

DOI: 10.13382/j.jemi.B2508691

改进 HHO 在无刷直流电机转速控制中的应用*

张冰战^{1,2} 虎啸鸣¹ 李传宝³ 方涛¹ 毕健波¹ 赵晓敏¹

(1. 合肥工业大学汽车与交通工程学院 合肥 230009; 2. 安徽省数字化设计与制造重点实验室 合肥 230009;

3. 合肥龙控智能科技有限公司 合肥 230600)

摘要:随着工业电动化和自动化水平的提升,电机作为动力系统的核心部件,其运行效率与控制性能直接影响系统的整体性能和可靠性。传统 PI 控制器由于响应速度较慢,抗扰能力不足,常常难以满足高动态控制需求。针对这一问题,提出了一种基于改进哈里斯鹰优化算法与 PI 控制器相结合的无刷直流电机转速控制方法。该方法结合了对立学习,自适应权重,非线性能量因子和嵌入式平滑处理等机制,显著提升了优化搜索能力和精度,并增强了控制系统在动态工况下的适应性。通过在 Simulink 仿真环境中进行多种工况测试,并结合基于 GD32F103RCT6 控制平台的实机试验,对比分析了 EHHO-PI 与传统 PI 控制方法在突加速度,突加负载和变速变载等复杂工况下的控制性能。结果表明,EHHO-PI 控制器在速度响应,抗扰能力,调节精度等方面均优于传统控制策略,表现出较强的鲁棒性和实用性,适用于各种复杂环境下的稳定控制。该控制策略为电机控制技术提供了一种有效的优化方案,具有广泛的工程应用前景。

关键词:改进哈里斯鹰算法;直流无刷电机控制;对立学习;自适应权重;平滑处理;非线性能量因子

中图分类号: TM301.2; TP273

文献标识码: A

国家标准学科分类代码: 081104

Application of enhanced HHO in speed control of brushless DC motor

Zhang Bingzhan^{1,2} Hu Xiaoming¹ Li Chuanbao³ Fang Tao¹ Bi Jianbo¹ Zhao Xiaomin¹

(1. School of Automotive and Transportation Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;

2. Anhui Key Laboratory of Digital Design and Manufacturing, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;

3. Hefei Longkong Intelligent Technology Co. Ltd., Hefei 230600, China)

Abstract: With the advancement of industrial electrification and automation, electric motors, as the core components of power systems, directly influence the overall performance and reliability of the system. Traditional PI controllers often fail to meet high-dynamic control demands due to their slow response speed and poor disturbance rejection capability. To address this issue, this paper proposes a speed control method for brushless DC motors that integrates an enhanced Harris hawks optimization (EHHO) algorithm with a PI controller. The proposed method incorporates opposition-based learning, adaptive weights, nonlinear energy factors, and embedded smoothing techniques, significantly improving the optimization search capability and accuracy while enhancing the control system's adaptability to dynamic operating conditions. Through Simulink simulations and hardware experiments based on a GD32F103RCT6 control platform, the performance of EHHO-PI is compared with that of traditional PI control in various complex conditions, including sudden acceleration, sudden load, and variable speed/load scenarios. The results demonstrate that the EHHO-PI controller outperforms the conventional methods in terms of speed response, disturbance rejection, and regulation accuracy, showing strong robustness and practical applicability. This control strategy provides an effective optimization solution for motor control technology with broad engineering application prospects.

Keywords: enhanced HHO; BLDC control; opposition-based learning; adaptive weights; smoothing technique; nonlinear energy factor

0 引言

随着工业电动化和自动化技术的不断发展,电动机在各行各业中得到了广泛的应用。无刷直流电机(brushless DC motor, BLDC)凭借其高功率密度(达永磁同步电机的1.15倍^[1])、紧凑的结构和优良调速性能的优良特性,广泛应用于新能源汽车、工业工控自动化以及航空航天等领域^[2]。

然而, BLDC 的控制系统在实际应用中面临着诸多挑战。PID 算法结构简单并且调参相对容易, 使得其应用依然十分广泛^[3]。尽管如此, 传统 PI 控制器在高动态控制需求下, 在负载快速变化的情况下, 往往无法满足工程的需要^[4]。传统 PI 控制器响应速度较慢且鲁棒性差, 导致其在复杂工况下的控制能力不足。BLDC 是非线性时变的复杂系统, 传统的 PI 控制算法并不能使系统的动态响应达到理想状态^[5]。

智能优化算法近年来被广泛用于智能制造、系统控制、信号处理等多个领域^[5-8]。在电机控制领域, 群智能优化算法已经被用于转速环 PI 参数整定并取得良好效果: 例如混沌精英黏菌算法显著提升 BLDC 速度环控制精度与抗扰性^[9]; 改进鲨鱼优化使永磁电机转速 ITAE 指标显著降低^[10]; 改进鲸鱼优化算法有效改善 PID 控制的收敛速度与鲁棒性^[11]。

哈里斯鹰优化算法(Harris hawks optimization, HHO)^[12]是一种近年来提出的群智能优化方法, 具有结构简单、参数量少、全局搜索能力强等优点, 在多峰复杂函数中展现出良好的跳出局部最优能力。然而原始 HHO 仍存在收敛速度偏慢、后期寻优精度不足、易陷入局部最优等问题^[13-17], 限制了其在复杂动态电机系统中的应用。

为了解决上述问题, 并充分利用 HHO 的结构优势, 本文引入对立学习、自适应权重、非线性能量因子以及嵌入式平滑处理等机制, 构建了改进的哈里斯鹰优化算法(enhanced HHO, EHHO)并将其用于速度环 PI 参数整定。通过仿真和实验对比, 本文的方法在多个复杂工况下表现出了优异的控制性能, 提高无刷直流电机在复杂工况下的动态响应和鲁棒性。

1 无刷直流电机建模及控制需求

为了简化分析, 假设 BLDC 为理想电机, 且满足如下条件^[11]:

- 1) 忽略电机铁芯的饱和;
- 2) 不计电机内的涡流和磁滞损耗;
- 3) 电机内电流为三相对称正弦电流;

