

Real-Time Dynamic Hybrid Testing
Theory and Practice

实时耦联动力试验 理论与实践

王进廷 徐艳杰 金峰◎著

中国建筑工业出版社

王进廷 徐艳杰 金峰 著

中国水利水电出版社

中国水利水电出版社

中国水利水电出版社

实时耦联动力试验 理论与实践

王进廷 徐艳杰 金峰 著

中国水利水电出版社

中国水利水电出版社

中国水利水电出版社

135

中国水利水电出版社

中国水利水电出版社

中国水利水电出版社

中国水利水电出版社

TV32

01

中国水利水电出版社

中国水利水电出版社

中国水利水电出版社

图书在版编目(CIP)数据

实时耦联动力试验理论与实践/王进廷, 徐艳杰, 金峰著. —
北京: 中国建筑工业出版社, 2013. 12
ISBN 978-7-112-16143-0

I. ①实… II. ①王…②徐…③金… III. ①水工结构-结构动
力学-结构试验-研究 IV. ①TV32

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 284318 号

本书是近十年清华大学水工结构抗震研究组在实时耦联动力试验方面的集体研究成果总结, 共分八章。主要包括: 概论; 实时耦联动力试验相关的基本理论; 振动台实时耦联动力试验的系统构建; 基于虚拟振动台的实时耦联动力试验系统; 一种新型的双显式积分系列算法; 实时耦联动力试验的时滞稳定性; 结构-地基动力相互作用的实时耦联动力试验; 振动台-有限元实时耦联动力试验。

本书可供从事结构动力试验相关问题研究的研究和技术人员参考。

责任编辑: 辛海丽

责任设计: 张 虹

责任校对: 张 颖 赵 颖

实时耦联动力试验理论与实践

王进廷 徐艳杰 金 峰 著

*

中国建筑工业出版社出版、发行(北京西郊百万庄)

各地新华书店、建筑书店经销

北京科地亚盟排版公司制版

北京同文印刷有限责任公司印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 12 $\frac{3}{4}$ 字数: 310 千字

2014 年 4 月第一版 2014 年 4 月第一次印刷

定价: 48.00 元

ISBN 978-7-112-16143-0

(24905)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

前 言

结构动力试验是研究结构抗震性能的主要方法之一。随着科学技术水平的不断发展,结构动力试验方法也在不断革新。20 世纪六七十年代,先后出现了振动台试验方法和拟动力试验方法,是目前常用的两种结构抗震试验方法;20 世纪 90 年代初在拟动力子结构试验的基础上,发展出现了实时耦联动力试验方法。实时耦联动力试验方法,将物理模型试验和数值模拟计算实时耦联进行整体结构的动力特性分析,既可以像拟动力子结构试验方法一样,只对复杂结构中的部分构件进行物理试验,而剩余部分采用数值方法模拟,从而增大试验模型比尺;又能够像振动台试验一样,以实际荷载加载速率进行加载,反映结构动力特性受加载率的影响。因此实时耦联动力试验方法兼具有拟动力试验和振动台试验的优点,代表着结构抗震试验未来发展的一个重要趋势。清华大学水工结构抗震研究组从 2003 年开始,在张楚汉院士的带领下,开始筹建和研制实时耦联动力试验系统,经过近 10 年的时间,建成了基于双振动台的实时耦联动力试验系统,并开展了一系列实时耦联动力试验研究。现在,总结这方面的研究成果并汇集成书,与从事实时耦联动力试验相关问题研究的学者和研究人员进行交流。

全书共分 8 章。第 1 章为概论,综述了常用的几种结构动力试验方法的发展,以及实时耦联动力试验方法的国内外研究现状。第 2 章为实时耦联动力试验相关的基本理论,介绍了动力模型试验的相似理论、动力问题的子结构分析方法、动力系统的控制理论和稳定性判别以及 Simulink 仿真建模等基本理论与方法。第 3 章为振动台实时耦联动力试验的系统构建,针对实时耦联动力试验方法的关键问题,提出了相应的解决方案,构建了基于双振动台的实时耦联动力试验系统。第 4 章为基于虚拟振动台的实时耦联动力试验,采用 Simulink 建立了振动台系统的虚拟仿真模型以及基于虚拟振动台的实时耦联动力试验模拟系统,实现了实时耦联动力试验的离线调试。第 5 章为实时耦联动力试验的一种新型显式积分系列算法,基于离散控制理论,提出了位移和速度均为显式的积分算法,并对其数值精度、稳定性和计算效率进行了对比分析。第 6 章为实时耦联动力试验的时滞稳定性,采用根轨迹方法,分析了单自由度系统的时滞稳定性及附加阻尼特性,并研究了多自由度系统的时滞稳定性以及补偿效果。第 7 章为结构-地基动力相互作用的实时耦联动力试验,采用数值子结构模拟无限地基,振动台试验模拟上部结构,进行了结构-地基和渡槽-流体-地基等动力相互作用问题的实时耦联动力试验研究。第 8 章为振动台-有限元实时耦联动力试验,基于 S-function 编写了具有有限元计算功能的 Simulink 仿真模块,作为实时耦联动力试验的数值子结构,实现了有限元-振动台试验的实时耦联。

