

基于神经网络的 PMSM 自适应滑模控制

李鸿儒¹, 顾树生²

(1. 东北大学 教育部暨辽宁省流程工业综合自动化重点实验室, 辽宁 沈阳, 110004)

2. 东北大学 信息科学与工程学院, 辽宁 沈阳, 110004)

摘要: 结合滑模控制和神经网络各自的优点, 对永磁同步电机(PMSM)提出了一种基于神经网络的 PMSM 自适应滑模控制方案. 首先设计了带积分操作的滑模变结构位置控制器, 通过递归神经网络的在线学习来实时估计系统参数变化和外部负载扰动等不确定性的界限, 减小滑模控制器的控制量. 进而, 在滑模控制器中又引入饱和函数取代符号函数, 进一步减弱“抖振”现象. 理论分析和实验仿真对比研究的结果表明所提出方法具有优越的动态性能和鲁棒性.

关键词: 永磁同步电机; 滑模变结构控制; 神经网络; 抖振

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Neural-network-based adaptive sliding mode control for PMSM

LI Hong-ru¹, GU Shu-sheng²

(1. Key Laboratory of Process Industry Automation, Ministry of Education, Shenyang Liaoning 110004, China;

2. School of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang Liaoning 110004, China)

Abstract: With the combination of the merits of sliding-mode control and neural network, a neural-network-based adaptive sliding-mode control scheme for permanent magnet synchronous motor (PMSM) is proposed. First, a sliding-mode controller with an integral-operation switching surface is designed. Then a recurrent neural network is used to estimate the upper bound of uncertainties in real-time, which include parameter variations and external load disturbance, such that the control effort of the sliding-mode controller is reduced. Furthermore, in order to reduce the chattering phenomenon, the sign function in sliding-mode controller is replaced by the saturation function. Theoretical analysis and experiment simulation results show that the proposed strategy has high-performance dynamic characteristics and stronger robustness.

Key words: permanent magnet synchronous motor (PMSM); sliding-mode control; neural network; chattering

1 引言(Introduction)

永磁同步电机(PMSM)具有气隙磁密高、转矩脉动小、转矩/惯量比大、效率高等优点, 在中小容量的伺服系统中得到了广泛应用. 由于伺服系统运行情况比较复杂, PMSM 本身又是一个多变量、非线性、强耦合的系统, 一般的常规控制器, 容易受电机参数变化和负载扰动等不确定性的影响, 而且动态响应和抗扰能力不能很好地兼顾. 为了克服这些不足, 多种消除不确定性影响的控制策略已相继提出^[1~3], 然而, 这些策略基本上还是按着线性设计模型得到的, 鲁棒性难以得到保证.

10 多年来, 滑模控制由于对系统参数变化和外部扰动具有强壮的鲁棒性, 实现简单, 在交流传动系统中受到广泛重视, 并且取得了许多卓有成效的研究成果^[4~7]. 但限制滑模控制器应用的主要是“抖

振”问题, 如何减小“抖振”是其应用研究的焦点.

神经网络由于对非线性函数具有非凡的逼近能力, 作为一种新的控制策略已有了广泛的应用, 在交流传动领域也有了一定的应用^[6,7,9~11]. 神经网络和滑模控制结合, 利用各自的优点组成复合控制器^[6~8], 有广泛的应用前景.

本文提出了一种基于神经网络的自适应滑模控制策略, 设计了带积分操作的滑模变结构位置控制器, 通过神经网络来实时估计系统的不确定性界限, 从而减弱“抖振”现象. 实验仿真研究证明了所提出方法的有效性.

2 矢量控制的 PMSM(PMSM drive with vector control)

永磁同步电机的电磁转矩方程为

$$T_e = p_n [L_{md} I_{fd} i_q + (L_d - L_q) \cdot i_d i_q], \quad (1)$$

$$T_e = T_L = \bar{B}\omega + \bar{J}p\omega. \quad (2)$$

式中: i_d 和 i_q 分别为 d, q 轴定子电流; L_d 和 L_q 分别为定子绕组 d, q 轴电感; p 为微分符号; L_{md} 为定、转子间的 d 轴互感; I_{fd} 为永磁体的等效 d 轴励磁电流; p_n 为极对数; T_e 为电磁转矩; T_L 为负载转矩; $\bar{J}$ 为转动惯量; $\bar{B}$ 为阻尼系数; ω 为转子角速度.

