

卷烟智能工厂建设体系架构与关键技术分析

丁男哲¹, 蒋一翔¹, 王文娟¹, 吕依颖², 张茂林²

1. 浙江中烟工业有限责任公司宁波卷烟厂, 浙江省宁波市奉化区葭浦西路 2001 号 315040

2. 浙江大学机械工程学院, 杭州市西湖区余杭塘路 866 号 310058

摘要: 卷烟智能工厂建设是推动卷烟行业高质量发展的重要举措。为解决当前卷烟智能工厂建设多以局部点状应用为主、缺乏系统化技术架构与演进路径的问题, 在梳理行业与国家智能制造标准以及卷烟制造相关文献研究的基础上, 从“技术-业务-价值协同”视角构建了卷烟智能工厂建设体系架构, 该架构一是提出了以工厂数字化、生产智能化和管理精益化为核心的发展内涵, 二是构建了涵盖感知与执行层、互联层、数据治理层和业务应用层的卷烟智能工厂技术架构, 三是提出了由智能生产单元、智能车间到智能工厂的三阶段渐进式发展路径。此外, 重点分析了面向卷烟制造企业特色业务的多源数据协同的管控一体化、人工智能赋能卷烟工艺优化与卷烟设备智能运维等关键技术。研究表明, 所提出的体系架构可实现从局部优化到系统集成再到整体智能的演进逻辑, 为卷烟智能工厂由单点智能化向系统集成和整体智能化演进提供了理论框架与技术参考。

关键词: 卷烟; 智能工厂; 技术体系; 发展路径

中图分类号: F407.4;TS4 文献标志码: A 文章编号:

Analysis of the construction architecture and key technologies of intelligent cigarette factories

Ding Nanzhe¹, Jiang Yixiang¹, Wang Wenjuan¹, Lv Yiyi², Zhang Maolin²

1. Ningbo Cigarette Factory, China Tobacco Zhejiang Industrial Co., Ltd., Ningbo 315040, Zhejiang, China

2. School of Mechanical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China

Abstract: The construction of intelligent cigarette factories is a crucial initiative to advance the high-quality development of the cigarette industry. To address the current issue that cigarette smart factory construction is mainly focused on local dot-point applications and lacks a systematic technical architecture and evolution path, based on reviewing industry and national intelligent manufacturing standards and literature related to cigarette manufacturing, a system architecture for cigarette intelligent factory construction was constructed from the perspective of "technology and business, value synergy". First, the development connotation of smart cigarette factories was defined with factory digitalization, production

基金项目: 浙江中烟工业有限责任公司科技项目“卷烟生产未来工厂数字化转型建设指南研究”(ZJZY2023F004)。

第一作者: 丁男哲(1991—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事卷烟工厂智能制造建设相关研究。E-mail:

dingnanzhe@zjtobacco.com

引用本文: 丁男哲, 蒋一翔, 王文娟, 等. 卷烟智能工厂建设体系架构与关键技术分析[J].烟草科技.DOI:

10.16135/j.issn1002-0861.2025.0738. (Ding Nanzhe, Jiang Yixiang, Wang Wenjuan, et al. Analysis of the construction architecture and key technologies of intelligent cigarette factories[J].Tobacco Science & Technology. DOI:

10.16135/j.issn1002-0861.2025.0738)

intelligence, and lean management as its core dimensions; Second, a technical architecture for cigarette intelligent factories comprising the perception and execution layer, interconnection layer, data governance layer, and business application layer was established. Third, a three-stage progressive development pathway from intelligent production units to intelligent workshops and ultimately to smart factories was proposed. In addition, key technologies tailored to the specific business requirements of cigarette manufacturing enterprises were analyzed, including integrated production management and control based on multi-source data collaboration, artificial intelligence-enabled cigarette manufacturing process optimization, and intelligent operation and maintenance of cigarette manufacturing equipment. The results indicate that the proposed architecture can realize an evolutionary process from local optimization to system integration and ultimately to holistic intelligence, providing a theoretical framework and technical reference for the transformation of smart cigarette factories from single-point intelligent applications toward system integration and factory-wide intelligence.

Keywords: Cigarette; Intelligent factory; Technical architecture; Development pathway

为了推动制造业不断向数字化、网络化与智能化方向发展,我国“十四五”规划将智能制造作为主攻方向。智能工厂作为智能制造的重要载体,通过整合业务、数据、技术和系统架构,为提升产业竞争力提供了关键路径^[1-3]。卷烟智能工厂不仅是烟草行业推进新型工业化的重要举措,也是人工智能等新一代信息技术与卷烟制造深度融合的必然趋势,对于提升行业整体竞争力和实现高质量发展具有深远意义。

近年来,部分卷烟厂开展了基于信息物理系统(Cyber Physical System, CPS)等技术的试点探索^[4],在自动化生产、智能设备、智能化管理等方面形成了一定的技术积累,并在局部领域已达到较高的智能化水平。在YC/T 625—2025^[5]等行业标准制定与颁布后,卷烟智能工厂建设在行业范围内有了明确的路径指引。然而,从标准要求向企业具体建设方案转化的过程中,还需要进一步回答不同建设内容(如智能装备、数字基础设施)之间如何形成技术支撑关系、局部智能化应用如何逐步演进为车间及工厂级系统智能,以及人工智能、数字孪生等技术如何与卷烟生产管控、工艺优化等特色业务相结合。按照国家标准评估^[6-7],大部分卷烟厂处于规范与集成级之间,个别域达到优化级,表明卷烟智能工厂建设总体仍处于探索阶段,且当前实践多以局部应用为主,尚未实现全流程系统化集成。因此,本研究中通过系统梳理行业与国家智能制造标准以及卷烟制造相关文献研究,进一步探索了卷烟智能工厂的发展内涵,研究构建承载其核心内涵的技术架构,规划发展路径并提出了针对卷烟制造特色业务的关键技术,与YC/T 625—2025更侧重建设目标与基本要求不同,本研究从“技术-业务-价值协同”视角,重点研究了各建设要素之间如何形成技术支撑关系、如何由局部智能逐步演进至整体智能,以及如何通过关键技术实现卷烟制造业务价值。该研究可为卷烟智能工厂建设要求向系统化技术方案和场景化实施路径转化提供理论框架与技术参考。

1 卷烟智能工厂研究现状

近年来，国家围绕智能制造陆续出台了一系列标准规范，从整体架构、能力成熟度评估到关键技术要素给出了系统性要求。烟草行业同样制定了多项标准，涵盖生产过程管理、质量与风险控制、环境保障以及生产水平综合评价等内容，具体内容如表 1 所示。其中，YC/T 625—2025^[5]作为最新行业标准，明确了卷烟智能工厂的建设目标、原则和分层架构，为卷烟智能工厂建设提供了政策引导和方法支持。

表 1 智能制造标准与卷烟行业标准

Tab. 1 National intelligent manufacturing standards and cigarette industry standards		
来源		主要内容
国家 标准	GB/T 39117—2020 ^[6]	规定基于人员、技术、资源和制造等四要素的评估框架，五级成熟度等级判定和标准化流程
	GB/T 39116—2020 ^[7]	提出智能制造发展的 5 个等级、4 个要素、20 个能力子域以及 1 套评估方法
	GB/T43064.1—2023 ^[8] 、 GB/T 43064.2—2024 ^[9]	规定物理工厂智能化系统的架构、配置要求及关键技术要素，虚拟工厂的基本 要求、模型构建及应用功能等
	YC/T 625—2025 ^[5]	规定卷烟智能工厂的建设目标与原则、规划与设计、智能装备与设施、数字 基础设施、数据资源、生产制造及运营、网信安全等内容及要求
行业 标准	YC/T 581—2019 ^[10]	指导烟草行业数据中心数据模型设计的技术性规范，规定了数据建模的方 法、流程及标准，旨在形成统一通用的数据模型以支撑行业数据共享和应用
	YC/T 494—2014 ^[11]	通过明确网络分区、访问控制、数据加密等技术要求，保障烟草企业生产网 与管理网互联的信息安全和生产连续性
	YC_T 493.2-2014 ^[12]	明确了企业服务总线的体系架构、功能及开发要求，为烟草企业不同应用系 统间的服务交互与数据共享提供标准化技术支撑

