

并联冗余驱动电液 振动台控制系统

沈 刚 主编
汤 裕 李 翔 副主编



科学出版社

并联冗余驱动电液振动台控制系统

沈 刚 主编

汤 裕 李 翔 副主编

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书提供了并联冗余驱动电液振动台的伺服控制系统、系统辨识及其前馈补偿控制、在线自适应控制方法以及离线补偿与在线自适应控制结合的复合控制方法,并结合六自由度八执行器冗余驱动的电液振动台进行了试验验证。

本书可供从事电液伺服控制系统研究的科研人员作为参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

并联冗余驱动电液振动台控制系统/沈刚主编. —北京:科学出版社, 2016.6

ISBN 978-7-03-049333-0

I. ①并… II. ①沈… III. ①电液伺服系统—振动台—控制系统
IV. ①TH137.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 151016 号

责任编辑:胡 凯 周 丹/责任校对:贾伟娟

责任印制:张 伟/封面设计:许 瑞

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京中石油彩色印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 6 月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2016 年 6 月第一次印刷 印张: 10

字数: 200 000

定价: 59.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

冗余驱动指所使用的激振器数量多于控制自由度数量，冗余驱动电液系统隶属并联机器人领域，其典型装置为六自由度电液振动台，具有刚度大、承载能力强、结构比较简单、精度高、没有误差累积、易于控制等优点，主要用于模拟被试件所承受的振动或加载环境，考核被试件在振动或加载激励下保持原有性能的能力，被广泛应用于航空、航天、兵器、船舶及核工业等国防工业领域和汽车、建筑等民用工业部门。作者自攻读博士到从事科研教学工作，一直从事电液伺服控制系统方面的研究工作。

本书依托作者所攻读博士单位哈尔滨工业大学电液伺服仿真及试验系统研究所及作者工作单位多年来在电液伺服控制系统领域的研究背景和应用成果，并根据作者多年来从事并联冗余驱动电液振动台控制系统工作和研发经历，对电液伺服系统建模与仿真、离线补偿控制和在线自适应控制的研究成果进行了总结。基于本书作者多年来主持的多项课题研究、发表的论文和申请的专利，本书融合了电液伺服控制系统的最新成果，将系统辨识、逆模型设计、前馈补偿、自适应控制相结合，用于电液振动台的控制系统设计。

本书共有 8 章，主要分为四部分。第一部分为第 1 章绪论，对本书内容相关的电液振动台研制、关键技术和存在的科学问题进行综述，对本书组织结构进行介绍。第二部分为电液振动台的伺服控制系统，包括第 2 章并联冗余驱动电液振动台试验系统、第 3 章电液振动台系统模型、第 4 章并联冗余驱动电液振动台协调控制和第 5 章电液振动台伺服控制系统。第三部分为电液振动台的离线补偿控制研究，包括第 6 章电液振动台闭环传递函数辨识及逆模型设计和第 7 章电液振动台离线补偿控制。第四部分为第 8 章电液振动台在线自适应控制，包括电液振动台的在线自适应控制与基于离线补偿和在线自适应调节的复合控制。

本书的编写基于哈尔滨工业大学电液伺服仿真及试验系统研究所和机械工程江苏省优势学科建设平台多年来的研究成果的积累，得到作者所在研究团队的大力支持。本书的研究工作得到了作者主持的国家自然科学基金（项目批准号 51575511 和 51205392）和江苏高校优势学科建设工程资助。感谢作者博士生导师哈尔滨工业大学韩俊伟教授和丛大成教授多年来的指导和帮助，感谢作者工作单位中国矿业大学朱真才教授对作者学术研究方向上的导引和帮助。在此对作者指导的博士生李戈和臧万顺，硕士生侯冬冬、张丁龙、安昭辉、乔杰、张明飞、李丹

