

## 机电与智能化



移动扫码阅读

胡亚辉,赵国瑞,吴群英.面向煤矿智能化的5G关键技术研究[J].煤炭科学技术,2022,50(2):223-230.

HU Yahui,ZHAO Guorui,WU Qunying.Research on 5G key technologies in intelligent coal mining[J].Coal Science and Technology,2022,50(2):223-230.

## 面向煤矿智能化的5G关键技术研究

胡亚辉<sup>1</sup>,赵国瑞<sup>2,3</sup>,吴群英<sup>4</sup>

(1.中国矿业大学(北京)机电与信息工程学院,北京 100083;2.中煤科工开采研究院有限公司,北京 100013;

3.煤炭科学研究总院开采研究分院,北京 100013;4.陕西陕煤陕北矿业有限公司,陕西 榆林 719000)

**摘要:**5G 通信技术应用与煤矿智能化开采中已成为目前各界的共识。为了给煤矿智能化开采应用提供更为有效的无线通信与信息处理支撑,调研了5G技术在煤矿智能化中的研究及网络建设现状,分析了其在煤矿应用时的理论研究、标准化、实验室研究及试点建设多个方面的进展情况;针对井下无线传播环境及业务需求,从无线频段选择、无线基站选型、组网方式以及核心网建设方式多个层面,研究了煤矿5G网络规划的方案,指出了“统一规划、安全经济、全面覆盖、精细设计”煤矿5G网络规划原则;总结了5G在煤矿中的可能应用新场景,研究并提出5G网络切片应在运营商增强移动宽带通信、低延迟高可靠通信和海量物联网通信三大应用场景的基础之上,进一步细化煤矿的应用场景,同时需协调业务匹配粒度、切片管理与网络资源之间的相互关系,以达到最佳网络资源使用度;研究了煤矿5G边缘计算技术,设计了面向具体煤矿智能化业务需求的云-边-端协同的边缘计算架构,并进行了计算卸载、边云协同等关键技术研究。上述分析与研究表明,商用5G在应用于煤矿智能化开采过程中,仍然需要针对具体应用业务和场景进行网络规划、网络切片,并且由于5G技术本身处于不断更新发展之中,因此在5G与煤矿智能化结合的过程中,需不断融入新技术,并在新技术的背景下仔细评估所采用的关键技术、网络设计与建设方案。

**关键词:**煤矿智能化;5G;网络规划;网络切片;边缘计算

中图分类号:TD65;TP393

文献标志码:A

文章编号:0253-2336(2022)02-0223-08

## Research on 5G key technologies in intelligent coal mining

HU Yahui<sup>1</sup>, ZHAO Guorui<sup>2,3</sup>, WU Qunying<sup>4</sup>

(1.School of Mechanical Electronic &amp; Information Engineering, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China;2.CCTEG Coal

Mining Research Institute, Beijing 100013, China;3. Mining Design Institute, China Coal Research Institute, Beijing 100013, China;4. Northern

Shaanxi Mining Co., Ltd., Yulin 719000, China)

**Abstract:** The application of 5G communication technology to the intelligent mining of coal mines has become the consensus of all walks of life. In order to provide more effective wireless communication and information processing support for the intelligent mining application of coal mines, the research and network construction status of 5G technology in the intelligentization of coal mines were investigated, and the progress of research and pilot construction in multiple aspects including theoretical research, standardization, and laboratory application of 5G technology in coal mines were analyzed. In view of both the wireless communication environment and service requirements, the coal mine 5G network planning scheme from the aspects of wireless frequency band selection, wireless base station selection, wireless networking and core network construction were studied, and it was pointed out some network planning principles such as “unified planning, safe economy, universal coverage and fine design”. Then, the possible new scenarios of 5G in coal mines were summarized, and it was pro-

收稿日期:2021-06-12

责任编辑:周子博

DOI:10.13199/j.cnki.cst.2020-1093

基金项目:中央高校基本科研业务资助项目(2019QJ05);中国工程院咨询研究资助项目(2019-XZ-60);国家自然科学基金重点资助项目(51834006)

作者简介:胡亚辉(1982—),女,河南信阳人,副研究员,硕士生导师,博士。E-mail:huyahui@cumb.edu.cn

posed that 5G network slicing should coordinate the service matching granularity and further be refined based on the three basic scenarios of enhanced mobile broadband (eMBB), ultra reliable low latency communication (URLLC) and massive Machine Type Communication(mMTC), in order to achieve optimum use network resources, which further refined the application scenarios of coal mines, and at the same time, coordinated the relationship between business matching granularity, slice management and network resources to achieve the best network resource utilization; it also studied coal mine 5G edge computing technology, designed a cloud-edge-end collaborative edge computing architecture for specific coal mine intelligent business needs, and conducted research on key technologies such as computing offloading and edge-cloud collaboration. The above analysis and research show that when commercial 5G is applied to the intelligent mining process of coal mines, network planning and network slicing are still required for specific application services and scenarios. Because 5G technology itself is constantly being updated and developed, it is necessary to continuously integrate new technologies in the process of integrating 5G and coal mine intelligence, and carefully evaluate the key technologies adopted and network design and construction plans in the context of new technologies.

