

# 工程抗震的新领域

## ——结构振动控制

张敏政

(中国哈尔滨 150080 国家地震局工程力学研究所)

### 摘 要

本文叙述了建筑结构振动控制的起源和设想,介绍了控制理论在建筑结构抗震中的应用和当前振动控制应用开发研究的现状,最后提出了该领域研究的前景展望和有待解决的主要理论和技术课题。

**关键词** 主动控制;被动控制;隔震

### 1. 前 言

社会经济的迅速发展对建筑结构的安全性、适用性和舒适性提出了日益增高的要求。由于新型高、长结构的建造并辅之以办公自动化的趋势,一座重要建筑破坏所引起的损失,将大大超出建筑物的自身价值,而对社会经济生活产生重大影响。面对当今社会对建筑结构提出的更新、更高的要求,按现行抗震规范设计建造的房屋和构筑物则显露出某些局限性,这主要表现为:

(1)传统建筑材料(砖、石、木、混凝土和钢材)的物理性能,难以满足设计者对结构构件的强度、变形和耗能能力的新的更高的要求;

(2)按抗震规范设计的建筑一旦建成,其抗震能力就被固定在预先规定的设防水准上;

(3)因而,在遭遇超过设防水准的地震袭击时,建筑的安全性仍令人担心;

(4)极大提高抗震设防水准又将增加社会的经济负担,造成社会财富的浪费。

在人们对建筑结构的强度和延性、对建筑的安全性和经济性进行权衡,寻求更适当更满意的抗震设计的同时,工程师们也产生了对建筑结构实施隔震和减振技术措施的设想,并于本世纪 70 年代提出了建筑结构振动控制的概念(Yao, 1972)。目前,广义的建筑振动控制涉及如下构想:(1)减少输入上部结构的地震动幅度并改变其频谱特性,(2)利用设于建筑物上(或相邻建筑之间)的附加装置改变体系的动力特性、耗散能量,减低结构体系的

\* 1992 年 8 月 17 日收到本文初稿,1992 年 11 月 21 日决定采用。

地震反应。(3)结构体系在地震中改变自身的刚度、阻尼和变形能力,以求避免类共振现象发生并耗散地震能量。(4)通过控制装置利用外界能源对结构施加控制力,使结构地震反应满足预定要求。

显然,上述设想的实现已超出了传统抗震设计的范畴,它以实施隔震、被动控制、半主动控制和主动控制为目标,为建筑结构的防震减灾开辟了新的技术途径。

2. 结构主动控制原理

结构主动控制需监测地震动和结构地震反应,计算控制力并借助作动装置施予结构,使结构地震反应满足预定要求(见图 1)。受控结构体系的运动方程为

$$M\ddot{X} + C\dot{X} + KX = -M\ddot{X}_g + U \tag{1}$$

式中,  $M, C, K$  分别为体系的质量、阻尼和刚度矩阵;  $X, \dot{X}$  和  $\ddot{X}$  分别为结构体系地震反应的位移、速度和加速度矢量;  $\ddot{X}_g$  为输入地震动加速度,  $U$  为控制力矢量, 控制力是结构反应和地震动输入的函数, 假设取为如下形式:

$$U = M_1\ddot{X} + C_1\dot{X} + K_1X + M_2\ddot{X}_g \tag{2}$$

式中,  $M_1, C_1, K_1$  和  $M_2$  均为增益矩阵, 将式(2)代入式(1)可得

$$(M - M_1)\ddot{X} + (C - C_1)\dot{X} + (K - K_1)X = (M_2 - M)\ddot{X}_g \tag{3}$$

将式(3)与式(1)作比较, 可见控制力的施加, 相当于改变了结构体系的等效质量、阻尼、刚度和外部荷载。式(2)的具体形式取决于不同的控制律, 若控制力  $U$  仅由测量结构反应而确定时, 为闭环控制; 控制力仅由测量地震输入而确定时, 为开环控制; 同时测量结构反应和

