

余克兴. 调质阻尼器在带裙房高层建筑地震反应半主动控制中的应用 [J]. 华南地震, 2020, 40 (3): 155-160. [YU Kexing. Seismic Safety Analysis of Urban Underground Pipelines Based on Large Data Analysis [J]. South China journal of seismology, 2020, 40 (3): 155-160]

# 调质阻尼器在带裙房高层建筑地震反应半主动控制中的应用

余克兴

(朔黄铁路发展有限责任公司, 河北 沧州 062350)

**摘要:** 目前, 带裙房高层建筑层出不穷, 底盘大的高层建筑可以使用于人口密集区, 符合人类生活需求。而带裙房高层建筑也可理解为竖向收进建筑, 结构竖向收进将存在刚度异常, 抗震性较差等弊端。为此, 提出基于调质阻尼器的带裙房高层建筑地震反应半主动控制方法。先构建 ER/MR 智能杆件的力学模型, 分析 ER/MR 智能杆件的力学特征, 之后通过 ER/MR 智能阻尼器的“开关-耗能”半主动控制策略, 实现基于调质阻尼器的带裙房高层建筑地震反应半主动控制。实验结果表明: 该方法控制下, ER/MR 智能杆件径向设定时, 减震效果较佳; 该方法减震性、实时性、可靠性、可操作性、合理性以及有效性的满意率均大于 0.97。

**关键词:** 调质阻尼器; 带裙房; 高层建筑; 地震; 反应; 半主动控制

**中图分类号:** TU973.31 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-8662 (2020) 03-00155-06

**DOI:** 10.13512/j.hndz.2020.03.020

## Application of Tuned Mass Damper in Semi-active Control of Seismic Response of High-rise Building with Podium

YU Kexing

(Shuohuang Railway Development Co., Ltd., Cangzhou 062350, China)

**Abstract:** At present, high-rise buildings with podiums emerge in endlessly, and high-rise buildings with large chassis can be used in densely populated areas, meeting the needs of human life. The high-rise building with podium can also be regarded as the vertical building, which will have some disadvantages such as abnormal stiffness and poor seismic resistance. Therefore, the semi-active control method of seismic response of high-rise building with podium based on the tuned mass damper is proposed. Firstly, the mechanical model of ER/MR intelligent members is constructed, and the mechanical characteristics of ER / MR intelligent members are analyzed. Then, through the semi-active control strategy of "switch energy consumption" of ER / MR intelligent dampers, the semi-active control of seismic response of high-rise buildings with podium buildings based on the damper is realized. The results show that under the control of this method, the damping effect is better when ER / MR intelligent members are set radially, and the satisfactory rate of damping, real-time, reliability, operability, rationality and effectiveness of this method is greater than 0.97.

**Keywords:** Tuned mass damper; With podium; High-rise building; Earthquake; Response; Semi-active control

收稿日期: 2019-10-12

作者简介: 余克兴 (1973-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事工民建和管理工程。

E-mail: ykx0902@sina.com

## 0 引言

近年来,人们对应用控制方案降低地震和强风对土木工程结构存在的损害方面的问题十分重视。结构控制分析大多分成振动控制装置、控制算法。截止当下,已有大量减震控制装置获得认可。控制算法的使用促进控制技术进一步优化,让建筑结构抗震控制从非主动控制变成非被动控制、混合控制与半主动控制。

按照非主动控制与非自动控制的特征,相关研究人员陆续设计了可调摩擦阻尼器、能够调节的调谐阻尼器与能够控制的液体阻尼器等智能阻尼器,把它使用在控制结构里,构架半主动控制系统,实现非被动控制。半主动控制稳定性较高,损耗小,且反应效率高。所以,半主动控制具有较好的使用前景。

