

基于改进模糊控制的印刷机卷纸张力均衡器设计

赵丽, 潘君

(巴音郭楞职业技术学院, 库尔勒 841000)

摘要: **目的** 为了提高印刷机收卷系统张力平衡控制性能, 结合模糊控制和 PID 控制设计一种卷纸张力均衡器。**方法** 以无轴传动多机组卷纸印刷机为例, 介绍其工作原理并建立收卷张力数学模型。在模糊控制的基础上, 加入调整因子, 用于实时调节 PID 控制器的关键参数比例、积分、微分系数。基于 ARM 控制器 STM32F103RC 搭建收卷张力控制系统。通过仿真和实验验证所述方法的可行性和有效性。**结果** 实验结果表明, 采用改进模糊控制器后, 其线速度和张力曲线平滑、收敛速度较快、超调量较小。**结论** 所述控制方法能够有效抑制非线性因素导致的抖振等问题, 可满足印刷工艺要求。

关键词: 印刷机; 张力控制; 模糊控制; 调整因子; ARM

中图分类号: TB486; TP273 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2018)17-0192-05

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2018.17.032

Design of Tension Equalizer Used in Web Press Based on Improved Fuzzy Control

ZHAO Li, PAN Jun

(BaYin GuoLeng Vocational and Technical College, Korla 841000, China)

ABSTRACT: The work aims to design a web tension equalizer combined with fuzzy control and PID control, to improve the rolling system tension balance control performance of web press. With shaft-less driven multi-unit web press as an example, its working principle was introduced and winding tension mathematical model was established. On the basis of fuzzy control, adjustment factor was added to adjust the PID controller's key parameters in real time, including proportion, integral and differential coefficient. The winding tension control system was built based on ARM controller STM32F103RC. The feasibility and effectiveness of the described method were verified by simulation and experiment. The experimental results showed that, after the improved fuzzy controller was adopted, its linear velocity and tension curve were smooth, the convergence speed was faster and the overshoot amount was small. The described control method can effectively restrain such problems as chattering caused by nonlinear factors. It can meet the requirements of printing process.

KEY WORDS: press; tension control; fuzzy control; adjustment factor; ARM

张力控制系统在纺织、印刷、造纸等行业中的应用十分广泛^[1]。在造纸工艺中, 纸张的加工和装饰过程均离不开张力控制系统, 其性能直接影响纸张质量^[2-3]。在印刷过程中, 卷纸外径不断变化而且极有可能出现卷纸外形不是标准圆、卷纸中心与旋转轴中心不重合等情况, 势必导致纸带张力发生波动^[4]。尤其在高速胶印设备中, 张力波动对印刷精度的影响会十分明显^[5-7]。若以印刷机为例, 张力控制关键在于实现纸张恒张力控制。张力控制系统是一种比较典型的非线性系统, 往往存在不可建模的内部或外

部干扰, 因此对控制系统的要求比较高^[8]。

近几年, 针对张力控制的相关策略不断改进, 例如: 最初采用 PID、频域校正等经典控制方法, 该方法重点解决单个输入以及单个输出的问题^[9-10], 然而受强耦合、非线性、参数时变等特性的影响, 无法准确地建立系统数学模型^[11]。为解决此问题, M.Anfibal Valenzuel 等^[12]设计了一种基于观测器的间接张力控制系统, 根据控制信号实现张力的预测, 但无法消除转动惯量和摩擦造成的不利影响。F. Janabi Sharifi 等^[13]提出了一种模糊神经网络张力控制, 采用神经网络

收稿日期: 2017-09-04

作者简介: 赵丽 (1980—), 女, 巴音郭楞职业技术学院讲师, 主要研究方向为电气自动化控制。

络实现了控制器参数的调节。根据现有研究成果发现，模糊控制器不依赖被控对象数学模型，模仿人类控制经验进行推理，能够总结相关经验并形成模糊规则。将模糊控制和 PID 控制结合，即模糊自适应 PID 控制，基于模糊逻辑推理实现 PID 控制器关键参数实时调整^[14-16]。如此，控制系统则具有参数自整定能力，可适应控制过程条件变化。

