

DOI: 10.13382/j.jemi.B2306746

麻雀搜索算法的 PMSM 固定时间无模型滑模控制^{*}

侯利民 韦卓庆 曹生辉 张 明

(辽宁工程技术大学电气与控制工程学院 葫芦岛 125105)

摘 要:针对永磁同步电机(permanent magnet synchronous motors,PMSM)调速系统的易受外部负载扰动的影响,提出了一种基于改进麻雀搜索算法的 PMSM 固定时间无模型滑模控制策略。在转速环输入输出超局部模型的基础上构建了固定时间滑模速度控制器,设计了固定时间扰动观测器估计超局部模型的未知扰动,并通过前馈补偿的方式削弱未知扰动对调速系统带来的不利影响,提高调速系统的抗干扰能力,利用李雅普诺夫函数证明了速度控制器和观测器的固定时间收敛性。由于控制器参数较多且会影响系统性能,为了准确获取参数,提出了改进的麻雀搜索算法对控制器的参数进行优化。实验结果显示,本文提出的控制方案与 PI 控制相比较,有效解决了超调问题,稳定时间加快了 22.8%,加载时转速变化减少了 75%,表明本文提出控制方案的有效性。

关键词: 麻雀搜索算法;无模型;固定时间滑模控制;固定时间观测器

中图分类号: TM351;TN **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.8010

Fixed time model-free sliding mode control of PMSM based on sparrow search algorithm

Hou Limin Wei Zhuoqing Cao Shenghui Zhang Ming

(Faculty of Electrical and Control Engineering, Liaoning Technical University, Huludao 125105, China)

Abstract:The permanent magnet synchronous motor (PMSM) speed control system is easy to be affected by external load disturbance, this paper presents a fixed-time model-free sliding mode control strategy for PMSM based on improved sparrow search algorithm. Based on the input-output ultra-local model of the speed loop, a fixed-time sliding mode speed controller is constructed, and a fixed-time disturbance observer is designed to estimate the unknown disturbances of the ultra-local model, and through the way of feed-forward compensation to weaken the adverse effect of unknown disturbance on the speed control system, and improve the anti-interference ability of the speed control system, the fixed-time convergence of the speed controller and the observer is proved by Lyapunov function. In order to obtain the parameters accurately, an improved sparrow search algorithm is proposed to optimize the parameters of the controller. The experimental results show that the control scheme proposed in this paper effectively solves the overshoot problem compared with the PI control, accelerating the stability time by 22.8% and reducing the loading speed change by 75%, indicating the effectiveness of the proposed control scheme.

Keywords: sparrow search algorithm; model-free; fixed time sliding mode control; fixed time observer

0 引 言

PMSM 具有转矩密度高、效率高、尺寸紧凑等优点,在电动汽车、压缩机、电力推进系统、铁路牵引系统等领域得到广泛应用^[1]。由于其存在强耦合、非线性、未建模

动力学、不确定性和负载扰动,PMSM 的控制问题一直具有挑战性。PI 控制器作为一种简单而有效的控制方法,已广泛应用于 PMSM 驱动系统,然而,当面对快速变化的负载时,PI 控制器的响应不再能够满足工程的需要。为了提高 PMSM 驱动系统的性能,已经应用了许多先进的非线性方法,如滑模控制(sliding mode controller,

SMC)^[2-4]、模型预测控制^[5]、无差拍控制^[6]、自抗扰控制^[7-8]等。

在各种鲁棒性能改进的方法中,SMC 是一种有效的非线性鲁棒控制策略。SMC 策略已成功地用于提高驱动系统的控制性能,因为它使系统动力学在滑动模式控制下的系统动力学具有对不确定性的不变性。虽然滑模控制对系统内外扰动具有一定的鲁棒性,但对电机的数学模型具有较强的依赖性,且实际运行过程中的未知扰动是不可避免的,为了解决这些问题,基于扰动观测器的无模型滑模控制方法被提出。无模型控制结合的滑模控制有效减弱了电机对数学模型的依赖,扰动观测器的作用则是提高了系统的抗干扰能力。文献[9]提出转速环扩展非奇异终端滑模扰动观测器与新型无模型非奇异快速终端滑模控制器相结合的方法。文献[10]提出转速环扩展滑模观测器与改进型无模型滑模控制相结合的方法。文献[11]提出改进扩张状态观测器与改进无模型滑模控制相结合的策略。文献[9-11]均为基于扰动观测器的无模型滑模控制策略,在保证系统跟踪精度的同时,也提升了系统抗干扰能力。

快速收敛性是评价控制系统性能的一个重要指标,传统的基于指数趋近律的 SMC 保持了有限时间收敛的性质,但收敛时间与系统的初始状态有关。为了摆脱这种限制,固定时间收敛理论被提出,利用该理论可以在固定时间内使跟踪误差收敛至零域,并且可以计算出该固定时间的上限值,因此许多学者采用固定时间理论设计观测器与控制器^[12]。文献[13]结合固定时间理论和全局积分滑模控制,设计了固定时间积分滑模控制器。文献[14]构建了具有输出约束的新型终端滑模变量,并设计了具有扰动抑制能力的固定时间滑模控制律,保证跟踪误差在固定时间内收敛到原点的充分小的邻域内。文献[15]电流调节回路和速度跟踪回路均采用设计的固定时间收敛滑模控制器进行控制,提高了控制性能,保证了固定时间的收敛。

