模糊滑模迭代学习控制算法在液压系统中应用

王 岩 付永领

(北京航空航天大学 自动化科学与电气工程学院，北京 100083)

摘 要：普通比例(P，Proportion)和比例微分(PD，Proportion and Differential)迭代学习控制(ILC，Iterative Learning Control)算法在液压位置伺服系统中收敛速度比较慢，很难在实际中应用.为了提高 ILC 算法的收敛速度，将滑模控制算法引入 ILC，提出模糊滑模迭代学习控制(FSMILC，Fuzzy Sliding Mode Iterative Learning Control)算法，利用滑模控制响应快的优点来加速 ILC 的收敛速度，利用模糊控制来减小滑模控制所引起的抖动问题.FSMILC 算法的实质是以系统的滑模函数作为模糊控制器的输入，以模糊控制器的输出作为 ILC 的控制增量.通过仿真可以看出，FSMILC 算法能够实现系统快速收敛，相对于 P 型和 PD 型具有明显优势.

关 键 词：模糊控制；滑模控制；迭代学习控制；液压系统

中图分类号：TP 273

文献标识码：A **文 章 编 号**：1001-5965(2007)01-0086-04

Application of fuzzy sliding mode iterative learning control algorithm in hydraulic servo system

Wang Yan Fu Yongling

(School of Automation Science and Electrical Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: The common P(proportion) type or PD(proportion and differential) type ILC(iterative learning control) is difficult to apply in a hydraulic servo system because of its low convergence rate. To improve the convergence rate, a new ILC based on a sliding mode fuzzy control is presented which combines a sliding mode control with ILC. The new algorithm makes use of the fast response merit of a sliding mode control to quicken the convergence of ILC. The fuzzy control in the algorithm can smooth the control signal and lessen the common dithering of sliding mode control. The FSMILC (fuzzy sliding mode iterative learning control) is an iterative learning control algorithm essentially, which takes the function of a sliding mode control as the input of fuzzy control and takes the fuzzy control output as the control increment of iterative learning control. The simulation results indicate that the new algorithm is effective, which can achieve higher speediness than that of iterative learning control of P type or PD type.

Key words: fuzzy control; sliding mode control; iterative learning control(ILC); hydraulic system

迭代学习控制(ILC，Iterative Learning Control)最初是文献[1]针对机器人系统轨迹跟踪问题提出的，因为文章是以日文发表，没有引起人们注意.文献[2]根据这个思想，于 1984 年发表了 ILC 的开创性文献，提出迭代学习控制微分(D 型，Differential Type)学习律.随后许多学者在 ILC 方面进行了大量的研究，取得许多成果：文献[3]提出了基于向量图分析的迭代学习控制非线

收稿日期：2006-02-23

作者简介：王 岩(1975—)，男，江苏宿迁人，博士生，wyan75@sina.com.cn.

性算法;文献[4]提出模糊迭代学习控制算法;文献[5]将自适应引入 ILC;文献[6]将 ILC 应用于机器人等等.

在 ILC 中,算法的收敛性条件均是在学习次数 $k\to\infty$ 下给出的,它保证了系统随着迭代次数增加不断收敛,但没有给出系统何时能够达到误差要求,因此算法的收敛速度是其能否实用的关键因素之一. 20 多年来,很多学者在收敛速度方面取得了研究成果:文献[7]给出了离散系统优化的 D 型学习算法;文献[8]指出高增益反馈可以提高 ILC 的收敛速度;文献[9]通过研究发现跟踪轨迹时间长短对系统的收敛速度有很大的影响.

本文将 ILC 引入液压位置伺服系统中,分析 Pb-211 液压机器人单关节系统原理,建立了系统数学模型. 通过仿真发现,普通比例(P, Proportion)和比例微分(PD, Proportion and Differential)迭代学习控制算法收敛速度比较缓慢,不能满足系统实用要求. 由于变结构控制具有响应快、对参数变化及扰动不敏感、无需系统在线辨识等优点,将模糊滑模控制算法引入 ILC 提出模糊滑模迭代学习控制(FSMILC, Fuzzy Sliding Mode Iterative Learning Control). 利用变结构控制响应快的优点来加速 ILC 收敛速度,利用模糊控制来减小滑模变结构控制的抖动问题. 本文给出了 FSMILC 的算法原理框图和模糊规则,通过仿真可以看出,FSMILC 算法在收敛速度方面具有明显的优势.

1　Pb-211 液压机器人单关节建模

Pb-211 液压机器人单关节阀控摆动液压缸原理如图 1 所示. 建立以伺服阀输入电压为输入和摆动液压缸输出转角为输出的系统传递函数 $P(s)$.

伺服阀阀芯位移和输入电压关系:

$$x_v = ku \tag{1}$$

式中,x_v 为阀芯位移;k 为比例系数;u 为加在伺服阀上电压.

