

# ATMD 结构基于补偿器的准滑模控制\*

李志军<sup>1,2</sup>, 邓子辰<sup>3</sup>, 顾致平<sup>2</sup>

(1. 西安建筑科技大学土木工程学院 西安, 710055) (2. 西安工业大学建筑工程学院 西安, 710032)

(3. 西北工业大学工程力学系 西安, 710072)

**摘要** 针对主动调谐质量阻尼器(active tuned mass damper, 简称ATMD)控制系统用于结构振动控制工程中存在主动控制力偏大、控制系统鲁棒性较差的不足,基于线性二次型最优控制理论,设计了一种带有补偿器的滑模控制算法来计算ATMD系统的主动控制力。为了避免控制系统过大的颤振,提出一种含有饱和函数的指数趋近律,并且给出了相应准滑模控制器的设计方法。鉴于实际中会产生外部能量有限问题,引入了相应的饱和控制器。以一个单自由度结构模型为例进行了相应的数值分析,与相应的未含补偿器的指数趋近律方法设计的ATMD控制系统以及AMD和TMD控制系统的控制效果进行了对比。仿真结果表明,所提方法在保证控制系统较好鲁棒性和较小颤振的前提下,具有较好的控振效果。

**关键词** 补偿器;颤振;鲁棒性;饱和函数;准滑模控制;ATMD结构

**中图分类号** TU311.4; O328; TH11

## 引言

ATMD是土木工程结构中最常用的一种主动控制装置,ATMD系统因其需要的作动器少且控制效果好等优点在高层建筑、高耸结构风振、地震反应控制以及大型桥梁结构建设期间的桥塔风振控制中获得了很好的应用<sup>[1-5]</sup>。ATMD系统的不足在于它所需的最优主动控制力较大,有时鉴于外部能量有限,导致作动器无法提供最优的控制力,因而影响整个结构系统的控制效果<sup>[5]</sup>。

设计ATMD系统中主动控制作动器的驱动力的算法很多<sup>[6-7]</sup>,滑模控制算法作为非线性控制算法的一种,相比于传统的线性控制算法而言,具有控制算法简单、鲁棒性好和可靠性高等优点<sup>[8-12]</sup>。滑模控制对系统的参数摄动和外部干扰的不变性是以控制量的高频抖振换取的。在实际应用中,这种高频抖振在理论上是无限快的,没有任何执行机构能够实现。同时,这样的高频输入很容易激发系统的未建模特性,从而影响系统的控制性能。过大的抖振成为滑模控制在实际结构工程中应用的突出障碍<sup>[11-12]</sup>。

为了改善ATMD系统的不足,使结构系统在一定的主动控制力作用下具有相对最优的控制效果,笔者采用了一种带有补偿器的准滑模控制算法来计算

ATMD系统的主动控制力。考虑到外部能量有限问题,引入了相应的饱和控制器。以一个单自由度结构模型为例,利用Matlab软件编制了相应的程序,并进行了相应的数值分析。

## 1 运动方程

设 $n$ 自由度结构的顶部安装了主动ATMD系统,如图1所示,则结构ATMD控制系统的运动方程可以表示为

$$\begin{cases} M\ddot{X} + C\dot{X} + KX = -M\{1\}\ddot{x}_g(t) + B_s U(t) \\ X(t_0) = X_0 \\ \dot{X}(t_0) = \dot{X}_0 \end{cases} \quad (1)$$

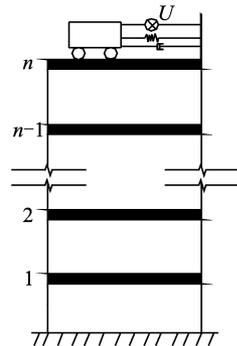


图1 顶层装有ATMD的高层建筑模型

\* 国家自然科学基金资助项目(编号:10632030,51178388,10972168);陕西省教育厅专项科研计划资助项目(编号:09JK485);西安工业大学校长基金重点资助项目(编号:XAGDXJJ0919)

