

文章编号: 1671-7848(2008)03-0291-04

基于多控制器的直接自适应控制

游乙龙, 李平

(汕头大学机械电子工程系, 广东 汕头 515063)



摘 要: 为解决多模型自适应控制可能造成的模型失配不稳定性问题, 利用非伪控制理论, 提出了一种直接辨识控制器的方法。由一步超前控制器构造控制器集, 通过一个具有一定属性的恰当选择的代价函数, 只要控制器集中至少存在一个镇定的控制器, 即自适应控制问题是可行的, 滞后切换逻辑总能快速将镇定控制器切换到控制回路中, 保证闭环系统稳定和输出误差渐近趋于零。给出了闭环系统在 L_{2e} 意义下输入输出稳定性结论, 并给出仿真实例验证其有效性。

关键词: 多控制器自适应控制; 非伪控制; L_{2e} 稳定性

中图分类号: TP 273

文献标识码: A

Direct Adaptive Control Based on Multiple Controllers

YOU Yi-long, LI Sheng-ping

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

Abstract: To solve the model-mismatch instability problem which may be caused by multiple model adaptive control, a method which directly identifies the candidate controllers using unfalsified control theory is provided. The candidate controller set is constructed by one step ahead of controller. Whenever there exists at least one stabilizing controller in the candidate controller set, i. e., the adaptive control problem is feasible, through a suitably chosen cost function which has some properties, the hysteresis switching logic will quickly switch the stabilizing controller to the control loop, guaranteeing that the closed-loop system is stable and the tracking error is asymptotically zero. The input-output stability of the closed-loop system in the sense of L_{2e} is given. Simulation example is given to show the efficiency of this method.

Key words: multiple controller adaptive control; unfalsified control; L_{2e} stability

1 引言

传统的自适应控制器设计往往基于一个参数固定或慢时变的系统模型, 并假设操作环境是时不变或慢时变的。因此, 传统自适应控制对复杂系统往往难以取得良好的控制效果, 尤其在参数突变或环境变化时, 将导致很差的瞬态响应。而随着控制理论的发展和实际控制工程的需要, 对一类具有高度不确定性的系统进行有效控制, 并取得良好的控制性能具有十分重要的理论和现实意义。因此, 一种新的基于切换逻辑^[1]的自适应控制应运而生。在自适应控制领域中, 切换方法主要有间接切换^[2-6]与直接切换^[7-12]。间接切换的一个基本假设是模型集中至少存在一个子模型与被控对象的模型充分接近。当该条件不满足时, 可能造成模型失配不稳定性^[8]。直接切换方法指直接基于由对象的测量数据构造的性能指标的最小化进行控制器的切换、选

择。但先前只能进行不现实的顺序切换^[7], 因此仅根据实验数据智能地进行直接切换显得十分重要。最近, 基于非伪控制理论^[9], 可以直接辨识、选择最优控制器, 并“快速”将它切换到控制回路中。但研究对象都局限于连续时间系统。

本文对一类离散时间系统提出了基于多控制器的直接自适应控制, 所提出的算法保证闭环系统输入输出稳定, 输出渐近跟踪参考输入, 从而避免了模型失配不稳定性。

2 问题描述

1) 被控对象描述 考虑由下列 ARMA 模型描述的单变量离散时间被控对象:

$$A(t, q^{-1})y(t) = q^{-d}B'(t, q^{-1})u(t) \quad (1)$$

式中, $y(t)$, $u(t)$ 分别为被控对象的输出、输入; d 为被控对象的时间延迟; $A(t, q^{-1})$, $B'(t, q^{-1})$ 分别为时间 t 和后移算子 q^{-1} 的多项式。

收稿日期: 2007-03-20; 收修定稿日期: 2007-05-23

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

作者简介: 游乙龙(1980-), 男, 福建平和人, 研究生, 主要研究方向为多模型自适应控制、多控制器自适应控制等; 李平(1966-), 男, 教授, 博士。

$$A(t, q^{-1}) = 1 + a_1(t)q^{-1} + \dots + a_n(t)q^{-n}$$

$$B'(t, q^{-1}) = b_1(t)q^{-1} + b_2(t)q^{-2} + \dots + b_m(t)q^{-m}$$

上述 ARMA 模型可用 d 步超前预测器的形式表示：

$$y(t + d) = \alpha(q^{-1})y(t) + \beta(q^{-1})u(t)$$

式中 $\alpha(q^{-1}) = \alpha(q^{-1})$; $\beta(q^{-1}) = F(q^{-1})B'(q^{-1})$ 多项式 $F(q^{-1})$, $\alpha(q^{-1})$ 都是惟一的, 且满足：

$$F(q^{-1})\alpha(q^{-1}) + q^{-d}\alpha(q^{-1}) = 1$$

以下分析中, 假设：

A1 $a_i(t)$ ($i = 1, 2, \dots, n$) 和 $b_j(t)$ ($j = 1, 2, \dots, m$) 为时间 t 的常值或分段常值, 即考虑线性时不变离散时间系统或参数跳变系统; 并且 n, m 上界已知, $A(t, q^{-1}), B'(t, q^{-1})$ 互质, $B'(t, q^{-1})$ 是稳定多项式。

