

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.200332

# 基于灰狼优化的永磁同步电机自适应反推鲁棒控制策略

俞沛宙<sup>1</sup>, 王澍<sup>2</sup>, 杨继辉<sup>1</sup>, 张宇华<sup>3</sup>, 薛花<sup>3</sup>, 黄珂<sup>3</sup>

(1. 国网浙江宁波市鄞州区供电有限公司, 浙江 宁波 315100; 2. 国网浙江省电力有限公司双创中心, 浙江 杭州 310051; 3. 上海电力大学电气工程学院, 上海 200090)

**摘要:** 针对永磁同步电机存在非线性项的不确定性, 以及在运行过程中参数摄动与负载扰动对机械角频率、转速以及系统控制产生的影响, 为适应高精度、高稳定的调速应用要求, 提出一种基于灰狼优化的永磁同步电机自适应反推鲁棒控制策略。应用非线性反推控制解决电机的非线性问题, 并将灰狼优化应用于自适应反推算法中, 实现电机转速对期望值的自适应调节跟踪, 从而获得较好的动态响应及鲁棒性。首先, 建立包含参数摄动以及输出侧负荷扰动的永磁同步电机数学模型, 设计出满足李雅普诺夫稳定的反推控制器。其次, 用灰狼算法对反推控制器参数进行优化, 进一步提高系统的稳定性和鲁棒性。仿真结果验证了该控制器具有良好的速度跟踪与抗干扰调节效果, 表明了该方法的有效性。

**关键词:** 永磁同步电机(PMSM); 自适应反推控制; 李雅普诺夫; 灰狼优化; 鲁棒性

## Adaptive backstepping robust control strategy of PMSM based on grey wolf optimization

YU Peizhou<sup>1</sup>, WANG Shu<sup>2</sup>, YANG Jihui<sup>1</sup>, ZHANG Yuhua<sup>3</sup>, XUE Hua<sup>3</sup>, HUANG Ke<sup>3</sup>

(1. State Grid Zhejiang Ningbo Yinzhou District Power Supply Co., Ltd., Ningbo 315100, China;

2. Innovation and Entrepreneurship Center of State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Hangzhou 310051, China;

3. School of Electrical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

**Abstract:** There is uncertainty of the nonlinear term in a permanent magnet synchronous motor, as well as of the influence of parameter perturbation and load disturbance on mechanical angular frequency, rotational speed and system control during operation. To meet the requirements of high precision and high stability speed regulation application, an adaptive backstepping robust control strategy of PMSM based on grey wolf optimization is proposed. The nonlinear backstepping control is applied to solve the nonlinear problem of the motor, and grey wolf optimization is applied to the adaptive backstepping algorithm to realize the adaptive adjustment and tracking of the motor speed to the expected value, thus obtaining better dynamic response and robustness. A mathematical model of a permanent magnet synchronous motor including parameter perturbation and output side load perturbation is established. Then a backstepping controller satisfying Lyapunov stability is designed. Then the parameters of the backstepping controller are optimized by grey wolf algorithm to further improve the stability and robustness of the system. The simulation results verify the controller's good speed tracking and anti-interference adjustment effects and the effectiveness of the method.

This work is supported by the Shanghai Science and Technology Innovation Action Plan (No. 19DZ2204700) and the Innovation and Entrepreneurship Incubation Fund Project of Zhejiang Electric Power Company.

**Key words:** permanent magnet synchronous motor (PMSM); adaptive backstepping control; Lyapunov; grey wolf optimization; robustness

## 0 引言

永磁同步电机(Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM)不仅具有功率密度高、结构紧凑和转

矩惯性高的优点, 且损耗小、效率高, 节电效果明显, 在电气设备中有广泛的应用<sup>[1]</sup>。节约能源和环境保护日益受到重视, 对电机控制性能要求越来越高, 特别是在高调速精度、高稳定性的应用场合, 对电机的控制提出更高的要求, 永磁同步电机控制的高性能研究就显得非常必要。随着电力电子技术、微电子技术、新型电机控制理论和稀土永磁材料的

基金项目: 上海市科技创新行动计划(19DZ2204700); 浙江省电力公司双创孵化培育基金项目

快速发展, 永磁同步电机也得到了越来越多学者和机构的关注和研究。在风电、航空航天、航海、家用电器、新能源汽车等方面均得到不同程度的应用<sup>[2-5]</sup>。永磁同步矢量控制在高精度和大范围调速上有自己独特的优越性, 因此 PMSM 还被广泛应用于柔性制造、机器人等领域<sup>[6]</sup>。

有关 PMSM 高性能控制方面的研究, 近年来发表了很多研究成果。文献[7-8]通过滑模观测器对参数变化的不敏感特性及自身特有的鲁棒性, 提高转子位置和转速的估计精度, 来对 PMSM 进行控制, 有很好的鲁棒性, 但正因为滑模控制对参数变化的不敏感, 而极易产生波动。文献[9]考虑到相电流测量对转速、转矩控制的影响, 通过消除电流测量误差提高转速的控制精度。文献[10]利用有限集模型预测控制的灵活性对 PMSM 的位置进行观测和判断, 从而提高观测精度和控制性能, 但同样, 其在在线计算量较大的情况下, 会产生控制延迟的现象, 易出现控制偏差。文献[11]通过将负载扰动估计器与离散滑模控制相结合, 从而减小外部扰动及其控制偏差对控制效果产生的影响, 但未考虑到非线性部分及参数摄动的影响。文献[12]将速度误差引入到传统指数趋近函数中, 以消除起动电流和快速响应之间的矛盾, 但速度误差的设计将会直接影响控制效果。

