移动扫码阅读

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. doi:10.13199/j.cnki.cst.2020.12.020

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. doi:10.13199/j.cnki.cst.2020.12.020

基于边缘计算的采煤工作面甲烷监测模式研究

屈世甲[1,2],武福生[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:针对工作面现有甲烷监测点不足,无法满足智慧矿山建设中工作面甲烷感知、分析和预警需求的问题,结合边缘计算技术、矿山物联网环境感知技术和数据传输等相关技术,分析了甲烷微功耗感知、自组网传输、监测终端供电和传感位置服务问题。提出了集微功耗甲烷感知、自供电、自定位及自组网数据传输于一体的甲烷监测终端,配合工作面区域边缘网关、矿端边缘服务器和云端大数据分析,建立了基于云、边、端三级的甲烷边缘监测模式的系统架构,解决了工作面区域基于边缘计算的甲烷感知和传输问题。以 100 台液压支架、2 台端头支架工作面为例,在笛卡尔二维坐标系下设计了该工作面基于边缘计算的甲烷监测方案,实现了甲烷浓度二维空间范围的大数据量监测,提出了工作面区域全覆盖的甲烷含量数字场实现方法和云图直观展示方式。在甲烷含量空间场和云图展示的基础上,提出了 2 种基于大数据支撑的甲烷含量分析预警模式和思路,一是对甲烷超限含量前后区域空间场进行关联分析,提取工作面甲烷含量超限对应空间场的分布特征和变化规律,利用区域含量场及早发现甲烷含量超限问题,另一种是利用大数据分析工具解决甲烷监测报警阈值以下的显现异常问题。

关键词:边缘计算;边缘网关;智慧矿山;甲烷监测;甲烷感知;煤矿智能化

中图分类号:TD67　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:0253-2336(2020)12-0161-07

Research on methane monitoring mode of coal mining face based on edge computing

QU Shijia[1,2],WU Fusheng[1,2]

(1.*Changzhou Research Institute Co.,Ltd.,China Coal Technology and Engineering Group,Changzhou*　213015,*China*;
2.*Tiandi(Changzhou) Automation Co.,Ltd.,Changzhou*　213015,*China*)

Abstract:In view of the shortage of existing methane monitoring points in the coal face, and it can notmeet the the needs of methane sensing, analysis and early warning in the coal face of smart mine construction. In combination with the edge of computing technology, mine Internet of things environment sensing technology and data transmission related technologies, analysis methane micropower perception, network transmission, monitoring terminal power supply and sensing location service issues, a methane monitoring terminal that integratesmicro-power methane perception, self-powered supply, self-positioning, and self-organizing network data transmission was proposed. With the analysis of the work area regional edge gateway, mine-end edge servers and cloud big data, a system architecture of methane edge monitoring mode was established based on cloud-edge and end to solve the problem of methane sensing and transmission based on edge computing in the face area.Taking the 100 hydraulic supports and 2 end support of coal faces as an example,a methane monitoring scheme based on edge calculation was designed in the Cartesian two-dimensional coordinate system to realize the monitoring of large amounts of data in the two-dimensional spatial range of methane concentration. The realization method of the methane concentration digital field with full coverage in the coal face area and the visual display method of the cloud image were proposed. On the basis of the spatial field of methane concentration and the cloud image display, two early warning modes and ideas for methane analysis based on big data support were proposed. One is to perform correlation analysis of regional space field before and after methane over-limit concentration, and extract the corresponding methane over-limit in the coal face. The distribution characteristics and changing rules of the spatial field use the regional concentration field to detect the methane concentration over-limit problem as early as possible. Another one is to use a big data analysis tool to solve the problem of abnormal manifestation below the methane monitoring alarm threshold.

