值最小。

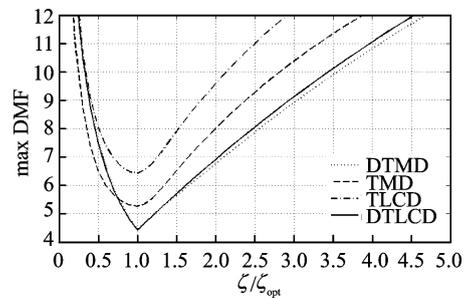


图8 4种吸振器阻尼系数变化后的比较

Fig. 8 Frequency response curves of structure change with damping ratio for four different mass dampers

由图 8 可以看出,DTLCD 与 DTMD 的曲线仍然基本一致,只在 1.5 倍的阻尼系数后比 DTMD 稍大。相比之下,DTLCD 全程都优于 TLCD,且在 0.75 倍阻尼系数后优于 TMD。由此可见:在阻尼系数变动方面,DTLCD 拥有良好的鲁棒性,且与 DTMD 基本一致;而在阻尼系数过小时,DTLCD 对其变动比 TMD 更加敏感,鲁棒性变差,但仍然优于 TLCD。因此可以把 DTLCD 的阻尼系数设定的比最优值大一些,即使阻尼系数发生变化,动力放大系数最大值的增加也可以得到抑制。

主结构固有频率的变化也是衡量吸振器鲁棒性的重要因素。由于主结构刚度与固有频率成正比,而且主结构的刚度变化更加直观,故笔者利用主结构刚度的变化来代替固有频率的变化。图 9 为 4 种吸振器作用下主结构动力放大系数最大值随主结构刚度变化的曲线,图中 4 种吸振器的参数都是相同基本动力特性下的全局最优参数。

由图 9 可以看出,在刚度减小的区域,DTLCD 与 DTMD 两者的曲线一致;但在刚度增大的区域,DTMD 的动力放大系数最大值逐渐大于 DTLCD,说明 DTLCD 在主结构刚度变化的方面其鲁棒性优

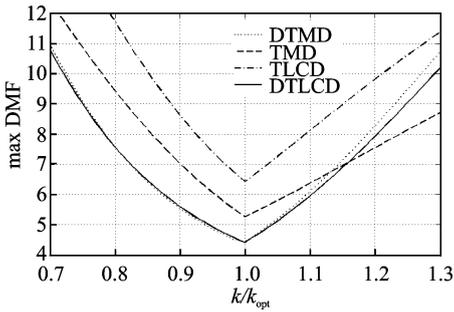


图9 4种吸振器在主结构刚度变动后的比较

Fig. 9 Frequency response curves of structure change with stiffness for four different mass dampers

于DTMD。与剩下的两者相比,DTLCD在结构刚度变化幅度为 $-30\% \sim 15\%$ 内比TMD鲁棒性更好,在图中全程范围内都优于TLCD。总之,对主结构频率的摄动而言,DTLCD的鲁棒性对比TMD和TLCD是有较明显的优势,而与DTMD相比效果相近,在刚度增大范围内则略优。

就鲁棒性的两个方面来说,主结构频率的摄动显然更为重要,因为阻尼系数是一个可以调节的参数,能通过重新调试或者更换阻尼系数变动的阻尼器来解决。相比之下,主结构频率本身就存在不便测量和控制的特点,而且一旦主结构频率发生摄动,工程上也没有有效的方法可以解决这个问题。因此可以认为,DTLCD的鲁棒性比TMD和TLCD更好,与DTMD基本一致。

## 6 结论

1) DTLCD系统存在一个最优的相对质量比(宽高比)、阻尼比使得结构的反应最小。其中,无论主结构阻尼比和DTLCD质量比取何值,DTLCD系统 $\zeta_1$ 的全局最优参数都是零。

2) 全局最优参数条件下,DTLCD的有效性比TLCD和TMD更优。DTLCD控制下结构的动力反应系数最大值相比TMD和TLCD控制下结构的动力响应分别降低了15.4%和32.3%。DTLCD的调频宽度比TMD和TLCD分别增大了87.5%和114.3%,对高阶振型的控制效果大大增加。DTLCD的控制效果与DTMD基本相同。

3) 当阻尼器的阻尼系数发生摄动时,DTLCD的鲁棒性与DTMD相同,在大部分情况下优于TMD,并显著优于TLCD。在更为重要的主结构固有频率摄动方面,DTLCD的鲁棒性优于TMD和

