

基于改进黑翅鸢算法的永磁同步电机自抗扰控制

王子辰, 胡春鹤*

(北京林业大学 工学院, 北京 100083)

Active Disturbance Rejection Control of Permanent Magnet Synchronous Motor Based on Improved Black-winged Kite Algorithm

WANG Zichen, HU Chunhe*

(College of Engineering, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: [Objective] Permanent magnet synchronous motor (PMSM) is widely used in servo systems, electric vehicles and other fields, where high requirements exist for motor control accuracy, response speed, and anti-interference ability. The speed control of PMSM mostly adopts proportional integral differential (PID) control. However, the linear structure of traditional PID controllers struggles to provide the precise tracking performance and anti-interference ability required by PMSM when dealing with complex nonlinear systems. In order to address this issue, this paper proposes an active disturbance rejection control (ADRC) strategy based on the improved Black-winged Kite algorithm (IBKA). [Methods] Firstly, the PMSM was modeled and analyzed in the $d-q$ coordinate system, and a speed controller for the PMSM was designed. Nonlinear ADRC was used to control the PMSM's speed loop to enhance the system's robustness against model uncertainties and external disturbances. The core advantage of ADRC is its ability to estimate and compensate for the total disturbance of the system in real time through the extended state observer, including unmodeled dynamics and external disturbances, thereby achieving precise control of the system state. Secondly, to address the issue of traditional ADRC relying on experience for parameter tuning, an IBKA algorithm that integrated Tent chaotic mapping and Gaussian mutation mechanism was proposed. This algorithm was used to achieve real-time online tuning of ADRC parameters. Finally, simulations based on Matlab/Simulink were conducted to verify the effectiveness of the ADRC strategy based on IBKA optimization proposed in this paper. [Results] The simulation results showed that compared with the traditional proportional integral (PI) control and standard ADRC, the ADRC based on IBKA optimization enabled the PMSM to exhibit good dynamic and static performance, with faster

response speed, better tracking accuracy, stronger anti-interference ability, and superior torque control capability. The simulation results not only verified the effectiveness of IBKA in ADRC parameter optimization but also demonstrated the potential of ADRC in improving PMSM control performance. [Conclusion] The control strategy proposed in this paper provides an effective solution for PMSM in high precision, high dynamic, and high anti-interference applications, with important theoretical significance and practical value.

Key words: permanent magnet synchronous motor; active disturbance rejection control; Black-winged Kite algorithm; parameter tuning

摘要: [目的] 永磁同步电机 (PMSM) 被广泛应用于伺服系统、电动汽车等领域, 这些领域对电机控制的精度、响应速度和抗干扰能力要求较高。PMSM 速度控制多采用比例积分微分 (PID) 控制, 然而, 传统 PID 控制器的线性结构在面对复杂的非线性系统时, 难以提供 PMSM 所需的精确跟踪性能和抗干扰能力。针对此问题, 本文提出了一种基于改进黑翅鸢算法 (IBKA) 的自抗扰控制 (ADRC) 策略。【方法】首先, 在 $d-q$ 坐标系下对 PMSM 进行建模和分析, 并对 PMSM 速度控制器进行设计, 采用非线性 ADRC 对 PMSM 的速度环进行控制, 以增强系统对模型不确定性和外部扰动的鲁棒性。ADRC 的核心优势在于其能够通过扩张状态观测器实时估计并补偿系统的总扰动, 包括未建模动态和外部干扰, 从而实现对系统状态的精确控制。然后, 针对传统 ADRC 依赖经验进行参数整定的问题, 提出了一种融合 Tent 混沌映射和高斯变异机制的 IBKA, 通过该算法实现 ADRC 参数的实时在线整定。最后, 基于 Matlab/Simulink 进行仿真, 验证本文所提基于 IBKA 优化的 ADRC 策略的有效性。【结果】仿真结果表明, 相较于传统的比例积分 (PI) 控制和标准 ADRC, 基于 IBKA 优化的 ADRC 能够使 PMSM 表现出良

好的动、静态性能,具有更快的响应速度、更好的跟踪精度、更强的抗干扰能力和更优的转矩控制能力。仿真结果不仅验证了 IBKA 在 ADRC 参数优化方面的有效性,还展示了 ADRC 在提高 PMSM 控制性能方面的潜力。【结论】本文提出的控制策略为 PMSM 在高精度、高动态和高抗干扰中的应用提供了一种有效的解决方案,具有一定的理论意义和应用价值。

关键词: 永磁同步电机; 自抗扰控制; 黑翅鸢算法; 参数整定

0 引言

随着现代工业自动化和智能制造的迅速发展,各行业对电机控制性能的要求日益提高^[1-2]。永磁同步电机 (Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM) 凭借其高效率、高控制性能、高可靠性以及低噪音等优势,在众多领域得到广泛应用^[3]。然而,在实际运行中,PMSM 易受多种干扰因素的影响,例如负载扰动、参数变化和外部环境变化等,这些因素会导致电机动态响应变慢、稳态精度下降,甚至引起系统不稳定^[4]。PMSM 作为一种非线性、强耦合的多变量系统,其控制系统设计面临诸多挑战,传统的控制方法往往难以实现理想的控制效果^[5-8]。

