

东南土木
青年教师
科研论丛

工程结构黏滞消能减振 技术原理与应用

黄镇 著

The Principle and Application on Vibration Energy
Dissipation Technique of
Engineering structures with Viscous Damping

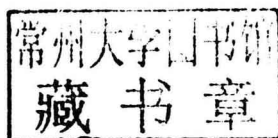
东南大学出版社

东南土木·青年教师·科研论丛

江苏高校优势学科建设工程资助项目

工程结构黏滞消能减振技术 原理与应用

黄 镇 著



东南大学出版社

SOUTHEAST UNIVERSITY PRESS

· 南京 ·

内 容 简 介

本书系统地介绍了工程结构采用黏滞消能减振技术的基本理论、设计方法、检测要求和工程应用,主要包括:黏滞消能减振技术的发展、各类黏滞消能器构造、基本原理及综合性能分析,采用黏滞消能减振技术的设计方法,消能减振装置连接与安装,黏滞消能器检测及评价标准,采用黏滞减振技术的工程实例。

本书可供土木工程相关科技人员、结构设计人员及施工技术人员参考,也可作为结构工程、防灾减灾工程及防护工程专业研究生参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

工程结构黏滞消能减振技术原理与应用/黄镇

著. —南京:东南大学出版社,2018.5

(东南土木青年教师科研论丛)

ISBN 978-7-5641-7694-5

I. ①工… II. ①黄… III. ①工程结构-减振措施-研究 IV. ①TU3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 072783 号

工程结构黏滞消能减振技术原理与应用

著 者 黄 镇

出版发行 东南大学出版社

社 址 南京市四牌楼 2 号 邮编:210096

出 版 人 江建中

责任编辑 丁 丁

编辑邮箱 d.d.00@163.com

网 址 <http://www.seupress.com>

电子邮箱 press@seupress.com

经 销 全国各地新华书店

印 刷 江苏凤凰数码印务有限公司

版 次 2018 年 5 月第 1 版

印 次 2018 年 5 月第 1 次印刷

开 本 787mm×1092mm 1/16

印 张 11

字 数 274 千

书 号 ISBN 978-7-5641-7694-5

定 价 48.00 元

本社图书若有印装质量问题,请直接与营销部联系。电话(传真):025-83791830

序

作为社会经济发展的支柱性产业,土木工程是我国提升人居环境、改善交通条件、发展公共事业、扩大生产规模、促进商业发展、提升城市竞争力、开发和改造自然的基础性行业。随着社会的发展和科技的进步,基础设施的规模、功能、造型和相应的建筑技术越来越大型化、复杂化和多样化,对土木工程结构设计理论与建造技术提出了新的挑战。尤其经过三十多年的改革开放和创新发展,在土木工程基础理论、设计方法、建造技术及工程应用方面,均取得了卓越成就。特别是进入 21 世纪以来,在高层、大跨、超长、重载等建筑结构方面成绩尤其惊人,国家体育场馆、人民日报社新楼以及京沪高铁、东海大桥、港珠澳桥隧工程等高难度项目的建设更把技术革新推到了科研工作的前沿。未来,土木工程领域中仍将有许多课题和难题出现,需要我们探讨和攻克。

另一方面,环境问题特别是气候变异的影响将越来越受到重视,全球性的人口增长以及城镇化建设要求广泛采用可持续发展理念来实现节能减排。在可持续发展的国际大背景下,“高能耗”“短寿命”的行业性弊病成为国内土木界面临的最严峻的问题,土木工程行业的技术进步已成为建设资源节约型、环境友好型社会的迫切需求。以利用预应力技术来实现节能减排为例,预应力的实现是以使用高强高性能材料为基础的,其中,高强预应力钢筋的强度是建筑用普通钢筋的 3~4 倍以上,而单位能耗只是略有增加;高性能混凝土比普通混凝土的强度高 1 倍以上甚至更多,而单位能耗相差不大;使用预应力技术,则可以节省混凝土和钢材 20%~30%,随着高强钢筋、高强等级混凝土使用比例的增加,碳排放量将相应减少。

东南大学土木工程学科于 1923 年由时任国立东南大学首任工科主任的茅以升先生等人首倡成立。在茅以升、金宝楨、徐百川、梁治明、刘树勋、丁大钧、方福森、胡乾善、唐念慈、鲍恩湛、蒋永生等著名专家学者为代表的历代东大土木人的不懈努力下,土木工程系迅速壮大。如今,东南大学的土木工程学科以土木工程学院为主,交通学院、材料科学与工程学院以及能源与环境学院参与共同建设,目前拥有 4 位院士、6 位国家千人计划特聘专家和 4 位国家青年千人计划入选者、7 位长江学者和国家杰出青年基金获得者、2 位国

