

基于模糊神经网络 PID 的永磁同步直线电机控制算法研究

党明辉,郭亮

(浙江理工大学机械与自动控制学院,杭州 310018)

摘要:针对永磁同步直线电机(PMLSM)系统模型参数的时变性、非线性以及负载扰动等问题,在建立永磁同步直线电机的动态数学模型的基础上,结合传统PID算法和具有强自适应能力、强抗干扰能力的模糊神经网络智能算法的优点,提出一种基于模糊神经网络PID的永磁同步直线电机控制算法。运动控制系统仿真实验结果表明:系统经模糊神经网络PID控制静态误差为零、干扰影响小,过渡过程时间缩短近50%,相对于传统PID控制和模糊PID控制具有更高的控制精度、更好的动态特性和静态特性。

关键词: 永磁同步直线电机; PID控制; 模糊神经网络

中图分类号: TP173.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-3851(2016)01-0052-06 **引用页码:** 010501

0 引言

永磁同步直线电机(PMLSM)组成的直线伺服系统,由于取消了从旋转电机到工作台间的所有机械传动环节,极大地提高了进给系统的快速反应能力和运动精度,具有高速、高精和直接驱动的特性,近年来在加工中心、数控铣床、车床等高档数控机床中得到了广泛应用。但直接驱动方式也同时使得永磁同步直线电机和工作台之间没有了缓冲环节,负载变化、参数摄动等因素直接作用于直线电机,系统控制难度增加,直线电机铁心饱和引起的非线性和强耦合性等特征,也进一步增加了电机控制系统的难度^[1-4]。

传统PID控制器(proportion integration differentiation,比例-积分-微分控制器)具有原理简单、使用方便、稳定性好、鲁棒性强等特点,在实际工业领域有着很广泛的应用。但它对数学模型的依赖性强、参数确定后无法更改,这个特性使其无法满足非线性永磁同步直线电机的控制要求。许多专家学者结合传统PID控制和鲁棒控制、模糊控制、神经网络控制、滑膜变结构控制等控制方法的优点,提出了鲁棒PID控制、模糊PID控制、神经网络PID控制、变结构PID控制等控制方法^[5-7]。鲁棒PID控

制是基于最小-最大原理,针对系统最恶劣运行状况进行设计,虽控制效果较好,但随着控制系统阶次的增加,计算量急剧增大,增加了系统的复杂程度。模糊PID控制通过模糊算法实现了PID参数自适应调节,但其模糊规则和隶属度函数的确定仍需通过经验来选择。神经网络PID控制系统中也同样存在隐含层数目和初始权值难以确定的问题^[8-9]。

本文结合了模糊控制、神经网络控制、PID的特点,提出了一种基于模糊神经网络PID的永磁同步直线电机控制算法。该算法利用模糊神经网络结构通过学习训练系统输入输出对PID参数进行调整,在实现系统稳定控制的同时,具有参数辨识、自学习、自适应的特点,不仅可以满足了具有负载绕组的非线性永磁同步直线电机控制系统需求,且与其他方法相比更适合应用于对伺服性能要求较高的直线电机控制系统。

1 永磁同步直线电机的工作原理

本文研究对象为动初极型永磁同步直线电机,其结构原理如图1所示。其中:1为定子,表面均匀开槽并放置三相绕组;2为转子,铁心表面粘贴有垂直充磁的永磁体,以形成励磁磁场。当定子绕组通

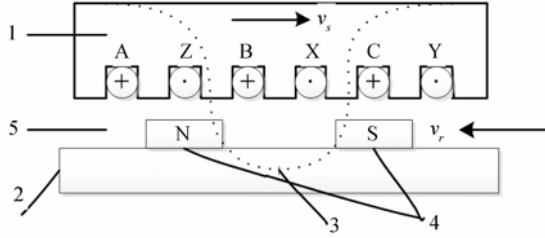
收稿日期:2015-03-25

基金项目:浙江省自然科学基金项目(LY14E070008)

