

# Direct Torque Control of Switched Reluctance Motor Based on Super-Twisting Sliding Mode

Ling Wang, Guobao Zhang

School of Automation, Southeast University, Nanjing Jiangsu  
Email: 419061732@qq.com

Received: Jan. 14<sup>th</sup>, 2019; accepted: Jan. 24<sup>th</sup>, 2019; published: Jan. 31<sup>st</sup>, 2019

---

## Abstract

Switched reluctance motor (SRM) has many excellent qualities, so how to restrain the torque ripple to make it more widely used and popularized has become a hot issue in academia. Although the traditional direct torque control (DTC) of switched reluctance motor can restrain the torque ripple to some extent, its restraining effect is limited. And also, there are problems such as big overshoot and weak robustness. In this paper, a direct torque controller based on Super-Twisting sliding mode control is designed. In addition, some improvements have been made to the direct torque controller. Finally, the theory was simulated and verified by using MATLAB/Simulink. The results show that, compared with the traditional direct torque control, the direct torque control of the switched reluctance motor based on the sliding mode control effectively improves the control performance of the system, makes the torque ripple smaller and meets the control requirements.

## Keywords

Switched Reluctance Motor, Direct Torque Control, Sliding Mode Control

---

# 基于Super-Twisting滑模的SRM直接转矩控制

王 玲, 章国宝

东南大学自动化学院, 江苏 南京  
Email: 419061732@qq.com

收稿日期: 2019年1月14日; 录用日期: 2019年1月24日; 发布日期: 2019年1月31日

---

## 摘 要

因为开关磁阻电机(SRM)具有很多优良品质, 所以如何抑制它的转矩抖振使其能够得到更广泛的应用与

推广成了学界的热点问题。传统的开关磁阻电机直接转矩控制(DTC)虽然能在一定程度上抑制电磁转矩脉动,但其抑制效果有限并存在超调过大、鲁棒性较差等问题。对此本文设计了一种基于Super-twisting滑模控制的直接转矩控制器,此外对直接转矩控制器也进行了一定的改进,最后利用MATLAB/Simulink进行建模仿真分析。结果表明,与传统直接转矩控制相比,基于滑模控制策略的开关磁阻电机改进直接转矩控制系统有效地改善了系统的控制性能,使电磁转矩脉动更小,满足了控制需求。

## 关键词

开关磁阻电机, 直接转矩控制, 滑模控制

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

开关磁阻电机(Switched Reluctance Motor, SRM)是一种双凸极结构电机[1],因具有结构简单、成本低,可靠性高等优点,使其能够在恶劣、高速的环境中运行,这也使SRM具有广阔的应用前景。可因为SRM具有较大的转矩脉动,是它难以得到进一步的发展。近年来,不少专家学者将直接转矩控制应用于对SRM转矩抖振的抑制中[2] [3],并取得了不错的控制效果。SRM的直接转矩控制系统一般采用双闭环结构,即外环为转速环,内环为磁链、转矩环,但由于转速环仍采用传统控制,所以控制系统仍存在鲁棒性差、超调量大等缺点。文献[4]将滑模控制引入SRM直接转矩控制的转速环中,使系统具有较好的鲁棒性。但传统的滑模控制本身就具有较大的抖振,为了能有效抑制抖振同时保留传统滑模控制的强鲁棒性,本文将引入高阶滑模控制。此外传统的直接转矩控制虽然对转矩脉动的抑制取得了一定的控制效果,但并不是十分理想。

因此,本文设计了基于Super-twisting滑模的转速控制器,并将其应用于直接转矩控制的双闭环调速系统中,此外对传统的直接转矩扇区进行进一步细分,并增加了相应的电压矢量。相比于普通直接转矩控制,该系统实现了快速响应,对转矩抖振也有明显的抑制效果,拥有较好的控制性能。

## 2. Super-twisting 滑模控制器设计

一般来说,对于一个动态系统,通常有:

$$\frac{dx}{dt} = a(x,t) + b(x,t)u, y = c(x,t) \quad (1)$$

其中,  $u$  为控制输入量;  $x$  为状态变量;  $y$  为控制输出量;  $a, b, c$  为未知函数。

那么,对于式(1)的通用二阶滑模控制式为:

$$u = K_A \operatorname{sgn} k_1 \dot{y} + k_2 |y|^r \operatorname{sgn}(y) + K_B \operatorname{sgn} k_3 \dot{y} + k_4 |y|^r \operatorname{sgn}(y) \quad (2)$$

