

吴晨, 吕春帅, 张昊, 等. 模拟地震实验(体验)平台建设研究[J]. 地震工程学报, 2017, 39(增刊): 209-213. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2017.增刊.209

WU Chen, LÜ Chunshuai, ZHANG Hao, Le, et al. Research on the Construction of Earthquake Simulation Experimental and Experiential Platforms [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2017, 39(Supp.): 209-213. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2017.Supp.209

模拟地震实验(体验)平台建设研究^①

吴 晨, 吕春帅, 张 昊, 王纪强, 宋文杰, 田 丹, 杨 乐

(山东省地震局, 山东 济南 250014)

摘要:目前国内用于模拟地震的振动平台按用途划分大体可以分为两种,一种是用于科研(实验),另一种是用于体验(科普)。这两种振动平台由于用途不同,所以技术要求和技术指标以及工艺处理就有很大差别。随着从国家层面到社会大众对防震减灾科普宣传的重视度的提高,防震减灾部门在做好业务工作的同时,也急需加大在科普宣传方面的工作投入,那么能够将试验和体验结合在一起的模拟地震平台在地震行业会有广阔的应用前景。本文结合山东省地震应急救援训练基地对模拟地震实验(体验)平台的建设需求,对该项研究的背景、建设方案和理论技术等进行了介绍,并重点对模拟地震实验(体验)平台的基本原理和关键技术进行了分析研究,并就建设该项目的几个关键问题,如负载、加速度、最大位移、最大速度等进行详细讲解。结合本行业的实际需求和今后业务的发展规划,为同行业建设类似项目提供了可靠的技术参数、可行的技术方案和宝贵的建设经验,在本行业也能起到一定的示范作用。

关键词:加速度; 最大位移; 运动自由度; 频率; 荷载; 静动出力

中图分类号: TU317

文献标志码: B

文章编号: 1000-0844(2017)增刊-0209-05

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2017.Supp.0209

Research on the Construction of Earthquake Simulation Experimental and Experiential Platforms

WU Chen, LÜ Chunshuai, ZHANG Hao, WANG Jiqiang, SONG Wenjie, TIAN Dan, YANG Le

(Earthquake Administration of Shandong Province, Jinan 250014, Shandong, China)

Abstract: Based on the construction of earthquake simulation experimental and experiential platforms in Shandong Province, in this paper, we analyze the basic principles and key technologies of these platforms, compare their similarities and differences, and discuss the feasibility of combining them. We analyze in detail several key problems in project construction, including the load, acceleration, maximum displacement, and maximum speed. The study results show that an earthquake simulation that combines experimental and experiential platforms can not only provide reliable technical parameters and valuable construction experience for similar projects, but also play a demonstration role in earthquake research.

① 收稿日期: 2017-02-10

基金项目: 山东省地震局合同制科研项目(17Y33)

作者简介: 吴 晨(1980—), 男, 工程师, 主要从事工程技术和信息技术在防震减灾领域中的应用工作。

E-mail: Wuchen800911@163.com。

Key words: acceleration; maximum displacement; freedom of movement; frequency; load; static dynamic output

0 引言

为了山东省防震减灾事业能够更好地发展,我局于 2013 年开始了山东省地震应急救援训练基地的建设,模拟地震实验(体验)平台位于训练基地综合训练楼的地下一层,该平台项目的建设目的有二,一是进行对建筑构件和建筑模型的抗震性能进行模拟地震实验,从而得出相应数据进行性能分析^[1]。二是让培训学员(参观者)能够最大程度的感受到真实地震的情况。该平台应能模拟出历史上若干次真实地震,比如唐山大地震,汶川大地震,日本阪神大地震等,再结合模拟场景以起到最好的体验效果,使体验者能够有更深刻和直观的认识。该模拟振动平台的操作系统要求具有开放性,也就是如果录入其他(新发生)地震的波形和地震动参数,该平台也可以模拟出地震效果。本文针对新建模拟振动台的设计背景、需求和采用较为先进的施工方案,以及占据本行业的技术先进性等特点,对模拟地震实验平台进行全面的整体介绍。

