

文章编号: 1671-251X(2023)04-0009-06

DOI: 10.13272/j.issn.1671-251x.18026

# F5G 工业光环网通信技术在煤矿中的应用与展望

赵廷钊<sup>1</sup>, 原生蒂<sup>1</sup>, 李朝飞<sup>2</sup>, 侯尚武<sup>1</sup>, 侯振堂<sup>1</sup>, 谢植栋<sup>2</sup>

(1. 河南能源集团有限公司, 河南 郑州 450046; 2. 河南巨捷通信技术有限公司, 河南 郑州 450000)

**摘要:** 矿井传统有线通信网络存在带宽固定、有效利用率低、时延较高、系统配置不灵活等问题, 无法满足矿井智能化业务发展需求。矿用 5G 及 WiFi6 无线通信存在巷道衰减大、可靠性不及有线通信的问题。针对 F5G(第 5 代固定网络)工业光环网通信技术的特点, 指出 F5G 工业光环网通信技术是矿井有线通信的发展趋势。介绍了 F5G 工业光环网的 2 个关键技术: 10 Gbit/s PON(无源光网络)技术、数智光分配网(DQ ODN)技术; 比较了 F5G 工业光环网与传统有线网络在网络时延、电气安全、业务安全、施工安全、维护安全等方面的优势。结合 F5G 工业光环网通信技术在煤矿井下应用的需求特点及建设实例, 分析了 F5G 工业光环网通信技术在井下工业远程控制、高清视频回传、工业网络迁移、远程故障诊断、无线网络信号回传等场景的具体应用, 指出 F5G 工业光环网通信技术在矿井应用的不足与前景: ① 基于 F5G 工业光环网通信技术的矿用设备种类较少。② 在不同场景的适应性、不同业务种类的适配性方面有待提升。③ F5G 工业光环网通信技术在系统接口与协议方面与传统以太网通信接口相同, 终端设备无需更改适配即可接入使用, 是未来煤矿场景工业网络的有效解决方案。④ 煤矿应结合自身实际情况建设 F5G 试点, 以实际场景支撑 F5G 工业光环网通信技术的应用与研究。

**关键词:** 煤矿智能化; 矿井有线通信; F5G; 工业光环网; 无源光网络; 数智光分配网; 光虹膜技术  
**中图分类号:** TD655 **文献标志码:** A

F5G industrial optical ring network communication technology and its application and prospect in coal mines

ZHAO Tingzhao<sup>1</sup>, YUAN Shengfu<sup>1</sup>, LI Chaofei<sup>2</sup>, HOU Shangwu<sup>1</sup>, HOU Zhentang<sup>1</sup>, XIE Zhidong<sup>2</sup>

(1. Henan Energy Group Co., Ltd., Zhengzhou 450046, China;

2. Henan Jujie Communication Technology Co., Ltd., Zhengzhou 450000, China)

**Abstract:** The traditional wired communication network in coal mines has problems such as fixed bandwidth, low effective utilization, high time-delay, and inflexible system configuration. This cannot meet the development needs of intelligent business in coal mines. Mining 5G and WiFi6 wireless communication has the problem of large roadway attenuation and lower reliability than wired communication. According to the characteristics of F5G (the fifth generation fixed networks) industrial optical ring network communication technology, it is pointed out that F5G industrial optical ring network communication technology is the development trend of mine wired communication. Two key technologies of F5G industrial optical ring network are introduced. They are 10 Gbit/s PON (passive optical network) technology and digital quick optical distribution network (DQ ODN) technology. The advantages of F5G industrial optical ring network and traditional wired network in network delay, electrical safety, business safety, construction safety and maintenance safety are compared. Based on the demand characteristics and construction examples of F5G industrial optical ring network communication technology applied in coal mines, this paper analyzes the specific applications of F5G industrial optical ring network communication technology in scenarios such as underground industrial remote control, high-

收稿日期: 2022-09-01; 修回日期: 2023-03-20; 责任编辑: 王晖, 郑海霞。

基金项目: 河南能源集团有限公司科研项目(2022XXH24)。

作者简介: 赵廷钊(1964—), 男, 河南长葛人, 教授级高级工程师, 博士, 主要从事矿山机电、发供电、信息化管理工作, E-mail: zhaotingzhao@hneecg.com.cn。

引用格式: 赵廷钊, 原生蒂, 李朝飞, 等. F5G 工业光环网通信技术在煤矿中的应用与展望[J]. 工矿自动化, 2023, 49(4): 9-14.

