

智能矿山物联网存在技术短板及解决思路研究探讨

贺耀宜^{1,2}

1.中煤科工集团常州研究院有限公司; 2.天地(常州)自动化股份有限公司

摘要

我国煤炭行业的智能化建设正在稳步推进,但由于缺少建设和评价标准,所建成的煤矿智能化水平参差不齐,同时由于制约煤矿智能化建设的一些技术难点尚未攻关,减人提效的效果并不显著。针对目前矿山智能化建设中物联网存在的不足和国家八部委《关于煤矿智能化发展的指导意见》对智能矿山提出的六大能力要求,将工业互联网“云、边、端”体系结构应用于智能矿山物联网,并从“制定矿山物联网信息编码与信息交互行业标准”、“煤矿井下超低功耗无线智能传感及能量捕获技术”、“煤矿井下受限空间高精度位置服务技术”和“边缘计算技术”4个方面的关键技术入手进行研究,进一步提升智能矿山物联网在深度感知、信息互联互通、统一精准位置、信息实效处理方面的能力。

关键词: 物联网信息编码;信息交互标准;深度感知;互联互通;高精度位置服务;信息实效处理

我国煤矿智能化经历了单机自动化、综合自动化、数字化发展历程,正在向智能化迈进^[1]。经过多年发展,煤矿智能化建设取得了瞩目成就。国内开采条件较好的矿井已实现综采工作面自动化开采,监控中心远程干预;主煤流运输系统及部分生产辅助控制系统已实现远程集中控制;并针对矿井灾害和有害气体建立了相应的监控预警系统;针对井下作业人员安全问题建立了静态精度可达30 cm的精确定位系统。煤矿装备的智能化、自动化水平均有较大提升,安全保障水平也大幅提高。目前,国家能源集团、陕西煤业集团、山东能源集团等国内大型煤炭生产企业正在积极探索智能化矿山建设模式,并对一

些关键技术进行攻关,形成了一批智能化水平较高的示范矿井。尽管成果显著,但必须清醒地认识到目前矿山智能化建设仍存在不足,例如:矿井整体感知能力差,各环节系统间数据交互缺乏协议和时标的一致性,感知网络并未真正形成一张网,煤矿井下缺乏高精度的位置服务,还有大量数据需要传输到地面进行集中处理而导致效率低下等问题,这些问题间接导致矿井整体透明度差、安全预警准确性不足,进而限制各类安全、生产系统间的协同作业,且人工巡检客观上制约了智能化矿建设。

2020年2月,国家发改委、能源局等八部委联合发布了《关于加快煤矿智能化发展的指导意见》(下

基金项目:天地科技股份有限公司科技创新创业资金专项资助项目(2019-TD-ZD007)

作者简介:贺耀宜(1974—),男,陕西蓝田人,研究员,硕士。E-mail:hyy@cari.com.cn

称《指导意见》），对智能化矿山建设的目标和具体任务进行部署。《指导意见》指出要深度融合人工智能、工业互联网、云计算、大数据等技术，使煤矿具有全面感知、实时互联、分析决策、自主学习、动态预测、协同控制的能力^[2]。这些能力的发挥均离不开最基础的技术支撑——矿山物联网关键技术。

1 矿山物联网研究意义及重点

当前，国内多所科研院校、煤矿企业的专家学者从不同视角、不同专业对智能化矿山建设进行了研究并取得阶段性成果，包括：智能化矿山内涵、发展路径、体系架构、信息标准规范、关键技术、评价体系、管控平台、大数据分析决策、网络传输与通信等，有序推动了智能化矿山建设的发展。

