

# The Installation and Debugging of Nine Sub-Array System of Shaking Table

Juke Wang, Chunhua Gao, Shuoyu Zhang

Beijing Laboratory of Earthquake Engineering and Structural Retrofit, Beijing University of Technology, Beijing  
Email: 1163230292@qq.com

Received: Dec. 20<sup>th</sup>, 2015; accepted: Jan. 10<sup>th</sup>, 2016; published: Jan. 14<sup>th</sup>, 2016

Copyright © 2016 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

---

## Abstract

Facing the damage caused by the frequent occurrence of earthquakes, this study pointed out that shaking table experiment is the research and development direction of structural seismic test, and briefly summarized the developmental history and status quo. In recent years, as array system offered important experiment methods to the anti-seismic experimental research and theoretical research of such slim-lined constructions as large-space structure, pipeline, multiple span bridge, etc., this study made a conclusion of the system composition, functional characteristics, installation method and debugging procedures of nine sub-array system based on the nine sub-array system of BJUT, and further explained the characteristics and contents of array system control. It's of some referential value for the technological development of shaking table array experiment.

## Keywords

Shaking Table Array, Function Debugging, System Control

---

# 地震模拟振动台九子台阵系统的安装与调试

王巨科, 高春华, 张硕玉

北京工业大学, 工程抗震与结构诊治北京市重点实验室, 北京  
Email: 1163230292@qq.com

收稿日期: 2015年12月20日; 录用日期: 2016年1月10日; 发布日期: 2016年1月14日

## 摘要

面对到地震频发的危害,指出了地震模拟振动台试验是结构抗震试验的研究和发展方向。简要概括了地震模拟振动台的发展历史和现状。基于近年来振动台台阵系统已成为大型空间结构、管道、多跨桥梁等细长结构的抗震试验研究与理论研究重要的试验手段,以北京工业大学九子台阵系统为例,对九子台阵系统的系统组成、功能特点、安装方法、调试进行总结,并进一步说明台阵系统控制的特点和值得研究的内容。希望对地震模拟振动台台阵试验技术的发展有一定的参考价值。

## 关键词

振动台台阵, 功能调试, 系统控制

## 1. 引言

近年来,地震在世界范围内频频发生,给人类带来了巨大灾难。合理的结构抗震设计方法可以提高建筑结构的抗震能力避免倒塌。抗震理论分析和试验研究是结构抗震理论研究的两个重要方面。鉴于地震机制和结构抗震性能的复杂性与多样性。理论分析的方法往往不能准确的建立数学模型,来反映结构破坏的机理与过程。因此,通过结构抗震试验才能进一步丰富和完善结构抗震理论。目前结构抗震试验通常分为3类:拟静力、拟动力和振动台试验。振动台试验是结构抗震研究最直接也是较为方便的实验方法,被广泛应用于研究结构的动力特性、地震响应等方面。

## 2. 振动台的发展与现状

### 2.1. 地震模拟振动台的发展

早在20世纪60年代中期开始,日本就开始了振动台的建造,至今已建成50余台。包括目前世界上规模最大的振动台是日本防灾科学研究所建成的三向六自由度的振动台E-Dfense,其台面尺寸为 $15\text{ m} \times 20\text{ m}$ ,已完成多个足尺试验[1]。美国加州大学圣地亚哥分校在NEES的支持下建立了世界上最大的室外单向振动台,其台面尺寸为 $7.6\text{ m} \times 12.2\text{ m}$ ,且试验高度无限制[2]。

### 2.2. 多振动台台阵的发展

美国纽约州立大学于2003年建成了地震模拟振动台二台阵系统;同年美国内华达大学建成了三台阵系统,这两个台阵系统均被列入美国的“NEES”计划[3]。重庆交通科研设计院于2004年建成了 $3\text{ m} \times 6\text{ m}$ 二台阵系统。2006年北京工业大学建成了( $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ )九子台阵系统,如图1所示。目前国内许多科研院所及高校均建成了地震模拟振动台阵系统,如福州大学一大( $4\text{ m} \times 4\text{ m}$ )两小( $2.51\text{ m} \times 2.51\text{ m}$ )3台阵系统、同济大学( $4\text{ m} \times 6\text{ m}$ )4台阵系统、中南大学( $4\text{ m} \times 4\text{ m}$ )4台阵系统等,并完成了多项台阵试验[4]-[6]。此外,还有较多高校及研究所正在筹备建设振动台台阵系统。

