

基于机器视觉的笼绞机线轴智能监测系统研究

李 昂

南京邮电大学通信与信息工程学院 江苏南京

【摘要】针对传统笼绞机线轴人工巡视效率低、视角受限、安全风险高等问题，设计并实现了一种基于机器视觉的智能监测与自动化控制系统。系统采用高帧率工业相机配合环形光源进行图像采集，基于 RK3588 边缘计算平台部署优化后的 YOLOv11 目标检测算法，实现对线轴有序缠绕、无序缠绕、夹线、断线等多种状态的实时检测。通过模型压缩和 INT8 量化技术，系统在保证检测精度的同时实现了边缘端的实时推理。测试结果表明，系统对各类状态的检测准确率均超过 92%，其中断线检测准确率高达 98.2%。该系统能够实现 24 小时无人值守监控，有效提高了生产效率，降低了安全风险，为工业自动化生产提供了可靠的技术支撑。

【关键词】机器视觉；笼绞机；智能监测；边缘计算

【基金项目】国家自然科学基金 (62306151)

【收稿日期】2025 年 10 月 24 日 **【出刊日期】**2025 年 11 月 24 日 **【DOI】**10.12208/j.jeea.20250206

Research on intelligent monitoring system for spools in cage stranding machine based on machine vision

Ang Li

School of Communications and Information Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing, Jiangsu

【Abstract】 To address the problems of low efficiency, limited viewing angle, and high safety risks in traditional manual inspection of cage stranding machine spools, this paper designs and implements an intelligent monitoring and automatic control system based on machine vision. The system uses high frame rate industrial cameras with ring light sources for image acquisition, and deploys optimized YOLOv11 object detection algorithm on RK3588 edge computing platform to achieve real-time detection of various spool states including orderly winding, disorderly winding, wire clamping, and wire breaking. Through model compression and INT8 quantization techniques, the system achieves real-time inference at the edge while maintaining detection accuracy. Test results show that the detection accuracy for various states exceeds 92%, with wire breaking detection accuracy reaching 98.2%. The system can achieve 24-hour unmanned monitoring, effectively improving production efficiency and reducing safety risks, providing reliable technical support for industrial automated production.

【Keywords】 Machine vision; Cage stranding machine; Intelligent monitoring; Edge computing

引言

随着工业 4.0 和智能制造的快速发展，工业生产过程的自动化和智能化水平不断提升。在电线电缆制造行业中，笼绞机作为关键生产设备，其线轴状态的实时监测对于保障生产连续性和产品质量具有重要意义。笼绞机作为电缆生产中的核心设备，主要用于将多股导线按照特定的节距和方向进行绞合，形成具有一定机械强度和电气性能的线缆产品。在实际生产过程中，线轴的放线状态直接影响着产品的质量和生产效率。一旦线轴用完而未及时更换，或者出现夹线、断线等异

常情况，不仅会导致生产中断，还可能造成大量的废品和经济损失。

然而，当前车间笼绞机线轴状态主要依赖人工巡视，这种传统方式面临着诸多困境。首先，车间布局复杂，设备分布广泛，一个典型的电缆生产车间可能拥有数十台笼绞机，巡视人员需要在不同设备之间来回移动，完成一次全面巡视往往需要数小时，这导致对单个设备的监测存在较长的时间间隔。其次，为保障人员安全，设备旋转体外侧通常设置了防护栏、防护网和箱体等装置，这些防护设施虽然有效降低了人员意外接触

旋转部件的风险，但也严重限制了巡视视角，使得许多潜在的异常情况难以被及时发现。此外，人工巡视属于高度重复性劳动，巡视人员长时间从事单调的观察工作，极易产生视觉疲劳和注意力不集中，这不仅影响了巡视的准确性，还可能导致重要异常信息的遗漏。

据行业统计数据显示，由于人工巡视的局限性，约有 15% 的线轴异常情况未能被及时发现，导致的生产损失占总损失的 30% 以上。特别是在夜班期间，由于人员精力下降和环境光线不足，异常检出率更是大幅降低。这些问题不仅影响了生产效率，还增加了企业的运营成本和安全风险。

