

混合励磁磁通切换直线电机磁悬浮系统改进 自抗扰控制的研究

刘鞠波, 蓝益鹏*

(沈阳工业大学 电气工程学院, 辽宁 沈阳 110870)

Research on Improved Active Disturbance Rejection Control for Maglev System of Hybrid Excitation Flux Switching Linear Motor

LIU Jubo, LAN Yipeng*

(School of Electrical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China)

Abstract: This paper investigated a hybrid excitation flux switching linear magnetic suspension motor (HEFSLMSM), which is used in maglev trains. The extended state observer of the original active disturbance rejection control (ADRC) algorithm, designed using the traditional *fal* function, often leads to issues such as chattering, slow convergence speed and excessive overshoot. To improve the performance of suspension system, an improved ADRC strategy was proposed. Based on the special principle and operation mechanism of HEFSLMSM, the mathematical model of the system was derived, including the motor excitation circuit voltage equation, the magnetic suspension force equation and motion equation. A new *sfal* function, which met the criteria of “small error, large gain, large error, small gain, continuous smoothness, differentiability everywhere, symmetry at the origin,” was designed to replace the original *fal* function. An improved ADRC simulation model was established and compared with ADRC and proportional integral devivative controllers through simulation experiments. The simulation results showed that the HEFSLMSM maglev system using the improved ADRC exhibited significant advantages in dynamic performance, effectively suppressing various uncertain disturbances and ensuring the system stability and accuracy.

Key words: hybrid excitation; flux switching; maglev system; active disturbance rejection; parameter tuning

摘 要: 本文研究用于混合励磁磁通切换直线磁悬浮电动机 (HEFSLMSM) 磁悬浮列车。由于原自抗扰控制 (ADRC) 算法的扩张状态观测器是基于传统 *fal* 函数设计而易产生抖振、收敛速度慢及超调量过大等现象。为了提高悬浮系统的性能,提出了一种改进自抗扰控制策略。

根据 HEFSLMSM 特有原理和运行机制,建立了其数学模型,推导出电机励磁回路电压方程、磁悬浮力方程和运动方程,设计出满足“小误差、大增益,大误差、小增益,连续光滑,处处可导,原点对称”的 *sfal* 函数,取代原有 *fal* 函数。建立改进 ADRC 的仿真模型,并通过仿真试验与 ADRC 和比例积分微分控制器进行了比较。仿真结果表明,采用改进 ADRC 的 HEFSLMSM 磁悬浮系统在动态性能方面具有明显优势,能有效抑制各种不确定的扰动,从而保证了系统的稳定性和精度。

关键词: 混合励磁; 磁通切换; 磁悬浮系统; 自抗扰; 参数整定

0 引言

在轨道交通领域,牵引系统的核心组件通常包括旋转电机和直线电机^[1]。相较于旋转电机,直线电机的驱动模式展现出独特的优势^[2],其在高速铁路系统中得到了广泛的应用^[3]。然而,直线电机在轨道交通中的应用也存在一些挑战,如效率不高和无功功率占比大^[4]。特别是在长定子轨道交通系统中,使用永磁体或绕组会增加成本,并且维护工作相对复杂,这些问题需要进一步的技术创新来解决^[5]。

对于磁悬浮列车,采用混合励磁磁通切换直线磁悬浮电动机 (Hybrid Excitation Flux Switching Linear Magnetic Suspension Motor, HEFSLMSM) 是一个有效的方案。HEFSLMSM 的永磁体、励磁绕组和电枢绕组都在动子上,而次级长定子仅包含导磁铁心,实现了直接驱动和稳定的磁悬浮^[1],且具有高效率、大推力密度以及可调节的气隙磁场。

此外, HEFSLMSM 结构简单、成本低、耐用性强, 非常适合用于长距离的轨道交通^[6]。

尽管 HEFSLMSM 系统省掉了中间传动环节, 但端部效应和其他不确定扰动对系统性能的影响更加显著, 这使得系统控制变得更加复杂^[7]。因此, 如何选择适当的控制策略以提高系统的鲁棒性, 成为了研究的热点^[8]。目前, 已有一些控制方法被应用到改系统设计中^[9]。周扬把传统自抗扰用到了直线电机中^[10], 比例积分 (Proportional Integral, PI) 控制器仍然占据主导地位^[11], 自抗扰控制^[12] 继承并发展了“基于误差消除误差”的思想。