在工程实践中,PMSM 速度控制多采用比例积分微分 (Proportional Integral Differential, PID) 控制器,PID 控制的实现相对简单^[9]。然而,传统 PID 控制器的线性结构在面对复杂的非线性系统时,难以提供 PMSM 所需的精确跟踪性能和抗干扰能力^[10]。为提升系统的控制性能,研究者们提出了多种先进的非线性控制方法,包括模糊控制^[11]、滑模控制^[12]、鲁棒控制^[13]以及神经网络方法^[14]等。虽然这些先进的控制方法在理论上展现出卓越的性能,但是往往涉及复杂的理论架构,或者需要依赖于精确的数学模型来实现;在实际工程应用中的门槛相对较高,需要具备深厚的理论基础和对模型的精确掌握^[15]。因此,研究一种既能够满足 PMSM 在复杂环境中的控制要求又具有较低实施门槛的控制方法,对于提高 PMSM 在工程实践中的应用效率和可靠性具有重要意义。

自抗扰控制 (Active Disturbance Rejection Control, ADRC) 是一种先进的控制方法,通过估计和补偿系统的内部和外部干扰,可实现对目标

的精确控制,特别适用于处理非线性、强耦合和不确定性的复杂系统^[16]。自抗扰控制器由跟踪微分器 (Tracking Differentiator, TD)、扩张状态观测器 (Extended State Observer, ESO) 和非线性状态误差反馈 (Nonlinear State Error Feedback, NLSEF) 三部分组成。ESO 将模型的不确定性和外部干扰视为总体干扰进行估计,然后通过 NLSEF 消除误差;TD 确保系统能够快速且无超调地响应输入信号^[17]。然而,ADRC 的控制参数较多,且其非线性结构使得参数意义不够明确^[18],传统的自抗扰控制器的设计通常依赖于经验和反复试错,难以实现参数配置的最优化,从而影响控制器的控制精度^[19]。

随着智能优化算法的快速发展,其在控制系统参数整定中的应用日益广泛,采用智能优化算法进行参数整定,能够有效提高控制系统的性能,获得更优的控制效果^[20]。文献[21]提出了一种基于改进黏菌算法的优化方法用于 PID 控制器的参数整定,取得了较好的控制效果。文献[22]提出一种基于粒子群算法的 ADRC 参数整定方法,提高了系统的控制性能。黑翅鸢算法 (Black-winged Kite Algorithm, BKA) 作为一种新型群智能优化算法,与现有的多种智能优化算法相比,具有进化能力强、搜索速度快以及寻优能力强等优点^[23]。

本文针对 PMSM 的高精度控制要求,首先,将非线性 ADRC 应用于 PMSM 速度环控制,以提高系统的跟踪性能和抗干扰能力^[22]。然后,针对非线性 ADRC 参数较多难以通过试凑法进行整定的问题,采用基于 Tent 混沌映射以及高斯变异机制的改进黑翅鸢算法 (Improved BKA, IBKA) 对 ADRC 参数进行实时整定,进一步提高自抗扰控制器的控制性能。最后,基于 Matlab/Simulink 进行仿真分析。仿真结果表明,基于 IBKA 优化的自抗扰控制器能够使 PMSM 具有更快的响应速度、更好的跟踪精度和更强的抗干扰能力。

1 PMSM 数学模型

在两相同步旋转 $d-q$ 坐标系下对 PMSM 进行建模和分析。应用 $i_d=0$ 矢量控制方法,PMSM 的电压方程为

$$\begin{cases} u_d = -\omega_e L_s i_q \\ u_q = R_s i_q + L_s \frac{di_q}{dt} + \omega_e \psi_f \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} e_1 = v_1(k) - z_1(k) \\ e_2 = v_2(k) - z_2(k) \\ u_0 = \beta_1 \text{fal}(e_1, \alpha_3, \delta) + \beta_2 \text{fal}(e_2, \alpha_4, \delta) \\ u(k) = u_0 - \frac{z_3(k)}{b} \end{cases} \quad (9)$$

式中: β_1, β_2 为函数增益; α_3, α_4 为 fal 函数的非线性因子。

基于 ADRC 的 PMSM 双闭环控制系统框图如图 2 所示。其中, 速度外环采用 ADRC, 电流内环采用比例积分 (Proportional Integral, PI) 控制。这种控制结构不仅能实现对 PMSM 速度的精确控制, 还能确保电流控制的稳定性和响应速度^[16]。