A2 未知参数向量：

$$\theta = [a_1(t), \dots, a_n(t), b_1(t), \dots, b_m(t)]$$

在一个有界的凸集 Ω 中变化。

根据以上假设, 及先验知识、被控对象的特性及其环境变化, 建立一个有限个数的控制器集 C_i , $i \in \{1, 2, \dots, N\}$, 覆盖各种可能变化的情形, 使得被控对象总可以被镇定。采用一步超前控制, 只要控制器集中至少存在一个镇定的元素, 则总可以实现输出渐近达到期望输出, 且保证输入输出有界。

定理 1^[13] 考虑由确定性自回归滑动平均时不变模型式 (1) 描述的系统：

i. 使得 $(t + d)$ 时刻的输出 $y(t + d)$ 达到某个有界期望值 $y^*(t + d)$ 的反馈控制律具有如下形式：

$$\beta(q^{-1})y(t + d) = \alpha(q^{-1})y(t), t \geq 0$$

ii. 在假设 **A1** 条件下, 所得闭环系统具有有界输入, 有界输出。

控制目的是建立一个自适应控制律, 使得输入输出有界, 并使输出渐近跟踪参考输入。在已建立控制器集的基础上, 就是要直接辨识备选控制器, 将镇定的控制器 (设为 C_{rsp}) 切换到反馈回路中, 保证闭环系统稳定, 输出渐近跟踪参考输入。直接自适应控制系统, 如图 1 所示。

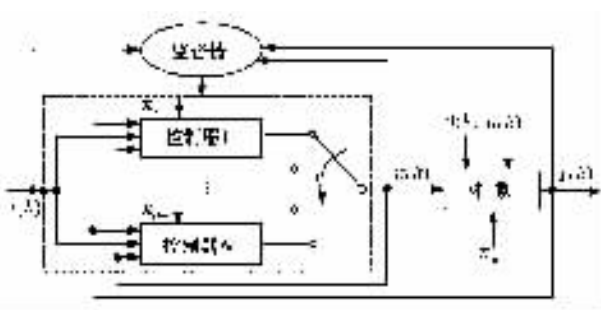


图 1 直接自适应控制系统

Fig.1 Direct adaptive control systems

图中, x_{oi} , $i = \{1, 2, \dots, N\}$ 为控制器的初始状态; x_{op} 为对象的初始状态; $d(k), n(k)$ 分别为干扰和噪声; $u(k), y(k)$ 为被控对象的输入、输出。

定义 $w := (u, y)$ 为被控对象的输入输出测量数据。在以后的讨论中, 假设该系统的所有成分都具有零输入-零输出属性, 即当输入 r 的范数为零时, 输出 w 的范数也为零。

2) 一些定义 为了方便下文说明, 给出一些定义。

令 T 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 $[0, \tau T]$ 上的截断信号。定义如下：

$$x_\tau(kT) = \begin{cases} x(0), x(T), \dots, x(\tau T), & k \leq \tau \\ 0, & k > \tau \end{cases}$$

定义 1 (L_{2e} -信号) 如果：

$$\|x_\tau(kT)\| = \left(\sum_0^\tau |x(kT)|^2 \right)^{1/2} < \infty$$

则称 x_τ 属于 L_{2e} 信号。

如果 $x(kT)$ 是一个函数向量, 即：

$$x(kT) = [x_1(kT), x_2(kT), \dots, x_n(kT)]$$

则定义 L_{2e} 范数为

$$\|x_\tau(kT)\| = \max_{i=1, 2, \dots, n} \|x_i(kT)\|_\tau$$

定义 2 (虚拟参考信号, Fictitious Reference Signal, FRS^[9]) 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是这样假设信号, 假设在采集 d_τ 的整个过程中, 此控制器在反馈回路中, 则虚拟参考信号将产生完全一样的数据 w_τ 。对数据 w_τ 的控制器 C 虚拟参考信号记为 $\tilde{r}(C, w_\tau, \tau T)$, 简称 \tilde{r} 。

