

多轴同步控制在电子导纱络筒机中的应用研究

梁朝阳 梁添锦 梁钱凯 杨云峰

浙江凯成智能设备股份有限公司 浙江 绍兴 312000

【摘要】：电子导纱络筒机是纺织卷绕核心装备，其多轴同步性直接决定纱线质量。针对传统单机控制导致的同步精度低、张力波动大等痛点，本文基于多轴同步理论与机电技术，系统解析其在络筒机中的应用。研究涵盖工作原理、控制策略、系统设计、案例分析、稳定性提升及工程适配六大维度，揭示参数与策略对运行稳定性及成型质量的调控规律。提出兼顾精度、速度与稳定性的优化方案，为设备智能化升级提供理论依据，对推动纺织装备自动化革新、提升效率质量及降低能耗具有重要价值。

【关键词】：电子导纱络筒机；多轴同步控制；卷绕成型；控制策略；系统优化；机电一体化

DOI:10.12417/3083-5526.26.01.026

引言

纺织工业正向智能化、精细化转型，装备控制精度成为核心竞争力。电子导纱络筒机作为纱线加工关键设备，其导纱、卷绕、牵伸等多轴运动的同步协调性直接决定纱线成型质量与生产效率。传统络筒机多采用单轴独立控制，缺乏有效协同机制，难以应对张力变化与负载波动，导致同步精度低、纱线缺陷多及断头率高，已无法满足高端生产需求。

随着伺服驱动与控制技术的迭代，多轴同步控制成为装备升级核心方向。然而，当前该技术在络筒机应用中仍存在策略单一、抗扰能力不足及系统设计缺乏工艺针对性等短板，制约了精度与效率的协同提升。

本文立足多轴同步理论、机电技术与纺织工艺，不依赖量化数据，纯通过理论推导与机理演绎，系统剖析络筒机多轴控制需求、核心策略及系统优化方法，构建完整的应用理论体系。研究旨在填补理论与工艺深度融合的空白，为设备智能化升级提供系统化支撑，推动纺织装备自动化革新，助力行业向高效、智能方向发展。

1 电子导纱络筒机工作原理与多轴控制需求

1.1 电子导纱络筒机核心工作原理

电子导纱络筒机旨在将原纱加工为密度均匀、成型良好的纱筒，其过程涵盖牵伸整理、导纱运动与卷绕成型三个协同阶段。牵伸阶段通过牵伸轴旋转消除原纱捻度不均与粗细偏差，需精准控制速度以防断纱或牵伸不足，并保持张力恒定。导纱阶段依靠导纱轴往复运动带动导纱器，使纱线均匀排列于纱管；其速度与行程须与卷绕轴转速严格匹配，过快致起皱重叠，过慢致排列稀疏，且运动平稳性直接关乎排列精度。卷绕阶段由卷绕轴旋转完成最终成型，需随纱筒直径增大实时降速以维持恒线速度，并动态调整速比以稳控张力。整机运行依赖多轴在速度、位置及张力上的精准协同，任何环节失调均会损害质量与效率。

1.2 多轴控制的核心需求

基于工艺特性，多轴控制需满足四大核心需求：一是同步

精度，即多轴速度与位置的协同一致性，直接决定纱线排列均匀度与密度，精度缺失将导致成型缺陷或断头；二是响应速度，指系统对张力变化、负载波动等干扰及参数调整的即时反应能力，确保快速恢复同步状态以保障连续生产；三是张力稳定性，通过多轴联动实时调节，维持张力恒定，避免因张力过大断纱或过小松散；四是运行可靠性，要求系统在长期连续作业中抗干扰、少故障，确保生产稳定高效。四者互为支撑，构成系统设计基准。

1.3 多轴控制存在的核心问题

当前应用仍面临诸多瓶颈：首先是同步精度不足，传统单轴独立控制缺乏联动机制，仅靠预设速比难以应对动态负载与张力变化，导致多轴失步、排列不均。其次是张力控制不稳，缺乏实时监测与动态调节机制，固定参数无法适应复杂工况，致使断头率升高、成型缺陷增多。再次是响应慢、抗扰差，简单控制策略难以抑制电源波动、环境变化等干扰，偏差修正滞后，降低系统稳定性。最后是工艺适配性差，固定参数设置无法灵活匹配不同材质与线密度的纱线工艺需求，通用性弱，制约了高端精细化生产的发展。

2 多轴同步控制核心理论与控制策略

2.1 多轴同步控制核心理论基础

多轴同步控制旨在通过特定策略使多轴在速度、位置及力矩上协同运动。其理论体系由三大支柱构成：一是同步控制原理，核心在于利用反馈调节机制，实时监测各轴状态并与预设值对比，通过算法修正偏差，确保速度与位置的高度一致；二是协同控制理论，强调将多轴视为有机整体，通过优化联动策略避免单轴独立运动导致的系统性能下降，实现牵伸、导纱与卷绕轴的深度协同；三是伺服驱动理论，作为技术基石，利用闭环控制机制精准调节电机电流，凭借高响应、高精度特性，为多轴协同提供可靠的执行保障。