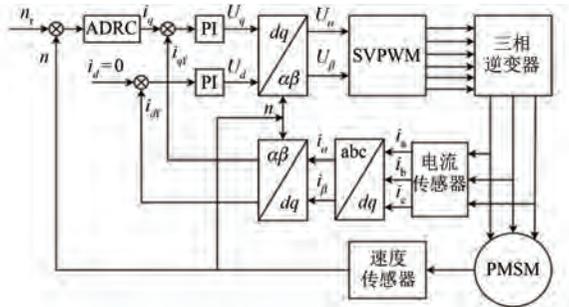


图 2 基于 ADRC 的 PMSM 双闭环控制系统框图

Fig. 2 Block diagram of the dual-loop control system for PMSM based on ADRC

3 基于 IBKA 的 ADRC 参数优化

3.1 PMSM 调速过程优化目标

在控制系统设计中, 为了获得理想的控制性能, 本文综合考量了系统的快速响应、稳定性和控制精度, 并将上升时间 t_r 、超调量 M_p 和系统误差 e 等关键性能指标以加权方式整合到性能评估体系中。基于积分绝对误差指标, 为了进一步提升系统的响应速度, 本文引入了惩罚函数方法, 若系统在指定仿真周期内未达到预期的期望值, 则惩罚函数 penalty 将赋予一个较大的值 k_i , 以反映系统响应的延迟; 反之, 若系统在规定周期内成功达到期望值, 则惩罚函数的值将相应减小。惩罚函数的具体定义如式 (10) 所示:

$$\text{penalty} = \begin{cases} k_i, & \text{false} \\ t_r, & \text{true} \end{cases} \quad (10)$$

适应度函数表达式为

$$F = \int_0^{T_s} [\eta_1 | e(t) | + \eta_2 | M_p |] dt + \text{penalty} \quad (11)$$

式中: η_1, η_2 为权重; T_s 为采样周期。

3.2 ADRC 参数整定方案设计

自抗扰控制器的性能在很大程度上由其内部参数配置决定, 其中 ESO 作为 ADRC 的核心部分, 其观测和补偿直接影响整个系统的控制性能, 而参数 $\beta_{01}, \beta_{02}, \beta_{03}, \beta_1$ 和 β_2 直接影响 ESO 的性能。

这些参数的调节范围较大且调节过程较为复杂, 为了快速获得一组能够满足系统调速性能指标的最优参数组合, 本文提出了一种基于智能优化算法的非线性参数自整定方案。该方案以调速过程的性能指标为优化目标, 将非线性 ADRC 与智能优化算法相结合, 通过迭代寻优, 自动获取一组最优参数组合。PMSM 非线性 ADRC 参数整定方案的设计流程如图 3 所示。

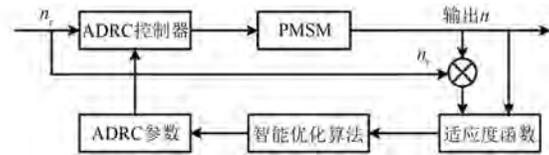


图 3 ADRC 参数整定方案设计流程

Fig. 3 ADRC parameter tuning scheme design flowchart

本文所设计的非线性 ADRC 参数整定方案流程简便易行, 仅需通过智能优化算法确定五个关键参数, 即可获得理想的调速控制性能。此方法不仅显著降低了整定成本, 还具有较好的整定效果。然而, 其成功应用高度依赖于所采用的智能优化算法, 该算法需具备卓越的全局优化能力, 以确保在复杂系统中仍能稳定、高效地找到最优解。

3.3 标准 BKA

Wang^[23] 等人在 2024 年提出了一种名为 BKA 的新型元启发式算法。该算法的构思借鉴了黑翅鸢的狩猎行为和迁徙模式, 黑翅鸢在狩猎和迁徙中表现出高度的适应性和智能行为。与现有的智能优化算法相比, BKA 具有进化能力强、搜索速度快以及寻优能力强等优点。

BKA 均匀地分配每只黑翅鸢的位置, 其种群初始化过程如式 (12) 所示:

$$X_i = BK_{lb} + \text{rand}(BK_{ub} - BK_{lb}) \quad (12)$$

式中: i 为 $1 \sim pop$ 之间的整数, pop 为种群数; BK_{lb} 和 BK_{ub} 分别为第 j 维黑翅鸢的下界和上界; $rand$ 为 $[0,1]$ 上的随机数。

在初始化过程中,BKA选择适应度值最好的个体作为初始群体中的领导者,初始领导者的位置 X_L 即黑翅鸢的最优位置。以最小值为例, X_L 的表达式为

$$f_{best} = \min[f(X_i)] \quad (13)$$

$$X_L = X\{find[f_{best} = f(X_i)]\} \quad (14)$$

式中: f_{best} 为当前找到的最优目标函数值; $f(\cdot)$ 为目标函数,即需要优化的函数; $find(\cdot)$ 为查找函数,用于找到使目标函数达到最小值的变量位置; X 为候选解的集合,即所有可能的解的集合。