控制器中各个参数的取值对系统性能具有重要作用,随着计算机技术的快速发展与现代启发式智能优化方法的兴起,越来越多的优化方法应用在控制器的参数整定问题中^[16],避免了手动调节参数的繁琐及其不准确。文献[17]提出一种基于混沌变异的动态重组多种群粒子群算法实现权重系数自整定,处理多目标多约束条件时权重系数。文献[18]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。文献[19]采用改进的鲨鱼算法优化自抗扰控制器,使系统转速与转矩效果良好。文献[20]针对永磁同步电机电流环 PI 控制器参数自整定依赖电机参数和系统模型精确度的问题,提出一种基于模型与规则相结合的控制参数自整定及优化方法。

基于上述分析,本文提出了一种基于麻雀搜索算法的永磁同步电机无模型固定时间滑模控制。仿真和实验结果表明该控制策略具有良好的转速精度且收敛速度快,对外部干扰具有强鲁棒性。本文的主要贡献如下:

1) 提出了转速环固定时间无模型滑模控制器与固定时间观测器相融合的控制方案,保证了电机转速在固定时间内收敛到其期望值,提高系统的抗干扰能力。

2) 控制器参数的取值影响系统性能,本文提出了改进的麻雀搜索算法,对控制器的参数进行寻优,免去手动调节参数的繁琐,提高参数准确度,使系统性能达到最优状态。

1 永磁同步电机的数学模型

在 $d-q$ 轴坐标系下表贴式 PMSM 的理想速度环状态方程可以描述为:

$$\dot{\omega} = (1.5n_p\psi_f i_q - B\omega - T_L)/J \quad (1)$$

式中: i_q 为电机在 q 轴的定子电流; T_L 为负载转矩; B 为粘性摩擦系数; ψ_f 为永磁体磁链; ω 为电机的转子转速; n_p 为极子对数; J 为转动惯量。

但在实际应用中,电机控制器受到参数扰动、系统不确定性和外界干扰。所以 PMSM 的数学模型可以进一步表示为:

$$\dot{\omega} = (1.5n_p\psi_{f0}i_q - B_0\omega - f_\omega)/J_0 \quad (2)$$

$$f_\omega = \Delta J\omega' - 1.5n_p\Delta\psi_f i_q + T_L + \Delta B\omega \quad (3)$$

式中: B_0 、 ψ_{f0} 、 J_0 分别为粘性摩擦系数、永磁体磁链、转动惯量的标称值; ΔB 、 $\Delta\psi_f$ 、 ΔJ 分别为粘性摩擦系数、永磁体磁链、转动惯量的变化量; f_ω 表示速度环的集总扰动。

在 $d-q$ 参考系中,使用超局部模型可以简化 PMSM 驱动系统的数学模型,降低电机对数学模型的依赖并给出为:

$$\dot{\omega} = \alpha i_q + F_\omega \quad (4)$$

因此系统转速环的状态方程被分为两部分:线性系统状态部分和非线性未知扰动部分;式(4)中 α 为待设计的系统状态增益; F_ω 为转速环待观测的未知量,包含 PMSM 的参数不确定部分和扰动部分。

2 固定时间无模型滑模控制器的设计

本章主要介绍基于固定时间无模型滑模控制方法的 PMSM 转速跟踪控制策略,所设计的控制器可使系统状态快速到达滑模面,且固定时间收敛,进而提高系统动态性能,以确保转速能够及时地调节到给定值。可克服传统 SMC 的局限性,加快系统收敛速度。

将固定时间理论应用于积分滑模面上,所设计的滑模面为:

$$s = e + k_1 \int \text{sign}^{1+\frac{1}{r}}(e) dt + k_2 \int \text{sign}^{1-\frac{1}{r}}(e) dt \quad (5)$$

式中: $\text{sign}^a(x) = |x|^a \text{sign}(x)$ 。 $k_1 > 0, k_2 > 0, r > 1$, 为待设计的增益; e 为转速误差, 即 $e = \omega^* - \omega$, ω^* 为给定的参考转速。

设计的趋近律为:

$$\dot{s} = -D \text{sign}(s) - g_1 \text{sign}^{1+\frac{1}{\gamma}}(s) - g_2 \text{sign}^{1-\frac{1}{\gamma}}(s) \quad (6)$$

式中: $g_1 > 0, g_2 > 0, \gamma > 1, D > 0$, 为待设计的增益。

基于式(5)滑模面与式(6)趋近律的滑模控制结合转速环超局部模型设计的固定时间无模型滑模速度控制器为:

$$\begin{aligned} i_q^* = & \alpha^{-1} [k_1 \text{sign}^{1+\frac{1}{r}}(e) + k_2 \text{sign}^{1-\frac{1}{r}}(e) + \\ & D \text{sign}(s) + g_1 \text{sign}^{1+\frac{1}{\gamma}}(s) + g_2 \text{sign}^{1-\frac{1}{\gamma}}(s) - F_\omega] \end{aligned} \quad (7)$$

