

矿山物联网人-机-环状态感知关键技术研究

袁亮¹, 俞啸², 丁恩杰², 赵小虎², 冯仕民², 张达³, 刘统玉⁴, 王卫东⁵, 黄艳秋⁶

- (1. 安徽理工大学能源与安全学院, 安徽 淮南 232001; 2. 中国矿业大学物联网(感知矿山)研究中心, 江苏 徐州 221008;
3. 北京矿冶科技集团有限公司矿山工程研究设计所, 北京 100160; 4. 山东科学院激光研究所, 山东 济南 250014;
5. 北京邮电大学电子工程学院, 北京 100876; 6. 不来梅大学电动力学与微电子研究所, 不来梅 28359)

摘要: 物联网技术的多学科交叉融合特性为解决矿山安全生产问题提供了全新的途径, 矿山“人-机-环”状态信息的实时精准感知是矿山物联网应用的基础。分析了矿山安全生产物联网技术体系架构, 围绕矿山物联网感知理论、智能传感技术、标准化方法、大数据分析服务几个关键问题, 建立了基于信息物理系统和数字孪生的虚实融合感知理论模型, 提出了矿山“人-机-环”信息统一描述方法, 研究了矿用光学等多参数传感与能量自动捕获技术, 规范了矿山物联网编码与交互协议标准, 设计了矿山物联网融合通信网络服务架构, 构建了矿山物联网大数据高效接入与深度分析应用服务体系, 实现矿山安全生产状态信息的全面精准感知、实时高效交互与智能分析应用。为提升矿山安全预防准备、监测预警、态势预判、综合保障技术水平, 提高矿山安全生产效率提供有力的科技支撑。

关键词: 矿山物联网; 虚实融合感知; 智能传感器; 融合通信网络; 大数据分析服务

中图分类号: TP393

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-436x.2020036

Research on key technologies of human-machine-environment states perception in mine Internet of things

YUAN Liang¹, YU Xiao², DING Enjie², ZHAO Xiaohu², FENG Shimin²,
ZHANG Da³, LIU Tongyu⁴, WANG Weidong⁵, HUANG Yanqiu⁶

1. School of Energy and Safety, Anhui University of Science & Technology, Huainan 232001, China
2. IoT Perception Mine Research Center, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China
3. BGRIMM Technology Group, Beijing 100160, China
4. Laser Institute, Shandong Academy of Sciences, Jinan 250014, China
5. School of Telecommunication Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China
6. Institute of Electrodynamics and Microelectronics, University of Bermen, Bermen 28359, Germany

Abstract: The multi-disciplinary cross-integration of Internet of things (IoT) technology provides a new way to thoroughly solve the problem of mine safety production. The real-time accurate perception and intelligent analysis of mine “human-machine-environment” status information is the basis of mine IoT application. The technological architecture of the IoT was analyzed for mine safety production, the virtual-real fusion perception theory model based on CPS and DT was established to solve key issues in mine IoT, such as perception theory, intelligent sensing technology, standardization method and large data analysis service. A unified description method for mine “human-machine-environment” information was put forward, the multi-parameter sensors and intelligent autonomous sensing devices were developed, and the mine IoT coding and interaction protocol standards were standardized. In addition, it was designed for the mine IoT converged communication network service architecture, the application service system of high-efficiency access and deep analysis of large data in mine IoT was constructed, which realized the comprehensive and accurate perception, real-time and efficient interaction and intelligent analysis application of mine safety production status information. It also provides strong scientific and technological support for the mine safety prevention preparation, monitoring and early warning, situational prejudgment, comprehensive protection and other technical levels.

Key words: mine Internet of things, virtual-real fusion perception, smart sensor, converged communication network, big data analysis service

收稿日期: 2019-10-21; 修回日期: 2020-01-30

通信作者: 俞啸, yxcumt2006@163.com

基金项目: 国家重点研发计划基金资助项目 (No.2017YFC0804400, No.2017YFC0804401, No.2017YFC0804404)

Foundation Item: The National Key Research and Development Program of China (No.2017YFC0804400, No.2017YFC0804401, No.2017YFC0804404)

1 引言

在我国的能源结构中，煤炭占一次性能源和消费结构的 60%以上。随着煤矿开采深度的不断增加，现场环境愈加复杂，生产体系日渐庞大，煤炭安全高效开采面临巨大挑战。煤矿的安全生产问题一直是国家关注的重点，经过多学科多年努力，矿山安全生产水平得到显著提高，但安全形势依然严峻^[1]。物联网、大数据、人工智能技术的多学科交叉融合特性为解决矿山安全生产问题提供了全新的途径。《煤炭工业发展“十三五”规划》和《能源技术革命创新行动计划（2016—2030）年》中指出，要推动物联网、人工智能、大数据技术在智慧矿山建设领域中的深度应用，重点突破煤炭绿色安全无人开采等技术，解决煤矿安全生产智能管控与风险防控问题^[2]。

目前，我国矿山物联网建设还处于起步阶段，各种子系统级的物联网工程应用研究相继开展，取得了一定的研究成果^[3-5]，但矿山生产中的探测、采掘、运输、通风、排水、供电等生产过程包含的各类自动化、控制、信息、管理子系统多达百余个^[6]，诸多智能化的感知、控制、管理与决策问题尚未解决，面向整个矿山安全生产体系的成熟物联网解决方案尚未形成^[7-8]。矿山物联网感知技术是智能矿山应用服务的基础，“人-机-环”信息的精准

感知与状态在线判识可以为矿山生产过程的状态实时再现、过程演化跟踪、增强现实交互分析、设备智能调度与协同管控、安全态势预测预警、自主决策支持等提供信息支撑，是实现智能矿山建设需要首先突破的课题。

本文围绕物联网技术在矿山安全生产智能管控深度应用中的问题，给出了矿山安全生产物联网技术体系与架构，在此基础上，阐述了矿山安全生产“人-机-环”感知信息描述与知识建模方法，分析了新型高性能智能传感、物联网编码与交互协议标准、多源异构融合通信网络、大数据深度挖掘应用等几个方面的关键技术与研究内容。矿山物联网基础理论、关键技术与智能应用的突破，将为健全矿山生产安全体系、全面提升矿山生产安全保障与重大事故防控能力提供有力的科技支撑。

2 矿山安全生产物联网技术体系建设

矿山安全生产物联网建设目标是通过基础理论创新、关键技术突破、应用系统研发、技术集成示范，形成面向矿山安全生产过程的全面感知、物物相连、快速交互、在线判识、智能调度、协同管控、自主决策、预测预警的智能化服务体系，如图 1 所示。矿山安全生产物联网技术体系建设主要包括以下几方面内容。开展矿山“人-机-环”感知信息融

