

# 基于粒子群优化算法的改进 降全阶切换自抗扰控制

饶欢\*, 杨璟珉, 梁文, 周泉, 任奕锟  
(广东工业大学机电工程学院, 广东广州 510006)

## Improved Reduced-Full-Order Switched Active Disturbance Rejection Control Based on Particle Swarm Optimization Algorithm

RAO Huan\*, YANG Jingmin, LIANG Wen, ZHOU Quan, REN Yikun

(School of Electromechanical Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

**Abstract:** [Objective] This study addresses the challenges of slow dynamic response, insufficient tracking accuracy, and complex parameter tuning in permanent magnet synchronous linear motor under multi-source disturbances. Reduced-full-order switched active disturbance rejection control based on particle swarm optimization (PSO-RSADRC) algorithm is proposed to enhance control precision. [Methods] First, an intelligent switching active disturbance rejection control (SADRC) architecture was constructed, optimizing disturbance rejection performance through linear/nonlinear dynamic switching. Then, reduced-full-order SADRC (RSADRC) to simplify the observer structure and reduce parameter coupling was proposed. Finally, to address the multi-parameter coupling issue in the nonlinear error feedback module, a PSO-RSADRC approach was developed, and simulation and experimental validation were conducted based on a fourth-order S-curve motion planning model. [Results] Simulation results demonstrated that PSO-RSADRC achieved an integral time-weighted absolute error of 0.95 and maximum dynamic error of 19  $\mu\text{m}$  under 1 A step disturbance, improving precision by 98% compared to conventional linear ADRC. During platform validation, the settling time was reduced to 57 ms with a 32% enhancement in response speed. [Conclusion] The proposed PSO-RSADRC strategy effectively resolves precision motion control challenges under multi-source disturbances, demonstrating significantly superior parameter tuning efficiency and disturbance rejection robustness compared to conventional methods. This solution provides a reliable technical approach for high-precision

industrial applications such as microelectronics packaging.

**Key words:** permanent magnet synchronous linear motor; active disturbance rejection control; reduced-full-order switched active disturbance rejection control; particle swarm optimization algorithm

**摘要:** [目的]针对永磁同步直线电机在多源复合扰动下存在的动态响应慢、跟踪精度不足及参数整定复杂等问题,提出一种基于粒子群优化算法的改进降全阶切换自抗扰控制(PSO-RSADRC),旨在突破快速整定时间与抗干扰性。【方法】首先,构建智能切换自抗扰控制(SADRC)架构,通过线性/非线性动态切换优化扰动抑制性能。然后,提出降全阶切换自抗扰控制(RSADRC),简化观测器结构以降低参数耦合度。最后,为解决非线性误差反馈模块的多参数耦合问题,开发 PSO-RSADRC,并基于四阶 S 型运动规划模型开展仿真与试验验证。【结果】仿真结果表明,PSO-RSADRC 在 1 A 阶跃扰动下的时间加权绝对误差积分降至 0.95,最大动态误差仅为 19  $\mu\text{m}$ ,较传统线性自抗扰控制精度提升 98%。试验平台验证中,整定时间缩短至 57 ms,响应速度提升 32%。【结论】所提出的 PSO-RSADRC 策略有效解决了多源扰动下的精密运动控制难题,其参数整定效率与抗扰鲁棒性显著优于传统方法,为微电子封装等高精度工业场景提供了可靠的技术方案。

**关键词:** 永磁同步直线电机;自抗扰控制;降全阶切换自抗扰控制;粒子群优化算法

## 0 引言

永磁同步直线电机(Permanent Magnet Synchronous Linear Motor, PMSLM)作为焊线装备

基金项目:国家自然科学基金(61973093)

National Natural Science Foundation of China (61973093)

的核心驱动单元,其动态特性直接影响高精度运动控制的实现效果。然而,传统比例积分微分(Proportional-Integral-Derivative, PID)调控策略在面对多源复合扰动时仍存在控制瓶颈。自抗扰控制(Active Disturbance Rejection Control, ADRC)凭借其未建模动态与非线性耦合效应的强鲁棒性,在运动控制领域获得学术界广泛认可。采用 ADRC 算法不仅能深度释放 PMSLM 的动态性能潜力,更可在微电子封装工艺中达成微米级定位精度,有效突破传统控制策略的精度边界。

ADRC 作为韩京清<sup>[1]</sup>提出的非线性鲁棒控制范式,其核心创新在于将各类扰动统一建模为系统的扩张状态变量。随着理论发展,ADRC 衍生出多种创新架构:文献[2]对传统 *fal* 函数进行改进,提出 *sfal* 函数变体,通过数值仿真验证其稳定裕度提升效果;文献[3]构建自抗扰自适应控制框架,仿真结果表明系统能耗降低 21%~35%;文献[4]开发的复合控制方案在仿真中展现出更优的动态响应特性。然而,ADRC 的多参数调节问题始终制约其工程应用。学界针对该问题开展了系统性研究:文献[5]引入动态步长狼群算法对控制参数实施智能优化,在轨迹跟踪精度与控制能效方面取得显著提升,验证了智能算法在参数整定中的价值。文献[6]采用模糊逻辑策略进行观测器参数整定,但其隶属度函数设计存在较强经验依赖性。文献[7]创新性地将天牛须搜索机制融入粒子群优化框架,基于线性自抗扰控制(Linear ADRC, LADRC)构建机器人动力学模型并实现参数智能配置。文献[8-11]则构建拟牛顿优化框架,在无约束大规模控制参数寻优中展现出独特优势,收敛速度较传统方法提升 40%~60%。

