

直驱式永磁直线电机深度模糊滑模-自抗扰控制

谭草, 鲁应涛, 葛文庆, 李波, 陆佳瑜

(山东理工大学交通与车辆工程学院, 255000, 山东淄博)

摘要: 针对直驱系统中各种非线性干扰直接作用下的永磁直线电机控制性能恶化的问题, 提出一种深度模糊滑模-自抗扰控制方法。首先, 通过非线性扩张状态观测器估计系统不确定扰动, 在滑动面设计中引入跟踪误差的积分项, 结合饱和函数 $\text{sat}(s)$ 与位移误差的幂函数设计趋近律, 从而改进滑模-自抗扰控制方法; 其次, 为避免设计过程中的主观影响, 进一步提升直线电机在复杂工况下的适应能力, 基于深度神经网络训练模糊规则, 进而调节滑模控制的关键参数。采用所提方法在直驱泵性能测试平台进行了实验研究, 结果表明: 所提深度模糊滑模-自抗扰控制方法有效提高了直线电机控制精度、响应速度与鲁棒性, 直线电机的阶跃响应时间相对于传统滑模控制方法提升了 23.87%; 正弦目标跟踪的 ITAE 指标改善是传统滑模控制方法的 4.7%、是改进滑模-自抗扰控制方法的 13.2%; 在传感器白噪声干扰下, 正弦目标跟踪的最大跟踪误差相对于改进滑模-自抗扰控制方法改善了一个数量级。

关键词: 永磁直线电机; 直驱泵; 深度神经网络; 滑模控制; 自抗扰控制

中图分类号: TM301 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202301018 **文章编号:** 0253-987X(2023)01-0185-10

Depth Fuzzy Sliding-Mode Active Disturbance Rejection Control Method of Permanent Magnet Linear Motor for Direct Drive System

TAN Cao, LU Yingtao, GE Wenqing, LI Bo, LU Jiayu

(School of Transportation and Vehicle Engineering, Shandong University of Technology, Zibo, Shandong 255000, China)

Abstract: A depth fuzzy sliding-mode active disturbance rejection control (DFSMA-ADRC) method is proposed to solve the problem that the control performance of permanent magnet linear motors (PMLM) deteriorates under the direct action of various nonlinear disturbances. Firstly, the system uncertainty disturbance is estimated by a nonlinear extended state observer. The integration of tracking error is applied to the design of the sliding surface, and the saturation function $\text{sat}(s)$ and the power function of displacement error are introduced into the approach law, so that the improved sliding mode active disturbance rejection control (ISM-ADRC) method is proposed. Secondly, to avoid the subjective influence and further improve the adaptability of PMLM under complex conditions, fuzzy rules are trained by deep neural networks, and the key parameters of sliding mode control are adjusted. The experimental research has been carried out through the performance test platform of the direct drive pump. The results show that the proposed DFSMA-ADRC method effectively improves the control accuracy, response speed and robustness of the

收稿日期: 2022-06-01。 作者简介: 谭草(1991—), 男, 副教授; 葛文庆(通信作者), 男, 教授, 博士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51905319, 51875326); 山东省青年科技人才托举工程项目(SDAST2021qt20)。

网络出版时间: 2022-10-09

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20221001.2041.002.html>

controller. The proposed DFSM-ADRC method improves the step response time by 23.87%, compared with the conventional sliding mode control (SMC); improves the ITAE of sinusoidal target tracking by 4.7% and 13.2%, compared with the SMC method and the ISM-ADRC method respectively; and improves the maximum tracking error of sinusoidal target tracking under sensor white noise by one order of magnitude, compared with the ISM-ADRC method.

Keywords: permanent magnet linear motor; direct drive pump; deep neural network; sliding mode control; active disturbance rejection control

直驱式永磁直线电机具有功率密度高、驱动能力强等优点,由于没有运动转换机构,有效提高了直驱系统动力传递效率、控制灵活性与动态响应品质^[1-2]。由于直线电机与负载间缺少缓冲环节,非线性干扰的作用将影响其动、稳态性能。

永磁直线电机运动灵活可控,提高其控制精度和响应速度是直驱系统性能提升的关键。PID 控制、滑模控制、自抗扰控制和鲁棒控制等已在永磁直线电机运动控制中应用^[3]。滑模控制以其良好的鲁棒性等优点,在电液伺服系统、机电伺服系统中具有显著潜力。针对高增益补偿不确定性造成的抖振严重影响的问题,神经网络算法、模糊控制等被用于改进滑模控制^[4]。文献[5]提出了改进的滑模-自抗扰控制方法,在提高直线电机的控制精度同时减弱系统抖振。文献[6]设计了基于自适应动态 PID 滑模面的二阶滑模控制器。

针对各种非线性干扰直接作用下的永磁直线电机控制性能恶化的问题,文献[7]提出将分数阶滑模控制和状态观测器结合,改善抖振的同时提高系统鲁棒性。文献[8]针对系统的强非线性、外部扰动等问题,设计基于 RBF 神经网络自适应控制器。文献[9]提出了一种基于自适应控制的改进滑模观测器,实现了估计补偿。文献[10]提出了一种基于粒子群算法优化的最优双面滑模观测器来改善瞬态响应。近年来,众多学者运用不同算法的优势互补,获得了较好的控制效果,然而在实际工况下,被控系统面临高频测量噪声干扰、非线性摩擦等问题,高性能控制方法仍需进一步研究。

控制器参数往往较多且依靠经验整定,导致控制器性能不能充分体现。有关学者设计了基于模糊控制、神经网络和粒子群优化等算法,实现了控制器参数的自整定^[11-12]。文献[3]设计的基于遗传算法的 PID 参数优化方法可以保证在模型失配和负载扰动时仍能较好响应。文献[13]提出一种基于 PD 神经滑模的自适应跟踪控制方法,实现了控制方法在线自适应学习。文献[14]通过设计 RBF 网络的