永磁同步电机控制的基本原理是矢量控制, 采用 $i_d = 0$ 控制方法, 用 i_q^* 表示 i_q 的计算值, 有

$$T_e = (3p_n L_{md} I_{fd} / 2) \cdot i_q^* = K_t i_q^*. \quad (3)$$

定义状态变量如下:

$$x_1(t) = \theta^*(t) - \theta(t) \quad (\theta(t) \text{ 为转子位置角}), \quad (4)$$

$$x_2(t) = \omega(t) = \dot{\theta}(t) = -\dot{x}_1(t). \quad (5)$$

于是可构成 PMSM 控制系统的状态空间模型为

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 0 & -\frac{\bar{B}}{\bar{J}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{K_t}{\bar{J}} \end{bmatrix} i_q^*(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{\bar{J}} \end{bmatrix} T_L. \quad (6)$$

3 滑模位置控制器 (Sliding-mode position controller)

方程(6)可表示为

$$\dot{X}(t) = AX(t) + BU(t) + DT_L. \quad (7)$$

其中

$$A = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 0 & -\frac{\bar{B}}{\bar{J}} \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{K_t}{\bar{J}} \end{bmatrix},$$

$$D = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{\bar{J}} \end{bmatrix}, \quad U(t) = i_q^*(t).$$

考虑方程的不确定性, 有

$$\dot{X}(t) = (A + \Delta A)X(t) + (B + \Delta B)U(t) + (D + \Delta D)T_L. \quad (8)$$

式中 $\Delta A, \Delta B, \Delta D$ 表示相应的不确定项, 整理得

$$\dot{X}(t) = AX(t) + B(U(t) + E(t)). \quad (9)$$

式中 $E(t)$ 表示总的不确定性.

$$E(t) = B^+ \Delta A X(t) + B^+ \Delta B U(t) + B^+ (D + \Delta D) T_L. \quad (10)$$

式中 $B^+ = (B^T B)^{-1} B^T$ 是伪逆.

设计带积分作用的滑模平面如下:

$$S(t) = C[X(t) - \int_0^t (A + BK)X(\tau) d\tau] = 0. \quad (11)$$

其中 $C \in \mathbb{R}^{1 \times 2}$ 为正常数矩阵, K 是状态反馈增益矩阵.

系统方程(9)的状态轨迹达到滑模平面方程(11), 即 $S(t) = \dot{S}(t) = 0$ 时, 其等价动态方程为

$$\dot{X}(t) = (A + BK)X(t). \quad (12)$$

如果滑模开关变量 $S(t)$ 满足

$$\dot{S} = -K_S \text{sgn}(S(t)), \quad K_S > 0. \quad (13)$$

其中 $\text{sgn}(S(t)) = \begin{cases} 1, & S(t) \geq 0, \\ -1, & S(t) < 0 \end{cases}$ 为符号函数,

则滑模的存在性和可达性满足. 由式(11)和(13)有

$$C(\dot{X}(t) - (A + BK)X(t)) = CBU(t) + CB(E(t) - KX(t)) = -K_S \text{sgn}(S(t)). \quad (14)$$

假设不确定性项 $E(t)$ 为零, 则滑模控制律为

$$U(t) = KX(t) - (CB)^{-1} K_S \text{sgn}(S(t)) = KX(t) - K_f \text{sgn}(S(t)). \quad (15)$$

其中 $K_f \triangleq (CB)^{-1} K_S$, 设定为 $K_f \geq |E(t)| > 0$, 而 CB 为正值. 进一步验证滑模的存在性和可达性, 有

$$S(t)\dot{S}(t) = S(t) \cdot \{CX(t) - C(A + BK)X(t)\} \leq -CBK_f |S(t)| + CB|S(t)| |E(t)| = CB|S(t)| |K_f - |E(t)|| \leq 0. \quad (16)$$

显然由式(15)得到的位置控制器保证了滑模的存在性和可达性, 即

$$\lim_{s \rightarrow 0} S\dot{S} < 0. \quad (17)$$

4 神经网络滑模位置控制器 (Neural-network-based sliding-mode position controller)

