

地震模拟振动台台阵性能评估与测试笔记

国巍,余志武,蒋丽忠

中南大学土木工程学院;高速铁路建造技术国家工程实验室,长沙 410075

摘要 考虑到近几年强震频发的风险,以及地震模拟振动台设备和技术的快速发展,首先介绍了近几年来我国振动台设备的发展现状和趋势,结合中南大学近期已经完成验收的振动台台阵系统,阐述振动台及台阵系统的主要性能指标、设计意图和评估方法,指出振动台性能的主要测试内容,并给出振动台系统的性能验收和使用要点。

关键词 地震;模拟振动台;振动台阵系统

中图分类号 P315.8

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2013.12.009

Performance Evaluation and Test Note of Earthquake Simulation Shaking Table Array System

GUO Wei, YU Zhiwu, JIANG Lizhong

School of Civil Engineering, Central South University; National Engineering Laboratory for High Speed Railway Construction, Changsha 410075, China

Abstract Considering the risk caused by the frequently occurrence of strong earthquakes, and the development of earthquake simulation shaking table and related technologies, the construction of shaking table device has entered into a boom period in China in order to improve the experimental conditions for carrying out in-depth study on the damage mechanism of buildings in the earthquake. Firstly, the present development state and trends of shaking table are introduced. And then based on the shaking table array system located at Central South University that has passed the acceptance recently, the performance indexes, design ideas, and evaluation method of the overall array system are clearly described. Furthermore, key testing contents of the system are pointed out, the performance acceptance and usage essentials of shaking table array system are also given.

Keywords earthquake; simulation shaking table; shaking table array system

0 引言

近年来世界范围地震频发,自2009年9月以来7级以上强烈地震已达30余次,地球进入地震活跃期已经得到公认。2008年中国汶川地震,2010年智利地震、海地地震、中国玉树地震,2011年东日本大地震等都给人类带来了巨大损失。地震风险的显著增加对建筑物抗震设防提出了更高的要求 and 严峻考验,抗震设计理论、计算方法和抗震减震措施等都亟待进一步完善,而建筑物强震破坏机制和破坏特征更是得到关注,成为当前抗震领域的研究热点。建筑物抗震研究一般有两种思路:数值计算和试验研究,二者相辅相成。鉴于强震时结构的复杂压弯扭受力情况和动态、强非线性本构特征,往往难以建立准确数学模型,此时试验研究显得更为直接可靠。结构抗震试验通常分为3类:拟静力、拟动力和振动

台试验。其中,振动台试验直接模拟地震发生过程,简单自然,起源最早,20世纪60年代初建造了室内机械式地震模拟振动台,60年代末出现了电液伺服控制振动台,但受限于试验设备规模和较大试验投资,70年代进一步发展了拟静力和拟动力试验方法。拟静力试验通过低周往复荷载作用以评估结构和构件的基本抗震性能,但无法模拟实际地震作用;拟动力试验能够近似模拟实际地震作用和结构破坏状态,但以慢速静态加载取代实际地震动态过程,一方面不能体现结构材料动力性能,另一方面可能还会受到收缩余变影响。所以,拟静力和拟动力试验虽然细节可控,但都无法从真正意义上再现结构强震破坏,更无法辅助探索强震破坏机制和特征,这正是地震模拟振动台试验的巨大优势。然而振动台模型是缩尺建造,更关注宏观破坏现象,细节模拟不足,这是较易实

收稿日期:2012-07-24;修回日期:2013-01-20

基金项目:国家自然科学基金项目(50938008, 51108466);中国博士后科学基金项目(20110491277, 2012T50663);中南大学博士后基金项目

作者简介:国巍,博士后,研究方向为复杂结构体系抗震减震,电子信箱:wei.guo.86@gmail.com

现足尺设计的拟静力和拟动力试验的优势所在。因此,拟静力、拟动力和地震模拟振动台试验各具优势和特色,综合3种试验能够较完美地研究建筑物抗震性能、破坏机制和破坏特征等。

