

文章编号: 1000-4750(2014)04-0171-07

实时混合模拟试验作动器位移追踪的 频域评价方法

郭 彤¹, 徐伟杰¹, 陈 城²

(1. 东南大学混凝土与预应力混凝土结构教育部重点实验室, 南京 210096; 2. 旧金山州立大学工程学院, 加州 旧金山 94132)

摘 要: 实时混合模拟是一种新型而有效的抗震试验方法。其中, 作动器作为维系试验子结构和数值子结构的边界条件, 其对指令位移的追踪直接影响到试验的准确性, 而现有的作动器追踪精度的评价方法均基于时域分析。为克服时域评价方法的缺陷, 该文提出了一种作动器追踪精度的基于傅里叶变换的频域评价方法, 其优点是仅需试验的输入和输出, 且能同时反映输入和输出的时间误差(时滞)和幅值误差。为克服快速傅里叶变换以及频谱泄漏对分析结果的影响, 提出了一种数据加窗的处理方法。在一个由作动器、阻尼器和反力装置构成的实时混合模拟试验系统中, 分别输入已知的正弦波和随机波并进行频域分析, 验证了该频域评价方法的有效性。

关键词: 实时混合模拟; 频域; 作动器位移追踪; 评价方法; 试验验证

中图分类号: TU375.4 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2012.11.0871

FREQUENCY-DOMAIN ASSESSMENT FOR TRACKING SERVO-HYDRAULIC ACTUATOR DISPLACEMENT IN REAL-TIME HYBRID SIMULATIONS

GUO Tong¹, XU Wei-jie¹, CHEN Cheng²

(1. Key Laboratory of Concrete and Prestressed Concrete Structures, Ministry of Education, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. School of Engineering, San Francisco State University, San Francisco 94132, USA)

Abstract: Real-time hybrid simulation is a novel and effective technique for seismic tests. Servo-hydraulic actuators play an important role in a real-time hybrid simulation, where they serve to maintain the boundary conditions between the experimental and analytical substructures. Accurate actuator tracking directly affects the reliability of hybrid simulation results. Existing methods for actuator tracking assessment are often based on time-domain analysis. This paper proposes a frequency-domain actuator tracking method, based on use of the Fourier transform, which only requires the input and the output of the actuator and can simultaneously evaluate the phase delay and the amplitude error. To minimize the effect of the fast Fourier transform (FFT) and spectrum leakage on the analysis results, a Hann window is used to improve the accuracy of the method. The effectiveness of the proposed method is validated experimentally using a real-time hybrid simulation system which subjects the actuator to predefined sinusoidal and random signals.

Key words: real-time hybrid simulation; frequency domain; actuator tracking; evaluation method; experimental validation

传统土木工程结构的抗震试验方法包括拟静力试验、拟动力试验及地震模拟振动台试验等。

1992年, Nakashima等^[1]采用动态加载作动器代替静态作动器, 提出一种新的试验方法, 即实时拟动

收稿日期: 2012-11-18; 修改日期: 2013-01-24

基金项目: 混凝土及预应力混凝土结构教育部重点实验室开放课题基金项目(56237845); 美国国家自然科学基金项目(1227962)

通讯作者: 郭 彤(1977—), 男, 山东青岛人, 教授, 博士, 博导, 从事新型抗震结构体系, 结构健康监测与评估研究(E-mail: guotong@seu.edu.cn).

作者简介: 徐伟杰(1990—), 男, 山东临沂人, 博士生, 从事抗震试验方法研究(E-mail: xwj19900429@gmail.com);

陈 城(1977—), 男, 上海人, 助理教授, 博士, 从事抗震试验方法研究(E-mail: chcsfsu@sfsu.edu).

