

矿井巷道电磁干扰预测与防护技术研究进展

贾宇昊

煤炭科学技术研究院有限公司, 中国·北京 100013

摘要: 矿井巷道作为典型深地受限空间, 其电磁波传播受几何结构、围岩电参数、壁面粗糙度及粉尘等多因素耦合影响, 传播行为远比自由空间复杂。随着煤矿智能化建设深入, 井下高密度电气与无线设备形成了复杂电磁环境, 电磁干扰已成为制约设备可靠运行与安全生产的核心瓶颈。本文以电磁兼容分析为主线, 从传播机理、预测建模与防护技术三个维度系统综述矿井巷道电磁干扰研究进展。在传播机理方面, 梳理了波导模型、射线追踪法、矢量抛物物方程法及全波数值方法四大主流理论体系; 预测建模重点分析了数据驱动方法和物理约束深度学习网络的前沿突破; 防护技术从设备级与系统级两个层次进行评述。最后指出当前研究在多因素耦合建模、确定性与统计性方法融合、专用标准落地等方面的不足, 并展望了多物理场融合与物理约束 AI 等未来发展方向。

关键词: 矿井巷道; 电磁干扰; 传播模型; 预测建模; 电磁防护; 电磁兼容

Research Progress on Electromagnetic Interference Prediction and Protection Technology in Mine Roadways

Jia Yuhao

China Coal Research Institute Co., Ltd., China Beijing 100013

Abstract: As a typical deep confined space, mine roadways witness electromagnetic wave propagation affected by the coupling of multiple factors including geometric structure, electrical parameters of surrounding rock, wall roughness and dust, leading to far more complex propagation behaviors than those in free space. With the in-depth advancement of intelligent coal mine construction, high-density electrical and wireless equipment underground has formed a complex electromagnetic environment, and electromagnetic interference has become a core bottleneck restricting the reliable operation of equipment and safe production. Taking electromagnetic compatibility analysis as the main line, this paper systematically reviews the research progress of electromagnetic interference in mine roadways from three dimensions: propagation mechanism, prediction modeling and protection technology. In terms of propagation mechanism, four mainstream theoretical systems are summarized, namely waveguide model, ray tracing method, vector parabolic equation method and full-wave numerical method. For prediction modeling, the cutting-edge breakthroughs of data-driven methods and physically constrained deep learning networks are emphatically analyzed. The protection technologies are reviewed from both equipment level and system level. Finally, the deficiencies of current research in multi-factor coupling modeling, integration of deterministic and statistical methods, and implementation of dedicated standards are pointed out, and future development directions such as multi-physical field fusion and physically constrained artificial intelligence are prospected.

Keywords: Mine roadway; Electromagnetic interference; Propagation model; Prediction modeling; Electromagnetic protection; Electromagnetic compatibility

0 引言

矿井巷道是兼具科学研究独特性与工程应用紧迫性的深地受限空间。科学层面, 巷道壁面多次反射、围岩介质吸收、壁面粗糙度散射、粉尘颗粒附加衰减等多因素耦合, 使电磁波传播特性与自由空间、地面室内环境存在本质差异。工程层面, 煤矿智能化建设推动 5G/ WiFi6/7 基站、UWB 定位系统、变频驱动装置、多参数传感器等大量电气设备密集部署, 形成了“有意发射与无意辐射交织、传

导耦合与空间辐射耦合并存”的复杂电磁环境。

矿井场景的电磁干扰风险具有三大核心特征: 一是窄小空间内设备间的强耦合干扰直接影响通信可靠性, 严重时可引发采煤机总线通信中断等安全故障; 二是井下甲烷等易燃易爆气体环境中, 电磁能量局部聚焦可能诱发电离效应, 引发瓦斯爆炸, 安全风险远高于地面工业场景; 三是井下电磁环境长期缺乏专用标准约束, 现有地面工业电磁兼容标准在矿井特殊环境中的适用性不足。在此背景下,

