文章编号:1006-1355(2015)06-0017-05 15099

# 考虑时滞的结构AMD系统控制方法与效果分析

陈茂生，王修勇，孙洪鑫，李建强

（湖南科技大学 土木工程学院，湖南 湘潭 411201）

**摘 要**:无线传感器网络的特点使得控制系统中不可避免地存在时滞,从而导致作动器产生的控制力不能及时地施加到结构上,影响控制效果。从考虑时滞的结构主动质量阻尼(AMD)控制系统的状态微分方程求得控制律,研究时滞线性系统振动的主动最优化控制方法并给出具体的实现过程。设计出的控制律表达式中既包括当前的状态反馈,又包括前若干步控制项的线性组合。若仍按无时滞控制设计对时滞控制系统进行控制将可能导致系统的响应发散,达不到对受控结构减振的目的。仿真算例表明,在一定的时滞量范围内,所提方法能够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。

**关键词**:振动与波;无线传感器网络;时滞;结构AMD控制系统;最优控制;均方值响应

**中图分类号**:TU311.3;TB535 **文献标识码**:A DOI编码:10.3969/j.issn.1006-1335.2015.06.004

# Control Method and Effect Analysis of Structure AMD System Considering Time Delay

*CHEN Mao-sheng, WANG Xiu-yong, SUN Hong-xin, LI Jian-qiang*

(Department of Civil Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, Hunan China)

**Abstract**: The characteristic of wireless sensor network makes the time delay inevitable in the control system, so that the control force produced by the actuator cannot be timely applied to the structure, which reduces the control effect. In this paper, the control law of the system was obtained by solving the state differential equation of the structure AMD (Active Mass Damper) control system considering the time delay. The active optimal control method for linear vibration systems considering the time delay was studied and its implementation process was given. The designed control law expression contained the current step state feedback and the linear combination of the control terms in some previous steps. The instability in responses may occur if the systems with time delay are controlled by using the control law designed in the case of no time delay, failing to realize the goal of reducing the vibration of the controlled structure. The simulation results demonstrate that in a certain range of time delay, the presented control method is effective in reducing the maximum responses and mean square responses of the systems and the systems stability can be guaranteed by using this control method.

**Keywords**: vibration and wave ; wireless sensor network ; time delay ; structure AMD control system ; optimal control ; mean square value response

主动质量阻尼控制系统是目前研究与应用最为广泛的一种控制形式,为结构的抗震减振做出了重要的贡献[1]。全世界采用了AMD控制系统来减小或消除结构在施工中或使用中的风震响应的已有50多座电视塔、高层建筑和大型桥塔结构,且其都在实际的外部激励下取得了很好的减震效果[2]。鉴于此,对AMD控制系统的研究一直是学者们努力的方向之一,如涂建维等[3]将自适应最小控制合成算法应用到AMD控制系统中并取得了优于采用传统极点配置算法的实验控制效果;张春巍等[4]提出了应用于电磁驱动AMD控制系统的极点配置控制算法并进行了小型振动台试验,取得了很好的控制效果。近年来,无线传感器节点技术和无线传感器网络技术的发展,以及其在结构健康监测领域中的实际应用[5,6],为高耸、大跨和形式复杂的空间结构的

