

文章编号: 1000-8152(2009)06-0665-04

## 拟合迭代学习数据的工业过程控制器

回立川, 林 辉

(西北工业大学 自动化学院, 陕西 西安 710129)

**摘要:** 为进一步提高工业过程控制系统的跟踪能力, 实现稳、准、快等性能, 本文利用迭代学习算法产生的各类信息, 在控制器函数拟合的基础上, 设计了一种高精度跟踪的鲁棒控制器. 首先在频域对闭环迭代学习算法进行分析, 得出迭代学习控制器等同于级联控制器的结论, 进而采用一个低阶结构的控制器去拟合误差序列与控制序列, 避免了难以物理实现的高阶控制器, 最后通过对一般的工业过程对象进行实验设计, 结果表明这种控制器在快速性、无超调及控制精度上具有很好的优势, 并且具有良好的抑制干扰能力.

**关键词:** 迭代学习; 工业过程; 控制器拟合; 鲁棒性

**中图分类号:** TP273      **文献标识码:** A

## Fitting industrial controller to iterative learning control

HUI Li-chuan, LIN Hui

(Automatic School, Northwest Polytechnical University, Xi'an Shaanxi 710129, China)

**Abstract:** In order to improve the tracking performance of the industrial process system, we fit a robust controller to the information derived from the iterative learning controller. First, the iterative learning algorithm is analyzed in frequency domain by considering the iterative learning controller a cascade controller, and then, a controller is designed to fit the control error and the controlled output, resulting in a realizable controller which is lower in order than the cascade controller. An example is given to illustrate the approach, which shows the advantages of the fitting controller in speed, of none overshoot, with high accuracy and good robustness against disturbances.

**Key words:** iterative learning; industrial process; controller fitting; robustness

### 1 引言(Introduction)

自从Arimoto等人<sup>[1]</sup>在1984年提出迭代学习控制至今, 这种不需要知道系统对象具体模型的控制器对于轨迹跟踪问题表现出的良好性能, 引起国内外诸多学者的兴趣, 他们从收敛性、初始状态、鲁棒性以及控制器各个角度进行了进一步研究<sup>[2~7]</sup>, 不仅在工程实际应用中取得了良好效果, 而且在理论证明上也取得了丰硕成果. 然而由于它是利用系统先前的控制经验和输出误差来修正当前的控制作用, 因此迭代学习控制目前仅局限于对某种具有重复运动性质的被控对象进行控制, 但是在工业过程控制中却不具备这种重复运动的规律, 因此迭代学习控制方法直接应用于工业系统就有些勉为其难了.

另一方面在工业过程控制系统中, 为了提高生产效益, 笔者又希望得到诸如迭代学习控制系统那样尽可能小的误差效果, 同时保证较快的响应速度, 以及良好的鲁棒性能. 而目前大范围使用的PID控制器

对于这3个方面不能同时兼顾, 其参数的选取只能是快速性、稳定性和准确性的折中, 并且对于干扰抑制能力不足, 鲁棒性能较差.

本文基于以上观点, 在线性系统范围内首先通过对闭环迭代学习控制在频域角度的分析, 导出其等价的高阶控制器结构, 得到了下步拟合过程的先决条件; 由此利用迭代学习控制器的输入输出数据进行控制器的传递函数拟合, 得到系统相应的低阶控制器模型, 并且该模型与上述高阶模型以及迭代学习控制器等效; 最后通过对一般的2阶线性控制系统进行仿真分析, 验证了所设计的控制器效果.

### 2 迭代学习控制频域分析(Analysis of iterative learning control)

一般的闭环迭代学习控制器结构如图1所示.

图中控制器的学习方法为: 第 $k+1$ 次的控制等于 $k$ 次的控制加上当前误差的校正项 $G_c(s)e_{k+1}(t)$ ,

当采用闭环PID型控制器时有

$$u_{k+1}(t) = u_k(t) + \Gamma_p e_{k+1}(t) + \Gamma_i \int_0^t e_{k+1}(s) ds + \Gamma_d \dot{e}_{k+1}(t). \quad (1)$$

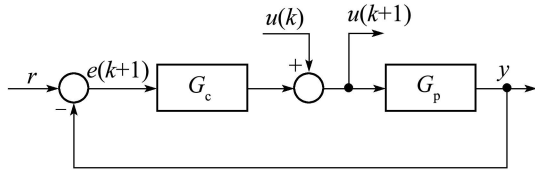


图1 闭环迭代学习控制框图

Fig. 1 Flow chart of closed-loop ILC

在迭代初始控制 $u_0(t) = 0$ 的作用下,根据图1可得系统各物理量之间的频域关系:

$$Y_{k+1}(s) = [U_k(s) + E_{k+1}(s)G_c(s)]G_p(s) = Y_k(s) + E_{k+1}(s)G_c(s)G_p(s). \quad (2)$$

