

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2026.06.003

基于 DBO-FOPID 控制器的无刷直流电机 DTC 控制

黄康^{1,2}, 刘杭¹, 孙浩^{1,2}, 夏伟¹

(1. 合肥工业大学 机械工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 安徽省数字化设计与制造重点实验室, 安徽 合肥 230009)

摘要:文章采用一种直接转矩控制(direct torque control, DTC)方案,将参考转矩直接与估计转矩进行比较,并将误差提供给控制器,从而实现极低转矩纹波下的直流无刷电机(brushless direct current motor, BLDC)控制。相较于传统的整数阶比例-积分-微分(proportion-integration-differentiation, PID)控制器,分数阶 PID(fractional order PID, FOPID)控制器的可调参数由过去的 K_P 、 K_I 、 K_D 增加为 K_P 、 K_I 、 K_D 、 λ 、 μ , 可调参数数量的增加能够更好地反映控制对象的非线性特性和时变性质,从而提升控制系统的鲁棒性。为避免 PID 参数过于依赖专家经验的缺点,采用蜣螂优化(dung beetle optimization, DBO)算法对 FOPID 进行自适应参数整定;并在 MATLAB/Simulink 环境中搭建 BLDC 的 DTC 控制模型,将所提出的基于 DBO-FOPID 控制器的 BLDC 直接转矩控制与基于粒子群优化(particle swarm optimization, PSO)算法的 FOPID 控制器的 BLDC 直接转矩控制、基于麻雀搜索优化算法(sparrow search algorithm, SSA)的 FOPID 控制器的 BLDC 直接转矩控制以及基于 PI(proportion integration)控制器的 BLDC 速度控制等方法进行对比。仿真对比结果验证了所提出的控制器能够以极低的转矩脉动实现对电机转矩的有效控制。

关键词:分数阶比例-积分-微分(FOPID)控制器;直接转矩控制(DTC);蜣螂优化(DBO)算法;参数整定

中图分类号: TM301.2

文献标志码: A

文章编号: 1003-5060(2026)06-0739-08

Direct torque control of brushless DC motor based on DBO-FOPID controller

HUANG Kang^{1,2}, LIU Hang¹, SUN Hao^{1,2}, XIA Wei¹

(1. School of Mechanical Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. Anhui Key Laboratory of Digital Design and Manufacturing, Hefei 230009, China)

Abstract: This paper uses a direct torque control(DTC) scheme, where the reference torque is directly compared with the estimated torque and the error is provided to the controller to achieve control of a brushless direct current motor(BLDC) with very low torque ripple. Compared with traditional integer order proportion-integration-differentiation(PID) controllers, the adjustable parameters of fractional order PID(FOPID) controllers have been increased from K_P , K_I , and K_D in the past to K_P , K_I , K_D , λ , and μ . An increase in the number of adjustable parameters can better reflect the nonlinear and time-varying characteristics of the control object, thereby improving the robustness of the control system. To avoid the disadvantage of relying too much on expert experience for PID parameters, this paper uses the dung beetle optimization(DBO) algorithm to adaptively tune the FOPID parameters. A DTC control model for BLDC is built in MATLAB/Simulink environment, and the DTC of BLDC based on DBO-FOPID controller proposed in this paper is compared with the DTC of BLDC based on FOPID controller tuned by particle swarm optimization(PSO) algorithm, DTC of BLDC based on FOPID controller tuned by sparrow search algorithm(SSA), and speed control of BLDC based on proportion inte-

收稿日期:2024-03-28;修回日期:2024-05-23

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52375051);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(PA2023GDSK0063)

作者简介:黄康(1968—),男,安徽合肥人,博士,合肥工业大学教授,博士生导师,通信作者, E-mail: hfhuang98@163.com.

gration(PID) controller. Through simulation comparison, it can be verified that the controller proposed in this paper can effectively control the motor torque with very low torque ripple.

Key words: fractional order proportion-integration-differentiation (FOPID) controller; direct torque control(DTC); dung beetle optimization(DBO) algorithm; parameter tuning

0 引言

自 19 世纪 70 年代以来,直流无刷电机 (brushless direct current motor, BLDC) 已在军事装备、航空航天、工业以及家电设备等多个领域得到广泛应用,成为一种备受欢迎的通用电机。BLDC 电动机具有体积小、质量轻、转矩密度高、效率高、速度调节范围宽等特点,既保留了直流电动机调节方便、价格低廉的优点,又具有较好的转矩性能和较快的响应速度。BLDC 的转子可分为表面永磁式和内置永磁式两种,此外,还有一种混合式 BLDC,它将表面永磁式与内置永磁式转子的优点结合起来,能够在同样体积下提高机械输出功率和效率。BLDC 根据传感器测量的电机电势变化相位进行换相,其面临的一个挑战性问题是控制转矩和速度,以实现 BLDC 电机的平稳响应^[1]。

为了获得电机的平滑响应和减少电机转矩纹波,文献[2]提出了一种高性能的每安培最大扭矩 (maximum torque per ampere, MTPA) 控制策略,考虑通过直接转矩控制方案对铁损的影响进行补偿,从而获得更好的响应和更少的电机转矩纹波;文献[3]提出了一种基于相电动势矢量定向技术的方法,用于实现 BLDC 电机的瞬时转矩控制,并最小化铜损耗。