纵观地震模拟振动台发展历史,按时间顺序主要分为3类:机械式、电磁式和电液伺服式。机械式多数只能进行正弦波试验,电磁式可随意复现波形,但位移较小,仅 $\pm 25\text{mm}$,目前绝大多数振动台都是电液伺服式,可实现低频大位移和3向6自由度控制。现今世界上有数百座地震模拟振动台设备,主要集中在中、日、美三国^[1]。振动台建造最早的是多震国日本,已经建造50余座,主要由日本三菱公司、日立制作所和美国MTS公司承建,其中最具有代表性的是国立防灾科学技术研究所(NIED)的 $15\text{m}\times 20\text{m}$ 的3向6自由度巨型振动台,已经完成数个足尺原型试验。美国目前也有数十座振动台,多数由MTS公司承建,1971年世界第一台水平和垂直双向同动的 $6.1\text{m}\times 6.1\text{m}$ 地震模拟振动台在加州大学伯克利分校建造,2003年美国纽约州立大学建成世界上第一套双台阵系统,同年美国内华达大学建成3台阵系统。20世纪60年代起,中国振动台建造同样经历了由机械至电液伺服式、正弦波至地震随机波、单向至3向6自由度振动、模拟控制至全数字控制的发展历程,目前振动台进入快速发展期,不论数目还是指标都逐步接近日本水平。中国振动台现在主要采用全部自主研发、部分自主研发、全部进口等方式^[2-3],本文仅介绍近几年国内振动台发展情况。中国也在做地震模拟振动台的相关研发工作^[4-7],但由于关键技术和信任度等原因,地震模拟振动

台主要购自国外,集中于美国MTS和英国Servotest两家公司。MTS公司在液压伺服设备方面居世界顶尖水准,同济大学新建的2向2自由度 $4\text{m}\times 6\text{m}$ 3台阵系统购自该公司。东南大学选择购买MTS公司激振和控制系统自行组装,效果良好。因性价比优势,Servotest公司近几年占据了我国部分市场份额,目前已完成的振动台多为台阵系统,如图1所示,包括重庆交通科研设计院的 $3\text{m}\times 6\text{m}$ 2台阵系统、福州大学的一大($4\text{m}\times 4\text{m}$)两小($2.5\text{m}\times 2.5\text{m}$)3台阵系统、中南大学 $4\text{m}\times 4\text{m}$ 4台阵系统,以及在建的河海大学(水下振动台, $0.1\sim 100\text{Hz}$)、中国地震局工程力学研究所($5\text{m}\times 5\text{m}+3\text{m}\times 3\text{m}$ 2台阵系统)、华南理工大学、山东建筑大学、兰州理工大学、昆明理工大学、成都理工大学、河北工业大学等高校。另外,东南大学(扩建为 $6\text{m}\times 9\text{m}$ 3向6自由度,与原台形成台阵)、大连理工大学、湖南大学、西南交通大学、长沙理工大学、苏州科技大学($6\text{m}\times 8\text{m}$ 3向6自由度)、广州大学都有新建或扩建地震模拟振动台计划。初步估计,中国近5年内会增加地震模拟振动台20~30座,已经超过现有振动台的总和,振动台建造进入快速发展期。同时,从新建台子或台阵可以看到新建振动台都各具特色,有各自不同的试验优势,目前发展趋势主要有以下特征:(1)台阵化,满足大跨结构和桥梁结构试验要求;(2)大型化,满足大缩尺甚至足尺试验要求;(3)多功能化,利用台阵系统能够拼装成大型振动台,可大大提升振动台性能;(4)多向多自由度化,目前振动台均不再局限于单向单自由度;(5)特色化,如满足高频振动、水下试验等特殊试验要求。



图1 中国近几年的振动台阵系统
Fig. 1 Shaking table array systems in China during the recent years

