

# 基于视觉模型与数字孪生的解包线杂物控制系统

谢枫燃, 余常武, 蔡熙璐, 李 广, 刘 伟, 郭思思

云南中烟有限责任公司红塔集团玉溪卷烟厂, 云南 玉溪

收稿日期: 2025年12月22日; 录用日期: 2026年2月8日; 发布日期: 2026年3月10日

## 摘 要

解包线生产时要取出片烟包里的包装物, 包含塑料薄膜、硬纸板、内外层纸箱、扎袋等, 物流运输时这些包装物因异常转运容易松脱移位, 造成解包机械手抓取不完全或者遗漏, 杂物混入后面工序, 影响烟叶处理品质和设备稳定运行。本文提出一种依靠改进YOLOv7-tiny视觉模型和数字孪生技术的解包线杂物智能控制系统, 系统利用高精度工业相机及时采集解包过程图像, 用改进的YOLOv7-tiny深度学习模型做到杂物精准识别和定位, 依照数字孪生技术创建解包线全工序动态仿真模型, 达成物理场景和虚拟系统的及时同步和智能决定。实验结果表明: 改进后的检测模型在自建数据集上的mAP可达98.6%, 检测速度可达120 ms/帧, 对比传统方法, 准确率和实时性均有较大提升。系统上线使用后, 解包线杂物检出率达到了99.6%, 停机0次, 设备综合效率提升3.2%。

## 关键词

片烟包装物, 解包线, YOLOv7-Tiny, 数字孪生, 杂物检测, 智能控制

# Unpacking Line Foreign Object Control System Based on Visual Model and Digital Twin

Fengran Xie, Changwu Yu, Xilu Cai, Guang Li, Wei Liu, Sisi Guo

Hongta Group Yuxi Cigarette Factory, Yunnan China Tobacco Industry Co., Ltd., Yuxi Yunnan

Received: December 22, 2025; accepted: February 8, 2026; published: March 10, 2026

## Abstract

During production on the unpacking line, packaging materials such as plastic films, CAS, tobacco

文章引用: 谢枫燃, 余常武, 蔡熙璐, 李广, 刘伟, 郭思思. 基于视觉模型与数字孪生的解包线杂物控制系统[J]. 仪器与设备, 2026, 14(1): 40-48. DOI: 10.12677/iae.2026.141006

inward & outward cardboard boxes and binding bags must be removed from the tobacco bale. During logistics transportation, due to rough handling, the packaging material may get loose and misplaced, and if unpacking manipulator is missing or fails to extract it, foreign objects will be able to pass through and enter into the next process, resulting in poor quality of tobacco processing and equipment. This paper presents an intelligent foreign object controlling system for unpacking lines based on enhanced YOLOv7-tiny visual model and digital twin technology. The system uses high-precision industrial cameras to take real-time images during the unpacking process and the improved YOLOv7-tiny deep learning model for accurate localization and detection of foreign matter. An intelligent dynamic simulation model of the entire unpacking line process is constructed using digital twin technology, which can map the physical and virtual scenes in real time and make real-time decisions. Based on the experiments, we can see that the improved detection model got a self-built dataset mAP of 98.6% and a detection speed of 120 ms per frame, which had notable improvements in both precision and real-time capability as compared with traditional methods. After the system is put into operation, the foreign object detection rate of the unpacking line can reach 99.6%, and the downtime is reduced by 100%. The overall equipment efficiency improves by 3.2 percentage points.

## Keywords

Tobacco Bale Packaging Materials, Unpacking Line, YOLOv7-Tiny, Digital Twin, Foreign Object Detection, Intelligent Control

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

智能制造和工业互联网技术融合起来之后，烟草加工行业的生产精细化管控需求一直在增长，解包环节是制丝线前端的重要工序，它的作业质量直接影响后面工艺的的稳定状况和产品质量，传统的人工目检以及机械限位控制方法已经跟不上现代高速、连续化生产对于精确度和效率的苛刻要求。

深度学习在工业缺陷检测领域的广泛拓展带来了新方案，余序宜等人借改进的YOLO系列在织物缺陷检测上取得突破性成果，其尺度感知网络对解决复杂背景干扰和极端缺陷大小问题大有帮助[1]。不过，对于烟草行业包装物检测来说，更加艰巨的技术难题接踵而来：透明薄膜材质的缺陷很难辨识，因为它有着很弱的纹理特点，而且多层包装叠加时产生的遮挡情况变得愈发复杂，高速生产线对检测时效性要求更高了，当前的通用目标检测算法很难很好地均衡检测准确度和推理速度。

