

无刷直流电机神经网络 PI 控制系统设计*

温嘉斌, 赵红阳, 刘子宁

(哈尔滨理工大学 电气与电子工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘要: 针对传统 PI 控制存在的动、静态控制性能较差的缺点, 提出一种基于神经网络的 PI 控制方法。将神经网络与传统 PI 控制结合, 构建神经网络 PI 控制系统, 建立三层 BP 神经网络, 并通过梯度下降法对各项参数进行修正, 从而实现 k_p 、 k_i 参数的在线调节。仿真及试验证明, 与传统 PI 控制方法相比, 使用神经网络的 PI 控制系统在不同外部条件下都具有更快的响应速度和更小的超调量, 可明显提高系统的动、静态性能。

关键词: 无刷直流电机; BP 神经网络; 在线更新; PI 控制

中图分类号: TM 33 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2018)12-0050-05

Brushless DC Motor Neural Network PI Control System Design*

WEN Jiabin, ZHAO Hongyang, LIU Zining

(School of Electrical and Electronic Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China)

Abstract: Aiming at the disadvantages of traditional PI control such as poor dynamic and static control performance, a PI control method based on neural network was proposed. Combining neural network and traditional PI control, we constructed the neural network PI control system. Three-layer BP neural network was established, and through the gradient descent method the parameters were modified to achieve on line adjustment of k_p and k_i parameters. Through simulation and experimental verification, it was proved that compared with the traditional PI control method, the PI control system using neural network had faster response and smaller overshoot under different external conditions, which could significantly improve the dynamic and static performance of the system.

Key words: brushless DC motor (BLDCM); BP neural network; online update; PI control

0 引言

无刷直流电机 (Brushless DC Motor, BLDCM) 具有结构简单、运行稳定、调速性能优良等优点, 在航空航天、新能源汽车、家用电器、医疗器械等领域均有广泛的应用。在电机控制领域, 应用最普遍的是传统 PI 控制算法。该算法结构简单、稳定性高、可靠性强、应用范围广。传统 PI 控制算法适用于线性被控对象的模型, 但在实际控制应用中, 被控对象存在许多非线性的干扰因素, 而这些因素复杂多变, 很难建立精确的数学模型。在

这种情况下, 传统 PI 控制过度依赖被控对象数学模型的缺点, 将导致其控制效果不够理想。此时具有自适应、自学习功能的智能控制策略 (如模糊控制、神经网络控制等) 能得到较为满意的控制结果^[1-4]。但模糊控制设计难度较大, 规则难以掌握, 且针对不同的控制对象其模糊规则需要重新制订, 在实际工程中不便大范围推广与应用。

人工神经网络是由大量的基本单元经过复杂的连接而成的一种高度复杂、非线性、能并行处理信息的处理系统, 具有一定的自学习、自适应、非线性映射能力, 且有鲁棒性和容错性较强等特点^[5-8]。

* 基金项目: 国家自然科学基金项目 (51275137)

作者简介: 温嘉斌 (1961—), 男, 博士, 教授, 硕士生导师, 研究方向为电机冷却技术、电机及电机控制。

赵红阳 (1993—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电机驱动与控制。

刘子宁 (1992—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电机驱动与控制。

针对实际应用中传统 PI 控制无法达到预期控制效果的缺点,本文采用 PI 控制和神经网络相结合的方式来实现 BLDCM 的智能控制,使其既具有传统 PI 控制器的优良特性,又具有神经网络控制器的自适应能力。经过仿真与试验验证,相比于传统 PI 控制方法,神经网络 PI 控制可有效提高电机的响应速度及控制精度,从根本上解决传统 PI 自适应能力差的问题。

1 BLDCM 神经网络控制系统

本文根据 BLDCM 的工作原理及控制原理采用转速外环、电流内环的双闭环控制方案。其中电流环采用传统 PI 控制算法,电流内环保证电机的快速起动,同时在动态过程中,电流环能够对电机母线电流进行监测,起到保护作用。BLDCM 在实际运行中会遇到负载、给定转速突变等情况,由于 BLDCM 非线性的特点,传统 PI 控制算法很难达到控制要求。本系统采用神经网络控制理论与传统 PI 算法相结合的神经网络 PI 算法对电机的转速进行控制,以改善电机的响应性能及调速范围,使控制器在不同的运行环境下都能够有较好的静态和动态性能。BLDCM 神经网络 PI 控制系统原理图如图 1 所示。