由

$$E_k(s) = R - Y_k(s),$$

得

$$E_k(s) = E_{k+1}(s) + E_{k+1}(s)G_c(s)G_p(s). \quad (3)$$

进一步得到

$$E_{k+1} = E_k \left( \frac{1}{1 + G_c G_p} \right) = E_1 \left( \frac{1}{1 + G_c G_p} \right)^k. \quad (4)$$

对式(4)求范数

$$\|E_{k+1}\|_\infty = \|E_k \left( \frac{1}{1 + G_c G_p} \right)\|_\infty \leq \|E_k\|_\infty \left\| \frac{1}{1 + G_c G_p} \right\|_\infty. \quad (5)$$

由此可见,设计合适的 $G_c(s)$ 使 $\|1 + G_c G_p\|_\infty > 1$ 时,可保证迭代过程收敛,使得 $\lim_{k \rightarrow \infty} E_k = 0$ .在此收敛条件下,控制量满足如下关系:

$$\begin{aligned} U_{k+1} &= (E_{k+1} + E_k + \dots + E_1)G_c = \\ &= E_{k+1} \left( \frac{1 - (1 + G_c G_p)^{k+1}}{1 - (1 + G_c G_p)} \right) G_c = \\ &= E_{k+1} \left( \frac{(1 + G_c G_p)^{k+1} - 1}{G_p} \right), \end{aligned} \quad (6)$$

进而得到迭代控制器的等价闭环形式为

$$G'_c = \frac{U_{k+1}}{E_{k+1}} = \frac{(1 + G_c G_p)^{k+1} - 1}{G_p}. \quad (7)$$

式(7)说明在控制系统中,用高阶控制器代替迭代学习控制器同样可实现无误差跟踪效果,同时将迭代控制器开环性能转变为闭环,达到一定的抗干扰性能.然而控制器的阶数与迭代次数有直接关系,

因此对于一个需要迭代多次才能满足小误差的系统来说,如果直接用式(7)的等价控制器来实现,其阶数太大,并且由于存在系统的逆,故而实现起来比较繁琐,甚至可能无法实现.

考虑到式(7)的高阶问题,根据它的结构形式,可采用等效的低阶可实现模型来代替,故可利用迭代数据进行控制器拟合.

### 3 控制器拟合(Controller fitting)

通过上节对迭代学习控制器的频域分析可知,迭代学习控制等同于形如式(7)的闭环控制结构,本节将采用数据拟合方法设计出与高阶控制器等效的低阶控制器.为保证等效过程中迭代学习控制器的无误差性能,这些数据来源于迭代学习控制器历次迭代保存数据.

对于一般的工业过程来说,控制对象可描述为如下的2阶模型:

$$G_p = \frac{n_1 s + n_0}{d_2 s^2 + d_1 s + d_0}. \quad (8)$$

根据收敛性选择PD型控制器

$$G_c = k_p + k_d s. \quad (9)$$

进而对控制器(7)通过一个2阶模型来近似,设其控制器的一般形式为

$$G''_c = \frac{U_{k+1}}{E_{k+1}} = \frac{b_2 s^2 + b_1 s + b_0}{a_2 s^2 + a_1 s + 1}. \quad (10)$$

应该说明的是传统的PID为上式的特殊形式.在此控制下系统输出为

$$Y(s) = \frac{R(s)G''_c(s)G_p(s)}{1 + G''_c(s)G_p(s)}. \quad (11)$$

以变化最强烈的阶跃响应作为检测输入,在稳态误差指标 $e_{ss}$ 的要求下,利用终值定理

$$1 - e_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} sY(s) = \frac{sR(s)G''_c(s)G_p(s)}{1 + G''_c(s)G_p(s)} = \frac{b_0 n_0 / d_0}{(1 + b_0 n_0 / d_0)}. \quad (12)$$

因此可得

$$b_0 = \frac{1 - e_{ss}}{e_{ss}} d_0 / n_0. \quad (13)$$

其中: $e_{ss}$ 可根据要求给定,而 $n_0/d_0$ 为系统对象在阶跃响应下的稳态值,因此式(10)中 $b_0$ 已知.

