

# 基于 RBF 终端滑模观测器的电机转子位置估计

刘慧博 江帅璐

(内蒙古科技大学 内蒙古 包头 014010)

**摘要** 无刷直流电机常采用位置传感器来检测转子位置,这会影 响系统的可靠性,增加电机体积和成本。采用无位置传感器控制技术:引入终端滑模面,其具有快速收敛性和良好观测精度,可减少相位滞后问题;采用 RBF 神经网络来设计观测器的控制策略,将滑模变量作为神经网络输入,输出即为控制策略,简化控制结构。RBF 终端滑模观测器将 RBF 控制与终端滑模控制的优点紧密结合,优化了控制信号,削弱了抖振现象。仿真结果表明,该观测器能快速准确地估计电机的线反电势及电机转速,系统具有良好性能,满足无刷直流电机的工作要求。

**关键词** 终端滑模 RBF 神经网络 无位置传感器

中图分类号 TP391.9

文献标识码 A

DOI:10.3969/j.issn.1000-386x.2020.01.012

## ROTOR POSITION ESTIMATION BASED ON RBF TERMINAL SLIDING MODE OBSERVER

Liu Huibo Jiang Shuailu

(Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, Inner Mongolia, China)

**Abstract** Brushless DC motor often uses position sensor to detect the rotor position, which will affect the reliability of the system and increase the volume and cost of the motor. Therefore, this paper adopts the sensorless control technology. We introduced the terminal sliding surface, which had fast convergence and good observation accuracy, and reduced the phase lag problem. RBF neural network was used to design the control strategy of the observer. The sliding mode variable was the input of the neural network and the output was the control strategy, which simplified the control structure. RBF terminal sliding mode observer combined the advantages of RBF control and terminal sliding mode control, optimized the control signal and weakened the chattering phenomenon. The simulation results show that the designed observer can quickly and accurately estimate the linear back-EMF and motor speed. The system has good performance and meets the requirements of brushless DC motor.

**Keywords** Terminal sliding mode RBF neural network Sensorless

## 0 引言

无刷直流电机因其体积小、重量轻、效率高、运行可靠等优点在各个领域都被普遍采用。尤其是在一些特殊的工作环境下,位置传感器的安装会带来诸多问题,因此无位置传感器控制技术被越来越多地应用于实际生产工作中。

传统无位置传感器估计方法有反电动势法、电感

法、续流二极管法、观测器等,其中滑模观测器因对系统数学模型的精确度要求低且具有良好鲁棒性,已成为目前研究的热点。但是在实际系统中,滑模观测器会由于其控制作用的不连续性而产生抖振现象,不能消除,只能削弱。

文献[4]采用 sigmoid 连续函数来代替切换函数,有效抑制了抖振,但同时也降低了系统的鲁棒性和反应速度。文献[5]利用趋近律的概念,提出一种变结构控制系统的抖振消除方法,通过调整趋近律参数保

证滑动模态的动态品质,减弱高频抖动,但参数的值需要精准控制,否则也会导致抖振。采用滤波器对控制信号进行平滑滤波,也是抑制抖振的有效方法,文献[8-9]采用低通滤波器,获得了平滑的控制信号,有效抑制了抖振,但是这种方法的难度在于加入滤波器之后的稳定性分析。文献[10-11]设计了滑模观测器来估计反电势,省去了低通滤波器和相位补偿环节,但估算的反电势因为抖振和噪声的影响仍然是不准确的。

本文采用无位置传感器控制方法,在传统滑模观测器的基础上,为抑制抖振现象,引入了终端滑模面,提出了基于自适应 RBF 神经网络终端滑模观测器的转子位置估计方法,结合 RBF 神经网络控制与终端滑模控制的优点,不仅优化了控制信号,还削弱了一般滑模控制的抖振现象,提高了转子位置与速度的估算精度,满足无刷直流电机的工作要求。

