

文章编号: 1671-251X(2024)11-0017-10

DOI: 10.13272/j.issn.1671-251x.18218

采煤工作面 CH₄ 大样本数据感知关键技术及 监测模式研究

贺耀宜^{1,2}, 代左朋^{1,2}, 杨耀^{1,2}, 屈世甲^{1,2}, 张清^{1,2}, 孙旭峰^{1,2}, 张涛^{1,2}

(1. 中煤科工集团常州研究院有限公司, 江苏 常州 213015;

2. 天地(常州)自动化股份有限公司, 江苏 常州 213015)

摘要: 全面感知和实时互联是智能化煤矿最基本的功能要素。现阶段采煤工作面整体环境感知能力不足, 感知设备设置监测点数量有限, 末端无线网络不够健全, 缺乏高精度位置服务, 导致矿井与采煤工作面全面感知所需数据样本量偏少, 信息透明度不够, 隐患识别和安全预警准确性偏低。针对该问题, 以采煤工作面为应用场景, 以 CH₄ 为监测对象, 研究煤矿工作环境参数大样本数据感知关键技术及监测模式。通过研究无线低功耗 CH₄ 传感与自标校技术, 实现在采煤工作面布置大量 CH₄ 传感器进行全面感知, 解决长时间免标校维护的技术难题; 通过研究传感设备对象编码与定位技术, 解决大量传感设备的身份和位置识别难题; 通过研究适用于矿井线性空间的高速无线数据传输技术, 以及无线骨干网链路节点的路由自发现、网络故障自主发现、故障节点及时隔离和自恢复技术, 解决采煤工作面布设大量 CH₄ 传感器及工作面移动带来的数据实时传输与维护问题; 通过研究基于边缘计算的大样本数据连续监测模式, 针对采集的大量 CH₄ 传感数据, 利用空间数字云图技术, 实现整个采煤工作面 CH₄ 面域连续监测和全面感知及作业现场数据分级处理。采煤工作面 CH₄ 大样本数据感知关键技术及监测模式为其他矿井环境参数的全面感知研究提供了基础技术积累。

关键词: 智能矿山; 采煤工作面; 安全监控; CH₄ 监测; 大样本数据感知; 全面感知; 实时互联; 空间数字云图

中图分类号: TD712

文献标志码: A

Key technologies and monitoring model for large-scale data perception of CH₄ in coal mining faces

HE Yaoyi^{1,2}, DAI Zuopeng^{1,2}, YANG Yao^{1,2}, QU Shijia^{1,2}, ZHANG Qing^{1,2}, SUN Xufeng^{1,2}, ZHANG Tao^{1,2}

(1. CCTEG Changzhou Research Institute, Changzhou 213015, China;

2. Tiandi(Changzhou) Automation Co., Ltd., Changzhou 213015, China)

Abstract: Comprehensive perception and real-time connectivity are fundamental functional elements of intelligent coal mines. Currently, coal mining faces suffer from insufficient overall environmental perception capabilities. Limitations include the small number of monitoring points for perception devices, inadequate terminal wireless network coverage, and a lack of high-precision positioning services. These shortcomings result in inadequate data sample sizes required for comprehensive perception of mines and coal mining faces, low information transparency, and reduced accuracy in hazard identification and safety warnings. To address these

收稿日期: 2024-10-22; 修回日期: 2024-11-15; 责任编辑: 李明。

基金项目: 江苏省成果转化项目(BA2022040); 中国煤炭科工集团有限公司科技创新创业资金专项项目-国际科技合作项目(2021-2-GH003); 天地科技股份有限公司科技创新创业资金专项项目(2019-TD-ZD007); 天地(常州)自动化股份有限公司基金项目(2024TY2002, 2024TY2005)。

作者简介: 贺耀宜(1974—), 男, 陕西蓝田人, 研究员, 硕士, 主要从事煤矿监测监控与信息化、物联网应用研究工作, E-mail: hyy@cari.com.cn。

引用格式: 贺耀宜, 代左朋, 杨耀, 等. 采煤工作面 CH₄ 大样本数据感知关键技术及监测模式研究[J]. 工矿自动化, 2024, 50(11): 17-25, 91.

HE Yaoyi, DAI Zuopeng, YANG Yao, et al. Key technologies and monitoring model for large-scale data perception of CH₄ in coal mining faces[J]. Journal of Mine Automation, 2024, 50(11): 17-25, 91.



扫码移动阅读

issues, this study investigated coal mining faces as the application scenario and CH_4 as the monitoring target, exploring key technologies and monitoring models for large-scale data perception of coal mine environmental parameters. By investigating low-power wireless CH_4 sensing and self-calibration technologies, the study enabled the deployment of numerous CH_4 sensors in coal mining faces for comprehensive perception, resolving technical challenges associated with calibration-free maintenance. The study also addressed the difficulties of identifying the identities and locations of numerous sensors by developing device encoding and positioning technologies for sensing devices. Additionally, the study proposed high-speed wireless data transmission technologies suitable for the linear space of mines, along with autonomous routing discovery, network fault detection, timely isolation of fault nodes, and self-recovery for wireless backbone link nodes. These advancements solved the real-time data transmission and maintenance challenges arising from the deployment of large numbers of CH_4 sensors and the mobility of coal mining faces. Furthermore, a continuous monitoring model for large-scale data based on edge computing was developed. This model processed the collected CH_4 sensor data using spatial digital cloud mapping technology to achieve continuous monitoring and comprehensive perception of CH_4 across the entire coal mining face, as well as hierarchical data processing at operational sites. The key technologies and monitoring model for large-scale data perception of CH_4 in coal mining faces accumulate foundational technical knowledge for comprehensive perception studies of other mine environmental parameters.

