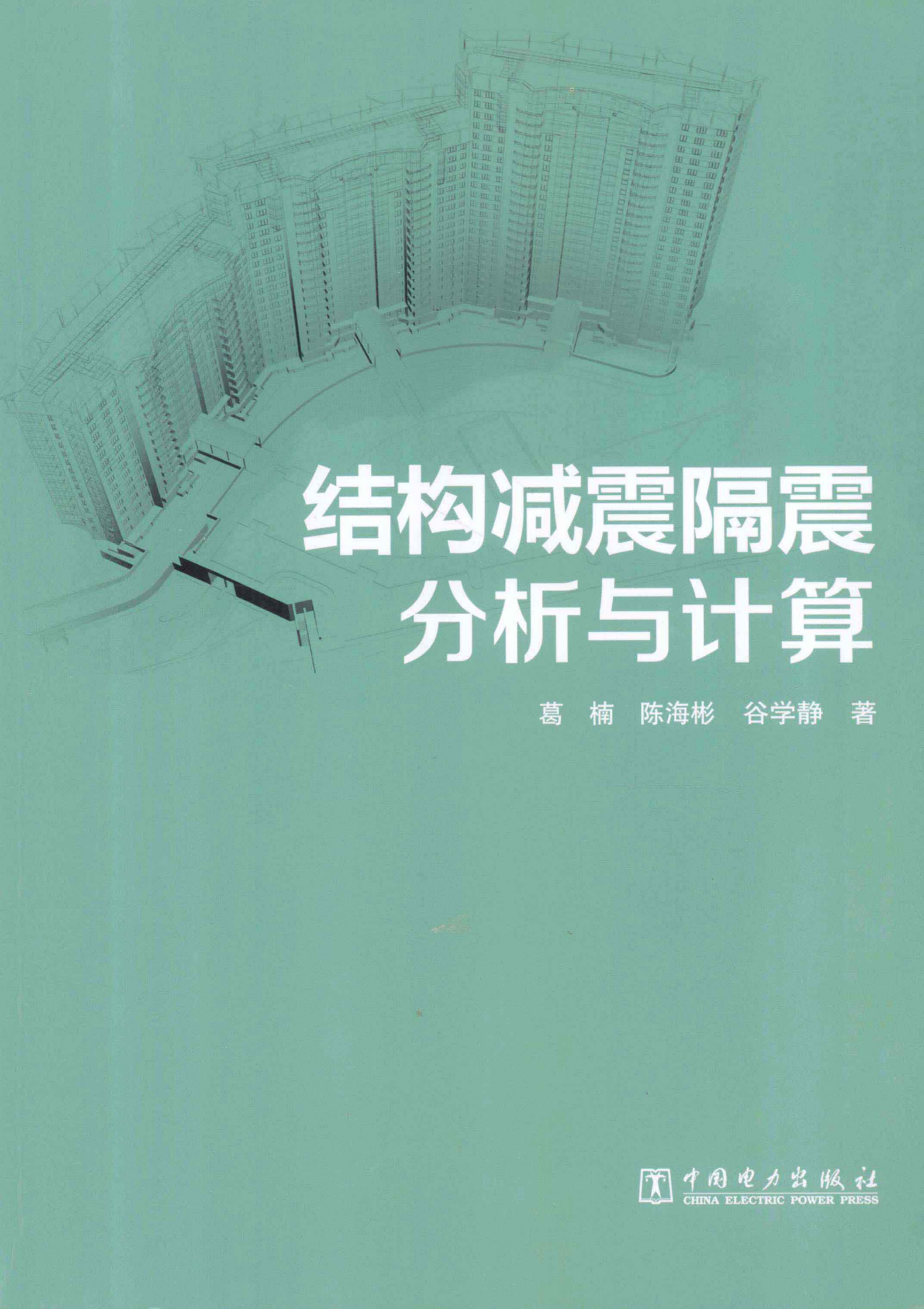




结构减震隔震 分析与计算

葛 楠 陈海彬 谷学静 著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

结构减震隔震 分析与计算

葛楠 陈海彬 谷学静 著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书在结构动力学基本理论的基础上,结合数值计算方法叙述了结构设置 TMD 阻尼器减震与隔震体系动力反应计算方法,同时也介绍了考虑大位移条件下高层悬挂结构地震动力反应分析计算方法、简支桥梁设置 FPS 摩擦摆隔震支座地震动力反应计算方法,以及浮放物隔震地板系统动力反应计算方法。本书的主要内容为作者自己近年来的科研成果,同时也附带介绍近年来这方面的最新研究成果。本书可供土木工程专业研究生和高校教师参考,也可供结构工程设计人员及地震工程研究人员使用和参考。

图书在版编目(CIP)数据

结构减震隔震分析与计算/葛楠,陈海彬,谷学静著. —北京:中国电力出版社,2013.8

ISBN 978-7-5123-4624-6

I. ①结… II. ①葛…②陈…③谷… III. ①建筑结构—抗震结构—分析
②建筑结构—抗震结构—计算 IV. ①TU352.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 144646 号

中国电力出版社出版发行

北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>

责任编辑:周娟华 联系电话:010-63412601

责任印制:蔺义舟 责任校对:马 宁

北京市同江印刷厂印刷·各地新华书店经售

2013 年 8 月第 1 版·第 1 次印刷

787mm×1092mm 1/16·12.5 印张·301 千字

定价:42.00 元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪

本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

前 言

结构隔震与减震计算作为结构力学、流体力学、计算方法、优化理论、自动控制、计算机、材料与测试等多学科交叉的研究领域，是一门新兴的学科分支及高新技术，有着重要的应用价值和发展前景。特别是随着科学技术和国民经济的发展，高层建筑和高耸结构的减震与隔震计算研究也发展成为防灾、减灾工程和结构工程的研究热点。国内外的专家、学者做了大量的研究工作，但至今还没有一本全面介绍其计算方法以及实现计算过程得出计算结果，并能用于实际减震、隔震效果分析方面的专著。近年来我们在这一领域进行了一些探索性的研究，取得了一些阶段性的研究成果，在此整理成书供读者参考。

