

# 结构振动逻辑控制

陈静摇著

# 内 容 简 介

本书是目前国内出版的第一本关于结构振动逻辑控制方面的专著。

本书共分 9 章,详细介绍结构振动逻辑控制的理论、计算机仿真和试验研究。作者以带裙房高层建筑结构为典型对象,将基于泛布尔代数的逻辑控制引入结构振动控制中,建立具有工程应用价值的半主动逻辑控制算法,包括逻辑控制、鲁逻辑控制、月逻辑控制、悦逻辑控制、阅逻辑控制、耘和逻辑控制、云等 7 种,并将其运用于带裙房高层建筑地震反应鞭梢效应的控制,进行世界上首次单轴、双向阻尼器耦联的带裙房高层建筑结构地震反应的振动台试验并取得成功。

本书可供控制科学与工程和结构工程领域的研究生、大学教师和研究人员学习参考。

摇图书在版编目(CIP)数据

摇结构振动逻辑控制 靳静著 ①—北京:国防工业出版社, 2003

摇 ISBN 7-118-03111-1

摇 I ①结 ②靳 ③靳 ④结构振动 ⑤逻辑控制 ⑥  
IV ⑥

摇中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 000000 号

(北京市海淀区紫竹院南路 10 号)

(邮政编码 100088)

北京奥鑫印刷厂印刷

新华书店经售

\*

开本 787mm×1092mm 1/32 印张 4 插页 0 千字

2003 年 1 月第 1 版 2003 年 1 月北京第 1 次印刷

印数 1—1000 册 定价 15.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68401414 发行邮购:(010)68401414

发行传真:(010)68401414 发行业务:(010)68401414

# 前摇摇言

结构振动控制是指在工程结构特定部位,设置某种控制装置或某种机构或某种子结构或施加外力,改变或调整结构的动力特性或动力作用,以减小结构振动反应的技术,它综合了控制理论、计算机技术、新材料和结构振动理论等学科的最新研究成果和技术,是一门新兴的交叉学科。

建筑结构抗震能力是影响地震损失的主要因素。为了降低地震给人类带来的灾难,研究更可靠、更经济的结构新体系是十分必要的。结构振动控制就是在这种形势下发展起来的。1969年美籍华人姚治平(姚振环)提出土木工程振动控制的概念以来,经过广大科学家和工程师们的不断努力,结构振动控制的研究从理论、试验到应用等方面都取得了可喜的发展。

结构振动控制的研究主要集中在两个方面:一方面是振动控制装置的研究和应用;另一方面是控制算法的研究和应用。

目前已研制出来多种控制装置并得到了广泛的运用。控制算法的研究推动了控制技术的进步和发展,使结构振动控制技术由被动控制发展到主动控制、混合控制和半主动控制。被动控制、主动控制、半主动控制和混合控制的划分是依据被控系统是否有外部能源输入:被动控制无需外加能源,其控制力是控制装置随结构一起振动变形而被动产生的;主动控制是有外加能源的控制,其控制力是控制系统根据结构反应按某种控制算法控制主动控制器产生需要的控制力;半主动控制是一种有少量外加能源的控制,其控制力是控制装置本身的运动而被动产生的,但在控制过程中控制系统根据结构反应按某种控制算法调节半主动控制装置的参数,从而起到调节控制力的作用;混合控制是主动控制和被动控制的有机结合形成的控制方法,有部分能源输入。

人们相继研究出了可调摩擦阻尼器、可调整的调谐阻尼器和可控液体阻尼器等智能阻尼器,将其应用于结构控制中,从而形成半主动控制系统,它能达到主动控制系统的控制性能,所需能量少,在整个带宽范围内能有效地降低结构反应,可靠性高,反应快,性价比高。半主动控制在实际应用中有着广阔的前景。半主动控制系统包括主动变刚度系统、半主动变阻尼系统、半主动摩擦阻尼器系统和可控液体阻尼器系统。

可控液体阻尼器包括 磁流变阻尼器(磁流变液)和 电液阻尼器

(粘滞阻尼器、摩擦阻尼器)两种,它们是结合近年来受到广泛关注的新型智能阻尼器。磁流变阻尼器是利用磁流变液的磁流变效应制作出的智能阻尼器。采用磁流变阻尼器,配以合适的半主动控制算法,能够对结构振动反应控制提供变阻尼,能够适应不同地震强度振动控制的需要,对结构的振动控制具有自适应能力。磁流变阻尼器是一种失效——安全型的阻尼器,即在控制系统(如电源、硬件设备、控制软件)失效后,磁流变阻尼器仍然能够作为一种被动控制的阻尼器来抑制结构的振动。因此,磁流变阻尼器是目前结构减振控制最有效的半主动控制装置,采用磁流变阻尼器来实现振动控制成为结构控制领域的一个重要的研究方向。磁流变阻尼器使用磁流变液产生可变阻尼力,具有高非线性特点。长期以来,人们一直在寻求适应磁流变阻尼器的非线性特点、工程实现容易的控制算法。

