

建筑结构 金属消能器减震设计

黄 镇 李爱群 编著

中国建筑工业出版社

建筑结构金属消能器减震设计

黄 镇 李爱群 编著

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

建筑结构金属消能器减震设计/黄镇, 李爱群编著. —北京:

中国建筑工业出版社, 2015.12

ISBN 978-7-112-19010-2

I. ①建… II. ①黄… ②李… III. ①建筑结构-金属材料-
减振装置-防震设计-研究 IV. ①TU352.104

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 012584 号

本书系统地介绍了建筑结构在地震作用下的金属阻尼器消能减震的基本理论、设计方法、施工和检测要求以及工程应用, 共分 6 章, 主要内容包括: 金属消能器的类型、构造、基本性能、减震原理、分析方法、设置金属消能器减震结构的设计方法和工程实例等。

本书内容涉及建筑结构金属消能减震设计的基本内容和关键技术, 可供从事土木工程领域的研究、设计和施工技术人员参考, 也可作为土木工程结构、防灾专业研究生和高年级本科生参考用书。

责任编辑: 吉万旺 仕 帅

责任校对: 李欣慰 张 颖

建筑结构金属消能器减震设计

黄 镇 李爱群 编著

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京西郊百万庄)

各地新华书店、建筑书店经销

北京楠竹文化发展有限公司制版

北京云浩印刷有限责任公司印刷

*

开本: 787×960 毫米 1/16 印张: 11 $\frac{3}{4}$ 字数: 233 千字

2015 年 12 月第一版 2015 年 12 月第一次印刷

定价: 30.00 元

ISBN 978-7-112-19010-2

(28268)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

前 言

地震是地壳和地幔上部的岩层之间相互作用而产生并以地震波的形式向外释放能量的一种过程。由于其随机性和突发性，地震难以准确预测，往往造成灾难性的后果。我国地处欧亚地震带与环太平洋地震带之间，地质构造复杂，地震活动较为频繁，是世界上大陆地震最多的国家之一，也是世界上地震灾害损失最为惨重的国家之一。因此，最大限度地减轻震灾所造成的损失，是人类必须解决的一个重要问题。随着科学技术的发展，结构消能减震技术已经成为抵御地震灾害的一种有效方法和比较成熟的技术。在被动控制装置中金属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震设计的重要选择。

本书是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编写而成的。本书的编写突出了以下特点：第一，体系的完整性，介绍了各种被动减震装置及其减震机理，同时介绍了金属消能减震结构的分析方法、设计方法和工程应用等；第二，理论与应用的紧密结合，本书在叙述金属消能器的减震原理和力学性能的同时，给出了工程实用设计计算方法和金属消能器的检测方法，并辅以适当的设计例题作为示范，还详细介绍了消能减震控制技术在工程中的具体应用。

本书在编写的过程中，学习和参考了国内外大量的论著，在此谨向原著者致以诚挚的谢意和敬意。

本书由黄镇和李爱群编著。

在本书的编写过程中，本书作者的研究生李宗京、吴鹏、杨林志、陈伟、李芮秋、覃作伟等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资助项目（A Project Funded by the Priority Academic Program Development of Jiangsu Higher Education Institutions）和国家自然科学基金重点项目（51438002）资助。

