

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2019.09.021

永磁同步电机的复合控制及参数自整定研究*

贺云波, 陈家俊

(广东工业大学 机电工程学院, 广东 广州 510006)

摘要:针对常规的比例-积分-微分(PID)控制器性能不足,以及PID参数手动调整不便等问题,对前馈控制结构及径向基函数(RBF)神经网络进行了研究,提出了一种“三闭环+前馈”的复合PID控制结构。利用RBF神经网络对控制系统进行了在线辨识,结合梯度下降法对控制器的PID参数进行了自动调整,并在实验平台上进行了常规的三闭环PID控制器和“三闭环+前馈”的复合PID控制器的对比实验,以及位置环PID参数自整定的实验。研究表明:相比于常规PID控制结构,复合控制结构的位置响应性能提高了12%,速度响应性能提高了31%;利用RBF神经网络能够实现PID参数的自整定,且整定效果较好。

关键词:复合控制;RBF神经网络;梯度下降法;PID自整定

中图分类号:TM301.2

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2019)09-0995-06

Compound control and parameter self-tuning of permanent magnet synchronous motor

HE Yun-bo, CHEN Jia-jun

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

Abstract: Aiming at the deficiency of conventional proportional-integral-differential (PID) controller and the inconvenience of manual adjustment of PID parameters, the feedforward control structure and radial basis function (RBF) neural network were researched. A compound PID control structure of "three-closed-loop + feedforward" was proposed. RBF neural network was used for on-line identification of control system and gradient descent method was used to automatically adjust the PID parameters of the controller. Then contrastive experiments of conventional three-closed-loop PID controller and "three-closed-loop + feed-forward" compound PID controller and self-tuning experiment of position loop PID parameters were carried out on the experimental platform. The results indicate that compared with the conventional PID control structure, the position response performance of the compound control structure is improved by 12% and the speed response performance is improved by 31%. In addition, the self-tuning of the PID parameters can be realized by using RBF neural network and the tuning effect is good.

Key words: compound control; RBF neural network; gradient descent method; PID self-tuning

0 引 言

永磁同步电动机(PMSM)因具有发热小、响应快、启动转矩大、功率因数高等优点,被很多交流伺服系统作为动力源^[1]。PID控制器算法实现简单、应用范围

广。但在高精度高、加速度应用领域,需要对普通PID算法进行改进。

河海大学的戴卫力等人^[2]针对永磁同步电机传统三环控制,采用结合变结构控制和前馈控制的复合控制策略,提高了响应速度和定位精度;范宇恒、李培

收稿日期:2019-05-09

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51675106, U1601202);广东省自然科学基金资助项目(2016A030308016, 2015A030312008);广东省R&D重点项目(2015B010133005, 2015B010104006, 2015B0101040088);广东省重大研发专项资助项目(2018B090906002)

作者简介:贺云波(1973-),男,湖北荆州人,博士,教授,主要从事运动控制方面的研究。E-mail:heyunbo@gdut.edu.cn

林等人^[3]针对泵控系统转速不稳以及负载扰动的问题,提出了一种利用优化后增量式 PID 与前馈结合的复合控制结构,提高了系统的调速能力以及鲁棒性。

神经网络因具有很好的逼近非线性映射能力,较强的鲁棒性^[4],在控制领域得到广泛应用。徐杭东、麦云飞^[5]采用单神经元 PID 自适应控制器,结合 Hebb 神经网络学习算法,对电液位置伺服系统进行了控制,实现了 PID 参数的在线调整,系统稳定性和鲁棒性好、动态精度高;FREIRE E O 等^[6]提出了一种适用于非线性动力学的多输入多输出自适应神经元 PID (AN-PID) 控制器,修正了由于机器臂动力学的不确定性和变化而导致的跟踪误差,并通过实验验证了该控制策略的鲁棒性和自适应能力;韩国的 CHO C N 等人^[7]提出了一种基于神经网络的 PID 控制器参数更新算法,有效降低了轮廓误差和跟踪误差,提高了加工质量和效率;日本的 KENTO K 等人^[8]针对非线性系统,利用神经网络设计了非线性 PID 控制器,在线整定 PID 参数,并通过仿真和实验验证了该控制器的可行性。

