

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2518812

基于柔性传感器数据采集与处理平台设计

柏川青 彭阳阳 周建 潘如如

(江南大学纺织科学与工程学院 无锡 214122)

摘要:为提升柔性传感器的开发效率与信号处理的实时性,本文设计了一种集成化的柔性传感器信号处理平台,旨在实现电阻式柔性传感器信号的快速采集与连续处理,并解决其输出非线性与稳定性差等问题。该平台由电阻采集系统与信号处理系统组成:采集系统基于STM32微控制器构建,支持对柔性传感器8路多通道数据的实时采集;处理系统集成基于标定点的分段线性映射算法,并支持包含混合自适应滤波在内的11种滤波方法与实时波形可视化功能。实验结果表明,该平台可实现柔性传感器信号的高精度采集,显著提升其线性表现与输出稳定性,支持采集与处理全流程的实时一体化运行,能够为柔性传感器的开发与应用提供可靠的数据基础与方法支持。

关键词:柔性传感器;信号处理平台;线性化映射;自适应滤波;采集与处理一体化

中图分类号: TN98 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 510.1050

Design of a data acquisition and processing platform for flexible sensors

Bai Chuanqing Peng Yangyang Zhou Jian Pan Ruru

(College of Textile Science and Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract: To enhance the development efficiency and real-time signal processing capabilities of flexible sensors, this paper presents an integrated signal processing platform specifically designed for resistive flexible sensors. The platform enables rapid acquisition and continuous processing of sensor signals while addressing issues such as nonlinear output and poor stability. It consists of a resistance acquisition system and a signal processing system: the acquisition module, based on an STM32 microcontroller, supports real-time acquisition from eight channels of flexible sensors; the processing module integrates a segmented linear mapping algorithm based on calibration points and supports 11 filtering methods—including hybrid adaptive filtering—as well as real-time waveform visualization. Experimental results demonstrate that the platform achieves precise acquisition of flexible sensor signals, significantly improves signal linearity and output stability, and supports fully integrated real-time operation across the acquisition and processing stages. This platform provides a reliable data foundation and methodological support for the development and application of flexible sensors.

Keywords: flexible sensor; signal processing platform; linear mapping; adaptive filtering; integrated acquisition and processing

0 引言

随着可穿戴设备、柔性电子和智能监测技术的持续发展,电阻式柔性传感器因其优异的可拉伸性、顺应性与结构多样性,已广泛应用于生理信号监测、运动状态评估与智能纺织等领域^[1-2]。然而,在柔性传感器的研发与测试过程中,当前主流的信号采集方式仍以万用表等手动测量手段为主,需将数据离线导出至Excel、Origin等软件进行处理^[3-4]。由此带来仪器便携性差、实验流程繁琐、缺乏实时性与系统性等问题,严重影响柔性传感器的研发效率与数

据质量。在信号处理方面,自适应滤波算法虽然被广泛应用于柔性传感器信号的去噪与平滑处理中,但由于通常未结合柔性传感器的动态状态特征进行处理策略切换,难以兼顾动态响应速度与稳态抗干扰能力,在提升信号线性度方面亦存在局限^[5-6]。例如,最小均方(LMS)收敛速度慢,难以应对突变干扰;递归最小二乘(RLS)对初始参数与输入噪声敏感,计算复杂度高;卡尔曼滤波对系统建模精度高度依赖,在模型不完善或信噪比波动剧烈的场景下性能大幅下降。

近年来,机器学习在柔性传感器信号处理中的应用逐

渐增多^[7-8],但其实际应用仍面临挑战:首先,模型训练通常依赖高性能计算平台,成本与功耗较高;其次,柔性传感器种类繁多、响应特性差异显著,不同传感器往往需重新构建与训练模型,模型的可移植性较差;此外,模型开发周期长且调参过程复杂,对柔性传感器研发人员的算法基础要求较高,导致应用门槛较高。

与此同时,新一代嵌入式平台的快速发展也为柔性传感器系统提供了新的技术路径^[9-13]。相较早期设备在处理性能与接口资源方面的限制,STM32 系列、ESP32 等新型平台在运算能力、通信接口以及对 FreeRTOS 等实时操作系统的支持方面具备明显优势,为柔性传感器信号的本地实时采集、无线传输及边缘计算部署提供了坚实的技术基础。

基于上述考虑,本文提出一种基于柔性传感器的数据采集与处理平台,旨在提升柔性传感器的开发效率与实际

应用性能,并解决柔性传感器信号在噪声干扰下的稳定性问题,以及输出特性中的非线性响应问题。该平台由电阻采集系统与信号处理系统组成,电阻采集系统采用 STM32 微控制器,支持对 8 路柔性传感器信号的实时采集;信号处理系统基于 Qt Creator 平台,采用 C++ 语言开发,具备灵活的人机交互能力与图形可视化界面。相较于传统系统仅支持原始数据读取,本平台结合柔性传感器特性,设计了基于标定点的分段线性映射算法与状态驱动的混合自适应滤波机制,可在低成本嵌入式环境中实现对电阻信号的动态线性重构与稳定输出。

1 平台概述

平台的整体设计框图如图 1 所示,系统由两大核心功能系统组成:电阻采集系统与信号处理系统,分别承担柔性传感器原始信号的采集与数据优化处理任务。

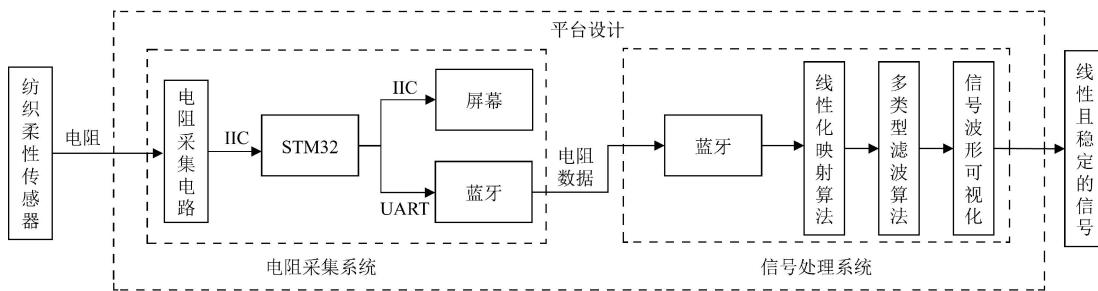


图 1 平台设计框图

Fig. 1 Platform design block diagram

其中,电阻采集系统作为平台与电阻式纺织柔性传感器之间的桥梁,负责对传感器输出的电阻信号进行多通道、实时采集,并将信号稳定、准确地传递至信号处理系统。电阻采集系统基于 STM32F411CEU6 微控制器实现,支持 8 路柔性传感器电阻信号较高精度的多通道快速采集。通过周期性通道轮询机制,结合 FreeRTOS 多任务调度,实现数据采样、滤波、暂存与异步发送的协同运行,从而保障采集数据的完整性与连续性,为信号处理系统提供稳定可靠的输入支持。

信号处理系统对采集到的原始电阻信号进行精细化处理,主要包括基于标定点的线性化映射与多类型滤波算法两大核心功能。系统采用基于标定点的响应线性化映射算法,实现传感器信号随应变变化的线性响应重构,有效克服其原始输出的非线性特性;滤波模块集成了具备状态判别机制的混合自适应滤波方法,支持包括卡尔曼滤波在内的共 11 种可选算法,最终实现柔性传感器信号的线性化与稳定输出。此外,系统配备图形化界面与数据保存功能,支持信号波形的实时可视化。

