

文章编号: 1000-8152(2001)02-0314-03

提高迭代自学习控制算法收敛速度初探*

魏燕定

(浙江大学机械系生产所, 流体传动及控制国家重点实验室·杭州, 310027)

摘要: 从学习律、学习律参数、输出误差等三方面讨论了迭代自学习算法的收敛速度, 为提高该算法的收敛速度得到了一些有用的结论。

关键词: 迭代自学习控制; 收敛速度; PID 控制

文献标识码: A.

Research on Convergent Speed of Iterative Learning Control

WEI Yanding

(The State Key Lab of Fluid Power Transmission & Control, Institute of Production Engineering,
Zhejiang University · Hangzhou, 310027, P.R. China)

Abstract: Convergent speed of iterative learning control (ILC) is discussed from three factors of learning law, learning law's parameters and output errors. Some useful conclusions are gotten for improving convergent speed of this kind of algorithm.

Key words: iterative learning control; convergent speed; PID control

1 引言(Introduction)

自从日本学者 S. Arimoto 于 80 年代提出迭代自学习控制(iterative learning control)算法以来, 已有大量文献从线性、非线性、时域、频域等角度利用范数的概念证明了迭代自学习算法的收敛条件^[1-3], 但至今鲜见有文献报道对该算法收敛速度的研究。

在控制理论中, 对一个控制算法优劣可用三个词: 稳定、准确、快速来评价, 稳定和准确在该算法收敛条件的证明中已得到了反映, 但快速性即学习次数的多少则未见论述。这是因为所有的收敛条件均是在学习次数 $k \rightarrow \infty$ 下给出的。我们知道, 迭代自学习算法是一种将前一次所得的误差通过一定学习律后修正下一次控制信号并使控制误差趋向收敛的算法, 因此当每次重新开始运行时, 一般都要进行重新迭代学习过程, 这有点不同于基于神经网络的参数学习算法, 由此可见, 如何提高该算法的收敛速度具有重要意义。

作者在利用迭代自学习控制(ILC)算法对超低频标准振动台稳态正弦波形反馈控制研究^[4]以及通过大量理论仿真和实验研究中, 对如何提高 ILC 算法的收敛速度得到了一些初步结论, 下面将对之作

一些讨论。

2 迭代自学习算法(ILC algorithm)

在迭代自学习控制算法中, 目前应用最广、最成熟的学习控制律是 S. Arimoto 等提出的 PID 型迭代学习控制律, 具体算法可描述如下:

$$\begin{cases} U_{k+1}(t) = U_k(t) + K_{id} \frac{d}{dt} E_k(t) + \\ K_{up} E_k(t) + K_{ii} \int E_k(t) dt, \\ E_k(t) = Y_d(t) - Y_k(t), \end{cases} \quad (1)$$

其中 $U_k(t)$, $U_{k+1}(t)$ 分别是第 k 次, 第 $k+1$ 次的给定, $Y_d(t)$, $Y_k(t)$ 分别为期望输出和第 k 次实际输出, K_{up} , K_{ii} , K_{id} 分别为迭代自学习 PID 算法的比例、积分、微分增益矩阵, $E_k(t)$ 是第 k 次的响应误差。

迭代自学习算法收敛性证明见文献[1~3]。

3 迭代自学习控制算法收敛速度讨论(Discussion on convergent speed of ILC algorithm)

由式(1)可知迭代自学习控制信号与学习律、学习律参数、期望输出与实际输出之间误差大小有关。本文结合对超低频标准振动台波形迭代自学习控制为例, 分别讨论上述三因素对迭代自学习收敛速度

* 基金项目: 受流体传动及控制国家重点实验室开放基金(9908)资助项目。
收稿日期: 1999-06-22; 收修改稿日期: 2000-01-10。

的影响。

3.1 学习律的影响(Effect of learning law)

式(1)中对 K_{up} , K_{ui} , K_{ud} 分别取值时,可得如下几种学习控制律:P型、D型、PI型、PD型和PID型,这与传统的PID控制策略一样.根据控制对象特点和要求,可以选取合适的控制律.一般地讲,PID型比P型、PI型等迭代自学习律收敛速度要快.这是因为PID型迭代自学习控制算法在控制输出信号 $U_{k+1}(t)$ 中更多地利用了上一次控制误差 $E_k(t)$ 的信息.PID型迭代自学习控制算法与P型、PI型迭代自学习控制算法的这种差别与联系跟PID控制与P、PI等控制的关系非常相似.在对超低频标准振动台波

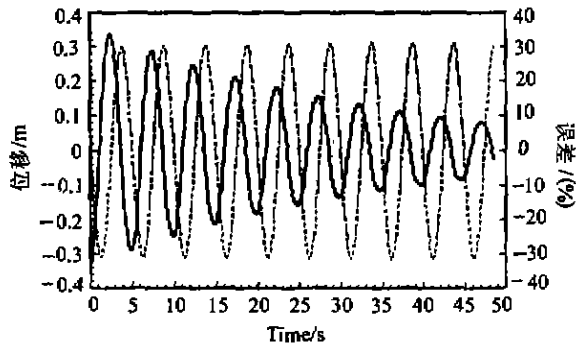


图1 $K_{up}=0.1$ 时输出位移波形及其误差曲线
Fig.1 Simulation curve of output displacement and error ($K_{up}=0.1$)

