

节能降排型智能热风拉幅定型机 总体设计及关键技术分析

李家全

(山东泰达仁信机械装备有限公司, 山东 德州 253000)

摘 要 本文对节能降排型智能化热风拉幅定型机总体设计及关键技术进行系统论述。在总体设计层面上, 确定以高能效和低排放为主线的设计目标和原则, 搭建集成化智能系统架构。关键节能技术主要集中在烘房结构及高效保温、智能多温区精准供热、废气余热深度回收及梯级利用三个主要方向, 在结构、控制、能源管理维度上达到节能降耗的目的。在模块实现部分提出一种基于数字孪生的工艺参数自适应优化系统, 通过虚拟映射和实时反馈增强工艺精度和稳定性; 同时, 设计多级余热回收和能源梯级利用系统, 以最大限度地提高热能利用率。研究表明, 将以上技术和模块有机地结合在一起, 可以显著减少智能定型机单位产品能耗和废气排放, 从而为纺织印染行业的发展提供一套高效和智能的系统、装备解决方案, 促进产业的可持续发展。

关键词 节能降排型智能热风; 拉幅定型机; 烘房结构; 智能多温区; 废气余热深度回收

中图分类号: TS193.3

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.26.027

0 引言

热风拉幅定型作为纺织品后整理过程中的关键步骤, 能耗大、废气排放量多等问题始终困扰着印染行业绿色发展。在“双碳”战略不断深入发展的背景下, 开发具有高效生产和节能环保双重特点的智能装备已成为业界的迫切要求。传统定型机一般存在热能利用效率不高、温控精度不到位、余热浪费等诸多问题, 很难适应现阶段节能减排和智能化升级发展的需要^[1]。为此, 本文系统阐述一种节能降排型智能热风拉幅定型机的创新设计, 涉及从整机系统架构顶层设计到烘房保温、精准供热、余热回收等核心节能技术突破, 进一步探索基于数字孪生智能优化和多级能源梯级利用的先进模块实现方式, 旨在通过技术集成和系统创新为新一代智能绿色定型装备的研发提供理论依据和技术参考, 助推印染行业降本增效和低碳转型。

1 节能降排型智能热风拉幅定型机总体设计

1.1 设计目标与原则

设计节能降排型智能热风拉幅定型机, 其主要目的就是达到高能效和低排放协同最优, 以此为基础进行集成智能化控制, 增强工艺精度和生产稳定性。在设计中遵循系统性、经济性、前瞻性三个原则^[2]。系统性原则强调把装置看作是能源输入、转换、使用、回收、排放的有机整体, 并在全局上对热能流动路径

进行优化, 而不是对单一部件进行孤立的改善, 确保各子系统(供热、循环、排废、回收等)之间的高效耦合与协同运行。经济性原则需要综合考虑设备制造成本、运行维护费用、投资回报周期等因素, 在保证高性能的条件下优选出具有较高性价比的物料和技术方案, 如使用效率较高但造价适中的复合保温材料等, 使其在长时间运行过程中达到最佳节能和经济效益。前瞻性原则强调, 在设计过程中应充分考虑到未来智能制造和绿色制造的发展方向, 预留设备的数据接口和功能扩展空间, 以支持与工厂级能源管理系统(EMS)或制造执行系统(MES)的无缝对接, 并兼容未来可能的清洁能源(生物质能、绿电供热等)接入方案, 确保设备的技术生命周期与行业升级步伐相匹配^[3]。

1.2 整机系统架构

智能热风拉幅定型机整机系统架构设计为分层分布式, 包括物理设备层、智能控制层、云端/厂级管理层三层组成, “感知—分析—决策—执行”闭环。所述物理设备层为执行主体, 由进布及对中装置, 若干独立可控智能温区烘房、链条、针板拉幅机构、循环风机、高效换热器等组成、废气收集及多级净化—回收系统和出布冷却装置^[4]。每一个关键部件都整合高精度传感器如分布式热电偶、红外测温仪、风压风速传感器、废气成分和流量传感器, 组成一个全方位