本书在结构动力学基本理论的基础上，结合数值积分方法重点介绍了结构设置 TMD 阻尼器体系减震计算方法。全书共分为 8 章，具体内容如下：第 1 章为绪论，主要介绍了结构减震控制的基本概念、基本原理以及常用阻尼器的类型。第 2 章为减震体系分析计算方法，主要介绍体系运动方程的建立方法以及分步积分数值算法。第 3 章介绍了铅芯橡胶支座-质量块 TMD 调谐质量阻尼器减震计算方法及实例。第 4 章介绍了干摩擦板、弹簧-质量块 TMD 调谐质量阻尼器减震计算方法及实例。第 5 章介绍了 FPS 摩擦摆隔震支座-质量块 TMD 调谐质量阻尼器减震计算方法及实例。第 6 章介绍了核筒悬挂结构体系地震动力反应计算方法及实例。第 7 章介绍了简支桥梁体系设置 FPS 及 RFPS 隔震支座时地震动力反应计算方法及实例。第 8 章介绍了隔震地板体系的地震动力反应分析计算方法及实例。

我们的研究工作得到了国家自然科学基金、河北省自然科学基金以及河北省教育厅专项基金的支持，在此表示衷心的感谢。同时得到了本领域许多专家、教授的教诲和指导，本书也引用了国内外同行专家、学者的研究成果，在此一并表示感谢。

结构减震隔震计算的研究涉及面宽，各项内容起点高度不一，要在有限的篇幅内全面地论述与介绍这方面的研究内容也很困难，书中列入的参考文献也可以给读者提供一些信息，以便读者进一步的研究。限于作者的水平，错误之处在所难免，欢迎读者批评指正。

编 者
2013 年

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 结构减震控制的概念	2
1.2 工程结构减震控制的特点	7
1.3 结构减震控制的分类及常用装置	9
1.4 耗能减震阻尼器	11
1.5 质量调谐阻尼器 (TMD)	14
第 2 章 减震体系分析计算方法	19
2.1 体系运动方程建立的基本方法	19
2.2 体系运动方程的求解方法	21
2.3 编程平台 MATLAB	26
第 3 章 铅芯橡胶支座质量调谐体系减震分析计算	29
3.1 橡胶支座分类及铅芯橡胶支座构造	29
3.2 铅芯橡胶支座力学性能	30
3.3 铅芯橡胶支座调谐质量系统减震机理	32
3.4 多质点非线性 TMD 结构减震系统运动方程的建立	33
3.5 铅芯橡胶支座调谐质量系统框架结构减震实例分析计算	35
本章小结	49
第 4 章 干摩擦板—弹簧调谐质量体系减震效果分析	50
4.1 干摩擦板—弹簧调谐质量阻尼器简介	50
4.2 干摩擦板—弹簧调谐质量体系减震基本原理	50
4.3 干摩擦板—弹簧调谐质量减震体系运动方程	52
4.4 计算实例与减震效果分析	54
本章小结	72
第 5 章 FPS 摩擦摆调谐质量体系减震效果分析计算	73
5.1 FPS-TMD 的减震原理	73
5.2 摩擦摆的研究现状	74
5.3 FPS 减震体系运动方程建立	76
5.4 计算实例与减震效果分析	79
本章小结	97

第 6 章 核筒悬挂结构体系减震分析计算	99
6.1 悬挂结构简介与分类	99
6.2 悬挂结构的研究现状	103
6.3 核筒悬挂结构体系运动几何关系分析	104
6.4 核筒—悬挂结构体系运动方程的建立	105
6.5 实例计算分析	106
本章小结	112
第 7 章 桥梁隔震体系分析计算	113
7.1 桥梁隔震体系简介	113
7.2 FPS 隔震系统研究与应用现状	115
7.3 桥梁结构运用 FPS 隔震体系运动方程建立	119
7.4 桥梁结构采用 RFPS 支座的桥梁结构地震反应分析	137
本章小结	143
第 8 章 三维隔震地板体系减震分析计算	145
8.1 隔震地板研究现状及应用	145
8.2 隔震地板体系减震耗能原理	150
8.3 FPS 支座—碟形弹簧隔震地板效果分析计算	160
8.4 RFPS 隔震地板体系减震分析计算	166
本章小结	180
参考文献	181

第 1 章 绪 论

地震是一种自然灾害，对人类的生命财产安全构成极大威胁。中国是遭受地震灾害最严重的国家之一，1976 年唐山大地震、2008 年汶川地震、2010 年玉树地震、2011 年云南盈江地震，每发生一次强烈地震都会带来重大损失。尤其是最近几年地震频繁发生，更值得我们对自己的工作进行深刻反思。我们应该运用工程结构的抗震知识建造具有安全性的建筑，以最大限度地减少国家和人民生命财产的损失。

当地震到来时，地震动引起结构产生地震反应。基础固结在地面的结构，地震引起的结构反应沿高度逐渐放大，只要结构某一部分的反应（位移等）过大，就会使结构主体损坏，甚至倒塌，并导致严重的经济损失。例如，1976 年 7 月 28 日于我国发生的唐山大地震，在 10 多秒内将一座拥有百万人口的工业大城毁为一旦，死伤 40 余万人，震惊海内外。

传统的抗震方法是利用提高结构构件的抗力来抵抗地震的作用，然而对于那些发生概率小、随机性强的强震作用，这种方法既不经济又不安全。传统的抗震技术包括加强结构、加粗构件的断面、增加构件配筋、提高结构的刚度等，这种传统的“硬抗”的方法在大多数情况下是能起作用，但在强震作用下就很难确保结构及结构中的人员、设备、仪器的安全，不符合现阶段基于性能的抗震设计思想。近年来，在大地震和风灾造成损失越来越严重的情况下，人们越来越认识到传统的结构设计对未知强度的自然灾害抗御能力的局限性和不可改性（如地震设防烈度的不准确性）。