除了相关标准文件对卷烟智能工厂建设进行规划与指导，学术界也围绕卷烟制造的智能化转型展开探索。通过在知网与 Scopus 平台以“卷烟”“制造”“cigarette”“tobacco”“manufacturing”等为检索词，对近 5 年的相关研究进行系统梳理，剔除非期刊来源及与生产制造无直接关联的（如医学、化学、教育学、公共安全、税收和传统工艺等）研究后，最终筛选出 534 篇中文文献和 303 篇英文文献，研究关键词概况如图 1 和图 2 所示。可知，研究热点集中于深度学习、机器视觉、物联网、大数据分析和数字孪生等关键共性技术。这些技术正成为推动卷烟制造智能化的重要支撑，为卷烟智能工厂建设奠定了技术基础。与此同时，部分企业针对上述技术开展应用试点，形成若干可复制的局部应用场景。

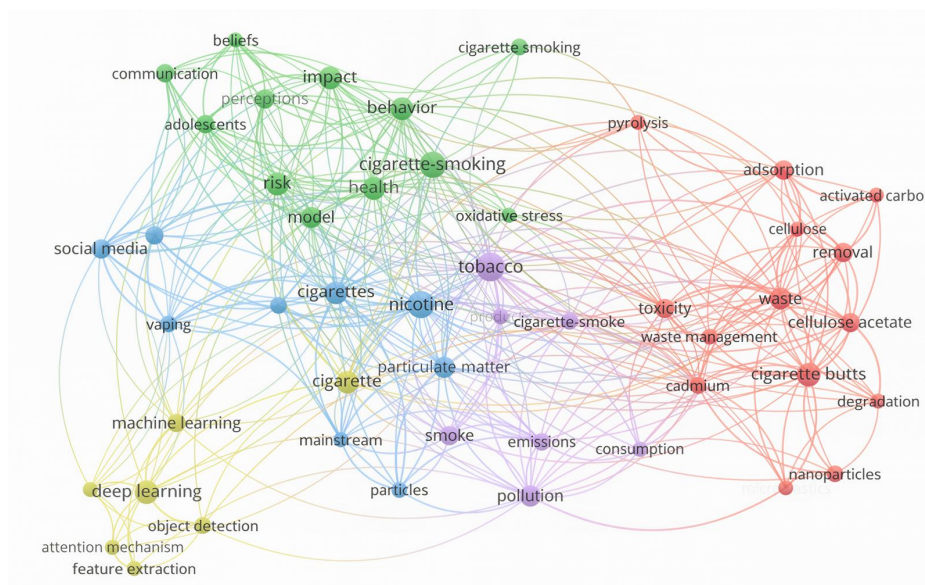


图 1 卷烟制造英文关键词共现图

Fig. 1 Co-occurrence map of English keywords in cigarette manufacturing

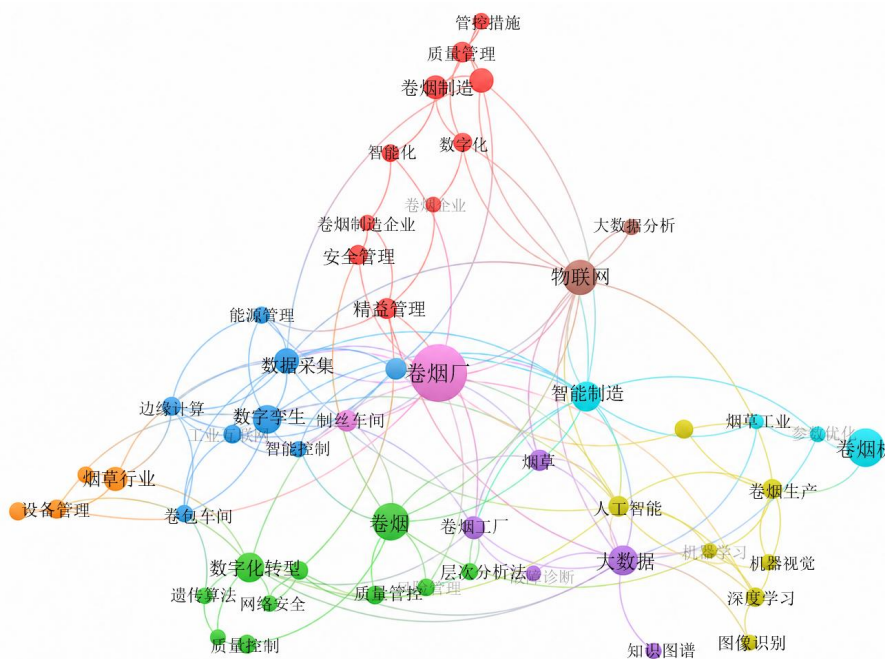


图 2 卷烟制造中文关键词共现图

Fig. 2 Co-occurrence map of Chinese keywords in cigarette manufacturing

我国烟草工业先后经历了设备自动化、信息化系统应用与集成、信息化与工业化深度融合等多个阶段，已基本实现生产自动化、信息化，使得智能技术的应用与推广具备了良好基础。但整体来看，智能技术应用仍呈现出点状分布与局部优化的特征，尚未形成覆盖全流程的系统化能力。不同企业在建设目标、技术选型与实施节奏上的差异，导致行业整体水平参差不齐、资源投入分散、价值闭环不完整，难以实现由“项目成果”向“体系能力”的跨越。

综上，卷烟智能工厂建设不仅需要明确各类建设内容，还需要进一步厘清技术要素、业务应用与价值目标之间的关联关系，揭示智能化建设由局部应用向系统集成和整体智能演进的过程。因此，如何基于国家与行业标准提供的宏观指引，从技术支撑、业务融合与价值实现相结合的角度，将前沿技术与卷烟制造企业特色业务深度融合，系统构建智能工厂的建设框架，成为卷烟制造企业进行智能化转型过程中的核心问题。

2. 卷烟智能工厂建设体系架构

本研究提出卷烟智能工厂建设体系架构：以“工厂数字化、生产智能化、管理精益化”为发展内涵，设计涵盖“感知与执行层、互联层、数据治理层、业务应用层”的技术架构，并在此基础上提出“智能生产单元、智能车间、智能工厂”的发展路径，是对智能工厂建设目标、技术实现方式、阶段演进规律及重点突破方向的总体描述，旨在为卷烟智能工厂建设的系统化推进提供理论依据与实践指引。

2.1 卷烟智能工厂发展内涵

卷烟智能工厂发展内涵以设备运维、生产管控及工艺优化等业务为纽带，实现从数据采集、过程管控到价值创造的闭环提升过程（图3）。①工厂数字化强调以卷烟数字化设计、设备数字孪生和数据管理平台为支撑，构建覆盖设计、制造与运维的全流程数据底座。②生产智能化依托数字化基础，围绕智能化排产调度、工艺参数智能调控及知识驱动设备运维，推动生产模式由经验驱动向数据驱动转变，实现过程自适应优化与动态协同。③管理精益化通过能源管控精细化、在线无损质量管理 and 预测性维护，兼顾成本、效率与质量，提升资源利用率及产品稳定性。

