

包装机械

基于神经网络 PID 的造纸机多电机同步控制研究

吕常智, 刘培

(山东科技大学, 山东 266590)

摘要: **目的** 为提高生产的质量和降低纸的断头率, 研究造纸机多电机同步控制的方法。**方法** 应用 Matlab/Simulink 建立模型和仿真实验, 分析主从同步控制结构和并行同步控制结构, 在并行同步控制结构的基础上, 引入基于神经网络 PID 算法的速度补偿器。**结果** 仿真结果表明, 引入速度补偿后, 2 台电机的转速逐渐上升至给定速度, 且速比稳定保持在 1.01。在 $t=2$ s 只有第 2 台电机的负载转矩发生变化时, 2 台电机的转速基本没有下降。**结论** 该方法增强了造纸机多电机同步控制系统的同步跟随能力, 提升了抗干扰性能, 可以有效避免在造纸机运行过程中, 电机负载转矩突变造成的纸张过紧断纸、过松褶皱, 为造纸机多电机提供了一种新的同步控制的方法。

关键词: 神经网络 PID; 造纸机; 多电机同步控制

中图分类号: TS736 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2016)13-0106-06

Multi-motor Synchronous Control of Paper Machine Based on Neural Network PID

LYU Chang-zhi, LIU Pei

(Shandong University of Science and Technology, Shandong 266590, China)

ABSTRACT: A multi-motor synchronous control strategy of paper machine was applied to improve the production quality and reduce the breakage rate of paper. The neural network PID algorithm based on parallel synchronization was determined by comparing with the structure of master-slave synchronization control and parallel synchronization control, for which modeling and simulating were conducted by Matlab/Simulink. The results showed that after the introduction of speed compensation, the speed of the two motors gradually increased to a given speed and maintained a stable ratio 1.01. At $t=2$ s, only the load torque of the second motor was changed, but the rotational speed of the two motors substantially did not decrease. This method enhances the synchronization ability of multi-motor synchronous control system and improves the anti-jamming performance. It can effectively prevent the motor load torque caused by mutations in tight paper breaking or loose folds in the process of paper machine operation, and provide a new method for synchronous control.

KEY WORDS: neural network PID; paper machine; multi-motor synchronous control

目前, 长网造纸机在造纸工业中普遍使用, 它是由多套设备构成一种联动装置。长网造纸机的工艺流程见图 1, 由纸浆到形成纸张, 需经过多个分

部, 各个分部都有若干台异步电动机进行驱动, 分部之间的速度需要严格配合。在造纸机运行过程中, 由于纸张自身伸缩等原因, 可能会导致某些分部的

收稿日期: 2016-01-12

基金项目: 中国博士后科学基金 (2012M521361); 山东省青年科学家基金 (BS2012DX034); 山东省自然科学基金 (ZR2013CQ017, ZR2012EEM021); 山东省高校科技计划项目 (J13LN17)

作者简介: 吕常智 (1971—), 男, 江西省兴国县人, 硕士, 山东科技大学副教授, 主要研究方向为电力系统及其自动化、检测技术与自动化装置、自动控制技术。

纸张过松或过紧。为避免纸张过紧而断纸、过松而褶皱这种问题的发生,需要纸机的各分部都能稳速,且相互之间保持一定的速比关系,因此,应采用多分部速度链同步控制系统。

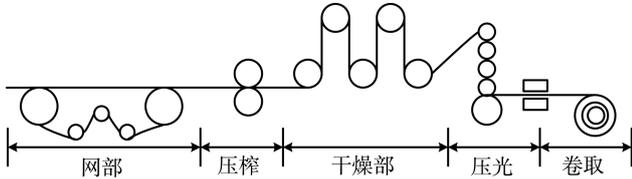


图 1 长网造纸机工艺流程
Fig.1 Fourdrinier flow chart

造纸机各分部速度之间按比例协调控制,并可以同步升降,速差的变化应该控制在 0.1%内,这样不易拉断纸,另外为了保证纸的质量和减少纸的断头,造纸机各分部的速度需要可调节并保持稳定。针对此类问题,文中设计了造纸机多电机同步控制系统,研究了造纸机多电机同步控制方法。首先,对主从同步控制结构和并行同步控制结构进行分析,确定以并行同步控制结构为基础;然后,引入基于神经网络 PID 算法的速度补偿器,进一步提高系统的性能。

