

文章编号:1671-251X(2018)04-0001-07

DOI:10.13272/j.issn.1671-251x.17324

矿山物联网网络技术的发展趋势与关键技术

赵小虎^{1,2}, 张凯^{1,2}, 赵志凯^{1,2}, 霍羽^{1,2}

(1. 矿山互联网应用技术国家地方联合工程实验室, 江苏 徐州 221008;
2. 中国矿业大学 物联网(感知矿山)研究中心, 江苏 徐州 221008)

摘要:总结了当前矿山网络现状;结合矿山物联网的发展目标及未来矿山在信息处理方式上的变化趋势,分析了矿山网络在网络容量、可管理性、密集接入、实时性、智能化、灾后应急通信等方面的发展需求及趋势;提出了扁平化、智能化、资源抽象化等矿山物联网网络设计原则,并对无线传输编码、软件定义网络、流量卸载、边缘计算、网络功能虚拟化、认知无线电、能量捕获、语义网络等关键技术 in 矿山物联网中的应用和发展需求进行了介绍。

关键词:矿山物联网; 矿山网络; 网络发展趋势; 网络设计原则; 网络扁平化; 网络智能化; 软件定义网络; 边缘计算

中图分类号:TD67 文献标志码:A 网络出版时间:2018-03-23 09:52

网络出版地址:<http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1627.TP.20180322.1724.001.html>

Developing trend and key technologies of network technology of mine Internet of things

ZHAO Xiaohu^{1,2}, ZHANG Kai^{1,2}, ZHAO Zhikai^{1,2}, HUO Yu^{1,2}

(1. The National and Local Joint Engineering Laboratory of Mine Internet Application Technology, Xuzhou 221008, China; 2. Internet of Things (Perception Mine) Research Center, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China)

Abstract: The current status of mine network was summarized. According to development goal of mine Internet of things and changing trend of information processing modes in future mine, developing requirements and trend of mine network were analyzed from aspects of network capacity, manageability, dense access, real-time performance, intelligentization, emergency communication after disaster, etc. Design principles of network of mine Internet of things were proposed including flattening, intelligentization, resource abstraction, etc. The application and developing requirements of key technologies in mine Internet of things were introduced such as wireless transmission coding, software-defined network, flow offloading, edge computation, network function virtualization, cognitive radio, energy capture, semantic network and so on.

Key words: mine Internet of things; mine network; developing trend of network; design principle of network; network flattening; network intelligentization; software-defined network; edge computation

收稿日期:2018-02-28;修回日期:2018-03-20;责任编辑:李明。

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2016YFC0801405,2017YFC0804404);江苏省自然科学基金青年基金资助项目(BK20140216)。

作者简介:赵小虎(1976—),男,江苏徐州人,教授,博士,主要研究方向为矿山物联网、矿山网络技术,E-mail:xiaohuzhao@126.com。

引用格式:赵小虎,张凯,赵志凯,等. 矿山物联网网络技术的发展趋势与关键技术[J]. 工矿自动化,2018,44(4):1-7.

ZHAO Xiaohu, ZHANG Kai, ZHAO Zhikai, 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.

0 引言

矿山网络伴随信息化、自动化进程不断发展,在矿山作业由单机自动化、区域自动化、矿山综合自动化及感知矿山物联网发展过程中,矿山网络结构不断演化,规模不断壮大,应用的通信技术不断发展,以满足各阶段信息交互需求。矿山物联网不是矿山综合自动化的简单升级,矿山物联网网络也不仅仅是原有矿山网络的扩容改造。矿山综合自动化初步实现了矿山已有各种监测监控系统的网络化集成,通过网络互联和协议转换实现了多种子系统数据互通,但与矿山物联网最终发展目标还有很大距离。袁亮^[1]、谢和平等^[2]指出,矿山物联网发展要融合云计算、大数据分析等技术,为矿山精准开采、无人开采提供支撑;张申等^[3-6]较全面地给出了感知矿山的定义,指出矿山物联网是融合了真实物理矿山、数字矿山和虚拟信息矿山三者为一体的综合体,更加具体、全面、动态、详尽地描述真实矿山,其本质是通过更广泛、更充分信息的融合应用来指导矿山科学开采。从直观上理解,未来矿山网络应满足物物相联

