

矿井5G无线通信系统关键技术及装备研发与示范应用

霍振龙 肖松 孟玮 顾义东 王丽丽



让矿井更安全



- 人员位置、体征监测
- 瓦斯、CO、风压、风速等环境参数监测
- 煤机装备运行状态监测

让生产更高效



- 智能掘进
- 精准高效生产调度
- 辅助运输
- VR设备远程巡检

让行业更智能



- 联网矿用机器人
- 装备边缘云, 装备自主分析、自主决策、自主运行

煤矿智能化发展下的矿用 5G

2020年2月, 国家发展改革委、国家能源局、国家矿山安全监察局等八部门联合印发了《关于加快煤矿智能化发展的指导意见》, 明确了我国煤炭工业智能化发展的方向, 建设新时代智能化煤矿是煤炭工业高质量发展的必然选择。智能化煤矿建设要求将物联网、云计算、大数据、人工智能、自动控制、机器人等先进技术与现代化煤矿开发技术深度融合, 形成矿井全面感知、实时互联、分析决策、自主学习、动态预测、系统控制的完整智能化系统, 对矿井生产管理全过程进行智能化管控。这一愿景的实现, 需以高性能、高可靠的矿井移动通信网络为基础。

5G通信技术具有高带宽、低时延、大规模设

备连接等特性, 可实现矿井全范围通信网络覆盖, 对井下设备和环境数据进行全方位采集和传输, 并实现对设备的精准可靠控制, 满足井下各类业务系统的网络数据传输需求, 为煤矿井下设备群的万物互联提供了技术支撑。研究矿井5G通信网络技术, 对煤炭行业智能化发展具有关键性作用。

矿用 5G 关键技术

中煤科工集团常州研究院有限公司与华为技术有限公司、中兴通讯股份有限公司、中国大唐集团有限公司等企业合作, 共同开展了适合在煤矿应用的矿用5G专网系统及相关设备的研究工作。主要研究内容包括以下4个方面:



1) 结合5G通信技术的网络架构及煤矿井下环境特点,研究井下5G通信网络架构,构建井下巷道5G网络覆盖方案。

5G通信技术的网络带宽、传输时延等无线通信指标较4G等技术有了很大提高,因而对5G承载网的需求也大幅提升,矿井现有的工业以太网难以满足5G承载网的要求。因此,研究了切片分组网(Slicing Packet Network, SPN)等技术,以解决5G承载网在吞吐量、传输时延、网络切片等方面的问题。

2) 研究矿用5G安全技术要求及GB 3836—2010相关标准和5G基站及终端矿用技术,研究矿用5G基站供电及后备电源技术,设备天线输出及隔离技术。

3) 研究5G工作频段在矿井巷道中的传输特性和井下5G无线网络覆盖技术。研制矿用5G CPE信号转换器、隔爆兼本安型基站、天线、终端、5G通信模组等设备,实现井下5G信号的全覆盖,为建设5G+智能化矿山提供了通信基础设施。

4) 研究语音、调度、高速数据传输及视频传输的有线无线一体化融合通信解决方案,构建煤矿5G专网通信平台,除了提供移动语音调度通信外,还可应用于移动宽带传输、高清视频传输、实时远程操控、应急救援通信、井下无人驾驶、井下工业互联等场景,初步构建了以5G通信技术为基础的矿井工业互联网络。

尚未有全功能矿用 5G 网络架构的商用部署案例

实现5G通信技术在煤矿井下的应用,首先需要建设和部署矿用5G通信网络,主要包括无线接入网和核心网2个部分。无线接入网主要由矿用5G通信基站、矿用5G远端汇聚站等组成,实现井下5G信号的覆盖,为用户提供无线接入功能;核心网则主要负责数据的处理和路由,提供井下无线网络的注册和控制、业务鉴权、语音和数据交换等功能。第三代合作伙伴计划(3rd Generation Partnership Project, 3GPP)定义了独

立组网(Standalone, SA)和非独立组网(Non-Standalone, NSA)的部署方式。独立组网是指不依赖于现有网络新建1个网络,包括新基站、回程链路以及核心网;非独立组网是指利用现有4G网络的部分基础设施,对核心网、基站、传输网络进行升级而形成的5G网络部署,在非独立组网的方式下,5G网络作为4G网络的补充,无法单独工作。第三代合作伙伴计划制定的标准中列举了多种网络部署方式,但目前业界尚未有全功能的5G网络商用部署案例,5G网络的架构、设备形态和部署方式都存在较大的不确定性。对于矿用5G通信系统来说,如何在井上井下部署网络设备,使其满足矿井特殊应用场景的需求,是亟需解决的关键问题之一。

