

环境试验与观测

基于梳状电极的盐雾沉积率自动监测技术

岑远遥^{1,2}, 贺琼瑶^{1,2,3*}, 吴遥^{1,2}, 赵方超^{1,2,3}, 陈明亚¹,
刘聪^{1,2,3}, 周堃^{1,2,3}, 邓家卫⁴

(1.西南技术工程研究所 装备环境工程研究中心,重庆 400050; 2.环境效应与防护重庆市重点实验室,重庆 400050; 3.国防科技工业自然环境试验研究中心,重庆 400050;
4.陆军装备部驻重庆地区第二军事代表室,重庆 400060)

摘要: **目的** 针对装备服役过程中大气环境和具备微环境的盐雾沉积率自动监测开展研究,为装备服役过程提供腐蚀损伤研究提供全过程盐雾数据。**方法** 通过分析,确定利用湿烛法捕集大气盐雾,使用梳状电极作为传感器探头,采用交流阻抗法测量盐雾浓度变化后溶液阻抗值。**结果** 经过测试所设计的交流阻抗测量系统,误差最大小于5%。对不同浓度的盐雾溶液测量后,得到浓度与阻抗之间的关联模型,相关性为 $R^2=0.9870$ 。在25℃下,对不同浓度的溶液进行测量后,得到盐雾浓度测量的温度补偿模型。在某地开展了户外实时监测试验,监测时间为1周,测量的盐雾沉积率为0.04 mg/(100 cm²·d),同时开展纱布挂片法进行对比实验,纱布挂片法测量的结果为0.025 mg/(100 cm²·d)。**结论** 该技术可实现盐雾沉积率自动监测,监测数据可用于装备状态评估。

关键词: 盐雾沉积率; 梳状电极; 交流阻抗; 盐雾浓度; 实时测量; 温度补偿

中图分类号: TN721 文献标志码: A 文章编号: 1672-9242(2024)11-0146-09

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2024.11.018

Automatic Monitoring Technology for Salt Spray Deposition Rate Based on Comb Shaped Electrodes

CEN Yuanyao^{1,2}, HE Qiongyao^{1,2,3*}, WU Yao^{1,2}, ZHAO Fangchao^{1,2,3}, CHEN Mingya¹,
LIU Cong^{1,2,3}, ZHOU Kun^{1,2,3}, DENG Jiawei⁴

(1. Equipment Environmental engineering Research Center, Southwest Institute of Technology and Engineering, Chongqing 400050, China; 2. Environmental Effects and Protection of Chongqing Key Laboratory, Chongqing 400050, China; 3. National Defense Science and Technology Industry Natural Environment Test and Research Center, Chongqing 400050, China; 4. The Second Military Representative Office of the Army Equipment Department Stationed in Chongqing, Chongqing 400060, China)

ABSTRACT: The work aims to study the automatic monitoring of salt spray deposition rate in atmospheric environment and microenvironment during equipment service, providing full-process salt spray data for corrosion damage research during equipment service. Through analysis, the wet candle method was used to capture atmospheric salt spray. The comb shaped elec-

收稿日期: 2024-07-17; 修订日期: 2024-08-12

Received: 2024-07-17; Revised: 2024-08-12

引文格式: 岑远遥, 贺琼瑶, 吴遥, 等. 基于梳状电极的盐雾沉积率自动监测技术[J]. 装备环境工程, 2024, 21(11): 146-154.

CEN Yuanyao, HE Qiongyao, WU Yao, et al. Automatic Monitoring Technology for Salt Spray Deposition Rate Based on Comb Shaped Electrodes[J]. Equipment Environmental Engineering, 2024, 21(11): 146-154.

*通信作者 (Corresponding author)

trodes were used as sensor probes, and the impedance value of the solution after changes in salt spray concentration was measured by the AC impedance method. After testing, the maximum error of the designed AC impedance measurement system was less than 5%. After measurement of salt spray solutions of different concentrations, a correlation model between concentration and impedance was obtained, with a correlation coefficient of $R^2=0.9870$. A temperature compensation model for salt spray concentration measurement was obtained after measurement of solutions of different concentrations at 25 °C. An outdoor real-time monitoring experiment was conducted at a certain location for one week, with a measured salt spray deposition rate of 0.04 mg/(100 cm²·d). At the same time, a comparative experiment was conducted by the gauze hanging method, leading to a result of 0.025 mg/(100 cm²·d). This technology can achieve automatic monitoring of salt spray deposition rate, and the monitoring data can be used for evaluating equipment status.

KEY WORDS: salt spray deposition rate; comb shaped electrode; AC impedance; salt spray concentration; real-time measurement; temperature compensation

目前, 在经历高温、高湿、高盐雾的作用下, 装备关键材料腐蚀, 活动机构腐蚀卡滞、承载机构腐蚀开裂等环境适应性问题频发^[1]。金属腐蚀的过程是持续性、长期累积的过程, 短期内影响较小, 在盐雾长期累积作用下造成装备结构累积损伤。在装备长期服役过程中, 对盐雾沉积率进行实时在线监测, 对装备腐蚀环境评估具有较大意义^[2-4]。ISO 9223 采用环境因素法评估大气腐蚀性时, 以氯离子沉积速率为评价指标之一^[5]。

金属材料的腐蚀往往不能消除, 只能进行提前预防, 因此针对复杂自然环境下的金属腐蚀, 以发现、检测为目的的腐蚀检测技术就显得至关重要, 尤其是在不易检查的关重结构位置^[6-9]。早期腐蚀检测的重要性表现在 2 个方面: 一方面, 装备定期的拆装检查不仅消耗大量的人力、物力, 而且可能会影响整体性能, 造成不必要的损失; 另一方面, 当用肉眼可以观察到腐蚀效果时, 其腐蚀厚度已经达到金属原始厚度的 10%, 此时就需要花费大量的人力和财力进行修复^[9]。