分数阶比例-积分-微分 (fractional order proportion-integration-differentiation, FOPID) 控制最先由文献[4]在 1999 年提出,是近年来新兴的一种控制方法,相较于传统的整数阶 PID 控制器, FOPID 控制器的可调参数由过去的 K_P 、 K_I 、 K_D 增加为 K_P 、 K_I 、 K_D 、 λ 、 μ , 可调参数数量的增加能够更好地反映控制对象的非线性特性和时变性质,从而提高控制系统的鲁棒性,但同时也大大增加了 FOPID 控制器设计的难度。FOPID 控制器的设计方法已成为当前分数阶控制工程领域的前沿问题^[5]。由文献[6]提出的自适应神经网络与非线性 FOPID 控制器设计方法已成功应用于水下机器人。研究者们将基于萤火虫算法优化的 FOPID 控制器^[7]、基于萤火虫算法与粒子群算法混合优化的 FOPID 控制器^[8]、基于人工神经网络

的 FOPID 控制器^[9]用于对 BLDC 电机的直接瞬时转矩控制。文献[10]提出了基于自适应人工蜂群算法的自适应 FOPID 参数整定方法,并应用于 BLDC 电机的控制;文献[11]设计了基于群灰狼优化算法的最优 FOPID 控制器,实现了并网光伏逆变器的最大功率追踪;文献[12]设计了基于改进麻雀搜索算法的分数 PID 控制器。

蜣螂优化 (dung beetle optimization, DBO) 算法是文献[13]提出的一种全新的群智能优化算法,它具有全局寻优能力强、收敛速度快、算法参数少、对高维问题有较好的适应性等优点。本文提出一种基于 DBO 算法的 FOPID 控制器,以获得 BLDC 电机的平滑响应,从而有效降低电机扭矩和速度的波动。

1 BLDC 电机的数学模型

BLDC 电机特殊的整距绕组结构造成了梯形平顶波的反电动势, BLDC 电机的一个特点是电源电压不必为正弦波,但应限制其峰值电压不超过电机的最大允许电压。

为简化 BLDC 电机的整体建模分析,通常基于电动机的基本特性进行如下理想化假设:① 各相绕组空间分布对称,各相电感值相等;② 磁路不饱和,转子磁钢没有阻尼;③ 忽略 BLDC 电机的涡流损耗和磁滞现象;④ 反电动势梯形波的平顶宽度为 120° ;⑤ 所有器件均为理想开关。

BLDC 电机电枢绕组的电压方程推导如下:

$$V_a = RI_a + L \frac{dI_a}{dt} + e_a \quad (1)$$

$$V_b = RI_b + L \frac{dI_b}{dt} + e_b \quad (2)$$

$$V_c = RI_c + L \frac{dI_c}{dt} + e_c \quad (3)$$

其中: L 为电枢自感; R 为定子相绕组电枢的电阻; V_a 、 V_b 、 V_c 为端电压; I_a 、 I_b 、 I_c 为电机的输入电流; e_a 、 e_b 、 e_c 为对应相位上的梯形反电动势。

因此, BLDC 电机的电压状态矩阵可表示为:

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_a & 0 & 0 \\ 0 & R_b & 0 \\ 0 & 0 & R_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} +$$

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} \\ L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (4)$$

假设 BLDC 电机各相绕组电阻和电感值均相同,即 $R_a = R_b = R_c = R$, $L_{aa} = L_{bb} = L_{cc} = L$, $L_{ab} = L_{ba} = L_{bc} = L_{cb} = L_{ac} = L_{ca} = M$,则式(4)可以改写为:

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L & M & M \\ M & L & M \\ M & M & L \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (5)$$

在三相 BLDC 电机中,转子的位置决定了反电动势的波形,因此每个反电动势的相位方程可以表示为:

$$e_a = K_b f_{as}(\theta) \omega \quad (6)$$

$$e_b = K_b f_{bs} \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) \omega \quad (7)$$

$$e_c = K_b f_{cs} \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) \omega \quad (8)$$

其中: K_b 为单项反电动势常数; θ 为电转子角度(电角度); ω 为转子转速; f_{as} 、 f_{bs} 、 f_{cs} 为梯形函数。

梯形函数 $f_{as}(\theta)$ 可以表示为:

$$f_{as}(\theta) = \begin{cases} \frac{\theta}{\pi/6}, & 0 < \theta \leq \frac{\pi}{6}; \\ 1, & \frac{\pi}{6} < \theta \leq \frac{5\pi}{6}; \\ 1 - \frac{\theta - 5\pi/6}{\pi/6}, & \frac{5\pi}{6} < \theta \leq \frac{7\pi}{6}; \\ -1, & \frac{7\pi}{6} < \theta \leq \frac{11\pi}{6}; \\ -1 + \frac{\theta - 11\pi/6}{\pi/6}, & \frac{11\pi}{6} < \theta \leq 2\pi \end{cases} \quad (9)$$

