

Design of an Ultra-Low Energy Surface EMG Signal Acquisition System *

LIU Zhifeng, HUANG Min, XIAO Zhongzhe *

(School of Optoelectronic Science and Engineering, Soochow University, Suzhou Jiangsu 215006, China)

Abstract: A portable weak surface electromyogram (sEMG) signal acquisition system is proposed which feature of ultra-low power consumption. The sEMG signal of human arm is connected to the detection circuit through silver patch electrode, and then sampled by the built-in ADC of Silicon Lab's EFM32TG840F32 after signal amplification and filtering process. CC2541, which is a low Bluetooth module, is adopted to achieve wireless transmission of the acquired data at the transparent transmission mode. Ultra-low power consumption can be achieved by adaptively switching the working mode (EM1 to EM4) with different working power of EFM32TG840F32. The system only works at EM1 with relatively higher power consumption during the data acquisition process of ADC and switches into deep sleep mode with relatively low power consumption in the data transmission process. When the system is idle, it would switch into the stop mode of EM4 with the lowest power consumption. Ultimately, the maximum power consumption of the proposed system is less than 46 mW, which makes it promising in many domains including health monitoring.

Key words: surface electromyography; EFM32; ultra-low power consumption

EEACC: 6140 doi: 10.3969/j.issn.1005-9490.2022.03.013

一种低能耗表面肌电信号采集系统设计 *

刘智丰, 黄敏, 肖仲喆 *

(苏州大学光电科学与工程学院, 江苏 苏州 215006)

摘要: 完成了一种低能耗表面肌电信号采集系统的设计。人体手臂处的表面肌电信号通过银质贴片电极进入检测电路, 经过信号放大和滤波电路后, 被主控芯片 EFM32TG840F32 内置模拟数字转换器采集。主控芯片利用其低能耗定时器 (LETIMER) 和低能耗通用异步收发器 (LEUART), 在 9 600 波特率下每秒发送 20 组肌电值数据至 CC2541 低功耗蓝牙模块。低功耗蓝牙模块在透传模式中, 将肌电值传输至上位机, 从而实现表面肌电图的显示。通过不同工作模式的转换, 即在不使用时设置为停止模式 EM4, 在运行模式 EM1 进行 ADC 采样转换, 在深度睡眠模式 EM2 进行数据传输, 采集系统的最高功耗仅为 46 mW, 使之可广泛应用于健康监测等领域。

关键词: 表面肌电图; EFM32; 超低能耗

中图分类号: R337.5

文献标识码: A

文章编号: 1005-9490(2022)03-0580-07

生物电信号源自细胞, 当细胞受到内部或外部刺激时产生兴奋, 产生由静息电位向动作电位的变化, 从而产生电信号^[1]。生物电信号是人体上一种宝贵的资源, 种类繁多且获取的复杂程度也有所不同。肌电信号是相对容易获取的一种生物电信号, 它与人体肌肉的活动和功能等有着一定程度的关联。现阶段肌电信号主要分为两种, 一种为线性肌电信号, 主要通过植入式的针式电极检测; 另一种为表面肌电信号, 主要通过非植入式的表面电极检测^[2]。针式电极检测需要把探针插入肌肉深处, 虽

然能够在很大程度上避免外界的干扰, 获得清晰的肌电信号, 但由于这种方法对人体肌肉组织极可能造成创伤, 且不宜长时间采集, 应用范围相对比较局限^[3]。而表面电极检测具有的无创伤性、便捷性等优势, 使其得到了更为广泛的应用。表面肌电图 (surface Electromyography, sEMG) 就是由从人体皮肤表面获得的反映神经肌肉系统活动的表面肌电信号绘制而成。表面肌电图早期主要应用在生物和医疗领域, 比如运动员的肌肉疲劳检测与力量恢复、长期卧床病人的术后康复等^[4]。随着检测技术的发

项目来源: 国家自然科学基金项目 (61906128, 61802272); 江苏省自然科学基金项目 (BK20180834)

收稿日期: 2021-01-13 修改日期: 2021-03-23

展和人工智能的兴起,通过表面肌电信号识别肢体的动作模式已经成为仿生机器人、智能机械手臂等领域的重要课题^[5]。

表面肌电信号是一种比较微弱的信号,幅值通常在微伏至毫伏之间,频率不高于 1 kHz,它是一种随机信号,也是一种交变信号,它的大小和幅值具有不确定性^[6],但在一定程度上又与肌肉产生的收缩力成正相关^[7]。表面肌电信号的采集尤其要注意噪声的影响,比如环境的干扰、工频干扰、皮肤洁净度、表面电极位置移动等^[8],因此在电路设计、器件选型、实验操作方面要格外注意。

