

结构控制方法评述*

孙剑平 朱 晔

北方交通大学土木建筑学院, 北京 100044

摘 要 介绍了土木工程结构控制的基本概念和目前结构控制算法的理论基础、发展情况和几种算法的基本公式. 总结了目前各类结构控制措施的研究现状, 指出进一步研究的发展方向, 尤其是控制模型中几个问题的研究现状, 指出了算法中的局限和问题.

关键词 结构控制, 控制应用, 土-结构相互作用, 时滞现象

地震作用下单纯依靠加大构件尺寸、采用新型材料(如高强砼)等传统方法, 不仅增加结构造价, 而且由于荷载的不确定性, 难以达到预期效果^[1]. 所以结构控制这种积极主动的抗震设计新思想在土木工程界受到广泛重视. 文献[2]评价了1987年以前结构振动控制研究工作, 本文综述结构控制的最新进展.

1 结构控制中的基本概念

1.1 结构控制的概念和分类

结构控制这个设计思维的革命性突破, 在土木工程界中是 J.P. Yao (1972)^[3] 首先系统地提出来的. 他应用经典的或现代的控制理论, 在结构上安装一些控制系统. 受到地震或风荷载激励时, 这些控制系统产生控制力, 显著降低结构的动力反应. 控制系统的基本元素为传感器、处理器和作动器. 传感器感受外部激励及结构反应的变化信息, 处理器接受这些信息并依据一定的控制算法计算所需控制力, 作动器产生所需控制力并作用到结构上, 从而实现对结构的控制. 结构控制整个系统的动力分析需要考虑控制机构和电器设备的可靠性.

依据是否需要外界能源, 结构控制分为以下四类^[1,2,4,5]: (1) 被动控制系统, 无需外部能源驱动, 单纯地依靠控制装置与结构相互作用提供控制力; (2) 主动控制系统, 需要大功率的外部能源来驱动作动器, 控制力由测到的激励和 / 或结构响应的反馈决定; (3) 半主动控制系统, 以被动控制为主, 只在结构反应达到界限值时, 施加少量能量, 使控制系统切换工作状态, 其硬件简单、无需在线计算、稳定性和可靠性好; (4) 杂交控制系统^[5~7], 在结构上同时施加主动和被动控制, 作为整体分析其响应, 以克服纯被动控制的应用局限, 减小控制力同时减小外部控制设备的功率、体积、能源和维护费用, 增加系统的可靠性.

依据控制力调整方式不同, 结构控制分为以下三类^[1,2,4,5]: 开环控制, 仅由外界荷载变化调整, 被动控制多为此种控制; 闭环控制(反馈控制), 依据结构当前反应值和估计值调整; 开闭环控制, 同时感受外界荷载和结构反应的变化, 能够理想地控制结构振动, 但工程实现困难^[8,9].

收稿日期: 1999-03-07, 修回日期: 2000-07-16

* 国家自然科学基金(59678027)资助项目

1.2 结构控制的理论基础

作为控制算法的基础, 控制理论内容十分广泛和丰富. 早期控制算法的理论研究大部分在连续时间域内, 主要用模拟控制技术. 近年来, 数字计算机的发展促进了离散时间、数字控制的发展. 总体而言, 控制理论的基本控制策略主要有以下三种.

1.2.1 最优化理论的控制算法及主要公式

根据所受的荷载及结构反应值, 应用控制理论中的极大值原理、随机分析原理^[10,11]、动态规划以及最优滤波等, 对控制机构的参数及在结构上的位置进行优化, 求解最优控制力, 以使结构的振动达到最理想的控制效果, 这就是最优化理论控制算法. 该类算法目前应用最多, 存在形式也最多, 概述如下:

最早的负反馈控制^[12]用输入和输出的差计算控制信号. 改进后得到线性二次优化控制^[13~20], 其经典形式的状态方程为

$$\dot{z}(t) = Az(t) + Bu(t) + H\ddot{x}_g(t)$$

其中 $z(t) = \{x(t), \dot{x}(t)\}^T$ 为状态向量, $\ddot{x}_g(t)$ 为基础的加速度, $u(t)$ 为控制力向量, 系数矩阵 A, B, H 是结构质量、刚度、阻尼矩阵和控制力分布矩阵的函数; 线性二次优化控制^[13~20]的目标向量为

$$J = \int_{t_f}^0 (z^T Qz + u^T Ru) dt$$

其中 t_f 为地震持续时间, Q, R 分别为状态权矩阵和控制权矩阵; 求最优控制力 $u^*(t) = Gz(t)$ 使 J 最小, 其中 $G = -R^{-1}B^T P$ 为反馈增益矩阵, 解代数 Riccati 方程

$$PA + A^T P - PBR^{-1}B^T P - Q = 0$$

得到其中的 P .

离散时间的数字结构控制是近来发展起来的, 其状态方程和目标向量分别为

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) + H\ddot{x}_g(k), \quad J = \sum_{k=0}^{k_f} (x^T(k)Qx(k) + u^T(k)Ru(k))$$

其中最优控制力 $u^*(k) = Gx(k)$; 反馈增益 $G = -\frac{1}{2}R^{-1}B^T P(I + 2BR^{-1}B^T P)^{-1}A$; Riccati 方程 $P = 2Q + A^T P A - A^T P B(2R + B^T P B)^{-1}B^T P A$.

为解决控制的时滞问题, Martin-Sanchez 提出将目标函数定义为

$$J(k) = X^T(k+1)QX(k+1) + U^T(k)RU(k)$$

此时最优控制力 $U^*(k) = GX(k)$, 反馈增益 $G = -[R + B^T QB]^{-1}B^T QA$, 称之为预测控制策略. 其基本思路为: 引导块基于选定的规则计算理想输出, 预测器计算控制信号使输出达到理想. J.P. Yao^[3] 将其用于结构控制. J. Rodellar^[12] 用包括 LQ 最小指标法在内的两种方法计算理想输出.

进一步改进, 若 J, Q, R, G, P 均为 α 的函数则称可变反馈增益控制^[7]; 若取 $J = z^T Qz + u^T Ru$ 则称为瞬态最优控制^[8,9,15,17,21~25]; G 取为多项式形式则称最优多项式控制^[7]等. 这些基本的区别会使具体计算有较大差异.

