

# 基于ADS1299的穿戴式脑电检测装置设计

刘亚<sup>1</sup>, 伍倚明<sup>2</sup>, 李承炜<sup>1</sup>, 陈军<sup>3,4</sup>, 吴凯<sup>1,4,5</sup>

1. 华南理工大学材料科学与工程学院生物医学工程系, 广东 广州 510006; 2. 广东省医疗器械质量监督检验所, 广东 广州 510663; 3. 广东省医疗器械研究所, 广东 广州 510500; 4. 广东省老年痴呆诊断与康复工程技术研究中心, 广东 广州 510500; 5. 广东省精神疾病转化医学工程技术研究中心, 广东 广州 510370

**【摘要】**介绍了一种基于ADS1299的便携式脑电检测装置设计方案。该装置基于集成模拟前端芯片ADS1299对脑电信号进行采集,采用低功耗蓝牙4.0模块进行无线数据传输,并结合低功耗铁电存储MCU与电源管理模块有效地降低系统功耗,最后利用Matlab GUI对脑电信号进行波形显示和分析。通过内部参数测试,该装置具有体积小、噪声低、功耗低等特性,可实现长时间连续高精度采集脑电信号。

**【关键词】**脑电图;穿戴式;ADS1299;蓝牙4.0;低功耗

**【中图分类号】**R318.6

**【文献标志码】**A

**【文章编号】**1005-202X(2019)11-1317-08

## Design of a wearable EEG detection device based on ADS1299

LIU Ya<sup>1</sup>, WU Yiming<sup>2</sup>, LI Chengwei<sup>1</sup>, CHEN Jun<sup>3,4</sup>, WU Kai<sup>1,4,5</sup>

1. Department of Biomedical Engineering, School of Material Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510006, China; 2. Guangdong Medical Devices Quality Surveillance and Test Institute, Guangzhou 510663, China; 3. Guangdong Institute of Medical Instruments, Guangzhou 510500, China; 4. Guangdong Engineering Technology Research Center for Diagnosis and Rehabilitation of Dementia, Guangzhou 510500, China; 5. Guangdong Engineering Technology Research Center for Translational Medicine of Mental Disorders, Guangzhou 510370, China

**Abstract:** A designing scheme of a portable electroencephalogram (EEG) detection device based on ADS1299 is introduced in the study. The proposed device is designed with the integrated analog front-end chips of ADS1299 to collect EEG signals. A low-power consumption module of Bluetooth 4.0 is used to achieve wireless data transmission. Moreover, a low-power consumption ferromagnetic memory MCU is combined with a power management module to reduce power consumption effectively. Finally, the waveform display and analysis of EEG signals are carried out by Matlab GUI. The test of intrinsic parameter proved that the proposed device which has the characteristics of small size, low noise and low-power consumption can achieve long-time and high-precision acquisition of EEG signals.

**Keywords:** electroencephalogram; wearable; ADS1299; Bluetooth 4.0; low-power consumption

## 前言

随着便携式医疗装置的发展,便携式脑电检测装置的研究也得到快速发展。传统的脑电图(EEG)

一般采用有线方式,采集导联数较多,处理能力较强,但这类装置往往存在操作复杂和装置体积笨重以及用户体验差等问题<sup>[1]</sup>。而便携式脑电检测装置具有诸多优点:装置小巧便携,交互体验好,可在不同使用场景下长时连续地进行健康监测,检测成本与维护费用低,操作方法相对简单。因而,开发出可靠的便携式生理参数监测装置具有广泛的科学研究价值与市场应用前景。

本研究基于TI半导体公司的集成模拟前端芯片ADS1299进行设计<sup>[2]</sup>,集成模拟前端芯片采用24位 $\Sigma$ - $\Delta$ ADC对脑电信号进行模数转换,并结合蓝牙4.0无线传输模块,该脑电检测装置具有体积小、功耗低、精度高等优点,并通过电源管理与低功耗设计从

**【收稿日期】**2019-06-07

**【基金项目】**广东省前沿与关键技术创新专项资金(重大科技专项)(2016B010108003);广东省公益研究与能力建设专项资金(2016A020216004);广东省协同创新与平台环境建设专项资金(2017A040405059);广东省科技重点领域研发计划项目(2018B030335001);广州市产学研协同创新重大专项(201604020170, 201704020168, 201704020113, 201807010064, 201803010100, 201903010032)

