

## 矿山微功耗安全监测物联网系统的研究与应用

张达<sup>1,2,3,4</sup>, 王济农<sup>1,2</sup>, 冀虎<sup>1,3,4</sup>, 纪浩<sup>1,3,4</sup>, 赵云峰<sup>5</sup>

- (1. 北京矿冶科技集团有限公司, 北京 102608; 2. 北京矿冶研究总院, 北京 100160;  
3. 中国-南非矿产资源综合利用联合研究中心, 北京 102608;  
4. 中国-南非矿产资源可持续开发利用“一带一路”联合实验室, 北京 102608;  
5. 国家知识产权局专利局专利审查协作北京中心, 北京 100160)

**摘 要:** 针对矿山企业安全监测系统存在的可靠性差、覆盖面小、成本高昂、维护不力、预警不准等突出问题, 提出了一种新的矿山微功耗安全监测物联网系统, 可为矿山的生产作业安全提供有效的技术支持。所提系统突破了微功耗信息采集、故障诊断与自愈、无线网络节能通信和在线智能分析预警等关键技术, 并在矿山企业的尾矿库在线监测、边坡监测和地压监测等典型业务中成功应用。现场实践表明, 所提系统相对于现有常规安全监测系统更加适合矿山作业条件, 智能传感器信噪比提升 1.4 倍, 综合能耗降低 10%, 可实现在线智能分析与快速预警。

**关键词:** 物联网; 安全监测; 云服务; 无线通信

**中图分类号:** TD76

**文献标识码:** A

**doi:** 10.11959/j.issn.1000-436x.2020034

## Research and application of micropower safety monitoring IoT system for mine

ZHANG Da<sup>1,2,3,4</sup>, WANG Jinong<sup>1,2</sup>, JI Hu<sup>1,2,3,4</sup>, JI Hao<sup>1,2,3,4</sup>, ZHAO Yunfeng<sup>5</sup>

1. BGRIMM Technology Group, Beijing 102608, China  
2. Beijing General Research Institute of Mining and Metallurgy Technology, Beijing 100160, China  
3. China-South Africa Joint Research Center for Mineral Resources Development, Beijing 102608, China  
4. China-South Africa "Belt and Road" Joint Laboratory for Sustainable Development and Utilization of Mineral Resources, Beijing 102608, China  
5. Beijing Center for Patent Examination Cooperation of Patent Office of State Intellectual Property Office, Beijing 100160, China

**Abstract:** In view of the problems existing in the safety monitoring system of China's mining enterprises, such as poor reliability, small coverage, high cost, weak maintenance and inaccurate early-warning, etc., a new safety monitoring IoT system with micro power consumption was proposed for Chinese mines to provide effective technical support for the safety of mine production and operation. The key technologies such as micro-power consumption information collection, fault diagnosis and auto-recovery, energy-saving wireless communication, online intelligent data analysis and early warning had been broken through by the proposed system, which had been successfully applied in typical cases such as online monitoring of tailings ponds, open-pit slop and ground pressure of domestic mining enterprises. Field practice shows that the proposed system is more suitable for mine operation conditions than the existing conventional safety monitoring system, the SNR of new sensor is increased by 1.4 times, the comprehensive energy consumption is reduced by 10%, which is suitable for online intelligent analysis and rapid warning.

**Key words:** Internet of things (IoT), safety monitoring, cloud service, wireless communication

收稿日期: 2019-10-21; 修回日期: 2020-01-02

基金项目: 国家重点研发计划基金资助项目 (No.2017YFC0804402)

**Foundation Item:** The National Key Research and Development Program of China (No.2017YFC0804402)

## 1 引言

目前,我国正在加速工业化和基础设施建设的进程,而这些建设对我国矿产资源行业的供给能力和产品质量提出了越来越高的要求<sup>[1]</sup>。在新的形势下,绿色开采、智能开采、深部开采等已成为矿业行业的研究热点<sup>[2-6]</sup>。随着矿山开采强度不断加大,开采深度日益增加,矿山面临着更严峻的开采安全保障问题,成为制约我国矿业行业发展的瓶颈问题<sup>[7-9]</sup>。

我国矿山企业大多已建立了人工或者在线安全监测系统,如尾矿库在线监测系统、露天边坡监测系统或地压监测系统等。然而,受高温潮湿、粉尘侵蚀、爆破冲击、作业破坏、极端天气等外界因素影响,或受传感器质量、频繁断电、通信故障、软件兼容性等内部因素的影响,现有“系统集成式”的矿山安全监测系统往往存在系统结构混乱、运行可靠性差和维护复杂性高等突出问题<sup>[10-13]</sup>。同时,这些安全监测系统由于建设及运维成本过高,仅适合在小尺度的局部范围应用,很难实现对矿山大范围的生产作业区域内潜在隐患的有效监测。另外,现有监测系统大多只是实现了数据的采集、传输、存储和展示等基本功能,并基于相关要求或工程设计参数进行单阈值简单报警,并未考虑监测对象本身的工艺特性和结构特性,容易造成误报或漏报,难以保障安全监测系统的预警有效性<sup>[14-15]</sup>。

经过多学科多年的努力,矿山的总体安全生产水平已得到显著提高,但重大事故仍时有发生,安全形势依然严峻<sup>[16]</sup>。物联网技术强调物物互联,在低功耗传感器网络<sup>[17-18]</sup>、智能化传感单元<sup>[19-21]</sup>、柔性无线网络<sup>[22-24]</sup>以及边缘计算技术<sup>[25]</sup>等方面可以为矿山安全监测提供有益的借鉴,凭借其多学科交叉融合特性为彻底解决矿山安全生产问题提供了全新的途径<sup>[26-27]</sup>。

本文针对矿山企业安全监测系统存在的可靠性差、覆盖面小、成本高昂、维护不力、预警不准等问题,结合物联网技术领域的最新成果,提出了一种新的矿山低功耗安全监测物联网系统及成套解决方案。首先,自主研发了低功耗物联网采集终端,可兼容接入各种标准的矿用监测传感器,在采用电池供电的情况下可连续工作2年,也可通过捕获光能、振动能、温差能等矿山容易获取的微能量,实现对矿山监测对象的大范围、长时间、低成本监

测;其次,研究开发了安全监测物联网系统的故障诊断与自愈技术,可对传感器、数据采集终端、微能量捕获系统、无线通信系统等进行健康状态的在线诊断和故障辨识,一旦出现故障,快速启动故障信息上报,并根据预设策略尝试进行系统恢复,从而保障安全监测系统的可靠运行;再次,开发了矿山生产作业区域物联网节点的节能通信技术,实现了无线智能传感器网络的动态路由、候选集选择策略、能量捕获预测和能量分配策略,使安全监测系统在电池供电或本地微能量捕获供电的情况下能够在低能耗的前提下实现有效的无线组网与数据上传;最后,建立了基于工业混合云的矿山安全监测分析云服务平台,结合对矿山监测对象的精细建模与数值模拟构建了专家系统,并结合人工智能算法实现了对矿山监测对象的异构监测数据的在线分析,进而实现了对监测对象潜在隐患的临灾预警。通过上述措施,构建了具有低功耗、低成本、高集成度、易部署、高可靠和云端分析预警等优势

## 2 总体架构设计

矿山低功耗安全监测物联网系统的主要目标是实现对矿山开采过程中关键监测对象的安全状态的有效管控,需完成安全监测数据的可靠、准确获取,高效、便捷上报及实时、智能分析。依照功能划分,该系统总体上可分为感知层、传输层、应用层三层架构,如图1所示。

### 2.1 感知层

感知层主要由矿用安全监测传感器、物联网采集终端组成,主要完成矿山监测对象的状态获取。

#### 1) 矿用安全监测传感器

矿用安全监测传感器是矿山安全监测物联网的最前端节点,由于安全监测参数种类众多,难以实现统一化设计与生产,因此要考虑兼容常见传感器厂商的接口和通信协议标准。同时,为了实现安全监测系统的低功耗,安全监测传感器一般选用一次变送的微传感器或传感单元,针对矿山工作条件进行二次封装和专项防护,并强调智能分析和边缘计算特性。这些传感器具有体积小、价格低、功耗小的特点,适合大范围、高密度的监测应用场合,以获取被监测对象尽可能全面的状态信息,从而形成多元异构数据,支撑数据分析与智能预警应用。

