

白云鄂博铁矿 5G 网络条件下无人驾驶系统

张武虎¹, 王国栋², 杨旭东³, 魏二军⁴

(1. 包钢白云鄂博铁矿 内蒙古 包头 014080; 2. 包钢白云鄂博铁矿 内蒙古 包头 014080;
3. 北京踏歌智行科技有限公司 北京 014080; 4. 包钢白云鄂博铁矿 内蒙古 包头 014080)

摘要: 白云鄂博矿区自 1957 年正式投产, 距今已过去 66 年, 目前矿区的开采已进入深部露天开采阶段, 开采难度越来越高, 开采成本不断攀升, 开采效率被严重制约。同时, 高难度、高强度、大负荷的开采作业对现场操作人员来说亦存在一定的安全隐患。白云鄂博铁矿矿岩运输存在着三大困扰, 阻碍着运行效率的更高提升。首先, 矿区运输工作环境恶劣, 司机老龄化严重, 年轻司机从业意愿低, “招工难”、“管理难”问题越来越突出。其次, 每辆运输车一般配备 3-4 个司机, 同时因人为因素造成的车辆维修问题时有发生, 人力成本持续提升。最后, 矿车车型大, 盲区多, 晚上作业驾驶容易疲劳, 导致伤亡事故频频发生。白云鄂博铁矿提出了车-地-云协同的智慧矿山无人运输系统建设, 实现了由云端智能调度管理、矿卡无人驾驶改造、远程遥控驾驶、5G 网络通信、智能路侧单元和车载智能终端组成的露天矿全栈式无人运输解决方案。

关键词: 矿用卡车; 智能调度; 无人驾驶; 远程遥控驾驶; 5G 网络通信

Unmanned driving system under 5G network conditions at Bayan Obo Iron Mine

(ZHANG Wuhu¹, WANG Guodong², YANG Xudong³, WEI Erjun⁴)

(1. Baogang Bayan Obo Iron Mine, Baotou City Inner Mongolia, 014080, China; 2. Baogang Bayan Obo Iron Mine, Baotou City Inner Mongolia, 014080, China; 3. Beijing TAGE Zhixing Technology Co., Ltd., Beijing, 100080, China; 4. Baogang Bayan Obo Iron Mine, Baotou City Inner Mongolia, 014080, China)

Abstract: It has been 66 years since Bayan Obo Mining Area was officially put into production in 1957. Currently, the mining of the mining area has entered the deep open-pit mining stage, with increasingly high mining difficulties, rising mining costs, and serious constraints on mining efficiency. At the same time, the mining operations with high difficulty, high intensity, and heavy load also pose certain safety hazards for on-site operators. There are three major problems in the transportation of ore and rock in Bayan Obo Iron Mine, which hinder the higher improvement of operational efficiency. First of all, the transportation working environment in mining areas is harsh, the aging of drivers is serious, and young drivers have low willingness to work. The problems of "difficult recruitment" and "difficult management" are becoming increasingly prominent. Secondly, each transport vehicle is generally equipped with 3-4 drivers, while vehicle maintenance problems caused by human factors occur from time to time, and labor costs continue to rise. Finally, due to the large size of mining vehicles and many blind spots, driving at night is prone to fatigue, leading to frequent casualty accidents. Bayan Obo Iron Mine has proposed the construction of a vehicle ground cloud coordinated intelligent mine unmanned transportation system, realizing a full stack unmanned transportation solution for open pit mines consisting of cloud intelligent dispatching management, mine card unmanned driving transformation, remote remote control driving, 5G network communication, intelligent roadside units, and on-board intelligent terminals.