无论是智能化矿山安全系统还是生产运输系统，矿山中各智能单元均需通过物联网技术进行数据交互和深度应用。工业互联网整体架构采用“云、边、端”商业化服务的流行模式^[3-4]，而这种架构对智能矿山物联网也同样适用。首先，智能化矿山的信息感知主体为端，包括智能感知单元、装备和执行器和移动目标；其次，对感知信息形成的大数据进行深度分析应用的主体为云，包括云存储、云计算、人工智能。由于智能化矿山的数据量很大，如果集中到云端进行分析，效率较低，因此需要将实时性要求较高的计算能力进行下沉，形成一个靠近感知源端的具有数据采集、交互、存储、计算、分析能力的一体化开放平台——边。智能矿山物联网“云、边、端”体系结构如图1所示。

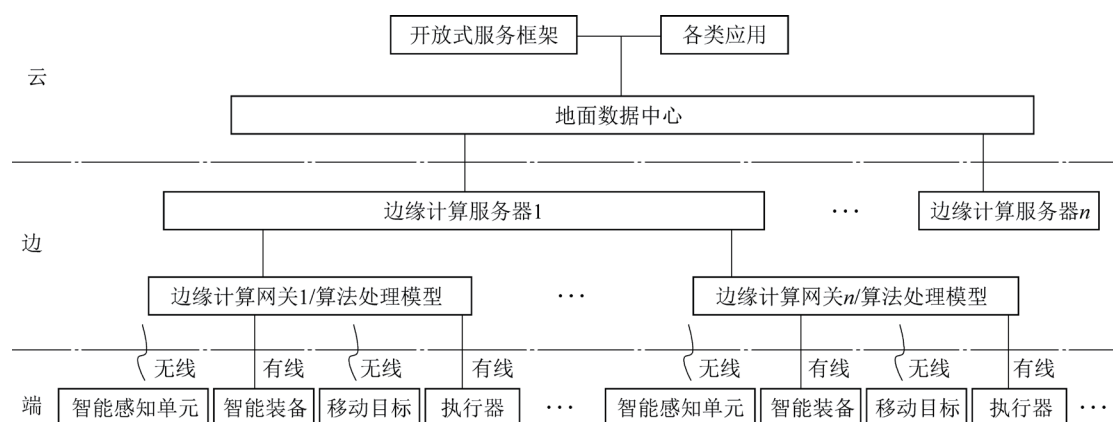


图1 智能矿山物联网“云、边、端”体系结构

通过图1可以看出，作为一体化边缘开放平台，一方面，边缘计算网关通过有线或末端无线网络与作业现场区域范围内的智能单元进行数据交互，并对采集到的人、机、环等信息进行综合分析处理，直接指导或控制现场作业；另一方面，边缘计算网关还承担协议标准化统一职能，将收集的信息或产生的分析结果以标准的协议交换格式通过主干网络传输给边缘计算服务器。边缘计算服务器通过边缘计算网关对所辖范围内的人、机、环等智能单元进行协同管控，并将信息上传到地面数据中心。地面数据中心负责对大数据进行分析处理，进而实现对全矿井范围智能单元的协同管控。因此，智能化矿山是物联网、大数据、云

计算和人工智能等技术协同工作的整体，要充分发挥《关于煤矿智能化发展的指导意见》中提到的智能化矿山的6大能力，必须立足矿山物联网的支撑，重点从深度感知、信息互联互通、统一精准位置、信息实效处理4个方面解决好大样本数据的获取与交互，进而为自主学习、分析决策、协同控制提供条件。

2 矿山物联网存在短板

尽管在矿山物联网理论、关键技术和应用方面都取得了一定成果，形成了系列关于感知矿山建设的应用理论模型、体系架构、关键技术与装备，并通过在某些煤矿示范应用，取得了良好效果，但仍存在以下



问题需要解决：①在深度感知方面，需要解决感知设备的超低功耗、自供电、无线自组网问题；②在信息互联互通方面，需要解决信息编码与信息交互标准化问题；③在统一精准位置方面，需要解决封闭受限空间条件下煤矿各类元素和智能感知单元在时空上的坐标统一问题；④在信息实效处理方面，需要通过边缘计算技术对深度感知信息进行就地分级处理，以提升信息处理效率。目前矿山物联网存在的技术短板如下：

