

振动台再现误差对试件响应的影响及修正方法

林树潮¹, 唐贞云¹, 黄立^{1,2}, 郭珺¹, 李振宝¹

(1. 北京工业大学城市与工程安全减灾教育部重点实验室, 北京 100124; 2. 厦门大学基建处, 厦门 361005)

摘要: 为了改善振动台控制精度问题, 获取准确的结构响应, 首先就振动台特性对结构响应的影响进行了分析, 而后基于振动台输入输出响应, 提出了实测结构响应修正方法. 试验结果证明: 修正方法较好地补偿了振动台误差的影响, 修正后的试件响应能代表试件在期望地震动作用下的试件真实响应, 因此, 该修正方法能提高结构响应精度.

关键词: 振动台试验; 再现误差; 结构响应; 试件与台面相互作用; 修正方法

中图分类号: TU 317

文献标志码: A

文章编号: 0254-0037(2017)01-0118-09

doi: 10.11936/bjtxb2016040073

Effect of Shaking Table Errors on Specimen Response and Its Correction Measures

LIN Shuchao¹, TANG Zhenyun¹, HUANG Li^{1,2}, GUO Jun¹, LI Zhenbao¹

(1. Key Laboratory of Urban Security and Disaster Engineering of Ministry of Education,

Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

2. Office of Campus Construction, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract: Shaking table test is the main testing method for engineering structures research, which plays an important role in the research for seismic performance of structures. In order to improve control accuracy problems of shaking tables, and to get the authentic structural response, firstly, the influence of the shaking table dynamic on structural response was analyzed. And then a correction measure was developed based on the input and output of the shaking table. Correction method of better compensation of the influence of vibration table error was provided. And specimen corrected response can be better representative specimen's response at the desired ground motions. Finally, the performance of the developed method was verified experimentally.

Key words: shaking table test; reproduction errors; specimen response; specimen-table interaction; correction measures

地震模拟振动台试验是结构抗震试验研究的主要手段^[1-2]. 该试验方法对结构抗震性能评价结果的可信度关键取决于振动台对输入地面运动的再现精度. 然而, 振动台是集液压、机械、电子元件为一体的综合试验平台^[2], 其复杂的动力特性使得振动

台再现地震记录的精度不高, 振动台台面的加速度响应较输入地震波的幅值相差可达 30% 以上^[3-4], 难以满足日益发展的工程结构抗震研究需求. 地震模拟振动台领域的学者们多年来一直致力于如何改善振动台再现输入精度方面的研究. 自 1977 年起

收稿日期: 2016-04-22

基金项目: 教育部留学归国资助项目(Q0004014201501)

作者简介: 林树潮(1983—), 男, 博士研究生, 主要从事结构与工程抗震方面的研究, E-mail: 945328799@qq.com

Abedi-Hayati 等^[5]实现加速度时程再现控制以来, 学者们对控制算法的研究持续至今^[6-7]. 相关研究主要集中在两方面: 一方面关注振动台自身动力特性的补偿^[8], 文献[6]已对相关研究策略进行详细总结; 另一方面关注的是试件与台面相互作用的问题^[9]. Symans 等^[10]的试验研究发现试件与台面相互耦合的作用对振动台影响十分显著. 而后 Conte 等^[11]、Trombetti 等^[12]对此进行的仿真及试验分析发现试件与振动台的耦合影响很大, 在试验中需要予以考虑. 为此, 唐贞云等^[13]针对试件与台面相互作用补偿提出了实时补偿措施. 以上研究工作主要针对振动台性能改善, 但迄今为止相关研究工作真正应用于振动台试验的还较少, 目前振动台试验的误差仍然难以忽略. 振动台试验的最终目的在于获取准确的结构响应, 因此, 致力于振动台对地震动再现精度的改善并非改善振动台试验的唯一途径. 例如, 在完成的试验结果基础上将振动台的再现误差予以补偿, 同样可以改善试验结果精度. 本文在考虑振动台自身误差及试件与台面相互作用的情况下, 通过振动台和结构系统建模, 分析了振动台再现误差对试验试件响应的影响程度, 而后基于振动台

输入输出响应发展了相关补偿方法, 并通过试验进行了验证.

1 振动台性能分析

振动台系统主要包括以下几部分^[2]: 控制器、伺服阀、作动器、振动台台面及试验试件, 各部分内在联系如图 1 所示. 以加速度作为输入输出量的振动台主要采用三参量控制器^[2, 14], 伺服阀驱动指令信号 u 由三参量控制器产生. 在整个工作范围, 伺服阀为高阶非线性系统, 但在一定工作频率范围内, 采用经验近似的线性传递函数也能很好地描述其动力特性. 此处按一阶传递函数^[15]处理, 其特性由阀增益 k_v 和阀频率 ω_v 决定. 伺服阀流量特性为其非线性流量方程^[2]在零点线性化, x_v 为阀芯位移、 p_L 为负载压力降、 Q_L 为负载控制流量、 K_q 为阀流量增益、 K_c 为阀压力增益. 通过流量连续性方程^[2]和牛顿第二定律, 作动器将伺服阀给出的流量压力转化为振动台位移 y . C_1 为活塞泄露系数、 V_1 为活塞流量缸体积、 β_e 为活塞缸有效体积弹性模量、 A_p 为活塞面积、 M_t 为振动台台面质量. M_s 、 c_s 、 k_s 分别为试件的质量、阻尼和刚度系数, s 为积分算子.

