

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2022.01.007

# 基于滑模自抗扰的永磁同步电机控制

周 杨, 李祥飞, 邹莉华, 陈 玄, 印 阳

(湖南工业大学 电气与信息工程学院, 湖南 株洲 412007)

**摘 要:** 针对基于自抗扰原理的永磁同步电机控制存在待整参数多和参数物理意义不明显等问题, 提出一种改进滑模自抗扰控制算法。首先, 利用滑模趋近律构建出最优控制函数, 将扩张状态观测器及非线性误差反馈控制律中的 *fal* 函数用最优控制函数代替, 从而减少待整参数, 完成对非线性自抗扰控制器结构的优化。其次, 使用李雅普诺夫函数对改进滑模自抗扰控制器的稳定性进行分析。最后, 采用 Matlab 仿真验证该算法的可行性。仿真结果表明: 永磁同步电机调速系统采用改进滑模自抗扰控制器后, 既能保留非线性自抗扰法无超调起动和抗负载扰动能力强的优点, 又能提高永磁同步电机调速系统的动态稳态性能。

**关键词:** 滑模趋近律; 最优控制函数; 李雅普诺夫函数; 改进滑模自抗扰控制器

**中图分类号:** TM341      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1673-9833(2022)01-0046-07

**引文格式:** 周 杨, 李祥飞, 邹莉华, 等. 基于滑模自抗扰的永磁同步电机控制[J]. 湖南工业大学学报, 2022, 36(1): 46-52.

## Permanent Magnet Synchronous Motor Control Based on Sliding Mode Active Disturbance Rejection

ZHOU Yang, LI Xiangfei, ZOU Lihua, CHEN Xuan, YIN Yang

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

**Abstract:** In view of the existential problems of many parameters to be adjusted and unclear physical meaning of parameters in the control of permanent magnet synchronous motor based on active disturbance rejection principle, an improved sliding mode active disturbance rejection control algorithm has thus been proposed. Firstly, the optimal control function is constructed by using the sliding mode reaching law, with the *fal* function in the extended state observer and non-linear error feedback control law to be replaced by the optimal control function, thus reducing the parameters to be adjusted and optimizing the structure of the non-linear ADRC. Secondly, Lyapunov function is used for an analysis of the stability of the improved sliding mode ADRC. Finally, Matlab simulation is used for the verification of the feasibility of the algorithm. The simulation results show that the improved sliding mode ADRC can not only retain the advantages of non-overshoot starting and strong anti-load disturbance ability of non-linear ADRC method, but also improve the dynamic and steady-state performance of permanent magnet synchronous motor speed regulation system.

**Keywords:** sliding mode reaching law; optimal control function; Lyapunov function; improved sliding mode active disturbance rejection controller

收稿日期: 2021-04-27

基金项目: 湖南省教育厅科研基金资助重点项目 (18A267)

作者简介: 周 杨 (1997-), 男, 湖南株洲人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为永磁同步电机控制与故障诊断,  
E-mail: 3291649656@qq.com

通信作者: 邹莉华 (1974-), 女, 湖南株洲人, 湖南工业大学讲师, 主要研究方向为电子应用技术,  
E-mail: 2867863591@qq.com

## 1 研究综述

永磁同步电机 (permanent magnet synchronous motor, PMSM) 因其构造简单、维修方便和能量转化率高等特点, 在现代工业自动化生产中逐渐取代交流异步电机。随着现代控制理论不断发展, 更多的先进控制策略被应用到以矢量控制技术为控制框架的永磁同步电机调速系统中来<sup>[1-5]</sup>。其中, 自抗扰控制 (active disturbance rejection control, ADRC) 作为一种新型的控制策略, 具有原理简单、鲁棒性强、无需知道被控对象的具体数学模型等优点, 引起了众多学者的关注。自抗扰控制分为线性型和非线性型, 线性自抗扰法待整参数少, 但是控制精度及鲁棒性相对非线性都表现较差, 而非线性自抗扰法中存在待整参数多且物理意义不明的缺陷, 给其工程化应用带来巨大困难<sup>[6]</sup>。因此, 非线性自抗扰法中的参数整定与优化显得尤为重要。文献 [7] 在永磁同步电机速度环上设计出一种无参数整定的自抗扰控制器 (no manual tuned active disturbance rejection control, NMT-ADRC), 采用该控制器后, 能够在电机本体参数扰动及外部负载扰动的条件下表现出良好性能。文献 [8] 剖析了非线性自抗扰控制抗扰原理, 分析了各参数对永磁同步电机系统动稳态性能的影响, 并总结出参数调节规律。改进后的算法能在低速甚至零速条件下实现对电机的优良控制; 此外, 在低速条件时, 使用跟踪微分器 (tracking differentiator, TD) 处理位置信号, 可减小噪声干扰、提高控制精度。文献 [9] 对永磁同步电机结构及数学模型进行了深入研究, 设计了一种实际工程上可实现的参数整定方法, 通过改进扩张状态观测器 (extended state observer, ESO) 提高观测器效率; 仿真和实验结果都表明, 该方法在机械角阶跃响应、随机负载响应条件下, 与传统方法相比具有更好的动静态性能及鲁棒性。

