

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2519933

# 基于 STM32 的多通道大气腐蚀监测系统设计\*

江明旭 闫炳均 胡波

(中国科学院沈阳自动化研究所机器人与智能系统全国重点实验室 沈阳 110016)

**摘要:** 为了满足大型基础设施及配套设备大气环境下腐蚀状态监测的需求,针对现有腐蚀状态监测系统中存在实时性差、监测精度低的缺点,设计实现一种基于 STM32F407ZGT6 的多通道大气腐蚀监测系统。该系统结合电化学阻抗谱测量技术与双电极原电池电偶探针等效电路模型理论,采用时分多路的方式控制多通道激励信号产生模块产生激励信号作用于各通道的电极系统,利用多通道响应信号采集模块实时采集各个通道电极系统产生的响应电压数据,将计算处理后的电化学阻抗谱数据通过无线通信模块传输至部署在云端服务器的上位机软件,最后分析处理电化学阻抗谱数据,获得腐蚀状态信息。实验结果表明,系统可以实现大气环境下多点位的腐蚀状态分析监测,腐蚀速率的准确度在 90% 以上,且监测数据可以实时准确的传递至监测平台。

**关键词:** 电化学阻抗谱;STM32;多通道;腐蚀速率;在线测量

**中图分类号:** TN919.5 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.8060

## Design of multi-channel atmospheric corrosion monitoring system based on STM32

Gang Mingxu Yan Bingjun Hu Bo

(State Key Laboratory of Robot and Intelligent Systems, Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China)

**Abstract:** In order to meet the requirements of large-scale infrastructure and supporting equipment for corrosion monitoring in atmospheric environment, a multi-channel atmospheric corrosion monitoring system based on STM32F407ZGT6 is designed and implemented, aiming at the shortcomings of poor real-time performance and low monitoring accuracy in the existing corrosion monitoring system. The system combines the electrochemical impedance spectroscopy measurement technology and the theory of the equivalent circuit model of the galvanic probe of the double electrode primary battery, uses the time division multiplexing method to control the multi-channel excitation signal generation module to generate the excitation signal to act on the electrode system of each channel, uses the multi-channel response signal acquisition module to collect the response voltage data generated by the electrode system of each channel in real time, and transmits the calculated and processed electrochemical impedance spectroscopy data to the upper computer software deployed in the cloud server through the wireless communication module, and finally analyzes and processes the electrochemical impedance spectroscopy data to obtain the corrosion state information. The experimental results show that the system can realize multi-point corrosion status analysis and monitoring in atmospheric environment, the accuracy of corrosion rate is more than 90%, and the monitoring data can be accurately transmitted to the monitoring platform in real time.

**Keywords:** electrochemical impedance spectroscopy;STM32;multi-channel;corrosion rate;on-line measurement

## 0 引言

近年来,我国桥梁、铁路、电力输送设备、油气输送管道等大型基础设施及配套设备逐步从建设阶段迈入运营维护

阶段,材料腐蚀问题日益凸显。材料腐蚀每年会造成巨大的经济损失,并引发严重的安全风险。大气腐蚀是材料在自然环境中最常见的腐蚀形式,其本质是材料与大气环境相互作用引发的电化学过程,同时也是发生范围最广、破坏

收稿日期:2025-09-24

\* 基金项目:中国科学院重点部署科研专项(E522080101)资助

性最强的腐蚀形式。因此,准确监测大气腐蚀状况,对大型基础设施的运行维护具有重要意义<sup>[1-3]</sup>。

工业中大气腐蚀监测最常见的方法为挂片失重法,通过计算挂片的重量变化来监测材料腐蚀情况,但该方法计算时间长、无法提供实时信息,难以满足实时在线监测的需求。目前大气腐蚀在线监测方法主要是基于电化学原理衍生出的电阻探针法、电偶探针法、电化学阻抗谱法等方法<sup>[4-6]</sup>,电化学探针法是通过测量金属探针腐蚀前后的电阻变化实现腐蚀状态实时监测的方法,可以快速准确测量腐蚀速率,岳远广等<sup>[7]</sup>基于新型探针研制的大气腐蚀监测系统,可在实时采集长期腐蚀数据的同时,监测温度、湿度、紫外线强度和  $\text{SO}_2$  浓度等关键大气参数。但上述方法仅适合于对均匀腐蚀进行长期监测,而不适用于材料局部腐蚀监测;电偶探针法则是基于电偶腐蚀原理设计的电偶型探针,通过监测电偶探针两种电极材料与外界环境组成的腐蚀原电池中的电偶电流来评估腐蚀状态。潘建乔等<sup>[8]</sup>设计的双电极原电池电偶探针,可以有效监测外界大气环境变化对腐蚀状态以及腐蚀速率的影响。但该方法电偶探针的灵敏度会随着腐蚀锈层的变厚而降低;电化学阻抗法的原理是对电极系统施加小振幅的不同频率的正弦波扰动信号,通过采集电极系统的响应信号和正弦波扰动信号确定系统的阻抗,得到电化学阻抗谱曲线,进而分析材料腐蚀状态。张晓东等<sup>[9]</sup>基于电化学阻抗谱技术设计的海水管路腐蚀监测系统,通过实时监测管路绝缘垫片的电阻变化,实现对海水管路腐蚀状态的监测,该方法通过调整监测探头类型适用于大气环境下的腐蚀状态监测。但该方法问题在于许多情况下,实际监测时得到的电化学阻抗谱数据进行等效电路模型拟合时,缺乏相对应的理论模型,难以获得准确的腐蚀状态信息<sup>[10]</sup>。

基于上述分析,本文将电偶探针法与电化学阻抗谱法相结合,选择双电极原电池电偶探针作为腐蚀监测电极,系统以 STM32F407ZGT6 为控制核心产生小幅值正弦激励电流信号分别作用于各通道连接的腐蚀监测电极,并采集各个腐蚀监测电极系统产生的响应电压信号计算得到电化学阻抗谱数据,通过无线通讯方式将电化学阻抗谱数据上传至云端服务器。部署在云端服务器中的上位机软件以双电极原电池电偶探针腐蚀等效电路模型理论为基础,分析处理电化学阻抗谱数据,从而获得腐蚀状态信息。该系统可以实时采集多路腐蚀电极系统电化学阻抗谱数据,同时获取金属材料在大气环境下多点位的腐蚀状态监测信息,另外采用基于双电极原电池电偶探针的腐蚀等效电路模型分析电化学阻抗谱数据信息,大大提高计算得到的腐蚀速率准确度。

## 1 系统总体方案设计

### 1.1 系统测量原理

腐蚀监测系统采用电化学阻抗谱法测量腐蚀状态信

息,电化学阻抗法是一种以小振幅正弦波电流信号为激励信号的电化学测量方法,通过对腐蚀体系施加小振幅的激励信号,使得产生的响应信号与激励信号之间近似呈线性关系,然后分析腐蚀体系响应信号与激励信号之间的关系,获得材料的极化电阻,最后分析得出包括腐蚀速率在内的腐蚀状态信息<sup>[11-13]</sup>。本系统测量原理示意图如图 1 所示。

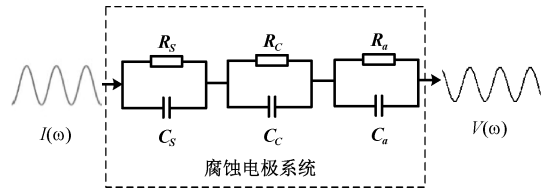


图 1 腐蚀监测系统测量原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of measurement principle of corrosion monitoring system