1) 缺乏统一的矿山物联网行业标准。随着智能矿山物联网技术的发展，越来越多的智能单元会被接入，要使更多的信息可被共享，实现物物互联，核心是建立矿山物联网信息编码和交互标准。虽然部分科研院所已经进行了相关标准研究，但还未正式发布为行业标准。由于缺乏行业标准支撑，在用的综合自动化系统仅能从上位机层面实现数据有限集成，并不能实现底层感知设备的数据共享，导致各系统的传感设备大量重复建设，且集成的数据坐标体系不统一，无法实现各系统传感设备之间的数据交互。因此，迫切需要完善矿山物联网技术标准体系^[5-6]，解决当前矿山物联网建设标准不统一，各厂家生产的传感器、传输设备等物联网设备无法兼容、通用性差、系统之间难以集成等技术难题。

2) 煤矿井下感知能力不足。高能效是煤矿物联网感知装置设计的必要条件。由于矿山现有传感器以有线供电、传输为主，体积及功耗大，移动、维护困难，设备成本高，煤矿作业现场只能按照煤安要求安

装有限的传感器，因此无法实现对矿井安全生产的全面深度感知。而要实现全面深度感知能力，需要安装大量传感设备进行大样本数据采集，因此必须降低传感及数据传输设备的成本，并保证稳定的供电能力。基于此，需要研究具备无线传输能力的超低功耗感知技术和为感知单元提供稳定电力的能量捕获技术^[7]，使低成本矿用无线感知设备可在煤矿井下大量部署，进一步提升矿山的感知能力、完善“智能”体系神经网络。

3) 煤矿井下感知单元对象缺乏一致的精准位置信息。作为智能化矿井，所有智能单元需进行互联互通、协同作业，因此，煤矿井下受限空间内的任何固有、静态、移动对象都必须具有一致的精确位置信息。目前，移动目标定位、工作面协同控制、快速掘进等系统虽具有定位功能，但均局限于各自系统，且定位精度不高，无法共享位置信息。安全分析预警系统虽可建立算法模型，但由于缺乏精确的位置信息，计算结果也会有偏差。当前流行的数字孪生系统虽可从静态物理体上进行对应，但井下对象精确位置信息的缺乏使其仅为简单的模拟系统。

4) 感知信息处理的时效性不强。矿山井下是流动作业，人员、设备等位置及工作面环境不断变化，需要对灾害源、设备健康状况、人员移动位置等情况进行全面感知。由于感知和连接的泛化，智能单元节点规模膨胀、数据量和传输需求大幅增长会造成网络压力剧增、信息的获取和分析处理实时性能降低，目



前, 主要将数据集中传输到地面数据中心或云端进行处理, 效率比较低下而无法满足智能矿山对时效性的要求。因此, 迫切需要采用分布式处理技术对作业现场数据进行分级处理, 将对时效性要求高的数据直接就地处理并控制, 同时将处理结果和原始数据分批上传至地面数据中心。

3 关键技术解决思路

针对智能矿山物联网存在的技术短板, 笔者分别从“制定矿山物联网信息编码与信息交互行业标准”、“煤矿井下超低功耗无线智能传感及能量捕获技术研究”、“煤矿井下受限空间高精度位置服务技术研究”、“边缘计算技术研究”4个方面提出解决思路。

3.1 制定矿山物联网信息编码与信息交互行业标准

智能化矿山中每个智能单元都需相互交互信息, 首先需要有唯一的身份标识, 同时还需要对交互的信息进行规范, 便于各智能单元能够准确识别接收到的信息。因此, 需要从矿山物联网信息编码标准和矿山物联网信息交互标准2个方面入手制定行业标准。