4) 不考虑温度、频率变化和绕组阻尼对电阻产生的影响。

电压方程:

$$u_x = Ri_x + (L - M) \frac{di}{dt} - e_x \quad (1)$$

式中: u_x 表示相电压; i_x 表示相电流; e_x 表示反电动势; R 表示相阻抗; L 表示三相绕组的自感; M 表示对互感。

转矩方程:

$$T_e = \frac{e_u i_u + e_v i_v + e_w i_w}{\omega_m} \quad (2)$$

式中: ω_m 表示机械角速度; T_e 表示电磁转矩。

运动方程:

$$T_e - T_m = B \frac{d\omega_m}{dt} + J\omega_m \quad (3)$$

式中: T_m 、 B 、 J 分别为负载转矩、阻尼系数和转动惯量。

BLDC 电机的控制, 特别是在复杂工况下, 如频繁变速和突加负载等情况, 需要控制系统具备高响应性和良好的抗扰能力。矢量控制(field-oriented control, FOC)是通过两次坐标变换把复杂的交流电机控制转换为简单的直流电机控制^[18]。其不仅使系统的动态特性和转矩响应能力更好, 同时提高了系统的控制精度和响应速度, 使电机调速范围更宽^[19]。

本文采用 FOC 策略, 并在此基础上结合 EHHO 进行控制器设计。通过采用双闭环控制结构, 电流环采用传统 PI 控制器, 速度环则采用基于 EHHO 优化的 PI 控制器。该方法能够有效克服传统 PI 控制器在复杂动态工况下的不足, 提升系统的鲁棒性和响应速度。

2 改进哈里斯鹰优化算法

哈里斯鹰优化算法是一种模拟哈里斯鹰群围猎行为的群体智能优化方法。整个优化过程分为探索、探索与开发转换及开发 3 个阶段。具有全局搜索能力强、结构简单等优点。然而原始的 HHO 算法存在收敛速度慢、易陷入局部最优解等问题。

2.1 改进策略

为了增强 HHO 算法在动态系统控制中的适应性和寻优性能, 本文对 HHO 算法进行了如下 4 点改进, 形成 EHHO 算法:

1) 对立学习策略

本文采用对立学习策略(opposition-based learning, OBL)^[20]增强全局搜索能力。通过生成当前解的“对立解”并共同参与初始种群构建, 扩大搜索空间, 提升多样性, 提升算法初始全局搜索能力。对立学习的表达式如下:

$$X_{oj} = Lb_j + Ub_j - X_{ij} \quad (4)$$

2) 自适应权重

惯性权重较大时,算法具有较强的全局搜索能力,可以探索更大的解空间。较小的自适应权重改变最优哈里鹰的位置,增强算法局部寻优的能力^[21]。在优化过程中引入随迭代变化的惯性权重因子 ω' , 权重从全局探索逐步过渡至局部开发:

$$\omega' = \sin\left(\frac{\pi \times t}{2T}\right) + 1 \quad (5)$$

改进后的猎物位置公式为:

$$X'_{\text{rabbit}}(t) = \omega' \times X_{\text{rabbit}}(t) \quad (6)$$

3) 平滑处理

在 HHO 算法的搜索过程中,尤其是在后期优化阶段,可能会出现解的震荡或振荡问题,这将影响算法的收敛速度和最终精度。本文引入了一种嵌入式平滑处理^[22]来抑制不必要的振荡,从而提高解的收敛速度和稳定性。与传统的后处理方法不同,本文的平滑策略直接嵌入优化过程,使平滑处理与算法的搜索机制更紧密结合,有助于提升优化质量。

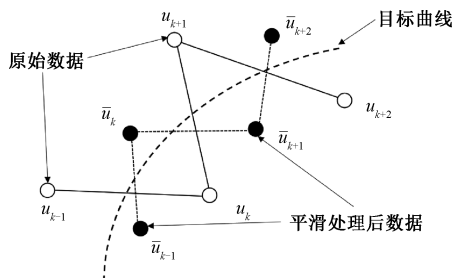


图1 平滑处理示意图

Fig. 1 Smoothing technique illustration

由图1可知,白点是平滑处理前的控制值,而黑点是平滑处理后的值。当相邻的线段斜率异号时,说明存在锯齿形波动,开始执行平滑处理。采用基于3个连续点中的每一个的平均值来减小跳跃的幅度。具体公式可以表示为:

$$\bar{u}_k = \begin{cases} \lambda u_{k-1} + (1 - \lambda) u_{k+1}, & (u_k - u_{k-1})(u_{k+1} - u_k) < 0 \\ u_k, & \text{其他} \end{cases} \quad (7)$$

式中: λ 是权重系数; u_k 是 k 处的值。

4) 非线性能量因子

为了保证全局搜索能力平滑衰减,避免算法过早陷入局部最优,改进原始线性逃逸能量模型,引入幂次衰减和正弦波振荡,增强前期探索能力、减缓后期陷入局部最优的风险,其公式如下:

$$E' = E_0 \times \left(1 - \left(\frac{t}{T}\right)^\beta\right)^\gamma \times (1 + \alpha \sin \omega t) \quad (8)$$

式中: $\beta > 1$ 控制能量衰减的速度; $\gamma \in [0.5, 1]$ 调节后

期全局搜索能力的减弱幅度; α 和 ω 则用于调节波动幅度和周期性。

2.2 性能验算

通过上述改进, EHHO 算法在传统 HHO 的基础上增强了全局搜索能力和局部优化能力。算法首先通过对立学习扩展搜索空间,并利用自适应权重逐步过渡至局部搜索阶段。后期,非线性能量因子和嵌入式平滑处理共同作用,确保了收敛过程的平稳性与精度。

为了评估 EHHO 算法的性能,本文采用了部分 CEC2005 标准测试集与鲸鱼优化算法 (whale optimization algorithm, WOA)^[23]、灰狼优化算法 (gray wolf optimization, GWO)^[24]、正余弦优化算法 (sine cosine algorithm, SCA)^[25] 以及原始 HHO 算法进行对比。测试函数及其参数如表1所示。

从表2可见, EHHO 算法在所有测试函数中表现优异,最优值和标准差均优于对比算法,尤其在多峰函数 F6 和 F7 上展现了更快且稳定的收敛性。

图2展示了部分测试函数的收敛曲线。EHHO 在多数函数上更早达到最优解并保持稳定趋势。如在 F1 和 F10 上收敛速度明显更快,在复杂函数 F5 和 F15 中仍具较高精度与效率,收敛曲线陡峭且平稳。

综合测试结果表明, EHHO 优化算法在多维优化问题中表现出强大的优势。与其他4种算法相比, EHHO 在收敛速度、最优解精度及稳定性上均具有显著优势,证明了其在实际应用中的可靠性和有效性。此外,从时间复杂度分析来看, EHHO 与 WOA、GWO、SCA 以及原始 HHO 均为 $O(N \times D \times T)$ 级别,其中 N 为种群规模、 D 为问题维度、 T 为最大迭代次数。本文在所有对比算法中统一设置 N 与 T , EHHO 仅在位置更新中增加少量算术运算,因此整体计算复杂度与其他算法处于同一数量级,不会显著增加 PI 参数整定的计算负担。

