

# 基于滑模控制的多电机速度同步偏差耦合控制

毛诗柱<sup>1</sup>, 梁志坤<sup>2</sup>

(1.广东轻工职业技术学院, 广州 510300; 2.广东工业大学, 广州 510006)

**摘要:** **目的** 解决传统机械连接方式多电机同步控制存在的机械结构磨损大、控制精度不高等问题。**方法** 基于偏差耦合控制系统结构, 与快速非奇异终端滑模控制相结合, 提出一种多同步电机速度同步控制策略。**结果** 该算法能够针对电机在不同转速和扰动负载下作出快速响应, 减少了扰动对系统的影响, 进一步提高了多电机运行时的同步精度。**结论** 该控制算法具有较好的控制性能, 能够满足实际生产的需要。

**关键词:** 多电机同步控制; 偏差耦合; 快速非奇异终端滑模

**中图分类号:** TB486; TP273 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2018)05-0153-05

**DOI:** 10.19554/j.cnki.1001-3563.2018.05.029

## Multi-Motor Speed Synchronization Relative Coupling Control Based on Sliding-mode Control

MAO Shi-zhu<sup>1</sup>, LIANG Zhi-kun<sup>2</sup>

(1.Guangdong Industry Polytechnic, Guangzhou 510300, China;

2.Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

**ABSTRACT:** The work aims to solve such problems as large wear and low control accuracy of the mechanical structure existing during the multi-motor synchronous control of the traditional mechanical connection. Based on the structure of relative coupling control system, and combined with the fast nonsingular terminal sliding-mode control, a kind of synchronous control strategy for the multi-motor synchronous speed was proposed. The algorithm could rapidly respond to the motor under different speeds and disturbance loads, which reduced the influence of disturbance on the system and further improved the synchronization accuracy during the operation of multiple motors. The proposed control algorithm has better control performance and can meet the needs of the actual production.

**KEY WORDS:** multi motor synchronous control; relative coupling; fast nonsingular terminal sliding mode

随着国家对制造业的不断重视, 在《中国制造 2025》提出, 应大力推广自动化功能包装、高通量检测及分级包装等设备的应用<sup>[1]</sup>, 这样对自动化具有较高要求的印刷、纺织和印染等工业领域提出更高的要求。为了解决传统机械连接方式的多电机同步控制系统中存在的机械磨损严重和同步控制精度不高等问题, 采用非机械连接方式的多电机同步控制系统是一个不错的选择<sup>[2-3]</sup>。在实际运行中, 多电机的同步性能很容易受到电机的参数变化和外界扰动的影响而

变差<sup>[4-5]</sup>。随着现代科技的发展和自动控制技术的不断进步, 目前适用于多电机同步控制系统的主从控制、交叉耦合控制和偏差耦合控制等控制算法等得到逐步推广和应用<sup>[6-9]</sup>。多电机同步系统在实际运行中, 同步精度极易受到参数变化和负载突变的影响, 采用传统 PI 控制的偏差耦合控制算法并不能取得较为满意的控制品质。

由于滑模控制具有很多其他控制算法无法比拟的优点, 如控制系统动态响应速度快、抗干扰能力强等,

收稿日期: 2017-09-14

基金项目: 广东省自然科学基金 (S2011010001153)

作者简介: 毛诗柱 (1982—), 男, 硕士, 广东轻工职业技术学院讲师, 主要研究方向为智能控制、PLC 及工业控制网络和工业机器人控制。

目前在多电机同步控制系统已有相关文献报道,并且获得了较好的控制性能<sup>[10-13]</sup>。为了提高多电机同步系统的同步精度,采用偏差耦合控制系统结构,并与文中新设计的快速非奇异终端滑模控制相结合,提出了一种适用于多电机同步控制系统的滑模控制算法。