其中,  $R_s$ 、 $C_s$  分别表示腐蚀电极系统中腐蚀环境阻抗与腐蚀环境容抗,  $R_c$ 、 $C_c$  分别表示腐蚀电极系统中阴极反应过程阻抗和阴极反应过程容抗,  $R_a$ 、 $C_a$  分别表示腐蚀电极系统中阳极反应过程阻抗和阳极反应过程容抗。

首先向双电极原电池电偶探针组成的腐蚀电极系统输入小振幅正弦波激励电流信号  $I(\omega)$ , 腐蚀电极系统在激励电流信号的激励作用下产生响应信号  $V(\omega)$ , 其中  $\omega = 2\pi f$ ,  $f$  表示正弦激励信号的频率, 按照式(1) 计算获得到在当前频率下, 腐蚀电极系统等效电路的复阻抗信息  $Z(\omega)$ 。

$$Z(\omega) = \frac{V(\omega)}{I(\omega)} \quad (1)$$

通过调整激励电流信号的激励频率从低频段逐渐增加至高频段, 即可得到腐蚀电极系统腐蚀等效电路的电化学阻抗谱曲线。根据腐蚀电极系统等效电路结构, 对测量得到的电化学阻抗谱曲线进行拟合计算, 获得腐蚀电极系统等效电路各部分具体参数, 然后通过对上述参数进行具体分析, 获取当前大气腐蚀状态。然后根据式(2)~(4) 计算得到当前腐蚀状态下的腐蚀速率  $V_{cr}$ 。

$$R_p = R_c + R_a \quad (2)$$

$$I_{crro} = \frac{B}{R_p} \quad (3)$$

$$V_{cr} = \frac{I_{crro} \cdot K \cdot M}{n \cdot \rho} \quad (4)$$

其中,  $R_p$  表示腐蚀等效电路极化电阻,  $B$  表示 Stern-Geary 系数,  $I_{crro}$  表示腐蚀电流密度,  $K$  表示腐蚀速率计算常数与外界环境以及腐蚀材料相关,  $M$  表示腐蚀电极系统材料的平均摩尔系数,  $n$  表示材料电化学腐蚀过程中产生离子的电荷量,  $\rho$  表示腐蚀材料密度。最后根据计算得到的腐蚀状态  $\rho$  以及腐蚀速率对在大气环境下材料的腐蚀状态进行综合评估。

### 1.2 系统架构

系统的整体架构图如图 2 所示。腐蚀监测系统由硬件

电路和软件程序两部分组成。硬件电路主要由多通道激励信号产生模块、多通道响应信号采集模块、无线通信模块以及嵌入式控制器 STM32F407ZGT6 组成,嵌入式控制器通过串行外设接口(serial peripheral interface, SPI)控制多通道激励信号产生模块产生 4 路激励电流信号分别作用于各通道连接的双电极原电池电偶探针组成的腐蚀监测电极系统,多通道响应信号采集模块按照嵌入式控制器控制指令实时采集各个腐蚀监测电极系统产生的响应电压信号,并通过 SPI 传输至嵌入式控制器。嵌入式控制器根据式(1)计算得出电化学阻抗谱数据,然后经通用异步接口(universal asynchronous receiver/transmitter, UART)将电化学阻抗谱数据传输至无线通信模块,无线通信模块按照消息队列遥测传输协议(message queuing telemetry transport, MQTT),将采集处理得到的电化学阻抗谱数据无线传输至云端服务器数据库。

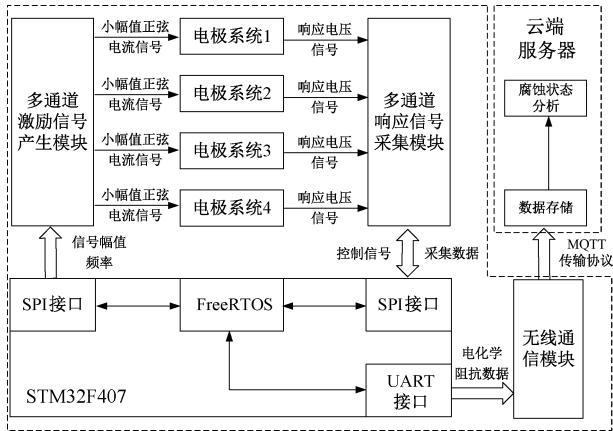


图2 腐蚀监测系统整体架构示意图

Fig.2 Schematic diagram of overall structure of corrosion monitoring system

腐蚀监测系统的软件程序主要由部署在云端服务器的上位机软件与运行在嵌入式控制器 STM32F407ZGT6 内的数据采集处理传输软件。上位机软件负责读取云端服务器数据库中存储的电化学阻抗谱数据,以双电极原电池电偶探针腐蚀等效电路模型为理论基础,分析处理获得包括腐蚀速率在内的腐蚀状态信息。数据采集处理传输软件主要由各个硬件电路模块的驱动程序以及在电化学阻抗谱数据计算处理程序。

## 2 硬件电路设计

### 2.1 多通道激励信号产生模块

多通道激励信号产生模块负责生成频率覆盖低频到高频、幅度较小的正弦波激励电流信号,并分别作用与 4 个独立通道所连接的电极系统,具体硬件电路如图 3 所示。

多通道激励信号产生模块电路主要由激励信号产生电路、多通道切换电路以及信号转换电路组成。首先,激励信号产生电路产生相位、频率可调的小幅值正弦激励电压信

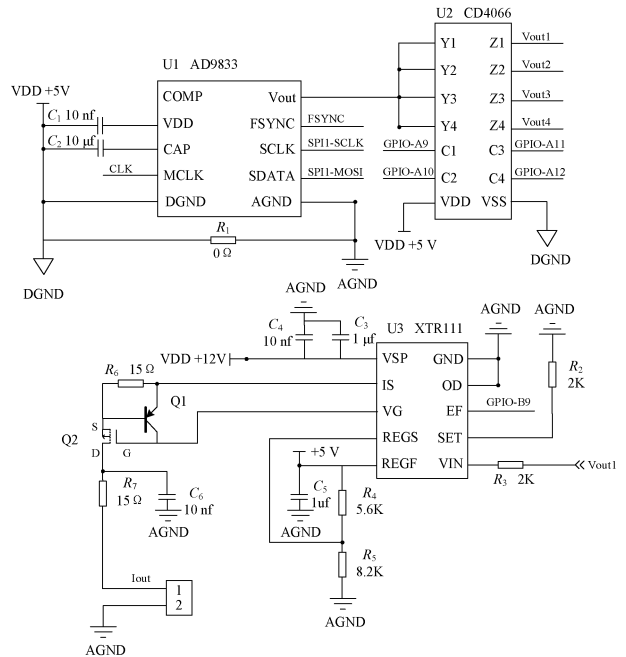


图3 多通道激励信号产生模块硬件电路图

Fig.3 Hardware circuit diagram of multi-channel excitation signal generation module

号,然后多通道切换电路将产生的电压信号分别传输至各个电极系统对应通道,最后利用信号转换电路将产生的小幅值正弦激励电压信号转换成激励电流信号后,作用于各个电极系统。下面结合硬件电路图分别进行具体介绍。

