

# 基于新型趋近律的永磁同步电机调速控制\*

周 杨, 李祥飞, 陈 玄

(湖南工业大学 电气与信息工程学院, 湖南 株洲 412007)

**摘 要:** 为了改善基于 PI 控制的永磁同步电机(PMSM)调速系统转速超调大和抗扰动能力差的问题, 研究一种自适应能力较强的新型指数趋近律。该趋近律在传统指数趋近律的基础上将等速项系数改进为时变量, 能让系统更快地收敛到给定值, 解决了传统指数趋近律系统收敛速度过慢的问题, 并且采用可变边界层的饱和函数来替代传统开关函数从而削弱了滑模抖振现象。采用 Lyapunov 函数对新型指数趋近律的稳定性进行分析, 并以此趋近律设计了速度环滑模控制器。采用 MATLAB 建模仿真, 将其与 PI 控制结果比较, 仿真结果表明基于新型指数趋近律的速度环滑模控制器能有效地提高 PMSM 调速系统的鲁棒性。

**关键词:** 永磁同步电机; 滑模控制; 新型指数趋近律; 速度环控制器

中图分类号: TM 351 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2020)12-0038-05

doi: 10.12177/emca.2020.151

## Speed Control of Permanent Magnet Synchronous Motor Based on Novel Reaching Law\*

ZHOU Yang, LI Xiangfei, CHEN Xuan

(College of Electrical and Information Engineering, Hunan University of Technology,  
Zhuzhou 412007, China)

**Abstract:** In order to overcome the problem of speed overshoot and improve the anti-disturbance ability of PI control in the permanent magnet synchronous motor (PMSM) speed control system, a novel exponential reaching law with strong adaptive ability is proposed. This novel reaching law, based on the traditional exponential reaching law, improves the isokinetic term coefficient to a time-varying term, which can make the system converge to a given value faster, and the problem of the slow convergence speed of the traditional exponential reaching law is solved. In addition, the saturation function of the variable boundary layer is used to replace the traditional switching function to weaken the sliding mode chattering phenomenon. Lyapunov stability theory is used to analyze the stability of the novel exponential reaching law, and the speed loop sliding mode controller is designed based on the novel law. The designed controller is compared with PI control by MATLAB modeling and simulation. The simulation results show that the speed loop sliding mode controller based on the novel law can effectively improve the robustness of the PMSM speed control system.

**Key words:** permanent magnet synchronous motor (PMSM); sliding mode control; novel exponential reaching law; speed loop controller

收稿日期: 2020-08-14; 收到修改稿日期: 2020-09-18

\* 基金项目: 湖南省自然科学基金项目(2018JJ4066); 湖南省教育厅科学研究重点项目(18A267)

作者简介: 周 杨(1997—), 男, 硕士研究生, 研究方向为永磁同步电机控制与故障诊断。

李祥飞(1969—), 男, 博士, 教授, 研究方向为永磁同步电机牵引传动控制。(通信作者)

