

控制与决策

Control and Decision

一种改进的紧格式无模型自适应控制方法

庞中华, 马标, 宋文太, 刘国平

引用本文:

庞中华, 马标, 宋文太, 等. 一种改进的紧格式无模型自适应控制方法[J]. *控制与决策*, 2021, 36(2): 436–442.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0635>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

带有输出约束的柔性关节机械臂预设性能自适应控制

Prescribed performance adaptive control of flexible-joint manipulators with output constraints

控制与决策. 2021, 36(2): 387–394 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0974>

基于神经动态优化的非线性系统近似最优跟踪控制

Approximate optimal tracking control for nonlinear systems based on neurodynamic optimization

控制与决策. 2021, 36(1): 97–104 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0056>

基于反演算法的严格反馈非线性系统固定时间跟踪控制

Fixed-time tracking control for strict-feedback nonlinear systems based on backstepping algorithm

控制与决策. 2021, 36(1): 173–179 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0658>

一类非线性大系统分散自适应预设性能有限时间跟踪控制

Decentralized adaptive prescribed performance finite-time tracking control for a class of large-scale nonlinear systems

控制与决策. 2020, 35(12): 3045–3052 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0623>

自适应事件触发的马尔科夫跳变多智能体系统一致性

Adaptive event-triggered consensus for Markovian jumping multi-agent systems

控制与决策. 2020, 35(11): 2780–2786 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.1507>

一种改进的紧格式无模型自适应控制方法

庞中华^{1†}, 马 标¹, 宋文太², 刘国平³

- (1. 北方工业大学 现场总线技术及自动化北京市重点实验室, 北京 100144;
2. 北京全路通信信号研究设计院集团有限公司 安全控制技术研究院, 北京 100070;
3. 武汉大学 电气与自动化学院, 武汉 430072)

摘要: 针对一类由一般非线性函数描述的离散时间非线性系统, 采用等价动态线性化技术, 提出一种改进的紧格式无模型自适应控制 (iCF-MFAC) 方法. iCF-MFAC 方法的自适应控制律包含两项: 时变比例控制项和时变积分控制项, 与只有一项时变积分项的原 CF-MFAC 方法相比, iCF-MFAC 方法具有更好的通用性和灵活性, 并能够提供更好的动态控制性能. 其次, 将 iCF-MFAC 方法与具有类似控制器结构的基于全格式动态线性化技术的无模型自适应控制方法进行对比分析, 在相同控制器参数作用下, iCF-MFAC 方法具有更快的输出响应. 最后, 从理论上证明闭环 iCF-MFAC 系统的收敛性和稳定性, 并分别通过数值仿真和真实实验验证所提出方法的有效性和可行性.

关键词: 数据驱动控制; 无模型自适应控制; 非线性系统; 紧格式动态线性化

中图分类号: TP273

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2019.0635

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



引用格式: 庞中华, 马标, 宋文太, 等. 一种改进的紧格式无模型自适应控制方法[J]. 控制与决策, 2021, 36(2): 436-442.

An improved compact form model free adaptive control method

PANG Zhong-hua^{1†}, MA Biao¹, SONG Wen-tai², LIU Guo-ping³

- (1. Beijing Key Laboratory of FTA, North China University of Technology, Beijing 100144, China; 2. Institute of Safety Control Technology, CRSC Research & Design Institute Group Co., Ltd., Beijing 100070; 3. School of Electrical Engineering and Automation, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: An improved compact format model free adaptive control (iCF-MFAC) method based on an equivalent dynamic linearization technique is proposed for a class of discrete-time nonlinear systems described by a general nonlinear function. The adaptive control law of the iCF-MFAC method consists of two parts: A time-varying proportional control term and a time-varying integral control term. Compared with the corresponding original CF-MFAC method with only a time-varying integral term, the iCF-MFAC method is not only more universal and flexible, but also can provide a better dynamical control performance. In addition, the comparison is also made between the iCF-MFAC method and an MFAC method that has a similar controller structure and is based on a full format dynamic linearization data model. With the same controller parameters, the iCF-MFAC can yield a faster output response. Then, the convergence and stability of the resulting closed-loop iCF-MFAC system are proved through rigorous analysis. Both numerical simulations and practical experiments are carried out to demonstrate the effectiveness and feasibility of the proposed method.

Keywords: data-driven control; model free adaptive control; nonlinear systems; compact form dynamic linearization

0 引言

自 20 世纪 50 年代以来, 随着计算机技术的飞速发展, 先进控制理论得到了极大发展和丰富. 先进控

制理论一般可分为两类: 一类是基于模型的控制, 另一类是基于数据的控制或者称为数据驱动控制, 前者相对于后者更为成熟和完善. 但随着生产的发展和

收稿日期: 2019-05-09; 修回日期: 2019-09-27.