收稿日期:2011-05-26;修改稿收到日期:2011-08-29

其中:  $\mathbf{X}, \dot{\mathbf{X}}, \ddot{\mathbf{X}}$  分别为结构 ATMD 控制系统的位移向量、速度向量和加速度向量, 且  $\mathbf{X} = [x_1, x_2, \dots, x_n, x_a]^T$  为  $n+1$  维位移列向量 ( $x_i$  为第  $i$  层相对于地面的位移);  $\mathbf{X}(t_0), \dot{\mathbf{X}}(t_0)$  分别为结构的初始位移向量和初始速度向量;  $\mathbf{B}_s$  为控制力作用位置矩阵,  $\mathbf{B}_s = [0, \dots, 0, -1, 1]^T$ ;  $U(t)$  为作动器作用在结构和 ATMD 惯性质量上的驱动力;  $\mathbf{M}, \mathbf{C}$  和  $\mathbf{K}$  分别为结构 ATMD 控制系统的质量阵、阻尼阵和刚度阵。

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} m_1 & & & & & \\ & m_2 & & & & \\ & & \ddots & & & \\ & & & m_n & & \\ & & & & & m_a \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & \dots & c_{1n} & 0 \\ c_{21} & c_{22} & \dots & c_{2n} & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ c_{n1} & c_{n2} & \dots & c_{nn} + c_a & -c_a \\ 0 & 0 & \dots & -c_a & c_a \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & \dots & k_{1n} & 0 \\ k_{21} & k_{22} & \dots & k_{2n} & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ k_{n1} & k_{n2} & \dots & k_{nn} + k_a & -k_a \\ 0 & 0 & \dots & -k_a & k_a \end{bmatrix}$$

其中:  $m_i$  为第  $i$  层的集中质量;  $k_{ij}, c_{ij}$  分别为结构的刚度和阻尼系数, 与结构的计算模型有关;  $\{-1\}$  是元素为  $-1$  的列向量;  $\ddot{x}_g(t)$  为输入到结构的地震加速度。

将式(1)转化成状态方程为

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{Z}}(t) = \mathbf{AZ}(t) + \mathbf{BU}(t) + \mathbf{H}\ddot{x}_g(t) \\ \mathbf{Z}(t_0) = \mathbf{Z}_0 \end{cases} \quad (2)$$

其中:  $\mathbf{Z}(t) = \begin{bmatrix} \mathbf{X} \\ \dot{\mathbf{X}} \end{bmatrix}$ ;  $\mathbf{Z}(t_0) = \begin{bmatrix} \mathbf{X}_0 \\ \dot{\mathbf{X}}_0 \end{bmatrix}$ ;  $\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{I}_{n+1} \\ -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{K} & -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{C} \end{bmatrix}$ ;  $\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{M}^{-1}\mathbf{B}_s \end{bmatrix}$ ;  $\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ -\mathbf{1} \end{bmatrix}$ 。

## 2 带有补偿器的准滑模控制

带有补偿器的准滑模控制器的控制系统框图如图2所示。

### 2.1 补偿器的设计

引入转换矩阵  $\mathbf{T}$ , 令  $\mathbf{Y} = \mathbf{TX}$ , 且忽略外部激励的

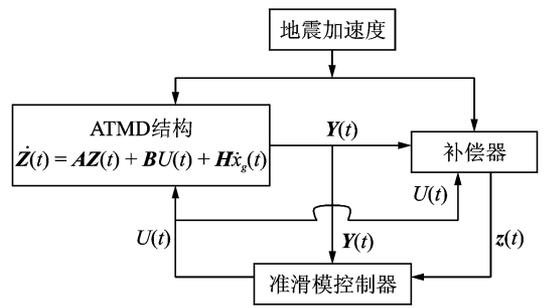


图2 结构 ATMD 控制系统框图

影响, 则式(2)可以转换为如下规范形式

$$\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{Y}}_1 \\ \dot{\mathbf{Y}}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{11}^* & \mathbf{A}_{12}^* \\ \mathbf{A}_{21}^* & \mathbf{A}_{22}^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_1 \\ \mathbf{Y}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{B}_2 \end{bmatrix} U(t) \quad (3)$$

其中:  $\mathbf{Y}_1$  为  $(2(n+1)-r)$  维向量;  $\mathbf{Y}_2$  为  $r$  维向量;  $\mathbf{A}_{ij}^*$  为变换后的结构参数矩阵  $\mathbf{TAT}^{-1}$  的相应维数的子矩阵;  $\mathbf{B}_2$  为  $r \times r$  维非零的控制力作用位置矩阵。