**【作者简介】**刘亚,硕士研究生,主要研究方向为生物医学电子与仪器,E-mail: 2806567965@qq.com

而降低设备功耗,运用单片机程序设计实现脑电采集功能,通过程序配置内部测试信号,从而验证ADS1299的精确性与低噪声特性<sup>[3]</sup>,最大限度地将脑电检测服务延伸到院外,能够进行长时间、实时以及在线监护。

## 1 便携式脑电检测装置设计方案

便携式脑电检测装置系统设计主要包括集成模拟前端ADS1299脑电采集电路设计、系统低功耗设计及电源管理电路设计3大部分。便携式脑电设备通过脑电电极采集使用者脑电信号,然后通过集成

模拟前端芯片ADS1299对模拟脑电信号进行信号调理与模数转换,转换后的数字脑电信号通过SPI接口输出给外部低功耗铁电存储MCU控制器进行数据处理,该控制器采用MSP430FR5739系列<sup>[4]</sup>,处理后的数据通过BLE蓝牙4.0模块进行无线数据传输,电源管理单元采用双极电源供电方式为各功能单元供电并进行功耗管理,整个装置的控制通过单片机的脑电采集程序设计来实现。最后,脑电采集结果可通过Matlab GUI进行显示和分析。便携式脑电检测装置结构框图如图1所示。

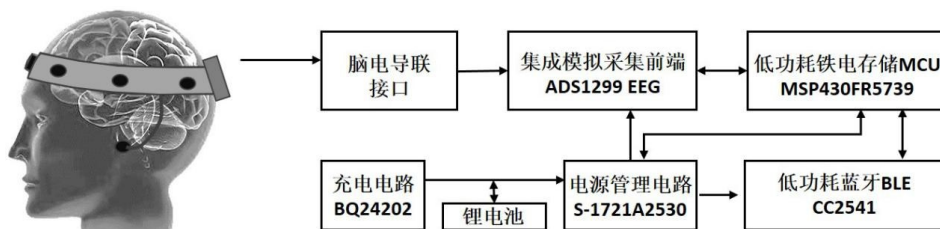


图1 便携式脑电检测装置结构框图

Fig.1 Block diagram of portable electroencephalogram (EEG) detection device

## 2 系统硬件设计与实现

### 2.1 集成模拟前端脑电检测电路设计

脑电检测电路基于集成模拟前端芯片ADS1299进行设计。ADS1299具有8通道低噪声、高分辨率同步采样的 $\Sigma$ - $\Delta$ ADC模数转换器,内置可编程增益放大器(Programmable Gain Amplifier, PGA)、输入复用器、内部基准电压、时钟振荡器和偏置放大电路与内部测试源以及导联脱落检测电路,内部器件噪声低于1  $\mu$ V,具备脑电采集所需的全部常用功能<sup>[2,5]</sup>。并且以通道正常运行时消耗5 mW的低功耗特性和高集成度特点,能够大幅度缩小板级空间,显著降低整体成本,构建可扩展的脑电采集系统。

由于ADS1299的模拟电源供电范围为4.75~5.25 V,而锂电池的工作电压为3.7 V,因此本设计ADS1299的电源供电方式采用双极电源方式进行供电,即模拟电源AVDD=+2.5 V,AVSS=-2.5 V,可通过低压差线性稳压器LDO对锂电池电压进行转换得到<sup>[6]</sup>。数字电源DVDD为3.0 V。其中模拟电源的纹波噪声应尽量小,每个电源都要通过10  $\mu$ F和0.1  $\mu$ F与地相连,拓扑结构上采用星形连接方式。ADS1299的电路原理图如图2所示。

集成模拟前端芯片ADS1299通过配置输入复用器可将输入信号配置为不同类型的输入信号。在测试阶段可以将输入信号配置为内部方波测试信号和输入短路测试信号,在测量正常脑电信号时,可将输

