

# 基于MCS算法的振动主动控制时滞补偿

马天兵, 张建君, 杜菲, 钱星光

安徽理工大学机械工程学院, 淮南 232001

**摘要** 针对振动主动控制中时滞会引起最小控制合成算法失稳问题, 提出在传统的MCS算法的基础上, 应用smith预估器时滞补偿原理, 在MCS算法中添加时滞补偿因子, 构建一种改进的具有时延补偿的MCS算法。选取工业生产中常见的受控机械臂结构进行建模和仿真。结果表明, 改进的MCS算法克服了振动主动控制策略中时滞失稳问题, 具有较好的时滞补偿控制效果。

**关键词** 时滞补偿; 最小控制合成算法; 振动控制; smith预估

**中图分类号** TP273

**文献标志码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2015.15.011

## Research on time-delay compensator for active vibration control based on MCS algorithm

MA Tianbing, ZHANG Jianjun, DU Fei, QIAN Xingguang

School of Mechanical Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China

**Abstract** The minimal control synthesis (MCS) algorithm is a kind of self-adaptive control algorithm, which has been widely used in automatic control field because of simple calculation, intuitive structure, good non-linear ability and the ability against anti-interference. In order to solve the problem of time-delay of vibration active control, which may cause the algorithm's instability problem, a time delay compensation factor is designed for improving the traditional MCS algorithm on the basis of the Smith predictor using the time-delay compensation principle. Then a controlled manipulator commonly used in industrial production is chosen for building the dynamic model and simulation study. The result shows that the improved MCS algorithm can not only overcome the problem of delaying buckling in an active vibration control strategy, but also has a good effect of delaying compensation control.

**Keywords** time delay compensation; minimal controller synthesis (MCS); vibration control; smith estimates

现实中许多系统的变化趋势不仅与当前状态有关, 还取决于过去的状态, 这种现象称为时滞<sup>[1]</sup>。从系统理论的观点来看, 系统的各个部分如传感器的测量、控制系统决策、驱动器作动都存在时滞。时滞会导致控制系统性能恶化, 甚至破坏控制系统的稳定性。时滞的存在给控制系统的分析和综合带来了很大困难。特别地, 随着振动主动控制技术向宽频和高速方向发展, 受控机械系统的控制速度和控制品质也相应的提高, 而其控制器和作动器却出现了不可避免时滞问

题, 由于时滞的存在, 扰动不能被及时察觉, 控制需要长时间(相对来说)才能反映到系统上, 因而导致传统的控制器参数不易选取, 若控制参数调整不当, 会造成系统控制品质下降, 严重时会导致受控机械系统失稳, 整个系统崩溃。受控机械系统这种难以避免的时滞问题正引起人们的关注。

最小控制合成算法<sup>[2]</sup>是由Stoten等于1989年提出的一种自适应算法, 由于该算法在解决非线性和时变系统的突出效果, 受到了国际控制理论和控制工程领域的广泛关注。对该

收稿日期: 2015-01-14; 修回日期: 2015-04-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(51305003); 安徽省高校优秀青年人才基金重点项目(2012SQRL045ZD)

作者简介: 马天兵, 副教授, 研究方向为振动控制, 电子信箱: dfmtb@163.com

引用格式: 马天兵, 张建君, 杜菲, 等. 基于MCS算法的振动主动控制时滞补偿[J]. 科技导报, 2015, 33(15): 72-75.

算法的改进和优化也是硕果累累。如用于对象模型参数识别的最小控制综合辨识算法(MCSID),用于降低干扰区敏感度的基于误差的最小控制综合算法(Er-MCSI),用于参数未知非线性多变量系统控制的分散最小控制合成算法(DMCS)等。然而,对于标准的MCS算法控制时滞振动系统时表现的失稳和补偿的问题研究却鲜有报道<sup>[3]</sup>。

本研究利用smith预估器<sup>[4]</sup>时滞补偿技术,在标准的MCS算法中添加时延补偿因子,构建具有时滞补偿作用的改进MCS算法,选取合适的结构动力学模型,利用Matlab-Simulink进行仿真。