力试验方法,也被称为实时混合模拟或者实时子结构试验。该方法将试验分为数值子结构和试验子结构两部分,其中的数值部分通常易于通过计算机建模加以分析,而试验子结构往往是非线性结构,其恢复力需要通过作动器的实测位移得到。积分算法和时滞补偿是联系数值子结构和试验子结构的两个重要环节^[2-6]。在实时混合模拟过程中,通过积分算法在前一步的恢复力和外力的基础上求得作动器下一步的指令位移。由于伺服系统的动力特性,作动器总是不能绝对实时地达到预定的位移,而是存在一个“时滞”,一般通过时滞补偿算法来减小时滞对试验的影响。

实时混合模拟能够反映速率对结构的影响,同时试验的成本较地震模拟振动台试验大大降低,更适合大比例的结构抗震试验以减小尺寸效应对结果的影响,因此近年来在美国、日本等国家得到广泛关注并快速发展^[3,7-9]。在实时混合模拟试验中,作动器作为试验子结构和分析子结构的边界条件,其对指令位移的追踪直接影响到试验的准确性。然而,对于作动器追踪精度的评价,目前尚没有一个普遍认可的标准;并且现有的评价标准均基于时域分析,如能量误差^[10-11]、最大跟踪误差、跟踪误差均方根和跟踪指示误差等^[12]。这些时域评价指标具有计算简单、物理意义明确的优点,但缺点是只能从某一个方面(如位移误差或能量误差)来描述试验的效果,很难反映输入与输出的时间误差,从而不能全面地反映试验效果。

鉴于此,本文提出了一种频域分析方法,以期更客观、全面地评价实时混合模拟试验的效果,并采用作动器位移追踪的数值模拟和实验室试验加以验证。这里的位移追踪是指对于已知的位移时程进行追踪,与实时混合模拟的区别主要是后者的下一步位移指令需要计算,而位移追踪的位移都是已知的。并且,由于时滞仅对实时混合模拟的幅值产生影响而不影响位移追踪的幅值,因此上述验证过程中产生的幅值误差仅由模拟或试验的误差造成,不至于与时滞产生的幅值误差相混淆,从而在对频域分析方法进行初步验证的同时,可加深对模拟和试验误差来源的认识。

1 实时混合模拟的频域评价方法

在实时混合模拟过程中,时滞对实验存在两方面的影响:即输入与输出的时间误差和幅值误差。

与传统的时域分析相比,频域内的分析可以通过相位反映输入与输出的时间误差,还可以通过各个频率下的幅值反映输入与输出的幅值误差;同时,频域评价方法仅需要输入和输出即可对试验效果进行评价。因此对于实时混合模拟,频域方法较时域方法具有理论上的先进性。

若实时混合模拟中的输入为 $I(t)$, 输出为 $O(t)$, 分别对输入和输出做快速傅里叶变换^[13], 可将信号由时域转换到频域:

$$y_I(f) = \mathcal{F}[I(t)] \quad (1)$$

$$y_O(f) = \mathcal{F}[O(t)] \quad (2)$$

式中: f 为信号的频率, \mathcal{F} 表示傅里叶变换。

当输入和输出之间存在时滞 τ , 即 $O(t)=I(t-\tau)$ 时, 其傅里叶变换存在如下关系:

$$y_I(f) = y_O(f) \cdot e^{j2\pi f \tau} \quad (3)$$

式中, j 为虚数, 代表 $\sqrt{-1}$ 。

令 $y_n(f) = y_I(f) / y_O(f)$, 则有:

$$y_n(f) = e^{j2\pi f \tau} \quad (4)$$

同时, 根据欧拉公式, 有:

$$y_n(f) = \cos(2\pi f \tau) + i \sin(2\pi f \tau) \quad (5)$$

于是有:

$$A_0 = \|y_n(f)\| = 1 \quad (6)$$

$$\varphi_0 = \arctan(\sin(2\pi f \tau) / \cos(2\pi f \tau)) = 2\pi \cdot f \cdot \tau \quad (7)$$

其中: A_0 和 φ_0 分别表示纯时滞下的幅值比和相位差; $\|\cdot\|$ 表示求模。

由以上推导可知, 对于存在时滞的输入和输出, 实时混合模拟的效果可以通过 y_n 的幅值 A_0 和相位 φ_0 来判断, 若 y_n 的幅值 A_0 接近于 1, 则说明时滞造成的输入和输出的幅值误差越小, 而在相同频率下, φ_0 越小, 时滞输入和输出的时间误差越小。