基金项目: 国家自然科学基金项目(61673023, 61773144, 61690212); 北京市自然科学基金项目(4182019); 北京市教委基本科研业务费项目(110052971921/026); 北方工业大学科技创新工程计划项目(110051360019 XN115); 北方工业大学毓杰人才培养计划项目(107051360019XN133/001).

责任编辑: 解学军.

[†]通讯作者. E-mail: zhpang@ncut.edu.cn.

科学技术的进步,很多被控系统变得越来越复杂,以至于难以为其建立准确的数学模型,从而导致基于模型的控制方法无法得到有效应用.而另一方面,随着工业化与信息化的深度、全面融合,越来越容易获得大量的被控系统数据,基于这些数据设计相应的控制方法成为了基于模型控制的有益补充,多种数据驱动控制方法应运而生^[1-5],如PID控制、无模型自适应控制、去伪控制、迭代学习控制等.

PID控制是最早的数据驱动控制方法,因其具有结构简单、鲁棒性好以及参数物理意义明确且调节相对容易等优点,在实际工程中得到了广泛应用.据报道,95%以上的过程控制采用的都是PID控制,且大多为PI控制^[6].然而,PID控制方法在用于非线性系统、时变系统和不确定系统时,参数不易调节,且效果不甚理想.无模型自适应控制(model free adaptive control, MFAC)^[7-9]是一种典型的数据驱动控制方法,该方法无需被控制系统的任何模型信息,只需要被控制系统的实时输入输出数据即可进行方法设计与实施.该方法解决了PID控制针对复杂系统时参数不易调节的问题,近年来已被广泛应用于过程控制^[10]、智能交通^[11]、无人驾驶^[12]、电机系统^[13]、智能电网^[14]、机器人系统^[15]、船舶控制^[16]等领域.

MFAC方法共有3种形式:紧格式(compact form, CF)、偏格式(partial form, PF)和全格式(full form, FF),其中CF-MFAC方法^[9,17]最简单,已被广泛应用于解决非线性系统更为复杂的问题.文献[18-19]针对一类网络化非线性离散时间系统,考虑通信网络引入的随机网络时延、数据包乱序与丢失等通信约束,基于CF-MFAC方法设计了数据驱动网络化控制方案,给出了闭环系统稳定和收敛的充分条件,并通过仿真和实验结果验证了方法的有效性.此外,CF-MFAC方法还被应用于解决非线性系统的预测控制^[10]、滑模控制^[20]、迭代学习控制^[21]、编队控制^[22]等问题.

由以上可以看出,CF-MFAC方法已经取得了丰富的实际应用和更深入的理论研究,但其控制律过于简单,仅含有一个时变积分控制项,对于比较复杂的非线性系统,将难以提供理想的控制性能.此时,可以采用合适结构的PF-MFAC方法或FF-MFAC方法,但与此同时也会增加参数辨识、控制器设计以及闭环系统分析的复杂度和难度.针对这一情况,为了改善MFAC方法的控制性能,又维持CF动态线性化技术不变,本文将提出一种改进的CF-MFAC(iCF-MFAC)方法.该方法的控制律将包括两项,一个时变比例控

制项和一个时变积分控制项,原CF-MFAC方法是改进方法的一个特例,因而,改进方法具有更好的通用性和灵活性,并从理论上证明了改进方法的闭环稳定性和收敛性.最后,将改进方法和原方法分别进行了数值仿真和真实实验研究,仿真和实验结果验证了改进方法的有效性和可行性.

1 iCF-MFAC方法

考虑如下单输入单输出离散时间非线性系统:

$$y(k+1) = f(y(k), \dots, y(k-n_y), u(k), \dots, u(k-n_u)). \quad (1)$$

其中: $y(k) \in \mathbf{R}$ 和 $u(k) \in \mathbf{R}$ 分别是系统在 k 时刻的输出和输入; $f(\cdot)$ 是未知非线性函数; n_u 和 n_y 分别是未知的系统输入和输出阶数.

对系统(1)作如下假设.

假设1 非线性函数 $f(\cdot)$ 对系统输入 $u(k)$ 的偏导数是连续的.

假设2 系统(1)满足广义Lipschitz条件,即对于任意时刻 k 且 $\Delta u(k) \neq 0$,均有 $|\Delta y(k+1)| \leq \bar{\phi}|\Delta u(k)|$,其中 $\bar{\phi} > 0$ 为常数.