Key words:edge computing; edge gateway; intelligent mine; methane monitoring; methane sensing; intelligent coal mine

---

收稿日期:2020-04-20;**责任编辑**:赵　瑞

基金项目:天地科技股份有限公司科技创新创业基金重点资助项目(2019-TD-ZD007)

作者简介:屈世甲(1984—),男,陕西铜川人,副研究员。E-mail:qushijiacz@sina.com

0 引　　言

《煤矿安全规程》要求采煤工作面及回风巷和回风隅角设置甲烷传感器,同时突出矿井同时需要在进风巷设置甲烷传感器,采煤机必须设置甲烷断电仪或便携式甲烷检测报警仪[1],在工作面区域和进风位置甲烷传感器分别按照 1.0%、0.5%的体积分数报警,1.5%、0.5%的体积分数进行区域断电控制。可以看出现有监控系统是按照安装地点提供单点的甲烷时间序列数据,实时反映安装位置甲烷浓度和变化情况。依据现有的规程规定,工作面区域甲烷测点一般包括工作面测点、上隅角测点和采煤机移动检测测点,用 3~4 个测点监测甲烷含量近似代表工作面区域甲烷含量,这种以点带面的甲烷含量监测方式在传统的传感技术和行业背景下是可行且必须的方案。

随着智慧矿山建设的不断推进,智能化技术、物联网技术、大数据分析技术等关键技术在煤矿得到了逐步应用与拓展,其中泛在网和移动互联是智慧矿山建设的基础支撑之一[2]。智能安全监测方面,集成各类传感器、控制器、传输网络和组件式软件等[3],能实现主动感知和智能分析,形成最优决策模型并参与生产、运输、安全环节的智能控制[4]。煤矿生产现场在动辄 200~300 m 面宽工作面区域的甲烷监测方面,传统的单点监测模式已经不能满足智慧矿山对空间区域甲烷含量的监测需求,急需探索一种覆盖区域广、数据传输和解析分析智能化的甲烷监测模式[5]。这种监测模式既是对传统安全监控中甲烷监测的补充,也是智慧矿山在工作面区域建设区域环境安全监测的重要保障。笔者旨在边缘计算技术的支撑下探索工作面区域甲烷含量的物联网监测问题,最终利用边缘计算装置实现区域甲烷含量分布情况可视化和区域分析预警这一新的监测模式。需要特别指出的是,由于现阶段《煤矿安全规程》的甲烷断电标准仅是针对固定测点甲烷监测数据进行约束[1],缺乏基于物联网甲烷监测全区域的断电控制标准,在工作面区域甲烷断电控制功能现阶段仍以监控系统实现为主,该系统可以作为断电控制的辅助向监控系统提供区域范围内的甲烷监测数据,断电执行由监控系统来完成,与监控系统的数据交互通过区域边缘网关或者矿端边缘服务器来实现。

1 基于边缘计算的区域甲烷监测综述

边缘计算是指在网络边缘执行计算的一种新型计算模型,其操作的对象既有来自云端的下行数据,也包括来自于万物互联的上行数据流[6]。美国韦恩州立大学施巍松团队[7]指出边缘计算中边缘可以是数据源到云计算中心路径之间的任意网络资源,属于 1 个连续统。边缘计算的提出是相对于云计算而言,初期的目的是解决实时性不足、带宽不足、能耗较大和数据的安全隐私等问题,在矿井工作面区域甲烷监测中,由分散在不同位置的智能传感装置相互交换本地浓度、湿度、温度等信息,借助事先建立的数学模型进行分布式协同计算分析,进而得到本区域甲烷报警阈值,最终决定是否采取报警、断电、调节通风和人员撤离等措施。就甲烷监测数据和分析处理需求而言,其数据量大和能耗大的问题不突出,但对数据处理实时性和数据安全隐私性的问题则能够借助边缘计算的模式来解决。边缘计算将计算和分析下放到靠近数据源的位置,非常适合煤矿对工作面区域甲烷监测、分析的处理需求。

现阶段监控系统通过监控分站来接收、控制和上传监测数据并实现断电控制,以中煤科工集团常州研究院有限公司的 KJF130 矿用本安型分站为例,受制于井下电器煤安认证的要求,分站接收数据并执行断电等指令负载(含有线和无线)不超过 64 个[8],且以有线传输为主。为了准确掌握工作面区域的甲烷含量分布,按照每个支架至少安装不少于 3 个甲烷传感器来预估,很多工作面甲烷传感器数量都超过 300 个,再加上现场计算分析和无线传输的需要,传统的分站明显不能简单改造来满足区域甲烷监测边缘计算的需求。