本文提出了一种改进自抗扰控制 (Active Disturbance Rejection Control, ADRC), 由于传统 *fal* 函数不光滑^[13], 通过对扩张状态观测器 (Extended State Observer, ESO) 的工作机理分析,

依据“大误差, 小增益; 小误差, 大增益”的思想, 基于正弦函数构建了一种新型的 *sfal* 非线性曲线函数以改进 ESO。通过仿真设计多组干扰试验, 并与其他改进 ADRC 进行比较, 验证了本文改进型 ADRC 的综合抗扰能力。研究的主要内容包括: (1) 建立 HEFSLMSM 的数学模型; (2) 设计新型非线性函数 *sfal*; (3) 基于新型非线性函数 *sfal* 设计了改进型 ADRC; (4) 基于改进型 ADRC 设计了 HEFSLMSM 磁悬浮列车控制系统, 并进行了仿真测试。

1 HEFSLMSM 的结构及运行原理

1.1 HEFSLMSM 结构及其参数

图 1 展示了 HEFSLMSM 的结构示意图, 包含了初级和次级部分。

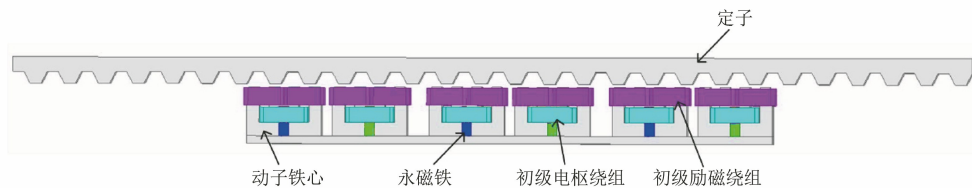


图 1 HEFSLMSM 结构

Fig. 1 Structure of the HEFSLMSM

1.2 HEFSLMSM 运行原理

图 2 到图 5 展示了 HEFSLMSM 电机动子中某一部分结构在一个周期内不同位置产生的磁通变化情况。

在图 2 中, A1 模块和 A2 模块位于正向磁通达到最大值的空间位置。通过叠加, A 相的总磁通在正向呈现最大值。

在图 3 中, 动子运动到 1/4 周期后, 可以观察到一些磁力线此时没有穿过电枢绕组, 另一些磁力线穿过电枢绕组后再次穿出。因此, 叠加后的磁通为 0, 这个位置被称为第一平衡位置。

图 4 展示了动子水平位移半个周期后的空间位置。磁力线逆时针流动并穿过电枢绕组, 在经过两个模块后产生的总磁通呈现负向最大值。这种磁链的双极性变换反映了切换的过程。

图 5 中动子的空间位置和上述分析的第一平衡位置情况有些类似, 磁力线也没有穿过电枢绕组, 此时的空间位置可以称为第二平衡位置。动子完整运动一个周期后, 磁场分布出现了四个特殊的位置情况, 这个特殊的过程被称为磁通切换。