本书是清华大学水工结构抗震研究组在实时耦联动力试验方面的集体研究成果总结，其中张楚汉院士和王光纶教授为实验室的筹建和试验系统的研制付出了极大的心血，并亲自指导了相关试验研究工作；参加本书研究工作的还有汪强博士和迟福东博士，以及周孟夏、桂耀和朱飞等博士研究生。本书研究成果得到了多项国家自然科学基金项目（No. 90510018, 51239006, 40974063, 41274106, 50779021, 51179093, 90715041, 91215301）的资助。在此，作者一并致以谢忱。

由于作者水平有限，书中难免存在疏漏与不足之处，诚恳地希望读者们不吝赐教。

2013 年于清华园

目 录

第 1 章 概 论	1
1.1 结构动力试验方法	1
1.1.1 拟静力试验	1
1.1.2 地震模拟振动台试验	1
1.1.3 拟动力试验	4
1.1.4 有效力试验	5
1.1.5 离心机动力试验	6
1.1.6 实时耦联动力试验	6
1.2 实时耦联动力试验方法研究	9
1.2.1 数值子结构的积分算法	9
1.2.2 数值子结构的子时步插值	12
1.2.3 加载器时滞及补偿	13
1.2.4 时滞稳定性分析	16
1.2.5 加载器的控制问题	18
1.2.6 实时耦联动力试验实例	18
1.3 实时耦联动力试验方法的发展趋势	20
参考文献	21
第 2 章 实时耦联动力试验相关的基本理论	27
2.1 结构动力模型试验的相似理论	27
2.1.1 线性模型	27
2.1.2 非线性模型	29
2.2 动力子结构分析法	30
2.3 自动控制系统的基本原理	31
2.3.1 控制系统的基本形式	31
2.3.2 控制系统的分类	33
2.3.3 控制系统的传递函数	34
2.3.4 控制系统的结构图	35
2.3.5 闭环系统的传递函数及特征方程	35
2.3.6 线性系统的稳定性	36
2.3.7 线性系统的根轨迹法	38

2.4	线性离散系统的稳定性判别	40
2.4.1	信号的采样和保持	40
2.4.2	z 变换	41
2.4.3	离散系统的稳定性	42
2.5	SIMULINK 仿真建模	43
2.5.1	Simulink 仿真模型	44
2.5.2	Simulink 的模块库	44
2.5.3	Simulink 子系统及其封装	45
2.5.4	S-Function	46
	参考文献	46
第3章	振动台实时耦联动力试验的系统构建	48
3.1	实时耦联动力试验系统构建的关键问题	48
3.2	清华实时耦联动力试验系统构建	49
3.2.1	宿主机-目标机数值实时计算子系统	49
3.2.2	振动台物理实时加载子系统	50
3.2.3	数据实时采集与传输子系统	51
3.3	清华实时耦联动力试验系统验证	54
3.3.1	试验模型	55
3.3.2	试验结果	60
	参考文献	68
第4章	基于虚拟振动台的实时耦联动力试验系统	69
4.1	电液伺服振动台系统的虚拟仿真模型	69
4.1.1	系统数学模型	69
4.1.2	系统 SIMULINK 模型	71
4.1.3	系统参数估计和识别	73
4.1.4	仿真效果验证	76
4.2	振动台离线调试	79
4.3	基于虚拟振动台的实时耦联动力试验	81
	参考文献	85
第5章	一种新型的双显式积分系列算法	87
5.1	新型双显式积分系列算法推导	87
5.1.1	极点映射法	87
5.1.2	放大矩阵特征值映射法	89
5.2	新型算法的数值特性分析	89
5.2.1	精度分析	89
5.2.2	稳定性分析	90
5.2.3	数值特性小结	94

5.3	多自由度问题数值分析算例	94
5.3.1	线弹性结构	94
5.3.2	刚度非线性结构	95
5.3.3	阻尼非线性结构	98
	参考文献	100
第6章	实时耦联动力试验的时滞稳定性	101
6.1	单自由度实时耦联动力试验的时滞稳定性	101
6.1.1	稳定性分析模型	101
6.1.2	稳定性分析技术	102
6.1.3	系统稳定条件	104
6.1.4	稳定性条件的虚拟振动台验证	114
6.2	单自由度时滞引起的附加阻尼	115
6.3	多自由度实时耦联动力试验的时滞稳定性	117
6.3.1	稳定性分析模型	117
6.3.2	无时滞补偿的稳定性	120
6.3.3	Lagrange 多项式时滞补偿的稳定性	122
6.3.4	最小二乘拟合预测算法的稳定性	127
6.3.5	时滞稳定性条件的试验验证	129
	参考文献	138
第7章	结构-地基动力相互作用的实时耦联动力试验	139
7.1	概述	139
7.2	结构-地基动力相互作用的实时耦联试验	140
7.2.1	试验研究对象	140
7.2.2	地基集总参数模型	141
7.2.3	试验模型设计	143
7.2.4	试验结果	145
7.3	渡槽-流体-地基动力相互作用的实时耦联动力试验	150
7.3.1	试验模型	150
7.3.2	试验结果	153
7.4	结构-地基相互作用实时耦联动力试验的时滞稳定性	164
7.4.1	分析模型的建立	164
7.4.2	稳定性分析实例及主要结果	166
7.4.3	稳定性结论的数值验证	169
	参考文献	171
第8章	振动台-有限元实时耦联动力试验	173
8.1	有限元数值子结构模型	173
8.1.1	有限元仿真模块创建	174

