

人工智能时代下的绿色造纸新技术及发展趋势

林庆旭

山东省郯城县商务局商务发展服务中心, 山东 临沂

收稿日期: 2026年4月21日; 录用日期: 2026年5月25日; 发布日期: 2026年6月30日

摘要

造纸工业是国家重要的基础原材料行业, 由于其大量消耗资源和产生大量的二氧化碳而受到广泛关注, 在“双碳”目标以及数字化转型的时代背景下, 人工智能正逐渐成为促进造纸行业绿色发展的有力工具。文章总结了当前人工智能在绿色造纸中的发展情况及其应用实例, 在生产过程智能化管控、设备运行状况监控与维修、能源管理和碳减排、污水处理及环境保护、供应链协同与行业发展等方面提出了一套以人工智能助力绿色造纸的技术框架。结果显示, 利用人工智能改善生产工艺条件、提前预警设备出现的问题、准确调控各环节操作可有效减少能源消耗和污染排放, 提升资源利用率。同时, 文章也对人工智能时代下造纸业由单一改进到整体协同、由自动化到智能化发展趋势进行了预测, 为造纸业实现绿色发展提供借鉴意义。

关键词

人工智能, 绿色造纸, 智能制造, 能源管理, 废水处理

New Green Papermaking Technologies and Development Trends in the Era of Artificial Intelligence

Qingxu Lin

Business Development Service Center, Tancheng County Bureau of Commerce, Linyi Shandong

Received: April 21, 2026; accepted: May 25, 2026; published: June 30, 2026

Abstract

The papermaking industry is a crucial basic raw material industry in China. Due to its large resource consumption and carbon dioxide emissions, it has attracted widespread attention. Against the backdrop of “dual carbon” targets and digital transformation, artificial intelligence (AI) is gradually becoming a powerful tool for promoting the green development of the papermaking industry. This paper

summarizes the current development and application examples of AI in green papermaking. It proposes a technical framework for AI-assisted green papermaking in areas such as intelligent control of production processes, equipment operation monitoring and maintenance, energy management and carbon emission reduction, wastewater treatment and environmental protection, and supply chain collaboration and industry development. Results show that using AI to improve production process conditions, provide early warnings of equipment problems, and accurately control operations at each stage can effectively reduce energy consumption and pollution emissions, and improve resource utilization. Furthermore, this paper predicts the development trend of the papermaking industry in the era of AI, from single-item improvement to overall collaboration, and from automation to intelligence, providing valuable insights for achieving green development in the papermaking industry.

Keywords

Artificial Intelligence, Green Papermaking, Intelligent Manufacturing, Energy Management, Wastewater Treatment

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

造纸工业是关系国计民生的基础原材料工业，存在得天独厚的天然绿色属性，具有原料可再生、产品可循环利用、生产废弃物可转化为生物质能源等特点。然而，造纸工业又是典型的能源资源密集型行业，已被纳入全国碳排放权交易市场的重点行业名单[1]。与此同时，行业正遭遇“增产不增收”的尴尬局面，生产越来越多的产品却获得越来越少的收益，企业盈利空间受到极大压缩。在此形势下，寻求一种可持续发展的新模式成为造纸行业的当务之急。

随着人工智能技术的发展，其在造纸行业绿色化转型中发挥着重要作用。相比于传统自动化造纸技术，人工智能具有学习、推理及自适应特性，能够解决造纸过程中多因素耦合、非线性及大时滞等复杂问题[2]。近年来，关于造纸工业智能化转型升级的研究日益增多[3]，高级控制技术在该行业的应用也越来越受到关注[4]。另外，基于深度学习提高纸张产品质量、降低能源消耗以及进行故障检测等方面亦取得一定进展[5]。研究发现，人工智能可以有效应用于机械精炼、干燥控制、设备保养等造纸关键环节，从而显著降低能源消耗[2]。因此，总结人工智能在绿色造纸中的应用情况、存在问题以及未来发展方向显得尤为重要。

本文主要围绕生产过程智能控制、设备状态监控及故障预警、能源管理与减碳、废水治理及环境污染监测、供应链协同及产业发展五个维度，对人工智能助力绿色造纸的技术原理以及现状进行阐述，并对其发展前景作出预测。在此基础上，本文从数据流、控制流、价值流与知识流四个交互层面，构建了人工智能赋能绿色造纸的技术框架，如图1所示。该框架明确了感知、认知、决策、执行四类AI角色在各模块中的分布与协同关系。

2. 生产过程智能控制

造纸生产工艺包括制浆、打浆、上网、压榨、干燥、压光等一系列步骤(见图2)，是十分复杂的工业过程。各个步骤之间紧密相连，一个环节出现问题会影响整个产品品质以及能耗问题。而利用人工智能技术进行智能控制系统及工艺参数调整可以有效改善生产过程中的问题。