控制元件方程:

$$Q_f = k_Q x_v - k_c p_f \tag{2}$$

式中,Q_f 为负载流量;k_Q 为流量增益;p_f 为负载压降;k_c 为流量-压力系数.

流量连续性方程:

$$Q_f = B_Q \frac{d\theta_t}{dt} + \frac{V_t}{4E}\frac{dp_f}{dt} + C_{sl} p_f \tag{3}$$

式中,B_Q 为摆动液压缸流量增益;θ_t 为摆动液压缸转角;V_t 为液压缸总的容积;E 为等效容积弹性模数;C_{sl} 为总的泄漏系数.

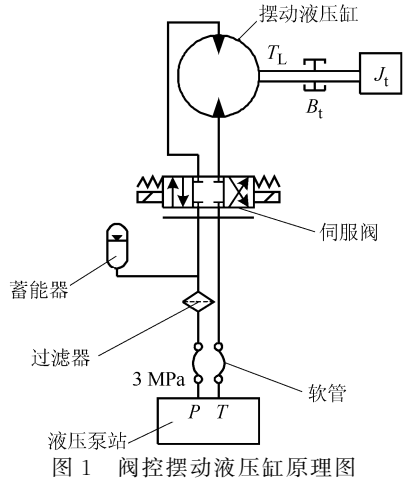


图 1　阀控摆动液压缸原理图

摆动液压缸的负载平衡方程:

$$B_Q p_f = J_t \frac{d^2\theta_t}{dt^2} + B_t \frac{d\theta_t}{dt} + T_L \tag{4}$$

式中,J_t 为马达和负载折算到摆动液压缸轴上的总的转动惯量;B_t 为粘性阻尼系数;T_L 为负载力矩.

由式(1)～式(4)得

$$P(s) = \frac{\theta_t}{u} = \frac{\dfrac{k_Q}{B_Q}k}{\dfrac{J_t V_t}{4EB_Q^2}s^3 + \left[\dfrac{J_t k_{ce}}{B_Q^2} + \dfrac{B_t V_t}{4EB_Q^2}\right]s^2 + \left[\dfrac{B_t k_{ce}}{B_Q^2} + 1\right]s} \tag{5}$$

式中　　$k_{ce} = k_c + C_{sl}$

式(5)中参数如下:

$$k_Q = 0.587\,7\ \mathrm{m^2/s}$$
$$k = 0.001\ \mathrm{m/V}$$
$$V_t = 1.06\times10^{-4}\ \mathrm{m^3}$$
$$k_{ce} = 1.2\times10^{-12}\ \mathrm{m^3/(Pa\cdot s)}$$
$$B_Q = 1.26\times10^{-5}\ \mathrm{m^3/rad}$$
$$J_t = 0.2\ \mathrm{kg\cdot m^2}$$
$$E = 1.4\times10^{9}\ \mathrm{N/m^2}$$
$$B_t = 6\times10^{3}\ \mathrm{N\cdot m/(rad/s)}$$

根据上述参数,式(5)可以转化为

$$P(s) = \frac{\theta_t}{u} = \frac{1.96\times10^{6}}{s^3 + 3\times10^{4}s^2 + 1.96\times10^{4}s} \tag{6}$$

2　ILC 设计控制器

设机器人单关节期望跟踪轨迹 $y_d(t)=$

$12t^2(1-t)$，$t\in[0,0.8\ \mathrm{s}]$，并设初态 $x_k(0)=0$，$k=1,2,\cdots,N$，要求每个点的绝对误差 $|e(t)|<0.04$，$t\in[0,0.8\ \mathrm{s}]$.

2.1 P型算法

使用P型算法，表达式如下：

$$u_{k+1}(t)=u_k(t)+Le_k(t)\quad k=1,2,\cdots,N \tag{7}$$

式中，$u_{k+1}(t)$为 t 时刻第 $k+1$ 次控制量；$u_k(t)$为 t 时刻第 k 次控制量；L 为比例系数；$e_k(t)$为系统 t 时刻第 k 次跟踪误差.

采用式(7)算法，利用多组比例系数 L 进行尝试，系统在进行1 000次迭代学习控制没有达到控制精度要求.

