

案例 22 山脚树矿 5G+智能化综掘系统

主要完成单位：贵州盘江精煤股份有限公司

一、主要建设内容

（一）建设情况

贵州盘江股份山脚树煤矿智能化综掘 230310 工作面在引入成熟的智能化综掘机基础之上，再次引入掘进巷道钻探、运输、锚固成套工作装备，采用与 5G 相结合的通讯方式，实现综掘工作面掘进系统数据传输高效稳定，基于综掘巷道施工作业较为繁琐的实际情况，优化了综掘工作面掘进工艺，采用多工序智能掘进系统作业方法，实现掘进巷道探、掘、支、锚、运一体化掘进机组智能作业，提高掘进面作业效率。总体布置情况分为两部分，分别为巷道“地面作业”和“空中作业”，“地面作业”主要是掘进装备，实现综掘工作面掘进机自动截割、装载、运输等，“空中作业”主要是探测、锚固、运输等，合理利用了巷道地面和空中的空间，优化巷道内锚护的作业工序，实现巷道迎头“分节拍”锚护，结合智能化和 5G+ 的控制系统，最终建成山脚树煤矿综掘全工作面成套装备自动化掘进及多工序锚护的示范面。

在瓦期抽采治理上，抽采智能化钻机增加了大容量钻杆箱及机器视觉人工智能技术，并实现了地面调度中心远程集中控制井下智能化钻机作业，一箱钻杆就能完成一个钻孔，提高了工作效率，大幅减轻了工人的劳动强度。建成了贵州省瓦斯抽采智能化打钻示范点，也为其他类似矿井的瓦斯抽采智能化建设提供借鉴。

（二）主要内容

山脚树矿智能化成套掘进系统由地面综掘系统、空中单轨吊系统、智能化控制系统、5G+掘进控制系统（如图 1 所示）组成。地面综掘系统是以综掘机为基础，增加多部锚杆装置，实现掘进智能化，锚护机械化。空中单轨吊系统主要是结合探测、锚固、运输为一体，可完成井下材料运输工作，同时可参与掘进工作，实现迎头探水、探瓦斯；并且增加两部锚杆钻机，可完成巷道内任意位置的锚固。

智能化控制系统以掘进装备姿态监控与智能感知系统、掘进装备定形定向截割系统、掘进系统协同控制及远程遥控系统、掘进机人员定位系统、掘进机集控系统为主要构成，实现地面掘进系统的智能化作业。5G+掘进控制系统主要是建设山脚树煤矿专用5G网络，地面5G覆盖山脚树煤矿绞车房和办公区，井下5G覆盖山脚树煤矿采区综掘面；在矿用5G无线通信系统基础上，运用5G网络实现对井下掘进机的无线远程控制功能，从而在远程操作的条件下，完成高效、安全的井下掘进作业，实现煤矿井下掘进工作的智能化、少人化的目标。

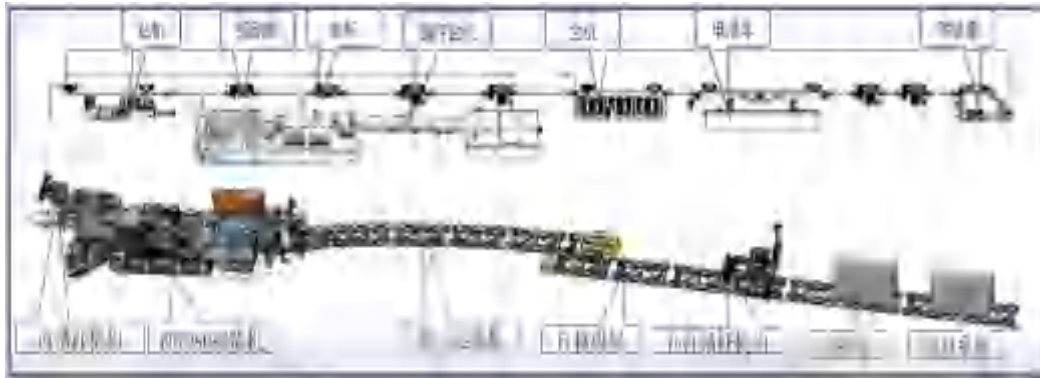


图1 智能化成套综掘装备系统示意图

1. 总体配套情况建设效果

如上图所示，总体为掘锚机+第二运输机+自移机尾系统+单轨吊系统成套方案：

- (1) 智能掘进：远程智能截割、截割轨迹在线监测。
- (2) 第二运输机：将物料转运至自移机尾上方。
- (3) 自移机尾系统：独立的液压系统，可以自行迈步前移，不需掘锚机后退拖拽；增加补打锚杆机构，用于后方锚杆施工。

