

# 改进型相邻交叉耦合结构的多电机同步控制

马志刚<sup>1</sup>, 赵志强<sup>1</sup>, 王保云<sup>2</sup>

(1.深圳职业技术学院, 深圳 518055; 2.云南师范大学, 昆明 650500)

**摘要:** **目的** 为了提高凹版印刷机电轴传动系统的可靠性以及控制精度, 提出一种相邻交叉耦合滑模变结构多电机同步控制方法。**方法** 基于相邻交叉耦合补偿基本原理建立相邻交叉耦合控制结构, 并将滑模变结构引入到相邻交叉耦合结构中, 通过饱和函数削弱抖振。**结果** 仿真结果表明, 改进型相邻交叉耦合多电机同步控制时系统在 0.004 s 便进入了稳定状态, 在初期的 0.002 s 时间内同步误差出现了一定程度的波动, 但从总体来看误差百分比很小。**结论** 与其他控制策略相比, 基于相邻交叉耦合系统的滑模变结构控制下其系统同步误差较小, 具有更高的同步控制精度、更强的削弱抖振能力, 同时系统具有较强的鲁棒性。

**关键词:** 凹版印刷机; 多电机同步控制; 相邻交叉耦合; 滑模变结构

**中图分类号:** TB486; TP271.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2017)03-0114-05

## Multi-Motor Synchronous Control of Improved Adjacent Cross Coupling Structure

MA Zhi-gang<sup>1</sup>, ZHAO Zhi-qiang<sup>1</sup>, WANG Bao-yun<sup>2</sup>

(1.Shenzhen Polytechnic, Shenzhen 518055, China; 2.Yunnan Normal University, Kunming 650500, China)

**ABSTRACT:** The work aims to propose a multi-motor synchronous control method for adjacent cross-coupled sliding mode variable structure, so as to improve the reliability and control accuracy of gravure printing machine's electronic axis transmission system. Based on the basic principle of adjacent cross coupling compensation, the adjacent cross coupling control structure was established, and the sliding mode variable structure was introduced to the adjacent cross coupling structure. The chattering was weakened by the saturation function. The simulation results showed that, during the multi-motor synchronous control of improved adjacent cross coupling, the system entered a stable state at 0.004 s. Within the early 0.002 s, synchronization error was subject to certain fluctuation, but generally, the percentage error was very small. Compared with other control strategies, the system synchronization error is small under the control of sliding mode variable structure based on adjacent cross coupling system, with higher synchronization control precision and stronger chattering weakening ability. Meanwhile, the system has strong robustness.

**KEY WORDS:** gravure printing machine; multi-motor synchronous control; adjacent cross coupling; sliding mode variable structure

传统的机组式印刷机通常采用的是机械轴进行传动, 即通过电动机通过皮带带动机械长轴, 由长轴通过机组的齿轮、凸轮和连杆等部件带动印刷滚筒等执行机构实现连续动作, 从而完成印刷<sup>[1-5]</sup>。该传动方式随着设备投入时间的不断延长, 在工作过

程中不断出现故障, 对于系统的维护造成困难, 增加了成本, 并且降低了生产效率。此外各机组轴与机械长轴很难保持一定的同步运动关系, 其印刷精度很难被控制<sup>[6-7]</sup>。

近年来, 随着电子技术的飞速发展, 利用相互独

收稿日期: 2016-08-19

作者简介: 马志刚(1979—), 男, 硕士, 深圳职业技术学院讲师, 主要研究方向为嵌入式系统软/硬件、计算机控制。

立的电机驱动系统带动传统的机械长轴传统，通过先进的控制策略使相互独立的电机实现同步控制，保证各版相位严格同步，从而减小传统机械传动中传动轴、齿轮以及凸轮等机构传动带来的积累误差。电子轴同步运动控制是对系统中多组电机进行协调控制，保证各电机的速度和位置能够保持同步<sup>[8-9]</sup>。

