

基于 Super-twisting 滑模永磁同步电机驱动的 转速和转矩控制

万东灵, 赵朝会, 王飞宇, 孙 强
(上海电机学院, 上海 200240)

摘 要: 针对永磁同步电机(PMSM)空间矢量的直接转矩控制方案超调频繁、响应时间慢等问题, 将传统的转速 PI 控制器和转矩 PI 控制器替换成 Super-twisting 滑模控制器, 并从理论上证明了 Super-twisting 滑模控制器用在转速环和转矩环上能在有限时间内收敛。借助 MATLAB/Simulink 仿真软件研究了 PMSM 的转矩脉动, 分析了其动态响应速度。仿真结果表明, 在空间矢量直接转矩控制中采用 Super-twisting 滑模控制器与 PI 控制器相比有更小的转矩脉动, 提高了动态响应速度并且解决了超调频繁的问题。

关键词: 永磁同步电机; 直接转矩控制; PI 控制器; Super-twisting; 滑模控制器

中图分类号: TM 301.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2017)10-0042-06

Super-Twisting Sliding Mode Control of Speed and Torque in Permanent Magnet Synchronous Machine Drives

WAN Dongling, ZHAO Chaohui, WANG Feiyu, SUN Qiang
(Shanghai Dianji University, Shanghai 200240, China)

Abstract: Permanent magnet synchronous motor (PMSM) had many problems such as frequent overshoot, slow response time and so on when using direct torque control (DTC) scheme based on space vector modulation. The traditional speed PI controller and torque PI controller were replaced with the super-twisting sliding mode controller and it was proved that the super-twisting sliding mode controller used in speed loop and torque loop could converge in finite time theoretically. The torque ripple and dynamic response speed of PMSM was studied by MATLAB/Simulink simulation software. The simulation results showed that the super-twisting sliding mode controller and PI controller in DTC of space vector compared with smaller torque ripple, high dynamic response speed and solves the problem of frequent overshoot.

Key words: permanent magnet synchronous motor (PMSM); direct torque control (DTC); PI control; super-twisting; sliding mode control

0 引 言

直接转矩控制(Direct Torque Control, DTC)技术是继矢量控制技术之后, 由德国和日本学者提出的一种具有高性能的交流变频调速技术^[1-2]。传统 DTC 技术在转矩环和磁链环采用滞环控制, 具有动态响应快速、控制结构简单和外干

扰鲁棒性强等优点, 但也存在着转矩和磁链脉动大、开关频率不恒定等缺陷^[3-4]。为了解决这些问题, 国内外学者提出了许多改进方法^[5-8]。其中, 文献[8]中提出了一种基于 SVPWM 的 DTC 系统方案。该方案采用预期电压矢量计算单元取代传统直接转矩系统中滞环比较器, 与以前的 SVPWM 控制相比仅需要转速和转矩两个 PI 调节

作者简介: 万东灵(1993—), 男, 硕士研究生, 研究方向为永磁同步电机驱动与控制。

赵朝会(1963—), 男, 博士, 教授, 硕士生导师, 研究方向为电力电子及电力传动。

孙 强(1990—), 男, 硕士研究生, 研究方向为永磁同步电机驱动与控制。

器,优化了控制结构。但特定的 PI 调节器参数往往会对电机参数、转速和负载变化敏感,存在系统鲁棒性不强等问题^[9]。

滑模变结构控制通过不断的切换控制量来实现快速的动态响应,这种控制方案拥有很强的鲁棒性^[10-11]。滑模变结构控制适合系统非线性化程度高,参数可变或者说存在大的扰动。抖振现象一直是滑模变结构控制需要解决的一大难题,抖振的发生会影响控制系统的性能,严重时甚至会造成系统失稳。因此,国内外学者对于该问题提出了滤波、降低切换增益等方法来降低系统抖振^[12-13]。

