

5G+智能化煤矿顶层设计与发展趋势

赵国瑞

煤矿智能化是转变煤炭生产方式和实现煤炭行业高质量发展的重要保障。目前，煤矿智能化发展仍处于示范培育阶段，通信系统存在控制时延高、系统协同差、数据利用率低、决策依据少、智能终端匮乏等一系列难题。5G技术以其大带宽、低时延、广连接的特性和支持边缘计算、网络切片及端到端数据传输的技术优势，为解决上述问题提供了有力支撑。同时5G作为第一个从设计之初就规划设计了应用场景的无线通信技术，不仅是整个煤矿智能化信息的载体和纽带，还是各智能化应用的赋能者，与新一代信息技术的融合应用构成了5G+智能化煤矿技术体系，将5G融入煤矿智能化是一个逐步推进和迭代进步的过程。目前，5G在煤矿智能化建设中的应用和发展仍面临着诸多问题和挑战。

5G+ 智能化煤矿顶层设计

5G+ 智能化煤矿整体架构

5G+智能化煤矿的整体架构是按照控制层级设计的，一般由感知执行层、传输层、存储分析层和控制层决策层组成，支撑了智能化煤矿初级阶段的各子系统建设。

随着煤矿各子系统的建成，系统间的协同逐渐成为影响煤矿开采效率和安全的的关键问题。为解决上述问题，逐步开发出了区域集控系统和远程调度系统，从垂直系统架构逐渐向横向扩容，形成了初期智能化煤矿的基本架构，如图1所示。

初期智能化煤矿整体架构解决了小规模、少层级系统间协同和数据共享的难题，也为生产型矿井的智能化改造提供了关键解决方案。但该架构偏向于中心化的思想，没有解决煤炭生产系统全面感知和局部敏捷响应的难题，因此远程智能化控制无法

实现常态化运行。

随着5G技术的逐渐成熟及其带来的技术革新，为从整体上解决上述问题并为煤矿智能化建设提供支撑。从5G视角重新审视煤矿智能化开采过程，打破了原有垂直层级结构和中心化思想，重塑了决策层级和数据流，整体架构由中心化思想主导的主从式层级架构演化为分布式决策和微服务支撑的扁平式架构。这种架构最大的特点是从煤炭开采和安全的核心需求出发，从5G+新一代信息技术的视角对流程和管理进行再造，既能利用物联网和边缘智能的能力保证终端系统的敏捷响应，又能充分发挥云端智能和大数据分析的优势，实现煤矿智能化开采的整体优化和高效管控，5G+智能化煤矿总体架构如图2所示。

5G+ 智能化煤矿逻辑关系

5G+智能化煤矿整体架构的改变必然带来逻辑关系的转变，5G+智能化煤矿逻辑关系转变主要体现在以下3个方面：

1) 单点逻辑向全局逻辑转变。传统煤炭开采系统多为线性的小规模系统，后发展升级为局部集控系统，但根本上每个单一决策仍然是基于单因素的因果推理。5G+大数据使单一因素推理转向多因素高效融合推理，不仅能够分析单一种类数据的时域规律和特征，还能够充分挖掘分析多种类数据时域的关联关系，从而为优化决策提供更好的支撑。

2) 主从逻辑向分布式逻辑的转变。中心化思想的总体架构决定了逻辑决策的主从关系。这种模式放在独立决策系统中高效可靠，但放在多个复杂的关联系统中则会出现“臃肿”和低效，更丧失了终端响应的敏捷性。5G核心技术之一的MEC下沉技术能够赋能边缘智能和增强边缘计算能力，形成多个分布式存在的局部大脑，根据局部场景完成快