滑模变结构控制 (sliding mode control, SMC) 是一种特殊的非线性控制算法, 其根据系统状态位置变化进行控制, 具有响应速度快、抗扰动力强的特点。文献 [10] 通过在双幂次趋近律后面增加一个自适应变指数项, 设计出一种改进型幂次趋近律; 采用此趋近律设计的滑模控制器能加速永磁同步电机启动和增加抗扰能力。文献 [11] 结合被控电机数学模型提出了一种改进型指数趋近律, 通过在等速项系数前增加速度误差绝对值, 能在不增加可调参数的条件下, 使电机状态变量收敛速度加快, 削弱滑动状态下的抖振, 提升电机控制性能; 文献 [12]

利用传统指数趋近律及线性滑模面, 构建出滑模自抗扰 (sliding mode active disturbance rejection control, SM-ADRC) 控制器, 其能减少电机非线性自抗扰法参数、增加电机系统的鲁棒性。

本文结合文献 [11] 与 [12], 研究一种改进滑模自抗扰控制算法; 通过将线性滑模面与改进指数趋近律相结合, 使非线性自抗扰法参数减少且物理意义更加明确, 从而简化参数整定。其中, 选用线性滑模面能保证电机状态变量处于滑动状态时呈指数收敛; 改进指数趋近律则可以保障电机状态变量能快速进入滑模面, 同时能减小滑动状态下的抖振带宽度, 降低抖振对电机的损伤。使用 Simulink 搭建永磁同步电机系统仿真, 发现改进滑模自抗扰控制算法相较于非线性自抗扰控制法及滑模自抗扰控制法, 其启动特性、抗负载扰动能力、变速适应能力、减小抖振能力均表现出更好的效果, 能显著提高电机控制品质。

## 2 传统速度环控制器

20 世纪末, 我国著名学者韩京清研究员首次提出自抗扰控制思想, 其核心理念起源于比例积分微分 (proportional-integral-differential, PID) 控制。非线性自抗扰控制器由跟踪微分器、扩张状态观测器和非线性误差反馈控制律 (non-linear state error feedback, NLSEF) 构成<sup>[13]</sup>。其组成示意图见图 1。

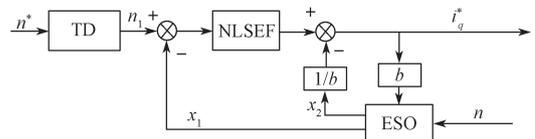


图 1 非线性自抗扰控制器的组成示意图  
Fig. 1 Non-linear ADRC controller diagram

基于转子两相旋转  $d-q$  坐标系下的永磁同步电机运动方程为

$$\frac{dn}{dt} = \frac{p}{J} (1.5p\psi_f i_q - T_L) \quad (1)$$

式中:  $n$  为转子电角速度;  $\psi_f$  为永磁体磁链;  $p$  为电机极对数;  $T_L$  为负载转矩;  $J$  为转动惯量;  $i_q$  为交轴电流分量。

令  $b=1.5p^2\psi_f/J$ , 电机系统总扰动理论值  $f=pT_L/J$ , 则式 (1) 可以写成

$$\frac{dn}{dt} = f + bi_q \quad (2)$$

根据式 (2) 及自抗扰控制的基本原理与构成<sup>[13]</sup>, 设计出永磁同步电机速度环非线性自抗扰控制器, 其结构分为 3 部分。

1) 根据电机给定输入转速设计的跟踪微分器, 其状态方程为

$$\begin{cases} \dot{n}_1 = n_2, \\ \dot{n}_2 = -1.76\gamma n_2 - \gamma^2(n_1 - n^*). \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $n_1$  为给定输入转速  $n^*$  的跟踪信号;  $n_2$  为  $n^*$  的微分信号;  $\gamma$  为速度因子。