Super-twisting 滑模变结构的控制理论是在高阶滑模控制的基础上发展而来,其使用控制误差及其误差的积分来构造滑模控制器。这种控制方案具有很好的鲁棒性和动态特性^[14-15]。目前 Super-twisting 滑模控制方案在电机控制中的文献并不多,主要应用在磁链观测器和控制器上^[15-17]。结合 PI 控制器和滑模控制器各自的优缺点,本文将 Super-twisting 滑模控制引入基于空间矢量控制的 PMSM 的 DTC 方案中去,将仅有的两个 PI 调节器替换成 Super-twisting 滑模变结构控制器,并通过理论推导证明这个新的控制系统能够在有限时间内收敛,期望能够解决超调频繁、动态响应时间慢的问题,且希望进一步减少转矩脉动。

1 PMSM 的 SVPWM-DTC 控制简介

如图 1 所示,定子磁链 Ψ_s 在 $\alpha\beta$ 坐标系中的空间相位角为 θ ,定子磁链与转子磁链之间的夹角为 δ , δ 又被称为负载角。定子磁链的旋转速度远快于转子磁链 Ψ_r 的旋转速度,故定子磁链运动到新的位置 Ψ_{sref} 处形成的负载角变化量为图 1 中的 $\Delta\delta$, Ψ_{sref} 的空间相位角为 $\theta + \Delta\delta$,其中 $\psi_{sref} = |\psi_s^*|$, $|\psi_s^*|$ 为定子磁链给定值。

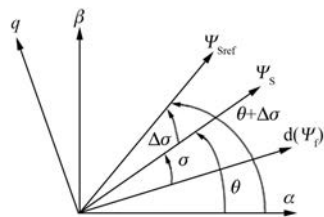


图 1 PMSM 坐标系

PMSM 在 dq 坐标系下的电磁转矩方程如式(1)所示。

$$T_e = \frac{3p}{4L_d L_q} [2\psi_r |\psi_s| L_q \sin\delta - (L_d - L_q) \psi_s^2 \sin 2\delta] \quad (1)$$

式中: L_d, L_q —— d 轴和 q 轴坐标系定子电感;

p ——极对数;

T_e ——电磁转矩。

由于 PMSM 的转子磁链幅值恒定,当定子磁链幅值被控制恒定后,电机的转矩仅与负载角有关,故对式(1)进行求导得到转矩变化和负载角变化关系表达式,如式(2)所示。

$$\frac{dT_e}{dt} = \frac{3p |\psi_s|}{4L_d L_q} \cdot$$

$$[2\psi_r L_q \cos\delta - 2|\psi_s| (L_d - L_q) \cos 2\delta] \frac{d\delta}{dt} \quad (2)$$

由式(1)和式(2)不难看出转矩和转矩的变化量与负载角之间是非线性关系。由式(2)可得转矩的变化量方程(3):

$$\Delta T_e = \frac{3p |\psi_s|}{4L_d L_q} \cdot [2\psi_r L_q \cos\delta - 2|\psi_s| (L_d - L_q) \cos 2\delta] \Delta\delta \quad (3)$$

如果定子磁链被控制成恒定值,并且不考虑定子磁链变化对转矩的影响,那么转矩的增量就取决于负载角的增量,通过控制负载角的变化就达到了控制电磁转矩的目的,从而达到控制整个电机的目的。

PMSM 在 $\alpha\beta$ 坐标系下的电压方程如式(4)所示。

$$\begin{cases} u_\alpha = R_s i_\alpha + \frac{d\psi_\alpha}{dt} \\ u_\beta = R_s i_\beta + \frac{d\psi_\beta}{dt} \end{cases} \quad (4)$$

由图 1 坐标系可将式(4)化为

$$\begin{cases} u_{\alpha ref} = R_s i_\alpha + \frac{|\psi_{sref}| \cos(\theta + \Delta\delta) - |\psi_s| \cos\delta}{\Delta T} \\ u_{\beta ref} = R_s i_\beta + \frac{|\psi_{sref}| \sin(\theta + \Delta\delta) - |\psi_s| \sin\delta}{\Delta T} \end{cases} \quad (5)$$

