

基于皮肤电活动的人体精神压力监控手环

陈广昊；叶子良；付晴柔

第一部分 设计概述

1.1 设计目的

目前有许多实现情绪检测的算法模型，但多借助于面部的表情，需要通过摄像头采集数据，难以应用于可穿戴式设备实现连续精神状态监控。本设计尝试通过基本的生理参数如脉搏波 PPG、体温、皮肤电阻抗 GSR(或称皮肤电活动 EDA)等信息实现精神压力连续预测记录，已有相关文章^[1, 2]论证其可行性。可进一步配合相关软件算法进行健康管理和用于开发更高效的模型。

1.2 应用领域

本设计实现了多参数采集和精神压力监控，可用于个人健康监护、疾病预后等领域，为用户的精神状态提供参考。在应用方面，精神压力监控手环可用于司机和其他需要精力高度集中的工作人员，提示其心理压力状态(是否过度紧张)，保证工作的安全。在实验方面，本设计可以为更高效的情绪(精神压力)检测算法、疾病预测模型的建立等提供开发平台。

1.3 主要技术特点

皮肤电导率作为衡量皮肤汗腺兴奋性的指标，间接反映了副交感神经系统兴奋性，因此常用作测量情绪变化的生理指标。本设计采集了皮肤电活动(皮肤电阻抗 GSR)，另外可以获取手腕处体温、绿光 PPG、三轴加速度等多生理参数数据，并通过这些数据结合简单的 MLP 模型将用户的精神压力状态分为三类(静息 Baseline、压力 Stress、娱乐 Amusement)。MLP 精神压力预测模型通过 WESAD 数据集建立，使用 TinyMaix 库在 BL618 平台部署。通过 LVGL 和 LCD 触屏搭建了离线平台，采集的数据可通过 GUI 显示，使用了 WIFI/BLE 功能将数据实时上传到云端或 APP，实现用户精神多生理参数连续采集、精神压力追踪的功能。

1.4 关键性能指标

基于 WESAD 数据集建立 MLP 模型，实现精神压力的简单预测评估，模型本地三分类准确率为 65%，二分类准确率为 87%。实现 PPG 心率、加速度、温度和 GSR 的准确测量。

1.5 主要创新点

(1) 针对此项目设计了新的传感器方案，制作了全新的配套传感器信号采集电路板，并优化了 AD5940 和 AFE4404 模拟前端的模拟信号通路，获得了良好的信噪比。

