

考虑滑模抖振的永磁同步电机模糊超螺旋滑模观测器

陶彩霞^{1,2}, 赵凯旋¹, 牛青³

- (1. 兰州交通大学自动化与电气工程学院, 甘肃 兰州 730070;
2. 光电技术与智能控制教育部重点实验室(兰州交通大学), 甘肃 兰州 730070;
3. 河南理工大学电气学院, 河南 焦作 454000)

摘要: 针对永磁同步电机控制系统中的传统滑模观测器在估计转子位置与转速时出现的抖振问题, 设计一种基于模糊规则的超螺旋滑模观测器。该观测器利用串联高阶滑模结构特点来保证输出的连续性, 以此削弱滑模控制中高频切换带来的抖振。而模糊规则的引入以解决超螺旋控制算法中边界函数的上界在实际中很难获得的问题, 然后利用反证法验证所提出的模糊超螺旋滑模控制率的收敛性。最后在 Matlab 中搭建模型, 实验结果表明所设计控制方案在满足控制精度的同时, 减弱了系统抖振。

关键词: 永磁同步电机; 滑模结构; 模糊控制器; 超螺旋控制算法; 模糊超螺旋观测器

Fuzzy super-spiral sliding mode observer for permanent magnet synchronous motor considering sliding mode buffeting

TAO Caixia^{1,2}, ZHAO Kaixuan¹, NIU Qing³

- (1. School of Automation and Electrical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China; 2. Key Laboratory of Optoelectronic Technology and Intelligent Control, Ministry of Education, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China; 3. School of Electrical Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China)

Abstract: Contraposing the buffeting problem of traditional sliding mode observer in permanent magnet synchronous motor control system when estimating the rotational speed and rotor position, a super-spiral sliding mode observer based on fuzzy rules is proposed. The observer adopts series high-order sliding mode to ensure the continuity of the output, and weakens the buffeting begeted by high-frequency switching in sliding mode control. The introduction of fuzzy rules solves the problem that the upper bound of the boundary function in the super-spiral control algorithm is difficult to obtain in practice, and then the proof is used to verify the convergence of the proposed fuzzy super-spiral sliding mode control rate. Finally, the model is built in Matlab. The laboratory results demonstrate that the designed control scheme reduces the system chattering while satisfying the control accuracy.

This work is supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2017YFB1201003-020).

Key words: permanent magnet synchronous motor; sliding mode structure; fuzzy controller; super-spiral control algorithm; fuzzy super-spiral observer

0 引言

永磁同步电机(Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM)因为其具备结构简单、功率因数高、损耗小等优点在工业生产中得到广泛的应用^[1-2]。目前, 工程中通常采用传感器获取电机转子转速及位置, 但这既增大了系统的体积与成本, 又降低了系

统的可靠性。滑模观测器(Sliding Mode Observer, SMO)由于自身对扰动与参数不敏感、响应速度快等优点被广泛用于无位置传感器永磁同步电机转子位置以及转速估测中^[3]。但也正是滑模控制结构特点在带来强鲁棒性的同时, 也造成了系统抖振, 从而阻碍了其在实际工程中的应用。文献[4]采用神经网络估计策略, 以获取滑模增益, 此方案虽能削弱抖振, 但设计的变量参数多, 令系统变得复杂。文献[5]利用改进型趋近律来降低滑模控制导致的系统

抖振, 虽然在一定情况下达到了目的, 但是控制偏差变化为零时, 滑模增益也为零, 对控制系统不利。文献[6]将变结构控制思想和直接转矩控制理论相结合, 使得系统动态性响应更快, 鲁棒性大大加强, 但是这导致变结构切换增益变大, 系统抖振问题依然存在。文献[7-8]在直接转矩控制中引入指数趋近律, 此方法增强了系统的稳定性, 缺点在于指数趋近律的滑模运动状态使系统在趋近原点时, 是趋于原点周围的一个振动, 而不是趋向于原点, 增加了系统的负担。文献[9]在 SVM 调制技术中采用 ILC 算法作用于新的控制器, 大大增强了永磁同步电机转速和转距的稳定性, 但是由于在 SVM 中, 磁链的空间角度的变化是连续的, 但是电压矢量的变换却是步进式的, 这样就会导致电机转矩的脉动。文献[10]为改善永磁同步电机中速度控制问题, 利用多滑模面切换处理的思想, 但过多的滑模平面切换实现存在困难, 同时也会导致系统鲁棒性减弱。文献[11-12]提出了一种自适应滑模观测器, 此观测器对参数扰动具有良好的鲁棒性; 文献[13]为优化传统滑模观测器选用低通滤波器的控制方案, 设计出一种新的级联式滑模观测器; 文献[14-16]提出了一种采用模糊控制来调整滑模增益的方法, 以解决传统滑模观测器在检测低转速时产生的抖振问题, 达到低速抖振削弱目的; 文献[17-18]为获得平稳的反电动势估计值, 设计了一种引入双曲正弦函数的反电动势观测器, 以此减弱系统抖振; 文献[19]为进一步提高滑模观测器对电机的转子转速与位置估测的精确性, 提出了一种经过两级滤波的新型滑模观测器。文献[20]将超螺旋算法与滑模控制相结合, 设计了串联高阶滑模结构以确保控制率输出的连续性, 改善滑模控制中固有抖振现象。