自适应律来实现滑模控制参数的自适应调整。文献[15]设计了基于神经网络的自适应反步控制器,在保证控制器鲁棒性的同时提高跟踪性能。文献[16]设计出一个结构简单的基于滑模趋近律在线参数整定的 RBF 函数神经网络控制器。文献[17]提出了基于扩张状态观测器和反步法的自适应控制方法,并结合连续动作强化学习器进行控制器参数整定。智能学习算法继承了自然和人脑思维的非线性并通过自校正、自学习等方式进行调节,进一步保证系统的实时性和鲁棒性^[18]。然而,智能学习算法在控制方法中的潜力有待进一步被挖掘。

本文针对非线性干扰作用下的永磁直线电机响应性能恶化的问题,建立一种考虑动态摩擦特性的永磁直线电机非线性数学模型,设计了深度模糊滑模-自抗扰控制器,通过不同期望目标的响应对比结果分析所提控制器的性能,最后通过实验验证控制方法的有效性。

1 永磁直线电机原理与建模

本文以直驱泵中永磁直线电机为研究对象。直驱泵活塞由永磁直线电机直接驱动,直驱活塞(直线电机线圈骨架固连的液压泵活塞)在液压缸中往复运动,同时,在单向阀的配流作用下,对外输出流量,其工作原理如图 1 所示。其中,永磁直线电机主要由内磁轭、外磁轭、永磁阵列、线圈绕组及线圈骨架

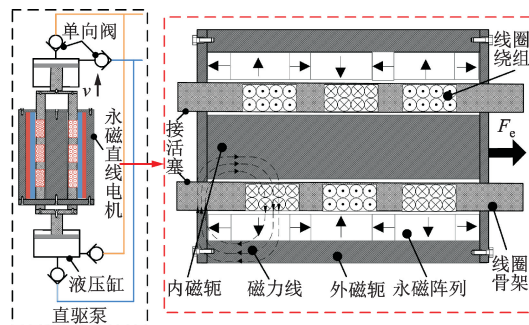


图 1 基于永磁直线电机的直驱泵工作原理图

Fig. 1 Schematic diagram of direct drive pump based on permanent magnet linear motor

组成,为一种高功率密度动圈式永磁直线电机,详细工作原理见文献[19]。电机采用 Halbach 永磁阵列提升气隙磁场强度,相邻线圈绕组反向排列,有效减小电枢反应的影响,具有功率密度高、响应迅速等优点。在直驱泵中,通过控制电机电线圈两端驱动电压即可实现直驱活塞的精确运动控制,从而实现输出流量的控制。

永磁直线电机由电路子系统、磁路子系统和机械子系统互相耦合,其状态空间方程为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 = v \\ \dot{x}_2 = \frac{K_m}{M}u - \frac{F_f + cv}{M} - \frac{F_d}{M} \\ y = x_1 \end{cases} \quad (1)$$

式中: x_1 为动子位移; x_2 为动子速度; M 为动子质量; u 为控制输入量; c 为阻尼系数; K_m 为电磁力系数; F_d 为不确定性的外部干扰包含直驱泵泵油时的液压负载等; F_f 为摩擦力; y 为位移。本文采用的 LuGre 动态摩擦力模型为

$$\begin{cases} F_f = \sigma_0 z + \sigma_1 \frac{dz}{dt} + \sigma_2 v \\ \frac{dz}{dt} = v - \frac{|v|}{g(v)} z \\ \sigma_0 g(v) = F_C + (F_S - F_C) e^{-(v/v_s)^2} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $\sigma_0, \sigma_1, \sigma_2$ 为模型参数; z 为内部摩擦状态; v 为相对速度; v_s 为 Stribeck 效应的经验系数; $\sigma_0 z + \sigma_1 (dz/dt)$ 为由接触表面间刚毛的形变引起的摩擦力; F_C 为库仑摩擦力; F_S 为静摩擦力。

2 改进滑模-自抗扰控制器设计

2.1 改进滑模-自抗扰控制器结构

传统自抗扰控制器包括跟踪微分器(TD)、扩张状态观测器(ESO)和误差反馈控制律^[20-21]。TD 根据实际安排输入目标的过渡过程,通过调整滤波参数过滤指令信号噪声提高控制性能;ESO 估计系统的“总和扰动”并动态反馈补偿。永磁直线电机采用双闭环的串级控制,其中电流环为 PI 控制,保证电流环稳态无静差、动态无超调。位置环为基于改进指数趋近律的改进滑模-自抗扰控制,图 2 所示为控制器结构示意图。改进滑模-自抗扰控制器中跟踪微分器的设计详见参考文献[5],本文不再赘述。

ESO 不仅能对被控系统的总和扰动进行观测补偿,还能通过输入输出信号估计和观测系统的位移与速度,进一步提高整个系统的响应性能。依据

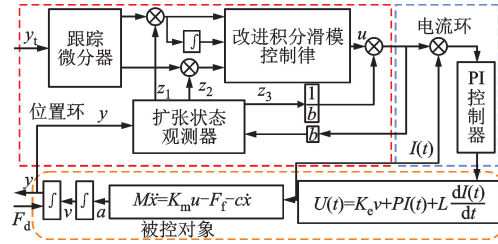


图2 改进滑模-自抗扰控制器结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of ISM-ADRC

式(1)的二阶系统,令

$$f(x, v) = -\frac{F_f + cv}{M} - \frac{F_d}{M} \quad (3)$$

式中: $f(x, v)$ 为系统内外扰动总和。则积分串联型系统为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = bu + x_3 \\ \dot{x}_3 = \omega(t) \\ y = x_1 \end{cases} \quad (4)$$

针对上述扩张的系统模型,设计 ESO 系统为

$$\begin{cases} e = z_1 - y \\ \dot{z}_1 = z_2 - \beta_{01} e \\ \dot{z}_2 = z_3 - \beta_{02} \text{fal}(e, 0.5, \delta_1) + b_0 u \\ \dot{z}_3 = -\beta_{03} \text{fal}(e, 0.25, \delta_2) \end{cases} \quad (5)$$