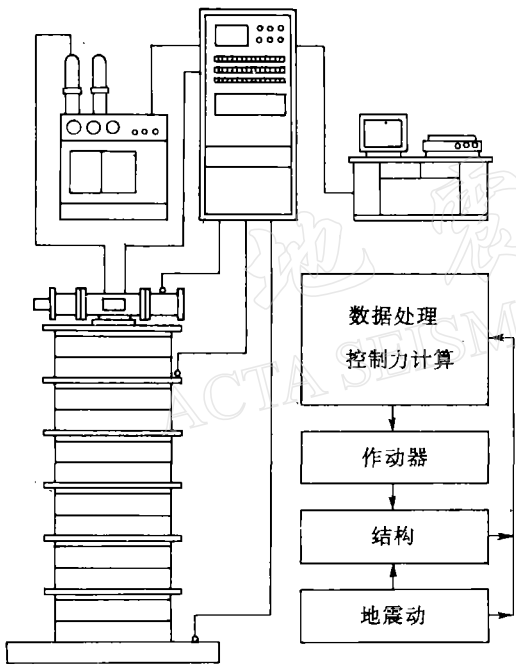


图 1 结构主动控制示意图

地震动而决定控制力为闭-开环控制。若在控制律推导中选用了受控体系的性能指标(即目标函数)求极小的数学手段, 这样得出的控制律称为优化控制律, 否则是非优化的。性能指标有多种取法, 常用的二次型性能指标如下:

$$J = \int_0^t [Z^T(t)QZ(t) + U^T(t)RU(t)]dt \tag{4}$$

式中,  $t$  是某个时间间隔,  $Z$  是结构反应状态矢量,  $U$  是控制力矢量,  $Q$  是半正定加权矩阵,  $R$  是正定加权矩阵, 适当选择  $R, Q$ , 可综合权衡受控体系的安全性和经济性。建筑工程中应用的主动控制律主要有以下几种。

2.1 线性优化控制律(Yang and Soong, 1988)

线性优化开环控制和闭-开环控制,因其控制律的推导都要直接使用无法预知的地震动时间过程,故不能用于建筑结构地震反应控制.若假定  $\ddot{x}_g$  是均值为零的随机过程,则可由经典线性优化闭环控制律导出利卡提闭环控制方法,这一方法目前在线性系统控制研究中被广泛使用.

## 2.2 极点配置法 (Abdel-Rohman and Leipholz, 1978)

根据需要,预先给定受控体系的特征值,可由极点配置法求得闭环反馈控制的增益矩阵.但是,就结构地震反应控制问题而言,用上述方法得到的增益矩阵并不是唯一的,其中只有一个等于利卡提闭环控制的解.显然,用极点配置得出的控制律不是最优的,但该方法无需求解利卡提方程,计算较为简易.

## 2.3 独立模态空间控制 (Abdel-Rohman and Leipholz, 1979)

独立模态空间控制方法是基于振动体系振型分解的概念建立的,即对各独立模态可分别进行控制设计,然后由线性变换得出体系的控制律.为节省计算时间,控制设计可仅针对少数主要振型进行.显然,这一方法只对线性系统有效.

## 2.4 随机最优控制 (Yang, 1975)

地震动是随机过程,结构反应状态变量的测量也必不可免包含观测误差,故将随机控制理论用于建筑结构地震反应控制是合理的.假定地震动和观测误差都是均值为零的高斯过程,对于具有二次型性状指标的线性体系,则构成经典的 LQG 问题.根据分离定理, LQG 系统的最优反馈控制是由确定性系统的最优控制和随机系统状态矢量的最优估计组成的.

## 2.5 瞬时优化控制 (Yang et al., 1987)

前述线性优化控制方法在建筑结构地震反应控制中,不能实现的根本原因在于其性状指标是在整个地震动持续时间中的积分,而地震动时间过程是不可预知的.为解决这一困难,可在每个时刻  $t$  使目标函数成为极小,从而得出了瞬时优化控制律.利用这一控制方法,只需在线测量当前时刻的地震动和结构反应即可进行控制计算,不必求解利卡提方程,且可方便地用于非线性系统的控制,从而为建筑结构和主动控制开辟了新的途径.

