

基于 Smith 预估补偿与 RBF 神经网络的 PID 控制在工业平缝机脚踏板调速模块中的应用

何臻祥, 肖 忠

(西南财经大学 天府学院, 四川 绵阳 621000)

摘要:针对工业缝纫机调速模块的伺服系统普遍存在耦合、大滞后的现象,提出了一种将 Smith 预估补偿和 RBF 神经网络算法与 PID 控制器相结合的 Smith-RBF-PID 控制算法。该方法利用了 Smith 预估补偿能克服纯滞后和 RBF 能处理非线性问题、在线自学习整定 PID 参数的优点,在调速模块的伺服控制系统中更加有效。

关键词:调速; Smith 预估补偿; RBF 神经网络; PID 控制

本文引用格式:何臻祥, 肖忠. 基于 Smith 预估补偿与 RBF 神经网络的 PID 控制在工业平缝机脚踏板调速模块中的应用[J]. 四川兵工学报, 2014(1): 111-114.

中图分类号: TP273

文献标识码: A

文章编号: 1006-0707(2014)01-0111-05

Application of Industry Sartorius Foot Speed Regulation Module on PID Control Based on Smith Predictive Compensation and RBF Neural Network

HE Zhen-xiang, XIAO Zhong

(Tian Fu College, Southwest University of Finance and Economics, Mianyang 621000, China)

Abstract: Aiming at the phenomena of coupling and big time delay existed in industry Sartorius foot speed regulation module servo system, this paper proposed a Smith-RBF-PID control method based on Smith predictive compensation algorithm and RBF neural network algorithm and PID controller. This method uses the advantage of Smith predictive compensation to overcome big time delay, and the ability of deal with non-linear problem, a self-turning control strategy of RBF neural network. It is more effective in speed regulation module servo system.

Key words: speed regulation; Smith predictive compensation; RBF neural network; PID control

Citation format: HE Zhen-xiang, XIAO Zhong. Application of Industry Sartorius Foot Speed Regulation Module on PID Control Based on Smith Predictive Compensation and RBF Neural Network[J]. Journal of Sichuan Ordnance, 2014(1): 111-114.

在工业平缝机发展中,缝制效率是一个重要的课题。而缝制效率主要是由缝纫机的缝纫速度所决定。在缝制过程中,通过人工踩踏脚踏板控制缝纫机的启动、调速和结束缝制。高速工业平缝机控制系统的对缝纫机的启动、停止和缝纫速度的技术要求非常严格。要求起动轻柔、迅速,升速从 0 r/min 到 4 500 r/min 的时间要小于 100 ms;停针要迅速准

确,速度从 4 500 r/min 减到 0 r/min 的时间小于 120 ms。同时在调速过程中要求无级调速,速度变化要平稳。一般的系统在调速模块中采用的是 $PI^{[1]}$ 或改进的 PID 控制算法^[2],此类算法虽然采取了高速和低速分段控制方法,但是当 PID 参数整定后,在这之间的控制过程都是固定不变的。而平缝机调速模块的伺服系统是一个多变量、非线性、强耦合、大滞

后系统。在负载变化或者出现扰动时的滞后时间范围内,被控的参数是无法进行调整的。使得系统不能及时反应,立即补偿。致使产生较明显的超调量和需要较长的调节时间,无法满足系统要求。

Smith 预估补偿控制是克服纯滞后的一个有效的控制方法^[3]。其设计的原理是与 PID 控制器并联接一个补偿环节,用来补偿被控对象中的纯滞后部分。

RBF 神经网络有很强的非线性拟合能力,可映射任意复制的非线性关系。而且具有学习算法简单、运算量小、收敛快等优点。利用 RBF 神经网络在线自学习整定 PID 参数,构成一个具有自调节能力、稳定的控制器。

为了满足系统的抗扰性、快速性、稳定性,提高控制质量,本文提出了一种基于 Smith 预估补偿与 RBF 神经网络模糊 PID 控制算法。

1 Smith 预估补偿控制原理

针对纯滞后系统闭环特征方程含的影响系统控制品质的纯滞后问题,1957 年 Smith 提出了一种预估补偿控制方案,即在 PID 反馈控制基础上,引入一个预估补偿环节,使闭环特征方程不含有纯滞后项,以提高控制质量^[4]。