作者简介:党明辉(1989-),男,山东菏泽人,硕士研究生,主要从事直线伺服控制方面的研究。

通信作者:郭亮,E-mail:lguo@zstu.edu.cn

有三相交流电时,在磁场的作用下可产生的电磁力驱动动子沿直线导轨做往复运动。为方便电磁力求解,工程上通常使用坐标变换将相对励磁磁场运动的 ABC 坐标系转化为相对励磁磁场静止的 $d-q$ 轴坐标系,坐标系如图 2 所示。



1:定子;2:动子;3:行波磁场;4:N、S 永磁体;5:间隙 v_s
行波磁场移动速度; v_r :动子移动速度
图 1 永磁同步直线电机结构原理

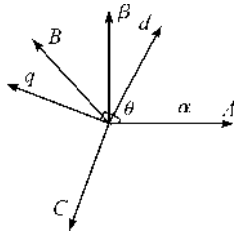


图 2 ABC 坐标系和 $d-q$ 轴坐标系

根据永磁电机特点,假设:a)永磁体初级为无阻尼绕组;b)忽略温度对电机参数的影响;c)忽略磁滞损耗及涡流损耗的影响;d)忽略反电动势谐波影响。那么 ABC 坐标系到 $d-q$ 坐标系的转换矩阵可由式(1)^[6-8]:

$$C_{3s/2s} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta - \frac{2}{3}\pi) & \cos(\theta + \frac{2}{3}\pi) \\ -\sin\theta & -\sin(\theta - \frac{2}{3}\pi) & -\sin(\theta + \frac{2}{3}\pi) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (1)$$

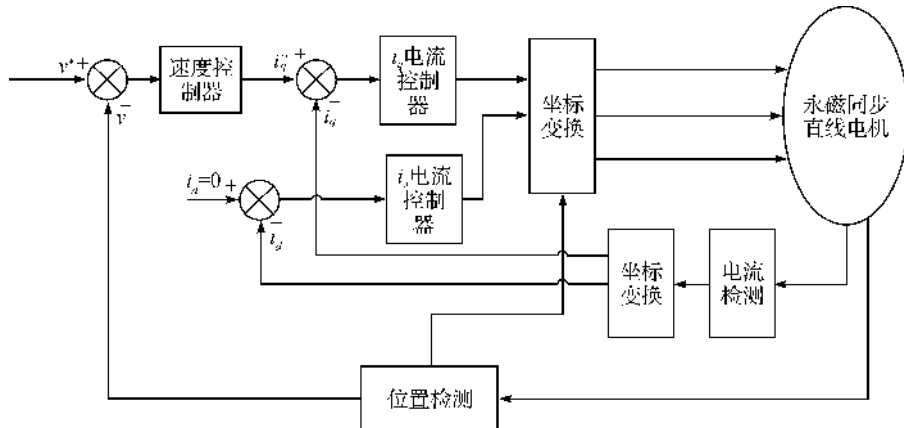


图 3 永磁同步直线电机控制系统框图

坐标变换后,电机 d 、 q 轴的电压和电磁推力方程分别可由式(2)—(4) 表示^[6-8]。

$$u_d = L_d \frac{di_d}{dt} + R \cdot i_d - \frac{\pi}{\tau} \cdot v \cdot L_q \cdot i_q \quad (2)$$

$$u_q = L_q \frac{di_q}{dt} + R \cdot i_q + \frac{\pi}{\tau} \cdot v \cdot L_d \cdot i_d + \psi_f \cdot \frac{\pi}{\tau} \cdot v \quad (3)$$

$$F_e = \frac{3\pi}{2\tau} N_p (\psi_f i_q + (L_d - L_q) i_d i_q) \quad (4)$$

其中: u_d 、 u_q 、 i_d 、 i_q 分别为 d 轴和 q 轴的电压和电流, L_d 、 L_q 分别 d 轴和 q 轴电感系数, ψ_f 是定子永磁体磁链, R 是各相绕组线圈的电阻, f 是直线电机的频率, N_p 是电机的极对数, τ 是极距。对于 $L_d = L_q$ 的隐极式电机,当采用 $i_d = 0$ 控制策略时,电磁推力可简化为:

$$F_e = \frac{3\pi}{2\tau} N_p i_q \psi_f \quad (5)$$

永磁同步直线电机机械运动方程可由式(6) 表示:

$$M \frac{dv}{dt} = F_e - F_d - B_v v \quad (6)$$

其中: M 为直线电机的质量, F_d 为直线电机的负载阻力, B_v 为黏滞摩擦系数。

2 基于模糊神经网络 PID 控制器

2.1 永磁同步直线电机控制系统结构

本文建立的永磁同步直线电机的控制系统基本结构如图 3 所示。该系统主要包括:电流环和速度环。电流环包括 $i_d = 0$ 控制器和 i_q 控制器,采用传统的 PID 控制器实现内环电流控制。速度环实现外环速度控制,控制结果作为电流环的输入,其控制效果的好坏将直接影响电流环进而影响系统整体性能,因此速度调节算法选用合适的控制策略非常重要。

本文在速度环中引入模糊神经网络算法,将传统PID算法和模糊神经网络控制相结合,设计了模糊神经网络PID速度控制器。模糊神经网络PID结构如图4所示,速度比较产生的误差 e 和误差变化率 ec 作为模糊神经网络组成的PID参数调节器的输入,在模糊神经网络内部经过比例因子调整后得 E 和 EC ,经学习训练过的模糊神经网络输出 P 、 I 、 D 经过比例因子调整后得到最佳的比例常数 k_p 、积分常数 k_i 和微分常数 k_d 输入PID控制器。

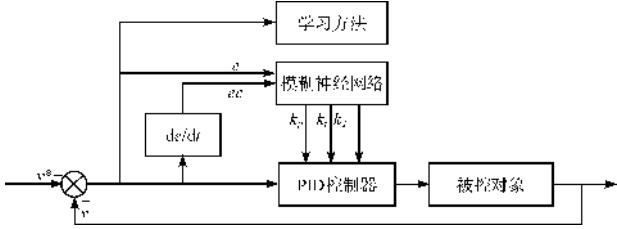


图4 模糊神经网络PID控制框图

模糊神经网络模型输入层、隶属度函数生成层、模糊推理层、归一化层和精确化层,其模型如图5所示。a) 隶属度函数生成层:该层共两个输入,每个输入有7个节点,分用字母PB、PM、PS、ZO、NS、NM、NB表示。对输入进行模糊化的隶属度函数如式(7)所示的高斯函数:

$$g_2(i, j) = \exp\left\{-\frac{[g_i(i) - c_{ij}]^2}{(b_{ij})^2}\right\} \quad (7)$$

其中: $i = 1, 2; j = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7$; c_{ij} 和 b_{ij} 分别表示第 i 个输入变量和第 j 模糊集合的隶属度的中心和宽度。b) 模糊推理层:共7个节点,同模糊化层7个节点相连完成模糊规则匹配。模糊推理层一个节点的输出是所有该点输入信号的乘积。c) 归一化层:对模糊推理层的结果进行归一化运算。d) 精确化层:实现对结果的计算,其连接权值为 ω_{ij} 。模糊神经网络学习的参数主要是连接权值 ω_{ij} 和隶属度函数的中心值 c_{ij} 和宽度值 b_{ij} ,学习方法采用BP神经网络学习法。在单输出情况下,定义误差函数可由式(8)表示:

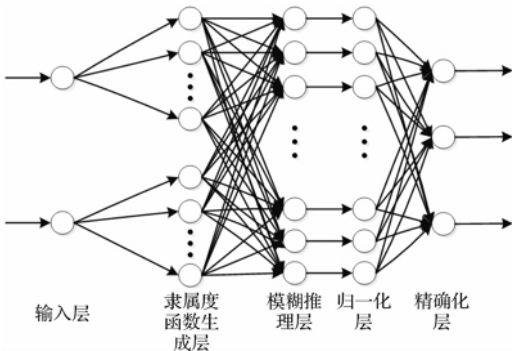


图5 模糊神经网络模型

$$E(k) = \frac{1}{2}[y_p(k) - \hat{y}(k)]^2 = \frac{1}{2}e^2(k) \quad (8)$$

其中: y_p 和 \hat{y} 分别代表实际输出理想输出(k_p, k_i, k_d)和实际输出($\hat{k}_p, \hat{k}_i, \hat{k}_d$)。