随着大型空间结构、管道、多跨桥梁的不断出现,仅通过增大振动台的规模来满足试验要求存在着许多弊端:如投资巨大,维护成本高;无法实现多维多点地震动输入等。而地震模拟振动台阵系统也存在机械耦合与控制耦合、多台之间要求同步一致、受试件非线性与控制系统非线性影响明显等特点,其调试难度较大[2]。多振动台台阵系统的控制与相关实验技术是结构动力试验技术的重要研究方向之一。

目前中国地震模拟振动台台阵建造进入快速发展期,而对地震模拟振动台台阵系统的了解和认识比



Figure 1. Nine sub-array system of BJUT  
图 1. 北京工业大学九子台阵系统

较有限。因此本文针对北京工业大学九子台台阵系统的系统组成、功能特点进行详细介绍，并提供作者参与振动台安装和调试期间的一些经验，进一步说明台阵系统控制的特点和值得研究的内容。希望能够对地震模拟振动台台阵建设提供重要的参考和借鉴。

### 3. 九子台地震模拟振动台台阵系统

九子台地震模拟振动台台阵系统由9个 $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ 的单台组成，每个子台由刚性台面、支承导向装置、激振系统和底座组成。可将任意子台进行积木式组合，对桥梁、管道、输电线路等细长结构和网壳等柔性结构进行多维多点的地震波输入试验，也可将若干子台组成一个大台进行大尺寸模型试验。目前台阵系统可由16套激振器和所需的连杆进行组合来实现多种形式、不同位置布局的地震模拟振动台台阵试验。该系统最多可进行 $35\text{ m} \times 16\text{ m}$ 尺度的大型结构试验[2]。其性能指标如表1所示。

## 4. 九子台台阵系统安装与调试

### 4.1. 液压源、机械系统的安装

九子台台阵系统液压源安装在油源泵房内。油路分配器安装在激振器附近，用于连接输油管 and 激振器伺服阀。台面机械系统由台面、激振器、支承、导向双头铰接连杆、碰撞件等组成[7]。九子台台面采用焊接格构式结构，具有质量轻、弯曲频率高等特点。在安装台面系统前需要检查各个部件的尺寸是否与设计尺寸一致。在安装台面时，要保证台面的水平度和相互位置。

### 4.2. 控制系统调试

#### 4.2.1. 振动台控制软件

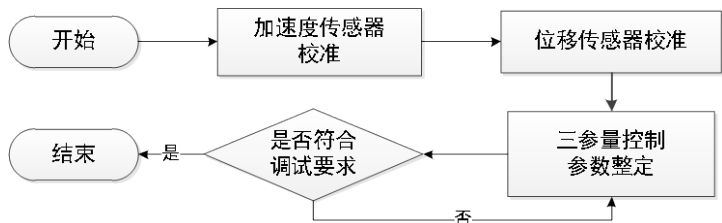
振动台九子台控制软件分为上位机软件、下位机软件两部分。上位机 TWR 控制软件的主要功能为系统识别、时频域迭代等。下位机伺服控制系统 TEST 软件主要功能为控制参数设定、传感器灵敏度设定、控制方式选择等；在试验的过程中，可以随时调整控制参数，以方便调试和实时控制。

#### 4.2.2. 振动台控制参数调试

首先在油源关闭情况下完成加速度传感器的校准和测试，然后开启油源，在油源压力小于 $5\text{ MPa}$ 的情况下，进行位移传感器的校准。完成传感器校准后油源压力升至工作压力，进行控制参数调整。调试流程如图2所示，调试步骤如下：

**Table 1. The technical parameters of nine sub-array system**  
**表 1. 九子台台阵系统的性能指标**

项目	指标	项目	指标
台面尺寸	1 m × 1 m	台面重量	1 Ton
最大荷载	10 Ton	最大位移	±10 cm
最大速度	60 cm/s	最大加速度	2.0 g (满荷) 0.9 g (空荷)
频率范围	0.1~50 Hz	控制方式	加速度控制
工作方式	水平单向	波形	正弦波、随机波、地震波



