

# 基于视频算法的电石炉夹钳预警平台的研发及应用

兰志平

新疆中泰矿冶有限公司 新疆 昌吉 831500

**摘要:** 电石炉运行稳定性关乎电石生产效率与人员安全,其电极压放系统的关键部件液压夹钳,在恶劣工况下易出现故障。传统人工巡检模式存在效率低、风险高、漏检率高等问题,已难以满足现代化生产的安全与效率需求。为解决上述难题,本文研发了基于视频算法的电石炉夹钳预警平台,集成可编程逻辑控制器(PLC)精准控制、机器视觉检测、激光测距定位等核心技术,实现高危工况下夹钳状态的无人化智能巡检与故障预警。故障的识别准确率达98%以上,有效降低了人工劳动强度,避免了安全事故发生,为电石炉的安全稳定运行提供了可靠保障。本文详细阐述了平台的研发背景、总体设计、关键技术及应用效果,为同类高危设备的智能监测技术研发提供了参考。

**关键词:** 电石炉; 液压夹钳; 视频算法; 机器视觉; 预警平台; 无人巡检

## 引言

电石是重要基础化工原料,应用广泛。电石炉生产时需在高温高压强电流下连续运行,电极稳定压放影响反应效率与产品质量。液压夹钳是电极压放系统关键设备,其工作可靠性对电石炉运行至关重要。但电石炉作业环境极端恶劣,炉室温度超50°C,有高电压等多重风险,属高危作业区<sup>[1]</sup>。且生产工艺要求每10-15分钟电极压放一次,压放时人员撤离,巡检时间窗口窄,人工巡检易受干扰,难识别细微故障。长期以来,夹钳故障引发诸多问题,影响生产连续性与人员安全。随着工业4.0与智能制造发展,机器视觉等技术广泛应用,基于视频算法的智能检测技术为高危工况设备监测提供新方案。研发基于视频算法的电石炉夹钳预警平台,实现无人化智能巡检与故障实时预警,意义重大、价值颇高。

## 1 电石炉现场工况分析

电石炉液压夹钳系统由8组夹钳及对应的升降缸组成,其工作流程具有严格的时序性,每组夹钳采用“松开-上升-夹紧”循环作业,最后同时进行压放,完成电极的入炉运行作业。夹钳的核心故障类型包括铁皮剥离(吡铁皮)、异物附着、夹紧力不足等。其中,铁皮剥离与异物附着会导致夹钳与电极接触不良,影响电极压放的稳定性,严重时会造成电极脱落;夹紧力不足会导致电极在运行过程中偏移,引发设备损坏。因此,预警平台需重点监测上述故障类型,实现故障的早期识别与预警。

## 2 基于视频算法的预警平台总体设计

### 2.1 设计目标

预警平台的核心设计目标如下:(1)功能目标:实现8组夹钳的自动巡检,能够准确识别铁皮剥离、异物附着等故障,实时发出预警信号,并上传故障图片与视频

供人工复核;(2)性能目标:巡检周期不超过10分钟,匹配电极压放工艺要求;故障识别准确率 $\geq 98\%$ ,漏检率 $\leq 2\%$ ;定位精度 $\leq \pm 1\text{mm}$ ,确保检测位置的准确性;(3)环境适应性目标:设备具备耐高温(50°C以上)、防爆、抗强磁干扰能力,满足电石炉现场工况要求;(4)安全目标:实现无人化巡检,避免人员进入高危作业区,保障人员安全;平台运行不影响电石炉正常生产,具备良好的安全性与可靠性。

### 2.2 总体架构

预警平台采用“硬件层-软件层-应用层”的三层架构:

#### 2.2.1 硬件层

硬件层是平台的数据采集与执行基础,包括机械结构、视频采集模块、定位控制模块、电气控制模块等:(1)机械结构:包括环形轨道、销轮驱动机构、支架、回转拖链等,为视频采集设备与控制设备提供安装支撑与运动载体;(2)视频采集模块:由防爆摄像头、激光位移传感器组成,负责采集夹钳表面图像与位置信息;(3)定位控制模块:包括防爆伺服电机、PLC控制器、驱动器等,实现环形轨道的精准旋转与定位;(4)电气控制模块:包括稳压器、电源模块、交换机、控制柜等,为平台提供稳定供电与信号传输通道。

#### 2.2.2 软件层

软件层是平台的核心处理单元,负责数据处理、故障识别与控制指令生成:(1)数据采集与预处理模块:接收摄像头与激光传感器的数据,进行图像降噪、增强、格式转换等预处理,提高数据质量;(2)视频识别算法模块:基于深度学习算法,对预处理后的图像进行分析,识别夹钳表面故障;(3)定位控制模块:根据预设巡检路径,生成PLC控制指令,驱动伺服电机实现精准定位;