## 1 无刷直流电机数学模型

三相无刷直流电动机相电压的平衡方程为:

$$\begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L & 0 & 0 \\ 0 & L & 0 \\ 0 & 0 & L \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $U_a$ 、 $U_b$ 、 $U_c$ 为定子各相的端电压(V); $R_a$ 、 $R_b$ 、 $R_c$ 为定子各相绕组电阻( $\Omega$ ); $L = L_s - M$ , $L$ 为定子电感, $L_s$ 为每相绕组自感, $M$ 为相间绕组互感; $i_a$ 、 $i_b$ 、 $i_c$ 为定子各相电流(A); $e_a$ 、 $e_b$ 、 $e_c$ 为定子各相反电势(V)。

基于电机线反电势的电压方程为:

$$\begin{cases} u_{ab} = Ri_{ab} + L \frac{di_{ab}}{dt} + e_{ab} \\ u_{bc} = Ri_{bc} + L \frac{di_{bc}}{dt} + e_{bc} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $i_{ab}$ 、 $i_{bc}$ 为两相定子电流之差; $e_{ab}$ 、 $e_{bc}$ 为电机的线反电势; $u_{ab}$ 、 $u_{bc}$ 为电机的线电压。电机的线电压状态方程为:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{ab} \\ i_{bc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & \\ & -\frac{R}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ab} \\ i_{bc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ \frac{1}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{ab} \\ u_{bc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{1}{L} \\ -\frac{1}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_{ab} \\ e_{bc} \end{bmatrix} \quad (3)$$

利用线反电势过零点获取电机转子位置时,由于电流微分项的存在,会导致线反电势的计算误差,所以本文设计了滑模观测器对线反电势进行估计,提高估计精度。

## 2 观测器设计

### 2.1 终端滑模观测器

采用滑模观测器进行转子位置估计的控制框图如图1所示,通过定子电流和线电压来估计电机的转子位置和速度。

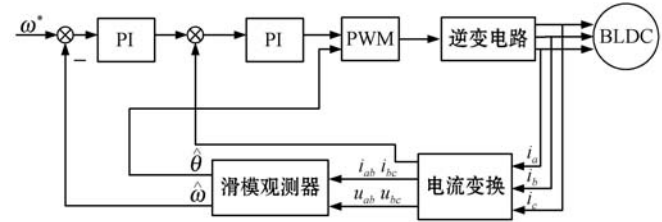


图1 采用滑模观测器电机控制系统框图  
构建终端滑模观测器为:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \hat{i}_{ab} \\ \hat{i}_{bc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & \\ & -\frac{R}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{i}_{ab} \\ \hat{i}_{bc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ \frac{1}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{ab} \\ u_{bc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ \frac{1}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

与式(3)相减得误差方程:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \tilde{i}_{ab} \\ \tilde{i}_{bc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & \\ & -\frac{R}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{i}_{ab} \\ \tilde{i}_{bc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ \frac{1}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_{ab} \\ e_{bc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ \frac{1}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$v = \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix}$  为观测器控制律,  $v = v_{eq} + v_n$ , 等效控制

$v_{eq}$  通过 RBF 神经网络得到,终端滑模观测器结构图如图2所示。

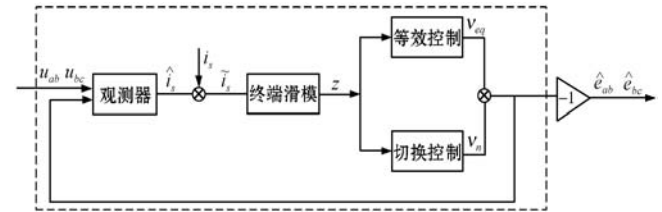


图2 终端滑模观测器结构图

假设  $u = [e_{ab}, e_{bc}]^T$ ;  $\tilde{i}_s = [\tilde{i}_{ab}, \tilde{i}_{bc}]^T$  为定子电流误差向量,  $\tilde{i}_{ab} = \hat{i}_{ab} - i_{ab}$ ,  $\tilde{i}_{bc} = \hat{i}_{bc} - i_{bc}$ , 将其作为滑模切换面, 可得滑模观测器的滑模面:  $s = [s_1, s_2]^T = \tilde{i}_s = \hat{i}_s - i_s = e$ , 使滑模变量  $s$  能够达到二阶滑模运动状态:  $s = \dot{s} = 0$ 。

