

半主动控制的研究现状及其工程应用

The Research Status of the Art of Semi-Active Control and It's Application

蒙文流¹, 韦树英¹, 罗会来²

MENG Wen-liu¹, WEI Shu-ying¹, LUO Hui-lai²

(1. 广西大学土木建筑工程学院, 广西南宁 530004; 2. 石家庄经济学院工程学院, 河北石家庄 050031)

(1. Institute of Civil Engineering, Guangxi University, Nanning, Guangxi, 530004, China; 2. Institute of Engineering, Shijiazhuang University of Economics, Shijiazhuang, Hebei, 050031, China)

摘要:介绍半主动控制的变刚度和变阻尼以及半主动变刚度/阻尼系统的研究现状, 以及半主动控制装置开发和工程实践应用情况, 展望半主动控制技术的发展方向。

关键词:半主动控制 主动变刚度 主动变阻尼

中图分类号:TU318 **文献标识码:**A **文章编号:**1002-7378(2008)03-0231-07

Abstract: Research status of the active variable stiffness, active variable damper, active variable stiffness/damper semi-active control systems, the semi-active control device exploitation and engineering application are introduced. The future development orientations of the structural vibration semi-active control techniques are prospected at last.

Key words: semi-active control, active variable stiffness, active variable damping

半主动控制兼顾被动控制与主动控制的优点, 仅需极少的能源输入就能达到近似主动控制的控制效果, 因此半主动控制是目前性价比最高、最具有工程应用前景的一种结构控制方法。最早提出半主动控制系统是在上世纪 20 年代^[1], 1983 年 Hrovat 等^[2]人最早提出将半主动结构控制技术应用于结构工程领域。随后, 国内外大量学者对半主动控制进行了理论、装置开发、试验和工程应用的研究。结构半主动控制本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振动, 因此半主动控制可以分为变刚度和变阻尼以及半主动变刚度/阻尼系统。本文介绍 3 种半主动控制系统的研究现状和工程应用情况, 展望半主动控制技术未来的发展方向。

1 主动变刚度系统

主动变刚度系统的基本思想是通过可变刚度装置使受控结构的刚度在每一采样周期内根据特定的控制律而不同刚度值之间实时进行切换, 使得受控结构在每一采样周期内都尽可能远离共振状态, 达到减振的目的。日本学者 Kobori 等^[3~6]首先提出主动变刚度系统(AVS)(图 1); 它可以根据结构的反应, 通过计算机控制的快速反应锁定装置来改变系统的刚度; 该系统由一个带有控制阀的双出杆粘滞油缸组成, 并用斜撑与结构相连, 根据结构的反应和预先设计的控制算法, 由计算机来控制控制阀的开启和闭合, 控制缸体与斜撑的连接与断开, 以改变结构的刚度, 使结构的自振周期尽可能避开地震动的卓越周期达到降低结构反应的目的; 该装置在东京进行足尺的三层钢结构振动台控制试验结果表明, 采用半主动变刚度控制技术对减小结构的地震反应是可行的。Nasu 等^[7,8]对一装有主动变刚度装置的高耸结构进行试验研究, 试验模型为 25 层钢框架结

收稿日期: 2007-11-14

修回日期: 2008-01-12

作者简介: 蒙文流(1979-), 男, 博士研究生, 主要从事结构振动控制研究。

构, AVS 控制体系的振动台模型结构试验与原型结构试验表明: 与主动控制相比, AVS 系统构造简单, 仅需非常少量的外部能量; 该装置对于各种不同刚度、不同高度的建筑物, 在不同的地震烈度下, 都能实施有效的减震控制, 取得良好的控制效果。1999 年我国学者刘季等^[9]提出变刚度半主动控制系统及其理论, 并成功完成我国第一个半主动振动控制试验; 该可变刚度系统由可变刚度构件、机构装置和控制器三部分组成, 其中, 可变刚度构件的一端固接于结构上, 另一端与油缸部件的缸体固接, 油缸部件的另一端与结构固接, 当活塞在油缸中不能相对运动时, 机械装置的作用将可变刚度固接在结构上, 使结构增加刚度, 当活塞在油缸中作相对运动时, 增加结构阻尼, 耗散输入结构的能量; 该系统可根据预先设定的控制算法控制油缸活塞的运动状态, 以实现半主动控制目的。吴波等^[10,11]将单自由度变刚度半主动控制结构等效为一种特殊线性结构, 给出等效附加刚度比和等效附加阻尼比的定量计算公式, 并建立多自由度变刚度半主动控制结构的拟振型分解法, 为变刚度半主动控制结构的实用抗震设计方法的建立奠定了基础。