本文通过引入超螺旋控制算法与模糊控制策略来取代传统滑模控制结构, 并设计出模糊超螺旋滑模观测器。该观测器从产生抖振的滑模切换函数根源出发, 将串联高阶滑模函数通过数学公式推导巧妙引入, 以取代原有滑模切换函数, 保证输出的连续性, 削弱系统抖振。而模糊控制器的引入以估测超螺旋控制算法中边界函数的上界, 解决此上界在实际中很难获得的问题。最后通过仿真实验验证该文所提方案的可行性。

1 PMSM 系统模型与传统滑模观测器存在的问题

在构建永磁同步电机的数学模型过程中, 通常作如下假设: 电机铁芯饱和忽略不计; 磁路假设线

性; 电感参数保持不变; 忽略电机中的涡流和磁滞损耗; 转子磁场在气隙空间分布为正弦波, 电流为对称的三相正弦波电流; 转子上没有阻尼绕组。

基于以上假设, 永磁同步电机在旋转坐标系下的数学模型如式(1)。

$$\begin{cases} \frac{di_d}{dt} = \frac{1}{L_d}(-Ri_d + u_d + L_q\omega_e i_q - E_d) \\ \frac{di_q}{dt} = \frac{1}{L_q}(-Ri_q + u_q - \omega_e L_d i_d - E_q) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $E_d = E_q = \omega_e \psi_f$ 可以看作 d - q 坐标系下的感应电动势。为了获得扩展反电动势的估计值, SMO 可设计为

$$\begin{cases} \frac{d\hat{i}_d}{dt} = \frac{1}{L_d}(-R\hat{i}_d + u_d + L_q\omega_e \hat{i}_q - V_d) \\ \frac{d\hat{i}_q}{dt} = \frac{1}{L_q}(-R\hat{i}_q + u_q - \omega_e L_d \hat{i}_d - V_q) \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} V_d = k \operatorname{sgn}(\hat{i}_d - i_d) \\ V_q = k \operatorname{sgn}(\hat{i}_q - i_q) \end{cases} \quad (3)$$

式中: \hat{i}_d 、 \hat{i}_q 分别是定子 d 轴和 q 轴的电流观测值; k 为滑模增益。

由式(1)和式(2)相减, 可得电流误差状态方程为

$$\begin{cases} \frac{d\tilde{i}_d}{dt} = \frac{1}{L_d}(-R\tilde{i}_d + L_q\omega_e \tilde{i}_q - V_d + E_d) \\ \frac{d\tilde{i}_q}{dt} = \frac{1}{L_q}(-R\tilde{i}_q - \omega_e L_d \tilde{i}_d - V_q + E_q) \end{cases} \quad (4)$$

式中, $\tilde{i}_d = \hat{i}_d - i_d$ 、 $\tilde{i}_q = \hat{i}_q - i_q$ 为电流观测误差。

将电流误差观测方程(2)~(4)改写成向量形式如式(5)。

$$\dot{\tilde{i}} = A\tilde{i} + B(-V + E) \quad (5)$$

式中: $\tilde{i} = [\tilde{i}_d \quad \tilde{i}_q]^T$, $V = [V_d \quad V_q]^T$, $E = [E_d \quad E_q]^T$;

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L_d} & \frac{L_q}{L_d}\omega_e \\ -\frac{L_d}{L_q}\omega_e & -\frac{R}{L_q} \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_d} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_q} \end{bmatrix}。$$

采用 SMO 对电流进行估计, 其滑模面函数定义为

$$\tilde{i} = [\tilde{i}_d \quad \tilde{i}_q]^T = 0 \quad (6)$$

当满足以下条件时, SMO 进入滑动模态:

$$\tilde{i}^T \dot{\tilde{i}} < 0 \quad (7)$$

当滑模增益满足不等式(7)时, 则

$$\tilde{i} = \dot{\tilde{i}} = 0 \quad (8)$$

将式(5)代入式(8)中, 可得

$$E = [k \operatorname{sgn}(\hat{i} - i_d) \quad k \operatorname{sgn}(\hat{i}_q - i_q)]^T \quad (9)$$

从式(9)可以看出, 估算出来的反电动势中存在着高频切换信号。而基于反正切函数的转子位置估计方法将高频切换信号直接代入反正切函数的除法运算中, 导致产生高频抖振现象。

2 基于超螺旋控制算法的滑模观测器设计

2.1 超螺旋控制算法

对于一个动态系统, 如式(10)。

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = a(x, t) + b(x, t)u \\ y = c(x, t) \end{cases} \quad (10)$$

式中: x 是状态变量; u 是控制输入; y 是被控制输入; a 、 b 、 c 是关于状态量和时间的函数。

针对系统(10)的控制问题, 实际上就是要找到一个控制 $u = f(y, \dot{y})$ 使系统能在有限的时间内趋近相平面 $y = \dot{y} = 0$ 。

