

煤矿应急救援通信技术的现状与趋势

胡青松^{1,2}, 杨维³, 丁恩杰^{1,4}, 李世银¹, 李冰皓²

(1. 中国矿业大学信息与控制工程学院, 江苏 徐州 221008; 2. 新南威尔士大学矿物与能源资源工程学院, 悉尼 2052;
3. 北京交通大学电子信息工程学院, 北京 100044; 4. 中国矿业大学物联网(感知矿山)研究中心, 江苏 徐州 221008)

摘要: 在煤矿事故后的灾区侦察和应急救援中, 应急通信系统是保障人员沟通联络、确定受困人员位置、感知灾区现场态势的必备设施。提炼了煤矿应急通信系统的总体架构模型, 即一个骨干、多个分支、若干专线, 辅以无线通信网络的结构模式。综述了主要的煤矿有线应急通信系统、无线应急通信系统、透地应急通信系统和混合应急通信系统的发展现状, 分析了各种系统的关键技术和在应急救援场景中面临的挑战。探讨了煤矿应急通信技术的发展趋势, 提出了基于煤矿物联网重构的应急通信新模式, 讨论了该模式需要解决的关键技术, 即煤矿物联网灾后重构策略、矿井事故漂移节点重定位方法、矿井事故区域的态势感知方法和灾后重构网络的数据传输方法, 有望显著提高事故应急处置速度和救援效果。

关键词: 煤矿事故; 应急救援; 应急通信; 通信网络; 煤矿物联网

中图分类号: TD676

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-436x.2019123

State-of-the-art and trend of emergency rescue communication technologies for coal mine

HU Qingsong^{1,2}, YANG Wei³, DING Enjie^{1,4}, LI Shiyin¹, LI Binghao²

1. School of Information and Control Engineering, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221008, China

2. School of Minerals and Energy Resources Engineering, University of New South Wales, Sydney 2052, Australia

3. School of Electronic and Information Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China

4. Internet of Things (Perception Mine) Research Center, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221008, China

Abstract: For the disaster area probing and emergency rescue in a mine, it is of great importance to employ the emergency communication system to communicate with each other, determine the places of trapped miners, and sense current status of disaster area. The hybrid emergency communication architecture model for coal mines was extracted, which was composed of one backbone, multiple branches, several special lines, and some wireless networks as assistance. Four types of emergency communication systems of coal mine were reviewed, namely through-the-air, through-the-wire, through-the-earth and mixed medium type. The key technologies and challenges of these four emergency communication types were analyzed. The research trend was discussed and a new emergency communication mode based on the reconstruction of mine Internet of things was proposed. The main enabling technologies of this new emergency communication mode were analyzed, namely post-disaster reconstruction of mine Internet of things, shifting nodes re-localization after mine disaster, status sensing method of mine disaster area, and data transmission method for post-disaster reconstruction network.

Key words: coal mine disaster, emergency rescue, emergency communication, communication network, mine Internet of things

收稿日期: 2018-12-26; 修回日期: 2019-04-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No.51874299, No.61771474); 江苏省科技成果转化专项基金资助项目(No.BA2016016)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.51874299, No.61771474), Special Funds for Transformation of Scientific and Technological Achievements in Jiangsu Province (No.BA2016016)

1 引言

煤炭在我国一次能源的生产和消费中占有重要地位,我国煤炭开采长期遭受瓦斯、水害、顶板等事故的困扰^[1]。尽管绝大多数矿井部署了通信联络、灾害预警等辅助系统,但是重大事故仍时有发生,造成的人员伤亡依然十分严重。因此,在煤炭主体能源地位无法替代、煤矿事故无法完全避免的情况下,提升煤矿事故应急处置和救援能力已上升为国家战略:国家安全生产“十三五”规划明确将“应急救援能力建设工程”作为八大重点建设工程之一,煤矿安全生产“十三五”规划要求“提升煤矿事故应急处置能力,完善煤矿应急救援体系”。

根据《煤矿安全规程》的规定^[2],事故救援前必须进行灾区侦察,根据探测到的事故地点、波及范围、灾区人员分布、潜在危险等因素制定救援方案和实施救援。在灾区侦察和事故救援中,迫切需要建立救援人员和地面救援指挥中心的通信联系,确定被困人员及事故的位置,帮助救援指挥人员掌握现场态势。尽管各种有线或无线通信设施在生产监测控制和灾害预测预警中发挥了巨大作用,但是一旦发生事故,事故区域的部分通信节点和感知节点将会在事故中损毁,导致有线通信线路中断,无线节点难以组网,进而导致沟通联络没有保障,人员位置无从知晓,现场感知难以进行。显然,为救援工作大规模部署有线或无线设施不太现实,因此,建设可靠的应急通信系统,利用残存资源和少量新添设备,满足事故救援所需的沟通联络等需求,是实现及时有效救援的重要保障。

矿井应急救援通信系统必须具有灾变情况下的顽存能力、灾变后的按需重构能力,以及通信与感知并重的特性。然而,当前煤矿中有的没有安装应急通信系统,仅仅部署了用于正常生产的矿用通信网络;有的虽然部署了应急通信系统,但只是地面网络系统的简单移植,使用效果并不佳。随着有线/无线通信技术的迅猛发展,以及物联网和云计算的快速成熟,矿井应急通信呈现出可重构化、协同化、云计算化^[3],甚至“空天地井”联合优化的趋势^[4]。本文拟对矿井应急通信的基本原理、发展现状、主要挑战和发展趋势进行全方位的综述,并提出一种新颖的基于煤矿物

联网重构的应急通信模式,为矿井应急通信研究提供一定借鉴。

2 煤矿应急救援的通信需求与总体架构

矿井应急通信系统是整个煤矿通信系统的有机组成部分,旨在建立起救援一线与地面救援指挥中心的通信联系,服务于煤矿灾后探查和应急救援。本节通过分析煤矿应急救援的通信需求,构建煤矿应急通信系统的架构体系。

2.1 煤矿应急救援的通信需求分析

如上文所述,当前煤矿的做法通常是为将正常生产而部署的煤矿通信系统兼做应急救援网络,因此有必要考察一般煤矿通信系统的影响因素。煤矿通信系统的结构选择受多个互相矛盾的因素制约,主要包括以下 3 个方面。

1) 数据类型多样。煤矿安全生产数据既包括机械化设备的运行状态、井下作业人员的位置信息和生命体征、煤矿巷道内的环境信息,也包括安装于井下关键区域的监控视频,以及地面和井下或井下不同区域之间的语音或视频等。此外,随着煤矿生产过程的推进,新的数据需求还会不断产生。因此,矿井骨干传输网络的吞吐量必须足够大,以保证大量异构煤矿安全生产数据的有效传输。

2) 传输及时可靠。只有准确把握生产现场的一手资料,地面决策指挥人员才能全面掌控井下的动态生产情况,以便进行有针对性的安全监控和生产调度。同时,及时准确地将地面调度指令传输到指定人员和设备,是保证生产效率和安全生产水平的必备条件。因此,煤矿通信中的传输可靠不但体现了无丢失、无差错的基本要求,而且包含了时延、时延抖动、确定性等 QoS(quality of service)约束。

3) 部署方便灵活。井下多数巷道(特别是主干巷道)是固定不变的,适合部署高带宽大容量的有线通信系统。另一方面,综采工作面和掘进工作面等巷道随着开采的推进而动态变化,适合部署成本低廉、结构可变、移动灵活的移动网络。另外,没有主干网络的分支巷道,也宜使用无线网络系统作为有线网络的有益补充,以便扩大通信网络系统的覆盖范围。

煤矿应急救援场景下通信联络的目的与正常生产情况有很大差别。正常生产情况下,所有通信和信

息化设施均为煤炭生产服务，目的是保安全提效率。而煤矿事故通常会造部分井下人员因巷道堵塞或受伤严重的原因而无法主动撤离，不得不在井下等待救援。在时间就是生命的情况下，通信联络的首要目标是抢救被困人员。在开展救援时，及时准确地掌握事故发生地点、事故区域环境参数及其变化情况、巷道破坏程度、影响范围、探测被困人员位置并了解其身心状态等信息，是进行救援决策和实施救援的重要依据，而事故区域和地面之间的通信联络系统是实现事故现场感知和信息传输的先决条件。

因此，煤矿应急通信具有如下典型特点。

1) 数据量大小不是重点。应急救援通信的第一要务是确定被困人员位置，只要能够建立救援人员和被困人员的通信联络，哪怕只是打点信号，都能够极大程度地避免救援的盲目性，大幅提高救援成功率。

2) 顽存性强。煤矿应急通信设备极有可被煤矿事故损毁，应通过地下埋入、钢管内铺缆、适度冗余等方式，增强通信系统的抗灾能力。

3) 重构能力强。矿井内的应急通信节点应具有极强的自组织能力，在事故发生后，残存通信资源应能够快速自主地重构成网，第一时间为救援决策指挥提供事故现场信息。

4) 通信与感知能力并重。应急通信节点应具有现场态势感知能力，从而帮助救援人员安抚被困人

员情绪，指导被困人员自救和互救，实现被困人员与救援人员协同救援，增强救援针对性和救援效果。

2.2 煤矿应急通信系统的总体架构

根据信号传播介质的不同，可将煤矿应急通信系统分成4类，即有线系统(TTW, through the wire)、无线系统(TTA, through the air)、透地系统(TTE, through the earth)、混合系统(MMT, mixed medium type)^[5-6]。TTW 可以采用双绞线、同轴电缆、漏泄馈线、光缆，甚至电力线等线缆，但每种线缆都有其特性和缺陷。TTA 技术种类繁多，所工作的频段也各异，进而导致通信容量、传输时延等存在很大差别。TTE 利用超低频或甚低频电磁波穿透能力强的特性，以大地为传播媒介传输信号，主要应用在地面和井下之间无法部署通信线缆且难以使用 TTA 技术的场景。

考虑到上述制约因素，煤矿应急通信系统通常采用一种混合结构，如图 1 所示。从传输媒介而言，该结构混合使用了有线网络和无线网络，采用一个骨干、多个分支、若干专线，辅以无线通信网络的模式^[7]。一个骨干即一个骨干网络，大多采用千兆甚至万兆工业以太网，可通过 2 个井筒与地面连通，也可通过单个井筒，图 1 中给出的是 2 个井筒的示例。各种矿用通信设施就近接入或通过分支交换机接入骨干网，或通过现场