带裙房的高层建筑是一种普遍存在的结构体系。裙房一般都建造在地下室的箱型基础或筏式地下室基础之上,高层建筑与裙房结构之间不设沉降和抗震缝而直接连在一起。这样,裙房的侧移刚度比主楼要大得多,导致裙房与主楼结构的过渡处会形成结构层间侧移刚度的突变,从而引起主楼结构地震反应的鞭梢效应,用传统抗震设计方法不容易解决。对带裙房高层建筑结构地震反应控制,瞿伟廉教授和徐幼麟教授进行了理论研究,探索使用磁流变阻尼器连接主楼与裙房来抑制结构地震反应鞭梢效应,将主楼与裙房脱开,用磁流变阻尼器耦联主楼与裙房,采用合适的控制算法抑制主楼地震反应的鞭梢效应。这一成果为解决带裙房高层建筑的抗震问题奠定了理论基础,是目前国际上这一领域的最新成果。

建筑结构振动控制经常采用的方法,一是使用基于传递函数模式的频域分析方法的经典控制理论,二是使用基于状态方程模式的时域分析法的现代控制理论。其共同特点都是基于模型的控制,包括控制对象模型和外部扰动模型,通常认为模型是已知的或经过辨识可以建立的。然而,结构振动控制是十分复杂的,对于建筑结构这种控制对象建立精确的数学模型是比较困难的,仍存在一些问题和实际的困难,缺乏实用、简便及有效的分析和控制方法。因此开展结构智能控制的研究对有效解决当前存在的问题,提高结构的抗震能力,减少震害损失具有重要意义。

控制理论经历了经典控制理论、现代控制理论和智能控制理论等几个发展阶段。经典控制理论主要用于线性小规模系统的自动化领域,现代控制理论在大规模线性多变量系统中得到了广泛应用,智能控制理论则对于非线性复杂系统取得突出的成绩。张南纶教授在控制方面,发现了系统最小逻辑单元,即泛布尔代数中的最小项对应于控制系统的最基本性能,给出了相应适当的控制作用,系统可以用单一控制作用来完成最基本性能的指标,从而得到良好的性能,甚至于改变了对象模型还能保持良好的性能。实现这种控制便成为一种新的逻辑控制器,也是一种新型的智能控制器。基于泛布尔代数的逻辑控制方法在工业领域中得到了成功的应用,本人对基于泛布尔代数的逻辑控制方法进行比较深入的研究,运用基于泛布

尔代数的逻辑控制方法实现对造纸机、空调机温度的智能控制。

本书以典型建筑结构——带裙房高层建筑为研究对象,结合国家自然科学基金重点项目“土木工程结构振动的智能控制”和香港理工大学资助项目,根据带裙房高层建筑抗震设计中存在的抗震难题和结构特点,运用控制理论、计算机控制技术与工程结构理论的深度结合,采取理论分析、计算机仿真和地震模拟振动台试验等手段,利用学科交叉的优势,将基于泛布尔代数的逻辑控制方法引入结构振动控制领域,探索一种实用高效的智能半主动控制方法,并进行相应的地震模拟振动台试验。

本书论述了以下一些主要内容。

根据带裙房高层建筑抗震设计中存在的抗震难题和结构特点,针对带裙房高层建筑地震反应的鞭梢效应问题,采取理论分析、计算机仿真和地震模拟振动台试验等研究手段,首次将基于泛布尔代数的逻辑控制方法引入结构控制领域,创新地提出半主动逻辑控制方法,包括逻辑控制、 $\mu$ 逻辑控制、 $\lambda$ 逻辑控制、 $\nu$ 逻辑控制、 $\omega$ 逻辑控制、 $\sigma$ 和逻辑控制云等远种。为此,首先分析研究逻辑控制的机理,进行仿真试验研究,理论上证明提出的半主动逻辑控制方法的有用性,进行实际应用,并分析其控制性能和鲁棒性。为有效控制由 $\mu$ 阻尼器耦联的带裙带房高层建设结构因地震反应引起的鞭梢效应提供可行的技术方法,丰富振动控制理论。

