

基于传感网的煤矿瓦斯监测数据发布系统关键技术

刘茜¹, 毛善君¹, 武建军², 李鑫超³

(1. 北京大学 地球与空间科学学院, 北京 100871; 2. 中煤华晋能源有限责任公司, 山西 河津 043300;

3. 北京龙软科技股份有限公司, 北京 100190)

摘要: 针对传统工业以太网在煤矿瓦斯监测异构传感器资源整合方面的弱势以及 OGC 传感器网络框架在异构传感器资源整合、协同监测、快速响应上的优势, 设计了一种基于传感网的煤矿瓦斯监测数据发布系统, 详细阐述了基于传感网的监测数据接入技术以及基于 MongoDB 的数据存储技术, 并成功应用到王家岭煤矿中。应用结果表明, 传感网服务技术打破了传统以太网低效工作模式, 提供了井下协同观测的可能性; 采用 NoSQL 存储技术实现了传感网监测数据的实时接入、海量存储、高效检索与动态管理, 为未来的智慧矿山建设奠定了基础。

关键词: 瓦斯监测; 传感器网络; MongoDB; 王家岭煤矿

中图分类号: TD67

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2015)05-0100-05

Key technology of mine gas monitoring and measuring data issue system based on sensor network

LIU Qian¹, MAO Shan-jun¹, WU Jian-jun², LI Xin-chao³

(1. School of Earth and Space Science, Peking University, Beijing 100871, China; 2. Huajin Energy Company Limited, China National Coal Group, Hejin 043300, China; 3. Beijing LongRuan Technologies Incorporation Limited, Beijing 100190, China)

Abstract: According to the disadvantage in the heterogeneous sensor resource integration of the mine gas monitoring and measuring with the traditional industrial Ethernet and the advantage of OGC sensor network framework in the heterogeneous sensor resource integration, collaborative monitoring and measuring, and fast response, a data issue data system of the mine gas monitoring and measuring was designed based on sensor network. The paper in detail stated the data access technology of the monitoring and measuring based on sensor network and the data storage technology based on MongoDB. The technology was successfully applied to Wangjialing Mine. The application results showed that the service technology of the sensor network broken the low efficient working mode of the traditional Ethernet and could provide a possibility of collaborative observation in the underground mine. The NoSQL storage technology was applied to achieve the real time access, mass storage, high efficient search and dynamic management of the monitoring and measuring data from the sensor network in order to set up the base of future intelligent mine construction.

Key words: gas monitoring and measuring; sensor network; MongoDB; Wangjialing Mine

0 引 言

瓦斯事故是煤矿事故的重大灾害之一, 现有的瓦斯监测联网技术已经较为成熟。但是由于各个矿井使用多个厂家的不同技术, 各系统难以有效集成, 使安全生产监测监控信息不能很好地整合利用, 不便于集团公司、安监部门等掌握各矿安全生产情况,

进行有效的监督管理。相关专家和研究人员在瓦斯监测数据整合、快速响应上做了较多研究。例如, 文献 [1] 提出了一种用于煤矿瓦斯监测的网格型无线传感器网络, 作为有线监测系统的补充, 将大幅提高煤矿瓦斯监测与预警水平; 文献 [2] 设计了一种煤矿瓦斯监测监控系统联网软件, 实现对多种异构矿井瓦斯监测监控系统的数据采集、数据监控与分析

收稿日期: 2014-12-11; 责任编辑: 赵 瑞 DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2015.05.025

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划) 资助项目(2012AA121403)

作者简介: 刘茜(1990—), 女, 江西赣州人, 硕士研究生。Tel: 010-62755420, E-mail: liuqian99@pku.edu.cn

引用格式: 刘茜, 毛善君, 武建军, 等. 基于传感网的煤矿瓦斯监测数据发布系统关键技术[J]. 煤炭科学技术, 2015, 43(5): 100-105.

LIU Qian, MAO Shan-jun, WU Jian-jun, et al. Key technology of mine gas monitoring and measuring data issue system based on sensor network [J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(5): 100-105.

