

# 基于快速 STA 与扰动观测器的 PMSM 滑模控制

淡 宁 袁宇浩 冯 进

(南京工业大学电气工程与控制科学学院, 江苏 南京 211816)

**摘要:** 针对永磁同步电机调速系统 PI 控制鲁棒性差以及传统滑模控制抖振过大的问题, 提出了一种快速超扭曲算法与扰动观测器复合的二阶滑模控制策略。采用以快速超扭曲和超扭曲算法分别设计速度和电流控制器的方法, 实现了双环二阶滑模控制, 解决了传统滑模存在的系统抖振与趋近速度、鲁棒性间的矛盾; 利用扩张观测器估计扰动值进行速度控制器补偿的方法, 进一步提高了滑模控制的鲁棒性。仿真结果表明, 所提方法可有效提高系统响应速度和鲁棒性, 并抑制滑模控制的抖振。

**关键词:** 永磁同步电机; 快速超扭曲算法; 二阶滑模控制; 扩张观测器

**中图分类号:** TM391.9 **文献标识码:** B

## Sliding Mode Control of PMSM Based on Fast STA and Disturbance Observer

DAN Ning, YUAN Yu-hao, FENG Jin

(College of Electrical Engineering and Control Science, Nanjing Tech University, Nanjing Jiangsu 211816, China)

**ABSTRACT:** In order to solve the problems of poor robustness of PI control and large chattering of traditional sliding mode control in PMSM speed regulation system, a second order sliding mode control strategy composed of a fast super-twisting algorithm and a disturbance observer was proposed. By using the fast super-twisting and super-twisting algorithms to design speed and current controllers respectively, the double-loop second-order sliding mode control was realized, and the contradiction between system chattering and reaching velocity and robustness existing in the traditional sliding mode was solved. The robustness of the sliding mode control was further improved by using the method of compensating the speed controller with the disturbance estimated by an extended observer. The simulation results show that the proposed method can effectively improve the response speed and robustness of the system, and restrain the chattering of sliding mode control.

**KEYWORDS:** Permanent magnet synchronous motor (PMSM); Fast super-twisting algorithm; Second-order sliding mode control; Extended observer

### 1 引言

在永磁同步电机(PMSM)矢量控制系统中, 由于需要实现速度、电流闭环, 因此可设计高性能控制器以提高系统调速性能。常规 PI 控制由于鲁棒性不强的原因容易受到系统参数变化及扰动的影响而降低调速品质, 并不能满足高性能控制的要求<sup>[1]</sup>。因此, 设计强鲁棒性的非线性控制器成为当下研究热点。

滑模控制作为先进的非线性控制算法之一, 因鲁棒性

强、计算量小及实现简单的优势, 被广泛应用在电机调速系统中<sup>[2-3]</sup>。传统滑模控制虽然提高了系统的鲁棒性, 但由于存在较大抖振, 反而加剧了转矩脉动, 降低了电机拖动负载的稳定性。因此, 减弱抖振是滑模控制调速系统的重要目标。

趋近律一阶滑模算法自提出以来, 便被广泛用于减弱滑模抖振。但对该方法而言, 趋近速度越快, 抖振越大。为解决这一矛盾, 文献[4-6]采用饱和或连续函数取代趋近律中的符号函数, 在保证趋近速度的同时成功降低了抖振, 但 these 方法降低了滑模控制的鲁棒性。文献[7]阐述了一种特殊的二阶滑模超扭曲算法(STA), 该算法不仅保证了强鲁棒性, 还可使输出控制信号连续无抖振, 因此被广泛应用于调

基金项目: 国家自然科学基金(61773200)

收稿日期: 2019-03-18 修回日期: 2019-04-16

速系统中<sup>[8-10]</sup>。文献[8]基于 STA 设计双馈异步发电机的直接功率控制方案,成功地处理了模型不确定性的存在、作用于系统的外部扰动和系统的非线性行为。文献[9-10]分别将 STA 用于永磁平面电动机的位置控制器及感应电机的转矩、磁链控制器设计,但上述方法均没有对电机系统内外环同时进行二阶滑模控制。

STA 在 PMSM 上的应用以直接转矩控制为主<sup>[11-13]</sup>,用以对转矩、磁链进行控制,在加快响应并降低转矩脉动方面取得了优异的效果,但在矢量控制中却鲜有应用。文献[14]通过在 STA 中加入滑模变量的比例项,构造了快速 STA 算法并应用于电机转速外环,进一步减小了系统的响应时间,但却忽略了控制律中的扰动项对系统性能的影响。