在现有永磁同步电机控制的研究中, 虽有大量的成果, 但由于永磁同步电机自身数学模型具有非线性和强耦合的特点, 对转速的控制以及控制方式的选择会直接影响 PMSM 的性能及使用, 还有需要进一步研究。除本身模型的耦合外, PMSM 在运行过程中不可避免会受到负载扰动<sup>[13-14]</sup>和参数摄动<sup>[15-17]</sup>造成的不确定性影响, 此问题也得到研究学者的关注。但如何在考虑非线性的同时较为准确地对不确定性影响自适应调整仍鲜有涉猎。

反推控制作为一种常用的非线性控制方法, 得到广泛应用, 而自适应反推控制可以较为灵活地选择控制信号, 在电机控制中也得到越来越多的研究<sup>[18-21]</sup>。文献[22-24]在反推控制的基础上利用神经网络的学习能力, 也取得了较好的控制效果。但其在设计过程中, 参数设置通常是依靠经验或多次实验来选择, 不具有通用性, 可靠性也不强。灰狼(Grey Wolf Optimizer, GWO)算法<sup>[25]</sup>自 2014 年提出后便受到国内外学者的广泛关注, 其在全局寻优方面明显优于粒子群算法以及遗传算法等智能优化算法, 在跟踪误差<sup>[26-27]</sup>、电压评估<sup>[28-29]</sup>、故障检测<sup>[30-31]</sup>等参数优化方面均表现出自己的优越性, 且该算法在优化时原理简单, 易于实现。

基于上述分析, 为解决永磁同步电机非线性强耦合的控制问题以及负载扰动与参数摄动对控制带来的困扰, 将自适应反推控制与灰狼优化有机结合起来, 提出一种基于灰狼优化的永磁同步电机自适应反推鲁棒控制策略。以非线性控制为基础, 通过灰狼算法自适应优化控制系统存在的不确定项和负载扰动, 实现对转速期望值的自适应调节, 从而提高系统的稳定性和鲁棒性, 提高永磁同步电机的控制精度与动态响应性能。

## 1 永磁同步电机数学模型

为了便于分析, 在建立数学模型时, 作以下假设: 忽略电动机的铁心饱和; 不计电机中的涡流和磁滞损耗; 定子和转子磁动势所产生的磁场沿定子内圆按正弦分布, 即忽略磁场中所有的空间谐波; 各相绕组对称, 即各相绕组的匝数与电阻相同, 各相轴线相互位移相同的电角度。

PMSM 在同步旋转坐标系下的数学模型为

$$\frac{di_d}{dt} = -\frac{R}{L}i_d + p\omega i_q + \frac{u_d}{L} \quad (1)$$

$$\frac{di_q}{dt} = -\frac{R}{L}i_q - p\omega i_d - \frac{p\varphi}{L}\omega - \frac{u_q}{L} \quad (2)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = -\frac{B}{J}\omega + \frac{3p\varphi}{2J}i_q - \frac{T_L}{J} \quad (3)$$

式中:  $u_d$ 、 $u_q$  为  $dq$  坐标轴的定子电压;  $i_d$ 、 $i_q$  为  $dq$  坐标轴的定子电流;  $R$  为定子电阻;  $L$  为定子电感;  $T_L$  为负载转矩;  $J$  为转动惯量;  $B$  为粘滞摩擦系数;  $\varphi$  为永磁磁通;  $p$  为极对数;  $\omega$  为转子机械角速度。

考虑到永磁同步电机模型的非线性项和外部扰动部分, 根据式(1)一式(3), 令  $x_1 = i_d$ 、 $x_2 = i_q$ 、 $x_3 = \omega$ , 可得状态方程为

$$x_1' = -\frac{R}{L}x_1 + p\omega x_2 + \frac{u_d}{L} + \gamma_1 \quad (4)$$

$$x_2' = -\frac{R}{L}x_2 - p\omega x_1 - \frac{p\varphi}{L}x_3 - \frac{u_q}{L} + \gamma_2 \quad (5)$$

$$x_3' = -\frac{B}{J}x_3 + \frac{3p\varphi}{2J}x_2 - \frac{T_L}{J} + \gamma_3 \quad (6)$$

其中:

$$\gamma_1 = \frac{-\Delta L x_1' - \Delta R x_1 + p\omega \Delta L x_2 + \Delta u_d + f_1}{L} \quad (7)$$

$$\gamma_2 = \frac{-\Delta L x_2' - \Delta R x_2 - p\omega \Delta L x_1 - p\varphi x_3 + \Delta u_q + f_2}{L} \quad (8)$$

$$\gamma_3 = \frac{-\Delta J x_3' - B x_3 + 1.5p\varphi x_2 - \Delta T_L + f_3}{J} \quad (9)$$

式中:  $\gamma_1$ 、 $\gamma_2$ 、 $\gamma_3$  分别代表永磁同步电机运行过程

中非线性项和外部扰动对系统造成的不确定因素;  
 $f_1$ 、 $f_2$ 、 $f_3$  分别代表实际运行中负载扰动的影响。

## 2 反推控制器设计

定义转速跟踪误差为  $e_3 = x_{3\text{ref}} - x_3$ , 其中  $x_{3\text{ref}}$  表示转子机械角速度参考值。定义李雅普诺夫函数为

$$V_1 = \frac{1}{2} e_3^2 \quad (10)$$

对式(10)求导, 可得

$$V_1' = e_3 \cdot e_3' = e_3 (x_{3\text{ref}}' - x_3') = e_3 \left( x_{3\text{ref}}' + \frac{B}{J} x_3 - \frac{3p\varphi}{2J} x_2 + \frac{T_L}{J} - \gamma_3 \right) \quad (11)$$