Key words: intelligent mining; coal mining face; safety monitoring; CH_4 monitoring; large-scale data perception; comprehensive perception; real-time interconnection; spatial digital cloud map

0 引言

2020 年,国家发改委、国家能源局等八部委联合发布《关于加快煤矿智能化发展的指导意见》,指出智能化煤矿需要具有全面感知、实时互联、分析决策、自主学习、动态预测、协同控制的能力。在这些能力要素中,最基本的要素莫过于全面感知和实时互联。其一方面为智能矿山提供分析决策、自主学习、动态预测所需的大样本数据,另一方面为数据共享和数据关联、协同控制提供必要的技术手段^[1]。近年来,我国煤矿智能化建设虽取得了显著成果,但仍处于初级阶段,存在很多不足,如矿井尤其是采煤工作面整体感知能力不足,末端无线网络不够健全,缺乏高精度的位置服务,间接导致矿井与采煤工作面全面感知所需的数据样本偏少,信息透明度不够,隐患识别和安全预警准确性低,影响采煤工作面安全、生产系统间的协同作业能力。针对这些不足,众多学者在大样本数据感知技术方面做了大量研究工作,主要集中在透明地质^[2-5]、AI 视频^[6-8]、环境泛在感知^[9-10]等方面。其中透明地质和 AI 视频方面的大样本数据感知技术已有一定的场景应用,煤矿作业环境泛在感知方面还需研究技术适应性难题,解决大量使用带来的成本高和维护难等问题。

采煤工作面是全矿井生产的源头,其安全性尤为重要。而 CH_4 是采煤工作面环境参数感知最主要的监测对象。因此,本文以采煤工作面作为应用场

景,研究探讨 CH_4 大样本数据感知关键技术与监测模式,为其他矿井作业环境参数的深度感知研究提供基础技术积累。

1 采煤工作面 CH_4 大样本数据分级处理模式

《煤矿安全规程》规定采煤工作面、回风巷与上隅角需设置 CH_4 传感器,瓦斯突出矿井还需要在进风巷设置 CH_4 传感器,采煤机必须设置 CH_4 断电仪,并能够实现区域断电控制。现有安全监控系统基本按照上述要求在固定地点安装 CH_4 传感器并提供有限地点的 CH_4 时间序列数据,再以该数据实时反映相关作业区域的 CH_4 浓度分布与变化情况。很显然,用 3~4 个有限传感测点的监测值来替代整个采煤工作面区域 CH_4 含量虽符合《煤矿安全规程》要求,但很多现代化采煤工作面长度超过 200 m,有的甚至达到 300 m,以上做法监测数据样本量偏少,难以真正体现整个采煤工作面的 CH_4 浓度分布与变化,无法实现对采煤工作面 CH_4 全面感知的技术要求。对此,需研究探索一种可满足整个采煤工作面 CH_4 全面感知、实时互联的监测模式,作为传统安全监控系统中 CH_4 监测的补充。该模式下需在采煤工作面部署大量 CH_4 传感设备,通过无线方式传输交互数据,这对感知设备的数量和功耗、智能化程度,以及无线传输网络的带宽、时延、数据分级处理方式提出较高要求。由于全面感知产生的 CH_4 监测数据量比较庞大,为了保证感知信息高效处理与实时

互联,参考工业互联网“云、边、端”体系架构,对采煤工作面 CH₄ 感知数据进行分级处理,并对处理流程进行规范,实现计算资源与负载在“云、边、端”之间的动态优化均衡^[11-12]。工作面 CH₄ 大样本数据分级处理模式如图 1 所示。

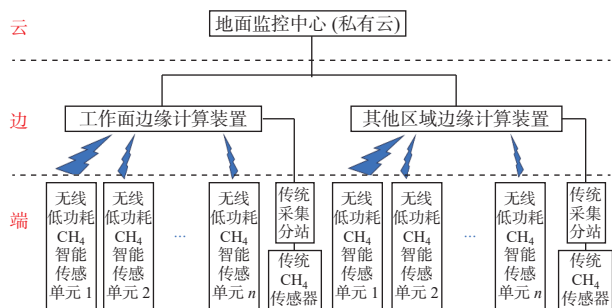


图 1 工作面 CH₄ 大样本数据分级处理模式

Fig. 1 Large sample data graded processing mode for CH₄ in working face

该模式最底层为“端”。为实现采煤工作面 CH₄ 浓度全面感知,需安装布设大量的 CH₄ 传感器。按照采煤工作面每台液压支架布置 3 个 CH₄ 传感器的方式,在液压支架底座后方、行人区域和液压支架前方各布置 1 个 CH₄ 传感器,分别监测采空区 CH₄ 涌出量、工作面 CH₄ 浓度和工作面落煤处 CH₄ 含量。按照 120 台液压支架和 2 台端头支架计算,共需布置 366 台 CH₄ 传感器。为确保现场感知数据的实时性,每台终端传感设备需具备自主感知和自诊断能力,且每台传感器需实现相互之间的无线数据传输与交互,为作业现场及时提供环境安全信息。

现阶段安全监控系统主要通过采集分站采集并向地面主机传输环境工况数据,同时对区域超限情况进行断电控制。无论采集分站采用哪种技术,受限于煤安认证要求,能够接入的传感器节点数量非常有限,一般包含各类负载不超过 64 个,显然无法满足采煤工作面 CH₄ 全面感知要求。此外,井下运输巷等重要监测区域也需要布置大量 CH₄ 传感器。这就需要采用计算能力更强的装置来实现工作面和其他重要监测区域 CH₄ 浓度的采集、分析与计算,进而实现区域连续监测。因此,考虑采用边缘计算技术。该技术最初由美国太平洋西北国家实验室提出,后来美国韦恩州立大学施巍松教授团队重新定义,认为边缘计算是在网络边缘端执行计算的一种新型计算模式,用于计算来自于云端的下行数据和来自于现场物联的上行数据。边缘计算具有 2 个明显优点:①在数据源端直接处理现场海量数据,根据实际需要将处理结果上传到云端,进而减轻网络带

宽占用和数据中心计算压力。②在作业现场处理数据,大大减少了处理延迟,增强了服务响应能力。因此,边缘计算装置在处理作业现场海量数据方面具有很大的技术优势,可满足采煤工作面 CH₄ 全面感知要求。采用边缘计算技术,可以通过边缘计算装置实现更多区域 CH₄ 信息的连续采集、处理和计算分析,还可以作为现有安全监控系统的补充而输出监测数据给采集分站,实现断电控制功能。

由于涉及全矿井包括 CH₄ 在内的各类有害气体集中监测与断电控制,需在地面设置计算能力更强的监控中心,即私有云端,负责全矿井各作业区域 CH₄ 的全面感知、大数据分析和一些算法模型的训练、应用,并统一协调井下作业现场各执行控制装置的控制执行,确保矿井生产本质安全。

如果采煤工作面和井下其他重点监测区域的 CH₄ 感知信息全部传输到地面监控中心处理,则会进一步加大整个矿井传输网络的负担,降低数据处理和监控中心控制指令的执行效率。因此,由采煤工作面的边缘计算装置对区域内的 CH₄ 大样本数据进行采集、处理,并将处理结果分级上传给地面私有云端的监控中心,监控中心可根据实际需求通过计划调度方式分时索要井下边缘计算装置的数据,从而形成数据分级采集处理模式,提高全矿井数据处理效率。

