

引用格式:刘微,刘志强.智能矿山有轨运输无人驾驶电机车无线通信方式的研究与应用[J].有色设备,2024,38(4):16-20,26.
LIU Wei,LIU Zhiqiang. Research and application of wireless communication mode of unmanned electric locomotive for intelligent mine rail[J]. Nonferrous Metallurgical Equipment,2024,38(4):16-20,26.

智能矿山有轨运输无人驾驶电机车无线通信方式的研究与应用

刘微,刘志强

(中国恩菲工程技术有限公司,北京100038)

[摘要]我国矿山有轨运输电机车运行路线覆盖矿山井下电机车轨道,无法采用有线通信的传输方式来采集和控制电机车上的所有数据。电机车需要跟控制室通信的数据,包含语音数据、机车定位数据、控制数据、视频数据等。大部分电机车传统通信方式只采用WiFi无线通信技术,无法保证移动电机车上的各类工业数据的稳定可靠传输。本文研究了无人驾驶电机车无线通信的多种传输方式,并根据矿山电机车运行的移动场景,提出了适合智能矿山无人驾驶电机车的高稳定性、高可靠性且经济实用、易于拓展维护的无线通信数据传输方式。

[关键词]智能矿山;有轨电机车;无线通信技术;数据传输;5G;WiFi6

[中图分类号]TD64 **[文献标志码]**A **[文章编号]**1003-8884(2024)04-0016-05

DOI:10.19611/j.cnki.cn11-2919/tg.2024.04.003

0 前言

智能矿山是集数字化、信息化、智能化及绿色环保等为一体的矿山运营新模式,是矿山可持续发展的基石,是化解高危行业风险的根本途径,是提高生产效率和解决未来劳动力危机的重要手段^[1-3]。

有轨运输电机车无人驾驶是矿山智能化的关键环节,是进一步提高矿山生产效率和智能化建设的必然选择,是建设安全、高效、绿色的智能矿山的重要任务,也是实现矿山机械化减人和自动化换人本质安全的有效手段。

矿山有轨电机车的机车运行数据需要在电机车运行中时刻保持与控制室的通信,有线通信的传输方式无法随着电机车的运行而传输所有数据,无线通信系统是移动设备接入智能矿山系统的有效通信方式,将检测技术、感知技术、传输技术、信息技术深度融合,并通过现代控制技术、智能技术、人工智能

提升有轨电机车的运行效率。

1 矿山无人驾驶电机车无线通信方式

1.1 矿山井下工况条件

矿山行业环境制约趋紧、成本上升,地下矿山有轨运输系统在智能化演进过程中面临四大痛点。①环境特殊:地下矿山空间狭长、湿度大、环境特殊且存在本质安全要求,对地下网络的设备形态和网络覆盖面临挑战;②多网并存:地下通信、视频、定位、语音、物联多张网络并存,数据采集和处理决策过于分散,不利于无人驾驶电机车控制系统技术发展;③性能挑战:地下有轨运输沿途安防监控、少人无人智能作业对网络性能提出较高要求;④运维困难:地下无人驾驶电机车运输控制系统数据类型繁多,管理困难,现场运维面临挑战,驱使网络运营维护升级。

1.2 矿山无人驾驶电机车通用无线通信方式

电机车所需传输的数据包含大量语音数据、定位数据、控制数据、视频数据等。这些数据均对网络的可靠性、实时性有较高要求。传统无人驾驶无线通信方式采用WiFi6信号无线覆盖的组网方式。无线通信方式单一,矿山井下环境恶劣,巷道壁凹凸不平,无线信号传输不稳定。矿山有轨电机车运行路

