

文章编号: 1000-4750(2009)05-0202-07

# 共享调谐质量阻尼器(STMD) 在附属结构减震中的应用

\*国 巍, 李宏男, 柳国环

(大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室, 大连 116024)

**摘 要:** 鉴于在两个频率接近的临近附属结构之间设置连接粘滞阻尼器(Viscous Damper, VD)的减震效果往往很差, 该文采用了一种新型的减震方法: 共享调谐质量阻尼器(Shared Tuned Mass Damper, STMD)的方法。该方法在临近的附属结构之间附加公共质量块, 并以粘滞阻尼器连接, 利用附属结构与质量块之间的相对运动来耗能减震; 同时实现了两个附属结构的协调振动, 避免地震作用下附属结构碰撞的发生, 并且当附属结构频率接近时共享调谐质量阻尼器(STMD)有很好的减震效果。该文研究了在临近附属结构之间分别采用粘滞阻尼器(VD)和共享调谐质量阻尼器(STMD)时的减震效果, 并对共享调谐质量阻尼器(STMD)减震效果的适用情况和影响因素进行了分析。

**关键词:** 二次结构体系; 附属结构; 减震; 粘滞阻尼器(VD); 共享调谐质量阻尼器(STMD)

**中图分类号:** TU318 **文献标识码:** A

## SHARED MASS DAMPER (STMD) USED TO REDUCE THE SEISMIC RESPONSE OF SECONDARY SYSTEMS

\*GUO Wei, LI Hong-nan, LIU Guo-huan

(State Key Lab of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

**Abstract:** By considering that the strategy of Viscous Damper (VD) does not behave well in reducing the seismic response of secondary systems, a new strategy termed as Shared Mass Damper (STMD) is introduced in the paper. In the strategy, a shared mass connected by viscous dampers is placed between two adjacent secondary systems, dissipating earthquake energy by the relative displacement between the secondary systems and the shared mass. Meanwhile, two adjacent secondary systems are made to vibrate coordinately so as to avoid the pounding. The new strategy of Shared Mass Damper (STMD) can work well, especially when the frequencies of two secondary systems are close to each other. The effects of two strategies as well as the influencing factors of STMD and VD on reducing the seismic response of secondary systems are studied.

**Key words:** primary-secondary systems; secondary systems; shock absorption; viscous damper (VD); shared mass damper (STMD)

随着社会经济和科学技术的发展, 大型电脑信  
息系统和精密仪器设备越来越频繁的应用使得附

属结构的抗震减震设计引起了人们广泛的关注, 在  
地震中它们的损坏所造成的损失往往是巨大的, 特

收稿日期: 2008-02-25; 修改日期: 2008-08-25

基金项目: 教育部创新团队项目(IRT0518), 高等学校学科创新引智计划项目(B08014)

作者简介: \*国 巍(1982—), 男, 山东人, 博士生, 从事结构和非结构构件的抗震减震研究(E-mail: wei.guo.86@gmail.com);

李宏男(1957—), 男, 沈阳人, 教授, 博士, 从事结构多维抗震、振动控制、健康监测等研究(E-mail: Li-hong-nan@163.com);

柳国环(1980—), 男, 天津人, 博士生, 从事高耸结构抗风抗震(E-mail: carecivil@yahoo.com.cn).

别是核电站、发电厂、医院、数据中心等重要生命线工程中，重要的附属结构、设备的损坏还涉及到生命安全、灾后恢复等问题，并可能在相当长的时间内影响建筑物的正常使用，因此附属结构的抗震减震在工程设计中有着重要意义。

在实际工程中，主体结构上往往支撑着多个附属结构，针对多个附属结构系统的特点，可以借鉴临近建筑物之间安装粘滞阻尼器进行消能减震的方法。对于利用临近建筑物之间相对运动来消能减震的方法，国内外进行了很多研究。国内，陈文兵和唐家祥<sup>[1]</sup>在临近结构体系之间设置了连接构件，并对连接参数进行了优化分析。龚治国等<sup>[2]</sup>对在上海世贸国际广场主楼和裙房之间设置粘滞阻尼器进行减震的方法进行分析，并评定了其有效性，该方法于 2005 年成功应用到实际工程中。徐幼麟等<sup>[3-5]</sup>对主-从结构体系连接粘滞阻尼器的被动减震方法进行了参数分析。国外，Gurley 等<sup>[6]</sup>利用连接阻尼器对高耸建筑物在风荷载作用下动力响应进行了耦合减振分析。Luco 和 Barros<sup>[7-8]</sup>采用不同的简化理论模型，对通过粘滞阻尼器连接的临近主体结构体系进行了减振分析。

本文针对多个附属结构体系的特点，首先提出了在两个附属结构之间设置粘滞阻尼器(Viscous Damper, VD)来实现消能减震的方法，这样既可以避免附属结构之间的碰撞，又同时减小了两个附属结构的动力响应。但是，由于该方法在对于频率相近的两个相似附属结构的减震效果很差，基于此，本文借鉴由 Abdullah 等<sup>[9]</sup>在 2002 年提出的在临近建筑物之间设置共享调谐质量阻尼器(Shared Tuned Mass Damper, STMD)来减震的方法，将其应用于附属结构之间，并分析了其有效性和在不同参数情况下的减震效果。