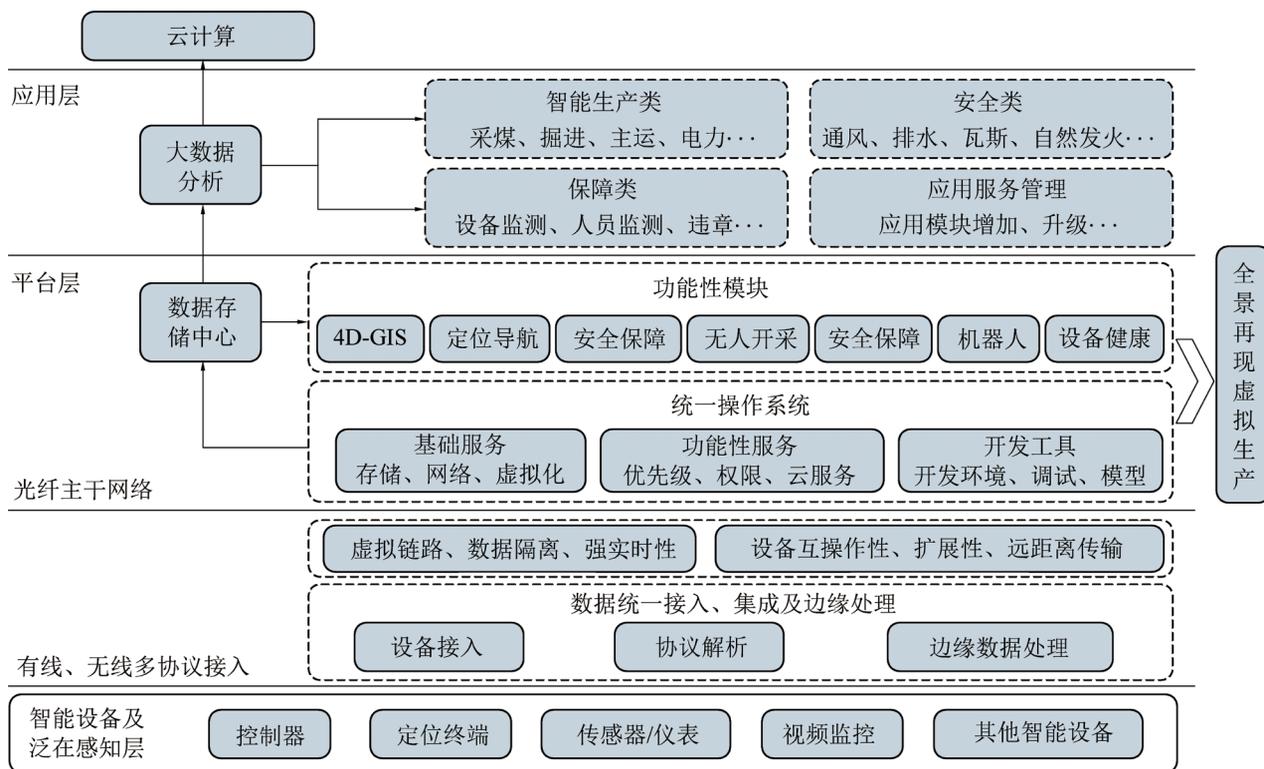


图1 初期智能化煤矿基本架构

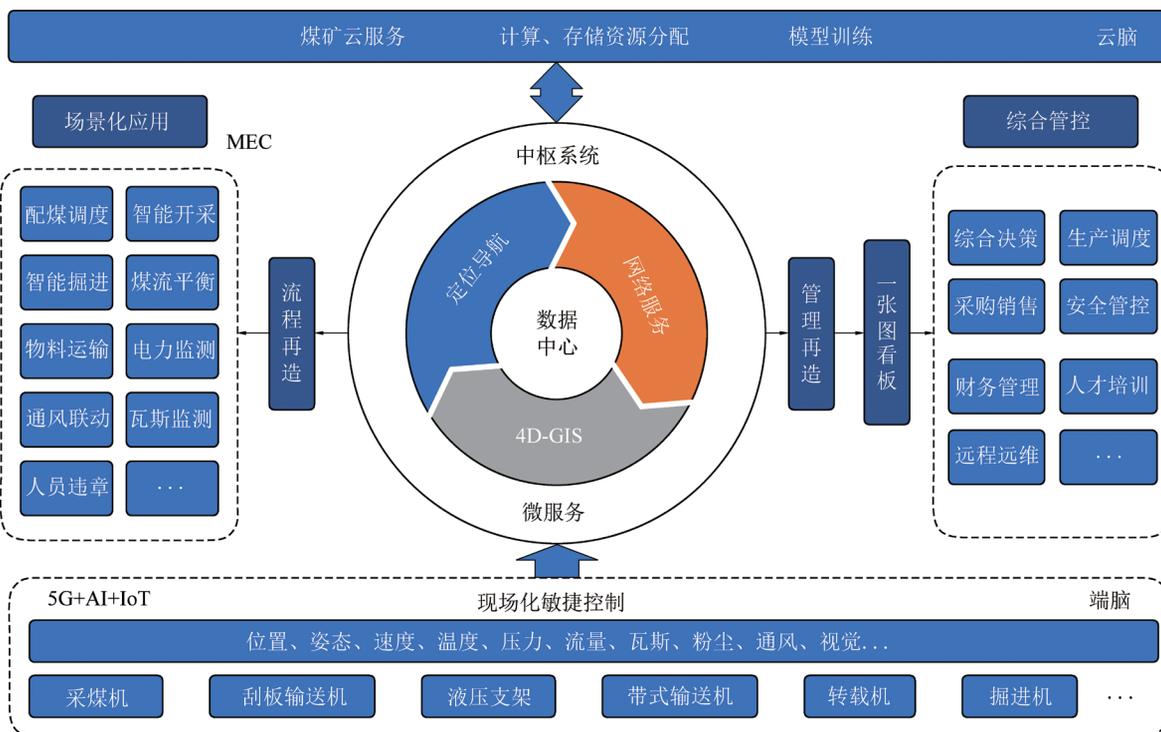


图2 5G+智能化煤矿总体架构

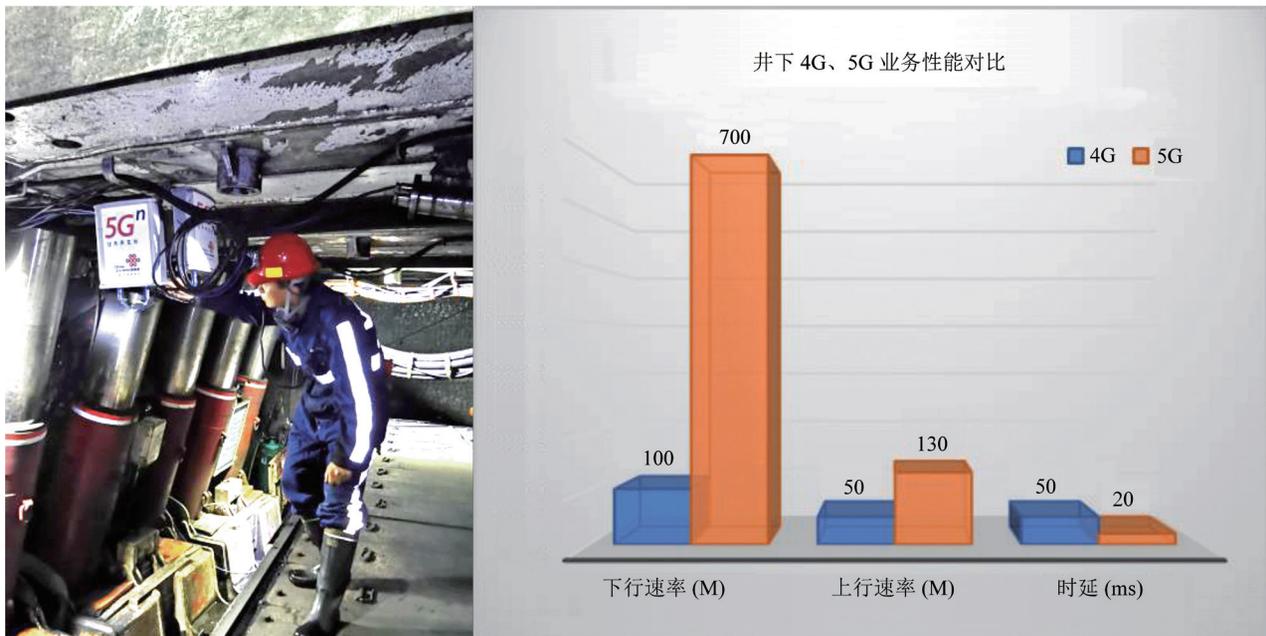


图3 张家峁煤矿5G建设及井下传输测试



图4 巴拉素煤矿井下5G安装及传输测试

速决策，提高系统响应的敏捷性。

3) 垂直线状逻辑向交叉网状逻辑的转变。现有开采控制受制于感知不全面、信息反馈不及时和决策数据时间基线不一致等问题，导致控制系统很难做出贴合实际的正确判断。5G广连接、大带宽和低时延的特性为开采环境和设备状态的全面感知提供了支撑，为不同种类数据的高速传输提供了保障，为决策数据的同步传输或同时间基线采集提供了基础，为解决上述同时间基线横向交叉决策问题提供了技术保障，使多系统的协同控制也有了可靠根基。

5G+ 智能化煤矿发展现状

智能化煤矿发展方兴未艾，5G+智能化煤矿更是处于技术探索阶段。目前各煤炭研究机构、煤炭企业、电信运营商和设备提供商等都在积极探索和测试相关技术，并在5G+智能化煤矿总体架构、井下通信技术装备、井下数据传输、应用场景测试等方面开展了大量有意义的研究和测试工作。其中，中国煤炭科工集团联合中国联合通信有限公司、中国移动通信集团、陕西陕煤陕北矿业张家峁煤矿、