目前中国地震模拟振动台建造进入快速发展期,较多采用Servotest设备,但相比MTS设备,对Servotest设备的了解和认识还比较有限。基于此,本文针对中南大学已经完成验收的振动台台阵系统一期工程,详细介绍设备性能评估和测试内容,并提供作者参与振动台建设和调试期间的一些重要经验,希望能够对中国地震模拟振动台建设提供重要的参考和借鉴。

1 中南大学地震模拟振动台

中南大学地震模拟振动台隶属于高速铁路建造技术国家工程实验室,又称为“高速铁路多功能振动台试验系统”,其总体投资规划是由一个 $4\text{m}\times 4\text{m}$ 3向6自由度固定台和3个 $4\text{m}\times 4\text{m}$ 3向6自由度移动台组成,4个振动台建在同一直线上,可独立使用,也可组成多种间距台阵,振动台具有大行程、宽频带等特点,可以承担桥梁、路基、隧道和房屋结构多点

输入地震模拟和高速铁路人体舒适度试验等。该试验系统采用 Servotest 公司设备,共分二期建设,一期由 1 个固定台和 1 个移动台组成,即 2 台 6 自由度振动台试验系统,台阵间距 6~25m 可调,2012 年 5 月验收,各项性能指标均满足要求,可承担房屋和单跨桥梁结构振动台试验。一期试验系统主要由 6 部分组成:2 套 6 自由度振动台(轴承及钢平台)、作动系统(作动器、伺服阀、差压传感器)、可移动台安装位置的调整系统(支撑系

统、夹紧系统、绞车系统、管路链),一套 Servotest Pulsar 双台阵控制系统(伺服控制器、调制器、计算机硬/软件、不间断电源),泵源系统(液压油源、液压油源分配器、电机/泵、蓄能器、油水热交换器等)。二期将添加 2 个 6 自由度移动台,台阵地坑已预留 2 个振动台的安装基础及移动轨道,技术规格充分考虑了台阵系统扩充能力,从而可构建完整的高速铁路多功能 4 台阵试验系统。图 2 是该套试验系统的主要组成部分。



图 2 中南大学地震模拟振动台
Fig. 2 Earthquake simulation shaking table located at Central South University

鉴于振动台系统属于大型特殊设备,对建筑基础要求较高,中南大学地震模拟振动台由中南大学自行设计并由湖南建工集团完成基础建设。类似的台阵系统,同济大学采用美国 MTS 系统。综合来看,随着振动台设备大型化、台阵化,投资必然会随之增加,故在满足大部分试验需求的情况下,建议不要过多追求大而全。此外,除了振动台设备之外,整个实验室的建设和规划同样非常重要,文献[8]在这方面已有所阐述。

B 台组成,各自独立技术性能指标和联合工作性能指标如表 1 所示,其中 $g=9.8m/s^2$ 。此外,3 个转动自由度也可以控制到零输出或指定波型输出,作动器的总行程比表 1 的指标大一些,在每个作动器内都有 1 个液压垫。采用计算机软件控制,6 个自由度及倾覆力矩实现自动补偿,Pulsar 控制系统对每个自由度都进行 PID(比例-积分-微分)控制,自动补偿由于试件偏心或系统几何误差导致的加速度与位移失真。对于台阵系统而言,2 台系统间距在 6~25m 调节,利用地槽底部和侧面的移动轨道系统,移动台在此间距内可固定在任意位置,实现无极可调。2 台联合控制同样通过 Pulsar 系统实现 16 自由度控制。相关指标测试在后文将详细阐述。

2 振动台性能指标评估

2.1 宏观指标

2 台 6 自由度振动台试验系统由固定的 A 台和可移动的

表 1 中南大学地震模拟振动台主要参数

Table 1 Main parameters for the earthquake simulation shaking table located at Central South University

振动台参数	台面尺寸 /m	质量 /t	载重 /t	最大位移 /mm	最大速度 /($mm \cdot s^{-1}$)	最大加速度 /($m \cdot s^{-2}$)	频率范围 /Hz	其他指标 /($t \cdot m$)
固定台 (移动台)	4x4	14	30	$x, y: 250;$ $z: 160$	正弦波振动速度: 750; 地震波振动速度: 1000	$x, y: 1.0g(20t), 0.8g(30t);$ $z: 2.0g(20t), 1.6g(30t)$	0.1~50	最大抗倾覆力矩: 30 最大抗偏心力矩: 20