等,解决集团公司对各矿的在线监测和远程调度问题。文献[3]采用多传感器信息融合方法,充分挖掘各类传感器监测数据的规律,构建了瓦斯安全监测预警系统,实现对井下工作面瓦斯危险的“实时感知、准确辨识、快速响应、有效控制”。这些研究多是针对硬件或后期数据处理的改进,没有从根本上突破传统以太网的限制。另一方面,随着空间数据采集能力的增强,矿山生产中积累的空间数据呈爆炸式增长,数字矿山中的海量数据管理、分布式存储等需求逐渐增多,信息管理系统要求能够处理多样性的数据类型,包括结构化和非结构化数据、Web 数据、语音数据甚至是图像、视频数据等,要求能够实现海量数据的高效率存储和访问需求。然而,传统的安全监测监控技术多采用工业以太网传输实时数据,存储到关系型数据库中,供 Web 客户端的查询和检索。受关系型数据库功能的限制,上述需求难以实现。

为了突破传统工业以太网在智能联网监测、实时监测数据的海量存储和高效检索上的限制,笔者探索性地将传感网服务技术和 NoSQL 存储技术应用到煤矿瓦斯监测中,设计了一种基于传感网的瓦斯监测数据发布系统。将多种具有感知、计算和通信能力的瓦斯监测传感器与万维网相结合,形成动态耦合的网络化协同观测机制^[4],参照 OGC 传感网相关规范对采集的异构瓦斯监测数据及各类传感器信息进行统一描述和数据编码,通过传感网服务接口将其接入 Internet,并提供发现、访问、规划、警告服务。远程客户端通过 Internet 从传感网服务器端请求并获取传感器数据及实时的瓦斯监测数据,写入本地的 NoSQL 数据库,并通过数据访问接口将瓦斯实时监测数据发布到应急响应平台,平台即可通过高效的时空检索获取瓦斯监测时间序列数据,进行瓦斯预警分析,从而实现煤矿井下瓦斯的安全可持续监测与瓦斯灾害快速响应。

1 瓦斯监测数据发布系统的设计

瓦斯监测数据发布系统是基于相关国家科技攻关项目设计开发的实时 GIS 应用系统。实时 GIS 系统是针对我国日趋频发的各种自然与人为突发事件监测、预警、应急响应等重大需求,研究建立实时数据集成表示的时空 GIS 模型,突破高效的时空索引、传感数据的实时接入与数据库动态更新等关键技术,研发实时 GIS 软件架构并形成基础软件平台。

具体关键技术包括:传感数据实时接入与更新、分布式时空数据存储与管理、高效一体化的时空索引和多层次时空数据访问接口。基于实时 GIS 平台的瓦斯监测数据发布系统分为传感网服务、数据接入和数据存储三大子系统,如图 1 所示。传感网服务系统提供异构瓦斯传感器的注册平台,采集已注册传感器的实时监测数据并接入 Internet,提供观测与消息通知服务;数据接入系统向传感网服务系统请求获取瓦斯监测数据,进行预处理后接入到数据存储系统;数据存储系统采用 NoSQL 文档型数据库 MongoDB,通过数据访问接口将实时监测数据发布到 GIS 应急响应平台。

