

文章编号: 2095-4980(2021)02-0324-06

## 时变扰动下的永磁同步电机滑模控制

闫宏亮, 李斌斌\*, 惠昭航

(西安石油大学 电子工程学院, 陕西 西安 710065)

**摘要:** 时变扰动环境下, 永磁同步电机(PMSM)采用鲁棒性较好的滑模控制。根据滑模控制中传统指数趋近律, 提出一种改进型的趋近律, 并基于改进型趋近律设计了一种PMSM调速系统的滑模速度控制器, 提高电机的运行性能。通过仿真结果对比分析, 设计的基于改进型趋近律的滑模速度控制器不仅可以提高系统的动态性能, 而且削弱了系统的抖振现象, 使电机在时变扰动下仍具有较高的运行性能。

**关键词:** 指数趋近律; 永磁同步电机调速系统; 速度控制器; 动态性能; 抖振现象

中图分类号: TM351

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2019503

## Sliding mode control of Permanent Magnet Synchronous Motor under time-varying disturbance

YAN Hongliang, LI Binbin\*, HUI Zhaohang

(College of Electronics Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an Shaanxi 710065, China)

**Abstract:** For Permanent Magnet Synchronous Motors(PMSM) in a time-varying disturbance environment, the sliding mode control with better robustness is adopted, an improved reaching law is proposed based on the traditional exponential reaching law in sliding mode control. Based on the improved reaching law, a sliding mode speed controller of PMSM speed regulation system is designed to improve the running performance of the motor. Through comparative analysis of simulation results, the sliding-mode speed controller based on the improved reaching law can not only improve the dynamic performance of the system, but also weaken the chattering phenomenon of the system, and it can make the motor still have high running performance under time-varying disturbance.

**Keywords:** exponential reaching law; Permanent Magnet Synchronous Motors(PMSM) speed regulation system; sliding mode speed controller; dynamic performance; buffeting phenomenon

在随钻测量技术中, 连续波泥浆脉冲远传系统是一项前沿技术, 可将数据传输速率提高到目前采用的正脉冲发生器的十倍以上, 并且可靠性高。其中, 永磁同步电机(PMSM)的旋转带动了转阀的运动, 从而产生了连续的压力波信号。因此, 电机的控制性能直接影响了连续波泥浆脉冲器转阀运动时产生的信号, 从而影响到井下信息的传输质量。而井下水力转矩产生的未知时变扰动会严重影响电机的运行性能, 因此需要选择一种抗扰动效果好的电机控制方法。在 PMSM 的控制策略中, 滑模控制是一类特殊的非线性控制, 并且滑模运动的设计与参数扰动和外界的扰动无关, 这就使得系统具有较好的鲁棒性, 可以有效避免外界环境的扰动, 但是滑模控制固有的开关特性会造成不可避免的抖振。在众多削弱抖振的方法中, 改进趋近律的方法由于思想简单, 控制器较容易实现, 并能够提高滑模运动中的动态品质因数而被广泛采用。

文献[1-3]通过在等速项增加一个含有随系统状态变化的量的函数, 使系统具有自适应调节的能力, 且有效地削弱了抖振, 但系统对于参数的依赖性过高, 从而降低了系统的稳定性。文献[4]在等速项增加了一个不含随系统状态变化的量的函数, 提高了系统的稳定性与快速性, 但对于系统抖振的削弱程度不足。文献[5-7]通过将

收稿日期: 2019-11-28; 修回日期: 2020-01-08

基金项目: 陕西省教育厅重点实验室资助项目(15JS084); 西安石油大学研究生创新与实践能力的培养计划项目(YCS19113049)

作者简介: 闫宏亮(1975-), 男, 副教授, 工学硕士, 研究方向为电机控制与配电网优化。email:hlyan@xsyu.edu.cn

\*通信作者: 李斌斌 email:595257958@qq.com

符号函数改为连续函数来实现光滑切换,从而达到削弱抖振的目的,但这种方法削弱抖振的程度不足。文献[8]将指数趋近律与幂次趋近律相结合,使系统既有指数趋近律的快速性,又可以像幂次趋近律一样平滑地进入滑模面从而削弱抖振,但参数较多,后期整定较为麻烦。文献[9-10]引入了终端吸引子的概念对指数趋近律进行修改,但控制器在设计中对于参数的依赖性较大,不易实现。从以上分析来看,现阶段对于指数趋近律的改进通常都存在参数较多,系统因过于依赖参数导致稳定性较低以及削弱抖振的程度不足等问题。