在图 1 所示的单回路控制系统中,控制器的传递函数为 $D(s)$,被控对象传递函数为 $G_p(s)e^{-\tau s}$,被控对象中不包含纯滞后部分的传递函数为 $G_p(s)$,被控对象纯滞后部分的传递函数为 $e^{-\tau s}$ 。

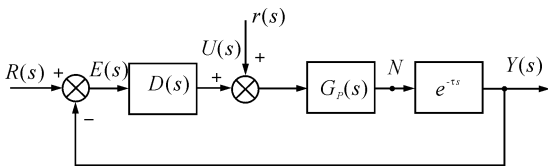


图 1 纯滞后系统结构示意图

图 1 所示系统的闭环传递函数为

$$\Phi(s) = \frac{D(s)G_p(s)e^{-\tau s}}{1 + D(s)G_p(s)e^{-\tau s}} \quad (1)$$

由式(1)可以看出,系统特征方程中含有纯滞后环节,它会降低系统的稳定性。如果能把图 1 中假想的变量 N 测量出来,那么就可以按照图 2 所示的那样,把 N 点信号反馈到控制器,这样就把纯滞后环节移到控制回路外边。

理想闭环系统结构示意图如图 2 所示。

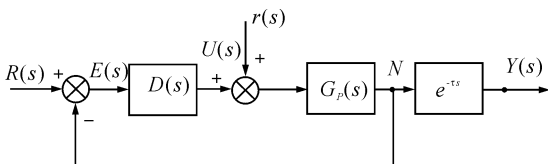


图 2 理想闭环系统结构示意图

由图 2 可以得出闭环传递函数为

$$\Phi(s) = \frac{D(s)G_p(s)e^{-\tau s}}{1 + D(s)G_p(s)} \quad (2)$$

由式(2)可见,由于反馈信号 N 没有延迟,闭环特征方程中不含有纯滞后项,所以系统的响应将会大大地改善。但是在实际情况中,脚踏板调速系统中是大滞后系统,在 N 点将会出现负荷扰动,所以这种方案是无法实现的。

实际工程上设计 Smith 预估器是在 PID 控制器中引入预估补偿器 $D_c(s)$,其原理是将其并联在控制器 $D(s)$ 上。如图 3 所示。其传递函数为 $D_c(s) = G_c(s)(1 - e^{-\tau_m s})$ 。

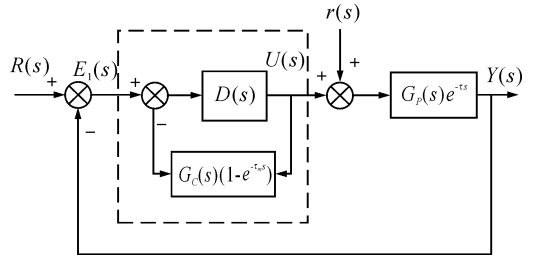


图 3 Smith 预估补偿控制系统框图

图 3 中虚线部分是带纯滞后补偿控制的控制器,其传递函数为

$$D_\tau(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = \frac{D(s)}{1 + D(s)G_c(s)(1 - e^{-\tau_m s})}$$

如果模型精确,可令其等于 $G_c(s) = G_p(s)$, $\tau_m = \tau$ 且不存在负荷扰动, $r(s) = 0$ 。

经过纯滞后补偿控制后系统的闭环传递函数为

$$\begin{aligned} \Phi(s) &= \frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{D_\tau(s)G_p(s)e^{-\tau s}}{1 + D_\tau(s)G_p(s)e^{-\tau s}} = \\ &= \frac{D(s)G_p(s)e^{-\tau s}}{1 + D(s)G_p(s)(1 - e^{-\tau s})} \\ &= \frac{D(s)G_p(s)e^{-\tau s}}{1 + \frac{D(s)G_p(s)e^{-\tau s}}{1 + D(s)G_p(s)(1 - e^{-\tau s})}} \end{aligned}$$

$$\Phi(s) = \frac{D(s)G_p(s)e^{-\tau s}}{1 + D(s)G_p(s)} \quad (3)$$

由式(3)可见,带纯滞后补偿的闭环系统与图 2 所示的理想结构是一致的,其特征方程为 $1 + D(s)G_p(s) = 0$ 。经补偿后,实现了将纯滞后环节移到闭环控制回路之外,纯滞后环节 $e^{-\tau s}$ 已经不出现在分母中,从而有效地消除了纯滞后对控制系统的影响。由此可知,使用 Smith 控制方法建立精确的预估模型需要知道被控对象的数学模型^[4]。

