

# 建筑结构振动控制的发展动态

每 纲 沈亚鹏 王 健

西安交通大学工程力学系, 西安 710049

**摘 要** 介绍振动控制技术在建筑结构抗震设计中应用的发展过程, 综述智能控制在建筑结构抗震设计中的应用, 控制策略的非线性化分析等, 最后简略讨论了建筑结构振动控制的研究方向.

**关键词** 抗震设计, 智能控制, 控制策略, 非线性

## 1 引 言

大型建筑结构在使用中要承受各种动态载荷, 例如地震、大风、海啸、移动车辆、高速旋转或往复运动的机器. 这些外部扰动都要给建筑物带来极大的影响. 一个成功的建筑结构就要消除这些因素的影响, 保证建筑物的安全性、舒适性、经济性和美观性.

以往经济条件的制约, 可靠性的要求, 以及结构所承受动载的不确定性等等都是对设计者的巨大挑战. 在前二、三十年中有关建筑结构振动的控制方面的研究得到了长足的发展. 从理论到实验乃至实际结构都充分证明各种抗震设计的合理性. 近年来现代控制理论引入到大型建筑结构的振动控制中, 使得振动控制由传统的被动控制抗震设计发展到主动控制, 进一步到主动、被动控制相结合的混合控制方法, 直至神经网络控制系统的引入为结构的减振提供了更新、更有效的概念和方法.

## 2 建筑结构振动控制的智能化趋势

在过去几十年中, 设计标准侧重于安全性. 由于地震等破坏因素为偶然事件, 而主动控制要求控制元件长期且时刻保持可靠性; 而且主动控制系统还依赖于公共事业, 如电力系统的保证; 此外, 还有经济条件的限制. 所以被动控制为人们所推崇.

Martel (1929)<sup>[1]</sup> 和 Green (1935)<sup>[2]</sup> 提出在多层结构的底层去掉剪力墙, 从而得到“柔性底层”. 他们认为这种柔性底层类似于汽车中的悬挂系统, 可以在地震时隔离较大的动态剪切力. 这种概念后来被 Jacobsen (1938)<sup>[3]</sup>, Biot (1943)<sup>[4]</sup> 及 Fintel 和 Kahn (1969)<sup>[5]</sup> 等人采用. 虽然正如 Fintel 和 Kahn 所言, 这种结构在中震时可以起到隔离作用, 但在大震时较大的横向运动和倒塌的危险限制了其广泛应用.

近 20 年各种隔离系统的设计或多或少借鉴了柔性底层的概念. Crandall<sup>[6,7]</sup> 的一个简明

收稿日期: 1996-04-16, 修回日期: 1997-11-27

的方法是将建筑结构放在一个允许结构横向滑动的水平垫上. 通过滑动来消除横向剪切力. 剪切力的传递效果由界面摩擦系数控制. Matsushite 和 Izumi (1969)<sup>[8]</sup> 提出将建筑结构置于特殊处理的椭圆支撑上, 如果结构产生横向位移, 椭圆支撑随之滚动, 从而使结构重心上升, 由结构的重量产生横向回复力, 通过处理椭圆支撑形状得到非线性的横向控制力, 对结构的地震响应能起到较好的被动控制效果. 另一种运用于结构底层的方法是层合橡胶支撑垫, 由钢与橡胶作成的夹层支撑垫法向的压缩载荷刚度很大, 但对平行于它的剪切力来说却很软, 可以达到 100% 的整体剪切变形而不破坏, 这种由 Derham<sup>[9]</sup> 提出的用于能量吸收的结构模型得到了广泛的应用.

实际中常用于被动控制的基底隔离系统是: 铅芯橡胶隔离<sup>[10]</sup> 和摩擦型滑移隔离<sup>[11~13]</sup>. 前者在实际中较常用, 而后者呈现出潜在的优势. 在地震中摩擦型隔离允许建筑结构在基础上滑动, 从而有效地减少了破坏的可能性. 它通过几乎无摩擦的 Teflon 在不锈钢板上的滑移将建筑上部结构和基础之间的运动解耦, 有效地减少振动. 但是隔离结构的最大缺点在于其有效性与外部激振的频率有很大关系, 而且太大的动态力和整体稳定受到影响, 不适宜应用在高层或太重的结构中<sup>[14]</sup>.

随着时代的进步, 高层建筑成为一种趋势. 高层建筑结构不仅受地震等因素的影响, 而且结构上部常受到大风的影响而晃动, 所以设计标准既要考虑安全性, 还要考虑舒适性. 如何有效地减少这种影响呢? 因而主动控制逐渐为人们所注意. 它能够产生外部控制力, 有目的地减少地震、大风等给结构带来的振动. 50 年代 Kobori 在日本提出主动对地震响应进行控制的结构概念<sup>[15~17]</sup>. 在现代控制理论逐渐成熟之时, Yao<sup>[18]</sup> 在 1972 年首先将主动控制的概念引入到建筑工程的振动控制中, 他认为在环境外载变动的情况下, 结构的性能可以被控制在一定的范围内. 要保证安全性就要控制结构位移, 而为了保证舒适性则要控制结构的加速度变化. 主动控制系统由计算机控制的闭环回路组成, 它可以进行实时计算, 而计算所得的控制力是测量所得结构响应的函数. 所以主动控制系统可以根据外部载荷的变化而产生相应的控制力, 而且可随外载频率变动<sup>[14]</sup>. Masri<sup>[19]</sup> 在 1973 年试图通过反馈来提高辅助质量冲击阻尼器 (Auxiliary Mass Impact Damper) 的效率, 并且提出在地震中使用简单的脉冲作动器对结构进行在线减振的有效算法. 而且他证明通过去掉附加质量, 使用由反馈回路控制的触发器, 阻尼器在瞬时激励时的控制效果会大大提高<sup>[20]</sup>.