## 2.6 界限状态控制 (Udwadia and Tabaie, 1981)

根据建筑物在使用过程中对安全性、适用性和舒适性的要求,可预先规定结构反应的限值,当反应超过限值时,控制系统启动,施加控制力以减低结构反应.这种控制方法称为界限状态控制,它可用于线性系统或非线性系统.界限状态控制要求在  $t$  时刻预估  $t+1$  时刻的地震反应,控制力的施加在本质上乃是试探和直接推断的,这是与优化控制方法的重要区别.

## 2.7 自适应控制 (Rodellar et al., 1987)

当地震动输入和结构特性改变时,自适应控制将使控制器自身参数产生相应变化,以保证系统的性能指标在各种条件下都尽可能保持最优.自适应控制系统主要分为两类:一类是模型参考系统;二类是具有辨识功能的系统.预报控制是自适应控制的一例,它使系统输出遵循预先设定的参考轨线.这种控制方法原则上也可用于非线性时变系统的控制.

### 3. 结构控制的工程应用研究

近年来,建筑结构振动控制技术的应用开发研究,引起了工程界的极大关注并取得了迅速进展.被动控制方式(含隔震)因其结构简单、造价低、易于维护且无需外界能源支持而成为应用开发的热点,若干被动控制技术已趋成熟并用于实际工程.主动控制因其涉及多个技术领域,仍处于探索阶段,工程应用仅限于特例(周福霖,1989;张敏政,1990).

#### 3.1 基底隔震

目前开发应用的隔震方式大致可分为如下三类(见图2):(1)柔性支承隔震装置,如积层橡胶支座、柔性金属支座和套筒桩等;(2)摩擦滑移隔震装置,如砂垫层、石墨、特氟仑滑移层和摩擦铰支座等;(3)滚动隔震装置,如滚球或滚柱支座.上述隔震方式的基本原理,都是利用隔震层减小上部结构体系的水平刚度,使体系自振周期加长,避开地震动中频率较高的卓越分量,减少结构的地震反应.任何一种成功的隔震方式都必须具备以下四个条件:

第一,有足够的竖向承载力;第二,适当减小的水平刚度;第三,有良好的耗能能力;第四,在风荷作用下不产生过大的位移.

为增加隔震层的耗能能力,可采用高阻尼橡胶或在橡胶支座中插入铅棒或钢棒;另外,将各种阻尼器与隔震支座配合使用也较普遍.基底隔震是减小低矮房屋地震反应的有效手段,隔震层即使发生损坏,也不致造成上部结构的破坏,这是隔震建筑比源于同一设想而开发的柔底层建筑的优越所在.

#### 3.2 被动控制

被动控制装置是设于建筑物上,无须外界能源支持而运行的耗能减振装置,文献中常称之为阻尼器或减振器.这种控制装置依其减振耗能机理可分为如下几类(见图3):(1)惯性装置,如调谐质量减振器(TMD)和荡液阻尼器(TSD);(2)弹塑性装置,如软钢斜撑、软钢结点和铅挤压阻尼器;(3)摩擦装置,如开缝壁、摩擦筒和摩擦板等;(4)粘性装置,如粘性阻尼壁和粘性阻尼结点;(5)碰撞装置,如踏步式桥墩;(6)其它装置.

调谐质量减振器通过附加质量的类共振耗散地震能量,这种装置已有较多应用,目前亦有应用其原理对顶部建有附属结构的房屋进行减振设计的研究.在地震作用下,结构各部位将发生相对变形,可在适当部位设置阻尼器,利用相对变形引起的摩擦、塑性和粘性耗能.被动减震装置种类繁多,并非上述几种所能包揽.实际使用的减振装置往往是几种不同机理减振装置的组合.

