

基于 STM32 的矿用本安型电法分布式监测系统设计^{*}

王淑民 翟梅涛 王鹏宇 马健康 易晓峰

(吉林大学仪器科学与电气工程学院 长春 130000)

摘要: 针对煤矿井下底板诱灾水体连续监测的实际需求,设计了一种基于 STM32 的矿用本安型电法分布式监测系统。高密度电阻率法具备高分辨率、结果直观且支持连续监测的技术优势,常用于监测煤矿井下底板突水情况,STM32 具有丰富的外设接口,而且其低功耗和可编程程度高等特点契合本安化电法系统设计。以本安化为核心前提,进行电法监测系统的主机和电极转换器的设计。主机负责发射和采集,主要部分为 STM32 控制芯片、H 桥稳压发射电路以及 ADS1256 采集传输电路。电极转换器主要负责电极状态切换,主要部分为 STM32 控制芯片以及固态继电器阵列电路。最后通过实验来验证仪器系统的稳定性与准确性,结果表明,该电法系统符合本安标准且能够准确获取电性信息,正确反映地质结构。

关键词: 高密度电阻率法;本安型;STM32;水害预警;分布式系统

中图分类号: TN710 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.4017

Design of mine-used intrinsically safe resistivity method
distributed monitoring system based on STM32

Wang Shumin Zhai Meitao Wang Pengyu Ma Jiankang Yi Xiaofeng

(College of Instrument Science and Electrical Engineering, Jilin University, Changchun 130000, China)

Abstract: To meet the practical demand for continuous monitoring of disaster-inducing water bodies in coal mine floors, an intrinsically safe STM32-based distributed resistivity monitoring system for mining is designed. The high-density resistivity method, with advantages of high resolution, intuitive results and continuous monitoring capability, is widely used for water inrush monitoring in coal mine floors. STM32 offers abundant peripheral interfaces, and its low power consumption and high programmability align with the design requirements of intrinsically safe resistivity systems. With intrinsic safety as the core premise, the system's host and electrode converter are developed. The host handles signal transmission and data acquisition, mainly consisting of the STM32 control chip, an H-bridge regulated transmission circuit, and an ADS1256 acquisition-transmission circuit. The electrode converter is responsible for electrode state switching, comprising the STM32 control chip and a solid-state relay array circuit. Experiments verify the system's stability and accuracy. Results indicate that the resistivity system meets intrinsic safety standards, accurately acquires electrical information, and correctly reflects geological structures.

Keywords: high-density resistivity method; intrinsically safe type; STM32; water hazard early warning; distributed system

0 引言

我国煤炭资源禀赋优越,不仅储量充裕、地理分布广泛,还拥有齐全的煤种类型,整体开发前景十分广阔。但在煤层回采过程中,安全生产面临诸多影响因素^[1],随着开采深度与范围的推进,工作面底板岩层赋水性带来的潜在威胁会愈发严重,大量现场统计数据表明,底板水害事故多集中于工作面回采阶段^[2],因此对底板水文动态的实时监测

已成为保障开采安全的关键需求。我国更是明确要求,矿山企业必须通过钻探、物探、化探等方法相互验证,查清隐蔽致灾因素后才可开展采掘作业^[3],进一步凸显了底板水害监测的紧迫性与必要性。

然而,当前常用的水害监测手段均存在明显局限,钻探法虽能直接获取地质信息,但成本高、对地层有破坏作用,且仅能获得局部点状数据^[4];水文地质调查法的周期长,无法满足回采过程中实时监测的需求^[5-6]。以井下瞬变电磁、

音频电透视法为代表的地探方法,虽然在地质勘探领域应用广泛^[7-10],却难以实现井下长时间连续监测。而传统电法仪器可以进行连续监测,但其局限性也比较显著,针对同一区域的每一次探测,均需重新布设电极。这一过程不仅会提升人为操作误差,还可能因布设环节的介入导致生产中中断,进而造成人力投入与物资消耗的不必要浪费。同时,相邻两次测量的时间间隔较大,造成期间数据缺失,无法对目标区域内的诱灾水体的动态过程及发展趋势进行有效且准确的分析。当前针对矿井回采场景且符合本质安全化要求的长时监测仪器仍然比较匮乏,使得底板水害的动态防控难以有效落地。目前矿用电法仪器个性化编程程度较低,通常只能按照设定好的模式监测,且目前电法仪器存在价格较贵、体积较大等问题。而STM32作为主控芯片时,具有低功耗、体积小、可编程程度高、开发成本低等特点^[11-12],能够针对性的进行监测控制。

