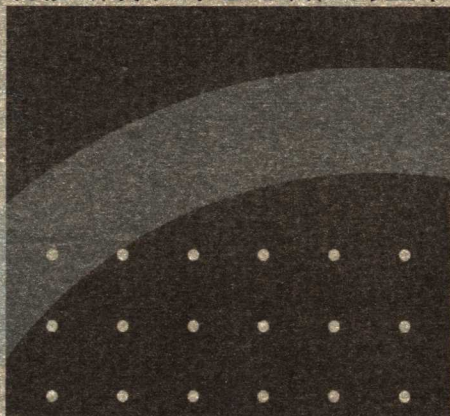


耗能减震设计理论及应用丛书



JINSHU HAONENG
JIANZHEN JIEGOU SHEJI

金属耗能
减震结构设计

周云 著

“耗能减震设计理论及应用”丛书之一

金属耗能减震结构设计

周 云 著

武汉理工大学出版社

· 武汉 ·

内容简介

本书系统地总结和阐述了金属耗能减震的理论、方法、技术和工程应用的主要研究成果。主要内容包括金属耗能减震的概念与原理、金属耗能器的类型和性能、金属耗能器的力学模型、金属耗能减震结构的特性、分析方法、设计方法和分析软件以及金属耗能器的工程应用情况等。

本书可作为从事土木工程、防灾减灾工程及防护工程、工程力学、材料科学与工程的研究、设计、制造和施工工程技术人员参考书,也可作为上述专业的研究生和高年级本科生的学习参考书。

图书在版编目(CIP)数据

金属耗能减震结构设计/周云著. —武汉:武汉理工大学出版社,2006.11
ISBN 7-5629-2466-X

I. 金…

II. 周…

III. 金属-金属耗能-建筑结构-减震设计

IV. TU352·104

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 131067 号

出版发行:武汉理工大学出版社(武汉市武昌珞狮路 122 号 邮编:430070)

<http://www.techbook.com.cn>

印刷者:武汉中远印务有限公司

经销者:各地新华书店

开本:787×1092 1/16

印张:14.5

字数:370千字

版次:2006年11月第1版

印次:2006年11月第1次印刷

印数:1—3000元

定价:43.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请向出版社发行部调换。

本社购书热线电话:(027)87394412 87383695 87384729

版权所有,盗版必究。



作者简介

周云，男，1965年9月生，云南人。1996年12月获哈尔滨建筑大学结构力学专业博士学位，1997年3月至2000年6月哈尔滨工业大学力学博士后流动站博士后，2001年12月破格晋升为教授。先后任广州大学土木工程学院副院长、院长，防灾减灾工程研究所所长，现任广州大学科技处处长、公共安全与防灾减灾研究中心主任。长期从事工程抗震与减灾工程减震控制、城市公共安全与防灾减灾研究。先后主持完成国家自然科学基金等项目10余项，获省（部）级科技进步二、三等奖3项，市科技进步二、三等奖2项，在《土木工程学报》等学术刊物上发表学术论文90余篇，获国家新型实用专利6项，主编《建筑耗能减震技术规程》，参加《高层钢结构技术规程》等三个规范或规程的编写；在科学出版社等出版社出版《土木工程抗震设计》，《土木工程防灾减灾学》等教材和著作14本。兼任土木工程学会防灾减灾工程技术委员会副主任，高等学校土木工程专业教学指导委员会委员，国际结构控制协会中国分会、中国钢结构协会钢-混凝土组合结构协会等16个协会或专业委员会的常务委员或委员，《土木工程学报》、《地震工程与工程振动》等7个学术刊物编委。

前 言

地震和风灾害严重威胁着人类的生存与发展,自从人类诞生以来人们就为抵御这两种自然灾害而奋斗。随着科学技术和人民生活水平的提高,预防与抵御地震和风灾害的能力也在不断的提高,结构减震(振)控制技术作为抗御地震(强风)的一种有效方法,也得到了发展和应用,并成为比较成熟的技术,结构减震(振)控制方法改变了通过提高结构刚度、强度和延性来提高结构的抗震抗风能力,而是通过调整或改变结构动力参数的途径,改变结构的震(振)动反应,有效地保护结构在地震(强风)中的安全。在结构中加入耗能器来控制结构的地震和风振反应的耗能减震(振)方法是结构减震(振)控制技术中一种有效、安全、可靠、经济的减震(振)方法。

近 30 年来,国内外学者对这一技术及相关的理论、方法进行了大量的研究和应用,取得了丰硕成果。为了使这些成果能尽早应用于我国量大面广的工程建设中,作者结合自己的研究,较系统地总结这一领域的研究成果,形成这套耗能减震系列丛书。该丛书包括《金属耗能减震结构设计》、《摩擦耗能减震结构设计》、《粘滞阻尼减震结构设计》、《粘弹性阻尼减震结构设计》4 本。