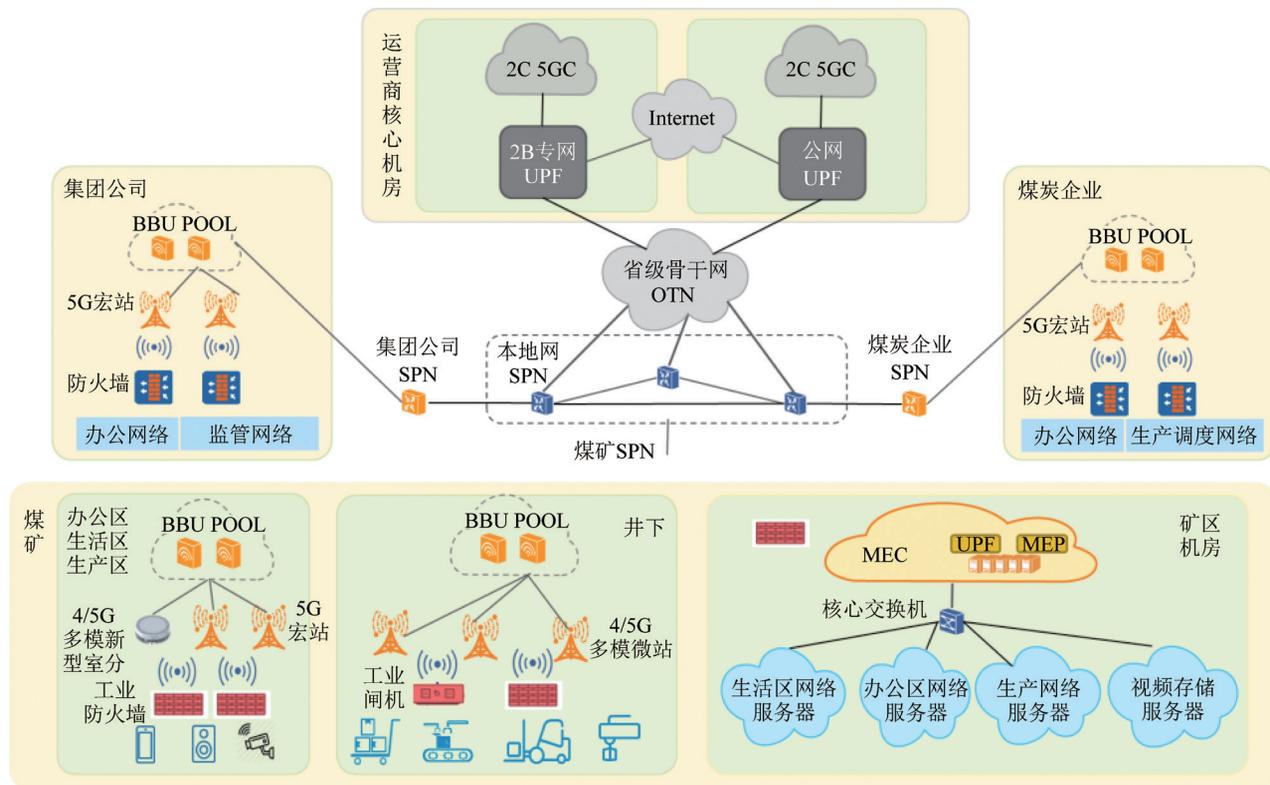


图5 中国华能集团有限公司三级网络总体架构

陕西延长石油巴拉素煤业有限公司、中国华能集团有限公司等煤炭企业分别探索出符合企业自身基础和实际需求的建设方案和关键技术，形成了具有典型代表意义的3种模式，为其他类似煤炭企业的规划设计提供了宝贵经验。

1) 张家峁煤矿属于生产型矿井，已建成4G+WiFi的网络系统。在全国尚无煤矿5G网络建设经验的情况下，采用NSA组网架构建设了矿区5G网络，并采用宏基站加室分基站的模式解决了信号覆盖范围和强度的问题，实现了地面厂区的信号全覆盖，地面实测数据传输速率均为4G的5倍以上。井下采用5G皮基站进行组网，完成井下5G数据传输测试的同时，开展5G+巡检机器人巡检测试、5G+通风机远程控制测试等5G应用场景试验。试验的成功破解了5G在煤矿应用初期类似功耗高不能用、传输距离短不能用、不能解决煤矿实际问题不能用等错误认知(图3)，具有重大意义。

2) 巴拉素煤矿属于新建煤矿，是第一个以5G+智能化煤矿思想进行全面全新设计的大型现代化煤矿。从顶层设计之初就充分考虑了5G各项

关键技术的赋能作用，如在云计算和大数据处理中心设计过程中，利用MEC技术实现算力的多级分布，为多级AI应用提供支撑；在综合管控平台设计中充分利用5G大带宽、低时延的特性开发多系统协同控制机制；在数据传输设计中考虑利用5G+AI技术减少无效大流量数据传输，降低带宽占用，同时提高数据利用效率等。在巴拉素煤矿进行的创新性实践开启了5G+应用的大门，为新建矿井的5G+智能化煤矿建设提供了宝贵经验(图4)。

3) 中国华能集团有限公司下属有多个煤矿，从集团到煤矿有集团级、煤炭企业级和煤矿级3个层级。在信息化建设过程中存在各单位信息化建设步伐不一、标准不一、网络架构不一等难题，导致难以实现统一管控。针对上述问题，提出一种基于5G技术的“集团-煤炭企业-煤矿”三级网络架构(图5)，并基于此架构详细规划了办公、安全监测、生产调度等网络系统结构，利用基于5G的有线+无线方式统一数据传输、分析和利用的标准，解决了办公、生产及安全监测过程中数据共享和高效利用的难题，为大型煤炭企业集团层面的智能化建设提供了借鉴。



