

# 基于新型趋近律的永磁同步电机积分滑模控制

陈 才, 王志亮, 徐 潇, 张言溪, 王 猛

(北京机电工程研究所, 北京 100074)

**摘 要:** 为了提升永磁同步电机(PMSM)调速系统动态品质,提出了一种基于新型混合趋近律的积分滑模控制算法。在传统指数趋近律基础上,引入了双曲正切函数、终端吸引子和基于系统状态变量幂函数的自适应因子,并结合积分滑模面,提高了系统趋近速度自适应调节能力和干扰抑制能力,有效削弱了抖振水平。基于所提出的趋近律,设计了 PMSM 新型混合趋近律积分滑模速度控制器,通过仿真完成了与传统 PI 算法控制性能的对比分析。仿真结果表明,新型趋近律速度滑模控制器具有更好的速度跟踪精度,抗负载扰动性能更好,抖振量非常小,鲁棒性强。

**关键词:** 永磁同步电机; 新型趋近律; PI 控制; 积分滑模控制

中图分类号: TM 351 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2021)04-0026-06

doi: 10.12177/emca.2020.233

## Integral-Type Sliding Mode Control for Permanent Magnet Synchronous Motor Based on Novel Reaching Law

CHEN Cai, WANG Zhiliang, XU Xiao, ZHANG Yanxi, WANG Meng

(Beijing Institute of Mechanical and Electrical Engineering, Beijing 100074, China)

**Abstract:** In order to improve the dynamic quality of permanent magnet synchronous motor (PMSM) speed regulation system, an integral sliding mode control algorithm based on a novel hybrid reaching law is proposed. Based on the conventional exponential reaching law, the hyperbolic tangent function, terminal attractor and adaptive factor based on power function of system state variables are introduced. Combined with integral sliding mode surface, the adaptive adjustment ability and anti-disturbance ability of the system approaching speed are improved, and the chattering level is limited. Based on the proposed reaching law, a new hybrid reaching law integral sliding mode speed controller for PMSM is designed. The control performance of the controller is compared with the traditional PI algorithm through simulation. Simulation results show that the new reaching law speed controller has better anti-load disturbance performance, very small chattering and strong robustness.

**Key words:** permanent magnet synchronous motor (PMSM); novel reaching law; PI control; integral-type sliding mode control

## 0 引 言

永磁同步电机(PMSM)结构简单、功率密度高、效率高<sup>[1]</sup>,是众多飞行器电动舵机和燃油系统电动燃油泵的关键部件。目前 PMSM 调速系统普遍采用算法简单、可靠性高和参数调整方便的比例-积分-微分(PID)控制,但 PMSM 是多变量

耦合的复杂非线性系统,传统 PID 控制难以满足在系统参数扰动和外界不确定因素影响状况下的高性能控制要求<sup>[2]</sup>。随着现代控制理论的发展,预测控制<sup>[3-4]</sup>、模糊控制<sup>[5-6]</sup>、模型参考自适应控制<sup>[7-8]</sup>、滑模控制(SMC)<sup>[9-11]</sup>、神经网络控制<sup>[12-13]</sup>等先进控制技术逐步被应用于高性能 PMSM 调速系统的设计。滑模控制通过控制量的切换迫使

收稿日期: 2020-12-17; 收到修改稿日期: 2021-02-04

作者简介: 陈 才(1994—),男,硕士研究生,研究方向为飞行器控制、飞行器电气系统设计、电机控制。

系统状态沿设计的滑模面滑动,使得系统在受到参数摄动和外部干扰时具有不变性,鲁棒性好、实现简单的滑模控制在复杂非线性系统的控制中已有广泛应用<sup>[14-15]</sup>。