陈 玄(1992—), 男, 硕士研究生, 研究方向为永磁同步电机控制与故障诊断。

## 0 引言

永磁同步电机(PMSM)因为具有结构简单、能量损耗低和能量利用率高等特点,广泛的应用在风机、数控机床、国防等科技领域中,但对PMSM系统的控制精度、控制的稳定性有着极高的要求<sup>[1]</sup>。20世纪40年代,PI控制作为一种经典的控制策略被提出。因为其算法理论较为简单、稳定可靠和方便工程师调节,所以在工业控制领域备受青睐。目前,传统的PMSM主要采用PI控制。然而,PMSM是一个非线性、强耦合、多变量、参数时变的复杂系统<sup>[2]</sup>。当PMSM系统受到扰动时,传统的PI控制抗扰动能力较差,很难满足工程人员对PMSM系统控制精度和稳定的要求<sup>[3-4]</sup>。众多的专家及学者为解决传统PI控制的局限性,研究了大量新型控制算法来替代传统PI控制,以提升PMSM系统的控制品质。例如滑模变结构控制<sup>[5-6]</sup>(SMC)、自抗扰控制<sup>[7-8]</sup>、自适应控制<sup>[9-10]</sup>、神经网络控制<sup>[11-12]</sup>等。其中,SMC是一种鲁棒性极强的非线性控制算法,具有不依赖控制对象模型参数、算法简单、响应速度快、抗扰动能力强等优点,因此许多专家及学者对SMC展开了深入研究并运用到PMSM控制系统中<sup>[13-14]</sup>。文献[15]在传统指数趋近率基础上,设计了一种分段函数的新型趋近率应用在速度控制器,以提高系统响应速度以及抑制抖振。同时,设计了一种基于滑模变结构的新型扩张状态观测器来估计扰动转矩,并作为前馈补偿信号给速度滑模控制器,进一步提高了系统自适应能力。文献[16]提出了一种快速幂次趋近律,通过纯幂次趋近律中引入终端因子,使被控对象能够保持全局快速收敛,且幂次项内含有系统状态变量能削弱抖振。文献[17]定义了一种非奇异快速终端滑模面,并结合非线性跟踪微分器设计了新型滑模观测器。通过该新型滑模观测器观测得到反电动势,并使用锁相环得到转速及转子位置信息,可减少传统滑模观测器经低通滤波器引起的相位滞后,同时消除了部分滑模抖振。文献[18]设计了一种变指数趋近律,通过引入2个含有系统状态变量的幂函数,使得该趋近律可以全局高速收敛且抖振小。为此,设计了滑模控制器应用在PMSM直接转矩控制系统中,提高了系统鲁棒性,加快了响应速

度。文献[19]在传统滑模观测器中采用边界层可调的双曲正切饱和函数来代替符号函数,以此观测反电动势,再利用锁相环计算转速、位置信息。改进后的观测器能够避免传统滑模观测器加入低通滤波器后引起的相位滞后,能够减小抖振现象,并将非线性自抗扰中拓展状态观测器与滑模控制相结合设计出速度环控制器来替换PI控制,进一步提升系统的鲁棒性及抗干扰能力。

综上所述,本文在文献[20]基础上改进了一种新型指数趋近律。该趋近律在传统指数趋近律等速项系数引入含有指数项的分数多项式,且采用可变边界层的饱和函数代替符号函数。相比传统指数趋近律,该趋近律响应速度更快、抖振更小、自适应能力更强。基于此趋近律设计了PMSM速度环滑模控制器来改善PMSM调速系统的动态控制品质。

## 1 PMSM 数学模型

在同步旋转  $d-q$  坐标系下表贴式 PMSM 定子电压方程为<sup>[21]</sup>

$$\begin{cases} u_d = Ri_d + L \frac{di_d}{dt} - pLn i_q \\ u_q = Ri_q + L \frac{di_q}{dt} + pn(Li_d + \varphi_r) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $u_d$ 、 $u_q$  分别为  $d$ 、 $q$  轴电压; $R$  为定子绕组相电阻; $i_d$ 、 $i_q$  分别为  $d$ 、 $q$  轴电流; $L$  为定子绕组电感; $p$  为电机极对数; $n$  为转子机械角速度; $\varphi_r$  为永磁体磁链。

PMSM 运动方程:

$$\frac{J}{p} \frac{dN}{dt} = T_e - T_L \quad (2)$$

$$T_e = 1.5p\varphi_r i_q \quad (3)$$

式中: $J$  为转动惯量; $N$  为转子电角速度; $T_e$ 、 $T_L$  为电磁转矩、负载转矩。

## 2 新型指数趋近律

### 2.1 新型指数趋近律的设计

文献[22]中的传统指数趋近律如下:

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

式中: $k>0$ ; $q>0$ ; $k\text{sign}(s)$  为等速项, $qs$  为指数项。

当系统内任意一点在远离滑模面  $s$ , 此时等速项和指数项共同作用,强迫被控系统快速地收敛

至滑模面附近;当系统进入滑模面,此时指数项已经为零,会在有限时间内收敛至原点附近,但是因为等速项含有符号函数,所以此时等速项不为零,导致系统最终会在滑模面两边来回抖振,形成抖振带。 $k$  和  $q$  取值大小与系统的收敛速度呈正相关。如果两者取值越大,那么系统收敛速度越快,相反则越慢。但是  $k, q$  过大会将系统的抖振带增大。为了改善上述问题,结合文献[20]改进了一种新型指数趋近律:

$$\dot{s} = -\frac{k \text{sat}(s)}{\beta + (1 - \beta) e^{-\alpha |s|}} - qs \quad (5)$$

