

# 永磁同步电动机转速自适应模糊 Backstepping 控制

方一鸣, 任少冲, 王志杰, 焦晓红

(燕山大学 工业计算机控制工程河北省重点实验室, 河北 秦皇岛 066004)

**摘要:**针对永磁同步电动机(PMSM)参数摄动和负载干扰情况下的转速跟踪控制系统,采用自适应算法估计负载扰动、粘性摩擦系数和转动惯量,利用自适应模糊系统逼近定子电阻和电枢电感等参数摄动造成的总的不确定性,并设计一种基于 Backstepping 的自适应模糊控制器。通过 Lyapunov 稳定性理论验证所设计系统的稳定性。对 PMSM 转速控制系统进行仿真,结果表明,与常规 PI 控制相比,该控制方法能够在参数摄动和负载干扰下更好地跟踪转速给定值,系统具有良好的动静态性能和很强的鲁棒性。

**关键词:**永磁同步电动机; 转速控制; 自适应算法; 自适应模糊系统; Backstepping

中图分类号: TP 273

文献标志码: A

文章编号: 1007-449X(2011)06-0097-06

## Adaptive fuzzy Backstepping control for speed of permanent magnet synchronous motor

FANG Yi-ming, REN Shao-chong, WANG Zhi-jie, JIAO Xiao-hong

(Key Lab of Industrial Computer Control Engineering of Hebei Province, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

**Abstract:** An adaptive fuzzy controller based on backstepping was designed for speed tracking control system of permanent magnet synchronous motor(PMSM) with parameter uncertainties and load disturbance. The adaptive algorithm was used to estimate the load torque, viscous friction coefficient and inertia. The adaptive fuzzy system was applied to approximate the total uncertainty caused by fluctuating of stator resistance and inductance. And the stability of system was also proved through the lyapunov stability theory. The simulation was done for speed control system of PMSM, and the simulation results show that this control method can more exactly track speed reference under parameter uncertainty and load disturbance compared with normal PI control. The system not only has good dynamic and static performance, but also strong robustness.

**Key words:** permanent magnet synchronous motors; speed control; adaptive algorithm; adaptive fuzzy system; Backstepping

## 0 引言

永磁同步电动机(permanent magnet synchronous

motor, PMSM)由于结构紧凑、体积小、重量轻、高功率密度、低转子损耗等优良特性被广泛应用到各种工业场合。然而,PMSM 控制系统是一个多变量、强

收稿日期: 2010-06-28

基金项目: 国家自然科学基金(60774018, 61074099)

作者简介: 方一鸣(1965—),男,博士,教授,博士生导师,研究方向为自适应鲁棒控制理论与应用、冶金自动化等;

任少冲(1984—),男,硕士研究生,研究方向为电机控制、自适应控制与应用;

王志杰(1986—),男,硕士研究生,研究方向为多模型切换控制、自适应控制与应用;

焦晓红(1966—),女,博士,教授,博士生导师,研究方向为非线性系统控制理论及应用。

耦合的非线性系统,同时存在参数摄动、负载扰动等不确定性。PMSM 的性能对于外部负载扰动和参数变化比较敏感,传统的线性控制方案已经不能满足人们对高控制精确度的要求。因此,如何克服扰动和参数变化带来的不利影响一直是 PMSM 控制研究的重点。

文献[1]研究了 PMSM 的速度自校正控制;文献[2]把 Backstepping 控制用于 PMSM 的速度控制中,但是没有考虑参数变化和扰动;文献[3-6]将滑模控制用于 PMSM 控制中,文献[3]研究了 PMSM 转速高阶终端滑模控制方法,削弱了控制量的抖振,文献[4]设计了基于神经网络的 PMSM 位置自适应滑模控制,文献[5]结合高阶滑模的抖振削弱机制,设计了一种基于负载转矩估计的 PMSM 位置矢量控制系统的无抖振滑模控制,文献[6]提出 PMSM 位置神经网络自适应滑模控制,采用 RBF 神经网络自适应调节滑模控制器的切换控制增益;文献[7]提出了基于滑模控制和模糊神经网络控制的复合智能 PMSM 速度控制;文献[8-10]把模糊控制用于 PMSM 控制中,文献[9]提出 PMSM 自适应模糊控制,所给出的控制器设计是建立在电机方程中含有角速度与电流的乘积项基础上,这使得控制器的设计难度大大增加,文献[10]通过 Backstepping 设计了 PMSM 的速度自适应模糊跟踪控制,但没有考虑定子电阻和电枢电感的不确定性。

