

文章编号: 1006-4710(2013)01-0027-05

# 填充墙 MTMD 减震结构优化参数分析

卢俊龙<sup>1</sup>, 何明胜<sup>2</sup>, 田洁<sup>1</sup>

(1. 西安理工大学 土木建筑工程学院, 陕西 西安 710048; 2. 石河子大学 水利建筑工程学院, 新疆 石河子 832003)

**摘要:** 以框架填充墙结构中的填充墙作为 TMD 系统中的质量块, 通过在结构中布置多个填充墙 TMD 形成 MTMD 减震系统。为了研究该新型减震结构中 TMD 布置及连接参数的设计方法, 基于结构受控振型及 MTMD 系统固有频率线性分布的假定, 建立了填充墙 MTMD 结构的理论分析模型, 由积分变换给出了传递函数。通过传递函数分析, 给出填充墙 MTMD 结构中 TMD 的连接参数的计算方法。针对优化设计目标, 设计了结构振动台试验的模型试件, 振动台试验研究结果表明, 结构设计参数优化后, 减震效果较为显著。

**关键词:** 填充墙 MTMD 结构; 减震性能; 地震反应分析; 参数优化

中图分类号: TU311.3

文献标志码: A

## The Parameter Analysis of Vibration Attenuation Structure Optimization of In-Filled Wall MTMD

LU Junlong<sup>1</sup>, HE Mingsheng<sup>2</sup>, TIAN Jie<sup>1</sup>

(1. Faculty of Civil Engineering and Architecture, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

2. College of Water Conservancy and Architectural Engineering, Shihezi University, Shihezi 832003, China)

**Abstract:** In the structures the in-filled walls are taken as mass blocks in Turned Mass Damper(TMD) systems. Several in-filled wall TMD devices are settled in structures so that the MTMD(Multi Turned Mass Damper) vibration absorption structures are formed. In order to study the location of TMD and design method of connection parameters, the theoretical analysis model of in-filled wall MTMD structure is established based on the controlled vibration type and the assumption of the inherent natural frequency linear distribution. And then the transfer function is given by integral transform. By analysis of the transfer function, the calculation method for the connection parameters of TMD in in-filled wall MTMD structures is obtained. With the aim of viewing the optimum design objective the shake-table test model is designed. The results of shake-table test indicate that the vibration absorption effect is remarkable after the structure design parameters are optimized.

**Key words:** in-filled wall MTMD structure; vibration attenuation performance; analysis of seismic response; parameter optimization

TMD 调谐减震技术是土木工程结构中常用的一种减震技术。在地震作用下, 结构的动力参数将产生摄动, 使 TMD 系统的固有频率与结构受控频率的调谐产生漂移, 影响 TMD 的控制效果。为了提高 TMD 的振动控制作用, 相关研究提出了具有分布频率的多重调谐质量阻尼器 MTMD (Multiple Tuned

Mass Damper), 并就 MTMD 系统在多种激励下的动力性能进行了研究<sup>[1-3]</sup>。目前, TMD 及 MTMD 调谐减震技术在工程中均有一定的应用, 部分结构还经历过地震的考验, 其减震及控震的有效性得到了验证<sup>[2-4]</sup>。然而, 相关研究中采用的 TMD 减震结构中, 需要将特定的调谐质量块与主结构通过阻尼器连接

收稿日期: 2012-06-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50868011, 51078310), 陕西省教育厅专项科研计划资助项目(12JK0908)。

作者简介: 卢俊龙, 男, 博士, 讲师, 研究方向为工程结构防震减灾。E-mail: lujunlong@sohu.com。

形成 TMD 系统,结构构造较为复杂,且会增加结构造价。同时,传统的 TMD 调谐减震结构中一般将调谐质量块设置于结构顶部,以控制结构第 1 阶主振型为目的,而地震作用下结构的振动大多受到高阶振型的影响,设置 TMD 后的减震作用不够显著<sup>[5-7]</sup>。为此,本文提出一种新型调谐减震技术——填充墙 MTMD 减震结构。

