

DOI: 10. 13382/j. jemi. B2003001

基于蜻蜓算法分数阶 PI 的 PMSM 矢量控制优化^{*}

杜 涛 曾国辉 黄 勃 刘 瑾 韦 钰
(上海工程技术大学 电子电气工程学院 上海 201620)

摘 要:针对永磁同步电机双闭环矢量控制系统中整数阶 PI 控制器存在动态响应速度慢、鲁棒性不强的问题,提出一种采用蜻蜓算法与分数阶 PI 控制相结合,对系统的转速外环和电流内环进行参数离线整定的方法。将待优化参数看作是蜻蜓在搜索空间中搜寻食物源的最优个体所处的空间位置,并利用误差性能指标 ITAE 作为其目标适应度函数。分别对传统工程经验整定整数阶 PI、蜻蜓算法整定整数阶 PI、蜻蜓算法整定分数阶 PI 和粒子群算法整定分数阶 PI 的电机调速性能进行仿真和实验对比。结果表明,蜻蜓算法优化的分数阶 PI 控制器具有提高系统的动态响应性能,减小超调量和增强鲁棒性的优势,证明了优化策略的优越性。

关键词: 永磁同步电机;蜻蜓算法;分数阶 PI 控制;参数离线整定;ITAE

中图分类号: TP273;TN98 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 120. 3099

Optimization of PMSM vector control based on dragonfly algorithm fractional PI

Du Tao Zeng Guohui Huang Bo Liu Jin Wei Yu
(School of Electronic and Electrical Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

Abstract: In order to solve the problems of slow dynamic response and weak robustness of the integer order PI controller in the double closed-loop vector control system of permanent magnet synchronous motors, an off-line parameter tuning method of outer speed loop and inner current loop of the system is proposed by using dragonfly algorithm and fractional order PI control. The parameter to be optimized is regarded as the spatial position of the best individual that the dragonfly searches for the food source in the search space, and the error performance index ITAE is used as its target fitness function. Simulation and experimental comparisons of motor speed regulation performance of traditional engineering experience tuning integer order PI, dragonfly algorithm for integer order PI, dragonfly algorithm for fractional order PI, and particle swarm algorithm for fractional order PI, respectively. The results show that the dragonfly algorithm optimized fractional-order PI controller has the advantages of improving the system's dynamic response performance, reducing the amount of overshoot, and enhancing the robustness, proving the superiority of the optimization strategy.

Keywords: permanent magnet synchronous motor; dragonfly algorithm; fractional-order PI control; parameter offline tuning; ITAE

0 引 言

永磁同步电机(permanent magnet synchronous motor, PMSM)具有结构简单、调速性能好、功率密度高等显著优点,广泛应用于电动汽车、工业机器人、数控机床等领域^[1]。目前,许多学者在利用智能算法优化电机控制器参数方面取得了一定的研究成果^[2-3]。然而,通常的智能算

法优化电机控制器参数仅用于转速外环,没有考虑到电流内环的影响,很难获得永磁同步电机驱动控制系统动态性能最佳。而且,PMSM 在运行过程中会受到自身的时变参数和外界负载扰动及工况变化的影响,采用传统的整数阶 PID(integer order PID, IOPID)控制难以满足对交流调速系统转速的精确跟踪和对抗扰动不敏感的要求。

近年来,分数阶 PID(fractional order PID, FOPID)控制的提出引起了国内外研究学者的广泛关注。高嵩等^[4]

采用改进粒子群算法优化分数阶 PID 控制器参数,并应用于随动电气伺服控制系统,提高了系统的收敛速度,证明了分数阶 PID 控制具有动态响应速度快、抗干扰能力强的优点。张欣等^[5]采用量子粒子群算法优化分数阶 PID 控制器,应用于高低温试验箱,表明了 FOPID 比 IOPID 控制具有调节时间短和稳态误差小的优势。吕毅等^[6]将分数阶 PID 控制应用于 AGV 小车的电机调速,实验结果表明分数阶 PID 控制的小车稳定性好、受外界干扰小。聂卓赞等^[7]基于理想 Bode 传递函数,结合短记忆法,将 FOPID 控制应用于直流电机调速系统,实验结果验证了, FOPID 控制具有更好的抑制扰动效果。张学典等^[8]提出了一种频域法与飞蛾火焰优化算法相结合的分

数阶 PI 控制器参数整定,表明分数阶 PI 控制器能降低系统的超调量和提高跟踪能力。王荣林等^[9]设计了一种分数阶 PID 与自抗扰控制相结合的火箭炮交流伺服系统,引入粒子群算法对 FOPID 参数进行在线整定,提高了系统的动态响应性能。

已有研究为智能算法整定分数阶 PID 提供了参考依据,但仍存在局限性。智能算法在线整定参数存在收敛时间长和实时采样数据多的问题,很难应用于实际的电机控制领域。为了满足电机驱动控制的实时性要求,实现 PMSM 的高性能控制,本文结合以上思想,提出一种采用蜻蜓算法 (dragonfly algorithm, DA) 对 PMSM 转速外环和电流内环的 3 个分数阶 PI 控制器进行参数离线整定。DA 算法本质上是一种群体智能算法,与粒子群算法 (particle swarm optimization, PSO)^[10-11]、蝙蝠算法 (bat algorithm, BA)^[12-13]、人工蜂群算法 (artificial bee colony, ABC)^[14-15]等典型的群智能算法相比,具有搜索精度高、收敛速度快和避免陷入局部最优解等显著优点。仿真和实验对比了传统工程经验整定整数阶 PI (IOPI)、蜻蜓算法整定整数阶 PI (DAIOPI)、粒子群算法整定分数阶 PI (PSOFOPI) 和蜻蜓算法整定分数阶 PI (DAFOPI) 的电机调速性能。

1 三相 PMSM 的数学模型与矢量控制

在两相同步旋转坐标系下,建立内嵌式永磁同步电机的数学模型为:

$$\begin{cases} u_d = R_s i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega L_q i_q \\ u_q = R_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega (L_d i_d + \psi_f) \\ T_e = 1.5 p_n [\psi_f i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] \\ T_e - T_L = \frac{J}{p_n} \frac{d\omega}{dt} \end{cases} \quad (1)$$

式中: u_d 、 u_q 和 i_d 、 i_q 分别为定子电压和电流的直、交轴分

量; L_d 、 L_q 分别为 d 、 q 轴电感; R_s 为定子绕组电阻; ω 为转子电角速度; ψ_f 为永磁体磁链; p_n 为电机的极对数; T_e 为电磁转矩; T_L 为负载转矩; J 为转动惯量。