为此,本文以煤矿底板水害预警需求为导向,结合矿用设备安全设计标准,设计了基于STM32的矿用本安型电法分布式监测系统。该系统能够精准揭示地下致灾水体的动态时移演化过程,为煤矿工作面底板突水灾害的早期预警提供稳定技术支撑。

1 电法系统设计

1.1 电法系统整体设计

电法监测系统由地面工控机、井下采集系统、发射系统、电极切换系统、电缆电极和以太网转RS-485模块组成,如图1所示。能够实现电法监测流程中的电流发射、数据采集、电极切换、远程控制等功能。

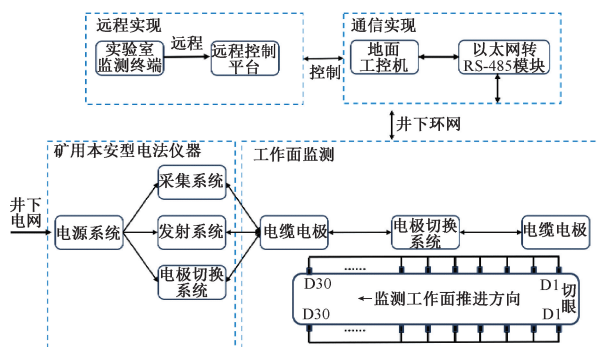


图1 电法系统整体结构

Fig. 1 Overall structure of the resistivity method system

1.2 电法系统本安化设计要求

电法系统硬件部分需要采用本安化设计作为设计前提。依据《GB/T 3836.4—2021 爆炸性环境第4部分:由本质安全型“i”保护的设》^[13],从理论角度看,本安型电路设计的核心在于能量受限原理,确保在正常或故障状态下均无法产生足以引燃爆炸性环境的电火花或热效应,也就是满足最小点燃能量:

$$E_{\text{total}} = \frac{1}{2}CV^2 + \frac{1}{2}LI^2 < \text{MIE}_{\text{env}} \quad (1)$$

其中, C 为等效电容, L 为等效电感, MIE_{env} 由环境可燃物特性决定。

具体元器件选型应该依据 GB/T 3836.4—2021 中具体要求开展^[14-16]。该标准对电阻电路、电感电路以及电容电路提出明确约束:以 $10 \mu\text{F}$ 电容为例,其最低点燃电压是 26 V ,取 1.5 倍的安全系数,则电压为 17.3 V ;光耦隔离电路中的保护器件的参数应该满足以下要求:齐纳二极管功率额定值应至少为 $1.7I_n \times$ 该二极管的最高齐纳电压 $\times 1.5$;电阻功率: $1.5 \times (\text{齐纳二极管电压})^2 / \text{电阻}$;熔断器:熔断器的电压额定值应大于所安装电路出现的最高电压;对于仪器中的电压和短路电流应该满足本安标准中的电压和设备类别相对应的允许短路电流表中具体参数,例如当电压为 36 V 时,对于 I 类设备留有 1.5 倍安全系数时短路电流最大为 289.3 mA 。此外,为防止系统中的元件失效,电阻、电容和电感选型要求工作电压要小于额定耐压值的 $2/3$ ^[17]。并且在所有参数计算时考虑器件的误差,计算最不利值。

1.3 电法主机硬件电路设计

1) 主机整体设计

电法主机系统核心板的设计围绕采集与发射两大功能模块,其主控单元采用 STM32F103C8T6 芯片以保障系统稳定控制、智能切换。发射模块方面,借助 H 桥电路实现对发射波形的动态控制,同时利用稳压电路滤除共模干扰与差模干扰,提高发射电压质量;采集模块则通过 ADS1256 芯片,调用其采集通道实现对电压、电流信号的同步捕获,满足数据采集需求。

2) 主机 STM32 芯片及其外围电路

本文选用 STM32F103 系列作为主控芯片,该芯片具备出色的控制性能、多模块协同能力及低功耗特性,同时兼具高集成度与易开发优势。其丰富的 I/O 接口与外部外设适配能力,简化了传统硬件设计流程,不仅提升了系统的可靠性与通用性,还为后续扩展升级提供了便利,可稳定实现电压电流信号采集、寄存、通信等核心控制功能。

STM32F103 主控芯片及其外围电路主要由 STM32F103 芯片、时钟电路、复位电路、滤波电路、线性稳压器 (low dropout regulator, LDO) 供电模块等组成。STM32 主控芯片主要负责接收采集信号并进行处理后传输到上位机中以及输出, H 桥继电器驱动部分的控制信号, STM32 及其供电电路部分原理如图 2 和 3 所示。