式中: z_1, z_2, z_3 和 $\dot{z}_1, \dot{z}_2, \dot{z}_3$ 分别为位置估计和其微分; $\text{fal}(e, \alpha, \delta)$ 可表示为

$$\text{fal}(e, \alpha, \delta) = \begin{cases} |e|^\alpha \text{sgn}(e), & |e| > \delta > 0 \\ \frac{e}{\delta^{1-\alpha}}, & |e| \leq \delta \end{cases} \quad (6)$$

在 $\text{fal}(\cdot)$ 函数中,一般取 $\alpha_1 = 0.5, \alpha_2 = 0.25$; 参数 b_0 依据永磁直线电机模型的已知信息得到。

2.2 改进滑模控制律设计

基于永磁直线电机的二阶模型,定义位置误差 $e_y = y_t - y$, 其中 y_t 为控制目标位移。在传统滑模面的基础上引入跟踪误差的积分项,改进的积分滑模通过寻找合适的初始位置保证其具有滑动项,避免常规滑模逼近相的缺点^[22]。对滑模面求导后得

$$\begin{aligned} \dot{s} &= k_1 \dot{e}_y + \ddot{e}_y + k_2 e_y = \\ &= k_1 \dot{e}_y + \ddot{y}_t - \frac{K_m}{M} u + \frac{F_f(\dot{y}) + c\dot{y}}{M} + k_2 e_y \end{aligned} \quad (7)$$

式中: k_1, k_2 为控制器的增益参数。考虑到直线电机的实际复杂工况,采用饱和函数 $\text{sat}(s)$ 来代替符号函数 $\text{sgn}(s)$ 以削弱抖振^[23]。将位置误差的幂函数引入到传统指数趋近律中,以保证趋近滑模面时

其指数项趋近零,此时系统趋近运动速度就取决于 $-\xi |e_y|^a \text{sat}(s)$ 。改进的指数趋近律如下

$$\dot{s} = -\xi |e_y|^a \text{sat}(s) - \eta s \quad (8)$$

$$\text{sat}(s) = \begin{cases} 1, & s > \Delta \\ \frac{s}{\Delta}, & |s| \leq \Delta \\ -1, & s < -\Delta \end{cases} \quad (9)$$

式中: Δ 为边界层厚度,且 $\Delta > 0$ 。将改进指数趋近律与一般指数趋近律在二阶系统中进行比较的结果如图 3 所示,从相轨迹图看出改进趋近律不仅削弱在滑模面的高频抖动,同时减少了响应时间。

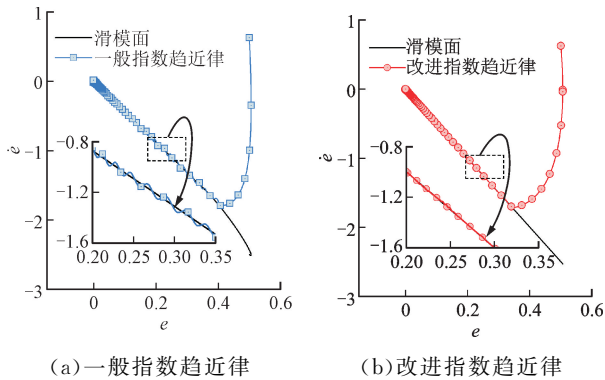


图 3 不同指数趋近律的相轨迹图

Fig. 3 Phase trajectory of different exponential reaching laws

联立式(7)与式(8),得到控制律为

$$u = \left[k_1 \dot{e}_y + \ddot{y}_t + \frac{F_t(\dot{y}) + \dot{c}_y}{M} + k_2 f(e_y) + \xi |e_y|^a \text{sat}(s) + \eta s \right] \frac{M}{K_m} \quad (10)$$

3 深度模糊滑模-自抗扰控制设计

3.1 深度模糊控制器设计

将深度神经网络与模糊控制结合调节滑模控制律中关键参数,基于深度神经网络训练模糊控制规则并将其作为样本用于模型训练、验证和预测,进而避免在模糊规则设计过程中存在人为主观性的影响^[24]。为进一步提升驱动单元在复杂工况下的适应能力与响应品质,深度模糊滑模-自抗扰控制(DFSM-ADRC)系统框架如图 4 所示。

控制律需要保证系统在不同工况下具有良好的响应品质与稳态精度,考虑到在实际工况中被控对象到达滑模面后不断地来回穿越滑模面,进而导致系统抖振、严重降低系统动态品质,因此选择切换项中 ξ 来制定模糊规则。首先保证 Lyapunov 函数稳

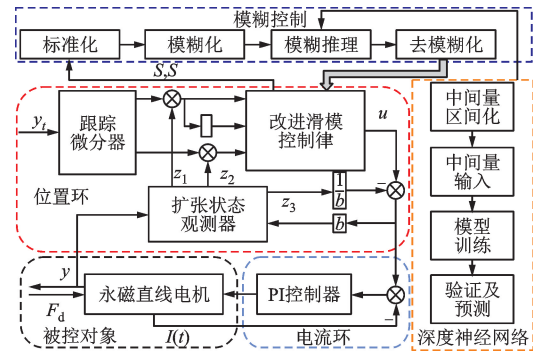


图 4 深度模糊滑模-自抗扰控制器结构示意图

Fig. 4 Schematic diagram of DFSM-ADRC

定,当接近滑模面即 $S=0$ 时,将 ξ 选取为较小的值以进一步削弱系统的抖振并保证系统在有限时间内到达滑模面;当状态变量随着距离滑模面减小, ξ 应逐渐减小直至适中以避免发生超调。在保证实现稳态误差最小化的同时,降低系统抖振,确保驱动单元在不同工况下的响应最优^[19]。因此,设计滑模面 s 和其导数 $\dot{s}$ 作为输入,实现控制律中切换项转化为连续的模糊输出,以实现永磁直线电机参数时变与不同工况下仍有较好的控制效果,保证在不牺牲系统鲁棒性的同时达到削弱抖振的目的。模糊趋近律设计为

$$\dot{s} = -\xi |e_y|^a \text{sat}(s) - \eta s = -\xi_0 \xi_i |e_y|^a \text{sat}(s) - \eta s \quad (11)$$

