

基于多变量全局耦合模型的卷对卷涂布机张力波动抑制技术研究

陈洪洋

北京印刷学院, 北京市, 102600;

摘要: 为了实现卷对卷涂布过程中多区段张力的稳定控制, 研究构建了以材料张力状态为核心的多变量全局耦合模型, 综合考虑驱动速度、卷径变化与材料弹性等关键因素, 建立非线性张力演化方程, 并设计具备状态观测、预测控制与扰动补偿功能的多输入多输出控制策略。通过自适应调节机制动态修正控制参数, 增强系统对非理想工况的响应能力。实验平台验证结果表明, 所提出的控制方法在应对扰动时具备更优的张力收敛速度与稳定性, 有效抑制张力波动, 提高了涂布过程的均匀性与控制精度。

关键词: 卷对卷涂布; 张力控制; 多变量耦合; MIMO 控制

DOI: 10. 64216/3104-9664. 25. 03. 028

引言

卷对卷涂布工艺作为柔性材料连续加工的重要环节, 其张力控制水平直接影响涂布厚度一致性与卷材质量稳定性。随着高速化、精密化涂布设备的广泛应用, 系统中各驱动单元间的张力耦合关系日趋复杂, 传统控制方法难以应对多区段非线性扰动引发的张力波动问题。针对多变量动态耦合特性下的张力稳定性挑战, 亟需构建具有全局响应能力与耦合解构机制的控制模型, 以实现复杂传动链中张力演化行为的精准调控, 推动高性能涂布系统的智能化运行。

1 卷对卷涂布系统张力动态耦合机理分析

在卷对卷涂布系统中, 张力的动态响应不仅取决于单一驱动单元的控制精度, 更深层地受制于系统内部多

个传动模块之间的耦合关系^[1]。该系统通常由放卷单元、涂布段、导辊机构、收卷组件及多级驱动器构成, 各单元间通过张力介质(即材料本身)实现物理连接, 在运行过程中形成典型的多变量、多自由度动力系统。由于材料在传输过程中具有延展性与非线性弹性, 其张力变化不仅呈现出空间分布特性, 更体现出时间演化特性, 导致局部张力扰动会在系统内沿传输方向叠加放大或相互干扰。尤其在速度波动、载荷扰动或惰辊偏移情况下, 张力波动会在驱动链中形成反馈回路, 引发跨区段的张力共振现象, 严重影响涂布厚度均匀性与卷材质量稳定性^[2]。图1所示为系统张力响应耦合结构图, 明确标识出各模块之间的力学交互路径与张力传递链条, 为后续耦合模型的数学抽象与控制策略设计提供了理论支撑。

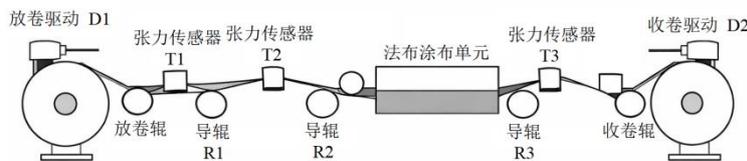


图1 卷对卷涂布系统张力耦合响应结构图

2 多变量全局耦合模型建立

多变量全局耦合动力学模型以张力状态变化为核心观测指标, 引入放卷驱动、收卷驱动、中间导辊速度、卷径变化、材料弹性模量与阻尼特性作为主导因子, 通过张力传感器布设点构建时间域连续系统方程^[3]。系统中张力传递过程受到材料延迟响应与驱动调节滞后的双重影响, 可表示为以下耦合微分方程:

$$\frac{dT_i(t)}{dt} = \frac{EA}{L_i(t)} [v_{i-1}(t) - v_i(t)] - \frac{C}{m} T_i(t)$$

其中, $T_i(t)$ 表示第 i 区段张力, E 为材料弹性模量, A 为截面积, $L_i(t)$ 为当前区段有效材料长度, $v_{i-1}(t), v_i(t)$ 分别为前后驱动辊速度, C 为张力耗散系数, m 为单位质量。在系统边界条件中, 放卷与收卷单元的驱动速度需同时考虑卷径随时间变化引起的非线性扰动, 其卷径更新关系可表述为:

$$R(t) = \sqrt{R_0^2 + \frac{v(t) \cdot t}{\pi h}}$$

其中, $R(t)$ 为时刻 t 的卷径, R_0 为初始卷径, $v(t)$ 为当前运行速度, h 为材料厚度。上述两式联合构成系统全局耦合模型的张力演化基础, 既体现了速度差驱动下的瞬时张力响应, 又嵌入了非线性卷径扰动与耗散机制, 形成一个包含速度—长度—张力—卷径多变量的非线性耦合张力动态系统, 为控制器构建与鲁棒性分析提供数学支撑^[4]。

3 张力波动抑制策略设计

$$J = \int_0^t \left[w_1 \cdot (T_i(t) - T_{ref})^2 + w_2 \cdot \left(\frac{dT_i(t)}{dt} \right)^2 + w_3 \cdot \Delta u(t)^2 \right] dt$$

