

# 主被动调谐控制结构动力响应分析与试验<sup>\*</sup>

刘彦辉<sup>1,2,3</sup>, 谭平<sup>1</sup>, 周福霖<sup>1,2</sup>, 闫维明<sup>2</sup>

(1. 广州大学减震控制与结构安全国家重点实验室(培育) 广州, 510405)

(2. 北京工业大学建筑工程学院 北京, 100124) (3. 多伦多大学土木工程系 加拿大, 多伦多, M5S1A4)

**摘要** 针对地震和风振下结构的振动控制, 提出了结构主被动复合调谐控制的策略, 以及采用直线电机驱动主动质量阻尼器(active mass damper, 简称 AMD)、中空橡胶隔震支座作为调谐质量阻尼器(tune mass damper, 简称 TMD)弹性单元、滑轨作为 TMD 支撑轨道的主被动复合调谐控制装置实现方法, 进行了主被动复合调谐控制对结构动力响应控制的效果及减震机理分析, 探讨了反馈响应向量对控制效果、AMD 控制力和 AMD 位移的影响, 完成了线性二次高斯算法(linear quadratic Gaussian, 简称 LQG)控制算法和  $H_2/H_\infty$  控制算法时的主被动复合调谐控制结构振动台试验。研究表明: 结构主被动复合调谐控制能有效减小结构的动力响应, 改善 TMD 的性能; 采用直线电机驱动的 AMD 作为主动控制装置, 为防止 AMD“飘移”, AMD 位移应作为目标向量和反馈响应; LQG 控制算法总体控制效果优于  $H_2/H_\infty$  控制算法。试验验证了提出的主被动复合调谐控制硬件系统方案的可行性, 为工程应用提供了支撑。

**关键词** 复合调谐控制; 振动控制; 主动质量阻尼器; 调谐质量阻尼器; 控制算法

**中图分类号** TU352.1; TH113

## 引言

近年来, 随着经济的快速发展, 世界各地兴建了大量的高层建筑、超高层建筑、电视塔等高耸结构, 特别是城市的地标性建筑已经成为城市经济实力的象征。如何保证这些高层、超高层、高耸结构地震作用下的安全性以及强风作用下的舒适性和安全性已经成为需要迫切解决的关键问题。大量的研究与工程实践表明, 结构振动控制技术可改变结构的动力特性, 减小结构的风致振动和地震响应, 提高其抗风抗震性能, 而结构主被动复合调谐控制技术具有主动控制的自适应性以及被动控制的无条件稳定性与可靠性, 已成为国内外结构振动控制领域研究的热点课题。

目前, 国内外对主被动复合调谐控制系统进行了一系列的研究。Lu 等<sup>[1]</sup>对 AMD 和被动阻尼器组成的复合调谐质量阻尼器进行了研究。Nagashima 等<sup>[2]</sup>对安装在实际 36 层钢结构上的复合调谐质量阻尼器的性能进行了研究, 结果表明复合调谐控制对结构摆动和扭转具有良好的控制效果。Fuji-

nami 等<sup>[3]</sup>对安装由旋转电机驱动的 AMD 摆式复合调谐质量阻尼器的一栋 100 m 钢框架办公楼的减震性能进行了研究。Watakabe 等<sup>[4]</sup>探讨了复合调谐控制系统中 AMD、弹簧和黏滞阻尼器对复合调谐质量阻尼的减震效果的影响。Saito 等<sup>[5]</sup>研究了安装伺服电机和隔震支座组成的复合调谐质量阻尼器的一栋 200 m 高钢框架结构的减震性能, 结果表明顶部加速度均方差可减小 25%~50%。Nakamura 等<sup>[6]</sup>对安装在由伺服电机驱动的 AMD、线性弹簧和黏滞油阻尼器组成的复合调谐质量阻尼器的 93 m 钢框架混凝土核心筒结构的减震性能进行了研究, 当控制力超过伺服电机的最大力时, 系统将转到被动控制模式成为 TMD。Fisco 等<sup>[7]</sup>对复合控制调谐阻尼器的主要特性进行了分析。欧进萍等<sup>[8-9]</sup>对 AMD、线性弹簧和阻尼器组成的混合调谐质量阻尼器的参数设计进行了研究。吕西林等<sup>[10]</sup>对装有悬吊式复合调谐质量阻尼器的 492 m 上海环球金融中心的减震效果进行了研究, 结果表明复合控制将整体结构的阻尼比提高 8 倍左右, 结构风振响应减小到 60% 以下。安方等<sup>[11]</sup>对基于速度-加速度时滞反馈的振动控制系统控制算法进行了研究。笔

