

doi: 10. 11720/wtyht. 2022. 1542

侯胜蓝,陈儒军,王子辉,等. 基于 NB-IoT 的宽频带岩矿石标本频谱激电响应测试仪测控软件研发[J]. 物探与化探, 2022, 46(6): 1463–1469.
http://doi.org/10. 11720/wtyht. 2022. 1542

Hou S L, Chen R J, Wang Z H, et al. Development of the NB-IoT-based measurement and control software for broadband SIP response testers for rock and ore specimens[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2022, 46(6): 1463–1469. http://doi.org/10. 11720/wtyht. 2022. 1542

基于 NB-IoT 的宽频带岩矿石标本频谱激电响应测试仪测控软件研发

侯胜蓝^{1,2}, 陈儒军^{1,2,3,4}, 王子辉^{1,2}, 刘志同^{1,2}, 刘璿^{1,2}

(1. 中南大学 地球科学与信息物理学院, 湖南 长沙 410083; 2. 中南大学 AIoT(人工智能物联网)与地质地球物理创新创业教育中心, 湖南 长沙 410083; 3. 有色金属成矿预测与地质环境检测教育部重点实验室, 湖南 长沙 410083; 4. 有色资源与地质灾害探查湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410083)

摘 要: 岩矿石标本频谱激电响应测试仪通过测量岩矿石标本的频谱激电特性, 了解矿体与围岩的频谱激电响应差异, 为找矿提供基础依据, 在地球物理勘探中应用广泛。然而现有的岩矿石标本频谱激电响应测试仪在带宽、智能化、便携性、低功耗等方面存在不足, 为解决这些问题, 本文结合 NB-IoT、蓝牙、WiFi 等物联网技术设计出一款宽频带岩矿石标本频谱激电响应测控软件, 实现了近程通讯、云端通讯、数据可视化、数据处理等功能。经过测试, 该软件操作简单、运行稳定、人机交互友好、达到预期效果。

关键词: 频谱激电; 岩矿石; 标本; 测控软件; NB-IoT

中图分类号: P631

文献标识码: A

文章编号: 1000-8918(2022)06-1463-07

0 引言

频谱激电法作为频率域激电法(又叫复电阻率法, 简称 SIP), 通过研究超低频段下观测的视复电阻率频谱特性与空间上的电性差异来推断异常体位置与信息^[1-2]。频谱激电法具有抗干扰能力强、电性参数多等优点, 在勘探金属矿物^[3]、寻找地下水^[4]、检测环境污染^[5]等方面有广泛应用。

通过测量岩矿石标本的复电阻率和相位, 能够了解矿体和围岩的电性差异, 为找矿提供物性信息, 还能为正反演提供基础依据^[6-8]。然而现阶段在岩矿石复电阻率测量的研究方面还存在一些问题, 首先市面上针对岩矿石标本频谱激电测量仪器较少, 仪器较为笨重, 操作困难, 给岩矿石标本测试工作带来了诸多不便; 其次, 城市物探干扰源复杂, 传统的

频谱激电仪面临施工效率低、环境适应能力差等难题; 再者, 现有仪器的测量频带多集中在低频段, 缺乏对高频段的研究^[9]。随着电子技术的发展, 地球物理学者将物联网技术与 Android 开发技术运用到仪器研制中, 推动仪器朝着轻量化和智能化方向发展^[10-11]; 近年来, 就有王甫康等^[12]设计了基于 WLAN 无线通讯技术的节点地震数据传输系统, 使地震仪摆脱了笨重电缆的束缚, 提高了仪器的便携性, 文尚石等^[13]设计了基于广域电磁接收机的 Android 端采集监控软件, 实现人机交互好的智能手机实时监测电磁接收机, 操作简单、携带方便。

针对现阶段岩矿石标本频谱激电响应测试仪器在便携性、智能化、环境适应能力方面的不足, 本文开发出了一款用于宽频带岩矿石标本频谱激电响应测试仪的测控软件, 在近距离时采用蓝牙实现命令下发、WiFi 原始数据传输, 在远距离时采用 NB-IoT