丹、王雷、蔡强和朱鹏表示感谢，他们做了大量的编辑工作和试验验证，感谢他们对本书所做的贡献！

限于作者水平，书中不足之处在所难免，敬请各位专家和同行批评指正！

沈 刚

2016 年 4 月于徐州

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 课题来源及研究的目的和意义	1
1.2 国内外多轴振动台发展现状及分析	1
1.2.1 多轴振动台的分类	1
1.2.2 国外多轴振动台的发展现状及分析	3
1.2.3 国内多轴振动台的发展现状及分析	9
1.3 电液振动台关键技术研究现状及分析	10
1.4 并联驱动电液振动台系统国内外研究现状	11
1.4.1 并联驱动电液振动台数学模型研究现状	11
1.4.2 并联冗余驱动电液振动台系统协调控制研究现状	12
1.4.3 电液振动台三状态控制研究现状及分析	12
1.4.4 并联驱动电液振动台电液系统辨识及前馈补偿研究现状	13
1.4.5 离线迭代控制技术的研究现状及分析	15
1.4.6 自适应控制在电液振动台领域中的研究现状及分析	16
1.4.7 复合控制策略的研究现状及分析	18
1.5 本书主要研究内容	21
第 2 章 并联冗余驱动电液振动台试验系统	22
2.1 电液振动台伺服控制系统组成	22
2.2 振动加载并联驱动电液试验台	23
2.2.1 系统描述	23
2.2.2 硬件平台	24
2.2.3 软件系统	26
2.3 本章小结	27
第 3 章 电液振动台系统模型	28
3.1 电液系统开环模型	28
3.2 本章小结	33
第 4 章 并联冗余驱动电液振动台协调控制	34
4.1 六自由度振动模拟协调控制	34

4.2 内力解耦控制	38
4.2.1 内力解耦控制的基本原理	38
4.2.2 冗余驱动振动台的内力解耦控制	39
4.3 试验验证	41
4.4 本章小结	43
第5章 电液振动台伺服控制系统	44
5.1 三状态控制器	44
5.1.1 参考信号发生器	44
5.1.2 三状态控制器	45
5.2 陷波器设计	47
5.3 三状态控制器试验验证	48
5.4 本章小结	54
第6章 电液振动台闭环传递函数辨识及逆模型设计	55
6.1 基于加速度闭环系统的非参数频响函数估计	55
6.1.1 基于 H1 的非参数频响函数估计	55
6.1.2 基于 RLS 的非参数频响函数估计	56
6.2 基于加速度闭环系统的参数传递函数辨识	57
6.2.1 递推增广最小二乘辨识算法	58
6.2.2 基于参数模型的加速度逆传递函数设计	59
6.3 基于加速度闭环系统的自适应逆建模辨识	61
6.3.1 自适应辨识模型	61
6.3.2 LMS 自适应辨识算法	62
6.4 传递函数辨识试验结果	64
6.4.1 基于非参数频响函数辨识试验结果	64
6.4.2 基于参数模型的传递函数辨识试验结果	65
6.4.3 基于自适应逆建模辨识试验结果	70
6.5 本章小结	71
第7章 电液振动台离线补偿控制	72
7.1 基于位置逆模型的三状态控制器	72
7.2 基于前馈补偿控制的离线时域波形复现	76
7.2.1 基于非参数模型的前馈补偿	76
7.2.2 基于参数模型的前馈补偿及其改进	78
7.2.3 基于自适应逆建模的前馈补偿控制	81
7.3 基于离线迭代控制的离线时域波形复现	83
7.3.1 传统的离线迭代控制	83

7.3.2 改进的离线迭代控制	86
7.4 仿真验证	88
7.4.1 基于非参数模型前馈补偿仿真结果	88
7.4.2 基于参数模型前馈补偿仿真结果	89
7.4.3 基于自适应逆建模前馈补偿仿真结果	90
7.4.4 离线迭代控制仿真结果	91
7.5 试验验证	92
7.5.1 基于逆模型的三状态控制器试验验证	92
7.5.2 基于非参数逆模型的前馈补偿试验验证	98
7.5.3 基于参数模型的前馈补偿试验结果	99
7.5.4 基于自适应逆建模的前馈补偿试验结果	107
7.5.5 离线迭代控制试验结果	108
7.6 本章小结	110
第 8 章 电液振动台在线自适应控制	111
8.1 在线时域波形复现的自适应逆控制算法	112
8.1.1 LMS 算法	112
8.1.2 归一化最小均方算法	116
8.1.3 X-滤波 NLMS 算法	117
8.1.4 ε -滤波 NLMS 算法	119
8.2 基于改进自适应逆控制的在线时域波形复现	120
8.3 基于自适应逆复合控制的在线时域波形复现	122
8.4 集成自适应逆和模型偏差补偿器的复合控制在线时域波形复现	125
8.5 在线时域波形复现仿真结果	127
8.6 在线时域波形复现试验结果	128
8.7 各控制策略效果分析	136
8.7.1 各控制器跟踪精度比较	136
8.7.2 各控制器实时性分析	140
8.8 本章小结	141
参考文献	143