其中: $k>0; 1>\beta>0; \alpha>0; q>0$ 。

饱和函数<sup>[22]</sup>  $\text{sat}(s)$  为

$$\text{sat}(s) = \begin{cases} \text{sign}(s), & |s| \geq \rho \\ \frac{s}{\rho}, & |s| < \rho \end{cases} \quad (6)$$

式中: $\rho$  为边界层厚度。

与传统指数趋近律的等速趋系数相比,新型趋近律系数是随着时间而变化的,而非一个常数。当系统远离滑模面  $s$ ,即离滑模面距离  $|s|$  很大,此时等速项系数为  $k/\beta$ ;趋近速度为最大值,当  $|s|$  很小接近于零时,等速项系数逐渐衰减至  $ks/\rho$ ,此时趋近速度为最小值。与传统指数趋近律相比,其加快了远离滑模面  $s$  时的收敛速度,且自适应调节能力更强。饱和函数  $\text{sat}(s)$  使系统收敛到其边界层时,切换为连续函数代替符号函数,有效地削弱了抖振现象,系统输出更加光滑。

### 2.2 稳定性证明

采用 Lyapunov 函数来对新型趋近律进行稳定性证明。Lyapunov 函数如下:

$$V = \frac{1}{2}s^2 \quad (7)$$

当满足 Lyapunov 稳定判据,即  $\dot{V} = s\dot{s} \leq 0$ ,则系统是稳定的,有:

$$\dot{V} = s\dot{s} = -k \frac{s}{\beta + (1 - \beta) e^{-\alpha |s|}} \text{sat}(s) - qs^2 \quad (8)$$

因为  $s\text{sat}(s) \geq 0; \beta + (1 - \beta) e^{-\alpha |s|} > 0$ ,所以  $\dot{V} \leq 0$  成立,即新型指数趋近律满足 Lyapunov 稳定,同时还满足滑模到达条件,能够让系统从相平面上任意位置在有限时间内收敛到原点附近。

### 2.3 性能分析

采用典型二阶系统<sup>[22]</sup>对新型趋近律的控制

性能进行分析。

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (9)$$

系统采用的为线性滑模面  $s = Cx$ ,对等式两边求导可得:

$$\dot{s} = C\dot{x} \quad (10)$$

将式(5)、式(9)代入式(10)中可以得到二阶系统控制器输出表达式:

$$u = (CB)^{-1} \left[ -CAx - \frac{k \text{sat}(s)}{\beta + (1 - \beta) e^{-\alpha |s|}} - qs \right] \quad (11)$$

式中: $x = [x_1 \ x_2]^T, x_1, x_2$  为二阶系统的状态变量; $A, B$  为系统矩阵参数<sup>[22]</sup>,  $A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -25 \end{bmatrix}, B =$

$\begin{bmatrix} 0 \\ 133 \end{bmatrix}; C$  为线性滑模面参数,  $C = [15 \ 1]; x(0)$

为状态变量初始值,  $x(0) = [0.5 \ 0.5]^T$ 。

$\alpha, \beta$  的取值大小影响着被控系统输出的收敛速度及输出的抖振带的宽度,经过大量的仿真及经验调试,新型指数趋近律参数  $\alpha = 3, \beta = 0.01$ ,其余参数与式(4)传统指数趋近律选取相同,  $q = 10, k = 5$ 。

2种趋近律基于 MATLAB 仿真结果如图 1、图 2 所示。

2种趋近律基于 MATLAB 仿真结果如图 1、图 2 所示。

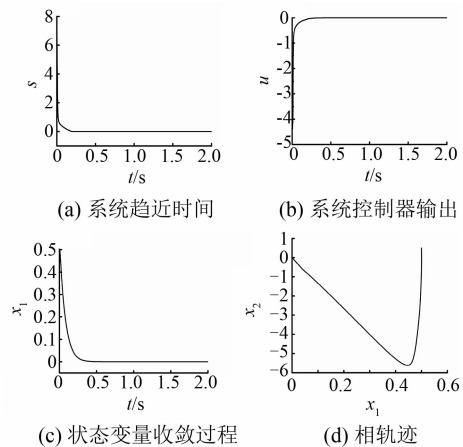


图 1 新型指数趋近律性能

图 1、图 2 的仿真结果表明新型指数趋近律的二阶受控系统的响应速度比传统指数趋近律更快;图 1(b)、图 2(b)系统控制器输出结果表明新型趋近律产生的滑模抖振更小。因此,新型指数趋近律控制品质优于传统指数趋近律。