而在被动控制中还有一种利用附加质量块做阻尼器的可调节系统 TMD 可调质量阻尼器 (Tuned Mass Damper), Mcnamara 和 Luft<sup>[21,22]</sup> 等提出对 TMD 的近似公式和参数优化方法, 并且这种装置已被用于实际结构中. 纽约市约 279m 高的 Citicorp Building 的 59 层上就安置了一个 400t 的可调辅助质量阻尼器<sup>[23]</sup>. 在波士顿的 John Hancock Building<sup>[24]</sup> 和多伦多加拿大国家纪念塔<sup>[25]</sup> 上都修建了相同的装置. Chang 和 Soong<sup>[26]</sup> 对该系统改进, 引入主动控制的概念, 用优化方法计算控制力, 对主动可调质量阻尼器 (Active Tuned Mass Damper) 对结构控制的理论进行研究, 而且通过实验证明这种方法优于被动的 TMD 法.

在主动控制概念引入建筑结构中来的 20 年中, 研究者们做了大量的工作, 出现了几百篇文章. 几部关于土木工程结构控制的著作也对这方面做了相应的总结<sup>[27~29]</sup>. 在外部激励很大的情况下, 主动控制就能显示出其控制效率高的优点. 目前主要有三种主动控制机理, ATM (Active Tendon Mechanism)<sup>[30~32]</sup>, ATMDM (Active Tendon Mass Damper Mechanism)<sup>[26,33]</sup> 和 AAAM (Active Aerodynamic Appendage Mechanism)<sup>[34,35]</sup>. ATM 和 ATMDM 的应用如图 1(a) 和图 1(b) 中所示. 在图 1(a) 中高层建筑的控制是楼层之间的联结腱 (Tendon), 如果联结腱装置的作动器开始移动, 沿对角的联结腱之一会受拉力, 从而产生控制力抵消使楼层平行于联结腱移动的侧向力. 在图 1(b) 中 ATMDM 是放置在顶楼的一个质量块. 如果作动器工作会对建

筑物顶楼产生控制力，从而减小晃动。图 2 中 AAAM 是用来控制桥梁的振动响应，如果作动器移向右边，联结腱中的拉力会增加，在桥梁中间产生向上的控制力。

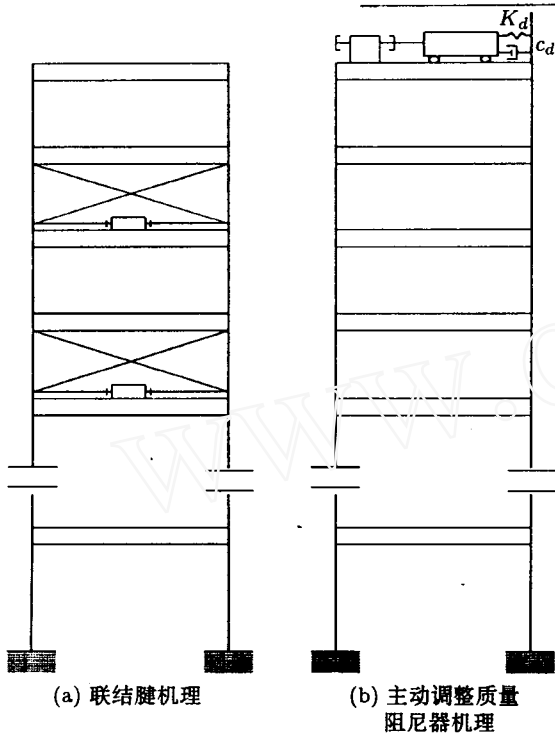


图 1 高层建筑的主动控制

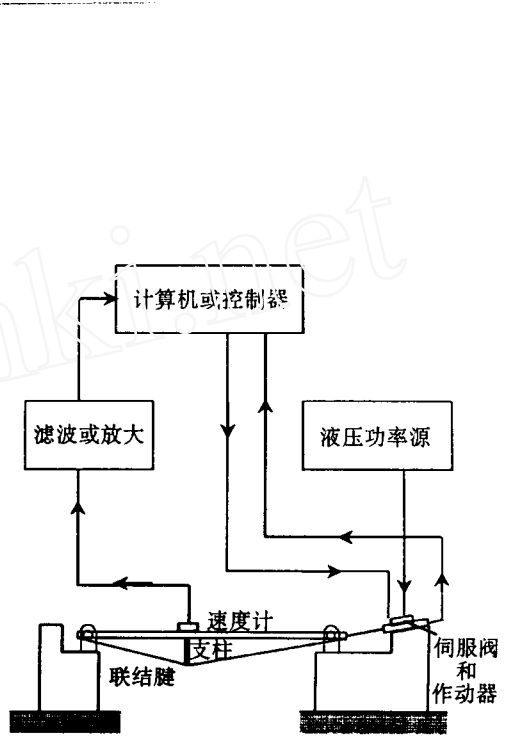


图 2 用主桁架联结腱机理控制的单跨桥

最近几年混合控制方法 (Hybrid Control) 也取得了较大的进展。混合的概念是建立在主动、被动控制的基础上，它利用主动和被动的各自优点达到更好的控制目的。例如在基底隔离和主动控制相结合的混合控制法中，基底隔离法用来减少由地面传递给建筑结构的运动，而主动控制既可用于减少建筑物的响应，也可用来保护隔离系统，还可以协助基底隔离法进一步将地面运动与建筑物的运动解耦。而由于基底隔离系统动态行为的非线性和非弹性，混合控制方法也就成为非线性或滞后系统，由此也产生了许多针对非线性或滞后系统的控制策略 [13,36~39]。

在过去的 10 年中，神经网络受到广泛研究和大力发展。神经网络受人脑结构和功能的启发，是一个庞大的并行计算模型。它由大量紧密相互关连的简单处理单元组成。每个单元可以由输入权网得到信号，通过计算接收信号的加权、评估函数，再由输出权网给其它处理单元输出信号。由神经网络得到的结果是其连接权的函数。神经网络具有学习能力。它所学得的信息存储于连接权中，是自适应的且可以随外部激励而改变。神经网络控制器与传递控制器的最大区别在于控制器获得控制能力的途径。传统控制是对控制方法进行设计从而能完成某一特殊的控制任务；而神经网络控制器可以学习控制任务，这种学习能力是对控制问题的最大贡献。由于神经网络控制器可以学习非常复杂的非线性映射，因此它不仅对线性问题，而且对非线性问题都可达到很好的控制效果。而且神经网络的学习能力使它成为适应性控制器，通过再学习它可以适应系统状态或控制要求的改变。