收稿日期: 2021-09-27; 修回日期: 2022-06-13

基金项目: 国家自然科学基金基础科学中心项目(72088101)

第一作者: 侯胜蓝(1998-), 女, 中南大学硕士研究生, 主要从事电法、瞬变电磁法仪器的研制工作。Email: 1875565461@qq.com

通讯作者: 陈儒军(1973-), 男, 博士, 副教授, 主要从事地球物理仪器及信号处理研究工作。Email: chen.rujun@foxmail.com

技术通过云平台实现数据流转,从而实现无线控制,提高仪器操作的灵活性,使仪器更加便携。

1 岩矿石标本测试仪测量原理

常见的标本频谱激电测量方式有:①非接触式测量法,标本与测量装置无物理接触,从而避免了接触过程中产生误差或损坏样本,该方法对仪器要求较高,使用较少。②接触测量法,标本与测量装置物理接触,该方法装置简单,成本较低。本文选用接触式四电极法进行测量,如图 1 所示,为标本测试仪的测量装置,AB 两极供电,MN 两极测量。

标本的复电阻率的计算公式为:

$$\rho = \frac{U_m - U_n}{U_a - U_1} \times \frac{R}{K} \quad , \quad (1)$$

其中: U_m 、 U_n 、 U_a 、 U_1 分别为 M、N、A、 A_1 处对地的电势; R 为取样电阻; K 为装置系数。

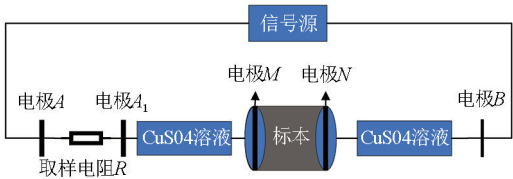


图 1 岩矿石标本频谱激响应(复电阻率)测量原理
Fig. 1 Schematic diagram of complex resistivity measurement for rock and ore specimen

2 测控系统总体设计方案

2.1 测控系统需求分析

测控系统分为 3 部分:下位机的嵌入式系统、上位机的 Android 端 App、云端控制系统,根据宽频带岩矿石标本频谱激电响应测量需要,整个测控系统需求如下:

- 1) 基于 Android 系统的岩矿石标本 SIP 响应测控 App;运行在 Android 手机上,具有参数设置、命令下发、数据解析和文件存储等功能。
- 2) 下位机软件设计;将采集端的上传数据发送至 Android 端 App,将 Android 端 App 下发的指令发送到采集端。
- 3) 云端通信;嵌入式系统将数据上传到云平台,也能解析云平台上发的命令,Android 端软件能够获取云平台数据,也能通过云平台下发控制指令。
- 4) 近距离无线数据传输;使用蓝牙 Wifi 进行控制指令的发送与原始数据的传输,让仪器更加便携,

- 减少野外工作者负担。
- 5) 数据计算;采用傅里叶变换计算标本在不同频率下的复电阻率和相位。
- 6) 数据可视化;实现实时成图,保证用户及时获取数据信息。

2.2 测控系统总体设计方案

基于 NB-IoT 的宽频带岩矿石标本频谱激电测试仪的采集控制系统总体设计如图 2 所示,主要以 STM32F429 处理器为控制核心,通过单片机上的无线通信模块与 Android 端完成信息交互。远距离通讯时,采集端通过单片机上的 NB-IoT 模块与华为物联网云平台取得连接,手机端与云平台通过 5G/4G 网络连接,从而实现远程发送控制指令与云端获取数据;近距离通讯时,手机端采用蓝牙发送控制指令到仪器,通过 Wifi 接收仪器采集的数据,完成近程信息交互^[14-15]。