文献[16]提出了一种基于改进幂次指数趋近律的模糊自适应滑模控制器设计方法,研究表明可提高 PMSM 控制系统在参数变化和外部扰动时的动静态性能和鲁棒性。文献[17]提出的新型滑模控制器采取变带宽趋近方式,并引进反双曲正弦函数特征,可有效抑制系统的稳态转矩脉动。文献[18]对基于变指数快速幂次趋近律的滑模控制器开展了研究,所设计的控制器响应速度快、鲁棒性强。文献[19]对滑模切换面进行优化设计,结合了提出的变指数趋近律,可有效削弱系统抖振。文献[20]提出一种切换增益可随系统偏差自适应调整的非线性变速趋近律,有效抑制了抖振,控制品质较好。

本文基于上述文献思想,提出一种基于新型混合趋近律的 PMSM 积分滑模控制器设计方法,并进行了仿真分析。

## 1 PMSM 数学模型

为了简化分析,在建立表贴式 PMSM 数学模型时,假设:(1)转子永磁磁场在气隙空间分布为正弦波,定子电枢绕组中的感应电动势也为正弦波;(2)忽略定子铁心饱和,认为磁路线性,电感参数不变;(3)不计铁心涡流和磁滞损耗;(4)转子上无阻尼绕组。则两相旋转  $d$ - $q$  坐标系下 PMSM 的电压方程为

$$\begin{cases} u_d = Ri_d - \omega_e L_q i_q + L_d \frac{di_d}{dt} \\ u_q = Ri_q - \omega_e L_d i_d + \omega_e \psi + L_q \frac{di_q}{dt} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $u_d$ 、 $u_q$  分别为  $d$ 、 $q$  轴的电压分量; $i_d$ 、 $i_q$  分别为  $d$ 、 $q$  轴的电流分量; $L_d$ 、 $L_q$  分别为  $d$ 、 $q$  轴的电感,在表贴式 PMSM 中一般认为  $L_d = L_q$ ;  $R$  为定子电枢绕组电阻; $\omega_e$  为电机的电角速度; $\psi$  为永磁体与定子交链磁链。

转矩方程为

$$T_e = \frac{3}{2} p_n [\psi i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] = \frac{3}{2} p \psi i_q \quad (2)$$

式中: $T_e$  为电磁转矩; $p_n$  为极对数。

运动方程为

$$T_e - T_L - B\omega = J \frac{d\omega}{dt} \quad (3)$$

式中: $T_L$  为负载转矩; $\omega$  为机械角速度,且  $\omega_e = p\omega$ ;  $B$  为摩擦系数,一般很小,在控制器设计时可不考虑; $J$  为转动惯量。

## 2 新型滑模控制器设计

利用趋近律设计滑模控制器的基本步骤是首先设计合适的滑模切换面,然后在滑模趋近律基础上设计滑模控制输出,使得系统轨迹在控制输出作用下快速沿着滑模面运动。

### 2.1 积分滑模面的选取

传统的线性滑模面函数中含有电机速度跟踪误差的微分项,易导致高频噪声,造成系统抖振。积分滑模面函数具有平滑输出转矩、削弱抖振、增强稳定性和减小稳态误差等优点。为此,定义 PMSM 系统状态变量为速度跟踪误差:

$$e = \omega_{\text{ref}} - \omega \quad (4)$$

式中: $\omega_{\text{ref}}$  为电机的参考转速。

选取的积分滑模切换面如下:

$$s = e + k \int_0^t e d\tau \quad (5)$$

式中: $k > 0$ 。

对积分滑模切换面求微分,可得:

$$\frac{ds}{dt} = \frac{de}{dt} + ke = \frac{d\omega_{\text{ref}}}{dt} - \frac{d\omega}{dt} + ke \quad (6)$$

由 PMSM 的运动方程和转矩方程可知:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{3p^2\psi}{2J} i_q - \frac{p}{J} T_L \quad (7)$$

将式(7)代入式(6)可得:

$$\frac{ds}{dt} = \frac{d\omega_{\text{ref}}}{dt} - \frac{3p^2\psi}{2J} i_q + \frac{p}{J} T_L + ke \quad (8)$$