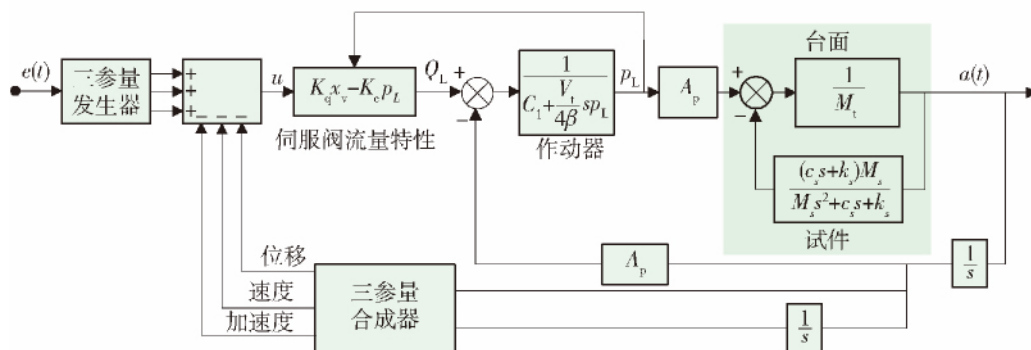


图 1 振动台控制系统框图

Fig. 1 Block diagram of shaking table control system

基于图 1 所示的振动台系统框图可对振动台性能进行数值分析, 本文以文献[2]中所给 3 m × 3 m 电液伺服振动台参数为例, 对振动台自身动力特性及试件性能对振动台性能的影响进行分析. 振动台控制器采用三参量控制, 试验试件阻尼比按常规混凝土结构处理, 取 5%; 结构频率 ω_s 分别取 2、4、8 Hz 以模拟不同动力特性的影响. 为了分析试件与台面相互作用的影响, 分别取试件质量与台面质量比 (M_s/M_t) 为 0、0.5、1.5. 基于文献[2]的振动台理论模型, 可直接得到以上参数对应相关系统的理论传递函数分析结果, 见图 2. 其中, 横轴为输入地震动

频率, 纵轴为振动台输入与输出的比值. 如果振动台能准确再现期望输入, 则输入输出应完全相同, 此时, 不同频率输入与输出的比值应为 1. 但图 2 所示结果显示, 振动台对不同频率信号再现精度差异较大, 其中误差由两方面造成: 一方面为振动台自身动力特性(见图 2 中“空载”对应曲线), 另一方面为试件动力特性. 振动台自身动力特性造成的误差主要集中在低频段(小于 1 Hz)和高频段(大于 30 Hz), 试件动力特性造成的影响主要集中在试件自身动力特性附近, 且误差随着试件频率和质量的增大而增大.

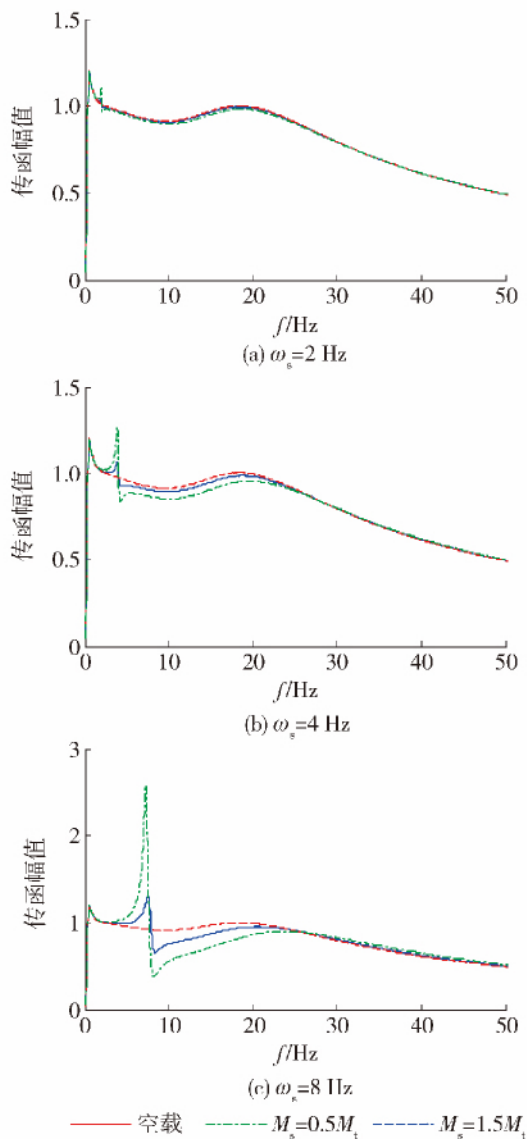


图2 不同负载下振动台传递函数

Fig. 2 Transfer functions of shaking table with different specimens

为了分析振动台误差对试件响应的影响,分析了阻尼比为5%,频率为4 Hz, $M_s/M_t = 1.5$ 的单自由度结构作为试验试件的响应,输入地震动为 El-centro NS 波原波. 图3给出了试件的真实加速度响应和振动台误差影响后的加速度响应对比,对比结果表明:振动台再现误差给试件响应造成了较大影响,不但幅值存在超过30%的误差,由图3局部图可知某些时刻响应的正负也出现了反转.这说明振动台误差对试验试件响应的误差需要予以重视.