1994年~1995年在香港理工大学,我们进行了世界上首次单 $\mu$ 阻尼器耦联的带裙房高层建筑结构地震反应的数字仿真和地震模拟振动台系列试验。设计和制作 $\mu$ 阻尼器耦联的带裙房高层建筑的试验结构模型,对结构模型的动力特性进行理论计算与实时测试。成功地将国际上的先进半实物仿真系统 $\mu$ 应用到试验控制系统中,开发相应的控制软件,提出控制软件的设计方法,为在国内推广使用 $\mu$ 起到指导性作用。采用面向对象的程序设计方法,用 $\mu$ 控制 $\mu$ 控制 $\mu$ 控制 $\mu$ 控制工具开发 $\mu$ 阻尼器耦联的带裙房高层建筑的仿真系统,并成功地进行仿真试验。创新地提出控制软件设计中的“自动数据分析法”及其软件设计。建立振动台试验系统,开发试验控制软件。

针对工程应用,进行多 $\mu$ 阻尼器耦联的带裙房高层建筑振动台试验,解决多 $\mu$ 阻尼器实际应用存在的关键问题,提出传感器布置的一般原则,确定试验结构模型响应的获取方法与观测点的选取,并用振动台试验进行验证,解决实际工作中的疑难问题,为推动这项工程的实际应用奠定基础。

地震模拟振动台试验结果表明: $\mu$ 阻尼器的 $\mu$ 控制方式是外部电源被切断时的最低控制效果,能消除带裙房高层建筑地震反应的鞭梢效应,并使主楼和裙房的地震反应有一定的减少,远种逻辑控制的减振效果比 $\mu$ 控制方式更好,多 $\mu$ 阻尼器控制的效果优于单 $\mu$ 阻尼器。本书提出的半主动逻辑控制方法的主要优点是快速、简单,不需要控制对象和 $\mu$ 阻尼器的数学模型,能充分应用



# 目 录

第 1 章 绪论.....	1
1.1 结构振动控制.....	1
1.2 智能阻尼器和结构半主动控制.....	1
1.3 智能控制算法.....	2
1.4 可调阻尼器半主动控制算法.....	2
1.5 基于鲁棒控制理论的智能控制.....	2
1.6 分散式开关控制.....	2
1.7 最大能耗控制.....	2
1.8 部分最优控制.....	2
1.9 均匀调节摩擦力控制.....	2
1.10 本书主要内容.....	2
第 2 章 半主动控制系统.....	3
2.1 可调阻尼器耦联的带裙房高层建筑半主动控制系统.....	3
2.2 结构模型设计.....	3
2.2.1 结构模型.....	3
2.2.2 独立主楼.....	3
2.2.3 独立裙房.....	3
2.2.4 原结构.....	3
2.2.5 单阻尼器耦联结构.....	3
2.2.6 多阻尼器耦联结构.....	3
2.3 结构模型参数、自振频率和振型计算.....	3
2.3.1 结构模型参数、自振频率和振型计算系统开发.....	3
2.3.2 独立主楼、独立裙房和原结构的质量与侧移刚度矩阵.....	3
2.3.3 结构模型的自振频率和振型计算.....	3
2.4 结构模型动态特性测试.....	3
2.4.1 结构模型动态特性测试系统设计.....	3
2.4.2 加速度传感器的布置及参数设置.....	3
2.4.3 信号采样频率的确定.....	3

