

# 基于 BP 神经网络 PID 的纸浆浓度自适应控制

陈银环

(四川建筑职业技术学院, 德阳 618000)

**摘要:** 目的 为了克服纸浆浓度控制系统的滞后性、非线性和时变性, 以提高纸浆浓度控制性能。**方法** 针对纸浆浓度控制问题提出一种 BP 神经网络 PID 控制技术, 构建 3-4-3 的 BP 神经网络结构, 并在该基础上建立 BP 神经网络 PID 控制的数学模型, 利用 BP 神经网络实现 PID 参数的自适应调整。**结果** 仿真结果表明, BP 神经网络 PID 控制相较于传统 PID 控制收敛速度更快、超调量更小、抗干扰能力更强、鲁棒性更好。**结论** 该控制方法实现了纸浆浓度的自适应控制, 为纸浆浓度的最优控制提供了一种有效可行的控制方法。

**关键词:** 纸浆浓度控制; BP 神经网络; PID; 参数自适应调整; 仿真

中图分类号: TB484.1 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2018)01-0146-05

## Adaptive Control of Pulp Concentration Based on BP Neural Network PID

CHEN Yin-huan

(Sichuan College of Architectural Technology, Deyang 618000, China)

**ABSTRACT:** The work aims to overcome the hysteresis, nonlinearity and time variability of the pulp concentration control system, so as to improve the pulp concentration control performance. A BP neural network PID control technique was proposed with respect to the problem of pulp concentration control. A 3-4-3 BP neural network structure was constructed. Based on that, a mathematical model of BP neural network PID control was built. The adaptive adjustment of PID parameters by BP neural network was made. The simulation results showed that, the BP neural network PID control had faster convergence speed, less overshoot, stronger anti-interference ability and better robustness than the traditional PID control. The control method realizes the self-adaptive control of pulp concentration and provides an effective and feasible control method for optimal control of pulp concentration.

**KEY WORDS:** pulp concentration control; BP neural network; PID; parameter adaptive adjustment; simulation

纸浆浓度是造纸生产中一个非常重要的参数, 纸浆浓度的稳定控制是实现造纸工艺、保证纸张质量的重要一环, 因此稳定且高精度地控制纸浆浓度是实现自动化造纸的关键<sup>[1—2]</sup>。纸浆浓度控制系统由于采用传感器进行反馈 PID 控制, 传感器信号采集过程中需要一定时间, 加上控制器本身具有扫描周期, 从而导致该系统具有大时滞、非线性、时变性等特点。由于生产环境在时刻发生变化, 导致纸浆浓度控制很难建立精确的数学模型, 采用传统控制算法设计的控制器很难满足纸浆浓度的精确实时控制, 甚至会因为外部环境变化出现大幅度波动<sup>[3—4]</sup>。

目前, 在纸浆浓度控制过程中通常采用 PID 进行反馈控制, PID 控制结构简单、易实现。在实际的纸浆浓度控制过程中, 由于参数的时变性, 导致传统 PID 控制很难在纸浆浓度控制过程中达到满意状态。为了克服传统 PID 控制缺陷, 国内外提出了多种智能 PID 控制方法<sup>[5—8]</sup>。葛升民等设计了一种 PID 参数自适应在线调整方法, 该算法提高了控制器性能, 但计算量复杂, 对于要求响应速度快的系统, 很难达到其理想状态<sup>[9]</sup>。叶自清等提出了一种单神经元 PID 的浆浓度控制, 该控制结构简单、容易实现, 但单层神经元只具有线性分类能力, 在较为复杂的控制中控制性能较低<sup>[10]</sup>。BP 神

经网络具有较强的逼近非线性映射的能力, 具有自适应学习、并行分布处理和强鲁棒性等特点, 特别适用于复杂非线性系统的自适应控制<sup>[11—15]</sup>。

为了提高纸浆浓度控制精度和稳定性, 拟提出一种基于BP神经网络PID的纸浆浓度控制算法, 使纸浆浓度在控制过程中能够具有自适应性, 可根据具体情况自动调节PID的3个参数, 从而提高控制器性能和可靠性。

