

[自控·检测]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2022.04.009

基于RBF神经网络的永磁同步电机控制系统

李瑞琦^{1,2}, 边火丁^{1,2}, 杨树炳³, 张华^{1,2*}

- (1. 浙江理工大学机械与自动控制学院, 浙江 杭州 310018;
2. 浙江理工大学浙江省现代纺织装备技术重点实验室, 浙江 杭州 310018;
3. 杭州汇坤控制技术有限公司, 浙江 杭州 310005)

摘要: 由于永磁同步电机控制系统具有非线性等特点, 而使传统PID人工调节参数过程过于繁琐, 且无法根据电机的运行状态改变参数, 为了提高控制精度、增强控制系统的自适应能力, 课题组以电流环PI控制为基础, 结合径向基(RBF)神经网络对永磁同步电机进行在线辨识, 根据辨识得到的灵敏度信息整定PID控制参数, 建立参考模型。在MATLAB软件中利用Simulink中建立了PMSM模型, 通过对比PID、RBF-PID在启动环节和负载变化时的速度变化, 验证了改进BRF-PID控制的有效性。仿真结果表明RBF-PID控制具有更快的响应, 更好的抗干扰能力。

关键词: 永磁同步电机; 速度控制; 径向基函数神经网络; PID控制

中图分类号: TM351; TH39 文献标志码: A 文章编号: 1005-2895(2022)04-0052-05

Permanent Magnet Synchronous Motor Control System Based on RBF Neural Network

LI Ruiqi^{1,2}, BIAN Huoding^{1,2}, YANG Shubing³, ZHANG Hua^{1,2*}

- (1. Faculty of Mechanical Engineering and Automation, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China;
2. Zhejiang Provincial Key Laboratory of Modern Textile Equipment Technology, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China;
3. Hangzhou Huikun Control Technology Limited Company, Hangzhou 31005, China)

Abstract: Due to the nonlinear characteristics of the permanent magnet synchronous motor control system, the traditional PID parameter adjustment process is too cumbersome, and the parameters cannot be changed according to the motor running state. In order to improve the precision of control and enhance the adaptive ability of the control system, based on the current loop PI control, combined with radial basis (RBF) neural network, the permanent magnet synchronous motor was identified online. The PID control parameters were adjusted according to the sensitivity information identified and a reference model was established. The PMSM model was established in Simulink in MATLAB software. The effectiveness of the improved BRF-PID control was verified by comparing the speed changes of PID and RBF-PID in the starting link and load changes. Simulation results show that RBF-PID has faster response and better anti-interference ability.

Keywords: PMSM (Permanent Magnet Synchronous Motor); speed control; RBF (Radical Basis Function) neural network; PID control

随着工业自动化技术的发展, 在工业生产制造行业, 永磁同步电机的应用越来越广泛。永磁同步电机具有结构简单、省电、效率高和运行可靠等特点^[1]。目前, 永磁同步电机控制方式主要依然是传统PID控

制。传统PID具有算法结构简单、方便移植等优点, 但是面对生产中复杂的工况, 尤其一些对于控制精度要求较高的应用场景, 就很难满足控制需求^[3]。

永磁同步电机在运行中, 外部工况往往非常复杂,

收稿日期: 2022-03-09; 修回日期: 2022-05-20

第一作者简介: 李瑞琦(2001), 男, 湖北十堰人, 本科, 主要研究方向为机电自动化。通信作者: 张华(1979), 男, 浙江杭州人, 讲师, 博士, 主要研究方向为机器人运动控制和智能纺织装备控制。E-mail: zhanghua@zstu.edu.cn

伴随着一些非线性因素的影响^[4],很容易受到外部扰动,由于很难对系统精确地建模,依靠人工调节 PID 控制器的参数,过程繁琐,且影响电机的正常运行^[5]。近年来神经网络发展迅速,RBF 神经网络具有结构简单、学习速度快的特点,且能够以任意精度逼近目标,能很好地避免局部最小的问题^[6]。

