

# 工程结构振动半主动控制发展现状与前景

丁于强, 刘齐茂

(广西工学院 土木建筑工程系, 广西 柳州 545001)

**摘要:** 结构振动控制是一种全新的、积极主动的结构设计对策, 半主动控制系统具有所需外加能源小、装置简单、稳定性好、减震效果接近主动控制的特点, 近年来受到国内外普遍关注, 并取得了较大的研究进展, 但仍存在明显的不足之处。首先综述了半主动控制装置的理论研究、装置开发, 并分析了各自的特点, 最后展望了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(阻尼); 磁流变阻尼器; 控制算法

**中图分类号:** TU352.1+1

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1673-9833(2010)05-0075-07

## The Status and Prospects for Semi-Active Control of Engineering Structural Vibration

Ding Yuqiang, Liu Qimao

(Department of Civil and Architecture Engineering, Guangxi University of Technology, Liuzhou Guangxi 545001, China)

**Abstract:** Structural vibration control is a new and positive strategy of structure design. The semi-active control has characteristics of low applied energy, simple device, good stability and damp effect similar to active vibration control. In recent years, semi-active control has received widespread attentions both at home and abroad, and it has achieved great research progress. However, there are still some significant deficiencies. Firstly reviews the theoretical research of semi-active control devices and the devices development, then analyzes their characteristics, finally prospects the technology developing trend.

**Keywords:** semi-active control; active variable stiffness(damping); magnetorheological damper; control algorithm

## 0 引言

地震和风是自然现象, 强震和飓风给人类带来了巨大的灾难。因此, 建筑结构的抗震、抗风将是地震和力学工作者及工程技术人员长期研究的课题。

对土木结构而言, 传统的结构抗震、抗风设计方法是: 通过增大构件或结构的承载力和变形能力等措施来改善结构本身的抗震、抗风性能。当地震和风振发生时, 通过结构的运动和结构构件的变形与破坏来转换、存储与消耗所吸收的振动能量。这种方法虽然对提高结构抵御震灾和风灾的能力发挥了较大的作用, 但也存在结构的安全性难以保证、适用性受到限

制、经济性欠佳以及震后修复难度大等一系列问题。因此在传统结构抗震抗风设计理论和技术的基础上, 国内外学者相继将结构振动控制的概念引入现代结构工程中来解决面临的问题。结构振动控制就是通过设置隔振或减震装置来控制结构在地震和风荷载作用下的振动响应, 从而有效地保护结构在强震和强风下的安全。这是一种新的结构形式, 由传统的“抗震、抗风”向“控震、控风”方向发展, 以期达到更经济、更安全、更可靠的效果。

土木工程结构振动控制的概念是由美国教授 T.J.P. Yao<sup>[1]</sup>于 1972 年提出的。目前, 按照控制系统是否要输入外部能量及输入能量的大小, 通常将工程结构振动

收稿日期: 2010-07-08

通信作者: 丁于强(1982-), 男, 山东菏泽人, 广西工学院硕士研究生, 主要研究方向为结构抗震, 结构优化设计,

E-mail: 214449137@qq.com

控制分为3类,即:被动控制、主动控制和半主动控制。被动控制的控制效果有限、调节性能差,适合窄带控制。主动控制属于外力控制,需要直接提供控制力的能源,造价高、技术复杂,且地震作用下无法确保能源正常供给,因此,可靠性和稳定性较难保证。半主动控制属于参数控制,不需提供控制力的能源或仅需极小的能量输入,用于控制结构的动力特性参数,它依赖于结构的振动反应或动荷载的信息,实时改变结构的动力特性以减振。半主动控制兼顾被动控制和主动控制的优点,仅需极小能量输入就能达到近似主动控制的控制效果,因此半主动控制及其装置是近年来国际研究的热点。本文主要介绍了5种半主动控制系统的研究现状及其存在的问题,并展望了半主动控制技术未来的发展方向。

## 1 主动变刚度控制系统

### 1.1 减振机理

Kobori<sup>[2]</sup>于20世纪80年代在结构主动控制的基础上提出了主动变刚度(AVS)控制系统,其作用原理为:在结构受到外部激励的作用下,变刚度控制系统根据结构的动力反应,实时改变体系内部刚度,从而调整结构固有频率,避免共振现象的发生。

