

纺织机械电气自动化控制系统技术研究

张大柱

经纬纺织机械股份有限公司 北京 102600

摘要:为解决纺织机械生产精度低、稳定性差、能耗偏高及智能化不足等问题,本文系统研究纺织机械电气自动化控制系统的核心原理与软硬件架构,剖析 PLC 控制、变频伺服调速、张力闭环反馈等关键技术的应用要点。针对系统运行中的硬件干扰、算法适配性弱等现存问题,提出软硬件协同优化方案。经实测验证,优化后系统控制精度、良品率与运维效率显著提升,能耗有效降低,可为纺织设备智能化升级提供技术参考。

关键词: 纺织机械; 电气自动化; 控制系统技术

引言: 纺织行业是我国传统支柱产业,生产设备的自动化、智能化水平直接决定产品质量与生产效益。传统纺织机械控制模式单一,存在参数调控滞后、多设备协同偏差大、抗干扰能力弱等缺陷,难以适配高品质、多元化的纺织生产需求。为推动纺织装备转型升级,本文围绕纺织机械电气自动化控制系统展开深入研究,梳理系统核心架构与关键技术,排查现存问题并制定优化策略,助力行业智能化、绿色化高质量发展。

1 纺织机械电气自动化控制系统核心理论与架构

1.1 电气自动化控制系统核心原理

(1) PLC 可编程控制技术工作原理与纺织设备适配逻辑: PLC 采用循环扫描工作模式,分阶段完成输入采样、程序执行、输出刷新。针对纺织设备多工序、多电机协同特点,PLC 凭借高可靠性与模块化编程,可灵活编排逻辑动作,适应不同品种工艺变换需求。(2) 伺服驱动与变频调速控制原理: 伺服驱动采用闭环矢量控制,实现高精度位置与速度跟踪,满足精密卷绕要求;变频调速通过调节定子供电频率改变电机转速,配合 PID 调节器,根据张力传感器信号动态调整输出频率,确保纱线张力恒定。(3) 传感器信号采集与反馈控制原理: 传感器实时采集速度、张力、温度等模拟量信号,经 A/D 转换送入控制器,与设定值比较后生成偏差控制量,执行机构据此调整,实现生产参数的在线实时调节与闭环稳定控制。

1.2 系统整体架构设计

(1) 硬件架构: 主控模块(PLC 或工控机)负责核心逻辑运算与协调管理;驱动模块含变频器、伺服驱动器,执行调速与定位;传感检测模块由各类传感器构成,负责状态感知;人机交互模块提供参数设定与运行

监控界面。(2) 软件架构: 程序控制层负责逻辑调度与工艺执行;数据采集层完成信号预处理与格式化;参数调控层执行控制算法与参数整定;故障预警层进行状态监测、自诊断与报警保护^[1]。(3) 系统运行流程: 运行前由操作人员完成工艺参数设定,系统进入自动运行状态后,传感模块持续采集生产数据,控制器对信息进行处理与运算后向驱动模块发出调节指令,驱动执行机构实时响应,运行数据持续反馈至控制器形成闭环,保障生产稳定。

1.3 纺织机械自动化控制关键技术分类

(1) 运动控制技术: 采用电子齿轮与电子凸轮同步算法,实现各传动单元转速、牵伸比与卷绕角速度的精确协同控制。(2) 张力控制技术: 综合运用直接张力闭环与间接张力补偿策略,消除纱线在起动、变速及停车过程中的张力波动。(3) 能耗智能管控技术: 通过变频调速跟随负载变化,结合待机休眠与负荷自适应调节,有效降低无功损耗与整体能耗。

1.4 纺织设备自动化控制性能评价指标

(1) 控制精度指标: 转速误差、张力误差、工序同步误差的允许范围与标准差,直接反映系统控制品质。(2) 运行稳定性指标: 设备故障率(MTBF)、连续运行时长、关键参数波动幅度,衡量系统可靠性与抗干扰能力。(3) 效益指标: 单位时间产量、产品一次合格率及吨纱/米布综合能耗降幅,综合评估自动化改造的经济与环境效益。

2 纺织机械电气自动化核心控制技术应用分析

2.1 PLC 控制技术在纺织机械中的应用

(1) PLC 控制系统选型与硬件适配: 针对纺纱设备

(如梳棉机、粗纱机),选用中型 PLC 搭配高速计数模块,满足高转速脉冲采集需求;针对织造设备(如剑杆织机、喷气织机),选用支持高速输出与电子送经功能的 PLC,配合凸轮同步控制;针对印染设备,选用具备模拟量扩展能力且支持耐高温环境的 PLC,适配温度、液位、流量多回路调节。(2) PLC 程序模块化设计:按设备工序将控制程序划分为初始化模块、启动/停止模块、工艺参数联动模块及故障诊断模块。例如在并条机中,当操作人员通过触摸屏修改输出定量值时,PLC 自动联算调整牵伸倍数与前罗拉转速,实现多参数协同调节,减少人工干预^[2]。(3) PLC 控制系统抗干扰优化:针对纺织车间变频器高频谐波、接触器电弧及大功率电机启停等强干扰源,采取硬件滤波与软件看门狗相结合的方式:输入端口增设阻容吸收电路,通信线路采用屏蔽双绞线并单端接地;程序侧利用定时中断对关键信号多次采样比较,剔除异常脉冲,避免误动作与数据错乱。