1) 矿山物联网信息编码标准。

目前国际上应用较广泛的物联网信息编码体系有GS1、EPC、Ecode、OID等, 各类编码体系特点和应用范围不同^[8-12]。经过分析比较, OID编码采用树状结构, 不同层次之间用“.”分隔, 层数无限制, 在标识对象时, 标识符是由从树根到叶子全部路径上的结

点顺序组合而成的字符串, 具有良好的扩展性和兼容性, 适合作为统一物联网对象标识方案。文献[11, 13]均指出OID是统一标识的最佳方案, 文献[14]提出了OID作为统一标识的实现框架, 也是物联网统一架构OneM2M^[14]采用的节点编码标识方法。我国信标委传感器网络标准工作组、工信部电子标签标准工作组和国家物联网基础标准工作组均采用OID标识机制进行对象管理。

因此, 矿山物联网信息编码采用OID标识体系, 并采用分层结构, 解决人、机、环等实体对象的唯一性编码问题, 使得每个对象拥有唯一身份标识。矿山物联网信息编码的分层结构规则如图2所示。其中, 1.2.156代表OID中国节点的编码, 为固定编码; 矿山物联网编码为行业标识, 由矿山物联网对象标识顶级运营机构向国家OID注册中心申请注册; 第三方组织编码为设备制造商标识码, 由统一社会信用代码表示; 煤矿企业编码为煤矿企业的标识码, 由煤矿企业的统一社会信用代码表示; 对象分类编码为矿山智能单元对象的标识码, 由矿山物联网对象标识顶级运营机构进行制定与分配; 对象身份标识编码为矿山物联网对象身份的标识码, 用于标识智能单元对象的唯一性; 对象属性编码为矿山物联网对象属性的标识码, 用于标识智能单元对象的主要属性。

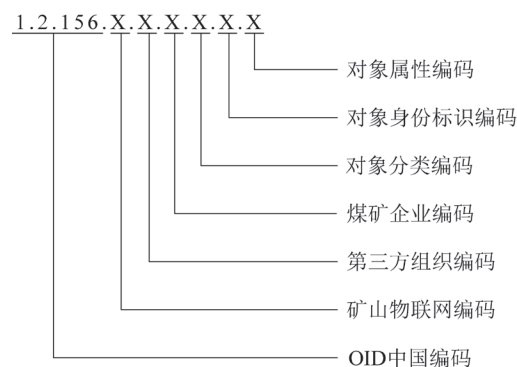


图2 矿山物联网信息化编码分层结构

2) 矿山物联网信息交互标准。

矿山网络除主干网络采用工业以太网外, 现场均由多种不同通信链路组成异构网络^[15-16], 如图3所示。智能单元在不同的系统内通过不同的网络进行通信, 一方面链路不统一, 另一方面信息的描述格式和通信机制不统一。因此, 矿山物联网信息交互规范要