超螺旋控制率一般包含两个部分: 一是滑模变量的不连续函数; 二是对时间偏导的连续函数。超螺旋控制算法可以记成如下形式:

$$\begin{cases} u = K_p |s|^r \operatorname{sgn}(s) + u_1 \\ \frac{du_1}{dt} = K_i \operatorname{sgn}(s) \end{cases} \quad (11)$$

式中, K_p 、 K_i 为增益。

控制系统稳定的充分条件为

$$\begin{cases} K_p \geq \frac{A_M}{B_M} \\ K_i \geq \frac{4A_M}{B_m^2} \cdot \frac{B_M(K_p + A_M)}{B_M(K_p - A_M)} \\ 0 < r \leq 0.5 \end{cases} \quad (12)$$

其中, $B_M \geq B \geq B_m$, $A_M \geq |A|$ 。

且 A 、 B 满足:

$$\frac{d^2 y}{dt^2} = A(x, t) + B(x, t) \frac{du}{dt} \quad (13)$$

超螺旋滑模控制律即为

$$u_{dq}(k) = v_{dq}(k) - k_1(k) |s_{dq}(k)|^{\frac{1}{2}} \operatorname{sign}(s_{dq}(k)) \quad (14)$$

并且有

$$v_{dq}(k+1) = K v_{dq}(k) - T_s k_2(k) \operatorname{sign}(s_{dq}(k)) \quad (15)$$

式中: $v_{dq} = [v_d \quad v_q]^T$ 是离散变量; K 是滑模控制率

增益, $0 < K < 1$ 。

根据滑模变结构控制原理定义滑模切换函数, 即

$$s_{dq}(k) = i_{dq}(k) - \hat{i}_{dq}(k) \quad (16)$$

$k_1(k)$ 、 $k_2(k)$ 是超螺旋滑模观测器的增益, 规定:

$$\begin{cases} k_1(k) = K_{\eta 1} \sqrt{f_\alpha(k)} \\ k_2(k) = K_{\eta 2} f_\alpha(k) \end{cases} \quad (17)$$

式中, $K_{\eta 1}$ 、 $K_{\eta 2}$ 为正常数; $f_\alpha(k)$ 为边界函数。

为改善滑模控制中的抖振问题, 超螺旋控制算法选用串联高阶滑模保证输出的连续性, 该算法的主要特征是只需知道滑模量的信息, 而不用知道其一阶导数。该算法能削弱有关维度为 1 的滑模控制系统的抖振, 并且还具有普通滑模的快速动态响应和抗干扰性。但是超螺旋控制算法中过度依赖边界函数的上界, 而这在实际中很难获得。

模糊控制由于不完全依赖数学模型, 而是依赖于模糊规则的控制方式, 对外界扰动有很强的适应性, 特别是适合应用于非线性控制系统, 在此引入模糊规则对边界函数的上界进行估计。

2.2 模糊控制器设计

根据滑模可达条件对边界函数 $f_\alpha(k)$ 进行估计。模糊控制系统的输入变量为 $s_{dq}(k+1)$ 、 $s_{dq}(k)$, 输出变量为 $f_\alpha(k)$, 如果 $s_{dq}(k+1) \cdot s_{dq}(k) > 0$, 则 $f_\alpha(k)$ 应增大; 如果 $s_{dq}(k+1) \cdot s_{dq}(k) < 0$, 则 $f_\alpha(k)$ 应减小。定义输入输出变量的论域均为 $\{-3 \ 3\}$, 输入量的模糊语言为 $\{\text{NB}(\text{负大})$ 、 $\text{NM}(\text{负中})$ 、 $\text{Z}(\text{零})$ 、 $\text{PM}(\text{正中})$ 、 $\text{PB}(\text{正大})\}$, 输出量的模糊语言值为 $\{\text{NB}(\text{负大})$ 、 $\text{NM}(\text{负中})$ 、 $\text{NS}(\text{负小})$ 、 $\text{Z}(\text{零})$ 、 $\text{PS}(\text{正小})$ 、 $\text{PM}(\text{正中})$ 、 $\text{PB}(\text{正大})\}$ 。在满足不等式 $s_{dq}(k+1) \cdot s_{dq}(k) < 0$ 的条件下, 设计 $f_\alpha(k)$ 得到控制规则如表 1 所示。

表 1 控制规则

Table 1 Control rule

$s_{dq}(k+1)/s_{dq}(k)$	NB	NM	Z	PM	PB
NB	NB	NB	NM	NS	Z
NM	NB	NM	NS	Z	PS
Z	NM	NS	Z	PS	PM
PM	NS	Z	PS	PM	PB
PB	Z	PS	PM	PB	PB

模糊控制器输入有 5 个模糊子集, 输出有 7 个模糊子集, 采用 Mamdani 模糊算法和重心反模糊化进行判决, 则输入输出的隶属函数如图 1、图 2 所示。