### 1 理论模型

本文分别采用粘滞阻尼器(Viscous damper, VD)和共享调谐质量阻尼器(Shared Tuned Mass Damper, STMD)两种减震方法来减小地震输入下附属结构的动力响应，如图 1 所示。

#### 1.1 粘滞阻尼器(VD)

如图 1(a)所示，通过设置粘滞阻尼器(VD)来利用两个附属结构之间的相对运动来减小其动力响应，建立该体系的运动方程：

$$M_v \ddot{X}_v + C_v \dot{X}_v + K_v X_v = -M_v E_v \ddot{x}_g \quad (1)$$

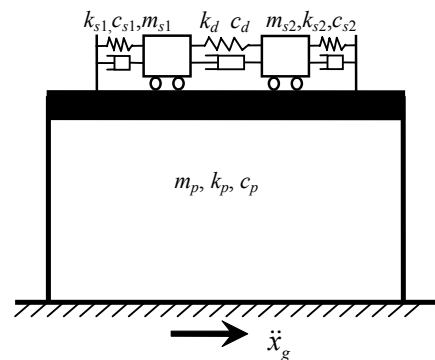
其中： $\ddot{x}_g$  为地震输入； $E_v$  为激励的作用位置向量， $E_v = [1, 1, 1]^T$ ； $X_v = [x_p, x_{s1}, x_{s2}]^T$  为二次结构体系相对于地面的位移；体系质量矩阵为： $M_v = \text{diag}[m_p, m_{s1}, m_{s2}]$ ；体系阻尼和刚度矩阵分别为： $C_v = [c_p + c_{s1} + c_{s2}, -c_{s1}, -c_{s2}; -c_{s1}, c_{s1} + c_d, -c_d; -c_{s2}, -c_d, c_{s2} + c_d]$ ， $K_v = [k_p + k_{s1} + k_{s2}, -k_{s1}, -k_{s2}; -k_{s1}, k_{s1} + k_d, -k_d; -k_{s2}, -k_d, k_{s2} + k_d]$ 。

#### 1.2 共享调谐质量阻尼器(STMD)

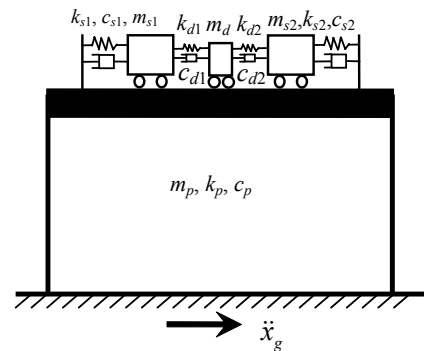
如图 1(b)所示，在两个附属结构之间设置共享调谐质量阻尼器(STMD)，建立该体系的运动方程：

$$M_{st} \ddot{X}_{st} + C_{st} \dot{X}_{st} + K_{st} X_{st} = -M_{st} E_{st} \ddot{x}_g \quad (2)$$

其中： $\ddot{x}_g$  为地震输入； $E_{st}$  为激励的作用位置向量， $E_{st} = [1, 1, 1, 1]^T$ ； $X_{st} = [x_p, x_{s1}, x_{s2}, x_d]^T$  为二次结构体系及共享调谐质量阻尼器(STMD)质量块相对于地面的位移；体系质量矩阵为： $M_{st} = \text{diag}[m_p, m_{s1}, m_{s2}, m_d]$ ；体系阻尼和刚度矩阵分别为： $C_{st} = [c_p + c_{s1} + c_{s2}, -c_{s1}, -c_{s2}, 0; -c_{s1}, c_{s1} + c_d, 0, -c_{d1}; 0, c_{s2} + c_{d2}, -c_{d2}, 0; -c_{d1}, -c_{d2}, c_{d1} + c_{d2}]$ ， $K_{st} = [k_p + k_{s1} + k_{s2}, -k_{s1}, -k_{s2}, 0; -k_{s1}, k_{s1} + k_d, 0, -k_{d1}; 0, -k_{d1}, k_{s2} + k_{d2}, -k_{d2}; 0, -k_{d1}, -k_{d2}, k_{d1} + k_{d2}]$ 。



(a) 粘滞阻尼器(VD)



(b) 共享调谐质量阻尼器(STMD)

图 1 附属结构的两种减震方法

Fig.1 Two types of strategy to reduce the seismic response of secondary systems

## 2 随机振动分析以及优化目标函数

### 2.1 虚拟激励法

地震输入为随机激励,从随机振动的角度研究分别采用粘滞阻尼器(VD)和共享调谐质量阻尼器(STMD)减震时附属结构体系的动力响应。下文中,两个不同体系的参数及响应均统一用  $M$ 、 $C$ 、 $K$  和  $X$  表示。