1 振动平台关键参数

振动台的主要参数包括:载重、尺寸、频率、位移、自由度和加速度等,其中任何一项参数的变化都会直接影响到整个振动平台的投资成本和相关配套系统的规模,所以我们应当根据实际需求建设适度规模的振动台,当然如有特殊需要,也可以适当扩大振动台系统的建造规模。

1.1 台面大小

如果振动台系统是以土木建筑为试验对象的,其台面越大,试件缩比减小,实验精度就可以提高。同时因为试件和台面总质量增加了,便会使加振器出力以及阀、泵的容量加大,直接后果就是加大了整个系统的造价。所以,应根据振动台的使用对象来确定振动台台面尺寸,如果是大型设备为实验对象,则台面尺寸可选在 $2\text{ m}\times 2\text{ m}$ 到 $3\text{ m}\times 3\text{ m}$;如以土木结构为实验对象,则台面可选 $4\text{ m}\times 4\text{ m}$ 到 $6\text{ m}\times 6\text{ m}$ 。除少数用于高频率的特殊振动台台面有用铝合金制造的,大部分大型的振动台台面采用钢材箱型结构^[2]。钢平台台面的鼓型自振频率一般较低,设计时必须控制在工作频率的 3 倍以上,其质量一般为载重的 $2/3$ 左右。

1.2 台面荷载

台面载重与台面大小一样,直接决定了系统的投入成本。合理选择台面载重很重要,一般用于大型设备的振动台,以 $5\times 10^4\text{ N}$ 到 $10\times 10^4\text{ N}$ 比较经济;用于土木建筑的台面,以 $20\times 10^4\text{ N}$ 到 $50\times 10^4\text{ N}$ 比较合适。

1.3 运动自由度

由于振动台运动自由度的多少,会影响到加振器的数量、供电量、泵源和阀及试件采集通道和控制通道数,所以其是影响造价的重要因素。通常看来,如果是大型设备实验为目的的振动台,选择一个水平向,一个垂直向的二自由度就可以了,只要将试件在台面水平方向上转动 90° ,就可以进行另一水平自由度的试验了;如果是土木建筑为目的的振动台,需要试件能够体现出三维地震分量共同作用的效果,这是单维和双维振动所不能代替的,只有三维运动能够同时再现地震的三维记录。所以,以土木建筑为目的的大型振动台一般都采用三维振动^[2]。由于运动自由度的增加将会很大程度上影响到造价,因此我们要特别注意权衡两者之关系。

1.4 运动加速度、速度和位移

加速度是振动平台相当重要的一个指标,因为加振器的出力值是由加速度的大小直接决定的,加速度还能间接影响到泵、阀和供电的容量。按相关实验规范,如以土木建筑实验为目的的振动台,可按台面大小和载重来确定试件的缩比,然后按相似理论推算出所需的加速度,如果是大型设备实验为目的的振动台,水平激励的加速度要符合 $4.5g < 5.0g$,垂直激励的加速度要符合 $3g < 3.5g$ 的相关要求。通常振动台在空载(或小吨位试件)的情况下,如果是 $4\text{ m}\times 4\text{ m}$ 以上的台面尺寸其主水平加速度可以达到 4.5 g 以上,垂直加速度在 3.0 g 以上,如果振动台在满载时台面的水平加速度能够有 $1.2g$,垂直有 $0.8g$ 以上。

伺服阀、泵源和供电容量的大小很大程度受振动台的速度影响。通常情况下采用楼面谱实验方式且用于大型设备的振动台,台面不需要很大的速度,其最大速度一般是以扫频一拍波实验方式确定的。水平速度如果达到 1.5 m/s ,垂直速度达到 1.0 m/s ,通常能够符合行业实验规范。以土木建筑为实验对象的振动台,它所需要的速度是按试件的缩