第1章 绪 论

1.1 课题来源及研究的目的和意义

本书来源于国家自然科学基金面上项目：基于振动与加载多元耦合的超冗余驱动电液系统协调控制研究（项目批准号：51575511）及机械工程江苏省优势学科建设平台的研究成果。

并联冗余驱动电液系统典型装置为六自由度电液振动台，该系统具有刚度大、承载能力强、结构比较简单、精度高、没有误差累积、易于控制等优点，主要用于模拟被试件所承受的振动或加载环境，考核被试件在振动激励下保持原有性能的能力。电液振动台作为关键的基础试验装备广泛应用于许多重要的工程领域以实现真实的环境模拟，如市政和建筑工程^[1, 2]；工程材料高频疲劳试验，汽车、行走机械的道路模拟试验^[3, 4]；水坝、高层建筑等大型工程的抗震试验等^[5, 6]。并联冗余驱动电液振动台试验系统是一项融合多学科的复杂系统，包括液压控制系统，机械设计理论及技术，控制系统的总体技术研究，电液伺服控制、振动控制算法，及其软件及硬件电路实现等。

本书主要研究并联冗余驱动电液振动台系统，实现振动力学环境模拟，考核被试件在振动环境作用下的性能，为科研人员提供可靠的试验数据，解决大型工程中关键构件和材料试验测试问题。然而，并联冗余驱动振动台的各伺服作动器之间存在强耦合现象以及整个系统频宽较低问题，因此，将开展并联冗余驱动电液振动台的液压模型、内力解耦控制、协调控制、前馈补偿控制以及自适应在线控制研究，提高振动环境模拟精度。

1.2 国内外多轴振动台发展现状及分析

振动模拟技术主要研究各种振动环境及诱发振动环境的人工再现技术，是环境模拟与仿真试验的一种。目前，该技术广泛应用于航天、航空、兵器、船舶、核工业等国防工业领域和汽车、建筑等民用工业部门^[7, 8]。

1.2.1 多轴振动台的分类

目前，常用的多轴振动台从驱动方式上可分为电液振动台和电动振动台两大类。多轴电液振动台由多个电液伺服阀控制的液压作动器构成，其主要工作原理：

用户将期望信号经过一定的算法处理后产生所需的电控驱动信号，然后经放大器转化为电流信号对电液伺服阀进行激励，伺服阀把与驱动信号成比例的液压油输入液压缸中，以驱动活塞并带动台面运动产生期望的振动模拟。其主要技术特点：加速度频率范围一般为 0.1~100Hz，或更高；振动位移的峰-峰值一般为 50~250mm，如有需要可提高到 500mm 以上；激振力达数百千牛顿以上，台面负载达数十吨。由于该振动台易于自动控制和多台并激，其主要应用范围是系统级或大型部件的多轴低频大位移振动试验，如地震模拟。

多轴电动振动台利用经改装的标准电动振动台组合而成。它的主要工作原理：通电导体处在恒定磁场中将受到力的作用，当导体通以交变电流时将产生振动。振动台的驱动线圈正是处在一个高磁感应强度的空隙中，当需要的振动信号从振动控制器产生并经功率放大器后作用于驱动线圈上时，振动台就会产生需要的振动波形。多轴电动振动台的主要特点^[9]：频率范围为 5~10000Hz，振动位移的峰-峰值一般为 30~50mm，激振力可达 200kN，甚至可产生 1000m/s² 以上的加速度，台面负载可达 1t 或更大，波形好，操作调节方便，易于自控并实现多台并激，可满足试验频带在 5Hz 以上的各类振动试验要求，适用于各类电子元器件的振动试验，配备附加台面和水平滑台，还可适用于中小型整机试验。但其缺点是价格高，有漏磁场。

图 1-1 所示为美国 Wyle 实验室为美国空军 Hill 基地研制成功用于导弹系统级振动环境试验的三轴六自由度电动振动台，这是目前世界上最先进的一套电动式多轴振动系统^[10]。该系统由 8 台 Ling2016 型电动激振器组成，振动台经过改装后安装在 450t 反作用质量块上。系统的主要技术参数如表 1-1 所示。

