

白云鄂博铁矿智能矿山建设与实践

王国栋, 付永强, 高永峰, 章发光, 霍光

(包钢(集团)公司白云鄂博铁矿 内蒙古 包头 014010)

摘要: 以包钢(集团)公司白云鄂博铁矿智能矿山建设为例, 论述了白云铁矿智能矿山生产调度系统、矿用汽车无人驾驶系统、采矿设备远程操控系统、智能矿山安全管理信息平台等子系统(模块)的建设情况, 实践证明, 智能矿山可提升生产效率、矿产资源利用率、设备本质安全水平, 降低矿山运营成本。在建设实践过程中, 总结了需关注的关键点、难点及建设经验, 提出了相应解决思路, 以缩短建设周期, 降低资金投入, 为矿山企业智能化转型提供借鉴和参考。

关键词: 智能矿山; 生产调度; 无人驾驶; 远程操控

Practice and exploration of intelligent mine construction

WANG Guodong, FU Yongqiang, Gao Yongfeng, Zhang Faguang, Huo Guang

(Baiyunebo Iron Mine of Baotou Steel Group, Inner Mongolia Baotou 014010)

Abstract: Taking the construction of Baiyunebo iron mine intelligent mine of Baogang Group as an example, the construction of subsystems (modules) such as intelligent mine production scheduling system, mine truck driverless system, remote control system of mining equipment and intelligent mine safety management information platform is discussed. It has proved that intelligent mines can improve production efficiency, mineral resource utilization, equipment intrinsic safety level and reduce mine operating costs by practicing. In the practical process of construction, the key points, difficulties and construction experience that need to be focused on are summarized, and corresponding solutions are proposed, shorten the construction period and reducing capital investment, which provides useful reference for the intelligent transformation of the mining enterprises.

Keywords: Intelligent mine; Production scheduling; Unmanned driving; Remote control; Intelligent decision-making and analysis platform

1 引言

白云鄂博铁矿是举世瞩目的铁、稀土、铌、钽、萤石等多金属共生(伴)矿, 是我国西北地区储量最大的铁矿, 现已发现有 71 种元素, 182 种矿物, 已探明铁矿石储量 14.6 亿吨; 稀土储量约 1 亿吨, 居世界第一位; 铌氧化物储量约 660 万吨, 居世界第二位。2022 年 8 月 18 日召开第五届白云鄂博资源战略研讨会, 14 名中国科学院、中国工程院院士和专家们深入交流, 达成共识, 对白云鄂博资源巨大的发展空间和良好的发展前景充满期许。近年来, 在详细查明铁矿体产状、规模、品位等特征的基础上, 对稀土、铌、萤石、富钾板岩等共伴生矿产进行了评价, 在白云鄂博矿床开展反射地震-重力-磁法-电法综合勘查技术方法示范, 深部勘探取得重大突破, 根据目前工程控制, 预计新增铁矿资源量超 2.28 亿吨, 伴生稀土资源 800 万吨。2022 年 12 月 2 日, 由包钢(集团)公司与中国地质科学院矿产资源研究所联合成立的白云鄂博科学研究基地研究人员发现并申报的自然界新矿物“白鸽矿”, 获得国际矿物学协会新矿物命名及分类委员会高票批准通过, 再次刷新白云鄂博矿物数量, 成为在白云鄂博矿床中发现的第 16 个新矿物。白云鄂博矿产资源接续和综合利用工作大幅延长了矿山服务年限。

白云鄂博铁矿 1957 年 2 月建矿，现已进入深部开采阶段，面对更加复杂的地质构造与条件，使得开采工艺与边坡治理难度骤增，无形中矿区的生产环境变得错综复杂，势必造成

