

文章编号: 1000-8152(2009)02-0225-03

含有负载扰动系统的多控制器自适应控制

游乙龙, 李昇平, 王 勇

(广东汕头大学 工学院 机械电子工程系, 广东 汕头 515063)

摘要: 对一类含有负载扰动的离散时间线性系统研究了多控制器自适应控制问题. 建立了能够改善扰动响应的二自由度极点配置控制器集合. 证明了度量无关的滞后切换逻辑经有限次切换后可将镇定控制器锁定在控制回路中, 保证输入输出序列有界, 因而实现对负载扰动的抑制. 算例仿真表明了该算法的有效性.

关键词: 极点配置; 度量无关的滞后切换; 多控制器; 自适应控制

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Multi-controller adaptive control for systems with load disturbance

YOU Yi-long, LI Sheng-ping, WANG Yong

(Department of Mechatronic Engineering, Shantou University, Shantou Guangdong 515063, China)

Abstract: The multi-controller adaptive control is studied for a class of discrete-time linear systems with load disturbance. Multiple pole-placement controllers with 2-DOF which can improve the response to the disturbance are developed to form a candidate controller set. It is proved that after a finite number of switching, the scale-independent hysteretic-switching logic will lock the stabilizing controller in the control loop, guaranteeing that the input and output sequences are bounded and the disturbance attenuation is achieved. The simulation example confirms its efficacy.

Key words: pole-placement; scale-independent hysteretic-switching; multiple controllers; adaptive control

1 引言(Introduction)

随着控制理论的不断发展和实际控制工程的需要, 对一类复杂系统进行有效控制, 并取得良好性能, 是当前控制界的一大热点. 基于切换逻辑^[1]的自适应控制是解决这类问题的一个有效方法. 切换自适应控制主要可分为间接切换和直接切换两种方法. 间接切换自适应控制, 即多模型自适应控制在过去几年得到了广泛的关注^[2,3], 但该方法潜在一个危险, 即当真实对象不与模型集中的元素充分接近时, 可能造成模型失配不稳定性^[4]. 而直接切换^[5,6]自适应控制, 即多控制器自适应控制无须辨识被控对象, 而根据先验知识构造控制器, 通过实时测量数据, 直接切换控制器. 该方法需要的假设是, 控制器集中至少存在一个镇定的控制器满足控制要求, 即自适应控制问题是可行的. 早期的直接切换只能顺序切换^[5]; 最近, 基于非伪控制理论^[6], 可以直接辨识、选择最优控制器, 将它切换到控制回路中. 但目前关于非伪控制的文献都是对连续时间系统进行控制, 并

且并未给出确实可行的控制器结构. 本文应用极点配置方案构造具有二自由度的控制器集, 并适当选取切换指标, 利用度量无关的滞后切换逻辑^[1]切换控制器. 同时, 考虑到实际被控对象常常含有负载扰动, 因此对控制器引入适当参数, 以实现负载扰动的抑制.

2 问题描述(Description of problem)

2.1 被控对象描述及控制器设计(Description of the controlled plant and the controller design)

考虑如下SISO离散时间被控对象:

$$A(q)y(t) = B(q)(u(t) + v(t)). \quad (1)$$

其中: $A(q) = q^n + a_1q^{n-1} + \dots + a_n$, $B(q) = b_0q^m + b_1q^{m-1} + \dots + b_m$, $v(t)$ 为负载扰动. 为了对被控对象(1)建立多控制器自适应控制做如下假设:

假设 1 n, m 的上界 \bar{n}, \bar{m} 已知, $A(q^{-1}), B(q^{-1})$ 互质.

假设 2 未知参数向量 $\theta_0 = [a_1, \dots, a_n, b_0, \dots,$

收稿日期: 2007-08-13; 收修改稿日期: 2008-03-10.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60774019, 60374009); 教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-06-0751); 广东省自然科学基金资助项目(04010976).

$b_m]^T$ 在一个有界的凸集 Ω 中变化,且未知参数为常值或分段常值;

假设3 负载扰动 $v(t)$ 未知,但在几种可能情形之中;

假设4 被控对象是最小相位的.

这样,就可以构造多个控制器 $C_i(i = 1, 2, \dots, n)$.只要 n 足够大,而且控制器构造合理,则总可以保证至少存在一个镇定的控制器(设为 C_{RSP})满足控制要求.

采用如下具有二自由度的控制律

$$Ru(t) = Tu_c(t) - Sy(t). \quad (2)$$

通过求解如下丢番图方程,可以得到 R, S ,

$$AR + BS = A_{cl}. \quad (3)$$

其中 A_{cl} 为稳定的闭环特征多项式.假设对指令信号期望的响应由下列动态系统表示 $A_m(q)y_m(t) = B_m(q)u_c(t)$.适当选取观测器多项式 A_0 ,取 $\beta = A_m(1)/B(1)$,再令 $T = \beta A_0$.将 R, S, T 代入式(2)即得到控制律.可以对控制器参数进行适当调整,添加某些因子,实现对参考信号的跟踪和对负载扰动的抑制^[7].