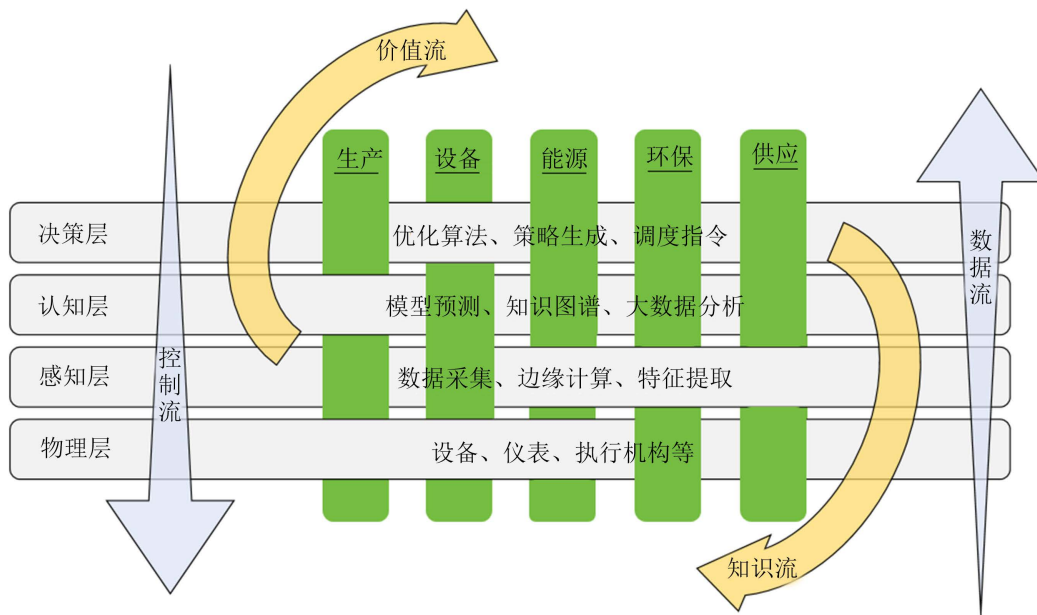


Figure 1. Framework diagram of AI-enabled green papermaking technology
图 1. 人工智能赋能绿色造纸技术的框架图

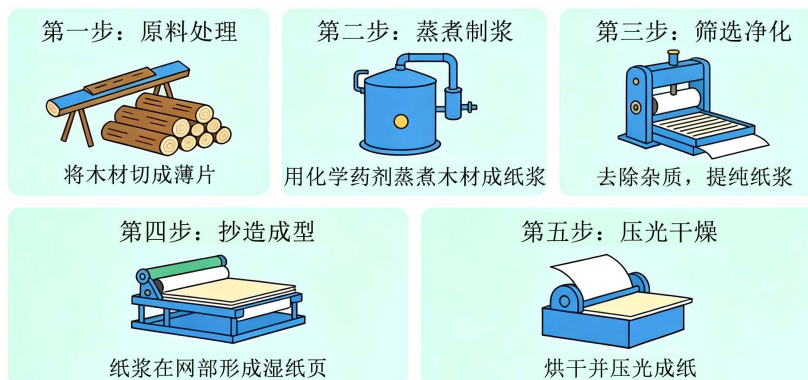


Figure 2. Papermaking process
图 2. 造纸生产工序

2.1. 智能化管控系统

长期以来，传统造纸企业存在信息孤岛问题——如 ERP (企业资源计划)、MES (制造执行系统)、SCADA (数据采集与监视控制系统)等系统之间数据无法共享，从而影响了生产的统筹安排。例如，生产任务布置不能及时了解设备的真实耗能情况，产品质量检验也不能及时反馈至生产工艺环节以优化参数等。这种信息割裂带来的弊端，使企业难以有效应对市场和原材料需求的持续变化。

智能化管控一体系统通过对各种不同来源的数据进行整合，把生产计划排程、设备状态监测、产品质量检查、能耗统计等都放在一个平台上操作，从而实现对整个生产的可视化以及智能化调度[6]。其主要作用是：不再把各个工序当作独立的部分来对待，而是作为一个整体来进行协调优化，在实际使用过程中发现，使用智能化管控一体系统之后，企业客户的订单交货期大幅减少，意外停机频率显著降低。智能机械控制系统在造纸生产线上的应用也说明，结合 PLC、DCS 等控制系统，可有效提高生产线稳定性和效率[3]。智能管理一体化结构如图 3 所示。

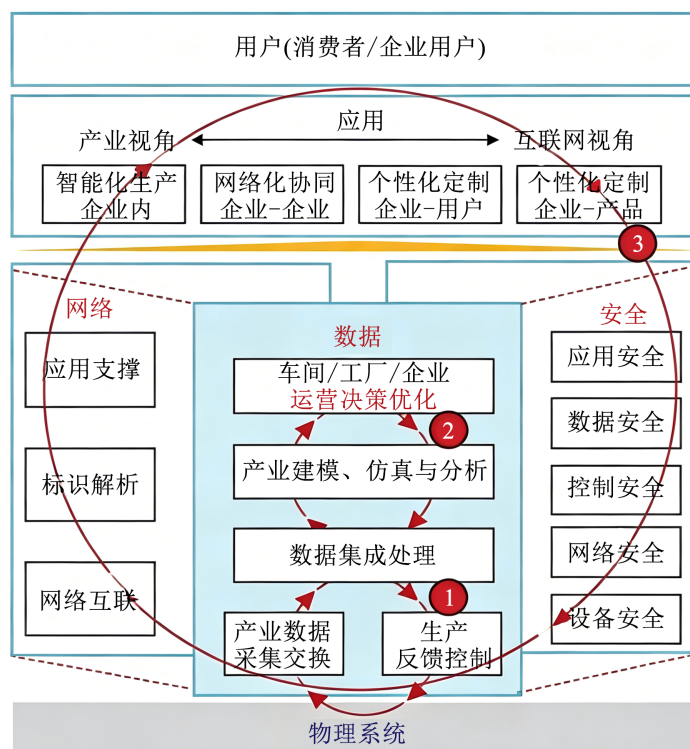


Figure 3. Typical intelligent integrated management and control system architecture [3]

图 3. 典型的智能化管控一体化系统架构[3]

从数据采集的角度来看，一体化物联网数据采集平台采用一致的数据采集规范以及通信协议来解决不同厂家设备、不同年代控制系统之间存在的“数据方言”，为上层智能化分析奠定坚实的基础[7]。例如部署边缘计算网关，可将现场 PLC、智能仪表、振动传感器等不同来源的数据汇聚并转换成 OPC UA 或者 MQTT 格式，进而实现从工厂到云端的数据连接。

此外，智能移动设备点巡检系统实现了设备巡检任务全流程管控：巡检人员根据系统安排路线一项一项进行巡查，在线拍摄照片、扫描条形码或二维码、填写相关数据等，所有内容及时上传到云端。与传统的纸质记录比较而言，本系统可以很好地解决记录不标准、信息传达延迟以及问题上报不够及时的问题[8]。