2 电阻采集系统设计

为实现对柔性传感器信号较高精度的采集与实时上

传,本文设计并实现了一套专用于电阻式柔性传感器的便携式多通道采集系统。该系统包括电源管理、传感器电阻测量、主控单元及通信模块等多个功能模块,结合 STM32 控制器与高精度模数转换芯片,能够对多路传感器信号进行稳定采样并通过蓝牙模块传输至上位机。系统在硬件架构、信号采集原理与软件调度策略方面均进行了优化,确保其在便携性、实时性与准确性上的综合性能表现优良。以下将分别介绍系统的硬件结构与软件实现。

2.1 电阻采集系统硬件设计

1) 电源电路

如图 2 所示,系统采用 USB Type-C 接口供电,输入电压为 5 V,通过电源开关控制后,经 $10\ \mu F$ 和 $100\ nF$ 电容滤波并输入至 AMS1117-3.3 稳压芯片,将电压降至 3.3 V,为采集系统核心、电阻测量及 OLED 模块供电。

芯片输出端并联滤波电容以稳定电压,同时串联 LED 指示灯,用于指示电源状态。系统中的 5 V 电压还直接供电子 ADS1115 模数转换模块和 HC-05 蓝牙模块,确保采集与通信功能正常运行。

2) 电阻测量电路

电阻测量电路采用基于分压原理的差分放大结构,结合高精度模数转换器实现对传感器阻值的精确获取。电

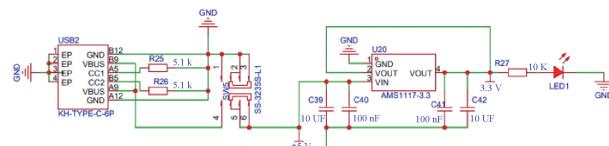


图2 电源原理图

Fig. 2 Power supply schematic

路中所采用的运算放大器具有 20 kHz 的带宽,能够满足柔性传感器低频信号的响应需求^[14]。此外,该运算放大器的输入失调电压典型值为 $\pm 10 \mu\text{V}$,输入偏置电流典型值为 $35 \mu\text{A}$,因此能够有效放大柔性传感器在 $0 \sim 4000 \Omega$ 阻值变化范围内所产生的微弱电信号。图 3 展示了该电路中单路电阻测量单元的电路详细结构。ADS1115 模块的 A0~A3 通道分别连接四路电阻测量单元,通过 I²C 接口与 STM32 建立通信。

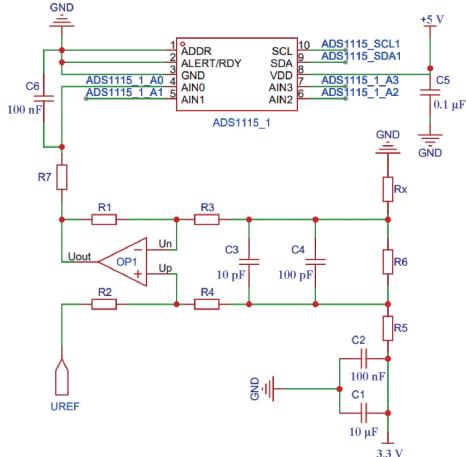


图3 测量电路原理图

Fig. 3 Measurement circuit schematic

在电路中,待测电阻 R_x 与电阻 R_5 、 R_6 构成分压网络,由 3.3 V 电源供电,并经电容滤波去除高频干扰。OP1 运算放大器两输入端并联 10 pF 与 100 pF 电容,构建差分低通滤波器,提高信号稳定性并抑制高频震荡。基于叠加定理和运放负反馈原理,可推导出运放的正输入端电压 U_p 和负输入端电压 U_n 关系式如下:

$$U_p = \frac{R_6 + R_x}{R_5 + R_6 + R_x} \times 3.3 \times \frac{R_2}{R_4 + R_2} + U_{REF} \times \frac{R_4}{R_2 + R_4} \quad (1)$$

$$U_n = \frac{R_x}{R_5 + R_6 + R_x} \times 3.3 \times \frac{R_1}{R_1 + R_3} + U_{out} \times \frac{R_3}{R_1 + R_3} \quad (2)$$

将式(2)化简后可得 OP1 运放输出电压 U_{out} 表达式:

$$U_{out} = \left(1 + \frac{R_1}{R_3}\right) \times U_n - \left(\frac{3.3 \times R_x}{R_5 + R_6 + R_x} \times \frac{R_1}{R_3}\right) \quad (3)$$

令 $R_1 = R_2$ 、 $R_3 = R_4$,由于 $U_p = U_n$,将式(1)带入

式(3),进一步整理得到:

$$U_{out} = \frac{R_6}{R_5 + R_6 + R_x} \times 3.3 \times \frac{R_1}{R_3} + U_{REF} \quad (4)$$

设定参考电压 $U_{REF} = 0$,并选择电阻参数 $R_5 = 2 \text{ k}\Omega$ 、 $R_6 = 10 \Omega$ 、 $R_1 = 1 \text{ M}\Omega$ 、 $R_3 = 5 \text{ k}\Omega$,带入式(4)可得待测电阻 R_x 的表达式:

$$R_x = \frac{6600}{U_{out}} - 2010 \quad (5)$$

其中, U_{out} 为运放输出电压, U_{out} 经过 R_7 (100Ω) 与 C_6 (100 nF) 构成的低通滤波器后, 输入到 ADS1115 采样, 并通过 STM32 控制器计算 R_x 。在实际应用中, 电阻式柔性传感器通常由导电纤维构成, 例如银纤维, 其连续承受电流一般在百毫安以内^[15]。为验证安全性, 根据欧姆定律估算电路测量电流范围:当 $R_x = 0 \Omega$ 时, 最大电流约为 1.64 mA ; 当 $R_x = 4000 \Omega$ 时, 最小电流约为 0.47 mA , 远低于银纤维柔性传感器的安全承载电流, 具备良好的电气安全性与适应性。

3) 电阻采集系统核心电路

系统采用 STM32F411CEU6 作为主控芯片, 主频最高可达 100 MHz, 内置浮点运算单元, 具备较强的数据处理能力, 适合应用于数据采集、信号处理与设备控制等场景。系统通过 NRSR 引脚连接复位按键, SWCLK 与 SWDIO 引出作为调试接口。图 4 展示了采集系统核心电路原理。

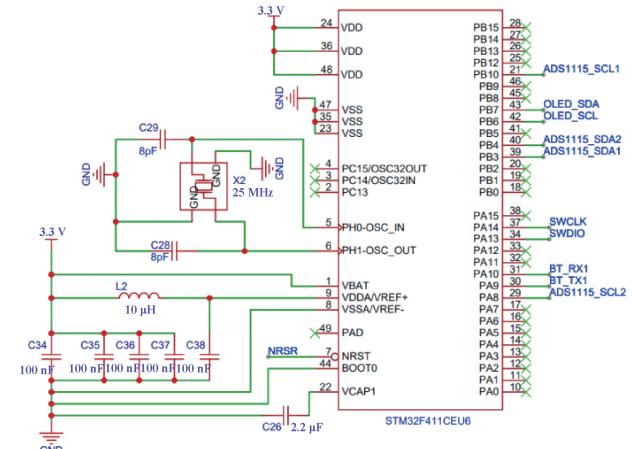


图4 系统主控原理图

Fig. 4 System control circuit

STM32F411 配置两路 I²C 接口, 用于连接两片 ADS1115 模数转换芯片; 通过 OLEO_SCL/SDA 引脚与 OLEO 显示屏通信; BT_RX1/TX1 接入 HC-05 蓝牙模块。为简化系统结构, 仅配置高速外部晶振作为系统主时钟源。

如图 5 所示, 整个平台支持 8 路电阻式柔性传感器的多通道实时测量, 每个通道采样速率为 50 SPS, 总采样速率达 400 SPS, 满足多通道实时测量需求。

