

基于变论域模糊迭代学习的直线电机位置控制*

张艺疆^{1,2†} 张涛² 李勇¹ 张国鹏^{2,3} 王昊^{1,2} 张华良²

(1. 沈阳工业大学 电气工程学院, 沈阳 110020)

(2. 中国科学院沈阳自动化研究所 工业控制网络与系统研究室, 沈阳 110016)

(3. 沈阳工业大学 人工智能学院, 沈阳 110020)

摘要 为提升永磁同步直线电机的位置跟踪精度,提出一种带有自适应遗忘因子的变论域模糊迭代学习控制策略,应用于电机控制系统.该控制策略集成了模糊逻辑、迭代学习和自适应遗忘因子的优点,能够有效提升控制系统的跟踪精度.变论域模糊控制器通过伸缩因子动态改变论域大小,设计二级模糊控制器用于生成伸缩因子.采用自适应遗忘因子减小迭代学习周期切换时产生的位置误差,设计平滑切换策略和缓步策略改进遗忘因子的自适应率,进一步减小周期切换时的位置误差.结果表明,该控制策略可以有效提高电机的位置跟踪精度,加快控制系统的收敛速度.

关键词 永磁同步直线电机, 变论域模糊控制, 伸缩因子, 迭代学习控制, 自适应遗忘因子

中图分类号:TM351

文献标志码:A

Position Control of PMLSM Based on Variable Universe Fuzzy Iterative Learning*

Zhang Yiqiang^{1,2†} Zhang Tao² Li Yong¹ Zhang Guopeng^{2,3} Wang Hao^{1,2} Zhang Hualiang²

(1. School of Electrical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110020, China)

(2. Key Laboratory of Networked Control Systems, Shenyang Institute of Automation Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China)

(3. School of Artificial Intelligence, Shenyang University of Technology, Shenyang 110020, China)

Abstract To improve the position tracking accuracy of permanent magnet synchronous linear motor, a variable universe fuzzy iterative learning control strategy with adaptive forgetting factor is proposed and applied to the motor control system. The control strategy integrates the advantages of fuzzy logic, iterative learning and adaptive forgetting factor, which can effectively improve the tracking accuracy of the control system. Variable universe fuzzy controller dynamically changes the size of the universe by scaling factor, and a two-level fuzzy controller is designed to generate scaling factor. Adaptive forgetting factor is used to reduce the position error during iterative learning cycle switching. Smooth switching strategy and slow stepping strategy are designed to improve the adaptive rate of forgetting factor and further reduce the position error during cyclic switching. The results show that this control method can effectively improve the position tracking accuracy and accelerate the convergence speed.

Key words permanent magnet synchronous linear motor, variable universe fuzzy control, scaling factor, iterative learning control, adaptive forgetting factor

2024-09-06 收到第 1 稿,2024-09-27 收到修改稿.

* 国家重点研发计划项目(2022YFB3303902),国家自然科学基金资助项目(91648204),National Key Research and Development Program of China (2022YFB3303902), National Natural Science Foundation of China (91648204).

† 通信作者 E-mail:zhjmub@163.com

引言

永磁同步直线电机 (Permanent Magnet Linear Synchronous Motor, PMLSM) 采用直接驱动的形式, 将电能直接转化为电磁推力, 驱动电机动子运动, 因而具有较好的动态性能^[1]. 直线电机没有中间传动结构, 有着高精度和高速度的优势, 因此被广泛应用于高精运动控制系统和重复运动系统. 但直线电机由于结构特殊性, 会产生端部效应、齿槽效应等不利因素, 降低控制精度, 增加控制策略的设计难度^[2].

传统的控制策略如 PID 控制虽然设计简单, 操作方便, 但其抗干扰能力较弱; 直接转矩控制易受噪声影响, 高速运动时对电机参数的敏感度下降; 滑膜控制虽然有很好的鲁棒性和良好的跟踪性能, 但容易出现抖振现象. 因此想实现高精度高速控制, 提升直线电机的控制性能, 就必须设计合理的控制策略^[3].

直线电机的运动具有重复性, 因此适用迭代学习控制 (Iterative Learning Control, ILC) 策略. 传统的 ILC 策略中, 在固定的学习增益下, 控制系统会受负载扰动和参数变化的影响, 降低控制效果. 张卉^[4]设计了一种模糊迭代 Q-学习控制器, 用于六自由度双臂机器人的控制系统中, 有效提升了机器人各关节的轨迹跟踪精度.

模糊迭代学习控制 (Fuzzy Iterative Learning Control, FILC) 的设计较为复杂, 需要丰富的专家经验和长时间的在线调整, 尤其是论域大小和隶属度函数的形式难以抉择. 变论域模糊迭代学习控制 (Variable Universe Fuzzy Iterative Learning Control, VUFILC) 能够根据系统误差调整模糊控制器的输入输出信息. 通过设计伸缩因子来调整模糊控制器中的量化因子和比例因子, 实现论域的收缩和膨胀^[5]. 赵希梅^[6]将变论域模糊控制与迭代学习控制结合起来, 设计了一种分段变论域模糊迭代学习控制器, 根据系统误差大小动态改变论域.

伸缩因子 (Scaling Factor) 的设计是变论域模糊控制的核心. 函数形式的伸缩因子较为常用, 但需要根据系统的实际情况设定并人为调整参数, 不具有普遍性. 葛磊^[7]设计了模糊控制器 I, 用于生成伸缩因子, 实现了论域的自整定. 杨荣昆^[8]引入了自适应粒子群算法, 用于优化风电机组齿轮箱温

度偏差与偏差变化率的伸缩因子.