由文献[8]知,在假设1和假设2下,非线性系统(1)可以转化为如下紧格式动态线性化数据模型:

$$y(k+1) = y(k) + \phi(k)\Delta u(k), \quad (2)$$

其中 $\phi(k)$ 为系统伪偏导数,且 $|\phi(k)| \leq \bar{\phi}$.考虑如下控制性能指标:

$$J(\Delta u(k)) = (y_r(k+1) - y(k+1))^2 + \lambda \Delta u(k)^2. \quad (3)$$

其中: $y_r(k+1)$ 为参考输入信号, $\lambda > 0$ 为控制加权系数.将式(2)代入性能指标函数(3)中,求解关于 $\Delta u(k)$ 的导数,并令其等于零,可得原CF-MFAC方法的控制律为

$$\Delta u(k) = \frac{\phi(k)}{\lambda + \phi(k)^2} (y_r(k+1) - y(k)) = \frac{\phi(k)}{\lambda + \phi(k)^2} e(k). \quad (4)$$

其中

$$e(k) = y_r(k+1) - y(k). \quad (5)$$

对于一般系统而言,即使是简单的线性系统,伪偏导数 $\phi(k)$ 也一般是未知的、时变的.因此,为了让控制律(4)可以实施,采用如下性能指标在线估计伪偏导数 $\phi(k)$ 的值:

$$J(\hat{\phi}(k)) = (y(k) - y(k-1) - \hat{\phi}(k)\Delta u(k-1))^2 +$$

$$\mu(\hat{\phi}(k) - \hat{\phi}(k-1))^2. \quad (6)$$

其中: $\hat{\phi}(k)$ 为伪偏导数 $\phi(k)$ 的估计值, $\mu > 0$ 为加权系数. 求解式(6)对于 $\hat{\phi}(k)$ 的导数, 并令其等于零, 可得如下 $\hat{\phi}(k)$ 的在线估计算法:

$$\hat{\phi}(k) = \hat{\phi}(k-1) + \frac{\Delta u(k-1)}{\mu + \Delta u(k-1)^2} (\Delta y(k) - \hat{\phi}(k-1)\Delta u(k-1)). \quad (7)$$

并引入如下参数重置机制:

$$\begin{aligned} \hat{\phi}(k) &= \hat{\phi}(0), \\ \text{if } |\hat{\phi}(k)| &\leq \varepsilon \text{ or } |\Delta u(k-1)| \leq \varepsilon \text{ or} \\ &\text{sign}(\hat{\phi}(k)) \neq \text{sign}(\hat{\phi}(0)). \end{aligned} \quad (8)$$

其中: $\varepsilon > 0$ 是一个充分小的数, $\hat{\phi}(0)$ 是 $\hat{\phi}(k)$ 的初始值.

由式(4)可知, 原CF-MFAC方法的控制律本质上是时变积分控制, 即仅含有一个时变积分控制项, 对于一些较为复杂的被控系统, 将难以获得理想的动态控制性能. 因此, 本文将对此控制律进行改进, 设计具有如下形式的控制律:

$$\Delta u(k) = \frac{\hat{\phi}(k)}{\lambda + \hat{\phi}(k)^2} (k_p(e(k) - e(k-1)) + k_i e(k)), \quad (9)$$

其中 $k_p \geq 0$ 和 $k_i > 0$ 为加权系数. 进而可得控制量

$$u(k) = u(k-1) + \Delta u(k). \quad (10)$$

由式(9)可以看出, iCF-MFAC控制律由时变比例控制项和时变积分控制项组成, 当 $k_p = 0$ 、 $k_i = 1$ 时, 控制律(9)退化为控制律(4), 即原CF-MFAC控制律是改进方法的一个特例. 因而, iCF-MFAC方法更具有通用性和灵活性.

注1 由文献[9]可知, 对于FF-MFAC方法而言, 当输入输出伪阶数取为 $L_u = L_y = 1$ 时, 其控制律变为

$$\begin{aligned} \Delta u(k) &= \\ &\frac{\hat{\phi}_2(k)}{\lambda + \hat{\phi}_2(k)^2} (-\rho_1 \hat{\phi}_1(k)(y(k) - y(k-1)) + \\ &\rho_2 e(k)). \end{aligned} \quad (11)$$

其中: $\hat{\Phi}(k) = [\hat{\phi}_1(k) \hat{\phi}_2(k)]^T$ 为FF动态线性化模型的伪梯度估计值, ρ_1 、 $\rho_2 \in (0, 1]$ 为步长因子. 将式(11)与(9)进行比较可以看出, 虽然两种控制律在结构上类似, 但其涵义却不同, FF-MFAC方法(式(11))是“时变误差积分控制+时变输出反馈控制”, 其中“时变输出反馈控制项”只在系统输出发生变化时起作用,

而对于参考输入信号的变化不起作用, 式(9)中的“时变输出误差比例控制项”对系统输出变化和参考输入信号变化均起作用. 因而, 当控制系统的参考输入为时变信号时, 在相同控制律参数的作用下, 式(11)对于时变参考输入的跟踪速度将稍慢于式(9). 另外, 式(11)及其参数估计算法的计算量要大于式(9), 且其闭环系统分析更要复杂一些^[23].

2 稳定性分析

为了分析所得iCF-MFAC闭环系统的稳定性和收敛性, 作如下假设.

假设3 非线性系统(1)的伪偏导数 $\phi(k)$ 恒大于0或恒小于0.

不失一般性, 本文假设 $0 < \phi(k) \leq \bar{\phi}$, 并有如下定理.