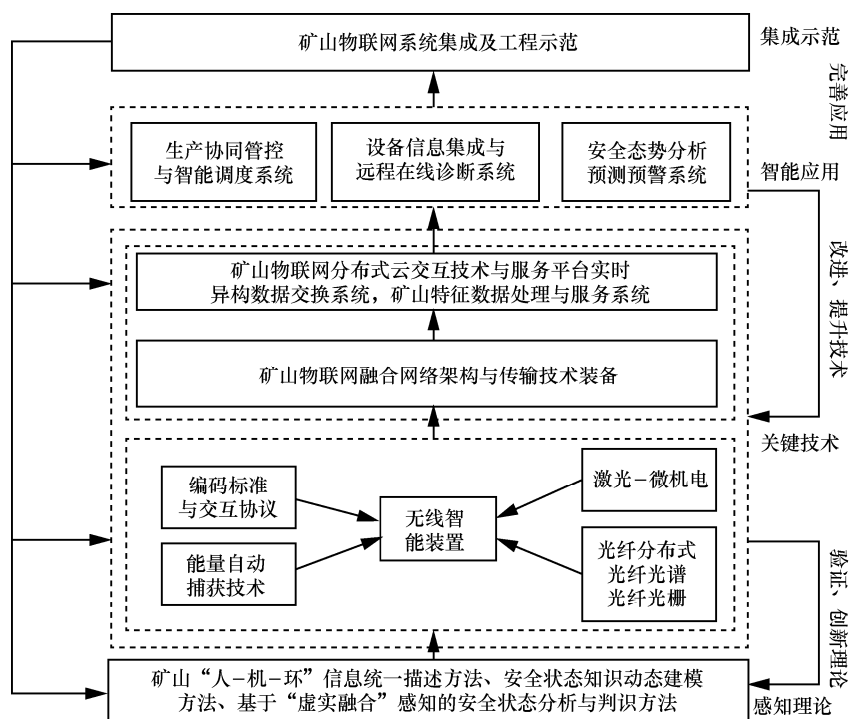


图 1 矿山安全生产物联网技术体系

合表示与安全辨识准则等基础理论研究，为矿山安全生产物联网的关键技术与装备研究提供理论依据；组织矿用高性能光学及无线智能传感技术攻关，实现能量自动捕获、超低功耗、宽量程、分布式多参数、高可靠性等技术突破，为装备研发提供技术支撑；制定矿山物联网编码、交互协议标准及矿山设备全生命周期信息集成方法，研发网络物联网融合传输技术与装备；研究矿山物联网云分布式架构，形成矿山大数据交换、智能处理与服务技术体系及平台；研发矿山特种设备全生命周期管理与远程在线诊断（PHM, prognostics health management）系统，安全生产全过程智能管控与调度系统，建立矿山安全态势分析及预测、预警系统；通过示范工程建设，完善基础理论、关键技术与装备、平台与应用系统的研究。

2.1 人-机-环状态感知理论与方法

人-机-环状态感知理论基于分析矿山安全生产过程“人-机-环”关键要素状态机理和演化规律，根据“人-机-环”感知信息特点，研究基于本体的矿山“人-机-环”生产过程信息统一描述方法，建立面向矿山安全生产过程实时再现、自然演化、智能交互的信息与知识表示体系，实现“人-机-环”生产过程信息的描述及知识的交换、共享和重用。研究矿山安全生产过程“人-机-环”多状态、多场景、多因素耦合作用下的物理模型与数字模型——数字孪生（DT, digital twin）的融合交互分析方法^[9-11]，建立基于信息物理系统（CPS, cyber-physical system）和DT的“虚实融合”感知模型。研究矿山物联网大数据分析，建立矿山“人-机-环”状态安全指标体系与知识库，研究灾害机理分析与数据特征挖掘相融合的矿山生产安全生产过程数据关联分析、深度挖掘方法体系，为矿山安全态势预测预警提供有力支撑。

2.2 人-机-环状态感知关键技术

人-机-环状态感知关键技术包括智能传感技术、高效信息交互与融合通信网络技术以及大数据管理平台。

1) 智能传感技术

在现有矿山“人-机-环”感知系统的基础上，针对传感器状态的不稳定、感知信息的不完整、通信接口标准的不统一，以及应用场景的局限性等问题，通过研发分布式、光纤光栅、激光、微机电系统（MEM, microelectro mechanical system）等低功耗、高灵敏度、宽量程、易维护传感器技术，拓宽

感知边界，解决安全隐患（特别是隐蔽灾害）的超前感知等难题；通过研究状态自诊断、能量自治、网络自治的智能传感技术，实现感知层的智能化管理；通过研究统一的感知信息编码标准，实现感知层信息的标准化接入。

2) 高效信息交互与融合通信网络技术

研究矿山物联网多终端、多系统之间的信息交互方法，实现矿山物联网的高效信息交互（物与物的高效连接）；研究适应矿山环境、支持各种类型系统的矿山物联网多系统融合网络架构，形成适用于井下分布式网关的高性能计算、大容量存储、高速通信、可靠链接管理与维护方法；研发井下智能边缘计算终端，提供智能分析、可靠通信、实时控制等服务，提升矿山生产过程实时智能交互与控制能力。

3) 大数据管理平台

矿山数据分散于各监测监控子系统，矿山大数据平台建设的研究工作已经陆续展开，目前仅完成了大数据的汇聚，面对异构分散的多源化的监控系统，需要解决矿山物联网大数据的高效管理、深入挖掘和智能化应用等问题。研究高效数据存取、标记与管理机制，为大数据知识发现服务奠定基础，研发矿山云交互式服务平台^[12-13]，解决矿山综合监测与控制的实时异构数据快速可靠交换、多源/多层次数据的分布式协同挖掘分析及智能化服务等难题。

2.3 智能化应用服务

研究基于数据驱动与知识驱动相结合的矿山设备智能调度与协同管控优化方法，研究设备运行状态多源传感器数据融合分析与状态诊断方法，建立面向矿山安全生产过程中的“采、掘、机、运、通、供电、排水、辅助运输”等装备与系统的智能诊断与协同管控平台，实现矿山安全生产过程中多设备之间的安全、高效、节能多目标优化的协同管控。研究大数据分析的矿山安全态势评价指标和方法体系，研发矿山安全态势分析及预测预警系统，实现对矿山安全态势的评价与预测信息的多维可视化，解决复杂环境下矿山安全态势难以预测的问题^[14]。

3 矿山人-机-环虚实融合感知理论

随着自动化、数字矿山及矿山数据集成技术的发展，矿山大数据平台的正在进行推广和建设，已经完成了矿山各监控系统数据的汇集，单个信息化矿井每年汇聚的数据量已经达到PB级，可以说是“富数据”；但是从大数据中挖掘的知识却很有限，

处于“贫知识”的状态。由于各系统数据描述逻辑上不一致,信息表达能力不足,数据含义不明确,存储形式不统一,系统间数据交互融合困难,从“富数据”中提取有效“知识”的能力受到限制,矿山数据虽然在物理上完成了汇聚,却难以得到有效的利用。因此,需要在矿山安全生产过程感知理论中寻求突破,实现矿山安全生产状态“知识”体系的构建,研究矿山“人、机、环”生产过程信息统一描述方法,实现矿山安全生产感知信息的数字化、模型化和统一描述;建立矿山 CPS 和 DT 的“虚实融合”感知体系,实现生产过程的实时再现、演化分析与智能交互;研发矿山“人、机、环”状态知识库,实现矿山生产过程安全状态知识的重构与复用;研究“人-机-环”状态判识方法,为生产过程安全状态的实时诊断与智能管控提供依据。

3.1 基于本体的人-机-环感知信息统一描述方法

本节结合矿山物联网的特点和本体描述中信息、知识表达的优势,分析“人-机-环”感知信息特点,在欧盟 oneM2M Base Ontology 规范基础上,提出了基于本体的矿山“人-机-环”生产过程信息统一描述方法,解决矿山“人-机-环”生产过程中多要素安全状态分析中面临的多源异构、信息分散、耦合复杂、矿山知识缺失和表达不规范问题,实现“人-机-环”生产过程信息的描述及知识的交换、共享和重用。