电磁干扰的精确预测与有效防护已成为矿井电气安全领域的研究热点。本文系统梳理国内外该领域的最新研究进展,明确当前研究瓶颈,展望未来发展方向,以期为矿井电磁兼容设计与工程应用提供理论参考。

1 矿井巷道电磁干扰产生与传播机理研究

矿井电磁干扰研究的核心基础是明确电磁波在受限空间内的传播规律、干扰源的电磁特性及环境因素的耦合影响。

1.1 干扰源类型的电磁特性分析

矿井巷道中的电磁干扰源可按产生机制分为三大类,各类干扰的频谱特性与危害模式差异显著。

(1) 大功率变频设备的传导与辐射干扰。大功率变频器是井下最核心的电磁干扰源,其 IGBT 开关器件工作中产生的高 du/dt 、 di/dt 是主要噪声来源,与寄生参数相互作用形成阻尼振荡,产生覆盖低频到数十兆赫兹的宽带干扰,分为差模与共模两类:差模干扰由 di/dt 与母排、滤波电容的寄生电感相互作用形成,共模干扰由 du/dt 与 IGBT 米勒电容、散热器寄生电容共同作用导致。

相关研究以 ZJT-75/660SF 矿用变频器为对象,采用矩量法建立天线模型仿真其电磁辐射特性,发现近场辐射集中于变频器内部,远场辐射具有明显方向性,为变频器安装位置优化提供了参考^[9]。同时,随着采煤机功率提升,隔爆电控箱空间限制加剧,变频器动力电缆与通信总线混合布线导致的传导/辐射交叉干扰,已成为采煤机总线通信中断的核心诱因。

(2) 机电设备的瞬态浪涌干扰。架线式电机车是井下核心移动式干扰源,其受电弓与架空线的滑动接触取流过程具有强非线性,产生的宽带电磁噪声覆盖从低频到数十兆赫兹频段^[10]。此外,大功率设备启停、短路故障、开关设备操作会产生峰值功率高、频谱覆盖宽的浪涌型电磁辐射,对井下敏感电子设备构成严重威胁。有限元法已被验证可有效处理该类瞬态非线性干扰的建模与分析。也有研究指出,井下动力电缆的辐射效应会成为矿井无线通信的额外干扰源,同时也可作为地下连通性的补充传输路径^[11]。

(3) 无线通信系统的射频共址干扰。随着多制式无线系统在井下密集部署,不同系统间的邻频干扰、谐波干扰、互调干扰形成了复杂的射频电磁环境。研究表明,多径传播条件下,井下巷道中电磁波主功率峰值较自由空间提升约 1.5 dB,波谷处能量提升约 5 dB;而采用低自相关系数的 MIMO 天线系统,可使同一位置的功率较相干叠加阵列降低约 10 dB,显著减少巷道内电磁能流密度,降低瓦斯

引燃风险^[12]。

1.2 环境因素对传播特性的影响

矿井电磁波传播特性受多种动态环境因素的耦合影响:围岩湿度方面,当矿井水电导率较高时,围岩电导率随湿度增加而升高,电磁波衰减显著增大^[13];粉尘影响方面,极端粉尘条件下,颗粒散射与吸收引起的附加衰减不可忽略,且具有显著的随机性与空间非均匀性;围岩电参数方面,相对介电常数越大,电磁波衰减越大,且该效应在垂直极化波中更显著,而围岩电导率在特高频段对衰减的影响可近似忽略。

2 矿井巷道电磁干扰预测建模方法研究进展

电磁干扰预测是井下电磁兼容设计的前置环节,核心目标是预判干扰的强度、传播路径与影响范围,当前研究面临电大尺寸计算域、复杂边界条件、干扰源多样化的三重挑战。

2.1 基于数值方法的精确干扰预测

有限元法是电磁干扰数值预测的经典方法,已在井下电机车、变频器等干扰源的建模中得到广泛应用,但其在电大尺寸矿井巷道场景中面临计算资源急剧增长的瓶颈。为突破该局限,基于表面积分方程的全波求解器通过快速多极子-快速傅里叶变换加速方案,结合奇异值分解与 Tucker 分解压缩数据结构,实现了电大尺寸巷道场景的高效求解。针对井下狭小空间内“空间辐射+传导耦合”的双重干扰路径特征,场路耦合方法将电磁场求解与电路分析相耦合,显著提升了混合干扰路径的建模精度,已在高压电子系统瞬态电磁干扰分析中展现出良好适用性。