其中,  $\operatorname{sgn}$  为符号函数;  $y$  为系统输出量; 增益  $K_A$ 、 $K_B$  为负值;  $r$  为指数调节因子。

由此可知,通过选择特定的增益可以得到不同的控制器。所有二阶滑模控制器稳定性的证明由文献[5]给出。

Super-twisting 滑模控制是一种二阶滑模控制方案,其控制思想是将开关作用的控制量  $u$  应用到高阶

导数中, 这样能有效抑制传统滑模控制中产生的抖振, 并能继承传统滑模控制优秀的动态响应和鲁棒性 [6] [7]。本文中将其引入对转速环的控制中。Super-twisting 滑模控制律包含了两个部分: 一个不连续的滑模变量函数和一个连续导数的函数, 分别如式(3)、(4)所示。

$$u = -K_p |y|^r \operatorname{sgn}(y) + u_1 \tag{3}$$

$$\frac{du_1}{dt} = -K_I \operatorname{sgn}(y) \tag{4}$$

其中, 增益  $K_p$ 、 $K_I$  均为正值;  $r=0.5$  且滑模变量为  $s = y^* - y$ 。

其在有限时间内收敛且稳定的充分条件[8]是:

$$K_p > \frac{A_M}{B_m}, K_I \geq \frac{4A_M}{B_m^2} \cdot \frac{B_M(K_p + A_M)}{B_m(K_p - A_M)} \tag{5}$$

其中,  $A_M$  为  $A$  的绝对值的最大值;  $B_m$  为  $B$  的最小值;  $B_M$  为  $B$  的最大值;  $A$ 、 $B$  为状态变量  $x$  的相关函数并由输出量  $y$  关于时间  $t$  的二阶导数来定义:

$$\frac{d^2y}{dt^2} = A(x, t) + B(x, t)u \tag{6}$$

对于开关磁阻电机系统而言, 其满足运动方程:

$$T_e = J \frac{d\omega}{dt} + D\omega + T_L \tag{7}$$

其中,  $T_e$  为电磁转矩;  $T_L$  为负载转矩;  $J$  为转动惯量;  $D$  为摩擦系数;  $\omega$  为转子角速度。

对式(7)中的转子角速度进行二次求导, 整理后可得:

$$\frac{d^2\omega}{dt^2} = -\frac{1}{J} \left( \frac{dT_L}{dt} + D \frac{d\omega}{dt} \right) + \frac{1}{J} \frac{dT_e}{dt} \tag{8}$$

根据式(6), 则令此时  $A = -\frac{1}{J} \left( \frac{dT_L}{dt} + D \frac{d\omega}{dt} \right)$ ,  $B = \frac{1}{J}$ 。

由于电机的角速度  $\omega$ , 负载转矩  $T_L$ , 转动惯量  $J$  均为有限值, 则一定存在合适的  $K_p$ 、 $K_I$  值, 使其满足 Super-twisting 控制器能在有限时间内收敛且稳定的充分条件。

基于以上所阐述的 Super-twisting 滑模控制理论, 转速环滑模控制器可以设计为:

$$T_e^* = k_p |s_\omega|^r \operatorname{sgn}(s_\omega) + T_e \tag{9}$$

$$\frac{dT_e^*}{dt} = k_I \operatorname{sgn}(s_\omega) \tag{10}$$

其中,  $s_\omega$  为转子角速度的滑模面函数,  $s_\omega = \omega^* - \omega$ 。

### 3. 改进的直接转矩控制

由 SRM 的电压平衡方程可知:

$$U_k = R_k i_k + \frac{d\psi_k}{dt} \tag{11}$$

其中,  $U_k$ 、 $R_k$ 、 $i_k$  和  $\psi_k$  分别为第  $k$  相绕组的电压、电阻、电流和磁链。由于通常情况下, 绕组电阻极小, 所以忽略绕组电阻的压降, 并离散化后可得:

$$\psi(k) = \psi(k-1) + U(k)T_s \quad (12)$$

其中,  $T_s$  为采样周期。将其用矢量三角形的方式描述可得到一个采样周期内磁链的变化值为:

$$\Delta\psi_s = |\psi_s(k)| - |\psi_s(k-1)| \approx |U(k)T_s| \cos\theta_{\psi} \quad (13)$$