针对常规的比例-积分-微分 (PID) 控制器性能不足,以及 PID 参数手动调整不便等问题,本文提出一种“三闭环+前馈”的复合 PID 控制结构。

1 PMSM 伺服系统控制结构

1.1 复合控制结构

常规的 PID 算法难以满足伺服系统快速响应和高精度位置跟踪等要求^[9],因此,引入前馈控制构成复合控制,对输入信号进行补偿,其原理图如图 1 所示。

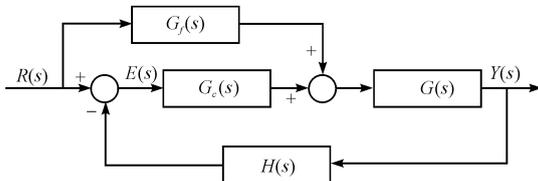


图 1 前馈控制原理图

$R(s)$ —系统输入; $Y(s)$ —系统输出; $E(s)$ —输入与输出之差; $G_c(s)$ —控制器的传递函数; $G(s)$ —控制对象的传递函数; $G_f(s)$ —前馈补偿的传递函数; $H(s)$ —反馈通道的传递函数

上述复合控制系统的传递函数为:

$$\Phi(s) = \frac{[G_c(s) + G_f(s)]G(s)}{1 + G_c(s)G(s)H(s)} \quad (1)$$

由式(1)可知:前馈的引入不会改变系统的特征方程,即不会对系统的稳定性造成影响^[10],因此,文中对 PMSM 采用了“三闭环+前馈”的复合控制结构,其

控制框图如图 2 所示。

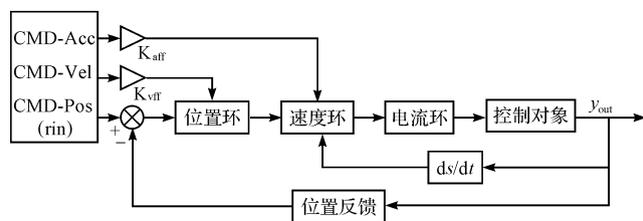


图 2 复合控制结构框图

CMD-Acc—规划加速度指令;CMD-Vel—规划速度指令;CMD-Pos—规划位置指令; y_{out} —系统输出; K_{aff} —加速度前馈系数; K_{vff} —速度前馈系数

1.2 积分分离算法

积分环节的作用主要是消除系统静差,提高控制精度。但在电机启动或停止时,短时间内系统响应延迟,导致偏差很大,若此时有积分作用,可能造成积分累积过大,发生系统振荡。文中采用了积分分离算法,其算法可描述为:

$$\Delta I = \begin{cases} K_I \sum_{j=0}^k e(j), & |e(j)| \leq \varepsilon \\ 0, & |e(j)| > \varepsilon \end{cases} \quad (2)$$

式中: K_I —积分系数; ε —设定值。

2 RBF 神经网络模型

2.1 RBF 神经网络

径向基函数(RBF)网络是一种三层前向网络,包括 1 个输入层、1 个隐含层以及 1 个输出层。这种结构减少了出现局部极小的可能性,加快收敛^[11]。

2.2 被控对象的辨识

在 RBF 神经网络中,高斯核函数 h_j 能够将原始特征映射到无穷维,其表达式为:

$$h_j = \exp\left(-\frac{\|x - c_j\|^2}{2b_j^2}\right), j = 1, 2, \dots, m \quad (3)$$

式中: $\| * \|$ —欧几里得 2 范数; x —网络的输入向量; c_j —第 j 个隐含层节点的中心矢量; b_j —节点 j 的基宽度参数。

辨识器的性能指标函数为:

$$J_1 = \frac{1}{2} (y_{out}(k) - y_m(k))^2 \quad (4)$$

网络权值、节点中心以及节点基宽参数,根据梯度下降算法进行迭代^[12],即:

$$w_j(k) = w_j(k-1) + \eta (y_{out}(k) - y_m(k)) h_j + \alpha (w_j(k-1) - w_j(k-2)) \quad (5)$$

$$\Delta b_j = (y_{out}(k) - y_m(k))w_j h_j \frac{|X - C_j|^2}{b_j^3} \quad (6)$$

$$b_j(k) = b_j(k-1) + \eta \Delta b_j + \alpha (b_j(k-1) - b_j(k-2)) \quad (7)$$

$$\Delta c_{ji}(k) = (y_{out}(k) - y_m(k))w_j \frac{x_j - c_{ji}}{b_j^2} \quad (8)$$

$$c_{ji}(k) = c_{ji}(k-1) + \eta \Delta c_{ji} + \alpha (c_{ji}(k-1) - c_{ji}(k-2)) \quad (9)$$

