

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.05.032

一种混合模糊 PID 控制的高速纸张分切机张力控制系统设计

潘颂哲¹, 张明亮¹, 周乔君²

(1. 温州职业技术学院, 浙江 温州 325035; 2. 中国计量大学, 浙江 杭州 310018)

摘 要:在系统自身参数变化和环境干扰时, 现有张力控制系统的控制精度难以满足高速分切机的要求。设计一种基于自抗扰控制及模糊 PID 控制的高速纸张分切机张力控制系统。结果表明: 分切机的张力误差值保持在 0.6 N 以内, 平均误差率在 2.4% 左右, 张力臂的最大偏移角误差不超过 0.5°; 控制系统的控制精度较高, 稳定性较好, 在张力控制方面具有优异的性能, 有一定的理论和实际应用价值。

关键词:自抗扰控制; 模糊 PID 控制; 高速纸张分切机; 张力控制系统; 系统设计

中图分类号:TP273 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2025)05-0163-05

Design of High Speed Paper Slitting Machine Tension Control System Controlled by Mixed Fuzzy PID

PAN Songzhe¹, ZHANG Mingliang¹, ZHOU Qiaojun²

(1. Wenzhou Polytechnic, Wenzhou 325035, China; 2. China University of Metrology, Hangzhou 310018, China)

Abstract: Given that the system's own parameters change and environmental interference occurs, resulting in the difficulty in meeting the requirements of high-speed slitting machines in terms of control accuracy of existing tension control system, a high-speed paper slitting machine tension control system based on self disturbance rejection control and fuzzy PID control is proposed. The results show that the tension error value of the slitting machine maintains within 0.6 N, with an average error rate around 2.4% and the maximum offset angle error of the tension arm less than 0.5°, which indicates that the control system is of high control accuracy and good stability, and has excellent performance in tension control, with certain theoretical and practical application value.

Keywords: self disturbance rejection control; fuzzy PID control; high speed paper slitting machine; tension control system; system design

0 引言

随着纸张加工业的飞速发展, 纸张分切机作为一种重要的纸品加工设备, 被越来越多地用于实际生产之中^[1-2]。分切机张力过大或过小都可能产生纸张的断裂、分切宽度不齐等问题。传统的张力控制系统简单易实现, 但在系统内部参数随时间变化以及存在环境干扰时, 其控制效果往往不够精确, 无法对系统张力进行有效的高精度稳定控制^[3]。因此, 很多学者专家都对如何提高张力控制系统的性能进行了各方面的研究。针对键合线缠绕运动存在耦合性强和张力波动等问题, 李长有等^[4]提出一种自适应反演滑模控制方

法应用于缠绕控制系统。结果表明, 自适应反演滑模控制的张力摆杆摆角波动控制在 $\pm 1.4^\circ$ 内, 能更有效地控制张力输出。张麦玲等^[5]发现了多线切割机因内部零件受损、受外界噪声影响、张力过大或过小而出现切割强震的问题。因此提出了一种应用云计算的张力控制系统。实验表明, 该系统的鲁棒性和可靠性较强, 控制精准度高。目前已有的研究在如何提高张力系统的抗干扰能力方面并没有太多的成果, 还存在需要继续改进的地方。因此, 本研究提出了一种基于自抗扰控制及模糊 PID 控制的高速纸张分切机张力控制系统, 期望提高系统的控制精度和自适应能力, 以及高速纸张分切机的工作效率和质量。

基金项目:教育部供需对接就业育人项目(2024121073783)

第一作者简介:潘颂哲(1989—), 男, 浙江温州人, 讲师, 硕士, 研究方向为分切机、水钻机、模切机等 PLC 控制系统研发工作, 928917804@qq.com。