综合甲烷监测现状和发展需求来看,边缘计算节点非常适合工作面区域较多甲烷采集测点的数据分析和计算,且无法在现有的监控系统架构上进行简单改造来实现,所以要建立煤矿针对工作面区域甲烷边缘计算节点的监测模式。边缘计算中最重要的一环就是边缘计算节点的选择,包括不同边缘计算节点的分布层级和边缘计算节点的可靠性问题。边缘计算节点的计算能力、网络带宽的差异性,不同边缘计算节点的层级布置会导致计算的差异[9]。通过对煤矿工作面环境监测的需求分析,对于煤矿的环境监测,至少需要布置区域边缘计算节点和全矿井计算边缘计算节点 2 层,分别用来进行工作面、运输巷等重点区域环境监测的边缘计算和全矿井环境的边缘计算分析,基于边缘计算的环境整体监测架构如图 1 所示。

由图 1 可知,相比较现有分布式由分站带传感

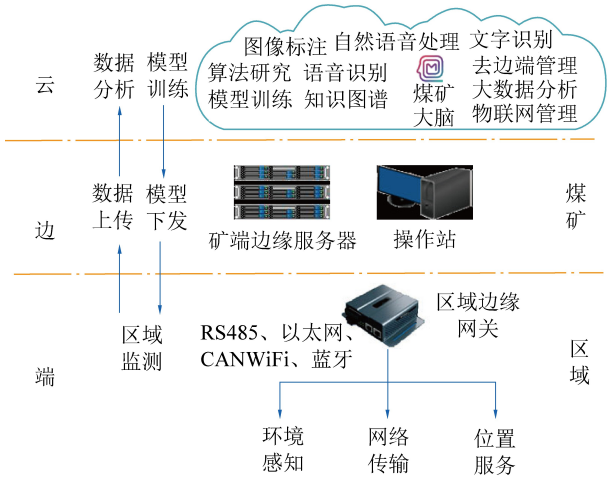

图 1　基于边缘计算的井下环境监测架构

Fig.1　Framework of underground monitoring based on edge computing

器,分站实现就地断电的安全监控模式,基于边缘计算的完整环境监测在监测终端方面更加强调监测终端的自定位、自供电和无线传输能力,在区域控制方面强调边缘网关的数据分析处理能力,而不是把所有的数据全部汇集到监控系统主机后在进行分析预警,突出了监测数据的分级处理,能够极大增加数据处理的实效性。基于边缘计算的完整环境监测架构按照 3 层来设计,包括云、边、端三级[10],云层主要负责算法训练、大数据分析和物联网管理等功能,边层主要负责全矿井环境监测数据的采集、分析和传输,端层主要负责区域边缘范围内环境数据的采集、分析和传输。

笔者主要分析矿端边缘计算服务器、边缘网关及以下关联设备和技术支撑的工作面区域甲烷浓度场监测新模式,暂不涉及云层的边缘计算应用问题,工作面区域范围内的边缘计算在区域边缘网关来实现,矿端边缘计算服务器节点将各区域汇集来实现全矿井的环境监测。

2　基于边缘计算的甲烷监测技术支撑

要利用煤矿边缘网关和关联设备实现工作面甲烷的区域监测和分析,为了实现无线供电、数据采集和传输功能,在硬件技术方面,至少需要考虑微功耗甲烷监测传感技术、微功耗传感器位置服务技术、微功耗网络传输服务技术和边缘计算节点装置 4 个方面的问题。

2.1　微功耗甲烷监测感知模组

基于 MEMS(Micro-Electro-Mechanical System)的微功耗传感技术是目前物联网甲烷监测技术领域的研究重点[11],相比较传统传感器,它具有体积小、质量小、成本低、功耗低、可靠性高、灵敏度高、适于批量化生产、易于集成和实现智能化的特点。在进行工作面区域甲烷含量分布监测时,借助 MEMS 技术开发微功耗甲烷传感模块,能够达到(500 ~ 40 000)×10^{-6}量程,分辨率超过 500×10^{-6},使用寿命超过 1 年,达到长期工作免人工维护的要求。特别需要具备的是能够采用电池供电或者自供电方式的工作能力,微功耗甲烷监测传感模组能够通过自主供电、主动动态标校感知模组能耗平衡功能,实现感知模块的微功耗运行和免供电运行,能够满足工作面区域甲烷监测要求。