式中: η —学习速率; α —动量因子。

雅克比(Jacobian)信息如下式所示:

$$\frac{\partial y(k)}{\partial \Delta u(k)} \approx \frac{\partial y_m(k)}{\partial \Delta u(k)} = \frac{\partial \sum_{j=1}^m w_j h_j}{\partial \Delta u(k)} =$$

$$\frac{\sum_{j=1}^m w_j \frac{\partial \exp\left(-\frac{|x_1 - c_j|^2}{2b_j^2}\right)}{\partial \Delta u(k)}}{\sum_{j=1}^m w_j h_j \frac{c_j - x_1}{2b_j^2}} = \frac{\sum_{j=1}^m w_j h_j \frac{c_j - x_1}{2b_j^2}}{\sum_{j=1}^m w_j h_j \frac{c_j - x_1}{2b_j^2}} = \quad (10)$$

3 RBF神经网络整定PID

3.1 RBF整定PID控制系统结构

本文的永磁同步电机控制系统采用“三闭环 + 前馈”的复合控制结构,并且通过RBF神经网络对系统进行在线辨识,并结合学习算法,对位置环控制器的PID参数进行整定。

其控制系统结构框图如图3所示。

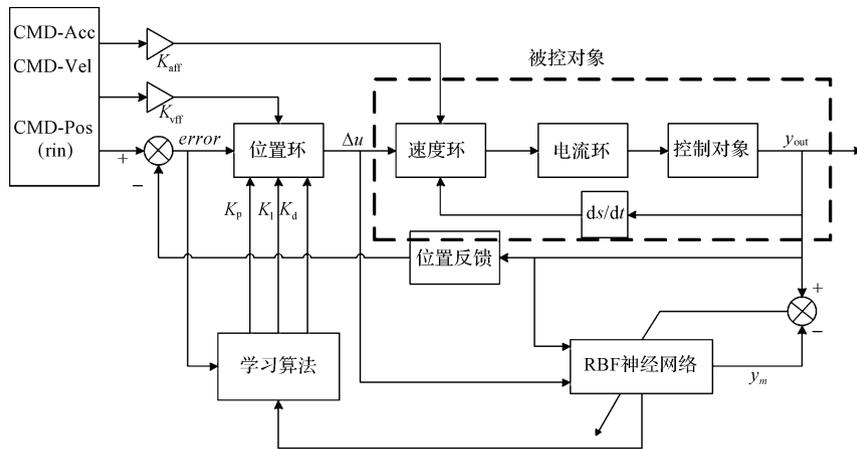


图3 RBF整定PID控制系统结构框

3.2 RBF整定位置环PID原理

本文利用RBF神经网络整定位置环控制器PID参数,将位置环环节后面的速度环环节、电流环环节以及控制对象当成一个整体(新的被控对象)。RBF神经网络对该被控对象进行在线辨识,并将辨识得到的被控对象的雅克比信息结合学习算法,对位置环PID参数进行整定。系统采用增量式PID控制器,其控制误差为:

$$error(k) = rin(k) - y_{out}(k) \quad (11)$$

位置环PID控制器的3项输入为:

$$\begin{cases} \Delta k_p = -\eta_p \frac{\partial E}{\partial k_p} = -\eta_p \frac{\partial E}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial \Delta u} \frac{\partial \Delta u}{\partial k_p} = \eta_p error(k) \frac{\partial y}{\partial \Delta u} xc(1) \\ \Delta k_i = -\eta_i \frac{\partial E}{\partial k_i} = -\eta_i \frac{\partial E}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial \Delta u} \frac{\partial \Delta u}{\partial k_i} = \eta_i error(k) \frac{\partial y}{\partial \Delta u} xc(2) \\ \Delta k_d = -\eta_d \frac{\partial E}{\partial k_d} = -\eta_d \frac{\partial E}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial \Delta u} \frac{\partial \Delta u}{\partial k_d} = \eta_d error(k) \frac{\partial y}{\partial \Delta u} xc(3) \end{cases} \quad (15)$$