文中模糊自适应 PID 控制的基础上，对模糊控制进行改进并设计相关控制器。基于 ARM 搭建印刷机收卷张力控制系统，通过仿真和试验验证所述方法的有效性。

1 收卷张力系统建模

1.1 无轴传动收卷系统原理

文中以无轴传动多机组卷纸印刷机为例，该类印刷机主要包括开卷模块、印刷模块、收卷模块等，各

机组由不同伺服电机分别驱动。多数情况下，基于工业网络可实现纸张张力控制、多色套准控制、多机组同步控制等。以收卷张力控制系统为研究对象，其控制方式通常采用串级控制，原理见图 1。其中内环为速度控制环，用于交流永磁同步伺服电机控制，实现虚拟主轴转速跟踪。外环为张力控制环，利用张力传感器检测纸张张力信号，与目标值比较得到张力偏差；然后，将张力偏差传送至张力控制器，经运算处理得到控制信号；控制信号作用于伺服系统，进而实现收卷张力控制。

1.2 收卷张力数学模型

收卷系统的动力学模型见图 2。图 2 中 δ 为卷纸厚度； b 为卷纸宽度； v 为纸张线速度； ω 为收卷角速度； D_0 为卷辊直径； D 为收卷卷径； M 为伺服电机输出力矩。

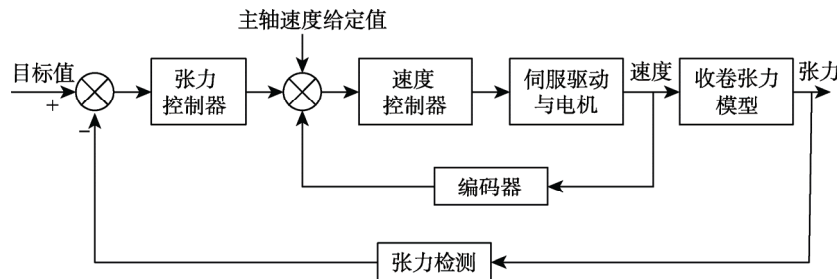


图 1 收卷张力控制系统原理

Fig.1 Winding tension control system principle

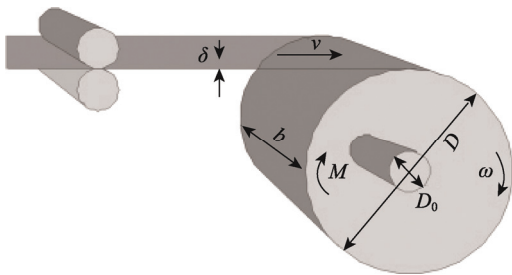


图 2 收卷系统动力学模型

Fig.2 Winding system dynamics model

那么收卷系统的动态力矩平衡方程可表示为：

$$\frac{d(J\omega)}{dt} = M - TD / 2 - B_f(t)\omega \quad (1)$$

式中： J 为收卷辊转动惯量； T 为收卷张力； $B_f(t)$ 为阻尼系数，则有：

$$T = 2 \left[M - \frac{d(J\omega)}{dt} - B_f(t)\omega \right] / D \quad (2)$$

根据文献[16]可推导出收卷张力：

$$T = \frac{2M}{D} - \frac{4B_f}{D^2}v + \left[\frac{8\delta J_0}{D^4\pi} - \frac{\rho b\delta}{4} \left(\frac{D_0}{D} \right)^4 - \frac{3}{4}\rho b\delta \right] v^2 + \left[\frac{\rho b D_0^4 \pi}{8D^2} - \frac{\rho b D_0^4 \pi}{8} - \frac{4J_0}{D^2} \right] \frac{dv}{dt} \quad (3)$$

