



移动阅读

王国法,赵国瑞,胡亚辉. 5G技术在煤矿智能化中的应用展望[J]. 煤炭学报,2020,45(1):16-23. doi:10.13225/j.cnki.jccs.YG19.1515

WANG Guofa,ZHAO Guorui,HU Yahui. Application prospect of 5G technology in coal mine intelligence[J]. Journal of China Coal Society,2020,45(1):16-23. doi:10.13225/j.cnki.jccs.YG19.1515

5G技术在煤矿智能化中的应用展望

王国法^{1,2},赵国瑞^{1,2},胡亚辉³

(1. 天地科技股份有限公司 开采设计事业部,北京 100013; 2. 煤炭科学研究总院 开采研究分院,北京 100013; 3. 中国矿业大学(北京) 机电与信息工程学院,北京 100083)

摘要:煤矿智能化是煤炭工业高质量发展的保障,当前处于煤矿智能化发展的初级阶段,仍然面临泛在感知难、多类型数据同步传输不可靠、远程控制实时性差、融合大数据的智能决策效率低等问题,面向垂直行业智能化应用的第五代移动通信技术(The fifth Generation Mobile Communication Technology,5G)为上述问题的解决提供了契机。分析了5G中的高频通信、大规模天线阵列、超密集组网、设备到设备通信、网络切片和移动边缘计算6项关键技术和各自的技术特征;研究了煤矿智能化应用在信息感知、多类型数据传输、实时决策控制、新技术应用和异构物联网设备互联互通需求等方面的短板,以视频传输为例分析了4G技术在未来应用中的局限性,研究了井下WiFi组网的不足之处,指出了煤矿井下应用5G技术的必要性;结合5G技术优势和煤矿井下实际需求提出了基于5G技术的高精度实时定位与应用服务、虚拟交互应用、远程实时控制、远程协同运维及井下巡检和安防等煤矿井下应用场景,提出了基于混合现实的井下智能化开采和远程实时可视化操控的构想,给出了井下应用5G技术的总体架构:有线光纤骨干环网加5G覆盖,分析了实施要点,指出与井下应用场景的结合才能最大程度发挥5G技术在煤矿智能化开采中的作用,简要展望了基于5G技术的物联网、大数据、云计算、人工智能和虚拟现实等技术在煤矿智能化中的融合应用。

关键词:5G技术;煤矿智能化;必要性;应用场景;混合现实

中图分类号:TD67 文献标志码:A 文章编号:0253-9993(2020)01-0016-08

Application prospect of 5G technology in coal mine intelligence

WANG Guofa^{1,2},ZHAO Guorui^{1,2},HU Yahui³

(1. Coal Mining and Designing Department,Tiandi Science & Technology Co.,Ltd.,Beijing 100013,China; 2. Mining Design Institute,China Coal Research Institute,Beijing 100013,China; 3. School of Mechanical Electronic and Information Engineering,China University of Mining & Technology(Beijing),Beijing 100083,China)

Abstract:Coal mine intelligence is the way for a high quality development of coal industry. At present,it is in the primary stage of coal mine intelligent development. It still has the problems of ubiquitous perception,unreliable synchronous transmission of multi-type data,poor real-time remote control,and low efficiency of intelligent decision-making integrated with big data,and so on. The fifth generation mobile communication technology for the intelligent application of vertical industry provides an opportunity for solving the above problems. In this paper,six key technologies of high frequency communication,massive MIMO,ultra-dense network,device-to-device communication,network slicing and

收稿日期:2019-11-05 修回日期:2019-12-13 责任编辑:郭晓炜

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2017YFC0603005);薄煤层综采自动化成套装备产业化资助项目(财企[2013]472);国家自然科学基金重点资助项目(51834006)

作者简介:王国法(1960—),男,山东文登人,中国工程院院士。Tel:010-84262016,E-mail:wanguofa@tdkcsj.com

通讯作者:赵国瑞(1982—),男,山东泰安人,副研究员。Tel:010-84264550,E-mail:zhaogurui@tdkcsj.com

mobile edge computing in 5G are analyzed. It also studies the shortcomings of the intelligent application of coal mine in information perception, multi-type data transmission, real-time decision control, the application of new technology and the interconnection requirements of heterogeneous equipment. Taking video transmission as an example, the paper analyzes the limitations of 4G technology in the future application, studies the shortcomings of underground WiFi networking, and points out the necessity of applying 5G technology underground in coal mine. Combined with the advantages of 5G technology and the actual requirements of coal mine, the paper puts forward some underground application scenarios, such as high precision real-time positioning and application service, virtual interactive application, remote real-time control, remote cooperative operation and maintenance, underground inspection and security, based on 5G technology, and puts forward the conception of underground intelligent mining and remote real-time visual control based on mixed reality. Also, the paper gives the overall structure of underground application 5G technology: cable optical fiber backbone ring network plus 5G coverage, analyzes the key points of implementation, points out that the combination of 5G technology and underground application scene can maximize the role of 5G technology in intelligent mining of coal mine, and briefly looks forward to the integration and application of 5G technology based on 5G technology, such as Internet of things, big data, cloud computing, artificial intelligence and virtual reality in coal mine intelligence.