为了减小抖振现象, 可以采用边界层法. 用以下饱和函数代替式(15)中的符号函数:

$$\text{sat}(S(t)) = \begin{cases} \frac{M}{\epsilon} \cdot S(t), & |S(t)| < \epsilon, \\ M \cdot \text{sgn}(S(t)), & |S(t)| \geq \epsilon. \end{cases} \quad (18)$$

式中 ϵ 为边界层厚度, 是一个很小的正值. 于是有

$$U(t) = KX(t) + K_f \text{sat}(S(t)). \quad (19)$$

然而, 控制增益 K_f 与不确定幅值密切相关, 通过连续调整 K_f 就可以减小抖振. 为此这里引用递归神经网络, 根据速度的变化和位置角的误差的变化来实现控制增益 K_f 的自适应调整, 以减弱抖振问题. 神经网络滑模控制器的结构如图1所示. 本文采用的神经网络为文献[12]提出的准对角递归神经网络(QDRNN)结构, 算法为文献[12]提出的并行递推预报误差算法. 准对角递归神经网络的输入为速度

$\omega(t)$ 和位置角误差 $e(t) = \theta^*(t) - \theta(t)$.

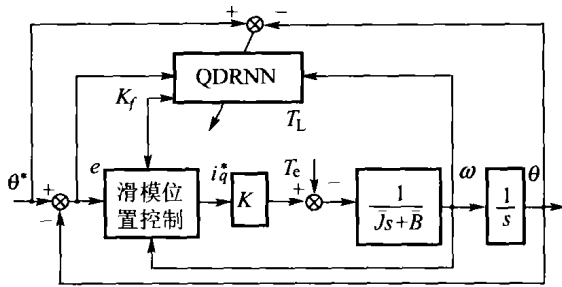


图1 PMSM神经网络滑模位置控制系统

Fig. 1 PMSM drive with neural-network-based sliding-mode position controller

5 实验仿真结果 (Experiment simulation results)

实验用PMSM参数见表1.

表1 PMSM的参数

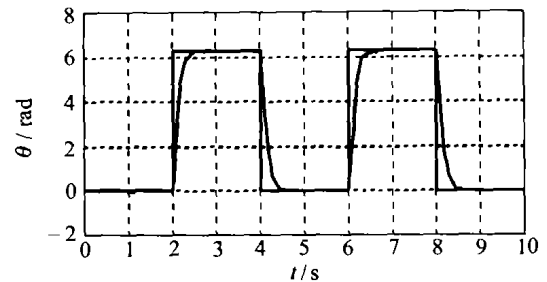
Table 1 Parameters of PMSM

PMSM 参数	数值	PMSM 参数	数值
额定功率 P_N/W	750	转动惯量 J/Nms^2	0.0176
额定转速 $\omega_N/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	1500	阻尼系数 $B/(\text{Nm} \cdot \text{rad} \cdot \text{s}^{-1})$	0.0022
额定电流 I_N/A	3	极对数 p_n	2

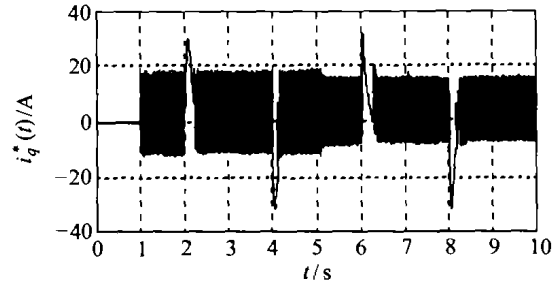
实验中位置给定为方波,周期4s,幅值 2π rad,开始外部负载转矩 $T_L = 0$,在1s时加入3Nm的负载转矩.在5s时,增大 J 大约5倍, B 不变.

QDRNN的结构为(2-7-1),先针对额定空载情况进行离线训练.对以下4种情况进行实验仿真研究:1)采用带开关控制律的一般滑模控制器;2)采用带平滑控制律的一般滑模控制器,取 $\epsilon = 0.1$, $M = 1$;3)采用带开关控制律的神经网络自适应滑模控制器;4)采用带平滑控制律的神经网络自适应滑模控制器,取 $\epsilon = 0.1$, $M = 1$.