为了让实际输出最大程度上逼近理想输出, $E(k)$ 需达到最小,本文采用最速下降法进行搜索,搜索算法可由式(9)表示:

$$\frac{\partial E}{\partial \Theta} = e(k) \frac{\partial e(k)}{\partial \Theta} = -e(k) \frac{\partial \hat{y}(k)}{\partial \Theta} \quad (9)$$

其中: $\Theta = (c_{ij}, b_{ij}, w_{ij})$, c_{ij} 为隶属度函数生成层隶属度函数中心值, b_{ij} 为隶属度函数生成层隶属度函数宽度值, w_{ij} 为归一化层与精确化的连接权值。通过神经网络最速寻优法得到的三参数表达式为:

$$\begin{cases} c_{ij}(k+1) = c_{ij}(k) - \eta(k) \frac{\partial \hat{y}(k)}{\partial c} + \alpha(c_{ij}(k) - c_{ij}(k-1)) \\ b_{ij}(k+1) = b_{ij}(k) - \eta(k) \frac{\partial \hat{y}(k)}{\partial b} + \alpha(b_{ij}(k) - b_{ij}(k-1)) \\ w_{ij}(k+1) = w_{ij}(k) - \eta(k) \frac{\partial \hat{y}(k)}{\partial w} + \alpha(w_{ij}(k) - w_{ij}(k-1)) \end{cases} \quad (10)$$

其中: η 为学习速率, α 为动量因子。

2.2 模糊神经网络的训练

通过Matlab中的anfisedit工具箱对神经网络进行训练。对设计好的模糊PID仿真系统的输入输出进行采集作为训练样本,采用BP神经网络误差逆向传播学习算法对该系统进行训练,设置误差允许值为0,训练次数为600次,误差曲线如图6所示。

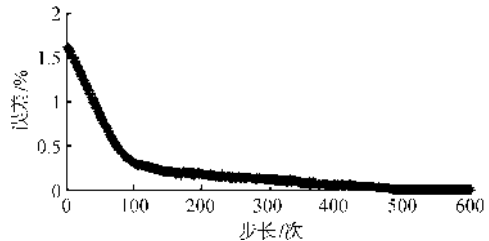


图6 训练后误差曲线

训练前后的 E 和 EC 的隶属度函数对比如图7所示。由图7可知:当系统误差 E 大小在NM、ZO、PS顶点值附近时,系统比较稳定,此时分辨率是系统主要考虑因素,所以隶属度函数都变得十分陡峭;当系统误差 E 大小在除了NM、ZO、PS顶点值附近以外的区域时,系统分辨率较高,此时稳定性是系统主要考虑因素,所以隶属度函数变得很平缓;当系统

误差变化率 EC 大小在 NM、NS、PS、PM 顶点值附近时,系统比较稳定,此时分辨率是系统主要考虑因素,因此隶属度函数此时坡度较大;当系统误差变化率 EC 大小在 NB、ZO、PB 附近区域时,系统分辨率较高,此时稳定性是系统主要考虑因素,所以隶属度

