

# Active Vibration Control of Towering Structure and Analysis of Its Installation and Commissioning Technologies

Li Aiqun<sup>1,2,\*</sup>, Xuan Peng<sup>2</sup>, Xu Yiming<sup>3</sup>, Xu Yanhong<sup>3</sup>

<sup>1</sup>School of Civil and Transportation Engineering, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing, China

<sup>2</sup>Department of Civil Engineering, Southeastern University, Nanjing, China

<sup>3</sup>China Construction Installation Engineering Company Limited, Nanjing, China

## Email address:

aiqunli@seu.edu.cn (Li Aiqun), xuanpeng200912@163.com (Xuan Peng), xym8912@163.com (Xu Yiming),

xuyanh1224@163.com (Xu Yanhong)

\*Corresponding author

## To cite this article:

Li Aiqun, Xuan Peng, Xu Yiming, Xu Yanhong. Active Vibration Control of Towering Structure and Analysis of Its Installation and Commissioning Technologies. *Science Discovery*. Vol. 4, No. 6, 2016, pp. 436-443. doi: 10.11648/j.sd.20160406.25

Received: October 19, 2016; Accepted: November 22, 2016; Published: December 9, 2016

**Abstract:** The paper simply introduces the working principle of active vibration control, and reviews the state-of-the-art of this technology in recent years in China and abroad, including the control theory and algorithms, experimental studies, and its practical applications. Also, the paper takes the installation and commissioning of AMD system as an example, and briefly demonstrates the process of other active control devices. This provides a reference for active control system in practical application.

**Keywords:** Towering Structure, Active Control, Installation and Commissioning, AMD

## 高耸结构振动主动控制与安装调试技术分析

李爱群<sup>1,2\*</sup>, 轩鹏<sup>2</sup>, 徐义明<sup>3</sup>, 徐艳红<sup>3</sup>

<sup>1</sup>土木与交通工程学院, 北京建筑大学, 北京, 中国

<sup>2</sup>土木工程学院, 东南大学, 南京, 中国

<sup>3</sup>中建安装工程有限公司, 南京, 中国

## 邮箱

aiqunli@seu.edu.cn (李爱群), xuanpeng200912@163.com (轩鹏), xym8912@163.com (徐义明), xuyanh1224@163.com (徐艳红)

**摘要:** 本文简要介绍了主动控制的工作原理, 综述了近年来中国国内及国外主动控制技术的发展现状, 包括主动控制理论及算法的发展、结构主动控制试验的研究以及主动控制的实际工程应用等。同时, 本文以AMD控制系统的安装调试为例, 简要说明了主动控制装置的安装调试过程, 为主动控制装置在实际工程中的应用提供了参考。

**关键词:** 高耸结构, 主动控制, 安装调试, AMD

## 1. 引言

1972年, 美国学者J. T. P. Yao结合现代控制理论, 首先提出了结构控制的思想, 并建立了结构主动控制理论,

使结构控制得以在土木工程的抗震抗风中应用[1]。土木工程结构振动控制可以有效地减轻结构在风、海浪、地震等动力作用下的反应和损伤累积, 有效地提高结构的抗振

能力和抗灾性能,是结构抗振减振、防灾减灾积极有效的方法和和技术[2]。

随着现代建筑技术的进步和高新材料的出现,建筑结构向着高耸、轻质、高强方向发展,建筑高度不断增加,建筑类型和功能不断复杂化,设计问题也日益复杂。高耸结构高而柔,在意料不到的干扰下会产生过度的振动和变形;对于此类复杂的工程结构,结构控制设计理论是无可替代的抗环境荷载的设计方法。主动控制通过振动响应的信息,向结构施加控制力,实现动态控制;虽然需要外部能源,求解复杂,但能有效地控制意外干扰,控制效果显著可靠[3]。

## 2. 主动控制工作原理

结构主动控制是利用外部能源,在结构物受到外部激励而发生振动的过程中,按照预先设定的控制算法瞬时施加控制力或瞬时改变结构的动力特性,以迅速衰减和控制结构振动响应的一种减振技术[4]。目前已经提出的主动控制系统包括[5]:主动质量阻尼系统(AMD)、主动支撑系统(ABS)、主动拉索系统(ATS)、脉冲发生器(PG)等装置。

图1给出了结构主动控制系统的组成及工作过程示意图[6]。从图中可以看出,除了被控结构外,传感器、控制器和作动器构成了主动控制系统的主要部分[7]。其中,传感器测量外部激励信息或/和结构反应,并将其传入计算机控制系统;控制器处理传感器测量的信息,根据给定的算法计算控制力的大小,并输出作为作动器的指令;作动器产生需要的控制力施加于结构上,所需的能量由外部能源提供[8, 9]。由于实时的控制力可以随输入地震动或风荷载而改变,因此控制效果基本上不依赖于外激励的特性,这方面明显优于被动控制等其它振动控制方式[10]。