<sup>\*</sup> 国家重点基础研究发展计划(“九七三”计划)资助项目(2012CB723304); 广州市珠江科技新星资助项目(2014J220058); 国家自然科学基金资助项目(51478131, 51408142); “十二五”科技支撑计划资助项目(2012BAJ07B02)

收稿日期: 2013-11-06; 修回日期: 2013-12-18

者所在课题组提出了一种在 TMD 上设置直线电机的 AMD 新型的主被动混合控制系统(HMD),目前已成功应用于广州塔的风振控制<sup>[12-15]</sup>。

笔者针对提出的结构主被动复合调谐控制的策略,提出了采用直线电机驱动 AMD、中空橡胶隔震支座作为 TMD 弹性单元、滑轨作为 TMD 支持轨道的主被动复合调谐控制装置实现方法,并进行了地震和模拟风振作用下 LQG 控制时主被动复合调谐控制对结构动力响应控制的控制效果及减震机理分析,以及 LQG 和  $H_2/H_\infty$  控制算法时的主被动复合调谐控制结构地震模拟振动台试验。分析和试验结果表明,复合调谐控制技术具有良好的减震效果,验证了提出的主被动复合调谐控制硬件系统方案完全可行,为工程应用提供了支撑。

## 1 新型主被动复合控制系统及动力模型

新型主被动复合控制系统(hybrid mass damper,简称 HMD)是在被动调谐装置(TMD)上再设置一小质量的主动调谐系统(AMD),从形式上看是双层调谐质量在运动。它通过小质量块的快速运动产生惯性力来驱动大质量块的运动,从而抑制主体结构的振动。当主动调谐控制系统失效时,变为被动调谐质量阻尼器(TMD),因此具有 fail-safe 的功能。AMD 控制装置绝大多数是依靠液压驱动或者是伺服电机马达驱动,液压系统构造复杂,需要空间大,能源利用效率降低,需要定期换油,维护成本高,运行时噪音大,这些问题在一定程度上限制了液压驱动型 AMD 控制系统的应用。旋转伺服电机虽然对液压驱动作了一些改进,但由于它需要借助于机械传动部件(滚珠丝杠)等中间环节,存在响应慢、难以获得更高的加速度、控制精度低等问题,一直影响其在实际工程中的应用。随着大驱动力直线电机的出现,笔者提出了把 AMD 质量与直线电机作成一体化结构,形成直线电机驱动的 AMD。在被动 TMD 控制装置方面,目前主要采用悬吊式 TMD 或支撑式 TMD。当采用悬吊式 TMD 时,由于悬摆较长,且需要设置阻尼器,通常需要较大的空间才能实现;当采用支撑式 TMD 时,其弹性元件通常用弹簧提供刚度,需要弹簧的长度较长,造成设计的支撑装置较大,引起控制装置造价大幅上扬。因此,笔者提出了中空橡胶隔震支座(具有较好的线性刚度)作为 TMD 弹性单元、双向导轨作为 TMD 支撑的复合控制系统硬件实现策略。提出的新型主被动复合控制

系统如图 1 所示。

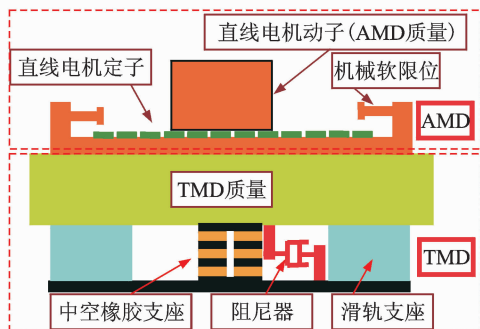


图 1 新型主被动复合控制装置

Fig. 1 Innovative hybrid control device

设多自由度结构在顶层安装了 HMD 控制系统,则结构在 HMD 控制下的控制系统运动方程可以表示为

$$\begin{cases} \mathbf{M}\ddot{\mathbf{X}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{X}} + \mathbf{K}\mathbf{X} = -\mathbf{M}\delta\ddot{x}_g(t) + \mathbf{I}\mathbf{F}_w + \mathbf{B}_s f_c(t) \\ \mathbf{X}(t_0) = \mathbf{X}_0 \\ \dot{\mathbf{X}}(t_0) = \dot{\mathbf{X}}_0 \end{cases} \quad (1)$$

其中: $\mathbf{X}$ 、 $\dot{\mathbf{X}}$ 和 $\ddot{\mathbf{X}}$ 分别为 HMD 控制系统的位移向量、速度向量和加速度向量, $\mathbf{X} = \{x_1, x_2, \dots, x_n, x_t, x_a\}^T$ ; $\mathbf{B}_s$ 为控制力作用位置矩阵, $\mathbf{B}_s = \{0, 0, \dots, 0, -1, 1\}^T$ ; $f_c(t)$ 为控制系统控制力; $\mathbf{F}_w$ 为风荷载向量; $\mathbf{I}$ 为单位矩阵; $\ddot{x}_g(t)$ 为地震地面运动加速度; $\delta = [1 \ 1 \ \dots \ 1]^T$ ; $\mathbf{M}$ 、 $\mathbf{C}$ 和 $\mathbf{K}$ 分别为 HMD 控制系统的质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵。