近年来，机器视觉技术的飞速发展为解决上述问题提供了新的技术路径^[1-4]。机器视觉作为人工智能的重要分支，通过模拟人类视觉系统，利用摄像头获取图像信息，并通过计算机进行处理和分析，能够实现对目标的自动识别、定位和测量。特别是深度学习技术的突破，使得机器视觉在复杂场景下的识别准确率大幅提升，已经在工业质检、安防监控、自动驾驶等领域得到广泛应用^[5-7]。通过在关键位置部署视觉传感器，结合深度学习算法，能够实现对设备运行状态的实时、全方位监测，有效弥补人工巡视的不足。

为此，本文设计并实现了一种基于机器视觉的绞线机轴智能监测与自动化控制系统，该系统综合运用了高速图像采集、深度学习目标检测、边缘计算和自

动化控制等多项先进技术，旨在彻底改变传统的人工巡视模式，实现线轴状态的智能化、自动化监测。系统不仅能够准确识别线轴的各种运行状态，还能根据检测结果自动触发相应的控制动作，大幅提高监测效率、保障生产安全、降低人力成本，为电缆制造行业的智能化升级提供有力支撑。

1 系统总体设计

基于对传统人工巡视模式的深入分析和工业现场的实际需求，本系统采用“采集-分析-预警-响应”的闭环设计架构，通过高清摄像头、边缘计算设备和智能检测算法的有机结合，构建了一套完整的智能监测解决方案。系统设计充分考虑了工业环境的复杂性、设备运行的连续性以及生产安全的重要性，力求在保证检测准确性的同时，实现系统的高可靠性和易维护性。

如图 1 所示，系统整体架构包括三个核心模块，各模块相互协作，形成完整的监测闭环。数据采集模块负责通过高性能工业相机实时获取线轴图像信息，该模块需要保证图像的清晰度和帧率，并适应工业现场复杂的光照条件和振动环境。智能分析模块基于边缘计算平台运行优化后的视觉检测算法，对采集到的图像进行实时分析，识别线轴的各种运行状态，包括正常放线、即将用完、夹线、断线等。自动控制模块根据检测结果触发相应的预警或控制动作，与现有的生产控制系统无缝对接，实现监测与控制的一体化。

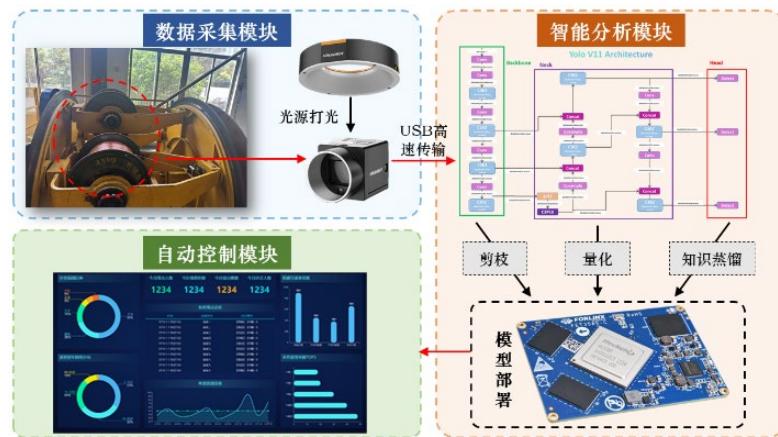


图 1 系统架构图

表 1 硬件配置表

组件	型号/规格	主要参数
工业相机	海康 MV-CU020-90UM	2048×1200, 150fps
边缘计算设备	RK3588 开发板	8 核 CPU, 6TOPS 算力
光源	环形 LED 光源	≥18000Lux, PWM 调光
镜头	C-Mount 镜头	8-12mm 焦距
存储	eMMC 闪存	128GB 容量