2.2. 工艺参数动态优化

打浆以及干燥是造纸行业的高能耗环节，在传统的生产方式下，工人凭经验设定加工条件并且一成不变地使用这些条件进行生产。但是由于原材料性质以及产品的不同，固定的加工条件会造成能源浪费或者产品质量不稳定的问题。而采用人工智能优化的方法可以利用机器学习对原材料进行识别并据此改变磨浆间隙、浓度、流量以及干燥温度等因素达到“按需供能”。

Viitala 等人[2]进行的一系列综述性研究也表明了节能效益：人工智能优化可以使机械打浆能耗减少最多 15%，干燥能耗降低 10%~20%。这其中的原因在于，在打浆过程中，AI 可以利用纤维形态在线监测信息来判断当前浆料到达目标打浆度所需要最少量的能量，以防止过多磨浆；而在干燥时，人工智能会考虑纸页原始水分、烘缸温度、蒸汽压力以及车速等多种因素，及时调整干燥策略，提高干燥效果的同时也避免因过度干燥而导致纤维受损及蒸汽的浪费。此外，在制浆造纸生产中智能控制技术的应用还包括浓度调节、打浆度控制等细节方面的工作，有利于对工艺参数进行精确的调控[9]。

造纸机负荷分配是又一个重要环节。造纸机由多个传动点共同驱动，各个传动点之间互相影响着彼此的负载情况。而传统固定分配方式使得一部分电机经常工作在效率较低区域，造成较大浪费。对于这个问题，则可以通过采用基于人工智能负荷分配节能控制策略来解决，在保证纸幅张力稳定的同时让所有传动点都尽可能工作在最经济状态，从而节省大量电能[10]。

从质量控制角度，在质量检查上，传统的检查方式是人工离线抽样检查，采样次数少、反馈慢，容易出现大量不合格产品。而基于大数据和人工智能的质量控制系统将质量检测提升到全方位在线检测以及智能化分析：利用安装在造纸机上的扫描传感器以及高速摄像头，对纸页定量、水分、厚度、匀度等进行每秒上百次检测；同时，用以往数据训练出的质量预测模型，能够及时发现质量问题并找出原因[11]。而定量与水分的智能控制数学模型设计是质量控制的重要技术手段，通过建立输入变量与输出指标间的动态关系，为实时调整提供指导[12]。云计算平台的应用使中小造纸厂以低成本享受云上数据分析的能力，不需要自己投入大量资金购买昂贵的本地服务器集群[13]。如表 1 所示，为关键技术环节的节能减排情况。

Table 1. Energy saving and consumption reduction effects of key technologies

表 1. 关键技术环节的节能降耗效果

技术环节	节能/优化效果
机械精炼(打浆)	能耗降低 15% [2]
干燥过程	能耗降低 10%~20% [2]
设备预测性维护	停机时间减少 50% [2]
造纸机负荷分配	电耗显著下降[10]
污水处理 AI 控制	药剂/能耗显著降低[25] [26]

在造纸机表面施胶及涂布质量控制领域，人工智能技术已在工业实践中取得显著成效，中华纸浆久堂厂部署的“全自动虚拟量测”(AVM)系统是一个具有代表性的真实案例。该企业长期面临涂布制程质量检测滞后的业务痛点：抄纸机连续运转，纸卷不可中断，传统依赖人工离线抽检不仅反馈严重滞后，且无法全面覆盖纸幅的横向与纵向质量波动，不均匀涂布或污点难以及时发现，导致后续工序产生大量废品。为解决这一问题，中华纸浆与成功大学智慧制造研究中心合作，将 AVM 专利技术首次应用于造纸涂布制程。该系统的核心 AI 模型借鉴了遗传算法改进的 BP 神经网络等混合神经网络方法——已有研究表明，此类算法在造纸过程性能指标建模预测中具有良好的适用性，能够有效处理多变量、非线性的工艺映射关系[14]。AVM 系统利用抄纸机上传的 AIoT 信号，通过 GPU 高速统计运算与 AI 模型分析，实现涂布质量的在线即时全检，其数据来源于现场传感器及物料追踪系统，经清洗与对齐后用于模型训练。实施成效显著：生产效能提升约 2.16%，纸机运转率从 80% 提升至 94%，显著高于业界平均的 90%，同时每年减少二氧化碳排放 6000 吨，该企业因此获得“数位转型鼎革奖”智慧制造楷模奖与 ESG 特别奖。这一案例表明，质量控制应从“事后抽检”转向“事前 AI 预测”，利用实时数据提前预见质量异常；而跨领域 AI 技术在充分适配造纸工艺特性后同样能够成功迁移应用，其发挥效用的前提在于扎实的数据治理——包括传感器精度、采集频率和物料追溯机制的建立。这些经验对于造纸行业推进智能化质量控制体系建设具有直接借鉴意义。

2.3. 智能化无人系统的应用

智能化无人系统通过对生产进行合理安排以及资源调配，可以大幅节约造纸行业单位产值能耗和碳

排放量,还可以利用智能监控以及预测性维护增加机器使用寿命[15]。该领域的应用包含自动导引运输车、无人机巡检平台、无人值守原料堆场管理系统等。而这些系统的运行需要基于人工智能的感知、分析、决策、执行四个环节配合才能完成,例如在原料场,无人机可以定时飞行拍摄木片堆大小,然后用人工智能图像识别技术判断当前剩余数量并传送到采购系统当中,从而做到“按需进货”,避免由于木片堆放不合理引起火灾及造成资金占用问题。

机器人及智能控制技术应用于造纸行业已经实现明显的节能减排成效[16]。合理规划 AGV 充电路线以及调度方案可避免无谓的空驶和等待所消耗的能量;自动化原材料运输以及产品入库能够降低运输过程中的碳排放量。而华章科技等中国造纸机械制造企业亦积极研究人工智能对装备升级的促进作用,持续推进无人化或少人化工厂建设[17]。