式中: u_α, u_β —— $\alpha\beta$ 轴电压值;

$u_{\alpha ref}, u_{\beta ref}$ —— $\alpha\beta$ 轴期望电压值;

i_α, i_β —— $\alpha\beta$ 轴电流;

ψ_α, ψ_β —— $\alpha\beta$ 轴定子磁链;

ΔT ——控制周期。

基于上述方程可搭建 SVPWM-DTC 控制框图如图 2 所示。

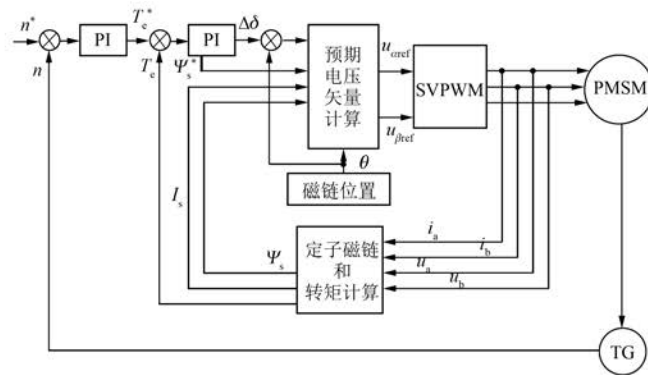


图 2 PMSM 基于 SVPWM 的 DTC 框图

2 Super-twisting 滑模变结构控制理论

Super-twisting 滑模控制 (STSM) 理论来源于高阶滑模控制理论, 是一种二阶滑模控制方案, 其在相平面上的移动轨迹是呈现螺旋扭曲形状且能够在有限的时间内收敛。在滑模面附近, 控制变量收敛到等效控制, 这样便可以避免抖动且保留其他的滑模特性和优点。Super-twisting 滑模控制器被证明对于所有二阶滑模控制器都具有稳定性^[14]。

对于一个动态系统:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = a(x, t) + b(x, t)u \\ y = c(x, t) \end{cases} \quad (6)$$

式中: x ——状态变量;

u ——控制输入量;

y ——输出量;

a, b, c ——未知函数。

就这个动态系统而言, 控制的主要问题就是找到一个反馈控制量 $u = f(y, \dot{y})$ 。这个控制量能够在有限的时间内驱动系统相轨迹到规定的原点 $y = \dot{y} = 0$ 。输入控制量 u 是一个新的状态变量。

输出量 y 是由 Super-twisting 滑模控制器控制, 滑模变量 $s = y \cdot (-y)$ 。

$$u = -k_p |s|^r \text{sgn}(s) + u_1 \quad (7)$$

$$\frac{du_1}{dt} = -k_1 \text{sgn}(s) \quad (8)$$

Super-twisting 滑模控制器不需要滑模变量的阶数, 在滑模面上收敛和稳定的充分必要条件:

$$k_p > \frac{A_m}{B_m}, \quad k_1 \geq \frac{4A_m}{B_m^2} \cdot \frac{B_m(k_p + A_m)}{B_m(k_p - A_m)} \quad (9)$$

式中: $A_m \geq |A|$ 和 $B_m \geq B \geq B_m$, 其中 A 和 B 是输出量 y 的二阶导数的上限和下限。

对于转速和转矩控制器的输出量、输出量的二阶导数可以由式 (10) 推导得到。

$$\frac{d^2 y}{dt^2} = A(x, t) + B(x, t) \frac{du}{dt} \quad (10)$$

PMSM 转子动力学方程为

$$T_e - T_L = J \frac{d\omega_r}{dt} + b\omega_r \quad (11)$$

假设定子磁链恒定, 由式 (11) 可推导出转速的二阶导数为

$$\frac{d^2 \omega_r}{dt^2} = -\frac{1}{J} \left(\frac{dT_L}{dt} - b \frac{d\omega_r}{dt} \right) + \frac{1}{J} \frac{dT_e}{dt} \quad (12)$$