Key words: mining truck, Intelligent scheduling, Unmanned driving, Remote control driving, 5G network communication

1 矿区无人驾驶系统建设难点

矿区工况环境复杂、恶劣，矿用车辆无人驾驶系统要求高。

2018年10月白云鄂博铁矿实施矿区无人驾驶改造改造，是我国首家实施无人驾驶改造示范单位，改造方案、技术、产品研发都是自主研发，没有可参考和借鉴的案列，项目推进难度大。

部分基建及配套设施、技术滞后，露天矿无人运输解决方案是个复杂的系统工程，不仅需要车辆技术，还需要掌握无人驾驶技术、调度与车队管理技术、车联网通信等技术。

无人驾驶建设与测试过程需对矿区日常产能的影响最小化，无人驾驶系统的测试需要基于白云鄂博矿区的现实条件，且测试场景要保证空旷与独立，通常不允许有测试车辆之外的车辆存在或运行，这在一定程度上将影响矿区现有产能。因此，需要在不对矿区现有产能造成较大影响条件下，完成一系列安全、可靠性实际场景测试，最终实现无人驾驶矿卡规模化运营。

在用车辆线控化改造及新车无人化前装方案技术难度大，白云鄂博铁矿正在使用的 MT3600、MT4400 电动轮矿车已经服役超过 10 年，设备严重老化，原车的数字化、线控化程度非常低：原车采用的是机械发动机；电驱动系统也是 GE 公司一阶段产品，不支持 CAN 通讯，只支持 R232 和硬线通讯；举升系统为拉线式控制方式；紧急制动为拉线式控制方式。白云鄂博铁矿采购的 NTE240 矿车使用的是电控发动机；二代电驱动系统，支持 CAN 总线数据；电控式液压举升系统；电控式紧急制动控制，因此需要针对三个不同型号电动轮矿车制定线控化方案并实施，技术难度大。

同时由于无人驾驶矿车空车及满载质量巨大，其动力系统、操控系统具有多部件、高时延、非线性等特点，因此大型电动轮矿车线控化控制精度、响应时间、反馈周期等参数均需要满足无人驾驶的需要，技术难度大。

另外，无人驾驶矿车在运行过程中的功能安全也是线控化方案需要重点考虑的因素。需要对三种不同型号的动力系统、驱动系统、操控系统、警示系统、辅助系统等实现故障自诊断功能，以确保无人驾驶矿车的行车安全，技术难度大。

2 矿区无人驾驶系统建设

响应国家智能矿山战略要求，面向政府/行业，开展露天铁矿无人驾驶示范区样板工程建设，搭建远程智能调度监控平台，建设车车/车网/车地通信系统，原有车辆无人驾驶改造，打造国家级智能化无人驾驶露天矿区示范样板工程。

综合考虑白云鄂博矿区的现实情况，以智能矿山总体设计为先导，开展智能矿山示范工程建设，制定智能矿山解决方案。白云鄂博矿区智能矿山解决方案基于车-地-云一体化方式构建，车载系统包括无人驾驶矿卡车载终端，实现无人矿卡的环境感知、任务执行、路径规划、车辆控制、故障诊断等功能；协同作业车辆终端，实现挖机、推土机等作业协同；预警终端，实现生产指挥车、洒水车等的集中云平台监视；还有支持现场工作人员高效作业的辅助工具；地面系统包括路侧单元，实现冗余通信、危害预警和交通管控；地面管控终端实现车辆驶入驶出的管控等；云控平台，主要实现对于车辆的集群管控，如任务调度、路权管控、路径规划、高精地图管理等等。随着白云铁矿智能矿山建设的各项目系统陆续投入运行、标准逐步的完善，并逐步推广到全国各大露天矿山，将对我国智能矿山建设起到示范导向的作用。

2018年10月，踏歌智行与包钢合作，将白云鄂博铁矿的一台在用的北方股份 MT3600B 型矿卡进行了非线控无人化改造，实现了在白云鄂博矿区国内首台无人驾驶矿卡的实测和试运营。非线控改造属于机器人控制车辆，电动助力转向机控制精度差，横向偏差大，满足不了矿山现有狭窄道路的运行，机械腿控制制动时，制动力过猛；并且没有感知系统，运行只靠 GPS 规划路径行驶，存在着安全隐患，这些空难阻碍这无人驾驶项目的快速发展。为了攻克这一难题，包钢白云铁矿、踏歌智行、北方股份共同研究应用线控化核心技术。



