

偏心支撑框架子结构实时混合仿真试验研究

李腾飞¹, 隋龔^{1,†}, 苏明周^{1,2}, 张浩¹, 高秀煜³

(1.西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055;

2.西安建筑科技大学 结构工程与抗震教育部重点实验室, 陕西 西安 710055;

3.美国 MTS 系统公司, 美国明尼苏达州 伊甸园市 55344)

摘要:实时混合仿真是一种新兴的结构抗震试验方法.建立了一套混合仿真试验系统,其中包括基于 OpenSees 有限元软件的数值模拟计算机,具有时滞补偿功能的目标计算机以及终端连接的电液伺服控制系统.在 MATLAB 中建立 Simulink 数值仿真模型,并提出了一种基于位移预测的自适应前馈时滞补偿器.最后,以一个单层三跨高强钢组合偏心支撑钢框架结构为原型,取边跨带有偏心支撑的单层钢框架作为试验子结构,进行了一个缩尺比例为 1/2 结构模型的实时混合仿真试验.试验结果表明随着模型整体响应加速度峰值的增大,控制系统的最大时滞补偿误差、最大幅值误差均有增大趋势,但均在容差允许范围之内,同时说明了该混合仿真试验系统具备良好的稳定性和精度,能够有效地对偏心支撑框架子结构模型进行抗震性能试验.

关键词:实时混合仿真; OpenSees; 自适应前馈时滞补偿; 偏心支撑框架; 子结构

中图分类号: TU317

文献标志码: A

Study on Real Time Hybrid Simulation Test of an Eccentrically Braced Frame as Test Sub-structure

LI Tengfei¹, SUI Yan^{1,†}, SU Mingzhou^{1,2}, ZHANG Hao¹, GAO Xiuyu³

(1.School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China;

2.Key Laboratory of Structural Engineering and Earthquake Resistance of the Ministry of Education,

Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China;

3.MTS Systems Corporation, 14000 Technology Drive Eden Prairie, MN55344, USA)

Abstract: Real-time hybrid simulation is a new method of structural seismic test. A hybrid simulation test system is established, which includes the numerical simulation computer based on OpenSees finite element software, the target computer with time delay compensation function and the electro-hydraulic servo control system. Furthermore, the Simulink numerical simulation model is established in MATLAB, and an adaptive feedforward time-delay compensator based on displacement prediction is proposed. Finally, a single story and three span high-strength steel composite eccentrically braced steel frame structure was considered as the prototype, the single story steel frame with

* 收稿日期:2017-11-24

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51178382), National Natural Science Foundation of China(51178382); 陕西省教育厅重点实验室项目(16JS048, 16JS049), Key Laboratory Foundation of Shan'xi Educational Committee(16JS048, 16JS049)

作者简介:李腾飞(1993—),男,陕西西安人,西安建筑科技大学博士研究生

† 通讯联系人, E-mail:suiyanmy@163.com

the eccentric brace was considered as the test sub-structure, and a real-time hybrid simulation test of a 1/2 scaled model was carried out. The experimental results show that the maximum time-delay compensation error and maximum amplitude error of the system increase with the increase of overall response peak acceleration of the model, but all of them are within the tolerance allowable range. At the same time, the hybrid simulation test system has good stability and accuracy, and can be used to test the seismic performance of the eccentrically braced frame as the test sub-structure.

Key words: real-time hybrid simulation; OpenSees; adaptive feedforward delay compensation; eccentrically braced frame; substructure

实时混合仿真,也称作实时子结构试验,是在子结构拟动力试验的基础上发展而来的一种新兴抗震试验方法。自从 Nakashima 等^[1]首次提出这一概念之后,近年来已经取得了重大的研究进展。由于实时混合试验要求数值子结构实时计算以及作动器实时加载,二者共同决定了试验结果的稳定性和精度,因此针对实时混合仿真的研究主要集中在数值积分算法、作动器精度控制、时滞分析补偿方法 3 个方面。其中,时滞分析补偿方法是实时混合试验成功的关键因素。在实时混合仿真试验中,液压伺服作动器通过数值积分算法求解动力方程来给试验子结构施加目标位移,由于液压伺服作动器自身的动力特性和系统的动力反应会导致加载位移命令与作动器实际位移反应之间存在时滞,因此需要对伺服液压系统进行适当的时滞补偿,否则不能保证混合仿真结果的精确性,以及仿真系统的稳定性。

为了实现精确地作动器控制,国内外学者已经进行了对实时混合仿真中作动器延迟补偿算法方面的研究,如 Chen 等^[2-3]对作动器的时滞补偿积分算法进行了研究;王贞等^[4]研究了近完全时滞补偿方法的参数确定和该补偿方法的性能;李妍等^[5]提出了能量守恒子结构试验方法的基本理论,并实现了弹塑性防屈曲支撑试件的实时能量守恒子结构试验。这些研究成果已经使得实时混合仿真成为了一种测试各种结构系统动态响应的有效试验方法。