**Key words:** intelligent mining; 5G; network planning; network slicing; edge computing

## 0 引言

近年来,煤矿智能化在我国煤炭生产高质量发展发面已体现出巨大的技术保障能力,成为煤炭工业科技发展的重要方向<sup>[1-4]</sup>。在煤矿智能化进程中,第五代移动通信技术(the 5th Generation Communication, 5G)融合物联网、人工智能、大数据、云计算等新一代信息技术成为煤矿智能化的有效推动力,已成为学术界和工业界的广泛共识<sup>[5-7]</sup>。随着国家发改委和国家能源局等八部委联合印发《关于加快煤矿智能化发展的指导意见》<sup>[8]</sup>的通知以及工信部印发《关于推动5G加快发展的通知》<sup>[9]</sup>,融合5G等新一代信息技术推进煤矿智能化建设进一步获得学术界、产业界以及政府的高度重视<sup>[10-12]</sup>。然而,井下的无线传播环境、煤矿开采的具体业务需求不明导致无法直接将5G通信系统应用于煤矿智能化开采之中,需要进一步研究5G适应性技术以满足煤矿智能化开采的无线通信与信息处理需求<sup>[13-14]</sup>。针对上述问题,学术界和产业界已经从关键技术研究、标准化制定、实验室及网络试点建设等各方面开展了积极的研发工作<sup>[15-16]</sup>。然而,目前的研发及试点建设尚处起步阶段,面向煤矿特定场景的针对性研究依然欠缺,对于煤矿智能化水平的提升有限。

鉴于此,为进一步探讨5G在煤矿智能化应用中的适应性,研究总结了5G关键技术特点及标准化进展情况;阐述了煤矿5G的关键技术研究、标准化制定、设备研发及网络建设现状;面向煤矿智能化的特定应用场景,从网络部署、业务应用的角度,研究了5G网络规划、网络切片以及移动边缘计算3个关键技术;最后,对面向煤矿智能化的5G技术未来发展趋势进行了展望。

## 1 5G技术特点及标准化进展情况

与4G相比,5G期望在峰值数据速率、连接密

度、时延、移动性支持以及单位面积可支持数据速率方面均有10倍以上的提升。这些能力的提升主要依赖无线空口及网络技术的突破性变革。空口技术包含高频通信、大规模天线阵列以及短时域调度等,网络技术主要包含网络切片与边缘计算等。上述技术特征已经得到了全面的阐述,有必要进一步从对垂直行业融合的角度,阐述5G标准化进展情况,厘清其对垂直行业的支撑度。

5G标准化进展及对垂直行业支撑能力如图1所示,早在2014年5月,我国标准化组织IMT-2020在《5G愿景与需求白皮书》<sup>[17]</sup>中第一次由个人通信转向了行业应用,定义了5G所面临的场景,包含超宽带视频业务通信、超低延迟通信和海量物联网通信三大类应用场景。2017年,5G的第一个标准化版本3GPP R15主要满足了商用初期个人和行业的迫切需求,重点关注增强移动宽带通信(enhanced Mobile Broadband)和简化的低延迟高可靠通信(Ultra Reliable Low Latency Communication, URLLC)场景,尚未针对海量物联网通信(massive Machine Type Communication, mMTC)场景制定技术标准。其中增强型移动宽带主要针对超高清视频、VR/AR等大带宽个人通信场景,而垂直行业通常面临的远程实时控制等低时延高可靠以及大量的传感器节点采集类应用尚未得到支持。2020年7月3日,5G的第一个完整标准版3GPP R16冻结,这也意味着5G能够全面支持eMBB、URLLC和mMTC。同时,3GPP R17版本的制定工作也正式启动,预计冻结时间为2022年6月。该版本主要是面向垂直行业应用进一步进行能力提升,如工业互联网增强、空口增强和空天一体化通信等。