家级教学名师;科研成果获国家技术发明奖 4 项,国家科技进步奖 20 余项,在教育部学位与研究生教育发展中心主持的 2012 年全国学科评估排名中,土木工程位列全国第三。

近年来,东南大学土木工程学院特别注重青年教师的培养和发展,吸引了一批海外知名大学博士毕业青年才俊的加入,8 人入选教育部新世纪优秀人才,8 人在 35 岁前晋升教授或博导,有 12 位 40 岁以下年轻教师在近 5 年内留学海外 1 年以上。不久的将来,这些青年学者们将会成为我国土木工程行业的中坚力量。

时逢东南大学土木工程学科创建暨土木工程系(学院)成立 90 周年,东南大学土木工程学院组织出版《东南土木青年教师科研论丛》,将本学院青年教师在工程结构基本理论、新材料、新型结构体系、结构防灾减灾性能、工程管理等方面的最新研究成果及时整理出版。本丛书的出版,得益于东南大学出版社的大力支持,尤其是丁丁编辑的帮助,我们很感谢他们对出版年轻学者学术著作的热心扶持。最后,我们希望本丛书的出版对我国土木工程行业的发展与技术进步起到一定的推动作用,同时,希望丛书的编写者们继续努力,并挑起东大土木未来发展的重担。

东南大学土木工程学院领导让我为本丛书作序,我在《东南土木青年教师科研论丛》中写了上面这些话,算作序。

中国工程院院士: 吕志涛

前 言

我国地处欧亚地震带与环太平洋地震带之间,地震活动较为频繁,地震灾害损失惨重。此外沿海及内陆地区也常受到风致灾害影响。随着科学技术的提高,黏滞消能减振技术已经成为抵御地震及风致灾害的一种有效方法。在被动控制装置中黏滞消能器由于其耗能能力强、性能稳定、受激励频率和温度的影响较小以及具有良好的耐久性等优点,成为工程师进行消能减振设计的重要选择。

本书在总结东南大学建筑工程抗震和减震研究中心近二十年相关的科研成果和工程实践经验基础上写作而成。本书的写作主要有以下特点:第一,体系的完整性,介绍结构振动控制技术发展、被动消能减振技术原理、各类黏滞消能减振装置及其减振机理;第二,理论与应用紧密结合,在叙述技术原理和减振装置性能的同时,给出工程实用减振分析方法和黏滞消能装置检测方法及评价标准;第三,结合课题组工程实践介绍了黏滞消能减振技术在实际工程中的具体应用。

本书在写作的过程中学习和参考了国内外众多论著,在此谨向原著者致以诚挚的谢意和敬意。

在本书的写作过程中,笔者的研究生蒋丛笑、张秦嘉协助做了大量的辅助工作,在此深表谢意。

本书得到江苏高校优势学科建设工程项目资助(A Project Funded by the Priority Academic Program Development of Jiangsu Higher Education Institutions)。

限于时间和水平,书中的疏漏和不妥之处,敬请读者批评指正。

笔者

2017年9月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 传统结构抗震设计理论及有待解决的问题	2
1.2 结构消能减振技术的研究进展	3
1.2.1 结构控制技术	3
1.2.2 结构消能减振技术	5
1.3 黏滞阻尼器研究进展	6
1.3.1 国际研究进展和应用现状	6
1.3.2 国内研究进展和应用现状	10
参考文献	13
第 2 章 黏滞阻尼器构造与制造工艺	17
2.1 黏滞阻尼器构造	17
2.1.1 单出杆型黏滞阻尼器	17
2.1.2 双出杆型黏滞阻尼器	18
2.1.3 间隙式黏滞阻尼器	18
2.2 黏滞阻尼器制造工艺	18
2.2.1 缸盖设计	18
2.2.2 主缸筒设计	19
2.2.3 导杆设计	19
2.2.4 活塞和阻尼孔设计	19
2.2.5 副缸设计	20
2.2.6 密封措施	20
2.3 黏滞阻尼器性能提升	21
2.3.1 密封性能	21
2.3.2 抗腐(锈)蚀性能	24
2.3.3 快速响应性能	24
2.4 大阻尼系数阻尼器的设计	25
2.4.1 工程需求	25
2.4.2 技术手段	26
2.4.3 阻尼器力学性能试验	26
参考文献	30

