

# 基于 Matlab-OpenSEES 混合编程的 子结构试验系统

陈再现<sup>1</sup>, 孔文江<sup>1</sup>, 王焕定<sup>2</sup>, 王琨<sup>3</sup>

(1. 哈尔滨工业大学(威海)土木工程系, 山东 威海 264200;

2. 哈尔滨工业大学 土木工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150090; 3. 扬州大学 建筑科学与工程学院, 江苏 扬州 225127)

**摘要:** 利用 Matlab 的强大矩阵运算功能、以及 OpenSEES 的开源特性, 采用混合编程方法, 建立了基于 Matlab-OpenSEES 的子结构混合模拟试验系统. 详细介绍了子结构混合模拟系统的组成及其原理, 即 Matlab 模块、OpenSEES 数值子结构模拟模块以及两者的接口. 其中, Matlab 模块主要实现运动方程计算、试验子结构加载控制以及数据采集功能; OpenSEES 数值子结构模拟模块为子模块, 实现子结构的数值模拟分析, 供 Matlab 模块调用; 接口可通过读写文本或 Socket 通信变量实现两者数据传输. 该系统可以直接在外接的计算机上编程独立实现, 再通过数据采集卡与电液伺服设备控制系统硬件的 I/O(输入/输出)通道连接即可, 从而避开了设备控制系统复杂的底层编程技术, 减少了对控制系统本身的要求, 降低了试验难度和费用. 通过 3 个大比例尺结构试验模型的系统子结构混合模拟试验结果, 验证了所提出的子结构试验系统的可行性.

**关键词:** 子结构; 混合模拟; Matlab; OpenSEES; 大比例尺  
**中图分类号:** TU317.1 **文献标志码:** A

## Substructure Testing System Based on Mixed Programming of Matlab and OpenSEES

HEN Zaixian<sup>1</sup>, KONG Wenjiang<sup>1</sup>, WANG Huanding<sup>2</sup>, WANG Kun<sup>3</sup>

(1. Department of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology at Weihai, Weihai 264200, China; 2. School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China; 3. College of Civil Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225127, China)

**Abstract:** Utilizing the powerful matrix calculating function from Matlab and the open-source characteristics from OpenSEES, this paper proposes a substructure testing system based on Matlab-OpenSEES by adopting mixed programming.

It introduces three basic components, which are the Matlab module, the OpenSEES numerical substructure simulation module and the interface function between Matlab and OpenSEES, and the principle of the proposed substructure system. The Matlab module is used to realize the function of solving motion equation, the loading control, and data acquisition of experimental substructure. The OpenSEES numerical substructure simulation module, which is a sub-module called by Matlab module, is used to realize the numerical simulation analysis of numerical substructure. The interface is used to realize the data transmission between Matlab and OpenSEES by the text or Socket communication variables. The proposed system can be programmed on an external computer connected with the hardware I/O channel of the MTS electro-hydraulic servo control system through the data acquisition card. In this way, the system can not only avoid the complex underlying programming technology of the electro-hydraulic servo control system, but also reduce the requirement of system itself and finally reduce the test difficulty and cost. The test results of three large-scale structure test models verify the feasibility of the proposed substructure testing system.

**Key words:** substructure; hybrid simulation; Matlab; OpenSEES; large-scale

目前, 在实验室进行的结构抗震试验方法主要有 3 种: 拟静力试验、地震模拟振动台试验、拟动力子结构试验(又称为联机试验或混合试验). 拟静力试验由于加载制度简单、稳定, 而应用最为广泛, 但是其缺点在于加载制度主观确定, 与实际地震作用历程无关, 不能直接考虑地震动对结构的影响, 较多地应用于构件试验, 很少进行整体结构模型试验. 振

收稿日期: 2016-05-03

基金项目: 国家自然科学基金(51678199); 国家自然科学基金国际合作项目(51161120360); 江苏省结构工程重点实验室资助课题(ZD1301); 江苏省自然科学基金青年项目(BK20140489)

第一作者: 陈再现(1981—), 男, 副教授, 工学博士, 主要研究方向为结构试验方法. E-mail: zaixian\_chen@sina.com.cn

动台试验能最真实地模拟地震对结构的影响,但是由于振动台尺寸及承载能力的限制,即使目前世界上最大的振动台——日本的 E-Defense(台面尺寸 20 m×15 m),对于很多结构模型来说,也往往只能进行缩尺结构试验.由于小尺度结构模型的动力相似率很难满足要求,且受尺寸效应的影响,尤其是进入非线性后,振动台试验不能很好地反映结构真实的抗震性能及抗震能力.虽然,近年来,有人将子结构技术引入到振动台试验中,提出了子结构振动台试验,为振动台试验发展注入了新的思路,然而其依然突破不了振动台台面尺寸的局限<sup>[1-3]</sup>.子结构试验方法源于日本学者 Hakuno<sup>[4]</sup>在 1969 年提出的拟动力试验,其将整体结构模型中非线性比较复杂的关键部位划分成试验子结构进行实际物理试验,而将其其他部分通过数值模拟实现,大大降低了试验规模,使进行足尺模型抗震性能试验成为可能.此外,由于振动台昂贵的建设费用,目前,国内拥有振动台试验能力的院校及科研机构远远少于拥有子结构试验的硬件条件(反力墙和电液伺服加载系统)的单位.因此,采用子结构试验方法普遍被看作是一种经济合理、应用前景广泛的试验方法.