### 1 多电机同步控制策略

为了便于分析,文中假设多电机系统中包含  $n$  台完全相同的电机,且定义第  $i$  台电机的跟踪误差为:

$$e_i(t) = n_i^*(t) - n_i(t) \quad (1)$$

式中:  $n_i^*(t)$ ,  $n_i(t)$  分别为第  $i$  台电机的参考转速和实际转速。通常参考转速设定为一常量。

为了实现多电机系统具有较高的同步精度和较好的控制性能。在多电机同步控制算法的作用下,满足  $e_i(t) = 0$  时,还要保证  $n$  台电机之间的跟踪误差具有关系见式(2)。

$$e_1(t) = \dots = e_i(t) = \dots = e_n(t) \quad (2)$$

根据多电机系统中各台电机之间的相邻顺序,定义  $n$  台电机的同步误差为:

$$\begin{cases} \varepsilon_1(t) = e_1(t) - e_2(t) \\ \varepsilon_2(t) = e_2(t) - e_3(t) \\ \vdots \\ \varepsilon_n(t) = e_n(t) - e_1(t) \end{cases} \quad (3)$$

为了确保式(3)成立,需满足  $\varepsilon_i(t) = 0, \forall i = 1, 2, \dots, n$ 。为了保证多电机同步系统具有较好的同步精度,结合滑模控制和偏差耦合控制系统的优点,设计基于滑模控制的多电机同步偏差耦合控制系统见图1。由图1可知,该控制系统主要包括滑模速度控制器、速度同步补偿器和输出速度耦合算法。其中,滑模速度控制器的主要功能就是保证系统具有较好的动态响应速度和抗扰动能力,是文中重点设计的部分,将在下节进行重点介绍。速度同步补偿器的控制框图见图2,

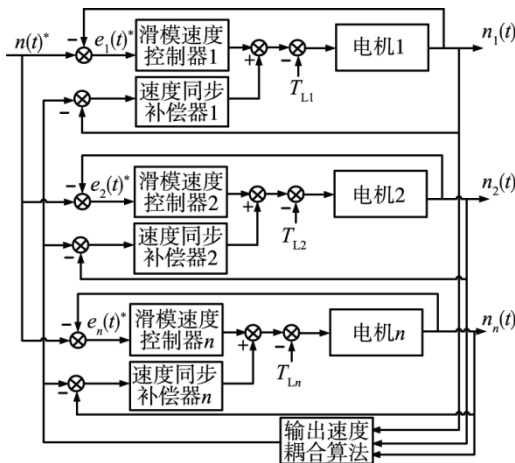


图1 基于滑模控制的偏差耦合控制系统  
Fig.1 Relative coupling control system based on sliding-mode control

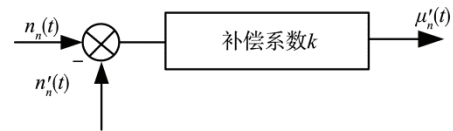


图2 第  $n$  台电机的速度同步补偿器的控制结构  
Fig.2 Control structure of motor  $n$  with speed synchronization compensator

主要用于对速度误差进行实时补偿。输出速度耦合算法其主要功能就是求取  $n$  台电机的实时平均值,即

$$n_n'(t) = \frac{n_1(t) + n_2(t) + \dots + n_n(t)}{n}$$

### 2 滑模速度控制器设计

以永磁同步电机为例,详细介绍滑模速度控制器的设计方法。

#### 2.1 永磁同步电机的数学建模

建立  $d-q$  坐标系下表贴式永磁同步电机的数学模型,即<sup>[14-15]</sup>:

$$\begin{cases} u_d = R i_d - p_n \omega L_s i_q + L_s \frac{di_d}{dt} \\ u_q = R i_q + p_n \omega L_s i_d + p_n \omega \psi_f + L_s \frac{di_q}{dt} \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $u_{dq}$ ,  $i_{dq}$  分别为  $d-q$  坐标系下的电压和电流;  $L_s$ ,  $R$  分别为电感和电阻;  $p_n$  为极对数;  $\psi_f$  为磁链;  $\omega$  为机械角速度。

电机的机械运动方程为:

$$J \frac{d\omega}{dt} = \frac{3}{2} p_n \psi_f i_q - T_L \quad (5)$$

式中:  $T_L$ ,  $J$  分别为负载转矩和转动惯量。

为了便于设计,首先定义状态变量:

$$\begin{cases} x_1 = \omega_{ref} - \omega \\ x_2 = \dot{x}_1 = -\dot{\omega} \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $\omega_{ref}$ ,  $\omega$  分别为转速的参考值和实际值。