作者简介: 李家全(1969-), 男, 专科, 工程师, 研究方向: 经济管理。

数据感知网络。智能控制层构成这一架构的核心部分，由高速可编程逻辑控制器（PLC）或工业计算机（IPC）作为主要控制单元，负责实时接收物理层的数据，并执行先进的控制算法。这一层具体由多个关键模块组成：多温区独立闭环控制温控模块在“比例—积分—微分”（PID）或者更高级别的前馈—反馈算法的基础上实现各烘房分区温度毫秒级的精准调节；风量风压平衡控制模块保证烘箱内部气流场的均匀和平稳，避免出现局部温度过高或者风量不足的情况。云端 / 厂级管理层再通过工业以太网或者 5G 等通信方式接入智能控制层，对数据进行远程监控、存储、深度分析。在这个层次上，部署基于数字孪生技术的高级优化工具，进行能源效率的分析和优化建议，并与企业资源计划（ERP）系统进行集成，从而实现订单和生产计划的智能排程。

2 节能降排型智能热风拉幅定型机关键节能技术

2.1 烘房结构与高效保温技术

烘房是热风拉幅定型机中最核心的耗能单元之一，烘房结构设计和保温性能的好坏直接决定着热能损失程度。节能降排型的设计是先优化烘房结构，利用模块化和分段式的设计思想将长烘房分割成若干相互独立密闭腔室（温区），在相邻腔室间布置迷宫式密封或者气幕密封等高效热隔离装置，来防止高温区的热量无序地向低温区或者外部传播，为随后多温区精准控制提供条件。在保温技术上，摒弃传统保温棉的单一填充方式，而采用复合高效保温体系。烘房壁板是一种“三明治”式结构：内外层是强度高、耐腐蚀彩钢板、不锈钢板，中间层充填既有低导热系数，又有高热稳定性新型纳米微孔硅酸钙或者气凝胶复合材料。这类材料具有极低的导热系数（可低于 $0.020 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ），能显著减少壁板的传导热损失。同时，在烘房门、观察窗、穿布缝隙这几个重点热泄漏点上，设计并使用多层高温硅胶密封条和陶瓷纤维绳进行密封，并设置自动压紧机构以保证装置工作过程中可靠的动态密封^[5]。

2.2 智能多温区精准供热技术

传统的定型机往往是集中供热，分区域进行粗略调节，造成温度控制响应缓慢、超调量较大、各区温度不均匀等问题，容易造成能源浪费及织物品质的波动。智能多温区精准供热技术的目的就是解决这一难题。本技术在烘房每个独立温区都配置一组独立，反应迅速的加热和循环单元。供热源一般为高效天然气直燃加热器、导热油间接换热管、电加热器等，各热源均装有高精度比例调节阀或者调功器以接收中央控制器发出的命令。核心在于智能温控算法，系统不仅采集每个温区出风口的温度作为主反馈，还通过布置在烘房内多点（尤其是靠近织物处）的温度传感器获

取温度场分布信息，构成多变量输入。控制器采用模糊 PID、模型预测控制（MPC）等先进算法，能够根据织物种类、克重、含水率、实时车速（由编码器反馈）的变化，前馈补偿热量需求，并快速抑制因进出布、门开启等扰动引起的温度波动，实现各温区设定温度的快速、精确（控温精度可达 $\pm 1^\circ\text{C}$ ）与稳定跟踪^[6]。