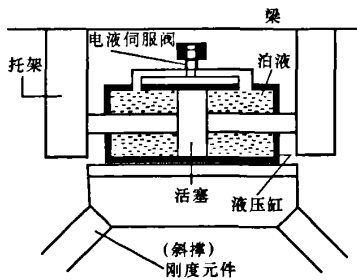


图1 主动变刚度系统

主动变刚度控制系统, 实质上是根据结构振动过程中位移和速度状态自动调节可变刚度的开关状态, 吸收和释放振动能量。当打开增加刚度开关时, 控制装置充分吸收振动能量, 当关闭增加刚度开关时, 控制装置消耗和释放吸收的振动能量, 因此结构始终处于一种非稳定、非共振状态。但是, 由于控制时滞问题将影响其控制效果, 也是该类控制系统应用于工程实践的困难所在。

2 主动变阻尼系统

主动变阻尼(AVD)控制系统由 Hrovat^[12] 首先提出, 他对应用可变阻尼器控制结构的风振反应进行研究, 通过仿真分析, 得到与主动控制接近的效果。随后国内外学者在变阻尼系统进行大量研究, 取

得了较大进展。目前已经开发的各种可变阻尼控制装置有: 半主动流体阻尼器、摩擦可控装置、半主动调谐质量阻尼器、半主动调谐液体阻尼器, 和电/磁流变阻尼器。

2.1 半主动流体阻尼器

Symans 等人^[13~15] 基于被动流体减振装置研制了半主动流体阻尼器(图2), 并对其减震性能和分析模型进行试验和理论研究, 该阻尼器由充满硅油的外缸、不锈钢活塞杆、铜制活塞和具有控制阀的旁路组成, 最大输出力为 8.9kN, 利用控制阀改变通过旁路的流体流量, 进而控制阻尼器的阻尼特性。控制阀可以处于完全打开、完全关闭和介于两者之间的状态, 因而从系统中得到的阻尼是可变的, 操作控制阀所需的功率仅为 3.5W; 将该阻尼器附设于三层框架结构模型进行振动台试验研究, 在 Hachinohe 地震波激励下, 半主动控制系统同纯框架结构、两种被动控制情况(阻尼器分别设置在低阻尼和高阻尼)进行比较, 得出的结论是被动附加高阻尼控制系统及半主动控制系统均明显地减小了纯框架结构的响应且响应几乎是相同的, 但是半主动控制系统总是稳定的, 在 EI-Centro 地震波激励下, 对采用相同控制算法的主动锚索系统与半主动系统进行比较的结果表明, 半主动控制系统达到甚至超过主动控制系统的控制效果。

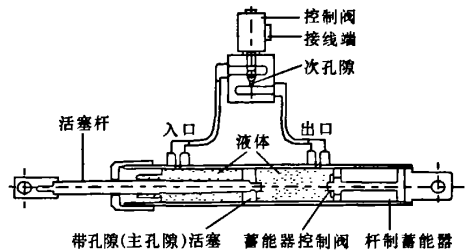


图2 半主动流体阻尼器

Kurata 等人^[16,17] 研制一个实尺寸的半主动液压阻尼器(SHD), 该阻尼器由可调阻尼单元和阻尼力控制器单元两部分组成, 变阻尼单元包括双推杆式液压缸体和管路, 在管路中装有流量控制阀、止回阀和蓄能器。阻尼力的大小通过流量控制阀来调节, 能产生的最大阻尼力为 1000kN。

可变孔隙阻尼器以传统的液压流体阻尼器为基础, 利用可调的机电变孔隙阀来改变对流体流动的阻力, 从而提供可变的阻尼力。Feng 等^[18] 第一次讨论应用这种变孔隙装置控制桥梁结构的地震响应, Kobori 等^[3,19] 将一足尺寸变孔隙阻尼器应用于主动变刚度控制系统中来研究其有效性, 结果证明变孔

