



地震模拟振动台 试验及案例

王燕华 · 编著



东南大学出版社
SOUTHEAST UNIVERSITY PRESS

地震模拟振动台试验及案例

王燕华 编著



 东南大学出版社
SOUTHEAST UNIVERSITY PRESS

· 南京 ·

内 容 提 要

本书就地震模拟振动台系统做了较为详细的阐述,同时对近些年基于振动台的部分试验案例做了汇总。内容包括振动台系统在国内的建设与发展,振动台的组成与工作原理,振动台的设计与分析,建筑结构模型设计与测量仪器选择,及基于地震模拟振动台一些典型实验教学案例汇总等。

本书可供从事地震模拟试验的研究人员和相关专业研究生参考。

图书在版编目(CIP)数据

地震模拟振动台试验及案例/王燕华编著. —南京:
东南大学出版社, 2018. 9
ISBN 978-7-5641-7543-6

I. ①地… II. ①王… III. ①地震模拟试
验—振动台试验—案例 IV. ①P315.8

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第315287号

地震模拟振动台试验及案例

编 著 王燕华

出版发行 东南大学出版社
社 址 南京市四牌楼2号 邮编:210096
出 版 人 江建中
责任编辑 丁 丁
编辑邮箱 d.d.00@163.com
网 址 <http://www.seupress.com>
电子邮箱 press@seupress.com
经 销 全国各地新华书店
印 刷 江苏凤凰数码印务有限公司
版 次 2018年9月第1版
印 次 2018年9月第1次印刷
开 本 787mm×1092mm 1/16
印 张 13
字 数 308千
书 号 ISBN 978-7-5641-7543-6
定 价 52.00元

本社图书若有印装质量问题,请直接与营销部联系。电话(传真):025-83791830

前 言

地震模拟振动台台面上可以真实地再现各种形式的地震波,是目前研究结构抗震性能最直接也是比较准确的试验方法。试验目的主要是了解工程结构物抗震的宏观性能,了解地震作用下工程结构物的破坏机理和地震作用下结构物的薄弱部位。

笔者留实验室工作近二十年,期间参与东南大学 $4.0\text{ m}\times 6.0\text{ m}$ 单向地震模拟振动台和 $6.0\text{ m}\times 9.0\text{ m}$ 三向六自由度地震模拟振动台的建设。据笔者实验室一线工作经验,收集部分试验案例整理于本书中。

本书主要包括七个章节,系统介绍了地震模拟振动台的设计原理、试验方法及试验案例等。

第2章介绍了地震模拟振动台近年来在国内建设和发展情况。

第3章介绍单向地震模拟振动台的基本构成、工作原理和系统控制。

第4章叙述了地震模拟振动台模型试验加载设计。

第5章汇总了基于东南大学 $4.0\text{ m}\times 6.0\text{ m}$ 地震模拟振动台的试验案例。

第6章叙述东南大学 $6.0\text{ m}\times 9.0\text{ m}$ 地震模拟振动台的建设。

第7章叙述了部分兄弟院校地震模拟振动台典型的试验案例。

本书得到(省优势)土木工程(05007002)学科建设经费、国家自然科学基金(6505000184)的资金支持。

本书的成果是在东南大学土木工程实验中心完成的,书中的试验案例来源于东南大学 $4.0\text{ m}\times 6.0\text{ m}$ 地震模拟振动台,在此对试验案例中的作者及作者导师表示感谢,也感谢东南大学振动台建设团队。最后感谢兄弟院校河海大学牛志伟老师、福州大学黄福云老师、西南交通大学赵灿辉老师和邵长江老师、广州大学陈建秋老师,中南大学国巍老师在试验案例和模型加载撰写上提供的帮助和支持。

由于笔者时间仓促,难免存在不少缺点和错误,诚望读者不吝赐教。

王燕华

2017年11月

目 录

第1章 引 言	1
第2章 国内振动台系统的建设与发展	2
2.1 国内振动台建设	2
2.2 振动台具体建设	5
第3章 4.0 m×6.0 m 单向地震模拟振动台	19
3.1 振动台组成	19
3.2 振动台部件选用	20
3.2.1 基础	20
3.2.2 台面	20
3.2.3 导轨	21
3.2.4 激振器	21
3.2.5 伺服阀与控制器	22
3.2.6 油源系统	22
3.2.7 数据采集及分析系统	23
3.3 系统性能参数	24
3.3.1 台面	25
3.3.2 作动器	27
3.3.3 油源系统	27
3.3.4 伺服阀	28
3.3.5 系统设计最大功能曲线	28
3.4 控制系统的组成及数学模型	28
3.4.1 控制系统组成	28
3.4.2 系统控制的数学模型	29
3.4.3 系统的参数	29
3.4.4 油柱共振频率理论计算	30
3.4.5 系统的仿真	30

