

永磁同步电机滑模调速系统新型趋近律控制^{*}

霍召晗, 许鸣珠

(石家庄铁道大学 机械工程学院, 河北 石家庄 050043)

摘 要: 基于传统指数趋近律的滑模控制(SMC)系统在永磁同步电机(PMSM)调速系统中应用广泛。但是该算法在 SMC 系统做趋近运动时,存在明显抖振,控制精度无法应对复杂情况。为了抑制系统抖振,提高 PMSM 调速系统的动态和稳态性能,在传统指数趋近律的基础上引入加权积分型增益,提出了一种新型趋近律。加权积分型增益的引入使系统在滑动模态阶段滑模面函数和积分结果可以同步趋近于零,从而有效抑制系统抖振。依照所提出的新型趋近律,设计了速度控制器,并应用到 PMSM 矢量控制系统中。分别利用软件仿真和硬件试验与传统指数趋近律控制进行了比较,验证了所提控制策略的可行性和有效性。

关键词: 永磁同步电机; 滑模控制; 加权积分型增益; 新型趋近律; 抖振

中图分类号: TM 341 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2019)12-0016-06

New Reaching Law Control of Permanent Magnet Synchronous Motor Sliding Mode Speed Regulation System^{*}

HUO Zhaohan, XU Mingzhu

(School of Mechanical Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: The sliding mode control (SMC) system based on the traditional exponential reaching law was widely used in the permanent magnet synchronous motor (PMSM) speed control system. However, this algorithm had obvious buffeting when the SMC system was approaching, and its control precision could not cope with the complicated situation. In order to suppress the system buffeting and improve the dynamic and steady-state performance of the PMSM speed control system, a new reaching law was proposed based on the traditional exponential reaching law by introducing the weighted integral gain. The introduction of the weighted integral gain made the system sliding mode function and its integral result close to zero in the sliding mode, which effectively suppressed system buffeting. According to the proposed new reaching law, the speed controller was designed and applied to the PMSM vector control system. The new reaching law control strategy was compared with the traditional exponential reaching law control strategy in software simulation and hardware experiments respectively to verify the feasibility and effectiveness of the proposed control strategy.

Key words: permanent magnet synchronous motor (PMSM); sliding mode control (SMC); weighted integral gain; new reaching law; buffeting

0 引 言

随着永磁材料技术的不断发展,永磁同步电机(PMSM)已广泛应用于航空航天、仪器仪表、数控机床等领域^[1]。PMSM 具有结构简单、功率密

度高、效率高、损耗小、节能效果明显等优点^[2]。传统 PMSM 调速矢量控制策略速度控制器多采用 PI 控制,算法简单、可靠性高、参数整定方便,但是 PMSM 作为一个非线性、强耦合的多变量系统,当系统受到外界扰动或者系统内部参数发生

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金面上项目(11972238)

作者简介: 霍召晗(1990—),男,硕士研究生,研究方向为控制理论与电机控制。

许鸣珠(1967—),女,教授,硕士生导师,研究方向为控制理论与控制工程。(通信作者)

变化时,传统 PI 控制不能满足控制要求^[3-4]。为了提高电机系统的调速性能,国内外学者做了大量研究,如自适应控制、滑模控制(SMC)、模糊控制和神经网络控制等^[5]。其中,SMC 对系统扰动和参数变化不敏感、响应速度快、鲁棒性强,广泛应用于 PMSM 驱动系统中。

SMC 作为一种变结构控制,在趋近运动中会产生高频抖振,不仅影响系统的精度,还会增加控制器的负担,影响系统稳定。解决抖振问题与提高 SMC 的动态品质,是目前 SMC 的研究热点之一。文献[6]设计了一种新型趋近律和扰动观测器相结合的 SMC 策略,并结合积分型滑模面有效抑制了系统抖振,但是该策略趋近律形式复杂,参数选取困难。文献[7]提出了变指数快速幂次趋近律 SMC,有效抑制了系统抖振,但是幂次趋近律在远离滑模面时趋近速度很低。文献[8]将系统状态变量加入到等速趋近律当中,根据系统状态距离平衡点的远近,自适应调整等速趋近律的趋近速度,有效抑制了抖振,但是平衡点的判定增加了系统的复杂性和可操作性。