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。

编者

2015年12月

目 录

第1章 绪论	1
1.1 结构振动控制技术	1
1.1.1 被动控制 (Passive Control)	2
1.1.2 主动控制 (Active Control)	3
1.1.3 半主动控制 (Semi-Active Control)	4
1.1.4 智能控制 (Intelligent Control)	5
1.1.5 混合控制 (Hybrid Control)	5
1.2 被动消能减震技术的原理	6
1.3 被动消能器的分类	7
1.3.1 摩擦阻尼器	7
1.3.2 黏滞消能阻尼器	7
1.3.3 黏弹性消能阻尼器	8
1.3.4 金属消能阻尼器	9
1.4 被动消能减震技术的优越性	9
第2章 金属消能器的类型与减震原理	12
2.1 金属消能器的基本原理	12
2.2 金属消能器的类型与性能	13
第3章 金属消能器的基本性能	25
3.1 低屈服点钢性能	25
3.1.1 基本力学性能	25
3.1.2 速率相关性	28
3.1.3 时效相关性	29
3.2 金属消能器的力学模型	31
3.2.1 金属消能器的常用恢复力模型	31
3.2.2 金属消能器模型修正	35
3.3 轴向拉压屈服型消能器	37
3.3.1 防屈曲支撑主要性能参数	37
3.3.2 其他影响因素	41

3.3.3	防屈曲支撑性能试验研究	41
3.4	面外受弯屈服型消能器	43
3.4.1	鼓形开洞软钢消能器的构造形式	43
3.4.2	鼓形开洞软钢消能器主要性能参数	44
3.4.3	鼓形开洞软钢消能器性能试验研究	47
3.5	面内受剪屈服型消能器	49
3.5.1	无约束受剪钢板受力机理	49
3.5.2	面内受剪屈服型耗能钢板防屈曲设计	52
3.5.3	防屈曲剪切耗能板主要性能参数	59
3.5.4	剪切耗能板性能试验研究	68
3.6	组合型分阶段工作金属消能器	70
3.6.1	组合型分阶段工作金属消能器构造形式	70
3.6.2	组合型分阶段工作金属消能器核心性能参数理论分析	71
3.6.3	组合型分阶段工作金属消能器性能试验	73
3.7	金属消能器可靠度分析	73
3.7.1	地震动的生成	74
3.7.2	模型的建立	76
3.7.3	后处理	77
3.7.4	分析流程	80
第4章	金属消能减震结构分析方法	81
4.1	金属消能减震结构分析模型	81
4.1.1	普通结构的分析模型	81
4.1.2	金属消能减震结构的分析模型	84
4.2	振型分解反应谱法	84
4.2.1	振型分解反应谱法概述	84
4.2.2	金属消能器的等价线性化	85
4.2.3	消能减震结构的振型分解法	88
4.2.4	消能减震结构的抗震设计反应谱	89
4.2.5	消能减震结构地震作用与作用效应计算	91
4.3	时程分析法	93
4.3.1	时程分析法概述	93
4.3.2	输入地震波的选用及调整	95
4.3.3	消能减震结构的恢复力模型	96
4.3.4	结构振动方程的数值积分法	98
4.4	静力弹塑性 (Push-over) 分析方法	100
4.4.1	静力弹塑性 (Push-over) 分析方法概述	100

4.4.2	静力弹塑性 (Push-over) 分析方法原理	100
4.4.3	结构能力谱	101
4.4.4	结构地震需求谱	108
4.4.5	目标位移与结构性能评估	109
4.5	能量分析法	113
4.5.1	能量分析方法概述	113
4.5.2	能量分析方法基本原理	114
4.5.3	地震输入能量及其分配的影响因素	118
4.5.4	能量反应谱	120
第 5 章	金属消能减震结构设计方法	123
5.1	消能减震结构适用范围和设防目标	123
5.1.1	金属消能减震结构的适用范围	123
5.1.2	金属消能减震结构的设防目标	123
5.1.3	金属消能减震结构的性能目标	124
5.2	金属消能减震结构地震反应简易预测	125
5.2.1	消能减震设计原理	125
5.2.2	金属消能减震结构单质点体系设计方法	129
5.2.3	金属消能减震结构单质点体系初步设计	133
5.3	金属消能减震结构多质点体系设计	133
5.3.1	多质点体系消能减震结构设计步骤	133
5.3.2	非减震主结构层间位移角和层刚度的评估	135
5.3.3	金属消能器在多质点体系中的分配	135
5.4	消能减震结构性能检验	136
5.5	金属消能器的安装	137
5.5.1	金属消能器与主体结构的连接	137
5.5.2	受剪型、受弯型金属消能器与支撑的连接	144
5.5.3	支撑与结构的连接	144
5.6	金属消能器性能检测	146
5.6.1	金属消能器性能评价标准	146
5.6.2	金属消能器性能试验方法	147
5.6.3	金属消能器的检验规则	147
第 6 章	金属消能器减震设计软件应用实例	149
6.1	PKPM 防屈曲支撑设计实例	149
6.1.1	工程概况	149
6.1.2	PKPM 软件设计过程	150