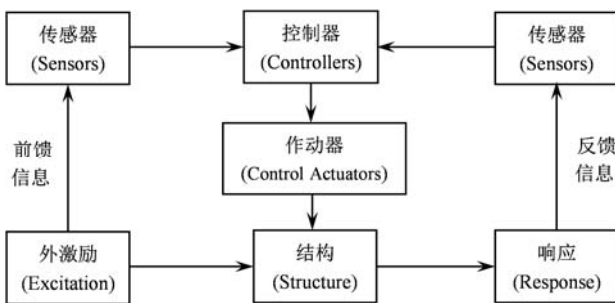


图1 主动控制系统的组成及工作过程图。

根据传感器的观测量及控制力的确定方法,主动控制系统可以分为开环、闭环和开闭环控制系统三种:开环控制仅测量外激励,并根据给定的控制律确定控制力;闭环控制是仅测量结构反应,并确定控制力的控制系统;开闭环控制则同时测量外部激励与结构反应,并根据其确定所需控制力[11]。以一个n维自由度质量-弹簧-阻尼系统所表示的结构体系为例,来说明主动控制系统的工作原理[12]。体系的运动方程如式(1)所示。其中, M、C、K分别为n×n维的质量矩阵、阻尼矩阵与刚度矩阵; x(t)为n维的位移向量; r阶向量f(t)表示施加的荷载或外部激励; m

阶向量u(t)是施加的控制力矢量; n×m维矩阵D以及n×r维矩阵E分别定义了控制力及外激励的作用位置。

$$M\ddot{x}(t) + C\dot{x}(t) + Kx(t) = Du(t) + Ef(t) \quad (1)$$

假设结构采用开-闭环控制系统,主动控制力u(t)为测量的位移向量、速度向量及外激励f(t)的线性函数,可以写作式(2)的形式。其中, K<sub>1</sub>、C<sub>1</sub>和E<sub>1</sub>分别是结构位移反应、速度反应和外部激励的增益矩阵,可能是时间相关的。

$$u(t) = K_1x(t) + C_1\dot{x}(t) + E_1\ddot{x}(t) \quad (2)$$

将式(2)代入式(1),得到下式:

$$M\ddot{x}(t) + (C - DC_1)\dot{x}(t) + (K - DK_1)x(t) = (E + DE_1)f(t) \quad (3)$$

从式(3)即可以看出,开-闭环控制的效果就是修改结构参数(刚度和阻尼)以更好地反馈外激励;开环控制的效果则是改变外激励。此即为主动控制系统的工作原理。

## 3. 主动控制发展现状

结构振动主动控制技术自提出以来,已经获得了较大的发展。主动控制的主要研究包括三个方面的内容,即:结构主动控制理论与算法、结构主动控制试验研究以及结构主动控制在实际工程中的应用。下面分别加以阐述。

### 3.1. 主动控制研究现状

结构主动控制基本算法包括[4]:线性最优控制算法、极点配置法、瞬时最优控制算法、滑动模态控制算法等。近年来,随着智能控制理论的发展,智能控制算法也逐渐运用在结构主动控制系统中。Aldawod等[13]采用模糊控制算法分析了高层建筑的AMD风振控制效果,结果表明其优于采用LQG控制算法的AMD控制系统。Battaini等[14]利用模糊控制的内在鲁棒性及其处理非线性能力的长处,分析了顶部安装AMD的三层钢框架在地震下的控制效果。中国国内方面,樊文华等[15]比较了LQR控制算法、模态控制算法以及极点配置算法三种主动控制算法的控制效果,指出结构刚度较大时,三种控制算法的控制效果均较理想;结构刚度较小时,LQR算法、模态控制算法得到的效果较好,而极点配置算法的效果较差,需要优化。涂建维等[16, 17, 18]则将最小控制合成算法(MCS)应用到AMD系统中,结果表明:采用MCS自适应算法可以使结构受控响应与参考模型预期的响应一致,其控制的效果要优于传统极点配置算法的控制效果。李宏男等[19]在结构顶部设置双向水平AMD装置,对偏心结构在多向地震下的振动进行了遗传BP神经网络的主动控制研究。毛克阳等[20],姜卫波[21]则利用遗传算法,提出了主动控制结构作动器布置的优化方案,其适应性强,效果显著。

对于主动控制时滞问题的考虑,中国国内的田石柱等[22]研究了时滞对主动控制效果的影响,分析了结构主动控制系统产生时滞的原因,并提出了时滞的三种补偿方法。朱宏等[23]分析了在小时滞范围内,时滞量变化和反馈增益在不同的取值下对系统响应的影响,所得结果可用于设

计考虑时滞影响的结构振动主动控制算法。陈茂生等[24]则从考虑时滞的结构主动质量阻尼控制系统(AMD)的状态微分方程出发,求得控制律,设计出的控制律表达式对结构的峰值响应和均方值响应均能达到较好的控制效果,而且确保了系统的稳定性。