各种方法的比较见图2~5.从控制的响应结果可以明显看出,各种控制器控制效果几乎没有差别,对参数变化和负载扰动都具有很强的自适应能力和很好的动态响应性能,滑模控制器的强壮的鲁棒性能是明显的.但是从相应的控制量也可以明显看出,不同方法的抖振情况有很大差别.带开关控制律的滑模控制器的抖振大,带平滑控制律的滑模控制器可以大大减小抖振现象,神经网络自适应滑模控制器能在一定程度上减小抖振,抖振的幅值比一般滑模控制器小,但不能消除抖振,带平滑控制律的神经网络自适应滑模位置控制器在参数或负载转矩变化时基本不变,效果最好,与理论分析一致.



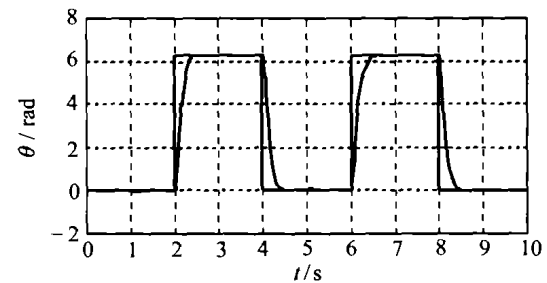
(a) 位置响应



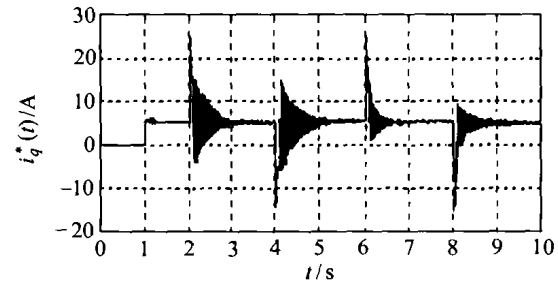
(b) 控制作用

图2 带开关控制律的一般滑模控制器

Fig. 2 Normal sliding model controller with switching control law



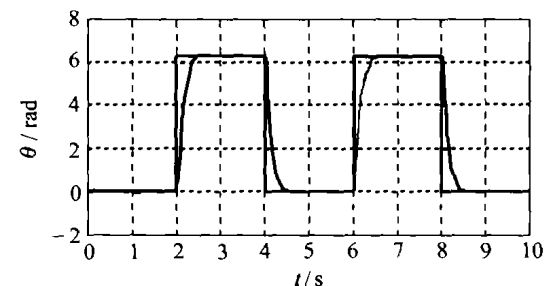
(a) 位置响应



(b) 控制作用

图3 带平滑控制律的一般滑模控制器

Fig. 3 Normal sliding model controller with smooth control law



(a) 位置响应

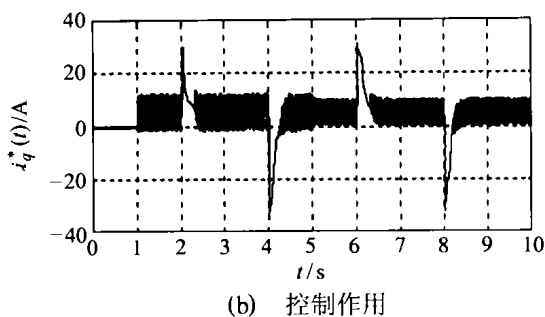


图4 带开关控制律的神经网络自适应滑模控制器
Fig. 4 Neural-network-based adaptive sliding model controller with switching control law

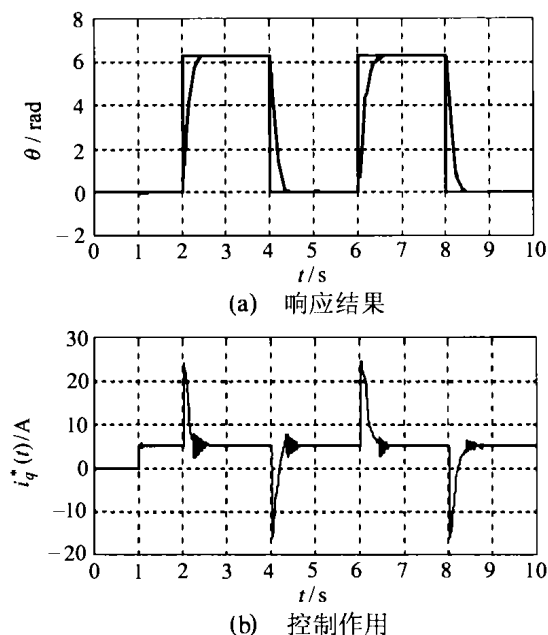


图5 带平滑控制律的神经网络自适应滑模控制器
Fig. 5 Neural-network-based adaptive sliding model controller with smooth control law

