

## 级联式滑模观测器的永磁同步电机鲁棒滑模控制

侯利民<sup>1</sup>, 王怀震<sup>1</sup>, 李 勇<sup>1</sup>, 张化光<sup>2</sup>

(1. 辽宁工程技术大学 电气与控制工程学院, 辽宁 葫芦岛 125105;  
2. 东北大学 信息科学与工程学院, 沈阳 110004)

**摘要:** 提出一种基于无速度传感器运行的永磁同步电机非线性控制方法. 为了有效地估计转速和位置信息, 构造一种新颖的级联式滑模速度观测器, 以解决传统滑模观测采用低通滤波器的相位延迟问题. 利用前级电流滑模观测器得到反电动势, 后级反电动势滑模观测器获取转速和位置信息, 利用李亚普诺夫理论进行稳定性分析. 针对速度控制, 提出利用带扩张状态观测器的滑模速度控制器取代PI调节器的方式提高系统的鲁棒性. 仿真结果验证了所提出方法的有效性.

**关键词:** 永磁同步电机; 级联式滑模观测器; 扩张状态观测器; 滑模控制; 双曲正切函数

**中图分类号:** TP273

**文献标志码:** A

### Robust sliding mode control of PMSM based on cascaded sliding mode observers

HOU Li-min<sup>1</sup>, WANG Huai-zhen<sup>1</sup>, LI Yong<sup>1</sup>, ZHANG Hua-guang<sup>2</sup>

(1. Faculty of Electrical & Control Engineering, Liaoning Technical University, Huludao 125105, China; 2. College of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004, China. Correspondent: HOU Li-min, E-mail: hlm760410@163.com)

**Abstract:** A nonlinear control method for the permanent magnet synchronous motor(PMSM) based on a speed sensorless is proposed. A novel cascaded sliding mode speed observer is proposed to estimate the speed and rotor position, to overcome the time delay caused by the low-pass filter. A front current sliding mode observer can estimate the electromotive force(EMF) of the motor in the axis, a back EMF sliding mode observer can estimate the speed and rotor position, and the Lyapunov theory is used to prove the stability of the algorithm. For the speed control problem, a robust sliding mode control with the extended state observer(ESO) is designed to improve the robust performance of system. The simulation results show the effectiveness of the proposed method.

**Keywords:** permanent magnet synchronous motor; cascaded sliding mode observer; extended state observer; sliding mode control; hyperbolic tangent function

### 0 引言

永磁同步电机(PMSM)因其具有一定的优点, 在工业中得到了广泛的应用. 要提高PMSM调速系统的鲁棒性能, 通常从速度传感器和控制器两方面进行改善. 传统矢量控制系统的转速和位置信息通常靠硬传感器获取, 该方法存在成本高、可靠性差和安装缺陷等问题. 因此, 近年来PMSM的无速度传感器控制<sup>[1-6]</sup>成为研究热点.

PMSM无速度传感器估计方法根据所适用的转速区间不同, 可分为两类: 1) 高频信号注入法<sup>[7]</sup>, 适用

于零低速段估计; 2) 各种观测器法, 在中、高速段可有效估计. 近年来, 滑模观测器方法因其具有鲁棒性强, 容易实现的特点, 已成为国内外研究的热点<sup>[8-11]</sup>. 传统的滑模观测器存在如下问题: 利用低通滤波器进行反电动势的高频滤波处理, 存在着相位延迟问题; 采用符号函数作为切换控制函数, 导致系统存在抖振现象; 利用反正切函数计算转子位置, 在DSP中通常需用查表方式, 往往难以达到预期精度要求. 因此, 一些学者致力于解决上述问题. 文献[12]设计了一种新的滑动模态观测器, 选择合适的边界层厚度的饱和函数

收稿日期: 2015-10-26; 修回日期: 2016-03-05.

基金项目: 国家自然科学基金项目(51307076); 辽宁省自然科学基金计划项目(201602350).

作者简介: 侯利民(1976-), 男, 副教授, 博士后, 从事电力电子与电力传动、电机控制等研究; 王怀震(1990-), 男, 硕士生, 从事永磁同步电机控制方法的研究.