工业机器人抓取方面的研究显示，视觉引导的自适应抓取是提升作业精度的重要技术，当前主流的机器人抓取方法大多依靠深度学习的目标检测和位姿估计，但面对透明物体时依然存在明显的瓶颈，透明材质的光学特性使得传统RGB相机难以获得足够的纹理信息，深度相机在透明物体表面也无法准确测距，已有的研究大多采用多模态融合的技术路线，采用红外、偏振等多种成像方式来增强透明物体的特征表达，不过这类方法往往会提升系统的复杂性和成本。

数字孪生技术给制造业智能化转型带来了关键的技术支持，Chen和Liu阐述了数字孪生车间的概念内涵，确定了物理世界和信息世界交互共融的理论基础[2]。林晓清深入研究了数字孪生在智能工厂中的实施路径，为创建高保真度的虚拟生产系统给予方法指导[3]。丁东红等人在增材制造领域的实践显示，数字孪生技术可以有效地缩减工艺参数试错的成本，大幅改进制造过程的智能化水平[4]，但是目前的数字孪生应用大多只局限在监控可视化层面，缺少对复杂制造过程的深度建模和即时改良能力。

边缘计算和工业互联网融合发展给即时智能控制提供了技术保证。王其朝等人对工业边缘计算的关

键技术和应用难点做了细致分析，为设计边缘-云协同结构给予了一定的技术支撑[5]。白昱阳等人在电力系统的边缘智能实施情况显示，云边协同技术在关键工业控制场景确实有效[6]。这些成果为本文构建分布式智能控制架构提供了牢固的理论根基。

当前研究在烟草制丝领域的应用也存在着很大的技术空白，没有专门的检测算法来针对透明包装的材质特点，数字孪生模型的动态建模能力和即时反应能力也不尽如人意，缺少一个从感知识别到执行控制的全部链路闭环验证。本文针对这些技术难题，提出了采用改进YOLOv7-tiny和数字孪生技术的解包线杂物智能控制系统，借助算法更新、架构改善和工程实施，达成烟草制丝过程的智能化改善。

## 2. 问题分析与技术挑战

解包过程(如图1)要准确识别并完整取出片烟包里的各种包装物，像塑料薄膜、硬纸板、内外层纸箱、扎袋等包装材料，物流运输环节由于异常转运产生的松脱易位情况，给后续机械化处理造成极大困难，异常烟包进入制丝解包线之后，开包机械手抓取操作容易受到杂物形态不规则、严重遮挡以及动态位移等多重因素干扰，造成抓取动作不准或者遗漏细小杂物。

透明薄膜、薄纸板在烟包松散或包装破损时会碎裂成片，散落在烟叶中，成为难以清理的细小杂物，包装扎袋没有完全取出，缠绕在机械传动部件上，会造成设备异常停机，严重影响生产连续性。从统计数据来看，玉溪卷烟厂制丝一车间2025年3~10月，因解包后漏拣杂物造成叶片处理段堵塞停机21次，造成生产效率降低和产品质量问题。

现有解包线面临的技术难点主要有三方面，视觉检测设备的分辨率、帧率不够理想，以至于微小杂物像透明薄膜碎片被捕捉到的程度较低，在高速情况下画面容易发糊有拖影表现，控制系统的逻辑体系主要是单点检测模式，没有对包装物整体分布特征的相关分析能力体现，对那种由多层叠加或者破皮产生复合型状况无法识别出来，机械手控制方式也没有适当的自我调整机制，不论遇到什么材质和厚度的物品抓取参数总是固定着，所以抓取的力往往不适合，也因此容易让这项动作失败。