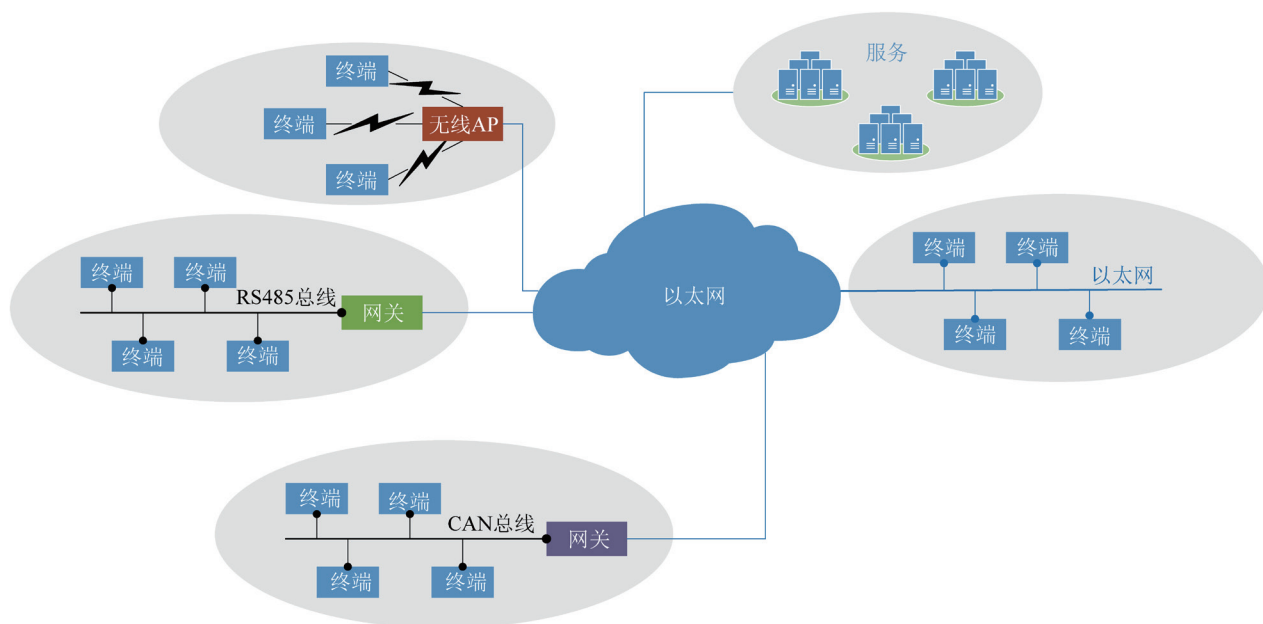


图3 煤矿异构网络

从解决智能单元之间互连互通互操作的问题入手。根据对现有物联网信息交互研究成果的分析研究，要实现开放的信息共享，至少要解决2个关键问题：①信息源如何展示自己能提供的信息和服务，具有哪些信息、如何描述、如何组织、具体的表示格式是什么，即数据建模和表示的问题；②信息的消费者和生产者之间如何通信，有哪些步骤、提供哪些接口、消息的格式是什么，即交互协议的问题。在链路方面，可将矿山异构网络抽象为IP网络和非IP网络，网络之间通过网关进行连通^[17]。

在互联互通时，非IP网络的网关和IP网络的终端可采用客户/服务的模式进行通信^[18]，服务器端将实体对象抽象为数据模型，并发布采用标准语法的格式化模型文件；客户端获取模型信息，并通过操作接口对相关信息发出访问请求；操作接口映射到具体的应用层协议，产生具体的消息报文；消息通过具体通信链路传输到服务器端，服务器端根据请求返回相关的信息内容，客户端对信息进行分析和利用。

3.2 煤矿井下超低功耗无线智能传感及能量捕获技术

针对传统感知技术无法在现场部署大量智能感知单元导致矿山感知能力受限的问题，首先从降低感知单元本身功耗方面入手进行解决。经过分析，基于

MEMS工艺的传感技术具备低成本、低功耗、体积小等特征^[19]，已在世界范围内迅速发展。许多国家的科研院校和企业都十分重视此方面的研究，推出了大批基于MEMS的加速度传感器、压力传感器、气体传感器，并在健康、医疗、空气质量监控、工业有毒气体检测等方面开始应用。Gas Clip Tec公司推出了一系列基于MEMS技术的便携式环境气体检测仪，其中4参数检测仪能连续使用2年，无需充电、无需标校。

随着国内高校和科研企业在该方面的介入，基于MEMS工艺的传感技术在井下应用已变为可能，尤其是 CH_4 、 CO 、 CO_2 已产生部分成果。研究分析表明，基于热导原理的MEMS CH_4 传感器具有灵敏度高、尺寸可微型化、监测范围广（0~100%）的优势，可做进一步矿用化研究；基于红外原理，利用多环境参数的补偿算法，可做出低功耗、微型化的MEMS CO_2 传感器；基于MEMS微加热板技术，结合磁控溅射敏感材料成膜工艺，可得到响应度较高、一致性较好的MEMS CO 气体传感器。由于功耗、成本、体积的优势，可在煤矿作业现场大量部署，进一步提升矿井的感知能力。