目前，比较常用的多轴同步控制技术包括主/从控制、“虚拟总轴”控制、交叉耦合控制、相邻交叉耦合控制、偏差耦合控制等<sup>[10-13]</sup>。概括地讲，多轴同步控制方法可分为：主从式和平衡式 2 种。主从式同步控制主要包括“虚拟主轴”控制、主/从控制等，即选定“任意轴”或“虚拟轴”作为主动轴，剩余轴作为从动轴。每个控制周期，所有从动轴根据主动轴的位置信号调整自身位置偏差。各从动轴之间互不影响而且主动轴不受从动轴影响。平衡式同步控制主要包括偏差耦合、交叉耦合等，系统中每根轴既是主动轴又是从动轴，即无固定主动轴，各轴之间相互同步<sup>[14]</sup>。二者相比，主从同步控制结构简单，比较容易实现，但是控制精度不高；平衡式同步控制则具有相对较高的控制精度，但算法比较复杂。而相邻交叉耦合控制，只考虑相邻 2 个轴的运动状态，因此控制结构简单，并且具有比较好的同步性能。

在多电机同步控制中，传统 PID 控制容易受参数以及外部扰动变化影响，很难达到令人满意的效果。滑模变结构控制（SMC）因其响应速度快、对参数和扰动变化不敏感、不需进行在线辨识等优点，在各种控制中被广泛应用，因此文中将滑模变结构控制方法引入到相邻交叉耦合控制中，进而提高多电机同步控制精度，提高系统的鲁棒性。

### 1 凹版印刷机套色系统结构

机组式凹版印刷机套色系统结构见图 1，系统主要包括放卷、印刷、收卷三大部分组成。生产过程为：放卷→张力控制→第一印刷→干燥→套色→调整第 2 印刷……第  $n$  色印刷→干燥→牵引→收卷。

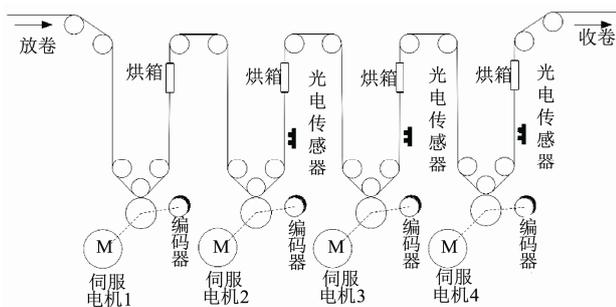


图 1 凹版印刷机套色系统结构

Fig.1 Chromatography system of gravure printing machine

对于电子轴印刷生产过程中，对于套印误差的消除通常采用对各电机速度进行控制实现，因此轴与轴之间的同步误差成了影响印刷精度的主要因素。为了提高各个印刷辊之间的同步精度可以通过控制器对所驱动的电机进行精确控制。

### 2 相邻交叉耦合结构

相邻交叉耦合控制是每一台电机与其相邻的电机状态误差进行补偿，例如在对第  $i$  台电机进行转速的跟踪误差进行控制之外，还要对此台电机与第  $i-1$  台和  $i+1$  台电机进行同步误差控制<sup>[15]</sup>。

第  $i-1, i, i+1$  台电机的跟踪误差为：

$$\begin{cases} e_{(i-1)(i-1)} = \omega^* - \omega_{i-1} \\ e_{ii} = \omega^* - \omega_i \\ e_{(i+1)(i+1)} = \omega^* - \omega_{i+1} \end{cases} \quad (1)$$

式中： $\omega^*$ 为电机参考速度； $e_{(i-1)(i-1)}$ ， $e_{ii}$ ， $e_{(i+1)(i+1)}$ 分别为第  $i-1, i, i+1$  台电机的跟踪误差； $\omega_{i-1}$ ， $\omega_i$ ， $\omega_{i+1}$ 分别为第  $i-1, i, i+1$  台电机反馈转速；

第  $i$  台电机和第  $i-1$  台电机的同步误差为：

$$\begin{aligned} e_{i(i-1)} &= e_{ii} - e_{(i-1)(i-1)} \\ &= \omega^* - \omega_i - (\omega^* - \omega_{i-1}) \\ &= -(\omega_i - \omega_{i-1}) \end{aligned} \quad (2)$$

第  $i$  台电机和第  $i+1$  台电机的同步误差为：

$$\begin{aligned} e_{i(i+1)} &= e_{ii} - e_{(i+1)(i+1)} \\ &= \omega^* - \omega_i - (\omega^* - \omega_{i+1}) \\ &= -(\omega_i - \omega_{i+1}) \end{aligned} \quad (3)$$