本文以前述文献所取成果为基础,探索提高 PMSM 矢量控制系统响应速度与鲁棒性的有效方案。关于速度控制器,不同于对趋近律修改符号函数的方法,本文利用 STA 算法自身的连续性减小抖阵,以克服趋近律算法鲁棒性与抖阵之间存在矛盾的不足;不同于一般 STA 算法,本文通过添加比例滑模项构造出快速 STA 算法,以加快系统响应,并通过扰动补偿的方式减小扰动项对系统性能的影响。同时为快速响应速度环的连续控制指令,基于 STA 设计电流控制器,实现双环二阶滑模控制,以进一步提高系统响应速率和抗扰性。

## 2 PMSM 转子运动方程

本文以表贴式 PMSM 为研究对象,其转子运动方程可表示为

$$\frac{d\omega}{dt} = -\frac{\beta}{J}\omega - \frac{T_l}{J} + \frac{3p\psi_f i_q}{2J} \quad (1)$$

式中:  $\omega$  为转子的机械角速度;  $\beta$  为粘性摩擦因数;  $J$  为转动惯量;  $T_l$  为负载转矩;  $p$  为磁极对数;  $\psi_f$  为永磁磁链;  $i_q$  为  $q$  轴电流。

考虑系统参数及负载转矩的变化可得

$$\begin{aligned} \frac{d\omega}{dt} &= -\left(\frac{\beta}{J} + \Delta a\right)\omega - \left(\frac{T_l}{J} + \Delta c\right) + \left(\frac{3p\psi_f}{2J} - \Delta b\right)i_q \\ &= a\omega + bu - d \end{aligned} \quad (2)$$

式中  $a = -\frac{\beta}{J}$ ,  $b = \frac{3p\psi_f}{2J}$ ,  $\mu = i_q$  为所要设计的控制律,  $\Delta a$ 、 $\Delta b$ 、 $\Delta c$  表示电机的参数变化,  $d$  为参数及负载变化带来的匹配性扰动,且

$$d = \Delta a\omega + \Delta bu + \Delta c + \frac{T_l}{J} \quad (3)$$

## 3 滑模速度控制器设计

### 3.1 传统一阶滑模控制器

滑模控制需先确定滑模面,其运动模态包括趋近模态和滑动模态两部分。近年来,基于趋近律的一阶滑模算法由于可以保证趋近运动的动态品质而被广泛应用于 PMSM 的速度控制器设计中。

一般趋近律为

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

式中  $s$  为滑模变量,  $k$  为滑模控制切换增益。

通常选取滑模面为

$$s = \omega^* - \omega \quad (5)$$

式中  $\omega^*$  为电机的参考转速。

对式(5)求导,结合式(1)可得

$$\dot{s} = \dot{\omega}^* - \dot{\omega} = \dot{\omega}^* - \left(-\frac{\beta}{J}\omega - \frac{T_l}{J} + \frac{3p\psi_f i_q}{2J}\right) \quad (6)$$

结合式(4)、式(6)得

$$\omega^* + \frac{\beta}{J}\omega + \frac{T_l}{J} - \frac{3p\psi_f i_q}{2J} = -k \text{sign}(s) \quad (7)$$

从而求得设计的控制律为

$$i_q^* = \frac{2J}{3p\psi_f} \left[ \omega^* + \frac{\beta}{J}\omega + \frac{T_l}{J} + k \text{sign}(s) \right] \quad (8)$$

从式(8)中可以看出,控制律中由于存在非连续项  $k \text{sign}(s)$  将会使系统产生抖阵。

系统的趋近速率、抖阵大小以及鲁棒性的强弱均与  $k$  值有关。 $k$  越大,鲁棒性越强,趋近速率越快,但抖阵也会越大。因此,系统抖阵与趋近速率及鲁棒性间存在矛盾。

### 3.2 快速 STA 二阶滑模控制器

高阶滑模算法为系统抖阵与鲁棒性间的矛盾提供了解决方案。不同于其它高阶滑模算法,二阶滑模 STA 不需要滑模变量的导数信息,避免了引入噪声、干扰等风险,且控制律设计更为简单。因此本文以 STA 为基础设计 PMSM 滑模速度控制器,其表达式为

$$u = k_1 |s|^{0.5} \text{sign}(s) + k_2 \int \text{sign}(s) dt \quad (9)$$

通过在 STA 中加入比例滑模项可构造出快速 STA,能够有效提高系统的收敛速率,其表达式为

$$u = k_1 |s|^{0.5} \text{sign}(s) + k_2 \int \text{sign}(s) dt + k_3 s \quad (10)$$

