

文章编号: 1001-0920(2010)05-0686-05

自适应模糊滑模软切换的PMSM无速度传感器鲁棒无源控制

侯利民^{1,2}, 张化光¹, 刘秀翀¹, 褚恩辉¹, 王强¹

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

摘要: 针对永磁同步电机(PMSM)转速调节和估计问题, 提出一种无速度传感器的PMSM调速系统. 利用双曲正切函数代替符号函数, 设计了自适应模糊滑模软切换控制器, 实现了软切换连续控制, 削弱了抖动现象. 通过设计鲁棒无源控制器, 得到了旋转坐标系下的 u_d 和 u_q . 建立了自适应滑模观测器, 并给出了速度辨识律, 观测器的增益通过求解线性矩阵不等式得到. 仿真结果表明了该控制策略与观测器配合的有效性, 且控制系统具有良好的动、稳态性能.

关键词: 永磁同步电机; 自适应模糊滑模软切换; 鲁棒无源控制; 自适应滑模观测器

中图分类号: TM341

文献标识码: A

Adaptive fuzzy sliding mode soft switch of speed sensorless for PMSM based on robust passivity-based control

HOU Li-min^{1,2}, ZHANG Hua-guang¹, LIU Xiu-chong¹, CHU En-hui¹, WANG Qiang¹

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

Abstract: In view of the speed regulation and estimation problem of permanent magnet synchronous motor(PMSM), a speed modulation system based on speed sensorless for PMSM is proposed. The adaptive fuzzy sliding mode soft switch controller is designed by using the replacement of $\text{sgn}(x)$ function by $\tanh(x)$ function, which realizes the soft switch control and reduces chatting. A robust passivity-based control algorithm is constructed to obtain the u_d and u_q based on the passivity-based control principle. An adaptive sliding mode observer is established and a speed identification law is proposed, and the gain matrix of the observer is obtained by solving linear matrix inequalities. The simulation results show that the proposed strategy is effective, and the system has a satisfactory performance.

Key words: PMSM; Adaptive fuzzy sliding mode soft switch; Robust passivity-based control; Adaptive sliding mode observer

1 引言

永磁同步电机(PMSM)具有结构紧凑、高功率密度和高转矩惯性比等优点, 在高性能控制场合占据很重要的地位. 其控制系统通常采用矢量控制和直接转矩控制, 在设计控制器时, 由于PI控制器的抗干扰和参数摄动的鲁棒性不够理想, 难以得到满意的动态性能. 近年来, 一些先进的控制理论, 如自适应控制、滑模变结构控制^[1,2]和无源控制^[3-5]等方法, 已被广泛应用于这一领域, 取得了一定成果. 针对滑模控制中的抖动问题, 文献[6,7]引入一个自适应模糊控制器来逼近滑模控制中的等效控制部分和不确定

参数, 减小了跟踪误差, 解决了参数不确定性, 增强了系统的鲁棒性, 削弱了控制信号中的高频抖动. 利用无源控制方法设计控制器, 可使设计与稳定性分析更加容易. 文献[8]基于能量成形方法和PCH系统原理, 研究了PMSM的建模与速度控制问题, 所得到的控制器简单、计算量小、便于实现. 文献[9]在无源控制的基础上, 结合鲁棒控制, 提出了开关磁阻平面电机控制器, 提高了控制品质和鲁棒性.

PMSM调速系统往往需要在电机轴上安装速度检测装置, 这势必增加系统成本, 降低系统的可靠性. 因此, 无速度传感器估计策略的研究已成为交流

收稿日期: 2009-07-09; 修回日期: 2009-09-03.

基金项目: 国家863计划项目(2006AA04Z183); 辽宁工程技术大学优秀青年科学研究基金项目(09-199).

作者简介: 侯利民(1976-), 男, 河北承德人, 讲师, 博士生, 从事电力电子与电力传动的研究; 张化光(1959-), 男, 吉林省吉林市人, 教授, 博士生导师, 从事模糊控制、自适应控制、电力系统自动化等研究.

传动的一个热点. 目前, 无速度传感器控制研究可按速度范围估算方法分类, 其中一些估算方法适用于电机静止和低速运行, 如高频信号注入法^[10]; 而另一些估算方法主要适用于中高速运行, 如基于基本电磁关系的估算方法, 基于观测器的估算方法^[11]和模型参考自适应法^[12-15]等.

