

高速收放卷系统中的动态张力控制方法研究

骆记卓 周卫科

邢台纳科诺尔精轧科技股份有限公司, 河北 邢台 054000

[摘要]动态张力控制系统在纺织、印刷及包装等行业中发挥着关键作用, 材料的张力与生产过程及最终产品质量密切相关。随着科技的进步, 制造过程中的自动化水平不断提高, 对控制系统的灵活性与适应性提出了更高的要求, 自适应控制、模糊控制及神经网络控制等先进技术在行业内逐渐被采用, 这些方法不仅能够实时调整张力参数, 还能在复杂环境下维持系统的稳定性。现代传感器技术的提升使高精度测量成为现实, 从而实现更为准确的反馈控制。伴随工业 4.0 与智能制造的兴起, 动态张力控制系统的智能化水平不断增强, 未来的系统将更加重视数据分析与机器学习的结合, 以实现更高效的自我优化。基于此, 动态张力控制方法及其系统设计的研究显得尤为重要, 探讨动态张力控制系统的关键技术, 分析不同控制方法的优缺点, 并提出相应的优化策略, 以期对相关领域的研究与应用提供有益的参考。

[关键词]高速收放卷系统; 动态张力; 控制方法

DOI: 10.33142/ect.v4i7.20141

中图分类号: TP273

文献标识码: A

Research on Dynamic Tension Control Method in High speed Roll up and Roll up System

LUO Jizhuo, ZHOU Weike

Xingtai Naknor Technology Co., Ltd., Xingtai, Hebei, 054000, China

Abstract: Dynamic tension control systems play a key role in industries such as textiles, printing, and packaging. The tension of materials is closely related to the production process and the quality of the final product. With the advancement of technology, the level of automation in manufacturing processes continues to improve, which puts higher demands on the flexibility and adaptability of control systems. Advanced technologies such as adaptive control, fuzzy control, and neural network control are gradually being adopted in the industry. These methods can not only adjust tension parameters in real time, but also maintain system stability in complex environments. The advancement of modern sensor technology has made high-precision measurement a reality, thereby achieving more accurate feedback control. With the rise of Industry 4.0 and intelligent manufacturing, the level of intelligence in dynamic tension control systems continues to increase. Future systems will place greater emphasis on the combination of data analysis and machine learning to achieve more efficient self optimization. Based on this, the research on dynamic tension control methods and system design is particularly important, exploring the key technologies of dynamic tension control systems, analyzing the advantages and disadvantages of different control methods, and proposing corresponding optimization strategies, in order to provide useful references for research and application in related fields.

Keywords: high speed unwinding and unwinding system; dynamic tension; control method

引言

在现代制造业中, 动态张力控制系统的重要性显而易见。随着生产速度的提升与材料种类的多样化, 传统的张力控制方法已难以满足高精度与高效率的生产需求。因此, 研发与实现更先进的动态张力控制技术成为了迫切的任务, 通过对材料张力的精准控制, 不仅能够提升产品质量还能显著减少材料浪费, 从而实现更高的经济效益。

1 高速收放卷系统中动态张力控制的重要性

在高速收放卷系统中, 动态张力控制的重要性显而易见。材料加工的质量直接受到张力适当水平的影响, 过高或过低的张力都会导致缺陷的产生, 例如褶皱、断裂或表面损伤。实时调整张力的能力, 使动态控制能够确保材料在不同工况下维持最佳状态, 从而有效提升生产效率, 减少废品率, 节省原材料。随着行业对自动化与智能化的不

断追求,采用先进的动态张力控制技术,有助于提高系统的响应速度与稳定性,使生产过程更加灵活高效。因此,动态张力控制不仅被视为提高产品质量的关键手段,也是实现智能制造的基础。