式中:  $k_1$ 、 $k_2$ 、 $k_3$  为控制器的正常数增益。 $k_1$  和  $k_2$  用于保证系统在有限时间内稳定、减小抖阵以及抵抗不确定因素的影响;  $k_3$  用于提高系统的收敛速率。

令  $x = \omega^* - \omega$ , 结合式(2),建立 PMSM 的转速误差状态方程为

$$\dot{x} = ax - bu + d + f(t) \quad (11)$$

式中:  $f(t) = \dot{\omega}^* - a\omega^*$ 。

选取滑模面为

$$s = x = \omega^* - \omega \quad (12)$$

结合式(11)、式(12)得

$$\dot{s} = \dot{x} = as - bu + d + f(t) \quad (13)$$

根据等效滑模原理,  $\mu$  可由等效控制律和切换鲁棒控制律构成,即

$$u = u_{eq} + u_{sw} \quad (14)$$

式中  $\mu_{eq}$  为等效控制,  $\mu_{sw}$  为切换鲁棒控制。

在实际系统中,  $f(t)$  为随机给定值,可视不确定项。

在求取滑模控制律时,首先不考虑 $f(t)$ 通过取 $\dot{s}=0$ 并联合式(13),可得到控制律的等效项为

$$u_{eq} = \frac{1}{b}(as + d) \quad (15)$$

然后,基于快速STA设计切换鲁棒控制律为

$$u_{sw} = k_1 |s|^{0.5} \text{sign}(s) + k_2 \int \text{sign}(s) dt + k_3 s \quad (16)$$

因此可得到速度控制器的控制律为

$$\begin{aligned} u &= \frac{1}{b}(as + d) + k_1 |s|^{0.5} \text{sign}(s) + k_2 \int \text{sign}(s) dt + k_3 s \\ &= k_1 |s|^{0.5} \text{sign}(s) + k_2 \int \text{sign}(s) dt + \left(k_3 + \frac{a}{b}\right)s + \frac{1}{b}d \end{aligned} \quad (17)$$

将式(17)代入式(13)得

$$\begin{aligned} \dot{s} &= as - bu + d + f(t) \\ &= -k_1 |s|^{0.5} \text{sign}(s) - k_2 \int \text{sign}(s) dt - k_3 s + f(t) \end{aligned} \quad (18)$$

式(18)所表示的系统的稳定性已经得到了证明,假设 $2|f(t)| \leq \delta, \delta \in R^+$ ,其稳定性条件可表示为<sup>[14]</sup>

$$\begin{cases} k_1' > 2.1 \\ k_2' > \max\left\{\frac{10k_1'^3 + 10k_1'\delta^2 + 3k_1'^2 - 21\delta^2 - 2k_1'}{4k_1'(10k_1' - 21)}, \frac{\delta}{2}\right\} \\ k_3' > 0 \end{cases} \quad (19)$$

在实际系统中,电机转速环节的确切模型参数很难获取,而结合式(17)和式(18)可以看出,即使不知道确切的模型参数,也只需对 $k_1, k_2, k_3$ 进行调节。

## 4 扩张观测器的扰动估计

### 4.1 扩张观测器设计

由式(17)可以看出,扰动项 $d$ 作为控制输出的一部分,对系统性能有很大的影响,通过扰动补偿可进一步增强系统的鲁棒性。但在实际系统中,扰动值无法直接测量,需要设计扰动观测器(DOB)以获取扰动信息。因此本文设计了扩张观测器估计扰动。

作为一种高增益观测器,扩张观测器的工作原理是将待估计量扩张为一个新的系统状态,并通过对误差反馈配置高的增益,达到观测器动态远高于系统动态的目的,从而完成状态跟踪。

建立系统的状态方程,令状态变量 $x_1 = \omega$ ,输出 $y = \omega$ ,由式(2)可得

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = ax_1 - d + bu \\ y = x_1 \end{cases} \quad (20)$$

