



文章编号: 1671-251X(2022)10-0123-06

DOI: 10.13272/j.issn.1671-251x.18038

煤矿井下无线传输分析方法

邵水才¹, 郭旭东¹, 彭铭², 张高敏²

(1. 国家能源集团国神公司, 陕西 府谷 719400;

2. 中国矿业大学(北京) 机电与信息工程学院, 北京 100083)

摘要: 目前, 矿井移动通信系统、人员和车辆定位系统设计和规划主要靠经验和现场测试, 存在工作量大、通信基站和定位分站布置及其天线设置难以优化等问题。为促进煤矿井下无线传输分析方法在矿井移动通信系统、人员和车辆定位系统设计和规划, 以及通信基站和定位分站布置及其天线设置中的应用, 分析了不同煤矿井下无线传输分析方法适用范围和优缺点: ① 抛物方程法具有算法简单、所需计算内存资源量较小等优点, 但不适用于分析巷道起伏、支护、纵向导体和横向导体等因素对矿井无线传输衰减的影响。② 时域有限差分法适用范围较广, 但需较大的计算内存资源量, 分析巷道弯曲、起伏、断面形状不规则等因素对矿井无线传输衰减的影响时, 误差较大。③ 有限元法适用范围最广, 可以采用四面体网格, 相比于时域有限差分法中使用的六面体网格, 可以更好地拟合不规则结构巷道, 但所需计算内存资源量最大, 现有高档服务器内存容量难以满足需求, 适用于小断面、短距离、低频率煤矿井下无线传输分析。④ 射线追踪法具有算法简单、所需计算内存资源量最小等优点, 但适用范围小, 仅适用于分析高频段无线工作频率、断面形状、围岩介质、巷道弯曲等因素对矿井无线传输衰减的影响, 不能分析天线在巷道断面不同位置、巷道分支、巷道起伏、支护、纵向导体和横向导体等因素对矿井无线传输衰减的影响, 并且在分析低频段无线工作频率对矿井无线传输衰减的影响时, 误差大。⑤ 统计分析法具有简单易用的优点, 但需要大量实测数据, 而煤矿井下巷道种类多、环境复杂, 存在分支、弯曲和起伏等, 测量工作量大, 效率低, 难以测量煤矿井下不同巷道和支护等条件下无线传输衰减数据, 难以分析无线工作频率、天线在巷道断面不同位置、巷道断面面积和形状、巷道弯曲、巷道分支、巷道起伏、围岩介质、支护、纵向导体、横向导体等因素对煤矿井下无线传输衰减的影响。

关键词: 煤矿井下无线传输分析; 抛物方程法; 时域有限差分法; 有限元法; 射线追踪法; 统计分析法

中图分类号: TD655

文献标志码: A

Coal mine underground wireless transmission analysis method

SHAO Shuicai¹, GUO Xudong¹, PENG Ming², ZHANG Gaomin²

(1. CHN Energy Guoshen Group, Fugu 719400, China; 2. School of Mechanical Electronic and Information Engineering, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: At present, the design and plan of the mine mobile communication system and the personnel and vehicle positioning system mainly depend on experience and field test. There are some problems such as heavy workload, difficult optimization of the layout of the communication base station and positioning substation and the antenna setting, etc. In order to promote the application of underground wireless transmission analysis methods in the design and plan of mine mobile communication system, personnel and vehicle positioning system, as well as the layout of the communication base station and positioning substation and the antenna setting, the

收稿日期: 2022-10-06; 修回日期: 2022-10-17; 责任编辑: 盛男。

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2016YFC0801800)。

作者简介: 邵水才(1969—), 男, 陕西蒲城人, 教授级高级工程师, 硕士, 主要从事煤炭企业现代化管理及智能化方面的工作, E-mail: 18002000@ceic.com。

引用格式: 邵水才, 郭旭东, 彭铭, 等. 煤矿井下无线传输分析方法[J]. 工矿自动化, 2022, 48(10): 123-128.

SHAO Shuicai, GUO Xudong, PENG Ming, et al. Coal mine underground wireless transmission analysis method[J]. Journal of Mine Automation, 2022, 48(10): 123-128.