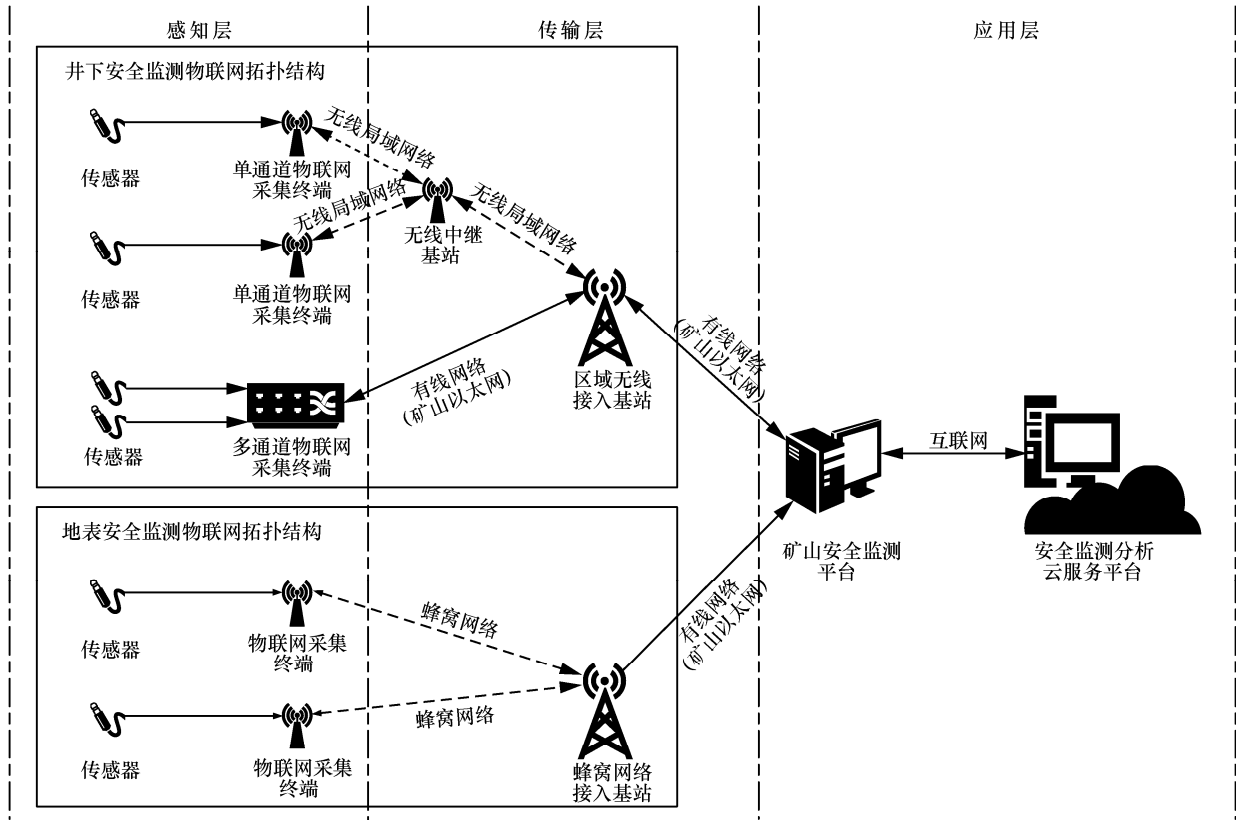


图 1 矿山微功耗安全监测物联网典型拓扑结构

### 2) 物联网采集终端

物联网采集终端的作用是对矿山安全监测传感器输出的物理信号进行采样，得到标准化的数字信号；同时，结合故障诊断算法，提高安全监测系统的可靠性。根据矿山安全监测传感器的布设密度及工艺要求，物联网采集终端一般包括单通道或多通道 2 种常见配置。

单通道物联网采集终端主要用于监测密度较小、在一定范围内仅需单一监测参数或者相邻监测点之间不便于布设线缆的应用场景。例如，在中线法筑坝尾矿坝的外坡表面位移监测、浸润线监测应用中，若物联网采集终端采用多通道，根据监测台网布设密度要求，必然需要在多个传感器与物联网采集终端之间采用有线连接，这些线缆在不断放矿冲刷条件下极易被破坏，而采用单通道物联网采集终端则可将传感器与物联网采集终端就近安装，大大减小工程布线量，提升系统的可靠性，并具有更好的适用性和性价比。与之类似，在尾矿库库水位监测或降雨量监测应用中，在特定区域内进行单通道数据采集就可完全满足监测要求，也比较适合采用单通道物联网采集终端。

多通道物联网采集终端适用于多个邻近传感器之间具备良好的线缆连接条件，且在终端附近台网监测密度较大的场合。在这些场合下，单独为每一个监测点设置独立的数据采集系统和数据通信系统性价比偏低，且易造成通信系统的过度复杂和低效，增加系统整体功耗。典型的多通道物联网采集终端应用场景是矿山井下微震监测系统，物联网采集终端大多置于某一生产中段的工作面附近，如采场脉外巷道内，并在终端附近安装 4~8 个通道的微震传感器，构成监测台网。由于各个传感器处于不同的区域，且常不通视，若每个传感器均采用独立的单通道物联网采集终端，则这些终端之间必然需要通过多跳的无线网络进行连接，需增加额外的无线网络中继基站，一方面损失了网络带宽，另一方面也增加了成本和功耗。而采用多通道物联网采集终端时，各个传感器均可通过线缆接入终端，再将采样后得到的数字信号以有线网络形式就近接入矿山井下以太网络，或者以无线网络形式连接到接入点。

矿用安全监测传感器与物联网采集终端之间多采用有线连接方式。物联网采集终端与传输层之

间优先采用有线连接方式，必要时采用单跳或多跳无线通信方式就近接入有线网络，尾矿库在线监测、边坡安全监测等地表应用在有条件的情况下还可借助第三方运营商的蜂窝移动网络进行通信。

## 2.2 传输层

传输层包含了用于数据通信的软硬件，主要用于感知层和应用层之间的监测数据、状态数据及控制指令的上传和下达。

物联网采集终端具备有线通信和无线通信 2 种数据传输方式，有线通信支持以太网通信、RS485 串行总线通信及 CAN (controller area network) 总线通信，无线通信支持 Wi-Fi、ZigBee、LoRa 及蜂窝移动网络等。

在典型的井下安全监测场景下，井下安全监测系统设置有多个物联网采集终端，各终端的无线通信模块构成了井下 MESH 网络，可进行柔性自组网通信，再通过数据交换网关就近接入井下以太网。针对长距离巷道通信场景，由于井下 MESH 网络大多分布于巷道沿线，常形成链式无线通信拓扑进行多跳无线通信，若终端之间距离较远或通视条件很差，还可能需补充中继通信节点以保障通信质量。

在典型的地表安全监测场景下，多个物联网采集终端常通过光纤进行数据通信，光纤通信具有本质防雷的特性，适合长距离信号传输，但容易被极端气象条件或者人工活动破坏，建设成本和运维成本高。为此，物联网采集终端支持通过第三方运营商的蜂窝移动网络实现数据上传，建站成本低，终端数量增减灵活，运维成本适中。随着我国 4G、5G 等移动通信技术的不断进步和数据流量资费标准的不断下调，这种通过运营商网络进行通信的解决方案逐步得到推广普及。

## 2.3 应用层

应用层主要实现安全监测系统的数据分析预警、安全监测系统状态诊断及针对监测对象的线上增值咨询服务等，包括矿山本地安全监测软件平台、部署在云端的矿山安全监测分析云服务平台及运行在以上 2 个平台上的多种专业化功能插件，如数据采集插件、故障诊断插件、数据处理插件、三维展示插件、数据库同步插件、系统发布插件、应急救援插件等。

应用层将感知层收集到的监测对象状态信息进行自动处理并基于人工智能技术及专家系统进行预警，供安全分析专家或者生产管控人员用于对

矿山安全管理和生产调度进行决策。

## 3 安全监测物联网系统的开发

本文提出的矿山微功耗安全监测物联网系统以智能传感器、物联网采集终端、无线节能通信模块为核心硬件基础，具有高集成度、微功耗等特点，适合矿山安全监测应用需求。

### 3.1 智能传感器

本文以矿用智能型微震检波阵列为例，阐述矿山低功耗安全监测物联网系统的智能传感器的技术要点。

矿用智能型微震检波阵列框架如图 2 所示。相对于常规传感器，智能传感器内置了微处理器，可实现波形预处理、在线分析诊断、远程控制等功能，从而实现边缘计算。本文研发了智能型微震检波阵列，它是在常规的三向检波器的基础上，通过在每一个方向上叠加传感器芯体，构成多维检波器