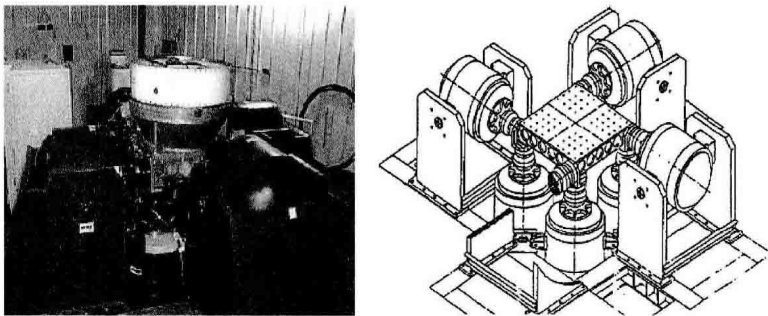


图 1-1 Wyle 实验室研制的六自由度电动振动台

表 1-1 图 1-1 振动台的主要技术参数

项目	技术参数
台面尺寸	1m×1m
最大试验件重量	2500kg
最大位移（峰-峰）	50mm

续表

项目	技术参数
最大速度	1.78m/s
频率范围	5~2000Hz
水平方向推力	180kN
垂直方向推力	360kN

1.2.2 国外多轴振动台的发展现状及分析

国外多轴振动试验系统不仅作为一个重要的研究方向，而且已经形成规模和产业。许多著名大学和研究机构与专业制造公司合作，在前沿技术和应用技术方面的研究和开发都取得了重要成果。国外制造公司主要有美国 Wyle 公司、MTS 公司、TEAM 公司、IST 公司，德国力士乐公司、Schenck 公司，英国 Servotest 公司，日本的三菱、IMV 公司和鹭宫制作所等。他们与国际著名大学，如美国加州大学伯克利分校，德国亚琛工业大学等进行广泛合作，使振动模拟技术处于国际领先水平^[11]。

1. 美国多轴振动台的研制

Wyle 实验室是国际上最早开始研究多轴振动环境试验技术和设备的单位之一^[7]，在 20 世纪 70 年代就成功研制了三轴电液振动台，其结构如图 1-2 所示^[12]。该设备安装在位于美国亚拉巴马州亨茨维尔分部的 Wyle 实验室，目前仍在使用。该电液振动台系统主要技术参数如表 1-2 所示^[7, 12]。Wyle 实验室除了研制多轴电液振动台，还研制用于中高频振动环境试验的多轴电动振动台。

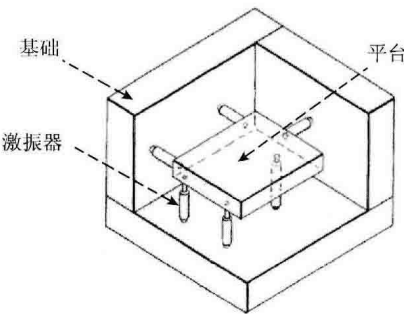


图 1-2 Wyle 液压振动台结构

表 1-2 振动台的主要技术参数

项目	技术参数
台面尺寸	2.7m×2.7m
最大试验件重量	6350kg
最大位移（峰-峰）	200mm

续表

项目	技术参数
最大加速度	4.5g
最大速度	0.9m/s
频率范围	0~100Hz

美国在多轴电液振动台方面以 MTS 公司为代表。MTS 公司已生产了数十台电液式地震模拟台^[13]，其中六自由度电液式地震模拟台十余台。该公司不仅研制地震台的伺服控制系统，还研制地震台的振动控制系统，曾为世界各国研制许多高性能的地震台。图 1-3 所示为 MTS 公司为日本 Kobe 研制的六自由度液压振动试验系统^[13]。2010 年 2 月，MTS 公司设计了新型的六自由度多轴 329 试验台^[14]，如图 1-4 所示。



图 1-3 MTS 六自由度液压振动试验系统^[13]



图 1-4 MTS 公司设计研制的多轴 329 系统试验台^[14]