由式(6),当  $s = \dot{s} = 0$  时,有:

$$\frac{de}{dt} = -ke \quad (9)$$

求解式(9)可得:

$$e = c \cdot \exp(-kt) \quad (10)$$

式中: $c$  为正常数。

显然,当选择合适的  $k$  时,PMSM 速度跟踪误差会逐步趋于零。 $k$  的取值影响速度误差趋于零的速度, $k$  越大,稳定时间越短,但  $k$  太大会导致抖振。

## 2.2 新型趋近律的提出

滑模控制的优势在于其结构可以根据系统状态变化而实时调整,进而使系统状态变量进入预先设定好的滑模面,直至运行到原点。系统状态变量在滑模控制下的运动包括趋近滑模面的趋近运动和沿着滑模面的滑模运动。传统的滑模控制可达性条件仅能保证系统状态可到达滑模面的要求,并未对趋近运动具体轨迹做出限制。基于趋近律的方法不仅能满足可达性条件,还可有效改善趋近运动阶段的动态品质和抖振抑制效果。传统趋近律有等速趋近律、指数趋近律和幂次趋近律,可通过调整相应的参数改变系统状态趋近速度。基于传统趋近律的滑模控制结构相对简单、易实现,但是不能解决趋近速度与抖振水平之间的矛盾。本文为了平衡这种本质矛盾,在传统趋近律基础上,引入双曲正切函数、终端吸引子和基于系统状态变量幂函数的自适应因子,提出一种新型的趋近律:

$$\frac{ds}{dt} = -F(e, s) M(e, s) \quad (11)$$

$$\text{其中: } F(e, s) = N / \left[ \alpha + \left( \frac{1}{|e|} + 1 - \alpha \right) e^{-\delta |s|} \right];$$

$$M(e, s) = A |e|^a \tanh\left(\frac{s}{\varepsilon}\right) + B |e|^b s + C |e|^c s^{q/p};$$

$$\tanh\left(\frac{s}{\varepsilon}\right) = \frac{e^{s/\varepsilon} - e^{-s/\varepsilon}}{e^{s/\varepsilon} + e^{-s/\varepsilon}}; A, B, C, N, a, b, c, \alpha, \delta > 0;$$

$p > q$  且均为正奇数。

新型趋近律中的  $F(e, s)$  是自适应因子。当  $|s|$  较大即系统状态远离滑模面时,  $e^{-\delta |s|}$  将趋于零,  $F(e, s)$  趋于常数  $N/\alpha$ ; 当  $|s|$  趋于零即系统状态变量靠近或在滑模面上运动时,  $e^{-\delta |s|}$  将趋于 1,  $F(e, s)$  将趋于如下值:

$$\frac{N}{1 + 1/|e|} = \frac{N|e|}{1 + |e|} \quad (12)$$

系统状态在沿着滑模面逐步收敛至原点的过程中,  $|e|$  将趋于零, 即:

$$\frac{N|e|}{1 + |e|} \rightarrow 0 \quad (13)$$

说明  $F(e, s)$  将根据系统状态及其与滑模面的位置关系进行自动调整, 进而改变趋近速度, 实现滑模控制器结构的自适应调整。

新型趋近律中的  $M(e, s)$  可看作由均含自适

应系数的变形后等速趋近律项、指数趋近律项与终端吸引子项构成。其中, 变速趋近律部分  $A|e|^a \tanh(s/\varepsilon)$  采用双曲正切函数替换传统等速趋近律中的符号函数, 并结合系统状态误差变量  $|e|$  的幂函数从而构成变速趋近方式; 变指数趋近部分  $B|e|^b s$  和变终端吸引子部分  $C|e|^c s^{q/p}$  同样是在传统指数趋近方式和终端吸引子的基础上结合系统状态误差变量的幂函数从而形成变指数趋近方式和变终端吸引趋近方式。系统状态误差变量幂函数的引入使新型趋近律趋近速度与系统状态相关联, 从而实现系统状态远离滑模面时趋近速度大, 但靠近或进入滑模面时冲击速度小的目的, 平衡了趋近速度与抖振之间的矛盾。  $F(e, s)$  项增强了这种平衡效果。

