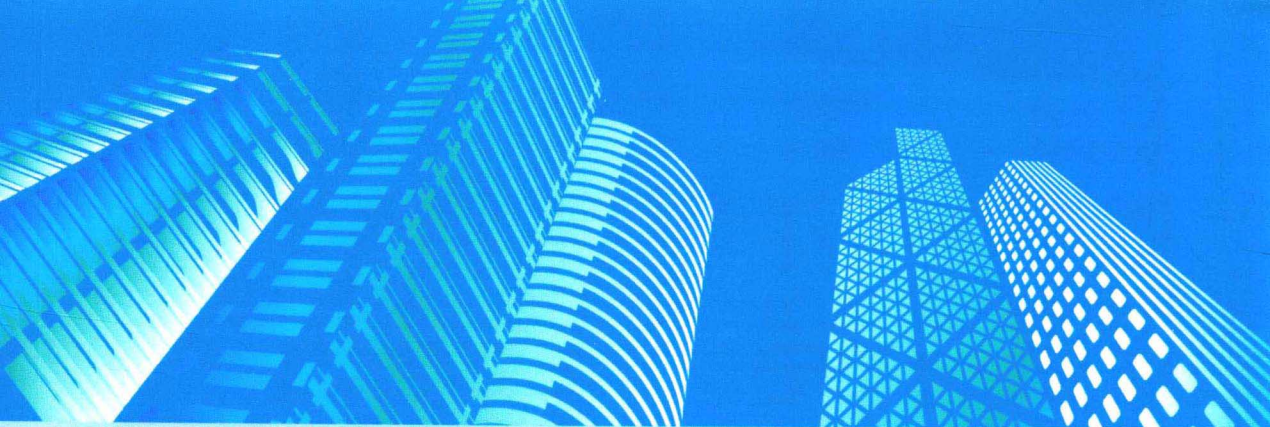




# 单平面准直线消能 减震系统

Vibration Control System Based on Quasi-linear Mechincal Motion for Single Plane

高金贺 著



武汉理工大学出版社

WUTP Wuhan University of Technology Press

# 单平面准直线消能减震系统

Vibration Control System Based on Quasi-linear Mechincal Motion for Single Plane

高金贺 著

武汉理工大学出版社  
· 武 汉 ·

## 内 容 简 介

本书重点介绍了一种新型的被动消能减震振动控制系统——单平面准直线消能减震系统。该系统在构造形式上具有一定的创新性,将机械运动结构领域的运动机构引入到建筑结构消能减震振动控制系统的领域。

本书可供高等院校土木工程、力学、机械和水利等学科的师生以及相关研究领域的科研和技术人员参考。

## 图书在版编目(CIP) 数据

单平面准直线消能减震系统/高金贺著. —武汉:武汉理工大学出版社,2015.12  
ISBN 978-7-5629-4474-4

I. ①单… II. ①高… III. ①建筑结构-防震设计-研究 IV. ①TU352.104

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 300983 号

项目负责人:汪浪涛

责任编辑:汪浪涛

责任校对:陈 平

装帧设计:兴和设计

出版发行:武汉理工大学出版社

社 址:武汉市洪山区珞狮路 122 号

邮 编:430070

网 址:<http://www.wutp.com.cn>

经 销:各地新华书店

印 刷:湖北新新城际数字出版印刷技术有限公司

开 本:787×1092 1/16

印 张:7

字 数:172 千字

版 次:2015 年 12 月第 1 版

印 次:2015 年 12 月第 1 次印刷

定 价:20.00 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:027-87785758 87384729 87165708(传真)

• 版权所有 盗版必究 •

# 前 言

地震作为自然灾害之一,给建筑结构的安全性带来了很大的威胁。20 世纪里氏 7.0 级以上的大地震全球共发生了 1700 余次,平均每年 17 次左右。我国位于世界两大地震带(太平洋地震带和欧亚地震带)的交会部位,是世界上地震灾害最严重的国家之一,地震造成的人员伤亡居世界首位,地震造成的经济损失也十分巨大。

在传统的抗震设计中,实现延性结构体系的设计是工程师所追求的基本目标,通过适当控制结构物的刚度与强度,使结构构件在强烈地震时进入非弹性状态后仍有较大的延性,从而通过塑性变形消耗地震能量。但是,1994 年美国北岭地震和 1995 年日本阪神大地震中,大量结构倒塌,究其原因主要是梁端部节点发生了脆性破坏,并没有发挥设计中期待的吸收地震能量的作用。因此,这种以“抗”为主要途径的传统方法,其有效性受到严峻的挑战。20 世纪 70 年代开始,学者们通过在建筑结构上设置振动控制装置的方法,寻求以“减”为途径的方法来抵御地震灾害。消能减震器作为结构振动控制的一种特殊手段,以其经济、实用和传力明确等特点被广泛采用。

我国《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2001)首次将消能减震技术和隔震技术作为重要内容专门设置一个章节,现行《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)(简称《抗震规范》)保留了原有关于消能减震技术的内容,并对相关条款进行了部分修改。可见,消能减震技术的应用必将成为我国结构抗震领域的一个发展趋势。