Wong等[25]首次将土与结构的相互作用(Soil-Structure Interaction, SSI)考虑进主动控制系统的设计中,考察了SSI对主动控制效果的影响。Spencer等[26], Yang等[27]考察了控制器与结构相互作用(Control-Structure Interaction, CSI)对主动控制系统控制效果的影响,得到了有益的结论。中国国内方面,杨宏等[28]推导了考虑土与结构相互作用时结构体系的主动控制方程,考察了土与结构相互作用对结构主动控制的影响。李春祥等[29]综述了结构被动控制、主动控制和半主动控制中考虑SSI效应的研究进展,指出地基土的性质、

### 3.2. 主动控制应用现状

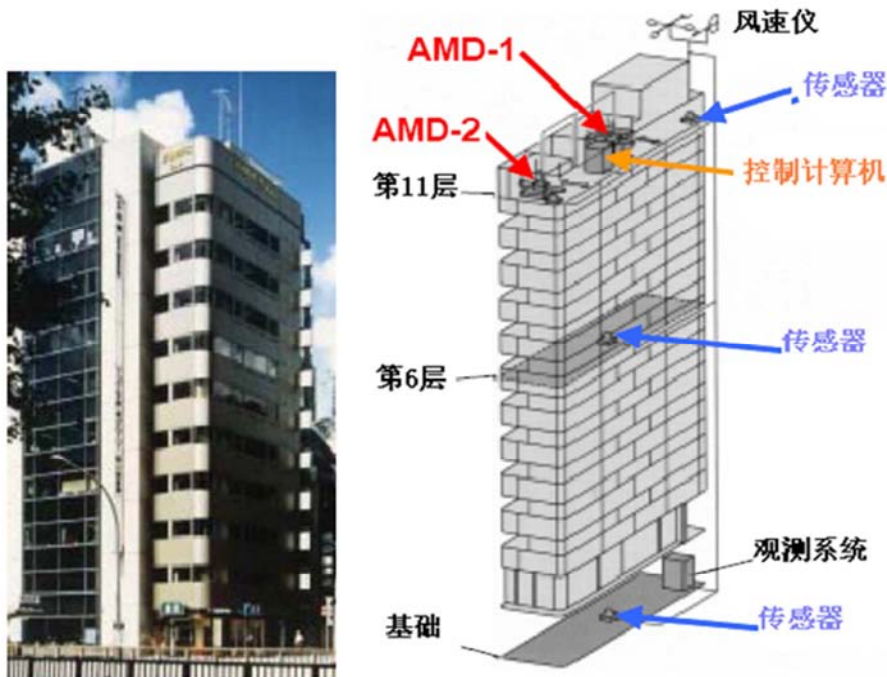


图2 日本京桥成和大厦外观及其控制系统图。

1989年,日本Kajima公司在东京建成了京桥成和大厦(Kyobashi Seiwa Building),它是世界上首个采用主动控制技术的实际工程[37, 38]:为控制建筑在地震和风载作用下的横向振动及扭转响应,在顶部安装了两个AMD,测试数据表明了控制系统的有效性。如上图2所示。随后,日本又在58m高的Sendagaya Intes结构上安装了2个AMD系统,以控制结构的平动和扭转反应,其惯性质量直接采用了建筑上的空调系统,采用多层橡胶垫支撑惯性质量,实测结果表明AMD系统的控制效果较好。日本大阪Applause塔上安装了1个质量达480t的AMD系统,惯性质量直接采用了该建筑上的直升机停机坪台,使用了2个5t的作动器,该系统给结构附加的阻尼比为1.4%~10.6%。大阪190m高的Herbis大厦上则安装了2个悬吊AMD结构控制系

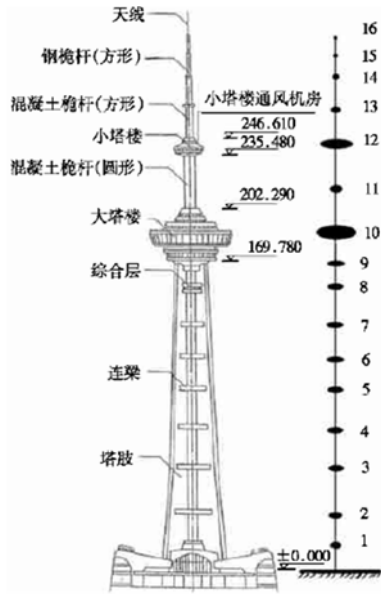
统,每个AMD装置的惯性质量为160t,悬吊杆长度为3.2m,装置的自振周期为3.6s,最大控制力为6t,最大冲程为500mm[39, 40]。