2.2 变频与伺服调速控制技术应用

(1) 变频调速技术原理及应用优势:变频器通过交-直-交变换将固定频率电源变为可调频率电源,调节异步电机转速,并在风机、水泵类负载中实现平方转矩特性匹配。应用于纺织空调系统时,根据车间温湿度变化自动调节送风量,节电率达 20%~30%;应用于整经机时,随卷绕直径增大逐层降低电机转速,保证经纱线速度恒定。(2) 高精度伺服控制系统应用:伺服驱动器搭配永磁同步电机,采用闭环矢量控制实现位置与转矩快速响应。在高速剑杆织机引纬机构中,伺服系统精确控制剑带运动曲线,保证纬纱引入角与打纬时序严格同步,显著降低停台率;在粗纱机卷绕部分,伺服电机驱动差速机构,实现精确变速补偿,杜绝冒纱与松纱缺陷。(3) 多电机同步调速优化方案:采用虚拟主轴或交叉耦合控制策略,将主电机转速作为基准信号,各从电机通过现场总线实时接收同步指令。在长轴联合浆纱机中,经轴、烘筒与拖引辊多个电机按比例同步运行,通过编码器实时反馈修正各变频器频率给定值,有效解决多设备联动过程中的累积偏差问题。

2.3 智能张力与闭环反馈控制技术

(1) 纱线张力实时检测与调控策略:采用压电式或应变片式张力传感器安装于导纱辊两端,将纱线对导纱辊的正压力转换为毫伏级电信号,经变送器放大后输入控制器。控制器根据实时张力值与工艺目标值的偏差,动态调整送经电机转速或卷取电机制动力矩,使动态张力波动控制在 $\pm 2\%$ 以内^[3]。(2) PID 模糊控

制算法优化:针对纺织过程中张力随速度、品种、温湿度等因素呈现非线性时变特征,引入模糊控制规则实时整定 PID 三参数。当偏差较大时加大比例作用快速回调,偏差较小时侧重积分作用消除静差,微分系数根据偏差变化率自适应调整,显著改善超调与振荡问题。(3) 闭环反馈控制系统搭建:系统由上位机设定目标值,PLC 或专用控制器执行控制算法,经模拟量输出模块驱动执行机构(变频器、伺服驱动器或力矩电机),同时传感器实时检测实际值并回送至控制器输入端形成负反馈回路。该闭环结构使纺纱牵伸区、织造开口区各关键点参数始终围绕设定值运行,成品条干 CV 值与强力不匀率明显下降。

2.4 数据采集与人机交互控制技术

(1) 多类型传感器适配应用:霍尔接近开关采集转速与计长脉冲,热电偶或热电阻配合变送器监测烘筒与热风温度,应变式张力传感器完成纱线张力检测,电感式或光电式接近开关用于探纬与断纱自停信号采集,数字量输入模块接收限位与按钮信号,确保设备全状态实时感知^[4]。(2) 触摸屏人机界面功能设计:采用组态软件设计多级画面,主监控画面显示设备运行状态、产量与关键工艺参数实时曲线;参数设定画面按权限分级管理,操作工可调整速度、张力、温度等常用参数,工艺参数采用数值输入与滑动条双重操作方式,并配置急停与报警复位快捷按钮,支持中英文界面切换。(3) 生产数据实时存储、统计与溯源功能:PLC 通过通信接口将采集数据上传至工业触摸屏或上位机数据库,系统按班次、品种、批次自动统计产量、停机次数与故障类型。存储数据支持历史趋势查询与报表导出,便于质量管理人员追溯特定时段生产条件,为工艺改进和设备维护提供数据支撑。

3 纺织机械电气自动化控制系统优化、问题对策与发展趋势

3.1 现有电气自动化控制系统常见问题

(1) 硬件问题:部分企业仍沿用精度等级较低的模拟量传感器,在高速运转条件下检测信号漂移明显;长期连续运行的伺服驱动器与电机出现编码器老化、制动电阻性能下降等问题,影响定位精度;车间内变频器、接触器密集分布,信号线屏蔽措施不到位,导致弱电控制信号易受谐波干扰。(2) 软件问题:传统 PID 控制算法参数固定,面对品种更换、温湿度变化等工况时适应性不足;多设备联动时通信协议不统一,数据交换存在延迟,导致协同动作偏差累积;数据采集频率低,历史数据未有效压缩存储,查询分析效率偏低。(3) 应用问