激励电流信号产生电路以数字频率合成器 AD9833 芯片为核心进行设计,AD9833 芯片是一款低功耗、高分辨率的直接数字频率合成芯片,最高工作频率为 12.5 MHz,频率分辨率小于 0.01 Hz,可产生精确的正弦波、方波和三角波信号,相比于电流型直接数字频率合成芯片,AD9833 芯片产生的频率分辨率较高、频率范围更宽,符合整体系统对产生的激励信号频率以及信号类型的要求;并且 AD9833 数字频率合成器采用 SPI 通讯,主控模块通过 SPI 可以实时控制产生波形的频率、幅值、相位等具体参数,可以有效提高主控模块控制激励信号产生模块生成激励信号精度。AD9833 芯片采用 5 V 单电源供电,通过 VDD 引脚进行供电,AGND 和 DGND 分别连接系统模拟地和数字地,两者之间通过 0  $\Omega$  电阻进行隔离;CAP 引脚为芯片内部 2.5 V 稳压器去耦电容外接引脚,MCLK 管脚作为 AD9833 数字频率合成器时钟输入管脚,连接 25 MHz 频率输入信号作为芯片时钟源,FSYNC、SCLK、SDATA 引脚为三线 SPI 通信协议接口负责与嵌入式控制器进行通信,接收嵌入式控制器发送的控制指令产生相应频率的激励电压信号。

多通道切换电路主要负责将激励信号产生电路产生的激励电压信号以时分多路的方式,分别传输至各个电极系统对应通道,相比于每个通道单独设计激励信号产生电路,采用多通道切换电路分别切换的方式可以有效降低硬件电

路设计复杂度以及整体功耗。多通道切换电路选择 CMOS 四通道双向模拟开关集成电路 CD4066 为核心进行设计, CD4066 采用宽范围单电源供电, 具有较低的导通电阻以及快速导通切换能力, 从而有效降低多通道切换电路对激励电压信号造成的误差和干扰。图 3 中 CD4066 模拟开关的 Y1、Y2、Y3、Y4 引脚分别为 4 个通道的输入端, 全部接入激励信号产生电路的电压信号输出端  $V_{out}$ , CD4066 模拟开关 4 个通道的输出引脚 Z1、Z2、Z3、Z4 分别连接各通道电极系统, CD4066 模拟开关的 C1、C2、C3、C4 引脚分别为模拟开关各个输出通道的控制开关, 嵌入式处理器通过输出高低电平的方式分别控制各个通道的通断, 从而实现输出信号通道的切换。

信号转换电路将前端电路输出的激励电压信号转换为激励电流信号后, 作为各通道连接的电极系统, 信号转换电路选用精密电压至电流转换芯片 XTR111 进行设计, XTR111 转换器具备极低的非线性误差和温度漂移, 确保输入电压与输出电流呈现高精度线性转换, 满足本系统对激励电流信号精度的要求, 另外 XTR111 具有高效的驱动能力, 可以通过外部连接三极管有效提高输出激励电流信号的幅值范围。图 3 中主要展示通道 1 信号转换电路硬件电路图, 另外 3 个通道的信号转换电路完全一致, 其中 XTR111 芯片接受  $+8 \sim 40$  V 宽范围供电, OD 引脚作为 XTR111 芯片使能引脚, 默认低电平使能工作, EF 引脚作为芯片故障输出引脚, 当芯片工作异常时输出高电平信号, 嵌入式控制器通过监测该引脚输出电平, 实时监测各个通道输出电流的工作状态; VIN 引脚与 IS 引脚分别为电压信号输入引脚与电流信号输出引脚, 其中输入电压  $V_{in}$  与输出电流  $I_{out}$  的转换关系如式(5)所示。

$$I_{out} = 10 \cdot (V_{in}/R_{set}) \quad (5)$$

其中, 调节电阻  $R_{set}$  为 SET 引脚连接的电阻  $R_3$ , 结合激励信号产生电路产生的激励电压信号幅值范围为  $0 \sim 5$  V, 以及电极系统激励所需电流信号幅值在  $10 \sim 20$  mA, 因此选择电阻  $R_3$  为  $2\ 000\ \Omega$ , 然后 PNP 三极管 Q1 与 PMOS 管 Q2 共同组成电流放大电路, 该部分一方面可以提高输出电流信号的带载能力, 避免电极系统输入阻抗过大, 导致多通道激励信号产生模块产生的激励电流信号幅值降低现象的发生, 另外一方面该部分电路利用 PNP 管发射极-集电极间具有反向耐压特性, 防止电极系统短路对多通道激励信号产生模块的损害。

## 2.2 多通道响应信号采集模块

多通道响应信号采集模块主要负责采集各个电极系统在激励电流信号作用下产生的响应电压信号, 多通道响应信号采集模块选用高精度模数转换器 AD7606-4 作为电路主体进行设计, AD7606-4 是一款 16 位、4 通道同步采样模数转换系统, 符合大气腐蚀监测系统同时采集 4 路电极系统激励电压信号的需求。AD7606-4 高精度模数转换器内部集成低噪声、低温漂带隙基准电压源, 相较于外部基准电

压源, 内部电压源更加精准稳定, 可以有效保证数据采集转换精度<sup>[14-15]</sup>。另外 AD7606-4 高精度模数转换器采样最高可以达到 200 KHz, 满足大气腐蚀监测系统电化学阻抗谱的  $0.1\ \text{Hz} \sim 100\ \text{KHz}$  采集频率范围的要求。AD7606-4 高精度模数转换器同时支持 SPI 串行总线通讯与并行高速通讯两种方式, 在本系统嵌入式控制器 STM32F407ZGT6 通过 SPI 控制高精度模数转换模块电路进行模数转换, 并将转换后的数据通过 SPI 进行读取。多通道响应信号采集模块硬件电路示意图如图 4 所示, 其中高精度模数转换器 AD7606-4 未使用的管脚并未展示。

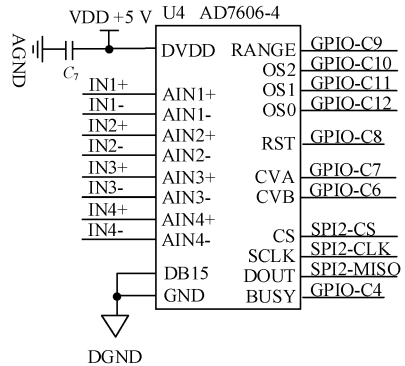


图 4 多通道响应信号采集模块硬件电路图

Fig. 4 Hardware circuit diagram of multi-channel response signal acquisition module

首先高精度模数转换器 AD7606-4 采用 5 V 单电源供电方式工作, AIN1+, AIN1-, AIN2+, AIN2-, AIN3+, AIN3-, AIN4+, AIN4- 分别对应 4 个通道的差分信号输入, RANGE 引脚对应控制输入信号范围, 当该引脚置低时输入信号范围为  $\pm 5$  V, 当该引脚置高时输入信号范围为  $\pm 10$  V, OS0、OS1、OS2 引脚共同决定高精度模数转换器 AD7606-4 的过采样频率, 在本系统设计中, 默认上述引脚置低电平不进行过采样; RST 引脚为软复位控制引脚, CVA、CVB 引脚为通道启动转换控制引脚, CVA 负责控制通道 1 和通道 2 的启动转换, CVB 负责控制通道 3 和通道 4 的启动转换, CS 负责 SPI 总线片选使能, 低电平使能片选开始与嵌入式控制器进行数据通信, SCLK 与 DOUT 引脚分别为 SPI 时钟总线与数据总线接口, 嵌入式控制器 STM32F407ZGT6 通过 CS、SCLK、DOUT 引脚控制高精度模数转换器 AD7606-4 的采集模式, 并读取高精度模数转换器 AD7606-4 采集的各通道电极系统产生的响应电压信号。另外当 AD7606-4 采用 SPI 串行通信协议进行数据通信时, 需将 DB15 引脚置低电平。

## 2.3 无线通信模块

嵌入式控制器读取获得多通道响应信号采集模块采集的响应电压信号, 结合多通道激励信号产生模块产生的激励电流信号, 按照电化学阻抗谱计算公式计算得出电化学阻抗谱数据后, 需要将电化学阻抗谱数据上传至上位机中,