**Figure 2. Debugging process**  
**图 2. 调试流程**

- 1) 加速度传感器校准与位移传感器校准
  - a) 开启 UPS 电源。
  - b) 开启 TEST 控制软件，预热十分钟左右。
  - c) 九子台台阵系统采用的是从零频开始的力平衡式(MBA-4 型)加速度传感器，可将传感器 90° 翻转，相当于 1 g，检查控制系统中的加速度显示值是否满足要求，通过调整传感器灵敏度设定值和零点完成加速度传感器校准。
    - d) 将位移反馈增益调至较小值，开启油源，低压状态下(5 MPa 即可)进行位移控制，通过量取台面实际运动位移与软件限制值的差异修改位移传感器灵敏度设定值，反复测试位移测量值满足精度要求。
- 2) 三参量控制参数整定
  - a) 将油源压力调升至工作压力，打开 TWR 控制软件，采用白噪声信号进行单方向单自由度的激励，通过观测系统传递函数特性修改三参量控制参数设定值，单方向有多个作动器时应同时进行整定。
  - b) 通过 TWR 控制软件辨识系统特性，建立控制系统模型，系统模型满足相关度要求后既可以进行预实验和正式试验。

## 5. 工程调试

以独塔自锚式悬索桥试验为工程背景，采用 8 个地震模拟振动台组成台阵进行试验，试验现场如图 3 所示。

### 5.1. 基于专家经验自整定策略

地震模拟振动台控制系统的控制参数较多，其参数整定手动费时费力，尤其对于多振动台台阵系统，其手动整定难度很大。基于上述问题，根据专家系统调试的经验提出了一种振动台控制参数自整定策略，自整定流程如图 4 所示[8]。



Figure 3. Commissioning test site  
图 3. 试验调试现场

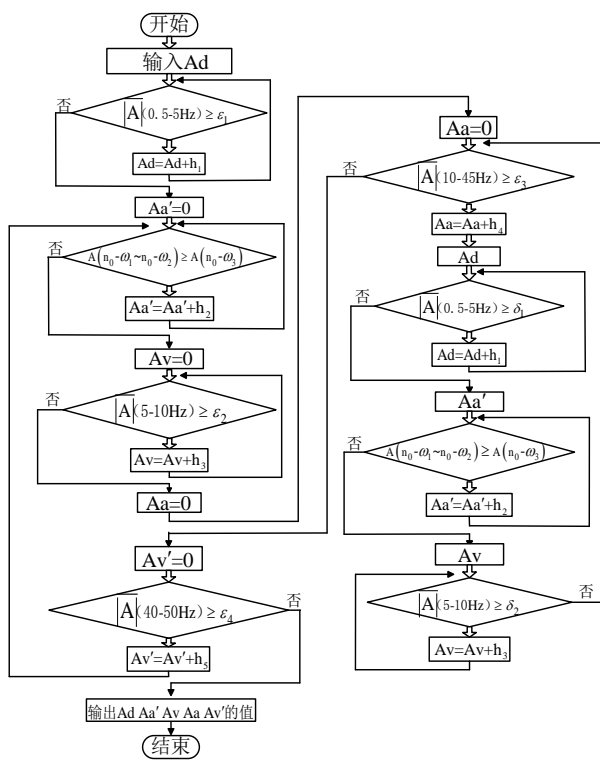


Figure 4. Auto-tuning algorithm flow diagram  
图 4. 自整定算法流程图

## 5.2. 自整定对比验证

依据上述整定策略编制的自整定程序输入信号采用白噪声序列来调节控制参数；手动整定则采用 LMS TWR 控制软件来实现，得到的整定参数值的参数值如表 2 所示。

由表 2 可以看出，自整定值与理论值存在一定的差异，由图 5 可以看出系统频响曲线在在 0.5~50 Hz 范围内较为平坦，基本保持在  $\pm 3$  dB 范围内，说明利用基于专家经验的控制参数自整定算法可以得到较好的控制参数。

## 6. 九子台台阵系统的应用

九子台台阵系统自投入运行以来，完成了国家体育馆双向张弦梁结构屋盖、奥运羽毛球馆新型弦支穹顶在内的 30 余大型试验[9]，取得了较理想的试验效果。为我国结构抗震的相关领域做出了贡献。九子台台阵系统的主要台阵试验如表 3 所示。

