

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2209039

# 基于改进滑模趋近律和非线性干扰观测器的 PMSM 位置跟踪\*

闫宏亮<sup>1</sup> 张嘉楠<sup>1</sup> 龙虎林<sup>2</sup>

(1. 西安石油大学电子工程学院 西安 710065; 2. 西安石油大学陕西省油气井测控技术重点实验室 西安 710065)

**摘要:** 针对永磁同步电机(PMSM)在实际运行过程中会受到参数摄动和外界不确定干扰等非线性因素影响,导致电机控制性能下降,位置跟踪精度降低。提出将滑模控制(SMC)与反演控制(backstepping control)结合设计非线性控制器,对反演滑模控制中的趋近律做出改进,提出一种基于指数趋近律的双幂次趋近律,并利用非线性干扰观测器(NDOB)观测和估计干扰,对其进行补偿。最后利用 MATLAB/Simulink 进行仿真,结果显示,该方法在一定程度上提高了电机位置控制精度,减小了位置跟踪误差,同时增强了系统抗干扰能力。

**关键词:** 位置跟踪;反演滑模控制;趋近律;非线性干扰观测器

中图分类号: TP273;TM341 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 510.8020

## PMSM position tracking based on improved sliding mode reaching law and nonlinear disturbance observer

Yan Hongliang<sup>1</sup> Zhang Jianan<sup>1</sup> Long Hulin<sup>2</sup>

(1. School of Electronic Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China;

2. Shaanxi Key Laboratory of Oil and Gas Well Monitoring and Control Technology, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China)

**Abstract:** In view of the fact that permanent magnet synchronous motor (PMSM) will be affected by nonlinear factors such as parameter perturbation and external uncertain interference in actual operation, which will lead to the decline of motor control performance and position tracking accuracy. To improve the control performance of permanent magnet synchronous motor(PMSM) under nonlinear factors, a nonlinear controller is designed by combining sliding mode control (SMC) with backstepping control, the reaching law in backstepping sliding mode control is improved, and a new sliding mode reaching law is designed by using a hyperbolic tangent function instead of symbolic function in traditional exponential reaching law. The nonlinear disturbance observer (NDOB) is used to observe and estimate the disturbance and compensate the disturbance, which is combined with the designed nonlinear control to track the motor position. Finally, the improved backstepping sliding mode control module and nonlinear disturbance observer module are built by using MATLAB/Simulink. The results show that this method improves the motor position control accuracy and tracking response speed to a certain extent, reduces the position tracking error, and enhances the anti-interference ability of the system.

**Keywords:** position tracking; inverse sliding mode control; reaching law; nonlinear disturbance observer(NDO)

## 0 引言

永磁同步电机(PMSM)凭借效率高、可靠性高及响应速度快等优点,在各个领域得到广泛应用。但因永磁同步电机是一个复杂的非线性系统,精确的系统模型难以确定,往往导致性能下降,特别是在永磁同步电机受到参数扰动

及不确定干扰<sup>[1]</sup>时,传统的PID控制难以满足PMSM位置伺服系统的跟踪精度,因此永磁同步电机位置跟踪精度的提高成为研究重点<sup>[2-3]</sup>。

为提高PMSM位置跟踪精度及抗干扰能力,国内外学者提出很多先进的控制策略,滑模控制作为一种稳定性较强的控制方法,因具有对参数及外界环境干扰不敏感性、

收稿日期:2022-02-19

\* 基金项目:陕西省教育厅重点实验室项目(15JS084)、西安石油大学研究生创新实践能力培养计划(YCS21213192)项目资助

结构简单等特点,受到学者重视。Liu等<sup>[4]</sup>在对发电机系统的无功功率和电磁转矩进行控制分析时,利用基于指数趋近律的滑模控制方法,此处的指数趋近律引入了幂次趋近律和非线性函数,提高了趋近速度及收敛速度并削弱了抖振,将新型滑模控制与功率控制策略结合,通过仿真验证,相比于传统滑模控制,该方法提高了发电机的电磁转矩和无功功率跟踪性能。Pan等<sup>[5]</sup>在对PMSM的干扰观测中,在滑模面的设计中引入分数阶微积分算子,以其能量和衰减特性缓慢传输来减弱抖振,提高了系统的灵活性及稳定性。文献[6]将滑模控制与反步控制结合,设计虚拟量,并采用全局滑模面,设计飞行模拟转台的速度控制系统,提高了系统的鲁棒性及跟踪精度,削弱滑模控制存在的抖振,却忽略了反步控制<sup>[7,9]</sup>所带来的微分爆炸。文献[9]设计鲁棒反步控制器进行位置跟踪并结合干扰观测器对干扰补偿,弥补了反步控制器未全面考虑干扰对位置精度影响,该方法设计简单,可调参数少,但是反馈增益参数的设置影响了干扰估计值的准确度,从而直接影响了位置跟踪。