填充墙 MTMD 减震结构的主要特点是将传统建筑结构中不参与结构受力的填充墙与主体承重结构分离,二者通过阻尼器与抗压件连接(如图 1 所示)。其中,主结构为主要的竖向和水平受力构件,填充墙不仅具有填充建筑物的功能,同时作为 TMD 系统中的质量块,与消能减振装置有机结合起来,形成 TMD 系统以耗散地震能量。

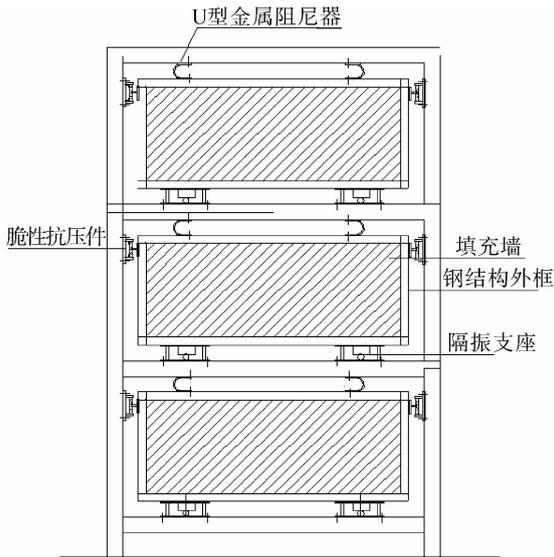


图 1 填充墙 MTMD 结构构造

Fig. 1 Construction of in-filled wall MTMD structure

同时,为了防止地震作用下 TMD 质量块发生出平面破坏,在隔震支座两侧设置出平面限位钢筋或钢板,且使限位元件与隔震支座最小净距不小于 5 mm,高度不小于框架梁与 TMD 外框间距的 1/5,且不小于 8 mm。由于 U 型金属阻尼器具有较强的平面外抗拉能力,可保证填充墙 TMD 在小震及大震时均不会发生墙体出平面破坏。

在填充墙 TMD 减震结构系统中,各层填充墙均可作为 TMD 质量块,形成 MTMD 系统,与传统 TMD 及 MTMD 减震结构相比,不需另外设置调谐质量阻尼器,且各填充墙 TMD 可以灵活布置,具有更显著的质量调频作用,减震控制效果明显。

为了研究填充墙 MTMD 减震结构的参数优化设计方法,达到最优的减震效果,通过建立结构的动力方程,推导其传递函数,以振动频率为依据研究

TMD 的相关设计参数,并通过振动台试验分析结构的减震性能,验证相关参数的合理性,为填充墙 MTMD 结构的优化设计提供参考。

## 1 填充墙 MTMD 减震结构动力分析

### 1.1 分析模型及动力方程

若将一设置  $n$  个 TMD 的填充墙 MTMD 减震系统中的主结构简化为一单自由度体系,并做如下假定:

- 1) 结构的受控振型为单振型;
- 2) MTMD 系统的固有频率呈线性均匀分布。

建立如图 2 所示的计算模型,则填充墙 MTMD 系统的动力方程为:

$$M_s \ddot{x}_s + C_s \dot{x}_s + K_s x_s = -M_s \ddot{x}_g +$$

$$\sum_{i=1}^n (C_{di} \dot{x}_{di} + K_{di} x_{di}) \quad (1)$$

$$M_{di} [\ddot{x}_g + \ddot{x}_{di}] + C_{di} \dot{x}_{di} + K_{di} x_{di} = 0 \quad (2)$$

式中  $M_s$ 、 $K_s$ 、 $C_s$  分别为主结构的质量矩阵、刚度矩阵和阻尼矩阵,  $x_s$  为主结构相对于地面的位移向量;  $M_{di}$ 、 $K_{di}$ 、 $C_{di}$  分别为 TMD 的质量矩阵、刚度矩阵和阻尼矩阵,  $x_{di}$  为第  $i$  个填充墙 TMD 相对于主结构的位移向量;  $\ddot{x}_g$  为地面运动加速度。

