

多电机速度同步自适应积分滑模控制

马文华, 张冬梅, 刘昕彤, 王建强
(河北水利电力学院, 沧州 061001)

摘要: **目的** 为了解决传统指数趋近律方法所固有的收敛速度慢和抖阵问题, 从而提高多电机同步控制系统控制精度。**方法** 基于相邻交叉耦合控制系统结构, 采用自适应积分滑模控制算法, 提出一种多同步电机速度同步控制策略。**结果** 仿真结果表明, 电机的实际转速能够迅速跟踪参考转速, 且同步误差为 0。**结论** 该策略可提高多电机同步控制系统的同步跟随性能和抗干扰性能, 增强系统的同步协调控制能力。

关键词: 多电机同步控制; 相邻交叉耦合; 自适应趋近律; 积分滑模

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2017)15-0121-05

Adaptive Integral Sliding-mode Control for Multi-Motor Speed Synchronization

MA Wen-hua, ZHANG Dong-mei, LIU Xin-tong, WANG Jian-qiang
(Hebei University of Water Resource and Electric Engineering, Hebei 061001, China)

ABSTRACT: The work aims to solve the inherently slow convergence speed and shaking matrix of traditional exponential reaching law method, thus improving the control accuracy of multi-motor synchronous control system. Based on the structure of adjacent cross coupling control system, the adaptive integral sliding-mode control algorithm was adopted and a strategy for synchronous control over multiple speeds of synchronous motors was proposed. The simulation results showed that, the actual speed of motor could rapidly track reference speed and the synchronization error was 0. Such strategy can improve the synchronous tracking performance and anti-disturbance performance of multi-motor synchronous control system, and enhance the synchronous coordination control ability of the system.

KEY WORDS: multi-motor synchronous control; adjacent cross coupling; adaptive reaching law; integral sliding-mode

目前, 多电机同步控制已广泛应用于印刷、纺织和印染等工业领域, 且同步控制策略的好坏决定着产品质量和性能^[1-3]。当电机受到外界扰动, 以及电机长时间运行而导致的电机参数漂移现象等诸多不确定性的影响, 多电机同步控制性能将变差^[4-5], 因此研究多电机同步控制策略具有重大的实际意义。

比较常用的多电机同步控制技术包括主从控制、交叉耦合控制、相邻交叉耦合控制、偏差耦合控制等控制算法^[6-9]。相比较而言, 虽然主从同步控制具有结构简单和实现容易等优点, 但同步精度并不高; 交叉耦合同步控制虽然提高同步控制的精度, 但算法比较复杂且实现较复杂。相邻交叉耦合控制虽然具有控制结构简单且具有比较好的同步控制性能, 但大多数

相邻交叉耦合控制仍然采用的是传统 PID 控制算法, 虽然 PID 控制结构简单, 参数便于整定等优点, 但该算法很容易受参数以及外部扰动变化影响, 很难使控制达到令人满意的效果。

为了解决传统 PID 控制存在的缺点, 随着现代控制技术的发展, 一些先进的控制算法逐步被应用于多电机同步控制系统。滑模控制作为一类特殊的非线性控制策略, 具有动态响应速度快、对参数摄动及外部干扰有强鲁棒性等诸多优点, 在不确定非线性系统的控制上得到一定程度的应用^[10-12]。为此, 文中基于相邻交叉耦合结构所具有的诸多优点, 将滑模控制引入到同步控制系统中, 提出了一种具有自适应能力的滑模控制策略。

收稿日期: 2017-01-12

基金项目: 河北省教育厅河北省高校重点研究项目(ZD2015104)

作者简介: 马文华 (1966—), 女, 河北水利电力学院副教授, 主要研究方向为电子与电气控制。

1 永磁同步电机的数学模型

建立 d - q 坐标系下表贴式永磁同步电机的数学模型, 即^[13-14]:

$$\begin{cases} u_d = Ri_d - p_n \omega L_s i_q + L_s \frac{di_d}{dt} \\ u_q = Ri_q + p_n \omega L_s i_d + p_n \omega \psi_f + L_s \frac{di_q}{dt} \end{cases} \quad (1)$$

式中: u_{dq} , i_{dq} 分别为定子电压和电流; L_s , R 分别为定子电感和电阻; p_n 为电机的极对数; ψ_f 为永磁体的磁链; ω 为机械角速度。