**Table 2.** Control parameters of TVC

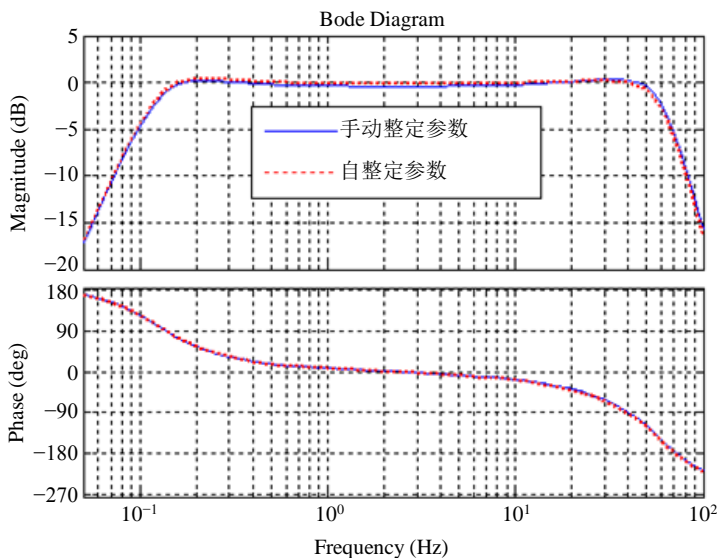
**表 2.** 三参量控制器控制参数值

增益	位移前馈	速度前馈	加速度前馈	位移反馈	速度反馈	加速度反馈
手动	0.131	0.105	0.069	-0.131	0.065	0.01
自动	0.131	0.11	0.072	-0.131	0.06	0.01

**Table 3.** The typical tests of nine sub-array system

**表 3.** 典型九子台台阵试验

结构形式	名称	模型比例	模型	台数
大跨度空间结构	国家体育馆双向张弦梁结构屋盖	1:10	11.4 m × 14.4 m (整体模型)	9
	奥运羽毛球馆新型弦支穹顶	1:10	R = 9.3 m (整体模型)	8
大跨度多跨桥梁	伊通河大桥	1:16	3.2 m + 9.8 m + 3.2 m (跨径组合)	3
	有机玻璃曲线桥	1:40	1.7 m + 3 m + 3 × 1.7 m (跨径组合)	6
	连续钢构桥	1:10	4 × 4 m (跨径组合)	5
输电塔-线体系	输电塔-线体系模型	1:10	2 × 16 m (跨径组合)	3
隧道体系	沉管隧道	1:60	7.3 m × 3.2 m (整体模型)	4



**Figure 5.** The contrast curve of self-tuning and manual setting

**图 5.** 自整定与手动整定结果对比曲线

## 7. 结论与展望

在地震模拟振动台尤其是多振动台台阵系统控制技术的发展现状的基础上，结合北京工业大学地震模拟振动台九子台台阵系统的开发和应用，总结了振动台台阵系统组成、安装调试过程，控制特点和试验应用等内容，得到如下结论：地震模拟振动台台阵系统具有较好的灵活性来完成大型空间结构、细长结构和多跨结构的振动试验，具有广泛的应用前景和发展空间；九子台台阵系统是国内自主研发的大型振动台台阵系统，虽然目前存在一定的尚需改进之处，但其已经在科学研究中发挥了强大的试验平台支撑作用，值得进一步推广和应用。

## 参考文献 (References)

- [1] Tagawa, Y. (2007) Controller Development for the E-Defense Shaking Table. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, **221**, 171-181. <http://dx.doi.org/10.1243/09596518JSC331>
- [2] 纪金豹. 地震模拟振动台台阵控制技术的研究与发展[J]. 结构工程师, 2012, 28(6): 96-101.
- [3] 黄宝锋. 地震模拟振动台阵系统模型试验方法探讨[J]. 土木工程学报, 2008, 41(3): 46-52.
- [4] 房贞政. 基于三台阵振动台的多塔斜拉桥试验研究[J]. 土木工程学报, 2012, 45(s1): 25-29.
- [5] Chen, J. (2010) Seismic Response of Underground Utility Tunnels: Shaking Table Testing and FEM Analysis. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, **9**, 555-567. <http://dx.doi.org/10.1007/s11803-010-0037-x>
- [6] 国巍. 地震模拟振动台台阵性能评估与测试注记[J]. 科技导报, 2013, 31(12): 53-58.
- [7] 黄浩华. 地震模拟振动台的发展情况介绍[M]. 北京: 地震出版社, 1986, 239-240.
- [8] 孙丽娟. 基于专家经验的振动台控制参数自整定方法研究[J]. 震灾防御技术, 9(4): 882-890.
- [9] 纪金豹. 九子台模拟地震振动台台阵系统及应用[J]. 结构工程师, 2011, 27(s1): 31-36.