本文在表面式PMSM的矢量控制系统的基础框架上, 采用非线性控制方法, 提出一种新的无速度传感器的调速系统. 设计了基于滑模控制原理的自适应模糊控制方法来估计集成不确定边界. 利用双曲正切函数代替符号函数, 实现了软切换连续控制, 削弱了抖动现象, 生成了期望的 q 轴电流. 基于无源控制原理, 设计了鲁棒无源控制器, 得到了需要的 u_d 和 u_q . 从速度估计出发, 设计了一种自适应滑模观测器进行速度和转子位置的估计. 仿真结果表明, 该控制策略与观测器配合是可行而有效的, 系统具有良好的动、稳态性能.

2 PBC系统控制器的设计

2.1 建立SPMSM的PBC模型

表面式永磁同步电机在 d - q 旋转坐标系中的数学模型为

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} d\psi_d/dt \\ d\psi_q/dt \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{r_s}{L} & \omega_r \\ -\omega_r & -\frac{r_s}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \psi_d \\ \psi_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_d + \frac{\psi_f}{L} r_s \\ u_q \end{bmatrix}, \\ \frac{J}{P_n} \frac{d\omega_r}{dt} = P_n(\psi_d i_q - \psi_q i_d) - \frac{B}{P_n} \omega_r - T_L. \end{cases} \quad (1)$$

式中: ψ_d 和 ψ_q 为定子磁链 d - q 轴分量; u_d , u_q 和 i_d , i_q 分别为定子电压、电流 d - q 轴分量; r_s 和 L 为定子电阻、电感; ω_r 为转子电角速度; ψ_f 为转子永磁磁链; P_n 为极对数; B 和 J 为阻力摩擦系数和转动惯量; T_L 为负载转矩. 令

$$\begin{aligned} Dx &= \begin{bmatrix} \psi_d - \psi_f & \psi_q & \frac{J}{P_n^2} \omega_r \end{bmatrix}^T = D [i_d \ i_q \ \omega_r]^T, \\ u &= [u_d \ u_q]^T, \ y = [i_d \ i_q]^T, \\ D &= \text{diag} \left\{ L \ L \ \frac{J}{P_n^2} \right\}. \end{aligned} \quad (2)$$

由此可写出系统的状态空间表达式为

$$\begin{cases} D\dot{x} = \begin{bmatrix} -r_s & 0 & \psi_q \\ 0 & -r_s & -\psi_d \\ -\psi_q & \psi_d & -B/P_n^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ \omega_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -1/P_n \end{bmatrix} T_L, \\ y = [i_d \ i_q]^T. \end{cases} \quad (3)$$

利用式(2)和(3), 可由式(1)的SPMSM数学模

型推导出PBC系统模型如下:

$$\begin{cases} D\dot{x} = [J(x) - R(x)]x + g(x)u + \zeta, \\ y = g^T(x)x. \end{cases} \quad (4)$$

比较式(3)和(4), 有

$$\begin{aligned} J(x) &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & \psi_q \\ 0 & 0 & -\psi_d \\ -\psi_q & \psi_d & -B/P_n^2 \end{bmatrix}, \quad g(x) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \\ R(x) &= \begin{bmatrix} r_s & 0 & 0 \\ 0 & r_s & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \zeta = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -1/P_n \end{bmatrix} T_L, \end{aligned}$$

$$x = [i_d \ i_q \ \omega_r]^T, \quad u = [u_d \ u_q]^T.$$

式中: $J(x)$ 为反对称矩阵, $J(x) = -J^T(x)$, 它反映了系统内部的互联结构; $R(x)$ 为半正定对称矩阵, 它反映了端口上的附加阻性结构.

2.2 鲁棒无源控制器^[9]设计

定义状态误差向量 $E = x - x^*$, 其中 x^* 为系统的期望向量. 将 E 代入式(4), 得到如下状态误差模型:

$$\begin{aligned} D\dot{E} - [J(x) - R(x)]E &= \\ -D\dot{x}^* + [J(x) - R(x)]x^* + g(x)u + \zeta. \end{aligned} \quad (5)$$

取误差能量函数

$$H_E = \frac{1}{2} E^T D E, \quad (6)$$

则

$$\dot{H}_E = -E^T R E + E^T \varphi, \quad (7)$$

式中 $\varphi = -D\dot{x}^* + [J(x) - R(x)]x^* + g(x)u + \zeta$.