为了验证所提出固定时间滑模控制器的收敛性, 选择的李雅普诺夫函数为:

$$V_1 = \frac{1}{2} s^2 \quad (8)$$

对式(10)求导可得:

$$\dot{V}_1 = s \dot{s} =$$

$$\begin{aligned} s [& -D \text{sign}(s) - g_1 \text{sign}^{1+\frac{1}{\gamma}}(s) - g_2 \text{sign}^{1-\frac{1}{\gamma}}(s)] = \\ & -s D \text{sign}(s) - g_1 (s^2)^{1+\frac{1}{2\gamma}} - g_2 (s^2)^{1-\frac{1}{2\gamma}} \leq \\ & -g_1 (s^2)^{1+\frac{1}{2\gamma}} - g_2 (s^2)^{1-\frac{1}{2\gamma}} \leq 0 \end{aligned} \quad (9)$$

由式(9)恒小于等于 0, 可知所设计的固定时间滑模控制器满足可达条件, 即固定时间无模型滑模控制器渐近稳定。

为了证明所设计的滑模控制器在固定时间内收敛, 由式(8)与(9)可知, 存在两个常数 a_1, a_2 使式(9)满足:

$$\dot{V} \leq -a_1 V_1^{1+\frac{1}{2\gamma}} - a_2 V_1^{1-\frac{1}{2\gamma}} \quad (10)$$

其中, $a_1 = 2^{(1+\frac{1}{2\gamma})} g_1, a_2 = 2^{(1-\frac{1}{2\gamma})} g_2$; 由式(10)从 $0 \sim t_1$ 积分可得:

$$\begin{aligned} \int_0^{t_1} dt \int_0^{t_1} \frac{\dot{V}_1 dt}{-a_1 V_1^{1+\frac{1}{2\gamma}} - a_2 V_1^{1-\frac{1}{2\gamma}}} \\ t_1 \leq \frac{2\gamma}{\sqrt{a_1 a_2}} \arctan \left(\sqrt{\frac{a_2}{a_1}} V_1^{\frac{1}{2}}(0) \right) \\ t_1 \leq \frac{\pi \gamma}{\sqrt{a_1 a_2}} \end{aligned} \quad (11)$$

综上, PMSM 调速系统在控制律(7)的作用下系统能在固定时间内实现渐近稳定, 对于给定的任何初值, 收敛时间均满足式(11)。

下面证明跟踪误差的收敛性, 根据式(9)~(11)可知, 滑模变量固定时间收敛, 当滑模变量稳定后, $s = \dot{s} = 0$, 可以得到:

$$\dot{e} = -k_1 |e|^{1+\frac{1}{r}} \text{sign}(e) - k_2 |e|^{1-\frac{1}{r}} \text{sign}(e) \quad (12)$$

选取的李雅普诺夫函数为:

$$V_2 = \frac{1}{2} e^2 \quad (13)$$

将式(13)求导可得:

$$\dot{V}_2 = e \dot{e} =$$

$$\begin{aligned} e (& -k_1 \text{sign}^{1+\frac{1}{r}}(e) - k_2 \text{sign}^{1-\frac{1}{r}}(e)) = \\ e (& -k_1 |e|^{1+\frac{1}{r}} \text{sign}(e) - k_2 |e|^{1-\frac{1}{r}} \text{sign}(e)) = \\ & -k_1 (e^2)^{1+\frac{1}{2r}} - k_2 (e^2)^{1-\frac{1}{2r}} = \\ & -b_1 V_2^{1+\frac{1}{2r}} - b_2 V_2^{1-\frac{1}{2r}} \leq 0 \end{aligned} \quad (14)$$

存在两个正常数 b_1, b_2 使得式(14)成立, $b_1 = 2^{(1+\frac{1}{2r})k_1}, b_2 = 2^{(1-\frac{1}{2r})k_2}$, 由式(14)可知跟踪误差在固定时间内收敛, 收敛时间证明与式(11)相同, 将式(14)从 $0 \sim t_2$ 积分, 跟踪误差收敛时间 t_2 满足:

$$t_2 = \frac{\pi r}{\sqrt{b_1 b_2}} \quad (15)$$

3 固定时间滑模观测器的设计

由于系统包含未知负载转矩和其他不确定扰动, 为了解决这些问题, 实现 PMSM 调速系统的快速瞬态响应、低超调量、对外部干扰不敏感等方面的高性能, 设计了一个固定时间观测器来估计扰动。然后, 将该估计的扰动用于固定时间收敛的滑模速度跟踪控制器, 抑制干扰, 提高系统的动态响应。

定义变量 $\sum = X - Z$, 其中 Z 为辅助变量, 定义如下:

$$\dot{Z} = \alpha U + d_1 \text{sign}(\sum) + d_2 \sum^{1+\frac{1}{\gamma}} + d_3 \sum^{1-\frac{1}{\gamma}} \quad (16)$$

式中: $d_1, d_2, d_3 > 0, \gamma > 1$, 为待设计的增益。

由式(4)与(16)可得:

$$\begin{aligned} \dot{\sum} &= \alpha U + F_\omega - \dot{Z} \\ \dot{\sum} &= F_\omega - d_1 \text{sign}(\sum) - d_2 \sum^{1+\frac{1}{\gamma}} - d_3 \sum^{1-\frac{1}{\gamma}} \end{aligned} \quad (17)$$

由式(17)可得, 设计的扰动观测器为:

$$\hat{F}_\omega = d_1 \text{sign}(\sum) + d_2 \sum^{1+\frac{1}{\gamma}} + d_3 \sum^{1-\frac{1}{\gamma}} \quad (18)$$