2.2 一些定义(Definitions)

令 T_0 为采样周期, τ, k 为非负整数,表示第 τ, k 采样时刻. X_τ 表示在时间 $[0, \tau T_0]$ 上的截断信号.

给定对象数据 w_τ 和一个备选控制器 C ,该控制器的虚拟参考信号^[6] $\bar{r}(C, w_\tau, \tau T_0)$ (简称 \bar{r})是这样一个假设信号:假设在采集 w_τ 的整个过程中,此控制器在控制回路中,则虚拟参考信号将产生完全一样的数据 w_τ .

说明 由式(2)构造的控制器 $C_i, i \in \{1, 2, \dots, n\}$ 满足SCLI^[6](stably-causally-left-invertible),即由测量数据 $w := (u, y)$ 到 \bar{r} 的映射是因果和稳定的,于是有

$$\bar{r}(C_i, w_t, kT_0) = \frac{R_i}{T_i}u + \frac{S_i}{T_i}y, \quad i \in \{1, 2, \dots, n\}. \quad (4)$$

3 多控制器自适应控制(Multi-controller adaptive control)

当被控对象式(1)已知时,利用控制律(2)能取得良好的控制效果.而当被控对象(1)存在较大不确定性时,如参数突变,负载扰动未知,或者无法确定不确定性范围时,基于单一的控制器的控制要求,造成瞬态响应很坏,甚至根本无法镇定被控对象.为此,需要根据先验知识,建立多个控制器覆盖各种可能的不确定性,构成一个控制器集,并及时切换,直到稳定控制器被切换到控制回路中为止.

考虑具有如下形式的代价函数:

$$V(C_i, w_\tau, \tau T_0) \triangleq \max_{\tau \leq k} \frac{\|\tilde{e}\|_\tau + \lambda \|u\|_\tau + \epsilon_0}{\|\hat{r}\|_\tau + \eta}. \quad (5)$$

其中: \tilde{e} 为 $\tilde{e}(C_i, w_\tau, \tau T_0)$ 的简称,表示第 i -th控制器的虚拟误差,定义为 $\tilde{e}(C_i, w_\tau, \tau T_0) \triangleq \hat{r}(C_i, w_\tau, \tau T_0) - y(\tau T_0)$; η 是一个正数,避免被零除; ϵ_0 保证了所有性能指标至少不小于 $\frac{\epsilon_0}{\eta}$; \max 算子保证了具有式(5)的代价函数满足单调非减性的性质.

在切换控制中,为了避免频繁切换导致的不稳定性,或者导致在某些控制器之间循环切换,需要采用切换逻辑.综述^[8]介绍了目前存在的几种切换逻辑.本文中采用被证明具有良好属性的度量无关的滞后切换逻辑,具体实现如图1所示.图中: h 为滞后因子, V 为代价函数.

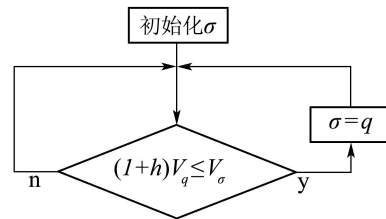


图1 度量无关的滞后切换原理
Fig. 1 The principle of scale-independent hysteresis switching

4 稳定性结论(Stability results)

很明显,式(5)的代价函数单调非减,且 $V(C_i, w_\tau, 0) > 0, i = 1, 2, \dots, n$.则下列定理1成立.

定理1 考虑被控对象(1),使用式(2)控制律和式(5)的代价函数,采用度量无关的滞后切换逻辑.假设自适应控制问题是可行的.则存在时刻 t^* ,当 $t^f > t^*$ 时, σ 为定常,(令 $\sigma = f$),且 $V(C^f, w_\tau, \tau T - 0)$ 有界,其中 $0 < \tau < t^f$.

下面的定理证明了多控制器自适应控制方法得到的闭环系统是输入输出有界的,并且实现对参考信号的跟踪.

定理2 考虑被控对象(1),使用式(2)控制律和式(5)的代价函数,并采用度量无关的滞后切换逻辑,假设自适应控制问题是可行的.则经过有限次切换后控制器 C_{RSP} 被切换到控制回路中,且 $\{y(k)\}, \{u(k)\}$ 都是有界序列,并且跟踪误差收敛至零.