另外最优控制能与随机控制^[10,11]、预测控制^[12,26]、系统自校正控制^[14,15]、模态控制^[2,27~36]、脉冲控制^[16,37~40]、模糊状态控制^[17,27,41]等多种控制理论联合应用派生出各种结构控制.

1.2.2 滑动模态理论的控制算法

滑动模态理论^[6,27]首先设计使结构系统响应有特定的性能(例如渐进稳定)的开关面,然后提出控制策略,使结构系统的响应定位在开关面,并尽可能停留在该处.它最大优势在于,设计的结构系统具有鲁棒性(即使有非模态振动、不确定参数或外激励也不影响结构性能及稳定性).基于该理论的控制算法,以追踪特定的轨道(结构的稳定性理想的轨道,一般为0)为目标,追踪精度由速度位移误差确定,且允许结构系统的确定参数(质量刚度阻尼特性)中存在不确定性.

极点配置控制^[17,29,30]指派特定值到闭环回路的极点上(Brogan, 1974).它和鲁棒控制^[42~46]、可变结构系统控制^[6,47]、滑动模态控制^[6,47]等一样都在不断发展中.

1.2.3 人工神经网络的控制算法

人工神经网络^[5,48,49]由许多处理单元(神经元)相互连接组成,具有并行处理信息的能力.神经元能够模拟人脑功能,综合由连接权获得的信息并依据某种激励函数进行处理,根据一定的学习规则,实现网络的学习和关系映射.连接权连接神经元并贮存网络获得的知识.人工神经网络具有高度自适应学习能力、鲁棒性、容错性、柔性结构的自组织离散分布处理能力,受到工程控制研究学者的重视,已经广泛用于机器人和航空领域.

1943年W. McCulloch和W. Pitts^[5]提出基于兴奋与抑制的神经元模型(MP模型),1949年D.O. Hebb提出神经元连接强度修改规则(Hebb规则),1961年E. Rosenblatt^[5]提出感知机模型,1962年Widrow提出自适应线性元件(Adaline)网络,1982年Hopfield将能量函数概念引入神经网络,Rumelhart和McClelland提出网络思想和误差拟传播学习(BP)算法,至今影响很大.

2 结构控制应用研究现状

土木工程应用控制理论自1973年提出以来受到广泛重视.1978年9月在苏格兰爱丁堡大学举行欧洲“结构振动控制”学术交流会,1979年6月和1985年7月国际理论与应用力学学会(IUTAM)分别召开第一、二届结构控制国际学术会议.在大型国际会议上有关结构控制方面文章的比重也很大,如1988年8月第九届世界地震工程会议(WCEE),1990年9月第九届欧洲地震工程会议,1991年5月美国土木工程协会第八届工程力学会议和1991年7月第四届结构动力学最新发展国际会议等.1992年第十届WCEE上,成立了与国际地震工程协会(IAEE)平行的国际结构控制协会(IASC),同年美国-意大利-日本结构控制和敏感系统会议在意大利召开.世界第一、二届结构控制会议分别于1994年(美国)、1998年(日本)召开.

在我国,50年代提出基础隔震思想,80年代末结构控制方面的研究正式起步,90年代以后结构控制方面的文章明显地逐年增多.振动工程学报1999年第二期为结构抗振控制专辑.1998年10月第一届全国结构控制会议在承德召开,全面展示了我国在结构控制方面的研究成果.但是目前,我国的试验研究工作多数还是被动结构控制.

结构控制的应用逐步广泛,从医院、桥梁、大型商场等重要建筑,推广到一般工业与民用建筑.许多国家已经或正在制定结构被动耗能的设计指南或设计规范^[50].我国正在修订的建筑结构抗震设计规范也拟增加隔震和耗能减震的内容.与此同时,控制理论研究不断深入,各种新的控制技术不断提出,可供选择的控制装置也越来越多.

2.1 被动控制

被动控制的设计思想就是采用直接减少(消振)、隔离(基础隔震)、转移(吸振减震)、消耗(耗能减震)能量等方法达到减小结构振动的目的.由于易于工程实现,受到工程界普遍重视,因而起步早,应用最多.但其中的消振思想^[19]即减弱结构所受的动力荷载,在土木工程控制中很少应用.

2.1.1 基础隔震

基础隔震是在建筑物基底设置柔性装置,以减弱震源对结构的动力作用,常与金属滞变阻尼器联合用于短周期结构。主要机构有跷板式、橡胶垫块^[51]、柔性桩基或桥墩等^[19]多种,近来开发出滚轴支座、滚珠及辊轴支座、盆式橡胶垫块支座、橡胶轴承、螺旋钢弹簧隔震、无粘结钢板橡胶叠层装置和变截面铅芯的铅-橡胶装置亦属此类。另外还有高阻尼铁氧体橡胶系统、“软着陆”隔震系统,振子隔震系统,滞变-摩擦基底支座^[52,11]等在研究中。李宏男等^[53]研究了采用基础滑移隔震时,为保证地震作用下的抗倾覆能力,多层砌体房屋的高宽比限值。

2.1.2 吸振减震

吸振减震是在主体结构上附加子系统(吸振器),以减小主结构的振动。吸振器是包括质量系、弹簧系的小振动系统,常与粘滞阻尼器联合使用。质量系相对运动的惯性力作为控制力,通过弹簧系作用到结构。质量系为气体的有空气阻尼器。

质量系为固体的,有被动调谐质量阻尼器(P-TMD)^[10,54]、摆式质量阻尼器^[2]、多结构联系体系^[27,55]、悬挂结构(苏联和其它国家)等。其中P-TMD应用最广泛,如美国纽约C.C.中心大厦(楼高278m,TMD370t,1978年)^[18]和波士顿J.Hancock大楼(两个300t的TMD)^[18],加拿大多伦多National大厦^[18](两个20t的TMD),澳大利亚悉尼C.Tower(水箱为TMD)^[18],泰国湄南河桥塔^[5],我国九江铁路公路两用长江大桥^[5],日本千叶港市某塔式建筑^[5],C.P.Tower(125m高,实际地震考验中顶层位移减少15%,由于设计中未考虑高振型影响,加速度减少仅2%)^[5],Crystal Tower(157m高,顶层水箱约1000t悬吊式)^[5]。摆式质量阻尼器适用于控制高耸结构的振动,类型主要有摆锤(苏联)^[9]、环状、倒置环状等,摆式质量阻尼器减振效果的评价见文献^[2]。