2 振动台再现误差对试件响应的影响

图3以特例的形式对振动台再现误差对试件响应的影响进行了定性讨论.目前工程验证及科学研

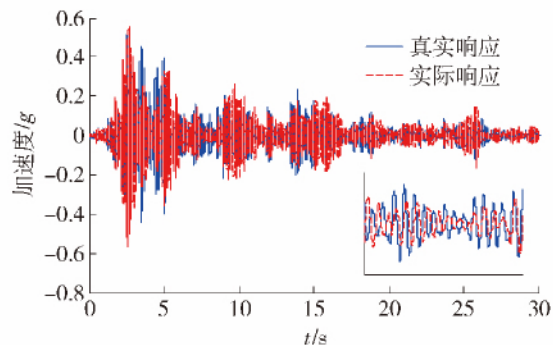


图3 考虑振动台误差前后试件加速度响应对比

Fig. 3 Comparison of acceleration with and without the consideration of shaking table dynamics

究过程中对振动台试验多着眼于结构响应最大值.为了进一步分析相关影响规律,从反应谱的角度进行探讨.基于抗震规范的4类场地条件,分别选取50条地震动,一共200条地震动进行振动台误差对结构反应谱的影响分析.所选200条地震动的傅里叶谱如图4所示,在0~20 Hz范围均有足够的分量.目前振动台的尺寸仍有限,缩尺试验不可避免,下面就振动台误差对原型试验和缩尺试验两方面影响进行分别讨论.

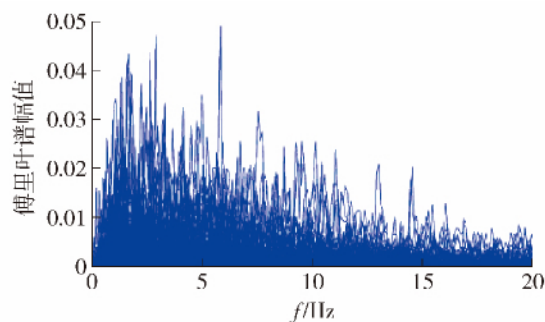


图4 选用地震动傅里叶谱

Fig. 4 Fourier spectrum of the selected ground motions

2.1 原型试验

分析中试件阻尼比均取5%,试件频率选定为0.5~5.0 Hz,试件质量分别取0.5倍、1.5倍台面质量.取每条地震动作用下的加速度、速度、位移响应最大值可分别得到加速度、速度、位移反应谱,为了讨论振动台误差的影响,分别计算了不考虑和考虑振动台误差影响下的反应谱曲线,将二者的比值绘制成谱曲线则可讨论振动台误差的影响范围.同时,地震动对结构的能量输入是结构抗震性能评价的另一个指标,输入结构的能量(E)计算公式为^[16]

$$E = \frac{1}{2} \mathbf{v}^T \mathbf{M} \mathbf{a} + \int_0^{t_0} \mathbf{v}^T \mathbf{C} \mathbf{v} dt + \int_0^{t_0} \mathbf{v}^T \mathbf{K} \mathbf{d} dt \quad (1)$$

式中: M 、 C 、 K 分别为结构质量、阻尼和刚度矩阵; a 、 v 、 d 分别为结构加速度、速度和位移响应向量; t_0 为地震动持续时间。

图 5、6 分别绘制了试件质量取 0.5 倍、1.5 倍台面质量时试件的加速度、速度、位移响应谱及能量谱比值,其中均值谱曲线由红色虚线标示。总体而言,加速度、速度、位移响应谱的影响在 $\pm 30\%$ 左右,能量谱的影响较大,最大能达到 4 倍,所以响应影响大的范围主要集中在低频段(小于 2.0 Hz)。对比图 5、6 可以看到,不同试件质量对加速度、速度、位移响应谱及能量谱的影响区别不大,由图 2 所示振动台性能分析可知,这主要是因为原型试验试件频率较低,与图 2(a)(b) 中所示情况类似,故而受试件台面相互作用影响不明显。

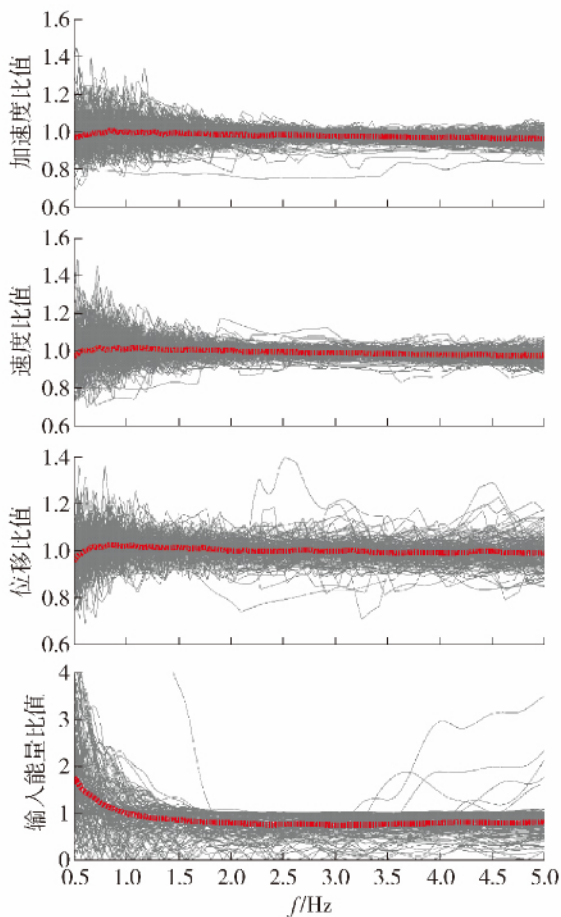


图 5 振动台误差对原型试验反应谱的影响 ($M_s = 0.5M_t$)

