

## 案例 43 西湾露天煤矿 5G 多频混合组网与矿卡无人驾驶

主要完成单位：国家能源集团陕西神延煤炭有限责任公司

### 一、主要建设内容

#### （一）建设背景

神延煤炭西湾露天煤矿地处榆神地区，年产原煤 1300 万吨，露天开采境界 50.77 平方公里，被誉为陕北煤炭市场中的“白菜心”。根据“国能发煤炭(2020)63 号”文件，西湾露天煤矿列入国家首批智能化示范建设煤矿，神延煤炭公司抓住机遇，参照《煤矿智能化建设指南（2021 年版）》，围绕露天矿山单斗—卡车间断工艺智能化系统“无人化”建设，打造露天矿山卡车无人驾驶运输新标杆，引领行业发展。

#### （二）建设情况

神延煤炭西湾露天煤矿矿卡无人驾驶运输项目完成了全矿 31 台 220 吨级矿卡无人化改造和 50 台协同车辆改造，并通过 4G+5G 双专网通信系统和地测采管理系统协助支持，搭建了无人驾驶地面调度指挥中心，确保无人驾驶项目安全运行。

2021 年 11 月至今，矿卡无人驾驶运输系统开始三班常态化作业，经受住了富水露天矿山、坑洼泥泞道路、严寒低温等恶劣矿山环境考验，实现了多铲多平盘多卡车编组的工业化生产，制定了一系列无人驾驶矿山基础建设和作业标准，满足露天矿生产要求，通过无人驾驶安全评审，并获得第五届“绽放杯”智能采矿专业赛道一等奖。

#### （三）主要建设内容

##### 1.4G+5G 双网冗余通信保障

建设了 7 座 4G 专网基站和 8 座 700M+2.6G+4.9G 三频混合组网 5G 专网基站，实现了国内首个采场 4G+5G 双网冗余通信网络覆盖（图 1）。



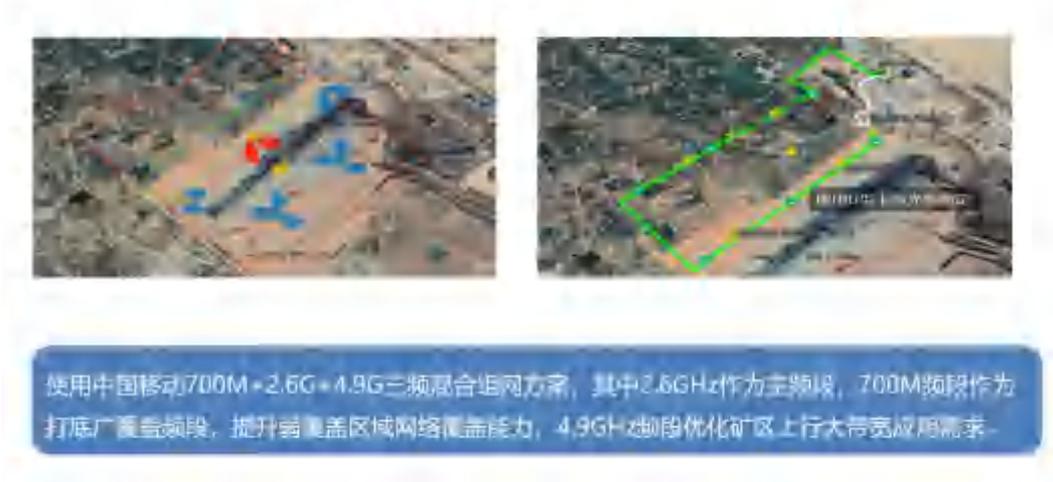
图 1 5G+4G 双冗余

利用 5G 大带宽吞吐、低时延和 4G 广覆盖优势，实现车-路-云-地一体化的多模冗余传输，最大化匹配通信覆盖能力，提高通信链路可用性，降低平盘频繁变化导致通信覆盖不足影响，保障数据传输的安全稳定性，为无人驾驶提供网络保障。5G 通信传输速率测试如图 2。