1 基于自抗扰控制及模糊PID控制的张力控制系统

1.1 一种结合神经网络的自抗扰控制方法

对高速纸张分切机的张力系统进行控制时,为了克服系统本身随时间的变化以及外部环境干扰带来的影响,本研究采用结合神经网络的自阻抗控制来解决这一问题,如图1所示。

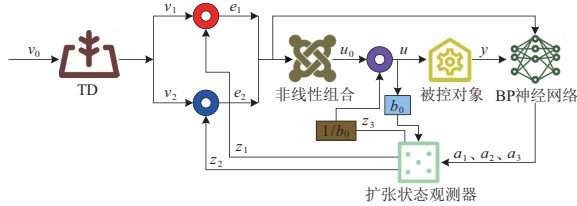


图1 结合神经网络的自抗扰控制方法

从图1可以看出,该方法可以分为自抗扰控制和BP神经网络两部分。自抗扰控制器主要由跟踪微分器、扩张状态观测器以及非线性状态误差反馈控制3部分构成。跟踪微分器能够提取信号的连续导数,安排闭环系统的过渡过程,给出合理的控制信号^[6-8]。为了在尽可能短的时间内提取出信号的动态特征,跟踪微分器会通过求解信号的微分表达方程^[9-10]。跟踪微分器的基本公式如式(1)所示。

$$\Phi(s) = \frac{G(s)}{1 + G(s)H(s)} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (1)$$

式中: $\Phi(s)$ 表示闭环传递函数; $G(s)$ 表示开环传递函数; $H(s)$ 表示反馈路径的传递函数; s 表示复变量; ω_n 表示无阻尼自然震荡频率; ξ 表示描述系统阻尼程度的参数。此时的系统状态方程如式(2)所示。

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = \ddot{y} = -2rx_2 - r^2(x_1 - v) \end{cases} \quad (2)$$

式中: x_1 表示过渡曲线; $\dot{x}_1$ 表示过渡曲线的瞬时变化率; x_2 表示过渡曲线的微分; $\dot{x}_2$ 表示二阶微分; y 表示系统当前状态; $\ddot{y}$ 表示状态变量的二阶导数; r 表示系统的收敛速度; v 表示目标状态。对目标状态函数进行合理的非线性化,就可以得到跟踪微分器的快速最优控制综合函数^[11-13],如式(3)所示。

$$u = -\text{sgn}\left(x_1 - v + \frac{x_2 |x_2|}{2r}\right) \quad (3)$$

式中: u 表示非线性控制函数; sgn 表示符号函数,用于确定控制输入的方向。一般状态观测器的系统方程如式(4)所示。

$$\ddot{y} = a + bU = a + (b_0 + \Delta b)U = d + b_0 U \quad (4)$$

式中: a 表示系统内部扰动; b 表示补偿因子; U 表示系统的控制输入量; b_0 表示 b 的最优估计; Δb 表示不确定项; d 表示外部环境干扰。扩展状态观测器的表达式如式(5)所示。

$$\begin{cases} e = z_1 - y \\ \dot{z}_1 = z_2 - \alpha_1 e \\ \dot{z}_2 = z_3 - \alpha_2 e + bu \\ \dot{z}_3 = -\alpha_3 e \end{cases} \quad (5)$$

式中: e 表示观测误差; y 表示系统的实际输出值; z_1 表示输出值的跟踪信号; z_2 表示输出值的微分信号; z_3 表示系统收到的总干扰; $\dot{z}_1$ 、 $\dot{z}_2$ 、 $\dot{z}_3$ 表示时间导数; α_1 、 α_2 、 α_3 表示增益系数。非线性状态误差反馈控制负责根据系统状态的估计误差来计算控制输入。非线性状态误差反馈控制律首先会建立系统的非线性状态误差反馈控制方程,如式(6)所示。

$$u = -\sum_{i=1}^n k_i \phi(e_i, \alpha_i, \delta_i) \quad (6)$$

式中: k_i 表示与第 i 个状态误差相关的控制增益; ϕ 表示非线性函数; e_i 表示非线性状态误差; α_i 和 δ_i 表示非线性函数的参数。该函数在误差较小时会提供较小的增益,在误差较大时提供较大的增益,以确保对误差的精细控制和快速响应。然后,非线性状态误差反馈控制会对由于扰动产生的系统误差进行补偿。同时,研究利用BP神经网络对各层的网络权值进行调整,使控制器的参数能够进行自整定,降低人为因素带来的干扰。

