

石圪台煤矿融合无人巡检的智能化采煤系统研究与应用

冯晓斌 方世巍

我国是世界第一大煤炭生产国家，煤炭资源在我国一次能源消费中的占比为60%~70%，对我国经济发展发挥着举足轻重的作用。然而由于煤矿开采灾害重、风险大，生产过程中下井人员多、危险岗位多，事故时有发生。在我国煤矿从业人员中，从事采煤、掘进、运输、安控等危险繁重岗位人员占比在60%以上，迫切需要开展“机器换人”工作。此外，国家矿山安全监察局制定公布了《煤矿机器人重点研发目录》，重点研发应用掘进、采煤、运输、安控和救援5类38种煤矿机器人，煤矿机器人的应用促进了智能巡检系统的诞生。

在国家能源局印发的《智能化示范煤矿验收管理办法（试行）》中，对采煤工作面的评分指标要求“薄及中厚煤层工作面需实现常态化无人作业”。基于这项要求，国能神东煤炭集团有限责任公司石圪台煤矿在22[±]103薄煤层工作面，搭建了一套融合无人巡检的智能化采煤系统。

智能化综采工作面系统搭建完成后，机器人巡检代替了传统的人工巡检，从根本上解决了“薄煤层工作面空间狭小，人工巡检困难”的问题。此外，自动化集控系统的引入，整合了旧有的“碎片化”系统信息，配合覆盖全工作面的视频监控系统，实现了全生产场景设备的“视频-数据”二元可视化远程监测功能。在此基础上，自动化集控系统引入协同机制，实现了煤流负载平衡、支架泵站联动等子系统联动，实现了常态化无人生产。

自动化集控系统的建设目标是将机器人、采煤机等设备统筹为一整套应用于其适配场景的“智能化生产机器人”，并通过多套“智能化生产机器

人”的协同配合，实现整个矿山的无人化生产。

“融合无人巡检的智能化采煤系统”项目，是石圪台煤矿就针对“无人化开采”实践研究的一次成功探索。

智能化采煤系统架构及功能

融合无人巡检的智能化采煤系统架构如图1所示，涵盖巡检、集控、网络、视频、电液控等多个子系统。相比较于传统的综采自动化系统，该系统具有组合式集控中心设计、全场景快插光纤网络覆盖、工作面无人巡检系统搭建3大突出特点。

工作面无人巡检系统

工作面无人巡检系统包括巡检机器人和惯导雷达机器人2台设备，各设备主要功能如下：

（1）环境巡检功能

巡检机器人上搭载多种传感器，基础功能可对环境温度、异常气体、运行视频等情况进行实时监测，核心功能则体现在视频识别、热成像画面识别以及声音识别。

视频识别功能是通过在地面安装视频识别服务器进行后端识别实现的。后端识别的优势有2点：①服务器内部搭载了大容量数据库，可以识别更多对象，拓宽机器人AI识别的功能边界；②服务器会基于机器人返回的画面进行“再学习”，从而保证AI识别的准确性能在设备使用过程中不断提升。而考虑到机器人运行在各方面监测功能本就齐