如图 1 所示,采用 $i_d^* = 0$ 控制策略的三相 PMSM 双闭环矢量控制框图。其中,转速外环 ASR,转矩电流内环 ACQR 和励磁电流内环 ACDR 均采用 DA 算法对分数阶 PI 控制器参数进行离线寻优。 N_r^* 和 N_r 分别为电机转速给定值和实际值, i_q^* 、 i_d^* 分别为转矩电流、励磁电流参考值, u_α^* 、 u_β^* 为 $\alpha\beta$ 坐标系下的定子电压分量参考值, i_α 、 i_β 为 $\alpha\beta$ 坐标系下的实际定子电流分量, i_a 、 i_b 、 i_c 为 A、B、C 三相定子电流, θ 为转子位置角, U_{dc} 为直流侧电压。

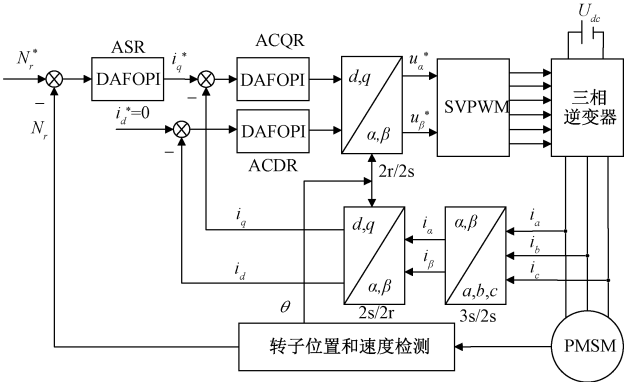


图 1 三相 PMSM 双闭环矢量控制框图
Fig. 1 Three-phase PMSM double closed loop vector control block diagram

2 分数阶 PI 控制器的 Oustaloup 算法实现

2.1 分数阶微积分

分数阶微积分的 Grunwald-Letnikov 定义^[16-17]为:

$$\begin{cases} {}_a D_t^\mu f(t) = \frac{1}{h^\mu} \sum_{j=0}^{\lceil (t-a)/h \rceil} \omega_j^{(\mu)} f(t-jh) \\ \omega_j^{(\mu)} = (-1)^j \binom{\mu}{j} \frac{(-1)^j \Gamma(\mu+1)}{j! \Gamma(\mu-j+1)} \end{cases} \quad (2)$$

式中: a 、 t 为算子的积分的上、下界; h 为步长; $\lceil \cdot \rceil$ 表示取整运算; μ 表示微积分的阶次, $\Gamma(\cdot)$ 为伽马函数。

2.2 分数阶 Oustaloup 算法

在拟合的频率段 (ω_b , ω_h) 内实现分数阶微积分算子 s^μ 的近似, Oustaloup 滤波器^[18-19]为:

$$s^\mu = K \prod_{k=-N}^N \frac{s + \omega'_k}{s + \omega_k} \quad (3)$$

式中: $\omega'_k = \omega_b \left(\frac{\omega_h}{\omega_b} \right)^{\frac{k+N+(1-\mu)/2}{2N+1}}$, $\omega_k = \omega_b \left(\frac{\omega_h}{\omega_b} \right)^{\frac{k+N+(1+\mu)/2}{2N+1}}$, $K = \omega_h^\mu$, $2N+1$ 为滤波器的阶次。



2.3 分数阶 PI 控制器

分数阶 PI 控制器的传递函数表达式为:

$$G_{(s)} = K_p + \frac{K_i}{s^\lambda} \quad (4)$$

式中: K_p 、 K_i 分别为比例、积分系数, 积分阶次 λ 取值范围为 $0 < \lambda < 1$ 。分数阶 PI^λ 控制器增加了可调参数 λ 增加了调节的自由度, 能更灵活地控制被控对象, 提高了系统的控制性能。

3 DA 算法优化分数阶双闭环 PI 参数的实现

3.1 DA 算法简介

蜻蜓算法是 2016 年由澳大利亚学者 Mirjalili 提出的一种新颖的自然启发式算法^[20]。蜻蜓算法的主要灵感来源于自然界中蜻蜓群体静态的觅食行为和动态的迁徙行为。在静态群体中, 蜻蜓创建不同的子群, 飞越不同的区域, 捕食蝴蝶和蚊子等其他飞行猎物, 这是全局搜索阶段的主要目标; 在动态群体中, 蜻蜓集结成群, 沿着一个方向飞行, 这对于局部开发阶段是有利的^[21]。

3.2 DA 算法的数学建模

蜻蜓算法是模拟蜻蜓飞行、觅食和避敌的过程, 运动过程中蜻蜓位置的更新主要分为以下 5 种行为。

1) 分离行为指蜻蜓个体与周围的其他个体之间避免碰撞。计算公式如式(5)所示。

$$S_i = - \sum_{j=1}^N X - X_j \quad (5)$$

式中: X 为当前蜻蜓个体所处的位置; X_j 为第 j 个相邻个体所处的位置; N 是相邻个体的数目。

2) 对齐行为指蜻蜓个体与周围的替他个体之间速度保持一致。计算公式如式(6)所示。

$$A_i = \frac{\sum_{j=1}^N V_j}{N} \quad (6)$$

式中: V_j 表示第 j 个邻近个体的速度。

3) 凝聚行为指蜻蜓个体向周围群体中心靠近的趋势。计算公式如式(7)所示。

$$C_i = \frac{\sum_{j=1}^N X_j}{N} - X \quad (7)$$

4) 觅食行为指蜻蜓个体靠近食物源的行为。计算公式如式(8)所示。

$$F_i = X^+ - X \quad (8)$$

式中: X^+ 是蜻蜓的食物源所处的位置。

5) 避敌行为指蜻蜓个体远离天敌所在位置的行为。

计算公式如下。

$$E_i = X^- + X \quad (9)$$

式中: X^- 是蜻蜓的天敌所处的位置。

蜻蜓群体行为被认为是以上 5 种个体行为的组合, 采用步长向量 ΔX 和位置向量 X 更新人工蜻蜓在搜索空间中的位置并模拟他们的运动。

步长向量显示出蜻蜓的运动方向, 其计算公式如式(10)所示。

$$\Delta X_{i+1} = (sS_i + aA_i + cC_i + fF_i + eE_i) + w\Delta X_i \quad (10)$$

式中: s 、 a 、 c 、 f 、 e 分别表示分离、对齐、凝聚、觅食、避敌 5 种行为的权重; w 表示惯性权重; t 表示当前迭代次数。

位置向量的更新计算公式分为两种情况, 有邻近蜻蜓时计算公式如式(11)所示。

$$X_{i+1} = X_i + \Delta X_{i+1} \quad (11)$$

无邻近蜻蜓时, 位置更新采用随机游走公式为。

$$X_{i+1} = X_i + Le'vy(d) \times X_i \quad (12)$$

$Le'vy$ 函数的计算公式为。

$$Le'vy(x) = 0.01 \times \frac{r_1 \times \sigma}{|r_2|^{\frac{1}{\beta}}} \quad (13)$$