作为吸收地震能量装置的阻尼器可分为速度相关型、位移相关型及其他类型。黏弹性阻尼器、黏滞流体阻尼器等属于速度相关型,其滞回曲线多为椭圆形,在主体结构小振动范围内可起到消能减震作用。金属屈服阻尼器、摩擦阻尼器及形状记忆合金阻尼器等属于位移相关型。在上述的阻尼器中,金属屈服阻尼器具有力学模型简单、成本低,具有温度无关性、易设计与施工等优点,是目前研究的热点之一。

本书介绍一种新型的金属屈服阻尼器。其在构造形式上有一定的创新性,结合机械运动机构领域中的近似直线运动机构的运动力学特性,通过机构提供稳定的变形,使机构中的 U 型金属器在主体结构发生侧向位移时,发生屈服变形,吸收振动能量。与以往的被动消能减震振动控制系统相比,它具有自重轻,

且可适用于大跨度空间的特点。本书倘若能为读者在消能减震领域的研究提供一种新的思路,启发读者的联想,著者幸甚。

本书在江西省教育厅青年科学基金项目(GJJ13440)、江西省科技厅自然科学基金项目(20132BAB216007)和国家自然科学基金(51568001)的资助下完成。

本书涉及学科宽广,交叉程度深厚,受学识所限,不当之处在所难免,谨请读者批评指正。

高金贺

2015 年

# 目 录

|                            |    |
|----------------------------|----|
| 第 1 章 绪论                   | 1  |
| 1.1 房屋隔震和消能减震的设计思想         | 1  |
| 1.1.1 抗震措施                 | 1  |
| 1.1.2 结构抗震、隔震和消能减震控制的对比分析  | 2  |
| 1.1.3 隔震结构                 | 2  |
| 1.1.4 消能减震                 | 3  |
| 1.2 消能减震阻尼器的分类             | 4  |
| 1.2.1 被动控制用的消能阻尼器          | 4  |
| 1.2.2 被动控制消能阻尼器总结及本书考察的出发点 | 9  |
| 1.2.3 U 型金属阻尼器             | 9  |
| 1.3 本书的研究目的                | 9  |
| 第 2 章 单平面准直线消能减震系统的构造      | 11 |
| 2.1 基本构造                   | 11 |
| 2.2 单平面准直线消能减震系统的结构特点      | 12 |
| 2.3 受压支撑构件的变形              | 13 |
| 2.4 总结                     | 16 |
| 第 3 章 刚度力学模型的建立            | 17 |
| 3.1 U 型阻尼的刚度               | 17 |
| 3.1.1 U 型阻尼力学模型 I          | 17 |
| 3.1.2 U 型阻尼力学模型 II         | 19 |
| 3.2 消能阻尼子系统的刚度             | 21 |
| 3.2.1 类型 I 的刚度             | 21 |
| 3.2.2 类型 II 的刚度            | 22 |
| 3.3 消能子系统的水平刚度             | 23 |
| 3.4 非耗能支撑子系统的水平刚度          | 24 |
| 3.5 准直线消能减震结构的水平刚度         | 25 |
| 3.6 考虑连接板弯曲变形的消能子系统的刚度     | 25 |
| 3.6.1 U 型金属阻尼的刚度矩阵         | 26 |
| 3.6.2 消能子系统的刚度矩阵           | 27 |
| 3.7 总结                     | 29 |

|                                        |    |
|----------------------------------------|----|
| 第 4 章 屈服荷载 .....                       | 30 |
| 4.1 不考虑连接板弯曲刚度的准直线消能减震结构的水平荷载承载力 ..... | 30 |
| 4.1.1 类型 I 的水平荷载承载力的推导 .....           | 30 |
| 4.1.2 类型 II 的水平荷载承载力的推导 .....          | 31 |
| 4.2 考虑连接板弯曲刚度的准直线消能减震结构的水平荷载承载力 .....  | 32 |
| 4.2.1 U 型阻尼端部的节点荷载 .....               | 32 |
| 4.2.2 类型 I 的荷载承载力推导 .....              | 34 |
| 4.2.3 类型 II 的荷载承载力推导 .....             | 34 |
| 4.3 结论 .....                           | 35 |
| 第 5 章 全塑性崩坏屈服荷载承载力 .....               | 36 |
| 5.1 类型 II 的塑性崩坏荷载 .....                | 36 |
| 5.2 类型 I 的塑性崩坏荷载 .....                 | 39 |
| 5.3 结论 .....                           | 40 |
| 第 6 章 循环荷载试验 .....                     | 41 |
| 6.1 试验体 .....                          | 41 |
| 6.2 加载方案 .....                         | 44 |
| 6.3 数据测量 .....                         | 45 |
| 6.4 试验体的刚度和承载力 .....                   | 45 |
| 6.5 实验结果 .....                         | 47 |
| 6.5.1 荷载-变形关系 .....                    | 47 |
| 6.5.2 初始预拉力对支撑构件(钢拉杆)应变的影响 .....       | 51 |
| 6.5.3 U 型阻尼的变形和应变响应 .....              | 52 |
| 6.6 连接板弯曲刚度的影响 .....                   | 54 |
| 6.6.1 刚度分析 .....                       | 54 |
| 6.6.2 承载力分析 .....                      | 54 |
| 6.7 结论 .....                           | 55 |
| 第 7 章 安装有准直线消能减震结构的框架结构的塑性设计 .....     | 56 |
| 7.1 框架崩坏机构的分析 .....                    | 56 |
| 7.1.1 准直线消能减震结构配置类型 I .....            | 56 |
| 7.1.2 准直线消能减震结构配置类型 II .....           | 58 |
| 7.2 梁腹板剪力分析 .....                      | 60 |
| 7.2.1 消能减震结构配置类型 I .....               | 60 |
| 7.2.2 消能减震结构配置类型 II .....              | 61 |
| 7.3 结论 .....                           | 62 |

