MES 系统，实现多参数远程查询、趋势分析与数据归档；

报警联动：当参数超出阈值（高流速 30m/s、低流速 0.5m/s、高密 2000kg/m³、低密 100kg/m³ 或信号丢失）时，系统通过总线向 DCS 发送报警信号，同时本地触发红色 LED 灯 + 蜂鸣器声光报警，并可联动控制（如低流速时自动开启管道吹扫装置，高流速时降低给粉机转速）。

4 测量系统核心功能

基于粉煤气化工段“实时监测、安全预警、数据追溯、便捷维护”的需求，系统设计四大核心功能：

4.1 多参数实时测量功能

测量范围：流速 0.5-30m/s、密度 0-2000kg/m³、质量流量 0.1-100t/h；测量精度：流速 ±1.0% FS、密度 ±1.5% FS、质量流量 ±2.0% FS，重复性 ≤0.5%；响应速度：≤0.5s，可实时捕捉管道堵塞导致的参数骤变，避免工艺滞后。

4.2 分级异常报警功能

多阈值报警：支持流速、密度、信号故障三类报警，阈值可通过触摸屏或 DCS 远程设置；报警联动：报警信号可触发 DCS 系统联锁控制（如密度过高时减少给粉量，信号丢失时切换备用测量通道）

4.3 自诊断与校准功能

自诊断：定期检测传感器信号强度、电源电压（AC220V/DC24V）、总线通信状态，故障时显示代码；

自动校准：支持与“空气 - 煤粉混合流标准装置”对接，一键完成流速、密度、质量流量全量程校准，校准数据自动存储；

5 测量系统核心特性分析

相较于传统煤粉测量设备，本系统的核心优势体现在环境适应性、测量稳定性、操作便捷性三个维度，具体如下：

5.1 强环境适应性：适配恶劣工况

耐高温高压：传感器耐受温度 - 40-250℃（覆盖粉煤气化 180-220℃工况），壳体耐受压力 ≤2.0MPa（满足 0.8-1.2MPa 操作压力）；抗粉尘干扰：24GHz 微波穿透性强，在 1500g/m³ 高浓度煤粉环境下，透射信号衰减率 ≤10%，无测量失效风险；耐磨损腐蚀：传感器探头碳化钨涂层（HRC65 以上）+316L 不锈钢外壳，煤粉冲刷下年磨损量 ≤0.1mm，使用寿命超 2 年（为传统涡轮流量计的 8 倍）；无放射源优势：无需遵循放射源管控流程，安装、存储、维护无需特殊审批，且规避了放射源设备的零点漂移与载气补偿问题，环保安全。

5.2 高测量稳定性：保障长期精准

低零点漂移：采用温度补偿 + 基线自动校正，-40-250℃范围内零点漂移 ≤0.2% FS/℃，避免温度波

动导致的偏差；抗煤质影响：主动式电磁波信号不受煤质（如灰分、水分、颗粒度）变化影响，

不同煤种（如烟煤、褐煤）工况下测量精度无明显变化；抗流场干扰：对管道内煤粉流速分布均

匀性要求低，在管道弯头下游（流场不均区域）测量精度仍保持 ±1.5% FS 以内；高可靠性：平均无故障工作时间（MTBF）≥20000h，减少现场维护频次（传统设备 MTBF 约 5000h）。

6 结语

本文设计的基于电磁波透射式测量的煤粉一体化测量系统，通过“现场传感器 - 信号积算 - 工业交互”三层架构与抗恶劣工况设计，有效解决了煤制氢粉煤气化工段传统测量设备“功能单一、易磨损、抗扰差、维护难”的痛点。系统融合微波多普勒效应与电磁波透射衰减法，实现“流速 - 密度 - 质量流量”同步测量，硬件层适配高温高压高粉尘工况，软件层保障测量精度，通信层兼容工业控制系统，核心特性兼具环境适应性、测量稳定性与操作便捷性。

现场应用表明，系统测量范围覆盖流速 0.5-30m/s、密度 0-2000kg/m³、质量流量 0.1-100t/h，综合精度 ±1.0% FS，响应速度 ≤0.5s，可使煤粉输送系统运行稳定性提升 30% 以上，为煤制氢装置氧煤比精准控制、气化效率提升及安全生产提供可靠参数支撑。

未来可进一步优化方向：1. 结合 使用情况精准预测并实现流速 / 密度的预测性维护，提前预警管道堵塞或传感器故障；2. 拓展无线通信功能（如 5G 工业网关），适配偏远区域测量点的数据传输；3. 开发多传感器协同测量算法，进一步提升复杂流场下的测量精度，为煤炭清洁利用领域的过程控制技术升级提供参考。

参考文献

[1] 中国石油化工股份有限公司. GB/T 37249-2018 煤制氢装置技术规范 [S]. 北京：中国标准出版社，2018.

[2] 中国计量科学研究院. JJF 1948-2021 气固两相流流速测量仪校准规范 [S]. 北京：中国计量出版社，2021.

