

# 超高层建筑结构组合调谐风振控制系统

赵 昕<sup>1,2</sup>, 王立林<sup>1</sup>, 郑毅敏<sup>1,2</sup>

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 同济大学建筑设计研究院(集团)有限公司, 上海 200092)

**摘要:** 为充分利用调谐液体阻尼器(TLCD)的经济性和调谐质量阻尼器(TMD)的高效性,提出一种 TLCD 与 TMD 相结合的组合调谐阻尼器(CTD),从理论上说明 CTD 的合理性,推导其运动方程,引入协同损失因子评价其减振性能,并与 TLCD 和 TMD 的减振效果进行对比分析.研究表明:CTD 不同参数配置时,协同损失因子不同,可达 35%;相同参数配置下,CTD 减振效果介于 TMD 和 TLCD 之间.综合经济和效率因素,CTD 是一种很有竞争力的减振手段,具有广阔的应用前景.

**关键词:** 超高层建筑;组合调谐阻尼器;风振控制;协同损失因子;调谐质量阻尼器;调频液柱阻尼器

中图分类号: TU973

文献标志码: A

## Combined Tuned Damper-based Wind-induced Vibration Control for Super Tall Buildings

ZHAO Xin<sup>1,2</sup>, WANG Lilin<sup>1</sup>, ZHENG Yimin<sup>1,2</sup>

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Tongji Architectural Design (Group) Co. Ltd., Shanghai 200092, China)

**Abstract:** To fully utilize the high efficiency of the tuned mass damper (TMD) and the economic advantage of the tuned liquid column damper (TLCD), a combined tuned damper (CTD) was proposed, and the wind-induced vibration mitigation effects of super tall buildings with such a combined tuned damper, were investigated. A kinematic equation was derived, which verified the feasibility of CTD theoretically. The collaborative loss coefficient was proposed to evaluate the performance loss due to the direct connection of TMD and TLCD to the structure of CTD. A comparative study was made of the vibration control efficiency of CTD with those of TMD and TLCD. The results show that the CTD with different parameters performs differently in vibration control and leads to different collaborative loss coefficients. The maximum collaborative loss coefficient can be up to 35%. With the same parameters, the vibration control of CTD is between those of

TLCD and TMD, which makes CTD a competitive vibration control option.

**Key words:** super tall buildings; combined tuned damper; wind-induced vibration control; collaborative loss coefficient; tuned mass damper (TMD); tuned liquid column damper (TLCD)

超高层建筑结构的自振周期接近风荷载的卓越周期,在脉动风荷载作用下的风致振动(抖振)除造成结构疲劳损伤外,还会引起居住者不舒适感.为了改善超高层建筑结构的风振舒适度性能,工程中常需安装振动控制装置,常用的包括调谐质量阻尼器(TMD)和调谐液体阻尼器(TLCD)<sup>[1]</sup>.传统的工程案例通常采用单一类型的阻尼器,这种做法存在一定局限性:采用 TMD 时,所需质量块体积大,占用空间多,造价高;采用 TLCD 时,除拟需的消防水箱还必须额外配置水箱,占用大量空间.为了降低阻尼器造价,实际工程中也有采用水箱充当 TMD 质量块的案例:澳大利亚的悉尼电视塔上安装了两个 TMD 来减小电视塔的第一、二振型风振反应,用于控制第一振型响应的 TMD 是悬吊在塔楼顶部重达 180 t 的水箱,这是第一个用水箱来代替质量块的尝试.也有学者对 TMD 与 TLCD 的结合使用进行了研究. XU<sup>[2]</sup>等提出了调谐液柱/质量阻尼器(tuned liquid column mass damper, TLCMD)装置,该装置中 TLCD 除发挥减振作用外,其 U 型水箱及其所储液体还作为 TMD 的运动质量.周福霖、黄东阳<sup>[3]</sup>等在 XU 研究的基础上,借鉴兰文武<sup>[4]</sup>提出的混合水箱装置(multiple tuned liquid column dampers, MTLDS)的设计方法,提出了充分利用 TLCMD 凹部空间的新型混合调频类阻尼器.为了充分利用 TLCD 的经济性和 TMD 的高效性,提出了一种

收稿日期: 2014-12-17

基金项目: 上海市优秀技术带头人计划(14XD1423900); 上海市科技攻关计划(09dz1207704)

第一作者: 赵 昕(1975—),男,高级工程师,工学博士,硕士生导师,主要研究方向为超高层建筑基于性能优化设计.

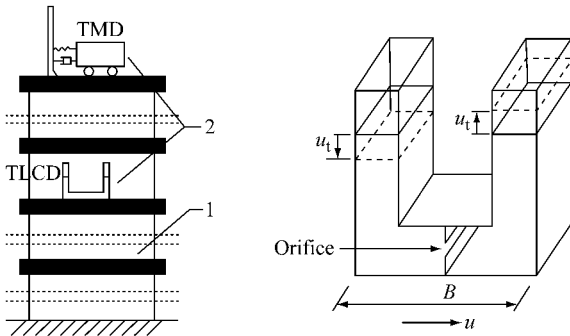
E-mail: 22zx@tjadri.com

TLCD 和 TMD 结合使用的 CTD,并研究了其减振性能。

## 1 组合调谐阻尼器

### 1.1 组合控制系统减振原理

TLCMD 是建立在 TLCMD 充当 TMD 的减振质量进而降低阻尼器造价的思想基础上的.当忽略液体的晃动效应时(水箱装满),TMD 保持运动特性;当液体的晃动效应不能忽略时(水箱不装满),TLCD 会对 TMD 的运动产生影响,整个装置可等效为受控的 TMD.该方案中 TLCD 与 TMD 的运动是相互耦联的,结构受振时引起 TMD 运动进而引起 TLCD 运动,当二者运动不同步时,液柱的晃动可能对阻尼器系统起抑制作用<sup>[2]</sup>.为了克服该局限性,提出组合调谐阻尼器(CTD),如图 1 所示.1 代表结构,2 代表阻尼器装置,其中 TLCD 由消防水箱充当,位置根据消防要求和结构特点确定;TMD 和 TLCD 直接设置在结构上,二者的运动是相互独立的,均直接控制结构的振动,减振原理如图 2 所示.2a 为将超高层建筑简化后得到的质点串模型,记为“结构 1”;图 2b 为在“结构 1”上仅布置 TMD,此时整体体系亦可视为质点串模型,记为“结构 2”;图 2c 为在“结构 1”上仅布置 TLCD,此时整体体系亦可视为质点串模型,记为“结构 3”;图 2d 有两种含义:一是表示在“结构 2”上仅布置 TLCD,此时整体体系亦可视为质点串模型,记为“结构 4”,二是表示在“结构 3”上仅布置 TMD,此时整体体系亦可视为质点串模型,记为“结构 4”.可以看出,借助“中间结构”的概念能够解释 CTD-结构系统的合理性.需注意的是,CTD 在实际工程中发挥作用时,其所包含的 TMD 和 TLCD 是同步、独立工作的,不存在先后之分.图中, $m_i, k_i, c_i (i=1, 2, \dots, n)$ ,分别为各质点质量、刚度和阻尼。