结合式 (10) 可知 $A = -\frac{1}{J} \left(\frac{dT_L}{dt} - b \frac{d\omega_r}{dt} \right)$, $B =$

$\frac{1}{J}$, 转速、转动惯量和负载转矩都是有界的, 由式 (9) 可设计好转速控制器的 k_p, k_1 。

在定子磁通恒定的情况下, 由式 (2) 可获得转矩变化和负载角变化的表达式:

$$\begin{aligned} \frac{dT_e}{dt} &= \frac{3p|\psi_s|}{4L_d L_q} \cdot [2\psi_r L_q \cos\delta - \\ &\quad 2|\psi_s|(L_d - L_q) \cos 2\delta] \frac{d\delta}{dt} \end{aligned} \quad (13)$$

在隐极式 PMSM 中 $L_d = L_q$, 故可将式 (13) 化简为式 (14) 所示的表达式:

$$\frac{dT_e}{dt} = \frac{3p|\psi_s|}{2L_d} \psi_r \cos\delta \frac{d\delta}{dt} \quad (14)$$

对式(14)进行求导化简可得电磁转矩的二阶导数的表达式:

$$\frac{d^2 T_e}{dt^2} = \frac{-3p|\psi_s|\psi_f \sin \delta}{2L_d \Delta T^2} + \frac{3p|\psi_s|\psi_f \cos \delta}{2L_d \Delta T} \cdot \frac{d\Delta \delta}{dt} \quad (15)$$

式(15)中 ΔT 表示系统控制周期,电磁转矩的二阶导数包含 $\Delta\sigma$ 的一次导数。结合式(10)和式(15)不难看出 $A = \frac{-3p|\psi_s|\psi_f\sin\delta}{2L_d\Delta T^2}$, $B = \frac{3p|\psi_s|\psi_f\cos\delta}{2L_q\Delta T}$, 电机极对数、定子磁链给定值、转子磁链、 $\sin\delta$ 、 $\cos\delta$ 、直轴电感及系统控制周期都是有界的,故而就像转速控制器一样,可以通过设计转矩控制器的 K_p 、 K_i 来达到系统稳定的条件。

为了获得转速控制器的表达式,定义转速滑模面函数为

$$s_{\omega} = \omega^* - \omega \quad (16)$$

利用基于 Super-twisting 算法的二阶滑模控制理论^[17],转速控制器的表达式为

$$T_e^* = k_n |s_\omega|^r \text{sgn}(s_\omega) + T_e \quad (17)$$

$$\frac{dT_e}{dt} = k_i \text{sgn}(s_\omega) \quad (18)$$

其中: $k_o, k_i > 0$, 为待设计参数。

为了获得转矩控制器的表达式,定义转矩的滑模面函数为

$$s_T = T_e^* - T_e \quad (19)$$

同样利用基于 Super-twisting 算法的二阶滑模控制基本原理,此时转矩控制器的表达式为

$$\Delta\sigma = k_n |s_T|^r \text{sgn}(s_T) + \Delta\sigma_1 \quad (20)$$

$$\frac{d\Delta\sigma}{dt} = k_i \text{sgn}(s_T) \quad (21)$$

Super-twisting 滑模控制器的第一项是滑模变量的非线性不连续函数,可以通过改变指数 r 来改变非线性量,其中 r 的取值范围是 $0 < r < 1$ 。控制器的第二项是滑模变量的积分函数。将 Super-twisting 滑模变结构控制器应用于基于 SVPWM 的永磁同步电机 DTC 中去得到的控制框图如图 3 所示。