式中:  $x_2$  为虚拟控制量; 定义  $e_2 = x_{2\text{ref}} - x_2$ , 其中  $x_{2\text{ref}}$  为  $q$  轴电流参考值。令:

$$x_{2\text{ref}} = \frac{2J}{3p\varphi} \left[ x_{3\text{ref}}' + \frac{B}{J} x_3 + \frac{T_L}{J} + k_3 e_3 + \rho_3 \text{sgn}(e_3) \right] \quad (12)$$

将式(12)代入式(11), 得

$$V_1' = -k_3 e_3^2 + (\rho_3 - |\gamma_3|) e_3 + \frac{3p\varphi}{2J} e_3 e_q \quad (13)$$

定义  $e_1 = x_{1\text{ref}} - x_1$  为  $d$  轴电流误差, 其中,  $x_{1\text{ref}}$  为  $d$  轴电流参考值。

$$e_d' = x_{1\text{ref}}' - x_1' = x_{1\text{ref}}' + \frac{R}{L} x_1 - p\omega x_2 - \frac{u_d}{L} - \gamma_1 \quad (14)$$

$$e_q' = x_{2\text{ref}}' - x_2' = x_{2\text{ref}}' + \frac{R}{L} x_2 + p\omega x_1 + \frac{p\varphi}{L} x_3 - \frac{u_q}{L} - \gamma_3 \quad (15)$$

定义李雅普诺夫函数为

$$V_2 = V_1 + \frac{1}{2} e_d^2 + \frac{1}{2} e_q^2 \quad (16)$$

对式(16)求导, 可得

$$V_2' = V_1' + e_d \cdot e_d' + e_q \cdot e_q' = e_3 \left( x_{3\text{ref}}' + \frac{B}{J} x_3 - \frac{3p\varphi}{2J} x_2 + \frac{T_L}{J} - \gamma_3 \right) + e_d \left( x_{1\text{ref}}' + \frac{R}{L} x_1 - p\omega x_2 - \frac{u_d}{L} - \gamma_1 \right) + e_q \left( \frac{3p\varphi}{2J} e_3 + x_{2\text{ref}}' + \frac{R}{L} x_2 + p\omega x_1 - \frac{u_q}{L} - \gamma_3 \right) \quad (17)$$

故, 设计反推控制器的控制量为  $u_d$ 、 $u_q$ , 表达式为

$$u_d = Lx_{1\text{ref}}' + Rx_1 - pL\omega x_2 + k_1 e_d + \rho_d \text{sgn}(e_d) \quad (18)$$

$$u_q = Lx_{2\text{ref}}' + \frac{3p\varphi L}{2J} e_3 + Rx_2 + p\omega x_1 + p\varphi x_3 + k_2 e_q + \rho_q \text{sgn}(e_q) \quad (19)$$

将式(18)、式(19)代入式(17), 可得

$$V_2' = -k_3 e_3^2 - (\rho_3 - |\gamma_3|) |e_3| - \frac{k_1 e_d^2 + k_2 e_q^2}{L} + (\gamma_1 e_d - \rho_d |e_d|) + (\gamma_2 e_q - \rho_q |e_q|) \leq -k_3 e_3^2 - (\rho_3 - |\gamma_3|) |e_3| - \frac{k_1 e_d^2 + k_2 e_q^2}{L} - (\rho_d - |\gamma_1|) |e_d| + (\rho_q - |\gamma_2|) |e_q| \leq -k_3 e_3^2 - \frac{k_1 e_d^2 + k_2 e_q^2}{L} < 0 \quad (20)$$

式(20)表示, 当  $|\gamma_1| < \rho_d$ 、 $|\gamma_2| < \rho_q$  且  $|\gamma_3| < \rho_3$  时,  $V_2' < 0$ , 即系统稳定。

综上所述, 反推控制器控制结构框图如图 1 所示。

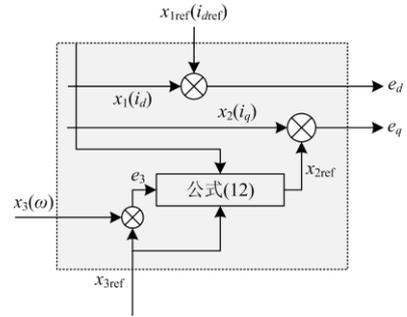


图 1 反推控制器控制框图

Fig. 1 Control block diagram of backstepping controller

## 3 参数与负载扰动自适应灰狼优化设计

### 3.1 基于反推控制器的灰狼优化

通过上述反推控制推导的控制器经式(20)证明可以保证系统稳定。但控制器中涉及多个参数设计, 且负荷存在不确定性和波动性, 这为控制器参数的设计增加了难度。灰狼优化算法通过模拟群居动物灰狼的领导形式以及社会关系对目标函数进行优化, 具有的较强的收敛性能以及易于实现的优点使得算法有着更好的效率。故采用灰狼算法对控制器的控制参数进行优化, 在提高控制器准确性的同时, 也减小机械角速度的动态响应偏差。