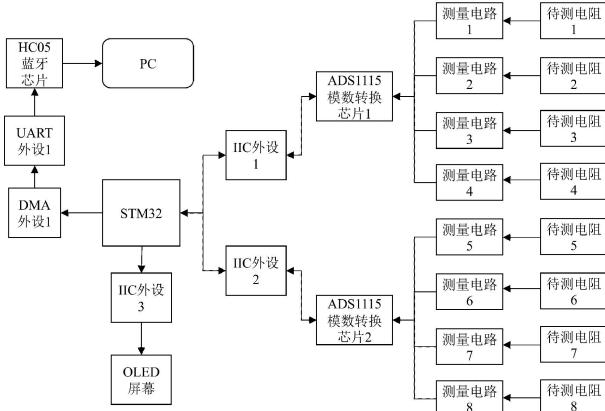


图 5 系统框图

Fig. 5 System architecture diagram

STM32 控制器通过 I^2C 采集 ADS1115 的模数转换结果，并计算获得柔性传感器电阻值。电阻数据经 DMA 搬运后，通过串口发送至 HC-05 蓝牙模块，实现无线数据上传；同时将实时测量结果发送至 OLED 显示模块供现场查看。系统电路设计图与实物图如图 6 和图 7 所示。电阻采集系统整板尺寸为 $6.5\text{ cm} \times 2.8\text{ cm}$ 。实物正面布置采样引脚，每两引脚构成一个通道，支持 8 通道独立采集，背面集成 OLED 屏与蓝牙模块，整体结构紧凑，具备良好的便携性与实用性。

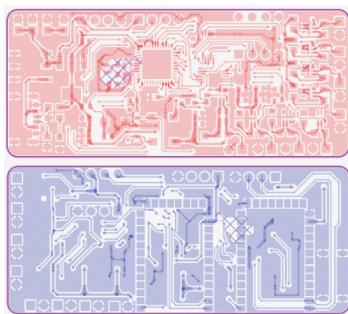


图 6 电路设计图

Fig. 6 Circuit design diagram

2.2 电阻测量系统软件设计

1) 软件总体流程设计

本系统基于 FreeRTOS 实时操作系统，设置电阻数据采集任务与 OLED 显示任务两类核心任务，如图 8 所示。系统上电后完成 STM32 初始化，包括 GPIO、UART、 I^2C 、OLED 与 ADS1115 等，随后启动 FreeRTOS 内核，进入多任务调度流程。

在运行过程中，电阻数据采集任务周期性地采集 8 个通道的电阻数据，采集完成后通过 UART 发送封装好的数据帧，并释放信号量通知 OLED 显示任务刷新界面。考虑资源占用差异，系统将采集任务优先级设为高于 OLED 显示任务，并在等待模数转换结果期间主动让出 CPU 使用

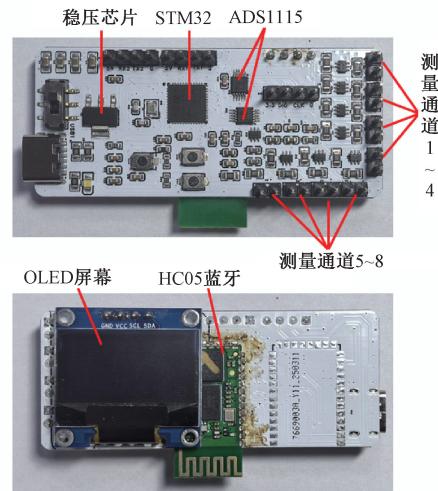


图 7 系统实物图

Fig. 7 Physical layout of the system

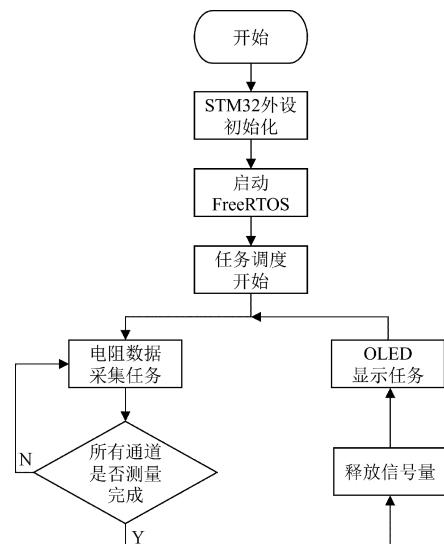


图 8 软件流程图

Fig. 8 Software workflow diagram

权，从而提高系统整体运行效率。

2) 电阻数据采集任务

多通道的电阻数据采集以 FreeRTOS 中的独立任务运行，具体任务流程如图 9 所示。首先，系统通过两路 I^2C 接口分别配置两片 ADS1115 的第一个通道，随后通过调用定时休眠函数进入短暂阻塞以等待电压转换完成，唤醒后，采集相应的电压值。每获取一组通道（即两片 ADS1115 各自一个通道）的电压数据后，先对其进行窗口大小为 4 的滑动均值滤波，再根据式(5)计算出电阻值并存储于缓存区。随后，系统切换两片 ADS1115 至下一采样通道，循环执行直至第 4 组（两片 ADS1115 的第 4 个通道）数据采集完成。每当第 4 组通道数据采集完成后，系统将 8 个通道的电阻数据组装成帧，并通过 DMA 方式写入串

口缓存，并经 HC-05 蓝牙模块发送至上位机，同时释放信号量，通知 OLED 显示任务进行数据刷新。

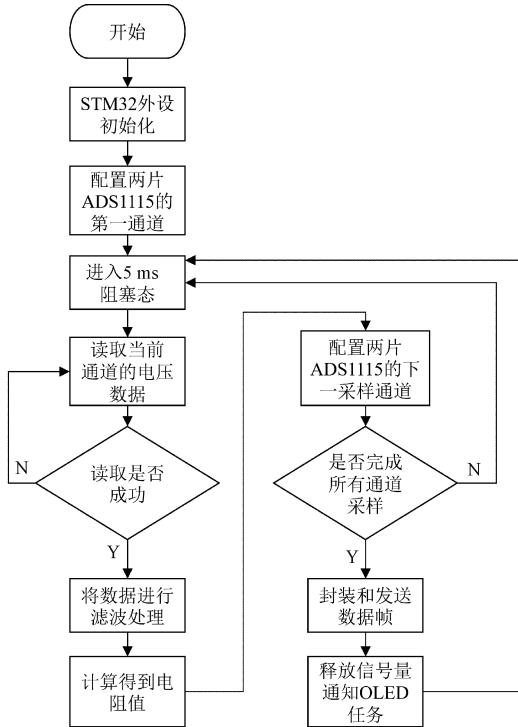


图 9 采集任务流程图

Fig. 9 Acquisition task flowchart

系统通过设置电阻数据采集任务优先级高于 OLED 显示任务，确保信号采集的实时性；而采集任务在等待电压转换期间，通过主动进入阻塞态，短暂让出 CPU，借助 FreeRTOS 多任务调度机制，使 OLED 显示任务有充足的时间完成屏幕刷新等较为耗时的操作，从而实现系统多任务的高效协同与稳定运行。

3) OLED 显示任务

OLED 显示任务同样采用无限循环的结构，流程如图 10 所示。

每次循环开始时，任务处于阻塞状态，等待电阻采集任务释放信号量。一旦唤醒，系统从全局缓存中读取最新电阻值，并在 OLED 屏幕上刷新显示。显示完成后重新进入阻塞状态，等待下一次采集任务通知，实现实时数据更新显示。