图 2 5G 通信传输速率测试

采坑 5G 网络在国内首次采用三频混合 5G SA 组网模式（图 3），以 2.6G 作为主力覆盖，同站部署 700M 提升覆盖能力，业务关键区域增加 4.9G 补充上行带宽需求，区域上行均值 50Mbps，下行均值 1500Mbps，时延低于 20ms。发挥 5G “万物互联” 功能，可支撑视频、数据、语音多业务场景的应用，为无人驾驶、无线智能调度、边坡监测等业务提供网络支撑，促进企业数字化转型，最终实现减人、增安、提效。



使用中国移动700M+2.6G+4.9G三频混合组网方案，其中2.6GHz作为主频段，700M频段作为打底广覆盖频段，提升弱覆盖区域网络覆盖能力，4.9GHz频段优化矿区上行大带宽应用需求。

图3 中国移动 700M+2.6G+4.9G 三频混合组网方案

### 2.地测采管理系统支持

根据无人驾驶技术水平及结合煤矿生产实际需求，以管理系统+工具为建设思路，以 5G 信息化网络为平台，采用多层编程架构设计开发，建立具有三维可视、云端协同、智能决策特点的地测采管理系统，实现无人机扫描数据成图、自动算量，自动布孔、爆破块度预测、爆堆形态模型、采矿设计、境界优化、自动排产、运输路径优化、排土容积计算等功能，为无人驾驶提供技术支持，主要实现以下几点：

