

工业过程稳态优化中一种改进的迭代学习控制

何善君, 程 菲, 罗 键*

(厦门大学自动化系, 福建 厦门 361005)

摘要: 为了改善工业过程稳态控制的动态品质, 对在重复性控制较为实用的 PD 型迭代学习控制算法进行改进, 引入积分环节, 以适应工业过程稳态控制; 针对带有噪声的系统输出信号进行滤波, 改进局部对称双积分型迭代学习控制算法, 提出了基于递归最小二乘法(Recursive Least Squares, RLS)滤波的 PID 型迭代学习控制算法, 以期过滤噪声的高频和低频分量, 获得更为理想的系统输出. 最后给出了相关的仿真试验结果.

关键词: 迭代学习控制; 稳态优化; PID 型; 递归最小二乘法; 滤波; Matlab

中图分类号: TP 273

文献标识码: A

文章编号: 0438-0479(2007)03-0326-05

在化工、石油、电力和发酵等工业过程稳态优化进程中, 往往将工业过程输出变量的稳态值反馈到上级协调器(全局反馈), 以修正基于模型的最优解, 使其逼近实际最优解. 反馈需要控制器设定值变化多次, 而且每次设定值必须施加到实际系统, 实际系统稳态值的测量必须等到暂态过程(过渡过程)结束后才能进行. 由于工业过程的复杂性, 传统的仪表控制器很难使控制系统的动态品质达到理想的控制效果, 如何进一步改善这种控制系统的动态品质, 是实际工业过程实施在线稳态优化算法亟待解决的问题.

西安交通大学万百五教授领导的课题组将迭代学习控制应用到工业过程稳态优化控制中, 并形成了从简单工业控制过程系统—工业过程控制系统—大工业过程控制系统等一系列较为系统的基于迭代学习控制的工业过程稳态优化递阶控制理论体系^[1-3]. 其中阮小娥建立了基本的迭代学习控制算法结构^[1], 提出了加权 PD 型开环和闭环迭代学习控制算法, 从理论上研究了控制算法的收敛性; 并针对噪声对系统输出信号的影响, 提出噪声平滑型迭代学习控制方案. 然而 PD 型迭代学习控制主要应用在重复运动性质的被控系统如机器人控制^[4], 对于广义上的工业过程稳态递阶优化并不能完全适用; 另外采用噪声平滑型迭代学习控制方案——对称积分型迭代学习控制来平滑噪声干扰, 根据系统传递函数, 其功能只能过滤噪声干扰的高频分量, 对于低频分量的幅值反而部分增强. 本文主要是在此基础上, 对这些算法进行改进, 以其获得更好的系统动态品质.

1 基于 PID 迭代学习控制的线性工业过程控制系统稳态优化

1.1 研究对象

本文讨论的是工业过程控制系统稳态递阶优化. 虽然近来新的控制理论和应用研究不断涌现, 但是传统的 PID 控制器具有结构简单、鲁棒性较强等特点, 目前仍然广泛应用于工业过程控制中, 所以本文仍以 PID 控制器控制的闭环稳定控制系统为研究对象^[1-2]. 图 1 给出了一般工业过程稳态优化迭代学习控制算法结构.

1.2 控制原理

工业过程稳态优化一般采用递阶控制形式^[1]. 为了防止工业系统的震荡或者失调, 对控制器的设定值需要分段逐步施加到实际系统中, 最终获取稳态控制设备的最优设定值. 即为了获取工业过程的最终系统稳态, 需要经过这样一个进程: 工业过程从一个稳态按照具有良好动态品质的理想轨线运行到另一个稳态, 逐渐到达实际需要的稳态. 图 1 中优化控制层就是把控制器的最优设定值分段, 产生幅值不等的阶跃输入(分段设定值)施加到实际系统控制器中; 由于 PID 控制器的动态控制效果不能完全满足实际需要, 所以引入迭代学习控制算法, 图 1 中迭代学习控制器就是基于迭代学习控制算法的控制器; $Y_d(s)$ 表示具有良好动态品质的理想轨线^[1].