将扰动项 $-d$ 扩张为新的状态变量 $x_2$ ,实际PMSM系统中扰动 $d$ 变化缓慢,其一阶导数可视为0。由此建立系统状态空间方程为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = ax_1 + x_2 + bu \\ \dot{x}_2 = 0 \\ y = x_1 \end{cases} \quad (21)$$

以 $x_1$ 和 $x_2$ 为观测对象,建立转速估计误差 $e$ 的高增益反馈,设计扩张扰动观测器为

$$\begin{cases} e = y - \hat{x}_1 \\ \dot{x}_1 = a\hat{x}_1 + \hat{x}_2 + bu + \frac{\alpha_1}{\varepsilon}e \\ \dot{x}_2 = \frac{\alpha_2}{\varepsilon^2}e \end{cases} \quad (22)$$

式中: $\varepsilon > 0, \alpha_1, \alpha_2$ 为正实数,通常取很小的 $\varepsilon$ 值以保证高增益。采用该扩张观测器,可实现 $\hat{x}_1 \rightarrow x_1, \hat{x}_2 \rightarrow x_2$ 。

### 4.2 观测器稳定性分析

为证明观测器可在有限时间内收敛,建立观测器的误差状态方程,利用李雅普诺夫稳定性理论对其稳定性进行分析。

定义观测器的误差状态变量 $\eta$ 为

$$\eta = [\eta_1 \quad \eta_2]^T \quad (23)$$

其中: $\eta_1 = \frac{x_1 - \hat{x}_1}{\varepsilon}, \eta_2 = -d - \hat{x}_2$ 。

由于

$$\begin{aligned} \varepsilon \dot{\eta}_1 &= \varepsilon \frac{\dot{x}_1 - \dot{\hat{x}}_1}{\varepsilon} = \dot{x}_1 - \dot{\hat{x}}_1 \\ &= (ax_1 + bu - d) - (a\hat{x}_1 + \hat{x}_2 + bu + \frac{\alpha_1}{\varepsilon}e) \\ &= (\varepsilon a - \alpha_1)\eta_1 + \eta_2 = -\alpha_1'\eta_1 + \eta_2 \end{aligned} \quad (24)$$

$$\begin{aligned} \varepsilon \dot{\eta}_2 &= \varepsilon(-\dot{d} - \dot{\hat{x}}_2) = \varepsilon(-\dot{d} - \frac{\alpha_2}{\varepsilon^2}(x_1 - \hat{x}_1)) \\ &= -\varepsilon\dot{d} - \frac{\alpha_2}{\varepsilon}(x_1 - \hat{x}_1) = -\alpha_2\eta_1 - \varepsilon\dot{d} \end{aligned} \quad (25)$$

因此,扩张观测器的误差状态方程可表示为

$$\varepsilon \dot{\eta} = \bar{A}\eta + \varepsilon \bar{B}(-\dot{d}) \quad (26)$$

$$\text{式中 } \bar{A} = \begin{bmatrix} -\alpha_1' & 1 \\ -\alpha_2 & 0 \end{bmatrix}, \bar{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}。$$

矩阵 $\bar{A}$ 的特征方程为

$$|\lambda I - \bar{A}| = \lambda^2 + \lambda\alpha_1' + \alpha_2 = 0 \quad (27)$$

式中 $I$ 为单位阵, $\lambda$ 为 $\bar{A}$ 的特征值,可通过配置 $\alpha_1', \alpha_2$ 使 $\bar{A}$ 为Hurwitz,则对任意对称正定阵 $Q$ ,存在对称正定阵 $P$ 满足

$$\bar{A}^T P + P\bar{A} + Q = 0 \quad (28)$$

定义观测器的李雅普诺夫函数为

$$V = \varepsilon \eta^T P \eta \quad (29)$$

对 $V$ 进行求导,结合式(28),可得

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \varepsilon \dot{\eta}^T P \eta + \varepsilon \eta^T P \dot{\eta} \\ &= (\bar{A}\eta + \varepsilon \bar{B}(-\dot{d}))^T P \eta + \eta^T P (\bar{A}\eta + \varepsilon \bar{B}(-\dot{d})) \\ &= \eta^T \bar{A}^T P \eta + \varepsilon (-\bar{B}\dot{d})^T P \eta + \eta^T P \bar{A} \eta + \varepsilon \eta^T P \bar{B}(-\dot{d}) \\ &= \eta^T (\bar{A}^T P + P\bar{A}) \eta + 2\varepsilon \eta^T P \bar{B}(-\dot{d}) \\ &= -\eta^T Q \eta + 2\varepsilon \eta^T P \bar{B}(-\dot{d}) \\ &\leq -\eta^T Q \eta + 2\varepsilon \|P\bar{B}\| \cdot \|\eta\| \cdot \|\dot{d}\| \end{aligned} \quad (30)$$