本文在以上文献的基础上设计了一种改进型的指数趋近律,该趋近律中不含有其他参数,因此不会降低系统的稳定性,同时也不会带来参数整定的困难,还可以有效削弱抖振,且控制器简单,容易实现。根据该改进型趋近律设计了一种 PMSM 调速系统的滑模速度控制器,并将此控制器应用到 PMSM 调速系统中。仿真结果验证了该趋近律的可行性与有效性,不仅提高了系统的动态性能,而且有效地改善了系统的抖振问题。

## 1 PMSM 的数学模型

为便于控制器的设计,以表贴式 PMSM 电机为例,采用  $i_d=0$  的控制方法,建立 d-q 坐标系下数学模型为:

$$\begin{cases} \frac{di_q}{dt} = \frac{1}{L_s}(-Ri_q - p_n\psi_f\omega_m + u_q) \\ \frac{d\omega_m}{dt} = \frac{1}{J}\left(-T_L + \frac{3p_n\psi_f}{2}i_q\right) \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $i_q$  为 q 轴电流;  $u_q$  为 q 轴电压;  $p_n$  为极对数;  $\omega_m$  为电机的实际转速;  $L_s$  为定子电感;  $\psi_f$  为磁链;  $J$  为转动惯量;  $T_L$  为负载转矩。

定义 PMSM 系统的状态变量:

$$\begin{cases} x_1 = \omega_{ref} - \omega_m \\ x_2 = \dot{x}_1 = -\dot{\omega}_m \end{cases} \quad (2)$$

式中  $\omega_{ref}$  为电机的参考转速。根据式(1)和式(2)可以得到:

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

## 2 滑模控制器设计

传统的指数趋近律为:

$$\dot{s} = -\varepsilon \operatorname{sgn}(s) - qs \quad (4)$$

趋近律法的主要思想为“远大近小”,即系统运动点在远离滑模面时速度非常大,可以快速趋近滑模面,但在接近滑模面时速度又非常小,从而削弱系统的抖振。本文设计的改进型趋近律需要满足参数少,系统稳定性高,并且可以有效削弱抖振的要求。

由于  $e^{-|s|}$  和  $\frac{1}{1+s^2}$  两个函数都满足在  $|s| \rightarrow \infty$  时,函数值为无穷小;  $|s| \rightarrow 0$  时,函数值都为 1,根据这 2 个函数的此特性,设计出如下改进型趋近律:

$$\begin{cases} \dot{s} = -\varepsilon f(s) \operatorname{sgn}(s) - qs \\ f(s) = \frac{1}{\frac{1}{1+s^2} + e^{-|s|}} \end{cases} \quad (5)$$

对改进型趋近律的特性做分析:

1) 当系统远离滑模面时,即  $|s| \rightarrow \infty$  时,此时  $e^{-|s|}$  和  $\frac{1}{1+s^2}$  无限趋近于 0,因此  $f(s)$  为无限大,等速项也为无穷大,此时系统的趋近速度不再主要由指数项决定,而是受等速项影响,使系统的趋近速度变得无限大,这有效提高了系统在趋近运动中的快速性,从而提高系统的抗扰性能。

2) 当系统接近于滑动模态时,即  $|s| \rightarrow 0$  时,指数项  $-qs$  也趋近于 0,此时系统趋近速度主要由等速项决定,

在改进型指数趋近律中  $e^{-|s|}$  和  $\frac{1}{1+s^2}$  趋近于 1, 因此  $f(s)$  趋近于  $1/2$ , 此时系统的趋近速度为  $\varepsilon/2$ , 系统可以以较小的速度进入滑模面, 有效削弱了抖振。

对改进型指数趋近律的指数项做趋近速度的分析。指数项为:

$$\dot{s} = -\varepsilon \frac{1}{\frac{1}{1+s^2} + e^{-|s|}} \operatorname{sgn}(s) \quad (6)$$