6.2	ETABS 剪切钢板消能器加固结构弹性分析	154
6.2.1	工程概况	154
6.2.2	ETABS 弹性时程分析	155
6.3	PERFORM-3D 剪切钢板消能器加固结构弹塑性分析	162
6.3.1	工程概况	162
6.3.2	PERFORM-3D 弹塑性时程分析	162
参考文献		173

第 1 章 绪 论

地震是地球自身在运动和发展过程中,地壳和地幔上部的岩层之间相互作用而产生并以地震波的形式向外释放能量的一种过程。由于其随机性和突发性,地震难以准确预测,往往造成灾难性的后果。我国地处欧亚地震带与环太平洋地震带之间,地质构造复杂,地震活动较为频繁,是世界上大陆地震最多的国家之一,也是世界上地震灾害损失最为惨重的国家之一。

据统计,在 20 世纪有 33% 的陆上破坏性地震发生在我国,死亡人数约 60 万,占全世界同期因地震死亡人数的一半左右。20 世纪死亡 20 万人以上的大地震全球共两次,都发生在我国,一次是 1920 年宁夏海原 8.5 级地震,死亡 23 万多人,另一次是 1976 年唐山 7.8 级地震,死亡 24 万多人。而于 2008 年 5 月 12 日发生在四川省汶川的 8 级大地震,死亡人数近 7 万,约 1.8 万人失踪,是近年来我国遭受的最严重的一次地震灾害^[1~4]。

由于地震灾害对建筑物可能带来毁灭性灾难,提高建筑结构对地震灾害的抵御能力和针对地震灾害的结构振动控制已经成为防灾减灾专业的重要课题。地震作用实质上相当于能量的输入,因此在强震作用下结构物应有足够的耗能能力,才能够避免发生破坏。传统的工程结构抗震设计方法主要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,即由结构本身储存和消耗地震能量,这种依靠结构本身“硬抗”的设计理念,难免使得结构构件的尺寸过大,这不仅造成经济性和美观性大打折扣,还带来了使用上的不便。并且在地震时依赖于某些特定结构部位的非弹性变形来耗能,灾后结构发生的永久性破坏即使可能修复,也需要花费大量的资金^[4~8]。

1.1 结构振动控制技术

振动控制作为现代控制理论中一个重要概念,已被引入结构抗震领域,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^[9]。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(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和处于正常的使用环境状况^[2]。

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。结构振动控制的概念于 1972 年由美籍华裔学者姚治平提出，我国在 1980 年王光远院士从高耸结构风振结构开始研究。经过数十年的发展，工程结构振动控制技术已日臻成熟。