5 仿真实例(Simulation)

考虑如下被控对象:

$$H(z) = \frac{0.1065z + 0.0902}{z^2 - 1.6065z + 0.6065},$$

采样周期为0.5 s,参考输入为矩形波,假设未知负

载扰动为0.1的负阶跃信号. 当被控对象参数在小范围内变化时, 且已知扰动特性时, Astrom提出的自校正方法能实现较好的控制效果^[9]; 但当含有大范围不确定性时或者扰动特性未知时, 传统自适应控制将无能为力. 利用上述多控制器自适应控制方法. 假设所构造的控制器集至少存在一个元素满足控制要求. 这里构造了4个控制器. 滞后因子=0.02. 仿真结果如图2~4所示.

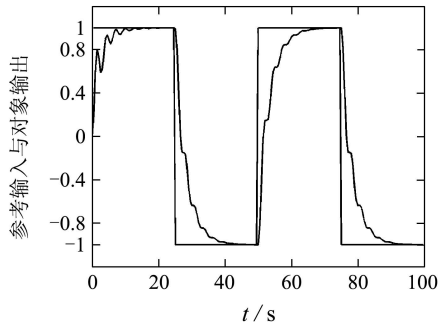


图2 参考输入与对象输出

Fig. 2 Reference input and plant output

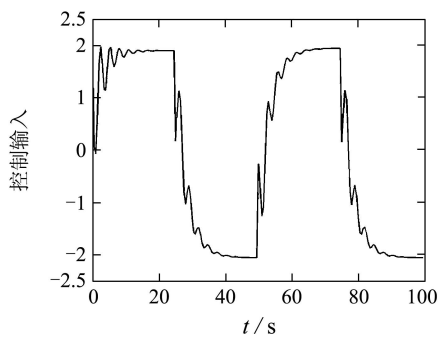


图3 控制输入

Fig. 3 Control input

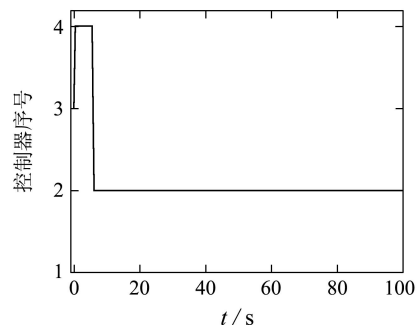


图4 切换曲线

Fig. 4 Switching curve

6 结语(Conclusion)

针对被控对象的不确定性, 对一类含有负载扰动

的离散时间线性系统给出了多控制器自适应控制. 基于极点配置方案构造具有2-DOF的控制器集. 该方法不必去辨识被控对象, 而是根据实时测量数据, 直接辨识所有控制器. 所提出的自适应控制算法总能快速将镇定的控制器切换到反馈回路中, 实现对指令信号的跟踪.

参考文献(References):

- [1] HESPANHA J P. *Logic-based switching algorithms in control*[D]. New Haven: Yale University, 1998.
- [2] 王伟, 李晓理. 多模型自适应控制[M]. 北京: 科学出版社, 2001. (WANG Wei, LI Xiaoli. *Multiple Model Adaptive Control*[M]. Beijing: Science Press, 2001).
- [3] 王昕, 李少远, 岳恒. 一类非最小相位系统分层递阶多模型解耦控制器[J]. 控制理论与应用, 2005, 22(2): 201 - 206. (WANG Xin, LI Shaoyuan, YUE Heng. Hierarchical multiple model decoupling controller for non-minimum phase systems[J]. *Control Theory & Applications*, 2005, 22(2): 201 - 206).
- [4] STEFANOVIC M, WANG R, SAFONOV M G. Stability and convergence in adaptive systems[C]//*Proceedings of the 2004 American control conference. Boston, Massachusetts*. Boston, MA: IEEE Press, 2004: 1923 - 1928.
- [5] FU M Y, BARMISH B R. Adaptive stabilization of linear systems via switching control[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1986, 31(12): 1097 - 1103.
- [6] MICHAEL G, SAFONOV, TSAO Y C. The unfalsified concept and learning[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1997, 42(6): 843 - 847.
- [7] ASTROM K J, WITTENMARD B. *Computer-Controlled Systems: Theory and Design*[M]. 3rd edition. Beijing: Tsinghua University Press, 2002.
- [8] HESPANHA J P. Tutorial on supervisory control. 2002, <http://www.ece.ucsb.edu/hespanha/published/tr-tutorial-cdc01.pdf>
- [9] ASTROM K J, WITTENMARD B. *Adaptive Control*[M]. 2nd edition. Beijing: Science Press, 2003.

作者简介:

游乙龙 (1980—), 男, 硕士, 目前研究方向为切换控制、自适应控制, E-mail: crazyfool@126.com;

李昇平 (1966—), 男, 工学博士, 目前研究方向为鲁棒控制、鲁棒辨识、自适应控制、智能控制及其工程应用, E-mail: spli@stu.edu.cn;

王勇 (1982—), 男, 硕士研究生, 目前研究方向为网络控制系统、混杂系统, E-mail: wystu@126.com.