目前,国内多数实时混合仿真试验集中于将结构构件作为试验子结构,来进行混合试验方法的研究^[6-7]。随着我国经济的快速发展,越来越多的高层甚至超高层结构出现,在对这类结构进行实时混合仿真试验时,取出结构整体中易损的部分框架作为试验子结构进行抗震试验研究显得更为合理。美国里海大学的研究人员^[8-9]曾将一个 0.6 比例的 3 层钢框架结构分成两部分,将其中一榀带有磁流变阻尼器

支撑的 3 层钢框架作为试验子结构,结构剩余部分等效为一个 3 质点杆系模型加普通钢框架作为数值子结构,进行了一系列实时混合仿真试验,研究了磁流变阻尼器的动力特性以及实时混合仿真试验方法对大型结构进行抗震性能试验的可行性。

基于前人的研究成果,首先建立了一套混合仿真试验系统,介绍了系统的组成和数据通信原理。然后提出了一种基于位移预测的自适应前馈时滞补偿器,介绍了其基本补偿原理。最后以一个单层 3 跨偏心支撑组合钢框架结构为原型,取边跨带有偏心支撑的单层钢框架作为试验子结构,建立混合仿真试验模型,进行一个缩尺比例为 1/2 结构模型的实时混合仿真试验,研究该混合仿真试验系统的稳定性和精度,以及其能否对偏心支撑框架作为试验子结构的混合仿真模型进行有效的抗震性能试验。

1 混合仿真试验系统

混合仿真试验系统包括基于 OpenSees 有限元软件的数值模拟计算机,具有时滞补偿功能的目标计算机以及终端连接的电液伺服控制系统,系统组成如图 1 所示。使用有限元软件 OpenSees 的前后处理程序 OpenSeesNavigator 建立并计算整体结构模型,通过 OpenFresco 提供的接口程序实现了 OpenSees 与 MTS 电液伺服控制系统间的数据通信。其中 OpenSees 与 OpenFresco 之间的通信使用 TCP/IP 协议,而 OpenFresco 与 MTS 电液伺服控制系统的数据交换采用共享公共 RAM 网络 (ScramNet) 的方式。这种试验系统模式的优点在于能够直接在有限元分析软件中定义具体的试验单元,试验单元通过与 OpenFresco 软件中的虚拟试验站台通信并直接连接本地的试验站台,从而达到试验子结构与数值子结构协同工作的目的。

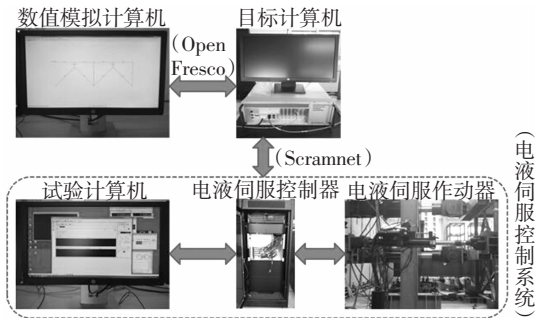


图1 混合仿真试验系统
Fig.1 System of the hybrid simulation test

2 混合仿真模型建立

研究的结构原型为一个单层 3 跨的高强钢组合偏心支撑钢框架,两个方向跨度均为 5 650 mm,层高三 600 mm,耗能梁段长度为 700 mm.考虑到实验室实际条件,将原结构按相似比例 1/2 缩尺,将缩尺后的结构作为混合仿真试验模型的全结构,如图 2(a)、(b)所示,其实际两个方向跨度为 2 825

mm,层高三 600 mm,耗能梁段长度为 350 mm.全结构与子结构之间的关系见图 2(c),选取边跨带有偏心支撑的单层钢框架作为试验子结构,通过侧向液电伺服作动器施加水平地震荷载;选取结构剩余两跨作为数值子结构.

在 OpenSeesNavigator 程序中进行数值建模,试验子结构选用试验通用单元(ExpGeneric Element),设置于层高位置,输入其初始刚度矩阵 K_e 、质量矩阵 M_e ,设定作动器作用位置等;对于数值子结构,由于只考虑单向加载,在有限元建模中可等效简化为平面结构模型,截面类型选为弹性截面(Elastic Section),单元类型选为基于位移的梁柱单元(DispBeamColumn Element),构件参数见表 1.试验子结构梁柱与数值子结构梁之间的连接,通过 OpenSeesNavigator 中的多点约束命令 Multi-Point Constraint:Equal DOF 来实现,保证试验子结构与数值子结构的位移响应始终协调统一.定义各荷载工况,计算机积分步长设为 0.01 s,即积分频率为 100 Hz.