本书系统地总结和阐述了金属耗能减震的理论、方法和技术及工程应用的主要研究成果。全书共 8 章。第 1 章为金属耗能减震的概念与原理,第 2 章为金属耗能器的类型与性能,第 3 章为金属耗能器的力学模型,第 4 章为金属耗能器减震结构的特性,第 5 章为金属耗能减震结构的分析方法,第 6 章为金属耗能器减震结构的设计方法,第 7 章为金属耗能减震器的工程应用,第 8 章为耗能减震结构分析软件简介。

本书得到周福霖院士等前辈和同行的鼓励、指导和支持,作者特表示由衷的感谢!

本书在编写过程中,参阅了国内外许多学者的著作、论文和研究报告,一些学者、工程技术人员主动提供了有关资料和工程照片,特在此表示衷心的感谢!作者的研究生吴从晓、王廷彦、汤统壁、冷加冰和聂一恒等协助进行了资料收集和书稿录入等大量工作,作者对他们的贡献表示衷心的感谢!

本书部分研究成果得到了国家自然科学基金、广东省自然科学基金和建设部、广东省建设厅、广州市建委、广州市教委科技基金的资助,在此表示衷心的感谢!

由于耗能减震内容十分丰富,书中难免挂一漏万,我们将在今后的研究和教学中逐步完善,同时,由于作者水平有限,书中难免有疏漏及错误之处,衷心希望有关专家、学者和读者批评指正。

周 云

2006 年 3 月于广州大学城

目 录

1 金属耗能减震的概念与原理	1
1.1 结构减震控制的概念与分类	1
1.1.1 结构减震控制的概念与发展简况	1
1.1.2 结构减震控制的分类与原理	1
1.2 耗能减震的概念、原理与分类	4
1.2.1 耗能减震的概念	4
1.2.2 耗能减震的原理	4
1.2.3 耗能减震装置的分类	5
1.2.4 耗能减震装置设计的新思路	6
1.3 金属耗能特性与减震原理	7
1.3.1 金属耗能的特性与减震原理	7
1.3.2 钢材的耗能特性与减震原理	9
1.3.3 铅的耗能特性与减震原理	10
1.3.4 形状记忆合金的耗能特性与减震原理	11
1.4 金属耗能减震特点与应用范围	12
参考文献	14
2 金属耗能器的类型与性能	15
2.1 软钢耗能器的类型与性能	15
2.1.1 梁式耗能器	15
2.1.2 锥形钢悬臂耗能器	15
2.1.3 加劲耗能装置(ADAS)	16
2.1.4 U形、S形、三角形钢元件耗能器	19
2.1.5 圆环(方框)耗能器	21
2.1.6 蜂窝状、槽型、单圆孔形、双X形钢板耗能器	25
2.1.7 剪切钢板耗能器	27
2.1.8 折叠薄壁钢管(Grooved thin-walled tubes)耗能器	29
2.1.9 无粘结支撑(约束钢构件耗能器)	29
2.1.10 Laura型耗能器、E字形钢耗能器	37
2.1.11 剪切联结耗能器	38
2.2 低屈服点钢耗能器的类型与性能	40
2.3 铅耗能器的类型与性能	42
2.3.1 铅挤压耗能器	42
2.3.2 铅剪切耗能器	44
2.3.3 铅节点耗能器	45

2.3.4	圆柱型铅耗能器	46
2.3.5	异型铅耗能器	47
2.3.6	新型铅耗能器	48
2.4	组合式钢耗能器的类型与性能	50
2.4.1	弹塑性滞回-摩擦复合耗能器	50
2.4.2	组合钢板耗能器	50
2.4.3	钢管铅芯耗能器	52
2.4.4	钢铅组合耗能器	52
2.4.5	超塑性合金筒耗能器	53
2.4.6	铅粘弹性阻尼器	54
2.4.7	铅粘弹性阻尼筒耗能器	55
	参考文献	56
3	金属耗能(阻尼)器的力学模型	59
3.1	理想弹塑性模型	59
3.2	双线性模型	59
3.3	Ramberg-Osgood 模型	60
3.4	Bouc-Wen 模型	61
3.5	钢材考虑损伤积累效应滞回模型	63
	参考文献	65
4	金属耗能减震结构的特性	66
4.1	装有加劲耗能装置结构体系的减震性能	66
4.1.1	装有 X 形加劲耗能装置的三层钢框架结构的振动台试验研究	66
4.1.2	装有三角形加劲耗能装置的两层钢框架的拟动力试验	69
4.1.3	装有开孔式加劲耗能装置的五层钢框架振动台试验研究	70
4.2	装有圆环和弹塑性滞回-摩擦耗能器结构体系的减震性能	72
4.2.1	试验结构的概况	73
4.2.2	地震波输入	74
4.2.3	结构特性	74
4.3	装有矩形板耗能器钢框架结构的减震性能	76
4.3.1	试验结构的概况	76
4.3.2	地震波的输入	76
4.3.3	结构特性	77
4.4	装有无粘结支撑框架的减震性能	78
4.4.1	装有无粘结支撑框架的拟动力试验	78
4.4.2	装有无粘结支撑框架的振动台试验	80
4.5	装有单圆孔软钢耗能装置钢框架的减震性能	82
4.5.1	结构概况	82
4.5.2	地震波的输入	83
4.5.3	结构特性	83