式中: ξ_0 为初步设定值; ξ_i 为模糊输出值。隶属度函数如图 5 所示。模糊规则如表 1 所示,其中 NB、NM、NS、ZO、PS、PM 和 PB 分别表示负大、负中、负小、零、正小、正中和正大; Z、LE、MS、ML 和 LA 分别表示零、较小、中小、中大和较大。

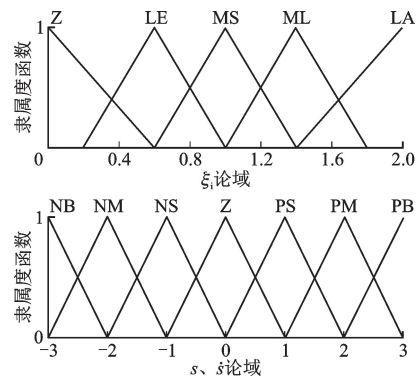


图 5 模糊控制隶属度函数

Fig. 5 The fuzzy control membership function

表 1 模糊控制规则表
Table 1 The fuzzy control rule list

$\dot{s}$	不同 s 下对应的 ξ_i						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	LA	ML	ML	MS	ML	ML	LA
NM	ML	ML	MS	Z	MS	ML	ML
NS	MS	MS	LE	Z	LE	MS	MS
ZO	LA	ML	LE	Z	LE	MS	LA
PS	MS	MS	LE	Z	LE	MS	MS
PM	ML	ML	MS	Z	MS	ML	ML
PB	LA	ML	ML	MS	ML	ML	LA

通过深度神经网络训练模糊控制规则,从而减少在模糊规则制定中人为主观性的影响。为充分利用深度神经网络学习与拟合能力以及模糊控制实现控制参数自调整的能力,通过深度模糊控制方法整定滑模控制律中关键参数。此外,选择 ITAE 准则最小化作为目标,减少实际调参时间的同时提高系统的自适应能力。选取绝对积分时间误差(integrated time absolute error, 用符号 J_{ITAE} 表示)作为评价准则,定义^[25]为

$$J_{ITAE} = \int_0^{\infty} t |e(t)| dt \quad (12)$$

设计深度神经网络的模型为两输入、一输出的神经网络,其模型如图 6 所示。通过增加规则层的方式,更加精确控制输出的变化,获得永磁直线电机在不同工况下良好的控制效果。规则层 1 根据输入变量确定中间变量所属区间,规则层 2 确定输出变量的具体值。

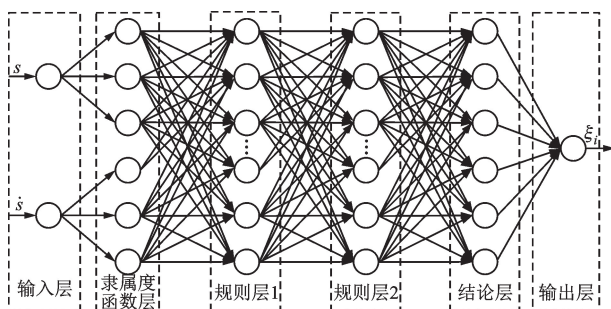


图 6 深度神经网络模型

Fig. 6 The deep neural network model

单个神经元感知器通过感知器的输入进行突触权值加权,再进行求和并进行偏置得到输入净值,最后通过激活函数运算得到最终的输出值,其表达式为

$$y_j = f\left(\sum_{i=1}^n W_{ij} X_i - \theta_j\right) \quad (13)$$

损失函数测量推理计算输出和目标之间的误差,反向传播使用链式规则反向传播误差信息,并计算网络中所有参数的梯度使损失最小化。更新所有参数调整权重,其权值修正如下式所示

$$\Delta W_i = -\zeta \frac{\partial E}{\partial W} \quad (14)$$

式中: E 为输出误差; W_i 为输入的权值。

制定好的输入、输出变量作为深度神经网络的输入量之前,对模糊子集进行区间化处理,保证实现数据的识别的同时减少模型训练时间,同时也能清晰地看出各个模糊子集的区间分布情况。与此同时,结合实际工况,对输入、输出变量的值域进行归一化处理的调整,使变量的值域落在 $[-1, 1]$ 以及 $[0, 1]$ 的区间内。对输入、输出变量作区间化和归一化处理,将各个区间进行编号后结果如图 7 所示。将对应的数据样本分成 3 个部分参与训练过程,70% 样本用于训练,15% 样本用于验证,15% 样本用于预测。基于 ITAE 准则评价跟踪结果,进行多次训练后确定最终模型。

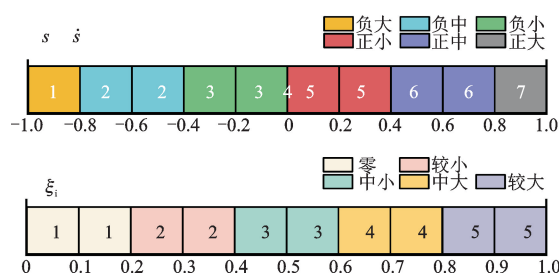


图 7 输入、输出变量区间化示意图

Fig. 7 The interval diagram of input and output variables

3.2 稳定性分析

深度模糊滑模-自抗扰控制器中,TD 的作用是安排过渡过程,系统的稳定性主要取决于改进滑模控制律和 ESO 的稳定性。本文基于 Lyapunov 稳定性定理进行分析,根据滑模控制器选取的滑模面,取 Lyapunov 函数为

$$V = 0.5s^2 \quad (15)$$

对上式进行求导,可得

$$\begin{aligned} \dot{V} = \dot{s}s &= s(\xi |e_y|^a \text{sat}(s) - \eta s) = \\ &= -\xi |e_y|^a \text{sat}(s)s - \eta s^2 \end{aligned} \quad (16)$$

