

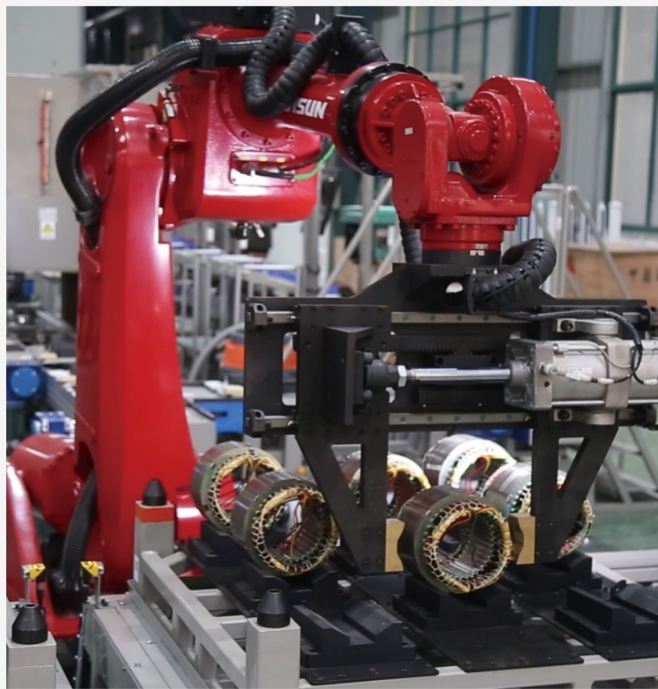
本文全文线上首发由
上海电器科学研究所
(集团) 有限公司
支持

陈德海, 曹永康, 阳攀.
基于变指数趋近律的永磁同步电机
滑模控制.
电机与控制应用, 2022, 49(2):8.



中国智能制造系统解决方案供应商联盟 (成员)
上海智能制造系统解决方案供应商 (首批)

电机·智能制造



咨询服务

规划设计

设计制造

信息化系统

项目实施



扫码联系
我们

联系人: 黄先锋 手机: 13501892388
上海电器科学研究所 (集团) 有限公司
上海电机系统节能工程技术研究中心有限公司
上海市武宁路505号9号楼6层

基于变指数趋近律的永磁同步电机滑模控制^{*}

陈德海¹, 曹永康¹, 阳攀²

(1. 江西理工大学 电气工程与自动化学院, 江西 赣州 341000;

2. 江西理工大学 外国语学院, 江西 赣州 341000)

摘要: 为进一步抑制永磁同步电机(PMSM)调速系统控制所产生的不稳定性问题, 在传统指数趋近律基础上, 设计了一种新型的趋近律。在传统指数趋近律的等速项中新加一个以滑模面 s 为变量的函数, 同时对传统符号函数进行改进优化, 进行曲线的平滑处理, 以及进行改进趋近律的存在性、可达性证明。以改进后的趋近律构建滑模速度控制器, 搭建系统的 Simulink 仿真模型, 与 PI 控制方法、传统指数趋近律方法进行仿真效果对比。仿真结果显示, 改进后的趋近律达到了减小抖振和提高抗扰性能的目的, 各方面提升效果更加显著。

关键词: 永磁同步电机; 趋近律; 滑模面; 滑模速度控制器; 抖振

中图分类号: TM351 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2022)02-0008-06

doi: 10.12177/emca.2021.186

Sliding Mode Control of Permanent Magnet Synchronous Motor Based on Variable Exponential Reaching Law^{*}

CHEN Dehai¹, CAO Yongkang¹, YANG Pan²

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China;

2. College of Foreign Languages, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China)

Abstract: In order to further suppress the instability of permanent magnet synchronous motor (PMSM) speed regulation system, a new exponential reaching law is designed based on the traditional law. A new function with sliding surface s as variable is added to the constant velocity term of the traditional exponential reaching law. At the same time, the traditional symbolic function is optimized and the curve is smoothed. The existence and the accessibility of the improved reaching law are proved. Then the improved law is applied to constructing the sliding mode speed controller and building a systematic Simulink simulation model. The simulation result is compared with that of PI control and the traditional exponential reaching law method. It is shown that the improved reaching law can reduce chattering and improve anti-interference performance, with more remarkable effect than the other two methods in all aspects.