高志强<sup>[12]</sup>提出的参数简化型线性 ADRC 架构,通过结构创新将调参维度降低 50% 以上,引发学界广泛关注。文献[13]设计超螺旋滑模观测器增强的 LADRC 方案,仿真显示其动态响应速度提升 32%;文献[14]成功将滑模-ADRC 复合架构应用于工业机器人,实测定位精度达  $\pm 0.02$  mm;文献[15]通过 LADRC 结构精简实现永磁同步电机的传感器精确控制,转矩脉动抑制率达 91%。鉴于此,工程实践中逐步发展出模态

切换自抗扰控制(Switching ADRC, SADRC)<sup>[16]</sup>,其核心机制在于依据系统动态特性与扰动强度两种调控模式进行智能切换以优化综合性能。在电机精密控制领域,该技术已形成系列创新应用:文献[17]将双模切换策略应用于磁悬浮轴承解耦控制,实现纳米级悬浮精度;文献[18]的改进型 SADRC 方案相较传统架构,定位误差降低 42%。同时,针对扩张状态观测器(Extended State Observer, ESO)的优化研究持续推进<sup>[19-20]</sup>,通过结构创新使扰动补偿精度提升至微米量级。

针对 LADRC 抗扰能力有限及非线性自抗扰控制(Nonlinear ADRC, NLADRC)在大扰动下稳定裕度不足的共性难题,本研究创新构建 SADRC 架构,为进一步提升扰动感知灵敏度,提出降阶型切换自抗扰控制(Reduced-Full-Order SADRC, RSADRC)方案。在参数整定过程中,发现 RSADRC 的非线性误差反馈模块存在多参数耦合困境,故引入群体智能算法开发粒子群优化型降阶切换自抗扰控制(Particle Swarm Optimization RSADRC, PSO-RSADRC)架构,在保证系统稳定性的同时提升调参效率达 60%。最终通过仿真与试验平台验证,所提改进方案在动态响应速度与扰动抑制效率方面均展现出显著优势。

## 1 PMSLM 系统辨识与运动规划

### 1.1 PMSLM 的数学模型

在理想情况下,PMSLM 在  $d$ 、 $q$  轴的电压方程如式(1)所示:

$$\begin{cases} u_d = R_s i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega_e \psi_d \\ u_q = R_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt} - \omega_e \psi_q \end{cases} \quad (1)$$

式中: $R_s$  为定子绕组的等效电阻; $i_d$ 、 $i_q$ 、 $u_d$ 、 $u_q$ 、 $L_d$ 、 $L_q$  和  $\psi_d$ 、 $\psi_q$  分别为  $d$ 、 $q$  轴上的电流、电压、电感和磁链; $\omega_e$  为电角速度。

为了简化 PMSLM 的控制模型,考虑采用  $i_d = 0$  控制,并且将电流环当成一个简单的单位增益环节。位置环控制器可以输出控制电压  $u$ ,再经历一系列的线性变换得到  $q$  轴的电流  $i$ 。故从  $u$  到位移  $y$  的传递函数如式(2)所示:

$$\frac{y(s)}{u(s)} = \frac{b}{s^2 + as} \quad (2)$$

## 1.2 PMSLM 的模型参数辨识

试验对象为 PMSLM 中的  $X$  轴,对其  $s$  输入一个阶跃信号,电机驱动器持续输出 0.2 s 值为 1 A 的电流。然后,再将捕捉到的电流响应值和速度响应值的原始数据导入到 Matlab 软件中,并进行曲线多点拟合。最后,顺利构建出电流  $i$  与电机转速  $v$  之间的传递函数,如式(3)所示:

$$\frac{v(s)}{i(s)} = \frac{7\ 125}{s + 0.666\ 1} \quad (3)$$

当模块电流设定在 1 A 时,相应的电压值为 0.4 V。利用这个规律,可以构建出驱动器电压到电机位移的传递函数,如式(4)所示:

$$\frac{y(s)}{U(s)} = \frac{2\ 850}{s^2 + 0.666\ 1s} \quad (4)$$

## 1.3 S 型运动规划

在众多规划策略中<sup>[21-23]</sup>,S 曲线速度规划因其出色的性能而被广泛应用<sup>[24-25]</sup>。本文试验采用的 S 型四阶规划算法是一种高阶曲线规划算法,通过对整个运动过程的位移、速度和加速度进行规划,可以实现更加精确的运动控制。

四阶曲线规划算法在运动规划中广泛应用,特别是对于高速高精度的运动控制系统而言。基于文献[26],本文实现的规划算法如式(5)所示:

$$\begin{cases} S(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3 + a_4 t^4 \\ v(t) = a_1 + 2a_2 t + 3a_3 t^2 + 4a_4 t^3 \\ a(t) = 2a_2 + 6a_3 t + 12a_4 t^2 \\ J(t) = 6a_3 + 24a_4 t \end{cases} \quad (5)$$

只需指定预定位置  $S_{\text{input}}$ 、最高速度  $v_{\text{input}}$  和最大加速度  $a_{\text{input}}$  这 3 个参数,便能计算规划轨迹。这些规划数据的每一阶都构成了前馈控制器输入的基础部分。

其中,具体的参数  $S_{\text{input}} = 8\ \text{mm}$ ,最大规划速度  $v_{\text{input}} = 0.4\ \text{m/s}$  和最大规划加速度  $a_{\text{input}} = 20\ \text{m/s}^2$ ,如图 1 所示。