涵盖铁矿开拓、采矿、运输、通风、安全保障、经营管理等环节的工人劳动强度增高、工作安全风险变大以及设备运维成本增长，对此亟待构建“智能矿山”以期解决生产、安全、效率、成本、人员短缺等一系列制约铁矿高质量发展的瓶颈问题。目前，随着 5G、人工智能、大数据、机器学习等先进技术的迅猛发展，在 2018 年 9 月，启动“5G 网络条件下无人驾驶及操作的智能矿山技术的开发及应用”项目，其深度融合智能化采矿设备（如无人值守的大型钻机、电铲等）、高效的数据传输（如 5G 技术）和大数据的高阶分析（如深度神经网络等 AI 算法）等技术，通过自感知、无人化、智能化来赋能白云铁矿的安全、高效、绿色开采，勇担资源强企重任为包钢的高质量发展筑牢钢铁产业基石。

2 白云鄂博铁矿智能矿山建设概况

建设目标：“实现少人矿山、无人矿山、安全矿山、高效矿山、绿色矿山”。逐步实现开采面、掘进面、危险场所以及大型设备的无人作业，最终达到矿区 5G 网络全覆盖，整座矿山的生产均由远程操控设备、智能设备完成，具体如下。

2.1 智能矿山生产调度系统及智能控制中心

智能矿山生产调度系统，采用北斗及 GPS 定位技术、矿山系统工程及优化理论、地理信息系统（GIS）等技术，涵盖穿孔、爆破、采掘、运输等生产工艺各环节的智能调度指挥系统。通过采集设备动态信息，实施监控和优化矿用汽车、电铲及辅助设备的运行，自动统计产量、运距、设备开动率、台效等生产指标，通过计算机综合调度模型实现露天矿生产目标的实时监督、分析及动态调整，包括自动配矿调度、优化车铲配比、优化动态调度、自动统计产量、人员绩效考核、设备效率分析等，实现铲、车实时运行、高度及匹配管理的精细化，从而形成集信息化、智能化为一体的新型调度控制系统和全方位的生产管理控制自动化决策平台，优化生产调度流程和管控环节，提高指挥效率。

智能控制中心集指挥调度、智能决策、音视频系统、视频指挥、图象监控、集成控制等功能，构建能够快速响应生产调度、实时指挥、紧急救援与智能矿山生产调度系统一体化协同控制系统，实现业务之间的关联互动。实现无人驾驶、远程操控（电铲、钻机、工程机械、破碎机）、智能矿山安全管理信息平台、智能供水、智能供电等全矿智能化系统集成，基于 5G 网络的指挥系统将所有的生产和管理数据在指挥中心集成管理，数据及时、准确、集中并共享。通过多屏联动，调度人员对生产过程随时监督、分析和调整，为生产组织和管理者提供决策数据支撑。利用大数据和人工智能，实现矿山安全、生产、运营等方面管控的快速分析及智能决策，实现生产指挥中心到各岗位的直接管理，实现生产指挥中心与各部室、各级管理技术人员之间信息的及时传递，以实现生产系统智能化调度。智能控制中心指挥大厅后部为采运设备远程操控台，电铲、钻机在指挥大厅内操控设备生产，实现统一指挥、协同作业、安全预警等功能，艰苦岗位操作人员具备白领工作条件。

2.2 矿用汽车无人驾驶系统

矿用汽车无人驾驶系统研发经历单车模拟、编组联动、工业试验三个阶段。基于车载多传感器主动融合的多目标识别和道路可行驶区域感知方法，攻克了基于 GPS/北斗的高精度轨迹跟踪的无人驾驶矿用汽车横、纵向控制技术；针对露天矿区作业需求，建立 CV2X(4G/5G)多模通信系统，实现了多车智能网联，凭借 5G 网络高可靠、低时延特性以及激光雷达与毫米波雷达的双重优势，无人驾驶矿用汽车可以实现 360° 无死角实时感知，实现了一车感知、数据共享、全局可知，保障了矿用汽车无人驾驶作业的高效与安全；构建了“端-边-云架构”的云智能平台和专属高精地图，实现基于端云融合计算的多车运行动态调度算法和软件，突破了云智能的铲与车协同作业、车寻铲动态路径规划、行车路权动态分配以及多车装卸载排队优化等核心技术，实现了矿用汽车-电铲-卸载端的自动编组作业和智能引导。在多传感器融合感知、通信智能协同交互、车铲协同控制、动态路径规划、安全员离开驾驶室监护作业等方面取得技术突破。现完成 19 台矿用汽车纯线控硬件改造及 4 台无人驾驶车辆 3 代系统升级，东采场 4 台无人驾驶车辆实现全流程试生产作业，单车作业效率达到人工驾驶单车效率的 93.7%，编组作业效率可达人工效率的 85%，单日人工接管率低于 3%。