另外, 由式(7)可知, 将 φ_0 除以频率即为时滞。对于最简单的正弦波, 将 φ_0 除以正弦波的频率即为时滞; 对于随机波, 其频率并非一个值而是一个频谱, 需定义一个等效频率 f^{eq} , 其等效原则为: 若在相同情况下, 未采用补偿的随机波与某个正弦波的时滞相同, 那么该正弦波的频率称为随机波的等效频率。实际应用中, 可近似地将输入傅里叶变换后的频率按照其幅值的加权平均作为随机波等效频率:

$$f^{eq} = \frac{\sum_{i=0}^{n/2} (\|(\mathcal{F}(I(t)))_i\| \cdot f_i)}{\sum_{i=0}^{n/2} \|(\mathcal{F}(I(t)))_i\|} \quad (8)$$

其中, n 代表不小于分析数据长度的最小 2 的整数幂。鉴于式(8)同样可以得到正弦波的频率值, 因此无论对于正弦波或随机波输入, 其等效频率都可以采用式(8)计算, 并由此得到试验的时滞:

$$\tau = \varphi_0 / (2\pi \cdot f^{eq}) \quad (9)$$

至此, 实时混合模拟的频域评价指标可由以下公式描述:

$$FEI = \sum_{j=1}^{n/2} \left\{ \frac{\mathcal{F}[I(t)]_j}{\mathcal{F}[O(t)]_j} \cdot \frac{\|\mathcal{F}[I(t)]_j\|}{\sum_{i=1}^{n/2} \|\mathcal{F}[I(t)]_i\|} \right\} \quad (10)$$

$$\varphi = \arctan[i(FEI) / r(FEI)] \quad (11)$$

$$A = \|FEI\| \quad (12)$$

$$d = \varphi / (2\pi \cdot f^{eq}) \quad (13)$$

其中: FEI 代表对不同频率下式(4)中 $y_n(f)$ 的加权平均; $i()$ 和 $r()$ 分别表示虚部和实部; φ 、 A 、 d 分别代表采用频域评价方法得到的相位差、幅值和时滞。理想情况下, 输入与输出没有任何误差, 此时显然 φ 和 d 应为 0, 且 A 应为 1。

2 频域分析的数据预处理

2.1 频谱泄漏问题

在信号的频域处理过程中, 涉及傅里叶变换, 而通常意义下的傅里叶变换仅针对无限长的信号。由于实际操作中只能采集到有限长度的信号数据, 因此通常需要对有限长度的信号做周期延拓, 以得到虚拟的无限长信号。在此过程中, 原本集中于某一频率的能量在一定程度上被分散到该频率附近的频域, 引起频域分析的误差, 这种现象称为频谱泄漏^[13]。频谱泄漏会改变信号的频谱成分, 对信号频谱的精度有很大影响。

2.2 正弦波频域分析的条件

在对正弦波进行频域分析时, 由于快速傅里叶变换和避免频谱泄漏的需要, 其数据长度应满足以下两个条件: 1) 数据长度 L 必须是 2 的整数次幂, 如式(14)所示; 2) 数据必须包含若干个完整周期, 如式(15)所示。

$$L = 2^k, \quad k = 1, 2, 3, \dots \quad (14)$$

$$L = 2n\pi f \quad (15)$$

若将数据长度用采样频率 f_s 和时间的乘积来表达, 则有: $L = f_s \cdot t = f_s \cdot n \cdot T = f_s \cdot n / f$, ($n=1, 2, 3, \dots$)。故对于正弦波, 采样频率需要满足如下条件:

$$f_s / f = 2^k / n, \quad k = 1, 2, 3, \dots; n = 1, 2, 3, \dots \quad (16)$$

2.3 随机波频域分析的条件

在实时混合模拟试验中, 输入通常是随机波(如子结构在地震下的响应)而非正弦波。快速傅里叶变换要求数据长度是 2 的整数次幂, 这对于随机波同样不能避免。由于随机波没有一个固定的频率(式(8)中的等效频率仅是一个描述随机波频率特性的近似量), 即不存在式(15)中的若干个完整周期。因此, 对于随机波而言, 不能直接采用频域评价方法进行分析, 而是需要对数据进行预处理。