式中: r_1 、 r_2 是 $[0, 1]$ 内的随机数; β 是一个常数, 本文取值为 1.5。 σ 计算公式为:

$$\sigma = \left(\frac{\Gamma(1 + \beta) \times \sin\left(\frac{\pi\beta}{2}\right)}{\Gamma\left(\frac{1 + \beta}{2}\right) \times \beta \times 2^{\left(\frac{\beta-1}{2}\right)}} \right)^{1/\beta} \quad (14)$$

3.3 基于 DA 算法的双闭环分数阶 PI 控制器设计

采用 DAFOPi 控制器的结构如图 2 所示, 控制器主要分为两部分。1) 虚线框所示的 DA 算法, 输入为闭环负反馈系统转速(电流)给定值与实际值的偏差, 输出为对比例积分参数离线整定全局最优值; 2) 分数阶 PI 控制器。

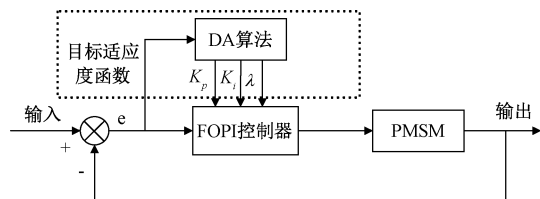


图 2 DAFOPi 控制器结构

Fig. 2 Diagram of DAFOPi controller

用 DA 算法对转速、电流双闭环控制的 PI^λ 参数进行离线整定, 即找出 3 个分数阶 PI^λ 控制器的最优组合参数 K :

$$K = [K_{sp}, K_{si}, \lambda_s, K_{qp}, K_{qi}, \lambda_q, K_{dp}, K_{di}, \lambda_d] \quad (15)$$

将待优化的 9 个参数看作是蜻蜓搜寻食物源的最优个体所处的空间位置, 蜻蜓飞行在 9 维空间中搜寻 9 个

参数的最优组合使系统的适应度函数值最低。将 PMSM 调速系统性能最优问题,等价转化为目标适应度函数寻找全局最优解。因此,目标适应度函数的选择对于系统的性能至关重要。本文采用误差性能指标 ITAE 作为其适应度函数,以提高转速外环和电流内环的快速动态响应性能,减小超调量,提高抗干扰能力。相应的适应度函数如(16)所示。

$$J = \alpha_1 \int_0^\infty t | e_s(t) | dt + \alpha_2 \int_0^\infty t | e_{qc}(t) | dt + \alpha_3 \int_0^\infty t | e_{dc}(t) | dt$$

(16)

式中: α_1 、 α_2 、 α_3 、 β 分别为转速外环 ASR、转矩电流内环 ACQR、励磁电流内环 ACDR 权重系数。权重的设置是根据经验进行设定的,通过外环和内环不同权重组合的仿真测试,得到最终的目标适应度函数中的权重。

3.4 DA 算法具体实现步骤

采用本文提出的蜻蜓算法优化分数阶 PI 控制器的永磁同步电机调速系统的具体步骤如下。

- 1) DA 算法的初始化。确定待优化的参数的维度 D , 取值范围 $[LB, UB]$, 蜻蜓种群规模 N , 最大迭代次数 $Max\text{-}iteration$;
- 2) 确立目标适应度函数 J , 将 PMSM 调速系统性能最优, 转化为目标适应度函数取得最小值 J_{min} ;
- 3) 在搜索空间中随机生成蜻蜓种群的位置向量 X 步长向量 ΔX ;
- 4) 计算每只蜻蜓的适应度函数值, 并按照适应度值更新最优个体和最差个体;
- 5) 更新蜻蜓 5 种行为的权重 s 、 a 、 c 、 f 、 e 和惯性权重 w ;
- 6) 采用式(5)~(9)更新蜻蜓个体的位置;
- 7) 更新邻域半径, 采用式(10)更新蜻蜓的步长向量, 有邻近蜻蜓时, 采用式(11)更新蜻蜓的位置向量, 无邻近蜻蜓时, 采用式(12)更新蜻蜓的位置向量;
- 8) 返回步骤 4), 进行下一次迭代更新, 直至达到设置的最大迭代次数;
- 9) 输出的最优蜻蜓个体所处的空间位置即为待优化的分数阶 PI 控制器的参数, 算法结束。

4 仿真验证

为了验证本文所提出的蜻蜓算法优化 PMSM 转速电流双闭环分数阶 PI 控制器矢量控制系统可行性和有效性, 根据图 1 在 MATLAB/Simulink 环境中搭建了 PMSM 按转子磁场定向的矢量控制系统的仿真模型, 对传统工程经验整定整数阶 PI、蜻蜓算法整定整数阶 PI、粒子群算法整定分数阶 PI、蜻蜓算法整定分数阶 PI 控制器的电

机调速性能 4 个实验进行了仿真对比。

对 4 种方式整定 PI 控制器进行了电机空载启动、变载、变速运行 3 种工况的转速响应、转矩响应和定子电流进行比较。首先, 电机空载启动, 给定转速为 600 r/min, 然后, 0.2 s 时给电机加 2 N·m 的负载, 最后 0.4 s 电机加速运行到 800 r/min。

本仿真实验中, 蜻蜓和粒子种群规模均为 $N = 10$, 最大迭代次数 $Max\text{-}iteration = 50$, 待求变量的维度 $D = 9$ 。为确保电机驱动控制系统的稳定性, 根据传统经验整定的 PI 控制器参数作为算法搜索待求变量的取值范围。待优化控制参数 K_{sp} 搜索范围为 $[0, 0.1]$, K_{si} 的搜索范围为 $[0, 10]$, K_{qp} 、 K_{dp} 搜索范围为 $[0, 20]$, K_{qi} 、 K_{di} 的搜索范围均为 $[0, 8000]$, 积分阶次 λ_s 、 λ_q 、 λ_d 的取值范围为 $[0, 1]$, 适应度函数中的权值分别为 $\alpha_1 = 0.7$, $\alpha_2 = 0.3$, $\alpha_3 = 0.3$ 。永磁同步电机和变换器的参数如表 1 所示, 4 种方法整定的 PI 控制器参数如表 2 所示。

表 1 永磁同步电机和变换器相关参数
Table 1 Permanent magnet synchronous motor and converter related parameters