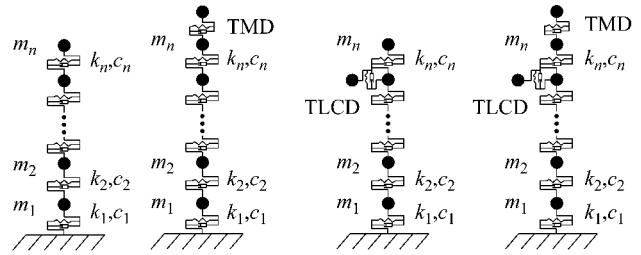


a CTD 控制系统示意图

b TLCD 示意图

图 1 组合调谐控制系统

Fig.1 Combined tuned damper



a 原结构 b TMD-结构系统 c TLCD-结构系统 d CTD-结构系统

图 2 CTD 原理示意图

Fig.2 Theory of combined tuned damper

### 1.2 组合控制系统运动方程

CTD-结构体系的运动方程可得

TMD 组员运动方程为

$$m_d \ddot{u}_d + c_d \dot{u}_d + k_d u_d = -m_d \ddot{u} \quad (1)$$

式中: $m_d, c_d, k_d$  分别为 TMD 的质量、阻尼、刚度; $\ddot{u}_d, \dot{u}_d, u_d$  分别为 TMD 相对于地面的相对位移、相对速度、相对加速度, $\ddot{u}$  为 TMD 所在结构层的加速度。

TLCD 运动方程为

$$\rho_w A L \ddot{u}_t + \frac{\rho_w A}{2} \delta |\dot{u}_t| \dot{u}_t + 2\rho_w A g u_t = -\rho_w A B \ddot{u} \quad (2)$$

式中: $u_t, \dot{u}_t, \ddot{u}_t$  分别为 TLCD 液柱晃动的相对位移、相对速度、相对加速度, $\ddot{u}$  为 TLCD 所在结构层的响应加速度; $\rho_w, g, \delta$  分别为液体密度、重力加速度、水头损失系数; $A, L, B$  分别为 TLCD 中液柱的横截面积、液柱总长及液柱水平长度。

结构运动方程为

$$\begin{cases} \mathbf{M}\ddot{\mathbf{U}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{U}} + \mathbf{K}\mathbf{U} = \mathbf{F} + \mathbf{F}_{CTD} \\ \mathbf{F}_{CTD} = E(c_d \dot{u}_d + k_d u_d) - H(\rho_w A B \ddot{u}_t + \rho_w A L \ddot{u}) \end{cases} \quad (3)$$

式中: $\mathbf{M}, \mathbf{C}, \mathbf{K}$  分别为结构的质量、阻尼、刚度矩阵; $\mathbf{U}, \dot{\mathbf{U}}, \ddot{\mathbf{U}}$  分别为结构的位移、速度、加速度响应向量; $\mathbf{F}$  为作用在结构上的风载向量; $\mathbf{F}_{CTD}$  为 CTD 对结构的控制力向量; $E, H$  分别为 CTD 中 TMD, TLCD 在结构层的位置向量

综合式(1)一式(3) 则可获得结构-CTD 体系的综合控制方程,即

$$\mathbf{M}' \ddot{\mathbf{X}} + \mathbf{C}' \dot{\mathbf{X}} + \mathbf{K}' \mathbf{X} = \mathbf{F}' \quad (4)$$

$$\text{式中: } \mathbf{M}' = \begin{bmatrix} \mathbf{M} + m_t \mathbf{I} & \alpha m_t H & 0 \\ \alpha m_t H^T & m_t & 0 \\ m_d E^T & 0 & m_d \end{bmatrix},$$

$$[\mathbf{C}'] = \begin{bmatrix} \mathbf{C} & 0 & -c_d \\ 0 & c_t & 0 \\ 0 & 0 & c_d \end{bmatrix}, \quad \mathbf{K}' = \begin{bmatrix} \mathbf{K} & 0 & -k_d \\ 0 & k_t & 0 \\ 0 & 0 & k_d \end{bmatrix},$$

$F' = \{F^T \ 0 \ 0\}^T, X' = \{U^T \ u_t \ u_d\}^T$ ;  $\alpha$  为长度系数,  $\alpha = B/L$ ;  $m_t$  为 TLCD 质量,  $m_t = \rho AL$ ;  $c_t$  为 TLCD 阻尼,  $c_t = \frac{\rho A}{2} \delta |\dot{y}| \approx 2\rho A \frac{\delta \sigma_y}{\sqrt{2\pi}}$ ;  $k_t$  为 TLCD 刚度,  $k_t = 2\rho Ag$ ;  $I$  是以  $H$  为对角阵的扩展矩阵.

## 2 CTD 减振效果研究

### 2.1 CTD-结构系统

方便起见, 以一个单质点案例对 CTD 的性能进行探究, 如图 3 所示. 图中:  $D$  为结构直径;  $Z$  为高度;  $m, c, k$  分别为质量, 阻尼和刚度. 对其运动方程分析如下:

$$\begin{cases} m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = F(t) - (\alpha m_t \ddot{u}_t + m_t \dot{u}_t) + \\ \quad (c_d \dot{u}_d + k_d u_d) \\ m_t \ddot{u}_t + c_t \dot{u}_t + k_t u_t = -\alpha m_t \ddot{u} \\ m_d \ddot{u}_d + c_d \dot{u}_d + k_d u_d = -m_d \ddot{u} \end{cases} \quad (5)$$

