

基于 5G 通信的露天矿山无人驾驶多车协同调度系统设计与应用

雷振华

中国水利水电第五工程局有限公司

DOI:10.12238/ems.v7i7.14269

[摘要] 露天矿山运输能耗较高、效率较低,本文聚焦于基于 5G 通信的无人驾驶多车协同调度系统设计与应用。通过 5G 通信架构和设备智能化改造,简述了 5G 通信网络部署与纯电低能耗无人设备改造,分析了多车协同调度技术,探讨了系统集成和应用成效,以此实现硬质石灰岩矿山开采挖机、卡车协同与动态化调度。实践研究表明,系统通信延迟低,多车运输高效,能耗下降,为露天矿山智能化、绿色化发展提供了解决方案。

[关键词] 5G 通信; 露天矿山; 无人驾驶; 多车协同; 调度系统设计

露天矿山运输占总能耗的 40%到 60%,传统人工调度响应在半小时以上,且路径冲突偶有发生。中电建重庆露天矿作为主要的矿产资源开采场地,该矿区岩石主要为硬质石灰岩,岩石节理、裂隙较发育,具有良好的工程力学性能,高强度,坚固且厚度大,十分稳定。按照该矿地形条件和矿体赋存形态等,开采矿区范围集中在标高+554m 至+445m 的矿体,平均剥采比在 0.5: 1 以下,满足露天开采的条件。中电建重庆露天矿主要以柴油卡车队列运输,平均剥采比为 0.45: 1,但是 20 台卡车主要依赖于人工调度,造成设备空置率较高,通信延迟在 200ms 以上,阻碍了开采效率的提升。

而 5G 低时延、大宽带的特点为露天矿山无人驾驶多车协同调度提供了可能。在多车协同作业场景下,设备实时信息交互尤为关键。要想确保信息传递无误且快速,就要实现协同动作精准配合,通信时延需在 20ms 以内。不过,传统 LTE 网络通信时延在 100 到 300ms 之间,难以满足露天矿山多车协同作业对于实时性方面的要求。通过 5G 通信技术系统,研发智能无人操控电驱矿用挖掘设备,无人挖机可以自主完成岩石识别、破碎、装车等作业任务。如此,要求挖机采用最新的传感器和智能算法,精准识别各种类型和大小的岩石,自主判断进行破碎与否,同时把岩石装载至卡车上。露天矿山生产过程为动态的,岩石硬度和品位等均会伴随开采位置、

深度发生变化。所以,调度系统设计需要根据这部分信息,灵活调整开采点位置与设备分配方案,保证设备产能保持均衡,防止发生设备闲置或者是超负荷运行的情况,以此优化矿山生产。

一、5G通信架构和设备智能化改造

(一) 5G 网络部署

1. 混合组网

为了确保矿区通信覆盖更加全面,需部署 4 座华为 BTS5900 宏基站。这部分宏基站工作在 3.5GHz 频段,发射功率在 43dBm,信号发射功能强大。通过测试,单站覆盖半径为 1.2km,可以将矿区大部分区域覆盖到,让矿区 90%以上的区域信号强度均保持在-90dBm,为设备通信稳定性奠定基础。

考虑到矿区有部分比较特殊的区域,比如高陡边坡等,这部分区域因为各种原因,比较常见的就是地形遮挡、信号反射等,宏基站信号难以全部覆盖。要想解决该问题,需要在 6 处重点区域进行微基站部署,该站覆盖半径是 200m,可以补盲宏站信号盲区。此外,借助波束赋形技术,严控信号传输仿写,增加非视距下的通信成功概率,在短期内做好复杂计算任务,处理时延在 5ms 以内。边缘服务器的主要作用就是冲突检测、轨迹预测等,可以增强系统决策效率。

2. 通信性能测试

结合实际性能测试可以发现, 5G新系统在上行带宽、下行时延、连接密度这三个指标上和传统的LTE进行比较, 明显提高了。传统LTE上行带宽为5Mbps, 5G新系统上行带宽为150Mbps, 提升幅度为30倍, 促使设备可以快速将数据传递至服务器, 支持更高分辨率图像和视频传输, 为设备远程监控及智能诊断提供了优质条件; 传统LTE下行时延为150ms, 5G新系统下行时延为7.2ms, 提升幅度为95.2%, 保证了控制指令可以及时传递给设备, 满足多车协同作业对实时性方面的需求; 传统LTE连接密度为50台/km², 5G新系统

连接密度为5000台/km², 提升幅度为100倍, 这表明在同样的区域当中, 5G新系统可以支持更多设备连接, 为矿山设备的增加与智能化升级留足空间。

(二) 纯电低能耗无人设备改造

1. 智能电驱挖机

由表1所示, 传统柴油挖机主要依赖于柴油发动机, 能耗较高, 污染环境。但是纯电低能耗无人机使用的是350kW永磁电机当成动力源, 能耗低, 下降了62.5%, 和绿色环保发展要求相符。