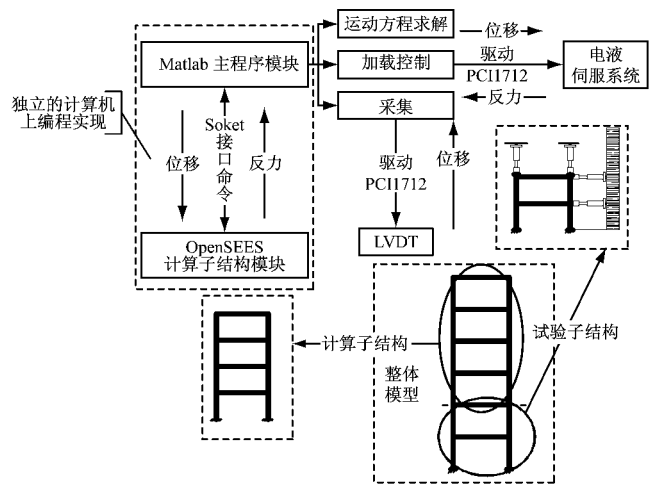
进入 21 世纪之后,随着网络技术及有限元的飞速发展,子结构试验方法出现了向网络化、精细化发展的趋势,多个国家开始逐步构建网络化结构试验室,其中规模最大的是美国 1999 年启动的 NEES (network for earthquake engineering simulation) 计划<sup>[5]</sup>,并开发了多种拟动力子结构试验平台(包括 OpenFresco<sup>[6]</sup>、UI-Simcor<sup>[7]</sup>、TUT<sup>[8]</sup>、NetSLab<sup>[9]</sup>、HyTest 等).为了推动我国子结构试验方法的发展,许国山等<sup>[10]</sup>在 OpenFresco 基础上,开发了基于 OpenSEES-OpenFresco-dSPACE 和 OpenSEES-OpenFresco-LabView-dSPACE 两套混合模拟系统.其中,OpenSEES 实现计算子结构模拟,OpenFresco 实现软件接口,LabView/dSPACE 实现试验子结构控制加载.这些复杂的子结构试验系统极大地推动了子结构试验方法的发展,但它们对于非抗震试验技术领域人员来说,需要熟悉多个软件的工作性能,并掌握各个软件之间的接口,尤其是上述系统多是基于 MTS FlexTest 平台基础的研发(如 OpenFresco、TUT、NetSLab、HyTest 等),程序的开发和扩展还涉及到试验设备控制系统的复杂底层技术,对非专业人员来说开发难度较大,从而浪费大量精力,而不能将主要精力集中在本身课题的研究.此外,很多子结构试验系统均需要使用人员开发相应

软件,比如目前使用最多的基于 OpenFresco 的试验系统,只能采用其开发的几个常规的试验单元,如果是复杂特殊试验模型形式,比如本文为了减少加载控制难度,选用的在结构反弯点处作为界面,就没有相应试验单元可用.

基于上述考虑,本文提出一种不涉及任何试验设备控制系统的外部命令控制方法,采用目前学者所熟悉的开发软件 Matlab 实现运动方程的求解、试验子结构控制加载以及数据采集等功能,调用有限元软件 OpenSEES,建立了通用子结构试验系统.其中,Matlab 部分可以作为黑匣子提供给系统应用人员,其只用根据本身所需利用 OpenSEES 建立适合自身结构模型的计算子结构数值模型即可.当然,如果使用人员熟悉其他有限元软件,如 ABAQUS 和 ANSYS 等,只需修改 Matlab 与其接口程序即可.

## 1 系统组成及原理

本文建立的子结构试验系统通过 Matlab 和 OpenSEES 混合编程实现,主要包括 Matlab 计算加载控制采集模块、OpenSEES 数值子结构模拟模块以及两者的接口,如图 1 所示.



LVDT: linear variable differential transformer

图 1 系统原理

Fig.1 System schematic

由图 1 可知,本文提出的子结构试验系统,是独立于 MTS 电液伺服设备控制系统的,其可以直接在外接的计算机上编程实现,再通过数据采集卡与 MTS 电液伺服设备控制系统硬件的 I/O(输入/输出)通道连接即可,从而避开了设备控制系统复杂的底层编程技术,减少了对控制系统本身的要求(通常设备控制系统的计算通道数目和函数非常有限,且

价格昂贵),降低了试验难度和费用.图 1 中试验子结构控制加载系统是以 MTS 电液伺服系统为例,对于任何其他控制系统,只要找到与硬件系统对应的 I/O 通道,本文提出的子结构试验系统即可应用,具有很好的通用性.

### 1.1 Matlab 模块

Matlab 软件具有强大的矩阵运算功能,并且含有丰富的应用工具箱功能,便于编程.因此,选择 Matlab 软件实现运动方程计算、试验子结构加载控制以及数据采集功能.