### 1 smith 预估器基本原理

smith 预估器控制的基本思路是预先估计控制过程在基本扰动下的动态特性,用一个smith 预估补偿器进行时间滞后补偿,其结构原理如图1<sup>[5]</sup>所示。

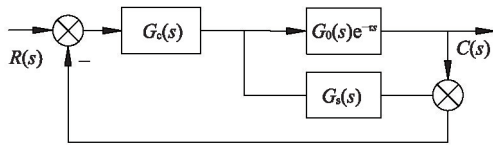


图1 smith 预估器结构原理

Fig. 1 Diagram of smith predictor

图1中,  $G_0(s)e^{-\tau s}$  为广义控制对象数学模型,  $G_0(s)$  为不包含延迟时间  $\tau$  的对象模型,  $G_c(s)$  为系统的一般控制器模型, 这里为后文提到的MCS算法控制器。  $G_s(s)$  为smith时延预估补偿器, 其计算表达式为

$$G_s(s) = G_m(s)(1 - e^{-\tau s}) \quad (1)$$

式中,  $G_m(s)$  为预估模型,  $\tau_m$  为预估滞后时间常数。控制系统传递函数为<sup>[6]</sup>

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{G_c(s)G_0(s)e^{-\tau s}}{1 + G_c(s)[G_m(s) + G_0(s)e^{-\tau s} - G_m(s)e^{-\tau s}]} \quad (2)$$

若预估模型  $G_m(s)$  近似估计值可以看作接近不含延迟控制对象模型  $G_0(s)$ , 预估滞后时间常数  $\tau_m$  估计值近似延迟时间  $\tau$ , 则  $G_s(s)$  变换为  $G_s(s) = G_0(s)(1 - e^{-\tau s})$ , 系统闭环传递函数为

$$\Phi(s) = \frac{C(s)}{R(s)} = \frac{G_c(s)G_0(s)e^{-\tau s}}{1 + G_c(s)G_0(s)} \quad (3)$$

其对应的动态结构等效原理如图2所示。

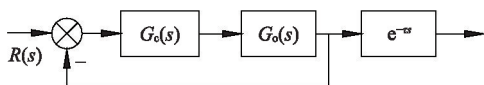


图2 动态结构等效原理

Fig. 2 Diagram of the dynamic structure equivalence principle

从图2可以看出控制系统转换为闭环控制结构和时延结构串联, 闭环控制结构就不含滞后环节。

### 2 含有时滞补偿的MCS算法

在标准的MCS算法控制中, 当输出响应  $x$  与参考模型输出响应  $x_m$  有偏差  $e$  时, 由  $e$  驱动自适应机构运行, 根据相应算法计算出控制增益  $k$  和  $k_r$ , 再根据状态反馈控制律计算出控制输出  $u$ , 施加到被控系统上<sup>[7]</sup>, 其工作原理如图3所示。

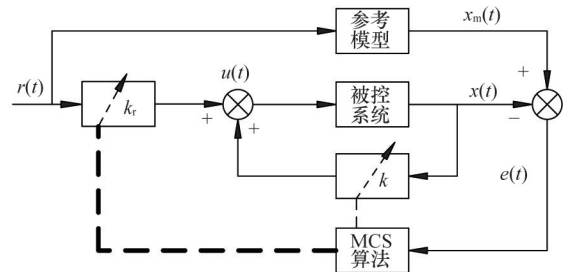


图3 标准MCS控制原理

Fig. 3 Block diagram of the MCS controller

标准MCS状态空间动力学方程为

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + d(t) \quad (4)$$

式中,  $A$  和  $B$  为系统参数矩阵,  $x$  为状态量,  $u$  为控制输出,  $d$  为外部扰动。

控制输出  $u$  的表达式为

$$u(t) = k(t)x(t) + k_r(t)r(t) \quad (5)$$

式中,  $r(t)$  为参考输入,  $k(t)$  和  $k_r(t)$  为系统的反馈和前馈增益, 分别由式(6)、(7)推导<sup>[8]</sup>得到

$$k(t) = \int_0^t \alpha y_c(\tau)x(\tau)d\tau + \beta y_c(t)x(t) \quad (6)$$

$$k_r(t) = \int_0^t \alpha y_c(\tau)r^T(\tau)d\tau + \beta y_c(t)r^T(t) \quad (7)$$