为提高永磁同步电机的位置跟踪精度及抗干扰能力,本文提出改进的反演滑模控制器,将传统滑模控制中的趋近律<sup>[10]</sup>做出优化,以达到对电机位置的精确跟踪,利用非线性干扰观测器<sup>[11]</sup>对系统所受的非线性因素进行观测估计,更好的补偿干扰。通过仿真表明,所提方法降低了位置跟踪误差,提高了系统响应速度和抗干扰能力。

### 1 PMSM 数学模型

PMSM 是一个非线性、强耦合的模型,在不影响电机控制性能的条件下,往往在对数学模型建立时会做出如下假设:1)不考虑转子和永磁体的阻尼影响;2)铁心是不饱和的;3)忽略电机的涡流及磁滞损耗;dq轴下,PMSM的状态方程为<sup>[12-14]</sup>:

$$\begin{cases} \dot{i}_q = \frac{1}{L}(u_q - Ri_q - p\omega Li_d - p\omega\psi) \\ \dot{i}_d = \frac{1}{L}(u_d - Ri_d + p\omega Li_q) \\ \dot{\theta} = \omega \\ \dot{\omega} = \frac{1}{J}\left(\frac{3}{2}p\psi i_q - T_L - B\omega\right) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $i_d, i_q$ 为dq轴电流, $L_d = L_q = L, R$ 为定子电阻, $u_q, u_d$ 为dq轴电压, $p$ 为极对数, $\omega$ 为电机转速, $\theta$ 为电机角速度, $\psi$ 为磁链, $J$ 为转动惯量, $B$ 为粘性阻尼系数, $T_L$ 为负载转矩。

采用 $i_d = 0$ 的矢量控制,将电机所受负载扰动、参数扰动及外界不确定干扰等视为综合干扰 $M$ 。可得PMSM的位置伺服系统模型为:

$$\begin{cases} \dot{\theta} = \omega \\ \dot{\omega} = -\frac{B}{J}\omega + bi_q + M \end{cases} \quad (2)$$

其中, $b = \frac{3}{2J}p\psi$ 。

上式中令 $\theta = x_1, \omega = x_2$ 得:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= -\frac{B}{J}x_2 + bi_q + M \end{aligned} \quad (3)$$

### 2 位置伺服系统设计

针对系统所受非线性因素的影响,本文采用改进滑模趋近律的反演滑模控制<sup>[15]</sup>和非线性干扰观测器的复合控制策略对电机位置进行跟踪,图1为永磁同步电机位置伺服系统方案设计。

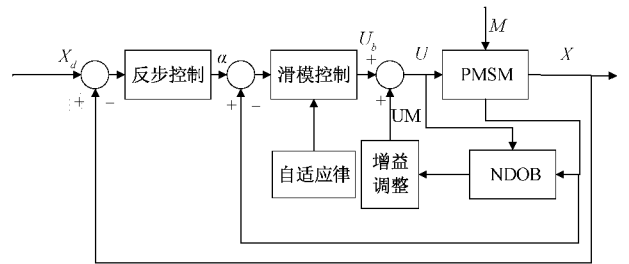


图1 自适应反演滑模控制器框图

反演控制特别适应于复杂的非线性系统,基本思想是将复杂的高阶系统降阶为低阶子系统,通过对每一阶子系统设计合适的虚拟控制量及李雅普诺夫函数保证子系统稳定性以达到全局稳定。