#### 1.1.1 计算加载控制模块

计算加载控制模块是本子结构试验系统的核心部分,主要实现运动方程的求解和试验子结构系统的控制加载,其流程如图 2 所示.求解运动方程如下:

$$M\mathbf{a}_{i+1} + C\mathbf{v}_{i+1} + \mathbf{R}_N(\mathbf{d}_{i+1}) + \mathbf{R}_E(\mathbf{d}_{i+1}) = -M\mathbf{I}\bar{\mathbf{x}}_{g,i+1} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{d}$ 、 $\mathbf{v}$ 、 $\mathbf{a}$  分别为整体结构的位移、速度和加速度  $n \times 1$  阶向量( $n$  为整体结构的自由度); $\mathbf{M}$  为  $n \times n$  阶质量矩阵; $\mathbf{C}$  为  $n \times n$  阶 Rayleigh 阻尼矩阵; $\bar{\mathbf{x}}_{g,i+1}$  为第  $i+1$  步地震动记录; $\mathbf{I}$  为  $n \times n$  阶单位向量; $\mathbf{R}_N$  为计算子结构  $n \times 1$  阶恢复力向量; $\mathbf{R}_E$  为试验子结构  $n \times 1$  阶恢复力向量,其通常采用电液伺服作动器内置的力传感器测得其反力后换算得到.

算法采用平均加速度法,其算法系数选取  $\alpha=0$ 、 $\beta=1/4$ 、 $\gamma=1/2$ ,则第  $i+1$  步的加速度和速度表达式如下:

$$\mathbf{a}_{i+1} = \frac{4}{\Delta t^2} \left( -\mathbf{d}_i - \Delta t \mathbf{v}_i - \frac{\Delta t^2}{4} \mathbf{a}_i + \mathbf{d}_{i+1} \right) \quad (2)$$

$$\mathbf{v}_{i+1} = -\frac{2}{\Delta t} \mathbf{d}_i - \mathbf{v}_i + \frac{2}{\Delta t} \mathbf{d}_{i+1} \quad (3)$$

式中: $\Delta t$  是积分时间间隔.

将式(2)、(3)代入式(1)中整理得到

$$\mathbf{R}_N(\mathbf{d}_{i+1}) + \mathbf{K}_{PD}\mathbf{d}_{i+1} + \mathbf{R}_E(\mathbf{d}_{i+1}) = \mathbf{F}_{EQ,i+1} \quad (4)$$

$$\mathbf{K}_{PD} = \frac{4\mathbf{M}}{\Delta t^2} + \frac{2\mathbf{C}}{\Delta t} \quad (5)$$

式中: $\mathbf{K}_{PD}$  为拟动力刚度.

$$\mathbf{F}_{EQ,i+1} = -M\mathbf{I}\bar{\mathbf{x}}_{g,i+1} + M\mathbf{a}_i + \left( \frac{4\mathbf{M}}{\Delta t} + \mathbf{C} \right) \mathbf{v}_i + \left( \frac{4\mathbf{M}}{\Delta t^2} + \frac{2\mathbf{C}}{\Delta t} \right) \mathbf{d}_i \quad (6)$$

将  $\mathbf{F}_{EQ,i+1}$  称之为第  $i+1$  步的等效力命令,由式(6)可知,在第  $i+1$  步时其为已知值,而且只有在式(4)等式左边(称之为等效力反馈值)等于该步等效力命令时,即可得第  $i+1$  步的位移反应,从而利用式(2)和(3)计算出第  $i+1$  步的速度、加速度反应.

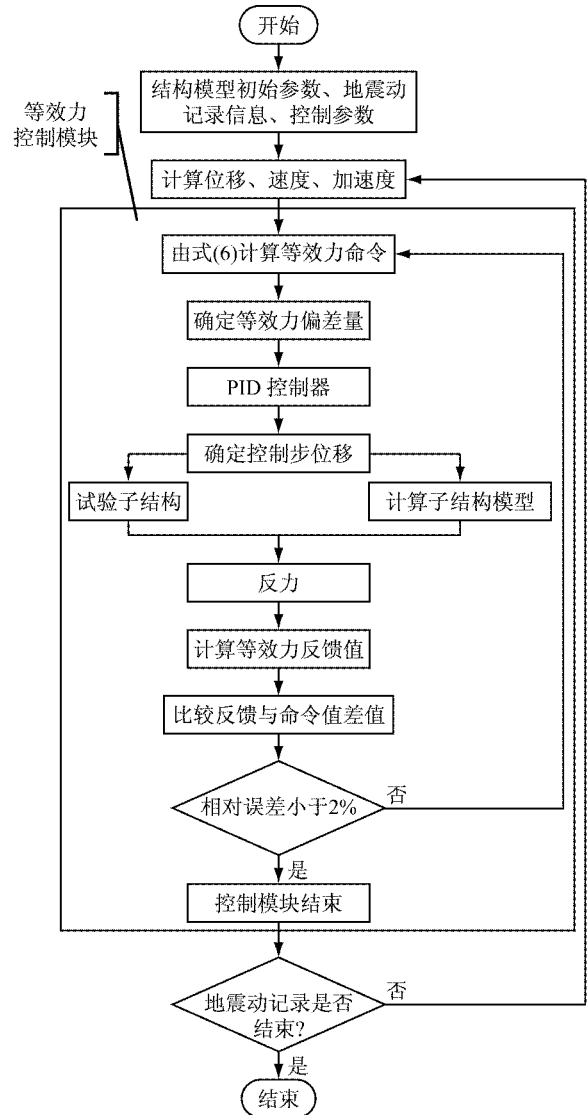


图 2 计算控制流程图

Fig. 2 Flowchart for calculation and control

为使控制等效力平稳追踪等效力命令,本文采用 PID(proportional integral derivative) 控制,控制量为试验子结构的位移,采用闭环控制系统,即反馈控制,使等效力反馈值(等式(4)左边)平稳渐近地趋于等效力命令(等式(4)右边),其已被作者广泛应用于多自由度子结构位移控制<sup>[11-12]</sup>.