ZHAO Tingzhao, YUAN Shengfu, LI Chaofei, et al. F5G industrial optical ring network communication technology and its application and prospect in coal mines[J]. Journal of Mine Automation, 2023, 49(4): 9-14.



扫码移动阅读

definition video transmission, industrial network migration, remote fault diagnosis, and wireless network signal transmission. It points out the shortcomings and prospects of F5G industrial optical ring network communication technology in coal mines. ① There are few types of mining equipment based on F5G industrial optical ring network communication technology. ② There is still room for improvement in the adaptation of scenarios and different business types. ③ The F5G industrial optical ring network communication technology is the same as the traditional Ethernet ring network communication interface in terms of system interface and protocol. The terminal equipment can be accessed and used without changing the adaptation. It is an effective solution for the industrial network in the future coal mine scenario. ④ Coal mines should build F5G pilot projects based on their own actual conditions to support the application and research of F5G industrial optical ring network communication technology with actual scenarios.

**Key words:** intelligent coal mine; mine wired communication; F5G; industrial optical ring network; passive optical network; digital intelligent optical distribution network; optical iris technology

## 0 引言

随着我国矿井开采规模和深度的逐步增加,井下作业的难度越来越大,矿井通信网络在煤矿生产、安全的重要性也愈加凸显<sup>[1]</sup>。矿井通信网络承载着矿井内电话、远距离监控信号等各种信息的传输,在安全生产、调度等方面发挥着重要作用<sup>[2]</sup>。

受井下空间、环境等条件的限制,矿井通信设备必须满足防爆、防潮、防尘的要求<sup>[3]</sup>;由于矿井作业场地需要经常移动、工作人员较为分散,矿井通信网络需同时满足易扩展、稳定性强的要求,因此矿井通信网络采用有线和无线相结合的方式<sup>[4]</sup>。我国煤矿传统有线通信网络主要以单系统自组网及千兆、万兆环网为主,但传统的交换机网络带宽固定、有效利用率低、扩容困难、时延较高、终端设备接口单一、系统配置不灵活,无法满足矿井智能化业务发展需求。无线通信矿用 5G 及 WiFi6 虽然移动便捷、传输速率高,但仍存在巷道衰减大、可靠性不及有线通信的问题。第 5 代固定网络技术(the Fifth Generation Fixed Networks, F5G)工业光环网具有安全可靠、极简部署、可视运维、灵活扩展、边缘智能等特点,为矿井有线通信网络提供了一种新的解决路径。

## 1 F5G 工业光环网关键技术及优势

### 1.1 F5G 工业光环网关键技术

F5G 是一个混合概称,涵盖了 10 Gbit/s 无源光网络(Passive Optical Network, PON)、200 Gbit/s/400 Gbit/s、下一代光传输网络(Next Generation Optical Transport Network, NG OTN)、光交叉连接(Optical Cross-connect, OXC)等技术类型,具有大带宽、低时延、高可靠的技术特点<sup>[5]</sup>。F5G 工业光环网是以 10 Gbit/s PON 技术为基础的新一代工业网络,拥有 10 Gbit/s PON、数智光分配网(Digital Quick Optical Distribution Network, DQ

