

基于自适应径向基函数神经网络的 无刷直流电机直接电流控制

夏长亮¹, 王 娟^{1,2}, 史婷娜¹, 陈 炜¹, 徐绍辉¹, 杨 荣¹

(1. 天津大学电气与自动化工程学院, 天津 300072;

2. 河北科技大学信息工程学院, 河北 石家庄 050054)

DIRECT CONTROL OF CURRENTS BASED ON ADAPTIVE RBF NEURAL NETWORK FOR BRUSHLESS DC MOTORS

XIA Chang-liang¹, WANG Juan^{1,2}, SHI Ting-na¹, CHEN Wei¹, XU Shao-hui¹, YANG Rong¹

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. School of Information Engineering, Hebei University of Science & Technology, Shijiazhuang 050054, China)

ABSTRACT: In this paper, a novel approach based on an adaptive Radial Basis Function (RBF) neural network is proposed, and through this approach, the direct control of the currents for a brushless DC motor without position sensors is realized. In the proposed RBF network, there is no hidden units at the beginning, and during the process of learning, they are increased or decreased according to an adaptive algorithm so that a RBF network is built with a much simpler and tighter structure to form an efficient nonlinear map from terminal voltages and phase currents of the motor to the states of the power switches, facilitating the elimination of the position sensors. The RBF network is trained both offline and online. In the offline methods with the training data collected from experiments, the number and locations of the hidden units of the RBFNN are obtained; while online learning, the weights between the hidden layer and the output layer are updated according to the recursive least squares (RLS) algorithm. The RBF network is used to realize the direct control of currents for the BLDC motor in experiments based on DSP, and the results show that with the proposed method, and higher control precision and robustness is obtained.

KEY WORDS: Brushless DC motor; Direct currents control; Adaptive RBF neural network; RLS(recursive least squares)

摘要: 提出了基于自适应径向基函数(Radial Basis Function)神经网络的无刷直流电机直接电流控制新方法。该方法构造了一个隐层节点初始个数为零的 RBF 网络, 通过在训练过程中不断地按照自适应算法添加和删除隐层单元, 形成

一个结构简单、紧凑的 RBF 网络来实现电机电压、电流与功率开关导通信号之间的非线性映射, 直接控制功率开关的通断, 实现无位置传感器的直接电流控制。网络训练采用离线训练和在线训练相结合的方法。首先利用来自实验数据的训练样本按给出的自适应算法对网络进行离线训练, 确定 RBF 网络隐层节点的个数及位置; 再按递推最小二乘法(RLS)在线修正隐层与输出层之间的连接权; 最后, 用数字处理器(DSP)实现在线控制算法。实验结果表明, 该控制方法具有较高的鲁棒性和控制精度。

关键词: 无刷直流电机; 直接电流控制; 自适应 RBF 神经网络; 递推最小二乘法

1 引言

为了实现同步运行和良好的调速性能, 无刷直流电机需要正确的转子位置信号控制其逆变器功率器件的导通与关断来给不同绕组供电。获得转子位置信号的传统方式是采用位置传感器直接检测, 但位置传感器的存在不仅使电机的体积、成本增加, 电机运行的稳定性也大大降低, 限制了无刷直流电机在高性能伺服系统中的应用。因此, 通过间接检测转子位置实现无位置传感器控制成为无刷直流电机控制领域的研究热点。近 20 年来, 许多文献对这个问题进行了讨论, 提出各种控制算法^[1]。反电势法是目前最常用的控制方法, 但在低速时容易引入噪声, 造成较大的控制误差^[2]; 通过检测磁链可以得到连续的转子位置信号, 达到较宽的调速范围, 但电机运行过程中参数的不稳定限制了该方

法的控制精度^[3]；利用现代控制理论作为基础，可构造位置及速度观测器对电机转子位置与转速进行观测，但电机的非线性与参数的不稳定性导致难以建立精确的数学模型，无法达到预期的控制效果^[4]。