针对盐雾沉积率采集, 目前主要是使用纱布挂片和湿蚀法 2 种方式。纱布挂片被《全国大气腐蚀网站操作规程》推荐使用, 利用固定在方框内的双层纱布暴露于遮雨条件下采集空气中的盐雾, 对纱布进行浸泡、清洗, 对洗出溶液中盐雾进行测定分析, 计算盐含量, 最后根据采样时间计算盐雾沉积速率^[10]。另一种方法是 ISO 9225 标准推荐使用湿蚀法采样, 将一根直径为 25 mm 左右的烛芯插入瓶内, 芯上紧紧缠有 2 层纱布, 纱布的自由端接触至瓶底, 瓶内装有甘油水溶液, 烛芯长期暴露于空气中, 利用缠绕其上的纱布采集盐雾。

通过上述方法实现盐雾沉积率采集, 采样时间长, 过程复杂, 无法实现实时采集, 只能记录一段时间的沉积率, 无法测得中间某一段时间的盐雾沉积率。马俊英等^[11]针对盐雾沉积率的实时监测开展了相关的研究, 但研制的装置体积较大, 很难实现便携式监测, 尤其空间受限的结构。李旭等^[12]针对海洋大气环境的氯离子监测开展了相关研究, 实现了氯离子空

间分布的实时监测, 但无法表征氯离子沉积率。查娜^[13]开展了基于光纤的氯离子沉积率监测传感器研究, 实现了氯离子沉积率的实时监测, 但该系统成本高, 体积大, 且不易实现小型化。于雷^[14]针对盐雾沉积率设计了基于激光三角法的自动监测研制了一套实时监测系统, 可以实现 1~2 mL/(80 cm²-h) 的监测, 但该系统体积大, 成本高。

综上所述, 目前现有的盐雾沉积率自动监测方法均无法实现便携式监测, 尤其是狭小空间、舱室的盐雾沉积率监测。本文针对盐雾沉积率实时采集技术开展了研究, 研制出一款小型伴随式盐雾沉积率实时采集装置。

1 盐雾实时测量技术研究

1.1 盐雾捕集方法

结合前文分析, 大气盐雾捕集中主要是使用湿蚀法和纱布法进行捕集, 纱布法捕集后需要进行浸泡、清洗等流程, 不适用于户外长期伴随式监测。在本课题研究中, 采用湿蚀法捕集盐雾, 纱布尾端浸没在纯水和甘油的混合溶液中, 直接测量溶液中的盐雾浓度, 并结合纱布面积、时间等参数, 可以计算出盐雾的沉积率。盐雾捕集池结构如图 1 示, 将梳状电极安装在捕集池的底部, 并进行密封, 通过导线连接的方式将电极信号引出。

1.2 测量方法研究

1.2.1 离子电极法

离子电极法是目前水质检测常用的方法, 通过能斯特方程, 离子电极中对盐雾敏感的薄膜电极进行检测。在离子浓度发生变化后, 离子电极输出的电位也会发生对应的变化, 经过对不同离子浓度的溶液尽心标定后, 可以得到实时测量的浓度值^[15]。其基本原理是通过电化学的方法将溶液中盐雾浓度变化信号转换为可以测量的电信号, 离子电极在达到化学平衡后, 离子膜相和液相的电位相等, 溶液中对应的离子

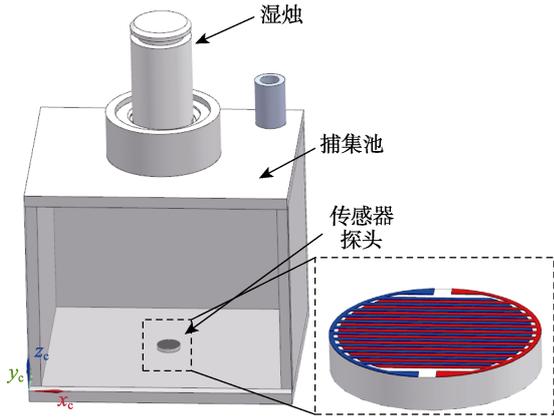


图1 盐雾气氛捕集池结构

Fig.1 Structure of salt spray atmosphere capture tank

浓度与电压构成线性关系^[16]。

在测量时，通过参比电极的恒定电位，结合离子电极产生的电信号测得因离子浓度变化引起的电位变化 E 。

$$E = E_v - E_r \tag{1}$$

式中： E_v 工作电极电位； E_r 为参比电极电位。

1.2.2 交流阻抗法

盐雾捕集到溶液中后离子浓度增加，通过梳状电极的方法监测溶液中阻抗的变化。当离子浓度不同时，梳状电极 A、B 两点测得的阻抗不同，对不同浓度的溶液标定后便可以反映出离子浓度变化量，经过计算可以得出盐雾沉积率。设计的梳状电极结构如图 2 所示。梳状电极参数：电极材料为 Ag，直径为 10 mm，电极膜厚为 10 μm ，电极间距为 0.12 mm，电极对数为 12 对，电极的基底材料采用的是氧化铝陶瓷。

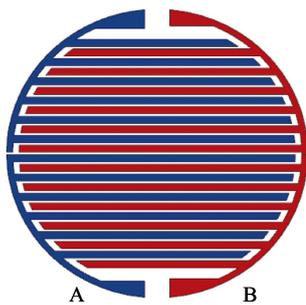


图2 梳状电极结构

Fig.2 Comb shaped electrode structure

1.3 交流阻抗检测技术研究

采用交流阻抗法原理测量溶液中盐雾变化后的阻抗，根据阻抗信号的不同，可以将其分为基于电压激励信号和电流激励信号的检测方法。梳状电极测盐雾溶液浓度常见的等效电路模型中， U_{OC} 表示开路电压， R_0 表示欧姆内阻， R_p 表示极化电阻， c_p 表示极化电容。在测试时，只需要对其施加相应的电压或者电流信号。