1 速度链数学模型和多电机同步控制结构

1.1 造纸机速度控制数学模型

在湿法造纸加工过程中^[1],纸机传动各分部间的线速度并不相同,它们受纸的抄造速度、纸的含水量等因素所影响。纸浆先经由网部变成纸幅,接着由压榨部的各道工序将纸拉长,之后进入烘干部,在该部的干燥过程中纸页会出现收缩的现象。在整个过程中,湿部方面,因该部分纸是湿的,并且主要完成纸幅的拉伸,所以一般都要求处在后面分部的车速比前面分部车速依次提高;干部方面,因该部分的纸幅逐渐变干,并且主要完成纸幅的干燥去水,所以一般都要求后面分部的车速比前面分部车速依次降低。各分部间组成一个线速度成比例的速度链(相邻 2 个分部的线速度保持恒定的比值),要保证产品的质量和生产的正常运行,就必须高精度、可靠地保持这个比例系数。

对于速度链控制中的速度同步关系,假设造纸机传动系统有 n 个分部,各分部速度分别为 N_1, N_2, \dots, N_n , 相邻分部间速度的比值分别为 k_1, k_2, \dots, k_{n-1} , 数学关系满足式:

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

式中: N_1 为第 1 个传动点的速度, N_1 的改变会使其余各传动点速度 $N_2 \sim N_n$ 成比例地改变,而速度比 $k_i (i=1, 2, \dots, n-1)$ 的改变,只会使第 i 个传动点以后的传动速度改变, i 之前各传动点速度不变。

1.2 多电机同步控制结构

基于同步的方式,多电机速度同步控制主要有机械同步以及电气同步 2 种。机械同步方式是通过机械齿轮传动实现的,如今在电子技术的快速发展过程中,已经较少采用了;而电气同步方式下的控制方法,又以并行同步控制、主从同步控制等等为主。其结构示意图见图 2。

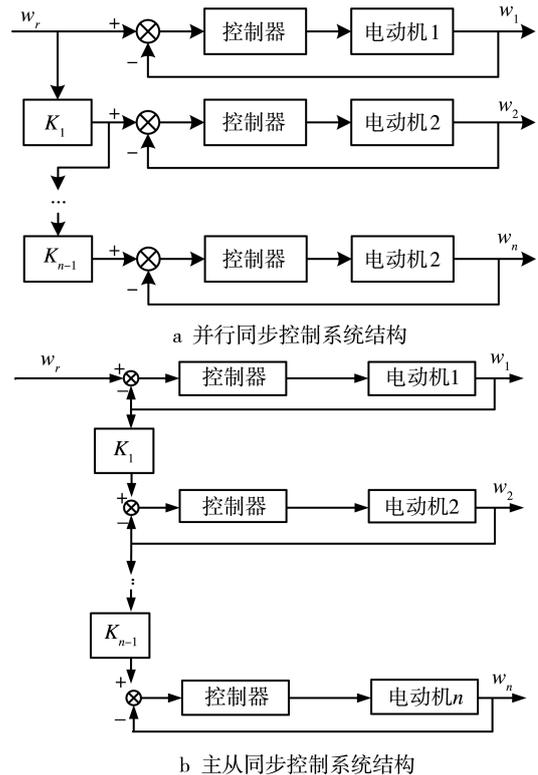


图 2 2 种电气同步控制结构

Fig.2 Two kinds of electrical synchronous control structure

并行同步控制结构把各个传动点的电机分别当作独立的速度控制对象,通过对各个子系统的电机速度控制,使每台电机都工作在速度给定值,相互之间没有影响。主从同步控制结构需要一台电动机作为速度同步的主电动机,而后一台电动机

机则作为主电动机的从电动机，主电动机速度的调节来自速度给定值，而从电动机速度的调节则是以两电动机之间的速比随同主电动机变化，受主电动机影响。

为了改善多电机同步控制系统的性能，提出了在电气同步控制结构基础上引入速度补偿器的方法。补偿器收到2台电机的速度偏差并进行处理之后，回馈到原来的速度控制系统。如果某台电机的转速发生变化，这种变化会由于补偿器的存在而影响另一台电机，最终2台电机又会实现同步，控制系统结构见图3。