注 1 FRS 类似于多模型自适应控制中的误差信号, 将用 FRS 来构造离散时间情形的代价函数。

定义 3 (稳定因果左可逆的 SCLF^[11], Stably-Causally-Left-Invertible) 如果从收集的测量数据 (u_p, y_p) 到对应 \tilde{r} 的映射是因果的和稳定的, 则称该控制器是 SCLF。

注 2 对图 1 的自适应控制系统, 只要控制器 C_i , $i \in \{1, 2, \dots, N\}$ 是可逆的, 则满足 SCLF, 此时得到：

$$\tilde{r}(C_i, d_\tau, kT) = C_i(z)^{-1} u_p(kT) + y_p(kT) \quad (2)$$

定义 4 (稳定性) 系统 $\Sigma : L_{2e} \rightarrow L_{2e}$, 输入为 v , 输出为 w , 若对任意 $v \in L_{2e}, \lim_{\tau \rightarrow \infty} \sup_{l \in (\tau, \infty)} \frac{\|w_l\|}{\|v_l\|} < \infty$ 且若 $\sup_{v \in L_{2e}, l \in (\tau, \infty)} \frac{\|w_l\|}{\|v_l\|} < \infty$, 则系统是有限增益稳定的, 否则, 系统是不稳定的。

3 多控制器自适应控制

考虑具有如下形式的代价函数的情形：

$$V(C_i, w_\tau, kT) \triangleq \max_{\tau \leq k} \frac{\|\tilde{e}_\tau\| + \lambda \|u_\tau\|}{\|\tilde{r}_\tau\| + \beta} \quad (3)$$

式中， β 是一个正数，避免被零除； \max 算子保证了具有式(3)形式的代价函数满足单调非减性的性质； \tilde{e} 为 $\tilde{e}(C_i, w_\tau, \tau T)$ 的简称，表示第 i -th 控制器的虚拟误差，定义为

$$\tilde{e}(C_i, w_\tau, \tau T) \triangleq \tilde{r}(C_i, w_\tau, \tau T) - y(\tau T)$$

为保证算法的快速收敛性，用一个非伪代价水准 γ ，删除备选控制器集中被证明是伪造的控制器，使得控制器集 C 收缩，即当 $V(C_i, w_\tau, \tau T) > \gamma$ 时， C_i 从控制器集中被删除。因此，选择较大的 γ 将使得控制器集 C 收缩速度比较慢；较小的 γ 能快速收缩控制器集。通过非伪代价水准，可以快速地将鲁棒镇定的控制器切换到反馈回路中。

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，目前主要采用了两种方式来改善切换品质。一种是利用等待周期^[14]，在任意两个连续的切换之间至少必须间隔 α 采样周期。该方法能避免频繁切换，但可能导致无法快速适时地切换到镇定的控制器。另外一种方式是滞后切换^[15]，只有当与当前活动控制器相关的代价函数超出与其他控制器相关的代价函数至少 ϵ 时，具有最小代价函数的控制器将马上被切换到反馈回路中。滞后因子 ϵ 将切换次数在有限时间间隔内限制在有限数量中，同时保证了在连续切换之间存在一个非零的滞留时间。本文采用了基于滞后切换的控制算法。

4 稳定性结论

定义跟踪误差为

$$e_c(k) = y(k) - y^*(k), k \in \mathbf{N}^+ \quad (4)$$

定理 2 考虑图 1 的自适应控制系统，使用滞后切换逻辑和式(3)的代价函数；如果自适应控制问题是可行的，控制器满足 SCLI 属性，则经过有限多次的切换后，将收敛到镇定控制器，且： $\{y(k)\}, \{u(k)\}$ 都是有界序列； $\lim_{k \rightarrow \infty} e_c(k) = 0$ 。

证明 由于具有式(3)的代价函数具有单调非减属性，因此在每个切换时刻，与每个控制器相关的所有代价函数中的最小值也是单调非减的。又由于假设自适应控制问题是可行的，因此代价函数的最小值存在一个上界。由之后切换逻辑可知，每次切换后，代价函数中的最小值增加一个有限值 ϵ ，因此，经过有限多次的切换后，代价函数的最小值将达到它的上界，镇定的控制器 C_{RSP} 被锁定在反馈