现在对带裙房高层建筑结构地震反应有关的资料已不在少数,但对耦联双塔楼地震反应非被动控制与半主动控制相关的研究资料极少。文献[1]提出磁流变阻尼器的半主动控制及实时混合模拟试验研究方法,该方法减震效果显著,但是仅适用于框架结构建筑;文献[2]围绕磁流变阻尼器的半主动控制算法设计与仿真这一问题进行研究,该方法的控制过程较为繁琐,应用效率较低;文献[3]提出半主动电涡流单摆式调谐质量阻尼器减震性能研究方法,该方法具有较好的减震效果。本文提出基于调质阻尼器的带裙房高层建筑地震反应半主动控制方法,对带裙房高层建筑地震反应半主动控制这一问题进行深入探讨<sup>[4]</sup>。

## 1 带裙房高层建筑地震反应半主动控制方法

### 1.1 ER/MR 智能杆件的力学模型

ER/MR 智能杆件包含 ER/MR 调质阻尼器与结构杆件<sup>[5]</sup>。本文变换 ER/MR 智能杆件窄缝或旁路里的电/磁水平,便能够变动窄缝或旁路里 ER/MR 流变液的屈服剪应力,以此设置阻尼器,目的是控制活塞运动的阻尼力大小,以此调节阻尼器参数<sup>[6]</sup>。

按照以往资料记载,ER/MR 调质阻尼器流变液的剪应力  $\alpha$  与剪切速率  $\beta$  间能够通过 Bingham 模型计算:

$$\alpha(D, \dot{\beta}) = \delta_0 \dot{\beta} + \alpha_y(D) \cdot \text{sgn}(\dot{\beta}) \quad (1)$$

其中,粘滞系数设成  $\delta_0$ ; 屈服剪应力设成  $\alpha_y(D)$ , 其伴随电(磁)场强度  $D$  的变大而变大,所以,根据 Phillips 获取的 Bingham 流体基于矩形窄缝里 Poseuille 流动的方程  $E_b$  与变化电/磁场强度优化阻尼器的参数  $G_b(D)$  可获取流动类 ER/MR 调质阻尼器<sup>[7-8]</sup>。则:

$$q_a(h) = E_a \dot{\beta} + G_b(D) \cdot \text{sgn}(\dot{\beta}) \quad (2)$$

式中:

$$\left. \begin{aligned} E_b &= E_1 \cdot \frac{(12\delta_0 JB_q)}{ct^3} \cdot B_q \\ G_b(D) &= E_2(D) \cdot \frac{J\alpha_y(D)}{t} \cdot B_q + G_y \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

针对流动类 ER/MR 调质阻尼器而言,存在:

$$\left. \begin{aligned} E_1 &= 1.0 \\ E_2(D) &= 2.07 + \frac{1.0}{1.0 + 4.0H(E)} \\ H(E) &= \frac{ct^2 \alpha_y(D)}{12B_q \delta_0 \cdot d(h)} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

针对混合类 ER/MR 调质阻尼器,存在:

$$\left. \begin{aligned} E_1 &= 1.0 - \frac{ct}{2B_q} \\ E_2(D) &= 2.07 + \frac{1.0}{1.0 + 0.4H(D)} - \frac{1.5 U^2}{1.0 + 0.4H^2(D)} \\ U &= \frac{ct}{2B_q} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

其中:  $ct$  描述求导参数;  $U$  表示电阻;  $H(E)$  表示阻尼流动系数;  $\delta_0$ 、 $B_q$  描述阻尼力; 窄缝和旁路长度设成  $J$ ; 窄缝和旁路/磁极间距、窄缝和旁路的展开宽度依次设定成  $t$ 、 $c$ ; 阻尼器活塞和缸体间相对运动的机械摩擦力设定成  $Q_y$ 。因为 ER/MR 流变液里只有  $\alpha_y(D)$  能够伴随电/磁场强度  $D$  实施调整,所以通过上述公式能够了解,ER/MR 调质阻尼器里仅存在  $G_b(D)$  能够伴随电/磁场强度  $D$  实施调整,  $E_b$  固定。

如果将 ER/MR 智能杆件自身的轴向刚度描述成  $F_b$ , 则 ER/MR 智能杆件的力学模型是:

$$q_a = F_d (v_B - v_A - \dot{\beta}) = E_b(D) \text{sgn}(\dot{\beta}) \quad (6)$$