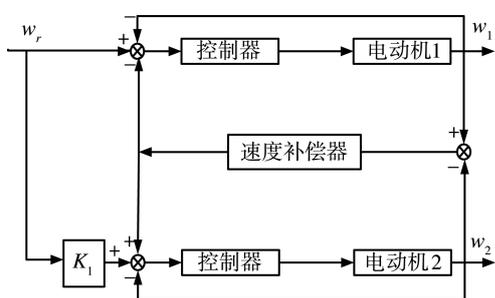


图3 基于速度补偿的同步控制系统结构
Fig.3 Compensation based on the speed of synchronization control system structure

速度补偿器的控制方式对于该同步控制结构的同步精度起到了决定作用。常用的控制方式如PID控制，要使效果明显，比例、微分、积分3种控制作用的协调配合非常重要。神经网络经过并行的非线性处理过程，可以自学习系统数据，并实现比例、微分、积分3种控制作用的最佳适配。文中使用BP神经网络，组建PID控制器，其参数 K_p , K_i , K_d 可以自学习和不断调整至最佳，将该控制器引入到多电机同步控制系统中，实现速度补偿要求。

2 BP神经网络PID控制器的原理

2.1 BP神经网络

含有隐含层的BP神经网络结构见图4。向量 u 和 y 作为网络的输入、输出。网络节点(每个神经元用一个节点表示)分为输入层、隐含层和输出层3部分。

采用BP学习算法的多层网络，分为正向和反向传播2个过程。首先是正向传播过程，网络的输入数据依次经过输入层、隐含层和输出层的处理，

各层节点的状态只受上一层的影响。若在输出层得到的输出与期望值不符，则转入反向传播过程，依次递归计算与期望输出之间的误差，由该误差调整前一层权值，根据梯度下降法对各层节点的权值和阈值进行调整，将误差信号减小到最小。

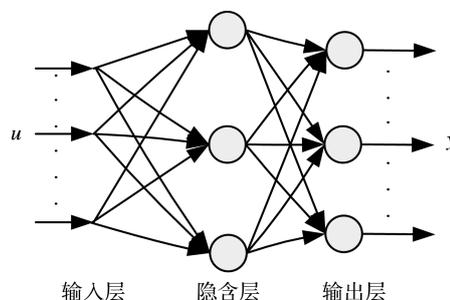


图4 BP神经网络的结构
Fig.4 The structure of neural network

2.2 BP神经网络PID控制器

BP神经网络PID控制器包括2个部分：

(1)传统的PID控制器，通过在线调整3个参数 K_p , K_i , K_d ，使用闭环方式控制被控对象。

(2)神经网络，输出层节点的输出状态对应于PID的3个参数 K_p , K_i , K_d ，不断根据网络的实际输出和期望输出之间的偏差值，调整PID控制器的参数，使控制效果达到最佳。通过神经网络的自组织、自学习和带权值的系数调整，使用最佳适配的PID控制器参数获得网络的输出，见图5。

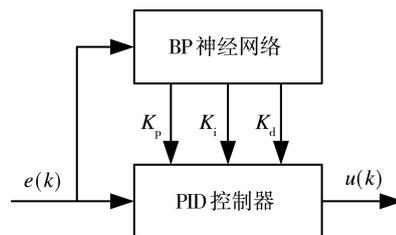


图5 基于BP神经网络的PID控制
Fig.5 PID control based on BP neural network

3 多电机同步控制结构的建模与仿真分析

3.1 造纸机速度链同步控制结构的搭建和参数设置

利用 Matlab/Simulink 搭建2个轴组成的速度链同步控制系统，电机模块采用三相异步电机 Asynchronous Machine SI Units，采用矢量控制方案实现变频调速^[2]，2台电机的参数见表1。每台电机的仿真模型见图6。