根据反演控制<sup>[16-18]</sup>的基本原理,利用式(3)定义位置跟踪误差变量 $e_1$ :

$$e_1 = x_1 - x_d \quad (4)$$

其中, $x_1$ 为电机系统实际位置信号, $x_d$ 为给定位置信号。

令电机速度跟踪误差为 $e_2$ :

$$e_2 = x_2 - \alpha_1 \quad (5)$$

其中, $\alpha_1$ 为虚拟控制量。

由式(4)可得 $e_1$ 的动态方程为:

$$\dot{e}_1 = \dot{x}_1 - \dot{x}_d = x_2 + \alpha_1 - \dot{x}_d \quad (6)$$

设计 $\alpha_1$ 为:

$$\alpha_1 = -k_1 e_1 + \dot{x}_d \quad (7)$$

对 $e_1$ 进行李雅普诺夫稳定性判断 $V_1 = \frac{1}{2}e_1^2$ ,使得:

$$V_1 = e_1 \dot{e}_1 = -k_1 e_1^2 + e_1 e_2 \quad (8)$$

由式(5)和(7)可得 $e_2$ 动态方程为:

$$\dot{e}_2 = f(x) + bu + M - k_1^2 e_1 + k_1^2 e_2 - \dot{x}_d \quad (9)$$

### 3 非线性干扰观测器设计

根据电机所受综合扰动,非线性干扰观测器<sup>[19-20]</sup>设计如下:

$$\begin{cases} \dot{\hat{M}} = Z + lx_2 \\ \dot{Z} = -lZ + l[-lx_2 - f(x) - bu] \end{cases} \quad (10)$$

式中： $\hat{M}$  为非线性干扰观测器输出的综合干扰估计值， $Z$  为干扰观测器内部辅助变量， $f(x) = -\frac{B}{J}x_2$ ， $l$  为观测器增益，影响观测器的收敛程度。

令 NDOB 观测误差的为  $e_n = M - \hat{M}$ ， $|e_n| \leq \delta$  且  $\delta^* = \delta - \hat{\delta}$ ， $\delta$  为误差上界， $\hat{\delta}$  为误差估计值。

#### 4 复合控制器

结合非线性干扰观测器<sup>[21-22]</sup>的设计，设计改进的反演滑模控制器，定义滑模面为线性滑模面：

$$s = ce_1 + e_2 \quad (11)$$

滑模控制器设计时，一般采用指数趋近律：

$$\dot{s} = -\epsilon \operatorname{sgn}(s) - qs \quad (12)$$

指数项作用于远离滑模面时，以指数形式趋近滑模面；等速项  $-\epsilon \operatorname{sgn}(s)$  作用于靠近滑模面时。 $\epsilon$  的选定影响了调节过程，过小引起趋近速度过慢，趋近时间过长，过大会引起速度过大，容易发生抖振。基于指数趋近律所述不足，设计了新型滑模趋近律为：

$$\dot{s} = -\hat{\delta} \tanh(\xi s) |s|^{\epsilon-1} - k_2 |s|^\lambda \quad (13)$$

对式(11)求导：

$$\dot{s} = c(-k_1 e_1 + e_2) + f(x) + bu + \dot{\hat{M}} + e_n - k_1^2 e_1 + k_1 e_2 - \ddot{y}_d \quad (14)$$

复合控制的控制律和自适应律设计如下：

$$u = u_b + u_M$$

$$u_b = -\frac{1}{b} \begin{bmatrix} -c(-k_1 e_1 + e_2) - f(x) \\ -\dot{\hat{\alpha}}_1 - \hat{\delta} \tanh(\xi s) \end{bmatrix} |s|^{\epsilon-1} - k_2 |s|^\lambda$$

$$u_M = -\frac{\hat{M}}{b}$$

$$\dot{\hat{\delta}} = -\gamma |s| \quad (15)$$

式(15)中  $k_1, k_2$  均大于 0， $\gamma > 0$  为自适应增益系数，是常数。

选择 Lyapunov 函数：

$$V_2 = \frac{1}{2} e_1^2 + \frac{1}{2} e_n^2 + \frac{1}{2\gamma} \delta^{*2} + \frac{1}{2} s^2 \quad (16)$$

对式(16)进行求导：

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 = & e_1 \dot{e}_1 + e_n \dot{e}_n - \frac{1}{\gamma} \delta^* \dot{\delta} + s \dot{s} = -k_1 e_1^2 + \\ & e_1 e_2 - s \begin{bmatrix} c_1(-k_1 e_1 + e_2) + f(x) + bu + \\ \hat{M} + e_n - k_1^2 e_1 + k_1 e_2 - \ddot{x}_d \end{bmatrix} - \\ & \frac{1}{\gamma} \delta^* \dot{\delta} + e_n \dot{e}_n \end{aligned} \quad (17)$$

