

基于改进 f_{aln} 函数的永磁同步电机自抗扰控制*

孙天齐 李波 韦青坤 宋亚东 谭草
(山东理工大学交通与车辆工程学院, 山东淄博 255049)

摘要: 针对干扰对永磁同步电机控制系统的影响, 提出了一种基于改进 f_{aln} 函数的永磁同步电机自抗扰控制方法。设计了永磁同步电机自抗扰控制器, 通过分析 f_{al} 函数对自抗扰控制器的影响, 提出了一种限幅的改进 f_{aln} 函数, 进而设计了扩张状态观测器, 证明了改进后的观测器的收敛性。通过对比试验证明了基于改进 f_{aln} 函数的永磁同步电机自抗扰控制方法相对于传统自抗扰控制具有更好的抗干扰性能。

关键词: 永磁同步电机; 自抗扰控制器; 扩张状态观测器; f_{al} 函数

中图分类号: TM341 **文献标识码:** A

DOI: 10.19287/j.mtmt.1005-2402.2024.09.017

Active disturbance rejection control of permanent magnet synchronous motor based on improved f_{aln} function

SUN Tianqi, LI Bo, WEI Qingkun, SONG Yadong, TAN Cao

(School of Transmission and Vehicle Engineer, Shandong University of Technology, Zibo 255049, CHN)

Abstract: In view of the influence of interference on permanent magnet synchronous motor control system, an improved f_{aln} function based active disturbance rejection control for permanent magnet synchronous motor was proposed. An active disturbance rejection controller of permanent magnet synchronous motor is designed. By analyzing the influence of f_{al} function on the active disturbance rejection controller, an improved f_{aln} function with limiting amplitude is proposed, and then an extended state observer is designed. The experiment results show that the improved f_{aln} function based on permanent magnet synchronous motor auto-rejection control method has better anti-interference performance than the traditional auto-rejection control.

Keywords: permanent magnet synchronous motor; active disturbance rejection controller; extended state observer; f_{al} function

永磁同步电机 (PMSM) 的优点非常明显, 其拥有的体积小、功率密度高以及可靠性强等突出优点被广泛应用于汽车行业^[1]。电机的控制技术是永磁同步电机高性能运转的核心, 实现好的控制技术不仅与电机本身的结构和参数有关, 更与好的控制算法紧密相联^[2]。

为了满足现代化工业对控制精度的要求, 国内外研究学者提出了很多的控制算法并将其应用于电机的控制系统中, 取得了一定的进展。目前针对永磁同步电机的控制算法有 PID 控制^[3]、自适应控制^[4]、滑模控制^[5] 和智能控制^[6] 等。永磁同步电机

作为一个非线性、不稳定的系统, 传统的 PID 控制器针对其还是具有难以解决的问题, 针对不足, 韩京清教授首先提出了自抗扰 (ADRC) 控制器^[7]。

王斯墨等^[8] 将自抗扰技术和负载转矩观测器合并应用于永磁同步电机转速环, 设计了改进的二阶自抗扰控制器, 有效提高了调速系统的动静态特征。刘鉴等^[9] 设计了降维转矩观测器与自抗扰技术结合形成基于转矩前馈的自抗扰控制策略, 改善了系统动态响应速度。张兴华等^[10] 将永磁同步电机 $i_a=0$ 的矢量控制系统与自适应反步控制方法组合, 设计了一种高性能的电机控制方案, 当电机参数改变时,

* 国家自然科学基金资助项目 (52305265, 52375105); 山东省自然科学基金资助项目 (ZR2023ME178); 山东省优秀青年人才基金资助项目 (ZR2022YQ51); 山东省的重大科技创新工程资助项目 (2021CXGC010703)

系统具有良好的鲁棒性。李德同等^[11]提出了一种变论域双模糊自抗扰控制方法，对于系统内外部不确定性扰动具有良好的鲁棒性。上述方法都是将传统自抗扰技术运用到电机控制中，本文将进一步对自抗扰控制技术在机理进行分析研究，提出一种限幅的改进 f_{aln} 函数用在自抗扰控制器中。