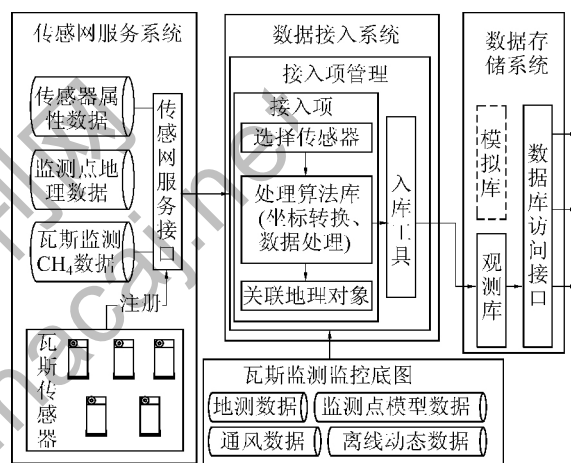


图 1 基于实时 GIS 平台的瓦斯监测数据发布系统

2 基于传感网的瓦斯监测数据接入

2.1 瓦斯监测传感网服务系统

2001 年,美国宇航局首次提出了传感器网络 Sensor Web 的概念。2005 年,开放地理信息联盟 (OGC) 提出了一种新型的传感器网络标准——传感器网络整合框架 (Sensor Web Enablement, SWE)^[5],并为其制定了 7 个传感器网络标准规范,包含 3 个信息模型和 4 个信息服务实现规范^[6]:传感器建模语言 (SensorML),观测与测量 (O&M) 编码,转换器描述语言 (TML),传感器规划服务 (SPS),传感器观测服务 (SOS),传感器报警服务 (SAS),Web 通知服务 (WNS)。SWE 通过提供统一的接口及编码,实现异构网络中资源的可管理、可共享和可配置^[5-7]。SWE 服务具有相对组件化、即插即用的资源整合优势,在安全、应急领域已出现了大量的应用^[7]。比如,Dapeng Li 等^[8]提出了一种基于 SWE 和数字地球的应急响应系统架构;Jirka

等^[9]基于 52°North 实现了 SWE 和 WPS 规范,通过传感网跨越行政边界去共享、集成传感器观测数据,实现危机管理;胡楚丽等^[10]构建了基于 SWE 的城市异构传感器资源集成共享平台,推动城市应急响应的智慧化。然而,SWE 在煤矿瓦斯监测应急中的应用尚无人尝试。针对 SWE 异构传感器资源整合、协同监测、快速响应的优势,建立基于 SWE 的瓦斯监测传感网服务系统,实现瓦斯实时监测数据的采集与网络接入。

目前很多机构推出了基于 SWE 的传感服务,如 OSHA 架构、52°North 的 SWE 框架实现以及 GeoSwift 的 SOS^[11]。笔者所研究的瓦斯监测传感网服务系统(Sensor Web Service System, SWSS)以开源 52°North 3.5.0 SOS 为基础(许可证协议为 GNU v2),运行模式采用 B/S 模式,开发语言为 Java,集成开发环境采用 Eclipse、Netbeans。SWSS 采集矿井下各类瓦斯监测传感器(甲烷、CO、风速、风门开停和温度)的监测数据,接入 Internet 并提供 SOS(Sensor Observation Service)和 SSNS(Simple Sensor Notification Service, WNS 的简化版本)服务。

瓦斯监测传感网 SOS 规范的相关操作^[12-13]:

①核心操作: GetCapabilities, 获得以 XML 方式编码的 SOS 服务描述信息,并支持矿井下已接入的瓦斯监测传感器的列表查询; DescribeSensor, 获得以 SensorML 编码的特定瓦斯监测传感器、传感器系统的详细描述信息(监测类型、报警点、断电点、复电点、安装位置等); GetObservation, 通过特定的时空查询条件获得以 O&M 编码的瓦斯监测数据、通风机监测数据; ②事务性操作: RegisterSensor, 通过该接口将以 SensorML 编码的瓦斯监测传感器描述信息注册到 SOS; InsertObservation, 允许瓦斯监测传感器向瓦斯监测传感网服务系统插入以 O&M 编码的新观测值; ③增强配置文件的操作: GetResult, GetObservationByID, GetFeatureOfInterest, GetFeatureOfInterestTime 等。

瓦斯监测传感网 SSNS 规范的相关操作^[14-15]:

①获取瓦斯监测传感器状态变更的信息,包括 Register, UnRegister, Pause, Resume, ChangeFrequency 操作; ②GetCapabilities 操作,获取以 XML 方式编码的 SSNS 服务描述信息; ③消息代理服务,对指定瓦斯监测传感器、指定观测事件(如瓦斯报警)提供事件消息订阅、更新订阅、取消订阅服务及其他相关服务的操作,包括 Subscribe, Unsubscribe, PauseSubscribe,