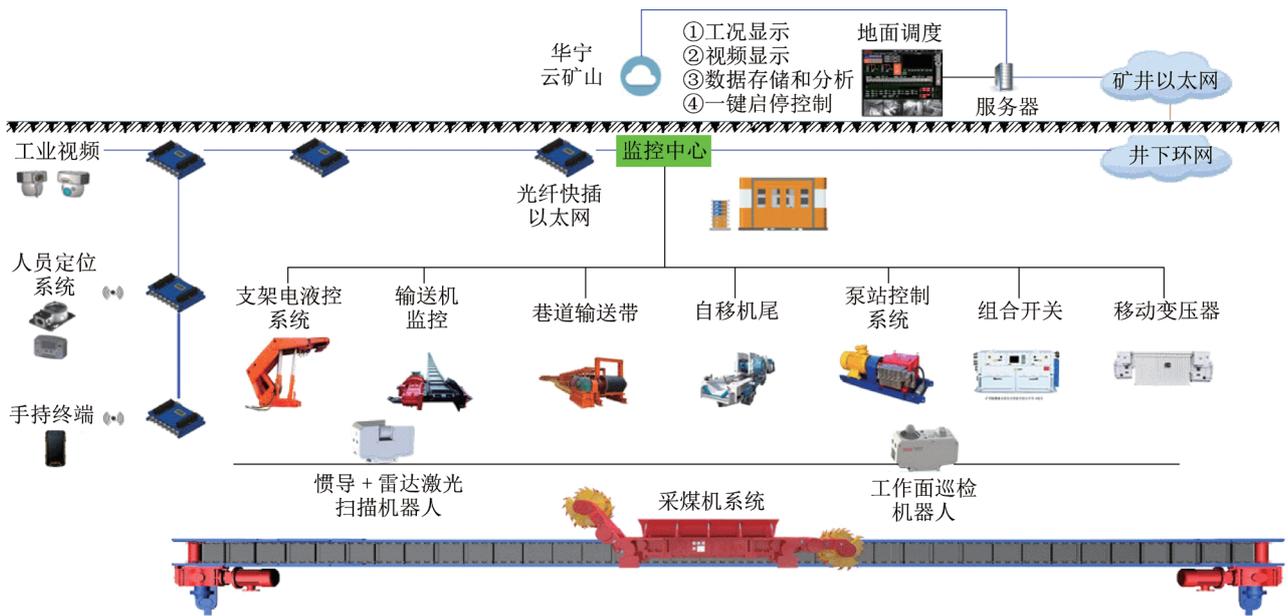


图1 融合无人巡检的智能化综采工作面系统架构



图2 工作面视频识别

全的工作面区域，后端识别的时延问题带来的影响较小，完全适配于工作面使用。工作面视频识别如图2所示。在井下低照度的现场仍能拍摄清晰的视频画面，巡检机器人的图像处理系统自带DSP画面处理功能，在照度强的时候拍摄彩色画面，而当照度降低时，则会通过CCD/CMOS采集光线后转换的电荷(电流)强弱判断是否需要转换为黑白画面。为了不让摄像机在电流临界值边缘上下不断反复地切换摄像机色彩，通常在电路上会做一个时间延迟处理电路来控制摄像机的色彩开关。

热成像画面识别功能是通过热成像仪将采集到的环境温度情况转换为在显示器上直接显示的数字图像。这一功能可以应用于：①发现工作面隐性火

区分布、确定火源位置；②各种电气及动力设备的运行会发热，热成像仪可以通过机体温度逆推设备运行是否处于正常状态；③工作面电缆长期使用会出现损耗，损耗处电缆电阻会比正常部分高，因而发热也更为严重，使用热成像仪可以对井下线缆进行红外探伤。为实现热成像画面识别功能，巡检机器人在热成像系统中融入了基于温度、相对温度和同类型设备发热状态的3大项指标判断法，以及对热谱图和大数据档案的分析法。

声音识别功能是通过煤矿井下高背景噪声环境下的异常声音提取识别技术，实现对设备异常运行等情况的智能识别、辅助判断。采用声音采样模拟分析的方法，对采集到的声波信息使用MATLAB在频域内的软件算法进行分析，计算出某一特征波形在频域内的能量分布，从而对于异常的声响进行识别。异常声音提取识别技术的实现主要是通过噪声滤波和异常声音识别，噪声滤波法能够避免传统的以声音强度或者频率进行异常声音信号的单一识别方法。噪声滤波法大幅提高了故障识别的准确性，在高声强背景噪声的环境下也能够对异常声音进行有效识别；异常声音识别法是通过设备运行时零部件或接触面的局部缺损、裂纹、松动等发出的异常声音进行研究分析实现的。采用独立分量分