参数	数值	参数	数值
功率/kW	0.75	转动惯量/(kg·m ²)	0.000 18
定子电阻/Ω	1.44	阻尼系数/(N·m·s)	0.008
直轴电感/mH	1.82	永磁体磁链/Wb	0.114 6
交轴电感/mH	2.65	直流母线电压/V	311
极对数	4	开关频率/kHz	10

表 2 4 种方法整定的 PI 控制器参数
Table 2 Four methods of tuning PI controller parameters

方法	传统 IOPI	DAIOPI	PSOFOPI	DAFOPI
K_{sp}	0.050 0	0.083 07	0.024 68	0.026 27
K_{si}	5.000 0	1.942 6	4.632 5	3.974 9
K_{qp}	13.165 2	8.774 8	3.669 1	1.527 0
K_{qi}	7 154.000 0	842.068 4	1 251.645 2	679.433 0
K_{dp}	9.040 0	14.741 3	15.857 4	18.094 4
K_{di}	7 154.000 0	1 045.244 3	1 348.226 4	550.024 7
λ_s	无	无	0.458 2	0.465 2
λ_q	无	无	0.436 1	0.385 7
λ_d	无	无	0.673 4	0.642 9

图 3 所示为本文提出的 DAIOPI、DAFOPI 和 PSOFOPI 的 3 种算法的适应度函数的迭代收敛曲线, 可以看出, 与粒子群算法相比, 蜻蜓算法整定的控制器参数寻优初始阶段均具有很快的下降性能, 在迭代 30 次后适应度函数值收敛, 且在最后的搜索过程中 DAFOPI 搜寻到的目标函数值最小, 证明了蜻蜓算法优化 PI 控制器参

数的有效性。

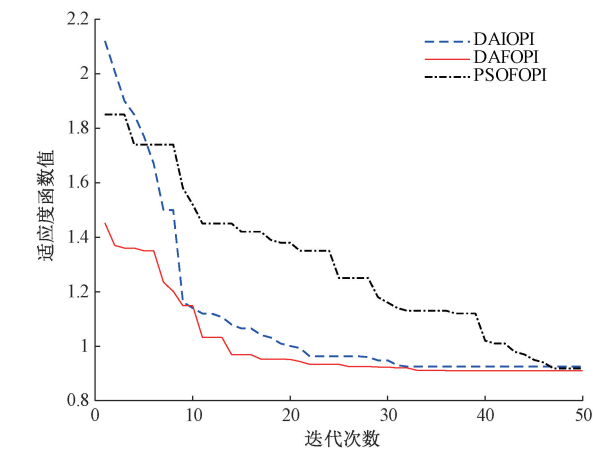


图 3 DA 算法适应度函数的收敛曲线

Fig. 3 Convergence curve of DA algorithm fitness function

图 4 所示为 4 种控制器转速特性曲线。电机空载启动,对 4 种控制方式的上升时间、超调量、调节时间和稳态误差进行对比,如表 3 所示。可以看出,相比于传统工程经验整定整数阶 PI,采用 DA 算法整定整数阶 PI 控制,电机在 3 次工况突变时超调量,调节时间较传统整数阶 PI 控制器有所改善,在电机加速运行时,超调量减小了 2.80%,调节时间缩短了 0.02 s。但是,电机在空载启动时有抖振现象。对比图 4 (b) 和 (c) 可以看出,采用 PSO 算法整定的分数阶 PI 控制器,电机在空载启动过程中,转速超调量减小了 3.25%,在变载、变速运行时,动态响应速度更快,调节时间缩短,且电机稳态时转速误差在 1.8 r/min。采用 DA 算法整定分数阶 PI 控制器,电机工况突变过程的超调量、调节时间进一步减小,且电机稳态时转速误差在 1.5 r/min,稳定性更好。

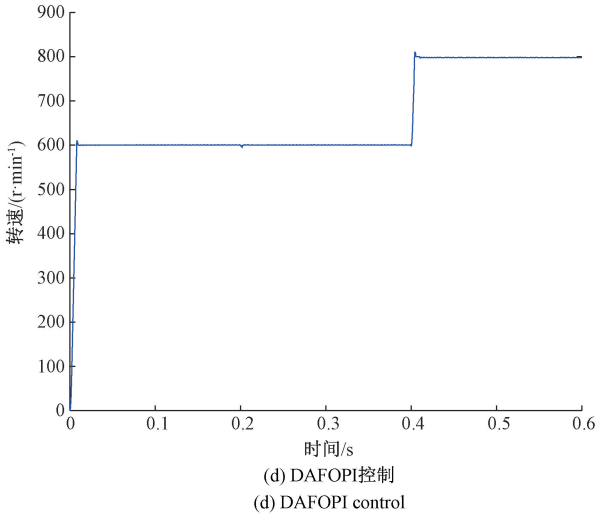
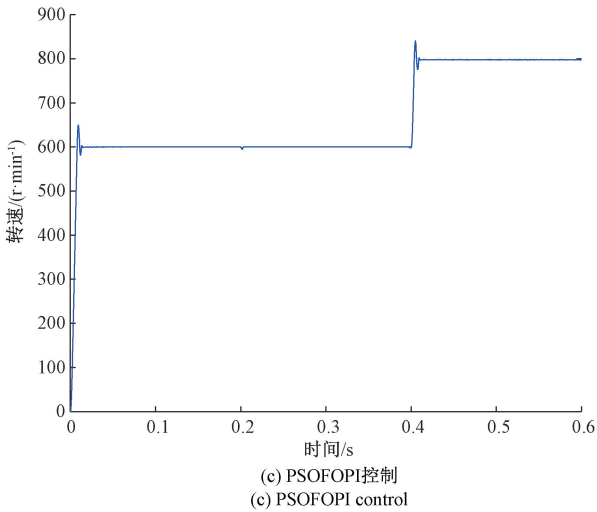
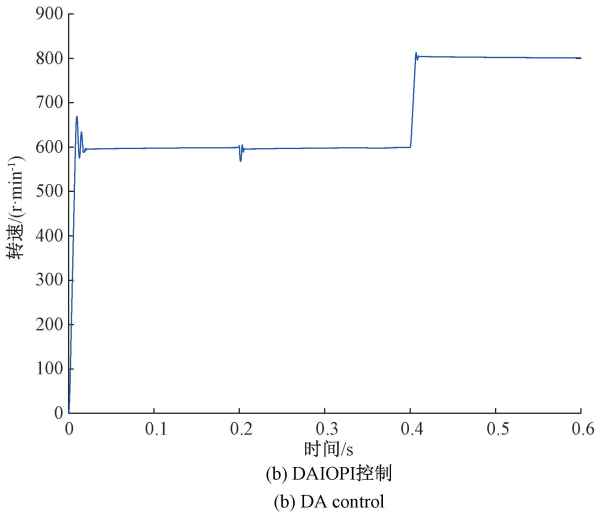
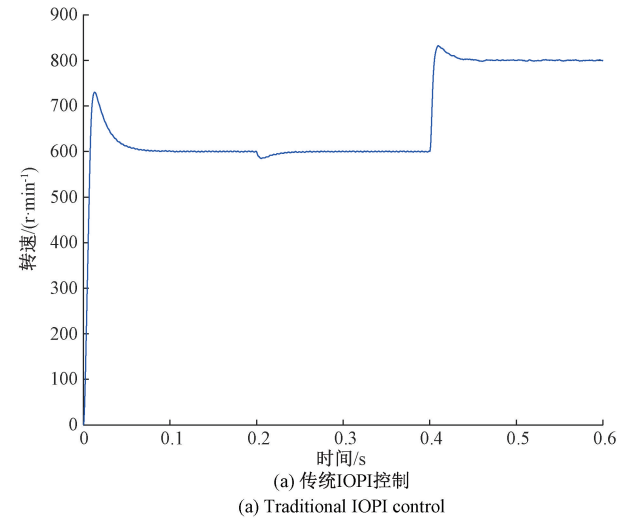