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^[2,7,10]，详细分类如图 1-1 所示。

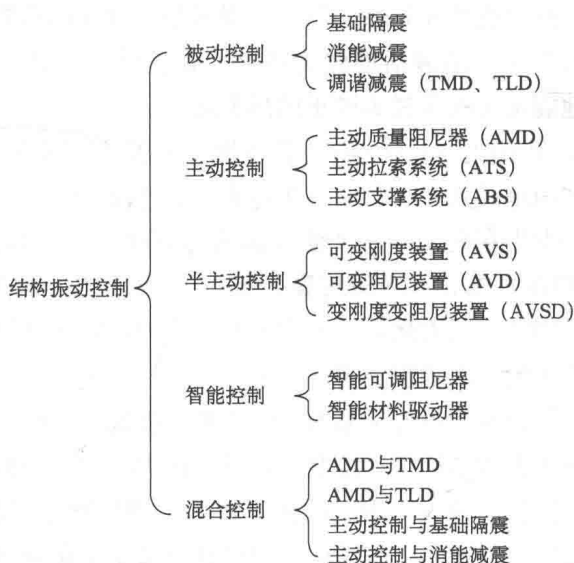


图 1-1 结构振动控制分类

1.1.1 被动控制 (Passive Control)^[11~17]

被动控制是指在结构中安装被动控制装置或设备后，无须再提供外部能源，控制过程不依赖于结构反应和外界干扰信息的结构控制方法。其控制力是控制装置随结构一起振动而被动产生的，即在地震发生时，通过隔震、减震等控制装置来消耗地震输入的能量，同时隔离或减小地震作用在结构中的传播。由于其形式多样、构造简单、造价相对较低、性能稳定可靠、便于维护及更换，并且不需要耗费额外能源，因而被动控制技术在国内外均得到了较为广泛的应用。日本、美国等发达国家率先采用并推广被动控制技术，近年来国内许多新建建筑及加固改造项目也逐步使用被动控制来减少地震反应。结构被动控制主要包括隔震、消能减震和吸能减震。

隔震技术大致可分为两类：层间隔震和基础隔震。层间隔震是在建筑物中间某层的柱和楼板之间设置隔震装置，并利用隔震装置来隔离或耗散地震能量，以避免或减少地震能量的传递。基础隔震是指在建筑物或构筑物基础顶面设置控制机构来隔离地震能量向上部结构传递，并且改变结构频率，达到减小结构振动、防止地震破坏的目的。其中基础隔震技术应用较多。现有的隔震技术主要有：摩擦滑移隔震、滚珠及滚轴隔震、支撑式摆动隔震、夹层橡胶垫隔震、铅芯橡胶垫隔震、混合隔震等。研究表明，基础隔震技术既能应用于新建多层或高层建筑，也可用于已建结构的抗震加固；既能用于重要结构物，也可用于一般房屋结构，具有较为广阔的应用前景。

消（耗）能减震技术是指在结构指定部位设置消能装置，通过所设置的消能装置产生摩擦、弯曲（或剪切、扭转等）弹塑性（或黏滞、黏弹）滞回变形来耗散或吸收地震或其他振动输入结构中的能量，从而减少主体结构的振动反应，避免结构本身产生损坏，保护结构自身的安全。消能装置与其相应的支撑一并安装在结构当中作为消能部件，装有消能部件的结构称为消能减震结构。消能减震技术既适用于新建工程，也适宜于已有建筑物的抗震加固及性能提升改造；既适用于普通的建筑结构，也适用于抗震生命线工程。

吸能减震技术，或调谐减震技术，是指在结构的某部位设置一个具有质量、刚度、阻尼的附加子结构，其与原结构体系的动力性能成一定的关系，使得振动能量在原结构与附加子结构之间重新分配，从而达到减小原结构振动响应的目的。通过适当调整子结构的自振频率，使其尽量接近主结构的基本频率或激振频率，当主结构受到外界激励而振动时，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于主结构上，从而减小主结构的振动反应。调谐减震技术的装置主要包括：调谐质量阻尼器（Turned Mass Damper，即 TMD）、调谐液体阻尼器（Turned Liquid Damper，即 TLD）、摆式质量阻尼器、质量泵、液体-质量振动控制系统（HMS）和空气阻尼器等几种，其中 TMD 和 TLD 应用较为广泛。

1.1.2 主动控制（Active Control）^[10,18~24]