本文针对永磁同步电机工作中存在外部不确定性干扰的问题，将传统的非线性函数进行改进，证明改进 f_{aln} 函数的扩张状态观测器的收敛性，通过实验证明永磁同步电机使用本文设计控制器的抗扰性好。

1 永磁同步电机自抗扰控制器设计

1.1 永磁同步电机数学模型

永磁同步电机凭借着其结构简单、响应快和精度高的优点被广泛使用，根据其结构不同分为表贴式和内嵌式，本文选择表贴式电动机作为研究对象，在不考虑永磁体的阻尼作用和磁滞损耗前提下，PMSM 在 dq 旋转坐标系的数学模型可以表示为

$$U_d = R_s i_d + L_s \frac{d}{dt} i_d - \omega_e L_s i_q \quad (1)$$

$$U_q = R_s i_q + L_s \frac{d}{dt} i_q + \omega_e (L_s i_d + \psi_f) \quad (2)$$

$$T_e = 1.5 p \psi_f i_q \quad (3)$$

$$T_e - T_l = \eta \frac{d}{dt} \omega_m + B \omega_m \quad (4)$$

式中： U_d 、 U_q 、 i_d 、 i_q 分别是 d 轴和 q 轴上的定子电压和定子电流； L_s 、 ψ_f 和 R_s 分别是定子电感、转子磁链和定子电阻； p 、 T_l 、 ω_m 、 η 、 ω_e 、 T_e 和 B 分别是极对数、负载转矩、机械速度、机器惯性、电角速度、电磁转矩和黏性摩擦因数。

1.2 自抗扰控制器设计

自抗扰控制器 (ADRC) 由非线性微分跟踪器 (tracking differentiator, TD)、扩张观测器 (extended state observer, ESO)、非线性误差反馈控制律 (nonlinear law state error feedback, NLSEF) 3 部分组成，其结构如图 1 所示。

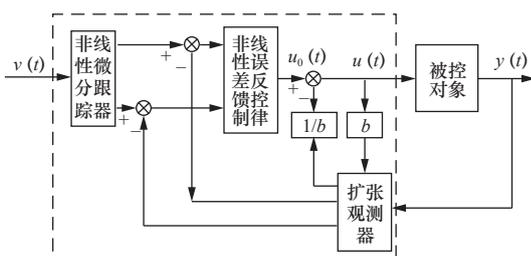


图 1 自抗扰控制器结构图

TD 作用是给定信号设置过渡过程并提取信号的微分值；ESO 作为自抗扰技术中关键核心，可以观测出状态变量和对系统扰动进行估计并加以补偿；NLSEF 将 TD 和 ESO 输出进行非线性组合，结合扰动补偿一起构成系统的控制量。本文设计一种简化的一阶自抗扰控制器，一阶 ADRC 系统具体可表示为

TD:

$$\begin{cases} e_0 = v^* - v_1 \\ v_1 = -r_0 f_{al}(e_0, \alpha_0, \delta_0) \end{cases} \quad (5)$$

ESO:

$$\begin{cases} e = z_1 - y \\ \dot{z}_1 = z_2 - \beta_1 f_{al}(e_1, \alpha_1, \delta_1) + b_0 u(t) \\ \dot{z}_2 = -\beta_2 f_{al}(e_1, \alpha_1, \delta_1) \end{cases} \quad (6)$$

NLSEF:

$$\begin{cases} e_1 = v_1 - z_1 \\ u_0(t) = k f_{al}(e_2, \alpha_2, \delta_2) \\ u = u_0(t) - \frac{z_2}{b_0} \end{cases} \quad (7)$$

式中： e_0 、 e 、 e_1 为误差信号； v^* 为 TD 模块的输入信号； v_1 为 v 跟踪信号； r_0 为速度因子； y 为被控对象的输出信号； z_1 为 y 的跟踪信号； z_2 为扰动观测值； α 为跟踪因子； δ 为滤波因子； β_1 、 β_2 为 ESO 输出误差的矫正增益； b_0 为补偿因子； k 为调节器增益； f_{al} 为最优控制函数。

f_{al} 表达式为

$$f_{al}(e, \alpha, \delta) = \begin{cases} |e|^\alpha \sin e, & |e| > \delta \\ \frac{e}{\delta^{1-\alpha}}, & |e| < \delta \end{cases} \quad (8)$$