$\mathbf{M}$ 、 $\mathbf{C}$ 、 $\mathbf{K}$ 分别为

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} m_1 & & & & \\ & \ddots & & & \\ & & m_n & & \\ & & & m_t & \\ & & & & m_a \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} c_{11} & \cdots & c_{1n} & 0 & 0 \\ \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots \\ c_{n1} & \cdots & c_n + c_t & -c_t & 0 \\ 0 & \cdots & -c_t & c_t + c_a & -c_a \\ 0 & \cdots & 0 & -c_a & c_a \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} k_{11} & \cdots & k_{1n} & 0 & 0 \\ \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots \\ k_{n1} & \cdots & k_n + k_t & -k_t & 0 \\ 0 & \cdots & -k_t & k_t + k_a & -k_a \\ 0 & \cdots & 0 & -k_a & k_a \end{bmatrix}$$

其中: $m_i$ 为结构第  $i$  层的质量; $k_{ij}$ 和  $c_{ij}$ 分别为结构的刚度和阻尼系数; $m_t$ 和  $m_a$ 分别为 TMD 和直线

电机驱动 AMD 动子的质量;  $c_t$  和  $c_a$  分别为 TMD 和 AMD 的阻尼系数;  $k_t$  和  $k_a$  分别为 TMD 和 AMD 的刚度。

HMD 系统 AMD 中并没有设置刚度和阻尼单元进行直接传力,亦即  $C_a$  和  $K_a$  应取为零,但考虑到数值仿真计算的收敛、TMD 轨道的摩擦力,以及设置在 TMD 上的直线电机驱动 AMD 的定子和动子之间轨道的摩擦力,需要将  $K_a$  设置成一个较小的数值以及将摩擦力等效转化为关于阻尼系数  $C_a$  的表达式。

将受控结构运动方程用状态空间方程来表达

$$\dot{Z} = AZ + Bf_c + E\ddot{x}_g(t) + FF_w \quad (2a)$$

$$y = CZ + Df_c + W\ddot{x}_g(t) + HF_w \quad (2b)$$

其中:  $Z = \begin{Bmatrix} X \\ \dot{X} \end{Bmatrix}$ ;  $B = \begin{bmatrix} 0 \\ M^{-1}B_s \end{bmatrix}$ ;  $A =$

$$\begin{bmatrix} 0 & I \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{bmatrix}; E = \begin{Bmatrix} 0 \\ -\delta \end{Bmatrix}。$$

选择输出向量  $y$  为结构层间位移、TMD 相对顶层的位移、AMD 相对 TMD 的位移以及结构、TMD 和 AMD 的绝对加速度。因此,输出矩阵为

$$C = \begin{bmatrix} G & 0 \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{bmatrix}$$

$$D = \begin{bmatrix} 0 \\ M^{-1}B_s \end{bmatrix}$$

$$W = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \end{Bmatrix}$$

其中:  $G$  为能输出相对位移的变换矩阵。

## 2 HMD 振动控制仿真及参数分析

仿真模型为单自由度体系,结构的质量、刚度和阻尼系数分别为 3 200 kg, 880 kN/m 和 3 183.9 (N·s)/m, TMD 的质量和刚度分别为 200 kg 和 190 kN/m, TMD 的阻尼系数为 1 547.3 (N·s)/m, AMD 质量为 70 kg (动子质量为 45 kg, 定子质量为 25 kg)。考虑到数值仿真的收敛性,令 AMD 的刚度和阻尼系数均为 0.01,由于仿真的目的是检验主被动复合控制的有效性以及能改善 TMD 的频率敏感性,因此仿真的 TMD 性能参数不是最优参数。分别进行无控结构、TMD 控制结构及 HMD 控制结构在外部激励下的动力响应分析,控制算法采用 LQG,输入地震波分别为 Kobe 地震波、EI Centro 地震波、Taft 地震波。为了模拟风荷载对结构的作用,对结构输入合成谐波,其根据正弦扫频波扫频得到的结构频率 2.56 Hz 进行合成,合成谐波的计算公式为

$$a = A[\sin(2 \times 2.56\pi t) + \sin(4 \times 2.56\pi t) + \sin(8 \times 2.56\pi t)] \quad (3)$$

