

无刷直流电机的 RBF 神经网络自适应控制研究

王 斌, 杨旭玮, 余茂全

(合肥工业大学 电气与自动化工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘 要: 针对传统 PID 控制器在无刷直流电机控制时的鲁棒性差、精度低等缺点, 在分析 BLDCM 数学模型的基础上, 设计了 RBFNN 自适应 PID 控制器应用于无刷直流电机控制系统。通过 Matlab/Simulink 环境下的仿真实验表明, 与传统的 PID 控制方法相比, 该方法大大改善了系统的动态特性, 减小了系统的稳态误差, 提高了系统的自适应能力和抗干扰能力, 满足了系统的控制性能要求。

关键词: 无刷直流电机; 自适应控制; Matlab/Simulink

中图分类号: TP273

文献标识码: A

文章编号: 1674-7720(2012)09-0069-03

Research on RBFNN self-adaptive PID controller for brushless DC motor control system

Wang Bin, Yang Xuwei, Yu Maoquan

(School of Engineering and Automation, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: Aiming at the weakness that traditional PID controller can't adjust themselves according to parameter variation of BLDCM, based on the mathematical model of the brushless DC motor, a control strategy which is based on Radial Basis Function Neural Network is provided for BLDCM control system. The experiment result which is based on the environment of Matlab/Simulink show that this control strategy has better dynamic and static characteristics than traditional PID control strategy, reducing the steady-state error of the system and improve the adaptive capacity and anti-jamming, meet performance requirements.

Key words: brushless DC motor; self-adaptive control; Matlab/Simulink

无刷直流电机 BLDCM (Brushless DC Motor) 体积小、重量轻、效率高, 在性能上保持了普通直流电动机的优点, 且克服了有刷直流电机机械换向带来的一系列缺点, 因此在国民经济的各个领域^[1]得到广泛应用。

传统 PID 控制原理简单、使用方便, 但依赖于被控对象精确的数学模型, 对于无刷直流电机的多变量、非线性时变、强耦合的系统^[2]难以达到很好的控制效果。本文将 RBF 神经网络自适应算法应用于 PID 控制中, 能够有效克服传统 PID 控制器在被控对象具有非线性、时变不确定性和难以建立精确的数学模型时出现的参数整定不良和性能欠缺等缺陷, 具有强鲁棒性和好的自适应性, 使控制器适应被控对象参数的任何变化, 能达到很好的控制效果。

1 BLDCM 的数学模型

无刷直流电机^[3-4]可以看作是一台用电子换相装置取代机械换相的直流电动机, 它由电动机本体、驱动控

制电路和转子位置检测器等主要部分构成, 其原理框图如图 1 所示。

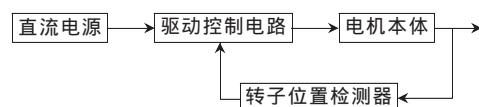


图 1 无刷电机原理框图

制电路和转子位置检测器等主要部分构成, 其原理框图如图 1 所示。

无刷直流电机采用两两导通的三相六状态的通电方式, 为简化模型的建立和分析, 作如下假设:

- (1) 磁路不饱和, 不计涡流和磁滞损耗。
 - (2) 忽略齿槽效应, 三相对称的星形绕组均匀分布于光滑定子内表面。
 - (3) 不考虑电枢反应, 气隙磁场分布近似梯形波, 平顶宽度近似 120° 电角度。
 - (4) 转子上没有阻尼绕组, 永磁体不起阻尼作用。
- 则三相电压平衡方程为:

技术与方法 Technique and Method

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r & 0 & 0 \\ 0 & r & 0 \\ 0 & 0 & r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L-M & 0 & 0 \\ 0 & L-M & 0 \\ 0 & 0 & L-M \end{bmatrix} \frac{d}{dx} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, r 为三相定子绕组电阻; u_a, u_b, u_c 为定子相绕组电压; i_a, i_b, i_c 为定子相绕组电流; e_a, e_b, e_c 为定子相绕组电动势; L 为每相绕组的自感; M 为每两相绕组间的互感。BLDCM 电磁转矩是由定子绕组中的电流与转子、磁钢产生的磁场相互作用而产生的, 电磁转矩方程为:

$$T_e = \frac{p_m}{\omega_m} = \frac{e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c}{\omega_m} \quad (2)$$

式中, 转速 $\omega_m = 2\pi n / 60$, 可见 BLDCM 的电磁转矩表达式与普通直流电机相同, 与磁通和电流幅值成正比, 因而控制逆变器输出方波电流的幅值即可控制无刷直流电机的转矩。在通电期间, 无刷直流电动机的带电导体处于相同的磁场下, 各相绕组的感应电动势为:

$$T_e = T_L + J \frac{d\omega_m}{dx} + B\omega_m \quad (3)$$

由此可知, 当电机采用两两导通三相六状态运行, 逆变器当作简单开关的情况下, 由于任意时刻电机只有两相导通, 故从直流侧来看, 无刷直流电动机具有和直流电动机相同的特性。