地震输入功率谱密度函数为  $S_{\ddot{x}_g}$ ,利用林家浩等<sup>[10]</sup>提出的虚拟激励法,地震输入可以表示为弦波的形式:  $\ddot{x}_g(\omega, t) = \sqrt{S_{\ddot{x}_g}} e^{i\omega t}$ ,从而可得:

$$X(\omega, t) = (-\omega^2 M + i\omega C + K)^{-1} (-ME \sqrt{S_{\ddot{x}_g}} e^{i\omega t}) \quad (3)$$

$$\ddot{X}(\omega, t) = (-\omega^2 M + i\omega C + K)^{-1} (ME \sqrt{S_{\ddot{x}_g}} \omega^2 e^{i\omega t}) \quad (4)$$

令:

$$X(\omega) = (-\omega^2 M + i\omega C + K)^{-1} (-ME \sqrt{S_{\ddot{x}_g}}) \quad (5)$$

$$\ddot{X}(\omega) = (-\omega^2 M + i\omega C + K)^{-1} (ME \omega^2 \sqrt{S_{\ddot{x}_g}}) \quad (6)$$

则附属结构的功率谱密度函数可以表示为:

$$S_X(\omega) = X(\omega)^* X(\omega)^T, \quad (7)$$

$$S_{\ddot{X}}(\omega) = \ddot{X}(\omega)^* \ddot{X}(\omega)^T.$$

其中: \* 标记为对复数取共轭; T 标记为对矩阵取转置。

由于附属结构相对于主体结构的位移可以表示为:

$$x_{s1,p}(t) = x_{s1}(t) - x_p(t), \quad (8)$$

$$x_{s2,p}(t) = x_{s2}(t) - x_p(t).$$

附属结构的绝对加速度可以表示为:

$$\ddot{x}_{s1,g}(t) = \ddot{x}_{s1}(t) + \ddot{x}_g(t), \quad (9)$$

$$\ddot{x}_{s2,g}(t) = \ddot{x}_{s2}(t) + \ddot{x}_g(t).$$

所以附属结构的相对位移和绝对加速度的功率谱密度函数可以表示为:

$$S_{x_{s1,p}} = S_{x_{s1}} + S_{x_p} - S_{x_p x_{s1}} - S_{x_{s1} x_p}, \quad (10)$$

$$S_{x_{s2,p}} = S_{x_{s2}} + S_{x_p} - S_{x_p x_{s2}} - S_{x_{s2} x_p}.$$

$$S_{\ddot{x}_{s1,g}} = S_{\ddot{x}_{s1}} + S_{\ddot{x}_g} + S_{\ddot{x}_{s1} \ddot{x}_g} + S_{\ddot{x}_g \ddot{x}_{s1}}, \quad (11)$$

$$S_{\ddot{x}_{s2,g}} = S_{\ddot{x}_{s2}} + S_{\ddot{x}_g} + S_{\ddot{x}_{s2} \ddot{x}_g} + S_{\ddot{x}_g \ddot{x}_{s2}}.$$

其中:

$$S_{\ddot{x}_{s1} \ddot{x}_g} = \ddot{X}(\omega)(2,1) \sqrt{S_{\ddot{x}_g}}, \quad S_{\ddot{x}_{s2} \ddot{x}_g} = \ddot{X}(\omega)(3,1) \sqrt{S_{\ddot{x}_g}}.$$

附属结构的响应均方值可以通过功率谱密度函数的积分得到,位移和加速度量可以表示为:

$$\sigma_{x_{s1}}^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} S_{x_{s1,p}}(\omega) d\omega, \quad \sigma_{x_{s2}}^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} S_{x_{s2,p}}(\omega) d\omega;$$

$$\sigma_{\ddot{x}_{s1,g}}^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} S_{\ddot{x}_{s1,g}}(\omega) d\omega, \quad \sigma_{\ddot{x}_{s2,g}}^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} S_{\ddot{x}_{s2,g}}(\omega) d\omega. \quad (12)$$

### 2.2 优化目标

在实际地震中,附属结构的损坏可能是由于支撑失效破坏产生,也可能是由于临近附属结构位移过大而发生的相互碰撞产生的,对于此类破坏,在附属结构减震设计的时候通过控制附属结构的相对位移就可以避免。而对于电子信息系统、精密仪器设备等,加速度往往是它们损坏的主要原因,在支撑还未损坏的时候,过大的加速度首先导致了它们的失效。当采取粘滞阻尼器(VD)和共享调谐质量阻尼器(STMD)两种方法保护附属结构时,可以实现协调振动从而避免临近附属结构的相互碰撞。本文以附属结构绝对加速度为控制目标,对减震装置进行参数优化,定义附属结构的减震指标为设置减震装置前后附属结构的加速度比值:  $\mu_s = \ddot{x}_{s,有控} / \ddot{x}_{s,无控}$ ,本文中  $\ddot{x}_{s,有控}$  和  $\ddot{x}_{s,无控}$  分别取附属结构响应的方值。参数优化涉及到两个附属结构减震分析,属于多目标优化问题,本文选取两个附属结构减震指标  $\mu_{s1}$  和  $\mu_{s2}$  的最大值进行优化,即最大值的最小化问题,优化目标函数为:  $f = \min \max(\mu_{s1}, \mu_{s2})$ 。