2 RBF 神经网络的 PID 整定

神经网络有很强的非线性拟合能力,可映射任意复杂的非线性关系,而且学习规则简单,便于实现。可以克服 Smith 控制方法必须确切地知道被控对象的数学模型的缺点。

本文采用的 RBF 神经网络的 PID 算法,是一种鲁棒性强,控制精度高的控制方法。它主要包括 2 个部分。一是采用增量式 PID 的控制算法。二是利用神经网络对 Jacobian

矩阵(信息)进行辨识^[5]。

2.1 RBF 神经网络算法

RBF 神经网络是一种性能优良的 3 层前馈型神经网络,由输入到输出的映射是非线性的,而隐含层空间到输出空间的映射是非线性的,从而大大加快了学习速度并避免局部极小值问题。RBF 网络结构如图 4 所示。

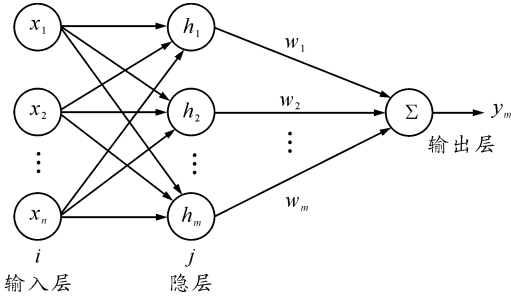


图 4 RBF 神经网络结构示意图

在 RBF 网络结构中, $X = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$ 为网络的输入向量。设 RBF 网络的径向基向量 $H = [h_1, h_2, \dots, h_j, \dots, h_m]^T$, 其中 h_j 为高斯基函数

$$h_j = \exp\left(-\frac{X - C_j^2}{2b_j^2}\right) (j = 1, 2, \dots, m) \quad (4)$$

网络的第 j 个结点的中心矢量为 $C_j = [c_{j1}, c_{j2}, \dots, c_{jn}]^T$, 其中, $i = 1, 2, \dots, n$ 。

设网络的基宽向量为

$$B = [b_1, b_2, \dots, b_m]^T$$

其中: b_j 为节点 j 的基宽度参数, 且大于零。网络的权向量为

$$W = [w_1, w_2, \dots, w_j, \dots, w_m]^T \quad (5)$$

辨识网络的输出为

$$y_m(k) = w_1 h_1 + w_2 h_2 + \dots + w_m h_m \quad (6)$$

辨识器的性能指标函数为

$$J_1 = \frac{1}{2} (y_{out}(k) - y_m(k))^2 \quad (7)$$

根据梯度下降法, 输出权、节点中心及节点基宽参数的迭代算法如下:

$$w_j(k) = w_j(k-1) + \eta (y_{out}(k) - y_m(k)) h_j + \alpha (w_j(k-1) - w_j(k-2)) \quad (8)$$

$$\Delta b_j = (y_{out}(k) - y_m(k)) w_j h_j \frac{\|X - C_j\|^2}{b_j^3} \quad (9)$$

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

$$\Delta c_{ji} = (y_{out}(k) - y_m(k)) w_j \frac{x_{ji} - c_{ji}}{b_j^2} \quad (10)$$

$$c_{ji}(k) = c_{ji}(k-1) + \eta \Delta c_{ji} + \alpha (c_{ji}(k-1) - c_{ji}(k-2)) \quad (11)$$

其中: η 学习速率; α 为动量因子。

Jacobian 阵(即为对象的输出对控制输入变化的灵敏度信息)算法为

$$\frac{\partial y(k)}{\partial \Delta u(k)} \approx \frac{\partial y_m(k)}{\partial \Delta u(k)} = \sum_{j=1}^m w_j h_j \frac{c_{ji} - x_{1j}}{b_j^2} \quad (12)$$