本文主要完成了一种低能耗表面肌电信号采集系统设计,包括硬件和软件两个部分。在完成表面肌电信号采集和传输的基础上,通过不同工作模式的切换,系统总体最高功耗仅为 0.046 W,实现了低功耗运行。

1 表面肌电信号采集系统总体框架

表面肌电信号采集系统的总体框架如图 1 所示。



图 1 表面肌电信号采集系统总体框架

人体皮肤采集到的表面肌电信号经过预处理电路的放大和滤波,被主控芯片 EFM32TG840F32 的内置 ADC 采集实现行模数转换,然后通过低功耗通用异步收发器发送给低功耗蓝牙模块,蓝牙模块和上位机进行数据通讯,从而进行指令控制和表面肌电图的显示。

2 表面肌电信号采集系统硬件设计

2.1 表面肌电信号预处理电路

表面肌电信号预处理电路的主要作用就是对采集到的电信号进行放大和滤波。前端放大电路主要部分是仪表放大器 AD8237,后端滤波电路主要是运算放大器 OPA4313。

AD8237 是 ADI 公司出品的一款低功耗、零漂移、轨到轨输入和输出仪表放大器,其结构如图 2 所示。

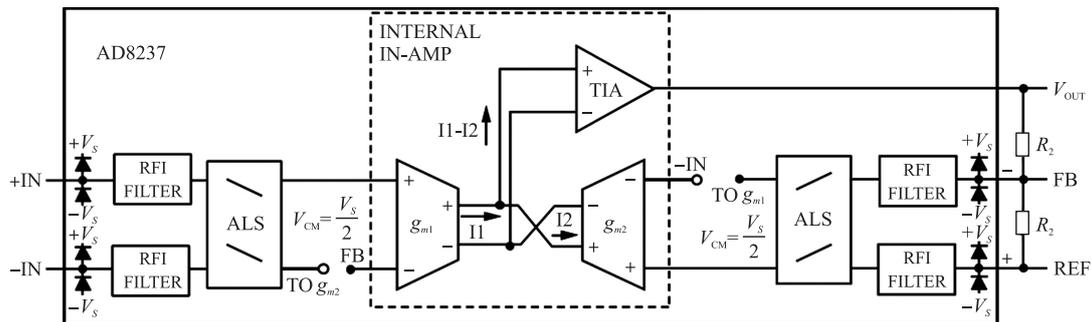


图 2 AD8237 结构

AD8237 集成了 RFI 滤波器,可在不影响输入阻抗和频率范围内共模抑制比的情况下极大抑制环境中电磁干扰的影响。AD8237 的增益设置是通过调整两个匹配电阻的阻值完成的,可以设置 1 至 1 000 间的任何增益,在任何增益下均可用比率匹配的两个电阻保持出色的增益精度。

AD8237 放大电路如图 3 所示。sEMG+和 sEMG- 分别连接有两个贴片电极, R_7 和 R_6 为两个匹配电阻,

增益 G_1 为:

$$G_1 = 1 + \frac{R_{56}}{R_{68}} = 1 + \frac{200 \times 10^3}{1 \times 10^3} = 201 \quad (1)$$

AD8237 的增益精度和两个匹配电阻有关,两个误差为 1% 的电阻可能会造成约 2% 的最大增益误差。通过计算可得 G_1 范围在 197~205 之间。则最终输出电压为:

$$V_{OUT} = G V_{+IN} - V_{-IN} + V_{REF} \quad (2)$$

式中: V_{REF} 为 1.5 V, 是 3 V 的 V_{DD} 经两个等值电阻分压获得的,通过一个 0.2Ω 的电阻连接至 AD8237 前端,为输入的差分电路提供直流偏置,同时还为后面的 OPA4313 放大电路提供直流偏置。

OPA4313 是 TI 公司出品的一款低功耗、低噪声,轨到轨输入输出的四通道运算放大器,本质上是集成了 4 个单通道的 OPA313 运算放大器。OPA4313 工作电压为 1.8 V~5.5 V,增益带宽为 1 MHz,输入偏置

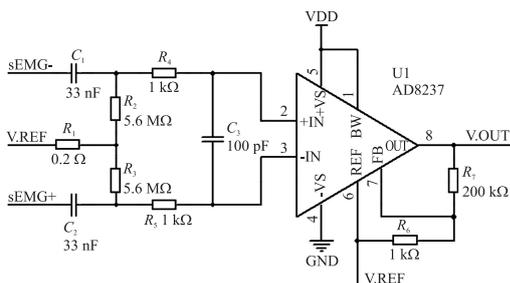


图 3 AD8237 放大电路

电流为 0.2 pA。轨到轨输入和输出摆幅,低静态电流(典型值 50 μ A)与 1 MHz 的带宽和极低噪声(1 kHz 时为 25 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$)组合在一起,使得其在电池供电类的应用中能够很好地平衡成本和性能。