2.2　微功耗传感器位置服务模组

基于物联网需求的工作面区域甲烷监测离不开传感器精确位置信息,位置服务模组能够实时提供甲烷感知模块的测量位置,补充甲烷监测数据的位置属性,为后期区域甲烷含量分布场构建和分析提供基础。位置服务系统定位终端与定位模组在指标方面应能够满足多源定位欧氏距离误差小于 0.1 m[12]。该模组与微功耗甲烷感知模组、无线自组网模组一起组成微功耗甲烷感知传输终端(以下简称终端),终端集甲烷含量感知、位置感知和信息传输于一体,能够通过电池或者自供电技术满足终端能量需求,通过无线方式将浓度信息和位置信息实时传输至区域智能边缘网关处。

2.3　甲烷感知终端供电技术

当感知技术、无线通信技术的能耗降低后,感知设备的供电成为感知设备海量应用的约束条件[13]。能量捕获技术可将周围环境中的各种能量转化成电能,为无线传感器和身份标识器等感知设备的传感和无线传输提供能量,降低设备安装、使用和维护的成本[14]。煤矿井下巷道中风能、机电设备运转产生的机械动能、电气设备和柴油发动机产生的热能等等均可以转换为电能[15]。研制自发电装置,用于微功耗无线传感设备的自发电模组发电功率≥0.5 mW ,同时配合可充电电池,实现感知终端自供电和连续供电。实现感知设备的无源、无线,有利于矿山感知设备的大量部署和应用,能够有效提升矿山的大样本感知能力,为矿山智慧化提供甲烷感知数据基础。

2.4　井下末端有线无线互联网络

矿山末端 1 km 有线无线互联及无线自组网通信技术是甲烷浓度数据传输的基础,首先需要满足井下生产各类感知节点接入、信息交互及海量动态信息传输与交换的需要,实现甲烷监测数值的实时无线和有线传输。同时需要根据微功耗传感器自身

技术特点、使用环境和通信协议等,解决煤矿井下微功耗光电模组传输问题。在无线传输方面,WaveMesh 无线传感网络在一些监控系统取得了应用,周期性地读取网络中所有传感节点实时数据,由于传感节点对功耗要求苛刻,在现有监控系统甲烷监测中的应用效果一直不理想[16]。同时针对井下可能发生的供电中断、无线传输环境变化和网络节点增减的问题,井下传输网络需要兼顾灾害状态下的网络自适应能力,网络设备能够即插即用,能够自动配置无线参数和传输参数,实现自主管理临近网络节点关系等功能[17]。考虑到配套微功耗传感器模块使用的问题,需要同时具备超微功耗无线射频的需要。根据工作面与监测需要,无线射频模组功耗不大于 200 mW,通信距离不小于 10 m,无线自组网基站功耗不大于 5 W,无线通信距离不小于 10 m。边缘计算节点及传感终端网络连接如图 2 所示。