**收稿日期**:2015－03－21

**基金项目**:国家自然科学基金资助项目(51378203)

**作者简介**:陈茂生(1988－),男,湖南省邵阳市人,硕士生,主要研究方向:结构振动控制研究。

**通讯作者**:王修勇,男,教授,博士,主要研究方向:结构振动控制研究。

E-mail: xywang_cs@sina.com

减振控制带来了新的思路，这就是研究发展基于无线传感器网络的无线结构振动控制技术。无线传感器网络固有的特点使基于无线传感器网络的无线控制系统中存在不可避免且大小不能够被忽略的时滞，否则将达不到控制的目的，甚至取得适得其反的结果。针对控制系统中存在时滞的现象，国内外专家和学者已经提出了多种时滞补偿方法并对其进行了相关的研究和报导，概括起来主要有时域补偿、理论型补偿和相空间补偿三类基本的时滞补偿方法。Yang等[7]采用时域补偿方法对主动控制系统的时滞进行了研究；Qi等[8]提出了采用扩展的卡尔曼滤波器预测结构响应时进行时滞补偿的结构主动控制算法；Chung等[9]提出了一种改进的瞬时控制算法，通过瞬时改变反馈增益矩阵补偿时滞影响；李春祥等[10]提出了一种离散、时滞补偿控制算法补偿时滞对结构主动控制效果的不良影响；孙清等[11]通过采用移项法补偿时间滞后保证半主动控制系统的控制效果；赵明晓等[12]采用移相法和状态预测补偿策略补偿时滞给半主动控制系统带来的不利影响；李忠献等[13]对全反馈主动TMD控制理论及时间滞后量对TMD控制效果进行了研究；金峤等[14]研究了延时AMD对偏心结构离散变结构控制效果；滕军、鲁志雄等[15]提出了HMD控制系统基于模糊自适应调节的滑模变结构时滞补偿控制方法。本文通过直接求解考虑时滞的结构－AMD控制系统的状态微分方程，直接得出其控制率，并通过仿真模拟验证其对结构的减振控制效果。

# 1 结构—AMD控制系统的运动方程及其控制实现

## 1.1 结构—AMD控制系统的运动方程

设在顶部安装了一个AMD控制装置的$n$自由度结构控制系统的模型如下图1所示，则其运动方程可以表示为

$$\left.\begin{aligned}\bar{\boldsymbol{M}}\ddot{\bar{X}}+\bar{\boldsymbol{C}}\dot{\bar{X}}+\bar{\boldsymbol{K}}\bar{X}&=+\bar{\boldsymbol{M}}\bar{\boldsymbol{I}}\ddot{x}_g+\bar{\boldsymbol{H}}\bar{U}\\ \bar{X}(0)=0,\ \dot{\bar{X}}(0)&=0\end{aligned}\right\} \tag{1}$$

式中$\bar{X}$、$\dot{\bar{X}}$和$\ddot{\bar{X}}$分别是结构-AMD控制系统相对地面的位移向量、速度向量和加速度向量，且$\bar{X}=[x_1,x_2,\cdots,x_n,x_a]^{\mathrm{T}}$；$\bar{\boldsymbol{H}}=[0,\cdots,0,-1,1]^{\mathrm{T}}$是控制力作用位置矩阵；$\bar{U}=f_a(t)$；$\bar{\boldsymbol{I}}=[1,1,\cdots,1]^{\mathrm{T}}$；$\bar{\boldsymbol{M}}$、$\bar{\boldsymbol{C}}$和$\bar{\boldsymbol{K}}$分别是结构—AMD控制系统的质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵。

令$\bar{Z}=[\bar{X},\ \dot{\bar{X}}]^{\mathrm{T}}$，则结构－AMD控制系统的运动方程可改写成状态方程

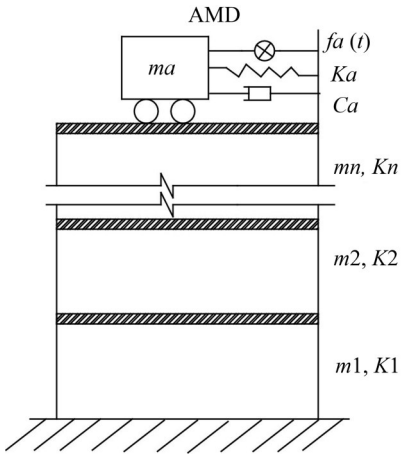



图1 结构-AMD控制系统模型

$$\left.\begin{aligned}\dot{\bar{Z}}&=\bar{\boldsymbol{A}}\bar{Z}+\bar{\boldsymbol{B}}\bar{U}+\bar{\boldsymbol{E}}\ddot{x}_g\\ \bar{Z}(0)&=0\end{aligned}\right\} \tag{2}$$