6 结论(Conclusions)

本文对 PMSM 系统的位置控制问题提出一种基于神经网络的自适应滑模控制策略. 通过神经网络的在线学习来实时估计系统的不确定性界限, 从而控制系统在滑动平面上的运动, 减弱“抖振”现象. 利用边界层法将控制量在开关点附近连续化, 可以进一步减弱“抖振”现象. 理论分析和实验仿真都证明了所提出控制方法的有效性.

参考文献(References):

[1] LIN F I. Real-time IP position controller design with torque feedfor-

ward control for PM synchronous motor [J]. *IEEE Trans on Industry Electron*, 1997, 44(3): 398 - 407.

- [2] 葛宝明, 蒋静坪. 永磁同步电动机传动系统的模型算法控制 [J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(10): 27 - 31.
(GE Baoming, JIANG Jingping. The model algorithm control for PMSM drives system [J]. *Proc of the CSEE*, 1999, 19(10): 27 - 31.)
- [3] 许强, 贾正春, 李朗如. 带负载转矩补偿的 PMSM 交流伺服系统自适应控制 [J]. 电工技术学报, 1997, 12(5): 1 - 4.
(XU Qiang, JIA Zhengchun, LI Langru. Adaptive controller of PMSM servo drives with load torque disturbance compensation [J]. *Trans of China Electrotechnical Society*, 1997, 12(5): 1 - 4.)
- [4] LIN F J, SHYU K K, LIN Y S. Variable structure adaptive control for PM synchronous servo motor drive [J]. *IEE Proceedings-Electric Power Application*, 1999, 146(1): 173 - 185.
- [5] LIN F J, CHIU S L. Adaptive fuzzy sliding-mode control for PM synchronous servo motor drives [J]. *IEE Proceedings-Control Theory and Application*, 1998, 145(1): 63 - 72.
- [6] LIN F J, WAI R J. Fuzzy neural network sliding-mode position controller for induction servo motor drive [J]. *IEE Proceedings-Electric Power Application*, 1999, 146(3): 297 - 308.
- [7] KARAKASOGLU A, SUNDARESHAN M K. A recurrent neural network-based adaptive variable structure model-following control of robotic manipulators [J]. *Automatica*, 1995, 31(10): 1495 - 1507.
- [8] FANG Y, CHOW T W, LI X D. Use of a recurrent neural network in discrete sliding-mode control [J]. *IEE Proc Control Theory and Application*, 1999, 146(1): 84 - 90.
- [9] BRDYS M A, KULAWSKI G J. Dynamic neural controllers for induction motor [J]. *IEEE Trans on Neural Networks*, 1999, 10(2): 340 - 355.
- [10] WISHART M T, HARLEY R G. Identification and control of Induction machines using artificial neural networks [J]. *IEEE Trans on Industry Application*, 1995, 31(3): 612 - 619.
- [11] RUBAAI A, KOTARU R. Neural net-based robust controller design for brushless DC motor drives [J]. *IEEE Trans on System, Man and Cybernetics*, 1999, 29(3): 460 - 474.
- [12] 李鸿儒. 基于神经网络的永磁同步电机控制策略的研究 [D]. 沈阳: 东北大学, 2001.
(LI Hongru. Study on control schemes of PMSM based on neural networks [D]. Shenyang: Northeastern University, 2001.)

作者简介:

李鸿儒 (1968—), 男, 东北大学信息科学与工程学院副教授, 研究领域为智能控制理论及其应用、复杂工业过程建模、控制与优化, E-mail: hongru_li@163.com;

顾树生 (1939—), 男, 东北大学信息科学与工程学院教授, 博士生导师, 研究领域为多变量系统、智能控制理论及其应用.