为了证明分析所提出扰动观测器的稳定性, 选取如下李雅普诺夫函数为:

$$V_3 = \frac{1}{2} \sum^2 \quad (19)$$

对式(19)求导得:

$$\begin{aligned} \dot{V}_3 = \sum \dot{\sum} = \\ \sum (F_\omega - d_1 \text{sign}(\sum) - d_2 \sum^{1+\frac{1}{\gamma}} - d_3 \sum^{1-\frac{1}{\gamma}}) \leq \\ -d_2(\sum^2)^{1+\frac{1}{2\gamma}} - d_3(\sum^2)^{1-\frac{1}{2\gamma}} + \|\sum\| \cdot \|F_\omega\| - \\ d_1 \|\sum\| \end{aligned} \quad (20)$$

假设式(20)中的 F_ω 是有界的,即存在一个非 0 常数 ρ 满足 $\|F_\omega\| \leq \rho \leq \infty$, 当 $\rho < d_1$ 时,式(20)恒小于 0, 所设计的扰动观测器渐近稳定,由式(20)进一步得到:

$$\dot{V}_3 \leq -d_2(\sum^2)^{1+\frac{1}{2\gamma}} - d_3(\sum^2)^{1-\frac{1}{2\gamma}} \quad (21)$$

总存在 c_1, c_2 两个正常数使式(21)满足式(22):

$$\dot{V}_3 \leq -c_1 V_3^{1+\frac{1}{2\gamma}} - c_2 V_3^{1-\frac{1}{2\gamma}} \quad (22)$$

由式(22)可知所设计的扰动观测器式(18)在固定时间内渐近稳定,收敛时间满足:

$$t_3 = \frac{\pi\gamma}{\sqrt{c_1 c_2}} \quad (23)$$

式中: $c_1 = 2^{(1+\frac{1}{2\gamma})} d_2, c_2 = 2^{(1-\frac{1}{2\gamma})} d_3$ 。

综上,最终本文设计的固定时间无模型滑模控制方法的转速控制律为:

$$\begin{aligned} i_q^* = \alpha^{-1} [k_1 \text{sign}^{1+\frac{1}{r}}(e) + k_2 \text{sign}^{1-\frac{1}{r}}(e) + \\ D \text{sign}(s) + g_1 \text{sign}^{1+\frac{1}{\gamma}}(s) + g_2 \text{sign}^{1-\frac{1}{\gamma}}(s) - \hat{F}_\omega] \end{aligned} \quad (24)$$

4 改进麻雀搜索算法

由于在固定时间无模型滑模控制器的设计中引入部分未知参数,这些参数的取值影响将系统性能,为了准确的确定这些参数,本文利用改进的麻雀搜索算法对未知参数 $\alpha, k_1, k_2, r, D, g_1, g_2, \gamma$ 进行寻优,使得调速系统达到最优状态并具有良好的性能。

4.1 传统麻雀搜索算法

传统的麻雀搜索算法主要模拟麻雀的觅食行为,去解决全局优化问题。在麻雀搜索算法中定义发现者、加入者以及侦察者,且每只麻雀位置对应一个解,各自位置的更新公式如下。

发现者的位置更新公式:

$$X_i^{t+1} = \begin{cases} X_i^t \cdot \exp(-\frac{i}{\alpha, iter_{\max}}), R_2 < ST \\ X_i^t + Q \cdot L, R_2 \geq ST \end{cases} \quad (25)$$

其中, t 为当前迭代数; $iter_{\max}$ 为最大迭代次数,是一个常数; X_i^{t+1} 为表示在 $t+1$ 代第 i 只麻雀的位置信息; $\alpha \in (0, 1)$ 为随机数; $R_2 (R_2 \in [0, 1])$ 和 $ST (ST \in [0.5, 1])$ 为预警值和安全值; Q 是正态分布的随机数; L 是 $1 \times d$ 的矩阵。

加入者的位置更新公式如下:

$$X_i^{t+1} = \begin{cases} Q \cdot \exp(\frac{X_{worst}^t - X_i^t}{i^2}), i > n/2 \\ X_p^t + |X_i^t - X_p^t| \times A^+ \times L, i \leq n/2 \end{cases} \quad (26)$$

式中: X_p^t 是全局最佳位置; X_{worst}^t 是全局最差位置; A 为一个 $1 \times d$ 且各元素随机赋值为 1 或 -1 的矩阵, $A^+ = A^T (AA^T)^{-1}$ 。

在种群觅食的时候,会有少量麻雀担任警戒的角色。每代从种群中随机选择 SD 只麻雀警戒,其位置更新的描述如下:

$$X_i^{t+1} = \begin{cases} X_{best}^t + \beta \cdot |X_i^t - X_{best}^t|, f_i > f_g \\ X_i^t + k(\frac{|X_i^t - X_{worst}^t|}{(f_i - f_w) + \varepsilon}), f_i \leq f_g \end{cases} \quad (27)$$

其中, X_{best}^t 为全局最佳位置; β 为步长控制参数,为随机数; f_i 为麻雀的个体适应度值; f_g 为最优适应度值; ε 为常数; k 为控制步长的参数。