的需求,实现信息全面互通。更深刻的理解是,矿山物联网的发展目标不仅要求海量数据在网络间充分共享,更要求测量数据多维度关联认知,这必将加深数据在网络空间的交互频率和交互范围,同时也将改变当前信息处理的一般模式,势必在多方面对矿山网络提出新的要求。当前,中国矿山正处于由综合自动化向物联网变革的起步阶段,总结矿山网络现状、分析矿山物联网网络发展趋势和关键技术,对矿山物联网发展具有重要意义。

1 矿山网络现状与发展趋势

1.1 矿山网络现状

目前广泛应用的矿山网络仍采用以有线网络为主、无线网络为辅的架构,如图1所示。井下网络多采用千兆工业以太环网作为有线骨干网络,采用无线和工业总线作为分支网络,并通过多网融合网关接入到工业以太环网中。其中,无线网络由具有自组网功能的接入点及具有救灾通信功能的接入点组成。井上下网络通过防火墙隔离连接,从而实现井上下统一的矿山物联网网络体系建设。

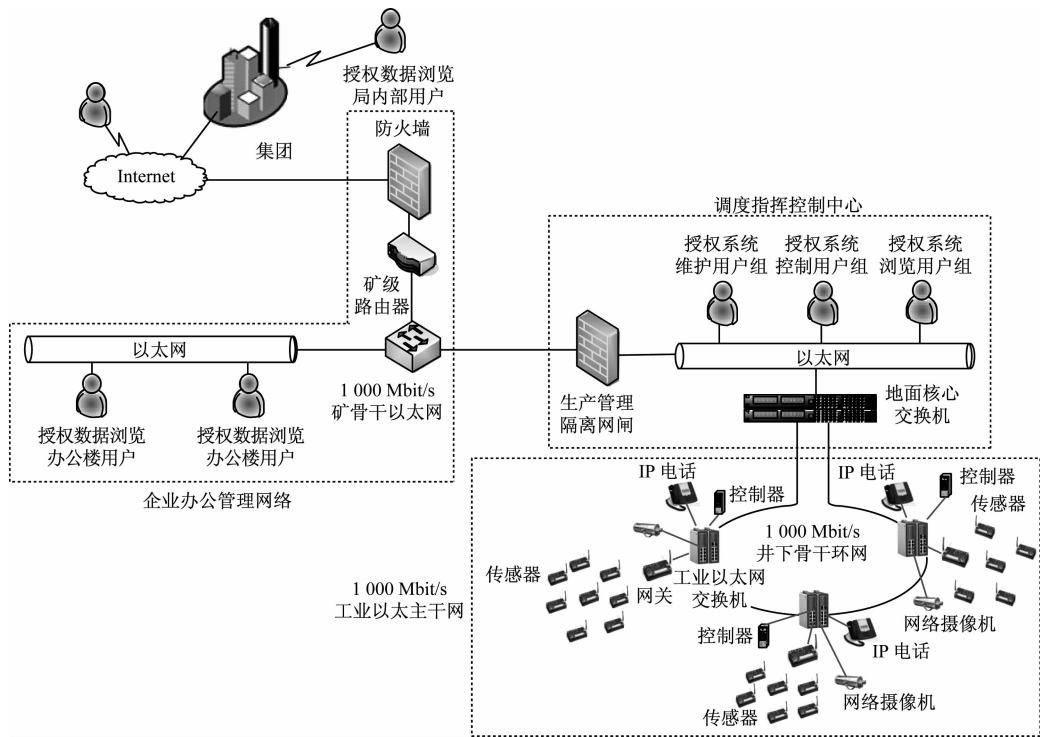


图1 矿山网络一般架构

Fig. 1 General mine network structure

实际上,虽然有有线网络高效稳定,但其固定布线和不可移动的特点无法满足煤矿移动作业需求,且在动态变化的工作面巷道中易受破坏,安装、维修成本较高。鉴于煤矿井下特别是工作面的复杂性和现