析和自相关分析相结合的方法来采集设备异响。

为实现设备异常声音与环境噪声的分离，采用混合提纯的盲源分离算法，可以有效判别设备运行情况。

(2) 惯导找直功能

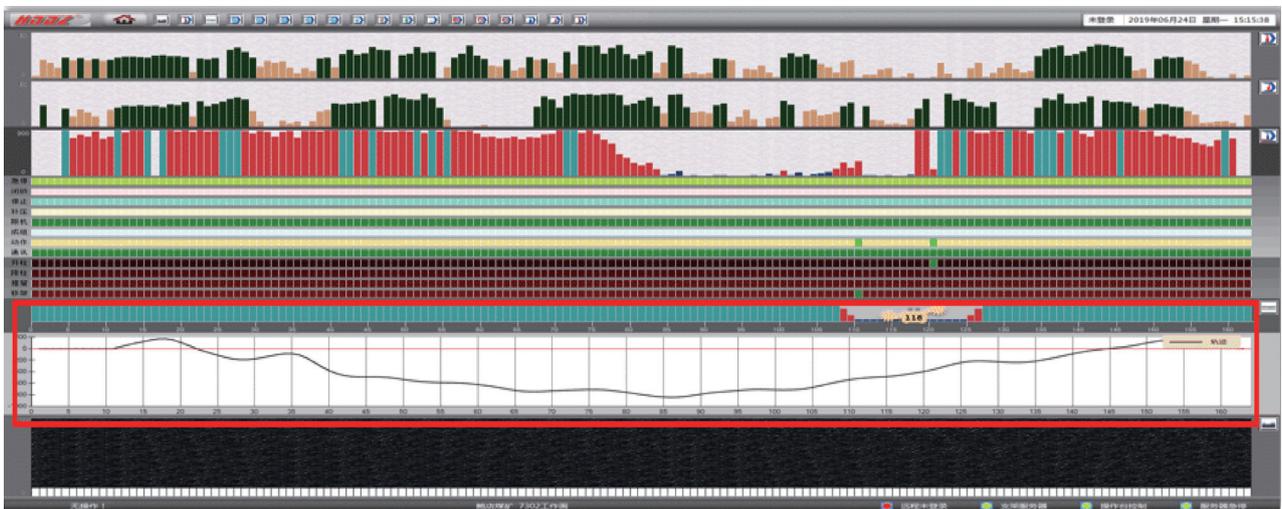
工作面巡检系统的轨道搭在刮板输送机上，惯导雷达机器人中搭载有惯导系统，可以代替采煤机机载陀螺仪，对采煤机截割轨迹的弯曲情况进行测绘。惯导系统的核心器件为组合式测定模块，模块通过6态卡尔曼滤波得到最优估计输出，可以分别测出3个方向的角度变化情况，包括刮板输送机在采煤机前进方向的偏差量（支架煤壁向）、前进俯仰量（煤层倾角变化）、倾斜量（煤层走向起伏变化），结合机器人内部里程计的数据，可绘制出采煤机运行曲线，进而实现工作面自动找直功能，自动化系统找直界面如图3所示。

惯导找直工序：①高精度陀螺仪在惯导机器人运行时，结合机器人内部数据，完成对整条刮板输

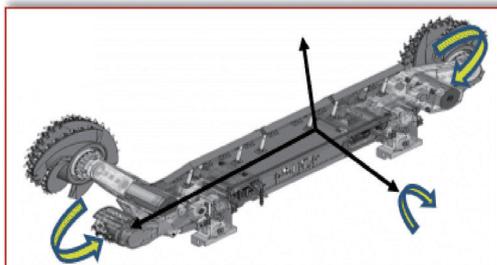
送机轨迹的绘制。测绘出来的轨迹数据通过无线通信方式，由惯导机器人和基站进行上传，接入自动化系统。惯导机器人生成的刮板输送机运行轨迹曲线，与实际轨迹的偏差量 ≤ 50 mm；②电液控主机的找直系统软件，通过对惯导机器人上传的惯导轨迹数据进行分析，计算出全序列液压支架对应的拉架行程量；③找直程序与电液控主机通信，给电液控下发调直策略指令，液压支架控制器执行电液控主机发出的调直指令，通过液压支架电液控系统对拉架行程量进行控制，进而达到工作面自动找直的目标。完成找直后的全工作面直线度偏差，可在300 m距离范围内控制在500 mm以内。

