



移动扫码阅读

庞义辉,王国法,任怀伟.智慧煤矿主体架构设计与系统平台建设关键技术[J].煤炭科学技术,2019,47(3):35-42.doi:10.13199/j.cnki.est.2019.03.005  
 PANG Yihui,WANG Guofa,REN Huaiwei.Main structure design of intelligent coal mine and key technology of system platform construction[J].Coal Science and Technology,2019,47(3):35-42.doi:10.13199/j.cnki.est.2019.03.005

## 智慧煤矿主体架构设计与系统平台建设关键技术

庞义辉<sup>1,2</sup>,王国法<sup>1,2</sup>,任怀伟<sup>1,2</sup>

(1.天地科技股份有限公司 开采设计事业部,北京 100013;2.煤炭科学研究总院 开采研究分院,北京 100013)

**摘要:**针对煤矿建设过程中存在的信息孤岛、子系统割裂等问题,提出了以“自主感知与控制-信息传输系统-操作平台-井下系统平台-生产经营管控平台”为主线的智慧煤矿建设主体架构,通过底层的自主感知系统对井下的“人-机-环-管”信息进行全面感知,并对感知信息的数据格式、通信协议、存储方式等进行统一,构建了井下多源异构大数据共享平台,实现了井下各子系统之间的数据统一管理与信息共享。利用统一操作平台对井下生产系统、安全保障系统、综合保障系统进行统一管理,解决了信息孤岛、子系统割裂等问题。井下系统平台不仅为上层的生产经营管理平台提供数据支撑,而且为底层机械设备的智能操控提供决策依据,实现了井下信息感知、分析、决策、控制的智能化操控。将智慧煤矿智能生产系统细分为地质及矿井采掘运通信息动态管理平台、井下精准定位导航通信管理操作平台、智能化少人采掘系统综合管理平台,详细阐述了智能综采子系统间的组织架构与实现路径。按照井下危险源的种类对智慧煤矿智能安全保障系统进行了分类,搭建了智能安全保障系统的主体架构,分析了井下危险行为、危险区域识别系统的技术路径。基于井下采掘工程需求分析,对智慧煤矿智能综合保障系统进行了分类,构建了智能综合保障系统的主体架构,详细论述了井下设备在线诊断与远程运维系统的实施过程。从基础理论、信息感知、数据处理、高效传输、精准控制5个方面,对未来需要突破的智慧煤矿建设关键技术进行了展望。

**关键词:**智慧煤矿;物联网;大数据平台;图像识别;远程运维

**中图分类号:**TD984      **文献标志码:**A      **文章编号:**0253-2336(2019)03-0035-08

### Main structure design of intelligent coal mine and key technology of system platform construction

PANG Yihui<sup>1,2</sup>,WANG Guofa<sup>1,2</sup>,REN Huaiwei<sup>1,2</sup>

(1. Coal Mining and Designing Department, Tiandi Science & Technology Co., Ltd., Beijing 100013, China;

2. Coal Mining Branch, China Coal Research Institute, Beijing 100013, China)

**Abstract:** In view of the problems of isolated information and fragmented subsystems in the process of coal mine construction, the main structure of intelligent coal mine was proposed based on the system architecture of the independent perception and control, information transmission, unified operation platform, underground system platform and production management and control platform. The underground multi-source data sharing platform was established through comprehensive monitoring the information based on the underlying system of autonomous perception system and unifying the data-format, communication protocol, communication mode and so on, which implemented the unified data management and sharing of the subsystems. The unified operation platform was used to manage the underground production system, safety support system and comprehensive support system unified, which solved the problems of the isolated information island and the subsystems disconnection. The underground system platform not only provided data support for the upper production management and management platform, but also provided decision-making basis for the intelligent control of the underlying mechanical equipment, which realized the intelli-

收稿日期:2019-02-01;责任编辑:赵瑞

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2017YFC0603005)

作者简介:庞义辉(1985—),男,河北保定人,副研究员。E-mail:pangyihui@tdkcsj.com

gent control of underground information perception, analysis, decision-making and controlling. The intelligent production system of the intelligent coal mine was subdivided into the geological and mine mining information dynamic management platform, precise positioning, navigation and communication management and operation platform, and the intelligent integrated management platform of the low-manpower mining system, and the organizational structure and technology path between the subsystem of longwall mining was described in detail. The safety guarantee system of intelligent coal mine were classified based on the type of hazard, the main structure of the intelligent safety guarantee system was established, and the technical path of the underground hazard behavior and regional identification system was analyzed. The intelligent comprehensive safety guarantee system was classified based on the demand analysis of the underground mining engineering. The intelligent comprehensive safety guarantee system was constructed, and the implementation process of the on-line diagnosis and remote operation and maintenance system of the underground equipment was discussed in detail. The key technologies of the intelligent coal mine construction needed to be broken through in the future were prospected from five aspects, such as basic theory, information perception, data processing, efficient transmission and precise control.