Key words: permanent magnet synchronous motor (PMSM); reaching law; sliding mode surface; sliding mode speed controller; chattering

0 引言

目前, 永磁同步电机(PMSM)在航空航天、机

器人、新能源汽车等控制领域应用广泛, 主要原因是其具有结构简单、器件体型小巧、稳定性高等优点。PMSM 的控制策略则影响电机使用性能, 因

收稿日期: 2021-12-21; 收到修改稿日期: 2022-01-14

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金项目(61763015)

作者简介: 陈德海(1978—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电机与控制。

曹永康(1998—), 男, 硕士研究生, 研究方向为运动控制。

此吸引了一大批学者对其控制方法进行深入研究。

传统的 PI 控制虽然具有算法简便、易于操作调节、可靠等优点,但是当系统受外界干扰或参数发生变化时,PI 控制应变能力不足,抗干扰性较差,鲁棒性差,不能满足系统的实际需求。于是,充分考虑系统各方面的需求特点之后,对其查漏补缺,致其控制策略层出不穷,例如模糊控制^[1]、自适应控制^[2-3]、神经网络控制^[4-5]、滑模控制(SMC)^[6-14]等,其中滑模变结构控制具备抗干扰性强、响应速度快、稳定调节时间短等特点,而一般的控制策略不能满足 PMSM 非线性、多变量、强耦合等特点,因此近年来,国内外学者致力于将滑模变结构控制应用于 PMSM 控制系统。由于 SMC 不可避免地会出现抖振、超调等问题,对系统运行有一定影响,研究人员致力于对趋近律进行改进创新,并且以此构造滑模速度控制器,进一步抑制超调和抖振的产生。文献[6]在传统指数趋近律上引入了系统状态变量的幂次方,超调和抖振均得到进一步抑制,但效果稍显逊色。文献[7]将传统指数趋近律的趋近系数设计成倒数关系,系统性能改善明显。文献[8]在指数趋近律的等速项中新加一个关于滑模面 s 的函数,系统自适应调整能力加强,但趋近律略显复杂。文献[9]用幂次函数以及反双曲正弦函数构造新的趋近律,抖振得到削弱。文献[10]使用新建函数代替传统符号函数,并且引入了一个包含两个状态变量的表达式,优化指数趋近律,降低了系统的抖动程度。文献[11]在双幂次趋近律基础上,增加了自适应项,但是没有考虑外部干扰。文献[12]基于传统指数趋近律,引入了变指数函数和双曲正切函数,提高了系统趋近速度自适应调节能力和抖振抑制能力。文献[13]提出一种带饱和函数的幂次趋近律,系统动态品质得到一定改善。文献[14]在传统指数趋近律上,结合了终端吸引因子和状态变量的幂函数,控制效果得到提升。通过以上文献内容得知,要改善系统超调、抖振等问题,解决方法较多,但或多或少都有其不足之处。

本文设计了一种新的趋近律,在传统指数趋近律基础上,将一个以滑模面 s 为变量的函数引入等速项中,用以加快系统响应速度,缩短系统响

应进程,并优化传统符号函数,对此作了平滑处理,提高控制系统的动态品质。

1 PMSM 数学模型

为了方便分析,假设电机元件、条件等是理想的。在 $i_d=0$ 的条件下,选取 $d-q$ 坐标轴下的数学模型,PMSM 定子电压方程为

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

式中: u_d 、 u_q 为 d 轴、 q 轴定子电压分量; i_d 、 i_q 为 d 轴、 q 轴定子电流分量; R 为定子电阻; φ_d 、 φ_q 为 d 轴、 q 轴磁链分量; φ_f 为永磁体磁链; ω_e 为电角速度。

电磁转矩表达式:

$$T_e = 1.5p i_q \varphi_f \quad (2)$$

式中: T_e 为电磁转矩; p 为电机极对数。

电机机械运动表达式:

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

式中: J 为转动惯量; T_L 为负载转矩; ω_m 为机械角速度; $\omega_e = p_n \omega_m$ 。

2 改进趋近律设计

2.1 传统指数趋近律

指数趋近律这一概念最早由我国院士所提出,并亲自设计了指数趋近律表达式,具体如下:

$$\dot{s} = -\varepsilon \text{sign}(s) - qs \quad (4)$$

式中: s 为滑模面函数; ε 、 q 为趋近系数,并且都是大于 0 的数; $\text{sign}(s)$ 为符号函数。

算法第一项 $-\varepsilon \text{sign}(s)$ 是等速项,第二项 $-qs$ 是指数项。当运动点离滑模面 s 较远时(趋近运动),等速项与指数项共同作用,指数项起主要作用;当运动点在滑模面 s 附近时(滑模运动),等速项起作用,指数项逐渐为 0。其中 q 越大,到达滑模面所用时间越短, ε 越小,到达滑模面时的速度越小。合理平衡两者的数值关系,才能达到加快系统响应速度、减小超调和抖振的效果。