3) 主机采集电路

考虑到系统对供电电流的严格要求,选择灵敏度较高的采集芯片,这样才能精准测量出电性信息^[18-19],确保在符合安全标准与节能要求的同时,有效获取电阻率计算所需的关键数据。因此,本文采用 TI 公司生产的高精度、低功耗 24 位模数转换器 (analog-to-digital converter, ADC)

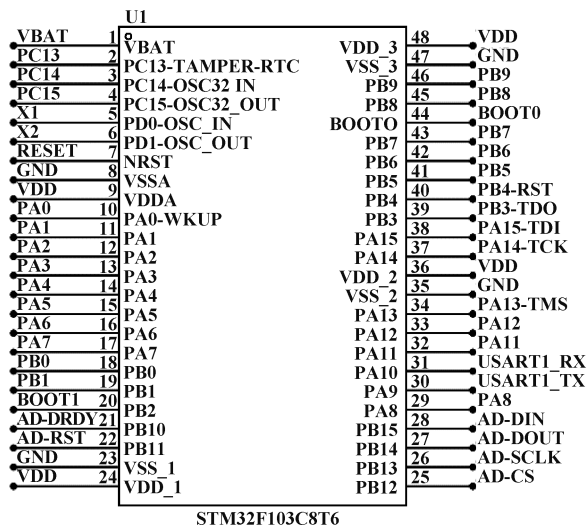


图 2 主机 STM32 原理

Fig. 2 Schematic of host MCU STM32

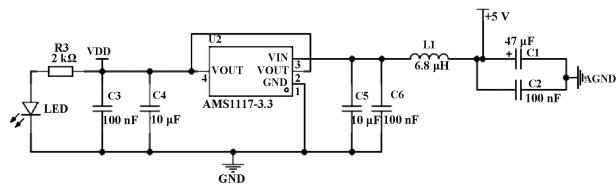


图 3 线性稳压器供电电路原理

Fig. 3 Schematic of the linear regulator power supply circuit

ADS1256 作为微控制单元 (microcontroller unit, MCU) 的外部 ADC。该 ADC 工作电流低至 0.5 mA (典型值), 待机模式仅 1 μ A, 采集速率为 30 ksp/s, 精度可达到 0.001%, 可满足电法系统低功耗监测需求。

STM32 与 ADS1256 通过标准 SPI 总线实现物理层直接连接, 以此完成数据的采集与接收, 电路原理如图 4 所示。在通信过程中, STM32 通过 ADS1256 的 SCLK 端口提供同步时钟, 作为通信基准; 控制指令通过 MOSI (主出从入) 引脚写入 ADS1256 的 DIN 端口, 采集到的数据则经 MISO (主入从出) 引脚从 DOUT 端口回传至 STM32。为保障数据转换完成后能被及时处理, ADS1256 的 DRDY 状态指示信号与 STM32 的中断引脚互联, 当数据转换结束导致 DRDY 电平从高跳变至低时, 会立即触发中断响应。

4) 主机电流转换电路

为了采集电流信号, 本文选取了 WCS38A25 霍尔磁感线性电流感测元件, 该芯片灵敏度为 7.0 mV/mA, 工作电流低至 3 mA, 其内部集成了一个精密的、低温漂线性霍尔传感器 IC 以及温度补偿电路等, 如图 5 所示。将其串入输出回路中通过感受磁场变化将电流进行处理后转换成等比例电压信号输出到 ADS1256 中。

5) 主机 H 桥发射电路

H 桥发射电路由光耦隔离、四路继电器等部分组成。

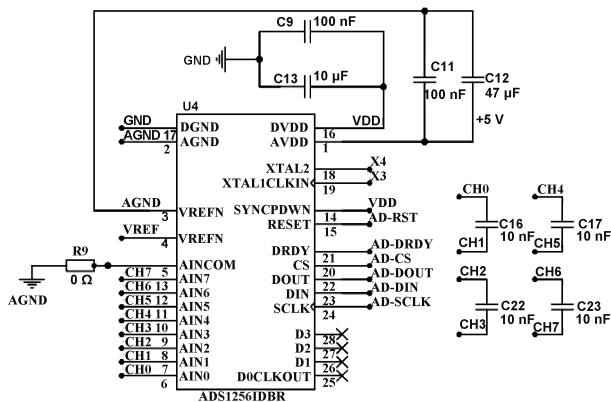


图 4 ADS1256 采集部分电路原理

Fig. 4 Schematic of the ADS1256 acquisition circuit

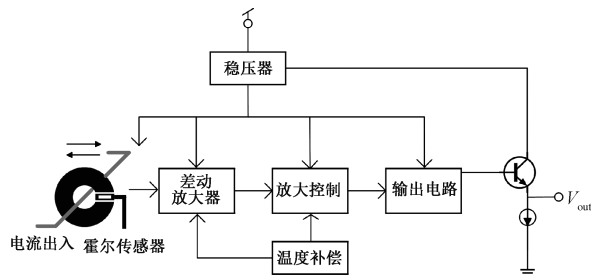


图 5 WCS38A25 内部结构

Fig. 5 Internal structure of WCS38A25

控制信号由 STM32 提供, 控制 H 桥继电器驱动电路工作, 实现四路继电器两两导通两两关断, H 桥继电器电路如图 6 所示。通过继电器的开合, 从而实现输出双极性方波电压。