黑翅鸢狩猎行为的数学模型为

$$y_{t+1}^{i,j} = \begin{cases} y_t^{i,j} + n(1 + \sin r) \times y_t^{i,j}, & p < r \\ y_t^{i,j} + n(2r - 1) \times y_t^{i,j}, & \text{else} \end{cases} \quad (15)$$

$$n = 0.05 \times e^{-2 \times (\frac{t}{T})^2} \quad (16)$$

式中: $y_t^{i,j}$ 和 $y_{t+1}^{i,j}$ 分别为第 i 只第 j 维黑翅鸢在第 t 次和第 $t+1$ 次迭代步骤中的位置; r 为 $0 \sim 1$ 之间的随机数; $p=0.9$ 为一个固定的概率阈值; T 为总迭代次数; t 为到目前为止已经完成的迭代次数。

鸟类在迁徙过程中,领导者的导航技能是决定迁徙是否成功的关键因素。根据鸟类迁徙提出了一个基于适应度的领导选择假设:若领导者的适应度值低于随机种群的适应度值,则其将放弃领导权;反之则继续领导直至迁徙完成。这一假设有助于动态优化领导者的选择,以确保迁徙过程的成功。黑翅鸢迁徙行为的数学模型为

$$y_{t+1}^{i,j} = \begin{cases} y_t^{i,j} + C(0,1) \times (y_t^{i,j} - L_t^j), & F_i < F_{ri} \\ y_t^{i,j} + C(0,1) \times (L_t^j - m \times y_t^{i,j}), & \text{else} \end{cases} \quad (17)$$

$$m = 2 \times \sin(r + \pi/2) \quad (18)$$

式中: L_t^j 为第 j 维黑翅鸢迭代至第 t 次时的领导者; F_i 为第 j 维任意黑翅鸢在第 t 次迭代中的位置; F_{ri} 为第 j 维任意黑翅鸢在第 t 次迭代中随机位置的适应度值; $C(0,1)$ 为柯西突变。

3.4 IBKA

3.4.1 混沌序列初始化

BKA在种群初始化阶段采用随机方法确定个体位置,这可能导致初始种群在搜索空间中的分布不均,从而影响种群多样性的保持和算法的

全局搜索能力^[28-29]。混沌理论能有效提高算法的全局搜索能力和种群多样性。同时,混沌运动的随机性、规律性和遍历性有助于算法避免陷入局部最优解^[30]。

Logistic混沌映射常在智能优化算法中被用于种群初始化以丰富多样性,但研究表明Tent混沌映射在遍历均匀性和收敛速度方面具有更优的表现。为了验证这一点,本文设置种群规模为500,并在 $[0,1]$ 上使用Logistic映射和Tent映射生成混沌序列。Logistic混沌与Tent混沌映射分布对比如图4所示,可以观察到Logistic混沌映射生成的序列在 $[0,0.1]$ 和 $[0.9,1]$ 上的概率分布高于其他区间,而Tent混沌映射生成的序列则展现出更为均匀的概率分布。

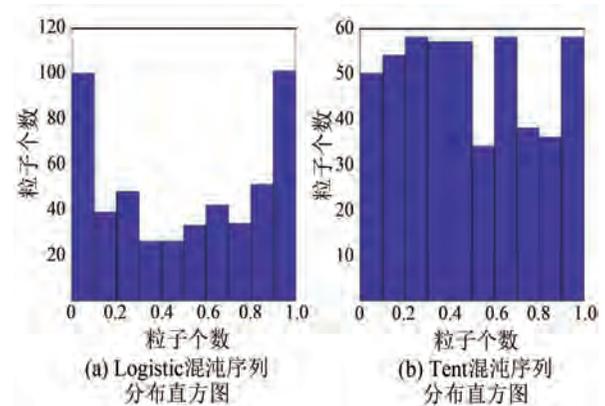


图4 Logistic与Tent混沌映射分布对比

Fig. 4 Comparison of Logistic and Tent chaotic map distributions

因此,本文选择Tent混沌映射作为IBKA迭代初期的种群初始化方法。这种方法能够确保黑翅鸢个体在搜索空间内的位置分布更加均匀,从而有助于提升算法的搜索效率和求解性能。Tent混沌映射的数学表达式为

$$x_{i+1} = \begin{cases} \frac{x_i}{a}, & x_i < a \\ \frac{1 - x_i}{1 - a}, & x_i \geq a \end{cases} \quad (19)$$

式中: x_i, x_{i+1} 分别为当前状态、下一个状态; $a \in (0,1)$ 。

设定参数 a 为0.5,Tent混沌映射展现出其最典型的形态,在此设定下得到的序列展现出高度均匀分布的特性。对于不同的参数值,Tent混沌映射生成的序列保持了相似分布密度,这一性