## 2 SADRC 控制器设计

### 2.1 系统状态方程

由式(4)可知,PMSLM 平台的理想微分方程形式为

$$\ddot{y} = -0.666\ 1\dot{y} + 2\ 850u \quad (6)$$

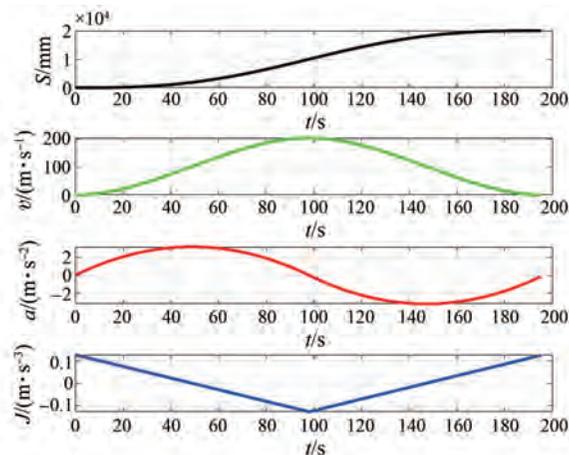


图 1 运动规划示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the movement planning

在实际的运动过程中,平台会受到多因素扰动,例如平台结构件部分老化导致的摩擦系数波动、运动过程中的发热问题带来的温度变化导致电机力常数波动等,将这一系列干扰整合为一个总扰动,并将其代入式(6)中,可得:

$$\ddot{y} = \underbrace{-0.666\ 7\dot{y} + (2\ 850 - b_0 u)}_{f(\dot{y}, u, w)} + w + b_0 u \quad (7)$$

式中: $f(\dot{y}, u, w)$  为总扰动; $w$  为一系列不明扰动; $b_0$  为  $b$  的模拟值。

状态系统  $x_1 = y, x_2 = \dot{y}, x_3 = f(\dot{y}, u, w)$ , 则得到系统扩张状态方程,如式(8)所示:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = x_3 + b_0 u \\ \dot{x}_3 = \dot{f} \\ y = x_1 \end{cases} \quad (8)$$

## 2.2 ADRC 设计

### 2.2.1 LADRC 控制器设计

LADRC 通常由 3 个主要部分组成:首先是追踪微分(Tracking Differentiator, TD)环节,用于捕捉系统动态变化;其次是线性状态误差反馈(Linear State Error Feedback, LSEF)控制律,负责根据系统误差调整控制信号;最后是线性扩张状态观测器(Linear ESO, LESO),用以估计和补偿扰动。由于 TD 通常负责平滑追踪给定信号及其微分提取,但是输入的运动规划已非常平滑且无需微分,故去除该环节。

根据式(8),LESO 设计为

$$\begin{cases} e = z_1 - y \\ \dot{z}_1 = z_2 - \beta_1 e \\ \dot{z}_2 = z_3 - \beta_2 e + b_0 u \\ \dot{z}_3 = -\beta_3 e \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $\beta_1, \beta_2, \beta_3$  为观测器的参数。

当位置的反馈值精确有效时, 速度也可直接获取, 故在式(9)中优化相关结构得到降全阶线性观测器, 如式(10)所示:

$$\dot{z}_3 = \beta_3(\ddot{y} - b_0 u - z_3) \quad (10)$$

且 LADRC 的 LSEF 控制律设计为

$$u = \frac{k_1(r - z_1) + k_2(\dot{r} - z_2) - z_3}{b_0} \quad (11)$$

同样对于一些可以得到的反馈值, 便可不用观测值, 降全阶线性自抗扰控制 (Reduced-Full-Order LADRC, RLADRC) 的降全阶线性状态误差反馈控制律设计为

$$u = \frac{k_1(r - y) + k_2(\dot{r} - \dot{y}) - z_3}{b_0} \quad (12)$$

式中:  $r$  为规划位置;  $\dot{r}$  为规划速度;  $k_1, k_2$  为 LSEF 模块增益。

基于带宽法<sup>[2]</sup>对 LADRC 与 RLADRC 的两部分参数进行整定, 则:

$$\begin{cases} \beta_1 = 3\omega_o, \beta_2 = 3\omega_o^2, \beta_3 = \omega_o^3 \\ k_1 = \omega_c^2, k_2 = 2\omega_c \end{cases} \quad (13)$$

式中:  $\omega_o$  为观测器带宽;  $\omega_c$  为控制器带宽。

$b_0$  的值在调试过程中确定, 根据经验法,  $\omega_o$  取值要在  $2\omega_c \sim 5\omega_c$  的区间内, 有合适带宽, 可以保证观测器的跟踪能力。最后, 经过不断地仿真调试, 锁定 LADRC 与 RLADRC 的参数为:  $b_0 = 2850, \omega_c = 400, \omega_o = 800$ 。

### 2.2.1 NLADRC 控制器设计

实际上, 线性被认为非线性的一种特殊形式, NLADRC 有更好的普适性。NLADRC 省去了 TD 环节, 包括非线性状态误差反馈 (Nonlinear State Error Feedback, NLSEF) 控制律和非线性扩张状态观测器 (Nonlinear ESO, NLESO)。

根据式(9), NLESO 设计为

$$\begin{cases} e = z_1 - y \\ \dot{z}_1 = z_2 - \beta_1 e \\ \dot{z}_2 = z_3 - \beta_2 \cdot fal(e, a_1, \delta) + b_0 u \\ \dot{z}_3 = -\beta_3 \cdot fal(e, a_2, \delta) \end{cases} \quad (14)$$

同样优化相关部分, 便可得到降全阶非线性扩张状态观测器, 如式(15)所示:

$$\begin{cases} e = \ddot{y} - z_3 - b_0 u \\ \dot{z}_3 = \beta_3 \cdot fal(e, a_2, \delta) \end{cases} \quad (15)$$