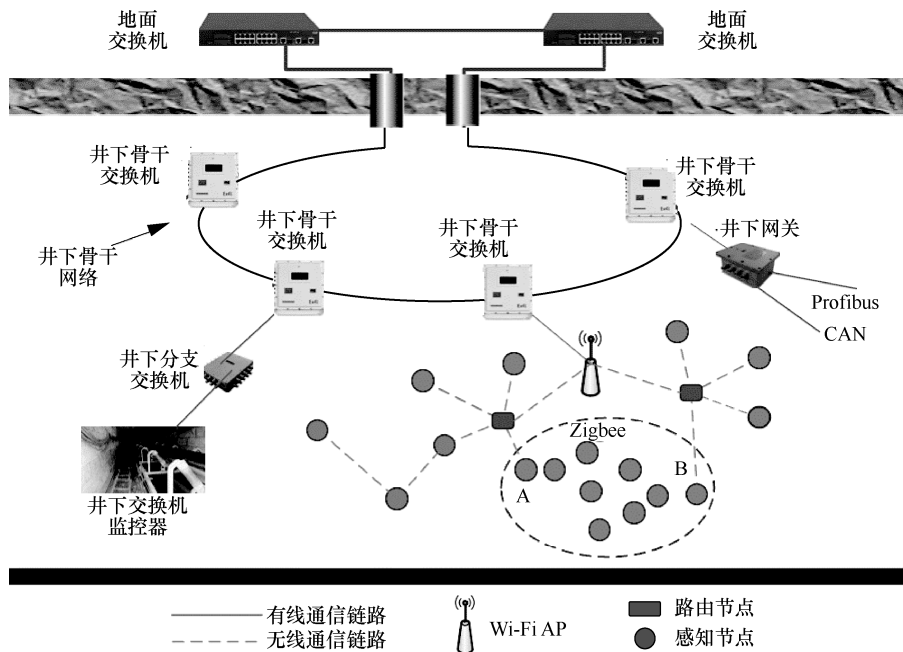


图 1 煤矿应急通信网络的总体结构

总线(如 CAN(controller area network)、Profibus、RS-485 等)接入骨干网^[8]。从拓扑结构而言,该结构采用环型、树型、网状型混合拓扑结构,其中,骨干网络一般采用环型结构,以增强数据传输的确定性;分支网络通常采用树型结构,以增强网络部署的灵活性;无线网络大多采用网状型拓扑,以提高网络的覆盖率和可靠性。

图 1 所示的混合式煤矿通信网络结构能够充分适应煤矿环境中的制约因素。由于采用了千兆甚至万兆工业以太网,因此能够传输类型多样的煤矿数据。由于工业以太网解决了普通以太网的实时性和确定性难题,能够保证数据的及时可靠传输。由于可用现场总线和无线网络对主干网络进行按需扩展,满足了部署灵活的要求。甚至为了增强应急通信系统的抗灾能力,有些矿井在有线网络的线缆选用和施工中做了特殊处理,比如选用抗拉能力和抗砸断能力强的线缆,将线缆埋入在巷道底板中或穿入钢管中。此外,辅以具有重构能力的煤矿物联网、具有穿岩能力的通信系统(如透地通信),将大幅提高应急通信系统的顽存性、感知能力和重构能力。

3 煤矿应急通信技术的发展现状

3.1 TTW 煤矿应急通信系统

虽然磁石式电话、声能电话、贝尔信令电话、拨号与寻呼混合系统、无源光网络等都在煤矿通信系统中得到过应用,但是应用较少,本文只讨论目前使用最为广泛的现场总线和工业以太网。现场总线是应用在生产现场的一种分层通信网络,用于连接现场的智能设备(如传感器、执行器等)、控制器(如 PLC(programmable logic controuer)、调节器等)、人机接口等设备^[10-11],实现控制中心与现场、现场设备之间的数值、状态、事件、控制命令等数据的传输。与传统的直接使用通信线缆连接设备的方案相比,现场总线的信息传输质量更高,传输的数据量更大,能够大幅节省电缆和减少安装费用,添加或删除现场设备更加容易。在煤矿通信网络中,现场总线通常被用作骨干网络的分支,而骨干网络则采用既能满足现场需求,又与办公网络一脉相承的工业以太网。

要将以太网用于煤矿领域,重点是解决以太网的不确定性和非实时性问题^[12-13]。以太网的 MAC(media access control)层采用了 CSMA/CD(carrier sense multiple access with collision detection)协议,其

发前侦听机制虽可降低冲突发生概率,但是难以做到完全避免。一旦检测到冲突,网络中所有站点必须随机退避一段时间后方可尝试再次发送。因此,数据在传输过程中是否会发生冲突无法预测,发生冲突后等待多长时间才能重发无法预知,数据最终能否传输成功没有保证。因此,以太网的数据传输不但是非实时的,而且具有相当大的不确定性,这对需要实时监控的煤矿生产和应急救援而言是致命的。针对这一问题,工业以太网多从抑制冲突、降低冲突概率,或以确定方式解决冲突等方面入手加以解决。

很多现场总线协议不能提供额外时间保证,即使能提供也很有限,比如 Ethernet/IP、Modbus TCP、Modbus RTSP、Profinet CBA 和 Profinet I/O。有些协议使用了额外的层,比如 EPL(ethernet power link)、EPA(ethernet for plant automation)、P-Net on IP、VNET/IP 和 TCnet。EPA 采用了基于固定周期的 TDMA(time division multiple access)策略,它抛弃了效率较低的轮询机制,节点之间的同步通过 IEEE 1588 协议实现。Profinet I/O 解决了自动化设备的远程输入/输出(I/O, input/output)问题,所有自动化设备和 I/O 设备之间的信息交换是周期性的。Profinet IRT 添加了同步传输,每个节点连接到一个专门设计的交换机,在传输同步数据的时候,其他数据会被交换机阻塞。此外,该交换机也具有直通功能和数据优先级功能,从而使同步数据的抖动较小,同时极大地降低了高优先级数据的时延。

由于具有上述优势,Profinet 在煤矿行业主干网络中的应用非常广泛^[14],用以无缝整合现有各个子系统^[15],如矿井提升系统、运输系统、通风系统、变电系统、排水系统、安全监控系统等,实现整个生产环节的统计监控、统一调度和管控一体化。ControlNet 及我国具有自主知识产权的 EPA 也有一定应用^[16-17]。主干网通过工业级交换机为全矿地面及井下各个子系统提供方便灵活的工业以太网接口,如果在使用过程中光纤网络在某点断开,网络也能照常工作,而且系统能及时诊断出故障点以便维修。敷设光缆根据环网需求和冗余性选用单模阻燃光缆。需要注意的是,为了保证调度的可靠性,《煤矿安全规程》规定矿用有线调度通信系统必须专线专用,不能接入骨干网络;矿井安全监控系统不能和图像监视系统共用同一芯光纤。

3.2 TTA 煤矿应急通信系统

矿井无线通信系统具有不同于地面系统的一

些特殊要求^[18]，比如设备必须防爆、抗衰落、抗干扰能力强，体积不能太大、发射功率要小，并且要具有较强的防尘、防水、防潮、防腐、耐机械冲击等性能。目前，可用于煤矿的无线通信技术较多^[19]，如蜂窝通信（井下小灵通/3G/4G/5G）、Wi-Fi、无线传感器网络（WSN, wireless sensor networks）、可见光通信（VLC, visible light communication）、RFID（radio frequency identification）、UWB（ultra wide band）等，本文重点介绍在矿井中广泛使用的 Wi-Fi、WSN 和具有极大应用潜力的 UWB 和 VLC 技术。

3.2.1 矿用 Wi-Fi

基于 IEEE 802.11 系列标准，传输速率较高，已成为井下主流无线网络技术的有力竞争者。从 1999 年发布 Wi-Fi 1 和 Wi-Fi 2 所对应的标准 IEEE 802.11b 和 IEEE 802.11a，到 2018 年 10 月发布 Wi-Fi 5 标准 IEEE 802.11ac^[20]，Wi-Fi 技术已经非常成熟。最新的 Wi-Fi 6 增强了稠密和拥挤（即大量用户同时访问）情况下的性能，能量效率和频谱利用率更高。IEEE 802.11 通过点协调功能（PCF, point coordination function）管理信道接入^[21]，来处理对传输时间要求严格的数据的冲突和退避。混合式协调功能（HCF, hybrid coordination function）对 PCF 进行了扩展，以支持参数化数据流，这与实际的传输调度更为接近。

矿用 Wi-Fi 无线通信结构简单^[22]，支持 TCP/IP 协议，扩展性好，方便与基于工业以太网的骨干网络互连互通，从而实现数据、语音和图像的综合传输。同时，矿用 Wi-Fi 系统也支持 Mesh 网

络技术，能够开发出强插、强接、群呼、录音、脱网通信等功能，并可通过网关实现与调度通信系统的无缝连接，实现矿井的移动语音调度。此外，通过对调度平台、AP（access point）、终端设备的集成优化，可在一定程度上克服跨 AP 通话时可能出现的无线信道带宽不稳定、语音通话时延较大、断话等方面的缺陷。

当井下 AP 与地面交换机之间的连接线缆中断时，基站服务区内的移动电话仍然可以通话，因此抗故障能力强。为了让 Wi-Fi 组网更加灵活，Wi-Fi 联盟在 2010 年发布了 Wi-Fi Direct，该网络中没有处于主导地位的 AP，各个移动站处于平等地位，相互之间可以自组成网，特别适合应用在无法部署线缆的灾害救援场景中。

3.2.2 矿用 WSN

WSN 由分布式的自治节点构成^[23]，这些节点具有低功耗、可编程、多参数感知、组网简单灵活等特点^[24]，对网络故障和节点移动具有较强的适应能力，在进行事故救援时的应急通信组网中具有较大优势。矿用 WSN 的核心功能是实现数据的采集，并具有一定数据转发能力，但是大量数据的传输仍然需要借助有线网络或 Wi-Fi 等无线网络，如图 2 所示，因此 WSN 节点一般部署于无线网络与有线网络接口的周围。前面已经提及，矿井有线网络一般采用工业以太网或现场总线，而无线/有线网络的接口位置往往由有线网络决定^[25]，因此需要通过研制合适的节点部署策略，矿用 WSN 以便适应有线网络接口位置，使

