

Research on Fault Location Technology of Underground Mine Power Supply Cable

Guang Lei

Jiangxi Copper Co., Ltd. Wushan Copper Mine, Jiujiang, Jiangxi, 332000, China

Abstract

With the advancement of mining technologies, the mechanization and intelligence levels of mining operations have been continuously improving. Mining enterprises must ensure stable power supply to provide reliable electrical support for mechanized operations. Underground cables, as the primary component of power supply systems, are often exposed to harsh environments with high humidity and strong electromagnetic interference. Frequent malfunctions occur, and fault localization remains challenging, significantly impacting production efficiency and operational safety. This paper systematically reviews two major types of fault localization technologies—offline and online—analyzes their technical principles and application boundaries, and proposes three key selection criteria. By determining appropriate solutions based on field-specific characteristics, the study aims to enhance fault localization accuracy and efficiency, thereby providing technical safeguards for mine power supply safety.

Keywords

Underground mine; Power supply cable; Fault location technology

井下矿山供电电缆故障定位技术研究

雷广

江西铜业股份有限公司武山铜矿，中国·江西九江 332000

摘要

随着矿山开采技术的发展，矿山生产的机械化、智能化水平也在不断提高，矿山企业需要确保稳定供电，为机械化作业提供安全的电力支持。井下电缆是供电系统的主要部分，长期处在潮湿、强电磁干扰的恶劣环境中，故障时有发生，而且难以定位，对生产效率和作业安全造成很大影响。本文对离线与在线两大类定位技术进行梳理，分析各种技术原理和应用边界，提出选用技术的三大原则，根据现场应用特点确定不同适用方案，从而提高故障定位精度和效率，为矿山供电安全提供技术保障。

关键词

井下矿山；供电电缆；故障定位技术

1 引言

井下矿山供电电缆是保证采掘、通风、运输等核心设备正常运转的重要载体，运行稳定性直接影响矿山生产效率和作业安全，故障定位技术作为供电系统维护的主要支持，对缩短抢修时间、降低安全风险有着非常大的意义。矿山井下的环境比较复杂多变，电缆故障频发。在实际操作中，故障点难以快速准确定位，从而为矿山生产带来了巨大影响。井下高湿度、多粉尘、强电磁干扰、机械磨损等恶劣工作环境容易造成电缆短路、开路、绝缘老化等各种故障，电缆敷设路径多沿巷道、洞室延伸，部分埋地或桥架敷设，故障点隐蔽性强，传统定位手段效率低。矿山机械智能化转型加快，供电系统负荷增大，电缆故障造成的停产损失和安全隐患越

来越突出，需要整理技术应用逻辑、优化定位方案，为矿山供电安全运维提供技术支持，助力矿山生产提质增效。

2 井下矿山供电电缆故障定位技术选用原则

2.1 环境适配性优先原则

井下环境特殊决定了技术选择应符合情景要求，即应对潮湿、多粉尘、强电磁干扰、空间狭小、防爆合规这些约束条件。潮湿环境会加速电缆绝缘层的老化速度，还会干扰电信号的传输，所以需要使用抗潮防水技术。分布式光纤技术的抗腐蚀性极强，适应相对湿度大于 95% 的巷道作业。强电磁干扰环境下，应避免使用基于电信号的技术，优先选择光纤传感等抗干扰性能好的方法，降低采掘设备电磁辐射为检测精度带来的影响^[1]。井下空间狭小，离线定位设备要便携，所有设备都必须符合矿山防爆规定，高压闪络法要配有防爆装置，严格控制操作风险，符合井下安全规程。

【作者简介】雷广（1998—），男，中国湖南常宁人，本科，助理工程师，从事电气工程及其自动化研究。

2.2 故障类型精准适配原则

不同故障类型有着差异化的特性，因此技术选择要具有针对性，不能使用单一技术。低阻故障（电阻 $< 100\ \Omega$ ）和开路故障，优先使用低压脉冲反射法，操作简单、安全，不需要高压设备就可以快速测距，定位误差控制在米级，适合井下大部分常规故障场景^[2]。高阻故障（电阻大于 $100\ \Omega$ ）和闪络性故障，需要利用高压闪络法击穿故障点转变为瞬时低阻故障，再配合声测法定点，准确找到故障点，操作前做好断电、接地等安全措施。绝缘老化、局部放电等隐性故障，应该选用在线监测技术，以此达成预防性维护的目的。