为使系统达到满意的动态性能要求, 快速收敛到期望点, 需注入阻尼以加速系统的能量耗散. 令 $\varphi = -R_a E$, 则式(7)可变为

$$\dot{H}_E = -E^T (R + R_a) E, \quad (8)$$

式中 $R_a = \text{diag}\{R_{a1}, R_{a2}, R_{a3}\}$ 为正定对角矩阵, 从而使误差以指数渐近收敛到零.

当系统有未知扰动时, 误差状态方程可表示为

$$\begin{aligned} D\dot{E} - [J(x) - R(x)]E &= \\ -D\dot{x}^* + [J(x) - R(x)]x^* + g(x)u + \zeta + \Delta\zeta. \end{aligned} \quad (9)$$

对 H_E 沿误差系统轨迹(9)求时间导数, 有

$$\dot{H}_E = -E^T R E + E^T \varphi + E^T \Delta\xi. \quad (10)$$

同理, 为抑制未知扰动引起的误差, 设计 $\varphi = -R_a E + \chi$, 则下式成立:

$$\dot{H}_E = -E^T (R + R_a) E + E^T (\chi + \Delta\xi) E. \quad (11)$$

合理选择 χ , 只要保证 $E^T (\chi + \Delta\xi) E \leq 0$, 则 $\dot{H}_E < 0$. 误差则以指数渐近收敛到零. 利用 $\varphi = -R_a E + \chi$, 可求出鲁棒无源控制器输出为

$$\begin{cases} u_d = -\psi_q \omega_r^* - r_{a1} i_d + \chi_1, \\ u_q = (L + r_s) i_q^* - r_{a2} (i_q - i_q^*) + \psi_d \omega_r^* + \chi_2. \end{cases} \quad (12)$$

3 速度控制器设计

3.1 滑模软切换控制器

PMSM 在电机参数变化和不确定性条件下的机械运动方程为

$$\dot{\omega}_r + (a + \Delta a)\omega_r + (d - \Delta d) = (b + \Delta b)i_q. \quad (13)$$

式中: $a = B/J$; $d = (P_n/J)T_L$; $b = (P_n^2/J)\psi_f$; Δa , Δd 和 Δb 代表电机参数的摄动值.

定义速度跟踪误差

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

式中: $\hat{\omega}_r(t)$ 为估计转速, $\omega_r^*(t)$ 为参考速度. 由此可得动态方程

$$\dot{e}(t) = -ae(t) + w(t) + f(t). \quad (14)$$

式中: $w(t) = bi_q - a\omega_r^*(t) - d - \dot{\omega}_r^*(t)$, $f(t) = -\Delta a\hat{\omega}_r(t) - \Delta d + \Delta bi_q$.

选择以速度跟踪误差 e 为自变量的积分型滑动模面

$$s = e + k \int_0^t e(\tau) d\tau. \quad (15)$$

根据式 (15), 得

$$\dot{s} = \dot{e} + ke = -ae(t) + w(t) + f(t) + ke(t). \quad (16)$$

令 $\dot{s} = 0$, $f(t) = 0$, 可得滑模等效控制

$$u_{eq} = 1/b[(a-k)e(t) + a\omega_r^*(t) + d + \dot{\omega}_r^*(t)]. \quad (17)$$

式中: u_{eq} 可确保系统的状态保持在滑动平面上, 当系统参数摄动或受到外部干扰时, 系统状态将偏离滑模面. 因此, 为使系统状态保持在滑模面上, 本文设计了切换补偿控制项 u_{bc} . 通常情况下取 $u_{bc} = k \operatorname{sgn}(s)$. 而本文采用软切换控制^[17], 即将符号函数的切换补偿控制变为采用双曲正切函数的切换控制, 可明显地改善抖振. 软切换控制器设计如下:

$$u_{bc} = -h \tanh(s), \quad (18)$$

则控制器的输出为

$$u = i_q^* = u_{eq} + u_{bc}. \quad (19)$$

稳定性证明. 定义 Lyapunov 函数为 $v = \frac{1}{2}s^2$, 则

$$\begin{aligned} \dot{v} &= s\dot{s} = \\ & s[-ae(t) + w(t) + f(t) + ke(t)] = \\ & s[-bh \tanh(s) + f(t)] = \\ & -bh|s| + f(t)s \leq -|s|(bh - |f(t)|). \end{aligned} \quad (20)$$

若 $\dot{v} < 0$, 则 $bh > |f(t)|$, 系统稳定.