(4) 单轨吊系统：单轨吊系统安装在巷道的上方，不占用下方空间，并且在单轨吊上增加超前钻探和锚杆系统，用于探水和探瓦斯，锚杆系统可以进行锚杆作业。

(5) 协同控制：协同控制成套设备，达到协调、连续、高效、安全运行的目的。

(6) 锚护平行作业：掘锚机在前面打部分锚杆，其他部件在后面补打锚杆、锚索，根据顶板条件，按同节拍作业时间分解前、后锚杆作业，实现锚护平行作

业。

掘锚机主要是在掘进机基础上增加两部机载锚杆钻机，同时优化整体结构，实现一体化作业。



图2 掘进机

自移机尾的末段有液压泵站，液压缸实现机尾迈步前移与横移功能。三运机尾向前移动时，不再需要掘锚机后退拖拽机尾，自移机尾自带动力，可以自己迈步前移，为掘锚机节省时间，提高掘进效率。自移机尾后方增设锚杆机构，锚杆机构可以用于补打锚杆或锚索，减少人工操作，见图3。



图3 自移机尾

补打锚杆机构安装在自移机尾上方，用于后方锚杆或锚索的补充施工，可有效减少人员搬运锚杆机带来的高强度劳动。整体与掘锚机锚杆部一致，保证通用性，减少配件数量。

单轨吊系统整体结构，见图4，主要分为三大部分：

- (1) 蓄电池单轨吊
- (2) 锚杆机构
- (3) 超前钻探装置



图 4 单轨吊系统

单轨吊采用防爆特殊型蓄电池单系统，以德标 I140E/I140V 工字钢为运输轨道，以车载防爆铅酸电池为动力源，与专用吊装设备配合，来完成井下材料、设备和人员等辅助运输任务，同时将超前钻机安装在设备前端，用于探水、探瓦斯，见图 5。锚杆钻机整机结构如图 6 所示。



图 5 单轨吊系统

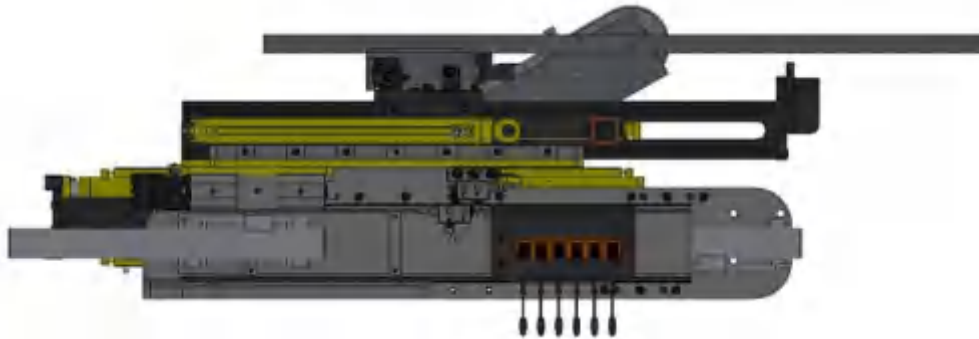


图 6 锚杆钻机

超前钻探装置钻臂通过承载连杆、调节油缸、推动油缸连接在起吊梁上，起吊梁上方加装两个承载起制小车，用于进行制动刹车。

2. 智能化控制系统部分建设效果

(1) 掘进装备姿态监控与智能感知系统

整体基于惯性导航技术的掘进机定位技术。惯性导航技术是通过陀螺仪和加速度传感计测量掘进机的三轴角速度和三轴加速度信息，通过积分运算得到掘进机的姿态与位置信息，是一种不依赖外部信息的自主导航技术，见图 7。惯性导