## 3 减震分析

如前文图 1 所示,二次结构体系模型参数主要有三部分组成,包括主体结构:  $m_p$ 、 $c_p$ 、 $k_p$ ,附属结构:  $m_{s1}$ 、 $c_{s1}$ 、 $k_{s1}$ 、 $m_{s2}$ 、 $c_{s2}$ 、 $k_{s2}$ ,减震体系: STMD 为  $m_d$ 、 $c_{d1}$ 、 $k_{d1}$ 、 $c_{d2}$ 、 $k_{d2}$ ,VD 为  $c_d$ 、 $k_d$ 。

对二次结构体系选取更利于分析的参数体系,地震输入模型采用白噪声模型  $S_{\ddot{x}_g} = 0.01 \text{m}^2/\text{s}^3$ ,主体结构质量为  $m_p = 1 \times 10^5 \text{kg}$ ,阻尼比为  $\xi_p = 0.05$ ,频率为  $\omega_p = 20 \text{rad/s}$ ;为表征相似的附属结构,附属结构 1 和附属结构 2 的质量取为相同的数值,可取为  $m_{s1} = m_{s2} = 1 \times 10^3 \text{kg}$ ,阻尼比为  $\xi_{s1} = \xi_{s2} = 0.02$ ,附属结构 2 的频率为  $\omega_{s2} = 10 \text{rad/s}$ ,附属结构 1 的频率分别取  $\omega_{s1} = 5 \text{rad/s}$ ,  $\omega_{s1} = 10 \text{rad/s}$ ,  $\omega_{s1} = 15 \text{rad/s}$ ,  $\omega_{s1} = 20 \text{rad/s}$ ,  $\omega_{s1} = 25 \text{rad/s}$ ,  $\omega_{s1} = 30 \text{rad/s}$ ,  $\omega_{s1} = 35 \text{rad/s}$ ,  $\omega_{s1} = 40 \text{rad/s}$  等一系列数值。

对于 VD 方法,参数  $c_d$ 、参数  $k_d$  为需要进行优化分析的参数;对于 STMD 方法,可取小质量  $m_d = 20 \text{kg}$ ,而参数  $c_{d1}$ 、参数  $k_{d1}$ 、参数  $c_{d2}$ 、参数  $k_{d2}$  为

需要进行优化分析的参数,通过优化得到最优的减震效果。

### 3.1 减震原理

共享调谐质量阻尼器(STMD)通过与连接的两个附属结构调谐共振来减小附属结构的响应。取  $\omega_{s1}=9, \omega_{s2}=10$  研究 VD 和 STMD 的减震效果,通过参数优化可得 VD 的最优减震指标为:  $f_{VD}=0.64$ , 相应的最优参数为:  $k_d=0, c_d=662.6$ ; STMD 的最优减震指标为:  $f_{STMD}=0.66$ , 相应的最优参数为:  $k_{d1}=883.7, c_{d1}=0, k_{d2}=877.2, c_{d2}=23.9$ 。图 2 给出了在设置 VD 和 STMD 前后附属结构 1 和附属结构 2 的功率谱曲线。从图 2 中可以看到在设置 STMD 和 VD 之后附属结构的谱密度峰值有明显下降,减震效果都比较明显,不过二者的减震原理并不相同,VD 是利用粘滞阻尼器安置点的相对运动来消能减震,而 STMD 是利用质量块的调谐共振来减震,且 STMD 的减震机理可做如下理解:由上文优化结果可以看到 STMD 装置的频率指标  $\omega_d = \sqrt{\frac{k_{d1}+k_{d2}}{m_d}} = 9.4\text{rad/s}$  位于频率  $\omega_{s1}$  与频率  $\omega_{s2}$  之间,并与二者都相距不远,属于调谐共振的频率范围,因此通过 STMD 的吸振效果会使二次结构体系中附属结构的响应明显减小。

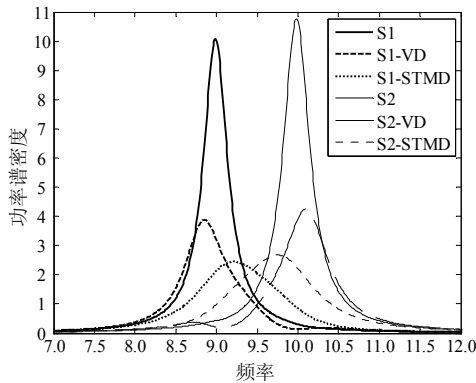
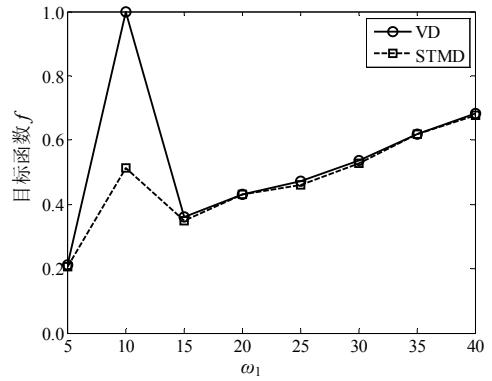