课题组以永磁同步电机伺服系统速度环为研究对象,将径向基函数(Radical Basis Function, RBF)神经网络与 PID 控制器互相结合,并在 Simulink 中由 RBF-PID 在线对系统进行辨识,根据辨识得到的灵敏度信息整定 PID 控制参数,最后通过仿真验证了该方法的有效性。

1 永磁同步电机模型

在 d - q 坐标系下的永磁同步电机伺服系统^[7],其数学模型为:

电压方程:

$$\left. \begin{aligned} u_d &= R_s i_d + L_d \frac{d}{dt} i_d - p\omega L_q i_q; \\ u_q &= R_s i_q + L_q \frac{d}{dt} i_q + p\omega(L_d i_d + \Psi_f) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: u_d 和 u_q 分别为 d 轴和 q 轴上定子电压分量, R_s 为定子电阻, i_d 和 i_q 分别为 d 轴和 q 轴上定子电流分量, L_d 和 L_q 分别为 d 轴和 q 轴上定子电感分量, ω 为转子机械角速度, Ψ_f 为永磁体磁链, p 为极对数。

电磁转矩方程:

$$T_e = \frac{3}{2} p [\Psi_f i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] \quad (2)$$

式中 T_e 为电磁转矩。

电磁转矩方程在有负载的情况下与负载转矩还应满足:

$$T_e - T_L = J \frac{d\omega}{dt} + B\omega \quad (3)$$

式中: T_L 为负载转矩, J 为转动惯量, B 为摩擦因数。

$$T_e = J \frac{d\omega}{dt} + B\omega + T_L = \frac{3p}{4} (\Psi_f + (L_d - L_q) i_d) i_q \quad (4)$$

为了实现 d 轴和 q 轴的电流静态解耦,矢量控制时 $i_d = 0$,所以式(4)可以简化为:

$$T_e = \frac{3p}{4} \Psi_f i_q \quad (5)$$

由上述式子可以看出,永磁同步电机的数学模型具有非线性,并且和负载转矩关联性强。

2 径向基神经网络模型

RBF 神经网络是一种前馈式 3 层神经网络,包括 1 层输入层、1 层输出层和 1 层隐含层^[8],其网络结构如图 1 所示。

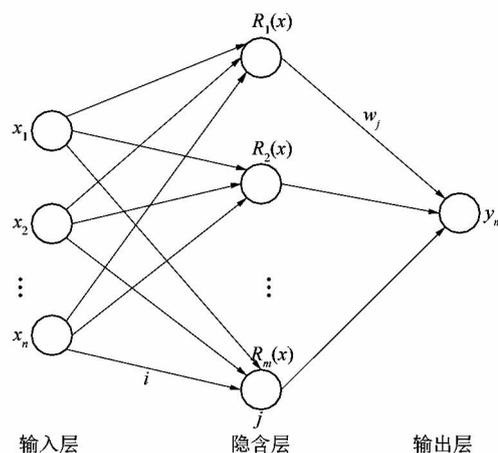


图 1 RBF 神经网络结构示意图

Figure 1 Schematic diagram of RBF neural network structure

第 1 层输入层的输入为:

$$\mathbf{X} = [x_1, x_2, \dots, x_n]$$

第 2 层隐含层径向基函数选取为高斯函数,高斯基函数具有形式简单、径向对称、光滑性好等优点,能够快速逼近目标值^[9]。高斯函数表达式如下:

$$h_j = \exp \left(- \frac{\| \mathbf{X} - \mathbf{c}_j \|^2}{b_j^2} \right)$$

式中: \mathbf{c}_j 为第 j 个节点的中心向量, b_j 为第 j 个节点宽度, $\| * \|$ 为欧几里得范数。

第 3 层的输出为:

$$y_m(k) = w_1 h_1 + w_2 h_2 + \dots + w_j h_j$$

式中: w_1, w_2, \dots, w_j 为节点权值。

RBF 神经网络的性能指标函数为:

$$E(k) = \frac{1}{2} e(k)^2 = \frac{1}{2} (y(k) - y_m(k))^2$$

式中: $e(k)$ 为跟踪误差, $y(k)$ 为目标系统实际输出, $y_m(k)$ 为神经网络辨识输出。

反向调节使用梯度下降法对输出权值、节点中心和节点宽度进行调整,梯度下降法具有形式简单、效率

较高和局部寻优效果良好等优点,因此采用梯度下降法作为反向调节方法^[10]。

节点的权值调节方法如下:

$$w_j(k) = w_j(k-1) + \eta[y(k) - y_m(k)]h_j + \alpha[w_j(k-1) - w_j(k-2)]。$$

式中: η 为学习率, α 为动量因子。

节点带宽参数调节方法如下:

$$b_j(k) = b_j(k-1) + \eta\Delta b_j + \alpha[b_j(k-1) - b_j(k-2)]。$$

中心向量调节方法如下:

$$\Delta c_{ji} = [y(k) - y_m(k)]w_j \frac{x_j - c_{ji}}{b_j^2};$$

$$c_{ji}(k) = c_{ji}(k-1) + \eta\Delta c_{ji} + \alpha[c_{ji}(k-1) - c_{ji}(k-2)]。$$

辨识系统的 Jacobian 灵敏度信息如下所示:

$$\frac{\partial y(k)}{\partial \Delta u(k)} \approx \frac{\partial y_m(k)}{\partial \Delta u(k)} = \sum_j^m w_j h_j \frac{c_{ji} - x_1}{b_j^2}。$$

3 基于 RBF 神经网络自适应 PID 控制

基于 RBF 神经网络整定的 PID 控制系统结构如图 2 所示。其中 K_p, K_i, K_d 参数为在线调整方式,以克服系统的特性、运行工况而引起的模型变化。

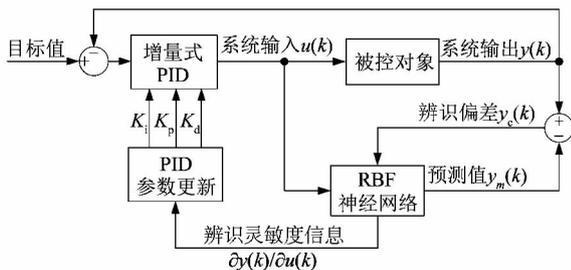


图 2 RBF-PID 结构

Figure 2 RBF-PID structure

系统输入层为 3 层,分别为:

$$x_1(k) = e(k) - e(k-1);$$

$$x_2(k) = e(k);$$

$$x_3(k) = e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)。$$

基于 RBF 神经网络自适应的 PID 控制系统 PID 部分采用增量式 PID,即:

$$u(k) = u(k-1) + K_p(k-1)x_1(k) + K_i(k-1) \cdot x_2(k) + K_d(k-1)x_3(k)。$$

式中: $u(k)$ 为系统输入, K_p 为比例系数, K_i 为积分系数, K_d 为微分系数。

为克服系统非线性因素和扰动引起的系统模型变化,其中参数 K_p, K_i, K_d 根据辨识的灵敏度 (Jacobian) 信息进行在线调整,调整的方式如下:

$$\Delta K_p(k) = -\eta \frac{\partial E(k)}{\partial K_p(k-1)} = \eta e(k) \frac{\partial y(k)}{\partial \Delta u(k)} x_1(k);$$

$$\Delta K_i(k) = -\eta \frac{\partial E(k)}{\partial K_i(k-1)} = \eta e(k) \frac{\partial y(k)}{\partial \Delta u(k)} x_2(k);$$

$$\Delta K_d(k) = -\eta \frac{\partial E(k)}{\partial K_d(k-1)} = \eta e(k) \frac{\partial y(k)}{\partial \Delta u(k)} x_3(k)。$$

4 系统仿真

为对比 RBF 神经网络 PID 控制器控制效果,在 Simulink 平台搭建了 RBF-PID 控制器和永磁同步电机模型,控制系统结构如图 3 所示,速度的设定值与实际速度的差值作为速度环 PID 控制器的输入,速度控制器产生转矩电流作为电流环 PI 控制器的输入^[11],然后对 $d-q$ 轴电压 PARK 逆变换得到 a, b, c 三相电压信号,最后通过 PWM 发生器控制逆变器驱动 PMSM。