(4) 预警与通信模块: 当识别到故障时, 触发预警信号, 将故障信息(包括图片、视频、位置、时间)上传至应用层, 并通过网络传输至监控中心。

### 2.2.3 应用层

应用层是平台的人机交互界面, 包括操作界面、数据存储、日志管理等功能, 供工作人员实时监控平台运行状态、查看故障信息与巡检记录。

## 2.3 机械结构设计

巡检设备安装在平台与横梁之间, 充分利用大力缸与筒子之间的400mm间距布置机械结构。整体采用环形轨道布局, 轨道直径适配1450mm至1850mm的检测范围, 确保全面覆盖8组夹钳。回转驱动机构选用销轮结构, 节圆直径为2011.4mm, 销齿轮直径181.03mm, 高度60mm, 以保障运行平稳性和定位精度。驱动系统采用防爆伺服电机, 线速度设定为0.5m/s, 配合高精度编码器实现 $\pm 1$ mm的定位能力。回转拖链高度52mm, 总结构高度134mm, 有效保护内部电缆与气管免受机械损伤<sup>[2]</sup>。摄像头支架安装高度为669mm, 预留19mm空间余量, 确保镜头始终对准夹钳检测区域, 提升图像采集质量。

## 2.4 硬件系统选型

为适应电石炉极端工况, 平台硬件选型严格遵循防爆、耐高温、抗干扰原则。防爆摄像头分辨率不低于1920×1080, 帧率 $\geq 30$ fps, 具备ExdIIBT4Gb防爆认证, 耐温能力达60℃以上; 激光位移传感器测量范围0–500mm, 精度 $\pm 0.1$ mm, 内置电磁屏蔽设计; PLC控制器支持多协议通信, 具备实时任务调度能力; 伺服电机功率1.5kW, 转速3000rpm, 定位精度达 $\pm 1$ 脉冲; 控制柜采用隔爆结构, 配备散热风扇、急停按钮及状态指示灯, 确保系统安全可靠运行。

## 2.5 软件系统开发

平台软件基于C++与Qt框架开发, 结合OpenCV图像处理库与TensorFlow深度学习框架, 在Windows 10环境下使用Visual Studio 2019进行集成。系统以1帧/秒的频率采集JPEG格式图像, 经中值滤波、直方图均衡化及区域裁剪等预处理后, 输入YOLOv8模型进行故障识别。当模型输出置信度 $\geq 95\%$ 时, 系统自动触发预警, 并存储故障发生前后各10秒的视频片段。定位控制模块通过PLC协同伺服电机, 按预设坐标依次移动至8个工位, 完成全周期巡检。操作界面提供实时视频流、故障列表、历史记录及系统参数配置功能, 支持管理人员远程监控与决策。

## 3 关键技术研发

### 3.1 高温强磁环境下的视频采集技术

为确保图像采集在高温、强磁、粉尘环境中稳定可

靠, 平台对摄像头进行了专项改造。外壳采用304不锈钢材质, 内部加装隔热层与散热片, 提升密封性与散热效率, 满足ExdIIBT4Gb防爆标准。信号传输线路采用双层屏蔽电缆, 外覆铜网, 并在电源与信号入口处加装EMI滤波器, 有效抑制电磁干扰<sup>[3]</sup>。同时, 系统具备自适应调节功能, 可根据环境温度与光照强度动态调整摄像头曝光时间、增益与白平衡参数, 并自动启用降噪算法, 确保图像清晰度与对比度, 为后续算法识别提供高质量输入。

### 3.2 基于YOLOv8的夹钳故障识别算法

针对夹钳故障特征不明显、背景复杂的问题, 平台构建了包含10000张标注图像的数据集, 其中正常样本6000张, 铁皮剥离与异物附着各2000张, 使用LabelImg工具进行精确标注。模型采用YOLOv8架构, 输入尺寸为640×640, 批量大小设为16, 初始学习率0.01, 训练100个epoch, 并引入随机翻转、旋转、亮度调整等数据增强策略以提升泛化能力。为进一步优化性能, 模型增加了特征提取网络深度, 重新聚类生成更适合夹钳场景的锚框尺寸, 并通过知识蒸馏技术压缩模型体积, 兼顾精度与推理速度。测试结果表明, 铁皮剥离识别准确率达98.5%, 异物附着为98.2%, 平均准确率为98.3%, 推理速度稳定在30fps, 完全满足实时巡检需求。