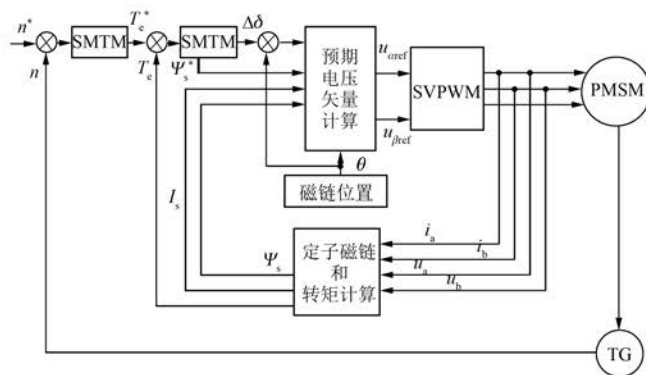


图 3 PMSM 基于 Super-twisting 滑模的 DTC

这两种控制器都采用了非线性量,控制误差绝对值的 r 次方乘以比例常数 K_p 来更好地控制误差。改变 r 实质上也改变了控制器的结构。在式(7)中 $k_p |s|^r \text{sgn}(s)$ 中 s 代表的是滑模变量。在 $r = 1$ 的情况下, $k_p |s|^r \text{sgn}(s)$ 是连续的并且与误差成正比例 ($k_p |s|^r \text{sgn}(s) = k_p s$), 控制器类似于恒定增益的 PI 调节器。 $r=0$ 时, 第一项变成不连续的 $k_p \text{sgn}(s)$, 是一个恒定增益的滑模控制器。滑模变结构控制有非常强的鲁棒性并且能够在有限的时间内收敛。

在两种方法之间找一个平衡,取 r 的值在 0

和 1 之间。在这种控制方案中控制的仍然是滑模变量。当控制误差变化的时候,这个参数修改有明显的滑模 P 增益效果 $[k_p |s| \text{sgn}(s)]$ 。相对于线性比例控制器的输出:当控制误差大于 1 时,控制器的输出减少;当控制误差小于 1 时,输出增加(由于根号的存在,大于 1 时经过根号缩小,小于 1 时经过根号变大)。当 r 接近于 0 时,滑模效果会更强,增益变化较小但对于很小的误差输入来说已经很大了。在这种情况下控制器就像滑模控制器一样并且存在一定的抖振。另一方面,当 r 趋近于 1,控制器运行效果便很接近 PI 调节器,

它的输出与控制误差成比例,抖振消失,但超调可能会产生得更加频繁。当控制误差为 0 时滑动增益也会一直是 0,使得甚至在 r 相对较小时,运行滑动模态时抖动会减小。这两个控制器的组成部分是平滑的,控制的误差接近于 0,比例分量变小,因此在稳态运行时没有抖振。

3 Super-twisting DTC 的仿真研究

本文利用 MATLAB/Simulink 仿真软件将基于 Super-twisting 滑模结构的 PMSM 的 DTC 理论进行了仿真验证。在仿真中使用的 PMSM 定子电阻为 $0.958\ 5\ \Omega$,定子电感为 $5.25\ \text{mH}$,转子磁链为 $0.182\ 7\ \text{Wb}$,转动惯量为 $0.000\ 632\ 9\ \text{kg}\cdot\text{m}^2$,

极对数为 4。在仿真中额定转速设为 $1\ 000\ \text{r/min}$,定子磁链给定值为 $0.23\ \text{Wb}$,控制周期为 $0.000\ 1\ \text{s}$ 。

基于 Super-twisting 滑模变结构的 PMSM 的 DTC 与基于 SVPWM 的 PMSM 的 DTC 相比拥有更快速的动态响应性能,二者的转速响应波形如图 4(a) 和图 5(a) 所示。从二者的波形不难看出使用 PI 控制器的转速波形有着频繁的超调且动态响应时间慢,在约 $0.015\ \text{s}$ 才稳定到给定值,而使用 Super-twisting 滑模控制器的转速波形几乎没有超调且拥有快速的动态响应,在 $0.004\ \text{s}$ 就稳定到了给定值。使用 Super-twisting 滑模控制器与使用 PI 控制器相比有着更小的转矩脉动,二者的转