其中:  $a$  为合成的谐波;  $t$  为时间;  $A$  根据合成谐波的峰值进行调整,持续时间为 40 s。

### 2.1 动力响应分析

LQG 控制时控制目标向量为结构位移、结构绝对加速度和 AMD 冲程,反馈向量为结构绝对加速度、TMD 绝对加速度和 AMD 冲程。通过反馈向量,估计结构的全状态进行控制。图 2 及图 3 分别为 Kobe 地震波作用下结构的位移和加速度响应,表 1 为各工况下结构最大响应及最大控制力。从图 2、图 3 及表 1 可以看出,采用 HMD 控制,无论是模拟的风荷载及实际的地震作用,结构的位移响应和加速度响应均有较大程度的减小,对实际地震波作用下的结构最大位移和最大加速度响应平均值减小为原结构的 78% 和 73%,对加速度响应的控制优于对位移响应的控制,对模拟的风荷载作用下的结构位移和加速度响应峰值减小为原结构的 25% 和 24%,HMD 对风荷载下的控制效果优于对地震作用下的控制效果。同时可以看出,TMD 对模拟的风荷载作用下的结构响应比较有效,而对于地震作用下,有些地震波有效,而在某些地震波作用下,甚至放大结构的响应,控制效果与地震激励有关。由此可见,在 TMD 上设置 AMD 形成的 HMD 大大改善了 TMD 的性能,无论是风荷载或是地震作用下,都有良好的控制效果。图 4 和图 5 分别为合成谐波和 Kobe 地震波作用下的 AMD 控制力与结构层位移关系图。可以看出,在合成谐波作用下,曲线比较饱满,说明 HMD 耗能能力比较强,这从机理上说明 HMD 对风荷载下的控制效果优于对地震作用下的控制效果。

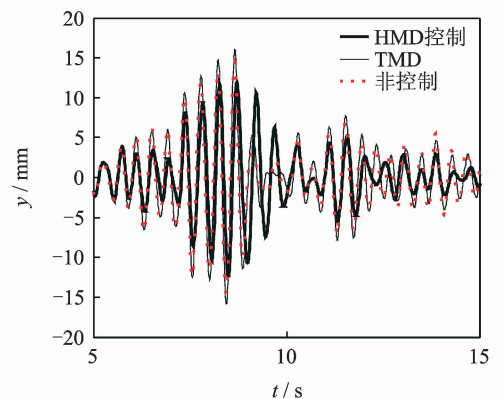


图2 结构位移响应(Kobe地震波)

Fig. 2 Displacement response of structure (Kobe)

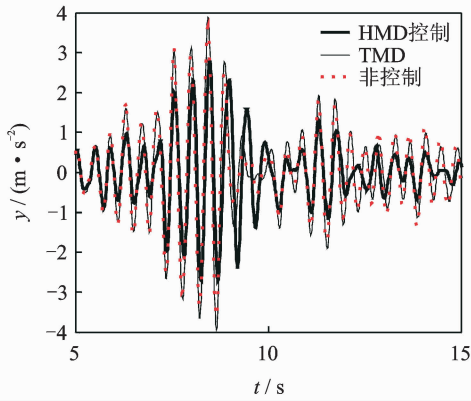


图 3 结构加速度响应(Kobe 地震波)

Fig. 3 Acceleration response of structure (Kobe)

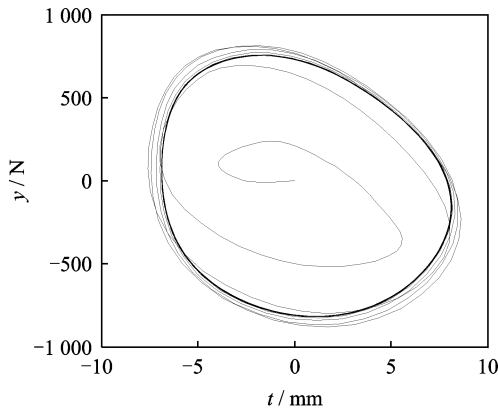


图 4 控制力与结构层位移关系(合成谐波)

Fig. 4 Relation of deformation to control force (Harmonic)

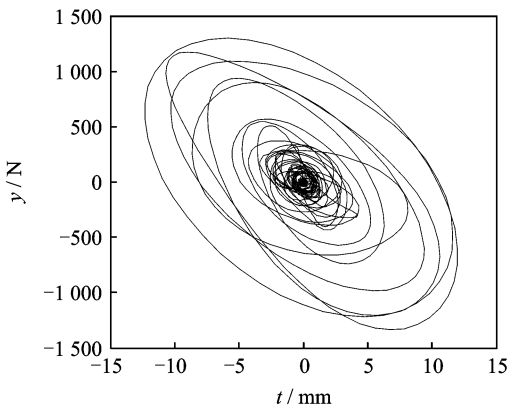


图 5 控制力与结构层位移关系(Kobe 地震波)

Fig. 5 Relation of deformation to control force (Kobe)

