

文章编号: 1001-0920(2001)0S-0681-04

带神经网络观测器的永磁同步电机 极点配置自校正前馈控制

李鸿儒, 王建辉, 王 珏, 顾树生
(东北大学 信息科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110004)

摘 要: 由递归神经网络构成综合负载转矩观测器, 从而把综合负载转矩视为可测干扰, 并利用极点配置自校正前馈控制策略实现了永磁同步电机的速度控制, 解决了永磁同步电机系统中参数变化和负载扰动等不确定性问题, 仿真结果表明该方法具有较强的鲁棒性。

关键词: 极点配置自校正前馈控制; 递归神经网络; 永磁同步电机; 负载转矩观测器

中图分类号: TP 273 **文献标识码:** A

Pole Placement Self-tuning Feedforward Control of PM SM with Neural-network-based Observer

LI Hong-ru, WANG Jian-hui, WANG Jue, GU Shu-sheng

(School of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004, China)

Abstract: A neural-network-based synthetical load torque observer is designed, and the synthetical load torque is considered as measurable disturbance. A pole placement self-tuning feedforward control of PM synchronous motor (PM SM) is implemented. The uncertainties of parameter variations and load disturbances for PM synchronous motor drive system are overcome. The simulation results show that the proposed control scheme has stronger robustness.

Key words: pole placement self-tuning feedforward control; recurrent neural networks; PM synchronous motor; load torque observer

1 引 言

永磁同步电机 (PM SM) 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, PM SM 本身又是一个多变量、非线性、强耦合的系统, 因此一般控制器都采用 PI 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 PI 控制器的不足, 多种消除不确定性影响的控制策略已相继提出^[1-5]。然而, 这些策略基本上是按着线性设计模型得到的。实际上电磁转矩中不可避免地包含有纹波转矩和齿槽转矩等脉动转矩, 加之负载转矩的不确定性, 转矩中存在大量的非线性和不确定性, 有时会引起控制品质严重下降, 因而鲁

收稿日期: 2001-02-27

基金项目: 辽宁省自然科学基金项目 (002011)

作者简介: 李鸿儒 (1968—), 男, 辽宁绥中人, 讲师, 博士生, 从事神经网络、自适应控制等研究; 顾树生 (1939—), 男, 黑龙江绥化人, 教授, 博士生导师, 从事智能控制、多变量控制及其在交流传动中的应用等研究。

棒性得不到保证。本文把脉动转矩和负载转矩合视为可测干扰,提出一种基于神经网络的永磁同步电机的极点配置自校正前馈控制(PPSTFC)策略。

极点配置自校正前馈控制将前馈和反馈结合起来实现了对系统的自适应极点配置,但它本身根本无法解决干扰的测量问题,神经网络作为一种新的手段在系统辨识和控制中已有广泛应用,且已应用于交流传动领域^[6,7]。本文利用一种递归神经网络作为负载转矩观测器,以文献[8]中所提出的方法对递归神经网络进行了快速训练。

2 矢量控制的 PM SM

永磁同步电机的数学模型为

$$u_d = R i_d + p \lambda_d - \omega \lambda_q \quad (1)$$

$$u_q = R i_q + p \lambda_q + \omega \lambda_d \quad (2)$$

$$\lambda_d = L_d i_d \quad (3)$$

$$\lambda_q = L_q i_q \quad (4)$$

$$\omega = P \omega \quad (5)$$

$$T_e = P [L_{md} I_{fd} i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] \quad (6)$$

$$T_e = T_L + B \omega + J p \omega \quad (7)$$

式中, u_d 和 u_q 分别为 d 和 q 轴定子电压, i_d 和 i_q 分别为 d 和 q 轴定子电流, λ_d 和 λ_q 分别为 d 和 q 轴定子磁链, L_d 和 L_q 分别为定子绕组的 d 和 q 轴电感, R 为定子电阻, ω 为电角速度, 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 为极对数, T_e 为电磁转矩, T_L 为负载转矩, J 为转动惯量, 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,如果 $i_d = 0$, d 轴定子磁链 λ_d 不变,而永磁同步电机中 L_{md} 和 I_{fd} 为常数,所以电磁转矩 T_e 与 i_q 成比例,即

$$T_e = (3PL_{md}I_{fd}/2) i_q^* = K_t i_q^* \quad (8)$$

把式(8)代入式(7)可得频域模型

$$\omega(s) = \frac{K_t}{J s + B} i_q^* - \frac{1}{J s + B} T_L \quad (9)$$

加入零阶保持器,对式(9)进行 z 变换,得离散化方程为

$$\omega(k) = \alpha \omega(k-1) + \beta i_q^*(k-1) - \gamma T_L(k-1) \quad (10)$$