(2) 借助 freeRTOS 实现了不同芯片的同步，GSR、心率、体温、加速度多生理信号以不同频率同步采集。

(3) 构建了基于 MLP 的精神压力三分类/二分类模型，实现在 BL618 平台上实时预测精神压力。

(4) 使用 LVGL 构建了 GUI 对精神压力和多生理参数进行展示。

(5) 使用 WiFi/BLE 向 OneNet/APP 实时上报数据。

第二部分 系统组成及功能说明

2.1 整体介绍

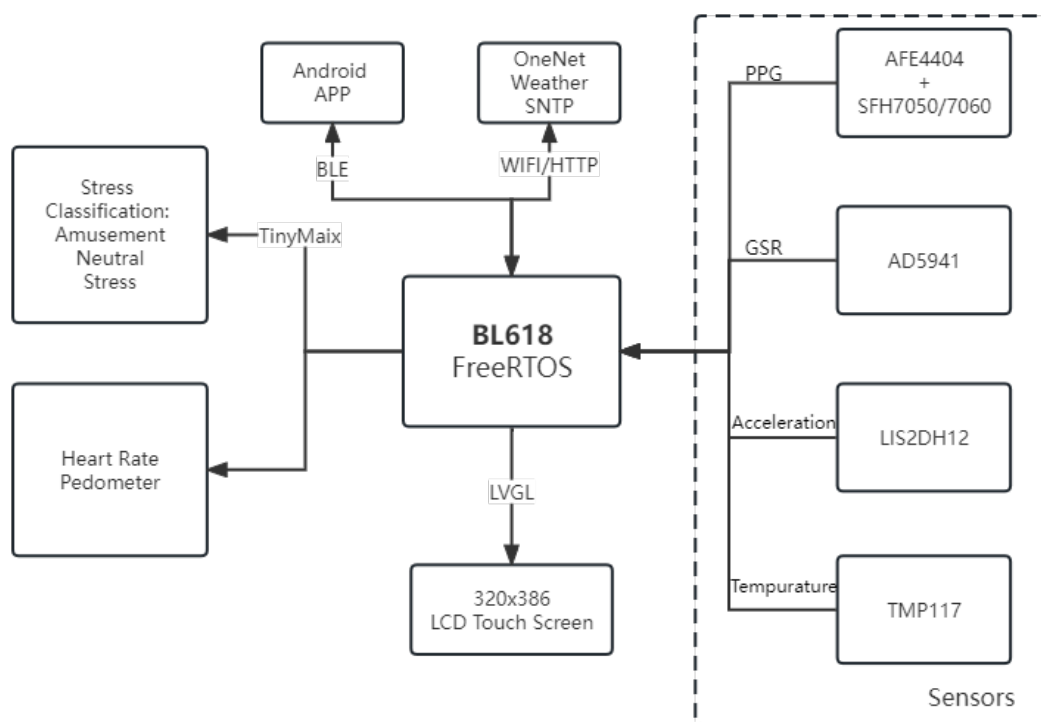


图 2.1 系统整体框图

传感器包括高精度生物阻抗和电化学前端 AD5941（采集皮肤电阻抗 GSR）、三轴加速度传感器 LIS2DH12（三轴加速度）、温度传感器 TMP117（手腕处体温）、光度学前端 AFE4404 和集成 LED/PD 传感器 SFH7060（光电容积脉搏波 PPG）。这些传感器通过 SPI（AD5940）和 IIC（其他）接口与 BL618 通信，由于每个芯片的时序和读取的方式不同，在 freeRTOS 中为每一个芯片配置一个任务。

使用 LVGL 构建 GUI，显示重要的数据如心率、体温等，将传感器的数据实时同步到 Chart 中进行可视化。

各传感器数据的时间窗为 30s，同时采集完成 30s 数据后，来自 4 个传感器的数据在 TinyMaix 算法任务中进行特征提取和神经网络计算。

使用了 WiFi 功能，在有 WiFi 连接条件下，将获取的心率、体温、精神状态三个信息实时同步到 OneNet 云端。使用了低功耗蓝牙功能，在通过蓝牙连接到安卓上位机时，同步心率、步数、体温、压力状态到 APP。

FreeRTOS:

系统核心为 BL618 MCU，为了使各传感器芯片按各自的时序运行互不干扰，也为了提高系统的稳定性，使用了 FreeRTOS 进行任务调度，提高系统实时性。FreeRTOS 共有 8 个任务，分别为 4 个传感器任务、LVGL、WiFi 连接、TinyMaix 算法和时钟显示。

对于不同任务访问同一个资源（如 IIC0）的问题，使用了互斥量对 IIC0 和 LVGL 刷新函数进行保护，AD5940 的初始化序列使用关键区进行保护以保证 AD5940 正确初始化。

2.2 各模块介绍

2.2.1 传感器板:

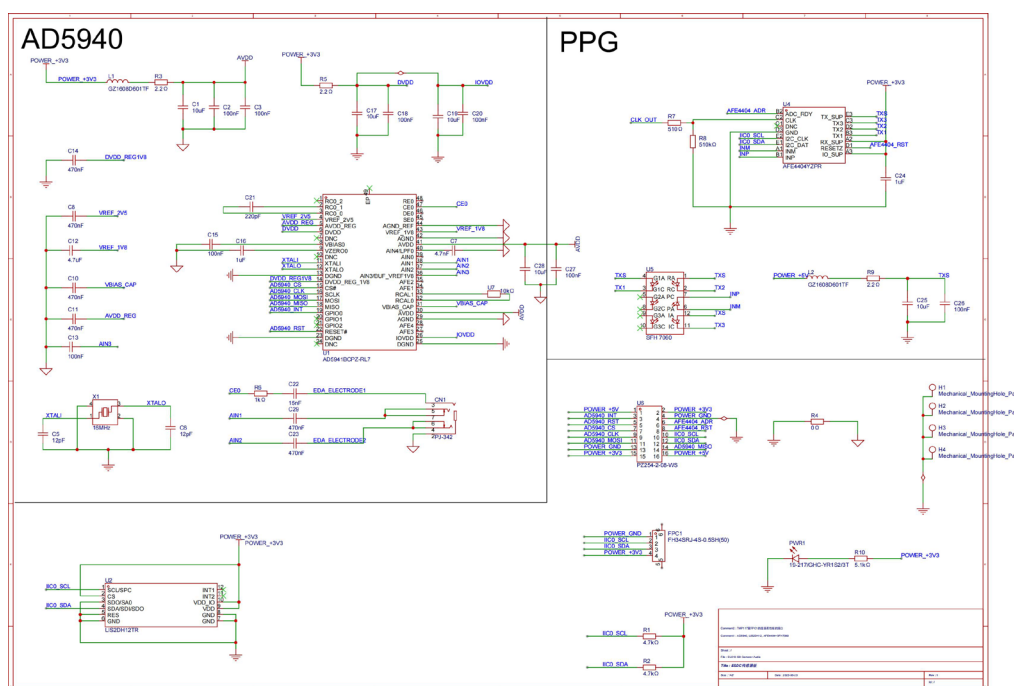


图 2.2 传感器板原理图

2.2.1.1 AD5941:

AD5941 是高精度、阻抗和电化学前端，可实现生物阻抗的连续低功耗测量。参考例程配置 EDA 测量功能，使用低功耗跨阻放大器和低速 DAC 通路，激励信号频率为 100Hz，幅度为 750mVpp。在 AD5941 芯片上进行 16 点 DFT 运算得到实部与虚部，通过 SPI 接口与 BL618 交换数据。最终数据输出频率为 4Hz。FIFO 大小设置为 8，每一秒中断一次读取一次 FIFO。

在 EDA 的任务中，缓冲区存储 30s 共 120 个 GSR 值，缓冲区满后进行 32 级 FIR 滤波，通带频率为 0.25Hz，波纹为 1dB，阻带频率为 0.5Hz，衰减为 25dB。采用了双缓冲以便于进一步处理滤波后的 EDA 信号。

2.2.1.2 LIS2DH12:

LIS2DH12 为三轴加速度传感器。设置 LIS2DH12 数据输出速率为 25Hz，精度为 10bit，最大量程 2g，FIFO 存储三组加速度数据，从 IIC 读取传感器 FIFO 状态为 DATAREADY 后进行 FIFO 读取。计步使用的是自相关的方法，对 4 秒的时间窗进行滤波、csi 序列相关计算后找到第一个自相关峰，对满足阈值的自相关峰，计算 4 秒内加速度的频率获得步数。

2.2.1.3 AFE4404+SFH7060:

AFE4404+SFH7060 的 PPG 电路中，目前使用了抗干扰/伪影能力更强的绿光（AFE4404 通道 1）获取心率。AFE4404+SFH7060 的方案：相比于集成 PPG 传感器如 MAX30102，本方案具有绿光 LED 并且光功率更强、配置更加灵活、成本更低；相比于全分立元件（分立 LED+分立放大电路），本方案电路设计更加方便、抗干扰能力更强、无需考虑光学元件的设计。

绿光 LED 电流和 ADC 增益、输入偏置由官方校正程序动态配置，采样率为 100Hz。AFE4404 有三个 LED 控制通道，本身硬件也连接了 SFH7060 的红光（通道 2）和红外光 LED（通道 3），可以获得 SpO2，但是目前由于校正程序的问题红光和红外光信号质量不好，暂时没有实现。

信号没有进行滤波或其他处理，因为目前时间窗寻峰的算法准确率已经足够，进一步处理（如使用 FIR/IIR 低通滤波器、小波等方法去除低频运动伪影以优化信号质量）代价高并且效果不好。