灰狼算法是模拟狼群社会特征的一种优化算法。作为位于食物链顶端的食肉群居动物, 其社会等级森严, 管理机制也十分严格。根据灰狼算法的社会分配等级(如图 2 所示), 实现自适应控制的算法设计。其中, 狼群中头狼被记为  $\alpha$  狼(代表最优解),  $\alpha$  狼负责捕食、栖息、作息时间等安排, 其他狼必须服从  $\alpha$  狼;  $\beta$  狼(代表优解)服从  $\alpha$  狼, 且协助其做出决策;  $\delta$  狼(代表次优解)需要服从  $\alpha$  狼和  $\beta$  狼, 同时可以支配更底层的狼,  $\delta$  狼一般负责侦察放哨,

包含幼狼和老年狼； $\omega$  狼(代表待选解)为最底层，其服从其他层次的狼，主要负责捕猎，是狼群中的主要部分。

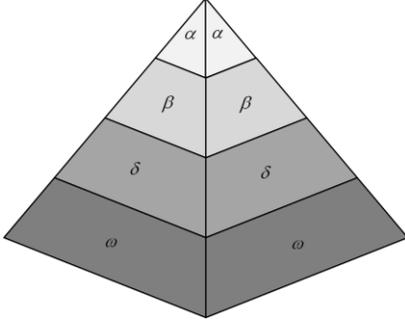


图 2 灰狼社会分配等级金字塔示意图

Fig. 2 Schematic diagram of grey wolf's social distribution hierarchy pyramid

根据灰狼算法，定义目标函数为

$$f = \frac{1}{N} \sum_i^N e_d^2 + e_q^2 + e_3^2 \quad (21)$$

式中， $e_d$ 、 $e_q$ 、 $e_3$  分别对应上文中反推控制器控制下  $d$  轴电流误差、 $q$  轴电流误差以及转速跟踪误差。

通过灰狼算法对目标函数进行优化，求出最优反推控制器  $u = [u_d, u_q]$ 。具体步骤如下。

步骤 1: 初始化过程

分别为灰狼狼群和头狼位置的初始化。狼群的初始化信息包括狼群的数量、迭代次数以及空间维度等。

步骤 2: 适应度值的计算和排序

根据目标函数计算适应度值，并依据适应度值的大小进行排序，排序为前三的依次定为最优解、优解和次优解。

步骤 3: 种群搜索

灰狼在进行捕食时，灰狼与猎物之间距离为  $D$ ，其数学模型如式(22)所示，并依照式(23)对猎物进行包围，即自身位置的更新。

$$D = |C \times X_p(t) - X(t)| \quad (22)$$

$$X(t+1) = X_p(t) - A \times D \quad (23)$$

$$A = 2a \times r_1 - a \quad (24)$$

$$C = 2 \times r_2 \quad (25)$$

式中： $X_p(t)$ 表示当下的目标位置； $X(t)$ 表示在  $t$  次迭代时的位置； $t$  表示当前迭代数； $A$ 、 $C$  为常数变量； $r_1$ 、 $r_2$  为[0,1]范围内均匀分布的随机数； $a$  的计算公式为

$$a = 2 - 2 \times \frac{t}{t_{\max}} \quad (26)$$

步骤 4: 位置更新

当狼群发现猎物时，开始进行狩猎过程。在狩猎过程中，将会由  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\delta$  狼进行指导包围，直到捕获。而个体位置亦会依照式(27)进行更新。

$$\begin{cases} D_\alpha = |C_1 \times X_\alpha(t) - X(t)| \\ D_\beta = |C_2 \times X_\beta(t) - X(t)| \\ D_\delta = |C_3 \times X_\delta(t) - X(t)| \end{cases} \quad (27)$$

式中： $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_3$  表示对  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\delta$  狼的干扰； $X_\alpha$ 、 $X_\beta$ 、 $X_\delta$  表示  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\delta$  狼的当前位置。式(28)、式(29)为  $\omega$  狼的运动方向及距离。

$$\begin{cases} X_1 = X_\alpha - A_1 \times D_\alpha \\ X_2 = X_\beta - A_1 \times D_\beta \\ X_3 = X_\delta - A_1 \times D_\delta \end{cases} \quad (28)$$

$$X_p(t+1) = \frac{X_1 + X_2 + X_3}{3} \quad (29)$$

### 3.2 灰狼算法自适应律

考虑灰狼优化的输出为控制量  $u_d$ 、 $u_q$ ，根据式(22)和式(23)，灰狼优化的控制器可表示为

$$u_{\text{GWO}}(a^*, r_1^*, r_2^*) = |k_w b_w| c_w = \begin{bmatrix} X_{pa}(t) & X_p(t) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & X_{pb}(t) & X_b(t) \end{bmatrix} \quad (30)$$

$$\begin{bmatrix} 2r_{1a} & 0 \\ -1 & 0 \\ 0 & 2r_{1b} \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 2a_a r_{2a} - a_a \\ 2a_b r_{2b} - a_b \end{bmatrix} = \begin{cases} |k_w b_w c_w| & c_w \geq 0 \\ -|k_w b_w c_w| & c_w < 0 \end{cases}$$

令  $b_w \cdot c_w = p_w$ ，考虑到最优参数的估计误差，控制量的误差表示为

$$e_u = u_{\text{GWO}}^*(a^*, r_1^*, r_2^*) + \varepsilon - \hat{u}_{\text{GWO}} = k_w e_{pw} + \varepsilon \quad (31)$$

其中：

$$e_{pw} = p_w^* - \hat{p}_w \quad (32)$$

选取李雅普诺夫函数为

$$V_3 = V_2 + \frac{e_{pw}^T \cdot e_{pw}}{2\zeta} \quad (33)$$

其中， $\zeta$  为大于 0 的常数。

由式(1)、式(2)可得

$$\begin{cases} u_d = Li'_d + Ri_d - pL\omega i_q \\ u_q = Li'_q + Ri_q + pL\omega i_q - p\varphi\omega \end{cases} \quad (34)$$

