

文章编号: 1000-1301(2004)03-0064-09

# 带裙房高层建筑地震反应控制振动台试验研究

瞿伟廉<sup>1</sup>, 陈 静<sup>2</sup>, 徐幼麟<sup>3</sup>, C. L. Ng<sup>3</sup>(1. 武汉理工大学 土木工程与建筑学院, 湖北 武汉 430070; 2. 武汉理工大学 自动化学院, 湖北 武汉 430070;  
3. 香港理工大学 土木工程系, 香港 红磡)

**摘要:** 2002 年 9 月在香港理工大学成功地进行了带裙房高层建筑地震反应控制试验研究。设计和制作的模型是带 3 层裙房的 12 层高楼剪切模型, 在裙房顶层与主楼之间安装单 MR 阻尼器形成 MR 阻尼器耦联结构模型。MR 阻尼器采用美国 LORD 公司摩擦型 MR 阻尼器, 并且选用其配套产品计算机电流控制器对其进行控制, 控制系统采用德国 dSPACE 公司实时控制系统。对独立主楼、独立裙房和原结构模型的动力特性进行了辨识; 对结构模型进行了 El Centro 地震动作用下的地震反应振动台试验; 以作者提出的 MR 阻尼器半主动逻辑控制算法, 对 MR 阻尼器耦联的结构模型进行了地震反应振动台试验。试验结果表明: 用 MR 阻尼器耦联主楼与裙房, 采用半主动逻辑控制方法进行控制, 能有效抑制主楼的鞭梢效应并使主楼和裙房的地震反应减小。

**关键词:** 带裙房高层建筑; 地震反应; 半主动控制

中图分类号: P315.97

文献标识码: A

## Experiment investigation on semi-active seismic response control of tall building with podium structure

Qu Weilian<sup>1</sup>, Chen Jing<sup>2</sup>, Xu Youlin<sup>3</sup>, C.L.Ng<sup>3</sup>

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;

2. College of Automation, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;

3. Department of Civil and Structural Engineering, The Hong Kong Polytechnic University, Hung Hom, Kowloon, Hong Kong, China)

**Abstract:** The experiments on semi-active seismic response control of tall building with podium structure were carried out in The Hong Kong Polytechnic University in Sep. 2002. The tall building was constructed as a slender 12-storey building model whereas the podium structure was built as a relatively stiff 3-storey building model. An MR damper together with a current controller manufactured by the Lord Corporation, USA, was used to link the 3-storey building to the 12-storey building. The dSPACE real-time simulator system is used in the experiment. The dynamic characteristics of the two buildings without any connection and with a rigid connection were first identified. The two building models without any connection and with a rigid connection were then tested under the scaled El Centro 1940 N-S ground motion. Finally, the two building models connected by the MR damper manipulated by a semi-active logic control algorithm were tested under the specified ground motion. The experimental results show that the MR damper with the semi-active logic control algorithm could significantly mitigate the seismic whipping effect and reduce the seismic responses of both the tall building and the podium structure.

**Key words:** tall building with podium structure; seismic response; semi-active control

收稿日期: 2003-07-07; 修订日期: 2004-04-21

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(50038010)

作者简介: 瞿伟廉(1946-), 男, 教授, 主要从事结构振动智能控制和结构健康监测研究。

# 引言

带裙房高层建筑在主楼与裙房之间通常没有任何抗震措施。裙房的侧向刚度比主楼要大得多,导致裙房顶层到主楼过渡处的侧向刚度发生突变,其结果是结构在地震作用下产生鞭梢效应,用传统的抗震设计方法不容易解决。

针对以上现象,瞿伟廉和徐幼麟进行了理论研究<sup>[1]</sup>,探索使用MR阻尼器连接主楼与裙房来抑制结构地震反应鞭梢效应的可能性。首先建立了结构模型的动力方程,指出解决问题的关键,将主楼与裙楼脱开用MR阻尼器耦联主楼与裙房,能抑制主楼地震反应的鞭梢效应,提出了“开关-能耗”控制方法。以20层主楼带5层裙房的结构模型,对其进行了El Centro(1940 N-S)地震动作用下地震反应的数字仿真研究,结论是用MR阻尼器来耦联主楼与裙房,采用合适的控制算法是可以抑制主楼的鞭梢效应的,并能使主楼与裙房的地震反应减小,为解决带裙房高层抗震设计奠定了理论基础。陈静和瞿伟廉等提出了基于泛布尔代数的MR阻尼器半主动控制方法<sup>[3,4]</sup>,通过检测结构的反应作为反馈信号,基于一些试验和经验数据,应用泛布尔逻辑规则,确定MR阻尼器的动作,从而控制结构反应。作者针对MR阻尼器耦联的带裙房高层建筑的特点,提出了一种使用速度和位移反馈的MR阻尼器耦联的带裙房高层建筑的半主动逻辑控制方法<sup>[9]</sup>。