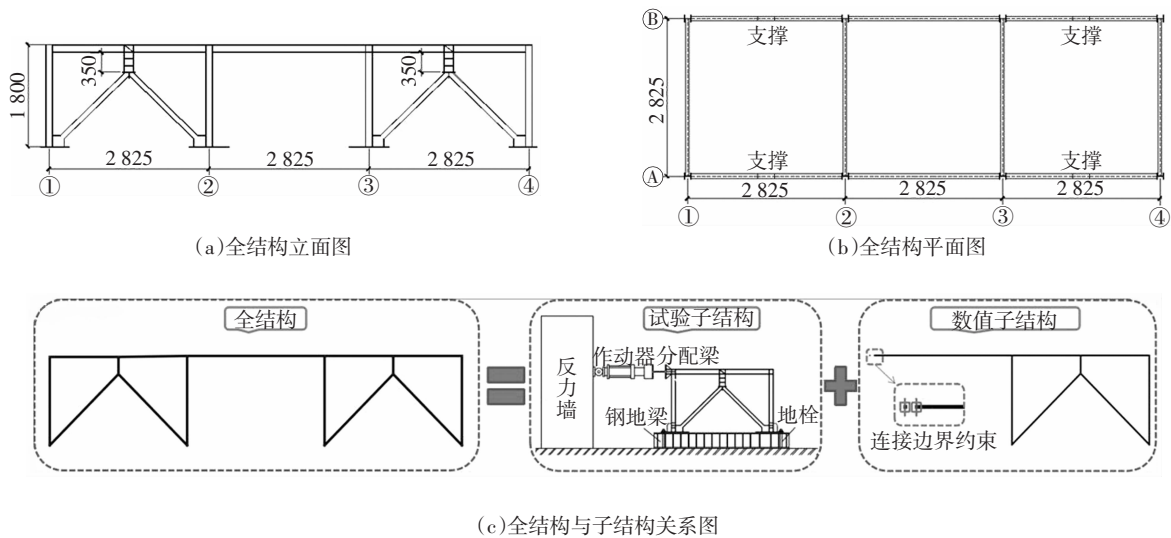


图2 混合仿真模型

Fig.2 Model of the hybrid simulation

表 1 构件参数

Tab.1 Mechanical properties of the specimen

构件名称	截面尺寸/(mm×mm×mm×mm)	横截面积 A/mm ²	$I_x/(10^6\text{mm}^4)$	$I_y/(10^6\text{mm}^4)$	E_s/GPa	G_s/MPa
框架柱	H125 × 125 × 10 × 10	3 550	9.25	3.26	206	80
框架梁	H140 × 100 × 10 × 10	3 200	9.91	1.68	206	80
支撑	H100 × 100 × 10 × 10	2 800	4.49	1.67	206	80
耗能梁段	H180 × 100 × 10 × 10	3 600	17.9	1.68	206	80

本次试验的目的是初步检验试验系统的有效性,只对框架结构进行小位移的地震反应试验.通过建立全结构的数值模型分析可知,梁柱节点处的竖向位移和转角位移分别仅为水平位移的 1/100 和 1/10 000 左右,因此拟简化试验子结构与数值子结构连接的边界条件,如图 2(c)中数值子结构的局部图所示,对试验单元及数值子结构梁端添加单点约束命令:Single-Point Constraints,限制连接节点处的竖向位移及转角,仅让其发生水平方向的位移.

为进一步验证上述简化的可行性,分别考虑下面 3 种边界模拟情况:1)利用控制系统中的虚拟站台对该混合仿真模型进行虚拟加载,即作动器仅有计算输入命令没有实际输出命令,这样既能模拟混合仿真试验的试验过程又不会对试验子框架造成任何损伤;2)建立简化边界条件(仅考虑水平位移)的全结构数值模型;3)建立完全边界条件(同时考虑水平位移、竖向位移和转角)的全结构数值模型.对比上述 3 种边界模拟情况的分析结果如图 3 所示.

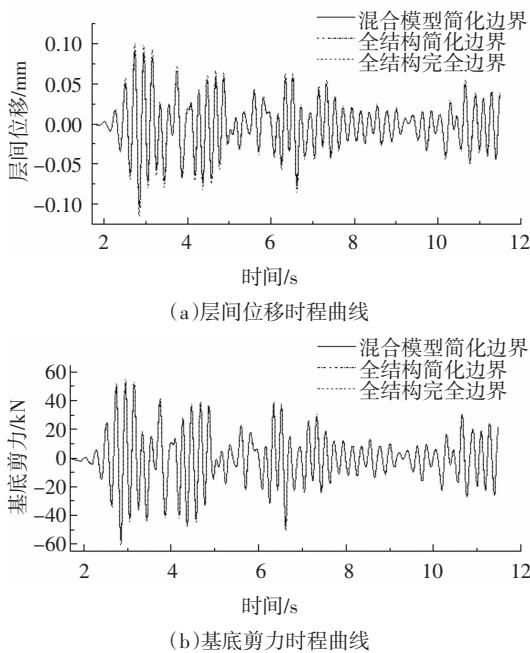


图 3 不同边界模拟情况分析结果对比
Fig.3 Comparison of analysis results under different substructure boundary simulation conditions