式中$\bar{\boldsymbol{A}}=\begin{bmatrix}\bar{0} & \bar{\Delta}\\ -\bar{\boldsymbol{M}}^{-1}\bar{\boldsymbol{K}} & -\bar{\boldsymbol{M}}^{-1}\bar{\boldsymbol{C}}\end{bmatrix}$，$\bar{\boldsymbol{B}}=\begin{bmatrix}\bar{0}\\ \bar{\boldsymbol{M}}^{-1}\bar{\boldsymbol{H}}\end{bmatrix}$，$\bar{\boldsymbol{E}}=\begin{bmatrix}\bar{0}\\ -\bar{\boldsymbol{I}}\end{bmatrix}$，$\bar{0}$和$\bar{\Delta}$为相应维数的零矩阵和单位矩阵。

无线传感器网络存在时滞的固有特性导致结构－AMD控制系统所需要的控制力不能及时地通过作动器予以施加，从而降低控制效果，甚至导致控制系统的失稳，因此时滞成为结构－AMD控制系统中必须要考虑的要素。考虑时滞的影响后，结构－AMD控制系统的状态方程式(2)变为

$$\left.\begin{aligned}\dot{\bar{Z}}&=\bar{\boldsymbol{A}}\bar{Z}+\bar{\boldsymbol{B}}\bar{U}(t-\tau)+\bar{\boldsymbol{E}}\ddot{x}_g\\ \bar{Z}(0)&=0\end{aligned}\right\} \tag{3}$$

式中$\tau$表示时滞量的大小，其余同式(2)。

为了更好地研究控制力的滞后对结构－AMD控制系统的控制效果的影响，在本文中取$ka$=0，$ca$=0。

## 1.2 结构－AMD控制系统的控制实现

对式(3)作如下变换[16]

$$\bar{Y}(t)=\bar{Z}(t)+\int_{-\tau}^{0}e^{-\bar{A}(\eta+\tau)}\bar{\boldsymbol{B}}\bar{U}(t+\eta)\mathrm{d}\eta \tag{4}$$

则可转换为

$$\dot{\bar{Y}}(t)=\bar{\boldsymbol{A}}\bar{Y}(t)+\bar{\boldsymbol{L}}\bar{U}(t)+\bar{\boldsymbol{E}}\ddot{x}_g \tag{5}$$

式中$\bar{\boldsymbol{L}}=e^{-\bar{A}\tau+\tau}\bar{\boldsymbol{B}}$，为((2$n$+2)×1)维矩阵。

采用线性二次型(LQR)经典最优控制理论[17]，选取目标函数为

$$J=\frac{1}{2}\int_0^{\infty}\bar{Y}^{\mathrm{T}}(t)\boldsymbol{Q}\bar{Y}(t)+\bar{U}^{\mathrm{T}}(t)\boldsymbol{R}\bar{U}(t)\mathrm{d}t \tag{6}$$

式中$\boldsymbol{Q}\in\boldsymbol{R}^{2(n+1)\times 2(n+1)}$为半正定系数矩阵，$\boldsymbol{Q}\in\boldsymbol{R}^{1\times 1}$为正定系数矩阵。

最优控制律可确定为

$$\bar{U}(t)=-\boldsymbol{G}\bar{Y}(t)=-\boldsymbol{R}^{-1}\bar{\boldsymbol{L}}^{\mathrm{T}}\hat{\boldsymbol{P}}\bar{Y}(t) \tag{7}$$

式中$\hat{\boldsymbol{P}}$为Riccati方程的解方程如(8所示)。

$$\hat{\boldsymbol{P}}\bar{\boldsymbol{A}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}-\boldsymbol{P}\bar{\boldsymbol{L}}\boldsymbol{R}^{-1}\bar{\boldsymbol{L}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}=-\boldsymbol{Q} \tag{8}$$