隙阻尼器能够有效减小地震激励下结构的响应。

Sedek 的研究^[20]则得出这样的结论:对于采用变阻尼控制的柔性结构(周期在 1.5s 以上),同时取得位移峰值和加速度峰值的减小是有可能的;而对于刚性结构(周期在 1.5s 以下),采用变阻尼控制则值得怀疑的。杨润林等^[21]经对半主动流体阻尼器的研究发现上述的观点是片面的,同时指出仅由结构的周期判定变阻尼控制的可行性和有效性是不合理的,必须从结构周期与外激励周期二者之间的比值出发进行考虑。也就是说,变阻尼控制的性能同时取决于结构的动力特性参数和地面运动的频谱特性。

在阻尼减震结构的抗震设计方面,郑久建等^[22]分析反应谱法计算减震结构存在的问题后,提出联合采用加速度谱、速度谱和位移谱才能较好地分析阻尼减震结构。由于反应谱法建立在线弹性理论的基础上,将非线性阻尼线性化后再采用反应谱计算会带来较大的误差,郑久建等^[23]通过计算结构的复数特征值和特征向量来改善振型分解反应谱法。这些方法对阻尼减震结构抗震设计技术的进步及其在今后工程中的推广应用起到一定的促进作用。

综上所述可知,仅在满足比较严格的特定条件下,变阻尼控制才有可能在牺牲位移指标的前提下进行折中考虑,同时取得结构位移反应和加速度反应的减小;相反,在大多数情况下,变阻尼控制效果不如对应的被动上限阻尼控制。因此,在变阻尼控制实际应用的过程中,必须根据结构的周期和可能出现的地震动频谱特性之间的相互关系慎重考虑。

2.2 摩擦可控装置

摩擦阻尼器是一种构造简单的耗能减振装置,已经用于国内外多座新建建筑的抗震设计和已建建筑的抗震加固中。目前也已经提出有各种利用表面摩擦来耗散结构系统振动能量的变摩擦装置。Akbar 等^[24,25]、Kannan 等^[26]分别提出一种变摩擦控制装置,该装置通过摩擦轴与结构的支撑刚性相连,界面摩擦力通过可控的滑移量来调节。但是该变摩擦装置是通过夹紧机械装置来改变摩擦力的大小,最大摩擦力受限于所使用的夹紧机械装置类型,而且还可能带来时滞问题。为此,Agrawal 等^[27]提出半主动电磁摩擦阻尼器(SAEMFD),该装置通过改变电磁场大小来调节摩擦力的大小,能有效解决时滞问题。由于压电材料在电压作用下产生应变,相应地产生应力,而且出力大,所以 Unsal 等人^[28]利用压电材料的特性研制了变摩擦装置,让摩擦力的大小与所输入的电压成比例,从而可以通过改变输入

电压来改变摩擦力的大小。我国学者瞿伟廉等^[29,30]提出一种半主动摩擦阻尼器,该装置通过调整阻尼器的起滑力来改善被动摩擦阻尼器的耗能减振性能,可以抑制高耸塔结构的地震反应,耗能减振效果明显优于被动摩擦阻尼器。

采用半主动摩擦阻尼器进行结构控制的效果在很大程度上取决于控制算法的优劣,优秀的控制算法应当能够使摩擦阻尼器在工作时始终处在滑移阶段,减少阻尼器处于附着阶段的次数与时间,使阻尼器能够不间断地耗能。初始摩擦起滑力的确定是实现半主动摩擦阻尼器控制的另一关键环节,初始起滑力必须确保摩擦阻尼器在小震作用下能够滑动。

2.3 半主动调谐质量阻尼器

被动调谐质量阻尼器基本上由单自由度的质量—弹簧—阻尼器系统组成,一般固定在多层结构的顶层。半主动调谐质量阻尼器(SATMD)于 1980 年提出^[31],并引起了广泛关注。SATMD 具有刚度和阻尼可变的能力,因此适应能力强,同时维护简单,对外部能源要求较低,可靠性和鲁棒性都很好。Hrovat 等^[2]比较研究 SATMD 和 TMD 控制高层建筑风振效果的结果是,设计得当的 SATMD 会明显优于 TMD,而且在大多数性能指标上与 ATMD 接近,在个别方向略超过 ATMD。Pinkaw 等^[32]研究 SATMD 对简谐荷载下单自由度结构系统减振效果的结果是,SATMD 对结构的稳态响应有明显的抑制作用。因此,SATMD 是一种比 ATMD 和 TMD 更有希望和潜力的控制方式。目前已经提出的 SATMD 主要有:(1)具有初始位移的 TMD^[33];(2)具有可变阻尼的 TMD^[2,32];(3)具有脉冲发生器的 TMD^[34]。这三种类型的 SATMD 都有较好的控制性能。