ResumeSubscribe 等操作; ④后续系统从 SSNS 获取传感器事件消息通知的操作,包括 GetSensorDetail, GetSubscription, Notify 等,传感器事件消息以 XML 格式的文件发布。

瓦斯监测传感网服务系统的业务流程如图 2 所示。RegisterSensor 将瓦斯监测传感器的 ID、属性、监测值属性等信息注册到瓦斯监测传感网服务系统中,注册成功后,即可 InsertObservation 上传实时监测数据,以及传感器 Pause、Resume、ChangeFrequency 等状态信息;数据接入系统 DescribeSensor 获取传感器信息,GetObservation 获取瓦斯监测数据,Notify 获取传感器事件消息。

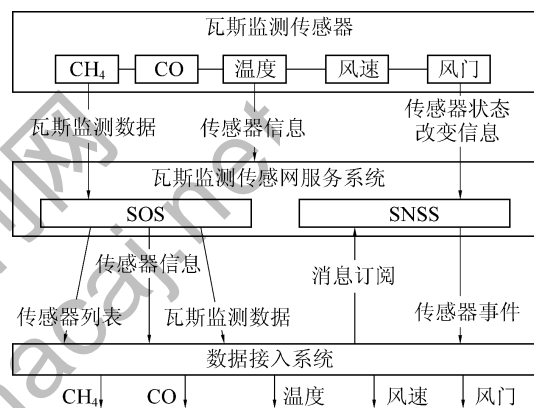


图 2 瓦斯监测传感网服务系统业务流程

2.2 数据接入系统

瓦斯监测数据接入 Internet 后,数据接入系统(Data Provision System, DPS)可以进行数据接收,将监测数据写入本地的 MongoDB 数据库中。数据接入系统的工作分为以下 4 个步骤。

1) 新建接入项:用户对数据库、瓦斯监测传感网服务进行配置后,DPS 向 SWSS 发出 GetCapabilities 请求,对方返回 SOS 服务描述信息及矿井中注册的瓦斯监测传感器列表数据;选择需要接入的瓦斯监测传感器 ID 并关联矿井内的二维监测点对象 ID,设定监测数据的获取频率等;最后,DPS 生成 XML 接入项配置文件。

2) 获取瓦斯实时监测数据:在 DPS 中导入 XML 配置文件后,DPS 就向 SWSS 发出 DescribeSensor 请求,获取瓦斯监测传感器的监测类型、报警点、断电点、复电点、安装位置等详细描述信息;同时,DPS 开始按照设定的频率向 SWSS 发出 GetObservation 请求,对方则实时地返回以 O&M 编码的瓦斯监测数据、通风机监测数据;DPS 对返回的二维监测点描述信息、传感器描述数据、监测数据进行解析,将其转

换成 BSON 格式的文档,写入 MongoDB 相应的数据集合中。

3) 瓦斯数据的预处理: 在将数据写入数据库之前,DPS 先对监测数据进行简单的预处理,例如坐标转换、比例尺转换等。

4) 瓦斯传感器事件通知: 导入 XML 文件时 DSP 自动订阅了 SNS 服务,在接入实时数据的同时监测瓦斯监测传感器的开停状态,当传感器状态发生变化时,DSP 会向后续系统发送通知消息。

3 基于 MongoDB 的瓦斯监测数据存储

Bernd^[16] 讨论了 NoSQL 数据库在分布式地理传感器数据存储上的优势: 面向对象存储、可伸缩性强、快速存取、分布式扩展存储、空间扩展等。相比传统关系数据库存在着诸如所支持数据类型不够丰富,系统数据增大到一定阶段之后很难扩展等弊端^[17],笔者转向了具有高效率、高并发、高性能的 NoSQL 数据库。采用开源成熟的 NoSQL 文档型数据库 MongoDB 进行瓦斯监测数据存储。MongoDB 是一个高性能、开源、面向集合的、模式自由的文档型数据库,介于关系数据库和非关系数据库之间^[18]。它使用数据结构松散的 BSON (Binary JSON) 格式,可以统一存储 CH₄、CO、风门等多种瓦斯传感器监测数据;支持类似于面向对象的查询语言和全类型索引,实现高效检索、快速处理;其内部的空间预分配机制与自动分片 (Auto - Sharding) 机制能实现随时间暴涨的海量瓦斯数据分布式扩展存储;通过主/从 (Master/Slave) 和复制集 (Replica Set) 数据复制机制实现数据备份保障系统安全^[19]。