质量系为液体的,有调谐液体阻尼器(TLD)^[56]、质量泵^[57]、液压阻尼系统(HDS)^[58]、油阻尼器等。质量泵利用液体振荡改变结构质量分布,我国李桂青等人研究用它控制结构鞭梢效应^[57],效果良好。调谐液体阻尼器^[59,60]通过浅水层的波浪效应控制结构多维方向振动。应用实例有:我国南京电视塔、日本横滨海港塔和川崎空港塔^[61],日本法华俱乐部(48t,1991)。我国张敏政的研究结果^[62]表明TLD能有30%的减震效果。蔡丹绎等^[61]根据流体力学理论,导出其等效力学模型,并得出结论:仅用TLD的一阶晃动等效力学模型就能满足工程需要。贾影和李宏男等人^[63]采用流体体积函数法(VOF)直接求解流体的N-S方程,计算了矩形容器中液体晃动时的动水压力,提出模拟动水压力的经验公式。

质量系包括固体和液体的,有液压质量控制(HMS)^[58]、摆、油阻尼器(POD)^[64,65]等。HMS^[66]多安装于结构底层,可以降低50%~70%结构振动,增加3~4倍结构阻尼。李惠等^[58]改进为液压阻尼系统(HDS),通过振动台试验,揭示HDS的减震机理和规律。郭迅和张敏政^[65]提出的POD技术具有比TMD更宽的有效频带,在接近调谐状态下能够减震48%,且易于工程应用。阎维明等人提出多结构混合体系控制概念,阐明其控制原理,建立状态方程,进行仿真分析^[27];并研制高效被动阻尼控制装置,建立其运动方程,并进行仿真计算和分析^[55]。

2.1.3 阻尼耗能减震

耗能减震是利用各种阻尼元件、吸能部件或摩擦支撑产生的阻尼力、塑性变形或摩擦力来衰减结构振动。它耗能能力强、低周疲劳性能好。目前大量应用的耗能器主要有速度相关型(粘滞、粘弹)和滞变型(金属屈服、摩擦)。对复杂结构粘性阻尼器效果明显。金属滞变阻尼器中,钢梁阻尼器(利用大塑性变形吸收能量)和铅塞阻尼器(利用铅的循环挤压吸收能量)已获得广泛应用^[5],如新西兰Wellington某警察所(套筒管柔性元件和铅阻尼器)和日本的两座建筑的预制砼墙板和钢框架间(铅阻尼器)。1992年美国铜锌铝记忆合金阻尼器的试验研究结果表明,SMA耗能器可以有效减小结构模型地震反应。摩擦阻尼器主要利用元件间的摩擦耗散能量。通过松紧节点螺栓,调节板间压力控制摩擦力。

周云和刘季依据低周反复荷载试验的结论提出了名为“双摩擦耗能器”^[67]的改进方案;依

据圆形、双环、加劲圆环、弹塑性-摩擦复合等耗能器循环荷载试验和钢筋砼框架模型上伪动力对比试验的结果,研究耗能减震结构体系的分析方法^[68];提出利用两个或多个耗能元件协同工作同时耗能的思想,并对双环软钢耗能器进行循环加载试验^[69]。

欧进萍等将 Pall 摩擦耗能器改进为组合钢板耗能器,并建立力学分析模型,检验减震效果^[70]。并进行大量数值计算,研究耗能刚度、屈服位移等参数对结构减震结果的影响,为结构的耗能减震设计提供基础^[50]。最近他们基于国内外耗能器的性能试验和耗能减震结构的计算研究并结合我国正在修订的建筑结构抗震规范,提出耗能减震结构抗震设计的统一方法^[71]。

2.2 半主动控制

近年来应用的半主动控制方法有变刚度和变阻尼两种^[47]。总体而言,数值分析研究较多,如 Inaudi^[73]和 Yang^[74]深入研究算法。试验研究主要有^[72]:以 Kawashima 为代表进行桥梁结构的理论和试验研究, Feng & Shinozuka 半主动滑动摩擦支座; Kobori et al.^[75]半主动刚度控制设备; Gavin et al. 和 Makris et al. 半主动电流变阻尼器; Spencer et al. 半主动磁流变阻尼器。Symans & Constantinou 总结了以上提到的试验性半主动控制系统检验的执行情况和结论^[27]。Kawashima^[72], Patten^[76]和 Symans & Constantinou (1997)^[27]研究半主动液阻尼器试验设备,通过分流回路改变液体量来实现控制,通过恰当调节控制阀可以用非线性阻尼器达到线性效果。

刘季^[47]重点阐述变结构系统(VSS)理论和滑移面的确定及控制律的设计。他和李敏霞首次完成我国变刚度半主动结构控制的振动台试验^[77],采用五层框架(1:4模型),控制系统全部硬件化以避免时滞问题,试验结果为低层层间位移随可变刚度增大变小,控制器明显起作用需要3s左右。阎兴华^[78]提出的“可控消能减震”,能将结构地震位移反应降低50%以上。

智能材料电流变液(ER)和磁流变液(MR)都是可控流体,在电场或强磁场作用下,可从流体变为剪切屈服应力较高的粘塑性体,且这种改变连续、可逆、迅速、易于控制,因此用它制作耗能器以实现半主动控制。瞿伟廉和项海帆^[79]研究适用于土木工程结构控制用的两类电流变液可调阻尼器的工作原理和力学模型,并提出其适用范围。欧进萍和关新春^[80]建立了磁流变耗能器的恢复力简化模型,提出参数设计要求和总阻尼系数计算方法,并比较粘性阻尼和库仑阻尼的比值关系。

2.3 主动控制

2.3.1 主动调谐质量阻尼器 A-TMD

90年代之前主动控制的情况见 Gong 的文^[81],试验研究主要有 Soong 和 Chung^[82~85]等,应用于工程实际是从80年代中期开始的^[86]。为改善高层建筑和桥塔的抗风和抗地震激励能力,各种类型的主动调谐质量阻尼器 A-TMD 系统已经应用于实际^[87]:世界首例 A-TMD 为日本京桥成和大厦(1990年8月,地上11层地下1层,顶部两台 TMD 分别控制水平和扭转振动,风速为20m/s时,顶层位移减少50%~60%),东京 C 办公大楼(130m高,0.34Hz,200t 的 TMD,1993年),地震观测试验楼(6t 的 TMD,顶部位移减少25%)。