### 3.3 PLC与伺服电机精准定位控制技术

平台采用“位置–速度–电流”三闭环控制策略, 由PLC生成运动指令, 驱动伺服电机精确定位至8个预设工位。每个工位对应唯一坐标, 系统通过高分辨率编码器实时反馈位置信息, 结合PID算法进行动态补偿, 消除机械间隙与热变形带来的误差。为提升定位精度, 平台引入激光位移传感器对实际位置进行校验, 将实测偏差写入PLC补偿表, 在后续运行中自动修正<sup>[4]</sup>。控制逻辑设计为“电机到位→触发图像采集→完成识别→移位下一工位”的串行流程, 确保各环节有序衔接, 避免误操作。

### 3.4 电气系统抗干扰与防爆技术

电气系统设计充分考虑电石炉强电磁环境的影响。供电采用三相五线制, 动力线与控制线物理分离, 布线间距保持30cm以上, 并加装浪涌保护器与隔离变压器, 防止电网波动干扰。信号线全部使用屏蔽双绞线, 关键节点采用光电转换器配合光纤传输, 彻底切断地环路干扰。所有电气设备均取得ExdIIBT4Gb防爆认证, 控制柜采用隔爆结构, 进出线口使用防爆密封接头, 内部元件布局合理, 散热通道畅通, 确保在高温高湿环境下长期稳定运行。

## 4 平台应用验证与效果分析

### 4.1 应用场景

平台在山东某大型电石生产企业两台电石炉上开展为期三个月的试点运行。系统按10-15分钟的电极压放周期自动启动巡检任务，全程无需人工干预，累计运行超

过2160小时，覆盖数千次压放操作，全面验证了平台的可靠性与实用性。

#### 4.2 性能测试结果

表1：性能测试结果

指标	要求	实测结果
巡检周期	≤ 10分钟	平均8.5分钟 (7.8-9.2)
定位精度	≤ ± 1mm	最大 ± 0.8mm
故障识别准确率	≥ 98%	铁皮剥离98%，异物98%
漏检率	≤ 2%	2 %
连续运行时间	—	2160 小时
MTBF	—	2160 小时
故障停机	—	1 次 (散热风扇故障)

真实运行中成功识别12次故障，无误报。

#### 4.3 应用效果分析

平台的应用带来了显著的安全、经济与管理效益。在安全方面，彻底实现了无人化巡检，杜绝了人员进入高危区域的风险，试运行期间实现零安全事故。在经济效益上，原需2名巡检人员，年人工成本14.4万元，平台年维护费用仅约2万元，年节省12.4万元；更重要的是，及时发现12次潜在故障，避免了单次平均50万元的设备损坏与停产损失，累计规避经济损失约600万元。在管理层面，平台自动生成数字化巡检档案，支持故障趋势分析与预防性维护策略制定，提升了设备管理的科学性与精细化水平。

#### 4.4 平台优化方向

尽管平台已取得良好成效，但仍存在进一步优化空间。未来可聚焦于提升对微小故障（如面积小于0.5cm<sup>2</sup>的异物）的识别能力，通过更高分辨率成像或改进算法敏感度实现；同时可增加远程参数调整与控制功能，支持运维人员通过移动端APP进行远程干预；此外，机械结构中的销轮与滚轮可采用更耐磨材料（如工程陶瓷或特种合金），延长使用寿命，降低维护频率。

### 5 结语

本文成功研发基于视频算法的电石炉夹钳预警平台，解决高危工况下夹钳监测难题。通过分析现场工况明确

需求，构建软硬一体三层架构并完成设计，攻克多项关键技术瓶颈，实际产线验证性能卓越，能提升安全生产水平、创造经济效益，为电石行业智能化升级提供可复制范式。未来研究可从多维度深化平台能力：算法层面，融合强化学习、探索数字孪生，实现从“故障识别”到“故障预测”；功能拓展上，集成多源感知设备构建多维评估体系，开发移动端应用支持远程监控；系统集成方面，与电石炉多监控系统融合打造全炉体智能监测平台。该技术有望推广至其他高危工业场景，推动我国高危制造业向本质安全、智能高效迈进。

#### 参考文献

[1]崔日山.基于机器视觉的电石炉巡检机器人系统设计与实现[D].齐鲁工业大学,2023.DOI:10.27278/d.cnki.gsdqc.2023.000227.

[2]史媛玉.基于数据驱动的电石炉场景目标检测策略研究[D].北京化工大学,2025.DOI:10.26939/d.cnki.gbhgu.2025.000568.

[3]周洪涛,姜荣吉,李刚,等.电石炉自动控制系统的优化[J].聚氯乙烯,2024,52(07):17-20.

[4]王岩.基于深度学习的电石炉生产场景目标检测方法研究[D].北京化工大学,2023.DOI:10.26939/d.cnki.gbhgu.2023.001128.