传统的变刚度控制系统如图1所示。该装置主要由工作液缸、控制旁路、活塞杆和附加刚性支撑等部件组成。控制旁路设有计算机控制开启的控制阀门,当阀门关闭时活塞在缸内无法运动,控制装置向受控结构提供一个附加刚度;当阀门开启时活塞在油缸内可以做相对运动,如果不考虑缸内液体的阻尼作用,则受控结构的振动与装置的振动互相独立,否则受控结构的振动与AVS装置的振动相互耦合。这种控制系统的原理在于:根据受控结构的不同运动状态,AVS控制系统取上限刚度值或下限刚度值,通过持续在这2个离散状态间进行非连续瞬时切换,使结构远离共振状态,从而达到减振的目的。

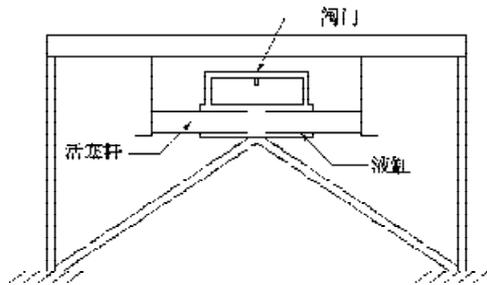


图1 单层框架上的半主动变刚度控制系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of semi-active variable stiffness control system of single-store frame

### 1.2 研究现状

Kobori等<sup>[3-4]</sup>对这种控制系统进行的振动台模型试验和原型结构试验均表明:这种控制系统的装置尽管比较简单,而且也仅需要极少的外部能量用来改变结构的动力参数,但控制效果却很明显。

李敏霞和刘季<sup>[5-6]</sup>在这方面做了大量的理论分析和实验工作,提出了与Kobori相似的控制系统,并首次在3 m × 4 m地震模拟振动台上完成了5层钢框架的半主动变刚度控制实验,结果表明主动变刚度系统能有效地减少结构振动反应;且硬件设施构造简单、造价低,系统的健壮性和鲁棒性好。考虑到结构的层间刚度较大,主动变刚度系统可以调节的频带宽极其有限,且无法有效地抑制结构的加速度反应。因此,欲充分发挥变刚度控制的潜力,首先要拓宽其有效抑振频带,目前一个相对简单可行的方法是,可以考虑在利用基础隔震的基础上施加变刚度控制,这样将可以大幅延拓有效抑振频带,充分发挥变刚度控制的效率。杨润林等<sup>[7-8]</sup>在基础层间同时采用隔振弹性支座和变刚度控制装置进行连续变刚度控制,并集合离复位控制策略进行数值模拟实验,该系统克服了基础隔振和常规变刚度控制系统二者的不足之处,同时兼顾它们的优点。谭平等<sup>[9]</sup>把主动瞬时最优控制算法推广到半主动变刚度控制系统的瞬时最优控制算法。通过对不同频率外界激励的仿真分析,得出半主动变刚度控制系统可以能动地避开地震动卓越频率,附加刚度越大偏离地震动卓越频率越远,对外界激励的适应功能和控制能力就越强。

## 2 主动变阻尼控制系统

### 2.1 减振机理

在地震作用下,除刚度外,阻尼也是影响结构动力反应的重要因素。Hrovat首先提出主动变阻尼(AVD)控制系统,由此改变结构的动力特性,以达到减轻结构振动的目的。变孔径油阻尼器是最典型的变阻尼装置,其结构如图2所示。

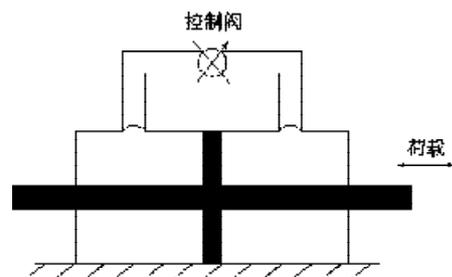


图2 变孔径油阻尼器示意图

Fig. 2 Schematic diagram of oil damper with variable aperture

图2所示AVD控制系统是利用旁路中控制阀的开孔率调整黏性油对活塞的运动阻力,并将这种阻力通过活塞传递给结构,向被控结构提供额外的黏性阻尼,来耗散输入结构的能量,结构增加的刚度几乎可以忽略不计。