Kobe 地震波作用下 AMD 位移响应如图 6 中工况 1 曲线,AMD 的位移响应在 HMD 控制中是比较重要的控制内容,关系到在实际工程中 AMD 装置的实现问题及造价;因此,要求 AMD 持续工作时应无“漂移”现象,以及最大位移在 AMD 设计时能够实现。从图 6 中工况 1 曲线可以看出,AMD 位移基本没有“漂移”。

表 1 各工况下结构最大响应及最大控制力

Tab. 1 Maximum response and control force

地震波	无控制		TMD 控制		HMD 控制		
	位移	加速度	位移	加速度	位移	加速度	控制力
合成谐波	30.5	7.65	23.8	5.84	7.6	1.81	869
Kobe	14.6	3.64	15.9	3.91	10.9	2.51	1 284
Taft	10.4	2.60	10.6	2.61	8.6	2.03	1 021
EICentro	9.8	2.46	8.4	2.09	7.5	1.78	973

## 2.2 反馈响应向量参数分析

由于结构加速度是主要反馈向量,进行参数分析时采用 3 种工况:工况 1 反馈向量同 2.1 节;工况 2 反馈结构绝对加速度、TMD 绝对加速度;工况 3 反馈结构绝对加速度和 AMD 冲程。图 7 和图 8 分别为工况 Kobe 地震波作用下结构加速度与位移响应,为了显示清晰,只取主要振动段的响应。由图可以看出,在理想条件下采用不同的反馈量,结构的加速度响应控制效果基本一样,这主要是因为通过 LQG 控制时根据不同的反馈量估计结构的全状态是一样的,因此控制效果基本一致,而且 AMD 位移响应也基本一致。然而在实际工程应用中,AMD

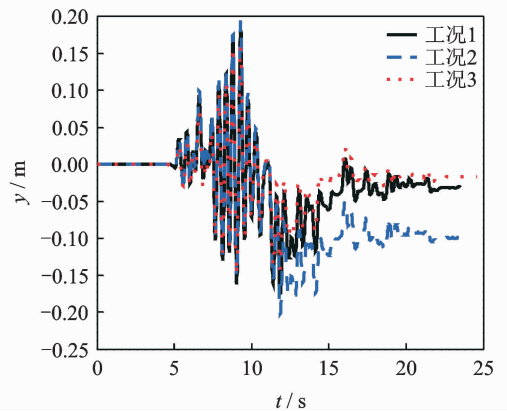


图 6 AMD 位移响应(Kobe,有摩擦力)

Fig. 6 AMD displacement (Kobe, with friction)

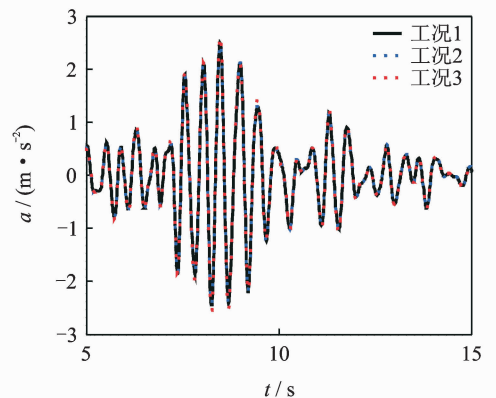


图 7 结构加速度响应(Kobe,无摩擦力)

Fig. 7 Structure acceleration (Kobe, without friction)



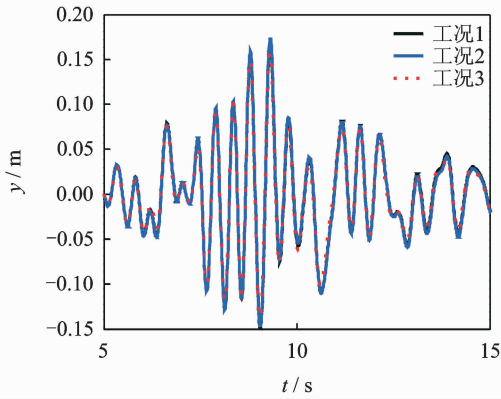


图 8 AMD 位移响应(Kobe,无摩擦力)

Fig. 8 AMD displacement (Kobe, without friction)

