

DOI 10.3969/j.issn.1003-0972.2010.04.034

模糊神经免疫自适应 PID 在恒张力控制系统中的应用

葛锁良, 方唐利*, 岳 胜

(合肥工业大学 电气与自动化工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘 要: 应用免疫反馈系统原理和模糊神经网络控制理论, 在传统 PID 控制基础上设计出一种模糊神经免疫自适应 PID 控制器, 阐述了该控制器的特点、控制规律和整定方法. 控制器参数 P 、 I 和 D 分别由模糊神经免疫反馈系统和模糊神经网络控制器在线修正. 进行了恒张力控制系统的动态仿真, 并与数字 PID 和模糊 PID 控制进行了比较. 仿真结果表明, 模糊神经免疫自适应 PID 控制器响应速度快、控制输出稳定、抗干扰能力强和鲁棒性好, 较传统 PID 和模糊 PID 控制器具有更好的动、静态特性.

关键词: 模糊神经网络; 自适应; 免疫; 恒张力控制系统

中图分类号: TP183 文献标志码: A 文章编号: 1003-0972(2010)04-0610-04

Studies on Fuzzy-neuro Immune Self-adaptive PID Controller for Constant Tension Control System

GE Suo-liang FANG Tang-li*, YUE Sheng

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

Abstract A kind of fuzzy-neuro immune self-adaptive PID controller was designed based on the principle of immune feedback system, the theory of fuzzy neural network control as its main features, such as the characteristics, the control law, the control method were described. In this system parameter P is adaptively modulated by means of fuzzy-neuro immune feedback system, parameters I and D are dynamically regulated by fuzzy neural network controller. Simulation on constant tension control system was carried out so as to evaluate the application of the presented control scheme. The result of simulation experiment showed that the improved performance is superior to the traditional PID and fuzzy PID controller. It works well with high dynamic and static performance due to its advantages of quick response, steady output, effective anti-interference and good robustness.

Key words fuzzy neural network; self-adaptive; immune; constant tension control system

0 引言

在腈纶纺丝和造纸生产中, 为了保证产品质量, 要求腈纶丝和纸在进入下一道工序前保持恒定的张力. 图 1 为某石化厂腈纶纺丝生产线在 F19 和 F20 之间设置的恒张力系统结构示意图. 为了保证产品质量, 工艺要求 F19 和 F20 之间的腈纶丝保持恒定的张力, 转角 θ 应稳定在水平位置 (0°). 图 1 是通过调整 F20 的速度来实现 F19 和 F20 之间的恒张力控制的.

F20 变频器、自整角机以及变送器可以等效为一个比例环节.

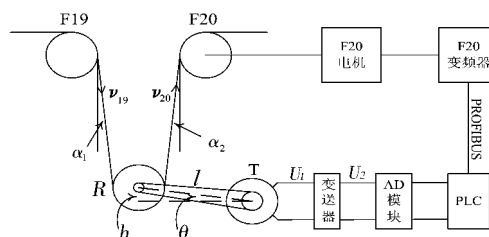


图 1 恒张力系统结构示意图

Fig 1 Structure of constant tension control system

对于变频器, 由于采用 V/F 控制方式, 其输出电压 U 与频率给定信号成正比, 这样就可以将其等效成为一个一

1 恒张力控制系统数学模型的建立

浮动辊 R 的位置由自整角机进行测量, 角度偏差信号 θ (失调角, 即发送机与接收机之间的差角) 经自整角机测量后由变送器变换为 $\pm 10\text{V}$ 电压信号, 送入 PLC. PLC 进行相应的控制后再通过 Profibus-DP 总线将频率信号发送给

收稿日期: 2010-04-28 修订日期: 2010-06-10 * 通讯联系人, E-mail: fll1983@163.com

作者简介: 葛锁良 (1964-), 男, 江苏人, 副教授, 硕士生导师, 主要研究现代控制理论与应用和工业控制.

