

研究论文

DOI: 10.63221/ecsp.v2i03.26-32

亮点:

- 提出三级分层融合架构与注意力机制，解决传统模型适配性差的问题。
- 搭建端边云协同智慧巡检系统，异常检测准确率高达 97.2%。
- 建立分级预警闭环机制，替代超 80% 人工巡检，年省成本超 15 万。

*通讯作者邮箱:

haoshengtao5294@163.com

英文引用: Hao Shengtao et al., 2026. Application Practice of Multimodal Heterogeneous Data Fusion Technology in Intelligent Coal Handling Inspection Systems. Evidence in Engineering Science and Practice, 2 (03), 26-32.

中文引用: 郝胜涛等., 2026. 多模态异构数据融合技术在输煤智慧巡检系统中的应用实践. 工程科学与实践, 2 (03), 26-32.

稿件处理节点:

接收	2026 年 09 月 21 日
修订	2026 年 09 月 25 日
接受	2026 年 09 月 25 日
发表	2026 年 09 月 28 日

基金资助:

本研究未收到基金资助。

版权:

本作品原创内容可依据《知识共享署名 4.0 国际许可协议》条款使用。任何对本作品的后续分发须标明原作者及作品标题、期刊引用及 DOI 信息。

多模态异构数据融合技术在输煤智慧巡检系统中的应用实践

郝胜涛¹, 刘剑钊¹, 杨超超¹, 张小强¹, 宗飞飞¹

¹ 华润电力登封有限公司, 郑州 452470

摘要 火力发电厂输煤巡检场景存在环境工况复杂、干扰因素多、监测数据异构性强等特点, 传统单一传感监测模式数据维度单一、特征关联性弱, 难以有效识别皮带堵煤、轻微跑偏、轴承渐进超温等复合型隐性故障, 误漏报问题突出。针对上述工程痛点, 本文引入多模态异构数据融合技术, 搭建端边云协同的输煤智慧巡检系统, 集成视觉、红外、振动、声学、温湿度、粉尘浓度等多类异构感知数据, 构建“数据预处理-注意力特征融合-量化决策判别”三级融合体系。通过自适应注意力机制解决传统固定权重模型适配性差、异构数据融合浅层化的问题, 建立多模态数据与六大典型输煤异常的耦合识别机理, 形成分级预警与闭环运维机制。工程实践结果表明, 所提技术方案整体异常检测准确率可达 97.2%, 误报率、漏报率分别控制在 2.2%、1.5%, 有效克服粉尘、高湿环境干扰, 大幅提升火电厂输煤设备复合型故障的识别精度与巡检智能化水平, 可为火电输煤系统智能化改造提供成熟的应用实践参考。

关键词: 火电厂; 输煤系统; 智慧巡检; 多模态异构数据; 数据融合

Application Practice of Multimodal Heterogeneous Data Fusion Technology in Intelligent Coal Handling Inspection Systems

Hao Shengtao¹, Liu Jianzhao¹, Yang Chaochao¹, Zhang Xiaoqiang¹, Zong Feifei¹,

¹ China Resources Power Dengfeng Co., Ltd., Zhengzhou 452470, China

Abstract The coal handling inspection scenarios in thermal power plants are characterized by complex environmental conditions, numerous interference factors, and strong heterogeneity of monitoring data. The traditional single-sensor monitoring mode has a single data dimension and weak feature correlation, making it difficult to effectively identify composite latent faults such as coal blockage on belts, slight deviation, and gradual bearing overheating, resulting in prominent false and missed alarms. To address these engineering pain points, this paper introduces multimodal heterogeneous data fusion technology and constructs a device-edge-cloud collaborative intelligent coal handling inspection system. This system integrates multiple types of heterogeneous sensing data, including vision, infrared, vibration, acoustics, temperature and humidity, and dust concentration, and establishes a three-level fusion architecture of "data preprocessing – attention feature fusion – quantitative decision discrimination". Through an adaptive attention mechanism, it solves the problems of poor adaptability of traditional fixed-weight models and shallow fusion of heterogeneous data, establishes the coupling identification mechanism between multimodal data and six typical coal handling anomalies, and forms a hierarchical early warning and closed-loop operation and maintenance mechanism. Engineering practice results show that the overall anomaly detection accuracy of the proposed technical scheme reaches 97.2%, with false alarm and missed alarm rates controlled at 2.2% and 1.5%, respectively. It effectively overcomes the interference of dust and high-humidity environments, significantly improves the identification accuracy of composite faults of coal handling equipment in thermal power plants and the intelligent level of inspection, and can provide a

mature practical application reference for the intelligent transformation of thermal power coal handling systems.