为了验证上述理论研究成果,并将其应用到实际工程中,2002年9月在香港理工大学土木及结构工程系结构动力实验室成功地进行了带裙房高层建筑地震反应控制试验。本文是对这次试验及其结果的总结,是前面工作的深入。文中介绍了结构模型的设计和制作,MR阻尼器及其电流控制器性能测试。结构模型由主楼与裙房组成,分为独立主楼与独立裙房、刚性连接和单MR阻尼器耦联等3种。其中刚性连接形成的结构模型就是“带裙房高层建筑”模型(简称原结构)。我们对独立主楼与独立裙房、原结构模型的动力特性进行了测试,并进行了独立主楼与独立裙房、原结构在El Centro地震动作用下的地震反应振动台试验和MR阻尼器耦联的结构模型在El Centro地震动作用下的反应的振动台试验。采用的控制算法是MR阻尼器半主动逻辑控制,我们将试验结果进行了比较研究。

## 1 试验建立

### 1.1 结构模型

根据瞿伟廉和徐幼麟的研究工作<sup>[1]</sup>,当裙房侧移刚度比较大时,在裙房与主楼结构的过渡处会形成结构层间侧移刚度的突变,从而引起主楼结构地震反应的鞭梢效应。据此,设计了12层带3层裙房的高层建筑试验结构模型,与剪切型结构动力特性相似,如图1所示。

结构模型用高强钢加工而成,弹性模数为200 GPa,屈服应力为435 MPa。12层主楼模型总高2.4m,楼板用4根50mm×6mm的矩形钢支撑,层净空高度0.184m,每层楼板尺寸是600mm×400mm×16mm,每层质量(包括立柱质量)为31.35 kg,层间侧移刚度为 $1.39 \times 10^6$  N/m。3层裙房模型总高0.6m,楼板用8根50mm×6mm的矩形钢支撑,层净空高度0.168m,每层楼板外形尺寸为1500mm×710 mm×32mm,在它中心有一个700 mm×500 mm的矩形开口,以便主楼能安装在裙房中间,两楼四边之间的空隙均为50 mm。每层质量(包括立柱质量)为183.61kg,层间侧移刚度为 $3.64 \times 10^6$  N/m。两个建筑模型焊接在一个底板上(25 mm厚),用14个高强度螺栓将底板紧固在振动台上。

裙楼每一层沿中心线分别与主楼用角钢连接,角钢在两个楼板上均用4个高强度螺栓连接形成刚性联接,实测两结构同层的反应接近于0。这种结构模型就是带裙房的高层建筑结构模型。

### 1.2 MR阻尼器及其电流控制器

为了抑制原结构主楼地震反应的鞭梢效应,独立主楼与独立裙房的第3层安装1只MR阻尼器。本试验结合模型大小,用数字仿真确定所需MR阻尼器提供的阻尼力的范围在100N左右。据此,本试验选用美国LORD公司生产的RD-1097-01X摩擦型阻尼器,连续和间断控制电流分别为0.5A和1.0A,活塞行程为50mm,MR阻尼器注入电流1.0A时能产生大于100N的阻尼力,电流为0.0A时其力小于9N,连续注入0.5A时容许的最高温度为70℃。本试验中输入0.5A电流的持续时间不超过30s。用频率为2Hz、行程为50mm的谐振波为激励,对MR阻尼器的动力特性进行了测试,得到输入电流与输出力的关系,如图2(a)所示。