4.6	装有剪切联结(SL)耗能装置的钢框架的减震性能	85
4.6.1	结构概况	85
4.6.2	地震波的输入	86
4.6.3	结构特性	86
4.7	装有低屈服点剪切钢耗能装置的钢框架的减震性能	87
4.7.1	试验结构的概况	87
4.7.2	地震波输入	88
4.7.3	结构特性	89
4.8	装有组合钢板屈服耗能器的高层钢结构的减震性能	89
4.8.1	试验结构概况	89
4.8.2	地震波的输入	90
4.8.3	结构特性	90
	参考文献	93
5	金属耗能减震结构的分析方法	94
5.1	耗能减震结构的分析方法概述	94
5.1.1	结构的地震反应分析方法概述	94
5.1.2	耗能减震结构的分析方法概述	94
5.2	耗能减震结构的分析模型	95
5.2.1	普通结构的分析模型	95
5.2.2	耗能减震结构的分析模型	99
5.3	基于等价线性化的振型分解反应谱法	99
5.3.1	振型分解反应谱法概述	99
5.3.2	耗能减震器的等价线性化	100
5.3.3	耗能减震结构的振型分解法	104
5.3.4	耗能减震结构的抗震设计反应谱	105
5.3.5	耗能减震结构地震作用与作用效应计算	106
5.4	时程分析法	108
5.4.1	时程分析法概述	109
5.4.2	输入地震波的选用及调整	110
5.4.3	耗能减震结构的恢复力模型	112
5.4.4	质量、刚度与阻尼矩阵	115
5.4.5	结构振动方程的数值积分法	116
5.5	静力弹塑性(Push-over)分析方法	117
5.5.1	静力弹塑性(Push-over)分析方法概述	118
5.5.2	静力弹塑性(Push-over)分析方法的原理	119
5.5.3	结构的能力谱	120
5.5.4	结构的地震需求谱	129
5.5.5	目标位移与结构性能评估	135
5.6	能量分析法	141

5.6.1	能量分析方法概述	142
5.6.2	能量分析方法基本原理	142
5.6.3	地震输入能量及其分配的影响因素	147
5.6.4	能量反应谱	150
	参考文献	155
6	金属耗能(阻尼)减震结构的设计方法	159
6.1	耗能减震结构的概念设计	159
6.1.1	耗能减震结构适用范围和设防目标	159
6.1.2	耗能减震结构需求阻尼比估计	161
6.1.3	耗能器的选择	161
6.1.4	耗能器数量估计和要求	162
6.1.5	耗能部件的形式及布置原则	164
6.2	耗能减震结构的抗震设计方法	165
6.2.1	多遇地震作用下耗能减震结构的抗震强度与变形验算	165
6.2.2	罕遇地震作用下耗能减震结构的弹塑性位移验算	167
6.3	耗能支撑的连接与构造	168
6.4	金属耗能减震结构的设计实例	170
6.4.1	加劲阻尼装置的结构设计	170
6.4.2	安装蜂窝状钢耗能器控制扭转和侧移的结构设计	175
6.4.3	安装无粘结支撑耗能装置结构的设计与分析	179
	参考文献	186
7	金属阻尼(耗能)减震器的应用	187
7.1	金属耗能器应用概述	187
7.2	加劲阻尼装置在工程中的应用	187
7.2.1	应用概况	187
7.2.2	加劲耗能器的运用实例	188
7.3	无粘结支撑耗能器的应用	190
7.3.1	无粘结支撑应用概况	190
7.3.2	无粘结支撑应用实例	192
7.4	铅耗能器的应用	195
7.4.1	铅耗能器应用概况	195
7.4.2	应用实例	196
7.5	其他类型的金属耗能器的应用	200
7.5.1	应用概况	200
7.5.2	应用实例	201
	参考文献	204
8	耗能减震结构分析软件简介	205
8.1	耗能减震结构分析软件概述	205
8.2	ETABS	205