摇摇圆猿猿摇结构模型动态特性测试结果分析方法 .....	圆愿
摇摇圆猿猿摇结构模型动态特性计算值与测试结果的比较 .....	猿园
圆猿猿摇地震反应方程 .....	猿源
摇摇圆猿猿摇无 酗阻尼器的单质点水平运动方程 .....	猿源
摇摇圆猿猿摇独立主楼、独立裙房和原结构的地震反应方程 .....	猿源
摇摇圆猿猿摇酗阻尼器耦联的单质点水平运动方程 .....	猿缘
摇摇圆猿猿摇酗阻尼器耦联的带裙房高层建筑结构地震反应方程 .....	猿远
圆猿猿摇电流控制器 .....	猿远
摇摇圆猿猿摇电流控制器调节原理 .....	猿苑
摇摇圆猿猿摇电流控制器的操作方式 .....	猿苑
摇摇圆猿猿摇电流控制器的特性测试 .....	猿愿
圆猿猿摇酗阻尼器特性测试与建模 .....	猿怨
摇摇圆猿猿摇酗阻尼器的选取 .....	猿怨
摇摇圆猿猿摇测试系统建立 .....	猿怨
摇摇圆猿猿摇酗阻尼器的特性测试 .....	源园
摇摇圆猿猿摇摩擦型 酗阻尼器的动态特性方程 .....	源园
第猿猿章摇摇逻辑控制 .....	源猿
猿猿猿摇逻辑控制的基本概念 .....	源猿
摇摇猿猿猿摇逻辑上的概念及术语 .....	源猿
摇摇猿猿猿摇系统运动的概念及术语 .....	源猿
摇摇猿猿猿摇逻辑控制模型及逻辑控制 .....	源源
猿猿猿摇逻辑控制的数学工具——泛布尔代数 .....	源源
猿猿猿摇逻辑控制系统组成 .....	源源
猿猿猿摇逻辑控制原理 .....	源源
猿猿猿摇逻辑控制的特点 .....	源苑
猿猿猿摇逻辑控制的工业应用 .....	源愿
摇摇猿猿猿摇纸机纸张定量智能逻辑控制 .....	源愿
摇摇猿猿猿摇空调机温度智能逻辑控制 .....	缘园
第源章摇摇半主动逻辑控制方法 .....	缘猿
源源猿摇基于速度和位移反馈的单 酗阻尼器半主动逻辑控制方法 .....	缘猿
摇摇源源猿摇逻辑控制 粤的控制规则 .....	缘猿
摇摇源源猿摇逻辑控制 粤的逻辑控制模型 .....	缘苑
摇摇源源猿摇逻辑控制 粤的输出变换 .....	缘愿
源源猿摇基于加速度反馈的单 酗阻尼器半主动逻辑控制方法 .....	缘愿
摇摇源源猿摇逻辑控制 月的控制规则 .....	缘愿

摇摇源摇摇逻辑控制 月的逻辑控制模型 .....	缘
摇摇源摇摇逻辑控制 月的输出变换 .....	远
摇摇源摇摇柔性的单 酞阻尼器半主动逻辑控制方法 .....	远
第 缘章摇摇仿真研究 .....	远
缘摇摇仿真输入 .....	远
缘摇摇酞阻尼器仿真 .....	远
缘摇摇结构地震反应仿真 .....	远
摇摇缘摇摇结构地震反应仿真系统设计 .....	远
摇摇缘摇摇结构仿真模型 .....	远
摇摇缘摇摇结构地震反应仿真结果 .....	远
摇摇缘摇摇仿真结果比较分析 .....	远
缘摇摇单阻尼器耦联结构地震反应仿真系统设计 .....	远
缘摇摇孕有阻尼器控制仿真结果 .....	苑
缘摇摇逻辑控制 粤 逻辑控制 月和逻辑控制 悦控制仿真结果 .....	苑
第 远章摇摇振动台试验系统及软件设计方法 .....	苑
远摇摇振动台试验系统设计 .....	苑
远摇摇地震模拟振动台 .....	苑
远摇摇试验控制系统设计 .....	苑
摇摇远摇摇粤孕悦实时仿真系统开发方法 .....	苑
摇摇远摇摇粤孕悦硬件系统 .....	苑
摇摇远摇摇粤孕悦软件系统 .....	苑
远摇摇结构响应的获取方法 .....	愿
摇摇远摇摇传感器布置的一般原则 .....	愿
摇摇远摇摇结构响应的获取方法 .....	愿
远摇摇试验软件设计方法 .....	愿
摇摇远摇摇控制程序设计方法 .....	愿
摇摇远摇摇试验控制平台设计方法 .....	愿
摇摇远摇摇试验结果的处理分析程序设计方法 .....	愿
远摇摇自动数据分解法 .....	愿
第 苑章摇摇单阻尼器耦联结构半主动逻辑控制振动台试验 .....	愿
苑摇摇翻原灾地地震波 .....	愿
苑摇摇控制程序设计 .....	愿
摇摇苑摇摇信号处理 .....	愿
摇摇苑摇摇控制器 .....	愿
摇摇苑摇摇输出 .....	愿