2) 利用电机外部实际电角速度建立扩张状态观测器, 其状态方程为

$$\begin{cases} \varepsilon_1 = x_1 - n, \\ \dot{x}_1 = x_2 - \beta_1 fal(\varepsilon_1, \alpha_1, \delta_1) + bi_q, \\ \dot{x}_2 = -\beta_2 fal(\varepsilon_1, \alpha_2, \delta_1). \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $x_1$  为实际转速  $n$  的观测值;  $x_2$  为  $f$  的观测值;  $\beta_1$ 、 $\beta_2$  为误差校正增益;  $fal(\varepsilon, \alpha, \delta)$  为非线性函数, 表达式为

$$fal(\varepsilon, \alpha, \delta) = \begin{cases} |\varepsilon|^\alpha \text{sign}(\varepsilon), & |\varepsilon| > \delta; \\ \varepsilon / \delta^{1-\alpha}, & |\varepsilon| \leq \delta. \end{cases} \quad (5)$$

其中,  $\varepsilon$  为误差;  $\alpha$  为非线性因子, 其取值范围为  $0 < \alpha < 1$ , 当其取值为 1 时, 整个控制器则化为线性型;  $\delta$  为滤波因子。

3) 将跟踪微分器输出的速度跟踪信号与扩张状态观测器中的速度观测信号做差, 进行非线性 PID 组合, 使电机速度控制器变成标准积分串型, 非线性误差反馈控制律的形式为

$$\begin{cases} \varepsilon_2 = n_1 - x_1, \\ \dot{i}_{q0} = -\beta_3 fal(\varepsilon_2, \alpha_3, \delta_2), \\ \dot{i}_q^* = i_{q0} - x_2/b. \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $i_{q0}$  为设定控制量;  $i_q^*$  为  $q$  轴电流参考值;  $\beta_3$  为误差增益。

### 3 改进的速度环控制器设计

根据传统速度环控制器及滑模控制器设计原理及步骤<sup>[14]</sup>, 对式(4)所示扩张状态观测器进行改进, 则式(4)可以改写如下:

$$\begin{cases} \varepsilon_1 = x_1 - n, \\ \dot{x}_1 = x_2 + bi_q, \\ \dot{x}_2 = -g^{(1)}(\varepsilon_1) - g(\varepsilon_1). \end{cases} \quad (7)$$

式中  $g(\varepsilon)$  为最优控制函数。

采用  $g(\varepsilon)$  代替非线性函数  $fal$ , 减少待整参数。对电机转速及电机系统总扰动理论值构建如下误差方程:

$$\begin{cases} \varepsilon_1 = x_1 - n, \\ \dot{\varepsilon}_n = x_2 - f. \end{cases} \quad (8)$$

对误差方程两边同时进行求导, 将式(2)、式(7)代入后得:

$$\begin{cases} \dot{\varepsilon}_1 = \varepsilon_n, \\ \dot{\varepsilon}_n = -g^{(1)}(\varepsilon_1) - g(\varepsilon_1). \end{cases} \quad (9)$$

根据式(8)构建如下线性滑模面方程:

$$s = c\varepsilon_1 + \varepsilon_n. \quad (10)$$

式中:  $c$  为滑模面参数, 且  $c > 0$ , 线性滑模面能保证电机状态变量在滑动状态下快速收敛; 同时采用如下滑模趋近律<sup>[11]</sup>:

$$\dot{s} = -k|\varepsilon_1|\text{sign}(s) - qs. \quad (11)$$

式中  $k$ 、 $q$  均大于零。

为分析趋近律的抖振问题, 将趋近律离散化一个采样周期  $T$  后可得:

$$\frac{s(\lambda+1) - s(\lambda)}{T} = -k|\varepsilon_1|\text{sign}(s) - qs. \quad (12)$$

若电机状态变量处于滑模面  $s > 0$  一侧, 则到达滑模面有  $s(\lambda) = 0^+$ , 因而下个周期:

$$s(\lambda+1) = -k|\varepsilon_1|T, \quad (13)$$

同理可得  $s < 0$  一侧的为

$$s(\lambda+1) = k|\varepsilon_1|T. \quad (14)$$

综上, 文献[11]切换带带宽为

$$\phi = k|\varepsilon_1|T, \quad (15)$$

同理可得, 传统指数趋近律切换带宽为

$$\phi_s = kT. \quad (16)$$

对比式(15)与式(16)可发现, 式(16)中缺少误差绝对值  $|\varepsilon_1|$ , 其带宽是一个常数值, 会形成一个固定宽度的抖振带, 而式(15)的带宽理论上会随着  $|\varepsilon_1|$  收敛至 0, 故能减小抖振。