8.2.1	ETABS 概述	205
8.2.2	耗能减震单元在 ETABS 中的实现	206
8.3	SAP2000	210
8.3.1	SAP2000 概述	210
8.3.2	耗能减震单元在 SAP2000 中的实现	210
8.4	MIDAS	213
8.4.1	MIDAS 概述	213
8.4.2	耗能减震单元在 MIDAS 中的实现	214
8.5	ANSYS	218
8.5.1	ANSYS 概述	218
8.5.2	耗能减震单元在 ANSYS 中的实现	218
	参考文献	221
附录	英制与国际单位制(SI)转换表	222

1 金属耗能减震的概念与原理

1.1 结构减震控制的概念与分类

1.1.1 结构减震控制的概念与发展简况

传统结构抗震是通过增强结构本身的抗震性能(强度、刚度、延性)来抵御地震作用的,即由结构本身储存和消耗地震能量,这是被动消极的抗震对策。由于人们尚不能准确的估计未来地震灾害作用的强度和特性,按照传统抗震方法设计的结构不具备自我调节能力,因此,结构很可能不满足安全性的要求,而产生严重破坏或倒塌,造成重大的经济损失和人员伤亡。

合理有效的抗震途径是给结构安装减震装置(系统),由减震装置与结构共同承受地震作用,即共同储存和耗散地震能量,以缓解和减轻结构的地震反应。这是积极主动的抗震对策,是抗震对策中的重大突破和发展^[1~4]。

结构减震控制的研究与应用已有将近 30 年的历史,以改变结构频率为主的隔震技术是结构减震控制技术中研究和应用最多、最成熟的技术。国内外已建隔震建筑数千栋,并在桥梁、地铁等工程中大量应用,其中一些隔震建筑已在几次大地震中成功经受了考验。

以增加结构阻尼为主的被动耗能减震理论与技术已趋于成熟,并已成功用于工程结构的抗震抗风控制中。本书与同期出版的系列书籍将着重介绍耗能减震控制的研究成果。

结构减震的主动控制具有很广的适应范围,控制效果好,已进行了大量的理论研究,并在少数试点工程中应用,但控制系统结构复杂,造价昂贵,所需的巨大能源在强烈地震时无法完全保证,因此,其应用遇到较大困难。

近年来,智能驱动材料和控制装置的研究和发展为土木工程结构的抗震控制开辟了新的天地,将为土木工程结构减震控制的第二代高性能耗能器和主动控制驱动器的研制和开发提供基础,从而使结构与其感知、驱动和执行部件一体化的减震控制智能系统设计成为可能。

1.1.2 结构减震控制的分类与原理

结构减震控制根据是否需要输入外部能源分为被动控制、主动控制、半主动控制、智能控制和混合控制^[2~5],见图 1.1 和图 1.2。

被动控制(Passive Control)——不需要输入外部能源提供控制力,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、耗能减震和吸震减震等均为被动控制,如图 1.2(a)、(b)、(c)所示。

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组成。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,如图 1.2(d)所示。