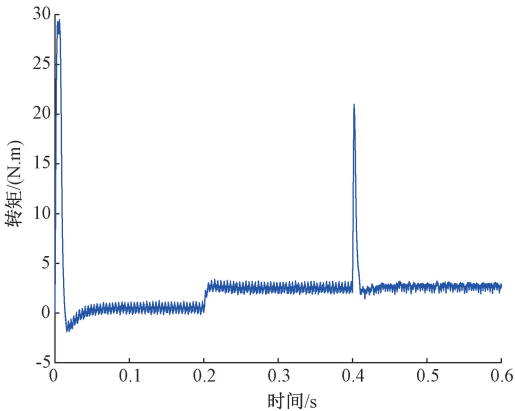
图 4 PMSM 转速特性曲线
Fig. 4 PMSM speed characteristic curve

表 3 4 种控制器空载启动性能指标

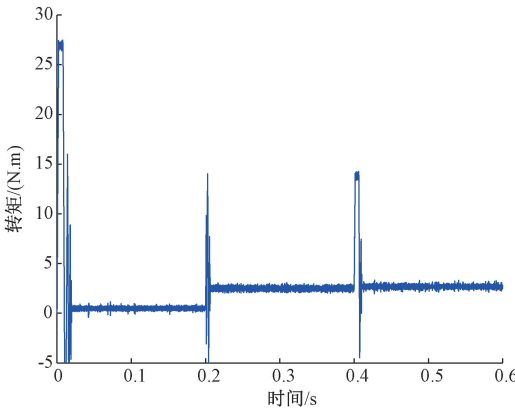
Table 3 Four controller no-load start performance indicators

性能指标	上升时间/s	超调量/%	调节时间 2%/s	稳态误差/($r \cdot \min^{-1}$)
IOPI	0.007 8	21.667 0	0.050 7	3.500 0
DAIOPI	0.007 4	11.583 3	0.016 2	1.540 0
PSOFOPI	0.007 3	8.333 0	0.012 6	1.800 0
DAFOPI	0.007 3	2.500 0	0.010 5	1.500 0

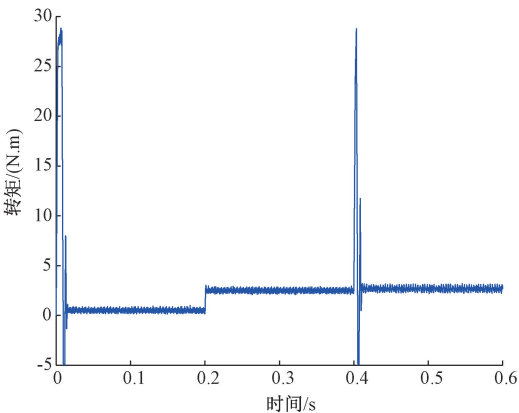
图 5(a)~(d) 所示分别为传统 IOPI 控制、DAIOPI 控制、PSOFOPI 控制和 DAFOPI 控制的 4 种电磁转矩特性曲线。与传统整数阶 PI 控制相比,DA 算法优化的整数阶 PI 控制器转矩动态响应速度快,但工况切换时转矩抖动较明显。PSO 算法优化的分数阶 PI 控制器,在负载突变时转矩动态响应快,转矩抖动时间缩短,鲁棒性好。采用 DA 算法优化分数阶 PI 控制器,加载和加速时抖动变小,抗外界干扰能力强,且稳态时转矩脉动小,总体的动静态性能较好。



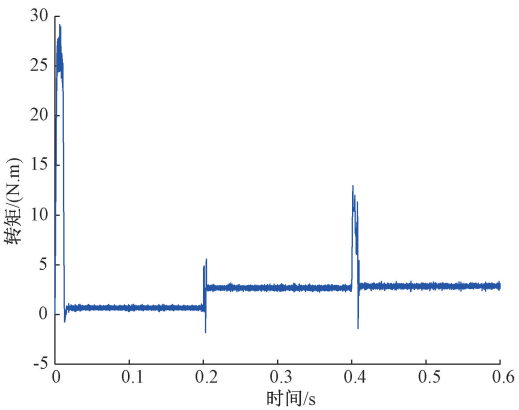
(a) 传统IOPI控制
(a) Traditional IOPI control



(b) DAIOPI控制
(b) DAIOPI control



(c) PSOFOPI控制
(c) PSOFO control



(d) DAFOPI控制
(d) DAFOPI control

图 5 PMSM 电磁转矩特性曲线

Fig. 5 PMSM electromagnetic torque characteristic curve

图 6 所示为 4 种 PI 控制器的定子三相电流波形,对定子 A 相电流 I_a 稳态时 0.25 s 开始选定 4 个周期做 FFT 分析,其中基波频率为 40 Hz,得到的 THD 含量百分比如表 4 所示,可以看出,传统工程经验整定的整数阶双闭环 PI 控制器的定子电流总谐波畸变率最高,采用 DAIOPI 整定的双闭环 PI 控制器 THD 含量比 IOPI 减少了 9.35%,电流 THD 含量最低。PSOFOPI 控制的 THD 含量较传统 IOPI 减少了 3.92%,在 0.4 s 电机加速运行时,电流畸变时间缩短。DA 算法整定的双闭环分数阶 PI 控制器的 THD 含量为 9.82%,但是在 0.4 s 电机加速运行时定子电流的波动较小,总体动静态性能较好,证明了 DA 算法优化双闭环分数阶 PI 控制器的优越性。