阶惯性环节:

$$G_{in}(s) = \frac{k_{in}}{\tau_{s+1}} \quad (1)$$

其中: k_{in} 为变频器的放大倍数, τ 为变频器的时间常数。

对于三相异步电动机,在忽略电动机的励磁电流并认为磁通在动态过程中保持不变的前提下, F20 异步电动机的传递函数可以等效为

$$G_{20}(s) = \frac{K_{20}}{T_{20}s+1} \quad (2)$$

由于 F19 F20 辊子位置以及自整角机 T 的位置是固定的,因此浮动辊 R 的运行轨迹是一条弧线。在系统运行平稳时,浮动辊 R 的运行范围很小,可以近似认为 R 是上下直线运动, θ 的变化很小且 $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha$ 。这样,张力辊的动态方程为

$$\begin{aligned} \ddot{h} &= \ddot{\theta} = (v_{20} \cos \alpha_2 - v_{19} \cos \alpha_1) / 2 = \\ &= \frac{1}{2} (v_{20} - v_{19}) \cos \alpha, \end{aligned} \quad (3)$$

其传递函数为

$$\frac{\Theta(s)}{V_{20}(s) - V_{19}(s)} = \frac{K_R}{s}, \quad K_R = \frac{\cos \alpha}{2L} \quad (4)$$

这样就建立了各环节的传递函数,系统的传递函数框图如图 2 驱动 F20 的变频器输入频率由两部分组成:一是由 F19 电动机的速度折算后的频率,二是由控制器输出折算后的频率。F19 的速度在系统中相当于一个大的扰动输入,系统要在 F19 速度变化时 also 具有很好的动态性能和稳态输出,需要设计出一种响应速度快、输出稳定、抗干扰能力强的控制器。

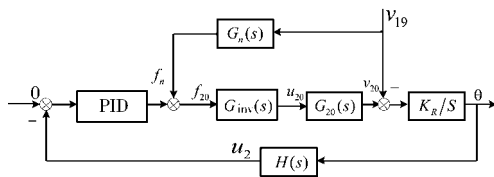


图 2 系统的传递函数框图

Fig 2 Structure of transfer function

2 模糊神经免疫自适应 PD 控制器

2.1 免疫反馈机制^[1-3]

生物的免疫系统对于外来侵犯的抗原可以产生相应的抗体抵御。抗原抗体结合后经一系列反应,通过吞噬作用或产生特殊酶而毁坏抗原。生物的免疫系统由淋巴细胞和抗体分子组成,淋巴细胞又由胸腺产生的 T 细胞(分别为辅助 T 细胞 T_h 和抑制 T 细胞 T_s)和骨髓产生的 B 细胞组成。当抗原侵入机体并经周围细胞消化后,将信息传递给 T 细胞,即传递给 T_h 细胞和 T_s 细胞, T_s 细胞用于抑制 T_h 细胞的生产,然后共同刺激 B 细胞, B 细胞产生抗体以消除抗原。

基于免疫反馈原理,假设第 k 代的抗原数为 $\varepsilon(k)$,由抗原刺激的 T_h 细胞的输出为 $T_h(k)$, T_s 细胞对 B 细胞的影响为 $T_s(k)$,则 B 细胞接收的总刺激为

$$S(k) = T_h(k) - T_s(k), \quad (5)$$

其中: $T_h(k) = k_1 \varepsilon(k)$, $T_s(k) = k_2 f(S(k), \Delta S(k)) \varepsilon(k)$ 。

若以抗原的数量 $\varepsilon(k)$ 作为偏差 $e(k)$, B 细胞接收的总刺激 $S(k)$ 为控制输出 $u(k)$, 则有如下的反馈控制规律:

$$\begin{aligned} u(k) &= k_1 e(k) - k_2 f(u(k), \Delta u(k)) e(k) = \\ &= K(1 - \eta f(u(k), \Delta u(k))) e(k) = K_p e(k), \end{aligned} \quad (6)$$

其中: $K_p = K(1 - \eta f(u(k), \Delta u(k)))$, $K = k_1$ 为控制反应速度, $\eta = \frac{k_2}{k_1}$ 为控制稳定效果, $f(\bullet)$ 为非线性控制函数。根据场合不同采用不同的函数去实现抑制环节、逼近 $f(\bullet)$, 如采用函数 $f(x) = x^2$ 或 $f(x) = 1.0 - e^{-x^{2/a}}$ 去逼近, 又或采用模糊控制器去逼近函数 $f(\bullet)$ 等。这里利用模糊神经网络逼近非线性函数 $f(u(k), \Delta u(k))$, 模糊神经网络结合了模糊理论表达知识的能力和神经网络的自学习能力,对非线性函数有很强的逼近能力^[4-6]。

2.2 Levenberg-Marquardt 算法

标准模糊神经网络为多层前向神经网络,其常规学习算法为 BP 学习算法^[4], BP 学习算法的基本思想是最小二乘学习算法,或称 LMS(Least Mean Squares)算法,是基于梯度搜索的最小均方差算法。众所周知,梯度下降法在最初几步下降较快,但随着接近最优值,由于梯度趋于零,致使误差函数下降缓慢,而牛顿法则可在最优值附近产生一个理想的搜索方向^[7]。