3 基于 EHHO 的 FOC 算法

3.1 EHHO-PI 控制器设计

在无刷直流电机调速系统中,由于系统对动态响应要求较高,采用 PID 控制器可能会导致控制系统不稳定,且容易产生噪音。而 PI 控制器可以有效减少这些问题,因为它不涉及微分项,避免了高频噪声,并且可以在系统中实现更简洁的控制。PI 控制器在具有控制简单、易于实现的优点^[26]。因此,使用 PI 控制器更加合适。

FOC 通过将电机电流分解为转矩和磁场分量,使用 PI 控制器来调节电流环和速度环。由文献[27]可知,电流环 PI 参数计算公式为:

$$K_p = \frac{L_s}{2T_0}, \quad K_i = \frac{R_s}{2T_0} \quad (9)$$

表 1 基准测试函数
Table 1 Benchmark functions

函数分类	函数	维度	$[Lb, Ub]$	$f_{\min}$
单峰 测试 函数	$f_1(x) = \sum_{i=1}^n x_i^2$	30	$[-100, 100]$	0
	$f_2(x) = \sum_{i=1}^n x_i + \prod_{i=1}^n x_i $	30	$[-10, 10]$	0
	$f_3 = \sum_{i=1}^n \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2$	30	$[-100, 100]$	0
	$f_4 = \max_i \{ x_i , -1 < i < n\}$	30	$[-100, 100]$	0
多峰 测试 函数	$f_5(x) = \sum_{i=1}^n ix_i^4 + \text{random}[0, 1]$	30	$[-1.28, 1.28]$	0
	$f_6(x) = \sum_{i=1}^n [x_i^2 - 10\cos(2\pi x_i) + 10]$	30	$[-5.12, 5.12]$	0
	$f_7(x) = -20\exp\left(-0.2\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^n x_i^2}\right) - \exp\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^n \cos(2\pi x_i)\right) + 20 + e$	30	$[-32, 32]$	0
	$f_8(x) = \frac{1}{4000}\sum_{i=1}^n x_i^2 - \prod_{i=1}^n \cos\left(\frac{x_i}{\sqrt{i}}\right) + 1$	30	$[-600, 600]$	0
固定 维度 测试 函数	$f_9(x) = \left(\frac{1}{500} + \sum_{j=1}^{25} \left(j + \sum_{i=1}^2 (x_i - a_{ij})^6\right)^{-1}\right)^{-1}$	2	$[-65.536, 65.536]$	1
	$f_{10}(x) = \sum_{i=1}^{11} \left[a_i - \frac{x_1(b_i^2 + b_i x_2)}{b_i^2 + b_i x_3 + x_4} \right]^2$	4	$[-5, 5]$	0.000 307 5
	$f_{11}(x) = -\sum_{i=1}^4 c_i \exp\left(-\sum_{j=1}^6 a_{ij}(x_j - p_{ij})^2\right)$	6	$[0, 1]$	-3.32
	$f_{12}(x) = -\sum_{i=1}^{10} [(X - a_i)(X - a_i)^T + c_i]^{-1}$	4	$[0, 10]$	-10