场作业的动态性,实时监控数据缺失容易酿成重大事故。为满足矿山生产对传输网络的要求,最理想的情况是实现井下无线通信全覆盖。这也是未来井下传输网络的发展趋势。

1.1.1 有线网络

有线网络方面,工业以太环网通信节点间通常通过光纤连接,传输速率达1 000 Mbit/s,具备在线管理、QoS(Quality of Service,服务质量)配置、VLAN(Virtual Local Area Network,虚拟局域网)划分功能,为矿山信息化拓展提供了有力支撑。在神华神东煤炭集团有限责任公司等信息化程度较高的矿井,10 Gbit/s 工业以太网已经开始使用,更进一步提升了大量多媒体业务承载能力。工业总线主要解决现场仪器仪表、控制器、执行机构等设备间的数字通信,可实现多种自动化控制系统和监测设备。矿山安全监测系统、井下人员定位系统多采用总线

型通信网络,但这类应用一般自成系统,需要特殊的转换设备实现跨系统互联互通,难以实现网络的分布式协作控制^[7]。

1.1.2 无线网络

无线网络主要用于复杂环境的网络接入和日益增多的移动通信需求,目前广泛应用的无线通信技术包括 WiFi(Wireless Fidelity,无线保真)、3G、4G、ZigBee、Bluetooth(蓝牙)、RFID(Radio Frequency Identification,射频识别)、LEACH(Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy,低功耗自适应集簇分层型协议)等,在传输距离、频段、速率、移动性管理、低功耗等方面各有特点,具体见表1。

表1 矿山无线网络技术对比
Table 1 Comparison of mine wireless network technologies

无线网络	主要技术指标(覆盖距离、速率、频段、功耗)	优点	缺点
WiFi	空旷地域覆盖半径300 m,井下有效覆盖半径约100 m,输出速率为54~300 Mbit/s,使用介于无线电波和微波之间的频段,功耗较低	数据传输速率及可靠性高,无需布网,健康安全	带宽不高,覆盖半径小,切换时间长,网络安全性不高
3G	采用2 GHz频段,可用带宽达230 MHz	便利高效,支持多业务、高速率传输	网络延迟大,信号不稳定
4G(LTE)	覆盖范围为几十到几百千米,商用频段为700 MHz~2.8 GHz,上载速率为20 Mbit/s,下载速率为100 Mbit/s	数据传输速率高,网络频谱宽,通信灵活,质量高,兼容性好,费用低	标准多,技术难,容量受限,设施更新慢
ZigBee	传输距离为几十米到几千米,功耗低	近距离,自组织,低功耗,低成本	传输速率低,实时性差
Bluetooth	覆盖范围为15 m,工作在2.4 GHz ISM频段,传输速率为1 Mbit/s	低功耗,全球可用,易于使用	通信速率低,应用成本高
RFID	典型的工作频率包括125 kHz,225 kHz,13.56 MHz等,有效读写范围约为15 m	设备抗污染能力和耐久性好,可重复使用,标签数据记忆容量大,可重复新增、修改、删除、更新,标签价格低廉	接入井下光纤环网困难,网络集中管理能力较弱,缺乏统一的安全认证机制和传输数据安全加密标准,可靠性差
LEACH	低功耗,自适应,集簇分层	融合发送,减少数据冗余,能量消耗小,网络生存时间长	不适用于大规模无线传感器网络,不适合节点能量不均衡的网络
透地通信	工作在超低频和甚低频频段,传输距离为几米到几十米	穿透性及抗干扰性强,适用于矿山、人防、地铁等领域	传输损耗大,效率低,硬件要求高,安全规范严格
感应通信	工作在50~500 kHz频段,借助沿线导体诱导传播完成无线通信	通信结构简单,易实现,投资少,见效快,适用于隧道、井下及地下建筑	传输损耗和耦合损耗随传输频率而改变,工作频率低,容量较小,易受干扰