2.3 采矿设备远程操控系统

利用数据模型、图像识别、边缘计算、位姿定位、通信网络、两化融合等技术对大型电铲、大型钻机两类采矿设备进行自感知、无人化远程操控作业研发。目前，在现有 5G+MEC 条件下，将电铲和钻机本地安装与华为等运营商匹配的 CPE 通讯模块，实现上述两类现场采矿设备控制信号、视频的远程传输与操控。电铲远程操控依托于 5G 专用网络，开发自适应挖掘、起重臂软着陆、倾角控制等智能化安全运行功能，在电铲加装高清摄像头、传感器、通信设备等数据采集终端，工控机下达控制指令，实现电铲远程作业任务。电铲端现场视频信号实时回传至 5G 专网云计算平台流媒体服务器中，并进行运算处理后推送至遥控驾驶室显示终端。2021 年底，第一台电铲远程操控改造完成，并通过了静态试验。2021 年 11 月起，利用白班时间间断性安排司机进行远程装车训练及消缺。由于部分功能优化以及司机熟练度问题，对比电铲司机现场装车，远程装车效率达 85% 左右。目前，第二台电铲改造试验已接近尾声，针对已发现问题进行了优化升级。钻机远程操控通过 5G 专用网络，在钻机加装定位天线、HMI 终端、主控制系统、摄像头、传感器、通信设备等数据采集终端，实现图像感知、震动感知、倾角感知、孔深感知、千斤顶状态感知、回转机构状态感知；使用北斗、GPS 定位及差分基站实现厘米级定位，远程控制钻机找布孔点，远程控制钻机进行生产穿孔等工作。17#牙轮钻机远程智能操控具备作业条件，19#牙轮钻机正在进行调试。

下一阶段：遵循可靠性、可扩展性、高效性、易用性、数据安全等多维度原则，在前期技术积累的基础上针对排土机、破碎机部分工程机械的应用场景的特点实施远程操控改造，确保远程遥控驾驶系统安全可靠，实用性强，既保障作业安全，又保障作业效率。时限目标：到 2023 年 6 月，实现 1 台 10 立电铲、1 台 14 立液压铲、2 台 KY310 钻机智能远程操控，工作效率达到人工效率的 100%。2023 年 6 月至 2024 年 10 月，实现 2 台 20 立电铲、2 台 10 立电铲、2 台 4 立电铲、2 台排土机、4 台 KY310 钻机、2 台边坡钻、1 台破碎机智能远程操控，工作效率达到人工效率的 100%。

2.4 智能矿山安全管理信息平台

智能矿山安全管理信息平台，通过集成 GPU 中央处理单元实现对三维海量地图数据的计算支持，将北斗高精度定位终端设备、毫米级边坡监测预警雷达、矿区道路安全检测、矿区路口智能视频监控的全部数据信息，反馈至平台进行分析及预警。对车辆、人员实现高精度定位，设置立体电子围栏，融合视频识别、自组网通信和雷达监测等多技术手段，实现矿山生产安全预警预报。