#### 1.1.2 采集模块

采集模块主要实现试验模型位移采集、向电液伺服加载系统发送位移以及采集其反力等功能.本试验系统选用研华 PCI 1712 数据采集卡实现,当然可以选用研华其他系列采集卡、NI (national instruments) 系列采集卡等. Matlab 软件为研华系列采集卡提供了模拟输入、模拟输出的驱动控制模块,同时在研华公司主页上提供实时更新的各种情况下 I/O 实现的 .m 文件供用户免费下载使用,本文

就是利用在该网站下载的程序 AsynchronousOneBufferedAI.m 和 StaticAO.m 修改实现的。目前,子结构试验系统选用的 PCI 1712,有 1 M 转换速度的 12 位 A/D (analog-to-digital) 转换器,卡上带有 FIFO (first in、first out) 缓冲器(可存储 1 k A/D 采样值和 32 k D/A 转换数据),提供 16 路单端或 8 路差分的模拟量输入(也可单端差分混合使用),2 路为 D/A 模拟量输出通道,本文中选用的均为差分输入。具体管脚线如图 3 所示,具体输入、输出管脚线接法详见官网上提供的用户手册。

AI0	68	34	AI1
AI2	67	33	AI3
AI4	66	32	AI5
AI6	65	31	AI7
AI8	64	30	AI9
AI10	63	29	AI11
AI12	62	28	AI13
AI14	61	27	AI15
AIGND	60	26	ANA_TRG
AO0_REF	59	25	AO1_PEP
AO0_OUT	58	24	AO1_OUT
AOGND	57	23	AOGND
AO_CLK	56	22	AI_TRG
DGND	55	21	DGND
AO_CLK	54	20	AO_TRG
CNT0_CLK	53	19	CNT0_GATE
CNT0_OUT	52	18	DGND
CNT1_CLK	51	17	CNT1_QATE
CNT1_OUT	50	16	DGND
CNT2_CLK	49	15	CNT2_GATE
CNT2_OUT	48	14	DGND
DIO0	47	13	DK1
DIO2	46	12	DK3
DIO4	45	11	DK5
DIO6	44	10	DK7
DGND	43	9	DGND
DIO8	42	8	DK9
DIO10	41	7	DK11
DIO12	40	6	DK13
DIO14	39	5	DK15
DGND	38	4	DGND
AI_TRG_OUT	37	3	AI_TRG_OUT
NC	36	2	NC
+12 V	35	1	+5 V

图 3 PCI 1712 管脚线

Fig. 3 PCI 1712 connectors

此外,为了方便子结构试验过程中随时观测、应变采集等,在每步发送采集完成后,在程序中设置暂停命令,等待用户反馈后进行下步运算。

## 1.2 计算子结构模块

计算子结构模块为子结构试验系统的子程序,可供 Matlab 主程序调用,其可根据用户整体模型及子结构模型选择情况,设置单个或多个计算子结构模块,从而实现分布式子结构试验。

OpenSEES 是 Open System for Earthquake Engineering Simulation 的简写,是一款面向对象的开源性有限元软件,初期主要由加州大学伯克利分校研发。其最大的特点是源代码的开放性,可为全世界相关研究人员所用,同时任何研发人员编写的被公认编码随时可加入到软件模块中,具有很好的应用和发展前景,得到越来越多研究人员的青睐。因此,本文选用 OpenSEES 软件进行计算子结构模拟。当然,用户可以根据自身情况,选用其他有限元软件,如 ABAQUS、ANSYS 等,只需修改 Matlab 与其接口程序即可。

## 1.3 接口

### 1.3.1 Matlab 与 OpenSEES 接口

子结构试验系统采用了两种接口方式实现编程软件 Matlab 和有限元软件 OpenSEES 的数据传输功能:① 读写文本文件,当需要向对方软件传输数据时,需要向两个文本文件写入数据,一个记录需传输的数据,另一个为对方软件的开关命令,比如当文件为 0 时,对方软件暂停等待读入数据,当文件变为 1 时,对方软件才开始读入数据;同理,当该软件输出数据后,就读对方软件给予的开关命令文件,等待对方软件传输数据;② Socket 通信变量传输,通过 Socket 命令建立软件间的 TCP/IP (transmission control protocol/internet protocol) 通讯地址,实现软件间的变量直接传输。其中,读写文本方法比较繁琐,且读写文本增加了系统的风险,但其最大的优势就是可以实现任意软件之间的传输,也即采用此法用户目前就可用任意有限元软件。而对于 Socket 通信变量传输,直接实现两个软件间相应变量传输,大大提高了效率,减少系统风险,但目前仅实现 Matlab 和 OpenSEES 之间的传输,其他有限元软件和 Matlab 的接口还需进一步探索。

### 1.3.2 Matlab 和 MTS 电液伺服设备控制系统接口

Matlab 和 MTS 电液伺服设备控制系统之间接口通过硬件-数据采集卡实现,即将数据采集卡插入到 Matlab 实现的计算机主机内,通过屏蔽线将其与 MTS 电液伺服设备控制系统对应的 I/O 通道连接起来。数据采集卡的连线和驱动参考 1.1 中采集模块介绍。