Fig. 5 Effect of shaking table errors on the response spectrum of prototype specimen when $M_s = 0.5M_t$

2.2 缩尺试验

目前的振动台尺寸及没问题都不足以满足所有试件进行足尺试验,缩尺试验仍然不可避免。试件缩尺对振动台的高频特性提出了更大挑战。本节中

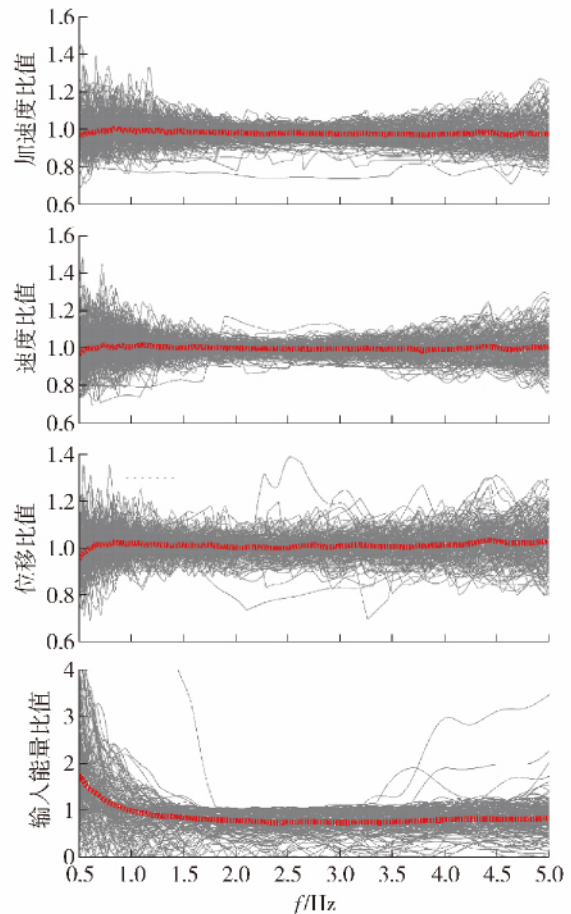


图 6 振动台误差对原型试验反应谱的影响 ($M_s = 1.5M_t$)

Fig. 6 Effect of shaking table errors on the response spectrum of prototype specimen when $M_s = 1.5M_t$

仍取试件阻尼比为 5%,试件频率进行 1/4 缩尺后为 2~20 Hz,同时,选用的 200 条地震动也进行相应比例缩尺。需要缩尺的试验试件通常都较大,且为了保证频率比还需施加配重,因此,试件质量都较大,此处取试件质量为台面质量的 1.5 倍。

分析不考虑和考虑振动台误差的加速度、速度、位移响应谱及能量谱比值,绘制于图 7 中。总体而言,加速度、速度、位移响应谱的影响正向在 50% 左右,负向最大超过 70%,能量谱的影响更大,最大值已超过 4 倍。与图 5、6 所示结果不同,缩尺后试件频率在低频段(小于 5 Hz)时各响应谱比值均在 1 附近,说明振动台误差影响较小,当试件频率较大时各响应谱比值均远离 1,振动台误差影响越来越大。对比均值曲线可知,相比于原型试验缩尺振动台试验中结构位移、速度、加速度反应谱受振动台误差的影响依次增大。主要原因是缩尺试验中地震动频谱因时间缩尺而被放大成高频信号^[2],从而突显出电液伺服式振动台对高频信号再现能力不足的弱点。

例如,本文选取的地震动频域分量(见图4)主要在0~20 Hz,缩尺试验中时间缩尺4倍后,地震动频域分量变成了0~80 Hz,图2所示的振动台特性表明,当输入信号频率大于30 Hz,振动台只能输出期望响应的80%,且输出误差随频率增大而增加。同时,位移、速度、加速度分别由低频、中频和高频信号控制^[2]。因此,地震动缩尺后振动台误差对位移、速度、加速度的影响依次增大。

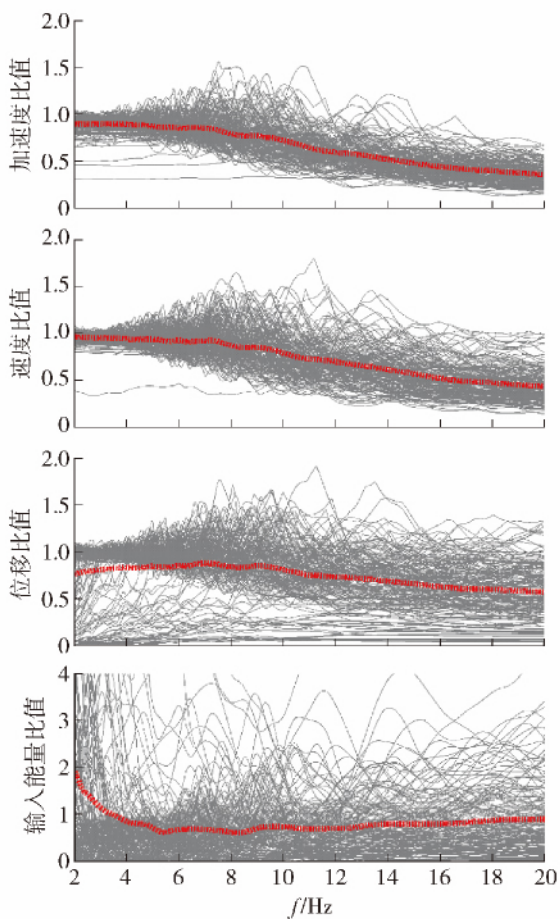


图7 振动台误差对缩尺试验反应谱的影响($M_s = 1.5M_t$)