入信号配置成单端输入方式和差分输入方式进行测量。本装置采用单端输入方式进行脑电信号的检测,所有通道的负输入端连接到耳电极,作为参考电极。脑电电极与耳电极之间形成电势差,通过输入复用器进入PGA进行一级放大<sup>[7]</sup>。另一部分通过采样电阻将输入信号采样叠加后输入到偏置放大器的负输入端,然后通过偏置输出到耳电极,从而将耦合进来的共模干扰通过偏置放大器进行反相输出到人体,从而降低共模干扰的影响<sup>[8]</sup>,只需微弱的电流即可很大程度上提升系统的共模抑制比(CMRR),从而提高脑电信号采集的质量。经过PGA放大后的脑电信号进入 $\Sigma$ - $\Delta$ ADC进行模数转换,转换后的脑电数据通过SPI接口发送给外部低功耗铁电存储MCU进行处理分析,即可通过ADS1299完成高质量的脑电数据采集。外部MCU通过SPI与ADS1299进行数据通信,将脑电数据通过异步通信串口发送给蓝牙模块,从而进行无线数据的传输<sup>[9-13]</sup>。ADS1299可通过寄存器的配置,从而将系统配置成所需的数据输出率和带宽,便于设计者对性能和功耗进行优化配置,可根据不同应用场景对脑电采集装置进行不同配置,具有很高的灵活性和低功耗特性<sup>[2]</sup>。

### 2.2 电源管理电路

采用低压差线性稳压器S-1721A3025固定输出两路电源,分别为3.0与2.5 V。然后通过电源反相器LMP2664进行反向输出-2.5 V电压,通过2.5 V双极