在装置的试验研究方面:1987年,小比例四层钢框架模型顶部设置AMD装置的主动控制试验由Aizawa等[30]完成;此后, Kobori等[31]完成了1:4钢框架顶层设置AMD的主动控制试验;1988年,美国T. T. Soong等[32]完成了1:4六层钢框架顶部设置AMD的主动控制试验。90年代初,日本学者和T. T. Soong等[33, 34]合作在东京完成了主动拉索控制系统的足尺试验。中国国内方面,刘季等[35]在国内率先开展了主动控制系统的试验研究,成功完成了5层1:4钢框架模型的AMD主动控制试验;1998年,底层装有ABS系统的三层钢框架模型的主动控制振动台实验研究由Loh等在中国台湾地震工程研究中心完成[36]。这些试验的结果均证明了主动控制系统的有效性。

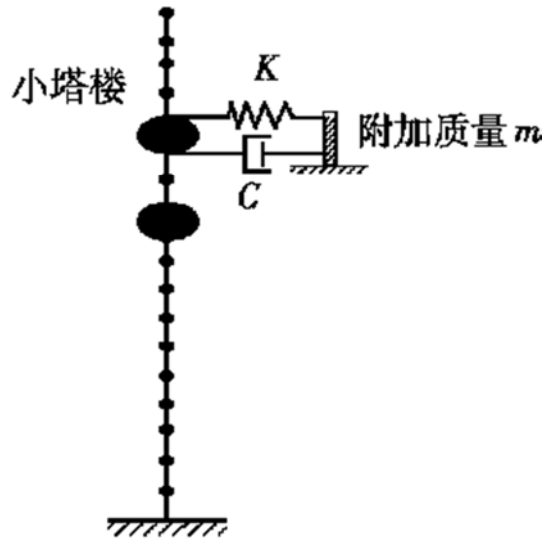
中国国内方面,2001年,中国国家自然科学基金委员会和美国国家自然科学基金会共同资助中美合作项目“南京电视塔风振控制”研究,美国T. T. Soong与我国程文灏等合作研究并实现了中国南京电视塔风振AMD控制。310m高的南京电视塔上安装了AMD系统,惯性质量为59t,占结构总质量的1%,作动器的行程达到了1.5m。AMD控制系统安装后,观光平台在风振下的加速度反应明显减小,电视塔在强风作用下的振动过大等问题得到有效解决,基本上满足了观光游客对舒适度的要求。这是中国国内首个采用主动

控制系统的实际工程，图3给出了南京电视塔及其AMD控制系统的示意图[41, 42]。

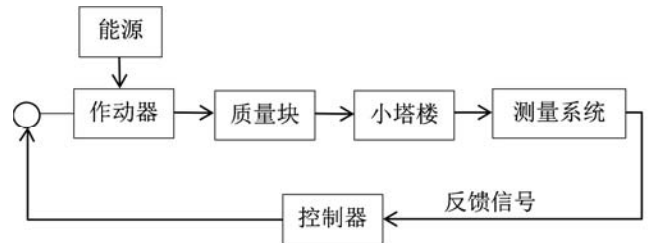
此后，中国深圳京基金融中心[43, 44]、中国台北Shin-Jei大楼[45]、中国大连某高层建筑[46]、中国广州新电视塔[47]等均采用有AMD控制装置，主动控制装置在实际工程中得到了越来越广泛的应用。除了上述列举的应用实例外，表1总结了主动控制近年来在世界范围内高层建筑中的应用，从中可以看出主要采用的是主动质量阻尼系统(AMD)。