盐雾交流阻抗检测如图 3 所示。基于电压激励信号的交流阻抗检测方法基本原理是向待测梳状电极施加角频率为 ω 的正弦电压信号 $E(j\omega)$ 作为激励，则回路中会随之产生一个同频率的响应电压信号 $I(j\omega)$ 。电池响应电流信号和输入的激励电压信号的比值即为被测梳状电极在该频率下的阻抗，可表示为：

$$Z(j\omega) = \frac{E(j\omega)}{I(j\omega)} \tag{2}$$

根据信号角频率 ω 和频率 f 之间的变换关系，可以计算出在频率 f 下的阻抗值。

$$\omega_1 = 2\pi f_1 \tag{3}$$

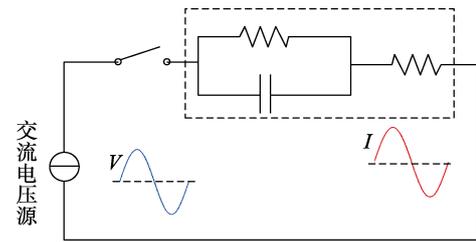


图3 交流阻抗检测原理

Fig.3 Principle of AC impedance testing

通过改变激励信号的频率 f ，便可以够得到梳状电极不同频率下的阻抗，即在某一段频率范围内的交流阻抗谱。基于傅里叶变换的阻抗参数求解，对梳状电极施加激励信号并对响应信号进行采集。提取出原始信号后，利用傅里叶变换对数字信号进行处理，通过傅里叶变换时域信号转变为频域信号，如图 4 所示。传统的离散傅里叶变换 (DiscreteFourierTransform, DFT) 对 N 点有限序列中进行复数乘法运算完成 N 点求解计算复杂度是 N^2 ，通过微处理器进行计算，计算过程复杂，实用性较差^[17]。对离散傅里叶变换算法进行改进后得到快速傅里叶变换 (FastFourierTransformation, FFT)，将点数大的 DFT 进行分解得到若干小点数的 DFT 进行运算，结合旋转因子的周期性和对称性可以将 DFT 运算中的部分进行合并实现蝶形运算^[18]。采用 FFT 能够有效地减少运算次数，可以提高计算的效率。

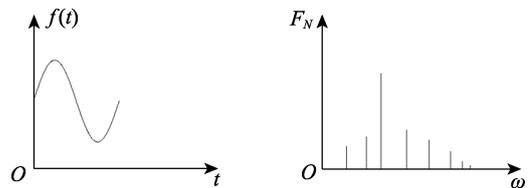


图4 时频信号转换

Fig.4 Time-frequency signal conversion

傅里叶变换的定义式为：

$$\begin{cases} X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)W_N^{kn} \\ W_N = e^{-j\frac{2\pi}{N}} \end{cases} \tag{4}$$

式中: $x(n)$ 为时域信号的离散序列。

设激励电压信号是幅值为 A , 频率为 f_0 的标准正弦信号, 令采样频率为 f_s , 则激励电压信号可表示为:

$$x(n) = A \sin\left(\frac{2\pi f_0 n}{f_s}\right) \quad (5)$$

将式 (5) 代入式 (4) 推算可得:

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} A \sin\left(\frac{2\pi f_0 n}{f_s}\right) e^{-j\frac{2\pi kn}{N}} \quad (6)$$

根据复指数序列的周期性和对称性对式 (6) 进行化简可得:

$$X(k) = \begin{cases} \frac{NA}{2}, k = N \frac{f_0}{f_s} \\ 0, k \neq N \frac{f_0}{f_s} \end{cases} \quad (7)$$

式中: $X(k)$ 为变换后频域信号序列下第 k 点的信息。时域下的原始激励电压信号经过傅立叶变换处理后被映射到了频域, 通过提取频域形式下的特定频率点的信息, 便可以得到原始激励信号的幅值、相位信息。同理, 对采集到的响应电压信号通过相同的方

式处理, 便可以提取出响应电压信号的幅值和相位信息, 之后再通过进一步计算便可以得到该频率点下的系统阻抗参数。

2 盐雾沉积率检测电路设计

2.1 正弦激励信号设计

微控制器输出正弦交流信号的方法主要有 2 种, 一是直接利用微控制器自身的 DAC 模块功能, 通过查表法输出模拟正弦电压信号, 但微控制器自身的 DAC 模块分辨率较低, 输出的信号和幅值调节比较麻烦。另一种是利用数字频率合成技术, 根据奈奎斯特定理, 从连续信号的相位出发, 将一个正弦信号采样、编码、量化, 形成一个正弦函数表进行存储, 如图 5 所示。在进行信号合成时, 查表将相位累加器的相位信息映射至数字幅度中, 进而驱动 DAC 模块产生模拟信号输出^[19]。采用 DDS 技术设计的信号源具有频率分辨率高, 输出频段宽, 体积小, 易于集成等优势。

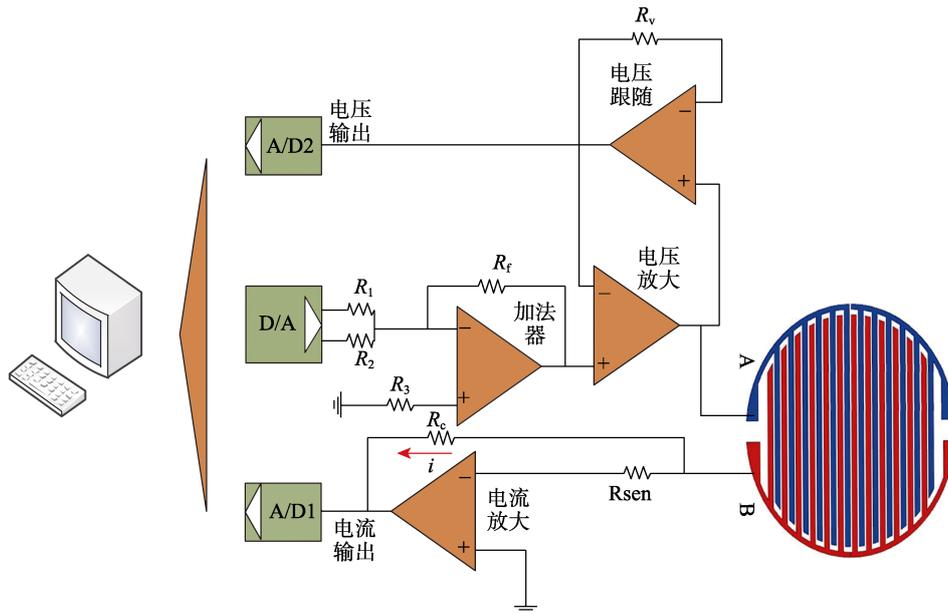


图 5 激励信号原理
Fig.5 Principle of excitation signal

1) DDS 芯片选择。DDS 芯片产生的波形直接决定信号激励模块输出正弦电压信号的波形质量, 需要根据系统需求进行 DDS 芯片选取, 不同 DDS 芯片的性能对比见表 1。