|                                    |    |
|------------------------------------|----|
| 第 8 章 静力性能有限元分析 .....              | 63 |
| 8.1 有限元模型的精确度 .....                | 63 |
| 8.1.1 有限元模型 .....                  | 63 |
| 8.1.2 有限元分析条件 .....                | 63 |
| 8.1.3 荷载-变形关系 .....                | 65 |
| 8.2 有限元分析框架 .....                  | 65 |
| 8.2.1 框架的基本组成及理论分析 .....           | 65 |
| 8.2.2 关于塑性设计的分析 .....              | 67 |
| 8.3 有限元数值解析模型和解析条件 .....           | 68 |
| 8.4 数值分析结果 .....                   | 69 |
| 8.4.1 层间剪力-层间变形角关系曲线 .....         | 69 |
| 8.4.2 塑性破坏机构的分析 .....              | 69 |
| 8.4.3 梁腹板剪力分布 .....                | 71 |
| 8.4.4 梁构件和 U 型阻尼的应力分布 .....        | 71 |
| 8.4.5 U 型阻尼应变响应 .....              | 72 |
| 8.5 讨论 .....                       | 73 |
| 8.5.1 剪切型框架模型的解析分析 .....           | 73 |
| 8.5.2 连接板视为刚性板时的解析分析 .....         | 74 |
| 8.6 结论 .....                       | 74 |
| 第 9 章 地震荷载作用下的动力性能数值有限元分析 .....    | 75 |
| 9.1 U 型阻尼单轴弹簧模型的转换 .....           | 75 |
| 9.2 数值分析模型的建立 .....                | 76 |
| 9.2.1 门型框架 .....                   | 76 |
| 9.2.2 安装有准直线消能减震结构的门型框架 .....      | 78 |
| 9.2.3 讨论 .....                     | 79 |
| 9.3 3 层 3 跨平面框架的地震荷载动力解析 .....     | 80 |
| 9.3.1 框架设计 .....                   | 80 |
| 9.3.2 数值分析模型和条件 .....              | 82 |
| 9.3.3 数值分析结果 .....                 | 82 |
| 9.4 支撑构件钢拉杆刚度对减震效果的影响 .....        | 87 |
| 9.5 结论 .....                       | 88 |
| 第 10 章 梁柱偏心节点时消能减震结构的配置方案 .....    | 89 |
| 10.1 H 型梁柱偏心节点的立体钢框架结构的弹塑性分析 ..... | 90 |
| 10.1.1 立体钢框架 .....                 | 90 |

---

|        |                               |     |
|--------|-------------------------------|-----|
| 10.1.2 | 有限单元数值分析 .....                | 91  |
| 10.1.3 | 数值分析结果 .....                  | 92  |
| 10.1.4 | 总结 .....                      | 97  |
| 10.2   | 跨越多层配置消能减震结构的框架结构的有限元分析 ..... | 97  |
| 10.2.1 | 有限元模型 .....                   | 97  |
| 10.2.2 | 数值分析结果 .....                  | 98  |
| 10.3   | 总结 .....                      | 99  |
| 第 11 章 | 结论 .....                      | 100 |
| 参考文献   | .....                         | 101 |

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 房屋隔震和消能减震的设计思想

### 1.1.1 抗震措施

传统的结构抗震[图 1.1(a)]是利用自身的结构构件的承载力和塑性变形来抵御地震作用的。抗震效果取决于当地震的作用超过结构的承载能力极限和弹性变形时结构构件的塑性变形能力和在往复荷载作用下的滞回耗能能力。然而,利用结构自身构件吸收地震能量势必会导致结构的损伤,甚至结构的破坏,造成大量的人员和财产损失。

相对于传统的结构抗震,图 1.1(b)、(c) 所示的结构隔震与消能减震等措施可有效地减小地震及风荷载对主体结构的影响。结构隔震与消能减震的研究和应用始于 20 世纪 60 年代,20 世纪 70 年代以来发展较快。这种积极的抗震方法与传统的消极抗震方法相比,具有以下优点:① 该方法能大幅度减小结构所受的地震作用,能较为准确地控制传到结构上的最大地震作用,提高了结构抗震可靠度,为解决不确定环境下结构反应的控制问题提供了新的途径;② 该方法大大减小了结构在地震作用下的变形,保证非结构构件不受地震破坏,从而减少震后维修费用;③ 对于核工业设备、高精度技术加工设备等,只能用隔震、减震的方法来满足严格的抗震要求。