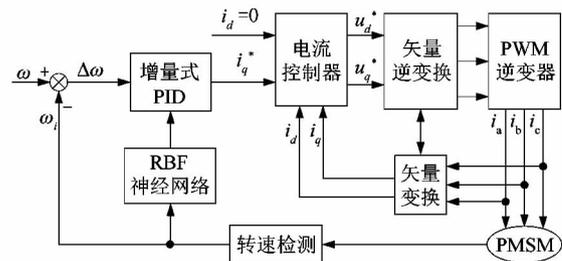


图 3 系统仿真框图

Figure 3 System simulation

其中速度环 PID 分别采用传统 PID 控制器和 RBF-PID 控制器,在初始 PID 参数参数相同的情况下对比系统的阶跃响应和负载发生扰动时的速度变化。系统 Simulink 仿真模型如图 4 所示,在仿真 1.0 s 时将速度设定值改为 1 000 r/min,在 2.0 s 时加入负载扰动,在 3.0 s 时改变速度设定值为 500 r/min。

各种仿真结果如图 5 ~ 8 所示。由图 6 可以看出,当速度设定值改为 1 000 r/min 后,RBF-PID 超调量比传统 PID 减少了 60%,传统 PID 在 1.1 s 后稳态误差明显大于 RBF-PID 控制。由图 7 可以看出,在施加负载扰动后,传统 PID 与 RBF-PID 同时速度下降,在速度回升过程中,RBF-PID 控制响应更快,并且超调减少了 40%。由图 8 可以看出,当速度设定值修改到