2.2 数据驱动与物理约束智能预测方法

数据驱动方法为矿井电磁干扰预测提供了全新范式,其核心优势是可通过实测数据刻画多因素耦合的非线性传播特性,规避传统数值方法的复杂建模过程。前述 SVM-AB 模型已验证了机器学习在小样本场景下的高精度预测能力,而物理约束深度学习模型则是该领域的最新前沿方向,解决了纯数据驱动模型可解释性差、泛化能力不足的瓶颈。

相关研究提出了物理信息递归反投影传播网络 (PRBPN),将电磁波传播物理定律嵌入神经网络结构,从粗网格抛物方程解重构分辨率接收信号强度场,在同类隧道截面与频率下的仿真中,可精准跟踪细网格全波方法的计算结果,并在法国 Massif Central 隧道的实测数据中验证了其在稀缺数据场景下的鲁棒性^[14]。此外,物理约束 Inc-GAN 方法也被提出用于基于稀疏测量的隧道传播建

模,为“精度与计算效率”的矛盾提供了新的解决方案^[15]。

3 矿井巷道电磁干扰防护与抑制技术研究进展

矿井电磁干扰防护技术可分为设备级与系统级两大体系,核心是从干扰源抑制、传播路径阻断、敏感设备保护三个维度实现电磁兼容。

3.1 设备级干扰抑制技术

(1) 专用 EMI 滤波器设计。EMI 滤波器是抑制变频器传导干扰的核心器件。针对矿用防爆变频器阻抗不匹配、滤波效果差的问题,相关研究提出了单级 LC 滤波器配合“P”型匹配网络的方案,在阻抗不匹配场景下仍可实现良好滤波效果,测试表明 1 MW/1140 V 防爆变频器的 EMI 信号可较标准限值降低 30~40 dB^[18]。针对现有滤波器仅关注输入端、忽略输出端传导路径的不足,有研究基于 SPWM 调制的干扰频谱特征,设计了新型高压电源 EMI 滤波器,弥补了矿用变频器输出端干扰抑制的技术空白^[19]。

(2) 调制策略优化的主动抑制。从源端通过调制策略优化降低干扰,是近年来的研究热点。相关研究提出了融合空间矢量脉宽调制(SVPWM)与快速傅里叶变换(FFT)的变频器干扰抑制模型,通过 PWM 算法优化输出波形提升直流电压利用率,再通过 FFT 精准定位关键干扰频段,动态优化开关策略,实验结果表明该方案可实现最低 0.11 的开关损耗,变频器整机效率达 0.97,在抑制干扰的同时兼顾了设备运行效率^[20]。

(3) 隔爆壳体与结构优化。隔爆壳体本身具备良好的电磁屏蔽效能,研究表明长方体隔爆外壳对浪涌电磁辐射具有极强的屏蔽作用,可为设备 EMC 设计提供依据^[21]。此外,通过优化变频器散热孔的结构形状与排列方式,可显著改善其电磁辐射骚扰水平,为低成本、无额外器件的 EMI 抑制提供了新思路。

3.2 系统级防护与无线系统抗干扰技术

(1) MIMO 天线去耦合与高隔离度设计。天线间互耦是制约 MIMO 系统性能、引发射频干扰的核心因素,尤其在井下有限空间内更为突出。西安科技大学团队设计了一种矿用高隔离度三频 MIMO 天线,通过加载 L 型枝节实现三频特性,在天线单元间加载 T 型寄生枝节抵消耦合电流,同时蚀刻矩形槽抑制表面波互耦,在 1.85~2.70 GHz、3.24~3.99 GHz、4.65~5.80 GHz 三个频段的隔离度分别大于 20 dB、22 dB、22 dB,可全面覆盖井下主流无线通信频段^[22]。