削弱抖振,将反电动势估算值反馈到定子电流的观测计算中,通过一个截止频率可随转子转速变化的低通滤波器对延迟进行补偿,能够在较广频率范围运行时准确地估算出速度和位置,而补偿相位还须进行;文献[13]研究了一种宽速滑模观测器,解决了相位延迟的同时降低了抖振,但不能保证观测器的误差能在边界层内收敛到零;文献[14]提出了一种非奇异高阶终端滑模的电机转速/转子位置观测器,能够满足稳定情况下快速收敛的目的,但增大了计算的复杂性;文献[15]将滑模控制和模型参考自适应结合在一起提取电机转速,该方法可以避免传统滑模参数估计时存在的抖动问题,同时具有良好的动静态性能以及更高的估计精度,但符号函数的使用仍会对估计精度产生直接影响。

为了构成速度闭环,估计的转速需要反馈到系统的输入端,常规的速度PI控制器易受电机参数及扰动的影响,鲁棒性不强,因此非线性速度控制器的研究也是当前热点.由于滑模控制具有鲁棒性强、计算量小等特点,目前在调速系统控制器的设计中得到了较广泛的应用<sup>[16-19]</sup>.文献[20]采用新的滑模趋近律(SMRL)设计了滑模速度控制器,加入了负载转矩观测器观测外部扰动,同时对其进行补偿,有效减弱了系统抖振;文献[21]将高阶滑模与非奇异终端滑模方法相结合,设计了PMSM速度和电流控制器,抖振有效消除的同时提高了系统鲁棒性,但两者增大了系统设计及计算的复杂性;文献[22]设计了永磁无刷直流电机的滑模速度控制器,转矩由扩张状态观测器(ESO)观测,系统的动静态性能得到了提高;文献[23]提出了一种基于扩张观测器的永磁同步电机自适应混沌控制方法,取消了系统所有状态完全可测的限制,降低了控制增益,改善了滑模控制中的抖振问题,保证了系统状态快速稳定收敛至零点。

本文基于滑模变结构理论分别对观测器和速度控制器进行设计,构成级联式滑模观测器(CSMO)的永磁同步电机鲁棒滑模控制调速系统.用CSMO代替传统的速度传感器,利用双曲正切函数取代符号函数,通过李亚普诺夫方程证明系统的稳定性,从而解决传统滑模观测的相位延迟和抖振问题.用带扩张状态观测器的滑模速度控制器(ESMC)取代PI调节器,利用双曲正切函数取代符号函数,增强系统鲁棒性的同时削弱抖振,而且方法简单、容易实现.仿真结果表明,该方法具有较高的估计精度,系统具有较强鲁棒性和快速动态响应。

## 1 级联式滑模观测器设计

### 1.1 电流滑模观测器构造

表面式永磁同步电机(SPMSM:  $L_d = L_q = L_s$ )

的数学描述在  $\alpha$ - $\beta$  轴系为

$$\begin{cases} \frac{di_\alpha}{dt} = -\frac{R}{L_S}i_\alpha - \frac{e_\alpha}{L_S} + \frac{u_\alpha}{L_S}, \\ \frac{di_\beta}{dt} = -\frac{R}{L_S}i_\beta - \frac{e_\beta}{L_S} + \frac{u_\beta}{L_S}, \\ e_\alpha = -K_E\omega_r \sin\theta, \\ e_\beta = K_E\omega_r \cos\theta. \end{cases} \quad (1)$$

其中:  $u_\alpha$ 、 $u_\beta$  和  $i_\alpha$ 、 $i_\beta$  分别为  $\alpha$ - $\beta$  轴定子电压和电流分量,  $R$  和  $L_S$  分别为定子电阻和电感,  $e_\alpha$  和  $e_\beta$  为反电动势  $\alpha$ - $\beta$  轴分量,  $\omega_r$  为转子电角速度,  $\theta$  为转子位置角,  $K_E$  为反电动势常数. 将电流误差定义为滑模面

$$s = \begin{bmatrix} s_\alpha \\ s_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{i}_\alpha - i_\alpha \\ \hat{i}_\beta - i_\beta \end{bmatrix}. \quad (2)$$

根据式(1)构造滑模观测器状态方程

$$\begin{cases} \frac{d\hat{i}_\alpha}{dt} = -\frac{R}{L_S}\hat{i}_\alpha + \frac{1}{L_S}[u_\alpha - (k + \zeta)\text{sgn}s_\alpha - ls_\alpha], \\ \frac{d\hat{i}_\beta}{dt} = -\frac{R}{L_S}\hat{i}_\beta + \frac{1}{L_S}[u_\beta - (k + \zeta)\text{sgn}s_\beta - ls_\beta]. \end{cases} \quad (3)$$