2.3 废气余热深度回收与梯级利用技术

定型机排出的废气温度高（通常可达 $140^\circ\text{C} \sim 180^\circ\text{C}$ ）、湿度大，且含有纤维屑、油剂及少量 VOCs，直接排放不仅是巨大的热能浪费，也加重环境热污染和尾气处理负荷。废气余热的深度回收和梯级利用技术，是装置达到“降排”效果的关键环节。该技术对废气进行高效净化预处理，通常采用多级过滤（旋风分离、袋式过滤等）去除大部分颗粒物和纤维尘，为后续的换热回收创造清洁条件。深度回收其核心是使用高效的气—气或气—液换热器。针对高温高湿废气的特性，优先选用耐腐蚀、防结垢、传热效率高的换热器类型，如全热交换器（可以实现显热与潜热的同步回收）、不锈钢板式换热器或热管换热器。通过换热把废气的热转移到新鲜空气（补风）或者工艺用水。梯级利用则体现系统思维的节能策略：首先，将回收的最高品位热量（最高温区的尾气）用于预热进入高温烘房的新鲜补风，这是最直接高效的利用方式；其次，利用中温品位余热预热进中低温烘房补风或加热过程洗涤用水；最后，对经多级回收还剩余温度的废气或者冷却水低品位热量，可以考虑在车间供暖或者预热锅炉给水时使用。整个余热回收系统集成了智能控制，依据烘房排风温度、补风需求及换热器两侧温差，对废气引风机及补风送风机频率进行动态调整，及换热旁通阀开度最大限度地提高回收效率，同时确保烘房内负压平稳，不会影响过程排湿。经过研究发现，一个精心设计的深度余热回收系统能够从废气中回收热能的 50% ~ 70%，从而使整个设备的能源消耗减少 15% ~ 25%，同时大幅降低废气排烟温度，减少后续尾气处理（热力氧化）的能耗负荷，实现节能与降排的双重效益^[7]。

3 节能降排型智能热风拉幅定型机模块实现

3.1 基于数字孪生的工艺参数自适应优化

为使工艺参数由“精确控制”向“智能优化”飞跃，该设计介绍一种基于数字孪生工艺参数自适应优化模块的方法。数字孪生作为虚拟空间内物理设备全生命周期的动态镜像，融合设备几何模型、物理特性、控制逻辑、实时运行数据等信息。在这个模块里，建立热风拉幅定型机的高保真多物理场仿真模型，该模型是通过有限元分析（FEA）和计算流体动力学（CFD）

方法来实现的,准确地描述烘房内部温度场、气流场的分布规律以及它们与织物传热传质之间的相互影响^[8]。该仿真模型与物理实体通过物联网平台保持实时数据同步,物理实体上的传感器数据(温度、风速、张力、能耗)持续驱动和校准虚拟模型,使其状态与真实世界保持一致。在此基础上,嵌入智能优化算法(遗传算法、粒子群算法、深度学习模型等)。当生产任务下达(规定织物的品种、幅宽、目标克重、手感要求等),优化算法在数字孪生体中进行海量的虚拟工艺试验。它能够以能耗最低、品质指标最优(缩水率、纬斜、手感评分等)或综合成本最低为目标函数,自动寻优出一组最佳的工艺参数组合,包括每个温区的设定温度、机器的运行车速、超喂率、循环风量。该优化方案是通过手动确认或者直接下发给物理设备控制系统实施。在执行过程中,数字孪生体持续比对预测结果与实际生产数据(由在线质量检测设备进行反馈),并利用机器学习技术不断修正和完善其内部模型,实现自我进化^[9]。