**Key words:** intelligent coal mine; internet of things; big data platform; image identification; remote operation

## 0 引言

能源是人类生存和发展的物质基础,2017年全球煤炭资源消费量占能源消费总量的28%,我国煤炭资源消费量占能源消费总量的60.4%,在相当长时间内煤炭仍将是我国的主体能源<sup>[1]</sup>。煤矿智能化开采是煤炭工业转型升级的战略方向和发展目标,是保障国家能源安全、实现煤炭工业高质量发展的核心技术支撑。

智能化是继工业化、自动化、信息化之后科技革命领域的一次新突破,以物联网、大数据、机器人及人工智能等技术为驱动力的第四次工业革命将极大地提高生产力,为适应第四次工业革命与科技创新发展的新趋势,煤炭产业必须由机械化、自动化向智能化、无人化转型升级,进行智慧煤矿建设。目前,我国煤矿智能化开采尚处于初级阶段,针对智慧煤矿建设过程中存在的诸多问题,国内外学者开展了广泛而深入的研究,其中文献[2-4]对智慧煤矿的概念、内涵等进行了阐述,认为智慧煤矿是煤矿机械化、信息化与自动化的深度融合,通过对井下人员、设备、环境的自主感知,进行煤炭生产过程不同需求变化的智能决策与控制。文献[5-7]针对智慧矿山存在的信息化标准缺失、信息孤岛等问题,提出了智慧矿山的整体架构,分析了智慧矿山建设过程中存在的技术难题及发展方向。文献[8-11]提出了基于大数据与云计算的智慧矿山智能决策支持整体架构及研发思路,分析了智能决策过程设计存在的关键技术难题。文献[12-13]研究了智慧矿山管理基础操作平台,详细介绍了涉及的物联网、大数据及三维可视化系统等相关技术。文献[14-17]详细分析了煤矿大数据的来源、分类及应用现状,提出了煤矿大数据、物联网等技术的发展方向。

以往研究成果主要从智慧煤矿的定义、系统总

体技术架构、关键技术等方面进行了理论研究,但相关技术架构体系与平台建设路径尚不十分清晰。笔者针对智慧煤矿建设过程中存在的总体架构不清晰导致子系统割裂、信息孤岛等问题,提出了智慧煤矿建设的总体技术架构,搭建了基于人-机-环-管信息全面感知的智慧煤矿多源异构信息大数据平台,研究了基于智慧煤矿统一操作系统平台的井下子系统组成与平台建设思路,提出了智慧煤矿关键技术的发展方向。

## 1 智慧煤矿建设主体架构

20世纪90年代后期,美国率先提出了“数字地球”的概念<sup>[18]</sup>,并随着计算机、网络、信息化等技术的快速发展,“数字地球”的定义逐渐向各个领域延伸,“数字矿山”的概念应运而生,在神东集团锦界煤矿、黄陵一号煤矿等进行了数字化矿山建设,初步实现了综采工作面生产过程的自动化、少人化及矿井信息系统的集成。近年来,随着人工智能、大数据、物联网、云计算等高新技术的快速发展,以“人-机-环-管信息全面自主感知、数据深度高效融合、自主学习、智能决策、精准协同控制”为特征的智慧煤矿建设成为煤炭工业转型升级的重要标志,智慧煤矿建设将再次大幅提升我国煤矿智能化、自动化、少人化发展水平。

由于智慧煤矿是近几年提出的一种煤炭安全、高效、智能开采新模式,智慧煤矿的概念、标准、总体架构、系统组成、关键技术等尚未形成统一的认识。笔者及研发团队基于近年来对综采工作面自动化、智能化生产系统与数字化矿山建设的经验积累<sup>[19-20]</sup>,提出了基于“自主感知与控制-信息传输-统一操作平台-井下系统平台-生产经营管控平台”的智慧煤矿建设系统主体架构,如图1所示。

智慧煤矿的底层主要为基于各类传感器的信息



图 1 智慧煤矿建设主体架构

Fig. 1 Mine architecture of intelligent coal mine construction  
感知系统及精准执行机构,通过在井下不同区域布设不同类型的传感器,实现对矿井内“人-机-环-管”信息的全面感知,其感知信息以数据、音频、视频等形式通过高速网速传输系统传送至智慧矿山统一操作系统平台,通过该平台进行多源异构数据的格式统一、通信协议转换等,为上层各子系统间的数据共享与互联互通提供条件。统一操作系统平台通过对采集的信息进行清洗、分析、挖掘与关联融合,形成智慧矿山多源信息大数据平台,为上层的井下系统平台提供控制与决策依据。

受制于网络带宽及信息传输响应的要求,可采用分布式策略将不同区域、不同类型的信息先进行初步清洗与分析,再将有效数据传输至智慧矿山多源异构信息大数据平台,减少无效信息的传输,提高网络的传输效率。

井下系统平台可划分为底层的矿井三维地质数据综合管理平台,中间层的生产系统、安全保障系统、综合保障系统,以及顶层的视频增强及实时数据驱动三维场景再现远程干预操作平台,其中底层的矿井三维地质数据综合管理平台为中间层的生产系统、安全保障系统、综合保障系统提供地质数据支撑。基于上述智慧煤矿多源异构信息大数据平台与矿井三维地质数据综合管理平台,实现中间层的生产系统、安全保障系统、综合保障系统之间的数据共享与智能联动,同时还可以保持各子系统功能的独立,最终通过视频增强及实时数据驱动三维场景再现远程干预操作平台进行井下作业场景的实时展现与智能操控。