表 1 DDS 芯片性能对比
Tab.1 Performance comparison of DDS chips

系列	特性
AD983×	性能低、精度低、输出幅值不可调
AD985×	性能高、输出频率和幅值可调
AD995×	性能高、功耗低、成本高

结合 DDS 芯片的对比分析, 为了满足激励模块所需的稳定、频率幅值可调的信号输出要求, 采用 AD985× 系列中的 AD9854 作为信号发生器的核心器件。该芯片内部集成了 48 位频率累加器、48 位相位累加器、正余弦波形表, 可以实现频率调制、相位调制、幅值调制等功能, 可以输出相位、频率、幅值稳定的正弦信号。

2) 接口电路设计。AD9854 与微控制器通信主要有并行和串行 2 种通信方式, 并行通信需要使用 8 位数据线进和 6 位地址线, 串行模式下是通过 SPI 接口进行数据传输, 串行模式占用的 IO 数量少, 相比并

行数据传输的优势更大，如图6所示。

2.2 信号调理电路设计

通过微控制器控制 DDS 芯片产生的正弦电压信号幅值较小，通常情况下最高只有 500 mV。该信号不能满足激励源输出交流信号的要求，因此需要对该

信号进行滤波和放大。

1) 滤波电路设计。为消除信号中的直流信号，保证系统输出的是交流信号，采用一阶 RC 高通滤波器设计，其截止频率为：

$$f = \frac{1}{2\pi RC} \quad (8)$$

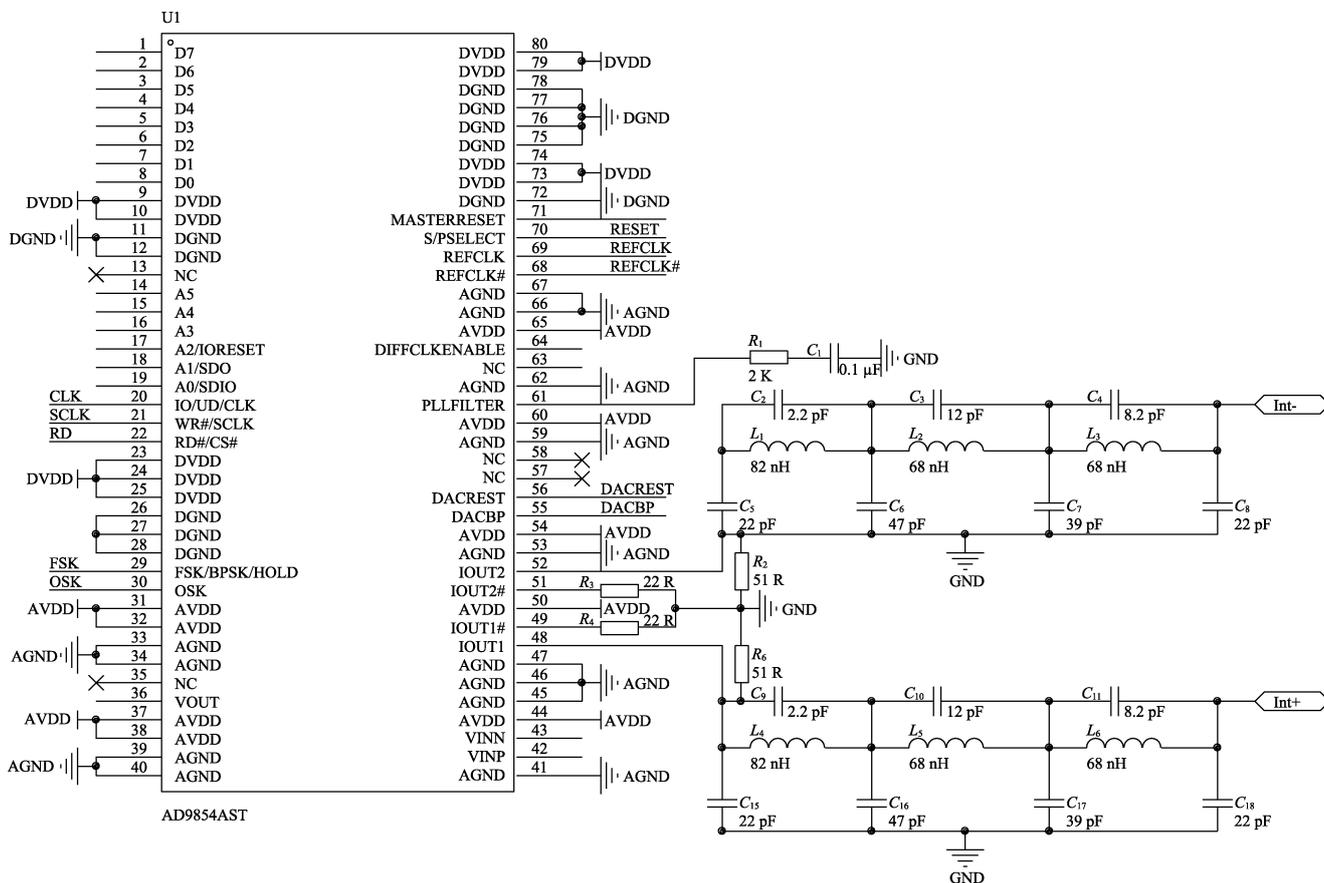


图6 激励模块电路
Fig.6 Circuit of the excitation module

高通电路设计时，一般是选择截止频率是实际频率的 1/10。在计算截止频率时，为防止信号在传输过程中的损耗，要保证滤波电路的电容阻抗远小于电阻阻值^[20-21]。激励模块输出信号最低频率为 1 Hz，因此，高通滤波电路截止频率取 0.1 Hz。为了便于取值的同时尽可能减小信号衰减，所设计的滤波电路电容值取为 4.7 μF，电阻值取 200 kΩ。