$$f_{bs}(\theta) = f_{as}(\theta + 2\pi/3) \quad (10)$$

$$f_{cs}(\theta) = f_{as}(\theta - 2\pi/3) \quad (11)$$

机械角度、电角度与电机极对数 P 的关系为:

$$\theta = \frac{P}{2} \theta_m \quad (12)$$

其中, θ_m 为转子的机械角度。

电磁转矩 T_e 的表达式如下:

$$T_e = \frac{e_a I_a + e_b I_b + e_c I_c}{\omega} \quad (13)$$

电机的机械运动方程表达式如下:

$$T_e - T_l = J \frac{d\omega}{dt} + B\omega \quad (14)$$

其中: T_e 为电机电磁转矩; J 为转轴转动惯量; T_l 为转轴上的负载转矩; ω 为转子机械角速度; B 为摩擦系数。

2 DBO 算法

1) 太阳对蜣螂滚动过程中的方向起到了关键作用,帮助其保持粪球沿直线滚动。为了模拟这种滚动行为,蜣螂需要按照指定的方向在搜索空间中移动。假设光线的强弱也会对蜣螂滚球的路径产生影响,在滚球过程中,滚球蜣螂的位置更新可以表示为:

$$\mathbf{x}_i(t+1) = \mathbf{x}_i(t) + \alpha K \mathbf{x}_i(t-1) + b \Delta \mathbf{x} \quad (15)$$

$$\Delta \mathbf{x} = |\mathbf{x}_i(t) - \mathbf{X}^w| \quad (16)$$

其中: t 为当前迭代次数; $\mathbf{x}_i(t)$ 为第 i 只蜣螂在第 t 次迭代时的位置信息; 偏转系数 $K \in (0, 0.2]$ 是一个常量; b 为常量, $b \in (0, 1)$; α 为一个自然系数,取值为 -1 或 1 ; $\mathbf{X}^w$ 代表全局最差位置; $\Delta \mathbf{x}$ 用于模拟太阳光线的变化。

2) 蜣螂在遇到障碍物无法继续前进时,它们通过跳舞来重新更新位置信息,获得一条新路线。本文用正切函数(只考虑区间 $(0, \pi)$ 上定义的正切函数的值)来获取新的滚动方向,继续滚动粪球,滚球蜣螂重新定义的位置更新可以表示为:

$$\mathbf{x}_i(t+1) = \mathbf{x}_i(t) + \tan \theta | \mathbf{x}_i(t) \mathbf{x}_i(t-1) | \quad (17)$$

其中, $\theta \in (0, \pi)$ 。

3) 在自然界中蜣螂会把粪球滚到安全的产卵点并藏起来,给后代提供一个安全的环境,因此提出一种模拟雌性蜣螂产卵区域的边界选择策略,具体表示为:

$$\mathbf{L}_b^* = \max(\mathbf{X}^* (1-R), \mathbf{L}_b) \quad (18)$$

$$\mathbf{U}_b^* = \min(\mathbf{X}^* (1-R), \mathbf{U}_b) \quad (19)$$

其中: $\mathbf{X}^*$ 为当前局部最优位置; $\mathbf{L}_b^*$ 、 $\mathbf{U}_b^*$ 分别为产卵区的下界和上界; $R = (1-T)/T_{\max}$, $T_{\max}$ 为蜣螂种群的最大迭代次数; $\mathbf{L}_b$ 、 $\mathbf{U}_b$ 分别表示待优化问题的下、上边界。

4) 一旦确定了产卵区域,雌性蜣螂就会选择这个区域的卵球产卵。在 DBO 算法中,每只雌性蜣螂在每次迭代过程中只产生 1 个卵,产卵区是由 R 值决定的动态边界范围,因此孵化球在迭代过程中的位置也是动态变化的,具体表示为:

$$\mathbf{B}_i(t+1) = \mathbf{X}^* + \mathbf{b}_1 \odot (\mathbf{B}_i(t) - \mathbf{L}_b^*) + \mathbf{b}_2 \odot (\mathbf{B}_i(t) - \mathbf{U}_b^*) \quad (20)$$

其中: $\mathbf{B}_i(t) - \mathbf{L}_b^*$ 为第 i 个孵化球在第 t 次迭代的位置信息; $\mathbf{b}_1$ 、 $\mathbf{b}_2$ 表示两个大小为 $1 \times D$ 的独立随

机向量, D 为待优化问题的维数。卵球的位置严格限制在产卵区域的一定范围内。

5) 小蜣螂长大后从地下钻出来寻找食物, 建立最佳觅食区指导小蜣螂觅食。最佳觅食区的边界具体表示为:

$$L_b^b = \max(\mathbf{X}^b(1-R), L_b) \quad (21)$$

$$U_b^b = \min(\mathbf{X}^b(1-R), U_b) \quad (22)$$

其中: $\mathbf{X}^b$ 为全局最优位置; L_b^b 、 U_b^b 分别表示最佳觅食区的下界和上界。

小蜣螂的位置更新具体表示为:

$$\mathbf{x}_i(t+1) = \mathbf{x}_i(t) + C_1[\mathbf{x}_i(t) - L_b^b] + C_2[\mathbf{x}_i(t) - U_b^b] \quad (23)$$