满足 eMBB、uRLLC、mMTC 等场景的矿井 5G 承载网络

与4G网络相比,5G网络能提供更高的性能指标,用户体验速率达100 Mbit/s以上,支持的连接数密度达 $10^6/\text{km}^2$,端到端的时延可控制在毫秒级,这使得5G网络对承载网带宽、时延、切片、同步等性能指标均有更高的要求;而矿井现有的网络能否满足矿井5G网络承载网络的需求,如何构建矿井5G承载网络使其满足增强移动宽带(eMBB)、高可靠低时延(uRLLC)、海量物联网(mMTC)等场景的需求是矿用5G通信需解决的关键问题之一。

满足井下大巷、工作面等不同场所信号覆盖的本质安全型基站和天线

煤矿井下环境特殊,电磁干扰严重,对井下电气设备均有防爆要求,且对设备的功耗、射频功率、储能元件都有一定限制;而5G通信设备的功耗相比4G通信设备要大一些,如何设计低功耗、低成本的矿用5G通信基站及天线,是矿用5G能否落地的关键。本质安全型防爆电气设备对设备的最

大工作电压、最大电流和最大功率均有严格限制,同时GB 3836—2010对防爆设备电路中的电容量和电感量有明确限制,在煤矿防爆的要求下,如何提高5G系统的抗干扰能力,是矿用5G亟需解决的技术难题。5G通信设备工作频段高,射频信号衰减快,如何优化布置井下基站及天线的位置,使其满足大巷、工作面等不同场所的信号覆盖也是实现矿用5G在井下应用必须解决的问题。

小型化、低成本、业务灵活的矿用5G通信系统管控平台

无线通信系统通常包括核心网、接入网、承载网及通信终端等部分。核心网是无线通信系统最核心的组成部分,是整个通信网络的大脑,存放所有用户的数据,控制所有用户的权限,负责所有用户的开机关机停机鉴权、保障用户之间不间断通话,控制用户使用数据业务上网等。从1G到4G,各阶段通信系统的核心网均有其独特的设备和架构。而5G时代的核心网,采用第三代合作伙伴计划确认的5G核心网基础构架,即基于服务的架构(Service Based Architecture, SBA),将系统架构中的元素定义为一些由服务组成的网络功能,并通过统一的框架接口为任何许可的网络功能提供服务。核心网络功能的虚拟化,实现了网元功能软件与硬件实体资源分离,为实现核心网的小型化、轻量化提供了可能。

矿用5G通信系统不同于地面公网系统,其核心网没有必要像公网的核心网一样大且全面,应设计开发小型化、低成本、业务灵活、适合矿用的核心网设备,开发矿用5G通信系统管控软件平台,满足矿用5G日常运行、管理维护的需要。开发小型化、低成本、行业专用的5G核心网设备也是实现矿用5G通信应用需解决的关键之一。

矿用5G通信技术创新之路

矿用5G通信技术的发展可推动矿井物联网的

发展,能够较好地满足井下多并发、大容量、高速度和低时延的通信要求。矿用5G通信技术将重点研究解决传统移动通信无法有效支持矿山各类物联网业务的难题。结合5G通信技术的三大应用场景,5G通信技术在煤矿的主要应用价值体现在以下2点:

1) 增强型移动宽带提高了网络传输速率,用于超高清视频等大流量移动宽带业务应用,可更好地满足煤矿井下语音、视频等大流量数据的传输需求,还可促进增强现实和虚拟现实技术在煤矿井下的应用,实现基于虚拟矿山模型和混合现实技术对煤矿安全生产实施智能化监控与管理。

2) 海量物联网和高可靠低时延是针对工业领域的大规模物联网业务和工业控制推出的2种应用场景,可实现煤矿井下人与人、人与物、物与物的“万物互联”,提高矿井设备通信和大规模通信网络的传输性能。在煤矿的应用场景包括井下设备与环境监测监控、作业安全监控、人员精确定位、设备远程操控、井下车辆无人驾驶运输和煤矿机器人控制。

矿用5G通信技术除了可以提供移动语音调度通信外,还可为煤矿井下提供一套技术先进、性能优异的无线通信平台,为井下各类监测监控信息的传输提供可靠的传输通道。

综上所述,5G通信技术将满足矿井特殊网络传输环境和智能矿山物联网业务应用对移动通信网络的要求,实现矿井上井下万物互联、泛在感知,为矿山的自动化、信息化和智能化建设提供可靠的通信网络。

矿井5G无线通信系统落地实现了以下3项创新:

1) 利用光纤直连、切片分组网等技术实现矿用5G无线通信系统承载网。

2) 采用小型化5G核心网等设备实现矿用5G独立组网无线通信系统的建设方案。

3) 支持有线和无线融合的多功能5G融合通信系统业务平台。



表1 5G使用场景及其特点

5G场景	特点	煤矿应用场景
uRLLC	低时延、超可靠通信	井下无人驾驶、智能运输、智能开采、全矿井位置服务、设备远程操控、故障远程诊断、机器人控制、设备协同作业等
eMBB	增强型移动宽带、热点大容量	井下高清视频监控、语音通信、智能终端、VR/AR 矿山、混合现实采矿等
mMTC	低能耗、小数据量、大连接数	车辆运输管理、智能穿戴设备、安全监测信息采集、井下电子围栏等

矿用 5G 通信技术三大场景落地应用

矿用5G通信装备是矿山安全生产中急需的高带宽、低时延、高可靠移动通信装备。随着国家对煤炭行业加大机械化换人、自动化减人的要求不断提高，煤矿智能化程度和安全管理水平将进一步提升，对矿井通信平台的性能指标要求大幅提高，矿用5G通信的推广应用能够满足矿山智能化的发展需求。

煤矿井下现有的传感设备，因其成本较高且数量有限，无法对空间进行全面感知，只是以点带面，而矿用5G通信具备超宽带、大连接、高可靠、低时延等特点，能够较好地解决井下移动通信及大样本数据感知问题，实现井下人-机-环等多环节信息的交互、控制，构建井上井下一体化工业互联网（图1），推动智能化矿山建设进程。

5G通信技术的三大应用场景覆盖了井下通信技术的发展和方向（表1）。

井下无人驾驶及智能运输

井下无人驾驶对矿井无线网络的要求很高，无人驾驶需要大量的机端数据与云端的实时计算，每小时大概需要的数据量为100 GB。实现全自动无人驾驶的试验时间为1~10 ms，车辆须在2.54 cm内完成启动或刹车，以减少碰撞事故发生。由于5G通信技术具备大带宽、高可靠、低时延3大技术特征，为井下车辆提供高性能、高可靠的车联网，满足车载传感器与路测单元、控制中心的实时信息交互的通信需求，为车辆的定位、导航、避障、红

绿灯控制等提供通信支持，从而实现井下运输车辆无人驾驶（图2）。

井下智能运输系统，需要对井下煤流、物料以及人员运输中涉及的输送带、车辆、单轨吊等运输设备和运输对象进行整体协调；5G通信技术可实时传输、采集海量的车辆、设备、煤流、物资等环境相关参数信息，实现对输送带运行速度、红绿灯等自动控制，以提高车辆运输和设备运行效率，保证运输系统运转过程的安全高效。

远程智能 AI 控制

设备远程操控是智能化开采的重要组成部分，实现设备远程控制对通信系统可靠性、实时性的要求较高。5G通信技术所提供的99.999%的高可靠及毫秒级超低时延的网络性能，可为井下设备的远程控制提供通信保障。同时，随着煤矿智能化建设的推进，井下开采作业生成的数据量也不断增大，包括采掘设备、液压支架、输送带等主要设备的实时状态信息、环境参数以及4K超清全景摄像头AI图像等，这些数据种类多、生成速度快，必须依靠5G通信网络才能将相关信息及时可靠地传送到目的端，进而在远端实时同步跟踪工作面现场场景，下达控制指令，实现设备及整套作业工序的智能远程实时控制，提供远端浸入式操作体验（图3）。

即时语音视频大带宽业务数据传输

随着矿井信息化水平的提高，煤矿井下工作面、运输巷、各类硐室等场所安装了大量高清摄像



图1 5G三大应用场景井下无线一张网

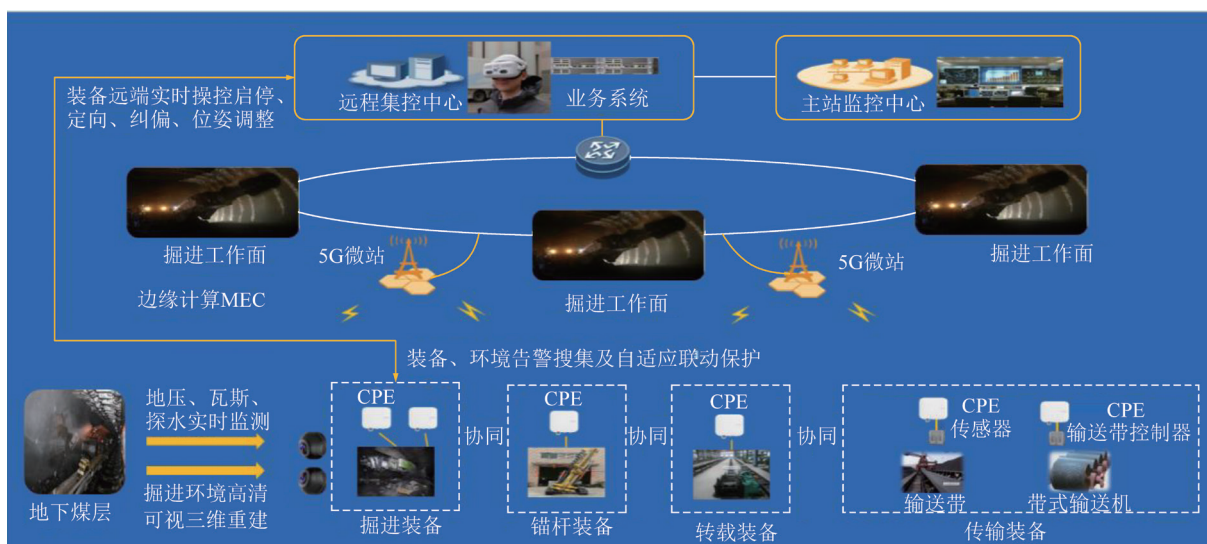


图3 远程设备智能控制



图2 井下胶轮车无人驾驶

装置, 各类巡检机器人、运输车辆等移动装备上也搭载了众多的摄像装置, 这些装置构成了矿井高清视频监控服务网络(图4)。大量高清视频信号的采集及人工智能的应用, 实现了生产作业区域的人员违规识别、煤岩介质识别、煤流运输状况识别、煤矸分拣图像识别、作业安全质量识别、设备状态巡检等功能, 提升了煤矿生产效率和工作人员作业安全性。然而, 大量高清摄像装置的应用也对网络传输能力提出了更高的要求, 5G通信技术可为单个用户提供100 Mbit/s以上, 总吞吐量10 Gbit/s以



影像应用



影像分析平台



接入

无线接入(5G+工业网关)

影像覆盖



图4 即时语音、高清视频传输与监控

上的大带宽数据传输能力，可满足矿井高清视频监控服务对网络带宽的要求。

煤矿机器人自动巡检和环境监控

煤矿开采正在向少人化、无人化方向发展，煤矿井下需要更多的机器人代替人工进行各类作业。通过智能机器人和部署在云平台上的巡检分析系统，以及加载红外热成像仪、气体检测仪、高清摄像机等设备检测装置，代替人工对井下环境进行巡检，将高清视频回传至监控中心，便于维护人员及时发现问题，可大幅提升巡检的质量和效率。5G通信网络具备的毫秒级低时延特性满足了机器人巡检、协同处理的时延要求，其高带宽特性也为机器人提供足够的带宽，并保证了高清视频及采集信息的实时回传功能（图5）。

结语

矿用5G通信系统为矿山智能化建设提供了大带宽、高可靠、低时延的通信平台，可提高煤矿安全管理水平，完善矿山物联网技术在矿井不同生产



图5 巡检机器人

环节的应用模式，对进一步在矿山安全生产领域推广新的矿山物联网技术应用具有重要意义。未来，可将相关成果拓展到矿工智能穿戴装备、生产协同控制、辅助运输、智能矿山建设等多个应用领域。

智能化矿山总体建设要求实现井下人-机-环信息全面自主感知、数据深度融合与传输、设备精准协同控制，以及各类生产系统的自主学习和智能决策。5G通信技术与物联网技术的深度融合应用，将满足矿井“万物互联、泛在感知”和各类业务系统的网络数据传输需求，实现井下全范围高速通信网络覆盖、数据全方位精准采集和高速传输、生产安全设备的精准可靠控制，从而进一步增强生产过程透明性、安全事件防患实时性、设备控制可靠性、通信网络传输性能和井下多目标相互协作能力。

■ 助理编辑：李艾稣

2021年9月，本项目被中国煤炭工业协会评选为
2019—2020年度煤炭行业两化深度融合优秀项目

作者简介：

第一作者：霍振龙，研究员，硕士，中煤科工集团常州研究院有限公司首席专家，主要从事煤矿通信、矿井人员定位等方面的技术研发工作。
E-mail: hzl@cari.com.cn

作者单位：中煤科工集团常州研究院有限公司；
天地（常州）自动化股份有限公司；
陕西延长石油巴陵素煤业有限公司

基金项目：天地科技股份有限公司科技创新创业资金专项资助项目（2020-TD-ZD004）