定理1 对于非线性系统(1), 在满足假设1~假设3的情况下, 当 $2k_p + k_i < \min\left\{\frac{4\sqrt{\lambda}}{\bar{\phi}}, 2\sqrt{\lambda}\right\}$ 时, 采用iCF-MFAC方案, 即式(7)~(10), 有:

1) 系统输出跟踪误差是收敛的, 即 $\lim_{k \rightarrow \infty} |r - y(k+1)| = 0$, 其中 r 为常值参考输入信号;

2) 闭环系统是BIBO稳定的, 即系统输出序列 $\{y(k)\}$ 和控制输入序列 $\{u(k)\}$ 是有界的.

证明 由式(5)、(2)和(9)得

$$\begin{aligned} e(k+1) &= r - y(k+1) = \\ &r - y(k) - \phi(k)\Delta u(k) = \\ &e(k) - \phi(k)\alpha(k)((k_p + k_i)e(k) - k_p e(k-1)) = \\ &(1 - (k_p + k_i)\phi(k)\alpha(k))e(k) + k_p \phi(k)\alpha(k)e(k-1), \end{aligned} \quad (12)$$

其中 $\alpha(k) = \frac{\hat{\phi}(k)}{\lambda + \hat{\phi}(k)^2}$.

由于 $\phi(k) > 0$, 可以选取伪偏导数估计值的初值 $\hat{\phi}(0) > 0$. 并由式(8)可知, 对于任意时刻 k , $\hat{\phi}(k) > 0$, 进而 $\alpha(k) > 0$. 令 $b_1(k) = (k_p + k_i)\phi(k)\alpha(k)$, $b_2(k) = k_p \phi(k)\alpha(k)$, 则有 $b_1(k) > b_2(k) \geq 0$. 对式(12)取绝对值, 得

$$\begin{aligned} |e(k+1)| &= \\ &|(1 - b_1(k))e(k) + b_2(k)e(k-1)| \leq \\ &|1 - b_1(k)||e(k)| + b_2(k)|e(k-1)| \leq \\ &\beta(k) \max\{|e(k)|, |e(k-1)|\}, \end{aligned} \quad (13)$$

其中 $\beta(k) = |1 - b_1(k)| + b_2(k) \geq 0$.

由 $b_1(k) > b_2(k) \geq 0$ 和 $2k_p + k_i < 4\sqrt{\lambda}/\bar{\phi}$ 得

$$0 < b_1(k) + b_2(k) = (2k_p + k_i)\phi(k)\alpha(k) \leq$$

$$(2k_p + k_i)\bar{\phi} \frac{\hat{\phi}(k)}{2\sqrt{\lambda}\hat{\phi}(k)} < 2, \tag{14}$$

$$0 \leq b_2(k) < \frac{1}{2}(b_1(k) + b_2(k)) < 1. \tag{15}$$

由式(15)知, $0 < 1 - b_2(k) \leq 1$, 进而由式(14)得

$$-1 \leq b_2(k) - 1 < 1 - b_1(k) < 1 - b_2(k) \leq 1, \tag{16}$$

即 $\beta(k) = |1 - b_1(k)| + b_2(k) < 1$. 取常数 $d = \max\{\beta(k)\}$, $k = 0, 1, 2, \dots$, 则 $\beta(k) \leq d < 1$. 由式(13)得

$$|e(k+1)| \leq d \max\{|e(k)|, |e(k-1)|\}. \tag{17}$$

由类似式(17)的推导过程可得

$$|e(k)| \leq d \max\{|e(k-1)|, |e(k-2)|\}, \tag{18}$$

$$|e(k-1)| \leq d \max\{|e(k-2)|, |e(k-3)|\}. \tag{19}$$

合并式(18)和(19), 得

$$\begin{aligned} & \max\{|e(k)|, |e(k-1)|\} \leq \\ & d \max\{|e(k-1)|, |e(k-2)|, |e(k-3)|\}. \end{aligned} \tag{20}$$

又由 $d < 1$ 知 $d|e(k-1)| \leq |e(k-1)|$, 则式(20)可化简为

$$\begin{aligned} & \max\{|e(k)|, |e(k-1)|\} \leq \\ & d \max\{|e(k-2)|, |e(k-3)|\}. \end{aligned} \tag{21}$$

将式(21)代入(17)得

$$\begin{aligned} & |e(k+1)| \leq \\ & d \max\{|e(k)|, |e(k-1)|\} \leq \\ & d^2 \max\{|e(k-2)|, |e(k-3)|\} \leq \\ & \begin{cases} d^{\frac{k}{2}+1} \max\{|e(0)|, |e(-1)|\}, & k \text{ 为偶数;} \\ d^{\frac{k+1}{2}} \max\{|e(1)|, |e(0)|\}, & k \text{ 为奇数.} \end{cases} \end{aligned} \tag{22}$$

由于 $0 \leq d < 1$, 则由式(22)可得

$$\lim_{k \rightarrow \infty} |r - y(k+1)| = \lim_{k \rightarrow \infty} |e(k+1)| = 0. \tag{23}$$

即定理1的结论1)成立, 并由式(22)知, $e(k)$ 有界, 又由于参考输入信号 r 为常数, 可知系统输出序列 $\{y(k)\}$ 也有界.