对  $n$  台电机进行同步控制，将第  $n$  台电机和第 1 台电机进行耦合，从而组成了相邻交叉耦合控制系统。

### 3 控制器的设计

#### 3.1 跟踪误差控制数学模型

假设电机的状态变量为：

$$\begin{cases} x_1 = \omega^* - \omega \\ x_2 = \dot{x}_1 = -\dot{\omega} \end{cases} \quad (4)$$

式中： $\omega^*$ 为实际转速； $\omega$ 为反馈转速； $x_1$ 为跟踪误差。

由永磁同步电机数学模型可得：

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -\dot{\omega} = \frac{p}{J} \left( \frac{3}{2} p \psi_f i_q - T_L \right) \\ \dot{x}_2 = -\ddot{\omega} = -\frac{3p^2 \psi_f}{2J} \frac{di_q}{dt} \end{cases} \quad (5)$$

式中： $p$ 为极对数； $J$ 为转动惯量； $T_L$ 为负载转矩； $\psi_f$ 为永磁体磁通； $i_q$ 为  $q$  轴定子电流。

由式(5)可以将电机跟踪误差控制表示为:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = -bu_1 \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $u_1$  为跟踪误差控制器,  $b = \frac{3p^2\psi_f}{2J}$ 。

### 3.2 同步误差控制数学模型

对于第  $i-1$  台和第  $i+1$  台电机取状态变量:

$$\begin{cases} e_1 = -(\omega_i - \omega_{i-1}) \\ e_2 = \dot{e}_1 = -(\dot{\omega}_i - \dot{\omega}_{i-1}) \end{cases} \quad (7)$$

由永磁同步电机数学模型得:

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = -\frac{3p^2\psi_f}{2J}(i_{q(i)} - i_{q(i-1)}) + \frac{P}{J}(T_{1(i)} - T_{1(i-1)}) \\ \dot{e}_2 = \ddot{e}_1 = -\frac{3p^2\psi_f}{2J} \frac{d(i_{q(i)} - i_{q(i-1)})}{dt} \end{cases} \quad (8)$$

由式(8)将电机同步误差控制表示为:

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = e_2 \\ \dot{e}_2 = -bu_2 \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $u_2$  为同步误差控制器,  $b = \frac{3p^2\psi_f}{2J}$ 。

### 3.3 控制器设计

由式(6)和式(9)可以看出跟踪误差与同步误差数学模型相同, 因此控制器  $u_1$  与控制器  $u_2$  也可以相同, 因此式(6)和式(9)可以统一表示为:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = -bu \end{cases} \quad (10)$$

设计的滑模面为:

$$s = \text{sign}(x_1 + rx_2) \frac{\sqrt{c(c+8|x_1+rx_2|)} - c}{2} + rx_2 \quad (11)$$

式中:  $\text{sign}$  为符号函数;  $c, r$  为大于 0 的常数。

对上式求导可得:

$$\dot{s} = \frac{\partial s}{\partial x_1} \dot{x}_1 + \frac{\partial s}{\partial x_2} \dot{x}_2 = \frac{8cx_1 + 8cr\dot{x}_2}{4\sqrt{c(c+8|x_1+rx_2|)}} + r\dot{x}_2 \quad (12)$$

将式(10)代入式(12)中得:

$$\begin{aligned} s\dot{s} &= \frac{(8cx_1 + 8cr\dot{x}_2)s}{4\sqrt{c(c+8|x_1+rx_2|)}} + r\dot{x}_2s \\ &= \frac{(8cx_2 - 8crbu)s}{4\sqrt{c(c+8|x_1+rx_2|)}} - rbu s \\ &< \frac{(8cx_2 - 8crbu)s}{4c} - rbu s \\ &= s(2x_2 - 3rbu) \end{aligned} \quad (13)$$

当滑模控制能够到达滑模面时便能满足条件  $s\dot{s} < 0$ , 结合式(13)得到设计的控制器为:

$$u = \frac{2}{3rb} [x_2 + \varepsilon \text{sign}(s) + \eta s] \quad (14)$$

将上式(14)代入到式(13)得:

$$\begin{aligned} s\dot{s} &< s(2x_2 - 3rbu) \\ &= s[-2\varepsilon \text{sign}(s) - 2\eta s] \\ &= -2\varepsilon |s| - 2\eta s^2 < 0 \end{aligned} \quad (15)$$