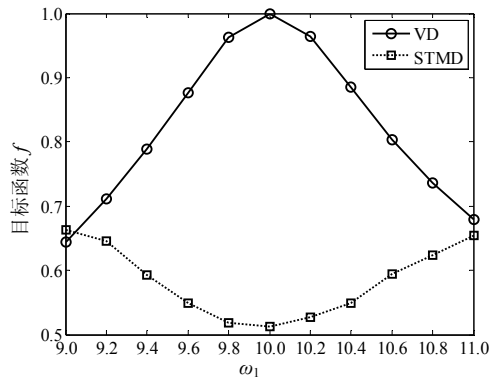
图 2 附属结构的功率谱密度  
Fig.2 Power spectrum density of secondary systems

### 3.2 减震区域

不考虑优化参数的约束条件,以  $f = \min \max(\mu_{s1}, \mu_{s2})$  为优化目标函数分别对 VD 和 STMD 装置进行参数优化,优化结果如图 3(a)所示。可以看到:当两个附属结构频率差别较大时 VD 的减震效果明显,频率相近时减震效果很差;当附属结构频率差别明显时优化所得的 STMD 减震效果与 VD 相当,频率接近时减震效果依然良好。



(a)  $\omega_1 \in [5,40], \omega_2=10\text{rad/s}$



(b)  $\omega_1 \in [9.0,11.0], \omega_2=10\text{rad/s}$

图 3 VD 和 STMD 两种方法的减震效果

Fig.3 Effect of the two strategies of VD and STMD on reducing the seismic response of secondary systems

VD 的减震原理是利用两个附属结构的相对运动,当频率接近时,附属结构之间的相对运动很小,VD 的减震效果变差,进而当二者频率相等时,附属结构之间不存在相对运动,VD 完全失效,所以出现了图 3(a)所示减震效果的变化趋势。而对于 STMD 来说,运动机理相对复杂,表 1 和表 2 给出了 STMD 优化的减震效果所对应的参数值以及质量块的运动情况。从表 1 和表 2 中可以看到当附属结构频率差别明显时,STMD 质量块的加速度相对于附属结构并不大,因此不能发挥动力吸振的作用,减震效果与 VD 相接近,实际上只是利用了粘滞阻尼器的消能减震,而当频率相等的时候,此时 STMD 减震效果明显,质量块的绝对加速度很大,起到了动力吸振的作用,此时两个附属结构才真正共享了调谐质量阻尼器。因此,可以得出结论:当频率相接近的时候 STMD 的动力减震效果才能得以明显体现,随着频率的远离减震效果相应下降。表 1 中对应的远离频率  $\omega_1=10\text{rad/s}$  的优化结果,实际上可以近似看作利用相对运动减震的 VD 装置,

所以由表中结果可以说两个附属结构的频率不接近时 STMD 实际的优化结果弱于 VD。

表 1 STMD 的减震效果及最优参数 ( $\omega_1 \in [5,40], \omega_2=10\text{rad/s}$ )

Table 1 Optimum parameters and effect of STMD on reducing the seismic response of secondary systems ( $\omega_1 \in [5,40], \omega_2=10\text{rad/s}$ )

参数工况 $\omega_1, \omega_2$ (减震率)	$k_{d1} / (\text{N/m})$	$c_{d1} / (\text{kg}\cdot\text{rad/s})$	$k_{d2} / (\text{N/m})$	$c_{d2} / (\text{kg}\cdot\text{rad/s})$
5, 10 (20.7%)	578.0	2584.0	28.8	21748.0
10, 10 (51.2%)	983.2	9.9	983.2	9.9
15, 10 (34.8%)	0.0	1788.9	$9.1 \times 10^9$	$1.1 \times 10^{11}$
20, 10 (43.1%)	2.1	3161.0	0.0	2642.0
25, 10 (45.9%)	16384.0	6501.0	32980.8	11922.0
30, 10 (52.8%)	116224.0	5093.0	32905.3	10786.0
35, 10 (61.7%)	116736.0	4605.0	131444.0	11810.0
40, 10 (67.8%)	114688.0	206248.9	4573.0	26178.0

表 2 随机输入下附属结构和 STMD 质量块的加速度 ( $\omega_1 \in [5,45], \omega_2=10\text{rad/s}$ )

Table 2 Acceleration of secondary systems and the mass of STMD under random input ( $\omega_1 \in [5,45], \omega_2=10\text{rad/s}$ )

工况/(rad/s) 加速 度/( $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ )	$\omega_2=10$							
	$\omega_1=5$	10	15	20	25	30	35	40
附属结构 1	0.9	7.4	21.4	141.4	37.2	16.9	12.0	15.2
附属结构 2	3.0	7.4	6.3	6.3	6.7	7.7	9.0	11.5
STMD	2.5	287.66	5.1	43.4	7.2	7.9	5.0	14.2

注：附属结构和 STMD 质量块的加速度为绝对加速度。

同时，利用调谐质量阻尼器的动力吸振效应可以通过单一质量块控制多自由度结构体系的某阶振型，相应的，若采用基于相对运动耗能减震的粘滞阻尼器，则需要多自由度结构体系的多个位置均加以布置。因此，可以说调谐质量阻尼器属于多自由度控制，而单个粘滞阻尼器只是控制单个自由度。基于此观点，STMD 的动力吸振作用是可以对多自由度体系进行振型控制，VD 则需要临近多自由度附属结构的多个位置之间设置粘滞阻尼器，