## 2 系统验证

在前面建立的系统基础上,目前完成了 3 个大

比例尺模型的子结构混合模拟试验. 其中, Matlab 模块、OpenSEES 数值子结构模拟模块以及二者的接口在如图 4 所示的普通计算机上完成. 该计算机实现本文所提出子结构混合模拟系统的程序计算和显示功能, 可以在试验时实时追踪计算程序中的所有数据, 从而监控试验进程, 如图 5 所示的等效力命令和等效力反馈值的比较曲线. 同时, 该计算机通过和图 6 所示的数据卡 PCI 1712 连接, 实现程序计算计算机和 MTS 电液伺服设备控制计算机之间的数据传输. 图 7 为 MTS 电液伺服设备控制计算机. 该计算机实现从数据卡 PCI 1712 接收到数据通过 MTS 控制柜发送到电液伺服加载器上, 实现模型的加载, 同时将电液伺服作动器反馈的信号再传递给 PCI 1712. 文中地震动参数输入均为南北方向 El Centro 地震动.



图 4 程序实现计算机

Fig. 4 Computer for program implementation

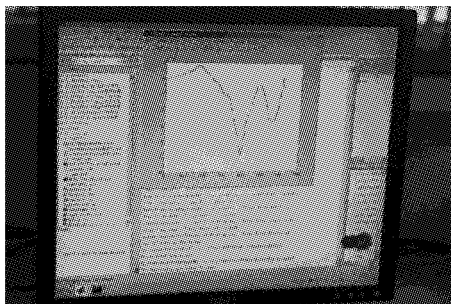


图 5 试验时追踪数据显示

Fig. 5 Tracking data display in test

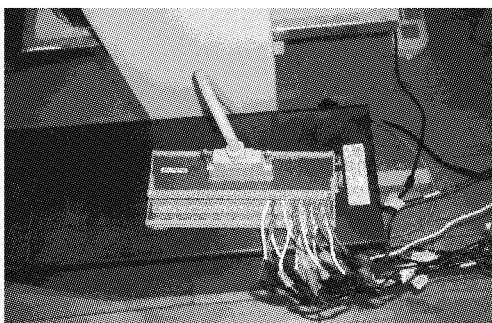


图 6 PCI 1712 数据卡

Fig. 6 PCI 1712 data acquisition card



图 7 MTS 控制计算机

Fig. 7 Computer for MTS control

## 2.1 底框配筋砌块短肢砌体剪力墙模型

该模型总层数为 6 层, 平面尺寸为  $4.0 \text{ m} \times 6.0 \text{ m}$ , 底部一层为框支层, 层高为  $3.6 \text{ m}$ , 柱截面为  $400 \text{ mm} \times 550 \text{ mm}$ , 梁截面为  $300 \text{ mm} \times 600 \text{ mm}$ , 上部 5 层为配筋砌块砌体剪力墙层, 层高为  $3 \text{ m}$ , 墙厚为  $190 \text{ mm}$ . 试验子结构模型选取底部 3 层, 采用本文提出的子结构试验系统完成了峰值加速度为  $0.35g$ 、 $0.70g$ 、 $1.10g$ 、 $2.20g$ 、 $2.60g$ 、 $3.10g$ 、 $3.50g$  系统子结构试验, 研究结构模型的抗震性能和抗震能力<sup>[13-14]</sup>. 试验子结构模型如图 8 所示, 其是在哈尔滨工业大学结构与抗震试验大厅完成, 水平加载装置采用在每层放置 1 个电液伺服作动器控制加载实现.

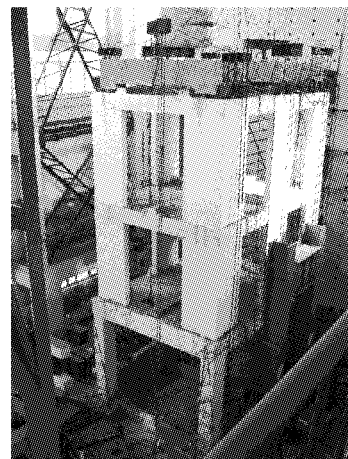


图 8 框支配筋砌块短肢砌体剪力墙模型

Fig. 8 Model of frame-supported reinforced concrete masonry short-leg shear wall structure

图 9 为峰值加速度为  $2.20g$  时的等效力命令和等效力反馈的比较时程曲线. 从图 9 可以看出, 等效力反馈值可以很好地追踪到等效力命令, 说明本文提出的子结构系统的控制模块是可行的. 各工况下的位移时程及滞回曲线如图 10 和图 11 所示, 这里

仅给出试验子结构 1 层结果. 从图 9~11 可以看出, 采用本文提出的子结构试验系统可以很好地评价多自由度结构体系抗震能力.