Levenberg-Marquardt(L-M)算法实际上是梯度下降法和牛顿法的结合,它的优点在于网络权值数目较小时收敛速度非常迅速。

L-M 算法的基本思想是使其每次迭代不再沿着单一的负梯度方向,而是允许误差沿着恶化的方向进行搜索,同时通过在最速梯度下降法和高斯-牛顿法之间自适应调整来优化网络权值,使网络能够有效收敛,大大提高了网络的收敛速度和泛化能力。

L-M 优化算法,又称为阻尼最小二乘法,其权值调整公式为

$$\Delta w = (J^T J + \mu I)^{-1} J^T e \quad (7)$$

其中: e 为误差向量; J 为误差对权值微分的雅可比矩阵; μ 为一个标量,当 μ 增加时,它接近于具有较小的学习速率的最速下降法,当 μ 下降到零时,该算法就变成高斯-牛顿法。

因此, L-M 算法是在最速梯度下降法和高斯-牛顿法之间的平滑调和。

L-M 算法具体迭代步骤为:

1) 将所有输入送到网络并计算出网络的输入,另用误差函数计算出训练集中所有目标的误差平方和;

2) 计算出误差对权值微分的雅可比矩阵 J ,

首先,定义 Marquardt 敏感度:

$$S_i^m = \frac{\partial E}{\partial n_i^m} \quad (8)$$

从(8)式可以看出,敏感度为误差函数 E 对 m 层输入的第 i 个元素变化的敏感性,其中 n 为每层网络的加权和。

敏感度的递推关系为

$$S_p^m = E(n_q^m)(w^{m+1})^T S_q^{m+1}. \quad (9)$$

可见敏感度可有最后一层通过网络被反向传播到第一层:

$$S^m \rightarrow S^{m-1} \rightarrow \dots \rightarrow S^2 \rightarrow S^1. \quad (10)$$

然后, 用式 (10) 计算雅可比矩阵的元素:

$$[JJ]_{h,1} = \frac{\partial e_{k,q}}{\partial w_{ij}^m} = \frac{\partial e_{k,q}}{\partial n_{i,q}^m} \frac{\partial n_{i,q}^m}{\partial w_{ij}^m} = S_{i,h}^m \frac{\partial n_{i,q}^m}{\partial w_{ij}^m} = S_{i,h}^{m-1}. \quad (11)$$

3) 用式 (7) 求出 Δw ;

4) 用 $w + \Delta w$ 重复计算误差的平方和. 如果新的和小于 1) 中计算的和, 则用 μ 除以 θ ($\theta > 1$), 并有 $w = w + \Delta w$, 转 1); 否则, 用 μ 乘以 θ , 转 3). 当误差的平方和减小到某一目标误差时, 算法即被认为收敛.

2.3 控制器设计

常规增量式 PID 控制器的离散形式为

$$u(k) = u(k-1) + K_p[e(k) - e(k-1)] + K_i T e(k) + K_D \left[\frac{e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)}{T} \right]. \quad (12)$$

由控制理论可知, 增大比例系数 K_p 可提高系统的调节精度, 积分控制可以减小系统的稳态误差, 微分控制能对偏差变化进行提前预报, 调节微分系数可以改善系统的动态特性. 据此对比例系数 K_p 的调节可采用神经模糊免疫反馈系统调节, 对 K_p, K_D 参数用模糊神经网络对其进行在线修改, 以满足不同误差 e 和误差变化 ec 对控制参数的不同要求, 使被控对象有良好的动静态性能, 从而使控制器有很强的自适应性. 本文设计的 PID 自适应控制系统的结构如图 3.