本文采用一种具有光滑连续特性的双曲正切函数取代传统函数,以此削弱抖振.双曲正切函数<sup>[24]</sup>表示为

$$H(x) = \tanh(x) = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}}, \quad (4)$$

其曲线如图1所示。

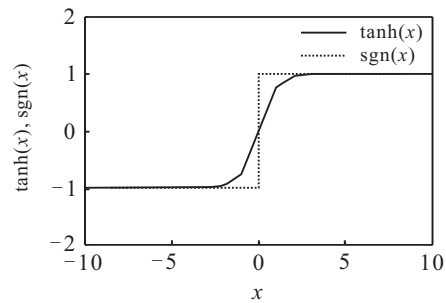


图1 双曲正切函数及符号函数

改进型滑模观测器如下:

$$\begin{cases} \frac{d\hat{i}_\alpha}{dt} = -\frac{R}{L_S}\hat{i}_\alpha + \frac{1}{L_S}[u_\alpha - (k + \zeta)H(s_\alpha) - ls_\alpha], \\ \frac{d\hat{i}_\beta}{dt} = -\frac{R}{L_S}\hat{i}_\beta + \frac{1}{L_S}[u_\beta - (k + \zeta)H(s_\beta) - ls_\beta]. \end{cases} \quad (5)$$

其中: 上标 $\hat{\cdot}$ 为估计量,  $H(\cdot)$  为双曲正切函数,  $k$ 、 $\zeta$ 、 $l$  为观测器增益。

用式(5)减去(1),得到估算电流的误差方程

$$\begin{cases} \frac{d\tilde{i}_\alpha}{dt} = -\frac{R}{L_S}\tilde{i}_\alpha + \frac{1}{L_S}[e_\alpha - (k + \zeta)H(s_\alpha) - ls_\alpha], \\ \frac{d\tilde{i}_\beta}{dt} = -\frac{R}{L_S}\tilde{i}_\beta + \frac{1}{L_S}[e_\beta - (k + \zeta)H(s_\beta) - ls_\beta]. \end{cases} \quad (6)$$

根据式(2)可将(6)重写为

$$\begin{cases} \frac{ds_\alpha}{dt} = -\frac{R}{L_S}s_\alpha + \frac{1}{L_S}[e_\alpha - (k + \zeta)H(s_\alpha) - ls_\alpha], \\ \frac{ds_\beta}{dt} = -\frac{R}{L_S}s_\beta + \frac{1}{L_S}[e_\beta - (k + \zeta)H(s_\beta) - ls_\beta]. \end{cases} \quad (7)$$

根据滑模变结构控制理论, 当系统在滑模面上滑动时, 有

$$s = \begin{bmatrix} s_\alpha \\ s_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{i}_\alpha - i_\alpha \\ \hat{i}_\beta - i_\beta \end{bmatrix} = 0. \quad (8)$$

由于  $|H(x)| \leq 1$ ,  $|H(x)|$  与  $x$  符号一致, 当满足

$$\xi > \max(|e_\alpha|, |e_\beta|) \quad (9)$$

时, 有

$$\begin{aligned} s_{\alpha,\beta} \times \dot{s}_{\alpha,\beta} = & -\frac{R}{L_S}s_{\alpha,\beta}^2 + \frac{1}{L_S}s_{\alpha,\beta}[e_{\alpha,\beta} - \\ & (k + \zeta)H(s_{\alpha,\beta}) - ls_{\alpha,\beta}] \leq \\ & -\frac{R}{L_S}s_{\alpha,\beta}^2 - \frac{1}{L_S}(ks_{\alpha,\beta}H(s_{\alpha,\beta}) + ls_{\alpha,\beta}^2) \leq 0. \end{aligned} \quad (10)$$

因此, 当  $S = 0$  时, 由式(7)可得

$$\begin{cases} e_\alpha = (k + \zeta)H(s_\alpha) + ls_\alpha, \\ e_\beta = (k + \zeta)H(s_\beta) + ls_\beta. \end{cases} \quad (11)$$

### 1.2 反电动势滑模观测器设计

根据式(1), 反电动势可描述为

$$\begin{cases} \frac{de_\alpha}{dt} = -\omega_r e_\beta, \\ \frac{de_\beta}{dt} = \omega_r e_\alpha. \end{cases} \quad (12)$$