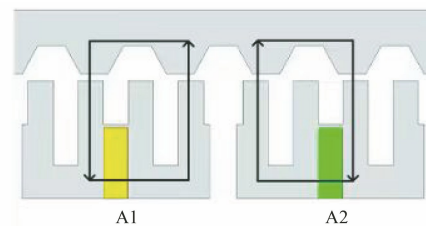


图 2 磁通正向最大位置

Fig. 2 Maximum positive position of magnetic flux

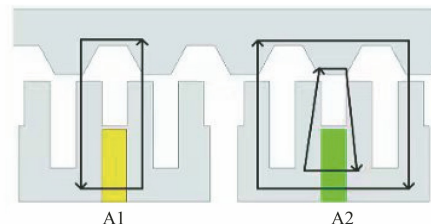


图 3 磁通达到第一平衡位置

Fig. 3 Magnetic flux reaches the first equilibrium position

1.3 悬浮力产生原理

直线电机气隙中形成的磁场源自永磁体和励磁绕组的协同作用, 这个磁场对定子铁心产生单侧的磁拉力, 进而导致动子悬浮。当磁悬浮列车

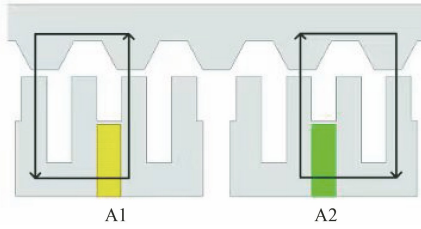


图 4 磁通负向最大位置

Fig. 4 Maximum negative position of magnetic flux

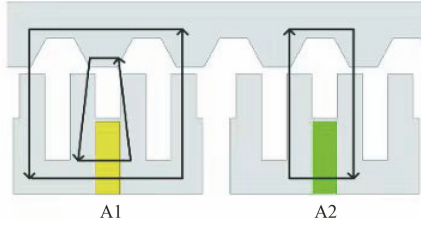


图 5 磁通达到第二平衡位置

Fig. 5 Magnetic flux reaches the second equilibrium position

本身的重力被悬浮力平衡时,便可实现悬浮状态的稳定。

2 建立 HEFSLMSM 数学模型

假设电机铁心的材料达不到饱和情况时,涡流和磁滞影响可以不考虑^[14]。此时,励磁绕组所产生的气隙磁场呈正弦波形,不考虑高次谐波对电机的影响^[15]。同时,通入电枢的电流呈三相正弦对称的形式。

在 d - q 坐标系下的磁链方程为

$$\begin{cases} \psi_d = i_d L_d + i_f M_f + \psi_{pm} \\ \psi_q = i_q L_q \\ \psi_f = L_f i_f + M_f i_f + \psi_{pm} \end{cases} \quad (1)$$

式中: L_d 、 L_q 分别为 d 轴、 q 轴的电感; i_d 、 i_q 分别为 d 轴、 q 轴电流; i_f 为励磁电流; M_f 为单相电枢绕组与励磁绕组之间互感的幅值; ψ_f 为励磁磁链; ψ_{pm} 为永磁磁链。

d 、 q 轴的电压方程为

$$\begin{cases} U_d = L_d \frac{di_d}{dt} + M_f \frac{di_f}{dt} + r_s i_d - \omega_e L_q i_q \\ U_q = L_q \frac{di_q}{dt} + r_s i_q - \omega_e L_d i_d - \omega_e L_f i_f - \omega_e \psi_{pm} \\ U_f = i_f r_f + \frac{d\psi_f}{dt} \end{cases} \quad (2)$$

式中: U_d 、 U_q 分别为 d 轴、 q 轴电压; U_f 、 r_f 分别为励磁电压、励磁绕组的电阻; r_s 为电枢绕组的电

阻; ω_e 为旋转磁场角速度。

电机在运行过程中,当忽略铁耗影响时,该电机的输入功率可表示为

$$\begin{aligned} P_{in} &= \frac{3}{2} (u_d i_d + u_q i_q) + u_f i_f = \\ &= \frac{3}{2} \left[\left(\frac{d\psi_d}{dt} - \omega_e \psi_q \right) i_d + r_s i_d^2 + \right. \\ &\quad \left. \left(\frac{d\psi_q}{dt} + \omega_e \psi_d \right) i_q + r_s i_q^2 + r_f i_f^2 \right] \end{aligned} \quad (3)$$

采用 $i_d = 0$ 的矢量控制方式^[16],将式(1)和式(2)代入式(3)可以得到电机的悬浮力方程:

$$F_y = \frac{3}{2} \left[\frac{M_f i_f + \psi_{pm}}{M_f \delta} + i_q^2 \frac{L_q}{\delta} \right] \quad (4)$$

式中: δ 为气隙高度; $i_q^2 \frac{L_q}{\delta}$ 为电枢电流的吸引力,

将其作为扰动项处理。

可得悬浮力方程为悬浮方向运动方程:

$$m \frac{d^2 Z}{dt^2} = F_y - mg - f_y \quad (5)$$

式中: f_y 为端部效应和竖直方向产生的扰动; m 为运动平台质量; g 为重力加速度。

悬浮力随励磁电流呈线性递增。当电枢电流一定时,励磁电流主要影响 HEFSLMSM 的悬浮力。式(4)可改写为

$$F_y = \frac{3}{2} \frac{M_f i_f + \psi_{pm}}{M_f \delta} = K \left(\frac{i_f}{\delta} \right) + D \quad (6)$$

式中: $K = 1.967$ 为磁悬浮系数; $D = 4.050$ 。

垂直方向总扰动为

$$f = f_y - \frac{3}{2} i_q^2 \frac{L_q}{\delta} \quad (7)$$

取状态变量 $x_1 = Z$, $x_2 = \frac{dZ}{dt}$ 得到 HEFSLMSM

磁悬浮系统的状态空间方程:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = \frac{K i_f}{m x_1} + \frac{D}{m} - g - \frac{f}{m} \end{cases} \quad (8)$$