回路中，切换停止。令最后切换时刻为 t^f ，则当 $t > t^f$ 时，控制器 C_{RSP} 将一直置于反馈回路中。

由式(2)及虚拟参考信号的定义可知，存在正常数 Q ，对控制器 C_{RSP} ，有 $\|r_f\| > Q^* \|\tilde{r}_f\|$ ，当 $t > t^f$ 时， $r = \tilde{r}$ 。因此，对控制器 C_{RSP} ，有：

$$\|r_\tau\| > Q' * \|\tilde{r}_\tau\|, \tau \in \mathbf{N}^+, Q' \in \mathbf{R}^+$$

可以得到：

$$V(C_{RSP}, w_\tau, \tau T) = \max_{\tau \in \mathbf{N}^+} \frac{\|\tilde{e}_\tau\| + \lambda \|u_\tau\|}{\|\tilde{r}_\tau\| + \beta} < L < \gamma, \quad (5)$$

于是得到：

$$\|\tilde{e}_\tau\| + \lambda \|u_\tau\| < L \|\tilde{r}_\tau\| + L * \beta \quad (6)$$

再由式(2)及虚拟误差的定义，可得：

$$-\|\tilde{r}_\tau\| + \|y_\tau\| + \lambda \|u_\tau\| < L \|\tilde{r}_\tau\| + L * \beta \Rightarrow$$

$$\|y_\tau\| + \lambda \|u_\tau\| < (L+1) \|\tilde{r}_\tau\| + L * \beta <$$

$$(L+1)Q' \|\tilde{r}_\tau\| + L * \beta$$

由上式可知， $(1+L)Q'$ ， $L * \beta$ 都是有限正数，于是：

$$\frac{\lambda \|u_\tau\| + \|y_\tau\|}{\|\tilde{r}_\tau\|} < \eta, \tau \in \mathbf{N}^+, \eta \in \mathbf{R}^+$$

由稳定性定义，向量的 L_{2c} 范数的定义，以及定理 1，立即可以得到闭环系统是稳定的， $\{y(k)\}, \{u(k)\}$ 都是有界序列， $\lim_{k \rightarrow \infty} e_c(k) = 0$ 。

5 仿真例子

考虑如下离散时间系统：

$$(1 - 0.8q^{-1} - 0.33q^{-2})y(t) = q^{-2}0.66u(t)$$

假设实际参数未知，定值参考输入 $y^*(t) = \sin(\pi t/20) + \sin(\pi t/10)$ 。为简单，设噪声和干扰为 0。利用一步超前控制原理，设计 5 个控制律，分别是：

