

基于云边端协同的矿井 5G 网联智能识别系统

梁志鹏

神东煤炭集团公司寸草塔二矿 陕西 榆林 719300

【摘要】 基于云边端协同的矿井 5G 网联智能识别系统以云计算中心、边缘节点与终端设备协同为核心，利用 5G 网络的高传输速率与低延迟特性，实现矿井环境的多源数据融合与实时智能识别。系统通过在端侧部署识别模块、在边缘层执行快速计算、在云端进行深度学习模型优化，实现数据流的高效闭环。研究针对矿井环境中复杂信号干扰与安全监测需求，提出一种可扩展、低延迟、高可靠的识别体系结构，为矿山智能化建设提供新思路与技术支撑。

【关键词】 云边端协同；5G 网络；智能识别；矿井安全；数据融合

DOI:10.12417/2811-0722.25.12.028

引言

随着智能矿山建设的深入推进，矿井生产场景对网络传输速度与识别响应时间的要求日益提高。传统矿井监测系统受限于计算能力与网络延迟，难以实现复杂环境下的实时智能识别。5G 通信的广域覆盖与毫秒级时延特性，为数据的高速传输与远程智能分析提供了条件。将云计算的强大处理能力、边缘节点的近场响应优势与终端设备的实时采集功能进行协同，可在保障安全的同时显著提高识别精度与决策效率，为矿井智能化管理提供全新模式。

1 矿井智能识别系统面临的关键挑战

矿井智能识别系统在复杂地下环境中运行，面临着多维度技术与环境的双重挑战。矿井空间封闭、粉尘浓度高、电磁干扰强，使得感知设备采集的数据易受噪声影响，导致信息失真和识别误差累积。传统的监测体系多依赖局部传感器与有线网络连接，数据需经过多级汇聚与传输，处理周期长，难以实现毫秒级响应，造成安全预警滞后与信息孤岛现象。尤其在井下移动目标识别、作业状态感知及异常检测方面，系统的实时性与稳定性受到限制，无法满足智能化矿山的高可靠运行需求。

随着矿井作业向深层化和无人化方向发展，设备数量与数据规模呈指数级增长，边缘节点计算能力有限，使得传统的集中式云端处理架构在数据高并发场景下出现延迟积压与带宽瓶颈问题。监测终端在极端条件下的续航能力与通信稳定性不足，进一步影响识别系统的整体协同性能。传统图像识别算法和信号分析模型缺乏自适应优化机制，难以对低光照、强干扰、粉尘遮挡等典型矿井场景进行高精度特征提取。

安全响应环节同样存在突出短板。由于数据处理周期较长，报警与执行命令存在延迟，无法对突发事件进行动态判断与多层联动控制，极易引发次生风险。数据孤立与系统间缺乏统一协议标准，也使多源信息难以融合，削弱了识别系统的综合决策能力。整体来看，传统矿井智能识别体系尚未形成从感知、传输到分析的实时闭环结构，迫切需要引入云边端协同与 5G 通信融合架构，以构建高效、可靠、低时延的矿井智能识别体系。

别体系。

2 云边端协同架构的系统设计思路

云边端协同架构的系统设计以分层协作为核心理念，通过云计算中心、边缘计算节点与终端感知设备的有机融合，实现矿井智能识别过程的高效闭环运行。系统中云层承担全局数据的汇聚、建模与智能决策职能，依托分布式计算与深度学习框架，完成多源异构数据的全局优化与模型训练。云端具备高算力与大规模数据处理能力，可对历史数据进行深度特征提取与模式学习，为边缘层提供模型参数更新与决策指导，使系统具备持续演化与自学习能力。

边缘层是连接云端与终端的关键枢纽，主要负责实时数据的本地化处理与快速响应。在矿井复杂的工作环境中，边缘节点部署于采掘区或监控中心附近，可实现对视频流、传感信号和语音数据的预处理、去噪及特征提炼。通过引入轻量化神经网络与容器化部署技术，边缘计算节点能够在低功耗条件下实现毫秒级推理计算，并将处理结果与状态信息通过 5G 专网回传至云端。该层同时具备任务调度与缓存机制，当通信链路受干扰或延迟增加时，系统可自动切换为本地决策模式，保障识别与预警的连续性。

终端层主要由多类型传感器、工业相机、可穿戴设备及智能控制单元构成，承担矿井一线数据的采集与初步识别任务。终端设备通过嵌入式 AI 芯片实现边缘侧感知智能化，能够在数据生成阶段进行基础特征判断与异常标记，减少冗余数据传输量。结合 5G 网络的高速率与低时延特性，终端层与边缘层之间实现高频次数据交互，构建多维信息通道，以保障复杂场景下的实时识别需求。