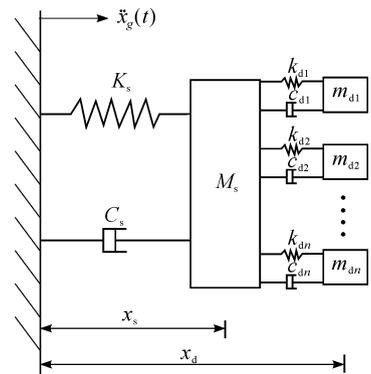


图 2 填充墙 MTMD 结构的计算模型

Fig. 2 Calculation model of in-filled wall MTMD structure

### 1.2 传递函数

若定义  $m_s$ 、 $k_s$ 、 $c_s$  分别为主结构的质量、刚度系数、阻尼系数,  $m_{di}$ 、 $k_{di}$ 、 $c_{di}$  分别为第  $i$  个填充墙 TMD 的质量、刚度系数、阻尼系数,则结构的动力特性参数:  $\omega_s^2 = k_s/m_s$ ,  $\xi_s = c_s/(2\omega_s m_s)$ ,  $\omega_{di}^2 = k_{di}/m_{di}$ ,  $\xi_{di} = c_{di}/(2\omega_{di} m_{di})$ ,  $\mu_i = m_{di}/m_s$ 。

在简谐波  $x_g(t) = e^{-i\omega t}$  激励下,主结构的位移  $x_s = H_s e^{-i\omega t}$ ,第  $i$  个填充墙 TMD 的位移  $x_{di} = H_i e^{-i\omega t}$ ; 并定义结构系统的频率与主结构频率之比  $\lambda = \omega/\omega_s$ ,第  $i$  个填充墙 TMD 系统的频率与主结构频率

之比  $\zeta_i = \omega_{di}/\omega_s$ , 进行积分变换后, 给出填充墙 MTMD 结构的传递函数  $H_s$  为:

$$H_s = -\frac{1}{\omega_s^2} \frac{\bar{R}_e(\lambda) + i\bar{I}_m(\lambda)}{R_e(\lambda) + iI_m(\lambda)} \quad (3)$$

式中:

$$\bar{R}_e(\lambda) = 1 + \sum_{i=1}^n \frac{\mu_i(\zeta_i^4 - \zeta_i^2\lambda^2) + 4\xi_{di}^2\zeta_i^2\lambda^2}{(\zeta_i^2 - \lambda^2)^2 + 4\xi_{di}^2\zeta_i^2\lambda^2}$$

$$\bar{I}_m(\lambda) = \sum_{i=1}^n \frac{2\mu_i\xi_{di}^2\zeta_i\lambda^3}{(\zeta_i^2 - \lambda^2)^2 + 4\xi_{di}^2\zeta_i^2\lambda^2}$$

$$R_e(\lambda) = 1 - \lambda^2 - \lambda^2 \sum_{i=1}^n \frac{\mu_i(\zeta_i^4 - \zeta_i^2\lambda^2) + 4\xi_{di}^2\zeta_i^2\lambda^2}{(\zeta_i^2 - \lambda^2)^2 + 4\xi_{di}^2\zeta_i^2\lambda^2}$$

$$I_m(\lambda) = -2\xi_s\lambda - \sum_{i=1}^n \frac{2\mu_i\xi_{di}^2\zeta_i\lambda^5}{(\zeta_i^2 - \lambda^2)^2 + 4\xi_{di}^2\zeta_i^2\lambda^2}$$

由传递函数的表达式可见, 影响填充墙 MTMD 结构动力响应的参数主要为 TMD 系统与主结构的质量比、刚度比、阻尼比, 在确定结构的最优参数时, 应重点就填充墙 TMD 的质量及其与主结构的连接刚度及阻尼参数进行设计。