Key words: 5G technology; coal mine intelligence; necessity; application scene; mixed reality

近年来,煤炭开采技术取得了快速发展,在大力淘汰落后产能的情况下保持了煤炭产量的相对稳定,满足了国家对煤炭资源的持续需求,为保障国家能源供给和能源安全做出了巨大贡献。但随着人民生活水平和生活质量的不断提升,对煤炭安全和生产环境也提出了更高要求。一方面煤炭安全的提升要求井下尽量少人或无人,一些地区的先进矿井已经实现了无人操作有人值守;一方面一些落后矿井因地质条件限制短期内难以减少井下用人,同时还面临工人流失的两难境地。这是煤炭开采地区发展不平衡、煤炭开采技术发展不充分的具体体现,煤矿智能化技术的研究和应用,是解决这一主要矛盾的关键,是煤炭工业科技发展的前沿课题,是煤炭行业转型升级的重要内容,也是煤炭企业安全高效、高质量发展的主攻方向^[1-8]。

以往煤炭智能化开采受传统无线通讯技术在

带宽、延时、并发数量等方面的限制一直难以形成较大突破,导致大数据、人工智能、虚拟现实等先进技术难以应用到煤炭开采中为智能化开采服务。5G技术以其大带宽、低延时和广连接的优势打通了不同应用场景间信息高效交互的通道,有利于重塑传统产业发展,助力数字化转型,牵引云计算、大数据、物联网、人工智能和移动应用的深度融合,创新应用和服务。

1 5G技术概述

5G是第五代移动通讯系统的简称,既不是单一的无线接入技术,也不都是全新的无线接入技术,是新的无线接入技术和现有无线接入技术的高度融合^[9-10]。其主要特点是超高数据速率、超低延时和超大规模接入。

5G与4G技术的关键指标对比如图1所示^[11]。

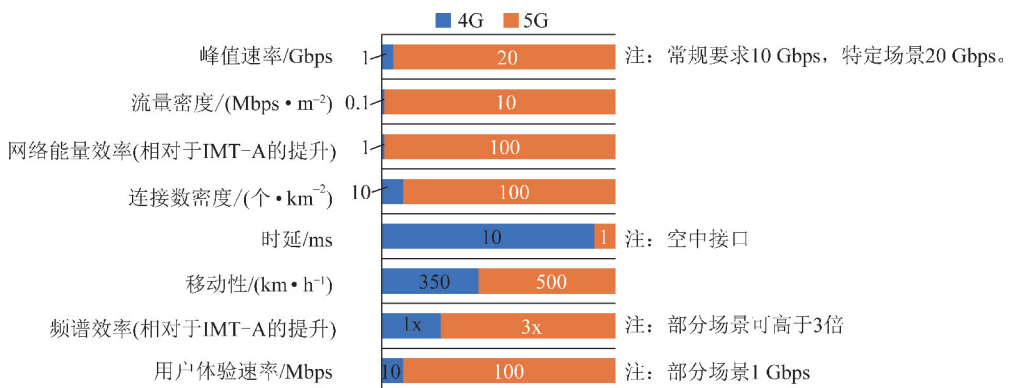


图1 4G与5G技术关键指标对比

Fig. 1 Comparison between 4G and 5G technical key indicators

5G 技术的突破很多,仅简述 6 项关键技术:

(1) 高频通信 (High Frequency Communication, HFC)。目前,3 GHz 以下的频谱资源十分紧张,而 3 GHz 尤其是 6 GHz 以上的高频段存在大量可用资源。另一方面,单纯提升频谱资源效率已无法满足 5G 中大带宽和高速率的业务(比如超高清视频传输、虚拟现实、增强现实及全息投影等)传输需求,因此采用高频段进行 5G 空口传输已成为必然趋势。

(2) 大规模天线阵列 (Massive MIMO)。高频段通信可以进一步减少天线尺寸,从而为在 5G 移动通信系统中引入大规模 MIMO 技术成为可能。Massive MIMO 技术能够带来更高的天线阵列增益,大幅提升系统容量;能够将波束控制在很窄的范围内,从而带来高波速增益,有效补偿高频段传输的大路损。

(3) 超密集组网 (Ultra Dense Network, UDN)。随着各种智能终端的普及和站点密度的增加,移动数据流量将呈指数级增长,由此带来了小间距、超密集异构网络的协调。超密集组网技术通过虚拟化小区消除频繁切换及密集邻区的同频干扰等问题,给用户提供更一致的体验。