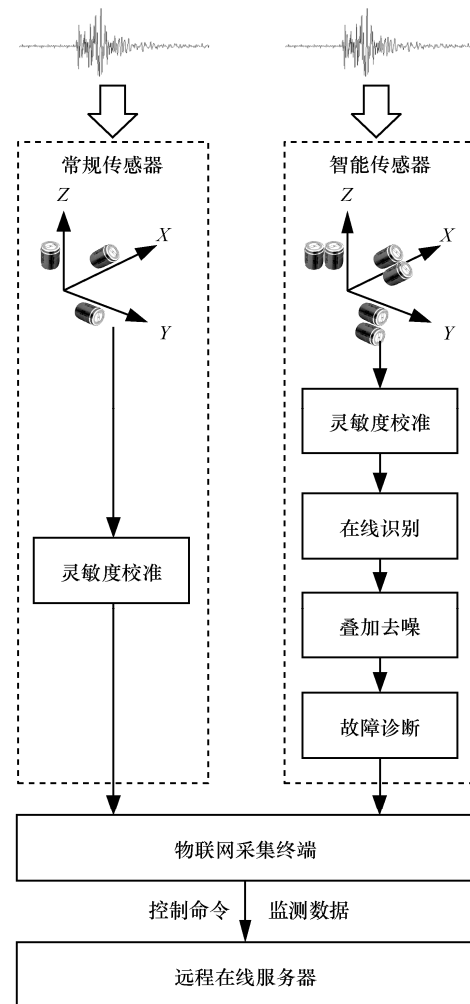


图 2 矿用智能型微震检波阵列框架

阵列,从而在小体积的情况下保障了传感器的高信噪比和灵敏度性能。智能传感器可实现网络中的智能传感器自动辨识与 ID 分配、自动去噪及传感器故障诊断、传感器芯体灵敏度校准等功能。

矿用智能型微震检波阵列核心模块包括信号接入与阻抗匹配模块和嵌入式滤噪模块。其中,信号接入与阻抗匹配模块安装于微震检波阵列内部;嵌入式滤噪模块叠加安装于信号接入与阻抗匹配模块顶端,该模块兼具传感器管理与故障诊断功能,是智能传感器的控制核心。

矿用智能型微震检波阵列的降噪原理如下。在检波器敏感单元最大灵敏度方向上,安装 $(n+1)$ 个等灵敏度的检波器敏感单元,检波器敏感单元间距为 $d$ ,同一振动信号依次传播到 $1\sim(n+1)$ 个检波器敏感单元。假设相邻 2 个检波器敏感单元接收到振动信号的相对时差为 $\Delta t$ ,则检波器敏感单元拾取振动信号在时域下叠加后的方程为

$$V(t) = v(t) + v(t - \Delta t) + \dots + v(t - n\Delta t) = \sum_{i=0}^n v(t - i\Delta t) \quad (1)$$

对方程进行傅里叶变换,可得频域下检波器敏感单元拾取振动信号的方程为

$$V(\omega) = \sum_{i=0}^n v(\omega) e^{j\omega i\Delta t} = v(\omega) \sum_{i=0}^n e^{j\omega i\Delta t} = v(\omega) e^{-j\omega \frac{n}{2}\Delta t} \frac{\sin\left(\omega \frac{(n+1)\Delta t}{2}\right)}{\sin\left(\omega \frac{\Delta t}{2}\right)} \quad (2)$$

其中, $v(\omega)$ 为 $v(t)$ 在频域下的表达式, $j$ 为时域转换到频域后的虚数单位, $\omega$ 为傅里叶变换后的频域变量。

记  $H(\omega) = e^{-j\omega \frac{n}{2}\Delta t} \frac{\sin\left(\omega \frac{(n+1)\Delta t}{2}\right)}{\sin\left(\omega \frac{\Delta t}{2}\right)}$ , 作为只与信号  $\omega$ 、时差  $\Delta t$  及其倍数有关的中间变量, 则

$$V(\omega) = v(\omega)H(\omega) \quad (3)$$

由此可见,增加检波器敏感单元后,其拾取振动信号的总振幅比单个检波器敏感单元的振幅增大了 $(n+1)$ 倍,与信号的到达时间无关,只与信号的频率和到达各敏感单元的相对时差有关。

下面,进一步分析经过组合的敏感单元所拾取信号中有效信号与随机噪声之间的关系。

已知输入信号 $v(t)$ 为有效信号和随机噪声的合成,可表示为

$$v(t) = s(t) + n(t) \quad (4)$$

其中, $s(t)$ 为有效信号, $n(t)$ 为随机噪声。由于随机噪声的瞬时幅值是随机的,并不确定,因此不能用随机噪声的瞬时幅值与有效信号振幅相比。因此选用均方值,通过描述随机信号偏离其平均值的幅度大小,进行信噪比(SNR)计算。

将信噪比定义为

$$\text{SNR} = \frac{A}{\sigma} \quad (5)$$

其中, $A$ 为有效信号振幅, $\sigma$ 为随机噪声的均方值。

当同一方向上的 $(n+1)$ 个检波器敏感单元进行信号叠加后,输出信号为

$$V(t) = v(t) + v(t - \Delta t) + \dots + v(t - n\Delta t) = \sum_{i=0}^n v(t - i\Delta t) = \sum_{i=0}^n s_i + \sum_{i=0}^n n_i \quad (6)$$

其中,叠加前的随机噪声均方值为

$$\sigma = \sqrt{D} = \sqrt{\frac{1}{n+1} \sum_{i=0}^n (n_i - \bar{n})^2}$$

$$\bar{n} = \frac{1}{n+1} \sum_{i=0}^n n_i$$

叠加后的随机噪声均方值为

$$\sigma' = \sqrt{D'} = \sqrt{\frac{1}{n+1} \left[ \sum_{i=0}^n (n_i - \bar{n}) \right]^2} = \sqrt{(n+1)D \left[ 1 + \frac{2}{n+1} \sum_{i=0}^{n-1} (n-1) \frac{R(l\Delta t)}{R(0)} \right]} \quad (7)$$

其中, $R$ 为相关函数,有

$$\frac{R(l\Delta t)}{R(0)} = \frac{l}{n-l} \frac{\sum_{i=1}^{n-l} (n_i - \bar{n})(n_{i+1} - \bar{n})}{\frac{l}{n} \sum_{i=1}^n (n_i - \bar{n})^2} \quad (8)$$

令  $\alpha = \frac{2}{n+1} \sum_{i=0}^{n-1} (n-1) \frac{R(l\Delta t)}{R(0)}$ , 则有

$$\sigma' = \sqrt{D'} = \sqrt{(n+1)D(1+\alpha)} \quad (9)$$

如果有效信号到达各个检波器敏感单元的震相相同，且检波器敏感单元收到的随机噪声是互不相关的，则  $\frac{R(I\Delta t)}{R(0)}=0$ ，计算叠加后和叠加前的信噪比比值为

$$k = \frac{SNR'}{SNR} = \frac{\frac{A}{\sigma'}}{\frac{A}{\sigma}} = \frac{\sigma'}{\sigma} = \frac{\sqrt{(n+1)D(1+\alpha)}}{\sqrt{D}} = \sqrt{n+1} \quad (10)$$

可见，由于有效信号存在相关性，而随机噪声不相关，通过检波器敏感单元信号叠加提高了信噪比。

本文基于丹麦 B&K 公司的振动校准系统给

定有效幅值固定、频率（30~1 130 Hz）可调的振动激励，通过分析振动台上常规检波器和智能检波阵列的相关性，在频域找到给定频率激励对应的振幅均方根最大值，并根据最大值设定阈值，提取有效信号，以此分别测试不同频率下检波阵列的信噪比。

本文开发的智能传感器基于检波器阵列结构和嵌入式信号处理算法，通过通道相关性提取有效信号，有效地抑制随机噪声干扰实现降噪，将信噪比提高 1.4 倍，分别如表 1 和表 2 所示。表 1 中，幅值阈值为 30%，相干系数>0.6。表 2 中，幅值阈值为 30%，相干系数>0.8。