I. Nagashima & Y. Shinozaki^[7]研究了质量块冲程长度的限制,提出用 A-TMD 系统实现可变增益反馈(VGF)控制的设计步骤和算法。C.H. Loh & P.Y. Lin^[88]基于 Pade 假定处理时滞问题,研究 Kalman 滤波法在 A-TMD 系统的应用。顾明和王晓勇^[89]提出用于高层建筑风振控制的 ATMD 设计的简单方法:基于 SDOF 结构模型和广义脉动风力的高斯白噪声假定,在频域内以最小化结构顶层位移为设计目标对控制力增益进行参数优化得增益解。

F.L. Almansa 等人采用两种评价准则研究结构模态的预控制:简易评价假定所有元素理想工作,鲁棒评价考虑控制回路中元件参数不匹配、传感器测量误差、作动器欠饱和运行等因素,并为每个独立模态提供有效的预控制方法并得到数值解^[28]。他还研究了该方法用于多自由度系统时的稳定性和有效性。

2.3.2 人工神经网络

近来,神经网络的学习功能已经成功地运用到结构主动控制^[90~100]. Nikzad & Ghaboussi (1991)^[90]提出了基于逆传递函数的神经网络控制方法,并将该方法应用于作动器动力试验和时滞研究(Nikzad 1996). Ghaboussi, Joghataie, Bani-Hani 等人^[92~95]研究了利用仿真器训练神经控制器并应用于线性结构的控制.神经网络控制的显著优点是:能够从训练中建立复杂非线性关系,并将其存储在连接权中. Joghataie 和 Ghaboussi^[93]提出神经网络识别-控制器的方案用以预测结构的动力反应,并使用模糊规则改善了神经控制器,减少了需要测量的量,改善了控制的效果. Ghaboussi^[96]研究了一种新的基于控制准则的神经网络,进行地面运动情况下,三层框架结构的主动控制计算机仿真试验,工作原理为:首先将一个神经网络作为模拟器加以训练,并用来预测未来反应,再用训练好的模拟器训练另一个神经网络,在仿真的每一个步长上,调节控制信号,根据控制准则推演出作动器所需要的控制力,并作用于结构上,达到减振的目的. Bani-Hani 在 Ghaboussi^[95]研究的基础上,利用神经网络对非线性结构体系进行了振动控制数值分析.在分析过程中,采用了作动器-结构耦联模型,并用非线性数值训练神经网络,扩大了该神经网络的应用范围.

Ankireddi^[98]等研究了神经网络控制方法中传感器误差的纠正问题,提高控制点精度. Paez 使用特殊的径向基函数网络,连接标准化线性样条网络预测单自由度体系在随机荷载作用下的反应. Morishita 等使用随机搜索全局优化的方法对神经网络的学习算法进行了改进,加快了学习的速度和精度,并将该算法应用于多层网络,结合在随机荷载作用下两自由度自适应体系进行了分析,验证了该神经网络的控制效果. Masri 和 Chassiakos 使用神经网络对结构的线性和非线性的动力问题进行了识别和控制,研究的对象是一个有阻尼的摆,利用神经网络的泛化能力预测同一个非线性摆在不同幅值随机激励下的反应,并对神经网络方法和定性相似非参数识别方法进行了对比,研究了使用神经网络方法计算的算法和容错性^[94].

2.3.3 其他主动控制

主动锚索控制系统^[19,21,101~106]是 Lev Zeltin 对高层建筑提出的层间交叉锚索控制系统^[2]. 建筑层间相对位移很大时锚索张紧,张紧后的锚索作为斜向支撑可以约束层间位移. 安装液压伺服装置和传感器,能增强控制效果. Roorda^[101]对高耸结构提出类似控制系统. 气体脉冲发生器^[18,38~40]通过喷气或其它途径产生脉冲控制力. 能够控制结构的峰值反应,控制效果较好,但脉冲力控制比较困难. 空气动力减振器(空气挡风板)改变板的受风面积提供控制力,用以控制桥梁结构^[18]和高层建筑的风振. 另外还有在框架上安装预应力斜支撑、控制悬索的扭转振动回转仪、用强电磁场控制撒有铁粉的大坝等多种主动控制形式.

2.4 杂交控制

目前杂交控制所用的控制装置主要有三大类:主动控制与基础隔震相结合^[6,51,73,107], A-TMD 和 TMD 相结合,主动控制(包括人工神经网络控制)与耗能装置相结合^[7,100].

由于基础隔震限于低层建筑^[51], J.N. Yang 等人提出铅芯橡胶基础隔震与 TMD 同时连接到结构上的杂交控制思想并实现杂交控制的计算分析. 他们基于可变结构理论(VSS)和 Lyapunov 方程或滑动模态控制(SMC)方法,研究地震作用下桥的杂交控制系统^[6],模拟结果显示:使用橡胶支座时,作动器能减小桥的响应,但控制力大;被动阻尼器比可变阻尼器有效,但无法控制桥台运动;滑动支座位移太大,且桥板最大加速度与地面运动加速度峰值(PGA)无关,这是由于从墩传递到桥板的地震力由支座性质确定;滑动支座如果有作动器,效果能进一步改善.

Venini^[100]等使用基于 BP 算法的多层神经网络对多自由度粘弹性结构进行混合振动控制,有效减小隔震基础的水平位移,取得明显的控制效果. Ichiro Nagashima 和 Yuzo Shinozaki^[7]首先考虑可变增益反馈控制,研究基于 LQ 优化控制的静力输出反馈求解包括 A-TMD 和被动阻尼设施(诸如油阻尼器或粘滞阻尼器)的杂交控制. 另外, Kelly 等人^[44]将基于 Lyapunov

方程的乒乓算法应用于基础隔离系统的主动控制; S.C. Charleston 将主动脉冲控制与耦合橡胶隔离器结合。

3 结构控制模型研究中的几个问题

结构振动控制经过近三十年的研究和发展,已经取得了包括理论、试验和应用各个方面的成果。虽然如此,以下几个方面仍存在许多问题需要解决:(1)结构控制的模型研究:充分利用结构本身的特点参与控制,考虑土-结构相互作用,时滞现象,控制力限制,辅助质量的冲程长度限制,非经典阻尼^[1,7,108]等理想化模型与实际结构差异的影响。(2)结构控制的理论研究:控制结构的优化问题^[109],控制参数的优化问题^[53],随机荷载作用下的控制问题,结构控制可靠性研究,模糊数学、系统辨识在系统控制中的应用等。(3)结构控制的措施研究:寻求构造简单、造价低、能耗少、施工方便、可靠性大的各种控制措施。另外为推动结构控制广泛应用,制定结构控制的设计指南或设计规范^[50]是必要的。

