

# 无刷直流电机单神经元自适应智能控制系统

李梦达<sup>1</sup>, 王 岩<sup>2</sup>, 孔铁晨<sup>3</sup>, 高伟华<sup>4</sup>

(1.东北石油大学, 电气信息工程学院, 黑龙江 大庆 163318;

2.大庆油田有限责任公司第一采油厂, 生产保障大队, 黑龙江 大庆 163111;

3.大庆油田总医院, 黑龙江 大庆 163001; 4.大庆市电业局, 黑龙江 大庆 163311)

**摘要:**针对无刷直流电机(BLDCM)设计了一种可在线学习的单神经元自适应比例-积分-微分(PID)智能控制器,通过有监督的 Hebb 学习规则调整权值,每次采样根据反馈误差对神经元权值进行调整,以实现 PID 3 个参数的自适应。采用分段线性化方法建立 BLDCM 反电动势梯形波,采用滞环电流控制器实现电流调节,并在 Matlab/Simulink 仿真平台上搭建仿真模型,结果表明智能 PID 控制效果和鲁棒性皆优于常规 PID,大大提高了系统的跟随性,能满足 BLDCM 系统对实时性的要求。

**关键词:**无刷直流电机;单神经元;智能控制;分段线性化

**中图分类号:**TM33

**文献标识码:**A

**文章编号:**1000-100X(2013)02-0027-03

## Brushless DC Motor Single Neuron Adaptive Intelligent Speed Control System

LI Meng-da<sup>1</sup>, WANG Yan<sup>2</sup>, KONG Tie-chen<sup>3</sup>, GAO Wei-hua<sup>4</sup>

(1.EE Dept. Northeast Petroleum University, Daqing 163318, China)

**Abstract:**This paper in view of brushless DC motor(BLDCM) designs a kind of single neuron adaptive proportion integration differentiation(PID) intelligent controller which can be learned online.The weights can be adjusted by supervised Hebb learning rule,the neuron weights are adjusted depending on feedback error in every sampling,so as to realize the self-adaptation of three PID parameters.BLDCM back electromotive force wave is built using piecewise linearization method,the current regulation is realized using hysteresis current controller and simulation model is structured based on Matlab/Simulink simulation platform.The results show that the intelligent PID control effect and robustness are better than the conventional PID,so it improves the following characteristic of the system,and it can satisfy the real-time requirements of the brushless motor system.

**Keywords:**brushless direct current motor; single neuron; intelligent control; piecewise linearization

## 1 引言

BLDCM具有体积小、功率密度高、控制简单、动态性能好等优点,其应用越来越广泛。但其控制系统是非线性、多变量系统,传统 PID 控制算法不易满足其高精度要求,很难实现电机的高精度运行;滑模变结构控制、神经网络控制、模糊控制等先进的控制算法相对复杂、较难实现。

采用单神经元自适应控制方法建立 BLDCM 双环调速系统,通过有监督的 Hebb 学习规则自适应地调节神经网络参数,采用分段线性法模拟 BLDCM 的反电动势变化趋势,并在此基础上搭建了模块化的双闭环 BLDCM 智能调速系统,仿真结果表明系统具有较强的抗干扰能力和随动性。

## 2 无刷直流电机建模

图 1 示出全控桥式三相星型 BLDCM 结构<sup>[1-2]</sup>。三相定子绕组分别与电子开关线路中相应的功率开关器件相连。其基本结构可认为是一台由电子开关线路、永磁式同步电动机以及位置传感器组成的“电动机系统”。

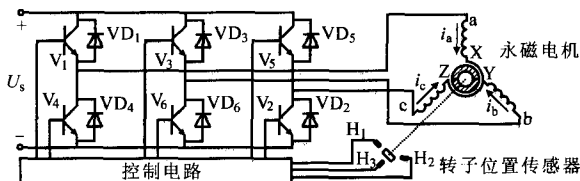


图 1 全控桥式 BLDCM 结构

Fig. 1 A fully-controlled bridge BLDCM structure

采用梯形波电枢驱动电流,两两导通工作方式,每瞬间有 2 个功率管导通。采用分段线性化方法建立梯形波反电动势波形,根据转子位置信号将运行周期分为 6 个阶段,如图 2 所示。根据转子