3 HEFSLMSM 磁悬浮系统 ADRC 控制器设计

3.1 HEFSLMSM 磁悬浮系统 ADRC 结构

采用 ADRC 控制 HEFSLMSM 的悬浮高度,系

Fig. 6 Structure of the magnetic suspension ADRC

$$\begin{cases} x_1(k+1) = x_1(k) + hx_2(k) \\ x_2(k+1) = x_2(k) + hf h \\ fh = fhan(x_1(k) - v(k), x_2(k), q, h) \end{cases} \quad (9)$$
$$\left\{ \begin{array}{l} fhan(e, x_2, r, h_0) = - \begin{cases} r \frac{a}{d}, & |a| < d \\ r \times sign(a), & |a| > d \end{cases} \\ a = \begin{cases} x_2 + \frac{(a_0 - d)}{2} sign(y), & |y| > d_0 \\ x_2 + \frac{y}{h}, & |y| < d_0 \end{cases} \\ y = e + hx_2 \\ a_0 = \sqrt{d^2 + 8r|y|} \\ d_0 = h_0 d \\ d = rh_0 \end{array} \right. \quad (10)$$
$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = x_3 + bu \\ \dot{x}_3 = \omega(t) \\ y = x_1 \end{cases} \quad (11)$$
$$\begin{cases} e = z_1 - y \\ \dot{z}_1 = z_2 - \beta_{01}e \\ \dot{z}_2 = z_3 - \beta_{02}fal(e, a, \delta) + bu \\ \dot{z}_3 = -\beta_{03}fal(e, a, \delta) \end{cases} \quad (12)$$
$$\left\{ \begin{array}{l} e = z_1 - y \\ \dot{z}_1 = z_2 - \beta_{01}e \\ \dot{z}_2 = z_3 - \beta_{02}fal(e, a, \delta) - g + \frac{D}{m} + b_0 i_f \\ \dot{z}_3 = -\beta_{03}fal(e, a, \delta) \end{array} \right. \quad (13)$$
$$\begin{cases} \dot{e}_1 = e_2 - \beta_{01}e_1 \\ \dot{e}_2 = e_3 - \beta_{02}fal(e, a, \delta) \\ \dot{e}_3 = -\beta_{03}fal(e, a, \delta) \end{cases} \quad (14)$$

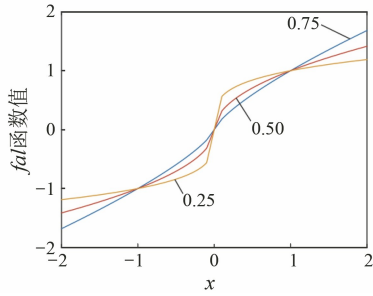


图7 fal 函数图像

Fig. 7 Graph of fal function

数、光滑连续、原点近线性、饱和特性,其核心思想依旧是:大误差小增益,小误差大增益^[20]。考虑到正弦函数具有奇函数、光滑连续、原点近线性的特点,再稍加改进,使其具备饱和特性,构成 $sfal$ 函数:

$$sfal(e, a, \delta) = \begin{cases} k_1 e + k_2 e^2 + k_3 \sin(e), & |e| \leq \delta \\ |e|^a \operatorname{sign}(e), & |e| > \delta \end{cases} \quad (15)$$

式中: k_1, k_2, k_3 为系数。 k_1, k_2, k_3 具体值为

$$\begin{cases} k_1 = a\delta^{a-1} - \frac{\delta^a(1-a)}{\tan\delta - \delta} \\ k_2 = 0 \\ k_3 = \frac{\delta^a(1-a)}{\sin\delta - \delta\cos\delta} \end{cases} \quad (16)$$

$sfal$ 函数光滑连续,结构简单,符合非线性曲线的选取原则。图 8 为 $sfal$ 曲线,可知在原点周围, $sfal$ 函数比传统非线性函数 fal 更平滑。