2.2 改进趋近律

趋近律的设计原则:

(1) 运动点在滑模面较远处时,趋近速度要

大,加快响应速度,缩短趋近时间。

(2) 运动点在滑模面附近处时,趋近速度要尽量小,以免产生较大的超调。

以趋近律设计原则出发,进行趋近律改进的深入研究,改进后的趋近律表达式如下:

$$\begin{cases} \dot{s} = -\varepsilon f(s) \operatorname{sign}(s) - qs \\ f(s) = \frac{1}{\frac{1}{a[\log_{10}(|s|+10)]^b} + |s|+1} \end{cases} \quad (5)$$

式中: $\varepsilon > 0, q > 0, a > 0, b > 0$ 。

函数 $f(s)$ 的作用是加快系统响应速度,缩短系统趋于稳定过程,系统状态变量绝对值的幂次项抑制抖振幅度,减小误差。当运动点在无限远处时, $|s|$ 趋近于无穷,则 $f(s)$ 趋近于无穷,趋近速度大;当运动点在滑模面附近处时, $|s|$ 接近于 0,此时 $f(s) \approx a/(1+a)$, 小于 1,趋近速度较小。与传统指数趋近律相比,改进后的趋近律在控制趋近速度方面效果较好,超调得到抑制,抖振幅度被削弱,自适应调整能力更为出色。

为了进一步对曲线进行优化,对符号函数采取平滑处理化,让仿真曲线更加平滑顺畅,平滑处理后的符号函数表达式如下:

$$\operatorname{sign}(s) = \frac{s}{|s| + \sigma} \quad (6)$$

式中: σ 是一个数值较小的正常数, $\sigma > 0$ 取 0.01。

2.3 新趋近律性能分析

选用以下系统对趋近律进行性能分析,验证改进趋近律的优越性:

$$\frac{dx}{dt} = Ax + Bu \quad (7)$$

滑模面函数设为 $s = Cx$, 对其求导可得:

$$\frac{ds}{dt} = C \frac{dx}{dt} \quad (8)$$

将式(4)、式(5)、式(7)、式(8)进行公式变换,则系统的控制输出 u 表达式如下:

$$u = (CB)^{-1}(-CAx + slaw) \quad (9)$$

式中: $slaw$ 为趋近律; $x = [x_1 \ x_2]^T$, x_1, x_2 为系统的两个状态变量; A, B 为系统矩阵参数, $A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -25 \end{bmatrix}$, $B = \begin{bmatrix} 0 \\ 133 \end{bmatrix}$; C 为滑模面参数, $C = [15 \ 1]$ 。状态变量初始值为 $x(0) = [0.5 \ 0.5]^T$ 。

对传统指数趋近律以及改进趋近律控制器进行 Simulink 建模仿真,而后进行各参数的调试工作(参数自整定方法和频域分析法),最终选取各参数值为,改进趋近律参数 $a = 15, b = 15$,两种趋近律共同参数 $q = 10, \varepsilon = 5$ 。

两种趋近律控制性能效果对比如图 1 所示。

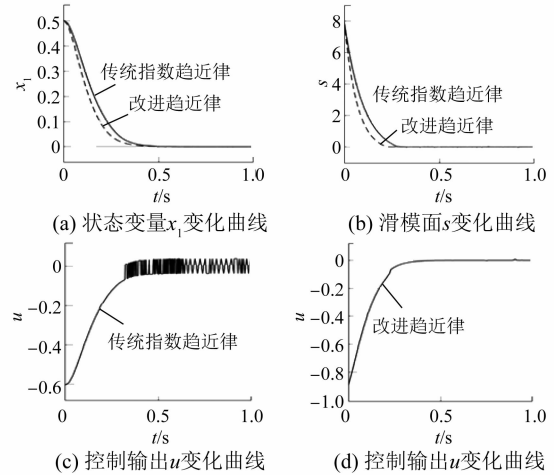


图 1 两种趋近律性能对比

从图 1 对比可知,在系统响应速度、趋于稳定时间、抖振幅度等方面,改进后的趋近律控制效果比传统指数趋近律更好。

3 滑模速度控制器设计

3.1 控制器设计

在 $i_d = 0, L_d = L_q = L_s$ 的条件下,对 PMSM 调速系统进行状态变量的定义:

$$\begin{cases} x_1 = \omega_{\text{ref}} - \omega_m \\ x_2 = \dot{x}_1 = -\dot{\omega}_m \end{cases} \quad (10)$$