2.2 PD型算法

使用PD型迭代学习控制算法，表达式如下：

$$u_{k+1}(t)=u_k(t)+L_{\mathrm{p}}e_k(t)+L_{\mathrm{D}}\dot{e}_k(t)$$
$$k=1,2,\cdots,N \tag{8}$$

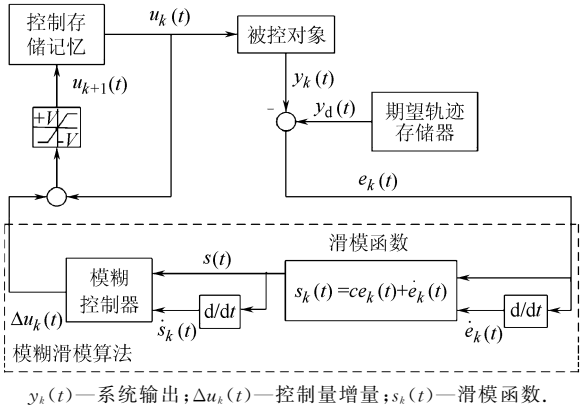
采用式(8)算法，使用多组比例系数(L_{p}，L_{D})尝试，参数在进行第 $n_{\mathrm{PD}}=958$ 次迭代学习时系统达到精度要求.

使用PD型算法能够达到满足精度要求，但其收敛速度太慢，在实际系统中很难应用，为此需要寻找新的ILC算法.

3 FSMILC算法

普通ILC的收敛速度比较慢，如何寻找一个合适算法来加快收敛速度是ILC一个重要的研究方向.

变结构控制具有响应快、对参数变化及扰动不敏感等优点，但单纯的变结构控制容易引起抖动问题，为此将模糊滑模控制算法引入迭代学习控制，提出FSMILC算法，算法原理如图2所示.



$y_k(t)$—系统输出；$\Delta u_k(t)$—控制量增量；$s_k(t)$—滑模函数.

图2 FSMILC算法原理图

由图2可以看出，FSMILC算法和其它ILC算法不同，本算法是利用模糊滑模控制进行控制量的增量计算. 滑模函数的输入为误差 $e_k(t)$ 和误差变化律 $\dot{e}_k(t)$，其中 $\dot{e}_k(t)$ 如式(9)所示：

$$\dot{e}_k(t)=e_k(t)-e_{k-1}(t) \tag{9}$$

滑模函数 $s_k(t)$ 如式(10)所示：

$$s_k(t)=ce_k(t)+\dot{e}_k(t) \tag{10}$$

模糊滑模控制器的输入和常规模糊控制器不同，常规模糊控制器的输入是系统的误差 $e(t)$ 和误差变化律 $\dot{e}(t)$，而模糊滑模控制器的模糊输入为滑模函数 $s(t)$ 和滑模函数变化率 $\dot{s}(t)$. 采用控制的变化量 Δu 作为模糊滑模控制器的输出，可使模糊滑模控制成为无模型控制，依赖于被控对象的程度较小[10].

设模糊控制器的输入为 $s(t)$ 和 $\dot{s}(t)$，它们分别是 $s_k(t)$ 和 $\mathrm{d}s_k(t)$ 的模糊变化量，模糊控制器的输出 $\Delta u_k(t)$ 是控制变化量 Δu 的模糊化变量.

1) 定义模糊集：

PB = 正大　　PM = 正中
PS = 正小　　ZO = 零
NS = 负小　　NM = 负中
NB = 负大

2) 根据模糊控制原理，定义 s 和 $\dot{s}$ 为模糊控制器的输入，Δu 为输出.

$$s=\{NB,NM,NS,ZO,PS,PM,PB\}$$
$$\dot{s}=\{NB,NM,NS,ZO,PS,PM,PB\}$$
$$\Delta u=\{NB,NM,NS,ZO,PS,PM,PB\}$$

3) 确定模糊滑模控制器的模糊控制规则. 在满足不等式 $s\dot{s}<0$ 的条件下设计控制量 Δu，所获得的控制规则如表1所示. 使用的模糊规则是：如果 s 等于 A，而且 $\dot{s}$ 等于 B，那么 Δu 等于 C.

表1 模糊滑模控制规则表

s \ $\dot{s}$	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
PB	ZO	PS	PM	PB	PB	PB	PB
PM	NS	ZO	PS	PM	PB	PB	PB
PS	NM	NS	ZO	PS	PM	PB	PB
ZO	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NS	NB	NB	NM	NS	ZO	PS	PM
NM	NB	NB	NB	NM	NS	ZO	PS
NB	NB	NB	NB	NB	NM	NS	ZO

4 利用FSMILC设计控制器

针对普通ILC算法收敛较慢的情况，Pb-211液压机器人单关节采用FSMILC算法. 根据FSMILC算法的原理，取式(10)的参数 $c=50$，即

$$s_k(t)=50\cdot e_k(t)+\dot{e}_k(t) \tag{11}$$

根据模糊控制原理，定义 s，$\dot{s}$ 和 Δu 论域：

$$s=\{-3,-2,-1,0,+1,+2,+3\}$$

$$\dot{s}=\{-30,-20,-10,0,+10,+20,+30\}$$

$$\Delta u=\{-0.36,-0.24,-0.12,0,+0.12,+0.24,+0.36\}$$

按照图 2 所示原理框图,采用表 1 的模糊控制规则,FSMILC 算法仿真结果如图 3 所示.