1.3 研究算法

1) PID 型迭代学习控制^[4]

线性时变连续系统一般形式如下:

$$\dot{x}_k(t) = A(t)x_k(t) + B(t)u_k(t) + D(t)\eta_k(t),$$

收稿日期: 2006-11-03

* 通讯作者: jianluo@xmu.edu.cn

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

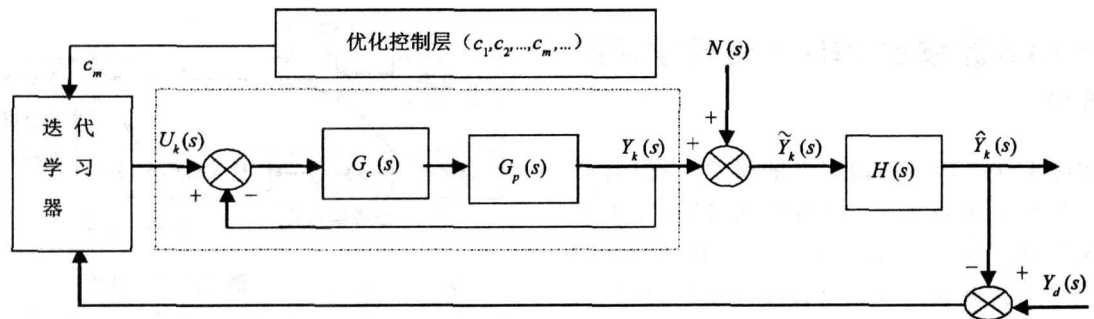


图1 带噪声的工业过程稳态优化迭代学习控制结构简图

Fig. 1 The structure of iterative learning control for industrial process steady state optimization with noise

$$\begin{aligned} y_k(t) &= C(t)x_k(t), \\ y_k(0) &= 0 \end{aligned} \quad (1)$$

PID 型开环迭代学习控制算法如下:

$$u_{k+1}(t) = u_k(t) + (G_p + G_i \int dt + G_d \frac{d}{dt}) e_k(t) \quad (2)$$

式中 G_p , G_i , G_d 分别为 PID 参数(或者称为学习增益)矩阵, 其收敛条件为 $\|I - C(t)B(t)G_d\| \leq \bar{p} < 1$. 算法中的误差信息 $e_k(t) = y_d(t) - y_k(t)$ 为系统第 k 次学习的误差. 如果把公式(2)中的 $e_k(t)$ 改为 $e_{k+1}(t)$, 则称为 PID 型闭环迭代学习控制算法.

PID 型迭代学习控制有如下形式表示: P 型、PI 型、PD 型、D 型以及混合型. 它们的使用根据具体问题有所差异. 主要是根据下文 2) 中阐述的 PID 参数作用来确定.

由于非线性系统可以转换为线性系统(如公式(1))表示, 故而 PID 型迭代学习控制算法也适用于非线性时变系统.

2) 工业过程稳态优化 PID 型迭代学习控制算法

首先对线性工业过程控制系统的稳态优化进程施行 PID 迭代学习控制, 其基本控制结构如图 1 所示. 其中, $N(s)$ 为随机噪声. 虚框内为稳态优化下的工业过程单输入-单输出控制系统, 其传递函数可表示为:

$$Y(s) = \frac{G_p(s)}{1 + G_p(s)} U(s) \quad (3)$$

其中, $U(s)$ 为控制输入, $Y(s)$ 为控制系统精确输出, $G_c(s)$ 为 PID 控制器传递函数, $G_p(s)$ 为工业过程传递函数, $G_{cp}(s) = G_c(s)G_p(s)$ 为控制系统开环传递函数.

设在工业过程稳态优化进程中, 优化层产生幅值不等的设定值阶跃变化序列, 其幅值为 $c_1, c_2, \dots, c_m, \dots$. 采用基于微计算机的迭代控制单元, 当每一 c_m 施加于实际控制系统时, 对工业过程控制系统施行迭代学习控制.