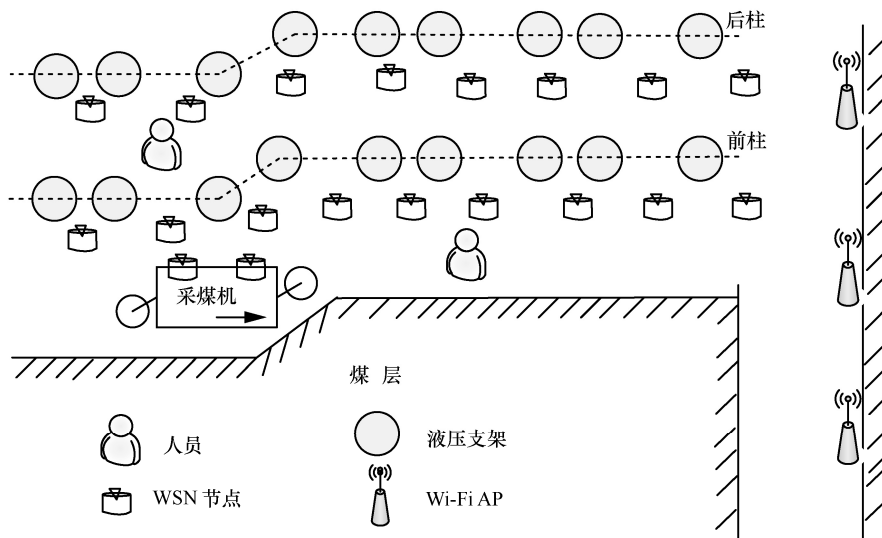


图 2 煤矿工作面 WSN 与 Wi-Fi 的混合部署

覆盖度和感知效率满足使用需求。

矿用 WSN 节点可分成 3 种类型, 即传感节点、路由节点和协作节点^[9], 其中, 传感节点负责采集感兴趣的矿井现场数据, 并将感知结果转发给路由节点; 路由节点将数据传输给无线网络和有线网络接口网关; 协作节点通过协同的方式为别的节点提供数据转发服务, 它可以是路由节点, 也可以是传感节点。为了满足矿井 WSN 节点的感知需求, WSN 节点宜采用 MEMS (micro-electro mechanical system) 等新兴技术, 克服传统催化式矿用传感器的缺陷, 如催化中毒导致感知结果误差严重、耗电过快导致监测空洞等问题。为了保证数据的可靠传输, WSN 节点应具有较强的自适应组网能力和重构能力, 以适应煤矿巷道通信信道复杂多变的特点, 并提高应急情况下网络损毁后的快速自愈能力。

3.2.3 矿用 UWB

UWB 的强穿透力对于救灾救援信号的传输十分有利。由于 UWB 采用了持续时间极短、占空比极低的窄脉冲信号^[18], 因此通过多径信道后的直射波、反射波或折射波不易重叠, 接收机在接收的时候容易分辨出不同路径的信号, 有助于降低煤矿巷道中强多径效应的影响。UWB 信号占用的频段极宽 (3.1~10.6 GHz), 与现有无线通信系统所使用的频带存在重叠, 因此必须限制其发送功率, 以免对现有的无线通信系统造成干扰, 这导致其最大传输距离仅为 10 m 左右。不过, 煤矿井下不存在地面那样众多的无线通信系统^[26], 不用过于考虑对其他无线通信系统的干扰, 因此可以适度增大发射功率以提高传输距离, 使 UWB 的传输距离达到 200 m 甚至更远。在保持发射功率不变的情况下, 降低数据传输速率, 也可以达到提高传输距离的目的。

在矿井中, 可将 UWB 作为 WSN 的物理层技术, 从而充分利用 WSN 和 UWB 的优势。一方面, WSN 具有分布式、自组织、顽健性高、扩展性好等优势, 可以动态组网以便采集和传输数据。另一方面, UWB 具有功耗低、速率高、抗干扰和抗多径能力强、定位精度高等优势, 适合在矿井复杂多变的环境中实现可靠数据通信, 并提供基于位置的服务。因此, 结合 WSN 和 UWB 的优势, 构建基于 UWB 的矿用 WSN, 可以显著提高 WSN 的感知能力、通信距离和覆盖范围, 增强网络通信容量、

传输速率和可靠性, 提高测距和定位精度, 这对应急救援是非常有利的。

在工作面使用的时候, UWB 调制方式宜采用 BPM (bi-phase modulation)^[27], 因为在信息源的“0”和“1”码元概率相等时没有离线谱线, 即使码元概率不相等, 它的离线谱线也很少, 这对低功耗 WSN 而言非常有价值。发送符号可采用二阶高斯波形, 接收端采用非相干接收方式, 以降低接收机结构。基于 UWB 的 WSN 已在矿井多媒体信息传输^[28]、移动目标定位^[29]等方面得到了广泛应用, 并在矿井灾后塌方体成像^[30]、塌方体下生命特征检测^[31]等方面取得一定研究成果, 不过仍然需要针对煤矿巷道特点, 大力研究普适性强的煤矿巷道 UWB 信号信道传输模型、适合于矿井环境的 UWB 调制方法、UWB 信号压缩感知方法, 以及 UWB 与其他无线技术融合使用方法等关键技术。

3.2.4 矿用 VLC

LED (light emitting diode) 灯具有光转化效率高、寿命长、发热率低^[32]等特点, 并且可以快速切换光强, 这种切换的速度极快以致肉眼无法察觉, 因此可以用于调制并传输数据。在煤矿巷道特别是煤矿工作面使用 VLC 具有得天独厚的优势: 首先, 煤矿巷道中本来就有照明灯具, 因此不需要专门为 VLC 系统大幅追加投资; 其次, 煤矿巷道不但没有太阳光等强背景噪声干扰, 而且黑色的煤壁对可见光的反射能力很弱, 因此通信比较稳定可靠。此外, VLC 所使用的带宽极高, 因此拥有更大的信道容量和更高的传输速度。

以煤矿工作面为例^[34], 在液压支架顶部安装 LED 照明灯具, 这些灯具兼做传输语音、视频、数据等信息的光源基站, 而位于巷道内的矿工是煤矿 VLC 系统的移动节点, 如图 3 所示^[33]。除了照明灯基站和移动节点外, 构成工作面 VLC 系统的设备还包括照明用电力电缆和综保电力载波装置。照明用电力电缆为工作面原有的 127 V 低压照明电缆, 照明灯基站和综保电力载波均连接在照明用电力电缆上。因此, 煤矿工作面 VLC 系统真正的可见光通信部分其实是移动节点与照明灯基站部分, 它们之间实现了双向无线移动通信, 而综保电力载波与井下环网交换机或分支交换机连接, 将煤矿工作面的数据经由有线骨干网络传输到地面。然而, 在发生矿井事故时, 照明灯基站由于供电中断而无法继续工作, 因此应大力研

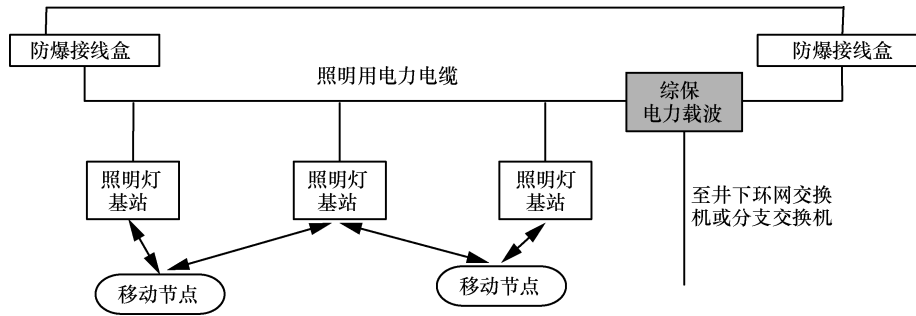


图 3 工作面可见光通信系统结构

究 LED 光源部署优化技术、LED 灯之间的无线自组网技术和煤矿 VLC 系统多用户技术，实现救援人员、被困人员等对象之间的自组成网。

3.3 TTE 煤矿应急通信系统

TTE 通信是一种有力的矿井事故应急救援通信手段^[6]，以大地作为媒介传播极低频信号^[35]，主要有磁感应、地电极和弹性波 3 种传输方式，其中，磁感应方式使用得最普遍，弹性波和地电极方式在低频段依赖于地层传播^[36]，因此受地层特性影响很大，应用于中间煤层和采空层时会严重影响信号强度。磁感应方式则是通过天线辐射进行低频电磁波传输，由于不同地层和空气介质的磁导率基本相同，不存在层面反射问题，因此通信过程受到大地介质和地层结构影响较小。另外，地电极和磁感应这 2 种方式是近场通信，不存在多径效应，而弹性波方式存在多径效应和衰落现象。从能量利用效率的角度而言，地电极方式在低频段的能量效率要显著高于磁感应方式，而弹性波方式的能量效率最差。

为了实现矿井磁感应 TTE 通信，需在地面和井下分别架设闭合线圈天线作为发射装置和接收装置，通过改变发射线圈中的电流产生时变电场，引起接收线圈所包围的有效面积的磁通量变化，从而在接收线圈导体中产生感应电动势，如图 4 所示^[37]。为了提高发射线圈的磁场强度，要求发射回路和接收回路中的电容、线圈电感和工作频率满足共振条件。这种通信方式的最大缺陷是发射天线太大，给在空间有限的煤矿巷道中部署和使用带来了很大不便。

位于煤矿井下的透地通信设备可以放置于矿工腰间，由电池供电。该设备可以作为一个信标，当灾害导致顶板垮落使某个区域无法到达时，用以

辅助确定被困矿工位置并与其通信。地面的敏感接收装置接收被困矿工发出的周期性窄带信令脉冲，并对信号源进行定位，从而确定被困矿工位置。一旦确定位置，就在被困矿工上方的地面部署一个大尺寸的发射装置，建立地面与被困矿工的直接语音通信。