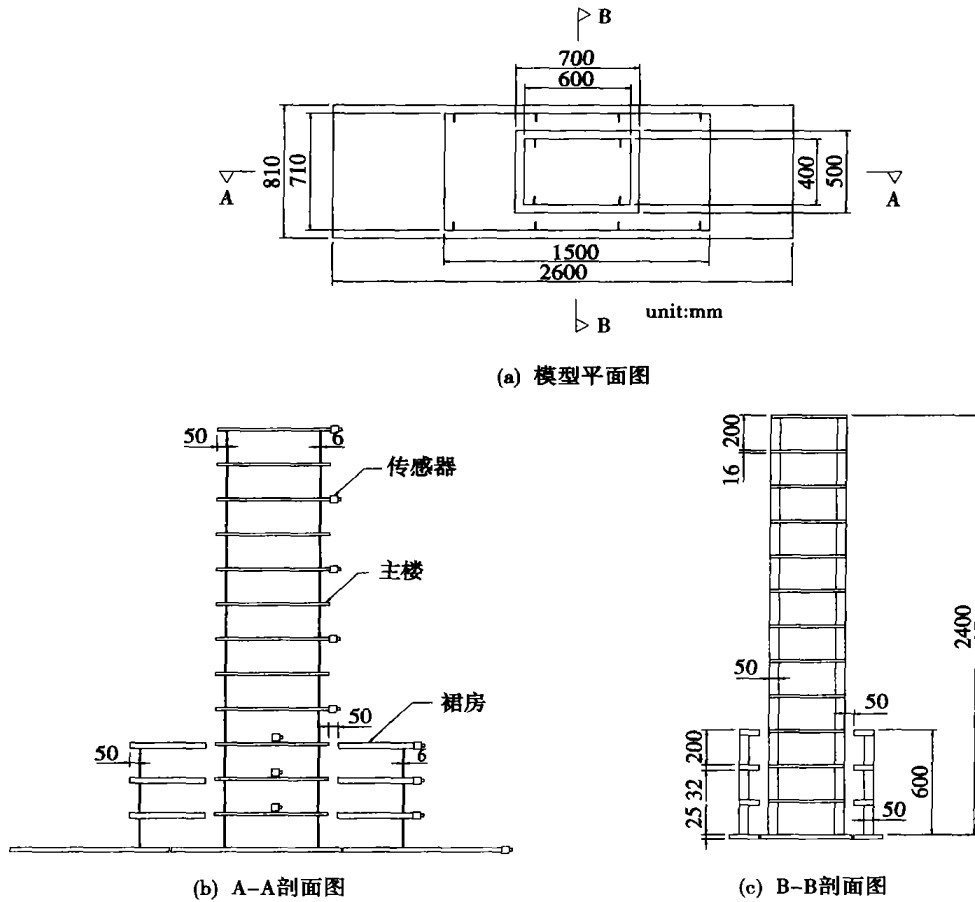


图1 主楼与裙房结构模型

为了获得MR阻尼器<sup>[2,3]</sup>的最佳控制效果,选用该阻尼器配套的电流控制器Wonder Box RD-3002-03。该电流控制器采用PWM脉宽调制方式。经过闭环测试,电流控制器的输出电流与控制电压呈线性关系,如图2(b)所示。0V~0.5V的控制电压的控制频率可高达1kHz,控制信号为0.0V~0.4V时输出电流为0.0A。

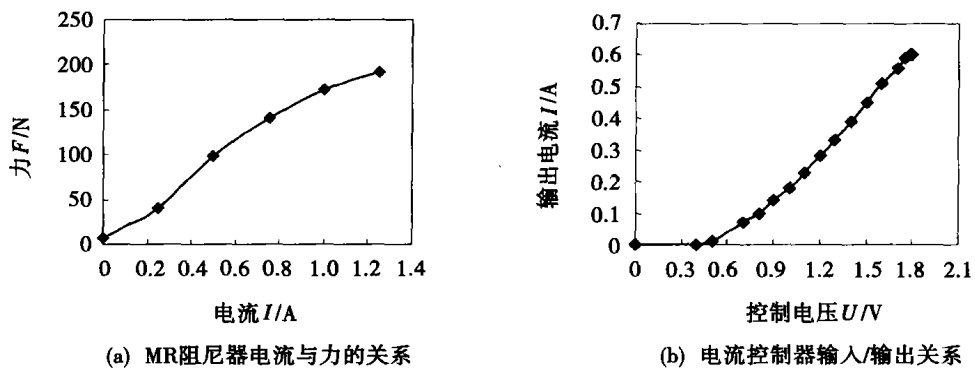


图2 MR阻尼器与电流控制器输入输出特性

### 1.3 地震模拟振动台与激励

试验在香港理工大学地震模拟振动台上完成。该振动台是美国MTS公司生产的单自由度地震模拟振动台MTS 469DU,台面尺寸为3.0m×3.0m,最大荷载100kN时的最大加速度为±1g,频率范围是0.1Hz~50Hz,行程为±100mm。使用El Centro(1940 NS)地震动作为输入激励,原始波的加速度峰值为0.319g,时间长度为62s,时间步长为0.039s。根据振动台的性能和调整技术,保证在具有“重复性”(高达95%以上)的前提下,达到本试验的目的原结构能产生鞭梢效应,经多次仿真与实验测试确定:幅值压缩比为35%,时间比为1:3,如图3所示。