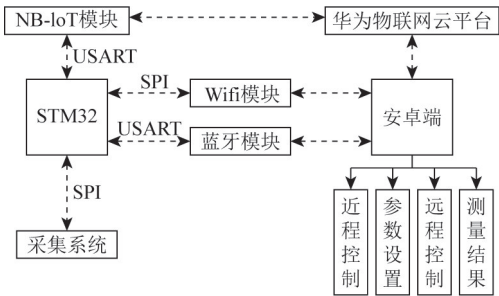


图 2 测控系统总体结构
Fig. 2 Overall structure diagram of measurement and control system

3 下位机软件设计

下位机软件采用 C 语言开发,开发软件为 Keil 5。下位机的软件设计主要包括对接云平台、命令解析、数据存储与上传 3 部分组成。

对接云平台任务:下位机采用 NB-IoT 模组与云平台进行交互,NB-IoT 模组入网后,采用“AT + NMGS = <length>,<data>”指令发送数据,其中 length 为数据长度,data 为字符串形式待发数据。

命令解析任务:命令解析程序负责解析 Android 端通过蓝牙或云平台发送到 NB-IoT 模组的控制指令并下发至采集端。Android 端与下位机的解析协议如图 3 所示,采用 64bit 二进制码流表示。解析函数根据‘/’分割字符串,并将数据转换为对应格式后通过 SPI 发送到采集系统。

数据存储与上传任务:为实现数据上传的实时性,采用边存储边发送的方法不断写入和读取 SD 卡中的数据,引入锁机制保证操作唯一性,从而解决

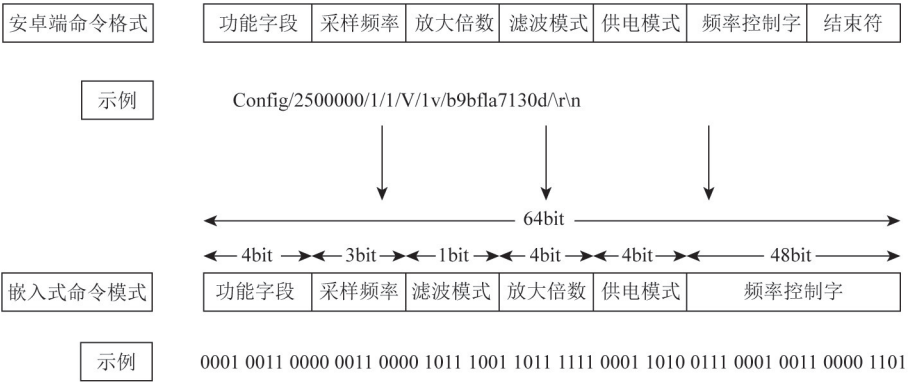


图 3 指令协议解析格式

Fig. 3 Instruction protocol parsing format diagram

数据写入和读取时可能发生的资源竞争问题。使用 DMA 双缓冲模式,实现不间断缓存,提高了数据的存储效率。数据上传即通过 Wifi 模块将数据传输至 Android 端,调用 Wifi 模块提供的接口函数完成。

4 云平台开发

本文选用的云平台为华为物联网云平台,相较于阿里云、电信云等其他物联网平台,华为云提供更丰富的接口和更强大的设备管理能力。云平台开发包括 Profile 开发和编解码插件开发^[16]。

Profile 开发:Profile 开发描述了设备的基本信息与服务能力。设备基本信息即定义产品名称、数据格式等信息。服务能力主要定义了仪器上报的数据(属性)和客户端下发的指令的消息格式,如表 1 所示为本文所定义的服务能力。

表 1 产品属性和命令

Tabal 1 Product attributes and commands

	类型	描述	
属性	Object	String	标本名
	Resistivity	String	电阻率
	Phase	String	相位
	Frequency	String	频率
命令	Status	String	仪器状态
	Config	String	配置指令

编解码插件开发:NB-IoT 模组具有低功耗特点,对省电有一定要求,所以设备侧数据以二进制格式传入云平台,而云平台和应用测开发则是采用 JSON 格式数据进行通信,故而在云平台进行编解码插件开发,完成二进制数据与 JSON 格式数据之间的相互转换^[17]。

5 上位机软件设计

上位机软件设计采用 Java 语言开发,开发环境

为 Android Studio + JDK1.8.0,采用的测试机为华为畅享 20。上位机的软件集近、远程控制、参数设置与结果存储于一体,实现了近远程通讯、下发指令、实时接收数据、快速成图等功能。