其中,  $v$  描述电压向量。按照 ER/MR 智能杆件的力学模型能够获取 ER/MR 杆件的轴力反应:

$$\left. \begin{aligned} q_j &= -\{d\}_k^H [H_j]^H \{v_j\} - l_d \cdot d_h \\ q_j &= -\{d\}_k^H [H_j]^H \{v_j\} - l_d \cdot d_h \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

则 ER/MR 杆件里阻尼器的滑动位移是:

$$-\{d_j\}_k^H [H]^H \{v_j\} - l_d d_j = e_d \dot{\beta} + G_{d_j} \operatorname{sgn}(\dot{\beta}) \quad (8)$$

其中, ER/MR 调质阻尼器的滑动位移描述成  $\{d\}$ ;  $H_j$  表示阻尼流动系数;  $l_d$  描述瞬时位移长度;  $d_h$  表示阻尼器滑动位移参数。使用上述公式, 能够获取基于 ER/MR 调质阻尼器的带裙房高层建筑地震中的瞬时反应<sup>[9]</sup>。

### 1.2 带裙房高层建筑的地震反应半主动控制策略

#### 1.2.1 ER/MR 调质阻尼器的最佳主动控制位移

如果假定 ER/MR 调质阻尼器的滑动位移  $\{d\}$  可完成自主调整, 则能够通过最佳控制原理得到让带裙房的高层建筑地震反应隶属最佳主动控制位移的最小值<sup>[10]</sup>。因为带裙房的高层建筑存在较大的动力自由水平, 但瞬间最佳控制理论能够计算对应的非低阶 Riccati 方程, 所以, 瞬时评估函数公式:

$$K = \{S\}^H [P] \{S\} + \{d\}^H [Z] \{d\} \quad (9)$$

其中, 结构瞬时反应状态向量  $\{S\}$  与阻尼器瞬时主动控制位移  $\{d\}$  的加权矩阵依次设成  $[P]$ 、 $[Z]$ 。由此, 通过瞬时最佳控制原理能够知道, 让评估函数  $K$  存在瞬时最佳闭环控制位移  $[Q^*]$  的最小值是:

$$\{d_H\} = -[Q^*] \{S\} \quad (10)$$

#### 1.2.2 ER/MR 智能阻尼器的“开关 - 耗能”半主动控制策略

将  $\{d\}$  设成 ER/MR 智能阻尼器的滑动位移向量, 非间接调整它变成  $\{d_r\}$  存在一定难度。按照 ER/MR 智能阻尼器的属性能够知道, 可以变换电 / 磁场强度优化阻尼器的参数  $G_b(D)$ , 由此让 ER/MR 智能阻尼器的滑动位移  $\{d\}$  接近于  $\{d_r\}$ , 让控制的评估函数变成最小值<sup>[11-12]</sup>。

本文采用 ER/MR 智能阻尼器的“开关 - 耗能”半主动控制策略, 该策略的内容为: 若阻尼器的滑动位移  $\{d\}$  往最佳主动控制方向运行时<sup>[13]</sup>, 把电 / 磁场强度设成 0, 则把调质阻尼器参数  $G_{b_i}$  变成最低  $G_{\min}$ , 让  $\{d\}$  快速变成  $\{d_r\}$ ; 若阻尼器的滑动位移  $\{d\}$  属于背驰最佳主动控制位移  $\{d_r\}$  时, 把电 / 磁场强度变大, 则变大  $G_{d_i}$ , 以此控制  $\{d\}$  背驰  $\{d_r\}$ 。ER/MR 智能阻尼器的“开关 - 耗能”半主动控制策略描述成:

$$G_{b_i} = \begin{cases} G_{\min} & \text{若 } \{d\} > 0 \\ \min \{J_{d_i}(\gamma_{j2} - \gamma_{j1} - \{d\}) - G_0, G_{\max}\} & \text{若 } \{d\} < 0 \end{cases} \quad (11)$$

其中  $G_0$  描述阻尼器最小量, 其必须按照

采样时间步长  $\gamma$ 、结构与阻尼器的详细状况设定<sup>[14-15]</sup>。

## 2 实验结果

### 2.1 实验设置

为了测试本文方法有效性, 本文设定实验目标为主楼是 21 层、裙房是 6 层的剪切类带裙房高层建筑结构。具体参数见表 1:

表 1 实验目标设置  
Table 1 Experimental target setting

建筑参数	层质量	层刚度	层阻尼
主楼 (21 层)	1290.1	$4.1 \times 10^6$	100.1
裙房 (7 层)	1290.1	$8.1 \times 10^6$	200.1

为了测试本文方法对带裙房高层建筑地震反应半主动控制的效果, 基于结构的第 17 层到第 21 层逐层设定 5 种耦合主楼和裙房的调质阻尼器, 当中各个智能阻尼器的尺寸见表 2:

表 2 智能阻尼器设定  
Table 2 Intelligent damper settings

种类	值 /mm
缸体内径	0.25
活塞杆直径	0.09
活塞头长度	0.6
缝隙高度	0.003

调质阻尼器里能够控制的流体参数见表 3:

表 3 智能可控流体的具体设定  
Table 3 Specific settings of intelligent controllable fluid

流体参数	值 /kPa
粘滞参数	0.0003
屈服剪应力最低值	0.06
屈服剪应力最高值	14.1

### 2.2 ER/MR 智能杆件的设定对半主动控制效果的干扰

设定 ER/MR 智能杆件的布置设定依次是径

向、环向。测试两种 ER/MR 智能杆件设定下，径向主轴中结构杆件的轴力最大值。结果见图 1:

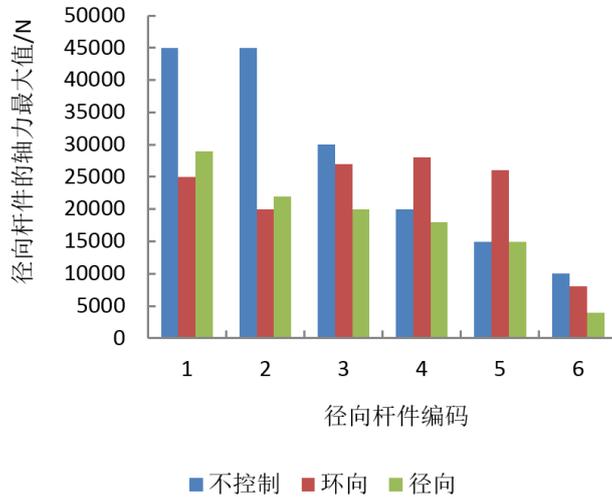


图 1 ER/MR 智能杆件差异设定下杆件轴力的半主动控制效果对比

Fig.1 Comparison of semi-active control effect of member axial force under ER / MR intelligent member difference setting

分析上图可知，两个差异设定模式下，径向杆件的轴力最大值均存在降低趋势。而 ER/MR 杆件属于径向设定时，ER/MR 智能杆件处于的环中径向杆件轴力变小程度较大，而近邻环中，径

向杆件轴力的降低幅度较低，减震效果好。

图 2 是 ER/MR 智能杆件在差异设定模式中径向主轴中结点的挠度最大值:

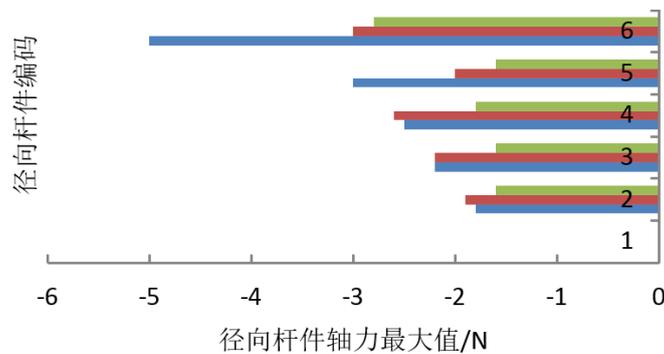


图 2 ER/MR 智能杆件差异设定中结点挠度的半主动控制效果对比

Fig.2 Comparison of semi-active control effect of node deflection in ER / MR intelligent member difference setting