人工神经网络具有自学习的功能，在处理控制系统的非线性、不确定性等问题上有很好的应用前景^[5-6]。文[7]将神经网络应用于无刷直流电机转子位置在线检测，实现了无位置传感器控制，但是没有完全脱离电机的数学模型；文[8]用神经网络实现了开关磁阻电机的无位置传感器控制，取得较高的控制精度，但网络参数不能在线调节，自适应性较差；目前文献多采用误差反传(BP)神经网络。文[9]将径向基函数(RBF)神经网络应用于无刷直流电机无位置传感器控制。径向基函数网络是一种新型神经网络，与传统的BP网络相比，具有结构简单、收敛速度快、泛化能力强等优点，广泛应用于模式识别、函数逼近等领域^[9]。在RBF网络中，可调节的参数有3个：隐层单元的中心、宽度以及隐层与输出层的连接权。其中隐层参数的初始值对网络的收敛性影响很大，文[10]提出了动态调节网络结构与参数的自适应算法，消除了因隐层参数初始值选择不合适导致网络收敛速度慢甚至不收敛的可能，但由于隐层单元删除算法比较复杂，影响了网络结构的寻优时间。

本文对上述算法进行改进，提出了利用自适应径向基函数(RBF)神经网络对无刷直流电机进行控制的新方法。所采用的RBF网络以电机可检测的电压、电流作为输入，功率开关的导通状态作为输出，通过离线和在线相结合的方法对网络进行训练，实现了无刷直流电机无位置传感器直接电流控制。

2 RBF网络及自适应算法

2.1 RBF网络

RBF网络是两层前馈式神经网络，采用径向基函数将输入矢量不通过权值直接映射到隐层空间，网络的输出是隐层单元输出的线性加权，权值为网络可调参数。因此从总体上看，输入到输出的映射是非线性的，而网络输出参数对可调参数而言又是线性的，这样就大大加快了学习速度，同时可避免局部极小的出现。

不失一般性，对于隐层径向基函数采用高斯函数，对于单个网络输出的RBF网络，第 k 个隐层单

元的输出为

$$\ddot{O}_k(X_i) = \exp\left(-\frac{\|X_i - c_k\|^2}{2s_k^2}\right) \quad (1)$$

式中 $\|\cdot\|$ 为欧几里德范数； X_i 为第 i 个输入向量； c_k 为第 k 个隐层节点的中心； s_k 为第 k 个隐层节点的宽度。

整个网络的输出方程为

$$f(X_i) = \sum_{k=1}^n w_k \ddot{O}_k(X_i) \quad (2)$$

式中 w_k 为输出空间与第 k 个隐层节点的连接权； n 为隐层节点的总个数。

2.2 自适应算法

本文所用的RBF网络的隐层单元初始个数为零，在训练过程中，按照一定规则自适应地添加，并将对输出信号作用很小的隐层单元删除，确保网络结构简单、紧凑，用最少的隐层单元有效实现系统的非线性映射。具体算法如下

每输入一个新样本 (X_i, t_i) ，

(1) 分别按式(1)和式(2)计算各个隐层单元的输出 $j_k(X_i)$ 及网络的输出 y_i ；

(2) 计算误差

$$\|e_i\| = \|t_i - y_i\| \quad (3)$$

以及样本与已存在的隐层单元的距离

$$d_j = \|X_i - C_j\| \quad j=1,2,\dots,u \quad (4)$$

式中 u 为已存在的隐层单元个数。

令

$$d_{\min} = \min(d_j) \quad (5)$$

$$(3) \text{ 若 } \|e_i\| > e, d_{\min} > I(i) \quad (6)$$

$$I(i) = \max(I_{\max} g^i, I_{\min}) \quad (7)$$

式中 e 为网络期望的精度； $I(i)$ 为第 i 个输入时网络的拟和精度。随着学习的进行， $I(i)$ 从 I_{\max} 减小到 I_{\min} ， g 为衰减因子， $0 < g < 1$ 。