基于北斗及 GPS 卫星导航双系统，配合自组网无线传输通道，为设备、人员提供厘米级高精度定位。系统由视频监控分系统、地质稳定性监测分系统、自组网分系统、导航增强分系统、人员和车辆监控分系统等组成。地质稳定性监测分系统 24 小时不间断对连续边坡变形进行监测，形成矿山边坡变形曲线，实现毫米级边坡监测预警。更为重要的是与矿用汽车无人驾驶系统数据融合，记录车辆行驶的车速、方位和轨迹，运行全过程监控，实现车辆电子围栏紧急制动、车辆安全制动（路沿报警）、车辆距离过近报警、车辆超速报警等功能，实现从“安全报警”为“安全预警”，为无人驾驶和自动化生产方式保驾护航。

重大危险源监测，对化工重点生产区域进行安全监控，通过三道人脸识别设备、安全金属探测设备、以及新旧产线厂房外配套防爆摄像头设备，实现一级、二级、三级厂区的人员管理和安全防控。另包括皮带、转载台监控、智能供电监控、维检修作业监控、相关方安全监控等子系统。

2.5 节能减排技术创新

矿山胶运系统高压永磁直驱电机研发应用，针对皮带机传统采取“电动机—减速机—驱动滚筒—皮带”驱动方式存在的弊病，实施攻关，简化为“低速直驱永磁电动机—驱动滚筒—皮带”驱动方式。取消原传动系统的减速机，降低备件采购资金，减少润滑油脂消耗。永磁直驱+变频调速突破了许多结构性技术极限，运行了 60 多年的 1500/300 破碎机传动系统通过技术改造，达到高同步、低故障，高效率、低能耗等显著技术性能。

变电站集控及远程运维系统，搭建变电站集控系统，增加单向无线传输模块，将电力数据上传云平台运维系统。利用环形光纤网络，上传集控数据。集控中心的运维系统利用云计算与大数据分析，相关人员使用

手机、PAD、PC 等终端设备，监控现场运行情况，及时判断、处理现场故障。

变电站辅控系统、视频巡检系统，利用声、光、电等采样设备对变电站全方位监控，有机结合辅控系统、视频巡检系统及综合自动化系统，达到少人值守，无人值守的目标。

采场高压供电线路改造，通过对采场高压架空线路的改造，消除线路不固定、变电站设备陈旧及经常性的越级跳闸现象，通过控制信号远程接入变电站，实现智能化远程操控。

智能供水改造项目，整合了白云铁矿的日常用水智能计量、泵站自动启停及远程控制、管网漏点分析、蓄水池储水量监测、用户用量智能分析等功能，实现水资源合理调配。

采场智能照明系统，实现矿区夜间可视化，以保证无人驾驶矿用汽车、采矿设备及人员安全，提升采运效率。

2.6 智能装备开发应用

智能矿山无人机航测系统搭建 4 套抗磁场工业无人机，通过平台的倾斜摄影和图传设备，实现矿区三维 GIS 建模、生产数据统计计算、地质数据采集、辅助边坡采场巡检监测等生产需求。完成矿石预爆生产产量计算工作及 3D 地质地形模型建立等工作。无人机系统技术团队已考取国家飞行证书。

建成发动机检修中心可实现康明斯 NTA855、M11、QSX15、KTA38、KTA50、K2000E 等型号矿用汽车发动机的自主检修。建成矿用汽车底盘总成件检修中心，完成矿用汽车的电动轮、液压件、主发电机、电阻栅风机等总成件的自主检修。建成铸造件研发及制造中心，正在调试 3 吨中频炉及树脂砂新的铸造件生产线，产能达 1400 吨/年以上。建成智能焊接中心由 1 台 10 轴龙门式机器人、2 台 8 轴地轨式机器人、1 台龙门式数控等离子切割机、1 台龙门式数控火焰切割机等设备组成，实现矿用汽车箱斗、铲斗、铲杆、斗车斗门及其它结构件的自动焊接。