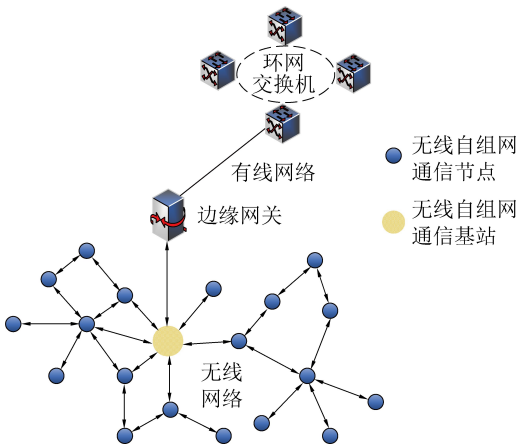

图 2　感终端区域网络连接示意

Fig.2　Schematic of sensor terminal area network connection

2.5　边缘计算节点装置

边缘计算节点的计算能力、网络带宽的差异性不同,对边缘计算节点装置的选择和布置会直接导致计算延迟和结果的差异,在很多行业,现有的基础设施可以稍作改进后用作边缘计算节点,比如手持设备通过改进绕过运营商基站直接访问主干网络的边缘计算节点[18-19]。所以在不同层级边缘计算节点具体选择或者开发过程当中,必须考虑现有的硬件设备或者协议接口如何与对应层级的边缘计算节点进行融合。前面已经分析了矿用分站作为煤矿环境监测区域数据采集处理设备按照现有的规程规定,虽然考虑了无线传输的接口,但其设计初衷就是以传输 RS485 总线为主要任务,很难满足区域甲烷分析的需要。煤矿甲烷监测边缘计算节点按照矿级和区域级进行设计,煤矿整体设计矿端边缘计算服务器,区域范围设计边缘网关来实现区域甲烷信息分析处理。

工作面区域边缘网关的设计不得不考虑设备的可靠性问题,边缘网关暴露于煤矿工作面区域,既要考虑本安化设计,又要保证其物理的可靠性。边缘数据的时空特性导致其数据有较强的唯一性和不可恢复性,需要在矿端建立双重备份机制的边缘计算服务器,从而保障其数据可靠性。基于微功耗传感模组、精确位置服务模组和无线自组网传输模组的甲烷监测终端,配合区域边缘网关和矿端边缘计算服务器可以实现工作面甲烷含量空间场和云图的实时构建,进而实现全矿井甲烷各区域安全监测分析,其实现方式如图 3 所示。

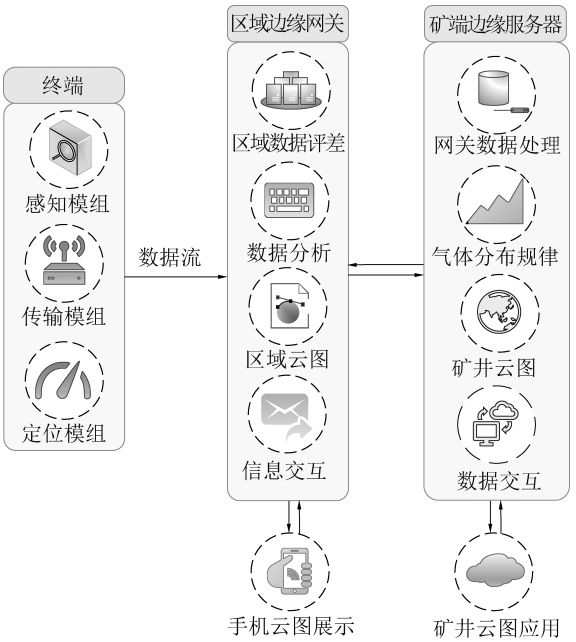

图 3　基于边缘计算工作面甲烷监测方式示意

Fig.3　Schematic of methane monitoring mode in coal face based on edge calculation

3　基于边缘计算甲烷监测模式设计

笔者讨论工作面区域甲烷监测和分析暂不考虑由于重力作用造成的甲烷三维分布状态,在笛卡尔二维坐标系下分析甲烷的监测和分析问题。按照前面甲烷监测终端的设计,能够实时对 0.1 m 误差范围的甲烷含量实时监测并上传至区域边缘网关,笔者设计工作面区域布置 1 台区域边缘网关,一般放置在工作面进风侧区域,如果条件允许,可以直接放置于移变列车上随工作面回采推进。工作面每个支架布置 4 个终端的布置方式,分别在液压支架底座后方 1 个,主要用来监测采空区甲烷涌出含量监测;支架行人区域前后两侧各布置监测终端 1 台;行人