则增加一个隐层单元，其参数

$$C_k = X_i \quad (8)$$

$$s_k = \frac{1}{p} \left(\sum_{j=1}^p \|X_i - C_j\|^2 \right)^{1/2} \quad (9)$$

式中 C_j 为离输入样本最近的 p 个隐层单元的中心，这里取 $p=2$ ；

(4) 否则，按递推最小二乘法调节网络连接权；

(5) 若对于连续输入的 n 个样本都满足

$$\left\| \frac{w_k \mathbf{j}_k(X_i)}{y_i} \right\| \leq d \quad (10)$$

式中 d 为预定义的常数。

则将第 k 个隐层单元删除（这里取 $n=100$ ）；

（6）输入新的样本，转第（1）步。

该算法与文[9]所用的 RBF 神经网络学习算法相比较，在达到相同拟合精度的要求下，该算法只需要 6 个隐层单元，而文[9]则需要 10 个隐层单元。由此可见，本文提出的自适应 RBF 神经网络学习算法能够形成更为简单紧凑的 RBF 神经网络，降低了算法的运行时间，能够更好地满足控制系统实时控制的要求。

3 神经网络控制

3.1 概述

通过检测电机的电压和电流可以实现转子位置的估计^[8]。在无刷直流电机中，转子位置直接决定着逆变器功率开关的导通顺序和时间，这就是本文无刷直流电机直接电流控制的基本原理。在本文中，通过对 RBF 网络进行离线训练和在线训练，实现从电机定子电压、电流与功率开关导通状态的非线性映射，直接控制绕组电流。

3.2 离线训练

离线训练中，获得训练样本是一个很重要的环节。神经网络的训练样本可以来自仿真数据或者实验数据，为了使离线训练得到的网络更接近电机的实际运行，本文离线训练用到的样本均是实验数据。

考虑到 Y 连接的无刷直流电机在任一时刻只有两相导通且总电流为零，取输入样本矢量^[9]

$$\mathbf{X}_i = \{i_a(k), i_b(k), i_a(k-1), i_b(k-1), v_a(k-1), v_b(k-1)\}$$

式中 v_a 、 v_b 分别为 A、B 相绕组端点对地的电压。

输出样本为 6 个功率开关的状态，直接检测功率开关的导通情况比较繁琐，本文由位置传感器测得的转子位置信号根据无刷直流电机的换相逻辑得到在不同转子位置下的功率开关的状态，导通为 1，关断为 0，作为训练样本的输出矢量，即

$$\mathbf{Y}_i = \{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6\}$$

式中 S_1 、 S_3 、 S_5 分别对应于 A、B、C 三相桥臂上桥功率开关导通信号； S_2 、 S_4 、 S_6 分别对应于 A、B、C 三相桥臂下桥功率开关导通信号。

获得训练样本以后，就可以按本文中提出的自

适应训练算法对网络进行离线训练，整个离线训练算法在 PC 机中由 MATLAB 实现。经过 3500 个样本训练，网络达到预定精度。离线训练完成以后，RBF 网络隐层单元的个数、位置以及连接权的初始值也随着确定，得到的网络初始结构如图 1。由于离线训练的样本来自实验数据，可以认为训练完的网络接近电机的实际工况，隐层单元的参数已不需要在线修正。

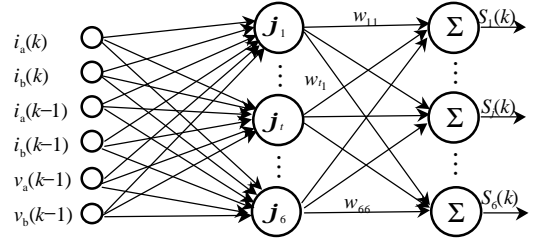


图 1 离线训练完后的 RBF 网络拓扑图
Fig. 1 The topology of the proposed RBF after off-line training