为了提高 PMSM 调速系统的动静态性能,抑制系统抖振,本文提出一种滑模调速系统新型趋近律控制策略。该新型趋近律在指数趋近律中引入加权积分型增益,使系统在滑动模态阶段滑模面函数和其积分结果可以同步趋近于零,即在增益项中引入换函数的积分绝对值,在滑模面函数趋近于零时,切换项增益也趋近于零,从而抑制了系统抖振;当系统不在滑动模态阶段时,根据滑模面函数值与具有其函数积分形式的切换项成正相关关系,在增益项中引入加权值 K_t ,可以有效控制切换项增益,使系统快速收敛。本文基于所提出的新型趋近律,设计了速度控制器,应用于 PMSM 矢量控制系统中,然后分别利用软件仿真和硬件试验与传统指数趋近律控制结果进行比较,验证了该控制策略的有效性和可行性。

1 PMSM 数学模型

建立 PMSM 数学模型,电机在 $d-q$ 旋转坐标系下的定子电压方程^[9]为

$$u_d = R_s i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - p L_q \omega_m i_q \quad (1)$$

$$u_q = R_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + p L_d \omega_m i_d + p \omega_m \psi_f \quad (2)$$

式中: u_d, u_q —— d, q 轴电压;

R_s ——定子相电阻;

i_d, i_q —— d, q 轴电流;

L_d, L_q —— d, q 轴电感;

p ——极对数;

ω_m ——转子机械角速度;

ψ_f ——转子永磁体磁链。

电磁转矩方程为

$$T_e = 1.5p[\psi_f i_q + (L_d - L_q)i_d i_q] \quad (3)$$

运动方程为

$$T_e - T_L = J \frac{d\omega_m}{dt} \quad (4)$$

式中: T_e ——电磁转矩;

T_L ——负载转矩;

J ——转动惯量。

2 新型指数趋近律

2.1 传统指数趋近律

高为炳院士^[10]于 20 世纪提出指数趋近律的概念,并将其应用到控制领域。目前,该趋近律在控制领域的应用越来越广泛。指数趋近律为

$$\dot{s} = -\varepsilon \operatorname{sgn}(s) - ks, \varepsilon > 0, k > 0 \quad (5)$$

式中: $-\varepsilon \operatorname{sgn}(s)$ ——等速趋近项;

$\operatorname{sgn}(s)$ ——符号函数;

s ——滑模面;

$-ks$ ——指数趋近项。

在精度要求较高的控制系统中,等速趋近项的趋近速度和鲁棒性不足,无法在要求时间内到达切换面,同时由于等速趋近项存在带状切换面,控制系统无法趋近于原点,从而在原点附近形成抖振^[11],严重影响控制系统的动态和静态特性。

2.2 新型指数趋近律和稳定性分析

针对传统指数趋近律存在的缺点,本文提出了一种新型指数趋近律:

$$\begin{cases} \dot{s} = -\varepsilon \operatorname{sgn}(s) - ks - K_w |\rho| \operatorname{sgn}(s), \\ \varepsilon > 0, k > 0, K_w > 0 \\ \rho = \int_0^t (K_t \rho + s) dt \end{cases} \quad (6)$$

式中: K_w, K_t ——待设计参数;

ρ ——积分函数。

为了减小系统抖振,在指数趋近律的基础上,引入加权积分型增益,以消除外部扰动带来的稳态误差,抑制系统抖振。对在指数趋近律的基础上引入加权积分型增益的混合趋近律进行了分析研究。典型的系统如下:

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (7)$$

定义系统的滑模面函数为

$$s = Cx \quad (8)$$

其中: A 、 B 、 C 为控制系统系数矩阵, C 满足滑模稳定条件且 $CB > 0$ 。

定义 Lyapunov 函数:

$$V = \frac{1}{2}s^2 \quad (9)$$

由式(7)~式(9)可得:

$$\dot{V} = s\dot{s} = sC(Ax + Bu) \quad (10)$$

实现 SMC 的前提是滑动模态的存在,而 Lyapunov 函数型滑模面滑动模态存在的条件是滑模面以外的任意点可以在有限时间内到达滑模面,即:

$$\dot{V} = s\dot{s} < 0 \quad (11)$$

当 $\dot{s}=0$, 系统达到理想滑动模态控制时, u 的解 u_{eq} 为系统在滑动模态区内的等效控制^[12]。由式(7)可得:

$$u_{eq} = -(CB)^{-1}CAx \quad (12)$$

引入加权积分型增益后,系统控制律为

$$u = u_{eq} + u_d \quad (13)$$

其中:

$$\begin{cases} u_d = -\varepsilon \operatorname{sgn}(s) - qs - K_w |\rho| \operatorname{sgn}(s), \\ \varepsilon > 0, q > 0, K_w > 0 \\ \rho = \int_0^t (K_\rho + s) dt \end{cases} \quad (14)$$