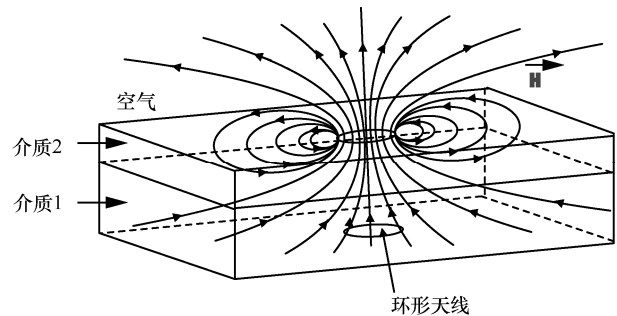


图 4 磁感应 TTE 信号传输原理

若采用基于振动的弹性波方式，则可用多个子阵列（而不是由多个单独的地震检波器）组成的一个阵列来接收振动信号，因为子阵列方式的 SNR (signal to noise ratio) 更高。在发生矿难时，若某矿工的所有可能逃生路径都被切断，则该矿工按照如下方式与地面建立联系：1) 戴上有害气体防护面罩，在受困位置等待地面信号；2) 地面人员引爆 3 个射孔弹；3) 当矿工听到 3 次射孔弹声音之后，就用硬物敲打矿井较硬的区域若干次；4) 如果听到来自地面的声音回应，便可确定自己的敲击信号已被地面收到，若没有接收到地面的响应，需每隔一段时间（比如 15 min）重复敲击动作。

3.4 TTW-TTA 混合技术

某些矿井通信技术不是单纯采用 TTW 或 TTA，而是结合了二者的优势，比如中频感应通

信和漏泄通信就是其中的典型代表。中频感应通信利用矿井巷道敷设的导线、金属管道等导体对电磁波的导行作用传输信息^[38]，这对于矿井应急通信具有一定吸引力，因为矿井巷道中广泛存在金属导线和金属管道。漏泄通信通过在同轴电缆上开孔或开槽的方式^[39]，使信号在沿着同轴电缆传播的同时，也能向电缆周围产生漏泄场强而实现无线通信功能。由于篇幅所限，这里仅讨论漏泄通信方式。

漏泄通信主要由漏泄电缆、功分器、双向中继器等组成，其中，漏泄电缆（如图 5 所示）是其核心组成部分^[40]。漏泄电缆是一种具有规律性开槽或开孔结构的同轴电缆，兼具信号传输线和发射天线的特性。按照开孔形式的不同，可将漏泄电缆分成耦合型和辐射型 2 种，前者只适合短距离通信，应用于煤矿的漏泄通信一般采用后者。当电磁波沿着电缆传输的时候，从开孔辐射到周围空间，通过而产生漏泄场，使移动终端获取到信号能量，实现与地面基站的通信。同时，也可将井下信号耦合到漏泄电缆中，将其传输到地面或井下其他地方，从而实现双向通信。漏泄通信不受环境影响，组网能力强、可靠性高、传输距离远，可以覆盖到包括竖井井筒、斜井巷道在内的需要无线通信的矿井区域，用于传递语音数据、打点信号等。

针对传统的漏泄通信系统存在的无线覆盖面积不大、传输带宽不高的问题，人们提出了一些改进型的方法和产品。一种方法是利用漏泄波导代替漏泄电缆^[41]，因为漏泄波导工作在 2~6 GHz 频段，其衰减仅为漏泄电缆的一半左右，所以中继器的部署密度可从 600 m 提高到 1 500 m，覆盖优势明显。此外，漏泄波导所能提供的带宽也远远大于传统的漏泄电缆，并且结构更加稳定，在矿难时不易断裂，抗毁能力更强。另一种方法是在线缆中集成微型基站^[42]，将射频单元、基带处理单元、天馈系统及传输线、电源线等全部汇集到一条线缆内，根据集成的微型基站的不同，该漏泄通信可以与 WSN 或 Wi-Fi 兼容，从而扩大了漏泄电缆的覆盖范围和传输带宽。

3.5 现有煤矿应急通信面临的挑战

煤矿事故会导致有线通信线缆被砸断、设备损毁或供电中断，因而骨干网络、调度通信系统、移动通信系统和广播通信系统都无法确保事故区域的通信联络^[43]。将电缆埋入底板虽可以一定程度上

抵御煤块砸压的影响，但在矿压和底鼓严重的情况下电缆依然会折断。透地通信虽然受到事故的影响较小，但是天线太大，铺设复杂，信道容量小，通信距离短。中频感应通信配备了特殊的感应通信电缆，但是信道容量小，天线体积大，电磁干扰强。漏泄通信的地面站通常建立在控制室，虽然覆盖范围广，但是抗干扰和移动能力较弱，不能完全满足井下救援通信需要。Mesh 技术虽然可以采用自组织的方式让残存节点自组成网^[44]，但是如果节点连片被毁（比如爆炸事故），也无法保证通信。基于钢轨的应急通信系统利用振动信号在固体媒介中的传播特性传输信号^[45]，但是传输的信息量较小，覆盖范围受限。虽然有文献针对救援网络信道容量不足、传输干扰严重的问题展开研究^[46]，但前提是需要有可用的灾后网络。另外，也有学者提出将井下扩播电话、井下小灵通、Wi-Fi 手机、调度电话、井下广播系统等通过网关或转换器互联起来^[47]，以增加覆盖范围和可靠度，但是这种互联并不能解决通信系统本身的损毁问题。其他无线通信方式，如无线传感器网络、可见光通信、RFID 等，都会由于设备在事故中损毁而无法组网。

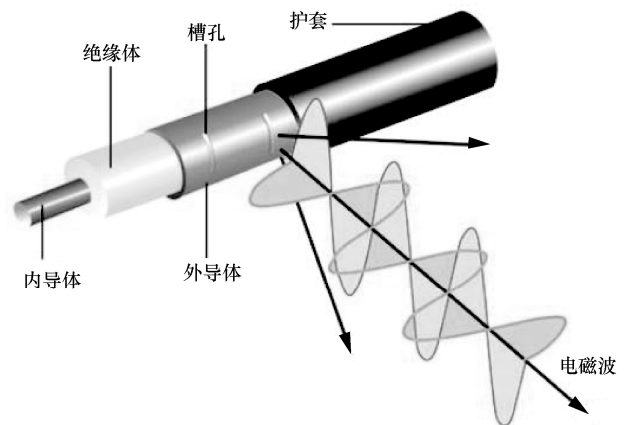


图 5 漏泄同轴电缆的原理示意

不过，煤矿事故并不会造成有线网络全部被毁。如前文所述，矿井骨干网络多采用千兆甚至万兆工业以太网，与地面连通可通过 2 个井筒，也可通过单个井筒。以 2 个井筒为例，如图 6 所示，事故虽然会造成井下交换机 A 和交换机 B 之间的线缆中断，但是网络的其他部分依然可以继续工作，这称为灾后可用有线网络。有鉴于此，Novak 等^[48]提出了基于漏泄通信的灾后通信网络，将图 6 中的骨干网络设计为漏泄通信电缆，交换机 A 可以通过灾后可用有

线网络和地面进行通信，进而与交换机 B 实现互连。实际上，骨干网络为其他线缆类型与此类似。此外，除了有线网络之外，包括事故区域在内的煤矿巷道内还部署有数量众多的煤矿物联网节点，它们可能是感知节点，也可能是通信节点。

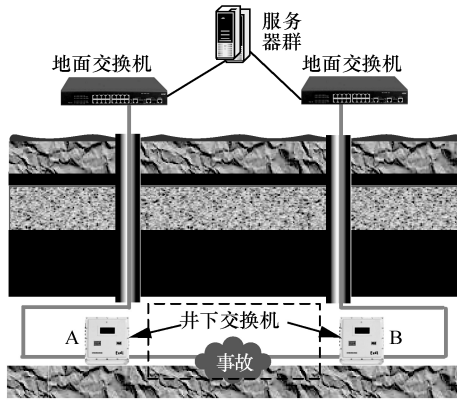


图 6 煤矿环形骨干网络

不失一般性，将与事故区域最近的交换机（如图 6 中的交换机 A）相连的尚未损毁的节点称为救援网络网关。显然，事故区域的残存节点若能实现灾后重构组网和数据传输，便能利用灾后重构网络对事故区域进行态势感知和通信联络。因此，救援所需的通信联络和态势感知问题可以归结为事故区域的煤矿物联网灾后重构感知问题。

目前，煤矿通信网络的灾后重构感知研究明显不足。Sun 等^[49]研究了救援场景的矿井链状 Ad Hoc 模型，其基本假设是机器人在巷道中移动采集信息，并通过 Ad Hoc 网络传输到操控中心。针对煤矿灾后井下可用 Wi-Fi AP 变少的问题，张国鹏等^[50]提出了基于 Wi-Fi Direct 的拓扑重构方案，以区分服务的方式优先上行传输关键的灾后信息，以无线多播的方式下行传输救援指令等数据。Liao 等^[51]提出由救援队和被困人员同时向中间努力，缩短被困人员的受困时间，矿工携带一个装有移动代理的 RFID 标签，用于确定紧急情况下应该采取的策略。张玉等^[52]研究了井下应急救援无线 Mesh 网络的拓扑规划与资源配置问题，以解决网关瓶颈、突发单点故障等问题。黄志凌^[53]研究了基于钻孔的逃生救援系统，探讨了钻孔的基础参数及其影响因素。