## 2.2 研究现状

在国外,Hrovat首先应用AVD控制系统对结构的风振控制进行了研究,通过数值仿真分析得到了与主动控制近似的效果。Kobori等提出了一种半主动流体阻尼器,将其安装在一个3层模型结构上并进行了振动台试验,结果表明,顶层的峰值加速度和位移均减小了30%~50%。1998年在日本建成的Kajima-Shizuoka建筑物,应用了半主动变阻尼控制系统,在实际地震作用下显示出了良好的控制效果<sup>[10-11]</sup>。在国内,孙作玉<sup>[12]</sup>研制开发了半主动变阻尼控制装置,并进行了相应的结构控制试验研究。Sedek等人<sup>[13]</sup>的研究则得出这样的结论:对于采用变阻尼控制的柔性结构(结构固有振动周期大于1.5s),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(结构固有振动周期小于1.5s),采用变阻尼控制则值得怀疑的。杨润林等<sup>[14]</sup>经对半主动流体阻尼器的研究,却发现上述观点是片面的。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,必须从结构固有振动周期与外激励周期二者之间的比值(关系)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。因此受控结构在满足比较严格的结构动力特性参数和地面运动的频谱特性的条件下,主动变阻尼控制系统才能取得比较理想的控制效果。

## 3 半主动调谐质量/液体阻尼系统

### 3.1 减振机理

半主动质量调谐(SATMD)和半主动液体调谐(SATLD)系统的控制原理相同,是在被控结构上安装一个与被控结构频率相近的控制装置,并合理设定质量比和阻尼比等主要参数,把被控结构的振动转移到控制装置上,从而有效减小被控结构的动力响应。

### 3.2 研究现状

SATMD最常见的研究情况是将常规质量调谐(TMD)的阻尼元件用在一定范围内可以连续变化的阻尼元件替代,然后据测量所得结构反应按给定的算法实时确定其瞬时阻尼值,进而对结构动力反应予以控制。SATMD研究的另一种情况是采取可变刚度元件替代常规TMD中的恒值刚度元件,然后据测量所得结构反应按给定的算法实时确定其瞬时刚度值,继而实现对结构的控制功能<sup>[15]</sup>。Yang Runlin等人<sup>[16]</sup>提出了

一种离复位控制策略,在此基础上设计SATMD的控制律,结果显示可取得较好的控制效果。

SATMD自身存在一些缺陷,这促使许多学者为改进其性能而努力研究。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,使SATMD控制效率降低也是必然的。尽力去克服时滞效应,是提高SATMD减振效果的有效方法。第二,对脉冲激励或突变激励反应迟缓。第三,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,因此,必须从整个减振过程去研究SATMD的最优控制。

在调谐液体阻尼系统(TLD)的基础上衍生出了一种U型液体调谐阻尼器(TLCD)。TLCD属于被动控制,其构造为一内部充液(通常是水)的U形管状刚性容器,水平管道中部设有预留孔。通过调谐管内液柱的振动频率至接近或等于结构的固有频率并选定适度的液力阻尼,然后附于结构之上,则结构的部分运动能量将传递给液体,引起液柱的振动,从而改善结构的动力状态。SATLCD是在TLCD基础上发展起来的控制装置,可以根据既定算法,实时调整开孔率,以适应不同时刻阻尼的需要,并保留了TLD的主要优点。理论分析和试验研究显示这种控制系统能在被动控制的基础上进一步减少结构的振动反应。