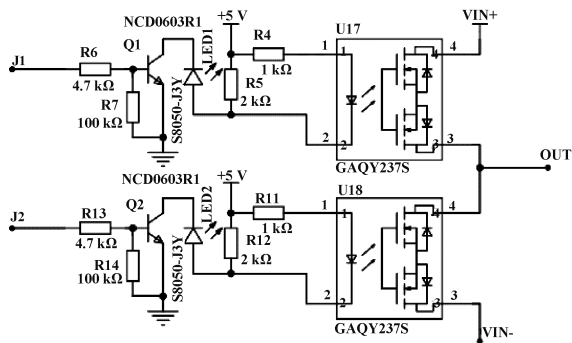


图 6 H 桥部分继电器电路原理

Fig. 6 Schematic of the H-bridge relay circuit

1.4 电法电极转换器硬件电路设计

1) 电极转换器整体设计

电法系统电极转换器分为核心控制部分和继电器阵列部分。核心控制部分选取 STM32 作为主控制核心, 继电器阵列部分主要为 40 个体积、耐压高的固态继电器负责电极的切换。

2) 电极转换器 STM32 电路

核心控制部分选取具备高性能、低功耗 STM32F103ZET6 作为主控制核心,其负责继电器阵列的控制信号输入以及通讯控制信号的接收与发送,是电极转换器的“大脑”,STM32 及其部分外围电路如图 7 所示。

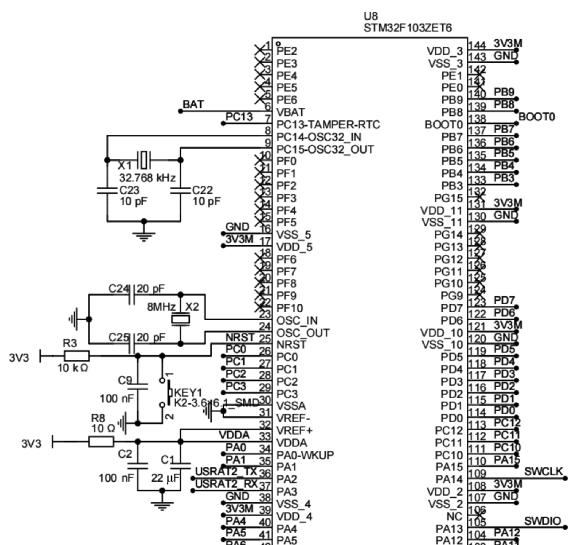


图 7 STM32 及其部分外围电路

Fig. 7 Circuit of STM32 and its partial peripheral circuits

3) 电极转换器 RS-485 通信电路

电极转换器的收发通信部分采用 RS-485 通信协议,其标准传输距离最大为 1 200 m,具有传输稳定、损耗小等优点。本文选用 SP3485EEN 芯片,其引脚通过导线与 STM32 外部通信接口相连,从而实现数据的输入和输出,如图 8 所示。

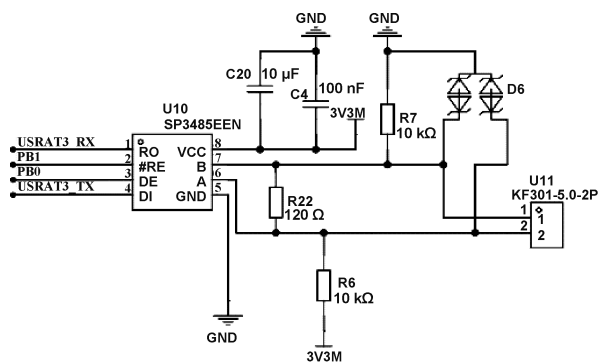


图 8 RS-485 通信电路原理

Fig. 8 Schematic of the RS-485 communication circuit

4) 电极转换器降压稳压供电电路

在传统高密度电法仪中,每个电极需单根电缆连接主机转换箱,体积较大,且野外电缆繁多,拉低工作效率与可靠性,所以本文采用分布式系统设计。为了解决串联较多数量电极转换器造成的远距离芯片供电问题,选取 LTC3638 芯片作为降压稳压芯片,其具有 5~140 V 的超