电机的机械运动方程为:

$$J \frac{d\omega}{dt} = \frac{3}{2} p_n \psi_f i_q - T_L \quad (2)$$

式中: T_L , J 分别为电机的负载转矩和转动惯量。

2 多永磁电机同步控制策略

为了保证多电机控制系统具有较好的控制性能, 目前通常采用相邻交叉耦合控制结构, 即对电机的跟踪误差和同步误差进行同时控制^[15]。对于包含 n 台电机的多电机同步控制系统, 假设第 m 台电机的跟踪误差为 $e_m = \omega_m^* - \omega_m$, 式中: ω_m^* , ω_m 分别为第 m 台电机的参考转速和实际转速。在速度同步控制器的作用下, 在满足第 m 台电机的跟踪误差 $e_m = 0$ 时, 还要确保 n 台电机的跟踪误差满足 $e_1 = \dots = e_m = \dots = e_n$ 。

根据电机之间的相邻顺序, 假设 n 台电机的同步误差为:

$$\begin{cases} \delta_1 = e_1 - e_2 \\ \delta_2 = e_2 - e_3 \\ \vdots \\ \delta_n = e_n - e_1 \end{cases} \quad (3)$$

为了确保式(4)成立, 同步误差需满足 $\delta_m = 0, \forall m = 1, 2, \dots, n$, 即要求电机 m 与电机 $m-1$, 电机 $m+1$ 须保持同步。

假设第 $m-1$, m , $m+1$ 台电机之间的跟踪误差的表达式为:

$$\begin{cases} e_{(m-1)(m-1)} = \omega^* - \omega_{m-1} \\ e_{mm} = \omega^* - \omega_m \\ e_{(m+1)(m+1)} = \omega^* - \omega_{m+1} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $e_{(m-1)(m-1)}$, e_{mm} , $e_{(m+1)(m+1)}$ 分别为第 $m-1$, m , $m+1$ 台电机的跟踪误差。

假设第 m 台电机和第 $m-1$ 台电机之间的同步误差表达式为:

$$\delta_{(m-1)} = e_{mm} - e_{(m-1)(m-1)} = -\omega_m + \omega_{m-1} \quad (5)$$

假设第 m 台电机和第 $m+1$ 台电机之间的同步误差表达式为:

$$\delta_{m(m+1)} = e_{mm} - e_{(m+1)(m+1)} = -\omega_m + \omega_{m+1} \quad (6)$$

为了保证 n 台电机能够实现同步控制, 除了考虑相邻 2 台电机之间的耦合外, 还需要将第 n 台电机和第 1 台电机进行耦合, 从而组成如图 1 所示的多电机同步控制系统。从图 1 可以看出, 该控制结构包含跟踪误差和同步误差 2 个控制器, 见图 2。其中跟踪误差控制器的目的是确保电机转速能够快速跟踪实际转速, 同步误差控制器的功能是将受控电机与相邻电机之间的同步误差趋于 0。

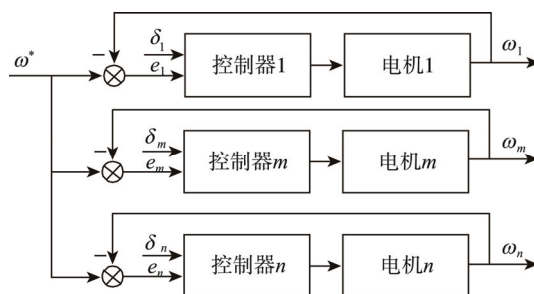


图1 多电机同步控制系统

Fig.1 Multi-motor synchronous control system

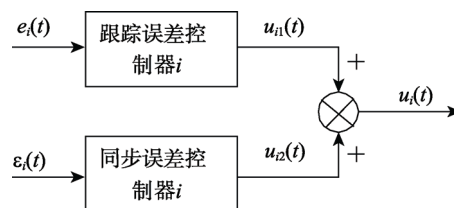


图2 第 m 台电机控制器的控制结构

Fig.2 Control structure of motor m controller

3 跟踪和同步误差数学模型

3.1 跟踪误差数学模型

为了便于跟踪误差控制器的设计, 定义电机的状态变量满足关系:

$$\begin{cases} x_1 = \omega^* - \omega \\ x_2 = \dot{x}_1 = -\dot{\omega} \end{cases} \quad (7)$$