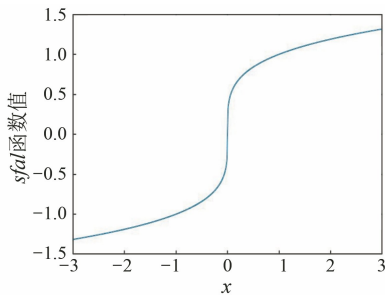


图8 sfal 函数

Fig. 8 Graph of sfal function

将 $sfal$ 函数代入式 (14) 中,可得改进后的 ESO 表达式为

$$\begin{cases} e = z_1 - y \\ \dot{z}_1 = z_2 - \beta_{01}e \\ \dot{z}_2 = z_3 - \beta_{02}sfal(e, a, \delta) - g + \frac{D}{m} + b_0 i_f \\ \dot{z}_3 = -\beta_{03}sfal(e, a, \delta) \end{cases} \quad (17)$$

3.5 非线性状态误差反馈律改进

传统控制器应用的线性叠加方法处理误差是形式上最简单的,但其控制效率和效果却不是最优的,也就是说单纯的线性叠加误差反馈律的控制性能不适合非线性算法。非线性状态误差反馈律 (Nonlinear State Error Feedback, NLSEF) 使用比例、微分、积分进行非线性计算如式 (18) 所示,得到最终的控制量 u ,提高了控制系统的控制精度,增强了系统鲁棒性。

$$\begin{cases} e_1 = v_1 - z_1 \\ e_0 = \int e_1 dt \\ e_2 = v_2 - z_2 \\ u_0 = \beta_{01}sfal(e_1, a_1, \delta) + \beta_{02}sfal(e_0, a_0, \delta) + \beta_{03}sfal(e_2, a_2, \delta) \\ u = u_0 - \frac{z_3}{b_0} \end{cases} \quad (18)$$

式中: e_0, e_1, e_2 分别为误差的积分、误差、微分的追踪误差。

4 ADRC 控制器参数整定方法

4.1 跟踪微分器参数整定

该模块的参数整定相对简单,一共有三个参数需要调整,分别是采样周期 h, h_0 和速度系数 r 。不同的 r 值对 TD 输出有影响。可以看出, r 值的大小会影响 TD 输出信号的跟踪速度^[21]。但是协调速度因子 r 和 h_0 可以获得良好的跟踪和滤波效果。

4.2 扩张状态观测器参数整定

$\beta_{01}, \beta_{02}, \beta_{03}$ 三个参数影响 ESO 的观测效果,且与 h 具有一定的关系简化了参数整定过程,根据文献 [21],引入带宽概念,这三个参数可以分别取:

$$\beta_{01} = \frac{4}{5}\omega^2, \beta_{02} = 3\omega, \beta_{03} = \omega^2 \quad (19)$$

5 仿真分析

式 (17) 中 b_0 整定可按照模型计算得出,鲁棒性强^[22]。

本文 $b_0 = 1.405$ 通过参数整定 $\beta_{01} = 8\ 000, \beta_{02} = 300, \beta_{03} = 10\ 000, \beta_1 = 23\ 000, \beta_2 = 1\ 900, \beta_0 = 1\ 000$ 对控制系统进行计算机仿真。

对 HEFSLMSM 磁悬浮系统进行分析:

(1) HEFSLMSM 的启动性能

比例积分微分 (Proportional Integral Derivative, PID) 控制、改进 ADRC、ADRC 启动时在气隙高度响应曲线上的对比表现如图 (9) 所示。从图中可以看出,三个控制系统下均无超调,磁悬浮系统采用 PID 控制,约 0.2 s 达到目标气隙高度,但在稳定状态下存在误差;采用 ADRC 系统,大约 0.08 s 达到给定高度;改进 ADRC 系统大约 0.04 s 达到给定高度,所用时间更短。因此,改进 ADRC 相较于 PID 控制和 ADRC 具有更快的响应速度和更卓越的性能。

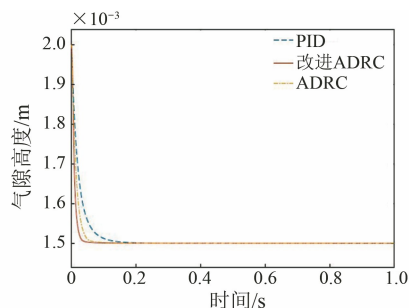


图 9 启动时磁悬浮气隙高度响应曲线

Fig. 9 Response curves of magnetic suspension air gap height during start-up

(2) HEFSLMSM 系统抗干扰能力

图 10、图 11 是在施加外部扰动情况下,PID 控制、ADRC 和改进 ADRC 的悬浮系统气隙高度响应曲线和励磁电流响应曲线的对比。在 PID 控制下,外部扰动对系统产生影响,使得动态降落到 6.2×10^{-5} m,相对误差达到了 4.13%,恢复到设定值所需的时间为 0.2 s。采用 ADRC,动态降至 2.5×10^{-5} m,相对误差为 1.67%,恢复时间缩短至 0.07 s;而当应用改进 ADRC,动态下降幅度为 9×10^{-6} m,相对误差为 0.6%,恢复设定值的时间需 0.04 s。ADRC 系统经过改进后,具有更强的抗干扰能力,对外部干扰表现出较高的免疫性,系统的扰动抑制能力显著提升。