质对于优化算法中的种群多样性和全局搜索能力具有显著影响。

3.4.2 高斯变异

高斯变异是一种基于高斯分布的变异机制,其核心在于在变异过程中引入一个服从数学期望为 μ 、方差为 σ^2 的正态分布的随机数,用以替换个体的原始参数值。具体的变异表达式为

$$mutation(x) = x[1 + N(0,1)] \quad (20)$$

式中: x 为原始的参数值; $N(0,1)$ 为服从期望为 0、方差为 1 的正态分布的随机数; $mutation(x)$ 为高斯变异后的数值。

根据正态分布的性质,高斯变异主要在原始个体的邻近区域内进行搜索。当算法中的个体适

应度值出现聚集现象时,应用高斯变异对这些聚集的个体进行变异操作,可以有效地促进算法在局部区域内进行精细搜索,从而有助于算法以更高的效率和精度找到全局极小值点,增强算法的区域搜索能力。

4 仿真分析

为了验证本文所提的基于 IBKA 优化的自抗扰控制器的有效性,在 Matlab/Simulink 上进行仿真分析,仿真模型如图 5 所示。经 IBKA 寻优后的 ADRC 参数为 $\beta_1 = 2\ 715.36$ 、 $\beta_2 = 411.79$ 、 $\beta_{01} = 40\ 005.32$ 、 $\beta_{02} = 526.16$ 和 $\beta_{03} = 799.87$ 。PMSM 主要参数如表 1 所示。

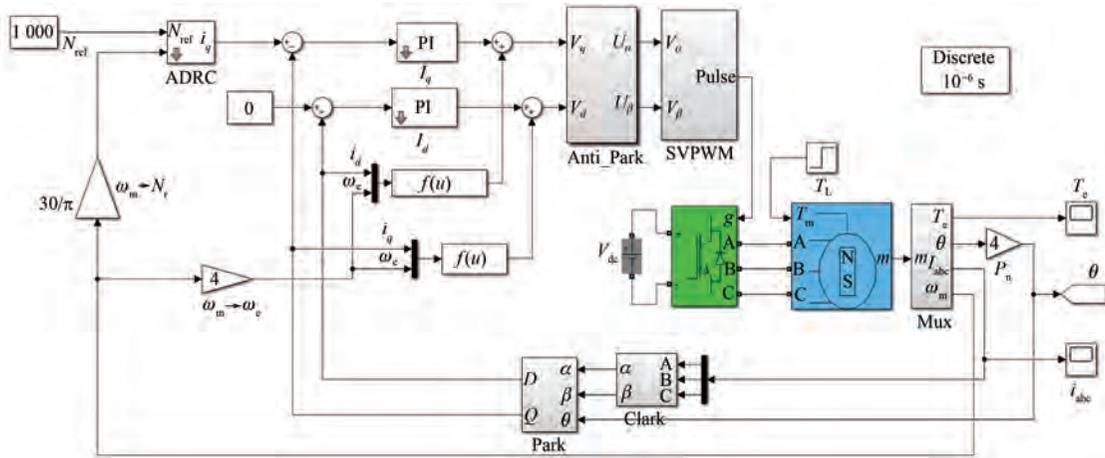


图 5 基于 ADRC 的 PMSM 控制系统 Simulink 仿真模型

Fig. 5 Simulink simulation model of PMSM control system based on ADRC

表 1 PMSM 主要参数

Tab. 1 Key parameters of PMSM

参数名称	参数值
定子电阻 R_s/Ω	0.96
电感 L/H	1.67×10^{-3}
转动惯量 $J/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	0.03
极对数 p_n	4
永磁磁链 ψ_f/Wb	0.07

转动惯量作为系统的重要参数,其变化会直接影响控制系统的稳定性。通过比较系统在不同转动惯量下的速度跟踪性能,可以验证 ADRC 系统的鲁棒性。本文设计了不同转动惯量下的对比试验,在给定转速信号相同时,比较转动惯量分别为 J 、 $2J$ 和 $0.5J$ 时系统的速度跟踪情况,如图 6 所示。

从图 6 可知,相较于转动惯量为 J 时,当转动

惯量为 $2J$ 时调节时间下降 0.049 s,当转动惯量为 $0.5J$ 时调节时间提升 0.015 s,系统的速度跟踪依然快速稳定,说明该控制器对参数变化具有较强的鲁棒性。

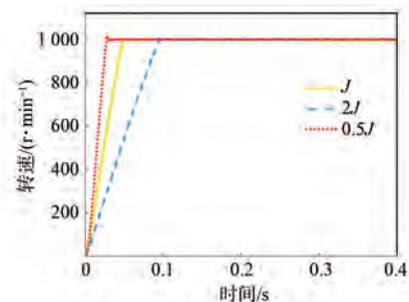


图 6 转动惯量为 J 、 $2J$ 和 $0.5J$ 时 PMSM 的转速跟踪
 Fig. 6 PMSM speed tracking for rotational inertia of J , $2J$, and $0.5J$