选取终端滑模函数  $z$  来实现  $s$  的二阶滑模控制:

$$z = \dot{s} + \gamma s^{q/p} \quad (6)$$

式中:  $z \in \mathbf{R}^2$ ;  $\gamma = \text{diag}(\gamma_1, \gamma_2)$ ,  $\gamma_1 > 0, \gamma_2 > 0$  为常数;  $q, p$

$p$  为奇数,  $0 < q/p < 1$ ;  $\dot{s}^{p/q} = [\dot{s}_1^{p/q} \ \dot{s}_2^{p/q}]^T$ 。

通过设计合适的滑模控制律可以使终端滑模面在有限时间收敛为零,从而达到  $z = \dot{z} = 0$ 。

### 2.2 RBF 神经网络设计

本文主要的创新点为等效控制  $v_{eq}$  是通过 RBF 神经网络得到,并且将滑模变量作为神经网络的输入,其输出即为观测器的控制策略,将控制目标从跟踪误差转为滑模函数。整体结构如图 3 所示。

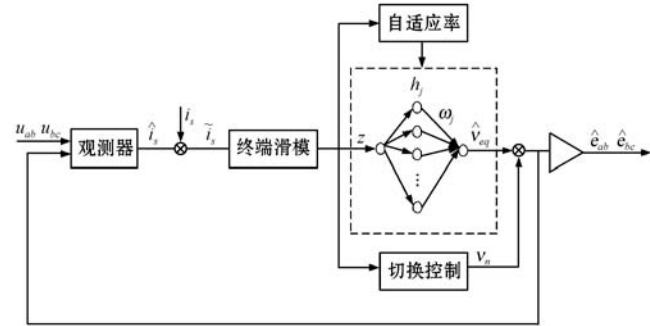


图 3 RBF 终端滑模观测器结构框图

采用 RBF 神经网络对  $\hat{v}$  进行逼近,令  $\hat{v} = [\hat{v}_1, \hat{v}_2]^T$ , 可用具有线性参数的 RBF 网络来实现,表示如下:

$$\hat{v}_i = \sum_{j=1}^k \hat{\omega}_{ij} h_j \quad (7)$$

式中:  $\hat{\omega}_{ij}$  为 RBF 网络的权值,  $j$  为隐层节点数,  $j = 1, 2, 3, \dots, k$ ;  $i = 1, 2$ ;  $h_j$  为高斯函数, 满足  $h_j = \exp(-\|z - A_j\|^2 / b_j^2)$ 。  $z = (z_1, z_2)^T$  是 RBF 网络的输入;  $A_j = (a_{1j}, a_{2j}, a_{mj})^T$  为网络第  $j$  个节点的基带参数。

令  $\hat{W}_i = (\hat{\omega}_{i1}, \dots, \hat{\omega}_{ij}, \dots, \hat{\omega}_{ik})^T$ ,  $H_i = (h_1, \dots, h_j, \dots, h_k)^T$ ,  $j = 1, 2, 3, \dots, k$ , 则式(7)化简为  $\hat{v}_i = \hat{W}_i^T H_i$ 。

令  $H = (H_1, H_2)^T$ ,  $\hat{W} = \text{diag}(\hat{W}_1^T, \hat{W}_2^T)$ , 则 RBF 网络的输出为:

$$\hat{v} = \hat{W}H \quad (8)$$

采用 RBF 网络,根据滑动变量  $z$  来逼近  $\hat{v}$ ,通过满足滑模可达条件这一前提对网络的权值进行在线修正。修正的目的是寻找最优的网络权值以获得稳定的收敛特性。