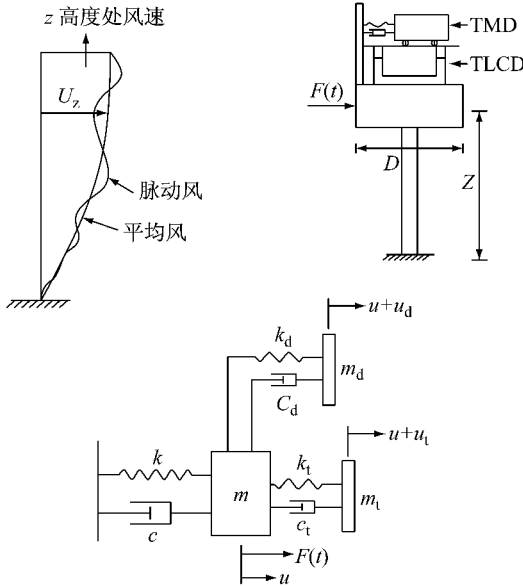


图 3 单自由度结构-CTD 系统示意图  
Fig. 3 1 DOF structure-CTD system

采用谱分析方法, 令  $F(t)$  为  $F(t) = \hat{F}e^{i\Omega t}$ , 则 CTD-结构体系响应可记为  $u = \hat{u}e^{i\Omega t}, u_d = \hat{u}_d e^{i\Omega t}, u_t = \hat{u}_t e^{i\Omega t}$ .  $\hat{F}$  和  $\Omega$  分别为激励幅值和频率. 因此, 式(5)~(7)可改写为

$$\begin{cases} -\Omega^2 m \hat{u} + i\Omega c \hat{u} + k \hat{u} = \hat{F} + (\Omega^2 \alpha m_t \hat{u}_t + \Omega^2 m_t \hat{u}) + \\ \quad (i\Omega c_d \hat{u}_d + k_d \hat{u}_d) \\ -\Omega m_t (\hat{u}_t + \alpha \hat{u}) + i\Omega c_t \hat{u}_t + k_t \hat{u}_t = 0 \\ -\Omega m_d (\hat{u}_d + \hat{u}) + i\Omega c_d \hat{u}_d + k_d \hat{u}_d = 0 \end{cases} \quad (6)$$

为方便计算,  $\bar{u} = \frac{\hat{u}\pi^4}{D}, \bar{u}_t = \frac{\hat{u}_t\pi^4}{D}, \bar{u}_d = \frac{\hat{u}_d\pi^4}{D}, \omega^2 = k/m$ ,

$\xi = \frac{c}{2\omega m}, \omega_t = k_t/m_t, \omega_d^2 = k_d/m_d, \xi_t = \frac{c_t}{2\omega_t m_t}, \xi_d =$

$\frac{c_d}{2\omega_d m_d}, \bar{m}_t = m_t/m, \bar{m}_d = m_d/m, f_d = \omega_d/\omega, f_t = \omega_t/\omega,$

$\rho = \Omega/\omega, \bar{F} = \frac{\hat{F}\pi^4}{\omega^2 D m}$ . 将式(6)改写为

$$\begin{cases} (1 - \rho^2 + 2i\rho\xi - \bar{m}_t\rho)\bar{u} - \rho^2\alpha\bar{m}_t\bar{u}_t - \\ \quad (2i\rho\xi_d f_d \bar{m}_d + f_d^2 \bar{m}_d)\bar{u}_d = \bar{F} \\ -\rho^2\alpha\bar{m}_t\bar{u} - (\rho^2\bar{m}_t - 2i\rho\xi_t f_t \bar{m}_t - f_t^2 \bar{m}_t)\bar{u}_t = 0 \\ -\rho^2\bar{m}_d\bar{u} - (\rho^2\bar{m}_d - 2i\rho\xi_d f_d \bar{m}_d - f_d^2 \bar{m}_d)\bar{u}_d = 0 \end{cases} \quad (7)$$

求解式(7)并将结果平方可得到频率响应函数,

即

$$\begin{cases} |H|^2 = \left| \frac{\bar{u}}{\bar{F}} \right|^2 = \frac{A_5^2 + B_5^2}{A_7^2 + B_7^2} \\ |H_t|^2 = \left| \frac{\bar{u}_t}{\bar{F}} \right|^2 = A_6 |H|^2 \\ |H_d|^2 = \left| \frac{\bar{u}_d}{\bar{F}} \right|^2 = B_6 |H|^2 \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $A_1 = \rho^2 - f_d^2, B_1 = -2\rho\xi_d f_d; A_2 = \rho^2 - f_t^2, B_2 = -2\rho\xi_t f_t; A_3 = f_d^2, B_3 = 2\rho\xi_d f_d; A_4 = 1 - \rho^2 - \bar{m}_t\rho^2, B_4 = 2\rho\xi_t; A_5 = A_2 A_1 - B_2 B_1, B_5 = B_2 A_1 + B_1 A_2; A_6 = \frac{\rho^4 \alpha^2}{A_2 + B_2^2}, B_6 = \frac{\rho^4}{A_1 + B_1^2}; A_7 = (A_5 A_4 - B_5 B_4) + \rho^2 \bar{m}_d (A_3 A_2 - B_3 B_2) + \rho^4 \alpha^2 \bar{m}_t A_1; B_7 = (A_5 B_4 + A_4 B_5) + \rho^2 \bar{m}_d (A_3 B_2 + A_2 B_3) + \rho^4 \alpha^2 \bar{m}_t B_1$ ;  $|H|^2$  为 CTD-结构系统中结构的频响函数,  $|H_t|^2$  为 CTD-结构系统中 TLCD 的频响函数,  $|H_d|^2$  为 CTD-结构系统中 TMD 的频响函数.

风荷载采用 Davenport 谱, 功率谱密度如下:

$$\bar{S}_{FF}(\Omega) = \hat{F}^2 \bar{S}_f(\Omega) \quad (9)$$

其中:  $\bar{S}_f(\Omega) = \frac{2\bar{x}^2}{2\Omega(1+\bar{x}^2)^{4/3}}, \bar{x} = \frac{600\Omega}{\pi v} (10), \hat{F} = \frac{1}{\mu} \mu_f$

$(z) \mu_s(z) \mu_z(z) w_0 A_0$ . 则位移和速度响应的功率谱密度可表示为

$$\begin{cases} S_{uu} = |H|^2 S_{FF}; S_{FF}(\rho) = \bar{F}^2 S_f(\rho) \\ S_{u_t u_t} = |H_t|^2 S_{FF}; S_{u_t u_t} = \rho^2 S_{u_t u_t} \\ S_{u_d u_d} = |H_d|^2 S_{FF}; S_{u_d u_d} = \rho^2 S_{u_d u_d} \end{cases} \quad (10)$$

式中:  $u$  为保证因子;  $u_f$  为脉动系数;  $u_s$  为体型系数;  $u_E$  为风压高度变化系数;  $w_0$  为基本风压;  $A_0$  为结构迎风面积.  $S_f(\rho) = \frac{2x^2}{2\rho\omega(1+x^2)^{4/3}}, x = \frac{600\rho\omega}{\pi v} (10)$

$\bar{F} = \frac{1}{\mu} \mu_r \mu_t(z) \mu_s(z) \mu_z(z) w_0 A_0 \frac{\pi^4}{\omega^2 D m}$ . 则 CTD-结构系统响应的标准差可表示如下:

$$\begin{cases} \bar{\sigma}_{\dot{u}_t}^2 = \left( \frac{\sigma_{\dot{u}_t} \pi^4}{D \omega} \right) = \frac{1}{2\pi} \int_0^\infty \rho^2 S_{u_t u_t} d\rho \\ \bar{\sigma}_{\dot{u}}^2 = \left( \frac{\sigma_{\dot{u}} \pi^4}{D \omega^2} \right) = \frac{1}{2\pi} \int_0^\infty \rho^4 S_{u u} d\rho \end{cases} \quad (11)$$

因为功率谱密度  $S_{u u}$ ,  $S_{u_t u_t}$  都是  $\bar{\sigma}_{\dot{u}_t}$  的函数,因此首先需要 对式(11)采用反复迭代的方法进行求解.