当大量部署低功耗智能感知单元时，为方便维护，一方面需要延长传感器的免维护周期，可从环境参数补偿、老化补偿、多模组相互佐证、监控系统数

据反哺、巡检数据反哺等方面开展研究；另一方面需要基于无线方式传输数据，因此需要配备适量电池并增加能量捕获技术来解决感知单元的长时间供电问题。煤矿井下有稳定的风力和生产过程中运转的设备都是电能的来源。由于巷道或压风管中产生的风力相对稳定，能够有效驱动螺旋型风叶竖轴发电机，因此可考虑井下的风力发电供电问题；煤矿井下掘进、采煤、运输、通风等机电设备有大量运动部件，可驱动发电机发电，目前已有成熟应用的此类矿用发电装置。研究适合于煤矿井下适用的供电装置，需要解决好不同能量收集技术中的微能量自适应转换技术、能量高效自动捕获技术和能耗平衡技术。

针对无线感知单元的数据传输需求，比较成熟的

ZIGBEE、Smartmesh等技术属于低速传输技术，无法满足智能矿山大数据传输要求，最新的5G技术由于功耗大、成本高，难以在短期内大量使用。因此，需要研究新的低功耗、高带宽无线通信技术与装备，按照特定的距离间隔布置无线通信节点实现感知单元节点间自组织网络通信；针对煤矿井下链状为主的特殊网络拓扑对OSPF（OPEN Shortest Path First，开放式最短路径优先协议）路由方法进行简化，并实现路由自发现和网络故障自恢复功能，进而实现井下末端网络的统一覆盖和感知单元无线传输。网络结构如图4所示，每个通信终端即为无线感知单元，目标单节点传输延迟 $\leq 10\text{ ms}$ ，128节点数下的数据传输带宽 $\geq 2\text{ Mbit/s}$ ，无线射频模组功耗 $\leq 200\text{ mW}$ ，通信距离不小于 10 m 。

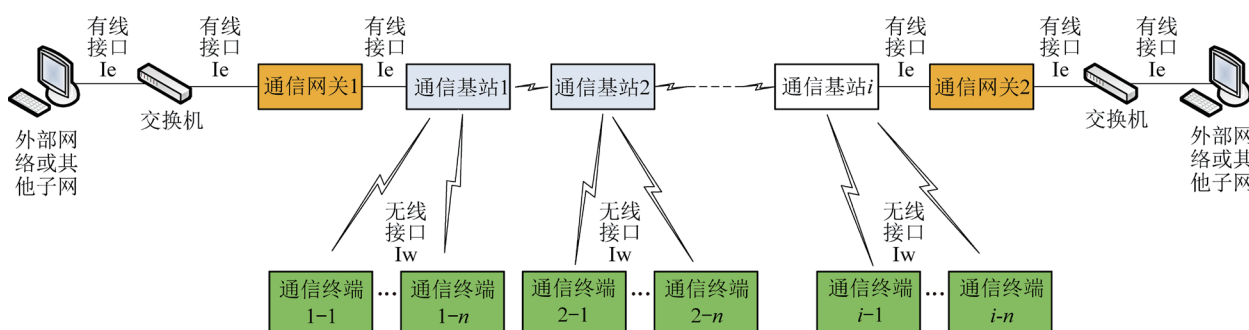


图4 无线自组网络结构

3.3 煤矿井下受限空间高精度位置服务技术

为解决智能化矿井下受限空间内的任何固有、静态、移动对象的统一精准位置信息，需要在煤矿井下建立类地面GPS系统，将精准位置服务引入井下。

根据国内外对无线定位方法的研究和应用分析比较，基于测距(Range-based)的方法适应于煤矿井下空间大多呈狭长巷道分布的现状。目前基于测距的定位方法主要有接收信号强度指示（RSSI）、测量到达角度（AOA）、测量到达时间（TOA）和测量到达时间差（TDOA）等方法。而TDOA是目前GPS系统实现定位的基本方法，具有明显的技术优势，包括定位精度高、系统容量大、响应时间短，完全可以支撑统一架构的煤矿井下位置服务。在定位技术方面，超宽带（UWB）无线定位技术具有信道容量大、传输速率