2.7 安全技术规范编制

编写完成《露天矿山无人驾驶采场道路安全技术规范》、《露天矿山无人驾驶车辆运行安全技术规范》，适用于露天煤矿、金属非金属露天矿山等固体矿产资源开采，具有较强实用性，是国内首次发布，填补了露天智能矿山无人驾驶运行安全标准体系的空白。组织参与全国首次露天矿山无人驾驶安全技术标准宣贯技术交流会，对标准进行了详细解读及宣贯，以建立露天矿山无人驾驶安全运行标准体系，实现露天矿山运输系统的安全运行及节能环保。

3 智能矿山实践探讨

3.1 需高度重视智能矿山建设的顶层设计

在建设智能矿山前，应高度重视顶层实施方案设计。目前各矿山的智能矿山建设^[1]往往是从一个子系统开始建设的，如无人驾驶系统，再构建其它子系统进行整合。由于各功能子系统（模块）由不同厂家研发，由于功能差异性及基于知识产权保护原因，采用的开发技术、编码规则、数据描述、存储格式及通信接口等不尽相同，分散异构的多数据源难以实现统一访问。随着各子系统的陆续投入，整合的任务由矿山本身或委托第三方完成，将出现“数字鸿沟”和“信息孤岛”问题，数据和信息共享困难，无法形成合力，流程不畅通，难以提供统一、高效的决策支持，影响智能矿山整体效能发挥，严重时子系统分别单独运行。为缩短建设周期，减少投资，应依据本矿山实际情况制定切实可行的智能矿山建设方案。

3.2 需确定智能矿山实施的优先级

智慧矿山建设需经历较长的过程，资金投入较大。各矿山企业应依据矿山规模、服务年限、开采方式等情况，论证各子系统实施的优先级，采用总体规划、分步实施策略。可有效提升管理及操作人员的认知、认可程度，同时智能矿山建设需要矿山行业共同努力，形成合力，智能矿山各子系统（模块）的技术日新月异，各矿山应积极推介成熟技术及经验，共同促进智能矿山建设快速发展。

3.3 需高度重视智能矿山智能决策分析平台的研发

智能决策分析平台^[2]基于大数据的统计、分析、预警及智能决策技术，将生产调度系统、安全管理信息

平台、监控系统及经营管理系统及其它相关系统的嵌入式集成和融合，是矿产资源、生产、设备、质量、能源、安全、通信、管理、能源、经营、财务等的集成应用。如果将无人驾驶、远程操控比作智能矿山的手脚，那么智能决策分析平台就是智能矿山的大脑。各矿山普遍存在“轻软件、重硬件”的现象，必须在顶层设计期间，就高度重视智能矿山智能决策分析平台的研发与应用。白云铁矿将智能决策分析平台设在智能控制中心，将其功能融入智能矿山生产调度系统进行建设。智能矿山生产调度系统在智能矿山建设中具有关键性作用，将数据分析、数据挖掘、优化模型与算法引入到生产调试指标之中，必须实现算法的自学与持续完善，重点在于建立符合矿山生产实际的优化模型，实现对采场、排土场、卸载点、电铲、钻机、矿用汽车等实时监控和优化管理，提高采装、运输、翻卸效率，优化开采设计，优化生产组织，降低开采贫化率，合理配矿，提高资源利用率。由于设备全息感知、调度算法影响、操作习惯等影响，智能采矿设备的效率有时达不到原人工效率，生产调度系统的优化模型及连续工作特性，将是提高效率的关键所在。

3.4 需重视设备的本质安全

设备本质安全至关重要，无论是无人驾驶还是远程操控均需要对原设备进行技术改造，如部分设备采用直流驱动系统，继电器控制方式，必须对其进行变频、自动化网络控制等改造。因此传统采矿设备生产厂家与新兴高科技公司应加强技术协作，一方面更好完成在用设备改造，一方面在新设备出厂时，即完成了智能操作改造，使设备达到本质安全，白云铁矿已经完成矿用汽车线控改造，内容包括无人驾驶模式切换系统、驱动系统线控化系统、发动机线控化系统、转向系统线控化系统、制动系统线控化系统、举升系统线控化、称重系统信息接入、无人驾驶行车警示系统线控化系统、故障自诊断系统、燃油、胎压监测系统、安全监测模块等。