式(12)中, $x_1 = \Delta u(k)$ 。

2.2 RBF 网络 PID 整定原理

RBF 网整定 PID 控制参数采用增量式 PID 控制器, 控制误差为:

$$error(k) = r_{in}(k) - y_{out}(k)$$

神经元 PID 控制器的三项输入为

$$\begin{cases} xc(1) = error(k) - error(k-1) \\ xc(2) = error(k) \\ xc(3) = error(k) - 2error(k-1) + error(k-2) \end{cases} \quad (13)$$

控制算法为

$$\Delta u(k) = k_p (error(k) - error(k-1)) + k_i error(k) + k_d (error(k) - 2error(k-1) + error(k-2)) \quad (14)$$

神经网络整定指标为

$$E(k) = \frac{1}{2} error(k)^2 \quad (15)$$

k_p, k_i, k_d 的调整采用梯度下降法:

$$\begin{cases} \Delta k_p = -\eta_p \frac{\partial E}{\partial k_p} = -\eta_p \frac{\partial E}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial \Delta u} \frac{\partial \Delta u}{\partial k_p} = \\ \eta_p error(k) \frac{\partial y}{\partial \Delta u} xc(1) \\ \Delta k_i = -\eta_i \frac{\partial E}{\partial k_i} = -\eta_i \frac{\partial E}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial \Delta u} \frac{\partial \Delta u}{\partial k_i} = \\ \eta_i error(k) \frac{\partial y}{\partial \Delta u} xc(2) \\ \Delta k_d = -\eta_d \frac{\partial E}{\partial k_d} = -\eta_d \frac{\partial E}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial \Delta u} \frac{\partial \Delta u}{\partial k_d} = \\ \eta_d error(k) \frac{\partial y}{\partial \Delta u} xc(3) \end{cases} \quad (16)$$

式(16)中: η_p, η_i, η_d 分别为比例、积分、微分的学习速率; $\frac{\partial y}{\partial \Delta u}$ 为被控对象的 Jacobian 信息, 可通过神经网络的辨识而得^[6]。

RBF 整定 PID 控制系统结构图如图 5 所示。

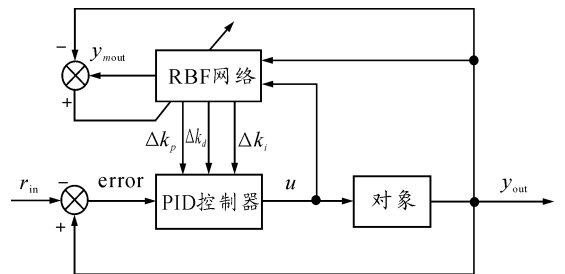


图 5 RBF 网络整定 PID 控制框图

3 基于 Smith 预估补偿与 RBF 神经网络 PID 控制算法与仿真结果

3.1 Smith 预估补偿与 RBF 神经网络 PID 控制算法

Smith 预估补偿与 RBF 神经网络 PID 控制结构图如图 6

所示。利用 RBF 神经网络不依赖于控制对象的精确模型的优点和在线学习方法,利用 Smith 预估补偿器对纯滞后系统的良好控制,以及利用 PID 控制能实现小偏差范围内实现精确控制,达到优势互补的作用。

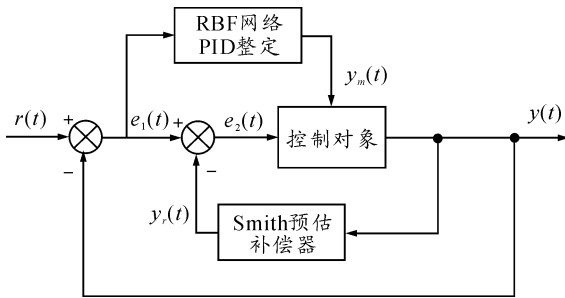


图 6 Smith 预估补偿与 RBF 神经网络模糊 PID 控制框图

3.2 仿真研究

在本文中所研究的对象是平缝机调速模块的伺服系统,该系统可以用带有纯滞后的一阶模型模拟,控制对象为 $G_p(s) = \frac{e^{-80s}}{60s + 1}$, 采样时间为 20 s, 输入信号为方波响应。RBF 的结构为 3-6-1, 网络辨识的 3 个输入为 $r_{in_m}(k) = [\Delta u(k), y_{out}(k), y_{out}(k-1)]$, 输出 $y_{out_m}(k)$ 。用 Matlab 7.0 进行仿真, 控制器的仿真结果分别如图 7~图 10 所示。