但是大气腐蚀监测系统需长期工作在偏远山区、隧道等复杂恶劣的野外环境下,传统的基于长距离传输电缆的数据传输方式无法适用于上述环境,因此本系统设计实现无线通信模块,采用无线传输方式通过4G通信网络将电化学阻抗谱数据传输至云端服务器。无线通信模块采用WH-LTE-7S1无线网络传输模块进行设计,WH-LTE-7S1无线网络传输模块是基于LTE Cat-1网络的无线通信模块,可以实现串口与网络的双向数据透明传输,支持2G/4G网络传输以及MQTT异步消息远程传输协议,满足本系统对无线通信模块数据传输稳定可靠的要求,另外WH-LTE-7S1无线网络传输模块集成度高,开发难度低,硬件上只需通过串行通信接口即可控制完成无线通信传输。无线通信模块功能结构框图如图5所示。

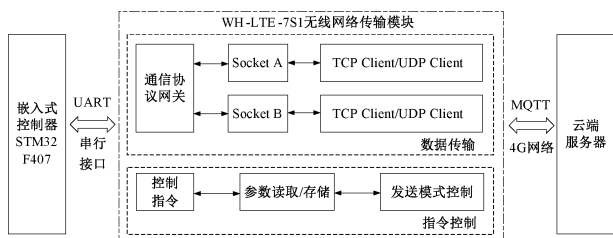


图5 无线通信模块功能结构框图

Fig. 5 Functional structure block diagram of wireless communication module

首先嵌入式控制器STM32F407ZGT6通过UART与WH-LTE-7S1无线网络传输模块进行数据传输与指令控制,在数据传输方面,无线网络传输模块的通信协议网关将嵌入式控制器发送的串行协议数据包转换成基于以太网通信协议的Socket数据包,然后采用TCP/UDP网络层传输协议将数据通过4G网络传输至云端服务器,并且无线网络传输模块支持两路独立Socket的传输,在提高传输效率的同时,两路Socket互为冗余备份,有效提高数据传输的可靠性。另外无线网络传输模块采用MQTT应用层数据传输协议,从而保证在带宽有限、网络不稳定的无线网络传输情况下,数据的安全稳定可靠传输;在指令控制方面,无线网络传输模块内部具有指令控制解析状态机,在接收嵌入式控制器发送的控制指令包后,解析控制指令包中的参数,并按照上述参数设置无线网络传输模块的传输模式,同时记录存储上述参数,当系统重新启动后仍可按照配置自动传输。

### 3 软件程序设计

大气腐蚀监测系统的软件设计包括运行在嵌入式控制器STM32F407ZGT6内的数据采集处理传输软件和部署在云端服务器的上位机软件两部分组成。数据采集处理传输软件实现的任务包括系统初始化、多通道激励电流信号产生、多通道响应电压信号数据采集、电化学阻抗谱数据计算以及数据无线通信传输任务。上位机软件则负责实现

读取电化学阻抗谱数据,以及结合腐蚀等效电路模型理论分析处理获得包括腐蚀速率在内的腐蚀状态信息。下面分别对各部分程序进行具体介绍。

#### 3.1 数据采集处理传输软件初始化程序设计

由于数据采集处理传输软件需要执行的任务多,且各个任务对于实时性要求不尽相同,为高效有序实现各任务之间的系统调度管理,数据采集处理传输软件采用FreeRTOS嵌入式实时操作系统作为基础<sup>[16]</sup>,进行软件功能的开发实现。数据采集处理传输软件初始化程序主要负责实现嵌入式控制器外设初始化、FreeRTOS嵌入式实时操作系统初始化以及各执行任务的资源调度分配工作,数据采集处理传输软件初始化程序流程框图如图6所示。

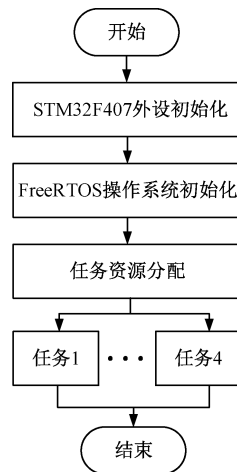


图6 数据采集处理传输软件初始化程序流程框图

Fig. 6 Flow chart of initialization program for data acquisition, processing and transmission software

首先程序对STM32F407ZGT6嵌入式控制器的外设驱动进行初始化,具体包括与多通道激励信号产生模块与多通道响应信号采集模块通信所使用的SPI初始化,无线通信模块通讯所适用的UART初始化以及FreeRTOS实时操作系统使用的定时器外设与系统中断外设初始化;然后FreeRTOS实时操作系统进行系统初始化,具体包括系统整体运行空间的分配、系统时钟源的选取以及系统中断设置等相应初始化操作,从而确保FreeRTOS实时操作系统可以稳定运行。接下来根据要实现功能的空间大小和实时性要求,分别为各个任务分配存储空间以及设置任务优先级,其中,多通道激励电流信号产生任务和多通道响应电压信号数据采集任务对实时性要求较高,赋予上述任务高优先级,电化学阻抗谱数据计算任务需根据数据长度划分足够的存储空间,并赋予该任务中优先级,无线通信传输任务相较于上述任务实时性要求较低,因此赋予该任务低优先级。

#### 3.2 多通道激励电流信号产生程序设计

多通道激励电流信号产生程序负责实现产生激励电流信号并分别作用与各个通道连接的电极系统,程序的具体

流程如图 7 所示。

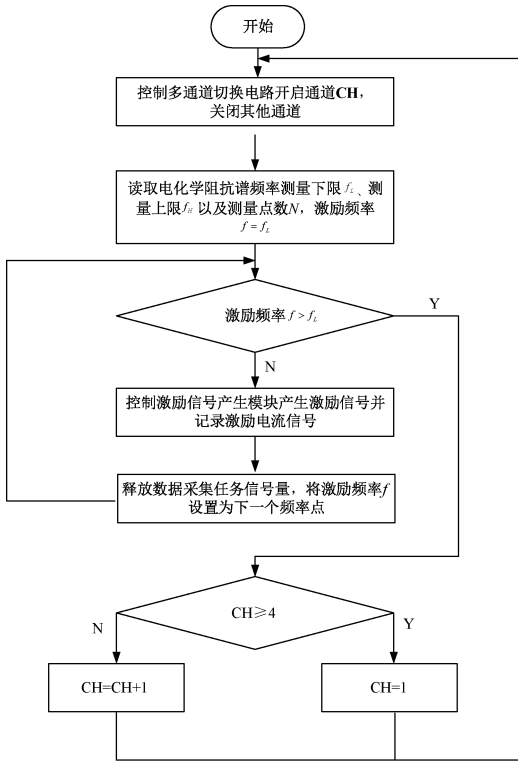


图 7 多通道激励电流信号产生程序流程框图

Fig. 7 Flow chart of multi-channel excitation current signal generation program

首先程序控制控制多通道切换电路开启通道 CH, 并关闭其他通道, 然后读取预先设定的电化学阻抗谱测量下限频率  $f_L$ 、测量上限频率  $f_H$  以及测量点数  $N$ , 结合双电极原电池电偶探针腐蚀机理, 设定电化学阻抗谱测量下限频率  $f_L$  为 0.1 Hz, 电化学阻抗谱测量上限频率  $f_H$  为 100 KHz, 将整个测量频率范围等比例划分为 50 份, 测量点数  $N=50$ ; 然后软件程序从测量下限频率  $f_L$  开始, 控制多通道激励信号产生模块产生当前频率下的激励电流信号幅值, 激励电流信号成功产生并记录存储至数据缓存区后, 释放采集任务信号量通知通道响应电压信号数据采集任务开始进行数据采集, 并将激励频率设置为下一个频率点, 重复上述过程直至采集至测量上限频率  $f_H$ ; 接下来控制控制多通道切换电路开启下一个通道, 并重复上述过程。