其中: $\mathbf{x}_i(t)$ 表示第 i 代小蜣螂在第 t 次迭代时的位置信息; C_1 为服从正态分布的随机数; C_2 为属于 $(0,1)$ 的随机数。

6) 自然界中的一种常见现象是小偷蜣螂会从其他蜣螂身上偷粪球, $\mathbf{X}^b$ 是全局最优位置即最优食物源, 假设围绕 $\mathbf{X}^b$ 是争夺食物的最佳地点, 小偷蜣螂在迭代过程中的位置信息更新可以表示为:

$$\mathbf{x}_i(t+1) = \mathbf{X}^b + Sg \odot \frac{|\mathbf{x}_i(t) - \mathbf{X}^*| + |\mathbf{x}_i(t) - \mathbf{X}^b|}{2} \quad (24)$$

其中: $\mathbf{x}_i(t)$ 表示第 i 代小偷蜣螂在第 t 次迭代时的位置信息; g 为服从正态分布的大小为 $1 \times D$ 的随机向量; S 为常数。

3 DBO 算法的 FOPID 控制器设计

本文提出一种基于 DBO-FOPID 的 BLDC 电机 DTC 控制器, 其设计框架如图 1 所示, 可以看出基于 DBO 算法的 FOPID 控制器的基本结构。FOPID 控制器是在典型 PID 控制器中加入积分阶数 λ 和导数阶数 μ , 相较于典型的 PID 控制器, 具有更高的鲁棒性以及参数变化不敏感等优点。

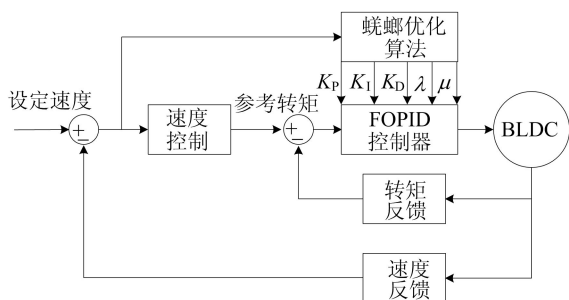


图 1 基于 DBO 算法的 FOPID 控制器设计框图

FOPID 控制器的微分方程表示为:

$$u(t) = K_p e(t) + K_I D^{-\lambda} e(t) + K_D D^{\mu} e(t) \quad (25)$$

$$e(t) = T_{\text{ref}} - T_{\text{act}} \quad (26)$$

其中: $u(t)$ 为控制信号; $e(t)$ 为误差信号; T_{ref} 为参考转矩; T_{act} 为由式(13)估算的转矩。

本文对 DBO-FOPID 控制器的设计是利用 DBO 算法在寻优空间内寻找一组参数 $\{K_p, K_I, K_D, \lambda, \mu\}$, 使得该系统满足设计要求, 具有良好的性能。

在 FOPID 控制器的设计中, 应选取符合控制系统性能指标的目标函数, 为了获取 BLDC 电机迭代过程中最优的动态特性, 采用时间乘绝对误差积分(ITAE)准则作为评价 BLDC 电机的性能指标:

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

研究表明, 初始种群的质量在很大程度上影响着算法的求解精度和收敛速度, 而具有多样性的初始种群能够提高算法的性能^[13]。本文采用文献[13]中 DBO 算法的初始化参数, 为了使各种算法具有可比性, 同时将对比较算法麻雀搜索优化算法(sparrow search algorithm, SSA)、粒子群优化(particle swarm optimization, PSO)算法^[14]与 DBO 算法保持同样的种群大小、迭代次数、优化维度以及优化参数的搜索空间, 各算法初始参数见表 1 所列。

经过多次仿真, 本文设定参数寻优范围如下: $K_p \in [0, 1\ 000]$, $K_I \in [0, 50]$, $K_D \in [0, 50]$, $\lambda \in [0, 5]$, $\mu \in [0, 5]$ 。将式(27)作为适应度函数, 采用 DBO 算法整定 5 个参数, 使得适应度函数值最低。DBO 算法整定 FOPID 控制器的参数步骤为:

1) 初始化蜣螂种群、问题求解维数、转换概率、初始值的上下界以及最大迭代次数。

2) 使用目标函数式(27)计算蜣螂个体的适应度值。开始迭代, 分配滚球蜣螂、雌蜣螂、小蜣螂、小偷蜣螂的种群数量。

3) 判断第 i 代是否是滚球蜣螂种群。若是, 则判断使用式(15)或式(17)更新滚球蜣螂位置; 否则执行步骤 4)。

4) 判断第 i 代是否是雌蜣螂种群。若是, 则使用式(18)、式(19)确定雌蜣螂的产卵区域边界, 使用式(20)更新雌蜣螂产卵球的位置信息, 使用目标函数计算雌蜣螂个体的适应度值; 否则执行步骤 5)。

5) 判断第 i 代是否是小蜥蜴种群。若是,则使用式(21)、式(22)确定小蜥蜴的觅食边界,使用式(23)更新小蜥蜴的位置信息,使用目标函数计算小蜥蜴个体的适应度值;否则执行步骤 6)。