OPA4313 带通放大电路如图 4 所示。低通滤波电路和高通滤波电路组合构成六阶带通滤波电路^[8]。根据截止频率计算公式

$$f = \frac{1}{2\pi RC} \quad (3)$$

可得高通截止频率 f_H 约为 800 Hz,低通截止频率 f_L 约为 20 Hz。根据运算放大器虚短、虚断特性^[9],可以得到图 4 中的放大倍数 G_2 为

$$G_2 = \frac{R_{15} + R_{13}}{R_{13}} = \frac{100 \times 10^3}{10 \times 10^3} = 10 \quad (4)$$

实际中由于信号幅值较小,电容的实际影响不能忽略,增益 G_2 会小于 10。

那么,根据式(1)和式(4),最终表面肌电信号预处理电路的放大倍数 G 为

$$G = G_1 \times G_2 = 2\ 010 \quad (5)$$

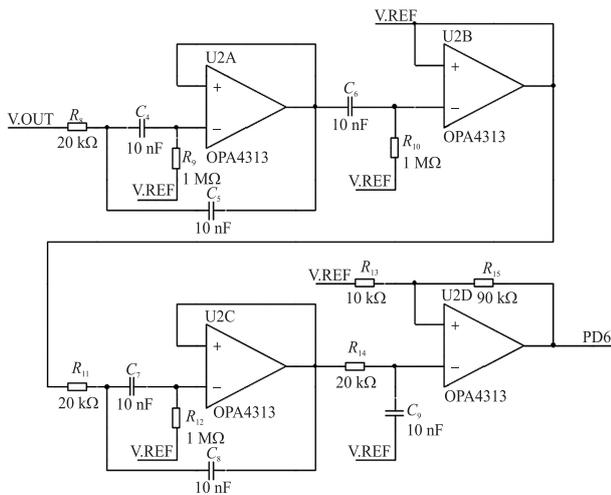


图 4 OPA4313 带通放大电路

2.2 表面肌电信号采集电路

2.2.1 EFM32TG 最小系统

表面肌电信号经过放大、滤波等处理后,通过主控芯片进行 ADC 采样和转换,这样表面肌电信号由模拟信号转换为数字信号,之后再传输。在本文系统设计中,使用的主控芯片为 Silicon Labs 公司出品的 EFM32TG840F32,基于 ARM Cortex-M3 架构,有着 32 kB 的闪存,4 kB 的内存,运行速度最高达 32 MHz。EFM32TG840F32 作为采集系统中处理调度模块的 MCU 具有许多优势:

(1)具备丰富的接口和外设,集成了模拟数字转换器 ADC、数字模拟转换器 DAC、直接存储访问

DMA、通用定时器 TIM 等诸多功能,集成度高,可以在采集方案系统中承担控制、运算、数据获取、模块通信等作用;

(2)建立于低能耗平台之上,有着创新的低能耗技术、快速唤醒时间和节能模式。可以根据外设的使用选择不同的低能耗模式,从而降低整个系统的总功耗,非常适合能源敏感型的系统设计;