3.2 自适应模糊滑模软切换^[13]速度控制器

式 (14) 中的集成不确定的上确界难以在实际应用中获得, 因此本文利用模糊滑模控制器, 使用模糊推理方法来估计 h .

将模糊控制器的输入量 s , \dot{s} 和输出量 h 进行归

一模糊化, 分别记为 \tilde{s} , $\dot{\tilde{s}}$ 和 \tilde{h} , 其论域规范化为 $[-1, 1]$ 和 $[0, 1]$. 取输入量 \tilde{s} , $\dot{\tilde{s}}$ 和输出量 \tilde{h} 的模糊语言值为 $\{N(\text{负}), Z(\text{零}), P(\text{正})\}$ 和 $\{Z(\text{零}), PS(\text{正小}), PM(\text{正中}), PB(\text{正大})\}$. 设计输入输出隶属度函数均为高斯型隶属函数. 采用 Mamdani 模糊推理, 设计模糊控制规则如表 1 所示.

表 1 模糊控制规则表

\tilde{h}	\tilde{s}		
	N	Z	P
N	PB	PS	PS
$\dot{\tilde{s}}$	Z	PM	Z
	P	PS	PB

模糊输出 h 使用重心法进行反模糊化计算, 即

$$h = \frac{\sum_{i=1}^N p_i \mu_i(\tilde{s}) \mu_i(\dot{\tilde{s}})}{\sum_{i=1}^N \mu_i(\tilde{s}) \mu_i(\dot{\tilde{s}})} = p^T w(s). \quad (21)$$

式中

$$\begin{aligned} w(s) &= [w_1(s), w_2(s), \dots, w_n(s)]^T, \\ w_i(s) &= \frac{\mu_i(\tilde{s}) \mu_i(\dot{\tilde{s}})}{\sum_{i=1}^N \mu_i(\tilde{s}) \mu_i(\dot{\tilde{s}})}, \quad p = [p_1, p_2, \dots, p_n]^T. \end{aligned}$$

设 h 的一个最优值为 h^* , 以满足滑模存在条件, 且可获得最小的控制作用 u_{bc}^* . 然而, 实际中的 h^* 是很难提前获取的, 因此可通过一个简单的自适应律来调节参数 h^* .

定理 1 对于系统 (13), 选取滑模面为式 (15), 设计自适应模糊滑模控制律为

$$u = 1/b[(a-k)e(t) + a\omega_r^*(t) + d + \dot{\omega}_r^*(t) - h \tanh(s)], \quad (22)$$

并采用自适应律 $\dot{p} = \beta b|s|w$, 则系统渐近稳定, 跟踪误差将以指数收敛到零.

证明 假设为取得最小控制, 存在一个特定的 \hat{h} , \hat{h} 满足滑模条件和 $\varepsilon = \hat{h} - h^*$, ε 取小正数. 因此, \hat{h} 能写成如下形式:

$$\hat{h} = \hat{p}^T w, \quad (23)$$

式中 \hat{p}^T 是取得滑模控制的最小控制力的最优矢量. 定义参数误差矢量为

$$\tilde{p} = p - \hat{p}. \quad (24)$$

构造 Lyapunov 函数 $v = \frac{1}{2}s^2 + \frac{1}{2\beta}\tilde{p}^T\tilde{p}$. 则

$$\begin{aligned} \dot{v} &= s\dot{s} + \frac{1}{\beta}\tilde{p}^T\dot{\tilde{p}} = \\ & s[-bh \tanh(s) + f(t)] + \frac{1}{\beta}\tilde{p}^T\dot{\tilde{p}} \leq \\ & -|s|(bh - |f(t)|) + \frac{1}{\beta}\tilde{p}^T\dot{\tilde{p}} = \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & -b|s|\left(h^* + \varepsilon - \frac{1}{b}|f(t)|\right) - b|s|(h - \hat{h}) + \frac{1}{\beta}\tilde{p}^T\dot{p} = \\
 & -b|s|\left(h^* + \varepsilon - \frac{1}{b}|f(t)|\right) - b|s|\tilde{p}^T w + \frac{1}{\beta}\tilde{p}^T\dot{p} = \\
 & -b|s|\left(h^* + \varepsilon - \frac{1}{b}|f(t)|\right) + \frac{1}{\beta}\tilde{p}^T(\dot{p} - \beta b|s|w). \quad (25)
 \end{aligned}$$