TEAM 公司于 1954 年成立于美国西雅图, 主要提供复杂的振动试验系统和扭转疲劳试验系统的设计与生产, 该公司研究的振动台系统专业用途非常广泛, 包括航天航空、汽车、电子设备、建筑物的振动试验, 以及噪声激励系统和冲击系统。从振动台结构上看, 单轴振动台包括垂直振动台、水平振动台; 多轴振动台包括 X - Y 双向联合振动台、轻质量的六自由度振动台^[15] (图 1-5), 以及用于汽车整车测试的 4 通道模拟振动试验台^[15] (图 1-6), 这种振动台的设计在道路模拟试验台中尚属首创, 作动器采用静压轴承, 具有低轮廓、无摩擦力、低噪声的优点, 这套振动试验系统可以满足正弦、随机、锯齿、冲击、瞬态、波形再现等信号的试验, 并且还可以实现信号的叠加。

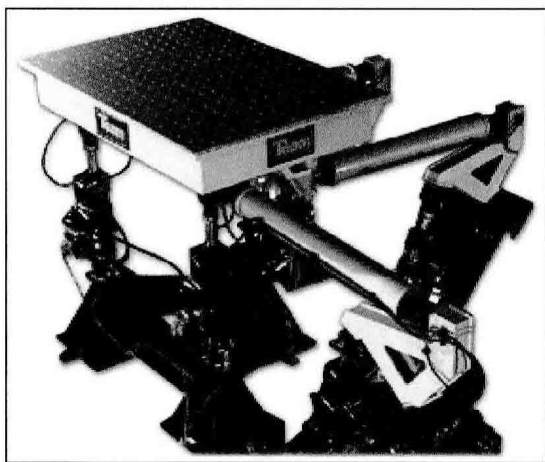


图 1-5 六自由度振动台^[15]

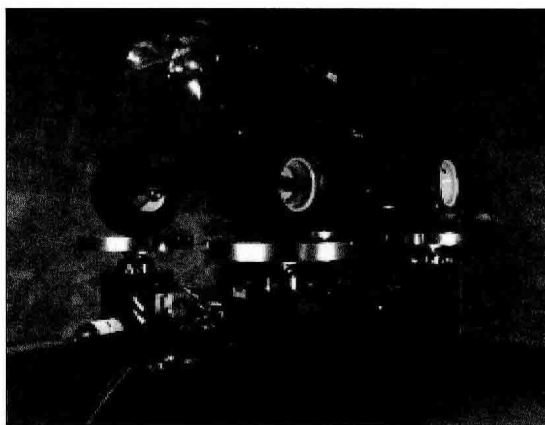


图 1-6 4 通道道路模拟振动试验台^[15]

2. 英国多轴振动台的研制

英国 Servotest 公司于 20 世纪 40 年代成立,是较早开始从事多轴振动台研究的公司,在伺服液压测试和运动模拟行业技术领先。其产品种类比较全,包括各种类型的汽车、摩托车等的轮胎耦合道路模拟机、多自由度振动台、零部件试验系统、转向试验机、座椅及安全吊带试验设备等,近 90% 的 F1 赛车是由 Servotest 公司研制的七通道道路模拟试验机来进行开发和调试的。

Servotest 公司在多轴振动台的研制和生产方面有很丰富的经验,可以生产的尺寸范围从 $0.5\text{m} \times 0.5\text{m}$ 到 $6\text{m} \times 6\text{m}$,频率范围为 $0.1 \sim 200\text{Hz}$,负载力承受极限垂直向为 1000kN ,水平向为 600kN 。图 1-7 是 Servotest 公司研制成功的高频多轴振动试验系统^[16]。图 1-8 是 Servotest 公司研制并搭建的飞行器模拟试验系统^[17],该系统可以模拟垂直方向的升降以及左右摇摆、俯仰运动等;为了确保安全,该试验台还设置了加速度更高限制,试验系统互锁以及紧急预警装置。

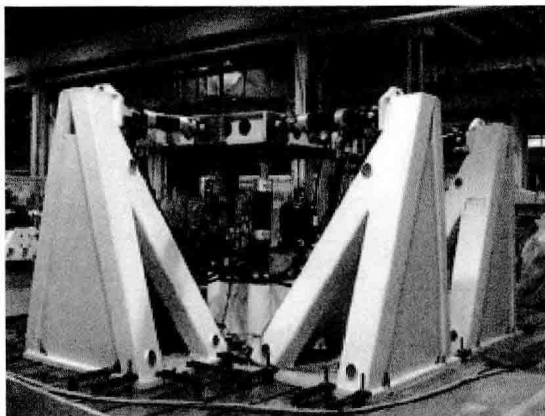


图 1-7 轻质高频振动台^[16]