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

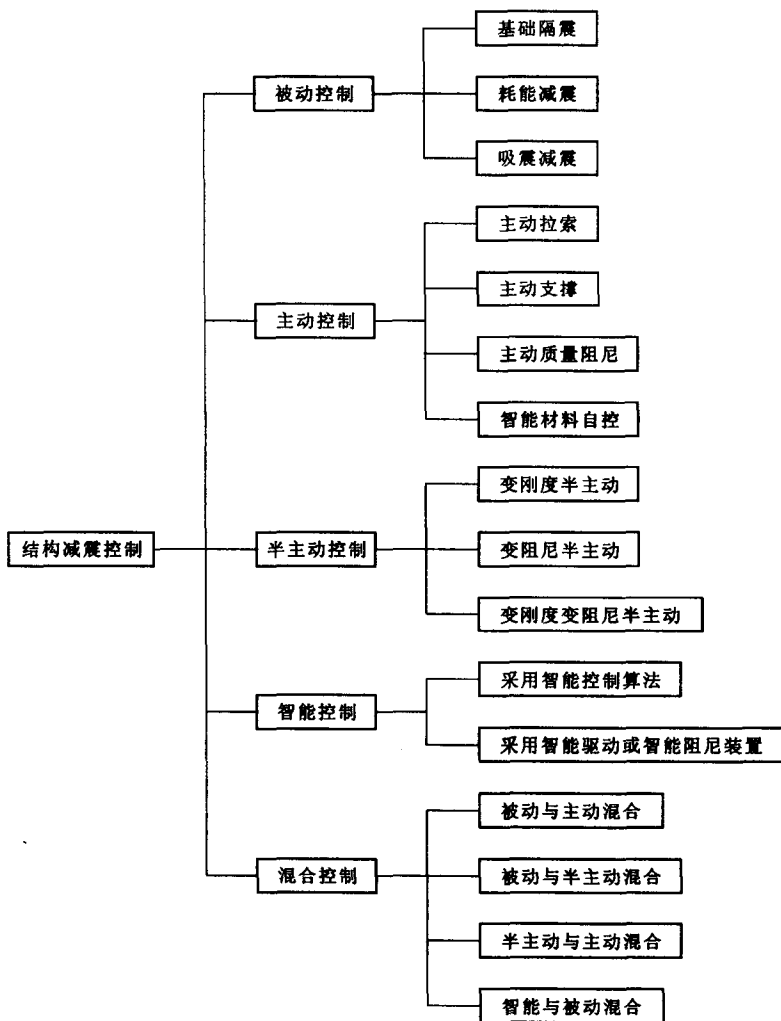


图 1.1 结构减震控制分类图

于结构反应和外界干扰信息的控制方法,如图 1.2(d)所示。

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。

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结构模型,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,只是实施控制力的作动器是用智能材料制作的智能驱动器或智能阻尼器。

混合控制(Hybrid Control)——不同控制方式相结合的控制方法,如图 1.2(e)所示。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