ODN)等关键技术。

1) 10 Gbit/s PON 技术。10 Gbit/s PON 是指上下行带宽超过 10 Gbit/s 的光接入设备,包含 XG-PON 和 XGS-PON。XG-PON 是不对称 PON, PON 口的上下行速率分别为 2.5, 10 Gbit/s<sup>[6]</sup>; XGS-PON 是对称 PON, PON 口的上下行速率均为 10 Gbit/s。XG-PON 和 XGS-PON 下行采用广播方式,上行采用时分多址(Time Division Multiple Access, TDMA)方式。

2) DQ ODN 技术。F5G 的 DQ ODN 解决方案融合了全程免熔接建网(Quick ODN)和精准可视化管理(Digital ODN)2 项技术创新。

Quick ODN 采用单芯、双芯和多芯的低插损预连接技术,组网灵活,适配多种网络方案,不仅支持全程预连接光纤到户(Fiber to the Home, FTTH)建网,还支持 P2P 综合业务接入<sup>[7]</sup>。Quick ODN 大幅降低 ODN 施工难度和建网技术要求,可提升 70% 的施工效率,减少 30% 的施工时间,同时节省 15% 的施工成本。

Digital ODN 采用业界首创光虹膜技术,全场景智能自动识别光信号在通过 ODN 链路后发生的关键特征变化,在网络管理平台进行大数据建模、分析,从而实现 ODN 链路拓扑和损耗可视化管理,资源长期准确率可达 100%,大幅减少企业因 ODN 资源不准导致的投资浪费,减少 30% 的资源浪费,降低 20% 的运营成本<sup>[8]</sup>。

光虹膜技术作为 DQ ODN 技术的重要组成部分,具有独特的功能和价值。光虹膜在光波导里印刷二维码,通过超高精度的加工技术,在比头发丝还细的光波导上雕刻出特殊的微结构,给经过不同支路的光打上不同标签。在光纤中叠加一个测试波长,在遇到光纤故障时,会产生异常的非涅耳反射<sup>[9]</sup>。通过光虹膜技术可实现井下网络故障的精准定位,当智能分析器捕获到反射信号后加以分析,准确判

断出故障位置,定位精度达 0.5 m,通过与可视化智能网管深度融合,将精确定位信息推送给维护人员,使井下维护人员工作更加高效<sup>[10]</sup>。

1.2 F5G 工业光环网技术优势

F5G 网络与传统网络时延对比见表 1。可看出相较于传统环网,F5G 工业光环网技术时延更低。

表 1 F5G 网络与传统网络时延对比  
Table 1 F5G network and traditional network delay comparison

| 类型    | 配置帧/bit | 最小时延/μs | 最大时延/μs  | 平均时延/μs  |
|-------|---------|---------|----------|----------|
| F5G网络 | 262     | 29.66   | 405.21   | 76.734   |
|       | 1 280   | 42.49   | 411.63   | 88.602   |
|       | 1 518   | 45.36   | 418.47   | 94.704   |
| 传统网络  | 262     | 28.30   | 8 762.81 | 5 320.05 |
|       | 1 280   | 42.97   | 8 762.87 | 2 713.12 |
|       | 1 518   | 47.14   | 8 788.44 | 3 969.04 |

与传统环网相比,F5G 工业光环网在电气安全、业务安全、施工安全和维护安全等方面具有一定的优势。

1) 电气安全。不同于传统交换机的 3 层网络架构,F5G 工业光环网只在光环网头端节点和末端节点部署有源设备,汇聚层则采用无源分光器替代有源交换机和防爆箱<sup>[11]</sup>。头端节点部署在地面核心机房内,井下只有靠近业务源的光环网末端设备是有源的。从头端节点到末端节点之间 40 km 的矿井坑道内,都是由无源分光器组成的无源光环网,从而减少 40% 的防爆箱使用,提升井下电气安全性。