第4章 模型试验加载	33
4.1 模型动力相似比设计	33
4.2 模型的相似要求	33
4.2.1 几何相似	33
4.2.2 质量相似	34
4.2.3 荷载相似	34
4.2.4 物理相似	35
4.2.5 时间相似	36
4.2.6 边界条件以及初始条件相似	36
4.3 模型的相似常数	36
4.3.1 基本物理量的选择	36
4.3.2 地震波的选择	36
4.3.3 地震动的幅值	37
4.3.4 地震动频谱	37
4.3.5 地震动持续时间	37
4.4 模型试验与加载	38
4.4.1 模型制作	38
4.4.2 模型安装	38
4.4.3 测量仪器选择	38
4.4.4 测点布置及仪器调试	39
4.4.5 动力特性试验	39
4.4.6 地震波试验	39
第5章 试验案例	41
5.1 预应力混凝土框架结构振动台试验研究	41
5.1.1 试验目的	41
5.1.2 试验原型	41
5.1.3 模型相似比设计	42
5.1.4 试验工况	43
5.1.5 测点布置与测量设备	45
5.2 错层板柱结构体系的抗震性能试验研究	45
5.2.1 试验目的	45
5.2.2 结构原型	46
5.2.3 模型相似系数	46
5.2.4 试验工况	47
5.2.5 试验设备与测点布置	49
5.3 空斗墙振动台试验研究	50
5.3.1 试验目的	50

5.3.2	试验模型	50
5.3.3	模型相似比设计	51
5.3.4	试验加载工况	51
5.4	粗料石砌体房屋振动台试验研究	52
5.4.1	试验目的	52
5.4.2	试验模型	52
5.4.3	模型相似比设计	54
5.4.4	试验加载工况	55
5.4.5	试验设备与测点布置	56
5.5	腹板摩擦式自定心混凝土框架振动台试验	57
5.5.1	试验模型	57
5.5.2	模型相似比确定	59
5.5.3	附加质量设计	59
5.5.4	试验加载方案	60
5.5.5	测试系统	63
5.6	混凝土减隔震梁桥地震响应振动台试验研究	64
5.6.1	工程背景	64
5.6.2	模型相似比设计	65
5.6.3	模型设计	66
5.6.4	振动台测试系统	67
5.6.5	振动台试验方案	69
5.7	半柔性悬挂减振结构振动台试验研究	71
5.7.1	试验目的	71
5.7.2	模型设计	71
5.7.3	模型相似比设计	73
5.7.4	模型测点布置	73
5.7.5	试验加载工况	73
5.8	混凝土柱振动台试验研究	74
5.8.1	试验目的	74
5.8.2	模型设计	74
5.8.3	构件浇筑	76
5.8.4	模型测点布置	79
5.8.5	地震波加载方案	81
5.9	多维粘弹性隔减震装置振动台试验	82
5.9.1	试验目的	82
5.9.2	多维粘弹性隔减震装置	82
5.9.3	模型相似比设计	83
5.9.4	结构模型及测点布置	84

5.9.5	试验工况及结果	85
5.10	多层冷成型钢房屋振动台试验研究	86
5.10.1	试验目的	86
5.10.2	试验模型设计	87
5.10.3	模型相似比设计	88
5.10.4	试验加载工况	89
5.10.5	试验设备与测点布置	90
5.11	强震作用下多塔斜拉桥的倒塌破坏研究	91
5.11.1	试验目的	91
5.11.2	模型相似系数	91
5.11.3	模型制作与安装	92
5.11.4	试验加载工况	93
5.11.5	模型测点布置	95
5.12	强震作用下高墩大跨连续刚构桥的倒塌破坏研究	96
5.12.1	试验目的	96
5.12.2	模型设计	96
5.12.3	模型相似比设计	98
5.12.4	试验加载工况	99
5.12.5	模型测点布置	100
5.13	强震下混凝土连续梁桥的倒塌破坏与控制研究	103
5.13.1	工程背景	103
5.13.2	模型相似比设计	104
5.13.3	模型设计	105
5.13.4	试验工况	106
5.13.5	模型测点布置	109
第6章	东南大学大型地震模拟振动台	111
6.1	建设目标	111
6.1.1	台面承载力与台面尺寸	111
6.1.2	性能指标	112
6.1.3	主要技术参数	119
6.2	配套建设项目	120
第7章	振动台试验案例	122
7.1	河海大学振动台试验案例	122
7.1.1	电气机柜抗震检测试验方案	122
7.1.2	岩质边坡模型抗震试验方案	131
7.2	福州大学振动台试验案例	140