式中:  $\delta$  为函数内部参数;  $fal$  为非线性函数, 如式(16)所示:

$$fal(e, a, \delta) = \begin{cases} \frac{e}{\delta^{(1-a)}}, & |e| \leq \delta \\ sign(e) |e|^a, & |e| > \delta \end{cases} \quad (16)$$

同样, 两种 NLSFE 控制律可设计为

$$u = \frac{k_1 \cdot fal(r - z_1, a_1, \delta) + k_2 \cdot fal(\dot{r} - z_2, a_2, \delta) - z_3}{b_0} \quad (17)$$

$$u = \frac{k_1 \cdot fal(r - y, a_1, \delta) + k_2 \cdot fal(\dot{r} - \dot{y}, a_2, \delta) - z_3}{b_0} \quad (18)$$

式中:  $0 < a_1 < 1 < a_2 < 2$ ; 一般  $\delta > 0$ , 可取  $5h \leq \delta \leq 10h$ , 其中  $h$  为对象采样周期。

$\delta$  越小,  $fal$  函数值就会越大, 故选定  $\delta = 0.001$ 。经过大量的仿真试验验证, 选择运动性能最好的参数, 取  $a_1 = 0.8, a_2 = 1.2$ 。NLADRC、降全阶 NLADRC (Reduced-Full-Order NLADRC, RNLADRC) 其余参数与 LADRC 相同。

### 2.3 SADRC

SADRC 融合线性与非线性自抗扰控制, 利用智能切换逻辑, 依据系统的实时状态和干扰大小, 动态选择最合适的控制策略, 以提升整体控制性能。基于此, SADRC 首先使用 LADRC 进行粗略的跟踪控制; 随后, 为了提高跟踪精度和抗干扰性能, 切换到 NLADRC; 当观测到输出状态的误差较大时, 为了维护系统的稳定性和控制质量, 再次切换回 LADRC。因此, SADRC 的切换到 LADRC 的条件为

- (1) 前阶段实时运动时刻  $t < T$ ;
- (2) 总扰动  $|z_{n+1}| > M$ ;
- (3) 观测误差  $|e| > K$ 。

在该条件中,  $T$  为认定的运动时间界限, 取总运动时长的 5% ~ 10%;  $M$  和  $K$  为切换条件的临界值, 其初始设定可以通过单独对 NLADRC 进行调

试来确定。

依据 SADRC 原理,系统在满足特定切换条件 A 时, SADRC 切换到 NLADRC, ESO 会转变为 NLESO, LSEF 也会切换到 NLSEF。如果不满足条件 A,则会反向切换回线性模式。基于此,可以得到 SADRC 的控制方程,如式(19)所示:

$$f_{\text{SADRC}} \begin{cases} f_{\text{NLADRC}} = \begin{cases} f_{\text{NLESO}} \\ f_{\text{NLSEF}} \end{cases}, \text{system state} \in A \\ f_{\text{LADRC}} = \begin{cases} f_{\text{LESO}} \\ f_{\text{LSEF}} \end{cases}, \text{system state} \notin A \end{cases} \quad (19)$$

为了减少 LADRC 和 NLADRC 之间的频繁切换,本研究采纳了文献[27]提出的设计思路,引入了一种改良的混合切换平滑技术。这项技术通过将扰动观测值的变化率纳入切换条件,以实现更平稳的切换过程。在切换区间内,控制电压是通过 LADRC 和 NLADRC 输出的加权组合来决定的,其表达如式(20)~式(23)所示:

$$u_{\text{final}} = \lambda u_{\text{NLADRC}} + (1 - \lambda) u_{\text{LADRC}} \quad (20)$$

$$\lambda = \frac{g_{\text{error}} + g_{\text{disturb}}}{2} \quad (21)$$

$$g_{\text{error}} = \begin{cases} 1, & |e| \leq E_1 \\ \frac{E_2 - |e|}{E_2 - E_1}, & E_1 < |e| < E_2 \\ 0, & |e| \geq E_2 \end{cases} \quad (22)$$

$$g_{\text{disturb}} = \begin{cases} 1, & |Z_3| \leq D_1 \\ \frac{D_2 - |Z_3|}{D_2 - D_1}, & D_1 < |Z_3| < D_2 \\ 0, & |Z_3| \geq D_2 \end{cases} \quad (23)$$

式中: $E_1$  和  $E_2$  为位置观测误差边界值的上下限; $D_1$  和  $D_2$  为观测的总扰动范围边界值的上下限; $M_1$  和  $M_2$  为观测的总扰动微分边界值的上下限; $u_{\text{LADRC}}$  和  $u_{\text{NLADRC}}$  为 LADRC、NLADRC 控制器的输出控制电压。

仿真试验显示,这些参数设置为 NLADRC 无扰动的条件下相应部分最大值的 80% 和 100% 时,可以获得理想的切换效果。

状态变量加权切换设计如式(24)所示:

$$z_n = \lambda N z_n + (1 - \lambda) L z_n \quad (24)$$

式中: $N z_n$  和  $L z_n$  为 NLADRC 和 LADRC 的状态变量。

对于 SADRC 的参数配置,只需确保各个组件的参数与其在 LADRC 和 NLADRC 中的参数相匹配即可。

## 2.4 RSADRC

按照 SADRC 的逻辑,搭建 RSADRC,因而得到 RSADRC 的控制方程如式(25)所示:

$$f_{\text{RSADRC}} \begin{cases} f_{\text{RNADRC}} = \begin{cases} f_{\text{RNLESO}} \\ f_{\text{RNLEF}} \end{cases}, \text{system state} \in A \\ f_{\text{RLADRC}} = \begin{cases} f_{\text{RLESO}} \\ f_{\text{RLSEF}} \end{cases}, \text{system state} \notin A \end{cases} \quad (25)$$