本节主要讨论模型研究的几个问题。理想化模型与实际结构之间差异的存在势必影响结构控制的精确性,甚至影响结构控制的稳定性和可行性。解决好这些问题是保证控制系统正常发挥作用的必要条件,具有非常重要的现实意义。

3.1 土-结构相互作用

三十多年来的研究表明,土-结构相互作用(SSI)对地震激励下结构响应^[110]主要有以下几方面的显著影响:减少共振频率;通过波辐射损失能量;改变结构基础的运动。在地震活跃区的结构设计分析时,SSI的考虑方法非常重要。但是目前绝大部分结构控制研究都忽略这种效应,假定结构建造在刚性地基上。

经联机检索发现,国外仅有四篇文献探讨考虑土-结构相互作用效应的抗震控制(SSIC):H.L. Wong等^[111]采用模型为匀质剪切梁支撑于刚性基础嵌固于匀质粘弹性半空间的土中,地震激励为竖直入射的剪切波,主动控制力用吸能边界模拟。H.A. Smith等^[112]提出用等效固基结构模型来表示整个SSI系统,以降低计算的复杂性。并提出此模型和SSI传递函数通过迭代^[113]联合确定多自由度的优化控制。S. Alam等^[42]用鲁棒主动优化控制策略研究SSIC。我国宰金珉等^[114]以某六层框架结构为例,分析脉冲发生器和锚索两种控制系统的SSI效应,结果表明SSI显著降低脉冲控制所需控制力。这些研究中,“土”为弹性均匀的半无限空间介质,基础多为矩形,圆形或台体等规则的浅平基础,埋入深度浅,仅在基础底部考虑场地土的作用。

桩基础适用面广承载力强,随着沙漠、淤泥、近海和海上等不良地基上建筑的增多和高耸建筑、大跨桥梁的快速发展,桩基础的应用越来越多,桩本身为细长的柔性结构且一般穿越多层土介质。目前尽管桩基础研究和结构振动控制研究都很多,同时考虑两者的却极少。EI检索(1993~1999)结果,没有找到研究桩基础结构的地震控制方面的文章。作者搜集大量桩基础的研究情况,拟另外整理成文。

3.2 时滞现象

结构控制中,传感器测量、处理器计算、作动器驱动都需要一定的时间,导致控制力出现时间滞后现象。时滞的影响及时滞补偿的重要性在Roorda试验中得到充分显示:时滞不仅减弱系统性能,并可能导致系统的不稳定性^[115],尤其在考虑高模态控制情况下,时滞效果更为明显。目前的三类时滞补偿方法都存在局限性有待完善:(1)理论型补偿,时滞系统描述为偏微分方程,在线计算量大,设计繁琐浪费时间。Taylor级数截断^[116]能简化计算,但只能用于时滞较小的情况。基于Pade假定^[88]不必增加在线计算,但需要引入作动器的反馈迭代步骤。(2)相空间补偿^[85],通过反馈增益修正,使真实系统和理想系统具有相同的主动刚度和主动阻尼,它对系统的频率要求比较严格,否则会导致失稳。(3)时域补偿,用运动补偿设计(用Taylor展

开更新系统状态)和动力补偿设计(用系统动力方程的在线解)预测响应,受系统噪声的影响很大.在离散时域采用理想控制增益,可以解决观测溢出导致的小阻尼模态不稳定问题^[117].

为 Buffalo-SUNY 结构控制试验提出的数字预控制算法^[14,82],采用控制律的补偿来克服时滞效果.试验结果和数字模拟结果比较显示,预控制在时滞不确定的情况下具有鲁棒性.但是状态估计不仅大大增加在线计算量,并且因为观测溢出和控制系统中噪声的存在,状态估计不可能精确. M.D. Symans^[27] 提出在半主动控制试验中时滞补偿的简单方法,假定在时滞间隔期间结构响应为无阻尼的自由振动,这只能适用于时滞相对较短的情况.

3.3 控制物理限制

A-TMD 系统所能提供的辅助质量冲程长度和控制力的最大值,在实际应用中受到经费、空间和电力动力设备的限制.线性控制理论缺乏适应性,强激励下可能因为冲程长度或控制力的物理限制导致整个系统停顿,而弱激励下能力没有得到充分利用.

对于控制力的最大值,解优化控制问题的开环乒乓解在 Wonham^[118] 研究了其二次性能指标后,近来已尝试应用.还有使用基于 Lyapunov 方程^[119] 的乒乓算法(闭环),解趋于保守.以上方法都存在高频转换开关可能导致控制颤动,高模态的不稳定溢出等问题.

如果能提供的控制力比需要的控制力小 50%,系统也不会失稳;但如果辅助质量的冲程长度(SLAM)幅值达到限值,为避免系统本身和建筑物破坏,整个控制系统就只好停止.故 SLAM 的最大值限制^[7]比控制力限制更为重要.可变增益反馈(VGF)控制虽然允许同时考虑控制力和 SLAM 的限制,但此算法仍存在缺陷:设计离散控制增益和确定转换准则困难;频繁转换引起控制颤动;算法复杂难于理解^[7]. I. Nagashima 提出了 VGF 控制系统设计程序和算法,以 SLAM 限制作为基本物理约束.首先提出了计算可变反馈增益系统的设计步骤,建筑响应的减小和 SLAM 幅值之间用变量 α 协调;然后提供了有效算法,计算变量 α 的值以适应外激励的强度变化水平,这样 SLAM 幅值维持在不变的限定值之内^[7].这种算法效果较好,只是需要在线计算变量 α .

3.4 有限测点问题

真实的结构系统自由度很多,但能够获得的结构反馈信息十分有限.有限测点问题,即依据有限的信息反馈如何获得结构全态响应问题,直接关系到结构控制的造价,是结构能否实际应用的关键问题.为解决该问题将静力输出反馈(SOF)^[7,6]用于可变增益反馈控制,优化输出反馈有多种算法:基于 LQ 优化控制算法是比较简单的一种;Kalman 滤波器在解决有限测点和预测控制的过滤技术中得到广泛应用;动力模态缩聚技术用与系统自由度缩聚类似的方法估计全状态. F. Lopez-Almansa^[120] 研究了有限个传感器和作动器约束下,多自由度系统预控制实现的方法论问题. C.H. Loh^[88] 给出推导方程和使用方法后,以六层框架结构(两个 TMD)为例,研究在全态反馈预控制、使用模态缩聚技术、使用预测型 Kalman 滤波器估计全状态三种控制条件下的顶层位移和 TMD 控制力.结果显示,三种控制条件下所得结果非常接近.