比,根据输入地震波的速度值按相似理论算出的。因为该值通常比用于大型设备实验的振动台所需速度小得多,所以阀、泵及供电容量也就小得多,相应造价也减少很多。

虽然位移的大小并不是影响振动台造价的主要因素,但是位移的增大,将会降低振动台的最高使用频率^[2]。所以,对于 4 m×4 m 左右台面的振动台,考虑到扫频一拍波实验,和兼顾土木建筑实验的大多数地震波的输入。通常情况选择主水平位移为±100 mm 或稍大,其他两个自由度为±50 mm。

1.5 频率范围

通常讲对于大型设备考核实验的振动台,振动频率范围应在 0~50 Hz 比较合适,而对于土木建筑用途的振动台,则可以按构筑件的缩放比例和所用地震信号的频率范围,按相似理论算出其频率。在满载情况下,对于 4 m×4 m 的振动台为能满足对大型设备试验的需求,通常上限频率有 50 Hz 就能满足要求。

2 振动平台建设方案

2.1 主要技术规格

根据我们的实际需求和场地现状,我们采用三向六自由度的振动平台,其主体表面积尺寸设计为

2 m×3 m,再在其上面设置一个尺寸为 4 m×5 m 过渡平台,平台主体和延展平台之间用螺栓固定。4 m×5 m 的尺寸基本可以满足我们对实验和体验的需求。

主要技术规格如下:

- (1) 负载:2 000 kg;
- (2) 频率范围:40 Hz;
- (3) 最大加速度:垂向:10 m/s²;水平向:10 m/s²;
- (4) 最大速度:0.8 m/s;
- (5) 最大位移:±150 mm;
- (6) 平台尺寸:3 000 mm×2 000 mm(长×宽)。

2.2 系统组成

模拟地震试验振动台的系统组成与结构示意图及过渡平台与房屋试件安装机构简图如图 1 所示。其主要由以下几部分组成:承载平台,过渡平台,水平 X 向作动器,水平 Y 向作动器,垂直 Z 向作动器,液压源和液压分配器,伺服控制系统,液压源控制系统,连接电缆,液压连接管路。

2.3 系统原理

该振动台由 3 个水平伺服作动器组件、3 个垂向伺服作动器组件等组成,在控制系统和液压源系统的驱动作用下,按照规定的规律进行振动。为了实现加速度控制,提高控制系统的稳定并拓展系统

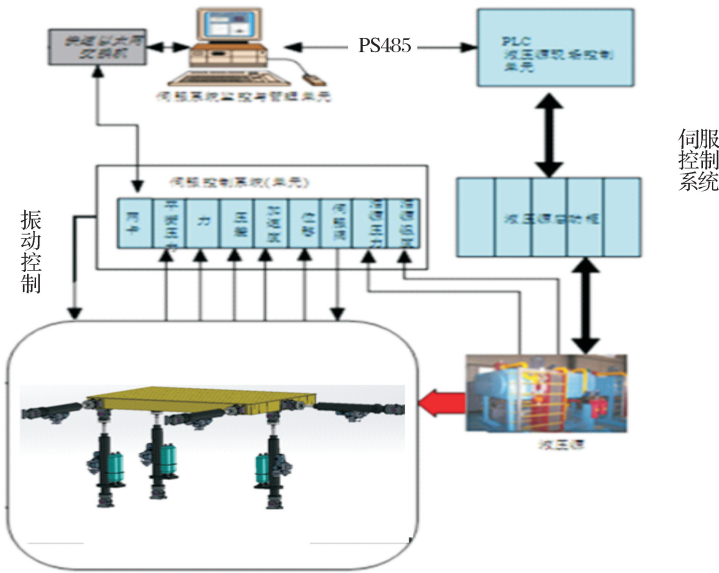


图 1 振动台结构简图

频宽,该系统采用三状态控制和极点配置等技术来进一步提高系统的控制精度。其工作原理如图 2 所示。伺服控制系统的主要作用是将对台面的自由度驱动信号转化为对各单系统(激振器)的驱动信号,通过控制激振器的运动来实现平台的运动^[3]。