由于 h^* 是对于滑模存在条件的最优值, 自适应律选为 $\dot{p} = \beta b|s|w$, 则上式变成 $\dot{v} = -|s|(b\hat{h} - |f(t)|) < 0$. 因此, 系统状态将到达滑模面, 并沿滑模面运动, 从而

$$s = e + k \int_0^t e(\tau) d\tau = 0.$$

这表明系统的跟踪误差将以指数收敛到零. □

4 自适应滑模观测器设计

在两相旋转坐标系下, 表面式永磁同步电机的数学模型可转化为

$$\dot{x} = Ax + Bu + C\omega_r, \quad y = Dx. \quad (26)$$

式中

$$\begin{aligned}
 x &= i_T = [i_d \quad i_q]^T, \quad u = u_T = [u_d \quad u_q]^T, \\
 A &= \begin{bmatrix} -r_s/L & \omega_r \\ -\omega_r & -r_s/L \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 1/L & 0 \\ 0 & 1/L \end{bmatrix}, \\
 C &= \begin{bmatrix} 0 \\ -\psi_f/L \end{bmatrix}, \quad D = I.
 \end{aligned}$$

根据上述状态方程和输出方程, 构建 PMSM 滑模自适应全状态观测器方程如下:

$$\frac{d}{dt}\hat{i}_T = \hat{A}\hat{i}_T + Bu_T + C\hat{\omega}_r - G(\hat{y} - y). \quad (27)$$

设计切换函数为

$$s = [s_1 \quad s_2]^T = e_T = i_T - \hat{i}_T = 0. \quad (28)$$

式中: \hat{x} 为观测器估计的系统状态, G 为观测器稳定所确定的增益矩阵.

用系统的状态方程(26)减去观测方程(27), 可得偏差系统的动态方程

$$\begin{aligned}
 \dot{e} &= \dot{s} = \\
 & (Ai_T - \hat{A}\hat{i}_T) + C(\omega_r - \hat{\omega}_r) + G(\hat{y} - y). \quad (29)
 \end{aligned}$$

为研究速度自适应观测器^[15]的稳定性, 采用 Lyapunov 理论推导自适应方案, 定义 Lyapunov 函数

$$v = \frac{1}{2}s^T P s + \frac{1}{2}(\omega_r - \hat{\omega}_r)^2. \quad (30)$$

为得到速度辨识律, 假设转子速度在一个估计周期中是常数, 将 V 对时间求导, 得

$$\begin{aligned}
 \dot{v} &= \\
 & \frac{1}{2}[(A - \hat{A})i_T + C(\omega_r - \hat{\omega}_r)]PS + \\
 & \frac{1}{2}S^T P [(A - \hat{A})\hat{i}_T + C(\omega_r - \hat{\omega}_r)] + \frac{1}{2}s^T (A - \\
 & - G)^T P s + \frac{1}{2}S^T P (A - G)S - \Delta\omega_r \hat{\omega}_r. \quad (31)
 \end{aligned}$$

根据 Lyapunov 稳定性理论, \dot{v} 必须保证状态观测器渐近稳定, 使系统观测值收敛到实际值, 可得如

下条件成立:

$$\begin{aligned}
 \Delta\omega_r \hat{\omega}_r &= \\
 & \frac{1}{2}[(A - \hat{A})i_T + C(\omega_r - \hat{\omega}_r)]PS + \\
 & \frac{1}{2}S^T P [(A - \hat{A})\hat{i}_T + C(\omega_r - \hat{\omega}_r)], \quad (32a)
 \end{aligned}$$

$$(A - G)^T P + P(A - G) < 0. \quad (32b)$$

在式(27)渐近稳定的情况下, 可从式(32a)中得到速度自适应律

$$\begin{aligned}
 \dot{\hat{\omega}}_r &= \frac{1}{2} \left[\hat{i}_q \quad -\hat{i}_d - \frac{\psi_f}{L} \right] PS + \\
 & \frac{1}{2} S^T P \left[\hat{i}_q \quad -\hat{i}_d - \frac{\psi_f}{L} \right]^T. \quad (33)
 \end{aligned}$$