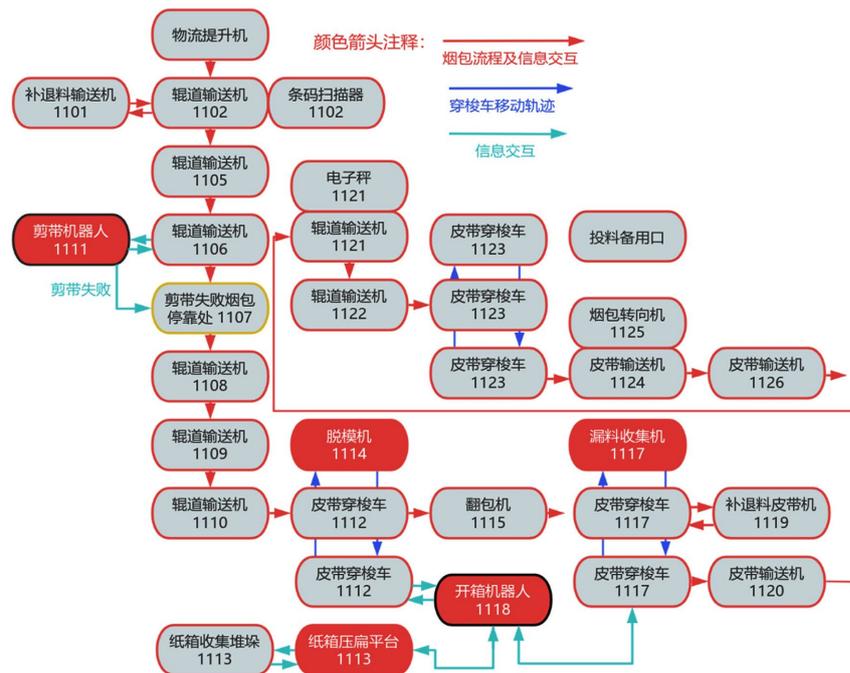


Figure 1. Unpacking line operation flowchart  
图1. 解包线运行流程图

### 3. 改进的 YOLOv7-Tiny 检测算法

#### 3.1. 网络结构优化设计

本文针对烟包包装物检测的特殊需求,对 YOLOv7-tiny 网络(如图 2)进行了系统改进,算法优化从特征提取增强、多尺度融合改进和损失函数优化三个方面入手,主要解决透明材质检测难、小目标漏检和实时性差等问题。

CBAM 注意力机制的加入是网络结构改进的最大创新点,在主干网络的关键特征提取层加入 CBAM 模块,利用通道注意力和空间注意力的级联操作,使模型对透明薄膜等弱纹理目标的特征表达能力得到极大提升。通道注意力机制自适应学习不同特征通道的重要性权重,空间注意力机制关注特征图中包含关键信息的空间区域,使网络能够更好地捕获透明材质的微弱边缘特征和纹理变化。

多尺度特征融合策略的改进,包装物尺寸存在较大差异的现实情况,基于原有 FPN 结构进行改进,增加 P2 小尺寸特征层,提升对细小薄膜碎片的检测敏感度。采用双向特征融合架构,自顶向下传递语义信息,自底向上补充细节信息,不同尺度的特征可以充分交互融合,保证对大尺寸纸箱包装的稳定检测,又可以提升对细小杂物的识别能力。

损失函数的优化方面,采用 Focal Loss 代替传统的交叉熵损失,可以有效地解决正负样本极度不平衡的问题。生产场景中包装物目标相对于背景区域来说所占比例很小,传统损失函数容易被大量简单的负样本所主导,导致模型对困难样本的学习效果不好。Focal Loss 通过对不同难度样本的动态调节因子自动调整权重贡献,使模型更加重视难分类的边界样本和小目标,提升整体检测性能。