## 2.2 阻尼器参数分析

### 2.2.1 CTD 参数敏感性分析

阻尼器作用效果可通过有控结构响应与无控结构响应比值体现,比值越小,作用效果越好.当响应为加速度标准差时记为  $\bar{\sigma}_{\ddot{u}_r}$ ,即

$$\bar{\sigma}_{\ddot{u}_r} = \left\{ \frac{\int_0^\infty \rho^4 \bar{F}^2 S_f(\rho) |H|^2 d\rho}{\int_0^\infty \rho^4 \bar{F}^2 S_f(\rho) \left[ \frac{1}{(1-\rho^2)^2 + (2\rho\xi)^2} \right] d\rho} \right\}^{1/2} \quad (12)$$

由公式(15)可以看出  $\bar{\sigma}_{\ddot{u}_r}$  是  $\omega, \bar{m}_t, \bar{m}_d, f_t, f_d, \alpha, \xi, \xi_d, \delta$  和  $\bar{F}$  的函数,可表示如下:

$$\bar{\sigma}_{\ddot{u}_r} = G(\omega, \bar{m}_t, \bar{m}_d, f_t, f_d, \alpha, \xi, \xi_d, \delta, \bar{F}) \quad (13)$$

根据文献[5]的建议,顶部装有大质量块的塔体结构基频周期可表示为

$$T_t = 2\pi/\omega = z/30 \quad (14)$$

而框架结构的基频周期可表示为

$$T_t = h^2 / (750(w_b + w_t)) \quad (15)$$

式中:  $T_t$  为结构周期(s);  $z$  为质点距地基高度(m);  $h$  为结构高度;  $w_b$  和  $w_t$  分别是结构基础和顶部的宽度.取结构的密度为  $\rho_t = 4\,000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ,  $\rho_0 = 1.2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ,  $w_0 = 0.3 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-2}$ ,  $\bar{v}(10) = 29.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $\alpha_1 = 0.22$ ,  $H_T = 450 \text{ m}$ ,  $\mu = 2.5$ , 对于公式(17)则有:

$$\omega = \frac{188.5}{z}, \mu_t(z) = 0.5 \times 35^{1.8 < \alpha_1 - 0.16 >} \left( \frac{z}{10} \right)^{-\alpha_1} =$$

$$\frac{1.22}{z^{0.22}} = 0.39\omega^{0.22}, \mu_s(z) = 1.3, \mu_z(z) = \left( \frac{z}{H_T} \right)^{2\alpha} \times$$

$$35^{0.32} \approx 3.12 \left( \frac{z}{H_T} \right)^{2\alpha} = \frac{2.13}{\omega^{0.44}}, \bar{F} = \frac{1}{\mu} \mu_t(z) \mu_s(z) \mu_z(z)$$

$$(z) \cdot w_0 A_0 \frac{\pi^4}{\omega^2 D m} = \frac{16}{\omega^{2.22} D^2};$$
 对于式(18)可以得到

相似结果.此时,式(15)可简化为

$$\bar{\sigma}_{\ddot{u}_r} = G(f, D, \xi; \bar{m}_t, f_t, \alpha, \delta; \bar{m}_d, f_d, \xi_d) \quad (16)$$

现取结构参数  $D = 60 \text{ m}$ ,  $\omega = 0.1 \times 2\pi \text{ s}^{-1}$ ,  $\xi = 0.01$  和 TMD 参数  $\bar{m}_d = 0.01$ ,  $f_d = 1.00$ , TLCD 参数  $f_t, \alpha, \bar{m}_t$  对  $\bar{\sigma}_{\ddot{u}_r}$  和  $\bar{\sigma}_w$  影响如图 4~图 8 所示.由图 4 可见对于给定的水头损失系数( $\delta > 27$ ),  $f_t = 1$  时加

速度减振效果最佳;对于最佳的减振效果,存在一个最优的水头损失系数;当 CTD 不能充分调谐时(如  $f_t = 0.95$  或  $f_t = 1.05$ ),可以通过调节水头损失系数使得减振效果达到最优.当水头损失系数小于 27,  $f_t = 1$  时加速度减振效果最差,并且随着水头损失系数增大,减振效果增加,这可能是由于水头损失过小时 CTD 中的 TLCD 不能充分发挥作用,导致  $f_t = 1$  时 TLCD 的减振效果与不能充分调谐时(如  $f_t = 0.95$  或  $f_t = 1.05$ )相比效果更差.由图 5 和图 6 可以看出,为了提高 CTD 的减振效果,可选择较大的长度系数( $\alpha$ )和质量比( $\bar{m}_t$ );当  $\alpha$  和  $\bar{m}_t$  确定后,可通过调节水头损失系数控制 CTD 减振效果.图 7 给出了不同频率结构加速度减振效果最佳时的水头损失系数,可以看出取不同  $\alpha$  时水头损失系数可能是相同的;随着结构的增加,所对应的水头损失系数是减小的,这表明最优水头损失系数随着结构高度增加而增大.图 8 给出了最优水头损失下的加速度减振效果,可以看出最优水头损失系数对应的减振效果随着  $\alpha$  的增大而增大,最大的减振效果可接近 50%;对

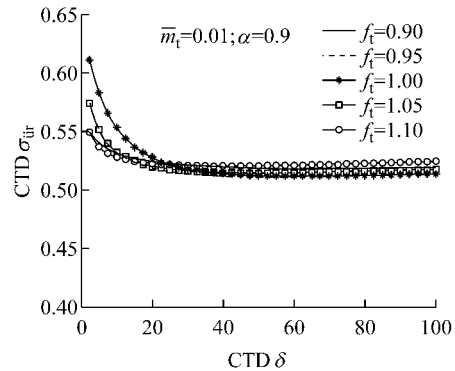


图 4 不同频率比下水头损失系数对加速度减振影响  
Fig.4 Influence of the head loss on the reduction in acceleration with different  $f_t$

