

Z YU GAOCENGGEZHEN DE
ZHINENGGEZHEN
LILUN YU SHIYAN

智能隔震与高层隔震的

理论与试验

付伟庆◎著

 黑龙江大学出版社

智能隔震与高层隔震的 理论与试验

付伟庆◎著



黑龙江大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

智能隔震与高层隔震的理论与试验/付伟庆著. —哈尔滨:黑龙江大学出版社, 2007. 12

(黑龙江大学学术文库)

ISBN 978 - 7 - 81129 - 031 - 8

I. 智… II. 付… III. ①智能建筑 - 建筑结构 - 隔震
②高层建筑 - 建筑结构 - 隔震 IV. TU243 TU973 TU352.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 203529 号

智能隔震与高层隔震的理论与试验

ZHINENGGEZHEN YU GAOCENGGEZHEN DE LILUN YU SHIYAN

付伟庆 著

出版发行	黑龙江大学出版社
地 址	哈尔滨市南岗区学府路 74 号 邮编 150080
电 话	0451 - 86608666
经 销	新华书店
印 刷	黑龙江省委党校印刷厂
版 次	2008 年 5 月 第 1 版
印 次	2008 年 5 月 第 1 次印刷
开 本	880 mm × 1 230 mm 1/32
印 张	4.625
字 数	110 千字
书 号	ISBN 978 - 7 - 81129 - 031 - 8/T · 1

定 价 19.00 元

凡购买黑龙江大学出版社图书,如有质量问题请与本社发行部联系调换

版权所有 侵权必究

前 言

隔震技术已被证明是一种减小地震动下建筑物灾害损失行之有效的方法。目前已建成大量的隔震结构,其中有的已经受住了实际地震动的考验。总的来说,对刚性结构的隔震技术研究已经较为成熟。在我国,2001年版的建筑抗震设计规范中已经列入隔震和消能减震设计一章。但随着经济和科学技术的发展,高层、超高层建筑在总建筑中的比例不断增多,同时也出现了一些重要的需特殊防护的建筑。对这类建筑应用隔震技术时,遇到了一些新问题需要研究和解决。为此,本书对隔震技术用于高层和特殊建筑物所面临的问题及解决方法进行了一些相关理论和试验的介绍。

本书第一章对国内外结构控制技术研究现状进行了介绍;第二章主要介绍了自主开发的一种流变液多功能测试装置,并利用均匀设计法设计获得了一种新的磁流变液配方;第三章介绍了采用高阶单步控制算法的磁流变阻尼器智能控制方法,并通过数值计算证明了这种控制方法的有效性;第四章对磁流变智能隔震这种新型隔震、减震系统的开发和试验进行介绍,通过相关数值模拟计算和振动台试验证明了这种控制系统的有效性;第五章主要介绍了橡胶垫大高宽比隔震结构模型的多维振动台试验情况,试验探讨了不同高宽比隔震结构在多维地震动

下的反应特点；第六章主要介绍了大高宽比隔震结构简化计算模型与设计理论，是在对原有简化模型进行修正的基础上，给出了一种新的、可考虑高阶振型和弯曲变形影响的简化计算模型，利用该模型可较为方便地对隔震结构地震最大反应进行预测，从而建立隔震结构实用设计方法。

本书是在我博士论文的基础上修改而成。在此衷心感谢导师哈尔滨工业大学土木工程学院王焕定教授多年来对我学业上的培养和生活中的帮助。

由于本人水平有限，书中不当之处恳请读者批评指正。

付伟庆

2007 年 10 月

目 录

1	国内外结构控制技术研究现状	1
1.1	结构振动控制技术的发展	2
1.2	国内外对智能控制的研究与应用现状	4
1.3	基础隔震技术研究与应用现状	13
2	电磁流变液测试装置与测试试验	19
2.1	平板式流变液测试装置的设计与制作	20
2.2	电、磁流变液的配制及性能测试	25
3	磁流变半主动控制的相关理论	35
3.1	磁流变体的力学模型及其阻尼器	36
3.2	控制算法	37
3.3	基于高阶单步法的 MR 控制数值模拟分析	39
3.4	基于第一振型的结构 MR 控制优化设计	44
4	磁流变智能隔震系统的理论与试验	50
4.1	磁流变智能隔震系统组成	51
4.2	隔震系统各部分简介	52
4.3	试验方案介绍	56
4.4	MR 被动控制的振动台试验结果分析	60
4.5	MR 半主动控制的数值模拟与试验结果分析	65
4.6	结构破坏性试验	74
5	LRB 隔震结构多维振动台试验	76
5.1	试验模型结构及其相似关系	76