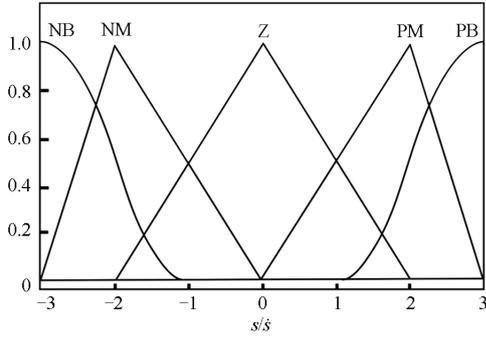


图 1 输入 $s_{dq}(k+1)/s_{dq}$ 的隶属函数

Fig. 1 Membership function of $s_{dq}(k+1)/s_{dq}$

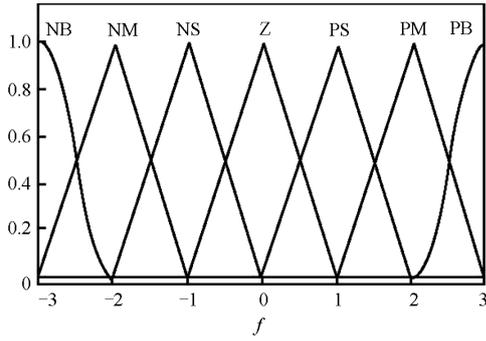


图 2 输出 $f_\alpha(k)$ 的隶属函数

Fig. 2 Membership function of $f_\alpha(k)$

2.3 模糊螺旋滑模观测器模型搭建

基于 d - q 旋转坐标系下的表贴式永磁同步电机离散电流模型, 如式(18)。

$$i_{dq}(k+1) = \left(1 - \frac{T_s R_s}{L_s}\right) i_{dq}(k) + \frac{T_s}{L_s} (v_{dq}(k) - e_{dq}(k)) \quad (18)$$

式中: $i_{dq} = [i_d \quad i_q]^T$ 为电机定子 dq 轴电流; R_s 为定子电阻; L_s 为定子电感; $v_{dq} = [v_d \quad v_q]$ 为电机定子 dq 轴电压; $e_{dq} = [e_d \quad e_q]^T$ 为电机转子 dq 轴相反电动势; T_s 为系统采样时间。

将式(18)中的 dq 轴反电动势作为未建模的系统有界扰动, 依据式(18)搭建以定子电流为系统变量的观测器为

$$\hat{i}_{dq}(k+1) = \left(1 - \frac{T_s R_s}{L_s}\right) \hat{i}_{dq}(k) + \frac{T_s}{L_s} v_{dq}(k) - u_{dq}(k) \quad (19)$$

式中: $\hat{i}_{dq} = [\hat{i}_d \quad \hat{i}_q]^T$ 为电机定子 dq 轴电流估计值; $u_{dq} = [u_d \quad u_q]^T$ 为控制律。观测器主要在于选择合适的控制律, 令其估测误差最小, 最后估算出电机定子 dq 轴相反电动势。

根据式(16), 可以得出

$$s_{dq}(k+1) = i_{dq}(k+1) - \hat{i}_{dq}(k+1) \quad (20)$$

结合式(20), 将式(18)减去式(19)得到

$$s_{dq}(k+1) = K_a s_{dq}(k) - K_b e_{dq}(k) + u_{dq}(k) \quad (21)$$

式中: $K_a = 1 - \frac{T_s R_s}{L_s}$; $K_b = \frac{T_s}{L_s}$ 。

当滑模切换函数趋近于滑模切换面时, 有

$$s_{dq}(k+1) = s_{dq}(k) = 0 \quad (22)$$

离散控制律根据式(19)可表示为

$$u_{dq}(k) = K_b e_{dq}(k) \quad (23)$$

进一步地, 将式(22)和式(23)代入式(14), 有

$$v_{dq}(k) = K_b e_{dq}(k) \quad (24)$$

考虑到电机反电动势 $e_{dq}(k)$ 与转子角速度成正比, 将式(20)和式(23)相结合可得函数 $f_\alpha(k)$ 。由此可以看出 $f_\alpha(k)$ 中含有超螺旋滑模观测器增益的信息。

根据式(23), 永磁同步电机反电动势估计为

$$\hat{e}_{dq}(k) = K^{-1} u_{dq}(k) \quad (25)$$

将式(14)代入式(21), 得到

$$s_{dq}(k+1) = K_a s_{dq}(k) - K_b e_{dq}(k) + v_{dq}(k) - k_1(k) |s_{dq}(k)|^{\frac{1}{2}} \text{sign}(s_{dq}(k)) \quad (26)$$

综上所述, 离散控制率中包含着超螺旋滑模观测器的反电动势信息。需要指出的是现实中反电动势中会有一定的残余抖振, 由于滑模运动在滑模面附近存在上下的抖动。

将式(26)两边同时减去 $s_{dq}(k)$, 得到

$$s_{dq}(k+1) - s_{dq}(k) = -(1 - K_a) s_{dq}(k) - K_b e_{dq}(k) + v_{dq}(k) - k_1(k) |s_{dq}(k)|^{\frac{1}{2}} \text{sign}(s_{dq}(k)) \quad (27)$$