参 考 文 献

- 1 李忠献. 结构地震反应优化阻尼器控制及非经典阻尼结构动力分析. [博士论文]. 天津: 天津大学, 1991
- 2 李桂青, 邹祖军. 结构振动控制评述. 地震工程与工程振动, 1987, 7(1): 83~93
- 3 Yao J P. Concept of structural control. *J Struct Div, ASCE*, 1972, 98(7): 1567~1574
- 4 周宏伟. 结构振动控制理论及其应用. [博士论文]. 武汉: 武汉工业大学, 1990
- 5 吴建军. 基于神经网络的结构地震响应控制. [博士论文]. 天津: 天津大学, 1998
- 6 Yang J N, et al. Hybrid control of seismic excited bridge Structure. *Earth Engrg & Struct Dyn*, 1995, 24: 1437~1451
- 7 Nagashima I, Shinozaki Y. Variable gain feedback control technique of active mass damper and its application to hybrid structural control. *Earth Engrg & Struct Dyn*; 1997, 26: 815~838
- 8 任晓崧, 徐植信. 地震动作用下结构瞬时开闭环最优控制算法. 地震工程与工程振动, 1997, 17(4): 81~87
- 9 任晓崧, 徐植信. 瞬时开闭环最优控制算法中的迟时研究. 地震工程与工程振动, 1998, 18(2): 85~90

- 10 林均岐, 王云剑. 调谐质量阻尼器的优化分析. 地震工程与工程振动, 1996, 16(1): 116~121
- 11 洪峰, 王前信. 滞变 - 摩擦基底隔震系统的随机地震反应分析. 地震工程与工程振动, 1997, 17(3): 1~8
- 12 Rodellar J, Barbat A H, Martin-Sanchez. Predictive Control of Structures. *J Engng Mech*, 1987, 113(6): 797~812
- 13 刘季, 腾军. 地震作用下结构振型组合自校正控制. 地震工程与工程振动, 1992, 12(2): 48~58
- 14 李桂青. 结构振动控制理论和方法. 世界地震工程, 1989, (1): 1~10
- 15 刘季, 腾军. 结构振动控制的理论和实践. 哈尔滨建筑工程学院学报, 1990, 10(4): 10~19
- 16 Leipholz H H. Structural control. In: Proc IUTAM Symp on Struct Control, Canada, 1980. University of Eaterloo Ontario
- 17 邹祖军. 结构振动控制理论和方法. [博士论文]. 武汉: 武汉工业大学, 1990
- 18 Rohman M A, Leipholz H H E. Stochastic control of structures. *J Struct*, 1981, 107(7)
- 19 Rohman M A, Leipholz H H E. General approach to active structural control. *J Engng Mech*, 1979, 105(6): 1007~1023
- 20 Yang J N. Application of optimal control theory to civil engineering structures. *J Engng Mech*, 1975, 101(6): 818~838
- 21 Yang J N, Soong T T. Recent advances in active control of civil engineering structures. *Probabilistic Engng Mech*, 1988, 3(4): 179~188
- 22 Yang J N, Akbarpour A, Ghaemmaghami P. Instantaneous optimal control laws for tall buildings under seismic excitations. Technical Report, NCERR-TR-87-7, 1987
- 23 Yang J N, Akbarpour A, Ghaemmaghami P. New optimal control algorithms for structural control. *J Engng Mech*, 1987, 113(6): 1369~1386
- 24 Yang J N, Akbarpour A. Effect of system uncertainty on control of seismic-excited buildings. *J Engng Mech*, 1990, 116(2): 462~478
- 25 阎维明, 谭平, 周福霖. 多结构混合控制体系研究. 地震工程与工程振动, 1998, 18(3): 108~115
- 26 Meirovitch L. Dynamic and control of structures. New York, NY: John Wiley & Sons, 1990
- 27 Symans M D, Constantinou M C. Seismic testing of a building structure with a semi-active fluid damper control system. *Earth Engng & Struct Dyn*, 1997, 26: 759~777
- 28 Lopez-Almansa, et al. Modal predictive control of structures. 1: formulation. *J Engng Mech*, 1994, 120(8): 1743~1760
- 29 Rohman M A, Leipholz H H E. Active control of large structures. *J Engng Mech*, 1982, 108(5): 719~730
- 30 Rohman M A, Leipholz H H E. Structural control by pole assignment method. *J Engng Mech*, 1978, 104(5): 1159~1175
- 31 Vilnay Oren. Design of modal control of structures. *J Engng Mech*, 1981, 107(10): 2185~2199
- 32 Yang J N, Liu M J. Building critical mode control: nonstationary. *Earthquake*, 1983, 109(Dec)
- 33 Meirovitch L, Lawrence M. Silverberg. Control of structures subjected to seismic excitation. *J Struct Engng*, 1983, 109(4): 965~976
- 34 Yang J N. Control of tall buildings underearthquake excitation. *J Engng Mech*, 1982, 108(5): 833~849
- 35 Martin C R, Soong T T. Modal control of multistory structures. *J Mech Div*, 1976, 102(4): 613~632
- 36 Chung M I J, Soong T T. Modal control design for system having complex eigenvalue. *Private Communication*, 1979, (6):
- 37 Udawadia F E, Tabaie S. Pulse control of single degree-of-freedom system. *J Engng Mech*, 1981, 107
- 38 Reihorn M A, Manolis G D, Wen C Y. Active control of inelastic structures. *J Engng Mech*, 1987, 113: 315~333
- 39 Udawadia F E, Tabaie S. Pulse control of structure and mechanical systems. *J Engng Mech*, 1981, 107: 1011~1028
- 40 龙复兴, 赵晓红. 土木工程结构最优控制问题的脉冲干扰法 PDM. 地震工程与工程振动, 1997, 17(4): 88~93
- 41 瞿伟廉, 李肇胤, 钟爱达. 高耸建筑模糊随风振反应的振型控制. 上海力学, 1988, 9(1): 33~46
- 42 Alam S, Baba S. Robust active optimal control scheme including soil-structure interaction. *J Struct Eng Div*, 1993, 119: 2533~2551
- 43 Lopez-Almansa F, Rodellar J. Feasibility and robustness of predictive control of building structures. *Earth Engng & Struct Dyn*, 1990, 19: 157~171
- 44 Kelly J M, Leitmann G, Soldatos A G. Robust control of base isolated structures under earthquake excitation. *J Optimization Theory and Applications*, 1987, 53(2): 159~180
- 45 陈善平. 不确定系统的鲁棒最优控制. [博士论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 1990
- 46 段广仁. 线性系统的特征结构配置与鲁棒控制系统设计. [博士论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 1989
- 47 刘季, 孙作玉. 结构可变阻尼半主动控制. 地震工程与工程振动, 1997, 17(2): 92~97
- 48 焦李成. 神经网络的应用与实现. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1995
- 49 Ghaboussi J, Joghataie A. Active control of structures using neural networks. *J Engng Mech, ASCE*, 1995, 12(4): 555~567
- 50 欧进萍, 吴斌, 龙旭. 构被动耗能减震效果的参数影响. 地震工程与工程振动, 1998, 18(1): 60~70
- 51 Yang J N, Danielians A, Liu S C. Aseismic Hybrid control systems for building structures. *J Engng Mech*, 1991, 117(4): 836~853
- 52 洪峰, 王前信. 滞变 - 摩擦基底隔震支座的试验和模型. 地震工程与工程振动, 1997, 17(1): 1~8