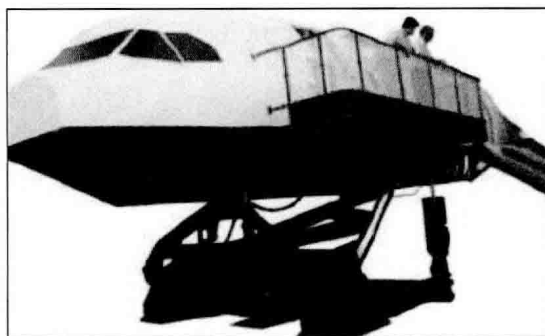


图 1-8 飞行器模拟试验系统^[17]

3. 日本多轴振动台的研制

日本是研制液压振动试验系统较早的国家之一，也是一直技术领先的国家之一。1984年，日本三菱公司成功研制了 $6\text{m} \times 6\text{m}$ 的三向六自由度大型地震台，采用三状态控制方法实现了液压振动试验系统的加速度控制，并在理论上首次解决了六自由度独立控制问题，该地震台的成功研制是地震台发展的一次飞跃^[18]。

图1-9是鹭宫制作所研制的多轴道路模拟试验机，该所研制的六自由度道路模拟试验机，在工作台上可以高精度再现实际行驶过程中的载荷情况，如图1-10所示^[19]。该所研制的大型三次元振动试验机，可以对实际建筑物同等大的试验体进行三次元同时加振，如图1-11所示。鹭宫制作所研制的小型三次元振动试验机，则主要用于对汽车零件的振动评价或模拟运输物的评价，如图1-12所示。图1-13所示为日本IMV公司研制的用于车辆座椅测试的六自由度振动台。2000年，日本防灾科学技术研究所开始在兵库县三木市内建造堪称世界上最大的地震台^[20, 21]，如图1-14所示。