4.2 Circle 混沌映射

在利用群体智能优化算法寻优的过程中,引入 Circle 混沌映射可以提高种群的多样性,以提高算法的全局搜索能力。以混沌性来代替麻雀搜索算法的随机初始化,可以使得种群资源在搜索空间中更加均衡的分配。其迭代方式如下:

$$x_{i+1} = x_i + 0.5 - \text{mod}(\frac{2.2}{2\pi} \sin(2\pi x_i), 1) \quad (28)$$

4.3 柯西变异与混沌扰动

早熟收敛现象是算法在寻优过程中,某一超级个体的适应度值远远好于个体平均适应度,该超级个体在种群中很快占有较大比例,致使群体多样性严重下降、失去进化能力,算法陷入局部最优。为了解决这个问题,当 $f_i < f_{avg}$ 时,表示为“聚集”现象,则对麻雀个体采用柯西变异。反之表示为“发散”趋势,则对麻雀个体采用 Circle 混沌扰动。 f_{avg} 为个体平均适应度。

柯西变异来源于连续型概率分布的柯西分布,主要特点为零处峰值较小,从峰值到零值下降缓慢,使变异范围更均匀。在种群个体位置更新中引入柯西变异,提升算法的搜索能力。变异公式为:

$$CauchyX_i = X_i \times (1 + \tan(\pi(u - 0.5))), u \in [0, 1] \quad (29)$$

式中: $CauchyX_i$ 为个体经过柯西变异后的位置; X_i 为个体原来的位置; u 为随机数。

混沌扰动可增强算法的全局搜索能力。在全局探索和局部开采后,对种群中适应度值较高的个体进行 Circle 混沌扰动,与柯西变异同时发挥作用,增加种群的多样性,防止陷入局部最优。其相应公式为:

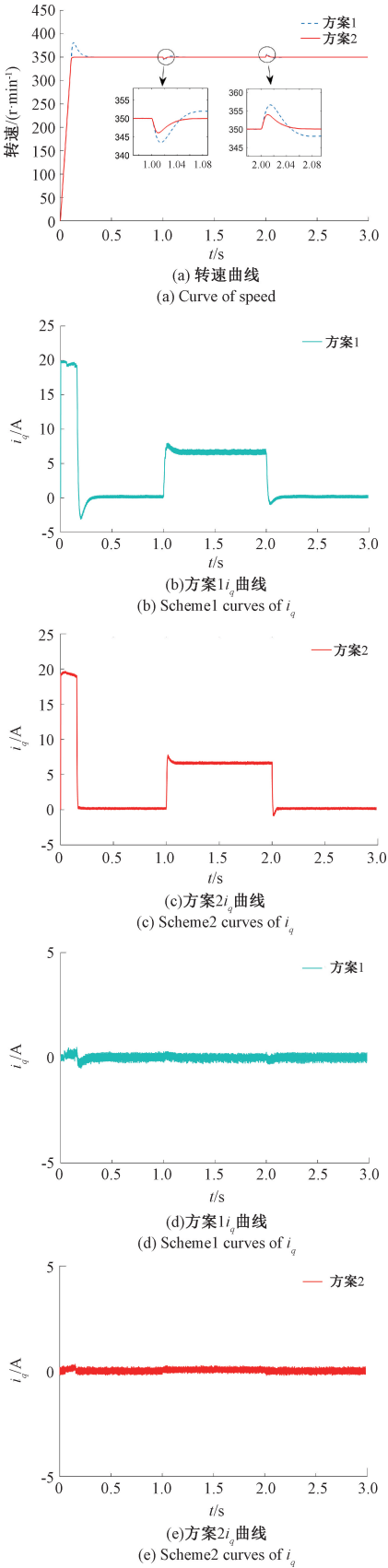


图 4 电机加载卸载仿真曲线
Fig. 4 Simulation curves of motor with loading and unloading

或突减负载时,方案 1 的转速变化约为 7 r/min,恢复时间约为 0.15 s,方案 2 的转速变化为 4 r/min,恢复时间为 0.05 s。从图 4 电流响应曲线可知,方案 1 突加负载对 d - q 轴电流的影响较大,导致了电流的强烈扰动,反观方案 2 对突加负载情况有明显改善,电流波纹较小。综上所述,本文提出的基于麻雀搜索算法的固定时间无模型滑模控制在突加或突减负载的情况下表现出良好的鲁棒性。

5.2 正反转与升降速

正反转运行状况为电机以 400 r/min 的转速启动,1.5 s 时将转速调到-400 r/min;升降速运行状况为电机以 300 r/min 的转速启动,1 s 时升到 500 r/min,2 s 时再降为 300 r/min。两种方案的运行情况如图 5 和 6 所示:

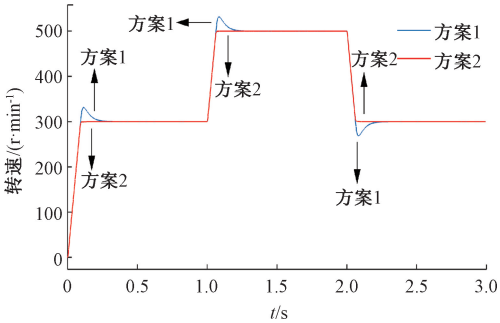


图 5 转速升降速仿真曲线
Fig. 5 Speed curves of speed up and down

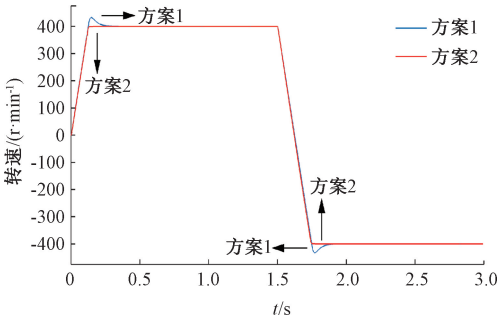


图 6 转速正反转仿真曲线
Fig. 6 Speed curves of speed forward and reverse

分析图 5 和 6 可知,方案 1 在升降速和正反转的状况下都存在超调现象,转速的波动较大;方案 2 在升降速和正反转时速度波动小,过渡较平缓且超调更小。综合分析说明本文设计的控制方案的系统性能的优越性。

上述仿真结果表明,本文设计的方案 2 在不同工况下运转情况相较于方案一具有较强的抗干扰能力、较小的速降、较快的瞬态响应、较小的电流纹波,具有良好的鲁棒性。

6 实 验

本节将在半实物实验平台验证本文提出方案的有效性,电机调速与加载综合实验平台实物如图 7 所示。主要包括 PWM 变频器、电机调速加载机械平台、NI 控制器、PC 监控上位机及配电线路等。



图 7 电机调速与加载综合实验平台实物
Fig. 7 Physical maps of a comprehensive experimental platform for motor speed regulation and loading

6.1 加减速半实物实验

加减速实验的运行状况为电机以 350 r/min 的转速空载启动,待电机转速稳定后突加大小为 10 N·m 的负载,待电机再次稳定运行后减去负载,两种控制方案加减速的实验结果如图 8 所示。

由图 8 可以观察到电机在加减速时转速及电流的变化情况,方案 1 稳定时间为 3.5 s,在加载时转速的下跌 40 r/min,恢复时间为 2.5 s,电流的波纹较大;方案 2 的稳定时间为 2.7 s,加载时转速下跌 10 r/min,且快速的恢复定转速,恢复时间为 1 s,电流波纹较小。综上本文设计的控制方案具有更好的鲁棒性和快速跟踪性。

6.2 升降速及正反转半实物实验

升降速实验的运行状况为电机以 300 r/min 的转速启动,待电机稳定转动时将转速提升到 500 r/min,电机平稳运转后再将电机降到 300 r/min;正反转实验的运行状况为电机以 400 r/min 的转速启动,电机稳定运转后将转速调为-400 r/min。