随着建筑物高度和质量的增加，结构所承受的风荷载和水平地震作用必然增大，因此在建筑物中考虑减震控制是对建筑结构发展的必然要求，减震控制技术为建筑结构抵御地震灾害提供了一种更加行之有效的全新方法。现代减震控制技术是通过在工程结构的特定部位安装某种隔震装置或消能减震装置、附加子结构、施加外力等措施以改变或调整结构动力参数的途径，以明显衰减结构的震动反应，有效地保护结构及内部设施在强震中的安全，或在其他外力干扰作用下使结构满足更高的减震要求。对高层建筑、超高层建筑和高耸构筑物的抗震和抗风也有一定效果。近年来迅速发展的质量调谐减震技术（TMD）由于其无须对结构采取传统的加强措施（如加大断面、增加配筋、加强刚度、加设构件等），且减震效果明显，易于实施，已作为一种全新的抗震对策，日益受到学术界、工程界的广泛重视，并在国内外工程中得到应用。因此，结构减震控制技术的理论和应用研究也受到极大的重视。结构减震控制是工程结构抗震抗风的一个新领域，包括隔震、消能减震，各种被动控制、主动控制、混合控制等。它不是采用加强结构的传统抗震方法来提高结构的抗震、抗风能力，而是通过增设子结构来减小主体结构的灾害响应，使结构在震害下少损坏甚至不损坏。鉴于其明显的减震效果、易于实施等优点，研究有效、经济、简单、可靠的结构减震控制装置，已成为结构抗震的发展趋势。

1.1 结构减震控制的概念

虽然人们在关于地震预报方面做了很多研究工作，但事实上，我们很难实现准确的地震预报，所以研究工程结构减震就显得极为重要。

根据减震控制采用的措施不同，可以将结构控制分为被动控制、主动控制、混合控制、半主动控制。被动控制不需要外界提供能量，如基础隔震、耗能吸能减震等均为被动控制。主动控制需要外界提供能量，传感器、运算器和施力作动器这三部分组成了主动控制系统。混合控制需要外界提供少量能量，它是主动控制与被动控制的综合应用，两者共同工作，既可以使两者的优点得到发挥，又可以使各自的缺点得到克服。半主动控制也是需要外界提供少量能量，它是以被动控制为主，既具有被动控制的可靠性，又具有主动控制的适应性。

1.1.1 被动控制

被动控制种类比较繁多，归纳起来，主要分为隔震、质量调谐减震和耗能减震等。

1. 隔震

隔震是指在建筑的上部结构和基础之间或上部建筑的层间设置的一种隔震装置，起到隔离地震向上部结构传递能量的作用。隔震系统由上部结构、隔震装置与下部结构三部分组成。

可变的水平刚度是隔震装置所具有的独特的特性，在遇到强风或者比较微小的地震的作用时，具有合适的水平刚度，而且上部结构的水平位移也非常小，不会影响建筑的正常使用。在遇到中强地震作用时，其水平刚度比上部结构的层间水平刚度还要小很多，这是因为隔震装置在中强地震的作用下首先会进入弹塑性变形的状态，因此，上部结构在地震作用下的水平变形就会从传统的抗震结构变成隔震结构，而且延长了自振周期，区别于上部结构的自振周期和场地的特征周期，有效地把地面震动隔开，上部结构的地震反应显著地得到了降低，所以上部结构在遇到强地震作用时仍处于弹塑性状态，这样既能使结构本身免遭破坏，又能使结构内部的装饰和仪器设备等得到保护。

2. 质量调谐减震

质量调谐减震是在建筑主体结构的特定部位配置子结构（如质量块等），能够改变主体结构振动时的固有周期，从而躲开振动时的共振区域，或者施加反向作用力作用于主体结构，使主体结构的振动减小。

3. 耗能减震

耗能减震是在结构的特定部位配置阻尼器或者是将结构中的一些构件设计成耗能的构件。在遇到风或者小震作用时，这些阻尼器或者耗能构件会有足够的初始刚度，结构处于弹性状态，结构仍具有满足使用要求的足够的侧向刚度；在遇到强烈地震作用时，阻尼器或者耗能构件首先进入非弹性状态，会大量耗散传入到结构中的地震能量，来减小结构的振动反应，进而使主体结构及其构件在强烈地震作用下不受破坏。

1.1.2 主动控制

主动控制需要外界提供能量，并利用外部能源对结构受到地震激励时输入的地震激励和

结构反应实时进行监测和反馈,再依据提前设定好的控制算法提供控制力。减小结构的地震反应,可以通过施加控制力,也可通过自动控制系统改变结构的刚度、阻尼或者质量来实现。主动控制系统需配置作动器(施加控制力)、传感器(监测和反馈)、控制器(处理控制算法)等装置。

目前,主动质量阻尼系统、主动支撑系统、主动拉索系统等主动控制系统已被提出。

1.1.3 混合控制

混合控制是利用主动控制或者半主动控制来完善被动控制特性的一种控制方法。最普遍的做法就是依据结构动力反应的特点,在一个结构上同时配置两种或者两种以上的控制装置,并设法把各种装置的优点发挥出来,来实现更好的减震效果。因为多种控制装置共同起作用,所以混合控制系统可以减少每个系统单独作用时的缺陷与不足,同时运行的可靠性显著提高。由于混合了被动控制,所以相对于全主动控制方法,对能量需求的要求大大减小了。

目前最常见的混合控制有 AMD 与 TMD 或者调谐液体阻尼器(TLD)的混合控制,隔震系统与主动控制系统的混合控制,阻尼耗能器与 ABS 的混合控制,以及混合质量阻尼器(HMD)。

