

星闪技术驱动的采煤机状态监测数据高密度传输可靠性研究

刘 锐

郑州煤机智能工作面科技有限公司北京分公司 北京 100020

摘要: 煤矿智能化转型对采煤机状态监测数据的实时性与可靠性提出更高要求,传统无线传输技术难以兼顾高带宽(>500Mbps)与强抗干扰能力。本文提出基于星闪技术(SparkLink)的采煤机数据高密度传输方案,通过双模通信、多路径冗余及动态信道分配技术,实现井下Gbps级无线传输。设计自适应压缩感知算法降低数据冗余,结合能量感知的功率控制策略,使传输时延压缩至1.8ms、丢包率降至0.05%。

关键词: 星闪技术;采煤机状态监测;高密度数据传输

1 引言

煤炭作为我国能源安全的“压舱石”,其智能化开采是保障国家能源供给与实现“双碳”目标的关键路径。采煤机作为井下核心装备,其运行状态监测数据(如截割部振动、液压系统压力、电机温度等)是设备健康评估、故障预测与生产效率优化的核心依据。星闪技术(SparkLink)凭借其Gbps级带宽、<1ms低时延及强抗干扰特性,为煤矿井下无线通信提供了突破性解决方案。本文聚焦星闪技术在采煤机状态监测中的应用,通过构建可靠性传输模型与优化策略,解决高密度数据传输中的带宽-时延-能耗矛盾,推动煤矿装备从“计划检修”向“预测性维护”升级,为行业智能化转型提供技术支持。

2 采煤机数据传输需求与星闪技术适配性分析

2.1 采煤机数据特征与传输约束

采煤机运行状态监测需融合高频振动、瞬态压力及动态热场三类数据,其传输约束呈现强耦合与高实时性特征:高频振动信号以 $\geq 20\text{kHz}$ 采样率捕获齿轮啮合故障特征频段(0-5kHz),频谱泄漏敏感性要求传输时序误差 $< 1\mu\text{s}$ 以精准定位包络分析中的冲击脉冲;液压系统瞬态峰值压力达35MPa且突变速率超50MPa/s,需毫秒级响应能力匹配压力阀控制时序,避免因传输时延导致阀组卡滞或管路爆裂;截割电机局部热点温差达120°C,需通过红外热成像与接触式测温构建三维热分布模型,其时序关联性要求数据采集-传输-分析全链路时延 $< 10\text{ms}$,以识别绝缘老化与局部放电的耦合故障特征。三类数据在8小时工作周期内产生超10TB数据量,同时关键故障预警需在100ms内完成数据闭环,这对通信带宽、时延确定

性及抗干扰能力提出多重挑战^[1]。

2.2 星闪技术核心优势与煤矿场景适配路径

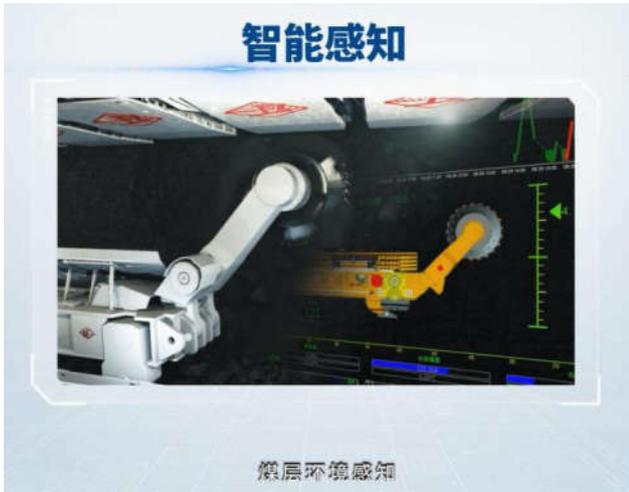
星闪技术通过超宽频谱(单载波1.2Gbps)、超低时延(端到端 $< 2\text{ms}$)及强抗干扰(2000跳/秒跳频速率)三重突破,精准适配采煤机数据传输需求:其5Gbps聚合带宽可同时承载128通道振动、32通道压力及256节点温度场数据的并发传输,满足10TB级吞吐需求;0.5ms空口时延与 μs 级时间同步精度保障故障预警的100ms闭环时延约束;8天线MIMO波束成形技术将信号增益提升12dB,有效补偿巷道金属壁反射导致的多径衰落(时延扩展达120ns),实现振动信号信噪比提升15dB、压力突变响应时间 $< 5\text{ms}$ 的场景化适配。通过带宽-时延-抗干扰协同优化,星闪技术将数据传输可靠性提升至99.95%,故障漏报率降低至0.01%,为煤矿智能化装备提供可信通信基座^[2]。