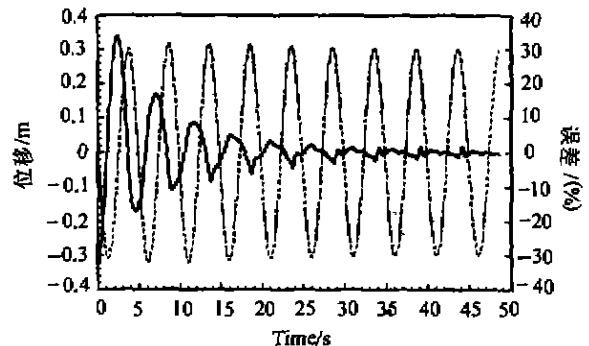


图2 $K_{up}=0.8$ 时输出位移波形及其误差曲线
Fig.2 Simulation curve of output displacement and error ($K_{up}=0.8$)

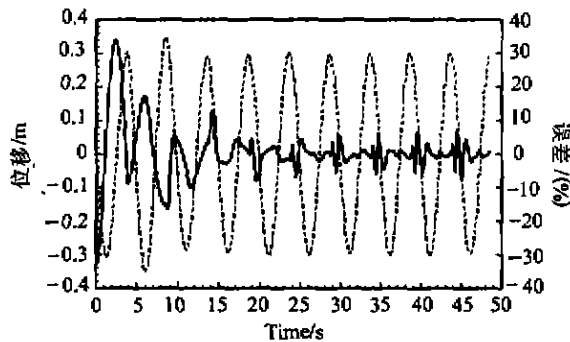


图3 $K_{up}=1.28$ 时输出位移波形及其误差曲线
Fig.3 Simulation curve of output displacement and error ($K_{up}=1.28$)

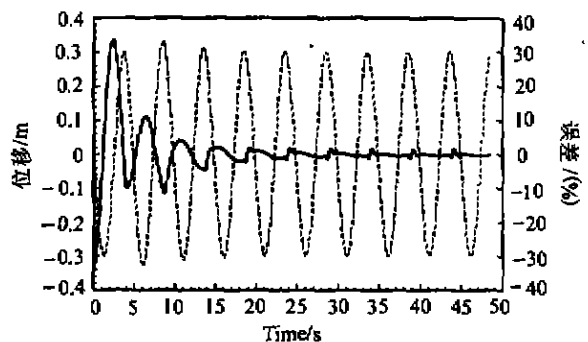


图4 $K_{up}=1.28$ 无噪声输出位移波形及其误差曲线
Fig.4 Simulation curve of output displacement and error without noise ($K_{up}=1.28$)

从图1~图3中可见, K_{up} 取较大值时,迭代自学习收敛速度快,取较小值,收敛速度慢.比较图3和图4,当 K_{up} 取值加大到一定值时,由于系统中的噪声原因,使得学习收敛性逐渐变差,当 K_{up} 取更大值时,甚至会使学习失败,见图5.由此表明, K_{up} 小,收敛速度慢,但学习收敛条件较宽,对控制系统参数变化较不敏感.

因此,为使控制系统既满足收敛稳定性,同时又使学习速度较快,本文借鉴自校正控制的设计思想,

形控制实例仿真中已得到验证,如在达到相同的误差精度5%时,取相同的 K_{ui} 和合适的 K_{ud} 值,P型迭代自学习需迭代8次,而PID型只需迭代6次.

3.2 学习律参数的影响(Effect of learning law's parameter)

相同的学习律中,采用不同学习参数也将影响学习的收敛速度.以P型迭代自学习为例.图1~图3为学习参数分别为 $K_{up}=0$, $K_{up}=0.8$, $K_{up}=1.28$ 时,对超低频标准振动台波形进行P型迭代自学习控制后,输出位移波形及其误差曲线.图4为学习参数 $K_{up}=1.28$,去掉系统中的噪声时,输出位移波形及其误差曲线.

提出如下非常实用简便的方法:取 K_{up} 为指数衰减形式,即 $K_{up}^k = cK_{up}^{k-1}$,其中 c 为衰减系数, $0 < c < 1$, k 为迭代次数,则此时P型迭代算法可表达为:

$$\begin{cases} U_{k+1}(t) = U_k(t) + cK_{up}^{k-1} E_k(t), \\ E_k(t) = Y_d(t) - Y_k(t). \end{cases} \quad (2)$$

图6为 $K_{up}=1.0$, $c=0.8$ 输出位移波形及其误差曲线图.显然,其前面几个波形具有较快的收敛速度而在后面的波形又具有较好的收敛稳定性.

对其它PID型学习律可作同样研究,具有相似结论.