不可避免地存在摩擦力,因此,有必要研究 AMD 轨道存在摩擦力情况下,不同反馈响应的控制效果及 AMD 位移。分析时假定摩擦力模型为

$$f_f = 60\text{sign}(\dot{x}_a) + 60\dot{x}_a \quad (4)$$

其中: $\dot{x}_a$  为 AMD 相对于 TMD 的速度。

图 9 和图 6 分别为在 AMD 轨道存在摩擦力情况下 Kobe 激励下各工况的结构加速度和 AMD 位移响应。从图 9 和图 6 可以看出,在有摩擦力情况下,不同反馈时对结构加速度响应控制基本一样,说明不同的反馈量对结构响应的控制效果是一样的,但是有摩擦力情况下采用不同反馈时,AMD 位移响应有较大的区别。从图 6 可以看出,当采用 AMD 位移反馈时,摩擦力对 AMD 位移影响比较小,基本没有“漂移”现象;而没有采用 AMD 位移反馈时,AMD 位移有很大的“漂移”。这对结构主动控制是很不利的,特别是长期风振实时控制时,AMD 会“漂移”到限位的位置,AMD 将失效,失去对结构的控制。因此在进行 HMD 主动控制时,AMD 位移应作为主要的反馈量之一。

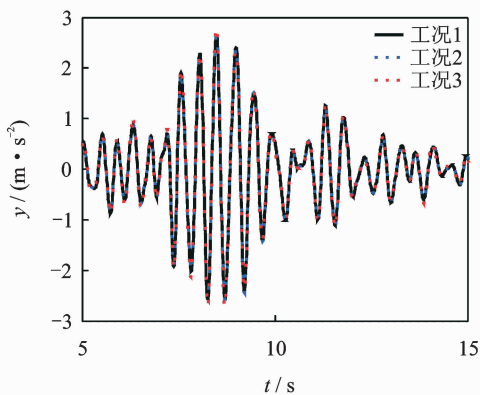


图 9 结构加速度响应(Kobe,有摩擦力)

Fig. 9 Structure acceleration (Kobe, with friction)

### 3 HMD 振动控制试验

#### 3.1 试验模型

设计试验受控结构模型参数同第 2 节仿真模型,用总质量约为 3 200 kg 的钢筋混凝土质量块模拟受控结构的质量,底部放置 4 个无铅隔震支座以模拟结构的刚度。TMD 的导轨以及用来模拟其刚度的两个中空隔震支座将受控质量块和钢板(TMD 质量)连接起来。钢板与 AMD 的基座(定子)相连,如图 10 所示。直线电机驱动的 AMD 参数如下:最大出力为±3 kN;额定出力为±1 kN,最大行程为±350 mm;最大速度为±3 m/s;定子质量约为 45 kg;定子和基座质量约为 70 kg。

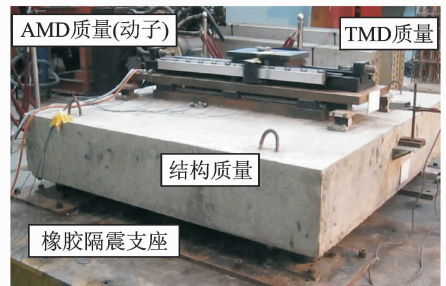


图 10 试验模型

Fig. 10 Experimental model

#### 3.2 HMD 振动控制试验系统与工况

进行实时控制时,振动控制算法采用 LQG 和  $h_2/h_\infty$  控制算法。通过振动台对模型进行激振,由传感器测量得到模型的响应,输入到 DSpace 系统,经 A/D 转换、控制算法在线实时计算控制力,再经 D/A 转换,传输到 TwinCAT I/O 的 EL3102, TwinCAT 系统接收到此信号并传输给工控机,再由工控机直接驱动直线电机(AMD)。直线电机驱动的 HMD 控制试验系统框图如图 11 所示。

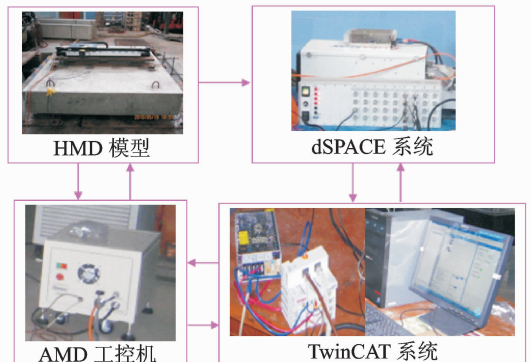


图 11 试验系统框图

Fig. 11 Block Diagram of the Experiment System

振动台输入激励同第 3 节激励。首先,固定 TMD 与 AMD,进行 4 种激励下的无控结构的振动台试验;然后,放开 TMD,固定 AMD,进行 4 种激励下的 TMD 控制的振动台试验;最后,放开 TMD 与 AMD,进行 4 种激励下两种控制算法时的 HMD 振动控制试验。

### 3.3 试验结果与分析

表 2 为各工况下主结构的动力响应,图 12 及图 13 分别为 Kobe 地震波下各工况的结构加速度响应(Kobe 地震波下的响应取主要振动时段)和结构位移响应。由表 2、图 12 和图 13 可以看出,各工况下 HMD 控制的结构位移和加速度响应得到有效的控制,特别是对于合成谐波结构位移和加速度响应