分析上图可知，两个设定模式下，结点的挠度均存在高程度降低，当中径向设定时，结点的挠度缩小程度更大，同时结点挠度变小趋势也十分均衡，但环向设定时，ER/MR 杆件所处环中的结点挠度降低出现异常。

综上所述，ER/MR 智能杆件径向设定最为合适，径向设定下对带裙房高层建筑的减震效果较佳，减震效果较为均衡。

### 2.3 半主动控制和非主动控制效果对比

考虑到 ER/MR 智能杆件基于开“电/磁场”与停“电/磁场”过程中依次描述两类差异的非主动控制模式，所以，为了深度测试 ER/MR 智能杆件的减震性能，本文对比了在 ER/MR 智能杆件径向设定时非主动 - 开、非主动 - 停、不控制三种模式下的控制效果。结果如图 3、图 4 所示:

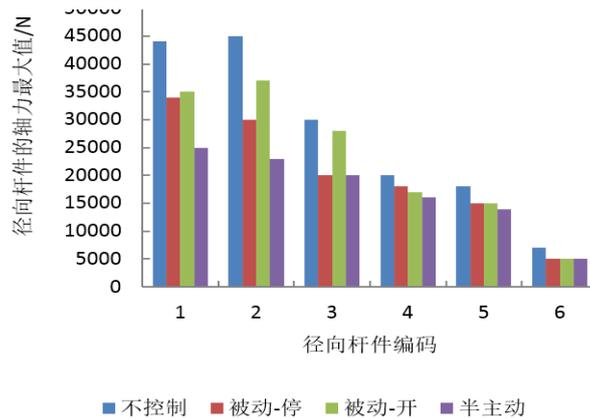


图3 差异控制模式下径向杆件轴力最大值对比结果

Fig.3 Comparison results of the maximum axial force of the radial member under the different control mode

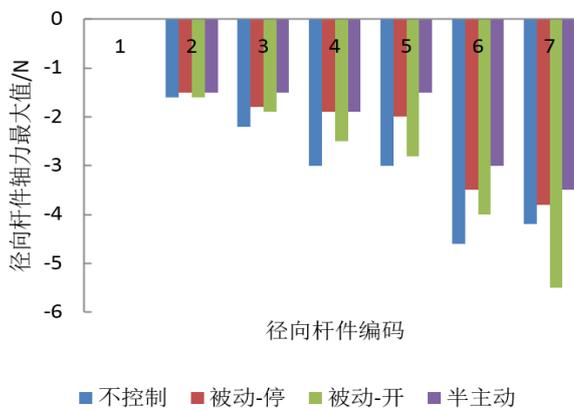


图4 差异控制模式中径向结点挠度最大值对比结果

Fig.4 Comparison results of the maximum deflection of radial nodes in the differential control mode

分析上图可知，三类控制模式里，本文方法的半主动控制效果最佳，虽然三种控制模式均能够降低带裙房高层建筑地震反应，但本文方法中的控制模式跳跃性较小，稳定性较好，不管发生什么状况，均可以实现减震控制。

本文将方法设定两个对比方法，依次是建筑结构地震反应的ATMD控制分析方法、高层建筑地震反应的混合控制方法。分析三种方法对实验所设定的实验目标的控制效果，通过满意率判断，结果见图5：

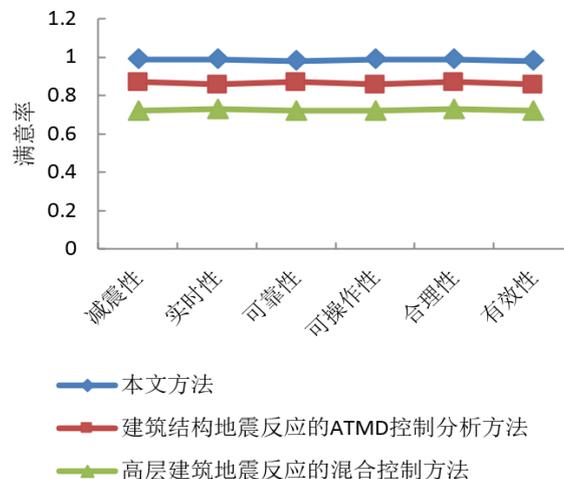


图5 三种方法满意率对比结果

Fig.5 Comparison results of satisfaction rate of three methods

分析图5可知,三种方法对比之下,本文方法的减震性、实时性、可靠性、可操作性、合理性以及有效性的满意率均高于建筑结构地震反应的ATMD控制分析方法、高层建筑地震反应的混合控制方法,且本文方法整体满意率大于0.97。由此可见,本文方法对带裙房高层建筑地震反应半主动控制下,应用效果较好,反馈较高。