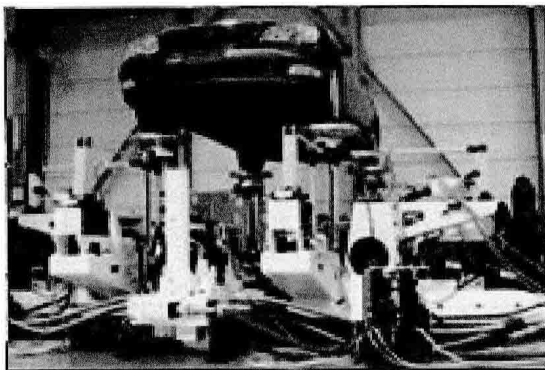


图 1-9 BBH 多轴模拟试验机



图 1-10 六自由度道路模拟试验机

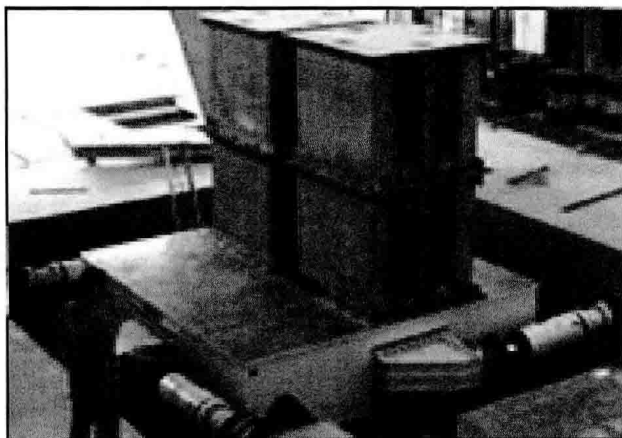


图 1-11 大型三次元振动试验机

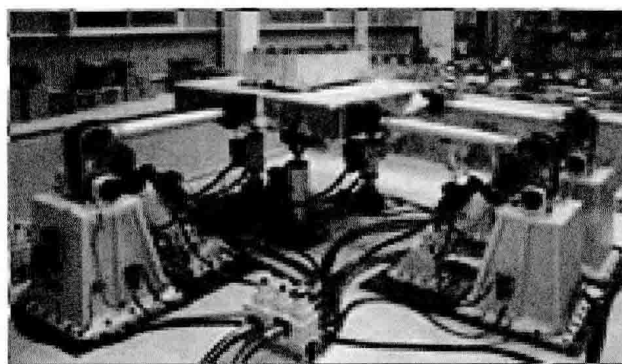


图 1-12 小型三次元振动试验机

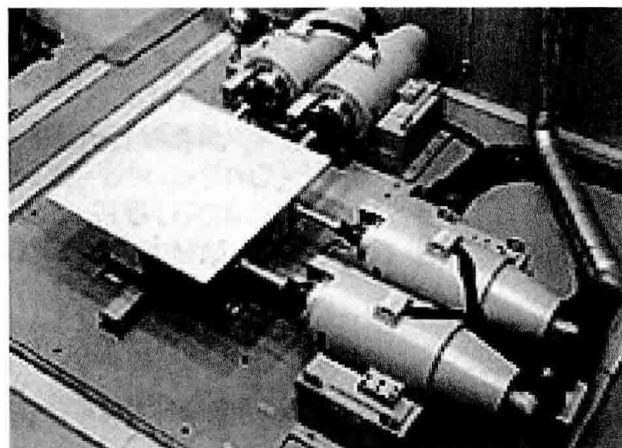


图 1-13 日本 IMV 公司的电液振动台

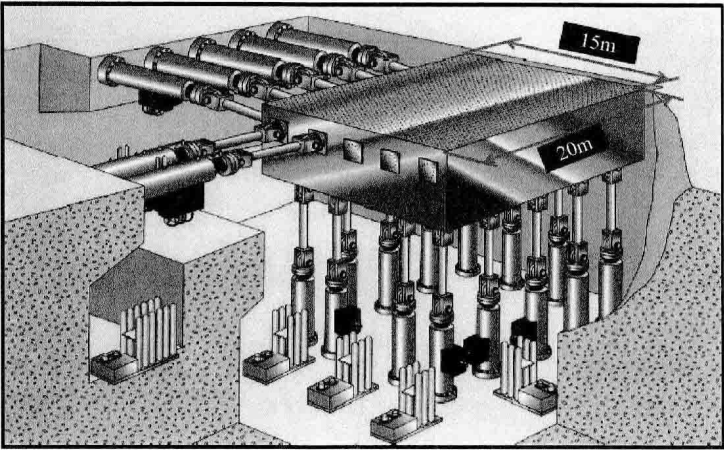


图 1-14 日本建造的世界上最大的地震台

1.2.3 国内多轴振动台的发展现状及分析

我国有关多轴振动台的研究起步较晚，尤其在大型振动模拟试验装备的研究和制造上，与其他国家先进水平相比，无论在技术上还是规模上都存在较大的差距^[7, 22]。表 1-3 是国内近年来引进和自主研制的各种振动台。在技术引进与自主研究的基础上，我国在该领域的研究也取得一定的成果。除了引进一些国外的高性能的地震台进行研究，还陆续建成一些地震模拟振动台，主要分布在高校和科研机构。国内研制过液压振动试验系统的单位较多，主要有哈尔滨工业大学电液伺服仿真及试验系统研究所、西安交通大学、武汉理工大学、浙江大学、吉林大学、北京机械工业自动化研究所、航空 303 所、中国地震局工程力学研究所、天水红山试验机有限公司、北京航空航天大学、南京航空航天大学等。

表 1-3 近年国内部分多轴液压振动台主要技术参数

引进单位	规格	厂商
航天一院 702 所	2m×2m, 6t, 6 DOF	Wyle
航天三院 8359 所	20t, 3 DOF	MTS
中国核动力研究设计院	6m×6m, 6 DOF	Servotest
交通部重庆公路科学研究所	6m×6m, 6 DOF	IST
中国建筑科学研究院	6m×6m, 40t, 6 DOF	MTS
上海同济大学	4m×4m, 15t, 6 DOF	MTS
北京水科学技术研究院	5m×5m, 20t, 6 DOF	Schenck
华南建设学院	3m×3m, 10t	MTS
河海大学	3m×3m, 10t, 4 DOF	MTS