函数曲线变得很平缓。训练后的隶属度函数更加符合实际情况。

训练前后 P 、 I 、 D 输出曲面如图 8 所示。从图 8 中可以发现,训练后 P 、 I 、 D 输出曲面变得更加平滑,说明控制更加平稳。

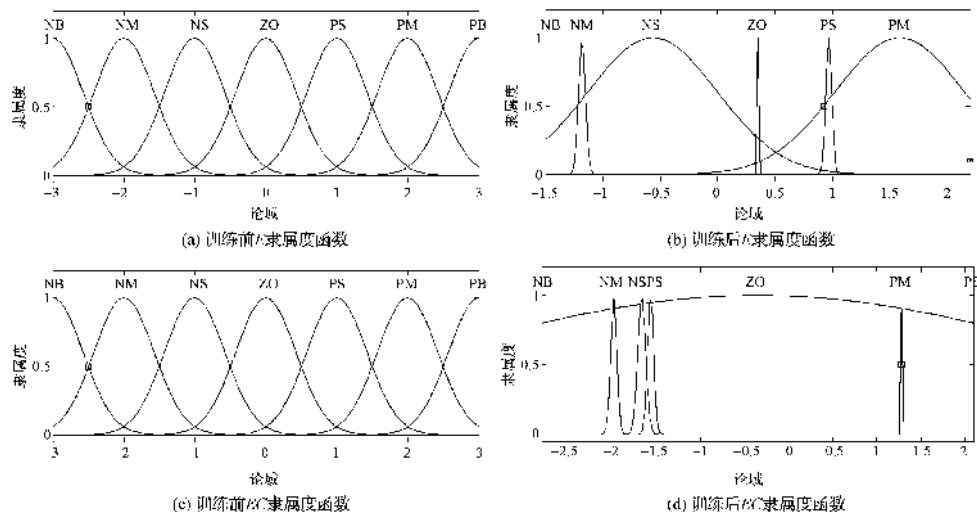


图 7 训练前后 E 和 EC 隶属度函数

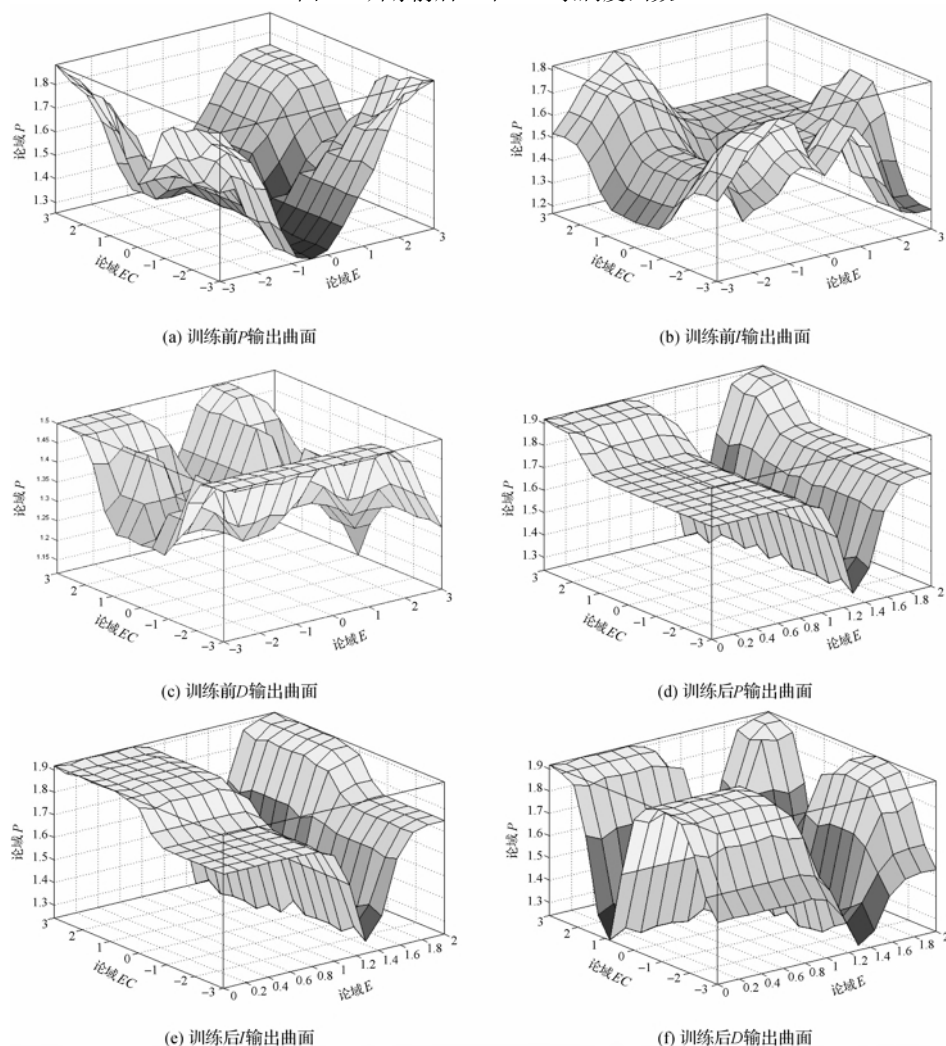


图 8 训练前后 P 、 I 、 D 输出曲面

PID 控制下的速度响应超调较小,调整时间较短,实验结果和仿真结果相吻合,进一步说明基于速度环模糊神经网络 PID 控制能明显提高直线电机伺服系统的动态特性和静态特性。