遗忘因子经常被用于改进迭代学习率, 但固定的遗忘因子通常无法兼顾收敛速度和精度^[9]. 可以根据迭代周期数改变遗忘因子大小, 但在周期变化时遗忘因子会发生突变, 对控制效果产生不利影响. 本文基于时间变量和周期变量设计了一种平滑切换策略, 应用于遗忘因子的自适应率中, 有效降低了周期切换时的位置误差, 并且设计了一种缓步策略, 弥补该策略在第二迭代周期内的不足.

本文提出一种变论域模糊迭代学习控制策略, 设计了二级模糊控制器用于生成伸缩因子, 用自适应遗忘因子改进迭代学习控制率, 设计平滑切换策略和缓步策略改进遗忘因子的自适应率. 旨在利用该策略实现模糊控制规则的自整定和迭代学习控制率的自我调整.

1 PMLSM 的数学模型

本文所用的表贴式永磁同步直线电机的运动方程为:

$$M \frac{d^2 x}{dt^2} = K_e i_q - F_l - B_v v \quad (1)$$

式(1)中, M 为直线电机动子的质量, x 为动子所在位置, K_e 为电磁推力常数, i_q 为 d - q 坐标系下 q 轴的电流, F_l 为负载扰动, B_v 为负载扰动系数, v 为动子速度.

假设系统的状态变量为:

$$\begin{cases} x_1 = x \\ x_2 = v = \dot{x}_1 \end{cases} \quad (2)$$

将式(2)与直线电机的运动方程联立, 可得:

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -\frac{B_v}{M} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{K_e}{M} \end{bmatrix} i_q + \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{M} \end{bmatrix} F_l \\ y = [1 \quad 0] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (3)$$

进而可得出系统的一般表达式:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}_k(t) = \mathbf{A} \mathbf{x}_k(t) + \mathbf{B} \mathbf{u}_k(t) + f[t, \mathbf{x}_k(t)] \\ \mathbf{y}_k(t) = \mathbf{C} \mathbf{x}_k(t) \end{cases} \quad (4)$$

式(4)中, t 为系统运行时间, k 为迭代次数, $\mathbf{x}_k(t)$ 为系统的状态向量, $\mathbf{u}_k(t)$ 为系统的控制向量, $\mathbf{y}_k(t)$ 为系统的输出向量, $f[t, \mathbf{x}_k(t)]$ 为系统扰动, \mathbf{A} 、 \mathbf{B} 、 \mathbf{C} 为相对应维数的矩阵.

2 变论域模糊迭代学习控制器设计

2.1 迭代学习控制器设计

迭代学习控制通常被用于做重复运动的系统中,利用先前迭代周期中的信息来改善当前迭代周期的控制性能,控制输入根据先前迭代学习的结果进行调整.这种方法记录了先前的控制输入和系统响应,并使用这些信息来优化下一次迭代的控制输入.通过这种方式减少跟踪误差,即实际系统输出与期望轨迹之间的差异.

闭环迭代学习的控制率为:

$$u_{k+1}(t) = u_k(t) + L[e_{k+1}(t), t] \quad (5)$$

式(5)中, $u_{k+1}(t)$ 为第 $k+1$ 次迭代系统的输出, $u_k(t)$ 为第 k 次迭代系统的输出, L 为线性或非线性算子, $e_{k+1}(t)$ 为第 $k+1$ 次迭代时系统的跟踪误差, $e_{k+1}(t) = y_d(t) - y_{k+1}(t)$, $y_d(t)$ 为系统的期望位置.

设计迭代学习的控制率, PID 型的闭环迭代学习率为:

$$u_{k+1}(t) = u_k(t) + k_p e_{k+1}(t) + k_i \int_0^t e_{k+1}(\tau) d\tau + k_d \dot{e}_{k+1}(t) \quad (6)$$

式(6)中, k_p 、 k_i 、 k_d 分别为比例系数,积分系数和微分系数, τ 是积分项中的时间变量.

2.2 模糊迭代学习控制器设计

传统的 ILC 学习增益是固定不变的,当受到外界扰动或内部参数变化时,固定的学习增益就不再适用.引入模糊控制器,并根据系统误差输出学习增益的修正值,实现迭代学习增益的自动调整.

模糊迭代学习的控制率如下:

$$u_{k+1}(t) = u_k(t) + k_{p1} e_{k+1}(t) + k_{i1} \int_0^t e_{k+1}(\tau) d\tau + k_{d1} \dot{e}_{k+1}(t) \quad (7)$$

式(7)中, $k_{p1} = k_p + \Delta k_p$, $k_{i1} = k_i + \Delta k_i$, $k_{d1} = k_d + \Delta k_d$, Δk_p 、 Δk_i 、 Δk_d 为模糊控制器输出的修正值, k_{p1} 、 k_{i1} 、 k_{d1} 为修正后的迭代学习增益.

模糊控制器的输入量为误差 e 、误差变化 ec . 输出量为 Δk_p 、 Δk_i 、 Δk_d . 输入变量 e 和 ec 的论域均为 $[-6, 6]$, 输出变量 Δk_p 、 Δk_i 的论域为 $[-6, 6]$, Δk_d 的论域为 $[-1, 1]$. e 、 ec 、 Δk_p 、 Δk_i 、 Δk_d 选取相同的模糊子集 {NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB}.

为提高灵敏度, {NM, NS, ZO, PS, PM} 均采用三角形隶属度函数, NB 选用 Z 型隶属度曲线, PB 选用 S 型隶属度曲线,这两种曲线较为平滑,能够提升控制稳定性,图 1 为输入变量的隶属度函数.