2.2 指标评估

确定了振动台主要性能参数后,其可行性和性能的基本保障,可从硬件角度进行评估^[9,10],该评估方法简单有效,可判定设备硬件能否满足使用性能要求。

(1) 作动器能力评估

水平 x 向和 y 向分别有 2 个作动器,选用 Servotest 080-250-100P 型,动态推力可达 145kN。考虑系统液压为 280bar (1bar=0.1MPa),作动器有效面积 6450mm²,故静态推力为

180.6kN。因为加速度与速度存在相位差,速度最大对应加速度最小,在实现最大加速度时应考虑其为静态推力。而非动态推力。145kN 是考虑 70bar 的压降所提出,其更多存在于加速度很小的时间段,对作动器能力评估意义不大。基于以上,考虑台面质量 14t,载重 20t 和 30t, x 向和 y 向分别有 2 个作动器,此时水平最大加速度可达:

$$180.6kN \times 2 = (14+30) \times 0.82g$$

故水平单向运动且不考虑偏心影响时,在 20t 试件下台面最

大加速度可达 $1.0g$, 在 $30t$ 试件下台面最大加速度可达 $0.8g$, 能够实现性能目标。

竖直方向有 4 个作动器, 选用 Servotest 080-160-100P 型, 其动静态力跟水平作动器相同, 其竖向最大加速度可达:

$$180.6kN \times 4 = (14+30)t \times 1.64g$$

故竖向单向运动且不考虑偏心时, 在 $20t$ 试件下台面最大加速度可达 $2.0g$, 在 $30t$ 试件下台面最大加速度可达 $1.6g$, 能够实现性能目标。

(2) 抗偏心能力评估

假定振动台上有 $20t$ 试件, 其偏心距为 a , 考虑 x 向和 y 向加速度同为 $0.9g$, 实际加速度约为 $1.269g$, 则偏心所致的平摇力矩为 ($kN \cdot m$)

$$1.269g \cdot 20a = 254a$$

因为台面与作动器耳朵状连接的设计优势, 4 个水平作动器到台面中心间距均为 $2m$, 且参数相同, 故克服平摇力矩的出力应该为 $254a/8 = 31.75akN$ 。

水平 x 向两个作动器出力应考虑平动和平摇出力两部分, 综合可知, 单个作动器出力应为 $(153+31.75a)kN$ 。该值应小于 $180.6kN$, 取界限值可知偏心距为

$$a = (180.6 - 153) / 31.75 = 0.87m$$

当 x 和 y 向同时输入 $0.9g$ 加速度时, 该振动台设备的抗偏心力矩为 $17.4t \cdot m$ 。

按照同样的思路, 考虑 x 和 y 向同时输入 $0.8g$ 加速度时, 振动台抗偏心力矩为 $31.6t \cdot m$ 。

该值与 $0.9g$ 加速度输入时显著不同, 抗偏心力矩与振动台运动强度成函数关系, 故振动台给出的 $20t \cdot m$ 仅具有参考价值, 并不能在不同试验中作为偏心的判断。原因在于: 当输入强度发生变化时, 平动对作动器的要求远大于克服偏心力矩的出力要求, 从数学函数上说, 二者对输入强度的比例放大系数完全不同。

(3) 抗倾覆能力评估

类似于抗偏心能力评估流程, 可对竖向作动器的抗倾覆能力做个简单评估, 从而可对振动台的试验能力有总体认识, 方便开展后续试验工作。同样考虑 $20t$ 试件, 其重心高度为 b , 竖向为最大加速度 $2.0g$, x 和 y 向同时为最大加速度 $1.0g$, 认为试件重量同样由竖向作动器支撑, 则竖向加速度和重量所需的单个竖向作动器最大出力为 $150kN$ 。

