

造纸机速度链控制系统设计

刘海军¹, 陈重阳²

(1.内江职业技术学院, 内江 641100; 2.重庆市金泽鑫科技有限公司, 重庆 402160)

摘要: **目的** 为改善造纸机多电机同步控制效果, 降低纸张生产过程断裂率, 基于神经网络 PID 算法设计一种造纸机速度链控制系统。**方法** 阐述造纸机的工艺流程, 在此基础上建立造纸机速度同步控制数学模型。设计一个神经网络 PID 控制器, 包括控制器结构和学习算法, 可用于解决相关非线性问题, 并进行仿真和试验研究。**结果** 该控制系统具有较好的稳定性、适应性, 响应速度较快, 同步精度高。**结论** 该方法增强了造纸机的同步跟随能力和抗干扰性能, 可以有效避免断纸、褶皱等现象的发生, 为造纸机多电机同步控制提供了一种有效的方法。

关键词: 造纸机; 同步控制; 神经网络; PID

中图分类号: TS734 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2018)13-0165-05

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2018.13.027

The Speed-chain Control System Design of Paper Machine

LIU Hai-jun¹, CHEN Chong-yang²

(1.Neijiang Vocational & Technical College, Neijiang 641100, China;

2.Chongqing Jin Zexin Technology Co., Ltd., Chongqing 402160, China)

ABSTRACT: The work aims to design a kind of paper machine speed-chain control system based on neural network PID algorithm for the purpose of improving the multi-motor synchronization control effect of paper machine and reducing the paper breaking rate in production process. The technological process of paper machine was expounded. On the basis of this, the mathematical model for the speed synchronization control of paper machine was established. A neural network PID controller was designed, including the controller structure and learning algorithm. It could be used to solve the relevant nonlinear problems. Finally, the simulation and experimental research were carried out. The results showed that the control system had better stability, adaptability, faster response speed and high synchronous precision. As this method enhances the synchronous follow-up capability and anti-interference performance of the paper machine, it can effectively avoid paper breaking and folding, etc. and provides an effective method for the multi-motor synchronization control of paper machine.

KEY WORDS: paper machine; synchronization control; neural network; PID

随着计算机控制、智能控制等技术的发展、应用, 造纸机的自动化水平不断提高^[1-3]。当前造纸机的发展趋势为高速化、大型化、高效化。造纸机同步控制具有强耦合、非线性等特点, 而且运行环境比较复杂, 容易受外界扰动的影响^[4-5], 因此, 在运行过程中对速度链控制的要求会比较高。根据纸张成型原理, 造纸机通常包括网部、压榨、前干燥、施胶、后干燥、压光和卷纸等几个传动点。各传动点由异步电动机驱

动, 而且要求线速度同步, 即当车速变化时, 所有传动点速度必须同步发生变化^[6-8]。

多电机同步控制是造纸机控制系统设计的重点和难点。同步性能往往会受一些因素的影响, 例如: 负载扰动; 电机驱动特性不匹配; 运行过程系统参数发生变化; 摩擦、间隙等导致系统非线性^[9-10]。目前, 造纸机常用的多电机同步控制方法包括主从级联控制和等状态控制^[11]。其中主从级联控制中后级电机以

收稿日期: 2017-09-01

基金项目: 四川高等职业教育研究中心基金 (GZY14C37)

作者简介: 刘海军 (1983—), 男, 内江职业技术学院讲师, 主要研究方向为电气控制工程、机电一体化技术。

前级电机输出作为速度给定值,由同步系数决定电机之间速度同步比例关系;主传动点扰动会对影响从传动点,但是从传动点扰动不会影响主传动点;容易造成误差累计和速度滞后^[12-13]。等状态控制中各传动点速度参考指令相同,速度同步比例关系由同步系数决定;控制结构简单、跟踪性能好,但容易受负载扰动影响^[14-15]。