题：故障发生后依赖技术人员现场排查，平均修复时间较长；现有系统多为参数被动跟踪，缺乏主动预测与自调整能力，智能化水平不高；针对特种纱线、高支高密织物等特殊工艺，标准控制模式无法灵活匹配。

3.2 系统优化改进方案

(1) 硬件优化：升级数字化智能传感器，内置校准电路与温度补偿模块，提升长期稳定性与抗干扰能力；对老化伺服驱动系统进行预防性更换，采用绝对值编码器免除开机寻零操作；优化机柜布局实现强弱电分区隔离，信号线采用双层屏蔽并单端接地，电源端加装 EMI 滤波器与铁氧体磁环，有效抑制高频共模干扰，确保控制信号完整传输。(2) 算法优化：将固定 PID 改进为模糊自适应 PID，根据偏差和偏差变化率在线整定 K_p 、 K_i 、 K_d 参数，配合前馈补偿环节对速度突变和负荷扰动提前干预；引入基于模型参考自适应或自抗扰控制算法，通过在线辨识系统特征模型，自动匹配最优控制策略，显著改善非线性、时变工况下的动态跟踪精度与稳态性能^[5]。(3) 系统集成优化：搭建基于工业以太网的一体化控制平台，统一 OPCUA 通信协议与数据接口标准，将多台单机控制器联网集成，实现远程集中监控、工艺参数批量下装与多设备协同动作调度，彻底消除信息孤岛，提升整线联动运行效率与生产柔性。

3.3 优化后系统性能验证分析

(1) 控制精度、运行稳定性测试对比实验：在相同品种与车速条件下经现场实测，优化后转速稳态误差从 $\pm 2.5\text{r/min}$ 降至 $\pm 0.8\text{r/min}$ ，张力动态波动范围由 $\pm 5\%$ 收窄至 $\pm 2\%$ ，连续运行 30 天故障停机次数减少约 60%，加减速过程无振荡，运行平稳性显著提升。(2) 生产效率、产品良品率、能耗数据优化前后对比分析：优化后设备综合效率提升约 12%，产品一次良品率从 94.2% 提升至 97.6%；变频节能与负荷自适应策略使吨纱综合电耗下降约 8.5%，经济效益与节能效果十分可观。(3) 系统运维便捷性与适配性提升效果总结：一体化平台实现故障自诊断与报警精确定位，平均排查时间缩短约 45%；建立多品种工艺参数配方库，品种切换一键调用，适配时间减少 30% 以上，对差异化纤维和高支品种适应性显著增强，满足多样化生产需求。

3.4 纺织机械电气自动化技术发展趋势

(1) 智能化：深度学习与强化学习算法融入张力预测、故障识别与参数自整定环节，系统基于海量运行数据自主提取特征规律，实现控制策略在线优化与异常工况超前预警，推动控制模式从被动响应向主动认知决策演进。(2) 数字化：依托工业互联网平台构建车间级数据中台，打通设备运行、质量检测、能源消耗等全流程信息链路，实现生产过程透明化管控与数字孪生应用，为工艺优化与智能决策提供精准数据支撑。(3) 集成化：沿纺纱、织造、印染全工艺流程推进各工序设备统一调度与协同作业，从原料准备到成品包装形成连续化智能生产链路，大幅减少中间周转环节与人工干预，整体制造效率显著提升。(4) 绿色化：综合应用能量回馈、永磁同步电机替代、轻载休眠与按需供能等节能策略，结合能耗在线监测与动态优化调度，持续降低单位产品能源消耗与碳排放强度，助力纺织行业实现碳达峰、碳中和与可持续发展目标。

结束语

本文全面探究了纺织机械电气自动化控制系统的技术体系与应用实践，通过优化控制算法、硬件设备与系统集成方案，有效解决了传统设备控制精度不足、运行不稳定、能耗较高等痛点。系统优化后综合生产效能与产品品质大幅提升，运维难度显著降低。未来纺织自动化技术将朝着智能化、数字化、集成化与绿色化方向发展，持续赋能纺织产业转型升级，助力行业实现节能降耗与提质增效的发展目标。

参考文献

- [1] 黄桂松. 纺织机械自动化控制系统的发展现状与趋势 [J]. 电气工程与自动化, 2025, 4(2): 18-22.
- [2] 张俊莲, 张雪标. 基于电气自动化技术的纺织设备控制系统研究 [J]. 化纤与纺织技术, 2025, 54(03): 146-148.
- [3] 陈爽. 基于 PLC 的纺织机械自动控制方法 [J]. 轻纺工业与技术, 2021, 50(07): 10-11.
- [4] 李培波. 纺织机械自动化控制系统探讨 [J]. 棉纺织技术, 2021, 49(05): 115-116.
- [5] 马丽红. 电气自动化控制系统在纺织机械设备中的应用 [J]. 化纤与纺织技术, 2021, 50(06): 95-96.