表 4 随机输入下附属结构和 STMD 质量块的加速度 ( $\omega_1 \in [9.0,11.0], \omega_2=10\text{rad/s}$ )

Table 4 Acceleration of secondary systems and the mass of STMD under random input ( $\omega_1 \in [9.0,11.0], \omega_2=10\text{rad/s}$ )

工况/(rad/s) 加速度/( $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ )	$\omega_2=10.0$										
	$\omega_1=9.0$	9.2	9.4	9.6	9.8	10.0	10.2	10.4	10.6	10.8	11.0
附属结构 1	7.8	8.0	7.7	7.5	7.4	7.4	7.7	8.4	9.6	10.6	11.8
附属结构 2	9.4	9.1	8.3	7.6	7.3	7.4	7.9	8.3	8.9	9.4	9.8
STMD	109.6	95.2	180.0	239.3	257.2	287.7	299.8	253.1	195.9	162.3	150.3

注：附属结构和 STMD 质量块的加速度为绝对加速度。

### 3.3 鲁棒性分析

取工况  $\omega_{s1}=9.0, \omega_{s2}=10.0$ ，此时 STMD 最优参数为： $k_{d1}=883.7$ 、 $c_{d1}=0$ 、 $k_{d2}=877.2$ 、 $c_{d2}=23.9$ 。在工程中结构实际参数总是与设计参数存在着偏差，这主要是由于人的主观意识不能完全反映本原系统所导致。鉴于传统的设计方法对实

际结构的描述往往是通过均值加以描述，而对减震体系进行鲁棒性研究具有重要的现实意义，针对参数的随机性往往是通过引入随机参数来进行描述的，本文通过结构参数的微小摄动来研究 STMD 减震体系的鲁棒性。

STMD 有着 VD 无法比拟的优势，有必要对动力吸振的减震效果进行研究。此外，本文的理论模型为单自由度附属结构，同样可以看作多自由度附属结构的某阶振型的简化表达。  
图 3(b)给出了附属结构频率接近时 STMD 的优化结果。为了使优化结果真正体现 STMD 的动力吸振作用，参考表 1 中的优化参数，在优化过程中设置约束条件： $0 \leq c_{d1}, c_{d2} < 50$ 。从图 3 中可以看到，由于 VD 在附属结构频率接近时不良的减震效果，STMD 可以提供良好的补充，但 STMD 随着附属结构频率远离减震效果下降，在  $\omega_{s1}=9, \omega_{s1}=11$  减震效果已经下降到与 VD 相当的程度。表 3 列出了  $\omega_{s1} \in [9.0,11.0]$ ， $\omega_{s2}=10.0$  时 STMD 的最优参数，表 3 和表 4 是优化后附属结构和 STMD 质量块的加速度数值，从表中可以看到，当附属结构频率接近时，STMD 发挥动力吸振作用，附属结构的减震效果明显。

表 3 STMD 的减震效果及最优参数 ( $\omega_1 \in [9.0,11.0], \omega_2=10\text{rad/s}$ )

Table 3 Optimum parameters and effect of STMD on reducing the seismic response of secondary systems ( $\omega_1 \in [9.0,11.0], \omega_2=10\text{rad/s}$ )

工况 $\omega_1, \omega_2$ (减震率)	参数			
	$k_{d1} / (\text{N/m})$	$c_{d1} / (\text{kg}\cdot\text{rad/s})$	$k_{d2} / (\text{N/m})$	$c_{d2} / (\text{kg}\cdot\text{rad/s})$
9.0, 10.0 (66.4%)	883.7	0.0	877.2	23.9
9.2, 10.0 (64.5%)	808.3	0.0	928.8	30.0
9.6, 10.0 (54.9%)	1035.9	0.0	898.0	19.1
9.8, 10.0 (51.9%)	946.0	0.0	1021.0	20.9
10.0, 10.0 (51.2%)	983.2	9.9	983.2	9.9
10.2, 10.0 (52.7%)	990.5	16.2	1078.4	3.0
10.4, 10.0 (54.8%)	984.5	20.9	1115.0	0.0
10.6, 10.0 (59.4%)	928.0	24.0	1237.5	0.0
10.8, 10.0 (62.3%)	1117.8	25.7	979.3	0.0
11.0, 10.0 (63.7%)	1037.2	25.9	1154.2	0.0

际结构的描述往往是通过均值加以描述，而对减震体系进行鲁棒性研究具有重要的现实意义，针对参数的随机性往往是通过引入随机参数来进行描述的，本文通过结构参数的微小摄动来研究 STMD 减震体系的鲁棒性。