根据动力吸振理论,在TLCD或SATLCD的设计过程中,盛液容器的液柱质量必须大于某一临界数量级(一般为主结构质量或欲控模态对应广义质量的1%),且液柱的振动周期需接近激励主周期才有可能抑制结构的动力反应。假设液体密度、容器横截面积、液柱全长、重力加速度分别用 $\rho, A, L$ 和 $g$ 表示,则容器液柱质量 $M=\rho AL$ ,容器液柱振动周期 $T=2\pi\sqrt{L/2g}$ 。依据上式不难发现,SATLCD、TLCD用于风振控制是适宜的,而用于结构地震反应控制则是很难成立的<sup>[17]</sup>。这是因为,一方面由于结构地震反应谱的卓越周期一般在0.05~2.5s变动,因此只有当液柱全长 $L\leq 3$ m时才有可能在此范围内取值,满足调谐比(吸振器和结构的频率比)的要求;但是另一方面欲取得满意的减振效果,吸振器和结构的质量比 $\mu$ 又要求 $L$ 不能太小。故同时满足 $M$ 和 $T$ 的要求是很困难的。如前所述,SATLCD主要用于风振控制,很少用于结构地震反应控制。这主要是因为盛液容器的液柱质量与振动周期皆依赖液柱长度,然而在地震反应控制中二者对液柱长度的要求往往不一致,使其陷入一种两难的境地。因此,除

非在装置构造上或液体材料上做出大的革新,否则 SATLCD 在抗震领域的应用将受到极大地限制。

## 4 可变液体阻尼系统

### 4.1 减振机理

磁流变(MR)阻尼器和电流变(ER)阻尼器均属于可控流体阻尼器。MR(ER)阻尼器是由磁(电)流

变体、缸体、活塞和可控磁场组成。磁(电)流变体在外加磁(电)场的作用下都可以在毫秒级的瞬间由牛顿流变体变成 Bingham 塑性体,这种迅速、连续、可逆的液塑转化可迅速大幅度地改变工作介质的屈服强度,在极短时间内完成阻尼力的调谐。

### 4.2 研究现状

磁流变体和电流变体的性能参数比较见表 1。

表 1 磁流变体和电流变体的性能参数比较

Table 1 Comparison of performance parameters of magnetorheological fluid and electrorheological fluid

性能	最大场强	最大屈服应力/kPa	表面黏度/Pa·s	适用温度/℃	杂质敏感性	反应时间	密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	耗电功率
ER 体	4 kV/mm	2~5	0.2~1.0	10~90	敏感	ms 级	1~2	2~50 W (2 000~5 000 V, 1~10 mA)
MR 体	250 A/mm	50~100	0.2~1.0	-40~150	不敏感	ms 级	3~4	2~50 W (2~50 V, 1~2 A)

从表 1 中可看出,在耗电功率相同的条件下,磁流变体的最大屈服应力是电流变体的 10~50 倍,且具有外加电压低,安全性好的优点,因此目前可控流体阻尼器的研究以磁流变阻尼器为主<sup>[18]</sup>。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。目前,研究者已建立的 MR 阻尼器动力学模型主要有: Bingham 模型、Bouc-Wen 模型和 Spencer 模型。Bingham 模型较好地反映了磁流变阻尼器的力-位移关系和耗能特性,但不能描述磁流变阻尼器在低速时力与速度之间的非线性性能; Bouc-Wen 模型克服了 Bingham 模型的缺点,但随着激励频率的变化,阻尼器的力-位移曲线也将发生变化,这同磁流变阻尼器的力-位移曲线不随频率变化的实际性能不吻合; Spencer 模型是修正的 Bouc-Wen 模型,更加精确地反应了 MR 阻尼器的性能。

Jansen 和 Dyke<sup>[19]</sup>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 2 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进行了分析,结果表明,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。欧进萍和关新春<sup>[20-21]</sup>进行了磁流变阻尼器性能的实验,提出了 MR 变阻尼器的理论设计方法和屈服强度下耗能器理论阻尼力的计算公式,分析了 MR 阻尼器的阻尼性能与响应时间。吴林林<sup>[22]</sup>、徐龙河<sup>[23]</sup>对基于 MR 阻尼器的半主动控制系统优化设计理论(包括控制装置在受控结构中的优化设置、控制系统权矩阵的选取、控制系统的时滞与补偿问题)进行了大量研究,这些研究论证了 MR 阻尼器在结构