表1 传统柴油挖机与纯电低能耗无人挖机对比

技术参数	传统柴油挖机	纯电低能耗无人挖机	性能提升
动力系统	336kW 柴油	350kW 永磁电机	
传感器配置	无	16线激光雷达和8组超声波和力传感器	能耗降了62.5%
自主破碎能力	人工操作	粒径≤1.2m 自主破碎	环境感知能力100%
电池续航	——	8小时 (200kWh)	快速换电处理效率提高20%

在传感器配置上, 传统柴油挖机使用的是人工操作与经验判断。而纯电低能耗无人机配置了各种先进的传感器, 如超声波和激光雷达等。可以精准感知到四周环境信息。

在自主破碎能力上, 传统挖机必须要人工操作开展破碎作业, 低效且有安全风险。纯电低能耗无人挖机可以自主完成粒径在1.2m左右的岩石破碎任务, 使用智能算法和破碎机构, 可以自动化开展破碎作业, 十分高效。

除此以外, 纯电低能耗无人挖机配置了200kWh的电池, 续航在8h左右, 可以支持快速换电, 保证设备不会发生突然中断作业的现象, 提高设备利用率。

2. 无人驾驶电动卡车

使用双轮毂电机当作驱动系统, 峰值功率为400kW, 能够为卡车提供强大的动力输出。在运行过程中, 能耗是0.72kWh/吨.km, 和传统柴油车1.5kWh能耗水平作比较, 具有更好的节能效果。

通过配置超宽带定位、惯导、视觉集于一体的定位系统, 定位精度小于等于8cm。如此让卡车在行驶时可以精准感知自身位置和姿态, 保证运输过程安全。

为了可以充分应对突发状况, 卡车采用的是电磁制动系统, 制动距离小于等于10@40km/h, 可以在紧急情况下停车, 防止事故发生。此外, 激光雷达避障系统可以实时探测障碍物位置和运行状态, 确保卡车安全驾驶。

二、多车协同调度技术

基于5G通信的露天矿山无人驾驶多车协同调度, 实现多车协同是一个技术关键, 这涉及到了时间、空间等方面的协同, 要确保空间定位准确, 协同时间同步, 开发与之对应的自适应调度系统。

(一) 时空同步

1. 时间同步机制

要想实现多设备之间时间同步, 需使用IEEE 1588v2精密时钟协议。使用这一协议, 5G基站和设备的时钟偏差小于1μs, 可以满足协同控制对纳秒级筒部的要求。该种高精度时间同步机制, 可以保证不同设备在协同作业期间, 可以严格按照时间顺序操作, 防止由于时间未能同步造成作业误差, 带来安全隐患。

为了避免不同设备状态数据在传输和处理环节中发生时

序混乱的情况，使用分布式账本技术。这一技术可以保证多设备状态数据时序保持一致，让不同设备记录数据在时间顺序上一致。使用这样的方法，可以为下一步协同控制和调度决策提供数据基础。

2. 空间定位

在这个方面，结合各种不同的定位技术，增加定位精度。使用卡尔曼滤波算法对多种定位数据加以融合处理，如超宽带定位、惯性导航系统定位等。通过融合处理后，定位误差可以控制在 5cm 以内，和单一的超宽带定位法箱壁，精度有所提升。这一高精度定位能力，可以满足装车对位的要求，保证挖机和卡车在装卸过程中能够精准配合。

(二) 多车协同控制算法

1. 动态路径

首先，为了促使卡车在露天矿山环境下合理规划路径，此次改进了蚁群算法。积极引进信息素挥发系数动态调整机制，按照交通密度变化情况，动态调整信息素挥发系数。在交通密度大的地方，增加挥发系数，推进信息素的挥发速度，防止蚂蚁集中于局部路径；在交通密度小的地方，缩减挥发系数，保留信息素，积极引导蚂蚁探究最佳路径。

其次，启发式函数融合了多因素，如坡度、电池、距离等。其中，坡度考虑到了卡车在不一样的坡度道路上行驶的困难程度合能耗差异；电池考虑到了卡车剩余电量情况，防止卡车运输期间由于电量不足发生故障；距离充分体现出了路径长短对运输时间带来的影响。经过多因素融合，让路径规划更科学，以此降低综合成本。

最后，规划效率提升。在测试过程中，蚁群算法改进以后在 20 车场景之下，规划时间下降至 68ms，收敛速度增加了 92.4%。如此表明在多车协同下，系统可以迅速为卡车规划最佳路径，提高运输效率。

2. 避免冲突

为了防止多车行驶期间发生冲突，需构建分级预警机制。按照相对距离的差异，把预警等级划分成三级，即两车相对距离为 50 至 100m 时，系统发出一级预警，自动控制车辆速度，速度调整幅度每小时±5km，响应时间在 100ms 以内。相对距离为 20 至 50m 时，系统发出二级预警，可立刻开启路径规划功能，使用智能算法规划车辆行驶路径，防止碰撞，响应时间在 500ms 以内。相对距离在 20m 以内的情况下，进入紧急状态，系统快速触发全电制动，发出声光报警，响应时间在 200ms 以内，可以有效确保人员和车辆之间的安全。

经过统计运行数据，这一系统的实施让多车冲突从每天 4.8 次变成了每天 0.2 次，避壮成功率在 99%左右。防止了因为车辆冲突造成运输不持续及安全事故，提高了露天矿山运输效率和安全性。