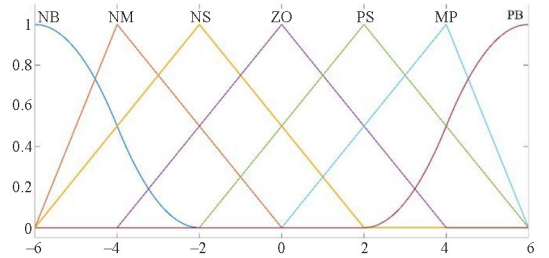


图 1 隶属度函数曲线

Fig. 1 Membership function curve

Δk_p 、 Δk_i 、 Δk_d 的模糊规则根据参数调整经验以及误差逐级逼近原则制定,如表 1~3 所示.

Δk_p 、 Δk_i 、 Δk_d 的输出曲面如图 2~图 4 所示.

采用重心法解模糊化,如式(8):

$$\Delta K_{out} = \frac{\sum_{i=1}^n M_i \cdot F_i}{\sum_{i=1}^n F_i} \quad (8)$$

式(8)中, ΔK_{out} 为各输出量的量化值, M_i 为隶属度, F_i 为模糊化值.

表 1 Δk_p 的模糊规则

Table 1 Fuzzy control rules of Δk_p

e	ec						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PM	PM	PS	ZO
NM	PB	PM	PM	PM	PS	ZO	NS
NS	PM	PM	PM	PS	ZO	NS	NM
ZO	PM	PM	PS	ZO	NS	NM	NM
PS	PS	PS	ZO	NS	NM	NM	NM
PM	PS	ZO	NS	NM	NM	NM	NB
PB	ZO	NS	NM	NM	NM	NB	NB

表 2 Δk_i 的模糊规则

Table 2 Fuzzy control rules of Δk_i

e	ec						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	NB	NM	NM	NS	ZO	ZO	ZO
NM	NB	NM	NS	NS	NS	ZO	ZO
NS	NM	NM	NS	NS	ZO	PS	PS
ZO	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
PS	NS	NS	ZO	PS	PS	PM	PB
PM	ZO	ZO	PS	PS	PS	PM	PM
PB	ZO	ZO	ZO	PS	PM	PM	PB

表3 Δk_d 的模糊规则
Table 3 Fuzzy control rules of Δk_d

e	ec						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PS	PS	NB	NB	NB	NM	PS
NM	PS	NS	NS	NM	NM	NS	PM
NS	ZO	NS	NM	NM	NS	ZO	ZO
ZO	ZO	ZO	NS	NS	NS	ZO	ZO
PS	ZO	ZO	ZO	ZO	NS	ZO	ZO
PM	PB	NS	PS	PS	PS	PM	PB
PB	PB	PM	PM	PM	PS	PS	PB

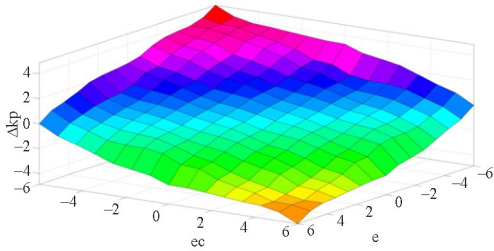


图2 Δk_p 的输出曲面
Fig. 2 Output surface of Δk_p

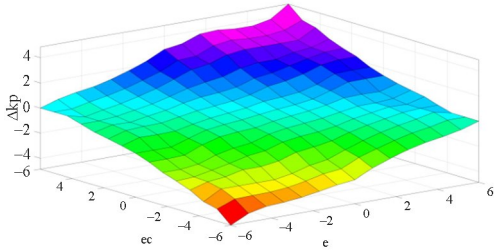


图3 Δk_i 的输出曲面
Fig. 3 Output surface of Δk_i

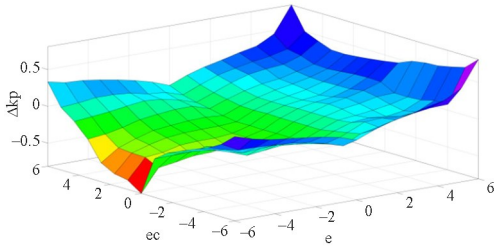


图4 Δk_d 的输出曲面
Fig. 4 Output surface of Δk_d

2.3 变论域模糊迭代学习控制器设计

在模糊控制中,控制精度随着模糊规则数量的增加而提升,规则越详细,控制效果越好^[10].实际运行中,系统状态是一直变化的.当系统误差较小,利用到的模糊规则会变少,添加规则又会提高设计难度.变论域模糊控制可以使论域根据输入量大小自动收缩或膨胀^[11],能够实现在不增加模糊规则数目的同时提升控制效果^[12].

论域的收缩和膨胀由伸缩因子控制,因此伸缩因子的设计至关重要.记输入变量的论域为 $[-E, E]$,输出变量的论域为 $[-K, K]$,当 E 和 K 不变时,即为固定论域.设计伸缩因子为 α, β ,变化后的论域为 $[-\alpha E, \alpha E]$, $[-\beta K, \beta K]$,论域的变化如图5所示.

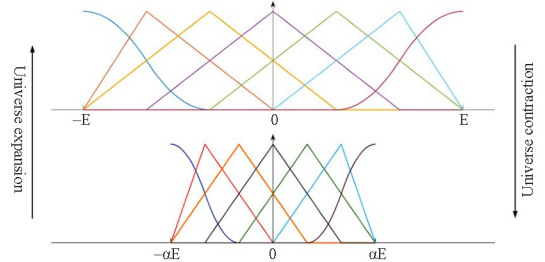


图5 论域变化示意图
Fig. 5 Schematic diagram of universe change

设计函数计算式可以根据误差实时整定伸缩因子,计算量小但需要人为调整参数.有研究者提出可以用模糊推理整定伸缩因子^[13].受此启发,本文设计了二级模糊控制器,用于生成伸缩因子.