7.2.1 典型试验示例	140
7.2.2 典型试验简介	152
7.3 西南交通大学振动台试验案例	167
7.3.1 惯性负载试验	167
7.3.2 弹性模型试验	167
7.3.3 混凝土简支梁桥试验	168
7.3.4 高压开关柜通电状态下的抗震性能试验	169
7.3.5 大型振动台隧道抗减震技术模型试验	170
7.4 广州大学振动台试验案例	171
陶粒混凝土内墙板抗震试验抗震性能研究	171
7.5 中南大学振动台试验案例	184
跨断裂带路基边坡模型抗震试验方案	184
参考文献	193

第1章 引言

众所周知,地震对人类的威胁是最严重的自然灾害之一,中国又是世界上地震灾害严重的国家之一,如何增强工程结构物的抗震能力显得更加重要。结构物抗震性能试验是结构工程抗震研究的重要组成部分,目前实验室内常用的试验方法有拟静力试验、拟动力试验和地震模拟振动台试验三种。拟静力试验主要目的是获得构件的刚度、承载力、变形和耗能等信息。拟动力试验主要的特点是将结构的恢复力特性直接从被测结构上实时取得而不是来自数学模型,但是试验的加载过程还是拟静力的。地震模拟振动台试验是真正意义上的地震模拟试验,台面上可以真实地再现各种形式的地震波,是目前研究结构抗震性能最直接也是比较准确的试验方法。

地震模拟振动台试验的目的和意义是:

- (1) 了解工程结构物抗震的宏观性能;
- (2) 了解地震作用下工程结构物的破坏机理;
- (3) 了解地震作用下结构物的薄弱部位。

可见,振动台试验主要是定性地给出结构物的抗震性能,振动台试验应用很广泛,例如结构物的动力特性、设备抗震性能、结构抗震措施的检验,同时也被应用于地震工程力学的基础研究、桥梁结构研究、地铁、隧道结构抗震试验研究等方面。

本书主要内容包括近年来地震模拟振动台在国内的建设情况,东南大学 4.0 m × 6.0 m 单向地震模拟振动台系统的组成、地震模拟振动台系统的性能分析,建筑结构模型设计,测量仪器选择及基于地震模拟振动台的一些典型试验案例汇总等。

第2章

国内振动台系统的建设与发展

第 1 章
言 语

20 世纪 40 年代首次在土木工程结构上利用地震模拟振动台来模拟地震作用,60 年代以后地震模拟振动台开始被广泛建设。目前世界上已经建立了几百座地震模拟振动台,主要分布在日本、中国和美国。

2.1 国内振动台建设

我国的振动台是从 20 世纪 60 年代开始建设的,虽然振动台的发展相对较晚,但是发展迅猛,这几年正在建设的单位有同济大学、福州大学、中国核动力设计研究院、西安建筑科技大学、昆明理工大学、兰州理工大学、华南理工大学、河海大学、苏州科技大学、西南交通大学、天津大学、华侨大学、北京建筑大学、东南大学等。我国振动台的建设情况大致统计如表 2.1、表 2.2 所示:

表 2.1 国内振动台单台建设

建设单位	振动形式	台面尺寸 (m×m)	模型重 (t)	最大加 速度(g)	最大速度 (mm/s)	最大位移 (mm)	工作频率 范围(Hz)
中国建筑科 学研究院	三向六自 由度	6.1×6.1	60	X: ±1.5 Y: ±1.0 Z: ±0.8	X: ±1 000 Y: ±1 200 Z: ±800	X: ±150 Y: ±250 Z: ±100	0.1~50
中国地震局 工程力学研 究所(哈尔滨)	三向六自 由度	5.0×5.0	30	X: ±1.0 Y: ±1.0 Z: ±0.7	X: ±600 Y: ±600 Z: ±300	X: ±80 Y: ±50 Z: ±50	0.5~40
北京工业 大学	双水平向	3.0×3.0	10	X: ±1.0 Y: ±1.0	X: ±600 Y: ±600	X: ±120 Y: ±100	0.4~50
哈尔滨工业 大学	水平单自 由度	3.0×4.0	12	X: ±1.5	X: ±760	X: ±125	0.4~40
同济大学	三向六自 由度	4.0×4.0	25	X: ±1.2 Y: ±0.8 Z: ±0.7	X: ±1 000 Y: ±600 Z: ±600	X: ±100 Y: ±50 Z: ±50	0.1~50
天津大学	三向六自 由度	φ3.6	20	X: ±1.50 Y: ±1.50 Z: ±1.20	X: ±1 000 Y: ±1 000 Z: ±800	X: ±300 Y: ±300 Z: ±200	0.1~100

续表 2.1

建设单位	振动形式	台面尺寸 (m×m)	模型重 (t)	最大加 速度(g)	最大速度 (mm/s)	最大位移 (mm)	工作频率 范围(Hz)
广州大学	三向六自 由度	3.0×3.0	10	X: ±1.0 Y: ±1.0 Z: ±2.0	X: ±100 Y: ±100 Z: ±100	X: ±100 Y: ±100 Z: ±50	0.1~50
大连理工 大学	水平+竖 向+摇摆	3.0×3.0	10	X: ±1.0 Z: ±0.7	X: ±500 Z: ±350	X: ±75 Z: ±50	0.1~50
武汉理工 大学	水平单自 由度	3.0×3.0	6	X: ±1.3	X: ±500	X: ±100	0.4~40
东南大学	水平单自 由度	4.0×6.0	30	X: ±1.5	±600	±250	0.1~50
西安建筑科 技大学	三向六自 由度	4.1×4.1	18	X: ±1.5 Y: ±1.0 Z: ±0.8	X: ±1 000 Y: ±1 250 Z: ±800	X: ±150 Y: ±250 Z: ±100	0.1~100
重庆大学	三向六自 由度	6.1×6.1	60	X: ±1.5 Y: ±1.5 Z: ±1.0	X: ±1 200 Y: ±1 200 Z: ±1 000	X: ±250 Y: ±250 Z: ±200	0.1~50
南京工业 大学	水平单自 由度	3.0×5.0	15	X: ±1.0	X: ±500	X: ±120	0.1~50
中国水利 水电科学 研究院	三向六自 由度	5.0×5.0	20	X: ±1.0 Y: ±1.0 Z: ±0.7	X: ±400 Y: ±400 Z: ±300	X: ±40 Y: ±40 Z: ±30	0.1~120
北京建筑 大学	三向六自 由度	5.0×5.0	60	X: ±1.5 Y: ±1.5 Z: ±1.2	X: ±1 000 Y: ±1 000 Z: ±1 000	X: ±400 Y: ±400 Z: ±200	0.1~100
东南大学	三向六自 由度	6.0×9.0	120	X: ±1.5 Y: ±1.5 Z: ±1.0	X: ±1 500 Y: ±1 500 Z: ±1 200	X: ±500 Y: ±500 Z: ±300	0.1~50
苏州科技 大学	三向六自 由度	6.0×8.0	120	X: ±1.2 Y: ±1.2 Z: ±1.0	X: ±1 500 Y: ±1 500 Z: ±1 200	X: ±500 Y: ±500 Z: ±300	0.1~50
河海大学	三向六自 由度	φ5.6	30	X: ±1.55 Y: ±1.55 Z: ±1.40	X: ±940 Y: ±940 Z: ±940	X: ±150 Y: ±150 Z: ±100	0.1~150