航系统的无源特性特别符合在井下的使用要求，目前惯性导航系统在煤矿井下救援机器人、综采工作面直线度测量与控制中的研究与应用正得到国内外的广泛关注。



图 7 掘进装备姿态监控与智能感知系统

对于掘进机位姿偏向位移的测量用激光指向仪光斑检测系统和激光测距仪实现，主要分为数据获取和数据处理，见图 8。



图 8 掘进机位姿偏向位移的测量原理图

掘进机可视化系统主要由数据采集设备、数据传输设备、核心控制设备三部分构成，见图 9。

(2) 掘进装备定形定向截割系统

基于断面自动截割成形控制运动学分析，提出了截割头空间位置坐标的检测方式，运用神经网络控制算法等建立掘进机定位断面自动切割控制系统，提出截割轨迹优化方法及工艺，提高掘进精度及效率。

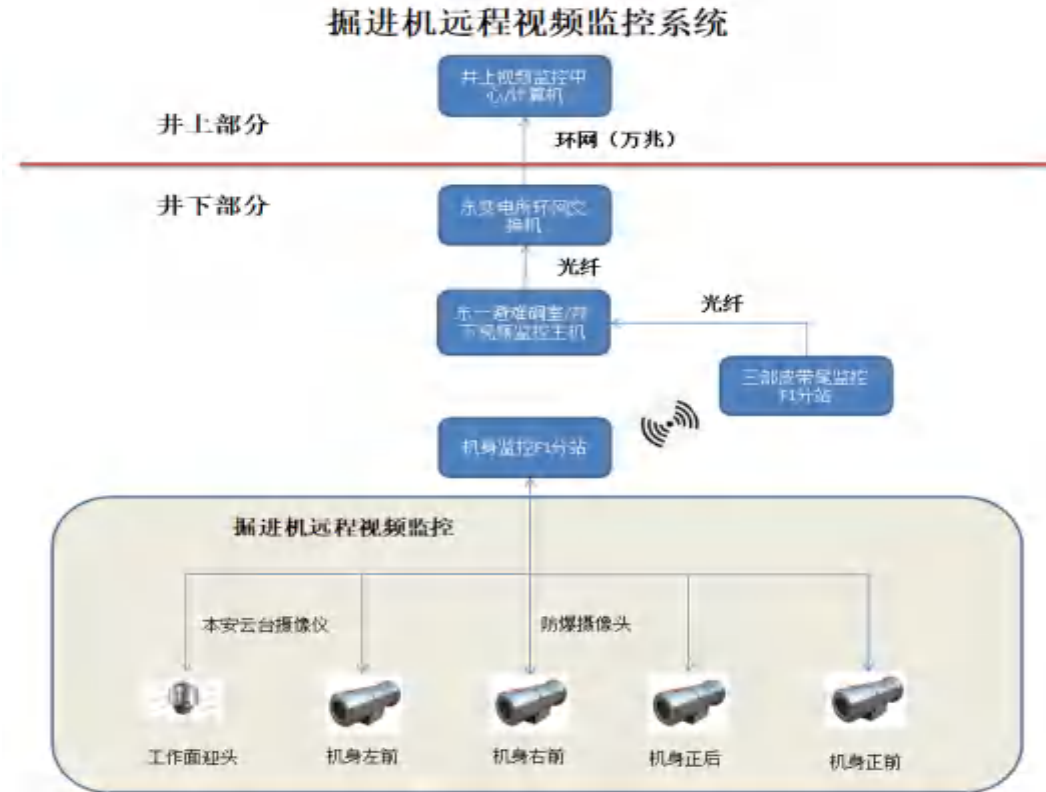


图 9 掘进机可视化系统示意图

掘进机的智能控制有掘进机行走部的智能路径跟踪和掘进机截割臂自动断面成形截割两部分。由此基于三维重建数据、期望巷道模型和截割工艺，提出了一种基于有限状态机切换的高阶滑模控制方法，并设计了控制系统。

采用云端-远程-本地三级运动控制架构，利用三维测量信息，实现截割导航与断面自动截割。利用惯性导航系统实时获取掘进机在空间巷道内位置关系，重建工作面作为三维地图。根据掘进机器人当前位姿，利用随机路图（PRM）方法，自动规划至截割面的运动轨迹。