第3章 细长孔式黏滞阻尼器原理与性能研究	31
3.1 阻尼介质基本性能	31
3.1.1 流体黏性	32
3.1.2 流体种类	32
3.1.3 层流、紊流与判据	33
3.1.4 硅油的基本性能	34
3.2 细长孔式黏滞阻尼器耗能机理	34
3.2.1 进口起始段能量损耗	35
3.2.2 充分发展段能量损耗	36
3.2.3 出流段能量损耗	37
3.3 细长孔式黏滞阻尼器阻尼力理论计算公式	38
3.3.1 牛顿流体阻尼器阻尼力理论计算公式	38
3.3.2 非牛顿流体阻尼器阻尼力理论计算公式	39
3.4 细长孔式黏滞阻尼器性能试验研究	44
3.4.1 试验目的	44
3.4.2 试验设备	44
3.4.3 试验阻尼器	44
3.4.4 试验方案	45
3.4.5 试验结果与分析	45
参考文献	53
第4章 螺旋孔式黏滞阻尼器原理与性能研究	55
4.1 圆截面螺旋管道黏性流动特性	55
4.1.1 正交螺旋坐标系的构建	55
4.1.2 螺旋管内流体流动的控制方程	57
4.1.3 螺旋管内流体二次流动分析	59
4.1.4 螺旋管内流体流动方程的近似解析解	59
4.1.5 螺旋管内流体流动方程的数值解	60
4.2 螺旋管道内黏性流动能量损失分析	61
4.3 螺旋孔式黏滞阻尼器理论计算公式	62
4.4 螺旋孔式黏滞阻尼器力学性能试验研究	66
4.4.1 试验方案	66
4.4.2 试验结果与分析	67
参考文献	72
第5章 调节阀式黏滞阻尼器原理与性能研究	74
5.1 调节阀式黏滞阻尼器耗能机理	74
5.1.1 调节阀的作用与特点	74
5.1.2 调节阀的工作原理	74

5.1.3 调节阀式阻尼器的耗能机理	80
5.2 调节阀式黏滞阻尼器力学模型	80
5.2.1 A型调节阀力学模型	81
5.2.2 B型调节阀力学模型	84
5.3 调节阀式黏滞阻尼器性能试验研究	87
5.3.1 试验方案	87
5.3.2 试验结果与分析	88
参考文献	93
第6章 黏滞阻尼器综合性能分析	94
6.1 黏弹性效应	94
6.2 材料可压缩性影响	97
6.2.1 阻尼介质及阻尼器零配件的可压缩性	97
6.2.2 阻尼介质的刚度	100
6.2.3 阻尼介质压缩性对阻尼器力学性能的影响	101
6.3 阻尼力滞后效应	103
6.4 阻尼器力学模型修正	105
6.5 能量耗散率	106
6.6 阻尼指数修正	108
参考文献	111
第7章 黏滞阻尼墙原理与性能研究	113
7.1 黏滞阻尼墙的耗能机理	114
7.1.1 黏滞流体材料的耗能机理	114
7.1.2 幂律流体间隙流动的阻尼计算	119
7.2 黏滞阻尼墙的力学模型	121
7.2.1 黏滞阻尼墙附加体系力学模型	121
7.2.2 黏滞阻尼墙阻尼力计算公式	123
7.3 黏滞阻尼墙性能试验	125
7.3.1 黏滞阻尼墙性能试验方案	125
7.3.2 黏滞阻尼墙试验结果与分析	126
参考文献	132
第8章 黏滞阻尼减振结构设计方法	134
8.1 黏滞阻尼减振结构适用范围	134
8.2 黏滞阻尼减振结构设防目标	134
8.2.1 抗震设防目标	134
8.2.2 抗风设防目标	134
8.2.3 其他设防目标	135

8.3 黏滞阻尼减振结构设计方法	135
8.3.1 消能减振结构的计算方法	135
8.3.2 黏滞阻尼减振结构的设计流程	136
8.3.3 黏滞阻尼减振结构附加阻尼计算	137
8.3.4 黏滞阻尼器与金属阻尼器减振设计方法对比	138
8.4 黏滞阻尼器连接与安装	139
8.4.1 黏滞阻尼器与主体结构的连接形式	139
8.4.2 黏滞阻尼器与主体结构连接部件的性能要求	140
8.4.3 黏滞阻尼器与主体结构的连接设计	141
8.4.4 黏滞阻尼器的安装要求	143
8.5 黏滞阻尼器性能与检测	143
8.5.1 黏滞阻尼器的性能要求	143
8.5.2 黏滞阻尼器的检测	143
参考文献	145
第9章 消能减振结构设计实例	147
9.1 消能减振方案	147
9.1.1 工程概况	147
9.1.2 减振结构目标性能	147
9.1.3 消能减振方案选择	148
9.1.4 模型建立	148
9.1.5 时程分析地震波选取	149
9.2 黏滞阻尼器减震设计方案	151
9.2.1 阻尼器的选择与布置	151
9.2.2 多遇地震作用下反应谱法分析结果	152
9.2.3 多遇地震作用下时程分析结果	153
9.2.4 罕遇地震作用下的弹塑性分析结果	155
9.2.5 与阻尼器相连的子框架梁、柱减震后内力值	158
9.2.6 结论	158
9.3 金属阻尼器减震设计方案	158
9.3.1 阻尼器的选择与布置	158
9.3.2 多遇地震作用下的反应谱法分析结果	159
9.3.3 多遇地震作用下的时程分析结果	161
9.3.4 罕遇地震作用下的弹塑性分析结果	163
9.3.5 结论	164
9.4 消能减振方案对比	165
参考文献	166