- 53 李宏男, 王苏岩, 贾俊辉. 采用基础摩擦隔震房屋高宽比限值的研究. *地震工程与工程振动*, 1997, 17(3): 73~76
- 54 李忠献, 张伟等. 高层建筑地震反应全反馈主动 TMD 控制理论研究. *地震工程与工程振动*, 1997, 17(3), 60~65
- 55 阎维明, 谭平等. 多结构联系体系的高效阻尼控制及其仿真分析. *地震工程与工程振动*, 1998, 18(3): 116~123
- 56 李宏男等. 利用多个调液阻尼器减小高层建筑地震反应的研究. *地震工程与工程振动*, 1997, 17(1): 23~31
- 57 李桂青, 熊火清. 用质量泵控制结构的鞭梢效应. *地震工程与工程振动*, 1987, 7(4): 1~14
- 58 李惠, 析皓, 刘季. 液压阻尼控制系统 (HDS) 用于底层柔性结构减震的试验研究. *地震工程与工程振动*, 1997, 17(4): 94~98
- 59 Dorothy Reed, et al. Investigation of tuned liquid dampers under large amplitude excitation. *J Engrg Mech*, 1998, 124(4): 405~413
- 60 李忠献, 王森林, 姜忻良. 高层建筑地震反应最优多重 TLD 控制. *地震工程与工程振动*, 1996, 16(4): 69~77
- 61 蔡丹绎, 李爱群, 程文攘. 调频液体阻尼器的等效力学模型研究. *地震工程与工程振动*, 1998, 18(1): 80~87
- 62 张敏政, 丁世文, 郭迅. 利用水箱减震的结构控制研究. *地震工程与工程振动*, 1993, 13(1): 40~48
- 63 贾影, 李宏男, 李玉成. 调液阻尼器液体动水压力的模拟. *地震工程与工程振动*, 1998, 18(3): 82~87
- 64 郭迅, 张敏政. 摆、油阻尼器减震的试验研究. *地震工程与工程振动*, 1996, 16(1): 122~128
- 65 郭迅, 张敏政. 用于控制高柔结构振动的 POD 技术. *地震工程与工程振动*, 1998, 18(2): 91~97
- 66 李惠. 液压质量控制系统 (HMS) 对底层柔性建筑的抗震控制研究. [学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨建筑大学, 1994
- 67 周云, 刘季. 两种摩擦耗能器的比较试验研究. *地震工程与工程振动*, 1997, 17(1): 40~48
- 68 周云, 刘季. 新型耗能 (阻尼) 减震器的开发与研究. *地震工程与工程振动*, 1998, 18(1): 71~79
- 69 周云, 刘季. 双环软钢耗能器的试验研究. *地震工程与工程振动*, 1998, 18(2): 117~123
- 70 欧进萍, 吴斌. 组合钢板耗能一种新型耗能减震装置. *地震工程与工程振动*, 1997, 17(1): 32~39
- 71 欧进萍, 吴斌, 龙旭. 耗能减振结构的抗震设计方法. *地震工程与工程振动*, 1998, 18(2): 98~107
- 72 Kawashima K, et al. Seismic response control of bridges by variable dampers. *J Struct Engrg*, 1994, 120(10): 2583~2601
- 73 Inaudi J A, Kelly J M. Single-degree-of-freedom nonlinear homogeneous systems. *J Engrg Mech*, 1994, 120(7): 1543~1562
- 74 Yang J N, Wu J C, Reihorn M A, Riley M. Control of sliding-isolated buildings using sliding mode control. *J Struct Engrg*, 1996, 122(2): 179~186
- 75 Kobori T, Takahashi M, Nasu T, Niwa N. Seismic response controlled structure with active variable stiffness. *Earth Engrg & Struct Dyn*, 1993, 22: 925~941
- 76 Patten W N, Sack R L, He Q. Controlled semi-active hydraulic vibration absorber for bridge. *J Struct Engrg*, 1996, 122(2): 187~192
- 77 李敏霞, 刘季. 变刚度半主动结构振动控制的试验研究. *地震工程与工程振动*, 1998, 18(4): 90~95
- 78 阎兴华. 可控效能减震原理及结构分析. *地震工程与工程振动*, 1997, 17(3): 66~72
- 79 瞿伟廉, 项海帆. ER 智能材料在结构振动控制中应用. *地震工程与工程振动*, 1998, 18(3): 49~55
- 80 欧进萍, 关新春. 滞流变耗能器及其性能. *地震工程与工程振动*, 1998, 18(3): 74~81
- 81 Soong T T. Active structural control in civil engineering. *J Engrg Struct*, 10: 74~84
- 82 Rodellar J, Chung L L, Soong T T, Reihorn M A. Experimental digital control of structures. *J Engrg Mech ASCE*, 1989, 115(6): 1245~1261
- 83 Soong T T, et al. Experimental study of active structural control. *J Engrg Mech*, 1981, 107(6): 1057~1067
- 84 Chung L L, Reinhorn A M, Soong T T. Experiment on active control of seismic structures. *J Engrg Mech ASCE*, 1988, 114: 241~256
- 85 Chung L L, Lin R C, Soong T T, Reinhorn A M. Experimental study of active control for midof seismic structures. *J Engrg Mech ASCE*, 1989, 115(8): 1609~1627
- 86 Yang J N, Soong T T. Review paper; recent advances in active control of civil engineering structures. *Probab Eng Mech*, 1988, 3(4): 179~188
- 87 Kobori T, Koshika, et al. Seismic-response-controlled structure with active mass driver system. Part 1: design. *Earth Engrg & Struct Dyn*, 1991, 20: 133~149
- 88 Loh C H, Lin P Y. Kalman filter approach for the control of seismic-induced building vibration using active mass damper system. *The Structural Design of Tall Buildings*, 1997, 6: 209~224
- 89 顾明, 王晓勇. 用主动调频质量阻尼器控制高层建筑的风致振动. *地震工程与工程振动*, 1998, (3): 88~95
- 90 Nikzad K, Ghaboussi J. Application of multi-layered feed-forward neural networks in digital vibration control In: Proc Int Conf on Neural Networks, 1991
- 91 李宏男, 阎石, 林泉. 智能结构控制发展综述. *地震工程与工程振动*, 1999, 19(2): 29~36
- 92 Bani-Hani K, Ghaboussi J. Neural networks for structural control of a Benchmark problem, active tendon system. Special Issue of a Benchmark Comparison. *Earth Engrg & Struct Dyn*, 1997,
- 93 Joghataie A, Ghaboussi J. Neural networks & fuzzy logic in structural control. In: Proc of First World Conf Struct Control, 1994 WP1, 21~30
- 94 Ghaboussi J. Some applications of neural networks in structural engineering. In: Proc Structures Congress, 1994 ASCE Atlanta Ga