由于控制器的数量为  $r$  个, 所以可设补偿器的状态向量  $\mathbf{z}$  为  $r+1$  维。为简单起见, 令  $\mathbf{z}_1$  为一维向量,  $\mathbf{z}_2$  为  $r$  维向量, 可由下面的动态系统来确定

$$\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{z}}_1 \\ \dot{\mathbf{z}}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{F}_{11} & \mathbf{F}_{12} \\ \mathbf{F}_{21} & \mathbf{F}_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{z}_1 \\ \mathbf{z}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{G}_1 \\ \mathbf{G}_2 \end{bmatrix} \mathbf{Y} + \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{D}_2 \end{bmatrix} U(t) \quad (4)$$

其中:  $\mathbf{D}_2$  为  $r \times r$  维的控制力作用位置矩阵。

假设理想滑模面具有如下线性形式

$$\boldsymbol{\varphi}(\mathbf{z}) = \boldsymbol{\varphi}_1 \mathbf{z}_1 + \boldsymbol{\varphi}_2 \mathbf{z}_2 = \mathbf{0} \quad (5)$$

其中:  $\boldsymbol{\varphi}_1$  为  $r$  维滑模面待定参数向量;  $\boldsymbol{\varphi}_2$  为  $r \times r$  维滑模面待定参数矩阵。

确定滑模面的方法有很多, 如极点配置法、二次型最优配置法等, 具体见文献[6]。

由式(5)可得

$$\mathbf{z}_2 = -\boldsymbol{\varphi}_2^{-1} \boldsymbol{\varphi}_1 \mathbf{z}_1 \quad (6)$$

如果达到理想的滑动模态控制, 则  $\dot{\boldsymbol{\varphi}}(\mathbf{z}) = \mathbf{0}$ , 即

$$\dot{\boldsymbol{\varphi}}(\mathbf{z}) = \boldsymbol{\varphi}_1 \dot{\mathbf{z}}_1 + \boldsymbol{\varphi}_2 \dot{\mathbf{z}}_2 = \mathbf{0} \quad (7)$$

将式(4)和式(5)代入式(7), 可得出相应的等效控制力  $U_{eq}$

$$U_{eq} = -(\boldsymbol{\varphi}_2 \mathbf{D}_2)^{-1} [(\boldsymbol{\varphi}_1 \mathbf{G}_1 + \boldsymbol{\varphi}_2 \mathbf{G}_2) \mathbf{Y} + (\boldsymbol{\varphi}_1 \mathbf{F}_{11}^* + \boldsymbol{\varphi}_2 \mathbf{F}_{12}^*) \mathbf{z}_1] \quad (8)$$

其中

$$\begin{cases} \mathbf{F}_{11}^* = \mathbf{F}_{11} - \mathbf{F}_{12} \boldsymbol{\varphi}_2^{-1} \boldsymbol{\varphi}_1 \\ \mathbf{F}_{12}^* = \mathbf{F}_{21} - \mathbf{F}_{22} \boldsymbol{\varphi}_2^{-1} \boldsymbol{\varphi}_1 \end{cases} \quad (9)$$

将式(8)代入式(3)、式(4)和式(5), 可得如下增广形式的全状态反馈控制系统

$$\dot{\mathbf{Y}}^* = \mathbf{A}^* \mathbf{Y}^* + \mathbf{B}^* U^* \quad (10)$$

其中

$$Y^* = \begin{Bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ z_1 \end{Bmatrix}, A^* = \begin{bmatrix} A_{11}^* & A_{12}^* & \mathbf{0} \\ A_{21}^* & A_{22}^* & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix},$$

$$B^* = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ B_2 & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{1} \end{bmatrix}, U^* = \begin{Bmatrix} U_{\text{eq}} \\ \dot{z}_1 \end{Bmatrix} \quad (11)$$

定义系统的二次型性能泛函为

$$J = \frac{1}{2} \int_{t_0}^{\infty} [Y^{*\text{T}}(t) Q Y^*(t) + U^{*\text{T}}(t) R U^*(t)] dt \quad (12)$$