定稿日期:2012-08-11

作者简介:李梦达(1980-),男,内蒙古赤峰人,博士,讲师,研究方向为电力电子及电力传动。

位置信号和转速信号  $\omega$ , 求出三相反电动势  $E_a$ ,  $E_b$ ,  $E_c$  变化轨迹的直线方程。

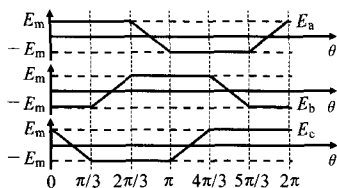


图 2 BLDCM 反电动势波形

Fig. 2 BLDCM back electromotive force waveforms

转子位置与反电动势间的线性关系如表 1 所示, 其中  $k$  为反电动势系数,  $\theta$  为电角度信号。

表 1 转子位置与反电动势对应关系

Table 1 The relationship between rotor position and  $E_a \sim E_c$

转子位置	$E_a$	$E_b$	$E_c$
$0 \sim \pi/3$	$k\omega$	$-k\omega$	$k\omega(1-6\theta/\pi)$
$\pi/3 \sim 2\pi/3$	$k\omega$	$k\omega[-1+6(\theta-\pi/3)/\pi]$	$-k\omega$
$2\pi/3 \sim \pi$	$k\omega[1-6(\theta-2\pi/3)/\pi]$	$k\omega$	$-k\omega$
$\pi \sim 4\pi/3$	$-k\omega$	$k\omega$	$k\omega[-1+6(\theta-\pi)/\pi]$
$4\pi/3 \sim 5\pi/3$	$-k\omega$	$k\omega[1-6(\theta-4\pi/3)/\pi]$	$k\omega$
$5\pi/3 \sim 2\pi$	$k\omega[-1+6(\theta-5\pi/3)/\pi]$	$-k\omega$	$k\omega$

### 3 系统控制策略

系统内环采用滞环控制实现电流调节, 如图 3 所示, 当设定电流值与反馈电流值的瞬时值之差达到滞环宽度正边缘时,  $V_1$  导通,  $V_4$  关断, 电动机接通直流母线的正端, 电流上升; 反之, 电流下降。选择适当的滞环环宽, 即可使实际电流不断跟踪参考电流的波形, 以实现电流闭环控制。

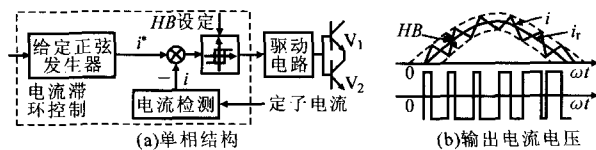


图 3 PWM 逆变器的工作原理

Fig. 3 The operation principle of PWM inverter

系统外环控制器采用单神经元自适应 PID 控制<sup>[3-4]</sup>, 其结构如图 4 所示, 单神经元输入分别为系统误差、误差累积和一阶差分:

$$\begin{cases} x_1(k) = e(k) = r(k) - y(k) \\ x_2(k) = T \sum \Delta e(k) \\ x_3(k) = [e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)]/T \end{cases} \quad (1)$$

神经元通过关联搜索, 计算产生输出信号为:

$$u(k) = u(k-1) + K \sum w_i(k) x_i(k) \quad (2)$$

式中:  $K$  为调节环节放大系数;  $w_i(k)$  为权系数。

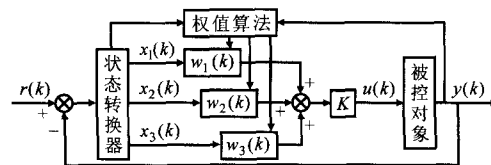


图 4 单神经元控制结构图

Fig. 4 Single neuron control structure

$K$  越大快速性越好, 但超调量大, 使系统不稳定。  $K$  值过小, 系统快速性变差。在此取  $K=2$ 。  $w_i(k)$  的调整采用有监督的 Hebb 学习规则, 实现 PID 控制中 3 个参数的在线实时整定。

$$\begin{cases} w_1(k) = w_1(k-1) + \eta_p e(k) u(k) x_1(k) \\ w_2(k) = w_2(k-1) + \eta_i e(k) u(k) x_2(k) \\ w_3(k) = w_3(k-1) + \eta_d e(k) u(k) x_3(k) \end{cases} \quad (3)$$