选取 RBF 网络的学习指标:

$$E = \frac{1}{2} z^T z \quad (9)$$

则  $\dot{z} = \ddot{s} + \gamma(q/p)s^{q/p-1}(-Re + u + v)/L$ 。

RBF 神经网络控制的目标是使  $z(t) \dot{z}(t) \rightarrow 0$ , 根据梯度下降法有:

$$d\hat{W} = -\eta \frac{\partial E}{\partial \hat{W}(t)} = -\eta \frac{\partial z^T(t) \dot{z}(t)}{\partial \hat{W}(t)} = -\eta \frac{\partial z^T(t) \dot{z}(t)}{\partial \hat{v}(t)} \frac{\partial \hat{v}(t)}{\partial \hat{W}(t)}$$

$$\frac{\partial z^T(t) \dot{z}(t)}{\partial \hat{v}(t)} = z^T(t) \frac{\partial \dot{z}(t)}{\partial \hat{v}(t)} = \gamma(q/p)s^{q/p-1}z^T(t)$$

$$\frac{\partial \hat{v}(t)}{\partial \hat{W}(t)} = H$$

则自适应率为:

$$d\hat{W} = -\eta \gamma(q/p)s^{q/p-1}z^T(t)H = \rho z^T(t)H \quad (10)$$

式中:  $\eta > 0$  为学习速率;  $\rho = -\eta \gamma(q/p)s^{q/p-1}$ 。

最终,通过所设计的 RBF 神经网络滑模设计策略,使得滑模观测器收敛,即  $e = \dot{e} = 0$ , 可得  $\hat{u} = -v$ 。

### 3 仿真分析

在 MATLAB/Siulink 中建立仿真模型并进行仿真对比,电机参数和观测器参数如表 1 所示。

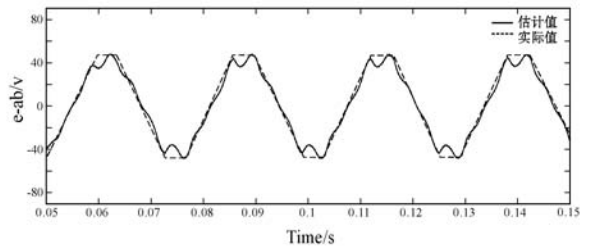
表 1 电机参数

电机参数	数值
电阻 $R/\Omega$	0.2
电感 $L/H$	0.01
额定电压/V	220
额定转速/(r · min <sup>-1</sup> )	3 000
极对数	2

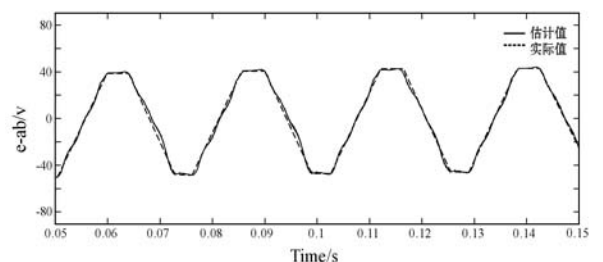
观测器设计参数:

$\gamma = \text{diag}(0.001, 0.001)$ ,  $q = 7, p = 9, R_s = 2.875$ , 神经网络初始权值为随机值,网络结构 2-5-2。高斯函数参数取  $j = 5, a_j = [-3, -1.5, 0, 1.5, 3; -1.5, 0, 1.5, 3]^T, b_j = [1, 1, 1, 1, 1]^T, \eta = 1.5$ 。