5G+ 智能化煤矿存在的问题与挑战

标准规范和技术理论的制约与促进

5G相关设备在井下应用必须具有矿用产品安标认证，但目前获取相关煤安认证的标准、试验方法等仅有暂行管理办法，没有最终的规定，导致5G新装备的研发进展缓慢，5G技术在煤矿井下的应用也就极其有限。究其根源还是缺乏相关的基础研究，如井下基础电磁环境的特点，不同频率电磁信号在井下特殊电磁环境下的吸收、反射、传输和叠加特性如何，高频引发的感应电动势导致瓦斯或煤尘爆炸的临界参数如何确定，以及多天线和多频段无线电波引起的能量聚集临界点如何确定等，导致井下5G新装备的研制和矿用产品安标认证标准的制定缺乏依据，因此安全检验标准也就一直无法落地。

此外，无论是5G技术还是其他无线传输技术都取得了飞速发展，并研发出了一些新技术，原有各类煤矿井下无线通信标准已经出现了一些不适应甚至阻碍技术发展和使用的情况，因此应根据技术发展和实际安全状况完善或重新制定相关标准。

思维模式的转变与重塑

5G赋能智能化煤矿的建设，深层次地影响到智能化煤矿建设的各个方面，从而形成5G+智能化煤矿的建设模式。目前，绝大多数煤炭企业甚至高校都还是习惯于传统的逻辑架构和系统思维方式，没有将5G及新一代信息技术融入到智能化煤矿建设的总体思路中，有的仍习惯于传统的开采流程和系统划分，按照原系统依次进行堆砌建设，缺乏顶层设计和系统思维，更没有从5G视角进行流程再造和管理再造，最后建设出来的仍然是传统自动化系统的升级版，解决不了根本问题。

要实现思维模式的转变必须走出原有舒适圈，放弃原有思维，以系统思维和5G视角重塑原有架构完成顶层设计。在顶层设计指导下进行流程再造和关联关系重塑，如从单纯的建云转向结合5G技术算力的重新分配；从单纯的系统集成转向横向分布的综合管控；从传统的数据采集、传输、存储、分析

等数据流转向数据采集、分析、传输、存储、再分析等，利用5G技术实现因需而变，敏捷响应。

技术装备的滞后与创新

在经历了炮采、普采和综采的发展之后，煤机装备全面升级，综采装备更是实现了国产的全替代甚至出口。但是，现有技术装备尚难以支撑智能化煤矿的建设和发展，一些新技术和装备更是空白。

智能化煤矿的建设最终要实现煤矿的全面感知、自主决策和自主执行，但目前设备位姿、超前探测、矿山压力、顶板下沉量等重要参数尚难以测量或测量结果难以用于实际控制；各种开采装备的智能化甚至比自动化水平还低，单体决策能力尚不足，更不用说群体决策水平；多数装备执行机构的执行精度远远不够，难以实现精确控制，且单纯靠算法无法解决；在执行精度不足的情况下执行结果又缺乏反馈，执行效果没有保障。上述问题导致目前的控制系统实际处于“双盲”状态，即“感知盲”“执行盲”。

另外，综合管控平台、设备全生命周期管理技术、虚拟现实技术、地质超前快速探测技术、新型传感器、煤矿机器人、快速支护装备、新型智能终端、智能化矿灯、融合定位基站等新技术与新装备亟待研发，以支撑智能化煤矿建设落地。因此，要重视基础技术和装备的研发，硬件不升级、不变革，难以承载智能化系统；智能化系统不升级、不变革，难以支撑智能化应用，也就无法解决煤炭安全生产现阶段面临的各种问题。

业务重组与应用场景创新

目前智能化的发展出现了一个怪圈，智能化系统越来越多，看似信息化程度越来越高，应该更省时、省力、方便，但实际上系统越来越复杂、流程越来越繁琐、效率反而在降低，究其原因一是智能化的发展已经引起生产关系和生产要素的改变，但业务模式和管理方式却未随之改变，简单将现有的生产、管理模式流水化软件实现智能化，导致两者