10	8.1.2 有限元程序运行时间分析	175
10	8.1.3 有限元程序精度验证	177
20	8.2 数值子结构求解任务分解	178
80	8.2.1 求解任务分解思路	178
100	8.2.2 计算求解任务的外插值方法	179
101	8.2.3 信号生成任务的内插值方法	180
101	8.2.4 计算效率的试验验证	180
101	8.3 多点激励实时耦联动力试验实例	183
105	8.3.1 连体结构试验模型	184
101	8.3.2 连体结构非均匀地震动响应	185
111	8.4 振动台-有限元系统的时滞稳定性	188
211	8.4.1 稳定性分析实例	189
111	8.4.2 稳定性分析的数值验证	190
111	8.4.3 试验系统参数变化对时滞稳定性的影响	193
150	参考文献	194
	附录	195
151	A.1 傅里叶变换	195
151	A.2 拉普拉斯变换	195
152	A.3 Padé 逼近	195

第 1 章 概 论

结构抗震试验是结构抗震理论研究的重要组成部分,是发展新型结构体系和新型施工工艺的重要途径,是探索结构动力分析方法和抗震设计理论的重要手段。本章简要介绍了常用的几种结构动力试验方法及其发展趋势,详细综述了实时耦联动力试验方法的研究现状。

1.1 结构动力试验方法

在地震工程领域结构动力试验方法包括^[1]:拟静力试验(Quasi-static testing),振动台试验(Shaking table testing),拟动力试验(Pseudo-dynamic testing),有效力试验(Effective force testing),离心机动力试验(Dynamic centrifuge testing),实时耦联动力试验(Real-time dynamic hybrid testing)等。

1.1.1 拟静力试验

拟静力试验是一种以静力方法模拟结构地震作用效果的试验方法。它通过一定的荷载控制或位移控制,对整体结构或构件施加多次往复循环作用的静力荷载,使结构或构件在正反两个方向重复加载和卸载,用以模拟地震时结构在往复振动中的受力特点和变形特点^[1,2]。所以拟静力试验又称低周反复加载试验或恢复力特性试验。

拟静力试验方法是 20 世纪 60~70 年代基于结构非线性地震反应分析的要求提出的,主要目的是对结构在地震作用下的基本性能进行深入的研究,进而建立恢复力模型和承载力计算公式,探讨结构的破坏机理,并改进结构的抗震构造措施。拟静力试验方法几乎可以应用于各种建筑材料或构件的抗震性能研究,具有良好的经济性和实用性。一方面,由于采用静力加载,对试验设备要求比较低,降低了试验设备费用;另一方面,可以只对构件进行试验,往往仅为整体结构模型试验花费的几分之一甚至几十分之一。另外,拟静力试验的加载速率很低,应变率对试验结果的影响可以忽略,因此不同研究人员在不同实验室获得的试验结果容易进行比较。但是,拟静力试验并没有真正模拟结构的动力特性(即惯性力的影响),也没有考虑结构动力特性受加载率的影响。

1.1.2 地震模拟振动台试验

地震模拟振动台试验的基本原理是将结构模型放在一个刚性平台上,然后给此刚性平台施加已知地震运动,这样就可以在整个结构上产生所需的惯性力,测量结构模型在惯性力作用下的响应,用于研究结构抗震性能。地震模拟振动台可以很好地再现地震过程和进行大量人工地震波的试验,研究结构动力特性、地震反应规律和破坏机理,测试设备抗震性能,检验结构抗震措施效果等。

地震模拟振动台试验研究最早可以追溯到 19 世纪末^[3]。大约在 1890 年,英国人 John Milne 和日本同事大森房吉在日本首次进行了考虑地震对结构模型影响的实验室试验。他们采用的试验设备是安装在铁轨上的一个可移动平台,通过连杆偏心连接在手动轮上,然后通过手动轮的转动牵引平台,使平台上的试件产生往复运动,由一个旋转筒上的笔记录运动过程。进入 20 世纪后,各国学者开始对振动台的驱动方式和控制方法进行了多种形式的改进与革新。1972 年,美国加州大学 Berkeley 分校建成了 6.1m×6.1m 的水平和垂直两向振动台,可以看成是真正现代意义上的第一台振动台。此后,振动台试验在世界范围内得到了广泛的应用,目前全世界已经建成了百余台中型以上的地震模拟振动台^[4]。