当 $\eta > \xi > 0$ 、 $-\xi |e_y|^a \text{sat}(s)s \leq 0$ 且 $-\eta s^2 \leq 0$

时, $\dot{V} < 0$, 即可知所设计的滑模控制律是稳定的。将系统和扩张状态观测器的观测量的误差定义如下

$$\begin{cases} e_1 = z_1 - y \\ e_2 = z_2 - x_2 \\ e_3 = z_3 - x_3 \end{cases} \quad (17)$$

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = e_2 - \beta_{01} e_1 \\ \dot{e}_2 = e_3 - \beta_{02} \text{fal}(e_1, 0.5, \delta) \\ \dot{e}_3 = \omega - \beta_{03} \text{fal}(e_1, 0.25, \delta) \end{cases} \quad (18)$$

由式(18)可知, 在扰动 ω 为零时, 零点是其平衡点, 三阶 ESO 误差系统在零平衡点渐近稳定, 即将位置误差进一步表示为 $\dot{e} = -A(e)e$ 形式, 同时定义存在三阶方阵 D 如下

$$D = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} \end{bmatrix} \quad (19)$$

式中: d_{11}, d_{22}, d_{33} 均大于 0, 当增益系数 $\beta_{01}, \beta_{02}, \beta_{03}$ 均大于 0, 且满足 $\beta_{01}\beta_{02} > \beta_{03}$ 时, 可以使得矩阵 $DA(e)$ 正定对称, 则可以选取 Lyapunov 函数并展开得

$$\begin{aligned} V &= \int_0^t (DA(e)e, \dot{e}) d\tau = \\ &\int_0^t (DA(e)e, -A(e)\dot{e}) d\tau = \\ &\int_0^t - (A(e)e)' D (A(e)e) d\tau = \\ &\int_0^t - (\beta_{01} e_1 - e_2)^2 - \epsilon(\beta_{02} f - e_3)^2 - \epsilon(\beta_{03} f)^2 d\tau \end{aligned} \quad (20)$$

式(20)中只包含方阵 D 对角线常值元素, 与其他元素无关, Lyapunov 函数的导数小于 0, 即三阶 ESO 误差系统是关于 0 平衡点渐近稳定的。

4 实验结果与分析

4.1 实验平台

搭建了直驱泵性能测试平台如图 8 所示, 主要由基于永磁直线电机的直驱泵、低压蓄能器、电磁换向阀、作动筒、流量传感器、位移传感器、压力传感器等组成。上位机的控制信号通过以太网传送给电磁直驱静液作动系统控制器, 控制器控制功率驱动模块控制永磁直线电机驱动电压, 从而驱动直驱泵输出液压油, 液压油推动作动筒活塞杆运动。控制器采用快速控制原型系统 RTU-BOX, 核心芯片为 TMS320C28346。功率驱动模块的供电电源电压为 48 V, 控制器硬件的运算频率为 20 kHz。流量传感

器为 PUKU 公司的 SN51B, 压力传感器为 PCM320, 分别测试直驱泵输出的流量与压力; 永磁直线电机位移传感器量程为 11.5 mm、精度为 0.001 mm、带宽为 2 kHz; 作动筒位移传感器为 MIRAN 公司的 MTL3。永磁直线电机主要参数如表 2 所示。

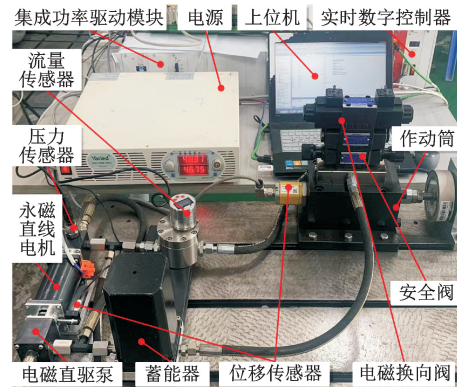


图 8 直驱泵性能测试平台

Fig. 8 The performance test platform of direct drive pump

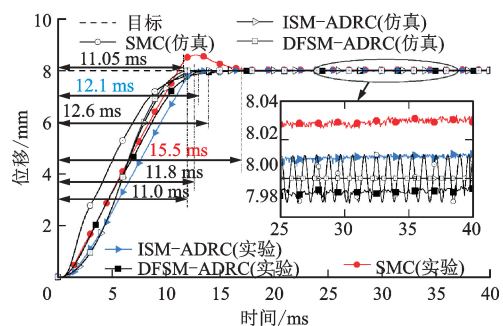
表 2 永磁直线电机主要参数

Table 2 Main parameters of PMLM

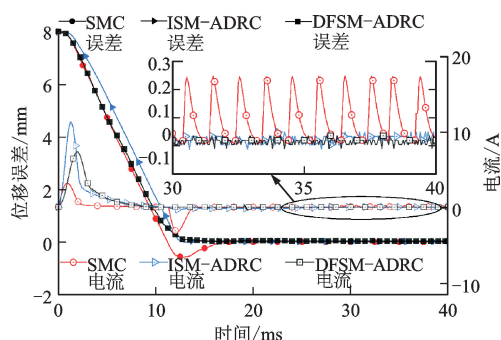
参数	数值
直线电机线圈电阻 R/Ω	1.41
直线电机线圈等效电感 L/mH	1.1
直线电机电磁力系数 $K_m/(\text{N} \cdot \text{A}^{-1})$	24.61
动子质量 M/kg	0.15

4.2 阶跃响应分析

永磁直线电机位移阶跃目标为 8 mm 时, 不同控制器下的阶跃响应结果如图 9 所示。将传统滑模控制器 (SMC)、改进的滑模-自抗扰控制器 (ISM-ADRC) 与提出的深度模糊滑模-自抗扰控制器 (DFSM-ADRC) 进行对比分析, 仿真结果表明, 3 种不同的控制算法在给定的信号下都能迅速响应且无超调, 其位移曲线与响应时间与实验结果接近, 验证了系统仿真模型的有效性。