由上述5G技术发展特征可知,目前5G商用设备和网络主要是基于R15版本,尚不能很好支持URLLC和mMTC的应用,因此对煤矿智能化的支持

能力尚有不足。但随着 R16 版本的冻结和 R17 版本的持续演进,5G 商用网络将能全面满足煤矿智能

化的泛在无线接入与信息高效传输要求。

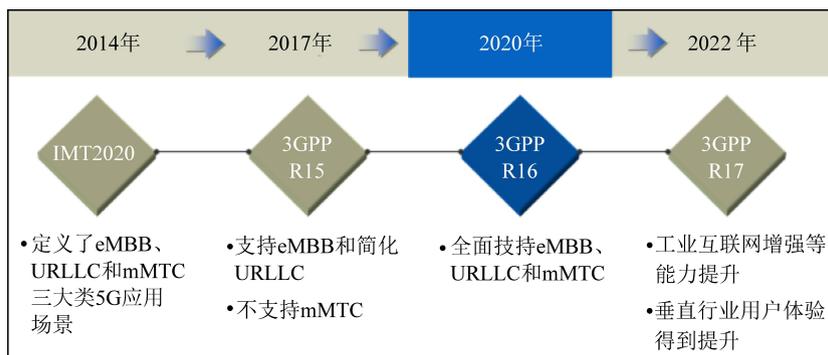


图1 5G 标准化进展及对垂直行业的支撑能力

Fig.1 5G standardization progress and supporting capability for vertical industry

## 2 煤矿 5G 技术研究及网络建设现状

如上所述,在国家政策的助力下,各运营商、煤矿企业、煤矿科研院所及高校均已积极开展面向煤矿智能化的 5G 网络关键技术研究、推动标准化制定、创立联合实验室,并建设网络及业务应用试点。

### 2.1 关键技术研究进展

面向煤矿智能化的 5G 关键技术研究,主要集中于分析煤矿应用 5G 技术的必要性及可能的应用场景。文献[5]比较了 5G 和 WiFi6 的各自技术特点,并得出结论 5G 和 WiFi6 用于煤矿通信各有优缺点,5G 通信质量有保证但成本高, WiFi6 成本低但通信质量无法得到保证。文献[6-7]进一步论证了 5G 用于井下通信的可行性,并总结了基于 5G 的煤矿智能化应用场景。文献[15]提出了一种 5G 矿井通信架构,采用 Pico RRU (Remote Radio Unit, 射频拉远单元)覆盖井下巷道,采用 AAU (Active Antenna Unit, 有源天线单元)完成地面覆盖。该架构为现有网络建设的基站选型和组网方式提供了一种有价值的参考,但该架构缺乏无线频段选择、核心网建网等方案。文献[16]主要研究并测试了 700 MHz 频谱在煤矿井下的无线传播特性,并从无线传播特性的角度指出 700 MHz 更适合井下通信。该工作为煤矿 5G 无线频谱选择提供了具体的数据支撑。

### 2.2 标准化制定进展

在煤矿 5G 标准制定方面,2020 年 6 月 17 日,由安标国家中心发布了《煤矿 5G 通信系统安全技术要求(试行)》《煤矿 5G 通信系统安全标志管理方案(试行)》两个标准,规定了 5G 系统的组网运行、技术性能、安全防爆和电磁兼容的特性,以及煤矿 5G 系统检验检测机构所应具备的能力。此外,中国煤炭科工集团也正在着手制定《煤矿 5G 高速传输

技术要求》的国家标准。2021 年,国家能源局立项了一系列煤矿 5G 标准,包括《煤矿 5G 通信系统的通用技术条件》、《煤矿用 5G 通信基站》、《煤矿用 5G 通信基站控制器》以及《煤矿 5G 通信系统用通信终端》。此外,中国煤炭学会也立项了《煤矿 5G 通信网络设备接入通用技术条件》。

### 2.3 煤矿 5G 技术科研组织成立现状

目前,面向煤矿智能化的 5G 实验室创立,主要是中国联通在推动。2019 年 8 月 20 日,山东联通、山东兖矿集团及中兴通信合作成立了 5G+智慧矿业联合实验室。2019 年 11 月 14 日,中国联通、中国煤炭科工集团以及中国矿业大学(北京)组建了地下空间 5G 技术创新应用联合实验室。

产业联盟的成立,主要是中国移动在推动。2019 年 9 月 6 日,中国移动、山西阳煤集团与华为公司作为合作成立了 5G 通信煤炭产业应用创新联盟。2020 年 6 月 18 日,中国移动联合清华大学、中国矿业大学(北京)、阳煤集团、中国煤炭科工集团、华为公司等 70 多家单位成立了 5G 智慧矿山联盟。

### 2.4 煤矿 5G 网络建设现状

在煤矿 5G 试点应用与项目落地方面,进展速度相对更快。2019 年,5G 商用牌照颁发不久,各大煤矿集团就相继开通了 5G 网络。此外,煤矿无人驾驶车、高清视频传输、井下智能巡检等也成为 5G 在推动矿山智能化中的典型示范应用。然而,目前的网络建设和试点示范仍然处于试验阶段,对 5G 所能支持的三大场景尚未全面落地,且现有试点应用离业界所构想的煤炭智能化应用仍然有很大的差距。