其中

$$\alpha = \exp\left(-\frac{B T_s}{J}\right)$$

$$\beta = K_t \frac{1-\alpha}{B}$$

$$\gamma = \beta / K_t$$

3 带神经网络综合负载转矩观测器的 PM SM 极点配置自校正前馈控制

3.1 极点配置自校正前馈控制器

将式(10)表示为

$$A(z^{-1})y(k) = B(z^{-1})u(k-1) + C(z^{-1})v(k) \quad (11)$$

式中 $y(k) = \omega(k)$ 为输出, $u(k) = i_q^*(k)$ 为输入, $v(k) = T_L(k)$ 为可测干扰, $A(z^{-1}) = 1 - \alpha z^{-1}$, $B(z^{-1}) = \beta$, $C(z^{-1}) = -\gamma$

控制系统的结构如图1所示,借鉴常规极点配置的设计方法^[9],可设控制器方程为

$$H(z^{-1})u(k) = E(z^{-1})y_r(k) - G(z^{-1})y(k) - D(z^{-1})v(k) \quad (12)$$

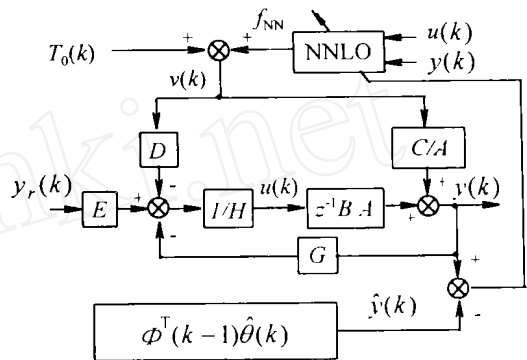


图1 带神经网络观测器的PPSTFC结构图

将式(12)中的 $u(k)$ 代入式(11),得到

$$y(k) = \frac{z^{-1}B(z^{-1})E(z^{-1})}{A(z^{-1})H(z^{-1}) + z^{-1}B(z^{-1})G(z^{-1})} y_r(k) + \frac{z^{-1}[H(z^{-1})C(z^{-1}) - B(z^{-1})D(z^{-1})]}{A(z^{-1})H(z^{-1}) + z^{-1}B(z^{-1})G(z^{-1})} v(k) \quad (13)$$

给定稳定的期望闭环极点多项式 $T(z^{-1})$, 得到极点配置方程

$$A(z^{-1})H(z^{-1}) + z^{-1}B(z^{-1})G(z^{-1}) = T(z^{-1}) \quad (14)$$

因为 $A(z^{-1})$ 与 $z^{-1}B(z^{-1})$ 互质,式(14)有唯一解。对多项式 $D(z^{-1})$ 和 $E(z^{-1})$ 的选择方法与常规线性对象设计时一样。为了有效地消除静差,在控制器中加入积分器,于是 $D(z^{-1})$ 满足

$$H(z^{-1})C(z^{-1}) = B(z^{-1})D(z^{-1}) \quad (15)$$

$E(z^{-1})$ 满足

$$E(1) = G(1) \quad (16)$$

由于 PM SM 参数和负载扰动的变化,对象模型

的参数会发生变化, 采用显式算法先辨识过程模型参数, 再求控制律. 应用具有遗忘因子的递推最小二乘算法估计参数^[9], 把式(11) 写成

$$y(k) = \Phi^T(k-1)\theta \quad (17)$$

式中

$$\begin{aligned} \Phi(k-1) &= [y(k-1), u(k-1), v(k-1)] \\ \theta &= [\alpha, \beta, -\gamma] \end{aligned}$$

3.2 神经网络综合负载转矩观测器

PM SM 的电磁转矩中实际上还包含有由反电势或定子电流谐波引起的纹波转矩以及由定子铁心与转子磁场相互作用(亦称齿槽效应)引起的齿槽转矩. 其中纹波转矩与定子电流和转子位置有关, 齿槽转矩与转子位置有关, 且其中的关系非常复杂, 难以精确表示. 另外, 负载转矩本身存在大量的非线性和不确定性. 所以 PM SM 简化模型中的 $T_L(k)$ 难以准确计算. 为此, 根据实际中主要负载转矩基本可知的情况, 对实际系统可已知的负载转矩直接引入, 设为 $T_0(k)$; 而对于不确定的部分加上电磁转矩中的纹波转矩和齿槽转矩等脉动转矩, 采用一递归神经网络来训练得到, 设为 $f_{NN}(k)$. 因为递归神经网络能够直接辨识黑箱系统(参见图 1), 有综合负载转矩为

$$v(k) = T_L(k) = T_0(k) + f_{NN}(k) \quad (18)$$

这里采用文献[9]中所用的对角递归神经网络及快速训练算法.