从图 3 可以看出,在加速度峰值为 6 gal 的地震波作用下,混合模型的基底剪力、层间位移与简化边界条件的全结构基本吻合;由于混合模型限制了子结构连接处的竖向和转角位移,其基底剪力和层间位移分别比完全边界条件下的全结构小 3.6%和 5.3%.可见,当模型整体位移响应较小时,仅考虑试

验子结构的水平位移边界条件,仍能保证实时混合仿真试验具有足够高的精度.

3 基于位移预测的自适应前馈时滞补偿器

目标计算机的主要作用是对试验子结构的位移进行预测和校正,以满足系统实时动力加载的要求,其主控组件为在 MATLAB 中建立的 Simulink 数值仿真模型,如图 4 所示,其中包含了一个基于位移预测的自适应前馈时滞补偿器 AFC (Adaptive Feedforward Compensator),该补偿器通过运用自适应前馈控制理论^[10-11]以及位移预测时滞补偿方法^[4]实现系统的时滞补偿.

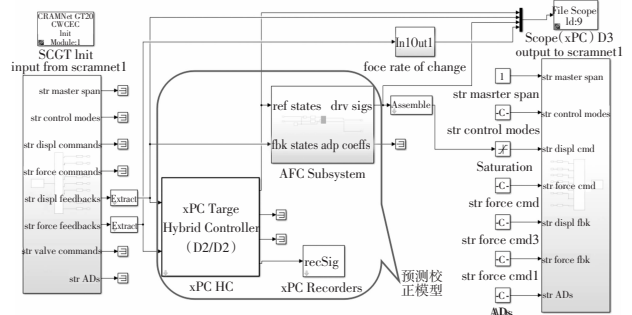


图 4 Simulink 数值仿真模型
Fig.4 Model of the Simulink numerical simulation

自适应前馈补偿的本质可以看做是一种“逆向”的控制补偿方案^[12],采用被控系统对象传递函数的逆作为串联控制器对系统的动态特性进行开环控制,这样不仅避免了反馈环节可能引起的系统不稳定,同时可以将系统动态特性的控制和对象扰动的抑制问题分开处理,互不影响.如图 5 所示,与传统的前馈控制不同,在 AFC 系统中引入了反馈,但这个反馈仅仅用于自适应过程本身,并不影响系统中的信号流动,只是为了用对象输出和指令输入之差的误差信号来调节控制器的可变参数,以使均方误差最小,从而进一步改善系统的精度和稳定性.

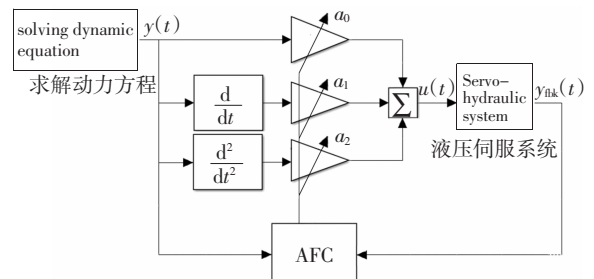


图 5 补偿系统
Fig.5 System of the compensation

Chae 曾在里海大学提出一种自适应时间序列补偿器 ATS(Aaptive Tme Sries)^[13],利用最小二乘法对模型参数进行在线估计,该法的缺点是每个运算步长(1ms)包含了大矩阵的乘法运算,运算效率很低.AFC 在 ATS 的基础上改用 Recursive Least Square(递推最小二乘算法)^[14],通过不断在线更新系统传递函数的系数实现自适应时滞补偿,对于较大的通信窗口需要更少的计算资源,从而提高了运行效率,能够有效地考虑强非线性试验(如混凝土构件的开裂或剪切型破坏)系统增益和时滞时变的特性.对于任意给定的系统的期望输出 $y(t)$,总能找到以 $y(t)$ 作为输入的逆系统并将其输出作为相应的控制函数 $u(t)$,使原系统在控制函数作用下的输出为 $y_{pbk}(t) = y(t)$.

补偿系统的传递函数^[10]模型可表示为:

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{K\omega_0^2}{s^2 + 2\zeta\omega_0s + \omega_0^2} \quad (1)$$

由式(1)得传递函数的逆为:

$$\frac{U(s)}{Y(s)} = \frac{s^2 + 2\zeta\omega_0s + \omega_0^2}{K\omega_0^2} \quad (2)$$

式中: s 为传递函数的 Laplace 变量; ω_0 和 ζ 分别为作动器系统的频率和阻尼比; K 为模型增益.