振动控制中应用的可行性和有效性。李忠献等<sup>[24]</sup>基于 LQR 算法提出了大跨平板网架结构的空最优控制力的计算方法,并应用 MR 阻尼器对大跨平板网架结构的多维地震反应进行了振动控制数值仿真,结果表明,应用 MR 阻尼器能使大跨平板网架结构的地震反应得到有效控制。李秀领和李宏男<sup>[25]</sup>对采用磁流变阻尼器控制框-剪偏心结构在地震作用下的平-扭耦联反应做了模拟地震振动台实验,试验结果表明:结构水平及扭转地震反应均能得到显著降低,半主动控制的效果要优于被动控制,且磁流变阻尼器(MRD)的位置对控制效果具有重要影响。秦相军等<sup>[26-27]</sup>研究了磁流变阻尼器作为半主动控制元件的巨-子型有控结构(Mega-Sub-Controlled Structur)的风振反应,基于限界 Hrovat 最优半主动控制算法的仿真分析表明:磁流变阻尼器对巨-子型有控结构体系风振反应的控制效果显著;对 MSCS 结构采取半主动控制时主子结构的刚度比可取为 0.17~0.30;当子结构的刚度一定时,增大子结构质量可以使结构的位移和加速度响应得到更好的控制。Tse 和 Chang<sup>[28]</sup>在以半主动控制的控制率作为判断条件的基础上,通过调节 MR 阻尼器的参数,使 MR 阻尼器控制力在满足对结构控制要求的前提下得到了有效的降低。

## 5 混合控制系统

### 5.1 减振机理

混合控制系统由 2 种或 2 种以上的半主动控制系统组成,它兼顾各系统的优点并克服各系统的缺点,可望取得更好的减振控制效果。目前已研制的此类控制系统主要有半主动刚度阻尼(AVSD)控制系统、半主动磁流变质量驱动(MR-AMD)系统。

半主动刚度阻尼 (AVSD) 控制系统是在主动变刚度 (AVS) 与主动变阻尼 (AVD) 2 种减振控制系统的基础上发展起来的, 即同时采用调频和阻尼 2 种减振机制。AVSD 系统的基本思想就是通过主动地控制阀门的动作从变刚度状态与变阻尼状态中选择一种较优的工作状态, 向受控结构提供附加刚度或阻尼, 从而使受控结构在每一采样周期内的动力反应尽可能最小, 以达到减震的目的。

半主动磁流变质量驱动系统即以磁流变减振驱动器代替传统 AMD 中的驱动装置, 与质量块和弹簧一起构成半主动磁流变质量驱动器 (MR-AMD)。

## 5.2 研究现状

周福霖等人<sup>[29]</sup>对 AVSD 系统进行了 Pacoimo, EL Centro, Taft 地震波的模拟地震振动实验, 并基于预测最优控制算法进行了计算机仿真分析。实验和仿真分析结果表明: 结构的层间位移控制效果可达到 40% 以上, 加速度控制效果也在 25% 以上。由于 AVSD 控制装置复杂的非线性特点和体系的高度非线性特征, 受控结构地震反应的计算结果要稍大于实验结果, 这在工程上是偏于安全的。彭亚萍和刘增夕<sup>[30]</sup>基于半主动 AVSD 控制系统的工作原理, 参照我国现行设计规范, 提出了规则框架结构在 AVSD 控制系统下的一般设计方法, 并提出了控振系统的最优设防目标的概念, 为 AVSD 控制系统在工程结构中的实际应用进行了有意义的探索。欧进萍和隋莉莉<sup>[31]</sup>首先提出了这种新型的半主动磁流变质量驱动器 (MR-AMD), 并采用半主动控制算法仿真分析了 MR-AMD 用于结构振动控制的有效性, 结果表明: 半主动磁流变质量驱动器 MR-AMD 可有效地降低受控结构的位移峰值、加速度峰值及基底剪力, 其性能虽然不如 AMD 但却优于 TMD, 且具有很好的稳定性和可靠性; MR-AMD 控制系统既避免了 AMD 控制系统能源要求高、驱动系统复杂、造价高、稳定性和可靠性不足等缺陷, 又避免了 TMD 控制系统频带窄的不足, 扬长避短, 是一种具有开发价值的优质的驱动装置。此外, Xu Zhaodong 和 Guo Yingqing<sup>[32]</sup>在半主动控制系统与智能控制结合方面作了研究。

## 6 结论

半主动控制由于较被动控制和主动控制性价比更高, 近年来受到了高度关注, 在理论研究和工程应用上都取得了一些新的研究成果。但半主动控制系统独有的问题有待进一步深入探究。