文献[1]中使用 PD 型迭代学习控制算法. 对于稳态优化进程中, P 参数控制输出的大小与误差的大小

成正比, D 参数作用则是事前预防控制, 即一发现输出有变大或变小的趋势, 马上就输出一个阻止其变化的控制信号, 以防止出现过冲或超调等, 然而由于没有误差时输出为零, 因此比例调节不可能完全消除误差, 不可能使被控值达到给定值. 必须存在一个稳定的误差, 以维持一个稳定的输出, 才能使系统的输出值保持稳定. 这就是通常所说的比例作用是有差调节, 是有静差的, 加强比例作用只能减少静差, 不能消除静差(静差: 即静态误差, 也称稳态误差). 对一个自动控制系统, 如果在进入稳态后存在稳态误差, 则称这个控制系统是有稳态误差的或简称有差系统(System with Steady-state Error). 为了消除稳态误差, 在控制器中必须引入“积分项”. 积分项对误差取决于时间的积分, 随着时间的增加, 积分项会增大. 这样, 即便误差很小, 积分项也会随着时间的增加而加大, 它推动控制器的输出增大使稳态误差进一步减小, 直到等于零. 因此, 比例+积分(PI)控制器, 可以使系统在进入稳态后无稳态误差. 所以对于一般工业过程控制系统稳态优化, 在 PD 型迭代算法中需要引入积分环节, 以消除稳态误差.

PID 迭代学习控制算法如下:

$$u_{k+1}(t) = \alpha(u_k(t) + (G_p + G_i \int dt + G_d \frac{d}{dt}) e_k(t)) \quad (4)$$

式中, $k = 1, 2, \dots$ 为算法的迭代学习次数, $u_{k+1}(t)$, $y_{k+1}(t)$ 分别为第 $k+1$ 次稳态优化时实际系统的控制输入和输出变量. $e_k(t) = y_d(t) - \hat{y}_k(t)$, $y_d(t)$ 为对应优化层 c_m 而选定的具有良好动态品质的理想轨线, $\hat{y}_k(t)$ 为采用平滑技术获得的系统输出值. α 为加权系数, 其作用是提高施加新的控制量后系统稳定性. 对于工业过程稳态优化中, 可以按以下方式取值^[1]:

$$\alpha = \frac{c_{m+1}}{c_m} \quad (5)$$

c_{m+1} 和 c_m 是分别前后两次对系统施加的控制量, 目的是保持两次控制量施加前后系统稳定性.

2 基于 RLS 滤波的 PID 型迭代学习控制算法

由于实际系统中存在不确定性的噪声干扰(含高频和低频分量),系统输出 $\tilde{y}_k(t)$ 含有测量噪声. 由于噪声对系统输出信号的影响,所提出的具有微分结构的 PID 迭代学习控制算法不能直接实际使用,所以文献[1-3,5]中均提出了对系统输出信号进行处理-噪声过滤算法,其中文献[1]采用噪声平滑型迭代学习控制方案——对称积分型迭代学习控制来平滑噪声干扰,但是根据系统传递函数,其功能只能过滤噪声干扰的高频分量,对于低频分量的幅值反而部分增强,所以需要对该算法进行改进. 本文采用自适应噪声抵消器对系统输出的噪声进行过滤.

图 2 为自适应噪声抵消器的原理图^[6]. 主输入中含有待抵消的加性噪声,参考输入对应主输入的噪声 n_0 ,但与信号 s (来自信号源)无关. 利用两输入噪声的相关性和信号与噪声的独立性,使参考输入通过自适应滤波器与主输入中噪声分量逼近并相减,输出误差信号. 自适应抵消效果不仅取决于所采用的自适应滤波算法,还在很大程度上依赖于参考信号与理想信号的独立性及两噪声信号的相关性. 如果参考信号中包含有理想信号成分,则抵消效果将大大破坏. 实际中很难让两噪声信号完全相同,所以不能直接相减得理想信号,这就需要选取理想的自适应滤波算法,自适应滤波算法决定滤波器对参考信号 n_1 的处理,使得滤波器的输出尽可能地逼近主输入中的干扰成分 n_0 并相减. 所以,滤波器的输出 e 是对 n_0 的最佳估计,而系统的输出 y 是对理想信号 s 的最佳估计. 本文自适应滤波器采用的算法是利用文献[6]中提出的递归最小二乘法(Recursive Least Squares, RLS). 限于篇幅,这里不给出具体的算法结构^[6].

图 3 为采用基于 RLS 滤波的自适应噪声抵消器环节的控制图.