5.1 软件主流程设计

如图 4 所示,为安卓端软件的主流程图,为用户不错过云平台数据,本研究采用开启前台服务来监听云平台推送,在系统内存不足时仍保持运行,从而保证用户切出软件也能接收云平台数据。仪器有近程控制和远程控制两种控制模式,分别位于两个界面中,不同界面开始采集时开启不同工作线程,从而根据需求创建相对应的无线通讯连接,实现两种采集方式。在近程控制时,先进行蓝牙配对和 Wifi 配置,通过蓝牙发送配置信息与开始采集命令,客户端通过 Wifi 接收单频点数据,解析处理后进行可视化成图,采用循环配置采集的方法不断向下发送配置指令和接收上传数据,直到采集到最后一个频点后结束。在远程控制时,客户端向云平台发送连接请求,用开启的前台服务实时监听云平台推送数据,同样使用单频点循环采集配置的方法采集数据。

5.2 无线通信模块设计

5.2.1 近程通讯

近程通信主要使用蓝牙和 Wifi 与仪器进行信息交互,采用蓝牙进行指令的快速下发,采用 Wifi 将采集的大量数据传输到手机。两者的结合使用充分利用了 Android 手机的优势,提高了传输效率,降低了开发难度。

Wifi 通讯使用广播实时监控 Wifi 状态,建立网络连接后利用套接字获取输入流,进而循环读取输入流数据,为后续存储成图做准备。Wifi 通讯采用 TCP/IP 通讯协议进行数据传输,保证数据的可靠性,另外为数据添加了校验位,保证数据传输过程中不出现丢包问题,提高传输质量。

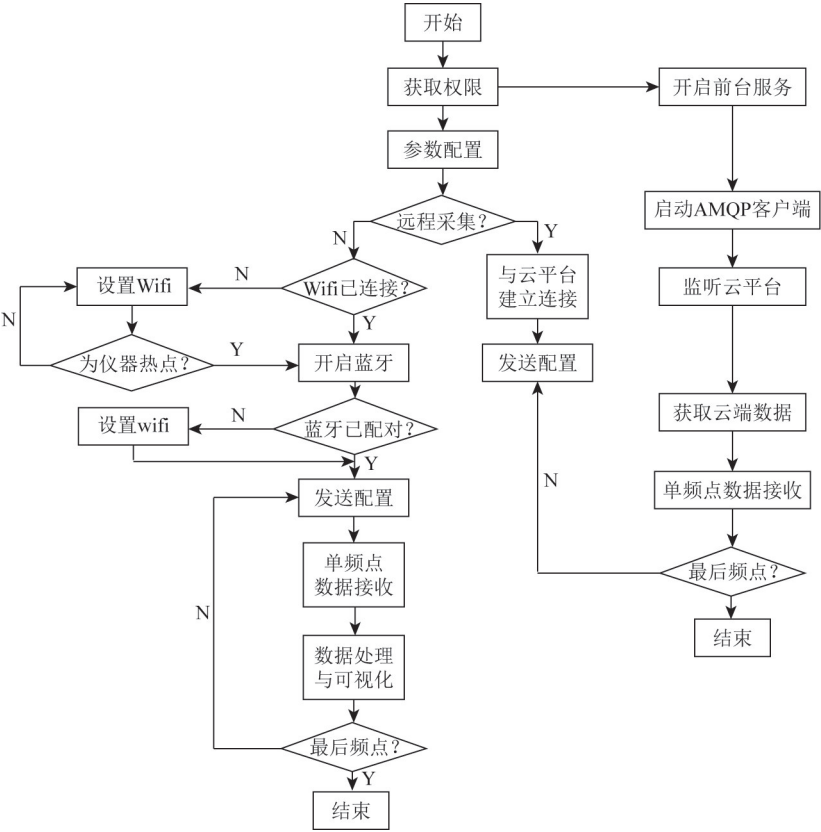


图 4 安卓端 App 主流程
Fig. 4 The main flow chart of the Android App

该软件与仪器的控制指令交互都是采用蓝牙来收发的,交互过程与 Wifi 传输并行,获取采集数据的同时能够接收蓝牙从仪器端传来的反馈信息,从而实时监控采集过程。

5.2.2 云端通讯

远程通讯采用 HTTPS 协议与云平台通信,使用 OkHttp 开源框架进行网络请求,减少请求次数,提高请求效率。OkHttp 进行网络请求主要分为 4 步:①构建 OkHttpClient 对象;②构建 Request 对象,构造请求 URI 后发起 Post 请求将配置信息提交给云平台;③使用 OkHttpClient 创建 newCall 并执行,从而获取 Response 对象;④分析 Response 对象,查看是否提交成功。