图 1 研究技术框架

3 无人驾驶线控系统改造

3.1 无人驾驶模式切换系统

研制的无人驾驶模式切换系统，设置有无人驾驶矿车驾驶模式控制开关，通过操作驾驶室仪表台上的模式切换开关，可实现本地整车无人/人工驾驶模式的一键切换；也可通过无人驾驶地面控制系统及矿用卡车无人驾驶车载系统，实现远程整车无人/有人驾驶模式的一键切换，无人驾驶矿车驾驶室内元件及操作方式与人工驾驶矿车完全一致。

3.2 驱动系统线控化改造

无人驾驶矿车驱动系统线控化系统，采用由车载控制器编制控制程序，通过 CAN 总线及信号转换器下发车辆的档位、油门、电制动、工作制动、远程启停等信号到驱动系统，实现驱动系统线控化的技术方案。线控化驱动系统控制流程如图 3 所示。研制的无人驾驶矿车驱动系统线控化系统采用主副控制器的冗余设计方案，当主控制器发生意外时，副控制器可以控制车辆安全停车，保障行车安全。

3.3 转向系统线控化改造

无人驾驶矿车线控转向系统，采用电液转向器+流量放大器+执行机构转角传感器+方向盘转角传感器技术方案，实现了转向系统控制的完全线控化，能够高效执行车载无人驾驶系统控制指令，转向工作平稳、无抖动、响应速度快。线控液压转向系统拓扑结构如下图所示。

3.4 制动系统线控化改造

无人驾驶矿车线控制动系统，采用人工制动+线控制动双路控制系统的技术方案，实现了制动系统控制的完全线控化，能够高效执行车载无人驾驶系统控制指令，并可实现无人驾驶系统控制车辆的工作制动（行车

制动)、装载制动、驻车制动、紧急制动等制动单元。线控液压制动系统拓扑结构如下图所示。

3.5 举升系统线控化改造

无人驾驶矿车线控举升系统，通过电液先导控制的技术方案，实现了无人驾驶系统通过电信号控制卡车厢斗的举升、迫降、锁止、浮动、紧急牵引等功能。线控液压举升系统拓扑结构如下图所示。

4 无人驾驶车载系统

4.1 车载控制系统

车载控制系统由车载主控硬件和主控软件构成。车载控制系统是矿卡无人驾驶系统的核心处理单元，分别从环境感知系统接收车身周围的环境探测信息，从高精定位系统接收车身定位、速度和姿态信息，从车载通信系统接收调度任务和路径信息，综合处理各种输入信息后，生成决策和控制指令，下发给整车线控系统实现车辆控制，完成指定的运输任务，并将系统运行过程中的关键数据发送给车载黑匣子进行存储。

4.2 无人驾驶感知系统

白云鄂博无人运输车载感知系统的设计与开发由北京踏歌智行科技有限公司负责。矿区无人驾驶环境感知模块必须满足矿区粉尘、雨雪雾、剧烈震动和极端低温等恶劣工况的使用需求，能够在全无人驾驶的情况下对道路、落石、凹坑、挡墙、车辆、行人等障碍物进行准确感知识别，确保卡车安全稳定运行。感知模块精度应保证其精度满足生产现场需求，使无人驾驶卡车安全、稳定正常作业，并输出大小、距离、种类等二维图像、三维点云数据一体化信息。

为了满足矿区车辆矿区粉尘、雨雪雾环境下的感知需求，踏歌智行智能计算单元（ICU）中通过点云深度学习算法及多传感器融合感知算法，实现对感知数据的灰尘、粉尘以及雨雾的滤除，从而实现粉尘、雨雪雾环境下精准感知。