(4) 设备到设备 (Device-to-Device, D2D) 通信。D2D 会话的数据直接在终端之间进行传输,不需要通过基站转发,从而减轻蜂窝基站的负担,降低端到端的传输时延,提升频谱效率,降低发射功率,最终能够增强用户体验。

(5) 网络切片技术 (Network Slicing)。基于软件定义网络 (Software Defined Network, SDN) 和网络功能虚拟化 (Network Function Virtualization, NFV), 5G 网络能够实现网络切片技术,即将一张物理网络中的带宽、计算及存储资源进行逻辑分割,构建多个虚拟化的端到端网络,每个虚拟网络的资源均可独立运营和动态伸缩,从而满足不同应用场景的业务服务质量需求。

(6) 移动边缘计算 (Mobile Edge Computing, MEC)。5G 的三大应用场景和小于 1 ms 的时延指标,决定了 5G 业务的终结点不可能都在核心网后端的云平台,而 MEC 通过在移动网络边缘提供 IT 服务环境和云计算能力,以减少网络操作和服务交付的时延,从而能够更好地满足超低时延的工业控制场景及大带宽的传输需求,更好地实现物与物之间的传感、交互和控制。

2 煤矿智能化应用 5G 技术的必要性与可行性

智能化是煤炭发展的必由之路,是支撑煤炭高质

量发展的关键核心技术。煤矿智能化离不开数据和信息的高效互联互通,而不同的煤矿应用场景数据的特点和传输的需求差别很大^[12-14],传统 4G+WiFi 的数据传输技术难以满足这种差异化的需求,导致煤矿各应用场景相互影响制约,不能支撑煤矿智能化发展的需求。5G 大带宽、低时延和广连接的特性以及微基站、切片技术和端到端的连接等为突破煤矿智能化开采数据传输处理的瓶颈提供了核心技术支撑。

2.1 煤矿智能化应用 5G 技术的必要性

5G 在设计之初就确定了三大应用场景,即增强型移动宽带 (Enhanced Mobile Broadband, eMBB)、超可靠低时延 (Ultra Reliable Low Latency Communications, urLLC) 和海量机器通信 (Massive Machine Type Communications, mMTC)。其对 eMBB 场景的技术支撑能力,能够有效适应煤矿中的超高清视频传输等大带宽的业务需求;对 urLLC 场景的技术支撑能力,能够有效满足无人采矿车、无人挖掘机等无人矿山智能设备间通信需求;对 mMTC 场景的技术支撑能力,能够更好地支持多种煤矿安全监测等传感数据采集需求。因此将 5G 通信技术应用用于煤矿智能化开采中(图 2)是未来煤矿开采的必由之路,也将有效推进煤矿智能化的进程,为全面开启煤矿智能化开采铺平“网络通信”之路。

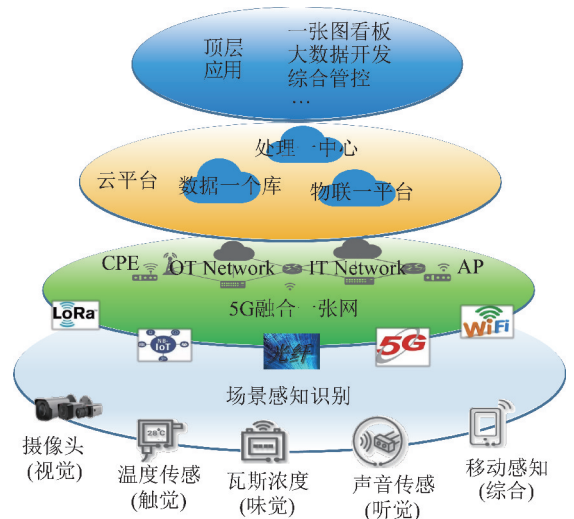


图 2 5G 对煤矿智能化开采的支持

Fig. 2 Support of 5G for intelligent mining of coal mine

与此同时,现有的主流煤矿无线通信技术,比如 4G 和 WiFi,则难以支撑煤矿智能化开采的数据传输与处理需求。

4G 技术的不足:可以提供下行超 100 Mbps 和上行超过 50 Mbps 的用户峰值速率,但在智能化生产过程中,大量的机器视觉等场景需要高清视频回传,1 080 P 单路就需要 20 Mbps 上行带宽,4K 甚至

需要 75 Mbps 上行带宽(带宽影响精度,精度影响识别度,而实时性决定了能否远程及时操控),显然,应对上述工业应用需求 4G 已力不从心。

WiFi 组网痛点:

- (1)移动性差。跨 AP 切换时延>100 ms,导致 AGV 等移动设备易断链,受限于 AP 内移动。
- (2)覆盖差。WiFi 信号反射绕射后易形成多径干扰。
- (3)频段干扰。WiFi 使用公共频段,存在干扰,影响解调能力。
- (4)带宽受限。基于视觉的应用需要的上行带宽大(百兆级)。