目前隔震系统和主动控制装置的结合使用是一个研究热点。因为此种混合控制不仅切断了地震的传播途径,还抑制了结构的振动,所以这种控制效果比较理想。

1.1.4 半主动控制

半主动控制的减震体系以被动控制为主,以主动控制手段为辅,施加一部分外力或者是改变结构的参数和工作状态。半主动控制与主动控制一样也需要控制算法与结构响应的实时监测和反馈,然后再根据需要由半主动控制系统通过驱动电磁阀或者伺服阀改变阻尼的大小或者改变结构的动力性能,来减小结构的振动反应。半主动控制系统同被动控制系统比较,其控制力可以调节;同主动控制系统比较,半主动控制需要的输入能源很小,如蓄电池之类的较少的能源就能满足系统工作的需要,能够较容易地确保控制系统在地震灾害过程中的正常运行。

目前常见的半主动控制系统有主动调谐参数质量阻尼器(ATMD)、可变刚度系统(AVS)、可变阻尼系统(AVD)、空气动力挡风板(ADA)等。

1.1.5 结构控制理论的发展

结构控制理论的大力发展是在 20 世纪 80 年代,与结构控制有关的论文也层出不穷。Yang Abded-Rohman 等学者对关于高层建筑的主动 TMD 控制系统和主动锚索控制系统在地震荷载与风荷载的作用下的可行性与适用性进行了充分的研究。传递矩阵不需要计算机的在线工作,只要确定控制参数,控制系统就会处于主动控制状态下,所以它也被应用在了求解结构反应的统计特征上。

Hwang 等学者共同研究了基础隔震与主动控制结构结合在一起在地震的作用下的反应,并发现基础隔震与主动控制结合在一起,对控制多层结构的地震反应效果最好。

Q. B. Warbnrton 和 E. Q. Ayorinde 对简化单自由度的结构减震器的参数的最优控制进

行了研究,并指出简化单自由度系统对空间结构的振动控制的研究是可行的。

日本对被动控制的理论和实验进行了大量的研究与开发利用,日本的下乡对被动控制的最优参数控制的计算方法进行了总结,有最小范数法(MNM)、最小误差激励法(MEEM)、等效最优化控制特性法(ECPM)。这为结构被动控制中应用最优控制理论奠定了一定的理论基础,也更为直观地比较结构主动控制和被动控制的效果奠定了基础。在其应用上,1986年日本在千叶观光塔(Chiba Port Tower)上安装了TMD控制系统,它在1987年12月17日的5级近海地震中经受住了考验,并取得了较好的降低位移的效果。经研究分析,因为设置了TMD系统,顶层位移减少得比较明显,减少了15%;而加速度减少得不太明显,仅有2%,原因是该TMD系统的设计没有考虑到高振型的影响。日本在办公楼Crystal Tower(157m高)上利用顶层设置蓄水箱(大约1000t)来做成悬吊式的TMD系统,Shibayra Square Building也设置了TMD系统。日本对减震、隔震技术的研究以及应用起步比较早,特别是在“阪神地震”以后,日本掀起了一股强烈的“隔震热”。

我国土木工程界是从20世纪80年代初开始对结构振动控制进行研究的。王光远教授在1981年率先对高耸结构的风振控制的研究情况做出了综合评价,并指出采用结构控制的方法来设计建筑结构在土木工程领域的广泛发展前景,成为了我国在结构振动控制方面的奠基人。基于此,李桂青等对结构控制体系做了较为全面的研究和介绍。张相庭对结构顺横风振的综合控制也做了研究,提出建议,使用互通管式液体阻尼器,用能量代替力的原则对等效线性阻尼比进行计算。王肇民对电视塔采用TMD风振控制的理论、参数和试验进行了研究,并对嘉定电视塔TMD的设计方法及构造处理进行了阐述。朱宏平对高层结构振动的行波控制进行了研究,指出用波动方程来描述高层结构振动,当在高层结构的顶端设置控制器并成为吸能边界时,它会尽量多地吸收行波来作为载体携带的振动能量。张敏政对高层建筑采用主动控制TMD振动装置的地震反应进行了分析。刘季等对结构顺风向TMD的优化设计,位移速度的反馈等控制系统的优化设计,振动控制系统的品质分析,做了比较详细的研究分析。李宏男对结构采用调频液体阻尼器减震的研究发展、结构振动控制实践的新进展等进行了研究。同时还有许多科研人员对实际的结构做了结构控制的可行性分析或者已经应用于实践中。

1972年,J. T. P. Yao首次提出了结构减震控制的概念,但结构减震控制技术的应用却早在一两千年前就已存在。古代结构减震控制技术主要有4种:其一是柱基铰接隔震消能,它的原理是柱子不是固结在基台上而是形成“铰接”,从而达到隔震消能的作用,例如山西浑源悬空寺、希腊雅典卫城等。其二是殿基、城墙或者塔基的滑移隔震消能,它是将建

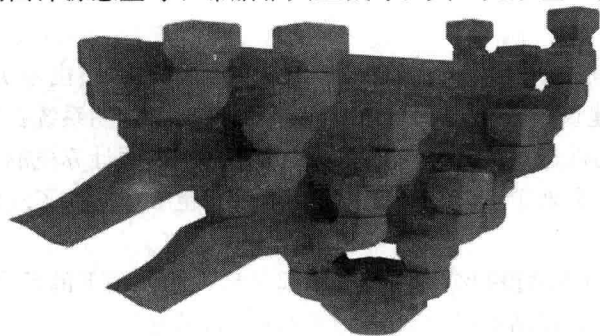


图1-1 斗拱结构

筑物基底砌筑在条石或整体片石上,通过滑动或摩擦来隔震,例如台北孔庙等。其三是“斗拱”消能节点(图1-1),它的方法是将梁柱节点和屋檐节点做成“斗拱”,例如山西应县木塔、日本奈良法隆寺等。其四是消能结构体,它是将一些结构物用柔性砂浆(灰砂膏等)砌筑,来消耗地震能量,例如意大利罗马斗兽场等。这些