文中采用等状态同步控制方法,利用神经网络PID制消除负载扰动等因素的影响,以保证造纸机速度链的同步性能,并通过仿真和试验验证所述方法的可行性和有效性。

1 造纸机工艺流程

1.1 工艺流程

造纸机工艺流程见图1,由纸浆到纸张需经过若干分部,如:网部、压榨、干燥部、压光、卷取等。各分部由异步电动机驱动,而且速度必须严格配合。在生产过程中,受纸张自身伸缩、摩擦、拉扯等因素的影响,容易导致个别分部内纸张过紧或过松。纸张过紧,会发生断纸;纸张过松,会出现褶皱。为避免此类问题,要求造纸机各分部速度恒定,且满足一定速比关系,因此,需要设计一种速度链同步控制系统。

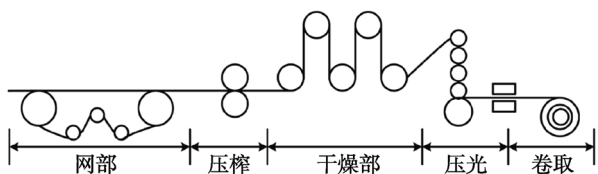


图1 造纸机工艺流程
Fig.1 Paper machine process

理论上,造纸机各分部的可按一定的速比协调控制并实现同步加减速,而且速度偏差的变化率应不超过0.1%,如此则可以保证轻易断纸。另外为提高纸张质量,造纸机各分部速度可单独调节并保持稳定。为解决此问题,文中在神经网络PID控制的基础上,提出了一种速度链同步控制方法。

1.2 运动分析

如上所述,造纸机各分部由电机单独控制。以网部为例,其可有多个轴,但是只有一个轴与电机直接相邻,即主轴;其余轴为从动轴。辊外缘线速度和电机转速之间的关系为:

$$v = \frac{\pi d}{60m} \cdot N \quad (1)$$

式中: v 为外缘线速度; d 为卷筒直径; m 为传动系统传动比; N 为电机转速。可以看出,线速度和电机转速成线性关系,因此通过电机速度控制即可实现各部分速度协调控制。

假设造纸机有 n 个分部,各分部电机转速为 $N_1, N_2, \dots, N_n$ 。相邻分部间速度比值分别为 $k_1, k_2, \dots, k_{n-1}$, 则有:

$$\begin{cases} N_2 = k_1 N_1 \\ N_3 = k_2 N_2 = k_2 k_1 N_1 \\ N_4 = k_3 N_3 = k_3 k_2 k_1 N_1 \\ \dots \\ N_n = k_{n-1} k_{n-2} \dots k_1 N_1 \end{cases} \quad (2)$$

2 多电机速度链控制

2.1 数学模型

假设造纸机具有 n 台电机,那么第 i 轴跟踪误差可定义为:

$$e_i(t) = v_i^d(t) - v_i(t) \quad (3)$$

式中: $v_i^d(t)$ 为速度期望值; $v_i(t)$ 为速度实际值。与传统运动控制不同,同步控制不仅要考虑跟踪误差的收敛,而且更注重同步误差的收敛性能。为便于分析,可设定各轴速度同步比例系数 $k_i=1$ 。为提高各轴速度同步性能,不仅要求 $e_i(t) \rightarrow 0$,而且需要满足:

$$e_1(t) = e_2(t) = \dots = e_n(t) \quad (4)$$

综上所述,可按相邻次序定义同步误差 $\varepsilon_i(t)$,描述为:

$$\begin{cases} \varepsilon_1(t) = e_1(t) - e_2(t) \\ \varepsilon_2(t) = e_2(t) - e_3(t) \\ \vdots \\ \varepsilon_n(t) = e_n(t) - e_1(t) \end{cases} \quad (5)$$

根据式(5),如果所有轴均满足 $\varepsilon_i(t) = 0$,那么如式(4)所示性能指标便可实现。如上所述,造纸机速度链同步控制可以描述为:设计一种控制器,通过控制转矩,保证各分部速度跟踪误差 $e_i(t)$ 以及同步误差 $\varepsilon_i(t)$ 均要收敛于0。