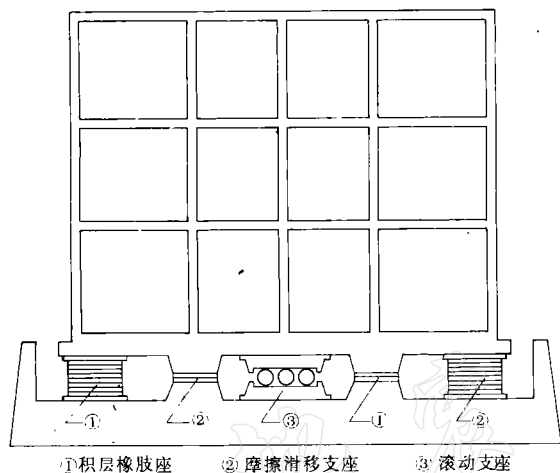


图2 基底隔震装置示意图

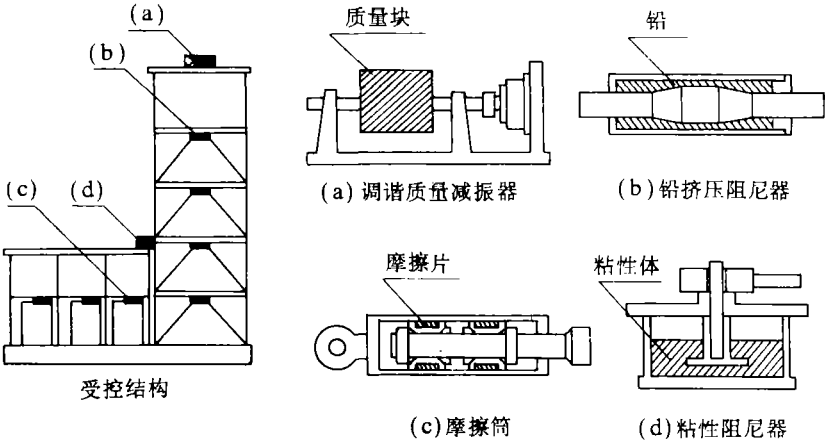


图 3 被动控制装置示意图

3.3 主动控制

目前研究开发的主动控制装置有如下三种(见图 4): (1)主动调谐质量控制; (2)主动拉筋控制; (3)喷气脉冲控制. 前两种控制装置已就不同结构型式, 如房屋、桥梁和核反应堆结构进行了室内模型试验, 日本已建成一座采用主动调谐质量控制的“智能”大楼. 就控制系统的作动装置而言, 线性电机具有能瞬时启动、构造简单和出力大的特点, 且无需液压作动器必须配备的贮油装置, 是一种有发展前景的高技术控制装置. 考虑到在某个时间间隔内持续提供巨大控制力在技术上的困难, 能在瞬间发生大推力的喷气脉冲装置提供了主动控制作动器的另一种可能的选择. 它特别适用于界限状态控制.

半主动控制方式可主动改变构件的刚度或阻尼, 但不给结构直接施加巨大控制力, 而是通过结构体系动力特性的改变减低地震反应. 这种控制方式只需很少的外界能量, 但能得到比被动控制更好的减振效果.

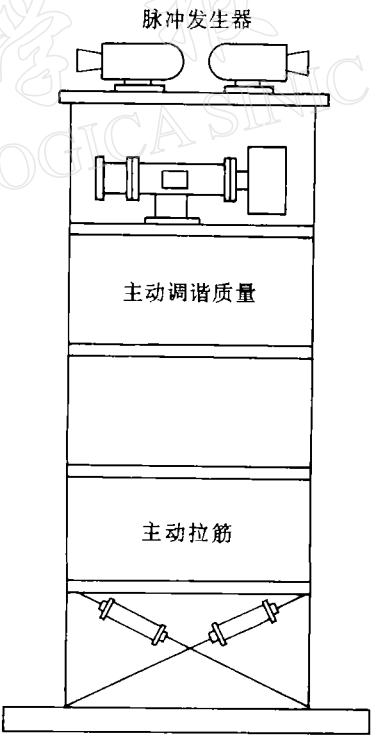


图 4 主动控制装置示意图

4. 结 语

建筑结构的地震反应控制是在电力通讯工程、航空航天和交通运输领域实施控制成功之后才提出的, 这反映了建筑结构振动控制有更大的理论和技术难度. 其原因主要在于: 第一, 地震动具有很大的不确定性, 不能准确