为了解决 PMSM 系统在参数摄动和负载干扰下的转速跟踪控制问题,本文在文献[10]的基础上,针对 PMSM 参数摄动和负载干扰情况下的速度跟踪系统,提出了一种基于 Backstepping 的自适应模糊控制算法,利用自适应算法和模糊逻辑系统的万能逼近作用<sup>[11]</sup>来处理系统的不确定性和参数摄动问题,并进行了控制器的设计。通过 Lyapunov 稳定性理论进行了稳定性分析。最后对 PMSM 转速控制系统进行了 Matlab 仿真,并与和 PI 控制方法下的仿真进行了比较,进一步验证了所提方法的有效性。

## 1 PMSM 数学模型及问题的提出

假设磁路不饱和,空间磁场呈正弦分布,不计磁滞和涡流损耗影响,交流 PMSM 在两相静止坐标系(d-q)下的数学模型为

$$\left. \begin{aligned} \dot{i}_d &= \frac{(-R_s i_d + L p \omega i_q + u_d)}{L}, \\ \dot{i}_q &= \frac{(-L p \omega i_d - R_s i_q - p \psi_f \omega + u_q)}{L}, \\ \dot{\omega} &= \frac{(1.5 p \psi_f i_q - B \omega - T_L)}{J}. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: $u_d, u_q$  为定子电压 d、q 轴分量; $i_d, i_q$  为定子电流 d、q 轴分量; $L$  为定子绕组等效电感; $\psi_f$  为转子永磁体产生的磁链; $R_s$  为定子电阻; $p$  为极对数; $J$  为转子转动惯量; $B$  为粘性摩擦系数; $T_L$  为负载转矩; $\omega$  为转子的角速度。

在实际运行过程中,PMSM 系统参数  $T_L, B, J, R_s$  和  $L$  均存在不确定性。下面针对  $T_L, B$  和  $J$  的不确定性,采用自适应算法加以估计;针对  $R_s$  和  $L$  等参数摄动所造成的总不确定性,采用自适应模糊系统进行逼近,并设计了一种基于 Backstepping 的自适应模糊控制器。PMSM 转速控制系统的控制目标是转速跟踪误差趋于零,即

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (\omega_r^* - \omega) = 0.$$

式中  $\omega_r^*$  为速度的参考值。

## 2 PMSM 转速自适应模糊 Backstepping 控制器设计

Backstepping 的设计思想是以 Lyapunov 稳定为原则,在每一步的设计过程中,选择相应的 Lyapunov 函数和虚拟控制函数,直到得到最终的控制量。Backstepping 最大优点是对于非线性系统的控制设计可保证系统稳定。

定义  $e = \omega_r^* - \omega$  为转速跟踪误差,选择  $e$  为状态变量,构成子系统,则转速误差系统方程为

$$\dot{e} = \frac{1}{J} \left( B \omega + T_L + J \omega_r^* - \frac{3p\psi_f}{2} i_q \right). \quad (2)$$

为了使转速跟踪误差趋于零,假定  $i_q$  为虚拟控制量,对于式(2)系统构造如下 Lyapunov 函数,即

$$V_0 = \frac{J}{2} e^2. \quad (3)$$

对其求导可得

$$\dot{V}_0 = J e \dot{e} = e \left( B \omega + T_L + J \omega_r^* - \frac{3p\psi_f}{2} i_q \right). \quad (4)$$

为使式(4)满足  $\dot{V}_0 \leq 0$ ,可选择虚拟控制量为

$$i_q = \frac{2}{3p\psi_f} (T_L + B \omega + J \omega_r^* + k e). \quad (5)$$

但是参数  $B, T_L$  和  $J$  都存在不确定性,这些物理量是随着负载的不同而变化的,针对这些参数的不确定性,需要采用其估计值,故设计虚拟控制量为

$$i_q = \frac{2}{3p\psi_f} (\hat{T}_L + \hat{B} \omega + \hat{J} \omega_r^* + k e). \quad (6)$$

式中: $\hat{T}_L$  为  $T_L$  的估计值; $\hat{B}$  为  $B$  的估计值; $\hat{J}$  为  $J$  的估计值; $k$  为正常数。自适应律为

$$\dot{\hat{T}}_L = r_1 e, \dot{\hat{B}} = r_2 e \omega, \dot{\hat{J}} = r_3 e \omega_r^*. \quad (7)$$

