

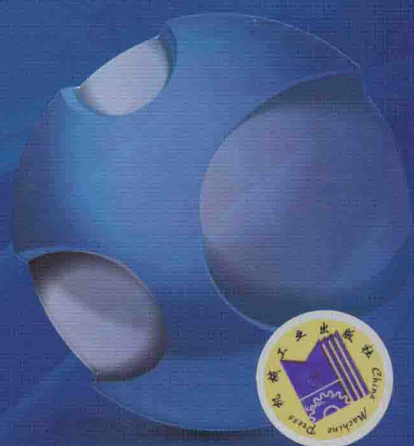


国家科学技术学术著作出版基金资助出版

基于颗粒阻尼技术 的结构振动控制

鲁正 吕西林◎著

Particle Damping Technology Based
Structural Vibration Control

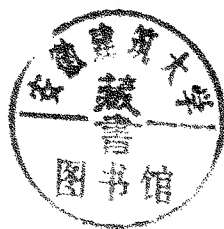


 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

基于颗粒阻尼技术的 结构振动控制

鲁 正 吕西林 著



机械工业出版社

颗粒阻尼技术是一种利用在振动体中有限封闭空间内填充的微小颗粒之间的摩擦和冲击作用消耗系统振动能量的减振技术,目前已在机械、航空航天等领域广泛使用,在土木工程领域中的应用研究也日渐开展。为了增强结构抵抗自然灾害的能力,尤其是减小其在地震和风振下的结构响应,对颗粒阻尼技术在结构振动控制中的应用进行了探讨。全书共分9章:结构振动控制概述、颗粒阻尼技术起源及发展应用、颗粒阻尼理论分析与数值模拟、单自由度结构附加颗粒阻尼器的性能分析、多自由度结构附加颗粒阻尼器的性能分析、颗粒阻尼技术振动台试验研究、颗粒阻尼技术风洞试验研究、颗粒阻尼技术在结构振动控制应用的设计讨论、半主动控制颗粒阻尼技术。

本书可供广大土木工程领域科研、技术人员在基于颗粒阻尼技术的振动控制分析、设计和研究时参考,也可供机械、航空航天等领域应用颗粒阻尼技术的人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

基于颗粒阻尼技术的结构振动控制/鲁正,吕西林著. —北京:机械工业出版社,2017.12

ISBN 978-7-111-59964-7

I. ①基… II. ①鲁… ②吕… III. ①结构振动控制 IV. ①TB123

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第101839号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:李帅 责任编辑:李帅 刘丽敏 责任校对:张薇

封面设计:马精明 责任印制:张博

三河市国英印务有限公司印刷

2018年7月第1版第1次印刷

184mm×260mm·13印张·318千字

标准书号:ISBN 978-7-111-59964-7

定价:59.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线:010-88361066 机工官网:www.cmpbook.com

读者购书热线:010-68326294 机工官博:weibo.com/cmp1952

010-88379203 金书网:www.golden-book.com

封面无防伪标均为盗版

教育服务网:www.cmpedu.com

前言

PREFACE



近年来,地震、台风等自然灾害频发,对结构产生了严重的破坏。为了增强结构抵抗自然灾害的能力,尤其是减小其在地震和风振下的结构响应,常用的做法是在结构上使用振动控制技术。颗粒阻尼技术是一种利用在振动体中有限封闭空间内填充的微小颗粒之间的摩擦和冲击作用消耗系统振动能量的减振技术,已在机械、航空航天等领域广泛使用,在土木工程的应用研究也日渐开展。

本书第一作者于2007年赴美国南加州大学跟随 Sami F. Masri 教授学习结构振动控制的知识, Masri 教授于1965年在加州理工学院完成了关于颗粒阻尼技术的第一篇系统性的博士论文。在 Masri 教授的启蒙下,作者一直从事将颗粒阻尼技术应用到土木工程的原创性研究。经过十余年的研究总结,将以下几部分特色内容整理于本书中。

(1) 利用离散单元法和等效简化算法,分别建立了结构附加颗粒阻尼器的精细化数值模拟方法和实用设计方法,编制了相应的程序,并完成了试验验证。

(2) 系统研究了颗粒阻尼器在不同动力荷载,尤其是地震和风振作用下的工作性能,揭示了其最优工作状态下的运动机理,提出了表征其最优工作性能的“全局化”指标。

(3) 系统开展了结构附加颗粒阻尼器的大型振动台试验和风洞试验,验证了数值模拟方法的可行性和可靠性,检验了对土木结构动力响应的控制效果,为土木工程实际应用提供了试验和理论支持。

(4) 结合工程特点,发明了系列具有自主知识产权的颗粒阻尼技术应用装置,给出了实际工程使用阻尼器的建议和设计导则。

本书的研究工作得到了“国家自然科学基金面上项目(51478361)”“国家自然科学基金青年基金项目(51108346)”、上海市教育委员会“晨光计划”(12CG18)和中央高校基本科研业务费专项资金的支持,特此致谢!