(3) HEFSLMSM 端部效应扰动的抑制能力分析

系统达到稳定运行状态后,施加正弦函数 $f = 30\sin(20t)$ N 模拟端部效应扰动。图 12 为正弦扰动下的气隙高度响应曲线。采用 PID 控制时,加入正弦扰动后,波形波动剧烈、抗干扰能力差,出

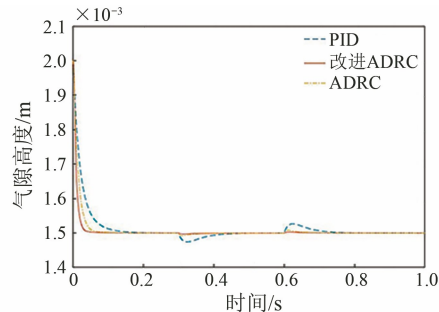


图 10 加入扰动时磁悬浮气隙高度响应曲线

Fig. 10 Response curves of magnetic suspension air gap height with disturbance

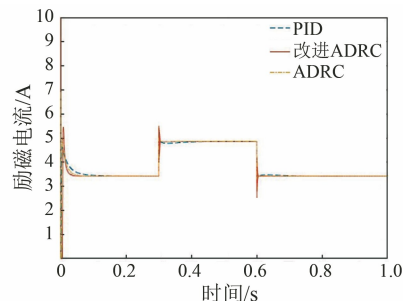


图 11 加入扰动时励磁电流响应曲线

Fig. 11 Response curves of excitation current with disturbance

现较大误差,相对误差达到了 3.33%。采用 ADRC 系统时,波动程度有明显增强,相对误差为 0.6%,与 PID 控制系统相比,ADRC 控制系统的抗扰动能力较强。改进 ADRC 系统没有明显的波动,相对误差仅 0.13%,抗扰动能力优于 PID 控制与 ADRC。

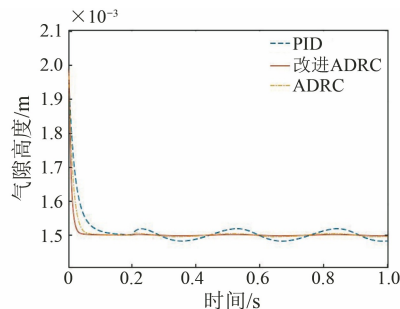


图 12 正弦扰动下磁悬浮气隙高度响应曲线

Fig. 12 Response curves of magnetic suspension air gap height under sinusoidal disturbance