2.1.1 智能化开采感知需求

智能化开采首先需要大量传感数据的支持,其数据具有以下特征(图 3):

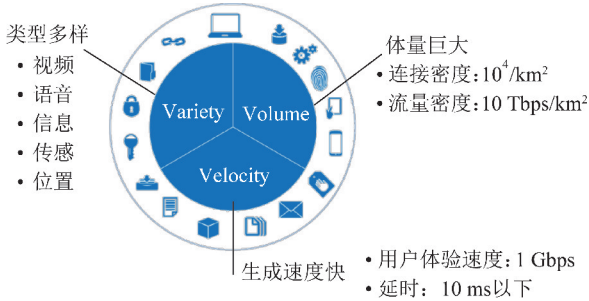


图 3 煤矿数据的多样性

Fig. 3 Diversity of coal mine data

(1)数据类型多样化。相关数据包括视频、语

音、振动、压力、温度、速度、瓦斯浓度等多种类型、多种传输要求的数据。

(2)数据生成速度快。5G 应用场景多是基于大量数据的实时支撑,同时 5G 支持下的物联网数据瞬间产出量会数十倍甚至百倍于以往的数据量,数据生成速度会极大提高。

(3)数据体量增长快。单位时间内的数据成指数级增加了,随时间累积的数据体量向着 PB 甚至 ZB 级发展,这也为大数据应用分析奠定了基础。

2.1.2 智能化开采传输需求

以往为解决煤矿的控制数据、视频监控数据和安全数据的及时传输和隔离难题多采用控制通信环网、视频环网和安全环网三网独立的建设方案,虽然一定程度上解决了数据互占通道和安全数据隔离的难题,但带来的投资大、底层物联和上层融合难的问题也很突出。5G 技术采用切片管理技术,按需定制网络,专网相互隔离、底层端端互联,为不同场景的传输需求提供了专用通道和安全解决方案(图 4)。

2.1.3 智能化开采决策控制需求

井下智能综采工作面设备众多,包括高精度定位装备惯性自主导航系统、智能协调控制系统、高密度传感器接入系统、智能机器人巡检系统、高清视频回传系统等(图 5),这些设备共同组成的设备群需要通过中心控制系统进行统一协调处理和快速反馈控制,对通信网络的可靠性、实时性均提出更高要求。

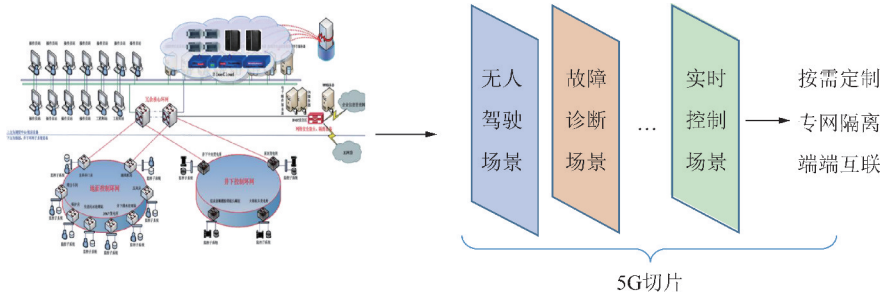


图 4 数据传输方式的改变

Fig. 4 Data transfer mode change

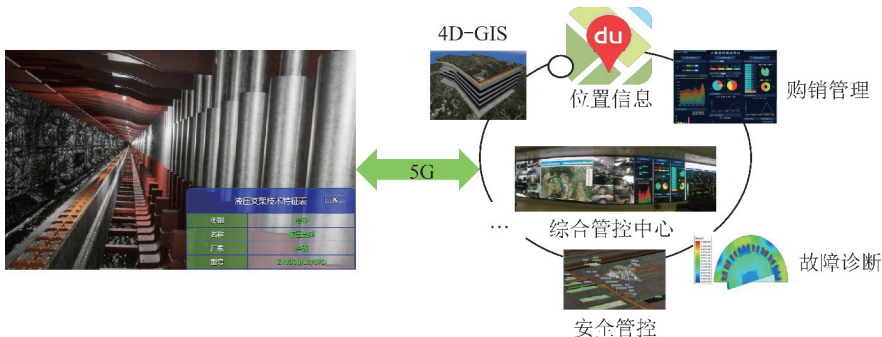


图 5 开采决策多样化的需求场景

Fig. 5 Demand scenarios for diversification of Mining decisions

井下单轨吊、电机车、胶轮车等辅助运输系统实现智能化甚至无人化,需要实时获取厘米级精确定位、高清图像视频等信息,以便实现主动避障、自动错车、风门联动等功能,保障人员、车辆及各类附属设备的安全,也都需要高可靠、高带宽、低时延的无线网络提供支撑。