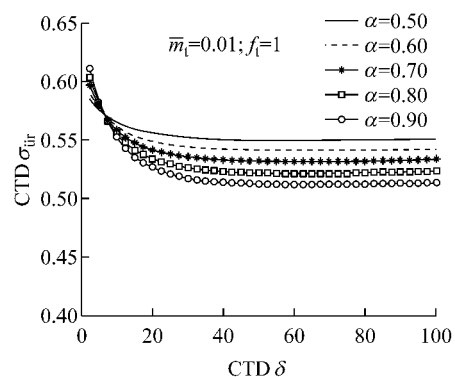


图 5 不同长度系数下水头损失系数对加速度减振影响  
Fig.5 Influence of the head loss on the reduction in acceleration with different  $\alpha$

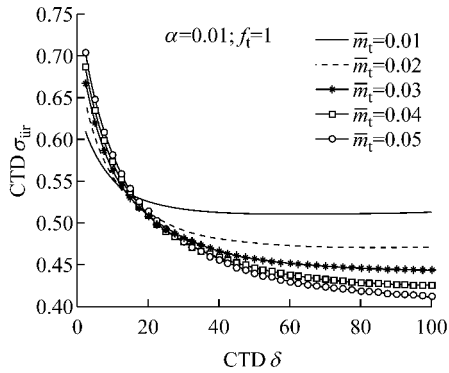


图 6 不同质量比下水头损失系数对加速度减振影响  
Fig.6 Influence of the head loss on the reduction in acceleration with different  $\bar{m}_t$

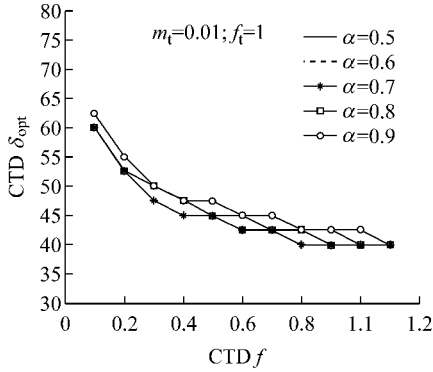


图 7 加速度减振最优水头损失系数 ( $f_t = 1, m_t = 0.01$ )  
Fig.7 Optimal head loss for the maximum reduction in acceleration for  $f_t = 1.0$  and  $m_t = 0.01$

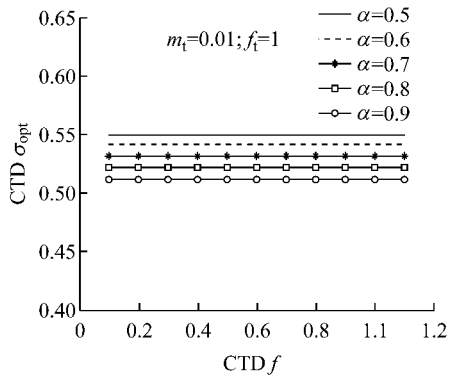


图 8 最优水头损失下加速度减振效果  
Fig.8 Reduction in acceleration corresponding to the optimal head loss for  $f_t = 1$  and  $m_t = 0.01$

于同一  $\alpha$ , CTD 对不同频率结构的加速度减振效果是相同的。

取结构参数  $D=60 \text{ m}$ ,  $f=0.1 \text{ s}^{-1}$ ,  $\xi=0.01$  和 TLCD 参数  $\bar{m}_t=0.01$ ,  $f_t=1.00$ ,  $\alpha=0.9$ , TMD 参数  $f_d, \xi_d, \bar{m}_d$  对  $\bar{\sigma}_{ir}$  影响如图 9~图 11 所示。图 9 表明对于给定的阻尼比  $\xi_d, f_d=1$  时加速度减振效果最

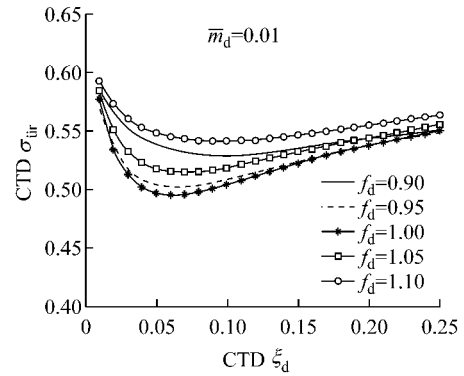


图 9 不同频率比下阻尼比对加速度减振影响  
Fig.9 Influence of the damping ratio of the TMD on the reduction in acceleration with different  $f_d$

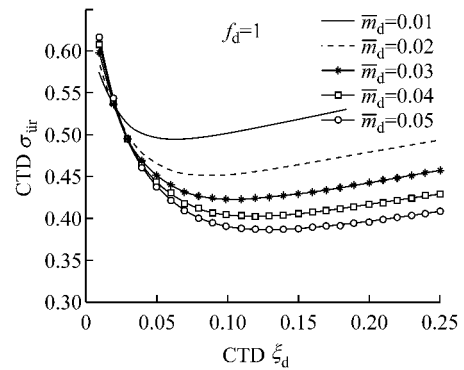


图 10 不同质量比下阻尼比对加速度减振影响  
Fig.10 Influence of the damping ratio of the TMD on the reduction in acceleration with different  $\bar{m}_d$

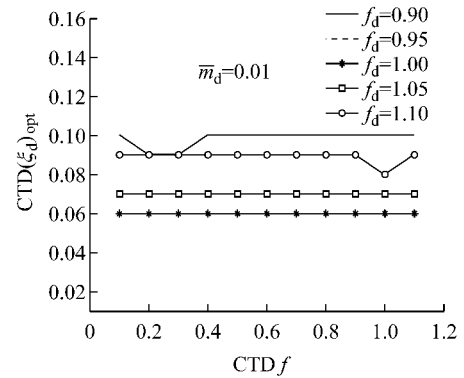


图 11 加速度减振最优阻尼比  
Fig.11 Optimal damping ratio of the TMD for the maximum reduction in acceleration for  $m_d = 0.01$

佳;对于最佳的减振效果,存在一个最优的水头损失系数;当 CTD 不能充分调谐时(如  $f_d=0.95$  或  $f_d=1.05$ ),可以通过调节阻尼比使得减振效果达到最优。由图 10 可以看出为了提高 CTD 的减振效果,可选择较大的质量比( $\bar{m}_d$ );当  $\bar{m}_d$  确定后,可通过调节阻尼比控制 CTD 减振效果。图 11 给出了不同频率结构加速度减振效果最佳时的频率比,可以看出取不同  $f_d$  时水头损失系数可能是相同的;对于同一

$f_d$ ,CTD对不同频率结构的最优频率比是相同的.图 12 给出了不同频率结构最优阻尼比下的加速度减振效果,可以看出  $f_d=1$  时最优阻尼比下的减振效果最佳,最大的减振效果超过 50%;对于同一  $f_d$ ,CTD对不同频率结构的加速度减振效果基本相同.