1.2 基于模糊PID控制的张力控制系统研究

PID控制也是对机器张力进行控制的主要方法之一,其主要原理是将比例控制、积分控制和微分控制相结合,使系统能够反馈误差并对其进行有效的处理,以实现对被控对象的控制^[14-15],如式(7)所示。

$$u(t) = k_p \left[e(t) + T_i \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (7)$$

式中: $u(t)$ 表示控制器输出量; k_p 表示比例系数; $e(t)$ 表示实际输出值在 t 时刻的误差; T_i 表示积分系数; T_d 表示微分系数。PID控制器主要由比例、积分、微分3部分组成,三者结合,提高了

PID 控制器的性能^[16]。传统 PID 控制不能很好地适应系统本身和环境带来的变化,因此研究提出了基于模糊 PID 控制的张力控制方法,如图 2 所示。

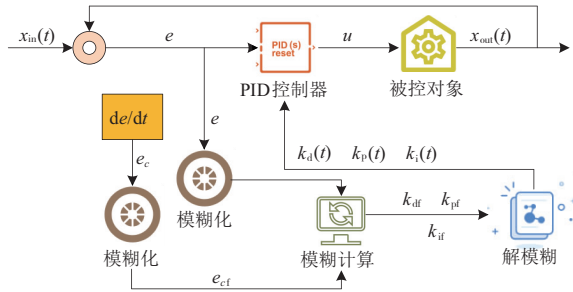


图2 模糊PID控制方法

从图2可见,该方法首先对变量进行模糊化处理,制定模糊控制规则,并通过推理将输出结果转化为清晰控制信号。模糊规则设计的核心在于根据系统误差和响应速度调整比例、积分和微分系数。最后就是对得到的系统模糊输出量进行求解,将其清晰化并用于张力系统的控制中,如式(8)所示。

$$O = \frac{\sum \mu(U_i) U_i}{\sum \mu(U_i)} \quad (8)$$

式中: O 表示清晰输出量; U_i 表示模糊输入量; μ 表示加权系数。

1.3 高速纸张分切机的张力控制系统设计

研究以自抗扰控制以及模糊PID控制为基础,设计了一种对高速纸张分切机的张力进行控制使其保持恒定的系统,具体流程如图3所示。

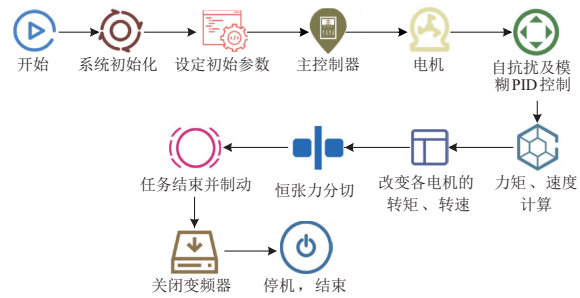


图3 高速纸张分切机张力控制系统设计图

从图3中可以看出,张力控制系统在初始时会根据以往经验对自抗扰控制以及模糊PID控制中所涉及的参数进行设置^[17],并将其输入到主控制器和电机中,使纸张分切机在这些初始值所生成的状态下开始工作。之后,控制系统会根据实际的工作效果,借助自抗扰以及模糊PID控制初始参数值进行调整。主控制器是张力控制系统的核心,系统的运行依赖于主控制器的调配^[18-19]。在分切机的运行过程中,主控制器还会实时收集分切机的张力数据,当检测到张力出现波动时,控制器就会根据内部所设置的自抗扰控制以及模糊PID控制算法对分切机的运行状态进行调整^[20]。

2 控制方法效果及系统性能分析

2.1 结合BP神经网络的自抗扰控制效果及分析

为了验证结合神经网络的自抗扰控制对高速纸张分切机张力的控制效果,本研究对其进行仿真分析实验。实验设置放卷阶段的张力恒定标准值为30N,收卷阶段的张力阈值为40N,具体实验结果如图4所示。