第1章 绪论

地震和风是人们所熟知的自然现象。地震灾害和风灾的发生具有随机性、突发性和不确定性等特点^[1-5],是一种严重危及人们生命财产的自然灾害。据统计,地球上平均每年发生震级为8级以上、震中烈度11度以上的毁灭性地震2次;震级为7级以上、震中烈度在9度以上的大地震不到20次;震级在2.5级以上的有感地震在15万次以上。我国近100年来发生里氏6级以上破坏性地震560余次,平均每年5~6次,其中8级以上地震10次。

随着社会经济的不断发展以及技术水平的逐步提高,在城市化进程中,高层、超高层建筑,高耸结构,大跨空间结构不断涌现,但始终受到地震和飓风的潜在威胁。20世纪以来,地震造成的经济损失高达数千亿美元,导致近130万人死亡和近千万人严重伤残。随着城市现代化进程的加快、人口的增加和密集,尽管在采取适当的抗震措施后,地震造成的人员伤亡有所减少,但带来的经济损失却日趋严重。强烈地震不仅可在数十秒内将一座城市夷为平地,交通、通信、供水、供电、医疗等生命线工程中断,还会引起火灾、疾病、山崩、滑坡、泥石流、海啸等严重的次生灾害。2008年5月12日,我国汶川发生里氏8.0级地震,根据记录,震中区的烈度达到了11度。地震持续时间约2分钟,造成的直接经济损失8452亿元,69227人在地震中遇难。地震灾害波及全国多个省、自治区、直辖市,其中以川陕甘三省受灾最为严重。除了人员伤亡外,财产损失中房屋建筑损失所占比重很大,城乡居民住房的损失约占总损失的27.4%,学校、医院和其他非住宅用房的损失约占20.4%。2010年4月14日,我国青海省玉树藏族自治州玉树县结古镇发生里氏7.1级地震,震中地区烈度达到了9度。地震导致2698人遇难,其中学生就有199人。玉树地震余震频发,造成的次生灾害严重,震区直接受灾人数达到了20万人。我国地处多个地震带,大小地震灾害频发,地震中房屋倒塌等将会直接导致重大人员伤亡以及财产损失。

此外,对于高层建筑、高耸结构和桥梁等结构物,风灾造成的破坏也十分严重。如1994年8月我国温州遭受强台风袭击,5座输高压电塔倒塌,百米高的电视塔、温州市中心公安大楼80m高的通信铁塔均被风吹倒,大批民房倒塌或受损,直接经济损失超过100亿元;1940年美国华盛顿立跨853m的悬索桥,建好不到4个月,就在一场风速不到20m/s的灾害下产生上下和来回扭曲振动而倒塌;1926年美国迈阿密市17层高的Meyer-Kiser大楼在飓风袭击下,维护结构严重破坏,钢框架结构发生塑性变形,顶部残留位移达0.61m;1972年美国波士顿60层高的John Hancock大楼在大风作用下,约170块玻璃开裂或破坏,事后不得不更换所有约10348块玻璃,并采取了相应的防护措施,该建筑的使用不仅被延误了三年,而且造价从预算的7500万美元上升到15800万美元。中国每年在福建沿海,广东广西沿海,浙江沿海,海南沿海等地区都会受到台风影响。每年台风都会对上述地区造成巨大的经济损失,譬如2014年影响海南全岛的9号台风“威马逊”,2016年影响厦门的14号台风“莫兰蒂”,以及2016年秋登陆台湾以及大陆的台风“鲶鱼”。超强台风“威马逊”最大风力17级,共造成海南、

广东、广西的 59 个县市区、742.3 万人、46.85 万 hm^2 农作物受灾,直接经济损失约为 265.5 亿元。海南因房屋建筑倒塌、洪水冲淹等死亡 9 人、失踪 5 人,广西因倒房、滑坡等死亡 5 人。受灾省份多地基础设施损毁严重,农作物大量受损,灾区人员紧急转移安置并安排紧急生活救助,灾区大部分房屋倒塌或严重损坏。“威马逊”对三省区电网造成冲击。灾情期间,南方电网 10 kV 以上线路累计跳闸 1 342 条次,累计损失负荷 139.74 万 kW。广西数十条普通公路部分路段断通,高速公路沿线设施受到较大破坏,北海、钦州、防城等地数百条客运班线停运。2016 年影响我国东南沿海大部分地区的超强台风“莫兰蒂”,最大风力达到 17 级,造成 29 人死亡、49 人受伤、18 人失踪,直接经济损失达到 25 亿 631 万美元,受灾地区建筑物、构筑物受损严重。