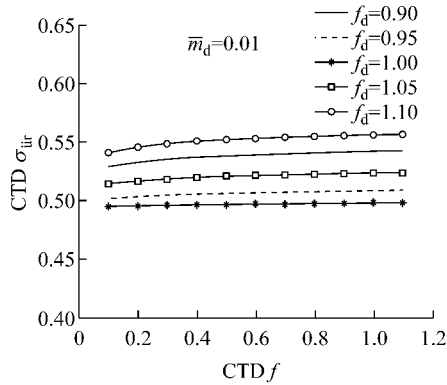


图 12 最优阻尼比下加速度减振效果

Fig. 12 Reduction in acceleration corresponding to the damping ratio of the TMD for  $\bar{m}_d = 0.01$

### 2.2.2 CTD 与 TMD/TLCD 作用效果对比

为了对 CTD, TLCD 和 TMD 性能进行比较,取参数为 CTD: $\bar{m}_i = 0.01, f_i = 1.00, \alpha = 0.9, m_d = 0.01, f_d = 1.00$ ; TLCD: $\bar{m}_i = 0.02, f_i = 1.00, \alpha = 0.9$ ; TMD: $m_d = 0.02, f_d = 1.00$  进行分析(未定参数  $\delta, \xi_d$  均通过编程实现最优值),三种阻尼器的减振性能如图 13 所示.可以看出单质点案例中,对于特定的阻尼器,不同频率的结构减振效果相同;对于不同的阻尼器,质量比相同时减振效果并不相同:TMD 减振效果最佳,TLCD 减振效果最差,CTD 减振效果介于二者之间.

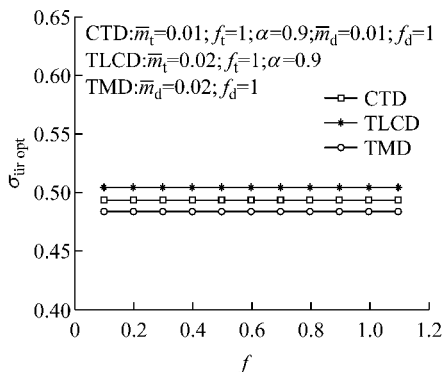


图 13 最优参数下加速度减振效果对比

Fig. 13 Comparison of acceleration reduction with optimal parameters

### 2.3 CTD 协同损失分析

从 CTD 的工作原理可知其包括的 TMD 和 TLCD 均直接控制结构的振动,二者相互独立,并不

藕联,但因二者同时对主体结构起作用,主体结构振动状态的改变,会引起二者减振效率的降低.因此,虽然 CTD 中 TMD 和 TLCD 相互独立,却因二者同时作用于同一结构而产生相互影响(如图 14 示意).为便于分析,将这种由结构的受控引起的 CTD 减振效率的损失定义协同损失因子:

$$\gamma(f, D, \xi; \bar{m}_i, f_i, \alpha, \delta; \bar{m}_d, f_d, \xi_d) = 1 - \frac{\chi_{TMD} \chi_{TLCD}}{\chi_{CTD}} \quad (17)$$

公式中: $\chi_{CTD}, \chi_{TMD}, \chi_{TLCD}$  分别为 CTD, TMD 和 TLCD 作用下结构响应指标(加速度、位移、动力放大系数等)与无控结构指标的比值; $\gamma$  为协同损失因子.从前文分析可知, $\gamma$  是  $f, D, \xi; \bar{m}_i, f_i, \alpha, \delta; \bar{m}_d, f_d, \xi_d$  的函数.

图 15 给出的是 CTD(参数为  $\bar{m}_i = 0.01, f_i = 1.00, \alpha = 0.9, \bar{m}_d = 0.01, f_d = 1.00$ )及其内部组员 TLCD( $\bar{m}_i = 0.01, f_i = 1.00, \alpha = 0.9$ )和 TMD( $\bar{m}_d = 0.02, f_d = 1.00$ )单独作用时的作用效果比较,可以看出 CTD 减振效率较其内部组员 TMD, TLCD 单独作用时减振效率高.图 16 给出了图 15

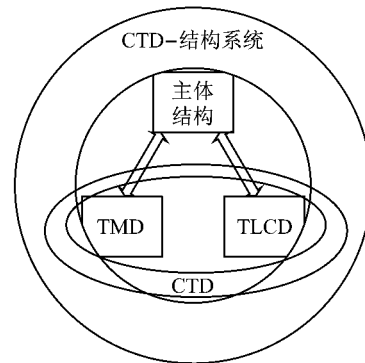


图 14 CTD-结构系统相互关系

Fig. 14 Relationship in the CTD-structure system

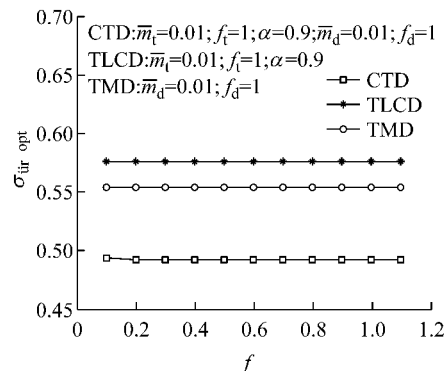


图 15 CTD 及其组员 TLCD/TMD 加速度减振效果

Fig. 15 Acceleration reduction of CTD and the included TLCD and TMD

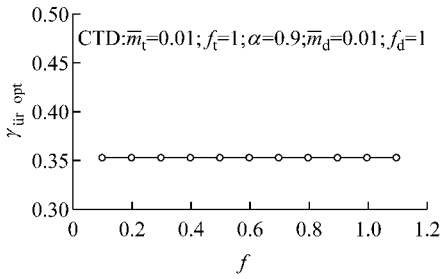


图 16 CTD 加速度协同损失因子

Fig. 16 Collaborative loss coefficient of acceleration for CTD-structure system

所示 CTD 参数配置下的减振效果,此时不同频率结构对应的协同损失因子均为 0.35.

### 2.3 CTD 设置方法

CTD 的设计步骤为:①由式(4)计算无控结构的各自振频率及标准化广义振型;②选取结构欲控制的振型,将 CTD 中 TMD, TLCD 的自振频率调谐到结构控制振型所相应的频率(即  $f_d=1$ (或  $f_d=\chi_{opt}$ ,  $\chi_{opt}$  为最优值)和  $f_t=1$ (或  $f_t=\chi_{opt}$ );③根据结构特点、消防要求及业主要求等选取 CTD 中各阻尼器位置;④根据欲控振型和实际情况确定质量比:  $\bar{m}_t$  根据结构特点和消防要求确定,  $\bar{m}_d$  根据舒适度要求确定,初步确定各个相关参数;⑤确定 CTD 的最优参数;⑥对配置 CTD 后的结构体系进行舒适度验算,若不满足控制指标或安全储备过大,则返回步骤④;⑦根据选取参数进行 CTD 构造设置.