图 4(a)给出了 STMD 减震体系相对于二次结构

体系频率摄动的鲁棒性。可以看到，主体结构频率的摄动对 STMD 减震效果的影响不大，而附属结构频率的摄动对 STMD 减震效果的影响较大。当附属结构频率摄动使得两个附属结构频率接近时减震效果反而更好，这主要是由于此时 STMD 的调谐共振更剧烈，动力吸振作用更明显，而随着摄动使附属结构频率相互偏离时，减震效果大幅减小。如图 4(a)所示，当附属结构的频率摄动幅度大于 10%时，减震效果大幅下降，效果很差，这是因为当摄动过大时 STMD 减震体系实际上不再起到动力吸振的作用，质量块不再调谐共振，此时 STMD 相当于 VD 减震体系。附属结构 1 和附属结构 2 的频率为影响减震效果的敏感性因素，附属结构频率摄动时 STMD 的鲁棒性较差。图 4(b)给出了 STMD 减震效果相对于二次结构体系阻尼比摄动的鲁棒性。从图 4(b)中可以看到，附属结构阻尼比的改变对 STMD 减震效果影响较小，误差达到 30%时仅有 5%左右的影响。此外，主体结构阻尼比的改变对 STMD 减震效果的影响很小。

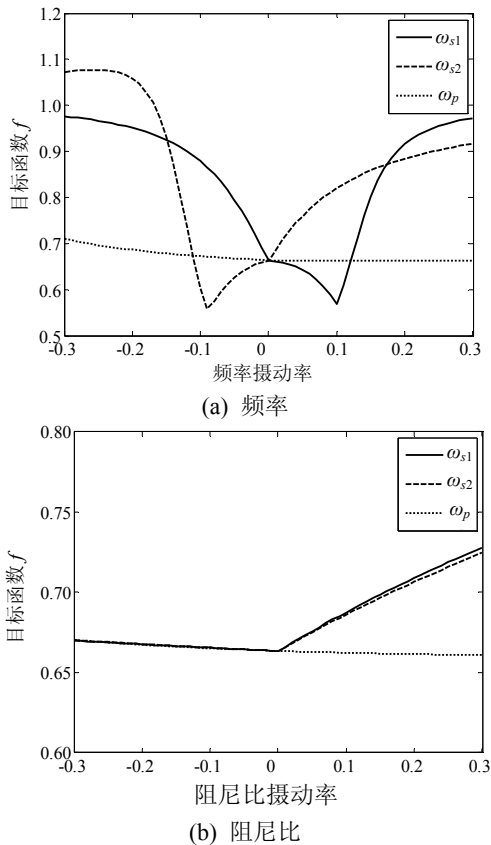


图 4 STMD 关于二次结构体系参数摄动的鲁棒性  
Fig.4 Robustness of STMD versus parameter perturbation of primary-secondary systems

### 3.4 场地条件对 STMD 最优参数的影响

采用 Clough 和 Penzien 建议的双过滤白噪声模型。对前文白噪声输入下的优化结果进行检验，分析 STMD 减震体系对于随机地震输入模型的敏感性。Clough-Penzien 过滤白噪声模型如下：

$$S(\omega) = \frac{\omega_g^4 + 4\zeta_g^2 \omega_g^2 \omega^2}{(\omega_g^2 - \omega^2)^2 + 4\zeta_g^2 \omega_g^2 \omega^2} \times \frac{\omega^4}{(\omega_f^2 - \omega^2)^2 + 4\zeta_f^2 \omega_f^2 \omega^2} S_0 \quad (13)$$

式中： $S_0$  为谱强度因子； $\zeta_g$  和  $\omega_g$  分别为地基土的阻尼比和卓越频率； $\zeta_f$  和  $\omega_f$  通常取  $\zeta_f = \zeta_g$  和  $\omega_f = 0.1\omega_g - \omega_f = 0.2\omega_g$ 。

根据不同场地类别和设计地震分组建立 12 种随机地震输入模型。参考文献[11]，根据《建筑抗震设计规范》(GB50011-2001)给出了对应场地条件的 Clough-Penzien 模型的参数值，对地震随机输入模型进行编号，如表 5 所示。按照白噪声输入对 STMD 进行优化，最优减震效果和相应的最优参数如前文所示。按照不同场地条件下 Clough-Penzien 随机输入模型对二次结构体系进行分析，得到随机响应，如图 5 所示。图 5 给出了不同场地类别和不同设计地震分组对应的不同随机地震激励下 STMD 的减震效果。从图 5 中可以看到，按照白噪声输入的优化参数对基于 Clough-Penzien 随机模型的不同场地条件下的附属结构减震效果仍然很好，因此场地条件对 STMD 最优参数的影响不大，即 STMD 参数对场地条件不敏感。

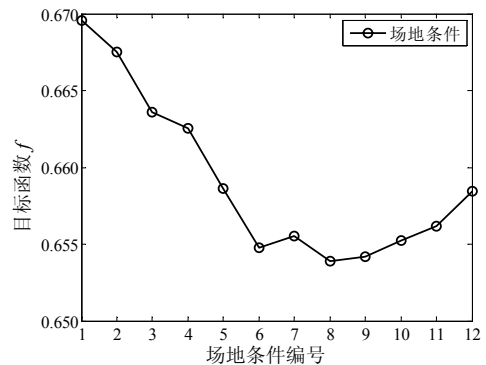


图 5 STMD 最优参数对场地条件的敏感性  
Fig.5 Sensitivity of STMD's optimum parameters versus random earthquake input