第 7 章 摇试验控制平台设计 .....	709
第 8 章 摇结构地震反应的振动台试验结果 .....	726
第 9 章 摇多自由度控制试验结果比较分析 .....	739
第 10 章 摇逻辑控制试验结果比较分析 .....	757
第 11 章 摇半主动逻辑控制方法控制性能研究 .....	770
11.1 摇部分最优控制 .....	770
11.2 摇部分最优闭环控制 .....	770
11.3 摇部分最优控制算法 .....	776
11.4 摇部分最优控制试验 .....	789
11.5 摇不同激励下的地震模拟振动台试验 .....	792
11.6 摇控制性能分析 .....	799
第 12 章 摇多阻尼器耦联结构半主动逻辑控制 .....	808
12.1 摇多 2 自由度阻尼器半主动控制 .....	808
12.2 摇观测点的选取 .....	819
12.3 摇基于速度和位移反馈的多 2 自由度阻尼器半主动逻辑控制方法 .....	829
12.3.1 摇多观测点逻辑控制 .....	829
12.3.2 摇单观测点逻辑控制 .....	830
12.4 摇基于加速度反馈的多 2 自由度阻尼器半主动逻辑控制方法 .....	836
12.4.1 摇多观测点逻辑控制 .....	836
12.4.2 摇单观测点逻辑控制 .....	839
12.5 摇柔性的多 2 自由度阻尼器半主动逻辑控制方法 .....	846
12.5.1 摇多观测点逻辑控制 .....	846
12.5.2 摇单观测点逻辑控制 .....	846
12.6 摇试验系统及其控制系统设计 .....	852
12.7 摇振动台试验及其结果比较分析 .....	858
12.7.1 摇多自由度控制地震反应振动台试验 .....	858
12.7.2 摇单观测点逻辑控制地震反应振动台试验 .....	860
12.7.3 摇多观测点逻辑控制地震反应振动台试验 .....	860
12.7.4 摇多观测点逻辑控制与单观测点逻辑控制的控制试验 结果比较 .....	866
12.7.5 摇逻辑控制 阅 逻辑控制 耘和逻辑控制 云控制性能比较分析 .....	872
12.8 摇逻辑控制 阅 逻辑控制 耘和逻辑控制 云的适应性和鲁棒性 .....	888
12.9 摇半主动控制系统可靠性分析 .....	899
参考文献 .....	909

# 第 11 章 绪论

## 11.1 结构振动控制

结构振动控制是近年来发展起来的一门新兴学科,综合控制理论、计算机技术、新材料和结构振动理论等学科的最新研究成果和技术。结构振动控制是指在工程结构特定部位,设置某种控制装置或某种机构或某种子结构或施加外力,改变或调整结构的动力特性或动力作用,以减小结构振动反应的技术。

然而,结构振动控制是十分复杂的。目前,使用基于传递函数模式的频域分析方法的经典控制理论和基于状态方程模式的时域分析法的现代控制理论,是建筑结构振动控制经常采用的方法。这两种方法的共同特点都是基于模型的控制,包括控制对象模型和外部扰动模型,通常认为模型是已知的或经过辨识可以建立的。虽然现代控制理论从理论上解决系统的可观、可控、稳定性以及许多系统的控制问题,但用于结构振动控制仍然存在一些问题和实际的困难,如对于建筑结构这种控制对象,建立精确的数学模型是比较困难的,缺乏实用、简便及有效的分析和控制方法。结构智能控制方法为解决该问题开辟了一条有效的途径。因此开展结构智能控制的研究对有效解决当前存在的问题,提高结构的抗震能力,减少震害损失具有重要意义。

建筑结构抗震能力是影响地震损失的主要因素。为了降低地震给人类带来的灾难,在经济条件允许的情况下,增强建筑结构的抗震能力是十分必要的。传统的建筑结构体系是通过增强结构构件的抗力、增加延性等措施储存和耗散地震能量,以满足结构的抗震设计要求,通过增强结构本身性能来“抵御”地震作用的。然而,这种方法存在一定的局限性:

(1) 安全性难以保证。目前抗震设计方法是以既定的“设防烈度”作为设计依据的。但由于目前人们不能准确地估计结构未来可能遭遇的地震的强度和特性,因此一旦发生超过“设防烈度”的地震时,结构难以达到安全的指标。

(2) 适应能力差。地震具有随机性,但目前还不能准确把握其变化规律。传统设计方法还不能做到在实际地震来临时,结构根据地震动的特性(强度、频谱、持时)进行自我调节,因此其适应性是有限的。