4 煤矿应急通信技术的发展趋势

本节在煤矿应急通信技术的发展现状的基础上探讨其发展趋势，进而引出一种新的基于煤矿物联网重构的应急通信新模式。

4.1 3 个典型发展趋势

随着新技术的蓬勃发展和不同技术的交叉融合，煤矿应急通信技术呈现出的典型发展趋势如图 7 所示，具体介绍如下。

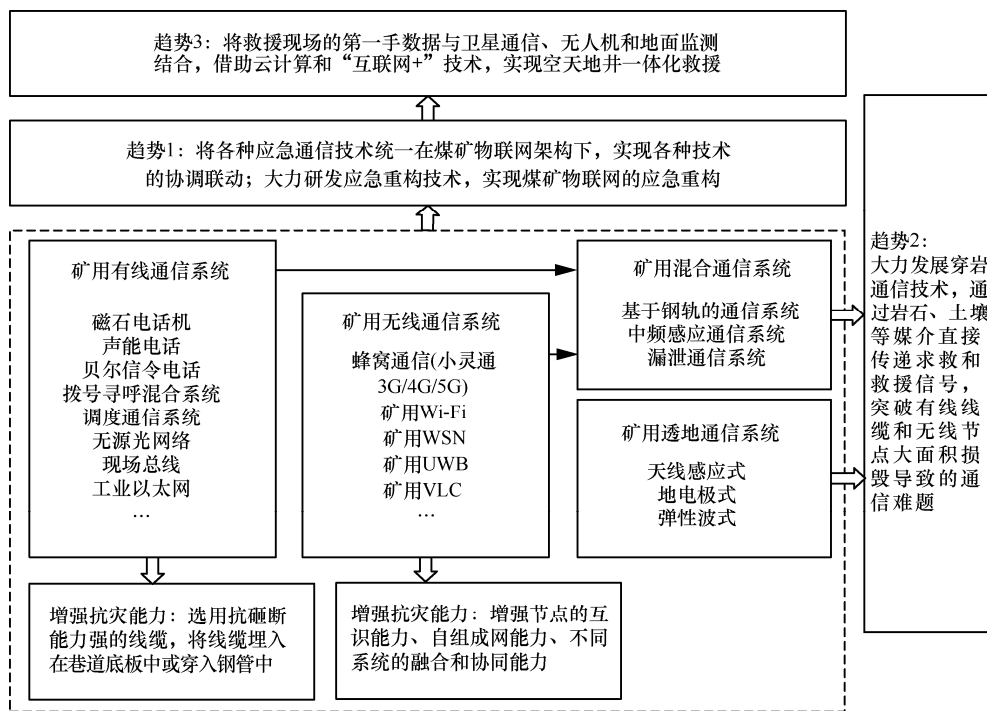


图 7 煤矿应急通信技术的发展趋势

1) 以物联网为架构平台,充分融合现有井上下通信资源,形成覆盖全矿井的煤矿安全生产和应急救援的一张网,融入大网中的资源具有较强的灾后互识能力和按需重构能力,具体介绍见 4.2 节和 4.3 节。

2) 大力发展穿岩通信技术,通过岩石、土壤等媒介直接传递求救和救援信号,突破有线线缆和无线节点大面积损毁导致的通信难题,这在“十二五”和“十三五”期间均有国家层面的科技攻关计划支持,如中国矿业大学(北京)的孙继平教授主持的“十三五”国家重点研发计划项目“煤矿重特重大事故应急处置与救援技术研究”。

3) 与云计算、“互联网+”等技术融合,构建空地井一体化的新兴救援方式,不过这种救援方式的前提是要有煤矿应急通信网络提供救援现场的一手信息,是在应急通信网络基础上的应用扩展,因此本文不再论述。

4.2 基于煤矿物联网重构的应急通信模式

本节重点讨论发展趋势 1,并提出一种基于煤矿物联网重构的应急通信新模式。煤矿物联网是实

现煤矿信息感知、传输和应用的信息基础架构。由于绝大多数感知节点同时具有通信能力,从通信组网的角度而言,可以不加区分地将感知节点与通信节点统称为物联网节点。煤矿事故发生后,若能尽快利用灾后残存的物联网节点(简称为残存节点)、井下备用通信设施(简称为备用节点)重构事故区域煤矿物联网,将有望重新建立起事故现场与地面指挥中心的通信联系,在专业救援人员到达事故矿井前或井下巷道暂时不适合救援人员进入的情况下,为初步了解现场态势提供“尽力而为”的感知和通信服务。在救援人员进行灾区探测和救援时,可以携带一定数量的临时通信节点(简称为临时节点,如图 8 所示)并放置于巷道交叉口或节点损毁严重区域。此外,救援人员、救灾机器人、救灾设施等都可携带或安装通信终端,他们具有移动能力,可作为重构组网的移动节点,用以增加组网节点数量,提高组网成功率和连通度。加入移动节点后,即使有少部分区域无法连通,也可利用移动节点的移动,为这些不连通区域提供机会连通路径,实现机会组网。

方便起见,将救援人员和救灾机器人在地面救

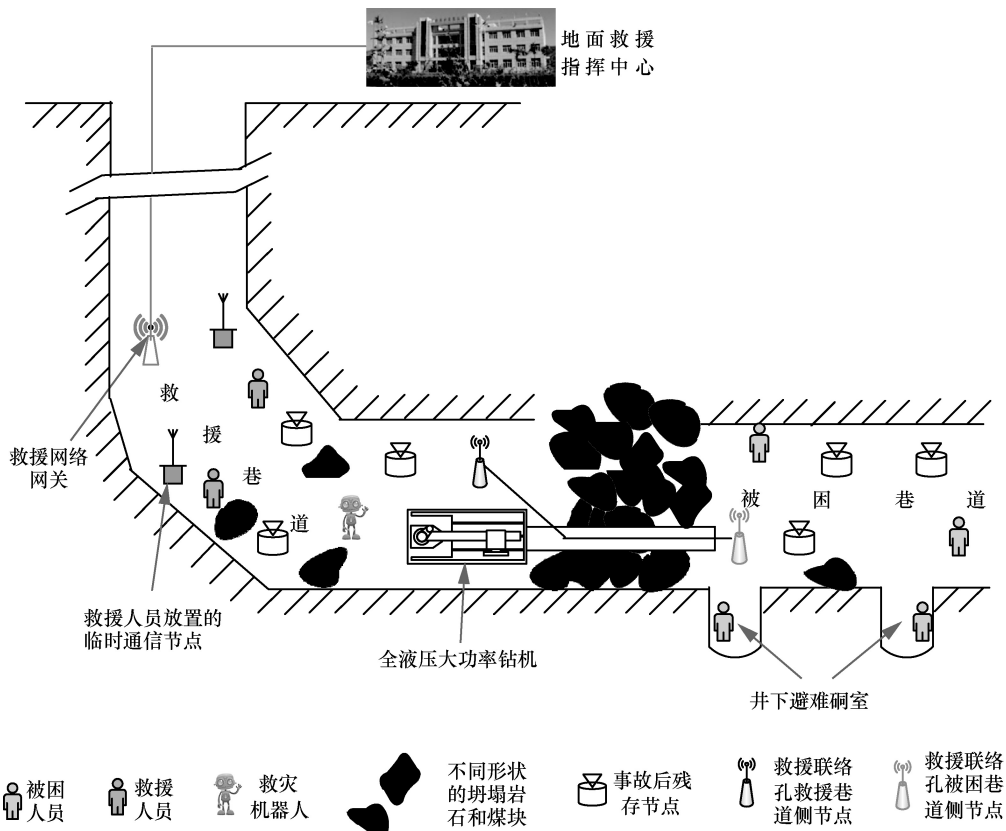


图 8 煤矿事故后的应急救援场景

援指挥中心的指挥下开展救援工作的巷道称为救援巷道，被困人员所处的巷道称为被困巷道，救援巷道和被困巷道统称事故区域。此外，将只由残存节点和备用节点进行的重构称为基本型灾后网络重构，简称为基本型重构，重构得到的网络称为基本型灾后重构网络；而将在基本型重构基础上加入临时节点、移动节点后的重构称为增强型灾后网络重构，简称为增强型重构，重构得到的网络称为增强型灾后重构网络。基本型灾后重构网络和增强型灾后重构网络统称为灾后重构网络。临时节点和移动节点增加了事故区域节点数量，从而增大了组网成功率和网络连通度。此外，移动节点可在少部分不连通区域间充当数据使者，为不连通区域提供机会链路，因此，增强型重构有望大幅提高重构的成功率和可靠度。为了增强移动节点能力，可为部分救援人员或救灾机器人配备或安装便携激光雷达，称为增强型移动节点。鉴于激光雷达已实现了微型化和廉价化，为救援人员或救灾机器人配备或安装激光雷达没有任何技术性 or 实践性的困难。

在实际救援中，地面救援指挥中心根据救援需要产生感知需求，由应急救援决策系统抽取感知需求特征，并利用感知节点可理解的语言进行描述，如图 9 所示。感知需求通过井上网络和灾后可用有线网络传输到救援网络网关，进而通过灾后重构网络将感知需求传输到事故区域，调度事故区域的残存感知节点实施协同感知。协同感知结果通过灾后重构网络、灾后可用有线网络、井上网络等传输到地面救援指挥中心，供救援指挥人员进行救援

决策。救援决策命令按照与感知需求相似的传输路径传输给井下救援人员、救灾机器人和被困人员。

4.3 煤矿物联网应急重构关键技术

确定被困人员位置是灾区侦察和事故救援的第一要务，只有确定了被困人员的准确位置，才能有的放矢地开展救援工作。此外，在灾区侦察和事故救援过程中，迫切需要建立救援人员和地面救援指挥中心的通信联系，帮助救援指挥人员掌握现场态势，这些需求均可通过基于煤矿物联网重构的应急通信模式加以解决。为了实现煤矿物联网重构和现场态势感知，必须攻克如下 4 项关键技术：煤矿物联网灾后重构策略、矿井事故漂移节点重定位方法、矿井事故区域的态势感知方法和灾后重构网络的数据传输方法。

4.3.1 煤矿物联网灾后重构策略

确定事故区域还有哪些残存节点可用是实现煤矿物联网灾后重构的一个基本前提。此外，如果损毁节点太多，仅仅使用残存节点和备用节点的基本型重构难以保证组网成功，此时应让临时节点及参与救援的移动节点（如被困人员、救援人员、救灾机器人、救灾设施等）也参与组网，利用机会通信的思想进行增强型重构^[54]。目前，有关机会通信的研究主要集中在地面场景，矿井中的机会通信研究成果极少。Luo 等^[55]将煤矿巷道中的机车作为移动 sink 节点，它在巷道中按照既定路线运动，直接收集传感节点的数据，不过没有考虑救灾场景中机车可能无法移动、数据传输时延不能太大等问题。邹艳芳等^[56]提出了一种基于终端属性的矿井机会网络分组转发协议，该协议以终端时延、与目的节