云平台选用 AMQP 订阅推送,在控制台创建订阅任务,云平台根据用户订阅的数据类型将消息发送到指定 AMQP 消息队列,客户端在远程控制界面初始化时创建一个服务(Service)启动 AMQP 客户端,用于监听云平台推送数据,循环获取 AMQP 队列中的消息。从云平台获取的数据为 JSON 格式,解析后采用广播接收并处理数据。

5.3 数据处理与智能扫频算法设计

本软件采用傅立叶变换计算电阻率和相位。App 获取到标本各频点的测量数据后进行傅立叶变

换,从而得到标本在该频点下的频率响应。本软件使用傅立叶变换库为 JTransforms,是一个用 Java 语言编写的多线程傅里叶变换库。通过傅里叶变换计算出 U_m, U_n, U_a 和 U_1 ,根据式(1)得到的振幅和相位即为当前频点下的标本复电阻率值和相位值。通过多次傅里叶后变换的均方差判断误差是否符合用户要求,满足要求则完成该频点测量,否则重新采集该频点。然后使用 HelloCharts 图表框架对数据进行成图可视化。

采用智能扫频算法进行自动测量控制,采集开始后,开启一个采集线程用于接收上传的数据,当数据量能做一次傅里叶变换时,通过 Handler 将消息传到主线程中,主线程再新建计算线程用于傅里叶变换,计算并存储电阻率和相位后发送更新 UI 消息。根据奈奎斯特采样定律设计信号频率与采样率的对应关系,如表 2 所示。

表 2 采样频率、采样点数与信号频率关系
Tabal 2 Relationship among sampling frequency, sampling points and signal frequency

信号频率 f_1/Hz	采样频率 f_2/Hz	采样时间 t/s	采样点数 ($N=f_2\times t$)	频率分辨率 ($r=f_2/N$)
$f_1>50000$	1250000	0.0032	4000	312.500
$50000\geq f_1>5000$	625000	0.0064	4000	156.250
$5000\geq f_1>1000$	312500	0.0128	4000	78.125
$1000\geq f_1>100$	156250	0.5000	78125	2.000
$100\geq f_1\geq 1$	78125	1.0000	78125	1.000

5.4 界面设计

安卓端软件的 UI 设计基于 Android 的开发框架,结合 Activity 和 Fragment 绘制而成,通过滑动、点击等事件完成交互式响应,如图 5 所示。

近程控制界面由图表显示、频点信息、打印信息和控制按钮 4 部分组成,每完成一个频点测量,更新

一次图表和频点信息,实时更新打印信息。远程控制界面与近程控制界面相似,由于远程控制传输数据速度慢,传输的原始数据有限,故而只显示频谱激电响应图。参数设置界面主要用于设置仪器的各种参数,主要分为标本参数、测量控制和标本信息 3 大模块。