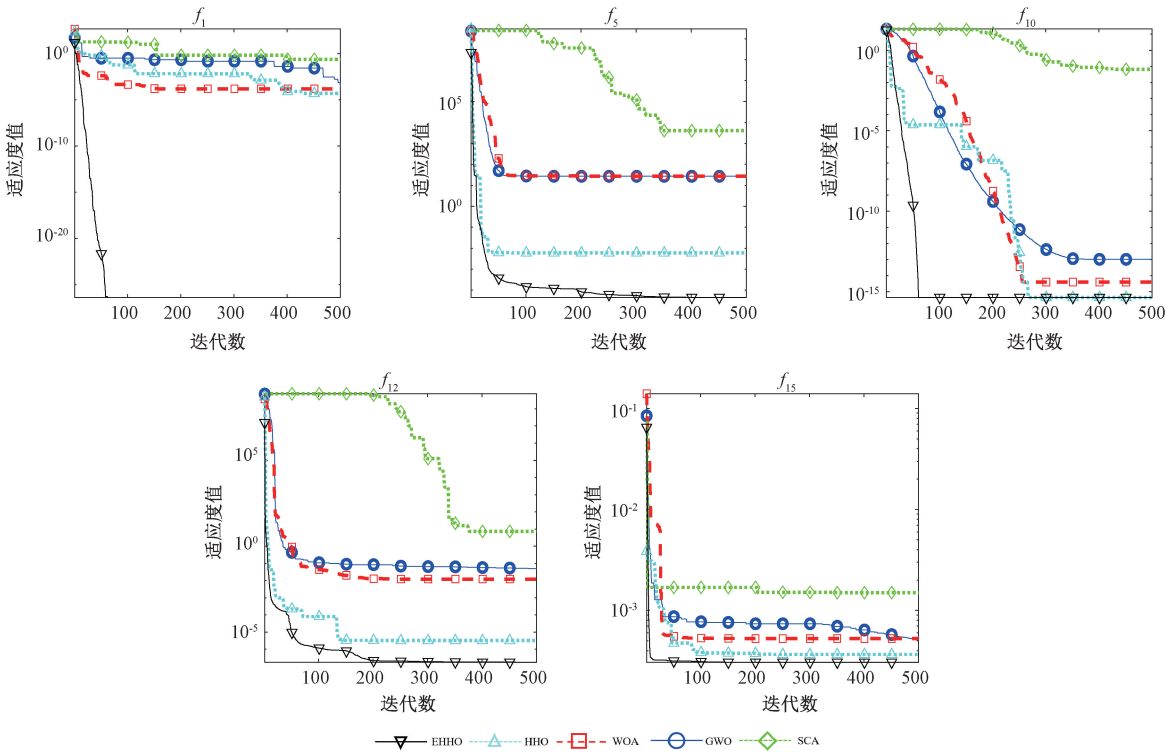


图 2 部分测试函数收敛曲线

Fig. 2 Convergence curves of partial test functions

表 2 测试函数结果
Table 2 Function results

函数	算法	最差值	最优值	平均值	标准差	函数	算法	最差值	最优值	平均值	标准差
f_1	GWO	6.41×10^{-27}	9.43×10^{-29}	1.53×10^{-27}	2.06×10^{-27}	f_7	GWO	1.46×10^{-13}	7.86×10^{-14}	1.07×10^{-13}	1.75×10^{-14}
	WOA	2.07×10^{-74}	1.70×10^{-82}	4.43×10^{-75}	6.06×10^{-75}		WOA	7.55×10^{-15}	4.44×10^{-16}	3.29×10^{-15}	2.13×10^{-15}
	SCA	1.02×10^1	4.92×10^{-2}	2.85×10^0	3.07×10^0		SCA	2.03×10^1	4.12×10^{-2}	1.06×10^1	9.70×10^0
	HHO	1.83×10^{-96}	2.84×10^{-104}	1.87×10^{-97}	5.47×10^{-97}		HHO	4.44×10^{-16}	4.44×10^{-16}	4.44×10^{-16}	9.86×10^{-32}
	EHHO	0	0	0	0		EHHO	2.44×10^{-16}	2.44×10^{-16}	2.44×10^{-16}	4.76×10^{-32}
f_2	GWO	4.72×10^{-16}	1.33×10^{-17}	1.39×10^{-16}	1.37×10^{-16}	f_8	GWO	1.12×10^{-2}	0.00×10^0	2.10×10^{-3}	4.22×10^{-3}
	WOA	8.09×10^{-52}	1.85×10^{-56}	1.08×10^{-52}	2.37×10^{-52}		WOA	1.89×10^{-1}	0	1.89×10^{-2}	5.68×10^{-2}
	SCA	8.41×10^{-1}	1.08×10^{-3}	9.95×10^{-2}	2.48×10^{-1}		SCA	2.50×10^0	8.75×10^{-2}	1.05×10^0	6.39×10^{-1}
	HHO	7.62×10^{-50}	3.00×10^{-58}	1.19×10^{-50}	2.31×10^{-50}		HHO	0	0	0	0
	EHHO	0	0	0	0		EHHO	0	0	0	0
f_3	GWO	4.72×10^{-16}	1.33×10^{-17}	1.39×10^{-16}	1.37×10^{-16}	f_9	GWO	1.27×10^1	9.98×10^{-1}	6.47×10^0	4.76×10^0
	WOA	8.09×10^{-52}	1.85×10^{-56}	1.08×10^{-52}	2.37×10^{-52}		WOA	2.98×10^0	9.98×10^{-1}	1.39×10^0	7.94×10^{-1}
	SCA	8.41×10^{-1}	1.08×10^{-3}	9.95×10^{-2}	2.48×10^{-1}		SCA	1.08×10^1	9.98×10^{-1}	2.57×10^0	2.87×10^0
	HHO	7.62×10^{-50}	3.00×10^{-58}	1.19×10^{-50}	2.31×10^{-50}		HHO	2.98×10^0	9.98×10^{-1}	1.20×10^0	5.95×10^{-1}
	EHHO	0	0	0	0		EHHO	1.99×10^0	9.28×10^{-1}	0.90×10^0	4.56×10^{-1}
f_4	GWO	2.60×10^{-6}	4.79×10^{-7}	1.36×10^{-6}	7.22×10^{-7}	f_{10}	GWO	2.04×10^{-2}	3.08×10^{-4}	4.35×10^{-3}	8.01×10^{-3}
	WOA	8.75×10^1	4.46×10^{-1}	3.77×10^1	2.83×10^1		WOA	1.40×10^{-3}	4.67×10^{-4}	8.16×10^{-4}	3.37×10^{-4}
	SCA	4.68×10^1	2.90×10^1	4.05×10^1	5.60×10^0		SCA	1.56×10^{-3}	7.19×10^{-4}	1.16×10^{-3}	3.21×10^{-4}
	HHO	4.31×10^{-49}	1.78×10^{-56}	4.85×10^{-50}	1.28×10^{-49}		HHO	1.47×10^{-3}	3.23×10^{-4}	4.80×10^{-4}	3.34×10^{-4}
	EHHO	0	0	0	0		EHHO	7.61×10^{-4}	3.08×10^{-4}	3.82×10^{-4}	1.38×10^{-4}
f_5	GWO	3.01×10^{-3}	4.47×10^{-4}	1.44×10^{-3}	7.54×10^{-4}	f_{11}	GWO	-3.09×10^0	-3.32×10^0	-3.23×10^0	9.57×10^{-2}
	WOA	1.10×10^{-2}	4.24×10^{-4}	3.34×10^{-3}	3.04×10^{-3}		WOA	-3.08×10^0	-3.32×10^0	-3.25×10^0	8.98×10^{-2}
	SCA	1.76×10^{-1}	8.86×10^{-3}	7.22×10^{-2}	6.05×10^{-2}		SCA	-2.97×10^0	-3.09×10^0	-3.00×10^0	3.31×10^{-2}
	HHO	7.75×10^{-4}	3.53×10^{-5}	2.40×10^{-4}	2.24×10^{-4}		HHO	-2.85×10^0	-3.18×10^0	-3.03×10^0	8.83×10^{-2}
	EHHO	1.39×10^{-4}	2.22×10^{-6}	4.44×10^{-5}	4.41×10^{-5}		EHHO	-3.20×10^0	-3.32×10^0	-3.31×10^0	4.83×10^{-2}
f_6	GWO	1.02×10^0	5.68×10^{-14}	1.02×10^{-1}	3.05×10^{-1}	f_{12}	GWO	-2.42×10^0	-1.05×10^1	-9.72×10^0	2.43×10^0
	WOA	0	0	0	0		WOA	-2.42×10^0	-1.05×10^1	-7.53×10^0	3.04×10^0
	SCA	6.34×10^1	1.12×10^0	3.71×10^1	2.17×10^1		SCA	-9.39×10^{-1}	-5.06×10^0	-3.93×10^0	1.30×10^0
	HHO	0	0	0	0		HHO	-2.42×10^0	-5.13×10^0	-4.84×10^0	8.08×10^{-1}
	EHHO	0	0	0	0		EHHO	-1.05×10^0	-1.05×10^0	-1.05×10^0	1.60×10^0

式中： L_s 为电感参数； R_s 为电机电阻； T_0 为系统延时常数。

由式(9)可知,电流环的PI调节涉及的参数较少,因此调节过程相对简单。但速度环的PI调节参数较多且相互耦合,这使得速度环在面对动态变化的系统时可能难以适应。特别是在系统参数发生变化时,可能导致电机出现转速超调显著、转矩波动明显等问题^[9]。

因此,为了优化FOC中的PI控制器,转速控制系统采用双闭环控制结构:转速外环采用基于EHHO优化的PI控制器,电流内环采用传统PI控制器。EHHO算法凭借其优越的优化搜索能力,能够有效克服传统参数整定方法的局限性,从而实现电机的平稳运行,具体控制框图如图3所示。