宽电压输入,还具有过温保护、欠压锁定等功能,能够满足远距离电压供电需要,电路原理如图 9 所示。

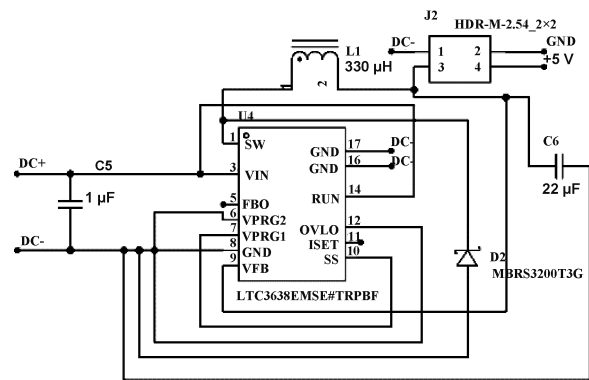


图 9 降压稳压电路原理

Fig. 9 Schematic of the step-down voltage regulator circuit

5) 电极转换器继电器阵列电路

继电器阵列可通过设置继电器的导通/关断来对电极状态进行控制。由于本文采用分布式电极转换器,其核心内容是一个电极转换器通过一根 18 芯线缆中的 10 芯连接 10 根电极,每个电极配备 4 个独立继电器开关单元分别负责 A、B、M、N 的切换,从而可以精简系统结构。每个继电器阵列主要由 40 个继电器及其驱动电路构成,如图 10 所示。由于需要负责 10 根电极的开断,所以电极转换器的继电器选取体积小、重量轻的固态继电器 AQY210SX。它通过光电耦合隔离输入与输出,无机械触点,适合低功耗、高频开关场景,尤其适合于防爆、无火花的场景。

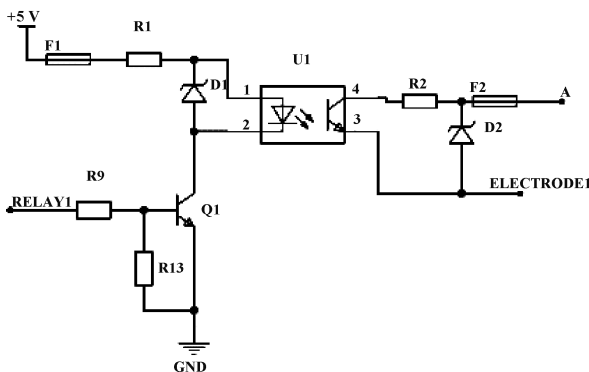


图 10 继电器驱动电路原理

Fig. 10 Schematic of the relay drive circuit

1.5 电法系统程序设计

1) 主机主程序设计

图 11 所示为主机程序流程,通过上位机发送采样率、发射时间、采控启动指令等控制主机进行动作,主机通过初始化端口配置,接收采控指令后控制 H 桥发射电压以及采集终端电压、电流信号并发送至上位机当中。

2) 电极转换器主程序设计

图 12 所示为电极转换器程序流程,充分发挥 STM32

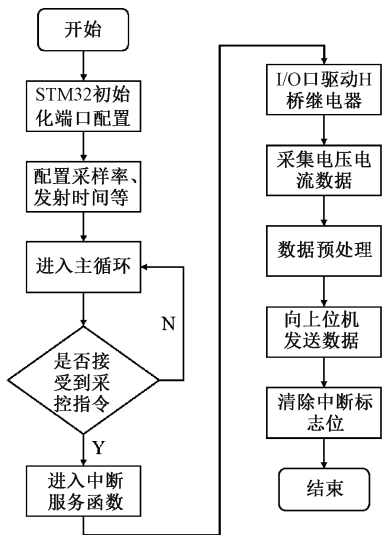


图 11 主机程序流程

Fig. 11 Flow chart of the host program

可编程程度高等特点,对各 I/O 口对应电极进行全自定义配置,并且内置多种固定电法跑极方案(如温纳法、偶极法等),无需硬件改动即可快速适配多样化测量需求。在仪器实际应用时,若检测到特定测量位置存在信号异常,或需针对复杂现场环境开展针对性测量,可通过上位机发送自定义指令,STM32 将快速响应并精准控制对应继电器动作。在电极转换器未被选用时,STM32 可通过软件配置将其切入低功耗模式,结合芯片自身的睡眠/停止模式特性,最大限度降低系统功耗。