重视采矿设备运行安全管理工作，设备实现无人驾驶或远程操控^[3]，设备与操作人员分离，如发生异响、感知雷达污染等情况，可能造成设备故障扩大或操控失灵。因此必须健全故障诊断、信息预警、人工干预及停止运行的机制和能力，最佳方案是实行双系统监测，如白云铁矿无人驾驶矿用汽车自身安全系统与安全监控系统同时为其安全运行进行监控。部分设备本身带有传感器和电脑，如康明斯发动机、GE 轮马达等，总成件生产厂家应放开部分权限，如因保护知识产权考虑，也应对数据进行封装，将所需状态数据、信息实时上传，尤其是故障及报警信息必须第一时间上传并发出预警，采取措施，避免车辆故障引发事故或设备损坏。

3.5 需重视标准的制定与推介

智能矿山应有健全的智能化应用技术规范与标准体系，但现有的规范与标准相对较少，《智能矿山建设规范》（DZ/T 0376—2021）为中华人民共和国地质矿产行业标准，《露天矿山无人驾驶采场道路安全技术规范》（T/NAJX 002-2020）、《露天矿山无人驾驶车辆运行安全技术规范》（T/NAJX 003-2020）为团体标准。为减少各矿山智能矿山建设资金投入，缩短建设周期，政府或行业协会应集合各智能矿山建设单位及研发单位的技术优势与实践情况，制定相应的规范、标准，并及时进行推介。

3.6 需高度重视智能矿山自有专业化人才培养

智能矿山建设、系统集成、运营维护、故障处理及技术升级，均需要矿山自有专业化人才队伍的参与，矿山技术人员对本企业设备技术性能、运行及使用均非常熟悉，这些技术人员的参与才能使智能化改造达到最佳效果，尤其是后期维护及技术改造最好由本企业技术人员完成。白云铁矿在智能矿山建设开始，即要求各相关作业部技术人员及信息中心人员全程参与，并设一名技术人员担任研发单位副经理，目前白云铁矿技术人员可自主完成智能化项目的运营维护、改造创新、通讯网络设计规划实施，软件编程、安全视频监控、无人机航测应用、自动化等工作，具备一定自主研发能力。自有专业化人才培养可保障智能矿山持续运行与发展。

4 结束语

白云鄂博铁矿智能矿山的建设不仅提升生产效率、矿产资源利用率、设备本质安全水平，更为重要的是降低矿山运营成本。在智能矿山的建设与实践过程中要高度重视其顶层设计，制定切实可行的智能矿山建设

方案，采用总体规划、分步实施的策略。智能矿山建设最为核心的是智能决策分析平台搭建，其是实现装备自动化、生产集约化、管理精益化、决策智能化、作业标准化、队伍专业化和环境生态化的关键。同时，各级政府部门、行业协会、矿山企业、研发公司、采矿设备生产厂商应通力合作，形成技术规范与标准，保证设备本质安全，打造智能矿山可复制模式，培养专业化人才队伍，在矿山企业推广使用，以降低建设费用，缩短建设周期，提高我国矿山企业的核心竞争力。

参考文献

- [1] 王慧芳. 智慧矿山建设架构体系及其关键技术[J]. 电子技术与软件工程,2019(12):175.
- [2] 谭章禄, 韩茜, 任超. 面向智能化矿山的综合调度指挥集成平台的设计与应用研究[J]. 中国煤炭, 2014,40(9):59-63.工矿自动化
- [3] 王国法.综采自动化智能化无人化成套技术与装备发展方向[J],煤炭科学技术,2014,42(9):30-34.