因此,5G 在煤矿的应用还属于试点和试验阶段,业界主要精力也投入在 5G 试点网络的建设上面,对煤矿 5G 在网络规划部署的优化、针对煤矿智能化特定业务的网络切片以及移动边缘计算等关键

技术的研究并不充分。

### 3 煤矿 5G 网络规划部署

煤矿 5G 网络需要同时覆盖地面和井下 2 个不同的使用环境。煤矿地面环境与普通地面环境差异性不大,但井下环境需同时考虑无线通信设备的安全防爆要求和无线电磁波的井下传输特性。首先,井下传播空间通常比较狭长且存在多分支;其次,巷道壁对无线电波易产生吸收或干扰;再次,井下的各种设备布设复杂,且大多数都需要供电,会产生强磁干扰;最后,开采环境存在比较多的粉尘,对毫米波传输损耗影响较大。

综上,煤矿 5G 网络规划部署与普通 5G 网络规划存在着很大的不同,既要考虑这 2 种使用环境下的不同无线覆盖、无线传输特性、业务类型和安全可靠等方面的差异性要求,还应遵循“泛在感知一体化网络”的煤矿智能化网络建设需求。因此,“统一规划、安全经济、全面覆盖、精细设计”理应成为煤矿 5G 网络的规划部署原则。在此原则下,从无线频段选择、无线基站选型、组网方式以及核心网建设 4 个方面阐述了煤矿 5G 网络规划核心要点。

#### 3.1 无线频段选择

2019 年 6 月 6 日,工信部向中国移动、中国联通、中国电信三大运营商及广电网络颁发了 5G 商用牌照。各运营商获得的 5G 频段各不相同,中国移动获得了 2.515~2.675 GHz 和 4.8~4.9 GHz 两个频段,中国电信获得了 3.4~3.5 GHz 频段,中国联通获得了 3.5~3.6 GHz 频段,广电网络获得的是 700 MHz 频段。2020 年 2 月 10 日,工信部又向中国联通、中国电信及广电网络颁发了 5G 室内运营牌照,并规定 3 家运营商在全国范围共同使用 3.3~3.4 GHz 频段,用于进行 5G 室内覆盖。

从上述频段分析来看,目前我国的商用 5G 频段主要集中于 Sub-1G 和 Sub-6G。其中,Sub-1G 主要是广电网络的 700 MHz 频段,该频段很显然单基站覆盖范围比 Sub-6G 的范围广,这也意味着煤矿井上覆盖采用 700 MHz 频段会带来更低的网络建设成本。此外,实际测试结果表明,700 MHz 在井下的传播距离、绕射能力等无线传播特性也好于 Sub-6GHz。然而,另一方面,考虑到煤矿无线通信除了满足煤矿生产需求以外,还需要满足煤矿员工的个人通信需求,广电网络在 5G 个人通信方面相对于其他运营商有比较大的差距。因此,在进行煤矿 5G 无线频段及合作运营商选择方面仍需要进行综合考虑。

除上述授权无线频段可用以外,利用无线非授权频段进行煤矿 5G 网络建设也值得关注。最近 3GPP 冻结的 R16 版本中将 5G 所能使用的无线频谱扩展到了非授权频段,其关键技术就是 5G NR-U(New Radio Unlicensed)技术。很显然,5G NR-U 技术能够利用非授权频谱建设 5G 无线专用网络,其建网成本和使用成本比授权频段更为经济有效。

#### 3.2 无线基站选型

5G 基站种类与形式并不单一,除了宏基站以外,还有微基站、皮基站以及飞基站。微基站、皮基站和飞基站的具体设备形态又分为分布式和一体化两种。宏基站发射功率较大,覆盖范围也比较大,因此适合于需要大面积覆盖的场景。相比宏基站,微基站、皮基站以及飞基站体积更小、部署方便、选址灵活,通常作为宏基站的补充进行无线覆盖增强和热点区域业务流量提升。通常,在如下场景中,亦可以采用微基站进行无线覆盖:①宏基站建设有难度的待覆盖区域,比如建站困难或者空间受限的地方;②较小的室外覆盖区域;③对无线传输带宽有较大要求的办公区或者居民区;④需要进行深度覆盖的区域。由于煤矿地面和井下两种不同的使用环境,因此煤矿 5G 无线基站需要根据这两种不同的使用环境分别进行选型。

1) 地面井上无线基站选型。地面的煤矿 5G 无线基站选型主要以宏基站为主,同时在某些需要补充或者增加流量的地方选择微基站进行补充。对于连片的住宅区、生产区和办公区,通常选择分布式微基站减少邻区之间的切换次数,提升通信质量。而对于独立的几栋楼或者需要进行深度覆盖的小面积区域,可以选择一体化微基站,以节约成本、方便后续运维管理。