式中,  $\alpha$  和  $\beta$  分别为比例因子,  $y_c$  为输出误差。  $e(t)$  为状态误差,  $c_e$  为误差系数, 其基本关系表达式为

$$y_c(t) = c_e e(t) = c_e(x_m(t) - x(t)) \quad (8)$$

$$c_e = [0 \quad 1]P \quad (9)$$

式中,  $x_m$  为参考模型的状态量,  $P$  为正定矩阵, 且满足

$$PA_m + A_m^T P = -Q \quad (10)$$

式中,  $A_m$  为参考模型状态方程系数矩阵,  $Q$  为选取矩阵, 且  $Q > 0$ 。

对于存在时滞的振动主动控制系统, 当运用MCS控制策略时, 由于时滞的存在, 导致控制力与传感不同步, 从而可能一定程度上引起跟踪偏差增大, 因此出现了控制系统的失稳现象。

为了克服控制系统时滞问题, 根据smith 预估器时滞补偿原理, 在标准的MCS算法中添加时滞补偿因子进行补偿。具体做法: 先构造时滞补偿器  $G_m(s)(1 - e^{-\tau s})$ , 然后将控制信号  $u$  输入时滞补偿器后计算出延时误差  $d_e$ , 再将  $d_e$  反馈到状态误差  $e(t)$ , 计算得到新的状态误差  $x_c = x_m - x - d_e$ , 最后根据新的状态误差反馈到自适应机构计算出改进MCS算法下的反馈和前馈增益  $k$  和  $k_r$ , 在经过反馈控制律, 计算出控制输出  $u$

施加到被控系统上,考虑时滞补偿的改进的MCS算法原理如图4所示。

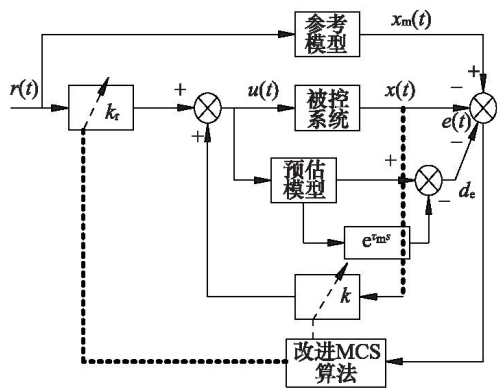


图4 改进的MCS算法控制原理

Fig. 4 Block diagram of the improved MCS controller

### 3 结构振动控制仿真与分析

选取文献[9]提供的柔性悬臂梁振动主动控制模型进行仿真研究,其状态空间方程为

$$\dot{Z} = AZ + Bu \quad (11)$$

式中,  $Z = \begin{bmatrix} Y \\ \dot{Y} \end{bmatrix}$ ,  $A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{bmatrix}$ ,  $B = \begin{bmatrix} 0 \\ -M^{-1} \end{bmatrix}$ 。Y为悬臂梁末端位移,M为梁的模态质量,K为模态刚度,C为模态阻尼。选取质量为0.1642 kg,刚度为41.7 N/m,阻尼为0.084 N·s/m,则得到:

$$M^{-1}k = 253.96$$

$$M^{-1}C = 0.51$$

$$M^{-1} = 6.09$$

$$\omega = \sqrt{M^{-1}K} = 15.94 \text{ rad/s}$$

为了方便仿真,被控系统模型、预估模型的参数矩阵均选择下文参数,并针对各组实际参数的不同略作调整:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -253.96 & -0.51 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ -6.09 \end{bmatrix}$$

$$C = [1 \ 0; \ 0 \ 1], D = [0]$$

参考模型也直接选择被控模型,并用文献[8]中的缩减因子法进行调整,缩减因子 $\mu$ 取0.3。仿真系统中取 $\alpha=1.0, \beta=0.1$ 。选取  $Q = \begin{bmatrix} 10 & 20 \\ 20 & 10 \end{bmatrix}$ ,利用 Matlab 中 lyap 函数求得误差系数  $c_e = [0.02 \ 9.84]$ 。