主动控制就是结构物在受到激励发生振动的过程中，利用外部能源在瞬时施加控制力或改变结构的动力特性，从而迅速衰减和控制结构的振动反应。主动控制系统主要由传感器、运算器、作动器三部分组成。在振动过程中，运算器依据主动控制算法处理由传感器监测到的信息，计算出控制力，再由作动器对结构提供所需的控制力作用于结构上。

主动控制的工作原理：传感器监测结构的动力响应和外部激励，并将监测的信息送入计算机内；计算机根据给定的算法给出应施加力的大小，然后由外部能源驱动作动器产生所需的控制力而施加于结构上，如图 1-2 所示。

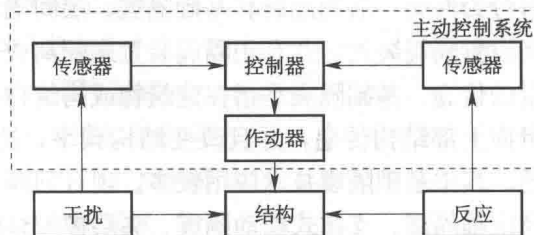


图 1-2 主动控制原理图

主动控制技术又有多种分类方法，就其控制方式和装置而言，获得较多应用有以下几种：主动质量阻尼系统（Active Mass Damper，简称 AMD）、主动拉索系统（Active Tendon System，简称 ATS）、主动支撑系统（Active Brace System，简称为 ABS）等。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。主动控制技术起步较晚，应用尚不成熟，广泛应用仍需进一步研究。1989 年，Soong 等人首次完成了主动控制试验（AMD）。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 主动控制试验。1999 年东南大学程文灏教授、李爱群教授等在南京电视塔的结构中安装了主动控制装置进行结构减震。研究表明，主动控制可获得比被动控制更好的振动控制效果，但也存在有待进一步研究和解决的问题，如控制实施过程造成的控制作用时间滞后，该滞后可能部分抵消控制作用，甚至可能使系统变得不稳定。

1.1.3 半主动控制（Semi-Active Control）^[10,23,25~29]

半主动控制融合了主动控制和被动控制的特点，是以被动控制为主，一般需要有少量外加能源输入。半主动控制所需外部能量少于主动控制，故更易于实施且更经济，是目前性价比最高、最具有工程应用前景的一种结构控制方法。结构半主动控制实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地震反应。半主动控制技术主要可以分为：主动调谐质量阻尼系统（Active Tuned Mass Damper，简称为 ATMD）、可变刚度系统（Active Variable Stiffness，简称为 AVS）、可变阻尼系统（Active Variable Damper，简称为 AVD）、变刚度变阻尼系统（Active Variable Stiffness and Damper，简称为 AVSD）等。

目前，日本已建成和竣工的结构主动变阻尼控制建筑已有 10 多座。在国内，刘季、李敏霞和欧进萍等研制开发出足尺的 AVS 装置；孙作玉、李惠等人研发了 AVD 装置；欧进萍等人研制的磁流变阻尼器用于岳阳洞庭湖大桥斜拉索的风雨激振。

1.1.4 智能控制 (Intelligent Control)^[10,30]

智能控制是采用了智能化的控制理论或智能化材料的控制系统,在结构受激励振动过程中,主动调节结构内部的参数,达到改变结构动力特性从而迅速减少结构振动反应的目的。它包括智能控制算法和利用智能材料制成的智能可调阻尼器和智能材料驱动器两类。采用诸如模糊控制、神经网络控制和遗传算法等智能控制算法为标志的结构智能控制,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下的作动器来实现。另一类是采用诸如电/磁流变液体、压电材料、电/磁致伸缩材料和形状记忆材料等智能驱动材料和器件为标志的结构智能控制,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智能材料制作的智能驱动器或智能阻尼器。