设计由前级观测器得到的反电动势和误差值组合的滑模面

$$s_1 = \hat{e}_\alpha \times \bar{e}_\alpha + \hat{e}_\beta \times \bar{e}_\beta. \quad (13)$$

其中:  $\bar{e}_\alpha = \hat{e}_\alpha - e_\alpha$ ,  $\bar{e}_\beta = \hat{e}_\beta - e_\beta$ . 构造线性反馈反电动势滑模观测器

$$\begin{cases} \frac{d\hat{e}_\alpha}{dt} = -\hat{\omega}_r \hat{e}_\beta - \hat{e}_\alpha \lambda H(s_1) - l_1(\hat{e}_\alpha - e_\alpha), \\ \frac{d\hat{e}_\beta}{dt} = \hat{\omega}_r \hat{e}_\alpha - \hat{e}_\beta \lambda H(s_1) - l_1(\hat{e}_\beta - e_\beta), \\ \frac{d\hat{\omega}_r}{dt} = \bar{e}_\alpha \hat{e}_\beta - \bar{e}_\beta \hat{e}_\alpha. \end{cases} \quad (14)$$

其中:  $\lambda$  为滑模增益系数,  $l_1$  为大于 0 的增益.

根据式(12)和(14), 利用  $\bar{\omega}_r = \hat{\omega}_r - \omega_r$  求得误差方程为

$$\begin{cases} \frac{d\bar{e}_\alpha}{dt} = -\bar{\omega}_r \hat{e}_\beta - \omega_r \bar{e}_\beta - \hat{e}_\alpha \lambda H(s_1) - l_1 \bar{e}_\alpha, \\ \frac{d\bar{e}_\beta}{dt} = \bar{\omega}_r \hat{e}_\alpha + \omega_r \bar{e}_\alpha - \hat{e}_\beta \lambda H(s_1) - l_1 \bar{e}_\beta. \end{cases} \quad (15)$$

下面证明式(14)的稳定性.

由 Lyapunov 定理可得

$$V = \frac{1}{2}\bar{e}_\alpha^2 + \frac{1}{2}\bar{e}_\beta^2 + \frac{1}{2}\bar{\omega}_r^2. \quad (16)$$

对式(16)求导可得

$$\begin{aligned} \dot{V} = & \dot{\bar{e}}_\alpha \bar{e}_\alpha + \dot{\bar{e}}_\beta \bar{e}_\beta + \dot{\bar{\omega}}_r \bar{\omega}_r = \\ & -(\bar{e}_\alpha \hat{e}_\alpha + \bar{e}_\beta \hat{e}_\beta) \lambda H(s_1) - l_1(\bar{e}_\alpha^2 + \bar{e}_\beta^2) = \\ & -\lambda s_1 H(s_1) - l_1(\bar{e}_\alpha^2 + \bar{e}_\beta^2) \leq 0. \end{aligned} \quad (17)$$

由式(17)可以得到, 反电动势滑模观测器具有稳定性.

CSMO 原理图如图 2 所示. 观测的转速会快速地跟踪上期望转速.

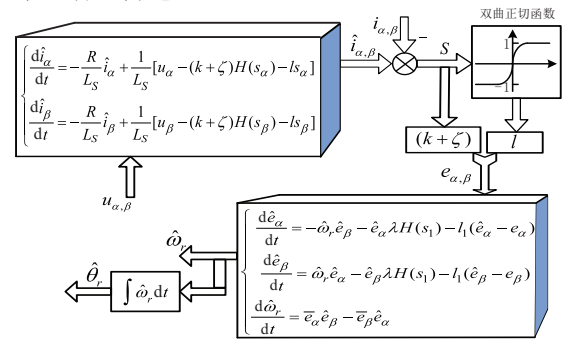


图 2 级联式滑模观测器 (CSMO)

### 2 鲁棒滑模速度控制器设计

采用 CSMO 估计出转子速度和位置信息, 反馈到系统的输入端及坐标变换中, 传统的控制方案是采用  $i_d = 0$  的矢量控制, 其中的速度调节器采用 PI 控制器, 易受电机参数及扰动的影响, 鲁棒性不强, 采用滑模速度控制器取代 PI 可提高系统的性能.