由式(16)可以看出, 当滑模面  $s$  取滑模面式(11), 控制器  $u$  取式(14)时,  $s\dot{s}$  在全局内都满足  $s\dot{s} < 0$  的到达条件, 由此可保证在控制过程中系统不会出现超调量, 能够提高系统控制效率。

从式(14)可以看出, 设计的控制器中  $u$  中含有切换函数  $\text{sign}(n)$ , 为了削弱抖振, 此处采用饱和函数取代切换函数, 饱和函数为:

$$K(s, \delta) = \begin{cases} \frac{s}{\delta} & |s| \leq \delta \\ \text{sign}(s) & |s| > \delta \end{cases} \quad (16)$$

## 4 仿真实验及分析

为验证文中设计方法的有效性, 选用 4 台相同电机进行了相关的仿真分析。在 Matlab/Simulink 环境下对相邻交叉耦合控制中分别引入 PI 控制和滑模变结构控制时多电机同步控制进行仿真。为了减小试验中的数据组数, 在同步误差上只表示了电机 1 的速度与电机 2, 3, 4 3 个电机之间的速度。为了验证所提方法的鲁棒性, 系统进入稳定后在 0.009 s 处对电机 3 引入一个矩形方波干扰。仿真结果见图 2 和图 3。其中图 2 为相邻交叉耦合结构中引入 PI 控制下时多轴同步控制误差, 图 3 为相邻交叉耦合滑模变结构控制时的多轴同步控制误差, 将同步误差用其相对于参考速度的百分比进行表示。

由图 2 可以看出, 相邻交叉耦合 PI 控制下, 系统在启动的初始阶段, 即 0~0.002 s 时各电机之间同步误差出现较大变化, 在 0.02 s 后系统慢慢进入稳态。系统在 0.009 s 时电机间同步控制因受到扰动干扰, 出现了 -0.01%~0.01% 的同步误差浮动, 该浮动持续了约 0.004 s, 由此可以看出该控制方法抗干扰能力比较弱。由图 3 可以看出, 基于相邻交叉耦合结构与滑模变结构控制下, 系统在启动阶段虽然也出现误差波动, 但明显远远小于相邻交叉 PI 控制下的同步误差, 系统在很短的 0.004 s 便进入了稳定状态, 在初期的 0.002 s 时间内同步误差出现了一定程度的波动但从总体来看误差百分比很小。系统在 0.009 s 时虽然存在一定程度的干扰, 但电机同步误差并未出现较大波动, 由此可以看出该控制方法具有很好的抗干扰能力, 拥有较强的鲁棒性。

