

瓦楞纸板生产线原纸张力自适应模糊 PID 控制

李坤全, 文睿

(河南工程学院, 郑州 451191)

摘要: 为了解决张力控制不稳定会对瓦楞纸板质量和生产效率产生影响的问题。方法 根据放卷辊的动力学分析, 建立瓦楞纸板原纸张力数学模型, 并分析张力稳定的主要因素。针对传统 PID 控制不能实现原纸张力控制过程中参数的自适应调整, 提出一种变论域自适应模糊 PID 控制策略, 采用变论域模糊控制实现控制参数自整定和控制规则的自调整, 并将其应用于原纸张力控制系统中。结果 仿真结果表明, 该张力控制策略的响应时间约为 0.65 s, 最大超调量为 3%。结论 所设计的控制方法与传统的 PID 控制相比, 具有响应速度快、抗干扰能力强、控制输出稳定等优点, 能够实现原纸张力的稳定控制。

关键词: 张力控制; 瓦楞纸板; 自适应模糊 PID 控制; 参数自整定

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Adaptive Fuzzy PID Paper Tension Control in Production Line for Corrugated Board

LI Kun-quan, WEN Rui

(Henan Institute of Engineering, Zhengzhou 451191, China)

Abstract: In order to solve the influence of tension control instability on the quality and production efficiency of corrugated cardboard. Based on volume and dynamic analysis, the establishment of the corrugated base paper tension in the mathematical model, and analysis the main factors leading to the stable tension. According to the traditional PID control cannot achieve the base paper tension control in the process of adaptive parameter adjustment, put forward a kind of variable domain adaptive fuzzy PID control strategy, using the variable universe fuzzy control to realize the control parameter self integration and control rules of the self adjustment, and its application in base paper tension control system. The simulation results show that the response time of the tension control strategy is about 0.65 s, and the maximum overshoot is 3%. The control methods which were designed compared with the traditional PID control, has fast response speed and anti-interference ability, stable control advantages, to achieve stable control of the original paper.

KEYWORDS: tension control; corrugated board; adaptive fuzzy PID control; parameter auto tuning

瓦楞纸包装具有价格低廉, 抗压性强, 易于运输, 环保性强, 能够根据不同产品特点进行不同风格的装潢印刷等优点, 因此瓦楞纸箱在商品包装中被广泛使用^[1-4]。目前, 我国瓦楞纸板生产线成千上万条, 但这些生产线均存在不同程度的断纸等质量问题, 其主要原因之一是原纸张力的控制输出不够稳定^[5-7]。张力过大或者过小均会引起原纸的塑性变形、断裂、起皱、翘曲等问题, 张力控制过程中如果张力大小不稳定, 还可能导致原纸出现走偏和漂移^[8-10], 从而严重影响瓦楞纸板的加工质量。一旦出现上述问题, 生产线便要立即停止进行调整, 重新进

行接纸才可继续进行生产, 这样导致瓦楞纸生产效率大大下降, 同时加大了生产成本。在原纸放卷过程中, 由于放卷辊半径的变化, 其转动惯量也随之变化, 从而导致系统动力学数学模型具有时变性^[11]。

由于原纸张力控制具有参数时变、变负载以及强扰动等特点, 因此传统 PID 的控制方法对于张力精度的控制效果很难达到令人满意的效果。为此文中提出了一种变论域自适应模糊 PID 控制方法, 采用变论域模糊控制实现控制参数自整定和控制规则的自调整, 并将其应用于原纸张力控制系统中。最后通过仿真实验验证了该方法的有效性。

1 放卷辊张力数学模型

瓦楞纸板生产线原纸供应系统见图1^[12]，其中 v 为原纸供应速度； R 为卷纸半径； r 为纸卷芯轴半径； F_T 为原纸张力； M_R 为磁粉制动器对转轴施加的制动力矩； M_f 为摩擦力矩； ω 为纸卷轴的角速度。