2) 业务安全。传统工业以太网采用环形组网,当多个接入节点或链路发生故障时,会造成相邻 2 个节点或链路之间的所有业务中断。F5G 工业光环网采用菊花链型拓扑组网。每个光环网末端的 2 根光纤分别接入 2 台不同的汇聚层分光器,末端与末端之间相互独立。当 1 个或多个光环网末端发生故障时,不会对网络的其他部分造成影响。传统的以太网在增加节点时需要破坏加点,增加节点过程中工业环网上业务需要进行多次倒换,操作难度大,风险高。而 F5G 工业光环网使用 Type-C 组网保护方式,其设备、链路都是 1+1 保护,故障倒换时间小于 30 ms,确保业务安全可靠。

3) 施工安全。传统的光纤施工需要使用专门的光纤熔接机,由专业人员操作<sup>[12]</sup>,在熔纤过程中会产生 1 800 ℃ 的高温,因此在井下作业时需要全程密切监控瓦斯浓度。而 F5G 工业光环网通过采用预连接方案,预连接光器件全部在工厂预制,现场施工时光纤与光器件的连接像网线一样即插即用,避免了井下熔纤操作,提高了工作效率。

4) 维护安全。传统的光纤维护方式是在光纤发生故障后,由维护人员带着测试仪到井下逐段排查故障位置。而 F5G 工业光环网在发生光纤故障时,会产生异常的非涅尔反射,智能分析器捕获反射信号后加以分析<sup>[13]</sup>,可以准确判断故障位置,定位精度达 0.5 m<sup>[14]</sup>。智能分析器自动向客户端或手机 APP 发送告警,通知维护人员现场更换光纤。相比传统的巡检方式,智能光纤诊断可以减少 90% 的井下维护时间。

2 F5G 工业光环网系统架构

F5G 工业光环网系统由光环网头端设备 (Optical Ring Head, ORH)、无源光环网设备 (Optical Ring Passive, ORP) 和光环网终端设备 (Optical Ring End, ORE) 3 个部分组成,如图 1 所示。ORH 是地面核心设备,主要功能为汇聚井下的业务数据并上传到地面数据中心,同时把数据中心的控制数据下发到井下各类设备中,并管理井下 ORE<sup>[15]</sup>。ORP 包含预制光缆和分光器,所有部件均为无源设备,无需供电,可将 1 个 ORH 的工业光接口连接到多个 ORE 上。ORE 是井下接口设备,ORE 网络侧通过 ORP 和 ORH 的工业光接口连接,用户侧通过以太网口、工业串口 (RS485) 连接井下各终端设备 (如井下摄像头、无线基站、机械设备、传感器等)。ORE 将井下各终端数据上传至 ORH,同时把 ORH 下发的数据传送至各终端<sup>[16]</sup>。

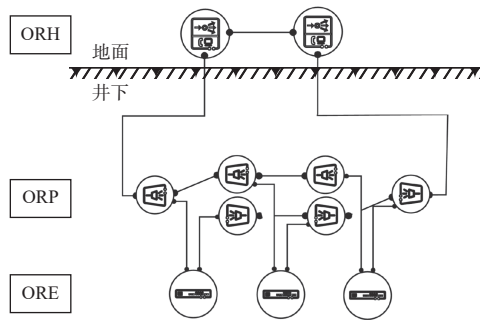


图 1 F5G 工业光环网系统组成  
Fig. 1 F5G industrial halo network system composition

3 F5G 工业光环网在矿井的应用

3.1 井下工业远程控制

工业远程控制系统对网络的传输质量要求十分严苛,尤其是网络时延方面。网络数据传输时延过高会影响地面操作人员对井下现场监测数据与音视频数据的接收,可能对作业现场的设备状态与动态环境做出误判,或影响地面至现场控制数据的发送及接收,从而导致远程控制的精准度降低,甚至造成

安全事故。F5G 工业光环网具有小于 500  $\mu\text{s}$  的极低时延,远低于原有的交换机网络,更适于承载工业远程控制系统。

随着智能化矿山建设进程推进,矿井多系统协同融合、海量大数据分析等新技术的加入,使矿井工业远程控制系统的网络结构更加复杂<sup>[17]</sup>。F5G 工业光环网通过 Type C 型组网保护架构与断纤检测功能保障数据传输高稳定、10 Gbit/s PON 技术的高速率、10 Gbit/s $\times$ 16 的大带宽,这些优势能够更好地满足工业控制系统的网络要求。F5G 工业光环网的切片硬隔离技术可为工业远程控制系统的数据传输划分出绝对独享的网络通道,不受其他系统和设备带宽影响,防止干扰导致误动作造成的安全隐患。