(3) 激光雷达扫描功能

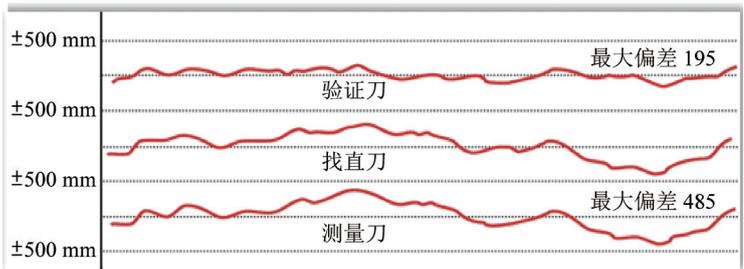
机器人上搭载的激光雷达，采用“检测发出的激光返回时间”方式进行测距（即TOF测距），能够以9.2 kHz的采样频率对周围环境进行实时扫描。在照射黑色物体（反射率仅为10%）的情况下，仍能保持10 m的有效距离，检测分辨率为30 mm，检测距离



(a) 电液控制系统软件界面



(b) 工作面坐标轴示意



(c) 惯导系统找直曲线

图3 自动化系统找直界面

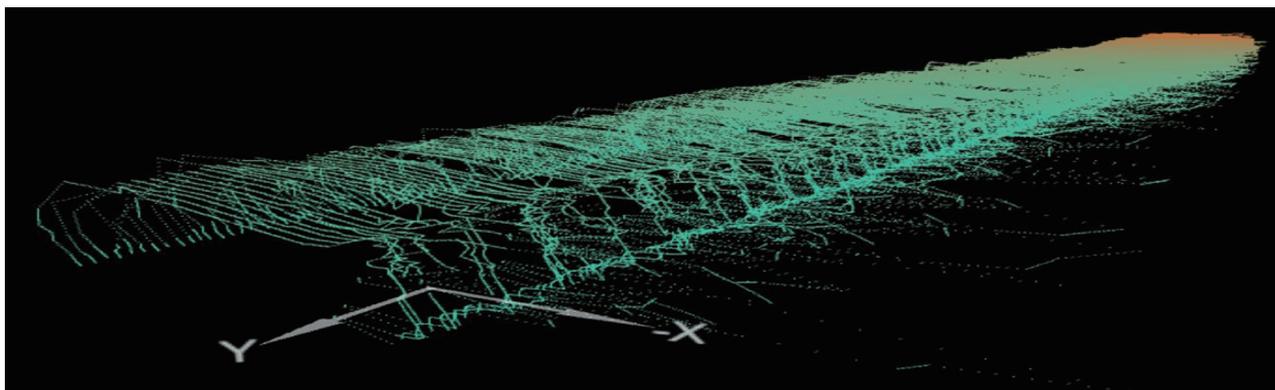


图4 激光雷达现场建模

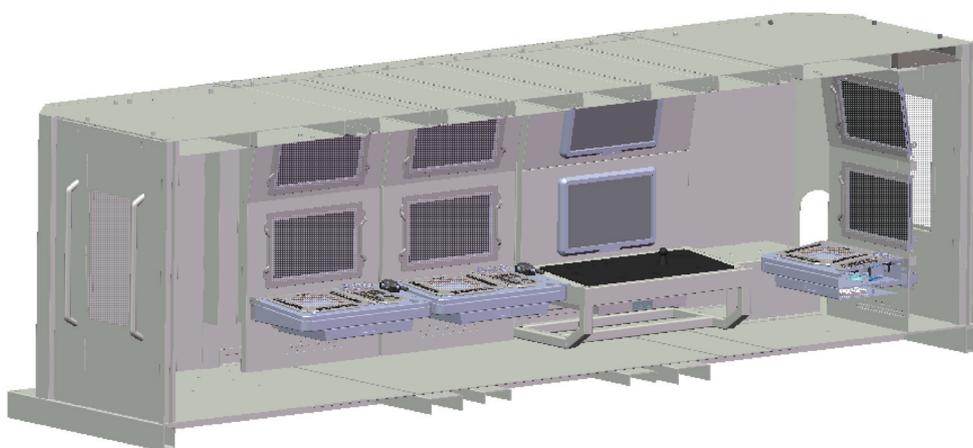


图5 巷道集控操作台

与实际距离误差可以控制在 ± 50 mm。此外，在旋转检测的过程中，设备的角分辨率可以随着实际旋转频率进行实时调整，保证了设备在旋转环境下的使用效果。

激光雷达现场建模如图4所示。在实际使用时，惯导雷达机器人在轨道上行走，激光雷达会以预设的频率旋转，激光雷达会根据扫过的截割面、顶板、液压支架等设备的点云，建立现场模型。通过对截割面部分进行实时分析，可以对采煤机的后续截割进行指导。配合对采高、压力等各项传感器数据的监控和汇总，可以建立一整套三维地质模型。在智能化系统建立三维模型的基础上，将采煤机的路径规划引入到智能控制中，系统自动计算生成合理的采煤路径。可实现和保障采煤机在采煤过程中工作面底板的完整性和平整性，提高工作面的采煤质量。