式中: ω_{ref} 为给定转速; ω_m 为电机实际转速; L_s 为定子电感。

由式(1)~式(3)可得:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} i_q = \frac{1}{L_s} (-R i_q - p \omega_m \varphi_f + u_q) \\ \frac{d}{dt} \omega_m = \frac{1}{J} (1.5 p \varphi_f i_q - T_L) \end{cases} \quad (11)$$

将式(11)代入式(10),则:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -\dot{\omega}_m = \frac{1}{J} (T_L - 1.5 p \varphi_f i_q) \\ \dot{x}_2 = -\ddot{\omega}_m = -1.5 \frac{1}{J} p \varphi_f \dot{i}_q \end{cases} \quad (12)$$

设 $D = 1.5p\varphi_f/J, u = i_q$, 则状态空间表达式:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -D \end{bmatrix} u \quad (13)$$

定义滑模面函数 s :

$$s = cx_1 + x_2 \quad (14)$$

式中: c 为待定系数; x_1 为转速误差; x_2 为位转速误差的微分。

对滑模面函数 s 进行微分:

$$\dot{s} = cx_2 - Du \quad (15)$$

对式(5)、式(15)进行公式变换, 则控制输出 u 为

$$u = \frac{1}{D} [cx_2 + \varepsilon f(s) \text{sign}(s) + qs] \quad (16)$$

q 轴参考电流为

$$i_q^* = \frac{1}{D} \int_0^t [cx_2 + \varepsilon f(s) \text{sign}(s) + qs] d\tau \quad (17)$$

由于式(17)带有积分项, 既削弱了抖振, 也降低了稳态误差, 系统动态品质得到提升。

3.2 稳定性分析

由李雅普诺夫 (Lyapunov) 函数:

$$V = \frac{1}{2}s^2 \quad (18)$$

可知, 对其微分, 并代入趋近律, 可得:

$$\dot{V} = s\dot{s} = -\varepsilon sf(s) \text{sign}(s) - qs^2 \quad (19)$$

前提 $\varepsilon > 0, q > 0, a > 0, b > 0$ 。即 $s \cdot \text{sign}(s) > 0$, 由于 $|s| \geq 0$, 则 $f(s) > 0$ 。即 $\dot{V} < 0$, 满足可达性条件, 系统运动点能在有限时间内到达滑模面。

4 仿真分析

图 2 为 PMSM 控制系统的调速框图, 是一个由电流环、转速环构成的双闭环控制系统, 其中电流环采用最原始的 PI 控制方法进行控制, 而转速环则运用由改进的趋近律所构成的滑模速度控制器进行控制。随后搭建 PMSM 调速系统的 Simulink 仿真模型, 并与 PI 控制器、基于传统指数趋近律的控制器进行仿真效果的对比。

电机参数如表 1 所示。

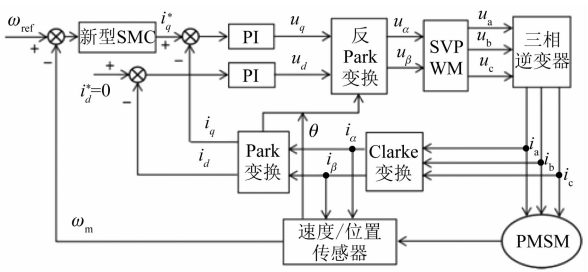


图 2 PMSM 调速系统框图

表 1 电机参数表

参数名称	参数值
定子电感 L_s/mH	8.5
定子电阻 R/Ω	2.875
磁链 φ_f/Wb	0.175
极对数 p	4
转动惯量 $J/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	0.003
阻尼系数 $B/(\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{s})$	0.008
直流侧电压 U_{dc}/V	311

控制算法参数设置: PI 控制电流环 $K_p = 45, K_i = 220$, 转速环 $K_p = 0.06, K_i = 3$; 传统指数趋近律、改进趋近律参数 $c = 200, q = 100, \varepsilon = 280, a = 12, b = 10$ 。