将式(4)代入式(7)，则控制律可表达为

$$\bar{\boldsymbol{U}}(t)=-\boldsymbol{R}^{-1}\bar{\boldsymbol{L}}^{\mathrm{T}}\hat{\boldsymbol{P}}\left[\bar{\boldsymbol{Z}}^{\mathrm{T}}(t)+\int_{-\tau}^{0}e^{-\bar{A}(\eta+\tau)}\bar{\boldsymbol{B}}\bar{\boldsymbol{U}}(t+\eta)\mathrm{d}\eta\right] \tag{9}$$

由式(9)可以看出，表达式中的积分项的计算是实现控制律的关键问题，下面给出其计算方法

$$\text{令 }\boldsymbol{U}(t)=\int_{-\tau}^{0}e^{-\bar{A}(\eta+\tau)}\bar{\boldsymbol{B}}\bar{\boldsymbol{U}}(t+\eta)\mathrm{d}\eta \tag{10}$$

一般来说，对于同一控制律，如果不改变影响时滞量的因素，如计算机性能、传感器和控制装置等，时滞总是固定在某一数值。设数据采样周期为$T$，并设时滞量可表示为

$$\tau=lT+m \tag{11}$$

式中$l>0$为正整数；$0\leqslant m<T$，当$m$=0时，时滞量为采样周期的整数倍，当$m\neq 0$时，时滞量为采样周期的非整数倍。

当数据采样周期较小时，在相邻的两个采样点之间的控制力可按常值处理，即

$$\bar{\boldsymbol{U}}(t)=\bar{\boldsymbol{U}}(k),\ \ kT\leq t<(k+1)T \tag{12}$$

$\bar{\boldsymbol{U}}(k)$实际上代表第k步控制力$\bar{\boldsymbol{U}}(kT)$。为表达方便，本节中其他变量表达亦同此。当$t=kT$，即进行第$k$步计算时，经适当变换，式(10)可变为如下形式

$$\begin{aligned}\boldsymbol{U}(k)=&\int_{-(lT-m)}^{0}e^{-\bar{A}(lT-m)}e^{-\bar{A}\eta}\bar{\boldsymbol{B}}\bar{\boldsymbol{U}}(kT+\eta)\mathrm{d}\eta=\\&e^{-\bar{A}(lT-m)}[\int_{-(lT-m)}^{-(l-1)T}e^{-\bar{A}\eta}\bar{\boldsymbol{B}}\bar{\boldsymbol{U}}(kT+\eta)\mathrm{d}\eta+\cdots+\\&\int_{-(l-1)T}^{-(l-2)T}e^{-\bar{A}\eta}\bar{\boldsymbol{B}}\bar{\boldsymbol{U}}(kT+\eta)\mathrm{d}\eta+\int_{-T}^{0}e^{-\bar{A}\eta}\bar{\boldsymbol{B}}\bar{\boldsymbol{U}}(kT+\eta)\mathrm{d}\eta=\\&e^{-\bar{A}(lT-m)}[e^{\bar{A}(lT-m)}\int_{0}^{T-m}e^{-\bar{A}\eta_1}\mathrm{d}\eta_1\bar{\boldsymbol{B}}\bar{\boldsymbol{U}}(k-l)+\\&e^{\bar{A}(l-1)T}\int_{0}^{T}e^{-\bar{A}\eta_2}\mathrm{d}\eta_2\bar{\boldsymbol{B}}\bar{\boldsymbol{U}}(k-l+1)+\cdots+\\&e^{\bar{A}T}\int_{0}^{T}e^{-\bar{A}\eta_l}\mathrm{d}\eta_l\bar{\boldsymbol{B}}\bar{\boldsymbol{U}}(k-1)]\end{aligned} \tag{13}$$