(3)提供集成片上调试支持,可以方便地利用 JTAG 接口(支持 SWD 模式)进行调试。

EFM32TG840F32 作为主控芯片的 EFM32TG 最小系统硬件电路设计如图 5 所示。

本文设计中的 EFM32 最小系统包含有两个晶振,频率分别为 32 MHz 和 32.769 Hz,如图 6 所示。

EFM32 最小系统的调试端口如图 7 所示。

EFM32 最小系统的电源管理单元如图 8 所示。

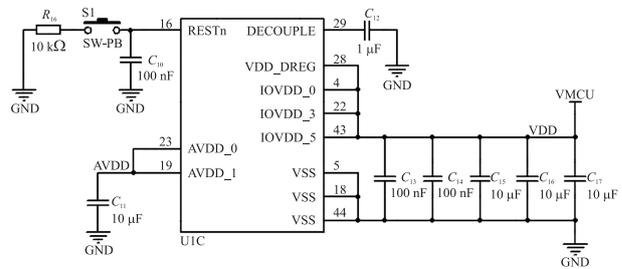


图 5 EFM32TG840F32 最小系统

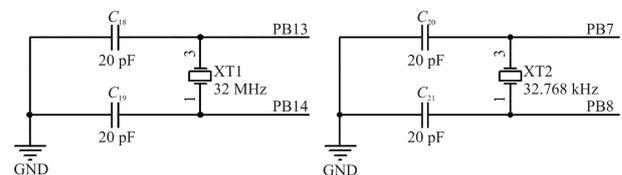


图 6 时钟电路

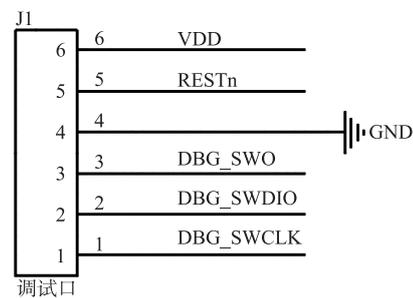


图 7 调试端口

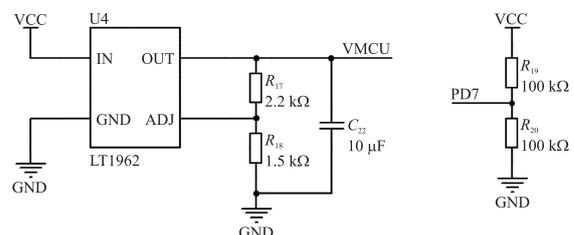


图 8 电源管理单元

LT1962 是 ADI 公司出品的一款输出可调的低噪声、微功率低压差线性稳压器 (Low Dropout Regulator, LDO), 通过改变两电阻的比值从而改变输出, 如式 (6) 所示:

$$V_{OUT} = V_{ADJ} \times \left(1 + \frac{R_{17}}{R_{18}} \right) + I_{ADJ} \times R_2 \quad (6)$$

式中: $V_{ADJ} = 1.22 \text{ V}$, $I_{ADJ} = 30 \text{ nA}$ at $25 \text{ }^\circ\text{C}$ 。本系统采用 3.7 V 的锂电池作为电源, VCC 经过 LT1962 转换成 3 V 的 V_{MCU} 。此外, 为了检测电池电量, VCC 经过两个等值电阻分压后接入主控芯片 ADC 输入端 PD7。

2.2.2 通讯模块电路

CC2541 是 TI 公司出品的一款低功耗蓝牙专有无线微控制器, 非常适合应用于低能耗系统之中。DX-BT05-A 4.0 低功耗蓝牙模块是基于 CC2541 的一款产品, 如图 10 所示, 它使得与 EFM32 芯片的通讯变得更为简单。只需要对该模块进行供电和接地, 就可以通过串口 TX 和 RX 端与 EFM32TG840F32 芯片的低功耗通用异步收发器 (Low Energy Universal Asynchronous Receiver Transmitter, LEUART) 进行通讯。DX-BT05-A 4.0 低功耗蓝牙模块的工作在 2.4 GHz ISM 频段, 待机电流约 $400 \text{ } \mu\text{A} \sim 1.5 \text{ mA}$, 传输数据时电流约 8 mA 。

蓝牙模块与主控芯片的电路连接如图 9 所示。

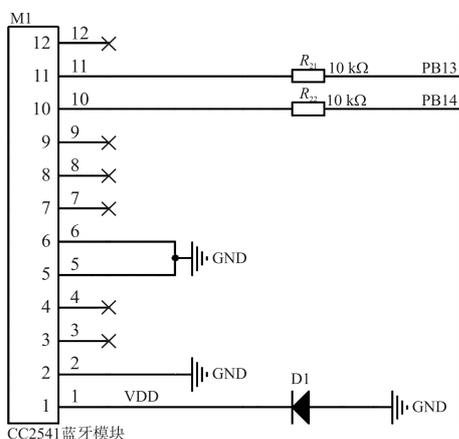


图 9 低功耗蓝牙模块电路

3 表面肌电信号采集系统软件设计

3.1 表面肌电信号采集

表面肌电信号的采集流程如图 10 所示。在芯片、LEUART、ADC、低功耗蓝牙模块初始化后, EFM32 进入低能耗模式 EM2, 上位机向下位机发送指令, 如果该指令符合通信协议, 就会进行表面肌电信号的采集, ADC 完成采样转换后经过串口发送到蓝牙模块, 蓝牙模块与上位机透传数据, 实现表面肌电图的显示。