2.2.1.4 TMP117 FPCB:

为了可以更灵活地采集体温，设计了包含 TMP117 芯片的 FPCB，使用铜片导热，使用时贴在传感器板背面。TMP117 配置 8 点平均值（单次温度转换输出的时间 125ms）、单次转换模式，在 BL618 配置采样率为 4Hz，精度为固定的 0.1℃。

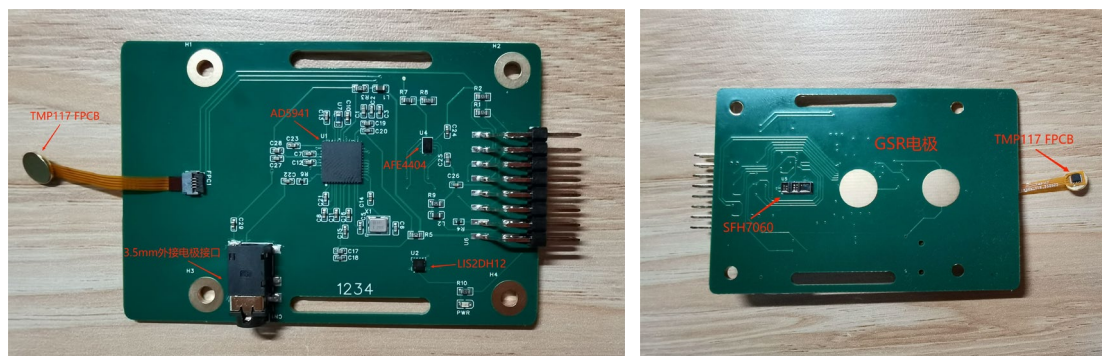


图 2.3 传感器板实物图

2.2.2 显示和 GUI 模块:

采用 320*386 分辨率 QSPI 接口的 1.89 英寸 LCD 屏幕, 驱动芯片为 GC9B71。屏幕使用电容触摸, 触摸分辨率同为 320*386, 驱动芯片为 CST816D。在调试时更改了 dbi 官方库在 QSPI 下“触发 QSPI (dbi) 传输”与“启动 DMA 传输”的顺序, 避免 BL618 重复发送第一字节 cmd, 匹配 GC9B71 QSPI 时序。目前显示有局部刷新时局部刷新区域边框轻微花屏的现象, 但不影响整体使用。

屏幕生产商和型号为华夏彩光电 H0189S002T002-V0

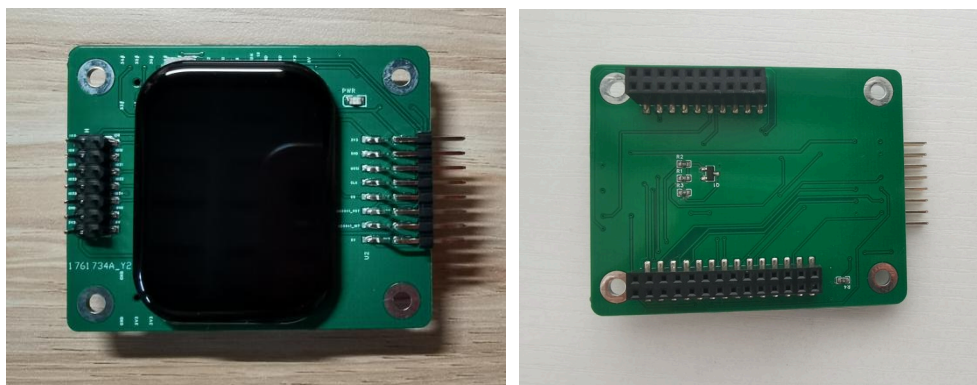


图 2.4 显示模块实物

QSPI 显示接口命令位 1 线, 地址 4 线, 数据 4 线, RGB565 色彩格式。CST816D 使用 IIC (BL618 片上 IIC1 外设) 接口与单片机通信, 配置了 LVGL indev 的相关接口。

使用 LVGL 构建 GUI, 实时显示时间日期 (计时)、温度、心率等。LVGL 目前包括三个可用的界面: 主界面、两个传感器状态显示界面, 可以相互滑动切换。其中的曲线图 Temperature Chart 和 Acceleration Chart 为实时更新, EDA Chart 由于 GSR 信号需要滤波所以每隔 30s 更新一次。Temperature 和 Acceleration 窗口显示 30 个数据, EDA 窗口一次显示 120 个数据点。