## 2 填充墙 MTMD 系统优化设计分析

### 2.1 设计参数分析

若假设各填充墙 TMD 的振动频率  $\omega_{di}$  均与主结构自振频率较为接近, 则 MTMD 的平均频率为:

$$\omega_T = \frac{\sum_{i=1}^n \omega_i}{n} \quad (4)$$

式中,  $\omega_T$  为各 TMD 的平均频率,  $n$  为填充墙 MTMD 系统中 TMD 的个数。

并定义 MTMD 系统的控制频带宽度  $\beta$  表示如下:

$$\beta = \frac{\omega_n - \omega_1}{\omega_T} \quad (5)$$

式中,  $\omega_1$  为结构第 1 阶振型频率,  $\omega_n$  为结构第  $n$  阶振型频率。

则第  $i$  个 TMD 的固有频率  $\omega_{di}$  可表示为:

$$\omega_{di} = \omega_T \left[ 1 + \left( i - \frac{n+1}{2} \right) \frac{\beta}{n-1} \right] \quad (6)$$

若定义 MTMD 系统的调谐比  $f = \omega_T/\omega_s$ , 总质量

比  $\mu = (\sum_{i=1}^n m_i)/m_s$ , 平均阻尼比  $\xi_T = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \xi_i$ , 则填充墙 TMD 的受控频率比  $r_i$  为:

$$r_i = \frac{\omega_i}{\omega_s} = f \left[ 1 + \left( i - \frac{n+1}{2} \right) \frac{\beta}{n-1} \right] \quad (7)$$

式中,  $\omega_i$  为第  $i$  个填充 TMD 的频率,  $\omega_s$  为结构受控频率。

此时, 第  $i$  个 TMD 的刚度和阻尼系数分别为:

$$k_i = m_i \omega_s^2 (f^{opt})^2 \left[ 1 + \left( i - \frac{n+1}{2} \right) \frac{\beta^{opt}}{n-1} \right]^2 \quad (8)$$

$$c_i = 2m_i \xi_T^{opt} \omega_s (f^{opt})^2 \left[ 1 + \left( i - \frac{n+1}{2} \right) \frac{\beta^{opt}}{n-1} \right] \quad (9)$$

式中,  $m_i$  为第  $i$  个填充墙 TMD 的质量,  $f^{opt}$  为最优控制目标频率,  $\beta^{opt}$  为最优频带宽度,  $\xi_T^{opt}$  为最优阻尼比。

### 2.2 参数优化方法

由结构的功能要求可知, 结构振动控制的目标可分为两类: 一类从结构的使用空间和允许的顶点最大绝对位移及最大层间位移等因素出发, 控制结构在地震作用下的最大位移; 另一类则从结构的正常使用功能或构件的强度等因素出发控制结构的最大速度、最大加速度。

本文中以填充墙 MTMD 减震结构的最大绝对位移及最大层间位移为目标, 采用多个 TMD 的频率以结构被控振型频率为中心, 按一定频率带宽分布进行优化设计, 具体设计步骤如下:

- 1) 确定主要受控振型, 计算相应的振动频率;
- 2) 计算受控振型广义质量;
- 3) 依据质量比确定结构体系中各填充墙 TMD 的质量及连接刚度。

## 3 实例分析

### 3.1 模型设计

拟以第 1 阶振型为控制振型, 应用 SAP2000 结构计算软件, 计算出主结构框架的第 1 阶频率为 3.98 rad/s。填充墙质量块与主结构以 U 形带片金属阻尼器连接, 单个 2 mm 厚的阻尼器刚度为 130 N/m, 单个 3 mm 厚的阻尼器刚度为 140 N/m, 二者并联后刚度为 270 N/m, 分别计算以 2 mm 厚、3 mm 厚及二者并联时 U 形金属阻尼器连接时 TMD 的振动基频分别为: 1.11 rad/s、1.15 rad/s、1.60 rad/s, 则由式(5)计算控制频带宽度  $\beta$  为 0.38, 调谐比  $f$  为 0.32, 且由式(8)计算出此时阻尼器的连接刚度分别为 223 N/m 和 405 N/m, 可见, 仅当两种阻尼器并联时的刚度与之接近, 此时能够获得较理想的减震效果。