2.2 神经网络PID控制器

本质上,造纸机速度链同步控制就是一种多电机同步控制问题。然而在实际运行过程中,多电机同步控制具有参数时变、时滞、非线性等特点,仅仅依靠PID控制很难取得理想的控制效果。神经网络并不依赖于被控对象的精确数学模型,而且具有很好的自适应、自学习能力以及良好的非线性逼近能力,因此文中结合PID控制和神经网络控制,设计了一种神经网络PID控制器,见图2。控制器输入可以是 $e_i(t)$ 或 $\varepsilon_i(t)$ 。

以跟踪误差 $e_i(t)$ 为例,神经网络控制器采用3层结构,输入节点的输入量为跟踪误差 e 及其变化率 $\dot{e}$; 输出节点的输出量对应PID控制器主要参数为 K_p, K_i, K_d 。考虑到 K_p, K_i, K_d 需取正值,因此输出层的

神经元活化函数可采用非负 Sigmoid 函数。另外，隐含层的神经元活化函数可采用正负对称 Sigmoid 函数。定义输入层和隐含层之间的连接权为 $W_{ij}(k)$ ，隐含层和输出层之间的连接权为 $W_{js}(k)$ 。根据造纸机同步控制要求，选取如下性能指标函数：

$$E(k) = (v_i^d(k) - v_i(k))^2 / 2 \quad (6)$$

式中： $v_i^d(k)$ 为 k 时刻电机转速给定值； $v_i(k)$ 为 k 时刻电机转速实际值。

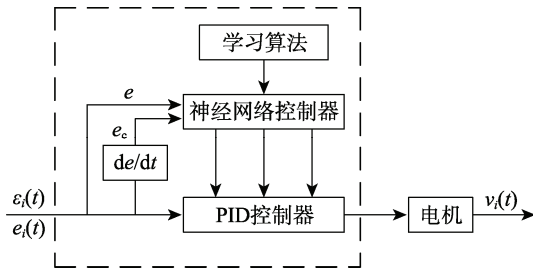


图 2 神经网络 PID 控制器
Fig.2 Neural network PID controller

同时采用增量式数字 PID 控制算法，相应表达式为：

$$u(k) = u(k-1) + K_p \Delta e(k) + K_i e(k) + K_d (\Delta e(k))^2 \quad (7)$$

根据式 (6) 性能指标，网络之间权值采用梯度下降法进行修正。具体原理： $e(k)$ 沿加权系数 $\omega(k)$ 的负梯度方向进行搜索，同时添加一个可以确保搜索快速收敛的极小惯性项。对应修正公式可表示为：

$$\Delta \omega(k) = -\mu \frac{\partial E(k)}{\partial \omega(k)} + \alpha \Delta \omega(k-1) \quad (8)$$

其中：

$$\frac{\partial E(k)}{\partial \omega(k)} = \frac{\partial E(k)}{\partial \mu(k)} \cdot \frac{\partial \mu(k)}{\partial \omega(k)} = \frac{\partial E(k)}{\partial \mu(k)} \cdot \frac{\partial \mu(k)}{\partial o(k)} \cdot \frac{\partial o(k)}{\partial net(k)} \cdot \frac{\partial net(k)}{\partial \omega(k)} \quad (9)$$

式中： μ 为学习速率，且满足 $\mu > 0$ ； α 为惯性系数，且满足 $0 < \alpha < 1$ 。

输出层满足：

$$\frac{\partial E(k)}{\partial \omega(k)} = -(v_i^d(t) - v_i(t)) = -e(k) \quad (10)$$

综合式 (5—10) 可以得到输出层权值学习算法，描述为：

$$\Delta \omega_{js}(k) = \delta_s o_j(k) + \alpha \Delta \omega_{js}(k-1) \quad (11)$$

$$\delta_s = e(k) \frac{\partial u(k)}{\partial o_s(k)} g(net_s(k)) \operatorname{sgn} \left(\frac{\partial \omega(k)}{\partial u(k)} \right) \quad (12)$$

$$g(x) = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}} \quad (13)$$

同理，可以得到隐含层权值学习算法，描述为：

$$\Delta \omega_{ij}(k) = \delta_j o_i(k) + \alpha \Delta \omega_{ij}(k-1) \quad (14)$$