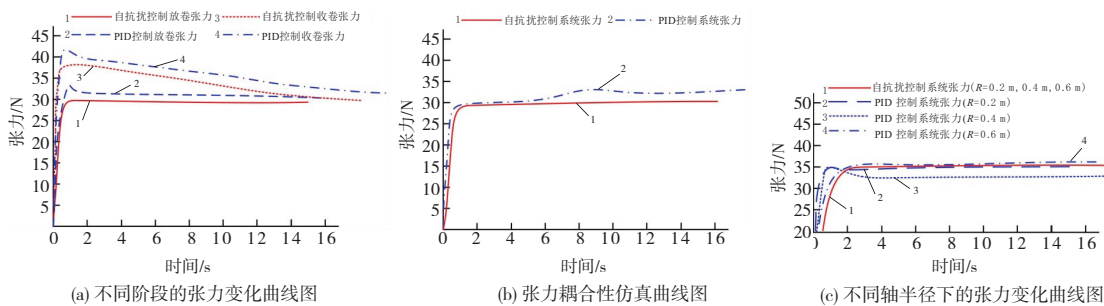


图4 结合神经网络的自抗扰控制效果示意图

图4(a)中,高速纸张分切机在两种不同的控制方法下,张力变化趋势存在显著差异。使用PID算法控制放卷阶段张力时,系统张力超过预设值30N,达到33N,最大误差为10%。经过约1.5s稳定后,张力降至31.6N,误差为5.3%。而

结合BP神经网络的自抗扰控制算法,在分切机稳定运行后,张力基本保持在预设值30N,误差仅为0.1%,且仅需0.5s即可达到稳定,从而提高了控制精度。在收卷阶段,PID算法控制下,分切机张力超过阈值,达到42N,存在5%的误差。调整

后,张力回落至阈值以下,但依然高于放卷阶段预设值。而神经网络自抗扰算法可确保收卷阶段张力始终在阈值以下,使收卷过程高效。收卷结束后,算法还能准确将张力控制回放卷阶段标准值,显示出优异控制性能。图4(b)中,在6~12s期间,对系统施加外部扰动后,PID控制下系统张力出现明显波动,波动范围1~3N,平均误差约6.7%,且短时间内无法恢复至标准值。而结合神经网络的自抗扰算法在这种情况下,系统张力保持稳定,无明显变化。这说明该算法具有较强的环境适应性,能应对外部环境变化的影响。

图4(c)中,改变分切机主轴半径后,PID控制系统出现5.6%的平均误差,需要调整参数以满足张力需求。而结合神经网络的自抗扰算法在相同条件下,能保持系统张力稳定,基本无误差,表明该算法能消除内部变化干扰,实现张力稳定。