Keywords: Thermal power plant; Coal handling system; Intelligent inspection; Multimodal heterogeneous data; Data fusion

1. 引言

随着国家“双碳”战略的深入推进和新型电力系统的构建，火电机组深度调峰成为常态，输煤系统作为锅炉原煤供给的“生命线”，其安全稳定运行面临更高挑战。根据《火力发电厂智能化技术导则》（DL/T2413-2021）及《关于推进电力源网荷储一体化和多能互补发展的指导意见》等政策与行业标准的要求，推进火电厂输煤系统的智慧化、少人化改造已成为行业共识^[1-2]。近年来，国内学者围绕火电厂输煤区域智能巡检系统设计^[3]及基于信息化的栈桥智慧巡检系统构建^[4]开展了大量研究。然而，火力发电厂输煤巡检场景存在环境工况复杂、干扰因素多、监测数据异构性强等特点。

火力发电厂输煤系统承担锅炉原煤接卸、输送、筛分的核心任务，设备长期连续重载运行，输煤廊道普遍存在高粉尘、高湿度、光照不均等复杂工况，设备机械故障与环境扰动耦合异常频发，直接影响发电机组稳定运行。传统输煤巡检多采用人工巡检辅以单一传感器监测模式，各类监测设备独立部署、数据孤立存储、研判逻辑相互独立，采集的图像、温度、振动、环境参数等数据存在显著的异构性、冗余性、干扰性问题，无法形成多维度特征互补校核机制。单一视频监控难以识别设备机械劣化趋势，单点温度、振动传感缺乏场景佐证，极易受环境干扰产生误判，对初期堵煤、轻微跑偏、轴承隐性超温等隐患识别能力不足，难以满足现代火电厂智慧巡检的精准化、前置化、自动化管控需求。

多模态异构数据融合技术是工业智能监测领域的核心技术方向，可对不同维度、不同类型、不同量级的异构感知数据进行统一净化、特征关联与协同决策，突破单一监测手段的技术瓶颈，显著提升复杂工况下故障识别的抗干扰性与精准性。当前该技术已广泛应用于电力、矿山等工业场景^[5-6]，但在火电厂输煤巡检领域，仍存在异构数据对齐难度大、多参数耦合特征挖掘不充分、融合算法场景适配性不足等问题。为此，本文结合某 600MW 火电厂输煤系统工程实际，开展多模态异构数据融合技术的落地应用研究，搭建一体化智慧巡检平台，构建适配输煤复杂工况的多级融合检测模型与分级响应机制，实现输煤皮带、转机设备、廊道环境全维度状态精准监测，解决传统巡检技术短板，为火电厂输煤系统安全稳定运行提供技术保障。

2. 输煤系统巡检痛点与异构数据特征分析

2.1. 典型巡检异常类型

结合火电厂输煤系统运行规程与现场故障统计，系统高频异常可划分为皮带结构异常、转动设备工况异常、廊道环境超标三大类，涵盖六大典型异常工况，且多为环境与设备耦合引发的复合型故障。一是皮带结构异常，包含皮带撕裂、皮带跑偏、皮带堵煤，多由环境积尘、原煤潮湿、受力不均诱发，故障表象兼具形态形变、振动异常、局部温升、扬尘突变等多维度特征^[7]；二是转动设备异常，包含转机振动超标、轴承超温，设备长期重载磨损、高湿锈蚀会引发设备渐进式劣化，呈现振动频谱畸变、温度持续攀升、运行异响等关联特征；三是环境参数异常，廊道粉尘、湿度超标不仅属于独立安全隐患，同时会加剧设备老化、诱发各类机械故障，是输煤系统异常频发的重要诱因。