煤矿智能化生产离不开井下机器人的大量使用。例如,具备定位导航、纠偏、多参数感知、状态监测与故障预判、远程干预等功能,实现掘进机高精度定向、位姿调整、自适应截割及掘进环境可视化的掘进机器人;能够自主决策、智能控制,具备精准定位、采高检测、姿态监测、远程通信控制、状态监测与故障预判、可视化远程干预等功能,实现采煤机自主行走、自适应截割及高效连续运行的采煤机器人;以及用于井下回采工作面作业环境巡检,具备自主移动、定位、图像采集、智能感知、预警、人机交互等功能,实现煤壁、片帮、大块煤、有害气体、温度、粉尘、设备状态等监测的工作面巡检机器人等。这些机器人大量的数据采集和传输,海量的接入设备以及极低时延的控制操作,都对网络传输的质量和有能力有着超高要求。

2.1.4 智能化开采新技术新场景应用需求

随着煤矿生产智能化程度的提高,井下无人机、智能 VR/AR 等设备必将大量采用,以便能够对现场进行及时巡查,对设备故障进行远程会诊,而无论是无人机飞行控制、无人机巡检视频回传,还是 VR/AR 智能远程设备故障诊断与维修,不仅需要极大地消耗网络带宽资源,更需要快速的信息反馈和实时的状态控制。

煤矿智能生产典型业务场景对无线传输网的要求见表 1。

表 1 煤矿智能生产典型业务场景对无线传输网的要求

Table 1 Requirements for wireless transmission network in typical application scenarios of intelligent coal mine

序号	业务场景	时延要求/ms	带宽要求/Mbps	4G	5G
1	智能工作面	<20		×	√
2	工业图像处理	<20	上行>100	×	√
3	机器人控制	<20	上行>50 下行>20	×	√
4	智能远程维修 (VR/AR)	<20	上行>25 下行>50	×	√
5	高密度物联网接入	<10		×	√

目前主流的 WiFi 技术、4G LTE 技术,以及 Zig-Bee、LoRa 等无线传输技术的时延(4G 典型时延约为 100 ms)基本上无法支撑智能化生产的需求;带宽(4G 上行稳定带宽约为 20 Mbps,仅可满足 2~3

路超高清视频图像传输)更是无法承载超高清工业图像处理、生产机器人控制以及智能远程维修(VR/AR)等移动宽带业务。而 5G 网络的时延(典型)约为 10 ms^[15],上行稳定带宽约为 150 Mbps,连接数为 10⁶ 个/km²,网络服务质量(Quality of Service, QoS)最高可达 99.999 9%。通过表 1 对比可以看出,5G 网络为煤矿智能生产各业务场景的实现提供了强有力的支撑。

2.1.5 异构物联网设备互联互通的需求

当前煤矿生产领域使用的无线通信协议众多、各有不足且相对封闭,工业设备互联互通难,用户体验较差,亟需构建能够兼容多种协议的新一代无线技术体系。而 5G 网络具备融合多类现有或未来无线接入传输技术和功能网络的能力,通过统一的核心网络进行管控,以提供超高速率和超低时延的用户体验和场景的一致无缝服务。

2.2 煤矿智能化应用 5G 技术的可行性

将 5G 技术应用于煤矿智能化开采中,需要着重分析井下特殊无线传播环境下 5G 系统部署的可行性。

与地面进行对比,井下无线传输的实际环境因素主要存在如下特征:① 井下狭长且多分支的空间特征;② 易产生吸收或干扰无线电波传输的粗糙煤壁;③ 复杂的设备布置和强磁干扰;④ 多粉尘和瓦斯的开采环境。

5G 无线传输技术在井下应用时,主要存在高频无线信号快速衰减、定向传输能力增强的同时绕射能力下降等现象,从而导致传输距离短、覆盖范围有限等,5G 技术面临的这些问题在 5G 技术研发初期就作为重大问题进行攻关,于是有了超密集组网技术、Massive MIMO(大规模天线阵列)和微基站技术等,这一系列关键技术的突破形成了 5G 核心技术体系,同时支撑了 5G 技术的商业化。

从网络部署的角度分析,目前井下布置的 4G 网络为 4G+WiFi 的架构,4G 覆盖距离(基于井下狭长的空间特征不用覆盖半径的概念)约 1 500 m。而 5G 有宏基站、微基站两种类型,宏基站设备容量大,发射功率高,不适合井下大规模应用;微基站虽然设备容量较小,但发射功率低,其有效覆盖距离约为 500 m。因此从技术角度考虑采用 3 个以上 5G 微基站即可完全覆盖原 4G 网的管控范围,并带来带宽、速率的大幅提升和延时的降低。此外,单个 5G 微基站的功耗和体积比现有 4G 基站的要小,更有利于井下长时间使用的安全性。5G 微基站布置示意图如图 6 所示。