表 2 各工况下结构响应最大值

Tab. 2 Maximum structure response

输入激励		加速度/ ( $m \cdot s^{-2}$ )	位移/ mm	完成控制 力/N		
Kobe	无控	3.769	15.90			
	TMD	3.827	17.73			
	HMD	LQG	1.976	9.33	964.6	
		$h_2/h_\infty$	2.046	9.36	1 000	
El	无控	2.228	8.59			
	TMD	1.780	6.92			
	HMD	LQG	1.892	8.10	857.8	
		$h_2/h_\infty$	2.223	7.83	1 000	
Taft	无控	2.615	10.31			
	TMD	2.611	11.07			
	HMD	LQG	1.858	6.93	1 000	
		$h_2/h_\infty$	2.641	9.48	1 000	
正弦 扫频波	无控	3.768	16.20			
	TMD	2.926	12.95			
	HMD	LQG	1.463	5.283	730.0	
		$h_2/h_\infty$	3.132	11.788	1 000.0	

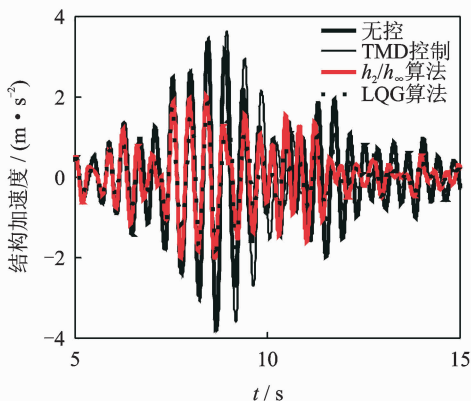


图 12 Kobe 地震波下结构加速度(试验结果)

Fig. 12 Structure acceleration (Kobe, experimental result)

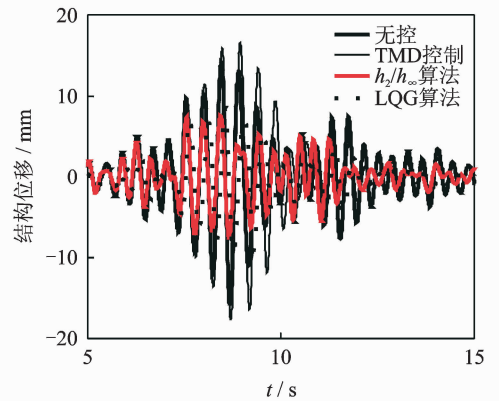


图 13 Kobe 地震波下结构位移(试验结果)

Fig. 13 Structure displacement (Kobe, testing result)

峰值分别减小为无控结构的 44.7%和 54.0%。但 TMD 控制对输入激励特性比较敏感,有时会对结构的位移响应和加速度响应控制不起作用。在 TMD 上设置 AMD 形成 HMD 控制后,试验结果同仿真结果一致,HMD 大大改善了 TMD 的性能,无论是风荷载或是地震作用下,都有良好的控制效果。同时可以看出,LQG 控制算法的控制效果优于  $h_2/h_\infty$  控制算法,且控制力小于  $h_2/h_\infty$  控制算法。

图 14 为 Kobe 地震波下 HMD 控制时 AMD 控制力时程,各工况下 AMD 最大控制力见表 2。图 14 中,实际的驱动力为 AMD 加速度与 AMD 质量相乘,为实际作用在结构上的控制力。完成的驱动力为 AMD 工控机反馈的控制力,该驱动力为实际的驱动力、纹波推力与轨道摩擦力之和。由图 15 可以看出,完成的驱动力与实际驱动力基本一致,说明 AMD 能准确地执行主动力,且 AMD 的纹波推力及轨道摩擦力相比可不考虑,其他激励下完成的驱动力与实际驱动力特性同 Kobe 地震波。试验时

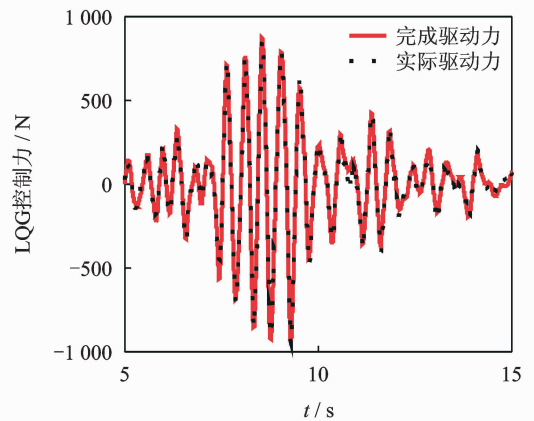


图 14 Kobe 地震波下控制力时程(LQG 算法)

Fig. 14 Control force (Kobe, LQG)