井下系统平台的生产经营数据,如产量、人员工资、物料消耗等,为顶层的生产经营管理平台提供决策

依据;井下系统平台的决策结果与控制信息将传送至智慧煤矿统一操作平台,并经信息传输系统传送至各设备的控制、执行机构,实现对底层设备的智能操控。

上述智慧煤矿建设主体架构的生产系统、安全保障系统、综合保障系统既独立运行又相互关联,井下系统平台的各子系统既可以共用各类传感器感知的多种数据信息,又根据各子系统内的数据驱动模型进行独立决策与控制,实现了多源异构数据的融合共享、单一系统的独立决策及系统间的智能联动。

## 2 基于工业物联网的智慧煤矿统一操作平台

近年来,我国煤矿自动化、信息化技术迅猛发展,各类智能传感器的广泛应用实现了矿井各子系统海量数据的采集与存储,但由于尚未建立统一的煤矿信息化标准体系,设备间的通信协议、数据格式等缺乏统一的标准,采集的海量数据难以有效利用,导致各子系统独立封闭运行,形成了数据孤岛,难以实现互联互通与智能联动。

物联网是通过各类传感器对人-机-环-管等信息进行实时采集与获取,并利用采集的信息进行系统的智能分析、决策与控制。基于工业物联网的智慧煤矿统一操作平台则主要通过对井下各类通信协议进行转换、对各类传感器采集的信息进行数据格式统一、数据抽取、数据清洗、数据转换与校验、数据建模、数据挖掘与深度融合,形成智慧矿山多源异构信息大数据服务平台,并通过建立统一的数据服务接口,为上层应用提供统一的数据服务,实现数据的共享,为各子系统提供决策依据,如图 2 所示。

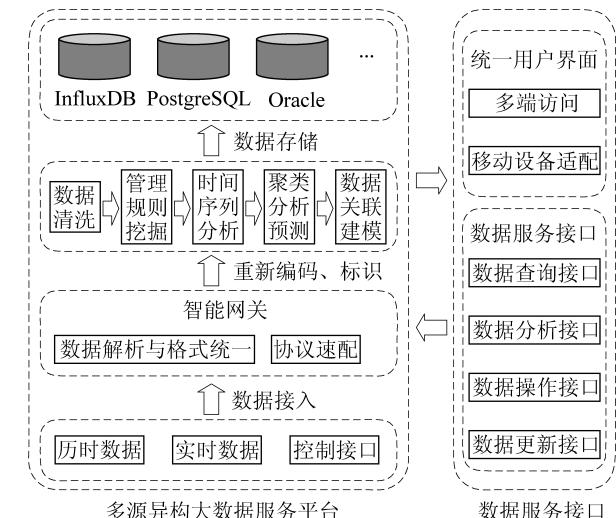


图 2 智慧煤矿统一操作平台

Fig. 2 Unified operating platform of intelligent coal mine

智慧煤矿底层各类传感器采集的实时数据及系统存储的历时数据必须采用统一的数据格式,能够

用统一的、无例外的方式进行程序解析。采集的所有数据统一采用数据点表来定义,即每个数据采集点必须有唯一的编号、统一的数据类型、统一的监测类型等。为了实现对底层执行机构的控制,需要提供执行机构的控制接口,并能够给予操作系统相关控制动作是否完成的反馈信号。

采用协议解析、中间件等技术对 ModBus、OPC、CAN、Profibus 等井下常用的通信协议和软件通信接口进行兼容,实现数据格式的转换和统一,并通过 HTTP、MQTT 等方式实现将采集的数据传输至云端,满足数据的分布式存储与管理。

基于不同的应用场景对采集的数据进行重新统一编码、标识,采用 Hadoop、Spark、Storm 等分布式处理架构,进行海量数据的批处理和流处理,运用数据冗余剔除、异常检测、归一化等方法对数据进行清洗。根据数据类型及应用场景要求,对数据进行分类分析,采用 Caffe、Torch、Theano、Weka、TensorFlow 等大数据分析模型进行数据的关联规则挖掘、时间序列分析、知识规则推理、聚类分析及预测等,建立不同应用场景的大数据关联模型与算法。

采用分布式存储、NoSQL 数据库、关系数据库、时序数据库等不同的数据库实现海量异构数据的分区存储,采用数据分发服务技术实现大量数据的实时、稳定传输。

基于上述智慧煤矿采集数据的实时接入、数据解析与协议速配、重新编码标识、数据清洗、聚类分析及关联建模等,形成了一个开放、安全、数据易获取和处理的多源异构大数据共享平台,向下可以实现感知数据的智能获取与高效融合分析,向上可以实现数据共享、各子系统的智能联动等,是智慧煤矿实现信息上传下达的咽喉,有效解决了现有数字矿山存在的信息孤岛及子系统割裂的问题。