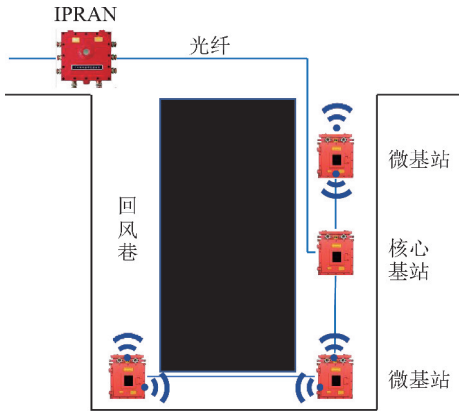


图 6 综采工作面 5G 布置示意

Fig. 6 Schematic diagram of 5G layout of fully mechanized mining face

对于煤矿井下面临的其他不利环境因素,合理运用和规划 5G 技术均可解决井下实际应用的难题,成败的关键在于针对不同的应用场景和应用环境设计不同的 5G 布设方案。比如针对狭长多分支的井下空间应采用有线光纤主干+密集 5G 微基站的模式,控制功耗和优化站点是关键;针对视频监控和控制信号同步传输的问题,合理进行网络切片是关键,并做安全隔离。

因此,煤矿智能化开采的发展必须建立起以 5G 网络作为基础设施的数据传输和分发平台,构建 5G+ 的煤矿应用场景,为煤矿智能化开采的实现提供基础平台和应用保障。

3 5G 在煤矿的应用场景

5G 网络创造性地采用了网络切片技术,将物理网络划分为多个虚拟网络,每一个虚拟网络根据不同的服务需求,比如时延、带宽、安全性和可靠性等来划分,以灵活的应对不同的网络应用场景,在满足大量并行业务上线的同时仍可保证端到端的性能。结合 5G 的技术特点和煤矿井下的实际需求简要提出几个典型应用场景如下。

3.1 基于 5G 的高精实时定位与应用服务

目前煤矿井下定位系统多是基于传统的蓝牙、ZigBee、超宽带等无线传输技术,定位精度不高,且需要单独布设相关基础设施,实时性也难以保障。基于 5G 的低延时特性开发基于 5G 网络的井下定位与应用服务系统是未来的发展方向,将产生井下车辆管理、开采精准推进等应用,解决移动装备的实时控制和管理难题。

3.2 基于 5G 的虚拟交互应用

虚拟现实(VR)与增强现实(AR)(图 7)是能够

彻底颠覆传统人机交互内容的变革性技术,在煤矿的应用未来可期^[16-19]。其应用可分为 3 个阶段:

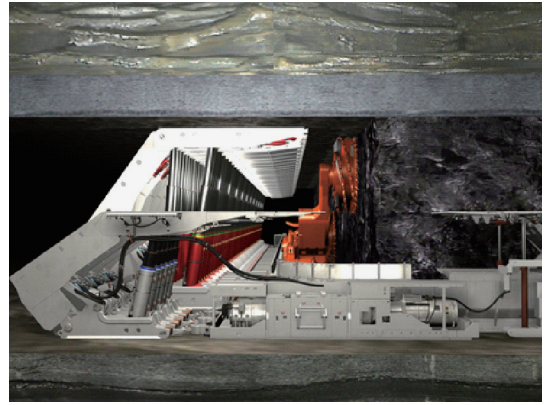


图 7 三维建模、虚拟展示

Fig. 7 3D modeling, virtual presentation

(1)主要用于三维建模和虚拟展示,如现在的裸眼 3D 等技术,其基本需求为 20 Mbps 带宽+50 ms 延时,现有的 4G+WiFi 基本可以满足。

(2)主要用于互动模拟和可视化设计等,如多人井下培训系统,其基本需求为 40 Mbps 带宽+20 ms 延时,Pre5G 基本可以满足。

(3)主要用于混合现实、云端实时渲染和虚实融合操控,如虚拟开采、协同运维等,其基本需求为 100 Mbps ~ 10 Gbps 带宽+2 ms 延时要求,需 5G 或更先进技术才可满足。

3.3 生产远程实时控制

生产实时性控制一直是煤矿智能化开采的关键卡脖子难题^[20-21]。传统的远程控制系统需要经过多重路由和多种协议才能将所需的各种传感信息汇集到集控中心,直至传至远程控制中心,因此仅有部分对实时性要求不高的功能可以用远程控制实现,实时性要求高的功能出于安全考虑是不能用远程控制的。5G 低延时的特性为这一难题的解决提供了基础支撑,基于 5G 的井上全功能的远程控制将会实现,图 8 为相关应用示意图。