综采综掘工作面智能化改造已成为当前矿山智能化的重要体现,无论是智能综采还是智能综掘系统,都是多个子系统的协同融合,多工业远程控制系统间的通信对时延、带宽有更高要求。传统的交换机网络带宽固定、有效利用率低、扩容困难、时延较高,且终端设备接口单一、系统配置不灵活,无法承载智能综采综掘系统。F5G 工业光环网带宽资源丰富、网络时延低、最前端设备 ORE 接口配置多样、场景模板配置灵活,更加适合成为未来智能化综采综掘系统的基础网络。

### 3.2 高清视频回传

随着矿山智能化建设逐步推进,视频监控在安全生产中发挥的作用越来越大。传统工业交换机环型网络带宽利用率仅为 50%,其余为冗余带宽。回传视频占用带宽过大时,会导致整体网络不稳定,表现为视频卡顿、丢帧及网络传输中断。随着大量视频监控点增加,网络总带宽会越来越不足<sup>[18]</sup>,将导致回传视频分辨率降低,视频监控质量下降,影响矿井安全生产<sup>[19]</sup>。以 400 万像素摄像头为例,1 台摄像头占用带宽为 10 Mbit/s,千兆工业交换机环网可承载摄像头仅为 50 台,万兆为 500 台。而 F5G 工业光环网拥有最少 16 万兆带宽,可承载更多视频监控设备,F5G 工业光环网连接视频终端如图 2 所示。由于其独特的组网方式,使得扩容简单,带宽上限高,时延低,能够更好地满足智能化矿山对视频监控的网络需求。

### 3.3 工业网络迁移

因煤矿行业特殊性,井下环网设备节点并非一成不变<sup>[20]</sup>。对于传统工业环网来说,当井下作业面发生变化时,原有的工业交换机设备需要发生位置改动,要断开线路,业务随之中断,等线路重新调整之后,再把工业交换机接入网络,恢复业务。F5G 工业光环网的预连接技术通过预制缆即插即用,高效

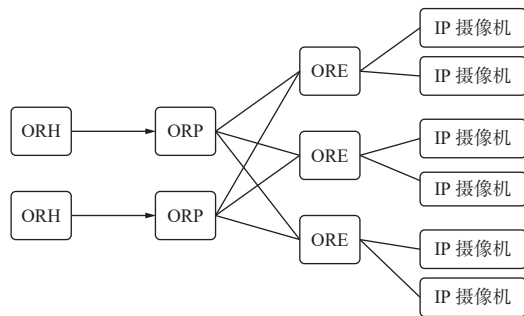


图 2 F5G 工业光环网连接视频终端

Fig. 2 Connection mode between F5G industrial optical ring network and video terminal

安全,只需拉 1 根免熔接光缆在新的地点进行配置,拆除该地点不用的设备即可,无需打破原有网络结构。配合 eSight 智能网管业务免配置部署,可在施工前对 ORE 进行应用场景业务的预部署,ORE 搬迁通电即通网,便捷高效。F5G 工业光环网采用无源分光器代替传统以太环网的汇聚层,减少了 40% 的防爆箱,设备安装更加方便快捷<sup>[21]</sup>。河南能源集团永煤公司陈四楼煤矿使用 F5G 工业光环网简化工序后,安设单个地点可减少 75% 的人力投入,极大地减少了劳动强度,提高了工作效率。

### 3.4 远程网络故障诊断

传统工业环网日常运维报表(如光功率、丢包率、带宽占有率等)需人为观察后手动记录,需要人员有较强的专业能力。井下光缆维护需技术人员多次下井并使用专业工具来维护,日常运维量大。