3. 设备状态监测与故障诊断

造纸机械一般需连续工作几星期乃至几个月,任何意外停工都可能导致大量生产损失以及能源浪费,而在设备长时间处于重载、潮湿及温差变化的情况下,不可避免会发生磨损、腐蚀、疲劳等问题。及时准确地识别设备问题并进行预防是保证纸浆造纸生产的必要条件。随着人工智能的发展,使得造纸设备保养由“定期维修”到“预测性维护”的转变成为可能——前者根据一定周期对零部件进行替换,容易出现“过度维修”或“维修不足”,而后者则是依据设备实际情况来进行维修,节省开支的同时也防止了突然断电带来的问题。

3.1. 运行状态智能监测

基于机器学习设备状态监测系统对设备的振动、温度、电流等特征参数进行实时检测以及分析,获得设备当前健康状况。相比于传统基于阈值报警的方法,该方法可以及时发现多种参数之间存在的非线性关系,在设备发生故障之前就可以提出警告[18],系统架构图如图 4 所示。张明辉等人[19]提出了一种适用于新时代纸机设备故障智能监测方案,通过采集多种传感器数据并进行处理,即可判断关键设备的运行状态。

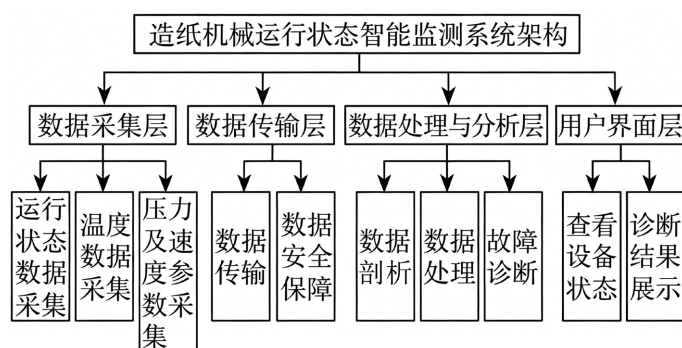


Figure 4. Architecture diagram of intelligent monitoring system for papermaking machinery operation status [18]

图 4. 造纸机械运行状态智能监测系统架构图[18]

在此基础上,研究者又提出一种基于传感器、边缘计算节点以及云服务器组成的在线监控方案,涵盖“感知-传输-计算-决策”的全过程[20]。即:在现场端加速度计、温度计等传感器以 kHz 频率进行数据采集;边缘计算节点对采集的数据进行预处理,如滤波、特征提取及简单的异常检测等工作,只需把特征值以及告警信息发送到云端,减少网络流量负担;云端使用深度学习方法来判断整体走势,发现缓慢发展的劣化情况。深度学习方法在故障诊断中也表现良好,例如利用一维卷积神经网络对振动信

号进行分类可识别出轴承内圈故障、外圈故障、滚动体故障等不同故障类型[5] [21]。

3.2. 知识图谱在故障诊断中的应用

流程工业企业所面临的深层次问题是：技术进步带来的复杂性已超出传统知识管理水平。一个先进的造纸厂可能存在上万个仪表、上千个电动机、上百个工艺模块，其出现问题的原因常常是多方面因素相互作用的结果，例如机械、电气、工艺、操作等；即便经验丰富的老工人，也难以将隐性知识有效传承给新人。为了解决这个问题，学者们以造纸过程故障诊断为例，开发了一套针对流程工业的知识图谱系统。

知识图谱使用自顶向下本体构建方式：先确定造纸过程中实体及其之间的关系，再由软件抽取造纸知识实例并导出文件到图数据库进行展示，在造纸干燥过程故障诊断中运用此知识图谱能准确表示整个工艺中物质以及能量流动情况——比如基于“蒸汽压力异常”可以从图谱中找到其原因并且对这些原因重要程度进行排序。此外，该系统具有良好的可复用性和灵活性：新出现的设备种类或故障均可便捷地纳入本体，无需重新设计整个系统[22]。

4. 能源管理与碳减排

能源成本占造纸业总成本的比例为 15%~25%，碳排放强度是其面临的重大限制因素，“双碳”目标对造纸行业的能源管理和碳排放提出新的要求。

4.1. 碳市场机制与数智化转型

2025 年，河北省创新出台造纸行业碳排放基准值，首次把造纸行业重点排放单位纳入碳抵消范畴，允许企业通过环保绩效创 A、碳捕集、低碳改造等方式取得的碳减排量用于抵消自身碳排放的一部分，起到一定的鼓励作用[23]。同时，广东省把造纸纳入 2025 年碳排放管理和交易中，重庆市也发布造纸行业重点排放企业名单。这说明全国碳市场扩容正在逐步推进，造纸企业将会承受实际碳成本。

在这种情况下，数智化手段是企业进入碳市场的有效途径。一般而言，企业碳排放核算是一种基于年度数据的“事后核算”，滞后且粗略，不利于碳交易相关工作开展。而以人工智能为基础的碳足迹管理系统可以通过物联网传感器获取电表、蒸汽流量计、压缩空气流量计等能耗数据，并结合生产批次，自动生成每吨纸碳排放量，甚至可以进一步细分不同产品的碳足迹。这些数据对于碳配额分配、碳资产管理，以及满足下游客户对低碳产品的需求，均具有重要的参考价值。研究表明，数智化转型与碳减排之间存在内在一致性——前者是后者的工具、手段以及依据，而后者又是前者的标尺、方向[24]。

4.2. 能耗预测与优化

能源管理不仅仅是事后统计分析，还需要事前预测以及在线优化。利用人工智能进行能耗预测可以以生产计划、设备状态、环境温度等因素为基础预测未来一天的用电量、用汽量、用气量等。根据这个预测结果，企业就可以调整自主供热供能电厂的发电量，也可以在电价较低时安排高耗电磨浆工段运行，在电价较高时减少非重要负荷，做到需求侧响应并节省开支。