式中: ω^* , ω 分别为电机的参考转速和实际转速。将式(2)代入到式(7), 并考虑式(1), 此时可得:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -\dot{\omega} = \frac{1}{J} \left(\frac{3}{2} p_n \psi_f i_q - T_L \right) \\ \dot{x}_2 = -\ddot{\omega} = -\frac{3 p_n \psi_f}{2J} \frac{di_q}{dt} \end{cases} \quad (8)$$

此时, 电机跟踪误差的数学模型为:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = -b u_1 \end{cases} \quad (9)$$

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

3.2 同步误差数学模型

为了便于同步误差控制器的设计,对于第 $m-1$ 台和第 $m+1$ 台电机,定义系统的状态变量为:

$$\begin{cases} e_1 = -\omega_m + \omega_{m-1} \\ e_2 = \dot{e}_1 = -\dot{\omega}_m + \dot{\omega}_{m-1} \end{cases} \quad (10)$$

对式(10)求导,并将式(1)和(2)代入可得:

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = -\frac{3p_n\psi_f}{2J}(i_{q(m)} - i_{q(m-1)}) + \\ \frac{p_n}{J}(T_{L(m)} - T_{L(m-1)}) \\ \dot{e}_2 = \ddot{e}_1 = -\frac{3p_n\psi_f}{2J} \frac{d(i_{q(m)} - i_{q(m-1)})}{dt} \end{cases} \quad (11)$$

此时,电机同步误差的数学模型为:

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = e_2 \\ \dot{e}_2 = -bu_2 \end{cases} \quad (12)$$

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

4 自适应滑模控制器设计

4.1 自适应变速趋近律设计

常用的指数趋近律的表达式为:

$$\dot{s} = -ks - \varepsilon \operatorname{sgn}(s) \quad k, \varepsilon > 0 \quad (13)$$

对于式(13),为了保证该方法具有较好的控制性能,通常在增大 k 值的同时减小 ε 值。这样一方面可以保证系统具有快速的收敛特性,另一方面削弱了系统抖阵的影响。 k 和 ε 的数值一旦确定,就不能根据系统的状态变量距离平衡点的距离而自适应调整,因此文中提出一种自适应变速指数趋近律,见式(14)。

$$\dot{s} = -(k + \alpha \|x\|_1)s - \varepsilon \frac{1}{1 + \alpha \|x\|_1} \operatorname{sgn}(s) \quad (14)$$

式中: $\|x\|_1 = \sum_{i=1}^n |x_i|$ 为系统状态变量的一阶范数,且参数满足 $k, \varepsilon, \alpha > 0$ 。从式(15)可以看出,当系统的状态变量距离平衡点较远时,即 $\|x\|_1$ 较大,此时指数趋近项的收敛速度远大于传统指数趋近律式(13)的速度。另外,等速趋近项趋近速率 $\varepsilon \frac{1}{1 + \alpha \|x\|_1}$ 远小于式

(14)中的数值 ε 。当系统的状态变量距离平衡点较近时,即 $\|x\|_1$ 较小,可增大参数 α 的值来缩短滑模到达时间,并可以削弱系统抖阵现象的影响。综上,该趋近律方法能够根据系统状态变量距离平衡点的远近而自适应调整参数。

为了说明文中所提趋近律方法的优越性,在使用相同参数的条件下得到的仿真结果见图3。从图3中可看出,系统的状态变量从初始值到达平衡点的过程中,相比其他2种算法,文中提出趋近律方法的收

敛速度具有明显优势,且系统的抖阵现象也得到了抑制。

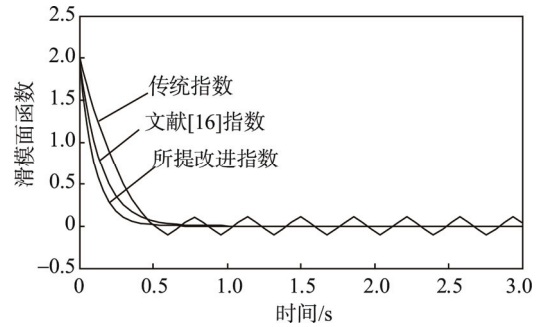


图3 3种趋近律方法的性能比较

Fig.3 Performance comparisons of the three different reaching law methods

4.2 自适应滑模控制器设计

从式(9), (12)可以看出,电机的跟踪误差与同步误差的数学模型是相同的。为了便于控制器设计,可以将两者统一表示为:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = -bu \end{cases} \quad (15)$$