SATMD 自身存在的一些缺陷也促使许多学者去为之努力。第一,时滞效应。SATMD 测取外部信号并作出决策不能同时完成,这样的时滞不可避免。虽然它不像主动控制情况下那样引起模态溢出,但是使 SATMD 控制效率降低却是必然的。尽力去克服时滞效应,开发一种对时滞不敏感的算法也将是未来一段时间提高 SATMD 减振效果的努力方向。第二,对脉冲激励或突变激励反应迟缓,也是 SATMD 的缺陷之一。第三,目前缺少从整个减振过程的眼光去研究 SATMD 最优控制的研究。地震波为随机波动,对其未来变化无法预知。SATMD 每一步调整操作都会影响到下一步调整时的初始状态,而每一步操作只考虑当前最优,它所造成的初始状

态很可能不利于下一步或整个减振过程。评估调整操作对下一步的影响很难,因为这必须预计将来一段时间外部激励的变化。

2.4 半主动调谐液体阻尼器

调谐液柱阻尼器(TLCD)是一种特殊的调谐液体阻尼器,其依靠U型管中液柱的运动来抑制结构的运动。当调谐液体阻尼系统的基本晃动频率与结构的基频相调谐时,能有效地控制结构振动。然而,作用在受控结构的外部激励(风、地震)是随机的,因此受控结构的动力性能也将随着改变。为了改善调谐液柱型阻尼器的减振性能,Sakai等^[35]首先提出半主动调谐液体阻尼器。之后,Kareem^[36]、Abe等^[37]也分别提出半主动TLCD系统,并对其进行研究。Yalla等^[38]利用电子螺线管来控制挡板开孔率,根据不同的控制算法对半主动TLCD系统进行研究的结果表明,半主动TLCD系统比被动TLCD系统更有效的减小结构振动,但是此控制装置只能实现全开或全关两种开启状态,不能实现连续控制。上述所提的半主动调谐液柱阻尼器在U型管中间设置可调孔径的挡板,通过调谐挡板的开孔率,改变水流速度及水头损失系数来提供不同的阻尼力。霍林生^[39]基于半主动控制概念提出半主动变刚度TLCD减振系统,通过在U型阻尼器上设置可调弹簧系统,根据减振系统的需要适时调整TLCD的频率,以获得更好的减振效果。Wang等^[40]则采用磁流变液体代替传统TLCD中的水,通过改变外加磁场来控制磁流变液体通过挡板孔隙,以提供不同的阻尼力。该装置具有较强的可操作性,且磁流变液体反应速度快,因此具有较好的应用前景。

2.5 电/磁流变阻尼器

电流变(Electrorheological,简称ER)流体是一种可控智能液体,在电场的作用下能够在毫秒级内实现自由流动、粘滞流动和半固态的可逆变化,具有动态范围宽、屈服强度可以随意控制、构造简单、响应快且连续顺逆可调等优良性能。1947年Winslow^[41]首次报道电流变效应,Ehrgott等^[42](1992)以及Gavin等^[43]在土木工程领域较早应用电流变液体研制半主动变阻尼装置。1996年,Makris等^[44,45]人建立电流变液的本构关系模型,并对电流变液在结构控制中的应用进行试验研究,他们采用的ER阻尼器(图3),当电场强度在3kV/m时,ER流体能够产生1.8kpa的剪切屈服应力。但是,ER流体始终存在两个问题限制了它在结构振动控制中的应用:一是它的剪切屈服强度不大只有