Ghaboussi 等 [40,41] 首先将神经网络控制方法引入到建筑结构的振动控制中。他提出一个神经网络仿真器作辅助的神经网络控制方法。首先训练神经网络仿真器，使它学会控制信号和结构响应之间的映射，然后在仿真器的帮助下训练神经网络控制器，训练后的神经网络控制器就可以进行控制。他的一系列工作证明神经网络控制方法是很有效的，也是将来的一个发展方

向。

在振动控制应用方面, 美国和日本都进行了相当数量的工作, 特别是日本在结构智能化控制方面的实例领先于别的国家。日本从 50 年代起开始这方面的研究工作。1989 AMD (Active Mass Driver) 系统第一次安装在一个实际的建筑结构上来减轻频繁地震和大风引起的振动, 这就是在日本东京建成的 Kyobashi Seiwa Building, 其有效性已被观测记录和模拟所证实<sup>[42]</sup>。其后十几个应用 AMD 和 HMD (Hybrid Mass Damper) 控制的实际结构在日本完成, 文 [43] 有详细的介绍。在中国南京电视塔的抗风振动控制也有很好的实际效果和应用价值<sup>[44]</sup>。

由上述我们可以看出, 建筑结构的振动控制随现代控制方法的不断发展而进步, 也随控制方法的智能化而逐步向智能控制结构和系统的方向迈进

### 3 控制策略的多样化

最常用的控制设计手段是线性化控制。LQR (Linear Quadratic Regulator) 方法通过使某一二次目标函数最小化, 得到对于某一确定系统的优化控制器。在某种意义上就是要使结构响应和控制力越小越好, 甚至趋于零。改变二次目标函数中对结构响应和控制力所加的权函数  $Q$  和  $R$ , 实际上是最小结构响应和最小控制力之间的一个折衷。

实际设计 LQR 是一个不断尝试的过程。在一定条件下设计一种性能指标, 从而得到优化控制力, 如果结构响应不能满足要求, 再重新设计性能指标直至设计达到要求。

对于随机激励与 LQR 相对应的优化控制方法是 LQG (Linear Quadratic Gaussian)。它由 LQR 和 Kalman-Bucy 优化滤波组合而成。Yang 和 Yao<sup>[45]</sup> 用 LQG 做控制器, 并将外部激励看作白噪声, 对其在结构控制中的应用进行研究。然而在实际设计情况, 地震信号不是白噪声, 而且地面加速度测量信息有助于结构控制设计。Yang 等针对这点提出三种相应的瞬时优化控制法 (Instantaneous Optimal Control)<sup>[46,47]</sup>, 即闭环、开环和闭开环控制。在每个时间步用线性二次规划 LQR 进行优化计算, 取时间为变量的二次性能指标函数  $J(t)$  为

$$J(t) = Z^T(t)QZ(t) + U^T(t)RU(t)$$

$Z(t)$  为状态向量,  $U(t)$  为控制力向量,  $Q, R$  为权函数矩阵。在运动方程的约束下对  $J(t)$  取最小值得到优化的状态向量和控制向量, 然而上述方法没有保证控制系统的稳定性。S. Baba<sup>[48,49]</sup> 提出了类同的方法, 称为数字优化控制 (Digital Optimal Control)。它是将时变系统在每一时间段进行优化控制。

严格说, 建筑结构是一个连续体, 有无限多个自由度。即使简化为离散系统, 一般说来仍有很多个自由度。无论从经济角度, 还是从数据处理、在线计算的角度, 对所有自由度状态的计算和反馈都是不实际的。只能对有限自由度状态进行控制反馈。一种方法是观测器和补偿器法。从有限的结构响应的测量, 通过观测器重建整个状态空间, 补偿器则对输出修正反馈, 形成控制力。补偿器还可以保证系统的稳定性。但由于观察器、补偿器本身及重建的复杂性使控制不利于实时进行。

另一种方法是直接输出反馈 (Direct Output Feedback)<sup>[50]</sup>。即测量的输出直接乘以与时间无关的反馈增益, 得到控制力。由于输出信息有限, 这种方法没有完全状态控制反馈效果好, 但简单方便, 容易在实际中执行。Chung<sup>[51]</sup> 在此基础上提出了优化直接输出反馈 (Optimal Direct Output Feedback), 对直接输出反馈的增益矩阵做了优化控制计算。他取

$$U(t) = Gy(t) = GDZ(t)$$

其中  $U(t)$  为控制力向量,  $G$  为增益矩阵,  $y(t)$  为传感输出向量,  $D$  为输出矩阵,  $Z(t)$  为状态向量. 取二次性能指标

$$J = \int_0^{\infty} [Z^T(t)QZ(t) + U^T(t)RU(t)]dt$$

通过求  $J$  的最小值可以得到优化的增益矩阵  $G$ , 从而使在线计算变得简便易行.

还有一种方法是模态控制. 假设系统是可离散的并且主要受少数几个模态的影响. 通过控制着几个模态以达到控制整个结构状态的目的. 这种方法忽略了其他模态, 因而易产生溢出, 影响其性能. 但仍不失为一种方便快速的算法. Almansa<sup>[52~54]</sup> 使用独立模态空间控制法对结构进行预测性控制. 预测性控制是在每个采样时刻  $k$  假设有一时间间隔  $[k, k + \lambda]$ , 系统的动态行为可由某一数学模型 (预测性模型) 推算出, 使  $k + \lambda + d$  时刻某一性能指标最小而求得控制信号,  $d$  为预估的时间滞后. 在模态空间控制中, 每个模态可以独立地由某一特定控制策略控制, 因此预测控制的参数选择可以根据模态的不同而不同.

在主动控制中, 控制力的量级较大, 很难在较长时间内维持; 而且非线性和时变行为使模态控制法较难应用. Masri<sup>[55]</sup> 证明可利用某一点位移的能量密度谱与地震谱非常接近的情况选取一组力脉冲对结构实现较好的控制. Masri 研究的脉冲控制法中脉冲的大小由响应速度的一个经验公式表达<sup>[56]</sup>. 另一种优化脉冲法中, 脉冲大小通过优化某一目标函数而得到<sup>[57]</sup>. 该方法的特点是只需知道局部点的位移和速度就可以对整个结构实现控制, 但通常一些重要参数如脉冲高度和形状要受到控制装置的限制. 如果控制高度太小, 控制效果就会极端微弱, 脉冲高度过大, 系统响应就会不稳定.