[收稿日期]2024-07-03

[第一作者]刘微(1987—),女,江西德兴人,高级工程师,主要从事矿山电信相关设计与研究工作。

[通信作者]五矿集团科创基金项目“有轨运输无人驾驶系统研发”。

线覆盖矿山井下电机车轨道,无法完全使用有线通信的传输方式来覆盖电机车上的所有数据。

现有技术大部分只采用 WiFi6 无线通信技术,无法保证移动电机车上的各类工业数据的低延时、高稳定性的可靠传输,造成电机车数据传输延迟性较高,稳定性较差。

2 无人驾驶电机车 5G + WiFi6 双路组网无线通信方式

智能矿山无人驾驶电机车无线通信系统采用 5G + WiFi6 无线覆盖的组网方式。为了保证无线信号的通信质量和稳定性,使用基于不同频段技术的多无线热冗余通信系统。基于不同频段技术的无线系统可以有效避免在同一波段上同时被干扰。

2.1 网络建设目标

1) 确保电机车重要控制数据稳定(网络延时控制在 100 ms 以内)、可靠(实时热冗余)、实时与控制室通信。

2) 电机车上重要控制数据通过不少于 2 个独立的无线网络进行传输。

2.2 总体网络需求

1) 带宽需求:上行通道需上传视频数据,预计单站点上行带宽并发需求在 100 Mbps/s 左右,下行通道主要传输控制命令,预计单站点下行带宽并发需求在 50 Mbps/s 左右。

2) 时延可靠性需求:无人驾驶系统需要实现集控室 PLC 与机车 PLC 控制数据通信延迟不高于 50 ms (30 ~ 50 ms),能实现双无线链路热冗余,基站能够自检网络状态,并在中控室显示网络状态。

3) 连接需求:无人驾驶系统需连接的设备网络通信方式包括以太网协议以及 RS485、RS232 等主流通信协议,5G 工业终端能够接入无人驾驶电机车等设备。

4) 基站切换需求:当单机车与多基站同时通信时,基站切换时延不高于 50 ms^[4]。

2.3 无人驾驶电机车通信性能要求

WiFi6 和 5G 专网无线通信技术具有大带宽、低时延和大连接的特点,满足无人驾驶电机车对无线通信网络的性能要求,符合智能矿山未来的技术发展趋势,便于后期系统升级。同时,相对于以前的通信系统,WiFi6 和 5G 专网具备电机车驾驶系统所需

的网络通信要求:实现电机车车载数据,包括视频数据、控制数据的无线传输功能,可实现下行峰值速率 1 Gbps/s,上行峰值速率可达 200 Mbps/s,根据矿车自动驾驶需求,还可提供切片能力以及增强上行带宽能力,满足无人驾驶系统单站点上行带宽并发需求 100 Mbps/s 和下行带宽并发需求 50 Mbps/s 的通信需求^[5]。

2.4 5G 和 WiFi6 通信技术对比分析

5G 和 WiFi6^[6] 是 2 种不同的无线通信技术。5G 是第五代移动通信技术的缩写,是 4G 网络的升级版,而 WiFi6 是第六代 WiFi 技术的缩写,是 802.11ax 协议的升级版。

2 种技术之间的区别见表 1。

2.5 5G + WiFi6 组网方案

对于工业控制类、稳定性要求高的场景,5G + WiFi6 的组网确保电机车重要控制数据稳定、可靠、实时地与控制室通信,通过对比分析这 2 种无线通信方式的特点和局限性,在实际无人驾驶控制系统实际实施时,采用双路组网方式,实现优势互补,热备冗余,提高无人驾驶电机车数据传输的稳定性、可靠性。

5G 专网网络由 5G 专网核心设备(含 5G 核心网元 UPF、MEC 服务器、业务交换机和防火墙等)和 5G 无线网络设备(含基站控制器 BBU、无线基站 RRU 设备)等系统设备构成。5G 无线网络设备设置在有轨电机车轨道附件,通过无线网络规划网络设备站址,将 5G 信号覆盖有轨电机车轨道全线^[7]。

在无人驾驶电机车轨道巷道壁部署 WiFi6 网络节点,重点在主要控制节点(转辙机、信号灯)和主要监控节点附近部署 WiFi6 网络节点,WiFi6 信号覆盖无人驾驶电机车轨道全线。