2) 差分放大电路设计。DDS 芯片的 2 个通道可以输出 2 路反向的正弦信号，所设计的差分电路需要对 2 路反向信号进行处理。为了保证激励信号的稳定输出，选择 AD8221 进行差分放大设计，设计的差分放大电路如图 7 所示。以通过选定不同增益电阻 R_E 来控制电路增益倍数^[22-23]。AD8221 的输出增益倍数计算公式为：

$$G = 1 + \frac{49.9}{R_g} \quad (9)$$

根据设计需求，使得信号源输出幅值为 1 V 的信

号，电路增益值设置为 2。为了便于实际选型，增益电阻阻值选取为 $R_3=49.4 \text{ k}\Omega$ 。设计完成后，测试输出激励信号如图 8 所示。

2.3 外围电路设计

本次设计的盐雾沉积率自动采集系统还有通信电路、数据存储电路等外围电路。本次所设计的通信电路为 Rs485 电路，如图 9 所示。通过串口可以实现采集装置的相关参数配置，数据上传等功能。为实现盐雾沉积率自动采集，采用 W25Q128JVSQTR 芯片作为外部 Flash，可以实现盐雾沉积率、温湿度等主要信息存储。

2.4 阻抗测试

使用本次研制的交流阻抗检测系统测量温度系数为 $5 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 、精度为 0.1% 的标准电阻，得到的结果见表 2。由表 2 可得，误差最大为 2.75%，表明本

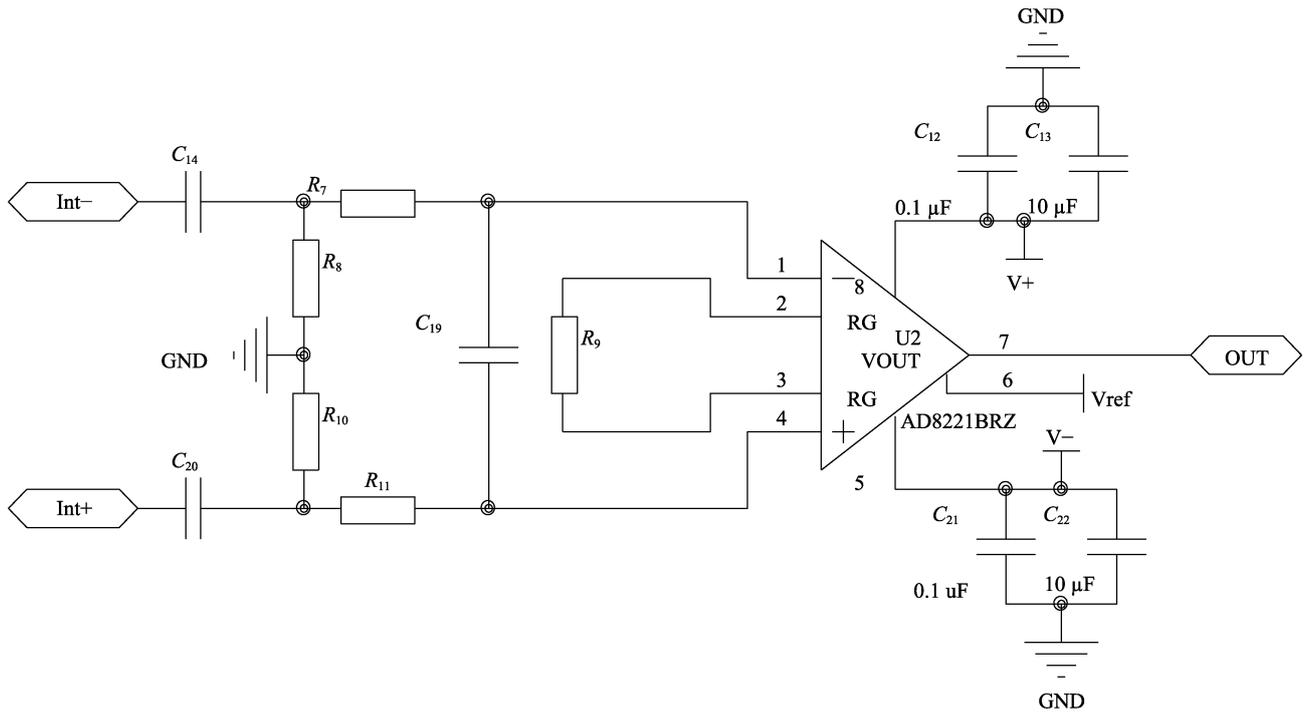


图 7 差分电路设计
Fig.7 Differential circuit design

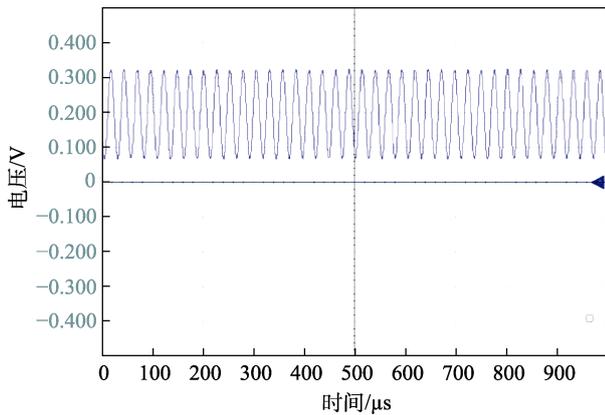


图 8 激励信号
Fig.8 Excitationsignal

次所设计的阻抗检测系统的精度较高。

3 盐雾与测试

3.1 盐雾浓度-阻抗标定

基于前文设计, 在实验室 25 °C 条件下, 使用不同浓度的盐雾溶液进行标定, 将梳状电极前端置于溶液中等待数据稳定后, 取 5 个数进行平均后得到表 3 所示的结果。在 Origin 中对标定的数据进行非线性拟合可以得到如图 11 所示的结果, 相关性 $R^2=0.987 0$, 标定结果为:

$$y = \frac{2.240 6}{0.006 62x + 0.037 77} \quad (10)$$

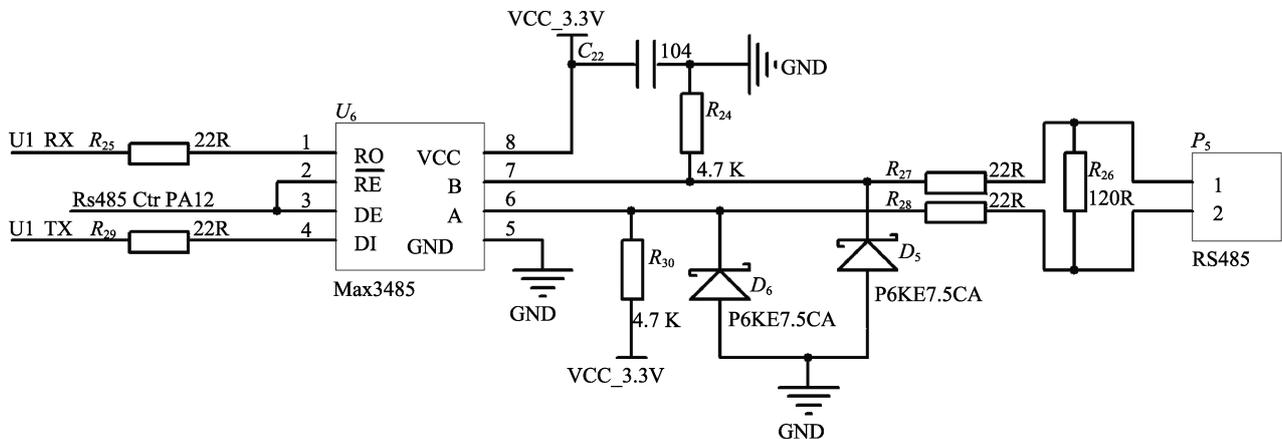


图 9 Rs485 通信电路
Fig.9 Rs485 communication circuit

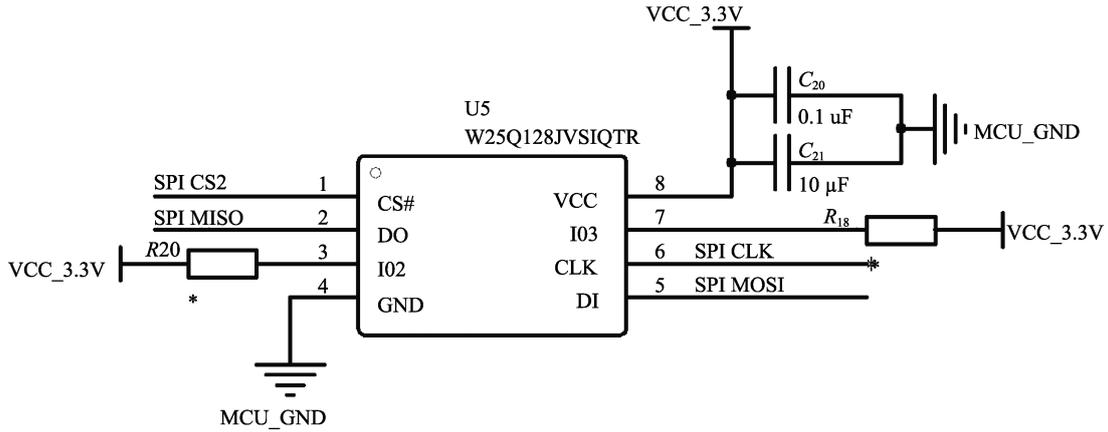


图 10 外部 Flash 电路
Fig.10 External Flash circuit

表 2 阻抗精度测试
Tab.2 Impedance accuracy testing

序号	标准值/ Ω	实测值 1/ Ω	实测值 2/ Ω	实测值 3/ Ω	实测值 4/ Ω	实测值 5/ Ω	平均值/ Ω	误差/%
1	1 000 000	999 500	996 961	997 136	998 722	996 996	997 863	0.213 7
2	750 000	753 706	755 364	752 860	756 589	753 840	754 471.8	0.596 24
3	500 000	502 726	502 992	502 801	503 906	502 804	503 045.8	0.609 16
4	300 000	306 043	306 145	306 283	306 195	306 564	306 246	2.082
5	100 000	102 485	102 456	102 455	102 473	102 524	102 478.6	2.478 6
6	50 000	51 373	51 385	51 365	51 374	51 381	51 375.6	2.751 2

表 3 传感器标定数据
Tab.3 Sensor calibration data

溶液浓度/ $(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	1	5	15	20	35	50	75	100
阻抗值/ $\text{k}\Omega$	49.328 8	35.389 0	14.277 7	12.411 0	6.348 0	5.279 0	4.541 0	4.028 2

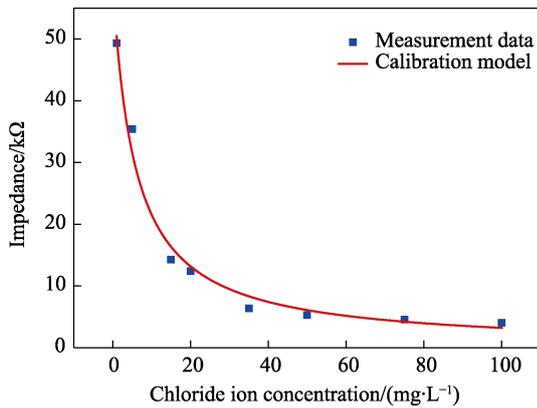


图 11 盐雾浓度-阻抗标定响应曲线

Fig.11 Salt spray concentration-impedance calibration response curve

式中: x 为盐雾溶液质量浓度, mg/L ; y 为测量的阻抗值, $\text{k}\Omega$ 。

3.2 温度补偿模型

盐雾溶液浓度受温度的影响较大,因此需要开展温度补偿标定。温度补偿时,将 100 mg/L 的盐雾溶液放入恒温水浴锅中,将传感器放入溶液中监测盐雾浓度,标定模型如图 12 所示。得到 100 mg/L 的盐雾