联合式(10,15)即可得到位置环PID控制器的参数调整量。

$$\begin{cases} xc(1) = error(k) - error(k-1) \\ xc(2) = error(k) \\ xc(3) = error(k) - 2error(k-1) + error(k-2) \end{cases} \quad (12)$$

位置环PID控制器的输出为:

$$\Delta u = k_p xc(1) + k_i xc(2) + k_d xc(3) \quad (13)$$

神经网络整定性能指标函数为:

$$E(k) = \frac{1}{2} error(k)^2 \quad (14)$$

k_p, k_i, k_d 的调整采用梯度下降法,即:

3.3 算法流程图

控制算法流程图如图4所示。

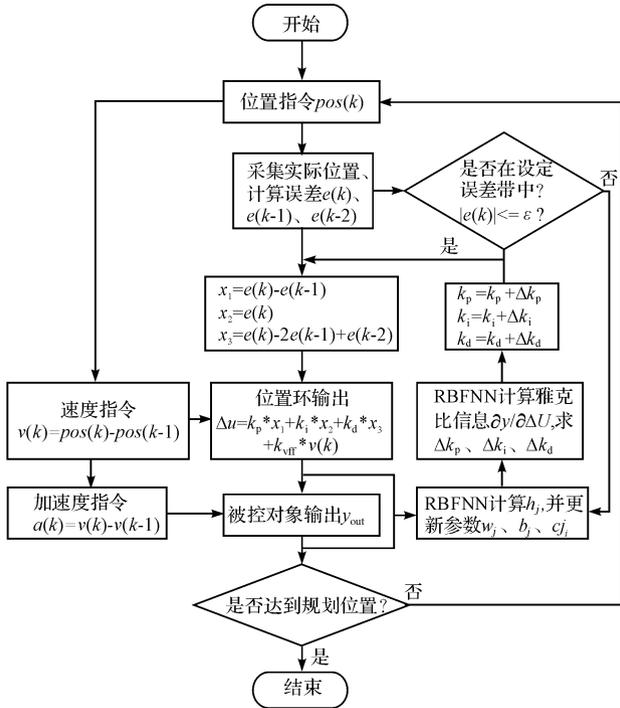


图 4 控制算法流程图

4 实验验证

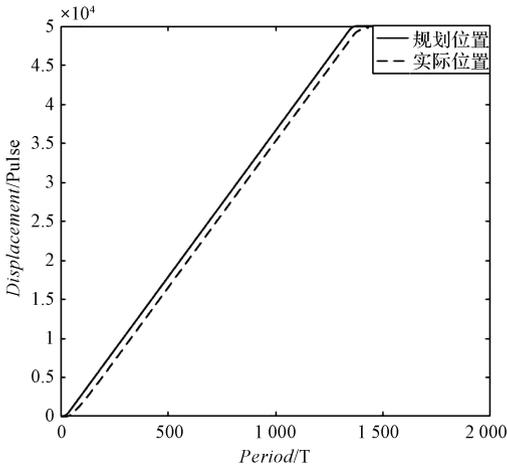
4.1 实验平台搭建

实验平台由松下 MSMD022P1U 交流伺服电机、松下 MADDT1207 驱动器、固高科技 GHN 运动控制卡组成。本研究利用 Visual Studio 的 MFC 编写上位机软件,利用亚德诺半导体的 DSP 软件 CCES2.8.0 编写控制算法。