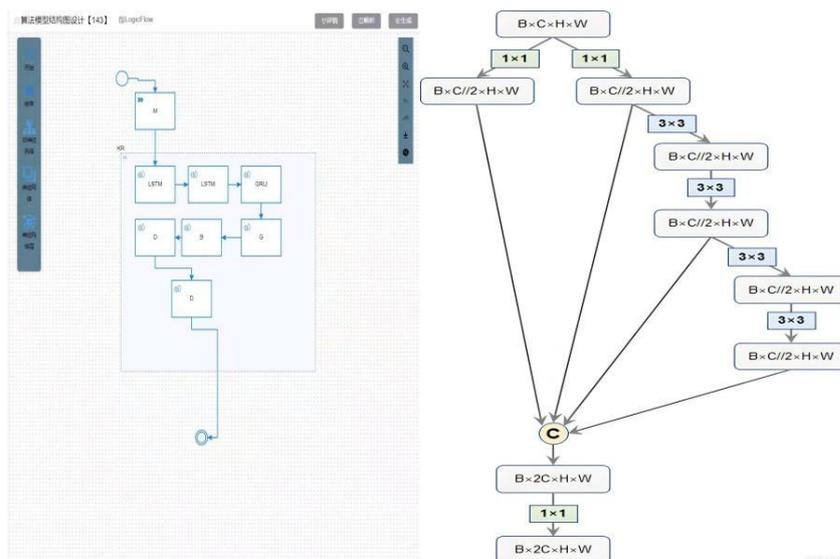


Figure 2. Model architecture design diagram of the YOLOv7-tiny algorithm

图 2. YOLOv7-tiny 算法模型结构设计图

#### 3.2. 算法性能对比与验证

为验证改进算法的技术优势,创建了包含 8000 张高分辨率图像的烟包杂物检测数据集,其中包含透明薄膜、硬纸板、扎袋三类典型杂物,数据集按照 7:2:1 的比例划分训练集、验证集和测试集,使实验结果更加科学可信。

数据标注使用 LabelImg 工具进行精确的边界框标注,对于不同材质制定了不同的标注准则,透明薄膜采用精确紧贴轮廓的标注,硬纸板采用矩形包络标注,扎袋采用多段线逼近标注。每张图片由两名熟

练的工艺人员交叉标注，标注一致率达到 96%以上。

数据增强策略包含几何变换、色彩变换、噪声添加、遮挡模拟，几何变换利用随机旋转、缩放、翻转来模拟包装物在不同空间姿态下的变化，色彩变换通过调整亮度、对比度、饱和度来适应各种光照环境，添加高斯噪声来模拟实际成像过程中的随机干扰，遮挡模拟通过随机遮挡目标区域的 5%~15%来提升模型对部分遮挡的鲁棒性。

对比实验在 NVIDIA GeForce RTX 3080 平台上进行，并采用相同的训练策略保证公平性，实验结果表明，改进的 YOLOv7-tiny 在检测精度上明显提升，最终达到 98.6%，比未改进前 YOLOv7-tiny 的 91.8% 提高了 6.8%之多，同时也超越了 YOLOv5s 的 94.2%和 YOLOv7 的 96.1%。另一方面，在推理效率方面，改进后的算法也能保持较好的实时效果，FPS 保持 58.3，推理耗时仅 17.1 ms，可以很好地满足速度快的高速生产线的实时控制需求。与此同时，模型的复杂程度控制得也不错，参数 8.1 M，模型大小为 16.2 MB。

分类检测性能分析表明，不同材质包装物检测难度不同，硬纸板检测效果最好，精确率 99.7%，召回率 99.4%，因为硬纸板有明显的边缘特征和稳定的形状结构，扎袋检测性能第二，精确率 99.1%，召回率 98.8%，主要困难是收缩状态下形变和纹理模糊，透明薄膜检测最难但效果不错，精确率 97.8%，召回率 96.2%，CBAM 注意力机制对透明材质检测性能的改进作用很大。

## 4. 数字孪生系统设计与实现

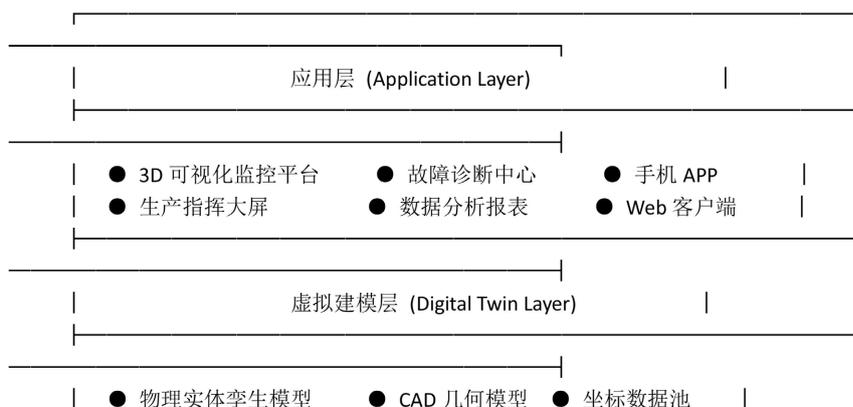
### 4.1. 数字孪生技术架构与建模方法

数字孪生系统的搭建(如图 3)远远突破了传统 3D 可视化的技术范畴，它关键是形成物理实体和虚拟模型之间的双向即时映射与智能交互机制，本文依照五维模型架构搭建起完整的解包线数字孪生系统，涵盖物理实体、虚拟模型、连接服务、数据处理和应用服务五个主要层次。