2) 井下无线基站选型。与地面进行对比,煤矿 5G 更适合采用微基站进行部署。主要出于以下 3 点原因:①5G 井下空间狭小,且采掘运等设备布设复杂,更适合采用尺寸较小的无线基站;②井下对无线基站的电磁干扰和安全防护要求比较高,更适合采用发射功率较小的微基站;③井下存在巷道起伏、弯曲以及拐弯等地形,容易造成无线覆盖盲区,可以采用微基站进行补盲或者补弱。

在进行一体化或者分布式微基站选型方面,同样需要进一步细化部署场景和选型方案。例如,对于需要固定基站位置的场景,比如主巷道,可以选择分布式微基站进行部署;对于需要定期进行地点更换的综采工作面,则更适合部署一体化微基站,方便后续的设备搬迁,以降低建网成本。微基站的架设

地点以及数量,需根据实际的布设环境、业务需求进一步进行无线优化。

### 3.3 组网方式

5G 空口的组网方式有 2 种,即 SA(Standalone,独立组网方式)和 NSA(Non-Standalone,非独立组网方式)。SA 方式也就是 5G 与 4G 通信系统之间相互独立,自身组成包含基站与核心网的通信系统,与 4G 网络之间采用跨核心网的互操作模式。NSA 方式中 5G 网络无法独立完成通信,需要借助 4G 基站进行无线空中接口的信令传输,数据则可以通过 5G 和 4G 两种空中接口进行传输。其中,NSA 有多种组网方式,早期部署中最具代表性的是 3GPP 中的选项 3x(NSA-3x)和选项 7x(NSA-7x)两种方式,其主要区别在于 NSA-3x 无需建设 5G 核心网,而 NSA-7x 则需要建设 5G 核心网。

SA 与 NSA 两种组网方式各有优劣。图 2 从业务能力、建网成本、终端能耗、设备选型以及智能矿山适应性 5 个维度对 SA、NSA-3x 和 NSA-7x 进行了对比分析。

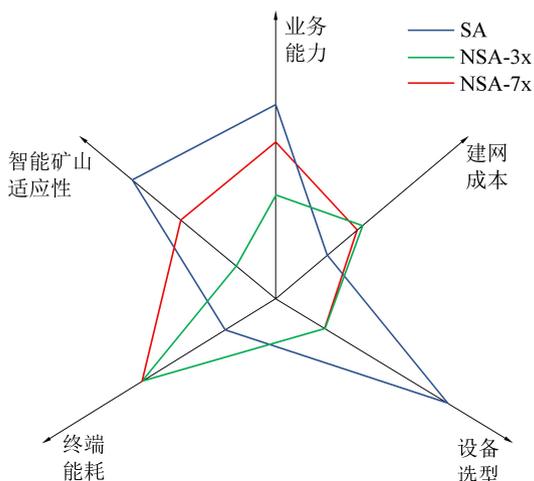


图 2 SA、NSA-3x 和 NSA-7x 组网对比分析

Fig.2 SA, NSA-3x and NSA-7x networking comparison

从业务能力角度分析,SA 满足所有的煤矿智能化应用场景要求;NSA-7x 虽然建设了 5G 核心网,但是其信令仍然依赖于 4G 技术,因此对时延要求高的煤矿智能化业务场景无法支持;而 NSA-3x 仅支持 eMBB 场景。从建网成本角度分析,SA 方式需建设 5G 基站和核心网,初期建网成本较高;NSA-7x 需建设 5G 核心网和部分 5G 基站,5G 基站主要作为 4G 基站的无线覆盖增强,初期建网成本中等;NSA-3x 只需要建设部分 5G 基站作为 4G 基站的无线覆盖增强,无需建设 5G 核心网,所以初期建网成本最低。然而,从 NSA 最终必然要演进到 SA 方式,NSA-3x 和 NSA-7x 后期会存在大量的

4G 网络改造费用,最终总成本会高于 SA 方式。从终端能耗的角度分析,SA 组网方式下,终端只需要与 5G 基站建立连接,终端能耗最低;而 NSA-3x 和 NSA-7x 需同时与 4G、5G 基站建立无线连接,功耗较高。因此,对于终端能耗要求比较严格的无线传感器监测类应用,SA 的组网方式要优于 NSA-3x 和 NSA-7x。从网络设备选型的角度分析,SA 不需要均来自于同一家厂商,而 NSA 则必须来源于统一厂商,因此设备选型非常受限。