(a) 8 mm 阶跃目标响应曲线



(b) 位移误差、电流测试结果

图9 不同算法下阶跃响应曲线

Fig. 9 Step response curves under different control methods

SMC 的仿真、实验响应时间分别为 12.6 ms 和 15.5 ms,位置稳态误差分别小于 ± 0.01 mm 和 0.03 mm。ISM-ADRC 的仿真和实验响应时间分别为 11.05 ms 和 12.1 ms,与 SMC 相比分别减少了 12.3% 和 21.9%,仿真稳态误差为 0 mm,实验稳态误差小于 0.01 mm。DFSM-ADRC 的仿真和实验在阶跃目标下位置稳态误差均为 0,响应时间分别为 11.0 ms 和 11.8 ms,与 SMC 响应时间相比分别减少了 12.70% 和 23.87%,与 ISM-ADRC 响应时间相比分别减少了 0.45% 和 2.48%。SMC 作用下永磁直线电机稳定后,电流与位移仍有一定抖振,这是由于传统滑模控制器中 $\text{sign}(s)$ 不连续的切换,降低了永磁直线电机的稳态精度和控制品质。ISM-ADRC 与 DFSM-ADRC 在稳定后改善了抖振现象,验证了改进滑模-自抗扰控制器的有效性;同时由于采用深度神经网络与模糊控制结合调节控制器关键参数,DFSM-ADRC 对阶跃目标位移响应速度、控制精度以及稳定性等优于传统滑模控制和改进滑模-自抗扰控制。

4.3 跟踪性能分析

永磁直线电机驱动直驱泵活塞进行往复运动以实现直驱泵对液压油的泵吸,因此对目标轨迹进行有效跟踪对液压油的精确稳定输出具有重要意义。设置永磁直线电机运动的目标轨迹为 $y_d = 5\sin(20\pi t)$,不同控制器下测试结果如图 10 所示。由图 10 可见,DFSM-ADRC 通过深度模糊滑模控制律的自适应以及 ESO 对干扰的观测补偿实现了鲁棒性的提高。与 ISM-ADRC 和 SMC 相比,DFSM-ADRC 可以较好地重复性目标进行跟踪。在第 2 个峰值处,DFSM-ADRC 相位滞后和幅值衰减分别为 1.19° 和 0.13%,ISM-ADRC 与 SMC 相位滞后角度分别为 3.36° 和 3.45°,幅值衰减分别为 0.29% 和 0.50%。

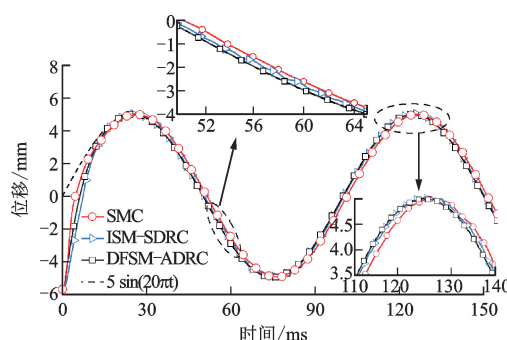


图10 不同算法下正弦轨迹跟踪曲线

Fig. 10 Sinusoidal trajectory tracking curves under different control methods

根据 ITAE 准则以及位移跟随的均方根误差来评价整个跟随过程中不同控制器性能评价结果,如图 11 所示。其中,DFSM-ADRC 在 ITAE 准则以及均方根误差准则下的计算结果均小于其他两种控制算法,分别为 0.002 9 和 0.001 45;正弦目标跟踪的 ITAE 指标改善为滑模控制的 4.7%、ISM-ADRC 的 13.2%。实验结果表明,在本文所提 DFSM-ADRC 作用下,系统的响应品质和跟踪性能都优于 SMC 和 ISM-ADRC,也验证了本文所提方法的有效性与性能优势。

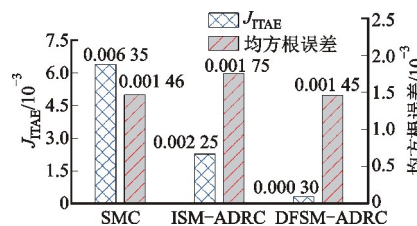
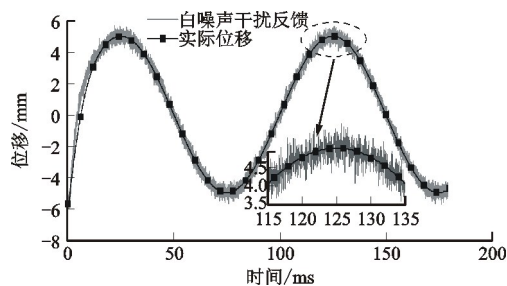


图11 不同控制方法下的响应评价

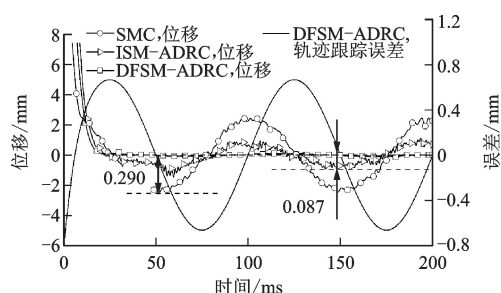
Fig. 11 Response evaluation under different control methods

考虑到在复杂工况下,永磁直线电机受持续性、非线性扰动以及传感器采集信号噪声的干扰,本文对所提出的 DFSM-ADRC 对抗传感器采集信号的噪声和外部不确定扰动的性能进行了验证,图 12 为施加一定功率的随机白噪声干扰下的正弦轨迹跟踪测试结果。由图 12 可见:DFSM-ADRC 在强噪声干扰条件下仍可以较好实现目标位移的跟随,表现出较强的鲁棒性;在整个重复性目标跟踪过程中,DFSM-ADRC 的跟踪误差明显小于 SMC 和 ISM-ADRC 下的跟踪误差,其中稳定后最大跟踪误差仅为 0.008 mm,而 ISM-ADRC 最大跟踪误差为 0.087 mm,SMC 的最大跟踪误差为 0.29 mm。DFSM-ADRC 不仅能提高系统的响应性能,且能够在噪声干扰下跟踪连续位置指令,证明了深度模糊对滑模控制律