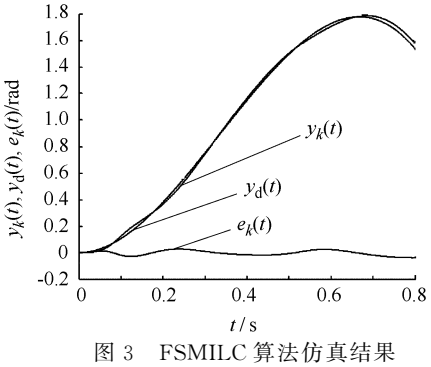


图 3　FSMILC 算法仿真结果

由图 3 可以看出利用 FSMILC 算法设计的控制器能够使系统很好跟踪期望轨迹,控制精度满足要求.

为了考察特定时刻系统历次迭代误差情况及系统迭代学习次数,选取 $t=0.7$ s 时刻来进行考察,系统历次迭代误差如图 4 所示.

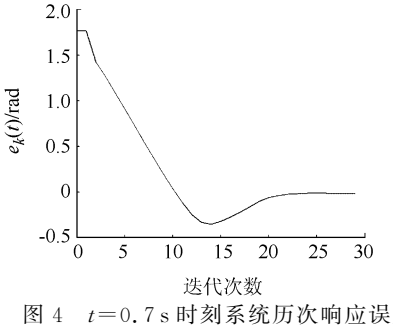


图 4　$t=0.7$ s 时刻系统历次响应误差

由图 4 可以看出,$t=0.7$ s 时刻系统误差是趋近于 0 的,而且进行 $n_{\mathrm{FSMILC}}=29$ 次迭代时系统就能达到控制精度要求.

由 $n_{\mathrm{FSMILC}}=29 \ll n_{\mathrm{PD}}=958$ 可以看出,FSMILC 算法在收敛速度方面具有明显优势,能够大幅提高系统的响应速度.

5　结 束 语

ILC 的收敛速度是迭代学习控制算法能否实用的关键因素之一,针对 P 型和 PD 型迭代学习控制算法在液压位置系统中收敛速度较慢的问题,本文提出了 FSMILC 算法.这个算法利用滑模控制响应速度快的特点来加速 ILC 算法的收敛速度,利用模糊控制来减轻或者消除滑模控制的振荡.通过仿真可以看出,FSMILC 算法的收敛速度明显快于 P 型和 PD 型迭代学习控制算法.

参考文献(References)

[1] Uchiyama M. Formulation of high-speed motion of a mechanical arm by trial [J]. Transactions of Society of Instrumentation and Control Engineers, 1978, 14(6): 706－712

[2] Arimoto S, Kawamura S, Miyazaki F. Bettering operation of robots by learning [J]. Journal of Robotics Systems, 1984, 1(2): 124－140

[3] 谢胜利,田森平,谢振东. 基于向量图分析的迭代学习控制非线性算法[J]. 控制理论与应用, 2004, 21(6): 951－955
Xie Shengli, Tian Senping, Xie Zhendong. Iterative learning control nonlinear algorithms based on vector plots analysis [J]. Control Theory & Applications, 2004, 21(6): 951－955(in Chinese)

[4] 于少娟,段锁林,吴聚华. 电液伺服力控系统的模糊学习控制[J]. 电机与控制学报, 2004, 8(1): 56－59
Yu Shaojuan, Duan Suolin, Wu Juhua. Fuzzy learning control of the electro－hydraulic servo force control system [J]. Electric Machines and Control, 2004, 8(1): 56－59 (in Chinese)

[5] Xu J X, Viswanathan B. Adaptive robust iterative learning control with dead zone scheme[J]. Automatica, 2000, 36(1): 91－99

[6] Vecchio D D, Mario R, Tomei P. Adaptive learning control for robot manipulator[C]// Proceedings of the American Control Conference. Arlington: [s. n.], 2001: 641－645

[7] Togai M, Yamano O. Analysis and design of an optimal learning control scheme for industrial robots: a discrete system approach [C]// Proceedings of the 24th IEEE Conference on Decision and Control. Fort Lauderdale: [s. n.], 1985: 1399－1404

[8] Bondi P, Casalino G, Gambardella L. On the iterative learning control theory for robotic manipulators [J]. IEEE Journal of Robotics and Automation, 1998, 4(1): 14－22

[9] Tayebi A, Zaremba M B. Exponential convergence of an iterative learning controller for time-varying nonlinear systems [C]// Proc of the Conference on Decision and Control. Phoenix, Arizona USA: [s. n.], 1999: 1593－1598

[10] 刘金琨. 滑模变结构控制 Matlab 仿真[M]. 北京:清华大学出版社, 2005: 100－120
Liu Jinkun. Matlab simulation for fuzzy sliding mode control [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005: 100－120(in Chinese)

(责任编辑:刘登敏)