假设扰动导数有界,即  $|\dot{d}| \leq L$  结合式(30)得

$$\dot{V} \leq -\lambda_{\min}(Q)\|\eta\|^2 + 2\varepsilon L\|PB\|\|\eta\| \tag{31}$$

根据李雅普诺夫稳定性理论,在满足  $\dot{V} \leq 0$  时可使观测器稳定,因此求得观测器的收敛条件为

$$\|\eta\| \leq \frac{2\varepsilon L\|PB\|}{\lambda_{\min}(Q)} \tag{32}$$

由式(32)可见  $\eta$  的收敛速率与参数  $\varepsilon$  成反比,即  $\varepsilon$  越小,收敛速率就越快。

### 5 仿真验证

基于 Matlab/simulink 仿真平台构建了表贴式 PMSM 的矢量控制系统,以对所设计的速度控制器进行相关实验与分析。同时为快速响应速度环的连续输出,基于 STA 设计了二阶滑模电流控制器<sup>[15]</sup>。PMSM 二阶滑模矢量控制框图如图 1 所示。

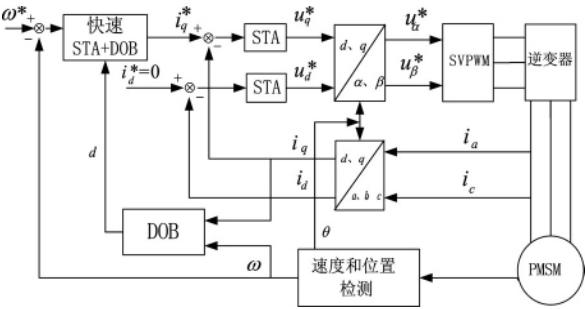


图 1 PMSM 二阶滑模矢量控制图

实验所用的表贴式 PMSM 的参数见表 1 所示。

表 1 表贴式 PMSM 参数

参数	数值
定子电阻 $R/\Omega$	0.875
绕组电感 $L/\text{mH}$	8.5
磁极对数 $p$	4
永磁磁链 $\psi_f/\text{Wb}$	0.3
转动惯量 $J/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	0.003
粘性摩擦系数 $\beta/(\text{N} \cdot \text{m} \cdot (\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})^{-1})$	0

本文所设计的速度控制器参数配置为  $k_1 = 4$ ,  $k_2 = 100$ ,  $k_3 = 0.45$ 。此外分别设计了 PI、传统滑模速度控制器和所提策略进行比较,其中 PI 参数配置为  $k_p = 0.03$ ,  $k_i = 1$ ,传统滑模参数配置为  $k = 200$ ;PI 与传统滑模控制方法的电流环依然使用 PI 控制器,本文所提策略中基于 STA 的电流控制器的控制参数配置为  $k_1 = 1$ ,  $k_2 = 80$ ;扩张观测器的参数配置为  $\alpha_1 = 15$ ,  $\alpha_2 = 9$ ,  $\varepsilon = 0.0005$ 。

#### 5.1 恒速下的仿真分析

为验证所提策略调速性能与抑制抖阵的能力,对 PMSM 进行恒速下的转速跟踪实验。系统期望转速为 1 000 rpm,空

载起动,在 0.2 s 时突加  $5 \text{ N} \cdot \text{m}$  负载,并在 0.4 s 处卸掉负载。由式(3)知负载的变化代表着扰动变化,因此由扩张观测器可完成对负载转矩的实时估计。图 2 给出了 PMSM 在不同控制方法下的转速响应图,且图 3 描绘了扩张观测器对扰动的实时估计性能。