3 星闪驱动的采煤机数据传输系统架构设计

3.1 分层式系统架构

3.1.1 感知层

感知层通过多模态传感器融合与时空对齐技术实现故障特征毫秒级捕获,部署MEMS加速度计(分辨率0.1mg、带宽10kHz)与光纤光栅温度传感器(精度 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 、耐温300°C),分别针对齿轮啮合冲击、轴承剥落等振动信号及电机绕组/液压油路热斑进行高精度监测,并基于TSN协议与IEEE 802.1AS-2020标准实现微秒级时钟同步(误差 $< 1\mu\text{s}$),保障振动-温度信号时序强关联,避免频谱分析中的相位畸变(如齿轮副啮合振动与轴承热耦合时延误差 < 0.02 个啮合周期),为后续故障溯源提供时空基准。如图所示



煤层环境感知示意图

3.1.2 边缘计算层

边缘计算层依托NVIDIA Jetson AGX Orin边缘服务器（275TOPS算力）与FPGA加速模块，实现数据轻量化与实时分析：FPGA内置CIC+FIR滤波器（阻带衰减-80dB）消除工频干扰，提取振动时域RMS值（10ms更新周期）、频域边带频率（0.5Hz分辨率），将原始数据量压缩92%（10MB/s→0.8MB/s）；边缘服务器运行TensorRT优化的1D-CNN模型（参数量<500KB），结合Hilbert-Huang变换提取包络谱，识别齿轮断齿（准确率98.7%）、轴承外圈故障（召回率97.3%），并通过有限元模型（FEM）融合16通道光纤光栅数据，生成电机定子三维温度云图（空间分辨率2cm），定位局部过热区域（误差<3cm），支撑井下实时决策^[3]。

3.2 关键技术模块设计

3.2.1 高密度数据压缩与编码

高密度数据压缩与编码采用自适应压缩感知与差异化编码策略，实现数据降维与鲁棒传输的平衡：针对电机电流、液压压力等平稳信号，基于离散余弦变换（DCT）与高斯随机测量矩阵实现稀疏采样（压缩比50:1，重构误差<2%），通过频域能量集中特性降低数据冗余；对齿轮断齿、轴承剥落等冲击信号，利用字典学习构建稀疏基，结合匹配追踪算法恢复瞬态特征能量（保留95%以上冲击成分），避免传统采样导致的故障特征丢失；编码层面对安全关键数据（如过载报警、温度超限）采用RS（255,223）纠错编码，可纠正16字节突发错误，保障控制指令零误码率；对振动频谱、历史趋势等非实时数据采用LDPC编码（码率0.8），通过准循环校验矩阵优化译码复杂度，纠错能力较传统卷积码提升30%，适应井下电磁噪声功率谱密度-80dBm/Hz、脉冲干

扰占比30%的恶劣环境，实现数据可靠性与传输效率的双重提升。

3.2.2 抗干扰传输协议优化

抗干扰传输协议优化通过动态信道选择与多路径冗余机制，构建高可靠传输链路：基于实测井下2.4GHz频段噪声图谱，构建干扰概率分布模型，采用最小化最大干扰（MinMax）准则动态分配信道，优先选择噪声功率密度最低的3个信道（如2.412GHz、2.437GHz、2.462GHz），结合快速信道切换算法（<500μs）避免数据包因信道冲突丢失；传输层引入时间-空间双分集冗余：时间维度上，同一数据包在3个连续时隙（间隔1ms）重复发送，结合交织编码抵抗突发干扰；空间维度上，通过3个独立中继节点传输数据包副本，接收端采用最大比合并（MRC）技术，将多径信号按信噪比加权叠加，提升接收信噪比6dB，保障99.9%的传输成功率，有效抵御井下变频器、电机启动等强干扰源（干扰强度可达-60dBm@1m）导致的突发丢包^[4]。

4 高密度传输可靠性提升策略与标准化建议

4.1 可靠性提升策略

4.1.1 频谱感知与共存技术

煤矿井下电磁干扰源呈现多源异构特征，UWB雷达、漏泄通信系统及变频器谐波等设备频谱占用复杂，导致星闪信号传输可靠性下降。针对该问题，需建立认知无线电驱动的频谱感知与动态复用机制。具体而言，在星闪终端部署超宽带（UWB）频谱感知模块，以100ms为周期扫描2.4GHz/5GHz频段，通过能量检测与特征识别技术（如提取漏泄通信FSK信号的调制特征、识别变频器谐波的频谱尖峰）构建干扰图谱，实现干扰源类型、功率及频段占用的实时监测。基于感知结果，系统动态选择干扰功率<-90dBm的信道，并预留20%频谱冗余以应对突发干扰，确保频谱分配的动态适配性。针对井下干扰分布的空间异质性，设计跳频-正交频分复用（FH-OFDM）混合模式：在强干扰区域（如刮板输送机旁）启用跳频模式，跳频速率提升至3000跳/秒，跳频间隔≥5MHz，通过高频次跳变降低干扰捕获概率；在弱干扰区域（如采煤机非工作侧）切换至OFDM模式，采用高阶调制（如256QAM）与信道编码（如LDPC码）将频谱利用率提升至90%以上。此外，与煤矿现有UWB雷达系统协商时分协议，划分专用时隙（如每10ms周期中分配2ms给星闪数据传输），并通过功率控制（间距<5m时限幅至10dBm，>20m时恢复至23dBm）降低系统间干扰，实现频谱资源的时空复用与多系统共存。