1) 研制开发功能更强、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。电/磁流变液、形状记忆合金等智能材料与结构的发展为新型

结构半主动控制装置的研制提供了基础。

2) 多维地震动输入的半主动控制研究。建筑结构由于刚度与质量的不均匀分布, 将发生扭转振动, 对于建筑结构扭转振动的半主动控制研究成为必要。李忠献等<sup>[24]</sup>对多维地震激励下空间结构的 MR 阻尼器半主动控制进行了研究。

3) 研究更有效的半主动控制理论和设计方法。半主动控制理论与主动控制理论基本相同, 但半主动控制装置又具有自身的特点, 如何利用主动控制理论并结合半主动控制自身的特点进行半主动控制装置及其参数设计, 且编制适合于各种半主动控制系统的结构分析与设计软件, 进而形成一套完善的半主动控制理论和设计方法是值得研究的。Erkus 等<sup>[33]</sup>在这方面进行了研究, 并以集中质量体系的弹性势能与动能之和为依据, 确定了状态向量和控制力权重矩阵函数。

4) 半主动控制的时滞问题研究。计算机处理、开关切换和控制系统工作状态转换必然需要一定时间, 从而产生控制系统的时滞问题。时滞问题会严重降低系统的稳定性, 恶化系统的控制效果, 因此减小系统时滞也是半主动控制需要研究的问题。徐龙河<sup>[34]</sup>提出的半主动预测控制能够有效地减小时滞的不良影响, 保证控制系统的稳定性。

5) 半主动控制系统控制装置的优化设置问题。对于半主动控制系统, 其控制装置的优化设置问题就是在某一种优化准则下寻找控制装置最优的布置位置, 确定其最佳的布置数目, 同时选取最优的控制参数, 使得各个控制器均能最大限度地发挥控制作用, 从而获得最佳布置方案。贝伟明和李宏男<sup>[35]</sup>提出了基于改进遗传算法和等效二次型性能指标的阻尼器位置优化方法。周云等<sup>[36]</sup>在高层建筑磁流变阻尼器风振半主动控制系统的优化方面做了研究。

6) 半主动控制系统的稳定性、可靠性和耐久性及其经济性研究。半主动控制技术是一项面向工程对象的综合技术, 半主动控制系统是传感器、计算机和控制装置等组成的系统, 对系统集成后的稳定性、可靠性、耐久性和经济性的研究是其能否推广应用的关键。

7) 开展半主动控制的试验和工程应用研究。在试验的基础上, 验证并完善半主动控制理论和方法, 特别是开展大尺寸模型试验和实际结构控制效果的对比研究; 通过工程应用研究, 是半主动控制技术成为一项较为成熟的减振控制技术。

## 参考文献:

- [1] Yao T J P. Conception of Structure Control[J]. Journal of Structure Division, 1972, 98(7): 1567-1574.