统一操作系统平台的上层为矿井三维地质数据综合管理平台,该平台主要是将煤矿中的地质、测量、水文、采掘、机电、运输、通风等多部门、多层次的数据存储于统一操作系统平台的数据库内,并将上述各种数据集成为一张图进行图形展示与管理,形成智慧煤矿一张图,为上层的生产系统、安全保障系统、综合保障系统提供数据服务、图形展示及互联互通的基础。

### 3 智慧煤矿井下系统平台

#### 3.1 智慧煤矿智能生产系统

智慧煤矿的智能生产系统主要包括地质及矿井采掘运通信息动态管理平台、井下精准定位导航通

信管理操作平台、智能化少人采掘系统综合管理平台,其中,智能化少人采掘系统综合管理平台是智能生产系统的核心,主要包括智能综采系统、智能掘进系统、智能运输系统与智能辅助运输系统等,笔者以智能综采系统为例,对智能综采系统的主体架构进行分析。

通过智慧煤矿底层的位移传感器、压力传感器、倾角传感器等各类传感器对综采工作面的液压支架、采煤机、刮板输送机等设备的位置、姿态及围岩的控制状态等进行实时在线监测,监测结果通过信息传输层存储于统一操作系统平台的智慧矿山多源异构信息大数据服务平台,实现对综采装备信息的智能感知,如图 3 所示。基于采煤机的截割感知信息及矿井三维地质数据综合管理平台内存储的基础地质信息,建立工作面地质条件预测模型,对工作面前方未开采区域的地质信息进行预测建模,例如基于采煤机每一刀截割的煤层厚度,对后续 5 刀煤的截割厚度进行预测,并基于瓦斯涌出量、涌水量等实时感知信息,分别建立工作面瓦斯浓度预测模型、涌水量预测模型、地质构造变化预测模型等,不仅可以为工作面采煤机的智能连续截割提供逻辑控制基础,而且可以为智能安全保障系统、智能综合保障系统的智能联动提供控制逻辑。

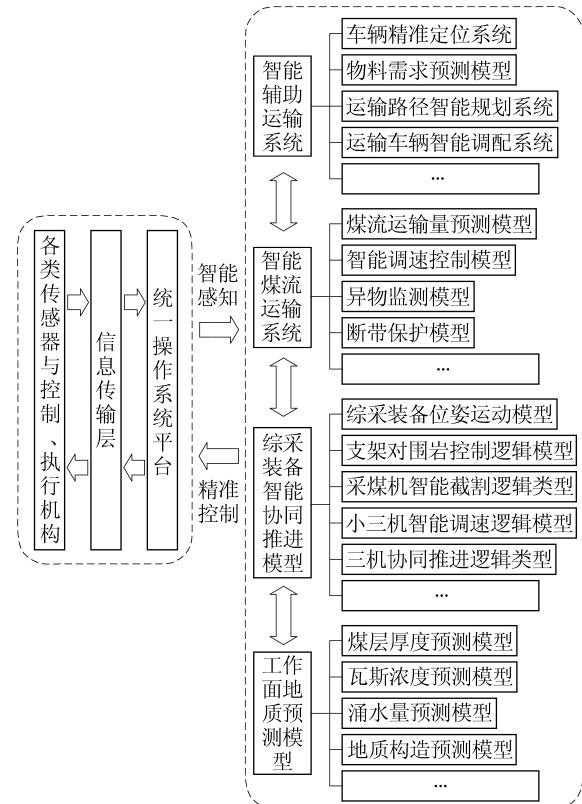


图 3 智能综采系统架构

Fig. 3 Architecture of intelligent fully mechanized system

综采装备智能协同推进模型是智能综采工作面生产系统的核心控制模型,包括综采装备位姿运动模型、支架对围岩控制逻辑模型、采煤机智能截割逻辑模型、小三机(刮板输送机、转载机、破碎机)智能调速控制逻辑模型、三机协同推进逻辑模型等,其中,综采装备的位姿运动模型是实现综采装备智能协调推进的基础,通过建立综采设备群的时空统一坐标系及各设备空间关联坐标系,得出综采设备群多体系统姿态、位置的运动关系模型;基于液压支架与围岩的动态耦合关系理论,建立液压支架对围岩高效支护控制逻辑模型;基于采煤机截割高度、厚度、速度等信息,建立综采工作面小三机智能调速控制模型;基于工作面地质条件预测模型及采煤机智能截割逻辑模型,对工作面综采工艺控制逻辑进行智能规划,并建立综采工作面三机协同推进模型,实现工作面综采装备的智能协调推进。

智能煤流运输系统主要基于综采工作面采煤机的截割煤量信息对带式输送机的煤流量信息进行预测,实现带式输送机的智能调速。目前,已有相关研发机构基于视频图像识别技术,建立了带式输送机的煤流量预测模型、带式输送机异物监测模型等,实现了通过视频图像信息对带式输送机内煤流量、异物等的智能识别与决策,如图4所示,从而实现煤流运输的智能化、无人化。



(a) 基于图像识别技术的煤量监测技术



(b) 基于图像识别技术的煤流内异物识别技术

图4 基于视频图像识别的煤量监测与异物识别技术

Fig. 4 Coal load monitoring and invaders recognition technology based on image recognition technology