$\eta_i$ ,  $\eta_p$ ,  $\eta_d$  分别为积分、比例、微分的学习速率, 采用不同的学习速率便于对不同权系数分别进行调整, 为提高算法的实时性, 每次采样时都直接根据反馈误差对神经元权值调整 1 次,  $\eta_i$ ,  $\eta_p$ ,  $\eta_d$  取值分别为 0.35, 0.5, 0.35; 3 个初始权值取值为 0~1 间的随机数。

由于 PID 参数的在线学习修正与  $e(k)$ ,  $\Delta e(k) = e(k) - e(k-1)$  有关, 基于此将单神经元自适应 PID 控制算法中的加权系数学习修正部分进行修改, 即将式(3)中的  $x_i(k)$  ( $i=1, 2, 3$ ) 改为  $e(k) + \Delta e(k)$ , 即可得到改进后的学习算法。

### 4 控制系统建模

根据上述建模及控制策略, BLDCM 控制系统设计如图 5 所示。采用双闭环控制方案, 转速环由 PI 调节器构成, 电流环由电流滞环调节器构成。

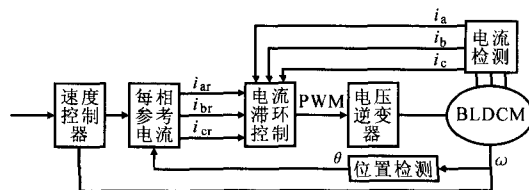


图 5 BLDCM 控制系统设计框图

Fig. 5 The design diagram of BLDCM control system

系统总体仿真模型包括 BLDCM 本体模块、速度控制模块、参考电流模块、电流滞环控制模块、转矩计算模块和电压逆变器模块。

滞环控制模块输入为三相参考电流和三相实际电流, 输出为 PWM 逆变器控制信号。三相参考电流由参考电流模块输出, 转子位置与三相参考电流之间的对应关系如表 2 所示。

系统速度环控制模块中分别采用常规 PID 和单神经元自适应 PID 作为速度环控制器。

表2 转子位置与三相参考电流对应关系

Table 2 The relationship between rotor position and  $i_u \sim i_w$ 

转子位置	$i_u$	$i_v$	$i_w$
$0 \sim \pi/3$	$I_s$	$-I_s$	0
$\pi/3 \sim 2\pi/3$	$I_s$	0	$-I_s$
$2\pi/3 \sim \pi$	0	$I_s$	$-I_s$
$\pi \sim 4\pi/3$	$-I_s$	$I_s$	0
$4\pi/3 \sim 5\pi/3$	$-I_s$	0	$I_s$
$5\pi/3 \sim 2\pi$	0	$-I_s$	$I_s$

## 5 系统仿真及实验验证

BLDCM 参数:定子相绕组电阻  $R=1 \Omega$ , 定子相绕组自感  $L=0.02 \text{ H}$ , 互感  $M=-0.061 \text{ H}$ , 转动惯量  $J=0.005 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ , 反电势常数  $K_e=0.185 \text{ V} \cdot \text{s} \cdot \text{rad}^{-1}$ , 阻尼系数  $B=2 \times 10^{-4} \text{ N} \cdot \text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{rad}^{-1}$ , 额定转速  $n=1000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ , 极对数  $p=1$ , 220 V 直流电源供电, 峰值电流为 35 A。

系统空载启动, 进入稳态后, 在  $t=0.7 \text{ s}$  时突加负载  $T_L=2.5 \text{ N} \cdot \text{m}$ , 在  $t=1.4 \text{ s}$  时撤去负载, 所得相电流、相反电势的仿真曲线如图 6 所示。