传统的滑模控制的主要缺点是存在抖振现象, 主要是由于在控制律中使用了切换增益控制项  $k \text{sgn}(s)$  的缘故, 而常用的处理方法是使用饱和函数或 sigmoid 函数代替符号函数, 这样虽然可以削弱抖振, 但降低了滑模控制的鲁棒性, 而且  $k$  取值越大, 抖振幅度越大. 为了既能保证控制系统的鲁棒性, 又尽可能减小抖振, 本文采用 ESO 实时估计并补偿系统中的综合扰动项, 进而设计 ESMC.

PMSM 在电机参数不确定性条件下的机械运动方程为

$$\dot{\omega}_r = (a + \Delta a)i_q^* - (b + \Delta b)\omega_r - (c + \Delta c)T_L. \quad (18)$$

其中:  $a = 3n_p^2\psi_f/2J$ ,  $b = B/J$ ,  $c = n_p/J$ ,  $\Delta a$ ,  $\Delta b$  和  $\Delta c$  代表电机参数的摄动值.

令

$$d = a(i_q - i_q^*) - b\omega_r - cT_L + g, \quad (19)$$

其中  $g = \Delta a i_q^* - \Delta b \omega_r - \Delta c T_L$ .

式(18)可重新写成 ESO 的标准形式

$$\dot{\omega}_r = a i_q^* + d, \quad (20)$$

其中  $d$  为综合干扰. 因此, 可构造出 PMSM 的非线性扩张状态观测器

$$\begin{cases} \varepsilon = z_1 - \omega_m, \\ \dot{z}_1 = z_2 - \beta_1 \text{fal}(\varepsilon, \alpha, \delta) + \frac{3n_p^2 \psi_f}{2J} i_q, \\ \dot{z}_2 = -\beta_2 \text{fal}(\varepsilon, \alpha, \delta), \end{cases} \quad (21)$$

其中通过  $z_2$  估计系统的综合扰动  $d$ .

定义速度跟踪误差

$$e = \omega_r^* - \hat{\omega}_r. \quad (22)$$

选择以速度跟踪误差  $e$  为自变量的积分型滑动模式面

$$s_2 = e + m \int_0^t e d\tau. \quad (23)$$

控制率可根据李亚普诺夫稳定条件确定, 构造如下 Lyapunov 函数:

$$V = \frac{1}{2} s_2^2. \quad (24)$$

对式 (24) 求导并利用 (23) 可得

$$\dot{V} = s_2(\dot{e} + me) = -s_2[ai_q^* + d - me - \dot{\omega}_r^*]. \quad (25)$$

采用 ESO 估计综合扰动并进行补偿, 设计  $i_q^*$  为

$$i_q^* = \frac{1}{a}(me + \eta s_2 - z_2(t) - \rho_{\text{ESO}} H(s_2) + \dot{\omega}_r^*). \quad (26)$$

其中:  $\rho_{\text{ESO}}$  为 ESO 对综合扰动项的观测误差上界, 假设  $|d - z_2(t)| \leq \rho_{\text{ESO}}$ .

将式 (26) 代入 (25), 可得

$$\dot{V} = -s_2[\eta s_2 + d - z_2(t) - \rho_{\text{ESO}} H(s_2)] \leq 0. \quad (27)$$

因此, 系统状态将以有限时间到达滑模面, 并沿滑模面运动, 跟踪误差将收敛到零.

### 3 仿真研究

基于 CSMO 的永磁同步电机鲁棒滑模控制系统原理框图如图 3 所示.

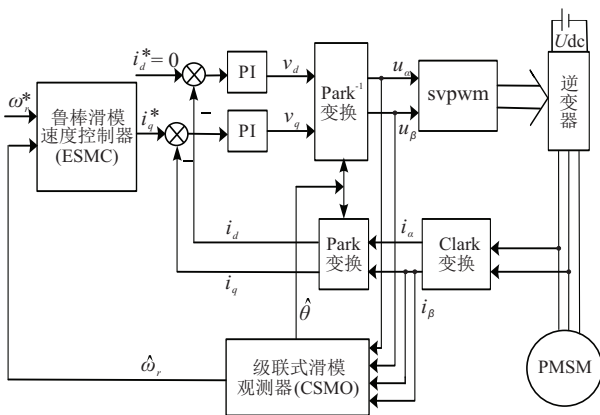


图 3 控制系统

在图 3 中: 级联式滑模观测器取代了矢量控制系统中的速度传感器, 鲁棒滑模速度控制器取代了速度 PI 调节器.

为了验证所设计的观测器和控制器的有效性, 进

行仿真实验研究, 所使用的永磁同步电机参数如表 1 所示.