地震模拟振动台试验可以认为是目前研究结构抗震性能最准确的试验方法。然而,由于振动台设备的承载能力限制,一般只能进行缩尺模型试验,要求试验模型满足动力相似性条件。而在实际试验中,很难让所有的模型参数都同时满足相似性条件,需要采取一些近似和简化,根据试验的主要目的只考虑主要参数的相似性。实际上,即使相似条件可以完全满足,也很难根据模型试验的结果确定原型结构真实的非线性动力反应特性,尤其是一些对于模型比尺非常敏感的问题,如钢结构中的连接部件、钢筋混凝土中的绑扎和焊接等。此外,由于地震模拟振动台台面近似为一个刚性体,因此单一振动台也无法考虑地面地震动非均匀的特点,对于一些大跨度结构,如桥梁、渡槽等,显然也不是十分合理。为了克服这些局限性,地震模拟振动台出现了两种发展趋势^[5]。一种发展趋势是建造超大型的地震模拟振动台,即振动台的大型化。通过加大振动台的台面尺寸和提高振动台的承载能力,以进行大比尺模型试验,甚至足尺模型试验,克服模型尺寸效应的影响。日本国立防灾科学技术研究所兵库地震工程研究中心(Hyogo Earthquake Engineering Research Center, National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevent) 2005 年建成的三向六自由度地震模拟振动台——E-Defense^[6~8],是目前世界上最大的振动台,台面尺寸为 15m×20m,最大载重量 1200t。美国加州大学 San Diego 分校(UCSD) 2004 年建成了 7.6m×12.2m 的大型单向振动台,最大载重量可以达到 2000t,是世界上最大的室外振动台^[9,10]。在国内,中国核动力研究设计院 2002 年在成都建成了 6m×6m 的三向六自由度振动台,有效承载力 60t;中国建筑科学研究院 2004 年在北京建成了 6.1m×6.1m 的三向六自由度振动台,有效承载力 60t。这两座振动台均为国内最大的地震模拟振动台,也可以看作是大型化的例子。上述 4 座振动台的性能指标基本参数如表 1-1-1 所示。图 1-1-1 所示为日本 1200t 的 E-Defense 振动台 2009 年进行的 7 层足尺木结构房屋试验,模型结构长 18.4m,宽 12.4m,高 20.4m^[11];图 1-1-2 所示为美国 UCSD 室外振动台进行的风力发电机原型试验,塔高 21.9m,转轮高度 22.6m,风轮直径 16m^[12]。

国内外四座大型振动台基本参数 表 1-1-1

振动台	日本国立防灾科学技术研究所	美国加州大学圣地亚哥分校	中国建筑科学研究院	中国核动力研究设计院
建成时间	2005	2004	2004	2002
驱动方式	电液伺服控制	电液伺服控制	电液伺服控制	电液伺服控制
自由度数	6 自由度	水平单向	6 自由度	6 自由度

续表

振动台	日本国立防灾科学技术研究所	美国加州大学圣地亚哥分校	中国建筑科学研究院	中国核动力研究设计院
台面尺寸	15.0m×20.0m	7.6m×12.2m	6.1m×6.1m	6.0m×6.0m
有效载重量 (t)	1200	2000	60	60
最大位移 (mm)	X 向: ±1000 Y 向: ±1000 Z 向: ±500	X 向: ±750	X 向: ±150 Y 向: ±250 Z 向: ±100	X 向: ±150 X 向: ±150 Z 向: ±100
最大速度 (mm/s)	X 向: 2000 Y 向: 2000 Z 向: 700	X 向: 1800	X 向: 1000 Y 向: 1200 Z 向: 800	
满载最大加速度 (g)	X 向: 0.9 Y 向: 0.9 Z 向: 1.5	X 向: 1.2	X 向: 1.5 Y 向: 1.0 Z 向: 0.8	X 向: 1.0 Y 向: 1.0 Z 向: 0.8
频率 (Hz)	0~50	0~20	0~50	0~100



图 1-1-1 日本 E-Defense 振动台七层木结构房屋原型试验^[11]

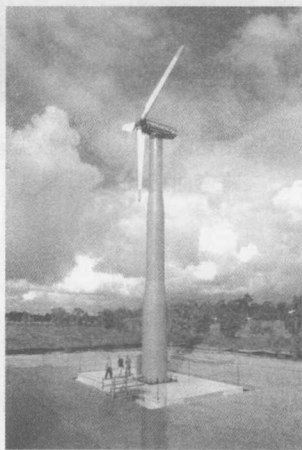


图 1-1-2 美国 UCSD 室外振动台风力发电机原型试验^[12]