对等式两边同时求积分并化简得:

$$t = \frac{1}{\varepsilon} \left[ \arctan|s(0)| + e^{-|s(0)|} - 1 \right] \quad (7)$$

传统指数趋近律中等速项的趋近时间为:

$$t' = \frac{|s(0)|}{\varepsilon} \quad (8)$$

式(7)和式(8)做差得:

$$\Delta t = t - t' = \frac{1}{\varepsilon} \left[ \arctan|s(0)| + e^{-|s(0)|} - 1 - |s(0)| \right] \quad (9)$$

在 Matlab 中做  $t$  与  $\Delta t$  关于系统初始状态  $s(0)$  的函数图像, 见图 1。由于  $t$  和  $\Delta t$  是对称函数, 从图 1 中可以看出  $t > 0$ , 并且  $\Delta t < 0$ , 因此可以得出系统在接近滑模面时, 改进型趋近律比传统趋近律会以更短的时间到达滑模面。

根据李雅普诺夫稳定性原理, 选择李雅普诺夫函数:

$$V = \frac{s^2}{2} \quad (10)$$

则有:

$$\dot{V} = s\dot{s} = -\varepsilon \frac{s}{\frac{1}{1+s^2} + e^{-|s|}} \operatorname{sgn}(s) - ks^2 \quad (11)$$

从式(11)中可以看出,  $-s\operatorname{sgn}(s) < 0$ , 而  $\left(\frac{1}{1+s^2} + e^{-|s|}\right) > 0$ , 因此  $\dot{V} < 0$ 。即设计的改进型趋近律满足滑模到达条件, 能够保证系统由趋近模态进入滑动模态渐进收敛, 并在有限时间内到达原点。

将滑模面函数设计为:

$$s = cx_1 + x_2 \quad (12)$$

根据式(3), 定义  $D = \frac{3P_n \psi_l}{2J}$ , 对式(12)求导得:

$$\dot{s} = c\dot{x}_1 + \dot{x}_2 = cx_2 + \dot{x}_2 = cx_2 - D\dot{i}_q \quad (13)$$

采用改进型指数趋近律, 可得:

$$\dot{i}_q = \frac{1}{D} [cx_2 + \varepsilon f(s) \operatorname{sgn}(s) + qs] \quad (14)$$

由式(14)可得  $q$  轴参考电流为:

$$i_q^* = \frac{1}{D} \int_0^t [cx_2 + \varepsilon f(s) \operatorname{sgn}(s) + qs] d\tau \quad (15)$$

由式(15)可以看出, 控制器中包含积分项, 一方面可以削弱抖振现象, 另一方面也可以消除系统的稳态误差, 提高系统的控制品质<sup>[11]</sup>。

### 3 仿真和结果分析

为说明本设计的改进型趋近律的优越性, 与文献[1]和文献[6]中的改进型趋近律作对比, 文献[1]与文献[6]的改进型趋近律分别如式(16)与式(17)所示。

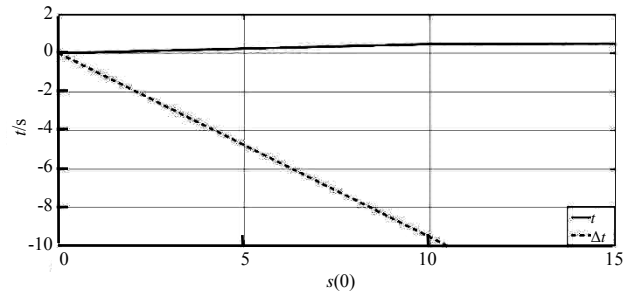


Fig.1 Reaching time  
图 1 趋近时间

$$\dot{s} = -\varepsilon(\lambda_1 \cdot |x_1|^\alpha + \lambda_2 \cdot |x_2|^\beta) \text{sgn}(s) - qs, \quad \lambda_1, \lambda_2, \alpha, \beta \text{ 均大于 } 0 \quad (16)$$

$$\dot{s} = -\varepsilon \frac{1}{(1-\delta)e^{-a|s|^b} + \delta} \text{sgn}(s) - qs, \quad 0 < \delta < 1 \quad (17)$$