智能驱动器通常需要比液压或电机式作动器更少的外部输入能量,并基本或完全实现主动最优控制力,从这一点来说,它与主动控制作动器性能相同或者说就是主动控制作动器,只是利用外部能源(通常是电能)转化成机械能(实现控制力)的方式、速度和效率不同。智能阻尼器只需要少量的能量调节,使其主动地甚至可以说是巧妙地利用结构振动的往复相对变形或相对位移,尽可能地实现主动最优控制力。

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。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,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。

1.1.5 混合控制 (Hybrid Control)^[31~35]

随着土木工程结构向大尺度、高柔方向发展,单一的控制方法有时由于控制力过大或成本太高而无法实现。混合控制就是从主动控制、被动控制、半主动控制或智能控制中选择两种或两种以上的控制技术组成新的结构振动控制体系。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,从而实现更好的控制效果,尽管它往往比完全主动控制结构更加的复杂,但它的控制可靠性却要优于完全主动控制结构。

目前,混合控制技术主要包括:主动质量阻尼系统(AMD)与调谐质量阻尼系统(TMD)或者调谐液体阻尼系统(TLD)的混合控制,主动控制与基础隔震的混合控制,主动控制与消能减震的混合控制等。

世界上第一个安装混合质量阻尼器(HMD)控制系统的建筑是1991年修建的

日本东京清水公司技术研究所的7层建筑。我国南京电视塔采用了主动质量阻尼系统（AMD）与调谐液体阻尼系统（TLD）相结合的混合控制系统来控制风振。

1.2 被动消能减震技术的原理^[7,13,36,37]

消能减震技术是被动控制的一种方法。消能减震结构在小震和设计风载作用下，耗能装置基本处于弹性状态，给主体结构提供附加刚度，使结构满足正常使用要求。在中震、大震及强震作用下，耗能装置率先进入耗能状态，产生较大的阻尼，大量耗散地震输入结构的能量，减小结构的动力反应，从而确保结构在强震或强风中的安全性和正常使用。

消能减震的原理可以从能量角度来描述，如图1-3所示，结构在地震中任意时刻的能量方程为：

传统抗震结构：

$$E_{in} = E_e + E_k + E_c + E_h$$

消能减震结构：

$$E'_{in} = E'_e + E'_k + E'_c + E'_h + E'_d$$

式中 E_{in} 、 E'_{in} ——地震过程输入传统结构、消能减震结构体系的总能量；

E_e 、 E'_e ——传统结构、消能减震结构体系的弹性应变能；

E_k 、 E'_k ——传统结构、消能减震结构体系的动能；

E_c 、 E'_c ——传统结构、消能减震结构体系的黏滞阻尼耗能；

E_h 、 E'_h ——传统结构、消能减震结构体系的滞回耗能；

E_d ——耗能装置吸收、耗散的能量。

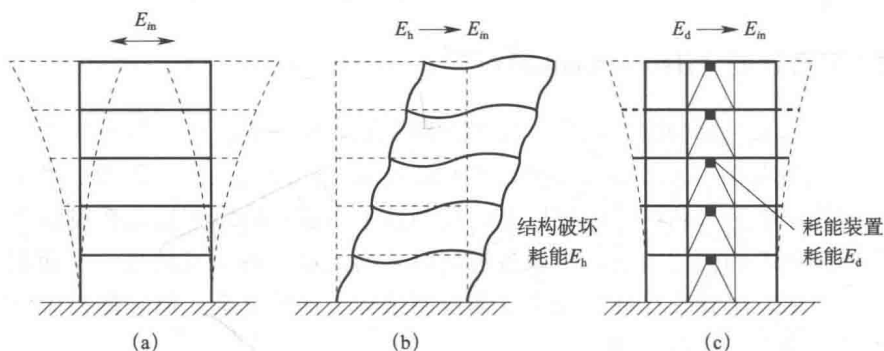


图1-3 结构能量转换途径对比

(a) 地震输入；(b) 传统抗震结构；(c) 消能减震结构

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, 构件本身将遭受损伤甚至破坏, 并且耗能越多, 破坏越严重。而对于消能减震结构, 消能减震装置在主体结构进入非弹性状态之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, 结构反应将大大减少, 从而有效保护了主体结构, 使其免受损伤和破坏。