2.3 全周期效益平衡原则

技术选择应考虑前期投资、维护费用、抢修效率、停产损失等，实现全生命周期效益最大化。中小型矿山或者资金有限的场合，首选成熟的传统离线技术，低压脉冲反射法、电桥法设备购置成本低，运维门槛低，可满足基本的故障定位需求。大型智能化矿山要加大在线监测技术的投入，虽然物联网智能监测系统初期投入大却能够远程监控、自动预警，不需要人下井就可以定位故障，比如某矿山使用此技术后，故障排查时间由4小时缩减至30分钟。企业还要考虑技术兼容性，新建矿山同步敷设传感光纤，老旧矿山选用模块化设备，避免重复投资，符合生产需求和资金投入水平。

3 井下矿山供电电缆故障定位技术及应用分析

井下矿山供电系统是矿山生产的“动力命脉”，电缆是电能传输的主要载体，长期处在潮湿、多粉尘、强电磁干扰、机械磨损的复杂环境中，很容易发生短路、开路、绝缘老化等故障。由于井下电缆敷设路径复杂（多沿巷道、硐室敷设，部分埋地或敷设在桥架内），故障点隐蔽性强，准确定位对故障抢修效率以及矿山安全生产有很大影响^[3]。目前井下矿山供电电缆故障定位技术可以分为传统离线定位技术、现代在线监测定位技术两大类，各种技术的原理、适用场景、优缺点差别较大。

3.1 传统离线故障定位技术

离线定位技术就是断电之后进行故障检测，技术成熟、设备便携，是井下现场故障排查的主要方式，主要包括故障测距和故障定位两个环节，要配合使用才能达到精确定位。

3.1.1 低压脉冲反射法

这一技术是井下电缆故障测距的首选方法，依据传输线的波反射原理，在故障电缆的一端注入一定幅值、宽度的低压脉冲信号，脉冲信号沿电缆传播，当遇到阻抗不匹配点（开路、短路、低阻故障点）时，便会产生反射脉冲^[4]。通过检测发射脉冲和反射脉冲的时间差，结合电缆中脉冲波的传播速度，就可以得到故障点到测试端的距离，计算公式为：

$$L=2v \times t$$

式中， L 为故障点距离， v 为脉冲波在电缆中的传播速

度， t 为发射脉冲与反射脉冲的时间差。

其具有操作简便、安全可靠、无需高压设备、适应井下狭窄空间现场检测、设备体积小、重量轻，便于井下运输等优势，适用范围为低阻故障（故障电阻小于 $100\ \Omega$ ）、开路故障，无法直接对高阻故障、闪络性故障进行定位。井下应用时要消除电缆接头、分支等阻抗不匹配点产生的干扰反射波，防止误判。

3.1.2 高压闪络法

对于低压脉冲反射法无法解决的高阻故障（故障电阻大于 $100\ \Omega$ ）和闪络性故障，高压闪络法是最常用的离线定位技术，其基本原理就是通过高压电源击穿故障点的绝缘层，将高阻故障转变成瞬间的低阻短路故障，随后使用脉冲反射原理捕捉故障点的反射信号并完成测距。实际应用中需要配用高压试验变压器、电容器、球隙等设备，采用电容充电、球隙放电的方式为故障电缆施加短时高压。当故障点被击穿的时候会产生强烈的电脉冲，电脉冲沿电缆传播、反射，检测仪器记录脉冲往返时间即可求得故障距离^[5]。这一技术的缺点是设备体积大，井下操作必须遵守防爆规程，高压操作有安全风险，必须提前做好断电、验电、接地等安全措施。

3.1.3 声测法定点技术

声测法是故障定位的关键技术，经常与高压闪络法配合使用，原理是利用高压击穿时产生的机械振动声来定位。当高压闪络法击穿故障点绝缘层时，故障点会产生电弧放电，放电产生的能量会使周围介质（电缆绝缘层、土壤、空气）发生振动，发出特有的“嘶嘶声”。检测人员将声电传感器贴在电缆外皮上，沿着测距得到的故障区间移动传感器，通过接收振动声波的强度变化来确定故障点准确的位置。该技术的优点是定点精度高，误差可以控制在米级甚至分米级，但受井下环境的影响较大，巷道内风机噪声、设备运行噪声会干扰声波接收，并且只适用于故障点能够被高压击穿的情况，在井下使用时一般需要关闭周围干扰设备，或者采用降噪型传感器提高检测精度^[6]。

3.1.4 电桥法

电桥法是一种传统的测距方法，分为直流电桥法和交流电桥法两种，其原理是依据惠斯通电桥的平衡条件^[7]。以直流电桥法为例，将故障电缆的故障相和健全相作为电桥的两个臂，调节标准电阻使电桥达到平衡状态，根据电桥平衡时的电阻比值计算故障点距离。该技术具有原理简单、测量精度高，适合低阻接地故障和短路故障，但是存在明显的局限性：一是需要电缆两端同时配合操作，井下巷道跨度大时，两端通信协调难度大；二是不能定位高阻故障和开路故障，对电缆敷设方式要求高，不适用于分支较多的电缆线路。