国内外著名的古建筑均是利用了结构减震控制技术,才使得它们在经历了多次强震后仍保存完整。

不仅仅是在遥远的古代,在现代,人们也很注重结构减震控制技术在建筑结构上的应用。惠灵顿一幢四层办公楼采用了铅芯橡胶隔震垫;周福霖等在汕头建立了一幢橡胶隔震示范楼;日本首都的 ENICOM 计算中心安装了金属阻尼器;云南振戎中学新建教学楼和食堂安装了摩擦阻尼器;日本全国总工会保险事务所大楼安装了黏滞阻尼墙;我国上海电视塔和九江长江大桥,日本千叶港观光塔及美国纽约花旗银行等采用了 TMD 减震装置抵抗地震;我国珠海金山大厦和南京电视塔及日本的长崎机场塔和横滨港导航塔等,均采用了 TLD 减震技术。

由此可见,结构减震控制技术是海内外应用的主要抗震措施,且具有显著减小地震反应的效果。

1.1.6 结构减震控制优势及作用机理

结构减震控制是在工程结构的某些特定的部位安装某种装置(如隔震垫等)或者机构(如耗能支撑、耗能节点、耗能剪力墙等),或者子结构(如 TMD 等),或者施加外力(即有外部能量输入),以此改变或调节该结构的动力特性或作用。

结构减震控制与传统的抗震方法相比,无论从设计、防护对象或是适用范围上都具有很大的优越性,见表 1-1。

表 1-1 结构减震控制的优越性

防护方式	传统抗震	结构减震控制	结构减震控制优越性
耐震概念及途径	“硬抗”	以“柔”克刚	有效减震,经济,维护方便
设计依据	按设防烈度	考虑突发性强震	确保安全、防御性强
防护对象	结构本身	结构及其内部设备	减少生命和财产损失
适用范围	新设计建筑	新、旧建筑和设备	适用范围广泛

结构被动调谐减震控制具有很大的优势。它应用范围广,既适用于新建筑结构,也适用于旧建筑结构的耐震改良、加层减震等;既适用于建筑结构上,也适用于重要的仪器、设备等;既适用于多层、高层、超高层结构,也适用于高耸塔架、烟囱结构等;既适用于大跨度桥梁,也适用于海洋平台或其他特种结构。而且它还有节省结构造价、一次装设永久使用的优点。

FPS-TMD 减震系统属于被动调谐减震控制的一种,FPS-TMD 减震系统的本质是非线性的,具有优良的摩擦耗能特性和自动复位功能。这是它与传统的调谐质量阻尼器(TMD)的不同之处,即不需要另设复位装置和阻尼构件,这在很大程度上节省了造价。

近几年,随着地震的频繁发生,为了避免造成重大的经济损失和人员伤亡,抗震工作显得尤为重要,同时工程结构减震控制技术也被广泛地应用。工程结构减震是工程结构抗震中的一个新的领域,它不是采用加强结构的传统抗震方法来提高结构的抗震能力,而是通过调整或改变动力参数的途径,以明显衰减结构的振动反应,有效地保护结构及内部设施在强地震中的安全,或在其他外干扰力作用下使结构满足更高的减震要求。本论文就提出了干摩擦板—弹簧调谐质量系统的减震装置。

自从 1909 年 Frahm 提出质量调谐阻尼器以来, TMD 很快就被应用到机械减震和噪声降低方面, 随后又被广泛地应用到地震方面。而对于干摩擦的研究也有很多专业人员进行了探索和研究, 如干摩擦在调谐质量阻尼器系统中的应用, 通过试验进行了减震效果的研究。

传统结构的抗震方法通常是采用被动消极的抗震对策, 地震能量是通过结构的本身来储存和消耗的。对于非人为的地震灾害, 我们无法判断也不能确定未来的地震灾害的强度和特性, 所以传统的抗震方法并不那么适用, 因为它的自我调节能力很差, 而且安全性能不够高, 因此我们应该选择积极、主动的抗震对策, 想办法在地震发生时, 能够更大化地储存和耗散地震能量, 这也就要求将减震装置设置在建筑结构本身上, 使它们在发生地震时共同发挥作用, 起到减震的效果, 不至于使结构或者结构内部的设施遭到严重的破坏。目前, 国内外对于隔震技术的研究已经达到了成熟阶段, 并在桥梁、地铁等工程中大量应用。纵观工程结构减震控制的发展, 结构减震控制技术的研究和应用已经取得了很大进展, 并在实际工程中得到了实践。目前, 基础隔震和消能减震体系是减震技术的主要体现, 文章在了解和总结世界各国对于工程减震控制的研究成果的过程中, 提出了干摩擦板—弹簧调谐质量系统 (TMD) 减震效果分析, 可以有效地减少楼层间的相对位移, 达到减震效果。在结构的顶部设置摩擦板, 使滑块具有一定的质量, 就可以起到调谐质量阻尼器的作用。摩擦板和阻尼的作用可以消耗地震过程中所释放出的能量, 弹簧的作用可以使建筑物正常复位。这样可以使建筑物具有较好的减震效果、消能效果与复位能力。

所谓工程结构减震控制, 就是对工程结构的动力特性进行改变或者调整, 在工程的特定部位, 通过安装某种机构 (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)、某种装置 (如隔震垫等)、施加外力 (外部能量输入) 等方式, 来达到减震的效果。

工程结构减震可以使建筑结构的位移、加速度、速度能够在地震的作用下得到适当的控制, 传统的抗震方法只是通过改变结构的刚度、强度和延性, 而现在的工程结构减震方法是一种既经济、有效又安全、可靠的减震方法, 不同于传统的抗震方法, 它主要是将结构的动力特性或者动力作用进行改变或者调整, 以此来改变结构的振动方法, 不仅可以保证结构本身的安全性, 而且还能够保证结构内部设施的安全性, 这样一来, 就大大减少了地震给我们造成的不必要的损害。