3.2 传统PI控制器参数整定方法

本文“传统PI控制器”按照工程上常用的整定方法获得的较优解。

1) 电流环PI整定。电流内环采用文献[27]中给出

的参数计算式,综合考虑电感、电阻R和系统延时常数,将电流环等效为一阶惯性环节加延时模型,通过对称最优法确定电流环PI参数,使其在带宽和相位裕度之间取得折中。仿真与实验中所用电流环PI参数均由上述方法计算获得。

2) 速度环PI整定。将电流环简化为一阶惯性环节后,将速度闭环传递函数简化为标准二阶形式;然后根据期望的超调量和调节时间,利用经典二阶系统指标推导出速度环PI参数的解析表达式,最终得到的传统PI速度环参数。

采用上述系统化的整定流程,可以保证传统PI控制器已经处于工程上较优的参数范围内。

此外,在控制系统性能评估中,时间乘误差绝对值的积分(integral of time multiplied by the absolute value of error, ITAE)是一种常用的调速控制过程性能评价指标^[9],具体公式为:

$$ITAE = \int_0^T t |e| dt$$

(10)

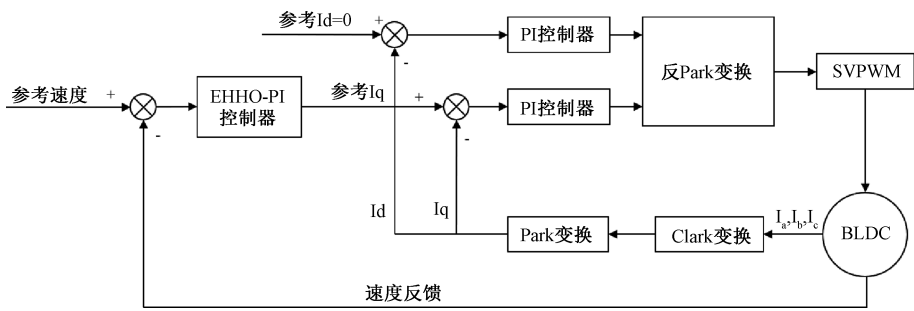


图 3 BLDC 控制框图

Fig. 3 BLDC control block diagram

优化后的 PI 控制器能够有效减少电机负载导致的转速变化,并提高系统的响应速度,同时增强了系统对外界扰动的抗干扰能力。

3.3 EHHO-PI 控制器实现步骤

采用 EHHO 算法优化 PI 控制器参数流程如图 4 所示,具体实现步骤如下。

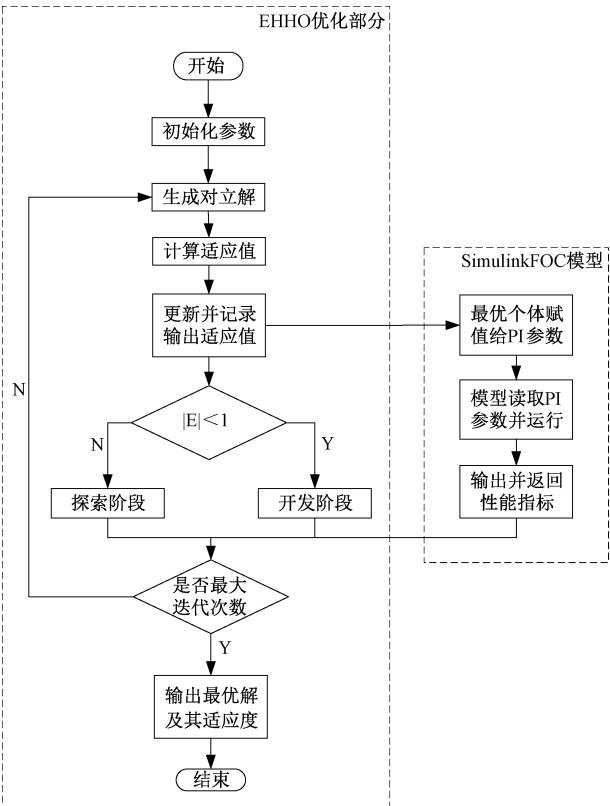


图 4 EHHO 优化 PI 控制算法流程

Fig. 4 EHHO-optimized PI control algorithm flow

步骤 1) 初始化参数

设置种群规模、最大迭代次数、维度,生成初始种群与对立解,并计算其 ITAE 适应度。

步骤 2) 迭代优化

根据逃逸因子 E 决定位置更新策略,结合改进机制更新种群位置。

步骤 3) 仿真计算

每轮迭代输出当前最优 K_p 、 K_i 参数,输出至 FOC 模型中计算 ITAE 反馈。

步骤 4) 终止判断

若算法达到设定的最大迭代次数,则输出最优 PI 控制器参数;否则,返回步骤 2),继续迭代优化。

本文采用离线优化策略,种群规模为 30、最大迭代次数为 100、维度为 2, K_p 、 K_i 的取值为 $[0, 100]$ 的条件下,优化目标为最小化 ITAE。优化结果表明,EHHO 在第 60 代收敛,最终获得适应度值为 0.213 3,最优控制参数 $K_p=2.707$, $K_i=5.16$ 。并且优化过程中的适应度函数呈现平稳下降的趋势,如图 5 所示。

4 仿真与实验验证

4.1 仿真分析

在 MATLAB R2022b 环境中,编写 EHHO 与其他对比算法并与 Simulink 模块相结合搭建 BLDC 转速控制仿真模型进行仿真实验。BLDC 参数设置如表 3 所示。

表 3 电机参数

Table 3 Motor parameters

参数	数值
定子电压 U/V	24
定子电阻 R/Ω	0.89
定子电感 L/mH	0.62
转子转动惯量 $J/(kg \cdot m^2)$	2.8×10^{-6}
阻尼系数 $B/(N \cdot m/(rad \cdot s^{-1}))$	6.5×10^{-4}

测试设置如下:

工况 1:突加速度工况

初始速度为 800 r/min,在 0.2 s 升至 1 000 r/min,用于模拟电机在启动阶段的加速过程。

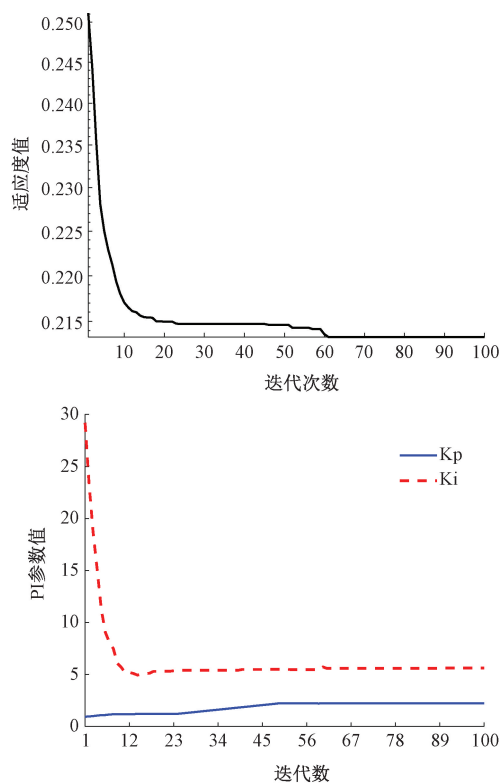


图5 适应度函数与PI参数曲线

Fig. 5 Fitness function and PI parameter curve

工况2:突加负载工况

初始负载为 $0.3 \text{ N}\cdot\text{m}$, 0.2 s 增至 $0.7 \text{ N}\cdot\text{m}$, 模拟电机在负载增加时的响应性能。

工况3:变速变载工况

在上述突加速度和突加负载的组合下, 电机在 0.2 s 内同时进行加速与负载增加, 模拟复杂的工作条件。

仿真结果如图6~8所示, 由仿真结果可知, 与其他算法以及传统PI相对比, 本文所提出的 EHHO-PI 在多种工况下展现了更快的收敛速度和更高的鲁棒性。

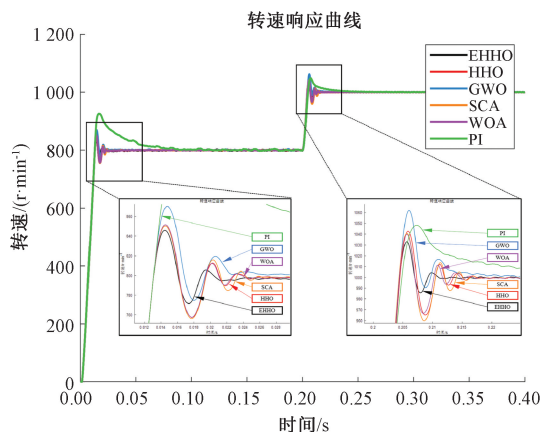


图6 突加速度工况

Fig. 6 Sudden acceleration condition

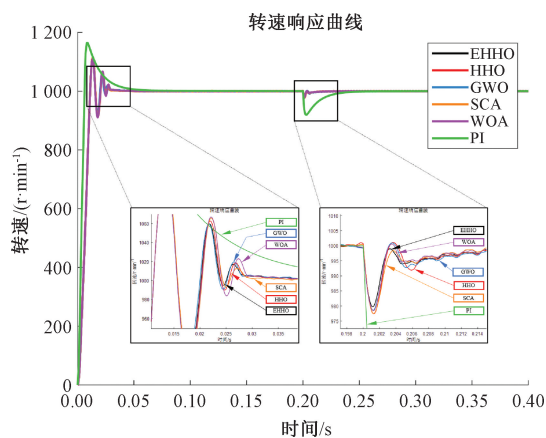


图7 突加负载工况

Fig. 7 Sudden load condition

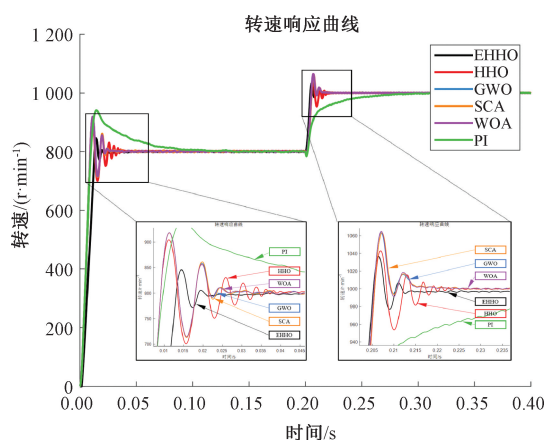


图8 变速变载工况

Fig. 8 Variable speed and load condition

4.2 实验验证

为进一步验证仿真模型的可靠性, 搭建了基于 GD32F103RCT6 的 BLDC 转速控制系统实验平台, 系统硬件组成如图9所示。

主要配套硬件包括 BLDC 电机, 4 极对, 额定功率 1500 W , 额定转速 1300 r/min ; 电机驱动器及霍尔传感器测速; J-Link 仿真器用于上位机数据采集; 磁粉制动器模拟负载扰动。

测试流程模拟复杂工况下的设备使用场景: 初始转速为 800 r/min , 稳定后 2 s 时增加负载, 待稳定后继续加大负载并提升转速至 1000 r/min 。

为确保硬件平台在多次加减速和负载切换工况下的稳定运行, 并兼顾实验周期的可控性, 本文未对所有优化算法结果逐一开展完整的独立硬件测试。在仿真阶段已经对多种算法进行了充分对比, 因此在实验环节选取表现较为稳定且具有代表性的原始 HHO 作为对照对象。由于 HHO 与 EHHO 同源, 其对比更能直观反映改进策