## 1 工艺分析和系统数学模型

纸浆浓度控制回路工艺见图1, 控制系统主要由流量传感器、浓度传感器、控制器(BP神经网络PID控制器)、送浆泵、调节阀门等组成。送浆泵将浆池中的溶液输送到调浆箱, 在调浆箱附近的浓度传感器检测到纸浆浓度值传送到控制器中, 将该值与控制器

中的目标值进行比较, 然后控制器根据比较值对稀释水调节阀门进行控制, 通过阀门的控制将适量的稀释水输送到浆池中进而实现对纸浆浓度的反馈控制, 浓度反馈调节控制系统见图2。

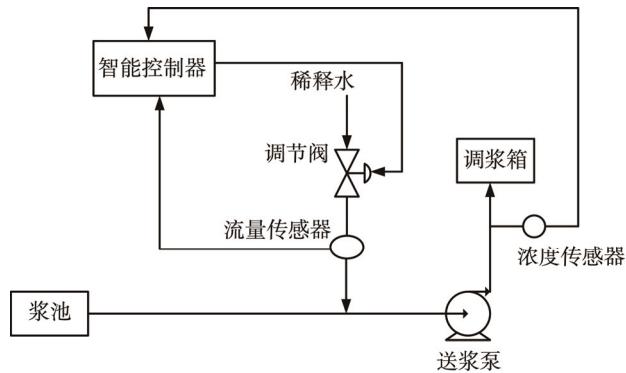


图1 纸浆浓度控制系统

Fig.1 Pulp concentration control system

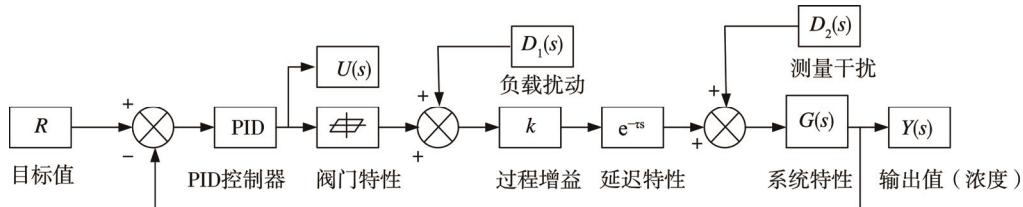


图2 纸浆浓度反馈控制结构  
Fig.2 Feedback control structure of pulp concentration

在实际浓度调节过程中,  $G(s)$ 包括3个环节, 即阀门动态变化、纸浆浓度变化、浓度变送器动态变化, 该3个环节均为一阶惯性环节,  $G(s)$ 表达式为:

$$G(s) = \frac{1}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)(T_3 s + 1)} \quad (1)$$

式中:  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$ 分别为3个动态特性的时间特性系数;  $s$ 为副变量。

由图2和控制理论可得纸浆浓度控制系统过程对象的传递函数为:

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{k}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)(T_3 s + 1)} e^{-ts} \quad (2)$$

式中:  $Y(s)$ 为浓度检测值;  $U(s)$ 为控制器输出;  $D_1(s)$ 为负载扰动;  $D_2(s)$ 为测量干扰;  $k$ 为过程增益;  $e^{-ts}$ 为阀门和浓度检测传感器的延迟特性。

在实际操作过程中,  $T_2$ 远大于 $T_1$ 和 $T_3$ , 由此可以得到最终的简化传递函数为:

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{k}{(Ts + 1)} e^{-ts} \quad (3)$$

## 2 传统PID控制

目前, 纸浆浓度控制基本采用PID控制, PID控制数学模型:

$$u(t) = K_p \left[ e(t) + \frac{1}{t_i} \int_0^t e(t) dt + t_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (4)$$