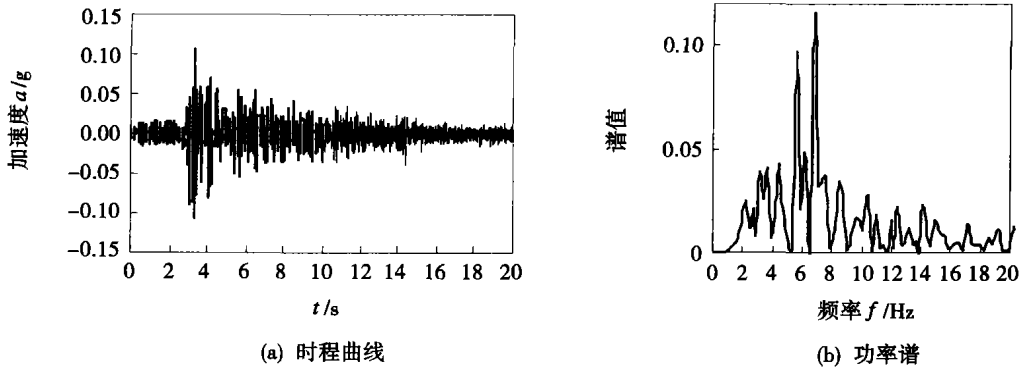


图3 El Centro 地震动

### 1.4 检测与控制系统

试验结构模型动力特性测试系统由信号检测、放大滤波器、智能信号自动采集分析仪 INV300E 和计算机等组成,如图4所示。

采用加速度传感器测量试验结构模型的反应,在振动台面布置一只加速度传感器,主楼的1,2,3,4,6,8,10,12层和裙房的1,2,3层上分别安装一只加速度传感器(见图1)。加速度传感器和放大滤波器均选用丹麦B&K公司生产的配套产品。加速度传感器的主要参数是其灵敏度( $PC/m/s^2$ )。放大滤波器的型号为2692和2635两种,其中2635是单通道的电荷滤波器,参数设置通过旋钮和旋转开关来设置,而2692是四通道的,参数设置和显示均在触摸屏上完成。它的参数设置包括灵敏度设置、工程单位( $m/s^2$ 、 $m/s$ 和 $mm$ )选择、测试范围(0.1, 0.316, 1, 3, 16, 10, 31.6, 100, 316, 1000)设定和滤波范围(下限:加速度:0.2或2Hz,速度:1或10Hz,位移:1或10Hz;上限:0.1, 1, 3, 10, 30, >100kHz)选择等4部分。某通道的灵敏度设置是根据接入该通道的加速度传感器的灵敏度来设置,放大和滤波器的滤波频率范围设置为:0.2~100Hz,其放大倍数根据检测的加速度的最大值与INV300E的参数来设置其范围,设置的放大倍数尽量使测得的信号在INV300E采集分析仪的量程的2/3位置左右。

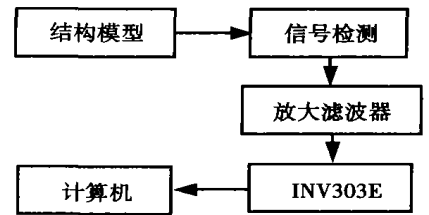


图4 试验结构模型动态特性测试系统组成框图

试验控制系统由信号检测变送、A/D转换器、控制器、D/A转换器和计算机电流控制器等组成,如图5所示。图中,虚线框为振动台控制部分,也是试验得以正常进行的保障之一。

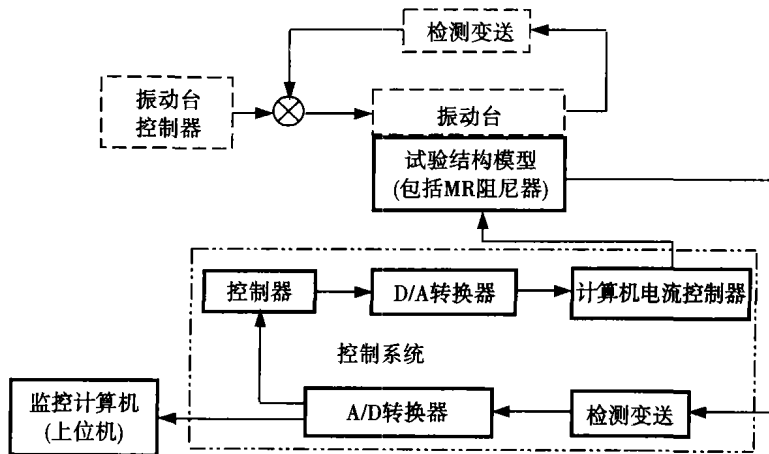


图5 试验控制系统框图

A/D转换器、控制器和D/A转换器选用由德国dSPACE公司生产的dSPACE实时控制系统。dSPACE实时控制系统是基于MATLAB/Simulink的控制系统开发及半实物仿真的软硬件工作平台,实现了和MATLAB/Simulink/RTW的完全无缝连接。dSPACE实时系统拥有具有高速计算能力的硬件系统,包括处理器、I/O等,

还拥有方便易用的实现代码自动生成/下载和试验/调试的软件环境。在 dSPACE 强大能力的支持下,可以很好地解决两大应用问题:实现快速控制原型 RCP(Rapid Control Prototyping)和实现半实物仿真 HILS(Hardware-in-the-Loop Simulation)。

控制器选用 DS1005 PPC 处理器板,它是 dSPACE 标准组件系统新推出的处理器板,它是主频为 480MHz 的 DSP 芯片。A/D 转换器选用 DS2003 32 通道 A/D 转换板,分辨率为 16 位,转换时间 73.2 $\mu$ s,量程  $\pm 5V$  或  $\pm 10V$ 。D/A 转换器选用 DS2102 6 通道并行处理的 D/A 转换板,量程  $\pm 5V$ 、 $\pm 10V$  或  $0V \sim 10V$ ,6 通道信号是用独立的 16 位 D/A 转换芯片进行转换的,16 位分辨率,1 个通道的转换时间是 0.05 $\mu$ s,6 通道信号转换完所需时间是 0.74 $\mu$ s。

dSPACE 软件系统分:(1)实现软件。Mathworks 公司的 MATLAB/Simulink、Real-Time Interface 和 RTW。(2)试验软件——综合试验环境(Control Desk)。Control Desk 是 dSPACE 开发的新一代试验工具软件。Control Desk 将提供对试验过程的综合管理。利用 Control Desk 可以实现对实时硬件的图形化管理、用户虚拟仪表的轻松建立、变量的可视化管理、参数的可视化管理和试验过程自动化。