$$\delta_j = f(net_j(k)) \delta_s \omega_{js}(k) \quad (15)$$

$$f(x) = \frac{e^x}{e^x + e^{-x}} \quad (16)$$

2.3 PID 控制器参数整定算法

综上所述，PID 参数自整定算法可以做如下描述。

1) 确定神经网络结构和层数，并给出各层网络初值；设定比例、积分、微分系数的初值以及学习速率和惯性系数。

2) 采样得到跟踪误差和同步误差，并进行模糊化处理，得到神经网络输入变量。

3) 计算神经网络各层神经元的输入和输出，计算 PID 控制器的输出量，作用到被控对象，得到实际输出量。

4) 根据式 (11—16) 计算各层权值。

5) 若控制对象的输出满足性能指标的要求，则算法结束，从而得到 PID 控制的 3 个最优参数；否则跳到步骤 2) 继续循环。

3 仿真与试验

3.1 仿真

为验证所述控制方法的可行性和有效性，文中利用 Matlab 进行相关仿真实验。仿真平台由 4 台 YS 系列异步直流电机构成。

神经网络 PID 控制器选用 2-5-3 结构，相关参数设置：学习速率 $\mu=0.35$ ，惯性系数 $\alpha=0.05$ ，加权系数初始值在区间 $[-0.5, 0.5]$ 上随机选取。为便于仿真，设定 4 台电机的转速相同，即 $\omega_1=\omega_2=\omega_3=\omega_4$ 。在电机运行稳定后，在 4 s 左右设置负载扰动，跟踪误差和同步误差仿真结果见图 3。

由仿真结果可以看出：4 台电机启动后，跟踪误差和同步误差均会在较短时间内收敛于 0；系统同步误差最大值仅为 3 rad/s；受扰动影响后，波形会出现微小的波动，但能够迅速地恢复稳定状态。仿真结果表明：所述控制系统具有较好的稳定性、适应性，响应速度较快；当发生扰动时，各电机的跟踪误差和同步误差波形变化非常小，同步精度较高。

3.2 试验

为进一步验证所述控制系统的性能，以某型号造纸机作为试验平台，针对真空伏辊、驱网辊、压榨辊、干燥辊等 4 个传动点进行速度链同步控制试验。并利用 5 组光电式转速传感器检测 4 个传动点电机的转速。试验结果见图 4。

1 号传动点电机速度为 1500 m/min，2, 3, 4 号传动点电机速度均比前一传动点电机速度高出 0.5%。并

在 17 s 时,将 1 号传动点电机速度升高至 1600 m/min,各传动点速度比例保持不变。由试验结果可以看出:

各传动点能够保持较好的跟随性能,完全满足速度链控制要求。

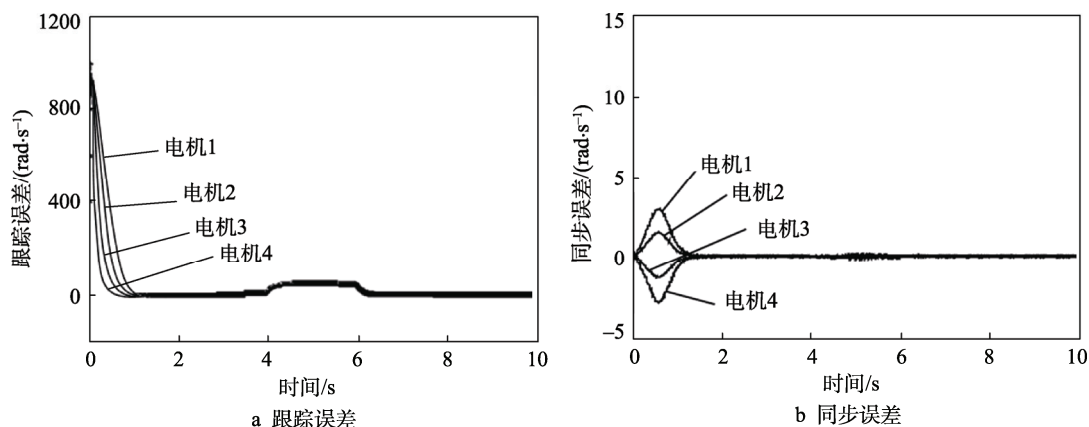


图 3 仿真实验结果
Fig.3 The simulation results

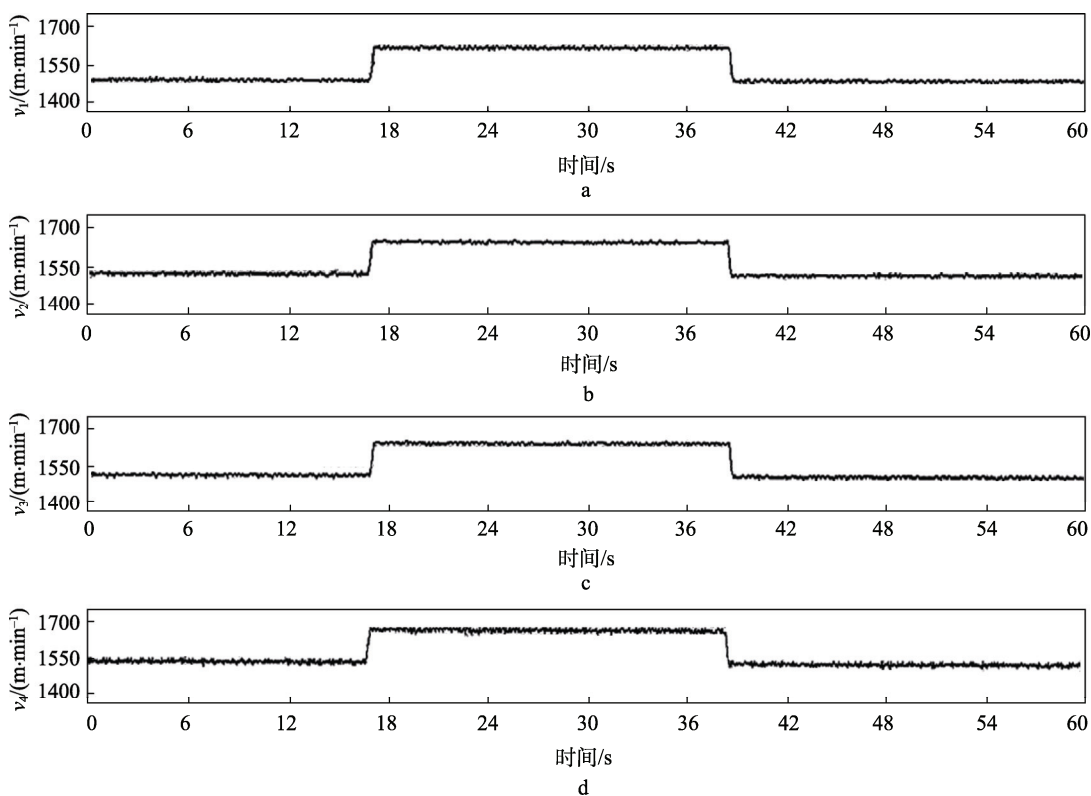


图 4 试验结果
Fig. 4 The test results

4 结语

造纸机是一种非常重要的工业自动化机械,同步控制作为一个关键控制技术,在很大程度上决定了造纸机精度和效率。造纸机同步控制具有强耦合、非线性等特点,而且运行环境比较复杂,容易受到外界扰动的影响。为解决此问题,文中基于神经网络 PID 设计了一种造纸机速度链控制系统。详细阐述了同步控制原理及控制过程,通过仿真和试验验证了所述控制

系统的有效性。该控制系统稳定性好、适应性强、响应速度快、同步精度高,对造纸机控制系统设计具有一定的借鉴意义。

参考文献:

- [1] 唐飞,夏陆岳,潘海天,等. 智能控制技术在制浆造纸生产过程中的应用[J]. 轻工机械, 2007, 25(4): 67—70.