对式(10)滑模面方程两边求导, 将式(9)、(11)代入式(10)中, 则最优控制函数  $g(\varepsilon)$  表达式为

$$g(\varepsilon) = -k|\varepsilon_1|\text{sign}(\varepsilon) - qs - c\varepsilon_n. \quad (17)$$

将式(17)代入两边求导后的式(10)得:

$$\dot{s} = -k|\varepsilon_1|\text{sign}(s) - qs - \dot{f}. \quad (18)$$

构建李雅普诺夫函数对二阶滑模自抗扰观测器的稳定性进行分析, 其数学形式如下:

$$V = s^2/2. \quad (19)$$

由李雅普诺夫稳定条件可知, 二阶滑模自抗扰观测器的稳定条件需要满足  $\dot{V} = s\dot{s} \leq 0$ , 同时, 永磁同步电机中总扰动理论值  $f$  为一个有界分量, 则有

$$\begin{aligned} s\dot{s} &= s[-k|\varepsilon_1|\text{sign}(s) - qs - \dot{f}] = \\ &= -k|\varepsilon_1||s| - qs^2 - \dot{f}s \leq \eta|s| - k|\varepsilon_1||s| = \\ &= (\eta - k|\varepsilon_1|)|s|. \end{aligned} \quad (20)$$

当有参数  $k \geq \eta/|\varepsilon_1|$  时, 则有  $s\dot{s} \leq 0$ , 即改进扩张状态观测器满足李雅普诺夫稳定性条件, 能够保证电机状态变量在有限时间内收敛到平衡点附近。

综上所述, 可得二阶滑模自抗扰观测器的最终形式如下:

$$\begin{cases} \varepsilon_1 = x_1 - n, \\ \dot{x}_1 = x_2 + bi_q^*, \\ \dot{x}_2 = -k|\varepsilon_1|\text{sign}(s) - qs - c(x_2 - f). \end{cases} \quad (21)$$

为进一步简化参数整定, 同理, 对非线性误差反馈控制律中含有 *fal* 函数部分进行改进, 将式 (6) 变化为滑模误差反馈控制律, 其形式如下:

$$\begin{cases} \varepsilon_2 = n_1 - x_1, \\ \dot{\varepsilon}_2 = i_{q0} = f(\varepsilon), \\ i_q^* = i_{q0} - x_2/b. \end{cases} \quad (22)$$

式中,  $f(\varepsilon)$  同最优控制函数, 选用  $s=c_1\varepsilon_2$  作为滑模面, 且  $c_1 > 0$ 。

同理, 对滑模面两边同时进行求导, 并采用所提滑模趋近律, 结合式 (22), 则滑模设定控制量为

$$i_{q0} = -(k_1|\varepsilon_2|\text{sign}(s) - q_1s) / c_1. \quad (23)$$

滑模设定控制量的稳定性分析与二阶滑模自抗扰观测器相同; 为进一步减小传统开关函数在电机状态变量进入滑动状态的抖振问题, 文章采用饱和函数  $\text{sat}(s)$  代替传统开关函数, 当电机状态变量进入边界层后, 由原来的开关函数变为连续函数, 故可以减弱抖振带, 其表达式如下:

$$\text{sat}(s) = \begin{cases} \text{sign}(s), & |s| \geq \rho; \\ s/\rho, & |s| < \rho. \end{cases}$$

式中  $\rho$  为边界层厚度。

从式 (21) 与 (23) 中可看出, 与非线性自抗扰法相比, 改进滑模自抗扰算法中只要整定  $k$ 、 $q$ 、 $c$ 、 $k_1$ 、 $q_1$ 、 $c_1$ 、 $\rho$  共 7 个参数, 比非线性自抗扰法少一个;  $k$ 、 $k_1$ 、 $q_1$ 、 $q$  的取值决定着电机状态变量从相平面任意位置收敛进入滑动状态的速度快慢,  $k$ 、 $k_1$ 、 $q_1$ 、 $q$  取值越大, 收敛速度越快, 但  $k$ 、 $k_1$  过大会增大抖振带宽度, 所以要合理分配  $k$ 、 $k_1$ 、 $q_1$ 、 $q$  数值;  $c$ 、 $c_1$  值决定着电机状态变量从滑模状态收敛到平衡点附近速度快慢,  $c$ 、 $c_1$  值越大, 收敛越快; 边界层厚度  $\rho$  取值偏小, 能减小电机转速的稳态误差, 但会增大在滑动状态下的抖振带, 给电机造成损伤; 如果取值偏大, 能减小抖振带, 但会增加稳态误差, 所以边界层厚度选择同样重要; 从以上分析可以得出, 滑模 7 个参数选取有着相