式中:  $K_p$ ,  $t_i$ ,  $t_d$ 分别为比例系数、积分时间和微分时间;  $e(t)$ 为不同时间段控制量的差值。

在PID控制过程中需要将其离散化处理, 再通过差分代替微分, 即:

$$\begin{cases} \int_0^t e(t) dt \approx T_0 \sum_{i=0}^n e(i) \\ \frac{de(t)}{dt} \approx \frac{e_n - e_{n-1}}{t_0} \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $t_0$ 为积分时间之差。

由式(4—5)可得PID控制数学表达式为:

$$U_n = K_p \left[ e_n + \frac{t_0}{t_i} \sum_{i=1}^n e_i + \frac{t_d}{t_0} (e_n - e_{n-1}) \right] \quad (6)$$

式中:  $n$ 为采样序号;  $e_n$ 为采样数值;  $U_n$ 为控制输出。

在PID控制过程中, 通常采用增量形式进行控制, 即:

$$\Delta U_n = K_p (e_n - e_{n-1}) + K_i e_n + K_d (e_n - 2e_{n-1} + e_{n-2}) \quad (7)$$

式中:  $K_d$ 为微分系数;  $K_i$ 为积分系数。上述PID控制方法虽然结构简单、容易实现, 但该方法中3个参数不能根据环境变化进行自适应调整, 而纸浆浓度

的控制是一个时变性较强的过程,传统 PID 控制满足不了高精度和高时效性的控制要求。

### 3 BP 神经网络 PID 控制

对于纸浆浓度这种强非线性系统,为了获得更好的控制效果,需要采用一种智能的控制方法对 PID 的 3 个参数进行调整。这里利用神经网络强大的非线性映射和自我学习的能力,通过 BP 神经网络对 PID 控制参数  $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$  进行在线自适应调整,从而使纸浆浓度的控制达到期望效果。纸浆浓度控制系统结构见图 3,控制器由 BP 神经网络和 PID 控制器构成。

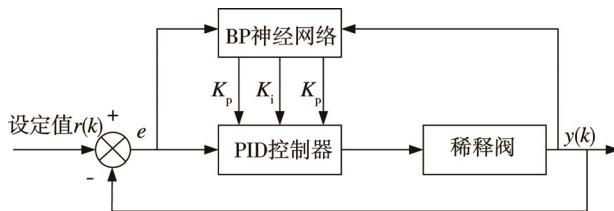


图 3 BP 神经网络控制器结构

Fig.3 Controller structure of BP neural network

BP 神经网络结构见图 4,该网络结构由输入层、隐含层以及输出层组成,这里取隐含层神经元的数目为 4,采用 3-4-3 的 3 层 BP 神经网络结构进行自学习。

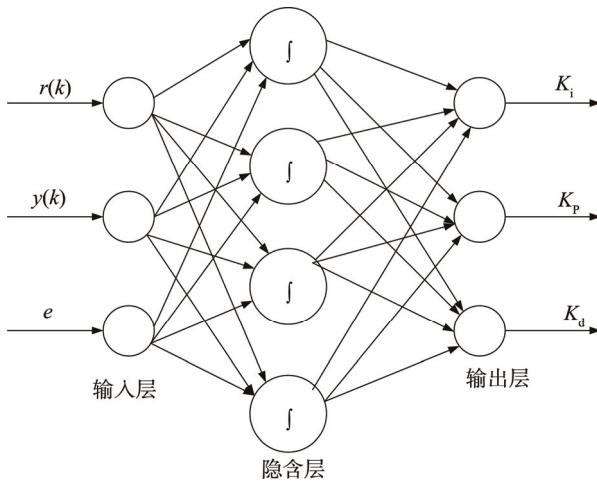


图 4 BP 神经网络结构

Fig.4 Structure of BP neural networks

BP 神经网络 PID 的输入、输出以及误差可表示为:

$$R^{(1)} = [r(k) \ y(k) \ e(k)]^T \quad (8)$$

式中:  $r(k)$  为  $k$  时刻纸浆浓度目标值;  $y(k)$  为  $k$  时刻纸浆浓度的测量值;  $e(k)$  为纸浆浓度的测量值与目标值的偏差。