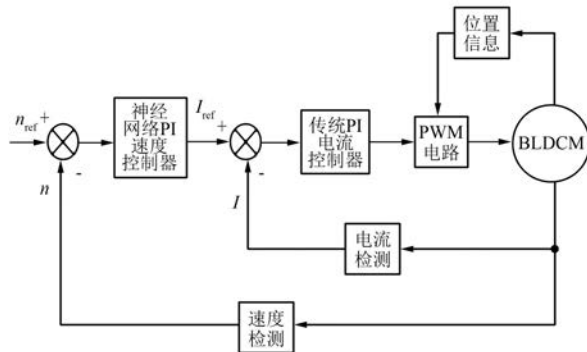


图 1 BLDCM 神经网络 PI 控制系统原理图

2 核心算法设计

2.1 神经网络算法

本文根据控制器实际输入,利用 BP 神经网络对作为神经网络权值的 k_p 、 k_i 值进行在线整定。神经网络输入为误差 e 及误差变化 e_c ,输出的是控制量 $u(t)$ 。本文 BP 神经网络采用 $2 \times 2 \times 1$ 的三层结构,设定输出层权值为 k_p 、 k_i 。整个神经网络

结构如图 2 所示。

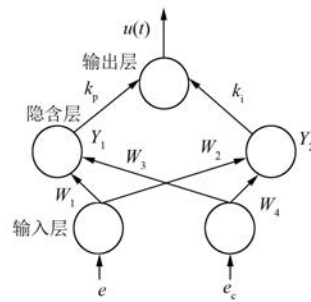


图 2 BP 神经网络结构图

隐含层节点 Y_1 、 Y_2 分别满足如下关系:

$$Y_1 = f_1(W_1 e + W_3 e_c + b_1) \quad (1)$$

$$Y_2 = f_2(W_2 e + W_4 e_c + b_2) \quad (2)$$

其中: Y_1 、 Y_2 为隐含层输出值; W_1 、 W_2 、 W_3 、 $W_4 \neq 0$ 为随机的神经网络初始权值,用于本神经网络的输入层至隐含层的连接; b_1 、 b_2 为神经网络的隐含层阈值,初始值为零。

该神经网络输出层有一个神经元,其输出为两个隐含层节点值的加权,满足如下关系:

$$u(t) = f_3(k_p Y_1 + k_i Y_2 + b_3) \quad (3)$$

其中:比例系数 k_p 、积分系数 k_i 为输出层和隐含层之间的权值。

BP 神经网络在控制过程中依据链式法则修正其权值系数,满足如下关系:

$$\frac{\alpha E}{\alpha W_{n1}} = \frac{\alpha E}{\alpha [u(t)]} \times \frac{\alpha [u(t)]}{\alpha Y} \times \frac{\alpha Y}{\alpha W_n} \quad (4)$$

E 为偏差量,偏差计算公式满足:

$$\sum E = \sum \frac{1}{2} [u(t) - u(0)]^2 \quad (5)$$

式中: $u(t)$ 、 $u(0)$ ——输出目标值与输出实际值。

通过计算输出目标控制量与实际控制量之间的偏差来实时更新权值。BP 神经网络权值更新满足如下关系:

$$k_{p(i)n} = k_{p(i)n-1} - \eta \frac{\alpha E}{\alpha k_{p(i)n-1}} \quad (6)$$

其中: k_{p_n} 、 k_{i_n} 为神经网络更新后权值; η 为学习速率。为了缩短神经网络训练时间及保证神经网络训练效果,本文将神经网络学习速率设为 0.3。BP 神经网络中通过反馈调节输出层初始权值,可得符合电机实时状况的最优控制参数。

2.2 神经网络 PI 控制器设计

PI 控制算法表达式为

$$u(k) = k_p \left[e(k) + \frac{1}{T_i} \int_0^k e(k) dk \right] \quad (7)$$

但在实际运用中需要对式(7)进行离散化处理,可得^[9-10]:

$$u(k) = k_p [e(k) - e(k-1)] + k_i e(k) \quad (8)$$

式中: $e(k)$ 、 $u(k)$ —— k 时刻的速度偏差量、输出控制量。

神经网络 PI 控制器结构如图 3 所示。

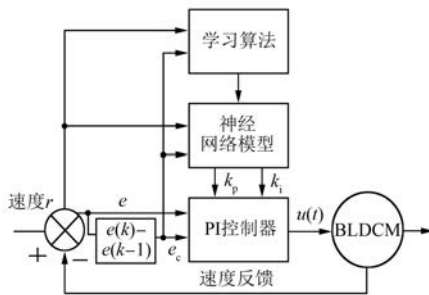


图 3 神经网络 PI 控制器结构

根据原理分析, BP 神经网络 PI 算法的主要流程如图 4 所示。

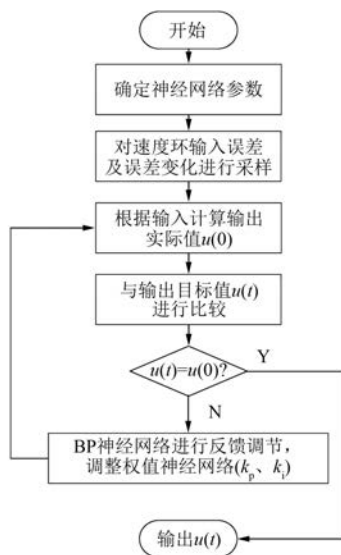


图 4 神经网络算法流程

2.3 神经网络激活函数的实现

本文选择 Sigmoid 函数作为所有神经网络的激活函数,将神经网络中的线性传递函数经过变换转换为非线性函数。Sigmoid 函数计算公式为

$$\varphi(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}} \quad (9)$$

其一阶导数如式(10)所示:

$$\varphi'(x) = \frac{e^{-x}}{(1 + e^{-x})^2} = \varphi(x) [1 - \varphi(x)] \quad (10)$$

由于 Sigmoid 函数及其导数的非线性,本文利用分段线性逼近法来实现非线性函数曲线,利用线性函数来逼近 Sigmoid 函数及其导函数。设某一线性逼近函数为 $f(x)_i$ 。对于 $x_i < x < x_i + \Delta x$,需满足 $\varphi(x) - f(x) \leq E$,偏差达到 E 时,调整函数,开始下一段折线。为了兼顾能耗和精确度,在满足可允许最大误差前提下,本文采用 15 段线性函数来逼近 Sigmoid 函数,采用 11 段线性函数来逼近 Sigmoid 函数的导数。将满足初始条件的激励函数值写入到控制板上的 Flash 中,激励函数不同的输入作为这个存储器的地址,然后根据地址取出 Flash 中存储的 Sigmoid 与 Sigmoid 导数值。Sigmoid 函数及其导函数曲线以及对应的逼近函数折线如图 5 所示。

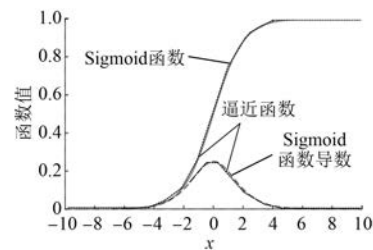


图 5 Sigmoid 函数与其导函数曲线及对应逼近函数折线

3 仿真及试验分析

本文利用 MATLAB/Simulink 搭建了基于神经网络的 BLDCM 转速电流双闭环控制系统模型,并进行了仿真。电流环采用传统 PI 算法进行调节,转速环分别用传统 PI 算法和神经网络 PI 算法进行调节,并进行对比。仿真所选电机参数:相电阻为 $R_s = 1 \Omega$;电感为 $L_M = 6.7 \text{ mH}$;转动惯量为 $J = 0.02 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$;磁极对数为 4;阻尼系数为 $B = 0.000 2 \text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}/\text{rad}$;电机额定转速为 3 000 r/min。

图 6 所示为设定转速 2 000 r/min 电机空载时进行传统 PI 控制和神经网络 PI 控制的电机转速仿真曲线。最终,使用神经网络 PI 控制的 BLDCM 在 0.015 s 到达稳态,而使用传统 PI 控制的 BLDCM 在 0.030 s 达到稳态。

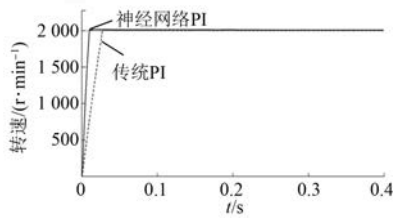


图6 电机空载时给定转速 2 000 r/min 的仿真转速曲线

图7所示为BLDCM空载给定转速2 000~1 500 r/min之间突变时进行传统PI和神经网络PI控制的仿真转速曲线。在0.15 s时,将给定转速由2 000 r/min突变为1 500 r/min,并在0.25 s时突变回2 000 r/min。最终,使用神经网络PI控制的BLDCM分别在0.16 s和0.26 s重新回到稳态,使用传统PI控制的BLDCM分别在0.17 s和0.27 s重新回到稳态。