2.2. 传统巡检核心技术瓶颈

1) 数据异构割裂，融合程度低。传统监测体系中图像、温度、振动、环境参数等异构数据独立采集、独立分析，时空基准不统一、特征无关联^[8]，无法发挥多源数据互补校核优势，海量监测数据资源利用率极低。

2) 抗干扰能力弱，误漏报频发。单一监测模型采用固定阈值判定，未区分设备常态波动、环境干扰与真实故障，高粉尘、高湿工况下视觉成像失真、传感数据波动大，隐性、复合型故障漏判、误判问题突出。

3) 特征挖掘浅层化，预判能力缺失。传统监测仅依托单参数阈值判定故障，无法挖掘多模态异构数据的关联劣化趋势，难以实现轻微跑偏、初期堵煤、渐进超温等前置隐患预判。

4) 管控机制粗放，闭环能力不足。无量化异常评价体系，预警层级模糊，无法实现分级、分类、分区的精准处置，难以形成全流程闭环巡检管控。

2.3. 多模态异构数据构成及特性

本文结合输煤巡检全场景监测需求，构建六维多模态异构感知体系，涵盖图像视觉、红外温度、机械振动、运行声学、环境湿度、粉尘浓度六大类异构数据，数据类型包含图像类二维数据、时序类数值数据、环境类参数数据，数据维度、量纲、特征

差异显著，具备典型的多源异构特性。其中视觉图像负责识别皮带撕裂、跑偏、堆煤等形态异常^[9]；红外温度聚焦轴承、托辊摩擦热劣化监测；振动与声学数据表征转机设备机械运行状态；温湿度、粉尘浓度数据用于环境干扰修正与故障诱因分析，多类数据相互补充、交叉校核，为复合型故障精准识别提供完整数据支撑。

为保障多源异构数据的有效融合，系统对各感知终端的关键技术参数与时空同步机制进行了统一规范。在硬件参数方面，视觉相机分辨率为 200 万像素（帧率 25fps），红外热像仪测温精度为 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ ，MEMS 振动传感器采样频率为 20kHz，声学传感器采样率为 48kHz，温湿度及粉尘传感器采样周期为 1s。在时空同步机制上，所有感知终端基于 PTP（精确时间协议）或 NTP 协议实现毫秒级时钟同步，确保多源数据在同一时间基准下对齐；在采样周期匹配上，采用边缘计算节点本地缓存与滑动窗口机制，将高频振动/声学数据与低频温湿度/粉尘数据统一映射至相同的时间切片窗口（如 100ms）内，进行特征提取与时空对齐，为后续的多模态融合提供高保真的数据基础。

3. 多模态异构数据融合关键技术

3.1. 多级分层融合架构

针对输煤场景数据异构性强、环境干扰突出的特点，本文采用“数据层预处理-特征层注意力融合-决策层量化判别”三级分层融合架构，逐级实现异构数据标准化、特征深度关联、智能精准决策，解决传统浅层融合算法特征利用率低、场景适配性差的问题。

数据层为异构数据净化与对齐阶段：针对不同类型异构数据开展差异化预处理，采用小波阈值降噪算法对振动、声学、温湿度、粉尘时序数据进行滤波，消除电磁干扰与随机波动噪声；采用 Canny 边缘检测与图像增强算法优化视觉、红外图像质量，解决粉尘遮挡、镜头雾化、光照不均导致的图像失真问题。同时完成所有数据的时空对齐、量纲统一与标准化处理，消除异构数据差异壁垒，为深度融合提供高质量数据基础。

特征层为核心融合阶段：引入注意力自适应加权融合机制，摒弃传统固定权重分配模式，针对六大类典型异常，动态调整不同模态异构数据的特征权

重。针对皮带结构性故障，强化视觉图像特征权重，辅以振动、粉尘数据校核；针对转机机械故障，重点凸显振动、声学、温度特征，结合环境参数修正判定阈值；针对环境耦合故障，联动设备与环境异构特征，精准挖掘复合型故障关联规律，实现异构数据深度特征融合。