式中:  $r_1, r_2, r_3$  为正常数。

取 Lyapunov 函数, 则

$$V_1 = V_0 + \frac{1}{2r_1} \tilde{T}_L^2 + \frac{1}{2r_2} \tilde{B}^2 + \frac{1}{2r_3} \tilde{J}^2. \quad (8)$$

式中:  $\tilde{T}_L = T_L - \hat{T}_L$ ,  $\tilde{B} = B - \hat{B}$ ,  $\tilde{J} = J - \hat{J}$  为估计误差。

对其求导, 并把式(6), 式(7)代入可得

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 &= \dot{V}_0 - \frac{1}{r_1} \tilde{T}_L \dot{\hat{T}}_L - \frac{1}{r_2} \tilde{B} \dot{\hat{B}} - \frac{1}{r_3} \tilde{J} \dot{\hat{J}} = \\ &e \left( T_L + B\omega + J\omega_r^* - \frac{3p\psi_f}{2} i_q \right) - \frac{1}{r_1} \tilde{T}_L \dot{\hat{T}}_L - \\ &\frac{1}{r_2} \tilde{B} \dot{\hat{B}} - \frac{1}{r_3} \tilde{J} \dot{\hat{J}} = -ke^2 + e \tilde{T}_L + e\omega \tilde{B} + \\ &e\omega_r^* \tilde{J} - \frac{1}{r_1} \tilde{T}_L \dot{\hat{T}}_L - \frac{1}{r_2} \tilde{B} \dot{\hat{B}} - \frac{1}{r_3} \tilde{J} \dot{\hat{J}} = \\ &-ke^2 \leq 0. \end{aligned} \quad (9)$$

因此利用控制式(6), 即可达到转速全局渐近跟踪的目的。

为了实现 PMSM 的完全解耦和速度跟踪, 可以选择电流环实际给定

$$i_q^* = \frac{2}{3p\psi_f} (\hat{T}_L + \hat{B}\omega + \hat{J}\omega_r^* + ke), \quad (10)$$

$$i_d^* = 0. \quad (11)$$

为了实现电流跟踪, 选择电流跟踪误差为

$$e_q = i_q^* - i_q, \quad (12)$$

$$e_d = i_d^* - i_d = -i_d. \quad (13)$$

分别考虑定子电阻  $R_s$  和等效电感  $L$  的参数摄动, 并对式(12)、式(13)求得

$$\dot{e}_q = p\omega i_d + \frac{\bar{R}_s}{L} i_q + \frac{p\psi_f}{L} \omega - \frac{u_q}{L} + D_q, \quad (14)$$

$$\dot{e}_d = -p\omega i_q + \frac{\bar{R}_s}{L} i_d - \frac{u_d}{L} + D_d. \quad (15)$$

式中:  $\bar{R}_s, \bar{L}$  为其标称值;  $D_q, D_d$  为定子电阻和电感的参数摄动引起的不确定项。

$$D_q = \dot{i}_q^* + \left( \frac{R_s}{L} i_q - \frac{\bar{R}_s}{L} i_q \right) + \left( \frac{p\psi_f}{L} \omega - \frac{p\psi_f}{L} \omega \right) - \left( \frac{u_q}{L} - \frac{u_q}{L} \right), \quad (16)$$

$$D_d = \left( \frac{R_s}{L} i_d - \frac{\bar{R}_s}{L} i_d \right) - \left( \frac{u_d}{L} - \frac{u_d}{L} \right). \quad (17)$$

式中:  $R_s, L$  为定子电阻和电感的实际值。

含有一元模糊化、乘积推理、加权平均反模糊化及隶属函数为高斯函数的模糊系统可以表达为

$$y(x) = \boldsymbol{\beta}^T \boldsymbol{\xi}(x). \quad (18)$$

式中:  $\boldsymbol{\beta} = (y^1, y^2, \dots, y^k)^T$ ,  $\boldsymbol{\xi}(x) = (\xi_1(x), \xi_2(x),$

$$\dots, \xi_k(x))^T, \xi_j(x) = \frac{\sum_{i=1}^n \mu_{A_i}(x_i)}{\sum_{j=1}^k \left( \prod_{i=1}^n \mu_{A_i}(x_i) \right)}, \mu_{A_i}(x_i) \text{ 是}$$