5.2	隔震支座的选择与性能试验	78
5.3	振动台试验的试验方案	81
5.4	模型结构的白噪声试验分析试验	83
5.5	Y 向小高宽比隔震结构双向振动台试验分析	84
5.6	X 向大高宽比隔震结构双向振动台试验分析	89
5.7	隔震结构三向振动台试验分析	98
6	高层隔震结构实用设计方法	105
6.1	隔震结构等效双自由度模型及其改进	105
6.2	剪切型隔震结构等效三自由度模型 及其参数简化	106
6.3	规则型隔震结构等效三自由度模型 及其参数简化	116
6.4	高层隔震结构实用设计方法与设计实例	123
	参考文献	130

1 国内外结构控制技术研究现状

自然灾害(地震、暴风、海浪等)给人类的生命、财产造成了巨大损失,而灾害发生时建筑物的大量破坏和倒塌是造成这种损失的直接原因。随着经济的发展和社会的进步,一些高层、超高层、大跨空间结构不断涌现。这些结构在不加控制的情况下,抵抗风、地震作用的能力较弱,这又加剧了自然灾害对人类的威胁。1995年日本阪神地震中,死亡约5 000人,直接经济损失高达1 000亿美元,间接经济损失更高达2 000亿美元^[1]。1999年我国台湾集集大地震,死亡人数达2 103人,总死伤人数超过万人,损失惨重。

1972年,YAO基于控制理论首次提出了“结构振动控制”的概念^[2]。这是人类抗震发展史上的一座里程碑,为结构的震害预防开辟了新的思路。之后许多国家的学者对控制理论及其在结构工程中的应用进行了广泛深入的研究,相继提出了被动控制、主动控制、半主动控制、混合控制、智能控制等理论,并在实践中进行了一些应用,取得了良好的制震效果^[3-5]。在我国,结构控制的研究始于1980年王光远院士对高耸结构振动控制的一篇综合评述文章^[6],之后我国对振动控制技术的理论和实践研究相继展开^[7-9]。

1.1 结构振动控制技术的发展

主动控制的控制效果明显,控制范围广,但造价昂贵,控制的实施有很高的精度要求^[10]。国外学者在理论、试验和工程实践方面都做了许多工作^[2,10-23];国内很多学者在算法、装置及试验研究方面开展了大量研究^[24-26]。主动控制技术起步较晚,应用也不成熟。1989年 Soong 等人首次完成了主动控制实验 (AMD)^[19]。同年,日本东京建成了第一座用 AMD 进行主动控制的建筑。我国于 1996 年由刘季教授指导完成了 AMD 的主动控制实验^[27-28]。1999 年在南京电视塔的结构中安装了主动控制装置。

半主动控制是应用少量外部能量,对控制系统中结构参数进行实时改变来抑制结构的反应。半主动控制系统主要有两类:主动变刚度系统 (AVS) 和主动变阻尼系统 (AVD)。半主动控制技术的研究起步较晚,应用也不成熟^[23,29-31]。日本的 Kawashima 等人对变阻尼控制器进行了试验研究。我国孙作玉等人设计了一种半主动变阻尼控制系统,并进行了理论和震动台实验研究^[32-33]。李敏霞等设计了一种变刚度半主动控制装置,并进行了振动台试验研究^[34-35]。

被动控制因造价低廉,构造简单,性能稳定,且不需要外部能源,一般在中低层建筑中被广泛采用。被动控制又可分为基础隔震、耗能减震和吸振三大类。其研究和应用相对较早,也较为成熟,现已开发出多种隔震和耗能、吸能减震装置,如叠层橡胶隔震垫^[36-37]、摩擦滑移隔震装置^[38-39]、金属耗能器^[40-42]、摩擦耗能器^[43-45]、粘滞阻尼器^[46-49]、粘弹性耗能