地震模拟振动台的大型化,使得进行结构抗震试验的能力大大提高,但振动台的大型化涉及高昂的费用,而且仍然无法考虑地面非均匀运动对大跨度结构的影响。于是,出现了另外一种发展趋势,即振动台的台阵化。通过同时建造多个中小型振动台,组成振动台阵,既可以使多台振动台同步振动,等效于一个大型振动台,进行大型结构或构件的抗震试验,克服试验模型尺寸效应的影响;也可以使多台振动台异步振动,考虑地面地震动沿空间分布的非均匀特性,克服单一振动台的均匀运动局限。美国内华达大学 Reno 分校建成了由 3 台 4.3m×4.5m 双向振动台和 1 台 2.8m×2.8m 六自由度振动台组成的振动台阵^[13],4 台振动台的有效承载力均为 50t,既可以使振动台同步振动进行大型结构的试验,也可以异步振动模拟非均匀的地震输入,如图 1-1-3 所示为正在准备进行的 3 跨弯曲桥梁的 4 个振动台试验^[14]。美国纽约州立大学 Bufflo 分校建成了两台间距可以调整的 3.6m×3.6m 三向六自由度振动台,两台振动台的最大承载力均为 50t,最大可以相距

30.48m, 进行不同跨度结构的试验, 同时考虑地面的非均匀运动^[15]。我国北京工业大学建成了 9 台 $1\text{m} \times 1\text{m}$ 的单向地震模拟振动台台阵, 每个振动台有效承载力 5t, 如图 1-1-4 所示^[16]。重庆交通科研设计院动力实验室建造了两台 $6\text{m} \times 3\text{m}$ 的台阵, 一台固定, 另一台可以移动, 振动台有效承载力均为 35t。最近, 我国同济大学建成了由 4 台 $6\text{m} \times 4\text{m}$ 大型双向振动台组成的振动台阵, 并预留了升级为六自由度的接口, 其中两台的有效承载力为 70t, 另外两台的有效承载力为 30t, 并且两台 70t 的振动台可以合并形成台面尺寸 $6\text{m} \times 10\text{m}$ 、有效承载力 140t 的单振动台, 如图 1-1-5 所示为该台阵系统正在进行泰州长江公路大桥试验^[17]。

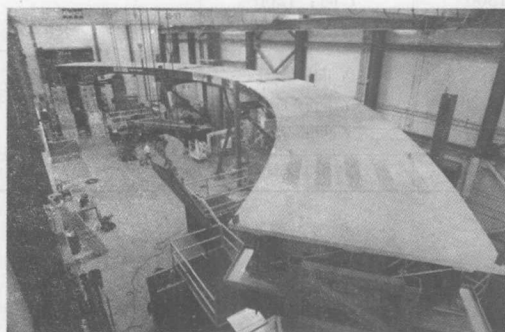


图 1-1-3 内华达大学 Reno 分校振动台阵
三跨弯曲桥梁试验^[14]

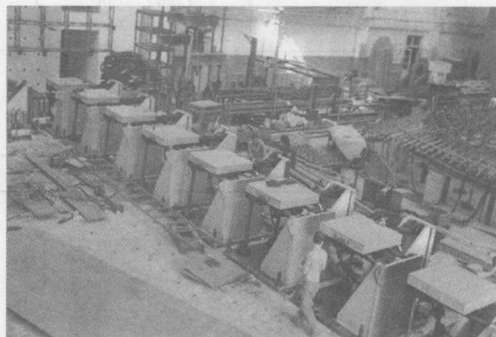


图 1-1-4 北京工业大学振动台阵^[16]

1.1.3 拟动力试验

20 世纪 70 年代初, 日本学者结合拟静力试验和振动台试验的特点, 提出了一种全新的结构抗震试验方法——拟动力试验方法^[18], 用物理试验和数值分析相结合的方式, 进行结构抗震试验, 其中结构动力方程中的惯性力和阻尼力应用数值方法进行计算, 而恢复力通过试验方法确定, 如图 1-1-6 所示。由于拟动力试验方法是将物理试验和数值分析相结合, 因此也称为联机试验

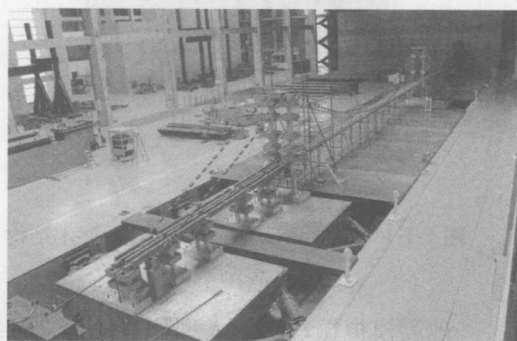


图 1-1-5 同济大学振动台阵泰州
长江公路大桥试验^[17]

(Online testing), 混合试验 (Hybrid experiment)。试验步骤为:

- (1) 采用逐步积分方法计算地震作用下的结构位移;
- (2) 以一种准静态的方式将计算得到的位移施加于试件;
- (3) 测量结构的恢复力并反馈给计算模型;
- (4) 根据测量得到的恢复力和已知地震作用进行下一个计算步骤。

与拟静力试验相比, 拟动力试验中已经通过数值方法考虑了惯性力和阻尼力的影响, 试验结果代表了结构的真实地震反应。与振动台试验相比, 拟动力试验的优点在于对作动器和测量仪器性能的要求较低, 类似于拟静力试验, 可以较方便地进行大比尺模型甚至足