2~5kPa;二是它的工作电压很高,通常为2~5kV,实际应用中很难满足。

MR流体是ER流体的磁性类似物。一般由微小的顺磁性颗粒分散在载体介质(如矿物油或硅油)中形成。Spencer等^[46~49]进行大量的研究来证明应用MR阻尼器减小结构地震响应的有效性。1998年Dyke等^[50]对装有4个MR阻尼器的1座6层钢框架结构模型进行试验研究,在两种激励频率下对原结构、被动控制结构和半主动控制结构的地震反应分析表明,限幅最优的半主动控制效果明显优于被动控制,顶层绝对加速度同原结构相比减小了62%;同被动控制结构相比减小了30%,而且控制效果总是稳定的。周强^[51]、孙清^[52]、闫维明^[53]等国内学者也进行了MR阻尼器的性能测试以及MR阻尼器动力模型的研究。

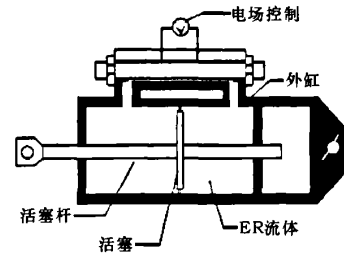


图3 ER阻尼器结构

采用MR阻尼器进行结构的半主动控制时,建立较为精确的MR阻尼器动力学模型是设计控制策略和获得良好控制效果的关键因素之一,也是阻尼器模型的输出和控制仿真分析具有较高可信度的有力保障。根据目前研究者们建立起的MR阻尼器动力学模型,可以分为参数化模型和非参数化模型。由于磁流变液体的动态本构关系很复杂,其动态阻尼力呈现强非线性,很难用流变力学理论分析,因此大多数研究者都基于试验结果来建立MR阻尼器的数学模型。由于各自的试验手段和数据处理方法不同,产生了多种数学模型,这些数学模型复杂程度及精度也不一样,在使用上很难得到统一。磁流变阻尼器性能的高度非线性和不可预测性,致使建立阻尼力-电压关系的逆向动力模型非常困难。而神经网络和模糊逻辑具有高度的鲁棒性和自学习能力,对处理非线性、不确定性、高度复杂性问题十分有效。因此,应用神经网络和模糊逻辑技术来提高磁流变阻尼器半主动控制的效率是一个很有研究价值的方向。

3 半主动变刚度/阻尼系统

对于一个振动系统,除外荷载的频谱特性外,其反应将主要取决于系统的频率及阻尼。主动变刚度控制装置仅使振动系统的刚度被适时地切换,而主动变阻尼控制装置则仅使系统的阻尼适时地切换。不难预见,如果将这两种控制装置有机地结合起来,构成一种新的半主动控制装置—主动变刚度阻尼控制装置,将会取得优于这两种装置中任何一种装置的控制效果。我国学者周福霖等^[54]基于上述思想将主动变刚度(AVS)控制和主动变阻尼(AVD)控制有机地结合起来,提出了一种崭新的半主动控制技术—主动变刚度/阻尼(AVS/D)控制。通过增加可变阻尼项,增强了主动变刚度控制装置在释放能量阶段的耗能效果,不仅具有 AVS 控制系统能主动地避开地震动卓越周期的优点,同时又具有 AVD 控制系统消减反应峰值,对较宽频带内的外界激励所具有的非频变的减振特性。

4 半主动控制工程应用

在理论和试验深入研究的同时,半主动控制的工程应用也得到了发展。日本已建成数十栋设置半主动控制装置的建筑,并显示出了良好的抗风抗震性能。世界上首次采用 AVS 半主动控制装置的建筑是日本东京鹿岛技术研究所。在此系统中,应用液压元件改变刚性支撑和大梁的连接条件,随时调节层间刚度,避免共振;该系统能耗比较低,所配备的备用电源在市电停止供应时尚可工作 3min^[55]。而世界上第 1 栋采用可变阻尼器控制的建筑在日本静岡完工^[56],这是一栋五层钢框架结构,每个阻尼器最大可提供 1000kN 阻尼力,功率为 70W,可以有效减小结构层间剪力和层间位移。美国 Oklahoma 州的 I-35 州际高速公路上的公路桥则是第 1 个采用半主动控制的桥梁结构^[57],该桥上设有可变阀孔阻尼器,研究者们还将 MR 阻尼器应用于拉桥的斜拉索进行风振控制^[58,59]。

