

非线性时滞系统开闭环 PD 型 迭代学习控制研究

杨翔¹ 孙瑜^{1,2}

(南京理工大学自动化学院¹, 南京 210094; 西北工业大学自动化学院², 西安 710072)

摘要 对于具有重复运动性质的对象,迭代学习控制是一种有效的控制方法。针对具有可重复输出扰动和初值偏差的一类非线性含有状态和控制时滞系统,鉴于闭环算法往往比开环算法具有更好的稳定性和更强的鲁棒性,为此闭环和开环相结合的算法研究具有更广泛的意义。提出了一种开闭环 PD 型迭代学习控制律,最后通过与开环 PD 型迭代学习律作对比来进行仿真验证,仿真结果验证了算法的有效性。

关键词 时滞系统 迭代学习控制 数值仿真

中图分类号 TP13; **文献标志码** A

日本学者 Uchiyama 于 1978 年提出迭代学习控制(ILC)的思想^[1], Arimoto 等人根据这一思想于 1984 年提出迭代学习控制的概念和方法^[2]。20 几年来,ILC 不但在理论方面展开了大量研究^[4-10],而且在工程实践中也有了较多的应用,如机器人控制^[11,12]、批处理过程^[13]、数控机床^[14]、包装机^[15]和电力系统控制^[16]等实际工业对象。随着迭代学习控制理论研究的不断深入,必将在工业控制领域中发挥越来越大的作用。由于工业过程系统中普遍存在时滞性,导致被控对象所承受的外界扰动不能及时通过被控量反映,使得系统超调明显、调节时间增长,给生产过程控制器的设计带来困难。因此,针对克服系统时滞性和改善滞后过程控制质量的研究具有较大现实意义。

姚仲舒^[17]针对一类不确定状态时滞非线性系统提出了一种形式简单的迭代学习控制算法。孙明轩^[18,19]讨论了具有干扰和状态时滞系统的迭代学习控制。然而,这些工作都是针对没有控制时滞

的系统进行的。但是众所周知,大多数现实工业生产过程中,一个被控系统中往往同时具有状态时滞和控制时滞,这就使得对同时含有状态和控制时滞系统的研究具有更大的实际应用价值。

本文对具有可重复输出扰动和初值偏差的一类非线性含有状态和控制时滞系统进行了迭代学习控制研究,提出了一种带遗忘因子的闭环 PD 型迭代学习律,最后通过 MATLAB 与文献[20]中的开环 PD 型迭代学习律作为对比来进行仿真验证,仿真结果验证了算法的有效性。

1 问题描述

考虑如下具有重复运动性质且同时具有状态时滞和控制时滞的非线性系统

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = f(t, x(t), x(t-\tau)) + B(t)u(t-\tau) \\ y(t) = C(t)x(t) + \omega(t) \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中, $x(t) \in R^n$, $y(t) \in R^m$, $u(t) \in R^r$ 分别为系统的状态、输出和控制向量, $\omega(t) \in R^m$ 为可重复输出扰动, $t \in [0, T]$; $f, B(\cdot), C(\cdot)$ 为适当维数的向量或矩阵, 且 $CB \neq 0$; 状态时滞和控制时滞均为已知常数 $\tau (0 < \tau < T)$; 初始条件当 $t \in [-\tau, 0]$, $x_k(t) =$

2011年5月30日收到,6月29日修改

第一作者简介:杨翔(1987—),江苏张家港人,硕士研究生,研究方向:复杂工业过程智能控制与优化控制。

$\varphi_k(t)$, 函数 $\varphi_k(\cdot)$ 在 $[-\tau, 0]$ 上分段连续; $x_d(t)$, $u_d(t)$, $y_d(t)$ 分别为期望轨迹上的状态向量、控制向量和输出向量。

当系统可重复多次运行时,第 k 次学习对应的动态方程表示为:

$$\begin{cases} \dot{x}_k(t) = f(t, x_k(t), x_k(t-\tau)) + B(t)u_k(t-\tau) \\ y_k(t) = C(t)x_k(t) + \omega_k(t) \end{cases} \quad (2)$$