器^[50-53]、调频质量阻尼器 (TMD)^[54-56]、调频液体阻尼器 (TLD) 等^[57-60]。

上述各种被动控制技术中, 隔震技术发展最为成熟, 有的已经得到了实际地震的检验。1993 年, 周福霖教授在汕头建成一幢用高阻尼夹层橡胶垫做隔震元件的八层框架楼。并于 1994 年成功地经受了一次小震的考验。1994 年美国洛杉矶大地震中, 南加州大学医院因采用橡胶支座隔震系统, 顶层最大加速度减小了 1.8 倍^[61]。1995 年日本阪神大地震, 两幢“橡胶垫基础隔震”房屋在强震中丝毫未损^[62]。截至 2005 年, 世界上应用隔震技术建成的建筑物总数已达 300 多座。我国已将隔震与消能设计列入结构抗震设计规范^[63]。

隔震体系经过多年推广和应用, 现在已经进入新的发展阶段, 同时也遇到了一些新的问题需要解决, 主要包括以下几个方面:

首先, 新型隔震系统的研究和开发。现在普遍采用的铅芯橡胶垫隔震支座, 相当于加入被动阻尼器, 在遭遇中小地震和风荷载时, 上部结构加速度和层间位移将要放大。这种过大的加速度将对一些如医院、通讯中心等特定建筑中的仪器造成损坏, 再由建筑物内物品散倒导致次生破坏^[64]。纵观隔震技术的发展, 已从对整体结构安全性的保护, 向确保内部设施不损坏发展, 这是对隔震技术更高的要求。

其次, 在高层建筑中应用隔震技术的理论和进行试验研究。近来, 隔震技术已不局限于中低层建筑, 在高层建筑中也有所应用。相对于中低层建筑, 对高层结构进行隔震无疑更具有性价比优势。但应该看到, 对于高层隔震结构, 无论是理论分析还是试验研究, 都还没有得到深入展开。

还有高性能夹层橡胶垫支座的研制和开发、隔震专用设计软件的编制等等。总之,隔震技术要向更广泛、更深入的领域应用和发展,还有许多问题需要解决。

1.2 国内外对智能控制的研究与应用现状

智能控制系统是以智能材料为主导,由智能材料调节器根据“感觉神经”测得的结构振动状态,自我调节智能材料结构构件的参数(或施加控制力),实现减小整个结构振动反应的目的^[8,65-66]。智能控制系统一般由传感器,智能驱动器,控制器及受控结构等组成,其具体执行过程如图1-1所示。

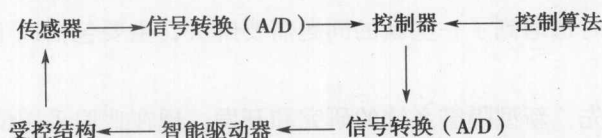


图 1-1 智能控制系统运行示意图

1.2.1 智能材料与智能驱动器

驱动器可以根据智能控制算法的计算结果,由控制器发出对应的指令,从而对结构施加控制力或位移,以抵抗结构的动力反应。驱动器所选用的智能材料一般有压电陶瓷(PE)、形状记忆合金(SMA)、磁致伸缩材料和电(磁)流变材料等。

1.2.1.1 压电材料

该材料在智能结构中既可作驱动器,也可作传感器,在受到一定方向的机械力后,在其两端产生符号相反且密度与机械

力成正比的约束电荷,依据此原理可将其制成智能传感器;另外,在外加电场作用下,材料将产生与电场强度成正比的变形或机械应力,因此可将其作成智能驱动器^[67-68]。现在应用较多的压电材料是压电陶瓷。

1.2.1.2 形状记忆合金(SMA)

该材料在结构振动控制中既可作被动控制的耗能器,也可作主动控制的驱动器。SMA在低温下弹性模量较低,具有超弹性,相变滞后性能,其应力应变曲线形成滞回环,可以吸收大量能量,故可以制成被动耗能器;而将其温度升高到一定程度时,它将产生很高的恢复应力和恢复应变,具有自动恢复形状的特性。如果抑制其恢复变形,则需要施加一个很大的力,因此可用其作主动控制的驱动器^[69-72]。

1.2.1.3 高磁致伸缩材料

这种材料一般用于振动控制中的驱动器。其机理是外界磁状态的改变引起材料产生应变,通过这种变形对结构施加力的作用。磁致伸缩材料一般是由铁、镍与一些稀有金属的合金制成的^[73-74]。

1.2.1.4 电磁流变液

电流变液(Eletrorheological Fluit, ER)或磁流变液(Magnetorheological Fluit, MR)是一种可控流体,是由不导电(磁)的母液(常为硅油或矿物油)和均匀散布其中的固体电解质颗粒或磁质颗粒加适量的稳定剂制成的非胶体性质的悬浮液。