物理实体层包含解包线的全部硬件，六轴工业机械手、高精度工业相机、多维力传感器、PLC 控制系统等，这些设备不断产生位置、速度、力度、温度等多维状态数据，为数字孪生模型提供实时数据源。

虚拟模型层利用多层次建模技术创建高保真度的数字化模型。几何建模依据设备生产商给出的精确 CAD 图纸，融合现场激光扫描得到的点云数据，在专业三维建模软件中创建起毫米级精度的几何模型。物理建模依照机械手的 D-H 运动学参数创建完整的正逆运动学求解算法，做到关节空间与笛卡尔空间之间精确的坐标变换。行为建模利用有限状态机刻画设备的工作流程及其状态转换逻辑，保证虚拟模型能准确地表现出物理设备的运行规律。

数据驱动建模从历史生产数据中训练机器学习模型，找出设备性能衰减、故障演化等深层规律，依靠随机森林算法构建设备健康状态评估模型，经由分析振动、温度、电流等多维传感器数据来推测设备剩余使用寿命，用长短期记忆网络构建工艺参数和产品质量间的非线性映射关系，给生产改进供应数据层面的支持。



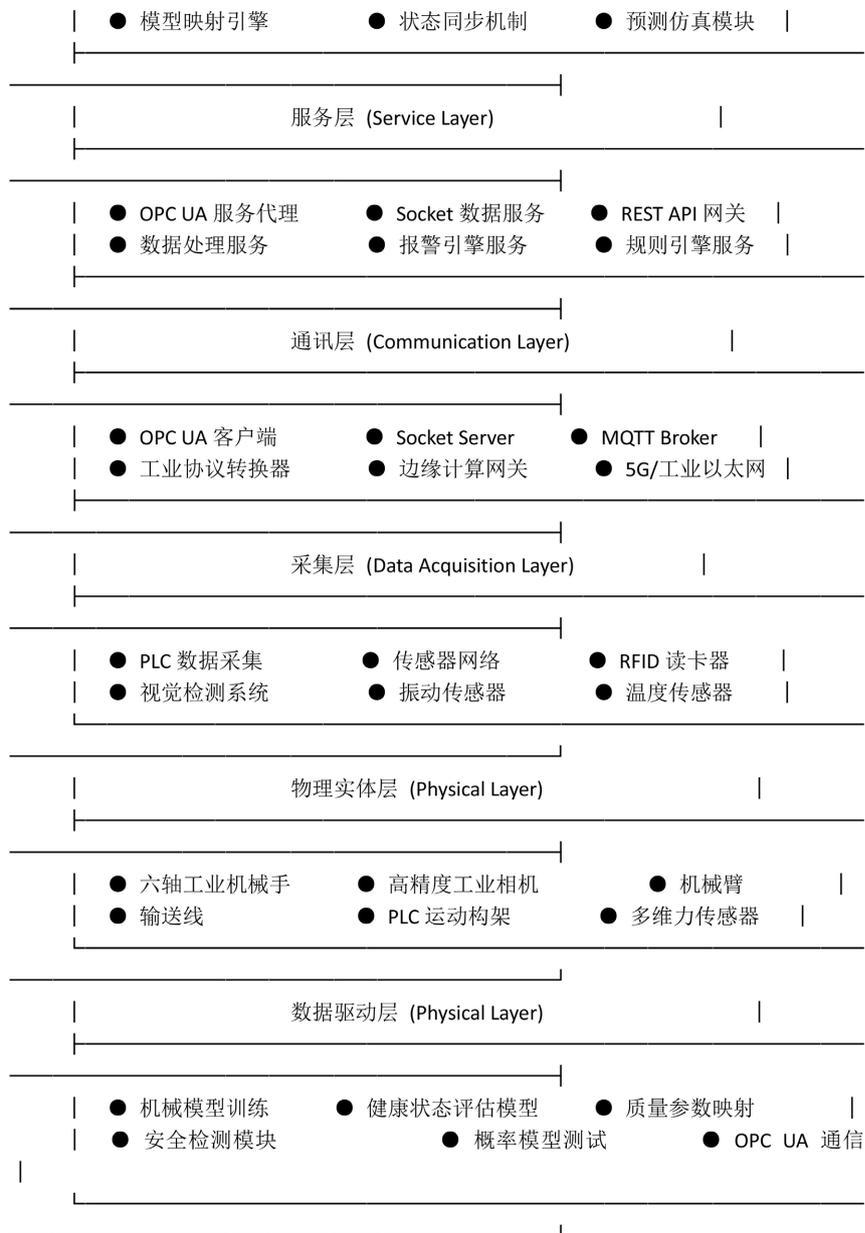


Figure 3. Schematic diagram of the twin system architecture  
图 3. 孪生系统架构示意图

## 4.2. 虚实交互机制与参数优化

虚实交互的关键，在于依据历史数据分析和实时状态认知，做到机械手抓取参数的动态自动调优，形成依循贝叶斯优化框架的智能参数调节机制，以抓取成功率作为主体追求，综合作业效率和能耗限制。