对于掘进机来说，巷道断面的截割环境是全局已知、局部未知的准静态环境，虽然截割过程中可能发生遇到夹矸的情况，需要基于多参数对夹矸位置及截割臂的位置进行描述，但是轨迹规划是要针对掘进机的整体截割工艺流程及断面进行设计，因此采用栅格地图作为掘进机的环境建模模型，并基于该地图对截割轨迹进行规划。

（3）掘进系统协同控制及远程遥控系统

掘进系统协同控制及远程遥控技术主要包含四个系统，分别为掘进机智能控制系统、掘进机远程可视化系统、掘进机人员定位系统、掘进机集控系统。

①掘进机智能控制系统

掘进机智能控制系统主要包括数据采集与传输单元、智能截割单元、远程控制单元。

②掘进机远程控制系统

掘进机远程控制系统立足于新型机械产品技术领域，面向工程机械装备制造产业，将煤炭巷道掘进技术升级换代，解决现有煤巷掘进带来的管理、安全、环保、效率等一系列问题。系统针对巷道工作面进行研究，以一种具有实时性的掘进机机身位姿参数测量系统作为基础，提出悬臂式掘进机智能远程控制方案，研究一种新型实用的掘进机智能远程控制系统，能够长期适用于现场恶劣的采掘环境，让司机远离粉尘和现场危险地段，改善操作人员的工作环境，减少人员伤害事故，提高掘进作业的安全性。

③多机协同控制系统

掘进设备的电控系统实现对设备上多电机的复合逻辑控制和保护、电磁阀控制和比例调节、传感器数据采集、远程遥控、图形显示、人机交互等功能。各设备电控系统通过无线通信装置、机载分站 5G 模组与矿方 5G 基站完成通讯，进行数据双向交互，实现高效快速掘进系统的协同控制，见图 10。

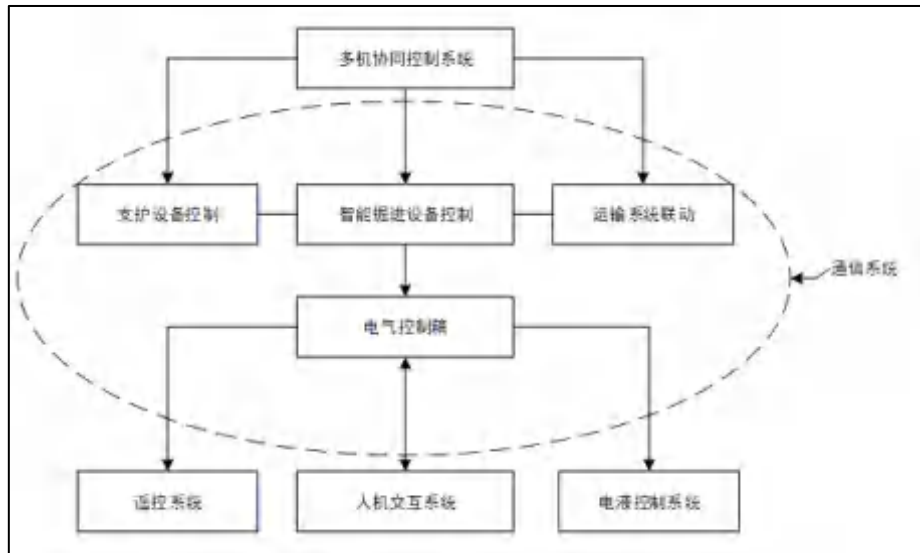


图 10 多机协同控制系统

(3) 智能瓦斯抽放钻机远程集中控制系统

智能瓦斯抽放钻机远程集中控制系统以用户为中心，遵循安全、生产与经营管理业务线，基于私有云&公有云搭建的混合云云计算平台基础，提供云平台

IaaS、PaaS、SaaS 产品服务，围绕监测实时化、控制自动化、管理信息化、业务流转自动化、知识模型化、决策智能化目标进行相应业务应用设计，提供煤矿智能化控制门户、智能监控、安全生产管理、精细化运营管理、四维时空数字化服务和智能决策支持服务，实现煤矿抽采智能管控。