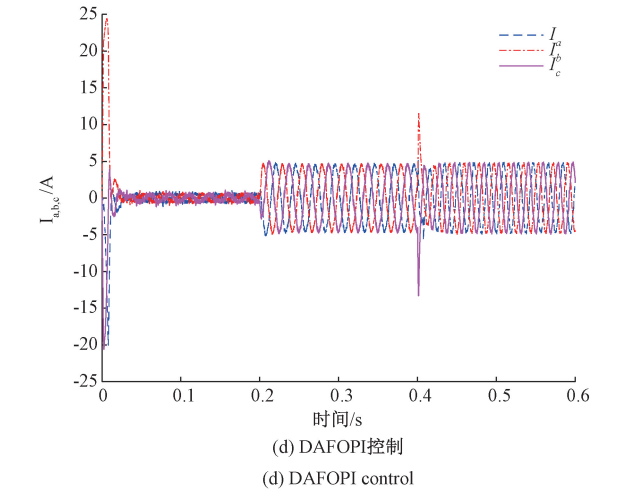
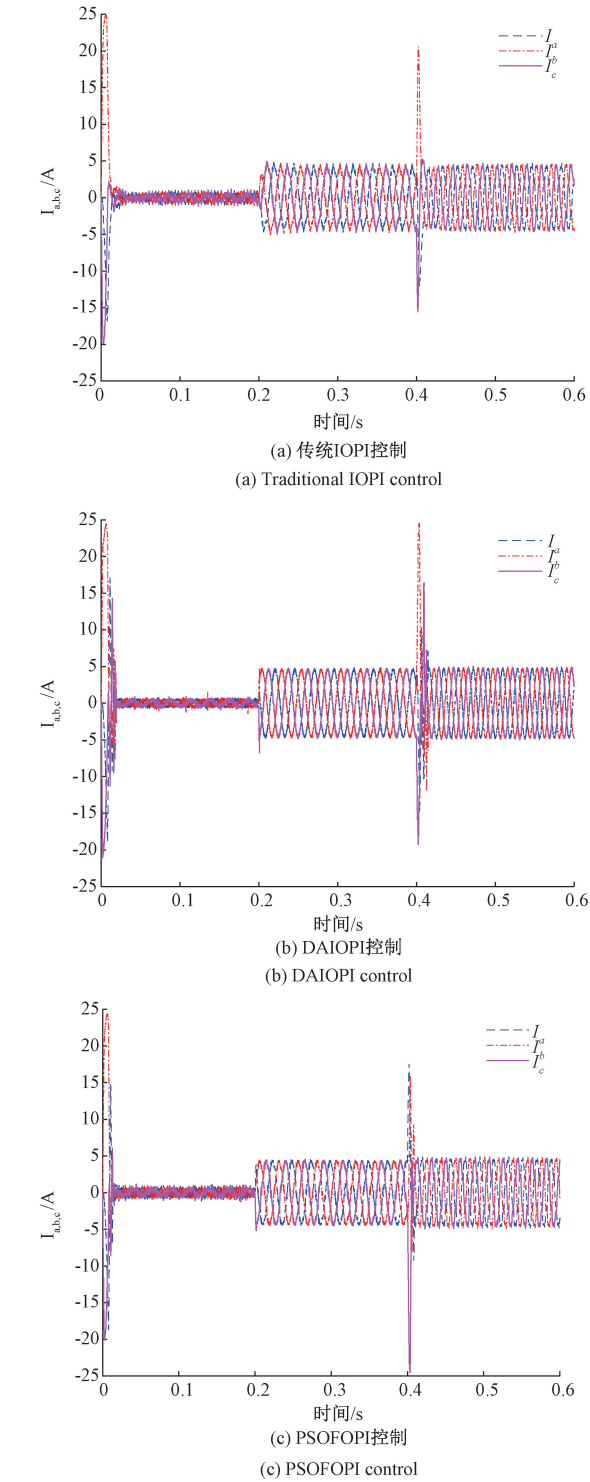


图 6 PMSM 定子三相电流曲线
Fig. 6 PMSM stator three-phase current curve

表 4 4 种控制器总谐波畸变率

控制器	IOPI	DAIOPI	PSOFOPi	DAFOPi
THD/%	17.56	8.21	13.64	9.82

5 实验验证

为了进一步验证本文所提出的基于蜻蜓算法分数阶 PI 控制器的算法的可行性和有效性,搭建了基于 dSPACE 的永磁同步电机交流调速系统的半实物实验平台,如图 7 和 8 所示。实验采用 dSPACE1104 作为控制器,PB-050 的磁粉制动器作为负载,PMSM 的额定功率为 600 W,额定转速为 750 r/min,额定转矩为 7.64 N·m,电机极对数为 14,永磁体磁链为 0.117 204 Wb,直轴电感为 23.0 mH,交轴电感为 22.6 mH。

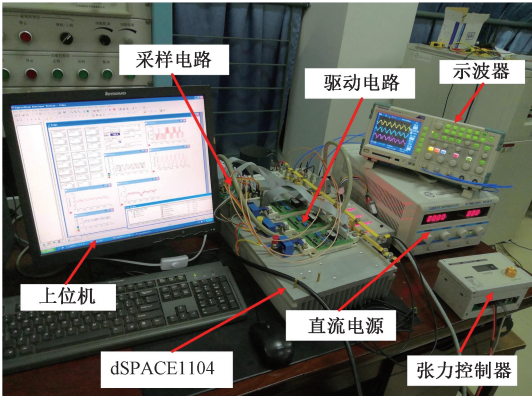


图 7 实验控制平台
Fig. 7 Experimental control platform

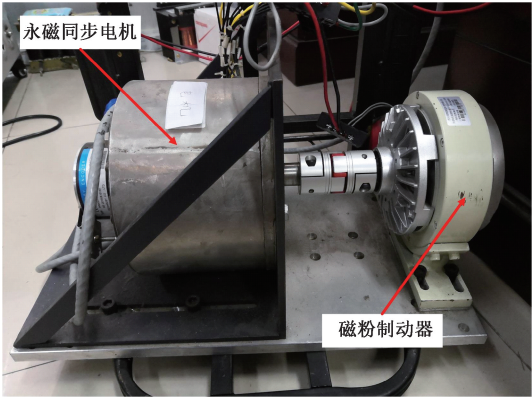
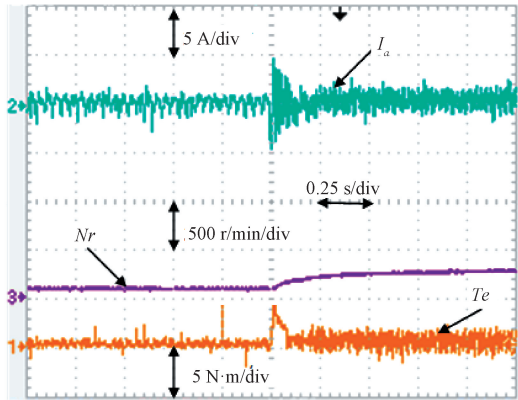