### 3.3 多通道响应电压信号采集程序设计

为保证多通道响应电压信号采集模块采集的响应电压信号能够与激励电流信号完全对应, 因此多通道响应电压信号采集任务只有获取到多通道激励电流信号程序释放的采集任务信号量后, 系统控制 SPI 向多通道响应信号采集模块发送开始采集指令, 并通过 SPI 读取高精度模数转换器 AD7606-4 采集的响应电压数据, 然后将采集的响应电压数据、当前响应电压信号对应的激励频率已经相应通道号存储至数据缓存区; 当存储成功后, 释放数据读取信号

量, 通知电化学阻抗谱数据计算任务开始进行电化学阻抗谱计算。最后等待接收下一次采集任务信号量, 多通道响应电压信号采集程序流程框图如图 8 所示。

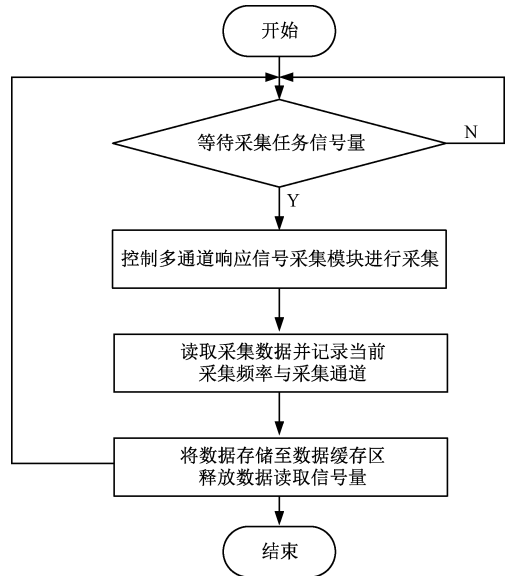


图 8 多通道响应电压信号采集程序流程框图

Fig. 8 Flow chart of multi-channel response voltage signal acquisition program

### 3.4 电化学阻抗谱数据计算程序设计

电化学阻抗谱数据计算任务主要根据腐蚀测量原理中的电化学阻抗谱计算公式进行计算, 首先任务开始后等待接收读取信号量, 当接收到读取信号量后, 从数据缓存区中读取当前激励频率、相应通道号、激励电流信号幅值以及产生的响应电压数据, 然后根据式(1), 计算腐蚀电极系统的复阻抗信息, 计算完毕后将复阻抗信息数据存储至发送缓存区, 并等待下一个读取信号量, 电化学阻抗谱数据计算程序流程框图如图 9 所示。

### 3.5 数据无线通信传输程序设计

数据无线通信传输程序主要采用定时发送的方式, 将发送缓存区中的电化学阻抗谱数据通过 4G 通信网络传输至部署在云端服务器的数据库。首先数据无线通信传输程序读取闪存 (flash EEPROM memory, FLASH) 中对无线通信模块的传输地址、传输方式在内的传输配置参数, 并据此设置无线通信模块的工作模式, 然后根据系统完成一次电化学阻抗谱测量下限到测量上限的扫频测量时间, 设置定时时间间隔, 在本系统中完成一次扫频测量的时间约为 45 min, 因此设置定时时间间隔为 1 h, 每当到定时时间后, 程序读取发送缓存区数据, 将发送缓存区数据按照配置信息中规定的数据发送格式进行打包并发送, 并程序具有数据包发送检测机制, 当发现数据包发送失败时, 重新发送数据包; 当数据包连续超过 3 次发送失败, 则放弃重新发送本包数据, 继续发送下一包数据, 同时记录存储数据包发送失败信息。

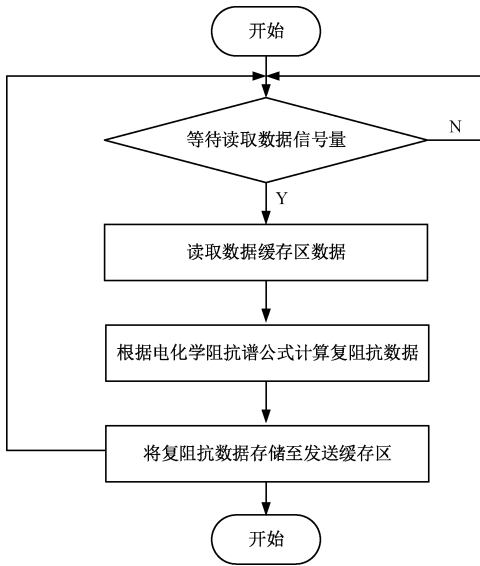


图9 电化学阻抗谱数据计算程序流程框图

Fig. 9 Flow chart of electrochemical impedance spectroscopy data calculation program

### 3.6 上位机程序设计

上位机程序采用 Python 语言,于 PyCharm 2024.1 集成开发环境中进行设计开发,负责根据实现根据电化学阻抗谱数据分析处理获得包括腐蚀速率在内的腐蚀状态信息,上位机程序的整体流程框图如图 10 所示。

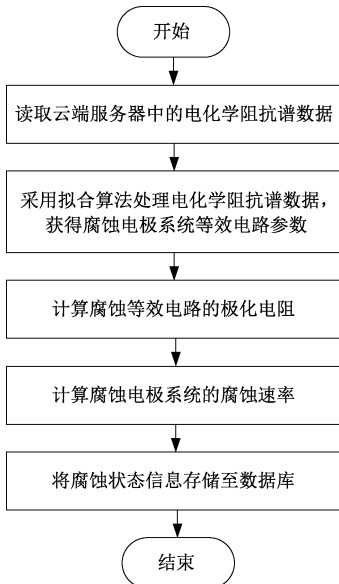


图10 上位机程序流程框图

Fig. 10 Upper computer program flow diagram

首先程序读取存储在云端服务器数据库中的电化学阻抗谱数据,然后以双电极原电池电偶探针腐蚀等效电路模型为理论基础,采用非线性最小二乘拟合算法对电化学阻抗谱数据进行拟合处理,由于腐蚀电极系统等效电路模型阻抗响应与电路元件参数呈非线性关系。实际腐蚀过程存

在电化学与扩散传质耦合、非理想元件引入等复杂性,传统线性拟合算法无法适配其非线性本质。非线性最小二乘拟合算法可通过迭代优化最小化残差,有效降低测量噪声干扰,提升参数估算精度,满足腐蚀状态精准监测对等效电路参数求解的需求;在获得腐蚀电极系统等效电路模型中包括阴极反应过程阻抗  $R_c$  和阳极反应过程阻抗  $R_a$  在内的等效电路参数后,根据式(2)计算得到极化电阻  $R_p$ ,接下来将极化电阻  $R_p$  代入式(3)中获得腐蚀电流密度  $I_{cor}$ ,并代入腐蚀速率计算式(4)计算获得腐蚀速率  $V_{cr}$ 。最终上位机程序将上述步骤获得等效电路模型参数以及腐蚀速率等腐蚀状态信息存储至数据库中。