Chang 等 1995 年<sup>[33]</sup> 提出闭环全反馈控制算法, 控制力由结构响应的位移、速度和加速度反馈得到. 他们比较了主动调节质量阻尼器 (ATMD) 在单自由度系统中使用速度反馈和全反馈的效果. 结果表明在速度反馈下 ATMD 的控制效果取决于被动控制系统的性能, 而且在控制系统参数得到优化后并不能减少系统的响应. 而在全反馈优化参数的情况下, 结构的位移响应得到较大的减小, 即在全反馈中用较小的控制力就可使结构减少相同程度的位移. 他所说的速度反馈即

$$U(t) = g_0 \dot{X}_0(t) - g_1 \dot{X}_1(t)$$

$g_0, g_1$  为速度反馈增益, 下标 0,1 分别表示被控结构和质量块. 全反馈为

$$U(t) = m_2(\ddot{X}_0(t) - \ddot{X}_1(t)) + c_2(\dot{X}_0(t) - \dot{X}_1(t)) + k_2(X_0(t) - X_1(t))$$

反馈增益  $m_2, c_2, k_2$  相当于控制力的等效质量、阻尼、刚度常数.

许多控制的设计都是建立在时域分析的基础上, 然而在优化控制中性能指标权矩阵的选取是比较困难的. Suhardjo 和 Spencer<sup>[58,59]</sup> 提出在频域中进行优化控制的方法. 众所周知结构乃至激励的动力特性常由频域函数来表示. 动力灾害例如地震、强风, 通常由频域的能量谱密度函数表达为随机过程. 频域优化控制使得我们能够直接就这些结构模型进行处理. 也允许设计者就某一范围的扰动进行控制或除去高频干扰项. 近年来频域方法主要集中在  $H_2$  法和  $H_{\infty}$  法<sup>[60,61,58]</sup>. 对于图 3 将传递函数矩阵  $p$  写为:

$$p = \begin{bmatrix} p_{zd} & p_{zu} \\ p_{yd} & p_{yu} \end{bmatrix}, \text{ 则 } d \text{ 到 } z \text{ 的整体传递函数为}$$

$$H_{zd} = p_{zd} + p_{zu}k(I - p_{yu}k)^{-1}p_{yd}$$

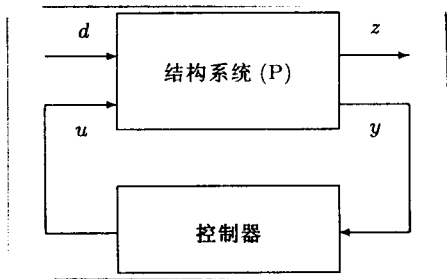


图 3

其中  $k$  为反馈增益系数.  $H_2$  控制方法就是要找一个稳定的控制能够使  $H_2$  的范数  $\|H_{zd}\|_2$  最小. 而  $H_\infty$  法则是要求使  $H_\infty$  的范数  $\|H_{zd}\|_\infty$  最小.  $H_2$  和  $H_\infty$  的范数定义为

$$\|H\|_2 = \sqrt{\text{trac} \left[ \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} H(j\omega)H^*(j\omega)d\omega \right]}$$

$$\|H\|_\infty = \sup_{\text{Re}(s)>0} \bar{\sigma}\{[H(s)]\}.$$

sup 为上确界,  $\text{Re}(s)$  为  $s$  的实部,  $\bar{\sigma}$  是最大奇异性矢量因子. 传递函数矩阵  $H_\infty$  的范数代表传递函数中的最大均方根, 通常用于最坏情况的控制设计, 对于非确定性设计非常有用.

以前大量的工作集中于线性模型振动控制的研究上, 对实际结构做了许多简化处理, 而在实际中由于建筑结构本身材料的非线性性、在地震中建筑结构所表现的弹塑性以及建筑结构中某些非线性构件的影响, 另外混合控制法的使用引入了被动控制中基底结构的非线性, 使得实际结构系统都是非线性问题. 非线性系统的复杂性使研究者在近 10 年才开始对其展开了一些研究.

Yang 在非线性和非线性方面做了一些工作, 除上述动态线性化方法外, 他主要对前述优化控制法从线性系统推广到非线性系统. 1992 年 Yang<sup>[62,63]</sup> 在混合控制方法中应用非线性原理考虑滞后效应进行了深入的讨论. 对一般的非线性或滞后系统运动方程为

$$M\ddot{X}(t) + F_D[\dot{X}(t)] + F_S[X(t)] = -M\xi\ddot{X}_0(t) + HU(t)$$

$M$  为质量矩阵,  $X(t)$  为位移向量,  $F_D[\dot{X}(t)]$  假设为  $\dot{X}(t)$  函数的非线性阻尼力向量,  $F_S[X(t)]$  假设为  $X(t)$  函数的非线性回复控制力向量,  $H$  为控制器位置向量,  $U(t)$  为控制力向量,  $\xi = [1, 1, \dots, 1]$ . 引入状态向量  $Z(t) = \begin{bmatrix} X(t) \\ \dot{X}(t) \end{bmatrix}$ . 运动方程又可写为

$$\dot{Z}(t) = g[Z(t)] + BU(t) + W\ddot{X}_0(t)$$

$$g[Z(t)] = \begin{bmatrix} \dot{X}(t) \\ -M^{-1}\{F_D[\dot{X}(t)] + F_S[X(t)]\} \end{bmatrix},$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ M^{-1}H \end{bmatrix}, \quad W = \begin{bmatrix} 0 \\ -\xi \end{bmatrix}$$

在运动方程的约束下对二次性能指标  $J(t) = Z^T(t)QZ(t) + U^T(t)RU(t)$  取最小值, 得到状态向量和控制向量. 在计算底层隔离结构加主动控制的混合系统的模型中, 阻尼取线性, 非线性回复力取为

$$F_{Si}(x_i) = \alpha_i k_i x_i + (1 - \alpha_i) k_i D_{yi} v_i$$

其中  $x_i$  为楼层变形位移,  $k_i$  为弹性刚度,  $\alpha_i$  为前后弯曲刚度比,  $D_{yi}$  为常弯曲变形,  $v_i$  为描述滞后的无量纲变量, 且  $\dot{v}_i = f(\dot{x}_i, v_i)$ ,  $|v_i| \leq 1$ .