2 无线低功耗 CH₄ 传感与自标校技术

2.1 低功耗传感技术

根据前文可知,采煤工作面受限空间区域 CH₄ 全面感知与监测需要部署大量感知设备,而传统的感知技术功耗大,需要供电和有线传输,且需要间隔较短的时间进行标校,维护工作量大。对此,需从降低感知设备功耗入手,研究低功耗 CH₄ 传感技术。基于 MEMS(Micro-Electro-Mechanical System, 微机电系统)工艺的传感技术具备低功耗、小体积、低成本特征,目前国外已进行大量技术研究,并推出系列成果应用,如英国 GSS 公司推出的超低功耗 MEMS CO₂ 传感器 CozIR-LP3,其基于非分光红外原理,在不断电的情况下将电流消耗降低至小于 1 μA,平均功耗仅为 3.5 mW。国内在 MEMS 气体传感技术领域也已经取得了长足进步,以中国科学院微电子研究所、中国科学院苏州纳米技术与纳米仿生研究所、微纳感知(合肥)技术有限公司、中国科学技术大学、中国矿业大学、中北大学等为代表的高校和科研机构在 MEMS 气体传感基础技术研究和产业化探索方面均取得了较好的成果,已经在地面

工业气体检测领域进行应用,涉及煤矿的场景应用也在实验室得到验证^[13]。笔者在总结分析已有技术成果的基础上,针对煤矿井下应用场景和需求,分别进行了基于金属氧化物和催化燃烧 2 种原理的技术研究探索,并从 3 个方面进一步研究如何降低传感器功耗。

1) MEMS 元件结构优化选择。研究 2 种 MEMS 工艺传感元件的共性技术——MEMS 微加热板。MEMS 微型加热板为制备基于催化燃烧、金属氧化物原理气体传感器的核心功能器件,其主要功能是为催化材料、金属氧化物等气敏材料提供加热区间,与传统绕丝加热器相比具有低功耗、低成本、性能稳定、响应快速等优点。作为典型的加热装置, MEMS 微型加热板主要由悬臂梁层、微加热层、绝缘层及叉指电极层组成。加热板工作时,分别向微加热层、叉指电极层电路施加额定电压,基于焦耳效应,叉指电极层上的敏感材料将被持续加热,当被测 CH₄ 扩散至敏感材料层时会发生电阻变化,从而实现气体浓度感知。

微型加热板芯片结构主要有封闭隔膜型、悬空隔膜型、桥型 3 种,如图 2 所示。在相同条件下,封闭隔膜型微型加热板功耗最大,悬空隔膜型功耗较低,桥型功耗最低。从力学角度来看,支撑物的减少会导致微型加热板的力学结构脆弱。考虑悬空隔膜型微型加热板功耗相对较低,且具有力学性能优异和耐震动的优点,选择悬空隔膜型微型加热板作为低功耗设计依据。

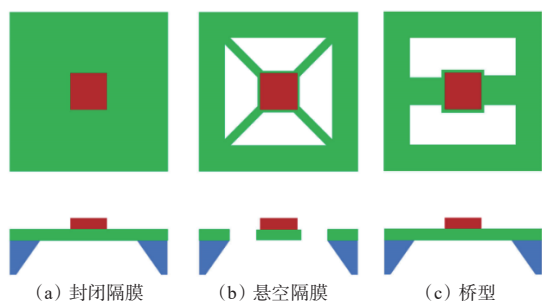


图 2 MEMS 微型加热板芯片结构

Fig. 2 Structure of micro-electro-mechanical system (MEMS) micro heating plate chip

2) 传感模组硬件及软件低功耗设计。在低功耗 MEMS 传感模组设计中,作为传感节点核心的微控制电路是功耗较大的部分。选择一款合适的单片机微控制器,并对内部寄存器及其功能进行合理选择使用,对于降低模组功耗非常重要。在低功耗设计应用时,选用具有超低功耗的高性能微控制器 STM32L431。该控制器基于最高频率达 80 MHz 并

带有 DSP 和 FPU(Floating Point Unit, 浮点处理单元)的 ARM® Cortex®-M4 内核,采用新型结构制造,具有 7 种低功耗模式。另外,可通过编程对微控制器中的特殊功能寄存器和相关功能模块进行选择使用,对于无需使用的功能模块,使其停止工作,进一步降低传感模组的额外能耗。

3) 传感元件的能耗特性和间歇工作特性研究,通过优化间歇周期降低功耗。根据实际应用及传感元件的工作特性,通过微处理器控制传感元件供电方式,使传感元件周期性工作,在不需要采集数据时断电以降低功耗,优化间歇周期,实现低功耗,如图 3 所示。进一步地,采用合理的休眠策略(图 4),使 CH₄ 传感器模组在不需要收发数据时休眠,在需要工作时通过定时器唤醒传感器,并通过优化协议来避免不必要的的数据发送行为,降低重传数据引起的能耗。

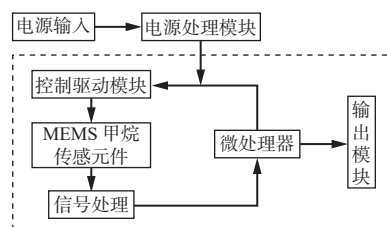


图 3 MEMS CH₄ 传感模组的微处理器控制逻辑

Fig. 3 Logical control of micro controller in MEMS CH₄ sensor

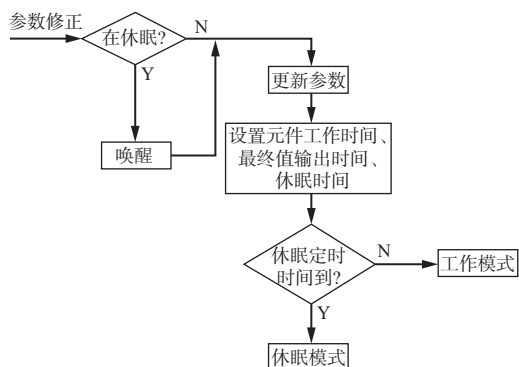


图 4 MEMS CH₄ 传感模组低功耗休眠策略

Fig. 4 Sleep schedule for low-power consumption of MEMS CH₄ sensor

通过相关技术研究和实验,研制出具备良好性能指标的 MEMS CH₄ 元件和模组。经测试,模组平均功耗不超过 2 mW,基于金属氧化物原理的 MEMS CH₄ 元件量程达 0~2%CH₄,基于催化燃烧的 MEMS CH₄ 元件量程达 0~4%CH₄,实验室稳定性超过 30 d。