为了验证基于 IBKA 优化的自抗扰控制器的

速度跟踪性能和抗负载能力,速度环分别采用 PI 控制器、基于经验整定的自抗扰控制器和基于 IBKA 优化的自抗扰控制器,电流环均采用 PI 控制器并始终保持不变,对同一个 PMSM 进行控制。仿真设定为空载启动和负载运行两个阶段。电机的设定目标转速为 $n_{ref} = 1\ 000\ \text{r/min}$,在 $t = 0.2\ \text{s}$ 时施加 $T_L = 10\ \text{N}\cdot\text{m}$ 的外加负载。三种不同控制器作用下的 PMSM 的转速跟踪曲线如图 7 所示,转速跟踪误差曲线如图 8 所示,转矩随时间的变化曲线如图 9 所示。

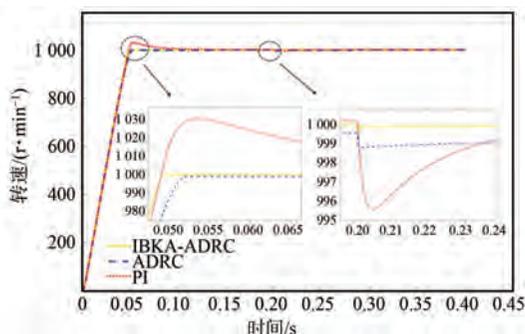


图 7 PMSM 转速曲线

Fig. 7 PMSM speed curves

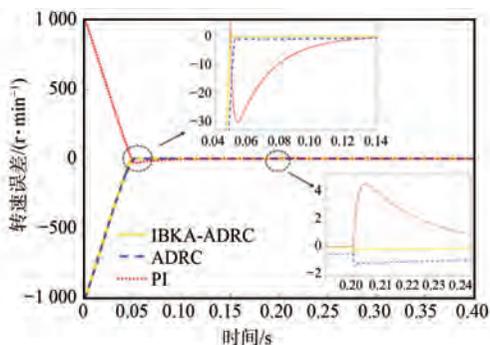


图 8 PMSM 转速跟踪误差曲线

Fig. 8 PMSM speed tracking error curves

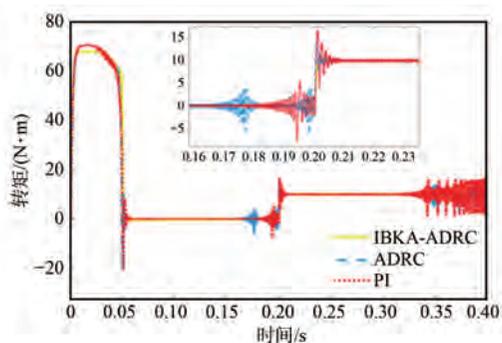


图 9 PMSM 转矩曲线

Fig. 9 PMSM torque curves

图 7 和图 8 的运行结果揭示了不同控制器下 PMSM 的性能差异。在启动过程中,PI 控制表现出较长的过渡时间和较大的超调量,同时稳态误差和波动较为显著。而基于经验整定的 ADRC 虽然避免了明显的超调现象,并且能够更快地实现系统稳定,但其过渡时间仍然较长。相比之下,采用基于 IBKA 优化的 ADRC 不仅避免了明显的超调现象,而且在跟踪速度和稳态误差等关键性能指标上均实现了显著提升。三种不同控制器作用下 PMSM 的主要性能指标如表 2 所示。由表 2 可知,基于 IBKA 优化的 ADRC 在响应速度、调节时间等核心性能参数方面,均明显优于传统的 PI 控制和基于经验整定的 ADRC。

表 2 主要性能指标

Tab. 2 Key performance indicators

控制器名称	上升时间/s	调节时间/s	超调量/%	受干扰后调节时间/s	受干扰后超调量/%
PI	0.049	0.116	3.03	0.067	0.442
ADRC	0.052	0.052	0	0.018	0.148
IBKA-ADRC	0.049	0.051	0	0.002	0.058

在负载突变的瞬间,三种控制器作用下的 PMSM 转速均出现了一定程度的偏差,但最终均能恢复至其稳态工作点。具体而言,在 PI 控制下,电机在受到干扰后转速波动较大,且恢复至稳态所需的时间较长;基于经验整定的 ADRC 在一定程度上降低了干扰引起的波动,并缩短了系统恢复至稳态的时间;基于 IBKA 优化的 ADRC 在干扰后转速波动最小,恢复至稳态的时间最短,并且在重新稳定后不存在稳态误差。可见,相较于 PI 控制和基于经验整定的 ADRC,基于 IBKA 优化的 ADRC 的抗干扰性能更强。

由图 9 可知,电机在无干扰匀速转动情况下和受到干扰情况下,与 PI 控制和基于经验整定的 ADRC 相比,基于 IBKA 优化的 ADRC 的最高启动转矩降低,并且对转矩抖动有更显著的抑制,且调节时间更短。可见,相较于 PI 控制和基于经验整定的 ADRC,基于 IBKA 优化的 ADRC 在转矩控制上的表现更优。