一般的优化理论中性能指标只包含结构变形和速度等, 而不考虑时间滞后和加速度. 实际上时间滞后现象主要是由作动器不能及时按反馈信号运作而引起的. 而且在混合控制法中, 由于被动控制中底层支撑行为的非线性及整体结构的滞后都使控制变得复杂化. Roffoei<sup>[64]</sup> 等在二次性能指标中考虑了加速度项. Yang<sup>[65]</sup> 在二次性能指标  $J$  中考虑到加速度和时间滞后的影响, 对结构进行优化控制. 对线性控制系统, Yang 取性能指标为

$$J = \int_0^{t_f} [Z^T(t)QZ(t) + U^T(t)RU(t) + \ddot{X}_a^T(t)Q_a\ddot{X}_a(t) + q^T(t)\bar{R}q(t)]dt$$

$Q, Q_a$  分别为  $(2n \times 2n), (n \times n)$  阶对称半正定权矩阵,  $R, \bar{R}$  为  $(r \times r)$  阶对称正定权矩阵,  $q(t)$  为  $r$  阶反馈信号向量, 与作动器动态性能有关,  $\ddot{X}_a(t)$  为加速度向量. 对非线性系统, 不考虑作动器动态性能的性能指标为

$$J = \int_0^{t_f} [g^T[Z(t)]Qg[Z(t)] + \ddot{X}_a^T(t)Q_a\ddot{X}_a(t) + U^T(t)RU(t)]dt$$

Yang 分别研究了主动支撑控制系统 (Active Bracing System)、主动质量阻尼系统 (Active Mass Damper) 和底层隔离混合控制系统的非线性控制问题. 表明优化控制算法在考虑时间滞后后控制效果更好, 而且易于在线操作和实际应用. Yang 的讨论还表明考虑作动器动态性能后, 由于作动器响应引起的控制性能的下降、稳定性问题都被解决. 通过考虑加速度的影响可以减少某一特殊层或部分的加速度响应, 保证舒适性. 非线性控制方法的结果比线性控制法更接近实际, 也更有效. 而且 Yang<sup>[66]</sup> 认为在控制反馈中使用速度和加速度反馈较传统的位移和速度反馈理想. 因为在地震时地面建筑结构都在移动, 位移响应的测量没有一个绝对的参考系; 由速度响应数值分析得到的位移有积累误差; 另外加速度响应可以很容易地从加速度传感器得到.

另一种非线性控制方法是动态线性化 (Dynamic Linearization), 主要应用于摩擦型滑移隔离系统<sup>[67]</sup>. Yang<sup>[39]</sup> 在 1994 年用该方法对滑移隔离建筑的混合控制进行分析. 该方法的特点是对控制向量进行合成, 使结构的动态响应与某一特定模型的动态响应吻合, 而该模型为稳定的线性系统, 其动态响应是已知的, 从而可以得到相应的控制力进行控制. 另外 Suhardjo<sup>[68]</sup> 针对非线性系统提出多项式控制法, 但该法的主要缺点是高阶控制计算增益矩阵非常繁复.

Barbat<sup>[69]</sup> 在 1995 年对非线性底层隔离结构用混合法控制. 他所用的模型是将某一不确定系统分为互相耦合的子结构, 主动反馈控制作用于其中之一. 并将结构、隔离部分、激励的不确定性考虑在内, 而且注意到隔离部分的非线性行为, 提出一种适应性控制策略, 既不要求预知系统参数, 也不要预知外部激励. 只要满足一定的假设该控制系统就可以保证其稳定性.

另外, Utkin, Young<sup>[70,71]</sup> 等提出 SMC (Sliding-Mode Control) 或 VSS (Variable Structure System) 理论用来对不确定性非线性系统做鲁棒性控制. SMC 用于线性和非线性系统或 Hysteretic 结构的地震响应控制<sup>[72,73]</sup>, 而且可用于参数控制<sup>[74]</sup>. 如主动变阻尼器 (Active Variable Damper)<sup>[75]</sup> 或主动变刚度器 (Active Variable Stiffness)<sup>[76]</sup>.

#### 4 其他方面的研究

在大型建筑结构的减振控制研究中还有许多其他方面的研究, 如建模、稳定性分析、控制器件的设计.

Wang<sup>[77]</sup> 要考虑控制器的参数如液压作动器的容量、能量消耗、液体的流速对控制效果的影响, 这就要求用一个具有代表性的简单模型. 他采用连续体模型, 将整个结构看成连续体. 假设建筑结构为剪切弯曲梁, 用 Euler-Bernouli 理论进行分析. 该方法主要用于结构形状和材料性能较规则的情况. 作为一个基本的分析手段它是完全能说明问题的, 特别是对于动态行为的分析.

一般的稳定性分析都在控制策略的设计过程中进行讨论. Zhang 和 Yang<sup>[78]</sup> 专门对时间滞后引起的不稳定进行了讨论. 以往的研究表明控制系统的不稳定性通常是由时间滞后引起的, 时间滞后由在线计算引起, 而更主要是由作动器的控制反应落后引起的. 以李雅普诺夫稳定性概念为基础, 他们用 D 细分方法 (D-subdivision Method) 得到了单自由度主动支撑控制系统的稳定和不确定区域. 讨论表明时间滞后越短稳定区域就越大.

另外在被动控制的器件方面也有所发展. 在地震时, 阻尼器对桥梁的减振起重要作用. 阻尼器的核心在于阻尼材料能量耗散的机制. Kawashima<sup>[79]</sup> 在阻尼器的基础上提出一种可变阻

尼器, 用来控制桥梁的地震响应. 该阻尼器有以下特点:

(1) 在车辆、风等引起的小振动中阻尼系数很大, 阻尼器起阻尼制动器的作用;

(2) 在桥的振动响应超过一定值时, 如地震引起的响应, 应减小阻尼系数以达到最大的能力吸收耗散;

(3) 为阻止在地震中振幅过大, 就要求较大的阻尼系数来充当制动器, 通常阻尼系数光滑逐渐增加的阻尼力是非常有效的. 其阻尼系数变化如图 4. Kawashima 从理论和实验两方面证实了该系统的有效性.