2.4 频域分析中的数据预处理

减少泄漏的方法有两种: 一种是信号的采样长度尽可能地增大; 另一种方法是对要进行傅里叶变换的输入和输出乘以不同形状的窗函数^[13], 使该信号在结束处不是突然截断, 而是逐步过渡到截断处, 这样就可以减少谱泄漏。由于在实际应用中的输入和输出长度总是受到限制的, 因此第 1 种方法对于频谱泄漏的影响有限, 本研究采用数据加窗的方法来减小频谱泄漏效应。

目前, 常用的窗函数有汉宁窗(Hannwindow)、海明窗(Hamming window)、凯瑟窗(Kaiser window)等^[11]。不同的窗函数对数据的影响不一样, 一般来说, 窗函数的旁瓣尽可能的小、主瓣带宽尽可能的窄。因此, 本文选用汉宁窗, 其频谱是由 3 个矩形窗相互平移叠加而成。该窗函数可以加强主瓣从而使泄漏得到有效的抑制, 以提高频谱的精度。

至此, 在对输入和输出信号在进行傅里叶变换之前, 可预先乘以一个窗函数, 从而减小频谱泄漏的影响。当然, 对数据加窗只能减少频谱泄漏的影响, 而不能绝对消除频谱泄漏效应。

3 频域评价方法的理论验证

3.1 满足长度和频率要求的正弦波

对 3 组具有不同输入和输出的正弦波进行分析, 对频域标准做初步的验证。采样频率为 1024Hz, 数据长度 4096, 即从 0s 到 3.999s 每隔 1/1024s 取样。所采用的 3 组正弦波分别为:

1) 输入为 $I(t)=\sin(2\pi t)$, 输出 $O(t)$ 通过 Matlab 中的 Simulink 模块得到, 并对输入数据添加一个 0.05s 的“传输滞后”(Transport Delay), 如图 1(a)所示。其含义是混合模拟的输入和输出的幅值没有变化, 但是有一个 50ms 的时滞, 转换为相位差 φ 即 0.342rad。

2) 输入为 $I(t)=\sin(2\pi t)$, 输出 $O(t)$ 采用 Simulink

得到，并对输入数据添加一个 2 的增益，如图 1(b) 所示。其含义是混合模拟中输入和输出之间没有时滞，但是输入的幅值是输出幅值的 0.5 倍。

3) 输入为 $I(t)=\sin(2\pi t)$ ，输出 $O(t)$ 采用 Simulink 得到，并对输入数据添加一个 0.05s 的“传输滞后”以及一个 2 的增益，如图 1(c) 所示。其含义是输入和输出之间既存在 0.314rad 的相位差，同时输入的幅值是输出幅值的 0.5 倍。

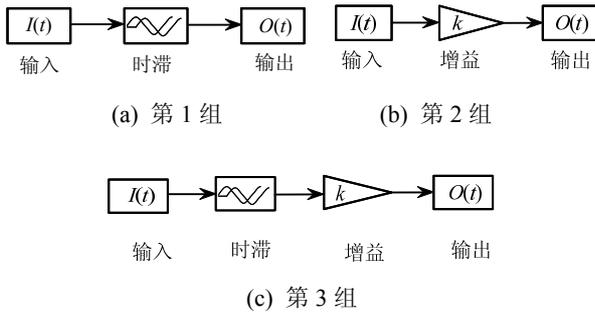


图 1 三组算例的 Simulink 模型

Fig.1 Example Simulink models

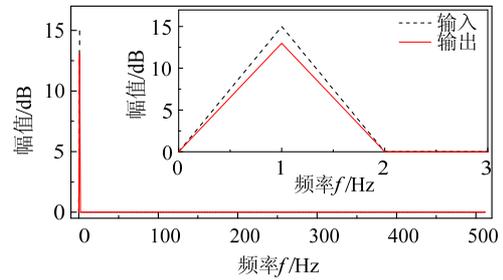
根据上述 3 组算例的意义，可得到频域标准中相关参数的理论值，如表 1 所示。根据式(10)~式(13)，得到频域标准中各相关参数的计算值。图 2 以第 3 组算例为例，给出了频域分析过程中的中间结果——快速傅里叶变换以及 y_n 的模。