设$\boldsymbol{D}(t)=e^{\bar{A}t}$，$\boldsymbol{G}(t)=\int_{0}^{t}e^{-\bar{A}\theta}\mathrm{d}\theta$，则式(13)可写成

$$\begin{aligned}\boldsymbol{U}(k)=&\boldsymbol{I}_{2(n+1)\times 2(n+1)}\boldsymbol{G}(T-m)\bar{\boldsymbol{B}}\bar{\boldsymbol{U}}(k-l)+\\&\boldsymbol{D}(m-T)\boldsymbol{G}(T)\bar{\boldsymbol{B}}\bar{\boldsymbol{U}}(k-l+1)+\\&\boldsymbol{D}(m-2T)\boldsymbol{G}(T)\bar{\boldsymbol{B}}\bar{\boldsymbol{U}}(k-l+2)+\cdots+\\&\boldsymbol{D}[m-(l-1)T]\boldsymbol{G}(T)\bar{\boldsymbol{B}}\bar{\boldsymbol{U}}(k-1)\end{aligned} \tag{14}$$

当$m$=0时，式(14)可表示为

$$\begin{aligned}\boldsymbol{U}(k)=&\boldsymbol{I}_{2(n+1)\times 2(n+1)}\boldsymbol{G}(T)\bar{\boldsymbol{B}}\bar{\boldsymbol{U}}(k-l)+\\&\boldsymbol{D}(-T)\boldsymbol{G}(T)\bar{\boldsymbol{B}}\bar{\boldsymbol{U}}(k-l+1)+\\&\boldsymbol{D}(-2T)\boldsymbol{G}(T)\bar{\boldsymbol{B}}\bar{\boldsymbol{U}}(k-l+2)+\cdots+\\&\boldsymbol{D}[-(l-1)T]\boldsymbol{G}(T)\bar{\boldsymbol{B}}\bar{\boldsymbol{U}}(k-1)\end{aligned} \tag{15}$$

从式(14)和(15)中可以看出，由(9)式具体实现控制律时，每一步的计算都包含了当前的状态反馈和前$l$步控制项的线性组合，而且不仅能够实现时滞量为采样周期整数倍的最优化控制，也能够实现时滞量不是采样周期整数倍时的最优化控制。

## 2　仿真算例

选取一在顶部安装了一个AMD控制装置的3自由度结构模型进行仿真分析，如上图1所示。设该结构结构各层质量和层间刚度分别为$m_i=4\times10^5$ kg和$k_i=2\times10^9$ N/m$(i=1,2,3)$，结构阻尼矩阵可按Rayleigh阻尼由前2阶振型阻尼比确定，即$\boldsymbol{C}=\alpha_c\boldsymbol{M}+\beta_c\boldsymbol{K}$，$\alpha_c$和$\beta_c$由前2阶振型阻尼比确定，且假定结构前2阶振型阻尼比$\xi_1=\xi_2$=5 %。设计AMD质量$m_a$为所控制结构质量的2 %。在此选取的地震波波源为EI Centro(NS,1940)波，且其输入峰值为200 Gal，采样周期$T$取为0.01 s。假定结构只遭受地震作用，无风荷载等其他外力荷载。

当采用理想(即时滞量为$\tau$=0 s)LQR控制方法对结构—AMD控制系统进行控制时，选取目标函数式(6)中的权系数矩阵$\boldsymbol{Q}$和$\boldsymbol{R}$分别如下：$\boldsymbol{Q}=\mathrm{diag}(\alpha_1\times\boldsymbol{K}\quad\alpha_2\times\boldsymbol{M}_s\quad\alpha_a\times m_a)$，$\boldsymbol{R}=7\times10^{-3}$，其中$\alpha_1=1\times10^7$，$\alpha_2=1\times10^7$，$\alpha_a=2\times10^4$，$\boldsymbol{M}_s$是结构的质量矩阵，即不含AMD系统的惯性质量。当控制系统中存在不同的时滞量，采用本文所提的时滞LQR控制方法进行控制时，仍采用与理想LQR控制方法时相同的权系数矩阵$\boldsymbol{Q}$和$\boldsymbol{R}$。