将式(34)与式(18)、式(19)相减可得控制器的控制误差为

$$\begin{cases} k_w e_{pa} = -Le'_d - k_1 e_d - \rho_d \operatorname{sgn}(e_d) \\ k_w e_{pb} = -Le'_q - \frac{3p\varphi}{2J} Le_3 - k_2 e_q - \rho_q \operatorname{sgn}(e_q) \end{cases} \quad (35)$$

对式(33)求导并将式(35)代入整理可得

$$V_3' = V_3' - \frac{e_{pb}}{\zeta} \left( \frac{e_q k_b \zeta}{L} + \hat{p}'_b \right) + \frac{e_q}{L} \left( -\frac{3p\phi L}{2J} e_3 - k_2 e_q - \rho_q \operatorname{sgn}(e_q) \right) + \frac{e_d}{L} \left( -k_1 e_d - \rho_d \operatorname{sgn}(e_d) \right) - \frac{e_{pa}}{\zeta} \left( \frac{e_d k_a \zeta}{L} + \hat{p}'_a \right) \quad (36)$$

选取自适应律为

$$\begin{cases} \hat{p}'_a = -\frac{e_d k_a \zeta}{L} \\ \hat{p}'_b = -\frac{e_q k_b \zeta}{L} \end{cases} \quad (37)$$

通过式(10)一式(37)的控制器设计, 可得基于灰狼优化的永磁同步电机自适应反推鲁棒控制策略的控制框图如图 3 所示。

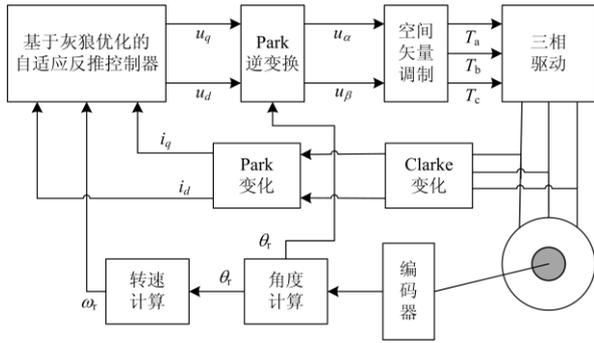


图 3 基于灰狼优化的永磁同步电机自适应反推鲁棒控制框图

Fig. 3 Adaptive backstepping robust control block diagram of permanent magnet synchronous motor based on grey wolf optimization

### 3.3 稳定性分析

系统稳定性分析如下:

将式(37)代入式(36)可得  $V_3' \leq 0$ , 为半负定函数, 则  $e_d$ 、 $e_q$ 、 $e_3$  有界, 则

$$V_3(0) - V_3(\infty) \geq \int_0^{\infty} k_3 e_3^2 dt \quad (38)$$

由于  $V_3$  有界, 根据 Barbalat 定理可得

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e_{pw} = 0 \quad (39)$$

同理可得,  $\lim_{t \rightarrow 0} e_d = 0$ 、 $\lim_{t \rightarrow 0} e_q = 0$  和  $\lim_{t \rightarrow 0} e_3 = 0$ ,

系统是稳定的。且控制器可以使电压得到准确控制, 并有效抑制参数变化对系统性能的影响, 在快速响应的同时具有较强的鲁棒性。

## 4 仿真分析

为验证上述所提方法的有效性, 基于上述控制器设计过程及永磁同步电机运行理论基础, 在参数

预测存在偏差、负载侧出现扰动的情况下, 通过 Matlab/Simulink 进行仿真。永磁同步电机仿真参数如表 1 所示。

表 1 仿真参数

Table 1 Simulation parameters

参数	数值	参数	数值
定子电阻 $R/\Omega$	0.52	永磁磁通 $\phi/\text{Wb}$	0.814
极对数 $p$	3	定子电感 $L/\text{H}$	0.015
转动惯量 $J/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	0.002	粘滞摩擦系数	0.000 01

设置初始时刻电机的负载转矩为  $5 \text{ N}\cdot\text{m}$ , 同时设置电机跟踪速度为  $300 \text{ r/min}$ , 在  $0.2 \text{ s}$  时刻, 设置转矩突变为  $10 \text{ N}\cdot\text{m}$ , 在此基础上观察电机转速变化情况以及电流、电压波形, 波形图分别如图 4—图 10 所示。

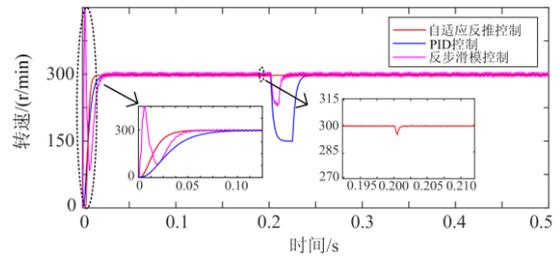


图 4 电机转速波形

Fig. 4 Motor speed waveform

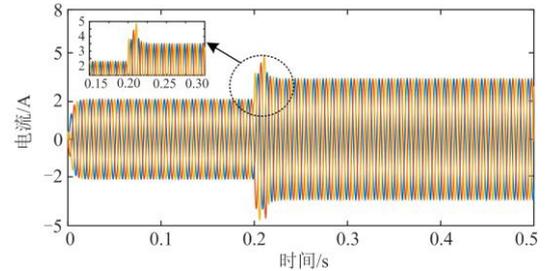


图 5 PID 控制下的电机三相电流图

Fig. 5 Three-phase current diagram of motor based on PID control

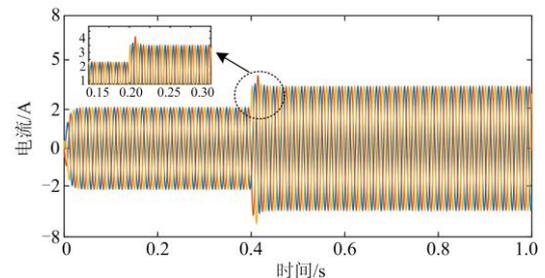


图 6 反步滑模控制下的电机三相电流图

Fig. 6 Three-phase current diagram of motor based on backstepping sliding mode control