将式(10)进行反拉普拉斯变换,得

$$(\ddot{e}, \dot{e}, -\ddot{u}, -\dot{u}) \begin{pmatrix} b_2 \\ b_1 \\ a_2 \\ a_1 \end{pmatrix} = u - b_0 e. \quad (14)$$

进而可得到(14)中参数的最小二乘解

$$\theta_{4 \times 1} = (\Phi_{4 \times N}^T \Phi_{N \times 4})^{-1} \Phi_{4 \times N}^T Z_{N \times 1}. \quad (15)$$

其中:  $N$ 为所记录数据列向量的行数,

$$\theta_{4 \times 1} = [b_2, b_1, a_2, a_1]^T,$$

$$Z_{N \times 1} = u - b_0 e,$$

$$\Phi_{N \times 4} = [\ddot{e}, \dot{e}, -\ddot{u}, -\dot{u}].$$

#### 4 工业过程仿真(Simulation for industrial process)

选取(8)中的工业过程参数为

$$n_1 = 1, n_0 = 3,$$

$$d_2 = 1, d_1 = 3, d_0 = 2,$$

在可收敛的迭代作用下, 式(9)的PD型增益可选择  $k_p = 1, k_d = 1$ , 在进行学习过程中如果出现发散可重新选择. 跟踪给定的阶跃信号使迭代过程具有初始偏差, 因此可在该信号后补偿一个惯性环节, 该时间常数可根据需要的快速性选择, 同时兼顾系统的可达性. 此处为了得到较快的响应, 取惯性环节时间常数  $T_s = 0.2s$ , 从而保证初始误差为0, 设定  $e_{ss} = 0.01$ . 故在给定时间区间  $[0, T]$  上逐次迭代可得到误差  $e_i(k)$ 、误差导数  $\dot{e}_i(k)$  及控制信号  $u_i(k)$ , 其中  $i \in Z$  为迭代次数, 采样时刻  $k = 1, 2, \dots$ , 信号采样频率  $f_s = 100 \text{ Hz}$ . 控制器设计步骤如下:

1) 利用给定PD参数在给定时间区间  $T \in [0, 4]$  上进行9次迭代后达到期望误差要求, 同时将每次迭代过程中的观测数据保存; 可得到式(15)每个变量数据的总个数  $N = 9 \times 400$ ;

2) 上述误差信号在实际过程中, 可通过相应的传感器采集进而计算控制信号, 并保存. 但是对于各阶导数信号在不采用传感器增加成本的情况下, 可利用采样时间对已得数据进行相关滤波处理后计算, 从而可依次得到式(14)中的  $\dot{e}_i(k), \ddot{e}_i(k), \dot{u}_i(k)$  和  $\ddot{u}_i(k)$ .

3) 由1)2)得到的历次控制、误差及它们的导数列合成  $N$  维列向量, 代入式(14)(15)得到式(10)的控制器

$$G_c'' = \frac{U_{k+1}}{E_{k+1}} = \frac{3.1975s^2 + 33.6656s + 66}{0.0269s^2 + 0.379s + 1}. \quad (16)$$

在式(16)的控制作用下, 系统在输入信号加入补偿环节后的输出如图2所示. 针对干扰的鲁棒性能检测如图3所示, 其中在5s加入幅值为1的干扰影响. 去除惯性环节后检测所受输入信号影响程度, 效果如图4所示.