3.2 多级余热回收与能源梯级利用系统

作为关键节能技术在具体项目中的实施,多级余热回收及能源梯级利用系统属于高度集成化物理模块。系统将多类型换热设备串联或者并联设置于硬件中,构成逻辑严密的余热回收“流水线”。典型的配置可能包括:第一级,在高温废气出口紧邻处安装高效气-气板式换热器(或热管换热器),采用最高温废气对送入高温烘房新鲜补风进行预热,是最高效回收环节。第二次,经第一层次换热降温的尾气进入一喷淋式气-液换热器或者热泵驱动升级回收装置进一步抽取其中温热量,以对过程热水箱或者清洗液进行加热,热泵在这里可以起到“热量搬运工”作用,把低品位热提升到可以利用的中温。第三级,对最终排出的低温废气(气温已下降到露点左右),可采用冷凝式换热器、回收其冷凝潜热,同时冷凝下来的水分和部分油剂也便于集中处理。另外,烘房循环热风系统自身得到优化,对一些气温比较高但还可以直接使用的内部循环风做合理的重新配置,以减少新鲜热风补充。在控制系统中,模块安装有独立能源管理控制器并与主机控制系统进行通信。它对每个换热节点前、后的温度、压力、流量等参数进行实时监控,并计算出实时回收热量及系统总能效。控制器根据主机运行状态(车速、各个温区的温度设置等)、室外新风温度、热水需求等,动态调整各换热器旁通阀、风机频率及泵启停智能决策出最佳热量分配及回收路径同时满足工艺要求,避免回收环节间互相干扰或者因“回收过度”而增加风机能耗^[10]。

4 结束语

本文以节能降耗型热风拉幅智能定型机为研究对象,对其总体设计、关键技术、具体模块的实现等方面作较为全面的探讨。通过高效保温结构、智能多温区控制、废气余热深度回收核心技术的应用,从根源上提高装置热能利用效率和工艺适应性。进一步引入数字孪生技术自适应优化工艺参数,将多级余热回收和梯级利用系统相结合,建立智能控制至能源闭环管理一体化节能系统。结果表明,该设计不但显著减少了装置运行时的能耗和热污染排放,而且以智能化的方式增强了生产稳定性和产品品质。

参考文献:

- [1] 周振环.拉幅定型机电气控制系统改进方案简介[J].国际纺织导报,2023,51(06):16-19.
- [2] 李智,梁芳,栗岱欣,等.拉幅定型机主体结构的演变及扩展应用[J].染整技术,2023,45(12):36-40.
- [3] 凡雄波.医用纱布拉幅定型机浆边装置的浆料输送结构:CN202320663515.4[P].仙桃市佳凌医用材料用品有限公司,2023-07-18.
- [4] 李凡.拉幅定型机出布区造型设计与研究[D].天津:天津工业大学,2023.
- [5] 盖佳,梁莉萍.远信工业:拉幅定型机技术创新跑出“加速度”[J].中国纺织,2022(Z4):30-31.
- [6] 潘永高,陈露军,王新江,等.节能型数控热风拉幅定型机[EB/OL].浙江永利通印染机械有限公司,2022-06-16. https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=MXvIvFkaDQyi8S-iOCGnkbH5m-oQ7jicqAaWEo1Uw2xxiYVnbXp9th9oR_kii6Rd6o98KGceJtlw_scfaAqyc6iu3Vg1QWgtwXhZLLUSInUY21BtJNf291Mj1rkKYwa2XxBiqSUg_9AAIbFQvc8moT4WC4d91GO0X9SsjKQEberkTfTnfC2PT-HQ==&uniplatform=NZKPT&language=CHS.
- [7] 司朝兵.拉幅定型机保温板热性能 Creo Simulste 仿真分析[J].染整技术,2022,44(02):25-28.
- [8] 刘化杰.纤维纱的拉幅定型机[DB/OL].安徽双盈纺织有限公司,2022-12-14. https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=hmNf6PfbABsq2yJQPh0XNPGvP2pfBSB0Rc7WjsB6yCd0CPizFNf6wsr6qXyHjXBam20wbLdE46eY_eJQC5tjI1fM3hY7ghDAtpg6Dj9e6S7ITodBOt5Haq6-j63thOCQSmpb6HDy_HqbNeC6yIciu2e_cNUaJ92aSwouZY3Tup_GDpixc3ycNw==&uniplatform=NZKPT&language=CHS.
- [9] 王传伟.热风拉幅定型机控制系统软件及上位机程序设计[D].广州:广东工业大学,2020.
- [10] 黄建平.热风拉幅定型机电气系统及控制策略设计[D].广州:广东工业大学,2020.