6 结语

(1) 分析论述了 HEFSLMSM 的运行原理,并建立了数学模型,推导出悬浮力表达式、运动方程

以及系统的空间状态方程。

(2) 设计改进 ADRC 控制器。选取最速跟踪微分器,设计非线性扩张状态观测器,并且构建新的非线性函数 $sfal$ 。

(3) 仿真结果证明了改进 ADRC 与 ADRC 与 PID 控制相比有更好的效果。

参考文献

- [1] 艾春洋, 蓝益鹏. 混合励磁通切换直线磁悬浮电动机电磁力的有限元计算[J]. 电机与控制应用, 2021, 48(3): 49-54.
- AI C Y, LAN Y P. Finite element calculation of electromagnetic force of hybrid excitation flux switching linear magnetic suspension motor [J]. Electric Machines & Control Application, 2021, 48(3): 49-54.
- [2] 卢琴芬, 沈懿明, 叶云岳. 永磁直线电动机结构及研究发展综述[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(9): 2575-2587.
- LU Q F, SHEN Y M, YE Y Y. Development of permanent magnet linear synchronous motors structure and research [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(9): 2575-2587
- [3] 梁建英. 中国高速磁悬浮交通系统发展现状与展望[J]. 科学, 2022, 74(5): 31-36.
- LIANG J Y. Development status and future prospects of the high-speed maglev transportation system in China [J]. Science, 2022, 74(5): 31-36.
- [4] STUMBERGRE G, ZARKO D, AYDEMIR M T, et al. Design and comparison of linear synchronous motor and linear induction motor for electromagnetic aircraft launch system [C] // IEEE International Electric Machines and Drives Conference, Madison, WI, 2003.
- [5] 李争, 肖宇, 孙鹤旭, 等. 基于速度前瞻的双轴直线电机交叉耦合控制策略[J]. 电工技术学报, 2021, 36(5): 937-983.
- LI Z, XIAO Y, SUN H X, et al. Speed prospective based cross-coupling control strategy for dual-axis linear motor [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(5): 937-983.
- [6] 熊嘉阳, 邓自刚. 高速磁悬浮轨道交通研究进展[J]. 交通运输工程学报, 2021, 21(1): 177-198.
- XONG J Y, DENG Z G. Research progress of high-speed maglev rail transit [J]. Journal of Traffic and

- Transportation Engineering, 2021, 21(1): 177-198.
- [7] 梁锦涛, 卢亮, 王丁磊. 实现高速精密成形的电磁悬浮直线驱动新方式[J]. 锻压装备与制造技术, 2022, 57(6): 7-14.
- LIANG J T, LU L, WANG D L. The new linear driven mode of electromagnetic levitation for high-speed precision forming [J]. China Metalforming Equipment & Manufacturing Technology, 2022, 57(6): 7-14.
- [8] 王立俊, 赵吉文, 于子翔, 等. 基于非线性时间延迟扰动估计的永磁同步直线电机无模型鲁棒位置跟踪控制[J/OL]. 电工技术学报, 2024-9-27. <https://link.cnki.net/doi/10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.231048>.
- WANG L J, ZHAO J W, YU Z X, et al. Model-free robust position tracking control of permanent magnet synchronous linear motor based on nonlinear time delay disturbance estimation [J/OL]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024-9-27. <https://link.cnki.net/doi/10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.231048>.
- [9] 武志涛, 李帅, 程万胜. 基于扩展滑模扰动观测器的永磁直线同步电机定结构滑模位置跟踪控制[J]. 电工技术学报, 2022, 37(10): 2503-2512.
- WU Z T, LI S, CHENG W S. Fixed structure sliding mode position tracking control for permanent magnet linear synchronous motor based on extended sliding mode disturbance observer [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(10): 2503-2512.
- [10] 周杨. 永磁同步电机滑模自抗扰控制策略研究[D]. 株洲: 湖南工业大学, 2022.
- ZHOU Y. The research on sliding mode active disturbance rejection control strategy of permanent magnet synchronous motor [D]. Zhuzhou: Hu'nan University of Technology, 2022.
- [11] 张瑞祥, 包广清, 汪波, 等. 基于变趋近律滑模反电动势观测器的 BLDCM 无位置传感器控制[J]. 电机与控制应用, 2022, 49(8): 1-6.
- ZHANG R X, BAO G Q, WANG B, et al. BLDCM position sensorless control based on variable reaching law sliding mode back EMF observer [J]. Electric Machines & Control Application, 2022, 49(8): 1-6.
- [12] 周新力, 李醒飞. 光电跟踪系统积分反步自抗扰控制策略[J]. 天津大学学报, 2021, 54(4): 379-387.