利用结构的动力方程可以对工程结构减震的机理进行描述, 这个方程式可以写成: $M\ddot{x}_s + C\dot{x}_s + Kx_s = F(t) - M\ddot{x}_g$, 式中, M 、 C 、 K 分别为结构的质量、阻尼和刚度; $F(t)$ 为外部作用 (包括地震或风或可能施加的外力); $\ddot{x}_s$ 、 $\dot{x}_s$ 、 x_s 分别为结构在外荷载作用下的加速度、速度和位移反应; $\ddot{x}_g$ 为地面地震加速度。

按照结构的动力反应方程式, 为了能使结构地震反应减少, 通过改变 K 、 M 来调整自振周期 T 或者自振频率 ω , 或者施加外力 $F(t)$, 或者使阻尼 C 增加。结构内部设施的安全性和结构本身的使用环境处于正常状态下所允许的结构极限的位移、速度和加速度分别用 $[x]$ 、 $[\dot{x}]$ 、 $[\ddot{x}]$ 来表示, 对于上面的方程, 要想能使结构内部的人、设备、仪器、装修的安全性有所保证和结构本身能处于正常的工作环境下工作, 只要能够满足 $x_s \leq [x]$ 、 $\dot{x}_s \leq [\dot{x}]$ 、 $\ddot{x}_s \leq [\ddot{x}]$ 即可。

1.2 工程结构减震控制的特点

(1) 耐震。工程结构减震控制技术通常采用新的方法来调整结构的动力特性，那就是以“柔”克刚，从而起到隔离地震或者消减地震反应的效果。相对于传统的抗震方法来说，无论从安全角度分析，还是从经济方面考虑，都能达到预期的目的，而且能起到有效减震的作用。

(2) 安全性好。设想在本地区可能会发生的大规模的地震，通过采用工程减震控制技术，能够在大地震发生时，仍使建筑结构保持在相对安全的范围内，而避免受到由地震带来的损害，这样一来，不但可以保证建筑结构中的人、设备、仪器处于安全条件下，而且还能够很好地确保建筑物自身的形态。

(3) 满足现代社会要求。结构减震控制技术是按照结构内部设施的不同和结构物自身安全性能的要求进行设计的，在此条件下设计的建筑结构既能对结构物自身的安全性进行保护。又能对其结构内部设施的正常使用性进行保护。工程结构的减震控制技术绝不像传统的抗震方法，只在保护结构的本身，而是对于结构内部的设施进行了充分考虑，所以，工程减震控制的方法能够达到现代社会的要求。

(4) 适用范围广。对于新、旧建筑物结构，减震控制技术都能适用；无论是一般建筑结构还是那些超高层建筑，抑或是大跨度桥梁结构，工程结构减震控制技术都能适用；对于仪器、设备，环境振动的减震或者是工程结构减震，工程结构减震控制技术同样也能适用。

(5) 检测修复方便。因为结构减震控制不是通过结构本身来达到减震要求的，而是通过外部装置的采用起到作用的，所以对其的耐震性能可以仅限于外部的装置，这样，安装、检测起来都比较简单、方便；同时，也能确保在地震后可以尽快地修复，对震后的建筑物能够保持正常的使用和人能够保持正常的工作起到很好的作用。

结构减震控制技术与传统的抗震技术相比有以下特点：

1. 抗震途径和方法不同

传统的抗震技术采用的是“硬抗”的方法，包括加强结构、加粗构件的断面、增加构件配筋、提高结构的刚度等途径来抵抗地震。但是结构的刚度越大，地震作用就越大，产生恶性循环，到最后，这些方法既不经济又不能保证安全。然而，结构减震控制是采用消能、隔震、改变结构动力性能等方法，实现隔离地震或者削减地震能量的目标，能有效地发挥减震的作用，而且既经济又安全。

2. 设计依据不同

传统的抗震方法根据预先设定的“抗震设防烈度”，来限制结构的抗震能力。当实际发生的地震超过预先设定的“抗震设防烈度”时，结构就会处在不安全的状态中。然而，结构减震控制技术是按照结构的特性和地区的场地的动力特性，采用不同的消能、隔震、减震控制技术，考虑该地区若发生超烈度的大地震时，结构仍能被控制在比较安全的范围内，并确保结构及结构中的人员、设备、仪器的安全和正常的使用环境。因此，结构减震控制技术与传统的抗震技术相比，更加安全。

3. 防护对象不同

传统的抗震技术仅考虑了结构本身的抗震能力，没有考虑结构中的装饰、仪器、设备等

的防护要求。而结构减震控制技术是根据结构本身的安全要求和结构内部装饰、仪器、设备的不同的要求进行消能、隔震或者减震控制，既可以保护结构本身免遭破坏，又可以保护结构内部装饰、仪器、设备以及正常的使用环境。如今，社会对地震的防护要求越来越高，结构减震控制技术将更加适用。

4. 适用范围不同

根据传统的抗震技术而设计的建筑结构，其主要是依靠结构的本身提供抗震的能力。而那些已有的建筑结构，如果建筑结构本身的抗震能力就不足，则很难再用加强的办法来补救。结构减震控制技术则是通过配置一些装置来进行消能、隔震、减震，而不是靠结构本身来抗震。因此，结构减震控制技术不但适用于新设计的建筑结构，还适用于对那些抗震能力不足的建筑结构进行加固和改良，使其达到抗震的要求。

减震控制技术的诸多特点与传统的抗震技术相比，有很多优越性，具体表现为以下几点：

1. 有效减震或抗风、安全可靠

根据地震台的试验或者实际的地震记录，结构采用减震控制技术的地震反应同采用传统抗震技术的地震反应，其比值见表 1-2。

表 1-2 减震控制技术地震反应

结构类型	反应系数比	结构类型	反应系数比
隔震结构	8%~25%	TMD 被动控制结构	30%~60%
消能结构	30%~60%	主动控制结构	10%~50%

2. 节约工程造价，比较经济

减震控制技术虽然配置了一些装置，但结构主体所承受的地震作用却大大减小了，因此可以减小构件的断面、减少构件的配筋等，结构的总造价反而节省了很多。根据一些已建的建筑结构的结算，工程结构减震控制技术与传统抗震技术在工程造价方面作对比，造价节省见表 1-3。