接下来将进一步证明控制输入序列 $\{u(k)\}$ 有界.

令 $c_1(k) = (k_p + k_i)\alpha(k)$, $c_2(k) = k_p\alpha(k)$, 则 $c_1(k) > c_2(k) \geq 0$. 对式(9)取绝对值, 得

$$\begin{aligned} |\Delta u(k)| &= \\ |(k_p + k_i)\alpha(k)e(k) - k_p\alpha(k)e(k-1)| &= \\ |c_1(k)e(k) - c_2(k)e(k-1)| &\leq \\ c_1(k)|e(k)| + c_2(k)|e(k-1)| &\leq \\ (c_1(k) + c_2(k)) \max\{|e(k)|, |e(k-1)|\} &= \end{aligned}$$

$$\gamma(k) \max\{|e(k)|, |e(k-1)|\}, \tag{24}$$

其中 $\gamma(k) = c_1(k) + c_2(k) > 0$.

由 $2k_p + k_i < 2\sqrt{\lambda}$ 得

$$\begin{aligned} \gamma(k) = c_1(k) + c_2(k) &= \\ (2k_p + k_i) \frac{\hat{\phi}(k)}{\lambda + \hat{\phi}(k)^2} &\leq \\ (2k_p + k_i) \frac{\hat{\phi}(k)}{2\sqrt{\lambda}\hat{\phi}(k)} &< 1. \end{aligned} \tag{25}$$

取常数 $g = \max\{\gamma(k)\}$, $k = 0, 1, 2, \dots$, 有 $\gamma(k) \leq g < 1$. 由式(24)得

$$|\Delta u(k)| \leq g \max\{|e(k)|, |e(k-1)|\}. \tag{26}$$

利用式(26), 可得

$$\begin{aligned} |u(k)| &= \\ |u(k) - u(k-1) + u(k-1) - u(k-2) + & \\ \dots + u(1) - u(0) + u(0)| &\leq \\ |\Delta u(k)| + |\Delta u(k-1)| + \dots + & \\ |\Delta u(1)| + |u(0)| &\leq \\ g(\max\{|e(k)|, |e(k-1)|\} + & \\ \max\{|e(k-1)|, |e(k-2)|\} + \dots + & \\ \max\{|e(1)|, |e(0)|\}) + |u(0)|. & \end{aligned} \tag{27}$$

由式(22)得

$$\begin{aligned} \max\{|e(k)|, |e(k-1)|\} &\leq \\ \begin{cases} d^{\frac{k}{2}-1} \max\{|e(2)|, |e(1)|\}, & k \text{ 为偶数;} \\ d^{\frac{k-1}{2}} \max\{|e(1)|, |e(0)|\}, & k \text{ 为奇数.} \end{cases} & \end{aligned} \tag{28}$$

令 $\sigma(k) = \max\{|e(k)|, |e(k-1)|\} + \max\{|e(k-1)|, |e(k-2)|\} + \dots + \max\{|e(1)|, |e(0)|\}$, 有

$$\begin{aligned} \sigma(k) &\leq \begin{cases} \frac{1-d^{\frac{k}{2}}}{1-d} \max\{|e(2)|, |e(1)|\} + \\ \frac{1-d^{\frac{k}{2}}}{1-d} \max\{|e(1)|, |e(0)|\}, & k \text{ 为偶数;} \\ \frac{1-d^{\frac{k-1}{2}}}{1-d} \max\{|e(2)|, |e(1)|\} + \\ \frac{1-d^{\frac{k+1}{2}}}{1-d} \max\{|e(1)|, |e(0)|\}, & k \text{ 为奇数} \end{cases} \leq \\ & \frac{2}{1-d} \max\{|e(2)|, |e(1)|, |e(0)|\}. \end{aligned} \tag{29}$$

将式(29)代入(27)得

$$|u(k)| \leq \frac{2g}{1-d} \max\{|e(2)|, |e(1)|, |e(0)|\} + |u(0)|. \tag{30}$$

即控制输入序列 $\{u(k)\}$ 有界, 则定理1的结论2)成

立. □

3 仿真研究

为了验证iCF-MFAC方法的有效性,选择如下非线性系统^[9]进行仿真研究:

$$y(k) = \begin{cases} \frac{y(k-1)}{1+y(k-1)^2} + u(k-1)^3, & k \leq 80; \\ \frac{y(k-1)y(k-2)y(k-3)u(k-2)(y(k-3)-1)}{1+y(k-1)^2+y(k-1)^3} + \frac{u(k-1)}{1+y(k-1)^2+y(k-1)^3}, & 80 < k \leq 160. \end{cases} \quad (31)$$

参考输入信号选为

$$y(k) = \begin{cases} 0.6, & k \leq 40; \\ -0.6, & 40 < k \leq 80; \\ 0.6, & 80 < k \leq 120; \\ -0.6, & 120 < k \leq 160. \end{cases} \quad (32)$$

并取 $\mu = 1, \lambda = 4, \hat{\phi}(0) = 0.8, \varepsilon = 10^{-5}$.

