DOI: 10.3901/JME.2021.17.236

数控机床直线同步电动机磁悬浮系统的 神经网络直接自适应控制*

蓝益鹏 姚婉婷 杨文康 雷 城
(沈阳工业大学电气工程学院 沈阳 110870)

摘要: 针对数控机床可控励磁直线同步电动机磁悬浮系统的强非线性、外部扰动不确定性的问题,设计基于 RBF 神经网络直接自适应控制器。通过分析磁悬浮系统的运行机理,推导运动方程及悬浮力方程,进而建立系统的状态方程;用悬浮高度的跟踪误差和误差的变化量构造误差函数,设计直接自适应理想控制器并采用 RBF 神经网络对其进行逼近;设计自适应律来估计神经网络理想权值,对误差函数的变化率构造二次型 Lyapunov 函数,利用 Lyapunov 稳定性理论来证明系统稳定;通过 Matlab 对控制系统进行计算机仿真,结果表明该方法设计的控制器与自适应模糊滑模控制器和 PID 控制器相比,空载启动时调节时间减少了 23.5%,突加负载时动态降落减少了 64.7%,恢复时间减少了 38.2%,具有稳态误差小,调节时间和恢复时间短,抗扰性较强的优点,能有效提高磁悬浮系统的控制性能。

关键词: 数控机床;直线同步电动机;磁悬浮系统;RBF 神经网络;直接自适应控制

中图分类号: TM383

Direct Adaptive Control of Neural Network of Magnetic Levitation System of CNC Machine Tool Linear Synchronous Motor

LAN Yipeng YAO Wanting YANG Wenkang LEI Cheng
(School of Electrical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870)

Abstract: Aiming at the problems of strong nonlinear and uncertainty of external disturbance of the controllable excitation linear synchronous motor magnetic levitation system of CNC machine tools, a direct adaptive controller based on RBF neural network is designed. By analyzing the operating mechanism of the magnetic levitation system, the motion equation and levitation force equation are derived, and then the state equation of the system is established. The error function is constructed by the tracking error of the levitation height and the variation of the error. The direct adaptive ideal controller is designed and approximated by RBF neural network; An adaptive law is designed to estimate the ideal weight of neural network. The quadratic Lyapunov function is constructed for the change rate of error function, and the stability of the system is proved by Lyapunov stability theory. The control system is simulated by Matlab, and the results show that compared with the adaptive fuzzy sliding mode controller and PID controller, the adjusting time of no-load starting is reduced by 23.5%, when the load is suddenly applied, the dynamic descent is reduced by 64.7% and the recovery time is reduced by 38.2%, it has the advantages of small steady-state error, short adjustment time and recovery time, strong disturbance immunity, and the control performance of the magnetic levitation system can be effectively improved.

Key words: CNC machine tools; linear synchronous motor; magnetic levitation system; RBF neural network; direct adaptive control

0 前言

数控机床进给平台采用可控励磁直线磁悬浮同

步电动机驱动系统,能够实现垂直方向的磁悬浮运动和水平方向的进给运动,具有结构简单、响应速度快、适用范围广的特点^[1]。

可控励磁直线同步电动机在运行过程中,不需要电磁铁多点支撑,具有无摩擦、无磨损等优点,通过控制悬浮系统可以达到直接悬浮,应用前景广泛^[2]。在加工过程中,突加负载造成的扰动、纹波

* 国家自然科学基金资助项目(51575363)。20200801 收到初稿,20201205 收到修改稿

推力, 端部效应等不确定性因素直接作用于磁悬浮系统, 且控制系统本身具有的非线性、强耦合, 使得系统控制更加困难, 因此, 需要找到合适的控制策略来提高可控励磁直线同步电机控制系统的稳定性与控制精度。

自适应控制是一种针对外部扰动较强的非线性控制系统的有效控制方法, 是由 Kalman 提出的一种基于参数估计的最优控制器设计方法^[3]。随着被控对象的复杂化, 自适应控制与一些先进的非线性控制算法完美结合, 来解决非线性系统的控制问题。文献[4]将自适应控制与模糊反演控制结合起来, 应用于永磁同步电机位置控制, 将位置误差集中在一个较小的范围。文献[5]将自适应控制与滑模控制结合起来, 应用于增强球形腕控制系统的抗扰性, 实现快速精确的定位控制。20 世纪 80 年代, 随着自适应理论的不断完善, 神经网络自适应控制 (Neural network adaptive control, NNAC) 这种融合了自适应较强鲁棒性与神经网络良好学习容错能力的控制方法, 逐渐被应用于非线性系统的控制中。WEN 等^[6]利用自适应神经网络控制研究了二阶非线性系统的跟随问题。SAHOO 等^[7]利用事件触发方式来设计相关的自适应神经网络控制器。文献[8]研究了基于神经网络的最优逼近控制理论。文献[9]提出一种改进型 NNAC 控制算法, 实现对非线性系统的轨迹跟踪。文献[10]提出了一种自适应神经模糊滑模控制来减少磁悬浮系统的干扰和参数扰动的影响。文献[11]采用 RBF 神经网络对系统辨识, 再结合自适应控制设计控制器, 以提高系统的抗干扰性。

本文针对数控机床可控励磁直线同步电机的非线性磁悬浮系统, 分析运行机理并建立数学模型, 构造误差函数, 设计理想控制器, 并采用 RBF 神经网络对其逼近, 设计自适应律并证明系统稳定性, 仿真表明控制策略可提高系统抗干扰性。

1 直线同步电动机的数学模型

直线磁悬浮同步电动机 (Linear magnetic levitation synchronous motor, LMLSM) 驱动的进给平台三维图如图 1 所示。

图 1 LMLSM 磁悬浮进给平台三维图

磁悬浮绕组采用直流励磁, 该励磁磁场与动子之间产生的法向麦克斯韦力为电机提供悬浮力。推力绕组中通入三相交流电流会产生行波磁场, 与励磁磁场相互作用产生水平方向的电磁推力。

当悬浮高度到达给定位置时, 控制磁悬浮力与动子平台自身重力大小相等, 即可实现稳定悬浮。当受到外部扰动时, 通过磁悬浮控制器调节励磁电流, 使其随气隙变化而改变, 以适应外界干扰, 就能保证恒定的悬浮高度。

为了便于分析计算作如下假设: 电机磁极上不含阻尼绕组^[12]。忽略电机铁心饱和与端部效应, 不计电机铁心的涡流与磁滞损耗^[13], 将悬浮系统当做单线圈励磁的铁心进行简化计算。当励磁线圈通入直流电流时, 铁心内产生环形磁场, 假设铁心磁路内的磁场强度均相等, 气隙内磁场强度也相等, 沿着闭合路径进行基尔霍夫磁位差计算, 辅以安培环路定律有

$$\frac{B}{\mu_{FE}} l_{FE} + \frac{B}{\mu_0} 2\delta = F_d + F_f \quad (1)$$

式中, B 为磁感应强度; μ_{FE} 为铁心磁导率; l_{FE} 为定子铁心磁路长度与动子铁心磁路长度之和; δ 为系统悬浮高度; μ_0 为真空磁导率; F_d 为动子线圈磁动势; F_f 为定子磁动势。

由于进给方向采用 $i_d=0$ 的控制方式来减少耦合现象, 且假设铁磁材料的磁导率为无限大, 则式(1)可化为

$$B = \frac{F_f}{\frac{l_{FE}}{\mu_{FE}} + \frac{2\delta}{\mu_0}} = \frac{\mu_0 F_f}{2\delta} \quad (2)$$

电磁力为

$$F_y = \frac{\mu_0 N^2 A}{4} \left(\frac{i_f}{\delta} \right)^2 \quad (3)$$

式中, A 为等效磁极面积; N 为励磁绕组匝数。垂直方向的运动方程为

$$m\ddot{\delta} = F_y - mg - f_y = \frac{\mu_0 N^2 A}{4} \left(\frac{i_f}{\delta} \right)^2 - mg - f_y \quad (4)$$

式中, m 是动子及负载质量; i_f 为励磁电流; f_y 是不确定性扰动。

令 $x_1 = \delta$, $x_2 = \dot{\delta}$, 得到控制系统的状态方程为

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_2 \\ \frac{H}{mx_1^2} i_f^2 - g \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{m} \end{bmatrix} f$$

$$H = \frac{\mu_0 N^2 A}{4} \quad (5)$$

其中包含状态变量 x_1 的平方项, 为非线性状态方程。

2 理想控制器及神经网络逼近

2.1 理想控制器设计

考虑如下二阶 SISO 非线性系统

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = \alpha(x)u + f(t) \\ y = x_1 \end{cases} \quad (6)$$

式中, $\mathbf{x} = [x_1 \ x_2]^T \in \mathbf{R}$ 为系统的状态矢量; $\alpha(x)$ 为非线性函数; $u \in \mathbf{R}$ 为系统输入; $y \in \mathbf{R}$ 为输出; $f(t)$ 为外界扰动且有 $|f(t)| \leq f_0$, $f_0 > 0$ 。

假设气隙高度的给定值为 δ^* , 跟踪误差为 e , 误差函数为 s , 则有

$$\begin{aligned} e &= \delta - \delta^* = x_1 - \delta^* \\ \mathbf{e} &= [e \ \dot{e}]^T \\ s &= [\lambda \ 1] \mathbf{e} = \lambda e + \dot{e} \end{aligned} \quad (7)$$

式中参数 $\lambda > 0$, 对 s 求导可得

$$\dot{s} = \lambda \dot{e} + \ddot{e} = v + \alpha(x)u + f(t) \quad (8)$$

式中, $v = \lambda \dot{e}$ 。

令式(8)中 $f(t) = 0$, 可设计理想控制器为

$$u' = -\frac{v}{\alpha(x)} - \left(\frac{1}{\varepsilon \alpha(x)} + \frac{1}{\varepsilon \alpha^2(x)} - \frac{\dot{\alpha}(x)}{2\alpha^2(x)} \right) s \quad (9)$$

式中, 参数 $\varepsilon > 0$ 。

令 $u = u'$, 代入式(8)中, 整理可得

$$\dot{s}' = -\left(\frac{1}{\varepsilon} + \frac{1}{\varepsilon \alpha(x)} \right) s + \frac{\dot{\alpha}(x)}{2\alpha(x)} s \quad (10)$$

由式(5)、(6)、(9)、(10)可得本文所研究磁悬浮系统的理想控制器 u^* 为

$$u^* = -\frac{mx_1^2}{H}v - \left(\frac{mx_1^2}{\varepsilon H} + \frac{m^2x_1^4}{\varepsilon H^2} + \frac{mx_1x_2}{H} \right) s \quad (11)$$

误差函数变化率 $\dot{s}$ 为

$$\dot{s} = \left(-\frac{1}{\varepsilon} + \frac{mx_1^2}{\varepsilon H} \right) s - \frac{x_2}{x_1} s \quad (12)$$

构造 Lyapunov 函数为

$$V = \frac{mx_1^2}{2H} s^2$$

则有

$$\dot{V} = -\left(\frac{mx_1^2}{\varepsilon H} + \frac{m^2x_1^4}{\varepsilon H^2} \right) s^2 \quad (13)$$

由于 $\frac{mx_1^2}{H} > 0$, 由 Lyapunov 稳定定理可知:

$\dot{V} \leq 0$, 表明 $\lim_{t \rightarrow \infty} |s| = 0$, 即 $\lim_{t \rightarrow \infty} \|e(t)\| = 0$, 可通过改变参数 ε 调整收敛性。

由式(11)可知, 理想控制器 u^* 可写为 $\mathbf{x}$ 、 s 和 v 的函数。

定义输入矢量

$$\mathbf{z} = [x_1 \ x_2 \ s \ s/\varepsilon \ v]^T \quad (14)$$

由于实际的控制系统不能满足 $f(t) = 0$ 的控制条件, 故理想控制器 $u^*(z)$ 无法直接用于控制, 而理论上来说, RBF 神经网络能够逼近非线性函数达到任何精度^[14], 因此采用 RBF 神经网络来逼近 $u^*(z)$ 。

2.2 RBF 神经网络逼近

RBF 神经网络是一种三层前馈神经网络, 由输入层, 隐层和输出层组成^[15], 结构如图 2 所示。

图 2 RBF 神经网络结构

其中矢量 $\mathbf{z}$ 为网络输入, $\mathbf{z}$ 中当 ε 很小时, s/ε 与 s 属于不同数量级, 因此也可将 s/ε 作为神经网络的输入, 来提高逼近精度^[16]。 u 为网络输出, h_j 采用高斯函数

$$h_j = \exp \left(-\frac{\|\mathbf{x} - \mathbf{c}_j\|^2}{2b_j^2} \right) \quad (15)$$

式中, $\mathbf{c} = [c_j]$ 是高斯函数的中心点坐标矢量, 且 $j = 1, 2, \dots, m$; b_j 是高斯函数的宽度; w_j 是网络的权值。

存在理想神经网络权值矢量 $\mathbf{W}^*$, 使

$$u^*(z) = \mathbf{W}^{*T} \mathbf{h}(z) + \mu \quad (16)$$

式中, μ 为网络逼近误差且有界。

设计直接自适应控制器 u 为网络的输出, 即

$$u = \hat{\mathbf{W}}^T \mathbf{h}(z) \quad (17)$$

式中, $\hat{\mathbf{W}}$ 为 $\mathbf{W}^*$ 的估计值。

磁悬浮系数 $H=5.659 \times 10^{-6}$ 。

RBF 神经网络的输入为矢量 z ，选取网络结构为 5-13-1，取参数 $c=(-3 \ -2.5 \ -2 \ -1.5 \ -1 \ -0.5 \ 0 \ 0.5 \ 1 \ 1.5 \ 2 \ 2.5 \ 3)$ ，取

$$b=11, \lambda=140, \Gamma_{ii}=8\ 000(i=13)$$

$$\varepsilon=0.005, \sigma=1 \times 10^{-5}, \bar{\beta}=0.05$$

在 Simulink 软件中建模，对所提出的神经网络直接自适应控制(Neural network direct adaptive control, NNDAC)进行仿真研究，并与文献[17]提出的滑模控制(SMC)及 PID 控制进行对比。

(1) 空载启动：磁悬浮系统从初始气隙高度 3 mm 开始运行，设置目标高度为 2.5 mm，系统响应如图 4 所示。

图 4 空载启动运行响应曲线

由图 4 可知，采用 PID 控制，约 0.29 s 到达给定的悬浮气隙高度，调节时间长；采用 SMC 控制，响应速度较快，约 0.21 s 达到给定的悬浮高度；采用 NNDAC 控制，系统响应速度最快，约 0.17 s 到达给定的悬浮高度，调节速度相比前两种控制方法分别提高了 41.4% 和 23.5%，可见 NNDAC 控制的启动性能要优于其他两种控制的启动性能。

(2) 突加负载：在磁悬浮系统稳定后的 0.3 s 处加入 30 N 的阶跃负载扰动并在 0.65 s 时去除扰动，磁悬浮气隙高度曲线如图 5 所示。

图 5 突加负载气隙高度响应曲线

由图 5 可知，采用 PID 控制，悬浮气隙高度动态降落约为 5×10^{-5} m，恢复时间约为 0.3 s，抗干扰

能力差；采用 SMC 控制，悬浮气隙高度动态降落约为 3.4×10^{-5} m，恢复时间约为 0.11 s；采用 NNDAC 控制，悬浮气隙高度动态降落约为 1.2×10^{-5} m，恢复时间约为 0.068 s，较前两种控制相比，动态降落分别减小 76% 和 64.7%，恢复速度分别提高 77.3% 和 38.2%，可见在施加相同的阶跃扰动下，NNDAC 控制能减小悬浮高度变化，快速到达稳定状态，从而提高控制系统的抗干扰性能。

图 6 突加负载励磁电流响应曲线

图 6 为励磁电流响应曲线。采用 PID 控制，恢复时间约为 0.23 s；采用 SMC 控制，恢复时间约为 0.11 s，超调量约为 12.9%；采用 NNDAC 控制，恢复时间约为 7.5×10^{-3} s，超调量约为 10.1%，较前两种控制相比，恢复速度分别提高 96.7% 和 93.2%，可见 NNDAC 控制在受到扰动时恢复速度更快。

(3) 模拟端部效应扰动：在磁悬浮系统稳定后的 0.3 s 处加入 $f=15\sin(30t)$ N 的正弦扰动，磁悬浮气隙高度的响应曲线如图 7 所示。

图 7 模拟端部效应扰动响应曲线

由图 7 可知，采用 PID 控制，响应曲线变化很大；采用 SMC 控制，响应曲线变化稍小；采用 NNDAC 控制，响应曲线基本不发生变化，且动态降落与前两种控制相比分别降低了 95% 和 85.7%。可见在直线同步电动机端部效应的影响下，NNDAC 控制使气隙高度的变化更平缓，能有效提高控制系统抵抗端部效应的能力。

5 结论

(1) 分析 LMLSM 的运行机理, 推导磁悬浮力的解析表达式和运动方程, 建立了磁悬浮系统的状态空间模型。

(2) 提出一种基于 RBF 神经网络的直接自适应控制方法, 构造误差函数, 设计直接自适应理想控制器, 采用 RBF 神经网络对其进行逼近, 设计自适应律, 并采用 Lyapunov 稳定性理论对控制系统稳定性进行分析, 使控制系统在多扰动的不利环境中具有良好控制性能。

(3) 在 Matlab 中, 建立控制系统的仿真模型, 对系统进行了仿真研究, 并与滑模控制以及 PID 控制进行对比, 仿真结果表明 NNDAC 的控制方法能提高控制系统的抗干扰性能, 同时也能有效的跟踪参考信号。

参 考 文 献

- [1] 智淑亚, 吴洪兵. 数控进给伺服系统摩擦补偿控制仿真[J]. 沈阳工业大学学报, 2019, 41(4): 361-365.
ZHI Shuya, WU Hongbing. Simulation of friction compensation control for CNC feed servo system[J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2019, 41(4): 361-365.
- [2] 陈永波, 燕延, 王伟明, 等. 磁悬浮直线电机三维有限元分析及优化设计研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2017(1): 31-34.
CHEN Yongbo, YAN Yan, WANG Weiming, et al. Three-dimensional finite element analysis and optimization design of magnetic levitation linear motor[J]. Combined Machine Tool and Automatic Processing Technology, 2017(1): 31-34.
- [3] GAO Hui, SONG Yongduan, WEN Changyun. Backstepping design of adaptive neural fault-tolerant control for MIMO nonlinear systems[J]. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 2016, 28(11): 2605-2613.
- [4] 张营, 巩永光, 郭亚军. 自适应模糊反演控制在机床永磁同步电机位置控制中的应用[J]. 机床与液压, 2020, 48(5): 119-123.
ZHANG Ying, GONG Yongguang, GUO Yajun. Application of adaptive fuzzy inversion control in position control of machine tool permanent magnet synchronous motor[J]. Machine Tool and Hydraulics, 2020, 48(5): 119-123.
- [5] 张永顺, 郭建超, 王新, 等. 不确定环境球型腕自适应滑模扰动控制[J]. 机械工程学报, 2015, 51(19): 21-27.
ZhANG Yongshun, GUO Jianchao, WANG Xin, et al. Adaptive sliding mode disturbance control of spherical wrist in uncertain environment[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(19): 21-27.
- [6] WEN G X, CHEN C L, LIU Y J, et al. Neural network based adaptive leader following consensus control for second order non-linear multi-agent systems[J]. Control Theory & Applications IET, 2015, 9(13): 1927-1934.
- [7] SAHOO A, XU H, JAGANNATHAN S. Neural network-based event-triggered state feedback control of nonlinear continuous-time systems[J]. IEEE Transactions on Neural Networks & Learning Systems, 2016, 27(3): 497-509.
- [8] WANG D, LIU D, MU C, et al. Neural network learning and robust stabilization of nonlinear systems with dynamic uncertainties[J]. IEEE Transactions on Neural Networks & Learning Systems, 2017, (99): 1-10.
- [9] CHEN C. W, CHEN P C, CHANG W L. Modified intelligent genetic algorithm-based adaptive neural network control for uncertain structural systems[J]. Journal of Vibration and Control, 2013, 19(9): 1333-1347.
- [10] SUN Y, XU J, QIANG H, et al. Adaptive neural-fuzzy robust position control scheme for maglev train systems with experimental verification[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(11): 8589-8599.
- [11] 赵石铁, 高宪文, 车昌杰. 基于 RBF 神经网络的非线性磁悬浮系统控制[J]. 东北大学学报, 2014, 35(12): 1673-1676, 1696.
ZHAO Shitie, GAO Xianwen, CHE Changjie. Control of nonlinear magnetic levitation system based on RBF neural network[J]. Journal of Northeastern University, 2014, 35(12): 1673-1676, 1696.
- [12] 卢晓慧, 梁加红. 直驱型机电作动器中永磁容错电机非线性模型研究[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(18): 145-151, 189.
LU Xiaohui, LIANG Jiahong. Research on nonlinear model of permanent magnet fault tolerant motor in direct drive electromechanical actuator[J]. Chinese Journal of Electrical Engineering, 2012, 32(18): 145-151, 189.
- [13] 严欣平. 无轴承永磁同步电机电磁设计与控制策略研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2008.
YAN Xinping. Research on electromagnetic design and control strategy of bearingless permanent magnet synchronous motor[D]. Chongqing: Chongqing University, 2008.
- [14] 吴宝强, 孙炜, 曹成. 柔性和摩擦力不确定条件下 RBF 神经网络自适应轨迹跟踪方法[J]. 机械工程学报, 2012, 48(19): 23-28.

- WU Baoqiang, SUN Wei, CAO Cheng. Adaptive trajectory tracking method of RBF neural network under uncertain conditions of flexibility and friction[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(19): 23-28.
- [15] 高贯斌, 王文, 林铿, 等. 基于 RBF 神经网络的关节转角误差补偿[J]. 机械工程学报, 2010, 46(12): 20-24.
- GAO Guanbin, WANG Wen, LIN Keng, et al. Joint angle error compensation based on RBF neural network[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(12): 20-24.
- [16] 张志颢, 虞旦. BP 和 RBF 神经网络在函数逼近上的对比与研究[J]. 工业控制计算机, 2018, 31(5): 119-120.
- ZHANG Zhixie, YU Dan. Comparison and research on function approximation of BP and RBF neural networks[J]. Industrial Control Computer, 2018, 31(5): 119-120.
- [17] 蓝益鹏, 李洁. 直线同步电动机磁悬浮系统的自适应模糊滑模控制[J/OL]. 控制与决策, 2021(3): 184-189.
- LAN Yipeng, LI Jie. Adaptive fuzzy sliding mode control of linear synchronous motor magnetic suspension system [J/OL]. Control and Decision, 2021(3): 184-189.

作者简介: 蓝益鹏, 男, 1962 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要从事电动机及其控制, 数控技术的研究。

E-mail: lanyipengg@163.com

姚婉婷, 女, 1995 年出生, 硕士研究生。主要从事直线电机伺服系统研究。

E-mail: yaowantingt@163.com