表 1 2 台电机的参数配置
Tab.1 Parameter configuration of two motors

序号	额定功率 /kW	频率/Hz	定子相绕组 电阻/ Ω	定子绕组 自感/H	转子相绕组 电阻/ Ω	转子绕组 自感/H	定、转子 互感/H	转动惯量 /($\text{kg}\cdot\text{m}^2$)	极对数
电机 1	37.3	60	0.087	0.8×10^{-3}	0.228	0.8×10^{-3}	34.7×10^{-3}	1.662	2
电机 2	37.3	60	0.116	0.6×10^{-3}	0.26	1×10^{-3}	33.8×10^{-3}	1.642	2

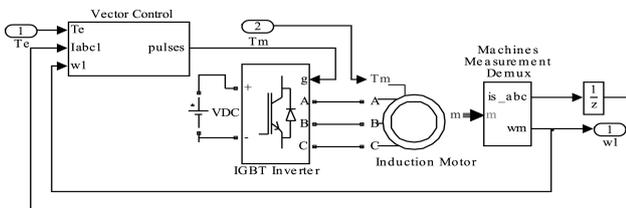
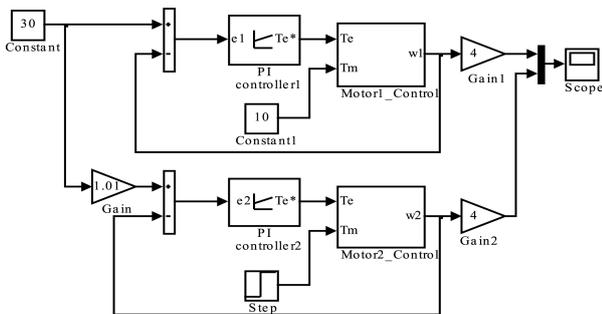


图 6 三相异步电机矢量控制仿真模型

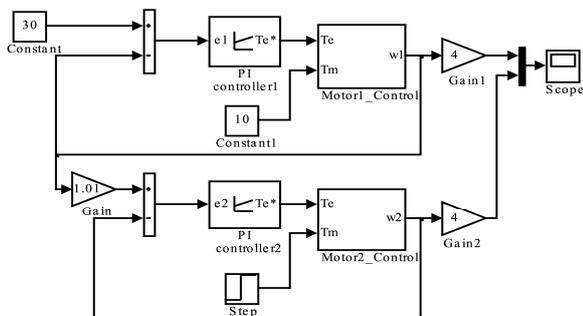
Fig.6 The simulation model of the three-phase asynchronous motor vector control

3.2 2 种电气同步控制结构的建模与仿真分析

并行同步控制结构和主从同步控制结构的仿真模型见图 7。系统仿真条件均采用：给定转速为 120 rad/s，初始负载转矩为 10 N·m，在 $t=2$ s 时，电机 2 的负载转矩变化为 18 N·m，但并行同步控制结构 2 台电机的输入分别为给定值以及给定值乘以速比，主从同步控制结构主电机的输入是给定值，而从电机的输入是主电机的输出乘以速比。仿真结果见图 8。



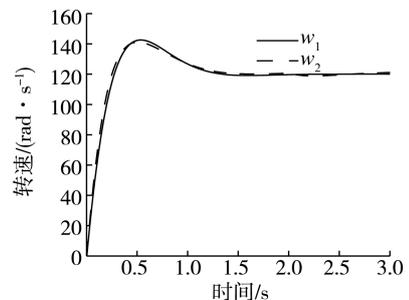
a 并行同步控制结构仿真模型



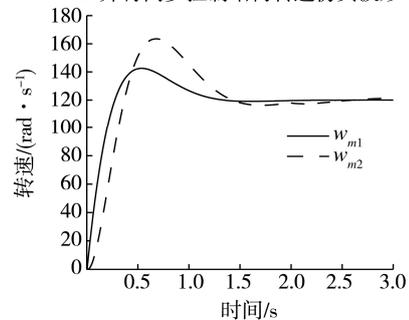
b 主从同步控制结构仿真模型

图 7 2 种电气同步控制结构的仿真模型

Fig.7 The simulation model of two kinds of electrical synchronous control structures



a 并行同步控制结构转速仿真波形



b 主从同步控制结构转速仿真波形

图 8 2 种电气同步控制结构的转速仿真波形

Fig.8 The simulation wave of two kinds of electrical synchronous control structures