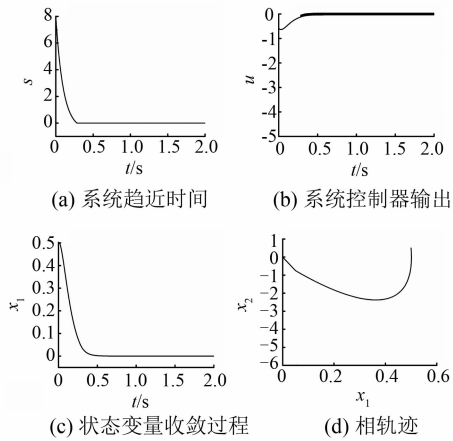


图2 传统指数趋近律性能

### 3 PMSM 速度环滑模控制器设计

本文将给定转速  $N^*$  与实际转速  $N$  的误差及误差的导数作为 PMSM 调速系统的状态变量：

$$\begin{cases} x_1 = N^* - N \\ x_2 = \dot{x}_1 = -\dot{N} \end{cases} \quad (12)$$

将式(2)、式(3)代入式(12)可得：

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -\dot{N} = -\frac{P}{J}(1.5p\varphi_f i_q - T_L) \\ \dot{x}_2 = -\ddot{N} = -1.5\frac{P^2}{J}\varphi_f i_q \end{cases} \quad (13)$$

令  $F = 1.5p^2\varphi_f/J$ 、 $u = i_q$ ，则 PMSM 调速系统的状态空间表达式为

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -F \end{bmatrix} u \quad (14)$$

本文选取线性滑模面  $s = Cx_1 + x_2$  作为切换函数，对其求导并结合式(14)，有：

$$\dot{s} = Cx_2 + \dot{x}_2 = Cx_2 - Fi_q \quad (15)$$

将新型指数趋近律结合式(15)，可设计出速度环滑模控制器，改善 PMSM 调速的动态控制品质。其控制器表达式为

$$i_q^* = \frac{1}{F} \int \left[ Cx_2 + \frac{k \text{sat}(s)}{\beta + (1-\beta)e^{-\alpha|s|}} + qs \right] dt \quad (16)$$

将给定转速与实际转速之间的误差输入到滑模控制器，经过滑模控制率的调制输出矢量控制中  $q$  轴电流给定值  $i_q^*$ ，由于  $i_q^*$  中含有积分器，其能够消除部分系统稳态误差，进一步提高了 PMSM 调速系统的稳定性能。

### 4 仿真与分析

图3为基于新型指数趋近律的 PMSM 双闭环矢量控制系统结构框图，主要由速度环、电流环构成。本文控制对象为表贴式 PMSM，采用  $i_d = 0$  的矢量控制。

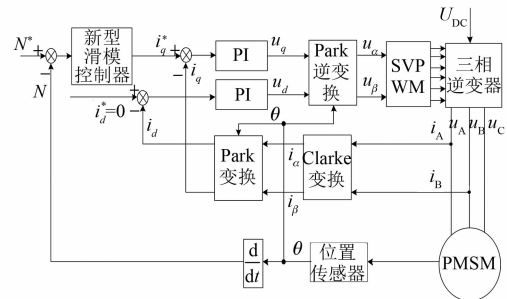


图3 PMSM 调速系统控制结构框图

PMSM 在 MATLAB/Simulink 中所用仿真参数如表 1 所示。

表 1 PMSM 仿真参数

参数名称	参数值
定子绕组相电阻 $R/\Omega$	1.9
极对数 $p$	4
定子绕组电感 $L/H$	0.003 34
转动惯量 $J/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	0.001 469
永磁体磁链 $\varphi_f/\text{Wb}$	0.171

为了验证新型趋近律的控制效果，将之与 PI 控制进行比较。为了保证仿真准确性，PMSM 调速系统除速度环之外，电流环均使用 PI 控制器，且 PI 控制器参数值设置相同。参考转速  $N^* = 800 \text{ r/min}$  空载运行条件下，基于新型指数趋近律的滑模控制和 PI 控制策略下的转速曲线对比如图 4 所示。