将复合控制器的控制律及自适应律代入式(17)可得：

$$\dot{V}_2 = -k_1 e_1^2 + e_1 e_2 + s \begin{pmatrix} e_n - k_2 |s|^\lambda \\ -\hat{\delta} \tanh(\xi s) |s|^{\epsilon-1} + \gamma \end{pmatrix} -$$

$$\frac{1}{\gamma} \delta^* \dot{\delta} - l e_n^2 \leq -k_1 e_1^2 + e_1 e_2 - k_2 |s|^{\lambda+1} - l e_n^2 \quad (18)$$

令：

$$-k_1 e_1^2 + e_1 e_2 - k_2 |s|^{\lambda+1} = -X^T EX \quad (19)$$

式中： $X = [e_1, e_2]^T$ 。

存在合适的参数  $k_1 > 0, k_2 > 0, c > 0$ ，使得：

$$\dot{V}_2 \leq -X^T EX - l e_n^2 \leq 0 \quad (20)$$

即可证明本文所提的控制方法是稳定的。

#### 5 仿真分析

为验证本文复合控制策略正确性，利用 MATLAB 对永磁同步电机进行仿真分析，PMSM 的主要参数如表 1 所示。

表 1 电机参数

序号	名称	量值
1	定子电感/H	0.001 2
2	定子电阻/ $\Omega$	1.875
3	粘滞摩擦系数/ $N \cdot m \cdot s$	0.002
4	极对数	4
5	永磁磁通/Wb	0.183

利用 MATLAB/Simulink 搭建改进反演滑模控制器模块及非线性干扰观测器模块，仿真参数如表 2 所示。

表 2 复合控制器参数

序号	复合控制器参数	量值
1	$k_1$	3 750
2	$c$	1 100
3	$\delta$	10
4	$\xi$	6
5	$l$	300

##### 5.1 位置跟踪对比

将本文控制方法与传统反演滑模控制方法进行仿真对比。给定系统的位置信号为正弦信号  $x_d = 10 \sin(\frac{\pi}{2} t)$ 。

图 2 与 3 分别是本文方法与传统控制方法对电机的位置跟踪图。

图 4 为本文所提复合控制策略的位置跟踪误差波形图；观察图 5 可以看出，在相同干扰情况下，改进反演滑模控制的位置跟踪误差约为  $8.32 \times 10^{-3}$  rad，传统反演滑模控制位置跟踪误差为  $8.68 \times 10^{-3}$  rad，所提控制方法在位置跟踪精度上明显优于传统控制方法，且位置跟踪误差更

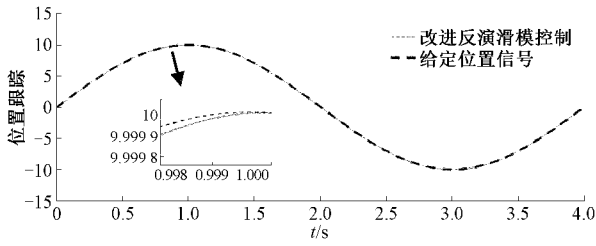


图2 改进反演滑模控制器位置跟踪

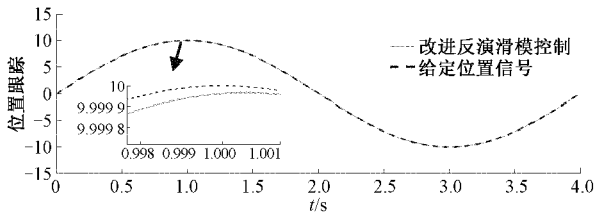


图3 传统反演滑模控制器位置跟踪

小;图6为两种控制方法的位置跟踪响应图,传统控制策略响应时间为0.008s,而改进策略的响应时间0.0049s,相同条件下改进反演滑模控制位置跟踪响应速度更快,响应时间更短,整体性能明显优于传统控制方法。