混合切换平滑策略依旧沿用 SADRC 的策略。对于平滑策略中变量阈值的确定,仿真试验显示,这些参数设置为 RNLADRC 控制器无扰动的条件下相应部分最大值的 80% 到 100%。

## 2.5 基于 PSO 算法的 RSADRC

PSO 算法是一种仿生优化技术,通过模仿自然界中昆虫等动物的社交互动<sup>[28-29]</sup>调整粒子的动态位置和速度,以实现粒子的邻近性和质量标准。因其易操作、效率出众、鲁棒性强以及具备全面的搜索能力<sup>[30]</sup>,故本文设计了一种融合 PSO 和 RSADRC 的 PSO-RSADRC,利用 PSO 的优势来整定 RSADRC 中 NLSEF 的 3 个参数,以提升 RSADRC 的控制效果。

首先初始化粒子的位置,将粒子随机地分布在所给的参数区间,并且初始化每个粒子的起始速度,如式(26)所示:

$$\begin{cases} v_{ij}(t+1) = w v_{ij}(t) + c_1 r_1 [p_{ij}(t) - x_{ij}(t)] + \\ c_2 r_2 [g_{ij}(t) - x_{ij}(t)] \\ x_{ij}(t+1) = x_{ij}(t) + v_{ij}(t+1) \end{cases} \quad (26)$$

式中: $w$  为惯性权重,决定粒子保持当前速度的能力; $c_1$ 、 $c_2$  为学习因子,影响粒子向个体最优解移动速度; $r_1$ 、 $r_2$  为 0 到 1 之间的随机数,增加了粒子运动的不确定性; $v_{ij}$ 、 $x_{ij}$  分别粒子在某一时刻的速度、位置,受到人为设定的界限限制,确保不会超出预设的范围; $p_{ij}$  为个体最优位置; $g_{ij}$  为全局最优位置。

速度更新式包含 3 个部分:第一部分是惯性项,反映了粒子维持其速度的趋势;第二部分是个体学习部分,表示粒子向其历史最佳位置移动的

倾向;第三部分是社会学习部分,显示了粒子向群体最佳位置移动的趋势,这 3 个要素共同决定了粒子的速度更新。

适应度函数是 PSO 算法中的核心组成部分,用于评估粒子在搜索空间中的位置是否接近于最优解。将适应度函数定义为系统规划运动开始至运动结束这个阶段的反馈值与规划值之间的误差累积和,即时间加权绝对误差积分(Integral of Time-weighted Absolute Error, ITAE),如式(27)所示:

$$ITAE = \int_0^T |e(t)| dt \quad (27)$$

式中: $T$ 为总观测时间; $t$ 为运动时刻; $e(t)$ 为 $t$ 时刻的位置误差,用于对控制器的稳态性能和快速响应能力进行量化评估。

较低的 ITAE 值意味着系统具有更好的稳定性和较快的动态响应能力。

### 3 仿真与试验验证

#### 3.1 仿真验证

针对相同四阶的 S 形路径规划任务,5 种不同的 ADRC 算法在统一的运动规划条件下运行。在 0.1 s 时,引入了一个大小为 1 的阶跃扰动,反馈位置对比以及位置误差对比如图 2 所示。将图 2 中的数据信息整理,得到表 1。

表 1 不同控制器运动性能

控制器	超调量/%	最大动态误差/ $\mu\text{m}$	ITAE
LADRC	0.125	608	48
NLADRC	0.35	275	14.1
SADRC	0.312	375	24.15
RSADRC	0.125	325	13.12
PSO-RSADRC	$\approx 0$	19	0.95

如表 1 所示,在超调量方面 RSADRC 与 LADRC 的效果较好,PSO-RSADRC 的效果最好;ITAE 方面,RSADRC 与 NLADRC 相差不大,LADRC 的 ITAE 最大,PSO-RSADRC 的 ITAE 最小;PSO-RSADRC 的最大动态误差最小,LADRC 最大。从图 2 中明显地看出 SADRC 遇到干扰后的抗扰动能力明显比 LADRC 强,PSO-RSADRC 表现更甚。故综合性能表现为:PSO-RSADRC > RSADRC > NLADRC > SADRC > LADRC。

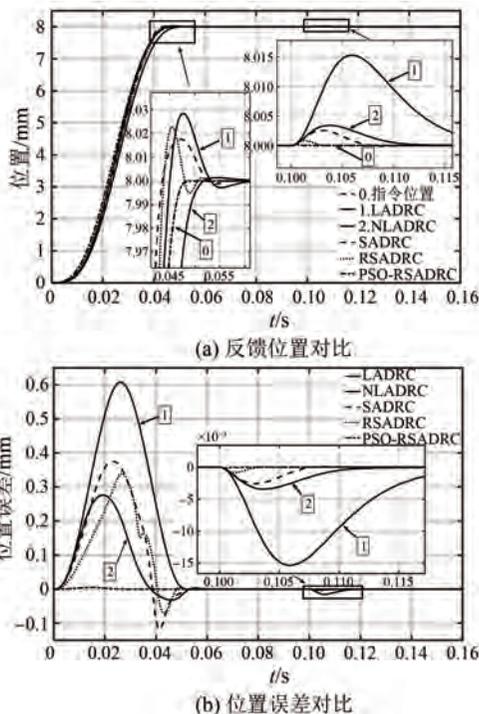


图 2 S 型点位运动对比

Fig. 2 S-type point motion contrast

#### 3.2 试验验证

在相同四阶 S 形路径规划条件下,通过试验平台验证 5 种不同的 ADRC 算法。仿真中的阶跃信号干扰在试验中用负载 3 kg 代替其外部干扰。

在试验平台对 PSO-RSADRC 参数进行离线整定,最后整定的 3 个值分别为  $\omega_c = 318$ 、 $a_1 = 1.081$ 、 $a_2 = 1.988$ 。其优化曲线如图 3 所示,反馈位置对比以及位置误差对比如图 4 所示。将图 4 中的数据信息整理,得到表 2。