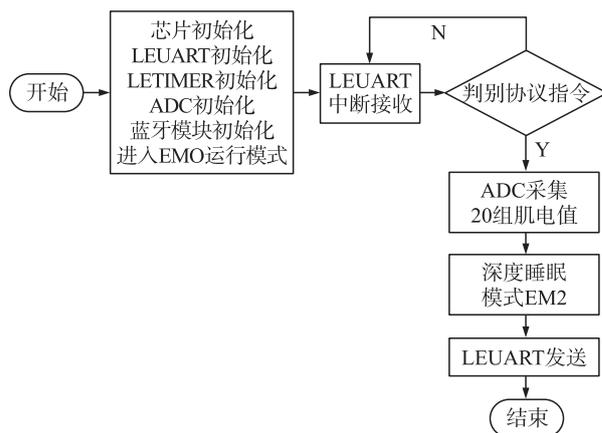


图 10 表面肌电信号采集流程

3.1.1 工作模式转换实现低能耗

在 EFM32TG 中, 能源管理单元 (Energy Management Unit, EMU) 负责管理每种能源模式, 包括运行模式 EM0 以及四种低能耗模式, 分别为睡眠模式 EM1、深度睡眠模式 EM2、停止模式 EM3、关机模式 EM4, 每种模式管理 CPU 和各种外围设备是否可用, EM0 模式下, 32 MHz 高频晶振为系统提供时钟, 所有功能和外设均可使用。EM2 模式下, 32.768 Hz 的低频晶振为系统提供时钟, 屏蔽了高频晶振、高频外围时钟树和片上稳压器。EM2 模式下 LETIMER 和 LEUART 均可正常使用。EM4 模式下, 除了复位键和配置好的 EM4 唤醒源皆处于屏蔽状态。EM0~EM4 模式下能量消耗如表 1 所示。

表 1 EM0~EM4 模式能耗

模式	能耗
运行模式 EM0	电压为 3 V 时功耗为 $150 \text{ } \mu\text{A}/\text{MHz}$
睡眠模式 EM1	电压为 3 V 时功耗为 $51 \text{ } \mu\text{A}/\text{MHz}$
深度睡眠模式 EM2	电压为 3 V 时电流为 $1.0 \text{ } \mu\text{A}$
停止模式 EM3	电压为 3 V 时电流为 $0.6 \text{ } \mu\text{A}$
关机模式 EM4	电压为 3 V 时电流为 20 nA

为了最大程度降低能耗, 本文系统设计中的主控芯片采用了 LEUART 进行通信, 这样主控 MCU 就可以在深度睡眠模式 EM2 下进行异步串口通讯。EM0 模式作为所有低能耗模式转变的承接, 整个工作过程中的模式转换如图 11 所示。

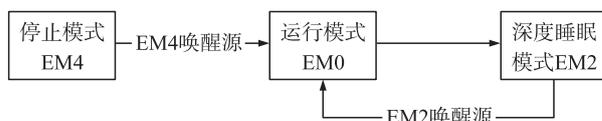


图 11 工作模式转换图

3.1.2 模数转换器 ADC

EFM32TG840F32 芯片内置 ADC 为一种低能耗逐次逼近型 ADC, 可对多达 8 个通道进行采样, 具

有高达 12 位的分辨率,采样速率最高达 100 万个样本/s。

根据硬件设计,采用了 ADC 8 个通道中的 2 个,其中,用于采集表面肌电信号的为通道 6,用于采集锂电池电压的为通道 7。

在 2.1 节,表面肌电信号预处理电路中,OPA4313 运算放大器 4 个通道的参考电压均为 1.5 V,且经过测试后所采集的表面肌电信号幅值一般不超过 1 mV,所以选择 ADC 通道 0 的参考电压为 2.5 V;锂电池电量的检测时通过电压来进行简单的判断,3.7 V 的电源电压经过两个相同电阻分压后为 1.85 V,所以选择 ADC 通道 1 的参考电压也为 2.5 V。

ADC 的常见的工作模式为单次采样模式、扫描模式和过采样模式等。32 个时钟周期能够满足各个模式的采样时间要求,12 位的分辨率满足了系统精度需求,何时进行表面肌电电压的采集和锂电池电量的采集是由上位机的指令来控制的,所以最终选择 ADC 工作模式为单次采样模式。ADC 时钟频率允许的范围为 32 kHz~13 MHz。

ADC 两个采集通道 CH6 和 CH7 使用同一配置:时钟频率 13 MHz;工作模式为单次;参考电压为 2.5 V;采集时间为 32 个时钟周期;采样精度为 12 位。

锂电池电量单位为毫伏,其计算如式(7):

$$\text{voltBAT} = \text{ADCData0} \times V_{\text{REF}} \times N_0 \times 2 \quad (7)$$