尺模型试验,而且可以近距离观测构件局部破坏特性。因此,在20世纪80年代初期,拟动力试验得到了迅速发展,在全世界范围内得到了认可,成为一种成熟的试验方法^[18~20]。到20世纪80年代中期以后,随着应用范围的扩大,拟动力试验在以下三方面得到了发展:

(1) 采用无条件稳定的积分算法。传统的拟动力试验是基于显式积分算法开发的^[1],显式积分算法一般是条件稳定的。对于自由度多、刚度大的结构,显式积分算法的条件稳定的特点限制了拟动力试验的应用。台湾学者提出的 Chang 算法^[21,22],被证明是一种适用于拟动力试验的无条件稳定的显式算法。也有学者将无条件稳定的隐式积分算法应用于拟动力试验中,但需要迭代求解^[23]或采用等效力控制方法^[24]。

(2) 开展拟动力子结构试验。对于大型结构往往难以进行整体结构的试验,这时可以将人们所关心的整个结构系统中的局部构件或可能出现非线性的部分建立试验模型(称为物理子结构),而对于剩余部分则用数值方法模拟(称为数值子结构),应用拟动力方法进行试验(图1-1-7),这就是拟动力子结构试验。拟动力子结构试验能大大降低试件尺寸,解决了实验室规模对大型结构试验的限制,同时也降低了试验成本,采用少量的作动器即可进行自由度很多体系的试验^[18,20]。

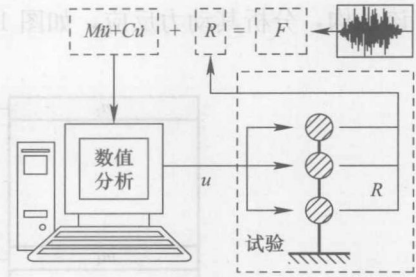


图 1-1-6 拟动力试验原理图

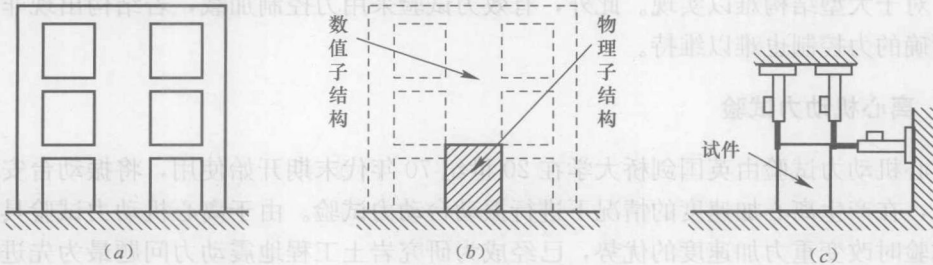


图 1-1-7 拟动力子结构试验示意图^[18]
(a) 整体结构; (b) 子结构; (c) 拟动力试验

(3) 开展快速拟动力试验。传统的拟动力试验以一种准静态方式加载,加载速率一般为实际速率的百分之一左右。随着隔震和减震及结构控制技术的发展,一些速率相关型的元件(如黏滞阻尼器、橡胶隔震器、摩擦阻尼器等)得到了广泛应用。对于这些速率敏感型元件仍进行拟动力试验,是不合理的。为解决加载率相关的问题,有人提出快速拟动力试验和连续拟动力试验^[18,20],提高加载率并且取消了时步之间的等待时间。但由于没有做到实时加载,速率相关甚至加速度相关的问题仍然没有得到很好的解决。

1.1.4 有效力试验

美国加州大学 Berkeley 分校的 Mahin 等在讨论拟动力试验时,提出了有效力试验的概念^[19],1999 年 Dimig 等人首次实现了有效力试验^[25]。有效力试验是根据结构动力学基本理论,将地基运动引起上部结构的等效作用力,直接采用力控制条件下的作动器施加于