智能辅助运输系统主要是通过对车辆精准定位、物料需求预测、运输路线智能规划、运输车辆智能调配等,实现对井下人员、物料的智能运输。目

前,井下车辆的定位与识别、运输路线的智能规划已经具有比较成熟的技术,随着地面无人驾驶技术的发展,相关技术有望应用于井下辅助运输系统,将车辆定位与识别、智能导航与无人驾驶技术相结合,可以实现井下辅助运输系统的智能化与无人化。

上述综采工作面地质预测模型、综采装备智能协同推进模型、智能煤流运输系统及智能辅助运输系统实现了对感知信息的智能分析与决策,通过将决策结果信息传送至底层的控制与执行机构,对综采装备群进行协同精准控制,从而实现综采工作的智能化、少人化开采。

随着综采工作面自动化、智能化技术的发展,我国已经在黄陵一号煤矿、转龙湾煤矿、斜沟煤矿、锦界煤矿等矿井建成了高度自动化的“有人值守,无人操作”综采系统<sup>[21-23]</sup>,但由于受制于综采工作面精准地质预测建模技术、封闭空间内综采(掘)设备的位姿监测及定位导航技术、复杂煤层条件的围岩控制逻辑建模技术、综采(掘)设备精准控制技术等,尚难以实现综采工作面的无人化开采,需要集中力量对上述核心技术进行持续攻关。

### 3.2 智慧煤矿智能安全保障系统

智慧煤矿智能安全保障系统主要是通过对井下的水、火、瓦斯、粉尘、顶板等危险源进行智能感知、分析、建模与评价,对井下可能发生的灾害进行预测,并在灾害发生后进行防灾措施的智能联动,实现煤矿重大灾害、重大隐患及生产设备、过程的不安全因素的早期预报、预警、预防与治理<sup>[24]</sup>。智慧煤矿智能安全保障系统的主体架构与原理如图5所示。

按照井下危险源的种类将智慧煤矿智能安全保障系统细分为瓦斯灾害防治系统、围岩灾害防治系统、水灾防治系统、粉尘灾害防治系统、火灾防治系统及危险行为、区域识别系统等,其中前5个子系统属于重大危险源防治系统,危险行为、区域识别系统属于事故隐患灾害防治系统。针对重大危险源主要采用瓦斯传感器、压力传感器、水量传感器、粉尘传感器、温度传感器等各类传感器对环境信息进行智能感知,基于感知的环境信息建立危险源风险预测评价模型,实现对危险源的发生位置、等级等进行评判,并根据评判结果对通风系统、排水系统、注浆系统、注氮系统、瓦斯抽采系统等进行智能联动控制,及时消除危险源的安全隐患。

当井下发生安全隐患时,则启动安全预警系统,并根据井巷环境监测信息智能规划逃生路线,同时启动灾害防治系统,实现井下灾害监测、预警、防治的综合联动。其中,井下危险源的预测评价模型是