进而, 由于试件重心并不在台面上, x 和 y 向运动必然产生倾覆力矩, 值为 $200bkN \cdot m$ 。

4 个竖向作动器参数相同, 到台面中心水平距离均为 $1.25m$, 倾覆力矩分配到每个作动器, 应承担的出力为 $40bkN$ 。

由于单个竖向作动器最大出力为 $180.6kN$, 且需与竖向运动和倾覆力矩所产生的力相平衡, 振动台才能发挥效用, 故 $20t$ 试件的重心高度 $b = 0.77m$ 。因此, 在所定义工况下, 抗倾覆力矩最大值为 $15.4t \cdot m$ 。

可以看到, 此抗倾覆力矩远小于表 1 所给的 $30t \cdot m$ 指标, 原因解释如下: 所给工况为最不利工况; 抗倾覆力矩随工况

不同而改变。类似于抗偏心力矩, 此抗倾覆力矩与竖向加速度、水平加速度均有关系, 当竖向加速度改为 $1.5g$ 时, $20t$ 试件的抗倾覆力矩为 $27.5t \cdot m$ 。故振动台参数标所描述的 $30t \cdot m$ 的指标仅可作为参考, 在具体试验中仍需计算并加以评判, 才能断定试验是否可顺利开展。

(4) 伺服阀流量计算

x, y, z 向作动器有效面积均为 $64.50cm^2$, 正弦最大速度均为 $60cm/s$, 故伺服阀需要通过的最大流量为 $232.2L/min$ 。

(5) 泵源能力评估

根据伺服阀流量可计算泵源需提供流量。 x 向有 2 个伺服阀, y 向有 2 个, z 向有 4 个, 故泵源流量为 $1857.6L/min$ 。

8 个伺服阀的先导阀流量预估为 $70L/min$, 8 个作动器泄露量预估为 $32L/min$, 则泵源所提供的峰值流量应为 $1959.6L/min$ 。

考虑蓄能器对泵源的支持, 按 $2/3 \cdot 1415 = 0.64$ 折减, 则为 $1254L/min$ 。

系统所配置的 $1320L/min$ 可满足正弦试验要求, 当进行地震模拟试验时, 即便各向均达速度最大值, 但考虑 $216L$ 蓄能器储能释放作用, 泵源一般按照峰值的 $1/3$ 即可, 所需油源流量还将更小。故系统所配油源系统足够满足使用要求。

(6) 近似空载能力评估

考虑到核电设备振动台试验往往要求高达 $3.0 \sim 5.0g$ 的加速度, 其质量较小, 往往可近似认为是空载情况。假定核电设备质量小于 $1t$, 此时作动器可实现的最大单向加速度为 $180.6kN \times 2 = 0.5t \times 7.2g$ 。可见, 就 $0.5 \sim 1t$ 核电设备而言, 最大加速度可实现 $3.6 \sim 7.2g$, 满足核电设备的试验要求。

(7) 转动能力评估

振动台为 3 向 6 自由度, 可实现转动方向的零输入和给定波形输入, 然而转动角度是受水平和竖向作动器行程所限制的。以工作位为零点位置, Servotest 080-250-100P 型和 080-160-100P 型作动器可分别实现 $\pm 125mm$ 和 $\pm 80mm$ 范围移动 (由于液压垫的存在, 实际范围比该数值稍大)。水平作动器到台面中心距离为 $2m$, 竖向作动器到台面中心距离为 $1.25m$, 故其转角范围为: 平摇 $(\pm 125/2000)rad = \pm 3.58^\circ$; 纵向倾覆 $(\pm 80/1250)rad = \pm 3.68^\circ$ 。

可见, 振动台平摇和纵向倾覆限值角度分别为: $\pm 3.58^\circ$ 和 $\pm 3.68^\circ$ 。需要明确的是, 转动输入较少采用, 一方面是由于地震转动分量的缺失, 另一方面是作动器位移限值所致。