该结构，分析其动力反应，如图 1-1-8 所示。

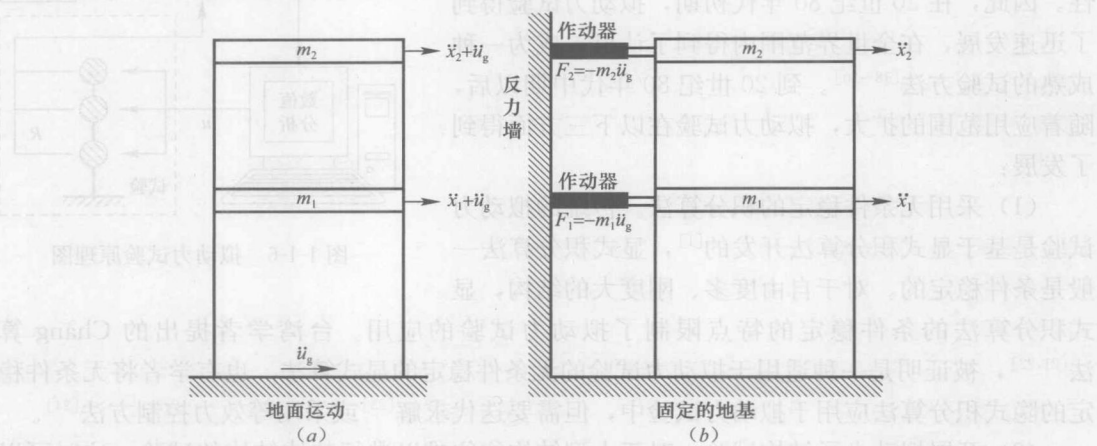


图 1-1-8 有效力试验示意图
(a) 结构原型；(b) 实验室模型

有效力试验中作动器施加的有效力只取决于地基运动加速度记录和结构的质量，与结构的非线性行为无关，是试验前预先确定的。所以，有效力试验不像拟动力试验那样需要联机计算，这是有效力试验的主要优势。但是，有效力试验需要将全部质量包括在试验模型中，对于大型结构难以实现。此外，有效力试验采用力控制加载，若结构出现非线性软化，精确的力控制也难以维持。

1.1.5 离心机动力试验

离心机动力试验由英国剑桥大学在 20 世纪 70 年代末期开始使用，将振动台安装在离心机上，在产生离心加速度的情况下进行振动台动力试验。由于离心机动力试验具有在振动台试验时改变重力加速度的优势，已经成为研究岩土工程地震动力问题最为先进的试验技术和研究方法。欧美、日本等发达国家发展了很多动力离心模型试验机，并进行了多方面的试验研究。近年来，这方面的研究在我国也越来越多，清华大学、南京水利科学研究院、同济大学、浙江大学和中国水利水电科学研究院都先后建成了离心机振动台系统^[26]。

近年来离心机动力试验技术也不断得到改进和提高，现在已经可采用黏滞系数较大的液体替代水来解决惯性和流固耦合的时间比尺问题，并研制了电液伺服等激振装置，实现了高频率、高加速度和高峰值动力输入，开发了刚性边壁吸波的模型箱和等效剪切梁式迭环模型箱等。这使得离心机动力试验技术的应用范围越来越广泛，成为模拟地震对土体和结构物产生影响的重要手段。

1.1.6 实时耦联动力试验

实时耦联动力试验是在拟动力子结构试验的基础上发展出现的一种新型试验方法。它秉承了拟动力子结构试验将整体结构拆分成物理子结构和数值子结构的思路，并采用了以实际的荷载速率进行加载的加载方式。因此，它综合了拟动力子结构试验和振动台试验的优点，既能够对局部构件进行足尺或大比尺模型试验，又能够反映结构在实际地震作用下

的动力性能。

实时耦联动力试验的基本原理是基于结构动力学中的子结构概念，将所要研究的整体结构拆分为物理子结构和数值子结构两部分，通过加载器（作动器或振动台）实时在界面施加相应的变形约束和作用力，保持两个子结构之间的力平衡条件和变形协调条件，反映整体结构的动力响应。一般地，将结构中本构关系明确、反应规律清楚的部分采用数值方法求解计算，即数值子结构；而将我们感兴趣又难以准确地用数值方法模拟的部分，制作物理模型进行试验研究，称为物理子结构。下面以图 1-1-9 所示的顶部带减震阻尼器的高层结构为例，对实时耦联动力试验的基本思路与试验流程进行说明。将原型结构拆分为两部分：顶部减震阻尼器作为物理子结构，对其进行试验研究；楼层结构作为数值子结构，采用数值方法求解计算。两个子结构通过 O 点力平衡和位移协调实现动力相互作用。具体试验流程如下：

- (1) 假定在 t 时刻，数值子结构中基底地震加速度输入 $A_g(t)$ 和减震阻尼器的作用力 $F(t)$ 均已知 [$F(t)$ 包括弹性力 $F_s(t)$ 和阻尼力 $F_D(t)$];
- (2) 采用直接积分法，求解数值子结构的动力方程，确定 O 点在 $t+\Delta t$ 时刻的加速度反应 $A_O(t+\Delta t)$;
- (3) 将数值子结构 O 点的加速度 $A_O(t+\Delta t)$ 作为 $t+\Delta t$ 时刻振动台的目标加速度，实时输入振动台控制系统，驱动振动台;
- (4) 实时测量 $t+\Delta t$ 时刻减震阻尼器所产生的弹性力 $F_s(t+\Delta t)$ 和阻尼力 $F_D(t+\Delta t)$ ，输入数值子结构模型;
- (5) 令 $t=t+\Delta t$ ，返回 (1) 进行下一次循环，一直到试验结束。