3.1 瓦斯监测数据存储设计

如图 3 所示,瓦斯数据库中设计了图层元集合 ST_LayerCollection、图层集合 ST_Layer_gas、瓦斯传感器集合 ST_SenorCollection、分区集合 ST_Partition 和对象状态集合 ST_Object_States_gas。每个瓦斯监测点是一个特定的时空对象,具有位置坐标、包围盒等属性,并关联对应的瓦斯监测传感器对象。将所有时空对象组织在一个图层集合 ST_Layer_gas 中,存储时空对象的全局属性(不随时间而变化),图层元集合 ST_LayerCollection 存储图层的元数据。相应的,用瓦斯传感器集合 ST_SenorCollection 存储传感器的全局属性,包括瓦斯监测传感器的监测类型 (CH₄、CO、温度、速度、风门)、监测值单位、报警点、断电点等。由于每个时空对象在不同的时刻具有不

同的监测数据 (CH₄ 浓度、温度、风速等) 和几何数据,将其当作对象的 1 个状态 state,把所有状态存储在对象状态集合 ST_Object_States_gas 中。为了解决单个对象状态集合数据量过大的问题,根据监测时间将对象状态集合拆分为多个子集合,设置对象状态子集合的自动生成: 监测数据接入的初始,生成第 1 个子集合 ST_Object_States_gas0,当 ST_Object_States_gas0 的数据量增长到某一阈值后,自动生成新的子集合 ST_Object_States_gas1 继续存储,以此类推。分区集合 ST_Partition 存储对象状态集合的分区信息,即分区集合与对象状态子集合是一对多的关系,分区集合的每个文档对应于一个子集合,存储该子集合的瓦斯监测起止时间等元数据。