无人驾驶电机车组网拓扑图如图 1 所示。该组网方案可实现以下功能。

1) 5G 无线网络设备及 WiFi6 网络设备采用综合基站部署方式,综合基站包含网络设备、UPS 供电设备、综合基站旁挂接光缆配线设备。

2) 综合基站的无线功能采用双无线链路热冗余,利用 5G 网络覆盖范围大于 WiFi6 设备的特点,在路段隧道、转弯关键节点缩小站间距,确保全程双无线链路冗余覆盖;在电机车发送端,控制器将相同数据进行采用不同寄存器分别发送,同时带有时间标记,接收端控制器使用不同的寄存器进行接收,接

表 1 5G 和 WiFi6 性能对比

Table 1 Performance comparison between 5G and WiFi6

对比项	5G	WiFi6
理论速率	64T64R:20 Gbps	8T8R:9.6 Gbps
调制技术/带宽	256QAM/100MHz (sub-6 GHz); 256QAM/400MHz (毫米波)	1024QAM/160MHZ
单设备覆盖范围	5 000 ~ 10 000 m ² (室内);平方公里级别覆盖范围 (室外)	500 ~ 1 000 m ² (室内)
时延	eMBB:4 ms uRLLC:0.5 ms	平均:20 ms 优先调度算法:10 ms
移动性	5G 信号覆盖广、移动性强,跨区连接速度快,可实现跨区网络无缝切换	WiFi6 信号覆盖面积小,跨区建立连接慢
物联网大连接	10 万个终端设备同时在线接入/单站点、广域覆盖、超低功耗(室外、室内)	74 个终端设备同时在线接入/单 AP,局域覆盖(室内)
信号干扰	信号不易被干扰	信号容易被干扰
安全性	空口安全性高,流量可以不出企业	最新的 WPA3 协议安全有保障,流量可以不出企业
主要应用场景	室内室外,面向大带宽 eMBB、大连接 mMTC 和超低时延 uRLLC 场景各类场景;自动驾驶、无人机、城市覆盖、矿山工厂等大连接、超低时延(< 10 ms)要求的场景	室内场景,在大带宽 eMBB 和大连接 mMTC 场景作为 5G 的补充;企业办公、学校学生上网、企业 VR/AR/4K 应用、仓储物流 AGV、商超工厂资产管理的 IoT 等场景。