**表 1** 检波器叠加信噪比分析 1

激励频率/Hz	信号类型	第一通道			第二通道		
		信号 S  <sup>2</sup> /V <sup>2</sup>	噪声 M  <sup>2</sup> /V <sup>2</sup>	SNR 提高	信号 S  <sup>2</sup> /V <sup>2</sup>	噪声 M  <sup>2</sup> /V <sup>2</sup>	SNR 提高
30	处理前	3.51	1.63×10 <sup>-4</sup>	2.26	3.51	7.26×10 <sup>-3</sup>	2.54
	处理后	3.51	7.22×10 <sup>-5</sup>		3.51	2.86×10 <sup>-3</sup>	
60	处理前	5.73	1.79×10 <sup>-4</sup>	1.92	5.77	7.19×10 <sup>-3</sup>	2.63
	处理后	5.73	9.34×10 <sup>-5</sup>		5.77	2.73×10 <sup>-3</sup>	
90	处理前	4.82	1.76×10 <sup>-4</sup>	1.96	4.88	7.31×10 <sup>-3</sup>	2.83
	处理后	4.82	8.97×10 <sup>-5</sup>		4.88	2.58×10 <sup>-3</sup>	
120	处理前	4.14	1.16×10 <sup>-4</sup>	3.97	4.24	6.90×10 <sup>-3</sup>	3.15
	处理后	4.14	2.92×10 <sup>-5</sup>		4.24	2.19×10 <sup>-3</sup>	
160	处理前	3.53	1.54×10 <sup>-4</sup>	2.12	3.62	7.30×10 <sup>-3</sup>	2.87
	处理后	3.53	7.27×10 <sup>-5</sup>		3.62	2.54×10 <sup>-3</sup>	
210	处理前	3.02	1.71×10 <sup>-4</sup>	2.09	3.10	6.84×10 <sup>-3</sup>	2.82
	处理后	3.02	8.15×10 <sup>-5</sup>		3.10	2.43×10 <sup>-3</sup>	
260	处理前	2.71	1.66×10 <sup>-4</sup>	2.10	2.79	7.04×10 <sup>-3</sup>	2.95
	处理后	2.71	7.90×10 <sup>-5</sup>		2.79	2.39×10 <sup>-3</sup>	
330	处理前	2.63	1.79×10 <sup>-4</sup>	2.11	2.72	6.98×10 <sup>-3</sup>	2.82
	处理后	2.63	8.47×10 <sup>-5</sup>		2.72	2.48×10 <sup>-3</sup>	
430	处理前	2.62	1.45×10 <sup>-4</sup>	2.37	2.72	7.10×10 <sup>-3</sup>	3.00
	处理后	2.62	6.10×10 <sup>-5</sup>		2.72	2.37×10 <sup>-3</sup>	
630	处理前	2.37	1.51×10 <sup>-4</sup>	2.08	2.48	6.91×10 <sup>-3</sup>	3.06
	处理后	2.37	7.26×10 <sup>-5</sup>		2.48	2.26×10 <sup>-3</sup>	
830	处理前	2.32	1.60×10 <sup>-4</sup>	2.27	2.43	6.89×10 <sup>-3</sup>	3.05
	处理后	2.32	7.02×10 <sup>-5</sup>		2.43	2.26×10 <sup>-3</sup>	
930	处理前	2.30	1.51×10 <sup>-4</sup>	2.47	2.42	6.97×10 <sup>-3</sup>	3.05
	处理后	2.30	6.12×10 <sup>-5</sup>		2.42	2.29×10 <sup>-3</sup>	
1 130	处理前	2.30	1.36×10 <sup>-4</sup>	2.43	2.43	6.71×10 <sup>-3</sup>	2.94
	处理后	2.30	5.62×10 <sup>-5</sup>		2.43	2.28×10 <sup>-3</sup>	

表 2 检波器叠加信噪比分析 2

激励频率/Hz	信号类型	第一通道			第二通道		
		信号 $ S ^2/V^2$	噪声 $ N ^2/V^2$	SNR 提高	信号 $ S ^2/V^2$	噪声 $ N ^2/V^2$	SNR 提高
30	处理前	3.51	$1.63 \times 10^{-4}$	2.45	3.51	$7.26 \times 10^{-3}$	2.68
	处理后	3.51	$6.67 \times 10^{-5}$		3.51	$2.71 \times 10^{-3}$	
60	处理前	5.73	$1.79 \times 10^{-4}$	2.06	5.77	$7.19 \times 10^{-3}$	2.76
	处理后	5.73	$8.70 \times 10^{-5}$		5.77	$2.61 \times 10^{-3}$	
90	处理前	4.82	$1.76 \times 10^{-4}$	2.62	4.88	$7.31 \times 10^{-3}$	2.94
	处理后	4.82	$6.70 \times 10^{-5}$		4.88	$2.49 \times 10^{-3}$	
120	处理前	4.14	$1.16 \times 10^{-4}$	4.33	4.24	$6.90 \times 10^{-3}$	3.24
	处理后	4.14	$2.67 \times 10^{-5}$		4.24	$2.13 \times 10^{-3}$	
160	处理前	3.53	$1.54 \times 10^{-4}$	2.12	3.62	$7.30 \times 10^{-3}$	2.87
	处理后	3.53	$6.81 \times 10^{-5}$		3.62	$2.45 \times 10^{-3}$	
210	处理前	3.02	$1.71 \times 10^{-4}$	2.19	3.10	$6.84 \times 10^{-3}$	2.92
	处理后	3.02	$7.79 \times 10^{-5}$		3.10	$2.34 \times 10^{-3}$	
260	处理前	2.71	$1.66 \times 10^{-4}$	2.19	2.79	$7.04 \times 10^{-3}$	3.05
	处理后	2.71	$7.58 \times 10^{-5}$		2.79	$2.31 \times 10^{-3}$	
330	处理前	2.63	$1.79 \times 10^{-4}$	2.67	2.72	$6.98 \times 10^{-3}$	2.94
	处理后	2.63	$7.87 \times 10^{-5}$		2.72	$2.37 \times 10^{-3}$	
430	处理前	2.62	$1.45 \times 10^{-4}$	2.42	2.72	$7.10 \times 10^{-3}$	3.07
	处理后	2.62	$5.98 \times 10^{-5}$		2.72	$2.31 \times 10^{-3}$	
630	处理前	2.37	$1.51 \times 10^{-4}$	2.25	2.48	$6.91 \times 10^{-3}$	3.18
	处理后	2.37	$6.72 \times 10^{-5}$		2.48	$2.17 \times 10^{-3}$	
830	处理前	2.32	$1.60 \times 10^{-4}$	2.35	2.43	$6.89 \times 10^{-3}$	3.16
	处理后	2.32	$6.80 \times 10^{-5}$		2.43	$2.18 \times 10^{-3}$	
930	处理前	2.30	$1.51 \times 10^{-4}$	3.52	2.42	$6.97 \times 10^{-3}$	3.24
	处理后	2.30	$4.30 \times 10^{-5}$		2.42	$2.15 \times 10^{-3}$	
1 130	处理前	2.30	$1.36 \times 10^{-4}$	3.19	2.43	$6.71 \times 10^{-3}$	3.05
	处理后	2.30	$4.28 \times 10^{-5}$		2.43	$2.20 \times 10^{-3}$	

### 3.2 物联网采集终端

智能传感器获取矿山监测对象的状态数据后，需要通过物联网采集终端实现数字化。本文围绕矿山典型的安全在线监测系统需求及其工艺难点与特点，针对尾矿库在线监测系统、边坡监测系统、地压监测系统、地下矿山安全避险“六大系统”等典型矿山安全监测应用进行概括凝练，提出了适合矿山安全监测要求的新型的低功耗物联网采集终端。

该终端的硬件结构如图 3 所示，主要包括了核心处理器、外部接口模块、传感器及温度采集模块、

按键及指示灯、温湿度监测模块、碰撞跌落检测模块、无线通信模块、微能量缓冲及储能模块、电量监测模块等主体功能模块。

物联网采集终端支持内部电池供电与外部供电，甚至可通过能量捕获装置对矿山常见的光能、热能、电磁能、温差能、振动能等微弱杂散能量进行收集，为物联网采集终端提供电能，大幅简化了安全监测系统的安装要求和运行维护要求。