扫码移动阅读

application scope, advantage and disadvantages of different underground wireless transmission analysis methods are analyzed. ① Parabolic equation method has the advantages of simple algorithm and small computing memory resources. But it is not suitable for analyzing the influence of roadway undulation, support, longitudinal conductor and transverse conductor on wireless transmission attenuation in mines. ② The finite-difference time-domain method has a wide range of applications. But it requires a larger amount of computing memory resources. When analyzing the influence of roadway bending, undulation, irregular section shape and other factors on the wireless transmission attenuation in mines, the error is large. ③ The finite element method is the most widely used. The tetrahedral mesh can be used. Compared with the hexahedral mesh used in the finite difference time domain method, it can fit irregularly structured roadways better. But it requires the largest computing memory resources. The existing high-grade server memory capacity is difficult to meet the demand. It is suitable for small section, short distance, and low-frequency coal mine underground wireless transmission analysis. ④ The ray tracing method has the advantages of simple algorithm and minimum computing memory resources. But the application range is small. The ray tracing method is only suitable for analyzing the influence of factors such as high-frequency wireless working frequency, section shape, surrounding rock medium, and roadway bending on the wireless transmission attenuation of the mine. The ray tracing method cannot analyze the influence of factors such as different positions of an antenna on a roadway section, roadway branches, roadway undulation, supports, longitudinal conductor and transverse conductor on the wireless transmission attenuation of the mine. When analyzing the influence of low frequency band wireless operating frequency on the wireless transmission attenuation of the mine, the error is large. ⑤ The statistical analysis method has the advantage of simplicity and ease of use, but it requires a large amount of measured data. The coal mine underground roadway has a plurality of types, complex environment, branches, bends, and undulation. It has large measurement workload and low efficiency. It is difficult to measure the wireless transmission attenuation data under the conditions of different roadways and supports in the coal mine underground. It is difficult to analyze the wireless working frequency, the different positions of the antenna on the roadway section, the area and the shape of the roadway section, the bend of the roadway, the branch of the roadway, the undulation of the roadway, the surrounding rock medium, the supports, the longitudinal conductor and transverse conductor on wireless transmission attenuation of the mine. roadway, the surrounding rock medium, the supports, the longitudinal conductors, and transverse conductor on wireless transmission attenuation of the mine.

Key words: analysis of wireless transmission in coal mine; parabolic equation method; finite difference time domain method; finite element method; ray tracing method; statistical analysis method

0 引言

矿井移动通信系统、人员和车辆定位系统是煤矿智能化建设的基础,是煤矿安全高效生产的重要保障。5G、WiFi6、UWB、ZigBee 等矿井移动通信系统、人员和车辆定位系统设计和规划,需要进行矿井井下无线传输分析,以优化通信基站和定位分站布置及其天线设置,在保证通信效果的前提下,减少通信基站和定位分站数量,降低系统成本和维护工作量。目前,矿井移动通信系统、人员和车辆定位系统设计和规划主要靠经验和现场测试,存在工作量大、通信基站和定位分站布置及其天线设置难以优化等问题。为促进矿井井下无线传输分析方法在矿井移动通信系统、人员和车辆定位系统设计和规划,以及通信基站和定位分站布置及其天线设置中的应用,

本文分析了全波算法、射线追踪法和统计分析法等煤矿井下无线传输分析方法适用范围和优缺点,以指导煤矿井下无线传输分析方法的选择和使用。

1 煤矿井下无线传输分析方法

煤矿井下无线传输分析方法主要有求解麦克斯韦方程的全波算法、将高频电磁波近似为射线的射线追踪法和应用统计学原理的统计分析法等,如图 1 所示。其中全波算法主要包括抛物方程法、时域有限差分法和有限元法。

1.1 抛物方程法

抛物方程法是通过波动方程在特定方向进行近似求解的方法,是一种广义上的全波算法,适用于分析巷道(轴向尺寸远大于断面尺寸)的无线传输问题。抛物方程法主要分为标量抛物方程法和矢量抛