首先,选取参数 $k_p = 0.0$ 固定不变,参数 k_i 分别为0.5、1.0和2.0,仿真结果如图1所示,其中 $K = [0.0, 0.5]$ 表示 $k_p = 0.0, k_i = 0.5$ 对应的 $y(k)$ (下同).可以看出,参数 k_i 的取值对系统输出响应的影响较大,当 k_i 取值较大时,系统输出响应变快,但同时超量也随之增大.需要指出的是,当 $k_p = 0.0, k_i = 1.0$ 时,iCF-MFAC方法退化为CF-MFAC方法,由此可见,改进方法具有更好的通用性和灵活性.

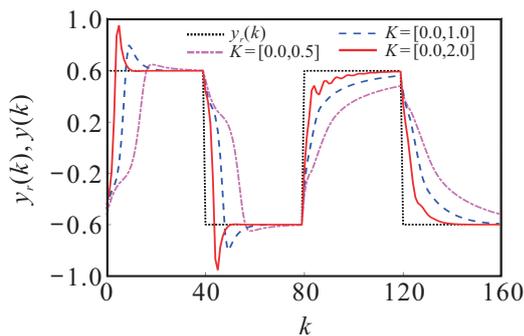


图1 iCF-MFAC方法针对不同 k_i 的仿真结果

其次,检验参数 k_p 对系统输出响应的影响,即取固定参数 $k_i = 2.0, k_p$ 分别为0.0、1.0和2.5,仿真结果如图2所示.可以看出, k_p 在此取值范围内,取值较大时,系统超调明显变小,系统响应速度虽然也会变快但不明显.综合考虑iCF-MFAC参数 k_p 和 k_i 对系统性能的影响,取 $k_p = 2.5, k_i = 2.0$,并将其与原CF-MFAC方法进行对比,仿真结果如图3所示.可以

看出,iCF-MFAC方法在响应速度和超调量方面均优于原CF-MFAC方法.

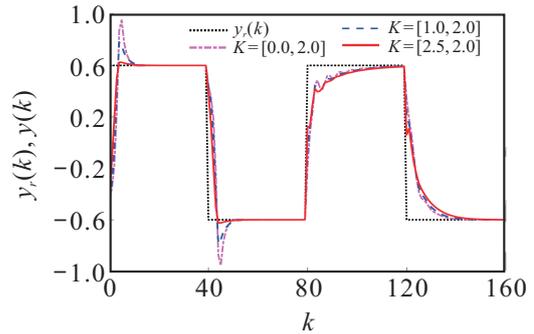


图2 iCF-MFAC方法针对不同 k_p 的仿真结果

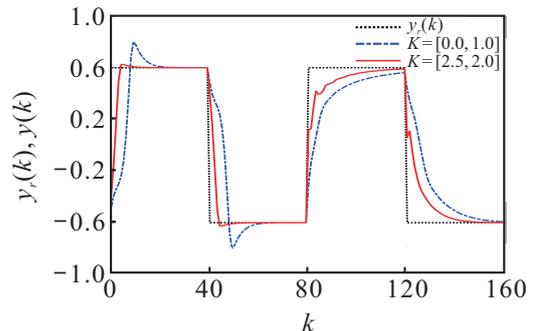


图3 iCF-MFAC方法与原方法的仿真结果对比

最后,为了比较iCF-MFAC方法与具有类似控制器结构的FF-MFAC方法(即 $L_u = L_y = 1$)的控制效果,根据注1,两种方法的参数选取如下: $\mu = 0.01, \lambda = 1, \rho_1 = \rho_2 = 1, \hat{\phi}_1(0) = 0, \hat{\phi}_2(0) = \hat{\phi}(0) = 0.8, \varepsilon = 10^{-5}, k_p = 1, k_i = 1.4$,仿真结果如图4所示.可以看出,iCF-MFAC方法在较小超调的情况下,仍具有更快的响应速度,这与注1中的分析结果一致.如果进一步调小FF-MFAC方法的参数 λ ,虽然可以提高系统的响应速度,但同时也会增大系统的超调.需要说明的是,通过选择更大的输入输出伪阶数 L_u 和 L_y 及其合适的相应参数,FF-MFAC可以获得与iCF-MFAC相近甚至更好的控制效果,但控制器则较为复杂.