决策层为量化智能判别阶段：结合电力行业辅机监督导则与设备故障机理^[10]，构建多证据融合量化评分体系，依据多模态融合特征偏差度输出 0~100 分设备健康评分，划分正常、轻微隐患、一般故障、严重故障四级状态，输出标准化预警与处置决策，实现故障精准定级与闭环管控。

3.2. 多模态异构数据-故障耦合识别机理

通过核心模态精准定位故障特征、辅助模态交叉校核剔除环境干扰，建立多模态异构数据与输煤典型异常的精准耦合识别机制^[11]，彻底解决单一监测误判、复合型故障识别难的问题，具体匹配与融合机理如表 1 所示。

表 1 多模态异构数据与输煤典型异常融合识别机理

典型异常类型	核心感知模态	辅助校核模态	融合识别机理
皮带撕裂	视觉图像	振动、粉尘浓度	以视觉纹理破损、裂口剥离特征为核心，耦合皮带瞬时冲击振动、局部扬尘突增特征，排除粉尘遮挡造成的视觉误判，精准识别隐蔽性撕裂故障。
皮带跑偏	视觉图像	振动、湿度	提取皮带偏移量、边缘错位特征，结合单侧托辊受力振动异常、高湿皮带打滑诱因，实现轻微跑偏隐患前置预判。
皮带堵煤	视觉、振动	红外温度、粉尘浓度	融合堆煤形变、电机负载振动、摩擦升温、瞬时扬尘多维度异构特征，精准识别初期隐性堵煤复合型故障。
转机振动超标	振动、声学	红外温度、湿度	依托振动频谱畸变、设备异常异响判定机械故障，结合轴承升温、高湿锈蚀诱因，有效区分设备常态波动与故障性振动。
轴承超温	红外温度	振动、环境温度	以高精度红外测温数据为核心，耦合轴承异常振动、环境基准温度，剔除环境热辐射干扰，杜绝虚假超温报警。

环境超标	粉尘、湿度	视觉、振动	量化环境超标参数，结合画面积尘雾化、设备小幅振动异常，双向验证环境风险，研判环境工况对设备故障的诱发作用。
------	-------	-------	---

4. 智慧巡检系统整体方案设计

4.1. 端边云协同系统架构

基于多模态异构数据融合技术，本文搭建了“感知层-传输层-边缘融合层-云端应用层”四级端边云协同架构（如图1所示），实现异构数据采集、传输、融合、决策、管控全流程自动化^[12]，适配火电厂输煤系统高实时、高可靠、高安全的巡检管控需求。

感知层部署高清防爆摄像头、红外热像仪、MEMS振动传感器、本安型声学传感器及温湿度、粉尘浓度传感器，搭配智能巡检机器人补盲，全覆盖采集多模态异构数据；传输层采用工业以太网+5G专网双链路传输模式，保障大数据量图像与低时延移动数据的安全交互^[13]；边缘融合层部署计算节点，本地化完成数据预处理、时空对齐与注意力特征融合，就地输出检测结果，满足毫秒级实时检测需求^[14]；云端应用层搭建智慧巡检管理平台，集成状态监测、智能诊断、分级预警与闭环运维管理功能，实现设备健康态势可视化与巡检数据台账数字化。