智能化无人系统在这个方面也起到一定的配合作用：合理规划 AGV 充电路线以及调配方案，避免无谓的空驶和等待所消耗的能量；另一方面，预测性维护可以避免因为设备故障而造成多余的能量浪费。相关报道显示，使用人工智能的状态监控系统能降低最多高达 50% 的维修时间损失，而这既减少了由于停产带来的经济负担，又节省了一部分由于设备非正常运转而导致的能量浪费[2]。另外，机器人的智能化以及自动化也能在一定程度上节约电力资源，比如对于用电量较大的电机、风机等设备进行有效控制[16]。

5. 废水处理与环境监测

造纸废水成分复杂、COD 较高、较难处理，是行业的重点环保问题。制浆废水中含有大量的木质素、纤维素的分解产物以及树脂酸等难以生物降解的大分子有机物，如果处置不当会造成对受纳水体的极大危害。人工智能在废水处理中可以应用于处理工艺改进、污染源查找、控制策略制定等方面。

5.1. 污水处理运行优化

造纸厂污水治理是典型的非线性、大时滞过程：来水水质及水量的变化对传统的 PID 控制不利——PID 控制器无法应对如此大的变化，容易造成供风过多或者供风不足。而基于机器学习的方法可以根据进水 COD、氨氮、pH 等信息在线调整曝气量、药品添加量以及剩余污泥排放量，使得整个污水处理过程在良好的工况下运行。例如，在进水 COD 突然增加的情况下，该方法可以预见后续需要更多的氧气，因此可及时提升鼓风机转速，而无需等到溶解氧降到一定水平后才做出反应。这种前馈 + 反馈的控制方法不但提高了工作效率，而且由于准确地进行控制而节约了化学品以及能源的使用量[25]。

此外，人工智能也可帮助传统生物处理及深度处理过程：利用智能化的方法寻找最优的操作条件来提高对于难降解有机物的去除率。在相同进水情况下，采用人工智能进行调控的污水处理厂较人工操作可节约 15%~20% 的药剂费用[26]。

近年来，多智能体强化学习技术已成功应用于造纸污水处理过程中的多目标优化调控，在满足出水达标排放的基础上尽可能减少曝气消耗以及药剂量的应用，取得良好成果[27]，也为污水处理厂智能化改造提供一种新思路。

5.2. 水污染智能监测与溯源

造纸企业偷排或事故性排放一旦出现，一般很难及时确定污染地点。而利用人工智能与雷达遥感影像相结合可以解决这个问题。雷达遥感具有全天候、全天时的工作能力，能够穿透云雨获取地面水体图像。基于深度学习对雷达遥感影像进行自动解译，可揭示造纸废水排放特点与其遥感影像光谱特征及后向散射系数之间的关联，进而准确定位污染源及其影响区域[23]，其工作原理如图 5 所示。该方法适用于监管区域内存在多个污染源的情况，其可迅速找到可疑排放位置，便于执法人员前往检查。

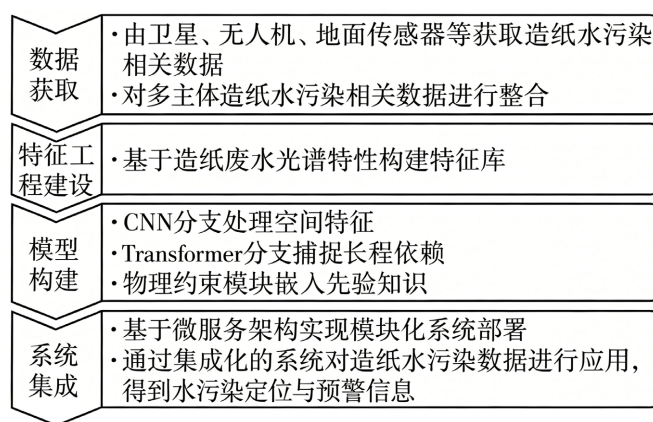


Figure 5. Operational logic diagram of intelligent radar remote sensing monitoring of water pollution [23]

图 5. 雷达遥感智能监测水污染运行逻辑图[23]

在线监测系统应用于工业废水环境风险预警对造纸企业的废水环境风险管理具有积极的意义[28]。在造纸厂雨水排放口及污水处理厂进出水口处安装在线 COD、氨氮、pH 监测仪和流量计，并将其接入

企业 DCS 控制系统。一旦检测到异常数据，系统可及时关闭排放阀门或开启应急缓冲池，防止不合格废水外排。目前，造纸行业的环境监控技术正朝着物联网与人工智能深度融合的在线监测方向发展[29]。此外，基于摩擦电探针以及深度学习的造纸白水稳定性智能检测技术是对过程水进行在线检测的一种新方式，可以及时对白水中出现的问题发出警报[30]。

5.3. 废水处理智能控制数学模型

造纸废水处理过程数学建模是进行智能化控制的前提条件。缺少合适的数学建模方法，再先进的控制技术也无法达到预期效果。针对造纸废水处理的特点，可建立涵盖生物反应动力学、沉淀过程流体力学及污染物降解机理的数学模型，为后续控制器设计提供理论指导[31]。同时这些模型还考虑了微生物在不同底物浓度下的生长情况以及二沉池内污泥的沉降压缩过程，在此基础上可以利用所提模型在计算机上进行仿真实验，方便工程师不断调整控制参数，分析各种干扰情况下的系统行为，减少实际调试工作中的风险与费用。