为了验证 PMSM 调速系统抗扰动能力，PMSM 在  $N^* = 800 \text{ r/min}$  的空载条件下，0.1 s 时刻加入  $5 \text{ N}\cdot\text{m}$  负载，PMSM 转速、电磁转矩响应曲线仿真结果如图 5 所示。

图 4 结果表明，PMSM 在 PI 控制启动时转速超调量大，超过了  $150 \text{ r/min}$ ，稳态调节时间长，而在新型滑模控制下能够无超调、快速跟踪给定转速。图 5(a)结果表明，当 PMSM 受到负载扰动，PI 控制转速波动超过了  $40 \text{ r/min}$ ，且恢复时间较

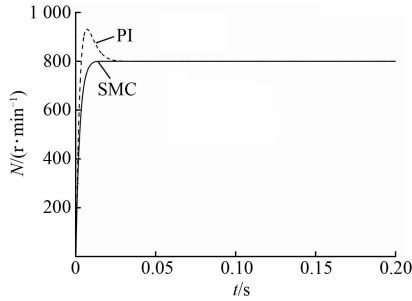


图4 空载起动转速对比

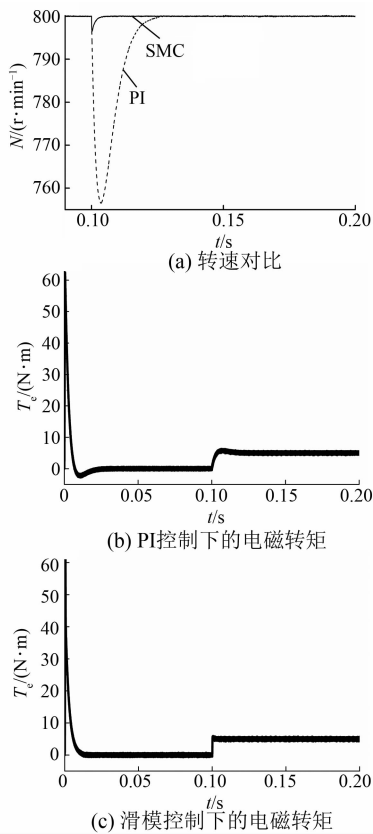


图5 动态控制仿真结果

长,新型滑模控制下转速波动不超过 5 r/min,转速波动较小,而且扰动恢复时间更短。图 5(b)、图 5(c)结果表明,PI 控制下电磁转矩在 0.1 s 负载转矩增大后需要较长时间才能再次到达稳定状态,而新型滑模控制下电磁转矩则能够快速跟踪并达到稳定状态。因此,PMSM 在基于新型指数趋近律的滑模控制比传统 PI 控制的控制性能更优。

## 5 结 语

本文为解决传统 PMSM 交流调速系统多采

用 PI 控制带来的稳态调节时间长、鲁棒性较差等缺点,改进了一种新型指数趋近律。该趋近律是在传统指数趋近律的等速项系数引入含有指数项  $e^{-\alpha|s|}$  的分数多项式,即将传统指数趋近律的等速项变为变速项系数。以此设计了速度外环滑模控制器替代传统 PI 控制器。使用 MATLAB/Simulink 对系统进行仿真,结果表明基于新型滑模趋近律的滑模控制器能减小稳态调节时间,消除超调,提高系统鲁棒性,改善了 PMSM 交流调速系统的性能。

## 【参 考 文 献】

[ 1 ] 许叙遥,林辉. 基于动态滑模控制的永磁同步电机位置速度一体化设计[J]. 电工技术学报,2014,29(5): 77.

[ 2 ] 符慧,左月飞,刘闯,等. 永磁同步电机转速环的一种变结构 PI 控制器[J]. 电工技术学报,2015,30(12): 237.

[ 3 ] 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.

[ 4 ] 朱磊,温旭辉,赵峰,等. 永磁同步电机弱磁失控机制及其应对策略研究[J]. 中国电机工程学报,2011,31(18): 67.

[ 5 ] 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.

[ 6 ] 崔家瑞,高江峰,张波,等. 永磁同步电机滑模变结构鲁棒控制[J]. 电机与控制学报,2016,20(5): 84.

[ 7 ] 侯利民,任一夫,徐越,等. 基于 NESO 的永磁同步电机滑模自抗扰控制[J]. 控制工程,2019,26(1): 50.