由于时滞的存在,传感器和作动器产生了时延,二者的采集信号和作动信号必然存在相位差,因此可以利用Lissajou图形法预估系统时间滞后常数 $\tau_m$ 。具体是将采集信号和驱动信号分别作为纵横坐标接入示波器,得到一个闭合的椭圆,如图5所示。对该椭圆进行拟合得到相位差 $\Delta\phi$ ,时延计算式<sup>[10]</sup>为

$$\tau_m = \frac{\Delta\phi}{2\pi} \frac{1000}{\omega} \quad (12)$$

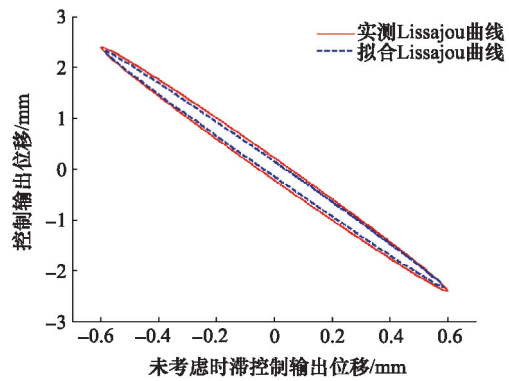


图5 Lissajou曲线拟合

Fig. 5 Lissajou fitted curve

采用频率为15.94 rad/s正弦信号激励,幅值为5 V,4 s后自由衰减,整个仿真时间为18 s。为了方便仿真结果的观测,人为取时延 $\Delta t$ 为1 s,搭建添加时滞补偿的MCS仿真模型。整个仿真结果如图6、图7所示。

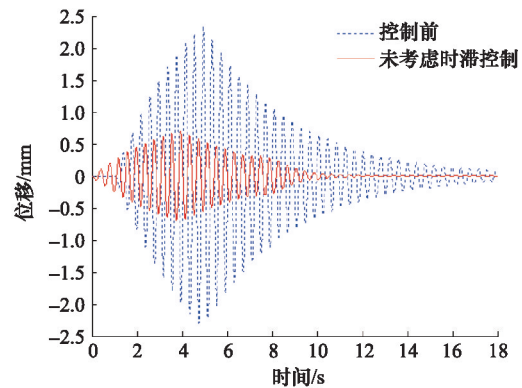


图6 未考虑时滞控制对比

Fig. 6 Without considering time-delay control comparison

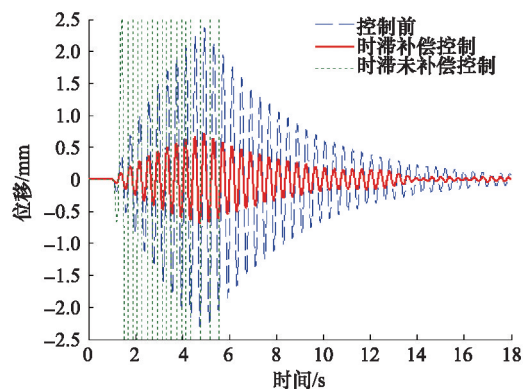


图7 添加时滞补偿控制对比

Fig. 7 With time-delay compensation control comparison

图6对比了未考虑时滞问题的MCS算法控制,也就是传统标准的MCS控制算法中未对控制对象添加时延,可以看出控制出现时间滞后,这与工程实际是高度吻合的,虽然仿真

效果较好,但在实际控制中,由于硬件控制器的限幅功能很容易导致发散,所以必须要进行时滞补偿。图7对比了时滞未补偿的控制和时滞补偿控制,也就是在标准的MCS算法中对控制对象添加时延,但前者并未进行补偿,而后者采用添加了smith预估时滞补偿器的MCS算法,仿真结果表明未添加时滞补偿的传统MCS算法控制出现了失稳,而添加时滞补偿的MCS算法具有更好时滞补偿作用,更优的控制效果。