隐含层的输入和输出为:

$$x_i^{(2)}(k) = \sum_{j=1}^3 w_{ij} R_j^{(1)} \quad i = (1, 2, \dots, 4) \quad (9)$$

$$y_i^{(2)}(k) = f(x_i^{(2)}(k)) \quad i = (1, 2, \dots, 4) \quad (10)$$

式中:  $x_i^{(2)}$  为隐含层第  $i$  个神经元的输入;  $w_{ij}$  为连接权值;  $R_j^{(1)}$  为输入层第  $j$  个神经元的输出;  $y_i^{(2)}$  为隐含层第  $i$  个神经元的输出。

隐含层的活化函数取正负对称的 sigmoid 函数为:

$$f(x) = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}} \quad (11)$$

网络输出层的输入和输出为:

$$x_h^{(3)}(k) = \sum_{j=1}^4 w_{hj} y_j^{(2)} \quad h = (1, 2, 3) \quad (12)$$

$$y_h^{(3)}(k) = g(x_h^{(3)}(k)) \quad h = (1, 2, 3) \quad (13)$$

$$\begin{cases} K_p = y_1^{(3)}(k) \\ K_i = y_2^{(3)}(k) \\ K_d = y_3^{(3)}(k) \end{cases} \quad (14)$$

式中:  $x_h^{(3)}$  为第  $h$  个神经元的输入;  $y_h^{(3)}$  为第  $h$  个神经元的输出。

输出层的 3 个神经元分别调控并输出 PID 控制器参数, PID 控制器中的 3 个参数  $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$  不能为负数,因此将输出层的活化函数取非负的 sigmoid 函数为:

$$g(x) = \frac{1 + \tanh x}{2} = \frac{e^x}{e^x + e^{-x}} \quad (15)$$

取准则函数为:

$$E(k) = \frac{1}{2}(r(k) - y(k)) \quad (16)$$

为了使 BP 神经网络能够快速收敛并能够收敛到全局最小值,按照梯度下降法对网络权系数进行修正,可以得到修正后的网络输出权值为:

$$\Delta^2 w_{hi}(k) = \alpha \Delta^2 w_{hi}(k-1) + \eta \delta_h^{(3)} y_i^{(2)}(k) \quad (17)$$

式中:  $\delta_h^{(3)} = e(k) \operatorname{sgn}\left(\frac{\partial y(k)}{\partial u(k)}\right) \frac{\partial u(k)}{\partial y_h^{(3)}(k)}$ ;  $\alpha$  为惯性系数;  $\eta$  为学习速率;  $w_{hi}$  为修正后的网络权值。

$$g'(x) = g(x)(1 - g(x)) \quad (18)$$

隐含层权值经过修正后为:

$$\Delta^1 w_{hi}(k) = \alpha \Delta^1 w_{hi}(k-1) + \eta \delta_h^{(2)} R_j^{(2)}(k) \quad (19)$$

式中:  $\delta_h^{(2)} = f'(y_i^{(2)}(k)) \sum_{h=1}^3 \delta_h^{(3)} w_{hi}(k)$ 。

$$f'(x) = (1 - f^2(x)) / 2 \quad (20)$$

### 4 仿真分析

为了验证文中提出的基于 BP 神经网络 PID 纸浆浓度控制方法的有效性和可行性,进行了仿真实验分析。以生产定量为 70 g/m<sup>2</sup> 的纸浆为例,纸浆浓度控制系统传递函数为:

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{5}{(20s+1)} e^{-20s} \quad (21)$$

使用 Matlab 进行仿真, BP 神经网络结构选取

3-4-3, 学习速率  $\eta=0.2$ , 惯性系数  $\alpha=0.05$ , 神经网络的权值取 $[-0.5, 0.5]$ 。BP神经网络PID控制器的输出向量为参数  $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$ , 采用纸浆浓度误差  $e(k)=r(k)-y(k)$  作为BP神经网络控制器的学习信号, 通过学习信号对PID控制器参数进行自适应调整。