高斯隶属函数,  $j = 1, 2, \dots, k, i = 1, 2, \dots, n$ 。

根据模糊系统万能逼近理论<sup>[11]</sup>, 存在最优模糊

系统  $u_q(\mathbf{x}_q/\boldsymbol{\beta}_q^*), u_d(\mathbf{x}_d/\boldsymbol{\beta}_d^*)$  使得

$$D_q = u_q(\mathbf{x}_q/\boldsymbol{\beta}_q^*) + \varepsilon_q = \boldsymbol{\beta}_q^{*T} \boldsymbol{\xi}_q(\mathbf{x}_q) + \varepsilon_q, \quad (19)$$

$$D_d = u_d(\mathbf{x}_d/\boldsymbol{\beta}_d^*) + \varepsilon_d = \boldsymbol{\beta}_d^{*T} \boldsymbol{\xi}_d(\mathbf{x}_d) + \varepsilon_d. \quad (20)$$

式中,  $\varepsilon_q, \varepsilon_d$  为逼近误差, 并且  $|\varepsilon_q| < \rho_q, |\varepsilon_d| < \rho_d$ ,  $\rho_q, \rho_d$  为逼近误差的未知上界。

分别利用模糊系统  $u_q(\mathbf{x}_q/\hat{\boldsymbol{\beta}}_q), u_d(\mathbf{x}_d/\hat{\boldsymbol{\beta}}_d)$  逼近  $u_q(\mathbf{x}_q/\boldsymbol{\beta}_q^*)$  和  $u_d(\mathbf{x}_d/\boldsymbol{\beta}_d^*)$ 。

$$u_q(\mathbf{x}_q/\hat{\boldsymbol{\beta}}_q) = \hat{\boldsymbol{\beta}}_q^T \boldsymbol{\xi}_q(\mathbf{x}_q), \quad (21)$$

$$u_d(\mathbf{x}_d/\hat{\boldsymbol{\beta}}_d) = \hat{\boldsymbol{\beta}}_d^T \boldsymbol{\xi}_d(\mathbf{x}_d). \quad (22)$$

式中:  $\hat{\boldsymbol{\beta}}_q, \hat{\boldsymbol{\beta}}_d$  分别为  $\boldsymbol{\beta}_q^*, \boldsymbol{\beta}_d^*$  的估值。

又  $\rho_q, \rho_d$  未知, 所以对  $\rho_q, \rho_d$  进行自适应估计, 为了补偿逼近误差和增强系统的鲁棒性<sup>[12-13]</sup>, 由此设计非线性辅助控制项为

$$u_{qn} = \hat{\rho}_q \operatorname{sgn}(e_q) + k_q e_q, \quad (23)$$

$$u_{dn} = \hat{\rho}_d \operatorname{sgn}(e_d) + k_d e_d. \quad (24)$$

式中:  $\hat{\rho}_q, \hat{\rho}_d$  分别是  $\rho_q, \rho_d$  的估值,  $k_q, k_d$  为正常数。

控制律设计为

$$u_q = \bar{L} p \omega i_d + \bar{R}_s i_q + p\psi_f \omega + \bar{L} (\hat{\boldsymbol{\beta}}_q^T \boldsymbol{\xi}_q(\mathbf{x}_q) + u_{qn}), \quad (25)$$

$$u_d = -\bar{L} p \omega i_q + \bar{R}_s i_d + \bar{L} (\hat{\boldsymbol{\beta}}_d^T \boldsymbol{\xi}_d(\mathbf{x}_d) + u_{dn}). \quad (26)$$

自适应律为

$$\dot{\hat{\boldsymbol{\beta}}}_q = \eta_1 e_q \boldsymbol{\xi}_q(\mathbf{x}_q), \dot{\hat{\rho}}_q = \eta_2 |e_q|, \quad (27)$$

$$\dot{\hat{\boldsymbol{\beta}}}_d = \eta_3 e_d \boldsymbol{\xi}_d(\mathbf{x}_d), \dot{\hat{\rho}}_d = \eta_4 |e_d|. \quad (28)$$

式中:  $\eta_1, \eta_2, \eta_3, \eta_4$  为正常数。

定义估计误差:  $\tilde{\boldsymbol{\beta}}_q = \boldsymbol{\beta}_q^* - \hat{\boldsymbol{\beta}}_q, \tilde{\rho}_q = \rho_q - \hat{\rho}_q, \tilde{\boldsymbol{\beta}}_d =$

$$\boldsymbol{\beta}_d^* - \hat{\boldsymbol{\beta}}_d, \tilde{\rho}_d = \rho_d - \hat{\rho}_d.$$