- TANG Fei, XIA Lu-yue, PAN Hai-tian, et al. Application of Intelligent Control Technology in Pulping and Papermaking Industry[J]. Light Industry Machinery, 2007, 25(4): 67—70.
- [2] 刘焕彬. 制浆造纸过程自动测量与控制[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2003.
- LIU Huan-bin. Automatic Measurement and Control of Pulp and Paper Making Process[M]. Beijing: China Light Industry Press, 2003.
- [3] YOUNGSEOK C, JAEHYUN P, HANS H, et al. Development of a Web-based Survey System for Evaluating Affective Satisfaction[J]. International Journal of Industrial Ergonomics, 2011(41): 247—254.
- [4] 张亚东. 基于PLC的造纸机自动控制系统设计与研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2012.
- ZHANG Ya-dong. Research and Design of Paper Machine Control System Based on PLC[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2012.
- [5] 文键. 西门子PLC和变频器在1800纸机中的应用[J]. 自动化信息, 2007(10): 84—85.
- WEN Jian. Application of SIEMENS PLC and Frequency Converter in 1800 Paper Machine[J]. Automation Information, 2007(10): 84—85.
- [6] 郭荣佐, 郭进, 王霖, 等. 基于ARM的造纸机控制器设计[J]. 微计算机信息, 2008, 24(28): 69—71.
- GUO Rong-zuo, GUO Jin, WANG Lin, et al. Design of the Controller of Paper Making Machine Based on ARM[J]. Microcomputer Information, 2008, 24(28): 69—71.
- [7] 孟彦京, 王佳宁, 段明亮. 面向对象方法在造纸机PLC程序中的应用[J]. 自动化仪表, 2015, 36(3): 29—31.
- MENG Yan-jing, WANG Jia-ning, DUAN Ming-liang. Application of the Object-oriented Method in the Paper Machine PLC Program[J]. Process Automation Instrumentation, 2015, 36(3): 29—31.
- [8] 张池, 杨琳. 基于PLC与变频器的造纸机张力控制系统[J]. 中国造纸, 2010, 29(9): 53—55.
- ZHANG Chi, YANG Lin. Realization of Tension Control of Paper Machine Based on PLC and VFD[J]. China Pulp & Paper, 2010, 29(9): 53—55.
- [9] 王浩陈, 王超, 张懿. 造纸机分部传动多电机变频同步控制系统[J]. 变频器世界, 2015(5): 58—60.
- WANG Hao-chen, WANG Chao, ZHANG Yi. Section-drive Multi-motor Variable Frequency Synchronous Control System of Paper Machine[J]. The World of Inverters, 2015(5): 58—60.
- [10] HOUBBCHEN Y, GAO Z, JIANG F, et al. Boulter Active Disturbance Rejection Control for Web Tension Regulation[C]// Proceedings of the 40th IEEE Conference on Decision and Control, Orlando, Florida USA, 2001(9): 4974—4979.
- [11] 吕常智, 刘培. 基于神经网络PID的造纸机多电机同步控制研究[J]. 包装工程, 2016, 37(13): 106—111.
- LYU Chang-zhi, LIU Pei. Multi-motor Synchronous Control of Paper Machine Based on Neural Network PID[J]. Packaging Engineering, 2016, 37(13): 106—111.
- [12] 卫宏, 周国平, 申冬琴. 凹印机电轴传动多电机同步控制策略[J]. 包装工程, 2015, 36(3): 134—138.
- WEI Hong, ZHOU Guo-ping, SHEN Dong-qin. Multi-motor Synchronous Control Strategy of Electronic Shaft Driving in Gravure Printing Machine[J]. Packaging Engineering, 2015, 36(3): 134—138.
- [13] 彭晓燕, 刘威, 张强. 基于改进型偏差耦合结构的多电机同步控制[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2013, 40(11): 77—83.
- PENG Xiao-yan, LIU Wei, ZHANG Qiang. Synchronized Control of Multi-motor Based on the Improved Relative Coupling Control[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2013, 40(11): 77—83.
- [14] 王建华, 詹国兵. 造纸机多电机同步速度链控制系统研究[J]. 机械工程与自动化, 2015(4): 148—149.
- WANG Jian-hua, ZHAN Guo-bing. Research on Multi-motor Synchronous Speed Chain Control System of Paper Machine[J]. Mechanical Engineering and Automation, 2015(4): 148—149.
- [15] 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): 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): 81—83.