5 结束语

结构振动半主动控制的研究与应用有着广泛的背景,它的研究与发展将给结构振动控制带来一场崭新的革命。虽然目前对半主动控制技术研究已经相当广泛,但是还存在着有待进一步研究的问题:(1)设计功能更强、实用性更好、价格更低廉的半主动控制装置,提高其加工工艺,制定其产品标准;(2)

基于随机振动理论的结构时变和非线性半主动控制的研究;(3)多维地震动输入的半主动控制研究,结构由于刚度与质量的不均匀分布将发生扭转振动,对于结构扭转振动的半主动控制研究成为必要;(4)设计更有效、更稳定、鲁棒性更强的半主动控制律;(5)半主动控制的时滞处理方法以及传感器和作动器的数量及位置优化研究;(6)进一步研究智能材料和结构在半主动控制中的应用;(7)广泛开展神经网络和模糊逻辑等人工智能技术在半主动中应用的研究;(8)将半主动控制和其它结构振动控制系统相结合,拓展其应用范围;(9)研究开发有关半主动控制技术的商业软件和硬件,促进半主动控制技术在工程中的应用。

参考文献:

- [1] Karnopp D, Crosby M J, Harwood R A. Vibration control using semi-active force generators[J]. Journal of Engineering for Industry, 1974, 96(2): 619-626.
- [2] Hrovat D, Barak P, Rabins M. Semi-active versus passive or active tuned mass dampers for structural control[J]. J of Engrg Mech, 1983, 109(3): 691-705.
- [3] Kobori T, Takahashi M, Nasu T, et al. Seismic response controlled structure with active variable stiffness system [J]. Earthquake Engrg and Struct Dyn, 1993, 22(11): 925-941.
- [4] Kobori T. Dynamics loading test of real scale steel frame with active variable stiffness device [J]. Journal of Structural Engineering, 1991, 37(B): 317-328.
- [5] Nasu T, Kobori T. Active variable stiffness system with non-resonant control [J]. Earthquake Engrg and Struct Dyn, 2001, 30(11): 1597-1614.
- [6] Kobori T. Technology development and forecast of dynamical intelligent building (D I B) [J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 1990, 1(4): 391-407.
- [7] Nasu T, Kobori T, Takahashi M, et al. Analytical study on applying the active variable stiffness system to a high-rise building [J]. Journal of Structural Engineering, 1995, 41(B): 33-39.
- [8] Nasu T, Kobori T, Takahashi M, et al. Analytical study on the active variable stiffness system applied to a high-rise building subjected to the records in osaka plain during the 1995 hyogo-ken nanbu earthquake [J]. Journal of Structural Engineering, 1996, 42(8): 1-8.
- [9] 刘季, 李敏霞. 变刚度半主动结构振动控制[J]. 振动工程学报, 1999, 12(2): 166-172.
- [10] 吴波, 刘汾涛, 魏德敏. 变刚度半主动控制结构的拟振