组件	型号/规格	主要参数
在硬件平台选型方面,如表1所示,工业相机选用了海康威视的MV-CU020-90UM型号,该相机采用CMOS全局快门传感器,能够在高速运动场景下获得清晰无畸变的图像,其150fps的高帧率确保了对快速旋转线轴的准确捕捉。边缘计算设备选用了基于RK3588芯片的开发板,该芯片集成了高性能的八核CPU和6TOPS算力的NPU,能够满足深度学习模型的实时推理需求。		理,是整个系统的信息输入端。该模块的实现分为三个步骤。第一步是图像采集,系统通过高帧率工业相机实时拍摄线轴图像,相机采用150fps的采集频率确保捕捉到线轴的每个运动细节,同时配合环形LED光源消除金属表面反光和阴影干扰。第二步是图像预处理,针对工业现场的复杂环境,系统首先采用中值滤波和高斯滤波相结合的方法去除椒盐噪声和高斯噪声,然后应用改进的自适应直方图均衡化算法(CLAHE)增强图像对比度,该算法通过分块处理和双线性插值有效避免了过度增强问题。第三步是特征提取,系统将图像从RGB空间转换到HSV空间,利用色调分量的光照不变性稳定提取线缆特征,并通过形态学开闭运算优化分割结果,为后续的智能分析提供清晰准确的图像数据。
数据采集方案的设计是系统成功的关键环节之一。考虑到笼绞机线轴的特殊性——高速旋转、金属反光、防护设施遮挡等问题,系统采用了创新的光学设计方案。高帧率工业面阵相机搭配专业的环形LED光源,通过精心设计的光路,有效消除了金属表面的反光和阴影,确保了图像的高质量。相机通过定制化的L型支架安装于笼绞机防护罩外侧的最佳拍摄位置,支架采用高强度铝合金材料制造,配备多自由度调节机构,可以根据不同型号的笼绞机灵活调整拍摄角度。这种安装方式既保证了拍摄视角的完整性,能够覆盖整个线轴区域,又确保了操作人员的安全,不会对正常的生产操作造成任何干扰。		(2) 智能分析模块
在数据传输方面,系统充分利用了现代高速接口技术。相机通过USB3.0接口直连边缘计算设备,该接口提供了高达5Gbps的传输带宽,完全满足高分辨率、高帧率图像数据的实时传输需求。为了进一步提高系统的可靠性,传输线缆采用了工业级屏蔽线材,有效避免了电磁干扰对数据传输的影响。同时,系统还配备了完善的触发同步机制,通过与笼绞机的编码器进行联动,实现了图像采集与设备运行的精准同步。这种同步机制不仅提高了检测的准确性,还大大减少了无效数据的产生,提高了系统的整体效率。		智能分析模块是系统的核心处理单元,负责从预处理后的图像中识别线轴状态并做出判断。该模块的实现包括四个关键步骤。第一步是目标检测,系统基于YOLOv11框架构建专门的旋转目标检测模型,通过C3k2模块提取多尺度特征,配合C2PSA注意力机制增强关键区域表达,实现对旋转线轴的精准定位。第二步是模型优化,为适应边缘设备部署,系统通过知识蒸馏将大模型知识迁移到轻量化模型,采用结构化剪枝去除冗余连接,并使用INT8量化将模型压缩75%,确保在RK3588平台上15ms内完成推理。第三步是状态识别,系统针对不同缠绕方式设计专门算法:有序缠绕通过几何分析计算缠绕比例估算剩余量,无序缠绕采用语义分割分析线缆密度分布,实现对线轴剩余量的准确判断。第四步是异常检测,通过分析连续帧的运动矢量场变化,系统能够快速识别夹线、断线等紧急状态,检测准确率超过96%。
系统软件架构采用了模块化设计理念,各功能模块之间通过标准化接口进行通信,便于系统的扩展和维护。核心算法模块采用C++语言开发,充分利用了硬件的并行计算能力;用户界面采用现代化的Web技术开发,支持跨平台访问;数据存储采用时序数据库,能够高效地存储和查询历史监测数据。整个系统设计充分体现了工业级产品的特点:高可靠性、易维护性和良好的可扩展性,为后续的功能升级和应用推广奠定了坚实的基础。		(3) 自动控制模块
2 关键模块实现		自动控制模块负责将检测结果转化为实际的控制动作,实现监测与生产的闭环控制。该模块的实现采用分级响应机制。第一步是通信接口建立,系统通过Modbus协议与现场PLC建立实时通信链路,采用中断驱动机制确保异常信息的毫秒级传输。第二步是预警分级管理,根据线轴剩余量设置三级预警:黄色预警(剩余30%, 提前15分钟)提醒准备更换,橙色预警(剩余15%, 提前5分钟)要求立即准备,红色警报(剩余10%)自动降速并强制更换。第三步是紧急响应处理,当检测到夹线或断线时,系统立即向PLC发
(1) 数据采集模块		
数据采集模块负责高质量图像数据的获取和预处		