在文献[9]中所采用的假设模态离散的最优跟踪控制方法,虽然取得了较好的控制效果,但是其线性化控制律并没有使系统在要求的时刻 $t=2$  s到达指定的位置,时滞问题的影响较为明显,而本文提出的添加时滞补偿的MCS算法弥补了该方面的不足。

#### 4 结论

在传统MCS算法的基础上,提出应用smith预估器进行时滞补偿,构建了一种改进的MCS算法。选取柔性悬臂梁结构模型作为控制对象,并结合Lissajou图形法,预估出时间常数 $\tau_m$ ,通过Matlab仿真出振动控制效果。仿真结果表明,改进的MCS算法不仅克服了振动主动控制策略中时滞失稳问题,而且具有较好的时滞补偿控制效果。

#### 参考文献(References)

- [1] 孙健, 陈杰, 刘国平. 时滞系统稳定性分析与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2012.  
Su Jian, Chen Jie, Liu Guoping. Time-delay system stability analysis and application[M]. Beijing: Science Press, 2012.
- [2] Stoten D P. A minimal controller synthesis adaptive algorithm for environmental systems[J]. Science et Technique Du Froid, 1989, 52(3): 277-286.
- [3] 马静, 麻莉莉. 最小控制综合算法综述[J]. 计算机测量与控制, 2013, 21(12): 3162-3167.
- [4] 洪镇南, 王旭东. Smith预估补偿器及其应用[J]. 控制工程, 2006, 9(5): 69-71.  
Hong Zhennan, Wang Xudong. Smith estimated compensator and its application[J]. Control Engineering of China, 2006, 9(5): 69-71.
- [5] Schneider D M. Control of processes with time delays[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1988, 24(2): 186-191.
- [6] 王华强, 李海波, 胡平. 一种改进的自适应smith预估器[J]. 合肥工业大学学报, 2007, 30(3): 316-320.  
Wang Huaqiang, Li Haibo, Hu Ping. An improved selfadaptive smith predictor[J]. Journal of Hefei University of Technology, 2007, 30(3): 316-320.
- [7] Benchoubane H, Stoten D P. The decentralized minimal controller synthesis algorithm[J]. International Journal of Control, 1992, 56(5): 967-983.
- [8] 瞿伟廉, 查小鹏. 基于最小控制综合算法的结构振动控制研究[J]. 武汉理工大学学报, 2007, 29(1): 145-148.  
Qu Weilian, Zha Xiaopeng. Application of minimal controller synthesis algorithm to structural vibration control[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2007, 29(1): 145-148.
- [9] 蔡国平, 李琳, 洪嘉振. 中心刚体-柔性梁系统的最优跟踪控制[J]. 力学学报, 2006, 38(1): 97-105.  
Cai Guoping, Li Lin, Hong Jiazhen. Optimal tracking control of a flexible hub-beam system[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2006, 38(1): 97-105.
- [10] 李生权, 季宏丽, 裘进浩. 基于输出预估自抗扰策略的加筋壁板结构多模态振动主动控制[J]. 振动工程学报, 2012, 25(1): 17-23.  
Li Shengquan, Ji Hongli, Qiu Jinhao. Multi-mode vibration suppression of a stiffened panel using activedisturbance rejection controller based on output predictor[J]. Journal of Vibration Engineering, 2012, 25(1): 17-23.

(责任编辑 赵业玲)

·学术动态·



中国科学技术协会

### 首届科协发展理论研讨会征文

中国科协拟于2015年11月在深圳举办首届科协发展理论研讨会。

主题:大众创业万众创新中的科协组织建设

主要议题:创新评估能力建设;高端智库发展战略;创新驱动助力工程与学会发展;构建基层科协创新平台;创新创业孵化与自主创新能力提升;大数据与众创平台

欢迎海内外专家学者、在校研究生、科协系统同仁和产业界人士积极撰稿并参会,将遴选优秀论文结集出版。

截稿日期:2015年9月20日

联系人:中国科协发展研究中心 刘春平,010-68788105

中国国际科技会议中心 孙跃,010-62013138

投稿邮箱:sunyue@cast.org.cn

详见中国科协网<http://www.cast.org.cn/n35081/n35488/16544870.html>。