

双直线电机 TSKRFNN 交叉耦合同步控制研究

吴有明¹, 方昱璋²

(1. 南宁职业技术学院 机电工程学院, 广西南宁 530008;

2. 国网甘肃省电力公司经济技术研究院, 甘肃兰州 730050)

摘要:针对高精度龙门移动式镗铣床加工中心 X 轴的两台直线电机的同步跟踪问题, 采用一种 TSK 型递归模糊神经网络 (TSKRFNN) 与交叉耦合控制 (CCC) 相结合的控制方法。利用 TSKRFNN 解决单轴 PMLSM 受到参数变化和外界扰动等不确定性影响的问题, 估计并补偿总不确定性因素并在线调整网络参数, 从而抵抗外界干扰, 提高系统的鲁棒性和跟踪性。其次, 为解决双直线电机运行时存在的参数不匹配性和耦合问题, 将 CCC 与 TSKRFNN 相结合, CCC 可以将单轴跟踪误差按照一定比例分配给两台永磁直线同步电动机 (PMLSM), 以抑制由不同步问题引起的不平衡转矩, 从而使系统高精度同步运行。最后, 通过双直线电机平台证明所提方法的有效性。实验结果表明, 该方法鲁棒性及跟踪性优良, 可以较好地满足加工中心同步控制的要求。

关键词: 双直线电机; TSK 型递归模糊神经网络; 交叉耦合控制; 同步控制

中图分类号: TM351 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqcd20891

Cross-coupled Synchronization Control of Dual Linear Motor Based on TSK-type Recurrent Fuzzy Neural Network

WU Youming¹, FANG Yuzhang²

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanning College for Vocational Technology,

Nanning 530008, Guangxi, China; 2. State Grid Gansu Economic Research Institute, Lanzhou 730050, Gansu, China)

Abstract: Aiming at the asynchronous position of dual linear motors on X axis of high precision gantry moving machining centers, a control method combining TSK-type recurrent fuzzy neural network (TSKRFNN) and cross-coupled control (CCC) was adopted. TSKRFNN was used to solve the problem that the tracking accuracy of single axis PMLSM is affected by uncertainties such as parameter changes and external disturbances. The total uncertainties were estimated and compensated, and the network parameters were adjusted online, so as to resist external disturbances and improve the robustness and tracking performance of the system. Secondly, in order to solve the problem of parameter mismatch and coupling in the operation of dual linear motor, CCC and TSKRFNN were combined. CCC can distribute the single-axis tracking error to two permanent magnet linear synchronous motors (PMLSMs) according to a certain proportion, so as to restrain the unbalanced torque caused by asynchronization and ensure the high-precision synchronous operation of the system. Finally, the validity of the proposed method was verified on the platform of double linear motor. The experimental results show that the proposed method has good robustness and small synchronization error in dynamic process, and can meet the requirements of high precision synchronization control of machining center.

Key words: dual linear motor; TSK-type recurrent fuzzy neural network (TSKRFNN); cross-coupled control (CCC); synchronization control

随着对高速度高精度镗铣加工技术的要求越来越高, 通常需要对大型零件和复杂的几何型

面进行高精密切削加工^[1-2]。移动式龙门镗铣床克服了传统固定式镗铣床受工作地点约束、体积重量

基金项目: 国家电网公司总部科技项目 (52272214002Z); 国网甘肃省电力公司信息研究开发管理咨询投资计划 (522728170000R)

作者简介: 吴有明 (1972—), 男, 硕士, 副教授, 高级工程师, Email: 895362655@qq.com

大的缺点,在多电机协同系统中受到更大的关注。移动式龙门镗铣床加工机构需要由两台完全相同且相互平行的永磁直线同步电动机(permanent magnet linear synchronous motor, PMLSM)构成,尽管安装在X轴的两台电机具有相同的结构与参数,但在PMLSM加工制造过程中难免会出现结构上的细微差异,以及在两台PMLSM运行过程中受参数变化、外部扰动等不确定性因素的影响,都会造成系统控制性能降低^[3]。另外,在机床实际运行过程中,加在工作台上的负载质量变化,也会导致两台PMLSM之间存在受力不平衡的现象,致使两个PMLSM子系统输出不同步,从而产生同步误差^[4]。

