

基于5G互联网的高可靠性采煤机通信系统研究与展望

于颖

我国是世界上煤炭生产和消费大国，2020年全国原煤产量达到38.4亿t，全国煤炭消费量40.4亿t，占能源消费总量的56.8%。目前我国能源消耗的70%依然来自于煤炭，因此，煤炭在能源结构中的地位仍无可替代。经过40年持续不断的科研攻关与创新实践，我国煤炭工业实现了由炮采、普采、综采到智能化的跨越，并为了进一步解决煤炭工业从粗放型转变为集约型的高质量发展需求，国家大力推进煤矿智能化建设。综采工作面是煤炭开采的“主战场”，采煤机是综采核心装备之一，但受限于井下与地面数据传输能力不足、传输速度慢、通信系统可靠性差等问题，导致远程实时、常态化可靠控制难以实现。

5G具有高速率、低时延和广连接的特点。随着5G通信技术的不断发展、应用及成熟，可以利用5G技术数据传输量大、传输速度快的优势，解决采煤机在智能化进程中通信数据传输能力不足、传输速度慢、通信系统可靠性差等问题。为此，针对采煤机通信系统进行了研究，通过分析对比有线、无线、5G等数据传输方案的优缺点，提出基于5G互联网的采煤机通信系统设计思路，实现采煤机机载5G无线通信和FSK数据有线通信融合的数据冗余通信，能够大幅提高采煤机通信系统的可靠性，为实现采煤机全工作面智能化运行奠定通信基础。

新型采煤机智能化控制系统及通信需求分析

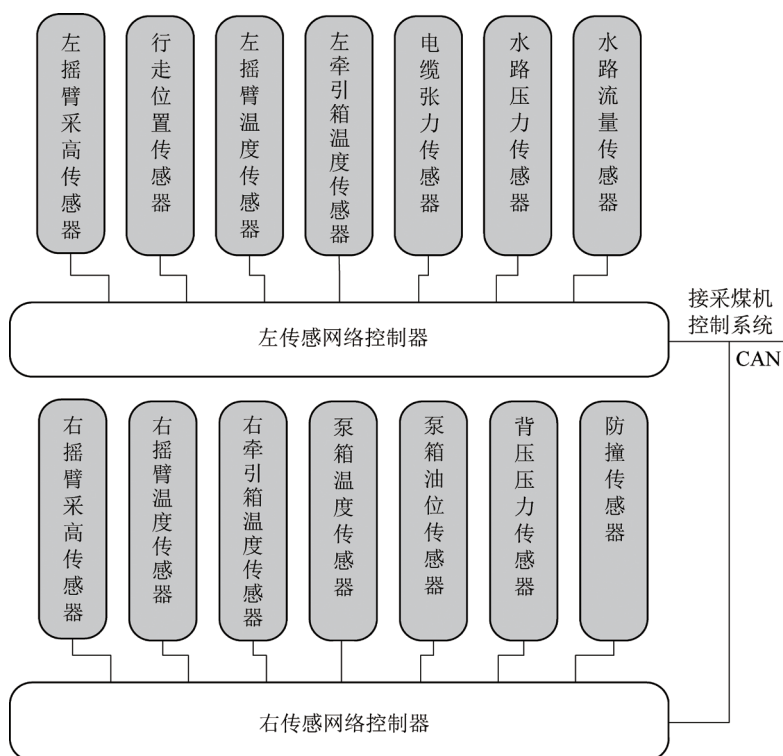
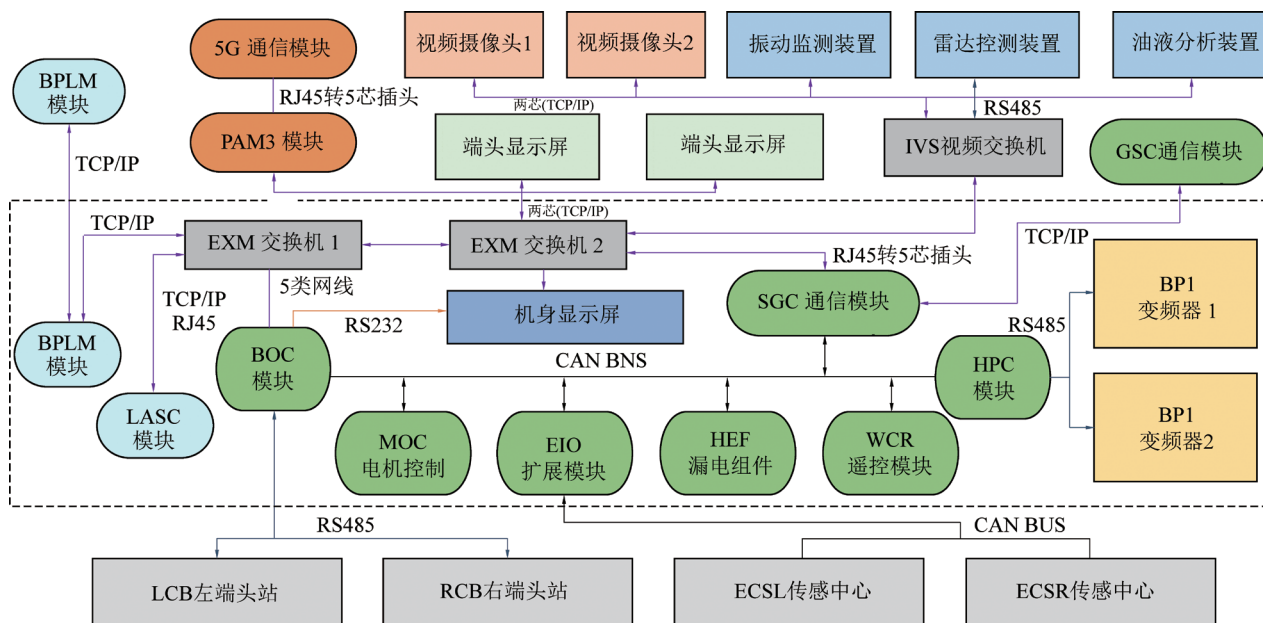
新型采煤机智能化控制系统以高性能的DSP技

术为基础，ARM处理器为核心，高可靠CAN总线及工业以太网技术为传输网络，确保采煤机上系统间数据传输的稳定。采煤机智能化控制系统原理框架如图1所示，按照采煤机行为功能划分，主要控制模块有BOC主控模块、电机控制、遥控、漏电等，采用CAN总线进行信息交互；各个控制模块分别连接控制终端，如HPC模块负责牵引控制变频器，实现牵引驱动，其余模块均类似，形成一套层次功能清晰的分布式控制系统。

针对中厚煤层大功率采煤机的结构特点，设计开发了机载本安传感系统，实现采煤机工况信息检测。机载本安传感系统网络架构如图2所示。

在采煤机左右牵引箱附近布置左右传感网络控制器，全部通过高速本安CAN总线引入采煤机电控箱内部，经过总线隔离器接入采煤机控制系统的主干CAN总线上，实现传感系统与采煤机电控系统的高速无缝连接。不同的传感器根据安装位置要求，就近接入左右传感网络控制器的相应接口。在软件功能上，每个传感器均设计了报警和保护级别，实现分级保护。机载本安传感系统在提供基本控制功能的基础上，还提供了可选配的高级智能化功能，包括采煤机到巷道的双向高速数据传输，采煤机的远程控制，采煤机多传感数据感知；记忆截割功能以及工作面自动找直等功能。

采煤机控制系统一般包含各类子系统和检测设备的交互信息，对系统的通信带宽、实时性等都提出了较高要求。CAN总线具有可靠性、自动纠错、帧管理等功能，作为控制局域网的现场总线适用于工业控制的绝大多数应用场景，但是一旦各子



1
2

图1 采煤机智能化控制系统原理框架

图2 机载本安传感系统网络构架

系统之间相互交互时，普通的现场总线就表现出带宽不足、时延过高等缺点，这时一般采用以太网或光纤网络替代。但在煤矿井下，工作面一直处于一种相互约束的动态过程中，这些线缆在工作面的运动过程中极易被损坏，从而造成通信失效。无线网

络的出现有望改善当前局面，通过在固定位置安装无线发射和接收装置，可在采煤机设备间传输数据，且能够避免有线网络的介质可靠性问题。

但是无线网络也有一定的缺陷，首先，在发射装置安装位置选择方面，尽管数据可以通过无线网

络传输,但发射装置之间还是通过有线连接;其次,无线通信也容易受到工作面液压支架等金属装备的影响,造成“镜面效应”;最后,无线网络的带宽是和环境密切相关的,其稳定性决定了应用场景的适应能力。因此,选择一个大带宽、低时延,满足接入高密度设备的无线网络是工作面信号传输的有效解决方案之一,而5G通信技术,其低时延、大带宽的本质属性,给工作面的通信传输提供了可能。

数据无线传输方式分析

5G通信技术,拥有大带宽、广连接、高可靠、低时延、低功耗等特性,其包含多个通信频段,其中6 GHz以下的频段多用于广域连接,适用于煤矿井下使用,5G通信技术主要有以下7点优势:

1) 高传输速度。5G通信网络拥有极高的速度,其峰值速度理论上,上行最高可达10 Gbit/s,下行最高可达20 Gbit/s,时隙比改造后的井下5G基站上行速率更高。

2) 高容量。5G通信网络能够支持高密度的设备连接和高容量的数据传输,5G通信网络的频谱宽度高达百兆甚至千兆赫兹,是4G通信的上百倍,因此支持更高容量的设备连接。微基站的广泛应用则进一步提升了5G能够支持的设备连接数。

3) 高可靠性。5G通信网络支持高可靠性的数据连接,其性能指标为0.001%丢包率,与光纤通信相当。5G通信技术充分整合6 GHz以下的频段以及可获取的WiFi资源,利用低频段的覆盖和可移动性以及高频段的高带宽和高速率,通过多连接技术为用户提供高可靠性通信。

4) 低时延。5G通信网络拥有极低的时延,其端到端时延的期望性能指标为1 ms。

5) 低功耗。5G通信网络得益于核心网中软件定义网络和网络功能虚拟化2项关键技术,在特定场景下可实现低功耗特性,支持高休眠或活动比以及无数据传输时的长时间休眠。

6) 高兼容性。兼容性一直是网络通信的关键难题。5G网络通信最显著的一个优势就是兼容性强,能在网络通信的应用及发展中满足不同设备的正常使用,同时可有效融合不同类型、不同阶段的网络,大幅增加应用5G网络通信的人群,在不同阶段实现不同网络系统的兼容,大幅降低网络维护费用,节约成本,使经济效益最大化。

7) 协调规划合理。5G网络通信要实现多网协作才能最大限度地发挥5G网络通信的优势,因此在应用5G网络通信的过程中,利用中央资源管理器促进用户和数据的解耦,优化网络配置,能够有效完成均衡负载的目标。

由于WiFi协议本身限制其设备的功率,使这类设备可以设计成符合煤矿安全要求的本质安全型设备,增加在井下的使用范围,并且可以改变井下无线通信长期以来一直在窄频范围的现状,使无线通信方式在井下得到更多的运用。相较于有线网络,5G网络可降低网络部署的难度及工程量,同时可以面向人员、传感器或设备提供便捷可靠的无线网络接入。统一的维护管理平台,也可以在后期使用中提升运维效率。相较于无线网络,5G网络基于调度机制,可以提供相对于WLAN更好的信号质量以及更高的频谱效率,并且还能满足不同类型的业务支持。

基于5G互联网的高可靠性采煤机通信系统设计思路及工作原理

由于煤矿井下环境恶劣,高瓦斯、高煤尘、水害渗水等环境对工作面现场影响较大。整个采煤机通信系统采用WiFi无线网络和TCP/IP协议为基本架构,以矿井工业以太环网为整个系统的主干输送平台,形成有线主干与无线终端相结合的方式和公网融合,支持终端机一机多网,并实现与现有无线系统的融合或平滑过渡。

基于5G互联网的高可靠性采煤机通信系统设计思路如下:

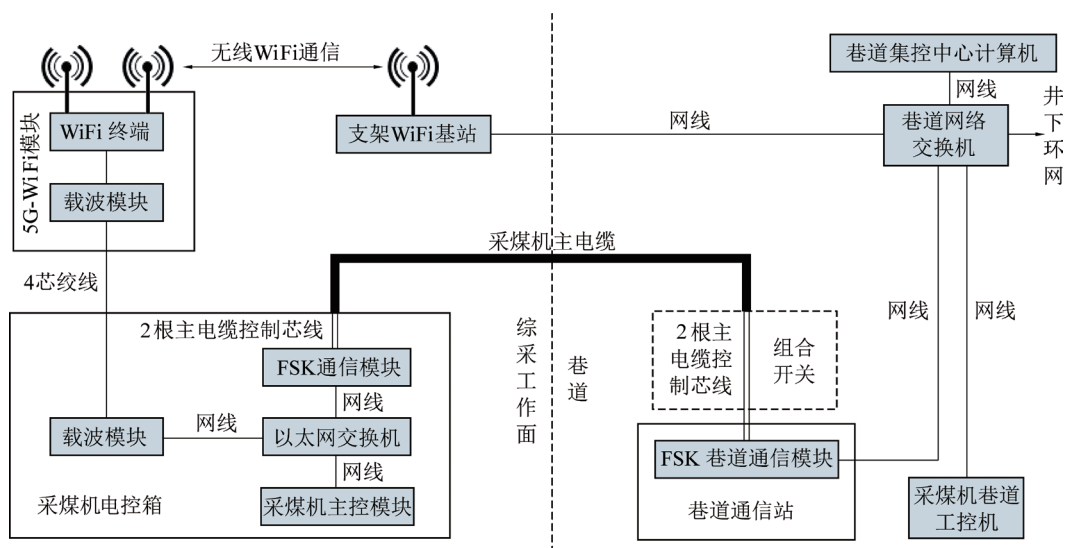


图3 机载5G模块在采煤机上的应用方案

1) 改变传统地面商用5G网络的上下行带宽，井下大上行容量更加适应矿井应用需求，进一步可使用MIMO方式实现分布式大规模应用，满足煤矿对5G上行网络容量的需求。

2) 工作面设备种类多，采集点位多，因此在5G网络应用时还融合了4G、NB-IoT的多模一体化矿用基站，满足采煤机和周边任意设备的可靠稳定连接。

3) 采煤机的远程操作首要保证的就是采煤机电缆信号的可靠，因此从采煤机到巷道控制中心可采用5G网络，巷道控制中心至地面调度中心采用5G+光纤网络的“5G+环网”传输，利用其大带宽、低时延、高可靠、硬隔离实现从工作面至地面的端到端综采网络建设方式，满足采煤机应用需求。

采煤机机身终端、巷道控制室和地面调度中心设计配置机载5G通信模块，通过工作面的5G无线基站，将采煤机的数据（包括机载高清视频、传感数据、控制信号）通过5G网络双向传输至巷道控制室和地面调度中心。机载5G通信模块设计实现采煤机数据冗余通信，即采煤机机载5G无线通信模块通过天线和工作面上布置的5G基站通信，可

与使用采煤机主电缆芯线进行FSK数据有线通信的方式并行工作，将采煤机数据传输至巷道。该通信方式为有线通信出现故障或通信信号不良时提供了通信解决方案，增强了数据传输或煤机与巷道通信的可靠性。机载5G通信模块在煤矿井下综采工作面采煤机上的应用方案如图3所示。

整个5G网络覆盖矿井部分或全部巷道及地面相关区域，可实现煤矿宽带无线通信。采煤机通信系统工作原理简单来说就是位于地面的管理主机通过交换机为进入到无线信号覆盖区域的每台手持机分配1个IP地址，并自动为其在管理软件中进行注册，将数据存入数据库，并将其调制打包后通过矿用网络交换机送到地面管理主机，经软件处理后又经矿用网络交换机送到覆盖被呼叫的手持机所在区域的节点，完成采煤机数据传输功能。期间所有经软件处理的数据都会存入数据库作为查询依据。采煤机通信系统如图4所示。

以内蒙古智能煤炭有限责任公司麻地梁煤矿为代表的端到端采煤控制为例，麻地梁煤矿完成煤矿井上井下5G网络覆盖，并实现了5G网络与工业互联网数据的有效通信，形成的多元化网络满足5G

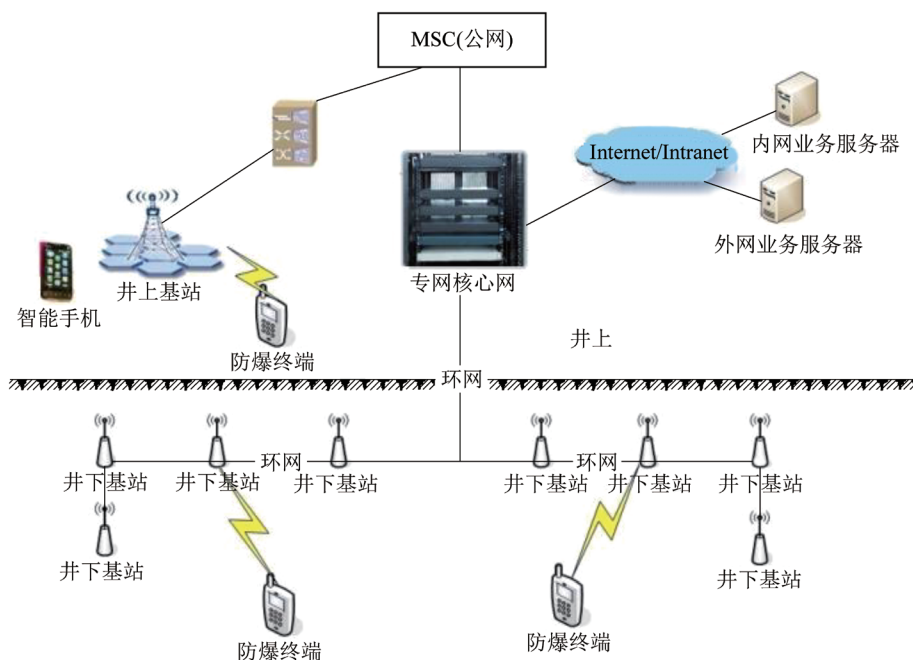


图4 采煤机通信系统示意

通信多种应用场景中的需求，主要技术思路有以下3点：

1) 双CPE链路实现煤机5G远控。通过地面煤机集控上位机至地面CPE和MEC与井下CPE及交换机的双CPE连接方式，打通了采煤机2层专有协议传输，实现采煤机端到端的5G控制。

2) 有线、无线冗余备用网络控制。通过安装冗余网络控制装置，建立了采煤机5G空口传输网络及光纤或FSK有线传输网络的双链路通信。冗余网络控制装置配套煤机专有冗余网络控制模块，嵌入L2冗余链路状态监测算法、链路切换广播风暴抑制、L4信标链路状态监测算法及网络流量监控算法等，通过定时发送网络检测报文，实现煤机5G网络通信异常时自动切换至备用有线网络，保障采煤机控制的可靠性。

3) AR双发选收技术。由于工作面环境复杂，垂直于5G网络覆盖方向的金属物很多（如液压支架），会造成“镜面效应”，干扰严重，导致采煤机5G网络时延抖动频繁，通过应用AR双发选收技术可成功解决该问题。在煤机终端与地面集控室均部署1台AR双发选收交换机，煤机或地面煤机集控

上位机发出数据，通过AR双发选收交换机复制成2组数据包，通过AR路由器、CPE2路链路进行传输至另一端AR交换机时，从2组数据中选择时延低的数据包收取组合，实现数据的可靠传输。

采煤机 5G 融合通信存在的问题与挑战

5G网络通信技术虽然在传输速度、传输稳定性上有很大改善，能适应多种复杂的场景，可有效避免现场复杂工况导致的通信故障，但考虑到煤矿井下恶劣的工作环境，亟需解决的问题有以下5点：

1) 设备类型多，需要井下部署不同的基站设备模块，其改造和认证都非常复杂。

2) 设备功耗大，进行井下防爆或隔爆改造非常困难，改造后的设备体积大、质量大，非常不利于部署。

3) 射频信号传输需要拉裸纤，无法利用煤矿井下已经部署的光纤环网，部署难度高。

4) 设备成本和部署成本以及后续维护成本高。

5) 5G的云边融合效果不佳，应用场景建设难度大。

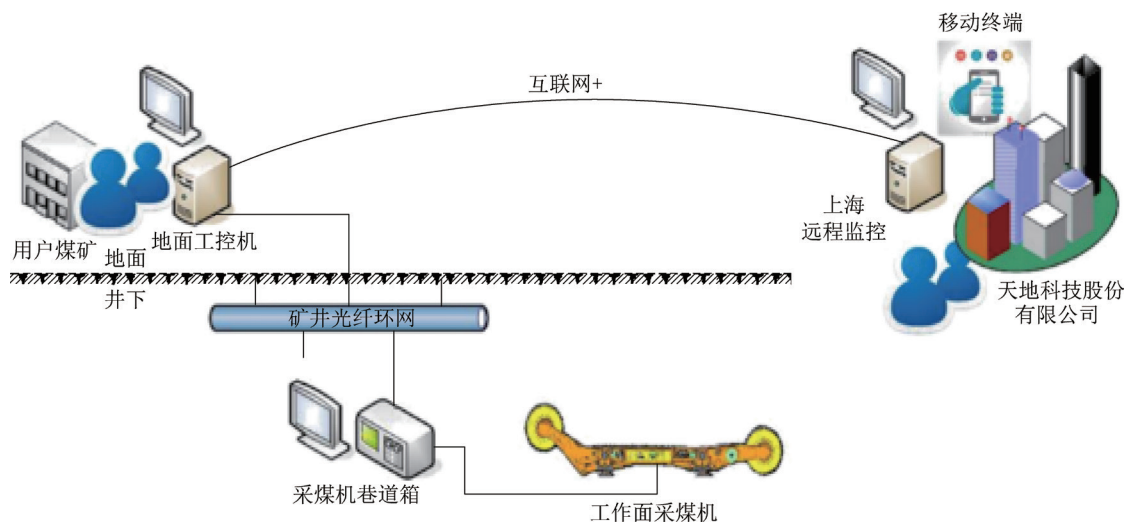


图5 煤矿互联网技术

上述问题在一定程度上制约着5G通信技术在煤矿井下的推广。

基于新通信方案的工作面智能化技术展望

虽然5G应用还存在诸多问题，但从长远看，5G的应用将对煤矿井下通信产生深远影响。采煤机互联网应用也将由工作面采煤机主机网络、采煤机到工作面平巷通信网络、矿井光纤环网、远程互联网和网络应用组成一体化监控服务体系，如图5所示。

通过应用互联网技术，可远程使用终端访问井下工作面的采煤机，通过监控实时查看采煤机运行状态，实时跟踪并监控工作面的生产状态，可以远程可视化监控诊断采煤机状态，查询分析采煤机主控系统、记忆截割系统的运行数据，为用户提供端到端的远程诊断服务；同时定期检查采煤机整体工作状态，及时为客户提供维护信息。

通过可靠的通信网络，可提供采煤机远程运维技术支持。采煤机数据通过电缆芯线或光纤到达巷道，然后接入矿井环网，再到地面调度中心；若矿方开放外网，可以在任何有网络的地方监视查看采

煤机运行状态。同时，系统还开发了远程监控运维中心的云服务，可以实时监控采煤机当前的运行情况并支持手机APP和平板应用。

采煤机运动容易导致传输介质损坏且影响光纤信号，但5G的加入不仅提供了可靠的备用网络，还解决了大带宽远距离数据传输的问题。5G+有线网络的冗余布置，既消除了无线网络受空间环境影响的问题，也在一定程度上解决了有线传输带宽低和易折损的问题。

综上，通过5G + FSK或光纤的冗余通信方式既很好地利用了无线传输的带宽和灵活性的优势以及有线网络不受干扰性的优势，又避免了无线通信受环境影响较大和有线易折损的缺点，有效地保证了采煤机对带宽、时延和通信可靠性的需求。

■ 助理编辑：李艾稣

作者简介：

于颖，工程师。Tel: 021-64382344，
E-mail: 59343708@qq.com

作者单位：中煤科工集团上海有限公司