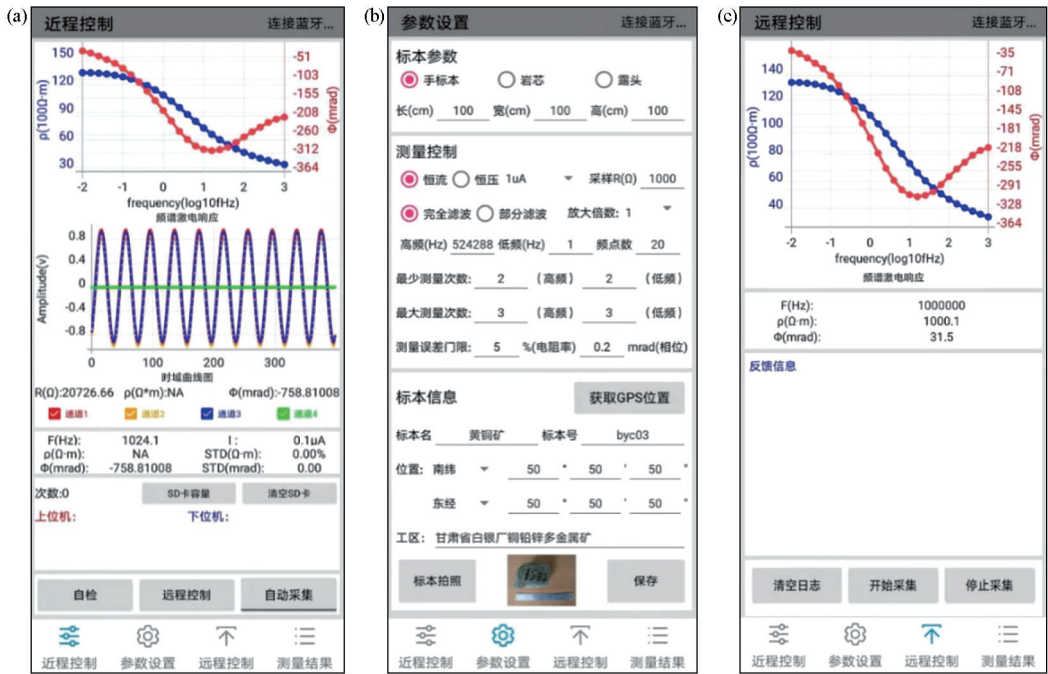


图 5 岩石标本 SIP 响应测试仪 (a) 近程控制、(b) 参数设置和 (c) 远程控制安卓端软件界面
Fig. 5 User interface of short-rang control (a) ,parameter setting(b) and remote control (c) in Android App for SIP tester for rock and ore specimens

6 软件测试

测试标本与其测量结果频谱激电响应 SIP 如图 6、7 所示。左 y 轴为电阻率,右 y 轴为相位,x 轴为频率关于基数 10 的对数值,采用对数坐标轴,构图美观。

图 6 采用近程控制方法测量黄铜矿标本,得出如下结论:①振幅曲线都随着频率增加而下降;②相

位为负值,曲线随着频率增加先上升后下降,且下降显著;综上,所得结果符合黄铜矿标本响应特性。

图 7 为通过云平台测量片岩标本的结果,得出如下结论:①本软件测量相位在 $-\pi/2 \sim \pi/2$,超过范围后要相位反转,反转后相位与原相位相差 π ,片岩不含矿,阻抗高,超过了 $-\pi/2$,故而在高频出现了相位反转;②在 50 Hz 处存在工频干扰,数据受到了影响;③相位和振幅都随频率的增加而降低;综上,所得结果符合片岩标本响应特征。

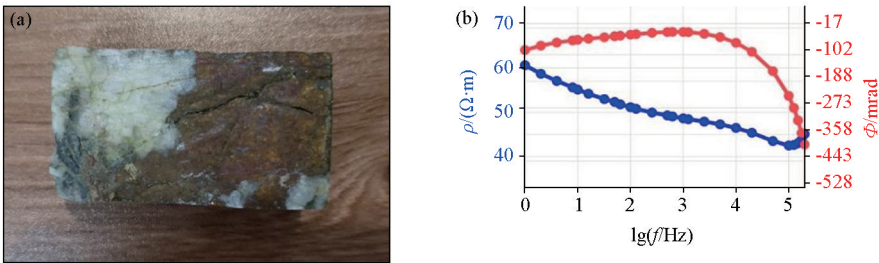


图 6 黄铜矿标本相片 (a) 及其 SIP 响应 (b)
Fig. 6 SIP response of chalcopyrite specimen and its photo