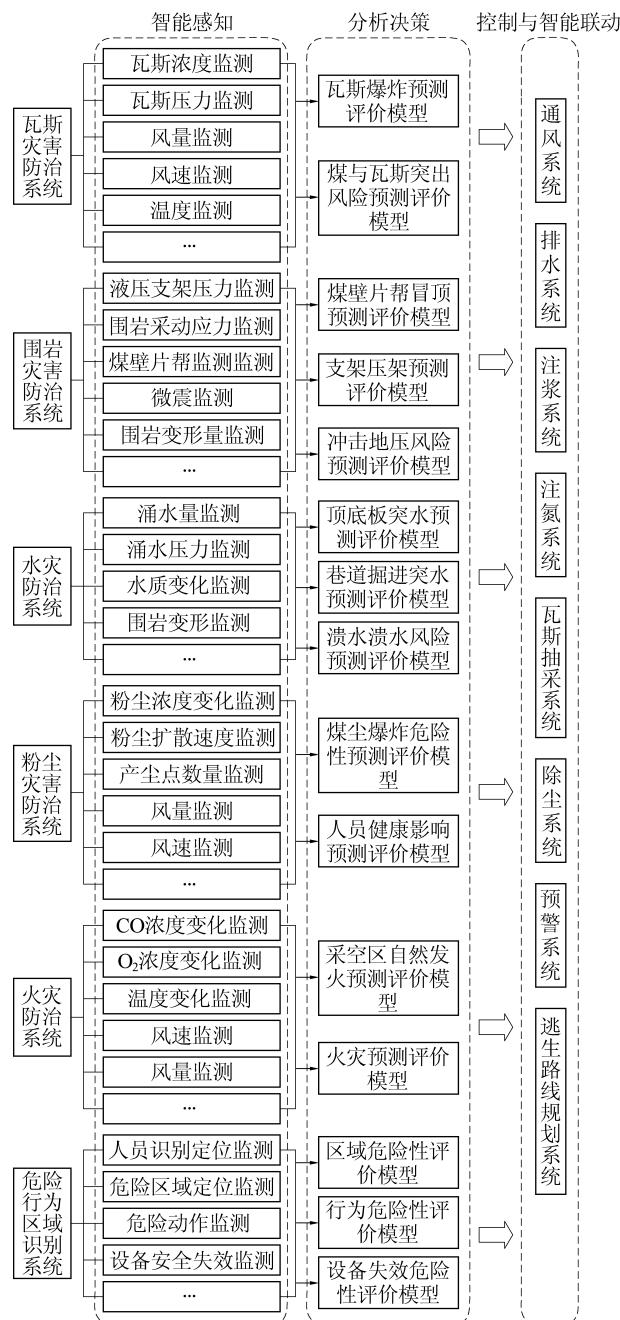


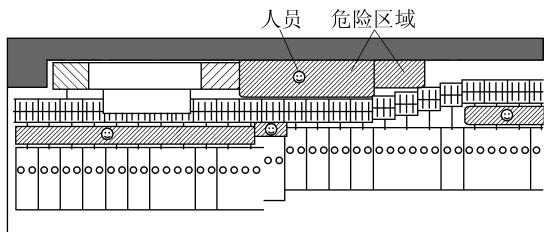
图5 智能安全保障系统主体架构

Fig. 5 Intelligent safety guarantee system architecture

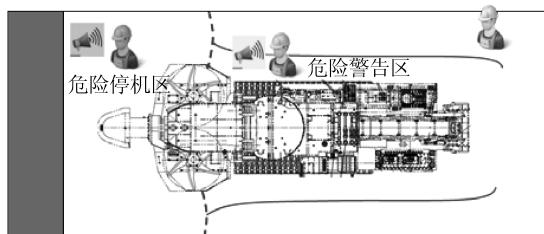
该系统的核心,以井下火灾防治系统为例,基于井下火灾隐患参数的智能感知,建立煤矿火灾预测模型,并对火灾的蔓延路径、井下空气污染扩散区域等进行预测,同时发出危险警报,并对最佳逃生路线、避灾预案进行智能规划,同时启动火灾防治系统;另外,若环境感知信息出现异常,同样可以通过煤矿火灾预测模型对火灾源头进行定位,并智能启动火灾防治预案。

井下危险行为、区域识别系统主要对井下的危险区域进行圈定,通过人员定位、识别技术对进入危险区域的人员进行识别与预警,目前相关技术已经

在综采工作面、掘进工作面进行应用,如图6所示。



(a) 综采工作面人员定位及危险区域识别



(b) 掘进工作面人员定位及危险区域识别

图6 综采(掘)工作面人员定位及危险区域识别  
Fig. 6 Personnel location and hazard area identification in fully mechanized mining and excavation

针对井下作业人员的危险动作、违章操作等安全隐患,目前已有科研机构在探索开发基于视频图像识别技术的井下违章监测系统,通过建立井下工人的正常行为模型与算法,对井下工人的正常行为进行自学习与训练,通过视频图像识别技术对井下工人的异常行为信息进行智能识别,并进行违章记录与预警。

目前,智慧煤矿智能安全保障系统的主要制约因素仍然是重大危险源的预测评价模型与算法的构建,由于煤矿瓦斯爆炸机理、冲击地压发生机理、底板突水机理等基础理论尚不十分清晰,因此,目前尚难以针对我国复杂地质条件建立危险源精准预测评价模型,但可以基于人工智能技术,采用聚类分析与模糊评判等方法对井下危险源进行智能识别与预警。

### 3.3 智慧煤矿智能综合保障系统

智慧煤矿智能综合保障系统主要实现对井下人员、设备、工程等进行智能供电、供液、供风、供料等,并对井下设备进行智能在线诊断与远程运维等。智慧煤矿智能综合保障系统主要包括井下机器人群协同控制与馈电管理平台、矿井设备和设施健康管理操作平台,受制于机器人相关技术的发展,本文主要进行矿井设备和设施健康管理操作平台的研究,其主体架构如图7所示。

根据矿井采掘工程实施进度计划,建立采掘工程实施智能保障模型,进行采掘工程所需人员、物料、设备的类型、数量等的分析预测,通过智能供电系统、智能供液系统、智能通风系统、智能物料运输

系统、设备故障诊断与健康管理系统、设备在线诊断与远程运维系统等保障采掘工程的顺利完成。

上述各子系统依然通过智慧煤矿底层的各类传感器对设备、人员等信息进行智能感知,并基于各子系统不同的应用场景建立逻辑控制模型,对感知信息进行智能分析、自学习与决策,并将决策信息传输至智慧煤矿底层的执行、控制机构,实现智能决策与控制。笔者以设备在线诊断与远程运维系统为例,进行系统架构、控制逻辑与实施流程分析,如图8所示。