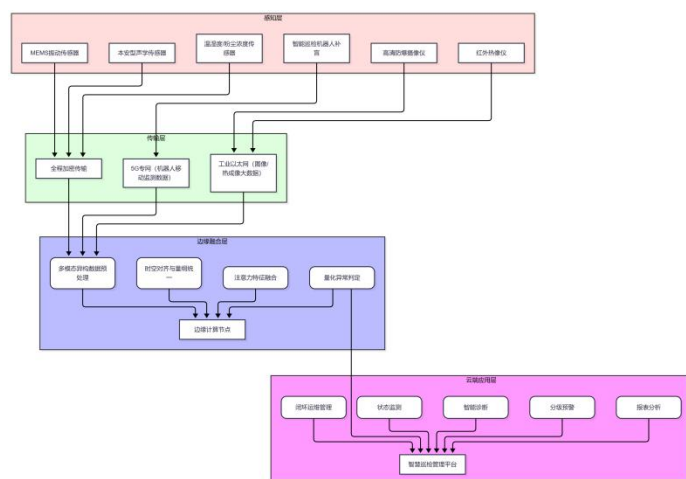


图1 端边云协同系统架构示意图

4.2. 分级预警闭环响应机制

依托异构数据融合量化评分结果，建立三级分级预警与闭环响应机制。80~100分为设备正常状态，执行常态化实时监测；60~79分为轻微隐患，触发一般预警，提示运维人员定期跟踪核查；40~59分

为一般故障，触发重要预警，限期完成隐患处置；0~39分为严重故障，触发紧急预警，联动除尘、通风、皮带停机联锁保护。通过分级预警、精准派单、现场处置、复核归档，形成完整巡检闭环管控体系。

4.3. 系统核心功能模块

1) 多模态异构数据实时监测模块：集中展示设备图像、温度、振动、噪声及环境温湿度、粉尘浓度全维度参数，动态刷新输煤系统设备状态与环境工况，实现全域可视化监测。

2) 智能异常诊断模块：基于多级融合算法，精准识别六大类典型异常，有效区分设备本体故障、环境干扰、复合型耦合故障，精准定位故障点位与成因。

3) 分级联动预警模块：根据异常等级分级推送预警信息，联动现场设备自动干预，有效杜绝隐患扩大引发停机、积煤自燃等安全事故。

4) 运维闭环管理模块：自动存储全量异构监测数据与故障预警台账，自动生成设备健康分析报告，实现隐患全生命周期数字化管控。

5. 工程应用实践与效果分析

5.1. 工程概况

本次工程应用场景为某2×600MW火力发电厂输煤系统，系统配置7段输煤廊道、百余组托辊及配套驱动、减速设备，承担全厂锅炉原煤输送核心任务。改造前系统采用单一视频监控+人工巡检模式，异构数据未融合、抗干扰能力差，隐性故障排查滞后，每年多次出现输煤设备异常引发的机组降负荷事件。本次完成全域感知终端部署与多模态异构数据融合系统搭建，实现全厂输煤系统智能巡检全覆盖。

5.2. 应用效果量化分析

系统连续稳定试运行6个月，从检测精度、巡检效率、安全效益、运维效益四维度开展量化验证，应用成效显著。

在检测精度方面，系统整体异常检测准确率达97.2%，误报率2.2%、漏报率1.5%。其中皮带撕裂、跑偏识别准确率98.5%，复合型堵煤识别准确率98.5%，轴承超温预警准确率99.0%，环境超标监

测准确率 98.5%，彻底解决传统单一监测环境干扰误判、隐性故障漏判的行业难题。

在巡检效率方面，系统实现 24h 不间断全自动巡检。量化对比依据如下：改造前，人工巡检模式下每日需安排 3 个班组共 6 人次进行全线巡查，单次耗时约 2h，日均巡检工时约为 12h；系统投运后，日常巡检完全由系统自动完成，仅需运维人员在收到预警后赴现场核实，日均人工工时缩减至 2h 以内。按此测算，替代人工巡检工作量比例达到 $(12-2)/12 \approx 83.3\%$ ，即有效替代了 80% 以上的人工现场巡检工作量。隐患发现时效由传统小时级提升至秒级，试运行期间累计提前排查各类隐性异常 20 余起，未发生输煤系统故障导致的机组降负荷事件。

在运维效益方面，系统通过精准运维减少了设备过修、欠修问题。成本测算依据主要包含以下三部分：1) 人工成本缩减：降低高危廊道人工作业频次，按减少 2 名外委巡检人员计，年节约人工费用约 10 万元；2) 设备维护成本降低：通过早期预警避免轴承烧毁、皮带撕裂等恶性故障扩大，减少备件更换与应急抢修费用，预计年节约备件及维修费约 8 万元；3) 停机损失规避：避免因输煤故障导致的机组降负荷，按试运行期间成功避免 1 次非计划降负荷事件、减少发电量损失约 5 万元计算。综合上述各项，系统每年可为电厂节约综合运维成本及减少损失合计 15 万元以上，有效延长了设备使用寿命。