2.2 模糊PID控制算法效果及分析

为了验证模糊PID算法对高速纸张分切机的张力控制效果,系统的张力恒定期望值为18N,本研究结合实际系统模型对该算法进行仿真对比分析,如图5所示。

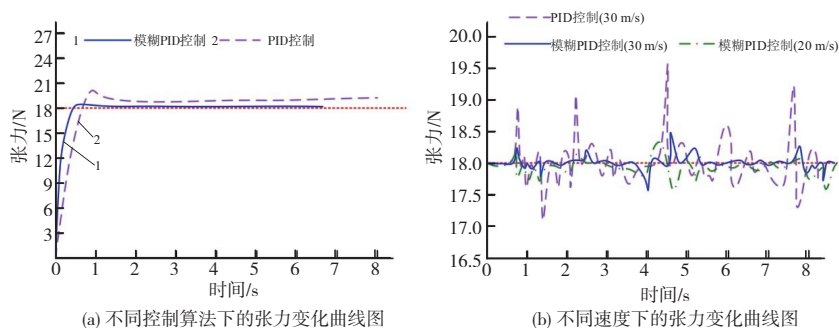


图5 模糊PID算法对比效果

图5(a)中,在分切机主轴速度相同的情况下,PID控制下的张力在初始震动阶段最大误差达到20N,误差为11.1%。系统稳定后,控制张力下降至19.5N,稳态误差约为8.3%。这表明PID控制下的系统张力误差较大,无法实现高精度控制。同时,调节张力至稳定状态的时间约为1.2s,响应速度较慢,对分切机工作效率提升有限。经过模糊处理的PID控制,性能得到了显著提高。在系统稳定运行后,其实际张力与期望值基本相同,稳态误差值仅为0.3N,误差约为1.7%,是PID算法的1/5左右。在模糊PID控制下,系统在大约0.4s时,其张力就达到了预设的期望值,缩短了控制系统所需的响应时间。图5(b)中,在主轴速度相同的情况下,使用PID控制的系统张力误

差为1.6N以内,误差为8.9%。然而,当速度变化时,系统张力会出现明显波动,且不能适应外部变化。相较之下,采用模糊PID算法控制的系统,张力误差不超过0.5N,误差控制在2.7%以内,曲线变化平缓。随着主轴速度增加,模糊PID控制下的张力曲线变化进一步降低,表明该方法具有较强的适应性和稳定性。

2.3 高速纸张分切机张力控制系统性能分析

由于分切机的主轴速度变化是影响其张力稳定的重要因素之一,所以研究设置了3种不同的主轴速度变化情况,以此来增加实验结果的全面性和可靠性。电机通电工作后,研究利用计算机软件对收线侧的张力变化进行了实时记录,如图6所示。

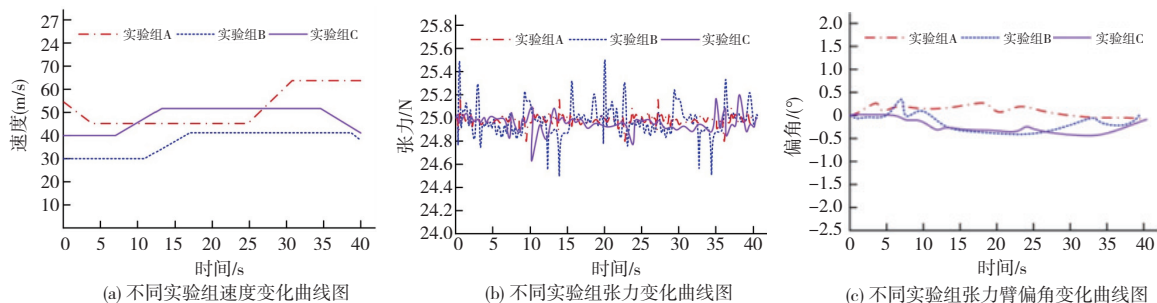


图6 不同速度变化下分切机张力及张力臂偏角变化曲线图

实验设置高速纸张分切机的张力期望值为25 N,张力臂平衡位置的偏角为 0° 。图6中,高速纸张分切机的主轴速度稳定时,其张力变化曲线平缓,控制效果较好。主轴速度变化时,张力变化曲线的波动程度也随之增大,张力误差出现最大值。图6(b)中,高速分切机的张力在期望值附近波动。张力误差值保持在0.6 N以内,平均误差在2.4%左右。图6(c)中,高速分切机运行过程中,张力臂的偏移幅度很小。张力臂的最大偏移角误差不超过 0.5° 。因此,该张力控制系统可以实现对张力的稳定控制,控制精度满足工作需要。

3 结语

针对现有的张力控制系统,本文提出基于自抗扰控制以及模糊PID控制的张力控制系统。测试结果显示,采用BP神经网络自抗扰控制算法在分切机放卷阶段,系统张力能稳定保持在预设标准值30 N,误差仅为0.1%,并在0.5 s内达到稳定。即使在6~12 s内施加外部扰动,系统张力依然稳定。当调整主轴半径时,该算法也能保持系统张力基本不变。启动阶段采用模糊PID控制,系统内部快速变化时未出现较大误差。稳定运行后,实际张力与期望值基本一致,误差仅0.3 N,约为1.7%。在模糊PID控制下,系统响应时间缩短至0.4 s。速度转向时,张力误差不超过0.5 N,误差控制在2.7%以内,整体曲线变化平缓。这些结果表明,控制效果有显著提升。本研究所提的张力控制系统能够较大地提高分切机运行时对张力控制的精确度和稳定性。本研究的不足之处在于在对高速纸张分切机的张力控制进行分析时过于理想化,没有考虑实际情况下可能对张力控制造成影响的次要因素,这也是后续研究需要继续改进之处。