6. 供应链协同与产业转型

造纸行业绿色发展是生产工艺技术改造的过程，也是原材料供应体系及产业结构调整的过程。

6.1. 林浆纸一体化与绿色经济

林浆纸一体化是造纸行业为保证原料供应而采取的一种方式——即造纸企业自主种植速生丰产林，将林地、制浆厂、造纸厂整合在一起。但是要让这种模式正常运转就必须有林业、制浆、造纸各方通力合作：林地砍伐计划要符合制浆厂生产能力，不同树木品种对纸浆质量以及造纸方法也有影响，它们之间的关系如图 6 所示。而数字平台实现信息交流与资源共享，是提高林浆纸一体化系统运作效率和环保效果的重要手段。例如，利用一个共同的云平台，林业部门可及时发布各个林区计划采伐数量以及木材尺寸等信息，而制浆厂可根据此进行相应的蒸煮操作调整，造纸厂也可根据情况进行相应的配浆。有文献指出基于该数字化平台进行信息共享及利益相关方之间的合作有利于提高整个林浆纸一体化系统的工作效率及其环保效益并且避免由于原材料供给不稳定而导致的能量损失[32]。

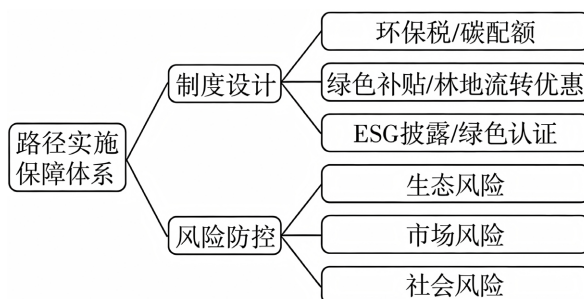


Figure 6. Implementation guarantee system for the integrated forestry, pulp and paper industry [32]

图 6. 林浆纸一体化路径实施保障体系[32]

6.2. 产业大脑与新型工业化

浙江造纸产业的“产业大脑”是产业数字化转型的一个典型案例。“产业大脑”实质上是一个行业的工业互联网平台，在此平台上集中整个产业链上企业的生产和用能、环保、物流等相关信息，实现对整个行业运转情况的模拟。在此基础上，政府部门可随时掌握每个工厂的单位产值能耗以及污染物排放量，行业协会能够了解全行业的开工率并发出警报，企业间也可以在保障自身商业机密情况下互相比较。

产业大脑使得产能预警、能耗监测、环保合规检查等功能自动化[33]。这样的产业级数字平台，把一个个的小我聚合成为一个整体飞跃——不是单一的企业“孤芳自赏”，而是一个区域的所有企业共同进步。造纸行业的智能制造以及互联网+对产业大脑建设起到支撑作用[34]，同时对中国造纸行业智能化转型的研究也给这种尝试提供一定的借鉴意义[3]。

6.3. 产业链现代化与经济效益

从战略上讲，中国造纸业要实现现代化就要以智能制造和绿色制造为两翼，实现全链条智能化、信息化、网络化，践行清洁生产和循环经济发展理念[35]。智能化改造带来的收益可以从不同角度进行衡量，在生产效率上，单个工人所产出的产品数量增多；在成本上，每吨纸所耗费的能量以及维修费用减少；在产品质量上，产品的合格率及稳定性增强；在能耗上，总的能耗降低[36]。而绿色技术的研发虽然在初期会加大企业的投入，但是长远来看却可以通过提高资源利用率以及提升自身竞争力而获得巨大的经济效益[37]。资本市场也逐渐意识到这一点，例如林平发展成功在上海证券交易所主板挂牌上市，说明循环经济造纸企业得到市场的认可[38]。

7. 新质生产力与人才培养

新质生产力是以创新科技为引领力量，在智能化的基础上促进资源合理分配、提高生产率的同时减少对环境的影响。研究表明，新质生产力给造纸行业带来一条兼顾经济利益和环境保护双赢的发展道路[39]。

人工智能在造纸行业也用于人才培训工作。学者们对人工智能技术融入造纸技术专业教学进行了探讨，为行业的人才培养提供了一定的教学思考[40]。韩小丽等人总结了目前人工智能在造纸行业中的应用情况，包括产品质量预测、节能减排、设备巡检等方面的内容，给行业发展带来一定的启示作用[41]。开赛尔·吾斯曼分析了计算机网络及人工智能相结合的造纸企业生产工艺智能化决策系统的研究，所提出的技术方案如图7所示，在从整体上对智能决策系统的使用进行阐述的基础上对其在造纸生产过程的应用进行展望[42]。杨海燕、李玲玉的研究针对造纸企业的物流作业过程进行研究，在需求预测及路径规划的基础上减少企业物流成本以及提高企业的供应链反应速度[43]。

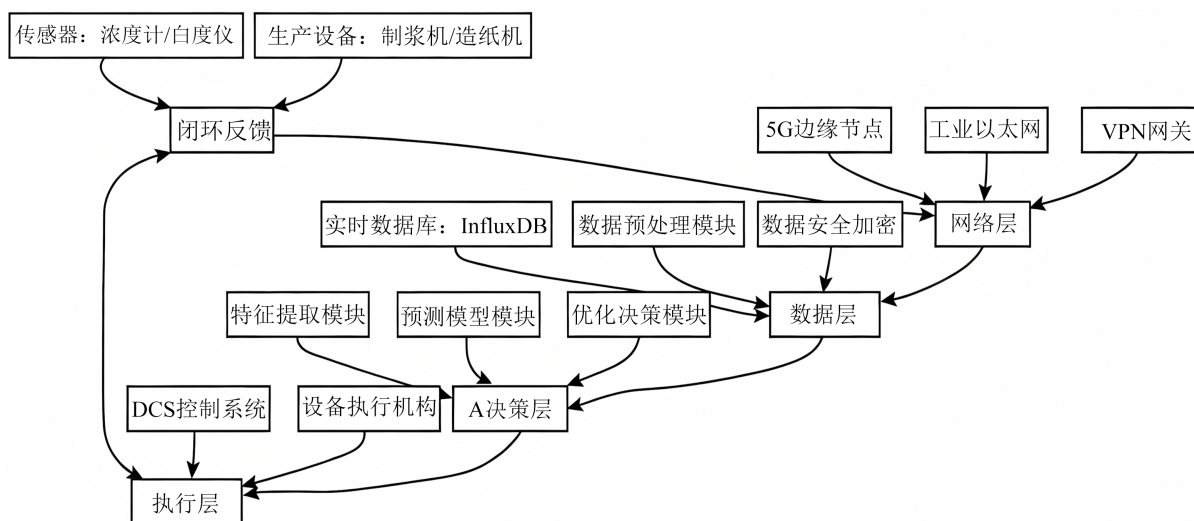


Figure 7. Block diagram of the intelligent decision-making system for production processes in paper manufacturing enterprises, which applies computer networks and artificial intelligence [43]