表 2 仿真不同控制器运动性能对比

控制器	超调量/%	最大动态误差/ $\mu\text{m}$	整定时间/ms
LADRC	6.21	491.2	86.25
NLADRC	-0.03	187.2	81.25
SADRC	1.42	576.4	79.25
RSADRC	0.46	494.2	66.25
PSO-RSADRC	0.18	490.8	57

从表 2 可以看出:RSADRC 的整定时间为 66.25 ms,LADRC 为 86.25 ms,这表明控制策略从 SADRC 变化到 PSO-RSADRC 系统的快速性逐步提升。PSO-RSADRC 的最大动态误差为 490.8  $\mu\text{m}$ ,略高于 RSADRC,但低于 SADRC,显示出一定的优化效果。综合来看 PSO-RSADRC 在

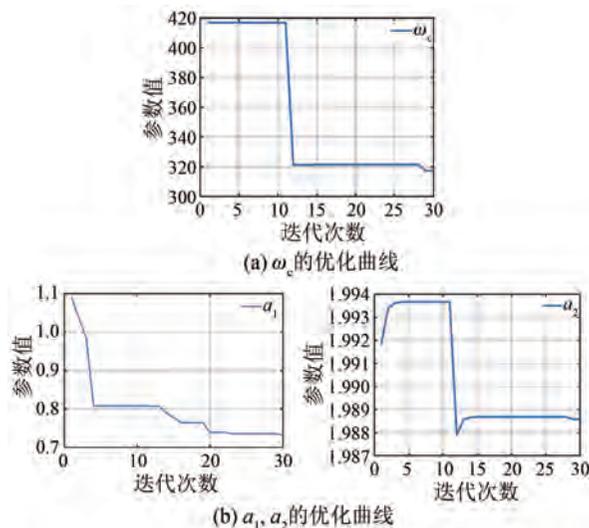


图3 PSO-RSADRC 中 NLSEF 参数优化曲线  
Fig. 3 NLSEF parameter optimization curves in PSO-RSADRC

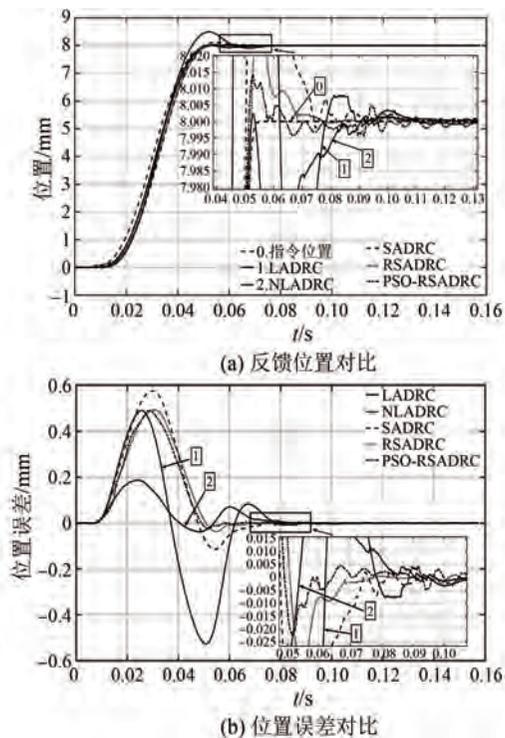


图4 S型点位运动对比  
Fig. 4 S-type point motion contrast

快速性和稳定性之间取得了较好的平衡,其整定时间最短、超调量和最大动态误差均表现良好。

SADRC、RSADRC 及 PSO-RSADRC 3 种控制策略的核心机制均涉及线性/非线性模式切换。图3通过量化切换阈值与持续时间占比的可视化表征,详细展示了各算法在模式转换阶段的动态

特性差异。

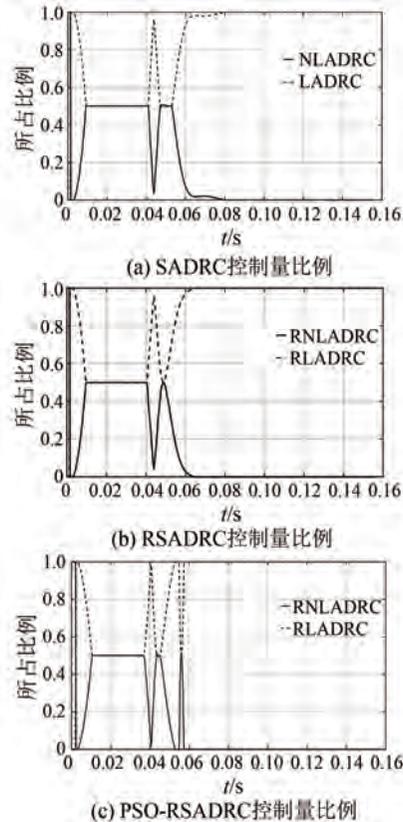


图5 三种 SADRC 中性性与非线性控制量比例  
Fig. 5 The portion of linear and nonlinear control quantities in the three SADRC