**定理** 对于 PMSM 系统(1), 控制律采用式(6)、式(25)、式(26), 自适应律采用式(7)、式(27)、式(28), 可以使得 PMSM 系统达到转速的全局渐近跟踪, 并且系统全局渐近稳定。

**证明** 选取 Lyapunov 函数

$$V = V_1 + \frac{1}{2} e_q^2 + \frac{1}{2} e_d^2 + \frac{1}{2\eta_1} \tilde{\boldsymbol{\beta}}_q^T \tilde{\boldsymbol{\beta}}_q + \frac{1}{2\eta_2} \tilde{\rho}_q^2 +$$

$$\frac{1}{2\eta_3} \tilde{\boldsymbol{\beta}}_d^T \tilde{\boldsymbol{\beta}}_d + \frac{1}{2\eta_4} \tilde{\rho}_d^2. \quad (29)$$

对其求导并把控制律和自适应律代入可得

$$\begin{aligned} \dot{V} = & \dot{V}_1 + e_q \left( p\omega i_d + \frac{\bar{R}_s}{L} i_q + \frac{p\psi_f}{L} \omega - \frac{u_q}{L} + D_q \right) + \\ & e_d \left( -p\omega i_q + \frac{\bar{R}_s}{L} i_d - \frac{u_d}{L} + D_d \right) - \frac{1}{\eta_1} \hat{\beta}_q^T \hat{\beta}_q - \\ & \frac{1}{\eta_2} \tilde{\rho}_q \dot{\hat{\rho}}_q - \frac{1}{\eta_3} \tilde{\beta}_d^T \dot{\hat{\beta}}_d - \frac{1}{\eta_4} \tilde{\rho}_d \dot{\hat{\rho}}_d \leq -ke^2 + \\ & e_q [D_q - \beta_q^{*T} \xi_q(x_q) + \beta_q^{*T} \xi_q(x_q) - \\ & \hat{\beta}_q^T \xi_q(x_q) - \hat{\rho}_q \operatorname{sgn}(e_q) - k_q e_q] + e_d [D_d - \\ & \beta_d^{*T} \xi_d(x_d) + \beta_d^{*T} \xi_d(x_d) - \hat{\beta}_d^T \xi_d(x_d) - \\ & \hat{\rho}_d \operatorname{sgn}(e_d) - k_d e_d] - \frac{1}{\eta_1} \tilde{\beta}_q^T \dot{\hat{\beta}}_q - \frac{1}{\eta_2} \tilde{\rho}_q \dot{\hat{\rho}}_q - \\ & \frac{1}{\eta_3} \tilde{\beta}_d^T \dot{\hat{\beta}}_d - \frac{1}{\eta_4} \tilde{\rho}_d \dot{\hat{\rho}}_d = -ke^2 + e_q \tilde{\beta}_q^T \xi_q(x_q) + \\ & \tilde{\rho}_q |e_q| + e_d \tilde{\beta}_d^T \xi_d(x_d) + \tilde{\rho}_d |e_d| - \frac{1}{\eta_1} \tilde{\beta}_q^T \dot{\hat{\beta}}_q - \\ & \frac{1}{\eta_2} \tilde{\rho}_q \dot{\hat{\rho}}_q - \frac{1}{\eta_3} \tilde{\beta}_d^T \dot{\hat{\beta}}_d - \frac{1}{\eta_4} \tilde{\rho}_d \dot{\hat{\rho}}_d - k_q e_q^2 - k_d e_d^2 = \\ & -ke^2 - k_q e_q^2 - k_d e_d^2 \leq 0. \end{aligned} \quad (30)$$

即系统全局渐近稳定。

又  $\dot{V} \leq -ke^2 - k_q e_q^2 - k_d e_d^2 \leq -ke^2$ , 因此可得

$$\int ke^2 dt \leq V(0) - V(\infty). \quad (31)$$

可见,  $V$  是非增的, 且由于  $V(0)$  有界, 故  $V$  也有界, 因此根据 Barbalat 引理, 可得:  $\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = 0$ , 即系统达到速度的全局渐近跟踪。