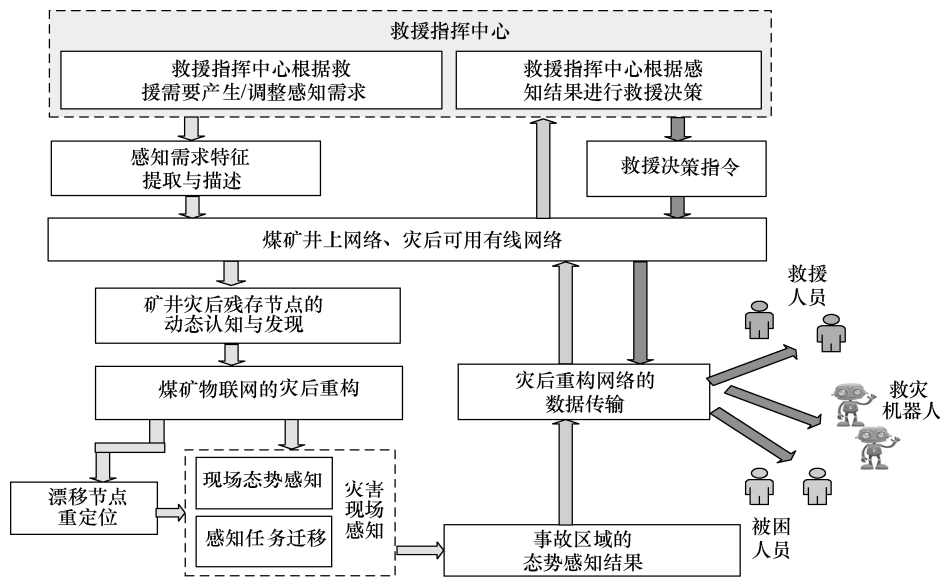


图 9 面向事故救援的煤矿物联网灾后重构与态势感知

点相遇概率、扩散范围等 3 个属性作为转发指标，主要聚焦于正常生产情况下的煤矿巷道，没有考虑灾后情况下的网络重构问题。

煤矿事故救援场景下，将邻居节点缓存起来的传统方法发现残存节点不再可行，因为灾后煤矿巷道的许多节点都处于运动或准运动状态，缓存中的节点信息无法反映事故区域的最新拓扑结构。此时，宜综合利用同步发现和异步发现的优势，通过残存节点显式或隐式的周期性发送邻居探测包的方法实现，如图 10 所示。此外，需动态建立事故区域的信道质量模型，据此设计在线链路质量估计算法，根据测得的链路质量数据动态确定节点的最佳通信参数，调度残存节点和备用节点按照最佳通信参数进行重配，实现节点之间的互联互通，达到灾后重构的目的。救援人员进入事故区域开展探测和救援工作后，事故区域内将具有实施增强型重构所需的移动节点和临时节点，这将增加组网节点数量，提高组网成功率和网络连通度。如果仍然有少部分区域无法连通，可进一步设计移动节点主动调度算法，或被动利用节点的自主性移动，实现不连通区域的机会组网，进而实现事故区域全覆盖。

4.3.2 矿井事故漂移节点重定位方法

在进行矿井事故救援时，救援人员必须掌握事故发生在哪里、受影响的巷道有哪些、被困人

员在何处等与位置有关的重要问题。在正常生产过程中，绝大多数感知节点部署后就不再移动，其位置就是安装位置^[57]，矿井内的移动对象（比如矿工、移动设备等）则依赖于矿井动目标定位系统实时获得自身位置。因此，无论是固定节点还是移动节点，它们在正常情况下的位置都可准确获得。然而，一旦发生煤矿事故，这些节点皆有可能受事故影响而被动偏离原来位置，即发生节点漂移。节点漂移一方面会造成节点自身的坐标位置变成未知量，另一方面也将造成以它为基准进行定位的节点无法获知参考位置而定位失败，因此，如何对漂移节点进行重定位是实施针对性事故救援必须要解决的基础性难题。尽管目前已有零星的重定位研究成果，但是这些方法不能解决煤矿井下，特别是矿井灾后救援场景面临的特殊难题。

不过，事故区域的节点位置虽然是未知量，但是利用被动定位技术可粗略地确定它们之间的相对空间关系。另外，考虑到激光雷达的小型化和低廉价格，可为部分救援人员或救灾机器人配备激光雷达，利用 RSSI（received signal strength indication）数据和 SLAM（simultaneous location and mapping）技术绘制事故区域无线信号强度地图，进而确定节点的相对空间位置，如图 11 所示。由于临时节点、救援网络网关等节点的绝对坐标

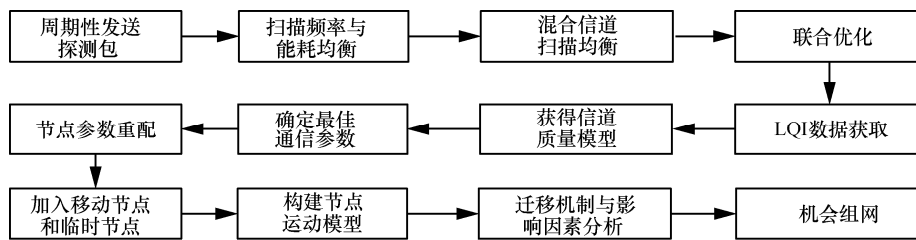


图 10 煤矿物联网灾后重构

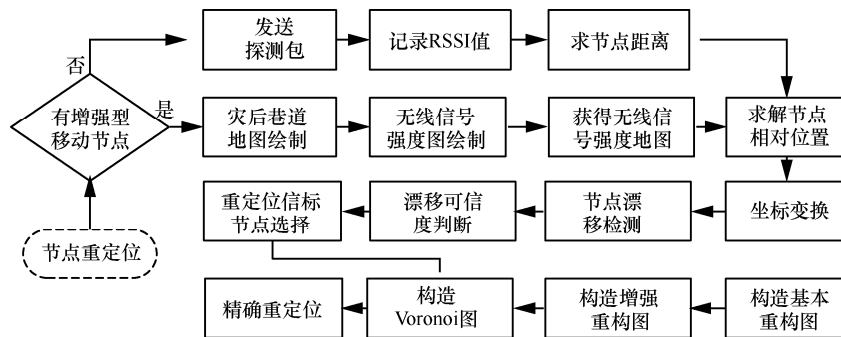


图 11 矿井事故漂移节点重定位

是已知的，以它们的坐标为基准对相对定位结果实施坐标变换，可得到残存节点绝对坐标。另外，地面煤矿物联网平台存储有井下所有节点的初装位置，通过将初装位置与变换得到的绝对坐标比较，即可判断是否漂移，从而选择出没有发生漂移和漂移程度较小的节点作为重定位信标。与传统的矿井定位系统自成体系不同，这里选择的定位信标节点不但可以是原矿井定位系统的信标节点，也可以是灾后重构网络中的感知节点和通信节点，因此大大增加了候选信标节点数量。基于所选择的定位信标，利用现有的矿井定位方法便能实现漂移节点的重定位。

4.3.3 矿井事故区域的态势感知方法

现有的零星煤矿网络重构研究很少关注救援所需的态势感知问题，这与传统的煤矿通信网络设施仅有通信能力而没有感知能力有关。煤矿物联网节点兼具通信和感知能力，有望在煤矿事故后实现重构和感知并重。但是，矿井灾后候选感知节点选择、节点资源分配策略与正常情况下的煤矿物联网有着极大差异^[58]，必须根据救援需要按需规划和动态调整。此外，可依据感知到的场景信息（如位置、温度、风速、矿工生命体征等）建立场景信息模型^[59]，进行场景信息推理，从而为事故救援服务。虚拟网络映射技术虽然可将物理资源按照约束条件分配给虚拟网络^[60]，但是虚拟网络映射研究的是如何将一个已知拓扑的虚拟网络的节点和链路映射到实际的物理节点和物理链路上，而灾后救援的关注点则是如何根据救援需求对残存感知节点进行动态调度，无论假设物理节点或虚拟节点已知都不再恰当，需要结合节点认知及其动态变化过程进行仔细优化。

事故现场态势感知的关键是如何调度灾后重构网络中的残存感知节点实施协同感知，这可根据

分布式渐进层次演化图思想（如图 12 所示），将残存感知节点调度过程视为在感知需求约束下与基本重构图或增强重构图匹配的过程。求解该匹配问题，即可得到满足感知需求的子图，即节点调度结果。当地面救援指挥中心的感知需求发生变化时，可以再次执行基于图匹配的残存感知节点调度算法，不过这将消耗较多的灾后重构网络资源，而这些资源对于本就比较脆弱的灾后重构网络而言十分珍贵。也可将残存感知节点调度算法设计为在线调度，但这将对灾后重构网络资源构成更大的考验。因此，为了降低残存感知节点的能量消耗，应尽量避免执行全新的节点调度，而应在保持当前调度结果不变的情况下，通过调整节点感知参数、增减感知节点数量等方式实现感知任务的渐进式迁移。只有当渐进式迁移无法满足需求时，才再次执行全新的节点调度。

4.3.4 灾后重构网络的数据传输方法

实现灾后重构网络中的双向数据传输，是掌握事故现场态势、与事故现场进行沟通联络的内在要求。由于救援网络网关可视为灾后重构网络的一部分，同时救援网络网关到地面间的灾后可用有线网络不存在任何障碍，因此只要保证灾后重构网络中的数据传输通畅，即可实现地面和事故区域的信息互通。灾后重构网络的一个典型特征，是数据接收者具有明显的地理位置特征，这为构建灾后重构网络的贪婪数据传输方法提供了条件，如图 13 所示。而灾区探测和救援中的移动节点，一方面可以作为贪婪数据传输的备选中继节点，用于提高灾后重构网络的数据传递成功率，节省残存节点的剩余能量；另一方面，这些移动节点还为构建基于运动统计特征或相遇预测等方式的机会数据传输方法奠定了基础。