## 4 系统测试验证

为了测试并验证本文设计的大气腐蚀监测系统的测量精度与腐蚀监测分析效果,在沈阳户外大气环境下搭建模拟测试平台,对双电极原电池电偶探针的大气腐蚀进行为期3个月的腐蚀状态监测,测试时间为2025年9月1日~2025年11月1日,模拟测试平台如图11所示,大气腐蚀检测系统模拟测试平台主要包括4路腐蚀电极系统、大气腐蚀监测变送器以及部署在云端的远程服务器组成,其中腐蚀电极系统通道1和通道3采用X80管线钢材质制作的双电极原电池电偶探针,通道2和通道4采用H62黄铜材质制作的双电极原电池电偶探针,大气腐蚀监测变送器基于上文所述的硬件电路进行设计制作,部署在云端的远程服务器采用阿里云商用云端服务器,服务器中运行部署MySQL 8.0数据库以及上文设计实现的上位机软件,模拟测试平台具体实物如图11所示。



图11 模拟测试平台示意图

Fig. 11 Schematic diagram of simulation test platform

云端远程服务器存储的电化学阻抗谱数据部分截图,如图12所示。

其中 dev\_id 表示设备节点号,channel\_type 表示大气腐蚀监测系统的监测通道,其中数字 0~3 对应监测通道 1~4,dev\_check\_time 表示腐蚀电极系统电化学阻抗数据采集时间,sensor\_positive 表示大气腐蚀监测系统采集的电化学阻抗实部数据,sensor\_negative 表示大气腐蚀监测系统采集的电化学阻抗虚部数据。然后从存储的电化学阻

	123_dev_id	123_channel_type	123_dev_check_time	123_sensor_positive	123_sensor_negative
1007	1,111,111,202,506,200,017	2	2025-07-01 13:13:22	[-2004172672,7000195, 1038426944,99961734	
1008	1,111,111,202,506,200,016	3	2025-07-01 13:09:52	[53855076,-103799651, 6322893696,308557632	
1009	1,111,111,202,506,120,018	1	2025-07-01 13:06:12	[-287465024,3222236, 311945056,-193198168	
1010	1,111,111,202,506,200,014	2	2025-07-01 12:45:31	[217084480,492722688, 291610016,-98517728	
1011	1,111,111,202,506,200,009	2	2025-07-01 12:07:30	[185907856,162373552, 77301344,-6189063,55	
1012	1,111,111,202,506,120,018	0	2025-07-01 11:53:20	[-751357632,27185033, -74021912,275133600,	
1013	1,111,111,202,506,200,017	1	2025-07-01 11:52:53	[16913266,16454184,16, -689909,19,337856,28,	
1014	1,111,111,202,506,200,009	1	2025-07-01 11:22:55	[26602448,1111749760, 5098450,5,-262181888	
1015	1,111,111,202,506,200,014	1	2025-07-01 11:21:13	[-170278976,13795979, -228793216,-16611896	
1016	1,111,111,202,506,200,017	0	2025-07-01 11:08:30	[-298992160,-83627534, 1447117056,212452416	
1017	1,111,111,202,506,200,016	1	2025-07-01 11:00:44	[30884974,19815302,16, [-2413652,25,-505301,3	
1018	1,111,111,202,506,200,016	0	2025-07-01 10:01:18	[-138203856,29990556, 112473304,-37217446	

图 12 云端远程服务器电化学阻抗谱存储数据截图

Fig. 12 Screenshot of electrochemical impedance spectroscopy data stored in cloud remote server

抗谱数据中选取两条数据进行分析。

晴朗干燥大气环境下和阴雨湿润环境下 X80 管线钢腐蚀电极测量结果分别如图 13、14 所示。晴朗干燥大气环境下和阴雨湿润环境下 H63 黄铜腐蚀电极测量结果分别如图 15、16 所示,其中图 13(a)、14(a)、15(a)、16(a)表示根据电化学阻抗谱实部与虚部数据计算的电化学阻抗模值与频率关系图,图 13(b)、14(b)、15(b)、16(b)表示电化学阻抗谱数据复阻抗相位与频率关系图。从图 13(a)、14(a)、15(a)、16(a)电化学阻抗模值与频率关系图对比分析可以发现,两种材料的腐蚀电极在低频段均呈现明显阻性特征,表现为等效电路模值较高,随着频率的增加腐蚀电极等效电路呈现容抗电路,电路模值明显降低,但是在晴朗干燥大气环境下等效电路整体的模值明显大于在阴雨湿润环境,并且由于 H63 黄铜相比于 X80 管线钢具有良好的耐腐蚀特性,其在两种环境下的等效阻抗明显高于 X80 管线钢腐蚀电极。

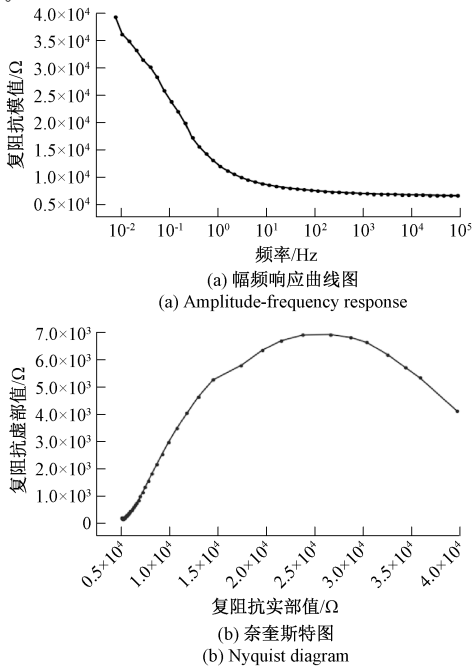


图 13 晴朗干燥环境下 X80 管线钢腐蚀电极测量结果  
Fig. 13 Measurement results of X80 pipeline steel corrosion electrode in sunny and dry environment

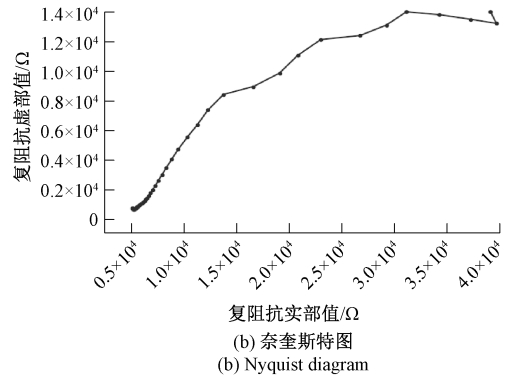
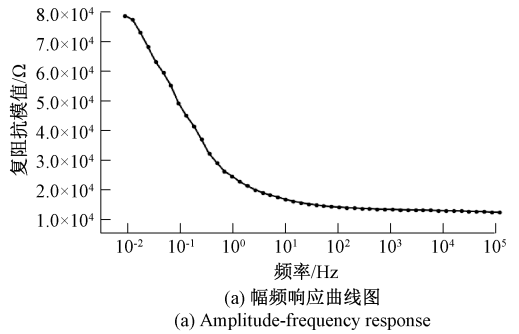


图 14 晴朗干燥环境下 H63 黄铜腐蚀电极测量结果  
Fig. 14 Measurement results of H63 Brass Corrosion electrode in sunny and dry environment

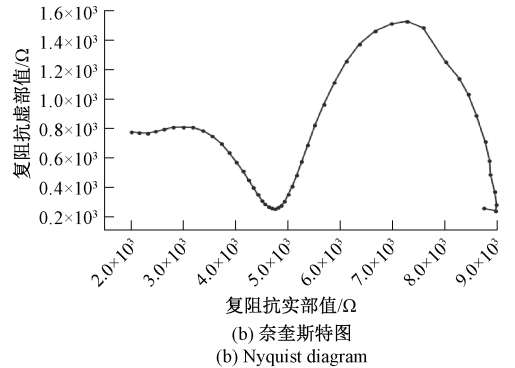
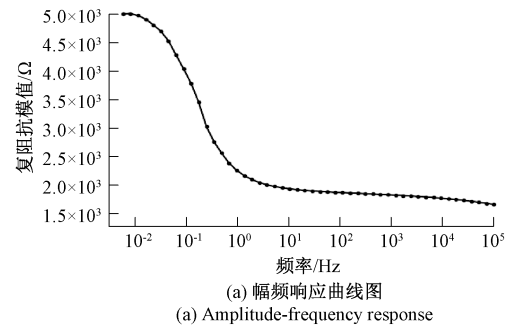