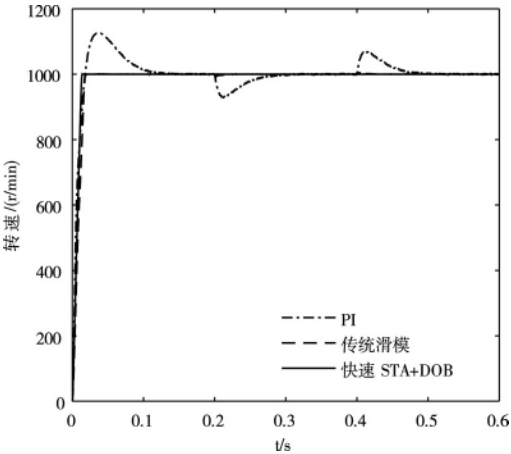


图 2 恒速指令下的系统响应

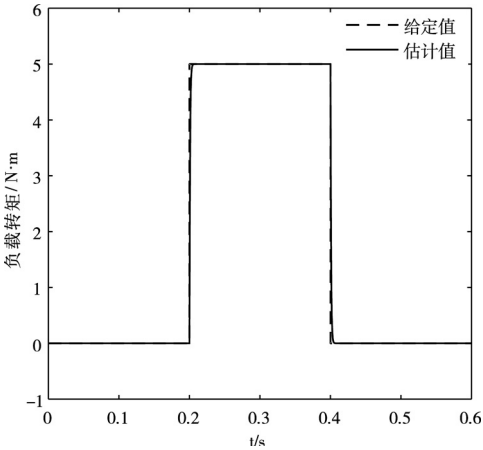


图 3 扰动估计

由图 2 可以明显的得出,与 PI 相比,滑模控制方法可使系统迅速响应无超调,且鲁棒性更强。为进一步将所提策略与传统滑模进行比较,图 4 给出了图 2 的局部放大图,且表 2 列出了系统在各控制方法下的动态和静态性能。

表 2 PMSM 系统性能

	PI	传统滑模	快速 STA + DOB
响应时间 $t_1/\text{s}$	0.14	0.02	0.014
起动超调	12.7%	0	0
扰动调节时间 $t_2/\text{s}$	0.1	0.02	0.002
最大扰动超调	7%	1%	0.6%

从图 2 以及表 2 中可以得出,相比于 PI 控制,滑模控制可有效提高 PMSM 调速系统的动态品质以及抗扰能力。从

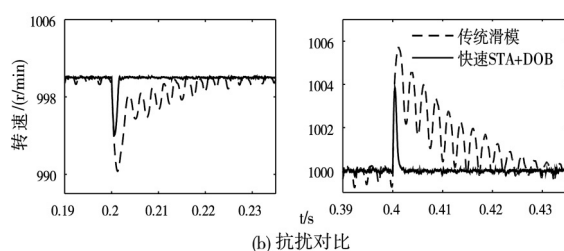
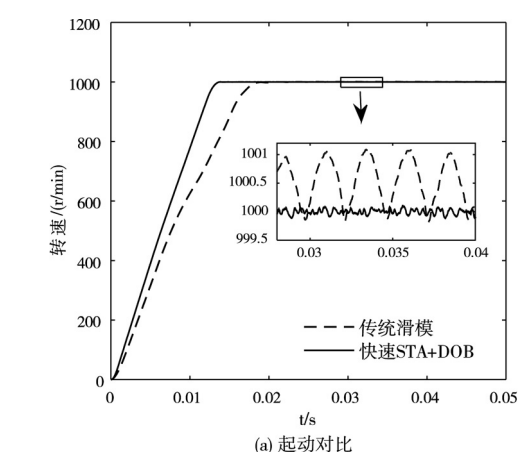


图4 系统响应的局部放大

图4(a)及表2中可以得出,与传统滑模相比,所设计控制方法可有效提高系统响应速度,减少30%的响应时间。而滑模方法所产生的抖阵,往往表现在系统转速跟踪的误差上。传统滑模控制产生的跟踪误差在 $-0.1 \sim 1.1$  rpm之间抖动,而所设计的基于快速STA的滑模控制,其跟踪误差仅在 $-0.1 \sim 0.1$  rpm之间抖动,成功减弱了抖阵。

此外,从图4(b)及表2中可以得出,通过对控制器进行扰动补偿并实现双环二阶滑模控制时,极大地增强了系统对扰动的抵抗能力。所提策略与传统滑模相比,扰动超调降低了40%,扰动调节时间减小了90%,鲁棒性明显增强。

## 5.2 变速下的仿真分析

为进一步验证所设计控制方法在系统带载情况下的加减速性能,使系统带 $1 \text{ N} \cdot \text{m}$ 负载起动,仿真时间为 $0.6 \text{ s}$ 。初始期望速度为 $200 \text{ rpm}$ ,在 $0.2 \text{ s}$ 突变为 $1000 \text{ rpm}$ ,在 $0.4 \text{ s}$ 速度再降为 $600 \text{ rpm}$ ,实现PMSM低中高速范围的带载运行。图5和图6分别给出了系统的转速及转矩响应图。