[3] 张宏涛，王丽。煤直接液化项目粉煤气化工段的仪表选型与维护 [J]. 石油化工自动化，2023，59 (2)：78-82.

 DOI: https://doi.org/10.12345/hgyjxjz.v3i9.32477

Stability optimization and troubleshooting method of remote power supply technology in coal mine

Tengfei Dou

Shaanxi Zhongneng Coalfield Co., Ltd., Yulin, Shaanxi, 719000, China

Abstract

Modern coal mining is undergoing accelerated development in intelligentization and deep mining. Underground excavation faces now extend over 5km from power supply hubs, making remote power systems the "lifeline" for maintaining continuous operation of core equipment like ventilation, drainage, and excavation machinery. Unlike traditional short-range systems, 35kV/10kV remote power networks must navigate complex underground environments-including high humidity (over 95% RH), strong electromagnetic interference, and frequent load fluctuations, posing significant operational stability challenges. Addressing these issues through a remote power system integrating hardware disturbance resistance, intelligent regulation, and precise diagnostics—while resolving core challenges like voltage degradation, protection failure, and fault localization—has become both an urgent requirement for advancing smart mining infrastructure and ensuring deep mining safety. This constitutes the central objective of this study.

Keywords

coal mine; remote power supply technology; stability; troubleshooting

煤矿远程供电技术的稳定性优化与故障排查方法

豆腾飞

陕西中能煤田有限公司，中国 · 陕西 榆林 719000

摘　要

当前煤矿开采正朝着智能化、深部化加速推进，井下采掘工作面与供电中枢的距离普遍延伸至5km以上，远程供电技术已成为保障通风、排水、采掘等核心设备连续运行的“生命线”。相较于传统近距离供电，35kV/10kV远程供电系统需应对更复杂的井下环境—高湿度（>95%RH）、强电磁干扰、频繁负荷冲击，导致其运行稳定性面临严峻挑战。在此背景下，构建兼具“硬件抗扰-智能调控-精准诊断”能力的远程供电系统，破解电压劣化、保护失效、故障定位难的核心问题，成为推动智慧矿山建设、保障深部开采安全的迫切需求，也是本文研究的核心目标。

关键词

煤矿；远程供电技术；稳定性；故障排查

1 引言

随着煤矿开采向深部及复杂地质条件延伸，远程供电技术已成为解决井下长距离、多分支供电的核心手段。当前 35kV/10kV 远程供电系统普遍面临三大技术瓶颈：长距离电缆分布参数导致的电压质量劣化问题（末端电压偏差超 15%）、多级保护装置配合失效引发的越级跳闸（占故障停电事件的 38%），以及高阻接地等隐蔽性故障的定位难题（传统方法定位误差超 500 米）。因此，构建兼具稳定性与自愈能力的远程供电系统，成为智慧矿山建设的迫切需求。

【作者简介】豆腾飞（1993–），男，中国陕西西安人，本科，工程师，从事煤矿机设备安装与检修研究。

2 煤矿远程供电系统的技术瓶颈与作用机理

2.1 长距离传输的电磁暂态特性

在 5km 级 10kV 供电线路中，电缆分布电容（约 0.2μF/km）与电感（约 0.3mH/km）形成的谐振网络，会在负荷启停时引发持续 200ms 以上的电压振荡。某矿实测数据显示，采煤机启动时末端电压跌落达 22%，持续时间超过 500ms，导致变频器欠压保护动作。而传统 RC 补偿电路在频率超过 500Hz 时补偿效率下降 40%，无法抑制高频谐波放大问题。

2.2 多级保护的配合失效机制

井下供电网络通常采用 " 中央变电所 - 移动变电站 - 末端设备 " 三级保护配置，传统定时限过流保护的时间级差需维持 0.5s 以上，导致故障切除时间长达 300-500ms。当发生高阻接地故障（过渡电阻 >1kΩ）时，故障电流仅为额定电流的 15%-20%，传统零序电流保护灵敏度不足，拒动率高达 65%。

2.3 复杂环境下的故障演化规律

井下 90% 的电缆故障起源于接头绝缘劣化，在潮湿环境（湿度 >95%RH）中，水分沿电缆附件缝隙侵入，导致局部放电量每年增加约 30%。当局部放电量超过 100pC 时，绝缘击穿概率提升 5 倍。而传统绝缘电阻测试（500V 兆欧表）仅能检测到绝缘下降至临界值（<2MΩ）时的故障，无法捕捉早期劣化征兆。

3 供电稳定性优化关键技术

3.1 硬件系统优化设计

3.1.1 电缆选型与敷设强化

选用低损耗交联聚乙烯（XLPE）电缆，根据供电距离和负荷容量精确计算电缆截面。例如，5 公里 35kV 供电场景推荐采用 3×300mm² 电缆，相比传统选型可降低 12% 的电压损耗。敷设时实行高压与控制电缆分层布置，间距不小于 300mm，穿越淋水区段采用防水密封接头，关键节点安装温度监测传感器，实时预警接头过热风险。