将式(16)命名为 SMC1，将式(17)命名为 SMC2。从趋近律形式上而言，改进型趋近律比 SMC1 与 SMC2 参数少，在参数整定方面要容易许多。SMC1 中含有随系统状态变化的量，系统稳定性较差；SMC2 在接近于滑模面时，趋近速度为  $\varepsilon$ ，理论上并不能有效削弱抖振。

在 Matlab/Simulink 环境下搭建系统基于改进型趋近律、传统趋近律、SMC1 与 SMC2 的仿真模型，仿真中电机的参数设置为 HK91 型三相永磁同步电机的电气参数。仿真条件设置为：直流侧电压  $U_{dc}=311 \text{ V}$ ，PWM 开关频率设置为  $f_{PWM}=10 \text{ kHz}$ ， $T_s=10 \mu\text{s}$ ，采用变步长 ode23tb 算法，仿真时间设置为 0.4 s，并在 0.2 s 时突加一个 10 N·m 的负载转矩。

图 2 为 4 种趋近律下电机转速响应对比图。从图 2 中得出转速响应性能对比，见表 1。

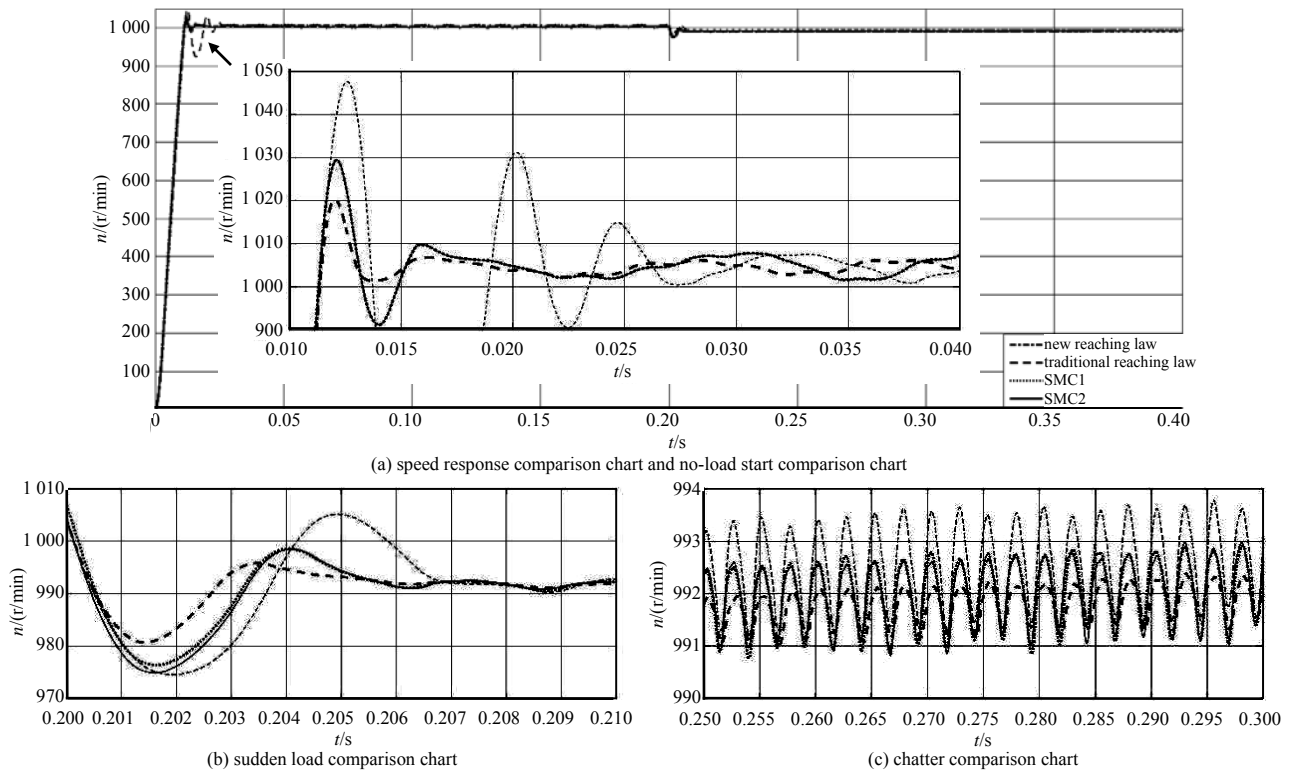


Fig.2 Speed response comparison

图 2 转速响应对比图

表 1 转速响应性能对比

	rise time/s	peak time/s	adjustment time/s	overshoot/%	(sudden load)	(sudden load)	(sudden load)
					dynamic rapid drop/%	adjustment time/s	chatter range(r/min)
new reaching law	0.012	0.013	0.020 0	2	2.00	0.205	991.0-992.0