3.3 在线训练

本文在线训练按递推最小二乘法有监督地调节网络连接权，教师来自经过逻辑处理后的网络输出信号，训练框图如图 2 所示。

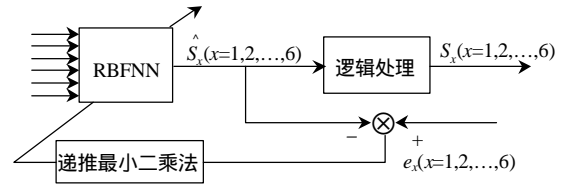


图 2 RBF 网络在线训练框图
Fig. 2 RBF network on-line learning

为了避免功率开关误导通，对状态信号进行整定和逻辑处理，采用区间函数来计算网络的输出信号

$$S_x(n) = \begin{cases} 0 & \hat{S}_x(n) \leq 0.25 \\ 1 & \hat{S}_x(n) \geq 0.7 \\ S_x(n-1) & \text{其它} \end{cases} \quad (11)$$

逻辑处理的原则如下：

- （1） S_1 、 S_3 、 S_5 及 S_2 、 S_4 、 S_6 任何时刻分别只有一个为 1；
- （2） S_1 与 S_2 、 S_3 与 S_4 、 S_5 与 S_6 各不同时为 1；
- （3）若与上述原则发生冲突，则按区间邻近优先原则处理。

递推最小二乘法(RLS)的学习规则：

- （1）对于第 k 个输入，重写网络输出方程

$$y(k) = \sum_{i=1}^n w_i \mathbf{j}_i(X(k)) = \mathbf{w}^H(k) \mathbf{u}(k) \quad (12)$$

式中 $w(k)$ 、 $u(k)$ 分别为权矢量和径向基函数矢量, H 代表共轭转置。

$$(2) \text{ 令 } P(0) = d^{-1}I, w(0) = 0 \quad (13)$$

$$(3) \text{ 计算 } v(k) = \frac{I^{-1}P(k-1)u(k)}{1 + I^{-1}u^H(k)P(k-1)u(k)} \quad (14)$$

$$z(k) = y(k) - w^H(k-1)u(k) \quad (15)$$

$$w(k) = w(k-1) + v(k)z^*(k) \quad (16)$$

$$P(k) = I^{-1}P(k-1) - I^{-1}v(k)u^H(k)P(k-1) \quad (17)$$

式中 d 为正小常数; I 为遗忘因子, $0 \leq I \leq 1$;

*表示复数共轭。

整个在线训练算法在 DSP 中通过 C 语言编程实现。本算法只需要调节隐层单元与输出层的连接权, 实现容易, 大大降低了算法运行时间, 提高了系统动态响应速度。

4 实验结果

网络离线训练在 PC 机内由 MATLAB 完成, 用 TI 公司的 TMS320LF2407 型 DSP 实现样机的在线控制。控制框图如图 3 所示。

试验样机参数如下:

额定电压 $U_N = 36 \text{ V}$; 额定电流 $I_N = 6 \text{ A}$;

额定转矩 $T_n = 0.4 \text{ N}\cdot\text{m}$; 额定功率 $P_N = 150 \text{ W}$;

额定转速 $n_N = 2500 \text{ r/min}$;

相电阻 $R = 0.66 \Omega$;

有效电感 $L - M = 1.1 \text{ mH} (\pm 1.3\%)$;

反电势系数 $K_e = 0.067 \text{ V}/(\text{rad}\cdot\text{s}^{-1})$;

转动惯量 $J = 4 \times 10^{-4} \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ 。