在扇区  $k$  中, 当前电压矢量为  $V_k$ , 若要增大磁链可选择电压矢量  $V_{k+1}$ , 若要减小磁链可选择电压矢量为  $V_{k+2}$ 。则磁链幅值的变化值可表示为:

$$\Delta\psi_{s-increase} = |V(k+1)|T_s \cos\theta_{\psi 1} \theta_{\psi 1} \in (30^\circ, 90^\circ) \quad (14)$$

$$\Delta\psi_{s-decrease} = |V(k+2)|T_s \cos\theta_{\psi 2} \theta_{\psi 2} \in (90^\circ, 150^\circ) \quad (15)$$

当  $\theta \in (0^\circ, 20^\circ)$  时,  $V_{k+1}$  对应的夹角  $\theta_{\psi 1} \in (70^\circ, 90^\circ)$ ,  $V_{k+2}$  对应的夹角  $\theta_{\psi 2} \in (130^\circ, 150^\circ)$ , 根据余弦三角函数的特性可知,  $\cos\theta_{\psi 1}$  的值比  $\cos\theta_{\psi 2}$  的值小得多, 这就会导致在一个采样周期内, 磁链幅值的增加与减小存在明显的不同, 增加量很少但减少量却很多, 使得磁链出现明显的不对称性导致出现转矩抖振。同理, 当  $\theta \in (40^\circ, 60^\circ)$  时, 磁链的增加量明显大于磁链的减小量, 而  $\theta \in (20^\circ, 40^\circ)$  时增加量和减小量相差不大。所以根据这种特性, 本文将每一扇区以  $20^\circ$  为界进一步细分为三个小扇区, 则原来的 6 个传统扇区可重新划分为 18 个扇区。

另外, 以传统 DTC 的第一扇区为例, 该区域的电压矢量为  $V_1(1, 0, -1)$ , 当需要转矩和磁链均增大时, 选取电压矢量  $V_2(0, 1, -1)$ , 其作用效果应为 A 相转矩减小, B 相转矩增大, C 相转矩不变, 而实际上由于处在换相区, A 相转矩的减小量比 B 相转矩的增加量大, 使得该区域内合成瞬时转矩总体是减小的, 出现转矩抖振不能满足转矩控制要求。因此可以增加电压矢量  $V(1, 1, -1)$  使 B 相提前导通, 以便在换相时达到期望的转矩。所以, 根据对称性本文选择增加六个有效电压矢量, 即总共 12 个有效电压矢量。

综上可以得出相应改进后基于 18 个扇区的开关矢量表。观察可发现, 扇区 3、4, 扇区 6、7, 扇区 9、10, 扇区 12、13, 扇区 15、16 和扇区 18、1 根据控制规则所选择电压矢量相同, 因此可将其合并。最终可以得到本文改进后的 12 扇区电压矢量图, 其相应的开关表如表 1 所示。

**Table 1.** Switching vector table based on 12 sections

**表 1.** 基于 12 扇区细分并优化电压矢量后的开关矢量表

变化需求 扇区位置	$T \uparrow  \psi  \uparrow$	$T \uparrow  \psi  \downarrow$	$T \downarrow  \psi  \uparrow$	$T \downarrow  \psi  \downarrow$
$N = k$	$V_k$	$V_{k+4}$	$V_{k-2}$	$V_{k-6}$

## 4. 系统仿真

最终依据本文理论所设计的基于 Super-twisting 滑模的 SRM 直接转矩控制器, 主要由 SRM 本体、功率转换器、扇区判断、开关矢量表、转速控制器等组成, 其系统基本原理结构图如图 1 所示。该控制系统采用了双闭环控制结构, 外环为转速环, 目标转速和实际转速通过 Super-twisting 滑模控制器的调节得到系统的参考转矩; 内环为转矩、磁链环, 将转矩和磁链误差根据直接转矩控制原理, 得到控制功率变换器的控制信号以实现 SRM 的控制。