2.2.3 WiFi:

使用 WiFi (HTTP 协议) 传输数据到 OneNet。目前 WIFI 可以通过 FreeRTOS 无线连接管理任务自动连接到代码中配置好的网络，SSID 和密码需要在代码中配置。WIFI 任务每隔 10 秒搜索网络进行连接，如果连接上，每隔 10 秒进行温度、心率和精神压力状态的 HTTP POST 传输。在 WIFI 连接成功后，使用 LWIP 库的 SNTP 服务获取时间并同步到 RTC，时间实时在 LVGL 主界面进行更新。使用了心知天气，通过 HTTP GET 请求获取天气，通过 cJSON 库解析返回的天气数据并同步到 LVGL，定位使用的是 IP。

2.2.4 BLE:

配置了 BLE 服务，服务的短 UUID 为 0x18FF，特性的短 UUID 为 0x2AFF。将心率、体温、压力、步数信息放在一段字符串中进行通知，然后在安卓 APP 中进行解析。安卓 APP 使用 Android Studio 开发，有些简陋但能用，具有 BLE 连接和数据同步、绘图的功能。

2.2.4 算法和 TinyMaix:

使用 PPG 信号、SCR 信号、温度三个数据，在 30s 的时间窗内提取特征。提取了 SCR 信号的平均值、标准差、最小值；使用由 MATLAB Coder 导出的寻峰函数获得 SCR 信号的局部峰值，提取峰值数量、平均高度、最小高度、最大高度、高度的标准差；由 PPG 信号提取心周期间隔最大值、最小值、标准差和心率；提取温度的平均值、最大值和最小值。

采用 MLP 进行分类，三分类模型结构如下：
Model: "sequential"

Layer (type)	Output Shape	Param #
flatten (Flatten)	(None, 15)	0
dense (Dense)	(None, 32)	512
dense_1 (Dense)	(None, 64)	2112
dense_2 (Dense)	(None, 3)	195

```

=====
Total params: 2,819
Trainable params: 2,819
Non-trainable params: 0
    
```

二分类模型结构如下：
Model: "sequential"

Layer (type)	Output Shape	Param #
flatten (Flatten)	(None, 13)	0
dense (Dense)	(None, 32)	448
dense_1 (Dense)	(None, 64)	2112
dense_2 (Dense)	(None, 16)	1040
dense_3 (Dense)	(None, 8)	136
dense_4 (Dense)	(None, 2)	18
activation (Activation)	(None, 2)	0
Total params: 3,754		
Trainable params: 3,754		
Non-trainable params: 0		

模型使用 WESAD 数据集进行训练，WESAD 是情绪分类多模态传感器数据集^[3]，由 15 名研究人员通过压力测试得出，包括 EMPATICA E4 手环的加速度、温度、EDA、心率和 BVP 中的数据。

第三部分 完成情况及性能参数

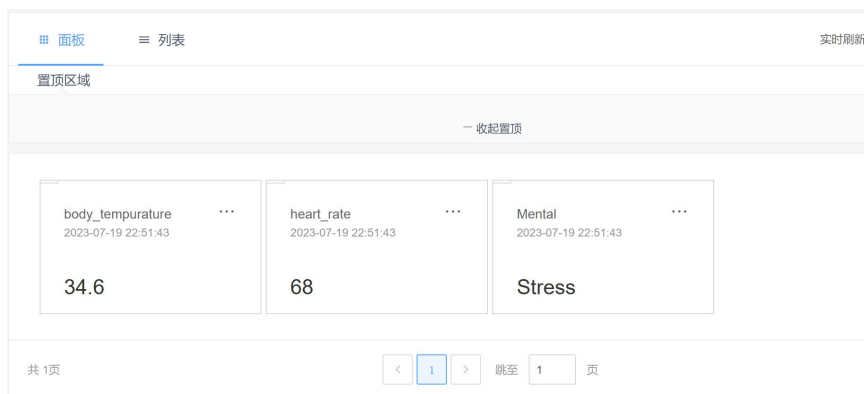


图 2.5 OneNet 上传的数据

性能参数:

传感器平台采集的绿光 PPG 波形如下图所示（静息状态于手腕处测得）。

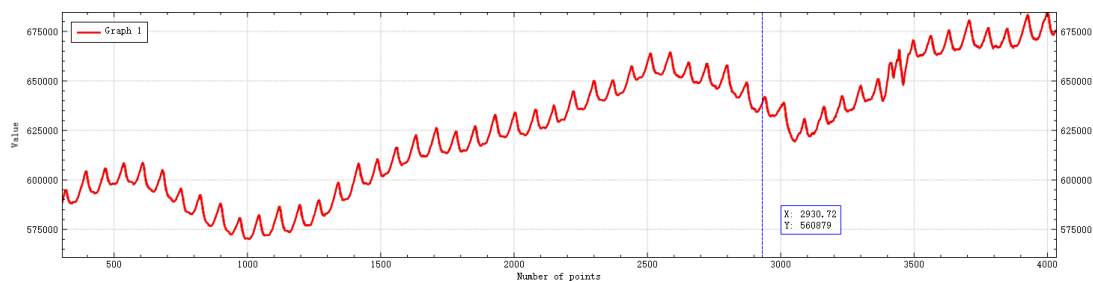


图 2.6 PPG 波形

为了测试心率的准确性，使用指夹式 PPG 血氧仪与本设计进行对比，以下为 120s 内二者测试心率的变化：

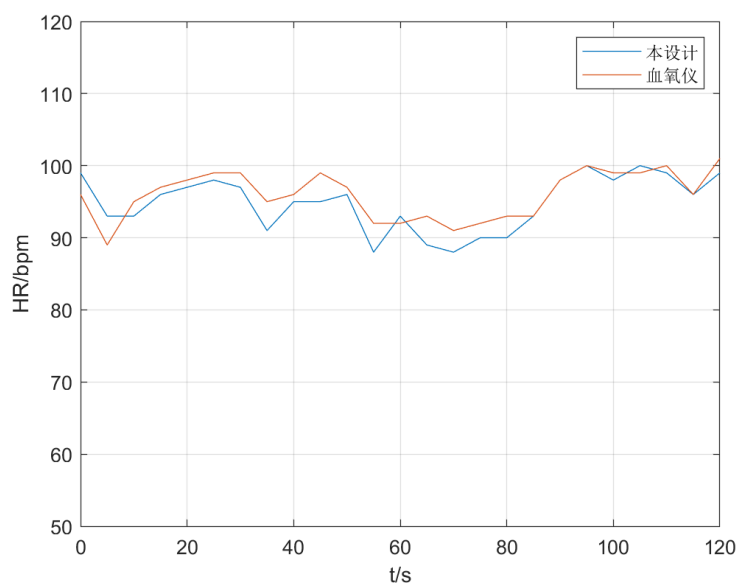


图 2.7 心率对比

传感器平台采集的 GSR 波形如下图所示（静息状态于手腕处测得）。

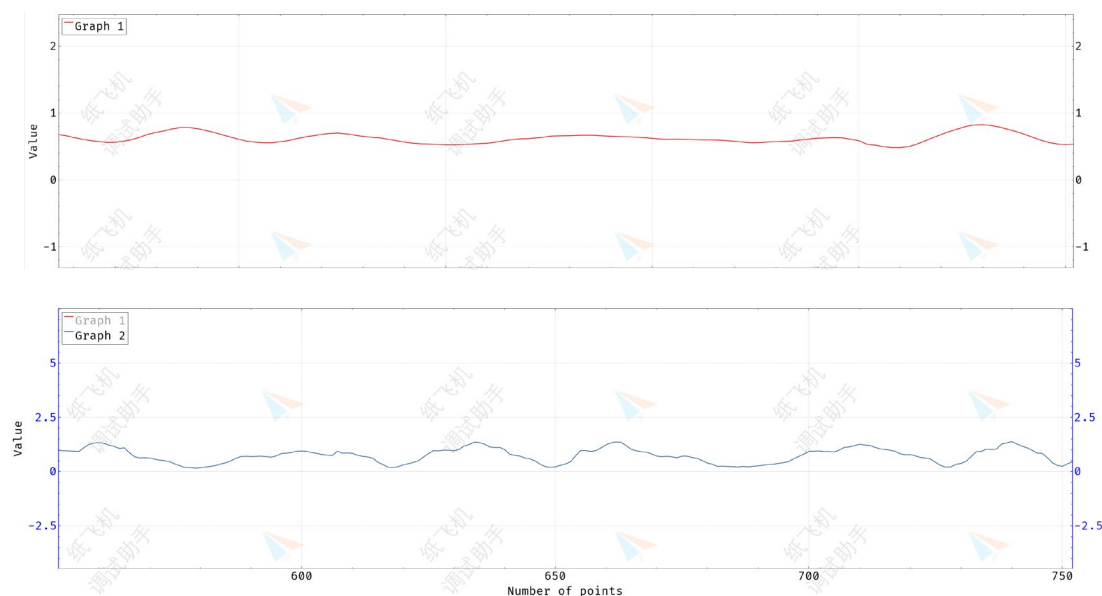


图 2.8 EDA 波形（上：滤波后；下：滤波前）

三分类情绪预测模型使用 WESAD 数据集的 E4 手环数据进行训练，在 LOSO 协议下得到如下的混淆矩阵：

```
array([[435,  59,  87],
       [ 54, 242,  30],
       [117,  30,  33]], dtype=int64)
```

0:Baseline; 1:Stress; 2:Amusement

准确率为 65.32%。

二分类模型是将 WESAD 数据集集中的 Amusement 项删除，只对 Baseline 和 Stress 进行分类。测试集上得到如下的混淆矩阵：

```
array([[154,  12],
       [ 23,  84]], dtype=int64)
```

0:Baseline; 1:Stress

测试集准确率为 87.18%。

为了将模型部署于 BL618，将模型权重和输入输出量化至 uint8。通过 TinyMaix 的 python 脚本将 tflite 模型转化为.h 文件。使用 TinyMaix 在此设计的硬件平台部署模型，仅根据经验将神经网络的输入归一化，进行迁移学习还需进一步收集一定量的数据。BL618 上模型运行时间在 0.7ms 到 1.0ms 附近。

第四部分 总结

本设计实现了 GSR、PPG、温度、加速度的采集，使用 LVGL 构建 UI 完成了心率、手腕处体温、加速度、滤波后 EDA 和三分类精神压力的显示。三分类精神压力通过 TinyMaix 库使用 MLP 模型进行预测。心率、体温、三分类精神压力使用 WiFi 上传到 OneNet。