则模糊超螺旋滑模观测器原理如图 3 所示。

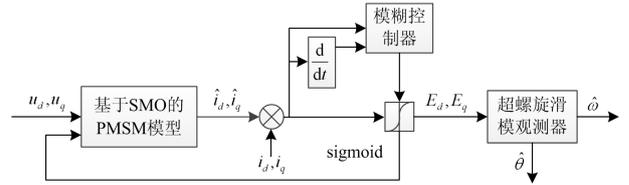


图 3 模糊超螺旋滑模观测器原理框图

Fig. 3 Block diagram of fuzzy super-slip sliding mode observer

3 模糊超螺旋滑模观测器控制率的收敛性

假设滑模运动处在理想条件, 即 $s_{dq}(k+1) = s_{dq}(k) = 0$, 则有 $v_{dq}(k) = K_b e_{dq}(k)$, 即 $v_{dq}(k+1) = K_b e_{dq}(k+1)$, 根据式(15)得到系统保持滑动模态的条件为

$$e_{dq}(k+1) = Ke_{dq}(k) \quad (28)$$

若 $e_{dq}(k+1) \neq Ke_{dq}(k)$, 滑模面附近将不存在滑模切换运动, 此时有

$$v_{dq}(k) \rightarrow K_b e_{dq}(k) + \tilde{v}_{dq}(k) \quad (29)$$

式中, $\tilde{v}_{dq} \approx K_b(e_{dq}(k) - Ke_{dq}(k-1) - T_s k_2(k) \text{sign}(s_{dq}(k)))$ 。由于 $T_s k_2(k) \text{sign}(s_{dq}(k))$ 旨在补偿反电动势估计误差, $K_b e_{dq}(k)$ 有界, 则 $\tilde{v}_{dq}(k)$ 有界。

定义:

$$\delta_{dq}(k) = -K_b e_{dq}(k) + v_{dq}(k) \quad (30)$$

$$\xi_{dq}(k) \text{sign}(s_{dq}(k)) =$$

$$(1 - K_a) s_{dq}(k) + k_1(k) |s_{dq}(k)|^{\frac{1}{2}} \text{sign}(s_{dq}(k)) = \quad (31)$$

$$[(1 - k_a) |s_{dq}(k)| + k_1(k) |s_{dq}(k)|^{\frac{1}{2}}] \text{sign}(s_{dq}(k))$$

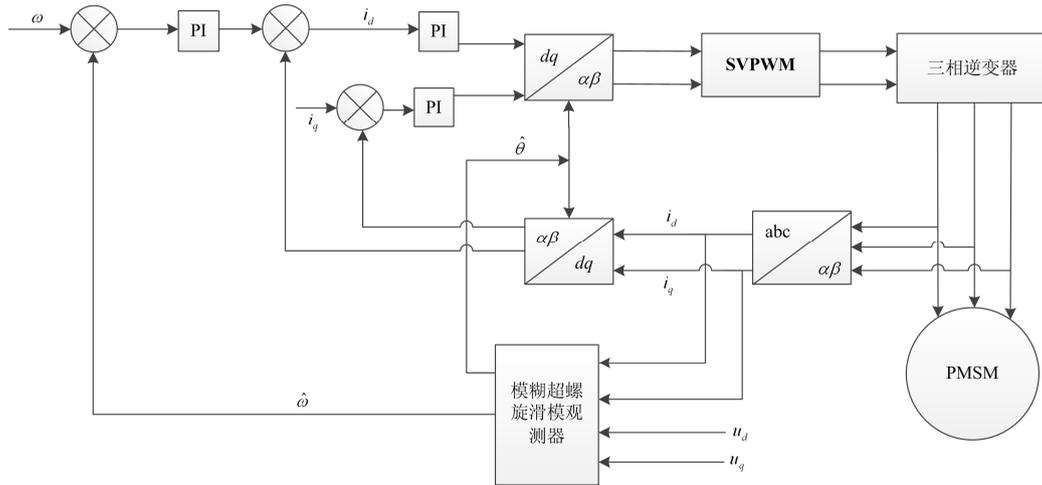


图 4 基于模糊超螺旋滑模观测器的永磁同步电机控制系统框图

Fig. 4 Block diagram of permanent magnet synchronous motor control system based on fuzzy super-spiral sliding mode observer

4 仿真验证

在 Matlab 中搭建仿真模型, 采用步长 ode23tb 算法, 相对误差为 0.000 1, 仿真时间为 0.4 s。各仿真参数如表 2 所示。

表 2 永磁同步电机仿真参数

Table 2 Simulation parameters of PMSM

参数	数值	参数	数值
额定电压/V	311	直轴电感/mH	8.5
额定电流/A	6.2	交轴电感/mH	8.5
额定转速/(r/min)	750	定子电阻/Ω	1.2
额定功率/kW	1.5	转子磁链/Wb	0.175
极对数	4	转动惯量/(kg·m ²)	0.000 8

将式(29)和式(30)代入式(27), 得到

$$s_{dq}(k+1) - s_{dq}(k) = -\xi_{dq}(k) \text{sign}(s_{dq}(k)) + \delta_{dq}(k) \quad (32)$$

由于 $1 - K_a > 0$, 并且 $k_1(k) > 0$, 则可推导得

$$\xi_{dq}(k) = (1 - K_a) |s_{dq}(k)| + k_1(k) |s_{dq}(k)|^{\frac{1}{2}} > 0 \quad (33)$$