3 振动台性能测试

中南大学地震模拟振动台一期双台阵系统已经完成验收, 测试性能良好。验收工作分别针对单台和双台联动开展, 本文分别就验收、测试和初步使用中遇到的问题加以说明。

3.1 单台性能测试

单台验收有安全验收和性能验收两类。安全验收包括液压泄露检查、台面位置、安全急停和不间断电源 UPS 检查等。性能验收包括台面自振频率、最大性能、波形失真度、背景噪

声和非主振方向分量等。台面自振频率为 134Hz,对应振型为扭转振型。所采用的试件如图 3 所示,包括弹性件和惯性件。惯性件需要注意的是要保证箱子中沙子塞满,避免在振动试验中晃动,尤其是竖向和水平多次振动试验后很可能发生沙子晃动,从而影响某些频率点的性能测试结果。



(a) 18.5t 的惯性试件 (b) 弹性试件
(a) Inertia specimen of 18.5 ton (b) Elastic specimen

图 3 中南大学地震模拟振动台

Fig. 3 Earthquake simulation shaking table located at Central South University

选取典型频率点,测试振动台最大性能,测试结果与所给最大性能曲线吻合良好,本文不再详述。波形失真度分别评估位移和加速度的波形失真度,计算选用二次谐波峰值与基波峰值的比值来评估,载荷选用惯性载荷。误差情况均在合理范围,仅在固定台出现一次误差超限情况,如表 2 所示。可以看到, z 向 20Hz 频率点位移误差达 9.1%,其他频率处最大误差控制在 5%以内,分析判断是惯性试件沙子晃动影响所致,加速度误差控制在 20%以内,满足相应规程标准。表 3 为移动台波形失真度情况,可以看到,振动台性能良好。较小的位移误差会导致加速度误差显著增大,加速度误差在 25%内可视为合理,具体指标可根据设备自行确定。继而,评估 0.1~50Hz 的随机信号的台面再现情况,利用白噪声确定振动台系统传递函数,并利用此传递函数对给定随机信号计算驱动信

号,驱动振动台,利用台面多个加速度传感器采集复现信号,与原信号做比值并取对数,以评估其误差情况。图 4 给出了指标变化情况,可以看到在 0.1~50Hz 范围内,误差控制在 3dB 内。

地震模拟振动台最重要的功能是实现地震波输入,测试中采用 Kobe、El-centro 等多条典型地震波,根据试件是惯性还是弹性试件、地震波是否压缩输入等多种因素,复现原波形,此时需要使用 Servotest 的迭代控制系统 (Iteration Control System, ICS) 功能,根据工况和设定参数 (如迭代比例系数、计算传递函数白噪声参数等) 迭代 3~6 次均可满足精度要求,如图 5 所示。

表 2 负载下固定台波形失真度

Table 2 Waveform distortion of fixed table with load

频率/Hz	加速度误差/%	位移误差/%
0.5	2.0	0.1
1.0	3.8	0.3
2.0	7.2	0.5
5.0	4.8	0.6
10.0	13.5	2.4
20.0	16.0	9.1(>5.0)
50.0	16.9	3.5

表 3 负载下移动台波形失真度

Table 3 Waveform distortion of movable table with load

频率/Hz	加速度误差/%	位移误差/%
0.5	1.8	0.1
1.0	4.1	0.3
2.0	6.3	0.5
5	3.3	0.6
10	2.4	0.8
20	11.2	3.4
50	17.3	4.8