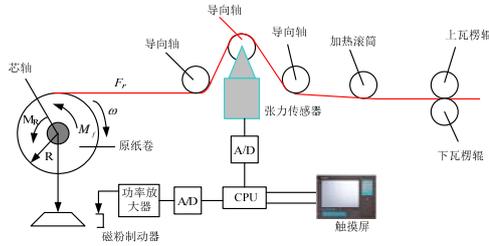


图1 原纸供应系统

Fig.1 Basepaper for conveying system schematic diagram

原纸张力受到主动辊的拉力、摩擦力以及制动力矩的作用，张力与其之间的关系为^[13]：

$$\frac{d(J\omega)}{dt} = F_T R - M_R - M_f \quad (1)$$

式中： J 为纸卷及转轴等效转动惯量。转动惯量计算公式为：

$$J = J_R + J_r = \frac{1}{2} \pi b \rho (R^4 - r^4) + \frac{1}{2} \pi b_1 \rho_1 r^4 \quad (2)$$

$$= \frac{1}{2} \pi b \rho R^4 + J_0$$

式中： J_R 为卷纸的转动惯量； J_r 为转轴转动惯量； ρ 为原纸材料密度； ρ_1 为卷轴密度； b 为卷纸材料宽度； $J_0 = \frac{1}{2} \pi b (\rho_1 - \rho) r^4$ ，为常数。

在原纸供应过程中，卷带半径不断变小， J 和 ω 为时变量。由 $\omega = \frac{v}{R}$ ，得：

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{R} \frac{dv}{dt} - \frac{v}{R^2} \frac{dR}{dt} \quad (3)$$

卷纸材料的厚度 δ 较小，在此假设 $\delta v dt = 2\pi R dR$ ，则：

$$\frac{dR}{dt} = \frac{\delta v}{2\pi R} \quad (4)$$

将式(2)，(3)和(4)代入式(1)中得：

$$F_T = \frac{M_R}{R} + \frac{M_f}{R} + \left(\frac{1}{2} \pi b \rho R^2 + \frac{J_0}{R^2} \right) \frac{dv}{dt} + \left(\frac{3}{4} b \rho \delta - \frac{J_0 \delta}{2\pi R^4} \right) v^2 \quad (5)$$

在卷纸供应过程中摩擦力矩很小，在此可忽略不计，并假设速度 v 不变，则式(5)

可以简写为：

$$F_T = \frac{M_R}{R} + \left(\frac{3}{4} b \rho \delta - \frac{J_0 \delta}{2\pi R^4} \right) v^2 \quad (6)$$

通过式(6)可看出，当速度 v 不变时，制动力矩 M_R 和卷纸带半径 R 直接影响卷纸张力的变化。张力控制系统见图2。该控制系统中用磁粉制动器作为执行元件，为了保证原纸供应过程中张力恒定，在原纸带卷半径减小时，磁粉制动器的输出转矩也要随之减小。采用张力传感器对纸张张力的实时变化进行检测，经过 A/D 转换并传送到 CPU 中，通过补偿控制、D/A 转换、PWM 驱动控制电机转矩输出，从而控制磁粉制动器的输出转矩，从而达到纸张张力恒定控制的目的。

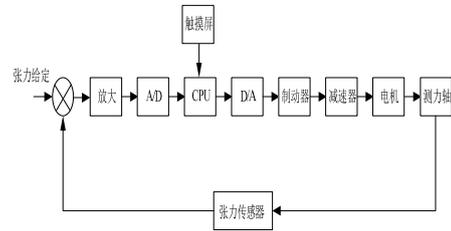


图2 张力控制系统

Fig.2 Tension control system block diagram

2 变论域自适应模糊 PID 控制

2.1 变论域模糊 PID 控制器

模糊控制不需要建立精确数学模型，能够避免系统不确定性对控制性能影响^[14—15]。变论域自适应模糊 PID 控制结构见图3。模糊控制器为实际张力与张力给定值的偏差 $e = F_t - F_j$ 以及误差变化 e_c 的 PID 增益调整控制器；通过调整 e 和 e_c 改变伸缩因子 $a_e, a_{e_c}, \beta_{pid}$ 。

2.2 模糊 PID 控制器

模糊控制器的输入量为误差 e ，误差变化 e_c ，输出控制量为 $\Delta K_p, \Delta K_i, \Delta K_d$ ，其归一化论域均设为 $[-1, +1]$ ，根据张力的动态范围 $[e_{\min}, e_{\max}]$ ， $[e_{c\min}, e_{c\max}]$ ， $[\Delta k_{\min(m)}, \Delta k_{\max(m)}]$ ($m = p, i, d$)，选择和确定量化因子 K_e, K_{e_c} ，以及比例因子 $L_{K(m)}$ ($m = p, i, d$)。论域的变换表达式为：