另外，该物联网采集终端具备完善的故障诊断能力，能够对智能传感器、供电线缆、通信系统及

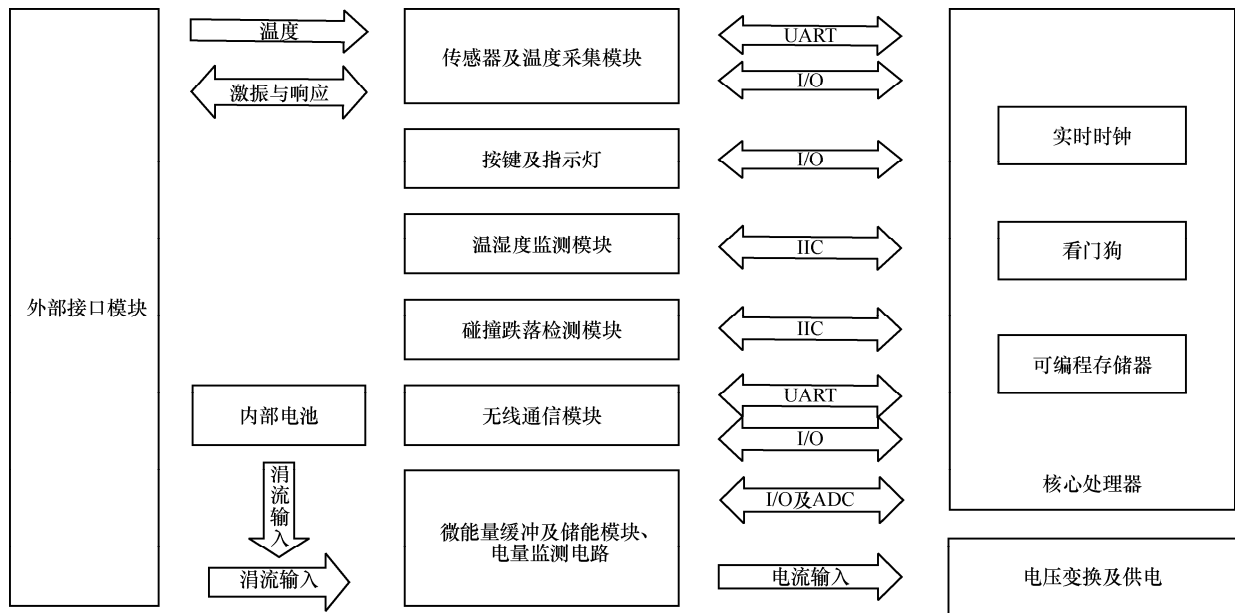


图 3 物联网采集终端硬件结构

自身运行状态进行在线评估。

物联网采集终端采用了高集成度的核心电路设计，便于在矿山监测对象中进行大范围高密度安装应用，配备内置 EEPROM 存储器，确保在网络通信失败的情况下能够将数据暂存于本地，待网络恢复后再同步到云端进行处理及分析。

物联网采集终端针对矿山常用的应力、应变、

位移等典型传感器的工作原理、信号特点、通信协议、状态特征及常见故障等进行了总结提炼，针对传感器失效、供电异常、线路损坏等典型故障建立了自检模型，如表 3 所示。

所提终端采用了低功耗设计，通过能量缓冲管理、智能休眠唤醒及模块功耗管理等方式，从软硬件各个细节有效控制和降低了系统功耗。经实测，

表 3 传感器主要故障自检模型参数

故障位置	故障源	状态类型	模型参数	阈值或标准
传感器	线圈或信号线	短路	线圈电阻	$R < 50 \Omega$
		正常		$50 \Omega \leq R \leq 10 \text{ k}\Omega$
		接触不良		$10 \text{ k}\Omega < R < 30 \text{ k}\Omega$
		断路或未接		$R \geq 30 \text{ k}\Omega$
	振弦	正常	频率	$f \geq 30 \text{ Hz}$
		故障		$f < 30 \text{ Hz}$
内置温度传感器		短路	热敏电阻	$R < 100 \Omega$
		正常		$100 \Omega \leq R \leq 50 \text{ k}\Omega$
		断路或未接		$R > 50 \text{ k}\Omega$
诊断装置	无线信号质量	优	接收功率	$P > -40 \text{ dBm}$
		良		$-80 \text{ dBm} \leq P \leq -40 \text{ dBm}$
		差		$P < -80 \text{ dBm}$
	主电源电量	正常	电源电压	$V > 70\% \text{ 满电电压}$
		电量低		$10\% \text{ 满电电压} \leq V \leq 70\% \text{ 满电电压}$
储能能量	电量低	节点电压	$V < 80\% \text{ 满电电压}$	
	正常		$V \geq 80\% \text{ 满电电压}$	

在供电电压为 3.7 V 时, 该装置的静态消耗电流仅为 8.1  $\mu$ A; 在进行数据采集时, 平均电流约为 40 mA, 完成时间为 1.36 s; 在监测信息无线上传时平均电流约为 44 mA, 完成时间为 14.5 ms, 其中峰值发送电流为 130 mA, 发送时间为 1.7 ms; 在进行指令接收时平均电流约为 35 mA, 完成时间为 3 s。在故障诊断与自愈功能每小时采集并上报一次的策略模式下, 平均动态电流消耗低于 30  $\mu$ A, 若使用单节 2.6 Ah 的 14500 规格的锂电池供电, 系统连续运行寿命可达 8 年以上, 功耗测试的结果如表 4 所示。

### 3.3 无线节能通信模块

物联网采集终端获取的在线监测数据需要传输至数据分析与处理服务器进行数据后处理。本文在进行无线通信过程中, 充分考虑了各个节点的物联网采集终端的电能消耗状态和电能剩余状态, 在电能较充裕时, 以较高的压缩率和传输速率进行通信; 否则, 要相应降低压缩率和传输速率。

基于这一原则, 建立无线通信网络模型, 并考虑传输节点在接收、转发、采样和压缩数据过程中的能量消耗, 动态地在每个时槽内为每个节点最优地分配数据采样速率并选择相应的数据压缩策略, 在保持节点电量不耗尽的条件下最大化网络收集的数据总量。

首先, 将每个节点的处理策略进行归一化建模。假设一个基于数据压缩的无线传感网络包括  $N$  个传感器节点和一个数据收集 sink 节点, 节点有效通信半径为  $R$ 。用  $p_j(t)$  和  $C_j(t)$  分别表示节点  $j$  在时槽  $t$  内汇聚树上父节点集合和子节点集合。假设在每个时槽  $t$  内, 网络中的各个节点稳定地进行采样, 记节点  $j$  的采样速率为  $r_j(t)$ , 节点  $j$  传送单位比特长度的数据给其父节点  $p$  的能耗为  $c_{jp}^{rx}$ , 接收单位比特长度的数据的能耗为  $c^{rx}$ , 采样单位比特长度的数

据的能耗为  $c^s$ 。

对于一个节点  $j$ , 定义其可压缩的数据流和不可压缩的数据流分别为  $g_j^c(t)$  和  $g_j^u(t)$ , 则

$$g_j^c(t) = \sum_{m \in C_j(t)} f_{mj}^u(t) + r_j(t) \quad (11)$$

$$g_j^u(t) = \sum_{m \in C_j(t)} f_{mj}^c(t) \quad (12)$$

其中,  $f_j^c(t)$  为经过压缩的数据流,  $f_j^u(t)$  为未经压缩的数据流。

设节点  $j$  在时槽  $t$  下对于其传输的数据  $g_j^c(t)$  采用高压缩比、低压缩比和不压缩 3 种方式的比例分别为  $x_j(t)$ 、 $y_j(t)$  和  $1 - x_j(t) - y_j(t)$ , 则可将压缩速率和采样速率的能耗描述为

$$C_j(t) = \Delta(c^s r_j(t) + c_{bwt}^c x_j(t) g_j^c(t) + c_{lzw}^c y_j(t) g_j^c(t) + c_{jp_j(t)}^{rx} f_{jp_j(t)}(t) + c^{rx} \sum_{m \in C_j(t)} f_{mj}(t)) \quad (13)$$

其中, 有

$$\begin{cases} f_{jp_j(t)}(t) = f_{jp_j(t)}^c(t) + f_{jp_j(t)}^u(t) \\ f_{jp_j(t)}^c(t) = (1 - cr_{bwt}) x_j(t) g_j^c(t) + (1 - cr_{lzw}) y_j(t) g_j^c(t) + g_j^u(t) \\ f_{jp_j(t)}^u(t) = (1 - x_j(t) - y_j(t)) g_j^c(t) \end{cases} \quad (14)$$

其中,  $cr_{lzw}$  和  $c_{lzw}^c$  分别为采用 S-LZW 算法<sup>[27]</sup>的压缩比和单位比特压缩能耗,  $cr_{bwt}$  和  $c_{bwt}^c$  分别为采用 S-LZW-BWT<sup>[27]</sup>算法的压缩比和单位比特压缩能耗。

在这种情况下, 可将无线节能通信问题转化为最大化网络数据采样总量问题, 表示为

$$\max_{\{r(t), x(t), y(t), f(t)\}} \sum_{j=1}^N r_j(t)$$

s.t. 式(11)~式(14)

$$C_j(t) \leq \lambda_j(t) \Delta A + B_j^{rc}(t) \quad (15)$$

表 4 物联网采集终端功耗测试结果

测试项	测试电压/V	峰值电流/mA	峰值持续时间/ms	平均电流/mA	持续时间/ms	平均功耗/mW	耗电量/(mA·s)
按键响应	3.7	44	1.7	40	28	148	1.12
传感器采集	3.7	68	20	40	1 360	148	54.4
信息上报	3.7	130	1.7	44	14.5	162.8	0.638
指令接收	3.7	36	2	35	3 000	129.5	105
静态待机	3.7	0.008 1	—	0.008 1	—	0.029 97	—

$$0 \leq x_j(t), y_j(t) \leq 1 \quad (16)$$

$$j \in N \quad (17)$$

其中,  $r(t) = \{r_j(t) | j \in N\}$ ,  $x(t), y(t)$  同理,  $f(t)$  为每条链路上的数据流。式(15)为能量约束条件,  $A$  为传感器节点能量供给能力,  $B_j^e(t)$  为当前节点的电池剩余电量。