从图3中可以看出,随着控制策略从 SADRC 到 RSADRC 再到 PSO-RSADRC 的演变,系统的快速性在逐步提升。其中,PSO-RSADRC 在镇定时间上表现最佳,NLADRC、RNLADRC 的响应速度也依次加快,说明 PSO-RSADRC 对于扰动观测更加细致,反应也更加灵敏。在一些需要非线性控制量介入的阶段,能够积极响应,充分验证了该算法在工业场景中应对复杂扰动的工程适用性。

#### 4 结语

在 PMSLM 的位置控制中,针对传统控制方法中动态响应慢和跟踪精度不高的问题,对标准 SADRC 的 LESO 和 NLESO 进行了改进优化,得到 RSADRC,并且在仿真与试验中也验证了其可靠性。同时,对 NLSEF 模块进行了优化仿真,结果表明,所提出的 PSO-RSADRC 策略在 1 A 阶跃扰动下的时间加权绝对误差积分降至 0.95,最大动态误差仅为 19 μm,较传统线性自抗扰控制精度

提升 98%。试验平台验证中, 整定时间缩短至 57 ms, 响应速度提升 32%。PSO-RSADRC 策略有效解决了多源扰动下的精密运动控制难题, 其参数整定效率与抗扰鲁棒性显著优于传统方法, 为微电子封装等高精度工业场景提供了可靠的技术方案。

### 利益冲突声明

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

### 作者贡献

饶欢进行了控制器方案研究设计, 控制器搭建, 仿真试验, 与论文撰写, 梁文进行了仿真对比方案讨论与完善, 其余同学参与了论文的审核与修改。所有作者均阅读并同意了最终稿件的提交。

The controller scheme was researched and designed by Rao Huan, who also implemented the controller setup and conducted simulation experiments. The manuscript was drafted by Rao Huan as well. Liang Wen contributed to the discussion and refinement of the comparative simulation schemes. The remaining co-authors participated in reviewing and revising the manuscript. All authors have read and approved the final version for submission.

### 参考文献

- [ 1 ] HAN J Q. From PID to active disturbance rejection control [ J ]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(3): 900-906.
- [ 2 ] 刘鞠波, 蓝益鹏. 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[ J ]. 电机与控制应用, 2024, 51(10): 98-106.
- LIU J B, LAN Y P. Research on improved active disturbance rejection control for maglev system of hybrid excitation flux switching linear motor [ J ]. Electric Machines & Control Application, 2024, 51(10): 98-106.
- [ 3 ] 张德民, 徐仕源. 基于自抗扰的自适应控制在永磁同步电机控制中的应用[ J ]. 电机与控制应用, 2017, 44(4): 70-73.
- ZHANG D M, XU S Y. Application of adaptive control based active disturbance rejection control for permanent magnet synchronous motor control [ J ]. Electric Machines & Control Application, 2017, 44(4): 70-73.
- [ 4 ] 方圣龙, 樊继东. 一种基于自抗扰的永磁同步电机复合控制策略[ J ]. 电机与控制应用, 2023, 50(10): 62-69.
- FANG S L, FAN J D. A composite control strategy of permanent magnet synchronous motor based on active disturbance rejection [ J ]. Electric Machines & Control Application, 2023, 50(10): 62-69.
- [ 5 ] 张长胜, 马泽楠, 李宽, 等. 改进狼群算法的 SCARA 机械臂自适应迭代学习控制[ J ]. 机械科学与技术, 2020, 39(8): 1177-1183.
- ZHANG C S, MA Z N, LI K, et al. Adaptive iterative learning control of SCARA manipulator with improved wolf pack algorithm [ J ]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2020, 39(8): 1177-1183.
- [ 6 ] 隋延飞, 李旭, 李星占, 等. 基于模糊自抗扰的精密直线电机运动控制[ J ]. 电机与控制应用, 2020, 47(6): 6-11.
- SUI Y F, LI X, LI X Z, et al. Precise linear motor motion control based on fuzzy ADRC [ J ]. Electric Machines & Control Application, 2020, 47(6): 6-11.
- [ 7 ] 李亮. 基于改进 PSO 算法的直升机线性自抗扰控制器优化设计[ J ]. 信息通信, 2019, (4): 44-50.
- LI L. LDARC controller optimization design based on improved PSO algorithm for attitude control of helicopter [ J ]. Information & Communications, 2019, (4): 44-50.
- [ 8 ] FENG H J, LIU J C. Research on mathematical statistics method based on computer big data [ C ] // 2022 IEEE International Conference on Electrical Engineering, Big Data and Algorithms, Changchun, 2022.
- [ 9 ] GOLDFARB D. A family of variable metric updates derived by variational means [ J ]. Mathematics of Computation, 1970, (24): 23-26.
- [ 10 ] LIANG J W, YU Z L, GU Z H, et al. Electromagnetic source imaging via Bayesian modeling with smoothness in spatial and temporal domains [ J ]. IEEE Transactions on Neural Systems and