仿真结果如图 4-图 8 所示。

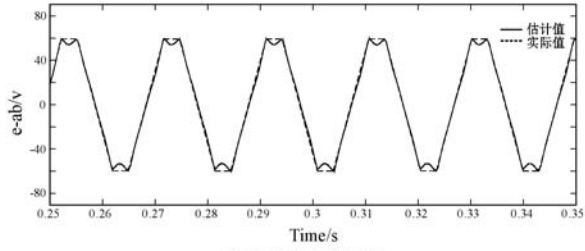


终端滑模观测器

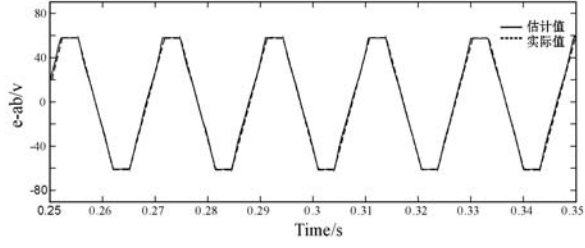


RBF 终端滑模观测器

(a) 转速为 600 r/min

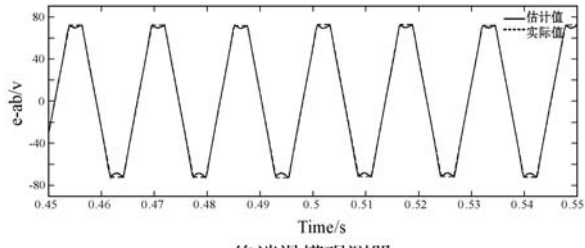


终端滑模观测器

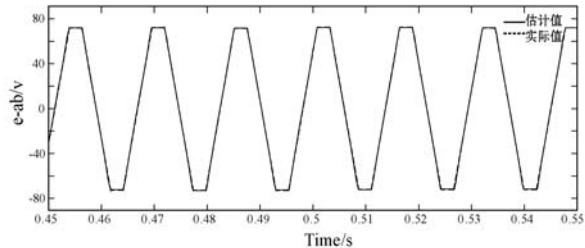


RBF终端滑模观测器

(b) 转速为 800 r/min

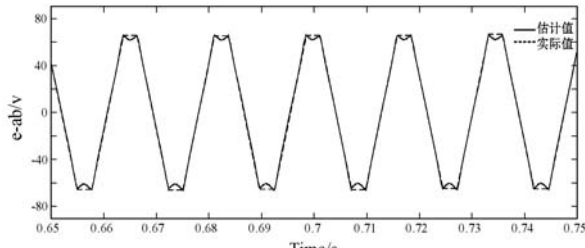


终端滑模观测器

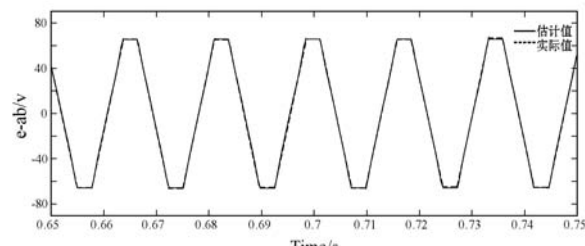


RBF终端滑模观测器

(c) 转速为 1 000 r/min



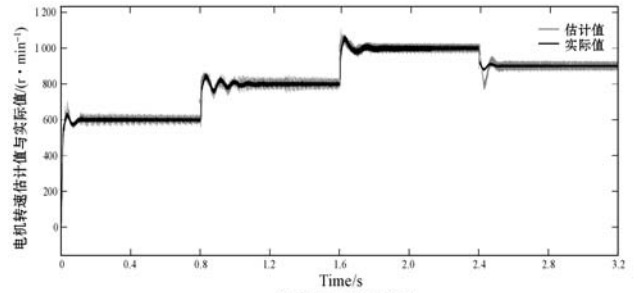
终端滑模观测器



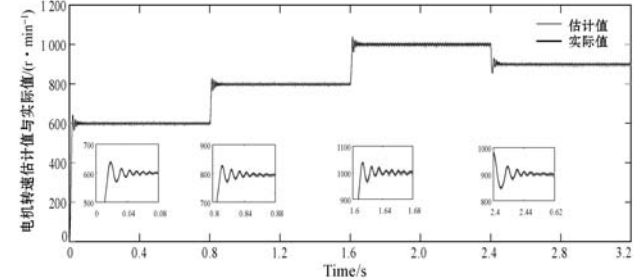
RBF终端滑模观测器

(d) 转速为 900r/min

图4 不同转速下反电势  $e_{ab}$  的估计值