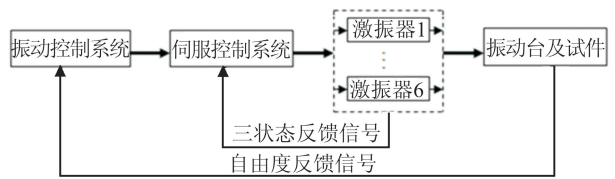


图 2 振动台控制系统结构

通过迭代运算对驱动信号进行修正,进一步减小系统响应信号与期望信号的差别,可以提高控制精度,在伺服控制系统的外环加上振动控制,形成一种真正意义上的振动闭环控制^[5]。令 $H(f)$ 表示伺服系统的频响函数,则振动控制的迭代补偿原理可以表示为图 3 所示。

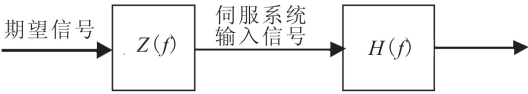


图 3 振动控制迭代补偿原理

图中,将期望信号经系统阻抗 $Z(f)$ 修正后的值作为伺服系统的输入信号, $Z(f)$ 表示系统阻抗,频响函数的逆为系统阻抗,有: $Z(f)=[H(f)]^{-1}$, 则伺服系统的输出即为期望信号^[4]。

3 设计思路和技术途径

3.1 平台设计

由于平台需要带动其上表面所连接的负载,完成各种姿态的运动。所以在设计时主要考虑以下几个问题:

- (1) 平台的第一振型的频率,应至少达到 80 Hz;
- (2) 平台的形位公差,如上表面与垂直向作动器安装面的平行度误差等,作动器安装平面间的平行度和垂直度公差;
- (3) 整个平台的各方向刚度以及平台与液压作动器的连接处的强度;
- (4) 被试件与平台的安装方式。

平台采用单层网格结构,用 Q235 板焊接而成,这样的设计可以准确地将电液伺服系统的力和运动规律传递给负载,平台在保证具有足够大的刚度和较高的固有频率的同时,做到了尽量减轻其重量^[6]。平台上表面为安装负载的基准面,为满足安装试件的需要,基准面为 3 m×2 m 的平面,平台上表面分布有螺纹孔,供负载连接,如图 4 所示。