6) 对于小偷蜥蜴种群,使用式(21)、式(22)确定小偷蜥蜴争夺食物的最佳地点,使用式(24)

更新小偷蜥蜴的位置信息,使用目标函数计算小偷蜥蜴个体的适应度值。

7) 判断第 t 次迭代的适应度值是否小于记录的最优适应度值。若是,则更新最佳位置,若 $t < t_{\max}$,令 $t=t+1$,返回步骤 3);否则算法结束,将最优适应度值时的整定参数赋值给 K_P 、 K_I 、 K_D 、 λ 、 μ 。

表 1 各算法初始化参数

参数	DBO 算法	SSA 算法	PSO 算法
种群大小	30	30	30
最大迭代次数	20	20	20
优化问题维度	5	5	5
滚球蜥蜴数量	6		
雌蜥蜴数量	6		
小蜥蜴数量	7		
小偷蜥蜴数量	11		
优化问题上边界	(1 000,50,50,5,5)	(1 000,50,50,5,5)	(1 000,50,50,5,5)
优化问题下边界	(0,0,0,0,0)	(0,0,0,0,0)	(0,0,0,0,0)

4 Simulink 仿真结果分析

Simulink 仿真结果如图 2 所示。

图 2a 所示为基于 DBO-FOPID 控制器对 BLDC 电机直接转矩控制的 Simulink 仿真图,将参考速度与 BLDC 电机的实际速度之间的差异(称为速度误差)提供给速度控制器模块,并将典型的 PI 控制器用作速度控制器,将速度差提供给

目标函数 ITAE,经计算后输出到 MATLAB 的 M 文件,作为 DBO 的目标函数,应用 M 文件与 Simulink 的联合仿真寻找出 FOPID 的最佳参数。该速度误差经 PI 控制器后得出参考扭矩,与由式(13)计算的估计扭矩比较,并计算扭矩差提供给 FOPID 计算模块,将 FOPID 的输出通过控制信号模块用来控制电机。图 2b 所示为 PI 控制器对 BLDC 速度控制的 Simulink 仿真图。

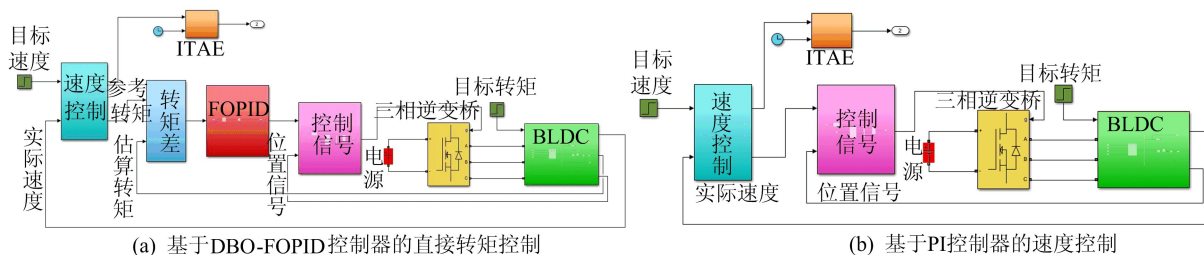


图 2 Simulink 仿真结果

BLDC 电机的基本参数如下:极对数 4,相电阻 0.7Ω ,相电感 2.72 mH ,转动惯量 $0.8 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 。定义下式衡量转矩纹波^[7],即

$$T_r = \frac{T_{\max} - T_{\min}}{T_{\text{avg}}} \times 100\% \quad (28)$$

其中: $T_{\max}$ 为在突加负载后转矩能达到的最大值; $T_{\min}$ 为在突加负载后转矩能达到的最小值; T_{avg} 为在突加负载后转矩的平均值。

通过对数据的分析,各算法的 FOPID 控制器参数见表 2 所列。

不同控制器控制下的电机速度与转矩对比图

如图 3 所示。

从图 3a 可以看出:使用 PI 控制器时电机的响应速度比使用 DBO-FOPID 控制器对电机进行直接转矩控制的响应速度要慢;使用 DBO-FOPID 控制器对电机进行直接转矩控制,能够使 BLDC 电机在超调量很小的情况下达到设定速度;在 0.2 s 时突加 $5 \text{ N} \cdot \text{m}$ 负载,使用 PI 控制器的电机出现了较大的速度波动,而使用 DBO-FOPID 控制器进行直接转矩控制的电机能够以很快的速度响应并快速恢复到设定速度,运行更加平稳。

从图 3b 可以看出,使用 DBO-FOPID 控制器进行直接转矩控制的电机,相较于使用 PI 控制器控制的电机,其转矩波动更加平滑。

从图 3c 可以看出,使用 DBO-FOPID 控制器进行直接转矩控制的电机,相较于其他控制器控制的电机,以更小的超调量达到了目标转速,并且在 0.2 s 时能够以非常小的速度波动应对突加 5 N·m 的负载。