由于作者水平有限,本书中肯定存在许多不足之处,敬请读者批评指正。

作者

目 录

CONTENTS



前 言

第 1 章 结构振动控制概述 / 1

1.1 被动控制 / 1

1.1.1 基础隔震 / 1

1.1.2 消能减震 / 2

1.1.3 被动调谐减震 / 6

1.2 主动控制 / 6

1.3 混合控制 / 8

1.4 半主动控制 / 9

1.4.1 主动变刚度控制系统 / 9

1.4.2 主动变阻尼控制系统 / 10

1.4.3 主动变刚度/阻尼控制系统 / 10

第 2 章 颗粒阻尼技术起源及发展应用 / 12

2.1 颗粒阻尼技术的基本概念 / 12

2.2 颗粒阻尼技术的起源与发展 / 16

2.3 颗粒阻尼技术在航空航天和机械等领域的应用 / 17

2.4 颗粒阻尼技术应用于土木工程 / 18

第 3 章 颗粒阻尼理论分析与数值模拟 / 23

3.1 等效简化模拟 / 23

3.1.1 等效简化原则 / 23

3.1.2 参数选取 / 26

3.1.3 程序编制 / 26

3.2 球状离散元模拟 / 29

3.2.1 离散单元法基本原理 / 29

3.2.2 球状离散元建模 / 31

3.2.3 程序编制 / 36

3.3 球状离散元数值模拟验证 / 38

3.3.1 理想试验验证 / 39

3.3.2 振动台试验验证 / 41

第 4 章 单自由度结构附加颗粒阻尼器的性能分析 / 44

4.1	单自由度结构附加颗粒阻尼器的解析解	/ 44
4.1.1	计算模型	/ 44
4.1.2	解析解法	/ 45
4.2	单自由度结构附加颗粒阻尼器的自由振动	/ 47
4.3	单自由度结构附加颗粒阻尼器的简谐振动	/ 49
4.3.1	颗粒数量、大小和材料的影响	/ 50
4.3.2	容器尺寸的影响	/ 53
4.3.3	颗粒质量比的影响	/ 53
4.3.4	外界激励频率的影响	/ 54
4.4	单自由度结构附加颗粒阻尼器的随机振动	/ 55
4.4.1	不同特性随机激励下的性能分析	/ 55
4.4.2	单向稳态随机激励	/ 56
4.4.3	双向相关稳态随机激励	/ 57
4.4.4	双向不相关稳态随机激励	/ 58
4.4.5	讨论	/ 58
4.4.6	参数分析	/ 63
4.4.7	与多单元单颗粒冲击阻尼器的性能比较	/ 65
第5章	多自由度结构附加颗粒阻尼器的性能分析	/ 67
5.1	多自由度结构附加颗粒阻尼器的解析解	/ 67
5.1.1	计算模型	/ 67
5.1.2	解析解法	/ 67
5.2	多自由度结构附加颗粒阻尼器的自由振动	/ 69
5.3	多自由度结构附加颗粒阻尼器的随机振动	/ 73
5.3.1	参数分析	/ 73
5.3.2	多自由度体系附加颗粒阻尼器的非平稳随机振动	/ 73
第6章	颗粒阻尼技术振动台试验研究	/ 77
6.1	三层框架附加颗粒阻尼器的振动台试验	/ 77
6.1.1	试验设计	/ 77
6.1.2	振动台试验结果	/ 78
6.1.3	离散元数值模型验证	/ 84
6.2	五层框架附加颗粒阻尼器的振动台试验	/ 88
6.2.1	试验设计	/ 88
6.2.2	振动台试验结果	/ 89
6.2.3	等效简化模型验证	/ 100
第7章	颗粒阻尼技术风洞试验研究	/ 106
7.1	试验设计	/ 106
7.2	风洞试验结果	/ 117
7.2.1	模型动力特性	/ 117
7.2.2	参数分析	/ 120
7.2.3	风场影响	/ 141
7.3	风洞试验数值模拟	/ 145
7.3.1	简化模拟方法概述	/ 145

7.3.2 模拟计算参数确定 / 150

7.3.3 模拟结果 / 151

第8章 颗粒阻尼技术在结构振动控制应用的设计讨论 / 153

8.1 颗粒阻尼器的产品设计 / 153

8.1.1 缓冲型悬吊式颗粒调谐质量阻尼器 / 153

8.1.2 新型二维调谐质量阻尼器 / 155

8.1.3 悬吊式多单元碰撞阻尼器 / 157

8.1.4 一种碰撞阻尼器 / 159

8.1.5 新型调谐颗粒质量阻尼器 / 162

8.1.6 一种混合消能减振装置 / 164

8.1.7 链式颗粒碰撞阻尼器 / 166

8.1.8 双向变刚度颗粒调谐质量阻尼器 / 168

8.1.9 具有非线性刚度的颗粒阻尼器 / 169

8.1.10 一种非线性轨道式颗粒阻尼器 / 171

8.1.11 非线性颗粒碰撞阻尼器 / 172

8.1.12 组合型多相减振装置 / 175

8.1.13 非线性轨道式协同调谐阻尼器 / 179

8.1.14 悬吊式材料阻尼器 / 181

8.2 颗粒阻尼器的设计要点 / 183

第9章 半主动控制颗粒阻尼技术 / 185

9.1 半主动控制颗粒阻尼技术的基本概念 / 185

9.2 半主动控制颗粒阻尼器的产品设计 / 186

9.2.1 半主动控制颗粒阻尼器相关发明专利 / 186

9.2.2 半主动控制颗粒阻尼装置的实施 / 188

参考文献 / 192

结构振动控制概述

结构振动控制,就是通过改变结构的刚度、质量、阻尼或者形状,并且提供一定的被动或主动的反作用力,来控制在地震和风作用下结构的振动。结构振动控制的概念是由日本的工程学教授 John Milne 最早提出^[1],他用木材制作了一栋房子,并将其放在滚珠轴承上,以此来证明结构可以与地震的晃动隔离开。第二次世界大战期间,结构振动控制的概念,例如结构隔震、结构消能减震和结构振动阻尼都得到了极大的发展,并且有效地应用于飞行器结构中。

在 20 世纪 60 年代,结构振动控制的概念开始进入土木工程领域,并且朝着多个方向发展。土木工程结构振动控制,是在工程结构的特定部位,装设某种装置(如隔震垫、隔震块等),或某种结构(如消能支撑、消能剪力墙、消能节点、阻尼器等),或某种子结构(如调谐质量等),或施加外力(即外部能量输入),以改变或调整结构的动力特性或动力作用,使建筑物的振动响应得到合理控制,确保结构本身的安全及结构中的人的舒适安全和仪器设备的正常工作。