2.2 自标校与免维护技术

《煤矿安全规程》要求对传感设备进行定期标校。当采煤工作面部署大量低功耗 CH₄ 传感设备

时,对设备维护提出较高要求。为了提升设备的易维护性,需从延长标校时间入手。资料显示,美国 Gas Clip Tec 公司推出的基于 MEMS 技术的 4 参数 (CH₄, O₂, CO, H₂S) 便携式气体检测仪在不标校的情况下可连续使用 2 a。结合煤矿井下实际情况,笔者认为可从环境参数与老化补偿、灵敏度漂移自补偿、参考点佐证、监控系统数据反哺等方面研究感知设备的自标校与免维护技术,以延长传感器标校时间,从设置故障探针、增加辅助检测技术等方面提高传感器的智能化水平。

CH₄ 传感元件受环境温度、湿度及压力影响,需进行环境温湿度和压力自补偿,以提高传感设备的环境适应性^[14]。一方面,利用高低温箱设置不同的温度和湿度,对传感模组的输出信号进行对比分析;另一方面,将传感模组置于混合气体测试设备中,通过改变一定范围内的压力参数,对比分析传感模组在相同浓度的标准气体下输出数据的变化情况,针对环境温度、湿度或压力参数变化,通过数据分析处理,对传感元件进行自补偿设计,以提高其在各种环境下的适应性。

CH₄ 传感器长时间运行会发生老化,环境中的其他气体也可能对探测器产生干扰,导致探测器输出信号发生漂移,影响传感器的稳定性。通过构建神经网络模型,并根据历史样本数据进行模型训练,实现 CH₄ 传感元件的灵敏度漂移自补偿。经过 43 d 的测试,利用神经网络模型对未补偿传感模组的实测值进行曲线拟合,然后进行预测,结果如图 5 所示。可看出该模型预测值与传感模组产生灵敏度漂移后的实测值基本一致,表明该模型可实现灵敏度漂移自补偿。

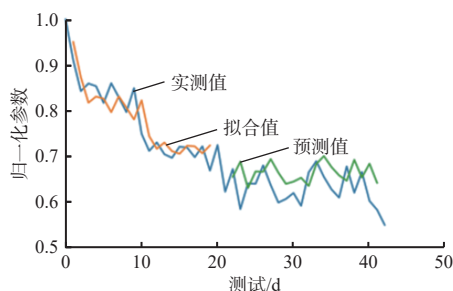


图 5 MEMS CH₄ 传感模组未补偿数据与拟合/预测值对比

Fig. 5 Comparison between MEMS CH₄ sensor data without compensation and the fitted value or the predicted value

由于无线传感设备数量多,采用传统标校方式不可行,需要在区域内设置固定的经过标校的精准传感设备,并建立算法模型,由区域内无线传感设备定期通过算法与精准传感设备进行对比并自动标校(图 6)。也可由地面监控系统主机通过算法模型进

行分析,利用分析结果对作业现场传感设备进行反哺、标校。

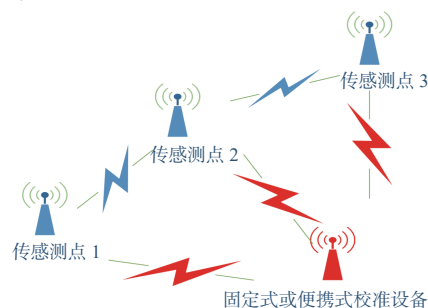


图 6 MEMS CH₄ 传感设备自标校方式

Fig. 6 Self calibration mode of MEMS CH₄ sensor

3 设备对象编码与定位技术

采煤工作面部署的 CH₄ 感知单元数量大,当数据集中传输到边缘计算装置时,测点的身份、状态、监测值、顺序和位置需实时同步传输,这对于工作面 CH₄ 全面、连续监测及故障位置诊断、远程运维具有重要作用。这就需要为每个智能 CH₄ 传感单元赋予唯一的编码^[15],并在每个传感设备上配置定位精度较高的位置服务模组。

当传感器数量较大时,数据传输的时间、先后顺序均随机。因此,传输的数据需要有唯一的身份标志,以便精准识别。为了解决唯一性身份识别问题,需对每个智能 CH₄ 传感单元进行物联网编码。采煤工作面涉及的传感种类较多,CH₄ 传感器只是其中一种,考虑对各类传感器均能统一识别,且后期还涉及传感器的自诊断、联网传输和厂家维修/维护,需进行可扩展性设计。目前国际上广泛采用的物联网编码体系有 Ecode、GS1、EPC(Electronic Product Code, 产品电子代码)、OID(Object identifier, 对象标志符)等。经研究对比,OID 编码技术采用树状结构,可根据实际情况利用“.”分隔符分成多个层级,具有较强的可扩展性,非常适合作为煤矿物联网设备对象标志方法。因此,采用 OID 标志体系对 CH₄ 传感器进行标志,也可以扩展标志其他类型的传感设备。

煤矿传感设备(智能设备)对象编码分层结构如图 7 所示。标志码由 7 个层级组成,层级之间用符号“.”分隔。标志码的前 3 层级标志代表国家节点,用 1.2.156 固定表示物联网中国节点代码;第 4 层级标志传感设备(智能设备)所在行业节点代码,可由矿山行业机构向国家 OID 注册中心申请注册;第 5 层级标志煤矿监测对象的类别代码,如人、各类智能或感知设备等;第 6 层级标志监测对象生产单位的组织机构代码,用企业的统一社会信用代码表示;

第 7 层级标志监测对象的具体代码,如果是人则采用煤矿企业的员工工号,如果是传感或智能设备则由设备分类代码、设备(传感)型号代码、设备序列号组成,还可根据实际情况扩展。

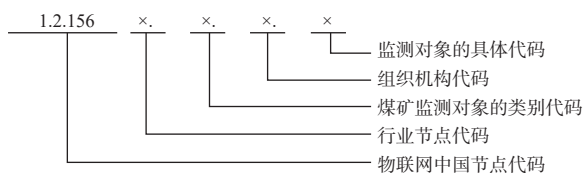


图 7 煤矿传感设备(智能设备)对象编码分层结构

Fig. 7 Object encoding layered structure of mine sensor (intelligent equipment)