研究 OWL (Web ontology language) 本体建模、知识表示、知识抽取方法,重点围绕矿山安全生产中“人-机-环”中各要素感知信息的一致性描述,涉及人员行为过程数据(包括视频数据、动作数据、位置数据、体征数据等),矿山关键生产设备(包括采掘、运输、提升、通风、排水、支护等设备)状态参数,瓦斯、水、火、地质构造以及采动环境时空演变信息,为各要素建立一致的描述形式。描述中将安全要素定义为智能体,智能体由实体、属性、实体关系和服务接口组成,兼容各级要素的信息描述需求,提供可扩展的组织结构,实现数据结构的统一化和规范化。

针对矿山不同应用场景,设计一体化的信息交互体系,满足矿山物联网“人-机-环”感知要素多元化应用需求,方便多源异构系统间交互和接入。在描述规范中定义了统一形式的信息交互实体和数据访问接口,可以实现智能体与智能体之间的信息交互,也可以完成智能体与外部系统的信息交互,通过访问接口可以完成实体、实体属性、实体

间关系和服务接口的访问。

针对“人-机-环”感知信息描述问题,本节设计了 117 个概念(类)、属性及关系,构建了矿山人员、设备和环境本体,解决不同结构、量纲、属性、维度、层次的矿山感知信息相互孤立、管理混乱、知识难以获取等问题,实现“人-机-环”感知信息资源语义标注、可互操作、知识共享和重用的目的。基于语义本体和 oneM2M Base Ontology 的矿山设备描述模型如图 2 所示。该模型既能够适用于不同类型设备的共性特征,也可以满足特殊设备状态扩展描述的需求,能够完成对设备的基本信息、功能信息、运行状态信息、异常信息结构、描述方法、接口的统一管理,提供物联网平台下的信息组织、存储及访问的标准接口规范,并为设备状态的在线判识提供统一的数据访问和交互接口。

3.2 基于数字孪生的“虚实融合”感知体系

本节分析矿山安全生产过程“人-机-环”关键要素状态机理和演化规律,揭示多源感知信息与“人-机-环”安全状态相互作用过程机理,研究矿山安全生产信息表达与状态知识动态建模方法,基于数字孪生技术建立矿山“人-机-环”数字化虚拟模型,研究多维度在线监测 CPS 感知数据与虚拟模型的信息加载与融合交互方法,研究物理模型与虚拟模型之间的无缝融合与感知一致性呈现方法,建立地下基础设施运行全过程实时感知、演化分析与智能交互的“虚实融合”感知体系。

矿山物联网“虚实融合”感知体系如图 3 所示,首先,要完成矿山“人-机-环”物理模型的重构。人员方面,主要建立人员在不同工作场景下的体征状态模型、位置空间模型与行为动作模型;设备方面,主要建立“采、掘、机、运、通、供电、排水”等不同的设备系统的结构模型、组件模型与运行状态模型;环境方面,主要建立面向“煤岩体、水体、顶底板”等内环境的空间结构与孕育演化模型和面向“瓦斯、温度、风场”等外环境的分布与运移规律模型。在重构的“人-机-环”物理模型的基础上,基于物理仿真、三维重构或虚拟知识结构建模等方法,设计“人-机-环”要素的虚拟智能体,在物理模型的基础上增加了属性、约束、状态、行为、特征等信息,建立虚拟化知识表达结构,研究虚拟模型信息空间与物理感知信号空间的实时交互方法,实现虚拟数字模型对物理实体模型的演化模拟、状态判识和趋势分析。