从图 3 仿真效果可以得知, 在转速方面, 系统刚启动时, PI 控制器产生的超调最大, 稳定下来所用时间也最长; 传统指数趋近律控制器超调较小, 稳定所用时间较短; 改进后的趋近律控制器无超调, 并且达到稳定状态所用时间最少。在 0.2 s 突加负载后, 改进趋近律超调最小, 传统指数趋近律次之, PI 控制表现最差, 超调最大, 如表 2 所示。

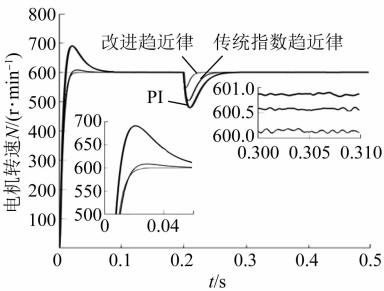


图 3 电机转速变化曲线

表 2 转速响应性能对比

控制方法	空载起动 峰值时间/s	空载起动 调节时间/s	空载起动 超调量/%	突加负载 低值时间/s	突加负载 调节时间/s	突加负载 抖振幅度/(r·min ⁻¹)	稳定后转速 误差/(r·min ⁻¹)
新趋近律	—	0.03	0	0.204	0.227	549~550	0.1
原趋近律	0.029	0.08	1.42	0.208	0.257	503~504	0.6
PI	0.210	0.10	15.12	0.210	0.280	479~480	0.8

为使视图清晰,图 4 和图 5 只显示系统起步响应阶段与跳变阶段。图 4、图 5 中,在电磁转矩方面,控制系统刚起步阶段时,改进趋近律和传统指数趋近律控制器接近无超调,但 PI 控制器产生超调较大。在 0.2 s 突加负载阶段,改进趋近律响应速度最快,并且稳定下来耗费时间最少;传统指数趋近律响应速度次之,稳定耗费时间次之;PI 控制响应速度最慢,稳定耗费时间最多。详细数据对比如表 3 所示。

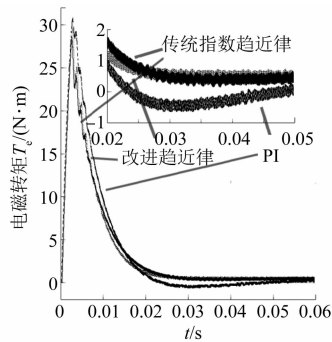


图 4 电磁转矩变化曲线

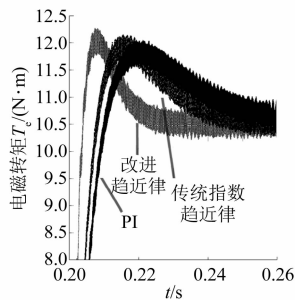


图 5 电磁转矩局部放大曲线图

表 3 电磁转矩响应性能对比

控制方法	空载起动 调节时间/s	空载起动 超调量	突加负载 峰值时间/s	突加负载 调节时间/s
新趋近律	0.035	0	0.207	0.23
原趋近律	0.045	0	0.216	0.26
PI	0.080	0.67	0.219	0.28

从以下图 6~图 8 可知,在第一次三相电流趋于稳定阶段中,PI 控制响应速度最慢,电流趋于 0 幅度变化最小,并且趋于稳定过程最长,电流容易紊乱;传统指数趋近律与改进趋近律响应速度、电流变化幅度差不多,均较快,电流曲线也比较平稳,趋于稳定过程较短。在系统 0.2 s 突加负载后三相电流第二次趋于稳定过程中,PI 控制不能够及时到达特定转矩,稳定过程中电流变化幅度较大,约 2 A,不够稳定,在 0.26 s 处稳定下来;传统指数趋近律稳定时电流幅度变化较大,约 3 A,不够稳定,在 0.25 s 处稳定下来;改进趋近律稳定时电流幅度变化较小,约 0.1 A,稳定性较好,在 0.23 s 处稳定下来。