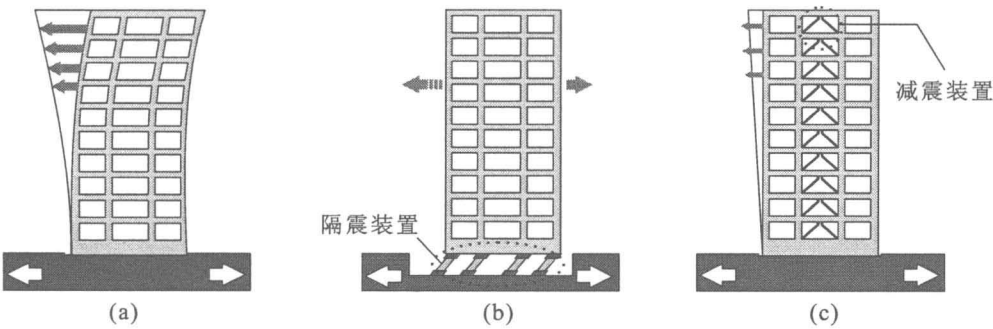


图 1.1 抗震的三种措施  
(a) 结构抗震;(b) 结构隔震;(c) 消能减震

### 1.1.2 结构抗震、隔震和消能减震控制的对比分析

#### (1) 抗震途径和方法方面

传统抗震技术采用加强结构、加大构件截面尺寸、加多构件配筋、提高结构刚度等“硬抗”的方法来抵抗地震；而结构隔震则是在基础与上部结构之间设置隔震层，限制和减少地震能量向上部结构的输入，达到隔离地震、降低结构地震响应的目的；消能减震控制则是在结构中设置减震装置，通过消耗地震能量、调整结构动力特性等方法，达到减轻结构地震响应的目的。

#### (2) 减震效果方面

同传统的抗震技术相比，隔震控制具有明显的减震效果，从振动台地震模拟试验结果及已建造的隔震结构在地震中的地震记录得知，隔震体系的上部结构加速度只相当于传统结构（基础固定）加速度反应的 8% ~ 25%；根据有关振动台试验的数据，消能减振结构的地震反应比传统抗震结构降低 40% ~ 60%，且结构越高、越柔，消能减振效果越显著，而调频质量阻尼器被动控制结构和主动控制结构的地震反应也比传统抗震结构分别降低 10% ~ 50% 和 30% ~ 60%。

#### (3) 经济性方面

传统抗震技术采用增大截面、提高材料强度和结构刚度来“硬抗”地震，因而需要一定的经济投入；而对于基础隔震体系，其上部结构承受的地震作用大幅降低，使得上部结构构件和节点的截面减小、配筋减少，构造及施工简单，从而可节省造价。虽然隔震装置需要新增一定的经济投入（约占总造价的 5%），但建筑总造价仍可降低。多层隔震房屋比传统抗震房屋节省土建造价为：7 度区基本持平，8 度区节省 5% ~ 10%，9 度区节省 10% ~ 15%，并且抗震安全度大大提高。消能减震结构是通过“柔性消能”的途径减小结构的地震反应，因而可以减少抗侧力构件的设置，减小结构构件的截面及其配筋，并提高结构的抗震性能。若用于既有建筑物的抗震加固，则可节约造价 10% ~ 60%。

#### (4) 适用范围方面

传统抗震技术所设计的工程结构，主要依靠结构本身来满足结构抗震要求，如果结构本身抗震能力较弱，则需要采用增大截面、提高材料强度和结构刚度等“补强”的方法来弥补，而结构隔震和消能减震控制技术主要依靠隔震和减震装置来有效提高结构的抗震能力，根据其工作原理，该技术不仅适用于新建的工程结构，同时也适用于已有建筑物的抗震加固改造。

### 1.1.3 隔震结构

隔震设计是指在房屋基础、底部或下部结构与上部结构之间设置由橡胶隔震支座和阻尼装置等部件组成的具有整体复位功能的隔震层，以延长整个结构体系的自振周期，减少输

入上部结构的水平地震作用,达到预期防震要求。房屋隔震设计的基本要求是,通过隔震层的大变形来减少其上部结构的地震作用,从而减少地震破坏。隔震设计需要解决的主要问题是:隔震层位置的确定,隔震垫的数量、规格和布置,隔震支座平均压应力验算,隔震层在罕遇地震下的承载力和变形控制,隔震层不隔离竖向地震作用的影响,上部结构的水平向减震系数及其与隔震层的连接构造等。