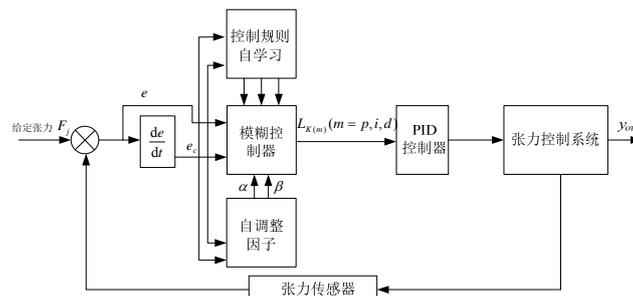


图 3 为自适应模糊 PID 控制结构

Fig.3 A fuzzy adaptive PID controller principle diagram

$$\left\{ \begin{aligned} E &= K_c \left(e - \frac{e_{\max} - e_{\min}}{2} \right), K_c = \frac{2}{e_{\max} - e_{\min}} \\ E &= K_{ec} \left(e_c - \frac{e_{c\max} - e_{c\min}}{2} \right), K_{ec} = \frac{2}{e_{c\max} - e_{c\min}} \\ \Delta K_{(m)} &= L_{K(m)} \left(\Delta k_m - \frac{\Delta k_{\max(m)} - \Delta k_{\min(m)}}{2} \right) \\ L_{K(m)} &= \frac{2}{\Delta k_{\max(m)} - \Delta k_{\min(m)}} \end{aligned} \right. \quad (7)$$

根据 Mamdani 的最小最大推理方法，采用加权平均解模糊化的模糊控制输出为：

$$\Delta K_m = \frac{C_i \sum \mu_{C_i}(\Delta K_{i(m)})}{\sum_i \mu_{C_i}(\Delta K_{i(m)})} \quad (8)$$

设定 PID 控制参数调整量为：

$$\begin{aligned} K_p &= K_{p0} + \Delta K_p \\ K_i &= K_{i0} + \Delta K_i \\ K_d &= K_{d0} + \Delta K_d \end{aligned} \quad (9)$$

则系统实际控制输出为：

$$u(k) = K_p e(k) + K_i \sum_{i=1}^k e(i) + K_d e_c(k) \quad (10)$$

误差 e ，误差变化 e_c 和控制量 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 采用一样的模糊子集。由 PID 参数调整经验以及误差逐渐逼近原则，建立 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 控制规则，此处以 ΔK_p 为例，见表 1。

表 1 ΔK_p 模糊控制规则

e	e_c					
	NS	NB	NZ	PS	PZ	PB
NS	NS	NS	NB	NB	NB	ZO
NB	NS	NS	NS	NS	ZO	PS
ZO	NS	NB	ZO	ZO	PS	PB
PB	NS	ZO	PB	PB	PC	PC
PS	ZO	PB	PB	PS	PC	PC

误差 e 、误差变化 e_c 的模糊子集为 {NB,NS,ZE,PS,PB}; 伸缩因子 α_e 、 α_{ec} 和 β_{pid} 的模糊子集为：{B, M, S, VS}, {VS,

B, M, S, VS}。

输入论域的伸缩因子为：

$$\alpha(e) = \left(\frac{\|e\|}{E} \right)^\tau \quad (11)$$

其中， τ 为常数， $0 < \tau < 1$ 。

输出论域伸缩因子 β 大小为：

$$\beta(t) = K_I \sum_{i=1}^n p_i \int_0^t e_i(\tau) dt + \beta(0) \quad (12)$$

式中： K_I 为比例常数；初值 $\beta(0)$ 则根据具体实际情况进行调整，通常取 $\beta(0) = 1$ 。由上面分析可以得到变论域自适应模糊控制的输出可表示为

$$u(x/\beta) = \beta \sum_{l=1}^h \prod_{j=1}^n A_{jl} \left(\frac{x_j}{\alpha(x_i)} \right) y_l \quad (13)$$

在模糊 PID 控制中引入变论域，通过变论域自适应调整，对模糊 PID 控制器的参数进行适当调整，从而可以克服传统模糊 PID 控制自适应能力弱的缺点。

3 仿真分析

为了验证文中所设计的瓦楞纸板生产线原纸张力变论域自适应模糊 PID 控制方法的有效性，利用 MATLAB 软件中的 Simulink 工具箱和模糊逻辑工具箱，对文中所设计的自适应模糊 PID 张力稳定控制器进行了仿真验证。主要技术参数为：卷纸的初始半径为 700 mm，包装速度为 6 m/s，卷纸的厚度为 0.2 mm，芯轴半径为 200 mm，纸质材料宽度为 1000 mm。