5 结语

本文提出了一种改进型 PMSM 速度 ADRC 系统,该系统结合了矢量控制与 ADRC 策略,旨在

实现更为精确和高效的电机控制。通过使用 Tent 混沌映射和高斯变异操作对 BKA 进行了改进, 进而利用该 IBKA 对 ESO 和 NLSEF 的参数进行优化整定。这种方法有效地解决了传统 ADRC 依赖经验进行参数整定的局限性。仿真结果表明, 经过参数优化的 ADRC 系统表现出良好的动、静态性能, 在响应速度、跟踪精度、抗干扰能力和转矩控制等关键性能指标上均表现更优, 有效地提高了 PMSM 的控制性能。

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

王子辰进行了方案设计、试验研究、内容总结与论文撰写, 王子辰、胡春鹤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 scheme design, experiment study, content summary and paper writing were carried out by Wang Zichen. The manuscript was reviewed and revised by Wang Zichen, Hu Chunhe. All authors have read the last version of paper and consented for submission.

参考文献

- [1] 周凯, 孙彦成, 王旭东, 等. 永磁同步电机的自抗扰控制调速策略[J]. 电机与控制学报, 2018, 22(2): 57-63.
- ZHOU K, SUN Y C, WANG X D, et al. Active disturbance rejection control of PMSM speed control system [J]. Electric Machines and Control, 2018, 22(2): 57-63.
- [2] 边琦, 马建, 张梦寒, 等. 改进细菌觅食算法的永磁同步电机参数辨识[J]. 电机与控制学报, 2024, 28(2): 174-181.
- BIAN Q, MA J, ZHANG M H, et al. Parameter identification of permanent magnet synchronous motor based on modified bacterial foraging algorithm [J]. Electric Machines and Control, 2024, 28(2): 174-181.

- [3] 王红, 潘家栋, 徐学武, 等. 永磁同步电机的无位置传感器控制参数优化[J]. 制造技术与机床, 2020, 70(11): 95-99.
- WANG H, PAN J D, XU X W, et al. Sensorless control of permanent magnet synchronous motor parameter optimization [J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2020, 70(11): 95-99.
- [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] 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.
- [6] 宋建国, 李子豪, 刘小周. 永磁同步电机改进型全阶滑模观测器无传感控制[J]. 电机与控制应用, 2024, 51(1): 14-21.
- SONG J G, LI Z H, LIU X Z. Improved full order sliding mode observer without sensing control of permanent magnet synchronous motors [J]. Electric Machines & Control Application, 2024, 51(1): 14-21.
- [7] 姚绪梁, 麻宸伟, 王景芳, 等. 基于预测误差补偿的鲁棒型永磁同步电机模型预测电流控制[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(17): 6071-6081.
- YAO X L, MA C W, WANG J F, et al. Robust model predictive current control for PMSM based on prediction error compensation [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(17): 6071-6081.
- [8] 杨镇宇, 王俊飞, 鄢志丹, 等. 自适应 PSO-LADRC 的永磁同步电机转速控制[J]. 微电机, 2021, 54(6): 65-70.
- YANG Z Y, WANG J F, YAN Z D, et al. Adaptive PSO-LADRC control of permanent magnet synchronous motor speed [J]. Micromotors, 2021, 54(6): 65-70.
- [9] 刘林, 曹鑫, 钱梦飞, 等. 永磁同步电机电流环 PI 控制器参数整定及优化[J]. 电机与控制学报,