3 信号处理系统设计

针对柔性传感器信号输出存在非线性和抗干扰能力差的问题，本文在信号处理系统中根据柔性传感器的特性设计并实现了两种关键算法：基于标定点的线性化映射算法用于提升电阻信号的线性度，基于状态判别的混合自适应滤波算法用于增强信号的稳定性与鲁棒性。这两类算法的结合实现了柔性传感器信号从波动性原始数据向高

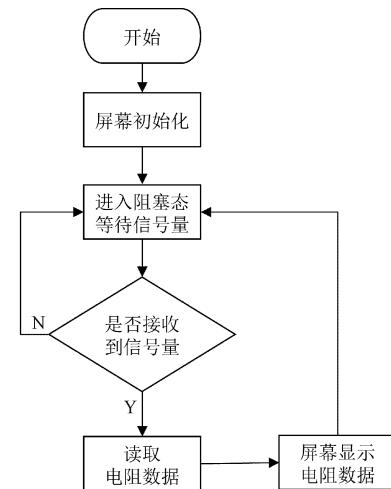


图 10 显示任务流程图

Fig. 10 Display task flowchart

线性、高稳定性输出的有效转换。

3.1 基于标定点的响应线性化映射算法

针对柔性传感器在中高应变阶段响应非线性的问题，本文提出一种基于标定点的分段线性映射算法，以提升电阻信号的线性度。该方法利用传感器在低应变区间内的线性响应作为基准，对整体响应曲线进行校正。

如图 11 所示，首先对柔性传感器在 0%、25%、50%、75%、100% 应变下的电阻响应进行采集标定，获得 5 个真实电阻值，分别记为记为 R_{0_real} 、 R_{25_real} 、 R_{50_real} 、 R_{75_real} 、 R_{100_real} 。考虑到柔性传感器在 0%~25% 区间内响应最接近线性，选取该段数据进行拟合，获得理想线性曲线函数，理想线性曲线函数的斜率和截距如下：

$$\begin{cases} a_{1_real} = \frac{R_{25_real} - R_{0_real}}{25 - 0} \\ b_{1_real} = R_{0_real} \end{cases} \quad (6)$$

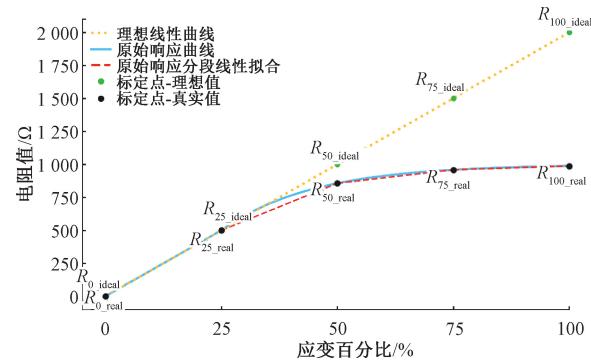


图 11 原始响应校正

Fig. 11 Original response calibration

由式(6)得到柔性传感器理想电阻值 R_{X_ideal} 的线性表达式(7)， X 为柔性传感器的应变率($0 \leq X \leq 100$)：

$$R_{X_ideal} = a_{1_real} \times X + b_{1_real} \quad (7)$$

根据式(7)可以分别得到柔性传感器应变率为 0%、

25%、50%、75%、100% 的理想电阻值, 分别记为 R_{0_ideal} 、 R_{25_ideal} 、 R_{50_ideal} 、 R_{75_ideal} 、 R_{100_ideal} 。将原始响应曲线按应变率区间均分为 4 段, 对每段分别拟合一次函数, 随后, 将每段原始响应曲线的一次函数与理想线性曲线之间建立一次映射函数, 映射函数的形式如式(8)所示, n 表示对应的每段区间编号($n=1, 2, 3, 4$):

$$R_{ideal} = a_n \times R_{real} + b_n \quad (8)$$

其中, a_n 和 b_n 由理想值 R_{n_ideal} 与实际值 R_{n_real} 配对计算得出, 例如:

$$\begin{cases} a_1 = \frac{R_{25_ideal} - R_{0_ideal}}{R_{25_real} - R_{0_real}} \\ b_1 = R_{0_ideal} - a_1 \times R_{0_real} \end{cases} \quad (9)$$

其他区间($n=2, 3, 4$)的系数亦可依此类推计算得到。如式(8)所示, 对于电阻式柔性传感器采集到的电阻值 R_{real} , 首先通过判断其所处的应变区间, 选择对应的映射函数进行线性变换, 即可得到校正后的理想线性化电阻值 R_{ideal} 。通过上述映射过程, 非线性变化部分得以修正。

由于已有研究表明, 部分柔性传感器的线性响应区间通常位于较低的应变范围内, 一般涵盖了 0%~25% 及以上的区间^[16], 因此选取 0%~25% 的低应变区间作为线性基准段, 以确保所选区间处于柔性传感器的线性响应范围内。同时, 将整体应变范围划分为 4 个分段, 是综合考虑实验复杂性和线性化效果后的结果。若分段数目过少, 则第一个区间作为线性基准区间可能包含明显的非线性响应段, 导致线性化精度下降; 而若分段数目过多, 则标定所需参数数量显著增加, 实验效率降低, 且线性化精度提升效果有限。因此, 选择 4 个分段可在实验操作简便性与线性化效果之间实现较为理想的平衡。

3.2 基于状态判别的混合自适应滤波算法

线性化映射虽能有效提升信号的线性度, 但同时可能放大原始信号中的波动噪声。柔性传感器易受空气扰动及环境噪声影响, 即便在静止状态(未发生明显形变且未受外力作用时)下也常伴随微小波动; 此外, 其结构特性决定其电阻信号在运动状态(如受力拉伸或收缩)下不应出现剧烈突变, 因此较大的突变值通常可视为噪声干扰。在此背景下, 引入滤波算法对于提升系统稳定性尤为关键。

图 12 展示了针对柔性传感器信号特性设计的混合自适应滤波算法流程图。该方法基于状态判别机制, 需设定最小偏差值、最大偏差值和滑动窗口大小三项参数。通过判断相邻测量值的差异大小, 实现滤波策略的自动切换。该算法无需人工干预, 即可根据柔性传感器的状态灵活调整处理方式, 兼顾响应速度与抗干扰能力, 有效提升系统的适应性与鲁棒性。

该算法中“最小偏差值”的确定依据柔性传感器在静止状态测量的电阻波动范围, 通过采集传感器在静止状态下相邻测量值的最大差值并将其设定为“最小偏差值”; 该方法不仅能够使传感器在未变形静止状态下的输出信号

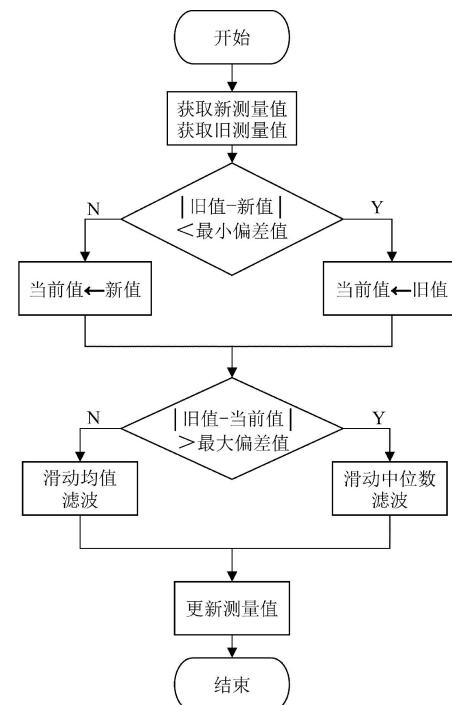


图 12 混合自适应滤波流程图

Fig. 12 Hybrid adaptive filtering flowchart

更加平稳, 也能使传感器在受力后达到新平衡状态时保持较好的信号稳定性, 从而有效减少信号波动。而“最大偏差值”则是根据柔性传感器处于运动状态时电阻值呈连续且渐变的变化特性设定; 通过连续采集柔性传感器运动状态下的原始信号, 可确定正常连续运动过程中相邻测量值的最大合理变化范围, 并将其设为最大偏差值; 当相邻测量值之间的差异超出该值时, 系统可判定为外界干扰等引起的异常突变值, 并通过滑动中位数滤波剔除。此外, 当滑动窗口过小时, 窗口内包含的数据量不足以有效平滑数据以及滤除异常突变值, 导致滤波效果不佳; 而当窗口过大时, 虽然能提高对异常突变值的滤除效果, 但会降低传感器响应速度, 并可能使正常的动态信号变化特征被过度平滑而导致信号失真。