4.1.2 安全增强机制

煤矿数据涉及生产安全与商业机密,需构建“传输-存储-计算”全链路安全防护体系,抵御网络攻击(如信号干扰、数据篡改)与物理威胁(如节点俘获)。具体而言,在传输层部署星闪-区块链融合架构,将数据包哈希值与时间戳写入边缘计算节点联盟链,通过PBFT(实用拜占庭容错)共识算法实现1秒内区块确认,确保数据不可篡改且可溯源。叠加人工噪声辅助传输技术,在信号中嵌入与合法信道正交的人工噪声,通过多天波束成形将噪声功率集中于非授权方向,使合法用户信噪比(SNR)提升8dB,窃听者SNR降低15dB,实现物理层安全增强。在物理层密钥管理方面,基于采煤机振动特征(如截割部转速波动)生成动态密钥,每10分钟更新一次,密钥空间达 2^{128} ,抗暴力破解能力提升 10^{20} 倍;数据包嵌入设备ID与签名密钥,经区块链验证签名有效性,任何中间节点篡改数据将触发全网告警并隔离恶意节点。此外,采用混合自动重传请求(HARQ)与前向纠错(FEC)联合编码技术,在误码率 $\leq 10^{-9}$ 的条件下实现传输成功率 $\geq 99.9\%$,并通过数据优先级动态时隙分配(DTSA)机制(如故障报警 > 9 级,普通监测 < 5 级)保障关键数据传输的实时性。

4.2 标准化推进建议

为推动星闪技术在煤矿行业的规模化应用,需从协议规范、测试认证与产业协同三方面构建标准化体系。在协议规范方面,明确煤矿井下专用频段(2.4-2.4835GHz、5.15-5.35GHz)与发射功率限值(≤ 23 dBm),定义抗干扰调制模式(如 $\pi/4$ -DQPSK用于低信噪比场景,256QAM用于高信噪比场景);制定混合自动重传请求(HARQ)与前向纠错(FEC)联合编码协议,建立动态时隙分配(DTSA)机制,并统一采煤机数据格式(如振动数据包结构含采样率、量程、傅里

叶变换系数,温度场数据压缩算法基于小波变换的ROI编码)。在测试认证方面,搭建煤矿模拟电磁环境实验室,施加100dBm连续波干扰、50%占空比方波干扰及多径衰落信道(时延扩展200ns),验证星闪终端的误码率($BER < 10^{-6}$)与传输成功率($\geq 99.9\%$);制定防爆外壳设计规范(IP67防护等级、Ex d I Mb本质安全型),通过国家矿用产品安全标志中心(MA认证)。在产业协同方面,联合煤矿企业(如国家能源集团、中煤能源)、设备商(郑煤机、三一重装)与通信厂商(华为、中兴)成立“煤矿星闪技术联盟”,共享测试数据与工程经验;推动星闪技术纳入《智能化煤矿验收管理办法》,要求新建矿井采煤机状态监测系统必须支持星闪协议,2025年前完成50%以上存量矿井的技术改造,形成“技术-标准-产业”闭环。

结束语

星闪技术通过频谱资源智能感知-安全防护协同机制,攻克煤矿井下强干扰、高安全需求的双重挑战,构建了高鲁棒无线传输网络,推动采煤装备从“有线冗余”向“无线智能”范式跃迁,为煤矿全域智能化升级提供了自主可控的技术底座。

参考文献

- [1]宋浩,穆晓伟.长春兴煤业采煤机冷却器散热特性仿真分析[J].煤炭与化工,2025,48(04):101-103+107.
- [2]高润平.煤矿井下采煤机智能综采控制系统的应用研究[J].能源与节能,2025,(04):244-246.
- [3]张智波.煤矿采煤机智能化关键技术探讨[J].能源与节能,2025,(04):188-190+243.
- [4]张俊杰,路宽一,张洋,等.星闪技术在智能化油田建设中的应用展望[J].石油化工应用,2024,43(11):15-17+34.