- 2023, 27(10): 131-140.
- LIU L, CAO X, QIAN M F, et al. Parameter tuning and optimization of PI controller for current loop of PMSM [J]. *Electric Machines and Control*, 2023, 27(10): 131-140.
- [10] TIAN L, WU L, HUANG X, et al. Driving range parametric analysis of electric vehicles driven by interior permanent magnet motors considering driving cycles [J]. *CES Transactions on Electrical Machines and Systems*, 2019, 3(4): 377-381.
- [11] NGUYEN V Q. The fuzzy PI controller for PMSM's speed to track the standard model [J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2020, 2020: 1698213.
- [12] 刘攀, 杨鹏, 马文良, 等. 基于模糊切换增益调节的PMSM滑膜控制算法的仿真[J]. *电子测量技术*, 2019, 42(19): 106-110.
- LIU J, YANG P, MA W L, et al. Simulation of PMSM synchronous control algorithm based on fuzzy switching gain adjustment [J]. *Electronic Measurement Technology*, 2019, 42(19): 106-110.
- [13] GHAFARI-KASHANI A R, FAIZ J, YAZDANPANA M J. Integration of non-linear H_{∞} and sliding mode control techniques for motion control of a permanent magnet synchronous motor [J]. *IET Electric Power Applications*, 2010, 4(4): 267-280.
- [14] SHARMA D, BHAT A H. Neural network controlled space vector PWM for a high power factor converter under perturbed conditions [J]. *IETE Journal of Research*, 2023, 69(3): 1500-1508.
- [15] 张琳元, 张清艺, 张志锋. 基于非线性观测器的永磁同步电机位置估计算法研究[J]. *电机与控制应用*, 2024, 51(3): 79-85.
- ZHANG L Y, ZHANG Q Y, ZHANG Z F. Research on position estimation algorithm of permanent magnet synchronous motor based on nonlinear observer [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2024, 51(3): 79-85.
- [16] 孙坚, 汪意和. 三相矢量下永磁同步电机占空比预测电流控制[J]. *电力系统及其自动化学报*, 2023, 35(10): 59-66.
- SUN J, WANG Y H. Duty-cycle predictive current control of permanent magnet synchronous motor under three-phase vector [J]. *Proceedings of the CSU-EPSA*, 2023, 35(10): 59-66.
- [17] 邵佳威, 蒋全, 倪燕青, 等. 基于改进自抗扰控制的永磁同步电机位置控制策略[J]. *控制工程*, 2022, 29(8): 1487-1496.
- SHAO J W, JIANG Q, NI Y Q, et al. Position control strategy of permanent magnet synchronous motor based on improved active disturbance rejection control [J]. *Control Engineering of China*, 2022, 29(8): 1487-1496.
- [18] ABDALLA M A, YANG G, HUANG C. Performance comparison of load frequency control for power system by ADRC approach and PID controller [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, 1510(1): 012007.
- [19] 于希宁, 朱丽玲. 自抗扰控制器的动态参数整定及其应用[J]. *华北电力大学学报*, 2005, 32(6): 9-13.
- YU X N, ZHU L L. Dynamic parameter setting and application of active disturbance rejection controller [J]. *Journal of North China Electric Power University*, 2005, 32(6): 9-13.
- [20] 高森, 王康, 姜宏昌, 等. 基于改进花授粉算法的永磁同步电机参数辨识[J]. *电机与控制应用*, 2024, 51(1): 97-105.
- GAO S, WANG K, JIANG H C, et al. Parameters identification of PMSM based on improved flower pollination algorithm [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2024, 51(1): 97-105.
- [21] 肖亚宁, 孙雪, 李三平, 等. 基于混沌精英黏菌算法的无刷直流电机转速控制[J]. *科学技术与工程*, 2021, 21(28): 12130-12138.
- XIAO Y N, SUN X, LI S P, et al. Speed control of brushless direct current motor based on chaotic elite slime mould algorithm [J]. *Science Technology and Engineering*, 2021, 21(28): 12130-12138.
- [22] 陈前, 李自成. 基于粒子群算法的永磁同步电机的转速自抗扰控制[J]. *自动化与仪表*, 2022, 37(5): 25-28.
- CHEN Q, LI Z C. Particle swarm active disturbance rejection control based on permanent magnet synchronous motor [J]. *Automation and Instrumentation*, 2022, 37(5): 25-28.
- [23] WANG J, WANG W C, HU X X, et al. Black-winged kite algorithm: A nature-inspired meta-heuristic for solving benchmark functions and engineering problems [J]. *Artificial Intelligence Review*, 2024, 57(4): 98.
- [24] SHI Z, ZHANG P, LIN J, et al. Permanent magnet synchronous motor speed control based on improved

- active disturbance rejection control [J]. *Actuators*, 2021, 10(7): 147.
- [25] 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.
HAN J Q. From PID technique to active disturbances rejection control technique [J]. *Control Engineering of China*, 2002, 9(3): 13-18.
- [26] 李盛前, 张小帆. 基于免疫粒子群的机器人自抗扰控制器参数整定方法 [J]. *机床与液压*, 2023, 51(14): 63-68.
LI S Q, ZHANG X F. Parameter tuning method of robot active disturbance rejection control based on immunity particle swarm optimization [J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 2023, 51(14): 63-68.
- [27] 孙彪, 孙秀霞. 离散系统最速控制综合函数 [J]. *控制与决策*, 2010, 25(3): 473-477.
SUN B, SUN X X. Optimal control synthesis function of discrete-time system [J]. *Control and Decision*, 2010, 25(3): 473-477.
- [28] TENG Z J, LV J L, GUO L W. An improved hybrid grey wolf optimization algorithm [J]. *Soft Computing*, 2019, 23(15): 6617-6631.
- [29] YIN Z, DU C, LIU J, et al. Research on auto-disturbance-rejection control of induction motors based on ant colony optimization algorithm [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2018, 65(4): 3077-3094.
- [30] 滕志军, 吕金玲, 郭力文, 等. 一种基于 Tent 映射的混合灰狼优化的改进算法 [J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2018, 50(11): 40-49.
TENG Z J, LV J L, GUO L W, et al. An improved hybrid grey wolf optimization algorithm based on Tent mapping [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2018, 50(11): 40-49.

收稿日期: 2024-10-30

收到修改稿日期: 2024-12-25

作者简介:

王子辰(2000-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电机控制、群智能算法, wangzichen0@foxmail.com;

* 通信作者: 胡春鹤(1986-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为智能控制、群体智能仿生, huchunhe@bjfu.edu.cn。