除上述地震灾害、风灾外,由于爆炸冲击波、机器运转、车辆运行、海浪冲击等因素引起的结构振动也不容忽视。这些灾害不仅造成大量人员伤亡和巨大经济损失,还给人类在精神上以重创。但是与此同时,人类也一直依靠自己的智慧,不断认识自然,揭示自然规律,并用以指导社会生产实践,能动地减轻自然界带给人类的灾害。

1.1 传统结构抗震设计理论及有待解决的问题^[5-10]

传统抗震设计理论以概率论为基础,提出三水准的设防要求,即“小震不坏,中震可修,大震不倒”。并通过两个阶段设计来实现:第一阶段设计采用第一水准烈度的地震动参数,结构处于弹性状态,能够满足承载力和弹性变形的要求;第二阶段设计采用第三水准烈度的地震动参数,结构处于弹塑性状态,要求具有足够的弹塑性变形能力,但又不能超过变形限值,使建筑物“裂而不倒”。然而,结构物要终止在强震或大风作用下的振动反应(速度、加速度和位移),必然要进行能量转换或耗散。传统抗震结构体系实际上是依靠结构及承重构件的损坏消耗大部分输入能量,这是一种消极被动的抗震策略。由于地震具有随机性特点,目前人们还不能准确估计结构在设计使用年限内可能遭遇的地震作用的强度和特性,建筑结构的破损程度及倒塌的可能性难以控制,当发生突发性超烈度地震时,可能导致结构构件严重破坏甚至倒塌,这在一定程度上是不合理也是不安全的。

采用传统抗震设计方法,须根据建筑的不同抗震等级采取大量严格的抗震构造措施,不但材料耗量大大增加,施工的难度也相应增大,从而大大提高了建筑造价;当遭遇大震后,结构的非线性耗能将对结构造成不可修复的损伤,其破坏的严重程度使建筑物无法继续使用,震后不得不拆除重建,在经济上造成的损失是极其巨大的。

此外,还应考虑如何保证地震发生时生命线工程以及某些高精尖技术设备能正常运行,不致因结构反应使其破坏,引发或加重次生灾害。

为了克服传统抗震设计方法的缺陷,各国学者与工程师们不断致力于结构地震反应控制技术的研究,结构振动控制技术逐渐发展起来。该技术是减轻结构地震和风振反应的积极主动手段,使结构能够具有自我调整的能力。结构消能减震(又称“消能减振”)技术就是一种结构振动控制技术,《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2001)首次以国家标准的形式对房屋消能减震设计这种抗震设防新技术的设计要点做出了规定,标志着消能减震技术在我国已经由科学研究走向了推广应用阶段。现行《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)在总结了地震惨痛教训的基础上将建筑结构的抗震设计与实际工程中的运用再一次紧密结合在了一起。

1.2 结构消能减振技术的研究进展

1.2.1 结构控制技术^{[1][8][11-68]}

振动控制作为现代控制理论中一个重要概念,已被引入抗震研究领域,并且随着时代的发展,振动控制技术已成为抵御震害的有效方法^[69]。所谓结构振动控制,就是在结构的特定部位装设某种装置(如隔振垫等)或某种机构(如消能支撑、消能剪力墙、消能节点、消能器等)或某种子结构(如调频质量等)或施加外力(如外部能量输入)或调整结构的动力特性,在地震(或风)的作用下,使其结构的动力响应(如加速度、速度、位移)得到合理的控制,确保结构本身及结构中的人员仪器设备的安全都处于正常的使用环境状况^[70]。

20 世纪早期,结构控制理论在机械工程、航空航天工程及运输工程中得到广泛应用。日本学者 Kabori 和 Minai 最早于 1960 年提出结构控制的概念,结构振动控制的概念最早是 1972 年由美籍华裔学者姚治平提出的,在我国是 1980 年王光远院士从高耸结构风振结构开始研究的。经过数十年的发展,工程结构振动控制技术已日臻成熟。中国学者周福霖提出了“结构减震控制体系”的概念,使得各种减震控制技术上升到了抗震设计理论的新阶段。