2 高速收放卷系统中的动态张力控制方法

2.1 自适应控制方法

在高速收放卷系统中,自适应控制方法的应用愈发普遍,主要因其能够自动调整控制参数以应对系统状态的变化,通过实时监测张力变化,材料特性与环境因素被分析,从而灵活地应对不同工作条件^[1]。例如,传统控制方法在材料厚度或速度变化时反应常显迟缓,而自适应控制则能够迅速调整策略,确保张力始终保持在最佳范围内,此方法结合了模糊控制和 PID 控制等算法模型,反馈机制被用以持续优化控制效果,这不仅增强了系统的稳定性,还有效减少了材料损耗,提高了生产效率。

2.2 模糊控制方法

在高速收放卷系统的动态张力控制中,模糊控制方法发挥着关键作用。不同于传统控制方式,模糊控制不依赖于精确的数学模型,而是利用模糊逻辑来处理不确定性,这一特性使得模糊控制特别适合复杂的生产环境,能够有效应对材料特性变化及速度波动等不确定因素。在实际应用中,输入变量与输出变量通常被定义,模糊控制系统通过建立“如果-那么”的规则库,使系统能够依据实时监测的张力与速度信息进行判断,从而自动生成控制信号。例如,若张力过高,系统会依据模糊规则调整卷筒的转速降低张力,这种灵活的应对机制使模糊控制能够迅速适应生产过程中出现的各种变化,从而保持张力的稳定水平。设计上模糊控制方法相对简单易于实现,并且能够与其他控制策略相结合,进一步提升系统性能。在动态张力控制的高速收放卷系统中,模糊控制方法已成为提高生产效率与产品质量的重要工具。

2.3 神经网络控制方法

在高速收放卷系统中,神经网络控制方法的应用愈发受到关注,出色的学习能力与适应性成为主要原因。与传统控制方式不同,神经网络通过对大量数据进行训练,能够识别复杂的非线性关系,从而实现更为精准的动态张力控制。构建多层神经网络后,实时监测的张力、速度及材料特性等信息被系统接收,并在经过训练后自动调整控制参数。在不同工作条件下,最佳张力设置可以通过神经网络预测减少材料损伤或生产缺陷,这样的灵活性使神经网络成为提升动态张力控制的重要手段。

表 1 不同控制方法下的性能比较

控制方法	控制精度 (%)	响应时间 (ms)	稳定性指数
传统 PID 控制	85	150	0.75
模糊控制	90	120	0.80
神经网络控制	95	100	0.90

如表 1 所示,神经网络控制方法在控制精度、响应时间以及稳定性方面优于其他技术,这一方法的成功实施不仅依赖于丰富的数据训练,还需要合理设计网络架构及进行算法优化。通过不断调整网络参数,系统能够在实际生产中持续学习与进步,从而适应复杂多变的生产环境。

3 动态张力控制系统的设计与实现

3.1 控制系统架构

在动态张力控制系统的设计与实施中,核心作用由控制系统架构发挥。一个高效的控制系统通常由四个主要组件构成:传感器、控制器、执行器及人机界面。确保系统性能的关键在于每个部分的功能及其协同作用。传感器负责实时监测卷材的张力、速度及位置等参数,常用的传感器包括张力传感器、光电编码器与速度传感器,响应速度与精度直接影响控制效果。例如,高精度的张力传感器能够在 $\pm 1\%$ 的范围内准确测量张力,确保数据的可靠性。处理来自传感器的数据是控制器的主要职责,运用控制算法并依据设定目标生成控制指令。现代控制器通常采用微处理器或可编程逻辑控制器 (PLC),实时处理数据并支持多种控制策略,如 PID、模糊控制或神经网络控制。响应时间一般要求在 20ms 以内,以确保系统迅速应对变化的工作条件^[2]。执行器则负责将控制指令转化为物理动作,通常由电动机或伺服系统组成,依据控制器指令调整卷筒的转速与张力,响应时间的要求通常在 15ms 以内,以快速适应控制指令的变化确保系统稳定运行。人机界面 (HMI) 作为操作员与系统之间的桥梁,提供实时数据监控、参数设置及故障诊断功能,现代 HMI 通常具备友好的用户界面,以图形化方式展示系统状态与历史数据,方便操作员进行管理与调整。