式中:ADCData0 为 ADC 通道 6 采样值,通过库函数 ADCDataSingleGet(ADC0) 获得, $N_0 = 10^3/2^{12}$, $V_{\text{ADC.REF}}$ 为 ADC 参考电压。设定锂电池电压为 3.3 V 时电量百分比为 0,这样可以延长电池使用时间,则电池电量百分比为

$$\text{BAT} = \frac{\text{voltBAT} - \text{voltBAT}_0}{V_{\text{CC}} \times 10^3 - \text{voltBAT}_0} \times 100\% \quad (8)$$

式中: $\text{voltBAT}_0 = 3.3 \times 1000$ 。

表面肌电信号幅值单位为微伏,其计算如式(9):

$$\text{sEMG} = (\text{ADCData1} - V_{\text{REF}}) \times V_{\text{ADC.REF}} \times \frac{N_1}{G} \quad (9)$$

式中:ADCData1 为 ADC 通道 7 采样值,通过库函数 ADCDataSingleGet(ADC0) 获得, V_{REF} 为式(2)中的偏置电压, $V_{\text{ADC.REF}}$ 为 ADC 参考电压, $N_1 = 10^6/2^{12}$, G 为式(5)中的放大倍数。

3.2 EFM32 数据交互

3.2.1 低能耗通用异步收发器(LEUART)配置

EFM32TG840F32 芯片可以进行通讯的有 I²C 接口,通用同步/异步接口(USART)和低能耗通用

异步收发器(LEUART)。LEUART 使用 32.768 kHz 低频时钟提供完整的通用异步收发通信。它允许 UART 通信以低能耗模式执行,在主动通信期间工作电流仅几微安,在等待输入数据时工作电流仅 150 nA,支持波特率范围 300 bit/s~9 600 bit/s。

EFM32TG840F32 芯片的 PD4 和 PD5 分别为 LEUART 的 TX 引脚和 RX 引脚,具体配置如表 2 所示。

表 2 LEUART 配置

波特率	数据位	奇偶校验位	停止位
9 600 rad/s	8	无	1

LEUART 采用中断函数 LEUART0_IRQHandler 接收,便于判断帧头和帧尾是否正确;采用库函数 LEUART_Tx 进行主动发送。

3.2.2 低能耗定时器(LETIMER)配置

EFM32TG840F32 共包含 2 个普通定时器/计数器和 1 个低能耗定时器。本系统中使用的 LETIMER 是一个 16 位的递减定时器,时钟源为 32.768 kHz 低频时钟,可以在深度睡眠模式下作为定时器运行。时钟不预分频,则为了实现中断时间 50 ms,需要把递减值设置为

$$\text{LetimerTop} = 32\,768 \times \frac{1}{50} = 1\,638 \quad (10)$$

3.2.3 通信协议

为了增强传输过程中数据的准确性,设计了简单的通信协议,如表 3 所示。帧头为 AA,帧尾为 CC 33 C3 3C。

表 3 通信协议

说明	下发	回传	回传说明
电池电量采集	AA A1 00 CC 33 C3 3C	AA A1 XX CC 33 C3 3C	XX 为电量百分比(0~100)
肌电数据采集	AA C1 00 CC 33 C3 3C	AA C1 XX CC 33 C3 3C	XX 为表面肌电值(0~100 μV)

3.2.4 DX-BT05-A 4.0 低功耗蓝牙模块

2.2.2 节中介绍了 DX-BT05-A 4.0 低功耗蓝牙模块,用户对该模块的配置是通过发送 AT 指令来实现的,本文系统设计中使用的指令如表 4 所示。

表 4 AT 指令设置

设置	指令
蓝牙名称设为 BT01	AT+NAME<BT01>
配对码设为 000000	AT+PIN<000000>
波特率设为 9 600 baud/s	AT+BAUD<1>
串口停止位设为 1	AT+STOP<1>
串口校验位设为无	AT+PARI<0>
上电后即进入低能耗	AT+PWRM<0>

在指令末尾要加上 '\r\n', 蓝牙模块才能够正常识别。对蓝牙模块的初始化, 即通过 LEUART 发送 AT 指令, 完成表 4 中的配置。

4 实验结果

经过计算硬件电路最小共模抑制比 (Common

Mode Rejection Ratio, CMRR) 大于 106 dB, 高于我国行业标准 YY1905-2007 肌电生物反馈仪规定的 90 dB 的标准。由于表面肌电信号电压量级在微伏, 难以使用信号发生器准确施加信号并测量, 所以采用 Multisim 仿真, 电路结构和 2.1 节中基本相同, 如图 12 所示, 其中采用 4 个 OPA313 代替 OPA4313。