式中, $s_{dq}(k) \neq 0$ 。

将式(29)代入式(30), 得到

$$\delta_{dq}(k) = \tilde{v}_{dq}(k) \quad (34)$$

将式(34)代入式(32), 得到

$$s_{dq}(k+1) - s_{dq}(k) = -\xi_{dq}(k) \text{sign}(s_{dq}(k)) + \tilde{v}_{dq}(k) \quad (35)$$

综上所述, 在 $K \geq N$ 有限时间段, 滑模运动被限定在边界 ε 内, 使得 $|s_{dq}(k)| \leq \varepsilon$, $|s_{dq}(k+1)| \leq \varepsilon$, 系统进入滑动模态。

则永磁同步电机控制系统框图如图 4 所示。

基于传统滑模控制系统电流波形与基于改进型滑模控制系统电流波形仿真图如图 5、图 6 所示。

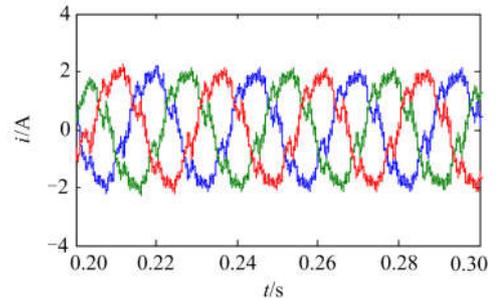


图 5 基于传统滑模控制系统电流波形

Fig. 5 Current waveform based on conventional sliding model control

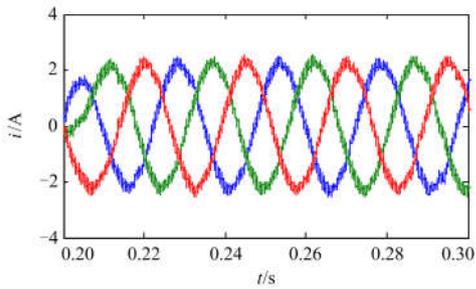


图 6 基于改进型滑模控制系统电流波形

Fig. 6 Current waveform based on modified sliding model control

由图 5、图 6 可以看出,在给定转速 600 r/min、负载转矩为 5 N·m 时,基于改进型的滑模控制系统电流波形相较于传统的更加平滑。

基于传统滑模控制系统转矩波形与基于改进型滑模控制系统转矩波形仿真对比图如图 7、图 8 所示。

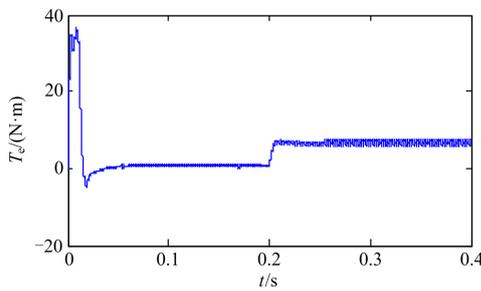


图 7 基于传统滑模控制系统转矩波形

Fig. 7 Torque waveform based on conventional sliding model control

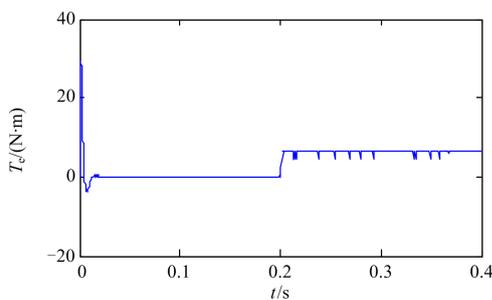


图 8 基于改进型滑模控制系统转矩波形

Fig. 8 Torque waveform based on modified sliding model control

由图 7、图 8 可以看出,在给定转速为 600 r/min、负载转矩在 0.2 s 时刻由 0 N·m 跳变为 5 N·m 时,基于改进型滑膜控制系统的转矩波形相较于传统的转矩超调时间明显减少,脉动现象减弱,最终趋向于零,动态响应时间也明显加快。

基于传统滑模控制系统转速波形与基于改进型滑模控制系统转速波形仿真对比图如图 9、图 10 所示。

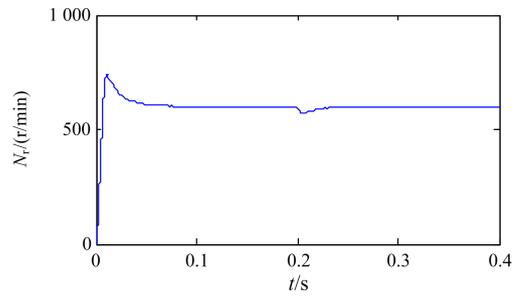


图 9 基于传统滑模控制系统转速波形

Fig. 9 Rotating speed waveform based on conventional sliding model control

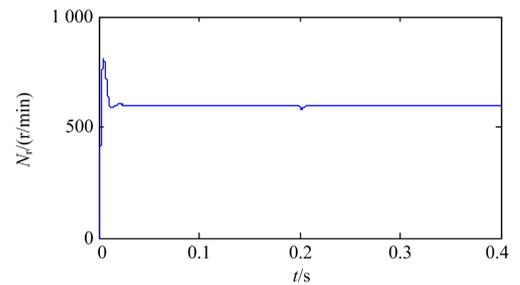


图 10 基于改进型滑模控制系统转速波形

Fig. 10 Rotating speed waveform based on modified sliding model control

由图 9、图 10 可以看出,在给定转速为 600 r/min,负载转矩突变时,基于改进型滑模控制系统相较于传统的,转速超调时间被极大缩短,脉动明显减小,动态响应更加迅速。