按照有无外部能源供给,结构控制可分为被动控制、主动控制、混合控制和半主动控制四种^[1]:被动控制是无外加能源的控制,其控制力是控制装置随结构一起振动变形时,因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,其控制力是控制装置按某种控制规律,利用外部能源主动实施的;混合控制在结构上同时应用主动和被动控制,从而充分发挥各种控制装置的优点,具有控制效果好、造价低、能耗小、易于工程应用的特点;半主动控制所需的外加能源远小于典型的主动控制系统,其控制力虽也由控制装置本身的运动而被动产生,但在控制过程中控制装置可以利用外加能源主动调整自身的参数,一般的,该系统不外加机械能,因而能保证系统的稳定性。通常,半主动控制被认为是可控的被动控制装置。

1.1 被动控制

被动控制由于概念简单,机理明确,因而在工程中得到广泛的应用。常见的被动控制包括基础隔震、消能减震和被动调谐减震控制。

1.1.1 基础隔震

基础隔震的基本原理是延长结构周期,给予结构适当阻尼使加速度反应减小,同时,让结构的大位移主要由结构物底部与地基之间的隔震系统提供,而结构自身不产生较大的相对位移^[2]。目前的基础隔震技术可分为两类:弹(黏)性隔震和基础滑动隔震。弹(黏)性

隔震指在结构物底部与基础顶面之间增设一侧向刚度较低的柔性层,使体系的周期延长,变形集中在底层,上部结构基本是刚体运动,柔性底层对上部结构来讲起着低通滤波的作用,使结构的基频比基础固定时的频率以及地震动输入的卓越频率段都低很多,目前国内外最受重视和应用范围最广的橡胶类支座隔震即此类方案的代表。基础滑动隔震是指在结构物与基础之间设置摩擦系数较小的摩擦材料,当结构在地震时的惯性力大于系统的摩擦力时,结构相对于基础产生滑动,一方面限制了水平地震作用向结构传递,另一方面耗散了地震能。基础隔震主要用于频率较高的低矮结构及桥梁等。

1.1.2 消能减震

消能减震是把结构物的某些构件(如支撑、剪力墙、连接件等)设计成耗能杆件,或在结构的某部位(如层间空间、节点、粘结缝等)安装耗能装置。在微风或小震时,这些耗能构件或耗能装置具有足够的初始刚度,处于弹性状态,结构物仍具有足够的侧向刚度以满足使用要求。当出现中、强地震时,随着结构侧向变形的增大,耗能构件或耗能装置率先进入非弹性状态,产生较大的阻尼力,大量消耗输入结构的地震能量,从而避免主体结构出现明显的非弹性状态,使结构的地震反应迅速衰减,保护主体结构及构件在强地震中免遭破坏,确保其安全性。目前常用的有以下四类:黏弹性阻尼器、黏滞阻尼器、摩擦阻尼器和金属阻尼器。其中前两类称为速度相关型阻尼器,后两类称为位移相关型阻尼器。许多学者均对这些消能器做了较为详尽的评述^[3,4,5]。

(1) 黏弹性阻尼器 黏弹性阻尼器一般由黏弹性材料和约束钢板组成,以隔层方式将黏弹性材料和约束钢板结合在一起,通过黏弹性材料的剪切滞回变形来耗散能量。黏弹性材料属高分子聚合物,既具有弹性性质,又具有黏性性质,前者可以提供刚度,后者可以提供阻尼,因此可以耗能减震。黏弹性阻尼器性能可靠,造价低,安装方便,适合于各种动荷载引起的结构振动控制。

黏弹性阻尼器在振动控制中的应用可追溯到 20 世纪 50 年代飞机结构的疲劳振动控制,在结构工程中的应用始于 1969 年建成的美国 110 层的纽约世界贸易中心,该结构的每座塔楼安装了大约 11000 个黏弹性阻尼器以减小风振反应。除此之外,黏弹性阻尼器还用于美国西雅图的 Columbia Seafirst 和 Two Union Square 大楼,以减小风振反应。

黏弹性材料的性能与振动频率、应变大小和环境温度密切相关。一般来说,剪切应力与剪切应变的关系为^[6]

$$\tau(t) = G'(\omega)\gamma(t) + \frac{G''(\omega)}{\omega}\dot{\gamma}(t) \quad (1-1)$$

式中 $G'(\omega)$ 、 $G''(\omega)$ ——黏弹性材料的贮存弹性模量和损耗弹性模量。

Tsai 和 Lee^[7]、Kasai 等^[8]以及 Sheng 和 Soong^[9]分别给出了 $G'(\omega)$ 和 $G''(\omega)$ 的解析表达式。根据式 (1-1) 所示本构关系,可得黏弹性阻尼器的力-位移关系为

$$F(t) = k_d(\omega)X + c_d(\omega)\dot{X} \quad (1-2)$$

其中, $k_d(\omega) = \frac{AG'(\omega)}{\delta}$, $c_d(\omega) = \frac{AG''(\omega)}{\omega\delta}$; A 和 δ 分别是阻尼器中黏弹性材料的受剪面积和厚度。

线性结构安装黏弹性阻尼器后仍保持线性状态,阻尼器的作用是增加结构的阻尼和抗侧

刚度, 这为分析带来极大的便利^[10]。根据模态应变能法^[11], Chang 等^[12]给出了安装黏弹性阻尼器后受控结构振型阻尼比和振型频率的求解方法, 由此可方便地进行结构分析。