## 2.3 PMSM 滑模速度控制器的设计

将新型混合趋近律代入式(8)便可得 PMSM 的滑模速度控制器:

$$i_q^* = \frac{2J}{3p^2 \psi}$$

$$\left[ \frac{d\omega_{\text{ref}}}{dt} + \frac{p}{J} T_L + k(\omega_{\text{ref}} - \omega) + F(e, s) M(e, s) \right] \quad (14)$$

式(14)中通过选择适当的可选参数值, 即可使系统拥有优良的控制品质。

## 2.4 稳定性分析

为验证基于新型混合趋近律的 PMSM 积分滑模控制器稳定性, 定义 Lyapunov 函数:

$$V = \frac{1}{2} s^2 \quad (15)$$

求导可得:

$$\dot{V} = s \cdot \frac{ds}{dt} \quad (16)$$

将式(11)代入式(16), 得到:

$$\begin{aligned} \dot{V} = & - \frac{N}{\alpha + \left( \frac{1}{|e|} + 1 - \alpha \right) e^{-\delta |s|}} \cdot \\ & \left[ A |e|^a \tanh\left(\frac{s}{\varepsilon}\right) + B |e|^b s^2 + C |e|^c s^{(q+p)/p} \right] \leq 0 \end{aligned} \quad (17)$$

式(17)当且仅当  $s=0$  时, 有  $\dot{V} = s \cdot ds/dt = 0$ 。根据连续系统滑模存在条件与滑动模态可达条件可知, 所设计的滑模控制器可使系统渐进稳定。

### 3 系统仿真与结果分析

为了验证本文提出的新型趋近律积分滑模控制策略的正确性和有效性,基于矢量控制结构在

MATLAB 中对转速环分别采用新型滑模控制器与 PI 控制器进行仿真对比分析,仿真时电流环均为 PI 控制且 PI 控制参数相同。仿真采用的控制系统结构原理图如图 1 所示。

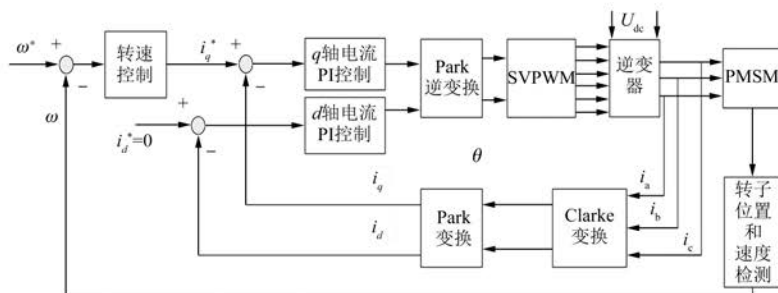


图 1 仿真用的控制系统结构

仿真时,电机参数为:极对数 2,定子电感 0.9 mH,定子内阻  $0.576 \Omega$ ,磁链  $0.054 \text{ 33 Wb}$ ,转动惯量  $4.094 \times 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 。采取 SVPWM 调制方式,开关频率为 10 kHz,直流侧母线电压为 270 V,采样周期为  $10^{-6} \text{ s}$ ,仿真时间为 0.3 s。额定转速  $\omega = 6\,700 \text{ r/min}$ ,0~0.1 s 时电机为空载状态,0.1~0.2 s 负载转矩为  $0.8 \text{ N} \cdot \text{m}$ ,0.2~0.3 s 为空载状态,即 0.1 s 突加负载,0.2 s 突卸负载。 $q$  轴电流 PI 控制参数为  $k_p = 4.7, k_i = 1\,920$ 。 $d$  轴电流 PI 控制参数为  $k_p = 4.7, k_i = 1\,920$ 。转速环 PI 控制参数为  $k_p = 0.05, k_i = 0.008$ 。转速环新型趋近律积分滑模控制参数为  $A = B = C = 0.1, a = b = c = 0.2, p = 7, q = 5, k = 600, \alpha = 0.1, \delta = 10, \varepsilon = 10, N = 1$ 。