区域前方布置终端 1 台,主要用于工作面落煤甲烷含量监测。终端利用电池或者自供电模式运行,通过无线自组网方式传输到区域边缘网关。具体布置方式如图 4 所示。

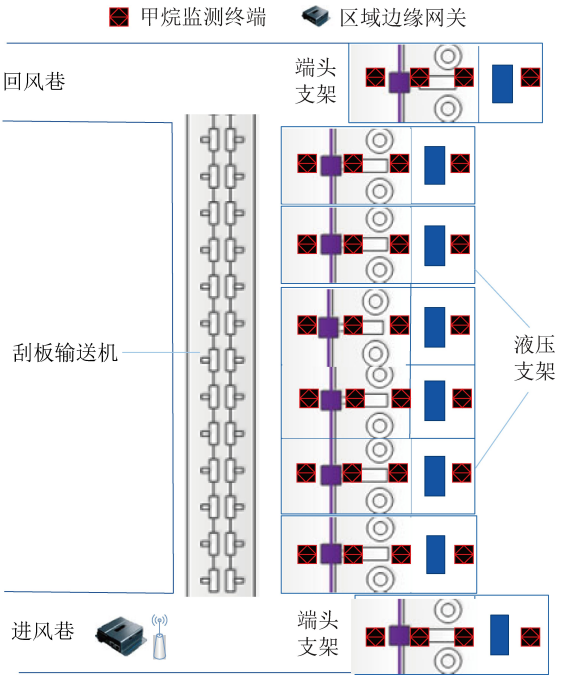

图 4　工作面区域终端布置平面示意

Fig.4　Schematic of terminal layout in coal face area

如图 4 所示,某工作面 100 台液压支架 2 台端头支架,其甲烷监测终端总数为 408 个,相比较现有监控系统的 3~4 个甲烷测点,监测点有了数量级的增加。为了更好地展现区域甲烷含量分布,笔者选择在边缘网关节点处对工作面区域的甲烷监测数据进行处理分析。以多参量、小样本数据为基础,采用迁移计算技术,描述工作面区域甲烷含量分布二维空间场,从而实现区域动态数字云图的构建。通过智能边缘计算网关生成网关范围内有限数据点的云图,用 408 个有限的监测数据点通过数值模拟的算法仿真,求出空间场和可视化云图的支撑数据组,建立工作面区域空间场实现算法和云图数据基础集,利用云图展示工作面区域甲烷含量分布。而工作面区域的甲烷处理展示工作全部由区域边缘网关来执行,某一时刻工作面甲烷含量分布如图 5 所示,该云图将以时间为坐标实时更新。

如图 5 所示,对于工作面区域任意位置甲烷含量,均可通过云图颜色直观展示,极大地方便了工作面区域甲烷管理工作。

4　基于边缘计算甲烷分析模式提升

在区域边缘网关、微功耗甲烷感知、精确位置服务和无线自组网技术的支撑下,实现了工作面区域甲烷含量分布的仿真和云图展示,这种监测模式和数据基础为工作面进一步甲烷安全分析提供了前所未有数据集的支撑。现阶段工作面甲烷实时分析大都通过单一传感器甲烷含量时间序列的各种特征来实现[20],基于边缘计算的甲烷监测对甲烷监测数据量、含量值位置属性和数据传输等方面的研究均有很好的推动作用。利用云图的直观可视化特征扩展区域范围内安全特征的变化态势问题研究,在时间坐标系下研究整个区域甲烷的安全状态,并在信息云图上通过合适的表达方式进行呈现,最终让区域的可视化云图不仅能够表达当前的安全信息,同时能够对区域的安全态势和趋势进行标识,这些分析在矿端边缘计算服务器上来实现。