- 型分解法[J]. 华南理工大学学报:自然科学版,2002,30(9):85-90.
- [11] 吴波,刘汾涛,魏德敏. 变刚度半主动控制结构的抗震设计方法[J]. 振动工程学报,2003,16(3):306-310.
- [12] Hrovat D, Pinhas Barak, Michael Rabins. Semi-active versus passive or active tuned mass dampers for structural control[J]. J of Engrg Mech, 1983,109(3): 691-705.
- [13] Symans M D, Constantinou M C. Semi-active control of earthquake induced vibration [A]. Proc of 11th World Conf on Earthquake Engineering, 1996;95.
- [14] Symans M D, Constantinou M C. Experimental testing and analytical modeling of semi-active fluid dampers for seismic protection [J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 1997, 8: 644-657.
- [15] Symans M D, Constantinou M C. Development and experiment study of semi-active fluid damping devices for seismic protection of structures [R]. Report No NCEER 95-0011, National Center for Earthquake Engineering Research, Buffalo, N Y, 1995.
- [16] Kurata N, Kobori T, Takahashi M, et al. Shaking table experiment of active variable damping system [A]. Proc 1st World Conf on Struct Control, 1994, TP2: 108-117.
- [17] Kurata N, Kobori T, Takahashi M, et al. Active variable damping system in large earthquakes [J]. Proc 3rd Int Conf on Motion and Vibrational Control, 1996, 3: 285-290.
- [18] Feng Q, Shinozuka M. Use of a variable damper for hybrid control of bridge response under earthquake [R]. Proc U S National Workshop on Structural Control Research, USC Publication No CE-9013, 1990.
- [19] Kamagata S, Kobori T. Autonomous adaptive control of active variable stiffness system for seismic ground motion [A]. Proc 1st World Conf on Struct Control Los Angeles, California, 1994, TA4:33-42.
- [20] Sadek F, Mohraz B. Semiactive control algorithms for structures with variable dampers [J]. Journal of Engineering Mechanics, 1998, 124(9):981-990.
- [21] 杨润林,周锡元,闫维明,等. 结构半主动变阻尼控制性能评估[J]. 振动与冲击,2007,26(3):37-41.
- [22] 郑久建,魏琏. 阻尼减震结构反应谱法计算若干问题[J]. 建筑科学,2003,19(4):4-8.
- [23] 郑久建,魏琏,黄文. 粘滞阻尼减震结构振型分解法的研究[J]. 工程抗震,2003(3):6-12.
- [24] Akbay Z, Aktan H M. Intelligent energy dissipation devices [A]. Proc 4th U S National Conf on Earthquake Engrg, 1990,3(4):427-435.
- [25] Akbay Z, Aktan H M. Actively regulated friction slip devices [A]. Proc 6th Canadian Conf on Earthquake Engrg, 1991:367-374.
- [26] Kannan S, Uras H M, Aktan H M. Aktan Active control of building seismic response by energy dissipation [J]. Earthquake Engrg and Struct Dyn, 1995,24(5):747-759.
- [27] Agrawal A K, Yang J N. A Semi-active electromagnetic friction damper for response control of structures [A]. Proc Structures Congress 2000b, ASCE, CD RAM (8 Pages), Philadelphia, PA.
- [28] Unsal M, Niezrecki C, Crane C. ■ Two semi-active approaches for vibration isolation: piezoelectric friction damper and magnetorheological damper [R]. Florida: University of Florida Gainesville, 2004.
- [29] 瞿伟廉,陈朝晖,徐幼麟. 被动及半主动摩擦阻尼器对合肥翡翠电视塔地震发应的控制[J]. 地震工程与工程振动,2000,20(2):101-106.
- [30] 瞿伟廉,陈朝晖,徐幼麟. 压电材料智能摩擦阻尼器对高耸钢塔结构风振反应的半主动控制[J]. 地震工程与工程振动,2000,20(1):94-99.
- [31] Chang J C H, Soong T T. Structural control using active tuned mass dampers [J]. Journal of Engineering Mechanics Division, ASCE, 1980,106(6):1091-1098.
- [32] Pinkaew T, Fujino Y. Effectiveness of semi-active tuned mass dampers under harmonic excitation [J]. Engineering Structures, 2001, 23(7):850-856.
- [33] Abe M. Semi-active tuned mass dampers for seismic protection of civil structure [J]. Earthquake Engrg and Struct Dyn, 1996, 25:743-749.
- [34] Abe M. Semi-active tuned mass dampers using pulse control [A]. Proc of 11th world conf. on earthquake engineering, Acapulco, Mexico, 1996.
- [35] Sakai F, Takaeda S, Tamaki T. Tuned liquid column damper-new type device for suppression of building vibrations [A]. Proceedings of International Conference on Highrise Buildings, Nanjing, China, 1989:926-931.
- [36] Kareem A. The next generation of tuned liquid dampers [A]. Proc of the 1st World Conf on Struct Control, Los Angeles, FB5 USA: IASC, 1994:19-28.
- [37] Abe M, Kimura S, Fujino Y. Control laws for semi-active tuned liquid column damper with variable orifice opening [A]. Paper presented at 2nd International Workshop on Structural Control, Hong Kong, 1996.
- [38] Yalla S K, Kareem A, Kantor J C. Semi-active tuned liquid column dampers for vibration control of