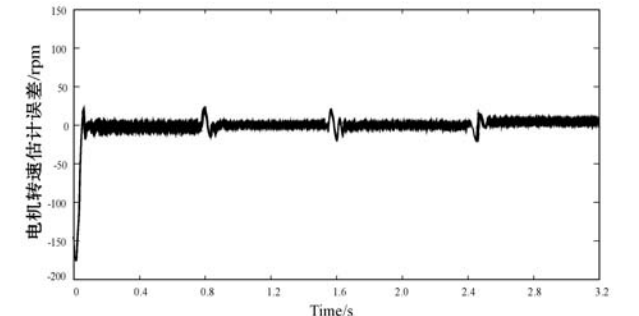


终端滑模观测器

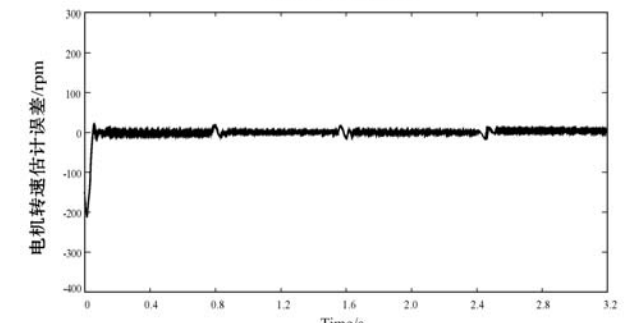


RBF终端滑模观测器

图5 转速估计值与实际值



终端滑模观测器



RBF终端滑模观测器

图6 转速估计误差

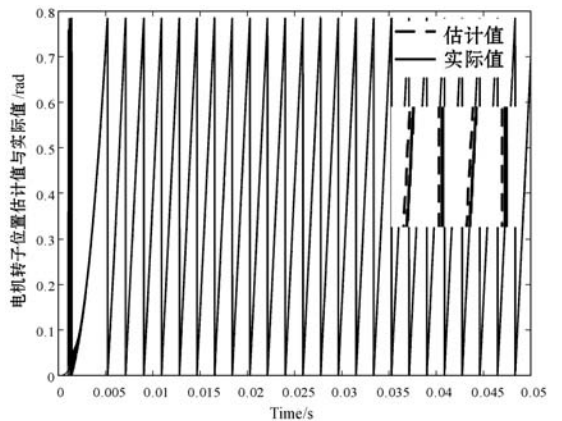


图7 RBF 终端滑模观测器转子位置估计值与实际值

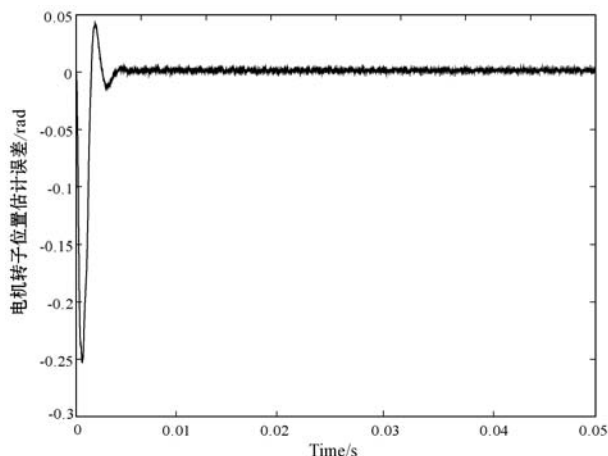


图 8 RBF 终端滑模观测器转子位置估计误差

图 4 表示电机在不同转速下的反电势估计值,可以看出 RBF 终端滑模观测器曲线相比终端滑模观测器曲线更加连续光滑,估计准确。

由图 5 和图 6 可看出,RBF 终端滑模观测器比终端滑模观测器电机转速实现了更快速准确的调整,转速估计误差也相对较小。在 0 ~ 2.4 s,电机转速逐渐增加,观测器能较好地观测速度,具备很好的动态性能;2.4 ~ 3.2 s 转速下降,电机也能快速调整,观测误差较小,抖振较小,说明所设计的 RBF 终端滑模观测器性能较好。