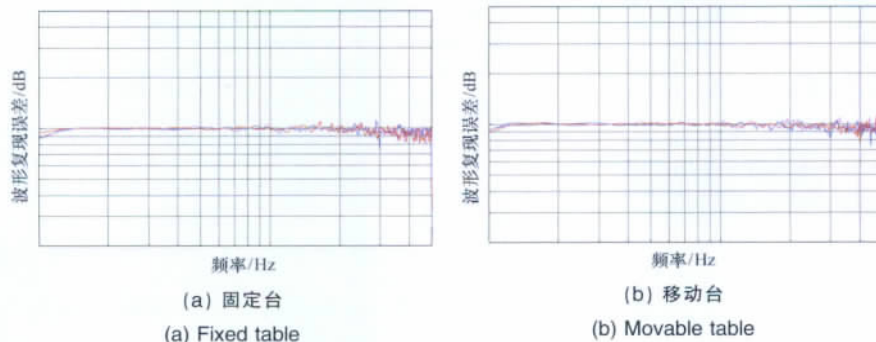


图 4 振动台波形复现误差

Fig. 4 Waveform replication errors of shaking table

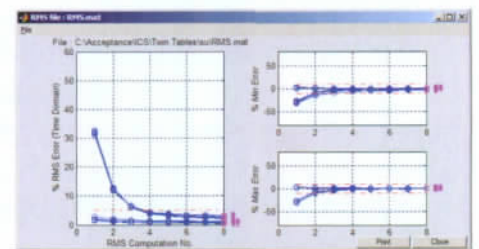


图 5 Kobe 地震波输入下 ICS 迭代误差收敛情况

Fig. 5 Convergence situation of iteration errors by ICS while Kobe earthquake record is adopted in the test

3.2 双台阵性能测试

在单台性能测试基础上,双台阵系统主要关注:(1) 双台相对位置;(2) 启动、停止时同比情况;(3) 装有试件时,双台同步和不同步复现波形时失真度情况。验收中主要针对前两

点进行了测试,对于装有联动试件下同步和不同步性能测试,因试件投资较大,已计划将铁道部某桥梁项目试验作为验证。双台相对位置停机位误差在 0.5mm 内,启动和停止时包括急停时相对位移误差均控制在 0.5~0.6mm 内。图 6 给出



图6 双台联动试验

Fig. 6 Chain effect test of two shaking tables

了双台验收试验照片,图7给出了双台联动时相对位置的误差情况。其中,联动试件将惯性试件和弹性试件相连接,考虑到双台试件不对称,连接杆件并非刚性,此试验与真实桥梁多点试验尚有较大区别,仅供参考。考虑试验投入和操作难度,建议台阵验收试验结合具体项目开展。

3.3 存在问题

振动台性能测试和验收过程中,遇到问题如下:(1)试件对振动台性能有较明显影响,尤其是弹性试件共振区;(2)振动台及台阵系统的传递函数与白噪声激励有较明显关系,其参数设

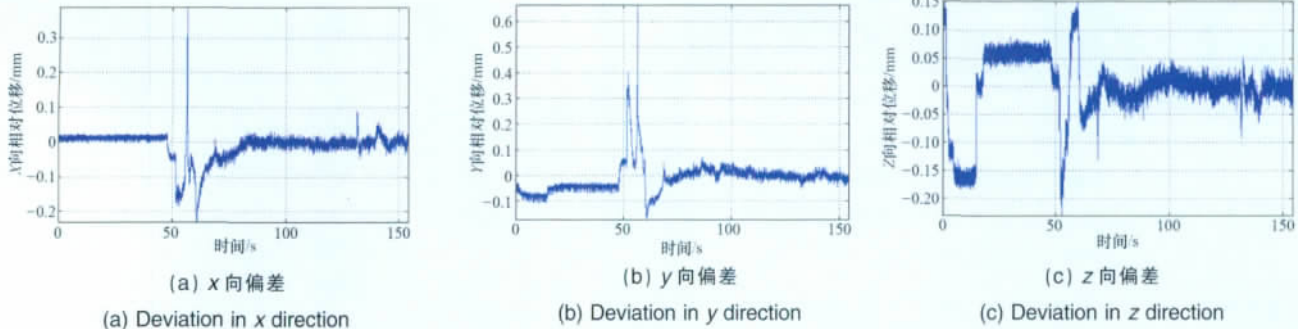


图7 联动试验启动时双台相对位移偏差记录

Fig. 7 Records of relative displacement deviation for the double tables ramping from rest position