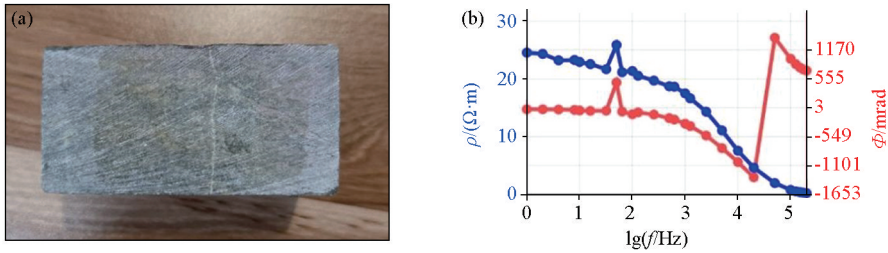


图 7 片岩标本照片 (a) 及其 SIP 响应 (b)

Fig. 7 Photo of schist (a) and its SIP response (b)

测试表明,该测控系统软件能够实现远近期采集控制,将测量的岩矿石标本数据完整地显示在 Android 端 App 界面中,且能够取得较好的测量效果,反映岩矿石的频谱特性,验证了数据的准确性,Android 端 App 人机交互好,界面切换流畅,达到预期效果。

7 结论

本文主要研究了基于 NB-IoT 技术的宽频带岩矿石标本频谱激电仪的测控软件开发,将窄带物联网、蓝牙、Wifi 等网络通讯技术运用到仪器的测控系统研制中,并结合 Android 技术,实现了远近期接收数据、下发指令、成果显示、存储数据等功能,满足了仪器低功耗、便携式、实时成图要求。

致谢:感谢课题组成员姚红春、陈兴生、王小杰、李生杰对本研究的大力支持。

参考文献 (References) :

[1] 曹中林,昌彦君,何展翔. 基于演化算法的复电阻率频谱参数反演[J]. 工程地球物理学报,2005,2(1):33-38.
Cao Z L, Chang Y J, He Z X. Inversion of complex resistivity spectrum parameters based on evolutionary algorithm[J]. Journal of Engineering Geophysics,2005,2(1): 33-38.

[2] 罗传华,昌彦君,李志华. 频谱激电法在铜陵市某滑坡地段滑动面勘探中的应用[J]. 工程地球物理学报,2017,14(1):26-30.
Luo C H, Chang Y J, Li Z H. The application of the spectrum induced polarization method in the exploration of the sliding surface of a landslide section in Tongling City[J]. Journal of Engineering Geophysics, 2017, 14(1): 26-30.

[3] 郑冰. 频谱激电法在某铅锌银矿的应用[J]. 工程地球物理学报,2015,12(6):750-754.
Zheng B. Application of spectrum induced polarization method in a lead-zinc-silver mine [J]. Journal of Engineering Geophysics, 2015,12(6):750-754.

[4] 武斌,邹俊,马代海. 频谱激电法在天然气水合物勘查中的应用[J]. 四川地质学报,2016,36(1):135-138.
Wu B,Zou J,Ma D H. Application of spectrum induced polariza-

tion method in natural gas hydrate exploration[J]. Journal of Sichuan Geology,2016,36(1): 135-138.

[5] Deng Y,Shi X,Zhang Z. Application of spectral induced polarization for characterizing surfactant-enhanced DNAPL remediation in laboratory column experiments[J]. Journal of Contaminant Hydrology, 2020, 230:103603.

[6] 杨迪. 天然岩矿石复电阻率测量及频谱曲线特征研究[D]. 北京:中国地质大学(北京),2019.
Yang D. Study on complex resistivity measurement and spectrum curve characteristics of natural rock ore [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing),2019.

[7] 郑树桐. 扫频介电测井岩石物理基础实验研究[D]. 北京:中国石油大学(北京),2018.
Zheng S T. Basic experimental study on rock physics of swept frequency dielectric logging [D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing),2018.

[8] 曹春国,冯国彦,刘红. 频谱激电法(SIP)在深部金属矿探测中的原理与应用[J]. 山东国土资源,2009,25(9):41-45.
Cao C G, Feng G Y, Liu H. Principle and application of spectrum IP method (SIP) in deep metal mine exploration [J]. Shandong Land and Resources,2009,25(9):41-45.

[9] 葛双超,邓明,陈凯. 复电阻率测量方法与模型仿真[J]. 地球科学进展,2014,29(11):1271-1276.
Ge S C, Deng M, Chen K. Complex resistivity measurement method and model simulation [J]. Advances in Earth Sciences,2014, 29(11):1271-1276.