另外,只有具有时间和位置标签的感知数据才能真正实现采煤工作面的时空全域感知,因此需在每个传感设备上配置定位精度较高的位置服务模组。近年来,在煤矿井下移动目标精确定位中应用较多的定位技术为 UWB(Ultra Wide Band, 超宽带)。该技术具有数据传输速率高(达 1 Gbit/s)、功耗低、抗多径干扰能力强、成本低、穿透能力强等特点,已成为煤矿井下移动目标精确定位的首选。目前,基于 UWB 的静态定位技术用于煤矿井下人员定位中精度已达 30 cm 以内,如果用于固定设备定位,精度将达到 10 cm 以内。传感模组集成定位功能后,会导致功耗增加。对此,可为带定位功能的 CH₄ 传感器设计合理的休眠策略,如图 4 所示。

4 工作面无线数据传输技术

由于采煤工作面设备经常移动,CH₄ 全面感知与监测需部署大量感知设备,有线传输会给日常维护带来极大不便,所以采用无线传输技术比较合理。针对煤矿井下的无线传感数据传输,应用较广泛的有 ZigBee, WaveMesh, LoRa, 4G/5G 等^[16-17]。这些无线通信技术应用用于不同厂家的安全监控系统末端传感网络进行补充,可接入少量传感器。ZigBee, WaveMesh, LoRa 等属于低速传输技术,传输带宽和速率难以满足采煤工作面 CH₄ 大样本数据传输要求,而 4G/5G 等由于功耗相对大、成本高,主要用于语音、视频通信,难以在短期内批量用于煤矿井下传感设备。因此,需研究新的低功耗、高带宽、低成本的无线数据传输技术与装备,以满足井下巷道和采煤工作面等链状线性空间大量传感模组的多跳接数据传输与自组网络通信需求。

目前,在地面物联网应用中较成熟的无线传输技术为 BLE(Bluetooth Low Energy, 蓝牙低功耗),广泛用于智能家居、健康监测等场景。目前 BLE5.0 功耗很低,通过运行策略可使平均功耗降至 2 mW,传

输带宽达 2 Mbit/s,传输距离达 300 m,有效载荷达 255 B,抗干扰能力和传输稳定性强。文献[18]通过实验分析了 BLE 模块的能耗特征,验证了其可应用于类似采煤工作面的线性空间。当采煤工作面无线 CH₄ 传感设备数量较多时,采用单路链接网络拓扑易产生数据碰撞,导致网络运行不稳定。因此,根据井下采煤工作面等链状线性空间的多跳接数据传输与自组网络通信技术要求,笔者采用 BLE5.0 技术设计了无线自组网络拓扑结构,如图 8 所示。基于冗余思想来设计混合链接组网的网络拓扑,可避免由于意外遮挡或碰撞导致单个骨干节点故障影响网络整体运作,提升网络健壮性^[19-21]。图 8 中,1—4 号无线网络节点为主要骨干节点,组成无线传输主链路,用于传输正常数据;2.1 号、3.1 号节点分别为 2 号、3 号节点的备用节点,在无线自组网络中作为辅助链路节点,当骨干网主链路意外断开或骨干网络中传输数据量较大并达到拥塞临界值时,可快速启用骨干网辅助链路传输数据,使主干通道的传输速率和可靠性有效提高约 25%。

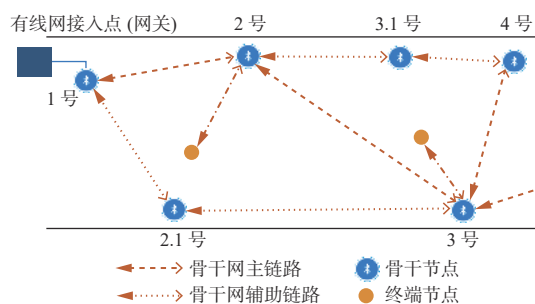


图 8 无线自组网络拓扑结构

Fig. 8 Topology structure of wireless ad-hoc network

骨干节点组成与通信方式如图 9 所示。每个骨干节点包含 2 个 BLE 模块,分别作为组网模块和接入模块。骨干节点间的链接和数据传输由组网模块完成,相邻节点依次以主从结构相链接,终端节点(无线 CH₄ 传感节点)通过接入模块与骨干节点完成链接并进行数据交互,终端节点同样包含 1 个 BLE 模块。

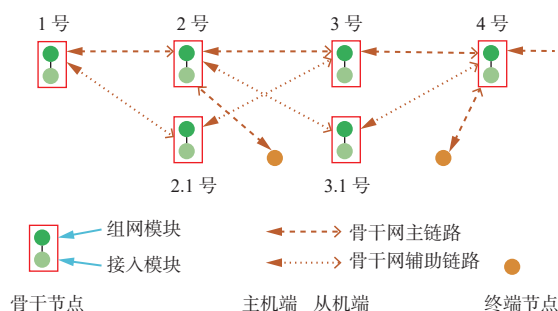


图 9 骨干节点组成与通信方式

Fig. 9 Component of backbone nodes and their communication mode

采煤工作面工况复杂,无线网络节点可能随时出现故障,因此,在设计无线网络节点时,要充分考虑骨干节点的路由自发现、网络故障自主发现、故障节点及时隔离和自恢复能力,并根据矿井环境下无线传感节点自组网的特殊网络特征改进 AODV (Ad hoc on-Demand Distance Vector Routing, 平面距离向量路由)协议。

5 基于边缘计算的 CH₄ 大样本数据连续监测模式

5.1 CH₄ 大样本数据连续监测技术路线

井下采煤工作面的安全与生产智能均离不开人、机、环等多元信息的支撑。作为作业现场的数据处理与计算中心,需研发部署一定数量的边缘计算装置,用来采集、处理、存储大量的现场作业环境数据,承载各种算法模型。考虑采煤工作面大量 CH₄ 数据采集与计算需求,以及后期其他有害气体、人员、设备、粉尘等环境工况的数据采集与融合分析需求,研发至少具有 RS485、CAN、以太网等有线接口和 Mini PCIe 无线接口(BLE),具有数据协同交互能力的智能边缘计算装置。该装置需具备一定的内存、存储、计算资源,保障各类算法运行。