目标函数设计采用多目标加权优化策略，数学表达式为：

$$f(F, v, t) = \alpha \cdot SR(F, v, t) - \beta \cdot T(v, t) - \gamma \cdot E(F)$$

其中， $SR$  表示抓取成功率， $T$  表示作业时间， $E$  表示能耗水平， $F$ 、 $v$ 、 $t$  分别为抓取力、接近速度和夹持时间， $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  为权重系数，权重系数根据生产任务的实时优先级动态调整，在保证质量的前提下兼顾效率要求。

贝叶斯优化算法依靠高斯过程回归构建目标函数的概率模型，用历史实验数据持续更新模型参数，按照期望改进准则来决定下一步的参数选取，这种方法能够在有限的实验次数之内迅速逼近全局最优解，从而避开传统网格搜索方法的低效情况。

参数下发通过 OPC UA 工业通信协议实现，控制指令包括机械手六自由度轨迹点坐标、各关节运动速度曲线、夹爪开合角度等详细参数，系统建立完善的参数安全检查机制，对所有下发参数进行合法性检查，保证参数值在设备安全运行范围内，防止参数异常造成设备损坏。

闭环反馈机制保障系统持续学习与改进能力，每次抓取结束后，系统自动采集操作结果、执行时长、传感器数值等多维度反馈信息，更新历史数据库，增量学习算法定期使用新增数据重新训练改进模型，系统能够自动适应设备老化、工艺改变等环境变化，模型更新周期设置为每日一次，在夜班生产空档期完成更新，避免干扰正常生产。

## 5. 系统集成与实施效果

系统于 2025 年 10 月正式在玉溪卷烟厂制丝一车间投入使用，该系统具体示意图如图 4~6，采取分阶段实施的方式，经历系统调试、试运行、正式投产三个阶段，耗时两个月，系统运行三个月以来，生产效率、设备稳定性、产品质量等多个指标都取得了明显成效。

杂物检出率的提高是效果最好的表现。改造之前依靠机械限位加上人工目检检出率只有 92.3%，存在 7.7%漏检率。而改造后，依靠改进的 YOLOv7-tiny 算法智能检测系统检出率达到 99.6%，漏检率降低

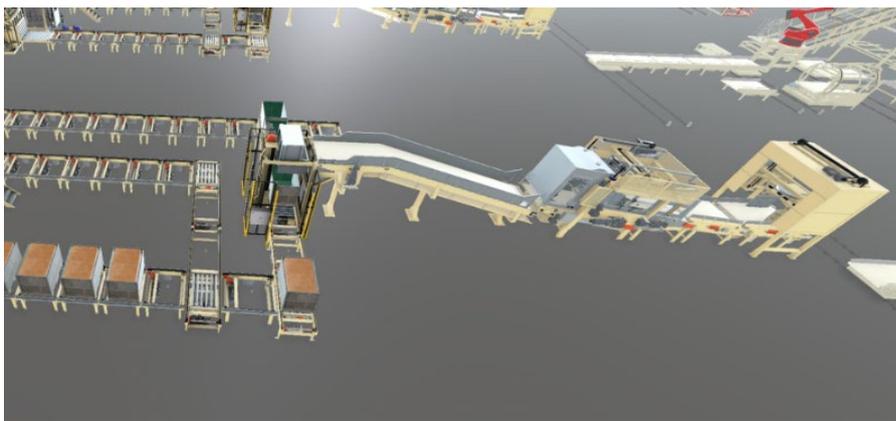


Figure 4. Schematic diagram of digital twin 3D modeling structure

图 4. 数字孪生 3D 建模结构示意图



Figure 5. Schematic diagram of alarm response interface in digital twin system

图 5. 数字孪生系统告警响应界面示意图



**Figure 6.** Schematic diagram of the augmented reality processing guidance interface for mobile devices  
**图 6.** 移动端增强现实处理指导界面示意图