图 2 是电机转速响应曲线,图 3 是转速稳定后的局部放大曲线。从图 2 可以看出,新型趋近律积分滑模控制的转速响应速度与 PI 控制差不多,2 种控制方式下的转速响应均无明显超调,且均能使电机转速在 0.02 s 之后达到稳定状态。但是从图 3 可以看出,当电机转速达到稳定状态以后,PI 控制下的转速在  $6\,701 \sim 6\,705.5 \text{ r/min}$  之间波动,最大转速波动幅值为  $4.5 \text{ r/min}$  左右,最大转速与给定转速  $6\,700 \text{ r/min}$  相比存在最大约  $5.5 \text{ r/min}$  的偏差;平均转速约为  $6\,703 \text{ r/min}$ ,比给定转速大了  $3 \text{ r/min}$  左右。与 PI 控制相比,新型趋近律积分滑模控制下的转速在  $6\,698 \sim 6\,701.5 \text{ r/min}$  之间波动,最大转速波动幅值为  $3.5 \text{ r/min}$  左右,与给定转速  $6\,700 \text{ r/min}$  相比存在最大约  $2 \text{ r/min}$  的偏差;平均转速约为

$6\,700 \text{ r/min}$ ,与给定转速相符。总的来说,新型趋近律积分滑模控制的转速响应速度快,无明显超调,转速波动和抖振量小,速度跟踪精度高。

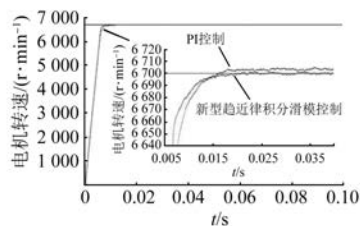


图 2 额定转速 6 700 r/min 时的转速响应曲线

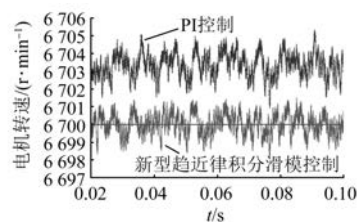


图 3 转速响应曲线(局部放大)

图 4 是存在负载转矩干扰时的转速响应曲线,图 5、图 6 分别是图 4 在突加负载和突卸负载时的转速响应局部放大曲线。从图 4 可以看出,当存在负载转矩干扰时,新型趋近律积分滑模控制下的稳态转速均值约为  $6\,685 \text{ r/min}$ ,与给定转速相比存在  $15 \text{ r/min}$  的偏差;PI 控制下的稳态转速均值约为  $6\,584 \text{ r/min}$ ,与给定转速相比存在  $116 \text{ r/min}$  左右的偏差,转速偏差值是新型趋近律积分滑模控制下的 7.73 倍。从图 5 可以看出,当

突加负载时,在 PI 控制下转速能在 0.05 s 内实现稳定,但在新型趋近律积分滑模控制下仅需 0.01 s 转速便能稳定。在图 6 中,当突卸负载时,2 种控制方式均能使转速在 0.02 s 内达到稳定状态,新型趋近律积分滑模控制下的转速存在 13 r/min 的小超调并能快速收敛,稳态转速相对于给定转速几乎无偏差;PI 控制下的转速响应速度稍慢,虽然无明显超调,但却存在约 5 r/min 的稳态转速偏差。综合来说,新型趋近律积分滑模控制的抗干扰性能更好,存在负载扰动时能实现更小的转速波动,突加负载和突卸负载时可以快速达到转速稳定状态。