带神经网络综合负载转矩观测器的 PM SM 极点配置自校正前馈控制的步骤如下:

- 1) 确定期望的极点多项式 $T(z^{-1})$;
- 2) 测取对象的输出 $y(k)$, 确定 $T_0(k)$, 利用神经网络求 $f_{NN}(k)$, 用式(18) 求 $v(k)$;
- 3) 对式(17) 进行模型辨识;
- 4) 对神经网络进行在线辨识;
- 5) 利用式(11) 求 $H(z^{-1})$ 和 $G(z^{-1})$;
- 6) 分别用式(15) 和(16) 求 $D(z^{-1})$ 和 $E(z^{-1})$;
- 7) 根据式(12) 求解 $u(k)$;
- 8) $k = k + 1$, 返回 2)。

4 实验仿真

采用美国科尔摩根公司的 PM SM 矢量控制系统进行实验, PM SM 参数见表 1. 用一台直流电机提供确定的负载转矩. 在永磁同步电机上安装变惯量机械装置, 通过其上安放不同的铁盘来改变转子的转动惯量和阻尼系数.

表 1 PM SM 参数

P_N/W	$\omega_N/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	$J_N/(\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^2)$	$B_N/(\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}/\text{rad})$
750	1 500	0.017 6	0.002 2

实验中速度给定为 $700 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$, 开始外部负载转矩 $T_L = 0$, 在 1 s 时加入 $3 \text{ N} \cdot \text{m}$ 的负载转矩. 对 3 种情况进行实验: 1) 额定情况; 2) 增大 J 约 5 倍, B 不变; 3) 增大 B 约 5 倍, J 不变. 为比较效果, 应用传统的 PI 速度控制器也进行了实验. 由递归神经网络构成的综合负载转矩观测器先针对额定空载情况进行了离线训练. 取在线训练步数为 5, 遗忘因子 $\lambda = 0.99$. 图 2 为 PI 控制的结果, 图 3(a) 和(b) 分别为把所加负载转矩作为 $T_0(k)$ 和 $f_{NN}(k)$ 的控制结果, 通过对比可看出所提出控制策略的有效性.

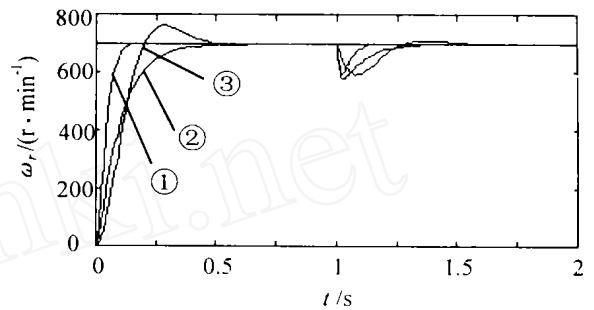


图 2 PI 控制器的响应结果

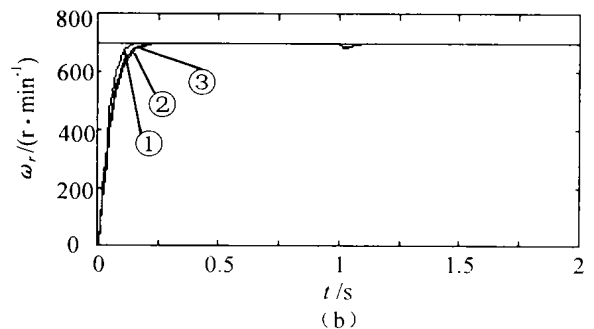
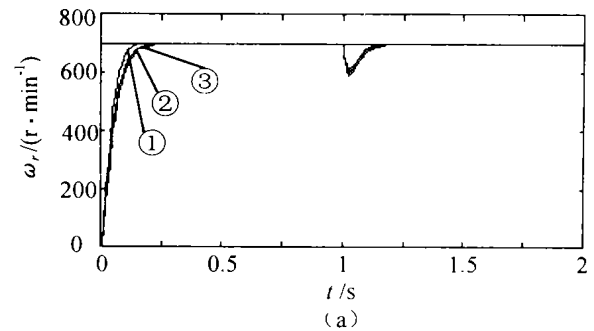