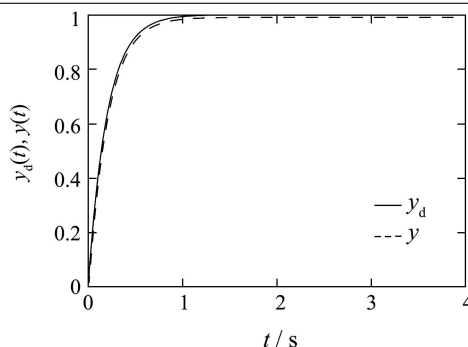


图2 在惯性环节下输出与期望比较

Fig. 2 Comparing between output and expected

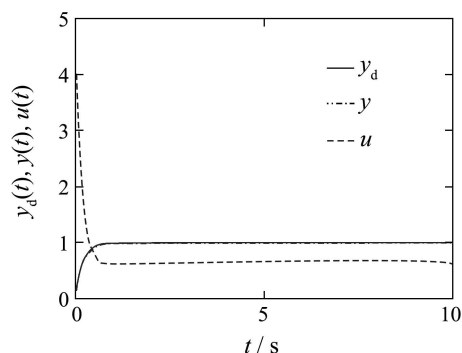


图3 在惯性环节下存在干扰的输出

Fig. 3 Output with disturbance

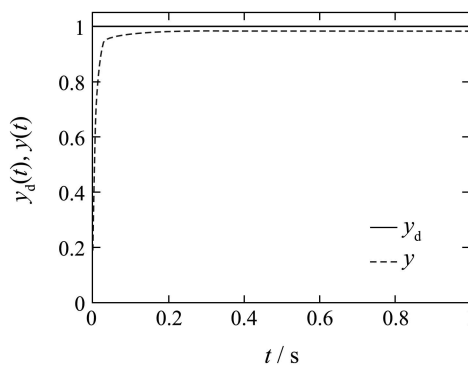


图4 无惯性环节的阶跃响应输出

Fig. 4 Step response without the low pass filter

通过以上实验结果可以看出, 设计的控制器可实现系统对象的良好跟踪, 完全满足所设定误差要求, 如果需要进一步降低误差, 只需改变  $e_{ss}$  即可; 在图3中虽然加入了幅值1的干扰, 远远高于一般工业过程20%标准, 但是系统输出在控制器作用下基本上没有变化, 这是因为加入干扰以后, 系统输出略有变化, 但是控制器很快调整, 使输出仍保持在允许的1%误差范围之内; 在没有滤波器的情况下, 系统相当于对于1阶跃信号进行跟踪, 此时表现为图4所示的输出, 由此体现了控制器对于不同信号的适应能力.

## 5 结论(Conclusion)

论文通过对迭代学习算法频域的分析,利用常见的工业过程传递函数进行控制器拟合,使系统稳态输出保持在所要求的误差范围内,并具有良好的快速性,鲁棒性且无超调,为迭代学习控制在工业过程中的应用提供了新方法。

## 参考文献(References):

- [1] ARIMOTO S, KAWAMURA S, MIYAZAKI F. Bettering operation of robotics by learning[J]. *Journal of Robotic System*, 1984, 12(2): 123 – 140.
- [2] XIE S L, TIAN S P, XIE Z D. New iterative learning control algorithms based on vector plots analysis[J]. *Acta Automatica Scinica*, 2004, 30(2): 161 – 168.
- [3] 朴凤贤, 张庆灵. 线性广义系统的迭代学习控制[J]. 控制与决策, 2007, 22(3): 349 – 351.  
(PIAO Fengxian, ZHANG Qingling. Iterative learning control for linear singular systems[J]. *Control & Decision*, 2007, 22(3): 349 – 351.)
- [4] 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, 19(1): 73 – 79.  
(RUAN Xiaoe, WAN Baiwu, GAO Hongxia. The ILC and convergence analysis for nonlinear industrial process control systems[J]. *Control Theory & Applications*, 2002, 19(1): 73 – 79.)
- [5] 任雪梅, 高为炳. 任意初始状态下的学习控制[J]. 自动化学报, 1994, 20(1): 74 – 79.  
(REN Xuemei, GAO Weibing. Learning control with an arbitrary initial state[J]. *Acta Automatica Scinica*, 1994, 20(1): 74 – 79.)
- [6] BIENZ Z, HWANG D H, OH S R. A nonlinear iterative learning method for robot path control[J]. *Robotica*, 1991, 9(4): 387 – 392.
- [7] 孙明轩, 何熊熊, 俞立. 迭代学习控制器设计: 一种有限时间死区方法[J]. 控制理论与应用, 2007, 24(3): 349 – 355.  
(SUN Mingxuan, HE Xiongiong, YU Li. Iterative learning controller designs: a finite time dead-zone approach[J]. *Control Theory & Applications*, 2007, 24(3): 349 – 355.)

## 作者简介:

回立川 (1980—), 男, 博士生研究生, 研究方向为迭代学习控制、现代控制理论与应用等, E-mail: huilichuan@163.com;

林辉 (1957—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为迭代学习控制、智能化装置等。

## 下 期 要 目

- 含扩散项不可靠生产系统最优生产控制的数值求解 ..... 宋春跃, 李 平
- 考虑时域硬约束的T-S模糊系统鲁棒 $H_\infty$ 控制 ..... 高兴泉, 马苗苗, 陈 虹
- 基于鲁棒滑模观测器的两关节柔性机械手控制 ..... 张袅娜, 张德江, 尤 文
- 主动队列管理中增强型自适应虚拟队列管理算法之设计及稳定性分析 ..... 钱艳平, 李 奇, 林相泽
- 城轨交通用直线感应电机模糊PI矢量控制 ..... 王立强, 卢琴芬, 叶云岳, 雷美珍
- 铅锌烧结过程烧穿点的集成预测模型 ..... 吴 敏, 丁 雷, 曹卫华, 段 平
- 基于量化控制信号的线性系统的跟踪性能极限 ..... 祁 恬, 刘 寅, 苏为洲
- 基于传感器网络的远程状态估计 ..... 肖 力, 孙志刚, 胡晓娅, 陈绵云
- 用于编制热轧生产流程的新型Meta-heuristic算法 ..... 张健欣, 童朝南
- 基于变约束规划模型的炼钢连铸动态调度 ..... 俞胜平, 王秀英, 郑秉霖, 柴天佑
- 加速冷却过程的模型预测控制 ..... 郑 毅, 李少远, 王笑波
- 不确定离散变结构控制系统的趋近律方法 ..... 高存臣, 刘云龙, 李云艳