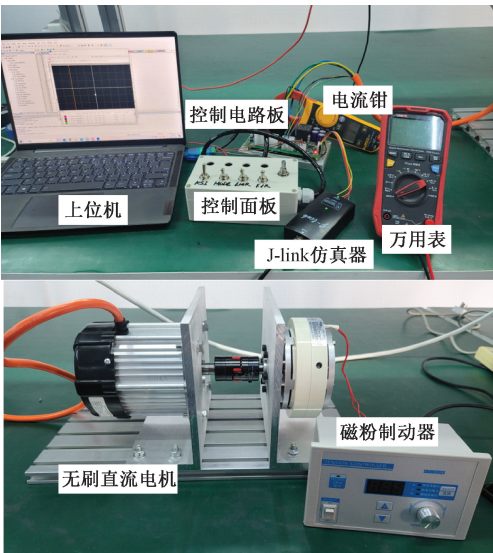


图 9 硬件实验平台
Fig. 9 Hardware experiment platform

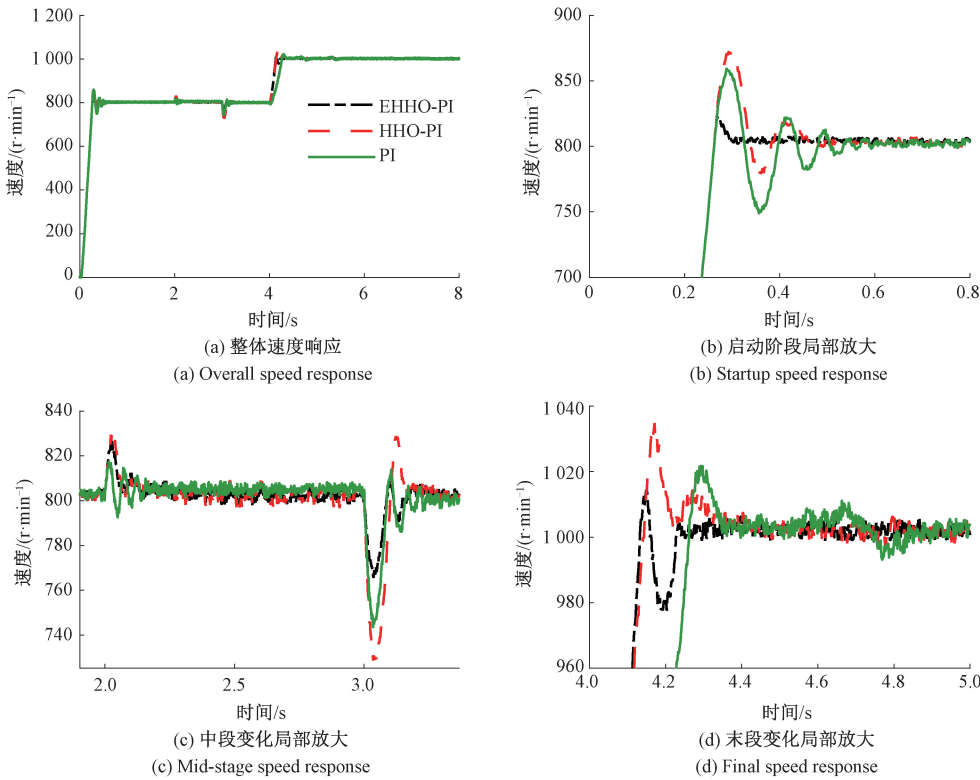


图 10 不同控制方法下的转速响应曲线
Fig. 10 Speed response curves under different control methods

了最优表现,尤其在最大超调量 (3.44%) 和 ITAE 指标 (161.87) 上明显优于其他控制器,说明其具有更好的鲁棒性与调节性能。

通过对比仿真和实验结果,本文证明了 EHHO-PI 控制策略在 BLDC 电机控制中的优越性。EHHO 算法

略的效果,同时避免重复加载造成的额外设备应力,使实验结果更可靠。

因此选取 EHHO-PI、HHO-PI 以及传统的 PI 3 类控制器分别运行于相同环境下,采集并对比转速响应曲线如图 10 所示,3 种控制器比较指标如表 4 所示。

表 4 3 种控制器的性能指标对比

Table 4 Performance comparison of three controllers				
控制策略	最大超调量/%	最大上升时间/s	最大稳态误差/%	总 ITAE
EHHO-PI	3.44	0.24	1.65	161.87
HHO-PI	9.36	0.24	2.17	181.98
传统 PI	7.55	0.32	2.23	244.26

由图 10 可见,EHHO-PI 控制器在设置的工况中均表现出更小的超调和更快的动态响应,系统波动最小。从表 4 可见,EHHO-PI 控制器在 4 项关键指标中均取得

优化了 PI 控制器的参数,使得电机能够在复杂的动态工况下保持更好的控制精度、稳定性和抗扰动能力。具体而言,EHHO-PI 控制器具有更短的响应时间和更小的超调量,同时能够有效减少负载扰动带来的影响。

5 结 论

本文提出了一种基于改进哈里斯鹰优化算法与 PI 控制器相结合的无刷直流电机转速控制方法。针对传统 PI 控制器在复杂工况下响应迟缓、鲁棒性差的问题,所提控制策略通过引入对立学习、自适应权重、非线性能量因子和嵌入式平滑处理等机制,显著提高了算法的优化能力与控制精度。仿真和实验结果表明,EHHO-PI 控制器在多种工况下展现了优异的性能,特别是在速度响应、抗扰动能力和调节精度方面,相较于传统 PI 控制策略,具有更强的鲁棒性与实用性。

尽管 EHHO 算法在优化性能上取得了显著进展,但仍面临计算复杂度、对初始参数敏感等问题,尤其是在资源受限的嵌入式平台上应用时,可能会出现实时性不足的情况。因此,未来工作可以考虑进一步优化 EHHO 算法的计算效率,或者将其与其他先进控制策略,如模型预测控制或强化学习方法相结合,以提升其在智能化电机控制系统中的适应性和泛化能力。

本研究为电机控制领域提供了一种新的优化方法,并为智能化电机调速系统的设计和应用提供了理论基础和技术支持。未来,随着控制算法的进一步优化和硬件平台的进步,该方法有望在更多的工业领域得到广泛应用。

参考文献

- [1] 张瑞祥. 基于改进滑模观测器的无刷直流电机无位置传感器控制研究[D]. 兰州:兰州理工大学,2023.
ZHANG R X. Research on sensorless control of brushless DC motor based on improved sliding mode observer [D]. Lanzhou:Lanzhou University of Technology, 2023.
- [2] 武智超,王慧,王吉亮,等. 基于阵列漏磁信号分析的无刷直流电机高阻接触故障诊断研究[J]. 电子测量与仪器学报,2021,35(11):108-114.
WU ZH CH, WANG H, WANG J L, et al. Fault diagnosis of high resistance connection in brushless DC motor based on analysis of array leakage flux signals [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35(11):108-114.
- [3] 卢志远,柏受军,江明,等. 改进的线性自抗扰永磁同步电机转速控制器设计[J]. 电子测量与仪器学报,2022,36(4):73-81.
LU ZH Y, BAI SH J, JIANG M, et al. Improved design of linear self-turbulent permanent magnet synchronous motor speed controller [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022,36(4):73-81.
- [4] 侯利民,韦卓庆,曹生辉,等. 麻雀搜索算法的 PMSM 固定时无模型滑模控制[J]. 电子测量与仪器学报,2023,37(12):156-165.
HOU L M, WEI ZH Q, CAO SH H, et al. Fixed time

model-free sliding mode control of PMSM based on sparrow search algorithm [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023, 37 (12): 156-165.