根据 Lyapunov 函数型到达滑动模态的条件表达式,将所设计的控制律代入式(11),可得:

$$\begin{aligned} \dot{V} = s\dot{s} &= sC(Ax + Bu) = sCAx + sCBu = \\ &sCAx + sCB[-(CB)^{-1}CAx - \\ &\varepsilon \operatorname{sgn}(s) - qs - K_w |\rho| \operatorname{sgn}(s)] = -\varepsilon CB |s| - \\ &qs^2 CB - K_w CB |\rho| |s| < 0 \end{aligned} \quad (15)$$

由 Lyapunov 稳定性定理可知,本文所设计趋近律满足稳定性条件,能够保证系统进入滑动模态。

3 滑模控制器设计

对于表贴式 PMSM 而言,满足 $L_d = L_q = L_s, L_s$ 为定子电感。本文采用 $i_d = 0$ 的转子磁场定向控制方法,对式(1)、式(2)和式(4)进行简单变换,可得:

$$\begin{cases} \frac{di_q}{dt} = \frac{1}{L_s}(-R_s i_q - p\psi_f \omega_m + u_q) \\ \frac{d\omega_m}{dt} = \frac{1}{J}\left(-T_L + \frac{3p\psi_f}{2}i_q\right) \end{cases} \quad (16)$$

定义 PMSM 系统的状态变量:

$$\begin{cases} x_1 = \omega_{ref} - \omega_m \\ x_2 = \dot{x}_1 = -\dot{\omega}_m \end{cases} \quad (17)$$

式中: ω_m ——实际转速;

ω_{ref} ——给定转速。

根据式(16)和式(17)可得:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -\dot{\omega}_m = \frac{1}{J}\left(T_L - \frac{3p\psi_f}{2}i_q\right) \\ \dot{x}_2 = -\ddot{\omega}_m = -\frac{3p\psi_f}{2J}i_q \end{cases} \quad (18)$$

定义 $u = i_q, D = \frac{3p\psi_f}{2J}$, 则式(18)可变为

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -D \end{bmatrix} u \quad (19)$$

定义滑模面函数为

$$s = cx_1 + x_2 \quad (20)$$

式中: c ——待设计参数, $c > 0$ 。

对式(20)求导,可得:

$$s = c\dot{x}_1 + \dot{x}_2 = cx_2 + \dot{x}_2 = cx_2 - Du \quad (21)$$

改进控制律将指数趋近律与加权积分型增益相结合,代入式(21)可得:

$$u = \frac{1}{D}[cx_2 + \varepsilon \operatorname{sgn}(s) + qs + K_w |\rho| \operatorname{sgn}(s)] \quad (22)$$

从而可得 q 轴的参考电流:

$$i_q^* = \frac{1}{D} \int_0^t [cx_2 + \varepsilon \operatorname{sgn}(s) + qs + K_w |\rho| \operatorname{sgn}(s)] dt \quad (23)$$

从式(23)可以看出,由于控制器包含积分项,一方面可以削弱抖振现象,另一方面可以消除系统的稳态误差,提高系统的控制品质。

4 仿真与结果分析

为了验证本文所提基于新型趋近律的滑模控制器的控制效果,与基于传统指数趋近律的滑模控制器进行比较分析,分别将2种控制策略应用

到 MATLAB/Simulink 仿真模型速度环当中,构成滑模速度控制器,如图 1 所示。图 2 所示为传统指数趋近律滑模速度控制器仿真模型。图 3 所示为新型趋近律滑模速度控制器仿真模型。