图 8 PMSM 和磁粉制动器

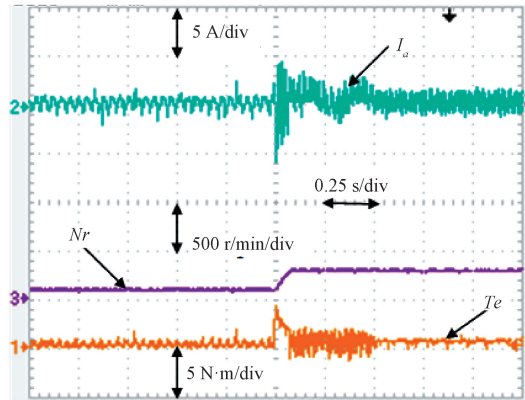
Fig. 8 PMSM and magnetic powder brake

实验中,将永磁同步电机从 100 加速至 300 r/min,对比传统工程经验整定整数阶 PI、蜻蜓算法整定整数阶 PI、粒子群算法整定分数阶 PI、蜻蜓算法整定分数阶 PI 的电机转速、电磁转矩和定子 A 相电流的性能,如图 9 所示。

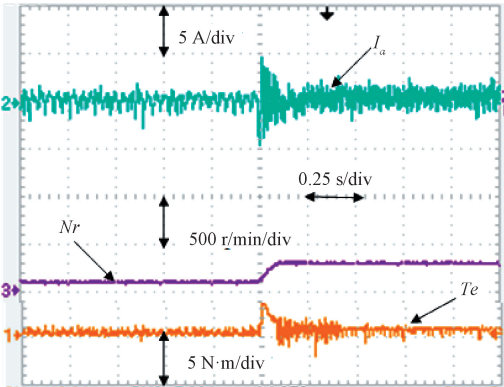
图 9 所示为 4 种 PI 控制器的永磁同步电机定子 A 相电流、转速、电磁转矩的波形,分别对应示波器的 2、3、1 通道。



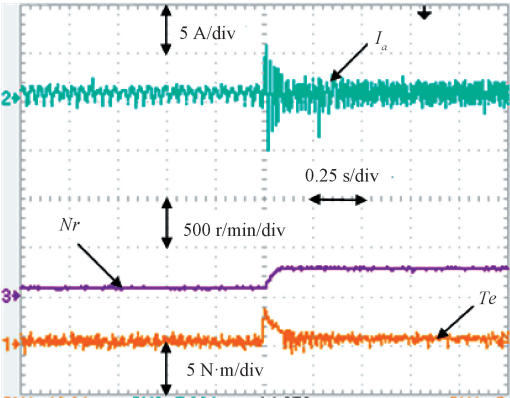
(a) 传统IOPI控制
(a) Traditional IOPI control



(b) DAIOPi控制
(b) DAIOPi control



(c) PSOFOPi控制
(c) PSOFOPi control



(d) DAFOPi控制
(d) DAFOPi control

图 9 4 种 PI 控制器的系统动态响应

Fig. 9 System dynamic response of four PI controllers

从图 9(a) 和 (b) 实验对比波形可以看出,DAIOPi 控制比传统 IOPI 控制的永磁同步电机转速动态响应速度快,调节时间缩短了 0.875 s,但是在电机达到期望转速后,稳态转矩脉动大,定子 A 相电流基本为正弦波,但存在畸变。对比图 9(b) 和 (c) 实验波形,PSOFOPi 控制的电机在加速运行时电流抖动时间缩短了 0.4 s,转矩抖动时间缩短了 20%。对比图 9(c) 和 (d) 实验波形,DAFOPi 控制电机转速能在较短时间达到期望值,动态响应速度快,转矩脉动时间缩短了 0.10 s,定子电流的正弦度较好。波形图中的少量毛刺主要是由实验中的硬件干扰所致。

6 结 论

本文采用蜻蜓算法对永磁同步电机矢量控制系统的 3 个分数阶 PI 控制器进行优化,在整数阶 PI 控制基础上增加了调节的自由度,减小了传统人工调试 PI 参数的复杂性,缩短调节时间。将 9 个待优化的参数看作是蜻蜓搜寻食物源最优个体所处的空间位置,通过构建合适的



目标适应度函数,将永磁同步电机调速系统的性能最优,转化为目标函数求得最优解的问题。为了使电机跟踪转速效果较快,减小超调量,目标函数构建中选用 ITAE 标准为优化指标,调节转速外环与电流内环的权重,较好的实现了了 PMSM 的高性能控制。并且,将本文提出的蜻蜓算法与经典的粒子群算法整定分数阶 PI 控制器参数进行对比,结果表明,采用蜻蜓算法整定的分数阶 PI 控制器具有动态响应快,超调量小,稳态误差小和鲁棒性好的优势,证明了优化策略的优越性。