ZigBee、LEACH等技术多用于复杂受限环境(如工作面、采空区等)的传感数据接入,可在一定程度上解决上述环境的供电问题,实现长时间多传感器自主组网通信,如王继水等^[8]针对矿山实际需求,应用物联网技术,通过建立基于ZigBee技术的无线传感器网络,实现矿山环境在线实时监测;丁恩杰

等^[9]研制了具有矿工定位、环境信息感知及双向通信功能的智能信息终端。Bluetooth普遍应用于移动设备近距离通信,具有低功耗、组网简单方便等优点,但当前1台蓝牙设备可同时连接的其他蓝牙设备数量极为有限(最多7台),更适用于矿工的随身体域网设备互联。另外,由于ZigBee技术数据传输

速率较低,接入互联网时需要复杂的应用层网关,目前有被改良技术 IPv6 取代的趋势。IPv6 主要面向低功耗、链路动态变化、低速率的无线网络,比 ZigBee 简单,无需网关即可实现端对端通信,大大降低了网络成本,可运行于多种介质,有利于实现统一通信。

WiFi、3G、4G 和 4G 后无线通信系统在增大无线覆盖范围和系统容量,提高信息传输量、传输速率、频谱资源利用率等方面具有很大优势,开始逐步尝试用于煤矿井巷^[10-13],为井下传感数据汇聚、移动通信、实时视频通话、实时定位提供了支持。但目前应用于煤矿井下的无线网络及通信系统等的基本架构和主要设备照搬地面无线通信系统,在井下无法发挥明显优势,如当前井下 WiFi 基站的理论传输速率可达 300 Mbit/s、覆盖半径可达 300 m,但由于巷道多径效应造成接收信号快速衰落及码间干扰,实际应用效果大打折扣^[10]。同样地,由于井下巷道呈线状结构,地面移动通信蜂窝网的很多优点在井下无法充分发挥。

总的来看,当前矿山网络还未达到矿山物联网全面覆盖、任意互联、智能统一管理的要求,不能有效支撑精准开采、无人开采的需要。

1.2 矿山网络发展趋势

矿山物联网与大数据融合要求新型信息处理方式的发展。近年来,矿山领域围绕信息化、智能化方面展开了大量的理论和应用研究,泛在传感感知与人工智能相结合,使矿山生产在智能决策、设备故障诊断、精确开采等方面得到新的发展机会和突破。不断互联化、智能化的应用发展使矿山信息处理方式在多方面悄然改变,主要体现在:传感感知手段愈发丰富,由单一目标监测向多维度感知发展;过程数据处理方法由传统的预置处理流程向事件关联智能分析、自主决策转变;监控数据由井下分散采集、井上集中处理反馈向现场就地分析、决策、执行转变。这些信息处理、应用方式的转变,使矿山感知数据体量飞速增长、挖掘深度加大、交互更加密集,要求矿山网络在多方面进一步发展,具体表现在以下 7 个方面。

(1) 更高的容量需求。矿山信息采集体量越来越大,物物相联使得网络终端间交互更加频繁,按当前趋势发展下去,数据量将增加 10~100 倍。这要求矿山网络在接入、骨干、回程各方面有更大的容量提升。

(2) 网络自动布置与管理。矿山网络随开采进

度不断拓展,设备、通信终端也在不断迁移,网络应当具备自动布置与自我管理能力,以满足少人、无人开采背景下的不间断作业需求。

(3) 密集接入能力。矿山物联网各个主体广泛互联,大量终端设备长时间在线交互数据,尤其在采煤工作面有限的空间内,设备密集布置,对网络在单位空间的并发接入能力有更高要求。