Fig. 7 Effect of shaking table errors on the response spectrum of scaled specimen when $M_s = 1.5M_t$

2.3 非线性结构试验

研究结构非线性特性是振动台试验的主要目的。因此,振动台误差对结构试验非线性响应的影响尤为重要。本节取2.1节相同参数,结构恢复力特性采用双线性模型分析了振动台误差对结构非线性响应的影响。分析所得加速度、速度、位移响应谱及能量谱比值见图8。

从图中可以看到,结构的加速度、速度、位移的误差基本在30%之内,在低频段误差较大,中间频段误差范围在10%左右。结构的输入能量误差同样

在低频段较小,到高频段误差范围扩大,误差范围在-30%~40%,说明输入大质量试验试件的能量经过振动台后相比直接输入结构的误差随着频率的提高而增大。相比于线性结构,非线性位移响应受振动台误差的影响差别较大,其他响应并未呈现较大差别。

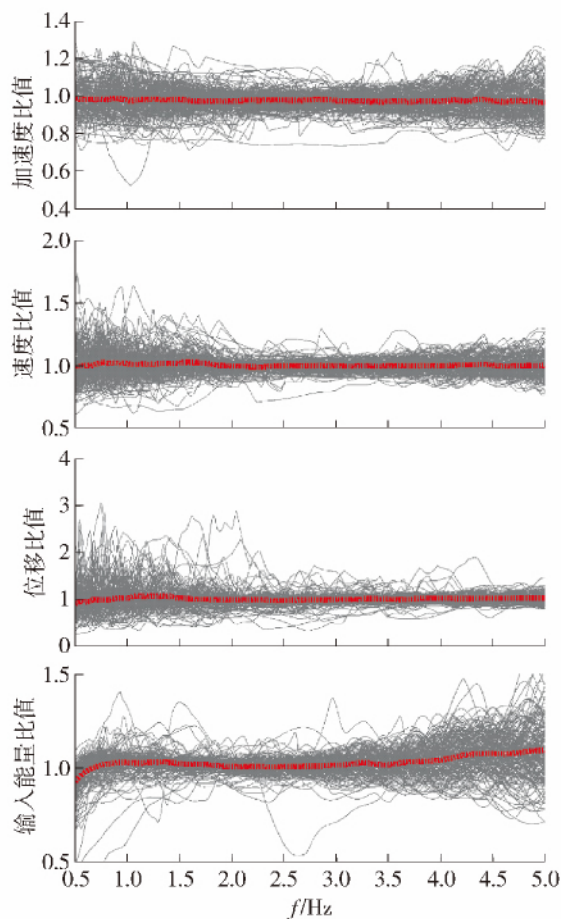


图8 振动台误差对非线性结构试验反应谱的影响($M_s = 1.5M_t$)

Fig. 8 Effect of shaking table errors on the response spectrum of nonlinear specimen when $M_s = 1.5M_t$

3 振动台再现误差修正

现有研究工作主要针对振动台性能改善,但相关研究工作应用于振动台试验的还较少,目前振动台误差对试验造成的影响仍不可忽略。振动台试验的目的在于获取所研究地震动作用下的结构响应。因此,在实测试验结果基础上消除振动台误差的影响,从而获取准确的结果响应将更加直接、方便。

3.1 频域逆补偿修正算法

频域迭代修正^[2,6]是振动台控制中常用的一种方法,其主要思想为:试验前通过预试验得到的加速

度时程与期望输入加速度时程求得系统传递函数, 对求得的传递函数求逆, 而后运用求逆后的新传递函数求取新的参考输入, 以达到修正输入的目的. 如此做法存在如下不足: 预试验输入过大会造成试件破坏, 预试验输入过小无法准确识别振动台及试件动力特性的影响. 将该思想直接用于试件响应修正可避免上述问题. 振动台试验基本流程如图 9 所示, 其中 $G(s)$ 和 $P(s)$ 分别表示振动台和试件的传递函数, $E(s)$ 、 $A(s)$ 、 $Y_1(s)$ 分别为时程 $e(t)$ 、 $a(t)$ 、 $y_1(t)$ 对应频域值. 输入地震动 $e(t)$ 通过振动台再现得到台面响应 $a(t)$, 而后作用到试验试件得到实测试件响应 $y_1(t)$, 该响应由于振动台误差的存在与试件在期望地震动作用下的真实响应 $y_r(t)$ 存在一定差别. 为了得到 $y_r(t)$, 需要从实测响应 $y_1(t)$ 中消除振动台误差的影响.

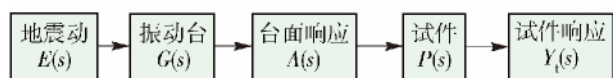


图 9 振动台试验流程

Fig. 9 Overall process of a shaking table test

将各时程转换到频域后, 由图 8 可知, 实测试件频域响应 $Y_1(s)$ 可表示为

$$Y_1(s) = E(s) G(s) P(s) \quad (2)$$

在期望输入地震动 $E(s)$ 作用下试件的真实响应 $Y_r(s)$ 为

$$Y_r(s) = E(s) P(s) \quad (3)$$

对比式 (2) (3), 只要在实测响应 $Y_1(s)$ 中消除振动台传递函数 $G(s)$ 即可得到真实响应 $Y_r(s)$. 由图 8 可得振动台传递函数为

$$G(s) = \frac{A(s)}{E(s)} \quad (4)$$

将式 (4) 求逆对实测响应 $Y_1(s)$ 进行修正可得真实响应为

$$Y_r(s) = Y_1(s) G^{-1}(s) \quad (5)$$

该过程中无需得到振动台传递函数表达式, 只需对各时域响应信号通过傅里叶变换转换为频域信号, 而后进行相应的数据计算, 最后, 通过傅里叶逆变换将修正后的试件响应转换为时域信号即可. 其基本操作流程如图 10 所示.