(a) 南京电视塔立面及简化模型图



(b) 控制系统力学模型



(c) 系统控制回路

图3 南京电视塔及其主动控制系统示意图。

表1 主动控制系统在高层建筑中的应用。

建筑名称	位置	建筑用途	建筑规模	控制系统	阻尼器重量(t)
Kyobashi Center	日本东京	办公	33m	2 AMDs	5.4
Sendagaya INTES	日本东京	办公	58m	2 AMDs	72
ORC 200 Bay Tower	日本大阪	办公/酒店/住宅	200m	2 ATMDs	200
NTT Cred Motomachi Bldg.	日本广岛	酒店/仓库	150	ATMD	80
Porte Kanazawa	日本金泽	酒店/办公	131m	2 AMDs	100
Yokohama Landmark Tower	日本横滨	办公/酒店/仓库	296m	2 ATMDs	340
Shinjuku Park Tower	日本东京	酒店/办公	233m	3 ATMDs	330
Hamamatsu ACT Tower	日本滨松	办公/酒店/仓库	213m	2 ATMDs	180
Hotel Ocean 45	日本宫崎	酒店	154m	2 ATMDs	240
MHI Yokohama Bldg.	日本横滨	办公/仓库	152m	ATMD	60
Osaka World Trade Center Bldg.	日本大阪	办公	255m	2 ATMDs	100
Rinku Gate Tower Bldg.	日本大阪	酒店/办公/展厅	255m	2 ATMDs	160
Nisseki Yokohama Bldg.	日本横滨	办公	133m	2 ATMDs	100
Herbis Osaka	日本大阪	酒店/办公	190m	2 AMDs	320
OTIS Shibayama Test Tower	日本千叶	电梯测试	154m	ATMD	35
Odakyu Southern Tower	日本东京	办公/酒店/仓库	151m	2 ATMDs	60
Kaikyo Messe Yume Tower	日本下关	观察	153m	ATMD	100
JR Central Towers: Office Tower	日本名古屋	办公	245m	2 ATMDs	150
JR Central Towers: Hotel Tower	日本名古屋	酒店	226m	4 ATMDs	240
Shinagawa Intercity Bldg.	日本东京	办公	144m	2 ATMDs	150
Century Park Tower	日本东京	住宅	170	4 ATMDs	440
Cerulean Tower	日本东京	酒店/办公	184m	2 ATMDs	110
Hotel Nikko Bayside Osaka	日本大阪	酒店	138m	2 ATMDs	124
Applause Tower	日本大阪	办公/酒店/剧院	162m	AMD	480
Riverside Sumida CentralTower	日本东京	办公/居住	134m	2 AMDs	60
南京电视塔	中国南京	通讯	310m	AMD	59
Shin-Jei Bldg.	中国台北	办公/商业	99m	AMD	-
仁川国际机场塔台	韩国仁川	机场调度	100m	AMD	-

## 4. 主动控制安装调试技术分析

主动控制装置种类较多, 各种控制系统的安装调试方法不尽相同。对于高层或高耸建筑, 大量的研究表明, 最合适的控制系统就是AMD控制系统, AMD系统将作动器集中使用, 以较小的控制力、较大的控制器行程, 实现对结构振动的控制能量输入, 性价比高[48]。因此现阶段, 主动控制的实际工程应用以主动质量阻尼系统(AMD)为主, 本文也将以AMD的一般安装调试技术为例, 简要说明主动控制系统的安装调试过程, 具体到实际工程还需要具体对待。

### 4.1. AMD系统的组成

结构振动的AMD控制系统通常由以下几个部分组成[4]: ①质量阻尼刚度装置, 包括质量块、刚度弹簧和阻尼器等; ②驱动装置和液压源, 包括伺服阀、驱动器、反馈传感器液压源及管路等; ③计算机及控制系统, 包括数据采集系统、滤波调节器和模拟微分器等。标准AMD控制系统的组成如图4所示[18]。

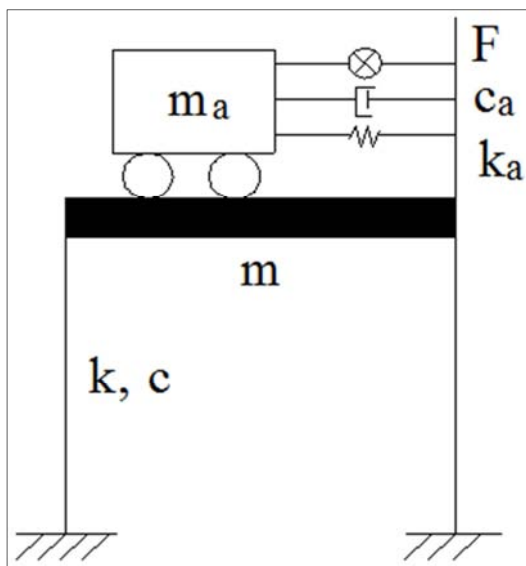


图4 标准的AMD控制系统示意图。

质量阻尼刚度装置一般都安装在建筑物的顶层: 质量块可以用密封室内支撑或悬挂的质量体(一般由密度较大的物质制成)构成, 或直接利用结构上的某些设施构成(如储液罐、电梯机房、中央空调冷却塔等), 也可以利用楼顶安装的可运动的直升机停落台这种大质量体构成[49]。它们都能对风和地震引起的结构振动做出及时反应。刚度弹簧可以是空气弹簧、螺旋弹簧或橡胶垫等。阻尼器一般采用油阻尼器。

传感器负责反馈与前馈信息观测, 包括外激励与位移、速度和加速度响应; 相应地, 需要的传感器包括力传感器、位移传感器、速度及加速度传感器。传统的作动器是液压作动器, 其输出力较大, 但速度慢、时滞现象明显; 随着新技术的发展, 电液伺服作动器、直线电机作动器、气压作动器等新兴作动器也逐渐被采用[50]。

控制器的功能是分析处理由传感器测量传递来的信号, 按照一定的控制算法, 计算所需的控制力并控制作动器的运动。一般控制器包括数字控制系统、客户自设计接口抽屉及控制柜等3部分[51]。