注:天津大学、河海大学为圆形台子,直径分别为3.6 m、5.6 m。

表 2.2 国内振动台台阵建设

建设单位	工作方式	台面尺寸 (m×m)	数量 (台)	载重 (t)	最大位移 (mm)	最大速度 (mm/s)	最大加速度 (g)	工作频率 范围(Hz)
重庆交 科院	三向六 自由度	3.0×6.0	2	2×35	X: ±150 Y: ±150 Z: ±100	X: ±800 Y: ±800 Z: ±600	X: ±1.0 Y: ±1.0 Z: ±1.0	0.1~100
北京工业 大学	9台阵单水 平向	1.0×1.0	9	9×10	X: ±75	X: ±600	X: ±1.0	0.4~50
	三向六 自由度	2.5×2.5	2	2×10	X: ±125 Y: ±125 Z: ±100	X: ±600 Y: ±600 Z: ±500	X: ±2.0 Y: ±2.0 Z: ±2.0	0.1~50
同济大学	三自由度	4.0×6.0	4	2×30+ 2×70	X: ±500 Y: ±500	X: ±1 000 Y: ±1 000	X: ±1.5 Y: ±1.5	0.1~50
中南大学	三向六 自由度	4.0×4.0	4	4×30	X: ±250 Y: ±250 Z: ±160	X: ±1 000 Y: ±1 000 Z: ±1 000	X: ±1.0 Y: ±1.0 Z: ±1.0	0.1~50
福州大学	水平三向 (X、Y向和 水平转角)	4.0×4.0+ 2×2.5× 2.5	3	22+ 2×10	X: ±250 Y: ±250	X: ±1 500 Y: ±1 000	X: ±1.5 Y: ±1.2	0.1~50
中国地震 局工程力 学研究所	三向六 自由度	5.0×5.0	1	30	X: ±500 Y: ±500 Z: ±200	X: ±1 500 Y: ±1 500 Z: ±1 200	X: ±2.0 Y: ±2.0 Z: ±1.5	0.1~100
	三向六 自由度	3.5×3.5	1	6	X: ±250 Y: ±250 Z: ±200	X: ±2 000 Y: ±2 000 Z: ±1 800	X: ±4.0 Y: ±4.0 Z: ±3.0	0.1~100
中国核动 力设计研 究院	三向六 自由度	6.0×6.0	1	50	X: ±300 Y: ±300 Z: ±200	X: ±1 500 Y: ±1 500 Z: ±1 200	X: ±2.0 Y: ±2.0 Z: ±1.5	0.1~100
	三向六 自由度	3.0×3.0	1	12	X: ±250 Y: ±250 Z: ±200	X: ±2 500 Y: ±2 500 Z: ±1 800	X: ±6.0 Y: ±6.0 Z: ±4.0	0.1~100
西南交通 大学	三向六 自由度	10.0×8.0	1	160	X: ±800 Y: ±800 Z: ±400	X: ±1 200 Y: ±1 200 Z: ±830	X: ±1.2 Y: ±1.2 Z: ±1.0	0.1~50
	三向六 自由度	3.0×5.0 3.0×6.0	2	2×30	X: ±400 Y: ±400 Z: ±400	X: ±1 800 Y: ±1 800 Z: ±1 500	X: ±2.0 Y: ±2.0 Z: ±1.5	0.1~50

2.2 振动台具体建设

中国建筑科学研究院

中国建筑科学研究院振动台实验室坐落于北京市通州区温榆河畔,该实验室于2000年初筹建,2004年9月通过验收并投入使用。该振动台由美国MTS公司总承包建设,台面由MTS设计后委托首都钢铁公司制造,采用4台油源并列供油,流量2 000 L/min,设置蓄能器阵,竖向采用4台MTS作动器,两个水平向分别采用4台作动器,共12台作动器(图2.1)。该振动台的主要技术参数如下(表2.3):

表 2.3 中国建筑科学研究院地震模拟试验台阵系统主要技术参数

技术参数	A台
台面尺寸(m×m)	6.1×6.1
最大试件质量(t)	60
台面自重(t)	37
最大抗倾覆力矩(kN·m)	1 800
工作频率范围(Hz)	0.1~50
最大位移(mm)	X: ±150; Y: ±250; Z: ±100
最大速度(mm/s)	X: ±1 000; Y: ±1 200; Z: ±800
最大加速度(g)	X: ±1.5; Y: ±1.0; Z: ±0.8