(3) 工程造价高。传统设计方法是以“抵抗”地震作用为主要手段的,如加大

结构的截面尺寸,提高材料强度等级,加大配筋量等手段,都必将增加工程的造价。

因此,这些被动的抗震方法不能从根本上解决抗震防灾问题,研究更可靠、更经济的结构新体系是十分必要的。结构振动控制就是在这种形势下发展起来的,有望彻底解决这些问题。

自1974年美国籍华人姚治平提出土木工程振动控制的概念以来,经过广大科学家和工程师们的不断努力,结构振动控制的研究从理论、试验到应用等方面都取得了可喜的发展。

按被控系统是否有外部能源输入,结构振动控制可分为被动控制、主动控制、半主动控制和混合控制四种,如图1-1所示。

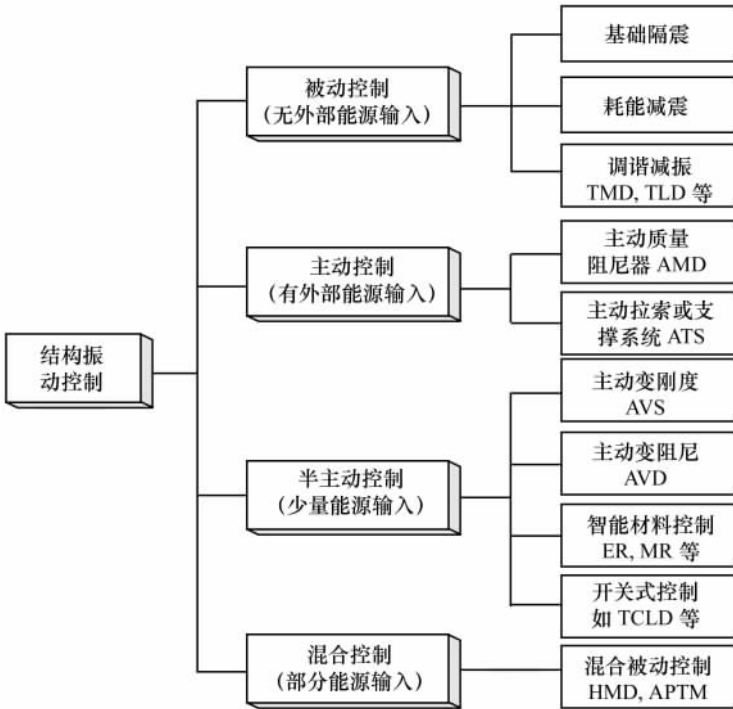


图 1-1 结构振动控制分类(按是否输入外部能源)

被动控制无需外加能源,其控制力是控制装置随结构一起振动变形(即控制装置本身的运动)而被动产生的。主动控制是有外加能源的控制,其控制力是控制系统根据结构反应按某种控制算法控制主动控制器产生需要的控制力。半主动控制是一种有少量外加能源的控制,其控制力是控制装置本身的运动而被动产生的,但在控制过程中控制系统根据结构反应按某种控制算法调节半主动控制装置的参数,从而起到调节控制力的作用。混合控制是主动控制和被动控制的有机结

合形成的控制方法,有部分能源输入。

半主动控制系统既有潜力提高被动控制系统的减振性能,又有多样性和自适应性。相对主动控制而言,半主动控制系统没有控制失稳的潜在可能,具有一定的可靠性和鲁棒性,并具有低能耗和易维护的优点。相对于被动控制而言,它们能通过结构响应动态地调整控制装置的参数,从而改善被动控制装置的减振性能。

## 猿 智能阻尼器和结构半主动控制

猿年来,人们非常关注使用控制系统来减轻地震或强风对土木工程结构造成的危害。结构振动控制的研究主要集中在两个方面:一方面是振动控制装置的研究和应用;另一方面是控制算法的研究和应用。

到目前为止,已经有很多种控制装置研制出来并得到了广泛的运用。控制算法的研究推动了控制技术的进步和发展,使结构振动控制技术由被动控制发展到主动控制、混合控制和半主动控制。

结合被动控制和主动控制的优点,人们相继研究出了可调摩擦阻尼器、可调整的调谐阻尼器和可控液体阻尼器等智能阻尼器,将其应用于结构控制中,从而形成半主动控制系统,它能达到主动控制系统的控制性能,而且它内在稳定,不增加结构系统的机械能,所需能量少,在整个带宽范围内能有效地降低结构反应,可靠性高,反应快,性价比高。因此,半主动控制在实际应用中有着广阔的前景。半主动控制系统主要包括:

(猿) 主动变刚度系统。在建筑物层间设置变刚度斜撑,通过不同层上变刚度斜撑工作状态的实时调整与切换,实现当前结构刚度的最佳组合,达到反共振的目的。

(圆) 半主动变阻尼系统。在结构的一定部位设置变阻尼控制装置,根据控制的需要实时地改变结构的阻尼特性,提供所需的变阻尼控制力。变阻尼构件阻尼特性的变化可通过改变液压伺服系统的油路通路来实现,如流体粘滞阻尼器。

(猿) 半主动摩擦阻尼器系统。在结构的一定部位设置半主动摩擦阻尼器,根据控制的需要实时地改变构件的摩擦力,从而提高摩擦阻尼器的减振性能。

(源) 可控流体阻尼器系统。在结构的一定部位设置可控流体阻尼器,在控制过程中控制系统根据结构反应按某种控制算法调节可控流体阻尼器的参数,从而起到调节控制力的作用。可控流体阻尼器包括 耘 阻 尼 器 和 磁 流 变 液 阻 尼 器 两 种,它们是结合近年来受到广泛关注的新型智能阻尼器。电流变液或磁流变液在电场或磁场下可由液态变为半固态,并能通过改变电场或磁场改变可控流体屈服强度达到调整阻尼器对结构的控制力,从而实现了对结构的振动控制。