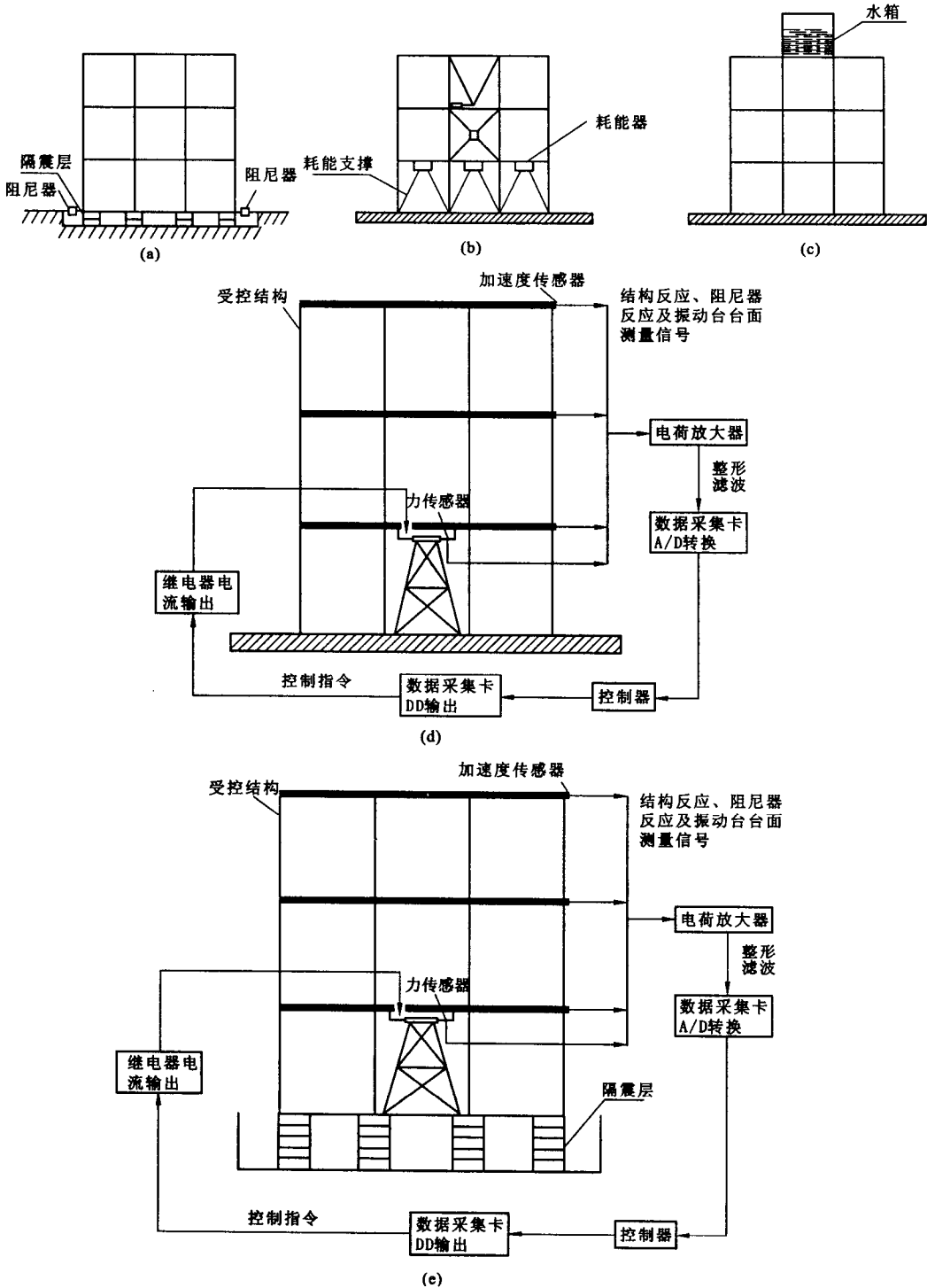


图 1.2 结构控制示意图

(a) 隔震结构示意图；(b) 耗能减震结构示意图；(c) 吸震减震结构示意图；
(d) 主动、半主动控制示意图；(e) 混合控制示意图

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。

1.2 耗能减震的概念、原理与分类

1.2.1 耗能减震的概念

结构耗能减震技术是在结构物的某些部位(如支撑、剪力墙、结点、联结缝或连接件、楼层空间、相邻建筑间、主附结构间等)设置耗能(阻尼)装置(或元件),通过耗能(阻尼)装置产生摩擦、弯曲(或剪切、扭转)弹塑(或粘滞、粘弹)性滞回变形来耗散或吸收地震输入结构中的能量,以减小主体结构地震反应,从而避免结构产生破坏或倒塌,达到减震控震的目的。耗能(阻尼)装置(元件)和支撑构件构成耗能部件,装有耗能部件的结构称为耗能减震结构^[6,7]。

1.2.2 耗能减震的原理

耗能减震结构在小震和设计风荷载作用下,耗能部件基本处于弹性状态,给主体结构提供足够的刚度,使耗能减震结构满足正常使用要求;在中震、大震及强震作用下,耗能(阻尼)装置(元件)率先进入耗能状态,产生较大的阻尼,大量耗散输入结构中的能量,迅速衰减结构的动力反应,而主体结构不出现明显非弹性,从而确保结构在强震或强风中的安全性和正常使用。

耗能减震的原理可以从能量的角度来描述,如图 1.3 所示,结构在地震中任意时刻的能量方程为^[8,9]:

对于传统抗震结构:

$$E_{in} = E_e + E_k + E_c + E_h \quad (1.1)$$

对于耗能减震结构:

$$E_{in}' = E_e' + E_k' + E_c' + E_h' + E_d \quad (1.2)$$

式中 E_{in} 、 E_{in}' ——地震过程中输入传统结构、耗能减震结构体系的总能量;

E_e 、 E_e' ——传统结构、耗能减震结构体系的弹性应变能;

E_k 、 E_k' ——传统结构、耗能减震结构体系的动能;

E_c 、 E_c' ——传统结构、耗能减震结构体系的粘滞阻尼耗能;

E_h 、 E_h' ——传统结构、耗能减震结构体系的滞回耗能;

E_d ——耗能装置或耗能元件吸收耗散的能量。

在上述能量方程中, E_e 、 E_k 和 E_e' 、 E_k' 仅是能量的转换,不产生能量消耗, E_c 和 E_c' 一般只占总能量很小部分(5%左右),可忽略不计。对于传统的抗震结构,主要依靠 E_h 消耗输入结构的地震能量,因此,结构构件在利用自身变形耗能的同时,构件本身将遭到损伤甚至破坏,而且耗能越多,破坏越严重;而对于耗能减震结构,耗能减震器或耗能元件在主体结构进入非弹性状态前率先进入耗能工作状态,充分发挥耗能装置作用,耗散大量输入结构的地震能量,因而结构本身需耗散的能量很少,结构反应将大大减小,从而有效地保护了主体结构,使其免受损伤和破坏。

一般来说,结构损伤与结构的最大变形 Δ_{max} 和滞回耗能(或累积塑性变形) E_h 成正比,可以表达为^[10~12]:

$$D_s = f(\Delta_{max}, E_h) \quad (1.3)$$

在耗能减震结构中,由于最大变形 Δ'_{max} 和构件的滞回耗能 E'_h 比传统抗震结构的最大变形 Δ_{max} 和滞回耗能 E_h 大大减小,因此结构的损伤也大大减少。