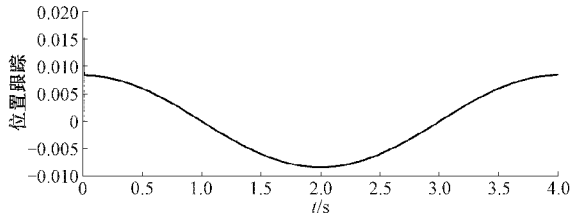


图4 改进反演滑模控制位置跟踪误差

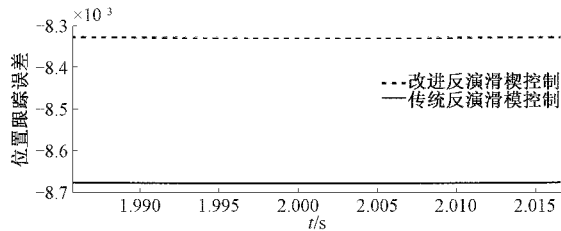


图5 位置跟踪误差对比波形

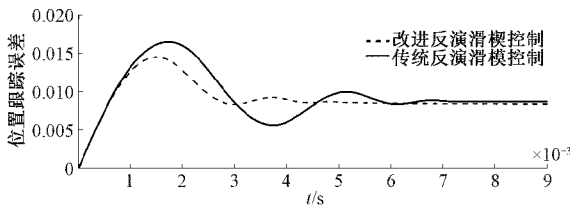


图6 两种控制方法跟踪响应仿真波形

5.2 抗干扰能力对比

为验证本文方法的抗干扰效果,系统给定位置信号仍为  $x_d = 10\sin(\frac{\pi}{2}t)$ , 在2s时施加  $10\text{ N}\cdot\text{m}$  的阶跃干扰信

号,比较传统方法与改进方法的抗干扰能力。

仿真结果如图7所示,可以得出,在施加干扰信号后,改进反演滑模控制策略的误差增加了约  $2.8 \times 10^5\text{ rad}$ ,  $10.738\text{ ms}$  后恢复,传统反演滑模控制策略的误差增加了约  $3.6 \times 10^5\text{ rad}$ ,调节时间为  $11.615\text{ ms}$ 。在系统受到相同干扰后,本文方法恢复时间相比与传统方法更短,位置跟踪误差影响更小,由此可得出改进方法抗干扰能力更强。

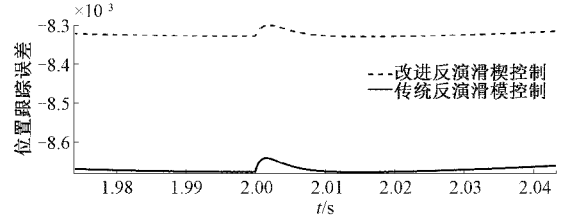


图7 抗干扰能力对比

5.3 NDOB 干扰估计

图8为给定干扰信号、传统方法及改进策略结合NDOB对干扰值的观测仿真波形图。传统方法结合NDOB后,干扰估计值约为  $9.7\text{ N}\cdot\text{m}$ ,本文所设计策略干扰估计值约为  $9.9\text{ N}\cdot\text{m}$ ,可以看出改进的复合控制方法观测的干扰值更接近于所给定干扰,即对干扰估计更为准确,并且改进策略相比于传统策略对干扰响应速度更迅速。验证了本文所设计方法的可行性。

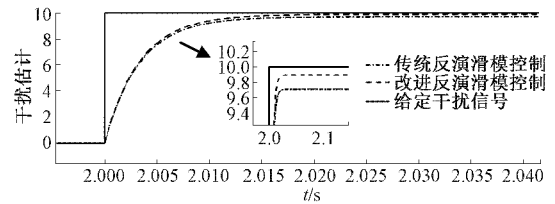


图8 两种控制策略干扰估计

6 结 论

本文采用反演滑模控制与非线性干扰观测器结合的复合控制策略,在传统的反演滑模控制器的基础上,通过对滑模趋近律的改进设计新型控制器,采用NDOB对综合干扰进行观测估计,补偿电机的扰动,通过仿真验证了该复合控制策略不仅能提高位置伺服系统的跟踪精度,降低位置跟踪误差,而且能提高电机的抗干扰能力,从而提高电机的控制性能。

参考文献

[1] KUMAR R H, IQBAL A, LENIN N C. Review of recent advancements of direct torque control in induction motor drives-a decade of progress[J]. IET Power Electronics, 2018,11(1):1-15.  
 [2] 蒋梦琴, 高强, 刘静宝, 等. 永磁同步电机位置伺服系统滑模控制研究[J]. 电气自动化, 2018, 40(2): 13-16.