- [5] 胡伟,耿亚珂. 改进滑模观测器的 BLDCM 无模型自适应控制[J]. 电子测量与仪器学报,2016,30(3):456-464.
HU W, GENG Y K. Model-free adaptive control of BLDCM based on improved sliding mode observer [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2016,30(3):456-464.
- [6] 王凌,李瑞,陈靖方. 面向人机协同能效车间调度的群智能优化算法[J]. 中国科学:技术科学,2024,54(9):1676-1692.
WANG L, LI R, CHEN J F. A swarm intelligence optimization algorithm for human-robot collaborative energy-efficient shop scheduling [J]. Scientia Sinica (Technologica), 2024, 54(9): 1676-1692.
- [7] 杨维,吴佐平,张才俊,等. 基于群智能优化算法的无线通信网络信道分配研究[J]. 自动化技术与应用,2024,43(11):132-135,150.
YANG W, WU Z P, ZHANG C J, et al. Research on channel assignment in wireless communication network based on swarm intelligence optimization algorithm [J]. Techniques of Automation and Applications, 2024, 43(11):132-135,150.
- [8] SUN J W, WANG C, SHI Q Z, et al. Intelligent optimization methods of phase-modulation waveform[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2022, 33(4): 916-923.
- [9] 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]. Journal of Computer Applications, 2021, 21(28): 12130-12138.
- [10] 王龙达,徐传芳,鞠艳杰,等. 永磁同步电机改进鲨鱼优化非线性自抗扰控制[J]. 仪器仪表学报,2023,44(6):303-312.
WANG L D, XU CH F, JU Y J, et al. Nonlinear auto disturbance rejection control via the improved shark smell optimization for permanent magnet synchronous motor [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(6): 303-312.
- [11] 兰淼淼,胡黄水,王婷婷,等. 基于改进鲸鱼优化 PID 的无刷直流电机转速控制算法[J]. 吉林大学学报(理学版),2024,62(3):704-712.
LAN M M, HU H SH, WANG T T, et al. Speed control algorithm of brushless DC motor based on improved whale optimization PID [J]. Journal of Jilin University

- (Science Edition), 2024, 62(3): 704-712.
- [12] HEIDARI A A, MIRJALILI S, FARIS H, et al. Harris hawks optimization: Algorithm and applications [J]. Future Generation Computer Systems, 2019, 97: 849-872.
 - [13] 朱诚, 潘旭华, 张勇. 基于趋化校正的哈里斯鹰优化算法[J]. 计算机应用, 2022, 42(4): 1186-1193.
ZHU CH, PAN X H, ZHANG Y. Harris hawks optimization algorithm based on chemotaxis correction [J]. Journal of Computer Applications, 2022, 42(4): 1186-1193.
 - [14] 汤安迪, 韩统, 徐登武, 等. 混沌精英哈里斯鹰优化算法[J]. 计算机应用, 2021, 41(8): 2265-2272.
TANG A D, HAN T, XU D W, et al. Chaotic elite Harris hawks optimization algorithm [J]. Journal of Computer Applications, 2021, 41(8): 2265-2272.
 - [15] KAVEH A, RAHMANI P, ESLAMLOU A D. An efficient hybrid approach based on Harris Hawks optimization and imperialist competitive algorithm for structural optimization[J]. Engineering with Computers, 2022, 38(Suppl 2): 1555-1583.
 - [16] 郭雨鑫, 刘升, 高文欣, 等. 精英反向学习与黄金正弦优化的 HHO 算法[J]. 计算机工程与应用, 2022, 58(10): 153-161.
GUO Y X, LIU SH, GAO W X, et al. Elite opposition-based learning golden-sine harris Hawks optimization [J]. Computer Engineering and Applications, 2022, 58(10): 153-161.
 - [17] ZHANG Y, ZHOU X Z, SHIH P C. Modified harris hawks optimization algorithm for global optimization problems [J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2020, 45(12): 10949-10974.
 - [18] LIU C, HU J H, SHANG J. Dual-vector predictive current control of open-end winding PMSM with zero-sequence current hysteresis control[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2021, 1(10): 184-195.
 - [19] RUBINO S, DORDEVIC O, BOJOI R, et al. Modular vector control of multi-three-phase permanent magnet synchronous motors[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 68(10): 9136-9147.
 - [20] TIZHOOSH H. Opposition-based learning: A new scheme for machine intelligence[C]. Proceedings of the International Conference on Computational Intelligence for Modelling, Control and Automation. Vienna: IEEE, 2005: 695-701.
 - [21] WANG H, WANG Y, LI C, et al. Adaptive weight update algorithm for target tracking of UAV based on improved Gaussian mixture cubature Kalman filter[J]. Complexity, 2020, 2020: 7828050.
 - [22] MEHNE H H, MIRJALILI S. A parallel numerical method for solving optimal control problems based on whale optimization algorithm [J]. Knowledge-Based Systems, 2018, 151: 114-123.
 - [23] MIRJALILI S, LEWIS A. The whale optimization algorithm[J]. Advances in Engineering Software, 2016, 95: 51-67.
 - [24] MIRJALILI S, LEWIS A. Grey wolf optimizer [C]. Proceedings of the IEEE International Conference on Computational Intelligence and Computing Research, 2014: 1-6.
 - [25] MIRJALILI S, LEWIS A. Sine cosine algorithm: A novel nature-inspired optimization algorithm[J]. Journal of Computational Science, 2016, 14: 56-67.
 - [26] 刘维莎, 石荣亮, 周其锋, 等. 基于改进麻雀搜索算法分数阶 PI 的 PMSM 调速策略[J]. 电子测量技术, 2024, 47(11): 78-85.
LIU W SH, SHI R L, ZHOU Q F, et al. Speed regulation strategy of PMSM based on fractional order proportional integral with improved sparrow search algorithm [J]. Electronic Measurement Technology, 2024, 47(11): 78-85.
 - [27] 王迪. 基于 STM32 的割草机用无刷直流电机 FOC 控制[D]. 济南: 齐鲁工业大学, 2024.
WANG D. FOC control of brushless DC motor for mower based on STM32 [D]. Jinan: Qilu University of Technology, 2024.

作者简介



张冰战(通信作者), 2004 年于合肥工业大学获得学士学位, 2011 年于合肥工业大学获得博士学位, 现为合肥工业大学副教授、硕士生导师, 主要研究方向为新能源汽车能量管理和动力传动技术与控制。
E-mail: zhangbingzhan@hfut.edu.cn

Zhang Bingzhan (Corresponding author) received his B.Sc. degree from Hefei University of Technology in 2004 and Ph.D. degree from the same university in 2011. Now he is an associate professor and M. Sc. supervisor at Hefei University of Technology. His main research interests include energy management of new energy vehicles and power transmission technology and control.



虎啸鸣, 2022 年于桂林电子科技大学获得学士学位, 现为合肥工业大学硕士研究生, 主要研究方向为新能源汽车动力学控制。
E-mail: huxm1231@foxmail.com

Hu Xiaoming received his B. Sc. degree from Guilin University of Electronic Technology in 2022. Now he is a M. Sc. candidate at Hefei University of Technology. His main research interest includes dynamics control of new energy vehicles.