黏弹性材料是一种温度敏感性材料。Chang 等对黏弹性阻尼器的力学性能与温度之间的相互关系进行了深入的理论和试验研究^[13, 14]。分析发现, 如果环境温度变化对黏弹性阻尼系统的自振频率影响不大, 且阻尼器的刚度较大时, 温度变化对黏弹性阻尼器的减震能力影响不大。

黏弹性材料贮存弹性模量和损耗弹性模量与激振频率的相关性给耗能减震系统的非线性分析带来一定的困难。为解决上述问题, Makris 提出了黏弹性材料的复参数模型, 该模型中的参数都是复数, 但与激振频率是无关的, 复参数模型给黏弹性阻尼系统的频域分析带来了很大的方便^[15]。

为了验证黏弹性阻尼器的理论研究成果及其在工程中的应用的可行性, 国内外学者对阻尼器和附加阻尼器的结构模型进行了大量的试验研究。

Blondet 等在 1993 年进行了 2 个足尺黏弹性阻尼器和 6 个阻尼器模型的性能试验, 试验中 6 个阻尼器模型在材料应变达 300% 以上时才发生破坏, 而且破坏多数发生在黏弹性材料和钢板的粘结处^[16]。国内北京工业大学、哈尔滨工业大学、广州大学和东南大学也先后对不同黏弹性材料制成的足尺或模型黏弹性阻尼器进行了系统的性能试验^[17, 18, 19, 20]。

Chang 等在 1994 年进行了两个 2:5 钢框架模型的动力试验, 其中一个为无控结构, 另一个为安装黏弹性阻尼器的有控结构^[12]。Foutch 等 1993 年在美国军用建筑工程试验室对两个安装黏弹性阻尼器的钢筋混凝土模型进行了振动台试验^[21]。试验表明, 黏弹性阻尼器对于钢结构和钢筋混凝土结构在任意地震作用下均有较好的减震效果; 同时, 由于阻尼器在钢筋混凝土结构的开裂阶段就已耗能, 因此可以有效地降低结构损伤。北京工业大学、哈尔滨工业大学、西安建筑科技大学分别对附加黏弹性阻尼器的钢结构和钢筋混凝土结构模型进行了振动台试验, 这些试验同样取得了较好的控制效果^[17, 22, 23]。

需要指出的是, 当温度不变时, 黏弹性材料在较大的应变范围内呈线性反应, 但在大应变情况下, 由于消耗大量的能量, 黏弹性材料温度会升高, 从而改变了材料的力学性能, 因而整个反应是非线性的。为此, 如果黏弹性阻尼器很有可能出现大应变, 则不能采用传统的频域法分析耗能体系的动力反应。

(2) 黏滞阻尼器 黏滞阻尼器最初被应用于导弹发射架、火炮等军事领域和其他工业机械设备的减振之中^[24, 25], 之后才逐渐应用到土木工程结构的耗能减震中^[26]。黏滞阻尼器主要分为两类, 一类是黏滞油缸型阻尼器^[27], 另一类是黏滞阻尼墙^[28, 29]。

黏滞油缸型阻尼器最早出现于 1862 年, 当时英国军队在大炮的发射架上使用这种耗能装置, 用来减小发射炮弹所引起的发射架移位^[30]。第一次世界大战结束时, 黏滞油缸型阻尼器因为能够减小反弹力, 被应用在发射架上以允许发射更大的炮弹和使用更大的发射推动力。20 世纪 20~30 年代开始在汽车中使用这种阻尼器来减小振动, 促进了黏滞油缸型阻尼器的革新, 使它具有足够长的使用寿命。冷战期间, 美国和苏联因为军事上的需要而使阻尼器的性能得到进一步提高。1990 年前后, 冷战结束, 黏滞油缸型阻尼器这一军事技术开始转向民用, 便开始在土木工程领域得到迅速和广泛的研究和应用^[25]。黏滞油缸型阻尼器主要由油缸、活塞和高黏度油液组成。在外界激励下, 活塞与油缸间产生相对运动, 使得油缸中的高黏度油液通过活塞上小孔或活塞的边缘从活塞的一侧流动到另一侧, 从而产生黏滞阻

尼。黏滞阻尼器安装在结构上,可以给结构提供较大的阻尼,它可以用来减小结构的地震反应,也可以用来减小结构的风振反应,还能作为基础隔震系统的辅助设备,与隔震系统协同作用以增强结构的抗震能力。

黏滞阻尼墙是一种用于建筑结构的耗能减震器,是日本学者 Arima 和 Miyazaki 等在 1986 年提出来的^[28, 29],它主要由悬挂在上层楼面的内钢板、固定在下层楼面的两块外钢板、内外钢板之间的高黏度黏滞液体组成。地震时上下楼层产生相对速度,从而使得上层内钢板在下层外钢板之间的黏滞液体中运动,产生阻尼力,吸收地震能量,减小地震反应。通过改变黏滞液体的黏度、内外钢板之间的距离、钢板的面积这三个因素,可以调整黏滞阻尼墙的黏滞抵抗力 and 能量吸收能力。黏滞阻尼墙外通常还有钢筋混凝土或防火材料制成的外部保护墙,以抵御外界环境的不利影响。

国内外学者对黏滞阻尼器的性能进行了广泛的研究^[31, 32, 33, 34, 35, 36]。研究发现,如果黏滞阻尼器中的油液是牛顿流体,则阻尼器提供的阻尼力与相对运动速度成正比。如果活塞在一个较宽的频率范围内运动,黏滞阻尼器将呈现黏弹性流体的特征。对此, Makris 和 Constantinou 在 1991 年提出了一种广义的 Maxwell 模型来描述黏滞阻尼器的力学性能。考虑到表达式的简化,目前大多数在土木工程领域使用的黏滞阻尼器力学性能可以表示为^[31]:

$$F = CV^\alpha \quad (1-3)$$

式中 C ——黏滞阻尼系数;