目前实际工程中应用的隔震支座主要有滑移式和弹性支撑式的,如图 1.2 所示。隔震装置应具有隔震功能、阻尼衰减功能、位移回复功能以及支承功能。所以,隔震装置一般应包括滑移支座或叠层橡胶支座、阻尼器(黏性阻尼器、金属屈服阻尼器、铅阻尼器、高弹橡胶阻尼器)等。

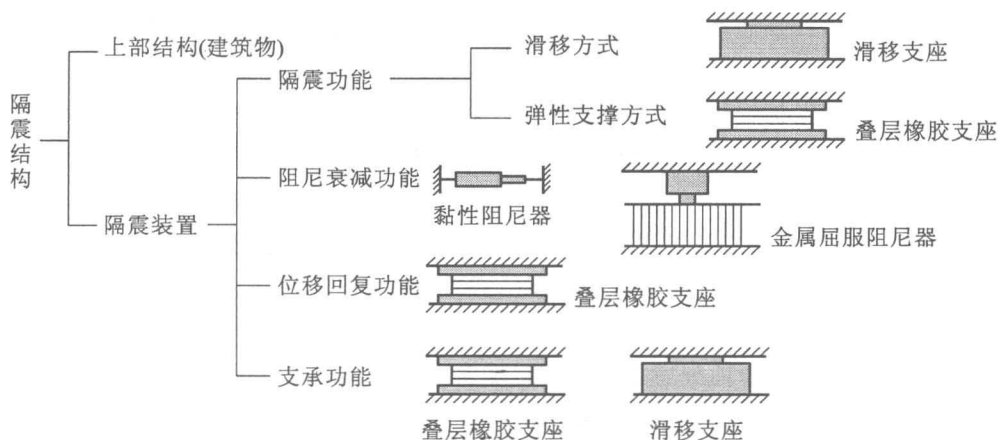


图 1.2 隔震结构功能

### 1.1.4 消能减震

消能减震设计是指在房屋结构中设置消能器,通过消能器的相对变形和相对速度提供附加阻尼,以消耗输入结构的地震能量,达到预期防震减震要求。房屋消能减震设计的基本要求是:通过消能器的设置来控制预期的结构变形,从而使主体结构构件在遭遇罕见地震时不发生严重破坏。消能减震设计需要解决的主要问题是:消能器和消能部件的选型,消能部件在结构中的布置和数量,消能器附加给结构的阻尼比估算,消能减震体系在罕遇地震下的位移计算,以及消能部件与主体结构的连接构造和其附加的作用等。

另外,消能减震技术根据有无外部能源输入、消能部件的组装方式的不同可分为主动控制、被动控制以及半主动控制。

#### (1) 主动控制

结构主动控制是需要外部能源输入提供控制力,且控制过程依赖于结构反应信息或外界干扰信息的控制方法。主动控制是振动控制的现代方法,可分为开环控制与闭环控制两种类型,目前研究较多的是闭环控制。闭环控制体系是在结构振动控制部位安装传感器,传感器把地震反应以信号形式输出至控制器,控制器为计算机系统,该系统将信号处理与计算

后,向驱动机构发出指令并向子结构施加控制力,改变结构的动力特性,降低结构振动反应。目前应用于结构抗震的主动控制体系主要有两种:一种是主动调频质量阻尼器,其子结构为一附加结构体系;另一种是锚索控制,其子结构为预应力拉索。

## (2) 被动控制

结构被动控制是不需要外部能源提供控制力,控制过程不依赖于结构反应信息与外界干扰信息的控制方法,其主要依赖于结构隔震体系与结构消能减震和阻尼减震体系。隔震技术能阻隔地震剪切波向结构的传播,限制输入结构的能量,从而保障结构在地震中的安全。消能减震和阻尼减震体系是在结构的某些非承重构件,如节点和连接处装设阻尼器,当轻微地震或阵风脉动时,这些消能杆件或阻尼器,处于弹性状态,结构物具有一定的侧向刚度,以满足正常使用要求。在强烈地震作用下,随着结构受力和变形增大,这些消能杆件和阻尼器进入非弹性变形状态,产生较大阻尼,大量消耗输入结构的地震能量,避免主体结构进入明显的塑性状态,从而保护结构,使其在强震中不发生破坏,不产生过大变形。

日本是一个灾难性地震多发的国家。因此,隔震结构及消能减震结构应用得非常多。日本兵库县南部地震后的1年时间里,设计建成的隔震结构数量等于此前10年所建的隔震结构数量的总和,并且之后的10年时间里,每年都有将近150栋隔震结构建筑物建成。另外,消能减震结构的应用比例也逐年上升,据统计,仅在1999年消能减震结构在超高层钢结构建筑物中的应用比例就高达90%。