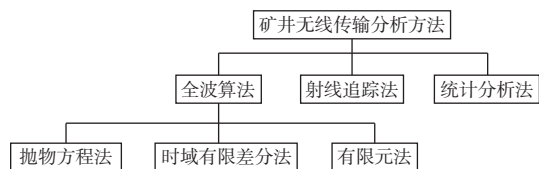


图1 煤矿井下无线传输分析方法

Fig. 1 Coal mine underground wireless transmission analysis method

物方程法(Vector Parabolic Equation, VPE),其中标量抛物方程法主要分为基于Crank-Nicolson的抛物方程法(Crank-Nicolson Parabolic Equation, CN-PE)和交替方向隐式抛物方程法(Alternating Direction Implicit Parabolic Equation, ADI-PE)。目前抛物方程法已在煤矿井下无线传输分析中应用。

2009年, P. Bernardi等^[1]采用VPE方法研究了弯曲对矩形隧道中无线传输衰减的影响。2010年, R. Martelly等^[2]用ADI-PE方法研究了隧道弯曲、分支和壁面粗糙度对无线传输衰减的影响。2019年, Zhang Xingqi等^[3]使用VPE方法研究了粗糙度和发射天线距隧道壁不同距离对拱形隧道中无线传输衰减的影响。2020年, Li Yusheng等^[4]采用三维交替方向隐式时域抛物方程(Alternating Direction Implicit Time Domain Parabolic Equation, ADI-TDPE)方法研究了隧道弯曲和含有车辆时对无线传输衰减的影响。2021年, Qin Hao等^[5]提出了一种分步抛物方程(Split-Step Parabolic Equation, SSPE)方法,适用于分析隧道中5 GHz及以上工作频率的无线传输衰减特性。

1.2 时域有限差分法

自1966年, K. Yee^[6]首次提出通过YEE网格差分离散方式求解麦克斯韦方程的时域有限差分法以来,经过50多年发展,时域有限差分法已经成为计算电磁学领域最重要的算法之一。时域有限差分法是通过差分离散麦克斯韦方程的微分形式,将微分运算转换为差分运算,对待求解区域按空间进行划分,并按时间顺序对电场分量和磁场分量进行逐步推进求解的方法^[7]。目前时域有限差分法已在煤矿井下无线传输分析中应用。

2008年, M. F. Hadi等^[8]为解决矩形巷道中使用传统时域有限差分法时,网格划分越小,占用计算内存资源量越大的问题,提出了使用紧致格式时域有限差分(Compact Finite Difference Time Domain, Compact-FDTD)方法,只对隧道横截面进行离散建模,并通过分析施加可预测的轴向尺寸解决方案,减小了所需计算的网格数量,提高了计算效率。2011年, Zhao Jingjing等^[9]用时域有限差分法研究了与拱形隧道断面平行的金属门对断面的场分布的影

响,发现场的能量刚开始主要集中在金属门四周,随着脉冲传播时间增加,场的能量逐渐集中在隧道中间。2012年, Liu Yawen等^[10]使用时域有限差分法研究了巷道壁内金属锚网对断面的场分布的影响,发现当巷道壁内有金属锚网时,其附近的场强明显增大。2014年, M. M. Rana等^[11]提出了一种分段交替方向隐式时域有限差分法(Segmented Alternating Direction Implicit Finite Difference Time Domain, S-ADI-FDTD),通过将隧道空间划分成段,用于模拟大断面远距离隧道内无线传输。2015年, Zhou Chenming等^[12]使用时域有限差分法分别计算了隧道中无线工作频率为455, 915 MHz的垂直极化与水平极化电磁波的无线传输衰减,并将该结果与射线追踪法和波模方法计算得到的结果进行比较,具有良好的 consistency。2018年, Li Dawei等^[13]将时域有限差分法和等效原理结合,将矩形隧道分为含有天线的子域和其余环境子域,分别使用不同大小的网格进行剖分计算,降低了对计算内存资源量的需求。2019年, Y. F. Mao等^[14]使用Prony方法解决了基于阵列扫描的时域有限差分法(Array Scanning Method Finite Difference Time Domain, ASM-FDTD)在模拟周期性隧道结构中无线传输的混叠问题。

1.3 有限元法

有限元法是基于变分原理和剖分插值对麦克斯韦方程进行求解的数值方法。该方法的基本思想是用简单模型代替复杂模型,将复杂模型分解成许多个简单的小三角形(或四面体),对每个简单的小模型求其近似解,然后汇集起来就是对整个模型进行求解。该方法对各种结构具有很强的适应性,且求解精度高。目前有限元法已在煤矿井下无线传输分析中应用。