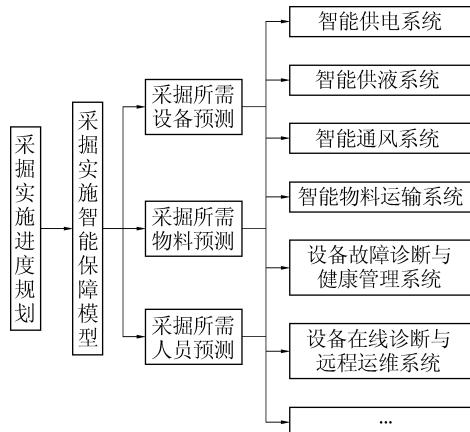


图7 智能综合保障系统主体架构

Fig. 7 Intelligent comprehensive guarantee system architecture

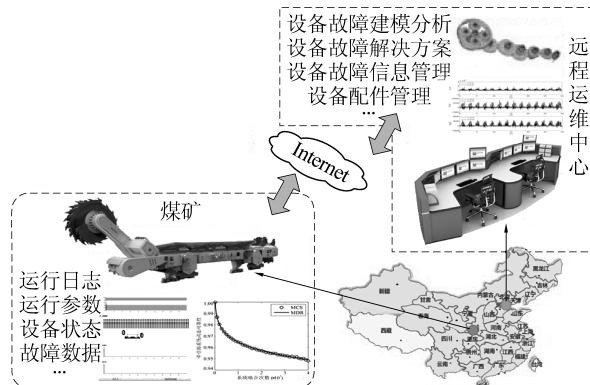


图8 设备在线诊断与远程运维系统

Fig. 8 On-line diagnosis and remote operations of equipment

以井下采煤机为例,安装在采煤机上的各种传感器可以对采煤机的运行状态信息进行实时监测,当出现监测信息异常时,则自动将采煤机故障信息通过互联网传送至远程运维中心,远程运维中心故障信息进行建模分析与故障检测,提出设备故障解决方案,并将所需配件运送至煤矿,实现井下设备的专业化远程诊断与维护。

## 4 结 论

1) 通过自主感知系统实现对井下“人-机-环-管”信息的全面感知,由统一操作系统平台对感知

信息进行融合分析处理,形成矿井多源信息大数据服务平台,为井下系统平台提供分析与决策的依据,井下统一操作系统平台实现对井下系统平台内各子系统的统一操控与管理,并将各系统相关数据上传至生产经营管理平台,实现煤矿企业智能决策,将控制信息反馈至自主感知与控制系统,实现井下设备的精准操控。

2) 通过建立统一的煤矿信息采集标准、数据格式与通信协议,实现数据的统一集中管理,建立矿井多源异构信息共享平台,有效解决了信息孤岛与子系统割裂的问题。

3) 智能生产系统的核心是实现综采(掘)作业的智能化,其中综采(掘)工作面地质信息精准感知与建模是基础,综采(掘)装备群智能协同控制模型是关键,综采(掘)装备群的高可靠性与精准控制是实现综采(掘)作业过程智能化、少人化的有效保障。

4) 井下水、火、瓦斯、粉尘、顶板等危险源的致灾机理是实现井下智能安全保障系统的基础,基于井下环境监测信息与灾害预测模型,实现井下重大安全隐患的智能预测、预警及防治措施的智能联动。

5) 基于矿井采掘规划建立井下人员、物料、设备等需求模型,通过智能供电、供液、通风、物料运输等系统,实现井下采掘的智能化、少人化。

## 参考文献(References):

- [1] 英国石油公司.2018年BP世界能源统计年鉴 [M].北京:北京格莱美数码图文制作有限公司,2018.
- [2] 王国法,王 虹,任怀伟,等.智慧煤矿2025情境目标和发展路径[J].煤炭学报,2018,43(2):295-305.  
WANG Guofa, WANG Hong, REN Huawei, et al. 2025 scenarios and development path of intelligent coal mine [J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(2): 295-305.
- [3] 卢新明,尹 红.数字矿山的定义、内涵与进展[J].煤炭科学技术,2010,38(1):48-52.  
LU Xinning, YIN Hong. Definition, connotations and progress of digital mine [J]. Coal Science and Technology, 2010, 38(1): 48-52.
- [4] 徐 静,谭章禄.智慧矿山系统工程与关键技术探讨[J].煤炭科学技术,2014,42(4):79-82.  
XU Jing, TAN Zhanglu. Smart mine system engineering and discussion of its key technology [J]. Coal Science and Technology, 2014, 42(4): 79-82.
- [5] 陈晓晶,何 敏.智慧矿山建设架构体系及其关键技术[J].煤炭科学技术,2018,46(2):208-212,236.  
CHEN Xiaojing, HE Min. Framework system and key technology of intelligent mine construction [J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(2): 208-212, 236.