3.3 信号处理系统的上位机实现

本上位机软件基于 QtCreator 和 C++ 开发, 通过 Qt 串口通信模块与下位机的蓝牙接口进行数据交互, 具备良好的跨平台兼容性与可扩展性。

如图 13 所示, 主界面由图表显示区和功能控制区组成, 其中图表区可实时绘制单通道的原始电阻、滤波后电阻及线性化电阻数据的曲线; 功能区则提供下位机连接、11 种滤波算法的选择与参数配置(如图 14 所示)、线性映射算法的参数设定(如图 15 所示)等功能。

此外, 软件支持八通道数据的动态可视化, 并可将原始电阻信号与信号处理结果以文本格式导出, 便于在 Origin 等专业工具中进行进一步分析与处理。

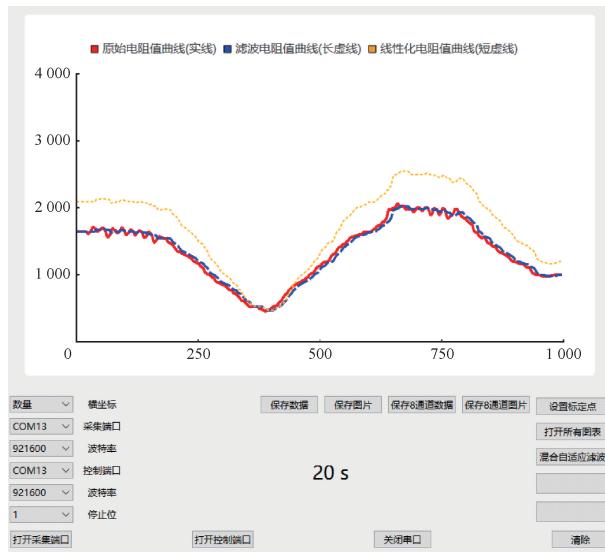


图 13 上位机主界面图

Fig. 13 Main interface of the host application



图 14 滤波选择与参数设定

Fig. 14 Filter selection and parameter setting

4 平台性能测试

4.1 平台测试环境搭建

本平台的性能测试涵盖 4 个方面, 分别包括柔性传感器的信号测量准确度、信号变化响应准确度、测量电流对柔性传感器安全性的影响, 以及信号的滤波与线性化处理能力的验证。其中, 滤波与线性化处理测试需结合实际柔性传感器进行实验验证。

图 16 与图 17 展示了线性化处理测试所使用的两类基于纱线结构的电阻式柔性传感器结构图, 图 16 为包芯纱, 图 17 为包缠纱。包芯纱传感器通过将镀银尼龙线缠绕于

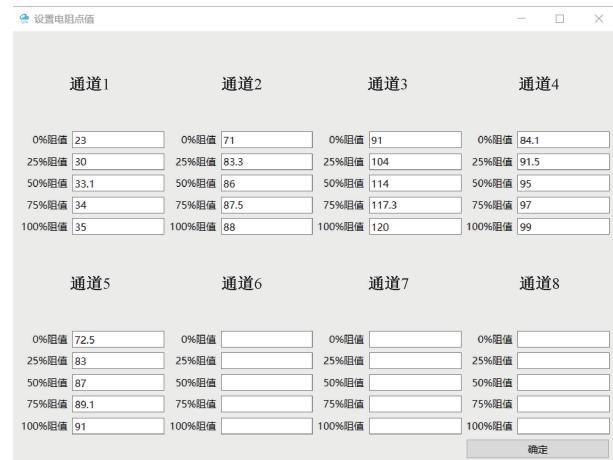


图 15 线性映射算法参数设定

Fig. 15 Linear mapping algorithm parameter setting

具有张力的氨纶芯纱表面, 使其在释放后紧密交织, 增强导电路径的应变响应灵敏度。包缠纱结构则以氨纶为芯纱、镀银尼龙线为鞘纱, 构成芯-鞘结构, 在保障拉伸性的同时提升导电稳定性, 整体具有更强的传感一致性。

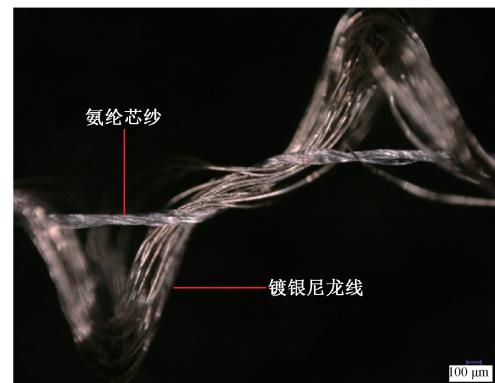


图 16 镀银尼龙线-氨纶包芯纱传感器

Fig. 16 Silver-plated nylon-spandex core-spun yarn sensor



图 17 镀银尼龙线-氨纶包缠纱传感器

Fig. 17 Silver-plated nylon-spandex wrapped yarn sensor

平台测试环境如图 18 所示, 从左至右、上至下依次包括: 直流电阻箱、数字万用表、5 V 锂电池及电阻采集系统、可编程运动控制器、上位机。测试中, 电阻采集系统作为

核心单元,实时采集柔性传感器的阻值变化数据,为后续分析提供支持。

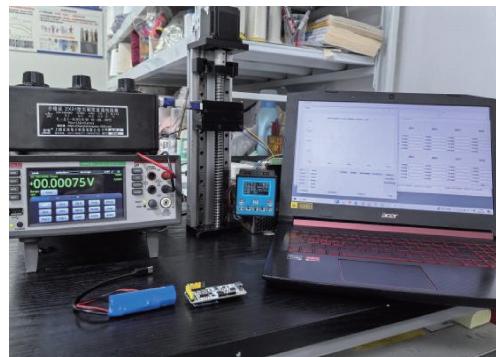


图 18 测试环境图

Fig. 18 Test environment setup

4.2 柔性传感器信号测量准确度测试

该实验旨在评估平台对电阻式柔性传感器电阻测量的准确性。考虑到柔性传感器在制造过程中存在阻值不确定性,为提高测试的准确性与可重复性,本实验采用标准可调电阻箱替代传感器进行测试。设定电阻箱为 10 个不同阻值点,每个阻值点采集 3 组样本,每组连续测量 50 次,取其平均值作为最终测量结果。表 1 为系统测量性能的统计结果。

表 1 电阻测量准确度

Table 1 Accuracy of resistance measurement

设定阻值/Ω	测量阻值/Ω	绝对误差/Ω	相对误差/%
0	0.000 097	0.000 097	不适用
10	10.000 96	0.001	0.010
510	511.326 6	1.327	0.260
1 010	1 010.869	0.869	0.086
1 510	1 509.992	0.008	0.001
2 010	2 020.127	10.127	0.504
2 510	2 513.265	3.265	0.130
3 010	3 011.476	1.476	0.049
3 510	3 510.398	0.398	0.011
4 010	4 008.011	1.989	0.050