温度模型为: $f(T) = -0.218 97T + 152.997 4$, 其中 T 为温度值, f 为溶液浓度。对多种规格的溶液浓度进行标定后,可以得到溶液的温度补偿模型:

$$F(T) = C(1 - 0.02(T_0 - T)) \quad (12)$$

式中: C 为盐雾浓度 (mg/L); T_0 为标定温度 (一般为 $25 \text{ }^\circ\text{C}$); T 为实时温度; $F(T)$ 为温度补偿后溶液浓度。

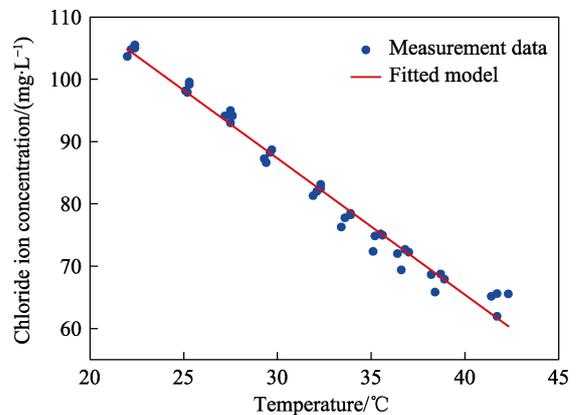


图 12 100 mg/L 盐雾溶液温度补偿

Fig.12 Temperature compensation of 100 mg/L salt spray solution

3.3 实验测试

将装置布置在江苏某地, 采样频率为 10 min/次, 经过 1 周的测量后, 得到的数据如图 13 所示。在温度补偿前的数据误差较大, 在温度补偿后数据较平稳。经过计算得到 1 周的沉积率如图 14 所示。同时在该地开展了传统纱布挂片法测试。

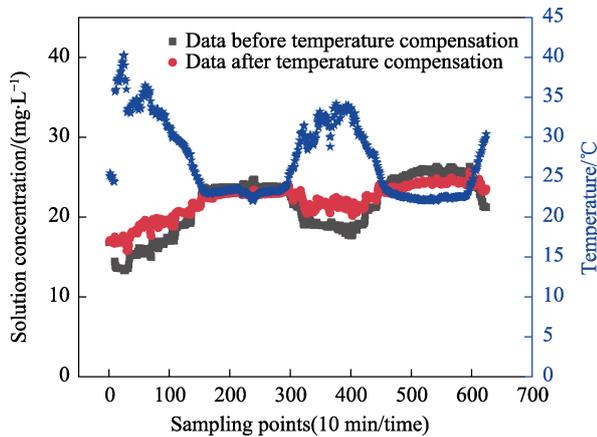


图 13 盐雾溶液浓度实时监测

Fig.13 Real-time monitoring of salt spray solution concentration

结合测量的浓度, 融入时间、体积、面积等信息后, 可以计算出盐雾沉积速率, 如下式所示。

$$C_{Cl} = \frac{(C_1 - C_0)V}{(100/S)t} \quad (13)$$

式中: C_{Cl} 为盐雾沉积率, $\text{mg}/(100 \text{ cm}^2 \cdot \text{d})$; C_1 为 t 时刻溶液质量浓度, mg/L ; C_0 为初始时刻溶液质量浓度, mg/L ; V 为溶液体积, L ; S 为纱布面积, cm^2 ; t 时间, d 。

结合测量的数据, 可以得到该地区几天时间内盐雾沉积率稳定后基本为 $0.04 \text{ mg}/(100 \text{ cm}^2 \cdot \text{d})$, 纱布挂片法测试得到的结果为 $0.025 \text{ mg}/(100 \text{ cm}^2 \cdot \text{d})$ 。

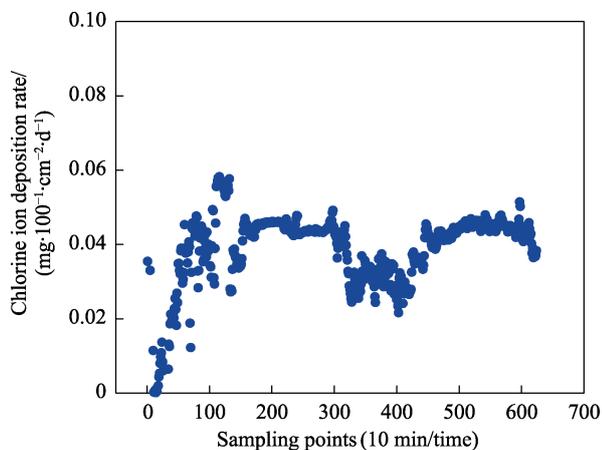


图 14 盐雾沉积率实时数据

Fig.4 Real-time data of salt spray deposition rate

4 结论

针对盐雾沉积率自动实时监测开展相关研究, 利用梳状电极作为感知器件, 结合湿蚀法捕集大气盐雾气氛, 采用交流阻抗方法实时测量捕集池中溶液浓度变化。针对信号激励电路和滤波算法开展研究, 实现了交流阻抗高精度测量, 使用标准电阻测量最大误差仅为 2.75%。测量不同浓度盐雾溶液后, 通过非线性拟合的方法得到盐雾浓度-阻抗模型, 相关性为 $R^2 = 0.9870$ 。同时开展了不同浓度氯离子溶液在不同温度下的浓度变化, 建立了盐雾浓度测量过程中的温度补偿模型。最后, 在某地区开展盐雾浓度监测, 经过温度补偿算法后得到了有效的实时盐雾沉积率数据, 并和纱布挂片法测量数据进行对比, 证明了研制的盐雾沉积率实时监测装置的有效性。

参考文献:

- [1] 党乐, 罗茜. 海洋环境下金属腐蚀评估与预测研究现状[J]. 装备环境工程, 2024, 21(3): 88-96.
DANG L, LUO X. Research Status of Metal Corrosion Assessment and Prediction in Marine Environments[J]. Equipment Environmental Engineering, 2024, 21(3): 88-96.
- [2] 覃粒, 吴德权, 胡涛, 等. 海南湿热海洋大气环境 Q235 钢腐蚀行为研究及严酷度评估[J]. 装备环境工程, 2023, 20(7): 90-97.
QIN L, WU D Q, HU T, et al. Corrosion Behaviors of Q235 Steel and Severity Evaluation for Humid and Hot Marine Atmosphere Environmental in Hainan[J]. Equipment Environmental Engineering, 2023, 20(7): 90-97.
- [3] XIA D H, MA C, SONG S Z, et al. Detection of Atmospheric Corrosion of Aluminum Alloys by Electrochemical Probes: Theoretical Analysis and Experimental Tests[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2019, 166(12): B1000-B1009.
- [4] 李建秋, 向利, 杨阳, 等. 海洋环境氯离子沉降率及腐蚀严酷度评价研究[J]. 装备环境工程, 2021, 18(2): 103-107.
LI J Q, XIANG L, YANG Y, et al. Evaluation of Sedimentation Rate and Corrosion Rate of Chloride Ions in Marine Environment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2021, 18(2): 103-107.
- [5] ISO 9223:1992(E), Corrosion of Metals and Alloys—Corrosively of Atmosphere—Classification[S].
- [6] MA C, WANG Z Q, BEHNAMIAN Y, et al. Measuring Atmospheric Corrosion with Electrochemical Noise: A Review of Contemporary Methods[J]. Measurement, 2019, 138: 54-79.
- [7] 郭赞洪, 唐其环, 刘聪, 等. 浅析典型湿热海洋大气环境严酷度及盐雾与湿热特征[J]. 环境技术, 2022, 40(1): 16-21.

- GUO Z H, TANG Q H, LIU C, et al. Analysis on the Severity of Typical Humid and Hot Marine Atmospheric Environment and the Characteristics of Salt Fog and Humid and Hot[J]. *Environmental Technology*, 2022, 40(1): 16-21.
- [8] 叶复萌, 陈川, 向利, 等. 大气盐雾沉降率收集方法与数据稳定性研究[J]. *环境技术*, 2021, 39(6): 7-10.
YE F M, CHEN C, XIANG L, et al. Study on Collecting Method and Data Stability of Atmospheric Salt Fog Content[J]. *Environmental Technology*, 2021, 39(6): 7-10.
- [9] 岑远遥, 廖光萌, 朱玉琴, 等. 基于布拉格光纤光栅的铝合金应力腐蚀裂纹扩展监测技术[J]. *中国腐蚀与防护学报*, 2024, 44(3): 815-822.
CEN Y Y, LIAO G M, ZHU Y Q, et al. Monitoring Technology for Stress Corrosion Crack Propagation of Al-Alloy Based on Optical Fiber Bragg Grating[J]. *Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection*, 2024, 44(3): 815-822.
- [10] 马长李, 刘聪, 马瑞萍. 某系统贮存环境中微量盐雾监测[J]. *装备环境工程*, 2017, 14(10): 78-81.
MA C L, LIU C, MA R P. Monitoring of Micro Salt Fog in Storage Environment of a System[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2017, 14(10): 78-81.
- [11] 马俊英, 丛培新, 刘明明, 等. 盐雾沉降率多测点实时自动检测装置设计[J]. *自动化仪表*, 2013, 34(12): 55-57.
MA J Y, CONG P X, LIU M M, et al. Design of the Real-Time Automatic Detector with Multiple Measuring Points for Salt Spray Sedimentation Rate[J]. *Process Automation Instrumentation*, 2013, 34(12): 55-57.
- [12] 李旭, 刘聪, 张宸, 等. 热带海洋大气环境氯离子浓度立体化观测技术研究[J]. *装备环境工程*, 2024, 21(1): 142-148.
LI X, LIU C, ZHANG C, et al. Three-Dimensional Observation Technology of Chloride Ion Concentration in Tropical Marine Atmospheric Environment[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2024, 21(1): 142-148.
- [13] 查娜. 近海环境配电箱温度控制和盐雾沉积率监测系统研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2016.
ZHA N. Research on Temperature Control and salt spray deposition rate monitoring system of distribution box in Offshore Environment[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2016.
- [14] 于雷. 盐雾沉降率高精度测量技术研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2014.
YU L. Study on High-Precision Measurement Technology of Salt Spray Sedimentation Rate[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2014.
- [15] 雷鸣. 氯离子传感技术的研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2018.
LEI M. Research on Chloride Ion Sensing Technology[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2018.
- [16] 陈吉勇. 氯离子浓度检测的研究与实现[D]. 北京: 北京化工大学, 2016.
CHEN J Y. Research and Implementation of Chloride Ion Concentration Detection[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2016.
- [17] 黄海宏, 罗磊. 基于储能电池电化学阻抗谱宽频测量方法的研究[J]. *仪器仪表学报*, 2023, 44(6): 273-283.
HUANG H H, LUO L. Research on the Broadband Measurement Method Based on Electrochemical Impedance Spectrum of Energy Storage Battery[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2023, 44(6): 273-283.
- [18] 郭盛军. 便携式蓄电池交流阻抗检测装置硬件平台设计[D]. 北京: 北京交通大学, 2023.
GUO S J. Hardware Platform Design of Portable Battery AC Impedance Detection Device[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2023.
- [19] MA C, XIA D H, ZHANG Y Y, et al. Sensing the Instant Corrosivity of Haze Using Electrochemical Probes by Electrochemical Noise Technique[J]. *Electrochemistry*, 2017, 85(12): 784-789.
- [20] 叶磊. 高精度数字程控微电流测量装置的研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2019.
YE L. Research on High-Precision Digital Program-Controlled Micro-Current Measuring Device[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2019.
- [21] 刘艳阳. 微通道板信噪比检测中微弱电流检测技术研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2014.
LIU Y Y. Research on Weak Current Detection Technology in Signal-to-Noise Ratio Detection of Microchannel Plate[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2014.
- [22] 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 Z, et al. Research and Application of Atmospheric Corrosion Monitoring Sensor[J]. *Corrosion & Protection*, 2021, 42(4): 58-61.
- [23] (日)冈村迪夫. OP放大电路设计: 从重视再现性设计的基础到实际应用[M]. 王玲译. 北京: 科学出版社, 2004.
OKAMURA D F. OP Amplification Circuit Design [M]. WANG L Translated. Beijing: Science Press, 2004.