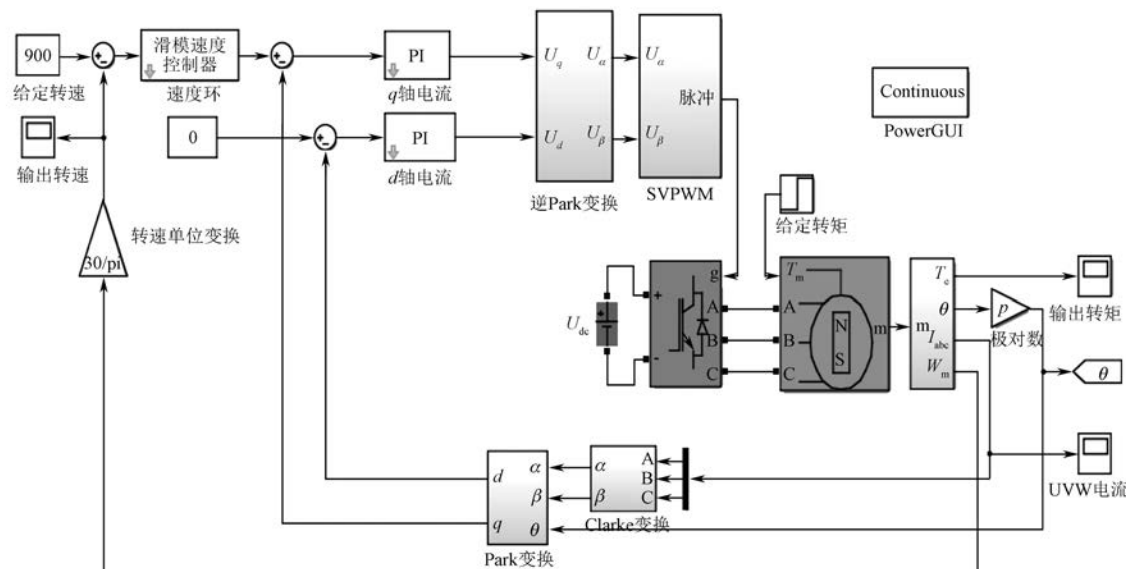


图 1 PMSM 滑模控制仿真模型

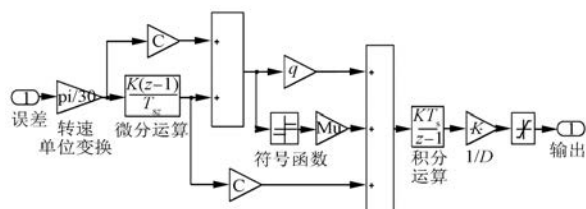


图2 传统指数趋近律滑模速度控制器仿真模型

仿真采用表贴式三相 PMSM 作为被控对象, 电机参数: $p=4$, 定子电感 $L_s=8.5$ mH, 定子电阻 $R_s=2.875$ Ω , 转动惯量 $J=0.003$ $\text{kg}\cdot\text{m}^2$, 磁链 $\psi_f=0.175$ Wb, 阻尼系数 $B=0.008$ $\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}$ 。仿真条件设置: 直流侧电压 $U_{dc}=311$ V, 脉宽调制 (PWM) 开关频率为 $f_{\text{pwm}}=10$ kHz, 采样周期 $T_s=10$ μs , 仿真时间为 0.4 s。基于传统指数趋近律控