近年来,被动控制的消能减震技术应用得非常多,今后,不仅在高层建筑物中,中低层建筑物中应用消能减震装置的例子也会越来越多。

本书将总结以往的研究实例,提出一种新型的被动控制消能减震结构——单平面准直线消能减震系统,并通过对该新型减震系统进行力学分析。

# 1.2 消能减震阻尼器的分类

## 1.2.1 被动控制用的消能阻尼器

本节将对被动消能减震阻尼器的分类及特点进行简要说明。消能减震装置应具有高刚度、低强度的特点,这样既可以保证结构的使用性能,又可以在地震和风荷载作用下,相对于主体结构率先进入塑性状态而大量地消耗能量。消能减震装置主要是消能阻尼器,消能部件可由消能器及斜撑、墙体、梁等支承构件组成,主要有消能支撑、消能墙、消能节点、消能连接和悬吊构件。消能阻尼器的功能是:当结构构件发生相对位移时,产生较大阻尼,从而发挥消能减震的作用。为了达到最佳消能效果,要求消能阻尼器提供最大阻尼,即当构件在地震作用下发生相对位移时,消能阻尼器所做的功最大。消能阻尼器主要分为位移相关型、速度相关型及其他类型。具体分类如图1.3所示。

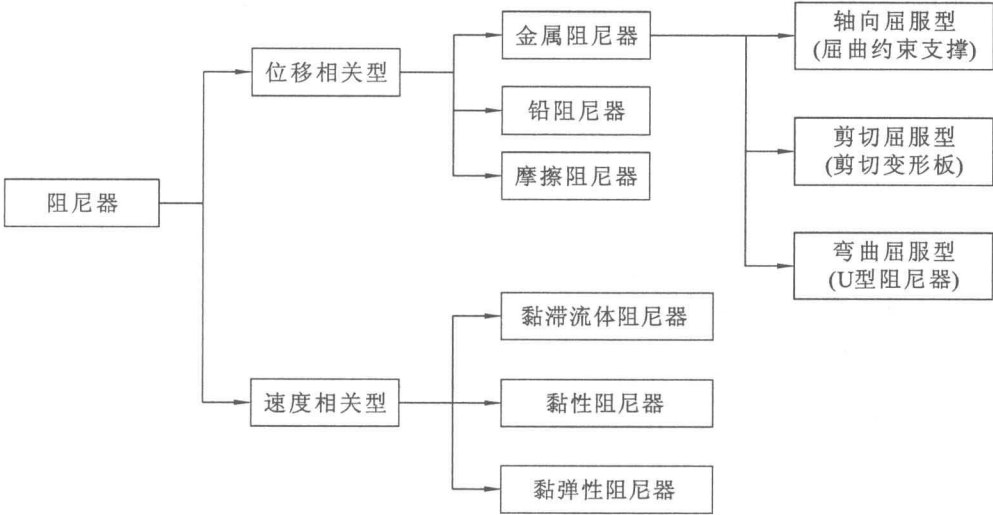


图 1.3 被动消能减震阻尼器分类

1) 速度相关型阻尼器

黏滞流体阻尼器、黏弹性阻尼器等属于速度相关型，即该类消能阻尼器对结构产生的阻尼力主要与消能阻尼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。

速度相关型阻尼器的滞回特性曲线为椭圆形，建筑物微小振动时就可以发挥减震效果。但是，这一类阻尼器受到使用年限、外界温度以及速度相关性的影响，因此在设计使用过程中应注意上述方面的影响。

(1) 黏滞流体阻尼器 —— 油阻尼器

图 1.4 为油阻尼器(一种黏滞流体阻尼器)构造示意图，气缸内装有液压硅油，该阻尼器利用活塞头左右的压力差使硅油通过小孔和活塞与缸体的空隙，从而产生阻尼力，当硅油过多或过少，控制阀就开启，使硅油从储备室进入或出来，从而调节阻尼。除了硅油外，也可以使用其他黏滞液体，只要能保证液体不可燃、无毒，温度变化时性能稳定及长时间不变质即可。

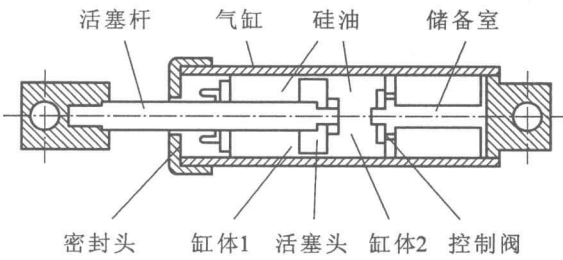
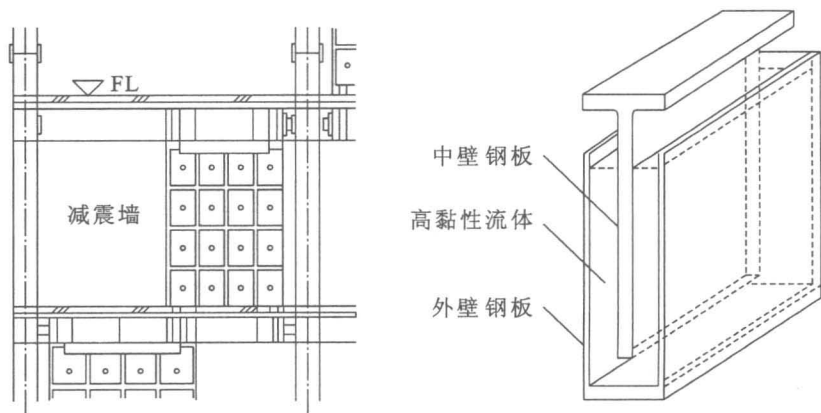