参数	数值
$d, q$ 轴电感 $L_d = L_q/H$	0.014
定子电阻 $R/\Omega$	4.765
永磁体磁链 $\psi_f/Wb$	0.1848
转动惯量 $J/kg \cdot m^2$	0.0001
粘滞阻尼系数 $B/N \cdot m \cdot g$	$4 \times 10^{-5}$
极对数 $n_p$	2

给定转速 60 rad/s, 在 0.15 s 时突加负载 0.3 N·m, 在 0.3 s 时突卸负载, 实际/估计速度曲线如图 4 所示.

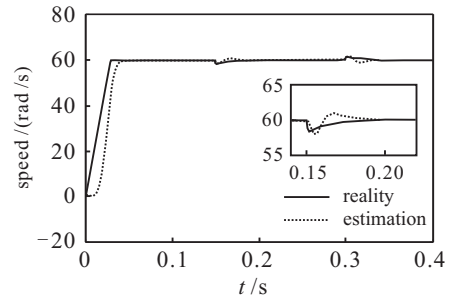


图 4 变载速度响应

从图 4 可以看出: 实际速度启动较快有超调, 估计的转速启动较慢无超调, 瞬时突加负载和突减负载时, 转速波动较小, 但很快调整过来, 转子实际与估计速度稳态时基本无静差.

给定转速 40 rad/s 时, 采用双曲正切函数取代符号函数, 对应的  $\beta$  轴反电动势曲线如图 5 所示.

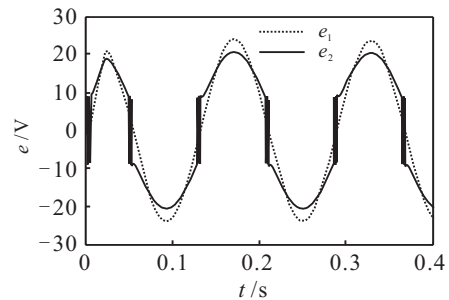


图 5  $\beta$  轴反电动势对比

由此可知, 开关函数选用  $\text{sgn}$  函数会使  $\hat{e}_\beta$  含有高次谐波, 最终导致转速波动, 而采用双曲正切函数  $\tanh(x)$  的  $\hat{e}_\beta$  曲线正弦平滑. 给定转速 60 rad/s 时, 对应的实际/估计转子位置角曲线如图 6 所示.