(2) 可重构智能超表面技术。可重构智能超表面是矿

井通信与电磁防护领域的前沿突破方向。针对井下弯曲段、分支点的信号衰减与通信盲区,东南大学团队研发了适用于矿井 5G 信号的多频段智能超表面系统,可精准聚拢电磁波束实现补盲,具备“随挂随取、随时补盲”的优势;西安科技大学团队研发的能量选择超表面,可选择性消除强电磁干扰对通信信号的劣化影响,在提升抗干扰能力的同时保障通信质量,为井下复杂电磁环境的主动调控提供了全新技术路径。

3.3 射频电磁能防爆安全防护

射频电磁能防爆是矿井电磁安全区别于地面工业场景的特殊核心问题。针对现有标准功率指标过于保守的问题,安标国家中心团队针对 3.55 GHz 井下 5G 典型频率,建立了环天线等效模型与放电火花功率计算模型,仿真与理论分析表明,100 W 发射功率、5 dBi 增益的天线,其远场辐射条件下的最大火花功率不足以引燃瓦斯气体,为井下 5G 设备的功率阈值优化提供了理论支撑。同时,低自相关系数 MIMO 系统可降低电磁能流密度约 10 dB 的研究结论,为井下无线设备的防爆安全部署提供了关键量化依据^[23]。

4 结语

矿井巷道电磁干扰预测与防护是横跨电磁理论、地下空间工程、智能信息处理的多学科交叉领域,是煤矿智能化建设的核心安全支撑技术。本文系统梳理了该领域的研究进展:在传播机理方面,波导理论、射线追踪法、抛物方程法与全波数值方法形成了互补的方法体系,数据驱动与物理约束深度学习方法为突破计算效率瓶颈提供了新路径;在预测建模方面,确定性数值方法、统计性量化方法、智能预测方法协同发展,实现了从单设备到系统级的全维度预测能力提升;在防护技术方面,形成了设备级无源/有源抑制、系统级天线优化与智能超表面调控、防爆安全边界量化的多层次防护体系。未来,建立多因素耦合的随机统计模型、完善矿井专用电磁兼容标准体系、推动物理约束 AI 方法的工程化应用,是该领域亟待突破的核心方向,也是保障煤矿智能化建设安全稳定发展的关键支撑。

参考文献:

- [1] 张长森,柯熙政.空拱形巷道中电磁波的传输特性[J]. 矿业研究与开发, 2009, 29(6): 64-66.
- [2] 田子建,王艳芬,张跃.煤矿巷道壁粗糙度对电磁波传播的影响[J]. 工矿自动化, 2013(3): 45-49.
- [3] Wang L, Zhang X, Li Y. Establishment of break point model for railway wireless communication system in curved

tunnels[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2025, 74(6): 5890–5900.

[4] 王洪梅, 李含笑, 卢旭等. 煤矿采空区多孔非均匀介质无线信道建模[J]. 工矿自动化, 2025, 51(8): 67–74.

[5] Shandu S, Moropa T S, Ndjiongue A R. Power cable radiation: a novel approach to underground mining connectivity [C]. 2025 IEEE International Conference on Communications, 2025: 1–6.

[6] 孟积渐. 井下 MIMO 天线电磁环境建模与防爆分析[J]. 煤矿安全, 2025, 56(9): 250–256.

[7] 刘玉梅, 孙继平. 矿井巷道围岩湿度对电磁波传播

的影响[J]. 河南理工大学学报 (自然科学版), 2010, 29(2): 170–174.

[8] Wu K, et al. Physics-informed deep recurrent back-projection network for tunnel propagation modeling[EB/OL]. arXiv:2601.02007, 2026.

基金项目: 煤炭科学技术研究院有限公司科技发展基金, 项目编号 2024QN-12。

作者简介: 贾宇昊 (1996.11–), 男, 汉族, 内蒙古, 煤炭科学技术研究院有限公司, 研究实习生, 硕士研究生, 研究方向: 煤矿智能开采通信与感知。