测试结果显示,在 0 Ω 条件下平台测值接近为零,零点偏差可忽略。在 0~4 000 Ω 范围内,平台测得的绝对误差控制在 0.001~10.127 Ω,相对误差为 0.001%~0.504%。整体精度表现优异,验证了本平台具备高可靠性的电阻采集能力,能够满足柔性传感器信号读取的工程应用需求。

4.3 柔性传感器信号变化响应准确度测试

鉴于柔性传感器在制备过程中电阻变化存在一定的不确定性,为提高测试的准确性与可控性,本实验采用标准可调电阻箱模拟柔性传感器在应变作用下的电阻变化

过程,以验证平台对传感器电阻变化响应的测量准度。在 3 个典型阻值区间(0~100 Ω、100~1 000 Ω、1 000~4 000 Ω)内,按固定步进设置若干电阻点,逐点调节阻值进行测试,其中,分别以 10 Ω、100 Ω 和 500 Ω 为步进,设置 11、10 和 6 个电阻测试点。每个测试点进行 3 轮独立测量,每轮采集 50 个数据并取平均值,计算相邻点之间的电阻差作为应变值,并与设定的步进值进行误差对比。测试结果如表 2 所示。

表 2 应变测量结果

Table 2 Accuracy of strain measurement

电阻变化范围/Ω	设定应变值/Ω	实际应变值/Ω	相对误差/%
0~100	10	10.04	0.40
100~1 000	100	100.134	0.134
1 000~4 000	500	499.832	0.034

实验结果表明,平台在各阻值区间均具有较高的应变测量精度,且相对误差随阻值增大逐步减小:在 0~100 Ω 区间为 0.40%,在中、高阻区依次降至 0.134% 和 0.034%。这一趋势反映出平台在高阻值下表现出更优的测量稳定性和线性响应能力。

该现象的原因在于:低阻区中,即使存在相同数量级的绝对误差,相对于较小的总变动量,所占比例更大,导致相对误差偏高;而在高阻区,误差对整体变化影响较小,相对误差随之降低。此外,随着步进值从 10 Ω 增至 500 Ω,平台对微小扰动的敏感性降低,鲁棒性增强。综上,平台在宽量程条件下具备良好的线性响应与抗干扰能力,可满足柔性传感器多场景下的应变测量需求。

4.4 测量电流对柔性传感器的安全性评估

为验证平台在电阻采集过程中对柔性传感器的电流安全性,评估其是否会因测量电流引发热效应或材料损伤,本文对平台在不同阻值下的电流输出进行了实测分析。

实验采用电阻箱模拟传感器负载,并使用数字万用表测量经过电阻箱实际电流值。在 3 个代表性阻值点(0 Ω、2 000 Ω、4 000 Ω)下,分别进行 3 轮测试,每轮采集 50 个数据,取平均值作为最终测量结果。实验结果如表 3 所示。

表 3 电流测量结果

Table 3 Current measurement results

阻值/Ω	电流/mA
0	1.613
2 000	0.807
4 000	0.532

结果显示,平台在最小负载下的最大电流为 1.613 mA,未超过理论最大值 1.64 mA,远低于常见导电银纤维可承

受的百毫安量级电流阈值,表明平台的工作电流均处于安全区间,不会对柔性传感器结构造成热损伤或熔断风险。

4.5 柔性传感器信号的滤波与线性化处理测试

为验证本平台对柔性传感器信号滤波与线性化处理方面的有效性,选取镀银尼龙线-氨纶包芯纱与包缠纱两类典型电阻式柔性传感器进行测试。传感器安装于可编程运动控制器上,在匀速拉伸条件下对柔性传感器进行加载,柔性传感器两端接入本平台的电阻采集系统,采集信号通过无线方式传输至上位机。

上位机采用混合自适应滤波算法对原始电阻数据进行实时预处理,滤波参数设定为:最小偏差值 0.04,最大偏差值 1.00,滑动窗口大小 10。图 19 和图 20 分别展示了两类传感器在拉伸过程中的原始电阻曲线与滤波后曲线对比结果。可见,原始数据均存在不同程度的波动噪声,而经过滤波处理后,曲线整体更加平滑,有效抑制了瞬时扰动与局部抖动,同时保留了电阻信号的变化趋势,显著提升了数据的可读性与稳定性。

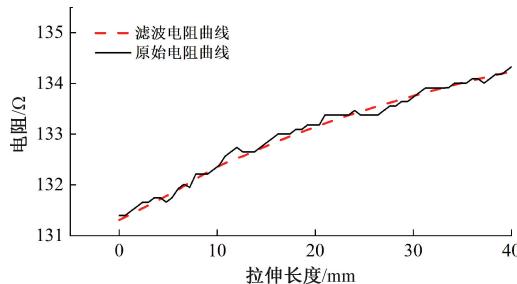


图 19 包芯纱传感器滤波曲线图

Fig. 19 Filtered resistance curve of core-spun yarn sensor

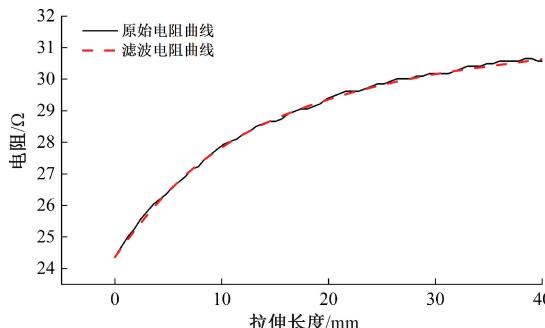


图 20 包缠纱传感器滤波曲线图

Fig. 20 Filtered resistance curve of wrapped yarn sensor

进一步地,在滤波基础上对电阻数据进行实时线性化处理,得到可表征性更强的线性化电阻数据,将其与一次函数进行最小二乘拟合,以评估线性化效果。图 21 和图 22 分别展示了包芯纱与包缠纱传感器的线性化电阻曲线及拟合结果。其中,包芯纱传感器的拟合优度 R^2 为 0.998,包缠纱传感器为 0.997,均非常接近于 1.000,表明本平台的线性化处理策略能够在不同类型柔性传感器上实现稳定且优异的线性重构。

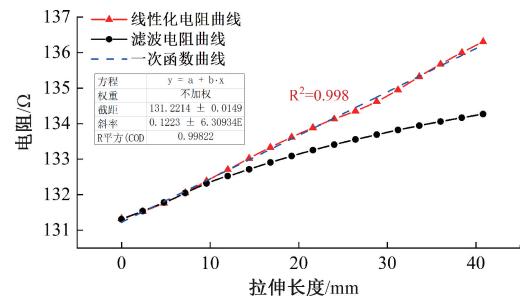


图 21 包芯纱传感器线性化电阻拟合曲线图

Fig. 21 Linearized resistance fitting of core-spun yarn sensor

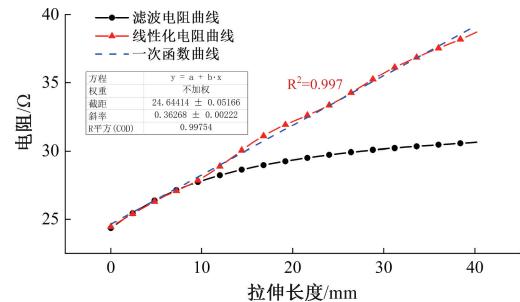


图 22 包缠纱传感器线性化电阻拟合曲线图

Fig. 22 Linearized resistance fitting of wrapped yarn sensor

值得注意的是,传统柔性传感器的信号分析通常基于原始或滤波后的电阻数据,相关表达形式在工程建模和控制应用中尚未形成统一规范。本文提出“线性化电阻数据”作为柔性传感器信号的标准表达方式,不仅为其性能评估提供了更具可比性与工程实用性的分析维度,更重要的是,使柔性传感器输出具备了更强的控制可用性,特别适用于对连续性与线性响应特性要求较高的控制系统。