从对智能矿山的适应性方面衡量,SA 的适应性最好,而 NSA 方式由于对智能矿山的业务支撑能力不够、建网运维成本高等问题,适应性更差一些。

### 3.4 核心网建设及运维管理方式

煤矿 5G 核心网的建设方式分为 2 种:①利用公网核心网,将煤矿 5G 基站直接接入运营商公网的核心网设备中;②自建核心网,所有无线基站接入自己的核心网中。利用公网核心网的方案,在建设成本和后期运维方面投入较少,但通信信令必须经过运营商核心网。该方案的缺点是,一方面网络传输质量不如自建核心网,且后期针对新兴智能煤矿业务场景的扩展性和支撑性更受限,另一方面也存在数据安全隐患。自建核心网方案,能够相对独立组成一张区域范围内的煤矿 5G 专网。该专网可以通过核心网设备与 5G 公网互联互通。同时可以加入网络防护、隔离与交换设备,在保证与 5G 公网互联互通的同时,最大程度保障煤矿 5G 专网安全。当然,该方案也会产生额外的建设成本,但相比建设 5G 基站的方案,成本预期较低。综上,煤矿 5G 核心网的建设,需根据企业自身的经济实力、服务质量要求以及数据安全性要求 3 个方面进行综合考虑。对于经济实力较强的煤矿企业,建议独立建设核心网以便后期业务扩容,同时也能有效保护煤矿企业的各类数据。

## 4 煤矿 5G 网络切片技术

网络切片的实质就是利用网络虚拟化技术将网络基础物理设备根据时延、带宽、可靠性、安全性等不同的业务场景服务需求切分出多个逻辑上的端到端网络,以进行各种不同业务的信息传输与交换。由此可见,对于业务场景的分析,是进行煤矿 5G 网络切片的前提,前期工作在这方面已经有一些研究成果,但主要是从场景本身来分析,在此基础上,需进行场景内的不同业务服务质量要求细分,为煤矿 5G 网络切片做准备。后续,将基于这些细分后的业务需求,分析 5G 煤矿切片技术。

#### 4.1 煤矿 5G 应用场景分析

1) 智能工作面控制。对智能工作面的协同远程控制,决定了生产效率和生产安全。因此,对 5G 无线网络的上行生产监控数据及下行工作面控制数据的传输时延、可靠性有着极为苛刻的要求。上行生产监控类数据,目前主要是传感数据,因此对时延有严格要求。但若后期有视频监控类数据,则需要进行工业图像处理,对带宽与时延均有一定的要求。

2) 井下远程协同运维。未来井下装备的维修工作可以通过专家远程指导的方式来完成。维修工人将现场采集的机器状态等超高清视频信息通过 5G 网络传输至远端,利用虚拟现实等技术,远程专家如临现场,指导维修现场设备。在此场景下,对带宽的传输能力和时延均有较高要求。

3) 井下安防和巡检。在井下巡检和安防系统场景中,会有大量的传感器通过 5G 接入网络,除了有对带宽要求不高的瓦斯、风速等监控数据,也有高带宽需求的视频监控类数据,同时还有人员定位等更新频率较高的数据,同样也需要多种切片融合处理,才能完成对该场景的支撑。除了上述应用场景以外,还存在很多其他可能的应用场景,且每种场景具有相应的服务质量(Quality of Service, QoS)要求,具体见表 2。

表 2 煤矿智能生产典型业务场景对无线传输网的要求<sup>[1]</sup>

Table 2 Requirements for wireless transmission network in typical application scenarios of intelligent coal mine<sup>[1]</sup>

序号	业务场景	时延要求	带宽要求
1	智能工作面	<20 ms	无
2	工业图像处理	<20 ms	上行>100 M
3	机器人控制	<20 ms	上行>50 M 下行>20 M
4	井下远程协同运维(VR/AR)	<20 ms	上行>25 M 下行>50 M
5	高密度物联网接入	<10 ms	无

大多数场景都覆盖了运营商定义的 eMBB、URLLC 以及 mMTC 三个或者多个场景,因此面向煤矿智能化的 5G 网络切片需基于各业务的重要性程度、隔离性要求以及服务质量要求等进行定制。

#### 4.2 煤矿 5G 切片关键技术分析

在运营商的切片实例中,通常对应 3 大类应用场景,也即是 eMBB、URLLC 和 mMTC。实际上,这种分类是针对所有垂直行业的大致场景分类。在煤矿的实际应用中,可以进一步细分为生产控制、环境监测、人员调度、远程运维等多个场景,并明确每类应用场景中所涉及到的各类具体业务,并将其转换

为服务等级(Service Level Agreement, SLA),也即是端到端的网络切片要求,比如时延、容量、覆盖安全性等等。SLA 下发到 5G 网络切片管理实体中,完成该应用场景的煤矿 5G 网络切片实例化。

当然,网络切片的粒度也不是越细越好,过细的切片一方面会在不进行信息传输时占用大量的网络资源,另外一方面会增加切片管理系统的负荷。尤其是在当前煤矿智能化应用场景尚未定义完备的前期下,在网络总体资源一定的情况下,亦需要为未来智能化业务预留一些网络资源。因此,面向煤矿智能化场景的 5G 网络切片既需要针对某些应用场景进行切片定制,也需要针对网络利用率高或者 SLA 要求不高的场景提供公共网络切片。