- Rehabilitation Engineering, 2022, 30: 2362-2372.
- [11] STEMPKOVSKY L, TELPUHOV D V, NADOLENKO V V. Espresso-like iterative algorithm for three-level logic minimization [C] // 2023 Seminar on Networks, Circuits and Systems, Saint Petersburg, 2023.
- [12] GAO Z Q. Scaling and bandwidth-parameterization based controller tuning [C] // Proceedings of the 2003 American Control Conference, Denver, CO, 2003.
- [13] 马雨新, 雷子奇, 顾萍萍, 等. 基于改进型超螺旋滑模线性自抗扰的永磁同步电机速度控制研究 [J]. 电机与控制应用, 2024, 51(9): 103-112.  
MA X Y, LEI Z Q, GU P P, et al. Research on PMSM speed control based on improved super-twisting sliding mode linear active disturbance rejection [J]. Electric Machines & Control Application, 2024, 51(9): 103-112.
- [14] 殷允飞, 上官凌霄, 侯福金, 等. 基于二阶滑模自抗扰控制的道路融冰除雪系统水泵电机优化策略 [J]. 电机与控制应用, 2023, 50(3): 29-38.  
YING Y F, SHANGGUAN L X, HOU F J, et al. High-performance second-order sliding mode control Strategy for water pump motor of melting and snow removal system via disturbance observer [J]. Electric Machines & Control Application, 2023, 50(3): 29-38.
- [15] 郭伟, 罗力成, 陆江燕, 等. 基于线性自抗扰控制的永磁同步电机无传感器控制 [J]. 电机与控制应用, 2023, 50(8): 1-8.  
GUO W, LUO L C, LU J Y, et al. Sensorless control of permanent magnet synchronous motor based on linear active disturbance rejection control [J]. Electric Machines & Control Application, 2023, 50(8): 1-8.
- [16] WAN H, QI X H, LI J. Stability analysis of linear/nonlinear switching active disturbance rejection control based MIMO continuous systems [J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2021, 32(4): 956-970.
- [17] 朱焜秋, 赵泽龙. 三自由度六极混合磁轴承线性/非线性切换自抗扰解耦控制 [J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(10): 3077-3086.  
ZHU H Q, ZHAO Z L. Decoupling control based on linear/nonlinear active disturbance rejection switching for 3-degree-of-freedom 6-pole hybrid magnetic bearing [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(10): 3077-3086.
- [18] ZHU H Q, WANG S S. Decoupling control based on linear/non-linear active disturbance rejection switching for three-degree-of-freedom six-pole active magnetic bearing [J]. IET Electric Power Applications, 2020, 14(10): 1818-1827.
- [19] WANG R Z, LI X M, ZHANG J G, et al. Speed control for a marine diesel engine based on the combined linear-nonlinear active disturbance rejection control [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2018, 2018: 7641862.
- [20] 高旭生, 李娟, 李生权, 等. 基于降阶自抗扰的永磁同步电机位置控制 [J]. 组合机床与自动化加工技术, 2022, (8): 105-108+113.  
GAO X S, LI J, LI S Q, et al. Permanent magnet synchronous motor position control based on reduced-order active disturbance rejection [J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2022, (8): 105-108+113.
- [21] 段振云, 王宁, 杨旭, 等. 一种改进 B 样条曲线拟合算法研究 [J]. 机械设计与制造, 2016, (5): 17-19.  
DUAN Z Y, WANG N, YANG X, et al. An algorithm of improved B-spline curve fitting [J]. Machinery Design & Manufacture, 2016, (5): 17-19.
- [22] 孙玉娥, 林浒. NURBS 曲线实时插补中的速度规划算法 [J]. 小型微型计算机系统, 2010, 31(6): 1162-1165.  
SUN Y E, LIN H. Speed planning algorithm in real-time interpolation of NURBS curve [J]. Small Microcomputer System, 2010, 31(6): 1162-1165.
- [23] 罗亮, 高敏, 黄正良, 等. B 样条曲线柔性加减速前瞻控制算法的研究 [J]. 机械设计与制造, 2017, (9): 254-256+260.  
LUO L, GAO M, HUANG Z L, et al. B-spline curve look ahead algorithm with flexible acceleration and deceleration method [J]. Machinery Design & Manufacture, 2017, (9): 254-256+260.
- [24] TAN A, GUO X W, WANG Q J, et al. Point to point trajectory planning of permanent magnet spherical motor based on quintic polynomial interpolation [C] // 2023 26th International Conference on Electrical Machines and Systems, Zhuhai, 2023.

- [25] ZHANG H Z, FUKUNAGA H, ISHIZUKA R, et al. Multi-floor positioning method based on RSSI in wireless sensor networks [ C ] // 2022 61st Annual Conference of the Society of Instrument and Control Engineers, Kumamoto, 2022.
- [26] 王允森, 盖荣丽, 孙一兰, 等. 高质量加工中四次多项式速度规划算法研究 [ J ]. 中国机械工程, 2014, 25(5): 636-641.
- WANG Y S, GAI R L, SUN Y L, et al. Research on quartic polynomial velocity planning algorithm for high-quality machining [ J ]. China Mechanical Engineering, 2014, 25(5): 636-641.
- [27] 郝正杰. 基于自抗扰控制的永磁同步电机驱动系统关键技术研究 [ D ]. 长春: 吉林大学, 2023.
- HAO Z J. Research on key technologies of permanent magnet synchronous motor drive system based on active disturbance rejection control [ D ]. Changchun: Jilin University, 2023.
- [28] TOLABI H B, ARA A L, HOSSEINI R. An enhanced particle swarm optimization algorithm to solve probabilistic load flow problem in a microgrid [ J ]. Applied Intelligence, 2021, 51: 1645-1668.
- [29] CAI Z H. Application of PSO algorithm in optimizing BP neural network [ C ] // 2024 IEEE 2nd International Conference on Control, Electronics and Computer Technology, Jilin, 2024.
- [30] PHOMMIXAY S, DOUMBIA M, ST-PIERRE D L. Review on the cost optimization of microgrids via particle swarm optimization [ J ]. International Journal of Energy and Environmental Engineering, 2020, 11: 73-89.

收稿日期:2024-12-26

收到修改稿日期:2025-03-31

作者简介:

饶欢(2000-),男,硕士研究生,研究方向为运动控制,1526669764@qq.com;

\*通信作者:饶欢(2000-),男,硕士研究生,研究方向为运动控制,1526669764@qq.com。