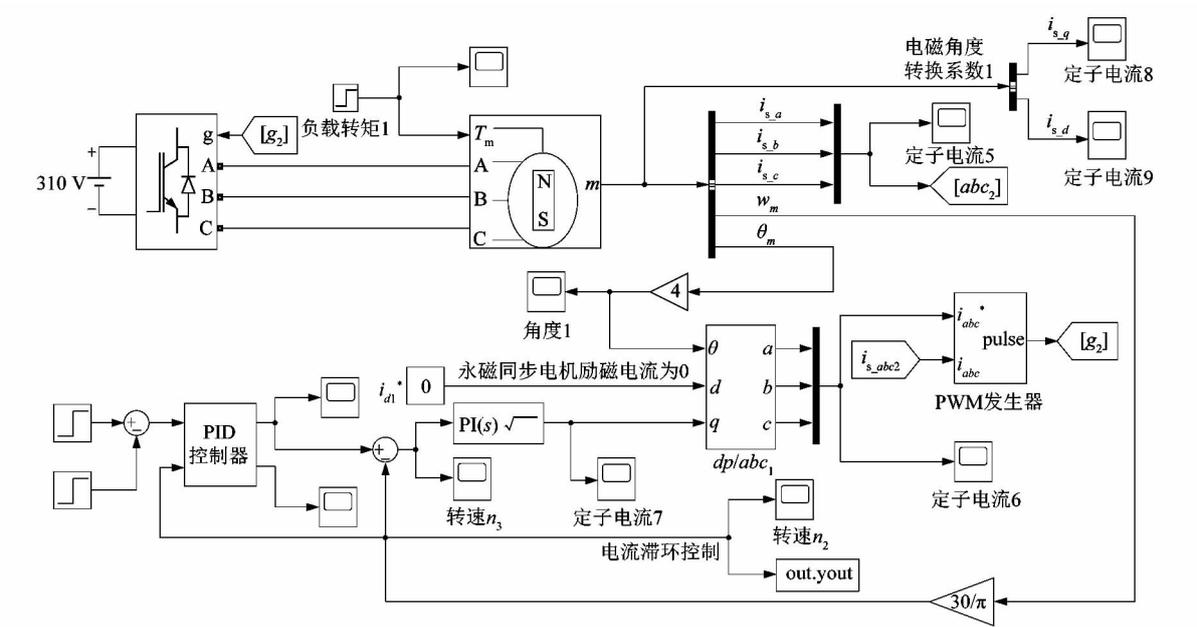


图4 系统 Simulink 仿真模型

Figure 4 System Simulink simulation model

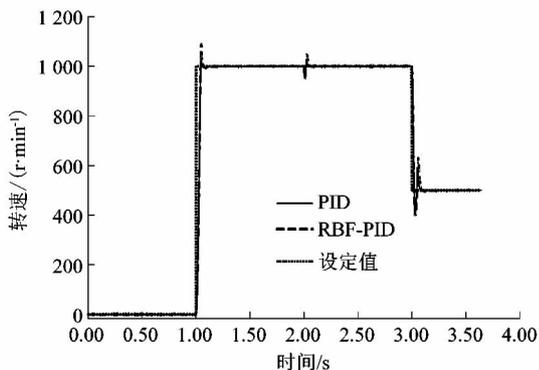


图5 仿真结果

Figure 5 Simulation result

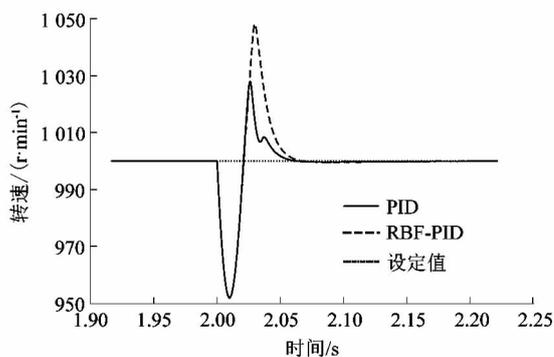


图7 负载扰动波形

Figure 7 Load disturbance waveform

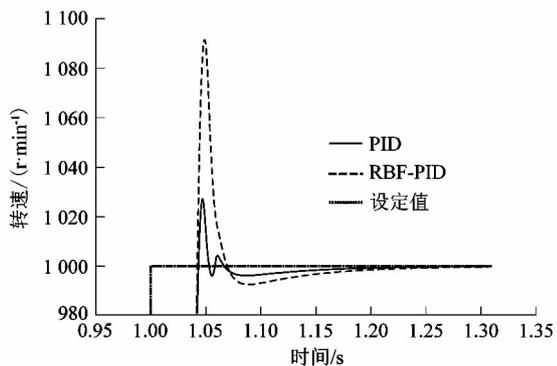


图6 速度阶跃响应波形

Figure 6 Speed step response waveform

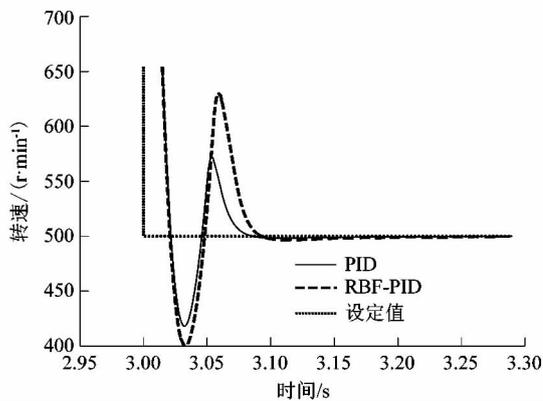


图8 速度降低波形

Figure 8 Speed reduction waveform

500 r/min 后,系统超调有了大幅的减少,并且响应时间减少了 20%。

综合来对比,RBF-PID 有着更快的响应速度、更少的超调、更好的抗干扰能力,控制效果明显优于传统 PID。

5 结语

针对永磁同步电机矢量控制系统,课题组设计了基于径向基函数(RBF)神经网络的 PID 控制器,根据神经网络辨识的灵敏度信息对 PID 参数进行在整定,通过在 Simulink 中进行仿真表明基于 RBF 神经网络的 PID 控制器控制效果更好。并且 RBF 神经网络节点较少,算法复杂度较低,后续可以在嵌入式控制设备中进一步移植与应用。

参考文献:

[1] 李政,胡广大,崔家瑞,等. 永磁同步电机调速系统的积分型滑模变结构控制[J]. 中国电机工程学报,2014,34(3):431-437.