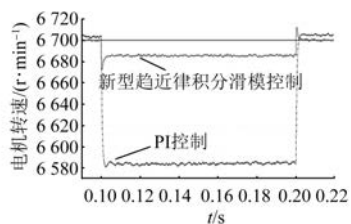


图4 存在负载转矩干扰时的转速响应

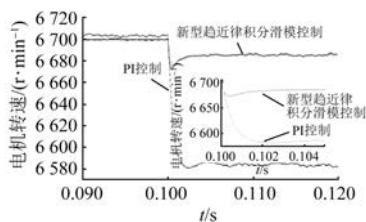


图5 突加负载干扰时的转速响应

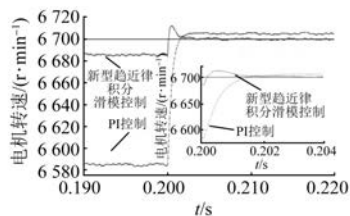


图6 突卸负载干扰时的转速响应

为验证新型趋近律积分滑模控制的宽范围调速性能,针对 600、1 500、3 000、5 000 r/min 等给定转速进行仿真。仿真时所有参数除给定转速外均与前文一致。运行仿真程序,得到不同给定转速情况下的电机转速响应曲线分别如图 7~图 10 所示。从仿真结果可以看出,当给定较宽范围的

不同转速时,新型趋近律积分滑模控制下的电机转速响应速度快于 PI 控制,且稳态误差小、无明显超调、抗干扰性能好,与额定转速 6 700 r/min 时的转速响应类似。显然,新型趋近律积分滑模控制能够满足对宽范围的高精度调速需求,不同转速情况下均具有较好的控制品质。

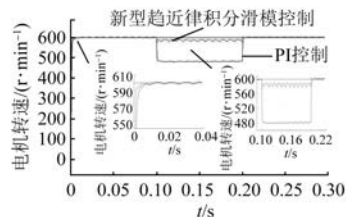


图7 给定转速 600 r/min 时的转速响应曲线

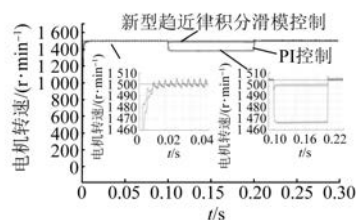


图8 给定转速 1 500 r/min 时的转速响应曲线

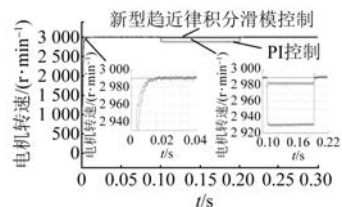


图9 给定转速 3 000 r/min 时的转速响应曲线

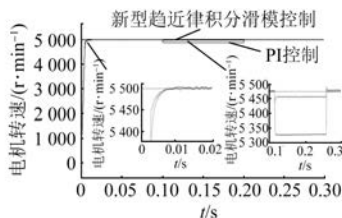


图10 给定转速 5 000 r/min 时的转速响应曲线

综上所述,在新型趋近律积分滑模控制下,电机输出转速能快速无明显超调地跟踪不同的给定转速,稳态转速偏差小,突加突卸负载时转速仅有较小波动,可有效抑制负载变化对输出转速的影

响,抖振现象得到明显削弱。

## 4 结 语

本文在传统指数趋近律的基础上引入了系统状态变量自适应加权因子和终端吸引子,提出了一种新型的混合趋近律,并结合积分滑模面,获得了新型混合趋近律积分滑模控制器构建方案。并针对 PMSM 设计了 PI 和新型趋近律积分滑模速度控制器,通过仿真方式对 2 种控制方法进行了对比分析。仿真结果表明,所设计的 PMSM 新型趋近律积分滑模速度控制器有效地抑制了抖振,系统动静特性良好,能有效提高系统控制品质,为 PMSM 实际控制器提供了新的设计方法。