中国矿业大学(北京)孙继平教授团队于2001年开始,采用有限元法研究了巷道弯曲、围岩介质、断面面积、断面形状、天线极化、金属支护、金属风桥、设备和人体等因素对矿井无线传输衰减的影响^[15-17],并将有限元法和解析法结合,分析了煤矿井下巷道中无线传输衰减的过程,提出了三段式煤矿井下高频连续波骚扰工程计算模型^[18]。2007年,赵静等^[19]利用有限元法研究了矩形巷道中含有运输机车时对矿井无线传输衰减的影响;刘玲丽^[20]用有限元法研究了椭圆形巷道中含有1辆或多辆列车时对矿井无线传输衰减的影响。

1.4 射线追踪法

射线追踪法的主要思想是将高频电磁波近似为射线,由发射源点向空间发射,遇到巷道壁、设备等

介质会发生反射、散射和绕射等光学现象,基于光学原理进行分析,计算出接收点处的射线能量(即接收功率)。射线追踪法具有原理简易、计算高效等优点。目前射线追踪法已在煤矿井下无线传输分析中应用。

2017 年, Zhou Chenming^[21]采用射线追踪法研究了隧道壁表面粗糙度对无线传输衰减的影响。2018 年, K. S. Kumar 等^[22]通过基于射线追踪法的仿真软件 Wireless Insite 对 2.4 GHz 无线工作频率下不同断面尺寸的 500 m 长直隧道的无线传输衰减特性进行模拟,发现隧道断面尺寸越大越有利于无线传输。2019 年, M. Ghaddar 等^[23]用射线追踪法研究了矿井巷道壁粗糙度对 5G 无线传输衰减的影响。2020 年, Li Shuangde 等^[24]使用射线追踪法分析了弯曲隧道中含有设备对无线传输衰减的影响;米广双等^[25]对射线追踪法进行了修正,提出了一种基于镜像原理的半圆拱形矿井巷道无线传输场强预测方法。2021 年, Zhai Menglin 等^[26]使用射线追踪法分析了在不同无线工作频率下具有不同曲率隧道的无线传输衰减特性,给出了无线工作频率和隧道曲率与无线传输衰减的关系。2022 年,孙继平等^[27]研究了天线在巷道断面不同位置对无线传输衰减的影响,考虑了射线反射时产生的损耗,并通过增加位置衰减系数修正了射线追踪法,解决了传统射线追踪法不适用于收发天线均位于巷帮时的情形。

1.5 统计分析法

统计分析法是通过现场实际测量得到的数据,利用统计学原理进行归纳总结,并进行数值分析的方法。目前,用于煤矿井下无线传输分析的统计分析法主要有 Rayleigh 分布、Rician 分布和 Nakagami 分布等。

1998 年, M. Lienard 等^[28]在空直隧道内测量了无线传输衰减情况,发现在空直隧道内的无线传输衰减服从 Rayleigh 分布; Zhang Yueping 等^[29]在矿井巷道中进行了无线传输衰减的测量,并对测量得到的数据进行了统计分析,发现工作频率、巷道弯曲和断面面积会影响 Rayleigh 分布与实际测量数据的拟合,提出 Rician 分布模型更适用于模拟空直隧道的无线传输衰减。2002 年, M. Djadel 等^[30]测量了在 2.45, 18 GHz 工作频率下弯曲巷道的无线传输衰减情况,验证了 Rician 分布也可用于模拟弯曲巷道的无线传输衰减,但在 18 GHz 频率下 Nakagami 分布更适于模拟巷道无线传输衰减特性。2018 年, Hou Weibin 等^[31]通过测量 900 MHz、2.4 GHz 和 5.8 GHz 频率下,不同参数和类型的天线对半圆弯曲隧道中

无线传输衰减特性的影响,用统计分析法总结出了多斜率路径损耗模型。2019 年, M. E. Elazhari 等^[32]采用统计分析法建立了线性函数模型、正弦函数模型、傅里叶模型和正弦与线性的组合模型 4 个路径损耗模型,来描述矿井内 UWB 信号的无线传输衰减。2020 年, S. A. M. Tariq 等^[33]通过测量方式研究了在 60 GHz 频率下巷道壁粗糙度对矿井无线传输衰减的影响,提出了通过多路径形状因子的统计参数来表征粗糙度造成的散射影响。2020 年,孙继平等^[34]通过煤矿井下现场测试和统计分析,提出了基站天线距巷帮应不小于 0.01 m。