其中:  $Q$  为相应维数的半正定矩阵;  $R$  为相应维数的正定矩阵。

根据线性二次型(LQR)经典最优控制算法<sup>[6]</sup>, 可得式(10)控制系统的控制力为

$$U^* = -K^* Y^* \quad (13)$$

其中:  $K^*$  为最优状态反馈增益矩阵。

由式(4)~式(8)可得

$$U^* = \begin{bmatrix} -(\varphi_2 D_2)^{-1}(\varphi_1 G_1 + \varphi_2 G_2) & -(\varphi_2 D_2)^{-1}(\varphi_1 F_{11}^* + \varphi_2 F_{12}^*) \\ G_1 & F_{11}^* \end{bmatrix} Y^* \quad (14)$$

比较式(13)和式(14)可得

$$K^* = - \begin{bmatrix} -(\varphi_2 D_2)^{-1}(\varphi_1 G_1 + \varphi_2 G_2) & -(\varphi_2 D_2)^{-1}(\varphi_1 F_{11}^* + \varphi_2 F_{12}^*) \\ G_1 & F_{11}^* \end{bmatrix} \quad (15)$$

因此,由LQR算法确定出状态反馈增益矩阵

$$K^* \text{ 后, 补偿器的设计参数 } F = \begin{bmatrix} F_{11} & F_{12} \\ F_{21} & F_{22} \end{bmatrix}, G =$$

$$\begin{bmatrix} G_1 \\ G_2 \end{bmatrix} \text{ 和 } D = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ D_2 \end{bmatrix} \text{ 可以由式(15)确定。式(15)中, } D_2$$

由式(11)中的  $B_2$  确定,  $F_{11}$  和  $F_{22}$  的选择要保证增广系统式(10)的稳定性。

## 2.2 控制器设计

考虑外部激励的影响,则补偿器的状态方程为

$$\begin{bmatrix} \dot{z}_1 \\ \dot{z}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{11} & F_{12} \\ F_{21} & F_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} z_1 \\ z_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} G_1 \\ G_2 \end{bmatrix} Y + \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ D_2 \end{bmatrix} U(t) + \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ H_2^* \end{bmatrix} \ddot{x}_g(t) \quad (16)$$

其中:  $H_2^*$  为与控制力位置相应的外部激励位置向量。

准滑动模态是指系统的运动轨迹被限制在理想滑动模态的某一邻域内的模态,而准滑动模态控制

则是使一定范围内的状态点均被吸引至切换面的某一邻域内,通常称此邻域为滑动模态切换面的边界层。在边界层内,准滑动模态不要求满足滑动模态的存在条件,因此准滑动模态不要求在切换面上进行控制结构的切换。将饱和函数引入到传统的指数趋近律中,设计控制律为

$$\dot{\varphi}(z) = -\varepsilon \text{sat}(\varphi(z)) - q\varphi(z) \quad (17)$$

$$\text{sat}(\varphi_i(z)) = \begin{cases} 1 & (\varphi_i > \delta) \\ k\varphi_i & (|\varphi_i| \leq \delta, k = \frac{1}{\delta}) \\ -1 & (\varphi_i < -\delta) \end{cases}$$

其中:  $\varepsilon > 0, q > 0$ 。

$\varepsilon$  为系统克服摄动及外干扰的主要参数,  $q$  主要影响切换函数的动态过渡过程。  $\varepsilon$  过小无法保证滑模面的存在,但  $\varepsilon$  过大又会引起控制系统过大的抖振。  $\delta$  称为“边界层”。饱和函数  $\text{sat}(\varphi)$  的本质为:在边界层外,采用切换控制;在边界层内,采用线性化反馈控制。

将式(6)、式(17)代入式(16),可得

$$U = -(\varphi_2 D_2)^{-1} [(\varphi_1 G_1 + \varphi_2 G_2) Y + \varphi_1 F_{11}^* z_1 + \varphi_2 F_{12}^* z_1 + \varphi_2 H_2^* \ddot{x}_g(t) + \varepsilon \text{sat}(\varphi) + q\varphi] \quad (18)$$