3.2 试验验证

本节设计振动台试验对本文发展的修正算法进行验证. 加载设备为三参量控制下的电磁振动台, 台面质量 33 kg. 试验试件为两自由度框架结构, 该试件由 2 个单自由度钢框架组装而成, 基本设计参

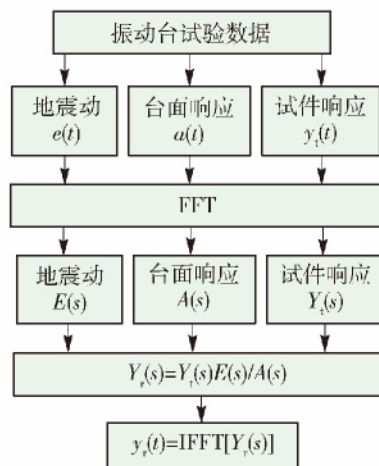


图 10 振动台再现误差修正流程

Fig. 10 Overall process of correction measures for shaking table errors

数如下: 柱为 4 个直径 8 mm、高 30 cm 的钢棒组成, 板为 10 mm 厚的钢板, 试件频率通过施加不同配重块进行调整. 为了模拟不同试件与台面相互作用的影响, 设计了 2 个不同质量的试验试件, 试件质量分别为 23.5 kg 和 53 kg, 对应的试件与台面质量比分别为 0.7、1.6. 2 个试件一阶、二阶模态对应频率分别为 7.34、20.07 Hz 和 4.73、12.83 Hz. 试验试件及实际试验照片如图 11 所示. 输入地震动为 El-centro NS 波原波. 实测台面加速度响应绘制于图 12. 从实测响应与台面输入对比可知, 在振动台动力性能及试验试件特性的影响下, 振动台再现地震动存在较大误差, 幅值误差在 50% 左右. 试件质量与台面质量比 $M_s/M_t = 1.6$ 时与质量比为 0.7 的试件相比, 前者会导致更严重的试件与台面相互作用, 理应导致更大的台面响应误差, 但图 12 所示结果表明二者导致的误差并不明显, 这主要是因为 $M_s/M_t = 1.6$ 对应试件的频率更低, 质量和频率导致的误差相抵消, 使得 2 个试件对应台面响应误差差不多.



图 11 试验照片

Fig. 11 Photos in the testing

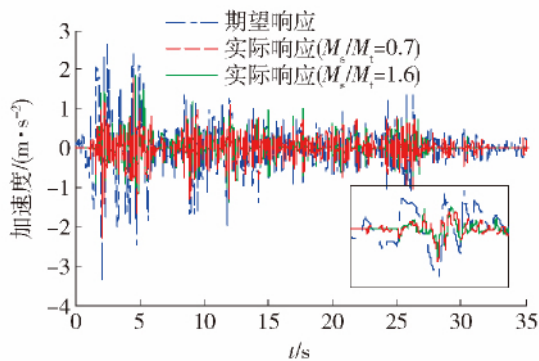


图 12 振动台台面响应对比

Fig. 12 Comparison of the shaking table response

当 $M_s/M_1 = 0.7$ 时, 实测顶层、底层加速度响应及底层柱应变响应曲线如图 13 中虚线所示. 此处的试件特性比较简单, 易于进行数学模型建立, 为了便于对比, 基于输入地震动和试件数学模型进行仿真作为试件真实响应, 如图 13 中实线所示. 对比实

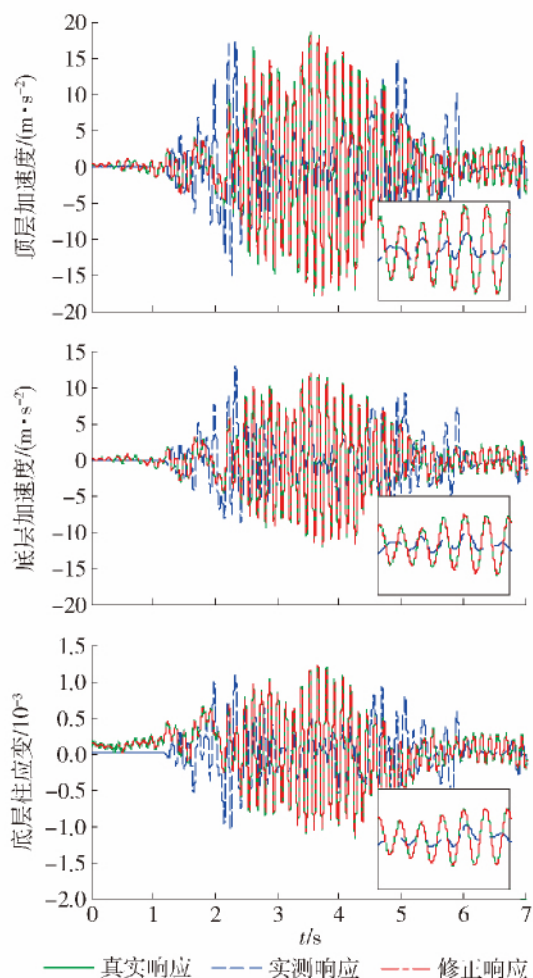


图 13 修正前后试件响应对比 ($M_s/M_1 = 0.7$)

Fig. 13 Comparison of the specimen response before and after correction when $M_s/M_1 = 0.7$

线与虚线可清楚看到: 实测响应与真实响应间差别很大, 且在不同时段幅值差别趋势并不统一, 实测响应与真实响应间差值时大时小. 同时, 由于三参量控制算法的存在, 使得振动台低频段响应出现相位超前, 即正相位现象. 采用本文发展的补偿方法修正后所得曲线如图 13 中点划线所示. 修正后曲线 (红色点划线) 与数值仿真所得真实响应 (蓝色虚线) 间差别很小, 可以代表试件的真实响应.