为了验证填充墙 MTMD 结构的减震性能, 进行 1/3 比例模型试验, 为使模型试件能够进行多次试验且不发生损伤, 同时考虑振动台最大载重量要求, 如图 3 所示, 主结构采用 3 层单跨钢框架, 以型钢构件焊接而成, 平面尺寸为 1.67 m × 1.78 m, 层高为 1 m, 总高为 3 m。构件截面尺寸如下: 框架柱 HW100 × 100 × 6 × 8, 框架梁 HW150 × 75 × 5 × 7, 材料均为

Q235 钢。质量块由实心粘土砖墙外包钢框格构成,砖墙厚 120 mm,外包框格以  $L50 \times 4$  角钢以连接板焊接构成,单块质量为 210 kg,U 形金属阻尼器的连接如图 4 所示。



图3 模型试件  
Fig.3 Test model

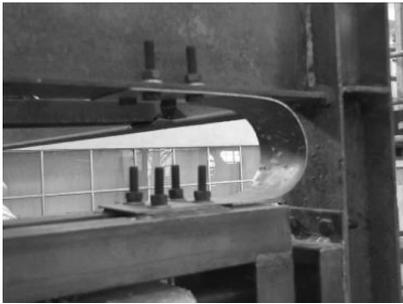


图4 U形金属阻尼器的连接  
Fig.4 Connection of U-shape damper

### 3.2 试验验证

#### 3.2.1 试验结果

进行振动台试验时,当输入 El-Centro 波的加速度峰值为  $100 \text{ cm/s}^2$  时,设置 3 mm 厚带片时柱顶的动力响应曲线与 El-Centro 波曲线基本一致;而设置 5 mm 厚带片时,因连接刚度增大,频率比随之增大,减震效果明显。当输入地震波的加速度峰值为  $200 \text{ cm/s}^2$  时,设置 5 mm 厚带片的响应均低于设置 3 mm 带片的地震反应,其中位移响应的最大降幅为 25.7%,加速度的降幅为 6.8%。

图 5 和图 6 分别为输入 El-Centro 波加速度峰值为  $400 \text{ cm/s}^2$  时,柱顶的位移与加速度响应。可以看出,设置 5 mm 厚金属阻尼器时柱顶的响应均低于设置 3 mm 厚带片时的响应,其中位移反应的最大降低幅度为 32.6%,加速度反应的降低幅度为 12.2%。

图 7 及图 8 为输入地震波加速度峰值为  $600 \text{ cm/s}^2$  时柱顶的动力响应。可见,设置 5 mm 厚带片时结构的地震反应仍低于 3 mm 厚时的地震反应,位移反应的最大降幅为 31.0%,加速度反应的降幅

为 11.3%。

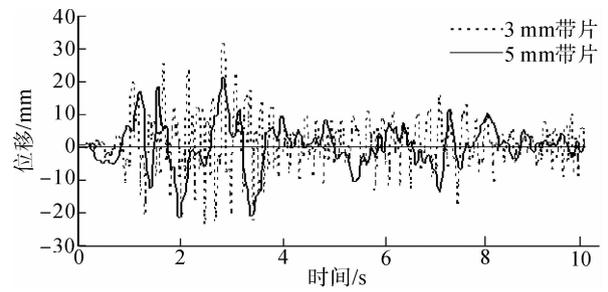


图5 加速度峰值为  $400 \text{ cm/s}^2$  时柱顶位移时程曲线  
Fig.5 Time-history curve of displacement at top of the pile under the acceleration peak value in  $400 \text{ cm/s}^2$