## 2 结构动力特性

用力锤分别给独立主楼和独立裙房的顶层以及原结构的主楼第 5 层施加持续 60s 的脉冲力,检测试验结构模型反应加速度经放大器放大滤波后,送入智能信号自动采集分析仪 INV300E 进行分析得到结构的动力特性。试验结构模型的阻尼比采用半功率法来得到,而试验结构模型的自振频率和振型采用互功率谱分析方法来求,得到的独立主楼、独立裙房和原结构 3 种试验结构模型的前 3 阶实测阻尼比和自振频率,如表 1 所示。

表 1 结构阻尼比与自振频率实测值

模态	独立裙房		独立主楼		原结构	
	阻尼比/%	频率/Hz	阻尼比/%	频率/Hz	阻尼比/%	频率/Hz
1阶	0.93	9.08	1.29	3.91	1.67	4.39
2阶	0.39	27.86	1.02	11.24	0.55	10.23
3阶	1.02	40.08	0.46	18.57	0.51	15.59

从表 1 可以看出,原结构的自振频率和模态阻尼比与独立主楼(或独立裙房)不同。3 种结构的前 3 阶振型如图 6 所示。

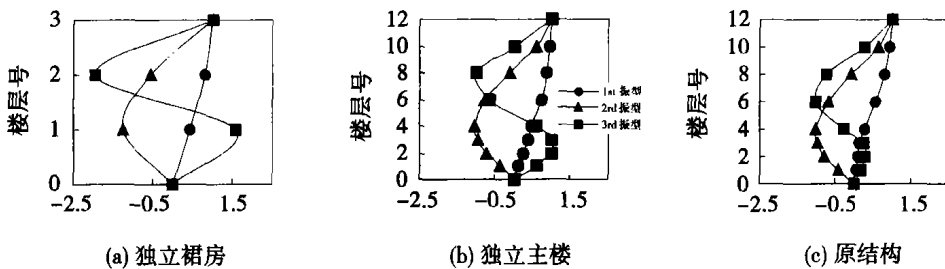


图 6 结构模型前 3 阶振型

## 3 独立主楼、独立裙房与原结构地震反应

在幅值为 0.13g、时间压缩比为 1/3 的 El Centro 地震动激励下,对独立主楼、独立裙房和原结构进行振动台试验,试验结果如图 7~图 9 所示。

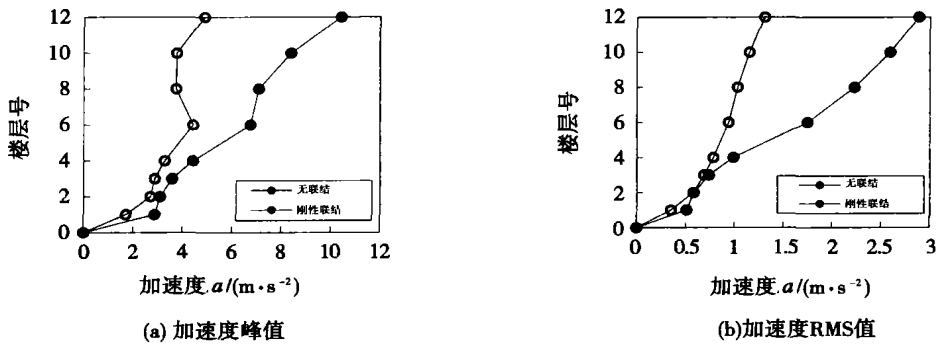


图7 独立主楼加速度

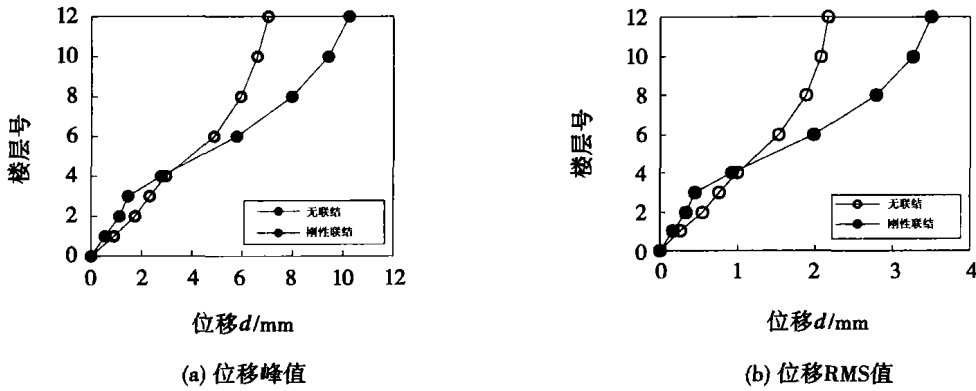


图8 独立主楼位移

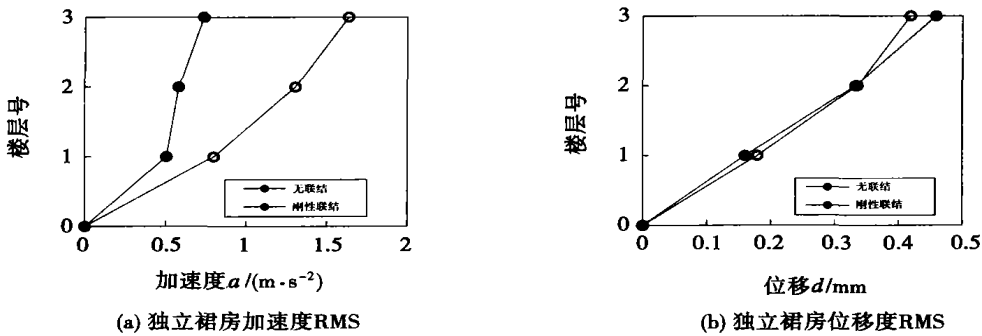


图9 独立裙房

从图7(a)和7(b)可以观察到,原结构加速度的最大值和RMS值与独立主楼比较前4层增加较少,高8层急剧加大,顶层达到最大。图8(a)和8(b)表明原结构前3层相对位移的最大值和RMS值比独立主楼要小,但高层越来越大,在顶层相对位移的最大值和RMS值比独立主楼分别增加了约46%和60%,同时还可以观察到原结构第三层与第四层的层间位移比独立主楼要大得多。从图8(a)和8(b)可有趣地观察到原结构与独立主楼相对位移曲线的包络线与它们的一阶振型非常相似(见图6(b)和6(c))。原结构第4层以上的楼层加速度和位移的剧烈增加,称之为鞭梢效应。从图9(a)和9(b)可以看出,对裙房而言,刚性联结与独立裙房的相对位移几乎一致,但是加速度减小了很多。以上试验结果再次验证了刚性联结就是原结构的假定。

### 4 结构地震反应的半主动控制

#### 4.1 MR 阻尼器半主动逻辑控制算法

作者于2002年提出了“MR 阻尼器半主动逻辑结构控制方法”<sup>[7]</sup>。该方法不需要建立MR 阻尼器、结构