将式(5)代入到式(6),可变为:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -\dot{\omega} = \frac{1}{J} \left( \frac{3}{2} p_n \psi_f i_q - T_L \right) \\ \dot{x}_2 = -\ddot{\omega} = -\frac{3 p_n \psi_f}{2J} \frac{di_q}{dt} \end{cases} \quad (7)$$

由于电机在实际运行过程中,电机的参数会受到运行时间和外界环境的影响。为了更好地描述实际电机的运行状态,通常可将电机参数的不确定性考虑在内,即:

$$\dot{x}_2 = \left( -\frac{3 p_n \psi_f}{2J} + \Delta a \right) \frac{di_q}{dt} + \left( \frac{\dot{T}_L}{J} + \Delta b \right) \quad (8)$$

此时,电机转速跟踪误差的数学模型可变为:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = -A u + g(t) \end{cases} \quad (9)$$

式中： $u$  为控制系统的控制器； $A = \frac{3p_n\psi_f}{2J}$ ； $g(t)$

为系统扰动量，即  $g(t) = \Delta au + (\frac{\dot{T}_L}{J} + \Delta b)$ 。由于  $g(t)$  有界，假设满足  $|g(t)| \leq l_g$ ， $l_g$  为一正常数。

### 2.2 滑模速度控制器设计

对于式 (9)，采用文献[15]提出的传统非奇异终端滑模控制算法，可得到滑模面函数  $s$  为：

$$s = x_1 + \frac{1}{\beta} x_2^{p/q} = 0 \tag{10}$$

式中： $\beta > 0$  为待设计参数； $p, q$  为正奇数，且满足  $1 < p/q < 2$ 。根据滑模控制的到达条件，基于等速趋近律方法，式 (9) 的控制器  $u$  可以设计为：

$$u = \frac{1}{A} \left[ \beta \frac{q}{p} x_2^{2-p/q} + (\eta + l_g) \text{sgn}(s) \right] \tag{11}$$

式中： $\eta > 0$  为待设计参数。根据参数  $p, q$  之间的关系，可知  $x_2$  的指数  $(2-p/q) > 0$ ，此时  $u$  满足非奇异性的条件。当系统处于滑动模态时，即  $s = \dot{s} = 0$ ，根据式 (10) 可以得到关系为：

$$\dot{x}_1 = -(1/\beta)^{q/p} x_1^{q/p} \tag{12}$$

从式 (12) 可以看出， $x_1$  指数小于 1，当系统初始值距离平衡点较远时，导致系统状态收敛速度较为缓慢。为了进一步提高系统的控制性能和动态品质，提出一种快速非奇异终端滑模面函数，定义为：

$$s = x e_1 + \frac{1}{\alpha} \|x_1\|^{\gamma+1} + \frac{1}{\beta} x_2^{p/q} \tag{13}$$

式中： $\alpha, \beta, \gamma > 0$  为设计常数； $p, q$  为正奇数，且满足  $1 < p/q < 2$ 。

对于系统式 (9)，选取滑模面函数式 (13)，根据滑模到达条件，可以设计控制器为：

$$u = \frac{1}{A} \left[ \beta \frac{q}{p} x_2^{2-p/q} (1 + \frac{\gamma+1}{\alpha} |x_1|^\gamma) + (\eta + l_g) \text{sgn}(s) \right] \tag{14}$$

为了验证所提算法的稳定性，选取 Lyapunov 函数见式 (15)。

$$V = \frac{1}{2} s^2 \tag{15}$$

对式 (15) 求导，并将式 (13) 和 (9) 代入，可得：

$$\dot{V} = s\dot{s} = s(x_2 + \frac{\gamma+1}{\alpha} \|x_1\|^\gamma x_2 + \frac{1}{\beta} \frac{p}{q} x_2^{p/q-1} \dot{x}_2) = \tag{16}$$

$$s(x_2 + \frac{\gamma+1}{\alpha} \|x_1\|^\gamma x_2 - \frac{1}{\beta} \frac{p}{q} e_2^{p/q-1} Au)$$