从图 3d 可以看出,使用 DBO-FOPID 控制器对电机进行直接转矩控制,相较于其他控制器控制的电机,能够以更小的转矩脉动使电机运行。

DBO-FOPID 控制器、PSO-FOPID 控制器、SSA-FOPID 控制器以及 PI 控制器的转矩纹波 Tr 见表 3 所列。

表 2 各算法 FOPID 控制器参数

算法	FOPID 参数				
	K_P	K_I	K_D	λ	μ
DBO 算法	863.492 2	47.560 1	1.501 4	0.612 7	0.868 8
DBO 算法	947.941 2	42.327 3	2.548 4	4.990 4	3.457 1
SSA 算法	946.069 1	31.167 1	1.470 2	1.544 6	0.332 1

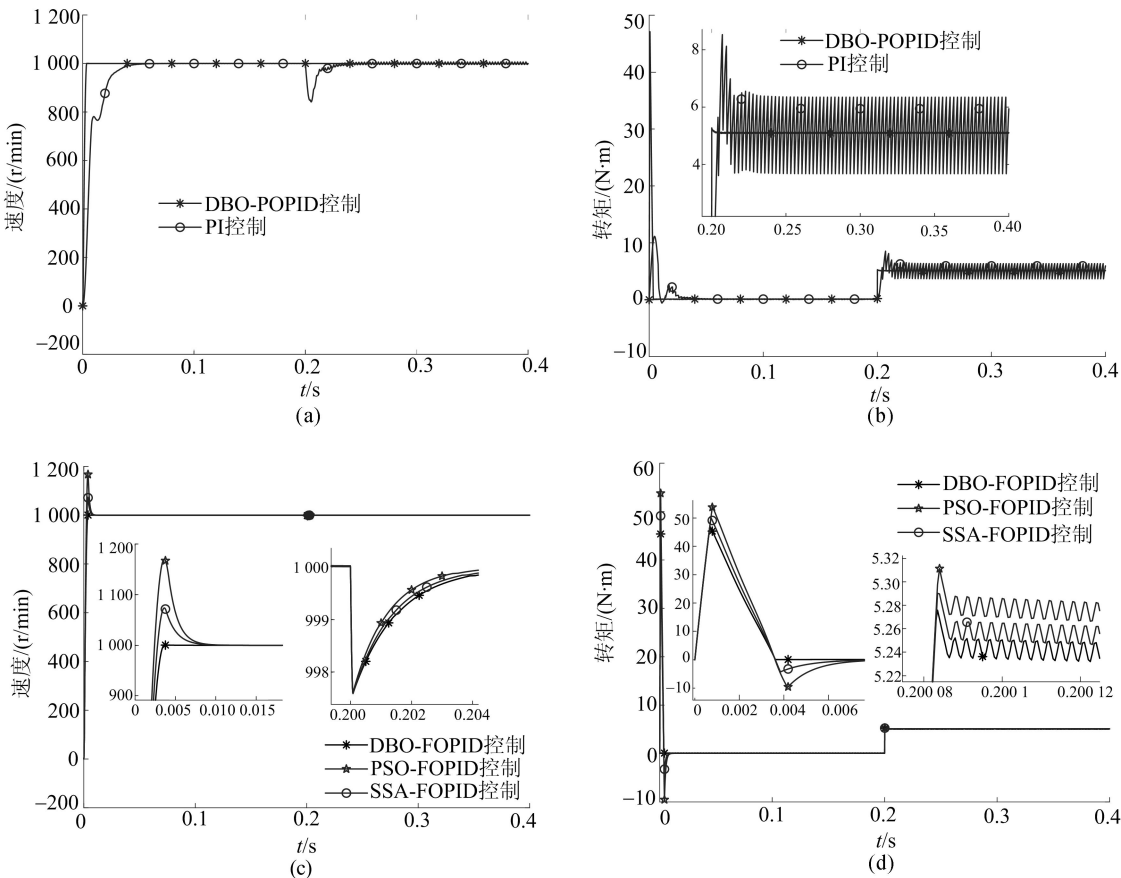


图 3 速度与转矩对比图

表 3 4 种控制器的转矩纹波

控制器	控制方式	转速/(r/min)	转矩/(N·m)	Tr/%
PI 控制器	速度控制	1 000	5	54.319 8
DBO-FOPID 控制器	直接转矩控制	1 000	5	3.648 0
PSO-FOPID 控制器	直接转矩控制	1 000	5	4.289 0
SSA-FOPID 控制器	直接转矩控制	1 000	5	3.913 0

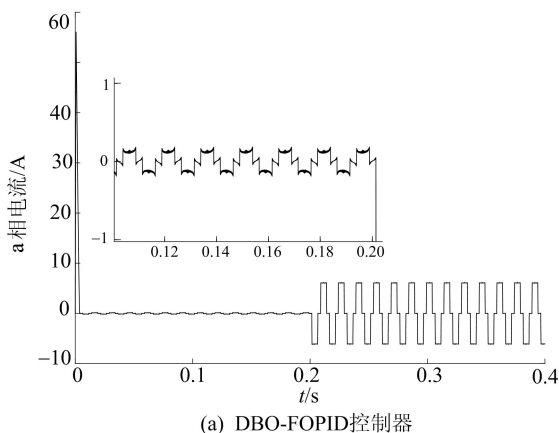
从表 3 可以看出:使用算法整定参数控制器的直接转矩控制电机比使用 PI 控制器的电机转矩脉动降低了 50%左右;而在算法整定参数的控制器中,使用 DBO-FOPID 控制器对电机进行直