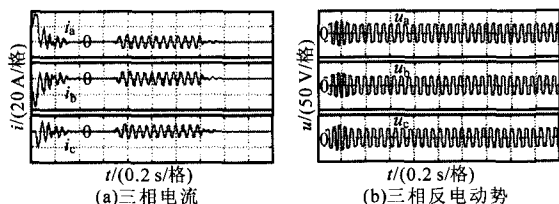


图6 仿真波形

Fig. 6 Simulation waveforms

由图可见, 空载运行时电流为零, 加上负载后电流增加并迅速达到稳态, 由于换向的影响, 方波电流波形的平顶部分有脉动。三相反电势波形平顶部分约为  $120^\circ$ 。

系统在常规离散 PID 和单神经元自适应 PID 控制下的转矩输出响应曲线如图 7 所示。与前者相比可见, 后者的转矩波动较小。

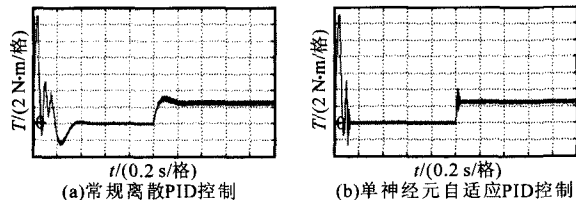


图7 转矩响应曲线

Fig. 7 The torque response curves

以高速 DSP TMS320LF2407A 为基础构建实验控制系统。采用数字式三相 BLDCM 作为被控对象, 内部包括 3 个霍尔传感器和 1 个增量式光电编码器, 在运行过程中将速度和电流信息反馈给 DSP 芯片, DSP 用于实现单神经元控制器的控

制算法和常规 PID 控制算法, 同时对速度、电流等信号进行检测、转换和数据处理, 上位机部分采用 VC++ 编写通信界面, 负责参数设定以及系统故障显示及处理等功能。

在  $1000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$  转速时, 系统空载启动,  $t=1 \text{ s}$  时突加负载  $T_L=2.5 \text{ N} \cdot \text{m}$ , 两种算法的速度响应曲线如图 8 所示。可见, 常规离散 PID 控制下, 系统自空载启动到达稳态所需时间约为  $0.45 \text{ s}$ , 且超调量较大, 约为 40%; 突加负载时, 转速发生突降, 经控制器调节, 约经  $0.35 \text{ s}$  系统恢复到平衡状态。单神经元自适应 PID 控制下, 系统自空载启动后在较短时间内 (约  $0.12 \text{ s}$ ) 进入稳定状态, 且超调量较小, 仅为 1.5%; 突加负载时, 转速仅出现较小波动, 并迅速恢复到平衡状态。实验表明, 单神经元自适应控制器具有较好的自适应性与鲁棒性, 改善了 BLDCM 的控制性能。

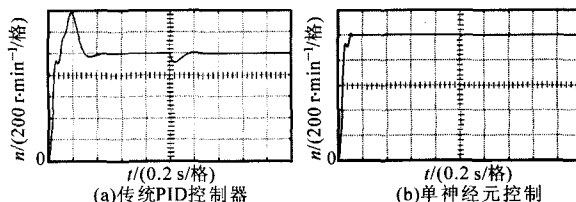


图8 转速响应波形

Fig. 8 The rotating speed response waveforms

## 6 结论

基于无刷直流电机建立的单神经元自适应 PID 智能调速系统在跟随性、抗扰性和鲁棒性等方面的性能均优于常规 PID 控制器。该控制器由于只考虑系统输入和输出的变化情况, 不受系统参数变化的影响, 具有很强的参数适应性和鲁棒性, 动态响应快, 稳态控制好, 可作为高性能调速系统的控制器, 具有广泛的应用前景。

## 参考文献

- [1] 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.
- [2] 卿启新, 叶汉民, 杨晓武, 等. 基于模糊 RBF 神经网络的无刷直流电机调速控制[J]. 化工自动化及仪表, 2010, 37(7): 84-86.
- [3] 付华, 冯爱伟, 徐耀松, 等. 基于单神经元控制器的异步电动机矢量控制[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(1): 127-131.
- [4] 代睿, 曹龙汉, 何俊强, 等. 基于微粒群算法的无刷直流电机单神经元自适应控制[J]. 电工技术学报, 2011, 26(4): 57-63, 70.