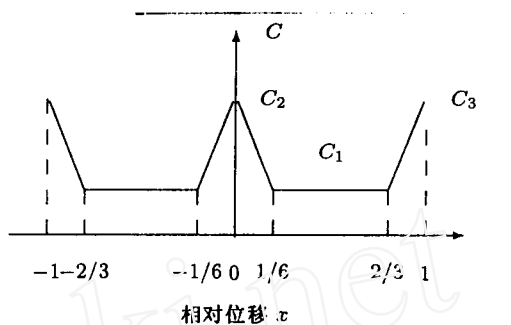


图 4

Olgac 等<sup>[80,81]</sup>提出一个新概念: 滞后谐振器 (Delayed-resonator), 可以用做主动可调吸振器. 传统的吸振器只在某一固定窄带频率范围工作时才有效, 在其他范围控制性能迅速下降. 他提出的滞后谐振器不仅能完全消除共振时结构的振动, 还能随激励频率的改变而调整, 如果不考虑硬件的限制, 其有效频率范围是半无限大的. 它能够实时调节消除结构的振动.

其它方面: 用 Electro-Rheological 材料做成的阻尼器已在实验中得以应用<sup>[82]</sup>. 这种材料具有随电场变化而几乎同时改变其材料特性的属性, 这种快速变化可以很好地应用于土木建筑的振动控制中<sup>[83]</sup>. Piezo-Electric 作动器也是一种新的引起广泛注意的控制器. 它利用压电效应产生控制力. Shape Memory Alloys 的相变特性也能对结构提供主动或被动控制. 光纤传感器作为传感器在土木结构中有很好的前景. 过去 20 年中光纤传感器一直在航空航天及医学领域得以广泛应用. 其主要优点是抗电磁干扰、长距离测量及传输、抗腐蚀及精度高等<sup>[84~87]</sup>.

## 5 结 论

综上所述, 近 20 年建筑结构的抗震、减振设计概念经历了很大的飞跃. 由被动控制发展到主动控制, 进一步向智能化的方向发展, 研究对象也从以前的理想状态向实际结构靠近. 非线性模型、滞后效应、不确定性因素都逐步被考虑在内. 计算控制过程从离线、静态、被动控制向在线、动态、实时、主动控制方向发展.

而目前主动控制在建筑结构振动控制中应用的主要困难在于: 需要的主动控制力的量级非常大, 很难保证随时产生相当于建筑结构自身重量这一量级的控制力; 主动控制系统依赖于公共事业的可靠性, 这一点在地震时难以保证; 主动控制要求测量和控制在线实时进行, 这样就对控制系统本身提出了较高要求. 例如, 控制算法的简便易行, 控制系统的滞后效应, 结构模型的合理假设等等.

所以建筑结构振动控制方面还有许多工作要做, 主要的研究方向有: 建立有效、准确、更符合实际的建筑结构的数学模型; 参数识别技术; 模态的消减、控制器与剩余模态的相互作用; 传感器、作动器的分布位置; 适应于在线、实时计算, 并且能考虑到实际的非线性滞后效应、非确定性因素的控制策略、手段和算法; 控制策略、手段和算法的有效性和稳定性分析; 功能强大的控制器的设计等等. 总之, 建筑结构振动控制的研究具有极大的研究价值和潜在的应用前景.

## 参 考 文 献

- 1 Martel R R. The effects of earthquakes on buildings with a flexible first story. *Bull of the Seismological Soc of America*, 1929, 19(3)