本文所设计的二级模糊控制器输入变量为系统误差 e 和误差变化率 ec ,输出变量为伸缩因子 α, β .其中, α 用于改变输入变量 e 和 ec 的论域大小, β 为 α 加上一个足够小的正数 ϵ ,用于改变输出变量 $\Delta k_p, \Delta k_i, \Delta k_d$ 的论域大小.输入模糊集同主模糊控制器,输出模糊集为 $\{Z, S, M, B\}$,均采用三角形隶属度函数,论域范围为 $[0.125, 2]$.二级模糊控制器的设计遵循伸缩因子与误差单调性一致的原则,即系统误差较小时,输出的伸缩因子变小,论域收缩;系统误差较大时,输出的伸缩因子变大,论域膨胀. α 的模糊规则如表4所示.

表4 α 的模糊规则
Table 4 Fuzzy control rules of α

e	ec						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	B	B	B	M	B	B	B
NM	B	B	M	S	M	B	B
NS	B	M	S	Z	S	M	B
ZO	M	S	Z	Z	Z	S	M
PS	B	M	S	Z	S	M	B
PM	B	B	M	S	M	B	B
PB	B	B	B	M	B	B	B

本文所设计的变论域模糊迭代学习控制率为:

$$u_{k+1}(t) = u_k(t) + k_{p2} e_{k+1}(t) + k_{i2} \int_0^t e_{k+1}(\tau) d\tau + k_{d2} \dot{e}_{k+1}(t) \quad (9)$$

式(9)中, $k_{p2} = k_p + \Delta k_p$, $k_{i2} = k_i + \Delta k_i$, $k_{d2} = k_d + \Delta k_d$, Δk_p 、 Δk_i 、 Δk_d 为主模糊控制器输出的修正值, k_{p2} 、 k_{i2} 、 k_{d2} 为修正后的迭代学习增益。

3 带有改进型自适应遗忘因子的变论域模糊迭代学习控制器设计

当电机的输入信号为正弦波时,由于初始值为 0,电机在一开始产生的位置误差较小,因此普通的迭代学习策略就可以在后续迭代周期中有效减小位置跟踪误差。但输入信号为余弦波等初始值不为 0,带有阶跃的信号时,电机从初始位置开始跟踪,初始误差比较大。若采用普通的迭代学习控制策略,在后续迭代过程中,当迭代周期发生改变时,这种误差很难消除。遗忘因子可以有效降低先前迭代周期误差对当前周期的影响,因此在第 2 节的变论域模糊迭代学习控制策略的基础上,设计一种带有平滑切换策略和缓步策略的自适应遗忘因子变论域模糊迭代学习控制策略。

3.1 自适应遗忘因子

遗忘因子分为固定遗忘因子和可变遗忘因子,固定的遗忘因子虽然设计简单,但无法兼顾收敛速度和精度,且无法应对复杂工况。因此设计一种自适应遗忘因子(Adaptive Forgetting Factor, AFF),在不同周期自动改变遗忘因子的大小。

带有自适应遗忘因子的迭代学习率为:

$$u_{k+1}(t) = [1 - \lambda(k)]u_k(t) + k_{p2}e_{k+1}(t) + k_{i2} \int_0^t e_{k+1}(\tau) d\tau + k_{d2} \dot{e}_{k+1}(t) \quad (10)$$

式(10)中, $\lambda(k)$ 为所设计的自适应遗忘因子:

$$\lambda(k) = \begin{cases} 0 & k = 1 \\ k^{-4} & k \geq 2 \end{cases} \quad (11)$$

式(11)中, k 为迭代周期数。指数形式遗忘因子的变化率由快到慢,使遗忘因子在迭代前期能够以较大的数值快速收敛,后期在收敛精度较高时通过较小的遗忘因子进行精密调整。

3.2 基于平滑切换策略和缓步策略的改进型自适应遗忘因子

自适应遗忘因子虽然能实现在整个控制过程中自动改变遗忘因子,但在单个迭代周期中,遗忘因子是固定不变的。当周期发生变化,遗忘因子也随之发生突变,会导致周期切换时的误差仍然较

大,对控制效果造成不利影响。

可以根据实时误差大小对遗忘因子的自适应率进行设计,但该策略所需计算量较大,设计难度较高。本文设计一种平滑切换(Smooth Switching, SS)策略,用于改变遗忘因子,该策略基于时间变量和周期变量,实现迭代周期改变时遗忘因子的平滑过渡。

带有平滑切换策略的自适应遗忘因子迭代学习率为:

$$u_{k+1}(t) = [1 - \lambda(t, k)]u_k(t) + k_{p2}e_{k+1}(t) + k_{i2} \int_0^t e_{k+1}(\tau) d\tau + k_{d2} \dot{e}_{k+1}(t) \quad (12)$$

式(12)中, $\lambda(t, k)$ 为遗忘因子,自适应率为:

$$\lambda(t, k) = \begin{cases} 0 & k = 1 \\ S_f k^{-4} + (1 - S_f)(k - 1)^{-4} & k \geq 2 \end{cases} \quad (13)$$