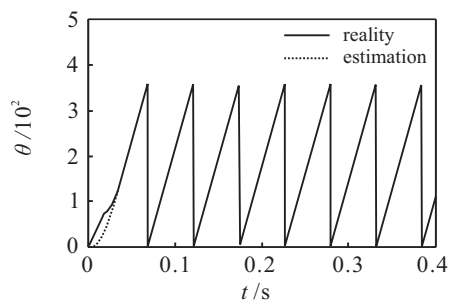


图 6 实际/估计转子位置角

从图6可以看出：启动时存在一定的误差，很快估计的转子位置就跟踪上实际转子位置，稳态误差小。

为了验证该系统的动态性能，下面将给定转速由40 rad/s 上升到60 rad/s，动态升速曲线如图7所示，反电动势估计曲线如图8所示。

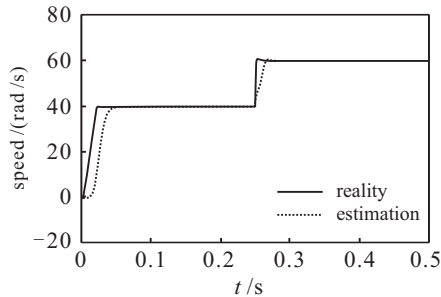


图 7 变速下实际/估计转速响应

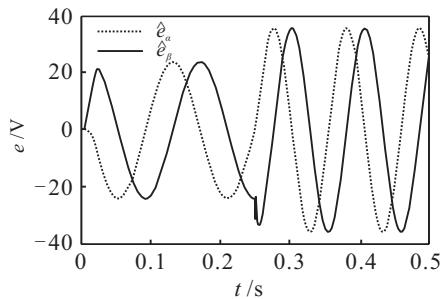


图 8 估计反电动势响应

从图7和图8可以看出：该系统转速超调小，动态响应快速，具有较好的转速跟踪效果，转子反电动势除变速瞬间外正弦度较好。

系统的鲁棒滑模速度控制器与PI速度调节器的加载情况速度对比曲线如图9所示。

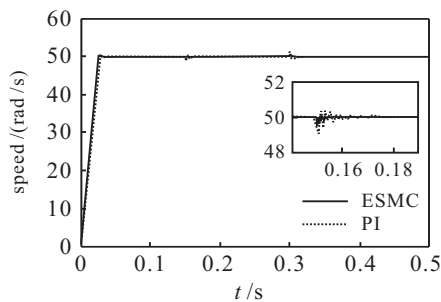


图 9 ESMC 和 PI 变载速度响应

从图9可以看出：鲁棒滑模速度控制器的调速系统启动速度快，无超调，而PI调节器速度存在超调；加载时PI调节器速度振荡较大，而文中方法的速度变化很小并快速调节回给定转速。

### 4 结 论

本文提出了一种级联式滑模观测器的SPMSM鲁棒滑模控制方法，构造了级联式滑模观测器和带ESO的滑模速度控制器，利用双曲正切函数取代符号函数，并经李亚普诺夫方程证明了各自的稳定性。仿

真结果验证了所提出方法的有效性及其整个系统的良好的动静性能。

### 参考文献(References)

- [1] Song Xinda, Fang Jiancheng. Adaptive compensation method for high-speed surface PMSM sensorless drives of EMF-based position estimation error[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2016, 31(2): 1438-1449.
- [2] 陆斌泉, 林鹤云. 永磁同步电机无传感器控制的软开关滑模观测器[J]. 电工技术学报, 2015, 30(2): 106-113. (Lu X Q, Lin H Y. Soft switching sliding mode observer for PMSM sensorless control[J]. Trans of China Electrotechnical Society, 2015, 30(2): 106-113.)
- [3] Zhao Yue, Qiao Wei. Dead-time effect analysis and compensation for a sliding-mode position observer-based sensorless IPMSM control system[J]. IEEE Trans on Industrial Application, 2015, 51(3): 2528-2535.
- [4] 侯利民, 王巍. 无速度传感器的表面式永磁同步电机无源控制策略[J]. 控制与决策, 2013, 28(10): 1578-1586. (Hou L M, Wang W. Speed sensorless system of passivity-based control strategy for SPMSM[J]. Control and Decision, 2013, 28(10): 1578-1586.)
- [5] Yuan Lei, Xiao Fei. Sensorless control of high power interior permanent magnet synchronous motor drives at very low speed[J]. IET Electric Power Applications, 2013, 7(3): 199-206.
- [6] 黄雷, 赵光宙, 年珩. 基于扩展反电势估算的内插式永磁同步电动机无传感器控制[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(9): 59-63. (Huang L, Zhao G Z, Nian H. Sensorless control of interior permanent magnet synchronous motor by estimation of an extended electromotive force[J]. Proc of the CSEE, 2007, 27(9): 59-63.)
- [7] 王高林, 张国强. 永磁同步电机无位置传感器混合控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(24): 103-109. (Wang G L, Zhang G Q. Hybrid sensorless control strategy for permanent magnet synchronous motors[J]. Proc of the CSEE, 2012, 32(24): 103-109.)
- [8] 尚喆, 赵荣祥. 基于自适应滑模观测器的永磁同步电机无位置传感器控制研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(3): 23-27. (Shang Z, Zhao R X. Research on sensorless control method of PMSM based on an adaptive sliding mode observer[J]. Proc of the CSEE, 2007, 27(3): 23-27.)
- [9] Rizvi S A A, Memon A Y. Robust output feedback control of PMSM using cascaded sliding mode and high gain observers[C]. The 40th Annual Conf of the IEEE Industrial