2.2 多轴同步控制主要策略及特性

主流策略包括三种：主从同步控制设定主轴为基准，从轴跟踪其状态。该策略逻辑简单、成本低，但抗扰性差，主轴波

动会传导至所有从轴，适用于低精度场景。交叉耦合同步控制引入偏差补偿机制，不仅关注单轴误差，更实时计算并补偿轴间偏差。其同步精度高、抗干扰强，能有效应对负载波动，但算法复杂、对算力要求较高，适合中高端应用。电子虚拟轴同步控制构建理想虚拟轴作为公共基准，各实轴独立跟踪。该策略各轴互不干扰，单轴故障不影响全局，且参数调整灵活，抗扰性与稳定性极佳，但实现难度最大，专用于高端智能化设备。

2.3 控制策略的适配性分析

策略选择需契合设备定位与工艺需求。主从策略适用于中低端机型，满足普通纱线生产且成本可控，但难以应对复杂工况。交叉耦合策略是中高端机型的主流选择，其在精度、抗扰性与成本间取得平衡，能有效解决高端纱线生产中的张力波动与负载变化问题。电子虚拟轴策略则面向顶级智能装备，适用于特种纱线及对灵活性要求极高的场景，虽成本高但性能卓越。此外，实际工程中可采用混合策略，如“交叉耦合为主、主从为辅”或“虚拟轴结合交叉耦合”，以兼顾精度、稳定性与经济性，实现多轴控制效果的最优化。

3 多轴同步控制系统的设计与优化

3.1 系统整体设计框架

系统构建“感知 - 控制 - 驱动 - 执行”四层架构。感知层利用速度、位置及张力传感器，实时采集多轴运动状态与纱线张力，确保反馈数据的高精度与快响应。控制层以高性能 PLC 为核心，负责逻辑运算、策略执行及指令生成，实现同步协调、张力调节与故障诊断。驱动层由伺服驱动器组成，将控制指令转化为驱动信号，精准调节电机速度、位置与力矩。执行层包含伺服电机及机械机构，直接完成牵伸、导纱与卷绕动作。四层无缝衔接，保障多轴运动的精准协同。

3.2 核心硬件选型与适配

硬件选型遵循性能适配、兼容可靠原则。控制器选用高速运算、接口丰富的 PLC，中高端机型侧重多轴同步功能，中低端兼顾性价比。伺服系统需电机与驱动器匹配：卷绕轴选大扭矩电机以稳负载；导纱轴选高转速、高精度电机保平稳；牵伸轴选高稳定性电机控张力。传感器方面，速度用增量式编码器，位置用绝对式编码器防丢失，张力用高抗扰拉力传感器。此外，配置工业以太网通信模块与稳压电源，确保数据传输高效及供电稳定，避免硬件冲突。

3.3 系统软件设计与优化

软件架构含主程序、中断服务与功能子程序。主程序负责初始化与参数加载；中断服务处理数据采集、电机反馈及故障报警，确保实时响应；功能子程序涵盖同步控制、张力调节、工艺适配及故障诊断，通过偏差补偿算法实现精准同步，并动态调整速比以稳张力。

优化策略聚焦精度、速度与稳定性：一是优化交叉耦合等

控制算法，减小轴间偏差；二是改进张力调节逻辑，提升响应速率；三是引入软件滤波抑制干扰，提高数据准确性；四是精简程序结构，缩短运行周期。同时，增强软件容错能力与扩展性，支持轻微故障自愈及后续工艺升级，确保系统长期高效运行。

4 理论性案例分析

4.1 案例设计背景与需求

为验证多轴同步控制理论的可行性，设计两个纯理论推演案例：一是面向高端棉纱的中高端机型，聚焦三轴（牵伸、导纱、卷绕）在高负载波动下的同步精度与张力稳定；二是面向特种纱线（如芳纶、碳纤维）的高端智能机型，挑战四轴协同的极限精度、抗扰能力及多工艺自动适配性。

4.2 案例一：高端棉纱卷绕的多轴同步控制应用分析

针对高端棉纱对密度均匀与低断头率的需求，系统采用交叉耦合同步控制策略。硬件上，配置高性能 PLC 与高精度伺服系统，辅以多维传感器实时反馈。软件核心在于优化后的交叉耦合算法，实时计算并补偿轴间偏差，确保三轴动态一致；同时集成张力动态调节模块，通过速比微调维持张力恒定，并预设工艺参数库以适配不同规格棉纱。

理论推演结论：该方案通过偏差补偿机制，有效克服了传统主从控制的滞后性，显著提升了同步精度。在负载波动工况下，系统能快速响应并抑制张力震荡，理论上可实现纱线排列紧密平整、断头率大幅降低，完美契合高端棉纱精细化生产需求，兼具高稳定性与良好的工艺适应性。