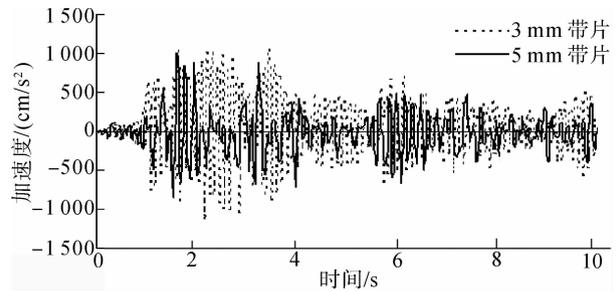


图6 加速度峰值为  $400 \text{ cm/s}^2$  时柱顶加速度时程曲线  
Fig.6 Time-history curve of acceleration at top of the pile under the acceleration peak value in  $400 \text{ cm/s}^2$

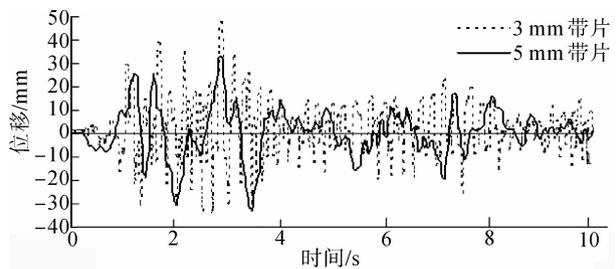


图7 加速度峰值为  $600 \text{ cm/s}^2$  时的柱顶位移时程曲线  
Fig.7 Time-history curve of displacement at top of the pile under the acceleration peak value in  $600 \text{ cm/s}^2$

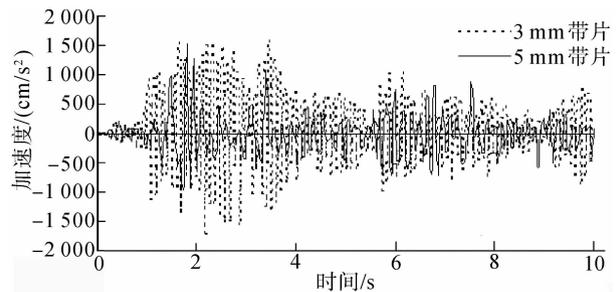


图8 加速度峰值为  $600 \text{ cm/s}^2$  时柱顶加速度时程曲线  
Fig.8 Time-history curve of acceleration at top of the pile under the acceleration peak value in  $600 \text{ cm/s}^2$

图 9 和图 10 为输入地震波加速度峰值为  $800 \text{ cm/s}^2$  时结构的动力响应,设置 5 mm 厚带片时结构

的位移反应最大降低幅度为 28.54%, 加速度反应的最大降幅为 23.18%。

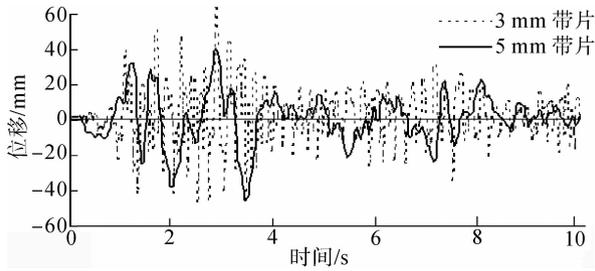


图9 加速度峰值为  $800 \text{ cm/s}^2$  时柱顶位移时程曲线  
Fig.9 Time-history curve of displacement at top of the pile under the acceleration peak value in  $800 \text{ cm/s}^2$

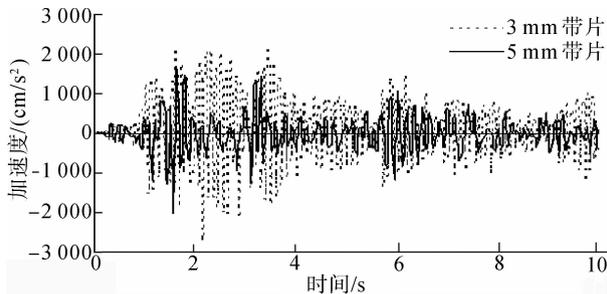


图10 加速度峰值为  $800 \text{ cm/s}^2$  时柱顶加速度时程曲线  
Fig.10 Time-history curve of acceleration at top of the pile under the acceleration peak value in  $800 \text{ cm/s}^2$