按是否需要外部能量输入,结构振动控制可以分为被动控制、主动控制、半主动控制、智能控制和混合控制五类,详细分类如图 1-1 所示。

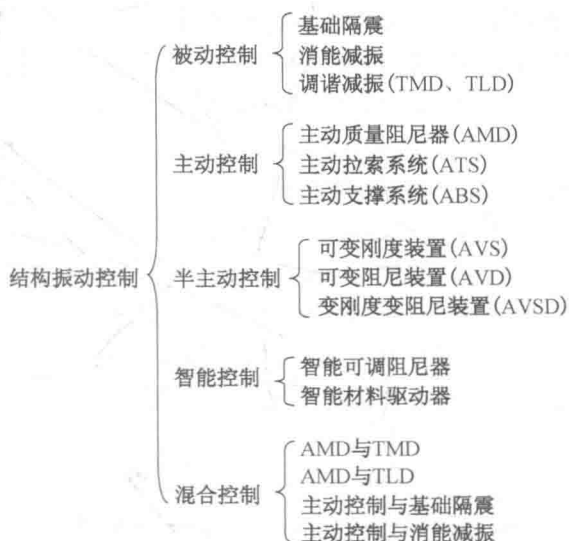


图 1-1 结构振动控制分类

1) 被动控制

被动控制(Passive Control):不需要输入外部能源提供控制力,其控制力是控制装置随结构一起振动变形时产生的,控制过程不依赖于结构反应和外界干扰信息的控制方法。基础隔震、耗能减震和吸收减震等均为被动控制。被动控制主要采用隔震技术、耗能减震技术和质量调谐减振技术(TMD、TLD)来调整结构动力特性,达到隔离地震和消减地震或其他振动的目的,

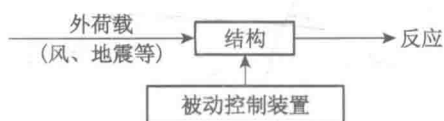


图 1-2 被动控制工作原理

而且与主动控制和半主动控制相比有着构造简单、造价低廉、可靠性高等优点。被动控制技术既能有效减震(振),又较为经济,且安全可靠,已成为人们应用开发的热点,在国内外的研究和实际工程的应用上已有一定时期,也日趋成熟。被动控制工作原理如图 1-2 所示。

结构被动控制概念是指通过在建筑结构上安装被动消能阻尼器和被动吸能器,消耗、吸收、转移结构的振动能量,减小结构的振动,从而确保结构本身及结构中的人、仪器设备、装修

等的安全或处于正常使用状态。

被动控制技术适用于抗震设防地区和对抗震设防有特殊要求的新建建筑结构以及既有建筑结构的抗震加固,适用于高层建筑、超高层建筑和高耸结构的抗风设计,也可用于其他动荷载作用下建筑结构的抗震设计。

2) 主动控制

主动控制(Active Control):需要输入外部能源提供控制力,控制过程依赖于结构反应和外界干扰信息的控制方法。主动控制系统由传感器、运算器和施力作动器三部分构成。主动控制是将现代控制理论和自动控制技术应用于结构控制中的高新技术。主动控制工作原理如图 1-3 所示。



图 1-3 主动控制工作原理图

主动控制可以在结构物受激励过程中瞬时施加控制力和瞬时改变结构的动力特性,是以迅速衰减和控制结构震动反应的一种减震(振)技术,这种技术减震效果非常好,与传统的无控结构体系相比,能使结构推动反应减少 40%~85%。同时,其实用面广,既能对主振型实施控制,也能对其他振型实施有效控制,这对一些具有多个主振型及振型耦合较强的柔性结构体系具有重大意义,并且可根据不同的使用要求,实施不同减震水平的控制目标。

3) 半主动控制

半主动控制(Semi-Active Control):不需要输入外部能源提供控制力,控制过程依赖于结构反应和外界干扰信息的控制方法。

半主动控制以被动控制为主,它既具有被动控制系统的可靠性,又具有主动控制系统的强适应性,通过一定的控制规律可以达到主动控制系统的控制效果,是一种具有前景的控制技术。

4) 智能控制

智能控制(Intelligent Control):采用智能控制算法和采用智能驱动或智能阻尼装置为标志的控制方式。

采用智能控制算法为标志的智能控制,它与主动控制的差别主要表现在不需要精确的几何模型,采用智能控制算法确定输入或输出反馈与控制增益的关系,而控制力还是需要很大外部能量输入的作动器来实现;采用智能驱动材料和器件为标志的智能控制,它的控制原理与主动控制基本相同,只是实时控制力的作动器使用智能材料制作的智能驱动器或智能阻尼器。

目前代表性的智能阻尼器主要有磁流变液阻尼器和压电变摩擦阻尼器。1995 年日本 Nakajima 桥梁施工中的桥塔 AMD 控制应用了模糊控制算法。磁流变液阻尼器已经应用于日本的一座博物馆建筑的地震控制和 Keio 大学的一栋隔震居住建筑以及我国的岳阳洞庭湖大桥多塔斜拉桥的拉索风雨激振控制。智能控制构造简单、调节驱动容易、耗能小、反应迅速、几乎无时滞,在结构主动控制、半主动控制、被动控制中有广阔的应用前景。

5) 混合控制

混合控制(Hybrid Control):混合控制是一种采用了不同控制方式相结合的控制方法,合理选取控制技术的较优组合,吸取各控制技术的优点,避免其缺点,可形成较为成熟而先进有效的组合控制技术,但其本质上仍是一种完全主动控制技术,仍需外界输入较多能量。混合控