式(13)中, S_f 为平滑因子,随时间和周期数改变,其表达式为:

$$S_f = \frac{t}{T} \quad (14)$$

式(14)中, T 为一个控制周期的总时长,平滑因子本质上是在单个控制周期内,经历的时长与单个迭代周期总时长的比值。平滑切换策略能够兼顾前后两个周期的信息,并根据平滑因子决定前后两个周期对该时刻遗忘因子的影响占比,实现在周期切换时的平稳变化。

该策略的另一个优势是:当输入信号初始值不为 0,电机开始运行时会产生一个较大的误差,在后续的迭代周期中,每一个周期的开始阶段都会受到初始误差的影响,控制效果变差。该策略将第二周期开始阶段的遗忘因子设置为接近 1 的值,能够削弱后续周期受初始误差的影响。

在平滑切换策略下,第二周期中的遗忘因子变化速率过快,导致该周期控制效果不够稳定。因此设计一种缓步策略,减缓遗忘因子的变化速率。改进后的遗忘因子自适应率为:

$$\lambda(t, k) = \begin{cases} S_f k^{-4} + (1 - S_f)(k - 1)^{-4} & S_f < \theta \\ (1 - t_f)k^{-4} + t_f(k - 1)^{-4} & S_f \geq \theta \end{cases} \quad (15)$$

式(15)中, t_f 为本文设计的缓步因子, θ 为平滑区间,当第二迭代周期的平滑因子大于平滑区间,则利用指数衰减函数进行平缓过渡:

$$t_f = e^{-\left(\frac{S_f - t_w}{t_w}\right)^2} \quad (16)$$

式(16)中, t_w 为待设计的缓步宽度,且 $t_w \leq \theta$. 当平滑因子小于预设值,即第二周期的初始阶段,依然使用平滑切换策略;当平滑因子大于预设值,加入缓步策略,利用指数衰减函数可以使第二周期中遗忘因子变化更加平缓。

调整 t_w 与 θ 的值,可以控制缓步策略的开始作用时间,以及遗忘因子的变化速率。

更新后遗忘因子的自适应率为:

$$\lambda(t, k) = \begin{cases} 0 & k = 1 \\ S_f k^{-4} + (1 - S_f)(k - 1)^{-4} & k = 2, S_f < \theta \\ (1 - t_f)k^{-4} + t_f(k - 1)^{-4} & k = 2, S_f \geq \theta \\ S_f k^{-4} + (1 - S_f)(k - 1)^{-4} & k \geq 3 \end{cases} \quad (17)$$

式(17)中, S_f, t_f 等参数均由式(14)~式(16)计算出。

3.3 基于变论域模糊和改进型自适应遗忘因子的迭代学习控制策略

经过模糊推理生成伸缩因子 α, β , 通过改变量化因子和比例因子来放缩论域. 主模糊控制器的输出 $\Delta k_p, \Delta k_i, \Delta k_d$ 作为迭代学习增益的修正值. 公式(13)~(16)生成的遗忘因子作用于迭代学习率公式(12)中. 为滤除高频噪声,加入低通滤波器 Q , 采用等波纹 FIR 型,阶数为 5. 图 6 为本文所设计的控制策略框图。

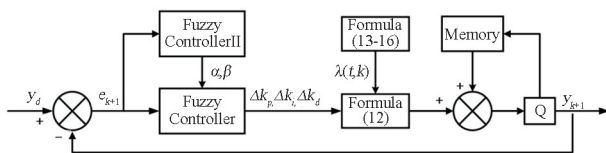


图 6 本文所设计的控制策略框图

Fig. 6 The control strategy diagram designed in this article

4 仿真分析

在 Simulink 中搭建模型并进行对比实验,采样周期为 $1 \mu\text{s}$. 电机参数设置为:极对数 $p = 1$, 相电阻 $R_s = 0.478 \Omega$, 电感 $L_s = 0.27 \text{ mH}$, 转动惯量 $J = 0.00728 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, 永磁体磁链 $\psi_f = 0.357 \text{ Wb}$.

首先对正弦位置信号进行仿真,输入的位置信号为 $x = 0.5 \sin(2\pi t) \text{ m}$. 设置迭代周期为 1 s , 迭代次数为 10 次. 分别采用 ILC, FILC, VUFILC 三种策略对电机进行控制. 三种策略下,预设的学习增益均为: $k_p = 3750, k_i = 50, k_d = 1.2$.