图 3 带神经网络综合负载转矩观测器的 PPSTFC 的响应结果

- (a) 把所加负载转矩视为 $f_{NN}(k)$ 的结果
- (b) 把所加负载转矩视为 $T_0(k)$ 的结果

5 结 语

本文提出一种带神经网络综合负载转矩观测器的永磁同步电机极点配置自校正前馈控制策略。由递归神经网络构成综合负载转矩观测器,从而把综合负载转矩视为可测干扰,实现了永磁同步电机极点配置自校正前馈控制,对参数变化和负载扰动等不确定性进行了有效的前馈补偿。理论分析和实验仿真证明所提出的控制策略具有较强的鲁棒性,明显优于传统的PI控制策略。

尽管采用了快速的训练方法,限于方法的局限以及微机的计算速度,递归神经网络构成的综合负载转矩观测器的在线训练无法达到最优。文中把已知的负载转矩直接引入,而对于不确定的部分采用递归神经网络来训练得到的方法非常实用有效,实验仿真结果充分说明了负载转矩的直接引入控制效果最佳。

参考文献:

- [1] Lin Faa Ieng. Real-time IP position controller design with torque feedforward control for PM synchronous motor[J]. IEEE Trans on Ind Electron, 1997, 44(3): 398-407.
- [2] Lin F J, Chiu S L. A daptive fuzzy sliding mode control

for PM synchronous servo motor drives[J]. IEE Proc Control Theory Appl, 1998, 145(1): 63-72

- [3] Hong Kichul, Nam Kwanghee. A load torque compensation scheme under the speed measurement delay[J]. IEEE Trans on Ind Electron, 1998, 45(2): 283-290
- [4] 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.
- [5] 许强, 贾正春, 李朗如. 带负载转矩补偿的PM SM 交流伺服系统自适应控制[J]. 电工技术学报, 1997, 12(5): 1-4
- [6] M T W ishart, Ronald G Harley. Identification and control of induction machines using artificial neural networks[J]. IEEE Trans on Ind Appl, 1995, 31(3): 612-619
- [7] Huang Chich Yi, Chen Tien Chi, Huang Ching-L ien. Robust control of induction motor with a neural-network load torque estimator and a neural-network identification[J]. IEEE Trans on Ind Electron, 1999, 46(5): 990-998
- [8] 舒迪前, 饶立昌, 柴天佑. 自适应控制[M]. 沈阳: 东北大学出版社, 1993
- [9] Li Hongru, Wang Xiaozhe, Gu Shusheng. An improved recursive prediction error algorithm for training recurrent neural networks[A]. Proc of the 3rd WCICA [C]. Hefei, 2000. 1043-1046

(上接第 680 页)

参考文献:

- [1] Petersen IR, Holbt C V. A Riccati equation approach to the stabilization of uncertain linear systems[J]. Automatica, 1986, 22(4): 397-411.
- [2] Cao Y Y, Sun Y S. Robust stabilization of uncertain multi-state-delay systems[A]. Proc of the 35th Conf on Decision and Control[C]. Japan, 1996. 4631-4636
- [3] Niculescu S I, De Souza C E, Dugard L *et al*. Robust exponential stability of uncertain systems with time-varying delays[J]. IEEE Trans on Automat Contr, 1998, 43(5): 743-748
- [4] 黎明. 非线性参数扰动时滞系统的鲁棒指数稳定性[J]. 控制理论与应用, 1998, 15(6): 969-971.

- [5] Yu L, Chu J. An LM I approach to guaranteed cost control of linear uncertain time-delay systems[J]. Automatica, 1999, 35(6): 1155-1159
- [6] 顾永如, 李歧强, 钱积新. 线性不确定时滞系统的 H_{∞} 无记忆控制器设计[J]. 自动化学报, 1999, 25(3): 429-431.
- [7] Chen W Y. On the H_{∞} control for linear time-delay systems[J]. J of Syst Eng and Electr, 1998, 9(3): 23-28
- [8] Niculescu S I. H_{∞} memory control with α stability constraint for time-delay systems: An LM I approach[J]. IEEE Trans on Automat Contr, 1998, 43(5): 739-743