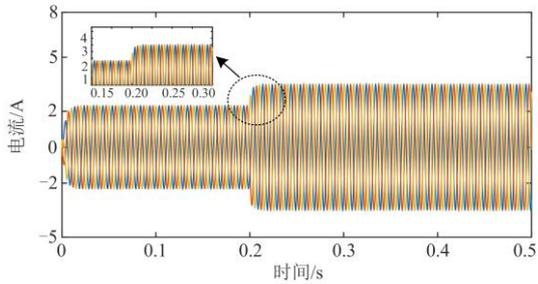


图 7 自适应反推控制下的电机三相电流图

Fig. 7 Three-phase current diagram of motor based on adaptive backstepping control

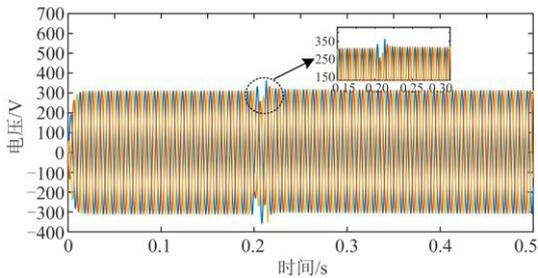


图 8 PID 控制下的电机三相电压图

Fig. 8 Three-phase voltage diagram of motor based on PID control

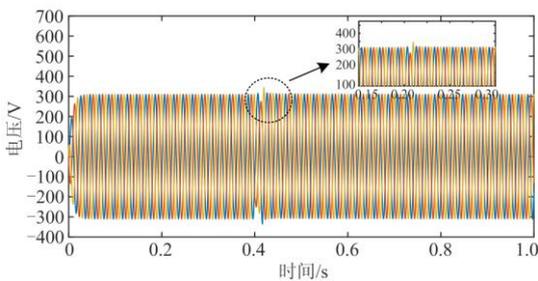


图 9 反步滑模控制下的电机三相电压图

Fig. 9 Three-phase voltage diagram of motor based on backstepping sliding mode control

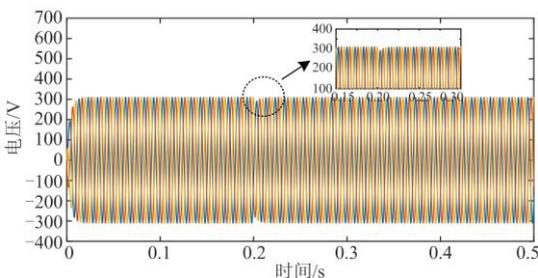


图 10 自适应反推控制下的电机三相电压图

Fig. 10 Three-phase voltage diagram of motor based on adaptive backstepping control

图 4 所示分别为基于灰狼优化的自适应反推控制、PID 控制以及反步滑模控制三种控制方式的转速变化情况对比。从图中可看出，PID 控制在转矩发生变化时，转速从 300 r/min 下降到 150 r/min，且恢复到稳定的时间需要 0.04 s；反步滑模控制在转矩发生变化时，转速从 300 r/min 下降到 225 r/min，且恢复到重新稳定的时间需要 0.02 s；基于灰狼优化的自适应反推控制，在负载转矩发生变化时，转速从 300 r/min 下降到 295 r/min，且恢复到重新稳定的时间仅需 0.012 s。对比发现，灰狼自适应控制能够在负载转矩发生变化时转速变化很小，且在启动阶段用时较短、无超调，能够保证永磁同步电机的快速跟踪与稳定运行，具有较高的鲁棒性。

如图 5 和图 6 所示，在 PID 控制下与反步滑模控制下的电机定子电流仿真波形中，在电机启动时可以保持较为平稳的增长，没有冲击；但在 0.2 s 时刻转矩突然增加时，会出现冲击电流。而如图 7 所示，在基于灰狼优化的自适应反推控制下的电机定子电流仿真波形中，电机启动时电流从零逐渐增加，平滑稳定，没有冲击；在 0.2 s 时刻转矩突然增加时，电流值也会随着平滑增加，增长平稳，没有出现大的过载电流，并随着调整结束，电流重新处于稳定状态，对电网的电流冲击较小。

如图 8 和图 9 所示，在 PID 控制和反步滑模控制下的电压仿真波形中，三条曲线分别代表电机的三相电压，在 0.2 s 负载转矩增加时，电压下降，且在控制达到稳定时，产生了电压超调情况。而在图 10 所示的基于灰狼优化的自适应反推控制下的电压仿真波形中，当 0.2 s 负载转矩增加时，在基于灰狼优化的自适应反推控制器的控制下，电压下降 10 V，波动较小，且仅需 0.01 s 左右便可恢复。

仿真结果表明，针对永磁同步电机的非线性及参数扰动或负载扰动，灰狼优化自适应反推控制能够快速做出控制补偿，根据系统变化对控制器进行自我调节和修正，实现自适应调节，具有动态响应快及鲁棒性强的特点。仿真结果验证了所提控制方法的合理性和有效性。