将视觉感知、毫米波雷达感知以及激光雷达感知的信息进行像素级融合，从而实现对道路、落石、凹坑、挡墙、车辆、行人等障碍物进行准确感知识别，进一步的输出障碍物的大小、距离、种类、速度等信息，并将感知信息与车辆决策控制层进行通信，从而让车辆根据不同情况合理采取停车、避让等措施；

（1）路侧协同感知

设计了路车融合感知方案，除车端感之外，对关键路段进行路侧感知，可实现超 500 米以上的超视距感知；

（2）感知防护

同时为了对传感器进行保护，定制化设计了传感器安装支架，确保装车、运行、卸载等作业过程中不会被碰撞损坏。

5 基于 5G 的多模式通讯系统

作为智能矿山的核心部分，为了保证矿山开发的效率及安全性，需对复杂而大量的数据及时高效地进行传输、计算、处理。本项目中，华为技术有限公司内蒙古分公司、中国移动通讯集团内蒙古有限公司包头分公司、北京踏歌智行科技有限公司三家单位采用 4G/5G 蜂窝通信、V2X 直连通信和路侧之间无线网桥通信互为冗余的通信方式，使得多条通信链路之间彼此相互支撑，共同用于矿区业务传输，形成有效冗余来保障通信的可靠性。

5.1 智能调度

智能调度功能模块，具备调度路径的集中呈现、调度指挥指令的下达、调度规则的配置、调度信息的查询等操作功能。同时，后台具备完善的调度算法，能够自动对车辆进行调度任务的分配，从而提高整个无人运输系统的生产效能和安全保障能力。

智能调度模块是该平台中最核心部分之一。在用户侧，具备调度中心、调度指挥、调度配置、调度查询等主要应用功能模块，可以对调度路径进行全局集中呈现，对调度人员的临时操作指令进行下发，对自动调度的调度规则进行合理配置，对调度过程中的过程记录和历史信息进行查询阅读。在系统后台，支持响应系统自动调度任务，按照调度算法和调度规则限制，自动计算调度目标、下发调度任务，并且基于高精地图，

形成车道级别的调度路径，引导车辆正确行驶到合理的调度目的地。

5.2 远程应急接管系统

应急接管系统可以分为两个模式：远程监控模式和应急接管模式。

在远程监控模式下，地面控制中心管理员可以通过中央大屏或者遥控驾驶舱的屏幕同时监控管辖下的所有车辆的运行状态，以阵列式分布，如作业任务和车辆故障等情况。同时管理员可以选择某一辆车，进入查看此车更加详细的运行状态，如作业任务、车辆故障、车辆周边视频图像、车辆状态参数、电子导航等信息。

当无人驾驶车辆出现故障后，车端控制器向地面控制中心发出远程应急接管申请，控制中心管理员可以将接管任务分配到遥控驾驶舱，由接管员通过遥控驾驶舱对故障车辆进行远程接管，帮助车辆脱困或者完成剩余作业。