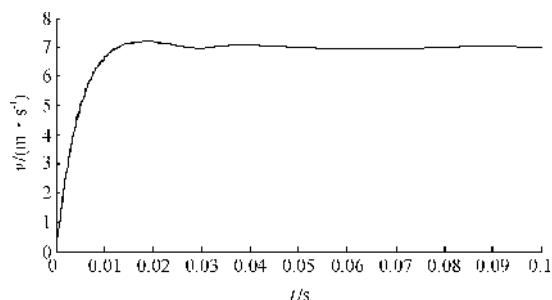


图 12 传统 PID 控制下的速度响应

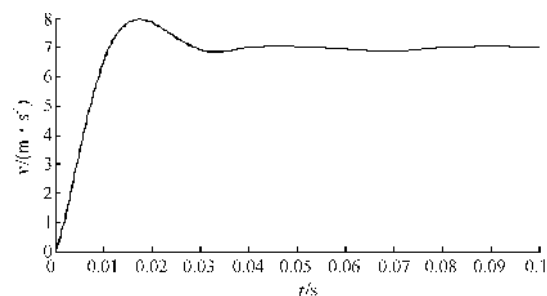


图 13 模糊神经网络 PID 控制下的速度响应

4 结 语

本文针对永磁同步直线电机系统模型不确定性和负载扰动性的特点,设计了一种模糊神经网络

PID 控制器,并应用于三相永磁同步直线电机速度环控制,Simulink 仿真和样机实验结果表明:模糊神经网络 PID 控制策略与传统 PID 和模糊 PID 相比,具有超调小,快速性好及运行稳定的优点,其控制效果得到了明显的提升。

参考文献:

- [1] 吴红星,钱海荣,刘莹,等. 永磁同步直线电机控制技术综述[J]. 微电机, 2011,44(7):76-80.
- [2] 丁文双,胡育文,鲁文其,等. 永磁同步电机模糊 PID 参数自整定[J]. 微特电机, 2011, 39(5): 17-21.
- [3] 章达众,廖有用,李国平. 直线电机的发展及其磁阻力优化综述[J]. 机电工程, 2013,30(9):1051-1054.
- [5] 金朝红,李槐树,宋立. 基于复合控制的圆筒形永磁直线同步电机位置控制[J]. 电气传动, 2012,42(1): 44-48.
- [6] 谢潜伟,刘军. 永磁同步直线电机的变论域模糊 PID 控制[J]. 微电机, 2013, 46(12):75-77.
- [7] 方斯深,周波,黄佳佳,等. 滑模控制永磁同步电动机调速系统[J]. 电工技术学报, 2008, 23(8): 29-34.
- [8] 童菲,窈勤,袁铁江,等. 基于神经网络的双馈风电机调速 PID 控制仿真[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 3(19):14-18.
- [9] ÖZTÜRK N, ÇELİK E. Speed control of permanent magnet synchronous motors using fuzzy controller based on genetic algorithms[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2012, 43(1): 889-898.

Research on PID PMLSM Control Algorithm Based on Fuzzy Neural Network

DANG Minghui, GUO Liang

(Faculty of Mechanical Engineering and Automation, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: According to time-varying nature, the nonlinearity, and load disturbance of permanent magnet linear synchronous motor (PMLSM) system model parameters, this paper combines traditional PID algorithm and fuzzy neural network intelligent algorithm with strong anti-interference ability and adaptive ability to propose PID PMLSM control based on fuzzy neural network on the basis of establishing dynamic mathematical model of PMLSM. Simulation experiment results of motion control system show that the motion control system based on fuzzy neural network PID control has no static error and small disturbing influence, transient time is shortened for nearly 50%. Compared with traditional PID control and fuzzy PID control, it has higher control precision, better dynamic properties and static property.

Key words: permanent magnet linear synchronous motor (PMLSM); PID control; fuzzy neural network

(责任编辑:康 锋)