由式(2)可得补偿器在时间域内的状态微分方程为:

$$U(t) = a_0y(t) + a_1\dot{y}(t) + a_2\ddot{y}(t) \quad (3)$$

式中:

$$a_0 = \frac{1}{K}; a_1 = \frac{2\zeta}{K\omega_0}; a_2 = \frac{1}{K\omega_0^2} \quad (4)$$

这些系数均是未知的,并且不是常数,所以它们需要通过一个在线自适应优化过程来确定.将式(3)改写为矩阵形式:

$$\begin{bmatrix} \hat{U}_{k-1} \\ \hat{U}_{k-2} \\ \vdots \\ \hat{U}_{k-q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{k-1} & \dot{y}_{k-1} & \ddot{y}_{k-1} \\ y_{k-2} & \dot{y}_{k-2} & \ddot{y}_{k-2} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ y_{k-q} & \dot{y}_{k-q} & \ddot{y}_{k-q} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \end{bmatrix}, \hat{U} = Ya \quad (5)$$

系数 a 的代价函数为:

$$f(a) = \sum_{i=1}^q (u_{k-i} - \hat{u}_{k-i})^2 = \sum_{i=1}^q (u_{k-i} - y_{k-i}^T a)^2 = (u - Ya)^T \cdot (u - Ya) \quad (6)$$

式中: u_{k-i} 为 t_{k-i} 时刻控制函数实际发送给液压伺服系统的输入信号; \hat{u}_{k-i} 为 t_{k-i} 时刻通过式(3)预测的发送给液压伺服系统的输入信号.

由代价函数的最优最小二乘解得:

$$a = (Y^T Y)^{-1} Y^T u \quad (7)$$

AFC 通过对位移信号进行预测控制,实现系统的时滞补偿,理想的补偿效果如图 6 所示,即目标计算机对 $t + \tau$ 时刻的目标位移进行预测并于 t 时刻提前发送了位移命令,使提前的时间 Δt 与系统的时滞估计 τ 相等,从而保证作动器能够在指定时刻达到指定位移,当系统的时滞由于试件刚度、加载幅值、命令频率等改变而发生变化时,亦能跟踪目标位移自动调节 Δt 的大小;同时考虑到作动器加载过程中自身误差,试件滑移,计算机性能,传感器精度等因素,根据式(3)将目标位移 $y(t + \tau)$ 进行幅值增益为命令位移 $u(t)$,以此消除作动器反馈位移总是小于实际目标位移的问题.

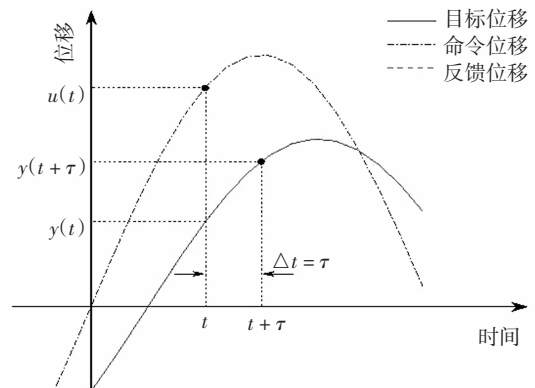


图 6 位移预测补偿示意图

Fig.6 Scheme of delay compensation using displacement prediction

4 实时混合仿真试验研究

实时混合仿真中,运动的时间离散方程在 $i + 1$ 步可表示为式(8):

$$M\ddot{X}_{i+1} + C\dot{X}_{i+1} + (r_{i+1}^a + r_{i+1}^e) = F_{i+1} \quad (8)$$

式中: \ddot{X}_{i+1} 、 \dot{X}_{i+1} 分别是结构的加速度和速度; r_{i+1}^a 、 r_{i+1}^e 分别是数值子结构和试验子结构的恢复力; M 和 C 分别是结构的质量矩阵和阻尼矩阵; F_{i+1} 是外部激励力.

采用 α -OS 显隐式组合数值积分算法求解运动方程^[15],使程序具有良好的数值稳定性,同时采用动态性能调试控制技术 PID^[16]来调试作动器在试验开始前自身的精度,在此基础上研究此实时混合仿真系统的时滞补偿性能.

本试验是在西安建筑科技大学结构与抗震实验室混合仿真中心进行的,试验过程中将框架柱与地梁通过地脚螺栓相连,以实现柱脚固端约束的边

界条件,利用地梁与基础的摩擦力阻止地梁与基础发生相对滑移,试验装置如图 7 所示.采用一个 25 t 动态 MTS 液压伺服作动器对试件进行单向加载,作动器的一端固定在反力墙上,另一端与位于层高处的分配梁中部相连,通过控制作动器的位移控制试件整体加载过程.选用 EL Centro(NS,1940)波为原始地震动记录,时间步长为 0.02 s,通过调整地震波的时间步长大小,来考虑模型的时间相似关系.结构阻尼采用 Rayleigh 阻尼,作动器位移控制精度为 0.001 mm,试验各工况详见表 2.