对更明确、具体的物理含义, 参数调节起来更加方便; 同滑模自抗扰法相比, 由于采用改进型指数趋近律, 不增加可调参数就可加快系统响应速度、减小滑模抖振。改进滑模自抗扰控制器结构如图 2 所示。

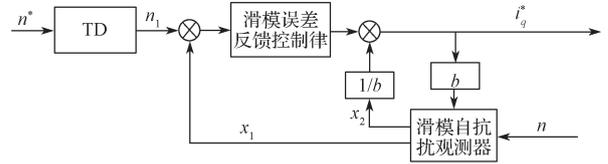


图 2 改进滑模自抗扰控制器的组成示意图

Fig. 2 Improved sliding mode ADRC composition diagram

### 4 仿真结果与分析

采用 Matlab/simulink 仿真对改进滑模自抗扰算法的可行性进行验证, 仿真结果与 PI 控制及非线性自抗扰法及滑模自抗扰法进行对比; 永磁同步电机的电流环均采用 PI 控制, 且参数相同, 保障电流内环具有快速性; 永磁同步电机本体参数见表 1。

表 1 PMSM 仿真参数

Table 1 PMSM simulation parameters

电机参数	取值
定子绕组相电阻 $R/\Omega$	1.9
极对数 $p/$ 对	4
定子绕组电感 $L/H$	0.003 34
转动惯量 $J/kg \cdot m^2$	0.001 469
永磁体磁链 $\psi_f/Wb$	0.171
额定功率 $P_N/kW$	1.82

以表贴式永磁同步电机作为研究对象, 采用  $i_d^* = 0$  的解耦控制策略, 永磁同步电机调速系统控制拓扑结构如图 3 所示。

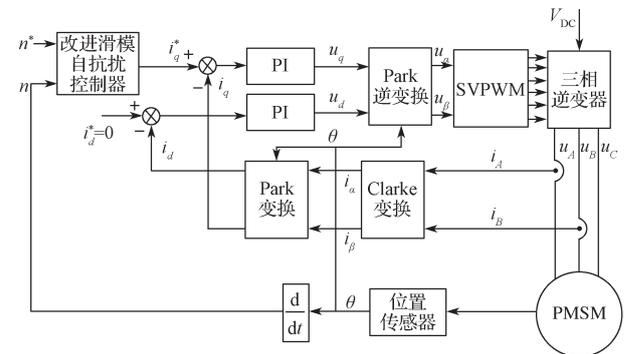
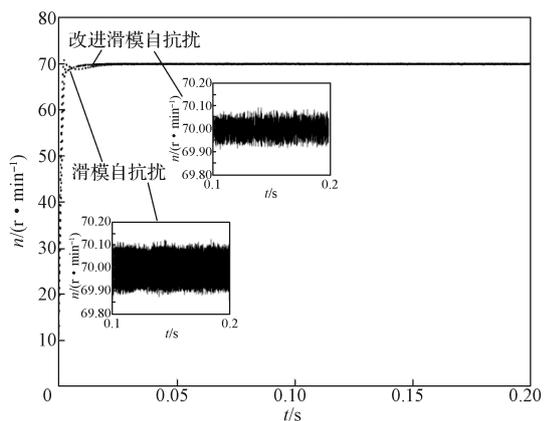


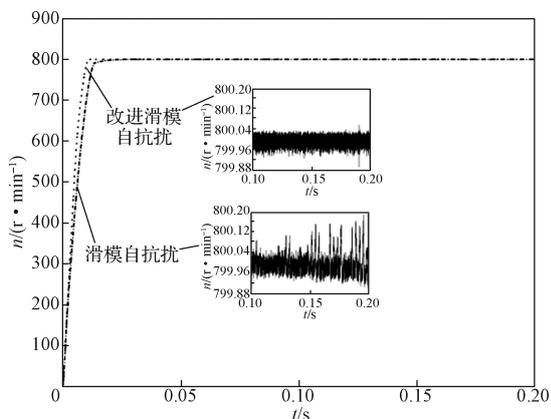
图 3 永磁同步电机调速系统控制的拓扑结构图

Fig. 3 Topology diagram of PMSM speed control system

为验证改进滑模自抗扰算法中  $|\varepsilon_1|$  与饱和函数  $\text{sat}(s)$  对滑模抖振的削弱能力, 在电机空载条件下, 分别给定电机低速 70 r/min 和高速 800 r/min, 得到滑模自抗扰法与本研究方法对比结果, 如图 4 所示。



a) 70 r/min



b) 800 r/min

图4 不同速度下的滑模抖振结果对比

Fig. 4 Comparison results of sliding mode buffeting at different speeds

从图4的高低速对比图可以明显看出,电机在达到给定转速后,改进滑模自抗扰算法与滑模自抗扰法相比,抖振幅度较小,输出曲线更为平滑。

为验证改进滑模自抗扰控制算法对时变转速的跟踪能力,给定电机的初始转速为400 r/min,在0.10 s时将转速增加至800 r/min,4种控制算法对比的仿真结果如图5所示。