4.1 可扩展之处

(1) 模型可以进一步改进，可以进一步使用 ResNet 或者 DNN。在数据/特征方面，可以使用新硬件制作数据集，但是情绪数据集操作难度比较大，或者使用转移学习。此外 WESAD 数据集还有许多已经报道的模型可以复现。目前尝试的分离 GSR 信号基本分量和脉冲分量的一些算法仍然不理想：sparsEDA 存在收敛性不好、需要大时间窗的问题；cvxEDA 需要解二次规划，存在运算速度慢的问题。

(2) GUI 可以进一步优化，添加交互（连接 WiFi、蓝牙等）。

(3) 三轴加速度可以换为 6 轴更好用一些，也有加速度芯片集成了计步的功能会更准一些。

第五部分 参考文献

- [1] Zhu, Lili, et al. "Feasibility study of stress detection with machine learning through eda from wearable devices." ICC 2022-IEEE International Conference on Communications. IEEE, 2022.
- [2] Eren, Eda, and Tuğba Selcen Navruz. "Stress Detection with Deep Learning Using BVP and EDA Signals." 2022 International Congress on Human-Computer Interaction, Optimization and Robotic Applications (HORA). IEEE, 2022.
- [3] Schmidt, Philip, et al. "Introducing wesad, a multimodal dataset for wearable stress and affect detection." Proceedings of the 20th ACM international conference on multimodal interaction. 2018.