### 3 仿真研究

本节分别采用 PI 控制方法和所提算法对 PMSM 矢量控制系统利用 Matlab/SIMULINK 进行仿真。PMSM 速度系统的控制如图 1 所示。

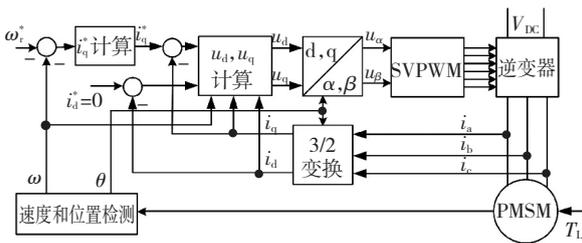


图 1 系统控制结构

Fig. 1 System control structure

PMSM 的标称参数取为:  $R_s = 2.875 \Omega$ ;  $L = 0.008 \text{ H}$ ;  $J = 0.0008 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ ;  $B = 0.002 \text{ N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}$ ;  $\psi_f = 0.175 \text{ Wb}$ ;  $p = 4$ 。所设计的控制器的参数取为  $r_1 = 0.25$ ,  $r_2 = 0.0001$ ,  $r_3 = 0.2$ ,  $k = 2.5$ ,  $\eta_1 = 250$ ;  $\eta_2 = 0.5$ ,  $k_q = 15$ ,  $\eta_3 = 200$ ;  $\eta_4 = 0.2$ ,  $k_d = 15$ 。

模糊逻辑系统的输入分别采用  $e_q$  和  $\dot{e}_q$ ,  $e_d$  和

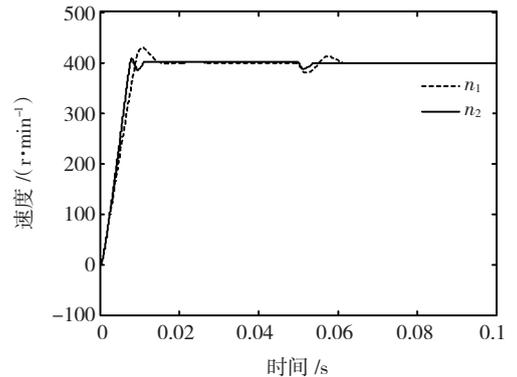
$\dot{e}_d$ , 并采用如下的隶属函数, 即

$$\mu_{A_i}(x_i) = \exp[-0.5(x_i + c_j)^2].$$

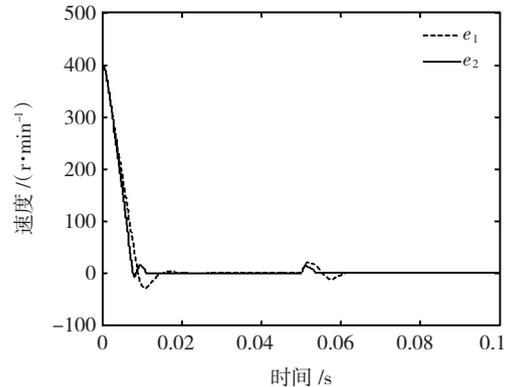
式中:  $i = 1, 2, j = 1, 2, \dots, 7$ ,  $[c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6, c_7] = \left[ \frac{\pi}{6}, \frac{\pi}{12}, \frac{\pi}{24}, 0, -\frac{\pi}{24}, -\frac{\pi}{12}, -\frac{\pi}{6} \right]$ 。

PI 控制器的速度环参数为:  $k_{p1} = 0.3$ ;  $\tau_{i1} = 100$ ; 交轴电流环参数为  $k_{p2} = 30$ ,  $\tau_{i2} = 2000$ ; 直轴电流环参数为  $k_{p3} = 100$ ;  $\tau_{i3} = 2000$ 。

仿真效果图如图 2 ~ 图 4 所示, 其中, 图 2、图 3 中  $n_1, e_1$  为 PI 控制系统响应曲线,  $n_2, e_2$  为本文算法的系统响应曲线。



(a) 速度跟踪曲线



(b) 跟踪误差曲线

图 2 负载干扰下速度响应及跟踪误差的比较

Fig. 2 Comparison of speed response and tracking error with load disturbance

图 2 为负载转矩  $T_L$  在 0.05s 从  $1 \text{ N} \cdot \text{m}$  突变到  $5 \text{ N} \cdot \text{m}$  时速度响应曲线及跟踪误差曲线。

图 3 为转动惯量由  $J$  变为  $2J$ , 阻尼系数由  $B$  变为  $4B$ , 定子电阻由  $R_s$  变为  $1.5R_s$ , 电枢电感由  $L$  变为  $1.5L$ ,  $T_L$  在 0.05s 从  $1 \text{ N} \cdot \text{m}$  突变到  $5 \text{ N} \cdot \text{m}$  时的系统响应曲线。