对式(33)两边求积分, 采用 PI 控制器, 可得如下估计转速的表达式:

$$\begin{aligned}
 \hat{\omega}_r &= \left(K_P + \frac{K_I}{s} \right) \left\{ \left[\hat{i}_q \quad -\hat{i}_d - \frac{\psi_f}{L} \right] P s + \right. \\
 & \left. s^T P \left[\hat{i}_q \quad -\hat{i}_d - \frac{\psi_f}{L} \right]^T \right\}. \quad (34)
 \end{aligned}$$

由线性矩阵不等式描述的式(32b), 具体求解可借助于 Matlab 中的 LMI 工具箱, 针对不同的转速求出观测器的增益矩阵 G 和 P .

5 仿真研究

为了验证上述系统的速度调节和估计策略的可行性, 下面对表面式 PMSM 的 PBC 无源控制系统进行仿真研究. 仿真实验电机参数如下:

$$r_s = 4.675 \Omega, \quad \psi_f = 0.1848 \text{ Wb},$$

$$L_d = L_q = 0.0014 \text{ H},$$

$$J = 0.0001051 \text{ kg} \cdot \text{m}^2,$$

$$B = 4.047 \times 10^{-5} \text{ N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}, \quad P_n = 2.$$

PMSM 控制系统原理如图 1 所示, 仿真结果如图 2~图 5 所示.

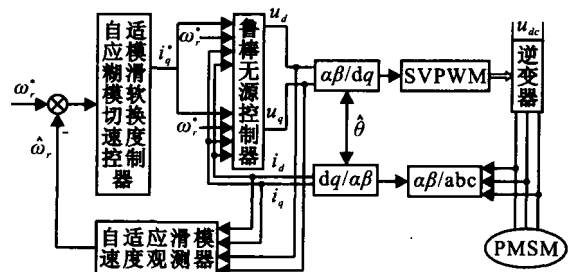


图 1 PMSM 控制系统原理框图

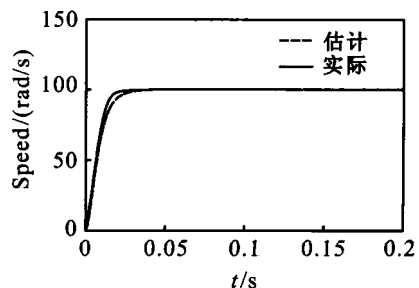


图 2 空载时速度实际/估计曲线

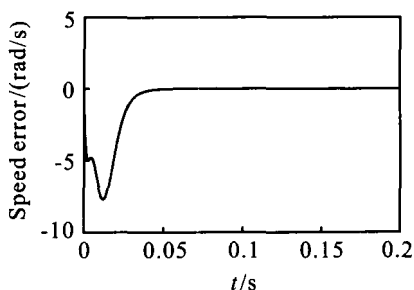


图3 速度误差曲线

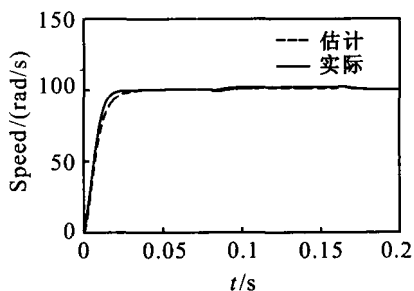


图4 实际/估计转子速度曲线

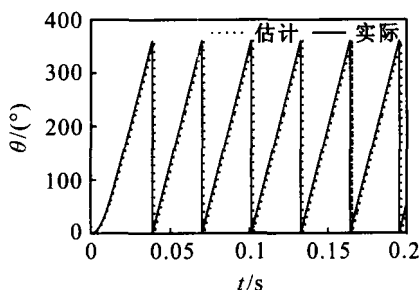


图5 转子位置实际/估计曲线

图2是给定转速为100 rad/s,空载时转速的实际/估计曲线;图3为对应的误差曲线。

为了测试负载转矩扰动和参数变化对系统的影响,给定转速100 rad/s,起始给定负载 $2\text{ N}\cdot\text{m}$,在0.08 s突加负载 $4\text{ N}\cdot\text{m}$,在0.16 s时突然卸掉负载,电阻变化2倍,转动惯量增加2倍,电机的实际/估计转子速度如图4所示。采用该速度调节,与估计策略得到的实际/估计转子速度吻合,扰动出现和消失的瞬间转速有波动,消失后转速又恢复到给定值,鲁棒能力较强。参数变化时速度启动稍慢,但速度仍然比较平滑,且跟踪性能比较好。