- 95 Bani-Hani K, Ghaboussi J. Nonlinear structural control using neural networks. *J Engrg Mech*, 1998, 124(3): 319~327
- 96 Jamshid Ghaboussi, Abdolreza Joghataie. Active control of structures using neural networks. *J Engrg Mech*, 1995, 121(4): 555~567
- 97 Chen H M, Qi G Z, Yang J N. Neural network for structural control. *Computing in civil Engng ASCE*, 1995, 9(2): 168~176
- 98 Ankireddi S, Henry T, Yang Y. Neural networks for sensor fault correction in structural control. *J Struct Engrg*, 1999, 125(9): 1056~1064
- 99 Yu Tang. New algorithm for active structural control. *J Struct Engrg*, 1996, 122(9): 1081~1088
- 100 Venini P, Wen Y K. Hybrid vibration control of MDOF hysteretic structures with neural networks. In: Proc of First World Conf Struct Control, 1994, TA3, 53~62
- 101 Roorda J. Tendon control in tall structures. *J Struct Div ASCE*, 1975, 101(3): 505~521
- 102 Yang J N, Giannopoulos F. Active control of two-cable-stayed bridge. *J Engrg Mech*, 1979, 105(5): 799~810
- 103 Rohman M A, Leipholz H H E. Active control of flexible structures. *J Struct Div ASCE*, 1978, 104(8): 1251~1266
- 104 Rohman M A, Leipholz H H E. Active control tall buildings. *J Struct Engrg*, 1983, 109(3): 628~645
- 105 Yang J N, Giannopoulos F. Active tendon control of structures. *J Engrg Mech*, 1978, 104(3): 551~558
- 106 Almansa F, Rodellar J. Control systems of building structures by active cables. *J Struct Engrg*, 1989, 115(11): 2897~2913
- 107 Luco J E, Wong H L, Mita A. Active control of the seismic response of structures by combined use of base isolation and absorbing boundaries. *Earth Engrg & Struct Dyn*, 1992, 21(6): 525~541
- 108 桂国庆. 非比例阻尼结构体系的动力分析方法研究及其在工程中的应用. [博士学位论文]. 天津: 天津大学, 1992
- 109 方建桥. 结构控制与控制结构的优化理论和方法. [博士学位论文]. 武汉: 武汉工业大学, 1993
- 110 Wu W H, Smith H A. Efficient modal analysis for structures with soil-structure interaction. *Earth Engrg & Struct Dyn*, 1995, 24: 283~299
- 111 Wong H L, Luco J E. Structural control including soil-structure interaction effects. *J Engrg Mech*, 1991, 117(10): 2237~2250
- 112 Smith H A, Wu W H. Effective optimal structural control of soil-structure interaction systems. *Earth Engrg & Struct Dyn*, 1997, 26: 549~570
- 113 Smith H A, Wu W H, Borja R I. Structure control considering soil-structure interaction effects. *Earth Engrg & Struct Dyn*, 1994, 23: 609~626
- 114 宰金珉, 陈国兴等. 考虑土语结构相互作用效应的非线性结构主动抗震控制研究. 地震工程与工程振动, 1997, 17(4): 72~80
- 115 Basharkha M A, Yao J P. Reliability aspects of structural control. *Civ Eng Syst*, 1984, 1: 224~229
- 116 Rohman M A. Time-delay on actively damped structures. *J Engrg Mech*, 1987, 113(11): 1709~1719
- 117 Abdel-Mooty M, Roorda J. Time-delay compensation in active damping of structures. *J Engrg Mech*, 1991, 117(10): 2549~2570
- 118 Wonham W M, Johnson C D. Optimal Bang-bang control with quadratic performance index. *J Basic Eng Trans*, 1964, 107~115
- 119 Kalman R E, Betram J E. Control system analysis and design via the second method of Lyapunov (I). *J Basic Eng Trans*, 1960, 371~393
- 120 Lopez-Almansa F, Andrade R, Rodellar J, Reihorn M A. Modal predictive control of structures. 2: implementation. *J Engrg Mech ASCE*, 1994, 120(8): 1761~1772

REVIEW ON STRUCTURAL CONTROL METHOD

Sun Jianping Zhu Xi

Northern Jiaotong University, Beijing 100044, China

Abstract The basic concepts and basic theories of structural control in civil engineering are introduced in this paper. The development and applications of structural control are discussed, together with limitations and problems in the models that should be solved in the future.

Keywords structural control, applications of control, soil-structure-interaction, time delay