对图 8 的仿真波形进行分析。并行同步控制结构中，2 台电机通电之后，转速逐渐上升，由于电机参数不同，电机 1 的转速响应滞后于电机 2，在 $t=2$ s，由于 2 台电机的并行关系，电机 2 的负载转矩发生变化时，即使其转速有波动，电机 1 的转速也不会变化，最后电机 1 的转速稳定于给定值 120 rad/s，而电机 2 的转速稳定于给定值的 1.01(速度比)倍。主从同步控制结构中，2 台电机的转速也在通电之后逐渐上升，但从电机的转速响应明显滞后于主电机，且超调量较大，在 $t=2$ s，从电机的转速受负载转矩突变的影响，会发生震荡，最后 2 台电机的转速以速度比 1.01 分别稳定于 120 rad/s 和 121.2 rad/s。

通过 2 台电机的仿真结果可以看到，从 $t=2$ s 到 2 台电机转速恢复稳定的这段时间内，2 台电机的转速明显不同步。在造纸机运行过程中，某些分部的纸张过松或过紧导致电机负载转矩突变，为避免纸张过紧而断纸、过松而褶皱，必须要求纸机的

各分部都能稳速,因此,不能允许多分部同步控制结构中这种短时间的不同步。为此,结合造纸机的实际要求,确定采用并行式的多电机同步控制方法,并基于该结构引入神经网络PID速度补偿器,进一步改善系统的同步性能。

3.3 神经网络PID速度补偿器同步控制结构的建模与仿真分析

引入神经网络PID速度补偿器的并行同步控制系统仿真模型见图9。该系统采用和前面无速度补偿器的并行同步控制系统一致的仿真过程。相应的仿真结果见图10。

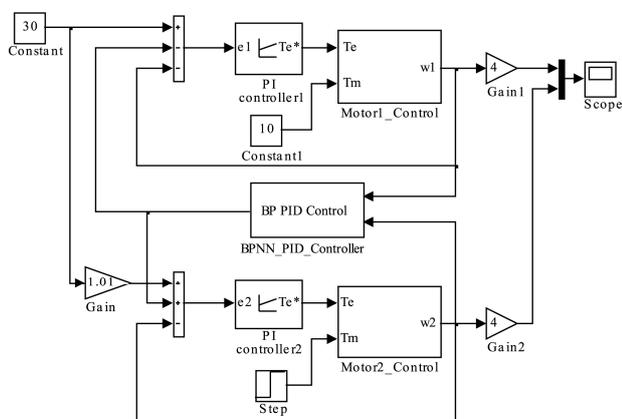


图9 基于神经网络PID速度补偿器的并行同步控制系统仿真模型

Fig.9 The simulation model of parallel synchronization control system based on neural network PID speed compensator

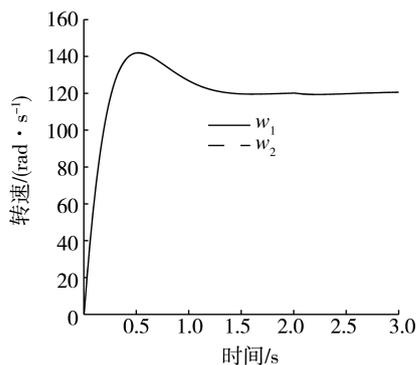


图10 基于神经网络PID速度补偿器的并行同步控制系统转速仿真波形

Fig.10 The simulation wave of parallel synchronization control system based on neural network PID speed compensator

由图10可见,基于神经网络PID速度补偿器的并行同步控制系统,2台电机的转速变化基本保持了同步。通电之后,2台电机的转速逐渐上升至速度比1.01稳定于120 rad/s和121.2 rad/s。而且当 $t=2$ s时,电机2的负载转矩突变也基本没有

对2台电机的转速产生影响,这说明采用神经网络PID速度补偿器,由于其自学习(自适应)的功能,仍能使系统处于稳定状态,并且调节时间没有明显加长,从而提高了测试系统的自适应能力和电机速度抗负载扰动的能力。在这种同步控制系统中,2台电机的转速响应基本一致,速度的同步性能得到了明显提高。对于造纸机运行过程中,电机负载转矩突变造成的纸张过紧断纸、过松褶皱问题,都能有效避免,满足了纸机的各分部速度严格配合且稳定同步运行的实际要求。