### 2.1　具体时滞量时的控制效果

仿真研究结果表明：当控制系统中存在时滞，却忽略其影响仍按理想情况下的LQR方法进行控制时，将可能导致系统的响应发散，达不到控制的目的，甚至会取得适得其反的结果。经验证，当时滞量大于或等于0.02 s时，该系统的响应都会发散，限于篇幅的原因，在此只给出时滞量为0.02 s时结构第三层的位移和加速度时程图，如图2所示。但是，当采用本文的考虑时滞的时滞最优控制方法进行控制时，系统响应不仅不会发散，而且能够取得较好的控制效果。当$\tau$=0.02 s，结构第三层的峰值位移、峰值加速度的减振率分别为58.2 %、45.0 %；均方值位移、均方值加速度的减振率分别为61.6 %、65.7 %。当$\tau$=0.1 s，结构第三层的峰值位移、峰值加速度的减振率分别为32.4 %、25.2 %；均方值位移、均方值加速度的减振率分别为40.5 %、37.1 %。综上可知，考虑时滞的时滞最优控制方法不仅能够确保结构—AMD时滞控制系统的稳定性，而且还能够取得较好的减振控制效果。限于篇幅，在此只给出$\tau$=0.1 s时结构第三层的位移和加速度时程图，如图3所示。

### 2.2　时滞量对控制效果的影响

为了对时滞量的大小对控制系统的控制效果的影响及其控制效果与时滞量的关系有一个更加清

晰、直观和明了的了解，采用各结构层的峰值位移减振率、峰值加速度减振率以及各结构层的均方值位移减振率、均方值加速度减振率这四个评价指标对其进行综合评价。在此分别给出结构峰值位移减振率、峰值加速度减振率与时滞量的关系，如图4所示；结构均方值位移减振率、均方值加速度减振率与时滞量的关系，如图5所示。

由图4和图5分析可知：

(1) 结构各层的峰值位移减振率和均方值位移减振率都随着时滞量的增大而呈现出减小的趋势，说明对结构位移的减振效果随着时滞量的增大而变差，但是即使时滞量较大，达到0.1 s时结构各层的峰值位移减振率和均方值位移减振率的最小值也还分别在30 %、40 %以上，进一步说明该控制方法对减小结构位移响应的有效性；此外，还可发现该控制方法对结构各层位移响应的减振率不相上下，说明对结构各层位移响应的控制效果都比较好。

(2) 结构第三层的峰值加速度减振率和均方值加速度减振率都随着时滞量的增大而变小，说明对结构顶层加速度的减振效果随着时滞量的增大而变差，但是即使时滞量较大，达到0.1 s时结构顶层的峰值加速度减振率和均方值加速度减振率也还分别在25 %、35 %以上，说明该控制方法对减小顶层加速度响应的有效性；结构第二层、第一层的峰值加速度减振率和均方值加速度减振率随着时滞量的增大没有确定的变化规律。但总的来说，在不同的时滞量情况下也都能够取得一定的减振效果；在不同的时滞量情况下，该控制方法对结构顶层的加速度减