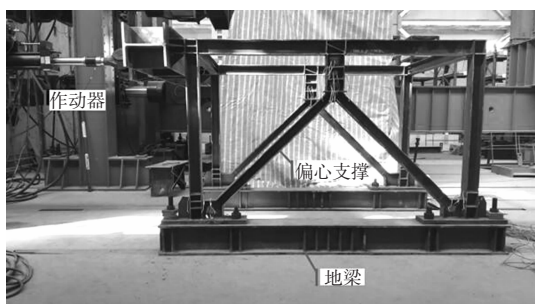


图 7 试验装置

Fig.7 Device of the test

表 2 试验工况

Tab.2 Sequence of hybrid simulation test

工况	质量/(10 ⁶ kg)	单向加速度峰值/gal	阻尼值
1	0.007 3	3	0.04
2	0.007 3	6	0.04
3	0.007 3	12	0.04
4	0.007 3	18	0.04

将运动方程式(8)完全展开并线性近似变换后得到式(9),其中 \dot{X}_{i+1} 的系数包含了一个负阻尼项: $\Delta\tau(M_e\omega^2 - K_e)$,负阻尼项不仅时刻影响着系统加载精度,当其值大于结构本身的阻尼系数值时,试验还将失去稳定性,这便是时滞对结构试验影响的本质.混合仿真系统的时滞和负阻尼不仅与作动器自身的控制误差有关,同时还受到试验子结构刚度 K_e 的影响.当 K_e 越大时,结构的负阻尼越大;当 K_e 发生时变(即试件进入非线性状态)时,系统响应变得复杂,时滞也会相应增大.本文在保证 K_e 始终最大的前提下,对系统稳定性进行试验研究,因此 4 个加载工况均保持试件处于刚度不变的弹性状态.

$$(M_n + \Delta M_e - \Delta\tau C_e) \ddot{X}_{i+1} + [C_n + \Delta C_e + \Delta\tau(M_e\omega^2 - K_e)] \dot{X}_{i+1} +$$

$$(K_n + \Delta K_e) X_{i+1} = -(M_n + \Delta M_e) \ddot{X}_{g+1} \quad (9)$$

式中: M_n 、 M_e 分别是数值子结构和试验子结构的质量矩阵; K_n 、 K_e 分别是数值子结构和试验子结构的刚度矩阵; C_n 、 C_e 分别是数值子结构和试验子结构的阻尼系数矩阵; τ 、 Δ 分别是系统时滞和幅值误差; ω 是结构的自振圆频率; \ddot{X}_{i+1} 、 \dot{X}_{i+1} 同上; X_{i+1} 是结构的位移; \ddot{X}_{g+1} 是地面运动加速度.

进行试验模型的实时混合仿真试验,考虑了地震动整体加速度峰值改变对模型整体动态响应的影响.将试验结果中计算机“目标位移”,作动器“命令位移”,作动器实际“反馈位移”绘制于同一幅图中(如图 8)进行对比分析.需要指出的是,在本次试验加载过程中,未对第 1 加载步进行时滞补偿,由各工况的全局图及局部图 2 可见,试验初始阶段的“反馈位移”总是落后于“目标位移”,在运行大约 1 s 后,自适应的控制算法会根据之前的输入输出信号来调整控制参数,随后“反馈位移”便很好地跟踪上了“目标位移”,可见该自适应控制系统在频率、幅值时变条件下的收敛速度及稳定性均较好.由各工况的全局图及局部图 1 可见,随着整体加速度峰值的增大,最大时滞从 0.022 ~ 0.028 s 亦略有增大,系统通过提前发出相当于“目标位移”约 1.15 倍增益的“命令位移”抵消了幅值误差的影响,由此说明了结构响应的正确性.另外,将补偿后的“目标位移”与“反馈位移”在峰值处的最大时滞、幅值误差汇总于表 3 之中,对于工况 1、2,当加速度峰值相对较小时,时滞及幅值补偿效果良好;对于工况 3、4,当加速度峰值分别达到 12、18 gal 时,最大时滞补偿误差有较明显的增大,最大幅值误差虽然也在增大,但相对值始终保持在 6%左右,均在容差允许范围之内,说明实时混合试验在进行时滞补偿后得到了较好的试验结果.