采用BP神经网络PID控制和传统PID控制时的单位阶跃响应曲线见图5。由图5可以看出, BP神经网络PID控制与传统PID控制相比, 响应速度更快, 超调量小, 具有更好的静态和动态特性。

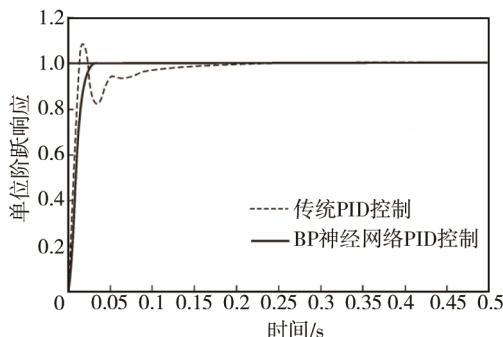


图5 阶跃响应曲线  
Fig.5 Step response curve

BP神经网络PID控制器经过网络学习后PID的3个参数  $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$ 变化曲线见图6。由图6可知, 当纸浆浓度出现偏差时, BP神经网络便开始对PID的3个参数进行调整, 3个参数经过很短时间便达到稳定, 由此可以看出, BP神经网络自适应PID纸浆浓度调节方法具有较高的响应精度和较强的在线自适应能力。

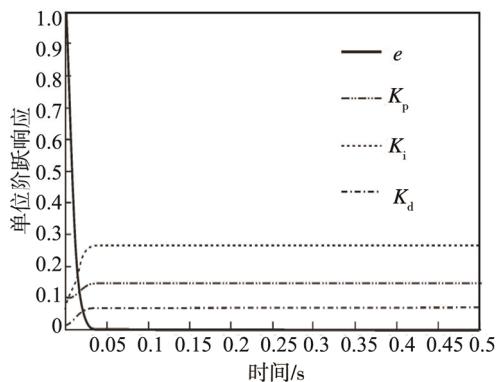


图6 PID参数变化曲线  
Fig.6 Change curve of PID parameter

## 5 结语

在分析纸浆浓度控制工艺原理的基础上, 建立了纸浆浓度控制的传递函数, 设计了基于BP神经网络PID的纸浆浓度自适应控制器, 通过BP神经网络对常规PID控制器的比例、积分、微分参数进行自适应调整, 避免了人工整定PID参数的繁琐工作和控制精

度不高的缺陷。仿真结果表明, 基于BP神经网络的PID自适应控制器具有动态响应快、鲁棒性强、稳态精度高的特点, 能够有效消除纸浆浓度控制过程中系统本身以及复杂多变的干扰等因素带来的影响, 在实际应用中具有一定的参考价值。