3.2 现代在线故障监测定位技术

3.2.1 分布式光纤测温与故障定位技术

这一技术利用光纤的瑞利散射效应以及光时域反射（OTDR）原理，将传感光纤和电缆并排敷设或直接集成在

电缆护套里。当电缆运行时，由于绝缘老化、局部放电等原因造成某一段温度异常升高，传感光纤把温度变化转换成光信号强度变化，通过检测光信号传输时间差，便可以确定温度异常点的位置。该技术最大的优势就是能实现实时在线监测、抗电磁干扰性能好、定位精度高，并且可以同时完成温度检测和故障定位，光纤本安、耐腐蚀、完全可以适应井下潮湿、强电磁干扰等恶劣的环境^[8]。本技术不仅能找到已经发生的故障，也可观测温度的变化情况来预警绝缘恶化存在的危险，实现预防性维护，其不足之处是设备初期的投入成本较高，并且对于光纤敷设工艺要求严格。

3.2.2 电缆局部放电监测定位技术

局部放电是电缆绝缘变坏的先兆，也是造成电缆故障的一个主要原因。局部放电监测定位技术是利用电缆运行时产生的局部放电信号，实现对故障隐患的早期定位，分为特高频法和超声波法两种。

其一，特高频法：局部放电会产生特高频电磁波（频率范围 300MHz~3GHz），在电缆接头、终端等处安装特高频传感器捕捉特高频电磁波信号，使用多传感器信号时差定位法来确定局部放电点的位置。该技术抗干扰性好，定位精度达到米级，适合对井下高压电缆进行在线监测^[9]。

第二，超声波法，局部放电会产生机械振动，产生超声波信号，利用超声波传感器检测振动信号，能确定放电点的位置。该技术原理和声测法相同，但是不需要加压，可以实现在线监测。

3.2.3 物联网智能监测定位系统

这一系统是集传感器技术、无线通信技术、大数据分析技术于一身的综合性监测平台，沿电缆线路布设温度、湿度、局部放电、电流电压等传感器，实时采集电缆运行数据，再经由井下无线通信网络（ZigBee、LoRa、5G 等）上传到地面监控中心。监控中心利用大数据分析算法对数据进行处理，检测到异常数据的时候就自动定位故障区域并发出预警信号^[10]。该系统具有电缆运行状态全感知和远程监控的功能，不

需要下井就可以定位到故障，大幅提高了故障排查的效率。

4 结语

矿山机械设备的自动化推动了矿山生产的快速发展，电力随之在矿山生产和发展中发挥着更加重要的作用，因此加强对矿山企业电力的优化很有必要。需对当前的矿山供电系统加强技术改造及优化，以现代化技术改造为核心推动电力系统的优化。传统离线定位技术和现代在线定位技术各有优势，应按照环境匹配、故障对应、效益平衡的原则来选择。分布式光纤、物联网等智能化的应用使得故障发现方式由原来的“事后维修”变成了“事前预警”，为矿井供电系统稳定运行指明了方向。

参考文献

- [1] 陈静.煤矿高压供电系统漏电保护装置应用分析[J].内蒙古煤炭经济,2025,(20):127-129.
- [2] 任磊.煤矿供电设备的安全防护与电气保护技术分析[J].能源与节能,2025,(08):152-154.
- [3] 张志飞.煤矿井下供电电缆实时故障自动定位技术研究[J].自动化应用,2025,66(01):89-91.
- [4] 杨晓春,孙垚雯.煤矿供电线路的运行维护及防雷技术措施[J].煤炭新视界,2024,(02):180-181.
- [5] 崔智明.煤矿井下供电系统电能质量在线检测系统的设计研究[J].科技与创新,2024,(21):46-48.
- [6] 任兆鹏.矿山供电系统可靠性分析[J].能源与节能,2024,(08):139-141+158.
- [7] 张敏.煤矿井下高压电缆故障监测与预防[J].矿业装备,2023,(09):105-107.
- [8] 汪劲涛.矿山高压电缆绝缘状态监测与寿命评估[J].江西煤炭科技,2022,(03):212-214.
- [9] 刘籽琦,崔永乐.保德煤矿高压动力电缆绝缘故障系统设计及应用[J].内蒙古煤炭经济,2022,(09):30-32.
- [10] 牟琳杰.无功补偿技术在煤矿供电系统中的应用试验研究[J].矿山现代化,2015,(06):70-71.