

基于小波神经网络自适应反推的 永磁同步电机位置伺服控制

刘 达^{1,2}, 李木国²

(1. 大连理工大学 电子信息与电气工程学部, 辽宁 大连 116023;

2. 大连理工大学 海岸与近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116023)

摘要: 提出一种基于小波神经网络(WNN)的自适应反推控制策略, 该策略通过对系统中的非线性不确定性进行估计和补偿, 可以自适应调节反推控制器的输出, 以获得良好的位置跟踪效果和对各类不确定性的鲁棒作用。设计中通过李雅普诺夫稳定性原理保证了整个系统的稳定性并给出了证明。经理论分析和通过与PI控制器及传统反推法的对比仿真的结果证明了该方法的有效性。

关键词: 同步电机; 神经网络; 反推控制; 鲁棒性; 位置伺服系统

中图分类号: TM 273.2

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2013.02.22

0 引言

永磁同步电机具有高效率、高功率密度、低噪声、低损耗、小体积等诸多优良特性, 因而广泛应用于各类工业场合特别是运动位置伺服领域。伺服控制要求系统具有良好的动静态性能, 即快速的动态响应和一定的稳态精度。但是永磁同步电机驱动系统自身的多变量、强耦合等非线性特性使以往的一些控制算法, 如传统的PID结合矢量控制的控制策略难以满足要求^[1-2], 因此寻求更加有效的控制方法成为目前永磁同步电机控制领域研究的热点。

控制理论的发展特别是非线性技术的引入, 为电机控制带来新的解决方法和思路, 状态反馈线性化、滑模变结构、反推控制等非线性方法有效地实现了永磁同步电机的非线性解耦, 同时保证了电机的精确伺服控制^[3-6]。其中的反推控制通过设计虚拟控制函数将控制对象简化为多个低阶子系统, 最终通过选择合适的李雅普诺夫函数得到实际的控制律, 通过与自适应技术结合, 适合具有不确定性的非线性系统控制^[7], 特别是不满足匹配条件的一类系统。其优势在于得到的控制律和不确定参数自适应律可以保证受控变量全局渐近稳定, 从而使整个系统具有良好的鲁棒性。但是反推控制在设计中也存在一些缺点, 例如递归矩阵引起的复杂度增加、估计项引起的奇点问题、过参数化及需要知道全部或部分模

型的精确信息等^[8]。

文献[6]利用反推控制跟踪电机速度和电流, 保证了系统稳定, 但是没有考虑到负载转矩和模型参数不确定性的影响; 文献[9-12]应用自适应反推控制设计了系统控制律和不确定参数自适应律, 但只考虑到部分参数的不确定; 文献[13-15]采用各类状态观测器与反推法结合估计系统不确定参数, 但没有考虑到观测器本身的估计误差。随着智能控制理论的发展, 其已逐步渗透和深入到各类控制技术中并显示出无可比拟的优越性, 文献[16-18]在运用反推法过程中利用模糊、神经网络技术逼近复杂的非线性项, 简化了控制结构。永磁同步电机位置伺服控制系统不但希望电机的运动轨迹实现渐近跟踪, 而且要求电流也能渐近稳定, 同时对于系统的外部负载转矩扰动、内部参数摄动及非模型不确定性有良好的抑制能力, 从而保证整个系统的鲁棒性。基于此, 本文采用反推法设计保证系统位置、电流的全局渐近稳定, 利用小波神经网络逼近设计中存在的不确定项, 结合自适应技术给出非模型不确定性的参数自适应律, 最终得到控制律并给出稳定性证明。相比于以往的反推控制法, 文中提出的算法结构简单, 考虑了所有参数不确定性, 不需要知道模型的精确信息, 并且克服了奇点和过参数化问题, 易于实现, 具有良好的工程实用价值。通过仿真对比分析可知, 所设计的控制器动静态伺服性能好, 对系统参数变化不敏感, 有较强的鲁棒性。

1 永磁同步电机位置伺服系统的数学模型

在假设磁路不饱和, 忽略磁滞、涡流损耗的影响, 空间磁场呈正弦分布, 并认为三相绕组对称均匀的情况下, 永磁同步电机 $d-q$ 轴同步旋转坐标系下的数学模型可表示为:

收稿日期: 2012-05-17; 修回日期: 2012-11-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50879098); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(DUT10JR14); 辽宁省教育厅高校科研项目(LS2010032)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(50879098), the Fundamental Research Funds for the Central Universities of China(DUT10JR14) and University Scientific Research Projects of Educational Commission of Liaoning Province(LS2010032)

$$\dot{\theta} = \omega \quad (1)$$

$$\dot{\omega} = \frac{3p\psi}{2J}i_q - \frac{B}{J}\omega - \frac{T_L}{J} \quad (2)$$

$$\dot{i}_q = -\frac{R}{L}i_q - p\omega i_d - \frac{p\psi}{L}\omega + \frac{u_q}{L} \quad (3)$$

$$\dot{i}_d = -\frac{R}{L}i_d + p\omega i_q + \frac{u_d}{L} \quad (4)$$

其中, θ 为转子旋转角度, ω 为转子角速度, p 为极对数, ψ 为转子永磁体产生的磁链, u_d, u_q 为 d - q 轴定子电压, i_d, i_q 为 d - q 轴定子电流, L 为 d - q 轴定子电感, R 为定子电阻, J 为转动惯量, B 为粘滞摩擦系数, T_L 为负载转矩。

在永磁电机运转过程中, 由于温度变化、磁饱和、负载转矩的突然增减等运行条件的改变会使电机的参数发生改变, 加剧了系统的非线性, 不但会使系统性能降低, 还可能导致系统不稳定, 因此在高性能伺服系统控制器设计中必须要考虑这些因素。

2 小波神经网络自适应反推控制器的设计

永磁同步电机位置伺服系统的控制目标是设计一个位置控制器使电机的位置输出能够渐近稳定地跟踪给定的轨迹信号。为实现这一目标, 采用反推控制方法选取需稳定的状态变量构成新的子系统, 通过构造合适的李雅普诺夫函数, 逐级设计, 最终推出系统实际控制量的控制率。为实现位置轨迹的跟踪, 定义位置跟踪误差为:

$$e_\theta = \theta - \theta_m \quad (5)$$

其中, θ_m 为给定的位置信号并假设其二次可微。选择 e_θ 为新的子系统的状态变量, 将其对时间求导得:

$$\dot{e}_\theta = \dot{\theta} - \dot{\theta}_m = \omega - \dot{\theta}_m \quad (6)$$

定义虚拟函数 $\alpha_1 = -k_1 e_\theta + \dot{\theta}_m, k_1 > 0$, 令 $e_\omega = \omega - \alpha_1$ 为子系统的虚拟状态变量, 对于式(6)的子系统选取李雅普诺夫函数 $V_1 = \frac{1}{2}e_\theta^2$ 并对其求导可得:

$$\dot{V}_1 = e_\theta \dot{e}_\theta = e_\theta(-k_1 e_\theta + e_\omega) = -k_1 e_\theta^2 + e_\theta e_\omega \quad (7)$$

由于在电机运行过程中工作环境的改变会导致式(2)—(4)中的参数随时间发生变化, 因此在反推设计过程中要考虑到这些参数变化引起的不确定性对系统的影响, 由于小波神经网络具有逼近任意复杂非线性函数的能力, 因此对永磁同步电机驱动模型中由参数不确定性引起的非线性项通过小波神经网络来估计补偿, 从而解决系统内外扰动对控制性能的影响。

对 e_θ, e_ω 组成的子系统选取李雅普诺夫函数 $V_2 = V_1 + \frac{J}{2}e_\omega^2$, 对其求导并将式(2)代入可得:

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 = \dot{V}_1 + J e_\omega \dot{e}_\omega = & -k_1 e_\theta^2 + e_\theta e_\omega + J e_\omega (\dot{\omega} - \dot{\alpha}_1) = \\ & -k_1 e_\theta^2 + e_\omega \left[\left(\frac{3p\psi}{2} + \Delta A \right) i_q - (B + \Delta B)\omega - \right. \\ & \left. (T_L + \Delta C) - J \dot{\alpha}_1 + e_\theta \right] = -k_1 e_\theta^2 + \\ & e_\omega \left(\frac{3p\psi}{2} i_q - B\omega - J \dot{\alpha}_1 + e_\theta + L_1 \right) \end{aligned} \quad (8)$$

