

输送带纵向撕裂实时检测系统的应用

——以华能福州电厂 C9EF 输煤带为例

徐令博, 陈珊峰, 姜亚波

(华能(福建)能源开发有限公司福州分公司, 福建 福州 350200)

摘 要 输送带作为矿山、化工、火电厂等领域散料输送的关键输送设备, 其纵向撕裂容易引发紧急非停、物料泄漏、设备损伤等严重影响安全稳定生产的风险, 但是现有检测技术无法完美适配当前复杂的工况, 亟待对现有检测技术进行全方位升级。本文以华能福州电厂 C9EF 皮带为实验对象, 研发了一套基于可见光识别、红外感应、激光分析、超声探测等多功能集成的输送带纵向撕裂分析系统。这套系统主要是通过多种传感器协同, 实时检测输送带的表面状态, 凭借 RFID 技术对撕裂部位的精准定位, 旨在实现从异物摩擦预警到撕裂叠带精准检测的全流程覆盖。

关键词 纵向撕裂; 可见光; 红外光; 激光; 超声波

中图分类号: TH222

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.26.028

0 引言

输送带纵向撕裂的演变有着明显的阶段性特征, 对应也能检测到不同的信号。在初期异物摩擦阶段, 异物在与输送带接触后, 会产生温度明显升高的特征; 再往后是表面微损伤阶段, 在连续摩擦和应力作用下, 输送带表面会出现细微划痕、裂缝或者局部鼓包这类微缺陷; 紧接着是贯穿撕裂阶段, 微缺陷会进一步发展成贯穿性撕裂, 输送带出现彻底破坏; 最后是叠带阶段, 在物料重力和皮带拉力的共同作用下, 撕裂后的输送带边缘很容易发生折叠、堆叠, 带宽出现明显变化^[1]。根据这些输送带纵向撕裂演化阶段的不同信号特征, 本文以华能福州电厂 C9EF 皮带为实验对象, 设计了一套多传感器协同的检测方案, 能在每个阶段捕捉到最关键的信号。借助不同类型的传感器数据相互验证与互补, 旨在共同实现从输送带局部温升到撕裂叠带的全流程实时监控。

1 输送系统现状与问题分析

1.1 研究背景

在矿山、电站这类工业场景中, 输送带都是比较重要的输送设备, 它的运行稳定性直接关系到生产效率和安全生产。各类散料运输事故中, 纵向撕裂是最严重的一种, 大多是尖锐异物穿刺或者物料卡塞摩擦引发的, 导致皮带破损、散料泄漏甚至关键设备故障, 进

而造成高额的维护成本和停机损失。华能(福建)能源发展有限公司福州分公司的煤炭运输系统中, 有多条长宽规格各异的输送带, 其中 C9EF 输煤带是输煤系统的核心环节, 其工作条件特别复杂——带长 800 m、宽 1.2 m, 双向运行速度能达到 2.5 m/s, 沿线 5 个落煤点受力不均匀, 主体还穿过了地下廊道, 有着高湿度、低光照、高粉尘以及明显振动的特点, 对检测系统的适应性要求非常严格。就当前现状, 一方面传统的人工检测响应太慢, 另一方面现有的红外热检测又适应不了这种复杂情况, 精度和可靠性都不高, 所以研究开发适配这种复杂场景的全程检测与预防系统, 对保障电厂输煤系统安全稳定运行来说, 确实有很大必要。

1.2 国内外研究现状

长期以来, 国内外学者都在输送带纵向撕裂检测方面做了不少研究, 初期的研究主要集中在接触式检测方法上, 靠检测钢丝绳芯的破裂和压力变化来判断缺陷, 这种方法只能检测已经发生的严重撕裂, 无法做早期预警, 而且适应性还差, 很容易受输送带振动的干扰。近些年, 机器视觉、超声波、激光这类非接触式检测技术成了研究热点, 其中机器视觉技术因为有着非接触、检测范围广的优点, 在工业检测领域使用频率较高^[2]。在输送带检测中, 可见光视觉会收集输送带的表面图像, 再用图像处理算法找出输送带的缺陷, 但很容易受光照和环境粉尘的影响; 红外线视

作者简介: 徐令博(1984-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 设备故障诊断与预测性检修。

觉则是靠检测输送带的温度变化, 识别出物体摩擦发热这类异常工况, 以此实现早期预警; 超声波技术凭着强渗透性的优势, 能用来检测输送带的内部缺陷和叠带缺陷; 激光技术则可以通过激光条纹变形分析, 高精度检测输送带表面的微损伤。目前, 有一些研究尝试把激光和视觉检测这类不同的传感器技术融合到一起, 但目前的研究在多传感器协同工作的策略, 还有多维数据深度融合的算法方面还比较薄弱, 无法满足实时预防检测的需求。