假设瓦楞纸所受恒张力值为 30 N，传统 PID 控制时原纸张力变化曲线见图 4a，采用变论域模糊自适应 PID 控制时的原纸张力

变化曲线见图 4b。通过比较可看出，基于变论域自适应模糊 PID 控制系统参数能够自我进行整定，系统响应速度明显比传统 PID 控制时系统响应速度要快。

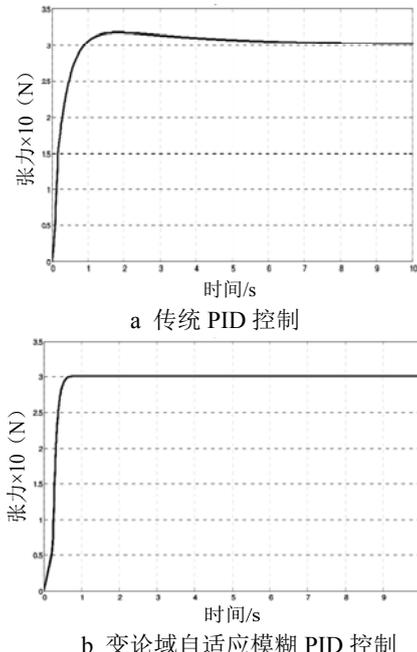


图 4 不同控制器下的张力响应曲线

Fig.4 Tension response curves under different controllers

在瓦楞纸板生产过程中，由于机械、原纸质量以及其他因素的影响，原纸恒张力控制系统中必然存在扰动，因此所设计的模糊控制系统必须具有相应的抗干扰能力。为了测试所设计控制系统的抗干扰能力，在仿真中引入了一个干扰信号，系统响应曲线见图 5。由图 5 可以看出自适应模糊 PID 控制器加入干扰信号后，系统输出信号并未受到太大影响，基本处于稳定的控制状态中，由此说明该控制系统具有很强的抗干扰能力。

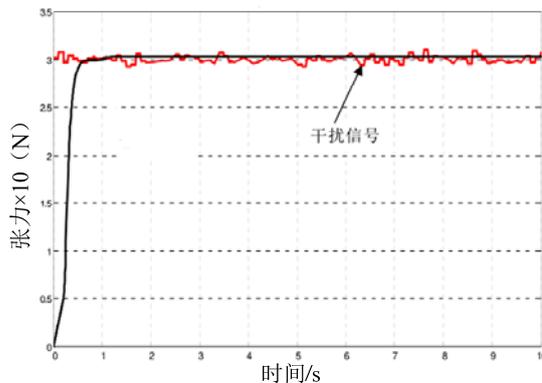


图 5 变论域自适应模糊 PID 控制器抗干扰仿真结果

Fig.5 Variable universe adaptive fuzzy PID controller interference simulation results

4 结语

为了提高瓦楞纸板生产的质量和生产效率，提出了一种基于变论域自适应模糊 PID 的原纸张力恒定控制策略，以克服传统 PID 控制时参数不能根据生产线状态进行自适应调整。采用变论域模糊控制，实现了控制参数自整定和控制规则的自调整，并将其应用于原纸张力控制系统中。最后的仿真结果表明，该控制方法响应速度快、抗干扰能力强、控制输出稳定，能够实现原纸张力的稳定控制。

参考文献

[1] 曾强龙, 徐伟民. 瓦楞纸板生产线原纸张力广义预测自适应控制[J]. 武汉理工大学学报(信息与管理工程版), 2012, 34(1): 49—51.
 ZENG Qiang-long, XU Wei-min. Generalized Predictive Adaptive Paper Tension Control in Production Line for Corrugated Board[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Information & Management Engineering), 2012, 34(1): 49—51.

[2] SCHRIJVER J, WIRTH B. Biocides for Deposit Control in the Production of Corrugated Base Paper[J]. Wochenblatt Fur Papierfabrikation, 2006, 134(22): 1336—1342.

[3] 孙振军, 陈文奇, 郑红艳. 瓦楞辊技术探析[J]. 包装工程, 2005, 26(3): 83—85.
 SUN Zhen-jun, CHEN Wen-qi, ZHENG Hong-yan. Exploration of Corrugated Roller Technology[J]. Packaging Engineering, 2005, 26(3): 83—85.