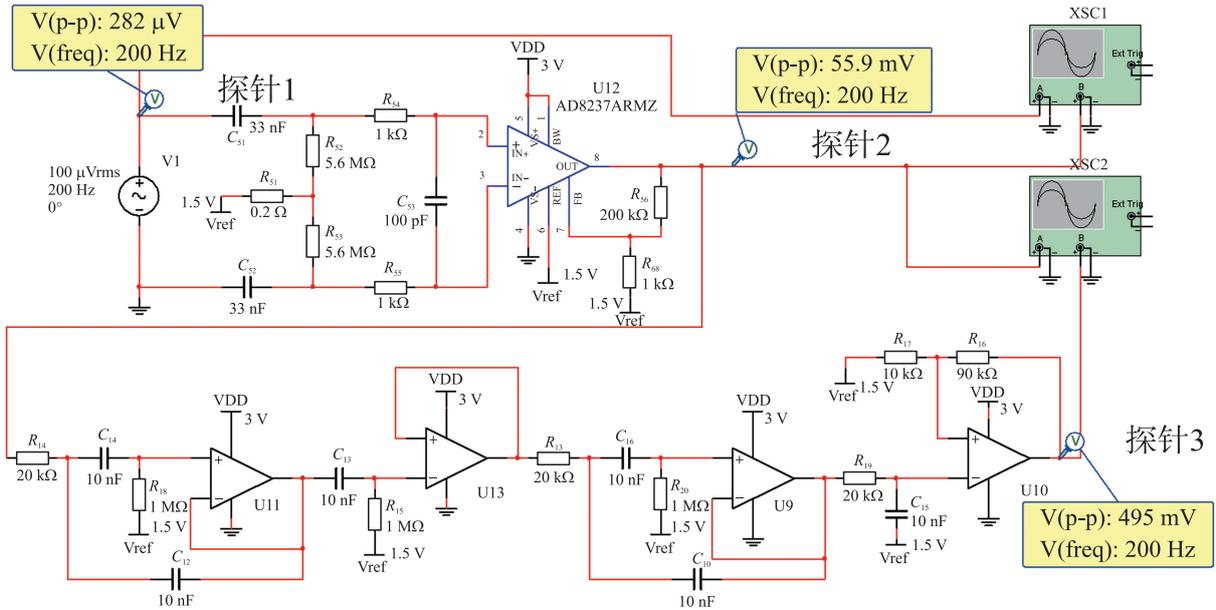


图 12 Multisim 仿真电路

仿真结果如图 13、14 所示, 波形图的横坐标为时间 (s), 纵坐标为电压 (mV)。探针 1 电压峰峰值为 282 μV, 探针 2 (通道 B) 电压峰峰值为 55.9 mV, 放大倍数约为 198 倍, 符合式 (1) 中增益 G_1 实际范围。探针 3 电压峰峰值为 495 mV, 放大倍数约为 9 倍, 符合式 (4) 中增益 G_2 的实际范围, 所以最终总的增益 G 也在合理范围内。

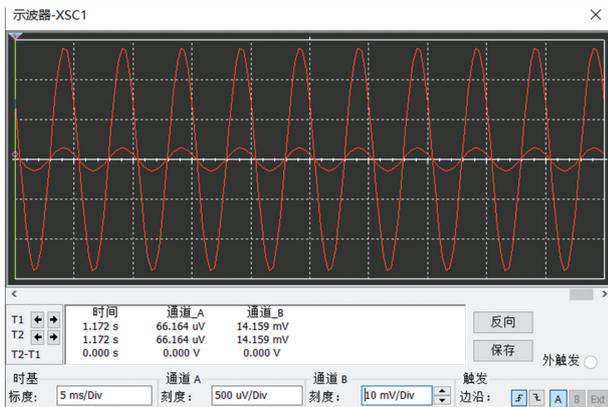


图 13 探针 1 和探针 2 波形

同时, 我们用市面上某同分辨率肌电仪器的采集结果进行比较, 结果基本一致。

本文使用的编程和调试软件是 Simplicity Studio, 一款 Silicon Labs 公司基于 Eclipse 和 C/C++

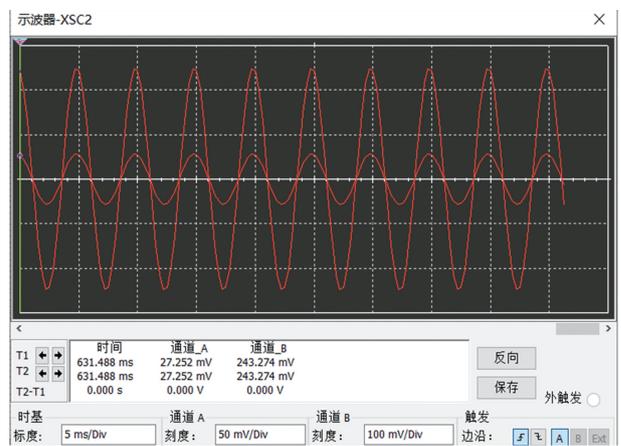


图 14 探针 2 和探针 3 波形

开发的 IDE (集成开发环境)。对于该公司出品的 EFM32 系列芯片, Simplicity Studio 中的 Energy Profiler 工具可以实时监测芯片的电流消耗, 正常工作模式下电流消耗约 4 mA, 如图 15 所示, 横坐标为时间 (s), 纵坐标为电流 (mA)。