由图 7 和图 8 可知,所设计的 RBF 神经网络终端滑模观测器可以准确检测转子位置,误差在允许范围之内。

## 4 结 语

本文设计了 RBF 神经网络终端滑模观测器,将 RBF 神经网络控制与终端滑模控制的优点结合起来,优化了控制信号。仿真结果表明,所设计的 RBF 终端滑模观测器削弱了终端滑模观测器的抖振现象,准确估计了线反电势、转速以及转子位置,满足无刷直流电机的工作要求。

## 参 考 文 献

- [ 1 ] 张袅娜. 终端滑模控制理论及应用[M]. 北京:科学出版社,2011.
- [ 2 ] 谷凯云,高斌,常宇. 基于心率的主动脉血泵流量控制[J]. 中国组织工程研究,2011,15(13):2390-2393.
- [ 3 ] 夏长亮. 无刷直流电机控制系统[M]. 北京:科学出版社,2009.
- [ 4 ] 刘金琨. 滑模变结构控制 Matlab 仿真[M]. 北京:清华大学出版社,2005.
- [ 5 ] Kim H, Son J, Lee J. A high-speed sliding-mode observer for

the sensorless speed control of a PMSM[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(9):4069-4077.

- [ 6 ] 黄智才,谭建平,程立志,等. 基于血泵转速与功率特性曲线的流量压力控制[J]. 测控技术,2015,34(12):54-57.
  - [ 7 ] 程帅,姜海博,黄进. 基于滑模观测器的单绕组多相无轴承电机无位置传感器控制[J]. 电工技术学报,2012,27(7):71-77.
  - [ 8 ] Tarchala G. Influence of the sign function approximation form on performance of the sliding-mode speed observer for induction motor drive[C]//2011 IEEE International Symposium on Industrial Electronics. IEEE, 2011.
  - [ 9 ] Fakham H, Djemai M, Busawon K. Design and practical implementation of a back-EMF sliding-mode observer for a brushless DC motor[J]. IET Electric Power Applications, 2008, 2(6):353-361.
  - [ 10 ] 王贞艳,张井岗,陈志梅. 神经网络滑模变结构控制研究综述[J]. 信息与控制,2005,34(4):451-455.
  - [ 11 ] Qiao Z W, Wang Y D, Shi T N, et al. New sliding-mode observer for position sensorless control of permanent-magnet synchronous motor[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(2):710-719.
  - [ 12 ] 莫远秋. 基于滑模观测器的高速永磁同步电机无传感器技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2015:26-28.
  - [ 13 ] Lin C, Guo H, Meng S, et al. Sensorless Control of PMSM Based on Modified Sliding Mode Observer[C]//2016 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC). IEEE, 2016.
  - [ 14 ] 孙耀程. 基于滑模观测器的 PMSM 无位置传感器驱动控制系统的研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2014:29-31.
  - [ 15 ] Ozturk S B, Alexander W C, Toliyat H A. Direct torque control of four-switch brushless DC motor with non-sinusoidal back EMF[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2010, 25(2):263-271.
- ~~~~~
- (上接第 42 页)
- [ 10 ] Iqbal R, Murad M A A, Mustapha A, et al. An experimental study of classification algorithms for crime prediction[J]. Journal of Science and Technology, 2013, 6:4219-4225.
  - [ 11 ] Alves L G A, Ribeiro H V, Lenzi E K, et al. Distance to the scaling law: A useful approach for unveiling relationships between crime and urban metrics[J]. PLOS ONE, 2013, 8(8):e69580.
  - [ 12 ] Ohyama T, Amemiya M. Applying crime prediction techniques to Japan: A comparison between risk terrain modeling and other methods[J]. European Journal on Criminal Policy and Research, 2018, 24(4):469-487.
  - [ 13 ] Zhang Y, Zhao J H, Ren L, et al. Space-time clustering of crime events and neighborhood characteristics in houston[J]. Criminal Justice Review, 2015(3):341-356.