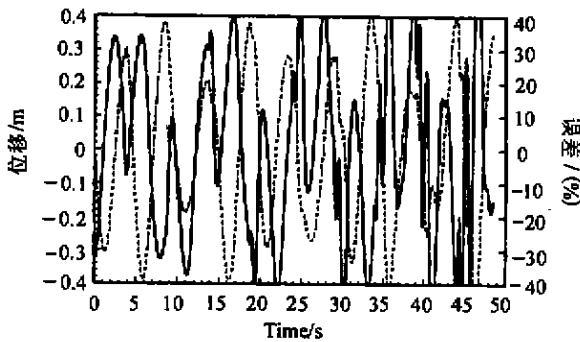


图5 $K_{ip}=1.95$ 时输出位移波形及其误差曲线
Fig. 5 Simulation curve of output displacement and error ($K_{ip}=1.95$)

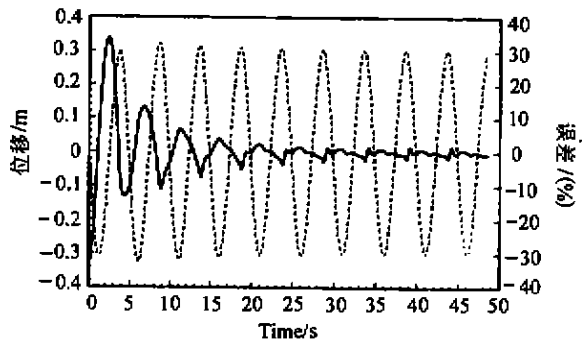


图6 $K_{ip}=1.0, c=0.8$ 时输出位移波形及其误差曲线
Fig. 6 Simulation curve of output displacement and error ($K_{ip}=1.0, c=0.8$)

3.3 输出误差的影响(Effect of output error)

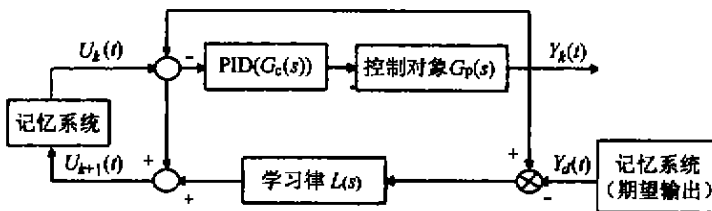


图7 PID控制与迭代自学习控制的复合控制器框图
Fig. 7 Structure of compound controller adopting PID and ILC

在迭代自学习控制中,可根据有否对控制对象施行闭环反馈控制分为开环迭代自学习控制和闭环迭代自学习控制.图7所示即为传统PID控制参考的闭环迭代自学习控制.由于控制对象已经PID反馈控制,故输出误差一般比无控制开环的要小许多,因此在达到相同的精度时,闭环迭代自学习控制比开环迭代自学习收敛速度要快.同样对超低频标准振动台波形控制中,在相同的迭代学习律和学习参数下,闭环迭代自学习控制经5次迭代后误差精度为0.31%,而开环迭代自学习控制经5次迭代后误差仅为3.68%.这表明为达到相同的误差精度,闭环迭代比开环迭代自学习控制的收敛时间要短许多.

需要指出的是,在闭环迭代控制中,对迭代学习律参数的选取时,满足收敛条件的传递函数应是PID控制器 $G_c(s)$ 与实际控制对象传递函数 $G_p(s)$ 组成的组合传递函数 $G(s)$.

4 结论(Conclusions)

本文从学习律、学习律参数、输出误差三个方面讨论了迭代自学习算法的收敛速度,在满足迭代自学习收敛性的前提下,为提高迭代自学习速度,我们得到了如下结论:

1) 闭环迭代自学习控制收敛速度明显比开环迭代自学习控制收敛速度快许多,这是提高收敛速

度最重要的一点;

2) 在相同的迭代学习律下,学习律参数大,迭代自学习收敛速度快,但过大会导致收敛失败;学习律参数小,收敛速度慢,但学习收敛条件较宽,对控制系统参数变化较不敏感;

3) 为加速学习收敛速度,又保证收敛稳定性,可利用自校正思想,在迭代过程中调节学习律参数;

4) 根据控制对象特点和要求,选取合适的学习律,可以提高收敛速度.

本文结论是在大量的仿真实验中总结得到的,非常有用.上述结论的理论推导证明尚需进行.

参考文献(References)

- [1] Arimoto S, Kawamura S and Miyazaki F. Bettering operation of dynamical systems by learning: a new control theory for servomechanisms systems [A]. In Proc. 23th IEEE Conf. on Decision and Control [C], Las Vegas, NV, USA, 1984, 1064 - 1069
- [2] Zeng Nan and Ying Xinren. Iterative learning control algorithm for linear dynamical system [J]. Acta Automatica Sinica, 1992, 18(2): 168 - 175(in Chinese)
- [3] Lin Hui and Wang Lin. The convergence of closed-loop P-type iterative learning control of nonlinear system [J]. Control Theory and Applications, 1995, 12(6): 742 - 746(in Chinese)
- [4] Wei Yanding. Study on several key techniques in developing the ultralow frequency and large amplitude standard vibrator [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 1998(in Chinese)

本文作者简介

魏燕定 1970年生,副教授.分别于1992年、1995年和1998年在浙江大学机械及自动化系获工学学士、硕士和博士学位.主要研究方向为计算机控制,标准计量等.