## 5 结论

本文提出的基于灰狼优化的永磁同步电机自适应反推鲁棒控制策略，具有以下特点：

- 1) 反步滑模控制能有效解决永磁同步电机数学模型非线性控制问题，相比线性控制，抗干扰能力更强。
- 2) 自适应反推鲁棒控制策略能够针对永磁同步电机数学模型的参数扰动与负载扰动进行自适应控制与补偿，控制的动态响应速度快，对负载适应性强，具有较强的鲁棒性。

3) 基于灰狼优化的永磁同步电机自适应反推鲁棒控制策略具有参数优化效果好、自适应优化速度快的特点。

4) 典型调节过程的仿真对比, 验证了本控制策略的有效性。

### 参考文献

- [1] 李珍国. 交流电机控制基础[M]. 北京: 化学工业出版社, 2010.
- [2] 陶彩霞, 赵凯旋, 牛青. 考虑滑模抖振的永磁同步电机模糊超螺旋滑模观测器[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(23): 11-18.  
TAO Caixia, ZHAO Kaixuan, NIU Qing. Fuzzy super-spiral sliding mode observer for permanent magnet synchronous motor considering sliding mode buffering[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(23): 11-18.
- [3] 朱健, 曹君慈, 刘瑞芳, 等. 电动汽车用永磁同步电机铁心采用非晶合金与硅钢的性能比较[J]. 电工技术学报, 2018, 33(增刊 2): 352-358.  
ZHU Jian, CAO Junci, LIU Ruifang, et al. Comparative analysis of silicon steel and amorphous on the permanent magnet synchronous motors on electric vehicles[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(S2): 352-358.
- [4] 颜湘武, 李君岩, 魏星. 直驱永磁同步风电机组在全风速范围内的控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(23): 138-144.  
YAN Xiangwu, LI Junyan, WEI Xing. Research on control strategy of direct-drive permanent synchronous wind turbine in full wind speed range[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(23): 138-144.
- [5] 何保营, 韩国辉, 耿英三, 等. 新型 126 kV 电机直驱高压真空断路器伺服控制系统研究[J]. 高压电器, 2020, 56(8): 92-99.  
HE Baoying, HAN Guohui, GENG Yingsan, et al. Novel servo control system for 126 kV direct-driven high-voltage vacuum circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(8): 92-99.
- [6] 李华德. 交流调速控制系统[M]. 北京: 电子工业出版社, 2003.
- [7] 王要强, 冯玉涛, 秦明, 等. 表贴式永磁同步电机全阶滑模观测与控制策略[J]. 电工技术学报, 2018, 33(24): 5688-5699.  
WANG Yaoqiang, FENG Yutao, QIN Ming, et al. Full-order sliding mode observation and control strategy for surface permanent magnet synchronous motor[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(24): 5688-5699.
- [8] 张立伟, 李行, 宋佩佩, 等. 基于新型滑模观测器的永磁同步电机无传感器矢量控制系统[J]. 电工技术学报, 2019, 34(增刊 1): 70-78.  
ZHANG Liwei, LI Xing, SONG Peipei, et al. Sensorless vector control using a new sliding mode observer for permanent magnet synchronous motor speed control system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(S1): 70-78.
- [9] 陈再发, 刘彦呈, 朱鹏莅. 相电流测量误差补偿在船舶永磁同步电机无位置传感器控制中的应用[J]. 电工技术学报, 2018, 33(增刊 2): 411-419.  
CHEN Zaifa, LIU Yancheng, ZHU Pengli. Application of phase current measurement error compensation in sensorless control of marine permanent magnet synchronous motor[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(S2): 411-419.
- [10] 陈卓易, 邱建琪, 金孟加. 内置式永磁同步电机无位置传感器自适应集总电动势模型预测控制[J]. 电工技术学报, 2018, 33(24): 5659-5669.  
CHEN Zhuoyi, QIU Jianqi, JIN Mengjia. Sensorless adaptive lumped electromotive-force model predictive control of interior permanent magnet synchronous motors[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(24): 5659-5669.
- [11] 郑长明, 张加胜. 基于最小阶扰动估计的永磁同步电机离散比例-积分准滑模控制[J]. 电工技术学报, 2018, 33(24): 5711-5719.  
ZHENG Changming, ZHANG Jiasheng. Minimum-order disturbance estimation based discrete-time proportional-integral quasi-sliding mode control for permanent magnet synchronous motor[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(24): 5711-5719.
- [12] CUI B, HAN Z, LI J, et al. Research on PMSM speed control system based on improved reaching law[C] // 2019 3rd International Conference on Circuits, System and Simulation (ICCS), 2019, Nanjing, China: 19-24.
- [13] 兰永红, 陈乾, 王亮亮, 等. 基于降维观测器的永磁同步电机反推控制[J]. 控制工程, 2019, 26(10): 1843-1849.  
LAN Yonghong, CHEN Qian, WANG Liangliang, et al. Reduced-order observer-based backstepping control of permanent magnet synchronous motor[J]. Control Engineering of China, 2019, 26(10): 1843-1849.
- [14] 张小华, 刘慧贤, 丁世宏, 等. 基于扰动观测器和有限时间控制的永磁同步电机调速系统[J]. 控制与决策, 2009, 24(7): 1028-1032.  
ZHANG Xiaohua, LIU Huixian, DING Shihong, et al. PMSM speed-adjusting system based on disturbance observer and finite-time control[J]. Control and Decision, 2009, 24(7): 1028-1032.
- [15] 侯利民, 张化光, 刘秀翀, 等. 自适应模糊滑模软切换的 PMSM 无速度传感器鲁棒无源控制[J]. 控制与决策, 2010, 25(5): 686-690, 694.  
HOU Limin, ZHANG Huaguang, LIU Xiuchong, et al. Adaptive fuzzy sliding mode soft switch of speed sensorless for PMSM based on robust passive-based control[J].