为了验证本文所设计的控制系统的有效性, 在 MATLAB/Simulink 中进行仿真实验。仿真中采用了三相 12/8 开关磁阻电机作为电机本体, 功率变换器为不对称半桥电路模型, 其系统仿真图如图 2、图 3 所示, 各参数设置如下: 转动惯量  $J$  为  $0.082 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ ; 负载转矩  $T_L$  为  $1 \text{ N}\cdot\text{m}$ ; 摩擦系数  $D$  为  $0.01$ ; 磁链给定值为  $0.25 \text{ Wb}$ , 磁链滞环为  $0.01 \text{ Wb}$ ; 转矩滞环为  $0.1 \text{ N}\cdot\text{m}$ ; 设定的目标转速为  $500 \text{ r/min}$ 。

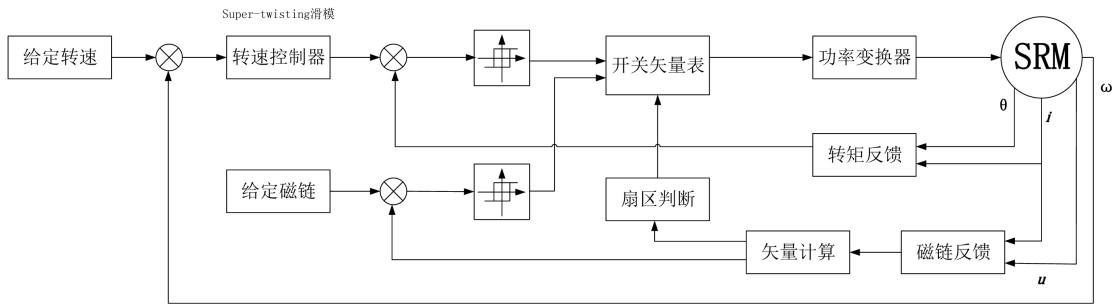


Figure 1. Basic principle structure diagram of SRM system  
 图 1. SRM 系统基本原理结构图

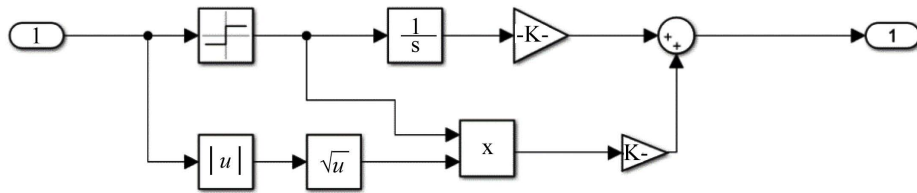


Figure 2. Speed control module based on super-twisting  
 图 2. Super-twisting 滑模转速控制模块