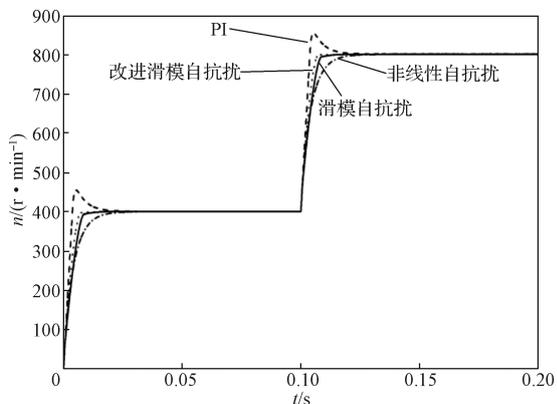


图5 变速跟踪性能对比曲线

Fig. 5 Variable speed tracking performance comparison curves

从图5中可以得知,在变速的动态条件下,改进滑模自抗扰算法与其余3种控制算法相比,能够更准确、快速、无超调地跟踪上给定速度,具有良好的动态性能。

为验证改进滑模自抗扰算法在低速条件下的性能,现给定转速为70 r/min,不同控制方法在此速度下的性能曲线如图6所示。现结合图6及图4a可以看出,改进滑模自抗扰算法在低速条件下,具有快速跟踪和抖振小等优点,即改进滑模自抗扰的启动特性比其它3种控制算法更优越。

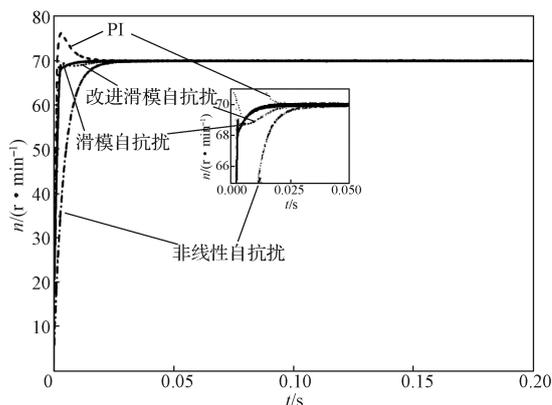


图6 低速条件下不同控制方法的性能对比曲线

Fig. 6 Performance comparison curves of different control methods at a low speed

图7为电机处于800 r/min的高速条件下,于0.10 s时加入5 N·m的负载扰动波形,从图7可以看出,改进滑模自抗扰算法在高速条件下也能实现对转速无超调、快速跟踪;且在加入负载扰动后,其转速脉动小且恢复时间最短,表现出很强的抗扰动能力。

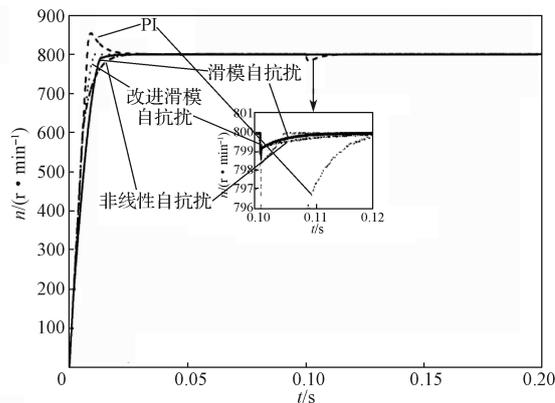
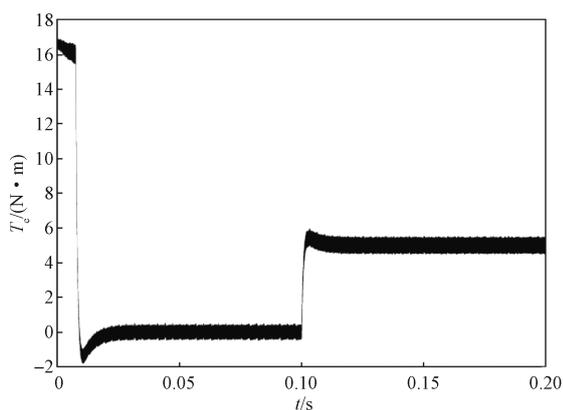