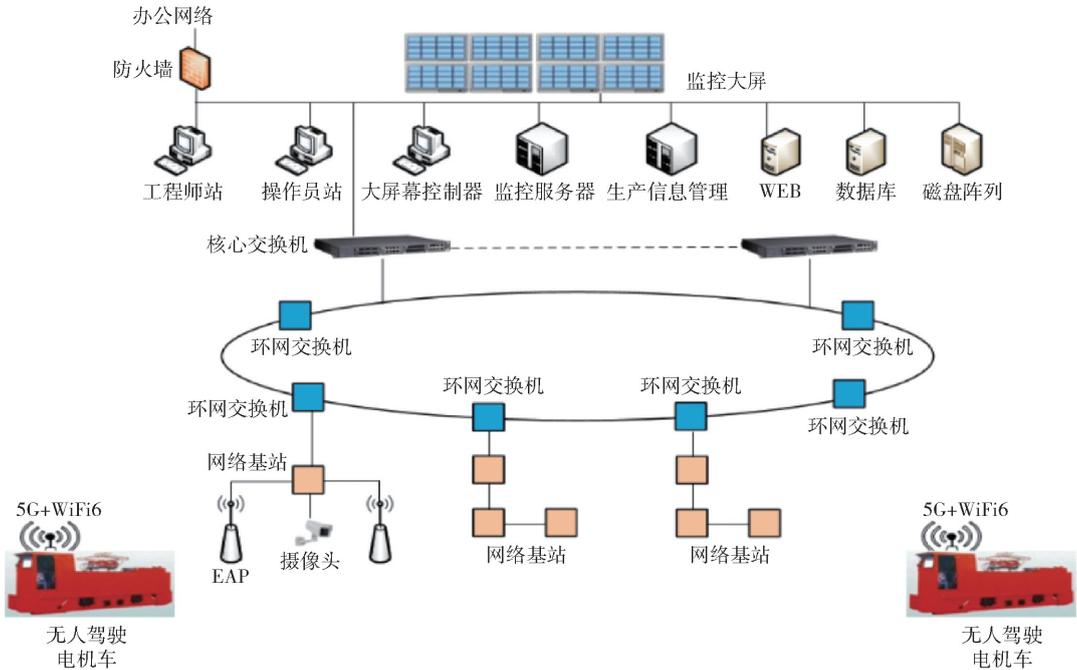


图 1 无人驾驶电机车组网拓扑图

Fig.1 Topology diagram of unmanned electric vehicle networking

收后通过收到的时间标签以及筛选算法进行最新数据的筛选使用。利用上述方法可实现多网络的实时

热冗余,因为多路数据保持实时接通,几乎不存在切换时间,切换时间可认为是控制器的扫描周期

(10 ms 以内), 完全满足工业及矿山远程传输及控制需求, 保障了数据的实时可靠传输, 提高了系统的安全性。

3) 综合基站采用 WiFi6 和 5G 模块化维护基站。综合基站能够自检网络状态, 采用电信级通信运营保障, 基站设备出现故障自动反馈至网管后台并下发通知提醒运维人员处理。

4) 提供无线手持设备接入能力, 5G 专网大带宽低时延能力结合专网物联网卡, 支持运维人员配备平板电脑等无线终端在巷道内随时接入无人驾驶控制系统及网络系统, 提供有权限的调试和操作功能。

5) 提供语音接入功能, 通过对讲设备在不增加系统复杂程度的前提下实现巷道人员手持电话对讲、通话功能。

6) 超低网络时延, 满足电机车无人驾驶低时延需求(50 ~ 200 ms), 同时支持通过 2 路光纤接入中控室内网, 保证数据不出矿区, 保障数据安全。

7) 终端接入能力, 目前 5G 网络终端接入方式可通过 5G 工业网关连接, 提供标准 RS 232、RS485、以太网和 WiFi6 接口, 支持 Modbus、主流 PLC 协议解析能力。有轨电机车配置 5G + WiFi6 无线通信终端, 实时发送电机车定位数据、控制数据、视频数据、音频数据。终端通过 5G 模组 + WiFi6 模组等方式接入 5G + WiFi6 网络。

8) 5G + WiFi6 核心网侧: 5G 系统部署 UPF(核心网用户面模块)、MEC(多接入边缘计算)平台下

沉至矿区, 实现本地流量分流; WiFi6 系统部署无线网关服务器, 服务器内置防火墙, 自定义过滤规则, 划分 VLAN, 实时监控设备状态。

9) MEC 多接入边缘计算(Multi-Acess Edge Computing)是在靠近人、物或数据源头的网络边缘侧, 融合网络、计算、存储、应用核心能力的开放平台, 就近提供边缘智能服务, 满足行业数字化在敏捷联接、实时业务、数据优化、应用智能、安全与隐私保护等方面的关键需求, 并通过该平台开放无线侧网络信息, 实现高带宽、低时延业务支撑与本地管理。

10) UPF 提供 5G 网络中的用户面功能, 主要负责处理用户数据包的传输和转发, 位于 5G 核心网络(5GC)中, 并且在用户设备(如智能手机、物联网设备等)和互联网之间建立通信桥梁。UPF 负责处理数据包的路由、传输、编解码、网络地址转换等任务, 以确保数据在网络中的高效传递。当用户设备发送数据包到 5G 网络时, 数据包首先传输到 UPF。UPF 根据数据包中的目标地址, 对数据进行处理, 并将其转发到相应的目标位置, 这可能是其他用户设备、云服务器或者是连接到 MEC 服务器的边缘计算节点。