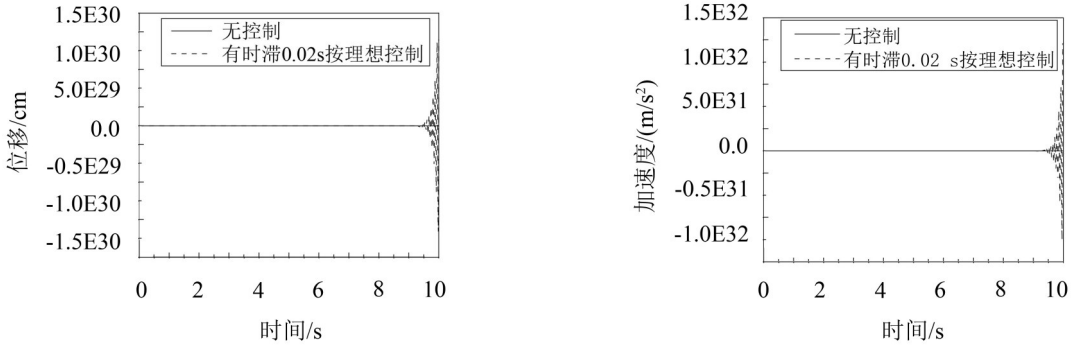



图2 有时滞量0.02 s按理想控制时结构第三层的位移和加速度时程图

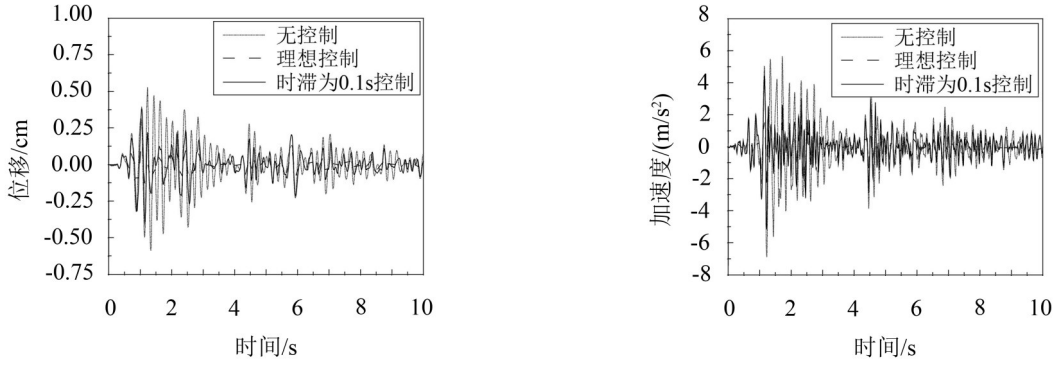



图3 时滞量 $\tau$ =0.1 s时结构第三层的位移和加速度时程图

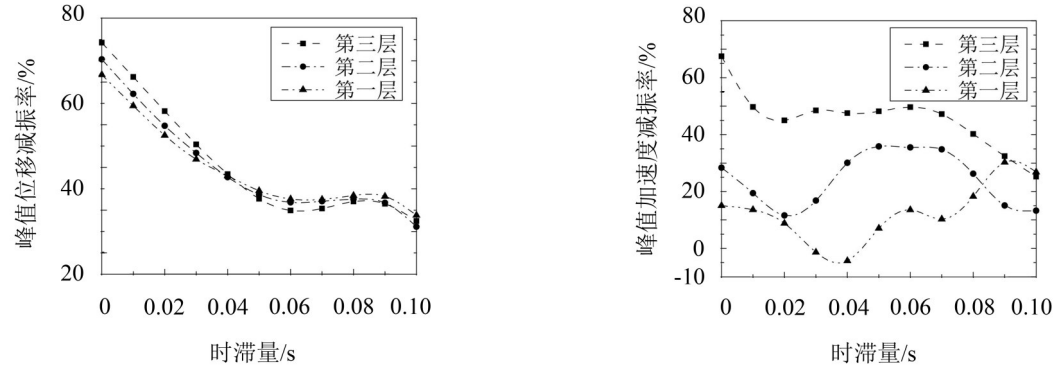



图4 结构各层位移峰值和加速度峰值减振率与时滞量的关系

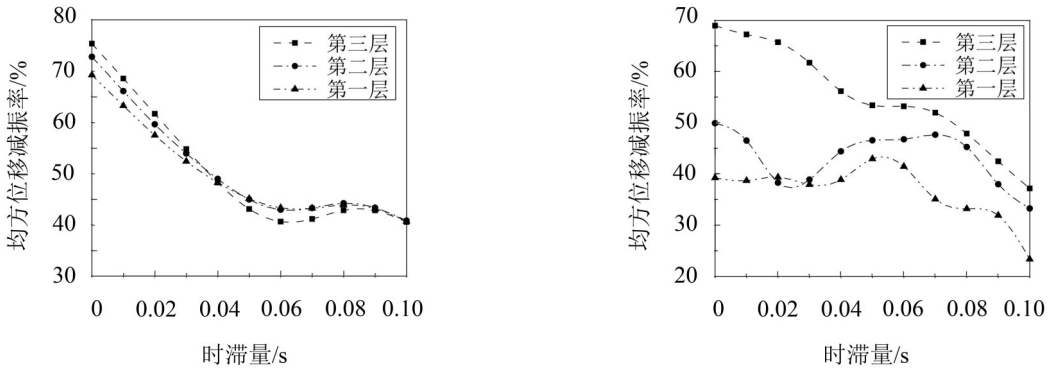



图 5 结构各层均方位移和均方加速度减振率

振控制效果要好于第二层，且第二层要好于第一层。综上可知，所提的控制方法能够在系统存在时滞的情况下对受控结构达到较好的减振效果。

## 3 结 语

通过求解考虑时滞的结构－AMD控制系统的状态微分方程，直接得出其控制率，既保证了控制系统的稳定性，又能够确保即使在较大的时滞量情况下对受控结构也能取得较好的控制效果。所设计出的控制率表达式中既包括了当前的状态反馈，又包括了前若干步控制项的线性组合。经研究发现，随着时滞量的增大，AMD控制系统对结构的减振控制效果虽然呈现出变差的趋势，但是即使是在时滞量较大(0.1 s)的情况下，也能够取得较好的控制效果，进一步验证了本文针对存在时滞的结构－AMD控制系统所提的控制方法的有效性。

**参考文献：**

[1] 欧进萍. 结构振动控制—主动半主动与智能控制[M]. 北京：科学出版社，2003.

[2] Spencer B F Jr, Nagarajaiah S. State of the art of structural control[J]. **ASCE, Journal of Structural Engineering**, 2003, 129(7): 845-856.

[3] 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**，2013，33(05)：136-140.

[4] 张春巍, 欧进萍. 结构振动的电磁驱动AMD系统控制策略与试验[J]. **噪声与振动控制**，2006，26(05)：9-13.

[5] Barroca N, Borges L M, Velez F J, et al. Wireless sensor networks for temperature and humidity monitoring within concrete structures[J]. **Construction and Building Materials**, 2013, 40(3): 1156-1166.