迭代学习控制目标是在一定的时间区间 $t \in [0, T]$ 内,对于已给定的期望输出 $y_d(t)$,通过多次的迭代学习获得控制输入向量 $u_k(t)$,使得当 $k \rightarrow \infty$ 时,系统输出 $y_k(t)$ 能尽可能的跟踪上期望输出 $y_d(t)$ 。

其输出误差为:

$$e_k(t) = y_d(t) - y_k(t) \quad u_0(t) = 0.1 \quad (3)$$

为表达方便,记 $\delta u_0(t) = u_d(t) - u_0(t)$; $\delta \psi_k(t) = u_d(t) - u_k(t)$, $t \in [-\theta, 0]$ 。

2 超前型开闭环 PD 型迭代学习律

目前,迭代学习控制方面的研究大都是在基于开环或闭环的基础上进行的,而通常情况下,闭环算法往往比开环算法具有更好的稳定性和更强的鲁棒性,所以对闭环和开环相结合的算法研究具有更广泛的意义。在开环学习律中引入闭环,由闭环实现对系统的镇定,保证系统输出不会偏离期望轨迹太远,从而加快了对期望轨迹的跟踪速度。因此,开闭环迭代学习律的研究,为改善的跟踪性能提供了一条有效的途径。

基于以上论述,本章针对式(1)所描述的一类同时具有状态时滞和控制时滞的非线性系统,提出了一类超前型开闭环 PD 型迭代学习律:

$$u_{k+1}(t) = u_k(t) + \Gamma_p(t)e_k(t+\tau) + \Gamma_p(t)e_{k+1}(t+\tau) + \Gamma_D(t)\dot{e}_k(t+\tau) + \Gamma_D(t)\dot{e}_{k+1}(t+\tau) \quad (4)$$
$$e_k(t+\theta) = y_d(t+\theta) - y_k(t+\theta) \quad (5)$$

式中, $t \in [-\tau, T-\tau]$, $\Gamma_p(t)$, $\Gamma_D(t)$ 分别是 P 型和 D 型学习增益,且二者都有界。初始控制 $u_0(t)$ 是分段连续且有界。对于所有的 k ,控制 $u_k(t)$ 分段连续且有界。

3 仿真研究

仿真算例:
考虑具有重复运动性质的非线性控制时滞系统。

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -(2+5t) & -(3+2t) \end{bmatrix} x(t-\tau) + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} u(t-\tau) \\ y(t) = [0 \quad 1]x(t) + \omega(t) \end{cases} \quad (6)$$

上述系统 $t \in [0, 1]$, 控制时滞 $\tau = 0.1$, $\omega(t)$ 是可量测重复干扰,且当 $t = 0$ 时, $\omega(t) = 0$ 。给定的系统期望输出轨迹为: $y_d(t) = t^2$, 在仿真过程中,取初始控制 $u_{-1}(t) = 0$, $u_0(t) = 0.2$, 对该系统施加式(4)所示的超前型开闭环 PD 型迭代学习算法,选取学习增益矩阵为 $\Gamma_p = 5$, $\Gamma_D = 0.1$, $\alpha = 2^{-k}$, k 是迭代次数,随着 k 的次数增多, $\alpha \rightarrow 0$ 。

为了体现本算法的优越性,特选取文献[20]中的开环 PD 型迭代学习律作为对比来进行仿真验证,该开环 PD 型迭代学习律为:

$$u_{k+1}(t) = u_k(t) + \Gamma_p(t)e_k(t) + \Gamma_D(t)\dot{e}_k(t) \quad (7)$$

进行对比仿真研究。对应的仿真参数为: $\Gamma_p = 1.8$, $\Gamma_D = 0.5$, $u_0(t) = 0.1$ 。

情形 1: 系统的初值偏差在 $[-0.2, 0.2]$ 范围内随机变化,且 $\omega_k(t) = 0$

采用式(4)所示学习律进行的仿真结果如图 1 所示。

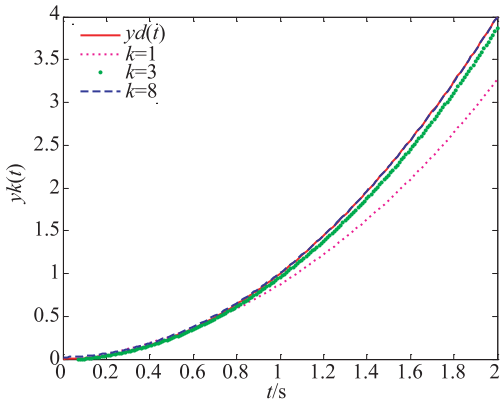


图 1 采用开闭环算法 y 的输出跟踪曲线

采用式(7)所示的学习律得出的仿真结果如图2所示:

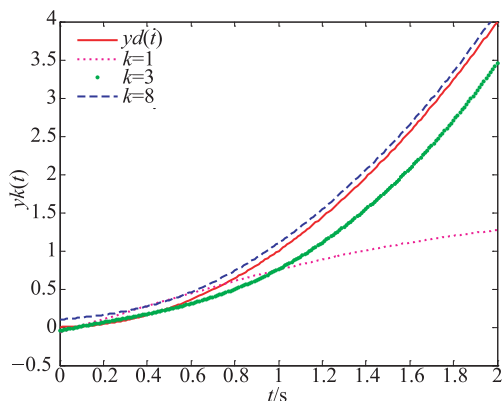


图2 采用开环算法 y 的输出跟踪曲线

情形2:系统初值偏差在 $[-0.2, 0.2]$ 范围内随机变化, $\omega_k(t) = 0.2\cos(50t)$ 。

采用式(4)所示学习律进行的仿真结果如图3所示。

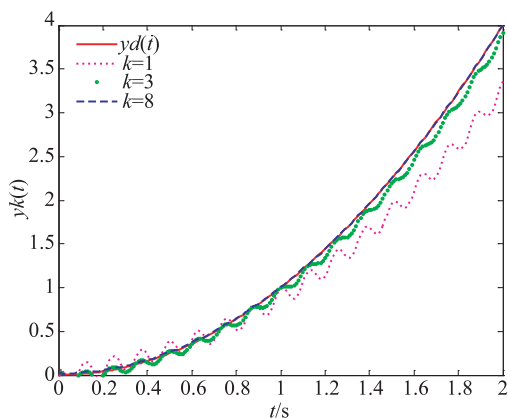


图3 采用开闭环算法 y 的输出跟踪曲线

采用式(7)所示的学习律得出的仿真结果如图4所示。

通过图1与图2的对比可以看出,在情形1下进行相同次数的迭代学习控制,运用本文提出的开闭环算法得到的输出曲线跟踪精度明显要优于普通的开环PD型迭代学习控制算法。通过图3与图4的对比可以看出,在情形2下,本章所提出的开闭环算法的抗干扰性能上明显优于普通的开环PD型迭代学习控制算法,这主要是因为本文算法引入了闭环控制,使得输出曲线的变化更加平滑,波动性

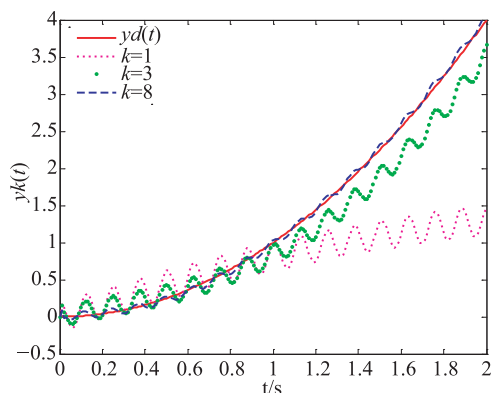


图4 采用开环算法 y 的输出跟踪曲线

明显减小。

4 结论

本文针对具有可重复输出扰动和初值偏差的一类非线性状态时滞系统,提出了开闭环PD型迭代学习律,另外,通过与普通开环PD型迭代学习律的对比仿真,表明了本文提出的开闭环PD型迭代学习律在输出曲线跟踪精度性能和抑制干扰方面均要优于普通的开环PD型迭代学习算法。