4.6 多种噪声环境下混合自适应滤波算法性能测试

为测试混合自适应滤波算法在多种噪声条件下对柔性传感器信号的降噪能力,本文选取典型噪声类型对包芯纱传感器的原始信号进行干扰注入实验。滤波算法参数均设定为最小偏差 0.04,最大偏差 0.6,滑动窗口长度 10。

1) 高斯白噪声下的滤波性能

在高斯白噪声背景下,对包芯纱柔性传感器进行匀速拉伸实验,并对采集到的信号应用混合自适应滤波算法进行处理。图 23 与图 24 展示了传感器的滤波前后信号曲线变化。实验结果显示,包芯纱传感器的信噪比(SNR)从 0.54 dB 提升至 10.19 dB,滤波增益为 9.65 dB。该结果验证了混合自适应滤波算法在高斯白噪声干扰下对柔性传感器信号具有良好的降噪性能。

2) 低频电磁干扰下的滤波性能

本实验在柔性传感器受力稳定条件下进行,以模拟其在静态检测过程中遭受低频电磁干扰的典型工况。实验中引入频率为 15 Hz 的正弦干扰信号,叠加于传感器原始信号之上,采样率为 50 Hz。图 25 与图 26 分别展示传感器经混合自适应滤波处理前后的信号变化。实验结果显示

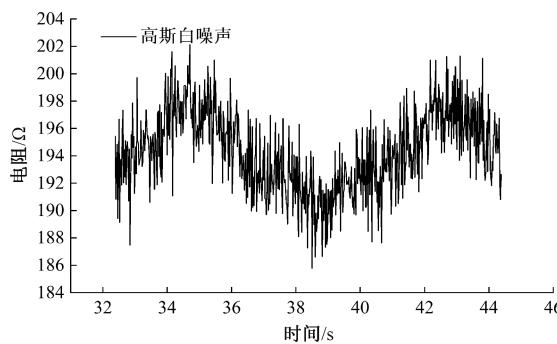


图 23 原始信号叠加高斯白噪声

Fig. 23 Original signal with Gaussian white noise

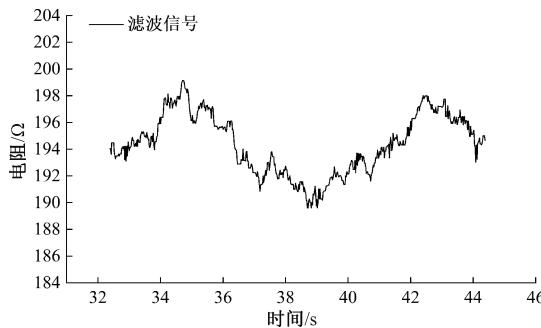


图 24 高斯白噪声经混合自适应滤波后

Fig. 24 Filtered signal under Gaussian noise

示,包芯纱传感器在干扰下的初始信噪比(SNR)为 -22.34 dB ,滤波后提升至 -4.88 dB ,实现了 17.46 dB 的滤波增益。结果表明了该算法在低频电磁干扰环境下对柔性传感器信号具有良好的恢复能力。

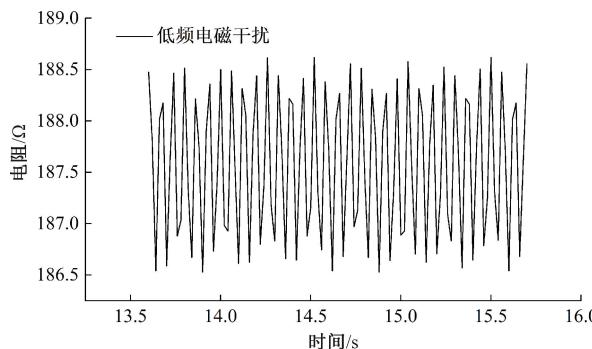


图 25 原始信号叠加电磁干扰

Fig. 25 Original signal with electromagnetic interference

3) 突发脉冲噪声下的滤波性能

本实验在柔性传感器受力稳定状态下进行,此状态下信号本身波动较小,有利于突出突发脉冲噪声的干扰特性。考虑到传感器受力稳定状态的波动幅度在 0.2 Ω 以内,故本实验引入幅度为 $2\sim4\text{ Ω}$ 的突发脉冲噪声,以模拟强干扰情形。图 27 与图 28 展示了传感器滤波前后的信号曲线变化。实验结果显示,包芯纱传感器的信噪比由 -14.5 dB 提升至 -5.43 dB ,滤波增益为 9.07 dB ,表明该

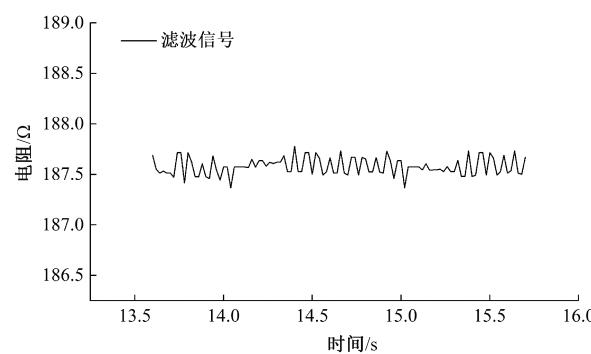


图 26 电磁干扰经混合自适应滤波后

Fig. 26 Filtered signal under electromagnetic interference

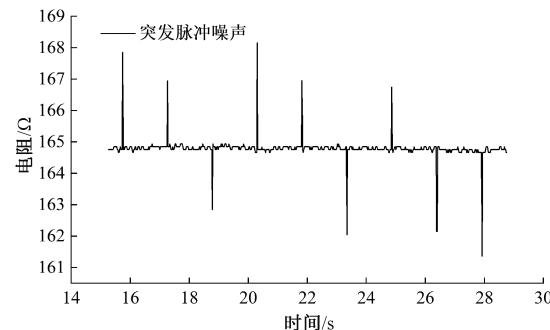


图 27 原始信号叠加突发脉冲噪声

Fig. 27 Original signal with impulse interference

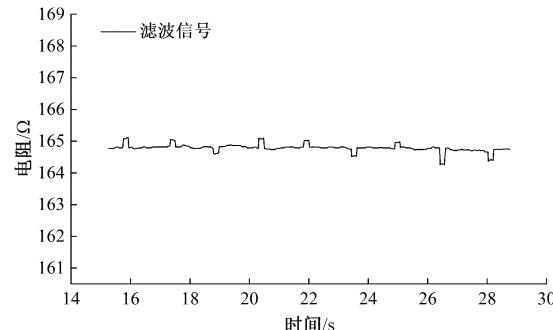


图 28 脉冲干扰经混合自适应滤波后

Fig. 28 Filtered signal under impulse interference

算法在突发干扰下具有良好的抗噪性能。

5 应用

本文设计了基于重复动作模拟的应用测试方案,利用包缠纱柔性传感器制作简易传感手套,如图 29 所示。

如图 30 所示,平台应用流程包括:佩戴手套后,操作者反复进行握拳与张开的周期性动作,手指弯曲引起传感器阻值变化;电阻采集系统实时获取变化数据并通过蓝牙发送至上位机;上位机对采集数据进行滤波与线性化处理,并以图形方式实时显示电阻信号波形。