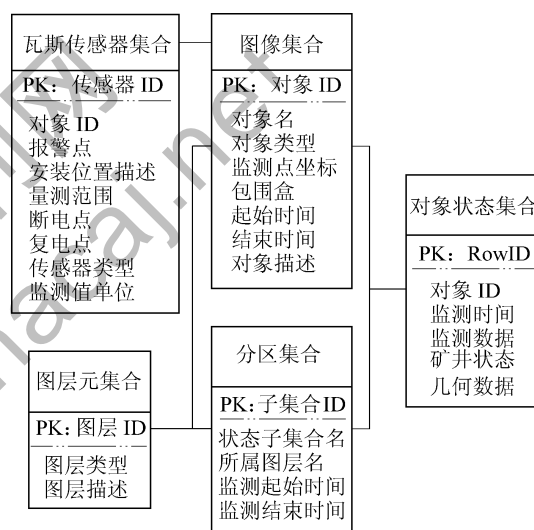


图 3 存储方案设计

3.2 瓦斯监测数据访问接口设计

针对瓦斯监测数据的存储方案,对 MongoDB 的数据库操作引擎进行封装,设计了访问接口,如图 4 所示。

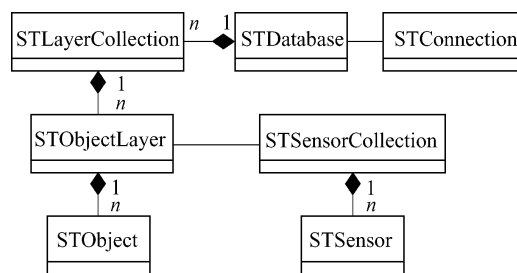


图 4 瓦斯外部数据访问接口

1) STConnection 连接类,提供 MongoDB 服务器连接、数据库管理等操作。

2) STDatabase 数据库类,提供对瓦斯数据库的一般操作,管理数据集合等。

3) STLayerCollection 图层集合类,存储每个图层的信息,实现对图层的管理。

4) STObjectLayer 图层类,将所有时空对象组织在一个图层里,实现对象的管理。

5) STObject 时空对象类,数据存储和组织的基本对象,每个对象包含多条监测状态(监测值、监测时间等),封装了时空检索、增加、删除等操作。

6) STSenorCollection 传感器集合类,提供对瓦斯监测传感器的管理等操作。

7) STSensor 传感器类,封装了瓦斯监测传感器对象的一般属性并提供相关操作。

3.3 瓦斯监测数据的应用发布

通过瓦斯监测数据发布系统,将煤矿瓦斯监测数据发布到煤矿的应急响应系统上:应急响应系统调用数据访问接口连接瓦斯数据库 gas,实时获取最新监测值、矿井状态,获取监测点在 1 个时间段内的瓦斯浓度数据,为应急响应系统的相关功能模块提供数据,从而实现数据的发布。

MongoDB 具备实时数据存储所需的复制及高度伸缩性^[20], 非常适合实时数据的插入, 可以长年累月不间断地接收瓦斯监测数据, 满足煤矿持续实时监测的要求。随着时间的增长, 监测数据量在不断增加, 数据文件(gas. 0, gas. 1, …… , gas. k) 也将不断增加, MongoDB 利用预分配空间机制预先分配数据文件 gas. (k + 1) , 其中 gas. (k + 1) 的大小是 gas. k 的 2 倍(每个数据文件最大为 2 GB) , 以避免较小

数据库浪费空间,又保证数据库有预留空间;此外,对每个预分配文件进行0填充,以避免由于数据暴增而带来的磁盘压力过大的问题,这对于集成多个煤矿监测系统,且矿井内传感器数量巨大的情况尤其有效。

关系型数据库的查询效率会随着数据量的增大而降低,由于 MongoDB 数据存储不需要固定的表结构,查询不需要多表连接^[20],而是采用面向对象的查询语言实现快速检索,因此适合煤矿海量瓦斯监测数据的存储。利用条件筛选器 BSONObjBuilder 构建时间检索条件, `BSONObjBuilder().appendTimeTl("start_time", timeStart).appendTimeTl("end_time", timeEnd).obj()`,可高效检索历史数据,用于瓦斯预警分析,实现预警信息的及时发布。

4 瓦斯监测数据发布系统应用

笔者在中煤能源集团王家岭煤矿实现了基于传感网的瓦斯监测数据发布系统,取得了较好的效果。在矿井巷道中均匀布设了若干具备通信感知能力的甲烷、CO、风速、风门开停和温度等监测传感器,注册到瓦斯监测传感网服务系统上,并实时上传瓦斯监测数据及传感器状态信息,构建协同监测系统。远程用户打开数据接入服务和 MongoDB 数据服务,就可不间断地接收瓦斯实时监测数据,1 个月内共接收了约 2 GB 的数据。将监测数据发布到王家岭煤矿的瓦斯突发事件应急响应系统上,为相关功能模块提供实时数据,如图 5 所示。