在现代电机自抗扰控制领域，选择合适的函数形式以提高电机性能一直是一个重要的研究课题，本文将 f_{al} 函数应用于永磁同步电机的控制中^[12]。这种函数的特点：当误差较小的时候，它可以避免扩张状态观测器产生高频振荡，提高系统的控制精度，从而保证系统的稳定性。

2 f_{al} 函数改进及分析

2.1 f_{al} 函数改进

永磁同步电机在工作过程中是一个不稳定、非线性的系统，在稳态行驶时误差基本小于 1，当行驶在特殊工况时会产生较大的扰动，进而使误差变大，导致系统不稳定。因此本文提出将限幅的改进 f_{aln} 函数应用于永磁同步电机的自抗扰控制器中，改进 f_{aln} 函数表达式见式 (9)。

$$f_{aln}(e, \alpha, \delta) = \begin{cases} |e|^\alpha \sin e, & \delta < |e| < 1 \\ \frac{e}{\delta^{1-\alpha}}, & |e| \leq \delta \\ 1, & |e| \geq 1 \end{cases} \quad (9)$$

图2所示为 δ 取0.01, α 分别取0.01、0.15、0.3时 f_{al} 和 f_{aln} 函数图像。

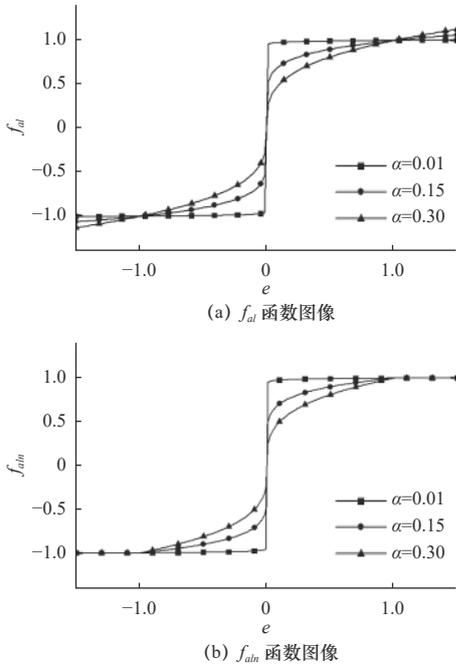


图2 不同函数图像

由图2可得,当误差大于1时,改进 f_{aln} 函数的值被限制在1,明显比 f_{al} 函数值小,降低了大误差产生的增益量。

2.2 f_{aln} 函数稳定性分析

分析 f_{aln} 函数的稳定性,首先要知道扩张观测器的误差方程 \dot{e} ,其表达式为

$$\dot{e} = -A(e_1)e \quad (10)$$

式中: e 为观测器对状态量的观测误差; e_1 为对状态量 x_1 的观测误差信号。

要证明使用 f_{aln} 函数的观测器可以完成搭建的永磁同步电机系统的状态观测,引用文献[13]中提出的系统稳定性理论来证明,其引理具体为

引理1 如果存在主对角元素为正数的斜对称矩阵 D

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

使 $DA(e)$ 对称正定,则系统是Lyapunov渐近稳定的。首先设定了一些参数,例 $d_{11}=d_{22}=d_{33}=\epsilon>0$,来满足主对角线元素为正数的要求。通过一系列计

算,得到矩阵 $DA(e)$ 的表达式,即

$$DA(e) = \begin{bmatrix} D_{11} & -d_{11} & -d_{12} \\ D_{21} & d_{12} & -d_{22} \\ D_{31} & d_{31} & d_{23} \end{bmatrix} \quad (12)$$

其中,

$$D_{11} = d_{11}\beta_{01} + d_{12}\beta_{02}F + d_{13}\beta_{03}F \quad (13)$$

$$D_{21} = -d_{12}\beta_{01} + d_{22}\beta_{02}F + d_{23}\beta_{03}F \quad (14)$$

$$D_{31} = -d_{13}\beta_{01} - d_{23}\beta_{02}F + d_{33}\beta_{03}F \quad (15)$$

$$F = \frac{f_{aln}(e, \alpha, \delta)}{e} \quad (16)$$

若 $DA(e)$ 为对称正定矩阵,需要满足以下条件:

$$D_{11} = \beta_{01} + \epsilon\beta_{02}F + \epsilon\beta_{03}F > 0 \quad (17)$$

$$\frac{\beta_{01}\beta_{02}B + \beta_{02}^3F}{B^2} > 1 \quad (18)$$

$$D_{11}(d_{12}d_{23} - \epsilon^2) - 2d_{12}\epsilon - d_{12}^2 - d_{23} > 0 \quad (19)$$