与传统的以少量离散位置点监测为主的矿井环境安全监测模式不同,因实现采煤工作面 CH₄ 全面感知需布设数量庞大的无线传感设备,且设备带有位置信息,这为区域环境参数连续监测提供了条件。在气象监测中,往往利用数字云图把卫星探测器感应到的每个像素或每几个像素的平均温度通过数字或经过客观分析的数字等值线方式直观显示。在此,笔者提出利用数字云图动态构建技术,融合感知采煤工作面各类人、机、环因素(本文主要考虑 CH₄),构建空间数字场数学分析模型,将大量的离散点信息就地形成具有面域监测信息能力的空间数字云图,再利用边缘计算装置强大的通信、存储、计算能力,对采煤工作面 CH₄ 进行空间动态连续监测,实现对采煤工作面局部作业区域的环境参数全面感知和透明化处理。由地面监控中心融合井下各边缘计算装置的空间数字云图数据,实现全矿井 CH₄ 全面感知。技术路线如图 10 所示。

传统的安全监控系统主要通过现场采集分站获取系统内有限的对应传感器数据,由监控中心按照约定规则判断处理并根据需要下发控制指令,而基于边缘计算的空间数字云图动态构建技术则是融合带有位置信息的人、机、环多元数据信息,将作业区域的大量离散环境信息形成连续的面域监测信息,进而实现区域的全面感知和透明化连续监测,大大

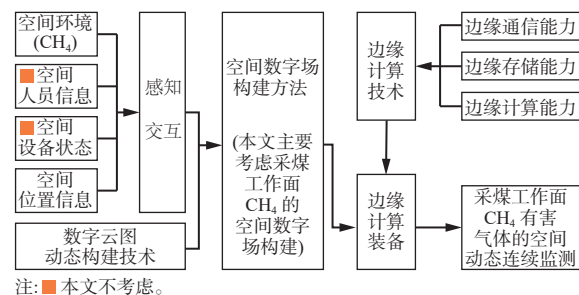


图 10 采煤工作面 CH₄ 大样本数据连续监测技术路线

Fig. 10 Technique route of large sample data monitoring for CH₄ in working face

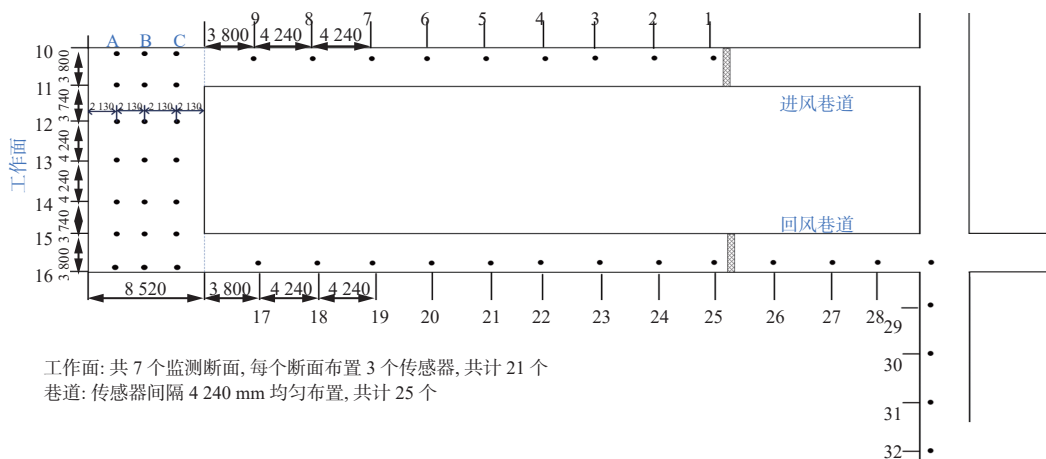
提高了区域范围数据分析和处理能力。

5.2 CH₄ 大样本数据连续监测模式设计方案

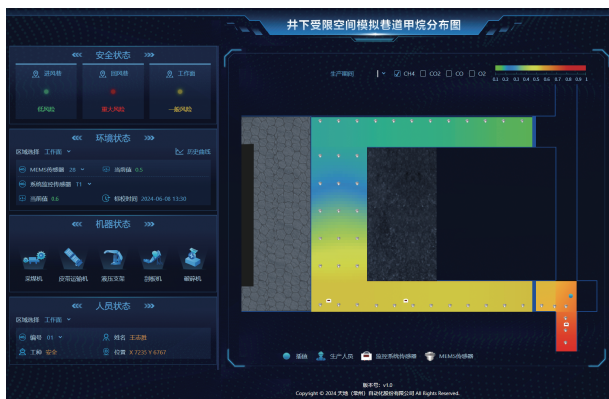
构建数字云图所需的支撑数据是一组连续的监测点数据,需要构建面域动态连续监测数学模型,将离散的 CH₄ 大样本数据补充完整,形成连续像素的数据。由于无线低功耗 CH₄ 传感器数量较大,相互之间的距离间隔较小,外部干扰因素对于数学模型的影响较小,所以笔者设计 CH₄ 面域动态连续监测数学模型时,暂不考虑空间风流、生产工艺,以及由于重力作用引起的 CH₄ 三维分布状态变化和工作面其他干扰因素,直接在二维坐标系下基于已采集的大样本数据,通过三次样条插值法生成数字云图所需的支撑数据组,进而生成 CH₄ 面域连续监测动态数字云图,实现模拟环境下 CH₄ 大样本数据连续监测。

笔者以某煤矿井下模拟巷道为试验场所,设计采煤工作面 CH₄ 大样本数据感知与连续监测应用场景。由于模拟巷道中工作面长度较短,将 CH₄ 传感器均匀间隔布置即可通过数据插值模型形成面域动态连续监测数学模型。具体布置方案如图 11 所示。进风巷有 9 个监测点;回风巷有 16 个监测点;采煤工作面共 7 个监测站,每个监测站有 A、B、C 3 个测点,共计 21 个测点。整个受限空间共布设 46 个监测点,节点自带无线自组网与通信模组。

设计边缘计算采煤工作面 CH₄ 面域动态连续监测软件时,先设计已布置的 MEMS CH₄ 传感器和《煤矿安全规程》要求的安全监控系统传感器,然后在工作面采用二维三次样条插值法、在巷道采用一维三次样条插值法,根据每个 MEMS CH₄ 传感器的监测值,通过数学模型在任意 2 个 MEMS CH₄ 传感器之间补充连续的插值,形成数字云图所需的连续像素支撑数据组,利用该数据组构建工作面 CH₄ 空间数字云图(图 12),模拟连续空间分布,实现工作面 CH₄ 全面感知与面域动态连续监测。在此基础上,后期可将人员位置信息和设备工况信息映射到已生