其中, $T_i(t)$ 为第 i 区段实际张力, T_{ref} 为张力参考值, $\Delta u(t)$ 为控制输入变化速率, w_1, w_2, w_3 为多目标加权因子。该目标函数综合衡量张力稳定性、动态响应性与执行器负载均衡性, 构成张力波动控制策略设计的性能基准。在约束条件方面, 系统需满足驱动响应上限、卷径变化物理限制、速度同步误差容限及张力变化范围边界等多重制约, 其中控制输入 $u(t)$ 受限于驱动电机最大响应速率, 材料卷径变化约束体现为非线性边界条件, 且张力控制需保持在材料屈服张力阈值以内。

3.2 基于耦合模型的控制器设计

基于卷对卷涂布系统的多变量全局耦合模型, 为实现张力状态的精确调控与扰动响应的快速抑制, 需设计具有动态补偿能力和耦合解耦机制的多输入多输出 (MIMO) 控制器结构。该控制器以张力区段状态变量为核心反馈信号, 嵌入各驱动节点的动态响应模型, 通过耦合解耦映射矩阵实现输入控制量与系统状态间的直接关联^[5]。设计中采用内嵌式状态观测器架构, 引入预测控制路径与扰动补偿支路, 对驱动速度变化、材料

$$u^*(t) = \arg \min_{u(t)} \left\| T_i(t) - T_{ref} \right\|^2 + \lambda \left\| \Delta u(t) \right\|^2 + \mu \left\| d_{est}(t) \right\|^2$$

其中, $u^*(t)$ 为最优控制输入, $T_i(t)$ 为当前张力状态, T_{ref} 为期望参考张力, $\Delta u(t)$ 为控制输入变化量, $d_{est}(t)$ 为扰动观测项, λ, μ 为权重因子。该优化模型融合了张力跟踪精度、执行器平滑性及外部扰动抑制性能, 通过实时迭代更新控制输入, 构建面向误差收敛速率与控制效率的双目标补偿调节路径。同时, 结合模型预测结构, 引入滚动时域优化机制, 提升策略对未来状态演化的敏感性。补偿与优化模块作为控制器结构中的核心调节单元, 为系统在复杂工况下保持稳定性和精准性提供动态支撑, 并为自适应参数调整机制奠定技术基础。

3.4 自适应调节机制研究

3.1 控制目标与约束条件

在多变量耦合模型的基础上, 为实现卷对卷涂布过程中张力响应的稳定控制, 需首先明确张力波动抑制的控制目标与可实施的约束边界。在设计层面, 控制目标应聚焦于张力变化速率抑制、稳态误差最小化及扰动传递抑制性能的协同优化, 以保障系统运行过程中的材料稳定性与涂布均匀性。具体而言, 期望通过构建以下性能指标函数作为控制优化目标:

卷径动态非线性变化及张力波动进行联动调节。控制器结构划分为张力状态观测模块、预测控制单元、速度同步调节通道及耦合解耦矩阵控制器, 其中状态观测器利用模型估算未测变量, 预测单元基于当前状态延拓张力趋势, 驱动控制器则据此生成调节命令并实时反馈于系统, 实现对各张力区段的同步、多维、分布式控制路径构建。

3.3 补偿策略与优化算法

为增强控制器在复杂张力耦合系统中的动态响应能力与鲁棒性, 需构建面向扰动估计与控制误差调节的联合补偿策略, 并引入动态优化算法实现对控制指令的实时修正。在系统运行过程中, 材料非线性响应、驱动迟滞及参数不确定性等因素会引发模型预测偏差, 导致控制输入与实际张力状态间产生残差。对此, 设计基于扰动观测器的前馈-反馈组合补偿路径, 在状态估计基础上引入广义扰动项作为补偿变量, 并构建如下优化调节函数:

针对卷对卷涂布系统在实际运行过程中存在的材料张力特性非恒定、驱动响应滞后变化及环境干扰不可预测等问题, 必须在控制器设计中引入具有参数在线调整能力的自适应调节机制, 以实现非理想工况的动态响应匹配。该机制嵌入控制器主结构的反馈通道与补偿路径, 通过引入系统识别模块与增益调整模块构建双层调节模型, 实现对控制律参数的实时修正。具体设计中, 采用基于 Lyapunov 稳定性的自适应调节方法, 针对张力偏差动态变化引入增益因子 $K(t)$ 并设计其在线更新规则如下:

$$\frac{dK(t)}{dt} = \gamma \cdot e(t) \frac{de(t)}{dt}$$

其中, $K(t)$ 为当前时刻自适应增益, γ 为正值调

节系数, $e(t)$ 为张力误差项。该设计使控制系统在误差变化剧烈或方向切换时, 可动态调整控制器响应强度, 提升系统在复杂工况下的稳定性与鲁棒性。同时, 增益更新机制与扰动补偿路径联动工作, 可实现“扰动感知—参数调整—控制律优化”的封闭自适应环路。通过这种基于误差导向的结构性动态修正机制, 系统具备对未知干扰、自身参数漂移及材料特性变化的在线适应能力, 为后续张力精度控制在非理想条件下提供控制基础。