从图 2 和图 3 容易看出, 所提算法比 PI 控制具有更好的动静态性能, 对参数变化和负载干扰具有更好的干扰抑制性能。

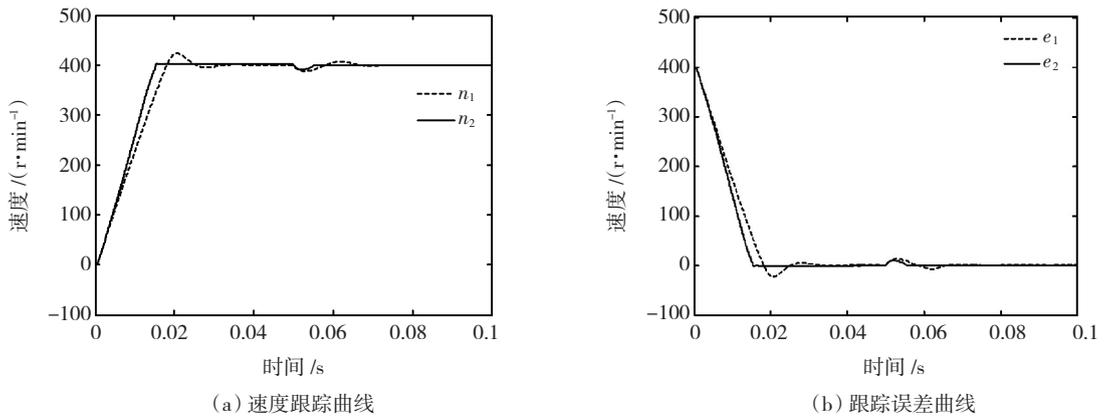
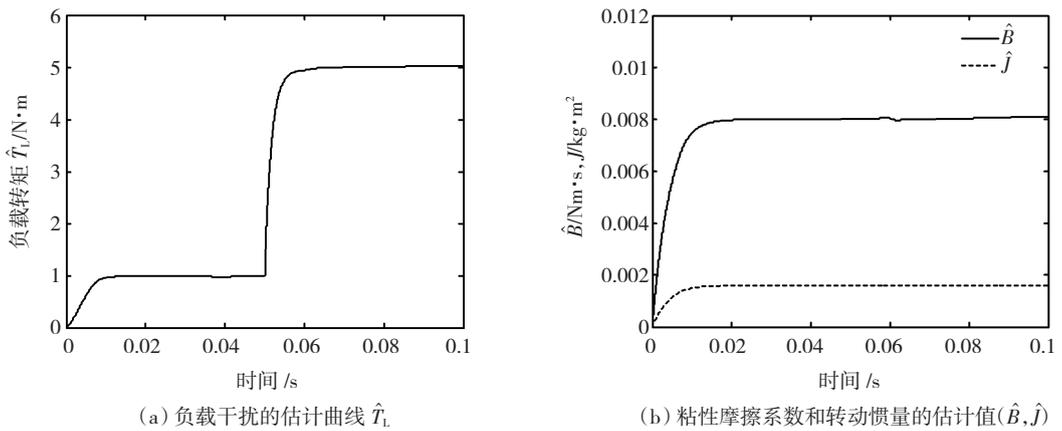


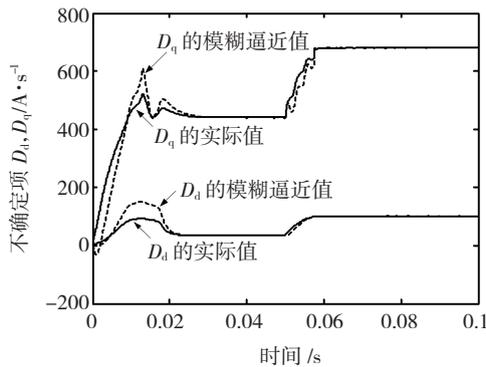
图 3 系统参数变化和负载扰动下速度响应及跟踪误差的比较

Fig. 3 Comparison of speed response and tracking error with system parameters change and load disturbance



(a) 负载扰动的估计曲线  $\hat{T}_L$

(b) 粘性摩擦系数和转动惯量的估计值  $(\hat{B}, \hat{J})$



(c) 不确定项  $D_d, D_q$  的模糊逻辑逼近效果

图 4 自适应估计和模糊逻辑逼近曲线

Fig. 4 The curves of adaptive estimate and fuzzy logic

图 4 为图 3 情况下的自适应估计和模糊逻辑逼近效果图。由图 3(a)、图 3(b) 可见, 负载扰动、转动惯量和粘性摩擦系数都得到较好的估计; 图 4(c) 是不确定项  $D_d, D_q$  的模糊逻辑逼近效果图, 可以看出, 模糊逻辑系统对  $D_d, D_q$  具有较好的逼近。