高、抗干扰能力强、抗多径性能好、定位精度高的特点，并且已经在煤矿精确人员定位系统中应用，定位精度不超过静态 0.3 m 。由于煤矿井下不能保证100%无线覆盖，需要采用惯性导航（IMU）技术实现自主定位以进行补偿。因此，采用UWB、TDOA和IMU融合定位方法实现煤矿井下高精度、大容量、短延时的位置服务系统具备现实可行性。

3.4 边缘计算技术

针对矿山井下工作环境中人员、环境、设备等由于位置及工作状态不断变化，且感知单元对象数据量庞大导致数据集中传输到地面数据中心或云平台处理时效性不强的问题，可考虑采用分布式处理技术对作业现场数据进行分级处理。而边缘计算装置可支持不同类型的应用和数据在网络边缘处理，能够有效降低

网络压力、提高信息处理和分析决策效率,且边缘计算装置和数据中心之间进行数据流和控制信息流的双向流动,可实现计算负载“云”、“边”、“端”之间的动态优化均衡,目前已在自动化工厂、机器人等行业应用。因此,边缘计算技术以其低延迟和更大范围的移动性,在煤矿井下的应用具有较大意义。

煤矿井下的安全与生产智能均离不开“人、机、环”等多元信息的支撑,这些信息可考虑先在作业现场进行就地处理,然后再分级上传到地面数据中心进行集中分析处理。首先,可考虑在井下作业区域设置合理数量的边缘计算装置,该装置具有常用的总线接口和无线、以太网接口,并采用矿山物联网信息编码与信息交互标准进行信息交互;其次,在数据采集和分析处理时,要保证数据在时空上的一致性,即作为井下受限空间的主要感知对象和矿井实体,所有“人、机、环”数据都必须带有时间和统一的位置标签,这样动态建立的分析模型才有意义;最后,以矿山物联网形成的泛在感知和连接为基础,通过边缘计算装备,实时、同步收集单元区域内人员、环境和机电设备状态等信息,构建数学分析模型,就地

形成空间数字云图数据,对局部作业区域进行透明化,再由地面数据中心通过数据模型对全矿井进行透明化处理。

4 结语

根据八部委联合发布的《关于加快煤矿智能化发展的指导意见》,各大煤业集团已着手进行智能化煤矿设计或建设,同时,中国煤炭科工集团王国法院士带头编制了《智能化煤矿分类、分级技术条件与评价体系》对智能化煤矿的建设目标和评价标准做了明确规定。结合相关要求和矿山物联网关键技术的研究实践,分别针对制约智能化矿山发展的4个短板“缺乏统一的矿山物联网行业标准”、“煤矿井下感知能力不足”、“煤矿井下感知单元对象缺乏一致的精准位置信息”、“感知信息处理的时效性不强”提出了相应的解决思路。目前,已经取得了部分研究成果,后期的研究重点是关键技术指标的提升,智能化矿山建设任重道远,而突破关键技术是根本。

■ 责任编辑:郭鑫

Research and discussion on the technical shortcomings and solutions of the internet of things in intelligent mines