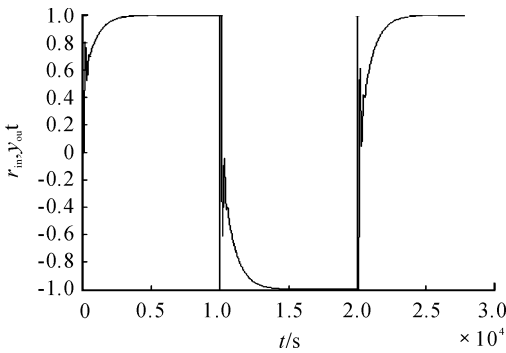


图 7 PID 控制的方波响应

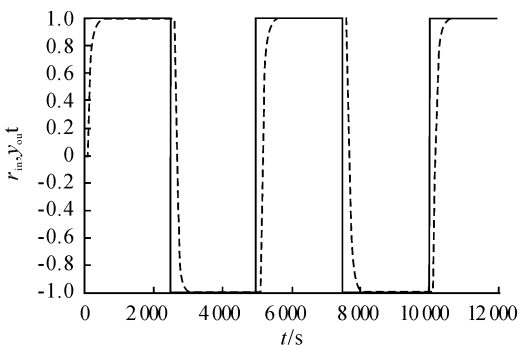


图 8 精确模型 Smith-PID 控制的方波响应

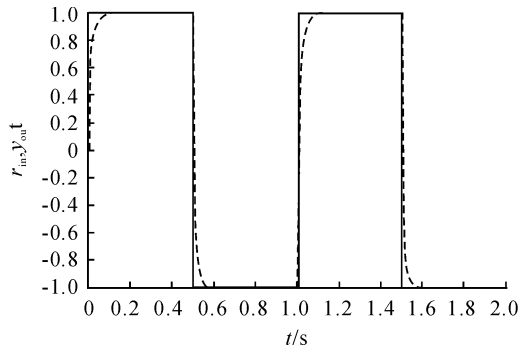


图 9 RBF-Smith-PID 控制的方波响应

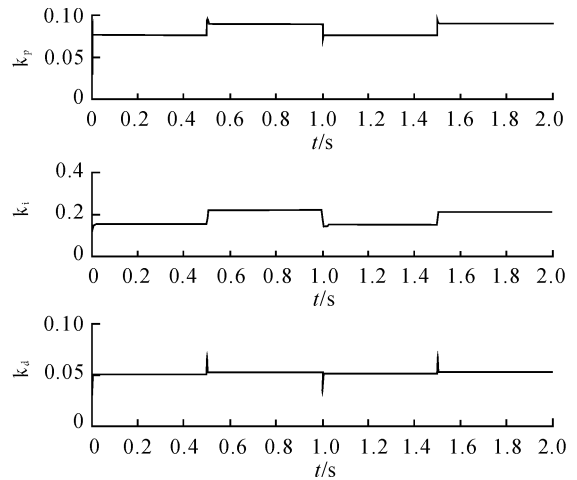


图 10 RBF-Smith-PID 控制参数自适应整定曲线

3.3 仿真结果分析

根据仿真结果可见,采用纯 PID 控制,当外界存在扰动时,系统具有较大的超调量,平缝机调速模块的控制精度变差,现场试验时会出现抖动现象;当采用精确模型 Smith-PID 控制时,系统超调量减小,控制效果显著增强;当采用 RBF-Smith-PID 控制时,如图 10 可知控制参数可以在线整定,系统稳定度和精度高,在进行无级调速时,速度变化平滑,停针和启针的精度都在要求范围之类,控制系统更加优越。

4 结束语

本文针对平缝机调速模块的伺服系统是一个多变量、非线性、强耦合、大滞后系统提出了基于 Smith 预估补偿与 RBF 神经网络 PID 控制算法。该算法利用各算法的优点和互补性,经过理论分析和仿真表明,该算法很好的改善了传统 PID 在控制过程中不能克服非线性因素的影响,对调节对象的参数不能在线整定等缺点,使该系统调速平滑,具有良好速度跟随性。