系统的精确数学模型, 只需检测结构的反应作为反馈信号, 基于一些实验和经验数据, 应用泛布尔逻辑规则, 确定 MR 阻尼器的动作, 从而控制结构反应。

安装 MR 阻尼器结构点间的位移差用  $x_r$  表示, 速度差用  $\dot{x}_r$  表示。根据本试验中 MR 阻尼器的安装位置,  $x_r$  表示主楼与裙房第 3 层位移差,  $\dot{x}_r$  表示其速度差。平衡位置指表征结构正常状态时的反应  $x_r$  和  $\dot{x}_r$  的值, 分别用性能指标  $|x_r| \leq e_0$  和  $|\dot{x}_r| \leq c_0$  表示,  $e_0$  和  $c_0$  是大于或等于 0 的正数。由  $e_0$  和  $c_0$  性能指标分解, 速度和位移的 9 种组合如图 10 所示。据此, 逻辑控制器的运行规则如表 2 所示。

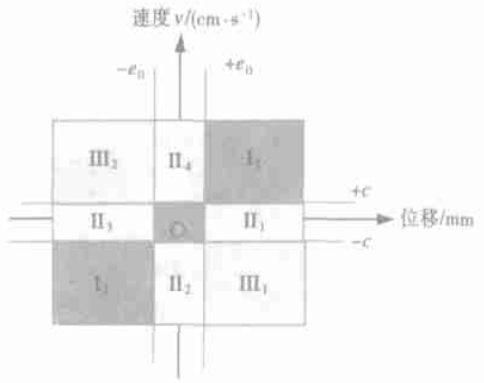


图 10 安装 MR 阻尼器结构点间的位移和速度组合图

根据基于泛布尔代数的逻辑控制方法<sup>[5]</sup>, 设逻辑控制的变量  $X_1$  表示  $x_r$ ,  $X_1$  的 3 个状态变量  $x_1^1, x_1^2$  及  $x_1^3$  是分别表示  $x_r$  的 3 种值的范围: “ $x_r < -e_0, |x_r| \leq e_0$  和  $x_r > e_0$ ”; 设逻辑控制的变量  $X_2$  表示  $\dot{x}_r$ ,  $X_2$  的 3 个状态变量  $x_2^1, x_2^2$  及  $x_2^3$  是分别表示  $\dot{x}_r$  的 3 种值的范围: “ $\dot{x}_r < c_0, |\dot{x}_r| \leq c_0$  和  $\dot{x}_r > c_0$ ”; 设  $Y_1$  表示逻辑控制的控制输出变量, 它的 4 个状态变量  $y_1^1, y_1^2, y_1^3$  及  $y_1^4$  对应于它的 4 种值“高电流 (HC), 低电流 (LC), 保持不变 (CC) 和 0 (NC)”。这样控制规则表 2 就符号化为表 3。

表 2 逻辑控制的控制规则表

位移 $x_r$	速度 $\dot{x}_r$		
	$x_r < -e_0$	$ x_r  \leq e_0$	$x_r > e_0$
$x_r < -e_0$	I <sub>2</sub> (HC)	II <sub>4</sub> (LC)	III <sub>2</sub> (CC)
$ x_r  \leq e_0$	II <sub>3</sub> (LC)	0 (NC)	II <sub>1</sub> (CC)
$x_r > e_0$	III <sub>1</sub> (CC)	II <sub>2</sub> (LC)	I <sub>1</sub> (HC)