工厂数字化为生产智能化奠定数据基座，生产智能化推动管理精益化，管理精益化又促进数字化持续优化，共同构成技术路径、业务优化与价值导向一体化的发展内涵。这一内涵与 YC/T 625—2025^[5]中“数字化、网络化、智能化”核心原则呼应，同时强调“技术-业务-价值”的跨维度统筹，构建“数字化-智能化-精益化”的动态闭环逻辑，并紧密围绕卷烟制造核心场景解读关键技术可落地性与行业适配性，形成对标准框架的有效补充与特色拓展。

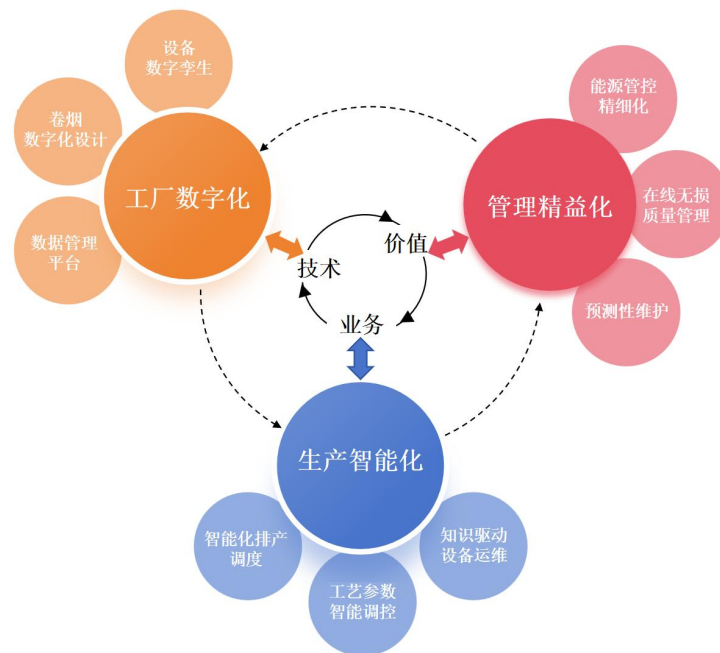


图3 卷烟智能工厂发展内涵

Fig. 3 Connotations of cigarette intelligent factory

2.2 卷烟智能工厂技术架构

卷烟智能工厂的技术架构作为其发展内涵的工程化承载，将对“工厂数字化、生产智能化、管理精益化”的内涵进行技术性解构与支撑。在 YC/T 625—2025^[5]对建设领域内容的分类基础上，本研究进一步从数据流动与业务赋能角度，揭示各类建设要素之间感知与执行、互联、数据治理和业务应用的纵向支撑关系，卷烟智能工厂技术架构如图4所示。感知与执行层、互联层共同构筑了“工厂数字化”的基础，数据治理层通过对数据进行加工、治理与分析，赋能“生产智能化”，业务应用层则直接将数据智能应用于生产执行、计划调度、设备运维等核心业务，最终实现“管理精益化”的价值目标。

①感知与执行层包括感知设备、工艺设备、能动设备和物流设备。工艺设备覆盖制丝与卷包等主要工序，能动设备如蒸汽锅炉、冷水机组和空气压缩机等提供能量与环境保障，物流设备实现物料搬运与配送，感知设备如RFID读取器、工业相机和温湿度传感器等为工厂数字化提供实时感知能力。②互联层通过网络与通讯协议（无线通信技术、现场总线和以太网等）和网络基础设施（边缘计算网关、云网关、路由器和交换机等），实现多设备数据接入、多源数据汇聚与处理、多途径数据传输，支持工厂全要素物联感知。③数据治理层承担对结构化与非结构化数据的存储、融合、分析和建模等，并通过云边协同技术支撑数据库、模型库与知识库的实时管理，为“生产智能化”与“管理精益化”提供支撑。④业务应用层着眼于生产过程中的不同业务环节，涵盖生产执行、计

划调度、质量管控、产品设计、设备运维、能源管控等卷烟生产主要业务类型。

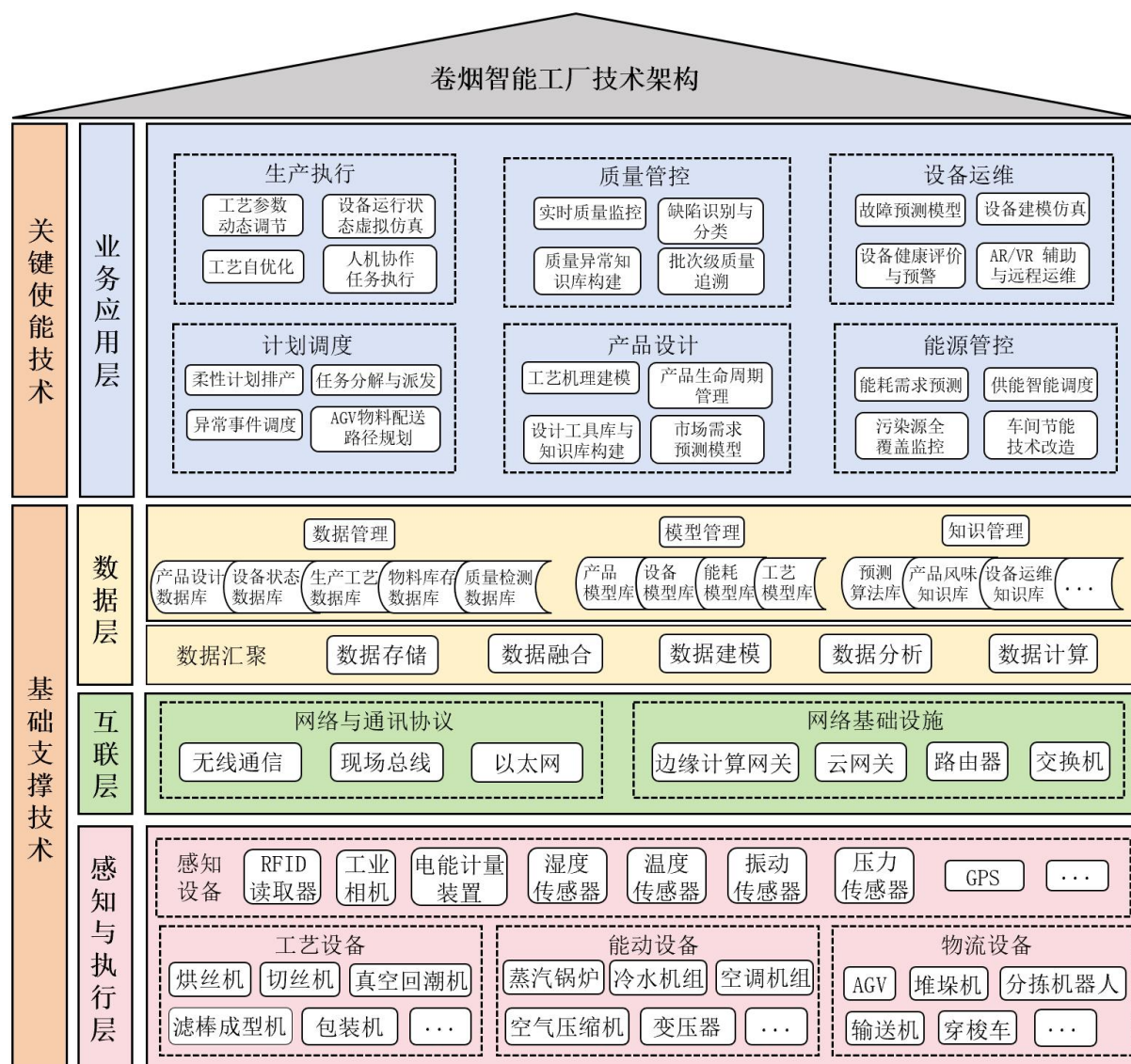


图 4 卷烟智能工厂技术架构

Fig. 4 Technical architecture of the intelligent cigarette factory

2.3 卷烟智能工厂发展路径

在上述卷烟智能工厂发展内涵引领和技术架构支撑的基础上，本研究进一步从建设对象、应用场景规模和系统集成深度等实施维度，对智能工厂的梯度发展过程展开分析。卷烟智能工厂的发展路径可根据制造技术与信息技术的成熟度、应用场景规模及系统集成深度，划分为卷烟智能生产单元、卷烟智能生产车间和卷烟智能工厂 3 个阶段（图 5），分别体现由单机和单工序优化、跨生产单元协同向工厂级系统智能集成逐步演进，与 YC/T 625—2025^[5]标准所体现的基础级到领航级梯度提升方向相衔接，推动卷烟行业在工厂数字化、生产智能化、管理精益化等方面的跨越式提升。