图 1.4 油阻尼器

(2) 黏性阻尼器

图 1.5 为黏性阻尼器的构造示意图，它主要是由黏性材料和约束钢板组成，连接的钢板

再与结构构件相连。当结构产生相对位移时,约束钢板与黏性材料之间发生剪切变形,从而产生一定的阻尼力。



注:外力作用下两块钢板产生相对错动的变形,从而带动粘性流体产生剪力变形,因此会产生与两块钢板相对错动速度成比例的剪切抵抗荷载。

图 1.5 黏性阻尼器

(3) 黏弹性阻尼器

图 1.6 所示为在消能墙中应用黏弹性阻尼器的实例。两块钢板中间夹有黏弹性材料,通过黏弹性材料的剪切变形吸收地震能量。其耗能效果受两块钢板相对错动的振幅、频率等因素影响,因此设计过程中要考虑到上述因素的影响。

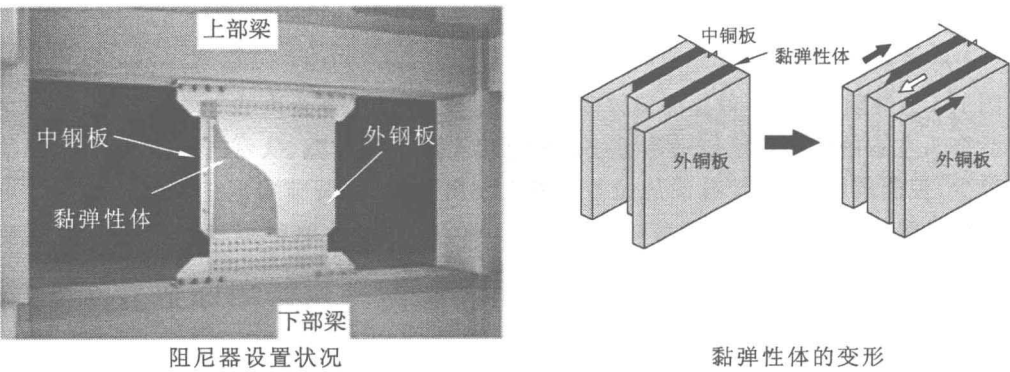


图 1.6 黏弹性阻尼器

2) 位移相关型阻尼器

金属屈服阻尼器、摩擦阻尼器及铅阻尼器等属于位移相关型,即该类消能阻尼器对结构产生的阻尼力主要与消能阻尼器两端的相对位移有关,当位移达到一定的限值才能发挥作用。摩擦阻尼器属于典型的位移相关型消能阻尼器,但是有些摩擦阻尼器有时性能不够稳定。下面主要介绍金属屈服阻尼器。

金属屈服阻尼器主要是通过金属构件的塑性变形吸收地震能量。金属屈服阻尼器具有

耗能能力强、经济以及设计容易等优点。另外,其耗能能力与速度、温度等无关,也不会随着时间的推移而弱化。因此近年来应用得很多。金属屈服阻尼器根据变形的特点可分为轴向屈服型、剪切屈服型和弯曲屈服型等类型。

(a) 轴向屈服型

轴向屈服型阻尼器主要是利用屈曲约束支撑的轴向屈服产生塑性变形来吸收地震能量。图 1.7 所示的屈曲约束支撑由内核心钢板、钢套管及内核心钢板与钢套管之间填充的灰浆组成。内核心钢板和灰浆之间涂了一层无粘结材料,可以确保内核心钢板上的轴力不传到灰浆和外钢管上,灰浆和外钢管共同阻止支撑产生弯曲变形。在轴向拉压力作用下屈曲约束支撑可承受压拉屈服,而不发生屈曲失稳,实现塑性变形从而消耗地震能量输入。常用的截面形式如图 1.7(b) 所示。在实际工程中可布置成 K 型支撑、斜杆支撑、交叉支撑等。

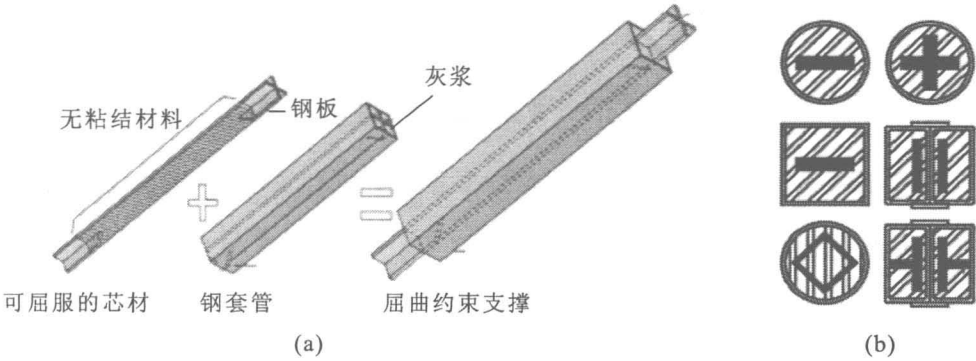


图 1.7 屈曲约束支撑

(a) 结构组成;(b) 常用的截面形式

(b) 剪切屈服型

剪切屈服型金属阻尼器主要利用钢板(腹板)的剪切变形吸收地震能量。剪切变形的金属阻尼器的构成如图 1.8(a) 所示,利用非耗能支撑将剪切钢板安装在间柱或者墙壁中间。多项研究已经明确了剪切钢板的耗能特性,并研发出了多种剪切钢板的构造形式,如图1.8(b) 所示。