式中： ρ 为纸张密度； J_0 为收卷辊转动惯量。由式（3）可以看出，收卷张力受多个因素影响，包括纸张厚度、密度、收卷辊转动惯量、线速度、纸辊直径、卷径、摩擦因数等，因此收卷张力系统具有多变量强耦合、时变、非线性等特性。

2 改进模糊控制器

改进模糊控制器具体结构见图 3，其中 α 为调整因子。张力期望值和实际值之差作为张力误差；模糊控制器输入量为张力误差 e 及其变化率 e_c ； e 和 e_c 经模糊化处理后转换成模糊变量 E 和 E_c 。与调整因子结合生成 αE 和 $(1-\alpha)E_c$ 并将其输入到模糊 PID 控制器中；通过模糊推理和去模糊处理，输出量 ΔK_p 、 ΔK_i 和 ΔK_d ，分别表示 PID 控制器的比例、微分、积分系数修正值。

PID 控制器参数 K_p 、 K_i 和 K_d 可描述为：

$$\begin{cases} K_p = K_{p0} + \Delta K_p \\ K_i = K_{i0} + \Delta K_i \\ K_d = K_{d0} + \Delta K_d \end{cases} \quad (4)$$

式中： K_{p0} 为比例系数初值； K_{i0} 为积分系数初值； K_{d0} 为微分系数初值。根据修正的 PID 参数 K_p 、 K_i 和

K_d 可得到输出 u 的表达式为:

$$u(i) = K_p e(i) + K_i \sum_{k=0}^i e(k) + K_d [e(i) - e(i-1)] \quad (5)$$

式中: i 为采样时刻; $u(i)$ 为输出量的第 i 时刻采样值; $e(i)$ 和 $e(i-1)$ 分别为张力误差第 i 和 $i-1$ 时刻采样值。程序流程见图 4。

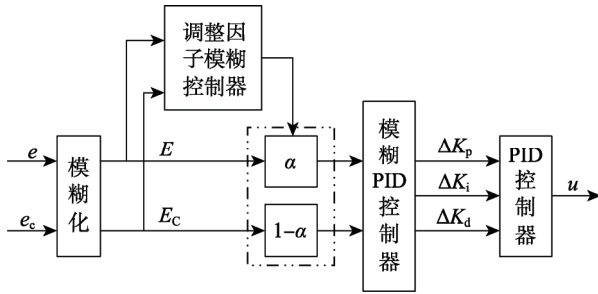


图3 改进模糊控制器
Fig.3 Improved fuzzy controller

3 控制系统设计

根据设计需求和 STM32F103RC 微型处理器的特点, 电路设计过程中充分考虑扩展、布局、散热、电磁兼容性以及操作便捷性等问题, 所设计控制系统结构见图 5。可以看出, 主控系统主要包括: ARM 最小系统、人机交互界面、信号输入模块、输出驱动模块、通信模块、数据存储模块等。

STM32F103RC 微控制器外围电路如下所述。

1) 电源驱动电路主要为整个系统提供稳定电源, 同时为 AD 模块提供精准参考电压; 复位电路主要负责系统上电复位和按键复位。

2) 485 串口电路可实现上位机和微控制器

STM32F103RC 以及 STM32F103RC 和张力控制器之间的双向通讯; 以太网通信模块可实现上位机对张力控制器运行状态的实时监控, 进而实现远程控制。