[ 8 ] 周凯,孙彦成,王旭东,等. 永磁同步电机的自抗扰控制调速策略[J]. 电机与控制学报,2018,22(2): 57.

[ 9 ] 柴青,刘旭东,罗巨龙,等. 基于预测控制和模型参考自适应的 PMSM 电流控制[J]. 电气传动,2018,48(3): 17.

[ 10 ] 赵换丽,王艳,许允之. 无传感器永磁同步电机模型参考模糊自适应系统[J]. 微特电机,2017,45(9): 64.

[ 11 ] 霍召晗,许鸣珠. 基于小波神经网络 PID 的永磁同步电机转速控制[J]. 电机与控制应用,2019,46(11): 1. (下转第 104 页)

的转子车间优化也可以使用,在考虑不改变原铸铝套轴区域,改变其他机床的顺序使按照工艺流程顺序而布置,按照这种布置方法,可以减少转子的搬运时间和距离,避免转子的重复交叉运输,提高了转子的生产效率和产能。同样,对于电动机零部件其他车间的布置也有很强的适应性。

电机制造企业通过将工序分析法和这种转子车间布置方法相结合,可以为企业解决复杂转子车间流程化问题时提供运营更稳定、信息传递更快、库存更低、效率更快的优化方案。

### 【参考文献】

- [ 1 ] 王昀睿. 基于 IE 的微型电动机装配生产现场改善[J]. 现代制造工程, 2015(9): 38.
- [ 2 ] 张学龙. 基于工序分析方法的企业生产流程优化研究[J]. 工业工程与管理, 2012, 17(1): 40.
- [ 3 ] 朱耀祥, 朱立强. 设施规划与物流[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- [ 4 ] 陆云, 邱胜海, 王志亮, 等. 某轴承制造企业设施规划及仿真[J]. 中国制造业信息化, 2011, 40(23): 27.
- [ 5 ] MEYERS F E, STEPHENS M P. 制造设施设计和物料搬运[M]. 2版. 蔡临宁, 译. 北京: 清华大学出版社, 2002.
- [ 6 ] 陈勇, 汤科峰, 林飞龙, 等. 企业 CD 段流水线的瓶颈分析与平衡改善[J]. 工业工程与管理, 2008(1): 112.
- [ 12 ] 张冷, 于霜, 丁力. 永磁同步电机的神经网络左右逆协同解耦控制[J]. 控制工程, 2016, 23(10): 1482.
- [ 13 ] 王新英, 何亚屏, 余栋, 等. 一种新型 PMSM 矢量控制系统速度辨识方案[J]. 控制工程, 2016, 23(6): 884.
- [ 14 ] 孙明江, 王兴松. 机器人永磁同步电机控制器的控制策略设计[J]. 控制工程, 2014, 21(4): 596.
- [ 15 ] 赵峰, 罗雯, 高锋阳, 等. 考虑滑模抖振和扰动补偿的永磁同步电机改进滑模控制[J]. 西安交通大学学报, 2020, 54(6): 28.
- [ 16 ] 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.
- [ 17 ] 兰志勇, 王波, 王琳, 等. 基于滑模观测器的永磁同步电机无传感器控制[J]. 微电机, 2018, 51(9): 32.
- [ 18 ] 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.
- [ 19 ] 王要强, 冯玉涛, 秦明, 等. 表贴式永磁同步电机全阶滑模观测与控制策略[J]. 电工技术学报, 2018, 33(24): 5688.
- [ 20 ] 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.
- [ 21 ] 李永恒, 刘陵顺, 闫红广. 基于积分滑模控制的对称六相永磁同步电机调速系统研究[J]. 电机与控制应用, 2018, 45(12): 1.
- [ 22 ] 刘金琨. 滑模变结构控制 MATLAB 仿真[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.

(上接第 91 页)

- [ 5 ] ROMARY R, JELASSI S, BRUDNY J F. Stator inter laminar fault detection using an external flux density sensor[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010, 57(1): 237.
- [ 6 ] GHANBARI T, FARJAH A. A magnetic leakage flux-based approach for fault diagnosis in electrical machines[J]. IEEE Sensors Journal, 2014, 14(9): 2981.
- [ 7 ] 孙宇光, 余锡文, 魏锴, 等. 发电机绕组匝间故障检测的新型探测线圈[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(6): 917.