(4) 实时性与确定性。矿山网络实时性有多样化的需求,如矿震预测、煤层在线精准识别、设备实时控制等要求可控时延极低和传输结果确定,以保证测量的精确性和控制的可靠性;井下在线视频通话、图像识别等应用没有严苛的时延要求,但应用效果会受传输时延的直接影响。因此,需要分析矿山不同业务对实时性和确定性的需求,在物理层、传输层、应用层提出相应的改进方法。

(5) 动态接入与安全识别能力。未来矿山物联网中应用与网络的耦合度更低,终端接入管理不再按具体系统划分,网络接入点分布更多、更广,网络数据共享度更高,需要更加有效的终端识别方法和灵活、可靠的接入控制管理方法来保障网络安全。

(6) 动态的端到端 QoS 保障。在无人化开采背景下,矿山网络存在接入设备和终端的双移动性,造成资源管理和终端移动性管理困难。另外,矿山多变环境造成不同时间段的数据关注度不同,传统的数据分类标记方法难以识别流量热点,需要新的方法完成动态流量保障。

(7) 灾后应急通信能力。矿山井下灾害种类多、影响大,尤其是工作面风险因素最多、设备最密集,应当进一步提升网络灾变条件下的自愈能力和区域自持能力,为人员安全、设备保护和抢险救灾提供更好的保障。

2 矿山物联网网络设计原则与关键技术

2.1 设计原则

由于矿山环境的特殊性,矿山网络很难用单一或几种技术实现重大突破,必须从需求特点、网络组织结构、网络协作管理方法等方面共同改进,才能满足矿山物联网发展的需求。矿山物联网网络在规划设计时,可参考以下设计原则。

(1) 网络扁平化。通过网络扁平化,在网络内合理分布计算资源,以减轻骨干网的负荷,在扁平化基础上实现网络功能划分、实时与非实时任务分配,以及网络自适应能力、自愈与可靠性、稳定性等统一管理。

- (2) 利用新的频谱资源和编码技术,提升物理层的传输容量和接入能力。
- (3) 提高网络智能化,实现流量和网络状态智能认知。通过流量和网络状态的双向认知,结合云计算技术,实现流量智能预测和资源优化调度。
- (4) 多层次综合能耗管理。在终端、网络物理层、路由优化方面共同促进网络能耗管理,尤其是工作面设备的能耗管理,提升恶劣环境下网络的长时间生存能力和灾变应对能力。
- (5) 网络资源抽象化、功能化,使网络设备像软件资源一样,可以根据需求进行快速分割和编织,实现实时动态组织,使网络具备实时向需求热点迁移的能力。

件资源一样,可以根据需求进行快速分割和编织,实现实时动态组织,使网络具备实时向需求热点迁移的能力。

- (6) 加快网络与云端资源融合,通过云端资源向工作面下沉,在网络边缘区域为工作面设备提供就地计算、就地决策、就地协作的环境,从而减少主干网络的负载,提高并发接入量和实时性。