## 2.3 饱和控制律的设计

对于土木工程振动的控制问题,由于外部所能提供的能量有限,实际控制力的大小将受到作动器最大极限控制力的限制;因此,采用如下饱和控制方法,实际控制力按式(19)取值

$$\dot{U}(t) = \begin{cases} U(t) & (|U(t)| \leq \bar{U}(t)), \\ \frac{U(t)}{|U(t)|} \bar{U}(t) & \text{其他} \end{cases} \quad (19)$$

其中:  $U(t)$ ,  $\bar{U}$  和  $\dot{U}(t)$  分别为计算控制力、最大极限控制力和实际作用于结构的控制力。

## 3 数值分析

考虑一座顶部安装了一个ATMD控制装置的单自由度结构,如图3(c)所示。为了说明笔者所提方法的有效性,同时提出了结构顶部分别安装一个TMD和AMD控制装置的情况,两种情况分别如图3(a)和图3(b)所示。结构质量  $m = 1\,000\text{ t}$ , 刚度  $k = 36 \times 10^6\text{ N/m}$ , 自振频率  $\omega_0 = 6\text{ rad/s}$ , 阻尼比  $\xi = 0.02$ , 阻尼  $c = 240\text{ (kN} \cdot \text{s)/m}$ 。结构只遭受地震作用,地震输入为EL Centro(NS, 1940)波,峰值为120 gal。式(17)中参数  $q$  取为10,  $\varepsilon$  和  $\delta$  均取为0.1。

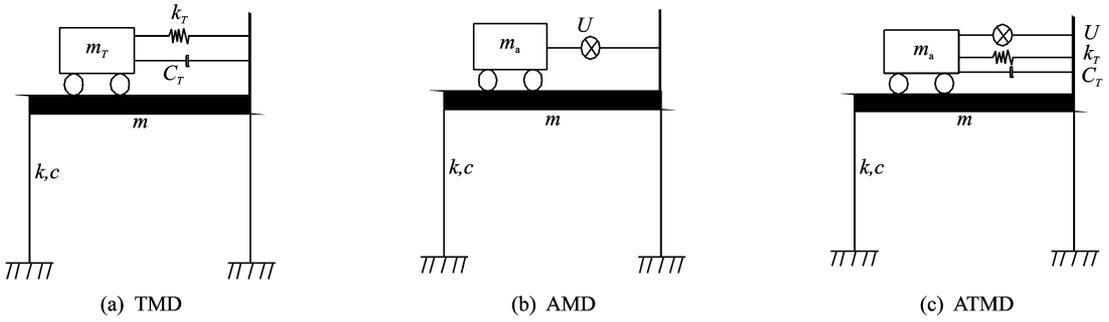


图3 结构计算模型

1) 被动TMD系统设计。ATMD系统按两阶段设计,首先,按没有主动控制作动器的被动TMD设计,设ATMD系统与结构的质量比 $\mu = m_a/m = 2\%$ 。根据文献[13],可得被动TMD系统的最优频率比和阻尼比为 $\beta_{opt} = 0.9755$ 和 $\xi_a = 0.07$ ,即TMD系统的频率为 $\omega_a = \beta_a \omega_0 = 5.853$ 。被动TMD系统的参数为 $m_a = m \times 2\% = 20\text{ t}$ ,  $k_a = \omega_a^2 m_a = 685.152\text{ kN/m}$ ,  $c_a = 2m_a \xi_a \omega_a = 16.388\text{ (kN} \cdot \text{s)/m}$ 。

2) AMD控制系统计算模型。结构AMD控制系统的质量阵、刚度阵和阻尼阵分别为

$$M = \begin{bmatrix} 10^6 & 0 \\ 0 & 2 \times 10^4 \end{bmatrix} (\text{kg})$$

$$C = \begin{bmatrix} 240 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} (\text{kN} \cdot \text{s)/m}$$

$$K = \begin{bmatrix} 36\ 000 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} (\text{kN/m})$$

采用最优控制方法确定切换面,取增益矩阵 $Q = \text{diag}[2 \times 10^9 \ 2 \ 2 \times 10^5 \ 2]$ ,可得切换面为 $S = -48.7250x + x_a + 7.5471\dot{x} + \dot{x}_a$ 。