### 4.2. AMD系统的安装

AMD控制系统的安装, 可以分解为质量块、支撑装置、刚度与阻尼单元、驱动装置、能源系统、传感器系统及控制系统等几个单元来进行。为了提高系统的运行安全, 避免失控等现象发生, 有时还需要安装限位系统等装置。具体实施时, 可按以下步骤进行:

- (1) AMD装置安装之前, 首先通过现场试验(环境激励法和正弦荷载激励后的自由衰减振动等)研究无控条件下主体结构的动力特性, 包括频率及阻尼比等; 利用试验得到的结构动力特性数据, 进行AMD控制系统参数与实际结构参数的匹配设计, 包括质量块的大小、刚度弹簧的刚度大小等。通过参数匹配设计, 使AMD系统的控制效果达到最优, 即在最少的外部能源需求下可以达到最好的控制效果。
- (2) 质量阻尼刚度装置的安装
  - 1) 质量块支撑系统的定位安装。支撑系统可以采用悬挂支撑体系, 也可以采用滑轨支座体系(这里以滑轨支座为例)。采用滑轨支座, 不仅要求其具有足够的刚度, 而且摩擦力要足够小, 不能在质量块滑动时造成过大的阻力。按照设计图纸, 将滑轨支座的轨道定位, 保持误差在允许范围内, 然后安装钢轨。由于此步的安装精度决定着整个装置的安装精度, 因此支撑系统的安装必须满足施工所允许的误差。
  - 2) 质量块的安装。将质量块吊放在滑轨支座的轨道上并安装好。
  - 3) 刚度单元的定位安装。已如前文所述, 刚度单元可以采用螺旋弹簧、空气弹簧、橡胶垫等。以螺旋弹簧为例, 按照设计图纸, 将弹簧的一端在质量块上定位、另一端在主体结构上定位, 然后采用螺栓连接或其它连接方式将弹簧与质量块、主体结构连接好。
  - 4) 阻尼系统的定位安装。阻尼系统一般采用油阻尼器, 与刚度单元的安装类似, 按照设计图纸, 将阻尼器的两端分别在质量块和主体结构上定位, 然后采用螺栓连接、销轴连接或其它连接方式连接好。
- (3) 作动器的安装。作动器一端与质量块相连, 另一端与主体结构相连。按照设计图纸, 在主体结构上安装作动器支座、在质量块上安装连接装置, 然后将作动器组装安装好。采用千斤顶调整个别点位没有到位的部分。
- (4) 安装能源系统。对于采用液压驱动装置的控制系統, 包括油箱、油泵、蓄能器、油管及其他附属设施等。
- (5) 成品保护。如果上述设备安装完成后, 主体结构还需继续施工, 则需要对上述装置采取保护措施:

采用防水防火帆布对所有设备进行包裹, 并利用钢管、九夹板做成全封闭的保护硬隔离, 确保防水、防火、防破坏等。

#### (6) AMD装置电气系统的安装

- 1) 安装传感器。按照设计需要采集的输入及响应量, 在相应的位置安装相应的传感器。
- 2) 安装控制系统。已如前文所述, 即安装数字控制系统、客户自设计接口抽屉及控制柜。使控制系统、传感器系统与作动器系统形成闭环系统。
- 3) 安装限位装置。在滑轨支座的两端布置蝶形弹簧片组或其他缓冲限位装置, 以提高系统的安全性。
- 4) 至此, 整个AMD控制装置的安装任务全部完成。

### 4.3. AMD系统的调试

主动质量阻尼器安装完成后, 需要对其进行调试, 以确保其在风载、地震作用下能正常工作并达到最优的控制效果。

- (1) 控制系统工作情况检验。操作控制柜上的各控制按钮, 以确认其能否在各种运行状态(停止状态、控制状态、制动状态)和异常信号变换时切换显示, 以检验其能否正常工作。
- (2) AMD控制装置联合调试

检查质量块子系统、刚度阻尼子系统、作动器系统、传感器系统及控制器各子系统, 进行联合调试。包括:

- 1) 先进行无负载试验。利用控制装置将正弦波加载在建筑物上, 当建筑物的摇晃达到一定加速度值后, 停止设备使建筑物处于自由振动状态, 测试整个控制系统在低速、中速、高速工况下与设计参数的偏差, 以及系统连续工作的稳定性、软件控制系统的符合性、制动系统的可靠性等。当以上工作状态均处于正常状态时, 进入加载试验。
- 2) 加载试验。利用控制装置将正弦波加载在建筑物上, 当建筑物的摇晃达到所设定的加速度值后, 将控制装置由加振状态切换到止振状态, 测量结构的响应; 调整AMD装置各子系统的参数直至所有响应均符合设计要求为止。加载试验时要注意动作幅度及频率, 不得造成人员明显感觉不适或建筑受损。
- 3) 输入强度不同的建筑偏移的模拟信号, 测试控制系统的工作状态(响应时间、动作幅度、加速度、超速时的紧急制动), 检验AMD系统的控制效果。注意试验的强度不能过大。