图 31 为上位机主界面显示的中指通道信号曲线图,展示了原始、滤波与线性化 3 种信号在实际动作过程中的

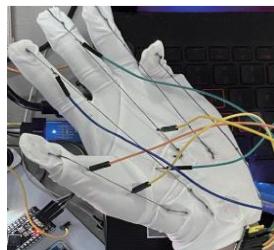


图 29 包缠纱传感器手套

Fig. 29 Wrapped yarn-based sensor glove

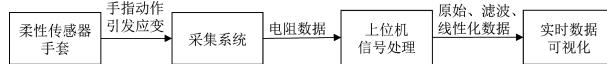


图 30 应用流程图

Fig. 30 Application workflow

变化特征。从图 31 中可以观察到,原始电阻信号在每次握拳、张手动作中呈现稳定的周期性变化;滤波后信号减少了抖动,呈现更平稳趋势;线性化信号在滤波基础上进一步优化,展现出更强的线性响应特性,三者对比清晰展现了平台的信号处理效果与性能优势。

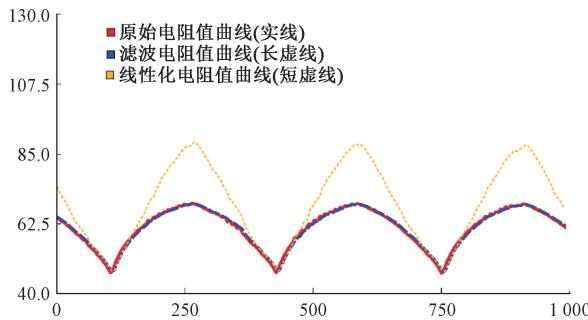


图 31 中指信号上位机图

Fig. 31 Signal curves of the middle finger channel

实验结果表明,该平台能够稳定采集柔性传感器的动态响应信号,并通过实时滤波与线性化算法处理,实现动作过程中的高可读性与线性映射特征,验证了其在柔性传感器应用开发中的实用性与处理性能。

6 结 论

本文基于 STM32 微控制器设计并实现了一种集电阻采集、混合自适应滤波与线性化映射于一体的嵌入式信号处理平台。实验结果表明,该平台在 $0 \sim 4000 \Omega$ 测量范围内的误差低于 0.5%,处理后的柔性传感器线性化电阻信号拟合效果优异,线性相关性可达 0.998,具备良好的测量精度与线性稳定性。平台提出以“线性化电阻数据”作为柔性传感器信号的表达形式,为其性能评估与控制应用提供了新的工程路径。

同时,该平台整体硬件尺寸仅为 $6.5 \text{ cm} \times 2.8 \text{ cm}$,成本控制在 70 元以内,具备高度集成、便携与低成本优势。此外,相较传统流程需通过万用表采集、手动导出并使用

第三方软件处理,整个过程耗时数小时;本平台实现了数据采集、处理与可视化的一体化集成,单帧数据的采集到处理全流程耗时为 20 ms 左右,提升了柔性传感器的研发效率,可将测试处理流程压缩至 10 min 内,显著降低试验周期与人力成本,具备良好的应用推广价值。

参 考 文 献

- [1] 杨平安,刘中邦,李锐,等. 电阻式柔性触觉传感器的研究进展[J]. 材料导报,2023,37(9):36-49.
YANG P AN, LIU ZH B, LI R, et al. Recent progress in the development of resistive flexible tactile sensors[J]. Materials Reports, 2023, 37(9): 36-49.
- [2] 张锐浩,李昀泽,党立志,等. 基于 AD8232 的表面肌电信号采集系统设计[J]. 电子测量技术,2023,46(6):173-177.
ZHANG R H, LI Y Z, DANG L ZH, et al. Design of a surface electromyography signal acquisition system based on AD8232 [J]. Electronic Measurement Technology, 2023, 46(6): 173-177.
- [3] 宿荣芳,文心仪,王俊,等. 智能可穿戴柔性压力传感器的研究进展[J]. 材料工程,2024,52(8):98-108.
SU R F, WEN X Y, WANG J, et al. Research progress of intelligent wearable flexible pressure sensors[J]. Materials Engineering, 2024, 52 (8): 98-108.
- [4] 晚春雪,吴子悦,黄显. 柔性可穿戴传感与智能识别技术研究进展[J]. 中国科学:化学,2022,52(11):1913-1924.
WAN CH X, WU Z Y, HUANG X. Research progress of flexible wearable sensing and intelligent recognition technology[J]. Science China: Chemistry, 2022, 52(11): 1913-1924.
- [5] 曹从军,赖凯旋,王旭升,等. 基于柔性压电薄膜的可穿戴脉搏传感器设计[J]. 电子测量与仪器学报,2024,38(10):35-47.
CAO C J, LAI K X, WANG X SH, et al. Design of a wearable pulse sensor based on flexible piezoelectric film [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2024, 38(10): 35-47.
- [6] 李凤超,孔振,吴锦华,等. 柔性压阻式压力传感器的研究进展[J]. 物理学报,2021,70(10):7-24.
LI F CH, KONG ZH, WU J H, et al. Advances in flexible piezoresistive pressure sensors [J]. Acta Physica Sinica, 2021, 70(10): 7-24.
- [7] 曹峻铭. 碳基柔性应变传感器的制备及可穿戴智能感知研究[D]. 北京:北京邮电大学,2024.
CAO J M. Carbon-based flexible strain sensors and wearable sensing research [D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2024.

- [8] 任艳玲. 基于柔性穿戴式传感器的人体活动识别和跌倒检测研究[D]. 杭州:杭州电子科技大学,2024.
REN Y L. Research on human activity recognition and fall detection based on flexible wearable sensors[D]. Hangzhou: Hangzhou Dianzi University, 2024.
- [9] 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. STM32 and USB-based data acquisition system [J]. Electronic Measurement Technology, 2024, 47(23): 104-113.
- [10] 吴启航,丁晓喜,何清波,等. 齿轮箱故障边缘智能诊断方法及应用研究[J]. 仪器仪表学报,2024,45(1): 70-80.
WU Q H, DING X X, HE Q B, et al. Research on edge intelligence-based fault diagnosis method and application for gearboxes [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(1): 70-80.
- [11] 张维. 基于 STM32 的防酒驾监测系统的设计[J]. 国外电子测量技术,2024,43(9):182-189.
ZHANG W. Design of an anti-drunk-driving monitoring system based on STM32 [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2024, 43 (9): 182-189.
- [12] 王楠,魏玉洁,张楠,等. 嵌入式水润滑轴承水膜压力无线传感监测方法[J]. 电子测量与仪器学报,2024, 38(5):38-46.
WANG N, WEI Y J, ZHANG N, et al. Wireless sensing and monitoring method for water film pressure in embedded water-lubricated bearings[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2024, 38(5): 38-46.
- [13] 蒋洋. 多通道电阻应变采集系统设计与实现[D]. 成都:电子科技大学,2022.
JIANG Y. Design of a multi-channel resistive strain system[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2022.
- [14] 全飞雨,李煜天,石佳玉,等. 纱线基柔性应变传感器及可穿戴应用研究进展[J]. 纺织工程学报,2023, 1(4):60-74.
TONG F Y, LI Y T, SHI J Y, et al. Yarn-based flexible strain sensors and wearable applications[J]. Journal of Textile Engineering, 2023, 1(4): 60-74.
- [15] REPON M R, MIKUĆIONIENĖ D. Progress in flexible electronic textile for heating application: A critical review[J]. Materials, 2021, 14(21): 6540.
- [16] TANG L, WU S, QU J, et al. A review of conductive hydrogel used in flexible strain sensor[J]. Materials, 2020, 13(18): 3947.

作者简介

柏川青,硕士研究生,主要研究方向为嵌入式系统开发及应用。

E-mail:1306407956@qq.com

潘如如(通信作者),教授,博士,主要研究方向为纺织图像技术、纺织智能制造。

E-mail:prrsw@163.com