图7 高速条件下不同控制方法的性能对比曲线

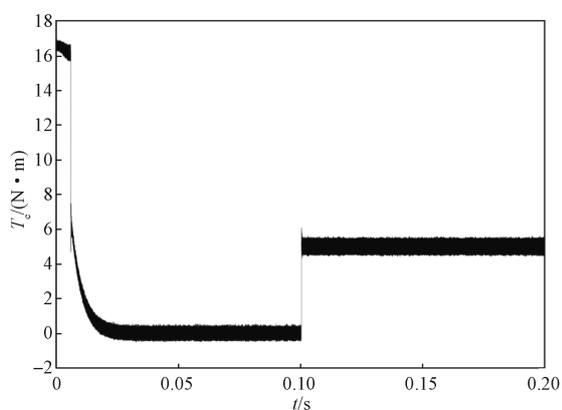
Fig. 7 Performance comparison curves of different control methods at a high speed

图8为永磁同步电机在4种控制算法下的电磁转矩响应曲线。从图8可以看出,与另外3种控制算法相比,采用改进滑模自抗扰控制算法的电磁转矩在电

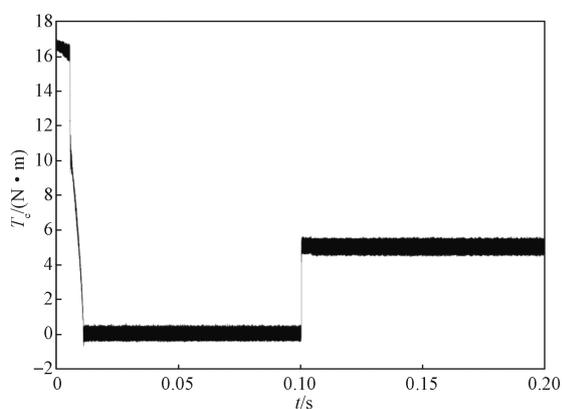
机起动后,能够在最短时间内无脉动进入稳态;在0.10 s时加入负载后,同非线性自抗扰法及滑模自抗扰法一样,能快速、准确地跟踪参考值,且在0.10 s时的转矩微分冲击最小,而PI控制则需要一定的时间才能再次跟踪;改进滑模自抗扰算法与滑模自抗扰法相比,在0.05~0.20 s时段,电磁转矩曲线明显更光滑;因此,改进滑模自抗扰算法能降低永磁同步电机调速系统的电磁损耗,进一步提高永磁同步电机调速系统的控制品质。



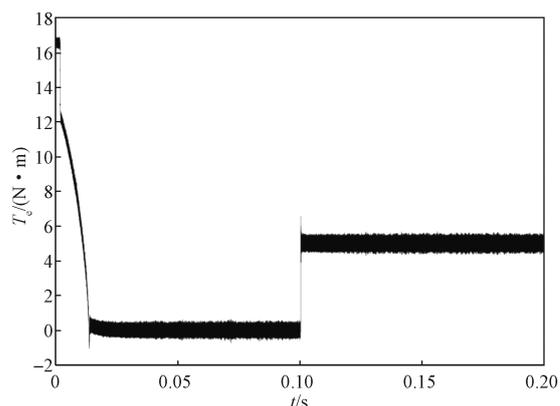
a) PI 电磁转矩



b) 非线性自抗扰电磁转矩



c) 改进滑模自抗扰电磁转矩



d) 滑模自抗扰电磁转矩

图8 不同控制方法的电磁转矩对比

Fig. 8 Comparison of electromagnetic torque between different control methods

## 5 结语

针对永磁同步电机采用非线性自抗扰法存在待整参数多且物理意义不明的情况,研究了一种改进滑模自抗扰算法,并将该算法在变速、低速、高速、外部负载扰动等复杂工况下进行了仿真对比及滑模抖振校验。结果表明,该算法既能克服PI控制快速性与超调之间的固有矛盾,还能保留非线性自抗扰法抗负载扰动能力强的优点,同时减小滑模抖振;因此,该算法能进一步提升永磁同步电机的控制效率、优化调速性能。

## 参考文献:

- [1] 宋 哲, 杨 军, 梅雪松, 等. 永磁同步电机抗惯量扰动自适应速度控制[J]. 西安交通大学学报, 2020, 54(12): 14-21.  
SONG Zhe, YANG Jun, MEI Xuesong, et al. An Adaptive Speed Control Method with Anti-Inertia Disturbance Performance for Permanent Magnet Synchronous Motors[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2020, 54(12): 14-21.
- [2] 权 晓, 余红英, 韦啸成. 基于遗传算法优化小波神经网络的永磁同步电机转子位置估计[J]. 微电机, 2020, 53(9): 63-68.  
QUAN Xiao, YU Hongying, WEI Xiaocheng. Rotor Position Estimation of PMSM Based on Genetic Algorithm Optimized Wavelet Neural Network[J]. Micromotors, 2020, 53(9): 63-68.
- [3] 王伟然, 吴嘉欣, 张 懿, 等. 永磁同步电机模糊自整定自适应积分反步控制[J]. 电工技术学报, 2020, 35(4): 724-733.