地面远程集中控制系统（图 11）由矿端地面智能控制站、云端地面智能控制站和移动端智能监视站组成，通过显示屏结合混合现实和操作杆力反馈等技术实现对井下设备的远程操控，达到亲临现场操作的感觉。其中，矿端智能控制站通过模块化设计的嵌入式软件，支持多种远程通讯模式及主流工业总线，采用多项技术提高系统远程通讯的可靠性，自诊断能力强，能监视主要硬件和软件的工作状态，并通过有线或无线方式传送数据，实现设备的远程监控和故障诊断、故障保护、故障记录等功能。



图 11 地面远程集中控制系统

（4）智能化钻机

智能钻机（图 12、13、14）采用 $\Phi 73*1000\text{mm}$ 规格的钻杆，设计钻孔深度 300m，一次钻杆箱装载 300 根，钻杆净重大于 6t；倾角和方位角可自由调整；整体采用主机钻车和钻杆车分离方式。

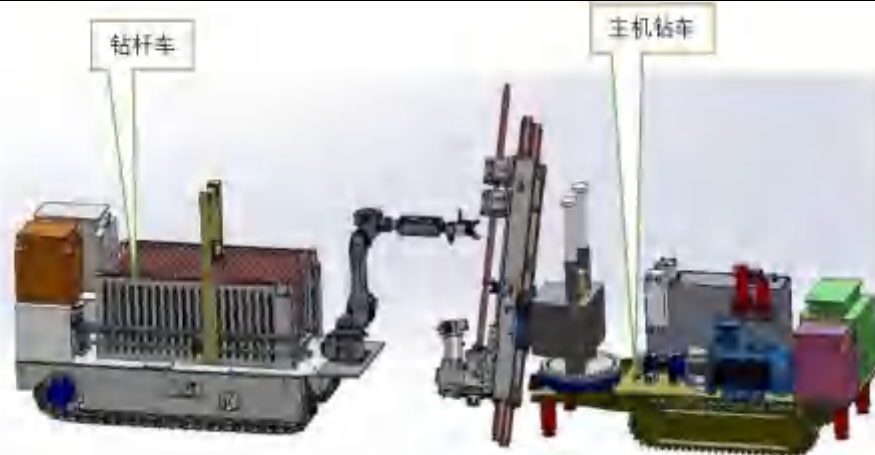


图 12 智能化钻机

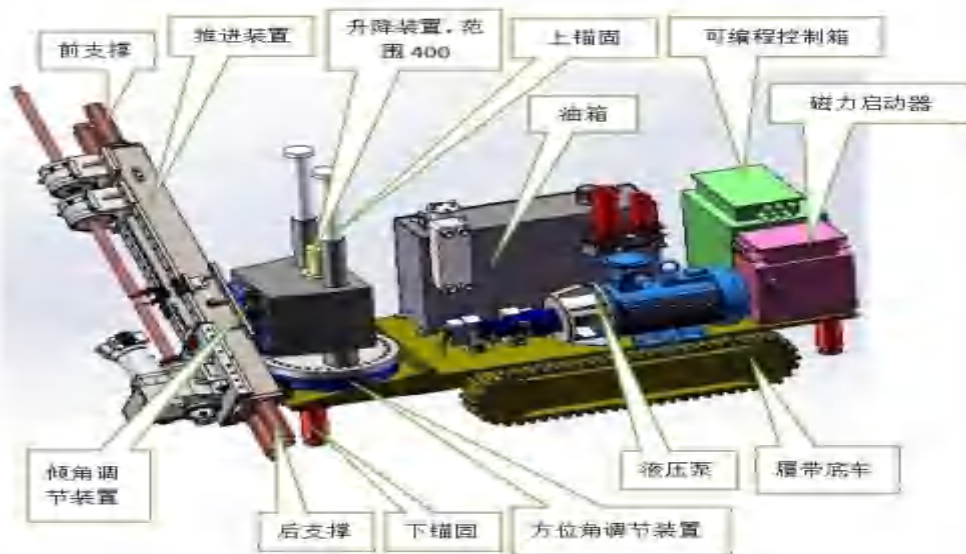


图 13 主机钻车结构示意图

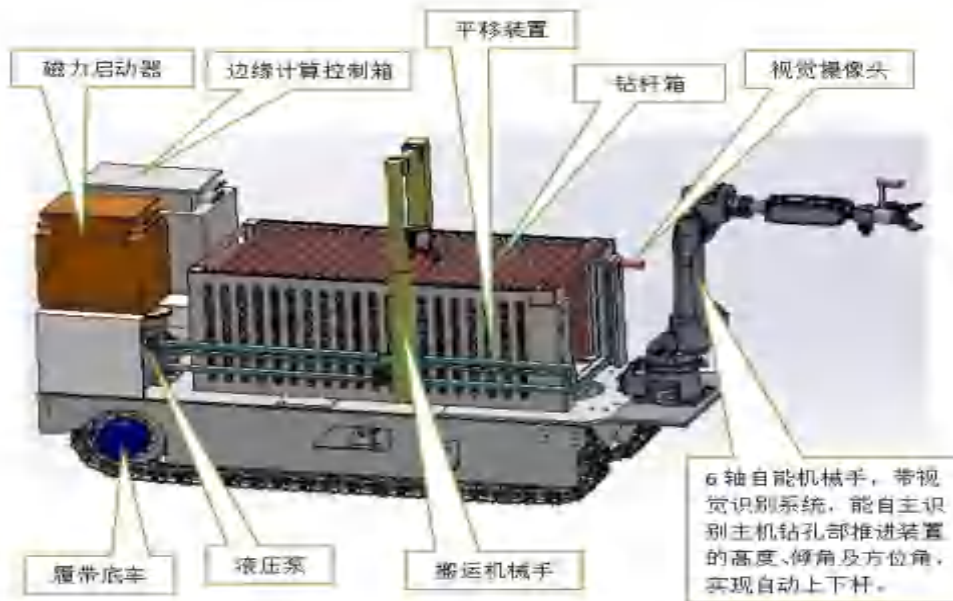