其中,

$$B = (\beta_{01}\beta_{02} - \beta_{03}) \quad (20)$$

若要使上述的不定式成立,需要证明 D 矩阵存在,在引用引理1时便要考虑矩阵的存在性,而式(17)存在的必要条件为

$$\lim_{\epsilon \rightarrow 0^+} D_{11} = \beta_{01} + \frac{\beta_{02}^2F}{B} > 0 \quad (21)$$

若式(18)成立,需满足 $B>0$ 或者是 $\beta_{01} + \frac{\beta_{02}^2F}{B} < 0$,但由于矩阵 $DA(e)$ 为对称正定矩阵,与条件 $\beta_{01} + \frac{\beta_{02}^2F}{B} < 0$ 相互矛盾,因此只需满足 $B>0$ 这一条件即可。

式(18)和式(19)可以根据矩阵的对称性要求可整理为

$$\frac{\beta_{01}\beta_{02}B + \beta_{02}^3F}{B^2} = 1 + \frac{\beta_{02}^2F + \beta_{03}B}{B^2} > 1 \quad (22)$$

$$\beta_{01}\beta_{02} - B > 0 \quad (23)$$

式中: β_{01} 、 β_{02} 、 β_{03} 为非线性函数的系数。

因为 $B = (\beta_{01}\beta_{02} - \beta_{03}) > 0$,所以以上公式成立。系统状态改变不会影响系统的稳定性,这可以证明使用 f_{aln} 函数的扩张状态观测器搭建的永磁同步电机系统是稳定的。

3 结果分析

3.1 试验平台

为了验证所提出算法的有效性,本文搭建了图3所示的试验平台,主要由上位机、RTU-BOX201实时控制器、双向直流电源、驱动模块、PMSM、负载电机、转接板卡等组成。上位机与控制器之间

通过以太网通信连接，双向直流电源为系统供电，驱动模块通过控制器控制电机的驱动电压。

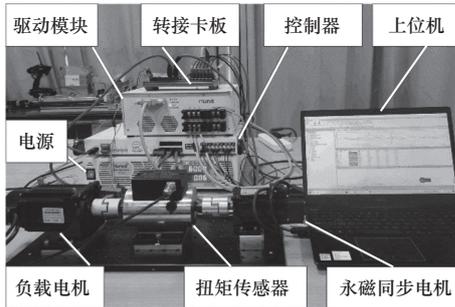


图3 PMSM 试验平台

将PMSM一端各线与编码器一一对应并与转接卡板连接，另一端接扭矩传感器与负载电机，电机部分参数见表1。本试验依照参数整定分离原则，将自抗扰控制器3个部分进行分析，通过固定其他参数值，调节单个参数来分析该参数对试验的影响，最终确定自抗扰控制器和改进自抗扰控制器参数为 $\alpha=0.05$ ， $\delta=0.01$ ， $r_0=8\ 000$ ， $b_0=720$ ， $k=3$ ， $\beta_0=200$ 。

表1 永磁同步电机参数

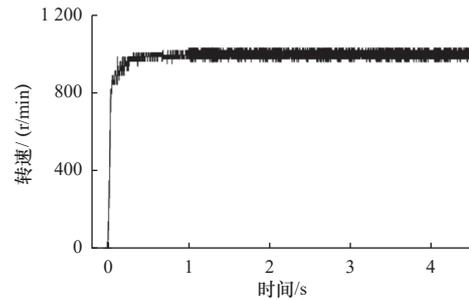
电机参数	数值
磁链/Wb	0.018
极对数	4
电感/mH	0.65
电阻/ Ω	0.19
阻尼系数/(N·s)/m	0.000 1
转动惯量/($\text{kg}\cdot\text{m}^2$)	0.000 342