F5G 工业光环网搭配 eSight 智能网管,设备一站式管理,通过大屏管理、性能管理可快速了解网络 KPI,通过报表一键导出,专业门槛低。通过数字化 ODN、DQ ODN 技术管理传统无源光缆,断纤诊断精准可靠,可在 5~10 min 内判断出主干线路故障点,诊断精度达 m 级,减少维护人员 90% 的下井排障时间,相较于传统工业环网 6~8 h 的排障时间,运维效率大幅提升。通过内置的 ORE 管理模块对 ORE 下属业务数据流进行实时监测,维护人员可通过分析数据流量,研判网络传输质量进行网络优化,从而减少网络故障。

### 3.5 无线网络信号回传

通过有线网络与无线网络相结合,使矿井通信接入方式更加灵活。F5G 为 WiFi6 提供超强运力、超低时延、确定性的连接,河南能源集团贵州公司新田煤矿已经依托 F5G 实现了 WiFi 基站承载,如图 3 所示。井上下可无障碍通话,无线摄像头、无线终端可便捷接入。

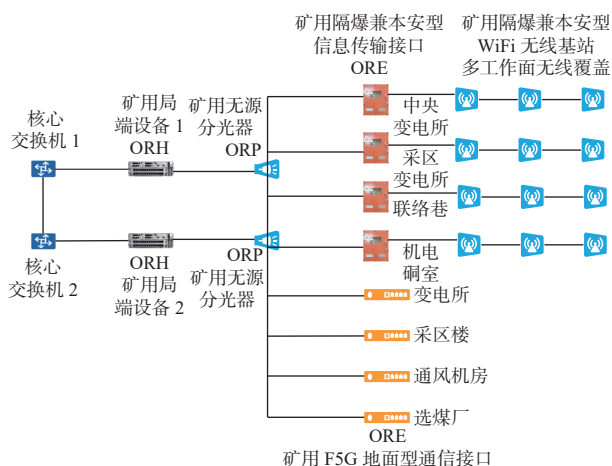


图3 F5G工业光环网承载WiFi基站

Fig. 3 F5G industrial optical ring network carrying WiFi base station

#### 4 F5G 工业光环网在矿井的应用展望

#### 4.1 F5G 工业光环网的不足

F5G 相关技术最早应用于商业网,已经比较成熟,2020 年开始向工业网络发展。在煤矿场景的应用中,由于下井设备必须经过安标认证,所以至今,F5G 工业光环网的设备种类还较少。

此外, F5G 技术对于矿井不同场景的适应性、不同业务种类的适配性还有一定提升空间。以掘进工作面为例,当机械设备前进时,如何保持有线网络设备的动态跟随,目前尚无完善的解决方案;因 F5G 工业光环网 ORE 的后备电源不能放置在采掘工作面,如出现意外大面积停电或检修停电时, F5G 承接的业务会同时中断,目前尚没有完善的解决方案。所以现阶段 F5G 工业光环网尚难以实现对既有有线网络的全面替代。

## 4.2 F5G 工业光环网技术在煤矿的应用前景

目前国内大多数煤矿工业以太网运行年限较久,随着矿山智能化发展,新增 AI 视频分析、无线回传等场景,网络资源需求日益增长。F5G 工业光以太网采用 XGS-PON 技术,可做到单纤上下行万兆传输。ORH 支持至少 16 个 XGS-PON 10 Gbit/s 工业光口。1 套 ORH 即可实现最少 16 个单独的万兆工业网络集成且互不干扰,支持对现有网络无影响的扩容。F5G 工业光以太网在井下可独享 16 万兆资源,带宽较之前的千兆/万兆环网大幅提升,完全可满足目前 AI 视频分析、无线回传等场景,其独特的网络结构,支持平滑升级 50, 100 Gbit/s 网络,且不影响原有业务网络传输。