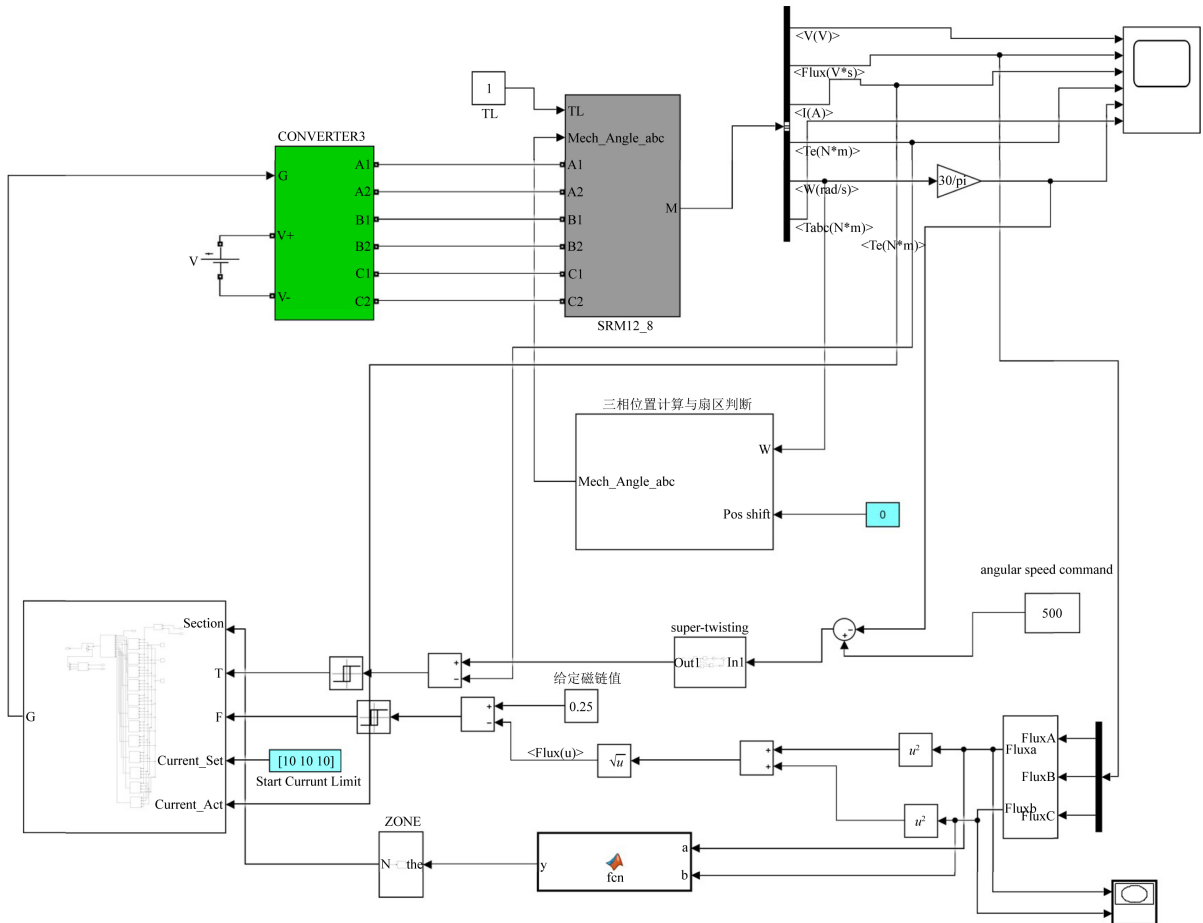


Figure 3. Simulation model of SRM direct torque control system based on Super-twisting sliding mode  
 图 3. 基于 Super-twisting 滑模的 SRM 直接转矩控制系统的仿真模型