表 3 各工况最大时滞、幅值误差

Tab.3 Maximum phase and amplitude error at all conditions

工况	最大时滞/s	最大幅值误差	
		绝对值/mm	相对值/%
工况 1	+0.005 20	+0.003 20	+5.205
工况 2	+0.006 21	+0.003 60	+6.512
工况 3	-0.009 20	+0.016 17	+6.937
工况 4	+0.009 61	-0.021 20	-5.822

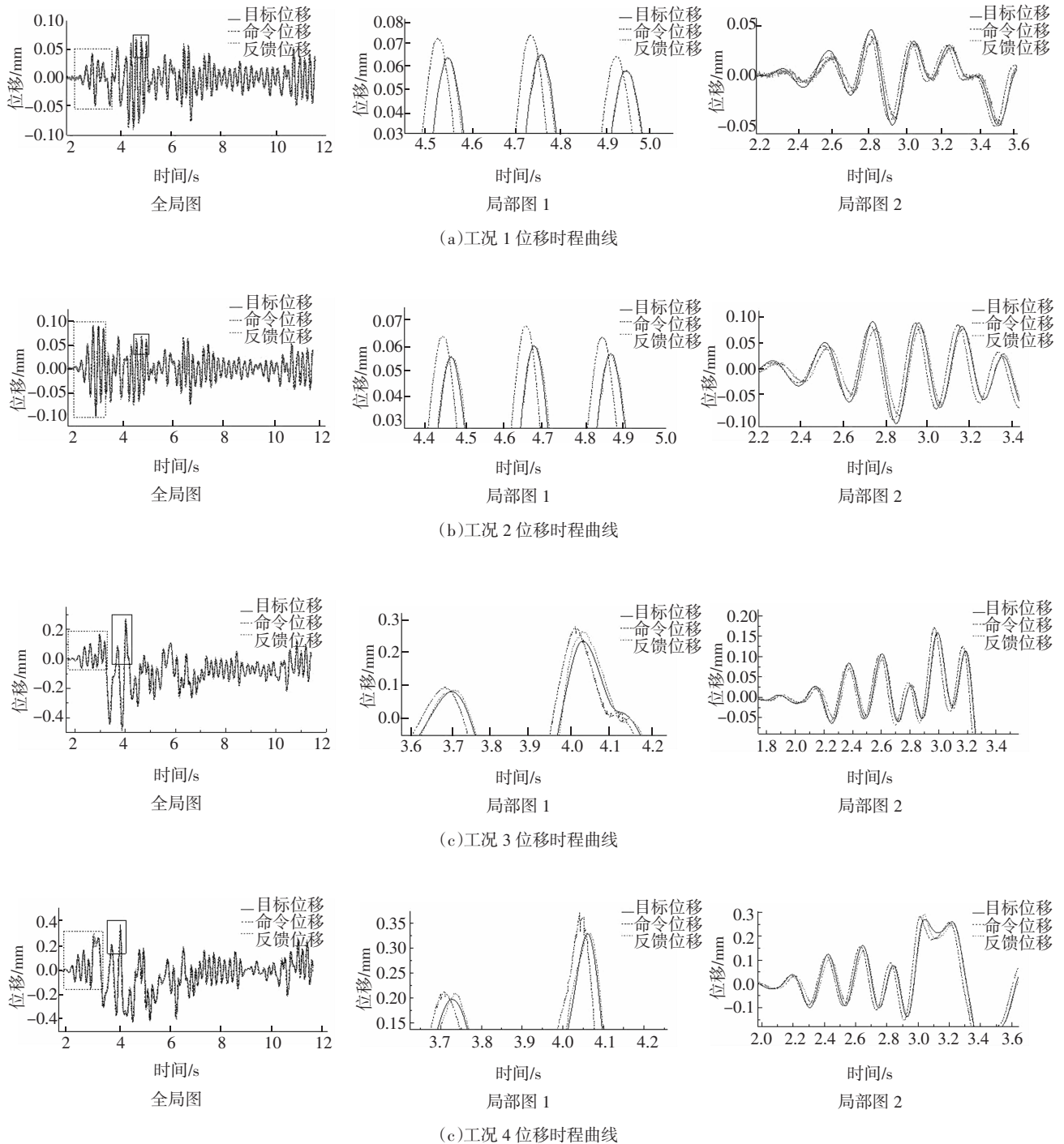


图 8 各工况下位移时程曲线

Fig.8 Time history curves of displacement under different working conditions

5 结论

本文基于一套混合仿真试验系统,建立 Simulink 数值仿真模型,提出了一种基于位移预测的自适应前馈时滞补偿控制器,并对一个单层 3 跨偏心支撑

钢框架结构进行了实时混合仿真试验研究,得到以下结论:

1) 试验结果表明,由基于 OpenSees 有限元软件的数值模拟计算机,具有时滞补偿功能的目标计算机以及终端连接的电液伺服控制系统组成的混合仿真系统,能够有效地对混合结构模型进行抗震性能试验研究.