(下转第 131 页)

```

data << = 1;
data = data + BIT0;
} else
data << = 1; P4OUT |= BIT5; //实现上升沿
}
RBuf[j] = data;
}
P4OUT &= ~BIT5;
}

```

完整的程序已经在 IAR 开发环境下通过了测试,能够准确地读取外围芯片传送的数据,也证明了该方法的可行性。该方法通过软件实现了硬件 SPI 的功能,具有更广泛的应用价值。

4 结束语

从上述内容可以看出,硬件 SPI 接口的工作独立于 MCU 内核,这使得 SPI 数据的收发与 MCU 内核运算可以并行执行,能够提高单片机系统的工作效率,尤其适合数据量较大的应用需求。由于数据的收发完全由硬件完成,软件的编写不涉及具体收发细节,程序简单、速度快。而采用软件模拟实现 SPI 接口的方法则具有端口定义灵活、使用方便的特点。可以在不增加硬件成本的情况下,给不含 SPI 接口的单片机增加 SPI 通信功能。但软件模拟 SPI 需要占用 CPU 处理时间,故一般只在通信数据量不太大的情况下使用。

本文通过 MSP430 单片机与高性能模数转换器 AD7656 的接口设计分析,为 SPI 接口的使用和多通道同步转换的应

用需求提供了重要的参考。

参考文献:

- [1] 邱桂芬,朱拥建. 高速多通道数据采集系统[J]. 舰船电子对抗,2013(1):93-96.
- [2] 甘建伟,秦付军,王鹏. 基于 FPGA 的高速多通道数据采集系统设计[J]. 电子技术应用,2013(4):55-57.
- [3] 章伟聪. 基于 AD7656 开发高压容性设备绝缘介损的信号采集系统[J]. 宁波大学学报,2009,22(2):217-221.
- [4] 宋浩然,赵铁龙. AD7656 的原理及在继电保护产品中的应用[J]. 电子技术应用,2007,33(4):55-58.
- [5] 秦龙. MSP430 单片机应用系统开发典型实例[M]. 北京:中国电力出版社,2005. 15-72.
- [6] 郭玉辉. 基于 MSP430F149 单片机的真空远程控制系统[J]. 仪表技术与传感器,2004(8):24-25.
- [7] 杨俊春,孙坤,赵国良. AVR 单片机中的 SPI 接口[J]. 应用科技,2005,32(2):43-46.
- [8] 王红亮,杨晓. AVR 单片机与串行 A/D 的 SPI 接口设计[J]. 电测与仪表,2008,45(9):45-48.
- [9] 王德银. MSP430 系列单片机实用 C 语言程序设计[M]. 北京:人民邮电出版社,2005:17-100.
- [10] 李文炜. MSP430 系列 C 语言环境下的软件设计实用技巧[J]. 化工自动化及仪表,2004(6):36-38.

(责任编辑 周江川)

(上接第 114 页)

参考文献:

- [1] 姜建奎. 工业平缝机控制器的研究[D]. 长沙:中南大学,2009.
- [2] 楼彦华. 基于 DSP 的全自动直驱工业缝纫机控制系统研究[D]. 杭州:浙江大学,2010.
- [3] 唐彪. 基于模糊 PID 的 Smith 预估控制器[D]. 长沙:中南大学,2010.
- [4] 王宝忠,宋东锋. 基于 Smith 预估补偿与 RBF 神经网络的改进 PID 控制[J]. 现代电子技术,2011,34(5):153

- 157.

- [5] 飞思科技产品研发中心. 神经网络理论与 MATLAB7 实现[M]. 北京:电子工业出版社,2002:18-23.
- [6] 刘金琨. 先进 PID 控制及其 MATLAB 仿真[M]. 北京:电子工业出版社,2003:104-111.
- [7] 梁晓娟,张硕. 模糊 PID 控制的助力模式对操纵稳定性影响分析[J]. 武汉理工大学学报,2012(3):128-131.
- [8] 严彤,易振国,张金朋,等. 航空发动机大延迟系统 Smith 预估补偿模糊 PID 控制算法[J]. 火力与指挥控制,2013(1):159-162.

(责任编辑 杨继森)