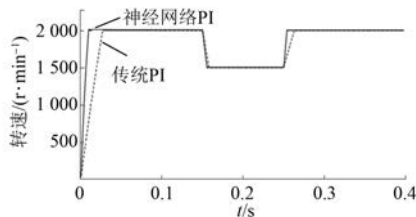


图7 转速2 000~1 500 r/min之间突变的电机空载仿真转速曲线

图8为电机空载给定转速1 000~500 r/min之间突变时传统PI和神经网络PI控制器的仿真转速曲线。在0.15 s时,给定转速由1 000 r/min变为500 r/min,并在0.25 s时变回1 000 r/min。最终,使用神经网络PI控制的BLDCM分别在0.17 s和0.26 s重新回到稳态,使用传统PI控制的BLDCM分别在0.17 s和0.27 s重新回到稳态。

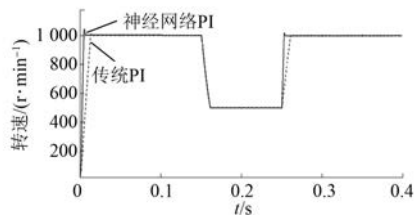


图8 转速1 000~500 r/min之间突变的电机空载仿真转速曲线

仿真曲线表明:采用神经网络PI控制器的BLDCM调速系统在不同的情况下,其动、静态性

能要强于传统的PI控制器。

经过仿真后,本文以Xilinx的Spartan-6的系列XC6SLX16-2CSG324现场可编程门阵列(Field Programmable Gate Array, FPGA)为核心,搭建了基于FPGA的BLDCM控制系统,并在此平台上验证了神经网络PI控制系统的优越性。其硬件控制框图如图9所示。所有神经网络算法及控制器参数在线调节均由软件实现。

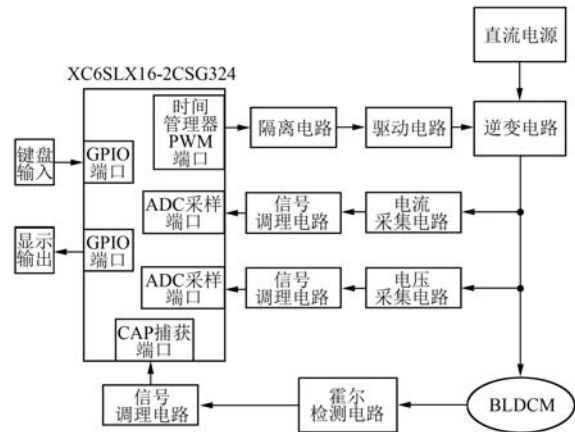


图9 BLDCM控制系统结构

试验用的BLDCM参数如表1所示。

表1 试验用BLDCM参数

参数名称	参数值
额定功率/W	60
额定电压/V	24
额定转速/(r·min ⁻¹)	3 000
额定转矩/(N·m)	0.18
电机极数	4

本文利用软件对FPGA中的算法进行编写并记录转速数据。测试完成后,将记录的数据文件导入MATLAB,利用描点绘图可以看到实测转速曲线。起动BLDCM。设定转速为2 000 r/min时使用传统PI控制和神经网络PI控制的BLDCM实测转速对比曲线如图10所示。根据图10可知,使用传统PI控制的BLDCM在0.31 s时达到稳态,使用神经网络PI控制的BLDCM在0.18 s时达到稳态。

设定转速为2 000~1 500 r/min之间突变时的传统PI控制和神经网络PI控制的BLDCM实测转速对比曲线如图11所示。在1 s时,将电机

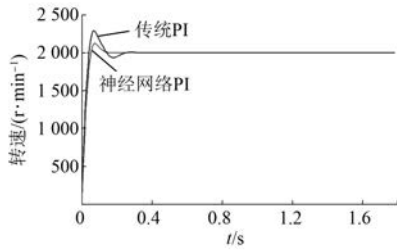


图 10 设定转速 2 000 r/min 时的电机空载实测转速曲线

转速由 2 000 r/min 变为 1 500 r/min, 在 1.9 s 时将转速变回至 2 000 r/min。根据图 11 可知, 使用传统 PI 控制的 BLDCM 分别在 1.46 s 和 2.15 s 时回到稳态, 使用神经网络 PI 控制的 BLDCM 分别在 1.35 s 和 2.06 s 时回到稳态。