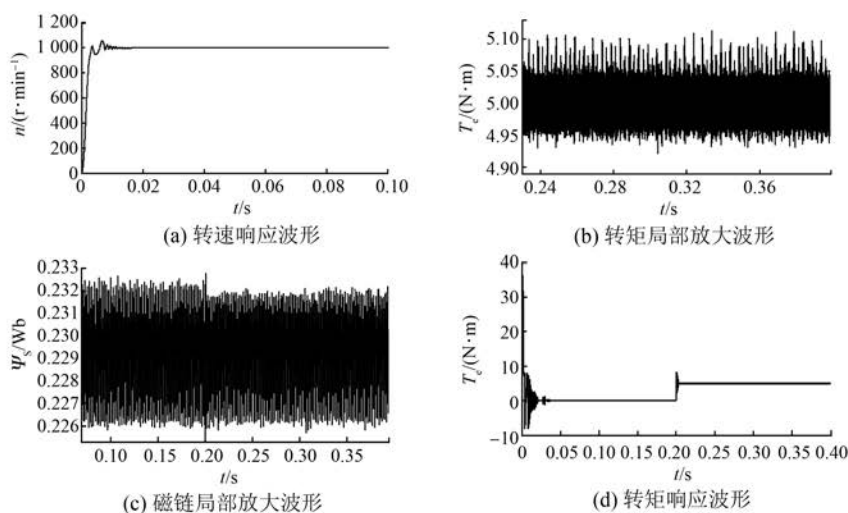


图 4 PI 控制的转速、转矩、磁链响应波形

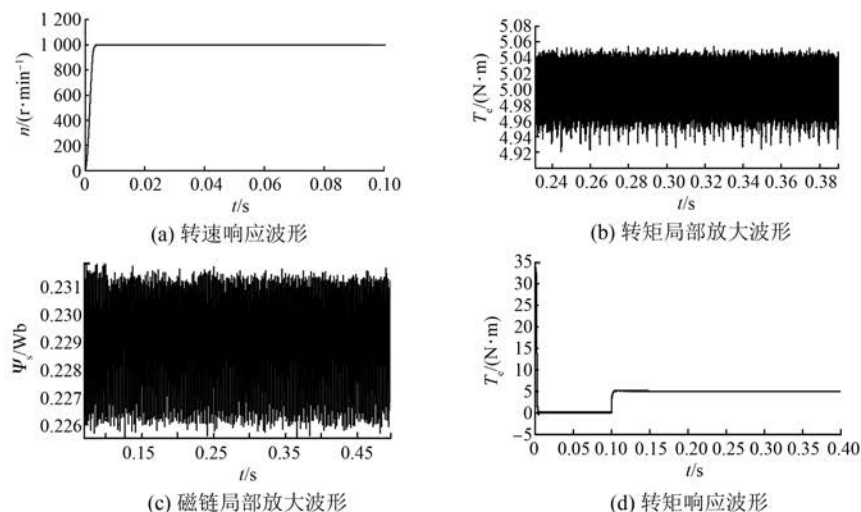


图 5 Super-twisting 滑模控制的转速、转矩、磁链响应波形

矩响应波形如图 4(b) 和图 5(b) 所示。从仿真波形可以看出使用 PI 控制器的转矩波形在系统稳定之后波动范围为 4.92 ~ 5.1, 转矩脉动为 0.018 N·m, 而使用 Super-twisting 控制器的转矩在稳定状态下的波动范围为 4.92 ~ 5.06, 转矩脉动为 0.014 N·m。由于本文并没有磁链环, 故而定子磁链脉动几乎差不多, 定子磁链的波形如图 4(c) 和图 5(c) 所示。