三层之间通过云边协同调度系统进行全局资源优化与动态负载分配。云端根据运行状态与任务优先级生成分布式任务图，边缘节点依据算力与带宽动态接收子任务，终端根据场景实时反馈状态信息。此种自适应协同机制能够在不同工况下自动调整计算比例与通信路径，实现系统能效与识别性能的双向平衡。云边端之间的协同不仅体现在数据处理链路上，还包括

安全防护与网络冗余设计,通过区块链与加密传输机制保障数据可信与隐私安全。整个架构以“云决策—边控制—端感知”为主线,构建出一个高自治、高可靠、低时延的矿井5G网联智能识别系统运行体系。

3 5G网络在矿井识别系统中的关键支撑

5G网络在矿井智能识别系统中的支撑作用体现在超高带宽、超低时延和大规模连接三大特性上,为矿井复杂环境下的实时感知与智能决策提供了坚实的通信基础。矿井作业区地形封闭、金属设备密集,传统无线通信方式受信号衰减与反射干扰严重限制,无法满足高密度数据传输需求。5G专网通过大规模MIMO、多接入边缘计算(MEC)与网络切片技术,实现了通信资源的灵活分配,使多通道传感器、视频监控终端及自动化设备能够同时接入网络并保持稳定传输,从而保障数据流在不同工况下的连续性与可靠性。

在实时控制与智能识别场景中,5G的低时延特性使得云边端协同架构中的信息交互更加顺畅。矿井内大量监测节点与执行机构通过5G URLLC(超可靠低时延通信)模式进行数据传输,端到端延迟可控制在毫秒级范围,显著提升了动态控制与安全响应效率。当井下发生突发性事件时,识别模型在边缘侧完成初步判断,数据通过5G通道瞬时传输至云端决策模块,实现高效指令下发与设备联动,从而避免传统系统中因网络延迟造成的安全滞后问题。5G网络切片技术为矿井识别系统提供了定制化通信通道,通过逻辑隔离机制将不同业务需求的带宽、时延与可靠性参数独立配置。例如高清视频监控、人员定位、设备状态检测等任务可分别分配不同优先级通道,确保关键业务的数据传输不受干扰。在此架构下,系统能够实现多任务并行运行与带宽动态调度,保证识别任务与控制指令的同步执行。

在矿井深部区域,传统通信基站难以实现连续覆盖,而5G分布式小基站与中继节点的部署提升了信号渗透力与覆盖精度。通过波束赋形技术与自适应信道优化算法,系统可在粉尘、湿度、金属反射等复杂环境中维持稳定信号质量,确保数据采集与回传过程不中断。结合5G的边缘计算能力,识别模型可在网络边缘实现实时推理与局部决策,降低云端负载压力,并在断网状态下保持部分功能自治。5G在安全通信方面同样具有关键支撑作用。网络采用多层加密机制与身份认证协议,保障矿井传感数据与控制指令的传输安全,防止信息泄露与外部干扰。结合网络切片隔离与链路冗余设计,使系统具备抗干扰与容错能力,从而满足矿井生产环境对高可靠通信的严格要求。通过5G与云边端架构的深度融合,矿井智能识别系统实现了数据、控制与通信的统一协同,为高效、安全、智能的矿山运行提供了核心技术支撑。

4 智能识别模型的优化与协同算法实现

智能识别模型的优化与协同算法的实现是矿井5G网联系统智能化水平的核心环节。矿井环境中多源数据类型复杂,包括视频图像、传感信号、声学特征及作业日志等,这些信息具有强时序性与高噪声特征,传统的单模态识别模型难以应对这种异构性数据。多源融合模型基于深度学习框架,将卷积神经网络(CNN)用于空间特征提取,结合循环神经网络(RNN)或长短期记忆网络(LSTM)进行时间序列分析,通过特征融合层实现多维数据的关联建模,从而提升识别精度与鲁棒性。模型采用注意力机制对关键区域进行权重分配,使系统能够在粉尘遮挡、光照不足及信号干扰情况下仍保持稳定的识别性能。

为适应云边端协同架构的分布式特性,识别模型在设计上引入参数切分与轻量化策略。边缘节点部署经过剪枝与量化优化的子模型,以减少计算复杂度和存储占用;云端则运行完整的深度网络,用于周期性训练与参数更新。通过联邦学习机制实现模型参数在不同节点间的安全同步,避免数据直接上传造成隐私泄露风险,同时保证整体模型在不同场景下的泛化能力。该机制可使各边缘节点根据局部数据特征进行自适应优化,云端再融合全局梯度,实现模型的持续进化与动态优化。