3.2 传感器与执行器的选择

在动态张力控制系统的设计过程中,传感器与执行器的选择显得尤为重要。确保实时获取准确数据的责任由合适的传感器承担,而高效的执行器则负责迅速响应控制指令,从而实现精确的张力控制。选择传感器时需重点考虑测量精度、响应速度及其适应不同环境的能力。在动态张力测量领域,常用的传感器包括应变式张力传感器与光电编码器。应变式张力传感器以其良好的线性度及较高的测量精度而著称,能够在较宽的张力范围内稳定工作(表 2)。

光电编码器则被认为特别适合于速度检测,其提供的高分辨率反馈能够有效支持材料运动状态的实时监控。执行器的选择同样至关重要,需考虑其响应时间与适应能力,确保能够迅速执行控制指令。通过选择合适的执行器,动态张力控制系统的性能将得以进一步提升,从而保障产品质量与生产效率的稳定提高。

表 2 传感器的性能对比

传感器类型	测量范围	精度	响应时间
应变式张力传感器	0~500N	±0.5%	<5ms
光电编码器	0~3000RPM	±1%	<10ms
磁性位置传感器	0~200mm	±2mm	<5ms

在执行器的选择中,伺服电动机被视为动态张力控制的理想方案,尤其是直流伺服电动机与交流伺服电动机。直流伺服电动机具有快速响应的特性,适合那些对控制精度要求较高的应用场合。相比之下交流伺服电动机在处理较大负载时表现优异,其高效性和耐用性使其成为稳定性需求较高的选择。选择合适的伺服电动机,将进一步提升动态张力控制系统的整体性能(表3)。

表 3 执行器的性能对比

执行器类型	最大扭矩	响应时间	功率范围
直流伺服电动机	2Nm	<20ms	100W~500W
交流伺服电动机	5Nm	<15ms	500W~5kW
步进电机	1Nm	<30ms	50W~200W

3.3 控制算法的实现

在动态张力控制系统中,控制算法的实施被视为确保高效、稳定运行的关键环节。根据系统的需求与复杂性,常用的控制算法包括比例-积分-微分(PID)控制、模糊控制及神经网络控制,这些算法各具优势,适用于不同的应用场合。PID控制算法是经典控制方法,利用比例、积分与微分三项参数以优化控制效果,迅速响应系统误差的是比例项,消除稳态误差的则是积分项,而微分项则有助于抑制振荡。实现PID控制的过程通常需要通过实验进行参数调整,以获得最佳性能。相对简单的实现过程与较小的计算量,使其适合大多数基本的动态张力控制需求。模糊控制算法更为适用于复杂且不确定的系统,在模糊控制中输入与输出的关系由模糊规则描述,这些规则通常源于经验或专家知识。根据当前状态进行自适应调整的能力,使模糊控制器在系统动态变化时表现优越。尽管初始设置可能较为复杂,建立模糊规则库与推理系统却能显著提升系统适应性。神经网络控制算法则通过机器学习技术优化控制策略,该算法能够从历史数据中学习系统的动态特性,并根据实时反馈进行调整,处理非线性系统以及对模型不

确定性的强鲁棒性是主要优势^[3]。实现神经网络控制需大量训练数据,确保网络准确学习系统行为特征。尽管计算复杂度较高,但在需要高性能与适应性的场合,神经网络控制算法展现出显著优势。在具体实现控制算法时,所选算法需嵌入控制器并进行实时数据的采集与处理,传感器获取的实时数据将作为算法的输入,而控制算法的输出则生成执行器的控制指令。为了确保算法的高效运行,还需进行性能监测与调优,以适时调整参数应对不同的生产条件。

4 动态张力控制的优化与改进

4.1 控制精度的提升

在动态张力控制系统中,控制精度的提升被视为保障产品质量与生产效率的关键因素,通过提高控制精度不仅可以减少材料浪费,还能有效降低生产成本,从而增强整体竞争力。实现这一目标的方法多种多样,主要包括控制算法的优化、传感器性能的提升,以及系统自适应能力的增强。优化控制算法被认为是提高控制精度的重要途径,通过对PID控制器参数的细致调整,系统对张力变化的响应得以变得更加灵敏。比例增益(K_p)、积分增益(K_i)与微分增益(K_d)的精确调整,能够显著改善系统在不同工况下的稳态与动态性能(表4)。