图 11 无线低功耗 MEMS CH₄ 传感器布置方案Fig. 11 Layout scheme of wireless MEMS CH₄ sensors with low power consumption

成的空间数字云图上,形成区域范围内完整的安全信息空间数字云图。

图 12 基于模拟巷道的工作面 CH₄ 空间数字云图Fig. 12 Spatial CH₄ data cloud map in working face based on simulated roadway

通过工作面 CH₄ 空间数字云图,可动态连续、全面监测进风巷、工作面及回风巷区域内的 CH₄ 分布情况。任选区域内一传感器编号,可显示该传感器实时监测值及其预警状态(预警区域根据监测值划分,以绿色、黄色、橙色、红色显示),并在云图中以闪烁图标显示该传感器位置。此外,可点击查看该传感器历史监测数据变化情况。监测界面如图 13 所示。点击插值区域时,会显示当前插值点的实时变化曲线,并在云图中显示标记位置。

6 结论

1) 分析了现阶段煤矿智能化建设存在的感知能力不足、工作面全面感知所需数据样本数量偏少、信息透明度不够的现状,以采煤工作面作为应用场景研究 CH₄ 大样本数据感知关键技术与监测模式,为其他矿井环境参数的全面感知提供基础技术积累。

2) 提出了基于“云、边、端”体系架构的大样本

图 13 MEMS CH₄ 传感器数据变化Fig. 13 Change of MEMS CH₄ sensor data

数据采集处理模式。当采煤工作面和井下其他重点监测区域部署大量低功耗 MEMS CH₄ 传感器后,可由采煤工作面的边缘计算装置对区域内的 CH₄ 大样本数据进行采集、处理,并将处理结果分级上传给地面私有云端的监控中心,形成数据分级采集处理模式。地面监控中心可根据实际需求分时索要井下边缘计算装置的数据,从而提高全矿井的数据处理效率。

3) 提出了基于边缘计算的 CH₄ 大样本数据连续监测模式,分析研究了该模式的技术路线,对采集的 CH₄ 大样本数据进行三次样条插值,形成空间数字云图所需的连续支撑数据组,利用数据组构建工作面 CH₄ 空间数字云图,实现工作面 CH₄ 的全面感知与面域动态连续监测。

4) 在模拟巷道布置一定数量的低功耗无线 MEMS CH₄ 传感器,对提出的 CH₄ 大样本数据感知关键技术与监测模式进行验证,应用效果符合预期。后期将持续改进 MEMS CH₄ 传感器的稳定性,并进行矿用化验证,为智能矿山环境参数全面感知提供技术支撑。

参考文献(References):

- [1] 王国法, 杜毅博, 庞义辉. 6S 智能化煤矿的技术特征和要求[J]. 智能矿山, 2022, 3(1): 2-13.
WANG Guofa, DU Yibo, PANG Yihui. Technique characteristics and requirements 6S intelligent coal mine[J]. Journal of Smart Mine, 2022, 3(1): 2-13.
- [2] 毛明仓, 张孝斌, 张玉良. 基于透明地质大数据智能精准开采技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(1): 286-293.
MAO Mingcang, ZHANG Xiaobin, ZHANG Yuliang. Research on intelligent and precision mining technology based on transparent geological big data[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(1): 286-293.
- [3] 郭昌放. 基于多源数据协同和智能算法的煤矿工作面透明化系统研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2020.
GUO Changfang. Research on transparency system of working face based on multi-source data collaboration and intelligent algorithms[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2020.
- [4] 程建远, 朱梦博, 王云宏, 等. 煤炭智能精准开采工作面地质模型梯级构建及其关键技术[J]. 煤炭学报, 2019, 44(8): 2285-2295.
CHENG Jianyuan, ZHU Mengbo, WANG Yunhong, et al. Cascade construction of geological model of longwall panel for intelligent precision coal mining and its key technology[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(8): 2285-2295.
- [5] 樊子恒. 融合透明地质与灾害预警的煤矿综合管控平台研究[J]. 矿业安全与环保, 2024, 51(4): 168-174, 180.
FAN Ziheng. Research on coal mine comprehensive control platform based on transparent geology and disaster early warning[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2024, 51(4): 168-174, 180.
- [6] 代伟, 赵杰, 杨春雨, 等. 基于双目视觉深度感知的带式输送机煤量检测方法[J]. 煤炭学报, 2017, 42(增刊 2): 547-555.
DAI Wei, ZHAO Jie, YANG Chunyu, et al. Detection method of coal quantity in belt conveyor based on binocular vision depth perception[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(S2): 547-555.
- [7] 陶显, 侯伟, 徐德. 基于深度学习的表面缺陷检测方法综述[J]. 自动化学报, 2021, 47(5): 1017-1034.
TAO Xian, HOU Wei, XU De. A survey of surface defect detection methods based on deep learning[J]. Acta Automatica Sinica, 2021, 47(5): 1017-1034.
- [8] 王渊, 郭卫, 张传伟, 等. 融合注意力机制和先验知识的刮板输送机异常煤块检测[J]. 西安科技大学学报, 2023, 43(1): 192-200.
WANG Yuan, GUO Wei, ZHANG Chuanwei, et al. Detection of abnormal coal block in scraper conveyor integrating attention mechanism and prior knowledge[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2023, 43(1): 192-200.
- [9] 王海波, 赵立厂. 矿山物联网的泛在特征分析与泛在能力建设[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(7): 127-133.
WANG Haibo, ZHAO Lichang. Ubiquitous feature analysis and ubiquitous capacity construction of mine Internet of things[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(7): 127-133.
- [10] 袁亮, 俞啸, 丁恩杰, 等. 矿山物联网人-机-环状态感知关键技术研究[J]. 通信学报, 2020, 41(2): 1-12.
YUAN Liang, YU Xiao, DING Enjie. Research on key technologies of human-machine-environment states perception in mine Internet of things[J]. Journal on Communications, 2020, 41(2): 1-12.
- [11] 贺耀宜, 刘丽静, 赵立厂, 等. 基于工业物联网的智能矿山基础信息采集关键技术与平台[J]. 工矿自动化, 2021, 47(6): 17-24.
HE Yaoyi, LIU Lijing, ZHAO Lichang, et al. Key technology and platform of intelligent mine basic information acquisition based on industrial Internet of things[J]. Industry and Mine Automation, 2021, 47(6): 17-24.
- [12] 屈世甲, 武福生. 基于边缘计算的采煤工作面甲烷监测模式研究[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(12): 161-167.
QU Shijia, WU Fusheng. Research on methane monitoring mode of coal mining face based on edge computing[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(12): 161-167.
- [13] 王海波. 低功耗甲烷传感器研究进展[J]. 工矿自动化, 2021, 47(5): 16-23.
WANG Haibo. Research progress of low-power methane sensor[J]. Industry and Mine Automation, 2021, 47(5): 16-23.
- [14] 王璐. 煤矿安全监控系统中无线激光甲烷传感器的研究与设计[J]. 煤炭技术, 2019, 38(8): 154-158.
WANG Lu. Research and design of wireless laser methane sensor in coal mine safety monitoring system[J]. Coal Technology, 2019, 38(8): 154-158.
- [15] 国家矿山安全监察局. 智能化矿山数据融合共享规范[EB/OL]. (2023-07-04) [2024-06-18]. https://www.chinamine-safety.gov.cn/xw/zt/2018zt/mkjqrjfy/gzdt_01/202307/t20230704_455286.shtml.
National Mine Safety Administration. Intelligent mine data fusion and sharing standard[EB/OL]. (2023-07-04) [2024-06-18]. https://www.chinamine-safety.gov.cn/xw/zt/2018zt/mkjqrjfy/gzdt_01/202307/t20230704_455286.shtml.