采用该速度估计方法,在变负载情况下的转子位置曲线如图5所示。从图5可以看出,估计的转子位置能与实际位置较好地吻合。

6 结论

本文设计了自适应模糊滑模软切换控制器,以取代速度PI调节器,得到期望的 q 轴电流。基于无源控制原理,设计了鲁棒无源控制器,得到了旋转坐标系下的 u_d 和 u_q ,从而建立了一种新的PMSM调速系统。

采用一种自适应滑模观测器法进行速度和转子位置的估计,构成了表面式PMSM无速度传感器的鲁棒无源控制系统。仿真结果表明,该控制策略与观测器配合是可行而有效的,系统具有较好的鲁棒性和良好的动、稳态性能。

参考文献(References)

- [1] 赵德宗,张承进,郝兰英.一种无速度传感器感应电机鲁棒滑模控制策略[J].中国电机工程学报,2006,26(22):122-127.
(Zhao D Z, Zhang C J, Hao L Y. A robust sliding-mode control strategy of a speed sensorless induction machine[J]. Proc of the CSEE, 2006, 26(22): 122-127.)
- [2] 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.)
- [3] Ortega R, Van Der Schaft A J, Maschke B, et al. Interconnection and damping assignment passivity-based control of port-controlled Hamiltonian systems[J]. Automatica, 2002, 38(4): 585-596.
- [4] Petrovic V, Ortega R, Stankovic A M. Interconnection and damping assignment approach to control of PM synchronous motors[J]. IEEE Trans on Control Systems Technology, 2001, 9(6): 811-820.
- [5] De Angelo C, Bossio G, Garcia G O, et al. Speed control of PMSMs with interconnection and damping assignment or feedback linearization comments about their performance[C]. IEEE ISIE. Montreal, 2006: 2182-2187.
- [6] 刘云峰,缪栋.电液伺服系统的自适应模糊滑模控制研究[J].中国电机工程学报,2006,26(14):140-144.
(Liu Y F, Miao D. Research on adaptive fuzzy sliding mode control for electro-hydraulic servo system[J]. Proc of the CSEE, 2006, 26(14): 140-144.)
- [7] 李继超,管萍,刘小河.间接自适应模糊滑模控制在电弧炉中的应用[J].系统仿真学报,2009,21(2):542-546.
(Li J C, Guan P, Liu X H. Application of indirect adaptive fuzzy sliding mode control in arc furnace[J]. J of System Simulation, 2009, 21(2): 542-546.)
- [8] 于海生,赵克友,郭雷,等.基于端口受控哈密顿方法的PMSM最大转矩/电流控制[J].中国电机工程学报,2006,26(8):82-87.
(Yu H S, Zhao K Y, Guo L, et al. Maximum torque per ampere control of PMSM based on pore-controlled Hamiltonian theory[J]. Proc of the CSEE, 2006, 26(8): 82-87.)

(下转第694页)

网络参数为 $p = 0.6$, $I_0' = 0.35$, $\beta = 0.0015$. 网络的初始值为 $u(0, 0) = [0.365, 0.042]$, $z(0, 0) = [0.065, 0.065]$.

图3为网络(5)在参数取以上值时神经元的输出 $y(t)$ 随时间 t 的演化图.

由图3可知, 神经元1的输出 $y_1(t)$ 经过短暂的分支后稳定在0.0898处, 神经元2的输出 $y_2(t)$ 趋向于0.7126. 因此, 网络的输出最终将到达函数的全局最小点(0.0898, 0.7126). 由此验证了该网络的有效性.