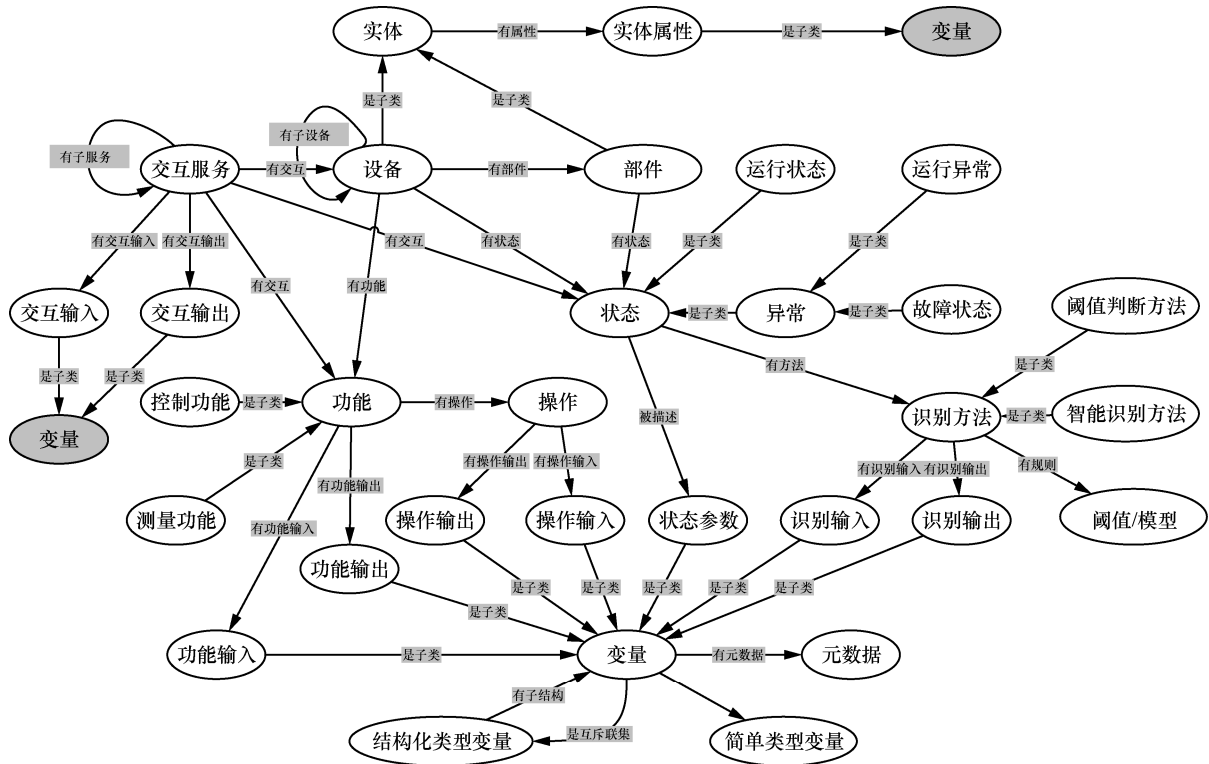


图 2 基于语义本体和 oneM2M Base Ontology 的矿山设备描述模型

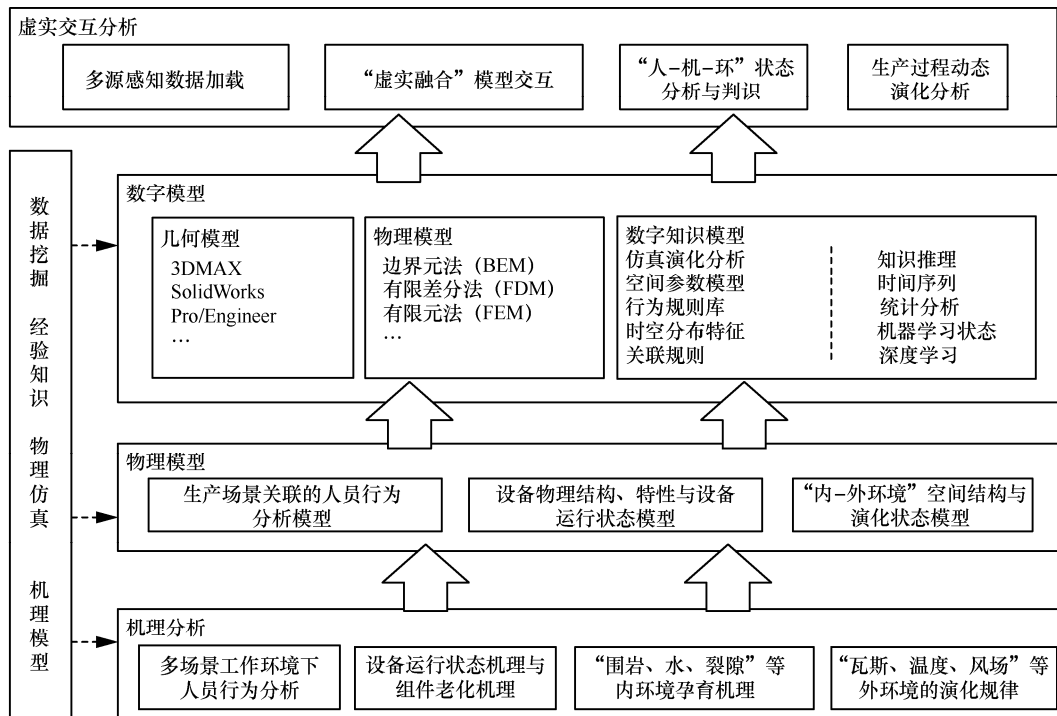


图 3 矿山物联网“虚实融合”感知体系

3.3 基于语义的人-机-环运行状态知识库

结合“虚实融合”感知体系，研究矿山生产过程“人-机-环”运行状态模式与异常发生机制，对状态模式、状态因素、传感数据、场景信息及状态

属性和关联关系进行本体语言描述，并通过相关理论和经验数据，建立异常状态诊断规则。收集现有的检修维护工程经验知识、设计资料、专业书籍、生产规程、安全标准、各系统领域专家工程实践经

验, 结合结构化、半结构化和非结构化数据管理相关技术, 实现专家经验知识的统一管理、复用检索、关联分析, 完成设备状态专家经验知识抽取。分析“人-机-环”运行状态与多源感知信息之间的关联关系, 融合多源传感器数据关联关系和专家经验知识, 基于本体建模、知识表示、知识抽取、故障树、故障模式-影响及危害性分析方法, 建立面向矿山生产过程“人-机-环”要素“多源信息-多状态”的知识关联关系与指标体系。

人员方面, 分析不同场景下的人员行为模式, 结合可穿戴装置传感信息和视频数据, 依据有关煤矿安全生产规定, 结合井下不同情境信息, 对矿工不安全行为规则进行整理归纳。研究人员自身安全行为状态特征、人员与设备物资交互过程的行为安全状态特征、人员与环境交互过程的行为安全状态特征, 以及人员与设备物资、环境同时交互过程的行为安全状态特征, 提取人员不安全行为规则, 在人员行为描述本体的基础上, 构建人员行为安全状态知识库。

设备方面, 针对矿山设备系统运行工况环境多

样化、设备构造复杂的问题, 构建矿山设备系统/关键部件状态知识库。分析多源感知信息、系统及设备运行状态、故障模式的一对多/多对多和非线性映射关系, 统计梳理各系统相关的机理知识和专家经验知识, 研究各系统部件典型特征信息, 构建知识生成规则。按预定的规则分解并统计分析各个系统及设备间的复用部分和相对独立的部分, 针对各部分的故障模式、故障机理、联动关系构建复用(部件级)状态知识库和设备系统级状态知识库。

环境方面, 收集矿山地质测量、钻探、物探、安全监测(通风、瓦斯、水、顶板、矿震等)等数据, 分析数据类型、结构、含义及其相互关系, 研究基于语义本体理论的矿山环境信息的有序组织、定位和提取技术, 结合矿山安全相关法律法规及瓦斯突出、采空区发火等灾害诱发机理, 建立矿山井巷内、工作面、采空区等区域的地质、瓦斯、水文等环境描述指标体系。采用事故树分析方法, 厘清矿山安全事故的参数条件与关联关系。基于事故树的瓦斯爆炸知识结构如图 4 所示,

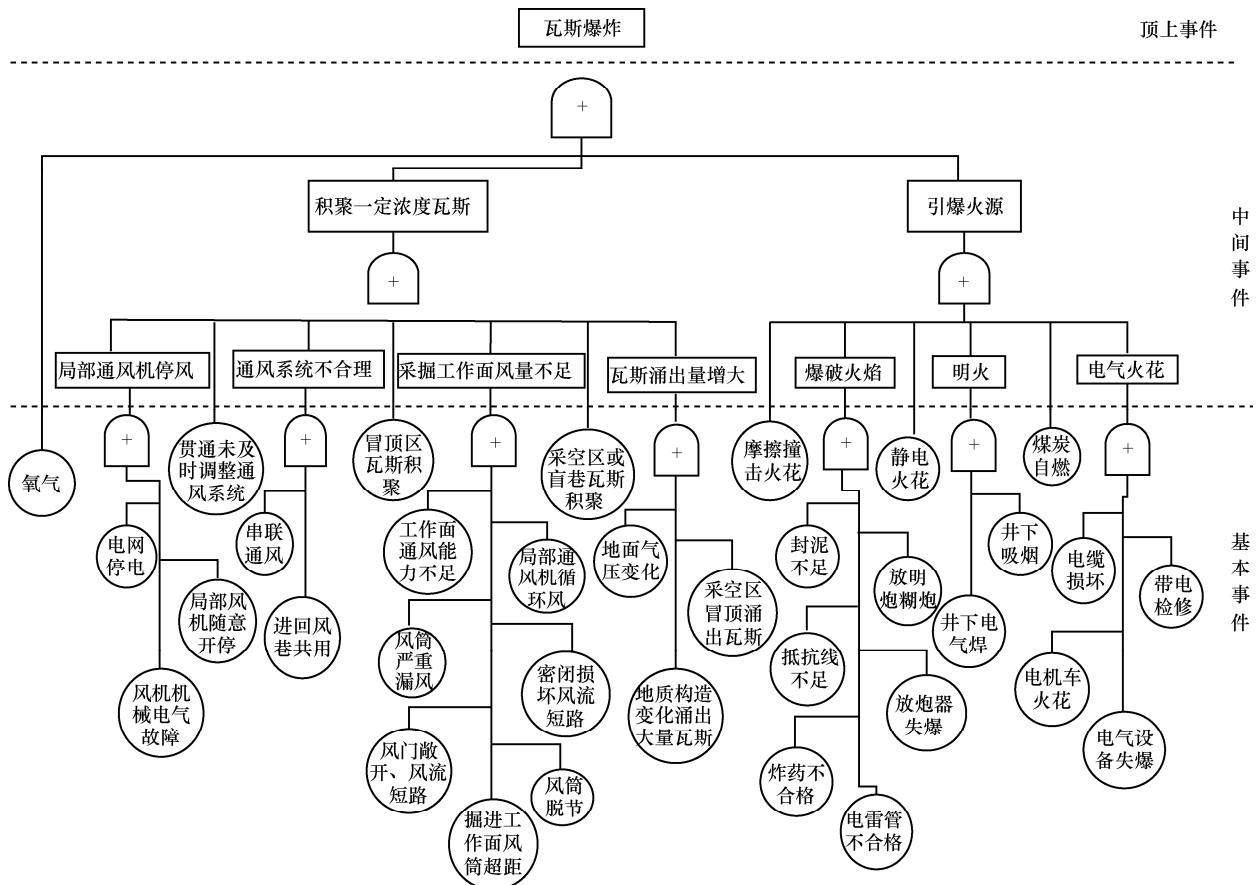


图 4 基于事故树的瓦斯爆炸知识结构

其集成了瓦斯爆炸事故的多层次因果关系。基于事故树可以构建包含时间和空间约束的时空动态安全判别准则，结合本体描述、语义逻辑和知识推理方法，实现多时空视角下矿山采动过程“内-外环境”安全状态知识库。