采用最优化方法对上述问题进行求解, 将求解后的最优策略作为物联网采集终端的通信策略, 并在安全监测物联网云服务平台上进行各终端通信行为的全局调配, 进一步降低监测系统的能耗。

### 3.4 矿山安全监测物联网云服务平台

矿山低功耗安全监测物联网系统将获取到的监测对象状态数据传输至数据处理与灾害分析预警模块进行后续处理。本文提出了“专家会诊监管、风险分级监管、网络化闭环监管”多维一体的安全监测分析云服务平台, 全面实现对矿山开采过程各种典型灾害隐患的立体监管, 具备资料管理、数据报表、风险登记、指标评价、系统运维、异地容灾、状态巡检、远程诊断、灾害预警、态势分析、专家评判等功能, 也可与情景构建与应急救援相结合, 实现深部开采过程地压灾害的演-防-控一体化。

该平台采用工业混合云架构, 以第三方公有云平台作为载体, 实现矿山现场在线监测数据的上传、存储、清洗、预处理和转发服务, 云平台根据安全监测业务的处理量柔性分配网络资源和计算资源。

当监测数据完成预处理之后, 系统将监测数据推送至矿山本地和第三方服务机构的私有云平台, 实现数据的异地容灾存储, 也为高效的预警分析和专家评判提供平台支撑。当矿山网络出现故障时, 监测数据存储于物联网采集终端, 网络恢复后, 数据自动同步到云端进行处理。

安全监测分析云服务平台实现全自动的数据分析处理与预警服务, 具体算法以组件方式挂载在云服务平台上进行调用, 根据研究开发进度不断迭代更新。下面以尾矿库调洪演算预警为例进行阐述。

调洪演算程序的输入包括洪水计算结果、水位-下泄流量关系和水位-调洪库容关系, 输出结果为尾矿库水位过程以及尾矿库是否安全的提示, 如图 4 所示。

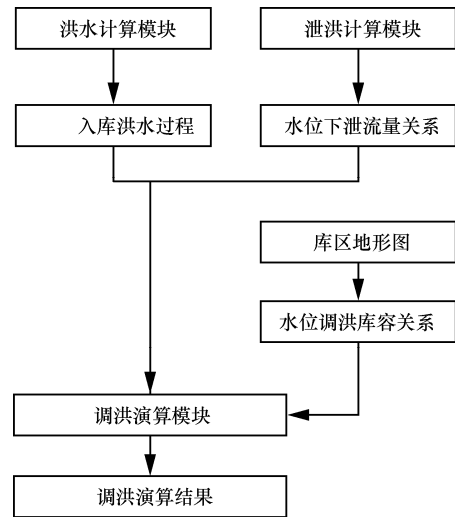


图 4 调洪演算及预警流程

具体的调洪演算及预警步骤如下。

**Step1** 用多项式 (或其他) 函数拟合水位-调洪库容关系曲线, 得到两者之间的关系式  $V_{调} = F(Z)$ 。

**Step2** 根据入库洪水过程线计算第一个时段的入流洪水总量  $W_{\lambda} = 60\Delta t \frac{Q_0 + Q_1}{2}$ , 其中  $W_{\lambda}$  单位为  $m^3$ ;  $Q_0$  和  $Q_1$  分别为  $t$  时刻和  $t+1$  时刻的洪水流量, 单位为  $m^3/s$ ;  $\Delta t$  为时段长, 计算时取为 10 min。

**Step3** 输入起始水位高程  $Z_0$ , 根据  $V_{调} = F(Z)$  计算初始水位  $Z_0$  对应的库容  $V_0$ 。

**Step4** 根据水位-泄洪函数关系  $q = f(z)$  计算  $Z_0$  对应的泄流量  $q_0$ 。

**Step5** 若  $\frac{Q_0 + Q_1}{2} > q_0$ , 假设时段末水位为  $Z_{01} = Z_0 + 0.001$ , 计算该水位对应的泄流量  $q_{01}$ 。

**Step6** 云服务平台启动, 自动计算出  $60\Delta t \frac{Q_t + Q_{t+1}}{2} + V_0 - 60\Delta t \frac{q_t + q_{01}}{2} = V'_0$ 。

**Step7** 根据水位-库容关系  $V_{调} = F(Z)$ , 计算  $Z_{01}$  对应的库容  $V_{01}$ 。

**Step8** 判断  $|V'_0 - V_{01}| \leq 10$ , 若符合条件, 则  $Z_{01}$  即为第一个时段末的水位。

**Step9** 若不符合条件, 继续假设  $Z_{02} = Z_{01} + 0.001$ , 计算  $q_{02}$ , 重复 Step4~Step8 进行计算, 直到找到符合条件的时段末水位。

**Step10** 继续进行下一个时段入流量计算。转至 Step2, 计算下个时段入流量。用计算所得上个时段末水位代替 Step3 和 Step4 中的起始水位  $Z_0$  进

行计算，得到该时段的时段末水位，直到计算完入流的所有时段。

**Step11** 得到时间-水位过程线，从该过程线中读取最高水位  $H_{max}$ 。

**Step12** 读取尾矿库的尾矿坝高程  $H_{坝}$ ，当前子坝高程  $H_{子坝}$ ，计算尾矿库的安全超高  $H_{超高} = H_{坝} - H_{子坝} - H_{max}$ 。

**Step13** 读取尾矿库干滩坡比  $\lambda$ ，计算尾矿库干滩长度  $L_{滩} = \frac{H_{超高}}{\lambda}$ 。

**Step14** 根据尾矿库安全等级阈值，来判断尾矿库是否安全。 $H_{阈红}$ 、 $H_{阈橙}$ 、 $H_{阈黄}$  分别为红色、橙色和黄色预警阈值， $L_{阈红}$ 、 $L_{阈橙}$ 、 $L_{阈黄}$  同理，则

- ① 若  $H_{超高} < H_{阈红}$  或  $L_{滩} < L_{阈红}$  发布红色预警。
- ② 若  $H_{阈红} \leq H_{超高} < H_{阈橙}$  或  $L_{阈红} \leq L_{滩} < L_{阈橙}$  发布橙色预警。
- ③ 若  $H_{阈橙} \leq H_{超高} < H_{阈黄}$  或  $L_{阈橙} \leq L_{滩} < L_{阈黄}$  发布黄色预警。
- ④ 若  $H_{阈黄} \leq H_{超高}$  或  $L_{阈黄} \leq L_{滩}$  无预警。

**Step15** 显示判断结果。

### 4 现场实验

基于矿山微动耗安全监测物联网系统，本文构建了矿山安全监测物联网云服务平台框架，如图5所示，

并在 20 余家矿山企业上线运行，达到了预期效果。

本文以某铜镍矿的地压监测系统和某铜矿尾矿库在线监测系统为例进行介绍。在铜镍矿中，曾安装过国外某知名地压监测系统，各中段布置的数据采集基站及传感器数量如下。

20 中段：一个 6 通道数据采集基站，3 个单向、一个三向传感器。

22 中段：2 个 6 通道数据采集基站，5 个单向、2 个三向传感器。

24 中段：一个 4 通道、一个 6 通道数据采集基站，4 个单向、2 个三向传感器。

26 中段：一个 8 通道数据采集基站，2 个三向传感器。

因此，共设有 6 个数据采集基站和 19 个传感器，共有 33 个通道。

本文研制的物联网采集终端与矿用智能型微震检波阵列于 2018 年 10 月在该矿进行安装实验，经论证分析，总共安装 4 个物联网采集终端替换原先的采集基站，每个中段部署一个；16 个智能微震检波阵列，其中 20 中段 4 个，22 中段 5 个，24 中段 5 个，26 中段 2 个。经实际对比，采集到的数据经处理分析，时间段的地压事件定位云图满足要求，波形拾取效果优于原有地压监测系统，如图 6 所示。同时应用的传感器数量大大减少，降低了成本。