表 3 逻辑控制的控制规则符号表

$X_1$	$X_2$		
	$X_2^1$	$X_2^2$	$X_2^3$
$x_1^1$	$y_1^1$	$y_1^2$	$y_1^3$
$x_1^2$	$y_1^2$	$y_1^4$	$y_1^2$
$x_1^3$	$y_1^3$	$y_1^2$	$y_1^1$

由表 3 得到逻辑控制的逻辑控制表达式, 并用泛布尔代数及其化简方法得到:

$$y_1^1 = x_1^1 \circ x_2^1 + x_1^3 \circ x_2^2 \tag{1}$$

$$y_1^3 = x_1^1 \circ x_2^3 + x_1^3 \circ x_2^1 \tag{2}$$

$$y_1^4 = x_1^2 \circ x_2^2 \tag{3}$$

$$y_1^2 = y_1^1 + y_1^3 + y_1^4 \tag{4}$$

式(1)~式(4)的逻辑表达式就是逻辑控制的逻辑控制模型。据此, 可实时计算出逻辑控制的控制输出量  $Y_1$  的四种值( $y_1^1, y_1^2, y_1^3$  及  $y_1^4$ )中的一个布尔值为“1”, 其余为“0”, 输出布尔值为“1”对应的控制输出量。

#### 4.2 结构地震反应的半主动控制

MR 阻尼器半主动逻辑控制的控制性能指标设为  $e_0=0.3\text{mm}$  和  $c_0=2\text{mm/s}$ , 控制输出 HC、MC、LC 和 NC 分别设为 0.6A、0.45A、0.35A 和 0.0A, 在给定的地震动作用下进行结构地震反应的半主动控制振动台试验。本试验中也研究了 Passive-off (MR 阻尼器的控制电流恒为 0)控制, 如果外部电源被切断或控制器无法正常工作, Passive-off 控制是 MR 阻尼器提供的最小有效控制。

半主动逻辑控制试验结果与独立主楼(独立裙楼)、原结构和 Passive-off 控制的比较如图 11 和图 12 所示。

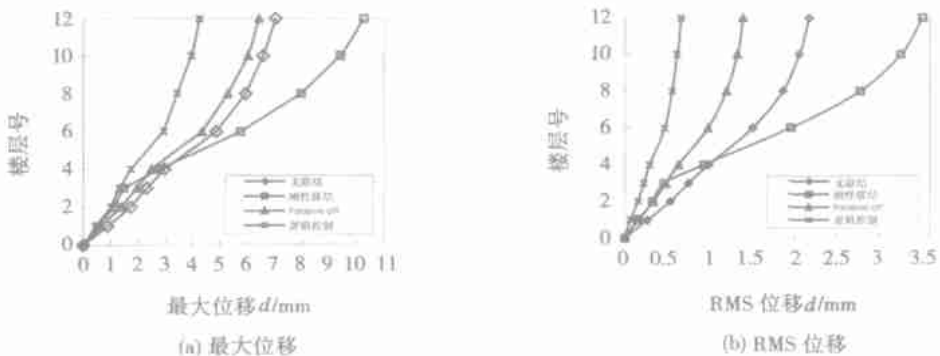


图 11 主楼位移

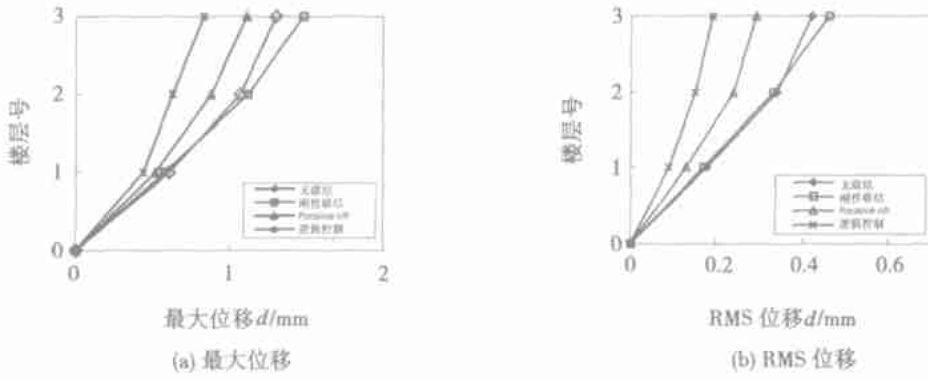


图 12 裙房位移

从图 11 和图 12 可以看出,对主楼而言,Passive-off 控制的位移反应比独立主楼的要小,Passive-off 控制能抑制原结构的鞭梢效应。同时可以观察到半主动控制的位移反应又比 Passive-off 控制要小得多,例如主楼顶层最大位移,原结构为 10.24mm,独立主楼为 7.02mm,Passive-off 控制为 6.41mm,半主动控制则为 4.24mm;对裙房而言,控制效果与主楼相似,半主动控制效果最好,例如裙房第 3 层最大位移,原结构为 1.48mm,独立裙房为 1.30mm,Passive-off 控制为 1.11mm,半主动控制则为 0.83mm。在原结构、独立主楼、Passive-off 控制和半主动控制 4 种不同方式下的主楼顶层位移时程曲线分别如图 13(a) ~ 图 13(d) 所示,进一步表明了半主动控制的有效性。