由表 1 可知，频域分析的理论值和计算值总体上吻合良好，说明 A 和 d 可以在理论上作为评价实时混合模拟效果的一种检验标准。其中，第 1 组和第 3 组中 A 的计算值与理论值略有差异，这是由于 Simulink 中的 Transport Delay 模块会在数据前面增加 0.05s 的 0 并将最后 0.05s 的数据去掉，从而使数据产生 0.05s 的时滞，而去掉的一部分会对结果产生一定的影响。若第 1 组和第 3 组的输出不采用 Simulink 而是采用纯时滞的形式，即 $O(t)=\sin(2\pi(t-0.05))$ 和 $O(t)=2\sin(2\pi(t-0.05))$ ，则可以得到准确的理论值。

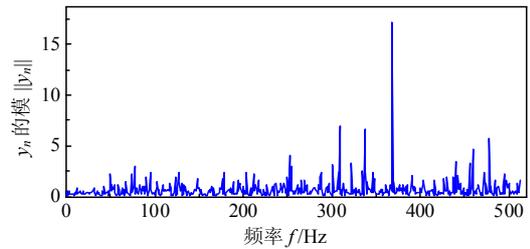
表 1 频域分析的理论值和计算值

Table 1 Theoretical and analytical values of frequency-domain analysis

组号	A	φ/rad	f^{eq}/Hz	d/ms	
1	理论值	1	0.314	1	50
	计算值	1.001	0.315	1	50
2	理论值	0.5	0	1	0
	计算值	0.500	5×10^{-6}	1	3×10^{-5}
3	理论值	0.5	0.314	1	50
	计算值	0.5004	0.315	1	50



(a) 输入与输出的傅里叶变换



(b) y_n 的模

图 2 算例 3 的计算过程

Fig.2 Analysis of Example 3

3.2 随机波

为验证数据加窗的适用性，采用美国 Lehigh 大学实时混合模拟试验中的两条白噪音信号 RD1 和 RD2^[3] 作为输入，如图 3 所示。输出信号 $O(t)$ 采用 Simulink 得到，并对输入数据添加一个 0.01s 和 0.05s 的 Transport Delay，其含义同样是模拟输入与输出之间存在一个 10ms 和 50ms 的时滞，采用直接分析和加窗分析的结果如表 2 所示。

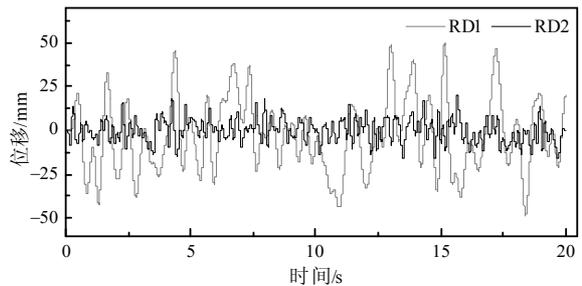


图 3 模拟采用的随机波

Fig.3 Random waves used in the simulation

表 2 随机波结果

Table 2 Results of frequency-domain analysis of random waves

随机波	τ/ms	分析方法	A	φ/rad	f^{eq}/Hz	d/ms
RD1	10	直接分析	1.0038	0.0616	18.0389	0.5
		加窗分析	0.9989	0.0695	1.0313	10.7
	50	直接分析	1.0123	0.2846	18.0389	2.5
		加窗分析	0.9708	0.3261	1.0313	50.3
RD2	10	直接分析	0.9882	0.1999	3.3161	9.6
		加窗分析	0.9924	0.2026	3.0055	10.7
	50	直接分析	0.8268	0.9161	3.3161	44
		加窗分析	0.8433	0.94	3.0055	48.9

由表 2 可以发现,对数据加窗后的分析结果明显优于直接分析的结果,而且当时滞为 10ms 得到的结果要优于时滞为 50ms 的结果,这是由于 Transport Delay 为 10ms 时在模拟过程中去掉的点数要少于 50ms,故得到的效果要比 50ms 的时滞要好;而当时滞为 10ms 的时候, A 和 d 分别接近于 1 和 10,这说明数据加窗方法适用于随机波的频域分析。

4 频域评价方法的试验验证

4.1 试验装置

为验证本文所提出的频域评价方法,采用反力墙、钢反力架、阻尼器和作动器构成一套混合模拟的试验装置,如图 4 所示。其中阻尼器采用粘滞流体阻尼器,最大工作荷载 150kN,极限荷载 180kN,工作位移 ± 150 mm;动态作动器的型号为 MTS 244.31,其最大输出荷载 250kN,最大位移 ± 250 mm。