3.4 人-机-环状态判识方法

在矿山生产过程“虚实融合”感知模型和安全状态知识库的基础上，分析矿山运行过程“人-机-环”不安全状态特征，研究矿山各安全监测系统的多源感知信息（水环境、围岩环境、外环境参数、电信号、设备参数、微震、振动、图像视频等）的内在关联及时空分布特性，分析不同维度、不同量纲、不同特性的感知信息与矿山生产过程安全状态的关联关系，融合矿山生产全过程感知信息的经验特征与深度特征，建立矿山生产安全状态实时诊断与智能辨识模型与算法。

人员方面，主要研究人员不安全行为识别方法。矿工人员违规行为与人员工种、工作地点、工作环境和设备状态等高度耦合。因此，研究基于视频图像识别的人员目标检测与行为识别方法，分析人员行为的数据级特征、语义级特征，揭示运动特征数据、场景语义与行为之间的规律，结合可穿戴、体感传感器等设备感知矿井人员内外环境数据，融合视频图像、姿态和情境语义多模态行为等多源特征信息，研究基于大数据挖掘、语义描述、深度学习等技术的语义式矿山人员违规行为识别方法，实现矿井人员违规行为的智能判识与预警。

设备方面，基于多源感知信息（工作环境与工况条件信息、运行调度信息和运转过程在线感知数据），研究与感知信号信源特性相适应的信号时域、频域、时频域分析方法，结合主成分分析、流形学习、稀疏表示等特征提取方法，获取感知信号的状态特征表示。研究语义网络、知识推理、机器学习、深度学习等人工智能方法，结合历史数据、专家经验及设备状态知识库，建立面向“采、掘、机、运、通、供电、排水”等设备系统的状态分析与诊断预测方法，实现矿山设备系统异常工况状态（显性工作异常）在线识别和关键部件内部状态（隐性早期损伤）智能诊断。

环境方面，针对突水、瓦斯、火灾、顶板事故等煤矿常发灾害，研究矿山地质测量、钻探、物探、标准、安全监测（通风、瓦斯、水、顶板、矿震等）

等数据与矿山生产过程“内-外环境”安全状态关联关系。研究基于多源感知信息融合的采动地质环境实时再现、动态演化与智能交互分析方法，研究静态数据与动态演化信息融合的“内-外环境”状态交互式跨时空分析方法，建立基于大数据、人工智能技术的环境安全感知跨时空预测模型，实现煤矿安全生产过程中的“内-外环境”风险预测、预警和灾害防治^[15]。

4 矿山人-机-环信息感知关键技术

4.1 智能传感技术

在矿山生产安全感知方面，针对当前矿山安全监控系统中存在的传感器精度低、可靠性差、功耗大，以及存在监测盲区等问题，开展了矿用光学等多参数传感机理与装置的研制工作，优化集成光纤光谱分析、光纤光栅和激光-微机电等先进传感技术，开发出一系列灾害前兆信息采集装备，为矿山物联网对安全生产信息的全面、快速、准确感知提供技术支撑。在分布式的光纤传感器方面，开展了时分复用、光子空心光纤等气室设计和半导体激光光谱快速分析技术研究，解决多传感器交叉干扰，光子晶体光纤模间干扰，以及光纤气室响应时间和工程防护等难题；在激光甲烷传感检测技术方面，利用无温控半导体激光器波长自适应跟踪技术，实现气体浓度的无波动连续分段切换；在光纤多气体传感器方面，采用预置零点技术，解决痕量气体检测中的基线漂移难题；在高灵敏度风速传感器方面，优化光纤风速传感器结构设计，研发宽量程、高灵敏度、快速响应光纤风速传感器。

在工作面生产过程感知方面，采面机的空间位置、运行轨迹以及煤岩界面的实时感知是工作面智能化控制的基础。煤矿井下为完全封闭空间和复杂电磁环境，没有卫星导航信号辅助，实现定位和导航的难度大。基于雷达探测、激光点云、热成像等技术，研究电磁波谱分析技术，利用煤岩介质在太赫兹频段的特殊性质，结合机器学习、深度学习等手段准确描述煤岩界面，实现复杂煤层中煤岩界面的在线实时判别。在工作面四维 GIS (geo-information system) 的基础上，结合超宽带定位、激光惯导等技术，实时计算采煤机机身的运动速度、航向、姿态和位置等信息，实现地下开采装备精确定位和导航^[16-17]。

在能量自动捕获方面，针对井下环境能量的不

稳定、时间不连续及地点分散等特点,研究井下微能量(热能、机械能、电磁能)高效转换机理,建立矿山微能量捕获-转换-存储-损耗-输出模型。采用微电子与电路设计等理论与方法,设计具有能量自动捕获、低耗能滤波及自适应输出的能量转换结构及电路,完成能量自动捕获传感装置的研发。研究基于自适应泵压技术的能量转换方法,实现对周围环境中能量等级和状态进行智能感知,并自适应地不断调整能量转换门限,实现断续微能量的高效储能。研发能量自治传感装置,延长无线传感器节点工作寿命,解决采空区、工作面等安全监测区域的传感器布线和维护难题。

在传感装置智能化集成方面,开展传感器故障自诊断技术的研究,提高传感器装置的容错性和稳定性,研究传感单元供电电路、通信链路、传感器件状态等检测技术,建立智能传感器自检测模型,实现智能传感器状态在线自检测。研究无线智能传感信息交互接口优化、传感器网络动态组网、协同信息处理、传感数据分析中间件等关键技术,实现矿山无线智能传感器信息快速交互。研究感知层的数据预处理、信息融合与智能分析方法,在传感器内集成轻量级信号分析与机器学习算法,构建具备轻量级分布式边缘计算能力的智能化传感体系。

4.2 编码标准与交互协议

将通用和专用编码体系有效结合,建设开放、兼容、规范的矿山物联网的编码体系。根据标识对象的特征属性、安全级别以及其数量等级,研究平衡多应用需求的编码方法,结合相关技术标准,研究矿山物联网中设备、软件等标识编码方法及地址配置协议,实现对矿山各类实体唯一标识。研究兼容异构编码的信息发现模型,开发物联网寻址系统及标识编码的智能识别方法,为实体的信息整合和精细化控制提供基础。基于矿山“人-机-环”本体描述方法,研究统一语义框架下的矿山对象逻辑表达模型,建立矿山物联网统一编码标准,实现矿山物联网的动态编码和解析,为矿山设备的互操作、矿山数据的共享和矿山应用的开发提供统一的编码规范。

针对矿山不同应用场景,研究兼容不同网络接入技术的矿山物联网网络架构,设计一体化的矿山信息交互体系,满足矿山物联网多元化应用需求。研究矿山不同网络设备的数据传输智能调度方法,实现矿山物联网接入设备的智能管控。研究矿山物