1.2.2 智能控制器

控制器是控制系统的神经中枢。由它根据结构的瞬时振动

反应,依一定的控制策略去调整驱动器的瞬时参数,以实现减小结构振动反应的目的。

传统控制算法主要依据现代控制理论^[75],属于时域法。它主要是以状态空间方法为主要研究方法,以现代数学为主要分析手段,以计算机为主要实现工具,而对多变量线性系统和非线性系统进行研究。应用于控制的算法主要有以下几种:经典线性最优控制(LQG)^[76]、最优控制^[77]、独立模态空间控制^[78]、极点配置控制^[79]、主动自校正控制、滑动模态控制。它们在其适用范围内均有较好的控制效果。其中经典最优控制算法,因控制方式简单,且鲁棒性好,在振动控制中较为常用。

现代控制理论是基于模型的控制,通常认为模型已知或可以辨识得到。但对于大多数控制结构,难以建立精确的数学模型。当被控对象和过程复杂(高维,强耦合,时变系统),控制要求较高时(如要求系统具有自行规划和决策能力),现有方法就难以胜任了^[80]。

为了克服现代控制理论的不足和在实际应用中的局限性,人们提出了智能控制的概念。它研究的主要目标不再是被控对象,而是控制器本身。控制器也不是单一的数学解析模型,而是数学解析和知识系统结合的广义模型^[81]。一般认为智能控制主要包括神经网络、模糊控制、遗传算法三种方法。

1.2.2.1 神经网络

它是依靠事前的自我学习,得以逼近任意精度和复杂程度的非线性系统,达到给出一个输入,可以得出一个输出,而不需要知道输出和输入之间存在着怎样的数学关系。在地面地震动的激励下,结构将产生受迫振动,用神经网络进行结构振动控制时,将前几步的结构响应和控制信号作为神经网络的控

制器输入,由神经网络控制器计算出下一步应施加给作动器的控制信号,并由作动器施加振动控制^[82-83]。Amini^[84]和 Venini^[85]等对弹性、弹塑性结构的振动控制应用神经网络进行了分析。

1.2.2.2 模糊控制

它是依据有关专家的经验、知识等建立控制规则,依赖于模糊规则和模糊变量的隶属度函数,通过模糊推理计算出较优的控制力。模糊控制因无需知道输出和输入之间的数学依存关系^[86],而具有鲁棒性强的特点,尤其适合于非线性、时变、滞后系统的控制。模糊控制在结构振动控制中有所研究^[87-88], Battaini^[89]等用模糊控制对一个三层框架的 AMD 控制进行了研究, Michael^[90]等应用模糊算法对桥梁结构的半主动隔震方案进行了研究。

1.2.2.3 遗传算法

它是一种新发展起来的优化算法,是模拟达尔文的遗传选择和自然淘汰的生物进化原则进行搜索的算法。该算法应用“染色体”字符表示控制力,通过“复制、交叉、变异”等操作,根据适应度函数来判断控制力的优劣,伴随着算法的运行,优良的品质被逐渐保留并加以组合,从而不断产生出更佳的个体。这一过程犹如生物进化那样,好的特征被不断的继承下来,坏的特征被逐渐淘汰,从而使控制力不断的接近于最优解^[91]。已有研究^[92-95]将遗传算法应用在振动控制的仿真分析和土木工程的优化设计中,取得了一定效果。

此外还出现了模糊神经网络,遗传算法,优化神经网络方法以及用三者结合综合集成一个神经网络推理、控制和决策智

能信息处理系统等新的发展方向。

1.2.3 电、磁流变液的研究与应用

1.2.3.1 流变液的配制

Winslow 于 1947 年首次对电流变效应进行了报道^[96]。1948 年 Rabinow 发明了电流变液^[97]。磁流变效应几乎与电流变效应同时发现。同年, Rabinow 又在设计一个磁流体离合器时发明了磁流变体^[97]。由于电流变液的剪切屈服强度提高幅度不大以及电源电压过高等原因^[98], 人们转向研究磁流变液的研制与开发。20 世纪 90 年代, 人们通过改善磁质粒子的表面活性, 探寻更好的添加剂等途径来解决磁流变液的悬浮性和沉淀性, 收到了一定的效果, 近几年磁流变液的研究得到蓬勃发展。

磁流变液和电流变液作为性质相似的可控流体都有四个重要特点^[81]:

(1) 连续性, 随着电(磁)强度的变化, 流变液的屈服剪切力可连续变化;

(2) 可逆性, 两相流变液随着场强的变化可以在固相和液相之间相互转化;

(3) 响应时间短, 两相流变液跟踪场强度变化的精度可达 10^{-3} s 数量级;

(4) 耗能小, 一般只需十几瓦至二十瓦功率的能源。

但电流变和磁流变产生的机理不同, 因而它们的物理力学性能也有所不同, MR 相对 ER 主要优点是耗能更小, 驱动器提供的驱动力更大, 但 MR 长期的沉淀也较大。两者的物理力学性能比较见表 1-1。

表 1-1 电流变液和磁流变液性能比较

流变液	最大屈服应力/kPa	最大场强/kV · m ⁻¹	表观粘度/Pa · s	适用温度/℃
ER	2 ~ 5	0 ~ 4	0.2 ~ 1.0	10 ~ 90
MR	5 ~ 100	0 ~ 250	0.2 ~ 1.0	-50 ~ 150
流变液	杂质敏感度	响应时间	密度/g · cm ⁻³	耗电功率/W
ER	敏感	ms 级	1 ~ 2	2 ~ 500
MR	不敏感	ms 级	3 ~ 4	2 ~ 50

美国 Lord 公司的研究人员申请了磁流变液专利。Weiss 等人通过对磁性颗粒进行表面清洗、表面包覆等处理之后改善了磁流变体的流变性能和沉降稳定性^[99]；Phule 等人研究了纳米二氧化硅与聚合物 PVP 联合使用的方案来解决沉降问题和二次悬浮问题^[100]。

1989 年中国科学院化学研究所许元泽等研制成功了非水型的聚丙烯腈类电流变体，武汉工业大学瞿伟廉等配置了 ER 电流变液^[101]。清华大学，中国科学院物理研究所，中国科技大学，复旦大学等也陆续开始了电流变流体和电流变应用方面的工作。1997 年成都电子科技大学杨仕清等发表了磁流变液制备和性质研究的论文^[102]。复旦大学，中国科技大学，哈尔滨工业大学，哈尔滨建筑大学进行了磁流变液的配制和测试设备的研制。

1.2.3.2 电（磁）流变液器件的研究与进展

电流变器件的大规模研究始于 20 世纪 80 年代。器件的应用涉及汽车、机械、航空等多个领域。这些器件有减震隔震装置、离合器、制动器、液压阀门、电器开关和各种精密仪器、

测试仪器等。但由于电流变液自身性能的局限,至今商品化的电流变器件还未得到广泛应用。

磁流变器件由于磁流变液的悬浮性、沉降性的问题,应用发展一直很缓慢。直到 20 世纪 90 年代,液体的悬浮性、沉降性得到一定程度的改善,有关磁流变体应用的专利和文献才大量出现。

对磁流变液最多的应用是用其做成减震装置,美国 Lord 公司在这方面作了大量的工作。他们配置了六种合金磁流变液,并于 1995 年展示了三种磁流变产品:车座位减振器,磁流变体刹车器和主动型减振器,这些器件应用在汽车上,可大大增加乘客的安全性和舒适性。1996 年,设计制造的 200 kN 磁流变阻尼器就是 Lord 公司和美国 Notre Dame 大学合作完成的^[103],该阻尼器可用于土木工程结构的振动控制。

我国对电(磁)流变液应用研究开始较晚。上海交通大学汪建晓等研究了磁流变液阻尼器用于转子振动控制^[104];重庆仪表材料研究所张平等针对汽车智能减振器的应用进行了系统研究^[105];重庆大学智能结构研究中心廖昌荣对基于 Poiseuille 流动的汽车磁流变减振器进行了力学分析和测试^[106]。1999 年哈尔滨建筑大学欧进萍、关新春设计出了应用于结构振动控制的驱动器,分析了其动力工作性能^[107-109]。但国内磁流变液的研制和应用仍落后于国外,很多方面还急需完善。

1.2.3.3 磁流变器件在土木工程中的应用

目前,大量针对磁流变阻尼器的结构振动控制的研究已经展开。美国学者 Dyke (1996) 等人研究了用四个 MR 阻尼器控制结构地震反应的一座六层钢框架,限幅最优半主动控制结构的顶层绝对加速度与原结构相比减少了 62%,与被动控制