其中, $\Delta A, \Delta B, \Delta C$ 为系统参数不确定性引起的非线性项, L_1 为等效的不确定性总和, 将在后面采用小波神经网络逼近处理, 所以在设计中可将其视为常量。为使系统渐近稳定, 应满足 $\dot{V}_2 \leq 0$, 因此可选择如下虚拟控制函数:

$$i_q^* = \frac{2}{3p\psi} (B\omega + J\dot{\alpha}_1 - e_\theta - k_2 e_\omega - \hat{L}_1) \quad k_2 > 0 \quad (9)$$

代入式(8)可得:

$$\dot{V}_2 = -k_1 e_\theta^2 - k_2 e_\omega^2 + e_\omega (L_1 - \hat{L}_1) \quad (10)$$

其中, \hat{L}_1 为 L_1 的估计值, 其误差可由后面得到的自适应律补偿。

基于磁场定向的矢量控制可以实现系统动态方程中转速和电流项的完全解耦, 以达到最大的控制效率, 因此可选择式(9)和(11)作为期望的参考电流。

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

为保证电机电流的渐近跟踪, 选择如下的电流跟踪误差为新的子系统的状态变量:

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

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

对式(12)、(13)求导, 分别代入式(3)、(9)和式(4)、(11), 考虑到式(3)和式(4)中的参数不确定性, 并采用上述处理方法可得:

$$\begin{aligned} \dot{e}_q = \dot{i}_q - \dot{i}_q^* = & -\left(\frac{R}{L} + \Delta D \right) i_q - p\omega i_d - \left(\frac{p\psi}{L} + \Delta E \right) \omega + \\ & \left(\frac{u_q}{L} + \Delta F \right) - \frac{2}{3p\psi} (B\dot{\omega} + J\dot{\alpha}_1 - \dot{e}_\theta - k_2 \dot{e}_\omega - \dot{L}_1) = \\ & -\left(\frac{R}{L} + \frac{B}{J} \right) i_q - p\omega i_d + \left(\frac{2B^2}{3p\psi J} - \frac{p\psi}{L} \right) \omega + \\ & \frac{u_q}{L} + \frac{2}{3p\psi} (\dot{e}_\theta + k_2 \dot{e}_\omega) + L_2 \end{aligned} \quad (14)$$

$$\dot{e}_d = \dot{i}_d - \dot{i}_d^* = -\frac{R}{L} i_d + p\omega i_q + \frac{u_d}{L} + L_3 \quad (15)$$

其中, $\Delta D, \Delta E, \Delta F$ 为系统参数不确定性引起的非线性项, L_2 和 L_3 为等效的不确定性总和。

为了估计不确定项 L_1, L_2, L_3 , 采用结构如图 1 所示的 3 层递归小波神经网络对控制系统中的非线性项进行逼近。网络的输入为位置跟踪误差及其微分, 输出即为不确定项的估计值 \hat{L}_1, \hat{L}_2 和 \hat{L}_3 , 选择一阶微分的高斯小波函数 $\phi(x) = -x \exp(-x^2/2)$ 作为隐含层神经元的作用函数。为提高网络收敛速度, 采用文

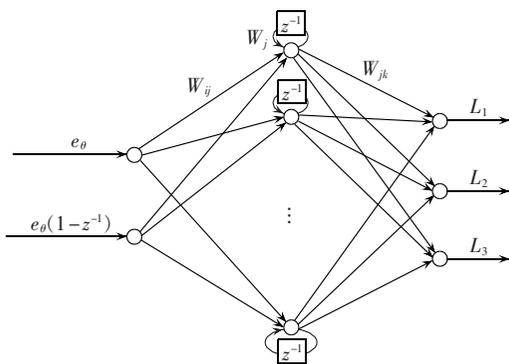


图 1 小波神经网络结构图

Fig.1 Structure of wavelet neural network

献[19]的方法初始化网络的初值。通过有监督的梯度下降法在线计算和更新网络的参数,可以实时调整网络的输出,使之准确跟踪不确定性非线性项的变化^[20]。选择合适的参数学习率对于保证网络的全局收敛起着关键作用,具体分析证明可参考文献[21]。

令 $E=(E_1, E_2, E_3)$ 为小波网络的逼近误差,则有 $L=\hat{L}+E$, 其中 L 是不确定性构成的向量, \hat{L} 为其估值。对于 $e_\theta, e_\omega, e_q, e_d$ 构成的子系统,选取如下李雅普诺夫函数:

$$V=V_2+\frac{1}{2}e_q^2+\frac{1}{2}e_d^2+\frac{1}{2k_3}(E-\hat{E})^2 \quad (16)$$