3.2 空载启动

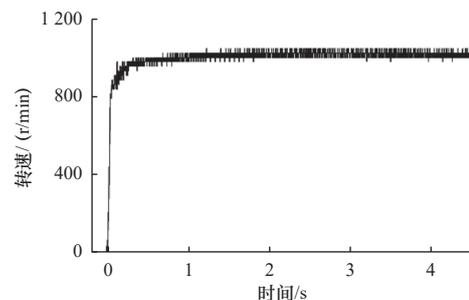
为了验证本文提出的控制方法的有效性，给定永磁同步电机1 000 r/min的额定转速，并使电机处于空载启动状态。当电机运转到达稳态后，记录电机转速和三相电流并绘图，图4所示为使用传统自抗扰控制器和改进自抗扰控制器的电机转速波形图。由图4可以看出，与传统自抗扰控制器相比，使用改进自抗扰控制器的电机转速波形图波动较小。因此在无负载情况下，电机稳态运行时使用改进自抗扰控制器精度更高、稳定性更好。

图5所示为使用传统自抗扰控制器和改进自抗扰控制器的电机三相电流波形图。图5a和图5b分别为使用原 f_{al} 函数和改进 f_{aln} 函数的三相电流图，为了进一步分析试验结果，对其进行误差分析计算，

在转速波动误差的分析结果中，使用传统自抗扰控制器的电机三相电流 i_a 、 i_b 、 i_c 误差分别为4.149、2.186、3.291，而使用改进自抗扰控制器的电机三相电流 i_a 、 i_b 、 i_c 误差则分别为4.121、2.169、3.286。在无外部干扰的情况下，这两种控制策略的运行情况基本一致。但是总的来看，改进后的自抗扰控制器在系统稳定性方面实现了小程度的提升。

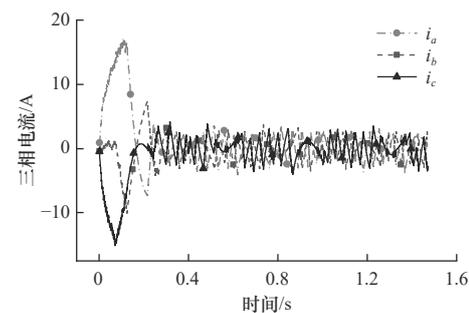


(a) 使用原 f_{al} 函数

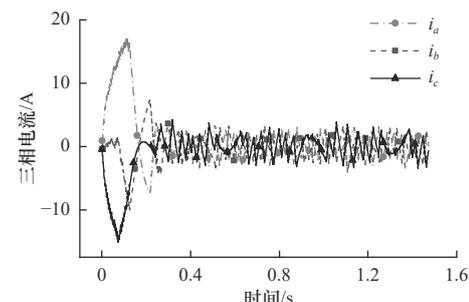


(b) 使用改进 f_{aln} 函数

图4 使用不同函数的转速图



(a) 原 f_{al} 函数



(b) 改进 f_{aln} 函数

图5 使用不同函数的三相电流图

3.3 突加负载

为了进一步验证改进后的 ADRC 具有更出色的抗扰性能, 设定 1 000 r/min 的额定转速, 并使电机处于空载启动状态。在达到稳定后, 在 3 s 时施加 0.5 N·m 的负载。图 6 所示为突加 0.5 N·m 负载后, 转速变化的局部放大图。通过该试验, 可以更直观地了解改进 ADRC 在实际应用中的性能表现, 进一步证实其抗扰效果好。

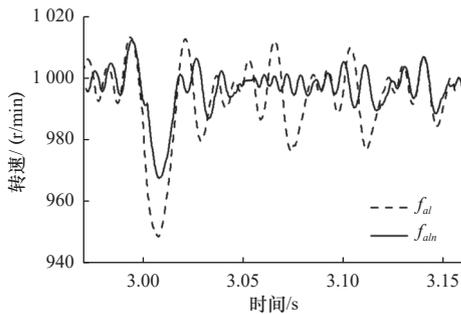


图 6 突加 0.5 N·m 负载后转速的变化

对于外部干扰, 改进 f_{aln} 函数和原 f_{al} 函数设计的自抗扰控制器都能使永磁同步电机恢复稳定运行。由图 6 可知, 采用改进型自抗扰控制器的永磁同步电机转速下降了 36 r/min, 而使用传统自抗扰控制器的永磁同步电机转速则下降了 47 r/min。经过改进的自抗扰控制器波动幅度较小, 因此在抗干扰性能方面更好。