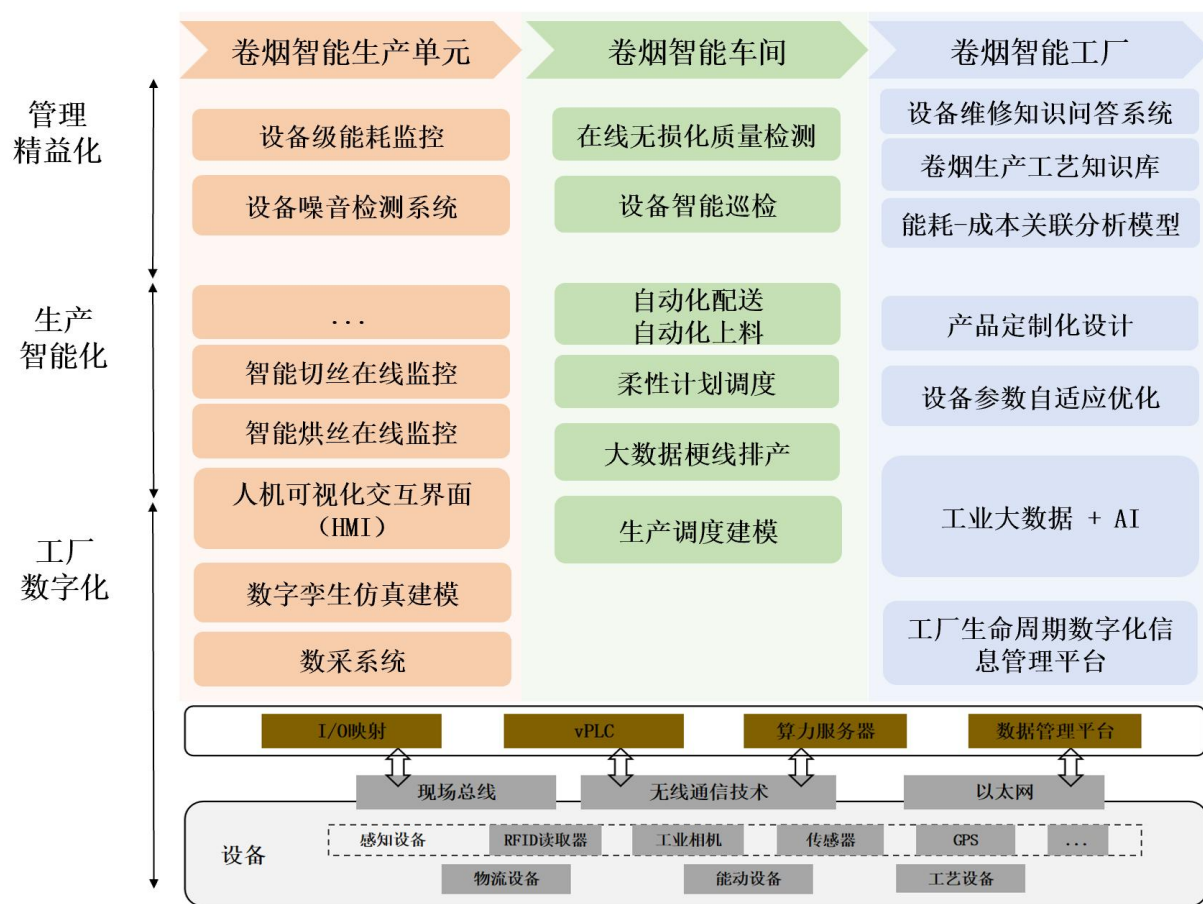


图5 卷烟智能工厂发展路线

Fig. 5 Development roadmap of intelligent cigarette factory

2.3.1 卷烟智能生产单元

卷烟智能生产单元聚焦制丝、卷包、滤棒成型等工序的单机或单工序智能化改造，旨在实现设备状态的实时感知与自适应控制，为更高层次的集成奠定基础。通过设备数字孪生仿真建模技术构建切丝机、烘丝机、卷包机组等设备的高保真三维动态模型，实现单机或单工序设备状态和生产过程的数字化表达。在此基础上，基于机器学习的异常诊断算法等智能控制模型得以持续运行，实现工艺参数、能耗监控、噪声干扰等自主优化与精益管理。在这一阶段，数据精准表达推动生产优化，优化成果支撑管理决策，而管理实践的反馈进一步促进数据采集与控制策略的迭代完善，从而实现卷烟智能生产单元的螺旋式升级。

2.3.2 卷烟智能车间

在卷烟智能生产单元的基础上，卷烟智能车间强调跨生产单元的协同与信息互通，旨在打通信息孤岛，实现车间级的生产资源优化配置。通过多系统集成与数据深度融合技术实现制造执行系统（Manufacturing Execution System, MES）、企业资源计划（Enterprise Resource Planning, ERP）、仓储管理系统（Warehouse Management System, WMS）等异构系统的互联互通，构建车间级数据服

务层，形成全局数据视野。其次，应用强化学习、混合整数规划等先进算法的柔性调度系统以及自动化上下料技术，实现制丝、卷包、滤棒成型等多条产线进行动态协同排产。同时，边缘侧部署算力平台支撑在线无损检测与设备智能巡检的低延迟实时计算。这一阶段的评估强调协同与流程效能，数字化表达与数据集成成为车间级生产智能化提供全局支撑，智能化加速了精益化管理高效落地，而精益化管理的实施效果又反向保障生产智能化的顺利实施，并促进数据集成管理的持续完善，进而提升车间级生产效率和产品一致性。

2.3.3 卷烟智能工厂

卷烟智能工厂阶段标志着整体系统的高度集成与全局智能化，需攻克全生命周期数字孪生技术，构建起覆盖设计、生产、运维的工厂级虚实映射与交互平台。这一平台不仅实时复现物理工厂的运行状态，更重要的是通过人工智能驱动的智能决策模型，实现大数据洞察与业务实践的深度融合。在这一阶段，数字化管理平台提供全局数据基础，生产智能化推动生产过程优化与动态协同，管理精益化将效率、质量与成本优化转化为可持续价值，三者的高度协同形成“数据采集-过程管控-价值创造”的完整闭环，支撑卷烟行业系统化、技术驱动和价值导向的智能化转型。

综上，卷烟智能工厂的三阶段发展路径，是一个技术能力层层叠加、业务价值持续释放的螺旋上升过程。每个阶段均需明确其技术攻坚方向、评判标准，从而在行业标准的规范指引下，稳步推进卷烟制造向数字化、网络化、智能化的高级形态迈进。