- Control and Decision, 2010, 25(5): 686-690, 694.
- [16] RAMIREZ L, PERALTA S. Passivity-based speed control for permanent magnet motors[J]. Procedia Technology, 2013, 7: 215-222.
- [17] 韦笃取, 张波. 基于无源性理论自适应镇定具有 v/f 输入的永磁同步电动机的混沌运动[J]. 物理学报, 2012, 61(3): 80-85.  
WEI Duqu, ZHANG Bo. Robust suppressing chaos in permanent magnet synchronous motor with v/f control based on passivity theory[J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61(3): 80-85.
- [18] 张立伟, 张鹏, 刘曰锋, 等. 基于变步长 Adaline 神经网络的永磁同步电机参数辨识[J]. 电工技术学报, 2018, 33(增刊 2): 377-384.  
ZHANG Liwei, ZHANG Peng, LIU Yuefeng, et al. Parameter identification of permanent magnet synchronous motor based on variable step-size Adaline neural network[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(S2): 377-384.
- [19] EL-SOUSY F F M, EL-NAGGAR M F, AMIN M, et al. Robust adaptive neural-network backstepping control design for high-speed permanent-magnet synchronous motor drives: theory and experiments[J]. IEEE Access, 2019, 7: 99327-99348.
- [20] SU Q, DONG F, LI J. Improved nonlinear robust adaptive backstepping controller design for generator excitation systems[J]. IEEE Access, 2019, 7: 83187-83197.
- [21] 吴勇慷, 赵希梅. 基于函数链径向基神经网络的 PMLSM 自适应反推控制[J]. 电工技术学报, 2018, 33(17): 4044-4051.  
WU Yongkang, ZHAO Ximei. Adaptive backstepping control based on functional link radial basis function neural network for PMLSM[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(17): 4044-4051.
- [22] LIU Sheng, GUO Xiaojie, ZHANG Lanyong. Robust adaptive backstepping sliding mode control for six-phase permanent magnet synchronous motor using recurrent wavelet fuzzy neural network[J]. IEEE Access, 2017, 5: 14502-14515.
- [23] 赵希梅, 吴勇慷. 基于自适应修正拉盖尔递归神经网络的永磁直线同步电机反推控制[J]. 电工技术学报, 2018, 33(10): 2392-2399.  
ZHAO Ximei, WU Yongkang. Backstepping control based on adaptive modified Laguerre recurrent neural network for permanent magnet linear synchronous motor[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(10): 2392-2399.
- [24] 阎彦, 刘锐, 史婷婷, 等. 基于自适应反推控制的永磁同步电机摩擦力矩补偿策略[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(33): 76-84, 10.  
YAN Yan, LIU Rui, SHI Tingna, et al. Friction compensation for permanent magnet synchronous motors based on adaptive back-stepping control[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(33): 76-84, 10.
- [25] MIRJALILI S, MIRJALILI S M, LEWIS A. Grey wolf optimizer[J]. Advances in Engineering Software, 2014, 69.
- [26] SUN X, HU C, LEI G, et al. State feedback control for a PM hub motor based on gray wolf optimization algorithm[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(1): 1136-1146.
- [27] HEKIMOĞLU B. Optimal tuning of fractional order PID controller for DC motor speed control via chaotic atom search optimization algorithm[J]. IEEE Access, 2019, 7: 38100-38114.
- [28] 蔡国伟, 刘旭, 张旺, 等. 基于灰狼优化的灰狼优化算法的分布式电源优化配置[J]. 太阳能学报, 2019, 40(1): 134-141.  
CAI Guowei, LIU Xu, ZHANG Wang, et al. Optimal configuration of distributed generation based on grey optimization algorithm[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2019, 40(1): 134-141.
- [29] SAMPAIO L P, DA ROCHA M V, DA SILVA S A O, et al. Comparative analysis of MPPT algorithms bio-inspired by grey wolves employing a feed-forward control loop in a three-phase grid-connected photovoltaic system[J]. IET Renewable Power Generation, 2019, 13(8): 1379-1390.
- [30] ZHAO S, WANG E. Fault diagnosis of circuit breaker energy storage mechanism based on current-vibration entropy weight characteristic and grey wolf optimization-support vector machine[J]. IEEE Access, 2019, 7: 86798-86809.
- [31] 王旭, 生西奎, 慕锟, 等. 基于多频超声波技术和 GWO-BP 算法的变压器油电气性能检测方法研究[J]. 高压电器, 2020, 56(8): 114-120.  
WANG Xu, SHENG Xikui, MU Kun, et al. Electrical performance testing method of transformer oil based on multi-frequency ultrasonic technology and grey wolf-optimized neural network[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(8): 114-120.

收稿日期: 2020-03-30; 修回日期: 2020-08-12

作者简介:

俞沛宙(1981—), 男, 高级工程师, 主要从事电网自动化工作; E-mail: yupeizhou@sina.com

王 澍(1991—), 男, 工程师, 主要从事电力技术研究与管理工作; E-mail: ferrariccc@163.com

杨继辉(1980—), 男, 助理工程师, 主要从事配电网运维工作。E-mail: 298698294@qq.com

(编辑 魏小丽)