预知其时间过程和统计参数;第二,建筑结构种类繁多、型式各异,且建筑物使用的材料特性和构件联结更为复杂,从而系统特性的识别和控制装置的设置更为困难;第三,建筑结构重量巨大,地震扰力也可能非常强,故所需主动控制的能量也将是巨大的。

尽管面临众多困难,近年来的建筑结构振动控制研究,特别是被动控制研究已取得迅速进展。为促进该领域研究的深入和开发应用,显然需要进行涉及控制理论、随机振动、结构工程、材料科学、生物科学、机械工程、计算机科学和人工智能等各领域的跨学科研究,需要科学界、工程界、企业界和有关管理部门的密切协作。当前的研究内容,除结合建筑结构特点进行必要的理论探索外,特别应将控制体系的试验和工程应用作为重点,其主要研究课题应包括:(1)与主动和被动控制有关的新材料的研究开发;(2)用于主动控制的传感器和作动器的开发;(3)与控制系统在线监测、系统识别和控制计算有关的人工智能、神经网络和模糊逻辑的研究;(4)受控体系的模型化及其误差估计,体系振动反应的计算机仿真;(5)受控体系的室内地震模拟试验、现场地震反应观测,建立标准化的试验规程和系统性能的评价指标;(6)受控体系的设计、施工技术研究及有关规程的编制;(7)控制系统的可行性、稳定性、耐久性和经济性论证;(8)作动系统的时滞效应和超调影响的分析;(9)主动控制传感器和作动器的优化设置;(10)随机荷载作用下非线性振动控制方法的研究。

## 参 考 文 献

- 周福霖, 1989. 隔震消能减振和结构控制技术的发展和应用. 世界地震工程, 1: 16—20.
- 张敏政, 1990. 日本的制震研究. 世界地震工程, 3: 11—20.
- Abdel-Rohman, M. and Leipholz, H. H., 1978. Structural control by pole assignment method. *Journal of Engineering Mechanics Division*, **104**, 1159—1175.
- Abdel-Rohman, M. and Leipholz, H. H., 1979. General approach to active structural control. *Journal of Engineering Mechanics Division*, **105**, 1007—1024.
- Lin, S. C., Lagorio, H. J. and Chong, K. P., 1991. Application of active control technology to buildings and bridges. *China-Japan-USA Trilateral Symposium/Workshop on Earthquake Engineering*, 13. Harbin, China.
- Rodellar, J., Barbat, A. H. and Martin Sanchez, J. M., 1987. Predictive control of structures. *Journal of Engineering Mechanics Division*, **113**, 6, 797—812.
- Udwadia, F. E. and Fabaie, S. 1981. Pulse control of single degree-of-freedom system. *Journal of Engineering Mechanics Division*, **107**, 1011—1028.
- Yang, J. N. and Soong, T. T., 1988. Recent advancement in active control of civil engineering structures. *Probabilistic Engineering Mechanics*, **3**, 4, 179—188.
- Yang, J. N., 1975. Application of optimal control theory to civil engineering structures. *Journal of Engineering Mechanics Division*, **101**, 6, 810—838.
- Yang, J. N., Akbarpour, A. and Ghaemmaghami, P. 1987. New optimal control algorithms for structural control. *Journal of Engineering Mechanics Division*, **113**, 1369—1386.
- Yao, J. T. P., 1972. Concept of structural control. *Journal of the Structural Division*, **98**, 1567—1574.