置优劣对模拟效果和迭代次数影响较大,不同振动台不同试件都有合适的参数设置,需要一定程度的经验积累;(3)地震模拟单次迭代往往不能达到要求精度,需要一定的迭代次数;(4)虽然 Servotest 公司在设备成本控制上做了较大努力,工艺和性能保障上有一定的妥协,但计划性能实现良好,具性价比优势;(5)地震波和随机波台面复现时波形需要加以处理,避免突然启动和停止操作损坏设备;(6)台阵系统往往对运动偏差有较严格控制,研究认为控制在 1mm 以下对具有大负重、中低频振动等特征的大部分土木工程地震模拟试验是可行的;(7)振动台启动时需要设定试件载重,此值应略低于实际值,过高会导致台面有掀翻危险,过低则需要较长时间的平衡重载;(8)冷却水系统需要保障油温稳定在 40℃左右;(9)南方天气对油源间的防水防潮提出了较高要求,同时土建基础设计对振动台设备性能和厂房安全正常使用至关重要;(10)需要注意作动器伸出端的保护,在未使用时尽量封盖,以免落灰,在运行前需擦拭;(11)在较高频率振动时空气振动会明显影响周围空间,在设计高频振动台时需要特别注意。

4 结论

本文详细阐述了地震模拟振动台的发展现状和趋势,结合中南大学建造的多振动台台阵系统,阐明了振动台的性能设计和评估方法,指出了关键指标,以及振动台重要性能测试内容和测试方法,给出了测试、使用经验。

参考文献 (References)

[1] 黄浩华. 地震模拟振动台设计与应用技术[M]. 北京: 地震出版社, 2008.
Huang Haohua. Design and application of the technology of seismic simulation shaking table[M]. Beijing: Seismological Press, 2008.

[2] 王燕华, 程文灏, 陆飞, 等. 地震模拟振动台的发展 [J]. 工程抗震与加固改造, 2007, 29(5): 53-56.
Wang Yanhua, Chen Wenrang, Lu Fei, et al. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2007, 29(5): 53-56.

[3] 宗周红, 陈亮, 黄福云. 地震模拟振动台台阵试验技术研究及应用[J]. 结构工程师, 2011, 27(S): 6-14.
Zong Zhouhong, Chen Liang, Huang Fuyun. Structural Engineers, 2011, 27(S): 6-14.

[4] 邱法维, 沙锋强, 王刚, 等. 地震模拟振动台控制技术 & 软件研究[J]. 液压与气动, 2011(6): 98-101.
Qiu Fawei, Sha Fengqiang, Wang Gang, et al. Hydraulic and Pneumatic, 2011(6): 98-101.

[5] 田述永. 地震模拟振动台基础设计研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2006.
Tian Shuyong. Study on foundation design of earthquake simulator[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2006.

[6] 陈建秋. 六自由度模拟地震振动台台面控制原理研究[J]. 广州大学学报: 自然科学版, 2006, 5(3): 75-78.
Chen Jianqiu. Journal of Guangzhou University: Natural Science Edition, 2006, 5(3): 75-78.

[7] 谭宇昂, 徐松林. 万科地震模拟振动台的建设 [J]. 工程抗震与加固改造, 2012, 34(2): 28-32.
Tan Yuang, Xu Songlin. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2012, 34(2): 28-32.

[8] 程绍革, 张自平, 贺军, 等. 大型高性能振动台模拟地震实验室 [J]. 工程抗震与加固改造, 2006, 28(5): 39-42.
Chen Shaoguo, Zhang Ziping, He Jun, et al. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2006, 28(5): 39-42.

[9] 方重, 曹文清. 大型模拟地震振动台液压部件参数的计算 [J]. 世界地震工程, 2002, 18(3): 85-88.
Fang Zhong, Cao Wenqing. World Earthquake Engineering, 2002, 18(3): 85-88.

[10] 方重. 大型模拟地震振动台主要参数的确定及技术经济分析 [J]. 世界地震工程, 2001, 17(4): 135-138.
Fang Zhong. World Earthquake Engineering, 2001, 17(4): 135-138.

(责任编辑 朱宇, 马宇红)