联网多终端、多系统之间的信息交换方法,建立矿山物联网不同对象模型、对象间交互协议校验平台和应用原型系统,设计矿山物联网信息交互协议簇,形成面向不同对象的矿山物联网 M2M(machine to machine)信息交互协议标准。以统一编码标准为依托,研究各种智能装置的监测数据多源集成存取方法,研究感知层的边缘信息处理与集成方法,实现矿山物联网边缘网络信息处理、融合服务,满足大规模海量数据分发需求与时延敏感应用需求。

4.3 融合通信网络技术

矿山安全生产物联网面临多样化的业务结构,采掘、运输、通风、提升、供电、通信、排水,压风等业务交叠;多类型的网络形式,以太网、4G、NB-IoT、LoRa、Wi-Fi、ZigBee、RS485 等有线与无线网络并存;多种标准的通信协议,RS232/485/422、TCP/IP、ModBus、Profinet、OPC(object linking and embedding for process control)应用于各子系统^[18]。矿山通信网络接入的业务也越来越多,对通信网络的需求呈现出多样性发展趋势,不同接入系统对网络传输的实时性、带宽、并发量、移动性也提出了更高的要求。

因此,需要研究适应矿山网络结构特点、支持人-人、物-人、物-物高效交互的矿山物联网多系统融合通信的网络架构与传输技术,满足矿山物联网技术发展过程中综合接入服务的需求。研究井下物联网设备链接服务快速发现机制,保障设备间网络连接的可靠性,形成矿山各种智能装置的物-物互联、物-网联接,以及网络之间的互联互通标准,建立适应矿山环境、支持各种类型系统的矿山物联网多系统融合网络架构,如图 5 所示。研究矿山物联网异构网络统一传输与资源管控研究方法,开展多协议的融合传输、海量信息的汇聚处理,实现信息与网络的匹配,实现传感网-融合通信网关-传输网链路的双向高效信息交互。研究适用于井下分布式网关的高性能计算、大容量存储、高速通信、可靠链接管理与维护方法,研制矿山物联网融合通信网关装备与系统,支持多种工业标准总线、无线通信协议。

形成矿山物联网环境的融合通信网络架构、传输技术及装备系统,实现异构传输网络中海量信息的处理与分布式信息汇聚融合和资源管理;解决井下信息化建设中的设备与设备、设备与信息、信息与信息孤立的问题,以及现有网关设备支持协议种

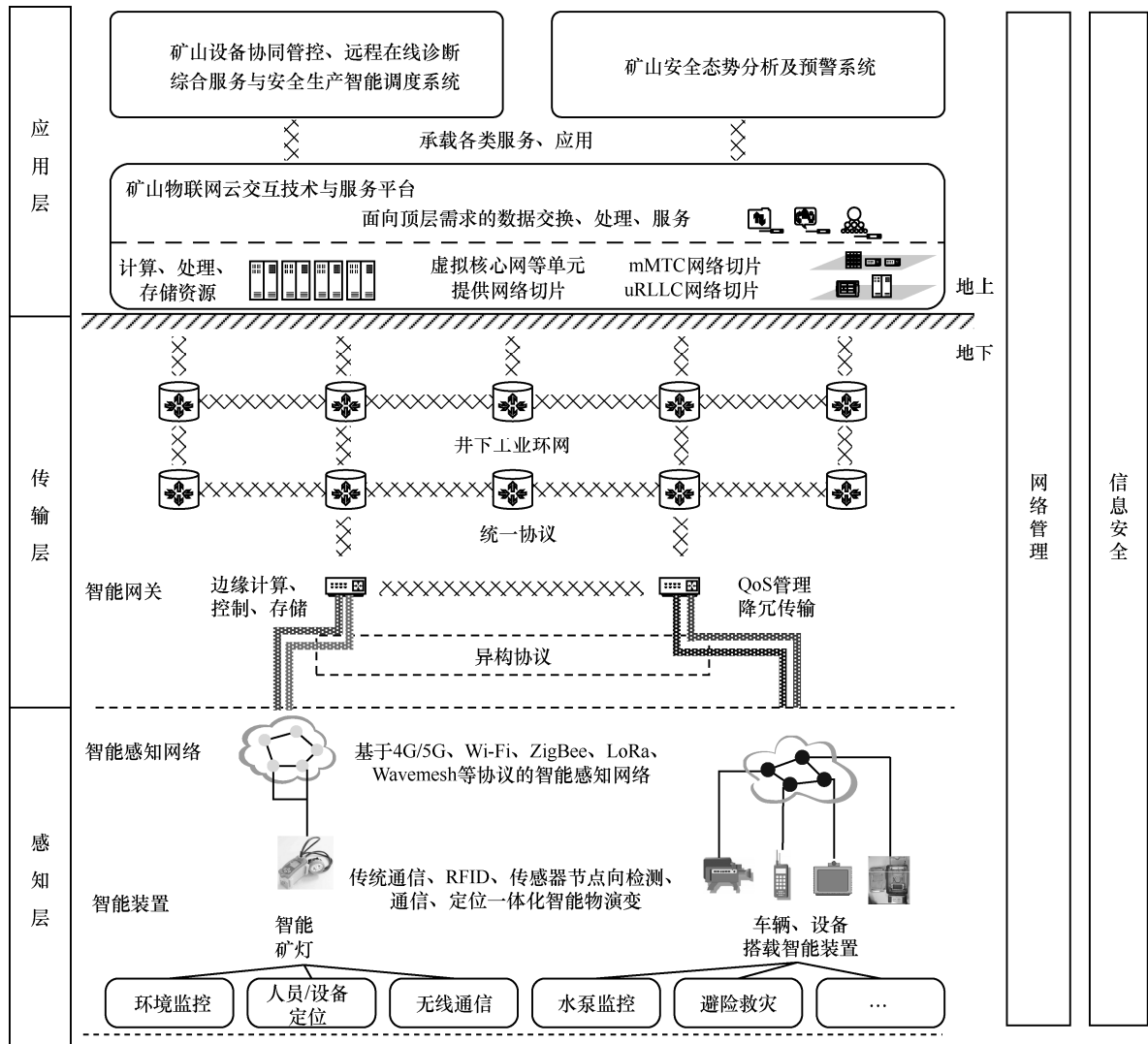


图 5 矿山物联网多系统融合网络架构

类单一，计算、分析、筛选、通信等能力较低的问题；满足矿山物联网不同的信息化应用的需求，实现无线、有线相结合、短距、长距异构融合的接入网，将感知层感知到的信息无障碍、高可靠性、高安全性地接入网络^[19]。

4.4 矿山物联网数据平台

单个信息化矿井中，人员、设备、生产、视频、安全等监控系统每天产生 TB 量级的数据，数据的有效管理和利用是矿山物联网智能化应用的基础，面向矿山多源海量监测数据，研究可靠性高、容量大、存储速度快、具备高度的伸缩性和扩展性的分布式存储架构，实现矿山安全生产过程大数据的高效泛在存取；针对矿山深层应用所需的数据内容及其特征，研究矿山物联网大数据异构管理与深度挖掘技术，构建安全可靠的矿山大数据处理与服务平

台，其架构如图 6 所示。感知层完成多源异构系统的统一接入，实现各监测监控系统运行和传感数据的集成；数据存储层集成数据清洗技术、数据统一编码方法和分布式存储架构，实现数据的高效存储、访问和管理；平台服务层集成实时流式计算和离线批量计算架构，结合统计分析、机器学习和数据深度挖掘方法，实现矿山监测数据安全状态特征的实时分析和安全态势的大数据深度挖掘；大数据应用层，完成对矿山“人-机-环”安全状态判识，设备智能调度与协调管控，生产过程智能化管控等应用服务的构建。