组合式集控中心

巷道集控操作台如图5所示，在巷道列车上设置一套集控中心，集控中心包括黑龙系统操作台、显示屏及计算机，以及电液控、“三机”控制、视频、巡检、惯导等系统显示屏和计算机，同时给变频一体机主机和泵站主机预留空间。

集控中心采用组合式设计。操作台和塔式主机均采用单元化设计，每个单元功能明确，便于使用。操作台上的按键支持“再编程”，根据现场情况以及客户需求，对操作台的功能进行设定，保证操作台能完美适用于现场环境。塔式主机采用“多层累加”的模式，计算机、交换机、硬盘刻录机以及UPS备用电源，在外形上保持统一，叠放后用附件固定。塔式主机一般在监控中心外侧独立放置，利于设备散热。此外，在后续使用过程中，若需要对监控中心的功能进行添加，也可以通过直接



增加塔式主机层数的方式进行实现。

全场景快插光纤网络

在综采场景中，液压支架之间基站密度较大，采取传统的光纤熔接方式工序繁琐，耗时较长。此外，在推移液压支架时，支架动作往往会带来架间光纤的扰动。基于上述2点考虑，“无人巡检和智能化综采系统的融合”项目应用了快插光纤技术，光纤快插接口特点如图6所示。

光纤环网搭建成功后，实现的功能包括：①通过环网站内置的交换机模块，将整个综采工程中各个子系统的通信协议进行统一，通过以太网的信号形式接入输送带自动化系统的监控中心；②巷道2.4G的WiFi覆盖，保证智能巡检仪和移动终端能以无线的方式接入系统，拓宽监控功能的适配范围；③以快插光纤环网作为载体，选用矿用网络型云台摄像机，可以搭建一套综采视频监控系統，提高对整个工作面生产场景的监控力度。