平台固有频率:一阶:122.8 Hz,二阶:153.9 Hz,三阶:272.7 Hz,图 5 以一阶固有频率为代表。

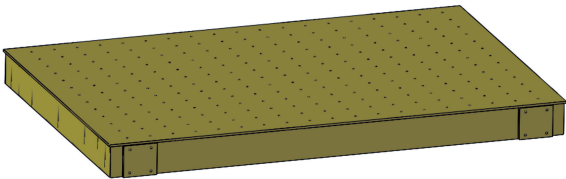


图 4 平台

3.2 过渡平台

过渡平台采用钢板焊接结构,上平面加工螺栓孔用于连接房屋试件,下平面加工安装螺栓的通孔。过渡平台与振动平台的结构示意图如图 6 所示,

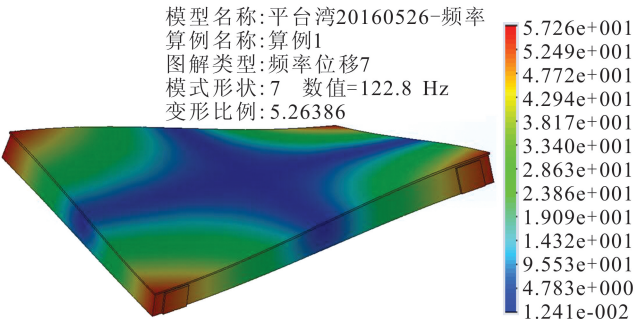


图 5 一阶固有频率分析

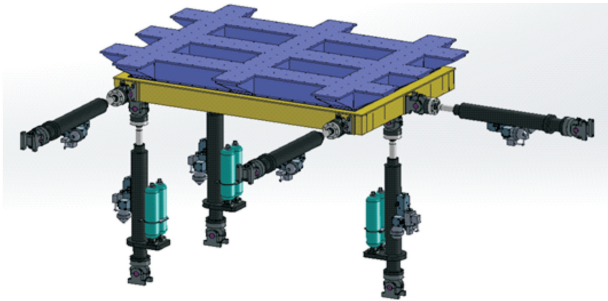


图 6 过渡平台与振动平台的安装示意图

过渡平台的各阶固有频率:一阶:80.87 Hz,二阶:134.02 Hz,三阶:185.37 Hz,图 7 仍以一阶固有频率为代表演示。

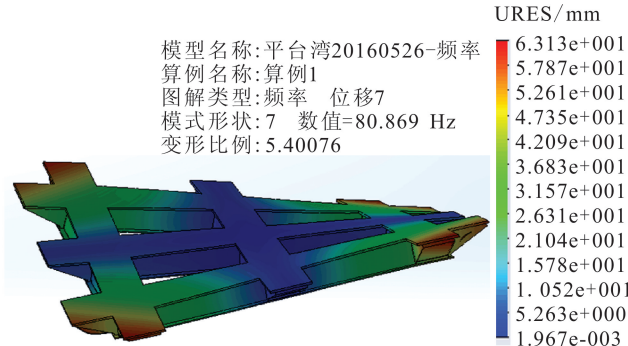


图 7 一阶固有频率分析

3.3 水平 X 向伺服作动器

3.3.1 作动器参数与配置

水平 X 向作动器共有 1 个,作动器静出力 53.6 kN,动出力 44 kN,可实现平台及负载 X 方向加速度 1 g 的振动。水平 X 向作动器见图 8。每个水平向作动器包括:液压缸、两级电液伺服阀、位移传感

器、加速度传感器。



图 8 水平 X 向作动器结构示意图

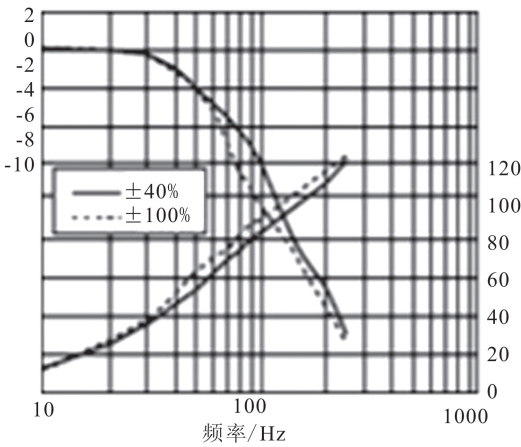


图 9 伺服阀频率响应

水平 X 向作动器实现的最大功能曲线如图 10 所示,满载负载质量 2 000 kg,在低频段(0.1~0.85 Hz)实现以最大振幅 $\pm 150\text{ mm}$ 振动,在中频段(0.85~2 Hz)实现以最大速度 0.8 m/s 振动,在高频段(2~40 Hz)实现以最大加速度 10 m/s^2 振动。