其中, \hat{E} 是 E 的估计值, $k_3>0$, 在计算速度足够快的情况下,可将 E 视为常量,对式(16)求导,将式(10)、(14)、(15)代入得:

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \dot{V}_2 + e_q \dot{e}_q + e_d \dot{e}_d - \frac{1}{k_3} (E - \hat{E}) \dot{\hat{E}} = -k_1 e_\theta^2 - k_2 e_\omega^2 + \\ & e_q \left[-\left(\frac{R}{L} + \frac{B}{J}\right) i_q - p\omega i_d + \left(\frac{2B^2}{3p\psi J} - \frac{p\psi}{L}\right) \omega + \right. \\ & \left. \frac{u_q}{L} + \frac{2}{3p\psi} (\dot{e}_\theta + k_2 \dot{e}_\omega) + L_2 \right] + \\ & e_d \left(-\frac{R}{L} i_d + p\omega i_q + \frac{u_d}{L} + L_3 \right) - \frac{1}{k_3} (E - \hat{E}) \dot{\hat{E}} \quad (17) \end{aligned}$$

由此设计实际的控制输入为:

$$u_q = L \left[\left(\frac{R}{L} + \frac{B}{J}\right) i_q + p\omega i_d + \left(\frac{p\psi}{L} - \frac{2B^2}{3p\psi J}\right) \omega - \frac{2}{3p\psi} (\dot{e}_\theta + k_2 \dot{e}_\omega) - \hat{L}_2 - \hat{E}_2 - k_4 e_q \right] \quad (18)$$

$$u_d = L \left(\frac{R}{L} i_d - p\omega i_q - \hat{L}_3 - \hat{E}_3 - k_5 e_d \right) \quad (19)$$

其中, $k_4, k_5>0$, 将式(18)、(19)代入式(17)得:

$$\begin{aligned} \dot{V} &= -k_1 e_\theta^2 - k_2 e_\omega^2 - k_4 e_q^2 - k_5 e_d^2 + e_\omega (L_1 - \hat{L}_1 - \hat{E}_1) + \\ & e_q (L_2 - \hat{L}_2 - \hat{E}_2) + e_d (L_3 - \hat{L}_3 - \hat{E}_3) - \frac{1}{k_3} (E - \hat{E}) \dot{\hat{E}} = \\ & -k_1 e_\theta^2 - k_2 e_\omega^2 - k_4 e_q^2 - k_5 e_d^2 + \\ & e (E - \hat{E}) - \frac{1}{k_3} (E - \hat{E}) \dot{\hat{E}} \quad (20) \end{aligned}$$

设计自适应律:

$$\dot{\hat{E}} = k_3 e \quad (21)$$

代入式(20)可得 $\dot{V} = -k_1 e_\theta^2 - k_2 e_\omega^2 - k_4 e_q^2 - k_5 e_d^2 \leq 0$, 由此可知,通过设计式(18)、(19)、(21)的控制律和自适应律,可使系统实现位置、电流的渐近跟踪且对于电机参数变化具有好的鲁棒性。系统实现如图2所示。电机的转子位置误差、速度及电流作为系统的输入,通过计算得到 d, q 轴的电压分量,经反帕克变换得到静止两相电压分量,通过空间矢量 PWM 计算得到开关电压控制逆变器输出从而驱动电机。转子位置误差及其微分作为小波网络的输入,其输出与系统误差通过设计的自适应律计算得到系统非线性引起的不确定性补偿量,从而能够使系统在具有良好鲁棒性的同时保证控制精度。

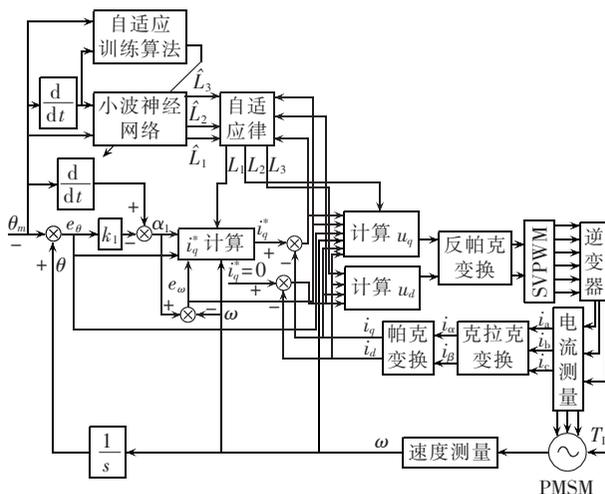


图 2 系统结构图

Fig.2 Structure of system

3 稳定性分析

通过对不等式 $\dot{V} = -k_1 e_\theta^2 - k_2 e_\omega^2 - k_4 e_q^2 - k_5 e_d^2 \leq -k_1 e_\theta^2$ 两边积分可得:

$$V(0) - V(\infty) \geq \int_0^\infty k_1 e_\theta^2 dt \quad (22)$$

因为 $V > 0$ 且 $\dot{V} \leq 0$, 所以 V 是有界的, 根据 Barbalat 推论可知:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e_\theta^2 = 0 \quad (23)$$

同理可得 $\lim_{t \rightarrow \infty} e_q^2 = 0, \lim_{t \rightarrow \infty} e_d^2 = 0$ 。

可知,对于式(1)—(4)所表示的永磁同步电机系统,通过设计式(18)、(19)、(21)的控制律及自适应律可保证如图2所示结构的控制系统的位置、电流能够渐近跟踪参考信号,实现系统的全局一致稳定。

4 仿真结果与分析

为验证所提控制策略的有效性,将经典 PI 控制、传统反推控制方法和基于小波网络的自适应反推控制方法进行了对比仿真实验。仿真所用电机的标称参数为:线电阻 $R=8.02 \Omega$,线电感 $L=16.3 \text{ mH}$,转子磁链 $\psi=0.107 \text{ Wb}$,极对数 $p=3$,转动惯量 $J=0.375 \text{ kg}\cdot\text{cm}^2$,粘滞摩擦系数 $B=0.000 1 \text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}$ 。考虑到电机的实际运行,假设参数变化为: $R=16 \Omega, L=16 \text{ mH}, \psi=0.2 \text{ Wb}, p=3, J=0.75 \text{ kg}\cdot\text{cm}^2, B=0.000 5 \text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}$ 。反推控制器参数为: $k_1=50, k_2=1, k_3=100, k_4=1 000, k_5=0.02$,小波网络隐含层神经元个数为 6。PI 控制器的位置环参数为 $k_{p1}=200, k_{i1}=2 000$;速度环参数为 $k_{p2}=0.1, k_{i2}=10$;d 轴电流环参数为 $k_{p3}=20, k_{i3}=2 000$;q 轴电流环参数为 $k_{p4}=100, k_{i4}=2 000$ 。

仿真的参考指令给定为幅值 10 rad、周期 2 s 的正弦信号。电机初始运行条件为空载,控制器参数为电机标称参数,于 0.5 s 和 1.5 s 时分别施加 0.5 N·m 和 -0.5 N·m 的负载。3 种策略的轨迹跟踪曲线和跟踪误差仿真结果如图 3—5 所示。其中图 5 为图 4 中区域 1、2、3、4 的放大显示。

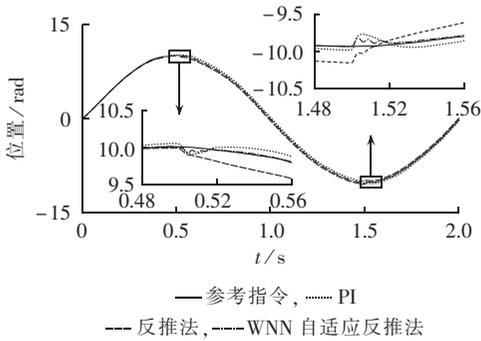


图 3 3 种控制策略在参数及负载变化下的位置轨迹跟踪比较

Fig.3 Comparison of position tracking among three control schemes for parameter perturbation and load variation