2)在保证试验子结构始终处于弹性状态(即刚度最大)的前提下,增大试验的整体加速度峰值,系统的最大时滞补偿误差、最大幅值误差均有增大趋势,但均在容差允许范围之内,可见该时滞补偿器通过对位移信号的自适应预测校正,保证了系统在整个加载过程中的精度和稳定性。

3)本文进行的是一个缩尺比例为 1/2 结构模型的偏心支撑框架子结构实时混合仿真试验,而非常见的将整体结构中单个构件作为试验子结构的混合仿真研究,得到了较满意的试验结果,可见运用成熟的有限元软件将偏心支撑框架作为试验子结构来进行实时混合仿真试验是有效且可行的。

参考文献

- [1] NAKASHIMA M, KATO H, TAKAOKA E. Development of real-time pseudodynamic testing[J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 1992, 21(1):79—92.
- [2] CHEN C, RICLES J M. Tracking error-based servohydraulic actuator adaptive compensation for real-time hybrid simulation[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2010, 136(4):432—440.
- [3] CHEN C, RICLES J M. Large scale real time hybrid simulation involving multiple experimental substructures and adaptive actuator delay compensation[J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2012, 41(3): 549—569.
- [4] 王贞,刘进进,吴斌.实时混合试验近完全时滞补偿方法的参数确定[J].*工程力学*, 2014, 31(10):158—166.
WANG Z, LIU J J, WU B. Parameter determination of near complete time delay compensation method for real time hybrid test[J]. *Engineering Mechanics*, 2014, 31(10):158—166. (In Chinese)
- [5] 李妍,吴斌,欧进萍.防屈曲支撑的实时能量守恒子结构试验[J].*工程力学*, 2010, 27(S2):157—162.
LI Y, WU B, OU J P. Real time energy conserving substructure test of buckling restrained brace [J]. *Engineering Mechanics*, 2010, 27(S2):157—162. (In Chinese)
- [6] 张兴虎,马磊,隋龔,等.空间结构 SRT 混合仿真试验技术研究[J].*西安建筑科技大学学报(自然科学版)*, 2014, 46(3):329—332.
ZHANG X H, MA L, SUI Y, *et al.* Research on the SRT hybrid simulation test technology in spatial structure [J]. *Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition)*, 2014, 46(3):329—332. (In Chinese)
- [7] 郭玉荣,刘钟真.基于 OpenSees 的子结构拟动力试验方法研究[J].*湖南大学学报(自然科学版)*, 2015, 42(9):1—7.
GUO Y R, LIU Z Z. Research on substructure pseudo dynamic test method based on OpenSees[J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2015, 42(9):1—7. (In Chinese)
- [8] KARAVASILIS T, RICLES J M, SAUSE R, *et al.* Experimental evaluation of the seismic performance of steel MRFs with compressed elastomer dampers using large-scale real-time hybrid simulation [J]. *Engineering Structures*, 2011, 33(6):1859—1869.
- [9] CHAE Y, RICLES J M, SAUSE R. Large-scale experimental studies of structural control algorithms for structures with magneto-rheological dampers using real-time hybrid simulation [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2013, 139:1215—1226.
- [10] JUNG R Y, SHING P B. Performance evaluation of a real-time pseudodynamic test system [J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2010, 35(7):789—810.
- [11] 高志远.基于前馈与混合自适应算法的振动主动控制方法研究[D].上海:上海大学机电工程与自动化学院, 2014:32—50.
GAO Z Y. Feedforward adaptive control algorithm and hybrid adaptive control algorithm research for active vibration control system [D]. Shanghai: School of Mechatronic Engineering and Automation, Shanghai University, 2014:32—50. (In Chinese)
- [12] 张雅楠.动态系统的可逆性和逆建模方法的研究[D].沈阳:东北大学信息科学与工程学院, 2012:3—8.
ZHANG Y N. Research on invertibility and inverse modeling methods of dynamic systems [D]. Shenyang: College of Information Science and Engineering, Northeastern University, 2012:3—8. (In Chinese)
- [13] CHAE Y, KAZEMIBIDOKHTI K, RICLES J M. Adaptive time series compensator for delay compensation of servo-hydraulic actuator systems for real-time hybrid simulation [J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2013, 42(11):1697—1715.
- [14] LJUNG L. System identification: theory for the user[M]. 2nd Edition. New Jersey: Prentice Hall PTR, 1999: 364—365.
- [15] NAKASHIMA M, AKAZAWA T, SAKAGUCHI O, *et al.* Integration method capable of controlling experimental error growth in substructure pseudodynamic test [J]. *Journal of Structural Construction Engineering*, 1993, 454:61—71.
- [16] JUNG R, SHING P B, STAUFFER E, *et al.* Performance of a real-time pseudodynamic test system considering nonlinear structural response [J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2007, 36:1785—1809.