4 实验验证与结果分析

4.1 实验平台搭建与参数设置

为对所构建的多变量全局耦合张力控制模型及其 MIMO 控制策略进行有效工程验证, 搭建可编程卷对卷涂布控制实验平台, 模拟典型工业涂布场景中材料传输与张力调控过程。平台结构依照实际工艺流程构建, 包含放卷驱动单元(选用松下 MHMF 系列伺服电机, 带 1:10 减速比)、两级导辊张力区段、中间张力调节模块及收卷系统, 各段配置高分辨率 LX-ZG-10N 型张力传感器, 响应频率为 2kHz, 采样精度优于 $\pm 0.01\text{N}$, 实时数据经 24 位 $\Delta-\Sigma$ 型 A/D 转换器采集后输入控制系统。控制核心采用 NiCrIO-9039 工业嵌入式平台, 结合 FPGA 模块实现 MIMO 状态观测与预测控制算法实时运行, 并通过 EtherCAT 总线连接伺服驱动器以闭环调整各驱动速度。实验中选用厚度为 $38\ \mu\text{m}$ 的 PET 材料,

幅宽为 400mm, 初始卷径设定为 130mm, 传输速度范围 10 - 60m/min, 参考张力值为 5.5N, 系统中卷径变化实时通过编码器反馈建模。为验证控制器在复杂工况下的动态响应能力, 平台预设扰动注入模块, 包括速度阶跃扰动单元与负载扰动执行器, 以构成典型耦合张力变化环境, 为后续实验提供真实可控的测试场景。

4.2 实验结果与分析

在设定扰动激励下对三组控制策略分别进行张力响应测试, 实验重点监测系统速度阶跃变化与载荷扰动输入时各张力区段的瞬态响应与稳态性能。以第二张力区段为例, 传统 PID 控制结构在 5%速度阶跃下出现显著过冲, 张力波动幅度达到 0.92N, 系统恢复时间接近 3.4s, 稳态误差维持在 $\pm 0.26\text{N}$ 区间内。而引入多输入多输出控制结构后, 张力波动显著收敛至 0.35N 以内, 恢复时间缩短至 1.2s, 但在扰动高频叠加下控制输入响应仍呈现一定非平稳性。进一步引入基于扰动观测与动态优化的补偿机制后, 系统响应更趋平滑, 张力最大波动降至 0.18N, 恢复时间控制在 0.9s, 稳态误差收敛至 $\pm 0.08\text{N}$ 范围, 控制输入变化率较未补偿时降低约 37%。表 1 列出了三种策略在相同扰动条件下的张力控制关键指标对比, 从中可见所提出的复合控制策略在张力稳定性、动态抑制与控制器平稳性方面均表现出显著性能优势, 为后续工程推广提供了实证支持。

表 1 不同控制策略下的张力响应性能对比

控制策略	张力波动幅度 (N)	恢复时间 (s)	稳态误差 (N)	控制输入变化率 (%)
传统 PID 控制	0.92	3.4	± 0.26	8.2
MIMO 控制	0.35	1.2	± 0.13	5.6
MIMO 控制 + 补偿机制	0.18	0.9	± 0.08	3.5

5 结论

卷对卷涂布机张力波动控制需在多变量耦合背景下实现对非线性扰动与动态耦合的精准响应。本文构建的全局耦合模型与复合控制策略验证了系统在复杂工况下的稳定性与快速收敛能力, 实证数据表明多输入多输出结构与扰动补偿机制显著提升了张力调控性能。然而模型仍受限于材料参数动态变化的精度建模与实时识别效率, 控制器在大范围工况适应性方面尚存优化空间。未来需进一步拓展算法对非高斯扰动的适应能力, 融合多模态感知机制以增强系统对极端工况下的响应鲁棒性与容错调节水平。

参考文献

[1] 黄磊, 徐莉萍, 李健, 何鹏博. 基于滑模变结构的精密涂布机放卷系统张力控制策略研究[J]. 印刷与数字

媒体技术研究, 2024(3): 267-273.

[2] 刘善慧, 王子煜, 习大润, 丁好迪, 薛志成. 卷筒料精密涂布机张力系统耦合建模与分析[J]. 西安理工大学学报, 2022, 38(4): 526-532.

[3] 叶宏. 三维耦合趋化一流体模型强解的全局存在性和衰减率估计[J]. 数学进展, 2024, 53(5): 1019-1038.

[4] 关立涛, 陈博. 浆态床渣油加氢机理与全局资源优化耦合模型研究与应用[J]. 炼油技术与工程, 2023, 53(1): 22-25+35.

[5] 孙聿超, 胡长青, 杨雪峰, 赵梅. 基于相函数和耦合筒正波的高效声传播模型[J]. 声学技术, 2024, 43(6): 772-781.

作者简介: 陈洪洋(2003.04-), 男, 汉, 山东省日照市五莲县, 本科, 研究方向: 机械。