(1) 通过资源储量管理建立了包含煤质、含矸率、硫分等关键信息的原始储量模型，为无人驾驶、采矿设计、防排水设计等提供了三维详实的地质模型（图 4）。

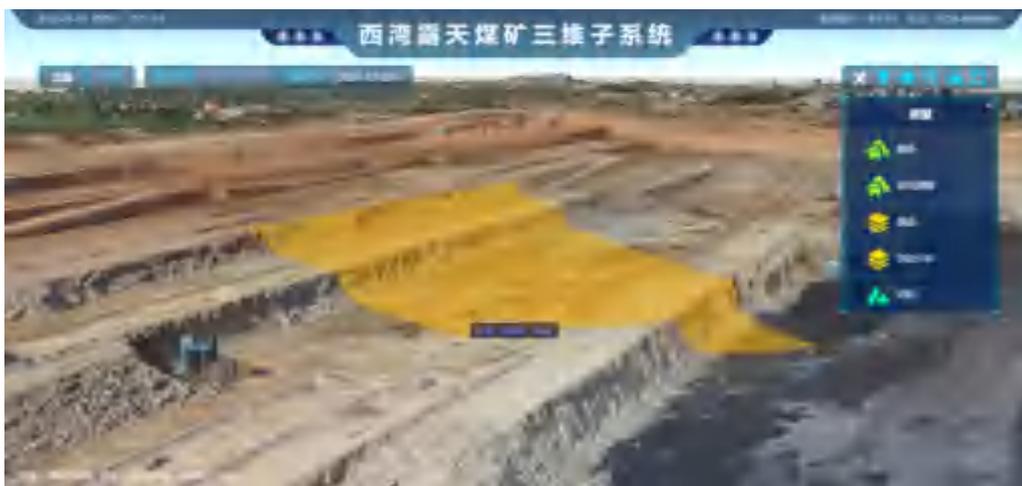


图4 三维地质模型

(2) 采用车载、机载三维激光扫描技术快速获取矿区高清影像数据和高精

度激光点云数据生成三维模型（图 5），为无人驾驶作业提供地图、地形数据。

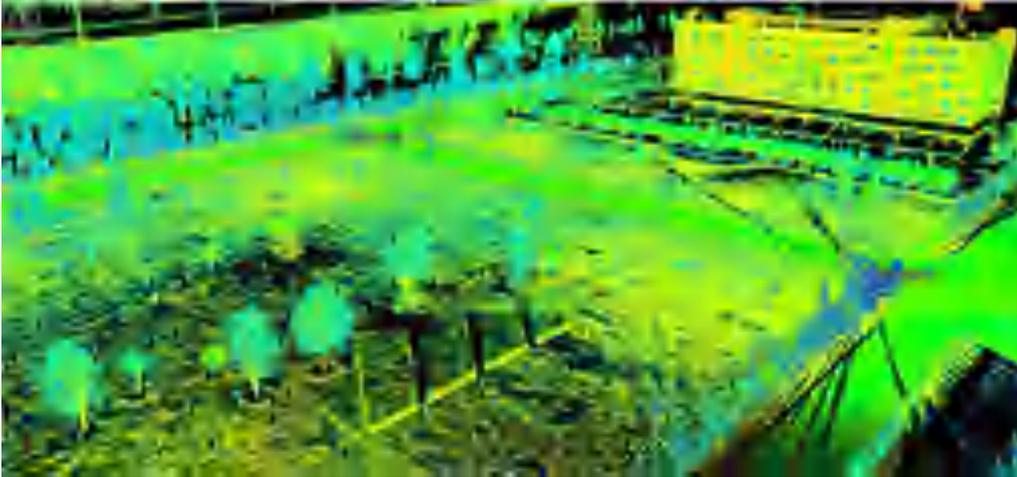


图 5 激光点云扫描

（3）以地质勘探及测量数据为基础资料，建立西湾露天煤矿三维采矿模型，实现开采境界、开采程序、排土场优化及中长期规划、月度、年度设计（图 6），布置无人驾驶生产作业任务，准确规划无人驾驶作业场地、运输路线及排土场。



图 6 三维展示系统一月度计划

### 3.无人驾驶安全性验证

无人驾驶安全性验证先后进行了空载试验场、土方重载试验场、半封闭重载岩石剥离试验场、全开放重载实际作业场等，各阶段循序渐进、由易到难，验证过程科学合理，历程记录清晰。无人驾驶系统安全解决方案如图 7。



图 7 无人驾驶系统安全解决方案

(1) 空载场地主要完成车辆线控标定检测，车辆牵引制动性能有人/无人模块对比，无人驾驶的功能试验、性能、安全导向试验实验，模拟实际作业场景进行问题复现分析解决。

(2) 土方重载试验场进行重载作业模式下安全性能、车辆协同、动态安全防护、挡墙排弃、入铲装载作业等测试过程中出现的问题，在土方现场和空载试验场复测并解决。

(3) 半封闭重载岩石剥离试验场为矿山实际生产场地，解决了入铲装载、水坑坑洼路面、排土场卸载等地点易散落物料及岩石采运过程无人与有人车辆协同作业、协同防护等问题。

#### 4.无人驾驶技术攻关

聚焦无人驾驶矿卡运输现场场景匹配问题，通过不断的技术提升和运营管理模式优化，高效解决无人驾驶运输实际生产过程中的各类难题，逐步提升矿卡无人驾驶运输系统安全和效率。无人驾驶系统架构如图 8。



图 8 无人驾驶系统架构

（1）地图融合：基于激光雷达及组合惯导的精确地图边界采集算法，地图采集更加便捷、精确，基于协同车辆的地图动态融合，装/卸载位动态融合更新周期 $\leq 2s$ ，常态化动态更新周期 $\leq 2min$ ，解决矿区作业平盘装/卸载区快速变化导致地图不准的问题，同时用于地测采管理系统地图更新。

（2）路径规划：基于图搜索+最优控制的全局路径规划算法，解决复杂矿区内全局路径场景的规划效率低、曲率超限等问题。1km 全局路径生成时间 $\leq 500ms$ ，解决百种路况场景最优规划路径生成问题。

（3）智能配车与调度：建立卡车智能调度管理系统，实现多方位数据监视、统计、查询及分析等功能，并生成生产报告；作业侦测车执行首趟路况探测，系统基于探测结果完成线路调整，根据运距智能分配编组车辆，实现车-铲-卸智能匹配；地面安全防护模块，根据路权计算和优先级保障卡车在电铲附近正常通行和排土场内多车同时排土作业（图 9）。



图 9 无人驾驶多车协同作业

#### （4）无人驾驶管理保障

建立决策和故障分析知识库，完成 453 项应用场景安全风险点梳理与生产作业测试，编制涵盖通用要求、协同作业、通信要求、车载/地面系统等 10 项作业标准，设计车载控制、协同车辆、应急接管、地面控制四层防护与 4G+5G 双层网络通信一层保障，确保系统安全。