- [3] 刘盼. 永磁同步电机位置跟踪系统控制仿真[J]. 计算机仿真, 2017,34(7):302-306.
- [4] LIU Y, WANG Z, XIONG L, et al. DFIG wind turbine sliding mode control with exponential reaching law under variable wind speed [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2018, 96:253-260.
- [5] PAN J, LI W, ZHANG H. Control algorithms of magnetic suspension systems based on the improved double exponential reaching law of sliding mode control [J]. International Journal of Control, Automation, and Systems, 2018,16(6):2878-2887.
- [6] 常诚, 常雅男, 艾飞. 飞行模拟转台非线性干扰观测器反步滑模控制器设计[J]. 计算机测量与控制, 2016,24(12):67-70.
- [7] 陈自力, 张昊, 蔺建斌, 等. 基于非线性干扰观测器的翼伞鲁棒反步跟踪控制[J]. 控制与决策, 2017, 32(8):1427-1433.
- [8] 曹伟, 乔金杰, 孙明. 永磁直线电机扰动估计与补偿的位置反步控制[J]. 控制与决策, 2020, 35(6): 1409-1414.
- [9] 奚文龙, 唐文秀, 许李尚, 等. 基于一阶低通滤波器滑模反步法的直流电机位置控制[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2017,29(4):550-556.
- [10] 张港, 高文根, 杭孟荀, 等. 基于改进 SMO 的永磁同步电机全速段位置估算研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2021,35(7):185-193.
- [11] GAO P, ZHANG G, LV X. A novel compound nonlinear state error feedback super-twisting fractional-order sliding mode control of PMSM speed regulation system based on extended state observer [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2020, 2020: 1-15.
- [12] 娄佩宾, 黄茹楠. 基于非线性干扰观测器的 PMSM 自适应反演滑模控制[J]. 微特电机, 2020, 48(5): 32-35.
- [13] 汪圆萍, 张俊, 张兴. 永磁同步电机位置伺服系统的 RBF 神经网络滑模控制策略[J]. 湖北大学学报(自然科学版), 2021,43(4):429-436.
- [14] 杨晓霞, 王帅, 邓永停, 等. 利用扩张状态观测器的交流永磁同步电机控制[J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 30(5):810-816.
- [15] 鲍雪, 王大志, 胡明. 基于自适应模糊的旋转弹反演滑模控制律设计[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(6): 1333-1339.
- [16] 张震阳, 汪成文, 郭新平, 等. 基于 ESO 的电液位置伺服系统反步滑模控制[J/OL]. 北京航空航天大学学报, 2021: 1-13 [2021-12-20]. <https://doi.org/10.13700/j.bh.1001-5965.2020.0724>.
- [17] 薛晶勇, 杨波, 朱永乐, 等. 四旋翼不确定干扰前馈补偿与反步滑模姿态控制[J]. 计算机集成制造系统, 2021:1-18.
- [18] 李硕, 马顺, 李艳山, 等. 高速列车非线性空气悬架自适应反步控制研究[J]. 噪声与振动控制, 2021, 41(1):145-149.
- [19] LIU X, LI K, ZHANG C. Improved backstepping control with nonlinear disturbance observer for the speed control of permanent magnet synchronous motor [J]. Journal of Electrical Engineering & Technology, 2019, 14(1): 275-285.
- [20] ZHENG Y, YU Z, MA G Q. Nonlinear disturbance observer backstepping control for electric dynamic load simulator[J]. Journal of Physics. Conference Series, 2020,1676(1):012182.
- [21] LI L, XIAO J, ZHAO Y, et al. Robust position anti-interference control for PMSM servo system with uncertain disturbance [J]. CES Transactions on Electrical Machines and Systems, 2020,4(2):151-160.
- [22] 王福超, 田大鹏, 王昱棠. 基于简化干扰观测器的光电平台稳定与评估[J]. 国外电子测量技术, 2015, 34(12):13-17.

### 作者简介

闫宏亮, 副教授, 主要研究方向为电机控制与配电网。

E-mail: hlyan@xsyu. du. cn

张嘉楠, 硕士, 主要研究方向为电力电子传动。

E-mail: 1242351891@qq. com

龙虎林, 硕士, 主要研究方向为电力电子传动。

E-mail: 2280503363@qq. com