输入不同加速度峰值 El-Centro 波时, 比较设置 3 mm 厚金属阻尼器与 5 mm 厚金属阻尼器框架柱顶最大位移及加速度响应可见, 布置不同刚度的阻尼器时, 子结构与结构系统的刚度比发生变化, 对应不同的频率比, 其减震效果随之改变。当设置 5 mm 厚 U 形金属阻尼器 (子结构与主结构频率比为 0.408) 时, 其地震响应远小于设置 3 mm 厚 U 形金属阻尼器 (频率比为 0.294) 时的地震响应。其中, 当输入地震波峰值为  $400 \text{ cm/s}^2$  时, 位移反应降幅最大, 降幅为 32.6%; 而当输入地震波峰值为  $800 \text{ cm/s}^2$  时, 加速度反应降幅最大, 降幅达 23.2%。

### 3.2.2 减震效果分析

通过上述对比分析可知, 输入地震波加速度峰值较小时, 不同频率比条件下结构动力响应变化不大, 减震率比较接近。随着输入地震波加速度峰值的增加, 频率比越大, 对应的减震率亦增大。因此, 若在最优频率比条件下, 填充墙 TMD 的减震作用在大震时更加明显。

## 4 结论

1) 简谐地震动激励条件下, 填充墙 MTMD 结构传递函数的影响参数有主子结构的刚度比、阻尼比、质量比;

2) 给出了各填充墙 TMD 系统频率与主结构频率接近时填充墙 MTMD 结构中 TMD 的连接刚度及阻尼系数;

3) 通过控制质量比及频率比, 应用优化参数计算方法, 给出了结构振动台试验模型试件中金属阻尼器的连接刚度;

4) 振动台试验结果表明, 按最优频率比条件下设置填充墙 TMD 的连接刚度, 减震效果较好, 表明了参数优化设计的有效性。

## 参考文献:

- [1] 吴波, 李惠. 建筑结构被动控制的理论与应用[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1997.
- [2] 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 (TMD) [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1996, 16(2): 87-94.
- [3] 李春祥. 高层钢结构抗风抗震控制优化设计理论与方法研究[D]. 上海: 同济大学, 1998.  
Li Chunxiang. Research on theory and method of optimal design of wind and earthquake resistant of high-rise steel structures [D]. Shanghai: Tongji University, 1998.
- [4] 李娟. 层间隔振结构理论与试验研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2006.  
Li Juan. Theory and test research on vibration isolation structure among stories [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2006.
- [5] 吕西林, 叶骅, 方重. 伺服电机 TMD 控制系统的研制与振动台试验[J]. 振动工程学报, 2000, 13(1): 61-70.  
Lv Xilin, Ye Hua, Fang Zhong. Shaking table test of a servomotor TMD system for structural control [J]. Journal of Vibration Engineering, 2000, 13(1): 61-70.
- [6] 李春祥, 黄金枝. 高层钢结构 MTMD 地震反应控制优化设计[J]. 振动与冲击, 2000, 19(1): 37-39.  
Li Chunxiang, Huang Jinzhi. The optimum design of MTMD control for earthquake-excited steel tall building [J]. Journal of Vibration and Shock, 2000, 19(1): 37-39.
- [7] 李春祥. 地震作用下高层钢结构的最优 MTMD 控制策略及设计[J]. 计算力学学报, 2002, 19(1): 83-88.  
Li Chunxiang. Optimum MTMD control strategy and design for tall steel structures [J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2002, 19(1): 83-88.
- [8] 卢俊龙. 围护墙 TMD 减震结构协同工作及减震性能研究[R]. 西安: 长安大学博士后研究工作报告, 2011.  
Lu Junlong. Research on cooperative and vibration absorption performance of infilled walls TMD vibration absorption structures [R]. Xi'an: Research Report of Postdoctoral of Chang'an University, 2011.