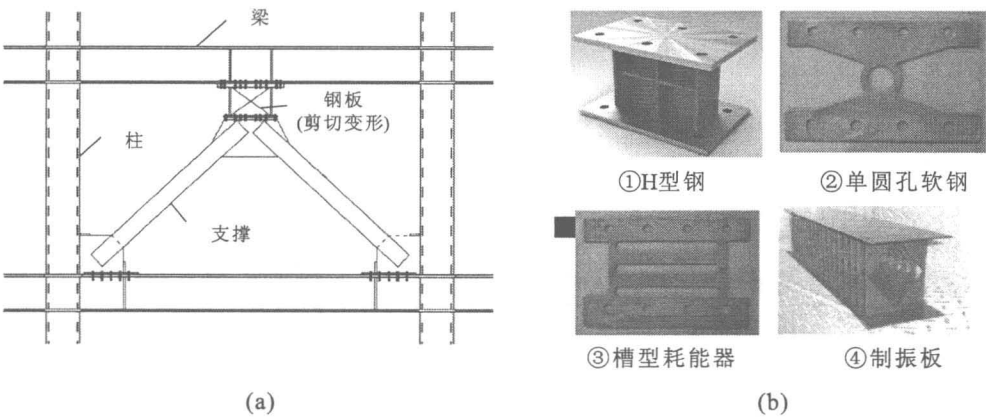


图 1.8 剪切屈服型阻尼器

(a) 剪切变形的金属阻尼器的构成;(b) 典型的剪切钢板的构造形式

## (c) 弯曲屈服型

弯曲屈服型金属阻尼器是利用金属构件的弯曲屈服变形吸收地震能量。隔震结构中常常将叠层橡胶隔震支座与 U 型阻尼器组合在一起使用,主要利用了 U 型阻尼器的弯曲变形吸收地震能量,当然随着地震输入方向的不同,可伴随有扭转变形。如图 1.9 所示。

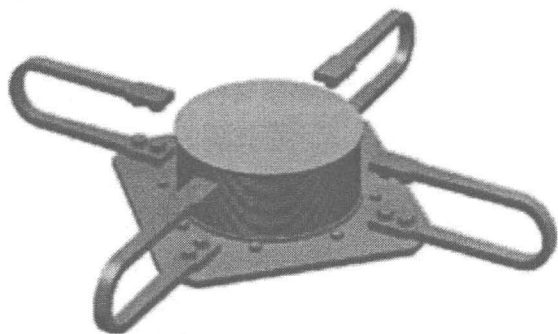


图 1.9 弯曲屈服型阻尼器

## 3) 其他类型的阻尼器

## (1) 消能交叉支撑

在交叉支撑处利用弹塑性阻尼器的原理,可做成消能交叉支撑,如图 1.10 所示。在支撑交叉处,通过方钢框或圆钢框的塑性变形消耗地震能量。

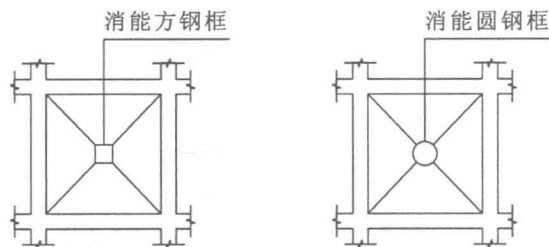


图 1.10 消能交叉支撑

## (2) 摩擦消能支撑

将高强度螺栓钢板摩擦阻尼器用于支撑构件,可做成摩擦消能支撑,如图 1.11 所示。摩擦消能支撑在风载或小震下不滑动,能像一般支撑一样提供很大的刚度,而在大震下支撑滑动,降低结构刚度,减小地震作用,同时通过支撑滑动摩擦消耗地震能量。

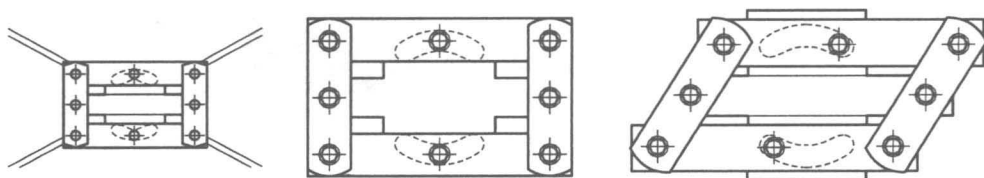


图 1.11 摩擦消能支撑