图 14 钻杆车结构示意图

(5) 钻孔轨迹测量系统

利用地面空间位置测量的成熟技术，以及基于高精度姿态检测传感器模块获取钻孔轨迹，利用成熟的无线通讯技术，实现钻孔轨迹测量系统，实现钻孔轨迹随机记录，开孔角度实时测量。钻孔内的无磁探管将数据无线传输至现场测量主机上，在测量主机上可以查看、存储、查询所获取的钻孔三维轨迹及其相关参数，钻孔轨迹测量装置配套智能化抽采钻机，协作开孔姿态角度调整、获知瓦斯抽放钻孔施工中位置偏差，在保障煤矿生产安全方面发挥积极作用。

（6）瓦斯抽采钻孔群质量评价系统

瓦斯抽采钻孔群质量评价系统（图 15）能够将钻孔数据显示为二维及三维图，并能够形成 Excel 数据报表，图形轨迹能够保存为 CAD 格式。计算机软件能够展示钻孔群的设计及实钻轨迹，形成二维及三维图形；实现钻孔质量评价数据化、对钻孔和钻孔群进行有效性评价，实测钻孔与设计钻孔比较分析、钻孔质量评价标准化和输出钻孔竣工图。其评价结果可以指导和修正钻孔施工开孔参数，修正区域或局部钻孔设计方案，从技术手段上和根本上解决打钻空白带问题，有效解决由于打钻不到位而引起的煤与瓦斯突出、瓦斯超限、瓦斯爆炸等重大煤矿安全生产问题。