- 2 Green N B. Flexible first-story construction for earthquake resistance. *Trans, ASCE*, 1935, 100: 645~674
- 3 Jacobsen L S. Effects of a flexible first-story in a building located on vibrating ground. In: Timoshenko S ed. 60th Anniversary Volume. New York: The Macmillan Co, 1938
- 4 Biot M. Analytical and experimental methods in engineering seismology. *Trans ASCE*, 1943, 108: 365~408
- 5 Fintel M, Khan F R. Shock absorbing soft story concept for multi-story earthquake structure. *ACI Journal*, 1969, Title No.66~29
- 6 Crandall S H, Lee S S, Williams J H Jr. Accumulated slip of a friction controlled mass excited by earthquake motions. *J of Appl Mech*, 1974, 41(4): 1094~1098
- 7 Crandall S H, Lee S S. Biaxial slip of a mass on a foundation subjected to earthquake motions. *Ingenieur-Archiv*, 1976, 45: 361~370
- 8 Matsushita K, Izumi M. Studies on mechanisms to decrease earthquake force applied to buildings. In: Proc 4th World Conf on Earthquake Engrg, B-3, 1969. 117~129
- 9 Derham C J, et al. Natural rubber foundation bearings for earthquakes protection-experimental results. *Natural Rubber Technology*, 1977, 8(3): 41~61
- 10 Kelly J M. Aseismic base isolation: review and bibliography. *J Soil Dyn Earthquake Engrg*, 1986, 5(3): 202~216
- 11 Mohka A, Constantinou M C, Reinhorn A. Teflon bearings in base isolation. I: testing. *J Struct Engrg, ASCE*, 1990, 116(2): 438~454
- 12 Constantinou M C, et al. Teflon bearings in base isolation. II: modeling. *J Struct Engrg, ASCE*, 1990, 116(2): 455~474
- 13 Nagarajaiah S M, Riley M A, Reinhorn A M. Hybrid control of sliding isolated bridges. *J Engrg Mech ASCE*, 1993, 119(11): 2317~2332
- 14 Barbat A H, Rodellar J, et al. Active control of nonlinear base-isolated buildings. *J of Engrg Mech, ASCE*, 1995, 121(6): 676~684
- 15 Kobori T, Minai R. Nonlinear structural vibration subject to earthquake loading, Artificial nonlinear response process. *J Struct Contr Eng Trans AIJ*, 1956, 52: 41~48
- 16 Kobori T, Minai R. Analytical study on active seismic. *Response Control, J Struct Contr Eng Trans AIJ*, 1960, (66): 257~260
- 17 Kobori T, Minai R. Condition for active seismic response control. *Response Control, J Struct Contr Eng Trans AIJ*, 1960, (66): 253~256
- 18 Yao J T P. Concept of structure control. *J Struct Div, ASCE*, 1972, 98(7): 1567~1574
- 19 Masri S F. Steady-state response of a multidegree system with an impact damper. *J Appl Mech, ASME*, 1973, 40: 127~132
- 20 Masri S F, Bekey G A, Caughey T K. Optimum pulse control of flexible structures. *J Appl Mech, ASME*, 1981, 48: 619~626
- 21 Mcnamara R J. Tuned mass dampers for building. *J Struct Div, ASCE*, 1977, 103(9): 1785~1798
- 22 Luft R W. Optimal tuned mass dampers for building. *J Struct Div, ASCE*, 1979, 105(12): 2766~2772
- 23 Peterson N R. Design of large scale tuned mass dampers. In: Leipholz H H E, ed. Structural Control. North Holland SM Publishing Co, 1979. 581~596
- 24 Zuk W. The past and future of active structure control systems. In: Leipholz H H E ed. Structural Control, North Holland SM Publishing Co, 1979. 779~794
- 25 Tucker J B. Superskyscrapers: Aiming for 200 stories. *High Technology*, 1985, 5(1): 50~63
- 26 Chang J C H, Soong T T. Structural control using active tuned mass damper. *J Engrg Mech Div, ASCE*, 1980, 106(6): 1091~1098
- 27 Soong T T. Active Structural Control. Burnt Mill, Harlow, England: Longman Scientific & Technical, 1990
- 28 Leipholz H H E, Abdel-Rohman M. Control of Structures. Amsterdam: Martinus Nijhoff, 1986
- 29 Meirovitch L. Dynamics and Control of Structures. New York: John Wiley & Sons, 1990
- 30 Abdel-Rohman M, Leipholz H H E. Active control of flexible structures. *Journal of the structure Division, ASCE*, 1978, 104(ST8): 1251~1266
- 31 Roorda J. Tendon control in tall building. *J Struct Div, ASCE*, (ST3), 1975: 505~521
- 32 Yang J N, Giannopoulos F. Active tendon control of structures. *J Engrg Mech Div, ASCE*, 1979, 105(EM4): 677~694
- 33 Chang C C, Yang T Y H. Control of building using active tuned mass dampers. *J Engrg Mech*, 1995, 121(3): 355~365
- 34 Abdel R M. Optimal control of tall building by appendages. *J Struct Engrg, ASCE*, 1984, 110(5): 937~947
- 35 Soong T T, Skinner G T. Experimental study of active structural control. *J Engrg Mech Div, ASCE*, 1981, 107(EM6): 1057~1067
- 36 Yang J N, Li Z, Liu S C. Stable controllers for instantaneous optimal control algorithm. *J Engrg Mech, ASCE*, 1992, 118(8): 1612~1630
- 37 Yang J N, Li Z, Liu S C. Control of hysteretic system using velocity and acceleration feedbacks. *J Engrg Mech*, 1992, 118(11): 2227~2245

- 38 Kelly J M, Leitmann G, Soldatos A G. Robust control of base-isolated structures under earthquake excitation. *J Optimization Theory Appl*, 1987, 53(2): 159~180
- 39 Yang J N, Li Z, Wu J C. Control of sliding-isolated buildings using dynamic linearization. *Engrg Struct*, 1994, 16(6): 437~444
- 40 Ghaboussi J, Garrett J H, Wu X. Knowledge-based modeling of material behavior with neural networks. *J Engrg Mech, ASCE*, 1991, 117(1): 132~153
- 41 Ghaboussi J. Structure control using neural networks. In: ASCE Specialty Conf on Probabilistic Mech and Struc and Geotech Reliability, 1992
- 42 Kobori T et al. Seismic-response-controlled structure with active mass driver system. part-1, design and part-2 verification. *Earthquake Eng & Struc Dyn*, 1991, 20: 133~166
- 43 Kobori T et al. Further direction on research and development of seismic-response-controlled structure. First World conference on Structural Control. Vol 1, Panel-19-31. Los Angeles, CA, 1994
- 44 Cheng W R, Qu W L, Li A. Hybrid vibration control of Nanjing TV tower under wind excitation. First World Conference on Structural Control. Vol 1, WP2-32-41, Los Angeles, CA, 1994
- 45 Yang J N, Yao J T P. Formulation of structural control. Technical report. CE-STR-74-2. School of Engineering Purdue University, 1974
- 46 Yang J N, Akbarpour A, Ghaemmaghani P. Optimal control algorithms for earthquake excited building structures. In: Leipholz H H E ed. Structural Control Proc 2nd Int Symp on Struct Control. Amsterdam: The Netherlands Martinus Nijhoff, 1985. 748~761
- 47 Yang J N, Akbarpour A, Ghaemmaghani P. New optimal control algorithms for structure control. *J Engrg Mech, ASCE*, 1987, 113(6): 1369~1386
- 48 Baba S, Ninoniya K, Kajita T. Servo-strengthening system in largescale suspension bridge. In: Proc 13th Int Symp on Modelling and Simulation, Lugano, Italy, 1985. 341~344
- 49 Baba S, Ninoniya K, Hayashi Y. Active optimal control of structure using optimal observer. *J Engrg Mech, ASCE*, 1989, 115(11): 2564~2581
- 50 Balas M J. Direct output feedback control of large space structures. *J Astronautical Sci*, 1979, 27: 157~180
- 51 Chung L L, Lin C C, Chu S Y. Optimal direct output feedback of structure control. *J Engrg Mech*, 1993, 119(11): 2157~2173
- 52 López-Almandsa F, Rodellar J. Control system of building structures by active cables. *J Struct Engrg, ASCE*, 1989, 115(11): 2897~2913
- 53 López-Almandsa F, Andrade R, Rodellar J, Reinhorn A M. Modal predictive control of structures I: Formulation. *J Engrg Mech, ASCE*, 1994, 120(8): 1743~1760
- 54 López-Almandsa F, Andrade R, Rodellar J, Reinhorn A M. Modal predictive control of structures II: Implementation. *J Engrg Mech, ASCE*, 1994, 120(8): 1761~1772
- 55 Masri S F, Bekey G A, Safford F B. Optimum response simulation of multidegree systems by pulse excitation. *J Dyn Sys Meas and Control, ASME*, 1975, 46~52
- 56 Masri S F, Bekey G A, Caughy T K. On-line control of nonlinear flexible structures. *J Applied Mechanics*, 1981, 49: 871~884
- 57 Masri S F, Bekey G A, Caughy T K. On-line pulse control of flexible structures. *J Applied Mechanics*, 1981, 48: 619~626
- 58 Suhardjo J, Spencer B F Jr, Kareem A. Frequency domain optimal control of wind- excited building. *J Engrg Mech, ASCE*, 1992, 118(12): 2463~2481,
- 59 Spencer B F Jr, Suhardjo J, Sain M K. Frequency domain optimal control strategies for aseismic protection. *J Engrg Mech, ASCE*, 1994, 120(1): 135~158
- 60 Doyle J C, Glover K, Khargonekar P, Francis B. State-space solutions to standard  $H_2$  and  $H_\infty$  control problems. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1989, 34: 831~847
- 61 Suhardjo J, Spencer B F Jr, Kareem A. Active control of wind excited buildings: a frequency domain based design approach. *J Wind Eng Ind Aerodyn*, 1992, 41~44: 294~304
- 62 Yang J N, Li Z, Danielians A, Liu S C. Aseismic hybrid control of nonlinear and hysteretic structures I. *J Engrg Mech*, 1992, 118(7): 1423~1440
- 63 Yang J N, Li Z, Danielians A, Liu S C. Aseismic hybrid control of nonlinear and hysteretic structures II. *J Engrg Mech*, 1992, 118(7): 1441~1456
- 64 Rofooei F R. Optimal control of structure with acceleration, velocity and displacement feedback. *J Eng Mech*, 1993, 119(10): 1993-2012
- 65 Yang J N, Li Z, Vongchavalitkul S. Generalization of optimal control theory: linear and nonlinear control. *J Engrg Mech*, 1994, 120(2): 266~283
- 66 Yang J N, Li Z, Liu S C. Control of hysteretic system using velocity and acceleration feedbacks. *J Engrg Mech*, 1992, 118(11)
- 67 Brogan W L. Modern Control Theory. 3rd Ed. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N J, 1991
- 68 Suhardjo J. Nonlinear optimal control of a duffing system. *Int J Nonlinear Mech*, 1992, 27(2): 157~172