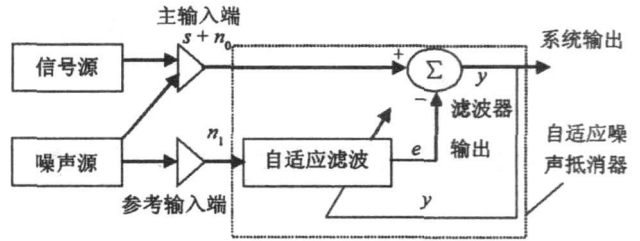


图 2 自适应噪声抵消滤波器示意图

Fig. 2 Adaptive noise cancellation controller

3 仿真实例

设图 1 所示的控制系统中, PID 控制器传递函数

$$G_c(s) = 2 + \frac{0.5}{s} + 0.2s, \text{ 控制对象的传递函数 } G_p(s) =$$

$$\frac{1}{2s^2 + s + 1}. \text{ 采用 PID 型迭代学习控制算法}^{[7-12]} \text{ (见公$$

式(4)), 选取学习增益 $G_p = 0.1, G_i = 0.1, G_d = 0.3$, 优化控制层控制序列 $c_1 = 3.0, c_2 = 2.8, c_3 = 2.6, c_4 = 2.4, c_5 = 2.2, c_6 = 2.0, c_7 = 1.8, c_8 = 1.6, c_9 =$

$1.4, c_{10} = 1.2$. 理想轨线 $y_d(t) = c_m(1 - \frac{1}{(1+t)^3})$. 仿

3.1 PD 型与 PID 型迭代学习控制算法仿真比较

从图 4、5 的对比可知, 采用 PD 型迭代学习控制器虽然能保证系统达到稳态, 但是系统输出与理想输出存在较大的稳态误差, 无法消除. 而采用增加了积分环节的 PID 型迭代学习控制器, 其系统输出曲线虽然在开始阶段有一定超调(实际控制过程中可以调节学习增益来减少超调), 但是不仅保证系统能达到稳态而且基本消除了稳态误差^[14]. 故而在工业过程稳态优化迭代学习控制中 PID 算法比 PD 算法更加稳定和适用.

3.2 局部对称双积分滤波与基于 RLS 滤波的 PID 型迭代学习控制算法比较

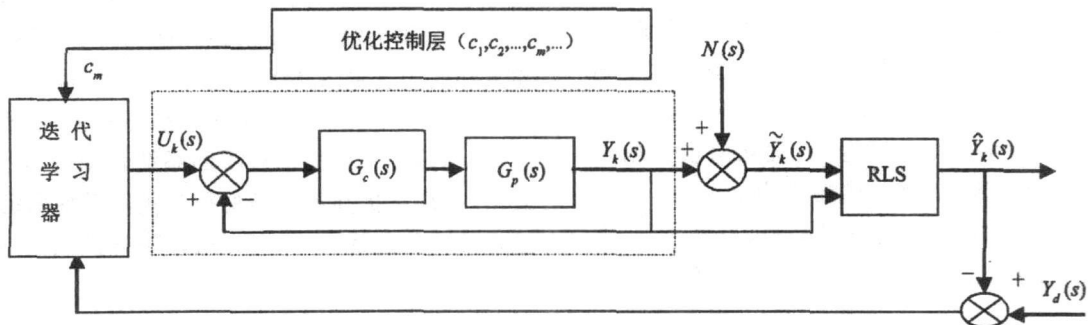


图 3 基于 RLS 的工业过程稳态优化迭代学习控制结构简图

Fig. 3 The structure of RLS based iterative learning control for industrial process steady state optimization

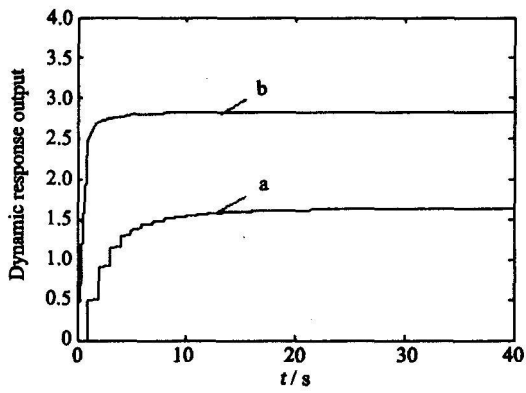


图4 PD型迭代学习控制器系统输出曲线图(不带噪声, $c_m = 2.8$)