参考文献:

- [1] 王景楠,薛晨阳,齐向东,等. 基于SSA-模糊PID的AUV姿态控制研究[J]. 计算机测量与控制, 2024(3):150-156.
- [2] 耿骏杰,孟帅. 基于BAS的模糊PID解耦算法在船舶动力定位中的应用[J]. 舰船科学技术, 2024, 46(6): 13-19.
- [3] GUO Z Y, LI Z Q. Distributed auto disturbances rejection resilient control of permanent magnetic maglev trains based on the optimized deep deterministic policy gradient algorithm[J]. IET Control Theory & Applications, 2024, 18(11):1383-1397.
- [4] 李长有,陈方静,王耿. 基于自适应反演滑模的键合线缠绕张力控制方法[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2023, 42(6):103-109.
- [5] 张麦玲,魏丹. 云计算模式下多线切割机张力控制系统设计[J]. 机械设计与制造, 2023, 388(6):152-156.
- [6] 汪良,王恒升,郭新平,等. 隔膜分切机放卷张力串级控制器设计[J]. 电机与控制学报, 2023, 27(10): 181-192.
- [7] LU Q L, SUN R S, LU Y. Output redefinition-based active disturbance rejection control for nonminimum phase hypersonic vehicles[J]. Aircraft Engineering and Aerospace Technology, 2024, 96(4):530-540.
- [8] 李超,谢振宇,吴传响,等. 基于模糊控制的磁轴承PID控制算法研究[J]. 机械制造与自动化, 2022, 51(2):38-41.
- [9] 王伟峰,杨泽,赵轩冲,等. 矿井带式输送机液压拉紧Fuzzy-PID控制技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(3):217-224.
- [10] XU J L, GUO Y S, LIU F C, et al. Development and experiment of semi-physical simulation platform for space manipulator[J]. Sensors, 2024, 24(13):4354.
- [11] 彭来湖,谢国旺,戴宁. 基于自抗扰控制的圆纬机恒张力输纱控制系统设计[J]. 纺织学报, 2024, 45(1):211-219.
- [12] 仇月仙. 小型金属窄带恒张力卷绕控制系统设计[J]. 机械科学与技术, 2023, 42(3):396-401.
- [13] 付茂文,沈丹峰,赵刚,等. 经纱张力神经反步分数阶快速终端滑模控制[J]. 现代纺织技术, 2023, 31(4):130-138.
- [14] 范维,陈剑文,曾荣. 多线切割机线锯系统张力预补偿控制与试验[J]. 机床与液压, 2023, 51(13): 21-26.
- [15] 刘志鹏,韩宾,李芸瑜,等. 3D打印形状记忆智能剪纸结构[J]. 精密成形工程, 2023, 15(11):39-45.
- [16] 葛林,刘志东,冯文,等. 双导向器对高厚度电火花线切割腰鼓度影响研究[J]. 机床与液压, 2023, 51(22):53-59.
- [17] 郭池,陈明霞,吴俊杰. 基于SOA优化的ADRC胎面卷取张力控制系统[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(23):9937-9946.
- [18] 邓明,曹子荷,王静南,等. 缠绕张力对干法缠绕复合材料结构残余应力及回弹变形的影响[J]. 复合材料学报, 2023, 40(12):6884-6896.
- [19] 应杰,殷振,张鹏,等. 芳纶纸蜂窝材料超声波振动切割刀的设计研究[J]. 机械设计与制造, 2024, 41(4): 117-122.
- [20] 巨国力,刘善慧,冯磊,等. 基于改进LADRC的放卷侧储料架张力系统建模与控制[J]. 中国造纸, 2024, 43(9):162-170.

收稿日期:2024-07-29