切换项参数的自适应以及扩展状态观测器对白噪声扰动补偿的有效性,在持续性白噪声干扰下仍能实现重复性目标的精确跟踪,其最大跟踪误差比 ISM-ADRC 改善了一个数量级。



(a) 位移反馈信号干扰



(b) 位移测试结果

图 12 反馈信号干扰下不同控制器效果

Fig. 12 Different controller effects under feedback signal interference

永磁直线电机在不同控制器下的闭环幅频特性如图 13 所示。由图 13 可见:DFSM-ADRC 在闭环响应中具有较大的带宽,控制系统的闭环带宽达到 117 Hz,此时的相位滞后约为 -42° ;ISM-ADRC 与 SMC 的带宽分别仅为 103 Hz 和 79 Hz,证明 DFSM-ADRC 有效改善了永磁直线电机闭环系统的伺服性能,有效地提升了直驱泵性能。

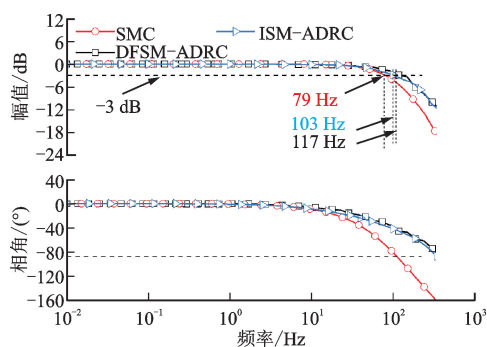


图 13 闭环系统的频率响应图

Fig. 13 Frequency response diagram of closed loop system

4.4 直驱泵性能分析

设置永磁直线电机工作频率为 5、10、15、20、25、30 和 35 Hz,目标位移为幅值 7 mm 的正弦曲

线,仿真模型的搭建详见参考文献[26]。不同工作频率下基于永磁直线电机的直驱泵流量特性结果如图 14 所示。

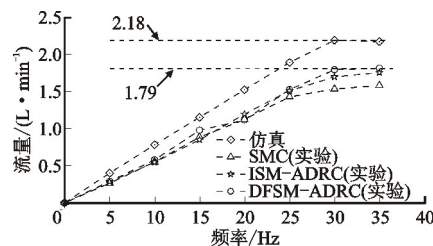


图 14 不同直线电机工作频率下直驱泵流量特性

Fig. 14 The flow characteristics of direct drive pump at different actuator operating frequencies

由图 14 可见:在 0~30 Hz 频率区间内,仿真与实验测得的平均流量与驱动单元作动频率近似成正比关系;实验结果总是小于仿真结果,随着频率的增加实验结果与仿真结果的误差也会随之增加;当频率高于 30 Hz 时,平均流量开始下降,这是由于被动单向阀响应滞后加剧直驱泵在高工作频率下的回流,从而导致输出流量下降;DFSM-ADRC 作用下测试流量较高且更加接近理论值,此规律工作频率越高时越加明显,原因在于提出的 ISM-ADRC 有效提高了控制精度与响应速度,而在此基础上提出的 DFSM-ADRC 进一步提升了控制器对变化负载干扰的鲁棒性,使得活塞的运动轨迹更加接近目标曲线,从而电磁直驱静液作动系统流量特性更加接近理论值。实验结果表明,本文提出的 DFSM-ADRC 方法有效提高了直线电机的响应性能,进而有效改善了直驱泵的流量特性。

5 结 论

为提高永磁直线电机在非线性干扰下的响应性能,本文设计了深度模糊滑模-自抗扰控制器,主要工作及结论如下。

(1)提出了一种直驱永磁直线电机深度模糊滑模-自抗扰控制方法,引入跟踪误差的积分项到滑动面设计中,并在趋近律中引入饱和函数 $\text{sat}(s)$ 与位移误差的幂函数,同时将深度神经网络与模糊思想结合调节滑模控制的关键参数。结果证明了提出的控制方法有效提高了永磁直线电机控制精度、响应速度与鲁棒性。

(2)不同控制器的对比分析结果表明,对于本文提出的深度模糊滑模-自抗扰控制下的永磁直线电机,正弦目标跟踪的 ITAE 指标改善为滑模控制的

4.7%、改进滑模-自抗扰控制的13.2%,传感器白噪声干扰下正弦目标跟踪的最大跟踪误差相对于改进滑模-自抗扰控制改善了一个数量级,从而有效改善了直驱泵的流量特性。

参考文献:

- [1] 权力,赵万华. 铣削过程多源扰动影响下直线电机推力电流频谱特性分析[J]. 西安交通大学学报, 2021, 55(4): 8-19.
QUAN Li, ZHAO Wanhua. Linear motor thrust current spectrum characteristics under influence of multi-source disturbance in milling process [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2021, 55(4): 8-19.
- [2] 李波,黎德祥,葛文庆,等. 基于直驱阀的快速响应线控制动系统液压力精确控制[J]. 中国公路学报, 2021, 34(9): 121-132.
LI Bo, LI Dexiang, GE Wenqing, et al. Precision control of hydraulic pressure in fast-response brake-by-wire system based on direct-drive valve [J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34(9): 121-132.
- [3] JIAO Zongxia, CAO Yuan, YAN Liang, et al. Advancing motivation feedforward control of permanent magnetic linear oscillating synchronous motor for high tracking precision [J]. Actuators, 2021, 10(6): 128.
- [4] GAO Bingwei, SHAO Junpeng, YANG Xiaodong. A compound control strategy combining velocity compensation with ADRC of electro-hydraulic position servo control system [J]. ISA Transactions, 2014, 53(6): 1910-1918.
- [5] LU Yingtao, TAN Cao, GE Wenqing, et al. Improved sliding mode-active disturbance rejection control of electromagnetic linear actuator for direct-drive system [J]. Actuators, 2021, 10(7): 138.
- [6] AYDIN M N, COBAN R. PID sliding surface-based adaptive dynamic second-order fault-tolerant sliding mode control design and experimental application to an electromechanical system [J]. International Journal of Control, 2022, 95(7): 1767-1776.
- [7] CHENG Cheng, LIU Songyong, WU Hongzhuang. Sliding mode observer-based fractional-order proportional-integral-derivative sliding mode control for electro-hydraulic servo systems [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers: Part C Journal of Mechanical Engineering Science, 2020, 234(10): 1887-1898.
- [8] 蓝益鹏,姚婉婷,杨文康,等. 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[J]. 机械工程学报, 2021, 57(17): 236-242.
LAN Yipeng, YAO Wanting, YANG Wenkang, et al. Direct adaptive control of neural network of magnetic levitation system of CNC machine tool linear synchronous motor [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(17): 236-242.
- [9] LU Wenqi, TANG Bo, JI Kehui, et al. A new load adaptive identification method based on an improved sliding mode observer for PMSM position servo system [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(3): 3211-3223.
- [10] MANSOURI S A, AHMARINEJAD A, JAVADI M S, et al. Improved double-surface sliding mode observer for flux and speed estimation of induction motors [J]. IET Electric Power Applications, 2020, 14(6): 1002-1010.
- [11] WANG Chengwen, QUAN Long, ZHANG Shijie, et al. Reduced-order model based active disturbance rejection control of hydraulic servo system with singular value perturbation theory [J]. ISA Transactions, 2017, 67: 455-465.
- [12] TANG Peng, DAI Yuehong, CHEN Junfeng. Nonlinear robust control on yaw motion of a variable-speed unmanned aerial helicopter under multi-source disturbances [J]. Aerospace, 2022, 9(1): 42.
- [13] 张铭钧,褚振忠. 自主式水下机器人自适应区域跟踪控制[J]. 机械工程学报, 2014, 50(19): 50-57.
ZHANG Mingjun, CHU Zhenzhong. Adaptive region tracking control for autonomous underwater vehicle [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(19): 50-57.
- [14] 赵健,邓志辉,朱冰,等. 基于RBF网络滑模的电动助力制动系统液压力控制[J]. 机械工程学报, 2020, 56(24): 106-114.
ZHAO Jian, DENG Zhihui, ZHU Bing, et al. Sliding mode control based on RBF network for hydraulic pressure in electric power-assisted brake system [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(24): 106-114.
- [15] 闫桂山,金振林. 容积伺服电液作动器位置控制研究[J]. 西安交通大学学报, 2021, 55(1): 94-100.
YAN Guishan, JIN Zhenlin. Position control of the volume servo electro-hydrostatic actuators [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2021, 55(1): 94-100.
- [16] LI Junfeng, TIAN Huifang. Position control of SMA actuator based on inverse empirical model and SMC-RBF compensation [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2018, 108: 203-215.
- [17] 王素珍,辛诚,孙国法. 连续搅拌反应釜的自适应输出反馈控制及参数整定[J]. 控制理论与应用, 2021, 38(10): 1587-1596.
WANG Suzhen, XIN Cheng, SUN Guofa. Adaptive

- output feedback control and parameter tuning for continuous stirred tank reactor [J]. *Control Theory & Applications*, 2021, 38(10): 1587-1596.
- [18] WANG Yunfei, ZHAO Jiyun, DING Haigang, et al. Output feedback control of electro-hydraulic asymmetric cylinder system with disturbances rejection [J]. *Journal of the Franklin Institute*, 2021, 358(3): 1839-1859.
- [19] LU Yingtao, LU Jiayu, TAN Cao, et al. Adaptive non-singular terminal sliding mode control method for electromagnetic linear actuator [J]. *Micromachines*, 2022, 13(8): 1294.
- [20] 王立新, 赵丁选, 刘福才, 等. 基于死区补偿的电液位置伺服系统自抗扰控制 [J]. *中国机械工程*, 2021, 32(12): 1432-1442.
- WANG Lixin, ZHAO Dingxuan, LIU Fucui, et al. ADRC for electro-hydraulic position servo systems based on dead-zone compensation [J]. *China Mechanical Engineering*, 2021, 32(12): 1432-1442.
- [21] 南凯刚, 杨帆, 汪可, 等. 有载分接开关驱动轴转动位置的闭环反馈抗扰控制策略 [J]. *西安交通大学学报*, 2022, 56(6): 58-66.
- NAN Kaigang, YANG Fan, WANG Ke, et al. Closed loop feedback disturbance rejection control strategy for drive shaft rotational position of on-load tap-changer [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2022, 56(6): 58-66.
- [22] 刘凌, 马一山. 面向最大风能捕获的双馈电机新型非线性积分滑模控制 [J]. *西安交通大学学报*, 2020, 54(5): 95-101.
- LIU Ling, MA Yishan. A novel nonlinear integral sliding mode control for maximum wind energy capture of doubly fed induction generators [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2020, 54(5): 95-101.
- [23] SAMI I, ULLAH S, ULLAH N, et al. Sensorless fractional order composite sliding mode control design for wind generation system [J]. *ISA Transactions*, 2021, 111: 275-289.
- [24] KUUTTI S, BOWDEN R, JIN Yaochu, et al. A survey of deep learning applications to autonomous vehicle control [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2021, 22(2): 712-733.
- [25] OUSSAMA M, ABDELGHANI C, LAKHDAR C. Efficiency and robustness of type-2 fractional fuzzy PID design using salps swarm algorithm for a wind turbine control under uncertainty [J]. *ISA Transactions*, 2022, 125: 72-84.
- [26] 谭草, 李波, 于鹏, 等. 电磁直驱静液作动器多学科建模与优化 [J]. *北京理工大学学报*, 2022, 42(10): 1080-1088.
- TAN Cao, LI Bo, YU Peng, et al. Multidisciplinary modeling and optimization of direct-driving electro-hydrostatic actuator [J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2022, 42(10): 1080-1088.

(编辑 刘杨 荆树蓉)