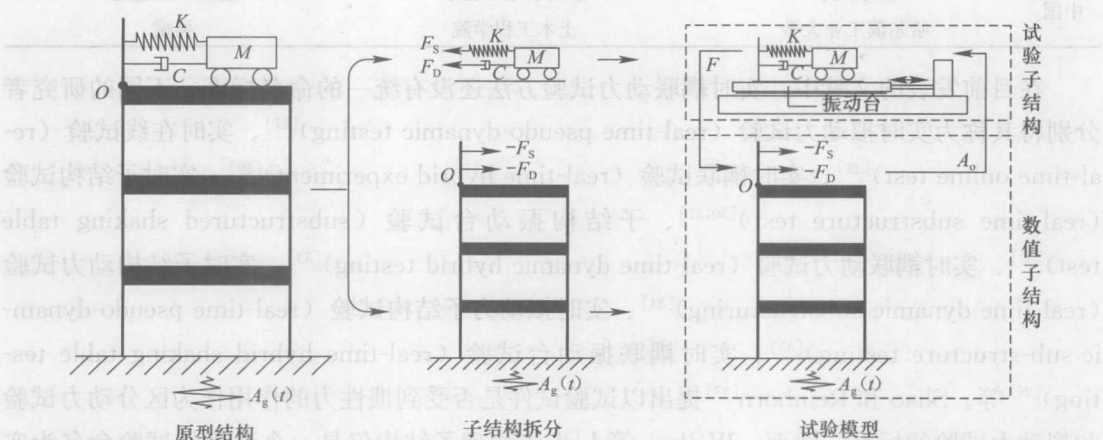


图 1-1-9 带减震阻尼器的高层结构实时耦联动力试验基本思路

实时耦联动力试验采用实时加载的方式，意味着每一个加载步骤必须在几个毫秒内完成，要求计算、数据的交换以及加载器的加载在非常短的时间内完成，对于相关设备的要求非常高。因此，尽管进行实时耦联动力试验的想法早在 20 世纪 80 年代就出现了，但是由于条件限制，直到 1992 年 Nakashima 等^[27]才首次发表了实时耦联动力试验的研究成果，一个位于多层建筑基底的阻尼器试验。其中，将阻尼器作为物理子结构，而将建筑物模拟为一个线性的单自由度系统。这一研究成果发表后，日本、欧洲、美国相继掀起了研

究这种新型试验方法的热潮，国内清华大学、哈尔滨工业大学等单位的一些研究者也开展了这方面的研究，表 1-1-2 列出了国内外部分研究机构及其主要研究者。

实时耦联动力试验主要的研究机构及学者 表 1-1-2

国别	单 位	研究机构	主要研究者
日本	University of Kyoto	防灾研究中心	M. Nakashima
	Hitachi, Ltd	机械工程研究实验室	T. Horiuchi
英国	University of Bath	建筑与土木工程系	A. P. Darby
	University of Oxford	工程科学系	M. S. Williams & A. Blakeborough
	University of Bristol	机械工程系	D. J. Wagg
	University of Bristol	Bristol 高级动力工程实验室	M. I. Wallace
美国	University of Buffalo	土木与环境工程系	A. M. Reinhorn & G. Mosqueda
	University of California at San Diego	结构工程系	P. B. Shing
	Lehigh University	土木与环境工程系	J. Ricles
	San Francisco State University	工学院	Cheng Chen
	Purdue University	土木工程系	Shirley J. Dyke
	Johns Hopkins University	土木工程系	Narutoshi Nakata
	University of Colorado at Boulder	土木、环境与建筑工程系	VictorSaouma
	University of Illinois at Urbana-Champaign	土木与环境工程系	B. F. Spencer Jr.
意大利	University of Trento	力学与结构工程系	O. S. Bursi
韩国	Dankook University	建筑工程系	Sung-Kyung Lee & Kyung-Won Min
中国	清华大学	水利水电工程系	金峰、王进廷
	哈尔滨工业大学	土木工程学院	吴斌

在目前发表的文献中，实时耦联动力试验方法还没有统一的命名标准。不同的研究者分别将其称为实时拟动力试验（real-time pseudo-dynamic testing）^[27]、实时在线试验（real-time online test）^[28]、实时耦联试验（real-time hybrid experiment）^[29]、实时子结构试验（real-time substructure test）^[30,31]、子结构振动台试验（substructured shaking table test）^[32]、实时耦联动力试验（real-time dynamic hybrid testing）^[33]、实时子结构动力试验（real-time dynamic substructuring）^[34]、实时拟动力子结构试验（real-time pseudo-dynamic sub-structure testing）^[35]、实时耦联振动台试验（real-time hybrid shaking table testing）^[36]等。Shao 和 Reinhorn^[37]提出以试验试件是否受到惯性力的作用作为区分动力试验和拟动力试验的标准；然而，Wallace 等人^[34]将物理子结构仅是一个弹簧的试验命名为实时子结构动力试验；Darby 等^[30]又将物理子结构分别是惯性质量、弹性元件和黏滞阻尼器的一组试验都命名为实时子结构试验。此外，子结构振动台试验^[32]和实时耦联振动台试验^[36]以振动台加载作为命名的标准；然而，同样采用振动台加载的实时子结构试验^[31]和实时拟动力子结构试验^[33]又没有区分加载装置。本书作者认为，尽管物理子结构和加载装置各有不同，但这些试验的本质是相同的，即通过耦联的数值计算和物理试验来模拟整体结构的动力响应，并按照实际加载速率进行数值计算和物理试验，因此本书统一采用“实时耦联动力试验”来命名这一类试验。