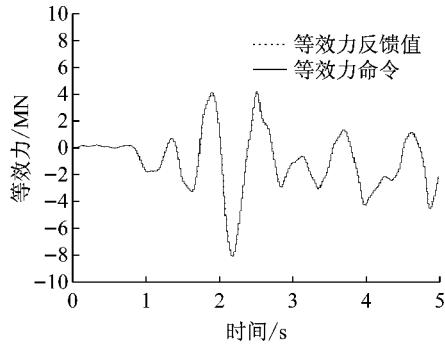


图 9 试验子结构 1 层等效力反馈值与命令比较时程曲线 (底框模型)

Fig.9 Feedback versus command of equivalent force (frame-supported model)

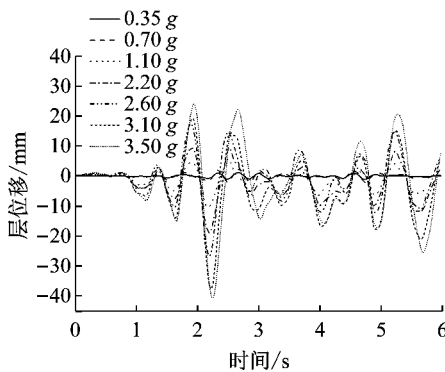


图 10 试验子结构 1 层位移时程(底框模型)

Fig. 10 Displacement time history of first floor at different ground accelerations ( frame-supported model)

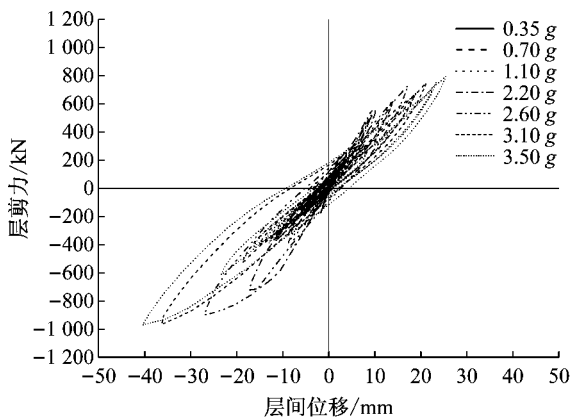


图 11 试验子结构 1 层滞回曲线(底框模型)

Fig.11 Hysteresis loops of first floor (frame-supported model)

2.2 装配 RC(reinforced concrete)剪力墙结构模型 该模型总层数为 12 层,各层层高均为 3.0 m,地

梁高度为 0.6 m,平面尺寸 4.2 m×3.0 m,连梁截面均为 200 mm×400 mm. 试验子结构模型选取底部 3 层,采用本文提出的子结构试验系统完成了峰值加速度为 0.35g、0.70g、1.10g、2.20g 的系统子结构试验,研究装配式结构模型在地震作用下的水平、竖向连接性能<sup>[15]</sup>. 试验子结构模型如图 12 所示,其是在哈尔滨工业大学结构与抗震试验大厅完成. 水平加载装置采用 4 个电液伺服作动器加载控制:在 1 层和 2 层中轴线位置分别作用 1 个作动器,在 3 层中轴线两侧对称位置分别作用 2 个作动器. 图 13 为峰值加速度为 2.20g 时的等效力命令和等效力反馈的比较时程曲线. 从图 13 同样可以看出,等效力反馈值可以很好地追踪到等效力命令,说明本文提出的子结构系统的控制模块可行. 试验子结构 1 层的滞回曲线如图 14 所示. 从图中可以看出,结构模型已经进入了下降段,说明本文提出的子结构试验系统可以得到复杂多自由度体系模型在地震作用下的

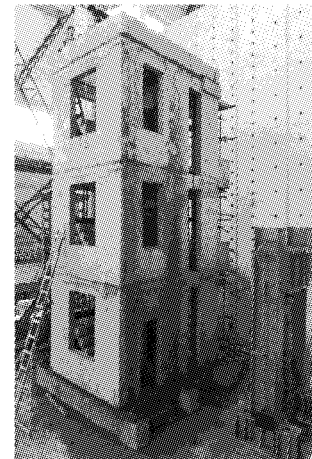


图 12 预制 RC 剪力墙结构模型

Fig.12 Model of precast reinforced concrete shear wall structure

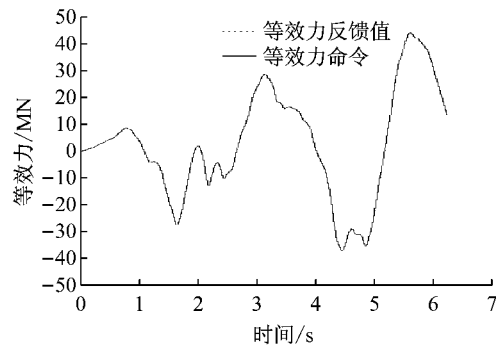


图 13 试验子结构 1 层等效力反馈值与命令比较时程曲线 (装配模型)

Fig.13 Feedback versus command of equivalent force (precast model)

下降段试验数据,具有很好的适用性. 试验子结构 1 层在不同峰值加速度下的位移时程曲线见图 15.