2 RBFNN 自适应 PID 控制器

径向基神经网络 RBFNN (Radial Basis Function Neural Network) 是由 MOODY J 和 DARKEN C 于 20 世纪 80 年代末提出的一种神经网络。RBFNN 是一种性能很好的前向网络, 该网络不仅具有全局逼近能力, 而且具有最佳逼近性能。

2.1 RBFNN 自整定 PID 控制系统的结构

RBFNN 自整定 PID 控制器由 PID 控制器和 RBF 神经网络两部分组成。该控制器主要通过 RBF 神经网络的自学习能力在线辨识得到系统近似模型, 进而获得被控对象的 Jacobian 信息, 实现对 PID 参数的在线调整。其原理框图如图 2 所示。

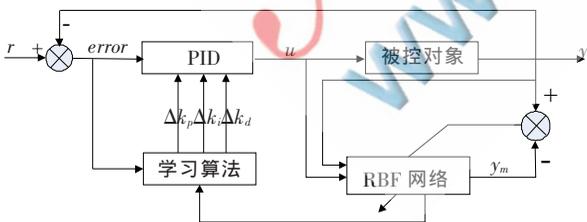


图 2 RBF 网络自整定的 PID 控制器的原理框图

2.2 RBF 神经网络

RBF 网络是一种三层前向网络, 由输入层、隐含层和输出层组成。从输入层到隐含层的变换函数的映射为非线性, 从隐含层到输出层的映射为线性, 可通过调整权重系数来改变网络的输出, 从而加快学习速度, 避免局部极小值的问题。其拓扑结构如图 3 所示。

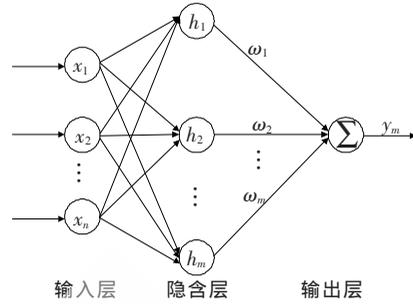


图 3 RBF 网络结构图

在神经网络结构中, 网络输入层的输入向量可以表示为 $X=[x_1, x_2, \dots, x_n]^T$, 网络隐含层的径向基向量可以表示为 $H=[h_1, h_2, \dots, h_m]^T$, 其中 h_j 为径向基函数。在实际应用中, 径向基函数可以选用不同的算法, 这里选用高斯函数, 即下式所示:

$$h_j = \exp\left(-\frac{\|X - C_j\|^2}{2b_j^2}\right) \quad (4)$$

其中, $j=1, 2, \dots, m$; C_j 是网络的第 j 个节点的中心矢量, 表达式为 $C_j=[c_{j1}, c_{j2}, \dots, c_{jn}]^T, i=1, 2, \dots, n$; 网络的基宽向量 $B=[b_1, b_2, \dots, b_m]^T$, 节点 j 的基宽参数 b_j 为大于零的数; 网络的权向量 $W=[w_1, w_2, \dots, w_j, \dots, w_m]^T$ 。辨识网络的输出表达式为:

$$y_m = w_j \sum_{i=1}^m h_j \quad (5)$$

RBF 网络学习的性能指标为: $E(k) = \frac{1}{2}(y(k) - y_m(k))^2$

为了得到更好的网络辨识效果, 在加权系数修正时, 增加一个惯性项。根据低梯度下降法, 输出权、节点中心和节点宽度参数的迭代算法如下:

$$w_j(k) = w_j(k-1) + \eta(y(k) - y_m(k))h_j + \alpha(w_j(k-1) - w_j(k-2)) + \beta(w_j(k-2) - w_j(k-3)) \quad (6)$$

$$\Delta b_j = (y(k) - y_m(k))w_j h_j \frac{\|X - C_j\|^2}{b_j^3} \quad (7)$$

$$b_j(k) = b_j(k-1) + \eta \Delta b_j + \alpha(b_j(k-1) - b_j(k-2)) + \beta(b_j(k-2) - b_j(k-3)) \quad (8)$$

$$\Delta c_{ji} = (y(k) - y_m(k))w_j h_j \frac{x_i - c_{ji}}{b_j^2} \quad (9)$$

$$c_{ji}(k) = c_{ji}(k-1) + \eta \Delta c_{ji} + \alpha(c_{ji}(k-1) - c_{ji}(k-2)) + \beta(c_{ji}(k-2) - c_{ji}(k-3)) \quad (10)$$

其中, η 为学习速率, α, β 为惯性系数, 其取值在区间 $(0, 1)$ 上。

2.3 参数在线整定原理^[5]

设 r 为系统输入, y 为系统输出, u 为控制器的输出, 则控制误差为:

$$e(k) = r(k) - y(k) \quad (11)$$

设有参数 c_1, c_2, c_3 , 且令:

$$\begin{cases} c_1 = e(k) - e(k-1) \\ c_2 = e(k) \\ c_3 = e(k) - 2e(k-1) + e(k-2) \end{cases} \quad (12)$$