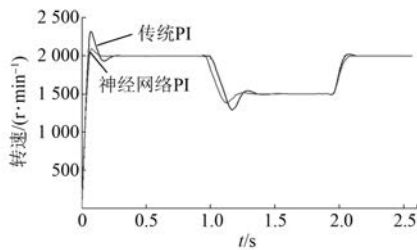


图 11 设定转速 2 000~1 500 r/min 之间突变的电机空载实测转速曲线

设定转速为 1 000~500 r/min 之间突变时的传统 PI 控制和神经网络 PI 控制的实测转速曲线如图 12 所示。在 1.4 s 时, 将电机转速由 1 000 r/min 变为 500 r/min, 在 2.8 s 时将转速变回至 1 000 r/min。根据图 12 可知, 使用传统 PI 控制的 BLDCM 在 2.5 s 和 3.2 s 时回到稳态, 使用神经网络 PI 控制的 BLDCM 在 2.3 s 和 3.1 s 时回到稳态。

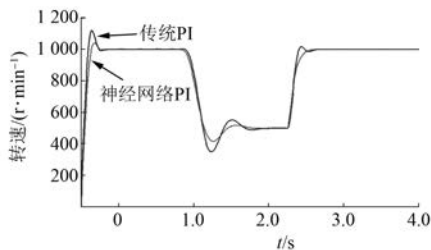


图 12 设定转速 1 000~500 r/min 之间突变的电机空载实测转速曲线

对比图 11、图 12 可得, 在转速突变的情况下使用 BP 神经网络 PI 控制系统具有更强的在

自调节能力, 其动态性能强于传统 PI 控制器。

通过试验对比可知:

(1) 在起动过程中, 神经网络 PI 控制器相比于传统 PI 控制器响应快、调节时间短。

(2) 当给定转速发生变化时, 相比于传统 PI 控制器, 神经网络 PI 控制器在不同转速区间适应能力强、电机转速波动小、回到稳态所需时间短。

4 结 语

针对传统 PI 控制调速系统存在响应速度慢、自适应能力差的问题, 本文提出了基于神经网络的 BLDCM PI 控制系统, 能较好地实现对 BLDCM 的速度控制。仿真和试验对比分析表明, 该控制系统在各个转速区间都有良好的动、静态性能。与传统的 PI 控制系统相比, 该系统响应速度快, 控制精度高, 具有较强的鲁棒性, 从根本上解决了传统 PI 控制自适应能力差的问题。

【参考文献】

- [1] 张勇, 程小华. 智能控制在无刷直流电机控制中的应用研究[J]. 微电机, 2013, 46(10): 87-90.
- [2] 纪志成, 沈艳霞, 姜建国. 一种新型的无刷直流电机调速系统的模糊 PI 智能控制[J]. 电机与控制学报, 2003, 7(3): 248-254.
- [3] 王霞, 朱景伟. 基于模糊 PI 控制的无刷直流电机调速系统[J]. 电气传动, 2014, 44(1): 63-67.
- [4] 王云良, 王继水, 王敏其. 无刷直流电机自适应模糊优化控制[J]. 电机与控制应用, 2014, 41(11): 14-17, 22.
- [5] 辛斌, 陈杰, 彭志红. 智能优化控制: 概述与展望[J]. 自动化学报, 2013, 39(11): 1831-1848.
- [6] 王敬志, 任开春, 胡斌. 基于 BP 神经网络整定的 PID 控制[J]. 工业控制计算机, 2011, 24(3): 72-73.
- [7] 冯立颖. 改进的 BP 神经网络算法及其应用[J]. 计算机仿真, 2010, 27(12): 172-175.
- [8] 刘国海, 金鹏, 魏海峰. 无刷直流电机调速系统神经网络逆控制[J]. 电工技术学报, 2010, 25(8): 24-30.
- [9] 黄剑平. 基于 BP 神经网络的 PID 控制研究[J]. 计算机仿真, 2010, 27(7): 167-170.
- [10] 张金龙, 徐慧, 刘京南, 等. 基于模糊神经网络的精密角度定位 PID 控制[J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(3): 549-554.

收稿日期: 2018-07-06