3) ATMD控制系统计算模型。结构ATMD控制系统的质量阵、刚度阵和阻尼阵分别为

$$M = \begin{bmatrix} 10^6 & 0 \\ 0 & 2 \times 10^4 \end{bmatrix} (\text{kg})$$

$$C = \begin{bmatrix} 240 + 16.388 & -16.388 \\ -16.388 & 16.388 \end{bmatrix} ((\text{kN} \cdot \text{s)/m})$$

$$K = \begin{bmatrix} 36\ 000 + 685.15 & -685.15 \\ -685.15 & 685.15 \end{bmatrix} (\text{kN/m})$$

同样采用最优控制方法确定切换面,取增益矩阵 $Q = \text{diag}[2\ 000 \ 20 \ 200 \ 2]$ ,可得切换面为 $S = -62.9061x + 4.8473x_a + 12.9516\dot{x} + \dot{x}_a$ 。

考虑含有补偿器的情况,根据LQR控制算法,取权矩阵 $Q = \text{diag}[1 \times 10^5 \ 1 \ 1 \times 10^7 \ 20 \ 1]$ ,  $R = \text{diag}[1 \times 10^{-5} \ 1]$ ,可以确定式(13)中的状态反

馈增益矩阵 $K^*$ 。取 $F_{12} = -1.0, F_{22} = -10, \varphi = [0.134 \ 2 \ 1]$ ,则可以确定补偿器的其余设计参数为 $F_{11} = -1.134 \ 2, F_{21} = -1.207 \ 8, G_1 = [0 \ 0 \ 0 \ 0], G_2 = [-335.95 \ -3.9 \times 10^{-4} \ -15.66 \ 2.85], D = 0, D_2 = 1.0 \times 10^{-5}$ 。

各种不同工况下,结构地震作用下最大位移和加速度反应如表1所示。表中ATMD工况表示ATMD控制系统的刚度和阻尼系数为上述被动TMD系统的相应值,且未引入补偿器的情况,主动控制器采用基于指数趋近律的滑模控制算法来设计;ATMDC工况表示ATMD系统引入了补偿器的情况,其中含有补偿器的主动控制器采用相应的准滑模控制算法来设计,其控制力时程如图4所示。

由表1可以看出,与TMD,AMD以及ATMD工况相比,含有补偿器的ATMD控制系统(即ATMDC工况)具有最好的控制效果。由图4可以看出,准滑模控制方法设计的控制系统具有很小的抖振。

表1 结构ATMD控制系统的最大地震反应

工况	$x_m /$ cm	$\dot{x}_m /$ (cm · s <sup>-2</sup> )	$\ddot{x}_m /$ (cm · s <sup>-1</sup> )	$x_{am} /$ cm	$U_{am} /$ kN
无控	5.40	272	31.69		
TMD	4.14	227	24.86	18.53	
AMD	2.81	175	20.81	35.99	276
ATMD	2.50	156	20.50	33.45	188
ATMDC	2.36	157	19.36	36.35	103

$x_m, \dot{x}_m$ 和 $\ddot{x}_m$ 分别为结构的最大位移、速度和加速度; $x_{am}, U_{am}$ 分别为相应控制系统的质量块最大行程和直接作用在结构上的控制力