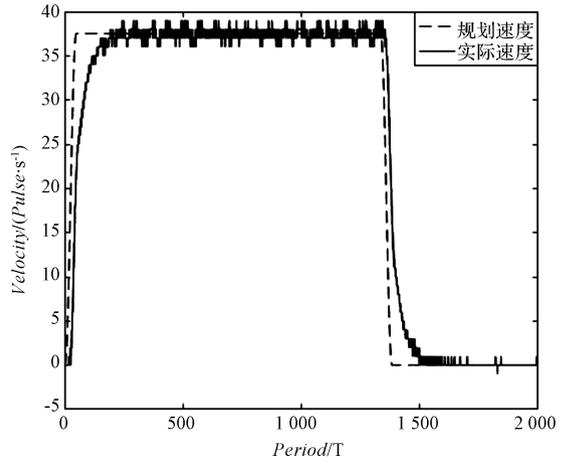
4.2 实验结果及分析

GHN 运动控制卡的采样频率是 4 K,即伺服周期是 250 us。实验过程中采用控制变量法。

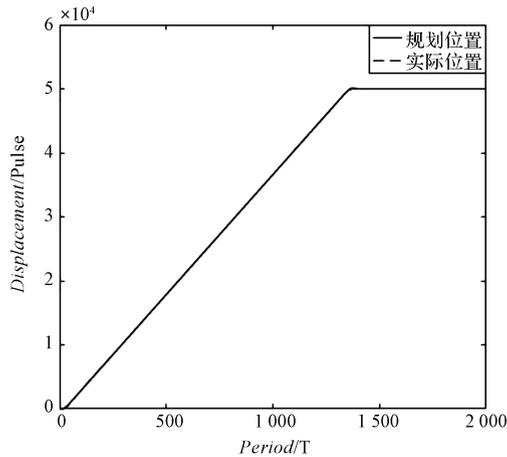
常规结构与复合结构控制效果对比图如图 5 所示。实验中,PID 参数保持一致。位置环控制器中, $k_p = 0.03, k_i = 0.0005, k_d = 0.5$;速度环控制器中, $k_p = 240, k_i = 0.02, k_d = 150$ 。其中,图 5(a,b)采用常规三闭环控制结构;图 5(c,d)采用“三闭环 + 前馈”复合控制结构,其中, $k_{vff} = 1.115, k_{aff} = 3000$ 。



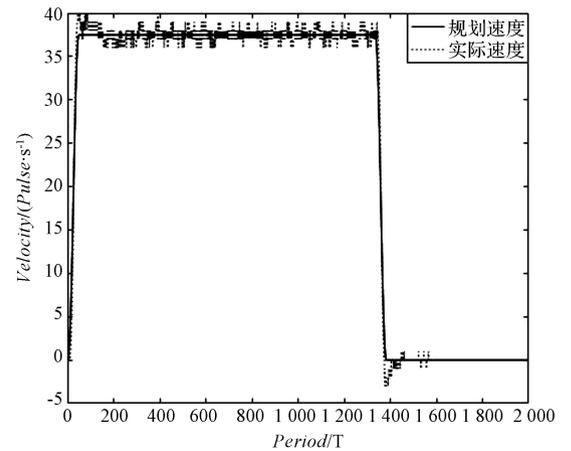
(a) 无前馈位置响应



(b) 无前馈速度响应



(c) 有前馈位置响应



(d) 有前馈速度响应

图 5 常规结构与复合结构效果对比图

图5(a)中,当位置给定值为50 000 Pulse时,系统达到稳态的周期数为1 590,约0.398 s;

图5(b)中,当速度给定值为37.5 Pulse/s时,系统达到稳态的周期数为192,约0.048 s;

图5(c)中,当位置给定值为50 000 Pulse时,系统达到稳态的周期数为1 408,约0.352 s;