当 $M_s/M_1 = 1.6$ 时, 顶层、底层加速度响应及底层柱应变响应实测值、真实值及修正值如图 14 所示. 尽管试件质量相对 $M_s/M_1 = 0.7$ 时较大, 但由于试件频率的降低, 实测响应与真实响应间差别比 $M_s/M_1 = 0.7$ 时稍小. 修正后响应 (红色点划线) 与真实值 (蓝色虚线) 基本重合, 很好地补偿了振动台再现误差的影响.

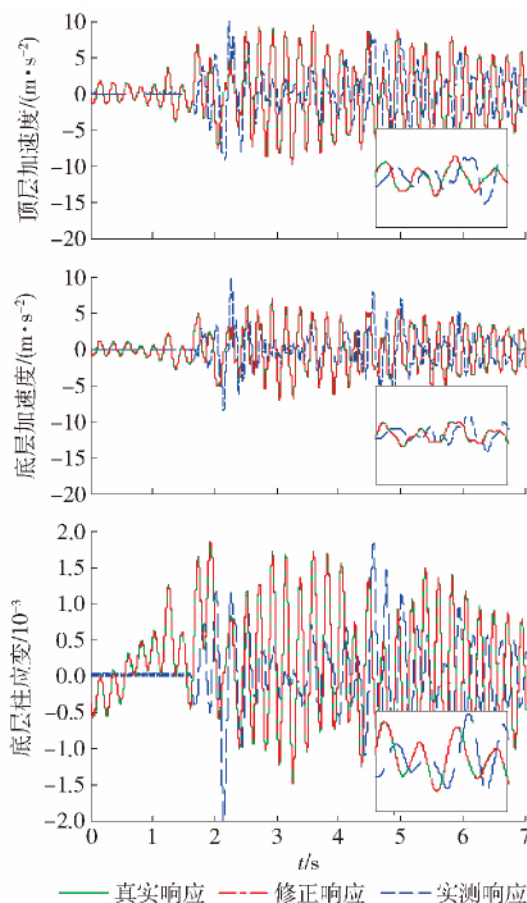


图 14 修正前后试件响应对比 ($M_s/M_1 = 1.6$)

Fig. 14 Comparison of the specimen response before and after correction when $M_s/M_1 = 1.6$

为了进一步定量对比修正前后所得结构响应的准确性, 采用积分绝对值误差 (E) 作为定量指标对修正算法的精度评价. 积分绝对值误差的表达式为

$$E = \int_0^t |y_e - y_s| d\tau \quad (6)$$

式中: y_e 为待评估量; y_s 为标准量. 此处取图 13、14 中结构真实响应作为标准量, 实测响应和修正响应分别为修正前后结构的待评估量. 按式 (6) 计算所

得修正前后结构响应误差绝对值如图 15 所示. 该图表明: 修正后结构的加速度响应累积误差降低了一个数量级, 应变响应累积误差降低了接近 2 个数量级. 这说明修正后振动台误差造成的结构响应误差得到了大大降低.