## 3 结构风荷载随机响应计算

由于风荷载的随机过程特性,结构在风荷载下的响应可以利用其响应功率谱密度来描述,通过荷载的功率谱经过频响函数等方法求得.而对于可能存在的振型密集或具有非线性阻尼的随机振动分析,可采用虚拟激励法<sup>[6]</sup>计算.

结构顺风向振动是由脉动风引起的.一般可将脉动风用具有零均值的高斯平稳随机过程来表达.结构顺风向风荷载功率谱密度通常可采用 Davenport 谱和 Harris 谱等,考虑脉动风的相关性可获得结构顺风向风荷载谱.通过随机振动结果分析,便可获得结构响应的功率密度谱,进而可求得结构顺风向的均方差.随着建筑结构物高度不断增加,结构的横风向效应愈加明显,甚至会超过顺风向风荷载成为结构抗风设计的控制荷载<sup>[7]</sup>.目前广泛采用基底高频测力天平进行相关研究,基于结构一阶振型为线性的假定求得结构的横风向气动力谱<sup>[7]</sup>.同

济大学全涌、顾明等采用高频测力天平技术拟合出了 4 种不同风场、15 种不同外形的超高层建筑横风向力谱,并给出了闭合公式<sup>[8]</sup>.与顺风向同理可得到横风向响应的均方差.对于某些外形变化较大的建筑在风载作用下还会产生扭转振动,结构的扭转振动是由于迎风和背风面及侧面风压的不对称所致,与紊流及尾流激励有关.当结构质点和刚度中心偏离时,弯曲振型与扭转振型出现耦合,结构响应与单一方向的响应有很大差别,表现为复杂的空间运动形式.因此这类建筑已考虑结构扭转效应的影响,其计算方法可参考文献<sup>[9]</sup>.

采用 CTD 对超高层的风振进行控制时,由于 CTD 系统和主结构的耦合作用,结构动力方程中质量及刚度矩阵为非对称矩阵,阻尼矩阵也为非经典正交阻尼矩阵.对于这种问题,可采用文献[6]提出的虚拟激励法等进行解决.

## 4 算例

某 141 层建筑功能为集商业、办公以及酒店为一体的综合性超高层建筑,结构高度为 600 m,截面尺寸  $B=D=69$  m,可根据文献[10]所示方法对原结构进行简化,原结构、简化后的质点串模型及相应的振动控制方案简图如图 17 所示.结构的阻尼比取为 2%,当地的风环境为:C 类地貌,10 年一遇的基本风压  $w_0$  为 0.30 kPa.拟对结构舒适度性能进行评估,并对上文提及的三种阻尼器减振效果进行比较.

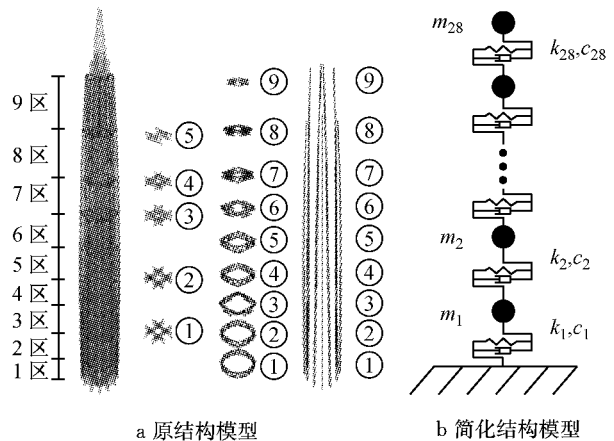


图 17 某超高层结构模型

Fig. 17 The model of a super tall building

### 4.1 风载作用下结构响应求解

以 10 年一遇的基本风压 0.3 kPa 为例,其所对应的基本风速为  $21.91 \text{ ms}^{-1}$ .运用虚拟激励法求解结构响应,结构各质点的加速度响应标准差如图 18

~图 19 所示,可以看出,主体结构在横风向的响应要大于其顺风向响应.需要指出的是,在计算横风向结构响应时,由于采用的是基底高频测力天平的相关结果,其是基于建筑物 1 阶振型近似为线性的假设,得到作用在建筑物上的广义 1 阶力谱,因此其结构响应为在竖向上也表现为近似线性.而在顺风向计算时,考虑了所有参振振型,结构的 1 阶振型呈弯剪型.

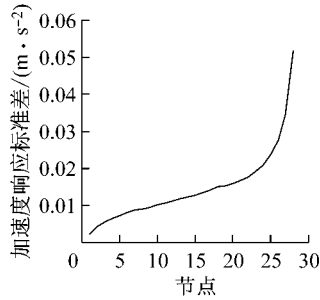


图 18 结构顺风向加速度响应均方差

Fig. 18 Acceleration response under along-wind load

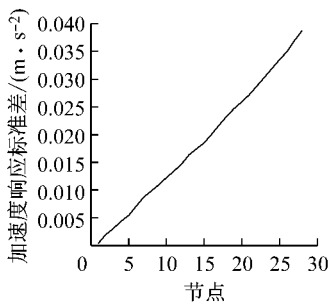


图 19 结构横风向加速度响应均方差

Fig. 19 Acceleration response under across-wind load

#### 4.2 TMD 和 TLCD 减振效果分析

合理布置阻尼器能够有效降低结构的响应加速度,进而提高结构的舒适度,阻尼器的作用效果可以通过减振系数表示.定义结构加速度响应均方差的减振系数  $\eta$ ,如下:

$$\eta = 1 - \frac{\sigma_{ur}}{\sigma_{ur}^{\text{damper}}} = \frac{\sigma_{ur} - \sigma_{ur}^{\text{damper}}}{\sigma_{ur}} = 1 - \frac{\xi_{sa}}{\xi_e} \quad (18)$$

式中: $\sigma_{ur}$ ,  $\sigma_{ur}^{\text{damper}}$  分别为无控结构和含阻尼器系统结构的加速度响应标准差; $\xi_{sa}$  为结构的自身阻尼  $\xi_s$  与结构气动阻尼  $\xi_a$  之和; $\xi_e$  为含阻尼器系统的结构等效阻尼比<sup>[11]</sup>.

由于该结构受横风向荷载控制,利用虚拟激励法求解结构在横风作用下的加速度响应,并进行数据处理得到 TMD 和 TLCD 的减振系数与参数的关系,如图 20 和图 21 所示.