表 5 随机地震输入模型序号  
Table 5 Serial number of random earthquake input models

场地类别	I ( $\omega_g, \zeta_g$ )	II ( $\omega_g, \zeta_g$ )	III ( $\omega_g, \zeta_g$ )	IV ( $\omega_g, \zeta_g$ )
地震分组				
设计地震第一组	1 (25.13, 0.64)	4 (17.95, 0.72)	7 (13.96, 0.80)	10 (9.67, 0.90)
设计地震第二组	2 (20.94, 0.64)	5 (15.71, 0.72)	8 (11.42, 0.80)	11 (8.38, 0.90)
设计地震第三组	3 (17.95, 0.64)	6 (13.96, 0.72)	9 (9.67, 0.80)	12 (6.98, 0.90)

## 4 结论

针对在相同附属结构之间安装粘滞阻尼器(VD)减震效果不明显的缺点,提出了利用共享调谐质量阻尼器(STMD)来实现多个附属结构协调减震的方法,分析了不同工况下两种方法的减震效果,并研究了 STMD 的减震远离和适用情况,得出了一些有意义的结论:

(1) 在附属结构之间设置共享调谐质量阻尼器(STMD)和粘滞阻尼器(VD)可以起到很好的减震效果,并可以使临近附属结构协调振动,避免因相互碰撞而发生的损坏。

(2) 当附属结构之间的频率有明显差异时,粘滞阻尼器(VD)可以起到很好的减震效果,当附属结构之间的频率接近时,粘滞阻尼器(VD)的减震效果很差甚至完全失效,而此时共享调谐质量阻尼器(STMD)通过共享质量块调谐共振的动力吸振作用会有很好的减震效果。共享调谐质量阻尼器(STMD)利用的是协调共振效应,可以控制附属结构的某阶振型,与单个粘滞阻尼器相比,更适用于多自由度附属结构的动力控制。

(3) 共享调谐质量阻尼器(STMD)对附属结构频率振动的鲁棒性较差,随着附属结构频率振动所导致的频率偏离减震效果大幅减小;对主体结构频率振动的鲁棒性较强。二次结构体系各部分阻尼比的振动对共享调谐质量阻尼器(STMD)的减震效果影响不大,鲁棒性强。

(4) 共享调谐质量阻尼器(STMD)减震效果和相应的最优参数对场地条件不敏感。从本文研究可以看到,在白噪声激励下优化的结果对于不同场地类别对应的 Cloug-Penzien 随机激励模型也有很好的减震效果,因此场地条件的改变对共享调谐质量阻尼器(STMD)的影响很小。

### 参考文献:

[1] 陈文兵, 唐家祥. 联合结构减震体系的动力分析和连接的优化布置[J]. 世界地震工程, 2002, 18(3): 141—145.  
Chen Wenbing, Tang Jiaxiang. Dynamic analysis of a

combined structure vibration-reducing system and linker s optimization layout [J]. World Information on Earthquake Engineering, 2002, 18(3): 141—145.

[2] 龚治国, 吕西林, 翁大根. 超高层主楼与裙房黏滞阻尼器连接减振分析研究[J]. 土木工程学报, 2007, 40(9): 8—15.  
Gong Zhiguo, Lu Xilin, Weng Dagen. Analysis of vibration reduction of fluid linking dampers connecting main building with podium [J]. China Civil Engineering Journal, 2007, 40(9): 8—15. (in Chinese)

[3] Xu Y L, He Q, Ko J M. Dynamic response of damper-connected adjacent buildings under earthquake excitation [J]. Engineering Structures, 1999, 21: 135—148.

[4] Yang Z, Xu Y L, Lu X L. Experimental seismic study of adjacent buildings with fluid dampers [J]. Journal of Structural Engineering, 2003, 129(2): 197—205.

[5] Zhu H P, Xu Y L. Optimum parameters of Maxwell model-defined dampers used to link adjacent structures [J]. Journal of Sound and Vibration, 2005, 279(1-2): 253—274.

[6] Gurley K, Kareem A, Bergman L A, Johnson E A, Klein R E. Coupling tall buildings for control of response to wind [C]. Proceedings of the Sixth International Conference on Structural Safety and Reliability (ISOSSAR), A.A. Balkema, Rotterdam, 1994: 1553—1560.

[7] Luco J E, Barros F D. Optimal damping between two adjacent elastic structures [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1998, 27: 649—659.

[8] Luco J E, Barros F D. Control of the seismic response of a composite tall building modeled by two interconnected shear beams [J]. Earthquake Engineering Structural Dynamics, 1998, 27: 205—223.

[9] Abdullah M M, Hanif J H, Richardson A, Sobanjo J. Using of a shared tuned mass damper (STMD) to reduce vibration and pounding in adjacent structures [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2002, 30: 1185—1201.

[10] Lin J H. A fast CQC algorithm of PSD matrices for random seismic responses [J]. Computers and Structures, 1992, 44(3): 683—687.

[11] 薛素铎, 王雪生, 曹资. 基于新抗震规范的地震动随机模型参数研究[J]. 土木工程学报, 2003, 36(5): 5—10.  
Xue Suduo, Wang Xuesheng, Cao Zi. Parameters study on seismic random model based on the new seismic code [J]. China Civil Engineering Journal, 2003, 36(5): 5—10. (in Chinese)