图 7. 计算机网络及人工智能应用于造纸企业的生产工艺智能决策系统的结构框图[43]

Sajadi 等人提出了一种基于最优控制方法、多目标粒子群优化以及 K-means 聚类算法相结合的方法, 在存在不确定性的条件下同时考虑降低生产成本、提高客户满意度以及减轻环境污染这三个方面的需求, 从而为造纸企业提供一种新的生产方式[44]。

8. 未来发展趋势

人工智能与绿色造纸的结合尚处于起步阶段。从目前的技术趋势以及实际情况来看, 未来的发展方向可能集中于全方位协同发展和从自动化到智能化这两个方面。

第一是从单点优化到整体协同。目前的人工智能应用更多地停留在工序级或者车间级“点状”的优化上, 未来将向产业链全链条协同演进。若实现从原材料采购、生产加工、能源消耗到物流运输等各环节的信息贯通, 即可达成“电-碳-料-产-销”的一体化优化, 其整体优化效果远远大于各个局部优化效果的简单叠加。中国的造纸行业智能化转型也说明了这一点, 由最初的单点自动化到系统的智能化, 再到整个产业链上的协同优化, 是中国造纸行业的必经之路[4]。

第二是从自动化到智慧化, 这也是人工智能与绿色造纸深度融合的一个重要方向, 其中知识图谱与可信人工智能驱动的智慧决策最具代表性。例如, 将造纸过程故障诊断知识图谱与知识工程、人工智能技术相结合, 正为流程工业智能化开辟新路径。未来, 知识图谱将会与机器学习模型进行结合, 从而形成“数据驱动+知识指导”的双轮驱动方式, 从而提高人工智能对于复杂工业应用场景下的透明度以及可靠性[22]。

9. 结语

本文以人工智能时代绿色造纸新技术及发展方向为主题, 系统梳理了生产过程智能化控制、设备状态监控及故障预测、能源管理和碳排放、污水处理及环保监测、供应链协同及行业改进等方面的研究现状和应用情况。其次, 阐述了智能一体化管理系统打破信息壁垒的方式, 介绍了基于人工智能的设备监控以及知识图谱进行故障预知与溯源的方法, 分析了工艺参数优化减少耗能的效果, 并探讨了在碳交易时代下数字化手段对于计算碳足迹以及调度能源的帮助。与此同时, 文章还涉及废水处理中的人工智能优化控制、林浆纸一体化与产业大脑等协同机制, 以及新质生产力对造纸产业绿色发展所起到的指导作用。最后指出, 数据治理、组织适配和人才培养等支撑要素同样不可忽视。未来的人工智能与绿色造纸将不仅仅局限于某一个方面或者某个环节上的改进和完善, 而是要实现全方位的合作, 以智能化代替简单机械化, 为传统的工业生产带来新的变化与可能。

参考文献

- [1] 程言君, 张亮, 王焕松, 等. 中国造纸工业碳排放特征与“双碳”目标路径探究[J]. 中国造纸, 2022, 41(4): 1-5.
- [2] Viitala, R., Miettinen, M., Marquez, R., Hämäläinen, A., Karhinen, A., Barrios, N., *et al.* (2025) Integration of Artificial Intelligence and Sustainable Energy Management in the Pulp and Paper Industry: A Path to Decarbonization. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **218**, Article 115809. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.115809>
- [3] 李继庚, 刘焕彬, 洪蒙纳, 等. 中国造纸工业智能化转型升级路径的探讨与实践[J]. 中国造纸, 2020, 39(8): 1-13.
- [4] 汤伟, 张诚, 冯波, 等. 造纸工业高级控制技术和先进控制系统综述[J]. 中国造纸, 2020, 39(8): 14-25.
- [5] 宋学斌, 贾灵波, 曹梅, 等. 深度学习技术在造纸行业中的应用成果与研究进展[J]. 中华纸业, 2025, 46(7): 54-60.
- [6] 俎文红, 肖峰军. 智能化管控一体系统在造纸企业管理中的应用研究[J]. 造纸科学与技术, 2025, 44(11): 159-161.
- [7] 李文娟, 郭其. 智能化视角下造纸企业一体化物联网数据采集系统研究[J]. 造纸科学与技术, 2025, 44(12): 137-138+141.
- [8] 张海潮, 贾媛媛, 程瑞鹏. 智能移动设备点巡检系统在造纸业中的应用[J]. 造纸科学与技术, 2025, 44(12): 124-126.
- [9] 全婧. 制浆造纸生产过程中智能控制技术的运用[J]. 造纸科学与技术, 2023, 42(4): 50-52.
- [10] 李婷. 人工智能背景下造纸机负荷分配节能控制技术[J]. 造纸科学与技术, 2023, 42(5): 44-47+57.