基于传统滑模控制系统 q 轴电流波形与基于改进型滑模控制系统 q 轴电流波形仿真对比图如图 11、图 12 所示。

由图 11、图 12 可以看出,在给定转速为 600 r/min,负载转矩在 0.2 s 时刻突变时,由改进型滑模控制系统提取出的 q 轴电流相较于传统的,初始脉动大大减小,超调时间也明显减少,动态响应更快,鲁棒性更强。

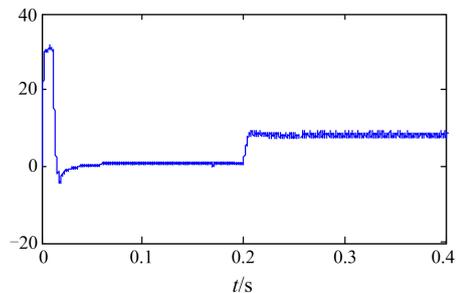


图 11 基于传统滑模控制系统 q 轴电流波形

Fig. 11 i_q waveform based on conventional sliding model control

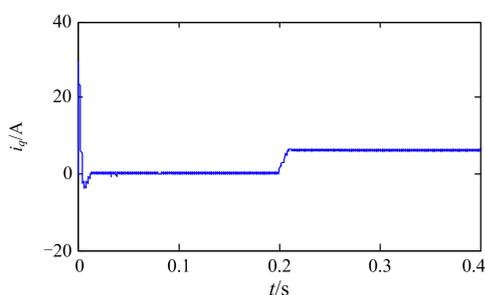
图 12 基于改进型滑模控制系统 q 轴电流波形

Fig. 12 i_q waveform based on modified sliding model control

5 结论

本文采用基于模糊规则的超螺旋滑模观测器来估测转速与转子位置。利用超螺旋控制算法中的串联高阶滑模的连续性, 以改善滑模控制中的抖振问题。但在超螺旋控制算法中, 滑模控制过度依赖边界函数上界。为能准确获得此上界, 在此引入模糊控制器, 利用其不完全依靠数学模型, 而是依靠于模糊规则的控制方法抗干扰性强, 外界扰动和参数变化对控制效果的影响被大大减弱的优点, 对边界函数上界进行估测。实验结果表明整个系统动态响应快, 极大地缩减了原系统变量的超调时间, 大幅度削弱了滑模抖振, 对外部扰动也有很强的适应性。但此控制算法实现过程中, 计算量较大, 下一步将重点研究此算法的优化。

参考文献

- [1] 徐旭, 于海生, 于金鹏, 等. 永磁同步电机驱动的机器人哈密顿与 PD 协调控制[J]. 制造业自动化, 2018, 40(10): 42-47.
XU Xu, YU Haisheng, YU Jinpeng, et al. Robot joint driven by permanent magnet synchronous motor position control based on port-controlled Hamiltonian and PD coordination control method[J]. Manufacturing Automation, 2018, 40(10): 42-47.
- [2] 左月飞, 张捷, 刘闯, 等. 基于自抗扰控制的永磁同步电机位置伺服系统一体化设计[J]. 电工技术学报, 2016, 31(11): 51-58.
ZUO Yuefei, ZHANG Jie, LIU Chuang, et al. Integrated design for permanent magnet synchronous motor servo systems based on active disturbance rejection control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(11): 51-58.
- [3] 陈天翔, 张辑, 彭彦卿. 基于转矩滑模观测器的抗负载扰动控制方法[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(8): 114-118.
CHEN Tianxiang, ZHANG Ji, PENG Yanqing. Anti-load disturbance control method based on torque sliding mode observer[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(8): 114-118.
- [4] RONG W. Total sliding-mode controller for PM synchronous servo motor drive using recurrent fuzzy neural network[J]. Transactions on Industrial Electronics, 2001, 48(5): 926-944.
- [5] 童克文, 张兴, 张昱, 等. 基于新型趋近律的永磁同步电动机滑模变结构控制[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(21): 102-106.
DONG Kewen, ZHANG Xing, ZHANG Yu, et al. Sliding mode variable structure control of permanent magnet synchronous machine based on a novel reaching law[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(21): 102-106.
- [6] 贾洪平, 孙丹, 贺益康. 基于滑模变结构的永磁同步电机直接转矩控制[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(20): 134-138.
JIA Hongping, SUN Dan, HE Yikang. The PMSM DTC based on variable structure sliding mode[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(20): 134-138.
- [7] 崔家瑞, 高江峰, 张波, 等. 永磁同步电机滑模变结构鲁棒控制[J]. 电机与控制学报, 2016, 20(5): 84-89.
CUI Jiarui, GAO Jiangfeng, ZHANG Bo, et al. Robust control of synchronous motor based on sliding mode variable structure[J]. Electric Machines and Control, 2016, 20(5): 84-89.
- [8] 张晓光, 赵克, 孙力, 等. 永磁同步电动机滑模变结构调速系统新型趋近率控制[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(24): 77-82.
ZHANG Xiaoguang, ZHAO Ke, SUN Li, et al. A PMSM sliding mode control system based on a novel reaching law[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(24): 77-82.
- [9] 张志文, 赵健康, 周腊吾, 等. 基于 ILC 算法和 SVM 调制的 PMSM DTC 控制[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(19): 63-70.
ZHANG Zhiwen, ZHAO Jiankang, ZHOU Lawu, et al. PMSM DTC based on ILC algorithm and SVM modulation[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(19): 63-70.
- [10] 王庆龙, 张兴, 张崇巍. 永磁同步电机矢量控制双滑模模型参考自适应系统转速辨识[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(6): 897-902.
WANG Qinglong, ZHANG Xing, ZHANG Chongwei. Double sliding-mode model reference adaptive system speed identification for vector control of permanent magnet synchronous motors[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(6): 897-902.
- [11] 林茂, 李颖晖, 吴辰, 等. 基于滑模模型参考自适应系