3.1.2 动态无功补偿体系构建

建立 " 集中补偿 + 分散补偿 " 的分层无功调节机制：在中央变电所配置容量为供电容量 20% ~ 30% 的静止无功发生器（SVG），实时补偿基波无功，将系统功率因数提升至 0.98 以上；在移动变电站低压侧部署动态电压调节器（DVR），针对采掘设备启停产生的快速无功波动（响应时间 <10ms）进行精准补偿，将电压波动控制在 ±5% 以内。

3.2 智能控制架构升级

3.2.1 同步相量测量与自适应保护

部署基于同步相量测量单元（PMU）的全网监测系统，以 1000Hz 高频采样电压电流数据，实时计算线路参数并动态调整保护整定值。采用暂态量保护技术，通过检测故障初期的电流突变量（响应时间 <20ms），实现对高阻接地、弧光接地等复杂故障的快速识别，将故障切除时间缩短至 50ms 以内，较传统保护提升 3 倍以上。

3.2.2 供电网络自愈技术

构建智能开关矩阵与路径优化算法，当检测到故障时自动隔离故障区域，并通过备用线路恢复非故障区域供电。某矿测试显示，故障后负荷转移时间控制在 100ms 以内，关键负荷（通风机、排水泵）不间断供电率达 99.9%，有效避免因停电引发的安全风险。

3.3 多维度监测体系构建

3.3.1 全要素传感器部署

建立覆盖 " 设备—线路—环境 " 的立体监测网络：在电缆接头安装光纤测温传感器（精度 ±0.5℃），实时监测温度场分布；在变压器部署油色谱传感器，监测 7 种特征气体浓度；在开关柜集成振动与局放传感器，捕捉设备机械故障与绝缘缺陷信号。所有数据通过工业环网实时传输，形成包含 128 个监测参量的实时数据库。

3.3.2 设备状态智能预警

采用深度学习算法构建设备健康模型，通过分析历史数据建立正常运行参数阈值。当电缆接头温度连续 3 天上升速率超过 5℃ / 天，或变压器油中氢气浓度超过 150ppm 时，系统自动发出橙色预警，提前 72 小时提示绝缘劣化风险，预警准确率达 95% 以上 [1]。

4 供电稳定性的系统化优化策略

4.1 分层分布式供电架构重构

传统单级长距离供电模式下，5km 以上的电缆传输会导致线路阻抗显著增大，分布电容与电感效应引发的电压衰减和无功损耗问题愈发突出。为破解这一难题，创新采用 "35kV 中央变电所 -10kV 区域供电中心 -1.14kV 末端变 " 的三级分层架构，核心是将单段供电距离严格控制在 2.5km 以内，从物理层面缩短能量传输路径，从根本上降低线路阻抗影响。

4.1.1 架构设计的技术逻辑

该架构遵循 " 分级降压、分区供电 " 原则：地面 35kV 高压电经中央变电所降至 10kV 后，通过 3 条主干电缆向井下 3 个区域供电中心辐射式供电，每个区域供电中心再以 10kV 电压向周边 2.5km 范围内的移动变电站供电，最终由末端变压器降至 1.14kV/660V 供采掘设备使用。这种设计将传统单级 5km 供电拆分为两级 2.5km 供电，线路阻抗直接降低 40%（从 0.6Ω/km 降至 0.36Ω/km），配合电缆截面优化（选用 3×300mm²XLPE 电缆），使末端电压偏差从 ±12% 稳定控制在 ±5% 以内，完全满足 GB/T12325 对工业用电的电压质量要求。

4.1.2 区域供电中心的核心功能

区域供电中心作为架构中的关键枢纽，承担三大核心任务：

动态无功补偿：配置 10Mvar 的 SVG（静止无功发生器），采用模糊 PID 控制算法，可在 5ms 内响应采掘设备的无功需求波动。以电铲为例，其启停时的无功变化率可达 500kVar/s，传统 PID 控制易出现超调或滞后，而模糊 PID 通过实时调整比例、积分、微分参数，使补偿精度提升至 98% 以上，系统功率因数稳定在 0.97-0.99 区间；

负荷均衡调节：内置智能负荷分配模块，实时监测各分支线路电流，当某工作面负荷突增（如同时启动 3 台刮板输送机）时，自动调整相邻区域的备用容量，避免单条线路过载；

区域化保护隔离：配置区域总开关与馈线开关，形成独立保护单元，将故障影响范围限制在单个区域，相比传统单级架构，故障停电面积缩小 60%。

4.2 自适应保护与快速自愈技术

针对传统保护装置 " 大负荷误动、小故障拒动 " 的痛点，基于同步相量测量（PMU）技术构建全网保护系统，实现故障响应速度与保护精度的双重突破。

4.2.1 同步相量测量的核心优势

在各级变电所及关键节点部署 PMU 装置，以 1000Hz 的高频采样率同步采集电压、电流相量数据（时间同步误差 <1μs），实时计算线路阻抗、功率因数等参数。与传统 SCADA 系统 1-2 次 / 秒的采样频率相比，PMU 可捕捉到故