参考文献

- 1 Uchiyama M. Formulation of high-speed motion of a mechanical arm by trial. Transaction of the Society of Instrumentation and Control Engineers, 1978; 14(6): 706—709
- 2 Arimoto S, Kawamura S, Miyazaki F. Bettering operation of dynamic systems by learning. Journal of Robotics Systems, 1984; 1(2): 123—140
- 3 吉 梗. 线性时滞系统开闭环PID型迭代学习控制. 台州学院学报, 2008; 30(3): 17—22
- 4 Arimoto S. Learning control theory for robot motion. Int J Adapt Control. Signal Processing, 1990; (4): 543—564
- 5 Su H Y, Chu J. A new nonlinear optimal control design approach for a chemical reactor. Control Theory and Applications, 1995; 12(5): 539—545
- 6 孙明轩, 黄宝健, 张学智. 任意初态下不确定时滞系统的型迭代学习控制. 控制理论与应用, 1998; 15(6): 853—858
- 7 方 忠, 陈彭年, 韩正之. 时滞系统采样迭代学习控制. 控制与决策, 2001; 16(6): 869—872
- 8 林 辉, 王 林. 迭代学习控制理论. 西安: 西北工业大学出版

- 社,1998
- 9 谢胜利,田森平,谢振东. 迭代学习控制的理论与应用. 北京:科学出版社,2005
- 10 朴凤贤,张庆灵,王 哲. 迭代学习控制的收敛速度分析. 东北大学学报(自然科学版), 2006;27(8):835—838
- 11 Wang D W. Simple iterative learning controller for manipulators with flexible joints. Automation, 2000;31(9): 1341—1344
- 12 蒋 平, Unbhuon Rolf. 无奇异间接迭代学习控制及其在机器人运动模仿中的应用. 自动化学报, 2002;28(6): 389—396
- 13 Dimitry Gornevsky. Distributed system loop-shaping design of iterative control for batch processes. Proc of the IEEE Conf on Decision and Control, 1999;(1):245—250
- 14 吴晓峰. 坐标测量机迭代学习控制研究. 自动化学报, 1994;20(5): 637—639
- 15 Grundelius M, Bernhardsson Bo. Constrained iterative learning control of liquid slosh in an industrial packaging machine. Proc of the IEEE Conf on Decision and Control, 2000; 5:4544—4549
- 16 张东霞,童陆圆,王仲鸿. 可控串补迭代学习控制法. 清华大学学报(自然科学版), 2000;(1): 12—16
- 17 姚仲舒,杨成梧,吴健荣. 不确定时滞非线性系统的迭代学习控制. 系统工程与电子技术,2002;24(11):34—63
- 18 孙明轩. 不确定时滞系统的迭代学习控制算法(I). 西安工业学院学报, 1997;17(4): 259—266
- 19 孙明轩. 不确定时滞系统的迭代学习控制算法(II). 西安工业学院学报,1998;18(1): 1—8
- 20 孙明轩,黄宝健,张学智. 非线性系统的 PD 型迭代学习控制. 自动化学报, 1998;24(5):711—714

Research on a Nonlinear System with State Delay and Control Delay with Open-closed-loop PD-type Iterative Learning Control

YANG Xiang¹, SUN Yu^{1,2}

(College of Automation Nanjing University of Science & Technology¹, Nanjing 210094, P. R. China;

College of Automation Northwestern Polytechnical University², Xi'an 710072, P. R. China)

[Abstract] For repetitive movements of the objects, iterative learning control is an positive and effective control method. This dissertation mainly studies a class of nonlinear systems with initial deviation, state and control time delay and repetitive output disturbance based on PD-type iterative learning control algorithm. Considering close-loop algorithm' stability and robustness is pretty better than open-loop algorithm's, combining the two algorithms has a wider significance, so a kind of open-closed-loop PD-type iterative learning control algorithm was proposed. The open-closed-loop PD-type learning algorithm and open-loop algorithm are applied respectively to simulation. The results of simulation prove that ILC algorithm can obtain a better control effect.

[Key words] systems with delay iterative learning control numerical simulations