- [2] Kobori T. Shaking Table Experimental of Multi-Story Seismic Response Controlled Structure with Active Variable Stiffness (AVS) System[C]// Proceedings of 8th Japan Earthquake Engineering Symposium. Tokyo: JSCE, 1990: 1923-1928.
- [3] Kobori T. Experiment Study on Active Variable Stiffness System-Active Seismic Response Controlled Structure[C]// Proceedings of 4th World Congress Council on Tall Buildings and Urban Habitat. Hong Kong: The Hong Kong Polytechnic University, 1990: 561-572.
- [4] Nasu T, Kobori T. Active Variable Stiffness System with Non-Resonant Control[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2001, 30(11): 1597-1614.
- [5] 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.  
Liu Ji, Li Minxia. Semiactive Structural Control with Variable Stiffness[J]. Journal of Vibration Engineering, 1999, 12(2): 166-172.
- [6] 李敏霞, 刘季. 变刚度半主动结构振动控制的试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 1998, 12(4): 90-95.  
Li Minxia, Li Ji. Experimental Study of Semiactive Structural Control Using Variable Stiffness[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1998, 12(4): 90-95.
- [7] 杨润林, 周锡元, 闫维明, 等. 结构半主动变刚度控制的研究[J]. 建筑科学, 2007, 23(3): 10-14.  
Yang Runlin, Zhou Xiyuan, Yan Weiming, et al. Study on Semi-Active Structural Control Using Variable Stiffness System[J]. Building Science, 2007, 23(3): 10-14.
- [8] 杨润林, 闫维明, 周锡元, 等. 结构离复位控制的可行性研究[J]. 振动工程学报, 2005, 18(4): 512-518.  
Yang Runlin, Yan Weiming, Zhou Xiyuan, et al. Feasibility Study for the Off-and-Towards-Equilibrium Control of Structures[J]. Journal of Vibration Engineering, 2005, 18(4): 512-518.
- [9] 谭平, 闫维明, 周福霖. 主动变刚度控制系统的瞬时最优控制算法[J]. 工程力学, 1998(增刊3): 65-70.  
Tan Ping, Yan Weiming, Zhou Fulin. Instantaneous Optimal Control Algorithm of Active Variable Stiffness Control System[J]. Engineering Mechanics, 1998(S3): 65-70.
- [10] Kobori T. Mission and Perspective towards Future Structural Control Research[C]// Proceedings of the 2nd World Conference on Structural Control. Kyoto, Japan: John Wiley and Sons, 1998: 25-34.
- [11] Kurata N, Kobori T, Takahashi M, et al. Actual Seismic Response Controlled Building with Semi-Active Damper System[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1999, 28(11): 1427-1447.
- [12] 孙作玉. 变阻尼半主动结构控制[D]. 哈尔滨: 哈尔滨建筑大学, 1998.  
Sun Zuoyu. Building Structure with a Semi-Active Fluid Damper[D]. Harbin: Harbin University of Civil Engineering and Architecture, 1998.
- [13] Sadek F, Mohraz B. Semiactive Control Algorithms for Structures with Variable Dampers[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1998, 124(9): 981-990.
- [14] 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.  
Yang Runlin, Zhou Xiyuan, Yan Weiming, et al. Performance Evaluation of Semiactive Structural Control Using Variable Dampers[J]. Journal of Vibration and Shock, 2007, 26(3): 37-41.
- [15] Nadathur V, Nagarajaiah S. Wind Response Control of Building with Variable Stiffness Tuned Mass Damper Using Empirical Mode Decomposition and Hilbert Transform[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2004, 130(4): 451-458.
- [16] Yang Runlin, Zhou Xiyuan, Liu Xihui. Seismic Structural Control Using Semi-Active Tuned Mass Dampers[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2002, 1(1): 111-118.
- [17] 杨润林, 闫维明, 周锡元, 等. 半主动U型液力阻尼器的结构振动控制[J]. 应用力学学报, 2003, 20(4): 108-112.  
Yang Runlin, Yan Weiming, Zhou Xiyuan, et al. Structural Control Using Semi-Active Tuned Liquid Column Dampers[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2003, 20(4): 108-112.
- [18] 李宏男, 李忠献, 祁皓, 等. 结构振动与控制[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.  
Li Hongnan, Li Zhongxian, Qi Kai, et al. Structural Vibration Control[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2005.
- [19] Jansen L M, Dyke S J. Semi-Active Control Strategies for MR Dampers: A Comparative Study[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2000, 126: 795-803.
- [20] 欧进萍, 关新春. 磁流变耗能器及其性能[J]. 地震工程与工程振动, 1998, 18(3): 74-81.  
Ou Jinping, Guan Xinchun. Magnetorheological Fluid Dampers and Their Properties[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1998, 18(3): 74-81.
- [21] 欧进萍, 关新春. 磁流变耗能器性能的试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 1999, 19(4): 76-81.  
Ou Jinping, Guan Xinchun. Experimental Study of Magnetorheological Damper Performance[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1999, 19(4): 76-81.
- [22] 吴林林. 磁流变阻尼器的构造设计与性能试验[D]. 天津: 天津大学, 2002.  
Wu Linlin. Structure Design and Performance Test of MRFD[D]. Tianjin: Tianjin University, 2002.
- [23] 徐龙河. 基于磁流变阻尼器(MRFD)的半主动结构控制理论的研究[D]. 天津: 天津大学, 2002.  
Xu Longhe. Research on the MRFD-Based Semi-Active Structural Control Theory[D]. Tianjin: Tianjin University, 2002.
- [24] 李忠献, 林伟, 丁阳. 多维地震激励下空间结构 MR