为了提高系统的动态性能,文中设计一种积分滑模面函数,即:

$$s = x_2 + \int (k_1 x_2 + k_2 x_1) dt \quad (16)$$

若滑模控制处于理想状态,则有 $s = \dot{s} = 0$, 此时式(17)将变为:

$$\dot{x}_1 + k_1 \dot{x}_1 + k_2 x_1 = 0 \quad (17)$$

通过适当选择 k_1 和 k_2 的数值,则误差变量 x_1 将趋于 0。为了求取控制器的表达式,对式(16)求导并将式(17)代入,可得:

$$\dot{s} = \dot{x}_2 + k_1 x_2 + k_2 x_1 = -bu + k_1 x_2 + k_2 x_1 \quad (18)$$

采用如式(14)所示的自适应变速趋近律,可求得控制器的表达式为:

$$u = \frac{1}{b} \left[k_1 x_2 + k_2 x_1 + (k + \alpha \|x\|_1)s + \varepsilon \frac{1}{1 + \alpha \|x\|_1} \operatorname{sgn}(s) \right] \quad (19)$$

为了证明系统的稳定性,定义 Lyapunov 函数:

$$V = \frac{1}{2} s^2 \quad (20)$$

对式(20)求导,并将式(17)和(18)代入,可得:

$$\dot{V} = s\dot{s} = s(\dot{x}_2 + k_1 x_2 + k_2 x_1) = s(-bu + k_1 x_2 + k_2 x_1) \quad (21)$$

将式(19)代入式(21),可得:

$$\begin{aligned} \dot{V} = s \left[-(k + \alpha \|x\|_1)s - \varepsilon \frac{1}{1 + \alpha \|x\|_1} \operatorname{sgn}(s) \right] = \\ -(k + \alpha \|x\|_1)s^2 - \varepsilon \frac{1}{1 + \alpha \|x\|_1} |s| \leq 0 \end{aligned} \quad (22)$$

系统满足 $\dot{s}s < 0$ 的到达条件,能保证系统进入滑动态。

5 仿真实验分析

为了验证文中设计控制算法的可行性和有效性, 选用4台相同的永磁同步电机进行相关的仿真分析, 其中电机的参数设置为: 定子电感 $L_d=L_q=8.5$ mH, 定子电阻 $R=1.2\ \Omega$, 磁链 $\psi_f=0.175$ Wb, 转动惯量 $J=0.8$ g·m², 极对数 $p_n=4$ 。在 Matlab/Simulink 环境下对采用自适应积分滑模控制时多电机同步控制进行仿真研究。另外, 限于篇幅, 文中只给出了电机1与电机2, 3, 4之间的同步误差仿真结果。

5.1 稳态性能分析

空载条件下, 4个永磁同步电机的转速和转速同步误差的变化曲线见图4。其中, 仿真条件设置: 转速的参考值为800 r/min。从图4可以看出, 在文中所提自适应积分滑模控制器的作用下, 4个电机都能够快速地跟踪上转速得参考值, 且同步误差也能够较短的时间内收敛到0, 用时约为0.12 s。可见, 文中所提控制算法具有较快的响应速度, 能够快速准确地实现对多电机的同步控制。

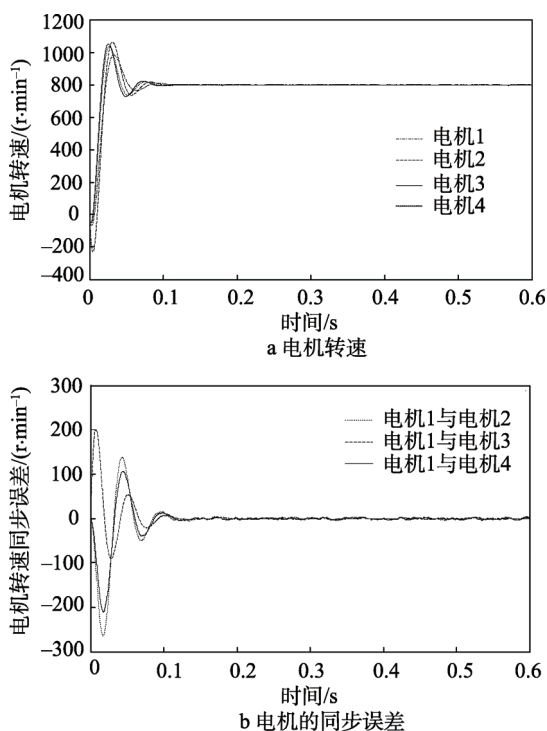


图4 空载条件下启动时电机转速和同步误差的变化曲线
Fig.4 Speed and synchronous error curve of motor start without load