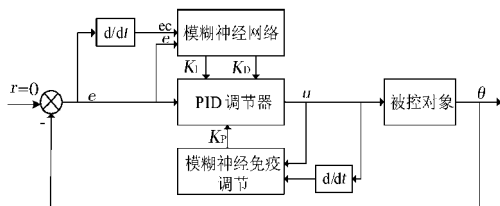


图 3 模糊神经免疫自适应控制系统

Fig 3 Structure of fuzzy-neuro immune self regulating PID controller

至此, 在传统的 PID 控制基础上通过对其比例系数、微分系数和积分系数的自动调节使系统能够适应系统环境条件的变化, 从而使系统具有一定的自适应性. 综合可得到控制器的控制式:

$$u(k) = u(k-1) + K(1 - \eta f(u(k), \Delta u(k))) \cdot [e(k) - e(k-1)] + (K_i(0) + \Delta K_i) T e(k) + (K_D(0) + \Delta K_D) \left[\frac{e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)}{T} \right]. \quad (13)$$

3 系统的仿真与实验分析

本文进行了仿真实验, 用于检验神经模糊免疫自适应 PID 控制器的效果, 并与传统的数字 PID 控制器和模糊 PID 控制器控制效果进行了对比. 异步电动机参数为: $U_e = 380$

$V, I_e = 2.67 \text{ A}, n_p = 2, J = 0.15 \text{ N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^2, G_T = 2.3 \text{ N} \cdot \text{m} / \text{A}$, 绕组等效电阻 11.95Ω , 等效电感 61.9 mH . F19 辊子直径 $D = 0.31830 \text{ m}$, 减速比 $i = 0.117647$; F20 辊子直径 $D = 0.19304 \text{ m}$, 减速比 $i = 0.2535523$. 对于本控制系统, 要求张力辊能尽快达到平衡位置, 并且在速度上升或者下降时张力辊能尽量稳定在平衡位置.

系统中各环节传递函数为

$$G_n(s) = 0.2168 G_{inv} = \frac{76}{0.8s + 1}, K_R = 0.45$$

$$G_{20}(s) = \frac{0.06515}{0.00512s + 1}, H(s) = 0.4$$

F19、F20 辊子直径、减速比等已经归并到传递函数中.

通过 MATLAB 建立并训练模糊神经网络^[7-9], 图 4 和图 5 分别为 BP 算法和 L-M 算法训练模糊神经网络得到的均方误差曲线. 可以看出 L-M 算法的收敛速度和控制精度较单纯的 BP 的学习算法都有所提高.

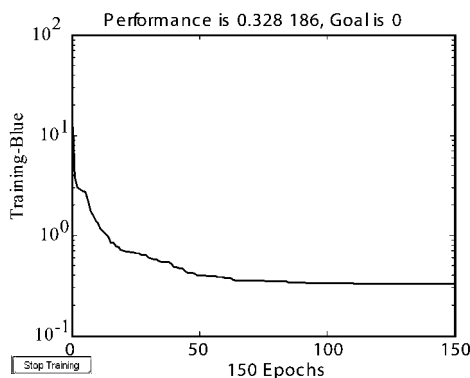


图 4 BP 学习算法均方误差曲线

Fig 4 The error curve of BP algorithm

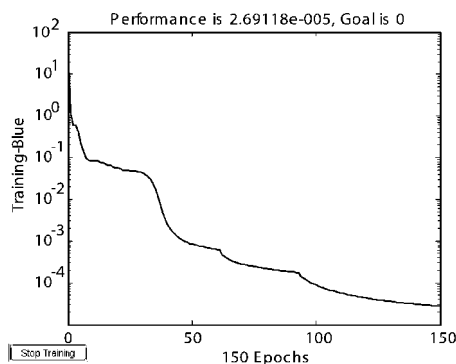


图 5 L-M 学习算法均方误差曲线

Fig 5 The error curve of L-M algorithm

利用 Simulink 工具建立系统的模型, 改变 $V_{19}(t)$ 速度, 观察 θ 曲线变化.

从图 6 可以看出: 模糊神经免疫自适应 PID 优于常规的数字 PID 和模糊 PID. 模糊神经免疫自适应 PID 具有 K_p, K_i, K_D 值自动修正优势, 使系统的响应具有更快、更稳的效果.