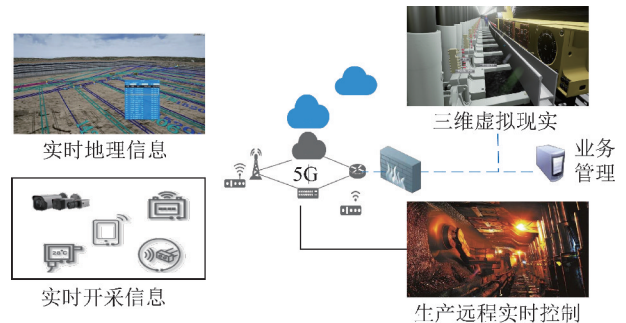


图 8 基于 5G 的多源决策控制示意

Fig. 8 Schematic diagram of multi-source decision control based on 5G

3.4 井下远程协同运维

5G 在井下的另一个重要应用场景是远程协同运维(图9)。未来井下装备的智能化程度会越来越高,系统也愈加复杂,传统的维修工人已难以独立完成维修工作,需借助远程专家协助完成。现场的音视频信息可通过5G网络传输至远端,相关的虚拟模型也可虚拟至现场设备上,通过虚拟现实技术可实现专家与现场工人同样的视场和操作,甚至还可以用机器人代替人在井下完成维修。



图9 基于5G的远程运维场景

Fig.9 Remote operation and maintenance scene based on 5G

3.5 井下巡检和安防

基于5G的定位、高速数据传输和端端物联将助力实现井下的高效巡检和安防。通过这一网络可实时定位井下的装备和人员(图10),可实时传输和共享井下的安全信息,智能终端的主动推送功能自动识别其他移动终端设备并按需推送相关信息,实现井下信息的泛在感知和共享。相较于传统的数据上传下发的利用方式,5G模式下的数据利用更高效、延时更短、可靠性更高、经济性更好。



图10 基于5G的井下巡检

Fig.10 Underground patrol based on 5G

4 前景展望

在地面,5G技术已经为森林防火的低功耗广连接场景、自动驾驶的低延时高可靠场景、高清赛事转播的多热点高容量场景等提供了切实可行的解决方案。5G技术与大数据、云计算、人工智能和虚拟现实等技术的结合也将逐一在煤矿落地,实现煤矿大数据的实时分析与决策支持,可视化远程操控与数字孪生应用,混合现实远程运维服务等。

(1) 总体网络架构应该是有线骨干+5G覆盖的形式。以光纤骨干环网保证井下信息传输的安全可靠,以5G网保证井下无线覆盖和移动传输的需求。

(2) 结合井下实际的巷道或工作面布置优化5G微基站的布置,保证覆盖的同时减少资源消耗。

(3) 分析并划分井下应用场景,梳理不同应用场景的个性化需求,根据需求对网络资源进行逻辑分割,即完成所谓的“切片”。

(4) 在构建好传输平台的基础上,要注重平台与应用场景和先进技术的融合,解决一直困扰煤矿智能化开采的泛在感知、实时可靠传输、大数据应用、快速智能决策、混合现实远程操作等卡脖子难题,实现基于混合现实的井下智能化开采和远程实时可视化操控。

参考文献 (References):

- [1] 王国法,赵国瑞,任怀伟.智慧煤矿与智能化开采关键核心技术分析[J].煤炭学报,2019,44(1):34-41.
WANG Guofa,ZHAO Guorui,REN Huaiwei. Analysis on key technologies of intelligent coal mine and intelligent mining[J]. Journal of China Coal Society,2019,44(1):34-41.
- [2] 王国法,刘峰,庞义辉,等.煤矿智能化——煤炭工业高质量发展的核心技术支撑[J].煤炭学报,2019,44(2):349-357.
WANG Guofa,LIU Feng,PANG Yihui,et al. Coal mine intellectualization:The core technology of high quality development[J]. Journal of China Coal Society,2019,44(2):349-357.
- [3] 王国法.如何正确认识并理解煤矿智能化[N].中国煤炭报,2019-03-19(04).
WANG Guofa. How to correctly recognize and understand the Intelligence of Coal Mine[N]. China Coal News,2019-03-19(04).
- [4] 王国法,杜毅博.智慧煤矿与智能化开采技术的发展方向[J].煤炭科学技术,2019,47(1):1-10.
WANG Guofa,DU Yibo. Development direction of intelligent coal mine and intelligent mining technology[J]. Coal Science and Technology,2019,47(1):1-10.
- [5] 范京道,徐建军,张玉良,等.不同煤层地质条件下智能化无人综采技术[J].煤炭科学技术,2019,47(3):43-52.
FAN Jingdao,XU Jianjun,ZHANG Yuliang,et al. Intelligent unmanned fully-mechanized mining technology under conditions of different seams geology [J]. Coal Science and Technology,2019,