接转矩控制的转矩脉动更小,控制效果最好,能够使电机在应对突加负载或外部干扰的情况下稳定运行,提高了电机系统的鲁棒性。

DBO-FOPID 控制器与 PI 控制器的 a 相电流

对比如图 4 所示。

从图 4 可以看出:使用 PI 控制器的电机的 a 相电流发生了畸变,电流波动较大;而使用



DBO-FOPID 控制器进行直接转矩控制的电机电流包含较少的纹波,因此转矩纹波也相应减小,接近理想电流波形,对减小转矩脉动有较好的效果。

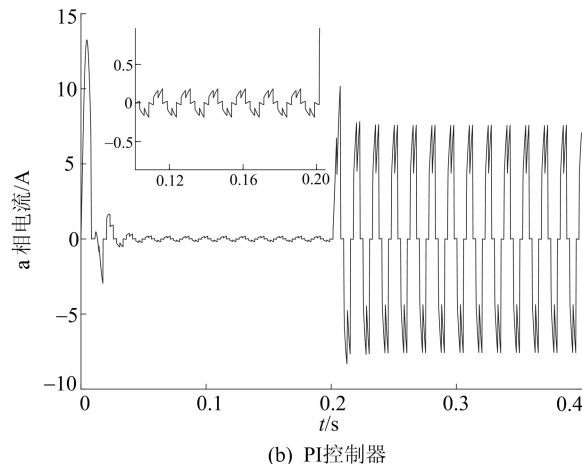


图 4 DBO-FOPID 控制器与 PI 控制器的 a 相电流

ITAE 下的适应度值如图 5 所示。

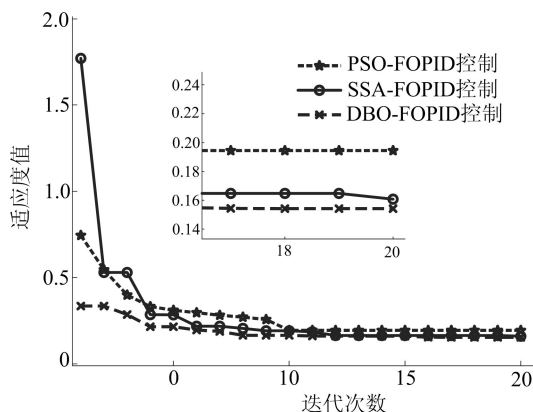


图 5 ITAE 下的适应度值

从图 5 可以看出,相较于 SSA-FOPID 控制器和 PSO-FOPID 控制器,DBO-FOPID 控制器能够在相同的种群数量和迭代次数下,以更短的时间寻找到待优化参数 K_P 、 K_I 、 K_D 、 λ 、 μ 的最佳值。

5 结 论

本文使用基于 DBO-FOPID 控制器的 BLDC 电机直接转矩控制方法,以 FOPID 的待优化参数 K_P 、 K_I 、 K_D 、 λ 、 μ 的取值范围作为搜索空间,将优化后的值分别赋予这 5 个参数。在 MATLAB/Simulink 平台上对本文提出的基于 DBO-FOPID 控制器的 BLDC 电机直接转矩控制方法进行了评估,结果表明:与基于 PI 控制器的 BLDC 电机速度控制方法相比,在相同工况下,经 DBO 整定的 FOPID 参数在负载突变时能够快速达到设定

速度,获得更稳定的速度控制,同时转矩纹波也相应减小;与基于 SSA-FOPID 控制器和基于 PSO-FOPID 控制器的 BLDC 电机直接转矩控制方法相比,在相同工况下,DBO-FOPID 能够在更少的迭代次数内寻找到 K_P 、 K_I 、 K_D 、 λ 、 μ 的最优值;相较于其他算法,DBO-FOPID 控制器能在超调量更小的情况下达到设定转速,转矩纹波也相应更小。这表明基于 DBO-FOPID 控制器的 BLDC 电机直接转矩控制能够满足系统的响应需求,在超调量、调整时间和转矩纹波方面表现优越。

在工程实践中,通过 Simulink 搭建所需控制电机及其工作工况的参考模型,采用 DBO-FOPID 控制器(迭代次数 20 次,种群大小 30)在多次仿真中选取自整定出的最优参数 K_P 、 K_I 、 K_D 、 λ 、 μ ,应用于实际工况下 BLDC 电机的直接转矩控制。该方法能够避免依靠个人经验整定 FOPID 参数,同时避免电机在反复调参实验中的损耗,减小调参工作量,通过仿真与实际工况的结合使电机达到更好的控制效果。

[参 考 文 献]

- [1] PRAKASH A, NAVEEN C. Combined strategy for tuning sensor-less brushless DC motor using SEPIC converter to reduce torque ripple [J]. ISA Transactions, 2023, 133: 328-344.
- [2] KHAZAEI A, ZARCHI H A, MARKADEH G A, et al. MTPA strategy for direct torque control of brushless DC motor drive [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 68(8): 6692-6700.