- ZHOU X L, LI X F. Integral backstepping active disturbance rejection control strategy for the electro-optical targeting system [J]. Journal of Tianjin University, 2021, 54(4): 379-387.
- [13] 华桑墩, 邱亚峰, 陈成. 基于改进 fal 函数的无人直升机姿态自抗扰研究[J]. 电光与控制, 2022, 29(4): 1-6.
- HUA S T, QIU Y F, CHEN C. Active disturbance rejection control for attitude of unmanned helicopter based on improved fal function [J]. Electronics Optics & Control, 2022, 29(4): 1-6.
- [14] 苏芷玄, 杨杰, 彭月, 等. 单点混合磁悬浮系统的自抗扰控制仿真研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2022, 19(4): 864-873.
- SU Z X, YANG J, PENG Y, et al. Simulating active disturbance-resistant control of single-point hybrid magnetic suspension system [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2022, 19(4): 864-873.
- [15] ZHU H Q, WU M C. Direct control of bearingless permanent magnet synchronous motor based on prediction model [J]. Progress in Electromagnetics Research M, 2021, 101: 127-138.
- [16] XUE W C, HUANG Y. Tuning of sampled-data ADRC for nonlinear uncertain systems[J]. Journal of Systems Science and Complexity, 2016, 29(5): 1187.
- [17] 石晨曦. 自抗扰控制及控制器参数整定方法的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2008.
- SHI C X. Auto-disturbance rejection controllers and the parameter adjusting [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2008.
- [18] 成庶, 刘翔, 王成强, 等. 基于自抗扰的高速列车升力翼攻角驱动系统同步控制[J]. 电机与控制应用, 2023, 50(6): 1-7.
- CHENG S, LIU X, WANG C Q, et al. Synchronous control of high-speed train lift wing angle of attack drive system based on active disturbance rejection [J]. Electric Machines & Control Application, 2023, 50(6): 1-7.
- [19] 迟世伟, 刘慧博. 基于前馈补偿的永磁同步电机自抗扰控制[J]. 电机与控制应用, 2023, 50(1): 9-13.
- CHI S W, LIU H B. ADRC control of permanent magnet synchronous motor based on the feedforward compensation [J]. Electric Machines & Control Application, 2023, 50(1): 9-13.
- [20] 于洪国, 康忠健, 陈瑶. 基于双曲正切函数的二阶时变参数扩张状态观测器[J]. 控制理论与应用, 2016, 33(4): 530-534.
- YU H G, KANG Z J, CHEN Y. Time-varying parameter second-order extended state observer based on hyperbolic tangent function [J]. Control Theory & Applications, 2016, 33(4): 530-534.
- [21] 王铁举. 基于自抗扰的 PMLSM 位置控制研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2015.
- WANG T J. The research for PMLSM position control based on ADRC [D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2015.
- [22] 李杰, 齐晓慧, 夏元清, 等. 线性/非线性自抗扰切换控制方法研究[J]. 自动化学报, 2016, 42(2): 202-212.
- LI J, QI X H, XIA Y Q, et al. On linear/nonlinear active disturbance rejection switching control [J]. Acta Automatica Sinica, 2016, 42(2): 202-212.

收稿日期:2024-05-28

收到修改稿日期:2024-07-10

作者简介:

刘鞠波(1999-),男,硕士研究生,研究方向为电力电子与电力拖动,1648822945@qq.com;

*通信作者:蓝益鹏(1962-),男,博士,教授,研究方向为电力电子与电力拖动,lanyipeng@163.com。

Research on Improved Active Disturbance Rejection Control for Maglev System of Hybrid Excitation Flux Switching Linear Motor

LIU Jubo, LAN Yipeng*

(School of Electrical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China)

Key words: hybrid excitation; flux switching; maglev system; active disturbance rejection; parameter tuning

At present, rotary motors and linear motors are mainly used as traction systems in rail transportation. In experiments and usage tests, it was found that linear motor drive systems offer significant advantages over rotary motor drive systems. The hybrid excitation flux switching linear magnetic suspension motor (HEFSLMSM) magnetic levitation control system can realize direct drive and frictionless feed, effectively improving the steady-state and dynamic performance of the servo system. Considering the issue of uncertain disturbances in the operation of the HEFSLMSM system, an improved active disturbance rejection control (ADRC) scheme is proposed.

First, based on the special structure and working mechanism of HEFSLMSM, the mathematical model of HEFSLMSM was derived, including voltage equation of the excitation circuit, magnetic levitation force equation and motion equation. In order to improve the anti-disturbance ability and tracking accuracy, a traditional ADRC was designed, in which the external disturbance in the levitation direction was regarded as the “Total

disturbance” and the total disturbance was estimated and compensated.

Since the extended state observer in traditional ADRC was designed based on the traditional fal function, it tended to produce issues such as chattering, slow convergence speed, and excessive overshoot. This paper proposed an sfal function based on a sine function, which met the design principles of “high gain for small errors, low gain for large errors, continuous smoothness, differentiability everywhere, and symmetry at the origin”.

Finally, multiple sets of simulation experiments were designed in Matlab and compared with other control methods. The results show that, for the HEFSLMSM magnetic levitation control system, compared with the traditional ADRC controller, the improved ADRC controller designed with the sfal function has faster convergence speed and lower overshoot. Therefore, the improved ADRC based on the sfal function demonstrates better anti-interference capabilities in the HEFSLMSM magnetic levitation control system.