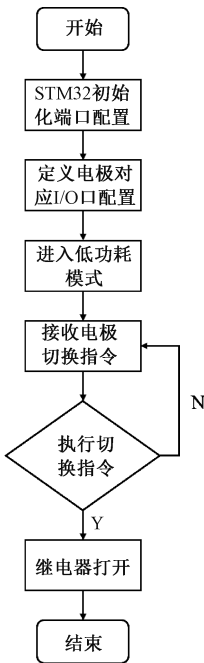


图 12 电极转换器程序流程

Fig. 12 Flow of the electrode converter program

1.6 电法仪器参数介绍

本文所设计电法仪器系统具有小型化、易编程性、采集电压电流精度高等特点,与市面上主流电法仪器关键数据对比如表 1 所示。

表 1 本文电法仪器与主流电法仪器对比

Table 1 Comparison of the resistivity method instrument in this paper and mainstream resistivity method instruments

测点序号	发射功率/W	采集精度	接收电压范围/V
WDDS-3 数字电阻率仪 (非本安)	6 000.0	24 位 AD	±50.0
DZD-8 多功能全波形直流电法仪(非本安)	7 500.0	32 位 AD	±40.0
ZJ-YDZ(A)矿用直流电法仪	6.3	24 位 AD	±2.0
本文研制电法仪器	5.0	24 位 AD	±2.5

2 实验验证

2.1 水箱模拟实验

基于电法分布式监测系统设计并展开实验研究。首先在水箱环境下进行模拟实验,由于铁块相对于水为低阻异常体,更符合井下含水体相比于周围环境电阻率更低的情况,所以用铁块作为被测对象。

在实验室水箱内搭建实验环境,具体配置如下:布设 10 根黄铜电极,极距为 10 cm,采用温纳 α 装置,发射电压 36 V。水体模拟煤岩工作面底板,铁块模拟含水层(置于 2~5 号电极正下方)。电极尖端仅与水体保持毫米级接触,避免柱状放电影响结果,异常体位置如图 13 所示。

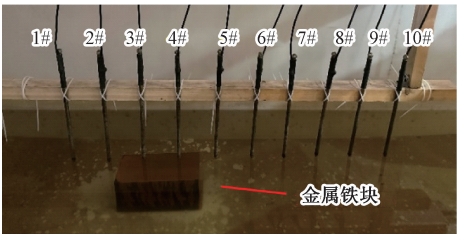


图 13 第 1 次实验场地布置

Fig. 13 Layout of the first experimental site

将计算机的网口与以太网转 RS-485 模块相连,传输信号经 RS-485 总线以 9 600 波特率传输至主机系统,再通过主机系统发射“控制字”控制电极转换器中的 STM32 与继电器阵列动作,从而实现电极状态的切换,采集数据如表 2 所示,依据视电阻率计算公式计算视电阻率:

$$\rho = K \frac{U}{I} \tag{2}$$

其中, ρ 为视电阻率, K 为装置系数, U 为采集电压, I 为采集电流。

表2 采集平均电压、平均电流及视电阻率数据
Table 2 Data of average acquisition voltage,
average current and apparent resistivity

测点 序号	电压 平均值/V	电流 平均值/mA	视电阻率/ (Ω·m)
1	0.733 118 154	33.458 920	13.760 103 46
2	0.485 825 972	41.915 843	7.278 839 899
3	0.804 235 768	32.187 820	15.691 030 41
4	1.194 900 377	38.031 751	19.730 814 83
5	0.859 657 450	29.217 250	18.477 607 53
6	1.096 888 566	35.052 688	19.651 731 69
7	1.263 378 208	43.379 592	18.289 741 28
8	0.682 683 889	36.637 423	23.403 692 03
9	0.836 171 095	29.927 125	35.092 943 12
10	0.857 281 187	35.467 587	33.725 612 31
11	0.876 653 312	36.524 637	30.146 132 87
12	1.181 897 041	35.555 490	62.625 888 26

在 MATLAB 中通过二维插值法生成视电阻率云图如图 14 所示。可以观察出左上角低阻异常体大致位置,说明电法系统能够准确采集到电性信息。

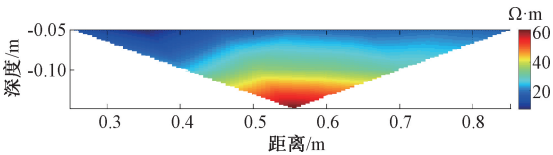


图 14 水池实验视电阻率云图

Fig. 14 Apparent resistivity cloud map of the water tank experiment

2.2 煤矿井下实测实验

在河北邢台某煤矿井下开展了系统可靠性与准确性实际实验验证,电极布设在皮带巷内,进行 7 d 连续监测,系统采集到电流范围为 24.314~49.832 mA。对采集数据进行反演,反演基于光滑约束最小二乘法进行,具体方程式为:

$$(J^T J + uF)d = J^T g \tag{3}$$

其中, $F = f_x f_x^T + f_z f_z^T$ 为光滑约束矩阵, f_x 为水平平面度滤波器, f_z 为垂直平面度滤波器, J 为偏导数矩阵, u 为阻尼因子, d 为模型扰动向量, g 为残差向量。