采用本文所设计的控制器的磁链轨迹、转速及转矩波形分别如图 4、图 5 和图 6 所示。

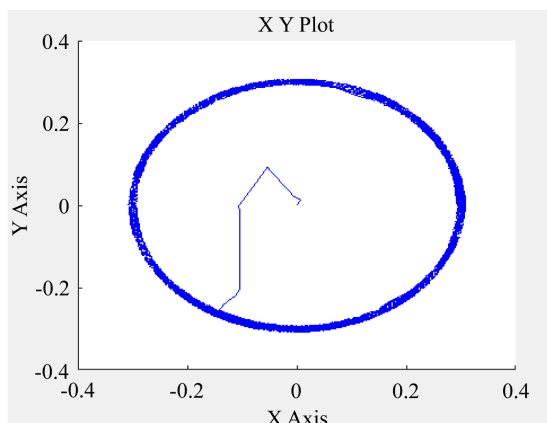


Figure 4. Flux-linkage track  
图 4. SRM 磁链轨迹

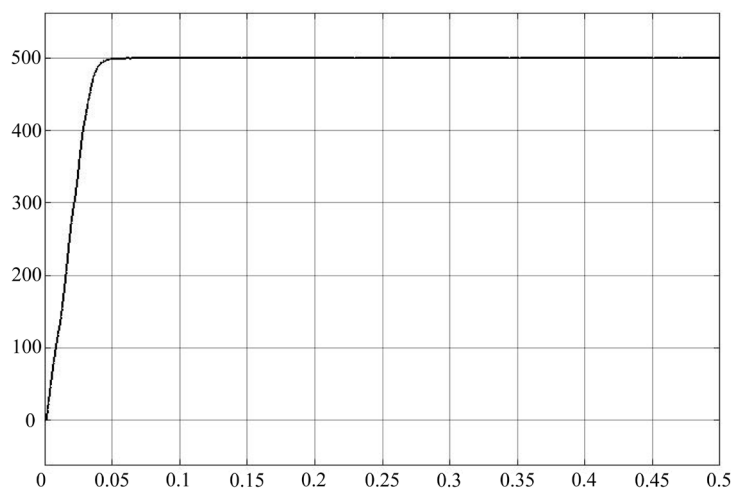


Figure 5. Speed waveform  
图 5. SRM 转速响应波形

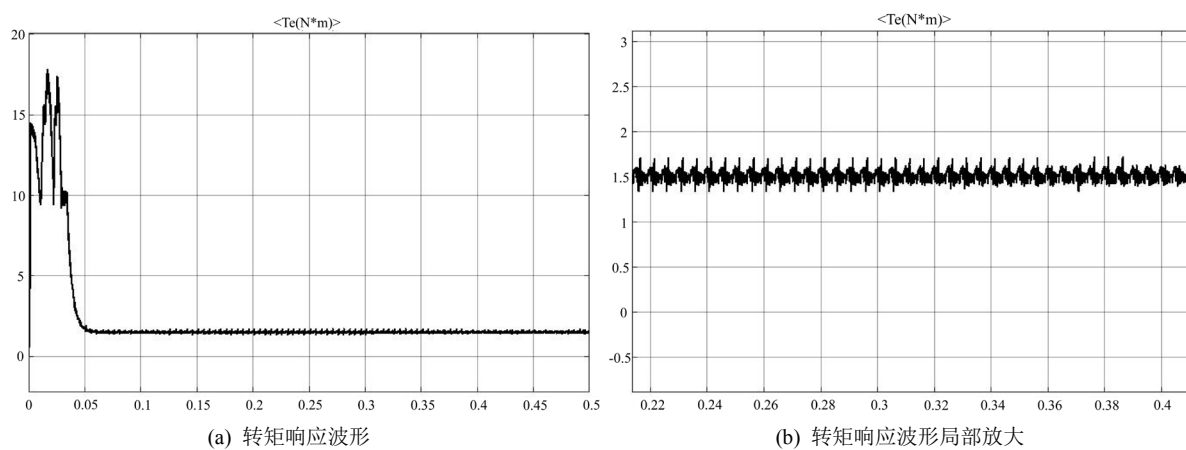


Figure 6. Output torque waveform  
图 6. SRM 转矩响应波形

从上述图中可以看出, 采用本文所设计的控制系统的 SRM 转速响应比较快, 超调较小, 波形较为稳定平滑; 磁链近似为一个圆形可知, 该控制器对转矩脉动有较好的抑制效果; 转矩响应也能较快的到达稳态, 稳定后转矩脉动很小仅在  $1.5 \pm 0.2$  N·m 左右浮动, 基本达到了预想的控制效果。

## 5. 结论

本文在开关磁阻电机的转速环引入了 Super-twisting 算法并改进了传统的直接转矩, 设计出了一种基于 Super-twisting 滑模算法的开关磁阻电机新型直接转矩控制器。在 MATLAB/Simulink 中进行建模仿真分析, 其结果表明该方法能在有效地抑制电磁转矩脉动的同时, 兼顾系统的转速响应, 提高了电机运行的稳定性。

## 参考文献

- [1] 吴红星. 开关磁阻电机系统理论与控制技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
- [2] Annegret, K., Andreas, H. and Rik, W. (2017) Direct Instantaneous Torque and Force Control: A Control Approach for Switched Reluctance Machines. *IET Electric Power Applications*, **11**, 935-943.  
<https://doi.org/10.1049/iet-epa.2016.0515>
- [3] 王玉林. 开关磁阻电机直接瞬时转矩控制的研究[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2016.
- [4] 王勉华, 邢幸. 开关磁阻电机直接转矩滑模变结构控制[J]. 电机与控制应用, 2017, 44(6): 35-39.
- [5] Levant, A. (2007) Principles of 2-Sliding Mode Design. *Automatica*, **43**, 576-586.  
<https://doi.org/10.1016/j.automatica.2006.10.008>
- [6] Cristian, L. and Ion, B. (2013) Super-Twisting Sliding Mode Control of Torque and Flux in Permanent Magnet Synchronous Machine Drives. *39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Vienna, 10-13 November 2013, 3171-3176.
- [7] Rafiq, M., Rehman, S.U., Rehman, F.U., et al. (2012) A Second Order Sliding Mode Control Design of a Switched Reluctance Motor Using Super Twisting Algorithm. *Simulation Modelling Practice & Theory*, **25**, 106-117.  
<https://doi.org/10.1016/j.simpat.2012.03.001>
- [8] 李鹏, 郑志强. 基于类二次型 Lyapunov 函数的 Super-Twisting 算法收敛性分析[J]. 控制与决策, 2011, 26(6): 949-952.

### 知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>  
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2161-8801, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>  
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: [csa@hanspub.org](mailto:csa@hanspub.org)