为提高双直线电机伺服系统的同步跟踪精度,国内外学者进行了深入的研究,主要研究方向为提高单轴PMLSM跟踪精度和双电机同步精度两方面^[5]。文献[6]采用自演概率模糊神经网络解决PMLSM中存在的时变不确定性问题,通过结构学习和参数学习训练网络参数,保证系统的鲁棒性,但该方法的稳定性证明十分复杂。文献[7]针对加工中心双直线电机系统设计了自适应模糊滑模控制器,保证了系统的跟踪性,但其单轴PMLSM子系统仅采用PI控制器,性能有待提高。文献[8]将积分滑模控制应用于双永磁同步电机中,解决了电机受负载扰动而转速不同步的问题,但其采用的积分滑模控制仍存在抖振现象。

因此,为提高龙门镗铣床加工中双直线电机伺服系统的同步跟踪精度,采用一种TSK型递归模糊神经网络(TSK-type recurrent fuzzy neural network, TSKRFNN)与交叉耦合控制器(cross-coupled control, CCC)相结合的控制方法。该方法充分考虑了双直线电机伺服系统的特点,分别从单轴和双轴两方面提高系统性能。利用TSKRFNN提高系统鲁棒性,同时利用CCC消除机械耦合引起的同步误差。实验结果表明,该方法有效地提高了双直线电机的同步运行精度,适于应用在同步控制中。

1 PMLSM 数学模型

由于两台PMLSM完全相同,因此,仅以一台PMLSM为例建立数学模型。PMLSM的简化电磁推力方程为

$$F_{ei} = K_{fi} i_{qi} \quad (1)$$

其中

$$K_{fi} = 3\pi n_{pi} \lambda_{PMi} / 2\tau_i$$

式中: F_{ei} 为PMLSM_{*i*}的电磁推力, $i=1,2$; K_{fi} 为电磁推力系数; n_{pi} 为极对数; λ_{PMi} 为磁链; τ_i 为极距; i_{qi} 为 q 轴电流。

根据系统的动力学模型,可将PMLSM的电磁推力方程表示为

$$F_{ei} = M_i \dot{v}_i + B_i v_i + F_{Li} \quad (2)$$

式中: M_i 为转子的质量; v_i 为转子的线速度; \dot{v}_i 为速度的微分,即转子加速度; B_i 为粘性摩擦系数; F_{Li} 为总不确定性因素,包括参数变化、外部扰动以及摩擦力等。

2 基于TSKRFNN的双直线电机交叉耦合控制系统设计

针对双直线电机系统易受不确定性因素的影响,且系统运行过程中由于负载力的变化以及环境的变化等会存在参数不匹配、不平衡力等耦合问题,采用基于TSKRFNN的双直线电机CCC方法以解决以上问题。基于TSKRFNN的双直线电机CCC方法系统总框图如图1所示。从图中可以看出,两台PMLSM采用并行控制方式,对两台电机输入相同的位置给定信号,同时每个轴均采用相同的传感器装置、伺服驱动器等组成的控制回路。

2.1 CCC设计

采用CCC方法消除双轴之间存在的同步误差,CCC方法能够将两个子系统产生的单轴位置跟踪误差按照一定比例分配到两轴中,从而达到平衡。首先,定义单轴PMLSM跟踪误差为

$$e_i = d_m - d_i \quad (3)$$

式中: e_i 为两台电机的位置跟踪误差; d_m 为直线电机给定位置; d_i 为实际位置。

为减小同步误差,需找到同步误差与单轴位置跟踪误差之间的关系。定义两轴间同步误差为

$$\begin{cases} \varepsilon_1 = e_1 - e_2 \\ \varepsilon_2 = e_2 - e_1 \end{cases} \quad (4)$$

式中: $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ 为双直线电机的同步误差,也就是两台PMLSM的跟踪误差的差值。

为方便分析控制器的设计,将式(4)表示为

$$\Xi = TE \quad (5)$$

其中

$$\Xi = [\varepsilon_1 \quad \varepsilon_2]^T \quad E = [e_1 \quad e_2]^T \quad T = \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix}$$