traditional reaching law	0.013	0.014	0.031 0	5	2.50	0.209	991.0-994.0
SMC1	0.012	0.013	0.020 0	3	2.30	0.206	991.0-992.8
SMC2	0.012	0.013	0.020 3	3	2.45	0.206	991.0-992.8

从表 1 中可以看出，空载启动时，改进型趋近律的上升时间、峰值时间、调节时间和超调量都要优于传统趋近律、SMC1 与 SMC2，说明改进型趋近律加快了电机响应的调节速度。在 0.2 s 突加负载时，改进型趋近律的动态速降、调节时间与抖振程度都要优于其他 3 种趋近律，即改进型趋近律具有较高的抗扰动性能与运行性能，并且可以有效削弱抖振。

图 3 为 4 种趋近律的滑模面函数波形。在图 3 中  $s=0$  代表滑模面，系统在其上的运动称为滑动模态。在电机启动时，改进型趋近律与 SMC1 和 SMC2 控制下的电机响应在 0.02 s 时都达到了滑动模态，而传统趋近律控制下的电机响应在 0.035 s 时才达到滑动模态，调节时间明显优于传统趋近律。在 0.2 s 突加负载转矩时，改进型趋近

律控制下的电机响应在 0.205 s 时达到了滑动模态, 而传统趋近律控制下的响应在 0.207 s 时达到了滑动模态, SMC1 与 SMC2 控制下的电机响应在 0.206 s 时达到了滑动模态; 改进型趋近律控制下的响应在滑动模态的抖振范围为  $-200 \sim 200$ , 而传统趋近律与 SMC1 和 SMC2 控制下的响应在滑动模态的抖振范围为  $-400 \sim 300$ 。因此, 改进型趋近律控制下的响应在动态性能以及抖振幅度等方面都要优于传统趋近律、SMC1 和 SMC2。