之间不匹配、不协调；二是智能化的发展促进了控制和执行方式的改变，甚至是时空关系的改变，如孪生控制、边缘计算、远程运维等，但目前智能终端、装备（生产工具）的研发滞后，难以支撑相关应用；三是底层数据与上层业务的紧耦合，导致多系统数据重采却难以实现复用共享。因此，急需研究和梳理新的生产关系，重组新的生产要素，重构新的时空关系，解构数据与业务的紧耦合逻辑，才能充分发挥和应用5G+新一代信息技术的优势，打造更符合煤矿实际的应用场景，促进煤矿智能化的高质量发展。

管理模式与人才结构的变革

智能化煤矿中智能装备的数量会越来越多、井下工人会越来越少、软件应用会越来越广泛、人工干预会越来越少，相应的生产模式管理会改变、安全调度管理会改变、设备管理会改变、人才结构也会改变。例如，使用智能装备时，会从原有由工人观察开采环境、操作开采装备逐渐转变为监控设备运行、处理突发状况，也就意味着更多的生产工艺和工人经验会由智能装备和各类软件替代，原有的生产技术部、机电物资部、信息化部等分工管理模式会逐步与之不适应，需要拆分重新匹配甚至取消一些部门，成立一些新部门，也就是随着流程再造进行相应的管理再造。

人员结构和人才储备也会发生较大变化。一些逐步进行智能化改造的矿井已经出现人员结构与当前工作不匹配的情况，比如原有采矿专业人员占比较多，信息化人员只有1~2人，但现在智能设备配套、安装、使用和维护等工作越来越多，信息化人员已不能满足现有需求。另外，需要越来越多掌握一定信息化和智能装备使用能力的人员，还需要一些具备采矿基础、自动化控制基础和设备运维基础等复合能力的人才。此外，随着智能化煤矿建设的深入推进，智能化装备和数据将是越来越重要的资产，因此相应的高端运维、数据资产管理和分析人才将成为紧缺型人才，新的业务和模式也会随之产生。

5G+ 智能化煤矿发展趋势

5G+智能化煤矿的关键在于思维模式和内生动力的转变，是一个将技术融入矿山场景的过程；5G+智能化煤矿也是煤炭企业管理水平和运维能力不断提升的过程，是复杂的系统工程。5G+智能化煤矿目前仍处于发展的起步阶段，基础理论、技术、装备和新的模式都亟待研究和解决。

全面感知和新型传感技术与装置

全面感知是智能决策和安全管控的基础。现有感知存在以下2点问题：

1) 信息不全面，设备位姿（含相对位姿）、运行状态、综合受力和外部环境等都存在信息不全甚至没有信息的情况，如缺乏对片帮冒顶、大块煤、顶板下沉量、掘进成型以及巷道变形量等的监测。

2) 一些数据可用性差，主要体现在2个方面：
①一些数据采样没有预先分析数据特征，不分缓变量还是瞬变量，采样不符合采样定理，采集的数据本身就不能准确还原信号特征；
②综合决策多数情况下要根据不同种类数据做分析，但现有数据的时间基线不一致，不在同一时间切片下的数据反映不同时刻下的状态，理论上不能作为下一步的决策依据。因此，在重视分析煤矿已有大量数据的情况下，也要重视数据的完备性和可用性，避免大量时间浪费在数据清洗和治理上。

根据实践经验，传统传感技术难以很好地解决煤矿智能化开采全面感知的难题，一些非结构化数据的采集技术和传感装置将是一大发展方向。另外，无线传感技术、多功能集成传感装置、传感器自供电技术等将是另一大发展方向。如现在已经在开发利用的光纤光栅传感技术、视觉传感技术、5G+IoT+低功耗传感技术等。