[10] 林君. 高端地球物理仪器研究及我国产业化现状[J]. 仪器仪表学报,2010,31(8):174-180.
Lin J. Research on high-end geophysical instruments and the status quo of industrialization in my country [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2010,31(8):174-180.

[11] 陈儒军. 新技术在电法仪器中的应用概况及前景[C]//当代矿山地质地球物理新进展:中国地质学会,2004:239-244.
Chen R J. Overview and prospects of the application of new technologies in electrical instruments [C]//New progress in contemporary mine geology and geophysics: The Geological Society of China,2004:239-244.

[12] 王甫康,庾先国,刘勇,等. 节点地震仪无线传输系统设计[J]. 制造业自动化,2021,43(11):85-88.
Wang F K, Tuo X G, Liu Y, et al. Design of wireless transmission system for nodal seismograph [J]. Manufacturing Automation, 2021,43(11):85-88.

[13] 文尚石,汤井田,裴婧,等. 基于 Android 平台的广域电磁接收

机采集监控软件研究与实现[J]. 地球物理学进展,2018,33(2):866-873.

Wen S S,Tang J T,Pei J,et al. Research and implementation of wide-area electromagnetic receiver acquisition and monitoring software based on Android platform[J]. Progress in Geophysics, 2018, 33(2):866-873.

[14] 何锦淳,李爵成,李丹. 基于 STM32 的智能安防系统[J]. 物联网技术,2020,10(5):49-54.

He J C,Li J C,Li D. Smart security system based on STM32[J]. Internet of Things Technology, 2020,10(5):49-54.

[15] 舒泰歌,游乾乾,李慕凡. 基于 STM32 无线信息采集系统设计[J]. 科技风,2020(15):120-121.

Shu T G,You Q Q,Li M F. Design of wireless information collection system based on STM32[J]. Technology Wind, 2020(15):120-121.

[16] 杨杰. 基于华为云的数据挖掘和展示系统研究[J]. 无线互联科技,2020,17(24):24-25.

Yang J. Research on data mining and display system based on Huawei Cloud[J]. Wireless Walian Technology,2020,17(24):24-25.

[17] 金恩曼,陈培余. 一种智能大棚的温湿度检测系统数字技术与应用[J]. 数字与技术,2019,37(7):85-87.

Jin E M,Chen P Y. Digital technology and application of a temperature and humidity detection system for intelligent greenhouse[J]. Digital and Technology,2019,37(7):85-87.

Development of the NB-IoT-based measurement and control software for broadband SIP response testers for rock and ore specimens

HOU Sheng-Lan^{1,2}, CHEN Ru-Jun^{1,2,3,4}, WANG Zi-Hui^{1,2}, LIU Zhi-Tong^{1,2}, LIU Jin^{1,2}

(1. School of Geoscience and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083, China; 2. AIoT Innovation and Entrepreneurship Education Center for Geology and Geophysics, Central South University, Changsha 410083, China; 3. The Key Laboratory of Nonferrous Metal Mineralization Prediction and Geological Environment Detection of Ministry of Education, Changsha 410083, China; 4. Hunan Key Laboratory of Non-ferrous Resources and Geological Disaster Exploration, Changsha 410083, China)

Abstract: Spectral induced polarization (SIP) response testers for rock and ore specimens determine the SIP response differences between ore bodies and host rocks by measuring the SIP characteristics of rock and ore specimens, thus providing a basis for ore prospecting. They are widely used in geophysical exploration. However, the existing SIP response testers have shortcomings in terms of bandwidth, intelligence, portability, and power consumption. Given this, this study developed a piece of measurement and control software for SIP response testers based on the Internet of Things (IoT) techniques including NB-IoT, Bluetooth, and Wifi, realizing the functions such as near-field communication, cloud communication, data visualization, and data processing. The test results verify that the software can achieve the desired effect owing to its easy operation, stable running, and friendly man-machine interaction.

Key words: spectral induced polarization; rock and ore; specimen; measurement and control software; NB-IoT

(本文编辑:王萌)