3 卷烟智能工厂建设关键技术

卷烟智能工厂建设不仅依赖于体系架构的宏观指导，也需要聚焦于生产管控、工艺优化与设备运维等卷烟核心业务需求与场景，以明确其实施落地过程中的关键技术。

3.1 多源数据协同的管控一体化技术

3.1.1 基于物联网的数据管理平台

基于物联网技术构建的数字管理平台，通过接入卷烟厂中独立运行的自动化工序所配备的感知设备，实现质量、设备、能耗等多维度数据的实时采集与统一管理，为计划调度、知识建模、工艺优化及能源管控等业务提供支撑。数据管理平台兼具数据湖与数据中台的功能特征，既能够对结构化、半结构化及非结构化的数据进行原始存储，又能通过数据抽取与分析，确保质量数据、设备数据、能耗数据等数据仓库的实时更新与集成，从而为卷烟生产制造提供可扩展的数据服务。同时，智能计划调度等业务对数据管理平台中设备状态、能源供给、物料库存等多源数据的实时分析提出了更高的要求，需要大规模计算资源的支持，云边协同技术根据计算节点灵活分配负载，即时调用云端虚拟服务与边缘计算设备，确保高响应速率、低延迟的数据处理与业务服务。

3.1.2 智能化生产计划和柔性调度

智能化生产计划和柔性调度凭借高效建模、智能算法求解以及数据驱动的决策支持等技术手段，实现生产过程中品牌切换、物料配送、设备产能等多方面协同，同时满足制丝、卷包、滤棒成型等工艺段流程-离散混合型生产的复杂要求。智能化生产计划与柔性调度经常通过多种方法开展建模，包括线性规划、混合整数规划等数学模型，虚拟模型驱动的仿真手段，以及强化学习等端到端方法。调度模型的高效求解依赖先进智能算法的支撑，其中启发式算法、机器学习与混合算法在优化调度模型性能方面展现出较强的潜力（表 2）。

表 2 人工智能技术在卷烟生产计划调度领域的应用

Tab. 2 Summary of AI in cigarette production planning and scheduling		
技术领域	具体方法	技术特点
启发式算法	遗传算法 ^[13]	以最小化最大完工时间为目标建模，采用工序-设备双层编码的改进遗传算法（混合初始化、两点交叉、分阶段变异）对卷烟卷包车间调度问题迭代寻优
	粒子群算法 ^[14]	通过动态惯性权重和加速因子设计，将粒子位置映射为生产决策变量，并结合速度约束实现车间混合生产线资源调度优化
	变邻域分解搜索算法 ^[15]	通过分解编码块，交替使用交换/插入邻域搜索与循环转移扰动，结合订单拆分策略优化卷包车间批量选择、设备分配及排序等调度问题
机器学习	专家策略和机器策略 ^[16]	通过聚类合并订单缩减规模；结合专家函数与机器策略函数构建搜索树，实现卷烟销售订单智能配送调度
混合算法	粒子群优化、模拟退火和 K-means 聚类算法 ^[17]	通过 K-means 聚类对卷烟订单进行分配，生成优质初始解；结合粒子群优化算法全局搜索以及模拟退火策略局部探索的特点，提升卷烟物流配送调度能力
	基于差分进化的混合多元宇宙算法 ^[18]	通过融合差分进化的变异/交叉算子与多元宇宙算法的宇宙膨胀收缩机制，对运输中心、订单组及异构车辆进行离散化编码，在满足多约束条件下实现成品卷烟配送多目标调度优化

3.1.3 多环节精细化能源管控

多环节精细化能源管控依托智能传感技术、物联网技术、大数据分析技术实现能源管控一体化，为解决卷烟厂能源利用效率低、能耗监管粗放等问题提供支撑。通过部署蒸汽计量，压缩空气计量，天然气计量，电计量等智能传感器，实时采集动力车间向制丝、卷包车间各环节输送的能源数据，从而实现“全厂-车间-工艺段-机台”的全方位能耗监控。大数据分析技术的引入确保能耗趋势和成本预算的精确估计，为能耗异常检测与精益化成本管理提供支持，MES 系统与能源管控一体化平台联动实现各工艺段空调、除尘、蒸汽等系统的远程控制。同时，冷凝水回用技术^[19]、锅炉余热回收利用^[20]等从能源供给侧提高利用效率，为卷烟生产的绿色转型与可持续发展提供支撑。

3.2 人工智能辅助卷烟工艺优化技术

3.2.1 数据驱动的工艺参数优化

以机器学习、深度学习为代表的人工智能技术通过数据驱动赋能滚筒烘丝机、卷烟机、加料系统等卷烟工艺设备实现自感知、自决策、自优化，被广泛用于卷烟工厂的设备工艺参数优化过程（表 3）。机器学习方法（线性回归、随机森林，贝叶斯网络等）和深度学习模型（以长短期记忆、前馈神经网络为代表）可用于各类数据回归与分类任务，从而构建工艺参数、产品质量与设备状态之间的预测模型。

表 3 卷烟关键工艺参数优化方法

Tab. 3 Optimization methods for key cigarette process parameters		
分类	具体方法	应用场景
数据统计	多源数据统计	滤棒物理指标 ^[21]
机器学习	支持向量机	烟丝掺配比例识别 ^[22]
	随机森林	烘丝含水量预测 ^[23]
	BP 神经网络	烟叶含水率预测 ^[24]
深度学习	卷积神经网络	烟叶清选分类 ^[25] 、烟叶杂质剔除 ^[26]
	长短时记忆网络	松散回潮含水量预测 ^[27]
	注意力网络机制	卷制过程激光打孔通风率预测 ^[28]

3.2.2 在线无损化质量检测技术

在线无损化质量检测技术通过使用相机、光学、气动或特定传感器等非破坏性手段，在不影响正常生产节拍、不破坏产品的前提下，对卷烟各阶段产品进行实时评估与监控。除化学成分、燃烧特性及抽吸性能等指标仍需依赖抽检或离线分析外，在线无损化质量检测技术主要应用于烟支物理结构及包装质量^[29]的检测，如烟丝填充密度、含水率、烟支外观缺陷及包装密封性等，从而有效提升生产一致性和产品质量稳定性。

实现质量实时性与非破坏性检测主要依赖于传感与图像处理技术的嵌入式应用，以及大数据与人工智能算法的融合，使检测过程能够与生产线同步进行，卷烟在线无损化质量检测方法如表 4 所示。此外，检测实时性需要确保智能算法对数据的即时推理，5G 专网架构的引入，能够有效解决数据传输延迟和存储受限问题，从而提升卷包数据采集、烟叶杂物识别等质检环节的响应速度与检测效率。

表 4 卷烟在线无损化质量检测方法

Tab. 4 Online nondestructive quality inspection methods		
分类	具体方法	应用场景
图像处理技术	高光谱成像技术	烟叶霉变检测 ^[30]
	外轮廓检测、模板匹配	卷包接装质量检测 ^[31]
机器学习	随机森林回归	烟支物理质量预测 ^[32]
	梯度提升决策树	烟丝杂质检测 ^[33] 、烟叶质量预测 ^[34]
	BP 神经网络	烟丝回弹特征预测 ^[35]
深度学习	生成对抗网络	卷包拉线缺陷检测 ^[36]

3.2.3 面向定制化需求的产品数字化设计

以知识图谱为代表的知识管理技术能为面向定制化需求的卷烟产品数字化设计提供支持。利用知识图谱和自然语言处理（Natural Language Processing, NLP）技术^[38]进行“原料-设计-生产-市场”全链条知识提取、知识语义表征、逻辑推理，将离散的配方经验与卷烟风味相联系，打破设计环节与生产环节之间存在的数据与信息壁垒，实现设计经验、生产经验的储存共享与高效复用。此外，数字孪生仿真^[39]、相似性算法配方生成^[40]等为缩减产品设计周期、减少迭代成本提供技术支持。