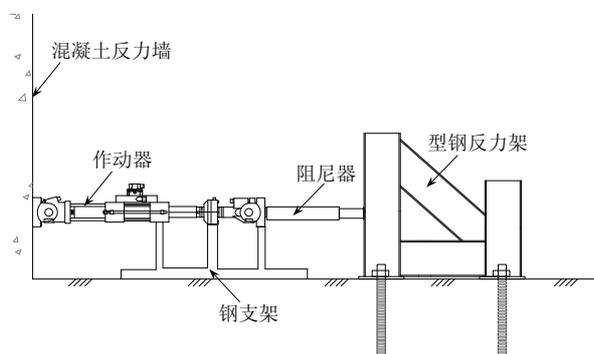


图 4 试验装置图

Fig.4 Experimental design

4.2 试验方案

对作动器分别输入两组正弦波和随机波,进行位移追踪试验,频率均为 1024Hz,即每秒输入 1024 个点。正弦波输入中包含了不同的频率和幅值,如表 3 所示。每条波重复 5 个周期,目的是观察不同频率和幅值的输入对作动器的影响,同时观察不同频率下试验系统可以达到的最大位移。试验不采用补偿方法。

表 3 试验中的正弦波输入

Table 3 Sine waves used in the tests

频率/Hz	作动器最大位移/mm	初始目标位移/mm	目标位移增量/mm	试验最大位移/mm
0.5	124.585	10	10	30
1	69.275	5	5	15
2	48.285	5	5	10
3	31.495	5	5	10
4	23.100	5	5	10
5	18.060	5	5	10

表 3 中,初始目标位移指在某一频率下输入第一条正弦波的幅值,目标位移增量指前后正弦波的幅值增量,试验最大位移指试验中实际达到的最大位移。随机波采用 3.2 节中的随机波,采样频率仍为 1024Hz,其幅值的缩尺比例如表 4 所示。

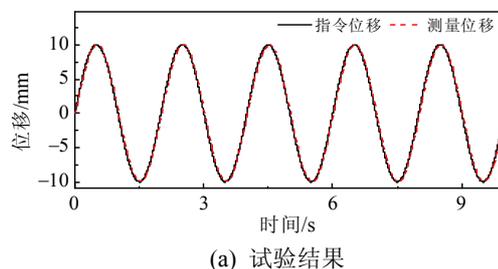
表 4 随机波的特性

Table 4 Properties of random waves

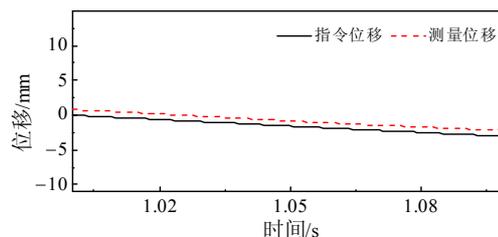
随机波	幅值/mm	幅值缩尺比例/(%)
RD1	50	15、20、25、30、35、40、45
RD2	20	30、50、75、100

4.3 正弦波分析结果

以频率为 0.5Hz、幅值为 10mm 的正弦波为例,其位移追踪试验结果如图 5 所示。从图 5 可以发现,作动器的测量位移能够对指令位移进行很好的追踪。对输入信号和输出信号分别乘以汉宁窗,然后对加窗后的数据采用频域评价方法进行频域分析,其分析结果如表 5 所示。



(a) 试验结果



(b) 图(a)的局部放大

图 5 频率为 0.5Hz、幅值为 10mm 的正弦波试验结果
Fig.5 Test results for sinusoidal wave with an amplitude of 10mm and a frequency of 0.5Hz

对于指标 A ,两种方法的理论值应在 1.0 左右。试验误差越大, A 与 1 的差值绝对值越大。由于上述试验未采用补偿, φ 大于零,且随频率的升高而增大。从表 5 可以看到,计算得到的 A 和 φ 与理论值较为接近,尤其是对于低频和低幅值的情况,这说明本实验的误差随频率和幅值的加大而增加。同时,由表 5 可知,加窗方法所得到的 f^{eq} 与实际值吻合良好。此外,尽管时滞 d 在实时混合模拟的过程中可能并不是一个固定值,但由于各个试验是在同一系统中进行的,因此各试验中的 d 较为接近