- [6] 李梅,杨帅伟,孙振明,等.智慧矿山框架与发展前景研究[J].煤炭科学技术,2017,45(1):121-128,134.  
LI Mei,YANG Shuaiwei,SUN Zhenming,*et al.* Study on framework and development prospects of intelligent mine [J]. Coal Science and Technology,2017,45(1):121-128,134.
- [7] 吕鹏飞,何敏,陈晓晶,等.智慧矿山发展与展望[J].工矿自动化,2018,44(9):84-88.  
LYU Pengfei, HE Min, CHEN Xiaojing, *et al.* Development and prospect of wisdom mine [J]. Industry and Mine Automation, 2018,44(9):84-88.
- [8] 毛善君.“高科技煤矿”信息化建设的战略思考及关键技术[J].煤炭学报,2014,39(8):1572-1583.  
MAO Shanjun.Strategic thinking and key technology of informatization construction of high-tech coal mine [J].Journal of China Coal Society,2014,39(8):1572-1583.
- [9] 谭章禄,马营营.煤炭大数据研究及发展方向[J].工矿自动化,2018,44(3):49-52.  
TAN Zhanglu,MA Yingying.Research on coal big data and its developing direction [J].Industry and Mine Automation,2018,44 (3):49-52.
- [10] 申琢,谭章禄.基于数据挖掘的煤矿大数据可视化管理平台研究[J].中国煤炭,2016,42(12):86-89.  
SHEN Zhuo,TAN Zhanglu.Research on big data visual management platform of coal mine based on data mining [J]. China Coal,2016,42(12):86-89.
- [11] 沈宇,王祺.基于大数据的煤矿安全监管联网平台设计与实现[J].矿业安全与环保,2016,43(6):21-24.  
SHEN Yu,WANG Qi.Design and implementation of coal mine safety supervision networking platform based on big data [J]. Mining Safety & Environmental Protection,2016,43(6):21-24.
- [12] 谭章禄,韩茜,任超.面向智慧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 (9):59-63.  
TAN Zhanglu, HAN Qian, REN Chao. Design and applied research,integrated dispatching platform for intelligent mine [J]. China Coal,2014 (9):59-63.
- [13] 张辉,聂百胜,许滕.煤矿虚拟现实技术应用于发展[J].煤矿安全,2016,47 (10):118-121.  
ZHANG Hui, NIE Baisheng, XU Teng. Utilization and development of virtual reality in coal mines [J]. Safety in Coal Mines,2016,47 (10):118-121.
- [14] 申雪,刘驰,孔宁,等.智慧矿山物联网技术发展现状研究[J].中国矿业,2018,27 (7):120-125,143.  
SHEN Xue, LIU Chi, KONG Ning, *et al.* Research on the technical development status of the intelligent mine base on internet of things [ J ]. China Mining Magazine, 2018, 27 ( 7 ): 120 - 125,143.
- [15] 王智峰,屈凡非,田建军,等.基于海量数据分析的煤矿生产辅助决策支持系统的设计[J].工矿自动化,2011,37 (10):22-25.  
WANG Zhifeng, QU Fanfei, TIAN Jianjun, *et al.* Design of auxiliary decision support system of coal mine production based on mass data analysis [ J ]. Industry and Mine Automation, 2011 , 37 ( 10 ):22-25.
- [16] 朱进云.大数据架构师指南[M].北京:清华大学出版社,2016.
- [17] 张申,丁恩杰,赵小虎,等.数字矿山及其两大基础平台建设[J].煤炭学报,2007,32 (9):997-1001.  
ZHANG Shen,DING Enjie,ZHAO Xiaohu,*et al.*Digital mine and constructing of its two basic platforms [ J ].Journal of China Coal Society,2007,32 (9):997-1001.
- [18] 马荣华,黄杏元,蒲英霞.数字地球时代“3S”集成的发展[J].地理科学进展,2001,20 (1):89-96.  
MA Ronghua, HUANG Xingyuan, PU Yingxia. Development on the integrating of “3S” in the era of digital earth [ J ].Progress in Geography,2001,20 (1):89-96.
- [19] 王国法,李占平,张金虎.互联网+大采高工作面智能化升级关键技术[J].煤炭科学技术,2016,44 (7):15-21.  
WANG Guofa, LI Zhanping, ZHANG Jinhu.Key technology of intelligent upgrading reconstruction of internet plus high cutting coal mining face [ J ]. Coal Science and Technology, 2016, 44 ( 7 ): 15-21.
- [20] 王国法,庞义辉.特厚煤层大采高综采综放适应性评价和技术原理[J].煤炭学报,2018,43 (1):33-42.  
WANG Guofa, PANG Yihui. Full-mechanized coal mining and caving mining method evaluation and key technology for thick coal seam [ J ].Journal of China Coal Society,2018,43 (1):33-42.
- [21] 袁亮.煤炭精准开采科学构想[J].煤炭学报,2017,42 (1):1-7.  
YUAN Liang.Scientific conception of precision coal mining [ J ]. Journal of China Coal Society,2017,42(1):1-7.
- [22] 庞义辉,王国法.基于煤壁“拉裂-滑移”力学模型的支架护帮结构分析[J].煤炭学报,2017,42(8):1941-1950.  
PANG Yihui, WANG Guofa. Hydraulic support protecting board analysis based on rib spalling “ tensile cracking - sliding ” mechanical model [ J ].Journal of China Coal Society,2017,42(8): 1941-1950.
- [23] 王国法,庞义辉,任怀伟,等.煤炭安全高效综采理论、技术与装备的创新和实践[J].煤炭学报,2018,43(4):903-913.  
WANG Guofa,PANG Yihui,REN Huaiwei,*et al.*Coal safe and efficient mining theory, technology and equipment innovation practice [ J ].Journal of China Coal Society,2018,43 (4):903-913.
- [24] 张旭平,赵甫胤,孙彦景.基于物联网的智慧矿山安全生产模型研究[J].煤炭工程,2012,44(10):123-125.  
ZHANG Xuping,ZHAO Fuyin,SUN Yanjing.Study on safety production model of intelligent mine base on internet of things [ J ]. Coal Engineering,2012,44(10):123-125.