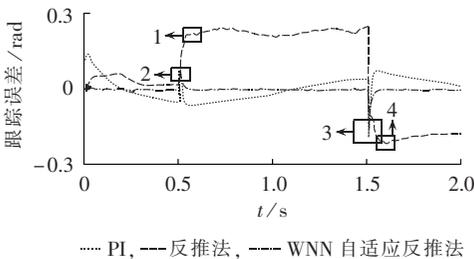


图 4 3 种策略跟踪误差比较

Fig.4 Comparison of tracking error among three control schemes

从图中可以看出,由于电机参数的变化,PI 控制器和反推控制器在电机初始空载运行阶段即存在稳态误差,而小波神经网络自适应反推控制器可以快

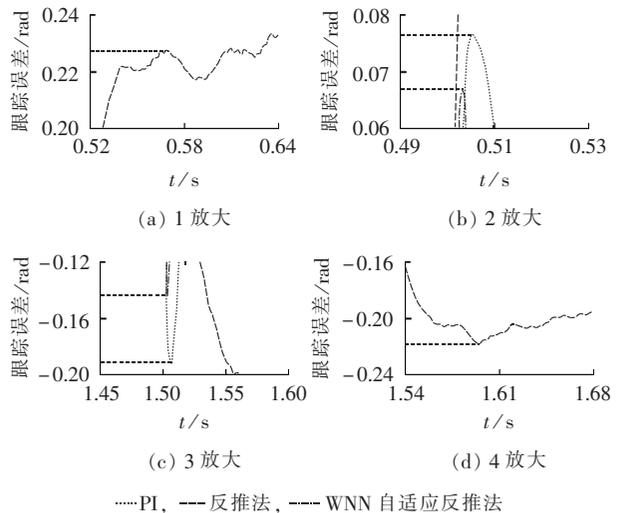


图 5 3 种策略跟踪误差的超调部分的放大显示

Fig.5 Detailed overshoot of tracking error for three control schemes

速准确地跟踪给定轨迹且稳态误差趋于零,具有很好的动静态性能。当 $t=0.5 \text{ s}$ 加载时,PI 控制器和反推控制器都产生了较大的轨迹波动,超调分别达到 0.076 rad、0.228 rad,且跟踪误差也相应增大;而小波神经网络自适应反推控制器超调为 0.067 rad 且在 0.1 s 内即恢复稳态且误差为零。这种对比在负载变化加剧时尤为明显, $t=1.5 \text{ s}$ 时,施加的负载等值反向,此时 PI 控制器和反推控制器的超调分别达到 0.19 rad、0.22 rad,而小波神经网络自适应反推控制器超调仅为 0.143 rad 且仍可在 0.1 s 内准确跟踪给定信号。

由上述分析可知,在存在参数不确定性及负载扰动的情况下,小波神经网络自适应反推法相对于传统反推法和 PI 控制器不存在稳态跟踪误差,且在负载变化时可快速回归稳态,超调量小,恢复时间短,因此其具有动静态性能好、鲁棒性强的特点。

5 结论

针对永磁同步电机位置伺服控制系统的非线性特点及其在工作中易受参数变化和负载扰动而引起控制精度不理想的问题,提出了一种基于小波神经网络的自适应反推控制策略,通过利用小波神经网络的非线性逼近能力和反推法设计保证控制稳定性的优点,解决了以往反推设计存在的控制器设计过于复杂、参数过多及部分参数不确定性影响的问题,对所有参数不确定性加以考虑并估计补偿,通过设计保证了系统位置、电流的渐近跟踪。通过与传统 PI、反推控制对比,证明了所提控制方法在存在参数不确定性及负载扰动的情况下具有良好的动静态性能和很强的鲁棒性。

参考文献:

- [1] 西佳军,孙斌,赵化启. 永磁同步电机单神经元自适应 PID 控制[J]. 电力自动化设备,2003,23(10):59-61.
XI Jiajun,SUN Bin,ZHAO Huaqi. Adaptive PID controller based on single neuron for permanent magnet synchronous machine[J]. Electric Power Automation Equipment,2003,23(10):59-61.
- [2] 刘英培. 基于自抗扰控制 PMSM 电压空间矢量调制直接转矩控制方法[J]. 电力自动化设备,2011,31(11):78-82.
LIU Yingpei. Space vector modulated direct torque control for PMSM based on ADRC[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011,31(11):78-82.
- [3] 刘慧贤,丁世宏,李世华,等. 永磁同步电机位置伺服系统的有限时间控制[J]. 电机与控制学报,2009,13(3):424-430.
LIU Huixian,DING Shihong,LI Shihua,et al. Finite time control of PMSM position servo system[J]. Electric Machines and Control, 2009,13(3):424-430.
- [4] 张昌凡,王耀南. 永磁同步电动机的变结构智能控制[J]. 中国电机工程学报,2002,22(7):13-17.
ZHANG Changfan,WANG Yaonan. Variable structure intelligent control for PM synchronous servo motor drive[J]. Proceedings of the CSEE,2002,22(7):13-17.
- [5] ZHOU J,WANG Y. Adaptive backstepping speed controller design for a permanent magnet synchronous motor[J]. IEE Proc on Electric Power Applications,2002,149(2):165-172.
- [6] 王家军,赵光宙,齐冬莲. 反推式控制在永磁同步电动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.
- [7] 王宝华. 逆推自适应滑模励磁控制器设计[J]. 电力自动化设备,2009,29(6):54-57.
WANG Baohua. Design of backstepping adaptive sliding mode excitation controller[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009,29(6):54-57.
- [8] KARABACAK M,ESKIKURT H I. Speed and current regulation of a permanent magnet synchronous motor via nonlinear and adaptive backstepping control[J]. Mathematical and Computer Modeling,2011,53(9-10):2015-2030.
- [9] 彭继慎,王强,刘栋良,等. 永磁同步电动机的速度自适应反推控制[J]. 煤炭学报,2006,31(4):540-544.
PENG Jishen,WANG Qiang,LIU Dongliang,et al. The auto-adapted backstepping control of the speed of permanent magnet synchronous motor[J]. Journal of China Coal Society,2006,31(4):540-544.
- [10] 王家军,王建中,马国进. 自适应 Backstepping 在永磁同步电动机速度跟踪控制中的应用[J]. 电气传动,2006,36(9):20-22.
WANG Jiajun,WANG Jianzhong,MA Guojin. Speed tracking control of permanent magnet synchronous motor with adaptive backstepping[J]. Electric Drive,2006,36(9):20-22.
- [11] 张细政,王耀南. 永磁同步电机鲁棒自适应反步控制[J]. 煤炭学报,2009,34(4):572-576.
ZHANG Xizheng,WANG Yaonan. Adaptive backstepping based robust speed control of permanent magnet synchronous motor servo drive[J]. Journal of China Coal Society,2009,34(4):572-576.
- [12] 刘栋良,王家军,崔丽丽. 永磁同步电机参数自适应调速控制[J]. 电工技术学报,2011,26(8):159-165.
LIU Dongliang,WANG Jiajun,CUI Lili. Speed tracking control of permanent magnet synchronous motors with adaptive parameters[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011,26(8):159-165.
- [13] LIU T H,PU H T,LIN C K. Implementation of an adaptive position control system of a permanent-magnet synchronous motor and its application[J]. IET Electric Power Applications, 2010,4(2):121-130.
- [14] 山炳强,于海生. 基于负载观测器的永磁同步电机反步法控制[J]. 电机与控制应用,2006,33(7):33-36.
SHAN Bingqiang,YU Haisheng. Based on the load torque observer of permanent magnet synchronous motors backstepping control[J]. Electric Machines & Control Application,2006,33(7):33-36.
- [15] 王礼鹏,张化光,刘秀翀. 基于扩张状态观测器的 SPMSM 调速系统的滑模变结构反步控制[J]. 控制与决策,2011,26(4):553-557.
WANG Lipeng,ZHANG Huaguang,LIU Xiuchong. Backstepping controller based on sliding mode variable structure for speed control of SPMSM with extended state observer[J]. Control and Decision,2011,26(4):553-557.
- [16] 方一鸣,任少冲,王志杰,等. 永磁同步电动机转速自适应模糊 Backstepping 控制[J]. 电机与控制学报,2011,15(6):97-102.
FANG Yiming,REN Shaochong,WANG Zhijie,et al. Adaptive fuzzy Backstepping control for speed of permanent magnet synchronous motor[J]. Electric Machines and Control,2011,15(6):97-102.
- [17] YU J P,CHEN B,YU H S,et al. Adaptive fuzzy tracking control for the chaotic permanent magnet synchronous motor drive system via backstepping[J]. Nonlinear Analysis-Real World Applications,2011,12(1):671-681.
- [18] WAI R J,CHANG H H. Backstepping wavelet neural network control for indirect field-oriented induction motor drive[J]. IEEE Transactions on Neural Networks,2004,15(2):367-382.
- [19] OUSSAR Y,RIVALS I,PERSONNAZ L,et al. Training wavelet networks for nonlinear dynamic input output modeling[J]. Neurocomputing,1998,20(1-3):173-188.
- [20] LI M G,LIU D. A novel adaptive self-turned PID controller based on recurrent-wavelet-neural-network for PMSM speed servo drive system[J]. Procedia Engineering,2011(15):282-287.
- [21] WAI R J,CHANG J M. Intelligent control of induction servo motor drive via wavelet neural network[J]. Electric Power Systems Research,2002,61(1):67-76.