低功耗蓝牙模块的电流消耗约 8 mA, 加上 ADC、LETIMER 和 LEUART, 系统的整体电流消耗应该在 12 mA 以上。使用直流电源供电测量实际功耗, 如图 16 所示, 电压 3.7 V, 电流约 12.4 mA, 功耗约 0.046 W。

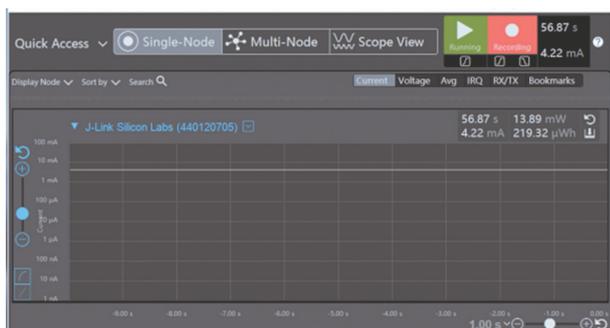


图 15 工作模式下芯片电流消耗



图 16 实际系统功耗测试

5 结束语

本文完成了一种低能耗表面肌电信号采集系统的设计。在 3.7 V 锂电池供电下,深度睡眠模式系统电流消耗约为 0.1 mA,工作模式下系统电流消耗约为 12.4 mA,功耗 0.046 W,实现了以极低的功耗采集表面肌电信号。本文的不足之处在于:采集通道数较少、缺少对噪声干扰相关的数字信号处理;没有对表面肌电信号进行变化进行分析,比如肌肉疲劳度等^[10]。在下一阶段的工作中,将继续完善表面肌电信号采集系统,利用数字信号处理提高采集信号准确

性;对原始肌电信号进行信号处理,提取其中更多有用信息,利用深度学习方法进行动作、情感等的识别^[11];探索脑电采集和相关生理信息的提取与识别^[12]。

参考文献:

- [1] Wu Y S, Liang S L, Zhang L, et al. Gesture Recognition Method Based on a Single-Channel sEMG Envelope Signal[J]. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2018, 2018 (1):35.
- [2] Merletti R, Farina D. Analysis of Intramuscular Electromyogram Signals[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society A Mathematical Physical & Engineering Sciences, 2009, 367(1887): 357-368.
- [3] 吴颜生. 基于表面肌电信号的人手动作识别研究[D]. 长春: 东北师范大学, 2019.
- [4] 糜超, 陈阳, 邹凌. 基于表面肌电的肌肉疲劳检测系统研究[J]. 现代电子技术, 2018, 41(20): 78-82.
- [5] 张志勇. 肌电信号采集与肌电假肢控制的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
- [6] 郭旻. 八通道体表肌电探测图仪研究[D]. 南京: 东南大学, 2019.
- [7] 任丽晔, 徐冬蕾. 基于人体上肢表面肌电信号在运动过程中的研究[J]. 长春大学学报, 2020, 30(2): 45-48.
- [8] 徐斌. 基于脑电与肌电信号融合的多自由度手部动作识别研究[D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2012.
- [9] 杨建国. 你好, 放大器[M]. 北京: 科学出版社, 2015: 3-5.
- [10] 任见, 李传江, 翟润哲, 等. 上肢肌肉疲劳的 sEMG 信号特征分析[J]. 仪表技术, 2015(12): 26-28.
- [11] 程波. 基于小波(包)变换的表面肌电信号情感识别方法研究[D]. 重庆: 西南大学, 2008.
- [12] 陆云. 基于脑电的听觉注意解码与情绪识别的认知计算研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.



刘智丰(1998—),男,硕士研究生,研究方向为智能信号检测,20204239031@stu.suda.edu.cn;



肖仲喆(1979—),女,博士,副教授,科研方向为音频信号处理,尤其是基于人工智能方法对语音、音乐进行情感识别等,以及对其他通用音频信号事件的智能检测等, xiaozhongzhe@suda.edu.cn。