制工作原理如图 1-4 所示。

混合控制则是主动和被动甚至多种控制方式的混合,在控制结构时,部分通过隔震、消能技术调整结构的动力特性,部分输入外部能源来达到减震目的。被动控制简单可靠,不需要外部能源,系统设置要求高。

把两种甚至多种系统混合使用,取长补短,

更加合理、经济、安全。例如,当结构在常遇地震时,主要依靠被动控制系统实现减震;当结构遭遇罕见的大地震时,主动控制系统被驱动参与工作,两种系统联合运作,达到最佳的控制效果。

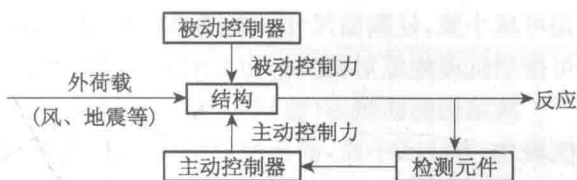


图 1-4 混合控制工作原理图

1.2.2 结构消能减振技术^{[1][8][10][21][22]}

由前述分析可知,结构控制技术主要借助于振动隔离、吸能或耗能等手段,降低被控结构在外界激励下的动力响应。结构消能减震(振)技术就是一种结构控制技术,它是通过在结构的适当位置安装消能减震(振)装置,利用这些装置的耗能来减小结构的动力响应。

结构消能减震(振)技术的研究来源于对结构在地震发生时的能量转换的认识,现以一般能量表达式来分别说明地震时传统抗震结构和消能减震结构的能量转换过程:

传统抗震结构:

$$E_m = E_R + E_D + E_S \quad (1-1)$$

消能减震结构:

$$E_m = E_R + E_D + E_S + E_A \quad (1-2)$$

式中, E_m ——地震时输入结构的地震能量;

E_R ——结构物地震反应的能量,即结构物振动的动能和势能(弹性变形能);

E_D ——结构阻尼消耗的能量(一般不超过 5%);

E_S ——主体结构及承重构件非线性变形(或损坏)消耗的能量;

E_A ——消能构件或消能装置消耗的能量。

地震发生时,地面震动反应引起结构物的震动反应,地面震动能量向结构物输入,结构物接收了大量的地震能量 E_m ,必然要进行能量转换或消耗才能最后终止震动反应。从式(1-1)看出,对于传统抗震结构体系,容许结构及承重构件(柱、梁、节点等)在地震中出现损坏,即靠结构及承重构件的损坏以消耗能量 E_S ,结构及构件的严重破坏或倒塌,就是地震能量消耗的最终完成($E_S \rightarrow E_m$),这在某种程度上是不安全的。

而对于消能减震结构[式(1-2)],如果 E_D 忽略不计,消能装置率先进入消能工作状态,大量消耗输入结构的地震能量($E_A \rightarrow E_m$),既能保护主体结构及承重构件免遭破坏($E_S \rightarrow 0$),又能迅速地衰减结构的地震反应($E_R \rightarrow 0$)。结构设置消能减震装置后,可同时减少结构水平和竖向地震作用,适用范围较广,结构类型和高度均不受限制;消能减震装置可使结构具备足够的附加阻尼,满足罕遇地震下预期的结构位移要求;消能减震结构不改变结构的基本形式(但

是可减小梁、柱断面尺寸和配筋,减少剪力墙的设置),除消能部件和相关部件外,结构设计仍可按照抗震规范对相应结构类型的要求进行。

故结构消能减震(振)技术是一种积极的、主动的抗震对策,不仅改变了结构抗震设计的传统概念、方法和手段,而且使得结构的抗震(风)舒适度、抗震(风)能力、抗震(风)可靠性和灾害防御水平大幅度提高。

结构消能减振体系通常由主体结构和消能部件(消能装置和连接件)组成,按照消能部件的不同“构件形式”可以分为消能支撑、消能剪力墙、消能支承或悬吊构件、消能节点和消能联接等几种常用的形式。

消能部件中安装有消能器(通常称为“阻尼器”)等消能减振装置,当结构构件(或节点)发生相对位移(或转动)时,消能器能够产生较大阻尼,发挥消能减振作用。消能器可分为位移相关型、速度相关型及其他类型。黏滞阻尼器、黏弹性阻尼器、黏滞阻尼墙、黏弹性阻尼墙等属于速度相关型阻尼器,即阻尼器对结构产生的阻尼力主要与消能器两端的相对速度有关,与位移无关或与位移的关系为次要因素;金属屈服型阻尼器、摩擦阻尼器属于位移相关型阻尼器,即阻尼器对结构产生的阻尼力主要与阻尼器两端的相对位移有关,当位移达到一定的起动限值才能发挥作用。