1) 信息高效接入与预处理

研究采掘、提升、通风、压风、供电、排水、皮带、调度通信、语音广播、视频监控等多源异构系统数据的海量实时接入、分发技术，实现矿山多



图 6 矿山大数据处理与服务平台架构

类型、多参数系统信息的高效接入与实时协同控制。分析多源异构数据的内在特征、关联特征和时空分布特征，研究面向泛在监测数据属性约简、过滤清洗、数据融合及知识表示的实时分析和预处理模型与方法，构建面向矿山设备监测数据的实时分析与智能预处理方法体系。

2) 矿山大数据分布式存储

在数据存储层面，面向视频监控数据、设备监测数据、生产调度信息、巡检文档等多源异构数据，根据数据的类型和应用场景采用不同的分布式存储技术进行存储，如 Hive、HBase、HDFS (hadoop distributed file system)、RDBMS (relational data base management system) 等。在数字平台中构建可靠性高、容量大、存储速度快、具备高度的伸缩性和扩展性的分布式存储架构^[20]，能够满足矿山设备监测数据结构化、半结构化、非结构化多种类型并存的数据特点和 PB 级的数据规模高效存取需求，为矿山生产过程安全状态分析与设备智能调度管控提供数据支撑。

3) 矿山大数据分布式计算服务

矿山大数据平台分布式计算架构如图 7 所示。在针对矿山生产过程中海量监测数据的不同信源

特性（包括生产信息、环境参数等缓变数据，振动、电磁等高频数据，视频、点云等高密度数据）的基础上，采用内存计算技术（如 Spark）、即时查询技术（如 Impala）、实时流处理技术（如 Storm）和并行批处理技术（如 MapReduce）相融合的计算框架。针对矿山多源监测系统高吞吐量、高并发、海量数据

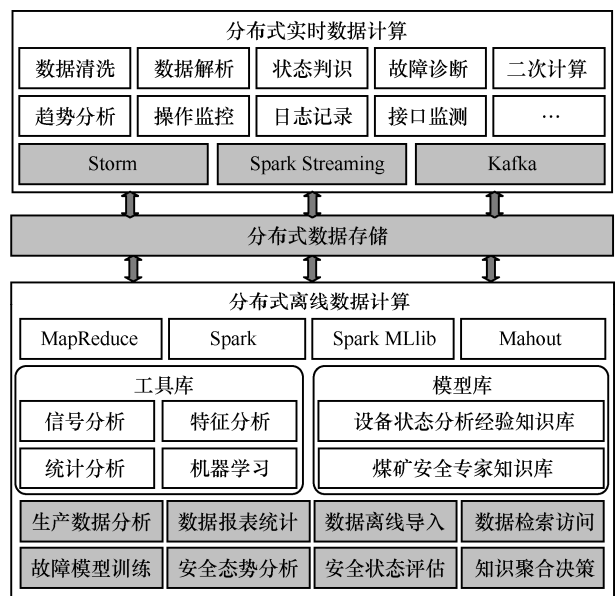


图 7 矿山大数据平台分布式计算架构

的特点,利用分布式实时计算流处理技术解决监控系统及传感器信号的在线分析与处理问题,利用分布式离线批处理计算技术解决海量历史数据多维度关联分析问题,满足矿山生产过程大数据深度挖掘应用的需求。

4) 矿山物联网大数据分析

在大数据管理的基础上,集成大数据分析与人智能算法工具,如 Tensorflow、Caffe、Mahout 和 Spark MLlib 等,集成回归分析、因子分析、特征提取、聚类分类、预测分析、关联挖掘、深度学习等算法,提供面向矿山物联网感知信息的信号分析、特征提取、智能判识和深度挖掘服务接口。结合矿山“人-机-环”状态感知模型、生产过程多源感知信息关联关系以及安全状态经验知识,研究面向多维异构矿山生产过程数据的分析与挖掘方法,研发机理与数据混合驱动的矿山生产过程安全大数据深度挖掘分析、知识发现与聚合平台。

5 智能应用

在“人-机-环”安全状态感知理论与方法的基础上,集成智能传感、融合通信网络、物联网数据平台、大数据挖掘等关键技术,融合独立分散的矿山安全监测与灾害预警系统,构建统一的矿山安全态势分析平台。建立与矿山安全生产相融合的“人-机-环”增强现实实体模型,研发矿山虚拟场景和真实感知数据有机融合与交互的增强现实系统,实现面向矿山安全生产状态演化过程的实时再现、动态分析、智能交互及可视化。研究面向矿山瓦斯、水、火、冲击地压(岩爆)、顶底板等重大危险源态势演化机理与大数据分析方法,建立矿山安全生产预测预警和智能决策模型,研发基于大数据的矿山安全态势分析及预测预警系统,实现矿山安全生产风险预测预警,解决复杂环境下矿山安全态势难以预测的问题。

针对矿山安全生产过程中的资源优化配置和任务智能调度问题,基于工作流技术以及智能计算理论,研究资源驱动的面向多生产场景的矿山安全生产智能调度技术,研究矿山设备协同管控与安全生产智能调度的集成技术,研发矿山安全生产过程中的“采、掘、机、运、通、供电、排水”等设备系统的故障远程诊断与协同管控平台。研究辅助运输车辆定位、RFID (radio frequency identification) 识别、智能化排程与调度技术,实现井下卡轨车、无轨胶轮车、单轨吊、电动机车等辅助运输车辆的

智能调度、合理资源分配、智能排程、智能路径优化。在综采工作面单机设备自动化基础上,集成位姿精准定位、煤岩界面识别、运行状态感知、视频监控、协同控制等技术,研发工作面液压支架、采煤机、刮板输送机、转载机、破碎机、顺槽胶带机等综采设备自主决策控制与智能协同联动系统,实现综采工作面的智能化无人化控制。

6 结束语

矿山物联网技术的发展为矿山智慧化、透明化体系建设提供了有效的思路 and 手段,本文针对物联网技术在矿山领域深度应用的需求,开展了物联网“人-机-环”状态感知理论与关键技术的分析和研究。

感知理论方面,提出了矿山生产过程“人-机-环”感知信息描述方法,建立“虚实融合”感知体系,以实现矿山安全生产过程的实时再现、演化分析、智能交互与可视化,为构建面向矿山安全生产的“智慧矿山”物联网模型提供了新的思路与理念。

关键技术方面,研究了矿用分布式、多参数、光纤无源、MEM 等低功耗、高灵敏度、宽量程传感器以及智能自治传感技术,形成新一代矿山智能化传感装备,完成了融合通信网络架构和矿山物联网数据平台建设,实现了矿山物联网前端精准感知、信息高效交互、大数据管理与知识挖掘。

智能应用方面,建立了基于大数据分析的矿山安全生产智能诊断、协同管控与预测预警模型,解决矿山安全生产中多因素、多层次、多智能体有效协同和安全态势分析难题,形成基于矿山物联网的安全生产智能预警与管理模式,提升矿山生产效率和水平。

矿山物联网技术的推进将实现矿山物与物的智能相连,各个系统通过融合通信网络实现信息共享,消除监测盲区,运用云计算和大数据技术,从大量低价值信息中提取有用信息,使矿山物理世界逐步从不透明向透明过渡,为建设本质安全矿山提供技术保障。

参考文献:

- [1] 王国法, 赵国瑞, 任怀伟. 智慧煤矿与智能化开采关键核心技术分析[J]. 煤炭学报, 2019, 44(1): 34-41.
WANG G F, ZHAO G R, REN H W. Analysis on key technologies of intelligent coal mine and intelligent mining[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(1): 34-41.