3.3 卷烟设备智能运维技术

3.3.1 卷烟设备数字孪生

数字孪生技术为卷烟厂提供虚实融合的设备管理方式，结合智能传感网络采集的设备状态数据，对工艺设备、能源设备、物流设备进行多维度、多尺度特征重构与行为映射，覆盖设备全生命周期，包括生产前状态诊断、生产过程仿真，生产后性能衰减及损耗估计，为设备健康监测、故障预警和维护优化提供支持。例如，使用数字孪生技术构建切丝机、烘丝机、加香机、卷接机组、包装机组等卷烟工艺设备的孪生模型^[41]，结合振动、电流、温度、压力等设备时序性运行数据，对工艺设备磨损疲劳及内嵌电机健康状态进行预测性评估，为产前设备状态诊断、产后性能衰减估计提供依据。此外，数字孪生工具集提供资源库管理，场景布局编排，可视化引擎^[42]，可实现“设备-车间-工厂”各层级运行工况的全局监控，并支持设备透视拆解、故障部位定位、动态巡检、异常预警，从而实现对卷烟厂生产状态的全局把握以及设备精细化管理。

3.3.2 数据驱动预测性维护

卷烟工厂产线高度自动化且生产节奏日趋紧凑，利用寿命估计、健康评估、异常检测、故障诊断等多角度预测性维护，可有效改善传统依赖人工巡检上传设备状态的管理模式，降低设备急停抢修的风险，提升产线稳定性。工业相机和温度、压力、湿度、振动等传感器实时采集设备数据，分别利用计算机视觉技术、大数据分析技术和人工智能技术将传感数据转化为设备状态估计，进而辅助零件更换、异常检查、故障定位的诊断，设备预测性运维方法如表 5 所示。

表 5 设备预测性运维方法

Tab. 5 Equipment predictive maintenance methods

分类	方法	应用场景
数学建模	时延反馈—分数阶随机共振模型	制丝设备故障诊断 ^[43]
	层次分析法	烘丝机健康评估 ^[44]
	随机森林	包装机故障诊断 ^[45]
机器学习	支持向量	卷接机组刀盘故障诊断 ^[46]
	BP 神经网络	烘丝机故障诊断 ^[47]

深度学习	Transformer 模型 卷积神经网络	烟机设备健康评估 ^[48] 卷包设备健康评估 ^[49]
------	--------------------------	--

3.3.3 基于知识图谱构建维修知识库

卷烟工厂设备维修工作需要复杂的专业知识与实操经验的积累，因此，高质量多方位设备维修知识供给与实操经验传承是设备维修工作的关键，而以 NLP^[50]和知识图谱为代表的先进知识管理技术能为设备维修知识库建设提供支持。例如，NLP 技术能够从离散化的维修知识及熟练维修工的处理经验等非结构化数据中提取信息，形成多模态知识图谱，从而构建设备故障智能问答系统。

4 结论

为解决当前卷烟智能工厂建设过程中存在的技术应用分散、系统集成不足以及发展路径不明确等问题，基于国家智能制造标准、卷烟行业标准及相关研究现状，系统分析了卷烟智能工厂建设需求，本研究基于 YC/T 625—2025 规定的卷烟智能工厂建设内容和基本要求，从“技术-业务-价值协同”视角构建了卷烟智能工厂建设体系框架。提出了以“工厂数字化、生产智能化、管理精益化”为核心的发展内涵，构建了涵盖“感知与执行层、互联层、数据治理层、业务应用层”的分层式技术架构，进一步提出了由智能生产单元、智能车间到智能工厂的渐进式发展路径，提出了卷烟制造智能化由单点优化向系统集成再向全局智能演进的技术路线。未来针对卷烟智能工厂的研究可进一步聚焦于联合“产学研”构建开放生态，加速成果转化与技术创新，开发可赋能全行业的数字化产品，完成从技术跟随到范式引领的跨越，推动卷烟产业链模式的创新变革。

参考文献（已替换）

- [1] 周济. 智能制造——“中国制造 2025”的主攻方向[J]. 中国机械工程, 2015, 26(17): 2273–2284.
Zhou Ji. Intelligent manufacturing——Main direction of “Made in China 2025”[J]. China Mechanical Engineering, 2015, 26(17): 2273–2284.
- [2] 姚锡凡, 景轩, 张剑铭, 等. 走向新工业革命的智能制造[J]. 计算机集成制造系统, 2020, 26(9): 2299–2320.
Yao Xifan, Jing Xuan, Zhang Jianming, et al. Towards smart manufacturing for new industrial revolution[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2020, 26(9): 2299–2320.
- [3] 孙宇祥, 何代炜, 周献中. 数智化情境下智能工厂生产组织与协同管理: 设计制造一体化协同研发模式[J]. 中国科技论坛, 2024(10): 152–165.
Sun Yuxiang, He Daiwei, Zhou Xianzhong. Intelligent factory production organization and collaborative management in the context of digital intelligence: Design and manufacturing integration collaborative research and development model[J]. Forum on Science and Technology in China, 2024(10): 152–165.
- [4] 李奇颖, 赵阳, 阿孜古丽·吾拉木, 等. 卷烟制造工业互联网平台建设与应用[J]. 计算机集成制造系统, 2020, 26(12): 3427–3434.
Li Qiying, Zhao Yang, Aziguli W, et al. Construction and application of industrial internet platform in cigarette manufacturing[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2020, 26(12): 3427–3434.
- [5] YC/T 625—2025 卷烟智能工厂建设导则[S].
YC/T 625—2025 Construction guidelines for cigarette smart factory[S].
- [6] GB/T 39117—2020 智能制造能力成熟度评估方法[S].
GB/T 39117—2020 Maturity assessment method of intelligent manufacturing capability[S].
- [7] GB/T 39116—2020 智能制造能力成熟度模型[S].
GB/T 39116—2020 Maturity model of intelligent manufacturing capability[S].
- [8] GB/T 43064.1—2023 智能工厂建设导则 第 1 部分: 物理工厂智能化系统[S].
GB/T 43064.1—2023 Guidelines for intelligent plants construction—Part 1: Intelligent systems of physical plants[S].
- [9] GB/T 43064.2—2024 智能工厂建设导则 第 2 部分: 虚拟工厂建设[S].
GB/T 43064.2—2024 Guidelines for intelligent plants construction—Part 2: Virtual plant construction[S].
- [10] YC/T 581—2019 烟草行业数据中心数据建模规范[S].
YC/T 581—2019 Data modeling specification for data center in tobacco industry[S].
- [11] YC/T 494—2014 烟草工业企业生产网与管理网网络互联安全规范[S].
YC/T 494—2014 Security specification for interconnection between production network and management network of tobacco industry enterprise[S].
- [12] YC/T 493.2—2014 烟草行业企业应用集成技术规范 第 2 部分: 服务总线[S].
YC/T 493.2—2014 Technical specifications requirements for enterprise application integration for tobacco industry—Part 2: Service bus[S].
- [13] 游勇, 李明伟, 许佩, 等. 遗传算法在卷包车间提效分析的应用研究[J]. 包装工程, 2024, 45(17): 149–155.
You Yong, Li Mingwei, Xu Pei, et al. Application of genetic algorithm in efficiency improvement analysis of cigarette workshop[J]. Packaging Engineering, 2024, 45(17): 149–155.
- [14] 何文婕, 许玉江, 闫浩峰, 等. 一种面向卷烟混合生产线的优化调度模型研究[J]. 包装工程, 2022, 43(17): 298–307.
He Wenjie, Xu Yujiang, Yan Haofeng, et al. Optimization scheduling model for hybrid production line of

cigarette[J]. Packaging Engineering, 2022, 43(17): 298–307.