- structures[J]. *Engineering Structures*, 2001, 23(11): 1469-1479.
- [39] 霍林生. 偏心结构利用调液阻尼器减震控制的研究[D]. 大连:大连理工大学, 2005.
- [40] Wang J Y, Ni Y Q, Ko J M, et al. Magneto-rheological tuned liquid column dampers (MR-TLCDs) for vibration mitigation of tall buildings: modeling and analysis of open-loop control[J]. *Computers and Structures*, 2005, 83: 2023-2034.
- [41] Winslow W M. Method and means for translating electrical impulses into mechanical forces [J]. US Patent, 1947(2): 417, 850.
- [42] Ehr Gott R C, Masri S F. Modeling the oscillatory dynamic behavior of electro-rheo-logical materials in shear[J]. *Smart Materials and Structures*, 1992, 1(4): 275-285.
- [43] Gavin H P, Ortiz D S, Hanson R D. Testing and modeling of a proto-type ER damper for seismic structural response control[A]. *Proc of International Workshop on Structural Control*, Honolulu, HI, 1993: 166-180.
- [44] Makris N, Burton S A, Hill D. Analysis and design of ER damper for seismic protection of structures[J]. *J of Engrg Mech*, 1996, 122(10): 1003-1011.
- [45] Makris N. Rigidity-plasticity: can electro-rheological dampers protect base-isolated structures from near-source ground motions [J]. *Earthquake Engrg and Struct Dyn*, 1997, 26: 571-591.
- [46] Spencer B F, Dyke S J, Sain M K, et al. Phenomenological model of a magnetorheological damper [J]. *J Engrg Mech*, ASCE, 1997, 123(3): 230-238.
- [47] Carlson J D, Spencer B F Jr. Magneto-rheological fluid dampers for semi-active seismic control[A]. *Proc 3rd Int Conf on Motion and Vib Control*, China, Japan, Vol 1, 1996: 35-40.
- [48] Spencer B F, Carlson J D, Sain M K, et al. On the current status of magneto-rheological dampers: seismic protection of full-scale structures[A]. *Proc American Control Conf*, Albuquerque, New Mexico, 1997: 458-462.
- [49] Dyke S J, Spencer B F, Sain M K, et al. Modeling and control of magneto-rheological dampers for seismic response reduction[J]. *Smart Mat and Struct*, 1996, 5: 565-575.
- [50] Yi F, Dyke S J, Frech S, et al. Investigation of magnetorheological dampers for seismic response control[A]. *Proc of the 2nd World Conf on Struct Control*, Kyoto, Japan, 1998: 349-358
- [51] 周强, 瞿伟廉. 磁流变阻尼器的两种力学模型和试验验证[J]. *地震工程与工程振动*, 2002, 22(4): 144-150.
- [52] 孙清, 伍晓红, 胡志义, 等. 磁流变阻尼器性能试验及其非线性力学模型[J]. *工程力学*, 2007, 24(4): 183-187.
- [53] 闫维明, 葛惠娟, 董彬, 等. 逆变型磁流变阻尼器的实验和分析[J]. *地震工程与工程振动*, 2007, 27(3): 171-176.
- [54] 周福霖, 谭平, 阎维明. 结构半主动减震控制新体系的理论与试验研究[J]. *广州大学学报: 自然科学版*, 2002, 1(1): 69-74.
- [55] Motoichi Takahashi, Takuji Kobori, Nasu T, et al. Active response control of buildings for large earthquake-seismic response control system with variable structural characteristics [J]. *Smart Mater Struct*, 1998, 7: 522-529.
- [56] Kurata N, Kobori T, Takahashi M, et al. Actual seismic response controlled building with semi-active damper system [J]. *Earthquake Engrg Struct Dyn*, 1999, 28(11): 1427-1447.
- [57] Patten W N. The I-35 Walnut Creek Bridge: an intelligent highway bridge via semi-active structural control[A]. *Proc 2nd World Conf on Struct Control*, Kyoto, Japan, 1998, 1: 427-436.
- [58] Ko J M, Ni Y Q, Chen Z Q, et al. Implementation of MR dampers to Dongting Lake Bridge for cable vibration mitigation[A]. *Proc of the 3rd World Conf on Struct Control*, Como, Italy, 2002.
- [59] 李金海, 关新春, 刘敏, 等. 斜拉索磁流变液阻尼器半主动振动控制系统的设计与应用[J]. *功能材料*, 2006, 37(5): 827-830.

(责任编辑: 邓大玉)