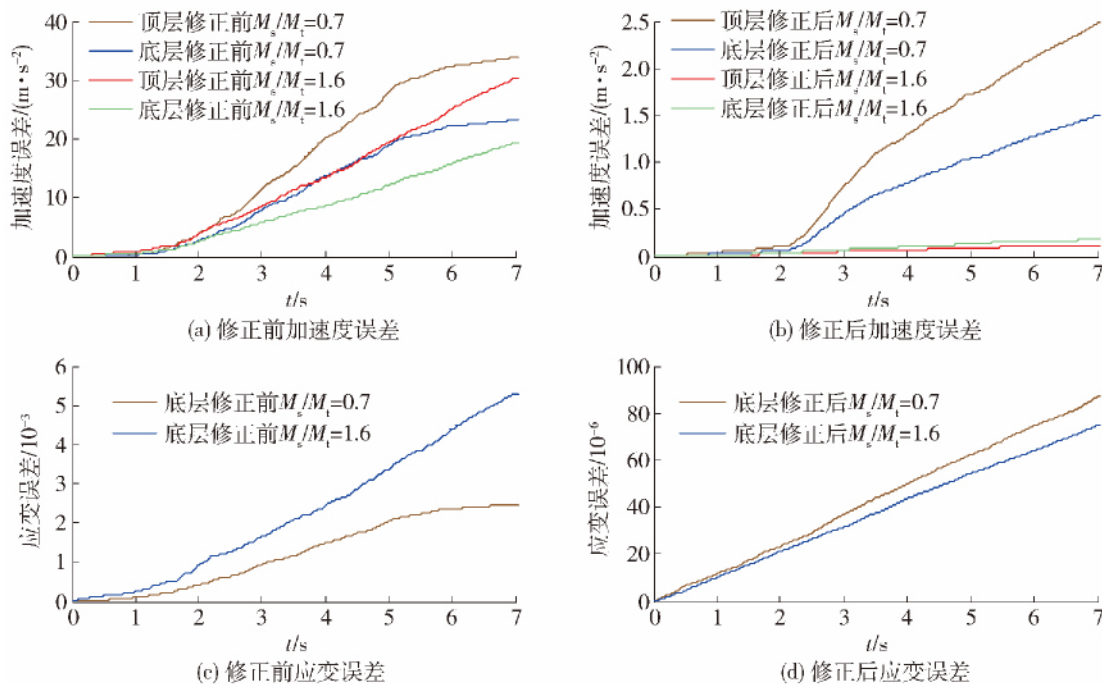


图 15 修正前后结构响应误差绝对值

Fig. 15 Absolute errors of structural response before and after correction

4 结论

1) 本文通过振动台试验系统建模系统分析了三参量控制振动台系统再现地震动误差对试件响应的影响. 分析结果显示: 振动台再现误差会对试件响应造成 30% ~ 70% 的误差, 试件频率越高、试件质量越大造成的误差越大.

2) 基于振动台控制中采用的频域迭代修正技术发展了频域逆补偿修正方法对振动台误差造成的试件响应误差进行修正, 试验及研究仿真分析对比结果表明: 修正方法较好地补偿了振动台误差的影响, 修正后的试件响应能较好地代表试件在期望地震动作用下的试件真实响应. 但发展的修正方法目前只针对线性结构进行了试验验证, 对于试件进入非线性之后的响应修正方法还需进一步验证与改进.

参考文献:

[1] 王进廷, 金峰, 张楚汉. 结构抗震试验方法的发展 [J].

地震工程与工程振动, 2005, 25(4): 37-43.

WANG J T, JIN F, ZHANG C H. Advances in the dynamic testing method of structures [J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2005, 25(4): 37-43. (in Chinese)

[2] LU X L, WANG D, WANG S S. Investigation of the seismic response of high-rise buildings supported on tension-resistant elastomeric isolation bearings [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2016, 13(45): 2207-2228.

[3] 黄浩华. 地震模拟振动台的设计与应用技术 [M]. 北京: 地震出版社, 2008: 196-201.

[4] 曹万林, 王尧鸿, 董宏英, 等. 钢管混凝土边框内藏钢板剪力墙振动台试验研究 [J]. 地震工程与工程振动, 2011, 31(2): 75-81.

CAO W L, WANG Y H, DONG H Y, et al. Shaking table test study on shear walls with concrete-filled steel tube columns and embedded steel-plate [J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2011, 31(2): 75-81. (in Chinese)

[5] ABEDI-HAYATI S, AUSLANDER D M. Control of multi-

- actuator electro-hydraulic shaking tables [J]. *Fluidics Quarterly*, 1979, 11(1): 1-16.
- [6] 唐贞云,李振宝,纪金豹,等. 地震模拟振动台控制系统的发展[J]. *地震工程与工程振动*, 2009, 29(6): 162-169.
TANG Z Y, LI Z B, JI J B, et al. Development in shaking table system [J]. *Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2009, 29(6): 162-169. (in Chinese)
- [7] SEVERN R T. The development of shaking tables—a historical note [J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2011, 40(2): 195-213.
- [8] YANG T Y, LI K, LIN J Y, et al. Development of high-performance shake tables using the hierarchical control strategy and nonlinear control techniques [J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2015, 44(11): 1717-1728.
- [9] RYU K P, REINHORN A M. Real-time control of shake tables for nonlinear hysteretic systems [EB/OL]. [2016-04-22]. <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/stc.1871/epdf>.
- [10] SYMANS M, TWITCHELL B. System identification of a uniaxial seismic simulator [C]// *Proc 12th Engineering Mechanics Conference*. Reston, Virginia: American Society of Civil Engineers, 1998: 1485-1488.
- [11] CONTE J P, TROMBETTI T L. Linear dynamic modeling of a uniaxial servo-hydraulic shaking table system [J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2000, 29(9): 1375-1404.
- [12] TROMBETTI T L, CONTE J P. Shaking table dynamics: results from a test-analysis comparison study [J]. *Journal of Earthquake Engineering*, 2002, 6(4): 513-551.
- [13] 唐贞云,李振宝,周大兴,等. 试件特性对地震模拟振动台控制性能影响研究(II)——对地震记录再现精度的影响及实时补偿[J]. *北京工业大学学报*, 2010, 36(9): 1199-1205.
TANG Z Y, LI Z B, ZHOU D X, et al. The effects on the earthquake simulation caused by the characteristics of the specimen in the shaking table tests—part(II): the effects on the replaying precision of the recorded seismic waves and the real-time compensation [J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2010, 36(9): 1199-1205. (in Chinese)
- [14] 李振宝,唐贞云,纪金豹. 地震模拟振动台三参量控制算法超调修正[J]. *振动与冲击*, 2010, 29(10): 211-215.
LI Z B, TANG Z Y, JI J B. Overshoot modification of shaking table TVC algorithm [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2010, 29(10): 211-215. (in Chinese)
- [15] THAYLER W J. *Transfer functions for Moog servo valves* [R]. New York: Technical Bulletin Moog Inc, 1958.
- [16] 北村春幸. 基于性能设计的建筑振动解析[M]. 裴星洙, 廖红建, 张立, 译. 西安: 西安交通大学出版社, 2006: 156-161.

(责任编辑 郑筱梅)