4 结 语

本文将 Super-twisting 滑模控制器应用到了 PMSM 的 DTC 的转速环和磁链环上。这种新的控制方法有着以下优势: (1) 最大程度上结合了滑模控制和 PI 控制的优势, 通过调节参数 r 便能够在 PI 控制器和滑模控制器之间找到一个平衡。(2) 它像线性控制器一样在运行的时候没有抖振, 并且能够像传统滑模控制器那样有着非常强的鲁棒性。(3) 运行时不像 PI 控制器那样有着频繁的超调, 较之 PI 控制器动态响应时间提高了 0.011 s。(4) 转矩脉动减少了 0.004 N·m。(5) 本文提出的 Super-twisting 滑模 DTC 结构简单、易于实现。

【参 考 文 献】

- [1] 胡育文, 高瑾. 永磁同步电动机直接转矩控制系统 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2015.
- [2] 田淳, 胡育文. 永磁同步电机直接转矩控制系统理论及控制方案的研究 [J]. 电工技术学报, 2002, 17 (1): 7-11.
- [3] DEPENDLOCK M. Direct self-control DSC of inverter-fed induction machine [J]. IEEE Trans on Power Electron, 1988, 3(4): 420-429.
- [4] TAKAHASHI L, NOGUEHI T. A new quick-response and high-efficiency control strategy of an induction motor [J]. IEEE Trans on Industry Application, 1986, 22(5): 820-827.
- [5] 杨影, 陈鑫, 涂小卫, 等. 占空比调制的永磁同步电机直接转矩控制 [J]. 电机与控制学报, 2014, 18 (4): 65-71.
- [6] 徐艳平, 钟彦儒. 扇区细分和占空比控制相结合的

- 永磁同步电机直接转矩控制 [J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(3): 102-108.
- [7] TANG L X, ZHONG L M. A novel direct torque control for interior permanent magnet synchronous machine drive with low ripple in torque and flux [J]. IEEE Transaction on Industry Applications, 2003, 39 (6): 1748-1756.
- [8] 李杰, 韩峻峰, 潘盛辉. 基于 SVPWM 的电动汽车直接转矩控制方法研究 [J]. 机电工程, 2014, 31(7): 898-902.
- [9] 贾洪平, 贺益康. 永磁同步电机滑模变结构直接转矩控制 [J]. 电工技术学报, 2006, 21(1): 1-6.
- [10] UTKIN V, GULDNER J, SHI J. Sliding mode control in electromechanical systems [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2009, 8(4/5): 451-473.
- [11] YAN Z, JIN C, UTKIN V I. Sensorless sliding-mode control of induction motors [J]. IEEE Trans Industrial Electronics, 2000, 47(6): 1286-1297.
- [12] XU J X, PAN Y J, LEE T H. A gain scheduled sliding mode control scheme using filtering techniques with applications to multi-link robotic manipulators [J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, 2000, 122(4): 641-649.
- [13] 林岩, 毛剑琴, 操云甫. 鲁棒低增益变结构模型参考自适应滑模控制 [J]. 自动化学报, 2001, 27(5): 665-671.
- [14] LEVANT A. Principles of 2-sliding mode design [J]. Automatica, 2007, 43(4): 576-586.
- [15] CRISTIAN L, ION B. Super-twisting sliding mode control of torque and flux in permanent magnet synchronous machine drives [C] // 39th Annual conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2013: 3171-3176.
- [16] 潘月斗, 陈涛, 陈泽平. 感应电机 Super-twisting 算法定子磁链观测器设计 [J]. 电机与控制学报, 2016 (5): 60-67.
- [17] DIGENNARO S, RIVERA J, CASTILLO T B. Super-twisting sensorless control of permanent magnet synchronous motors [C] // IEEE CDC Conf, 2010: 4018-4023.

收稿日期: 2017-05-31

欢迎投稿 欢迎订阅 欢迎刊登广告