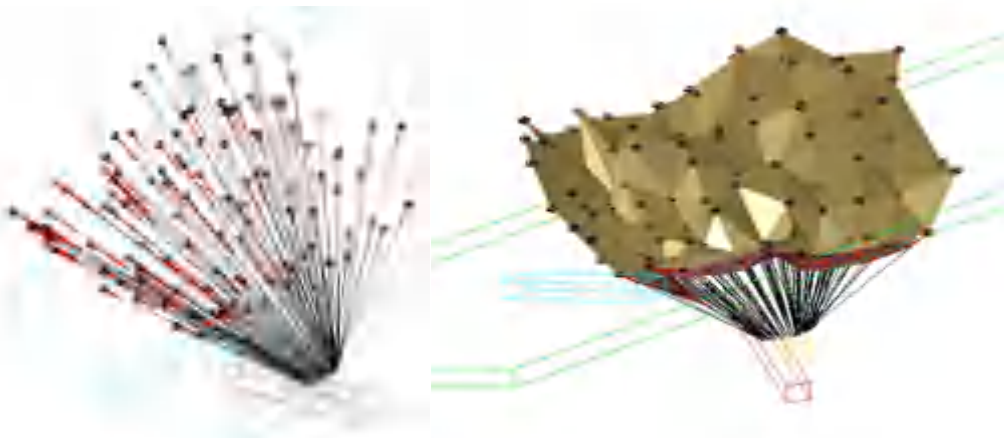


图 15 瓦斯抽采钻孔群质量评价系统

二、技术特点及先进性

1.5G+掘进控制技术

建设 5G 网络后与矿上现有网络形成清晰的组网架构、保障网络具备良好的性能；通过 5G 模组在掘进机上的安装和改造，实现基于 5G 的远程低时延控制，见图 16、17。

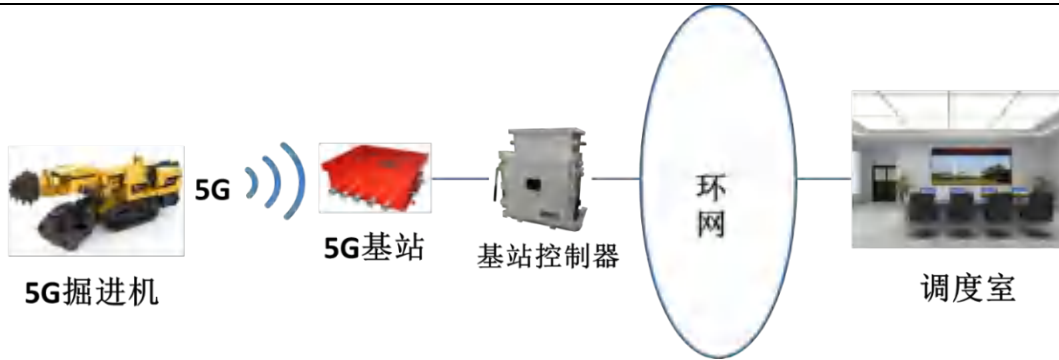


图 16 5G+掘进控制技术示意图

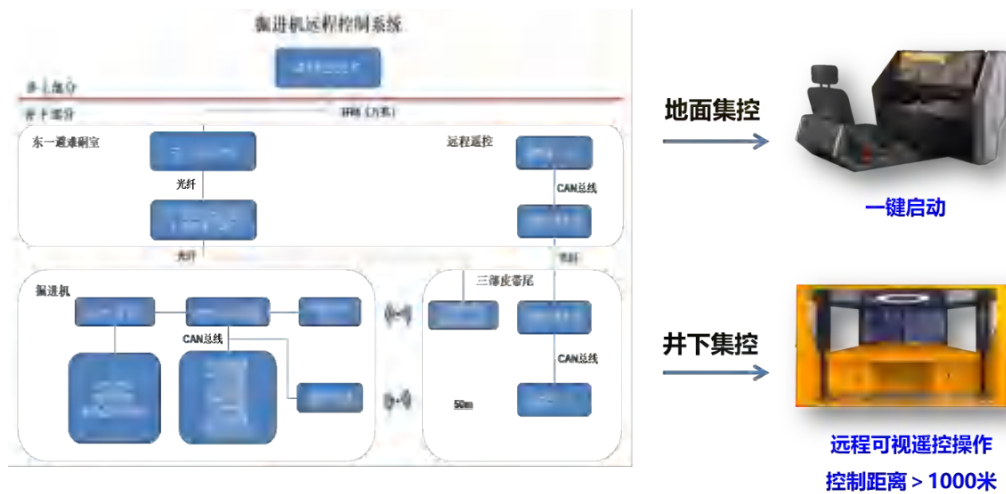


图 17 5G+智能掘进规划-远程智能控制技术

5G+掘进控制系统可实现井下环网达到 5 万兆带宽，且支持不更换设备的条件下，平滑升级至 10 万兆，在国内煤矿属领先水平；井下既建立了 5G 宽带网络，又建立了 NB 窄带网络，更加切合煤矿使用需要；全网交换机连接均可基于单、多模光纤或铜介质，可按需要任意选择；网络采用环网结构，光纤网络中的任何位置发生一个断点事故均可在瞬间内完成链路通信的恢复；主要网络节点设备均有主备切换，单一节点故障不影响整个网络使用；全网基于统一、简洁的网络管理。同时，地面控制中心远程控制井下掘进机指令传输时延不超过 50ms；井下通过遥控器远程控制掘进机指令传输时延不超过 20ms；掘进机可通过地面控制中心实现远程一键启停。