ILC 策略下,采用的是固定学习增益,即预设值,图 7 为 ILC 策略下的电机位置跟踪误差。

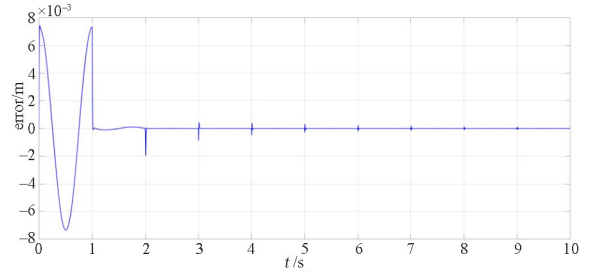


图 7 ILC 策略下的电机位置跟踪误差

Fig. 7 Motor position tracking error under ILC strategy

FILC 策略下,学习增益为预设值加上模糊控制器输出的修正值,图 8 为 FILC 策略下的电机位置跟踪误差。

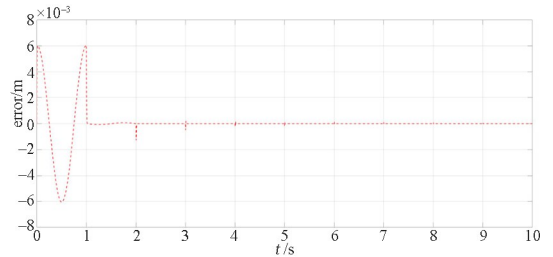


图 8 FILC 策略下的电机位置跟踪误差

Fig. 8 Motor position tracking error under FILC strategy

VUFILC 策略下,学习增益为预设值加上变论域模糊控制器输出的修正值,图 9 为 VUFILC 策略下的电机位置跟踪误差。

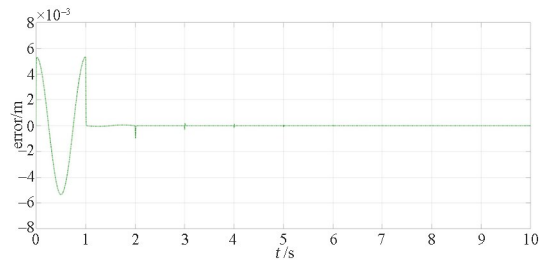


图 9 VUFILC 策略下的电机位置跟踪误差

Fig. 9 Motor position tracking error under VUFILC strategy

图 10 展现了 $9 \sim 9.1 \text{ s}$ 三种控制策略下的位置跟踪误差。

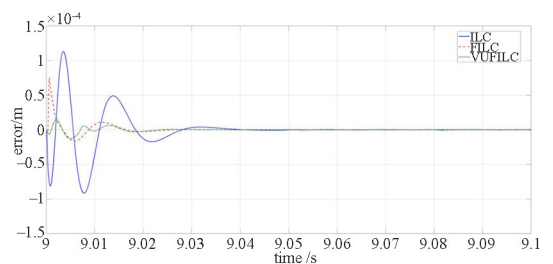


图 10 $9 \sim 9.1 \text{ s}$ 三种策略下的电机位置跟踪误差

Fig. 10 Motor position tracking error under three strategies in $9 \sim 9.1 \text{ s}$

图 7~图 10 中可以看出,利用模糊推理修正迭代学习的增益可以有效减小电机的位置跟踪误差,但效果并不显著.采用变论域模糊迭代学习控制策略时,第 1 s 内的跟踪误差就可以缩小至 ± 0.00534 m 内,在后续迭代周期中效果也更好.

图 11、图 12 分别为三种控制策略下在不同迭代周期中位置跟踪误差的最大绝对值 (MAX-ABS) 和均方根值 (RMS).

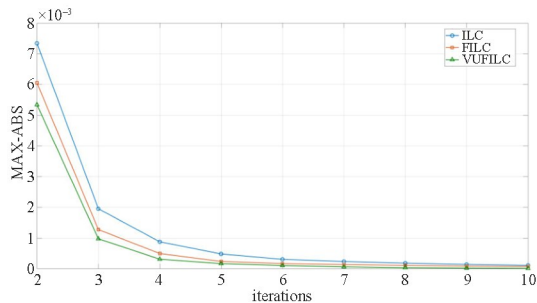


图 11 三种策略下的电机位置跟踪误差的最大绝对值
Fig. 11 MAS-ABS of motor position tracking error under three strategies

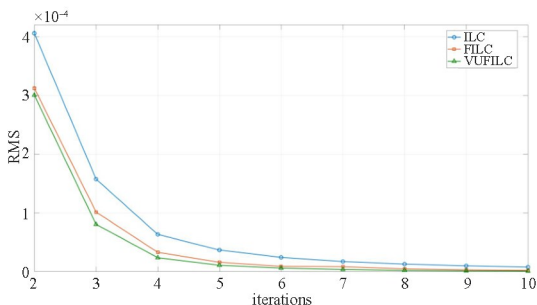


图 12 三种策略下的电机位置跟踪误差的均方根值
Fig. 12 RMS of motor position tracking error under three strategies

从图 11、图 12 中可以看出,在不同迭代周期中,VUFILC 策略下误差的最大绝对值和均方根值都要小于其他两种控制策略.三种策略在第十周期中,误差的最大绝对值分别为: 1.13×10^{-4} , 7.5×10^{-5} , 2.7×10^{-5} ; 误差的均方根值分别为: 7.82×10^{-6} , 2.19×10^{-6} , 1.53×10^{-6} . 由此可证变论域模糊迭代学习策略的有效性.

对余弦位置信号进行仿真实验,输入的位置信号为 $x = 0.5 \cos(2\pi t)$ m. 电机的起始位置为 $x = 0$. 设置迭代周期为 1 s, 迭代次数为 10 次. 分别采用变论域模糊迭代学习控制 (VUF-ILC), 变论域模糊自适应遗忘因子迭代学习控制 (VUF-AFFILC), 变论域模糊平滑切换自适应遗忘因子迭代学习控制 (VUF-SSAFFILC) 三种策略对电机进行控制. 三种策略下预设的学习增益均为: $k_p = 850$, $k_i = 45$, $k_d = 1.5$.

VUF-ILC 策略下,迭代学习率中不设置遗忘因子,图 13 为 VUF-ILC 策略下的电机位置跟踪误差.

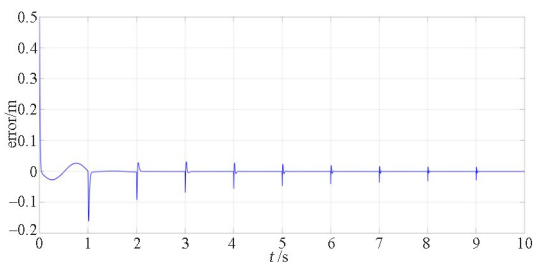


图 13 VUF-ILC 策略下的电机位置跟踪误差
Fig. 13 Motor position tracking error under VUF-ILC strategy

从图 13 中可以看出,在 VUF-ILC 控制策略下,由于初始位置误差较大,后续迭代过程中虽然误差可以不断减小,但在周期变化时所产生的位置误差依然较大,控制效果不理想.