表 1-3 减震控制技术造价节省

结构类型	造价节省	结构类型	造价节省
隔震结构	3%~20%	被动控制结构	5%~20%
消能结构	3%~10%	主动控制结构	5%~20%

3. 建筑结构的设计更加自由

因为采用了消能、隔震、减震控制技术，结构本身所承受的地震作用大大减少了，所以，可以打破传统抗震技术对结构设计的一些严格限制，根据建筑结构对功能的要求，可以做成各种形式的结构，使建筑设计师能够自由地设计建筑物或者构筑物，其抗震能力则可以通过增设“减震控制”装置来加以保证。

4. 适应范围比较广

既适用于新设计的建筑结构，又适用于对已建建筑结构进行抗震、抗风等性能的改良；既适用于数量大、面积广的一般建筑和住宅建筑，又适用于要求保证必须安全的重要建筑、

超高层建筑、铁路干线、大跨度桥梁等；既适用于建筑结构减震控制，又适用于仪器、设备、环境振动等的减震控制。

5. 检测修复比较方便

因为结构减震控制技术通过外设减震装置实现抗震要求，所以对它的抗震性能的检测与修复也仅限于外设减震装置。这比要检测或者修复建筑结构本身简单、快捷很多。减震控制技术能够确保震后结构的快速修复，这对于震后尽快地恢复正常的生产和生活具有重要的意义。

1.3 结构减震控制的分类及常用装置

1.3.1 结构减震控制分类

结构减震控制技术的种类很多、形式多样，一般可按技术方法和有无外部能源输入等方法进行分类。

(1) 按技术方法分类，可分为：隔震技术，消能减震技术（如消能剪力墙、金属阻尼器等）；调频减震技术（如 TMD、TLD 等），主动控制技术（如 AMD、ATS 等），半主动控制技术（如 AVS、AVD 等），混合控制技术（如复合 AMD 混合控制、主动与被动混合控制），智能控制技术（如电压驱动器等）。

(2) 按有无外部能源输入分类，可分为：无外部能源输入的被动控制（隔震、消能减震、调谐减震），有外部能源输入的主动控制，有少量能源输入的半主动控制，有部分能源输入的混合控制，有少量能源输入的智能控制。

1.3.2 工程结构减震控制装置

工程中常用的结构减震控制装置有以下几种。

1. 叠层橡胶支座

叠层橡胶支座（图 1-2）按照橡胶支座中使用的材料不同，可分为天然橡胶支座、高阻尼橡胶支座、铅芯橡胶支座等。叠层橡胶支座的主要性能包括支撑性能和承受荷载状态下的水平变形性能。此外，还有耐久性、耐火性等性能。影响叠层橡胶支座性能的主要因素有橡胶厚度、橡胶直径、橡胶层数等，这些因素对其性能的影响是相互耦合的。美国洛杉矶南加利福尼亚州大学（USC University）医院即采用了叠层橡胶隔震支座。

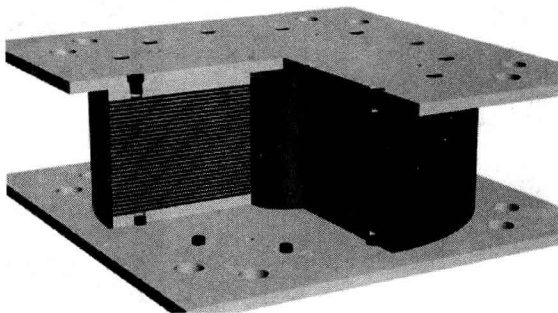


图 1-2 叠层橡胶支座

2. 摩擦摆（FPS）支座

摩擦摆支座（图 1-3）种类很多，大体上可分为两类，即上部滑动式支座和下部滑动式支座。其工作原理是通过由高强抗压材料制成的滑块与滑道的摩擦来消散振动能量。苏通长江大桥即采用摩擦摆支座减轻桥身振动。

3. 黏弹性阻尼器

黏弹性阻尼器（图 1-4）由黏弹性材料与约束钢板组合而成。它是通过黏弹性材料的滞回耗能功能来耗散结构的振动能量，从而实现减小结构动力响应的目的。黏弹性阻尼器性能的主要影响因素有温度、频率和应变幅值，尤其以温度和频率的影响较为显著。西雅图哥伦比亚中心大厦安装了 260 个大型黏弹性阻尼器。

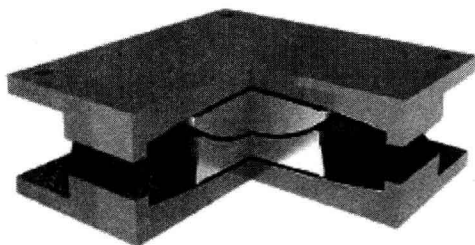


图 1-3 摩擦摆支座

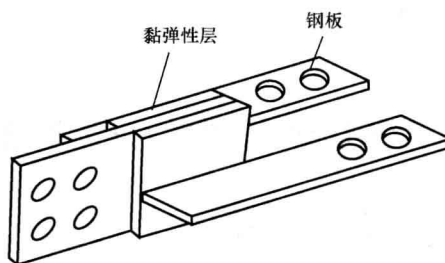


图 1-4 黏弹性阻尼器

4. 摩擦阻尼器

摩擦阻尼器（图 1-5）主要是通过界面摩擦生热耗散振动能量，因此摩擦耗能效果主要取决于接触面的粗糙程度和法向力装置，目前摩擦界面的做法有喷砂（丸）、生赤锈等。一般来说，每种摩擦阻尼器都有自己的本构关系，它适用于频带较宽、对频率敏感较低的情况。加拿大 Montreal 市 Concordia 大学图书馆在框架的交叉钢支撑节点处安装了 Pall 摩擦阻尼器。