图 15 阴雨湿润环境下 X80 管线钢腐蚀电极测量结果  
Fig. 15 Measurement results of X80 pipeline steel corrosion electrode in rainy and humid environment

图 13~16 中各(a)、(b)子图对应的奈奎斯特图(Nyquist plot)显示,两种材料在不同大气环境下的阻抗特

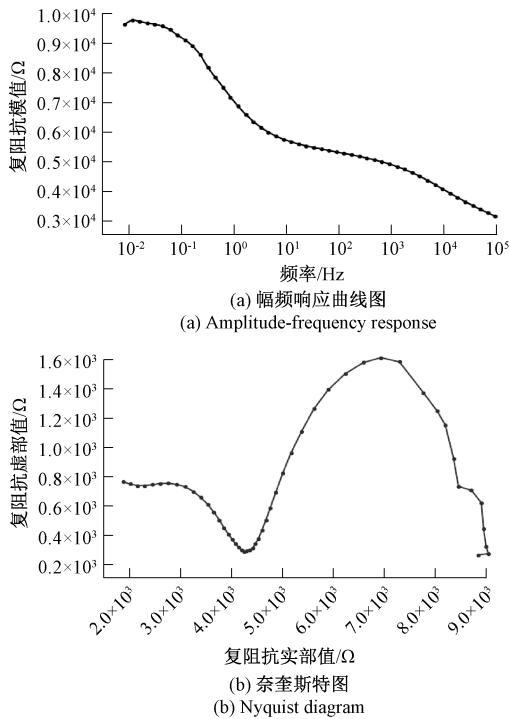


图16 阴雨湿润环境下 H63 黄铜腐蚀电极测量结果

Fig. 16 Measurement results of H63 Brass Corrosion electrode in rainy and humid environment

征存在显著差异:

在晴朗干燥环境下, X80 管线钢与 H63 黄铜腐蚀电极的奈奎斯特曲线均呈现单一半圆形态, 表明该环境下电极表面腐蚀过程以电荷转移控制为主, 界面整体表现为阻容复合特征。对比可见, X80 管线钢腐蚀电极的半圆直径显著小于 H63 黄铜, 根据电化学阻抗谱理论, 奈奎斯特曲线半圆直径与电荷转移电阻正相关, 电荷转移电阻越小, 腐蚀反应阻力越小, 腐蚀速率越高, 由此可判定 X80 管线钢的阳极氧化速率显著高于 H63 黄铜。

在阴雨湿润环境下, 两种腐蚀电极的奈奎斯特曲线均转变为双半圆形态。高频段半圆对应电极表面腐蚀产物膜的电容与电阻, 低频段半圆对应腐蚀反应的电荷转移过程, 表明湿润环境下腐蚀过程从单一电荷转移控制, 转变为“膜层阻抗-电荷转移”协同控制的多步反应机制, 阳极氧化与阴极还原反应的动力学速率均显著提升。即便耐腐蚀性更优的 H63 黄铜, 其低频段半圆直径也明显小于干燥环境, 表明腐蚀反应阻力降低, 腐蚀程度加剧。

上述阻抗特征变化与湿润环境加速金属腐蚀、不同材料耐蚀性差异主导阻抗大小的客观规律一致, 验证了本文设计的大气腐蚀监测系统可实现对多种金属材料在不同大气环境下腐蚀状态的精准监测。

部署在云端服务器的上位机软件一方面存储电化学阻抗谱数据, 另外一方面根据上文介绍的测量原理计算并存储得到的腐蚀速率, 本系统计算存储的腐蚀速率截图如

图 17 所示。

id	dev_id	channel_type	update_time	corrosion_rate	corrosion_mode
9693	26.090	1,111,111,202,506,120,026	3 2025-09-22 13:18:56	0	4
9694	26.092	1,111,111,202,506,120,026	0 2025-09-22 14:03:19	0.0521	2
9695	26.095	1,111,111,202,506,120,026	0 2025-09-22 14:03:19	0.0521	2
9696	26.096	1,111,111,202,506,120,026	3 2025-09-22 13:18:56	0	4
9697	26.098	1,111,111,202,506,120,026	0 2025-09-22 14:03:19	0.0521	2
9698	26.099	1,111,111,202,506,120,026	3 2025-09-22 13:18:56	0	4
9699	26.101	1,111,111,202,506,120,026	0 2025-09-22 14:03:19	0.0521	2
9700	26.102	1,111,111,202,506,120,026	3 2025-09-22 13:18:56	0	4
9701	26.104	1,111,111,202,506,120,026	0 2025-09-22 14:03:19	0.0521	2
9702	26.105	1,111,111,202,506,120,026	3 2025-09-22 13:18:56	0	4
9703	26.107	1,111,111,202,506,120,026	0 2025-09-22 14:03:19	0.0521	2
9704	26.108	1,111,111,202,506,120,026	3 2025-09-22 13:18:56	0	4
9705	26.110	1,111,111,202,506,120,026	0 2025-09-22 14:03:19	0.0521	2
9706	26.111	1,111,111,202,506,120,026	3 2025-09-22 13:18:56	0	4
9707	26.113	1,111,111,202,506,120,026	0 2025-09-22 14:03:19	0.0521	2
9708	26.114	1,111,111,202,506,120,026	3 2025-09-22 13:18:56	0	4
9709	26.116	1,111,111,202,506,120,026	0 2025-09-22 14:03:19	0.0521	2
9710	26.117	1,111,111,202,506,120,026	3 2025-09-22 13:18:56	0	4

图 17 云端远程服务器腐蚀速率存储数据截图

Fig. 17 Screenshot of cloud remote server corrosion rate storage data

其中 dev\_id 表示设备节点号, channel\_type 表示大气腐蚀监测系统的监测通道, 其中数字 0~3 对应监测通道 1~4, update\_time 表示大气腐蚀监测系统腐蚀速率计算时刻, corrosion\_rate 表示大气腐蚀监测系统计算的腐蚀速率, 单位为微米每年, 为验证大气腐蚀监测系统分析处理得到的腐蚀速率的准确度, 在实验测试结束后, 采用失重法分别处理大气腐蚀监测系统腐蚀速率各个通道连接的双电极原电池电偶探针, 即将双电极原电池电偶探针浸泡在 10% 浓度的柠檬酸铵溶液中, 去除探针表面的腐蚀产物, 然后采用显微镜测量探针表面最大蚀坑深度  $h$ , 除以腐蚀时间  $t$ , 从而获得双电极原电池电偶探针的标准腐蚀速率  $V_{cr-s}$ , 大气腐蚀监测系统计算的各通道腐蚀电极系统腐蚀速率与标准腐蚀速率的对比结果如表 1 所示。

表 1 大气腐蚀监测系统计算腐蚀速率与标准腐蚀速率对比结果

Table 1 Comparison results of calculated corrosion rate and standard corrosion rate of atmospheric corrosion monitoring system