由图 9 和 10 可以看出本文所提出的控制方案在这两种工况下转速过渡平滑,方案一则存在明显的超调现象,说明了本文所提出的方案具有强鲁棒性及快速跟踪性。

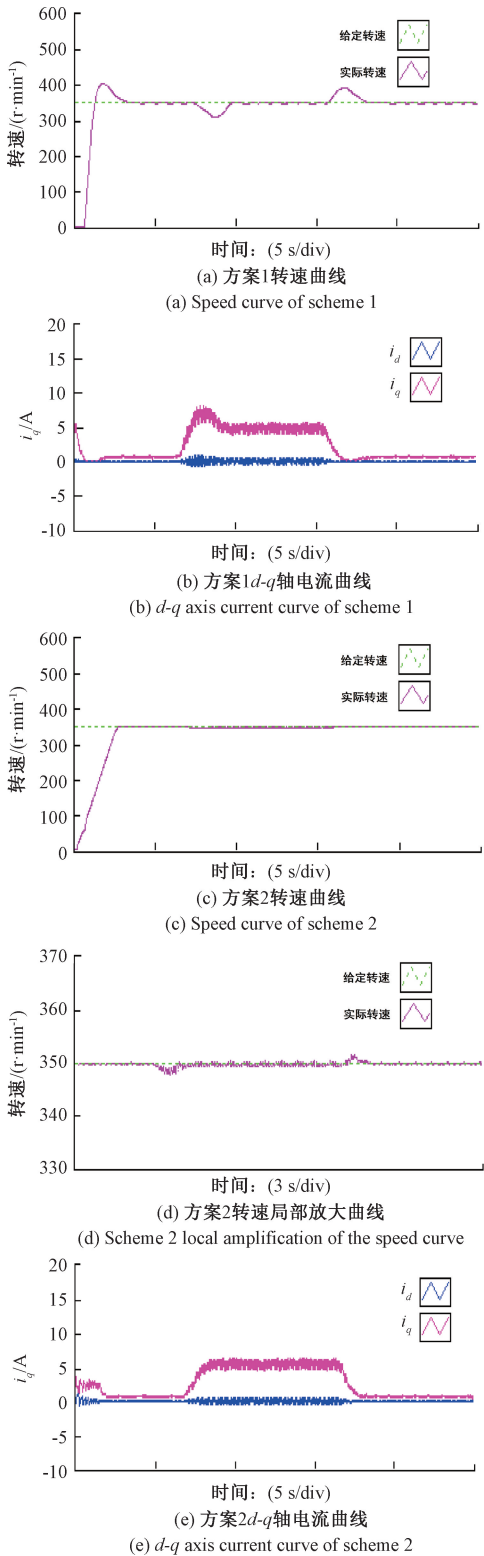


图 8 加减速实验

Fig. 8 Curves of motor with loading and unloading

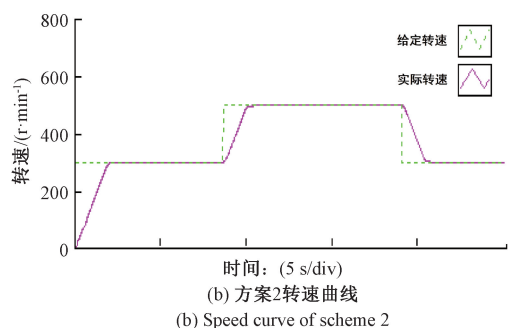
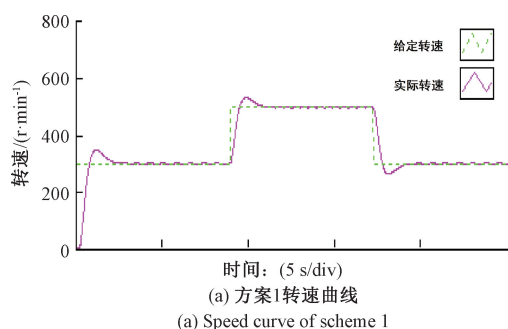


图 9 升降速实验

Fig. 9 Curves of speed up and down

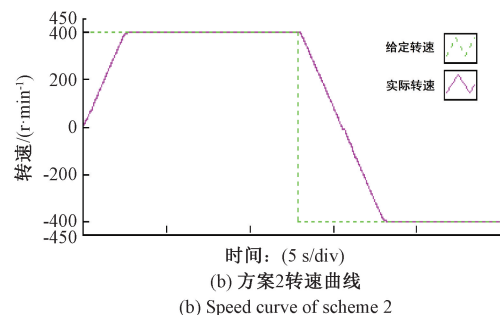
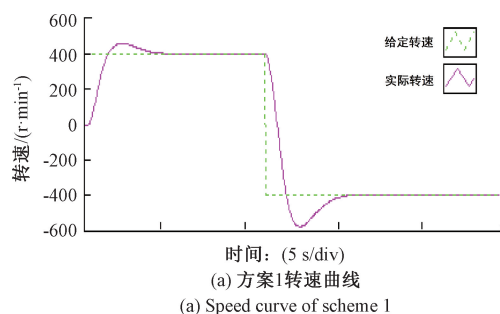


图 10 正反转实验

Fig. 10 Curves of speed forward and reverse

7 结 论

本文提出了基于改进麻雀搜索算法的 PMSM 固定时间无模型滑模控制策略。建立 PMSM 转速环的超局部模型,基于该模型设计了固定时间无模型滑模控制器和固

定时间观测器,将估计的综合扰动项前馈补偿到控制器,利用改进的麻雀搜索算法对控制器的参数进行了寻优整定,保证了转速和电流快速恢复到给定值。仿真和半实物实验结果表明本文提出的控制策略的有效性,可以抑制负载扰动对系统性能的影响,具有较强的抗干扰和恢复能力,提高了 PMSM 调速系统的稳态性能。

参考文献

- [1] 许明清,孙佃升. SPMSM 无传感器控制仿真及实验研究[J]. 控制工程, 2020, 27(2): 402-408.
XU M Q, SUN D SH. Simulation and experimental study of SPMSM [J]. Control Engineering, 2020, 27(2): 402-408.
- [2] 曹兆锦. 基于 MRAS 的永磁同步电机无传感器滑模控制[J]. 电子测量技术, 2019, 42(12): 37-41.
CAO ZH J. Sensorless sliding mode control of permanent magnet synchronous motor based on MRAS [J]. Electronic Measurement Technology, 2019, 42(12): 37-41.
- [3] GUO X, HUANG S, LU K, et al. A fast sliding mode speed controller for PMSM based on new compound reaching law with improved sliding mode observer[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2023, DOI: 10.1109/TTE.2022.3213562.
- [4] 周达,张博,牟明川. 非奇异终端滑模控制永磁直线同步电机[J]. 国外电子测量技术, 2020, 39(10): 84-87.
ZHOU D, ZHANG B, MOU M CH. Non-singular terminal sliding mode control of the permanent magnet linear synchronous motor [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2020, 39(10): 84-87.
- [5] 高俊,张河山,彭志远,等. 基于状态转移约束的永磁同步电机模型预测控制策略[J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(8): 86-92.
GAO J, ZHANG H SH, PENG ZH Y, et al. Predictive control strategy of permanent magnet synchronous motor model based on state transfer constraint [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2021, 35(8): 86-92.
- [6] 谷鑫,鲁金月,王志强,等. 基于无差拍电流预测控制的永磁同步电机谐波电流抑制策略[J]. 电工技术学报, 2022, 37(24): 6345-6356.
GU X, LU J Y, WANG ZH Q, et al. Harmonic current suppression strategy of permanent magnet synchronous motor based on non-free current prediction control [J]. Journal of Electrical Technology, 2022, 37(24): 6345-6356.
- [7] 张臻,周扬忠. 永磁同步电机位置伺服系统改进变结