限制 AMD 最大出力为  $\pm 1$  kN。由表 2 可以看出,在 Taft 和扫频波作用下,  $h_2/h_\infty$  控制算法在各种激励时控制力均达到饱和,而 LQG 控制算法仅在 EI Centro 地震波时控制力达到饱和。

## 4 结 论

1) 提出的采用直线电机驱动 AMD、中空橡胶隔震支座作为 TMD 弹性单元、滑轨作为 TMD 支撑轨道的主被动复合调谐控制装置对结构的动力响应有较好的控制效果,整套控制装置切实可行。

2) 主被动复合控制系统能有效改善 TMD 系统的性能,在不同的输入激励下,HMD 控制系统控制效率比较稳定,无论是结构加速度响应或者是位移响应,均能得到较好的控制。HMD 对风振作用时的控制效果优于对地震作用时的控制效果。

3) 采用直线电机驱动的 AMD 作为主动控制装置,为了防止“飘移”,AMD 应为目标向量和反馈响应。试验结果表明,HMD 控制时 LQG 控制算法总体控制效果优于  $H_2/H_\infty$  控制算法。

## 参 考 文 献

- [1] Lu L Y, Lin G L, Lin C H. A unified analysis model for energy dissipation devices used in seismic-resistant structures[J]. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2009,24(1):41-61.
- [2] Nagashima I, Maseki R, Asami Y, et al. Performance of hybrid mass damper system applied to a 36-story high-rise building [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2001,30(11):1615-1637.
- [3] Fujinami T, Saito Y, Masayuki M, et al. A hybrid mass damper system controlled by  $H_\infty$  control theory for reducing bending-torsion vibration of an actual building[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2001,30(11):1639-1653.
- [4] Watakabe M, Tohdo M, Chiba O, et al. Response control performance of a hybrid mass damper applied to a tall building [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2001,30(11):1655-1676.
- [5] Saito T, Shiba K, Tamura K. Vibration control characteristic of a hybrid mass damper system installed in tall buildings[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2001,30(11):1677-1696.
- [6] Nakamura Y, Tanaka K, Nakayama M, et al. Hybrid mass dampers using two types of electric servomotors: AC servomotors and linear-induction servomotors[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2001,30(11):1719-1743.
- [7] Fisco N R, Adeli H. Smart structures: part II—Hybrid control systems and control strategies[J]. Scientia Iranica, Transactions A: Civil Engineering, 2011,18(3):285-295.
- [8] 欧进萍. 结构振动控制——主动、半主动和智能控制[M]. 北京:科学出版社,2003:186-235.
- [9] 李宏男. 结构多维减震控制[M]. 北京:科学出版社,2008:433-450.
- [10] 吕西林,李培振,郭献群,等. 上海环球金融中心大厦振动控制及现场实测分析[J]. 结构工程师,2009,25(4):63-70.  
Lü Xilin, Li Peizhen, Guo Xianqun, et al. Vibration control and site measurement on Shanghai World Financial Center Tower[J]. Structural Engineers, 2009, 25(4):63-70. (in Chinese)
- [11] 安方,陈卫东,绍敏强. 基于速度-加速度时滞的振动主动控制[J]. 振动、测试与诊断,2012,32(3):364-370.  
An Fang, Chen Weidong, Shao Minqiang. Active vibration control based on time-delayed velocity acceleration feedback[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2012,32(3):364-370. (in Chinese)
- [12] Fu Linzhou, Tan Ping, Liu Yanhui, et al. Hybrid mass dampers for canton tower[J]. International Journal on Tall Buildings and Urban Habitat, 2012(1):24-29.
- [13] 刘彦辉,谭平,周福霖,等. 直线电机驱动的 AMD 性能测试试验研究[J]. 土木工程学报,2010,43(12):50-56.  
Liu Yanhui, Tan Ping, Zhou Fulin, et al. Experiment investigation of AMD performance driven by linear motor[J]. China Civil Engineering Journal, 2010,43(12):50-56. (in Chinese)
- [14] Tan Ping, Ning Xiangliang, Zhang Ying, et al. Application of hybrid mass dampers for vibration control of guangzhou tv and sightseeing tower[C]//11th World Conference on Seismic Isolation, Energy Dissipation and Active Vibration Control of Structures. Guangzhou: [s. n.], 2010.
- [15] 刘彦辉. 结构主被动混合质量阻尼器控制理论与试验研究[R]. 北京:北京工业大学,2011.



**第一作者简介:**刘彦辉,男,1980年7月生,博士后、副研究员、硕士生导师、国家一级注册结构工程师。主要研究方向为结构振动控制的研究。曾发表《直线电机驱动的 AMD 性能测试试验研究》(《土木工程学报》2010年第43卷第12期)等论文。

E-mail:Liuyanhu2012@163.com