- WANG Weiran, WU Jiabin, ZHANG Yi, et al. Fuzzy Self-Tuning Adaptive Integral Backstepping Control for Permanent Magnet Synchronous Motor[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(4): 724-733.
- [4] 王要强, 朱亚昌, 冯玉涛, 等. 永磁同步电机新型趋近律滑模控制策略[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(1): 192-198.  
WANG Yaoqiang, ZHU Yachang, FENG Yutao, et al. New Reaching Law Sliding Mode Control Strategy for Permanent Magnet Synchronous Motor[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(1): 192-198.
- [5] 朱进权, 葛琼璇, 孙鹏琨, 等. 基于自抗扰的高速磁浮列车牵引控制策略[J]. 电工技术学报, 2020, 35(5): 1065-1074.  
ZHU Jinqun, GE Qiongxuan, SUN Pengkun, et al. Traction-System Research of High-Speed Maglev Based on Active Disturbance Rejection Control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(5): 1065-1074.
- [6] 吴艳, 王丽芳, 李芳. 基于滑模自抗扰的智能车路径跟踪控制[J]. 控制与决策, 2019, 34(10): 2150-2156.  
WU Yan, WANG Lifang, LI Fang. Intelligent Vehicle Path Following Control Based on Sliding Mode Active Disturbance Rejection Control[J]. Control and Decision, 2019, 34(10): 2150-2156.
- [7] 卢达, 赵光宙, 曲铁龙, 等. 永磁同步电机无参数整定自抗扰控制器[J]. 电工技术学报, 2013, 28(3): 27-34.  
LU Da, ZHAO Guangzhou, QU Yilong, et al. Permanent Magnet Synchronous Motor Control System Based on no Manual Tuned Active Disturbance Rejection Control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(3): 27-34.
- [8] 孙斌, 王海霞, 苏涛, 等. 永磁同步电机调速系统非线性自抗扰控制器设计与参数整定[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(20): 6715-6726.  
SUN Bin, WANG Haixia, SU Tao, et al. Nonlinear Active Disturbance Rejection Controller Design and Tuning for Permanent Magnet Synchronous Motor Speed Control System[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(20): 6715-6726.
- [9] 邱建琪, 留若宸. 永磁同步电机位置伺服系统改进自抗扰控制[J]. 电机与控制学报, 2019, 23(11): 42-50.  
QIU Jianqi, LIU Ruochen. Improved Active Disturbance Rejection Control for Permanent Magnet Synchronous Motor Position Servo System[J]. Electric Machines and Control, 2019, 23(11): 42-50.
- [10] 马畅, 冷建伟. 永磁同步电机滑模调速系统新型趋近律控制[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2019(4): 81-85.  
MA Chang, LENG Jianwei. PMSM Sliding Mode Control Based on a Novel Reaching Law[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2019(4): 81-85.
- [11] 王毅波, 曹宽, 李彪. 一种改进型指数趋近律的永磁同步电机滑模控制[J]. 微电机, 2019, 52(12): 81-84, 106.  
WANG Yibo, CAO Kuan, LI Biao. A PMSM Sliding Mode Control System Based on an Improved Exponential Reaching Law[J]. Micromotors, 2019, 52(12): 81-84, 106.
- [12] 黄庆, 黄守道, 冯垚径, 等. 基于变结构自抗扰的永磁电动机速度控制系统[J]. 电工技术学报, 2015, 30(20): 31-39.  
HUANG Qing, HUANG Shoudao, FENG Yaojing, et al. Variable Structure Based Active-Disturbance Rejection Controller for Speed Control System of Permanent Magnet Synchronous Motor[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(20): 31-39.
- [13] 韩京清. 自抗扰控制技术: 估计补偿不确定因素的控制技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008: 255-263.  
HAN Jingqing. Active Disturbance Rejection Control Technique Active Disturbance Rejection Control Technique[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008: 255-263.
- [14] 刘金琨. 滑模变结构控制 MATLAB 仿真[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005: 22-25.  
LIU Jinkun. Matlab Simulation for Sliding Mode Control[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005: 22-25.

(责任编辑: 姜利民)