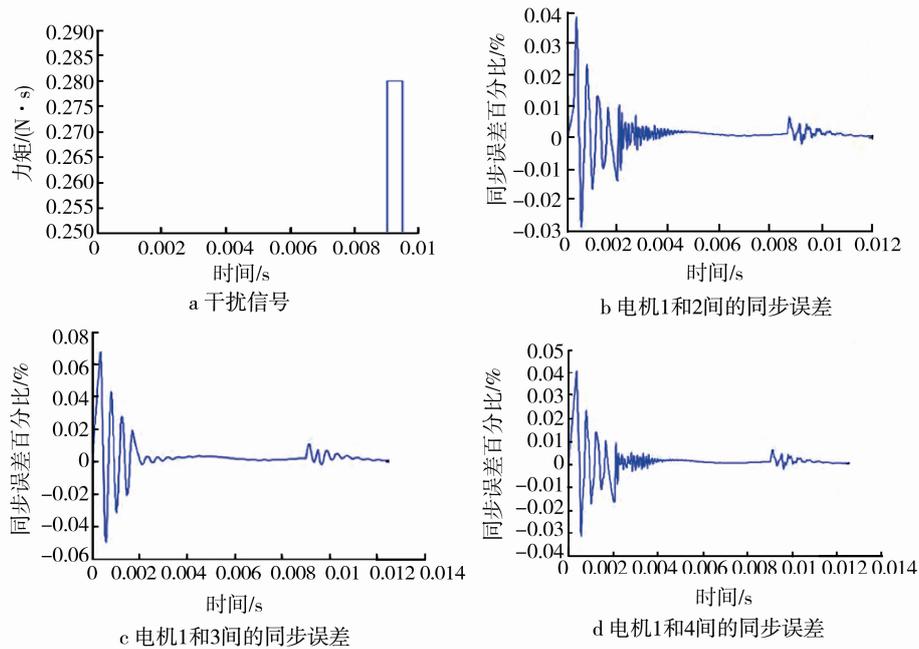


图 2 相邻交叉耦合 PI 控制多电机同步控制误差

Fig.2 Synchronous error control of multi motors with adjacent cross coupling PI

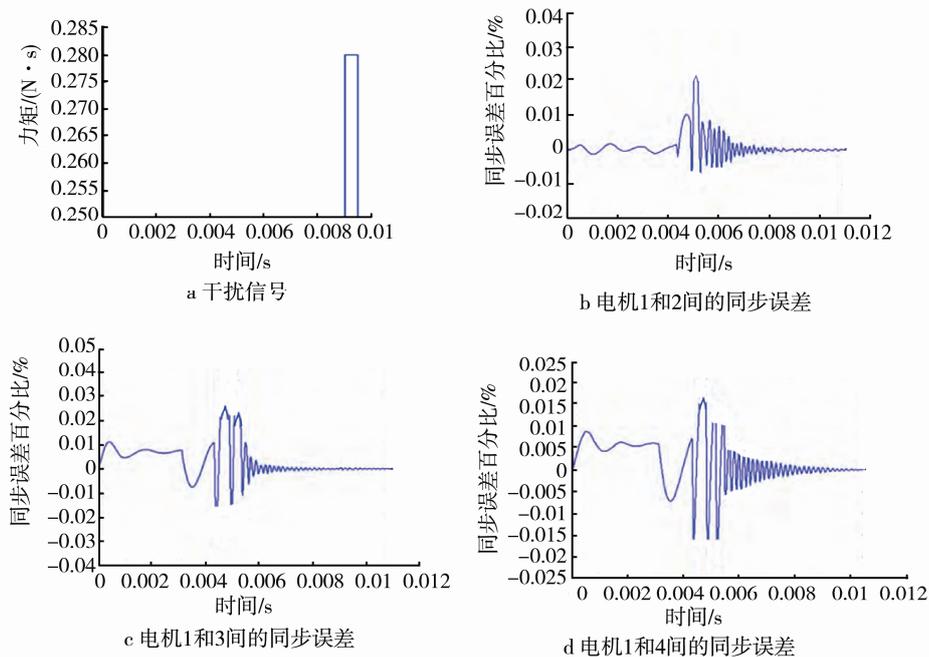


图 3 相邻交叉耦合滑模变结构控制多电机同步控制误差

Fig.3 Synchronous error control of multi motors with adjacent cross coupling sliding mode variable structure

## 5 结语

为了提高凹版印刷机电轴传动多电机同步控制精度，提高多电机同步控制的抗干扰能力，提出了基于相邻交叉耦合滑模变结构的多电机同步控制方法。基于相邻交叉耦合补偿基本原理建立了相邻交叉耦合控制结构，并将滑模变结构引入到相邻交叉耦合结构中，通过饱和函数削弱抖振。最后的仿真结果表