2 煤矿井下无线传输分析方法的适用性及优缺点

煤矿井下无线传输衰减受无线工作频率、天线在巷道断面的位置、巷道断面面积和形状、巷道弯曲、巷道分支、巷道起伏、围岩介质、支护、纵向导体、横向导体等因素的影响。用于地面的无线传输分析方法难以直接用于煤矿井下。抛物方程法、时域有限差分法、有限元法、射线追踪法和统计分析法等煤矿井下无线传输分析方法均存在一定的适用范围。现有主要煤矿井下无线传输分析方法适用性和优缺点见表 1。

3 结论

(1) 抛物方程法具有算法简单、所需计算内存资源量较小等优点,但不适用于分析巷道起伏、支护、纵向导体和横向导体等因素对矿井无线传输衰减的影响。

(2) 时域有限差分法适用范围较广,但需较大的计算内存资源量,分析巷道弯曲、起伏、断面形状不规则等因素对矿井无线传输衰减的影响时,误差较大。

(3) 有限元法适用范围最广,可以采用四面体网格,相比于时域有限差分法中使用的六面体网格,可以更好地拟合不规则结构巷道,但所需计算内存资源量最大,现有高档服务器内存容量难以满足需求,适用于小断面、短距离、低频率煤矿井下无线传输分析。

(4) 射线追踪法具有算法简单、所需计算内存资源量最小等优点,但适用范围小,仅适用于分析高频段无线工作频率、断面形状、围岩介质、巷道弯曲等因素对矿井无线传输衰减的影响,不能分析天线在巷道断面不同位置、巷道分支、巷道起伏、支护、纵向导体和横向导体等因素对矿井无线传输衰减的影响,并且在分析低频段无线工作频率对矿井无线传输衰减的影响时,误差大。

表 1 煤矿井下无线传输分析方法对比
Table 1 Comparison of analysis methods of wireless transmission in underground coal mine

方法	概述	优点	缺点
抛物方程法	对波动方程在特定方向进行近似求解的方法	算法原理简单,所需计算内存资源量较小	不适用于分析巷道起伏、支护、纵向导体和横向导体等因素对矿井无线传输衰减的影响
时域有限差分法	将待求解区域按空间进行划分,并按时间顺序对电场分量和磁场分量进行逐步推进求解的方法	原理相对简单,采用的六面体网格剖分容易,适用范围较广	需要较大的计算内存资源量,且分析巷道弯曲、起伏、断面形状不规则等因素对矿井无线传输衰减的影响时,误差较大
有限元法	通过变分原理将麦克斯韦方程转换为泛函极值问题,并进行剖分插值求解的方法	采用的四面体网格可以较好地拟合各种不规则结构的巷道,适用范围最广	所需计算内存资源量最大,仅适用于小断面、短距离、低频率煤矿井下无线传输分析
射线追踪法	基于几何光学理论,将高频电磁波近似为射线的方法	算法简单,所需计算内存资源量最小	仅适用于分析高频段无线工作频率、断面形状、围岩介质、巷道弯曲等因素对矿井无线传输衰减的影响,不能分析天线在巷道断面不同位置、巷道分支、巷道起伏、支护、纵向导体和横向导体等因素对矿井无线传输衰减的影响,且分析低频段无线工作频率对矿井无线传输衰减的影响时,误差大
统计分析法	利用统计学原理对现场实际测量数据进行归纳总结,并进行数值分析的方法	简单易用	现场测量工作量大,效率低,适用范围小,无法应用于分析无线工作频率、天线在巷道断面不同位置、巷道断面面积和形状、巷道弯曲、巷道分支、巷道起伏、围岩介质、支护、纵向导体、横向导体等因素对矿井无线传输衰减的影响

(5) 统计分析法具有简单易用的优点,但需要大量实测数据,而煤矿井下巷道种类多、环境复杂,存在分支、弯曲和起伏等,测量工作量大,效率低,难以测量煤矿井下不同巷道和支护等条件下无线传输衰减数据,难以分析无线工作频率、天线在巷道断面不同位置、巷道断面面积和形状、巷道弯曲、巷道分支、巷道起伏、围岩介质、支护、纵向导体、横向导体等因素对煤矿井下无线传输衰减的影响。

参考文献(References):

[1] BERNARDI P, CARATELLI D, CICCHETTI R, et al. A numerical scheme for the solution of the vector parabolic equation governing the radio wave propagation in straight and curved rectangular tunnels[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2009, 57(10): 3249-3257.