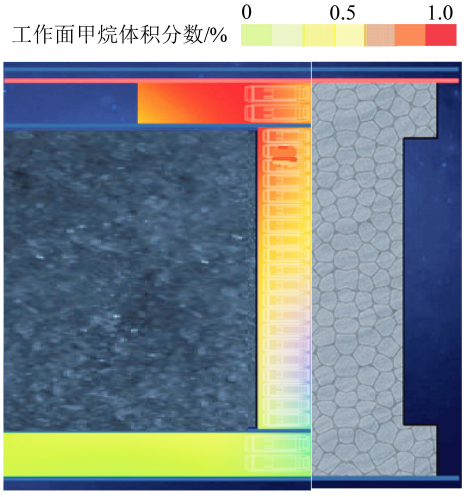

图 5　工作面区域甲烷含量分布

Fig.5　Distribution of methane content in coal face area

基于物联网模式的工作面甲烷监测对甲烷安全分析至少在 2 个方面能够带来突破,一方面,现有安全监控系统作为规程强制规定安装在工作面区域的甲烷传感器数据应该进入边缘计算服务器,《煤矿安全规程》设置的甲烷体积分数为 1.0%时报警、甲烷体积分数为 1.5%时断电依然是区域甲烷管理的基本准则,利用大数据分析工具对监控系统下 2 个超限含量前后甲烷区域空间场进行关联分析,找出工作面甲烷超限对应空间场的分布特征和变化规律,利用区域含量分布及早发现甲烷含量超限问题,这将是区域甲烷安全分析预判的一种新模式,笔者在此提出分析思路,不再进行深入阐述。另一方面在法规确定的报警、断电“红线”以内,依然有必要进行甲烷安全分析,例如有些工作面日常甲烷体积分数为 0.5%左右,有时上升到 0.7%可能应属于“正常”;有些工作面平时的甲烷体积分数只有 0.2%左

右,若突然上升到 0.7%,虽然没超标,但常规分析肯定不能认为是“正常”了。以安全法规形式确定的“正常”与“异常”判定有其不可替代的重要作用,但在揭示甲烷显现异常时却有着不可忽视的不足[21]。在此基础上,提出统计学上异常分析的思路,可以清晰地确定每一具体支架位置的甲烷正常波动和趋势范围,进而准确地提出工作面精准甲烷异常分析预警,是传统安全监控系统无法来完成的。这种针对不同支架甚至更精准位置超限范围内甲烷分析预警是工作面甲烷安全领域另外一个研究的课题。

5 结　　论

1)论述了边缘计算在矿井重点区域甲烷监测的必要性和可行性问题,首次提出了集微功耗甲烷感知、自供电、自定位及自组网数据传输于一体的甲烷监测终端,配合工作面区域边缘网关、矿端边缘服务器和云端大数据分析,建立了基于云、边、端三级的甲烷边缘监测模式的系统架构,解决了工作面区域基于边缘计算的甲烷感知和传输问题。

2)以 100 台液压支架和 2 台端头支架工作面为例,首次设计了基于边缘计算的工作面区域甲烷监测方案。布置了 408 台甲烷监测终端和 1 台区域边缘网关,以多参量、小样本数据为基础,描述了工作面区域甲烷浓度二维空间数字场,并进一步实现了工作面区域动态甲烷含量空间分布云图。

3)在甲烷浓度空间场和云图展示的基础上,提出了 2 种基于大数据支撑的甲烷分析预警模式和思路,一是对甲烷超限含量前后区域空间场进行关联分析,提取工作面甲烷超限对应空间场的分布特征和变化规律,利用区域甲烷含量分布情况及早发现甲烷含量超限问题;二是利用大数据分析工具解决甲烷监测报警阈值以下的显现异常问题。

参考文献(References):

[1] 国家安全生产监督管理总局,国家煤矿安全监察局.煤矿安全规程[M].北京:煤炭工业出版社,2016.

[2] 王国法,杜毅博.煤矿智能化标准体系框架与建设思路[J].煤炭科学技术,2020,48(1):1-9.
WANG Guofa, DU Yibo. Coal mine intelligent standard system framework and construction ideas [J]. Coal Science and Technology,2020,48(1):1-9.

[3] 王国法,刘　峰,孟祥军,等.煤矿智能化(初级阶段)研究与实践[J].煤炭科学技术,2019,47(8):1-36.
WANG Guofa, LIU Feng, MENG Xiangjun, *et al*. Study and practice of intelligent coalmine(primary stage)[J]. Coal Science and Technology,2019,47(8):1-36.

[4] 范京道,徐建军,张玉良,等. 不同煤层地质条件下智能化无人综采技术[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(3): 43-52.
FAN Jingdao, XU Jianjun, ZHANG Yuliang, *et al*. Intelligent unmanned fully-mechanized mining technology under conditions of different seams geology[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(3): 43-52.

[5] 吕鹏飞,何　敏,陈晓晶,等.智慧矿山发展与展望[J].工矿自动化,2018,44(9):84-88.
LYU Pengfei, HE Min, Chen Xiaojing, *et al*. Development and prospect of wisdom mine[J]. Industry and Mine Automation, 2018, 44(9):84-88.