2 系统硬件平台设计

2.1 双目分离式采集单元

考虑到可见光和红外线成像原理的巨大差别, 采用了双目分离的设计, 既能避免两者相互干扰, 还能优化各自的防护性能。针对可见光收集的部分, 选择低照度、高帧率的工业相机, 就是为了适应地下廊道里变化不定的光线, 对应的防护窗用的是高透光率的平面光学玻璃, 耐磨性和抗冲击性都很不错; 针对红外线收集部分, 根据红外热成像的特定波长要求, 定制了镀铂型碳膜的锗玻璃窗, 这种材料不仅能保证红外波的高透率, 还有着出色的抗刮擦能力; 针对煤粉黏附的问题, 两组摄像头都集成在独立的自动刮板装置上, 靠耐磨橡胶刮板来定期清洁。另外, 为了解决红外相机发热影响测量精度的问题, 还设计了独立的循环风冷散热通道, 保证它长期工作时的热稳定性, 整个收集单元都装在多自由度可调节的支架上, 方便现场调节的时候和检测区域精准对齐。

2.2 皮带状态监测单元

叠带故障一般发生在输送带纵向撕裂最严重的阶段, 对检测可靠性要求挺高的, 所以为了保证叠带检测的可靠性, 摒弃了单一传感器的方案, 而是给输送带状态监测单元用了超声波加冗余视觉的设计: 一方面是超声波测距模块, 在皮带两侧对称装一对高频超声波传感器, 实时测皮带边缘到传感器的距离, 再把横向距离的总和转换成固定的机械结构尺寸, 实时动态计算皮带的物理带宽; 另一方面是视觉检测模块, 在皮带正下方装了一个高清摄像头, 实时捕捉输送带带面的图像。这两种检测方式会相互校验, 要是其中一个传感器组检测到带宽变化, 会结合另一个传感器组的数据做最终判定, 这样就能避免单个传感器故障导致的误报和漏报, 保证报警的准确性和可靠性。

2.3 精准测速定位单元

如何在高速运转的长距离输送带上快速找到故障点, 一直是现场维护人员头疼的难题。本研究采用植入式 RFID 技术, 把特制的无源 RFID 标签按固定间距均

匀埋进皮带内部, 还在带面下方的固定位置装了 RFID 读写器板。当皮带运转的时候, 读写器能实时读取经过它下方的标签 ID, 这样就能确定读写器位置和皮带上这个点的对应关系, 实现米级的绝对位置定位。要是检测到撕裂异常, 系统会立刻抓住这个时刻 RFID 读写器获取的标签信息当位置基准, 通过速度积分算出撕裂点相对于读写器的精确距离, 还会在人机界面上动态显示撕裂点的移动轨迹, 停机后就能根据记录的坐标直接去现场处理, 把故障排查的时间从几小时缩短到几分钟^[3]。

2.4 数据管控服务平台配置

为了高效处理多路高清视频流和传感器数据流, 在云端部署了强大的 GPU 计算集群和海量存储, 用来运行复杂的深度学习模型。配套的工业级嵌入式边缘计算主机, 具备超强的实时数据处理能力, 主要负责图像预处理、传感器数据校准、简单决策判断这些任务, 既能减少数据传输量, 还能提升系统动作的实时性。边缘计算主机和中心服务器之间通过光纤高速网络保持连接, 能实现数据的实时交互和协同工作。我们所用的工业光纤环网连接具备极强的抗干扰和独立运算能力, 就算出现了单点故障, 整个通信链路也能保持畅通; 而且, 光纤有着传输速率高、传输距离远这些优势, 适合工业复杂环境下的大数据传输。边缘计算主机、中心服务器、各个传感器采集单元以及监控终端这些都通过星型交换机连接, 形成独立的局域网, 不会和其他工业网络互相干扰。

3 系统数据处理与算法设计

3.1 图像预处理与增强

现在视觉检测技术面临的最大难题是粉尘大、亮度低、潮湿的现场环境, 为此开发了一套组合式的图像预处理流程。在处理图像模糊的阶段, 用生成对抗网络的去模糊算法和自适应直方图来对摄像头采集的图像进行预处理, 生成对抗网络框架能通过生成器和识别器的对抗训练将模糊的图像有效地恢复成比较清晰的图像, 自适应直方图会将图像的局部灰度分布对比度进行增强, 两者配合着用能明显提升图像质量, 给后续的图像内容分析打下基础^[4]。在提取激光条纹中心线的环节, 按顺序做自适应阈值分割、Canny 边缘检测、骨架提取和最小二乘拟合, 得到一组精度比较高的激光中心线, 并且通过计算分析中心线的曲率和实际偏移量, 就能够准确识别出输送带表面出现的各类缺陷。在红外热图像处理过程中, 用多点校准方法建立了灰度和温度的映射关系, 实现了温度场的量化^[5]。这套流程通过多种类的图像处理和特征分析, 搭建了从