5.2 动态性能分析

为了验证系统的鲁棒性能, 文中所提算法作用下电机转速突变时转速和转速同步误差的变化曲线见图5。仿真条件设置为 $t=0$ 时转速为1500 r/min, 且 $t=0.3$ s时转速设置为1000 r/min。从图5中可知, 电机的实际转速能够迅速跟踪参考转速, 且同步误差为0。系统

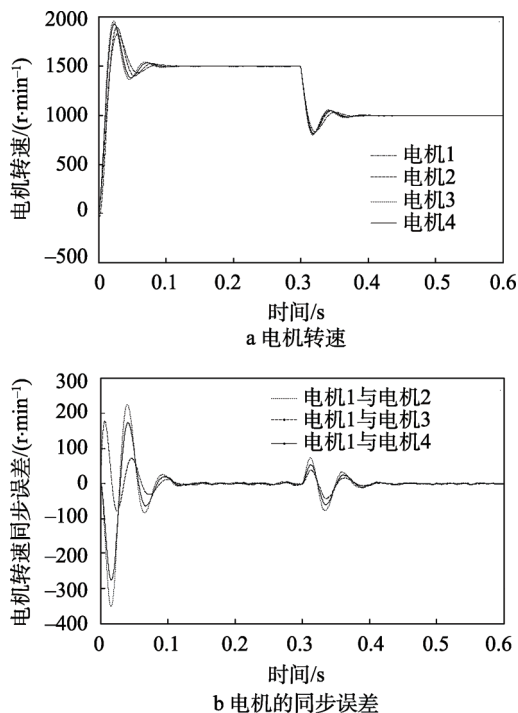


图5 转速突变时转速和同步误差的变化曲线
Fig.5 Speed and synchronous error curve when motor speed varies

保持着很高的同步精度, 体现了较强的鲁棒性。

为了验证系统的抗扰能力, 电机突加负载时转速和同步误差的响应曲线见图6。其中, 仿真条件设置为参考转速1500 r/min, 在 $t=0.3$ s时突加4个不同的负载转矩, 即 $T_{L1}=16$ N·m, $T_{L2}=18$ N·m, $T_{L3}=12$ N·m, $T_{L4}=18$ N·m。从图6中可以看出, 电机能够快速的跟踪

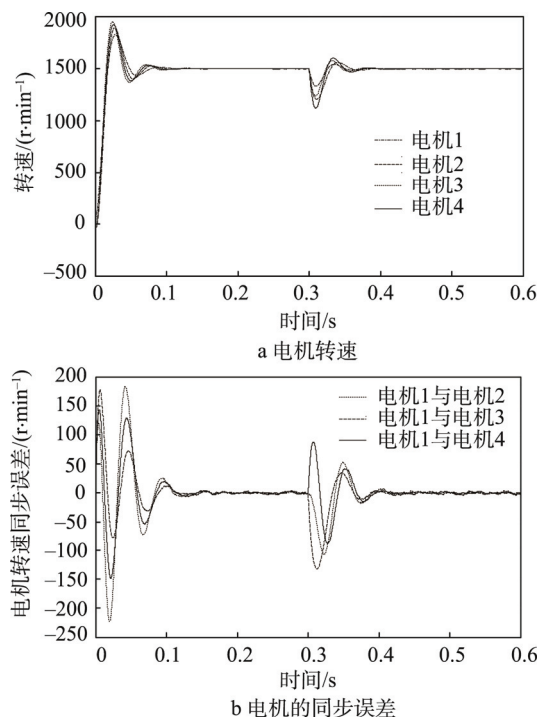


图6 突加负载时电机转速和同步误差的变化曲线
Fig.6 Speed and synchronous error curve with sudden load

上转速参考值,最长用时约为0.08 s,同时同步误差也能在较短的时间内收敛到0。可见,电机突加负载时采用文中所提算法具有明显的优越性。

综上所述,采用文中所提控制算法时,无论是稳态条件下还是动态条件下,电机转速都能快速跟踪上电机转速参考值,且同步误差收敛到0。可见,文中所提算法具有精确的同步性能、较好的抗干扰能力和较强的鲁棒性。