[6] 谭章禄,马营营,郝旭光,等.智慧矿山标准发展现状及路径分析[J].煤炭科学技术,2019,47(3):27-34.
TAN Zhanglu, MA Yingying, HAO Xuguang, *et al*. Development status and path analysis of smart mine standards[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(3):27-34.

[7] 施巍松,张星洲,王一帆,等.边缘计算:现状与展望[J].计算机研究与发展,2019,56(1):69-89.
SHI Weisong, ZHANG Xingzhou, WANG Yifan, *et al*. Edge computing: state-of-the-art and future directions [J]. Journal of Computer Research and Development, 2019, 56(1):69-89.

[8] 张得勇,高　阳,赵青山.KJF130 型监控分站在鲍店煤矿 6304 工作面的应用[J].山东煤炭科技,2018(11):34-36.
ZHANG Deyong, GAO Yang, ZHAO Qingshan. Application of KJF130 monitoring substation in working face 6304 of Baodian Coal Mine [J]. Shandong Coal Science and Technology, 2018(11):34-36.

[9] SHI Weisong, CAO Jie, ZHANG Quan, *et al*. Edge computing: Vision and challenges[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2016, 3(5):637-646.

[10] XIAO Surong, LIU Chubo, LI Kenli, *et al*. System delay optimization for Mobile Edge Computing[J]. Future Generation Computer Systems, 2020.

[11] 张　铮,曹守启,朱建平,等.面向实时监测的无线传感网微功耗通信策略[J].仪器仪表学报,2019,40(2):257-264.
ZHANG Huan, CAO Shouqi, ZHU Jianping, *et al*. Real-time monitoring low-power communication strategy for wireless sensor network[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(2):257-264.

[12] 包建军.煤矿巷道多源数据融合定位算法研究[J].工矿自动化,2019,45(8):38-42.
BAO Jianjun. Research on multi-source data fusion and location algorithm for coal mine roadway [J]. Industrial and Mining Automation, 2019, 45(8):38-42.

[13] 丁恩杰,金　雷,陈　迪.互联网+感知矿山安全监控系统研究[J].煤炭科学技术,2017,45(1):129-134.
DING Enjie, JIN Lei, CHEN Di. Internet plus perception mine safety monitor system [J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(1):129-134.

[14] 张嘉怡. 无线传感器网络在煤矿安全监测中的应用[D].成都:西南交通大学,2008.

[15] 路　萍.风光互补及无线传输在瓦斯管道监测中的应用[J].自动化与仪表,2020,35(1):76-79.
LU Ping. Application of wind solar complementation and wireless

transmission in gas pipeline monitoring [J]. Automation and instrumentation,2020,35(1):76-79.

[16] 马越豪,张文建,顾 强,等.基于 WaveMesh 的煤矿井下无线应力在线监测系统[J].煤矿安全,2020,51(1):130-133.
MA Yuehao,ZHANG Wenjian,GU Qiang,*et al*. Wireless stress online monitoring system in coal mine based on wavemesh [J]. Safety in Coal Mines,2020,51(1):130-133.

[17] 汪丛笑.煤矿安全监控系统智能化现状及发展对策[J].工矿自动化,2017,43(11):5-10.
WANG Congxiao. Intelligent status and development strategy of coal mine safety monitoring system [J]. Industrial and Mining Automation,2017,43(11):5-10.

[18] 李时杰. 远距离微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.

[19] 张 浪.巷道测风站风速传感器平均风速测定位置优化研究[J].煤炭科学技术,2018,46(3):96-102.
ZHANG Lang.Optimized study on location to measure average air velocity with air velocitysensor in wind measuring station of underground mine [J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(3):96-102.

[20] 赵美成,贺安民,屈世甲.综采工作面瓦斯数据时间序列预测方法研究[J].工矿自动化,2019,45(6):80-85.
ZHAO Meicheng,HE Anmin,QU Shijia.Research on time series prediction method of gas data in fully mechanized mining face [J].Automation of Industry and Mine,2019,45(6):80-85.

[21] 李冠华,屈世甲.基于监控系统的工作面瓦斯预警指标研究[J].煤矿安全,2018,49(11):168-171.
LI Guanhua,QU Shijia.Research on early warning indicators of gas in working face based on monitoring system[J].Safety in Coal Mines,2018,49(11):168-171.