$$y^*(t+2) = 0.8y(t) + 0.4y(t-1) + 0.4u(t) + 0.9u(t-1)$$

$$y^*(t+2) = y(t) + 0.5y(t-1) + 0.2u(t) + 1.2u(t-1)$$

$$y^*(t+2) = 0.97y(t) + 0.264y(t-1) + 0.66u(t) + 0.528u(t-1)$$

$$y^*(t+2) = 0.6y(t) + 0.2y(t-1) + 0.4u(t) + 0.5u(t-1)$$

$$y^*(t+2) = 0.45y(t) + 0.1y(t-1) + 0.8u(t) + 0.4u(t-1)$$

其中，第 3 个控制律能镇定被控对象，且实现跟踪误差为零；第 5 个控制律能镇定被控对象，但跟踪误差不收敛；其余控制器发散。

采用上文所述的基于多控制器的直接自适应控制算法，任意选取第一个控制器为初始控制器置于反馈回路中。仿真结果，如图 2，图 3 所示。

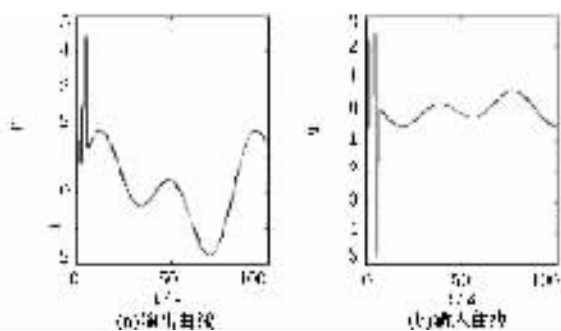


图 2 输出、输入曲线

Fig.2 Output and input curves

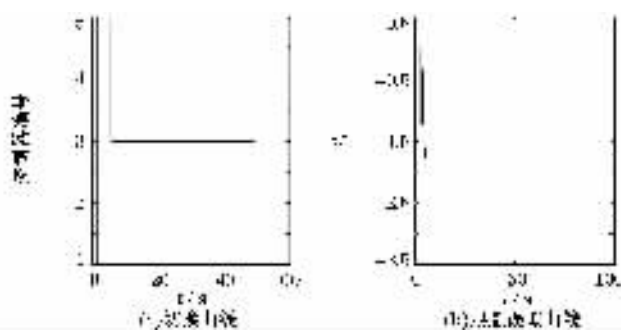


图 3 切换曲线和跟踪误差曲线

Fig.3 Switching map and tracking error figure curves

6 结 语

针对被控对象参数不确定性,对一类离散时间系统研究了基于多控制器的直接自适应控制。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、性能优良的控制器切换到反馈回路中。相信随着理论不断完善,基于多控制器的直接自适应控制将在实际工业控制中发挥重要作用,如在无线网络的电力控制^[11]等方面具有广阔的应用前景。进一步的研究方向包括如何放宽对控制器结构的限制等。

参考文献(References):

[1] Morse A S. Control using logic-based switching[M]. New York :Springer-Verlag ,1997.
 [2] Narendra K S ,Xiang C. Adaptive control of discrete-time systems using multiple models[J]. IEEE Transaction on Automatic Control ,2000 ,45 (9) :1669-1686.
 [3] Brian D O ,Thomas A ,Brinsmead S. Multiple model adaptive control , Part 1 :finite controller coverings[J]. Int J of Robust and Nonlinear Control 2000 ,10(11-12) 909-929.
 [4] 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.)
 [5] 王昕 ,岳恒 ,柴天佑,等.基于多模型切换的变量直接自适应极点配置控制[J].控制理论与应用 ,2001 ,18(S1) :23-27. (Wang Xin ,Yue Heng ,Chai Tianyou ,et al. Multivariable direct adaptive pole

placement controller using multiple model[J]. Control Theory & Application 2001 ,22(S1) 23-27.)
 [6] 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[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 & Application ,2005 ,18(2) 201-206.)
 [7] Fu M Y ,Barmish B R. Adaptive stabilization of linear systems via switching control[J]. IEEE Trans Automat Contr ,1986 ,31(12) :1097-1103.
 [8] Stefanovic M ,Wang R ,Safonov M G. Stability and convergence in adaptive systems[C]. Boston ,Massachusetts 2004 American Control Conference 2004.
 [9] Safonov M G ,Tsao Y C. The unfalsified concept and learning[J]. IEEE Trans on Automatic Control ,1997 ,42(6) 2819-2824.
 [10] Wang R ,Safonov M G. Stability of unfalsified adaptive control using multiple controllers[C]. Portland ,OR ,USA :2005 American Control Conference 2005.
 [11] Paul A. MCAC :cost-detectability ,stability and some applications[D]. Los Angeles ,California :University of Southern California 2005.
 [12] Paul A ,Stefanovic M ,Safonov M G. Multi-controllers adaptive control (MCAC) for a tracking problem using unfalsification approach[C]. Seville ,Spain :IEEE Conference on Decision and Control ,European Control Conference 2005.
 [13] Goodwin G C ,Sin K S. Adaptive filtering prediction and control[M]. Englewood Cliffs ,N J :Prentice-Hall ,1984.
 [14] Hespanha J P ,Morse A S. Stability of switched systems with average dwell-time[C]. Nanjing ,China :The 38th Conf on Decision and Contr ,1999.
 [15] Morse A S ,Mayne D Q ,Goodwin G C. Application of hysteresis switching in parameter adaptive control[J]. IEEE Transaction on Automatic Control ,1992 ,37(39) :1343-1354.

征 订 启 示

《控制工程》创刊于 1994 年,系国家教育部主管,东北大学主办的国家级学术性期刊,中国科技核心期刊,中国学术期刊综合评价数据库及中国科学引文数据库(CSCD)的核心期刊。本刊大 16 开本(210 mm × 297 mm),双月刊,单月出版。

《控制工程》2002 年开始被俄罗斯《文摘杂志》(AJ)、美国《剑桥科学文摘》(CSA)、英国《科学文摘》(SA,INSPEC)三大著名检索机构全文检索,为中国科技论文统计用刊,中国科学文献数据用刊。

本刊主编柴天佑为东北大学教授、博士生导师、中国工程院院士。编委会成员均为国内外该领域的知名专家和学者。其中,两院院士 11 人,其余均为教授、博士生导师、教授级高级工程师等。

《控制工程》从 2008 年起国内定价调整为每期 15 元,全年 90 元。

汇款地址:沈阳东北大学 310 信箱

邮 编:110004

联系电话:024-23883498 024-83687509

传 真:024-23883498

E-mail: kzgcbjb@mail.neu.edu.cn

网 址: http://www.kzgc.com.cn