HE Yaoyi^{1,2}

Abstract: The intelligent construction of China's coal industry is steadily advancing, but due to lack of construction and evaluation standards, the level of intelligent coal mines built is uneven. At the same time, some technical difficulties that restrict the intelligent construction of coal mines have not been tackled, reducing the number of people and improving efficiency is not significant. In view of the current deficiencies of the Internet of Things in the intelligent construction of mines and the six capability requirements of the "Guiding Opinions" for smart mines, the Industrial Internet "cloud, edge, and end" architecture is applied to the Internet of Things in smart mines, and from Industry Standard for Information Coding and Information Interaction of the Internet of Things in Mines, "Ultra-low-power wireless intelligent sensing and energy capture technology in underground coal mines", "High-precision location service technology in restricted spaces underground in coal mines" and "Edge computing technology". Research on the key technologies of the mine will further enhance the capabilities of the intelligent mine Internet of Things in depth perception, information interconnection, unified and precise location, and effective information processing.

Key words: internet of things information coding; information exchange standard; depth perception; interconnection and interworking; high precision location service; Information efficiency processing

□

1. CCTEG Changzhou Research Institute;
2. Tiandi(Changzhou)Automation Co., Ltd.



参考文献

- [1] 张 申,丁恩杰,徐 钊,等. 物联网与感知矿山专题讲座之二——感知矿山与数字矿山、矿山综合自动化[J]. 工矿自动化,2010,36(11):129-132.
- [2] 国家能源局. 关于印发《关于加快煤矿智能化发展的指导意见》的通知. 发改能源〔2020〕283号[EB/OL]. 2020-03-03. http://www.nea.gov.cn/2020-03/03/c_138838778.htm.
- [3] 陈 刚,孔德超,谷金龙,等. AI边缘计算技术推动万物智能时代的到来[J]. 人工智能,2019(5):6-17.
- [4] 工业互联网产业联盟. 工业互联网体系架构 V1.0[Z]. 北京:中国信息通信研究院,2017.
- [5] 张 申,胡青松,王 刚. 矿山物联网标准建设的思考[J]. 工矿自动化,2018(1):1-5.
- [6] 丁恩杰,胡青松. 矿山物联网顶层设计理念[J]. 物联网学报,2018(1):69-75.
- [7] 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(9):1-11.
- [8] GS1.GS1 General Specifications[EB/OL]. 2019-07. https://www.gs1.org/sites/default/files/docs/barcodes/GS1_General_Specifications.pdf.
- [9] GS1. EPC Tag data standard version 1.13. 2019.
- [10] Brock D. EPC Tag Data Specification[EB/OL]. [2020-10-02]. https://cocoa.ethz.ch/downloads/2014/06/None_MIT-AUTOID-WH025.pdf.
- [11] 张 晖. 物联网技术标准概述[M]. 北京:电子工业出版社,2012.
- [12] 郎为民,刘德敏,李建军. 泛在ID(UID)中心的RFID标准化进程[J]. 商品储运与养护,2007(1):33-36.
- [13] 周洪波. 物联网技术、应用、标准和商业模式[M]. 北京:电子工业出版社,2012.
- [14] oneM2M. oneM2M Technical Specification[EB/OL]. [2020-10-02]. <http://member.onem2m.org/Application/documentapp/downloadLatestRevision/default.aspx?docID=31068>.
- [15] 吴岳辛. 物联网异构环境互操作关键技术研究[D]. 北京:北京邮电大学,2017.
- [16] 林兆骧,黄 峥,王 翔,等. 当物联网标准遇上开源[J]. 物联网学报,2017(6):86-93.
- [17] MAHDA N, MOHAMMED qtiqzaman, MARTIN gaedke. interoperability in internet of things: taxonomies and open challenges[J]. Mobile Networks and Application, 2019(24):796-809.
- [18] KLAS G, RODERMUND F, SHELBY Z, *et al.* OMA whitepaper lightweight M2M[Z].[SI],2014.
- [19] 李 军,赵 军. MEMS传感器的发展及其在煤矿井下的应用研究[J]. 煤炭技术,2014(7): 238-240.