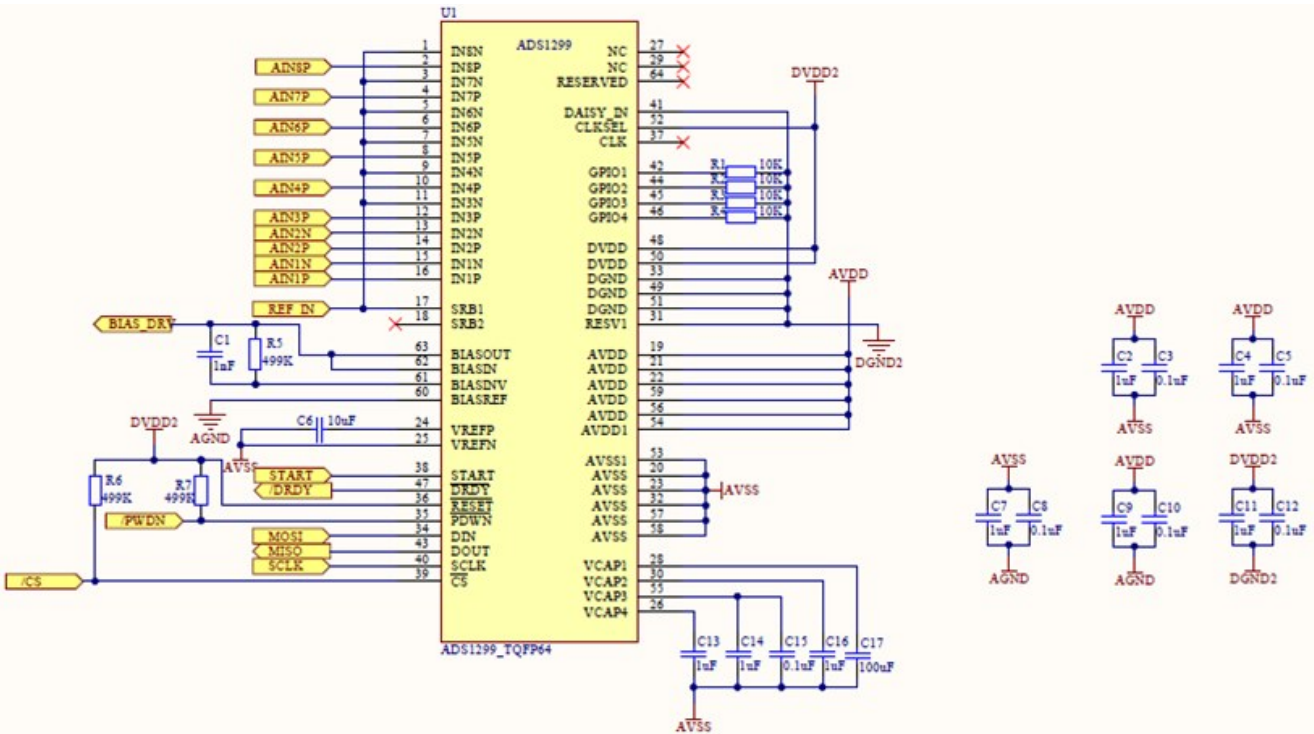


图2 ADS1299脑电检测电路原理图  
Fig.2 ADS1299-based EEG detection circuit

电源对ADS1299的模拟电压AVDD进行供电。适配器连接电源插座,接头J2与3.7 V锂电池相连,POWER\_EN、AFE\_ON和OFF/START 3个端口与低功耗铁电存储MCU控制器相连,可控制其它单元模块的电源开断,从而灵活管理各功能模块的电源供电,增强系统的稳定性,并通过程序控制可有效提升系统的续航能力<sup>[14]</sup>。考虑到便携式脑电检测设备便携性与可持续使用的要求,设计了单键开关机电路,可通过长按与短按控制设备的开关机状态,并进一步运用充电芯片BQ24202进行充电管理。脑电采集装置电源管理电路原理图如图3所示。

2.3 低功耗设计

电源是系统稳定运行的前提与基础,便携式设备的电源设计必须具备体积小、噪声低、集成度高等特点。本装置的低功耗设计主要通过电源管理模块与低功耗集成芯片的选型来降低功耗,通过程序控制各功能模块的功耗模式,有采集任务处于正常工作状态,无任务时则处于待机状态,可有效降低系统功耗,提升设备续航能力。本设计中低功耗MCU控制器选择具有超低功耗铁电存储器系列的MSP430FR5739控制器<sup>[4]</sup>,该型号控制器具有丰富的内部资源,并采用非易失性超低功率铁电存储FRAM技术进行数据读写。BLE蓝牙4.0模块采用基于无线收发集成芯片CC2541进行开发,支持蓝牙4.0协议,可通过UART接口进行功能配置,并通过电源管

理模块与单片机程序控制可按需配置各功能模块的功耗模式与电源开断状态,从而达到降低设备功耗,提升设备续航能力的目的。

3 系统软件设计

便携式脑电检测功能主要通过低功耗铁电存储MCU控制器MSP430FR5739单片机编程实现,图4为脑电信号检测软件程序流程图,设备上电以后,主程序对系统时钟、外设模块所需的GPIO端口、UART、SPI接口进行初始化设置,设置脑电数据包格式,并对数据包进行初始化。初始化完成后开始校验ADS1299是否工作正常,ID正确后对ADS1299进行初始化配置,包括ADS1299的内部功能寄存器和时钟源配置等;以上配置完成后则开启全局中断,发送开始连续读数据操作指令;中断产生则通过SPI连续读取8通道脑电数据;通过串口将数据发送给蓝牙模块,蓝牙模块进行无线数据传输发送给PC端Matlab GUI进行接收。

4 结果和测试

通过以上原理分析与单元电路设计,各单元电路的搭建模型与测试实验如图5所示,包括集成模拟前端芯片ADS1299脑电采集电路、低功耗铁电存储MCU控制器、电源管理电路、BLE蓝牙4.0及测试模拟仪MiniSim330,最终实现印刷电路板PCB的绘制