1.3 黏滞阻尼器研究进展^{[1][8][11-13][22-24][79]}

黏滞阻尼器一般由缸体、活塞、阻尼孔(或间隙或两者兼有)、黏滞流体阻尼材料和导杆等部分组成,活塞在缸筒内作往复运动,活塞上有适量小孔称为阻尼孔(和活塞与缸筒间配合间隙),缸筒内装满黏滞流体阻尼材料。当活塞与缸筒之间发生相对运动时,由于活塞前后的压力差使流体阻尼材料从阻尼孔(或间隙)中通过,从而产生阻尼力,达到耗能的目的。流体阻尼器对结构进行振动控制的机理是将结构振动的部分能量通过阻尼器中黏滞流体阻尼材料的黏滞耗能耗散掉,达到减小结构振动(地震或风振)反应的目的。

已有的理论分析以及实验研究结果表明:黏滞阻尼器能够提供较大的阻尼,因而可以有效地减小结构振动;此外,多数研究者认为黏滞阻尼器一般不提供附加的刚度,不会因为安装阻尼器而改变原结构的自振周期,从而增加地震作用。黏滞阻尼器与黏弹性阻尼器相比,受激励频率和温度的影响较小。这些优点使得黏滞阻尼器在结构的抗震和抗风控制中有着广阔的应用前景。

1.3.1 国际研究进展和应用现状^{[26-44][71][72]}

黏滞阻尼器是航空、航天以及车辆等机械中广泛使用的减振器的大型化,利用阻尼器进行结构振动控制的研究是20世纪80年代以来国际上才出现的新课题,美国和日本在这方面的研究较早,成果也较多。90年代中期,美国国家科学基金会(NSF)和美国土木工程协会(ASCE)等单位组织了两次大型联合试验,并由第三方对抗震加固工程中所使用的黏滞阻尼器及其他隔震类产品的减震性能进行测试评估,这一事件在阻尼器从试验机构迈向工程应用过程中具有承上启下的重要意义。目前,全世界已有数以百计的工程使用了黏滞阻尼器,涉及高层建筑、高耸结构、桥梁、铁道、体育馆、海洋石油平台甚至卫星发射塔等(见表1-1)。

表 1-1 黏滞阻尼器在国外的部分应用情况

工程名称	地 点	日期	概 况
北美防空司令部	夏安山,美国	1984	用于防护核攻击
加利福尼亚居民楼	加利福尼亚,美国	1985	黏滞阻尼器安装在隔震系统中
西雅图西桥	西雅图,美国	1990	安装了 6 个黏滞阻尼器用于减小甲板的摇摆。一种能够承受 1 000 kN 的力,行程是 406 mm;另一种能够承受 2 515 kN 的力,行程是 254 mm
意大利桥	意大利	1991	阻尼器重 2 t,长度为 2 m,行程为 500 mm,能够承受 5 000 kN 的力以及耗散 2 000 kJ 的能量
SUT-Building	静冈,日本	1992	世界上第一个使用黏滞阻尼墙进行消能减震的结构
Rich 运动场	布法罗,美国	1993	12 个黏滞阻尼器被用于减小底盘锚固螺栓的疲劳,每个阻尼器能承受 50 kN 的力,行程为 460 mm
San Bernardino 医疗中心	加州,美国	1993	180 个黏滞阻尼器,每个阻尼器最大输出阻尼力为 1 400 kN,长度为 1 200 mm
Petronas 双塔	马来西亚	1995	12 个黏滞阻尼器被安装天桥支腿上,每个阻尼器承受 10 kN 的力,行程是 50 mm
太平洋贝尔北方网络中心	加州,美国	1995	共安装了 62 个黏滞阻尼器
第一街桥	西雅图,美国	1996	共安装了 4 个黏滞阻尼器,每个阻尼器承受 400 kN 的力,行程为 685 mm
美国联邦储备银行	萨克拉曼多,美国	1996	两种共 120 个阻尼器被用于控制结构的地震响应。一种阻尼器的控制力为 710 kN;另一种阻尼器的控制力为 1 290 kN,行程为 64 mm
Langenbach House	奥克兰,美国	1996	4 个阻尼器加在结构的基底隔震系统,每个阻尼器的控制力为 130 kN,行程为 150 mm
Worcester 会议中心	美国	1997	32 个阻尼器加在结构的调频质量阻尼器系统中,每个阻尼器的控制力为 10 kN,行程为 75 mm
电影厂的停车库	洛杉矶,美国	1997	2 个阻尼器用来控制混凝土的热胀冷缩,阻尼器的控制力为 150 kN,行程为 50 mm
新西北太平洋棒球场	西雅图,美国	1997	8 个阻尼器用来控制 3 个活动屋顶的风振和地震响应,控制力为 5 000 kN,行程 375 mm
第一大街南桥	西雅图,美国	1998	4 个阻尼器用来控制桥的振动,每个阻尼器的控制力为 600 kN,行程为 635 mm
鹿儿岛国际机场航站楼	鹿儿岛,日本	1999	黏滞阻尼墙应用于机场航站楼的加固工程