3) 芯片 FLASH 用于存储已编译程序, EEPROM 芯片用于存储关键数据, 避免掉电丢失。

4) 信号输入模块用于接收按键输入信号、模拟控制信号、张力检测信号。

5) LCD 驱动采用液晶驱动芯片 UC1698u, 菜单显示则利用液晶显示屏 LM24080BFW。

6) 数码管主要用于张力标准值设定以及实时张力显示, 指示灯则用于系统状态显示。

7) 输出驱动电路主要为电气调节器、伺服放大器、磁粉离合器提供驱动信号。

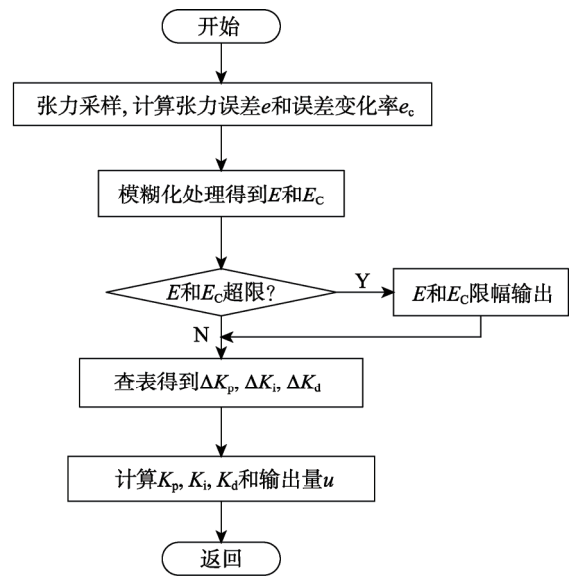


图4 程序流程
Fig.4 Program flow chart

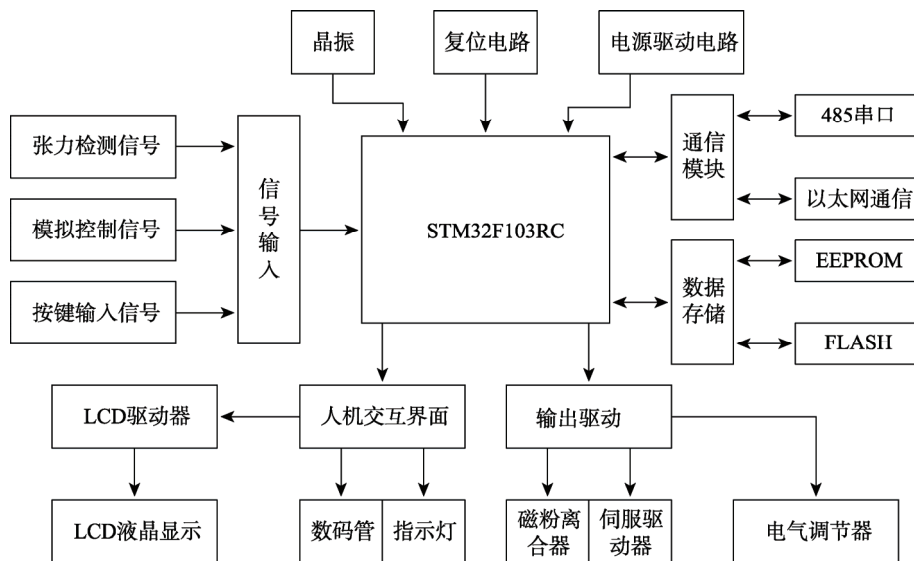


图5 控制系统结构
Fig.5 Control system structure

4 仿真和实验

4.1 仿真

若不考虑电参数, 仅仅保留机械参数, 收卷张力控制系统近似用二阶系统拟合。在单位阶跃响应条件下, 根据两点法可得其传递函数:

$$G(s) = \frac{k}{s(s+d)+\omega} \quad (6)$$

式中: k 为 1.7~3.5; d 为 0.01~0.05; ω 为与卷径有关的常数。整个系统经简化、近似处理后, 所得实际张力数值会存在一定偏差。不过所忽略电参数对结果的影响很小, 并不会出现实质性改变。Matlab 仿真环境下, 改进模糊 PID 控制器仿真结果见图 6。