- [3] 李珍国,王鹏磊,孙启航,等. 基于相电动势矢量定向的无刷直流电机铜耗最小化瞬时转矩控制技术[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(3): 1174-1184.
- [4] PODLUBNY I. Fractional differential equations: an introduction to fractional derivatives, fractional differential equations, some methods of their solution and some of their applications[M]. San Diego: Academic Press, 1999: 10-36.
- [5] 薛定宇. 分数阶微积分学与分数阶控制[M]. 北京: 科学出版社, 2018: 213-249.
- [6] HASAN M W, ABBAS N H. An adaptive neural network with nonlinear FOPID design of underwater robotic vehicle in the presence of disturbances, uncertainty, and obstacles[J]. Ocean Engineering, 2023, 279: 114451.
- [7] KOMMULA B N, KOTA V R. Direct instantaneous torque control of brushless DC motor using firefly algorithm based fractional order PID controller[J]. Journal of King Saud University-Engineering Sciences, 2020, 32(2): 133-140.
- [8] KOMMULA B N, KOTA V R. An effective sustainable control of brushless DC motor using firefly algorithm: artificial neural network based FOPID controller[J]. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2022, 52: 102097.
- [9] KOMMULA B N, KOTA V R. Design of MFA-PSO based fractional order PID controller for effective torque controlled BLDC motor[J]. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2022, 49: 101644.
- [10] VANCHINATHAN K, SELVAGANESAN N. Adaptive fractional order PID controller tuning for brushless DC motor using artificial bee colony algorithm[J]. Results in Control and Optimization, 2021, 4: 100032.
- [11] 杨博,束洪春,朱德娜,等. 基于群灰狼优化的光伏逆变器最优无源分数阶 PID 控制[J]. 控制与决策, 2020, 35(3): 593-603.
- [12] 陈炫儒,吴立飞,杨晓忠. 基于改进麻雀搜索算法的分数阶 PID 参数整定[J]. 控制与决策, 2024, 39(4): 1177-1184.
- [13] XUE J, SHEN B. Dung beetle optimizer: a new meta-heuristic algorithm for global optimization[J]. The Journal of Supercomputing, 2023, 79(7): 7305-7336.
- [14] 钱晓宇,方伟. 基于局部搜索的反向学习竞争粒子群优化算法[J]. 控制与决策, 2021, 36(4): 779-789.

(责任编辑 胡亚敏)

(上接第 728 页)

- [15] YASIR A T, BBENAMOR A, HAWARI A H. Enhancement of polysulfone ultrafiltration membrane with third generation poly (amido amine)-graphene oxide nanocomposite[J]. Journal of Water Process Engineering, 2023, 54: 103991.
- [16] LI Q, LIAO Z, FANG X, et al. Tannic acid assisted interfacial polymerization based loose thin-film composite NF membrane for dye/salt separation[J]. Desalination, 2020, 479: 114343.
- [17] NG Z C, LAU W J, ISMAIL A F. GO/PVA-integrated TFN RO membrane: exploring the effect of orientation switching between PA and GO/PVA and evaluating the GO loading impact[J]. Desalination, 2020, 496: 114538.
- [18] CUI H, ZHAO W, LIU H, et al. Multidimensional nanochannel design and regulation of ultra-thin GOQDs-AGQDs composite membranes[J]. Chemical Engineering Journal, 2024, 490: 151880.
- [19] SHE J, GAO H, SONG Z, et al. 'Green' fabrication of PVC ultrafiltration membranes with high-flux and improved hydrophilicity by in-situ interpenetration of hydrophilic crosslinking networks[J]. Journal of Membrane Science, 2024, 693: 122383.
- [20] 杨紫云,陈聪,刘巧鸿,等. DMA-MPC 共聚物亲水改性 PES 膜及抗蛋白吸附性能研究[J]. 膜科学与技术, 2023, 43(4): 1-9.
- [21] CHEN Y, NAN J. A strategy to alleviate membrane fouling by optimizing the structure of the cake layer formed by flocs deposited directly on the membrane in the ultrafiltration process through coagulation and nanoscale $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Fe}_3\text{O}_4 @ \text{SiO}_2$ load[J]. Journal of Membrane Science, 2023, 680: 121729.
- [22] MODI A, KASHER R. Nitrate removal from contaminated groundwater by micellar-enhanced ultrafiltration using a polyacrylonitrile membrane with a hydrogel-stabilized ZIF-L layer[J]. Water Research, 2024, 254: 121384.
- [23] JIAN L W, CHAO L, KAI H, et al. Synthesis of amphiphilic functional terpolymers towards preparation of high flux, anti-fouling, micropollutant-capturing ultrafiltration membranes[J]. Journal of Cleaner, 2023, 414: 137634.
- [24] CHAMANI F, TANHAEI B, CHENAR M P. Innovative strategies for enhancing gas separation ionic liquid-coated PES membrane for improved CO_2/N_2 selectivity and Permeance[J]. Chemosphere, 2024, 351: 141179.
- [25] 潘玉婷,李方,沈忱思,等. 退浆废水中聚乙烯醇的膜蒸馏超滤二级膜浓缩[J]. 纺织学报, 2018, 39(11): 96-102.

(责任编辑 吴 亮)