(20ms 左右), 与图 5(b)中的结果相近。

表 5 正弦波试验的结果

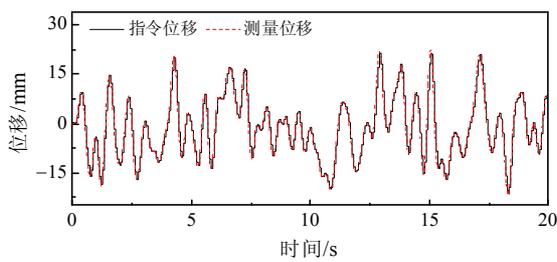
Table 5 Experimental results for sine waves

频率/Hz	幅值/mm	A	φ /rad	f^{eq} /Hz	d /ms
0.5	10	1.004	0.073	0.501	23.2
	20	1.002	0.076	0.501	24.1
	30	1.007	0.095	0.501	30.1
1	5	1.013	0.131	1.002	20.7
	10	1.012	0.134	1.002	21.3
1.5	15	1.017	0.149	1.002	23.7
	5	1.013	0.183	1.503	19.4
2	10	1.021	0.197	1.503	20.9
	5	1.015	0.237	2.004	18.9
3	10	1.048	0.268	2.004	21.3
	5	1.030	0.347	3.006	18.4
4	10	1.101	0.393	3.006	20.8
	5	1.049	0.452	4.008	17.9
5	10	1.156	0.516	4.008	20.5
	5	1.077	0.558	5.009	17.7
	10	1.204	0.632	5.009	20.1

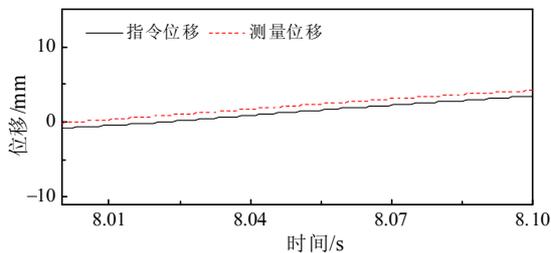
4.4 随机波的试验结果

以缩尺比例为 0.45 的随机波 RD1 为例, 其位移追踪试验结果如图 6 所示。从图 6 同样可以发现, 作动器的测量位移可对指令位移进行很好的追踪。对输入信号和输出信号分别乘以汉宁窗, 然后对加窗后的数据采用频域评价方法进行频域分析, 其分析结果如表 6 所示。

由于对随机波进行的是位移追踪试验, 输出不会对输入产生影响, 可以认为作动器的时滞不会对幅值造成影响, 即输入与输出的幅值误差 $A \neq 1$ 仅由试验误差造成, 而输入与输出的时间误差



(a) 试验结果



(b) 图(a)的局部放大

图 6 缩尺比例为 0.45 的随机波 RD1 的试验结果

Fig.6 Test results of random wave RD1 at 0.45 scale

表 6 随机波分析结果

Table 6 Analysis results for random waves

随机波	缩尺比例	A	φ /rad	f^{eq} /Hz	d /ms
r1	0.15	0.999	0.125	1.031	19.2
	0.20	1.002	0.123	1.030	18.9
	0.25	1.002	0.122	1.030	18.8
	0.30	1.005	0.124	1.030	19.1
	0.35	1.007	0.126	1.030	19.5
	0.40	1.012	0.131	1.030	20.3
r2	0.45	1.019	0.140	1.030	21.5
	0.30	0.986	0.334	3.030	17.5
	0.50	1.001	0.330	3.006	17.5
	0.75	1.023	0.340	3.006	18.0
	1	1.048	0.359	3.006	19.0

$\varphi(d) \neq 0$ 仅由作动器时滞造成。由于正弦波试验和随机波试验都是在同一台设备上进行的, 故随机波分析得到的 A 和 d 与正弦波分析得到的 A 和 d 应相似, 如图 6(b)所示。