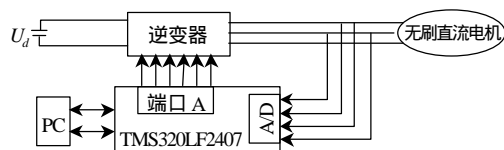


图 3 系统控制框图

Fig. 3 Configuration of system control

实验波形通过 Agilent 公司的 54622A 型示波器示出。图 4 记录了在额定转速、负载转矩 $T = 0.2 \text{ N}\cdot\text{m}$ 时 A 相电流的波形, 从图中可见, 在自适应 RBF 网络控制下, 电流可以正确换相, 实现无位置传感器控制; 图 5 记录了额定状态下负载突然从零增加到 $0.2 \text{ N}\cdot\text{m}$ 时 A 相电流的变化波形, 可以看出, 在本文给出的直接电流控制策略下, 系统具有快速的动态响应(过渡时间约为 30 ms)与较高的鲁棒性, 可以达到较高的控制精度。

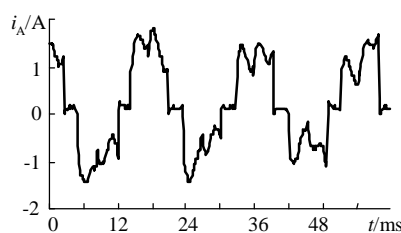


图 4 额定转速下 A 相电流波形

Fig. 4 The current waveform of phase A at rated speed

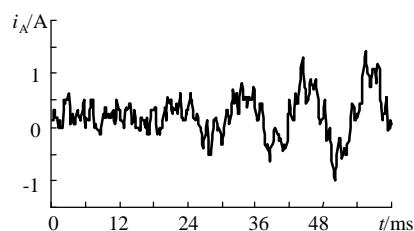


图 5 额定转速下负载突然变化时 A 相电流波形

Fig. 5 The current waveform of phase A with a sudden load-change at rated speed

5 结论

RBF 神经网络具有很强的非线性映射功能, 文[9]提出了利用 RBF 神经网络实现无刷直流电机无位置传感器控制的新思路, 取得了较好的控制效果。本文在文[9]的基础上, 重点对 RBF 神经网络在结构上、动态响应性能上作出进一步改进和完善, 按照自适应算法构造了一个结构简单、紧凑的 RBF 网络来实现无刷直流电机电压、电流与功率开关导通信号之间的非线性映射, 实现了无刷直流电机的直接电流控制。

与文[9]比较, 可以达到的最高转速由原来的 2700 r/min 提高到 4200 r/min , 同时, 在线训练算法简单, 运行时间短, 系统具有较高的鲁棒性和动态响应能力, 可以达到较高的控制精度。

参考文献

- [1] Johnson J P, Ehsani M, Guzelgunler Y. Review of sensorless methods for brushless DC[C]. IEEE Thirty-Fourth IAS Annual Meeting, 1999.
- [2] Iizuka K, Uzuhashi H, Kano M, *et al.* Microcomputer control for sensorless brushless motor[J]. IEEE Trans on Industry Application, 1985, IA-21(3): 595-601.
- [3] Corley M J, Lorenz R D. Rotor position and velocity estimation for a salient-pole permanent magnet synchronous machine at standstill and high speeds[J]. IEEE Trans on Industry Application, 1998, 34(2): 784-789.
- [4] Chen Zhiqian, Mutuwo Tomita, Shinji Doki, *et al.* New adaptive sliding observers for position- and velocity-sensorless controls of brushless DC motors[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2000, 47(3): 582-591.
- [5] Toshio Fukuda, Takanori Shibata. Theory and applications of neural networks for industrial control systems[J]. IEEE Trans. on Industrial

Electronics, 1992,39(6) : 472-489.

[6] 夏长亮, 文德, 王娟, 等(Xia Changliang, Wen De, Wang Juan,*et al*). 基于自适应人工神经网络的无刷直流电机换相转矩波动抑制新方法(A new approach of minimizing commutation torque ripple for brushless DC motor based on adaptive ANN)[J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2002,22(1) : 54-58.