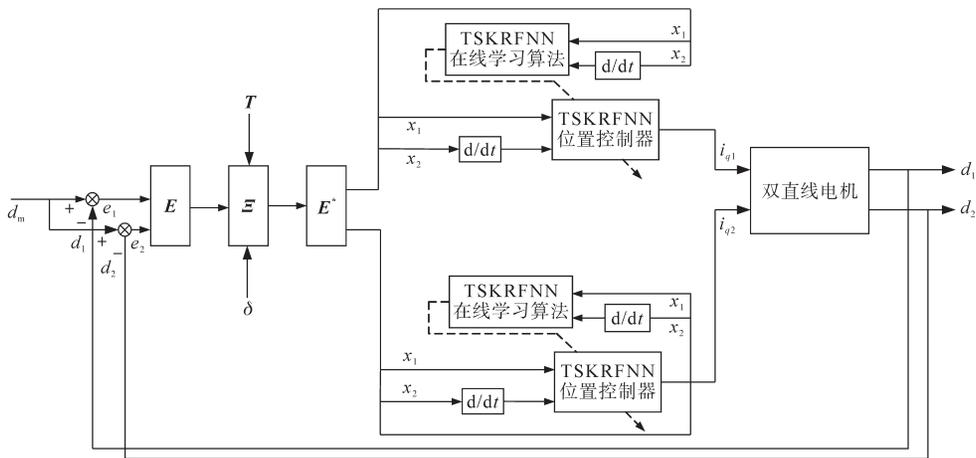


图1 基于TSKRFNN的双直线电机CCC方法系统总框图

Fig.1 Block diagram of dual linear motor based on TSKRFNN and CCC

为同时减小两台PMLSM的跟踪误差和同步误差,得出两者间关系为

$$E^* = E + \delta E \tag{6}$$

式中: E^* 为耦合误差, $E^* = [x_1 \ x_2]^T$; δ 为耦合参数, $\delta > 0$ 。

将式(5)代入式(6)得:

$$E^* = (I + \delta T) E \tag{7}$$

式中: I 为单位矩阵; $(I + \delta T)$ 为正定矩阵。

2.2 TSKRFNN设计

龙门镗铣加工中心X轴由两台PMLSM直接驱动,而PMLSM取消了齿轮、丝杠等中间传动装置,因此极易受到参数变化、外部扰动等不确定性的影响,不确定性的存在使PMLSM精准数学模型的建立十分困难。由于神经网络具有强大

的学习能力,且不依赖于精准数学模型,因此引入TSKRFNN对不确定性进行估计并补偿。TSKRFNN将模糊控制策略与神经网络算法的优点结合起来,具有较强的自学习和联想功能,能够有效提升双直线电机的伺服性能^[9]。设计TSK型模糊神经网络的第j条模糊规则为

$$R_j : \text{If } x_1 \text{ is } A_1^j \text{ and } \dots x_n \text{ is } A_n^j \text{ and } h_j(N) \text{ is } f_j, \\ \text{Then } y^* \text{ is } Q_j \text{ and } (N + 1) \text{ is } \theta_{jk} \tag{8}$$

式中: R_j 为第j条规则; A_1^j, f_j 为模糊集合; $x = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$ 为模型输入矢量; y^* 为网络输出; Q_j 为 y^* 的推论参数; h_j 为内部变量; θ_{jk} 为 h_j 的推论参数; N 为迭代次数。