4 结语

对比了主从同步控制结构和并行同步控制结构,并应用Matlab/Simulink对2种不同结构分别建立了模型和仿真实验,引入神经网络PID速度补偿器的并行同步控制系统作为造纸机多电机同步控制数学模型。通过对仿真实验结果的分析,说明了基于神经网络PID速度补偿器的同步控制方法,可以增强造纸机多电机同步控制系统的同步跟随能力,有效避免了造纸机运行过程中电机负载转矩变化产生的纸张断纸、褶皱等问题。采用该同步控制新方法的系统在同步控制精度和收敛速度等方面也取得了很好的效果,具有较好的鲁棒性。

参考文献:

- [1] 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(10):84—85.
WEN Jian. Application of SIEMENS PLC and frequency converter in 1800 paper machine[J]. Automation information, 2007, 10(10):84—85.
- [2] 周渊深. 交直流调速系统与Matlab仿真(第2版)[M]. 北京: 中国电力出版社, 2015.
ZHOU Yuan-shen. AC and DC speed control system and Matlab simulation (Second Edition)[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2015.
- [3] 卫宏, 周国平, 申冬琴. 凹印机电子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.
- [4] 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.

- [5] LORENZ P D, SCHMIDT P B. Synchronized motion control for Process automation[C]// Industry Applications Society Annual Meeting, Conference Record of the 1989 IEEE, 1989:1693—1698.
- [6] 薛定宇. 控制系统计算机辅助设计-Matlab 语言与应用[M]. 第 3 版. 北京:清华大学出版社, 2012.
XUE Ding-yu. Control System Computer Aided Design-Matlab Language and Application[M]. Third Edition. Beijing: Tsinghua University Press, 2012.
- [7] 李伟, 张海燕. 印刷设备新型纸张定位系统设计[J]. 包装工程, 2007, 28(10):104—106.
LI Wei, ZHANG Hai-yan. Design of New Type Sheet Positioning System for Printing Press[J]. Packaging Engineering, 2007, 28(10):104—106.
- [8] 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.
- [9] 杨梅. 滑模变结构在收卷张力控制系统中的应用与仿真[J]. 包装工程, 2013, 34(3):44—48.
YANG Mei. Application and Simulation of Sliding Mode Control in Winding Tension Control System[J]. Packaging Engineering, 2013, 34(3):44—48.
- [10] 马膺峻. 无轴套印控制系统综合控制策略的研究[D]. 沈阳:东北大学, 2010.
MA Ying-jun. Research on Synthentic Control Strategy of Shaftless Chromatography System[D]. Shenyang: Northeastern University, 2010.
- [11] 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.
- [12] ELMARAGHY H A, AIGEDDAWY T, AZAB A, et al. Change in Manufacturing-research and Industrial Challenges[C]// Proceedings of 4th International Conference on Changeable, Agile, Reconfigurable and Virtual Production(CARV), Montreal, Canada, 2011.
- [13] 武吉梅, 王伟鹏, 王月英. 印刷机张力控制系统的建模与仿真[J]. 包装工程, 2007, 28(6):66—68.
WU Ji-mei, WANG Wei-peng, WANG Yue-ying. Modeling and Simulating of the Tension Control System of Printing Press[J]. Packaging Engineering, 2007, 28(6):66—68.
- [14] SILVA G J, DATTA A, BHATTACHARYYA S P. New Results on Synthesis of PID Controllers[J]. IEEE Transactions on Automation Control, 2002, 47(2):241—252.
- [15] 刘金琨. 先进 PID 控制 MATLAB 仿真(第二版)[M]. 北京:电子工业出版社, 2004.
LIU Jin-kun. Advanced MATLAB control PID simulation (Second Edition)[M]. Beijing:Electronic Industry Publishing House, 2004.
- [16] 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.
- [17] 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, 2012:21—26.
ZHANG Ya-dong. Research and Design of Paper Machine Control System Based on PLC[D]. Hefei:Hefei University of Technology, 2012:21—26.
- [18] 宋钊. 纸板厚度方向的力学模型建立[J]. 包装工程, 2014, 35(3):52—55.
SONG Zhao. Establishment of Mechanical Model in the Thickness Direction of Paperboard Materials[J]. Packaging Engineering, 2014, 35(3):52—55.