耗能减震结构具有减震机理明确、减震效果显著、安全可靠、经济合理、技术先进、适用范围广等特点。目前,已被成功地用于工程结构的减震控制中。

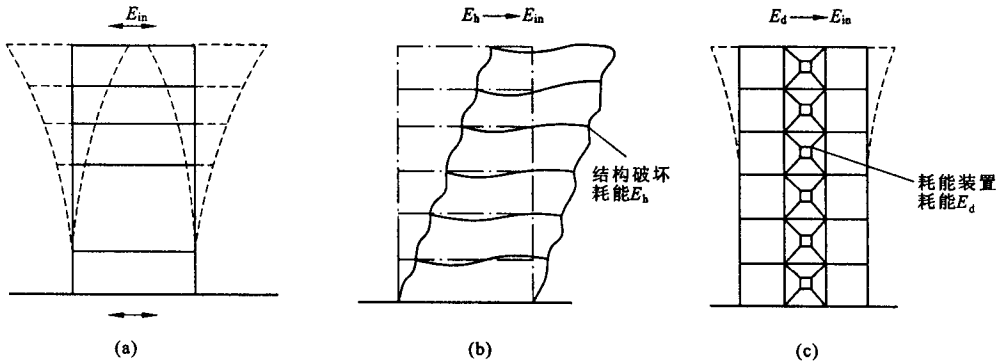


图 1.3 结构能量转换途径对比

(a)地震输入;(b)传统抗震结构;(c)耗能减震结构

1.2.3 耗能减震装置的分类

耗能减震装置可以用不同的材料、不同的耗能机制、不同的构造来制造。目前,研究开发的耗能减震器种类很多,从耗能减震器与位移、速度的相关性来分,可以分为位移相关型耗能减震器、速度相关型耗能减震器、位移与速度相关型(复合型)耗能减震器,如图 1.4 所示;从耗能减震器制造所用的材料可以分为金属耗能器、粘弹性阻尼器、粘滞阻尼器和智能材料阻尼器,如图 1.5 所示;从耗能减震器耗能的机制来分可以分为摩擦耗能器、弹塑性耗能器、粘弹性阻尼器、粘滞阻尼器和电(磁)感应式耗能器,如图 1.6 所示;从受力的形式上可以分为弯曲型、剪切型、扭转型、弯剪型和挤压型,如图 1.7 所示。

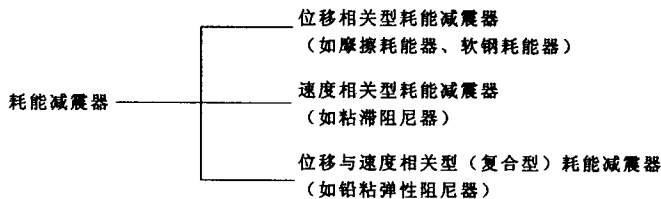


图 1.4 耗能减震器按速度与位移的相关性分类

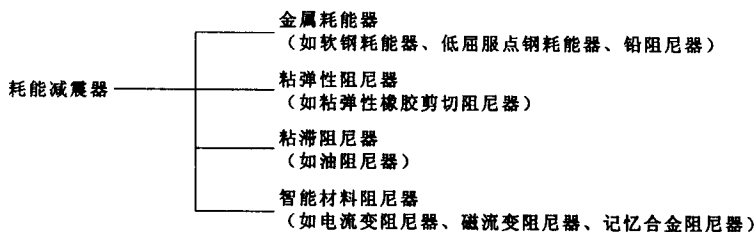


图 1.5 耗能减震器按耗能材料分类

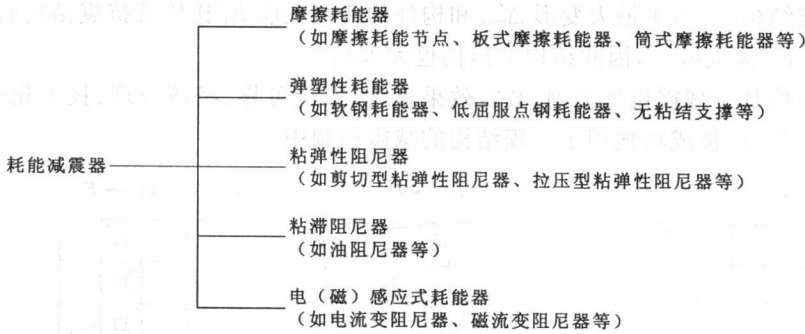


图 1.6 耗能减震器按耗能机制分类

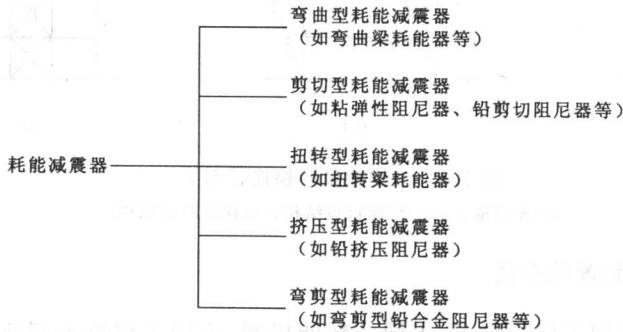


图 1.7 耗能减震器按受力形式分类

耗能减震器一般都可以增加结构阻尼和刚度，减少结构在地震作用下的动力反应。图 1.8 所示为不同耗能器的滞回曲线图^[13]。结构在地震时会产生一定的形变，如果将这栋变形的建筑比作一个驼背的人，耗能器就好像是扶杖，可以增加刚度和阻尼，使得结构不至于倒塌。