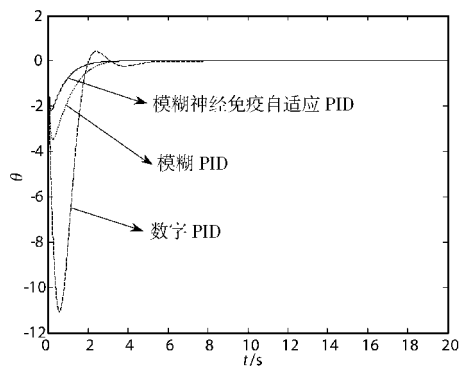
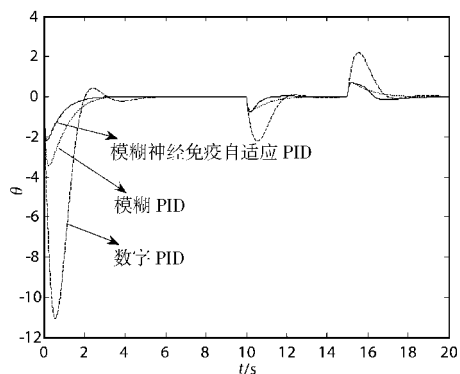
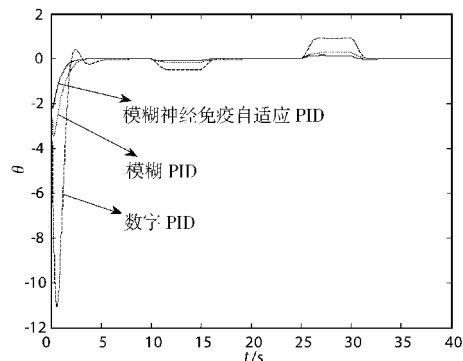
图 6 $V_{19}(t) = 100 \text{ m/min}$ 时控制效果Fig 6 The comparison of performance when $V_{19}(t) = 100 \text{ m/min}$ 图 7 $V_{19}(t)$ 突增、突减时 θ 控制效果

Fig 7 The comparison of performance evaluation When interference is appeared

从图 7 可以看出:传统的数字 PID 和模糊 PID 在 F19 速度为 100 m/min 时,第 10 s 突加 20 m/min 和第 15 s 突减 20 m/min 情况下,波动都比较大,系统达到稳定时间也较

长.模糊神经免疫自适应 PID 则具有良好的抗扰动性,其输出曲线较为平稳.

图 8 $V_{19}(t)$ 匀加、匀减时 θ 控制效果Fig 8 The comparison of performance evaluation when $V_{19}(t)$ is increasing and decreasing

从图 8 可以看出:在 F19 速度均匀加速和均匀减速时,模糊神经免疫自适应 PID 有很强的自适应功能,当 F19 速度变化时,能够迅速调节 PID 参数,从而达到更好的控制效果.

$$V_{19}(t) = \begin{cases} 100 \text{ m/min}, & t \leq 10 \text{ s} \\ 100 + 4(t - 10) \text{ m/min}, & 10 \text{ s} < t \leq 15 \text{ s} \\ 120 \text{ m/min}, & 15 \text{ s} < t \leq 25 \text{ s} \\ 120 - 8(t - 25) \text{ m/min}, & 25 \text{ s} < t \leq 30 \text{ s} \\ 80 \text{ m/min}, & t > 30 \text{ s} \end{cases}$$

4 总结

本文在传统 PID 控制的基础上应用免疫反馈系统调节原理和模糊神经网络控制理论设计出一种自适应 PID 控制器,并应用到恒张力控制系统中.理论分析及仿真结果表明:该控制器具有响应速度快、控制输出稳定、抗干扰能力强以及鲁棒性好等特点,在造纸、纺丝等工业控制领域中具有广泛的应用前景.

参考文献:

- [1] 焦李成,杜海峰.人工免疫系统进展与展望[J].电子学报,2003,31(10):1540-1548
- [2] Emma H, Jon T. Application areas of AIS: the past, the present and the future[J]. Applied Soft Computing(S1568-4946), 2008, 8(1): 191-201.
- [3] 付冬梅,郑德玲,位耀光,等.人工免疫控制器的设计及其控制效果的仿真[J].北京科技大学学报,2004,24(4):442-445
- [4] 孙增圻,张再兴,邓志东.智能控制理论与技术[M].北京:清华大学出版社,广西:广西科学技术出版社,2002 169-175
- [5] 刘孝恒,李振华.模糊神经网络辨识和控制非线性系统中的应用[J].电气传动自动化,2006,28(6):11-14
- [6] 乔维德.基于模糊神经网络的无刷直流电机位置伺服控制[J].电工电气,2009(9):42-45.
- [7] 张德丰,周品,许华兴,等. MATLAB 神经网络应用设计[M].北京:机械工业出版社,2009 92-106
- [8] 都洪基,孔慧超,李启亮,等.基于 MATLAB 的模糊神经网络高压直流输电换流控制器的研究[J].广东电力,2006,19(4):5-11.
- [9] 石辛明,郝整清.模糊控制及其 MATLAB 仿真[M].北京:清华大学出版社,北京交通大学出版社,2008 127-245.

责任编辑:郭红建