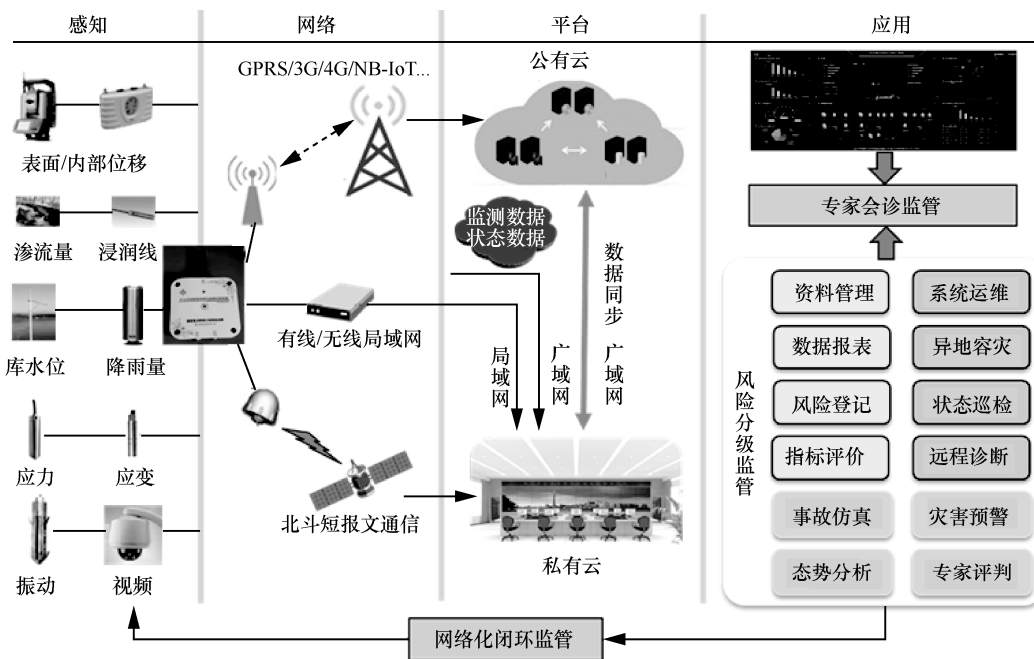
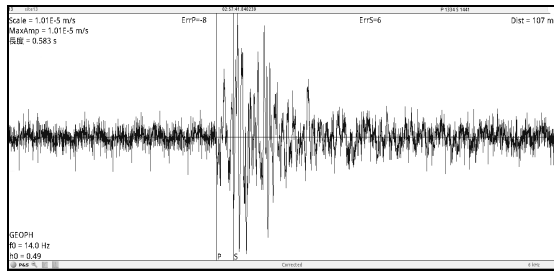
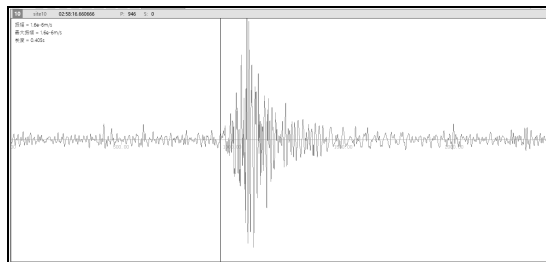


图 5 矿山安全监测物联网云服务平台框架



(a) 原系统



(b) 本文系统

图 6 拾取波形质量对比

2019 年 3 月 16 日，某铜矿尾矿库因当地电网线路问题停工 3 天，但是在现场进行实验的物联网采集终端和智能传感器因为微功耗设计，依靠自身的内部供电以及能量捕获装置继续工作，3 天内采集到的监测数据存储在采集终端的内置 EEPROM 里，在尾矿库控制室电力恢复后将数据同步到云端处理，没有造成监测数据的缺失。

2019 年 5 月 27 日，某铜镍矿因爆破开采作业，原先的地压监测系统传感器通信线路受损，失去联系。此时新安装的智能微震检波阵列由于采用基于 ZigBee 的局域无线节能通信方式，并未受到现场通信条件影响。同时，采集终端实时进行故障诊断，迅速定位通信故障点，现场人员仅仅花费一个下午就恢复了原监测系统传感器的通信。

传统的地压监测系统数据处理方式需要专家从矿山取得未经处理的监测数据，手动应用软件进行滤波、P 波 S 波拾取、空间定位，再通过聚类分析、应力反演、震源机制等系统分析来对矿山进行生产作业指导。本文研究开发的矿山安全监测分析云服务平台能够实时地接收矿山安全监测系统采集到的数据，并自动处理计算，再通过图表或三维显示计算结果，如图 7 所示，专家及现场管控人员能够通过多平台对云平台进行访问、查看、处理计算结果并结合经验进行分析，极大地提高了信息处理效率，减少了经验结论的时滞性。

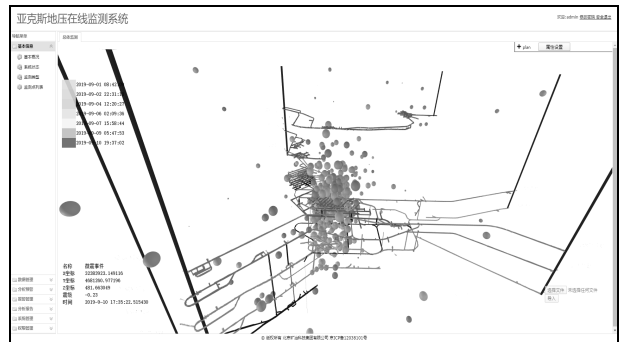
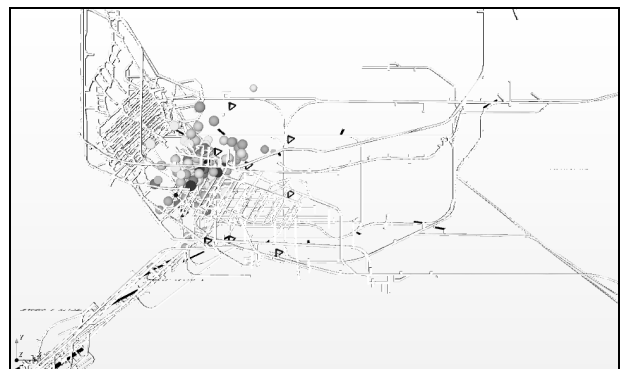


图 7 某铜镍矿地压监测系统三维定位

在无人值守的自动计算处理情况下，本文提出的系统微震定位所得图中也明显少于原系统，如图 8 所示。



(a) 原系统定位结果



(b) 本文系统定位结果

图 8 微震定位结果对比

传统的尾矿库监测系统仅针对单一指标进行监测预警，本文建立的包含在云平台中的尾矿库在线监测系统以水位、应力、位移等多源信息的融合，建立不同阶段、不同量纲之间的综合评估模型及预警指标，提高风险判断的可靠性，如图 9 所示。当判断结果出现灾情风险时，在本文研究开发的矿山安全监测分析云服务平台的首页进行对应矿山的闪烁预警。

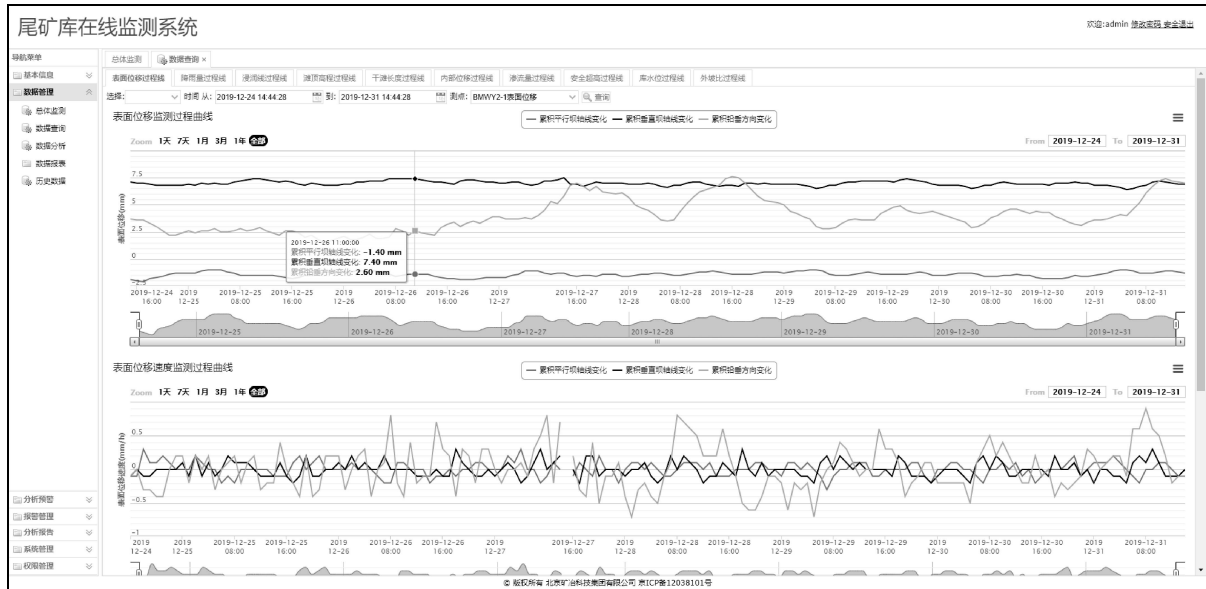


图 9 尾矿库在线监测平台多源参数计算曲线

### 5 结束语

本文针对矿山企业安全监测系统存在的可靠性差、覆盖面小、成本高昂、维护不力、预警不准等问题，提出了一种新的矿山微功耗物联网安全监测系统，该系统相对于传统安全监测系统具有多个优点。