基于这一思想,给出了一个面向煤矿智能化的 5G 网络切片参考架构,如图 3 所示。在该架构中,将网络资源划分为分为专用切片和公共切片。每个切片包含组成 5G 核心网的所有网元,包含策略控制功能(Policy Control Function, PCF)、接入和移动管理功能(Access and Mobility Function, AMF)、用户面管理功能(User Plane Function, UPF)、统一数据管理功能(Unified Data Management, UPF)、会话管理功能(Session Management Function, SMF);此外,还包含移动边缘计算功能(Mobile Edge Computing, MEC)。专用切片拥有从无线接入网、核心网以及边缘计算等一整套的虚拟 5G 网元设备,主要服务对象是生产控制类等对 QoS 有极其严苛要求的应用场景。公共切片的主要服务对象是对 QoS 要求有一定容忍度或者网络资源利用率低的场景,比如远程协同运维虽然对 QoS 要求严格,但由于不经常利用网络,因此将其划分到公共切片中,以提升网络资源利用率。值得注意的是,公共切片支持 eMBB、URLLC 以及 mMTC 三类切片,具体应用场景则可以联合使用这 3 大类切片完成信息传输。

#### 5 煤矿 5G 移动边缘计算技术

移动边缘计算(Mobile Edge Computing, MEC)通过在靠近终端用户提供 IT 服务环境和计算能力,将部分网络业务下沉到靠近终端用户的移动节点,从而缩短网络传输时延,助力 5G 网络提升用户体验质量<sup>[18]</sup>。因此,MEC 目前已成为 5G 网络的必备基础设施之一,且在车联网等场景中得以广泛应用。然而,移动边缘计算从节点部署到关键技术都需要根据具体应用场景进行方案设计,也即是现有的移动边缘计算方案并不能够直接应用于煤矿智能化。因此,将移动边缘计算应用于煤矿智能化仍需进行

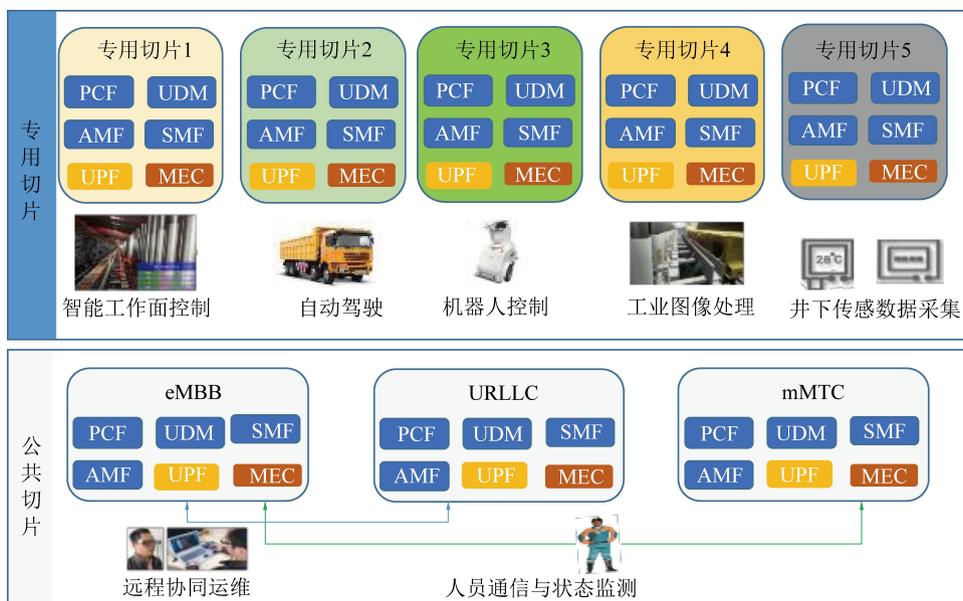


图 3 面向煤矿智能化的 5G 网络切片参考架构

Fig.3 5G network slicing reference architecture for intelligent coal mining

架构设计,并研发适用的云边协同、计算任务卸载与迁移等关键技术。

1) 云边协同。“云+边缘+端”的多层次智能架构仍然适用于煤矿移动边缘计算<sup>[19]</sup>,移动边缘计算节点不仅仅是网络设备,还包含终端设备,如采煤机、掘进机等自动化设备。在“端”处采用深度学习等人工智能算法实现采矿及运输设备的单台智能,在“边缘”收集多台设备的环境感知及运行参数,对时延要求极其严格的紧急事件(比如生产远程控制等)进行处理实现紧急设备托管,在“云”中通过采集“端”数据,进一步对智能算法进行改进,以促使单台设备的智能化提升。