V ——阻尼器活塞相对阻尼器外壳的运动速度;

α ——常数指数,变化范围可以是 $0.1 < \alpha < 2$ ^[1, 25, 35] (根据国外的经验,建筑物在使用黏滞阻尼器抵抗地震作用时, α 值通常在 $0.4 \sim 0.5$; 抵抗风荷载作用时, α 值通常在 $0.5 \sim 1.0$; 既抗震又抗风时, α 值通常取 $0.5 \sim 1.0$ 之间的较小值^[25])。

Constantinou 和 Symans 在 1993 年对黏滞阻尼器进行了系统的性能试验,将其安装在一个 1:4 的三层钢结构模型中,以考察阻尼器的减震效果^[37]; Reinhorn 等 1995 年在一个 1:3 的钢筋混凝土框架模型上测试了黏滞阻尼器的减震能力^[38]。1988 年 Arima 和 Miyazaki 等系统地研究了黏滞阻尼墙的力学特性,并测试了黏滞阻尼墙在五层钢框架模型和四层足尺结构中的动力响应^[28]。哈尔滨工业大学、同济大学、东南大学也先后对黏滞阻尼器的力学性能进行了试验研究^[35, 36, 39],哈尔滨工业大学和同济大学还对附加黏滞阻尼器的结构模型进行了振动台试验^[39, 40],清华大学对附加黏滞阻尼墙的小比例结构模型进行了振动台试验研究^[41]。这些研究表明,黏滞阻尼器具有出色的耗能减震效果,并且不会引起温度的较大变化;另一方面,黏滞阻尼器几乎只对结构提供阻尼力,而基本上不增加结构的刚度。结构合理地附加黏滞阻尼器以后,位移反应和内力反应同时减小。

(3) 摩擦阻尼器 摩擦阻尼器是由金属摩擦片在一定的预紧力下组成的一个能够产生滑动和摩擦力的机构。机构因振动变形带动摩擦阻尼器往复滑动,因此滑动摩擦力将做功耗散能量,从而达到减震的目的。摩擦阻尼器的摩擦力大小易于控制,可方便地通过调节预紧力大小来确定,其性能对环境温度及摩擦生热不敏感。

各国学者根据对不同结构的不同使用要求,通过改变摩擦阻尼器的构造和摩擦面材料及与结构的连接方式等,对摩擦阻尼器进行了深入的研究,在理论、试验及应用上也已取得了很多成果。1982 年加拿大 Pall 提出了十字芯板摩擦阻尼器 (即 Pall 摩擦阻尼器),该阻尼器

外框是一个平行四边形,将其用X形斜撑与结构相连,其独特的构造使其性能较普通摩擦阻尼器稳定,且斜撑不受临界力限制,试验证明了其良好的耗能能力^[42]。Grigorian等还提出了两种构造类似于黏弹性阻尼器的最简单的摩擦阻尼器^[43]。1990年Aiken和Kelly等提出了一种可复位的Sumitomo单向摩擦阻尼器等^[44]。我国的欧进萍等对摩擦阻尼器进行了研究和改进,提出了T字芯板摩擦阻尼器和拟黏滞摩擦阻尼器^[45, 46]。摩擦阻尼器大多采用钢—钢、钢—铜或者钢—掺石墨的铜片等摩擦界面材料,摩擦界面材料的性能对阻尼器的性能有很大影响。

Scholl和Nims等的研究表明,在摩擦阻尼器中,初始起滑位移和结构层间屈服位移之比,以及耗能支撑刚度和结构层间刚度之比是影响阻尼器减震效果的关键因素^[47, 48]。

摩擦阻尼器在小震作用下不起滑,只能起到支撑作用,振动控制效果不是很好。针对这一问题,Tsiatas和Daly提出将摩擦阻尼器和黏滞阻尼器串联起来,形成组合耗能体系。在风荷载和小震作用下,只有黏滞阻尼器发挥作用;在大震作用时,摩擦阻尼器也参与耗能,从而发挥了更好的减震效果^[49]。国内吕西林等对带有摩擦和黏滞阻尼器串联体系的结构进行了动力分析^[50]。

摩擦阻尼器也在国内外得到了较多的应用。加拿大Concordia大学的图书馆、Space公司的总部大楼等一批建筑物采用了Pall摩擦阻尼器来增强抗震能力^[51]。Sumitomo摩擦阻尼器在日本应用较多,Omiya市一幢31层的钢结构、东京一幢22层的钢结构和一幢6层的钢筋混凝土结构,都采用了这种阻尼器^[44]。我国1997年运用摩擦阻尼器对东北某政府大楼进行抗震加固,2001年新建的云南振戎中学食堂楼中也运用了T字芯板摩擦阻尼器和拟黏滞摩擦阻尼器来增强抗震能力^[52, 53, 54]。

(4) 金属阻尼器 金属屈服阻尼器的耗能机理是在结构振动时金属发生塑性屈服滞回变形而耗散能量,从而达到减震的目的。金属屈服阻尼器的特点是具有稳定的滞回特性,良好的低周疲劳性能,不受环境温度的影响,造价低廉等。

20世纪70年代初,Kelly等最早提出了金属屈服阻尼器,随后各国学者对金属屈服阻尼器进行了理论和试验研究,并开发了各种材料、各种构造形式的阻尼器^[55, 56, 57]。软钢具有屈服点低、断裂变形大、低周疲劳性能好等优点,且由于取材方便,特别适合制成金属屈服阻尼器。目前较有特色的金属屈服阻尼器是三角形和X形钢板两种,这两种金属阻尼器的特点是各截面是等曲率变形的,弯曲应力均匀分布能同时达到屈服。此外,铅和形状记忆合金也具有较好的耗能能力,也可以用来制造金属屈服阻尼器^[58, 59]。