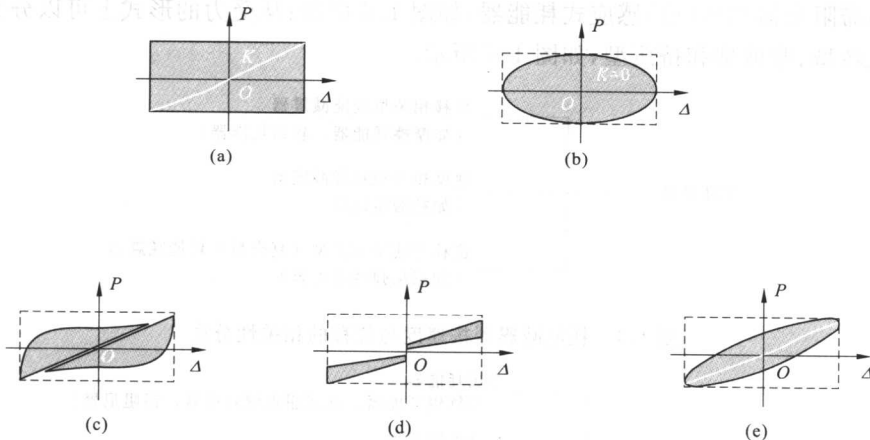


图 1.8 不同耗能(阻尼)器的滞回曲线

(a) Pall 摩擦耗能器；(b) 粘滞阻尼器；(c) 钢阻尼器；(d) 复式摩擦阻尼器；(e) 粘弹性阻尼器

1.2.4 耗能减震装置设计的新思路

针对以往耗能减震器的不足，作者提出了以下设计耗能减震器的思路^[14,15]：

- (1)在同一种耗能机制下,可利用多个耗能元件协同工作共同耗能;
- (2)在同一种耗能(阻尼)减震器中,综合利用不同的耗能机制共同耗能,即耗能(阻尼)减震器同时利用两种或两种以上的耗能方式耗能;
- (3)耗能(阻尼)减震器应具有多道耗能减震防线(或多级耗能元件);
- (4)具有良好的变形跟踪能力,其承载能力和耗能能力具有随变形增大(或减小)变化的自适应能力;
- (5)将耗能减震器设置成具有位移放大功能,能提高耗能减震器的耗能效果,大大减小结构的地震反应。

依据这些思路,作者研究开发了多种类型的耗能(阻尼)减震器^[7,14~16],见表 1.1。

表 1.1 作者研究开发的耗能(阻尼)减震器

类 型	名 称	耗 能 原 理	研制日期
金属类耗能器	双环耗能器	软钢滞回耗能	1993
	加劲圆环耗能器		
	超塑性合金筒耗能器	合金弹塑性滞回耗能	1998
摩擦耗能器	双摩擦耗能器	摩擦耗能	1994
粘(弹)性阻尼器	新型粘(弹)性阻尼器	粘弹性材料剪切滞回耗能	1994
	高效流体阻尼器	阻 尼	
复合类耗能(阻尼)器	弹塑性滞回-摩擦复合耗能器	软钢圆环滞回耗能与摩擦耗能	1994
	铅-粘弹性复合耗能器	铅往复挤压耗能与粘弹性材料剪切滞回耗能	1996
	弹塑性滞回-粘弹性复合耗能器	软钢滞回耗能和粘弹性材料剪切滞回耗能	1996
	摩擦-粘弹性复合耗能器	摩擦耗能器和粘弹性材料剪切滞回耗能	1996
	粘性流体-粘弹性复合阻尼器	流体阻尼和粘弹性材料剪切滞回耗能	1996
	钢管铅芯耗能器	钢、铅弯剪弹塑性变形	1998
	铅粘弹性阻尼筒耗能器	铅、粘弹性剪切与挤压滞回耗能	1998

1.3 金属耗能特性与减震原理

1.3.1 金属耗能的特性与减震原理

金属的弹塑性变形是消耗地震输入能量最有效的机制之一,制作金属耗能器常用的金属材料有钢材(软钢和低屈服点钢)、铅和形状记忆合金等。为了了解金属耗能器的性能,必须研究金属产生塑性变形的机制。

图 1.9(a)为某金属在简单拉伸时的应力-应变曲线,开始时应力 σ 与应变 ϵ 成正比,比例常数就是杨氏模量 E 。应力-应变曲线的这个弹性段在加载和卸载时是能重复产生(但并不耗能),可用下式表示:

$$\sigma = E\epsilon \quad (1.4)$$

所以, σ - ϵ 曲线的斜率是 E 。