图像增强、重要信息提取到异常检测的完整技术路径，能有效提升工业场景里视觉检测的鲁棒性和准确性。

3.2 输送带撕裂检测与识别算法

为了能准确识别不同阶段、不同类型的故障，设计了一套基于深度学习的多阶段、多特征融合网络。在纵向撕裂预防阶段，搭建了一个基于红外图像时序分析的温升预警模型，要是检测到连续异常模式的特征，就会触发早期预警，同时记录异常位置和温变轨迹；在早期微损阶段，采用多模态特征融合的策略，这个策略由两个并行的特征提取分支组成：一个分支接收激光条纹图像，通过卷积层提取中心线的几何变形特征，另一个分支接收对应区域的可见光图像，通过预训练的算法提取丰富的表面纹理特征，这样就能高精度分类微损伤、明显撕裂和正常状态；在撕裂严重后果和叠带阶段，部署了基于超声波测距和摄像头视觉边缘识别的融合检测算法，超声模块通过实时测距来计算物理带宽，视觉模块通过边缘检测和霍夫变换从仰视图像里提取视觉带宽，要是带宽突变值超过了考虑正常振动误差的设定阈值，就判定为叠带故障，同时结合输送带的运行速度和位置信息进行紧急停机，确保在严重后果刚发生的时候就能可靠报警，防止事故扩大。

3.3 系统软件平台与联动逻辑实现

为了让复杂的检测算法得以综合运用，开发了一套功能清晰的模块化系统管控平台——输送带纵向撕裂分析系统。这个平台以模块化上位机软件为核心，能实现从异常感知到执行响应的闭环控制和精准运维。上位机软件平台用了模块化架构设计，包括实时监控、历史回放和报警管理等核心功能模块：实时监控模块能同时展示可见光、红外、激光条纹的实时视频流；历史回放模块可以回放所有关联的传感器数据和视频片段，还会以动画形式展示事故发生时撕裂点的移动轨迹；在报警管理模块中，根据不同故障的严重程度定义了三级联动策略：预警三级只会触发声光报警并在画面提示，停机二级（输送带微损撕裂）和停机一级（输送带贯穿撕裂、叠带）会触发系统急停同时进行声光报警；系统还会记录所有预警和报警事件的类型、时间、位置还有处置状态，提供查询、统计和导出功能，方便运行检修人员分析输送带的运行规律和寿命情况。

4 系统测试、验证与工程应用分析

在系统正式投用前，以华能福州电厂的输煤系统C9EF皮带的作为试验平台，进行了一个月的实地模拟测试，测试内容包括早期温升异常的预警联动、微损

的预警联动、贯穿撕裂和叠带的急停联动。测试的时候，模拟了几种真实的故障场景：在备用输送带不同位置放了不同尺寸、不同形状的尖锐异物来模拟异物穿刺，还在备用旧皮带上人工制作从浅表划痕到完全贯穿的不同程度撕裂口。经过多轮测试结果表明，系统各个模块协同工作正常，联动逻辑准确可靠，很少出现联动失效或者误联动的情况。2025年9月，系统正式在C9EF皮带上投入试运行，截至目前，持续运行了至少3个月，全程记录了系统的运行数据和故障处理情况。试点运行的结果显示，系统在实际工业环境中运行稳定，未出现设备故障或者性能下降的情况，误报率和漏报率都控制在工业允许的范围内，比传统检测系统低很多；试运行期间，系统成功检测并预警了多起早期温升异常和微损故障，避免了撕裂事故发生；在出现的两起轻微撕裂事故中，系统及时触发了急停，减少了经济损失。现场运行人员反馈系统操作简单、维护成本低，实用性能很不错。

5 结束语

本文立足于解决华能福州电厂C9EF皮带在复杂工况下的纵向撕裂问题，成功研发了一套可见光、红外光、激光、超声波及RFID定位技术的多传感器协同的输送带纵向撕裂分析系统，并且在C9EF皮带实地成功应用。该系统的核心技术已经申请了“一种基于多模态感知的输送带纵向撕裂的实时监测系统”等8项专利，这些专利成果为系统的产业化推广提供了知识产权保障。经过实验模拟测试和现场试点的持续验证，该系统的稳定性是完全经得起考验的，能适配复杂工业环境，满足实时检测和预防的需求，已经具备了工程应用的条件。

参考文献：

- [1] 徐猛,刘正英.皮带机输送带撕裂产生的原因分析及预防[J].科技风,2025(05):163-165.
- [2] 王磊.带式输送机皮带防撕裂装置设计的探究[J].机械管理开发,2020,35(08):213-214,219.
- [3] 方崇全.基于无源RFID技术的输送带撕裂检测系统设计及应用[J].煤矿机械,2019,40(03):115-117.
- [4] 孟晓娟,张月琴,郝晓丽,等.多分类深度卷积生成对抗网络的皮带撕裂检测[J].计算机工程与应用,2021,57(16):269-275.
- [5] 张铤,孙宇,林清河,等.基于自适应阈值Canny边缘检测的Shi-Tomasi角点检测方法[J].东北大学学报(自然科学版),2025,46(10):36-43.