磁流变液是利用磁流变液的磁流变效应制作出的智能阻尼器。磁流变液是

用不导电的母液和均匀散布在其中的固体磁介质颗粒所制成的悬浮体。用作母液的通常为硅油和矿物油等,用作固体颗粒的可以是无机非金属颗粒或用纳米技术制作的无机有机纳米复合粒子。在磁场的作用下,磁流变液会形成一束束由固体颗粒组成的纤维状的“链”,横架于磁极之间,这时,磁流变液就由流动性良好的具有一定粘滞度的牛顿流体转变为有一定剪切屈服应力的粘塑性体,即所谓的“硬化”。随着磁场的加强,这种剪切屈服应力会有相当的增高。这是磁流变液的主要特性,也就是通称的磁流变效应,它具有以下三个特点:

(一) 连续性。可随着磁场强度的变化而连续变化。

(二) 可逆性。既可顺着磁场强度的增大而“变硬”,又可逆着磁场的解除而又变为流体。

(三) 响应速度快。磁流变液力学性能随磁场的变化在毫秒数量级内完成。

利用磁流变阻尼器作振动控制有以下优点:

(一) 采用磁流变阻尼器,配以合适的半主动控制算法,能够对结构振动反应控制提供变阻尼,能够适应不同地震强度振动控制的需要,对结构的振动控制具有自适应能力。

(二) 磁流变阻尼器是一种失效—安全型的阻尼器,即在控制系统(如电源、硬件设备、控制软件)失效后,磁流变阻尼器仍然能够作为一种被动控制的阻尼器来抑制结构的振动。

因此在结构控制领域中出现了一个重要的研究方向:采用磁流变阻尼器来实现振动控制。

目前,许多学者已对磁流变阻尼器的动力力学特性及其应用进行了广泛的理论和试验研究,并成功地应用于实际工程中。倪喜强和辛泽霖指出了磁流变阻尼器能够获得高屈服应力,其工作的温度范围可以从原屈服到真屈服。陈建和阎焱焱给出了磁流变阻尼器的动力力学特性。再森早郎和奈良雄设计了一个能够提供四倍屈服力的磁流变阻尼器,完成了从试验室到实际应用的研究。辛泽霖给出了适合磁流变阻尼器的各种力学模型,并作出了相应的比较。应用磁流变阻尼器,阎焱焱和奈良雄等人完成一个三层框架结构模型地震反应半主动控制的振动台试验,并建立了框架结构振动反应控制的一系列方法。

磁流变阻尼器是目前结构减振控制最有效的半主动控制装置,它使用磁流变液产生可变阻尼力,具有高非线性的特点。长期以来,人们一直在寻求适应磁流变阻尼器的非线性特点、工程实现容易的控制算法,并为此先后将多种控制方法引入结构振动控制领域,进行了大量的研究和应用。

高层建筑是一种普遍存在的结构体系。随着人口的增加,有用土地的减少,集中服务设施的增多,现代化都市常常修建许多高层建筑,其中一些是带裙房的高层建筑。裙房一般都建造在地下室的箱型基础或筏式地下室基础之上,因此大多数

钢筋混凝土的高层建筑与裙房结构之间不设沉降和抗震缝而直接连在一起。这样,裙房的侧移刚度比主楼要大得多,导致裙房与主楼结构的过渡处会形成结构层间侧移刚度的突变,从而引起主楼结构地震反应的鞭梢效应,用传统抗震设计方法不容易解决。

带裙房高层建筑结构地震反应的控制,实际上可归于耦联双塔楼地震反应控制领域。目前对耦联双塔楼结构地震反应的被动控制国际上已进行了较多的研究,对耦联双塔楼结构的主动控制或半主动控制,目前研究还不多。