## 参考文献:

- [1] 曹露, 熊智新, 胡慕伊. 纸浆浓度控制系统的仿真研究[J]. 计算机仿真, 2012, 29(6): 176—179.  
CAO Lu, XIONG Zhi-xin, HU Mu-yi. Simulation and Research on Pulp Consistency Control System[J]. Computer Simulation, 2012, 29(6): 176—179.
- [2] 黄亚南, 张爱娟, 胡慕伊. 基于单神经元PSD的纸浆浓度控制算法研究[J]. 中国造纸, 2016, 35(5): 46—50.  
HUANG Ya-nan, ZHANG Ai-juan, HU Mu-yi. Pulp Consistency Control Algorithm Based on Single Neuron Adaptive PSD[J]. China Pulp & Paper, 2016, 35(5): 46—50.
- [3] 吴新生. 纸浆浓度的模糊神经网络自适应PID控制[J]. 计算机测量与控制, 2013, 21(11): 2969—2971.  
WU Xin-sheng. Fuzzy Neural Network Adaptive PID Control of Pulp Consistency[J]. Computer Measurement & Control, 2013, 21(11): 2969—2971.
- [4] 吴勇, 宋磊, 曲乃锐. 矿用乳化液浓度配比装置的研究[J]. 工矿自动化, 2012, 14(2): 84—87.  
WU Yong, SONG Lei, QU Nai-rui. Research on the Ratio of Mining Emulsion Concentration Device[J]. Journal of Industrial Automation, 2012, 14(2): 84—87.
- [5] 陈道炯, 单世宝, 宫赤坤. 基于神经网络PID控制的系统非线性校正的研究[J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(7): 715—719.  
CHEN Dao-jiong, SHAN Shi-bao, GONG Chi-kun. Study on Nonlinear Adjustment of Neural Network PID Control System[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2006, 27(7): 715—719.
- [6] 程广伟, 周志立, 邓楚南. 发动机油门PID控制的参数整定[J]. 农业机械学报, 2008, 39(5): 26—29.  
CHENG Guang-wei, ZHOU Zhi-li, DENG Chu-nan. Parameter Tuning of the Engine Throttle Control[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2008, 39(5): 26—29.
- [7] 崔皆凡, 刘艳, 闫红, 等. 基于模糊控制的多电机神经元PID同步控制[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2013, 2(2): 81—83.  
CUI Jie-fan, LIU Yan, YAN Hong, et al. Multi-motor Neuron PID Synchronous Control Based on Fuzzy Control[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2013, 2(2): 81—83.

- [8] 吴宇平, 章家岩, 章磊, 等. 定量称重包装系统 RBF 神经网络 PID 控制研究[J]. 安徽工业大学学报(自然科学版), 2014, 31(3): 299—302.  
WU Yu-ping, ZHANG Jiayan, ZHANG Lei, et al. A Study of Quantitative Weighing Packaging System Based on RBF Neural Network PID Control[J]. Journal of Anhui University of Technology(Natural Science), 2014, 31(3): 299—302.
- [9] 吴宇平, 章家岩, 章磊. 定量称重包装系统 RBF 神经网络 PID 控制研究[J]. 安徽工业大学学报(自然科学版), 2014, 31(1): 299—302.  
WU Yu-ping, ZHANG Jiayan, ZHANG Lei. A Study of Quantitative Weighing Packaging System Based on RBF Neural Network PID Control[J]. Journal of Anhui University of Technology(Natural Science), 2014, 31(1): 299—302.
- [10] 叶自清, 陈敏. 基于动态矩阵和单神经元 PID 的浆浓度控制[J]. 控制系统, 2009, 25(5): 29—33.  
YE Zi-qing, CHEN Min. Plasma Consistency Control Based on Dynamic Matrix and Single Neuron PID[J]. Automation & Instrumentation, 2009, 25(5): 29—33.
- [11] SUWANSAWAT S, EINSTEIN H H. Artificial Neural Networks for Predicting the Maximum Surface Settlement Caused by EPB Shield Tunneling[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2006(21): 133—150.
- [12] 杜汉强, 张广文. 基于模糊自适应 PID 控制器的张力控制系统[J]. 包装工程, 2008, 29(1): 90—91.  
DU Han-qiang, ZHANG Guang-wen. Tension Control System Based on Fuzzy Self-adaptive PID[J]. Packaging Engineering, 2008, 29(1): 90—91.
- [13] 刘金昆. 先进 PID 控制及其 MATLAB 仿真[M]. 北京: 电子工业出版社, 2003.  
LIU Jin-kun. Advanced PID Control and MATLAB Simulation[M]. Beijing: Electronics Industry Press, 2003.
- [14] 蒋鼎国. 基于改进型 BP 神经网络 PID 控制器的温室温度控制技术[J]. 实验室研究与探索, 2015, 34(1): 9—13.  
JIANG Ding-guo. The Temperature Control of Greenhouse Based on Novel PID Controller[J]. Research and Exploration in Laboratory, 2015, 34(1): 9—13.
- [15] AI Jiu-jin, LYU Ning, XIA Zeng-gang. Speed Control System of Paper Cutting Machine Based on Fuzzy-PID[J]. China Pulp & Paper, 2008, 27(12): 51.