明，与其他控制策略相比，基于相邻交叉耦合系统的滑模变结构控制下其系统同步误差小，具有更高的同步控制精度、更强的削弱抖振能力，同时系统具有较强的鲁棒性。

## 参考文献：

[1] 张海燕, 王伟, 赵庆海. 无轴传动控制策略及仿真

- 析[J]. 自动化技术与应用, 2007(3): 105—108.  
ZHANG Hai-yan, WANG Wei, ZHAO Qing-hai. Simulation Analysis of the Control Strategy of Shaftless Dries[J]. Techniques of Automation and Applications, 2007(3): 105—108.
- [2] 黄灵阁, 王雪, 陈惠兰, 等. 凹版印刷中刀线和套印不准的分析[J]. 包装工程, 2010, 31(19): 77—79.  
HUANG Ling-ge, WANG Xue, CHEN Hui-lan, et al. Analysis of Knife Line and Register Difference in the Intaglio Printing[J]. Packaging Engineering, 2010, 31(19): 77—79.
- [3] 马膺峻. 无轴套印控制系统综合控制策略的研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2010.  
MA Ying-jun. Research on Synthentic Control Strategy of Shaftless Chromatography System[D]. Shenyang: Northeastern University, 2010.
- [4] 王吉岱, 张兆健, 梁存仙, 等. 包装机械电子凸轮关键技术研究与应用[J]. 包装工程, 2013, 34(7): 48—51.  
WANG Ji-dai, ZHANG Zhao-jian, LIANG Cun-xian, et al. Research and Application of Electronic CAM key Technology in Packaging Machine[J]. Packaging Engineering, 2013, 34(7): 48—51.
- [5] LIU Ran, SUN Jian-zhong, LUO Ya-qin, et al. Research on Multi-motor Synchronization Control Based on the Ring Coupling Strategy for Cutter-head Driving System of Shield Machines[J]. Applied Mechanics and Materials, 2011, 52/53/54: 65—72.
- [6] CHEN C S, CHEN L Y. Cross-coupling Position Command Shaping Control in a Multi-Axis Motion System [J]. Mechatronics, 2011, 21(3): 625—632.
- [7] ZHANG Peng, ZHANG Jian-hua, HE Dong-sheng, et al. Based on Adjacent Cross-coupling of Multi-motor Synchronous Drive[J]. Advanced Materials Research, 2011, 201/202/203: 1093—1097.
- [8] ZHANG Yong, DENG Hua, ZHANG Yi. Synchronization Control of Space Voltage Vector Controlled Multi-PMSM Based on Adjacent Cross-coupling[J]. Advanced Materials Research, 2012, 383-390(9): 6931—6937.
- [9] 曹玲芝, 李春文, 牛超, 等. 基于相邻交叉耦合的多感应电机滑模同步控制[J]. 电机与控制学报, 2008, 12(5): 586—592.  
CAO Ling-zhi, LI Chun-wen, NIU Chao, et al. Synchronized Sliding-mode Control for Multi-induction Motors Based on Adjacent Cross-coupling[J]. Electric Machines and Control, 2008, 12(5): 586—592.
- [10] 程斯一, 纪文刚, 王志俊. 基于模糊 PID 的多伺服电机交叉耦合同步控制[J]. 北京石油化工学院学报, 2014, 22(4): 54—57.  
CHENG Si-yi, JI Wen-gang, WANG Zhi-jun. The Cross-coupled Synchronous Control of Multi Servo Motors Based on Fuzzy-PID[J]. Journal of Beijing Institute of Petro-chemical Technology, 2014, 22(4): 54—57.
- [11] 张婧. 无轴传动印刷机同步控制系统的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2012.  
ZHANG Jing. Research on Shaftless Drive Printing Machine Synchronization Control System[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2012.
- [12] REXROTH. Modular System Solution for Shaftless Printing and Converting Machines[J]. Electric Drives and Controls, 2004(7): 6—7.
- [13] 武吉梅, 王伟鹏, 王月英. 印刷机张力控制系统的建模与仿真[J]. 包装工程, 2007, 28(6): 66—68.  
WU Ji-mei, WANG Wei-peng, WANG Yue-ying. Modeling and Simulating of the Tension Control System of Printing Press[J]. Packaging Engineering, 2007, 28(6): 66—68.
- [14] 陈文革, 蒋文燕, 黄学林. 我国凹版印刷机的现状及发展方向[J]. 包装工程, 2008, 29(4): 169—171.  
CHEN Wen-ge, JIANG Wen-yan, HUANG Xue-lin. Present Situation and Development Direction of Gravure Press in Our Country[J]. Packaging Engineering, 2008, 29(4): 169—171.
- [15] 曹玲芝, 王宏, 谢晓磊. 基于非线性滑模面的多PMSM变结构同步控制[J]. 威特电机, 2015, 43(6): 62—65.  
CAO Ling-zhi, WANG Hong, XIE Xiao-lei. Sliding Mode Variable Structure Synchronous Control for Permanent Magnet Synchronous Machines Based on Non-linear Sliding Surface[J]. Small & Special Electrical Machines, 2015, 43(6): 62—65.