至此, 整个AMD控制系统的调试任务全部完成。等待第一次强风或地震来临, 检验AMD的实际控制效果。

## 5. 结语

随着建筑高度的增加, 高耸结构的风振控制逐渐成为一个突出的问题; 另外, 地震区的结构还会受到地震作用的威胁。主动控制因其控制效果较好, 近年来受到越来越广泛的关注, 其实际工程应用也日益增多。相比于半主动控制装置, 主动控制安装实施起来也较容易[52]。但其仍

存在以下问题有待解决, 包括: 控制系统的可靠性及稳定性、时滞问题、经济性问题以及控制装置的日常维护等问题。可以预见, 如果上述问题能得到很好的解决, 主动控制系统将会得到更多的应用, 成为高耸结构不可分割的一个组成部分。

## 致谢

本文获中建股份科技资助(CSCEC-2010-Z-01)。

## 参考文献

- [1] Yao J. T. P. Concept of Structural Control [J]. Journal of Structural Division, 1972, 98 (7): 1567-1574.
- [2] 欧进萍. 结构振动控制-主动、半主动和智能控制[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [3] 黄金枝, 王建中, 成学明. 高耸电视塔主动控制应用研究中若干问题探讨 [J]. 上海交通大学学报, 1996, 30(12): 128-134.
- [4] 李爱群. 工程结构减振控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.
- [5] Soong T. T., Reinhorn A. M. Case Studies of Active Control and Implementation Issues[C]//Proceedings of ATC-17-1 Seminar on Seismic Isolation, Passive Energy Dissipation, and Active Control. San Francisco, California, 1993 (2): 701-714.
- [6] Soong T. T., Spencer B. F. Active, Semi-active and Hybrid control of structures[C]//Proceedings of 12th WCEE. Auckland, New Zealand, Paper No. 2834, 2000.
- [7] Yang J. N., Soong T. T., 赵威. 工程结构主动控制的最新发展[J]. 世界地震工程, 1988, 4: 37-42.
- [8] Housner G. W., Chassiakos A. G., Skelton R. E. et al. Structural Control: Past, Present, and Future [J]. Journal of Engineering Mechanics, 1997, 123: 897-971.
- [9] Dyke S. J., Spencer B. F., Quast P., et al. Role of Control-Structure Interaction in Protective System Design[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1995, 121 (12): 322-338.
- [10] 亓兴军, 李小军. 土木工程结构减震控制方法综述[J]. 工业建筑, 2006, 36(8): 59-63.
- [11] Datta T. K., A state-of-the-art review on active control of structures [J]. ISET Journal of Earthquake Technology, 2003, 40 (1): 1-17.
- [12] Soong T. T., Masri S. F., Housner G. W. An overview of Active Structural Control under Seismic Loads [J]. Earthquake Spectra, 1991, (3): 483-505.