## 【参考文献】

- [1] 戴鹏,徐楠,谢后晴,等. 永磁同步电机调速系统的快速幂次趋近律控制[J]. 电机与控制学报,2017,21(11): 32.
- [2] 林城美,杨静. 基于变指数趋近律的永磁同步电机滑模控制[J]. 电机与控制应用,2020,47(5): 18.
- [3] LI Y, ZHAO C, ZHOU Y, et al. Model predictive torque control of PMSM based on data drive[J]. Energy Reports,2020,6(S9): 1370.
- [4] 涂文聪,骆光照,刘卫国. 基于模糊动态代价函数的永磁同步电机有限控制集模型预测电流控制[J]. 电工技术学报,2017,32(16): 89.
- [5] 胡勤丰,陈威振,邱攀峰,等. 适用于连续加减速的永磁同步电机模糊增益自调整 PI 控制研究[J]. 中国电机工程学报,2017,37(3): 907.
- [6] BENSALAM Y, ABBASSI R, JERBI H. Fuzzy logic based active fault tolerant control of speed sensor failure for five-phase PMSM[J]. Journal of Electrical Engineering & Technology,2021,16: 287.
- [7] ZHENG L C, ZHENG Y H, WANG X, et al. Simplified model reference adaptive method for sensorless vector control of PMSM[J]. Advanced Materials Research,2013,860/861/862/863: 2240.
- [8] 任金霞,黄艺培,蒋梦倩. PMSM 分数阶模型参考自适应调速系统研究[J]. 河南理工大学学报(自然科学版),2020,39(3): 108.
- [9] 陈思溢,皮佑国. 基于滑模观测器与滑模控制器的永磁同步电机无位置传感器控制[J]. 电工技术学报,2016,31(12): 108.
- [10] ZHAO K, YIN T, ZHANG C, et al. Sliding mode-based velocity and torque controllers for permanent magnet synchronous motor drives system[J]. The Journal of Engineering,2019(7). doi:10. 1049/joe. 2018. 9065.
- [11] ZHAO Y, DONG L. Robust current and speed control of a permanent magnet synchronous motor using SMC and ADRC[J]. Control Theory and Technology,2019,17(2): 190.
- [12] 付文强,赵东标,赵世超. 基于 BP 神经网络优化自抗扰 PMSM 高精度速度控制[J]. 微特电机,2020,48(12): 50.
- [13] 李艳芳,崔成梅,谢宗华. 基于 RBF 神经网络 ESO 的 PMSM 速度控制[J]. 新乡学院学报,2020,37(9): 69.
- [14] 张立伟,李行,宋佩佩,等. 基于新型滑模观测器的永磁同步电机无传感器矢量控制系统[J]. 电工技术学报,2019,34(增刊1): 70.
- [15] 王娜,唐传胜. 基于滑模观测器的 PMSM 有限时间混沌同步控制[J]. 兵工自动化,2020,39(12): 38.
- [16] 苗敬利,郑大伟,周重霞. 基于新型趋近律的永磁同步电机模糊滑模控制[J]. 电气传动,2019,49(3): 3.
- [17] 樊英,周晓飞,张向阳,等. 基于新型趋近律和混合速度控制器的 IPMSM 调速系统滑模变结构控制[J]. 电工技术学报,2017,32(5): 9.
- [18] 黄灿,张远来,李京鸿,等. 永磁同步电机变指数快速幂次趋近律滑模控制[J]. 微特电机,2019,47(3): 44.
- [19] 毛亮亮,周凯,王旭东. 永磁同步电机变指数趋近律滑模控制[J]. 电机与控制学报,2016,20(4): 106.
- [20] 茅靖峰,吴爱华,吴国庆,等. 永磁同步电机幂次变速趋近律积分滑模控制[J]. 电气传动,2014,44(6): 50.