[15] 杨振宏, 何兴昌, 廖清亮, 等. 基于改进 VNDS 算法的并行机批量流调度[J]. 计算机集成制造系统, 2024, 30(12): 4420–4434.

Yang Zhenhong, He Xingchang, Liao Qingliang, et al. Parallel machine lot streaming scheduling problem based on improved VNDS algorithm[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2024, 30(12): 4420–4434.

[16] 安裕强, 徐跃明, 欧阳世波, 等. 基于机器学习的成品卷烟销售订单配送调度优化算法研究与应用[J]. 烟草科技, 2021, 54(8): 87–94.

An Yuqiang, Xu Yueming, Ouyang Shibo, et al. Research and application of optimization algorithm based on machine learning for scheduling cigarette product delivery[J]. Tobacco Science & Technology, 2021, 54(8): 87–94.

[17] 罗鹏宇, 李民, 陈波, 等. 基于 K-PSA 算法的卷烟订单分批策略研究[J]. 制造业自动化, 2024, 46(6): 58–66.

Luo Pengyu, Li Min, Chen Bo, et al. Research on order batching strategy based on K-PSA algorithm[J]. Manufacturing Automation, 2024, 46(6): 58–66.

[18] 欧阳世波, 张淼寒, 谢俊明, 等. 计及多目标约束的成品卷烟销售订单配送调度优化[J]. 中国烟草学报, 2024, 30(2): 80–91.

Ouyang Shibo, Zhang Miaohan, Xie Junming, et al. Optimization of multi-objective constrained distribution scheduling of finished cigarette sales orders[J]. Acta Tabacaria Sinica, 2024, 30(2): 80–91.

[19] 肖平, 王望升, 童方豪, 等. 卷烟厂双热源空调回水加热系统的设计[J]. 烟草科技, 2025, 58(4): 88–93, 112.

Xiao Ping, Wang Wangsheng, Tong Fanghao, et al. Design of return water heating system with dual heat source for air conditioning system in cigarette factory[J]. Tobacco Science & Technology, 2025, 58(4): 88–93, 112.

[20] 张岩, 刘文忠, 杨振东, 等. 复合烟气处理系统的开发与应用[J]. 中国烟草学报, 2021, 27(6): 10–16.

Zhang Yan, Liu Wenzhong, Yang Zhendong, et al. Development and application of compound flue gas treatment system[J]. Acta Tabacaria Sinica, 2021, 27(6): 10–16.

[21] 解晓翠, 刘畅, 樊肇胜, 等. 不同单旦丝束混合滤棒的加工工艺及应用研究[J]. 中国烟草学报, 2025, 31(4): 51–59.

Xie Xiaocui, Liu Chang, Fan Zhaosheng, et al. Study on processing and application of filter rods with different single-denier blended tow[J]. Acta Tabacaria Sinica, 2025, 31(4): 51–59.

[22] 刘涛, 丁美宙, 张二强, 等. 基于太赫兹光谱检测技术的烟丝掺配比例识别模型[J]. 烟草科技, 2024, 57(12): 74–83.

Liu Tao, Ding Meizhou, Zhang Erqiang, et al. A model to identify cut tobacco blending ratio based on terahertz spectroscopy[J]. Tobacco Science & Technology, 2024, 57(12): 74–83.

[23] 文广球, 吴文强, 刘斌, 等. 基于多参数特征协同优化的滚筒管板烘丝机出口烟丝含水率的控制及应用[J]. 烟草科技, 2025, 58(6): 82–91.

Wen Guangqiu, Wu Wenqiang, Liu Bin, et al. Moisture control in cut tobacco output from cylinder dryer with corrugated heating plate by collaborative optimization of multi-parameters[J]. Tobacco Science & Technology, 2025, 58(6): 82–91.

[24] 李圣陶, 王行, 王晓宾, 等. 基于 SSA-BP 算法的密集烤房烟叶含水率分布预测[J]. 烟草科技, 2025, 58(5): 61–71.

-
- Li Shengtao, Wang Hang, Wang Xiaobin, et al. Prediction of tobacco leaf's moisture content distribution in bulk curing barn based on SSA-BP algorithm[J]. Tobacco Science & Technology, 2025, 58(5): 61–71.
- [25] 齐海涛, 张艳, 范明登, 等. 多模态融合的烟叶二分类清选模型的构建与应用[J]. 烟草科技, 2025, 58(7): 69–78.
- Qi Haitao, Zhang Yan, Fan Mingdeng, et al. Construction and application of multimodal fusion model for sorting tobacco leaves based on binary-classification[J]. Tobacco Science & Technology, 2025, 58(7): 69–78.
- [26] 黄振军, 谭格, 尹泽恩, 等. 基于改进型 YOLOv10 算法的机器手剔除烟叶中非烟物质系统研究[J]. 烟草科技, 2025, 58(12): 61–70.
- Huang Zhenjun, Tan Ge, Yin Zeen, et al. A removing system for non-tobacco related materials from tobacco leaves by robotic hands based on improved YOLOv10 algorithm[J]. Tobacco Science & Technology, 2025, 58(12): 61–70.
- [27] 陈传通, 张朋, 廖康, 等. 基于回潮吸湿机理与深度强化学习的松散回潮机预测控制方法设计[J]. 烟草科技, 2025, 58(11): 66–75.
- Chen Chuantong, Zhang Peng, Liao Kang, et al. Design of a predictive control method for cut leaf loosening and conditioning machines based on moisture absorption mechanism of conditioning and deep reinforcement learning[J]. Tobacco Science & Technology, 2025, 58(11): 66–75.
- [28] 易斌, 张立斌, 刘丹楹, 等. 基于 AMTA-Net 的卷制过程激光打孔通风率预测模型[J]. 图学学报, 2025, 46(6): 1224–1232.
- Yi Bin, Zhang Libin, Liu Danying, et al. Prediction model of laser drilling ventilation rate in cigarette manufacturing process based on AMTA-Net[J]. Journal of Graphics, 2025, 46(6): 1224–1232.
- [29] 赵敏, 仝智强, 李斌, 等. 无损检测技术在优化卷烟小盒包装密封性中的应用[J]. 烟草科技, 2025, 58(7): 44–51, 112.
- Zhao Min, Tong Zhiqiang, Li Bin, et al. Application of non-destructive detection in optimization of airtightness of cigarette packets[J]. Tobacco Science & Technology, 2025, 58(7): 44–51, 112.
- [30] 范鹏飞, 马建伟, 姚思愚, 等. 基于高光谱成像和机器学习的烟叶霉变检测方法[J]. 烟草科技, 2024, 57(12): 96–105.
- Fan Pengfei, Ma Jianwei, Yao Siyu, et al. Method for detecting mildew on tobacco leaves based on hyperspectral imaging and machine learning[J]. Tobacco Science & Technology, 2024, 57(12): 96–105.
- [31] 李捷, 陆海华, 王翔, 等. 基于机器视觉的烟支接装质量在线检测系统[J]. 烟草科技, 2019, 52(9): 109–114.
- Li Jie, Lu Haihua, Wang Xiang, et al. Online cigarette appearance inspection system based on machine vision[J]. Tobacco Science & Technology, 2019, 52(9): 109–114.
- [32] 李宜馨, 郭朋玮, 周茂忠, 等. 基于机器学习的烟丝回弹特性与烟支物理指标关系研究[J]. 中国烟草学报, 2024, 30(6): 39–47.
- Li Yixin, Guo Pengwei, Zhou Maozhong, et al. Research on the relationship between rebound characteristics of cut tobacco and physical indicators of cigarettes based on machine learning[J]. Acta Tabacaria Sinica, 2024, 30(6): 39–47.
- [33] 付永民, 范磊, 李长进, 等. 基于计算机视觉与机器学习的烟丝杂质图像级联检测方法[J]. 轻工学报, 2023, 38(4): 113–121.
- Fu Yongmin, Fan Lei, Li Changjin, et al. Research on cascade detection technology of tobacco impurities images based on computer vision and machine learning[J]. Journal of Light Industry, 2023, 38(4): 113–121.
- [34] 别瑞, 周婷云, 周显升, 等. 基于 XGBoost 算法的山东烟叶质量预测模型初探[J]. 中国烟草科学,

2022, 43(5): 80–86, 93.