3 应用案例

近年来, 5G + WiFi6 的双路组网方式成功应用在江铜集团德兴铜矿铁运智能化升级无人驾驶项目以及冬瓜山铜矿 - 875 m 中段 5G + 无人驾驶项目。表 2 为某铜矿 5G + WiFi6 实际实施情况。

表 2 某铜矿 WiFi6 和 5G 基站部署情况

Table 2 Deployment of WiFi6 and 5G base stations in a certain copper mine

基站名称	经度	纬度	站点型号	AAU 型号	挂高-米	数量
某铜矿铁运路线 1#栈桥	117. 7135	29. 04286	宏站	AAU5336e	4	1
某铜矿铁运路线 11#弯道	117. 7126	29. 03351	宏站	AAU5336e	4	1
某铜矿铁运路线 13#弯道	117. 7122	29. 03485	宏站	AAU5336e	4	1
某铜矿铁运路线 16#弯道	117. 7132	29. 03786	宏站	AAU5336e	4	1
某铜矿铁运路线 1 号站	117. 7105	29. 02004	宏站	AAU5336e	4	1
某铜矿铁运路线 3#隧洞口	117. 7109	29. 02664	宏站	AAU5336e	4	1
某铜矿铁运路线 5#弯道	117. 7112	29. 0229	宏站	AAU5336e	4	1
某铜矿铁运路线 9#隧洞口	117. 7127	29. 03001	宏站	AAU5336e	4	1
某铜矿铁运路线放矿皮带处	117. 7111	29. 01828	宏站	AAU5336e	4	1
某铜矿铁运路线机车库	117. 7125	29. 0174	宏站	AAU5336e	4	1
某铜矿铁运路线放矿站 800 m 隧道	117. 7155	29. 01883	室分	RRU5150-D	0	1
WiFi 基站覆盖半径 150 m 部署						26

以上 2 个项目现场均部署 5G + WiFi6 双路组网无线通信基站(图 2),实际应用效果达到了预期,确

保电机车重要控制数据稳定(网络延时控制在 100 ms 以内)、可靠(实时热冗余)、实时地与控制室通信。

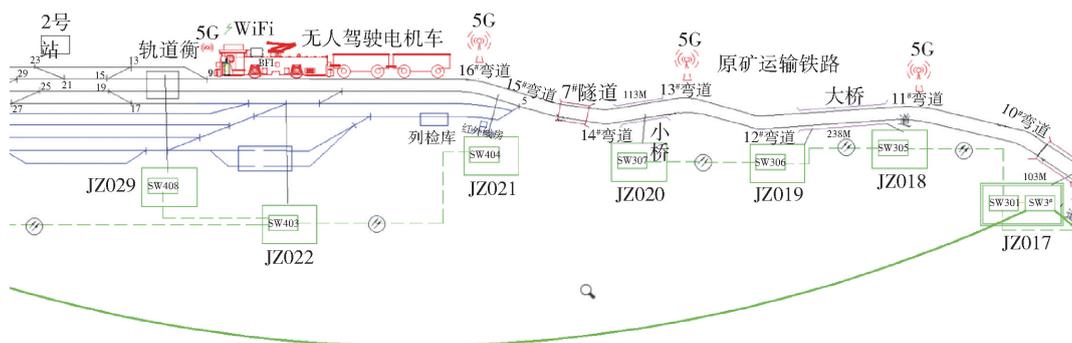


图 2 5G + WiFi6 基站部署示意

Fig. 2 Schematic diagram of 5G + WiFi6 base station deployment

4 面临的挑战及展望

随着国家不断重视、政策扶持与技术引导,国内大中型矿山企业逐步加大在采矿设备机械化无人化、开采环境数字化、生产过程控制自动化、经营管理信息化、大数据分析等方面的发展,智能矿山的建设将提高员工的健康保障和工作满意度,同时也面临着不少的挑战。

1) 井下潮湿、多尘环境对运行的机械化设备、电子设备的设备性能及稳定性要求很高,无线通信设备均属于较精密电子设备,井下恶劣环境一定程度影响设备的使用性能,有轨运输无人驾驶电机车将井下电机车的跟车控制操作替换为地表控制室远程操作。