1.3 被动消能器的分类^[19,38~43]

目前已经研发出的消能减震装置种类繁多, 从阻尼器与位移、速度的相关性来分, 可以分为位移相关型消能阻尼器、速度相关型消能阻尼器、位移与速度相关型(复合型)阻尼器, 其中位移相关型阻尼器有金属阻尼器和摩擦阻尼器, 其耗能能力与阻尼器两端的相对位移有关。速度相关型阻尼器有黏弹性阻尼器和黏滞流体阻尼器, 其耗能能力与阻尼器两端的相对速度有关; 从使用的耗能材料而言可以分为金属阻尼器、黏弹性阻尼器、黏滞阻尼器和智能材料阻尼器; 从耗能机理而言可以分为摩擦阻尼器、弹塑性阻尼器、黏弹性阻尼器、黏滞阻尼器和电(磁)感应式阻尼器; 从受力、变形的形式上可以分为弯曲型、剪切型、扭转型、弯剪型和挤压型。

1.3.1 摩擦阻尼器

摩擦阻尼器(Friction Damper, FRD)对结构进行振动控制的原理是将结构振动的部分能量通过阻尼器的摩擦耗能耗散掉, 从而达到减小结构风振、地震反应的目的。其在摩擦耗能工作过程中主要经历滑动和附着两个状态, 耗能效果的好坏取决于接触面的粗糙程度和法向力的大小。当外部激励大于摩擦阻尼器的最大静摩擦力时, 装置就会滑动耗散外部能量, 外部激励小于摩擦阻尼器的最大静摩擦力时, 装置就会处于附着状态。

摩擦阻尼器从汽车刹车耗能受到启发, 1980年 Paul 等人开始将摩擦阻尼器用于建筑结构的抗震消能, Paul 和 Marsh 提出一种用于框架结构交叉支撑系统的被动摩擦耗能装置, 该装置以汽车刹车片作为耗能材料以减缓结构物的运动, 且已运用到多项工程中。另一典型摩擦消能阻尼器为日本 Sumitomo 金属有限公司开发研制的 Sumitomo 摩擦阻尼器。

摩擦阻尼器具有构造单、耗能能力强、造价低廉及安装维修方便等诸多优点, 广泛应用于国外实际土木结构的消能减震。

1.3.2 黏滞消能阻尼器

黏滞消能阻尼器(viscous Damper, VD)将结构振动的部分能量通过阻尼器

中阻尼介质的黏滞耗能耗散掉,达到减小结构振动反应的目的。不同于其他类型的阻尼器,黏滞阻尼器通常情况下只为结构提供附加阻尼而不提供刚度。

应用于结构中黏滞阻尼器的构造种类很多,大体上主要为两类:一类是利用高浓度黏滞流体在敞开的容器中产生一定的位移并同时发生剪切变形来耗散振动能量的阻尼器;另一类是利用黏滞流体在闭口的容器中产生一定的流速来耗散振动能量的阻尼器,此类阻尼器阻尼力是由黏滞流体在活塞的推动下短时间迅速通过孔隙或缝隙而产生。

第一类黏滞阻尼器中比较典型的有 GERB Vibration Control 公司生产的圆柱筒式黏滞阻尼器,该阻尼器具有轴对称性,可在任意方向起到减震作用。第二类黏滞阻尼器中最有代表性的是美国 Taylor 公司生产的黏滞阻尼器,主要由缸体、活塞和可压缩硅油组成。

大量试验研究表明黏滞阻尼器具有以下特点:

- (1) 黏滞阻尼器内部的液体本身没有可计算的刚度;
- (2) 黏滞阻尼器能提供较大的阻尼,有效减小结构的振动;
- (3) 黏滞阻尼器对激励频率的变化不敏感;
- (4) 黏滞阻尼器内部液体的热稳定性、耐久性应该要得到研发人员的重视,并在工程应用中加以关注;
- (5) 设计时须考虑对用于不同工况的情况(如抗震、抗风以及人激振动)黏滞阻尼器的抗渗漏性能;
- (6) 在土木结构领域,黏滞阻尼器用于控制结构地震反应的工程居多,也可用于抗风控制。

1.3.3 黏弹性消能阻尼器

黏弹性阻尼器(Viscoelastic Damper, VED)通过阻尼器内部黏弹性材料的往复剪切滞回变形耗散能量,从而对结构进行振动控制。黏弹性阻尼器主要有板式和筒式两种。板式黏弹性阻尼器由黏弹性材料和约束板组成,约束板和黏弹性材料层均为平板状分布;筒式黏弹性阻尼器由黏弹性材料和内、外约束筒体组成,黏弹性材料层为筒状。

黏弹性阻尼器具有以下特点:

- (1) 黏弹性阻尼器的剪力-变形关系依赖于变形速度,滞回曲线形状为椭圆,能同时对结构提供刚度和阻尼;
- (2) 黏弹性材料具有较大的存储弹性模量和耗散因子,因而具有较高的耗能能力,但耗能性能受到环境温度和激励频率的影响;

(3) 黏弹性阻尼器性能稳定, 可经多次重复加载和卸载, 但经历大变形下的重复循环加载后, 刚度会产生一定程度的退化;

(4) 黏弹性阻尼器中的黏弹性材料会因振动而产生热量, 温度的短暂增加不会明显减弱黏弹性材料的效果。

黏弹性阻尼器最先应用于高层结构的风振控制。它在土木工程领域, 首次成功应用于 1969 年建成的美国纽约世界贸易中心双子塔楼, 每个塔楼都安装了约 1 万个 3M 公司生产的黏弹性阻尼器, 以减小结构的风振响应。黏弹性阻尼器应用于控制结构地震反应相对较晚。1993 年采用黏弹性阻尼器对美国加州圣荷塞 Santa Clam County Building 进行的抗震加固改造工程。大量的工程应用实践表明, 黏弹性阻尼器对结构风致振动和地震影响都具有较好的减振效果。

1.3.4 金属消能阻尼器

金属消能阻尼器 (Metal Damper, MD) 将结构振动的部分能量通过阻尼器中金属的塑性变形耗散掉, 从而达到减小结构地震反应的目的。金属消能阻尼器构造形式多样, 根据核心耗能构件采用金属材料的不同, 大致可以分为钢阻尼器、铅阻尼器以及记忆合金阻尼器等, 以钢阻尼器 (特别是其中的软钢阻尼器) 的应用最为广泛。

金属阻尼器具有以下特点:

(1) 金属阻尼器的滞回性能和低周疲劳性能稳定, 对环境和温度的适应性强;

(2) 尚应研究开发价格低廉的材料, 使其进一步得到广泛应用;

(3) 其设计方法和施工规程应在实际工程应用中进一步完善。

金属阻尼器最早应用于新西兰 Rangitikei 桥墩, 日本多座建筑使用了金属阻尼器。在我国, 金属阻尼器的研究和应用较其他国家晚。我国台湾金华城休闲购物中心首次采用 270 组三角形软钢阻尼器, 大连理工大学综合实验楼设置了双 X 形和单圆孔形软钢阻尼器。

1.4 被动消能减震技术的优越性

消能减震结构是通过安装在结构中指定部位的消能装置大量耗散地震时输入结构的能量, 从而有效减小结构本身的地震响应, 使结构减小或免于损伤和破坏。与传统抗震结构体系相比, 消能减震体系主要具有如下优势:

(1) 安全性。传统抗震结构体系采用“硬抗”的设计理念, 以结构本身及主