- 统观测器的永磁同步电机预测控制[J]. 电工技术学报, 2017, 32(6): 156-163.
- LIN Mao, LI Yinghui, WU Chen, et al. A model reference adaptive system based sliding mode observer for model predictive controlled permanent magnet synchronous motor drive[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(6): 156-163.
- [12] 田猛, 张波文, 周腊吾, 等. 基于RBF神经网络滑模变结构独立变桨控制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(4): 107-114.
- TIAN Meng, ZHANG Bowen, ZHOU Lawu, et al. Study of individual variable pitch control based on RBF neural networks-sliding mode control[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(4): 107-114.
- [13] CHALANGA A, KAMAL S, BANDYOPADHYAY B. A new algorithm for continuous sliding mode control with implementation to industrial emulator setup[J]. Transactions on Mechatronics, 2015, 20(5): 2194-2204.
- [14] 周永勤, 王东旭, 张玉光, 等. 开关磁阻电机模糊滑模观测器间接位置检测[J]. 电机与控制学报, 2013, 17(6): 57-63.
- ZHOU Yongqin, WANG Dongxu, ZHANG Yuguang, et al. Sensorless detection technique on fuzzy sliding mode observer for SRM[J]. Electric Machines and Control, 2013, 17(6): 57-63.
- [15] 张明锐, 宋柏慧, 王佳莹, 等. 基于模型预测控制的固态变压器控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(1): 129-137.
- ZHANG Mingrui, SONG Baihui, WANG Jiaying, et al. Control strategy for solid state transformer based on model predictive control[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(1): 129-137.
- [16] 李林, 宋宗勋, 李峰, 等. 抑制区域间低频振荡的UPFC模糊滑模控制器[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(10): 104-109.
- LI Lin, SONG Zongxun, LI Feng, et al. UPFC fuzzy sliding mode controller for damping inter-area low frequency oscillation[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(10): 104-109.
- [17] 史婷娜, 肖竹欣, 肖有文, 等. 基于改进型滑模观测器的无刷直流电机无位置传感器控制[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(8): 2043-2051.
- SHI Tingna, XIAO Zhuxin, XIAO Youwen, et al. A position sensorless control strategy for BLDCM based observer on an improved sliding mode[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(8): 2043-2051.
- [18] 田素立, 赵瑞杰, 李朝锋, 等. 永磁同步电机角度软锁相环估算方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(18): 108-113.
- TIAN Suli, ZHAO Ruijie, LI Chaofeng, et al. Research of angle soft phase-locked loop estimation method of permanent magnet synchronous motor[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(18): 108-113.
- [19] 丁文, 梁得亮, 罗战强. 两级滤波滑模观测器的永磁同步电机无位置传感器控制[J]. 电机与控制学报, 2012, 16(11): 1-10.
- DING Wen, LIANG Deliang, LUO Zhanqiang. Position sensorless control of PMSM using sliding mode observer with two-stage filter[J]. Electric Machines and Control, 2012, 16(11): 1-10.
- [20] 李正明, 单晓晨, 徐鹏坤. 基于超螺旋滑模控制光伏MPPT的实现[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(21): 32-37.
- LI Zhengming, SHAN Xiaochen, XU Pengkun. Super-twisting sliding mode controller used in photovoltaic system MPPT[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(21): 32-37.

收稿日期: 2018-12-21; 修回日期: 2019-04-24

作者简介:

陶彩霞(1972—), 女, 硕士, 教授, 研究方向为电力电子与电气传动、电机及其控制; E-mail: tao_caixia@mail.lzjtu.cn

赵凯旋(1990—), 男, 通信作者, 硕士, 研究方向为电机及其控制; E-mail: 18215159670@163.com

牛青(1991—), 女, 本科, 研究方向为电机学。E-mail: 763637987@qq.com

(编辑 魏小丽)