[7] Huang Fengtai, Tian Dapeng. A neural network approach to position sensorless control of brushless DC motors[C]. Proc. IEEE IECON 22nd International Conference, 1996.

[8] Mese E, Torrey D A. An approach for sensorless position estimation for switches reluctance motors using artificial neural networks[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2002,17(1) : 66-75.

[9] 夏长亮, 文德, 范娟, 等(Xia Changliang, Wen De, Fan Juan, *et al*). 基于 RBF 神经网络的无刷直流电机无位置传感器控制 (Based on RBF neural network position sensorless control for brushless DC motors)[J]. 电工技术学报(Transactions of China electrotechnical society), 2002,17(3) : 26-29.

[10] Wu Shiqian, Er MengJoo. Dynamic fuzzy networks — a novel approach to function approximation [J]. IEEE Trans on System, 2000, 30(2) : 358-364.

收稿日期：2002-11-22。

作者简介：

夏长亮 (1968-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电机及其控制；

王 娟 (1976-), 女, 硕士研究生, 研究方向为人工智能在无刷直流电机控制系统中的应用。

(责任编辑 韩 蕾)

(上接第 111 页 Continued from page 111)

表 2 “共轭法”转子绕组空载变频调速试验(电网 $U_1=360\text{V}$, 变频器 $U/f=250/50$)

Tab. 2 No-load frequency control test for wound-rotor winding with nested loops (Power supply : $U_1=360\text{V}$, Transducer: $U/f=250/50$)

变频器输出频率/Hz	2 极(变频器)定子电流 I/A	4 极(电网)定子电流 I/A	电网电源输入功率 P_i/W	转子转速 $r\cdot\text{min}^{-1}$
13	1.37	3.03	440	1260
15	1.47	2.89	447	1300
18	1.55	2.67	507	1360
21	1.49	2.9	748	1420
0	0	2.2	294	1478

从表 1 和表 2 所列数据可以看出,与“共轭法”相比较,“变极法”双馈电机有同样的变频调速效果,而在同样的条件下,从电网输入的功率及变频器输入的电流较小,说明这种电机会有更高的效率。

参考文献

[1] Wallace A K, Spee R, Alexander C G. The brushless doubly-fed machine : the advantages, application and design methods[C]. Sixth International Conferece on Electrical Machiness and Drives, IEE 1993.

[2] 杨顺昌(Yang Shunchang). 无刷双馈电机的电磁设计特点(Feature of electromagnetic design for brushless doubly-fed machines)[J]. 中国电机工程学报(Proceedings of the CSEE),2001,21(7) : 107-110.

[3] 卞松江, 贺益康, 潘再平(Bian Songjiang, He Yikang, Pan Zaiping). 级联式无刷双馈电机的建模与仿真(Modeling and simulation of the cascade brushless doubly-fed machine) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE),2001 ,21 (12) : 33-37.

[4] 张凤阁,王凤翔,王正(Zhang Fengge, Wang Fengxiang, Wang Zheng). 不同转子结构无刷双馈电机稳态运行特性的对比试验研究(Comparative experiment study on the performance of doubly-fed) [J]. 中国电机工程学报(Proceedings of the CSEE),2002, 22(4) : 52-55.

[5] Williamson S, Ferreira A C, Wallace A K. Generalised theory of the brushless doubly-fed machine. Part 1:Analysis[J]. IEE Proc-Electr. Power Appl., 1997, 144(2) : 111-122.

[6] Williamson S, Ferreira A C. Generalised theory of the brushless doubly-fed machine. Part 2: Model verification and performance[C]. IEE Proc-Electr. Power Appl., 1997, 144(2) : 123-129.

收稿日期：2002-11-27。

作者简介：

王雪帆(1954-), 男, 博士, 教授, 主要从事电机及其控制方面的研究；

(责任编辑 韩 蕾)