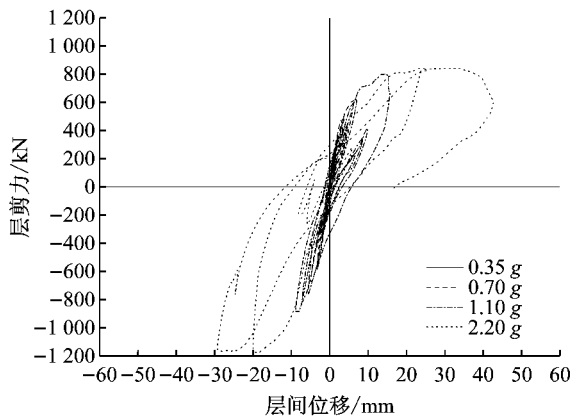


图 14 试验子结构 1 层滞回曲线(装配模型)

Fig. 14 Hysteresis loops of first floor (precast model)

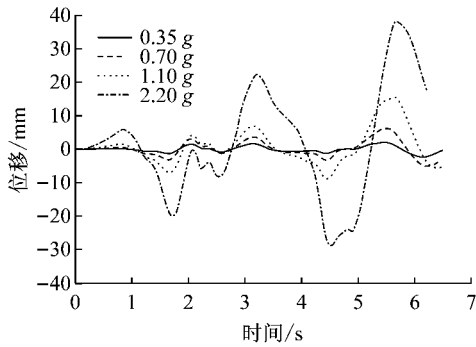


图 15 试验子结构 1 层位移时程(装配模型)

Fig. 15 Displacement time history of first floor at different ground accelerations (precast model)

### 2.3 钢框架模型

该模型总层数为 6 层单榀单跨钢框架:首层层高为 4.2 m,其他层高均为 4.0 m,跨度为 8.0 m,梁、柱均为 H 型钢,柱为 HW 600 mm×600 mm×20 mm×30 mm,梁为 HW 500 mm×300 mm×14 mm×22 mm. 试验子结构选取为底层,上部 5 层为计算子结构,采用本文提出的子结构试验系统完成了峰值加速度为 1.40g、3.10g、6.20g、8.00g、12.00g、16.00g 的系统子结构试验. 为实现子结构界面的准确模型,实际试验子结构选择在 2 层弹性反弯点处,即 1 层半模型,其中上部的半层作为加载层. 试验模型采用 1:2 的缩尺模型,试验模型图如图 16 所示. 水平加载装置采用 2 个水平作动器加载控制,竖向力采用液压千斤顶控制. 由于需要考虑倾覆力矩的影响,需要实时改变竖向力的大小,因此整个模型加载采用力-位移混合控制的方法实现(水平采用位移控制,竖向采用力控制). 图 17 为峰值加速度为 16.00g 时的等效力命令和等效力反馈的比较时

程曲线. 从图 17 同样可以看出,等效力反馈值可以很好地追踪到等效力命令,说明本文提出的子结构系统的控制模块可行. 图 18 给出了试验子结构 1 层位移时程,从图中可以看出,在 16.00g 时经历了反向峰值后,进入正向后已经达不到 12.00g 时的正向峰值,说明结构已经进入了下降段,因此在正向峰值经历后回到零点即停止试验. 由此可以说明,本文提

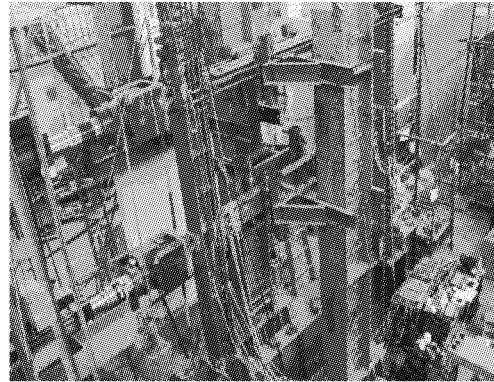


图 16 钢框架模型

Fig. 16 Steel frame testing model

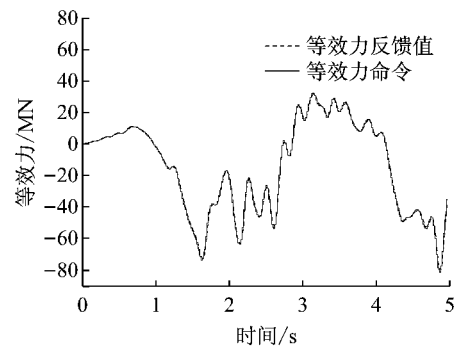


图 17 试验子结构 1 层等效力反馈值与命令比较时程曲线(刚框架模型)

Fig. 17 Feedback versus command of equivalent force (steel frame model)

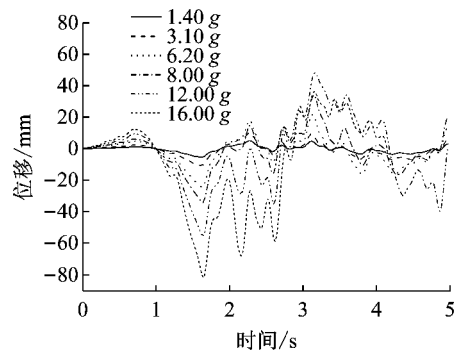


图 18 试验子结构 1 层位移时程(刚框架模型)

Fig. 18 Displacement time history of first floor at different ground accelerations (steel frame model)

出的试验系统可以得到力-位移混合加载情况下的下降段数据,具有很好的鲁棒性.图 19 给出了不同峰值加速度下的滞回曲线.随后,在完成子结构混合模拟试验后进行了单个作动器作用的低周往复试验,发现已经达不到 16.00g 时的峰值力,也说明了试验模型已经进入了下降段.