作者简介:

刘 达(1983-),男,黑龙江牡丹江人,博士研究生,研究方向为网络运动控制技术和现代智能控制理论(E-mail: dliu@mail.dlut.edu.cn);

李木国(1953-),男,辽宁庄河人,教授,博士研究生导师,主要从事大型海洋造波设备的研发、网络运动控制和数字信号处理的研究(E-mail:lmguo@dlut.edu.cn)。

永磁同步电机制动能量回收系统的控制方法

卢智锋¹, 李 军², 周世琼³, 康龙云⁴

(1. 深圳市特种设备安全检验研究院, 广东 深圳 518029;

2. 中山职业技术学院 机械工程系, 广东 中山 528404; 3. 深圳信息职业技术学院

交通与环境学院, 广东 深圳 518029; 4. 华南理工大学 电力学院, 广东 广州 510641)

摘要: 在矢量控制的铅酸蓄电池-永磁同步电机系统的基础上, 设计制动能量回收系统。通过设定 $-i_q$, 控制采用正弦脉冲宽度调制(SPWM)的三相全桥逆变器, 将永磁同步电机在制动时产生的交流电流整流为直流电流, 对铅酸蓄电池进行充电, 实现制动能量的回收。最后, 通过搭载了该系统的电动车对制动能量系统进行了试验, 分析制动电流与行驶速度、制动时间、电池放电深度等的关系。试验结果表明采用该系统后可以有效地增加持续里程。

关键词: 永磁同步电机; 能量回收; 矢量控制; 正弦脉冲宽度调制; 铅酸蓄电池; 同步电机; 脉冲宽度调制; 控制

中图分类号: TM 852

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2013.02.023

0 引言

能源是社会长期稳定发展的关键因素之一。随着社会的不断进步, 对能源的需求量也日益增大, 使得能源枯竭日益严重。能源危机是当今各国所共同面临也是必须解决的难题之一。如何有效地解决能源枯竭的问题, 各国已经展开了广泛而深入的探讨, 普遍认为应提高能源的利用率和开发新的能源。当然, 提高能源的利用率并不能阻止能源的枯竭, 但可起到延缓作用, 从技术上缓解能源紧张的问题。提高能源的利用率也即节能技术, 可以降低能源的使用成本, 与广大能源消耗者的切身利益密切相关。

收稿日期: 2012-04-19; 修回日期: 2012-12-03
基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划)(2007AA05Z-244)

Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China(863 Program)(2007AA-05Z244)

提高能源利用率的方法很多, 能量回收是其中之一。能量回收是通过回收系统中剩余的(多余的)或制动时产生的能量, 以达到节约能源的目的。

随着电能大规模的应用, 全球大多数电能都是通过电动机实现能量的转换。目前, 永磁电机驱动系统已经大量使用, 而且这种情况将会持续下去^[1]。电动机在制动过程中, 特别是在频繁制动的场合, 如日常使用的电梯、电动车等的电机系统, 往往会浪费大量的能源。通过回收制动能量产生电磁制动转矩代替传统的机械制动, 实现减速, 是非常有必要的^[2-5]。对制动能量进行回收, 一方面可以节约能源, 另一方面也可以作为电机的辅助制动, 更好地保护制动器, 并使制动更加平稳简单。

现在已有大量研究通过 DC/DC 逆变器实现制动能量回收的文献^[6-10]。本文通过 AC/DC 逆变器实现制动能量^[11-13]回收, 采用基于矢量控制的铅酸蓄电

PMSM position servo control based on wavelet neural network adaptive backstepping

LIU Da^{1,2}, LI Mugu²

(1. Faculty of Electronic Information and Electrical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China; 2. The State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering,

Dalian University of Technology, Dalian 116023, China)

Abstract: An adaptive backstepping control scheme based on WNN(Wavelet Neural Network) is proposed for PMSM(Permanent Magnetic Synchronous Motor) control system, which, being robust to all kinds of uncertainties, evaluates and compensates the nonlinear uncertainty existing in the system, and adaptively adjusts the outputs of backstepping controller to obtain good position tracking performance. The overall system stability is ensured by applying Lyapunov theory in the design. The effectiveness of the proposed control scheme is verified by the theoretical analysis and simulative comparisons with PI controller and traditional backstepping controller.

Key words: synchronous motors; neural networks; backstepping control; robustness; position servo system