VUF-AFFILC 策略下,迭代学习率中加入随着迭代周期数改变的遗忘因子,图 14 为 VUF-AFFILC 策略下的电机位置跟踪误差.

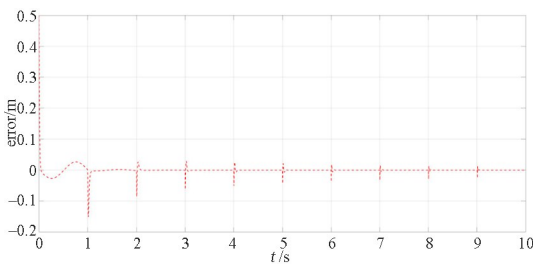


图 14 VUF-AFFILC 策略下的电机位置跟踪误差
Fig. 14 Motor position tracking error under VUF-AFFILC strategy

从图 14 中可以看出,在 VUF-AFFILC 控制策略下,相较于没有遗忘因子的控制策略,周期变化时产生的位置误差虽然有一定程度上的缩小,但并不明显,控制效果依然不够理想.

VUF-SSAFFILC 策略下,使用的迭代学习率在加入自适应遗忘因子的基础上,利用平滑切换策略和缓步策略进一步改进遗忘因子的自适应率,图 15 为 VUF-SSAFFILC 策略下的电机位置跟踪误差,设置参数:平滑区间 $\theta = 0.05$,缓步宽度 $t_w = 0.03$.

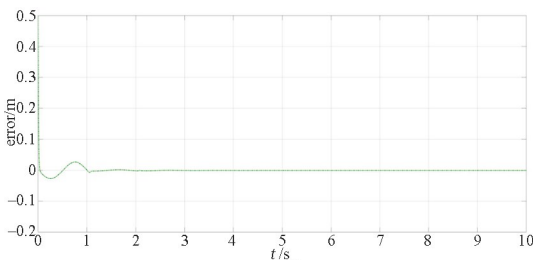


图 15 VUF-SSAFFILC 策略下的电机位置跟踪误差
Fig. 15 Motor position tracking error under VUF-SSAFFILC strategy

从图 15 中可以看出,在 VUF-SSAFFILC 控

制策略下,由于在遗忘因子的自适应率中加入了平滑切换策略,在周期变化时产生的位置误差明显地减小,控制效果明显提升。

图 16 为在 VUF-SSAFFILC 策略下,有无缓步策略时,第二周期内位置跟踪误差的对比。

图 16 中,SS 代表仅有平滑切换策略,SS-SS 代表在平滑切换策略基础上加入缓步策略。可以看出,在第二周期中加入缓步策略后,误差明显减小。

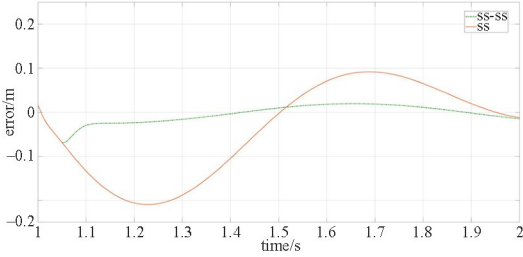


图 16 有无缓步策略下的误差对比

Fig. 16 Error comparison with or without slow step strategy

图 17 为 8.9~9.2 s 三种控制策略下的位置跟踪误差对比。

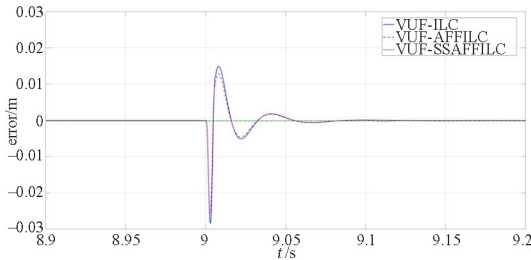


图 17 8.9~9.2 s 三种策略下的电机位置跟踪误差

Fig. 17 Motor position tracking error under three strategies in 8.9~9.2 s

由图 17 中可以看出,在第 9 和第 10 周期切换时,VUF-ILC 策略的误差最大,VUF-AFFILC 虽然能减小一部分误差,但十分有限。而在 VUF-SSAFFILC 策略下,周期切换时的误差能够被基本消除,再一次证明了本文所设计控制策略的有效性。

图 18、图 19 分别为三种控制策略下在不同迭代周期中位置跟踪误差的最大绝对值和均方根值。

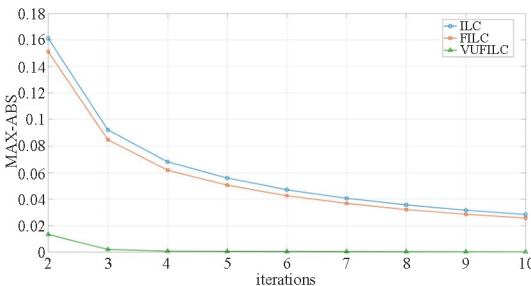


图 18 三种策略下的电机位置跟踪误差的最大绝对值

Fig. 18 MAS-ABS of motor position tracking error under three strategies

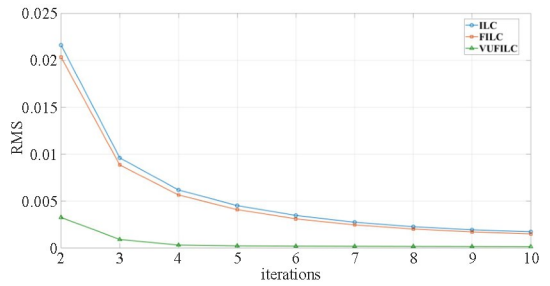


图 19 三种策略下的电机位置跟踪误差的均方根值

Fig. 19 RMS of motor position tracking error under three strategies

由图 18、图 19 中可以看出,在不同迭代周期中,VUF-SSAFFILC 策略下误差的最大绝对值和均方根值都要远小于其他两种控制策略。由此可证本文所设计的带有平滑切换策略和缓步策略的遗忘因子自适应率的优越性。