- 构自抗扰控制[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(5): 263-271.
- ZHANG ZH, ZHOU Y ZH. Position servo system of permanent magnet synchronous motor [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(5): 263-271.
- [8] 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-resistant permanent magnet synchronous motor speed controller [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36(4): 73-81.
- [9] 赵凯辉, 刘文昌, 刘智诚, 等. 一种永磁同步电机无模型高阶滑模控制算法[J]. 电工技术学报, 2023, 38(6): 1472-1485.
- ZHAO K H, LIU W CH, LIU ZH CH, et al. A model-free high-order sliding mode control algorithm for permanent magnet synchronous motor [J]. Journal of Electrical Technology, 2023, 38(6): 1472-1485.
- [10] 赵凯辉, 戴旺珂, 周瑞睿, 等. 基于扩展滑模扰动观测器的永磁同步电机新型无模型滑模控制[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(6): 2375-2386.
- ZHAO K H, DAI W K, ZHOU R R, et al. New model-free sliding mode control of permanent magnet synchronous motor based on an extended sliding mode perturbation observer [J]. Chinese Journal of Electrical Engineering, 2022, 42(6): 2375-2386.
- [11] 李争, 张梓豪, 王康涛, 等. 基于无模型的 PMLSM 改进自适应滑模自抗扰控制[J/OL]. 电机与控制学报: 1-11[2023-07-11].
- LI ZH, ZHANG Z H, WANG K T, et al. Model-free PMLSM for improved adaptive sliding-mode self-immunity control [J/OL]. Journal of Electric Motor and Control: 1-11 [2023-07-11].
- [12] 刘洋, 井元伟, 刘晓平, 等. 非线性系统有限时间控制研究综述[J]. 控制理论与应用, 2020, 37(1): 1-12.
- LIU Y, JING Y W, LIU X P, et al. Review of limited-time control studies of nonlinear systems [J]. Control Theory and Applications, 2020, 37(1): 1-12.
- [13] 黄浩乾, 刘睿童, 王迪, 等. 基于扰动观测器的 AUV 固定时间积分滑模控制方法[J]. 中国惯性技术学报, 2023, 31(3): 292-300.
- HUANG H Q, LIU R T, WANG D, et al. Fixed-time integrated sliding mode control method for AUV based on a disturbance observer [J]. Chinese Journal of Inertial Technology, 2023, 31(3): 292-300.
- [14] 安炳合, 王永骥, 樊慧津, 等. 具有输出/全状态约束的固定时间滑模控制[J]. 控制理论与应用, 2023, 40(7): 1151-1161.
- AN B H, WANG Y J, FAN H J, et al. Fixed time sliding mode control with output / full state constraint [J]. Control theory and application, 2023, 40(7): 1151-1161.
- [15] LIN X, WU C, YAO W, et al. Observer-based fixed-time control for permanent magnet synchronous motors with parameter uncertainties[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 38(4): 4335-4344.
- [16] 陈欣, 胡涛, 蒋全. 基于改进蜜獾算法的永磁同步电机 PI 控制参数优化仿真[J]. 电机与控制应用, 2022, 49(8): 28-33, 92.
- CHEN X, HU T, JIANG Q. Optimization simulation of PI control parameters of permanent magnet synchronous motor based on improved honey badger algorithm [J]. Motor and Control Applications, 2022, 49(8): 28-33, 92.
- [17] 李家祥, 汪凤翔, 柯栋梁, 等. 基于粒子群算法的永磁同步电机模型预测控制权重系数设计[J]. 电工技术学报, 2021, 36(1): 50-59, 76.
- LI J X, WANG F X, KE D L, et al. Design of predicted control weight coefficient of permanent magnet synchronous motor model based on particle swarm algorithm [J]. Journal of Electrical Technology, 2021, 36(1): 50-59, 76.
- [18] 杜涛, 曾国辉, 黄勃, 等. 基于蜻蜓算法分数阶 PI 的 PMSM 矢量控制优化[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(10): 132-141.
- DU T, ZENG G H, HUANG B, et al. Optimization of PMSM vector control based on dragonfly algorithm fractional PI [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 34(10): 132-141.
- [19] 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. Permanent magnet synchronous motor to modified shark optimization for nonlinear self-immunity control [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(6): 303-312.
- [20] 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 setting and optimization of current ring PI controller of permanent

magnet synchronous motor [J]. Journal of Electric Motor and Control, 2023, 27(10): 131-140.

作者简介



侯利民, 1999 年于辽宁工程技术大学获得学士学位, 2004 年于辽宁工程技术大学获得硕士学位, 2010 年于东北大学获得博士学位, 现为辽宁工程技术大学教授, 主要研究方向为电力电子与电气传动、先进控制理论与控制工程。

E-mail: hlm760410@163.com

Hou Limin received his B. Sc. degree from Liaoning Technical University in 1999, M. Sc. degree from Liaoning Technical University in 2004 and Ph. D. degree from

Northeastern in 2010, respectively. Now he is a professor in Liaoning Technical University. His main research interests include power electronics and electrical transmission, advanced control theory and control engineering.



韦卓庆 (通信作者), 2021 年于东华理工大学获得学士学位, 现为辽宁工程技术大学硕士生, 主要研究方向为电机控制。

E-mail: 652339334@qq.com

Wei Zhuoqing (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Liaoning Technical University in 2021 in East China University of Technology. Now he is a M. Sc. candidate in Liaoning Technical University. His main research interest includes motor control