## 4 结 论

针对 PMSM 参数摄动和负载干扰情况下转速

跟踪控制系统, 通过对负载扰动、粘性摩擦系数和转动惯量进行自适应估计, 并利用自适应模糊来处理定子电阻和电枢电感的参数摄动引起的不确定性, 设计了一种自适应模糊 Backstepping 控制器, 并用 Lyapunov 稳定性理论证明了所设计系统的稳定性。通过对 PMSM 控制系统仿真, 并与 PI 控制比较, 结果表明, 所提算法使 PMSM 系统具有更好的动静态性能, 对系统参数变化和负载干扰也具有较好的鲁

棒性。

### 参考文献:

- [1] MOHAMED Y A R. Adaptive self-tuning speed control for permanent-magnet synchronous motor drive with dead time [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2006, 21(4): 855-862.
- [2] 王家军, 赵光宙, 齐冬莲. 反推式控制在永磁同步电机速度跟踪控制中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(8): 95-98.
- WANG Jiajun, ZHAO Guangzhou, QI Donglian. Speed tracking control of permanent magnet synchronous motor with backstepping [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(8): 95-98.
- [3] 郑剑飞, 冯勇, 陆启良. 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 Jianfei, FENG Yong, LU Qiliang. High-order terminal sliding-mode control for permanent magnet synchronous motor [J]. Control Theory & Applications, 2009, 26(6): 697-700.
- [4] 李鸿儒, 顾树生. 基于神经网络的PMSM自适应滑模控制[J]. 控制理论与应用, 2005, 22(3): 461-464.
- LI Hongru, GU Shusheng. Neural-network-based adaptive sliding mode control for PMSM [J]. Control Theory & Applications, 2005, 22(3): 461-464.
- [5] 王艳敏, 冯勇, 陆启良. 永磁同步电机的无抖振滑模控制系统设计[J]. 电机与控制学报, 2008, 12(5): 514-519.
- WANG Yanmin, FENG Yong, LU Qiliang. Design of free-chattering sliding mode control systems for permanent magnet synchronous motor [J]. Electric Machines and Control, 2008, 12(5): 514-519.
- [6] 刘治钢, 王军政, 赵江波. 永磁同步电机神经网络自适应滑模控制器设计[J]. 电机与控制学报, 2009, 13(2): 290-295.
- LIU Zhigang, WANG Junzheng, ZHAO Jiangbo. Neural network adaptive sliding mode control for permanent magnet synchronous motor [J]. Electric Machines and Control, 2009, 13(2): 290-295.
- [7] Cetin Elmas, Oguz Ustun. A hybrid controller for speed control of a permanent magnet synchronous motor drive [J]. Control Engineering Practice, 2008, 6: 260-270.
- [8] CHENG K, TZOU Y. Fuzzy optimization techniques applied to the design of a digital PMSM servo drive [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2004, 19(4): 1085-1099.
- [9] 张细政, 王耀南, 袁小芳. 永磁同步电机自适应模糊滑模变结构控制[J]. 中国机械工程, 2010, 21(2): 206-211.
- ZHANG Xizheng, WANG Yaonan, YUAN Xiaofan. Adaptive fuzzy sliding-mode control for PM synchronous motor [J]. China Mechanical Engineering, 2010, 21(2): 206-211.
- [10] YU Jinpeng, GAO Junwei. Adaptive fuzzy tracking control for a permanent magnet synchronous motor via back-stepping approach [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2010: 1-13.
- [11] LX Wang, JM Mendel. Fuzzy basis functions, universal approximation, and orthogonal least squares learning [J]. IEEE Transactions on Neural Networks, 1992, 3(5): 807-814.
- [12] 年漪蓓, 高国琴. 一类不确定非线性系统的自适应模糊滑模控制[J]. 电机与控制学报, 2005, 9(5): 512-514.
- NIAN Yibei, GAO Guoqin. Adaptive fuzzy sliding mode control for a class of uncertain nonlinear systems [J]. Electric Machines and Control, 2005, 9(5): 512-514.
- [13] 朴营国, 张俊星, 张化光. 基于模糊逻辑的一类非线性系统直接自适应控制[J]. 控制理论与应用, 2001, 18(1): 45-50.
- PIAO Yingguo, ZHANG Junxing, ZHANG Huaguang. Direct adaptive control of a class of nonlinear system based on Fuzzy Logic [J]. Control Theory & Applications, 2001, 18(1): 45-50.

(编辑: 刘素菊)