- [13] Aldawod M., Samali B., Naghdy F., et al. Active Control of Along Wind Response of Tall Building Using a Fuzzy Controller[J]. *Engineering Structures*, 2001, 23: 1512-1522.
- [14] Battaini M., Casciati F., Faravelli L. Fuzzy Control of Structural Vibration—an Active Mass System Driven by a Fuzzy Controller[J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 1998, 27: 1267-1276.
- [15] 樊文华, 邹万杰. 3种主动控制算法的结构振动控制效果研究[J]. *广西科技大学学报*, 2016, 27(3): 69-75.
- [16] 涂建维, 涂波, 林晓烽. AMD系统的自适应最小控制合成(MCS)算法[J]. *噪声与振动控制*, 2013(5): 136-140.
- [17] 涂建维, 张妙娴, 汪伯潮. MCS自适应算法在非线形结构AMD控制中的应用[J]. *地震研究*, 2015, 38(4): 662-667.
- [18] 林晓烽. 参考模型MCS自适应算法对结构AMD的主动控制[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2013.
- [19] 李宏男, 金峤. 遗传BP神经网络主动AMD对偏心结构的减震控制[J]. *地震工程与工程振动*, 2003, 23(2): 134-142.
- [20] 毛克阳, 孙作玉, 燕乐纬, 等. 基于遗传算法的结构主动控制作动器优化布置[J]. *中山大学学报(自然科学版)*, 2013, 52(2): 129-132.
- [21] 娄卫波. 建筑结构在地震作用下的质量阻尼主动控制分析[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2014.
- [22] 田石柱, 李暄, 欧进萍. 结构主动控制系统时间滞后测量与补偿方法[J]. *地震工程与工程振动*, 2000, 20(4): 101-105.
- [23] 朱宏, 张斌, 孙清. 含时滞振动主动控制系统地震响应的数值分析[J]. *振动与冲击*, 2013, 32(6): 181-184.
- [24] 陈茂生, 王修勇, 孙洪鑫, 等. 考虑时滞的结构AMD系统控制方法与效果分析[J]. *噪声与振动控制*, 2015, 35(6): 17-21.
- [25] Wong H. J., Luco J. E., Structural Control Including Soil-Structure Interaction Effects [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 1991, 117(10): 2237-2250.
- [26] Dyke S. J., Spencer B. F., Quast P., et al. Role of Control-Structure Interaction in Protective System Design[J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 1995, 121(2): 322-338.
- [27] Battaini M., Yang G., Spencer B. F. Bench-Scale Experiment for Structure Control [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 2000, 126(2): 140-148.
- [28] 杨宏, 邹立华, 黄丽彬. 土-结构相互作用对结构主动控制的影响研究[J]. *振动与冲击*, 2009, 28(3): 98-101.
- [29] 李春祥, 张伏海, 顾新花, 等. 考虑土-结构相互作用下不规则建筑振动控制进展 [J]. *振动与冲击*, 2011, 30(3): 234-241.
- [30] Aizawa S., Fykao Y., Minewaki S., et al. An experimental Study on the Active Mass Damper[C]// *Proceedings of 9th World Conference on Earthquake Engineering*, 1987, 5: 871-876.
- [31] Kobori T., Kanayama H., Kamagata S. Dynamic Intelligent Building as Active Variable Stiffness System [J]. *Earthquake Engineering and Structure Dynamics*, 1987, 22: 925-941.
- [32] Soong T. T., Reinhorn A. M., Yang J. N. Active Response Control of Building Structures under Seismic Excitation[C]// *Proceedings of 9th World Conference on Earthquake Engineering*, 1988, 8: 453-458.
- [33] Soong T. T., Reinhorn A. M., Wang Y. P., et al. Full Scale Implementation of Active Control I: Design and Simulation [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 1991, 117(11): 3516-3536.
- [34] Reinhorn A. M., Soong T. T. Full Scale Implementation of Active Control II: Installation and Performance [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 1993, 119(6): 1935-1960.
- [35] 田石柱, 刘季. 结构模型AMD主动控制试验[J]. *地震工程与工程振动*, 1999, 19(4): 90-94.
- [36] Loh C. H., Lin P. Y., Chung N. H. Experimental Verification of Building Control Using Active Bracing System [J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 1999, 28: 1099-1119.
- [37] Kobori T., Koshika N., Yamada K., et al. Seismic-response-controlled structure with active mass driver system-Part 1: Design [J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 1991, 20: 133-149.
- [38] Kobori T., Koshika N., Yamada K., et al. Seismic-response-controlled structure with active mass driver system-Part2: Verification [J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 1991, 20: 151-166.
- [39] Nishitani A. Application of Active Structural Control in Japan [J]. *Progress in Structural Engineering and Materials*, 1998, 3: 301-307.
- [40] Nishitani A., Inoue Y. Overview of the Application of Active/Semi-active Control to Building Structures in Japan [J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2001, 30: 1565-1574.
- [41] 程文灏, 瞿伟廉, 陆勤等. 南京电视塔的风振控制[J]. *土木工程学报*, 1993, 26(4): 14-20.
- [42] 李爱群, 瞿伟廉, 程文灏. 南京电视塔风振的混合振动控制研究[J]. *建筑结构学报*, 1996, 17(3): 9-17.
- [43] 李焱, 张良平, 项兵. 京基金融中心风振控制的设计[J]. *建筑结构*, 2011, 41(S1): 1386-1389.
- [44] 鲁志雄, 滕军, 陈刘钢. 横风向激励下深圳京基金融中心舒适度控制[J]. *建筑结构*, 2011, 41(S1): 1381-1385.

- [45] 阎石, 结构振动智能控制的人工神经网络与模糊逻辑方法研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2000。
- [46] 欧进萍, 张春巍, 李惠, 等. 大连市某高层建筑风振和地震反应的主动质量阻尼 (AMD) 控制分析与设计[J]. 建筑结构学报, 2004, 25(3): 29-37。
- [47] 卜国雄, 高耸结构基于性能的 TMD/AMD 设计及其动力可靠度分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010。
- [48] 张春巍, 欧进萍. 结构AMD系统的控制力特性[J]. 振动工程学报, 2010, 23(1): 1-6。
- [49] 谭承业, 结构主动控制和混合控制的装置和方法[J]. 地震研究, 1996, 19(1): 85-94。
- [50] 楼群, 高层建筑风振的MRFD与轻型AMD混合控制系统研究[D]. 泉州: 华侨大学, 2013。
- [51] 陆飞, 李爱群, 程文灏. 南京电视塔风振主动控制的实施方案研究 [J]. 东南大学学报 (自然科学版), 2002, 32(5): 799-803。
- [52] 山本雅史, 铃木祥之, 日本结构控制的工程应用[J]. 地震工程与工程振动, 2001, 12(4): 32-39。