图5(d)中,当速度给定值为37.5 Pulse/s时,系统达到稳态的周期数为130,约0.033 s。

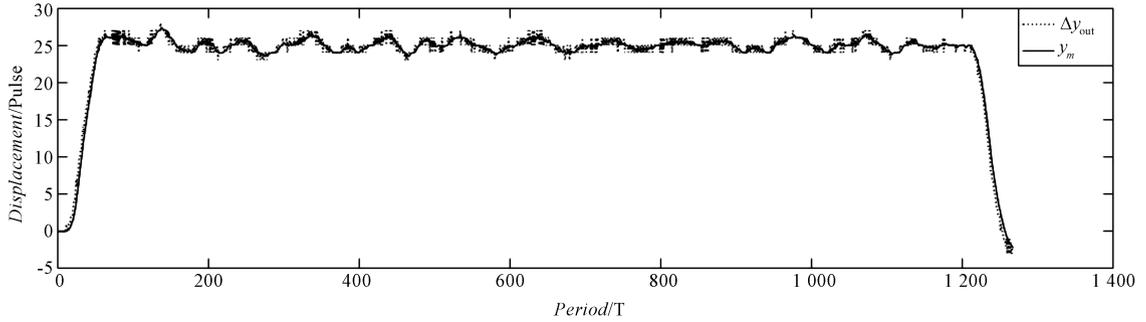
在位置响应方面,带前馈的复合控制结构比常规控制结构缩短了0.046 s,位置响应性能提高12%;在

速度响应方面,带前馈的复合控制结构比常规控制结构缩短了0.015 s,速度响应性能提高31%。

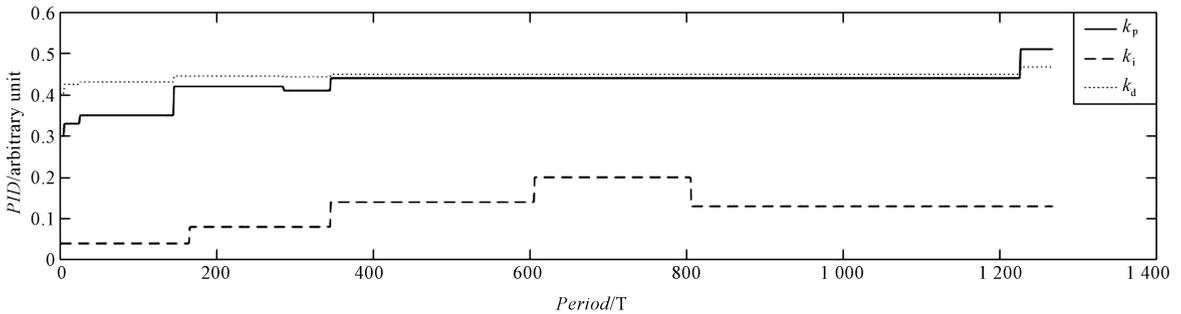
由图5可看出:采用带前馈的复合控制之后,电机在启动后即能迅速跟随规划位置及规划速度,带前馈的复合控制结构能够有效提高系统的响应能力。

进行RBF神经网络整定位置环PID时,位置环控制器中, $k_p = 0.03$, $k_i = 0.0004$, $k_d = 0.4$;速度环控制器中, $k_p = 240$, $k_i = 0.02$, $k_d = 150$;前馈控制器中, $k_{\text{vff}} = 1.115$, $k_{\text{aff}} = 3000$ 。

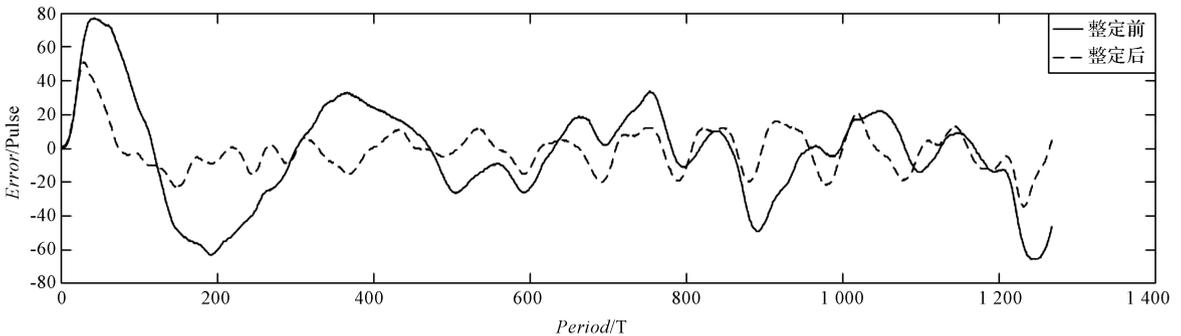
RBF神经网络整定前后效果图如图6所示。



(a) RBF辨识效果图



(b) PID参数整定效果图



(c) 整定前后跟踪误差对比图

图6 RBF神经网络整定前后效果图

图6(a)中, Δy_{out} 是被控对象的输出, y_m 是RBF神经网络的输出。可以看出:RBF神经网络对系统实际输出的逼近效果很好,由式(10)得到的Jacobian信息更加准确。