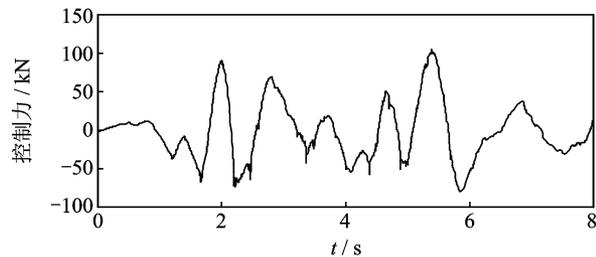


图4 采用准滑模控制算法的控制力反应时程

不同工况下,结构的位移反应时程如图5所示。由图5可以清楚地看出,相比其他工况,笔者所提方法具有很好的控制效果,尤其是对地震峰值反应的控制。

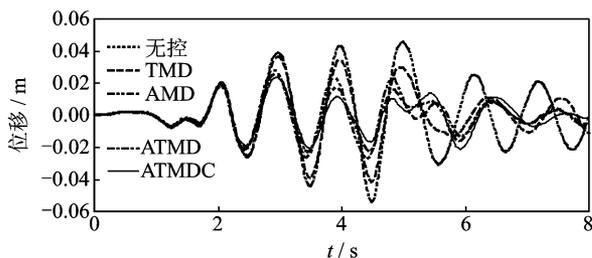


图5 不同工况下结构的位移反应时程

为了说明笔者所提方法对结构参数具有较好的鲁棒性,以结构刚度为例,变化结构刚度的 $\pm 10\%$ ,其相应的位移反应时程如图6所示。由图6可以看出,所提方法对于结构参数具有较好的鲁棒性。

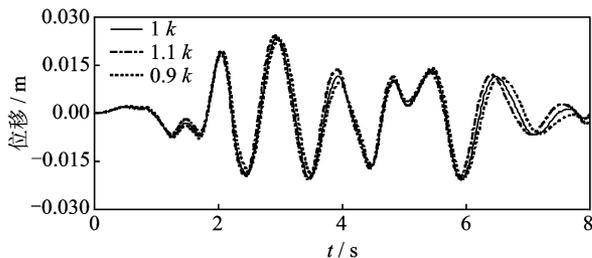


图6 刚度变化下结构的位移反应时程

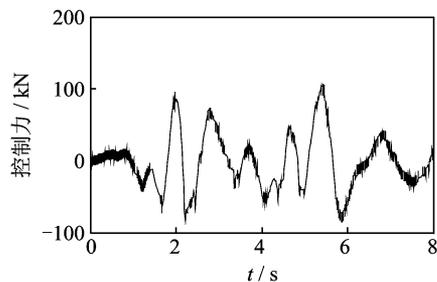
为了说明基于指数趋近律的滑模控制方法在抑制过大抖振方面的不足,改变设计参数 $\epsilon$ 值,分别采用指数趋近律的滑模控制算法和基于饱和函数的准滑模控制算法来设计含有补偿器的ATMD控制系统,相应的控制力时程如图7所示。由图7可以看出,准滑模控制方法克服了传统指数趋近律方法的不足,较好地抑制了控制系统过大的抖振。

以最大控制力 $U=100$  kN为例来说明控制力受限情况下所提方法的有效性,不同工况下结构的最大地震反应如表2所示。由表2可以看出,与其他控制方法相比,笔者所提方法在相同控制力作用下具有最优的控制效果。

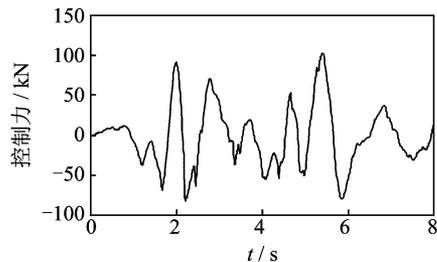
表2 结构ATMD控制系统的最大地震反应( $U=100$  kN)

工况	$x_m/$ cm	$\dot{x}_m/$ (cm·s <sup>-2</sup> )	$\ddot{x}_m/$ (cm·s <sup>-1</sup> )	$x_{am}/$ cm	$U_{am}/$ kN
无控	5.40	272	31.69		
TMD	4.14	227	24.86	18.53	
AMD	4.99	254	34.97	32.74	100
ATMD	2.54	159	20.65	34.16	100
ATMDC	2.36	157	19.36	36.35	100

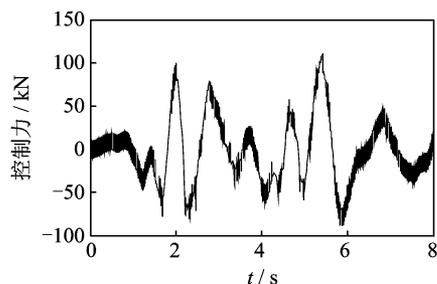
$x_m$ ,  $\dot{x}_m$  和  $\ddot{x}_m$  分别为结构的最大位移、速度和加速度;  $x_{am}$ ,  $U_{am}$  分别为相应控制系统的质量块最大行程和直接作用在结构上的控制力