5. 调谐液体阻尼器

调谐液体阻尼器（TLD）如图 1-6 所示，是一种有效的减震装置，它利用固定储液箱中的液体在摇晃过程中生成的动侧压力来提供减震作用。因此，TLD 除了具有造价低、易安装、维护费用少的优点外，还具有自动激活性能和容易匹配、调谐的特点。TLD 在海洋平台结构减震上的应用已取得一些成果。

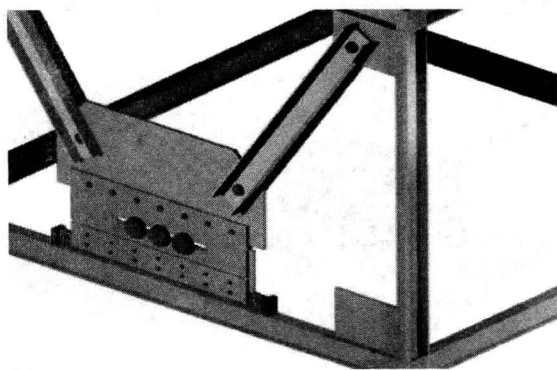


图 1-5 摩擦阻尼器

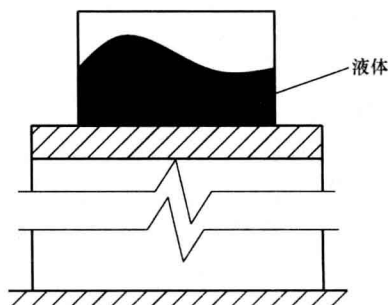


图 1-6 调谐液体阻尼器

6. 调谐质量阻尼器

调谐质量阻尼器（TMD）由主结构和附加的子结构构成，子结构包括调谐质量、阻尼器、弹簧等，通过控制其质量、阻尼等来改变结构的自振频率，达到减震的目的。例如，美

国波士顿 John Hancock Building 和澳大利亚悉尼塔均采用了 TMD 装置。目前, 高层结构设置屋顶花园是减震技术发展的新方向。

除以上几种装置外, 常用的装置还有滚轴摩擦滑移支座 (RFPS)、干摩擦板—复位弹簧减 (隔) 震装置、磁流变阻尼器等。

1.4 耗能减震阻尼器

所谓的建筑耗能减震控制其实是通过在结构上设置被动耗能减震装置, 用来消耗地震的能量, 从而大大减轻了结构由于动力荷载作用引起的变形和损伤。耗能减震的设计思想是在同一种耗能机理下, 可运用多个耗能元件一起工作共同来耗散能量。在同一种耗能减震器中, 综合运用不同的耗能机理共同耗能, 也就是说耗能减震器在综合地运用不同耗能方式的特点。耗能器应具有多道耗能减震防线。为了减少结构的地震反应, 提高耗能减震器的耗能效果, 可以将耗能器设置成具有位移放大的功能。除此之外, 耗能减震器还具有良好的变形跟踪性能, 随变形增大变化其承载能力和耗能能力, 具有自适应能力。它之所以能被广泛地应用到高层、超高层建筑, 大跨度结构体系, 高柔结构、高耸塔架, 柔性管道、管线和已有建筑物抗震 (抗风) 加固中, 是因为其具有可靠的经济安全性及技术合理性的特点。

随着时代的发展, 为了达到减震的效果, 人们已经设计出各种各样的阻尼器, 目前已经被广泛研究应用的阻尼器主要有金属阻尼器、摩擦阻尼器、黏滞阻尼器、黏弹性阻尼器和复合型阻尼器等。

1.4.1 金属阻尼器

金属阻尼器是利用金属进入塑性状态后具有良好的滞回特性, 并且能够在弹塑性滞回变形过程中吸收大量的能量, 所以常被用来生产各种类型的阻尼耗能器。它通常以钢或者铅作为原料, 金属阻尼器常用的有软钢阻尼器、铅阻尼器和形状记忆合金阻尼器。如图 1-7 所示。

软钢阻尼器是充分利用软钢的塑性滞回变形来耗散能量的, 以达到减震的效果, 由于软钢阻尼器具有费用较低、方便耐用、对外部环境温度变化不敏感性, 以及丰满的滞回曲线等特点, 所以在工程界被广泛地认可。该阻尼器的形式有 U 形钢板、X 形和三角形等。其中国内外对 X 形和三角形软钢阻尼器的研究居多, 将软钢阻尼器应用到工程中的实例有很多, 为了对原建筑物进行抗震加固, 墨西哥的三幢钢筋混凝土结构和美国旧金山 Wells Fargo 银行的一幢钢筋混凝土框架结构中都设置了软钢阻尼器。

1976 年, 新西兰 Robinson 等人利用铅的塑性发明了铅挤压阻尼器, 从而为我们展示了铅良好的塑性。而我们所说的铅阻尼器, 更进一步地综合利用了铅的高密度、低熔点、高塑性、强耐腐、强润滑能力等特点, 尤其是铅的延性和柔性能够使物体在变形的过程中吸收更多的能量, 同

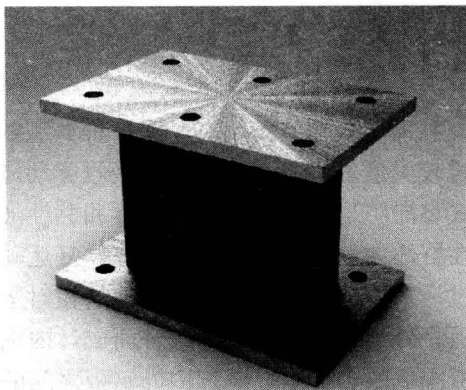


图 1-7 金属剪切阻尼器装置