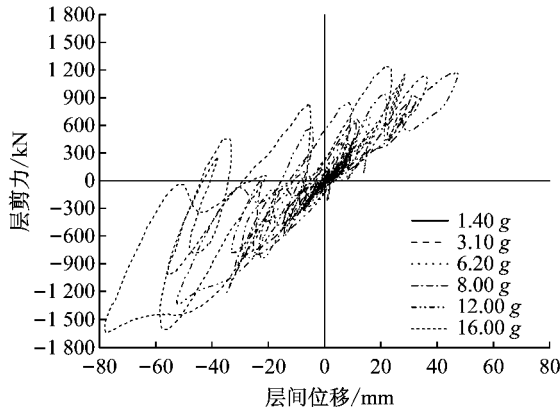


图 19 试验子结构 1 层滞回曲线(刚框架模型)

Fig.19 Hysteresis loops of first floor  
(steel frame model)

### 3 结论

(1) 本文提出了基于 Matlab 和 OpenSEES 的通用子结构试验系统,主要包括 Matlab 计算加载控制采集模块、OpenSEES 数值子结构模拟模块以及二者的接口.

(2) 本文提出的子结构试验系统,是独立于 MTS 电液伺服设备控制系统的,直接在外接的计算机上编程实现,避开了设备控制系统复杂的底层编程技术,减少了对控制系统本身的要求,降低了试验难度和费用,具有很好的通用性和推广度.

(3) 通过多个大比例尺结构试验模型的系统子结构试验,验证了本文提出的子结构试验系统的可行性.

#### 参考文献:

[1] 王向英,田石柱.子结构地震模拟振动台混合试验原理与实现[J].地震工程与工程振动,2009,29(4):46.  
WANG Xiangying, TIAN Shizhu. Study on structural hybrid testing method with shaking table[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2009, 29(4):46.

[2] 李振宝,李晓亮,唐贞云,等.基于振动台的动力子结构试验界面反力获取方法[J].地震工程与工程振动,2011,31(3):65.  
LI Zhenbao, LI Xiaoliang, TANG Zhenyun, et al. Research on the methods of evaluating reaction force for dynamic substructure experiments using shaking table[J]. Journal of

Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2011, 31(3):65.

[3] 汪强,王进廷,金峰,等.基于振动台的 RTDHT 试验及其在双层钢架结构上的应用[J].工程力学,2010,27(10):57.  
WANG Qiang, WANG Jinting, JIN Feng, et al. Real-time dynamic hybrid testing based on shaking-table and its application to a two storey rigid frame [J]. Engineering Mechanics, 2010, 27(10): 57.

[4] HAKUNO M, SHIDOWARA M, HARA T. Dynamic destructive test of a cantilever beam, controlled by an analog-computer [J]. Transactions of the Japan Society of Civil Engineering, 1969, 171(12): 1.

[5] BUCKLE I, REITHERMAN R, GEORGE E, et al. The consortium for the network for earthquake engineering simulation [C] // 13th World Conference on Earthquake Engineering. Vancouver: [s. n.], 2004; 4016.

[6] TAKAHASHI Y, FENVES G L. Software framework for distributed experimental-computational simulation of structural systems[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2006, 35:267.

[7] KWON O, ELNASHAI A S, SPENCER B F, et al. UI-SimCor: a global platform for hybrid distributed simulation[C]//Ninth Canadian Conference on Earthquake Engineering. Ottawa: [s. n.], 2007; 26-29.

[8] 邱法维,潘鹏,钱稼茹,等.建筑结构拟动力实验软件的开发与应用[J].建筑结构学报,2000,21(5):22.  
QIU Fawei, PAN Peng, QIAN Jiuru, et al. Development and application of pseudodynamic testing software[J]. Journal of Building Structures, 2000, 21(5): 22.

[9] 肖岩,胡庆,郭玉荣,等.结构拟动力远程协同试验网络平台的开发研究[J].建筑结构学报,2005,26(3):122.  
XIAO Yan, HU Qing, GUO Yurong, et al. A network platform for remote pseudo-dynamic testing [J]. Journal of Building Structures, 2005, 26(3):122.

[10] 许国山,郝伟,陈永盛,等.基于 OpenFresco- LabVIEW-dSpace 的混合试验系统研究[J].工程力学,2013,30(3):417.  
XU Guoshan, HAO Wei, CHEN Yongsheng, et al. Experimental validation on hybrid testing system based on OpenFresco-LabVIEW-dSpace [J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(3):417.

[11] 陈再现,吴斌,王焕定,等.多自由度等效力控制拟动力子结构试验研究[J].工程力学,2011,28(8):138.  
CHEN Zaixian, WU Bin, WANG Huanding, et al. Equivalent force control substructure pseudo-dynamic experimental study on a mdof model [J]. Engineering Mechanics, 2011, 28(8): 138.

[12] CHEN Zaixian, XU Guoshan, WU Bin, et al. Equivalent force control method for substructure pseudo-dynamic test of a full-scale masonry structure [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2014, 43(7): 969.

[13] 王凤来,陈再现,王焕定,等.底部框支配筋砌块短肢砌体剪力墙结构抗震性能试验研究[J].土木工程学报,2009,42(11):71.  
WANG Fenglai, CHEN Zaixian, WANG Huanding, et al. Experimental study on the seismic behavior of a frame-supported reinforced masonry short-limb masonry wall structure [J]. China Civil Engineering Journal, 2009, 42(11): 71.