假设  $\phi(x_2) = \frac{1}{\beta} \frac{p}{q} x_2^{p/q-1}$ ，并将式 (14) 代入，可得：

$$\dot{V} = \phi(x_2) s(g(t) - (\eta + l_g) \text{sgn}(s)) = \tag{17}$$

$$\phi(x_2) (g(t) s - l_g \|s\| - \eta \|s\|)$$

由假设条件  $\|g(x)\| < l_g$ ，式 (17) 将变成：

$$\dot{V} \leq -\phi(x_2) \eta \|s\| \tag{18}$$

由于  $p, q$  为正奇数，且满足  $1 < p/q < 2$ ，当  $x_2 \neq 0$  时， $x_2^{p/q-1} > 0$  成立，由于  $\beta > 0$ ，故  $\dot{V} \leq 0$  成立。可以证明在  $x_2 \neq 0$  成立的条件下，满足 Lyapunov 稳定性条件，则可在有限时间内到达滑模模态。

### 3 仿真结果分析

为了进一步验证文中所提的基于滑模控制的多电机同步偏差耦合控制系统的有效性和可行性，使用 3 台完全相同的永磁同步电机作为被控对象进行仿真研究，并传统 PI 控制进行对比分析。其中，3 台电机的参数均为：定子电感  $L_s = 1.48$  mH，定子电阻  $R = 0.33$   $\Omega$ ，磁链  $\psi_f = 0.646$  Wb，转动惯量  $J = 0.003$  kg·m<sup>2</sup>，极对数  $p_n = 2$ 。限于篇幅，文中同步误差的仿真结果只给出了电机 1 分别与电机 2 和电机 3 之间的同步误差的变化曲线。

在传统 PI 速度控制器和文中所提滑模速度控制器的作用下，3 台电机带相同负载启动时的仿真结果见图 3—4。仿真条件为负载转矩设定为  $T_{L1} = T_{L2} = T_{L3} = 5$  N·m，电机转速的参考值为 1000 r/min。由图 3 可知，在传统 PI 控制的作用下，虽然电机能够在 0.1 s 的时间内达到同步运行，且同步误差为 0，但超调现象严重。相比传统 PI 控制，文中所提滑模速度控制器能够快速达到稳态，调节时间约为 0.2 s，动态响应速度较快且无超调。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。

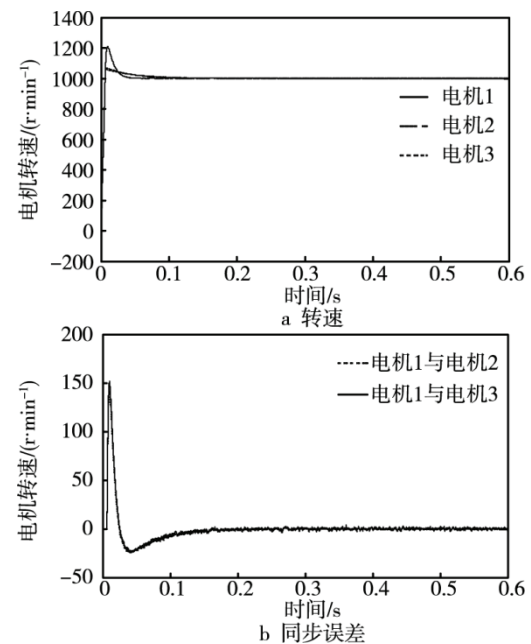


图 3 PI 速度控制器作用下的仿真结果  
Fig.3 Simulation results under the action of PI speed controller