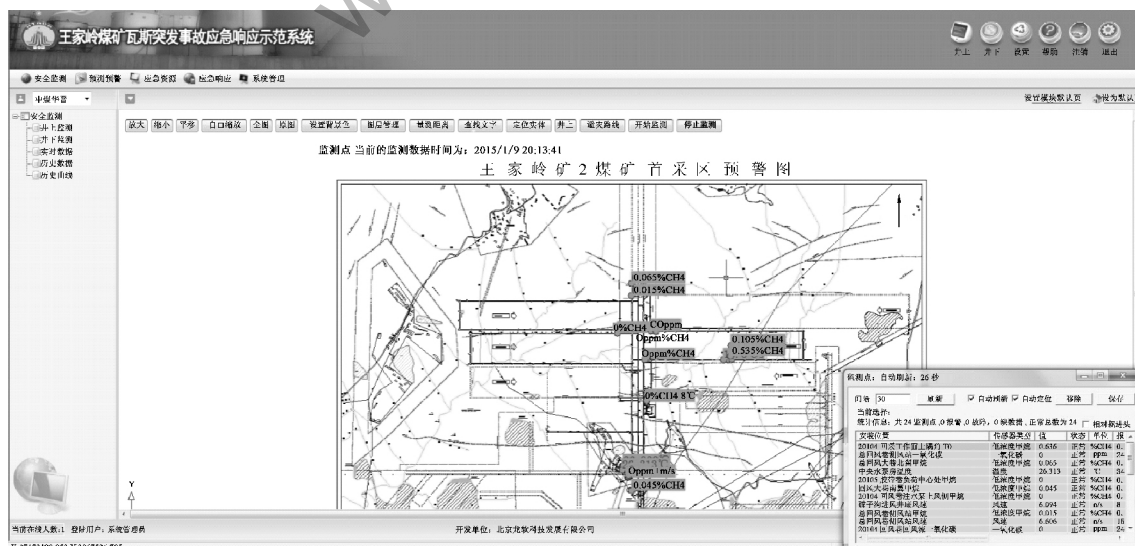


图5 王家岭煤矿的瓦斯突发事故应急响应系统截图

5 结 语

基于传感网服务和 MongoDB 数据存储技术,实现了煤矿瓦斯数据的实时发布。将传感网服务技术应用到煤矿瓦斯监测中,改变了传统工业以太网瓦斯数据采集流程中出现的异构传感器资源整合困难、观测与决策服务缺乏关联、非智能的被动监测等问题,将传统的被动接受数据服务,转变为主动聚焦数据服务,更有效地整合利用监测信息,实现多矿井联合监测和远程统一监控,为实现省市级矿井监测管理、领导决策服务提供新的思路;采用 NoSQL 文档型数据库 MongoDB 存储管理异构的瓦斯监测数据,实现了数据实时接入、海量存储、高效检索和动态管理,为瓦斯监测数据分析与预警、瓦斯灾害快速响应提供服务,突破了现有关键型数据存储的限制,大幅提高了瓦斯监测数据的存储效率,为数字矿山建设提供了新的技术支持。

参考文献:

- [1] 刘 彬. 煤矿瓦斯监测网格型无线传感器网络的实现 [D]. 北京: 北京交通大学, 2007: 20 - 41.
- [2] 任园园. 煤矿瓦斯监测监控系统联网软件分析与设计 [D]. 北京: 北京邮电大学, 2007: 13 - 34.
- [3] 朱世松. 煤矿瓦斯监测多传感器信息融合与知识发现研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2013: 43 - 58.
- [4] 陈能成. 传感网地理信息服务技术 [EB/OL]. [2014 - 09 - 24]. http://swe.whu.edu.cn/cnc_web/.
- [5] Delin K A, Jackson S P. The sensor web: a new instrument concept [C] // SPIE 2001 Conference Proceedings—Functional Integration of Opto - Electro - Mechanical Devices and Systems. San Jose, CA, 2001.
- [6] Mike Bots, Ingo Simonis. Sensor web enablement encoding specifications & web service specification [EB/OL]. [2014 - 09 - 20]. <http://www.ogcnetwork.net/swe>.
- [7] Mike Botts, George Percivall, Carl Reed, et al. OGC® OGC sensor web enablement: overview and high level architecture [EB/OL]. [2014 - 09 - 21]. http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-540-79996-2_10.
- [8] Li D, Cheng C. A proposed architecture for emergency response systems based on digital earth [C] // SPIE 2010 Conference Proceedings - The 6th International Symposium on Digital Earth. Beijing, 2010.
- [9] Jirka S, Nüst D, Proß B. Sensor web and web processing standards for crisis management [C] // ISCRAM2013 Conference Proceedings—10th International Conference on Information Systems for Crisis Response and Management. Baden, Germany, 2013.
- [10] 胡楚丽, 陈能成, 关庆锋, 等. 面向智慧城市应急响应的异构传感器集成共享方法 [J]. 计算机研究与发展, 2014, 51(2): 260 - 277.
- [11] 耿晓阳. 无线传感网数据处理服务的研究与实现 [D]. 北京: 北京邮电大学, 2013: 2 - 28.
- [12] Alexander C Walkowski, Alaxander Kmoch, Alaxander Strotmann, et al. 52 North sensor observation service [EB/OL]. [2014 - 09 - 20]. <http://52north.org/communities/sensorweb/sos/>.
- [13] Arne Bröring, Christoph Stasch, Johannes Echterhoff. Sensor observation service interface standard [EB/OL]. [2014 - 09 - 22]. <http://www.opengeospatial.org/legal/>.
- [14] Alexander C Walkowski, Alaxander Kmoch, Alaxander Strotmann, et al. 52 North Web Notification Service [EB/OL]. [2014 - 09 - 25]. <http://52north.org/communities/sensorweb/wns/>.
- [15] Ingo Simonis, Andreas Wytzisk. Web notification service [EB/OL]. [2014 - 09 - 21]. <http://52north.org/communities/sensorweb/wns/1.0.0/download.html>.
- [16] Bernd Resch. NoSQL Suitability for SWE - enabled sensing architectures [C] // Proceedings of the ACM International Symposium on Advances in Geographic Information Systems. Redondo Beach, USA, 2012.
- [17] 邸 铮. MongoDB 在煤炭行业 GIS 数据存储方面的应用 [J]. 煤炭技术, 2013, 32(4): 200 - 202.
- [18] MongoDB Inc. MongoDB documentation [EB/OL]. [2014 - 09 - 12]. <http://docs.mongodb.org/manual/release-notes/2.4/>.
- [19] 郭匡宇. 基于 MongoDB 的传感器数据分布式存储的研究与应用 [D]. 南京: 南京邮电大学, 2013: 37 - 63.
- [20] 王文龙. MongoDB 实战 [EB/OL]. [2014 - 09 - 12]. <http://www.doc88.com/p-0768012390926.html>.

(上接第 125 页)

- [2] 于师建, 程久龙, 王玉和. 覆岩破坏视电阻率变化特征研究 [J]. 煤炭学报, 1999, 24(5): 457 - 460.
- [3] 李 富, 刘树才, 胡文武, 等. 煤层底板破坏带电阻率变化规律研究 [J]. 能源技术与管理, 2006(3): 35 - 37.
- [4] 刘树才. 煤矿底板突水机理及破坏裂隙带演化动态探测技术 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2008.
- [5] 赵贤任, 刘树才, 李 富, 等. 煤层底板破坏带电阻率法异常特征研究 [J]. 工程地球物理学报, 2008, 5(2): 164 - 168.
- [6] 李建楼, 刘盛东, 张平松, 等. 并行网络电法在煤层覆岩破坏监测中的应用 [J]. 煤田地质与勘探, 2008, 36(2): 61 - 64.
- [7] 翟培合. 采场底板破坏及底板水动态监测系统研究—电阻率 CT 技术在煤矿中的应用 [D]. 青岛: 山东科技大学, 2005.
- [8] 程久龙, 王玉和, 翟培合. 地表浅部导水通道的高密度电阻率成像法精细探测研究 [J]. 煤炭学报, 2006, 30(12): 67 - 69.
- [9] 朱 鲁, 翟培合, 魏久传, 等. 工作面底板动态监测系统开发研究 [J]. 矿业安全与环保, 2008(6): 57 - 58.
- [10] 梁德贤, 翟培合, 王 莹. 三维电法在矿井防治水害中的应用 [J]. 工程地球物理学报, 2012, 9(4): 383 - 389.
- [11] 刘树才. 煤矿水文物探技术与应用 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2007.