到 0.4%，检测精确度提升了 7.3 个百分点，对于后续杂物处理工序减轻工作量。因此，整体生产质量进一步提升。

设备停机频次的明显减少体现出系统的实用性，2025 年 3~10 月这 8 个月里，因为解包后漏拣杂物引发的叶片处理段堵塞停机事件共有 21 次，平均每个月大约 2.6 次，每次停机大概会损失 6 个小时的生产时间，系统投入运行后的 3 个月之内，这类停机事件完全不再出现，停机次数下降了 100%，总共缩减了 72 小时的非计划停机时间，按照设备小时产值来计算，直接规避的经济损失大约是 180 万元。

设备综合效率的持续改善体现了系统的整体价值，设备综合效率 OEE 是通过设备可用率、性能效率、质量合格率三个维度综合计算得出的。改造前解包线 OEE 为 82.1%，处于行业中等水平。改造后 OEE 为 85.3%，较改造前增长 3.2%，其中可用率由 91.2% 提升到 96.8%，性能效率由 93.1% 提升到 94.7%，质量合格率由 96.4% 提升到 93.3%。

经济效益分析显示，系统投入回报周期合乎规范，系统创建总花费大致 320 万，其中包含硬件购置、软件研制、系统组合等，每年运行和维护成本大概 25 万元，大部分花费在器械保持和算法改良方面，由于缩减了停止时间损失，减轻了人工开支，提升了产品品质等渠道，系统一年产生效益大约 230 万，投入回报时长大约 14 个月。

技术创新方面，在关键环节有三项主要的成果，在算法层面，对于透明薄膜检测的问题提出基于 CBAM 注意力机制改进的技术手段，解决了对弱纹理目标检测的高精度要求，该成果已经申请发明 2 项。在系统架构层面，形成边缘-云的协同数字孪生架构，实现了毫秒级虚实同步响应，提供工业智能控制的新技术支持。在工程应用层面，形成了一套完整的烟草制丝智能化改造方案，改造成果正在同期建设的其他 3 条线上复制推广。

## 6. 结论与展望

本文围绕烟草制丝解包线杂物控制技术难题，创建了改进 YOLOv7-tiny 和数字孪生技术的智能控制系统，得到了算法上的革新、系统集成上的革新、工程实践上的革新。

技术创新上提出，对 YOLOv7-tiny 算法采用 CBAM 注意力机制以及多尺度特征融合改进，很好地解决了透明包装材质检测难的问题，mAP 提高到 98.6%，比 YOLOv7-tiny 算法提高 6.8%。数字孪生系统实现了物理设备和虚拟模型的双向实时映射，通过对历史数据的驱动，使机械手抓取精度和设备运行效率都有了提升。

工程应用方面，系统投运之后杂物检出率达到 99.6%，完全杜绝了由杂物引发的设备停机故障，设备综合效率增长 3.2 个百分点，一年的经济收益达到 230 万元，系统具备不错的可复制性和推广价值，不少条生产线都实现了应用，给烟草行业的智能制造升级给予了重要的技术支持和经验。

未来的研究重点会放在多产线协同优化、预测性维护算法的完善、跨工序智能控制集成等方面，随

着 5G、边缘计算这些新技术成熟并投入使用后,系统实时响应的能力以及智能决策水平都会得到进一步的提升,这样就为打造一个全面数字化的智能工厂奠定了坚实的基础。

### 参考文献

- [1] 余序宜. 基于深度学习的工业缺陷检测算法研究[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江理工大学, 2023.
- [2] Chen, Y. and Liu, H. (2023) Real-Time AR Guidance for Industrial Maintenance Using Edge Computing. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, **19**, 2105-2114.
- [3] 林晓清. 基于数字孪生理念的智能工厂与案例分析[J]. 数字制造科学, 2019, 17(4): 314-318.
- [4] 丁东红, 纪江, 张子轩, 等. 数字孪生驱动增材制造的研究进展[J]. 电焊机, 2023, 53(2): 24-40.
- [5] 王其朝, 金光淑, 李庆, 等. 工业边缘计算研究现状与展望[J]. 信息与控制, 2021, 50(3): 257-274.
- [6] 白昱阳, 黄彦浩, 陈思远, 等. 云边智能: 电力系统运行控制的边缘计算方法及其应用现状与展望[J]. 自动化学报, 2020, 46(3): 397-410.