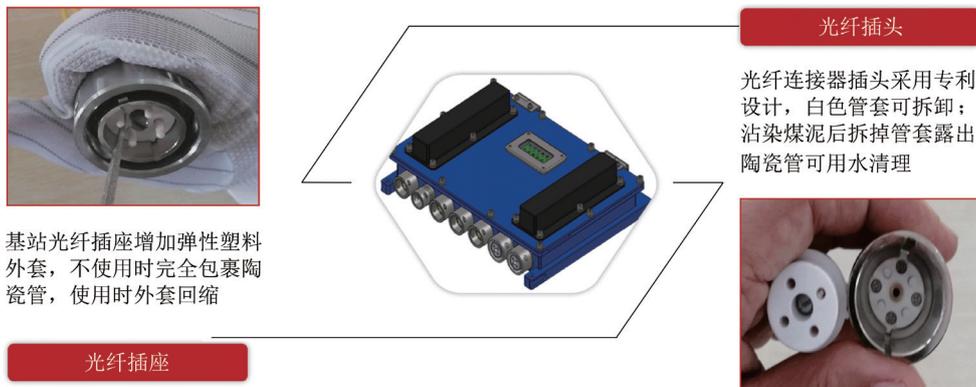


图6 光纤快插接口特点



图7 矿用5G系统结构

未来规划及总结

未来规划

(1) 第5代移动通信技术的升级

第5代移动通信技术(5G)是具备高带宽、低时延和广连接特点的新一代宽带移动通信技术,其核心的3大特点与煤矿生产需求高度契合。因此,自动化工程的未来规划,离不开在5G技术方面的升级。矿用5G系统结构如图7所示。

待5G技术成熟后,石圪台煤矿计划开展5G技术在全矿的普及使用。以单生产场景作为起点,逐步实现对旧有光纤网络的替代,完成井上井下基于无线传输的互联。同时加强5G相关的IDMZ工业隔离区的建设,建立矿井云平台,实现云监控、云诊断等功能。

(2) 基于“矿鸿”系统的万物互联

目前,国家能源投资集团有限责任公司计划开始推广“矿鸿”系统在煤矿生产行业的应用,石圪台煤矿也计划参与其中。在对井下设备完成“矿鸿”改造后,“矿鸿”将整合各子系统或生产场景之间的“碎片化”架构,消除“信息烟囱”现象,完成矿井各系统的深度互联,建立一个基于“矿

鸿”系统的智能生态圈。

总结

煤矿机器人的应用将影响现有智能化工作面人工巡检作业模式,作业人员数量将进一步减少,对安全生产将起到积极作用。对于薄煤层工作面,巡检机器人可解决人员行走困难、观察盲区大等问题。煤矿井下机器人的研发,将会带动工作面“三机”设备之外的移动巡检机构市场需求,低成本、高性能的工作面快速巡检系统,有利于煤炭企业开发出煤炭开采无人化、智能化的成套装备和技术,以及提高我国煤矿高端制造业的水平。

■ 责任编辑:李金松

作者简介:

第一作者:冯晓斌,高级工程师,硕士,现任国能神东煤炭集团有限责任公司石圪台煤矿党委书记、矿长,主要从事智能化无人开采研究和管理工作。E-mail:10015396@ceic.com

通讯作者:方世巍,工程师,现任国能神东煤炭集团有限责任公司石圪台煤矿机电管理办公室主管,主要从事智能矿山网络基础设施建设等工作。E-mail:10040431@ceic.com

作者单位:国能神东煤炭集团有限责任公司石圪台煤矿

热点问答

智能化煤矿对通信网络的需求有哪些?

(1) 大带宽。主要面向视频监控、远程控制场景的实时数据回传以及监测监控数据传输,以视频监控为例,为了保证视频画面的清晰度和流畅性,以H.264标准编码时,一路1080p的摄像头至少需要4Mbit/s带宽,设计要求应达到60Mbit/s以上,在高清摄像头密集的环境要求会更高。

(2) 低时延/高可靠。主要面向远程控制、远程(无人)驾驶等场景的时延和可靠性需求,一般要求双向时延小于20ms,可靠性达到99.99%或者99.999%以上。

(3) 移动性。自动巡检、自动驾驶等都有移动性的要求。

(4) 数据安全。矿山网络业务包括作业环境感知、控制信息下发、流程调度等,具备典型的封闭生产区域的特点,对数据安全性有很高的要求,数据不出园区,矿山通信网络业务与运营商公网业务必须保证有良好的隔离。

(5) 设备安全。井下安装设备必须要通过安标国家矿用产品安全标志中心的认证,并获得相关的煤矿安全证书。

——摘自《中国煤矿智能化发展报告(2022年)》