1) 一体化设计的物联网数据采集终端，具有更紧凑的结构和超低功耗，可通过电池实现超长时间工作，也可通过微能量捕获等方式连续提供能量工作。

2) 系统对于智能传感器、物联网采集终端以及其他相关模块进行智能故障诊断，及时发现数据异常和系统故障，并启动故障上报和自愈流程。

3) 通过无线数据节能通信，实现基于 ZigBee 等方式的低能耗无线局域通信，或者基于第三方供应商实现无线接入，不受现场通信条件限制。

4) 可基于矿山安全监测分析云服务平台实现现场在线数据的高可靠存储，防止现场采集存储服务器故障导致数据丢失。

5) 通过在线数据分析预警算法，结合专家现场诊断服务，实现真正有效的监测预警和临灾处置。

### 参考文献:

[1] 陈其慎. 中国矿业发展趋势及竞争力评价研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2013.  
CHEN Q S. The development trend of China's mining industry and competitiveness rating research[D]. Beijing: China University of

Geosciences(Beijing), 2013.  
[2] KRZIROGLOU M E, BOYLE D E, YEATMAN E M, et al. Opportunities for sensing systems in mining[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2017, 13(1): 278-286.  
[3] 古德生. 地下金属矿采矿科学技术的发展趋势[J]. 黄金, 2004, 1: 18-22.  
GU D S. The development tendency of mining science and technology of underground metal mine[J]. Gold, 2004, 1: 18-22.  
[4] 乔繁盛. 建设绿色矿山, 发展绿色矿业[J]. 中国矿业, 2009, 18(8): 4-6+16.  
QIAO F S. Building the green mine for the development of green mining[J]. China Mining Magazine, 2009, 18(8): 4-6+16.  
[5] 古德生. 智能采矿触摸矿业的未来[J]. 矿业装备, 2014, 1: 24-26.  
GU D S. Intelligent mining touches the future of mining industry[J]. Mining Equipment, 2014, 1: 24-26.  
[6] 吴涛, 张云鹏, 杨晓伟, 等. 固体矿产资源智能采矿关键技术研究[J]. 地质与勘探, 2017, 53(3): 558-564.  
WU T, ZHANG Y P, YANG X W, et al. The key technologies serving intelligent exploitation of solid mineral resources[J]. Geology and Exploration, 2017, 53(3): 558-564.  
[7] 古德生, 李夕兵. 有色金属深井采矿研究现状与科学前沿[J]. 矿业研究与开发, 2003, 1: 1-5.  
GU D S, LI X B. Science problems and research state of deep mining in metal and nonferrous mines[J]. Mining Research and Development, 2003, 1: 1-5.  
[8] SCHROEDER B A. On-line monitoring: a tutorial[J]. Computer, 1995, 28(6): 72-78.  
[9] 杨步生. 矿山安全形势和安全管理方法分析[J]. 世界有色金属, 2017, 9: 185-186.  
YANG B S. Analysis of mine safety situation and safety management method[J]. World Nonferrous Metals, 2017, 9: 185-186.  
[10] OTHMANA F, SHAZALIB K. Wireless sensor network applications: a study in environment monitoring system[J]. Procedia Engineering, 2012, 41(41): 1204-1210.

- [11] NUTTER R S, ALDRIDGE M D. Status of mine monitoring and communications[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1988, 24(5): 820-826.
- [12] HENRIQUES V, MALEKIAN R. Mine safety system using wireless sensor network[J]. IEEE Access, 2016, 4: 3511-3521.
- [13] 王利岗, 余乐文, 赵冰峰. 极端环境下矿山安全监测系统综合保障技术[J]. 有色金属工程, 2018, 8(4): 101-105.  
WANG L G, YU L W, ZHAO B F. Comprehensive safeguard technology of mine safety monitoring system in extreme environment[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2018, 8(4): 101-105.
- [14] DONG L, SHU W W, SUN D Y, et al. Pre-alarm system based on real-time monitoring and numerical simulation using internet of things and cloud computing for tailings dam in mines[J]. IEEE Access, 2017, 5: 21080-21089.
- [15] NUTTE R S. Hazard evaluation methodology for computer-controlled mine monitoring/control systems[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1983, 19(3): 445-449.
- [16] 杨军. 煤矿安全风险评价与预警研究[D]. 北京: 中国矿业大学, 2013.  
YANG J. Study on appraisal and early-warning of safety risk of coal mines[D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2013.
- [17] 冯凯, 郭雨, 赵端, 等. 井下热能收集装置研究与设计[J]. 电子技术应用, 2018, 44(12): 93-96.  
FENG K, GUO Y, ZHAO D, et al. Research and design of downhole thermoelectric energy harvesting device[J]. Application of Electronic Technique, 2018, 44(12): 93-96.
- [18] WANG J H, GUO Y F, JIA Y, et al. Modeling and application of the underground emergency hedging system based on internet of things technology[J]. IEEE Access, 2019, 7: 63321-63335.
- [19] 王继水, 曹帅. 基于物联网的矿山环境在线实时监测系统研究与实现[J]. 计算机测量与控制, 2012, 20(2): 342-344.  
WANG J S, CAO S. System's research and implementation of mine environment real-time online monitoring based on M2M[J]. Computer Measurement & Control, 2012, 20(2): 342-344.
- [20] 刘统玉, 王纪强, 孟祥军, 等. 面向矿山安全物联网的光纤传感器[J]. 工矿自动化, 2018, 44(3): 1-7.  
LIU T Y, WANG J Q, MENG X J, et al. Optical fiber sensor for mine safety Internet of things[J]. Industry and Mine Automation, 2018, 44(3): 1-7.
- [21] WU H, GUO Y X, XIONG L, et al. Optical fiber-based sensing, measuring, and implementation methods for slope deformation monitoring: a review[J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 19(8): 2786-2800.
- [22] ZHANG X M, LIU K N, TAO L. A cooperative communication scheme for full duplex simultaneous wireless information and power transfer wireless body area networks[J]. IEEE Sensors Letters, 2018, 2(4): 475-478.
- [23] ZHANG X M, WANG C, TAO L. An opportunistic packet forwarding for energy-harvesting wireless sensor networks with dynamic and heterogeneous duty cycle[J]. IEEE Sensors Letters, 2018, 2(3): 788-792.
- [24] 谢小军, 于浩, 陶磊, 等. 基于动态数据压缩的能量采集无线传感网络数据收集优化[J]. 计算机应用, 2018, 38(8): 2353-2358.  
XIE X J, YU H, TAO L, et al. Data gathering optimization based on dynamic data compression in energy harvesting wireless sensor[J]. Journal of Computer Applications, 2018, 38(8): 2353-2358.
- [25] JIANG H, CHEN L J, WU J, et al. A reliable and high-bandwidth multi-hop wireless sensor network for mine tunnel monitoring[J]. IEEE Sensors Journal, 2009, 9(11): 1511-1517.
- [26] 吴立新, 汪云甲, 丁恩杰, 等. 三论数字矿山—借力物联网保障矿山安全与智能采矿[J]. 煤炭学报, 2012, 37(3): 357-365.  
WU L X, WANG Y J, DING E J, et al. Thirdly study on digital mine: serve for mine safety and intellimine with support from IoT[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(3): 357-365.
- [27] SADLER C M, MARTONOSI M. Data compression algorithms for energy-constrained devices in delay tolerant networks[C]//The 4th International Conference on Embedded Networked Sensor Systems. 2006: 265-278.

#### [作者简介]



张达(1980—), 男, 北京人, 博士, 北京矿冶科技集团有限公司教授级高级工程师, 主要研究方向为矿山安全监测、矿山物联网及矿山智能化技术。

王济农(1995—), 男, 辽宁大连人, 北京矿冶研究总院硕士生, 主要研究方向为矿山安全监测、矿山物联网及矿山智能化技术。

冀虎(1986—), 男, 北京人, 北京矿冶科技集团有限公司高级工程师, 主要研究方向为矿山安全监测技术、矿山测量新技术、矿山物联网与云服务、矿山智能仪器等。

纪浩(1985—), 男, 黑龙江鸡西人, 北京矿冶科技集团有限公司工程师, 主要研究方向为仪器仪表和物联网技术。

赵云峰(1977—), 男, 辽宁抚顺人, 国家知识产权局专利局审查员, 主要研究方向为物联网、智能交通、定位导航等。