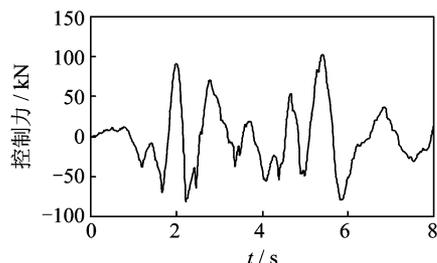
(a)  $\epsilon=0.3$  (指数趋近律)



(b)  $\epsilon=0.3$  (准滑模控制)



(c)  $\epsilon=0.5$  (指数趋近律)



(d)  $\epsilon=0.5$  (准滑模控制)

图7 控制力反应时程

## 4 结束语

ATMD控制系统是土木工程结构中最常用的主动控制装置,因其需要的作动器少而且控制效果和鲁棒性好等优点在结构振动工程中获得了广泛应用。采用传统指数趋近律滑模控制算法来设计ATMD系统的主动控制力,具有控制算法简单、鲁棒性好和可靠性高等优点,但仍会存在控制力偏大、控制系统抖振过大等问题。笔者采用了一种带有补偿器的准滑模控制算法来计算ATMD系统的主动控制力,并且引入了饱和控制器来解决外部能量有限的问题。同时,为了减小控制系统的抖振,设计了一种基于饱和函数的指数趋近律方法。数值仿真结

果验证了所提方法的有效性。

### 参 考 文 献

- [1] Adhikari R, Yamaguchi H. Sliding mode control of buildings with ATMD[J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 1997, 26:409-422.
- [2] Aldawod M, Samali B, Naghady F, et al. Active control of along wind response of tall building using a fuzzy controller[J]. *Engineering Structures*, 2001, 23:1512-1522.
- [3] Samali B, Al-Dawod M. Performance of a five-storey benchmark model using an active tuned mass damper and a fuzzy controller[J]. *Engineering Structures*, 2003, 25:1597-1610.
- [4] Wang Anpei, Lin Y H. Vibration control of a tall building subjected to earthquake excitation[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2007, 299:757-773.
- [5] Pourzeynali S, Lavasani H H, Modarayi A H. Active control of high rise building structures using fuzzy logic and genetic algorithms[J]. *Engineering Structures*, 2007, 29:346-357.
- [6] 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,2003:1-18.
- [7] 段丽玮, 汤忠梁, 吴志华. 飞行器垂直尾翼  $H_\infty$  鲁棒振动控制主动控制[J]. *振动、测试与诊断*, 2011, 31(1): 119-123.
- Duan Liwei, Tang Zhongliang, Wu Zhihua. Active vibration suppression of vertical tail using  $H_\infty$  robust control theory [J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2011, 31(1): 119-123. (in Chinese)
- [8] 高为炳. 变结构控制的理论及设计方法[M]. 北京:科学出版社,1996:30-49.
- [9] Yang J N, Wu J C, Agrawal A K. Sliding mode control for seismically excited linear structures[J]. *Journal of Engineering Mechanics ASCE*, 1995, 121(12): 1386-1390.
- [10] Zhao Bin, Lu Xilin, Wu Minzhe. Sliding mode control of buildings with base-isolation hybrid protective system[J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2000, 29:315-326.
- [11] 靳保全, 熊诗波, 程珩. 电液位置伺服系统的抖振削弱滑模控制[J]. *振动、测试与诊断*, 2011, 31(3): 323-326.
- Jin Baoquan, Xiong Shibo, Cheng Hang. Chattering reduction sliding mode control for electro-hydraulic position servo system [J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2011, 31(3): 323-326. (in Chinese)
- [12] Alli H, Yakut O. Fuzzy sliding-mode control of structures [J]. *Engineering Structures*, 2005, 27: 277-284.
- [13] Tsai H C, Lin G C. Optimun tuned-mass dampers for minimizing steady-state response of support-excited and damped systems[J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 1993, 22:957-973.



**第一作者简介:**李志军,男,1975年8月生,博士后、副教授。主要研究方向为结构振动控制。曾发表《带限位装置的基础滑移隔震结构的模糊滑模控制研究》(《振动与冲击》2008年第27卷第9期)等论文。

E-mail: lzjsjh@yahoo.com.cn