2.2 关键技术

未来矿山物联网网络结构如图 2 所示。其同时指出了不同应用场景中的关键技术。

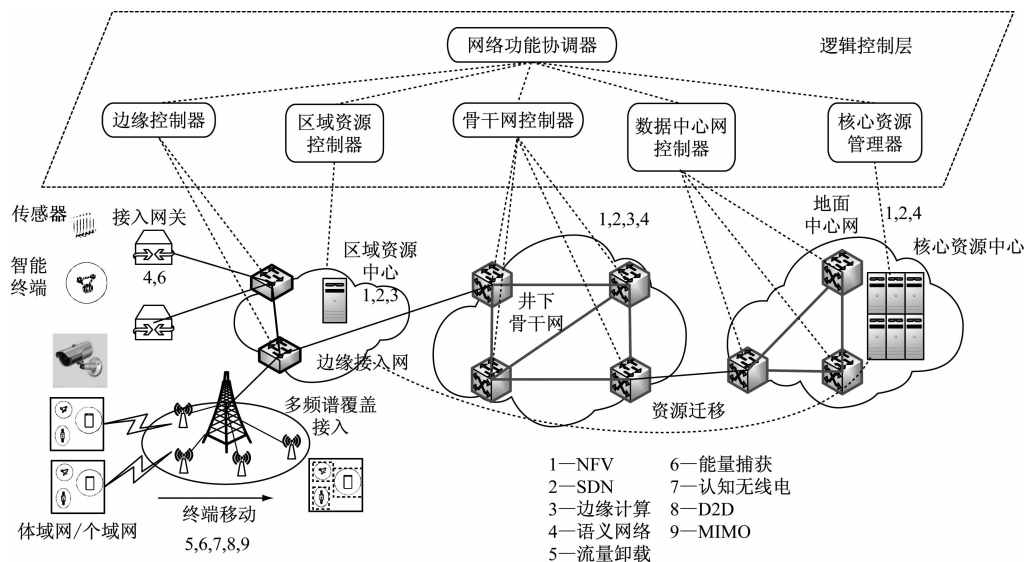


图 2 未来矿山物联网网络结构及关键技术

Fig. 2 Network structure and key technologies of future mine Internet of things

- (1) 矿山环境的无线传输理论和编码技术。信号在不同巷道及同一巷道的不同区段,其传输特性可能存在较大差异。研究无线电波在巷道中的传输理论,包括无线多径衰落规律,适合矿井无线传输的频率、调制方式、带宽等优化参数,对矿山通信扩容具有重大意义。例如,使用更多频谱(如毫米波、可见光)或使用载波聚合技术聚集零散的频谱资源,让终端聚合使用多个基站的频谱,从而实现传输扩容^[14];在物理层使用高阶调制和编码方案,如 256 正交幅度调制,提高频谱效率,并结合 MIMO (Multiple-Input Multiple-Output, 多输入多输出) 增加系统容量。

- (2) SDN (Software-Defined Network, 软件定义网络) 技术。SDN 的出现为网络创新带来了实质性推动。SDN 由可编程网络发展而来,在 SDN 架构中,控制平面和数据平面分离,网络信息和状态在逻辑上是集中的控制,底层基础网络设施从具体应用中抽离,可以实现脱离具体协议的网络创新^[15]。

SDN 在网络流量整形、动态细粒度质量控制、无缝接入、网络资源虚拟化、自动拓扑发现与管理、安全防范等方面具备应用研究价值^[15-17]。

- (3) 流量卸载与 D2D (Device-to-Device, 设备到设备)。矿山井下数据传输集中于工作面,而设备间的交互(尤其是移动设备的交互)有很多是工作面设备间的交互,通过流量卸载技术可以使很大一部分信息传输在网络边缘完成,减少了主干网络传输压力。D2D 直接通信的出现为突破无线组播的性能瓶颈提供了解决途径。D2D 是支持终端间直接通信的网络技术,可以减小通信跳数、缩短通信距离、降低传输能耗。通过研究移动网络、WiFi 与工业以太环网交换机的一体化混合组网,并参考井下环境与业务点分布情况,利用 SDN、节点冗余拓扑、局部网络灾变拓扑重构方法与通信调度机制,可以实现井下网络的密集接入、流量重整和灾害智能应对。

- (4) 边缘计算。为了解决大数据量传输与数据实时性问题,边缘计算应运而生。与云计算相比,边

缘并非由性能强大的服务器组成,而是由性能较弱、更为分散的异构计算资源组成,涉及矿山智能装置、传感器、控制器、调节器等底层设施。边缘计算扩展了以云计算为特征的网络计算模式,将数据、数据处理和应用程序分布在网络边缘的本地设备,而非集中在数据中心,通过强化独立节点间的局部即时交互和分布式智能,使节点具备自组织、自计算、自反馈的计算功能,从而更加广泛地运用于不同的应用形态和服务类型。