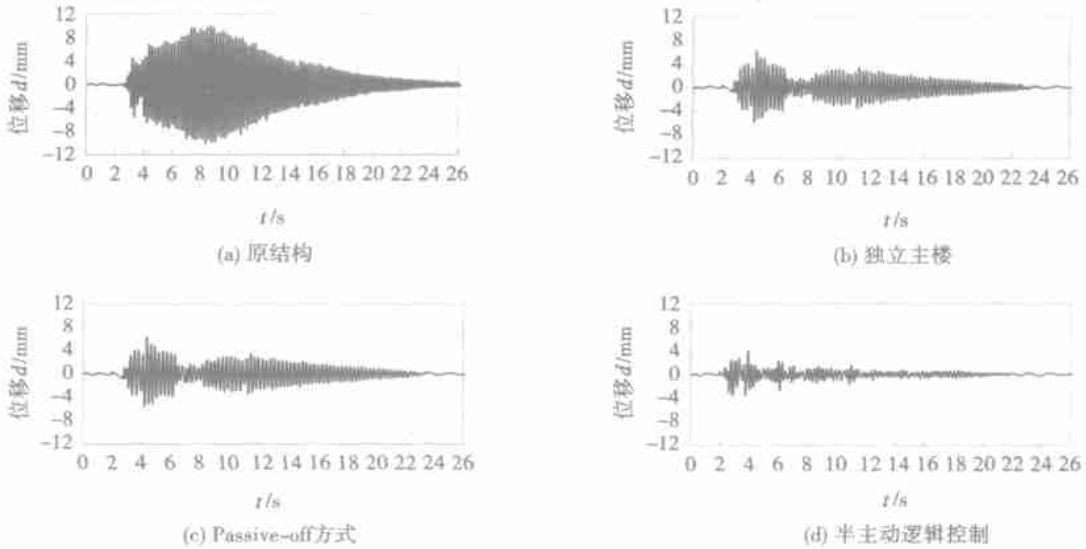


图 13 主楼顶层位移时程曲线

### 5 结语

本文就 MR 阻尼器耦联主楼与裙房能抑制主楼地震反应地震鞭梢效应并使两结构的地震反应减小进行了大量的振动台试验。可以得到以下结论:

- (1) 设计的试验结构模型能满足研究需要,原结构在 El Centro (NS1940) 幅值压缩 35%,时间压缩比为 1 : 3 的地震动作用下能产生鞭梢效应;
- (2) 将主楼与裙房脱离,用 MR 阻尼器来耦联它们能抑制带裙房高层建筑地震反应的鞭梢效应,即是 Passive-off 控制;
- (3) 选用作者于 2002 年提出的 MR 阻尼器半主动逻辑控制方法进行半主动控制,不但能抑制带裙房高层建筑地震反应的鞭梢效应,使两结构的地震反应减小,而且减振效果非常明显,如主楼顶层位移,比原结构



减少 59%，比独立主楼减小 40%，比 Passive-off 控制减小 34%。

(4) 试验结论与文献[1]的理论研究结果一致，为推动这项技术在实际工程中的应用奠定了基础。

#### 参考文献:

- [1] Qu W L, Xu Y L. Semi-active control of seismic response of tall buildings with podium structure using ER/MR dampers[ A] . The Structural Design of Tall Buildings[ C] . 2001, 10: 179~192.
- [2] Dyke S J, Spencer B F. Seismic response control using multiple MR dampers[ A] . Proc. of 2nd Int. Workshop on Structural Control[ C] . Hong Kong, 1996. 163~173.
- [3] Ribakov Y, Gluck J. Active control of MDOF structures with supplemental electro-rheological fluid dampers[ J] . Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1999, 28: 143~156.
- [4] Xu Y L, Qu W L, Ko J M. Seismic response control of frame structures using magnetorheological/ electrorheological dampers[ J] . Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2000, 29: 557~575.
- [5] Chen Jing, Qu W L, Zhang N L. Vibration control principium for structures based on panBoolean algebra[ J] . Noise And Vibration Control, 2002, 22 (3): 37~38.
- [6] Qu W L, Chen Jing, Xu Y L. Experimental investigation of semi-active control of tall buildings with podium structure using a MR damper[ A] . Conference on China-Japan Workshop on Vibration, Controller and Health monitoring of structures & third Chinese Symposium on Structural Vibration Control[ C] . Shanghai, China, December 2002, 8~12.
- [7] 陈静, 瞿伟廉, 徐幼麟. MR 阻尼器藕联的带裙房高层建筑的半主动逻辑控制[ J] . 地震工程与工程振动, 2003, 23(2): 150~153.