为了建立金属屈服阻尼器的滞回模型,从材料的本构关系出发建立的滞回模型以及试验研究是两个重要的手段^[60, 61, 62]。

金属屈服阻尼器是一种非线性装置,它安装在结构上以后,将使有控结构表现明显的非线性特征。研究表明,支撑刚度与阻尼器刚度之比、支撑和阻尼器的串联刚度与结构层间刚度之比,以及阻尼器屈服位移与结构层间屈服位移之比是影响该阻尼器减震效果的三个主要参数^[47]。为了分析阻尼器对结构的振动控制,可以采用两种方法,一种是运用阻尼器的滞回模型对耗能减震体系作动力时程分析^[63, 64],另一种是将阻尼器的滞回模型作等效线性化处理,然后利用其等价线性参数进行受控结构的计算分析^[48, 65]。

金属屈服阻尼器在土木工程中也有成功的应用。新西兰的一幢六层政府办公楼,其预制墙板的斜撑中采用了钢管耗能装置;意大利那不勒斯的一幢29层的钢结构悬挂建筑,在核

心筒和悬挂楼板之间采用了锥形软钢阻尼器；美国旧金山两幢结构和墨西哥三幢结构的抗震加固采用了 X 形钢板屈服阻尼器；日本 Kajima 公司研制的蜂窝阻尼器和钟形阻尼器分别应用到了一幢 15 层的钢结构办公楼和两个相邻的建筑物之间^[66, 67]。

1.1.3 被动调谐减震

被动调谐减震控制由结构和附加在主结构上的子结构组成，附加的子结构具有质量、刚度和阻尼，通过调整子结构的质量和刚度可以调整其自振频率，使其尽量接近主结构的基本频率或激振频率。这样，当主结构受迫振动时，子结构就会产生一个与主结构振动方向相反的惯性力作用在结构上，使主结构的振动反应衰减并受到控制，该减震控制不是通过提供外部能源，而是通过调整结构的频率特性来实现的。子结构的质量可以是固体质量，此时子结构被称为调谐质量阻尼器（TMD）；也可以是储存在某种容器中的液体质量，其调谐减震作用是通过容器中液体振荡产生的动压力差和黏性阻尼耗能来实现的，此时子结构被称为调谐液体阻尼器（TLD），TLD 可分为储液池式和 U 形柱式；还可以是放置在某种容器中的固体颗粒，其消能作用主要是通过颗粒冲击主体结构引起的动量交换和系统之间的摩擦耗能来实现。若只有单个颗粒，这种子结构称为冲击阻尼器（Impact Damper）；若有多个颗粒，这种子结构称为颗粒阻尼器（Particle Damper）。结构被动调谐减震控制技术已成功应用于多高层结构、高耸塔架、大跨度桥梁、海洋平台等的地震控制、风振控制和波浪引起的振动控制。

1.2 主动控制

主动控制就是有外加能源的控制，外加能源可以主动地向结构系统输入能量，输入的能量值由一定的控制策略确定，对输入的能量和结构的反应联机实时跟踪和预测，满足一定的优化准则，即在有限的能量输入条件下，最大程度的抑制结构的振动。主动控制是根据实际需要调节结构振动反应的控制效果，所以从理论上而言，其是最为有效的结构控制方法。

主动控制的相关概念最早是由 Zuk^[68]提出的，20 世纪 70 年代形成了系统的结构主动控制理论。美国华裔学者 Yao（姚治平）^[69]在 1972 年将现代控制理论应用于土木结构，确定了土木结构控制研究的开始。然而 1990 年左右，主动控制才真正从理论和实践两个方面研究并应用到土木工程结构上。

主动控制系统主要是由信息采集（传感器）、计算机控制系统（控制器）和主动驱动系统（作动器）三部分组成。主动控制系统中的外置作动器可以按照指定的方式给结构施加外力，这些外力可以用来增加和耗散结构中的能量。传给作动器的信号是结构及外干扰的振动反应信息，由一些物理传感器来测量，比如光学传感器、力学传感器、电学传感器、化学传感器等。

主动控制按照控制器的工作方式可分为开环控制、闭环控制和开闭环控制三种。开环控制，控制器通过传感器测得输入结构的外部激励，据此来调整作动器施加给结构的控制力，而不反映系统输出的结构反应的信息，如图 1.1 所示。闭环控制，控制器通过传感器测得结构反应，据此来调整作动器施加给结构的控制力，而不反映输入结构的外部激励的信息，如图 1.2 所示。开闭环控制，控制系统通过传感器同时测得输入结构的外部激励和系统输出的