第 1 和第 7 d 的反演结果如图 15 所示。反演结果显示坐标(40, -2.5)、(120, -7.5)、(200, -18.5)附近存在低阻区,分别定为 1、2、3 号低阻区。根据已有地质资料可知,13 号电极所在位置附近底板下 15~30 m 处存在岩层局部破碎含水反应,与 2 号低阻区相对应;21 号电极所在位置附近底板下 38 m 以浅范围也存在岩层局部破碎含水反应,与 3 号低阻区相对应;1 号低阻区可能为巷道干扰引起的低阻反应。经对比可知,反演结果与实际地质资料对应性

基本良好,验证了系统的准确性。

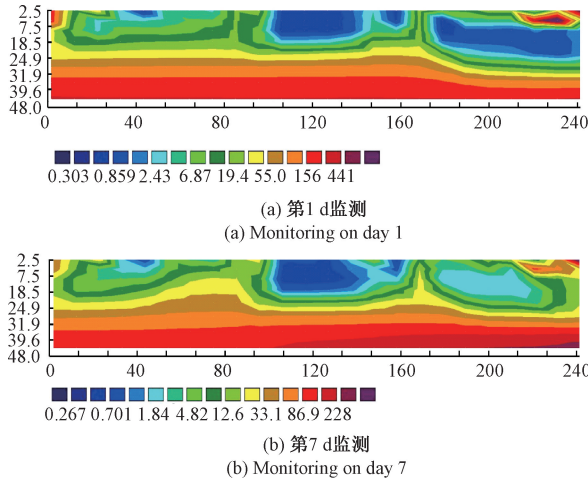


图 15 工作面监测反演图

Fig. 15 Monitoring and inversion map of the working face

3 结 论

本文围绕煤矿工作面底板水害预警的核心需求,针对传统电阻率法在物探应用中存在的局限性,完成了基于 STM32 的矿用本安型电法分布式监测系统的设计与多场景验证。在系统设计过程中,重点通过对 STM32 芯片进行低功耗参数配置,自定义编程,严格选用符合本安标准的元器件以及设计针对性的限制电路等措施,使电法监测系统在能够实现本安化的前提下,同时能够精准获取地下电性信息,从而对井下底板地质情况进行连续监测,并且通过实验验证,证明了仪器系统的稳定性和有效性。

参考文献

[1] 唐珏,王俊.“双碳”目标下煤炭发展及对策建议[J]. 中国矿业,2023,32(9):22-31.
TANG J, WANG J. Coal development and countermeasures under the carbon peaking and carbon neutrality goals[J]. China Mining Magazine, 2023, 32(9):22-31.

[2] 刘盛东,杨彩,章俊,等. 矿井微震与电法耦合监测技术[J]. 煤炭学报,2024,49(1):586-600.
LIU SH D, YANG C, ZHANG J, et al. Mine microseismic and electrical coupling monitoring technology[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(1):586-600.

[3] 《关于防范遏制矿山领域重特大生产安全事件的硬措施》印发[J]. 中国煤炭工业,2024(2):40.
Issuance of hard measures for preventing and containing major and extra-major production safety accidents in the mining sector [J]. China Coal Industry, 2024(2): 40.

[4] 周厚为. 钻探法研判断层走向在煤巷掘进中的应用[J]. 煤炭科技,2022,43(1):118-120.
ZHOU H W. Application of drilling method to judge