4 结论

本文提出了一种具有非线性自反馈的细胞神经网络, 该网络显示出了丰富的动力学特性. 由仿真发现, 该网络具有暂态混沌动力学的行为, 并且混沌动态持续时间的长短取决于自反馈项的初值和衰减因子 β 的大小. $z(0)$ 越大, 混沌持续的时间越长; β 越大, 混沌动态消失得越快. 具有自反馈的细胞神经网络结构是局域连接型的, 因而它非常适合于超大规模集成电路的实现. 最后通过2个应用例子验证了该网络在解决函数优化问题时的有效性.

参考文献(References)

- [1] Chua L O, Yang L. Cellular neural networks: Theory and application[J]. IEEE Trans on Circuits System, 1988, 35(10): 1257-1290.
- [2] Shih C W. Complete stability for a class of cellular neural networks[J]. Int J of Bifurcation and Chaos, 2001, 11(1): 169-177.
- [3] Zhang Y, Yu J. Global stability on a class of cellular neural networks[J]. Science in China (Series E), 2001, 44(1): 1-11.
- [4] Grassi G, Sciascio E D, Vecchio P. New objectoriented segmentation algorithm based on the CNN paradigm[J]. IEEE Trans on Circuits System-II: Express Briefs, 2006, 53(4): 259-263.
- [5] Wang S, Wang M. A new detection algorithm based on fuzzy cellular neural networks for white blood cell detection[J]. IEEE Trans Information Technology in Biomedicine, 2006, 10(1): 5-10.
- [6] 张强, 许进. 自相似过程的几种模型[J]. 通信学报, 2001, 22(2): 106-112.
(Zhang Q, Xu J. Several models on self-similar processes[J]. J of Communications, 2001, 22(2): 106-112.)
- [7] Wang L P, Liu W. Cellular neural network with transient chaos[J]. IEEE Trans on Circuits and Systems-II: Express Briefs, 2007, 54(5): 440-444.
- [8] Chen L N, Aihara K. Chaotic simulated annealing by a neural network model with transient chaos[J]. Neural Network, 1995, 8(6): 915-930.
- [9] Wang L P, Smith K. On chaotic simulated annealing[J]. IEEE Trans on Neural Network, 1998, 9(4): 716-718.
- [10] Wang L P. Oscillatory and chaotic dynamics in neural networks under varying operating conditions[J]. IEEE Trans on Neural Network, 1996, 7(6): 1382-1388.
- [11] Wang J H, Yi W B. Nonpositive hopfield neural network with self-feedback and its application to maximum clique problems[J]. Neural Information Processing - Letters and Reviews, 2006, 10(10): 243-248.
- [9] 杨金明, 汪小平, 赵世伟. 开关磁阻平面电机的鲁棒控制[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(30): 104-108.
(Yang J M, Wang X P, Zhao S W. Robust control of planar switched reluctance motors[J]. Proc of the CSEE, 2008, 28(30): 104-108.)
- [10] Jeong Y. Initial rotor position estimation of an interior permanent magnet synchronous machine using carrier-frequency injection methods[J]. IEEE Trans on Industry Applications, 2005, 41(1): 38-45.
- [11] Vasilios C Ilioudis, Nikolaos I Margaritis. PMSM sensorless speed estimation based on sliding mode observers[C]. PESC'2008 Record 39th Annual IEEE. Rhodes, 2008: 2838-2843.
- [12] Yoon-Seok Han, Jung-Soo Choi, Young-Seok Kim. Sensorless PMSM drive with a sliding mode control based adaptive speed and stator resistance estimator[J]. IEEE Trans on Magnetics, 2000, 36(5): 3588-3591.
- [13] 张化光. 模糊自适应控制理论及其应用[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2002: 232-240.
(Zhang H G. Fuzzy adaptive control theory and application[M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics, and Astronautics Press, 2002: 232-240.)
- [14] Zhang H G, Quan Y B. Modeling, identification, and control of a class of nonlinear systems[J]. IEEE Trans on Fuzzy Systems, 2001, 9(2): 349-354.
- [15] 黄志武, 桂卫华, 年晓红. 基于自适应观测器的无速度传感器感应电机控制[J]. 控制理论与应用, 2007, 24(6): 913-918.
(Huang Z W, Gui W H, Nian X H. Adaptive observer-based sensorless speed control of induction motors [J]. Control Theory & Applications, 2007, 24(6): 913-918.)

(上接第690页)