从图5及图6中可以看出,即使面对系统突然加减速的情况,本文所设计的控制方法依然表现了优异的调速性能,较PI、传统滑模方法响应更加快速,且无超调;同时在全速范围内都可以维持稳定的电磁转矩,保证了系统拖动负载的稳定性。

## 6 结语

为设计高性能的PMSM调速系统,针对PI控制鲁棒性差以及传统一阶滑模抖阵过大的问题,本文提出了一种基于

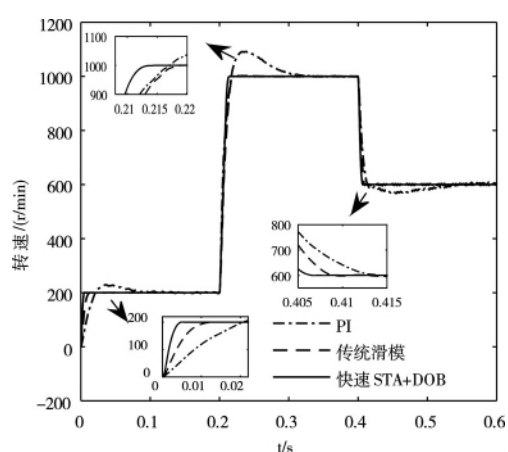


图5 变速指令下的系统响应

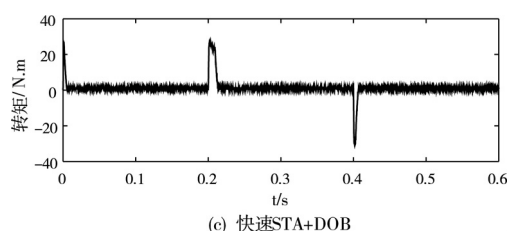
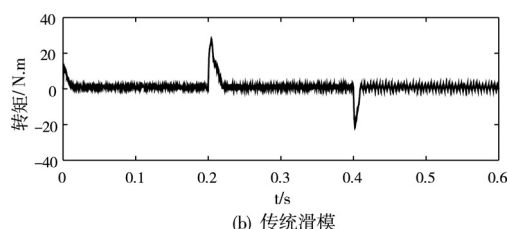
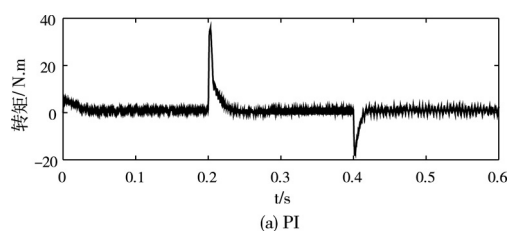


图6 转矩响应

快速STA与扩张扰动观测器的二阶滑模控制策略。通过仿真,将所提策略与PI、传统滑模控制策略对比,得到以下研究结论:

- 1) 采用快速STA二阶滑模控制策略,减小了系统响应时间,有效解决了传统一阶滑模抖阵过大的问题。
- 2) 设计扩张扰动观测器估计扰动信息,通过扰动补偿进一步增强了系统的鲁棒性。
- 3) 所提方法在期望速度变化时,无需调节控制器参数,便可以实现理想的控制效果,对不同工况的适应性更强。

## 参考文献:

- [1] 樊英,周晓飞,张向阳,等. 基于新型趋近律和混合速度控制器的IPMSM调速系统滑模变结构控制[J]. 电工技术学报, 2017, 32(5): 9-18.
- [2] 吕明琪,袁宇浩,陈青峰. 基于滑模变结构的永磁同步电机矢量控制研究[J]. 计算机仿真, 2016, 31(8): 311-316.
- [3] 王昊,李昕涛,闫庚龙,等. 基于干扰观测器的永磁同步电机复合滑模控制器设计[J]. 电子设计工程, 2018, 26(10): 171-175.
- [4] 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): 933-944.
- [5] 侯利民,王怀震,李勇,等. 级联式滑模观测器的永磁同步电机鲁棒滑模控制[J]. 控制与决策, 2016, 31(11): 2071-2076.
- [6] 董晓光,邹轩,张宇慧. 新型PMSM速度控制方法设计[J]. 信息技术, 2017, 4(9): 171-176, 180.
- [7] J J Rath, K C Veluvolu, M Defoort, et al. Higher-order sliding mode observer for estimation of tyre friction in ground vehicles[J]. Iet Control Theory & Applications, 2014, 8(6): 399-408.
- [8] A P Shah, A J Mehta. Direct Power Control of DFIG using Super-Twisting Algorithm based on Second-Order Sliding Mode Control[C]. International Workshop on Variable Structure Systems, 2016: 136-141.
- [9] 王丽梅,郑浩,贾启. 永磁同步平面电动机的滑模控制器设计[J]. 电机与控制学报, 2014, 18(7): 101-106.