- [2] 《中国煤炭》编辑部.《能源技术革命创新行动计划(2016-2030年)》发布[J]. 中国煤炭, 2016, 42(5): 141.
Editorial Department of China Coal. Energy technology revolution and innovation action plan (2016-2030) released[J]. China Coal, 2016, 42(5): 141.
- [3] 张申, 丁恩杰, 徐钊, 等. 物联网与感知矿山专题讲座之三——感知矿山物联网的特征与关键技术[J]. 工矿自动化, 2010, 36(12): 117-121.
ZHANG S, DING E J, XU Z, et al. Part III of lecture of Internet of things and sensor mine-characteristics and key technologies of sensor mine Internet of things[J]. Industry and Mine Automation, 2010, 36(12): 117-121.
- [4] 王国法, 王虹, 任怀伟, 等. 智慧煤矿 2025 情景目标和发展路径[J]. 煤炭学报, 2018, 43(2): 295-305.
WANG G F, WANG H, REN H W, et al. 2025 scenarios and development path of intelligent coal mine[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(2): 295-305.
- [5] 张申, 丁恩杰, 徐钊, 等. 物联网与感知矿山专题讲座之一——物联网基本概念及典型应用[J]. 工矿自动化, 2010, 36(10): 104-108.
ZHANG S, DING E J, XU Z, et al. Part I of lecture of Internet of things and sensor mine - basic concept of internet of things and its typical application[J]. Industry and Mine Automation, 2010, 36(10): 104-108.
- [6] 丁恩杰, 赵志凯. 煤矿物联网研究现状及发展趋势[J]. 工矿自动化, 2015, 41(5): 1-5.
DING E J, ZHAO Z K, Research advances and prospects of mine Internet of things[J]. Industry and Mine Automation, 2015, 41(5): 1-5.
- [7] 姚建铨, 丁恩杰, 张申, 等. 感知矿山物联网愿景与发展趋势[J]. 工矿自动化, 2016, 42(9): 1-5.
YAO J Q, DING E J, ZHANG S, et al. Prospect of perception mine Internet of things and its development trend[J]. Industry and Mine Automation, 2016, 42(9): 1-5.
- [8] SINGH A, KUMAR D, HÖTZEL J. IoT based information and communication system for enhancing underground mines safety and productivity: genesis, taxonomy and open issues[J]. Ad Hoc Networks, 2018, 78(S1):115-129.
- [9] FEI T, SUI F, LIU A. Digital twin-driven product design framework[J]. International Journal of Production Research, 2018(1):1-19.
- [10] LEHMANN C. The digital twin: realizing the cyber-physical production system for industry 4.0[J]. Procedia Cirp, 2017, 61:335-340.
- [11] 谢嘉成, 王学文, 杨兆建. 基于数字孪生的综采工作面生产系统设计及运行模式[J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25(6): 1381-1391.
XIE J C, WANG X W, YANG Z J. Design and operation mode of production system of fully mechanized coal mining face based on digital twin theory[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2019, 25(6): 1381-1391.
- [12] LEI S, MUKHERJEE M, PECHT M, et al. Challenges and research issues of data management in IoT for large-scale petrochemical plants[J]. IEEE Systems Journal, 2018, PP(99):1-15.
- [13] 丁恩杰, 施卫祖, 张申, 等. 矿山物联网顶层设计[J]. 工矿自动化, 2017, 43(9): 1-11.
DING E J, SHI W Z, ZHANG S, et al. Top-down design of mine Internet of things[J]. Industry and Mine Automation, 2017, 43(9): 1-11.
- [14] 韩建国. 神华智能矿山建设关键技术研发与示范[J]. 煤炭学报, 2016, 41(12): 3181-3189.
HAN J G. Key technology research and demonstration of intelligent mines in Shenhua Group[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(12): 3181-3189.
- [15] 袁亮, 姜耀东, 何学秋, 等. 煤矿典型动力灾害风险精准辨识及监控预警关键技术研究进展[J]. 煤炭学报, 2018, 43(2): 306-318.
YUAN L, JIANG Y D, HE X Q, et al. Research progress of precise risk accurate identification and monitoring early warning on typical dynamic disasters in coal mine[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(2): 306-318.
- [16] 袁亮. 面向煤炭精准开采的物联网架构及关键技术[J]. 工矿自动化, 2017, 43(10): 1-7.
YUAN L. Framework and key technologies of Internet of things for precision coal mining[J]. Industry and Mine Automation, 2017, 43(10): 1-7.
- [17] 吴立新, 汪云甲, 丁恩杰, 等. 三论数字矿山——借力物联网保障矿山安全与智能采矿[J]. 煤炭学报, 2012, 37(3): 357-365.
WU L X, WANG Y J, DING E J, et al. Thirdly study on digital mine: serve for mine safety and intellimine with support from IoT[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(3): 357-365.
- [18] 胡青松, 杨维, 丁恩杰, 等. 煤矿应急救援通信技术的现状与趋势[J]. 通信学报, 2019, 40(5): 163-179.
HU Q S, YANG W, DING E J, et al. State-of-the-art and trend of emergency rescue communication technologies for coal mine[J]. Journal on Communications, 2019, 40(5): 163-179.
- [19] 赵小虎, 张凯, 赵志凯, 等. 矿山物联网网络技术发展趋势与关键技术[J]. 工矿自动化, 2018, 44(4): 1-7.
ZHAO X H, ZHANG K, ZHAO Z K, et al. Developing trend and key technologies of network technology of mine Internet of things[J]. Industry and Mine Automation, 2018, 44(4): 1-7.
- [20] LI J. Intelligent mining technology for an underground metal mine based on unmanned equipment[J]. Engineering, 2018, 4(3):381-391.

[作者简介]



袁亮 (1960—), 男, 安徽金寨人, 中国工程院院士, 主要研究方向为煤炭开采及瓦斯治理、煤炭精准开采。

俞啸 (1989—), 男, 山东微山人, 博士, 中国矿业大学讲师, 主要研究方向为矿山物联网、信号处理、故障诊断。

丁恩杰 (1962—), 男, 山东青岛人, 博士, 中国矿业大学教授, 主要研究方向为工业物联网、模式识别、人员定位等。

赵小虎 (1976—), 男, 江苏徐州人, 博士, 中国矿业大学教授、博士生导师, 主要研究方向为物联网、机器学习。

冯仕民 (1983—), 男, 江苏连云港人, 博士, 中国矿业大学助理研究员, 主要研究方向为矿山物联网、图像识别技术。

张达 (1980—), 男, 北京人, 博士, 北京矿冶科技集团有限公司教授级高级工程师, 主要研究方向为矿山安全监测、矿山物联网及矿山智能化技术。

刘统玉 (1963—), 男, 山东济宁人, 博士, 山东省科学院研究员, 主要研究方向为光纤传感技术。

王卫东 (1967—), 男, 内蒙古包头人, 博士, 北京邮电大学教授、博士生导师, 主要研究方向为卫星通信、移动通信、物联网等。

黄艳秋 (1988—), 女, 江苏徐州人, 博士, 不来梅大学在站博士后, 主要研究方向为无线传感网络。