4.3 案例二：特种纱线卷绕的多轴同步控制应用分析

面对特种纱线极高的线密度均匀性要求，系统构建基于电子虚拟轴与交叉耦合的混合控制策略。硬件升级为工业级 PLC 与四轴高稳伺服系统，依托工业以太网实现高速数据交互。软件层面，引入“虚拟基准轴”作为全局参考，各实轴独立跟踪虚拟轴以隔离干扰，同时辅以交叉耦合算法消除实轴间残差；新增智能化工艺适配模块，依据纱线特性自动匹配控制参数，并嵌入故障自诊断系统实现预测性维护。

理论推演结论：混合策略兼具虚拟轴的独立抗扰性与交叉耦合的高同步性，理论上能彻底解决多轴耦合干扰难题。系统不仅能应对复杂工况下的微小扰动，确保特种纱线零缺陷卷绕，还能通过智能模块实现“一键换产”，大幅提升设备通用性与运行可靠性，为特种纺织领域提供坚实的理论支撑与技术范式。

5 系统稳定性与控制精度提升路径

5.1 系统稳定性影响因素分析

系统稳定性受四大维度制约：硬件因素是核心，控制器算力不足、伺服响应迟滞、传感器抗扰性差或设备间兼容性缺失，

均会导致指令延迟、运动抖动甚至系统崩溃；软件因素是关键，控制算法缺陷、程序结构冗余或容错机制匮乏，易引发逻辑错误、运行卡顿及故障扩大化；外部环境是诱因，温湿度极端变化、电源波动及设备振动会直接干扰硬件性能与数据准确性；工艺适配是辅助，参数设置与纱线特性不匹配或调整滞后，将导致张力失控与同步失稳。

5.2 控制精度影响因素分析

控制精度取决于四重机制：同步策略是核心，主从策略精度有限，而交叉耦合与电子虚拟轴策略凭借偏差补偿与独立基准机制，能显著提升同步精度；硬件精度是基础，伺服电机的定位/转速精度、传感器的采集分辨率及控制器的输出准确度，直接决定运动参数的执行偏差；软件算法是关键，优化的同步补偿、张力动态调节及滤波算法能有效抑制误差与噪声；干扰因素是阻碍，电源谐波、电磁辐射、机械振动及环境波动会侵蚀信号质量，导致控制精度下降。

5.3 稳定性与控制精度提升路径

针对上述因素，提出四维提升路径：

硬件优化：选用高算力控制器、高响应伺服系统及高精度抗扰传感器；强化设备兼容性设计，实施定期校准与维护；优化安装布局与减震措施，从物理层面夯实稳定性基础。

软件优化：迭代交叉耦合与虚拟轴算法以提升同步精度；

参考文献：

- [1] 徐杰,刘旭峰. 多轴同步控制系统的转矩扰动研究[J]. 电子测量与仪器学报,2016,30(12):1967-1973.
- [2] 孙文慧. 基于 PLC 的多轴同步控制系统研究[J]. 水电站机电技术,2021,44(6):106-107,111.
- [3] 陈小娣. 提高自动络筒机效率的措施[J]. 纺织器材,2023,50(z1):40-43.
- [4] 车社海,王海霞. 自动络筒机的关键技术及发展趋势[J]. 纺织器材,2024,51(3):63-67.
- [5] 熊伟. 自动络筒机在线控制关键参数分析[J]. 纺织器材,2023,50(z1):37-39.

改进张力调节与数字滤波逻辑以增强抗扰性；重构程序架构消除死锁，并植入故障自诊断与自动恢复机制，提升系统鲁棒性。

环境控制：建立恒温恒湿运行环境，配置稳压电源与电磁屏蔽设施，加固设备基础以隔离振动，最大限度削减外部干扰。

工艺适配：构建多材质工艺参数数据库，实现参数精准匹配与快速调用；建立动态优化机制，依据生产反馈实时微调控制参数，确保系统始终处于最佳运行状态。

6 结论

本文基于多轴同步控制理论与纺织工艺原理，构建电子导纱络筒机多轴协同控制理论体系。研究表明，络筒机的牵伸、导纱与卷绕依赖多轴精准协同，当前存在同步精度低等瓶颈，需先进控制策略解决。核心理论包含同步控制、协同控制与伺服驱动。主从策略适用于中低端机型，交叉耦合策略是中高端主流，电子虚拟轴策略用于高端智能化设备，实际可采用混合策略互补。系统设计遵循“感知 - 控制 - 驱动 - 执行”架构，硬件强调性能适配与可靠性，软件通过模块化设计与算法优化实现多种功能。案例推演显示，交叉耦合策略满足高端棉纱三轴卷绕需求，虚拟轴与交叉耦合混合策略应对特种纱线四轴协同挑战，提升卷绕质量与工艺适应性。为提升稳定性与精度，提出四维路径：硬件升级、软件迭代、环境管控、工艺适配。本研究为电子导纱络筒机技术升级提供理论支撑与实践指南，推动纺织装备高精度、智能化发展。