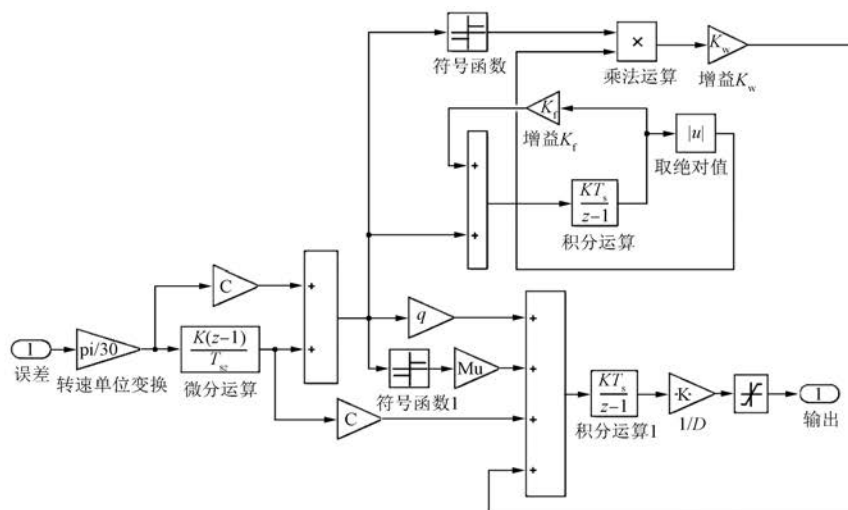


图3 新型趋近律滑模速度控制器仿真模型

制器参数设置: $c=60$, $\varepsilon=200$, $q=300$, $D=350$ 。基于新型趋近律控制器参数设置: $c=60$, $\varepsilon=200$, $q=300$, $D=350$, $K_w=5\ 000$, $K_f=-10$ 。以上参数均为在线仿真调试过程中的最优参数值。2种控制策略下, PMSM 均由静止起动, 初始转速设置为 900 r/min, 在 $t=0.2$ s 时为电机施加 10 N·m 的负载。电机的转速响应如图 4 和图 5 所示。转矩响应如图 6 和图 7 所示。

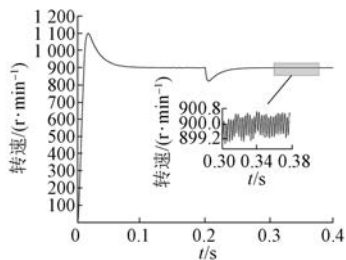


图4 传统指数趋近律转速响应

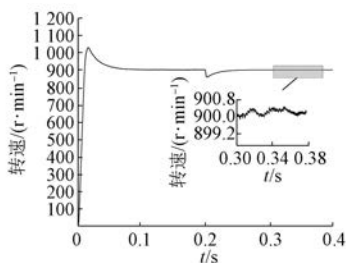


图5 新型趋近律转速响应

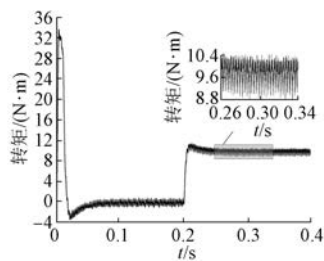


图6 传统指数趋近律转矩响应

对比图 4 和图 5 可以发现, 电机加速至 900 r/min 时, 基于传统指数趋近律的电机转速最大超调量为 199 r/min, 而基于新型趋近律的电机转速最大超调量为 129 r/min, 波动减小了 70 r/min; 在 $t=0.2$ s, 为电机突加 10 N·m 负载时, 基于传统指数趋近律的电机转速波动为 78 r/min, 而基于新型趋近律的电机转速波动为 42 r/min, 波动降低了 36 r/min。通过观察图 4~

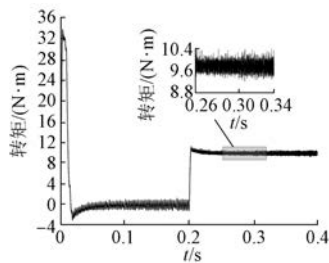


图7 新型趋近律转矩响应

图 7 的局部放大图可知, 电机在达到稳态后, 基于传统指数趋近律的转速波动范围为 898.9 ~ 900.7 r/min, 转矩波动范围为 8.8 ~ 10.5 N·m; 基于新型趋近律的转速波动范围为 899.9 ~ 900.4 r/min, 转矩波动范围为 9.3 ~ 10.4 N·m。通过以上仿真数据可知, 与传统指数趋近律结果相比较, 本文所提的新型趋近律有效抑制了系统抖动, 使系统具有更好的动静态特性, 且提高了系统的控制品质。