F5G 工业光环网可使井下网络按需分步建设,后期部署即插即通,特别是在掘进工作面,光插座可使设备接入更便捷,光纤维护更简单。F5G 工业光环

网通过随流检测(In-situ Flow Information Telemetry, IFIT)技术对业务报文进行测量,得到IP网络的真实丢包率、时延等指标,从而实现对网络中业务数据的侦测,有效提高网络传输率。华为实验室依托F5G工业光环网技术研发出全光生命感知保障系统,可将光缆变成传感器和麦克风,在井下无电环境下,人为敲击光缆即可实现精确定位;井下人对光缆讲话,地面即可通过光纤内的光波信号接收到讲话内容,在紧急情况下可成为生命安全的最后通道。F5G工业光环网技术作为一种新型网络技术,发展前景广阔。

## 5 结语

F5G 工业光环网通信技术具备优异的性能,且其在系统接口与协议方面与传统以太环网通信接口相同,终端设备无需更改适配即可接入使用,是矿井有线通信发展的趋势。由于 F5G 工业光环网出现的时间较晚,且技术对于煤矿场景的适配还存在较大进步空间,所以,煤矿应结合自身实际情况建设 F5G 试点,以实际场景支撑 F5G 工业光环网技术的应用与研究,使国产自主的 F5G 工业光环网尽早成为煤矿场景成熟的工业网络解决方案。

### 参考文献(References):

- [1] 朱德娟. 基于现代化矿井的通信技术[J]. 电子技术与软件工程, 2020(9): 17-18.  
ZHU Dejuan. Communication technology based on modern mines[J]. Electronic Technology & Software Engineering, 2020(9): 17-18.
- [2] 罗红霞. 矿井融合调度通信系统设计[J]. 工矿自动化, 2021, 47(增刊2): 81-83.  
LUO Hongxia. Design of mine integrated dispatching communication system[J]. Industry and Mine Automation, 2021, 47(S2): 81-83.
- [3] 余明高, 阳旭峰, 郑凯, 等. 我国煤矿瓦斯爆炸抑爆减灾技术的研究进展及发展趋势[J]. 煤炭学报, 2020, 45(1): 168-188.  
YU Minggao, YANG Xufeng, ZHENG Kai, et al. Progress and development of coal mine gas explosion suppression and disaster reduction technology in China[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(1): 168-188.
- [4] 魏景新, 靳文涛. 基于ZigBee技术的煤矿井下自组网定位系统设计[J]. 中国煤炭, 2017, 43(3): 84-88.  
WEI Jingxin, JIN Wentao. Design of underground coal mine ad-hoc network positioning system based on ZigBee technology[J]. China Coal, 2017, 43(3): 84-88.
- [5] 刘晗蓁. 面向5G的承载网发展趋势探讨[J]. 广西通信