5.3. 现存不足与优化展望

系统在极端高粉尘、高湿工况下，视觉成像质量与环境传感器采集精度存在小幅衰减，小众复合型故障样本量不足导致算法泛化能力有待提升。后续将优化感知终端防尘、防潮、自动吹扫防护结构，适配恶劣工况运行需求；持续积累多工况异构数据与故障样本，迭代优化注意力融合模型权重参数，提升小众复合型故障识别精度^[15]；同时融合数字孪生技术，构建设备-环境一体化仿真模型，实现设备健康状态可视化、故障趋势预判与全生命周期精细化管理。

6. 结论

本文针对火电厂输煤巡检多源数据异构割裂、复合型故障识别难、环境干扰误漏报率高的工程痛点，引入多模态异构数据融合技术，搭建端边云协

同智慧巡检系统，构建三级分层融合体系与量化决策机制，实现皮带撕裂、跑偏、堵煤、转机振动超标、轴承超温、环境超标六大类典型异常的精准监测。通过多模态异构数据的标准化净化、注意力深度融合、交叉校核判别，有效突破单一监测技术瓶颈，大幅提升复杂工况下故障识别的精准性与稳定性。工程实践表明，该技术方案适配火电厂输煤恶劣运行工况，智能化程度高、检测效果优异，可有效提升输煤系统巡检自动化水平与安全管控能力，为火电及同类工矿输送系统多源数据融合、智能巡检改造提供可靠的实践参考与技术支撑。

参考文献

- [1] 国家能源局. DL/T 2413-2021 火力发电厂智能化技术导则[S]. 北京：中国电力出版社，2021.
- [2] 国家发展改革委，国家能源局. 关于推进电力源网荷储一体化和多能互补发展的指导意见[Z]. 2021.
- [3] 柳长胜，邵华国，何军，等. 火电厂输煤区域智能巡检系统设计[J]. 中国高科技，2026, (1): 153-155.
- [4] 韩瑜. 基于信息化的火电厂输煤栈桥智慧巡检系统创新与构建[J]. 企业管理，2025, (S2): 174-175.
- [5] 陈前，刘天旭，郭航，等. 基于多传感器融合的输煤皮带机状态监测与早期故障预警系统[J]. 环境工程，2025(07): 112-116.
- [6] 张千元. 输煤系统自动化故障的智能诊断策略[J]. 煤矿机械，2025, 46(09): 134-136.
- [7] 杨文波，闫学伟，王明信，等. 基于多模态信息融合的输煤皮带跑偏故障智能视觉识别[J]. 自动化应用，2025(19): 45-48.
- [8] 国家能源局. DL/T 5187.1-2016 火力发电厂输煤系统设计技术规程[S]. 北京：中国计划出版社，2016.
- [9] 全瑞琴，程丽娟，何向阳，等. 基于机器视觉的输煤皮带故障识别与定位研究[J]. 计算机测量与控制，2026, 34(8): 34-41.
- [10] 国家能源局. DL/T 1823-2018 火电厂辅机设备状态监测与技术监督导则[S]. 北京：中国电力出版社，2018.
- [11] 荆涛，李铁一，王杰，等. 火电厂多源感知数据的输煤故障诊断系统开发[J]. 能源新观察，2026, (4): 57-58.
- [12] 电力行业智能化标准工作组. DL/T 2463-2021 火力发电厂智能巡检系统技术规范[S]. 2021.
- [13] 马战南，杨发亮，贺辽，等. 5G 技术在火电厂智慧视频监控系统中的应用[J]. 电力设备管理，2026, (4): 83-85.
- [14] 李盛平，文壮选，王军林. 基于边缘计算的火电厂输煤系统巡检机器人状态监测与故障诊断[J]. 国外电子测量技术，2025, 44(11): 35-41.

- [15] 张宏利.基于智能监测的火电厂输煤系统电气设备故障预测技术研究[J]. 现代制造技术与装备, 2026, 62(9): 193- 195+ 221.