图2为TSKRFNN的结构框图。

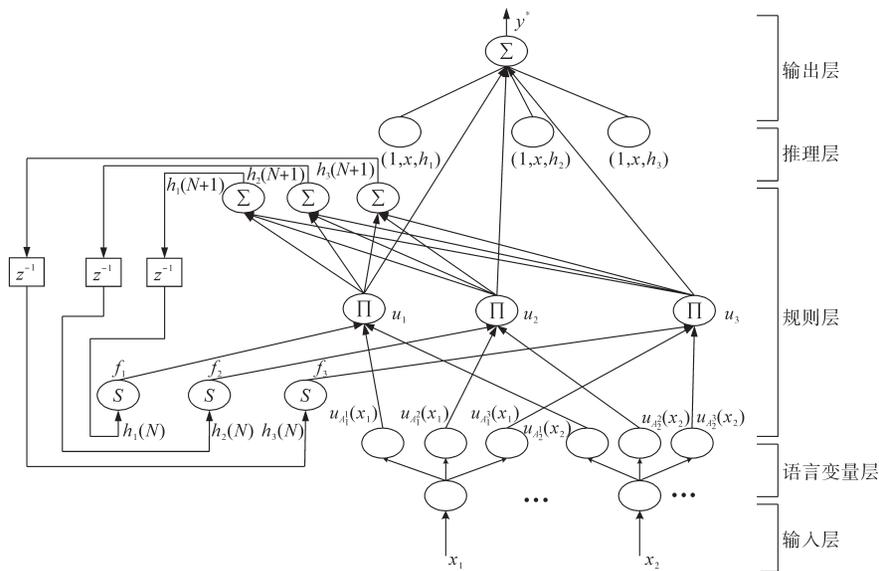


图2 TSKRFNN结构框图

Fig.2 Structure diagram of TSKRFNN

每层网络具体介绍如下:

1)输入层:TSKRFFNN为双输入神经网络。耦合误差 x_1 和耦合误差的微分 x_2 作为网络的输入。

2)语言变量层:此层中隶属函数选取高斯型函数,表示为

$$u_{A_i} = \exp\left[-\frac{(x_i - m_{ij})^2}{\sigma_{ij}^2}\right] \quad (9)$$

式中: m_{ij}, σ_{ij} 分别为与第 i 个输入变量相关的第 j 个节点的高斯函数的平均值和标准差, $i = 1, \dots, n$ 。

3)规则层:将内部变量 h_k 以S型隶属函数的形式可以描述为

$$f_j = \frac{1}{1 + \exp(-h_j)} \quad (10)$$

其中

$$h_j = \sum_{k=1}^M u_j \theta_{jk}$$

式中: h_j 为递归单元; θ_{jk} 为递归权重。

第 f 条规则的节点可表示为

$$u_j = f_i \prod_{i=1}^n u_{A_i} = \frac{1}{1 + \exp(-h_j)} \prod_{i=1}^n \exp\left[-\frac{(x_i - m_{ij})^2}{\sigma_{ij}^2}\right] \quad (11)$$

4)推理层:本层中节点采用线性加和的方式进行传播。节点 j 描述为

$$Q_j = \sum_{i=0}^{n+1} a_{ij} T_j = a_{0j} + \sum_{i=1}^n a_{ij} x_i + a_{n+1j} h_j \quad (12)$$

其中

$$T_j = (1, x, h_j)$$

式中: a_{ij} 为可以调整的参数值, $i = 0, 1, \dots, n + 1$ 。

5)输出层:此层输出信号 y^* 表示为

$$y^* = \frac{\sum_{j=1}^M u_j Q_j}{\sum_{j=1}^M u_j} \quad (13)$$

定义能量函数 V 为

$$V = \frac{1}{2} (d_m - d)^2 = \frac{1}{2} e_m^2 \quad (14)$$

TSKRFFNN可以对双直线电机系统中存在的不确定性因素的值进行估计,同时根据估计值对网络中参数进行在线调整。TSKRFFNN可以利用一定的规则进行参数优化,具体描述如下:

1)输出层:该层中的误差描述为

$$\begin{aligned} \delta^5 &= -\frac{\partial V}{\partial y^*} = -\frac{\partial V}{\partial e_m} \frac{\partial e_m}{\partial y^*} \\ &= -\frac{\partial V}{\partial e_m} \frac{\partial e_m}{\partial d} \frac{\partial d}{\partial y^*} \end{aligned} \quad (15)$$

2)推理层:该层中的误差描述为

$$\delta_j^4 = -\frac{\partial V}{\partial Q_j} = -\frac{\partial V}{\partial y^*} \frac{\partial y^*}{\partial Q_j} = \delta^5 \quad (16)$$

3)规则层:该层中的误差描述为

$$\begin{aligned} \delta_j^3 &= -\frac{\partial V}{\partial u_j} = -\frac{\partial V}{\partial y^*} \frac{\partial y^*}{\partial u_j} \\ &= \delta_j^4 \frac{(\sum_{j=1}^M Q_j)(\sum_{j=1}^M u_j) - \sum_{j=1}^M u_j Q_j}{(\sum_{j=1}^M u_j)^2} \end{aligned} \quad (17)$$

4)语言变量层:该层中的误差描述为

$$\delta_{ij}^2 = -\frac{\partial V}{\partial u_{A_i}} = \frac{\partial V}{\partial y^*} \frac{\partial y^*}{\partial u_j} \frac{\partial u_j}{\partial u_{A_i}} = \delta_j^3 f_j \quad (18)$$

$a_{ij}, \theta_{jk}, m_{ij}$ 和 σ_{ij} 的更新律分别表示为

$$\begin{aligned} \Delta a_{ij} &= -\eta_a \frac{\partial V}{\partial a_{ij}} = -\eta_a \frac{\partial V}{\partial y^*} \frac{\partial y^*}{\partial a_{ij}} \\ &= \eta_a \delta^5 u_j Q_j / \sum_{j=1}^M u_j \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} \Delta \theta_{jk} &= -\eta_\theta \frac{\partial V}{\partial \theta_{jk}} = -\eta_\theta \frac{\partial V}{\partial u_j} \frac{\partial u_j}{\partial \theta_{jk}} \frac{\partial f_j}{\partial h_j} \frac{\partial h_j}{\partial \theta_{jk}} \\ &= \eta_\theta \delta_j^3 f_j (1 - f_j) u_j (N - 1) \prod_{i=1}^n u_{A_i} \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} \Delta m_{ij} &= -\eta_m \frac{\partial V}{\partial m_{ij}} = -\eta_m \frac{\partial V}{\partial u_{A_i}} \frac{\partial u_{A_i}}{\partial m_{ij}} \\ &= \eta_m \delta_{ij}^2 \frac{2(x_i^2 - m_{ij})}{(\delta_{ij})^2} \end{aligned} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} \Delta \sigma_{ij} &= \eta_\sigma \frac{\partial V}{\partial \sigma_{ij}} = -\eta_\sigma \frac{\partial V}{\partial u_{A_i}} \frac{\partial u_{A_i}}{\partial \sigma_{ij}} \\ &= \eta_\sigma \delta_{ij}^2 \frac{2(x_i^2 - m_{ij})^2}{(\delta_{ij})^3} \end{aligned} \quad (22)$$

式中: $\eta_a, \eta_\theta, \eta_m, \eta_\sigma$ 分别为连接权重、递归权重、平均量和标准偏差量的学习速率。

隶属度函数和权重的平均量及标准偏差量优化为

$$a_{ij}(N + 1) = a_{ij}(N) + \Delta a_{ij} \quad (23)$$

$$\theta_{jk}(N + 1) = \theta_{jk}(N) + \Delta \theta_{jk} \quad (24)$$

$$m_{ij}(N + 1) = m_{ij}(N) + \Delta m_{ij} \quad (25)$$

$$\sigma_{ij}(N + 1) = \sigma_{ij}(N) + \Delta \sigma_{ij} \quad (26)$$

3 实验结果及分析

本系统利用DSP作为控制核心,对系统进行

实验。实验中所选用电机如图3所示。实验中所选PMLSM参数为： $M=5.8\text{ kg}$ ， $B=2\text{ N}\cdot\text{s/m}$ ， $K_f=10.97\text{ N/A}$ 。TSKRFNN中选取网络参数为： $\eta_a=1.25$ ， $\eta_\theta=0.17$ ， $\eta_m=0.34$ ， $\eta_\sigma=0.05$ 。

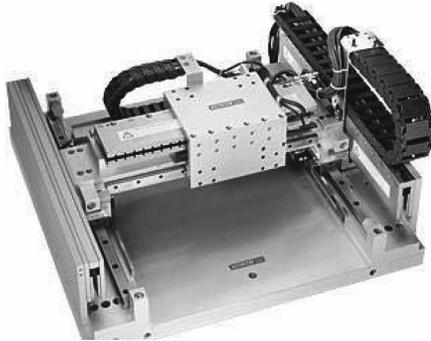


图3 实验装置

Fig.3 Experimental setup

为验证所提出的TSKRFNN双直线电机CCC方法的有效性,在参数变化(实际质量 $M_1=2M$,实际粘滞摩擦系数 $B_1=1.5B$)的情况下对双直线电机伺服系统给定如图4所示的梯形位置信号。两台电机在TSKRFNN控制和TSKRFNN+CCC控制下的位置响应曲线、跟踪误差曲线和电流曲线分别如图4~图7所示,且两种控制方法下的同步误差曲线如图8和图9所示。对比曲线可以看出,在仅有TSKRFNN控制时,两台电机的位置跟踪误差均较大,从而导致同步误差约在 $-1.5\sim 1.5\text{ }\mu\text{m}$ 之间波动。而在TSKRFNN+CCC控制下,两台电机的位置跟踪误差和同步误差均得到了改善,同步误差约为 $-0.7\sim 0.7\text{ }\mu\text{m}$ 。因此,针对含有不确定性和耦合问题的双直线电机系统,所提方法能够有效减小跟踪误差和同步误差,提高同步控制精度。

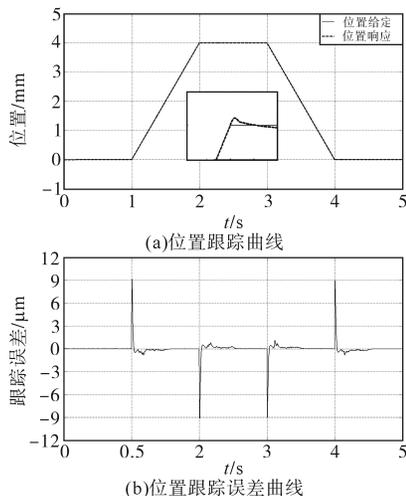


图4 基于TSKRFNN的PMLSM₁位置响应曲线

Fig.4 Position response curves of PMLSM₁ based on TSKRFNN

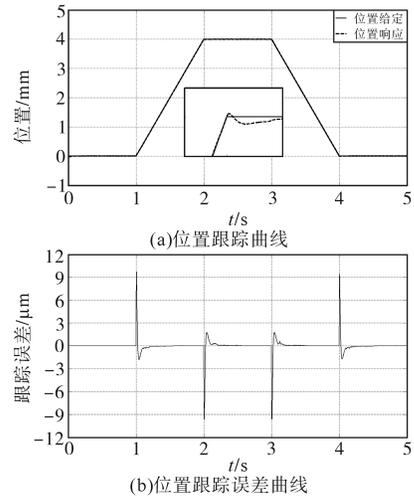


图5 基于TSKRFNN的PMLSM₂位置响应曲线

Fig.5 Position response curves of PMLSM₂ based on TSKRFNN

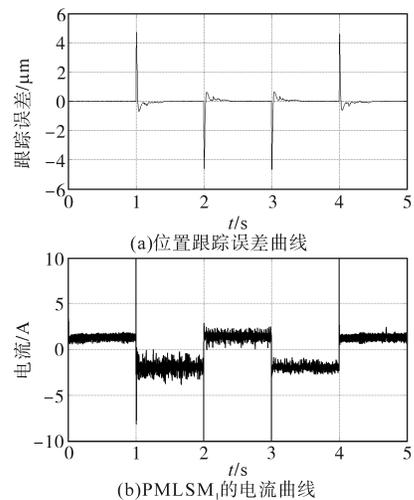


图6 基于TSKRFNN+CCC的PMLSM₁位置跟踪误差曲线及电流曲线

Fig.6 Position tracking error and current curves of PMLSM₁ based on TSKRFNN+CCC

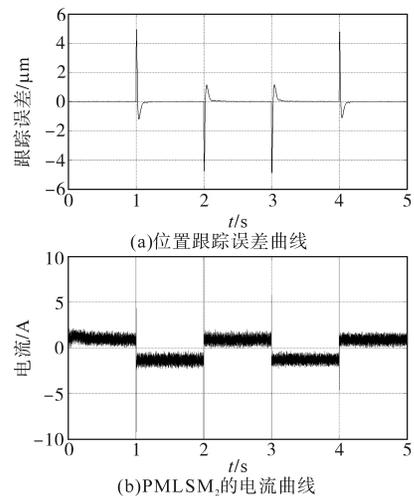


图7 基于TSKRFNN+CCC的PMLSM₂位置跟踪误差曲线及电流曲线

Fig.7 Position tracking error and current curves of PMLSM₂ based on TSKRFNN+CCC

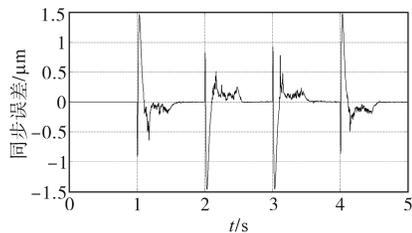


图8 基于TSKRFNN的双直线电机伺服系统位置跟踪误差及同步误差曲线图

Fig.8 Position tracking error and synchronization error curves of dual linear motor servo system based on TSKRFNN

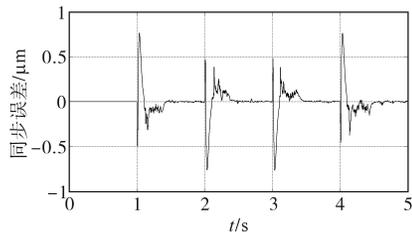


图9 基于TSKRFNN+CCC的双直线电机伺服系统位置跟踪误差及同步误差曲线图

Fig.9 Position tracking error and synchronization error curves of dual linear motor servo system based on TSKRFNN+CCC

4 结论

针对双直线电机中存在不确定性以及耦合现象的问题,提出一种TSKRFNN与交叉耦合控制相结合的同步控制方法。利用TSKRFNN强大的自学习能力,估计系统中不确定性并在线调整网络参数,保证单轴PMLSM伺服系统的控制性能。同时,将交叉耦合控制方法加入到双直线电机系统中以解决系统中存在的参数不匹配等耦合问题。仿真结果表明,该方法可极大地减小不

确定性因素对系统的影响,从而实现双直线电机伺服系统的精准位置控制。

参考文献

- [1] Chen M Y, Lu J S. High-precision motion control for a linear permanent magnet iron core synchronous motor drive in position platform [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2014, 10(1): 99-108.
- [2] Wang W, Su L Y. Application of CMAC-PID compound control in PMLSM servo system [J]. Advanced Materials Research, 2011, 341-342:780-784.
- [3] Chen C S, Lin W C. Self-adaptive interval type-2 neural fuzzy network control for PMLSM drives [J]. Expert Systems with Applications, 2011, 38(12): 14679-14689.
- [4] 李萍, 朱国力, 龚时华, 等. 基于干扰观测器的龙门机床双驱系统的同步控制[J]. 中国机械工程, 2016, 27(19):2630-2636.
- [5] 王丽梅, 李兵. 直线电机驱动XY平台的速度场轨迹规划与控制研究[J]. 中国电机工程学报, 2014(3): 438-444.
- [6] Chen S Y, Liu T S. Intelligent tracking control of a PMLSM using self-evolving probabilistic fuzzy neural network[J]. IET Electric Power Applications, 2017, 11(6): 1043-1054.
- [7] 于冬梅, 刘丹, 胡庆. 加工中心双直线电机自适应模糊滑模同步控制[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2013(6): 92-94.
- [8] 夏长亮, 李莉, 谷鑫, 等. 双永磁电机系统转速同步控制[J]. 电工技术学报, 2017, 32(23): 1-8.
- [9] 孙丽萍, 李元, 张冬妍, 等. 中央制冷空调冷冻水系统模糊RBF控制研究[J]. 电机与控制学报, 2017, 21(5): 110-116.

收稿日期:2019-09-20

修改稿日期:2019-11-04