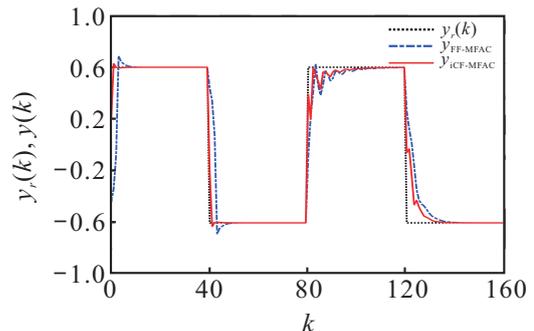


图4 iCF-MFAC方法与具有类似控制器结构的FF-MFAC方法的仿真结果对比

4 实验研究

为了检验iCF-MFAC方法的可行性,本文将其用于图5所示直流电机系统的速度控制.该直流电机系统的输出为速度信号 $0 \sim 3000 \text{ rpm}$,输入为直流电压信号 $0 \sim 10 \text{ V}$.取控制周期 $T = 0.05 \text{ s}$,控制参数 $\mu = 2, \lambda = 1200000, \hat{\phi}(0) = 300, \varepsilon = 10^{-5}$,并分别选取 $k_p = 0.0, k_i = 1.0$ 和 $k_p = 35, k_i = 8$,即分别对应于原CF-MFAC方法和iCF-MFAC方法,实验结果如图6所示.可以看出,与原CF-MFAC方法相比,在近似相同超调的情况下,iCF-MFAC方法具有更快的响应速度.

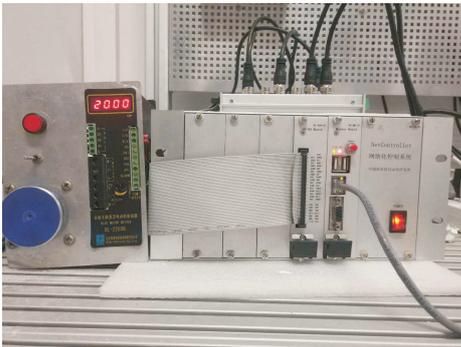


图5 直流电机控制系统实验平台

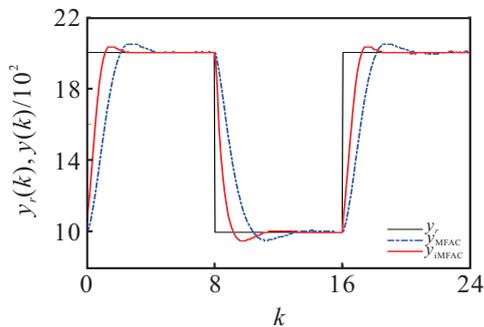


图6 iCF-MFAC方法与原方法的实验结果对比

5 结论

本文针对非线性系统的数据驱动控制问题,在分析CF-MFAC方法优势和缺陷的基础上,提出了一种改进的iCF-MFAC方法.该方法的自适应控制律由时变比例控制项和时变积分控制项组成,原方法是其一种特殊形式,因而具有更强的通用性和灵活性,并将其与具有类似控制器结构的FF-MFAC方法进行了对比分析.本文还分析了改进方法的闭环稳定性和收敛性,并分别通过典型非线性系统的数值仿真和直流电机系统的实际实验,验证了改进方法的有效性和可行性.仿真和实验结果表明,在保证相同超调的情况下,改进的CF-MFAC方法在系统输出响应速度方面要优于原CF-MFAC方法和具有类似控制器结构的FF-MFAC方法.

参考文献(References)

- [1] 侯忠生, 许建新. 数据驱动控制理论及方法的回顾和展望[J]. 自动化学报, 2009, 35(6): 650-667. (Hou Z S, Xu J X. On data-driven control theory: The state of the art and perspective[J]. Acta Automatica Sinica, 2009, 35(6): 650-667.)
- [2] Hou Z S, Wang Z. From model-based control to data-driven control: Survey, classification and perspective[J]. Information Sciences, 2013, 235(20): 3-35.
- [3] Yin S, Gao H J, Kaynak O. Data-driven control and process monitoring for industrial applications, Part I[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(11): 6356-6359.
- [4] Yin S, Li X W, Gao H J, et al. Data-based techniques focused on modern industry: An overview[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(1): 657-667.
- [5] Hou Z S, Chi R H, Gao H J. An overview of dynamic linearization based data driven control and applications[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(5): 4076-4090.
- [6] Zhao C, Guo L. PID controller design for second order nonlinear uncertain systems[J]. Science China Information Sciences, 2017, 60(2): 022201.
- [7] 侯忠生, 韩志刚. 非线性系统鲁棒无模型学习自适应控制[J]. 控制与决策, 1995, 10(2): 137-142. (Hou Z S, Han Z G. Robust modelless learning adaptive control of nonlinear systems[J]. Control and Decision, 1995, 10(2): 137-142.)
- [8] 侯忠生. 无模型自适应控制的现状与展望[J]. 控制理论与应用, 2006, 23(4): 586-592. (Hou Z S. On model-free adaptive control: The state of the art and perspective[J]. Control Theory & Applications, 2006, 23(4): 586-592.)
- [9] Hou Z S, Jin S T. Model free adaptive control: Theory and applications[M]. New York: CRC Press, 2013: 1-93.
- [10] Hou Z S, Liu S D, Yin C K. Local learning-based model-free adaptive predictive control for adjustment of oxygen concentration in syngas manufacturing industry[J]. IET Control Theory & Applications, 2016, 10(12): 1384-1394.
- [11] Chi R H, Hou Z S. A model free adaptive control approach for freeway traffic density via ramp metering[J]. International Journal of Innovative Computing, Information and Control, 2008, 4(11): 2823-2832.
- [12] 田涛涛, 侯忠生, 刘世达, 等. 基于无模型自适应控制