TLCD。

4) 综合比较DTLCD,TMD和TLCD的有效性、鲁棒性和实用性,结果表明DTLCD与DTMD有相同的特性,且更具工程适用性。

## 参 考 文 献

- [1] Rana R, Soong T T. 调谐质量阻尼器的参数研究与简化设计[J]. 世界地震工程, 1998, 14(4):91-107.  
Rana R, Soong T T. Parametric study and simplified design of tuned mass dampers[J]. World Information on Earthquake Engineering, 1998, 14(4):91-107. (in Chinese)
- [2] 背户一登. 结构振动控制[M]. 北京:机械工业出版社, 2011:1-40.
- [3] Gao H, Kwok K C S. Optimization of tuned liquid column dampers[J]. Engineering Structures, 1997, 19(6):476-486.
- [4] 阎石,李宏男,等. 可调频调液柱型阻尼器振动控制参数研究[J]. 地震工程与工程振动, 1998, 18(4):96-102.  
Yan Shi, Li Hongnan, et al. Vibration control parameters research on system with adjusted frequency and tuned liquid column damper [J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1998, 18(4):96-102. (in Chinese)
- [5] Xu Kangming, Igusa T. Dynamic characteristics of multiple substructures with closely spaced frequency [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1992, 21:1059-1070.
- [6] 李春祥,韩兵康,杜冬,等. 结构双重调谐质量阻尼器(DTMD)控制策略研究[J]. 土木工程学报, 2005, 38(5):1-9.  
Li Chunxiang, Han Bing kang, Du Dong. Control strategy of double tune mass dampers for structures [J]. China Civil Engineering Journal, 2005, 38(5):1-9. (in Chinese)
- [7] 背户一登. 动力吸振器及其应用[M]. 任明章,译. 北京:机械工业出版社, 2013:1-50.
- [8] Hiroki Y, Napat H. Fundamental characteristics of multiple tuned mass dampers for suppressing harmonically forced oscillations [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1993, 22:51-62.
- [9] Soong T T, Dargush G F. Passive energy dissipation systems in structural engineering [M]. New York: John Wiley & Sons, 1997:1-25.
- [10] 翟伟廉,李肇胤,李桂青,等. U形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.

- Zhai Weilian, Li Zhaoyin, Li Guiqing, et al. Experiment and research on control of wind vibration responses of tall buildings and lofty structures by U-shape water tank [J]. Journal of Building Structures, 1993, 14(5):37-44. (in Chinese)
- [11] 闫维明, 纪金豹, 蒋华戈, 等. 新型悬吊式 TMD 及其在某标志塔风振控制中的应用[J]. 建筑结构学报, 2010, 31(2): 55-60.
- Yan Weiming, Ji Jinbao, Jiang Huage. A new type pendulous TMD and its application on a tower for wind-induced vibration control [J]. Journal of Building Structures, 2010, 31(2): 55-60. (in Chinese)
- [12] 曾胜, 任意, 程涛涛, 等. 利用调谐质量阻尼器进行管路系统减振[J]. 振动、测试与诊断, 2012, 32(5): 823-826.
- Zeng Sheng, Ren Yi, Cheng Taotao, et al. Vibration suppression of pipe system with tuned mass damper [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2012, 32(5): 823-826. (in Chinese)
- [13] Tanuja P B, Radhey S J. Dual-layer multiple tuned mass dampers for vibration control of structures[J]. International Journal of Advanced Structural Engineering, 2010, 2(2): 91-113.
- [14] Daniel Y, Lavan O, Levy R. Multiple-tuned mass dampers for multimodal control of pedestrian bridges [J]. Journal of Structure Engineering, 2012, 138: 1173-1178.
- [15] Clarence W de S. Vibration damping, control, and design [M]. LLC, Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2007:1-5,6-17.
- [16] 龙复兴, 张旭, 顾平, 等. 调谐质量阻尼器系统控制结构地震反应的若干问题[J]. 地震工程与工程振动, 1996, 16(2):87-94.
- Long Fuxing, Zhang Xu, Gu Ping, et al. Problems in seismic responses of structures under the control of tuned mass dampers[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1996, 16(2): 87-94. (in Chinese)
- [17] 欧进萍, 王永富. 设置 TMD、TLD 控制系统的高层建筑风振分析与设计方法[J]. 地震工程与工程振动, 1994, 14(2):61-75.
- Ou Jingping, Wang Yongfu. Wind induced vibration analyses and design methods of tall buildings with tuned mass dampers[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1994, 14(2): 61-75. (in Chinese)



**第一作者简介:** 闫维明,男,1960年9月生,研究员。主要研究方向为工程振动与智能控制、结构检测与健康监控、结构抗震与减震。曾发表《新型悬吊式 TMD 及其在某标志塔风振控制中的应用》(《建筑结构学报》2010 年第 31 卷第 2 期)等论文。

E-mail: yanwm@bjut.edu.cn

## 《机械制造与自动化》杂志 2017 年征订广告

□欢迎订阅 □欢迎刊登广告 □欢迎投稿

主办单位: 南京机械工程学会 南京机电产业(集团)有限公司

主要栏目: 综述与展望; 机械制造; 信息技术; 电气与自动化。

◎ 邮发代号: 28-291 ◎ 国内统一连续出版物号: CN 32-1643/TH 国际标准连续出版物号: ISSN 1671-5276

◎ 发行范围: 国内外公开发行 ◎ 订阅处: 全国各地邮局(所), 也可直接向本刊编辑部订购

◎ 刊期: 双月刊 ◎ 开本: 大 16 开 页码: 198 页 ◎ 定价: 每本 12 元 (全年 72 元)

◎ 编辑部地址: 江苏省南京市珠江路 280 号珠江大厦 1903 室 ◎ 邮政编码: 210018

◎ 电话: (025) 84217296 84207048 ◎ 传真: (025) 84207048 ◎ E-mail: editor@njmes.org

本刊已加入《中国学术期刊(光盘版)》、中国期刊网等网络系统

本刊现为: 中国科技核心期刊; “万方数据-数字化期刊群”全文收录期刊; 《中国学术期刊综合评价数据库》(CAJCED) 统计源期刊; 《中国期刊全文数据库》(CJFD) 全文收录期刊