结构反应，据此综合信息来调整作动器施加给结构的控制力，如图 1.3 所示。

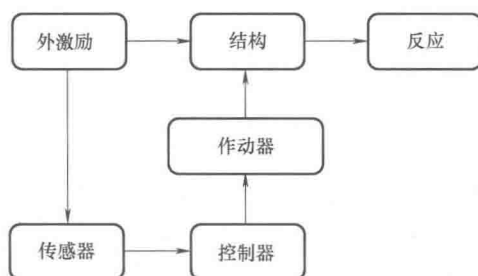


图 1.1 开环控制系统

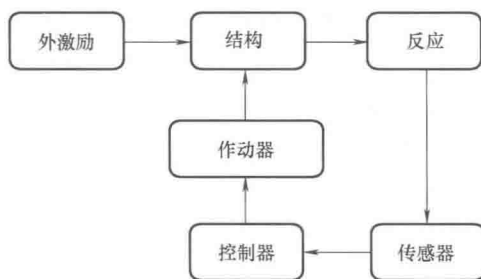


图 1.2 闭环控制系统

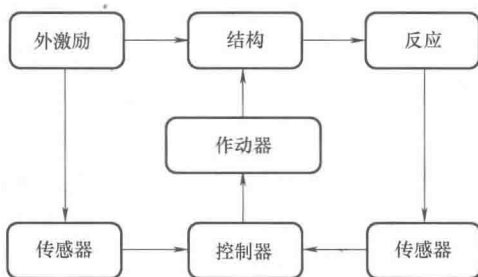


图 1.3 开闭环控制系统

由于闭环控制系统可以实时跟踪结构的动力反应，故结构的主动控制一般均采用闭环控制方法，有时也采用开闭环控制系统。闭环控制系统的工作原理：由装在结构上的传感器测得结构的动力反应，控制器按所采用的某种控制律计算出所需的控制力，该控制力通过作动器施加给结构，从而达到减小或抑制结构动力反应的目的。

主动控制主要包括主动锚索（拉索）系统（ATS）、主动支撑系统（ABS）和主动质量阻尼器（AMD）。

主动锚索（拉索）系统（ATS）其基本原理是在框架结构的层间设置交叉锚索，在锚

索上安装液压伺服系统,并在结构的附近和结构中设置传感器,当结构受到地震或风作用时,计算机控制中心将根据传感器观测的信号,启动伺服系统对锚索施力。为了验证 ATS 控制系统的有效性,在日本东京已经建成了一座足尺的 6 层试验结构^[70],ATS 控制系统设置在首层,并由 4 个驱动器与锚索相连来控制结构两个方向的振动,此试验结构作为 ATS 控制系统的长期观测建筑。

主动支撑系统 (ABS) 在结构物的楼层之间设置主动支撑装置,利用结构的层间反应信息,电液伺服控制机构可控制斜撑的收缩运动,改变支撑力的大小和方向,以控制结构的振动。Chin-Hsiung Loh^[71]等通过一座足尺三层钢结构模型的振动台试验来验证控制系统的有效性。该模型高 9m,每层附加质量 3468kg,在首层布置两套 ABS 控制系统。试验结果表明 ABS 控制系统作用明显,受控结构的相对位移减少了 50% 以上。

主动质量阻尼器 (AMD) 是在被动调谐质量阻尼器 (TMD) 的基础上增加量测、控制和驱动机构而形成的一种主动控制系统,其利用安装在结构上的传感器观测到的结构反应信息,由计算机控制中心根据选定的控制算法确定控制力,启动伺服系统,借助于附加质量,将控制力施加到结构上。

1989 年日本的东京 Kyobashi Seiwa 大厦首次采用了主动质量阻尼器^[72]。Kyobashi Seiwa 大厦建筑共 11 层,高 33.1m,为一栋高宽比为 8.25 的扁形高层钢框架结构。如果按照传统的抗震抗风设计,其水平刚度难以满足要求,故在其上布置两个 AMD 控制装置,其中,中央的 AMD 质量为 4t,用来控制结构的横向振动,端部的 AMD 质量为 1t,用来减小结构的扭转振动。

主动控制将现代控制理论的最优控制理念引入建筑结构的振动控制中,有突出的效果。实践证明,采用主动控制的结构体系与不采用任何控制技术的传统结构体系相比,能使结构振动反应减少 40%~85%。虽然主动控制在减震上具有明显的优越性,并已在理论研究、试验研究和工程应用上取得了一定的突破,但目前为止,其仍存在一些缺陷有待改进,主要表现在:

- 1) 主动控制系统造价高昂,且需要巨大的外部能源支持,很难在罕遇地震等极端条件下确保能源的供应。
- 2) 控制系统工作的稳定性无法得到保证:有诸多因素影响控制系统工作的稳定性,例如,控制算法是否能真正优化,数据采集、分析和控制系统工作是否可靠(时滞效应是否得到改善),外部能源和电源储备是否稳定等。

1.3 混合控制

混合控制是将主动控制和被动控制两者作用在同一结构上的结构振动控制方式。主动控制虽然具有突出的效果,但是造价昂贵,技术要求苛刻。被动控制简单可靠,造价低廉,易于工程实现,但是控制范围及控制效果受到限制。将两者有机结合,则可以取长补短,做到更加合理、经济和安全。例如,当结构在多遇地震作用下,主要依靠被动控制系统实现减震;当结构遭受罕遇地震时,主动控制系统开始参与工作,结构同时依靠被动控制、主动控制两种系统共同运作,达到最佳的振动控制效果。

从被动、主动两种控制所起的作用的相对大小来看,有两种混合形式:一是主从混合形

式,即以某一控制为主、另一控制为辅的形式;二是并列混合形式,即主动控制和被动控制独立工作,对结构实施校正作用。现阶段研究最多的是被动控制为主、主动控制为辅的混合形式,其中的两种主要混合方案如下:

1) 被动控制作为结构在多遇地震作用下的保护措施,主动控制作为结构抵御罕遇地震作用的保护措施,主动控制系统是结构破坏的最后一道防线。

2) 被动控制作为控制系统的主体,主动控制对被动控制系统提供限位控制,并提供被动控制所需的恢复力。

现阶段,较为典型的几种混合控制装置有:

1) 混合质量阻尼器(HMD)。将TMD与主动控制作动器组合起来,HMD降低结构反应的能力主要依赖于TMD的运动,来自作动器的力被用来增加HMD的有效性和改变主体结构动力特性的鲁棒性。

2) 混合基础隔震。在隔震层增设主动控制装置,使隔震层的相对位移保持在允许的范围内,并进一步减小上部结构的地震反应,常见的有叠层橡胶支座与AMD、可变阻尼器等组合形式。