1969年美国的运肇社首次提出了双高层建筑耦联的概念,1971年日本的运铁郎和藤井提出了耦联的多塔结构。在20世纪80年代中期,运肇社和勾藤建建议用可拉紧和松弛的索来耦联双塔楼实现结构风振反应的半主动控制,他们观察到对有不同自振频率的双塔结构才能用一根索耦联实现结构风振反应的半主动控制。同时建议索耦联的位置在结构的顶层,因为顶层的模态幅值不为0。20世纪90年代,随着结构控制的发展,对耦联结构的研究再度复兴。1991年建立了一个单自由度的双塔结构模型,采用了被动与主动控制算法,结果表明耦联主动控制算法对于抑制两个耦联建筑的振动反应是十分有效的。进一步的研究证明了被动与主动控制对耦联双塔结构的有效性。1993年运老和云梁等对耦联的高耸双塔结构进行了被动控制的研究,而德和载等已经研究了用被动控制装置来耦联低塔结构。他们的研究均说明了他们采用的控制方法能有效控制双塔结构的风振和地震反应。云梁等与运肇社和勾藤建研究结论一样,再次证明了耦联的索的安装位置的重要性。云梁和再老等对耦联的高柔双塔结构进行了研究,用主动控制方法能有效控制结构的地震反应,获得了显著的效果,成功地控制了圆个和猿个相邻高柔结构模型的前圆个模态。袁建在1995年提出了对耦联建筑的主动和智能阻尼控制算法,计算结果表明智能阻尼半主动控制算法实现的抗震效果已接近主动控制算法。这表明对于双塔楼结构的振动反应应用的半主动控制方法是十分有效的。

针对带裙房高层建筑结构地震反应控制,瞿伟廉教授和徐幼麟教授进行了理论研究,探索使用阻尼器连接主楼与裙房来抑制结构地震反应鞭梢效应的可能性。他们指出解决问题的关键,将主楼与裙房脱开,用阻尼器耦联主楼与裙房,采用合适的控制算法能有效地抑制主楼地震反应的鞭梢效应,并对此进行了理论分析与数字仿真研究。这一成果为解决带裙房高层建筑的抗震问题奠定了理论基础,是目前国际上这一领域的最新成果。

## 员猿 智能控制算法

从控制理论发展历史来看,控制理论分为经典控制理论、现代控制理论和智能



糊控制。但由于模糊控制是一种基于模糊规则的控制,而模糊规则是人们对受控对象认识的归纳和控制经验的总结,其模糊集隶属函数的选择、模糊规则、模糊量化的设置固定,不适应被控过程的变化,从而影响控制效果。对于自适应模糊控制系统的稳定性、鲁棒性和全局性尚缺乏有效的数学分析手段。

神经网络以生物神经网络为模拟基础,以非线性大规模并行处理为主要特征,具有学习、记忆、联想、容错和并行处理等能力,具有适应性、柔软性、鲁棒性和实时性等特点,也得到广泛的应用。但由于神经网络不适于表达基于规则的知识,且网络中映射规则是不可见的和难于理解的,因此网络的结构依经验而定,难以找到一个合适的、满足控制需要的神经网络。

张南纶教授在 20 世纪 80 年代中期发现,可以用泛布尔代数描述关于一类复杂过程,因其变量取值和所取的状态分开而呈现出良好的应用前景。张南纶教授在逻辑上发现了一条有异于布尔代数公理的规则,一个变量的多个状态服从的逻辑规则称为状态律,建立了泛布尔代数,重新认识了普遍适用的 3 条思维规律,即同一律、矛盾律和排中律的新表述或者称新同一律、新矛盾律和新排中律,重新认识了归纳推理;在控制方面,发现了系统最小逻辑单元,即泛布尔代数中的最小项对应于控制系统的最基本性能(如上升时间、超调量、稳态误差等),给出了相应适当的控制作用,系统可以用单一控制作用来完成最基本性能指标,从而得到良好的性能,甚至于改变了对象模型还能保持良好的性能。实现这种控制便成为一种新的逻辑控制,也是一种新型的智能控制器。基于泛布尔代数的逻辑控制方法在工业领域中得到了成功的应用。本人对基于泛布尔代数的逻辑控制方法进行了比较深入的研究,运用基于泛布尔代数的逻辑控制方法实现了对空调机温度的智能控制。

## 非线性阻尼器半主动控制算法

非线性阻尼器固有的非线性,要将其引入到实际工程中,面临的挑战性问题是,如何结合非线性阻尼器的属性研究出一种合适的非线性控制算法。目前主动半主动控制算法主要有经典线性最优控制、模态控制、滑模控制、线性瞬时最优控制、模糊控制、神经网络控制、预测控制和鲁棒控制等。目前用于非线性阻尼器的半主动控制算法主要有 3 种,它们是基于稳定性理论的控制(非线性最优控制)、分散式开关控制(非线性最优控制)、部分最优控制(非线性最优控制)、均匀调节摩擦力控制(非线性最优控制)和最大能耗控制(非线性最优控制)。

若有  $n$  个非线性阻尼器控制的地震激励结构能保持在线性范围内,则它的运动方程为: