

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2019.12.014

高精度数控机床直线电机的 改进型自抗扰控制研究^{*}

郭 亮, 邓乾坤, 鲁文其, 吉 祥, 王 凡
(浙江理工大学 机械与自动控制学院, 浙江 杭州 310018)

摘要:针对高精度数控机床伺服系统中, 直线电机对扰动量高度敏感而影响系统稳态特性和控制精度的问题, 提出了一种改进型永磁同步直线电机(PMLSM)自抗扰控制(ADRC)策略。将新型非线性函数引入扩张状态观测器, 克服了传统型 ADRC 扩张状态观测器中非线性函数的不平滑性, 并对系统总扰动进行了估算, 并给予实时动态补偿; 采用比例微分器代替非线性反馈控制规律, 降低了系统参数调节的难度; 利用 Matlab 对基于改进型 ADRC 控制策略的 PMLSM 调速控制系统进行了仿真, 针对系统的空载启动响应特性和突加负载扰动对系统稳态性能的影响进行了测试。研究结果表明: 与传统型 ADRC 控制策略相比, 改进型 ADRC 控制策略具有更好的负载扰动抑制力和更小的超调量; 系统控制精度得到提升。

关键词:改进型自抗扰控制; 非线性函数; 改进型扩张状态观测器; 永磁同步直线电机

中图分类号: TH-39; TM359.4

文献标识码: A

文章编号: 1001-4551(2019)12-1303-06

Improved ADRC control strategy of linear motor for high precision NC machine

GUO Liang, DENG Qian-kun, LU Wen-qi, JI Xiang, WANG Fan

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

Abstract: Permanent magnet synchronous motors are suitable for direct driving of high precision numerically controlled servo systems. However, the high sensitivity of disturbance influence the position accuracy. Aiming at the problem, an improved active disturbance rejection control strategy of permanent magnet linear synchronous motors was proposed. A new non-linear function was introduced into the extended state observer to overcome the rough of non-linear function in extended state observer of conventional ADRC. By using the extended state observer of improved ADRC, the total disturbance of the system was estimated for real-time dynamic compensation. The proportional differentiator was used to replace the nonlinear state error feedback(NLSEF), and the difficulty of system parameter adjustment was reduced. The Matlab was used to simulate PMLSM speed control system based on the improved ADRC control strategy, and the effects of system's no-load start response characteristics and suddenly-applied load disturbances on the steady-state performance of the system were tested. The results indicate that the improved ADRC strategy has better load disturbance rejection and smaller overshoot than the traditional ADRC control strategy. It can make the system has a good control accuracy.

Key words: improved active disturbance rejection control; nonlinear function; improved extended state observer; permanent magnet linear synchronous motor(PMLSM)

收稿日期: 2019-04-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51677172); 浙江省自然科学基金资助项目(LY19E070006); 浙江省科技厅重点研发项目(2018C01074, 2018C01061)

作者简介: 郭亮(1979-), 女, 山东济宁人, 副教授, 主要从事电机设计和优化、精密磁悬浮驱动技术方面的研究。E-mail: lguo@zstu.edu.cn

0 引言

随着精密制造和数控技术等先进工业技术的发展,对高精度数控机床进给系统的要求越来越高,而传统的精密滚珠丝杠已不能满足高精度加工的要求。永磁同步直线电机(PMLSM)具有推力强度高、加减速速度大、灵敏度高、速度快、随动性好等优点,在高精度数控机床加工领域获得了广泛应用^[1-3]。但是直线电机采用直接驱动技术,没有中间缓冲机构,摩擦力扰动、负载波动直接作用于电机,严重影响系统的性能指标和机床加工精度。目前,PMLSM 伺服控制系统普遍采用的是比例积分微分(PID)控制方式,但是基于 PID 控制的系统存在快速响应,与超调量无法同时解决的矛盾,且 PID 控制器的参数整定较为困难,难以满足高精度数控机床对于快速响应和高精度的要求。

自抗扰控制技术^[4-5]以其不依赖被控对象数学模型、算法简单易于实现、较强的抗干扰能力和较好的鲁棒性等特点,已在电机调速系统和精密机械加工等领域得到广泛的应用^[6]。其中,刘希喆等^[7]将自抗扰控制应用于永磁同步直线电机速度控制系统,提高了系统抗内部参数摄动的鲁棒性;雷春林等^[8]设计了考虑永磁直线电机耦合和外部摩擦干扰情况下的自抗扰控制器,提高了系统的抗干扰能力,使得系统具有更好的动态性能;施昕昕等^[9]提出了基于自抗扰控制器实现的三闭环控制系统,不仅有效抑制了参数不确定性和外部扰动对系统的影响,还提高了系统的响应速度和跟踪精度。然而,上述文献中 ADRC 的扩张状态观测器(extended state observer,ESO)和非线性状态误差反馈控制规律(nonlinear state error feedback,NLSEF)是基于传统的非线性函数—fal 函数设计的,fal 函数具有在原点附近不够平滑,且存在拐点的缺点,会导致传统 ADRC 的净输出控制量产生抖颤,从而对系统的控制精度产生消极影响,不利于实现 PMLSM 的高精度控制。

为了实现数控机床的高精度控制,本文将提出一种改进型 ADRC 算法,该算法采用平滑性更好的非线性函数 sigfal 函数代替 fal 函数,采用比例微分器代替 NLSEF,使得系统具有较高的抗干扰能力和控制精度。

1 改进型 ADRC 控制器

改进型 ADRC 包含了 3 个模块:基于 sigfal 函数设计的改进型扩张状态观测器(ESO)、比例微分器(PD)和跟踪微分器(tracking derivative,TD)模块。

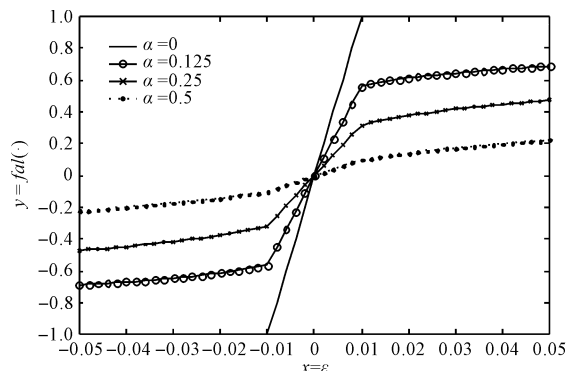
1.1 新型非线性函数设计

传统 ADRC 的非线性函数为 fal 函数,fal 函数可以表述为^[10-12]:

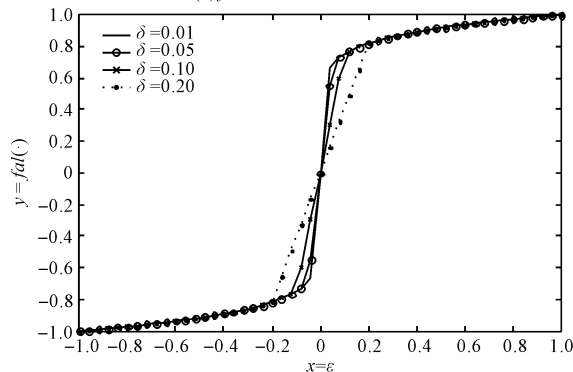
$$fal(\varepsilon, \alpha, \delta) = \begin{cases} |\varepsilon|^\alpha \text{sign}(\varepsilon), & |\varepsilon| > \delta \\ \frac{\varepsilon}{\delta^{1-\alpha}}, & |\varepsilon| \leq \delta \end{cases} \quad (1)$$

式中: ε —偏差; α —非线性因子; δ —滤波因子。

fal 函数分别在 $\delta = 0.01$ 、 α 取不同值时,和 $\alpha = 0.125$ 、 δ 取不同值时的特性曲线如图 1 所示。



(a) fal 函数 α 取不同值的曲线



(b) fal 函数 δ 取不同值的曲线

图 1 fal 函数曲线图

从图 1 可以看出,fal 函数在 < 1 时,具有小误差大增益和大误差小增益的特点,但是其特性曲线存在有明显的拐点,且平滑性较差。而拐点和不平滑性会影响 ADRC 的抗干扰能力和鲁棒性^[13]。

为了克服 fal 函数的不平滑,本文提出了一种平滑性更好的新型非线性函数(Sigfal 函数),其方程为:

$$\text{Sigfal}(\varepsilon, \alpha, \delta) = \begin{cases} |\varepsilon|^\alpha \text{sig}(\varepsilon), & |\varepsilon| > \delta \\ k_2 \text{sig}(\varepsilon), & |\varepsilon| \leq \delta \end{cases} \quad (2)$$

$$\text{Sig}(\varepsilon) = 2 \left(\frac{1}{1 + e^{-k_1 \varepsilon}} - 0.5 \right) \quad (3)$$

式中: k_1 —Sig 函数的非线性因子; k_2 —Sigfal 函数的系数。

当下式成立时,Sigfal 函数满足连续的条件:

$$\begin{cases} \text{Sigfal}(\varepsilon, \alpha, \delta) = \delta^\alpha \text{sig}(\delta), & \varepsilon = \delta \\ \text{Sigfal}(\varepsilon, \alpha, \delta) = -\delta^\alpha \text{sig}(\delta), & \varepsilon = -\delta \end{cases} \quad (4)$$

结合式(2 ~ 4),可得 $k_2 = \delta^\alpha$ 。经分析后得到,当 $k_1 = 1/\delta$ 时, *Sigfal* 函数表现出较好的平滑性,此时的状态方程可以表述为:

$$\text{Sigfal}(\varepsilon, \alpha, \delta) = \begin{cases} 2|\varepsilon|^\alpha \left(\frac{1}{1 + e^{-k_1 \varepsilon}} - 0.5 \right), & |\varepsilon| > \delta \\ 2\delta^\alpha \left(\frac{1}{1 + e^{-k_1 \varepsilon}} - 0.5 \right), & |\varepsilon| \leq \delta \end{cases} \quad (5)$$

1.2 基于 Sigfal 函数的扩张状态观测器

基于 *Sigfal* 函数的改进型 ESO 离散形式的状态方程为:

$$\begin{cases} e_{(k)} = Z_{1(k)} - y \\ Z_{1(k+1)} = Z_{1(k)} - \beta_1 * \text{Sigfal}(e_{(k)}, \alpha_1, \delta) \\ Z_{2(k+1)} = Z_{2(k)} - \beta_2 * \text{Sigfal}(e_{(k)}, \alpha_2, \delta) + b * u_{(k)} \\ Z_{3(k+1)} = -\beta_3 * \text{Sigfal}(e_{(k)}, \alpha_2, \delta) \end{cases} \quad (6)$$

式中: $e_{(k)}$ —观测偏差; $Z_{1(k)}$ —观测的动子速度; $Z_{2(k)}$ — $Z_{1(k)}$ 的微分信号; $Z_{3(k)}$ —观测的系统总干扰量; b —补偿因子; $u_{(k)}$ —控制量 i_q ; α_1, α_2 —非线性因子; δ —滤波因子; $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ —改进型 ESO 需要整定的误差校正增益。

根据学者高志强^[14]提出的带宽思想整定参数方法,则有:

$$(s + w_0)^3 = s^3 + \beta_1 s^2 + \beta_2 s + \beta_3 \quad (7)$$

展开式(7),可以得到:

$$\beta_1 = 3w_0, \beta_2 = 3w_0^2, \beta_3 = w_0^3 \quad (8)$$

式中: w_0 —控制带宽,可由极点配置得到。

1.3 比例微分器及扰动补偿装置

以上所述比例微分器的方程为:

$$\begin{cases} u_{q0} = u_{q01} + u_{q02} \\ u_{q01} = k_1 e_1 + k_2 \dot{e}_1 \\ u_{q02} = k_2 e_2 \end{cases} \quad (9)$$

式中: k_1, k_2 —比例微分器的系数; e_1 —TD 跟踪输入与 ESO 观测输出的偏差; $\dot{e}_1$ — e_1 的微分值; e_2 —TD 跟踪输入的微分与 ESO 观测输出微分的偏差。

扰动补偿装置常被用于补偿系统的内部扰动和外部扰动,其算法可表示为:

$$u_q = u_{q0} - \frac{Z_3}{b} \quad (10)$$

式中: u_{q0} —比例微分器的输出; u_q —扰动补偿后的控制信号。

1.4 跟踪微分器

根据系统的控制需要,本文给出了跟踪微分器状

态方程的离散形式:

$$\begin{cases} Z_{1(k+1)} = Z_{1(k)} + h * Z_{2(k)} \\ Z_{2(k+1)} = Z_{2(k)} + h * fhan(Z_{1(k)} - v_0, Z_{2(k)}, \lambda, h_0) \\ x_{1(k)} = Z_{1(k)} - v_0 \\ x_{2(k)} = Z_{2(k)} \end{cases} \quad (11)$$

$$fhan(x_1, x_2, \lambda, h_0) = \begin{cases} -\lambda * \text{sign}(a), & |a| > d_0 \\ \frac{\lambda * a}{d}, & |a| < d_0 \end{cases} \quad (12)$$

$$\begin{cases} a = \begin{cases} x_2 + \frac{(a_0 - d) \text{sign}(y)}{2}, & |y| > d_0 \\ x_2 + \frac{y}{h_0}, & |y| < d_0 \end{cases} \\ d = \lambda * h_0 \\ d_0 = h_0 * d \\ y = x_1 + h_0 * x_2 \\ a_0 = \sqrt{d^2 + 8\lambda |y|} \end{cases} \quad (13)$$

式中: h —积分步长; λ —决定跟踪速度快慢因子; h_0 —决定跟踪精度的因子; v_0 —给定输入信号; $Z_{1(k)}$ — v_0 的跟踪信号; $Z_{2(k)}$ — $Z_{1(k)}$ 的微分信号。

2 PMLSM 速度控制系统

在 $d-q$ 坐标系下, PMLSM 系统的动子运动子系统的非线性动态数学模型为^[15]:

$$\frac{dv}{dt} = \frac{3p_n \pi \psi_{PM} i_q}{2\tau M} + \frac{3p_n \pi (L_d - L_q)}{2\tau M} i_d i_q - \frac{F_L + B_v v}{M} \quad (14)$$

式中: i_d, i_q — d, q 轴的定子电流; L_d, L_q — d, q 轴的定子电感; M —动子质量; Ψ_{PM} —永磁体磁链; p_n —极对数; M —极距; F_L —外部扰动力; B_v —粘滞摩擦系数。

根据自抗扰控制的理论, PMLSM 动子运动子系统采用自抗扰控制设计,则该系统的总扰动可以表述为:

$$w = \frac{3p_n \pi (L_d - L_q)}{2\tau M} i_d i_q - \frac{F_L}{M} \quad (15)$$

根据式(14 ~ 15),可得:

$$\frac{dv}{dt} = \frac{3p_n \pi \psi_{PM} i_q}{2\tau M} + w + \frac{B_v v}{M} \quad (16)$$

动子运动子系统的总扰动由改进型扩张状态观测器预测出,并由扰动补偿装置给出扰动补偿,则该子系统的控制信号为:

$$i_q = i_{q0} - \frac{Z_3 2\tau M}{3p_n \pi \psi_{PM}} \quad (17)$$

为了实现直线电机的解耦,常采用磁场定向控制($i_d = 0$)的方式。根据式(14),设: $x_1 = v$; $x_2 = \frac{dv}{dt} = \dot{x}_1$; $f_0(v) = -B_v v/M$; $f_1(t) = -F_L/M$; $u = i_q$; $b = 3\pi p_n \psi_{PM}/2\tau$ 。动子速度方程的状态空间表达式为:

$$\begin{cases} y = x_1 = v \\ \dot{x}_1 = x_2 \\ x_2 = f_0(v) + f_1(t) + bu \end{cases} \quad (18)$$

式中: v_0 —动子速度的输入给定; v —动子速度反馈值; Z_1 — v_0 的跟踪信号; Z_2 — Z_1 的微分信号; Z_{11} — v 的跟踪信号; Z_{22} — Z_{11} 的跟踪信号; Z_3 —观测系统内部扰动和外部扰动的总扰动量。

基于改进型 ADRC 的速度子系统结构框图如图 2 所示。

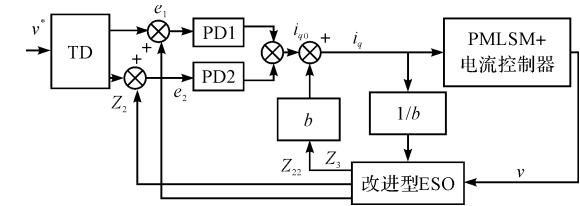


图 2 速度子系统结构框图

基于改进型 ADRC 的永磁同步直线电机调速系统结构框图如图 3 所示。

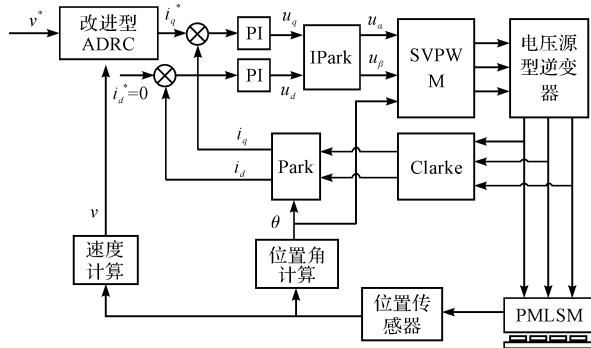


图 3 基于改进型 ADRC 的 PMLSM 控制系统框图

3 仿真分析

为了验证改进型 ADRC 控制策略的有效性,本文将改进型 ADRC 应用于平板型永磁同步直线电机调速控制系统,并在 Matlab/Simulink 环境下,与传统 ADRC 控制系统进行对比仿真。

改进型 ADRC 的参数取为: $\lambda = 100$, $h = h_0 = 0.02$, $\beta_1 = 60$, $\beta_2 = 1\,200$, $\beta_3 = 8\,000$, $\alpha_1 = 0.25$, $\alpha_2 = 0.125$, $\delta = 0.01$, $k_1 = 1\,000$, $k_2 = 10$ 。

传统 ADRC 的参数取为: $\lambda = 100$, $h = h_0 = 0.02$, $\beta_1 = 60$, $\beta_2 = 1\,200$, $\beta_3 = 8\,000$, $\alpha_1 = 0.25$, $\alpha_2 = 0.125$, $\delta = 0.01$, $\delta_{01} = 100$, $\delta_{02} = 50$, $\alpha_{01} = 0.75$, $\alpha_{02} =$

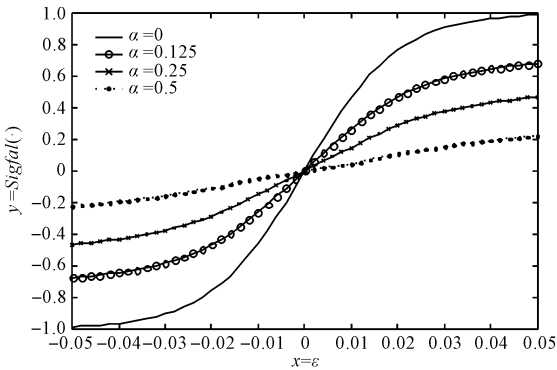
0.25 , $\delta_1 = 1$ 。
永磁同步直线电机样机主要参数如表 1 所示。

表 1 永磁同步直线电机参数表

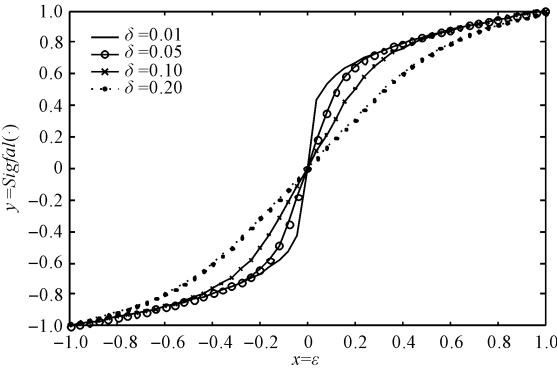
动子质量	定子电阻	d 轴电感	q 轴电感
M/kg	R/Ω	L_d/mH	L_q/mH
6.6	2.6	0.026 7	0.026 7
极距 τ/mm	永磁体磁链值 $\Psi_{PM}/(\text{V} \cdot \text{S})$	极对数 P_n	粘滞摩擦系数 $B_v/(\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1})$
18	0.24	2	0.2

3.1 sigfal 函数特性分析

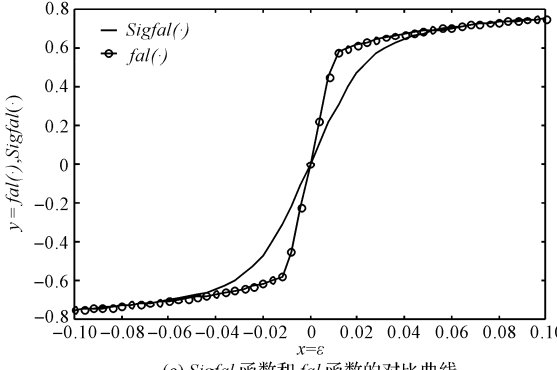
Sigfal 函数的特性曲线如图 4 所示。



(a) Sigfal 函数 α 取不同值的曲线



(b) Sigfal 函数 δ 取不同值的曲线



(c) Sigfal 函数和 fal 函数的对比曲线

图 4 sigfal 函数特性曲线

本文为验证 Sigfal 函数具有较好的性能,对 Sigfal 函数进行仿真分析, $\delta = 0.01$ 且 α 取不同值,和 $\alpha = 0.25$ 且取不同值时,Sigfal 函数的仿真曲线如图 4(a, b) 所示; Sigfal 函数和 fal 函数在 $\delta = 0.01$, $\alpha = 0.125$

时的仿真对比曲线如图4(c)所示。

由图4可知:*Sigfal*函数不仅具有小误差大增益、大误差小增益的特性,还克服了*fal*函数特性曲线不平滑的缺点。

3.2 系统空载启动及抗负载扰动性能分析

3.2.1 系统空载启动性能分析

系统在空载启动阶段的速度响应曲线如图5所示。

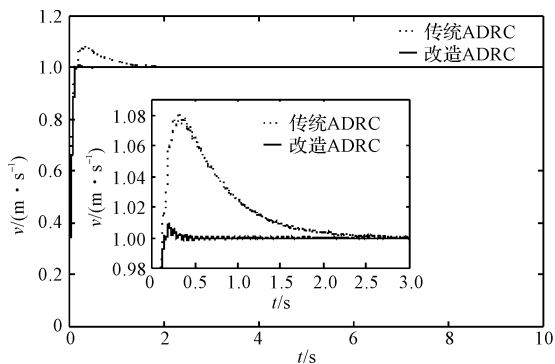


图5 系统空载启动时局部放大的速度响应曲线对比图

由图5可知:在改进型ADRC控制策略下,系统的超调量很小,几乎可以忽略不计。而在传统型ADRC控制策略下,系统的超调量约为8%,系统达到稳定的时间约为2.5 s。

由此可见,与传统型ADRC相比,改进型ADRC能够有效地减小系统的超调量,使系统具有更好的动态跟随性能。

3.2.2 系统抗扰性能分析

系统在4 s时,突加200 N负载,其速度响应曲线如图6所示。

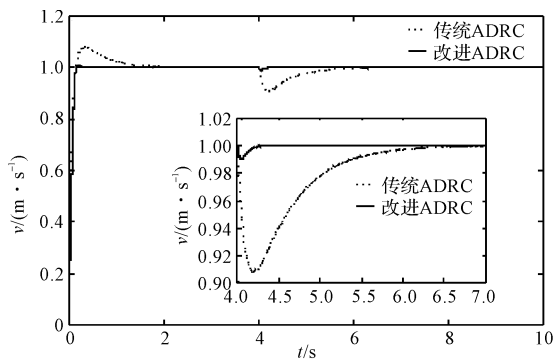


图6 系统突加负载时局部放大的速度响应曲线对比图

由图6可知:系统在两种控制策略下空载启动,且在4 s时突加200 N负载,系统均发生了一定程度速度波动,采用改进型ADRC的系统的超调量很小,约为1%,调节时间同样比较短,约为0.2 s;而采用传统型ADRC的系统在突加负载时的超调量达到了9.2%,并

且调节时间也较长,约为2.5 s。

因此,在应对负载带来的扰动时,改进型ADRC的抗扰能力更强,能够有效地抑制扰动量对系统的影响。

4 结束语

为了满足高精度数控机床用直线电机伺服系统对控制精度的要求,本研究提出了一种改进型ADRC控制策略,采用新型非线性*Sigfal*函数,克服了传统ADRC中非线性函数的不平滑性;采用比例微分器代替非线性反馈控制规律,解决了传统ADRC控制参数多、调节困难的问题;将改进型ADRC应用于数控机床用平板型永磁同步直线电机调速控制系统,并且在Matlab/Simulink环境下对系统进行了仿真对比分析。

仿真分析结果表明:在电机起步和突加200 N负载,和应对电感参数摄动时,与传统型ADRC相比,改进型ADRC能使永磁同步直线电机速度控制系统的超调量更小、响应速度更快、抗扰能力更强,可满足数控机床对高精度控制的要求。

参考文献 (References):

- [1] 房方,李荣丽,刘吉臻.基于多变量内模结构的循环流化床锅炉床温自抗扰控制[J].中国电机工程学报,2017,37(1):172-181.
- [2] 王亮,马立新,杨威.基于自抗扰控制的无刷直流电机换相转矩脉动抑制的研究[J].机电工程,2017,34(1):52-57.
- [3] 徐莉萍,蔡留金,李健,等.基于自抗扰控制的铣面机床电液位置伺服系统控制策略[J].计算机集成制造系统,2018,24(11):2770-2778.
- [4] 韩京清.从PID技术到“自抗扰控制”技术[J].控制工程,2002,9(3):13-18.
- [5] Han Jin-qing. From PID to active disturbance rejection control[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009,56(3):900-906.
- [6] 刘春强,骆光照,涂文聪,等.基于自抗扰控制的双环伺服系统[J].中国电机工程学报,2017,37(23):7032-7039,7095.
- [7] 刘希喆,吴捷.永磁直线同步电动机速度环自抗扰控制器的设计[J].电工技术学报,2004,19(4):6-11.
- [8] 雷春林,吴捷,陈渊睿,等.自抗扰控制在永磁直线电机控制中的应用[J].控制理论与应用,2005,22(3):423-428.
- [9] 施昕昕,黄家才,林健.基于自抗扰控制的新型直线电机轨迹跟踪研究[J].组合机床与自动化加工技术,2014(12):119-122,127.

[10] 韩京清. 自抗扰控制器及其应用[J]. 控制与决策,1998 (1):19-23.

[11] 胡 建,颜钢锋. 基于自抗扰控制算法的两轮自平衡车分析[J]. 机电工程,2014,31(2):159-164.

[12] 刘志刚,李世华. 基于永磁同步电机模型辨识与补偿的自抗扰控制器[J]. 中国电机工程学报,2008,28(24):118-123.

[13] 刘丙友,竺长安,郭兴众,等. 基于改进型 ADRC 的永磁同步电机转子位置角控制方法[J]. 电机与控制学报,2017,21(12):24-33.

[14] GAO Zhi-qiang. Scaling and bandwidth-parameterization based controller tuning[C]. Proceedings of the 2003 American Control Conference. 2003, Denver:IEEE,2003.

[15] 郭庆鼎,孙宜标,王丽梅. 现代永磁电动机交流伺服系统[M]. 北京:中国电力出版社,2006.

[编辑:程 浩]

本文引用格式:

郭 亮,邓乾坤,鲁文其,等. 高精度数控机床直线电机的改进型自抗扰控制研究[J]. 机电工程,2019,36(12):1303-1308.

GUO Liang, DENG Qian-kun, LU Wen-qi, et al. Improved ADRC control strategy of linear motor for high precision NC machine[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2019,36(12):1303-1308.

《机电工程》杂志;<http://www.meem.com.cn>

(上接第 1293 页)

参考文献(References):

[1] NYAMSUREN P, LEE S H, KIM S. A web-based revision control framework for 3D CAD model data[J]. **International Journal of Precision Engineering and Manufacturing**, 2013,14(10):1797-1803.

[2] 李 谨,王 斌,姚新改,等. 基于 Web 的液压支架四连杆优化设计[J]. 矿山机械,2014,42(2):9-12.

[3] 钱小刚. 基于 Silverlight 技术下的 CAD 图形研究与应用[J]. 电子技术与软件工程,2017(5):81-82.

[4] 洪云飞. 基于 Web 的煤矿机械 CAE 技术与系统设计[J]. 煤矿机械,2017,38(7):140-142.

[5] 高梓越,丛洪莲,蒋高明,等. 基于超文本标记语言 5 的横编计算机辅助设计系统[J]. 纺织学报,2017,38(10):132-137.

[6] 杨志龙,王学文,谢嘉成,等. 网络环境下刮板输送机减速器参数化动力学仿真系统分析[J]. 矿业研究与开发,2018,38(6):109-112.

[7] 刘兴升,师雅并. 使用 Pro/Web. Link 进行 Pro/E 二次开发[J]. 纺织机械,2005(6):37-40.

[8] 朱志斌,田雪冬. 等静压技术的应用与发展[J]. 现代技术陶瓷,2010,30(1):17-24.

[9] 冀文恒,王晓笋,王爱华,等. 基于 Pro/E 的行星齿轮机构参数化建模和自动装配研究[J]. 组合机床与自动化加工技术,2018(7):156-159.

[10] 单 泉,陈 砚,汪殿龙. Pro/ENGINEER Wildfire 4.0 中文版参数化设计从入门到精通[M]. 北京:机械工业出版社,2008.

[11] 马福康. 等静压技术[M]. 北京:冶金工业出版社,1992.

[12] 储久良. Web 前端开发技术—HTML、CSS、JavaScript[M]. 北京:清华大学出版社,2016.

[编辑:李 辉]