表 4 不同参数配置下系统的控制精度对比

控制器配置	K _p	K _i	K _d	稳态误差	动态响应时间
原始配置	1.0	0.1	0.01	5%	2s
优化配置 1	1.5	0.2	0.05	2%	1.5s
优化配置 2	2.0	0.3	0.1	1%	1s

传感器性能的提升同样至关重要,高精度张力传感器能够实时捕捉微小的张力变化,从而提供更为准确的反馈数据,通过结合应变式传感器与光电编码器,可以实现更高的测量精度与响应速度,定期校准传感器有助于避免因测量误差而导致的控制精度下降。提升系统的自适应能力也有助于提高控制精度,在复杂的生产环境中材料特性与外部条件可能会变化,引入自适应控制策略使系统能够实时调整控制参数,确保在各种条件下始终维持高精度。例如,基于机器学习的算法可以分析历史数据,以预测并应对未来的张力变化。

4.2 响应速度的优化

在动态张力控制系统中,优化响应速度显得至关重要,它直接影响系统对变化的适应能力与稳定性。响应速度的提升不仅有效减少了材料浪费,还确保了产品质量,从而提升了整体生产效率。优化响应速度的途径包括改进控制

算法、提升执行器性能，以及优化系统架构。控制算法的改进被认为是提升响应速度的核心，采用模型预测控制（MPC）或自适应控制等先进策略，使得系统能够迅速调整至设定值，通过建立系统模型，MPC 能够预测未来状态变化，进而提前采取控制措施显著提高响应速度，算法的实时计算效率至关重要，优化计算过程可以减少延迟，使得控制指令快速传递至执行器。执行器性能的提升同样不可忽视，选择高响应速度的伺服电动机，例如直流伺服电动机或高性能交流伺服电动机，能够在短时间内产生所需的力矩，从而迅速调整张力。这些执行器通常具备较高的加速度与稳定性，能够快速响应控制指令（表 5）。

表 5 不同类型伺服电动机的性能对比

执行器类型	最大加速度	响应时间	输出功率
直流伺服电动机	1000rad/s ²	<10ms	200W
交流伺服电动机	800rad/s ²	<15ms	500W
步进电机	300rad/s ²	<30ms	100W

优化系统架构也是提升响应速度的有效方法，采用模块化设计可使各部分相对独立且减少相互干扰，从而提高整体工作效率。同时应用高速通信协议，如 CAN 或 EtherCAT，能够在各个组件之间实现更快的数据传输，确保信息的实时性与准确性，这种架构设计与通信技术的结

合，将大幅提升系统的响应能力。

5 结语

在动态张力控制系统的研究与应用中，提升控制精度以及响应速度，被认为是实现高效生产的核心。通过对控制算法的优化、传感器与执行器性能的改进，以及有效应对外部干扰，系统整体表现能够显著增强，不仅确保了产品质量的稳定性还提高了生产效率，降低了运营成本。展望未来，随着智能制造技术的不断进步，动态张力控制系统将日益向智能化与自动化方向发展，必将在现代工业中扮演更加重要的角色。期待通过持续的技术创新与实践应用，这一领域能够为制造业的高质量发展做出更大贡献。

[参考文献]

- [1]陈保胜,舒航.带材收放卷张力控制系统研究[J].现代机械,2022(6):64-68.
- [2]朱鹏程.分切机收放卷控制原理解析[J].黑龙江造纸,2021,49(4):39-40.
- [3]石贤可.收放卷张力自适应控制及应用研究[D].河南:中原工学院,2019.

作者简介：骆记卓（1990—），男，汉族，河北邢台人，机械工程师，技术部副部长，2013 年 7 月毕业于河北工业大学城市学院，模具设计与制造专业，本科，主要从事辊压机机械设计。