(下转第 91 页)

- [13] 陈宇鸣. 基于 SINS/UWB 的刮板输送机高可靠性直线度检测技术研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2021.
CHEN Yuming. Research on high reliability straightness measurement technology of scraper conveyor based on SINS/UWB[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2021.
- [14] 杨波, 吴宁. 基于组合惯导的综采工作面刮板输送机直线度检测方法[J]. 煤矿安全, 2022, 53(6): 148-152.
YANG Bo, WU Ning. Combined inertial guidance based Straightness detection method of scraper conveyor in fully mechanized mining face based on integrated inertial navigation[J]. Safety in Coal Mines, 2022, 53(6): 148-152.
- [15] 杨墨. 基于视觉测量的综采工作面直线度测量技术研究[J]. 煤炭工程, 2016, 48(9): 134-136.
YANG Zhao. Research on measurement technology of working face straightness based on vision measurement[J]. Coal Engineering, 2016, 48(9): 134-136.
- [16] 刘鹏坤. 基于视觉测量的综采工作面直线度控制研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2020.
LIU Pengkun. Research on straightness control of fully mechanized coal face based on vision measurement[D]. Beijing: China University of Mining and Technology-Beijing, 2020.
- [17] 方新秋, 陈宁宁, 冯豪天, 等. 刮板输送机直线度光纤精准感知与调直关键技术[J]. 采矿与安全工程学报, 2023, 40(5): 1043-1056.
FANG Xinqiu, CHEN Ningning, FENG Haotian, et al. Key technologies of optical fiber accurate perception and straightening of straightness of the scraper conveyor[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2023, 40(5): 1043-1056.
- [18] 宁耀圣. 智能工作面刮板输送机直线度感知机理研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2019.
NING Yaosheng. Study on straightness perception mechanism of scraper conveyor in intelligent working face[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2019.
- [19] 王学文, 李素华, 谢嘉成, 等. 机器人运动学与时序预测融合驱动的刮板输送机调直方法[J]. 煤炭学报, 2021, 46(2): 652-666.
WANG Xuewen, LI Suhua, XIE Jiacheng, et al. Straightening method of scraper conveyor driven by robot kinematics and time series prediction[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(2): 652-666.
- [20] 葛世荣. 刮板输送机技术发展历程(三)——驱动与智能控制技术[J]. 中国煤炭, 2024, 50(4): 1-12.
GE Shirong. The development history of scraper conveyor technology (part three): intelligent drive and control technology[J]. China Coal, 2024, 50(4): 1-12.
- [21] 王雪松, 王世博, 王世佳, 等. 刮板输送机直线度误差预测模型[J]. 中国矿业大学学报, 2023, 52(1): 168-177.
WANG Xuesong, WANG Shibo, WANG Shijia, et al. Prediction model of straightness error of scraper conveyor[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2023, 52(1): 168-177.
- [22] 王峰. 液压支架精确推移控制方案研究与应用[J]. 工矿自动化, 2017, 43(5): 6-9.
WANG Feng. Research of precise pushing control scheme for hydraulic support and its application[J]. Industry and Mine Automation, 2017, 43(5): 6-9.

(上接第 25 页)

- [16] 余海林, 莫莉, 赵悦, 等. 基于 ZigBee 无线传感器的井下甲烷浓度监测系统[J]. 成都大学学报(自然科学版), 2022, 41(2): 146-150, 163.
YU Hailin, MO Li, ZHAO Yue, et al. Underground methane concentration monitoring system based on ZigBee wireless sensor[J]. Journal of Chengdu University(Natural Science Edition), 2022, 41(2): 146-150, 163.
- [17] 吴士涛, 汤建泉, 杨婕. 基于 WaveMesh 网络与 STM32 的煤矿顶板离层监测系统[J]. 煤矿安全, 2022, 53(1): 139-144.
WU Shitao, TANG Jianquan, YANG Jie. Design of monitoring system for coal mine roof separation based on WaveMesh network and STM32[J]. Safety in Coal Mines, 2022, 53(1): 139-144.
- [18] 卓敏敏, 赵立厂, 李继云. 低功耗蓝牙模块能耗特征分析[J]. 工矿自动化, 2019, 45(10): 91-94, 98.
ZHUO Minmin, ZHAO Lichang, LI Jiyun. Analysis of energy consumption characteristics of bluetooth low energy module[J]. Industry and Mine Automation, 2019, 45(10): 91-94, 98.
- [19] 张铮, 曹守启, 朱建平, 等. 面向实时监测的无线传感网低功耗通信策略[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(2): 257-264.
ZHANG Zheng, CAO Shouqi, ZHU Jianping, et al. Low power communication scheme in wireless sensor network for real-time monitoring[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(2): 257-264.
- [20] 李时杰. 远距离低功耗无线传感网络终端节点的设计与实现[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2018.
LI Shijie. Design and implementation of long-distance and low-power wireless sensor network terminal node[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2018.
- [21] 滕文想, 何继鹏, 刘鹏宇. 窄长空间无线传感器网络节点部署策略研究[J]. 煤炭工程, 2023, 55(7): 151-157.
TENG Wenxiang, HE Jipeng, LIU Pengyu. Deployment strategy of wireless sensor network nodes in narrow and long space[J]. Coal Engineering, 2023, 55(7): 151-157.