[2] 刘计龙,肖飞,沈洋,等. 永磁同步电机无位置传感器控制技术综述[J]. 电工技术学报,2017,32(16):76-88.

[3] 齐亮. 基于滑模变结构方法的永磁同步电机控制问题研究及应用[D]. 上海:华东理工大学,2013:1-6.

[4] 林茂,李颖晖,吴辰,等. 基于滑模模型参考自适应系统观测器的永磁同步电机预测控制[J]. 电工技术学报,2017,32(6):156-163.

[5] 王松. 永磁同步电机的参数辨识及控制策略研究[D]. 北京:北京交通大学,2011:6-12.

[6] 周佳,卢少武,周凤星. 基于 RBF 神经网络的永磁同步电机速度 PI-IP 控制[J]. 组合机床与自动化加工技术,2017(1):116-118.

[7] 邵明玲. 永磁同步电机的神经网络模糊自适应控制[D]. 青岛:青岛大学,2016:7-11.

[8] 柳海科,袁忠干,曹奔,等. 基于 RBF 神经网络的永磁同步电机预测控制[J]. 兰州交通大学学报,2019,38(5):90-95.

[9] 吴非非. 基于模糊 RBF 神经网络的永磁同步电机控制系统研究[D]. 大连:大连交通大学,2020:18.

[10] 黄有概,高向东. 焊缝跟踪 RBF 整定 PID 控制算法[J]. 电焊机,2016,46(1):16.

[11] 任芸,朱祖超,吴登昊,等. 基于嫡产的离心泵流动损失特性研究[J]. 哈尔滨工程大学学报,2021,42(2):268.

(上接第 51 页)

[2] 陆青,张明,张成祥. 燃气安全自闭阀在居民用户的应用与改进[J]. 煤气与热力,2013,33(5):20-23.

[3] 王子敬,韦江力,聂隆梅,等. 基于安全智能燃气表的研究和运用[J]. 城市燃气,2021(5):8-11.

[4] 王凡,柴家凤,陈婷婷,等. 管道燃气自闭阀使用前后性能变化研究[J]. 煤气与热力,2021,41(1):36-42.

[5] 车立新,王凡,柴家凤,等. 燃气自闭阀切断流量与燃具热负荷匹配性分析[J]. 城市燃气,2016(4):31-34.

[6] ZHANG J J, WANG Y, ZHANG C, et al. Research on gas leakage through suction valves of reciprocating compressor under varying load conditions[J]. High Technology Letters, 2021, 27(3):262-271.

[7] SHEVCHENKO S A, KONOTOPOV O I. The dynamic characteristics of a resonator of the gyroscope based on elastic waves in solids: finite-element modeling [J]. Petersburg State Polytechnical University Journal: Physics and Mathematics, 2021, 14(52):65-80.

[8] WU D F, WANG X, MA Y X, et al. Research on the dynamic characteristics of water hydraulic servo valves considering the influence of steady flow force [J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2021, 80: 101966.

[9] KUHR M M G, LUDWIG G, PELZ P F. Measurement and simulation of the dynamic characteristics of plain and profiled annular seals [C]//30th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems. [S. l.]: IAHR, 2021: 012073.

[10] 卢安乐,钱锦远,张含,等. 基于 CFD 的垂直管路中先导式截止阀动力特性研究[J]. 轻工机械,2013,31(5):15-18.

[11] 霍增辉,董成,俞经虎,等. 基于 FLUENT 的三偏心蝶阀数值仿真及结构优化[J]. 轻工机械,2021,39(1):47-51.

[12] 张含,匡继勇,王建凯,等. 基于 UDFs 程序的先导式截止阀启闭特性数值分析[J]. 轻工机械,2011,29(2):10-13.

[13] 刘恒丽. 调速阀动态特性的计算机仿真[J]. 轻工机械,2007(2):82-83.