- 69 Barbat A H, Rodellar J, Ryan E P, Molinares N. Active control of nonlinear base-isolated building. *J Engrg Mech*, 1995, 121(6): 676~684
- 70 Utkin V I. Sliding Modes in Control Optimization. New York: Springer-verleg, 1992
- 71 Young K D (edtier). Variable Structure Control for Robotics and Aerospace Applications. New York: Elsevier, 1993
- 72 Yang J N, Agrawal A K, Wu J C. Sliding mode control for structure subjected to seismic loads. In: First World Conference on Structural Control, Vol.1, Wa1-13-22, 1994
- 73 Krishman R, Singh M P, Nerres A C. Mitigation of wind and earthquake effects on structures by sliding mode control. In: First World Conference on Structural Control, Vol.1, Wa2-13-22, 1994
- 74 Yang J N, Wu J C, Hsu S Y. Parametric Control of Seismic Excited Structures. In: First World Conference on Structural Control, Vol.1, Wpl-88-97, Los Angeles, CA 1994
- 75 Yang J N, Li Z, Wu J C, Young. Adiscontinuous control method for civil engineering structures. In: Proc 9th VPI&SV Symposium on Dynamics and Control of Large Structures, VA, 1993. 167~180
- 76 Yang J N, Li Z, Wu J C. Control of seismic excited buildings using active variable stiffness systems. In: Proc 1994 American Control Conference, 1994. 1083~1088
- 77 Wang Y P, Reinhorn A M, Soong T T. Development of design spectra for actively controlled wall-frame building. *J Engrg Mech*, 1992, 118(6):
- 78 Zhang L, Yang C Y, Chajes M J, Cheng A H D. Stability of active-tendon structural control with time delay. *J Engrg Mech*, 1993, 119(5): 1017~1024
- 79 Kawashima K, Unjoh S. Seismic response control of bridge by variable dampers. *J Stuct Engrg*, 1994, 120(9): 2583~2601
- 80 Olgac N, Holm-Hansen B. A novel active vibration absorption technique: Delayed resonator. *J Sound and Vibration*, 1994, 176(1): 93~104
- 81 Olgac N, Holm-Hansen B. Design considerations for delayed-resonator vibration absorbers. *J Engrg Mech*, 1995, 121(1): 80~89
- 82 Ehergott R C, Massri S F. Use of Electro-rheological materials in intelligent systems. In: Proc US/Italy/Japan Workshop on Structural Control and Intelligent Systems. Sorrento, Italy, 1992. 87~100
- 83 Housner G W, Soong T T, Masri S F. Second generation of active structural control in civil engineering. In: First World Conference on Structural Control, Vol.1, Panel1-3-18, 1994
- 84 Wanser K H, Voss K F, Griffiths R W. Distributed fiber optic sensors for structural health and vibration monitoring using optical time domain. In: First World Conference on Structural Control. Vol.1, NA3-3-12, 1994
- 85 每纲, 沈亚鹏, 王晓明. 光纤传感器在悬臂结构中应用的分析. *实验力学*, 1996, 11(3): 293~302
- 86 Devries M, Murphy K A, Poland S, Arya V, Claus R O, Massri S F. Optical fiber sensors for civil structure applications: A comparative Evaluation. In: First World Conference on Structural Control. Vol.1, WA3-23-29, 1994
- 87 Lyori V, Suopajarvi P, Nissila S, Kopola H, Suri H. Measurement of stress in a road structure using optical fiber sensors. In: First World Conference on Structural Control. Vol.1, WA3-40-48, 1994

## A REVIEW ON VIBRATION CONTROL OF CIVIL STRUCTURE

Mei Gang   Shen Yapeng   Wang Jian

Department of Engineering Mechnics, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049

**Abstract** This paper discusses the development of vibration control technique used in aseismic control of structures. The intelligent control methods used in aseismic control design and analysis of the nonlinear control strategy are reviewed. Finally some potential problems are proposed briefly.

**Keywords** aseismic design, intelligent control, control strategy, nonlinear