5 硬件试验与结果分析

为了验证本文所提算法的实际控制效果, 以 TMS320F28335 为核心搭建的 PMSM 控制系统硬件试验平台, 如图 8 所示。

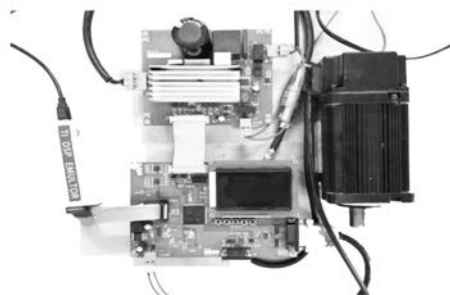


图8 PMSM 控制系统硬件试验平台

分别将传统指数趋近律控制算法和新型趋近律控制算法进行 C 语言编程, 应用于试验平台。该硬件试验中, 基于传统指数趋近律控制器参数设置: $c=6$, $\varepsilon=0.02$, $q=2$, $D=0.053$ 。基于新型趋近律控制器参数设置: $c=6$, $\varepsilon=0.02$, $q=5$, $D=0.053$, $K_w=5$, $K_f=-0.1$ 。以上参数均为在线调试过程中最优参数值。PMSM 由静止起动, 以 300 r/min 的步调依次加速至 1 200 r/min, 转速每隔 50 μ s 进行一次采样。2 种趋近律控制下, 电机转速响应分别如图 9 和图 10 所示。

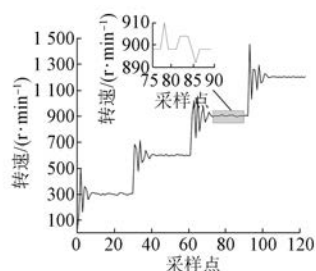


图9 传统指数趋近律转速试验结果

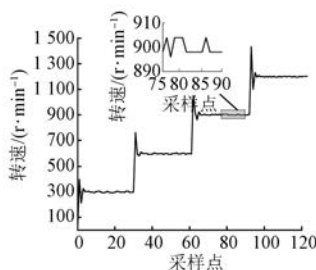


图10 新型趋近律转速试验结果

通过对比图9和图10可知,采用本文所提新型趋近律控制的电机转速比传统指数趋近律控制的电机转速稳定,在发生阶跃变化时,电机波动次数更少,达到稳态的时间更短,电机转速收敛更快。以转速900 r/min时为例,当电机转速达到900 r/min时,基于传统指数趋近律的电机转速波动范围为892~910 r/min,稳定时间为500 μ s,而基于新型指数趋近律的电机转速波动范围为896~904 r/min,稳定时间为200 μ s,说明新型趋近律控制下,电机抖振更小。硬件试验证明采用本文所提新型趋近律控制的电机转速,收敛速度快、电机抖振小,与传统指数趋近律控制相比,具有更好的动态和静态特性。

6 结 语

本文在传统指数趋近律的基础上引入加权积分型增益,提出了一种新型趋近律方案。从理论上分析了新型趋近律的存在性和可行性。在新型趋近律的基础上,设计了电机滑模速度控制器,并与传统指数趋近律滑模控制器进行了比较。仿真和硬件试验结果表明,该种新型趋近律滑模速度控制器有效抑制了系统抖振,电机转速控制系统

具有更好的动静特性,提高了系统的控制品质,为PMSM实际控制提供了新方法。

【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] SU S, WANG H, ZHANG H, et al. Reducing chattering using adaptive exponential reaching law [C]//2010 Sixth International Conference on Natural Computation, 2010.
- [3] 肖曦,张猛,李永东.永磁同步电机永磁体状况在线检测[J].中国电机工程学报,2007,27(24): 43.
- [4] MOON H, KIM H, YOUN M. A discrete-time predictive current control for PMSM [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2003, 18(1): 464.
- [5] MCCANN R A, ISLAM M S, HUSAIN I. Application of a sliding mode observer for position and speed estimation in switched reluctance motor drives [J]. IEEE Transactions on Industry Application, 2001, 37(1): 51.
- [6] 刘京,李洪文,邓永停.基于新型趋近律和扰动观测器的永磁同步电机滑模控制[J].工程科学学报, 2017,39(6): 933.
- [7] 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.
- [8] ZHANG X G, SUN L Z. Nonlinear speed control for PMSM system using sliding mode control and disturbance compensation techniques [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(3): 1358.
- [9] 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.
- [10] 高为炳.变结构控制理论基础[M].北京:中国科学技术出版社,1990.
- [11] 童克文,张兴,张昱,等.基于新型趋近律的永磁同步电动机滑模变结构控制[J].中国电机工程学报,2008,28(21): 102.
- [12] 刘金琨.滑模变结构控制 MATLAB 仿真[M].北京:清华大学出版社,2005: 4-8.

收稿日期: 2019-08-20