- 的无人驾驶汽车横向控制方法[J]. 自动化学报, 2017, 43(11): 1931-1940.
(Tian T T, Hou Z S, Liu S D, et al. Model-free adaptive control based lateral control of self-driving car[J]. Acta Automatica Sinica, 2017, 43(11): 1931-1940.)
- [13] Di S S, Li H F. Model free adaptive speed control on the travelling wave ultrasonic motor[J]. Journal of Electronical Engineering, 2018, 69(1): 14-23.
- [14] Zhang H G, Zhou J G, Sun Q Y, et al. Data-driven control for interlinked AC/DC microgrids via model-free adaptive control and dual-droop control[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(2): 557-571.
- [15] Treesatayapun C. Data input-output adaptive controller based on IF-THEN rules for a class of non-affine discrete-time systems: The robotic plant[J]. Journal of Intelligent & Fuzzy Systems, 2015, 28(2): 661-668.
- [16] Weng Y P, Wang N, Qin H D, et al. Data-driven adaptive tracking control of unknown autonomous marine vehicles[J]. IEEE Access, 2018, 6: 55723-55730.
- [17] 金尚泰, 赵汝莉, 侯忠生, 等. 基于虚拟参考反馈整定的改进无模型自适应控制[J]. 控制与决策, 2015, 30(12): 2175-2180.
(Jin S T, Zhao R L, Hou Z S, et al. Improved model free adaptive control approach with virtual reference feedback tuning[J]. Control and Decision, 2015, 30(12): 2175-2180.)
- [18] Pang Z H, Liu G P, Zhou D H, et al. Data-based predictive control for networked nonlinear systems with network-induced delay and packet dropout[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(2): 1249-1257.
- [19] Pang Z H, Liu G P, Zhou D H, et al. Input design-based compensation control for networked nonlinear systems with random delays and packet dropouts[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2017, 64(3): 299-303.
- [20] Xu D Z, Shi Y, Ji Z C. Model-free adaptive discrete-time integral sliding-mode-constrained-control for autonomous 4WMV parking systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(1): 834-843.
- [21] Treesatayapun C. Adaptive iterative learning control based on IF-THEN rules and data-driven scheme for a class of nonlinear discrete-time systems[J]. Soft Computing, 2018, 22(2): 487-497.
- [22] Bu X H, Hou Z S, Zhang H W. Data-driven multiagent systems consensus tracking using model free adaptive control[J]. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 2018, 29(5): 1514-1524.
- [23] Hou Z S, Xiong S. On model free adaptive control and its stability analysis[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2019, 64(11): 4555-4569.

作者简介

庞中华(1981—), 男, 教授, 博士生导师, 从事数据驱动控制、网络化控制等研究, E-mail: zhpang@ncut.edu.cn;

马标(1995—), 男, 硕士生, 从事数据驱动控制、网络化控制的研究, E-mail: mabiao28102@163.com;

宋文太(1992—), 男, 硕士, 从事数据驱动控制、网络化控制的研究, E-mail: 13693679688@163.com;

刘国平(1962—), 男, 教授, 博士生导师, 从事网络化控制、多智能体控制等研究, E-mail: guoping.liu@whu.edu.cn.

(责任编辑: 孙艺红)

《控制与决策》入选“2020中国国际影响力优秀期刊” “2020年度中国高校百佳科技期刊”

本刊讯: 2020年12月17日, 由中国期刊协会、中国科学技术期刊编辑学会、中国高校科技期刊研究会、全国高等学校文科学报研究会、《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司共同主办的“2020中国学术期刊未来论坛”以线上会议形式隆重召开. 会上发布了“TOP10%中国国际影响力品牌学术期刊”榜单, 《控制与决策》入选“2020中国国际影响力优秀

期刊”. 大会同时发布了《世界期刊影响力指数(WJCI)报告(2020科技版)中国期刊名单》, 《控制与决策》在“控制科学与技术”学科中(WJCI分区为Q1区)位列中国期刊的第一位.

另悉, 《控制与决策》被中国高校科技期刊研究会评为“2020年度中国高校百佳科技期刊”.