- 47(3):43-52.
- [6] 雷毅. 我国井工煤矿智能化开发技术现状及发展[J]. 煤矿开采,2017,22(2):1-4.
LEI Yi. Present situation and development of underground mine intelligent development technology in domestic[J]. Coal Mining Technology,2017,22(2):1-4.
- [7] 葛世荣,王忠宾,王世博. 互联网+采煤机智能化关键技术研究[J]. 煤炭科学技术,2016,44(7):1-9.
GE Shirong, WANG Zhongbin, WANG Shibo. Study on key technology of internet plus intelligent coal shearer[J]. Coal Science and Technology,2016,44(7):1-9.
- [8] 王国法,王虹,任怀伟,等. 智慧煤矿 2025 情景目标和发展路径[J]. 煤炭学报,2018,43(2):295-305.
WANG Guofa, WANG Hong, REN Huaiwei, et al. 2025 scenarios and development path of intelligent coal mine[J]. Journal of China Coal Society,2018,43(2):295-305.
- [9] 张赟. 5G 通信技术应用场景和关键技术策略[J]. 计算机产品与流通,2019(10):68.
ZHANG Yun. Application scenario and key technology strategy of 5G communication technology[J]. Computer products and Circulation,2019(10):68.
- [10] 刘振宇. 5G 通信技术应用场景和关键技术[J]. 电子技术与软件工程,2019(19):30-31.
LIU Zhenyu. Application scenario and key technology of 5G communication technology[J]. Electronic Technology and Software Engineering,2019(19):30-31.
- [11] 胡丹. 4G/5G 无线链路及覆盖差异探讨[J]. 移动通信,2019,43(7):86-90.
HU Dan. Discussions on the difference of 4G/5G radio links and coverage[J]. Mobile Communication,2019,43(7):86-90.
- [12] 范京道,王国法,张金虎,等. 黄陵智能化无人工作面开采系统集成设计与实践[J]. 煤炭工程,2016,48(1):84-87.
FAN Jingdao, WANG Guofa, ZHANG Jinhu, et al. Design and practice of integrated system for intelligent unmanned working face mining system in Huangling coal mine[J]. Coal Engineering,2016,48(1):84-87.
- [13] 任怀伟,孟祥军,李政,等. 8 m 大采高综采工作面智能控制系统关键技术研究[J]. 煤炭科学技术,2017,45(11):37-44.
REN Huaiwei, MENG Xiangjun, LI Zheng, et al. Study on key technology of intelligent control system applied in 8 m large mining height fully-mechanized face[J]. Coal Science and Technology,2017,45(11):37-44.
- [14] 黄曾华. 可视远程干预无人化开采技术研究[J]. 煤炭科学技术,2016,44(10):131-135,187.
HUANG Zenghua. Study on unmanned mining technology with visualized remote interference[J]. Coal Science and Technology,2016,44(10):131-135,187.
- [15] 孙继平,陈晖升. 智慧矿山与 5G 和 WiFi6[J]. 工矿自动化,2019,45(10):1-4.
SUN Jiping, CHEN Huisheng. Smart mine with 5G and WiFi6[J]. Industry and Mine Automation,2019,45(10):1-4.
- [16] 袁亮. 煤炭精准开采科学构想[J]. 煤炭学报,2017,42(1):1-7.
YUAN Liang. Scientific conception of precision coal mining[J]. Journal of China Coal Society,2017,42(1):1-7.
- [17] 毛善君. “高科技煤矿”信息化建设的战略思考及关键技术[J]. 煤炭学报,2014,39(8):1572-1583.
MAO Shanjun. Strategic thinking and key technology of informatization construction of high-tech coal mine[J]. Journal of China Coal Society,2014,39(8):1572-1583.
- [18] 毛善君,杨乃时,高彦清,等. 煤矿分布式协同“一张图”系统的设计 and 关键技术[J]. 煤炭学报,2018,43(1):280-286.
MAO Shanjun, YANG Naishi, GAO Yanqing, et al. Design and key technology research of coal mine distributed cooperative “one map” system[J]. Journal of China Coal Society,2018,43(1):280-286.
- [19] 吕鹏飞,何敏,陈晓晶,等. 智慧矿山发展与展望[J]. 工矿自动化,2018,44(9):84-88.
LÜ Pengfei, HE Min, CHEN Xiaojing, et al. Development and prospect of wisdom mine[J]. Industry and Mine Automation,2018,44(9):84-88.
- [20] 康红普,王国法,姜鹏飞,等. 煤矿千米深井围岩控制及智能开采技术构想[J]. 煤炭学报,2018,43(7):1789-1800.
KANG Hongpu, WANG Guofa, JIANG Pengfei, et al. Conception for strata control and intelligent mining technology in deep coal mines with depth more than 1 000 m[J]. Journal of China Coal Society,2018,43(7):1789-1800.
- [21] 田成金. 煤炭智能化开采模式和关键技术研究[J]. 工矿自动化,2016,42(11):28-32.
TIAN Chengjin. Research of intelligentized coal mining mode and key technologies[J]. Industry and Mine Automation,2016,42(11):28-32.