Bie Rui, Zhou Tingyun, Zhou Xiansheng, et al. Study on quality prediction model of Shandong tobacco based on XGBoost algorithm[J]. Chinese Tobacco Science, 2022, 43(5): 80–86, 93.

[35] 李晓, 郭朋玮, 周茂忠, 等. 烟丝物理指标对其回弹特性的影响研究[J]. 轻工学报, 2024, 39(1): 97–102.

Li Xiao, Guo Pengwei, Zhou Maozhong, et al. Research on the influence of physical indicators of cut tobacco on its rebound characteristics[J]. Journal of Light Industry, 2024, 39(1): 97–102.

[36] 朱立明, 王伟, 范霞萍, 等. 基于无监督深度神经网络的卷烟小包拉线缺陷视觉智能检测方法[J]. 包装工程, 2022, 43(17): 273–281.

Zhu Liming, Wang Wei, Fan Xiaping, et al. Vision intelligent detection method of cigarette packet tear tape defects based on unsupervised deep neural network[J]. Packaging Engineering, 2022, 43(17): 273–281.

[37] 杨彩虹, 易进参, 施云霞, 等. 基于 PP-PicoDet 超轻量级模型的复合滤嘴端面视觉检测系统设计[J]. 包装工程, 2025, 46(S1): 86–91, 107.

Yang Caihong, Yi Jinshen, Shi Yunxia, et al. Design of visual inspection system for composite filter end face based on PP-PicoDet ultra-lightweight model[J]. Packaging Engineering, 2025, 46(S1): 86–91, 107.

(自译)

[38] 周小华, 居雷, 田海英, 等. CigEngine: 基于知识图谱的卷烟数字化设计引擎[J]. 数据与计算发展前沿(中英文), 2024, 6(6): 109–122.

Zhou Xiaohua, Ju Lei, Tian Haiying, et al. CigEngine: A cigarette digital design engine based on knowledge graph[J]. Frontiers of Data & Computing, 2024, 6(6): 109–122.

[39] 樊志海, 鲁纪平, 苑宝龙, 等. 基于数值模拟的片烟加料机参数优化设计[J]. 烟草科技, 2024, 57(4): 100–107.

Fan Zhihai, Lu Jiping, Yuan Baolong, et al. Parameter optimization of tobacco strip casing cylinder based on numerical simulation[J]. Tobacco Science & Technology, 2024, 57(4): 100–107.

[40] 郝贤伟, 田雨农, 李石头, 等. 基于关键化学指标相似的上部烟叶模块配方数字化设计[J]. 烟草科技, 2025, 58(9): 65–75.

Hao Xianwei, Tian Yunong, Li Shitou, et al. Digital design of module formulation for upper tobacco leaves with similar key chemical indexes[J]. Tobacco Science & Technology, 2025, 58(9): 65–75.

[41] 阴艳超, 李旺, 唐军, 等. 数据—模型融合驱动的流程制造车间数字孪生系统研发[J]. 计算机集成制造系统, 2023, 29(6): 1916–1929.

Yin Yanchao, Li Wang, Tang Jun, et al. Development of digital twin system for process manufacturing workshop driven by data/model fusion[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2023, 29(6): 1916–1929.

[42] 陶刚, 李欣明, 于中江, 等. 基于烟草工业互联网的数字孪生工具集研究[J]. 数字通信世界, 2024(4): 34–36.

Tao Gang, Li Xinming, Yu Zhongjiang, et al. Research on digital twin toolset based on tobacco industry internet[J]. Digital Communication World, 2024(4): 34–36.

[43] 郑超, 邬晓龙, 徐立, 等. 基于分数阶随机共振的烟草制丝设备滚动轴承故障特征增强方法[J]. 烟草科技, 2025, 58(12): 79–86.

Zheng Chao, Wu Xiaolong, Xu Li, et al. Trouble feature enhancement method for rolling bearings in primary tobacco processing equipment based on fractional order stochastic resonance[J]. Tobacco Science & Technology, 2025, 58(12): 79–86.

[44] 何林洋, 王荣, 卓亮, 等. 基于层次分析法的卷烟烘丝机健康度评估[J]. 工业控制计算机, 2023,

36(3): 16–18, 21.

He Linyang, Wang Xing, Zhuo Liang, et al. Tobacco drier health status evaluation based on analytic hierarchy process[J]. Industrial Control Computer, 2023, 36(3): 16–18, 21.

[45] 张延琛. 基于组合学习网络的卷烟包装机轴承故障诊断[J]. 中国设备工程, 2024(22): 176–180.

Zhang Yanchen. Bearing fault diagnosis of cigarette packing machine based on combined learning network[J]. China Plant Engineering, 2024(22): 176–180. (自译)

[46] 安佳敏, 张雷, 李善莲, 等. 基于 AE 重构误差和 SVDD 的滚筒叶丝干燥异常工况检测[J]. 中国烟草学报, 2023, 29(6): 31–37.

An Jiamin, Zhang Lei, Li Shanlian, et al. Anomaly detection for cut tobacco drum dryer based on AE reconstruction error and SVDD[J]. Acta Tabacaria Sinica, 2023, 29(6): 31–37.

[47] 汪冬冬, 侯加文, 焦帅帅, 等. 基于 FA-BP 神经网络模型的烘丝机设备故障诊断[J]. 中国仪器仪表, 2024(1): 40–44.

Wang Dongdong, Hou Jiawen, Jiao Shuaishuai, et al. Fault diagnosis of silk drying machine based on FA-BP neural network model[J]. China Instrumentation, 2024(1): 40–44.

[48] 王茂方, 陈圣, 金义龙. 基于改进 Transformer 的烟机设备健康状态诊断方法[J]. 中国烟草学报, 2025, 31(3): 70–77.

Wang Maofang, Chen Sheng, Jin Yilong. Health status diagnosis method for tobacco machine equipment based on improved transformer[J]. Acta Tabacaria Sinica, 2025, 31(3): 70–77.

[49] 陈天丽, 江志凌, 邵力波, 等. 基于深度学习的卷包设备清洁保养质量判别系统设计[J]. 中国烟草学报, 2022, 28(6): 20–29.

Chen Tianli, Jiang Zhiling, Shao Libo, et al. Deep learning-based discriminant system design of cleaning and maintenance quality of cigarette maker and packer[J]. Acta Tabacaria Sinica, 2022, 28(6): 20–29.

[50] 任海玉, 刘建平, 王健, 等. 基于大语言模型的智能问答系统研究综述[J]. 计算机工程与应用, 2025, 61(7): 1–24.

Ren Haiyu, Liu Jianping, Wang Jian, et al. Research on intelligent question answering system based on large language model[J]. Computer Engineering and Applications, 2025, 61(7): 1–24.

责任编辑 李 路