6 结语

深入研究了多电机同步控制策略,为了提高多电机同步控制精度和抗干扰能力,文中提出了一种基于相邻交叉耦合的自适应积分滑模控制的多电机同步控制方法。采用相邻交叉耦合补偿的基本原理,建立了多电机同步控制系统的相邻交叉耦合控制结构,并将积分滑模控制引入到相邻交叉耦合结构中,并利用Lyapunov函数证明了其有效性。仿真结果表明,文中提出的控制策略不仅使系统具有良好的动态性能和抗干扰性,同时还具有较快的响应速度,增强了系统的鲁棒性,提高了系统的同步精度,适合于对多台电机的同步控制以及对同步精度要求较高的场合。

参考文献:

- [1] 高振新,孙建红.多电机无轴传动同步控制策略[J].包装工程,2016,37(15):144—149.
GAO Zhen-xin, SUN Jian-hong. Multi-motor Synchronization Control Strategy with Shaftless Drive[J]. Packaging Engineering, 2016, 37(15): 144—149.
- [2] 曾超,杨喜军,唐厚君,等.高速轮转式印刷设备无轴传动的应用[J].电气自动化,2015,37(3):33—36.
ZENG Chao, YANG Xi-jun, TANG Hou-jun, et al. Application of Shaftless Drive of High-speed Rotary Printing Equipment[J]. Electric Automatic, 2015, 37(3): 33—36.
- [3] 蒋毅.多永磁电机传动系统的同步控制策略研究[D].杭州:浙江大学,2014.
JIANG Yi. The Research of Synchronous Control for Multi PMSM Drive System[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.
- [4] 刘星桥,徐迎辉.一种新型多电机同步控制平台研制[J].电机与控制应用,2016,43(9):8—13.
LIU Xing-qiao, XU Ying-hui. Development of a Novel Multi-motor Synchronous Control Platform[J]. Motor and Control Application, 2016, 43(9): 8—13.
- [5] 卫宏,周国平,申东琴.凹印机电子轴传动多电机同步控制策略[J].包装工程,2015,36(3):134—139.
WEI Hong, ZHOU Guo-ping, SHEN Dong-qin. Multi-motor Synchronous Control Strategy of Electronic Shaft Driving in Gravure Printing Machine[J]. Packing Engineering, 2015, 36(3): 134—139.
- [6] LIU R, SUN J Z, LUO Y Q, 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.
- [7] CHEN C S, CHEN L Y. Cross-coupling Position Command Shaping Control in a Multi-axis Motion System[J]. Mechatronics, 2011, 21: 625—632.
- [8] ZHANG P, ZHANG J H, HE D S, et al. Based on Adjacent Cross-coupling of Multi-motor Synchronous Drive[J]. Advanced Materials Research, 2011, 201/202/203: 1093—1097.
- [9] ZHANG Y, DENG H, ZHANG Y. Synchronization Control of Space Voltage Vector Controlled Multi-PMSM Based on Adjacent Cross-coupling[J]. Advanced Materials Research, 2012, 383(9): 6931—6937.
- [10] 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.
- [11] 李春文,赵德宗,任军.基于全滑模面的多感应电机速度同步控制[J].系统工程理论与实践,2009,29(10):110—117.
LI Chun-wen, ZHAO De-zong, REN Jun. Total Sliding Mode Speed Synchronization Control of Multi Inductions Motors[J]. System Engineering Theory & Practice, 2009, 29(10): 110—117.
- [12] 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].微特电机,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 Nonlinear Sliding Surface[J]. Small & Special Electrical Machines, 2015, 43(6): 62—65.
- [13] 袁雷,沈建清,肖飞,等.插入式永磁低速同步电机非奇异终端滑模观测器设计[J].物理学报,2013,62(3):37—45.
YUAN Lei, SHEN Jian-qing, XIAO Fei, et al. Nonsingular Terminal Sliding-mode Observer Design for Interior Permanent Magnet Synchronous Motor Drive at Very Low-speed[J]. Acta Phys Sin, 2013, 62(3): 37—45.
- [14] YUAN L, XIAO Fei, XIAO J Q, et al. Sensorless Control of High-power Interior Permanent Magnet Synchronous Motor Drives at Very Low Speed[J]. IET Electric Power Applications, 2013, 7(3): 199—206.
- [15] 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 Qian. A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Engineering[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2012.
- [16] 姚琼芸,宋立忠,温洪.离散变结构控制系统的比例—等速—变速控制[J].控制与决策,2000,15(3):229—332.
YAO Qiong-hui, SONG Li-zhong, WEN Hong. Proportional-constant-variable Rate Control for Discrete-time Variable Structure Systems[J]. Control and Decision, 2000, 15(3): 229—332.