- stratum strike in coal roadway excavation[J]. Coal Science & Technology Magazine, 2022, 43(1):118-120.
- [5] 赵冬. 不同综合物探法在缺水地区的水源探测分析[J]. 黑龙江水利科技, 2024, 52(4):119-121, 163.
ZHAO D. Analysis of water source detection in water-scarce areas by different comprehensive geophysical exploration methods [J]. Heilongjiang Hydraulic Science and Technology, 2024, 52(4):119-121, 163.
- [6] 王学元. 矿山水文地质调查与地质灾害调查工作方法研究[J]. 世界有色金属, 2024(3):226-228.
WANG X Y. Research on the working methods of hydrogeological investigation and geological hazard investigation in mines[J]. World Nonferrous Metals, 2024(3):226-228.
- [7] 杨少文, 张平松, 许时昂, 等. 矿井直流电法技术应用现状与展望[J]. 工矿自动化, 2023, 49(8):20-29.
YANG SH W, ZHANG P S, XU SH ANG, et al. Status and prospect of the application of mine DC electrical method technology [J]. Journal of Mine Automation, 2023, 49(8):20-29.
- [8] 陈斌, 汪耀, 胡祥云, 等. 大湾区珠江口海上高密度电法探测[J]. 地球科学, 2020, 45(12):4550-4562.
CHEN B, WANG Y, HU X Y, et al. Marine electrical resistivity tomography research in pearl river estuary of greater bay area[J]. Earth Science, 2020, 45(12):4550-4562.
- [9] 董江鑫, 王飞. 地质雷达和高密度电法联合探测底板含水性的应用[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(5):222-231.
DONG J X, WANG F. Application of GPR and high density electrical method to detect water content of floor[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(5):222-231.
- [10] 段国秀, 贾小旭, 白晓, 等. 电阻率层析成像法在土壤水文学中的应用——基于 CiteSpace 的计量分析[J]. 土壤通报, 2021, 52(6):1447-1459.
DUAN G X, JIA X X, BAI X, et al. Application and progress of electrical resistivity tomography in pedohydrology——Citespace-based quantitative analysis[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2021, 52(6):1447-1459.
- [11] 祝克辉, 王衍学, 戴伟杰. 基于 STM32 与 FPGA 自适应谱线增强轴承故障检测系统[J]. 电子测量技术, 2024, 47(15):161-168.
ZHU K H, WANG Y X, DAI W J. Adaptive spectral line enhanced bearing fault detection system based on STM32 and FPGA [J]. Electronic Measurement Technology, 2024, 47(15):161-168.
- [12] 陈威威, 徐会员, 王峰. 基于 STM32 和 USB 的多功能数据采集系统设计[J]. 电子测量技术, 2024, 47(23):104-113.
CHEN W W, XU H Y, WANG F. Multifunctional data acquisition system based on STM32 and USB bus[J]. Electronic Measurement Technology, 2024, 47(23):104-113.
- [13] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 爆炸性环境第 4 部分: 由本质安全型“i”保护的装置: GB/T 3836. 4—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2022: 05.
State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. Explosive atmospheres—part 4: Equipment protection by intrinsically safe "i": GB/T 3836. 4—2021 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2022: 05.
- [14] 王吉武, 闫野, 金浩, 等. 本质安全理论综述研究[J]. 价值工程, 2019, 38(8):182-185.
WANG J W, YAN Y, JIN H, et al. The review of intrinsic safety[J]. Value Engineering, 2019, 38(8):182-185.
- [15] 黄鹤松, 王家豪, 戴传浩, 等. 基于 XBee3 的矿用本安型低功耗数据采集系统[J]. 煤矿安全, 2021, 52(6):143-148.
HUANG H S, WANG J H, DAI CH H, et al. An intrinsically safe low-power data acquisition system for mine based on XBee3[J]. Safety in Coal Mines, 2021, 52(6):143-148.
- [16] 燕斌. 煤矿井下矿用本安型钻机开孔定向仪的研制[J]. 仪表技术与传感器, 2021(5):63-66.
YAN B. Development of orientation instrument for opening of intrinsically safe drilling rig in coal mine[J]. Instrument Technique and Sensor, 2021(5):63-66.
- [17] 朱前伟. 本安设备常用无源器件选型原则及失效分析[J]. 电气防爆, 2024(6):34-36, 39.
ZHU Q W. Failure analysis and selection of passive device for intrinsic safety equipment [J]. Electric Explosion Protection, 2024(6):34-36, 39.
- [18] 卢健, 郭世旭, 焦君圣, 等. 小型水下探测平台舷侧阵声纳系统设计[J/OL]. 电子测量与仪器学报, 1-10[2026-01-21]. <https://link.cnki.net/urlid/11.2488.TN.20260108.1601.018>.
LU J, GUO SH X, JIAO J SH, et al. Flank array sonar system design for compact underwater exploration pla [J/OL]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 1-10[2026-01-21]. <https://link.cnki.net/urlid/11.2488.TN.20260108.1601.018>.
- [19] 王全增, 封皓, 沙洲, 等. 基于 TDOA 的水下泄漏气泡定向方法[J]. 仪器仪表学报, 2024, 45(8):103-111.
WANG Q Z, FENG H, SHA ZH, et al. Underwater leakage bubble orientation method based on TDOA[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(8):103-111.

作者简介

王淑民, 硕士研究生, 主要研究方向为高密度电法仪器研制与软件开发。

E-mail: wsm23@mails.jlu.edu.cn

易晓峰(通信作者), 博士, 教授, 主要研究方向为磁共振探测方法与仪器、工程与公共安全监测预警技术及装置。

E-mail: yixiaofeng@jlu.edu.cn