### 3 结论

本文提出一种基于调质阻尼器的带裙房高层建筑地震反应半主动控制方法,得到了下列的结论:

该方法主要应用了ER/MR智能阻尼器,该阻尼器属于性能十分优越的半主动控制设备。

所提方法操作简单,不用格外使用能源,使用成本较低,但减震效果极好,应用性能优于主动控制设备。

(3) ER/MR杆件属于径向设定时,ER/MR智能杆件处于的环中径向杆件轴力变小程度较大,而近邻环中,径向杆件轴力的降低幅度较低,减震效果好。径向设定让结点的挠度缩小程度更大,同时结点挠度的变小也十分均衡,但环向设定让ER/MR杆件所处环中的结点挠度降低出现异常。

(4) 三类控制模式里,本文方法的半主动控制效果最佳,虽然三种控制模式均能够降低带裙房高层建筑地震反应,但本文方法中的控制模式跳跃性较小,稳定性较好。本文方法的减震性、实时性、可靠性、可操作性、合理性以及有效性的满意率均高于对比方法。

### 参考文献

- [1] 李歆,吕西林,Shirley Dyke.磁流变阻尼器的半主动控制及实时混合模拟试验研究[J].世界地震工程,2018,34(04):130-135.
- [2] 胡为,常天昊,傅莉,等.磁流变阻尼器的半主动控制算法设计与仿真[J].控制工程,2018,25(08):1585-1590.
- [3] 王梁坤,施卫星,周颖,等.半主动电涡流单摆式调谐质量阻尼器减震性能研究[J].建筑结构学报,2019,40(06):184-190.
- [4] 贾立夫,程东辉,熊慧中,等.多维Benchmark桥梁结构半主动控制策略[J].世界地震工程,2018,34(02):132-139.
- [5] 潘炜,闫政涛,朱石坚.基于模糊PID控制的磁流变半主动抗冲击系统最优设计研究[J].海军工程大学学报,2019,31(03):28-31+54.
- [6] 陈水生,刘宝龙,桂水荣.MR阻尼器对斜拉索振动控制效果的仿真分析[J].公路工程,2017,42(01):46-51+84.
- [7] 彭勇波,曾小树,陈建兵.考虑参数随机性的高层建筑风振舒适度的非线性黏滞阻尼器优化布设[J].建筑结构学报,2018,39(01):11-20.
- [8] 黄浩宇,张纹韶.不同种类形状记忆合金在结构振动控制中的研究现状[J].振动与冲击,2019,38(18):154-164.
- [9] 陶莉,涂静文.基于半主动阻尼器车辆跨度系统最优化控制[J].控制工程,2018,25(11):1988-1992.
- [10] 周创辉,文桂林.基于改进型天棚阻尼控制算法的馈能式半主动油气悬架系统[J].振动与冲击,2018,37(14):168-174.
- [11] 周颖,龚顺明.混合非线性黏弹性阻尼器非线性特征与力学模型研究[J].工程力学,2018,35(06):132-143.
- [12] 黄哲忱,袁宇波,张小易,等.热倒母线操作合闸可靠性在线预警技术研究[J].电力工程技术,2017,36(01):65-69+78.
- [13] 黄致谦,丁勤卫,李春.漂浮式风力机多频调谐质量阻尼器控制及其参数优化设计[J].动力工程学报,2019,39(1):72-78.
- [14] 闫振林.郑州某高层建筑裙房钢结构桁架建筑施工技术[J].钢结构,2018,33(06):89-92.
- [15] 廖小凤,雷旭.城市高层建筑智能火灾多感监测系统研究[J].现代电子技术,2019,42(16):67-70.