5.3 独立于无人驾驶系统，配置冗余通信和控制

在无人矿卡上，安装有主副两套控制器，在无人驾驶系统中，以主控制器为主，副控制器作为备用。

即使无人系统出现故障，应急接管系统从感知端、控制端和通信端均不受影响，可以作为完全安全冗余，进行应急接管远程遥控。

应急接管系统与无人驾驶系统控制的冗余关系图下图所示。

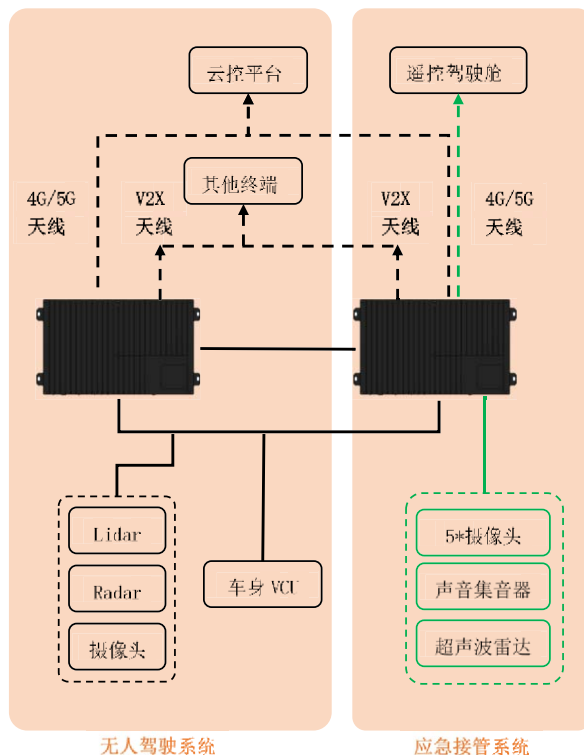


图2 应急接管系统冗余通信示意图

6 无人驾驶成就

2018年9月27日，踏歌智行与包钢集团、包头市政府、北方股份、北京航空航天大学中国移动内蒙公司、华为集团正式签订合作协议，共同推进世界最大的稀土露天矿（白云鄂博矿）矿区无人驾驶项目，携手致力于矿用车无人驾驶和智慧矿山建设！

与此同时踏歌智行研发出第一代无人驾驶执行器--线控机器人，车辆的方向盘、制动系统由线控机器人操作，该线控机器人在原来基础上有所改良，简化了机器人腿部构造，转向采用侧向转向结构，这样可实现人机随时切换更加方便灵活，稳定性更高。



2021年踏歌智行实现了5G网络下白云鄂博东矿区全矿无人驾驶，是全国无人驾驶露天铁矿示范工程，也是全球无人驾驶矿车基于5G网络条件的首个应用。经专家评审，该系统具备稳定的“车、边、云”系统架构，性能满足矿区环境应用要求具备大范围商用推广的条件。

在矿区无人驾驶领域，白云鄂博矿区是“先行者”的试验场。包括踏歌智行在内的项目实施方，需要共同应对矿区粉尘、雨雪雾、剧烈振动和极端低温等工况，以及长距离上下陡坡、大曲率弯道、坑洼及结冰等复杂道路条件。在此过程中，工程师们夜以继日的测试、采集、开发、调试，研发了近20项专利提供支撑的关键技术，进而实现了世界首台在用卡车非线控无人化改造、国内首台矿卡车辆无人驾驶改造并投入运营、国内首次无人驾驶矿卡多编组运营、国内首次无人驾驶矿卡夜班作业、国内首个全矿无人驾驶运输运营。

基于硬核的技术实力，踏歌智行立足于白云鄂博铁矿，首创“车-路-云”协同架构，打造了露天矿全栈式无人驾驶运输解决方案“旷谷”，并自主设计了针对矿区自动驾驶的系列域控制器。该系列产品已通过3C认证、入网认证及中国计量院的多项车规级认证，有效保证了“旷谷”系统在矿区恶劣环境下的高效、可靠作业。

至今，踏歌智行以白云鄂博铁矿为无人驾驶发展原点，取得长足地进步，协同众多国家级协会，参编近20项矿区无人驾驶标准，包括无人驾驶相关的整车技术、道路运输、车辆安全、检验检测、通讯技术、车联网等多个方面。同时，公司已申请自动驾驶发明专利90余项，获得发明专利授权约50项。

7 总结

随着白云铁矿智能矿山建设的各项工作及系统陆续开展及运行，极大地提升了矿区安全管理水平及生产运行效率，降低人工成本，促进“四降两提”工程。同时白云铁矿将抓住这次难得的历史机遇，形成智能矿山建设、无人驾驶系统自主知识产权，对外承包工程，将包钢技术普惠到全国各大露天矿山，助推中国智能矿山、绿色矿山、无人矿山建设的时代进程。在本项目技术支撑条件下，已有多座矿区实现了智能无人驾驶技术，并获得了一定的成绩。