(5) NFV(Network Function Virtualization,网络功能虚拟化)技术。NFV通过使用 x86 等通用性硬件及虚拟化技术,来承载多功能的软件处理,从而降低网络设备成本;通过软硬件解耦及功能抽象,使网络设备功能不再依赖于专用硬件,资源可得到充分灵活共享,实现新业务的快速开发和部署,并基于实际业务需求进行自动部署、弹性伸缩、故障隔离和自愈等。将 NFV 与 SDN 结合,可实现网络和计算资源的协作管理,进行矿山边缘计算功能的快速迁移,使矿山网络具备云计算资源在工作面就近投射功能,在网络服务灵活性、实时性、质量保障、密集接入、灾害应急方面都具备发展潜力。

(6) 认知网络与认知无线电技术。认知无线电可用来提高资源管理效率、QoS、安全性、接入控制能力等网络目标。认知网络仅受限于运营网络元素的适应性和认知框架的灵活性。Ad-hoc 网络、基于基础设施的骨干网络和异构式网络都可作为矿山认知网络设计的候选网络。应用于矿山的泛在感知网络应该是具有环境认知和自动重新配置能力的认知无线网络^[18-19],其可针对各种环境提供良好的解决方案,使矿山无线电设备能够在不同情况下工作。

(7) 微型化智能装置及能量捕获技术。高能效是矿山物联网传感器与装置设计的必要条件。矿山现有传感器以有线供电、传输为主,其体积及功耗大,移动、维护困难,通过微型化智能装置及能量捕获技术,实现小型设备长时间低功耗工作和无外接电源工作,对恶劣环境长期在线监测和灾后通信具有重要意义。例如,在低功耗方面,MEMS(Micro-Electro-Mechanical System,微机电系统)瓦斯传感器的功耗可降低 30%;在能量捕获技术方面,可参考目前一些智能家居和野外环境监测活动中使用太阳能、温度差和振动等能量为微型设备供电的技术,利用井下设备的振动能量和井下风能,实现传感器网络设备即插即用^[20],有望解决煤矿采掘工作面供电问题。

(8) 语义网络。语义网络具备强大的层次化描述能力、便捷灵活的数据存储结构、丰富的工具及方法论支持、良好的可移植性,有利于网络数据的多维度含义分析,便于信息的深度关联发现,可使网络具备流量感知和预测能力,为传输优化、资源迁移等提供指导,从而实现细粒度网络资源组合^[21-23],对矿山网络智能化具有重要意义。

3 结语

随着矿山物联网技术的深入发展,矿山网络将联系矿山生产中规划、管理、传感、决策、控制等方面,但其现状尚不满足矿山物联网更加融合、智能的发展目标,需要加速发展。在该过程中,应打破原有按系统功能设计具体网络的思维,统筹考虑未来矿山物联网需求和网络前沿技术,通过统一管理、资源均衡、多网协作来解决矿山网络发展难题。

参考文献(References):