3) 阻尼耗能与主动控制相结合。用黏弹性阻尼器和主动支撑系统(ABS)混合控制。一方面,由于黏弹性阻尼器作用,大大减小了ABS所需提供的控制力;另一方面,由于ABS的作用,大大提高了黏弹性阻尼器的阻尼比,减小了黏弹性阻尼器所承受的剪力。

1.4 半主动控制

半主动控制是根据结构反应,进而通过改变结构的刚度或阻尼,自适应调整结构动力特性来达到减振控制目的的一种振动控制技术。它具有控制效果接近主动控制但仅需极少能源输入的优点,而且由于是受限输入受限输出系统,不存在主动控制那样的控制失稳问题。当能源供给中断时,可立即变为被动控制系统而发挥控制作用,因而具有广阔的应用前景。因为半主动控制本质上是一种参数控制,通过改变结构的刚度或阻尼来减小结构的振动,所以半主动控制可以分为主动变刚度控制系统(AVS)、主动变阻尼控制系统(AVD)以及主动变刚度/变阻尼控制系统(AVS/D)。

1.4.1 主动变刚度控制系统

主动变刚度控制系统通过可变刚度装置使受控结构的刚度在每一采样周期内根据设定的控制率在不同刚度值之间实时切换,使得受控结构在每一采样周期内都尽可能远离共振状态,达到减震的目的。

在理论研究方面,主动变刚度系统(AVS)最早由日本学者Kobori等^[73, 74]提出,基本思路是根据结构的反应,通过计算机控制的快速反应锁定装置来改变系统的刚度,使结构的自振周期尽可能避开地震动的卓越周期以达到降低结构反应的目的。主动变刚度控制系统实质上是根据结构振动过程中的位移和速度状态,利用控制算法自动调节可变刚度的开关状态,因此结构始终处于一种非共振状态。然而开关关闭与启动过程带来的时滞问题将影响其控制效果,这也是该系统在土木结构推广应用的障碍所在。因此有必要开发一种对时滞效应

不敏感、更有效、更稳定、鲁棒性更强的半主动控制算法。

在试验研究方面, Kobori 等^[73]进行了足尺的三层钢结构主动变刚度控制振动台试验, 结果表明采用半主动变刚度控制技术对减小结构的地震反应是可行的; Riche 等^[75]提出了“能量消散约束”装置 (EDR), 该装置在加载和卸载时可以提供不同的刚度; Nasu 等^[76]对一装有主动变刚度装置的高耸结构进行了试验研究, 并与原型结构试验进行对比, 试验表明, AVS 系统构造简单, 仅需非常少的外部能量, 并对各种不同刚度、不同高度的建筑物, 在不同的地震烈度下, 都能实施有效的减震控制; 刘季等^[77]提出变刚度半主动控制系统及其理论, 并成功完成我国第一个半主动控制振动试验, 取得了良好的控制效果, 推动了该技术在我国的研究与应用。

在工程应用方面, 世界上首次采用 AVS 半主动控制装置的建筑是日本东京鹿岛技术研究所, 在此系统中, 应用液压元件改变刚性支撑和大梁的连接条件, 随时调节层间刚度, 避免共振, 在经受了加速度峰值为 0.25g 强地震考验之后, 运行正常, 减震效果非常明显。该系统能耗较低, 所配备的备用电源在市电停止供应时尚可工作 3min^[78]。

1.4.2 主动变阻尼控制系统

主动变阻尼控制系统原理基本和主动变刚度控制系统一样, 只是主动变阻尼控制系统控制的对象是结构的阻尼。主动变阻尼控制系统通常由液压缸、活塞和电液伺服阀等组成。实际应用时, 分别将主动变阻尼控制系统的活塞杆和缸体支座连接在结构的两个不同的构件上, 在地震和风作用下结构产生振动, 主动变阻尼控制系统中的活塞和缸体就会在结构的带动下产生相对运动, 其中系统所能提供阻尼力的大小主要取决于电液伺服阀处节流口开口的大小。

主动变阻尼控制系统 (AVD) 由 Hrovat^[79]首先提出, 他对采用可变阻尼装置控制结构的风振反应进行研究, 通过仿真分析, 得到与主动控制接近的效果; Kawashima 等^[80]对可变阻尼器进行试验, 并研究了由可变阻尼器与橡胶支撑组成的混合控制系统对桥梁结构在地震激励下的控制, 结果表明控制效果很明显。目前已经开发的各种可变阻尼控制装置有半主动流体阻尼器、摩擦可控装置、半主动调谐质量阻尼器、半主动调谐液体阻尼器和电/磁流变阻尼器。

1.4.3 主动变刚度/阻尼控制系统

我国学者周福霖等^[81]提出将主动变刚度控制技术 (AVS) 和主动变阻尼控制技术 (AVD) 有机结合起来, 构成一种崭新的半主动控制技术——主动变刚度/阻尼控制技术 (AVS/D)。通过增加可变阻尼项, 增强了主动变刚度控制装置在释放能量阶段的耗能效果, 不但能很好地避开地震卓越周期, 同时又能消减反应峰值, 对较宽频带内的外界激励具有非频变的减震特性; 何亚东等^[82]设计了一个三层钢框架结构采用半主动振动控制的试验, 用以检验主动变刚度/阻尼 (AVS/D) 控制技术及时最优半主动控制算法的有效性与实用性。试验结果表明, 对比被动控制方式, 半主动控制技术不但能有效地控制结构在地震作用下的位移和加速度响应, 而且克服了变刚度控制技术和变阻尼控制技术各自存在的负面控制影响, 对不同的地震激励具有很强的鲁棒性, 而且实现方法简单易行, 从而为进一步深入研究与应用提供了试验依据。