(三) 自适应调度系统

1. 优化开采点

基于 XGBoost 模型，分析声波速度、节理密度等岩石力学参数，把矿区分成 5 个不一样的开采单元。这样划分主要是考虑到了岩石稳定性、硬度等，可以为下一步配置设备和制定开采方案提供重要依据。

表 2 开采点参数

单元	岩石硬度 (MPa)	剥采比 (: 1)	挖机类型	卡车数量
U1	>100	0.45	破碎型挖机	4
U2	80-100	0.38	标准挖机	6
U3-U5	<80	0.25-0.30	轻载挖机	2-3

按照不同开采单元的岩石硬度与剥采比等特点，科学配置类型不一样的挖机和卡车数量。比如，针对岩石硬度高的 U1 单元，需要配置破碎型挖机、4 辆卡车，从而满足破碎和

运输坚硬岩石的需求；当岩石硬度比较低时，即 U3-U5 单元，选用轻载挖机、2 到 3 辆卡车，增加设备开采效率。

2. 产能配比

要保证矿石品位和产量与生产要求相符,需构建闭环控制流程。其一,使用光谱分析仪对矿石品位进行实时监测。在监测到差异化的开采单元矿石品位有变化的情况下,比方说U1单元品位55%,U2单元品位52%,调度系统会严格按照规则自动调整单元运输量比例,从而确保混合以后的矿石品位控制在目标范围以内。

此外,还需要精准调控配比。皮带秤的主要作用在于反馈实际产量信息,调度系统按照皮带秤反馈信息,使用PID算法动态化调整挖机作业频率。这样的调整方式可以把配比误差控制在±1%以内,做到精准控制矿石产量和品位,保证露天矿山生产效益。

三、系统集成和应用效果

在开发多车协同自适应调度系统的基础上,还需要进一步融合通信等,实现系统集成,使其功能完善,能够在露天矿山的开采中,实现多车无人驾驶,确保矿石的运输效率和安全,并取得预期的效果。

(一) 部署方案

1. 设备组网

在部署期间,配置了纯电低能耗挖机和电动卡车,其数量分别为10台、15台,同时把挖机和卡车全部接入5G网络。为促使数据本地化处理和存储,配置3台边缘服务器。考虑到电动卡车续航,需设计2座换电站,保证卡车可以在电量耗尽的情况下更换电池,确保运输持续进行。

2. 软件平台

开发专门的矿山智能调度软件平台,即矿山智能调度系统。这一平台将设备监控、能耗等不同功能模块加以集成,可以充分显示设备位置信息、运行状态等。与此同时,可以实时监控PC和移动端,有关操作人员能够使用手机和电脑在任何时间、地点查看露天矿山生产情况,实施远程调度。

(二) 性能对比实验

经过和传统系统性能对比实验能够了解到,5G无人系统在不同关键指标上有着显著的优势。从综合能耗看来,因为使用的是纯电低能耗设备和调度算法,能耗减少到58.1%,

减少了生产成本及其对环境的影响。运输效率增加了41%,提高了露天矿山生产能力。装车精度增加了77.3%,从传统的±30cm增加到了±6.8cm,避免了物料浪费,促使资源利用率越来越高了。调度响应时间从过去的大于1800s减少到4.5s,降低了99.8%,达到了实时调度决策的目的,提高了调度系统响应速度。

(三) 经济效益

5G无人系统年节约燃油成本450万元,根据柴油价格每升8元进行计算,每年能够节省油耗58万升。此外,因为设备自动化和智能化作业实现,避免了对人工操作的依赖性,人工成本节省了240万元。设备维护成本降至505,根本原因在于系统可以对设备运行状态进行实时监测,预先预警故障隐患,达到预防性维护,降低设备维修次数。

结束语:

综上所述,基于5G通信的无人驾驶多车协同调度系统提高了露天矿山运输效率及其安全性,通信延迟较低,多车冲突减少,为复杂场景下的无人作业提供了方案。纯电低能耗设备和自适应调度相融可以实现绿色开采,单位能耗下降,年减排二氧化碳为9000吨以上,和双碳目标要求相符。无人驾驶多车协同调度系统的成功应用,表明5G+智能化+绿色的技术路径是值得推广和运用的。未来,还需要相关研究人员进行深入研究和探索,以此推动行业技术优化升级。

[参考文献]

- [1]李复东.露天矿山运输无人驾驶关键技术与标准分析[J].善天下,2020(16):587-588.
- [2]符宣博.通信技术与智慧交通融合发展路径的探索[J].电子元器件与信息技术,2022(12):210-213.
- [3]帅根来,白洪亮,张伟,等.矿车无人驾驶通信技术的创新与应用探索[J].数字通信世界,2024(3):102-104.
- [4]梁明智,柳昆鹏.基于5G网络的无人驾驶运输技术在兴盛露天煤矿的应用[J].露天采矿技术,2024,39(3):32-36.
- [5]刘小杰,曹胜武,罗怀廷,等.露天矿山无人驾驶卡车安全管控研究[J].中国安全科学学报,2021(S01):031.