- 技术, 2018(3): 42-46.
- LIU Hanqu. Research on the development trend of 5G-oriented bearing network[J]. *Guangxi Communication Technology*, 2018(3): 42-46.
- [6] 肖荣军, 徐义光. 高带宽需求的PON网络技术升级方案初步探讨[J]. *江苏通信*, 2019, 35(5): 57-59, 68.
- XIAO Rongjun, XU Yiguang. Preliminary discussion on the PON network technology upgrade scheme with high bandwidth demand[J]. *Jiangsu Communications*, 2019, 35(5): 57-59, 68.
- [7] 彭齐琼. 固网F5G的趋势及应用场景分析[J]. 电信技术, 2019(增刊1): 96-98.
- PENG Qiqiong. Trend and application scenario analysis of fixed network F5G[J]. *Telecommunication Technology*, 2019(S1): 96-98.
- [8] 高谦, 罗卫国. 激活“闲置资源”构建“共享光网”——太原移动城域光纤网智能化探索与实践[J]. *电信技术*, 2013(5): 16-19.
- GAO Qian, LUO Weiguo. Activate "idle resources" to build "shared optical network" – Intelligent exploration and practice of Taiyuan mobile city optical fiber network[J]. *Telecommunication Technology*, 2013(5): 16-19.
- [9] 王洋. 基于宽带布尔混沌的光纤故障特性检测[D]. 太原: 太原理工大学, 2021.
- WANG Yang. Optical fiber fault characteristic detection based on broadband Boolean chaos[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2021.
- [10] 黄海峰. 盘点2022光网络产业: F5G演进让一切成为可能[J]. *大数据时代*, 2023(1): 60-67.
- HUANG Haifeng. Overview of optical network industry in 2022: F5G made everything possible[J]. *Big Data Time*, 2023(1): 60-67.
- [11] 任立全, 张钊. 无源光网络在某综合医院中的设计与应用[J]. *智能建筑电气技术*, 2020, 14(5): 67-70.
- REN Liquan, ZHANG Zhao. Design and application of passive optical network in a general hospital[J]. *Electrical Technology of Intelligent Buildings*, 2020, 14(5): 67-70.
- [12] 丘栋, 陆以夫, 陈娟, 等. 智能变电站光缆全套解决方案[J]. *广西电力*, 2015, 38(1): 57-59, 76.
- QIU Dong, LU Yifu, CHEN Juan, et al. A full set of solutions to optical fiber cable in intelligent substation[J]. *Guangxi Electric Power*, 2015, 38(1): 57-59, 76.
- [13] 张静. 电力光纤故障检测及抢修最优路径方法研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2013.
- ZHANG Jing. Research of electrical optical cable fault detection and repair optimum path method[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2013.
- [14] 王天惠. 基于多测点信息的辐射状配电网故障定位研究[D]. 成都: 西华大学, 2020.
- WANG Tianhui. Research on radial distribution network fault location based on multi-measurement information[D]. Chengdu: Xihua University, 2020.
- [15] 吴文臻, 温良. F5G技术在煤矿井下的应用[J]. *智能矿山*, 2022, 3(9): 68-71.
- WU Wenzhen, WEN Liang. Application of F5G technology in underground coal mine[J]. *Intelligent Mine*, 2022, 3(9): 68-71.
- [16] 温良, 吴文臻, 李起伟. 矿用F5G架构的智能化煤矿建设方案研究[J]. *煤炭科学技术*, 2022, 50(11): 176-182.
- WEN Liang, WU Wenzhen, LI Qiwei. Study on intelligent coal mine construction scheme of F5G architecture[J]. *Coal Science and Technology*, 2022, 50(11): 176-182.
- [17] 王家旭, 王文成, 王浩年. 浅析基于5G技术的物联网应用[J]. *中国新通信*, 2019, 21(16): 117-118.
- WANG Jiaxu, WANG Wencheng, WANG Haonian. The application of the internet of things based on 5G technology[J]. *China New Telecommunications*, 2019, 21(16): 117-118.
- [18] 李松蹊. 智能变电站网络架构改进的研究[D]. 沈阳: 沈阳工程学院, 2019.
- LI Songqi. Research on optimization of intelligent substation network structure[D]. Shenyang: Shenyang Institute of Engineering, 2019.
- [19] 孙洪勤. 深部开采热环境治理及通风系统研究[D]. 青岛: 山东科技大学, 2012.
- SUN Hongqin. The study of thermal environment deep mining and its ventilation optimization[D]. Qiangdao: Shandong University of Science and Technology, 2012.
- [20] 陈士松. 梁家煤矿工业以太环网升级研究与应用[J]. *山东煤炭科技*, 2017(11): 166-167.
- CHEN Shisong. Research and application of Ethernet ring network upgrade in Liangjia Coal Mine Industry[J]. *Shandong Coal Science and Technology*, 2017(11): 166-167.
- [21] 王坚. 浅谈5G和广播电视网络的融合发展[J]. *数字传媒研究*, 2018, 35(12): 52-54.
- WANG Jian. Integration development of 5G and radio & television network[J]. *Research on Digital Media*, 2018, 35(12): 52-54.