a 为实际输出曲线; b 为理想曲线

Fig. 4 Output of PD-type iterative learning control system in $c_m = 2.8$

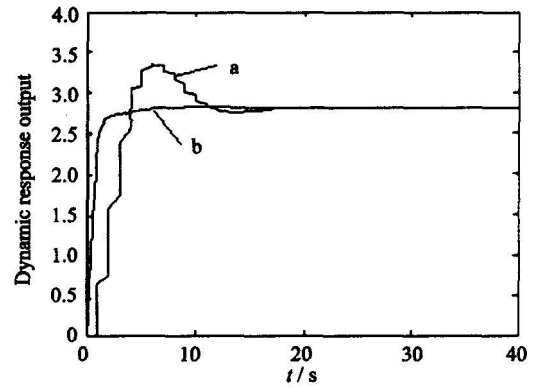


图5 PID型迭代学习控制器系统输出曲线图(不带噪声, $c_m = 2.8$)

a 为实际输出曲线; b 为理想曲线

Fig. 5 Output of PID-type iterative learning control system in $c_m = 2.8$

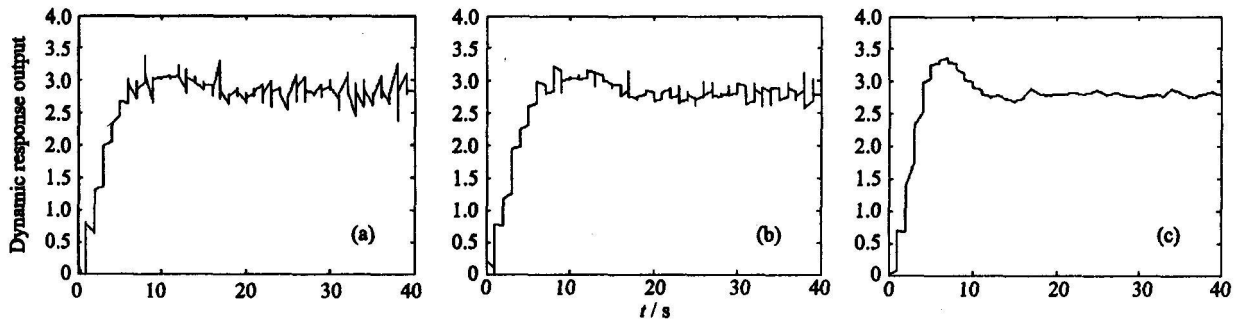


图6 采用不同滤波算法的系统输出曲线($c_m = 2.8$)

(a) 为未滤波的系统输出曲线; (b) 为局部对称双积分滤波后的系统输出曲线; (c) 为 RLS 滤波后的系统输出曲线

Fig. 6 Output of different algorithm for filter noise in control system($c_m = 2.8$)

仿真参数: $c_m = 2.8$, 噪声干扰设置为受限带宽的白噪声。

从图6的(b)和(c)曲线对比可以看出, 经过局部对称双积分滤波, 受噪声干扰的系统输出减少了噪声的高频部分, 然而其低频部分却进一步加强; 而采用基于 RLS 滤波的 PID 型迭代学习控制算法获得的系统输出曲线收敛速度快于前者, 而且具有更高的起始收敛速率、更小的权噪声和更大的抑噪能力。

4 结束语

在一般工业过程稳态优化递阶控制中, 需要对在重复性控制较为实用的 PD 型迭代学习控制算法进行改进, 引入积分环节以适应工业过程稳态控制, 仿真试验表明是有必要且效果明显的。本文还对带有噪声的系统输出信号进行滤波, 对局部对称双积分型迭代学习控制算法进行完善, 提出了基于 RLS 滤波的 PID 型迭代学习控制算法, 目的是过滤噪声的高频和低频分

量, 获得较为理想的系统输出, 仿真试验表明是比较有效的。本文是在相关文献的基础上对局部算法进行改进, 所以这些改进方法同样可以推广到大工业过程控制系统稳态优化中。

参考文献:

- [1] 阮小娥. 大工业过程的迭代学习控制研究[D]. 西安: 西安交通大学, 2001.
- [2] 阮小娥, 万百五. 递阶稳态优化下非线性大工业过程的迭代学习控制[J]. 系统工程理论与实践, 2002(6): 16-20.
- [3] 阮小娥, 万百五, 高红霞. 非线性工业过程控制系统的迭代学习控制与收敛性分析[J]. 控制理论与应用, 2002(1): 73-79.
- [4] 孙明轩, 黄宝健. 迭代学习控制[M]. 西安: 国防工业出版社, 1999.
- [5] Chen Y, Dou H, Tan K K. Local symmetrical integral type iterative learning control [J]. Control Theory and Application, 2000, 17(3): 347-352.