图6(b)中,为了让曲线更加直观, k_p 的比例放大了10倍, k_i 的比例放大了100倍。实验中,RBF神经

网络整定位置环PID的参数为 $k_p = 0.051$, $k_i = 0.0013$, $k_d = 0.467$ 。

图6(c)中,曲线为跟踪误差曲线,实线为未利用RBF神经网络进行PID整定时的位置跟随误差,虚线是利用RBF神经网络进行PID整定后的位置跟随误差。由图可知:整定前系统的超调量为63,整定后系

统的超调量为 23,超调量减少了 63.5%;同时,动态跟随误差也大大减小。总体上,RBF 神经网络进行 PID 整定的效果较好。

5 结束语

在分析 PMSM 伺服系统传统三闭环控制结构的基础上,针对其控制性能在某些应用领域难以满足需求,以及 PID 参数手动整定繁琐费时的问题,本文对前馈控制以及 RBF 神经网络进行了理论分析,将三者结合起来,提出了一种“三闭环 + 前馈”的复合 PID 控制结构。

实验结果表明:“三闭环 + 前馈”的复合控制结构能够有效提高系统的响应能力,位置响应性能可提高 12%,速度响应性能可提高 31%;利用 RBF 神经网络可实现 PID 参数的自整定,具有一定的工程价值。

参考文献 (References):

- [1] 唐任远. 现代永磁电机理论与设计[M]. 北京:机械工业出版社,2002.
- [2] 戴卫力,张晓峰. 永磁同步伺服电机的变结构与前馈复合控制[J]. 科学技术与工程,2019,19(4):131-137.
- [3] 范宇恒,李培林,王 葳,等. 基于 PID 与前馈相结合的泵控马达恒速输出系统研究[J]. 机床与液压,2018,46(1):68-73,90.
- [4] 孙增圻. 智能控制理论与技术[M]. 2 版. 北京:清华大学

出版社,2011.

- [5] 徐杭东,麦云飞. 基于神经网络的液压材料试验机系统自适应 PID 控制研究[J]. 机电工程,2018,35(4):375-379.
- [6] FREIRE E O ,ROSSOMANDO F G ,SORIA C M . Self-tuning of a neuro-adaptive PID controller for a SCARA robot base on neural network[J]. **IEEE Latin America Transactions**,2018,16(5):1364-1374.
- [7] CHO C N,SONG Y H,LEE C H,et al. Neural network-based real time PID gain update algorithm for contour error reduction [J]. **International Journal of Precision Engineering and Manufacturing**,2018,19(11):1619-1625.
- [8] KENTO K,SHIN W,SHUICHI O. Design of neural network PID controller based on E-FRIT[J]. **IEEE Transactions on Electronics Information and Systems**,2018,138(5):512-519.
- [9] 刘汉忠,俞 鹏. 模糊 PID 自适应控制在微型齿轮泵恒流控制系统中的应用[J]. 流体机械,2018,46(12):50-53,84.
- [10] 李万周,侯伯杰,高建设,等. 直线电机速度和加速度的复合前馈控制[J]. 机床与液压,2015(21):146-149.
- [11] LU Ying-wei,SUNDARARAJAN N ,SARATCHANDRAN P. Performance evaluation of a sequential minimal radial basis function neural network learning algorithm [J]. **IEEE Transactions on Neural Networks**,1998,9(2):308-318.
- [12] 邵文强,康尔良. 基于 RBF 神经网络的永磁同步电动机 PID 控制[J]. 微特电机,2018,46(11):75-78.

[编辑:周昱晨]

本文引用格式:

贺云波,陈家俊. 永磁同步电机的复合控制及参数自整定研究[J]. 机电工程,2019,36(9):995-1000.

HE Yun-bo,CHEN Jia-jun. Compound control and parameter self-tuning of permanent magnet synchronous motor[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2019,36(9):995-1000.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>