目前，在地面场景的机会数据传输的研究成果

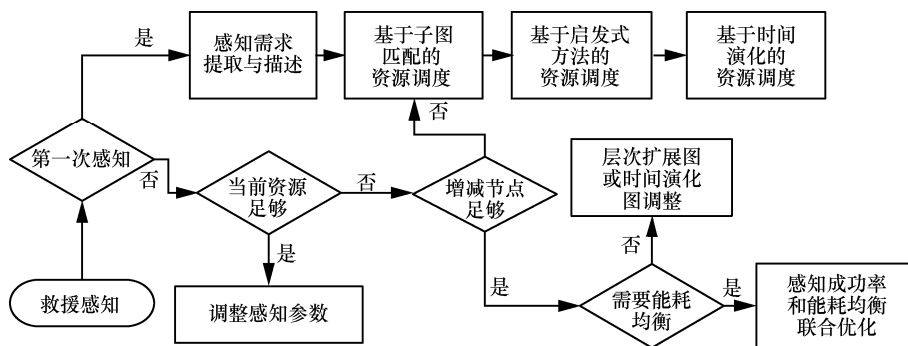


图 12 矿井事故区域的态势感知

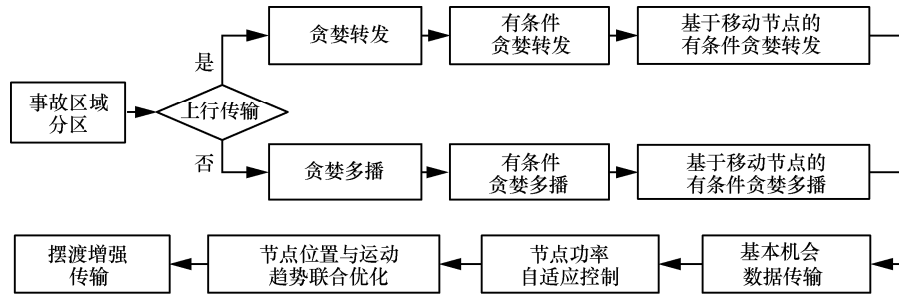


图 13 灾后重构网络的数据传输

较多，主要集中在对节点相遇间隔和持续时间的分析上，用于解释节点相遇的概率分布（比如指数分布^[61]、幂律分布^[62]、具有指数截止的幂律分布^[63]等）；或者建立网络时序图模型^[64]，用于反应网络拓扑的变化过程和态势；或者利用实验数据研究机会网络的消息传递路径特性^[65]，用于寻找节点之间的时间-空间相关性。不过，煤矿巷道的节点运动是作业人员驱动下的有目的性的运动，并且遵循特定的班组排班规律，已有运动模型并不适合，需要研究符合煤矿巷道特征的节点运动模型，用于指导机会路由算法的设计。从数据分发角度看，需要为数据选择合适的转发时机和中继节点。基于链路质量认知的节点参数重配技术能够进一步增加候选中继节点数目，从而满足救援所需的时延等 QoS 要求。

5 结束语

煤矿应急通信系统是提高应急响应速度和应急救援效果的必备基础设施。本文提炼了煤矿应急通信技术的混合架构模型，从 TTW、TTA、TTE 和 MMT 这 4 个方面综述了煤矿应急通信技术的发展现状、关键技术和面临的挑战，指出单一技术无法完美解决煤矿应急救援面临的通信难题。随后，本文阐述了煤矿应急通信技术呈现出的发展趋势，即基于煤矿物联网的多技术融合、以透地通信为代表的穿岩通信大发展及空地井一体化救援逐渐兴起等发展趋势，并提出了一种基于煤矿物联网重构技术的应急通信新模式，它融合了通信环境认知能力、事故态势感知能力和被困人员定位能力，有望显著提高事故应急处置速度和救援效果。

参考文献:

[1] 孙继平, 钟晓红. 2004-2015 年全国煤矿事故分析[J]. 工矿自动化,

2016, 42(11): 1-5.
 SUN J P, ZHONG X H. Analysis of coal mine accidents in China during 2004-2015[J]. Industry and Mine Automation, 2016, 42(11): 1-5.
 [2] 国家安全生产监督管理总局. 煤矿安全规程(2016 修订)[R]. 2016. State Administration of Work Safety. Coal mine safety regulations (2016 revision)[R]. 2016.
 [3] 李文峰, 唐善成. 矿山应急救援平台: 互联网+应急救援[M]. 北京: 清华大学出版社, 2016. LI W F, TANG S C. Mine emergency rescue platform: Internet + emergency rescue[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2016.
 [4] 李文峰, 白慧, 常姗. 空地井应急通信[M]. 北京: 科学出版社, 2018. LI W F, BAI H, CHANG S. Aerospace-borne, ground and mine based emergency communications[M]. Beijing: Science Press, 2018.
 [5] ARGHAVAN E F, SHAHZAD B, DAVID G M. A survey of wireless communications and propagation modeling in underground mines[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2013, 15(4): 1524-1545.
 [6] BANDYOPADHYAY L K, CHAULYA S K, MISHRA P K. Wireless communication in underground mines-RFID-based sensor networking[M]. London: Springer, 2010.
 [7] SERHAN Y, SABIH G U, HUSEYIN A, et al. Underground mine communications: a survey[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2009, 11(3): 125-142.
 [8] LIU S L, CUI L Z, WANG D, et al. Tunnel construction ventilation monitoring system based on fieldbus technology[C]//2016 International Conference on Industrial Informatics-Computing Technology, Intelligent Technology, Industrial Information Integration (ICICII).2016.
 [9] 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 mine in Shenhua group[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(12): 3181-3189.
 [10] THOMESSE J P. Fieldbus technology in industrial automation[J]. Proceedings of the IEEE, 2005, 93(6): 1073-1101.
 [11] LI J Q, YU F R, DENG G Q, et al. Industrial internet: a survey on the enabling technologies, applications and challenges[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2017, 19(3): 1504-1526.
 [12] DECOTIGNIE J D. The many faces of industrial ethernet[J]. IEEE

- Industrial Electronics Magazine, 2009, 3(1): 8-19.
- [13] 陈磊. 从现场总线到工业以太网的实时性问题研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2004.
CHEN L. Study on real-time problem from fieldbus to industry ethernet[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2004.
- [14] JASPERNEITE J U, RGEN F J. Profinet: an integration platform for heterogeneous industrial communication systems[C]//IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation. IEEE, 2005: 815-822.
- [15] 褚春华, 刘序言, 樊晓明. 全矿井综合自动化系统在丁集煤矿的应用[J]. 工矿自动化, 2009, 35(10): 97-99.
CHU C H, LIU X Y, FAN X M. The application of integrated automation system of whole mine in Dingji coal mine[J]. Industry and Mine Automation, 2009, 35(10): 97-99.
- [16] 赵小虎, 谭得健. ControlNet 总线在煤矿综合自动化系统的应用[J]. 煤炭科学技术, 2006, 34(9): 34-36.
ZHAO X H, TAN D J. Application of controlnet in coal mine comprehensive automatic system[J]. Coal Science and Technology, 2006, 34(9): 34-36.
- [17] 王兆恩. EPA 在煤矿综合自动化系统中的应用研究[J]. 福建电脑, 2011, 27(11): 54-55.
WANG Z E. Application research of EPA in integrated automation system for coal mine[J]. Fujian Computer, 2011, 27(11): 54-55.
- [18] 王艳芬. 矿井超宽带无线通信信道模型研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2009.
WANG Y F. Study on channel models of the ultra-wideband wireless communication in underground mines[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2009.
- [19] 孙继平. 矿井宽带无线传输技术研究[J]. 工矿自动化, 2013, 39(2): 1-5.
SUN J P. Research of mine wireless broadband transmission technology[J]. Industry and Mine Automation, 2013, 39(2): 1-5.
- [20] Wi-Fi Alliance. Wi-Fi 6: high performance, next generation Wi-Fi[R]. 2018.
- [21] LUCIA S, GIANLUCA C, STEFANO S, et al. Enhancing communication determinism in Wi-Fi networks for soft real-time industrial applications[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2017, 13(2): 866-876.
- [22] 王军, 顾义东, 曾苛. Wi-Fi 通信技术在煤矿信息化中的应用分析[J]. 工矿自动化, 2017, 43(7): 90-92.
WANG J, GU Y D, CENG K. Application analysis of Wi-Fi communication technology in coal mine information[J]. Industry and Mine Automation, 2017, 43(7): 90-92.
- [23] YOGENDRA D S, MAITY T, DAS P S, et al. Wireless communication and environment monitoring in underground coal mines - review[J]. IETE Technical Review, 2015, 32(2): 140-150.
- [24] ZHANG Y, YANG W, HAN D S, et al. An integrated environment monitoring system for underground coal mines-wireless sensor network subsystem with multi-parameter monitoring[J]. SENSORS, 2014, 14(7): 13149-13170.
- [25] ZHOU G B, ZHU Z C, ZHANG P, et al. Node deployment of band-type wireless sensor network for underground coalmine tunnel[J]. Computer Communications, 2016, 81: 43-51.
- [26] 吴迪. 矿井环境下无线传感器网络中若干关键技术研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2011.
WU D. Research on some key technologies for wireless sensor networks in underground mining environment[D]. Changsha: Hunan University, 2011.
- [27] 宋金玲. 采煤工作面无线传感器网络物理层的研究[J]. 工矿自动化, 2010, 36(3): 45-47.
SONG J L. Research on the physical layer of wireless sensor network for working face of coal mine[J]. Industry and Mine Automation, 2010, 36(3): 45-47.
- [28] HAN R S, YANG W, YOU K M. MB-OFDM-UWB based wireless multimedia sensor networks for underground coalmine: a survey[J]. Sensors, 2016, 16(12): 2158.
- [29] CHEHRI A, FORTIER P, TARDIF P M. UWB-based sensor networks for localization in mining environments[J]. Ad Hoc Networks, 2009, 7(5): 987-1000.
- [30] 郭继坤, 赵清, 徐峰. 基于 SVM 的煤矿井下超宽带穿透成像算法研究[J]. 煤炭学报, 2018, 43(2): 584-590.
GUO J K, ZHAO Q, XU F. Research on ultra wide-band penetration imaging algorithm for coal mine based on SVM[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(2): 584-590.
- [31] 郭继坤, 王保生, 郝维来, 等. 基于超宽带信号的矿井塌方地下生命特征的检测方法[J]. 黑龙江科技大学学报, 2017(1): 73-76.
GUO J K, WANG B S, HAO W L, et al. Research on detection method of life under mine based on ultra-wideband signal[J]. Journal of Heilongjiang University of Science & Technology, 2017(1): 73-76.
- [32] PARTH P H, FENG X T, HU P F, et al. Visible light communication, networking, and sensing: a survey, potential and challenges[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2015, 17(4): 2047-2077.
- [33] 胡青松, 张申, 马秀萍, 等. 一种基于可见光通信的煤矿工作面通信系统及其方法: CN20131011239206[P]. 2013-07-10[2018-12-26].
HU Q S, ZHANG S, MA X P, et al. A communication system and method for working face based on visible communications: CN20131011239206[P]. 2013-07-10[2018-12-26].
- [34] 游春霞, 张申, 翟彦蓉, 等. 煤矿工作面可见光通信光源优化设计新方法[J]. 中国矿业大学学报, 2014, 43(2): 333-338.
YOU C X, ZHANG S, ZHAI Y R, et al. A new optimization method of light source for visual light communication in mine working face[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2014, 43(2): 333-338.
- [35] 孙彦景, 吴天琦, 施文娟, 等. 无线透地通信理论与关键技术研究[J]. 工矿自动化, 2017, 43(9): 46-53.
SUN Y J, WU T Q, SHI W J, et al. Research on theory and key technologies of wireless through-the-earth communication[J]. Industry and Mine Automation, 2017, 43(9): 46-53.
- [36] 郝建军, 孙晓晨. 几种透地通信技术的分析与对比[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2014, 29(1): 59-63.
HAO J J, SUN X C. Analysis and comparison of several through-the-earth communication technologies for mining[J]. Journal of Hunan