新智能终端与智能开采装备

随着5G收发芯片的量产和不断改进，一些配备5G芯片的智能终端会逐步研发并应用到井下，如高度集成的可穿戴装备，将照明、定位、无线通



信、高清视频等集成在一起，满足井下定位、安全巡检等多功能需求。随着智能化开采需求的提升，对新技术和新装备的需求也愈加迫切，如液压支架油缸因其执行精度和速度越来越不能满足要求，相关传感和供液技术的研发成为了目前重要的研发方向；随着井下用工数量的减少，能够完成特定工作的煤矿机器人成为了重要研发方向；同样，无人驾驶技术和装备也是重要的发展方向之一。

流程再造和应用软件的研发

随着煤矿建设从自下而上到自上而下的转变，系统工程思想的逐步深入应用，5G+智能化煤矿必然对现有生产和安全管控流程进行再造，形成微服务支撑下的分布式应用场景，而流程再造和优化是一个长期的发展过程，需要长期持续不断的投入和优化。另外，支撑这一成果实现的重要基础是应用软件，相关发展方向包括统一应用平台的开发、数据库的构建、数据微服务系统的开发、数据分析处理系统或模组的研发和终端APP的研发等。可以说智能化硬件决定5G+智能化煤矿基础的优劣，而应用软件决定5G+智能化煤矿质量的高低。

5G+ 新一代信息化系统下的新模式与新业态

5G+新一代信息化系统促进各种业务的融合，将带来模式的改变和新业态的产生。如将5G与环境感知、视频监控、数据分析、AI和广播调度等技术和系统结合，将会改变现有的安全管控模式，视频监控人员不用再一直盯着屏幕看，发现问题也不用再逐帧回放，不用多方来回电话沟通和人工预警，5G+新一代信息化系统会直接实时判断生产安全情况，并在发现问题的第一时间向所有相关人员发送警报并推送险情信息。将井下生产、设备运维系统、井下井上物资库、物料运输系统和采购系统等进行联动，帮助维修维护人员及时找到或预订相关备品备件，提高维护效率、缩短订购或维护响应时间、减少停产损失等。

井下操作人员将逐渐转变或替换为井上服务人员，远程操作或运维将成为新业态，甚至会产生集

团级或一些独立的专业运维团队提供专业的运维服务。煤矿数据治理和分析将成为另一重要的发展方向，受专业性和复杂性的影响，煤矿独立进行数据治理和分析的模式将不再是大多数煤矿的发展模式，具有煤炭开采知识背景的专业化服务模式将是未来的发展方向。

装备可靠性与技术自主能力

虽然装备可靠性一直是各个阶段发展的重要方面，但在智能化煤矿发展阶段尤为重要。机械化发展阶段出现的问题多为机械故障，相对容易查找和处理。智能化发展阶段除机械装备外，还有智能控制终端和软件系统，智能控制终端和软件系统故障查找和排除需要专业知识，且相对难以查找、耗时较长，因此一旦出现故障对生产和安全的影响较大。所以，装备可靠性将是智能化开采的重要保障。此外，软件和网络传输技术的使用，意味着有可能通过远程常态化控制煤炭开采。需要注意的是，当前在国际上遇到的各种问题，不断警示我们要具备煤炭智能化开采软硬件自主研发的能力。

结 语

智能化煤矿建设仍处于示范培育阶段，5G+新一代信息技术为智能化煤矿建设提供了全新视角和技术解决手段，形成了5G+智能化煤矿建设的科学发展观，要紧紧抓住当前技术发展的契机，以煤矿实际需求和问题为导向，谋篇布局，推动煤炭行业的高质量发展。

■ 助理编辑：李文舛

作者简介：

赵国瑞，研究员，博士后。Tel: 010-84264550,
E-mail: 147466405@qq.com

作者单位：中煤科工开采研究院有限公司；
煤炭科学研究总院有限公司开采研究分院

基金项目：国家自然科学基金重点资助项目(51834006)；
中国煤炭科工集团科技专项重点资助项目
(2019-TD-ZD001)