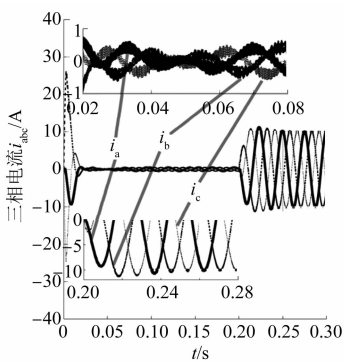


图 6 PI 控制三相电流变化曲线

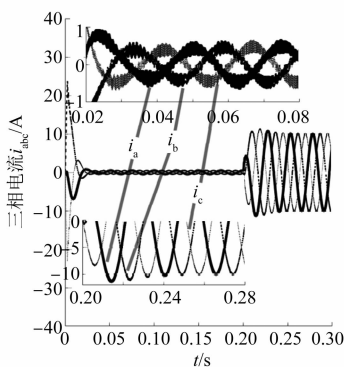


图 7 传统指数趋近律三相电流变化曲线

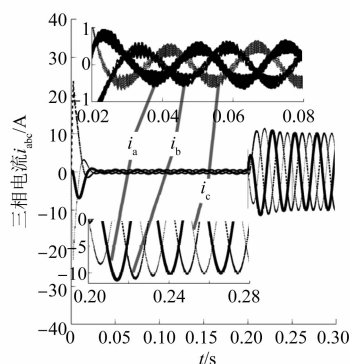


图8 改进趋近律三相电流变化曲线

从以上仿真效果以及说明解释可知,改进趋近律控制器不论是在响应速度快慢、超调大小方面,还是抖振幅度大小、稳定过程所用时间长短方面,其展现出来的效果均比传统指数趋近律控制器和PI控制器要好,系统动态品质全方面地得到提升。

5 结 语

本文在传统指数趋近律的基础上,针对性地对其不足之处(超调大、抖振幅度大等)进行分析以及解决,具体为在等速项中引入以滑模面 s 为变量的函数,并将符号函数进行平滑处理。而后构建相关的滑模速度控制器,搭建PMSM调速系统的Simulink仿真模型,并且与传统指数趋近律控制器和PI控制器进行仿真效果对比。结果表明,改进后的趋近律控制器在系统响应速度、抑制超调和抖振等方面控制效果均比之前的方法要更为精进,进一步改善了系统动态品质。由此可见,该方法是完全有效的,并且改善效果显著。美中不足的是,超调和抖振并没有达到完全消除的效果,因此需要再进一步的深入研究。

【参考文献】

[1] 彭思奇,宋彦彦. 基于自适应模糊滑模观测器的永磁同步电机无传感器矢量控制[J]. 控制与决策, 2018, 33(4): 644.

[2] 宋国杰,李国进,杨浩,等. 基于李雅普诺夫函数的微电网下并网逆变器的自适应控制[J]. 高电压技术, 2020, 46(12): 4455.

[3] CHOI H H, VU N T, JUNG J. Digital implementation of an adaptive speed regulator for a PMSM[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(1): 3.

[4] 王一光,李晓杰,陈兴林. 基于永磁直线同步电机的光刻机掩模台鲁棒自适应神经网络控制[J]. 电工技术学报, 2016, 31(6): 38.

[5] YU J, SHI P, DONG W, et al. Neural network-based adaptive dynamic surface control for permanent magnet synchronous motors[J]. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 2015, 26(3): 640.

[6] 张晓光,赵克,孙力,等. 永磁同步电机滑模变结构调速系统动态品质控制[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(15): 47.

[7] 秦超,高锋阳,庄圣贤,等. 基于一种指数趋近律的PMSM滑模变结构控制[J]. 计算机仿真, 2013, 30(12): 306.

[8] 闫宏亮,马菊菊,姬海斌. 永磁同步驱动电机的滑模控制研究[J/OL]. 控制工程, doi: 10. 14107/j.cnki. kzgc. 20200201.

[9] 周涛. 基于一种新型趋近律的自适应滑模控制[J]. 控制与决策, 2016, 31(7): 1335.

[10] 王湘明,王正. 永磁同步电机的改进指数趋近律控制策略[J]. 电机与控制应用, 2021, 48(6): 44.

[11] 翟伟娜,葛运旺,宋书中. 基于改进趋近律的机械手滑模控制[J]. 信息与控制, 2014, 43(3): 300.

[12] 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.

[13] 李蒙蒙,叶洪涛,罗文广. 带饱和函数的幂次新型滑模趋近律设计与分析[J]. 计算机应用研究, 2019, 36(5): 1400.

[14] 辛国建. 基于新型趋近律的双定子电机控制系统研究[J]. 测控技术, 2018, 37(2): 80.