- Electronics Society, Dallas: Dallas Republic, 2014: 274-280.
- [10] 黄守道, 高剑. 压缩机用内置式永磁同步电机无位置传感器控制[J]. 电工技术学报, 2013, 28(5): 182-187.  
(Huang S D, Gao J. Sensorless control of interior permanent-magnet synchronous motors with compressor load[J]. Trans of China Electrotechnical Society, 2013, 28(5): 182-187.)
- [11] 易伯瑜, 康龙云. 永磁同步电机抗扰高阶滑模观测器设计[J]. 电工技术学报, 2014, 29(5): 132-140.  
(Yi B Y, Kang L Y. Design of robust high order sliding mode observer for permanent magnet synchronous motors[J]. Trans of China Electrotechnical Society, 2014, 29(5): 132-140.)
- [12] 鲁文其, 黄文新. 永磁同步电动机新型滑模观测器无传感器控制[J]. 控制理论与应用, 2009, 26(4): 429-432.  
(Lu W Q, Huang W X. A novel sliding-mode observer for the sensorless control of permanent-magnet synchronous machines[J]. Control Theory & Applications, 2009, 26(4): 429-432.)
- [13] Fan Ying, Zhang Li. Sensorless SVPWM-FADTC of a new flux-modulated permanent magnet wheel motor based on a wide-speed sliding mode observer[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2015, 62(5): 3143-3151.
- [14] 郑雪梅, 李秋明. 用于永磁同步电机的一种非奇异高阶终端滑模观测器[J]. 控制理论与应用, 2011, 28(10): 1467-1472.  
(Zheng X M, Li Q M. Higher-order nonsingular terminal-sliding-mode observer for permanent-magnet synchronous motor[J]. Control Theory & Applications, 2011, 28(10): 1467-1472.)
- [15] 李冉, 赵光宙. 基于扩展滑模观测器的永磁同步电动机无传感器控制[J]. 电工技术学报, 2012, 27(3): 79-85.  
(Li R, Zhao G Z. Sensorless control of permanent magnet synchronous motor based on extended sliding mode observer[J]. Trans of China Electrotechnical Society, 2012, 27(3): 79-85.)
- [16] 许波, 朱焜秋. 自适应非奇异终端滑模控制及其在BPMSM中的应用[J]. 控制与决策, 2014, 29(5): 833-837.  
(Xu B, Zhu H Q. Adaptive nonsingular terminal sliding model control and its application to BPMSM[J]. Control and Decision, 2014, 29(5): 833-837.)
- [17] 王庆龙, 张兴. 永磁同步电机矢量控制双滑模模型参考自适应系统转速辨识[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(6): 897-902.  
(Wang Q L, Zhang X. Double sliding-mode model reference adaptive system speed identification for vector control of permanent magnet synchronous motors[J]. Proc of the CSEE, 2014, 34(6): 897-902.)
- [18] 张细政, 王耀南. 基于滑模观测器的永磁同步电机变结构鲁棒控制[J]. 控制与决策, 2009, 24(1): 157-160.  
(Zhang X Z, Wang Y N. Robust variable structure control of PMSM based on sliding mode observer[J]. Control and Decision, 2009, 24(1): 157-160.)
- [19] 侯利民, 王巍. 表面式永磁同步电机无源非奇异快速终端滑模控制[J]. 电工技术学报, 2014, 29(11): 45-52.  
(Hou L M, Wang W. Passivity-based control and nonsingular fast terminal sliding mode control for SPMSM[J]. Trans of China Electrotechnical Society, 2014, 29(11): 45-52.)
- [20] Zhang Xiaoguang, Sun Lizhi. Nonlinear speed control for PMSM system using sliding-mode control and disturbance compensation techniques[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2013, 28(3): 1358-1365.
- [21] 郑剑飞, 冯勇. 永磁同步电机的高阶终端滑模控制方法[J]. 控制理论与应用, 2009, 26(6): 697-700.  
(Zheng J F, Feng Y. High-order terminal sliding-mode control for permanent magnet synchronous motor[J]. Control Theory & Applications, 2009, 26(6): 697-700.)
- [22] 夏长亮, 刘均华. 基于扩张状态观测器的永磁无刷直流电机滑模变结构控制[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(20): 139-143.  
(Xia C L, Liu J H. Variable structure control of BLDCM based on extended state observer[J]. Proc of the CSEE, 2006, 26(20): 139-143.)
- [23] 陈强, 南余荣. 基于扩张状态观测器的永磁同步电机混沌系统自适应滑模控制[J]. 物理学报, 2014, 63(22): 220506-1-8.  
(Chen Q, Nan Y R. Adaptive sliding-mode control of chaotic permanent magnet synchronous motor system based on extended state observer[J]. Acta Physica Sinica, 2014, 63(22): 220506-1-8.)
- [24] 史婷娜, 肖竹欣. 基于改进型滑模观测器的无刷直流电机无位置传感器控制[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(8): 2043-2051.  
(Shi T N, Xiao Z X. A position sensorless control strategy for BLDCM based on an improved sliding mode observer[J]. Proc of the CSEE, 2015, 35(8): 2043-2051.)