5 结论

为减小永磁同步直线电机的位置跟踪误差,本文在迭代学习控制和模糊控制的基础上,提出一种带有平滑切换策略自适应遗忘因子的变论域模糊迭代学习控制策略,并设计二级模糊控制器生成伸缩因子;设计了自适应遗忘因子并提出平滑切换策略和缓步策略改进自适应率。

实验证明,与传统的迭代学习控制和模糊迭代学习控制策略相比,本文所设计的变论域模糊迭代学习控制策略能够有效提升电机的位置跟踪精度;与普通的遗忘因子自适应率相比,本文所设计的带有平滑切换策略和缓步策略的遗忘因子自适应率能够有效减小迭代学习周期切换时的位置误差,提升收敛速度。

参考文献

- [1] 邬博骋. 新型交替极永磁直线同步电机研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2022.
WU B C. Research on novel consequent-pole permanent magnet linear synchronous machines [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2022. (in Chinese)
- [2] 白聪. 永磁同步直线电机驱动系统扰动抑制方法研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2023.
BAI C. Research on disturbance suppression methods of permanent magnet synchronous linear motor drive system [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2023. (in Chinese)
- [3] 沈艳霞, 罗昌茜. 基于超螺旋滑模观测器的永磁同

- 步直线电机无模型控制[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(18): 62–69.
- SHEN Y X, LUO C X. Model-free control of a permanent magnet linear synchronous motor based on a super-twisting sliding mode observer [J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(18): 62–69. (in Chinese)
- [4] 张卉, 朱永飞, 刘雪飞, 等. 基于模糊迭代 Q-学习的冶金工业机器人轨迹跟踪控制研究[J]. 工程设计学报, 2022, 29(5): 564–571.
- ZHANG H, ZHU Y F, LIU X F, et al. Research on trajectory tracking control of metallurgical industrial robot based on fuzzy iterative Q-learning [J]. Journal of Engineering Design, 2022, 29(5): 564–571. (in Chinese)
- [5] 史晓娟, 潘泽旭. 直线倒立摆变论域模糊 PID 控制系统研究[J]. 制造业自动化, 2024, 46(3): 32–36.
- SHI X J, PAN Z X. Research on variable universe fuzzy PID control system for linear inverted pendulum [J]. Manufacturing Automation, 2024, 46(3): 32–36. (in Chinese)
- [6] 赵希梅, 金鸿雁. 永磁直线同步电机伺服系统的分段变论域模糊迭代学习控制[J]. 电工技术学报, 2017, 32(23): 9–15.
- ZHAO X M, JIN H Y. Segmented variable universe fuzzy iterative learning control for permanent magnet linear synchronous motor servo system [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(23): 9–15. (in Chinese)
- [7] 葛磊, 倪豪, 郝云晓, 等. 新型液压回转一机械直线执行器的死区补偿控制[J]. 机械工程学报, 2024, 60(8): 337–347.
- GE L, NI H, HAO Y X, et al. Dead zone compensation control of new hydraulic motor-mechanical linear actuator [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2024, 60(8): 337–347. (in Chinese)
- [8] 杨荣昆, 朱尤成, 樊瑞. 基于自适应粒子群算法优化 PID 的风电机组齿轮箱温度控制系统[J]. 自动化与仪表, 2024, 39(5): 64–67.
- YANG R K, ZHU Y C, FAN R. Optimization of PID based temperature control system for wind turbine gearbox based on adaptive particle swarm optimization algorithm [J]. Automation & Instrumentation, 2024, 39(5): 64–67. (in Chinese)
- [9] 戴宝林. 带遗忘因子迭代学习控制增益及性能优化问题研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2021.
- DAI B L. Optimization of parameters and performance of iterative learning control with forgetting factor [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2021. (in Chinese)
- [10] 李洪兴. Fuzzy 控制的本质与一类高精度 Fuzzy 控制器的设计[J]. 控制理论与应用, 1997, 14(6): 868–872.
- Li H X. The essence of fuzzy control and a kind of fine fuzzy controller [J]. Proceedings of the CSEE, 1997, 14(6): 868–872. (in Chinese)
- [11] WANG Y, LU Y P. Design of longitudinal predictive re-entry guidance law based on variable universe fuzzy-PI composite control [J]. Journal of Control Theory and Applications, 2012, 10(2): 264–267.
- [12] ZHANG L B, WU T, HUANG F L. A coupling motional control method based on parametric predictive and variable universe fuzzy control for multi-axis CNC machine tools [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 74(5): 1097–1114.
- [13] 梅品彬, 李芳芳, 吕杨. 基于变论域模糊控制的时变结构震动控制方法研究[J]. 振动与冲击, 2023, 42(18): 155–163.
- MEI P B, LI F F, LV Y. Vibration control of time-varying structures based on variable universe fuzzy control [J]. Journal of Vibration and Shock, 2023, 42(18): 155–163. (in Chinese)