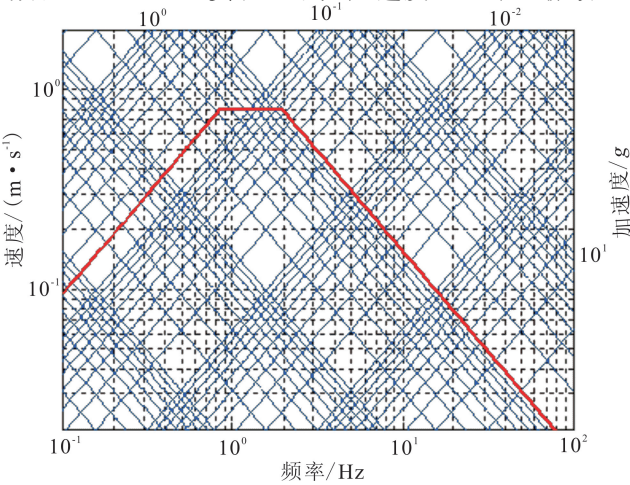


图 10 水平 X 向作动器最大功能曲线

根据上面 X 向负载参数和作动器参数,绘出 X 向的负载匹配曲线,如图 11 所示。显然,作动器设计完全满足负载振动的力和速度要求。

水平 Y 向作动器和垂直 Z 向做动器的构成以及工作原理与水平 X 向做动器完全相同,只是技术指标和输出参数不同。如:水平 Y 向作动器的作动器静出力 29.5 kN,动出力 23.5 kN,可实现平台及

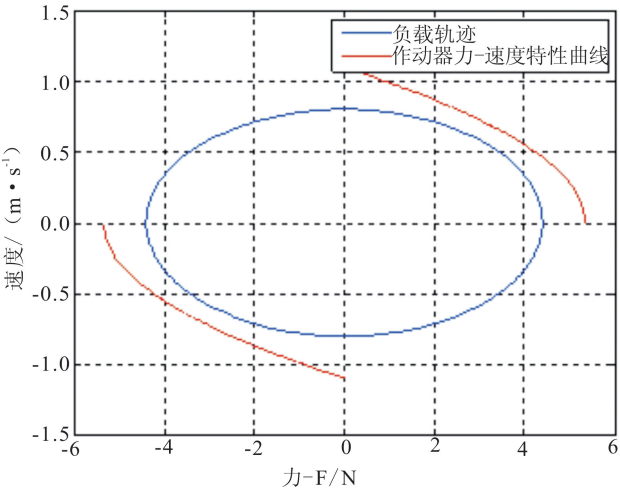


图 11 X 向负载匹配曲线

负载 Y 方向加速度 1g 的振动;Z 向作动器的静出力 53.6 kN,动出力 42.0 kN,可实现平台及负载 Z 方向加速度为 2g 的振动,同时平衡由于水平振动引起的倾覆力矩。

4 结语

在本系统省局级单位进行模拟地震实验平台建设的,屈指可数,我们开始对此方面的研究和了解也很少,所以在项目建设初期进行了大量的调查和研究工作以为后续工作打下基础,在此基础上提出了对关键参数的实现手段和初步的建设方案。在项目建设中我们还对建设方案进行完善以实现最终的设计目的,同时也希望我们的研究成果和经验更好地服务于我们的防震减灾事业,能够对兄弟省局进行此类研究和建设起到借鉴作用。

参考文献

[1] 王兰民,刘琨,孙军杰,等.饱和原状黄土液化基本特征的振动台试验研究[J].地震工程学报,2015,37(4):1023-1028.

[2] 吴晨,王鹏,房晓亮,等.山东地震数据中心高可用性研究[J].计算机应用研究,2015,32(增刊):19-21.

[3] 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,2011,17(4):135-138.

[4] 田力军.汽车多轴振动台试验台系统集成设计[J].机械制造与自动化,2012,41(1):19-22.

[5] 关广丰,丛大成.随机振动功率谱复现迭代算法的研究[J].地震工程与工程振动,2006,26(6):71-76.

[6] 关广丰,丛大成.自由度随机振动控制算法[J].机械工程学报,2008,44(9):215-219.

[7] 韩俊伟,张连鹏.多自由度振动台的发展与控制技术[J].液压与气动,2014,10(1):1-6.

[8] 付晓,杨长卫,韩宜康.岩质高陡边坡地震动响应规律的振动台试验研究[J].地震工程学报,2016,38(5):775-782.