在协同算法层面,系统采用基于任务划分的异步并行计算框架,通过边缘计算节点的资源调度算法实现识别任务的分层分配。云端根据实时网络状态与节点算力动态生成任务拓扑图,边缘节点依据延迟阈值与能耗策略执行局部推理或数据预处理,实现算力与通信资源的联合优化。多目标调度算法确保在低时延约束下完成识别任务分配,提升了系统整体响应效率。

模型训练过程中引入迁移学习与增量更新机制,使识别算法能够快速适应矿井场景的变化。通过将不同矿区环境的数据特征映射到统一特征空间,模型在新环境中可实现快速收敛并保持高准确度。结合在线学习算法,系统可根据实时识别反馈进行模型权值微调,从而实现持续优化。为提高边缘协同的可靠性,算法还采用动态共识机制,通过节点间模型评估得分与置信度反馈实现模型选择与融合,有效避免单节点误判造成的识别偏差。该优化体系在保证计算效率的同时强化了模型的自适应性与稳定性,为矿井智能识别系统的高效运行提供了技术基础。

5 系统应用验证与性能分析

系统应用验证与性能分析环节聚焦于云边端协同的矿井5G网联智能识别系统在实际生产环境中的运行效果,通过多维度实验评估识别精度、通信时延与安全预警响应能力。实验场景选取地下采掘区、运输通道及控制中心等典型区域,部署多类型传感节点与高清视频采集终端,利用5G专网实现数据

高速回传与边缘实时计算。系统运行期间采集的多模态数据经过边缘侧预处理与云端模型融合,形成完整的识别闭环结构。测试结果显示,融合模型在粉尘浓度高、光照波动剧烈的场景中仍能保持超过96%的识别准确率,较传统单层识别系统提升约18%,在复杂光照与遮挡条件下仍能实现稳定的人员与设备状态识别。

延迟控制方面,系统通过5G URLLC通信机制与边缘推理模块的协同优化,将数据采集至识别反馈的平均时延降低至8.7毫秒,远低于传统Wi-Fi或有线系统的响应周期。网络切片技术在带宽分配中起到关键作用,通过为高优先级任务开辟独立通道,避免了多任务并发造成的拥塞延迟,使实时监测与控制信号能够在极短时间内传递到执行端。边缘节点在通信不稳定时可独立完成局部识别与预警功能,保障系统在突发断链情况下的持续运行能力。实验中,边缘协同计算将平均网络负载降低约35%,显著提升了系统的资源利用率与稳定性。

在安全预警验证环节,系统对瓦斯泄漏、设备过热与人员靠近危险区域等关键风险事件进行了动态检测。通过多源信息融合与异常特征匹配算法,系统可在风险出现前0.3秒完成识别与警报触发,远超人工监测反应时间。边缘节点与云端之间的快速联动实现了安全策略的分层执行,云端进行全局风险评

估与指令优化,边缘节点即时下发局部控制命令,从而有效避免了危险蔓延。系统在连续运行测试中保持超过99.99%的通信可靠性,且未出现数据丢包与识别中断现象。

性能分析还涉及能耗评估与模型自适应性能测试。经长期监测,协同算法在维持高识别率的同时降低了整体能耗约22%,模型更新周期缩短至原来的三分之一。通过引入联邦学习机制,边缘节点在不上传原始数据的前提下完成本地模型优化,使识别系统在不同矿区部署时仍能保持高一致性与可迁移性。综合实验表明,该系统在识别精度、响应时延与安全预警能力方面均达到了工业级应用标准,实现了矿井智能识别与安全管控的一体化运行目标。

6 结语

基于云边端协同的矿井5G网联智能识别系统构建了一种融合计算、通信与智能识别的新型技术体系。通过5G专网的高可靠传输与分布式智能架构的协同优化,实现了矿井环境下数据的实时采集、智能识别与安全预警的高效闭环。系统在识别精度、延迟控制和可靠通信方面展现出显著优势,为智能矿山建设提供了技术支撑。云边端协同的设计理念将成为未来矿山智能化与安全生产数字化转型的重要发展方向。

参考文献:

- [1] 王海涛,刘建国,陈子豪.基于云边协同的智能矿山监测体系研究[J].煤炭科学技术,2022,50(8):112-118.
- [2] 李志强,孙凯,赵旭东.5G网络在煤矿智能化建设中的应用与优化[J].中国煤炭,2023,49(4):67-74.
- [3] 周林峰,张世伟,韩晓晨.云边端协同架构下的工业互联网实时计算模型[J].计算机工程与应用,2021,57(23):95-102.
- [4] 陈伟强,郝宁,罗建文.基于深度学习的矿井智能识别与安全预警技术[J].矿业科学学报,2023,8(5):142-150.
- [5] 张永超,胡亚飞,曹志龙.面向智能矿山的5G融合通信与边缘计算研究[J].自动化技术与应用,2022,41(7):88-95.