[4] 龚发云, 张哲, 魏春梅. 高速单面瓦楞机瓦楞辊机构的中心距运动学方程[J]. 包装工程, 2008, 29(7): 43—45.
 GONG Fa-yun, ZHANG Zhe, WEI Chun-mei. Kinematics Equation of the Center Distance of High-speed Single-sided Corrugating Machine Corrugating Roller[J]. Packaging Engineering, 2008, 29(7): 43—45.

[5] 王岭松. 瓦楞纸板螺旋横切机弹性除侧隙叠装齿轮的结构设计[J]. 包装工程, 2011, 32(21): 4—7.
 WANG Ling-song. Structure Design of Elastic Stack Loading Gear for Corrugated Board Spiral Cutting

- Machine[J]. Packaging Engineering, 2011, 32(21): 4—7.
- [6] 叶建美, 谢子青. 基于 S7-300 的瓦楞纸温控系统设计[J]. 包装工程, 2010, 31(11): 96—99.
- YE Jian-mei, XIE Zi-qing. Design of Thermal Control System for Corrugated Paper Based on S7-300[J]. Packaging Engineering, 2010, 31(11): 96—99.
- [7] 张满生, 刘苗生. 一种瓦楞纸板生产线原纸张力模糊控制系统[J]. 包装工程, 2001, 22 (3): 45—48.
- ZHANG Man-sheng, LIU Mao-sheng. A Tensile Force Fuzzy Logic Control System in Tegular Cardboard Production Line[J]. Packaging Engineering, 2001, 22(3): 45—48.
- [8] 徐晶, 李健, 丁颂, 等. 基于自抗扰控制的放卷张力控制设计[J]. 包装工程, 2016, 37(15): 150—155.
- XU Jing, LI Jian, DING Song, et al. Design of Tension Controller of Unwinding System Based on Active Disturbance Rejection Control[J]. Packaging Engineering, 2016, 37(15): 150—155.
- [9] 张永芳, 畅亚利, 高阳阳, 等. 模糊自抗扰控制在凹印机放卷张力中的应用[J]. 西安理工大学学报, 2015, 31(2): 144—149.
- ZHANG Yong-fang, CHANG Ya-li, GAO Yang-yang, et al. Fuzzy ADRC Applied in Gravure Press Tension Control System[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2015, 31(2): 144—149.
- [10] DOU X J, WANG W. Robust Control of Multistage Printing Systems[J]. Control Engineering Practice, 2010, 18(3): 219—229.
- [11] JANABI S. A Neuro-fuzzy System for Looper Tensioncontrol in Rolling Mills[J]. Control Engineering Practice, 2005, 13(1): 1—13.
- [12] 王保升, 左健民, 汪木兰. 瓦楞纸板生产线原纸张力模糊自适应 PID 控制[J]. 制造业自动化, 2009(6): 66—69.
- WANG Bao-sheng, ZUO Jian-min, WANG Mu-lan. Fuzzy Adaptive PID Paper Tension Control in Production Line for Corrugatedboard[J]. Manufacturing Automation, 2009(6): 66—69.
- [13] 王保升, 武华, 潘超. 卷筒包装材料输送系统动力学分析及张力自适应控制[J]. 中国制造业信息化, 2007, 36(19): 56—59.
- WANG Bao-sheng, WU Hua, PAN Chao. The Dynamic Analysis of Rewinding Packaging Material Feeding System and Adaptive Tension Control[J]. Machine Design and Manufacturing Engineering, 2007, 36(19): 56—59.
- [14] 应明峰, 王海祥, 翟力欣. 一种云自适应粒子群优化的模糊PID控制器设计[J]. 计算机测量与控制, 2013(12): 3278—3280.
- YING Ming-feng, WANG Hai-xiang, DI Li-xin. Design of Fuzzy PID Controller Based on Adaptive Particle Swarm Optimization with Cloud Theory[J]. Computer Measurement & Control, 2013(12): 3278—3280.
- [15] 赵庆海, 贾中华. 模糊自适应PID控制器在张力控制中的应用[J]. 包装工程, 2008, 29(1): 87—89.
- ZHAO Qing-hai, JIA Zhong-hua. Application of self-adaptive fuzzy-PID in the Tension Control[J]. Packaging Engineering, 2008, 29(1): 87—89.