通道	最大蚀坑深度 $h$ / $\mu\text{m}$	标准腐蚀速率 $V_{cr-s}$ / $(\mu\text{m}/\text{a})$	计算腐蚀速率 $V_{cr}$ / $(\mu\text{m}/\text{a})$	准确度 / %
通道 1	5.047	20.25	22.49	90.04
通道 2	2.367	9.47	10.06	94.14
通道 3	4.896	19.58	20.61	95.01
通道 4	2.191	8.76	9.51	92.12

其中, 计算腐蚀速率  $V_{cr}$  为数据库存储的腐蚀速率的平均值, 腐蚀速率准确度的计算公式如式(6):

$$\eta = \left( 1 - \left| \frac{V_{cr} - V_{cr-s}}{V_{cr-s}} \right| \right) \quad (6)$$

测试结果显示, 本文设计的大气腐蚀监测系统, 其各通道计算得出的腐蚀速率准确度均达 90% 以上; X80 管线钢腐蚀电极的腐蚀速率显著高于 H63 黄铜腐蚀电极, 且在相同大气环境条件下, 不同通道测量 X80 管线钢铜腐蚀速率

和 H63 黄铜腐蚀速率呈现良好一致性。上述结果验证了该大气腐蚀监测系统对腐蚀速率的测量与计算兼具较高精度和优良一致性,可为相关材料的大气腐蚀评估提供可靠数据支撑。

## 5 结 论

本文设计一种基于 STM32 的大气腐蚀监测系统,详细分析其测量原理、硬件设计和软件设计,通过测量结果验证本系统具备大气环境下多点位腐蚀状态监测与高精度腐蚀速率检测能力。从而为桥梁、铁路、电力输送设备等大型基础设施及配套设备的腐蚀状态监测提供一种行之有效的解决方案,但该系统数据传输依赖稳定的无线通信链路,在偏远无网络覆盖区域或强电磁干扰场景下,易出现数据丢包或传输延迟问题,影响监测实时性,且目前系统受限于探针电极的材质耐候性与腐蚀等效电路理论模型的适配性,仅适用于典型大气环境,未来通过提升探针电极在盐雾、厌氧等环境下的稳定性,建立适配海洋、土壤介质的腐蚀等效电路模型,将监测场景扩展至海洋、土壤等复杂介质环境。

## 参考文献

- [1] 李俊莉,路建萍,张颖,等. 油气集输管道腐蚀与防护技术研究进展[J]. 应用化工, 2024, 53(9): 2231-2236.  
LI J L, LU J P, ZHANG Y, et al. Research progress on corrosion and protection technology of oil and gas gathering and transportation pipelines[J]. Applied Chemistry, 2024, 53(9): 2231-2236.
- [2] 刘阳舟. 油气管道运输中的腐蚀与防护[J]. 流程工业, 2025(1):71-73.  
LIU Y ZH. Corrosion and protection in oil and gas pipeline transportation[J]. Process Industry, 2025(1): 71-73.
- [3] 姚勇,刘国军,黎石竹,等. 金属材料腐蚀预测模型研究进展[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2023, 43(5): 983-991.  
YAO Y, LIU G J, LI SH ZH, et al. Research progress on corrosion prediction model of metallic materials for electrical equipment[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2023, 43(5):983-991.
- [4] 周梦鑫,吴军,樊志彬,等. 大气腐蚀在线监测技术研究现状与展望[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2023, 43(1):38-46.  
ZHOU M X, WU J, FAN ZH B, et al. Current situation and prospect of on-line monitoring technology for atmospheric corrosion testing of metallic materials[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2023, 43(1):38-46.
- [5] 胡杰珍,曾俊昊,邓培昌,等. 电阻探针腐蚀监测技术的研究进展[J]. 材料保护, 2024, 57(2): 108-115,122.  
HU J ZH, ZHEN J H, DENG P CH, et al. Research progress of resistance probe corrosion monitoring technology[J]. Materials Protection, 2024, 57(2): 108-115,122.
- [6] 石鹏飞,胡凌越,段国庆,等. 腐蚀监测技术研究现状与展望[J]. 全面腐蚀控制, 2023, 37(10):23-30.  
SHI P F, HU L Y, DUAN G Q, et al. Research and prospect of corrosion monitoring techniques [J]. Materials Protection, 2023, 37(10):23-30.
- [7] 岳远广,尹志彪,张子月,等. 一种大气腐蚀实时监测装置的开发及其在不同环境中的应用[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2026, 46(1):308-314.  
YUE Y G, YIN ZH B, ZHANG Z Y, et al. Development of an atmospheric corrosion monitor and its real-time monitoring in different environmental conditions[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2026, 46(1):308-314.
- [8] 潘建乔,吴迪,余方召,等. 大气腐蚀监测传感器的研究与应用[J]. 腐蚀与防护, 2021, 42(4):58-61.  
PAN J Q, WU D, YU F ZH, et al. Research and application of atmospheric corrosion monitoring sensor[J]. Corrosion & Protection, 2021, 42(4):58-61.
- [9] 张晓东,许志雄,张聪,等. 基于交流阻抗技术的海水管路腐蚀监测系统[J]. 中国舰船研究, 2019, 14(4): 155-160.  
ZHANG X D, XU ZH X, ZHANG C, et al. Seawater pipeline corrosion monitoring system based on AC impedance technology [J]. Chinese Journal of Ship Research, 2019, 14(4):155-160.
- [10] 李婷玉,魏洁,陈楠,等. 用于大气环境的电化学传感器的腐蚀性能研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2024, 44(2):365-371.  
LI T Y, WEI J, CHEN N, et al. Corrosion performance of electrochemical sensors for atmospheric environments [J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2024, 44(2):365-371.
- [11] 李萌,程嘉瑞,汪坤,等. 小型动态极化腐蚀监测系统设计[J]. 仪表技术与传感器, 2023(8):69-74,100.  
LI M, CHENG J R, WANG K, et al. Design of small dynamic polarisation corrosion monitoring system[J]. Instrument Technique and Sensor, 2023(8): 69-74,100.
- [12] 吴绪,杨丽君,肖艳琳,等. 电池动态电化学阻抗谱的无源检测方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2024, 45(12):107-117.

- WU X, YANG L J, XIAO Y L, et al. Study of passive detection methods for dynamic electrochemical impedance spectroscopy of batteries [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(12): 107-117.
- [13] 吴磊, 吕桃林, 陈启忠, 等. 电化学阻抗谱测量与应用研究综述[J]. 电源技术, 2021, 45(9): 1227-1230.
- WU L, LYU T L, CHEN Q ZH, et al. Review of measurement and application of electrochemical impedance spectroscopy[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2021, 45(9): 1227-1230.
- [14] 何龙, 靳斌. 基于 STM32 的铜线放线监测系统设计[J]. 电子测量技术, 2024, 47(19): 17-23.
- HE L, JIN B. Design of copper wire laying monitoring system based on STM32 [J]. Electronic Measurement Technology, 2024, 47(19): 17-23.
- [15] 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.
- [16] 范亚南, 高军科, 韩文斌, 等. 基于 FreeRTOS 的多连接 TCP Server 设计[J]. 仪表技术与传感器, 2023(8): 96-100.
- FAN Y N, GAO J K, HAN W B, et al. Design of multi-connected TCP server based on FreeRTOS[J]. Instrument Technique and Sensor, 2023(8): 96-100.

### 作者简介

江明旭(通信作者), 硕士, 工程师, 主要研究方向为工业通讯与嵌入式系统开发。

E-mail: gangmingxu@sia. cn

闫炳均, 硕士, 副研究员, 主要研究方向为工业通讯与功能安全。

E-mail: yanbingjun@sia. cn

胡波, 硕士, 副研究员, 主要研究方向为功能安全与嵌入式系统开发。

E-mail: hubo@sia. cn