2) 机械设备自动化水平的提高,迫切需要机械设备、电子设备巡检维护等专业技术型人才,企业应根据矿山实际情况制订设备维护周期,设备维护人员应定期检查,发现问题应及时整改。

3) 目前 5G 系统的搭建费用较高,设备厂商可以开辟针对矿山井下使用终端情况,轻量化 5G 设备,使更多的企业可以广泛应用 5G 技术。

矿山有轨运输无人驾驶电机车的广泛应用,推动行业内设备的技术及性能迭代,电机车无线通信冗余链路技术理念渗透到无人驾驶电机车系统中,是未来智能矿山建设中重要的无线通信技术解决方案。

[参考文献]

- [1] 马宁,胡亚平. 无人驾驶车辆巷道十字路口交叉点智能决策系统研究[J]. 矿业研究与开发,2023,43(3):179-184.
- [2] 高德旭. 露天矿山无人驾驶网络通信技术探究[J]. 露天采矿技术,2023,38(2):98-102.
- [3] 马晓琳. 基于计算机视觉技术矿山运输智能调速控制系统研究[J]. 中国矿山工程,2021,50(5):67-70.
- [4] 张晓旭. 井下无人驾驶系统中的机车通信行为策略研究[D]. 合肥:合肥工业大学,2016.
- [5] 马力. 井下 5G 网络覆盖问题及优化方案探讨[J]. 工矿自动化,2024,50(S1):61-64,91.
- [6] 杨康,成曦,董金鑫,等. 5G 网络与 WiFi6 融合组网技术在智慧矿井中的应用[J]. 无线互联科技,2022,19(23):10-13.
- [7] 赵鹏,骆军军,冯金庆. 龙首矿电机车无人驾驶系统 5G 网络构建与优化[J]. 矿山机械,2021,49(9):17-23.

(下转第 26 页)

Application analysis of unmanned electric dump truck in open pit mine

HU Datao, XI Yong, MA Ning

(China ENFI Engineering Co., Ltd., Beijing 100038, China)

Abstract: Dump truck is the main tool for transporting minerals and rocks in mines, playing an important role in open-pit mining production. In recent years, the assessment indicators for energy conservation, emission reduction, and intelligent technology in mines have become increasingly strict. With the rapid development of battery technology and unmanned technology, unmanned electric trucks have also carried out experiments and applications in the field of mining. This paper carried out practical investigation and status analysis on the application of unmanned electric dump trucks in open-pit mines, listed application examples to illustrate the advantages and economic value of unmanned electric dump trucks compared with traditional fuel dump trucks in mining applications, and sorted out the application situation of unmanned dump trucks. It provides reference for the related research and application of unmanned electric dump truck technology.

Key words: unmanned; electric dump truck; open-pit mine; energy saving; safety; intelligent mining



(上接第 20 页)

Research and application of wireless communication mode of unmanned electric locomotive for intelligent mine rail transportation

LIU Wei, LIU Zhiqiang

(China ENFI Engineering Co., Ltd., Beijing 100038, China)

Abstract: The running route of the electric locomotive for mine rail transportation in China covers the underground electric locomotive track in the mine, and the transmission mode of wired communication cannot be used to collect and control all the data on the electric locomotive. The data that the locomotive needs to communicate with the control room includes voice data, locomotive positioning data, control data, video data, etc. The traditional communication mode of most electric locomotives only uses WiFi wireless communication technology, which cannot ensure the stable and reliable transmission of various industrial data on mobile electric locomotives. In this paper, a variety of transmission modes of wireless communication of unmanned electric locomotives are studied, and according to the moving scenarios of mine electric locomotives, a wireless communication data transmission mode with high stability, high reliability, economic and practical, and easy expansion and maintenance suitable for intelligent mine unmanned electric locomotives is proposed.

Key words: intelligent mining; rail locomotives; wireless communication technology; data transmission; 5G; WiFi6