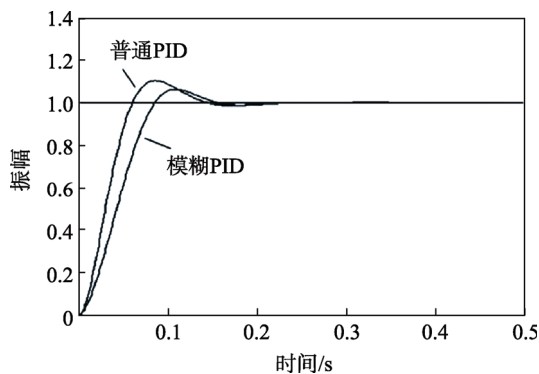


图 6 仿真结果
Fig.6 Simulation results

由仿真结果可以看出, 从稳态时间上, 基于改进模糊 PID 控制, 系统过渡时间只需 150 ms; 常规 PID 控制的过渡时间为 200 ms。从最大超调量上, 同样由 10%减小至 6%。改进模糊 PID 控制器具有比较理想的跟随性而且稳定性好、精度高, 调整时间和超调量均出现不同幅度的减小, 系统动态性能得到了全面改善。

4.2 实验

为进一步验证所述张力均衡器的可行性, 基于 ARM 搭建相应控制系统并将其移植到某型号无轴印刷机上。实验台动力执行机构选用三洋伺服电机, 张力传感器选用三菱 LX 系列。实验结果见图 7—8。

由实验结果可知, 基于所述改进模糊控制器, 伺服电机速度能够在 0.25 s 内达到稳定状态, 速度曲线平滑, 其跟踪误差逐步收敛而且不会出现大幅抖动。在稳定值附近, 速度抖振抑制效果比较理想, 抖振幅度可以控制在 ± 0.5 mm/s 以内。

张力跟踪实验过程中, 张力标准值设定为 4 N, 由实验结果可以看出, 在实验初始阶段, 张力瞬时值比较大, 是由电机加速导致的。一旦处于稳定状态, 张力值便可以稳定在标准值 4 N 附近, 跟踪效果比较

好, 张力值抖振能够得到有效抑制。

综上所述, 改进模糊 PID 控制可以有效地抑制非线性因素导致的抖振问题, 可满足无轴印刷机收卷过程对张力控制的要求。

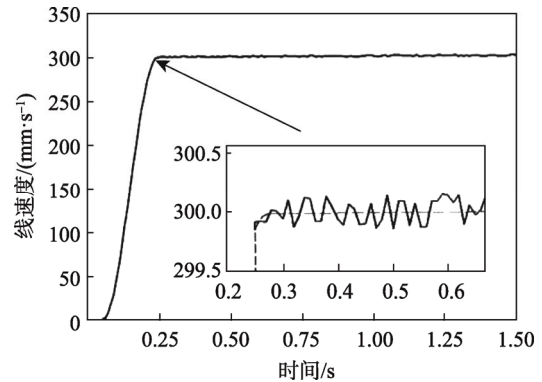


图 7 速度曲线
Fig.7 Speed curve

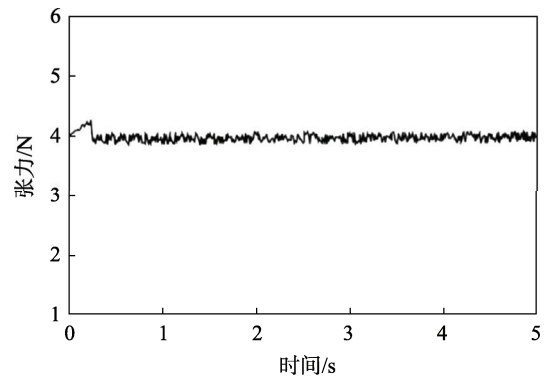


图 8 张力曲线
Fig.8 Tension curve

5 结语

张力控制系统在纺织、印刷、造纸等行业中的应用较多, 以无轴多机组印刷机为例, 探讨收卷系统张力控制方法。阐述了无轴传动收卷系统原理并建立了其数学模型, 在常规模糊控制的基础上, 加入调整因子并与传统 PID 控制相结合设计了一种改进模糊 PID 控制器。将其应用到无轴多机组印刷机中, 仿真和实验结果表明, 改机模糊 PID 控制可以有效地抑制非线性因素导致的抖振问题, 可满足无轴印刷机收卷过程对张力控制的要求。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 郭献军. 卷筒纸印刷中张力与套准关系的研究[J]. 包装工程, 2014, 36(7): 133—138.