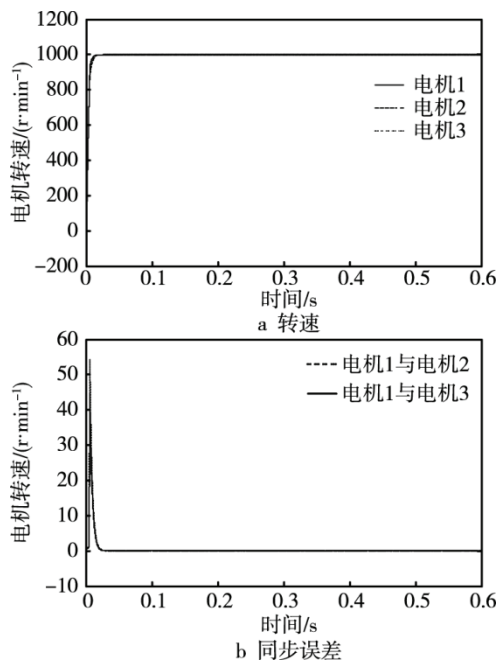


图4 滑模速度控制器作用下的仿真结果

Fig.4 Simulation results under the action of sliding-mode speed controller

为了进一步验证系统的抗扰动性能, 传统 PI 控制和文中所提滑模控制作用下突加负载的仿真结果见图 5—6。仿真条件设置: 电机的参考转速为 1000 r/min, 在  $t=0.3$  s 时电机 1 突加负载转矩  $T_{L1}=35$  N·m, 电机 2 突加负载转矩  $T_{L2}=32$  N·m, 电机 3 突加负载转矩  $T_{L3}=33$  N·m。从图 5 所示的仿真结果可以看出, 在  $t=0.3$  s 时 3 台电机突加负载后, 虽然 3 台电机能够在 0.15 s 的调节时间内恢复同步运行, 但对负载扰动较为敏感且超调现象严重。相反, 在文中所提滑模控制