2.智能防卡钻技术

智能抽采钻机为提高钻机防卡钻自动化水平，增强防卡钻效果，结合现场施工经验，基于大数据专家库采用人工智能算法，建立以 PID 与信号选择器相结合的控制策略，实现煤矿钻机自动防卡钻电液控制系统。该系统可实现回转动力的自

适应变化，避免回转动力不足引发的卡钻，降低了系统能量损失。控制器实时监测回转压力信号，控制电液伺服阀阀芯运动，实现给进力的自适应变化；同时系统可根据回转压力自动判别卡钻程度，并自动采取相应的防卡钻措施，增强了防卡钻的效果。通过软件进行系统仿真试验，验证了自动防卡钻电液控制系统的可行性。

在自动防卡钻电液控制系统中，PID 控制器用于回转压力的控制。控制器设定值为 16MPa，输入值为油压传感器实时反馈的回转压力值，偏差值为设定值减去输入值，PID 控制器以偏差值为输入信号，在对偏差进行比例、积分、微分运算后输出控制信号。当回转压力超过设定值 16MPa 时，PID 控制器通过 3 种不同形式的控制作用消除系统偏差，抑制回转压力持续上升。

3. 机器视觉伺服控制技术。

利用工业六轴机械手臂应用在煤矿井下，通过视觉伺服控制系统判断视野内是否有待抓取钻杆，对摄像机、目标和钻机的模型进行实时校准、实时跟踪空间目标并获取抓取目标的三维位姿信息，规划抓取路径，从而控制机械手臂对目标的准确抓取。

三、智能化建设成效

（一）提高劳动效率

受工综掘工作面掘进程序繁多的影响，并且锚护作业占用时间长的影响，严重影响采掘比例失调，我矿创新地采用多种装备协同同坐，并且采用多工序“分节拍”锚护方法，实现锚杆作业分散化，实现多位置锚护并行作业，大大提高了巷道掘进的效率。同时综掘工作的施工均由人工改为机械化，并增加智能化控制系统，进一步提升了煤矿井下的安全性和智能化程度。相对于传统人工控制机械设备作业方式在效率上有了明显的提高，为矿区智能化探索与发展打下坚实基础。

（二）加强安全保障，减轻劳动强度

为进一步提升智能化水平，我矿提出了井下 5G 网络建设，实现智能掘进 5G+ 远程控制，不仅对煤矿提供强有力的无线通信网络保障，还可为井下移动音视频通话、井下传感器无线通信、移动机器人巡检、低延迟大型设备远程控制等应用

场景提供优质的网络环境保障，为煤矿智能化建设提供更多无线化应用的可能；光电缆及设备数量的减少，维护工作量下降；随着自动化和智能化系统的逐步增多，维护人员在原有基础上可维持不变甚至减少，不但提高了安全性，同时提高了作业效率、减轻了劳动强度。

（三）精准施钻，为瓦斯治理提供更加强大有效的数据支撑

普通钻机施工过程中主要依靠人工经验调节钻进参数，操作人员操作技能参差不齐，钻孔施工时出现喷孔现象或瓦斯超限时，存在安全隐患；卡钻、掉钻事故频发，无法按照钻进工况及施工工艺自动调节钻进参数，进行自适应钻进。智能瓦斯抽采钻机根据抽采工艺所设定的技术参数，以及现场传感器传回的数据，实现抽放钻孔的自动钻进、退杆、自动装卸钻杆、自适应钻进调节等。系统采集了包括压力传感器、温度传感器、位移传感器、编码器、接近开关、转速传感器、瓦斯传感器、一氧化碳传感器、流量传感器等传感器数据，实时监测钻机设备的数据（钻机的打孔轨迹、钻头压力、钻孔速度、钻孔深度、倾角度、钻杆箱现有杆数量、存取机器人手臂位置），并且该数据通过网络上传到地面控制站，实时显示进退钻过程中的状态，再结合经验数据（推进压力、钻速、图像分析等）预防卡钻、喷钻。