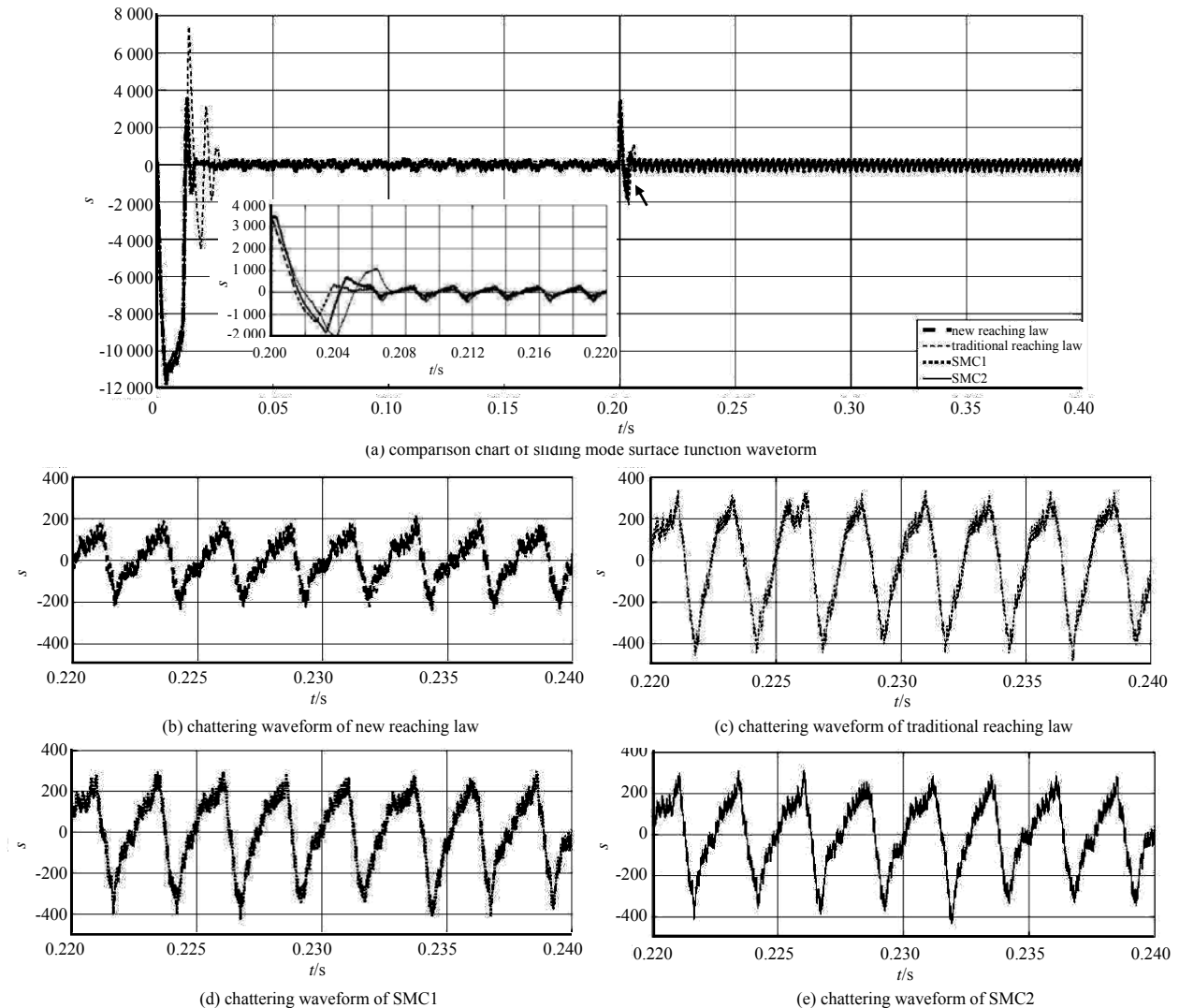


Fig.3 Waveform of sliding surface function

图 3 滑模面函数波形

#### 4 结论

根据传统指数趋近律, 设计出一种改进型的趋近律。从理论方面分析了改进型趋近律相对于传统趋近律的优势, 并将改进型趋近律应用于 PMSM 矢量控制的滑模速度调节器中。对传统趋近律和参考文献中的两种趋近律以及改进型趋近律分别进行仿真对比, 结果表明, 改进型趋近律控制下的电机响应更加快速, 控制性能更加优异; 在 0.2 s 突加负载转矩时, 通过对转速响应以及滑模面的波形的对比看出, 基于改进型趋近律的控制器有效地削弱了滑模控制固有的抖振, 改善了系统的动态品质, 可以使电机在井下存在时变扰动的情况下, 仍具有较好的运行性能。

#### 参考文献:

- [1] 苗敬利, 周重霞, 郑大伟. 永磁同步电机调速系统变指数趋近律控制[J]. 电气传动, 2019, 49(11): 18-21. (MIAO Jingli, ZHOU Chongxia, ZHENG Dawei. Variable exponential reaching law control of permanent magnet synchronous motor speed control system[J]. Electric Drive, 2019, 49(11): 18-21.)