5 结论

本文在频域分析的基础上提出了一种评价实时混合模拟效果的频域评价方法, 并由此得到实时混合模拟时滞的近似计算方法。该方法通过比较幅值(A)和相位差(φ)两个指标, 判断实时混合模拟的试验效果: 当 A 越接近于 1, φ 越接近 0, 试验的效果越好。引入等效频率的概念后, 实时混合模拟的时滞可以通过相位差计算得到。该方法仅需要试验的输入和输出即可进行分析, 分析结果能够同时反映作动器在加载过程中的时间误差和幅值误差, 因此可以较为全面的评价试验的效果。本文通过位移跟踪的数值模拟和试验初步证明了该方法的有效性。

为防止对数据长度对分析结果的影响, 本文从减小频谱泄漏的角度出发, 提出了对数据进行加窗的方法, 数值分析和试验的结果表明, 尽管对数据加窗不能完全消除频谱泄漏的影响, 但可将频谱泄漏现象限制在一个较小的范围之内。

参考文献:

[1] Nakashima M, Kato H and Takaoka E. Development of real-time pseudodynamic testing [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1992, 21(1): 79—92.

[2] Wu B, Bao H, Ou J, Tian S. Stability and accuracy analysis of central difference method for real-time substructure testing [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2005, 34(7): 705—718.

[3] Chen C, Ricles J M. Real-time hybrid testing using an

- unconditionally stable explicit integration algorithm [J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2009, 38(1): 23–44.
- [4] Chen C, Ricles J M. Analysis of actuator delay compensation methods for real-time testing [J]. *Engineering Structures*, 2009, 31(11): 2643–2655.
- [5] Chen C, Ricles J M. Development of direct integration algorithms using discrete control theory [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 2008; 134(8): 676–683.
- [6] Horiuchi T, Inoue M, Konno T, Namita. Y. Real-time hybrid experimental system with actuator delay compensation and its application to a piping system with energy absorber [J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 1999, 28(10): 1121–1141.
- [7] Chen C. Development and numerical simulation of hybrid effective force testing method [D]. Department of Civil and Environmental Engineering, Lehigh University, 2007.
- [8] 王向英, 吴斌, 王倩颖. 实时子结构实验的滑动模态控制[J]. *工程力学*, 2007, 24(6): 174–179.
Wang Xiangying, Wu Bin, Wang Qianying. Sliding mode control of real-time substructure testing [J]. *Engineering Mechanics*, 2007, 24(6): 174–179. (in Chinese)
- [9] 许国山, 吴斌. 采用比例-积分控制的实时子结构试验等效力控制方法[J]. *工程力学*, 2009, 26(9): 251–256.
Xu Guoshan, Wu Bin. Equivalent force control method with proportional integral controller for real-time substructure testing [J]. *Engineering Mechanics*, 2009, 26(9): 251–256. (in Chinese)
- [10] Mosqueda G, Stojadinovic B, Mahin SA. Real-time error monitoring for hybrid simulation. Part I: methodology and experimental verification [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2007, 133(8): 1100–1108.
- [11] Mosqueda G, Stojadinovic B, Mahin S A. Real-time error monitoring for hybrid simulation. Part II: structural response modification due to errors [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2007, 133(8): 1109–1117.
- [12] Chen C, Ricles J M, Guo T. Minimizing actuator tracking and energy errors for real-time hybrid simulation through a new adaptive compensation scheme [C]. 20th Analysis & Computation Specialty Conference: 335–345.
- [13] 王济, 胡晓. MATLAB 在振动信号处理中的应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社; 知识产权出版社, 2006: 124–130.
Wang Ji, Hu Xiao. The use of the MATLAB in vibration signal processing [M]. Beijing: China Waterpub Press; Intellectual Property Press, 2006: 124–130. (in Chinese)

(上接第 154 页)

- [15] Fan Y F, Hu Z Q, Luan H Y. Deterioration of tensile behavior of concrete exposed to artificial acid rain environment [J]. *An International Journal: Interaction and Multiscale Mechanics*, 2012, 5(1): 41–56.
- [16] GB/T50152-2012, 混凝土结构试验方法标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
GB/T50152-2012, Standard for test method of concrete structures [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012. (in Chinese)