#### （四）建设经验

##### 1. 科学推进聚焦场景匹配

矿卡无人驾驶从线控改造到实际融入生产作业，历经了空载试验场、土方重载试验场、和半封闭/开放式作业重载试验场。为无人驾驶落地提供场地建设、建

设标准、作业规范和管理支持，循序渐进每个阶段无人驾驶场景适配，技术攻关。

## 2.运营与技术协同

共同探索高效安全解决方案，构建常态化多层次沟通交流机制。通过参与班前会，了解作业计划作业环境，进行常态化的问题沟通交流改进，生产人员与技术团队深度融合，共同推进管理办法和建设标准，强化管理与技术互补，以实际生产为目标牵引，加速项目推进，技术深入一线生产现场，聚焦问题处理，快速响应。无人驾驶安全和效率的提升是长期优化改进的过程，通过技术+运营管理模式变更，双轮驱动，矿方与卡车无人驾驶系统供应商互相促进，加强运输作业模式变更后的运营管理、技术培训。路面条件提升将促进无人驾驶作业的安全和效率提高，反之无人驾驶通过信息化智能化手段推动工务精准标准作业等，从而逐步推进全矿智能化水平。

## 二、技术特点及先进性

### （一）技术特点

#### 1.系统多维度安全保障

车辆设备可靠：国内首次出厂即完成智能化改造：不改变原车操作、不影响原车功能及维护、不降低原车安全性能；全面监测车辆状态信息。

动态安全防护：精确计算最小追踪间隔，建立决策和故障分析库，保障系统安全。

#### 2.矿区极限路况自适应

复杂路况感知：多种传感器及学习方法的融合，实现极小障碍物的远距离精准全检测。

自适应规划控制：匹配上百种路况场景生成最优规划路径，预判且自适应调整策略，准确安全控制车辆。

#### 3.生产全流程集群调度

依托工务车辆的动态建图系统：为适应装卸载区快速推进和地图实时变化需求，通过全矿区的无人驾驶矿卡车载雷达与摄像头，结合协同车辆的位姿信息，精确采集地图边界，动态实时更新作业地图，无需依靠额外地图采集设备，将地

图更新融入车辆生产过程，不影响生产效率。



图 10 多车智能编组调度

以地面为中心的全局调度系统：以地面为大脑，对全局车辆统一优化调度，提升生产效率。局部自主智能决策的车载系统：局部场景智能决策，极大减少修路、移动基站的等待时间。

### （二）适用及推广范围

本项目的实施，可形成一套智能煤矿（露天）标准体系，提升集团内部露天板块的整体竞争力，带动我国露天煤矿的智能化应用，提升管理水平。同时，相关技术可应用于干线物流车、港口运输车等，推进车辆智能化与电动化技术发展，构建生态社会。

### （三）先进性及成熟度

- 1.是国内首个一次性通过 33 检测项点的无人驾驶线控改造车辆；
- 2.多编组智能调度技术：实现动态编组下的抗扰动实时调度和效率最优下的编组集群安全防护调度；
- 3.“四层防护，一层保障”：卡车、协同车、远程驾驶、地面控制四层的基于“原车+线控+软件”的安全导向防护体系、“4G+5G”双网冗余的保障技术；
- 4.挡墙精准识别技术：采用感知 AI 技术，精准识别挡墙高度、形态。

## 三、智能化建设成效

- 1.该无人驾驶项目满足露天煤矿生产要求，通过无人驾驶安全评审，并获得第五届“绽放杯”一等奖；
- 2.国内首次无人驾驶岩石生产作业量突破 582 万立方米，累计运行里程超 17 万公里的无人驾驶作业系统；
- 3.国内首个采用 4G+5G 双网冗余通信的无人驾驶项目，保障“车-路-云”

高安全、高稳定的数据交互；

4.建立运输安全数据库。根据《IEC 61508 标准》，基于人、机、环全流程作业梳理出 453 项安全风险点；引入轨道交通列车安全防护系统理念，建立决策和故障分析知识库；

5.基于专家系统的完备应急处置机制，建立不同层次的性能评估模型，实现系统整车全方位 110 余项状态在线监测与故障预警，防止系统“带病运行”，保证系统安全。