送停机指令，同时触发声光报警并将异常图像推送到监控大屏，整个响应过程在 2 秒内完成。第四步是状态反馈与记录，系统实时记录所有检测数据和控制动作，生成详细的运行日志，为生产优化和故障分析提供数据支撑。通过这种多级响应机制，系统实现了从检测到控制的全自动化流程。

3 实验与验证

系统考虑了工业环境的特殊性，电缆生产车间存在高温、高湿、粉尘等恶劣条件，因此所有设备均采用工业级设计，防护等级达到 IP54 以上。工业相机采用密封式金属外壳，镜头前端加装可更换保护玻璃；边缘计算设备采用无风扇设计，确保在-10°C至 50°C环境下稳定运行。安装过程中，与生产部门密切配合，利用设备检修时间完成部署。相机通过定制 L 型支架安装于防护罩外侧最佳拍摄位置，所有线缆采用工业级护套管保护并规范布线。

软硬件集成是实现智能监测的关键环节。软件系统采用三层架构设计：数据采集层通过多线程技术和环形缓冲区机制确保图像高速稳定采集；业务逻辑层包含所有检测算法，模块间通过消息队列通信；应用表现层提供直观的操作界面。系统通过 Modbus 协议与现场 PLC 实现无缝对接，采用中断驱动机制确保异常信息的实时传输。预警功能根据线轴剩余量分三级响应：黄色预警（提前 15 分钟）、橙色预警（提前 5 分钟）和红色警报（临界值），夹线断线等紧急情况则立即触发停机保护。

为验证系统性能，在某大型电缆企业进行了现场测试。该企业拥有 20 多台笼绞机，通过功能、性能、稳定性和极限测试的全面验证，系统展现出优异的性能指标。

表 2 不同状态检测结果

检测状态	检测准确率	误报率	漏报率
有序缠绕	94.8%	2.1%	3.1%
无序缠绕	92.3%	3.2%	4.5%
夹线检测	96.7%	1.8%	1.5%
断线检测	98.2%	0.9%	0.9%

测试结果充分验证了系统的实用价值。在 100 多

小时的连续运行中，系统成功检测出 42 次线轴即将用完的情况，避免了生产中断；准确识别了 8 次夹线和 3 次断线异常，及时触发停机保护。特别是在夜班期间，系统保持稳定的检测性能，有效弥补了人工巡视的不足。

4 结论

本文设计并实现了基于机器视觉的笼绞机线轴智能监测与自动化控制系统，成功解决了传统人工巡视存在的效率低、视角受限、安全风险高等问题。系统通过高速图像采集、YOLOv11 算法优化和边缘计算部署，实现了线轴多状态的实时准确检测，各类状态检测准确率均超过 92%。未来，该系统可推广至纺织、包装等类似工业场景，并通过与工业互联网平台融合，构建更大规模的智能制造生态系统，为传统制造业转型升级提供有力支撑。

参考文献

- [1] 许志文,廉迎战,陈阳,等.基于机器视觉的纺织品缺陷检测系统的研究与实现[J].工业控制计算机,2014,27(11):20-21.
- [2] 晋博,蔡念,夏皓,等.基于深度学习的工业视觉检测系统[J].计算机工程与应用,2019,55(02):266-270.
- [3] 张晨,高盛华,王朔,等.基于计算机视觉的化工安监系统[J].计算机应用与软件,2025,42(05):72-77.
- [4] 吴兆中,张新娜,王栋,等.基于机器视觉的凸轮轴表面缺陷检测实验研究[J].机电工程,2025,42(04):697-705.
- [5] 付山,谢晖,易建业.基于机器视觉的金属表面缺陷检测[J].电镀与精饰,2024,46(12):145-146.
- [6] 郭庆梅,刘宁波,王中训,等.基于深度学习的目标检测算法综述[J].探测与控制学报,2023,45(06):10-20.
- [7] Khanam R, Hussain M. Yolov11: An overview of the key architectural enhancements[J]. arXiv preprint arXiv:2410.17725, 2024.

版权声明：©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

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



OPEN ACCESS