- [1] 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.
- [2] 谢和平, 高峰, 鞠杨, 等. 深地煤炭资源流态化开采理论与技术构想[J]. 煤炭学报, 2017, 42(3): 547-556.
XIE Heping, GAO Feng, JU Yang, et al. Theoretical and technological conception of the fluidization mining for deep coal resources[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(3): 547-556.
- [3] 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 Shen, DING Enjie, XU Zhao, 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.
- [4] 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.
ZHANG Shen, DING Enjie, XU Zhao, et al. Part II of lecture of Internet of things and sensor mine-sensor mine, digital mine and integrated automation of mine[J]. Industry and Mine Automation, 2010, 36(11): 129-132.
- [5] 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 Shen,DING Enjie,XU Zhao,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.
- [6] 张申,丁恩杰,徐钊,等. 物联网与感知矿山专题讲座之四——感知矿山物联网与煤炭行业物联网规划建设[J]. 工矿自动化,2011,37(1):105-108.
- ZHANG Shen,DING Enjie,XU Zhao,et al. Part IV of lecture of Internet of things and sensor mine-plan and construction of Internet of things of sensor mine and coal enterprise [J]. Industry and Mine Automation,2011,37(1):105-108.
- [7] 钱建生,马姗姗,孙彦景. 基于物联网的煤矿综合自动化系统设计[J]. 煤炭科学技术,2011,39(2):73-76.
- QIAN Jiansheng, MA Shanshan, SUN Yanjing. Design on mine comprehensive automation system based on Internet of things [J]. Coal Science and Technology,2011,39(2):73-76.
- [8] 王继水,曹帅. 基于物联网的矿山环境在线实时监测系统研究与实现[J]. 计算机测量与控制,2012,20(2):342-344.
- WANG Jishui, CAO Shuai. System's research and implementation of mine environment real-time online monitoring based on M2M [J]. Computer Measurement & Control,2012,20(2):342-344.
- [9] 丁恩杰,张申,郁万里. 矿山个人双向信息传输系统设计与实现[J]. 科技导报,2011,29(35):55-59.
- DING Enjie,ZHANG Shen,YU Wanli. Design and implementation of personal two-way information transmission system for the coal mine[J]. Science & Technology Review,2011,29(35):55-59.
- [10] 孙维. 基于 Wi-Fi 技术的矿井无线通信系统的设计与应用[J]. 煤矿安全,2010,41(4):87-89.
- [11] 李继来,王小岑. 基于 WCDMA 的矿用 M2M 终端系统的设计[J]. 工矿自动化,2011,37(12):1-4.
- LI Jilai,WANG Xiaocen. Design of mine-used M2M terminal system based on WCDMA[J]. Industry and Mine Automation,2011,37(12):1-4.
- [12] 焦保国. 基于 3G 技术的煤矿移动综合监控平台[J]. 煤矿机电,2012(4):77-80.
- JIAO Baoguo. Coal mine mobile comprehensive monitor platform based on 3G technology [J]. Colliery Mechanical & Electrical Technology, 2012 (4): 77-80.
- [13] 樊荣,宋文,黄强. 矿井无线通信系统研究与发展[J]. 西安科技大学学报,2010,30(4):471-474.
- FAN Rong, SONG Wen, HUANG Qiang. Research and development of mine radio communication system [J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology,2010,30(4):471-474.
- [14] DOPPLER K, RINNE M, WIJTING C, et al. Device-to-device communication as an underlay to LTE-advanced networks [J]. IEEE Communications Magazine,2009,47(12):42-49.
- [15] SEZER S, SCOTT-HAYWARD S, CHOUHAN P K, et al. Are we ready for SDN? implementation challenges for software-defined networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2013,51(7):36-43.
- [16] KIM H, FEAMSTER N. Improving network management with software defined networking [J]. IEEE Communications Magazine, 2013, 51 (2): 114-119.
- [17] KOBO H I, MAHFOUZ A M, HANCKE G P. A survey on software-defined wireless sensor networks: challenges and design requirements[J]. IEEE Access, 2017(5):1872-1899.
- [18] YARKAN S, GUZELGOZ S, ARSLAN H, et al. Underground mine communications: a survey [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2009, 11(3):125-142.
- [19] 胡青松. 煤矿认知无线电网络的路由协议研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2011.
- [20] GUILLEMIN P, BERENS F, CARUGI M. IERC cluster book 2014 Ch. 3 SRIA web[EB/OL]. [2018-02-02]. https://www.researchgate.net/publication/263970751_IERC_Cluster_Book_2014_Ch3_SRIA_WEB#pf4b.
- [21] GYRARD A, BONNET C, BOUDAUD K. A machine-to-machine architecture to merge semantic sensor measurements [C]// The 22nd International World Wide Web Conference, Rio de Janeiro, 2013: 371-376.
- [22] PFISTERER D, ROMER K, BIMSCHAS D, et al. Spitfire: toward a semantic web of things[J]. IEEE Communications Magazine,2011,49(11):40-48.
- [23] 孙瑜,李志平. 基于多领域本体的智能查询系统模型 [J]. 计算机工程,2005,31(13):148-150.
- SUN Yu, LI Zhiping. Model of intelligent query answering system based on multi-domain ontology [J]. Computer Engineering,2005,31(13):148-150.