- [ 2 ] ASAD M,BHATTI A,IQBAL S. A novel reaching law for smooth sliding mode control using inverse hyperbolic function[C]// International Conference on Emerging Technologies.Washington,USA:IEEE, 2012:1-6.
- [ 3 ] WASU S M,SARODE U B,BAHAVALKAR M P. Speed control of PMSM system using improved reaching law based sliding mode control and disturbance observer technique[J]. International Journal of Advanced Computer Research, 2013,3(4):312.
- [ 4 ] 郭小定,柏达,周少武,等. 一种新型趋近律的永磁同步电机滑模控制[J]. 控制工程, 2018,25(10):1865-1870. (GUO Xiaoding,BO Da,ZHOU Shaowu,et al. A new reaching law of sliding mode control for permanent magnet synchronous motor[J]. Control Engineering of China, 2018,25(10):1865-1870.)
- [ 5 ] 郑长明,张加胜. 基于最小阶扰动估计的永磁同步电机离散比例-积分准滑模控制[J]. 电工技术学报, 2018,33(24): 5711-5719. (ZHENG Changming,ZHANG Jiasheng. Discrete proportional-integral quasi-sliding mode control of permanent magnet synchronous motor based on minimum order disturbance estimation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018,33(24):5711-5719.)
- [ 6 ] 董绍江,胡宇,王艳,等. 一种改进的永磁同步电机直接转矩控制方法[J]. 北京化工大学学报, 2019,46(3):105-111. (DONG Shaojiang,HU Yu,WANG Yan,et al. Improved direct torque control method of permanent magnet synchronous motor[J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology, 2019,46(3):105-111.)
- [ 7 ] 肖仁鑫,王泽林,申江卫. 车用永磁同步电机变指数滑模控制研究[J]. 微电机, 2018,51(5):43-47. (XIAO Renxin, WANG Zelin,SHEN Jiangwei. Research on variable exponential sliding mode control of automotive permanent magnet synchronous motor[J]. Micromotors, 2018,51(5):43-47.)
- [ 8 ] 马畅,冷建伟. 永磁同步电机滑模调速系统新型趋近律控制[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2019(4):81-85. (MA Chang,LENG Jianwei. New reaching law control of sliding mode speed regulation system for permanent magnet synchronous motor[J]. Modular Machine Tool and Automatic Manufacturing Technique, 2019(4):81-85.)
- [ 9 ] 程勇,李田桃. 永磁同步电机的分数阶新型复合积分滑模控制[J]. 电气传动, 2018,48(8):10-12. (CHENG Yong,LI Tiantao. Fractional-order novel composite integral sliding mode control for permanent magnet synchronous motor[J]. Electric Drive, 2018,48(8):10-12.)
- [10] 张晓光,赵克,孙力,等. 永磁同步电动机滑模变结构调速系统新型趋近率控制[J]. 中国电机工程学报, 2011,31(24): 77-82. (ZHANG Xiaoguang,ZHAO Ke,SUN Li,et al. New reach law control of sliding mode variable structure speed control system for permanent magnet synchronous motor[J]. Proceeding of the CSEE, 2011,31(24):77-82.)
- [11] 周怀平,葛萍. 基于非线性观测器的永磁同步电机无传感器控制[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2012,10(6):771-774. (ZHOU Huaiping,GE Ping. Sensorless control of permanent magnet synchronous motor based on nonlinear observer[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2012,10(6):771-774.)

-----  
(上接第 294 页)

- [ 7 ] TAKAYA Wada,DAISUKE Okubo. Tunable isolator using variable capacitor for multi-band system[C]// 2013 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest. Seattle,WA,USA:IEEE, 2013:1-3.
- [ 8 ] ALMALKAWI M,ZHU L. Magnetically tunable substrate integrated waveguide bandpass filters employing ferrites[C]// 2011 International Conference on Infrared,Millimeter,and Terahertz Waves. Houston,TX,USA:IEEE, 2011:1-2.
- [ 9 ] ZHANG Yi,DINESH K. Microwave power absorption mechanism of metallic powders[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2018,66(5):2107-2115.
- [10] WU Jing,YANG Xi. Nonreciprocal tunable low-loss bandpass filters with ultra-wideband isolation based on magnetostatic surface wave[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2012,60(12):3959-3968.
- [11] 何振娟,王录全. 粉末混料均匀性的影响因素及改善方法[C]// 2012 年川渝蓉粉末冶金技术交流会. 成都:[s.n.], 2012: 1-12. (HE Zhenjuan,WANG Luquan. Influencing factors and improvement methods of powder mixing uniformity[C]// Sichuan-Chongqing-Chengdu Powder Metallurgy Technology Exchange Conference in 2012. Chengdu,China:[s.n.], 2012: 1-12.)
- [12] MONTES J,CUEVAS F. Electrical conductivity of metal powders under pressure[J]. Applied Physics A, 2011,105(4): 935-947.