- [10] C Lascu, F Blaabjerg. Super-twisting sliding mode direct torque control of induction machine drives[C]. 2014 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). IEEE, 2014: 5116-5122.
- [11] S Zhang, M A Heming, M O Zhaojin, et al. Research of PMSM-DTC system based on the super-twisting second sliding mode control[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2017, 38(2): 176-182.
- [12] 葛如愿,邓福军. 基于super-twisting滑模的永磁同步电机转矩环控制器设计[J]. 微电机, 2018, 51(2): 51-55.
- [13] 万东灵,赵朝会,孙强. 基于二阶滑模的永磁同步电机SVM-DTC[J]. 电机与控制应用, 2018, 41(6): 34-39.
- [14] 张庆超,马瑞卿,皇甫宜耿,等. 电机转速环节Super-Twisting算法二阶滑模控制律设计与研究[J]. 西北工业大学学报, 2016, 34(4): 669-676.
- [15] H Benariba, Abdelmadjid Boumediène. Super twisting sliding mode control of an electric vehicle[C]. International Conference on Control. IEEE, 2015: 1-6.

## 【作者简介】

淡 宁(1994-),男(汉族),江苏省徐州市人,硕士研究生,主要研究领域为电机驱动控制。

袁宇浩(1979-),女(汉族),江苏省南京市人,副教授,硕士研究生导师,主要研究领域为新能源开发与利用及故障自愈策略研究。

冯 进(1993-),男(汉族),江苏省盐城市人,硕士研究生,主要研究领域为电机驱动控制。



(上接第108页)

- [3] 周哲,张振东,尹丛勃,等. 基于转矩模型的高压共轨柴油机控制策略[J]. 汽车工程, 2017, 39(11): 1245-1251.
- [4] 范丽. 低温等离子体联合光催化减少船舶柴油机模拟烟气中NO<sub>x</sub>排放的实验[J]. 上海海事大学学报, 2018, 39(2): 73-80.
- [5] 韩伟强,卢耀,黄泽远,等. 预混比和喷油定时对异丁醇/柴油RCCI燃烧与排放特性的影响[J]. 农业工程学报, 2019, 35(9): 88-96.
- [6] 胡杰,王立辉,王天田. 柴油机Urea-SCR控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2016, 47(2): 349-356.
- [7] 梁渠,汪顺兴,刘凯. 麻疯树油直接用作柴油机燃料产生积炭的机理初探[J]. 中国油脂, 2017, 42(12): 58-61.
- [8] 夏萌,赵长禄,黄英,等. 基于负荷前馈的增压柴油机转速控制算法研究[J]. 兵工学报, 2016, 37(9): 1561-1569.
- [9] 王冀白,边耀璋,张哲林,等. 添加乙醇对脂肪酸甲酯-柴油混合燃料的燃烧及排放特性的影响[J]. 甘肃农业大学学报, 2016, 51(2): 127-133.

- [10] 胡杰,李泽西,林峰,等. 柴油机排气后处理系统CRT故障诊断研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2017, 41(6): 918-923.
- [11] 黄河,孙平,叶松,等. CeO<sub>2</sub>用于柴油机尾气NO还原的DFT研究[J]. 中国稀土学报, 2016, 34(5): 618-624.
- [12] 王有栋,吴淑英,陈丹丹,等. 基于实验数据的电蒸汽发生器模糊控制仿真[J]. 计算机仿真, 2019, 36(06): 320-325.

## 【作者简介】

王 磊(1980-),男(汉族),河南周口人,硕士,讲师,研究方向:发动机工作过程及排放控制。

陈爱红(1965-),女(汉族),河北保定人,硕士,副教授,研究方向:机械工程。

黄英娜(1979-),女(汉族),河南周口人,硕士,讲师,研究方向:计算机应用技术。