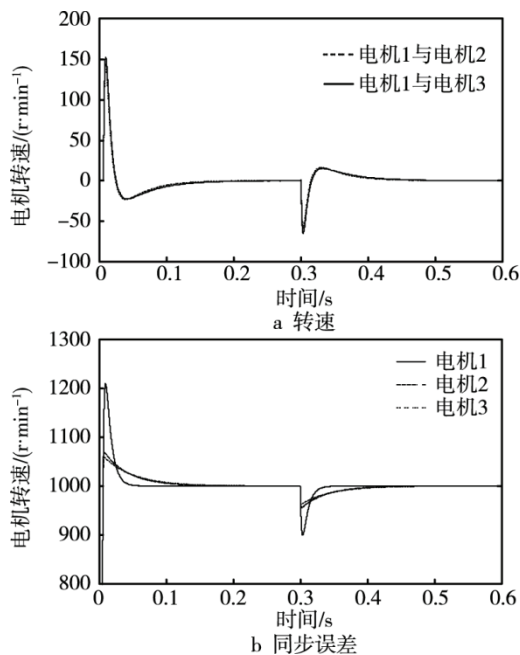


图5 PI控制作用下突加负载时的仿真结果

Fig.5 Simulation results of sudden load under the action of PI control

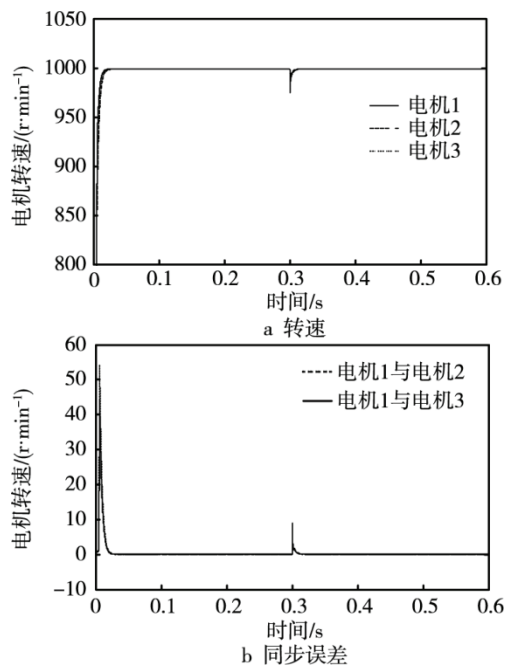


图6 滑模控制作用下突加负载时的仿真结果

Fig.6 Simulation results of sudden load under the action of sliding-mode control

的作用下 (图 6), 突加负载后系统恢复同步运行的调节时间较短, 且对负载扰动不敏感, 体现了滑模控制的动态响应速度快和鲁棒性强的优点。

### 4 结语

针对印刷、纺织和印染等工业中常用的多电机同步控制系统进行了深入的研究。基于多电机同步控制系统中常用的偏差耦合控制结构, 利用滑模控制动态性能好、鲁棒性强等优点, 提出了一种基于快速非奇异终端滑模控制的多电机速度同步控制策略。通过与传统 PI 控制进行详细地仿真对比分析, 结果表明文中所提控制算法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] 国家制造强国建设战略咨询委员会. 《中国制造 2025》重点领域技术路线图(2015 版)[EB/OL]. [2016-11-10]. <http://b2b.toocle.com/detail--6282305.html>. National Manufacturing Strategy Advisory Committee. The “Made in China 2025” Technology Roadmaps in Key Areas(2015 Edition)[EB/OL]. [2016-11-10]. <http://b2b.toocle.com/detail--6282305.html>.

[2] 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 Crosscoupled Synchronous Control of Multi Servo Motors Based on Fuzzy-PID[J]. Journal of Beijing In-

- stitute of Petro-chemical Technology, 2014, 22(4): 54—57.
- [3] 王建华, 詹国兵. 造纸机多电机同同步速度链控制系统研究[J]. 机械工程与自动化, 2015(4): 148—149. WANG Jian-hua, ZHAN Guo-bing. Research on Multi-motor Synchronous Speed Chain Control System of Paper Machine[J]. Mechanical Engineering and Automation, 2015(4): 148—149.
- [4] 曹春平, 王波, 胥小勇, 等. 基于神经网络多电机偏差耦合同步控制研究[J]. 控制工程, 2013, 20(3): 415—418. CAO Chun-ping, WANG Bo, XU Xiao-yong, et al. Research on Relative Coupling Control for Multi-motor Synchronization Based on Neural Network[J]. Control Engineering of China, 2013, 20(3): 415—418.
- [5] 刘福才, 刘学莲, 刘伟. 多级电机传动系统控制理论与应用研究[J]. 控制工程, 2002, 9(4): 87—89. LIU Fu-cai, LIU Xue-lian, LIU Wei. Synchronous Control Theory and Practical Study of Multimotor Synchronous Driving System[J]. Control Engineering of China, 2002, 9(4): 87—89.
- [6] 李慧, 刘星桥, 李景, 等. 多电机同步协调系统控制策略[J]. 电机与控制应用, 2014, 41(4): 6—11. LI Hui, LIU Xing-qiao, LI Jing, et al. Summary of Multi-Motor Synchronization and Coordination System Control Strategy[J]. Machine and Control Applications, 2014, 41(4): 6—11.
- [7] LIU G H, KANG M, YOU D T. Neural Network in Verse Control of Two-motor Synchronous System[J]. Journal of Jiangsu University Natural Science Edition, 2006(1): 67—70.
- [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] XU B, SUN F, LIU H, et al. Adaptive Kriging Controller Design for Hypersonic Flight Vehicle via Backstepping[J]. IET Control Theory and Application, 2012, 6(4): 487—497.
- [10] 马志刚, 赵志强, 王保云. 改进型相邻交叉耦合结构的多电机同步控制[J]. 包装工程, 2017, 38(3): 114—118. MA Zhi-gang, ZHAO Zhi-qiang, WANG Bao-yun. Multi-Motor Synchronous Control of Improved Adjacent Cross Coupling Structure[J]. Packaging Engineering, 2017, 38(3): 114—118.
- [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] 马文华, 张冬梅, 刘昕彤. 多电机速度同步自适应积分滑模控制[J]. 包装工程, 2017, 38(15): 121—125. MA Wen-hua, ZHANG Dong-mei, LIU Xin-tong. Adaptive Integral Sliding-mode Control for Multi-Motor Speed Synchronization[J]. Packaging Engineering, 2017, 38(15): 121—125.
- [13] 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.
- [14] 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): 61—65. 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): 61—65.
- [15] YUAN L, XIAO F, SHEN 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.