- [11] 郑丽娟, 谢治军. 基于大数据与人工智能的造纸质量控制系统设计[J]. 造纸技术与应用, 2025, 53(1): 30-32.
- [12] 张小辉, 周敏. 造纸过程定量水分智能控制数学模型构建[J]. 造纸科学与技术, 2024, 43(6): 89-92.
- [13] 刘华, 王梅. 基于云计算的制浆造纸产业大数据统计分析平台的构建[J]. 造纸科学与技术, 2025, 44(12): 119-120+131.
- [14] 张梦, 黄依可, 袁其栋, 等. 基于 GA-BPNN 算法的碳纸原纸性能指标建模预测研究[J]. 中国造纸, 2024, 43(1): 116-122.
- [15] 赵欢, 高荣. 智能化无人系统对造纸产业低碳式发展水平的影响研究[J]. 造纸科学与技术, 2025, 44(12): 51-53.
- [16] 王浩. 机器人与智能控制技术在造纸过程中的节能减排效果分析[J]. 华东纸业, 2024, 54(11): 25-27.
- [17] 卢琦瑶. 华章科技: 击楫勇进, 人工智能助力造纸装备创新发展[J]. 造纸信息, 2023(10): 18-19.
- [18] 高白川, 高佳佳. 人工智能背景下造纸机械运行状态智能监测研究[J]. 造纸科学与技术, 2025, 44(8): 96-99.
- [19] 张明辉, 于丽萍. 人工智能时代下造纸机械设备故障智能监测系统设计[J]. 造纸科学与技术, 2022, 41(6): 35-39.
- [20] 柴葳葳, 王妍, 程颖菲. 基于人工智能的造纸机械运行状态实时监测系统设计[J]. 造纸科学与技术, 2025, 44(7): 25-28.
- [21] 曹劲草. 基于人工智能的造纸机械设备故障检测系统设计[J]. 华东纸业, 2025, 55(10): 43-45.
- [22] Liang, X.Y., Zhang, Q.Y., Man, Y. and He, Z. (2024) Toward Sustainable Process Industry Based on Knowledge Graph: A Case Study of Papermaking Process Fault Diagnosis. *Discover Sustainability*, 5, Article No. 93. <https://doi.org/10.1007/s43621-024-00259-6>
- [23] 王婷, 赵坤. 人工智能与雷达遥感影像技术融合定位造纸水污染研究[J]. 造纸科学与技术, 2025, 44(10): 40-42+126.
- [24] 王辉, 谢辉. “双碳”目标背景下造纸企业数智化发展路径研究[J]. 造纸科学与技术, 2025, 44(11): 146-148.
- [25] 陆军祥, 白会茹. AI 技术在造纸污水处理运行优化中的应用[J]. 造纸科学与技术, 2026, 45(2): 18-21.
- [26] 宋继红, 郭琨. 基于人工智能辅助强化技术的制浆造纸污水处理研究[J]. 造纸科学与技术, 2025, 44(12): 45-47.
- [27] 何正磊, 胡丁丁. 基于多智能体强化学习的造纸污水多目标优化[J]. 化工学报, 2025, 76(4): 1617-1634.
- [28] 杨春蕾. 在线监测系统在工业废水环境风险预警中的应用——以造纸废水为例[J]. 华东纸业, 2026, 56(2): 73-75.
- [29] 周洪源. 造纸行业中环境监测的研究及进展[J]. 中华纸业, 2025, 46(8): 82-84.
- [30] 朱云鹏. 基于摩擦电探针和深度学习的造纸白水稳定性智能监测[D]: [硕士学位论文]. 南宁: 广西大学, 2024.
- [31] 秦玉静, 杨越, 李欢. 面向造纸废水处理智能控制的数学模型搭建[J]. 造纸科学与技术, 2025, 44(12): 59-60+84.
- [32] 徐冰, 张卓. 林浆纸一体化视角下多元主体区域性绿色经济发展研究[J]. 造纸科学与技术, 2025, 44(9): 154-156+168.
- [33] 魏文光, 黄鹏, 刘鸿斌, 等. 基于“产业大脑”的造纸产业新型工业化实践与思考[J]. 造纸信息, 2026(3): 19-23.
- [34] 王斌. 造纸工业智能制造与互联网+模式融合的概况和展望[C]//中国造纸学会. 中国造纸学会第十八届学术年会论文集. 2018: 457-462.
- [35] 赵国昂. 中国造纸产业链现代化构建路径战略思考[J]. 中国造纸, 2026, 45(3): 1-7.
- [36] 罗亚梅. 智能制造条件下造纸企业经济运行效率评价研究[J]. 投资北京, 2026(3): 131-132.
- [37] 郭政华, 王智堉. 造纸产业经济效益受绿色技术创新应用的影响研究[J]. 造纸科学与技术, 2025, 44(12): 168-170.
- [38] 钟华. 林平发展成功登陆沪主板循环造纸领先企业开启资本新篇[J]. 中华纸业, 2026, 47(3): 2.
- [39] 吴乙玉, 加婷婷. 新质生产力赋能造纸产业绿色发展的逻辑脉络及实践研究[J]. 造纸科学与技术, 2025, 44(8): 142-145.
- [40] 冯群. 人工智能赋能工科专业教学——以造纸技术课程为例[J]. 造纸技术与应用, 2025, 53(5): 54-56+60.
- [41] 韩小丽, 裴明驰, 韩建芹, 等. 人工智能在造纸行业的应用[J]. 造纸技术与应用, 2025, 53(3): 18-20.
- [42] 开赛尔·吾斯曼. 计算机网络与 AI 融合的造纸企业生产工艺智能决策系统研究[J]. 华东纸业, 2026, 56(2): 49-51.
- [43] 杨海燕, 李玲玉. 造纸企业物流作业流程与优化策略研究[J]. 造纸科学与技术, 2026, 45(2): 53-56.
- [44] Sajadi, S.M., Behnamfar, R., Sadeghi, M. and Tootoonchy, M. (2026) AI-Enhanced Simulation for Sustainable Production in Pulp and Paper Industry. *Annals of Operations Research*. <https://doi.org/10.1007/s10479-026-07047-7>