- GUO Xian-jun. The Relationship Between Tension and Register in Web Printing[J]. Packaging Engineering, 2014, 36(7): 133—138.
- [3] 陈康昊, 郑刚, 杨建武, 等. 无轴传动控制实验平台的开发研究[J]. 现代制造工程, 2010(12): 141—144.
CHEN Kang-hao, ZHENG Gang, YANG Jian-wu, et al. Research and Development of Shaftless Driving Experiment Technology[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2010(12): 141—144.
- [4] LI J, MEI X, TAO T, et al. Design Tension Controller of Unwinding System Based on BP Neural Network[J]. Advanced Science Letters, 2011, 4(6): 2222—2226.
- [5] 张义兵, 戴瑜兴, 袁巨龙, 等. 多线切割机线张力控制系统设计实现[J]. 机械工程学报, 2009, 45(5): 295—300.
ZHANG Yi-bing, DAI Yu-xing, YUAN Ju-long, et al. Design and Implement of Wire Tension Control System for Multi-wire Saw[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(5): 295—300.
- [6] 李健, 梅雪松, 陶涛, 等. 放卷张力系统 H_∞ 鲁棒控制器的设计[J]. 西安交通大学学报, 2012, 46(1): 86—90.
LI Jian, MEI Xue-song, TAO Tao, et al. Design of H_∞ Robust Controller Based on Unwinding Tension System[J]. Journal of Xi'an Jiao Tong University, 2012, 46(1): 86—90.
- [7] 张鹏, 杨瑞峰, 张学良, 等. 速度差间接张力控制系统的建模与研究[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2013, 34(6): 678—681.
ZHANG Peng, YANG Rui-feng, ZHANG Xue-liang, et al. Research on Modeling for the Indirect Tension Control System Based on Difference of Rotational Speed[J]. Journal of North University of China (Natural Science Edition), 2013, 34(6): 678—681.
- [8] 郭应锋. 印刷机系统恒张力控制的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2004.
GUO Ying-feng. Research of Constant Tension Control System of Printing Machine[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2004.
- [9] 李琳, 林炯辉, 邹焱飏. 基于滑模变结构的张力控制系统设计[J]. 机械设计与制造, 2016(4): 175—177.
LI Lin, LIN Jiong-hui, ZOU Yan-biao. Design of Tension Control System Based on Sliding Mode Control[J]. Machinery Design & Manufacture, 2016(4): 175—177.
- [10] 侯飞. 新型纸纱复合制袋印刷一体机开发研究[J]. 中国印刷与包装研究, 2012, 4(6): 22—27.
HOU Fei. Research and Exploitation of the New Paper and Yarn Compounding Bag-making and Printing All-in-one Machine[J]. China Printing and Packaging Study, 2012, 4(6): 22—27.
- [11] 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.
- [12] VALENZUELA M A, BENTLEY J M. Sensorless Tension Control in Paper Machines[J]. IEEE Transaction on Industry Applications, 2003, 39(2): 294—304.
- [13] JANABI-SHARIFI F. A Neuron-fuzzy System for Looper Tension Control in Rolling Mills[J]. Control Engineering Practice, 2005, 13(1): 1—13.
- [14] HAN J Q. From PID to Active Disturbance Rejection Control[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(3): 900—906.
- [15] SU J, QIU W, MA H, et al. Calibration-free Robotic Eye-hand Coordination Based on an Auto Disturbance-rejection Controller[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2004, 20(5): 899—907.
- [16] 杨梅, 续明进. 基于 MATLAB 的卷筒纸印刷机张力控制系统的建模与仿真[J]. 包装工程, 2011, 32(7): 22—25.
YANG Mei, XU Ming-jin. Modeling and Simulation of Tension Control System in Web Press Based on MATLAB[J]. Packaging Engineering, 2011, 32(7): 22—25.