[6] 刘世金, 张榆锋, 陈文略, 等. 在噪声抵消应用中自适应滤波算法性能的仿真比较[J]. 系统仿真学报, 2006, 18(5): 1178– 1180.

[7] 兰婷, 张伟勇. 一种具有稳态目标优化的预测控制算法[J]. 油气田地面工程, 2002(3): 109– 110.

[8] 田森平, 谢胜利, 傅予力. 一种新的迭代学习控制快速算法(英文) [J]. 华南理工大学学报: 自然科学版, 2002(5): 37– 40.

[9] 罗中良, 高潮, 周先波, 等. 工程建模下过程控制的迭代学习控制算法及其收敛性[J]. 中山大学学报: 自然科学版, 2002(2): 15– 18.

[10] 杨小军, 李俊民. 一类未知非线性系统的智能迭代学习控制[J]. 控制与决策, 2002(3): 360– 363.

[11] 杨小军, 李俊民. 基于神经网络的鲁棒自适应滑模迭代学习控制[J]. 西安电子科技大学学报, 2002(3): 382– 386.

[12] 林辉, 王林. 迭代学习控制理论[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 1998.

[13] 姚俊, 马松辉. Simulink 建模与仿真[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2002.

[14] 陶永华, 尹怡欣, 葛芦生. 新型 PID 控制及其应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.

An Improved Method for Iterative Learning Control in Industrial Process Steady-state Optimization

HE Sharr jun, CHENG Fei, LUO Jian*

(Department of Automation, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract: In order to improve procedure of industrial process steady state optimization, integral unit was added to PD type iterative learning controller, which is practical in repeatable control system. Furthermore, an improved PID type iterative learning control based on RLS adaptive filter was introduced. To do so, high frequency and low frequency of noise were filtered and system output would be more perfect. The numerical simulations showed that all improved algorithms in this paper were necessary and more effective.

Key words: iterative learning control; steady state optimization; PID type; recursive least squares; filter; Matlab

• 简 讯 •

2006 年度我校获国家及部省市级科技奖项目

序号	项目名称	获奖类别	获奖等级
1	碳原子团簇的形成研究	国家自然科学基金	2 等
2	海洋初级生产力结构及微型生物生态学研究	国家自然科学基金	2 等
3	台湾海峡微型浮游生物生态研究(合作)	高等学校科学技术奖	2 等
4	优质早稻新品种佳辐占的选育与应用	福建省科技进步奖	1 等
5	大弹涂鱼生产性育苗技术研究及规范化养殖(合作)	福建省科技进步奖	2 等
6	Axin 在控制细胞生长及应激反应两种途径中双功能性转换机制及结构基础	福建省科技进步奖	2 等
7	半导体热电转换系统的新优化理论	福建省科技进步奖	3 等
8	新型活性炭材料的开发与应用(合作)	福建省科技进步奖	3 等
9	CAD 在膜工程中的应用研究	福建省科技进步奖	3 等
12	两种石斑鱼引种及人工育苗技术研究	厦门市科技进步奖	2 等
13	远端保护装置的颈动脉支架术——预防中风技术研究	厦门市科技进步奖	2 等
14	HLA 不相合造血干细胞移植治疗白血病的临床研究	厦门市科技进步奖	3 等
15	RNA 干扰抑制 HepG2 N10 细胞系中乙肝病毒基因表达及复制的研究	厦门市科技进步奖	3 等
16	经导管介入封堵器治疗先天性心脏病的临床研究	厦门市科技进步奖	3 等
17	桩基低应变动测的智能化诊断(合作)	厦门市科技进步奖	3 等