2) 计算任务卸载与迁移。计算卸载是指用户终端设备将计算任务卸载到 MEC 网络中,主要解决设备在资源存储、计算性能以及能效等方面的不足<sup>[20]</sup>。计算卸载技术中,最为关键的是确定计算任务如何在云与端之间进行切割。计算迁移主要是指计算任务在不同的网络节点之间进行分配,这些节点可以是端节点,也可以是网络节点。计算卸载与迁移算法的关键就在于如何确定计算任务在用户终端与边缘服务器节点之间进行合理切割,以最少的能耗或者带宽需求,满足业务的服务质量要求。在煤矿场景下,需根据具体业务,决定在端、边、云进行分别处理的具体计算任务。比如,对于高清视频监控类业务,可以首先在监控摄像头处进行画面的初步处理,去掉一些重复的静止画面或者非异常画面,只传输感兴趣画面。上传后的画面可以在 5G 基站处部署的边缘计算节点进行进一步压缩处理,最后

上传到云端。

## 6 展 望

随着煤矿智能化的进展以及 5G 技术在煤矿领域的逐步适用,越来越多的应用案例表明 5G 技术能够提升煤矿生产企业的信息化智能化水平。然而,若要充分利用 5G 加快推进煤矿智能化进程,需进一步进行应用场景规划,并面向特定场景进行 5G 网络规划、网络切片以及移动边缘计算等关键技术的探索。此外,5G 技术也同时在不断向前发展,最新冻结的 3GPP R16 版本虽然对垂直行业的支撑进行了业务增强,但在 R17 版本中仍然在探索新的增强型技术,因此在面向煤矿智能化的 5G 关键技术研发过程中,理应及时关注最新技术进展情况,以经济有效的方式切实推动煤矿智能化进程。

### 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持[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(004).  
WANG Guofa. How to correctly recognize and understand the intel-

- ligence of coal mine[N]. China Coal News, 2019-03-19(004).
- [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] 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.
- [6] 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.  
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.
- [7] 范京道,李川,闫振国.融合5G技术生态的智能煤矿总体架构及核心场景[J].煤炭学报,2020,45(6):1949-1958.  
FAN Jingdao, LI Chuan, YAN Zhenguo. Overall architecture and core scenario of a smart coal mine incorporating 5G technology ecology[J]. Journal of China Coal Society, 2020,45(6):1949-1958.
- [8] 关于加快煤矿智能化发展的指导意见[N].中国煤炭报,2020-03-05(002).  
Guidance on accelerating the intelligent development of coal mines. [N]. China Coal News, 2020-03-05(002).
- [9] 关于推动5G加快发展的通知[N].工信部通信(2020)49号,2020-03-24.  
Guidance on accelerating the 5G development.[N]. Ministry of Industry in Information Technology Communication No. [2020] 49, 2020-03-24.
- [10] 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.
- [11] 雷毅.我国地下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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 范京道,闫振国,李川.基于5G技术的煤矿智能化开采技术研究及探索[J].煤炭科学技术,2020,48(7):92-97.  
FAN Jingdao, YAN Zhenguo, LI Chuan. Research and exploration of intelligent coal mining technology based on 5G technology[J]. Coal Science and Technology,2020,48(7):92-97.
- [15] 霍振龙,张袁浩.5G通信技术及其在煤矿的应用构想[J].工矿自动化,2020,46(2):1-7.  
HUO Zhenlong, ZHANG Yuanhao.5G communication technology and its application conception in coal mine[J]. Industry and Mine Automation, 2020,46(2):1-7.
- [16] 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.
- [17] 5G愿景与需求白皮书[S].IMT-2020(5G)工作组,2014-05. White Paper on 5G Vision and Demand[S]. IMT-2020(5G) workgroup, 2014-05.
- [18] 田辉,范绍帅,吕昕晨,等.面向5G需求的移动边缘计算[J].北京邮电大学学报,2017,40(2):1-10.  
TIAN Hui, FAN Shaoshuai, LYU Xinchun, et al. Mobile edge computing for 5G requirements[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications., 2017,40(2):1-10.
- [19] 杨鑫,赵慧玲.MEC的云边协同分析[J].中兴通信技术,2020,26(3):27-30.  
YANG Xin, ZHAO Huiling. MEC cloud-edge collaboration [J]. ZTE Communications,2020,26(3):27-30.
- [20] 谢人超,廉晓飞,贾庆民,等.移动边缘计算卸载技术综述[J].通信学报,2018,39(11):138-155.  
XIE Renchao, LIAN Xiaofei, JIA Qingmin, et al. Survey on computation offloading in mobile edge computing [J]. Journal on Communications, ,2018,39(11):138-155.