[2] MARTELLY R, JANASWAMY R. Modeling radio transmission loss in curved, branched and rough-walled tunnels with the ADI-PE method[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2010, 58(6): 2037-2045.

[3] ZHANG Xingqi, SARRIS C D. Statistical modeling of electromagnetic wave propagation in tunnels with rough walls using the vector parabolic equation method[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2019, 67(4): 2645-2654.

[4] LI Yusheng, BIAN Yuqian, HE Zi, et al. EM pulse propagation modeling for tunnels by three-dimensional ADI-TDPE method[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 85027-85037.

[5] QIN Hao, ZHANG Xingqi. Efficient modeling of radio wave propagation in tunnels for 5G and beyond using a split-step parabolic equation method[C]. 2021 XXXIVth General Assembly and Scientific Symposium of the International Union of Radio Science(URSI

GASS), Rome, 2021: 1-3.

[6] YEE K. Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1966, 14(3): 302-307.

[7] 盛新庆. 计算电磁学要论[M]. 3版. 北京: 科学出版社, 2018.

SHENG Xinqing. Essentials of computational electromagnetics[M]. 3rd ed. Beijing: Science Press, 2018.

[8] HADI M F, MAHMOUD S F. Modeling wireless propagation in a rectangular tunnel with the Compact-FDTD method[C]. 2008 IEEE Radio and Wireless Symposium, Orlando, 2008: 339-342.

[9] ZHAO Jingjing, LIU Yawen, CHEN Bin, et al. Study on the impact of metallic door on the field cross-section distribution of the EMP propagation in tunnel with parallel implementation[C]. The 4th IEEE International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation and EMC Technologies for Wireless Communications, Beijing, 2011: 754-757.

[10] LIU Yawen, CHEN Yiwang, ZHANG Pin, et al. Study on the field cross-section distribution of the EMP propagation in vaulted tunnel with parallel implementation[C]. International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology, Shenzhen, 2012: 1-4.

[11] RANA M M, ANWAR M S, MOTIN M A. Segmentation technique with ADI-FDTD for EM propagation modeling in electrically large structure[C]. International Conference on Electrical Engineering and Information & Communication Technology, Dhaka, 2014: 1-4.

[12] ZHOU Chenming, JACKSHA R. Radio propagation analysis in mines and tunnels based on FDTD[C]. The 31st International Review of Progress in Applied Computational Electromagnetics, Williamsburg, 2015:

- 1-2.
- [13] LI Dawei, WANG Jianlai, TIAN Guansuo, et al. An efficient algorithm based on the equivalence principle and FDTD for wave propagation prediction in tunnels[C]. International Applied Computational Electromagnetics Society Symposium-China, Beijing, 2018: 1-2.
- [14] MAO Y F, WU H B, CHEN J H, et al. ASM-FDTD combine the Prony's method to simulate the EMP propagation in tunnel[J]. The Applied Computational Electromagnetics Society Journal, 2019: 1821-1828.
- [15] 孙继平, 张长森. 列车对梯形隧道中电磁波截止频率的影响[J]. 微波学报, 2002, 18(4): 76-79.
SUN Jiping, ZHANG Changsen. Effect of train on the cutoff frequency of trapezoid-tunnel[J]. Journal of Microwares, 2002, 18(4): 76-79.
- [16] 孙继平, 张长森. 异型波导截止频率的研究[J]. 煤炭学报, 2003, 28(2): 210-213.
SUN Jiping, ZHANG Changsen. Study on cut-off frequency of abnormality wave-guide[J]. Journal of China Coal Society, 2003, 28(2): 210-213.
- [17] 孙继平, 成凌飞, 张长森. 截面尺寸对矩形巷道中电磁波传播的影响[J]. 中国矿业大学学报, 2005, 34(5): 596-599.
SUN Jiping, CHENG Lingfei, ZHANG Changsen. Influence of Transverse Dimensions on Electromagnetic Waves Propagation in Rectangular Tunnels[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2005, 34(5): 596-599.
- [18] 孙继平, 刘毅, 樊京. 煤矿井下高频电磁骚扰工程计算模型[J]. 煤炭学报, 2012, 37(12): 2118-2122.
SUN Jiping, LIU Yi, FAN Jing. High frequency electromagnetic disturbance engineering calculation model in coal mine tunnel[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(12): 2118-2122.
- [19] 赵静, 姚善化. 煤矿巷道中运输机车对电磁波截止频率的影响[J]. 矿业快报, 2007(4): 53-54, 81.
ZHAO Jing, YAO Shanhua. Effects of electric locomotive on cut-off frequencies of electromagnetic wave in coal mine tunnel[J]. Express Information of Mining Industry, 2007(4): 53-54, 81.
- [20] 刘玲丽. 列车对椭圆形隧道电磁波传播特性的影响[D]. 昆明: 云南师范大学, 2007.
LIU Lingli. Effect of train on electromagnetic wave propagation characteristics in elliptical tunnel[D]. Kunming: Yunnan Normal University, 2007.
- [21] ZHOU Chenming. Ray tracing and modal methods for modeling radio propagation in tunnels with rough walls[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2017, 65(5): 2624-2634.
- [22] KUMAR K S, LEE Y H, MENG Y S. Radio-wave propagation in tunnel structures at ISM band: a preliminary study[C]. 2018 International Conference on Intelligent Rail Transportation, Singapore, 2018: 1-4.
- [23] GHADDAR M, BEN MABROUK I, NEDIL M, et al. Deterministic modeling of 5G millimeter-wave communication in an underground mine tunnel[J]. IEEE Access, 2019, 7: 116519-116528.
- [24] LI Shuangde, LIU Yuanjian, YAO Lin, et al. Improved channel model and analysis of the effect of bodies in curved tunnel using ray tracing[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2020, 19(7): 1162-1166.
- [25] 米广双, 杨维. 基于镜像原理的半圆拱形矿井巷道电磁波传播场强预测[J]. 煤炭学报, 2020, 45(增刊2): 1089-1099.
MI Guangshuang, YANG Wei. Field strength prediction of electromagnetic wave propagation along semicircular arched mine roadway based on mirror principle[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(S2): 1089-1099.
- [26] ZHAI Menglin, ZHAI Kai, CUI Hengrong, et al. Multifrequency channel characterization for curved tunnels[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2021, 20(12): 2457-2460.
- [27] 孙继平, 张高敏. 基于混合射线追踪的矿井电磁波分析方法[J]. 煤炭学报, 2022, 47(7): 2834-2843.
SUN Jiping, ZHANG Gaomin. Mine electromagnetic wave analysis method based on mixed raytracing[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(7): 2834-2843.
- [28] LIENARD M, DEGAUQUE P. Propagation in wide tunnels at 2 GHz: a statistical analysis[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 1998, 47(4): 1322-1328.
- [29] ZHANG Yueping, HWANG Y. Characterization of UHF radio propagation channels in tunnel environments for microcellular and personal communications[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 1998, 47(1): 283-296.
- [30] DJADEL M, DESPINS C, AFFES S. Narrowband propagation characteristics at 2.45 and 18 GHz in underground mining environments[C]. IEEE Global Telecommunications Conference, Taipei, 2002: 1870-1874.
- [31] HOU Weibin, WANG Junhong, LI Dawei, et al. Radio-wave propagation in a curved tunnel with a semicircle cross section[J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2018, 60(4): 122-131.
- [32] ELAZHARI M E, TALBI L, NEDIL M. Comparative study of four path loss models for UWB off-body propagation channel inside a mine[C]. IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting, Atlanta, 2019: 2103-2104.
- [33] TARIQ S A M, DESPINS C L, AFFES S, et al. Angular dispersion of a scattered underground wireless channel at 60 GHz[J]. IEEE Access, 2020, 8: 67572-67580.
- [34] 孙继平, 张高敏. 矿用5G频段选择及天线优化设置研究[J]. 工矿自动化, 2020, 46(5): 1-7.
SUN Jiping, ZHANG Gaomin. Research on 5G frequency band selection and antenna optimization setting in coal mine[J]. Industry and Mine Automation, 2020, 46(5): 1-7.