- 阻尼器半主动控制[J]. 天津大学学报, 2007, 40(5): 512-518.
- Li Zhongxian, Lin Wei, Ding Yang. Semi-Active Control on Spatial Structures Using MR Damper Under Multi-Dimensional Earthquake Excitations[J]. Journal of Tianjin University, 2007, 40(5): 512-518.
- [25] 李秀领, 李宏男. 框-剪偏心结构平-扭耦联反应半主动控制试验研究[J]. 大连理工大学学报, 2008, 48(5): 691-697.
- Li Xiuling, Li Hongnan. Experimental Study of Semi-Active Control of Coupled Translation and Torsion Response for Frame-Shear Wall Eccentric Structure[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2008, 48(5): 691-697.
- [26] 秦相军, 张洵安, 谷文成. 半主动控制下巨-子型有控结构的风振控制参数特性研究[J]. 振动与冲击, 2008, 27(1): 49-52.
- Qin Xiangjun, Zhang Xunan, Gu Wencheng. Parametric Study on Semi-Active Control for a Mega-Sub-Controlled Structure Subjected to Random Wind Loads[J]. Journal of Vibration and Shock, 2008, 27(1): 49-52.
- [27] Qin X J, Zhang X A, Sheldon Cherry. Study on Semi-Active Control of Mega-Sub Controlled Structure by MR Damper Subject to Random Wind Loads[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2008, 7(3): 285-294.
- [28] Tse T, Chang C C. Shear-Mode Rotmy Magnetorheological Damper for Small-Scale Structural Control Experiments[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2004, 130(6): 904-911.
- [29] 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.
- Zhou Fulin, Tan Ping, Yan Weiming. Theoretical and Experimental Research on New System of Semi-Active Control of Structure[J]. Journal of Guangzhou University: Natural Science Edition, 2002, 1(1): 69-74.
- [30] 彭亚萍, 刘增夕. AVS/D半主动振动控制结构的抗震设计方法探讨[J]. 地震工程与工程振动, 2005, 25(6): 159-164.
- Peng Yaping, Liu Zengxi. Study on Seismic Design Method of Structures with Active Variable Stiffness/Damper Semi-Active Control System[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2005, 25(6): 159-164.
- [31] 欧进萍, 隋莉莉. 结构振动控制的半主动磁流变质量驱动器(MR-AMD)[J]. 地震工程与工程振动, 2002, 22(2): 108-114.
- Ou Jinping, Sui Lili. Structural Vibration Control of Semi-Active MR-AMD[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2002, 22(2): 108-114.
- [32] Xu Zhaodong, Guo Yingqing. Integrated Intelligent Control Analysis on Semi-Active Structures by Using Magnetorheological Dampers[J]. Science in China Series E: Technological Sciences. 2008, 51(12): 2280-2294.
- [33] Erkus B, Abe M, Fujino Y. Investigation of Semi-Active Control for Seismic Protection of Elevated Highway Bridges[J]. Engineering Structures, 2002, 24(3): 281-293.
- [34] 徐龙河. 高层结构半主动预测控制[J]. 天津大学学报, 2008, 41(4): 482-487.
- Xu Longhe. Semi-Active Predictive Control of Tall Building [J]. Journal of Tianjin University, 2008, 41(4): 482-487.
- [35] 贝伟明, 李宏男. 半主动控制装置在受控结构中的优化布置[J]. 防震减灾工程学报, 2008, 26(1): 28-33.
- Bei Weiming, Li Hongnan. Optimal Placement of Semi-Active Control Devices for Controlled Structure[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2008, 26(1): 28-33.
- [36] 周云, 邓雪松, 吴志远. 高层建筑磁流变阻尼器风振半主动控制系统的优化[J]. 振动与冲击, 2003, 22(1): 1-5.
- Zhou Yun, Deng Xuesong, Wu Zhiyuan. Optimization of Semi-Active Control System for Wind-Induced Vibration Control of Tall Building Using MR Damper[J]. Journal of Vibration and Shock, 2003, 22(1): 1-5.

(责任编辑: 李玉珍)