以上结果证明, 本文设计的改进 f_{aln} 函数自抗扰控制器在永磁同步电机上使用的可行性。相较于传统的自抗扰控制器, 使用改进 f_{aln} 函数的自抗扰控制器可以使永磁同步电机具有更好的稳定性, 并且抵抗外部干扰的能力更强。

4 结语

本文的研究重点在于提高使用永磁同步电机在工作时抗干扰能力。基于此目标, 本文将使用改进 f_{aln} 函数的自抗扰控制器与永磁同步电机结合。对原 f_{al} 函数和改进 f_{aln} 函数形式进行了对比分析, 并通过数学理论证明了改进 f_{aln} 函数形式的稳定性。进一步通过试验验证基于改进 f_{aln} 函数的永磁同步

电机自抗扰控制器在稳定性和抵抗外部干扰能力方面的优势。试验结果表明, 改进后的控制器有更好的抗干扰能力。

参 考 文 献

- [1] 王鑫, 李伟力, 程树康. 永磁同步电动机发展展望 [J]. 微电机, 2007(5): 69-72.
- [2] 刘计龙, 肖飞, 沈洋, 等. 永磁同步电机无位置传感器控制技术综述 [J]. 电工技术学报, 2017, 32(16): 76-88.
- [3] Xia C L, Ji B N, Yan Y. Smooth speed control for low-speed high-torque permanent-magnet synchronous motor using proportional-integral-resonant controller [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 62(4): 2123-2134.
- [4] Liang D, Li J, Qu R, et al. Adaptive second-order sliding-mode observer for PMSM sensorless control considering VSI nonlinearity [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 33(10): 8994-9004.
- [5] 谭草, 鲁应涛, 葛文庆, 等. 直驱永磁直线电机深度模糊滑模-自抗扰控制 [J]. 西安交通大学学报, 2023, 57(1): 185-194.
- [6] Liu L, Han Y, Fang Y M, et al. Neural network dynamic surface backstepping control for the speed and tension system of reversible cold strip rolling mill [J]. Asian Journal of Control, 2018, 20(4): 1452-1463.
- [7] 韩京清. 自抗扰控制技术 [J]. 前沿科学, 2007(1): 24-31.
- [8] 王斯墨, 范文超. 改进二阶自抗扰控制器在永磁同步电机上的仿真应用 [J]. 火力与指挥控制, 2020, 45(3): 162-166.
- [9] 刘鉴, 诸德宏, 费城. 基于转矩补偿的永磁同步电机自抗扰控制研究 [J]. 微电机, 2020, 53(10): 38-41.
- [10] 张兴华, 唐其太. 考虑参数和负载不确定性的内置式永磁同步电机自适应反步控制 [J]. 控制与决策, 2016, 31(8): 1509-1512.
- [11] 李德同, 葛文庆, 谭草, 等. 电磁直线执行器变论域双模糊自抗扰控制 [J]. 制造技术与机床, 2023(3): 101-106.
- [12] Zhang Y W, Yang L P, Zhu Y W. Estimate error analysis of the nonlinear third order extended state observer [C]. Intelligent Control and Automation, 2012: 1621-1627.
- [13] Lozgagev G I. On a method of construction of Lyapunov functions [J]. Automation and Remote Control, 1998, 59(10): 1365-1368.

第一作者: 孙天齐, 男, 2000 年生, 硕士研究生, 研究方向为机电液一体化技术。E-mail: 1151970782@qq.com

通信作者: 谭草, 男, 1991 年生, 副教授, 硕士研究生导师, 研究方向为机电液一体化技术。E-mail: njusttancao@yeah.net

(编辑 高扬)

(收修改稿日期: 2023-12-08)

文章编号: 20240920

如果您想发表对本文的看法, 请将文章编号填入读者意见调查表中的相应位置。