[6] Chae M J, Yoo H S, Kim J Y, et al. Development of a wireless sensor network system for suspension bridge health monitoring[J]. **Automation in Construction**, 2012, 21: 237-252.

[7] Yang J N, Akbarpour A, Askar G. Effect of time delay on control of seismic-excited building[J]. **Journal of Structural Engineering**, **ASCE**, 1990, 116(10): 2801-2814.

[8] Qi K, Kuang J S. Time delay compensation in active closed- loop structural control[J]. **Mechanics Research Communications**, 1995, 22(2): 129-135.

[9] Chung L L, Wang Y P, Tung CC. Instantaneous control of structures with time- delay consideration[J]. **Engineering Structures**, 1997, 19(6): 465-475.

[10] 李春祥，韩传峰，杨文勇. 建筑结构在风与地震作用下的时滞补偿主动控制算法[J]. **山东建筑工程学院学报**，1997 (12).

[11] 孙清，伍晓红，戴红，等. 结构振动半主动控制系统的时滞补偿研究[J]. **机械科学与技术**，2005(05).

[12] 赵明晓，张春丽. 结构振动半主动控制系统的时滞与补偿[J]. **中原工学院学报**，2006 (08).

[13] 李忠献，张伟，姜忻良，等. 高层建筑地震反应全反馈主动TMD控制理论研究[J]. **地震工程与工程振动**，1997，17(3)：60-63.

[14] 金峤，周晶. 考虑控制延时的AMD对偏心结构离散变结构控制[J]. **哈尔滨工业大学学报**，2005，37(6)：790-794.

[15] 鲁志雄. 高柔结构质量阻尼器振动控制应用研究[D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学，2009.

[16] Kwon W H, Pearson A E. Feedback stabilization of linear systems with delayed control[J]. **IEEE Transactions on Automatic Control**, 1980, AC225 (2): 266-269.

[17] 顾仲权，马扣根，陈卫东. 振动主动控制[M]. 北京：国防工业出版社，1997.