- University of Science & Technology (Natural Science Edition), 2014, 29(1): 59-63.
- [37] JOSUA P C, LUCAS S E S, SÁVIO O D A, et al. Through-the-earth (TTE) communications for underground mines[J]. *Journal of Communication and Information Systems*, 2016, 31(1): 164-176.
- [38] ABRUDAN T E, KYPRIS O, TRIGONI N, et al. Impact of rocks and minerals on underground magneto-inductive communication and localization[J]. *IEEE Access*, 2016(4): 3999-4010.
- [39] MISRA P, KANHERE S, OSTRY D, et al. Safety assurance and rescue communication systems in high-stress environments: a mining case study[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2010, 48(4): 66-73.
- [40] 马于惠. 漏油同轴电缆带宽拓展及其应用分析[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2018.
MA Y H. Analysis of bandwidth expansion and application of leaky coaxial cable[J]. Xi'an: Xidian University, 2018.
- [41] 董明霞. 基于漏泄波导构建矿井无线通信系统研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2017.
DONG M X. Research on construction of mine wireless communication system based on leaky waveguide[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2017.
- [42] 聂百胜, 彭斌, 范鹏宏, 等. 矿山无线安全监测预警系统设计及关键技术[J]. *煤炭科学技术*, 2016, 44(7): 53-58.
NIE B S, PENG B, FAN Y H, et al. Design and key technology on early warning system of mine wireless safety monitoring[J]. *Coal Science and Technology*, 2016, 44(7): 53-58.
- [43] 孙继平. 矿井移动通信的现状 & 关键科学技术问题[J]. *工矿自动化*, 2009, 35(7): 110-114.
SUN J P. Present situation and key problems of science and technology of mine mobile communication[J]. *Industry and Mine Automation*, 2009, 35(7): 110-114.
- [44] GURTUNCA R G. Possible impact of new safety technology developments on the future of the United States mining industry[C]//1st International Mining Conference. UNSW, 2008.
- [45] 林偕黠. 坍塌事故后利用钢轨进行应急通信的系统设计[D]. 成都: 成都理工大学, 2015.
LIN R X. Emergency system design using rail for collapse event[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2015.
- [46] 张帆, 赵思羽, 邹安平. 多模式矿井移动应急通信系统设计及性能分析[J]. *煤炭学报*, 2015, 40(11): 583-590.
ZHANG F, ZHAO S Y, ZOU A P. Analysis on performance of multimode-based scheme for mine mobile emergency communication system[J]. *Journal of China Coal Society*, 2015, 40(11): 583-590.
- [47] 钱建生, 李双双, 王莹莹. 煤矿应急通信保障系统的设计[J]. *工矿自动化*, 2012, 38(2): 5-8.
QIAN J S, LI S S, WANG Y Y. Design of emergency communication security system of coal mine[J]. *Industry and Mine Automation*, 2012, 38(2): 5-8.
- [48] NOVAK T, SNYDER D P, KOHLER J L. Postaccident mine communications and tracking systems[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2010, 46(2): 712-719.
- [49] SUN L, XU Z, ZHAI W Y, et al. Model of ad hoc networks for rescuing in mine[C]//International Conference on Networks Security, Wireless Communications and Trusted Computing. IEEE, 2010: 210-213.
- [50] 张国鹏, 刘鹏, 丁恩杰. 煤矿应急通信网络的拓扑重构和数据传输研究[J]. *煤炭科学技术*, 2015, 43(11): 95-100.
ZHANG G P, LIU P, DING E J. Study on topology reconstruction and data transmission of mine emergency communication network[J]. *Coal Science and Technology*, 2015, 43(11): 95-100.
- [51] LIAO L X, LOU G H, CHEN M. An Integrated RFID and sensor system for emergency handling in underground coal mines environments[C]//International Conference on Ad Hoc Networks. DBLP, 2009: 818-824.
- [52] 张玉, 杨维, 韩东升, 等. 井下应急救援通信网络拓扑规划与资源配置[J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2013, 41(7): 61-66.
ZHANG Y, YANG W, HAN D S, et al. Topology design and resource allocation of emergency rescue communication networks for underground mines[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Nature Science Edition)*, 2013, 41(7): 61-66.
- [53] 黄志凌. 王家岭矿钻孔逃生救援系统研究与应用[D]. 北京: 北京科技大学, 2016.
HUANG Z L. Research and application of borehole rescue system in Wangjialing coal mine[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2016.
- [54] 宋文. 井下灾区搜救侦测通信技术装备的研究与发展[J]. *矿业安全与环保*, 2014, 42(5): 93-97.
SONG W. Research and Development of Search, rescue, detection and communication technology and equipment used in disaster area of coal mines[J]. *Mining Safety & Environmental Protection*, 2014, 42(5): 93-97.
- [55] LUO J, ZHANG Q, WANG D. Delay tolerant event collection for underground coal mine using mobile sinks[C]//IEEE International Workshop on Quality of Service. 2009.
- [56] 邹艳芳, 于宏毅, 李青, 等. 基于终端属性的矿下机会网络分组转发协议[J]. *计算机应用研究*, 2017, 34(1): 206-210.
ZOU Y F, YU H Y, LI Q, et al. Packet forwarding protocol in coal mine opportunistic networks based on terminal attribute[J]. *Application Research of Computers*, 2017, 34(1): 206-210.
- [57] 胡青松, 张申, 吴立新, 等. 矿井动目标定位: 挑战、现状与趋势[J]. *煤炭学报*, 2016, 41(5): 1059-1068.
HU Q S, ZHANG S, WU L X, et al. Localization techniques of mobile objects in coal mines: challenges, solutions and trends[J]. *Journal of China Coal Society*, 2016, 41(5): 1059-1068.
- [58] KIZIROGLOU M E, BOYLE D E, BOYLE D E, et al. Opportunities for sensing systems in mining[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2017, 13(1): 278-286.
- [59] 薛霄, 常静坤, 安吉宇. 智慧矿山服务系统的情境感知实现技术研究[J]. *计算机研究与发展*, 2014, 51(12): 2746-2758.
XUE X, CHANG J K, AN J Y. Intelligent service system with context-awareness capability for coal mine industry: design and implementation[J]. *Journal of Computer Research and Development*, 2014, 51(12): 2746-2758.
- [60] 李振涛, 孟相如, 赵志远, 等. 基于节点抗毁能力感知的虚拟网络可靠映射算法[J]. *计算机工程*, 2017, 43(9): 62-67.
LI Z T, MENG X R, ZHAO Z Y, et al. Reliable mapping algorithm for

virtual network based on node survivability-awareness[J]. Computer Engineering, 2017, 43(9): 62-67.

- [61] LUCA B, ANDREA C, FRANCESCO P, et al. Flooding time in opportunistic networks under power law and exponential inter-contact times[J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2014, 25(9): 2297-2306.
- [62] MUHAMMAD A, ROBERT S. A simulation study of common mobility models for opportunistic networks[C]//The 41st Annual Simulation Symposium. IEEE, 2008: 43-50.
- [63] ANDREA P, MARCO C. Analysis of individual pair and aggregate intercontact times in heterogeneous opportunistic networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2013, 12(12): 2483-2495.
- [64] 吴大鹏, 张普宁, 王汝言. 节点连接态势感知的低开销机会网络消息传输策略[J]. 通信学报, 2013, 34(3): 44-52.
WU D P, ZHANG P N, WANG R Y. Connection status aware cost efficient message transmission mechanism in opportunistic networks[J]. Journal on Communications, 2013, 34(3): 44-52.
- [65] 蔡青松, 牛建伟, 刘燕. 机会网络中的消息传输路径特性研究[J]. 计算机研究与发展, 2011, 48(5): 793-801.
CAI Q S, NIU J W, LIU Y. Message delivery properties in opportunistic networks[J]. Journal of Computer Research and Development, 2011, 48(5): 793-801.

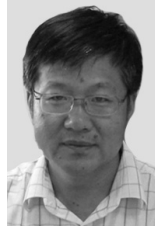
[作者简介]



胡青松(1978-), 男, 四川岳池人, 博士, 中国矿业大学副教授、硕士生导师, 主要研究方向为救灾通信、目标定位与跟踪、物联网、无线通信。



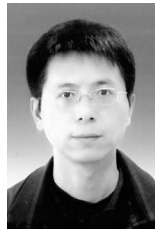
杨维(1964-), 男, 北京人, 博士, 北京交通大学教授、博士生导师, 主要研究方向为无线通信、救灾通信、宽带移动通信系统与专用移动通信。



丁恩杰(1962-), 男, 山东青岛人, 博士, 中国矿业大学教授、博士生导师, 主要研究方向为矿山物联网和矿山自动化。



李世银(1972-), 男, 四川犍为人, 博士, 中国矿业大学教授、博士生导师, 主要研究方向为矿井通信与监控、煤矿信息化、移动目标定位。



李冰皓(1972-), 男, 湖南长沙人, 博士, 新南威尔士大学 Research Fellow, 主要研究方向为室内导航定位、卫星导航定位、基于位置的服务与物联网。