参考文献

- [1] BETIN F, CAPOLINO G A, CASADEI D, et al. Trends in electrical machines control: Samples for classical, sensorless, and fault-tolerant techniques [J]. IEEE Industrial Electronics Magazine, 2014, 8(2): 43-55.
- [2] 舒双宝,王晓旭,夏豪杰,等. 基于神经内分泌算法的智能控制器设计[J]. 电子测量与仪器学报, 2018, 32(07): 192-197.
SHU SH B, WANG X X, XIA H J, et al. Design of intelligent controller based on neuroendocrine algorithm [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2018, 32 (07): 192-197.
- [3] 汪旭东,夏涛,许孝卓,等. 永磁同步直线电机的粒子群 PID 空间矢量控制[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(5): 655-661.
WANG X D, XIA T, XU X ZH, et al. Particle swarm PID space vector control of permanent magnet synchronous linear motor [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2015, 29 (5): 655-661.
- [4] 高嵩,王磊,陈超波,等. 一种改进粒子群优化的分数阶 PID 参数整定[J]. 控制工程, 2017, 24(10): 2010-2015.
GAO S, WANG L, CHEN CH B, et al. Fractional PID parameter tuning with improved particle swarm optimization [J]. Control Engineering, 2017, 24 (10): 2010-2015.
- [5] 张欣,仲崇权. 基于量子粒子群优化设计的分数阶 $PI \sim \lambda D \sim \mu$ 控制器[J]. 控制工程, 2018, 25(3): 493-498.
Zhang X, ZHONG CH Q. Fractional order $PI \sim \lambda D \sim \mu$ controller based on quantum particle swarm optimization design [J]. Control Engineering, 2018, 25 (3): 493-498.
- [6] 吕毅,戚志东. 一种基于分数阶 PID 直流电机调速的 AGV 控制系统[J]. 现代电子技术, 2017, 40(3): 127-130.
LV Y, QI ZH D. AGV control system based on fractional-order PID DC motor speed regulation [J]. Modern Electronic Technology, 2017, 40 (3): 127-130.
- [7] 聂卓赞,朱海燕,刘建聪,等. 基于理想 Bode 传递函数的分数阶 PID 频域设计方法及其应用[J]. 控制与决策, 2019, 34(10): 2198-2202.
NIE ZH Y, ZHU H Y, LIU J C, et al. Frequency domain PID design method based on ideal Bode transfer function and its application [J]. Control and Decision, 2019, 34 (10): 2198-2202.
- [8] 张学典,孙俊峰,秦晓飞. 基于飞蛾火焰优化算法的 PMSM 分数阶 $PI \sim \lambda$ 研究[J]. 计算机应用研究, 2019, 36(5): 1323-1327.
ZHANG X D, SUN J F, QIN X F. Study of PMSM fractional order $PI \sim \lambda$ based on moth flame optimization algorithm [J]. Application Research of Computers, 2019, 36 (5): 1323-1327.
- [9] 王荣林,陆宝春,侯润民,等. 交流伺服系统分数阶 PID 改进型自抗扰控制[J]. 中国机械工程, 2019, 30(16): 1989-1995.
WANG R L, LU B CH, HOU R M, et al. Frequency-rank PID improved active disturbance rejection control for AC servo system [J]. China Mechanical Engineering, 2019, 30 (16): 1989-1995.
- [10] 王镇道,张乐,彭子舜. 基于 PSO 优化算法的模糊 PID 励磁控制器设计[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2017, 44(8): 106-111, 136.
WANG ZH D, ZHAN L, Peng Z SH. Design of fuzzy PID excitation controller based on PSO optimization algorithm [J]. Journal of Hunan University (Natural Science Edition), 2017, 44 (8): 106-111, 136.
- [11] 郑恩让,姜苏英. 基于改进粒子群优化算法的分数阶 PID 控制[J]. 控制工程, 2017, 24(10): 2082-2087.
ZHENG E R, JIANG S Y. Fractional PID control based on improved particle swarm optimization algorithm [J]. Control Engineering, 2017, 24 (10): 2082-2087.
- [12] 吕磊,章国宝,黄永明. 基于蝙蝠算法的 PID 参数整定[J]. 控制工程, 2017, 24(3): 548-553.
LV L, ZHANG G B, HUANG Y M. Tune PID parameters based on bat algorithm [J]. Control Engineering, 2017, 24 (3): 548-553.
- [13] 罗苻子,汪泓,谭阳红,等. 改进小生境蝙蝠算法在无功优化中的应用[J]. 电力系统及其自动化学报, 2017, 29(10): 35-39, 51.
LUO X Z, WANG Y, TAN Y H, et al. Application of improved niche bat algorithm in reactive power optimization [J]. Journal of Electric Power Systems and Automation, 2017, 29 (10): 35-39, 51.
- [14] 李霜天,段海滨. 基于人工蜂群优化的高超声速飞行器在线参数辨识[J]. 中国科学: 信息科学, 2012, 42(11): 1350-1363.



- Li SH T, DU H B. On-line parameter identification of hypersonic aircraft based on artificial bee colony optimization [J]. Science and Technology of China, 2012, 42 (11): 1350-1363.
- [15] SABANCI K. Detection of sunn pest damaged wheat grains using artificial bee colony optimization based artificial intelligence techniques [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2019.
- [16] Sahar Z A, SHUYU S. Physics-preserving averaging scheme based on Grünwald-Letnikov formula for gas flow in fractured media [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2018, 163.
- [17] 戚志东,裴进,胡迪. 基于分数阶 PID 控制的质子交换膜燃料电池前级功率变换器 [J]. 电工技术学报, 2019, 34 (S1): 235-243.
- QI ZH D, PEI J, HU D. Proton exchange membrane fuel cell front power converter based on fractional PID control [J]. Journal of Electrical Engineering and Technology, 2019, 34 (S1): 235-243.
- [18] 赵蕊,许建,王森,等. 基于遗传算法和分数阶技术的水下机器人航向控制 [J]. 中国舰船研究, 2018, 13(6): 87-93.
- ZHAO R, XU J, WANG M, et al. Heading control of underwater robot based on genetic algorithm and fractional-order technology [J]. China Ship Research, 2018, 13 (6): 87-93.
- [19] 齐乃明,秦昌茂,王威. 分数阶系统的最优 Oustaloup 数字实现算法 [J]. 控制与决策, 2010, 25 (10): 1598-1600.
- QI N M, QIN CH M, WANG W. Optimal Oustaloup digital realization algorithm for fractional order systems [J]. Control and Decision, 2010, 25 (10): 1598-1600.
- [20] MIRJALILI S. Dragonfly algorithm; a new meta-heuristic optimization technique for solving single-objective, discrete, and multi-objective problems [J]. Neural computing & applications, 2016, 27(4): 1053-1073.
- [21] 吴伟民,吴汪洋,林志毅,等. 基于增强个体信息交流的蜻蜓算法 [J]. 计算机工程与应用, 2017, 53 (4): 10-14.
- WU W M, WU W Y, LIN ZH Y, et al. Dragonfly algorithm based on enhancing individual information exchange [J]. Computer Engineering and Applications, 2017, 53 (4): 10-14.

作者简介



杜涛, 2018 年于天津理工大学中环信息学院获得学士学位, 现为上海工程技术大学硕士研究生, 主要研究方向为电机控制。

E-mail: 1987787494@qq.com

DU Tao received his B. Sc. degree from Zhonghuan Information College Tianjin University of Technology. Now he is a M. Sc. candidate at Shanghai University of Engineering and Science. His main research interest is motor control.



曾国辉, 1995 年于南昌大学获得学士学位, 2003 年于上海交通大学获得硕士学位, 2007 年于上海交通大学获得博士学位, 现为上海工程技术大学副教授, 主要研究方向为智能控制、电力电子系统及其控制。

E-mail: zenggh@sues.edu.cn

ZENG Guohui received his B. Sc. degree from Nanchang University in 1995, M. Sc. degree from Shanghai Jiaotong University in 2003, and Ph. D. degree from Shanghai Jiaotong University in 2007. He is currently an associate professor at Shanghai University of Engineering Science. His main research interests are intelligent control, power electronics system and its control.