#### 4.3 TMD, TLCD 与 CTD 减振效果比较

设置各阻尼器的质量比均为 0.01,具体参数为

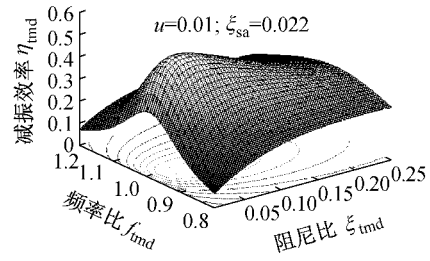


图 20 TMD 减振效率与频率比、阻尼比的关系

Fig. 20 Relationship amongst frequency ratio, damping ratio and vibration control efficiency of TMD

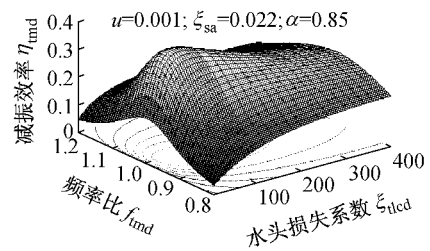


图 21 TLCD 减振效率与频率比、水头损失系数的关系

Fig. 21 Relationship amongst head loss coefficient, frequency ratio and vibration control efficiency of TLCD

CTD:  $\bar{m}_t=0.005, f_t=1.00, \alpha=0.85, \delta=60, m_d=0.005, f_d=1.00, \xi_d=0.053$ ; TLCD:  $\bar{m}_t=0.01, f_t=1.00, \alpha=0.9, \delta=60$ ; TMD:  $m_d=0.01, f_d=1.00, \xi_d=0.053$ . 分别求解配置三种阻尼器的时的结构响应,并比较三种阻尼器的减振系数.如图 22 和图 23 所示,结构在横风作用下的加速度响应为线性,同一种阻尼器作用下各楼层减振系数相同;不同阻尼器作用下结构减振系数不同, TMD 减振效果最佳, TLCD 减振效果最差, CTD 减振效果介于二者之间.

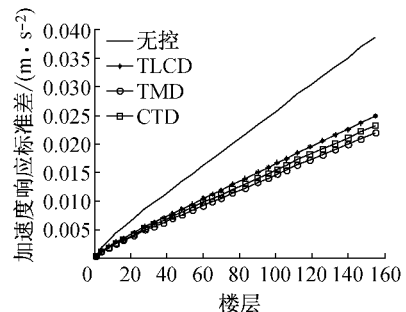


图 22 结构各节点加速度响应标准差

Fig. 22 Standard deviation of structural acceleration response

## 5 结论

通过对 CTD 的减振思想、工作原理及减振效率



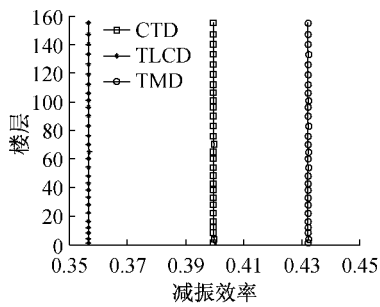


图 23 CTD, TMD 和 TLCD 减振效率比较

Fig. 23 Comparison of vibration control efficiency amongst CTD, TMD and TLCD

的分析,可得到以下结论:

(1)CTD 建立在充分结合利用 TMD 的高效性与 TLCD 的经济性的基础上;单质点案例最优参数配置下,质量比为 0.02 的 CTD 减振效率高达 50%;超高层案例最优参数配置下,质量比为 0.01 的 CTD 减振效率可达 40%;CTD 的减振效率介于相同参数配置的 TMD 和 TLCD 之间,是一种极具竞争力的减振手段;

(2)CTD-结构系统中,TMD 与 TLCD 运动不耦联,通过被作用结构相互影响.提出了评价该影响协同损失因子  $\gamma(f, D, \xi; \bar{m}_t, f_t, \alpha, \delta; \bar{m}_d, f_d, \xi_d) = 1 - \frac{\chi_{TMD}\chi_{TLCD}}{\chi_{CTD}}$ ,案例表明对加速度响应协同损失因子可达到 35%;

(3)CTD 的参数设置应根据结构特点和舒适度目标要求进行,提出了 CTD 配置的一般方法.

#### 参考文献:

- [1] Soto M G, Adeli H. Tuned mass dampers [J]. Archives Computational Methods in Engineering, 2013, 20:419.
- [2] Xu Y L, Samali B, Kwok K C S. Control of along-wind response of structures by mass and liquid dampers[J]. ASCE Journal of Engineering Mechanics, 1992, 118(1): 20.
- [3] 黄东阳. 调谐类阻尼器的性能改良研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2010.  
HUANG Dongyang. Research on performance improvement of tuned typed dampers [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010.
- [4] 兰文武. 调频液体阻尼器对高层建筑结构地震反应控制效果的研究[D]. 广州:华南理工大学,1995.  
LAN Wenwu. Study of earthquake-induced vibration control for tall buildings by tuned liquid damper[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 1995.
- [5] Balendra T, Wang C M, Cheong H F. Effectiveness of tuned liquid column dampers for vibration control of towers [J]. Engineering Structures, 1995, 17(9):668.
- [6] 林家浩, 张亚辉. 随机振动的虚拟激励法[M]. 北京:科学出版社,2004.  
LIN Jiahao, ZHANG Yahui. Pseudo-excitation method for random vibration[M]. Beijing: Science Press, 2004.
- [7] 全涌, 曹会兰, 顾明. 高层建筑横风向风效应研究综述[J]. 同济大学学报:自然科学版, 2010, 38(6): 810.  
QUAN Yong, CAO Huilan, GU Ming. Cross-wind effect of high-rise buildings: state of art [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2010, 38(6): 810.
- [8] 全涌, 顾明. 超高层建筑横风向气动谱[J]. 同济大学学报:自然科学版, 2002, 30(5): 627.  
QUAN Yong, GU Ming. Power spectra of across-wind loads on super high-rise buildings [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2002, 30(5): 627.
- [9] 唐意, 顾明, 金新阳. 偏心超高层建筑的风振研究[J]. 同济大学学报:自然科学版, 2010, 38(2): 178.  
TANG Yi, GU Ming, JIN Xinyang. Research on wind-induced response of structurally asymmetric tall buildings [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2010, 38(2): 178.
- [10] 刘彬, 丁桦, 时忠民. 基于柔度修正的局部刚体化结构动力模型简化方法[J]. 工程力学, 2007, 24(10): 25.  
LIU Bin, DING Hua, SHI Zhongmin. A model reduction method for dynamic analysis based on quasi-rigid-body mode and flexibility modification [J]. Engineering Mechanics, 2007, 24(10): 25.
- [11] 瞿伟廉, 陶牟华. 五种被动动力减振器对高层建筑脉动风振反应控制的实用设计方法[J]. 建筑结构学报, 2004, 22(2): 29.  
QU Weilian, TAO Muhua. Practical design method for effect of five kinds of passive dynamic absorbers on fluctuation wind-induced vibration response control of tall buildings [J]. Journal of Building Structures, 2004, 22(2): 29.