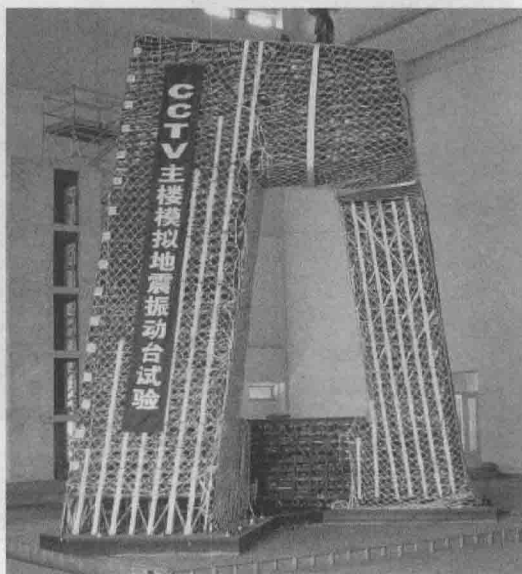


图 2.1 中国建筑科学研究院 6.1 m×6.1 m 六自由度振动台

同济大学

同济大学地震模拟振动台在 1983 年 7 月建成, 原为 X、Y 两向振动台, 90 年代进行了多次改造, 模型质量由 15 t 升级至 25 t, 控制系统和数据采集系统也进行了同步升级, 双向四自由度升级至三向六自由度, 控制部分和数据采集部分由 MTS 公司生产, 钢结构台面由 MTS 公司设计, 红山材料试验机厂通过兰州化工总厂生产, 油源部分的核心部件由 MTS 公司提供, 其他油箱、硬管道等部分由红山材料试验机厂生产, 作动器均采用 MTS 公司产品, 整个系统由 MTS 公司总承包(图 2.2)。该振动台的主要技术参数如下(表 2.4):

表 2.4 同济大学地震模拟试验台阵系统主要技术参数

技术参数	A 台
台面尺寸(m×m)	4.0×4.0
最大试件质量(t)	25
台面自重(t)	10
最大抗倾覆力矩(kN·m)	1 800
工作频率范围(Hz)	0.1~50
最大位移(mm)	X: ±100; Y: ±50; Z: ±50
最大速度(mm/s)	X: ±1 000; Y: ±600; Z: ±600
最大加速度(g)	空载: X: ±4.0; Y: ±2.0; Z: ±4.0 负载(15 t): X: ±1.2; Y: ±0.8; Z: ±0.7
最大重心高度(mm)	台面以上 3 000
最大偏心(mm)	距台面中心 600



图 2.2 同济大学 4.0 m×4.0 m 振动台

重庆大学

重庆大学自2010年开始立项建设单台振动台,2015年完成技术验收。台面尺寸 $6.1\text{ m}\times 6.1\text{ m}$,设备提供厂家为美国MTS公司,台面由湖州镭宝公司制造(图2.3)。该振动台的主要技术参数如下(表2.5):

表 2.5 重庆大学地震模拟试验台阵系统主要技术参数

技术参数	A台
台面尺寸(m×m)	6.1×6.1
最大试件质量(t)	60
台面自重(t)	41
最大抗倾覆力矩(kN·m)	1 800
工作频率范围(Hz)	0.1~50
最大位移(mm)	X: ±250; Y: ±250; Z: ±200
最大速度(mm/s)	X: ±1 200; Y: ±1 200; Z: ±1 000
最大加速度(g)	X: ±1.5; Y: ±1.5; Z: ±1.0



图 2.3 重庆大学 $6.1\text{ m}\times 6.1\text{ m}$ 振动台

西安建筑科技大学

西安建筑科技大学振动台位于西安建筑科技大学草堂校区,2009年筹建,2012年完成验收并投入使用,台面尺寸 $4.1\text{ m}\times 4.1\text{ m}$,流量 $1\,800\text{ L/min}$ 。设备提供厂家为美国MTS

公司,台面由 MTS 公司设计后委托首都钢铁公司制造,竖向 4 台作动器,水平 4 台作动器(图 2.4)。该振动台的主要技术参数如下(表 2.6):

表 2.6 西安建筑科技大学地震模拟振动台系统主要技术参数

技术参数	A 台
台面尺寸(m×m)	4.1×4.1
最大试件质量(t)	满负荷:20;减负荷:30
台面自重(t)	18
最大抗倾覆力矩(kN·m)	800
工作频率范围(Hz)	0.1~100
最大位移(mm)	X: ±150; Y: ±250; Z: ±100
最大速度(mm/s)	X: ±1 000; Y: ±1 250; Z: ±800
最大加速度(g)	载荷 20 t; X: ±1.5; Y: ±1.0; Z: ±1.0 载荷 30 t; X: ±1.0; Y: ±1.0; Z: ±0.9
试件最大偏心距(mm)	≥600
最大偏心弯矩(kN·m)	300



图 2.4 西安建筑科技大学 4.1 m×4.1 m 振动台

中国水利水电科学研究院

中国水利水电科学研究院 1987 年从德国 Schenck 公司引进了全套振动台,考虑水工结构模型的大缩比,该振动台的工作频率上限达到了 120 Hz。振动台由德国 Schenck 公司总