技术与方法 Technique and Method

PID 的控制策略采用增量式算法, 即有表达式:

$$u(k) = u(k-1) + k_p c_1 + k_i c_2 + k_d c_3 \quad (13)$$

采用梯度下降法对参数 k_p, k_i, k_d 进行调整, 其计算过程如下:

$$\begin{cases} \Delta k_p = -\eta \frac{\partial E}{\partial k_p} = \eta e(k) \frac{\partial y}{\partial u} c_1 \\ \Delta k_i = -\eta \frac{\partial E}{\partial k_i} = \eta e(k) \frac{\partial y}{\partial u} c_2 \\ \Delta k_d = -\eta \frac{\partial E}{\partial k_d} = \eta e(k) \frac{\partial y}{\partial u} c_3 \end{cases} \quad (14)$$

式中 $\frac{\partial y}{\partial u}$ 为被控对象的信息, 可以通过神经网络的辨识获得。

3 系统仿真^[6]结果

为了对比分析, 在 Matlab/Simulink 中利用系统仿真基本模块搭建了 RBFNN 自适应 PID 和常规 PID 控制器仿真模型。被控对象的基本参数为: 额定电压 $U_N = 36 \text{ V}$, 额定转速为 1500 r/min , 相电阻为 1Ω , 定子相绕组自感为 0.02 H , 互感 $M = -0.006 \text{ mH}$, 转动惯量 $J = 0.005 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, 极对数为 2。仿真步骤为: 首先通过人机交互的无刷直流电机模型辨识平台运用离线算法训练 RBF 神经网络, 使 RBF 神经网络能够辨识电机, 将得到的参数值作为在线算法的初始值, 然后使用在线辨识的自适应算法在线训练网络。

图 4 为相同条件下, 传统 PID 控制与 RBF 自适应控制对无刷直流电机转速的控制曲线。图 5 为在 0.5 s 突加干扰时传统 PID 控制与 RBF 自适应控制的转速响应曲线。

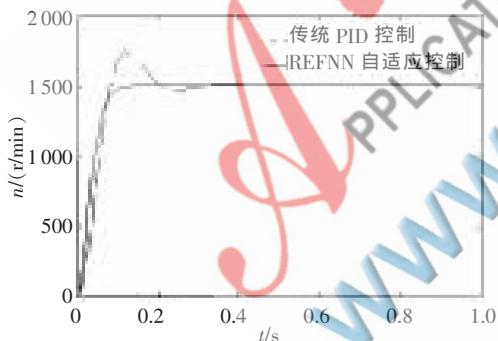


图 4 相同条件下的控制曲线

从图 4、图 5 可以看出, 本文设计的基于 RBFNN 自适应 PID 控制方法, 不仅使无刷直流电机调速系统的响应速度快、超调量小、控制精度高, 且对外界干扰波动很小, 自适应能力很强, 稳定性能好。

针对无刷直流电机转速控制中的高度非线性时变性、多变量难以控制的问题, 本文提出了基于 RBFNN 自适应 PID 控制的方法。该方法充分利用了 RBF 神经网络的非线性逼近能力强, 实时性好, 输出误差小等优点, 实时地调整 PID 控制参数以实现最优控制。Matlab 仿真

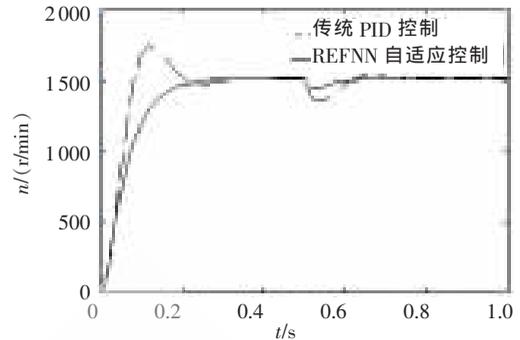


图 5 在 0.5 s 突加干扰时的控制曲线

结果表明, 该控制方法不仅使系统达到了较好的动静态特性, 而且在突加负载情况, 控制器仍能保持较好的控制效果, 使系统具有便强的自适应能力。

参考文献

- [1] FURUHASHI T. A position and velocity sensorless control for brushless DC motors using an adaptive sliding mode observer [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1992, 39(2): 89-95.
- [2] PILLAY P, MODELING K R. Simulation and analysis of permanent magnet motor drives [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1989, 25(2): 265-273.
- [3] 高瑾, 胡育文, 黄文新. 基于反电势形状函数法的无刷直流电动机直接转矩控制 [J]. 南京航空航天大学学报, 2007, 39(4): 417-422.
- [4] 张琛. 直流无刷电动机原理及应用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- [5] 林嘉宇, 刘荧. RBF 神经网络梯度下降训练方法的学习步长优化 [J]. 信号处理, 2002, 18(1): 43-48.
- [6] 刘海珊, 陈宇晨. 无刷直流电机 PID 控制系统仿真及实验研究 [J]. 系统仿真学报, 2009, 21(16): 5157-5160.

(收稿日期: 2011-12-12)

作者简介:

王斌, 男, 1982 年生, 硕士, 主要研究方向: 现代控制理论及其应用。