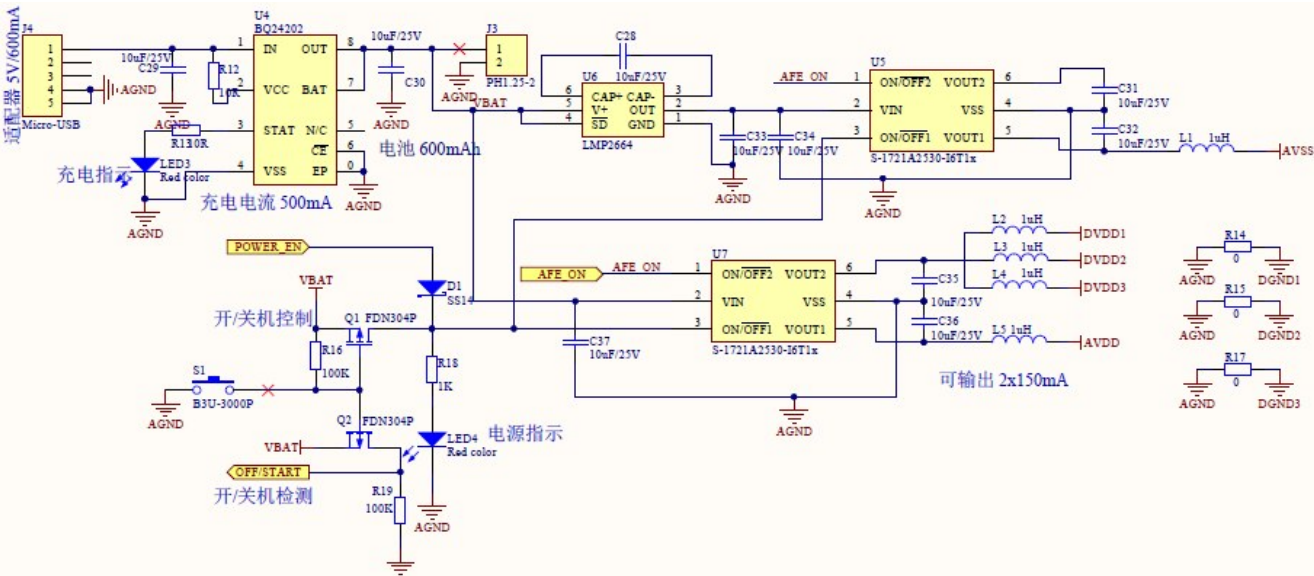


图 3 电源管理电路原理图

Fig.3 Schematic diagram of power management circuit

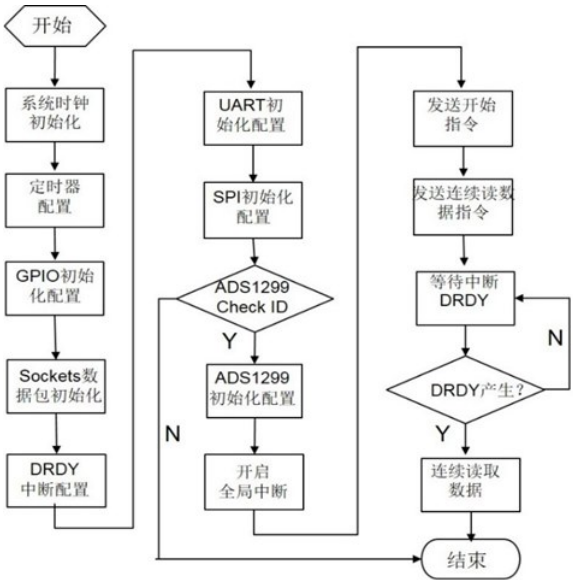


图 4 脑电检测装置单片机程序流程图

Fig.4 Flow chart of microcontroller program of EEG detection device

与产品实物的设计(图 6),脑电检测装置的真人佩戴方式如图 7 所示。由于脑电信号属于微弱信号源,因此在 PCB 布线时对噪声的抗干扰能力要求更高。在进行布线时电源旁路去耦电容应尽量靠近元器件,封装焊盘连接到地线,电源电路引出的所有电源应采用单点接地方式连接于同一点,集成模拟前端 ADS1299 的数字信号与模拟信号应尽可能分开走线,模拟输入信号和模拟地应加屏蔽<sup>[15]</sup>。便携式脑电检测设备几何尺寸大小为(4.1×7.5) cm<sup>2</sup>,可检测 8 通道脑电信号,具有体积小、功耗低、精度高等特点。

系统基本参数测试主要参照标准 JJG 1043-2008

脑电图机检定规程提出的技术要求<sup>[16]</sup>。集成模拟前端芯片 ADS1299 内部通过输入复用器可以提供多种测量信号,包括输入短路系统噪声测量和方波测量信号,该芯片评估板通过 USB 接口与 PC 端上位机软件进行连接,可将采集的数据发送至 PC 端进行实时显示,可连续采集,也可按需进行数据采集<sup>[2]</sup>,因此,可以通过配置 ADS1299 的内部寄存器进行设备的精确性与低噪声特性测试,主要流程如图 8 所示。ADS1299 评估板如图 9 所示。

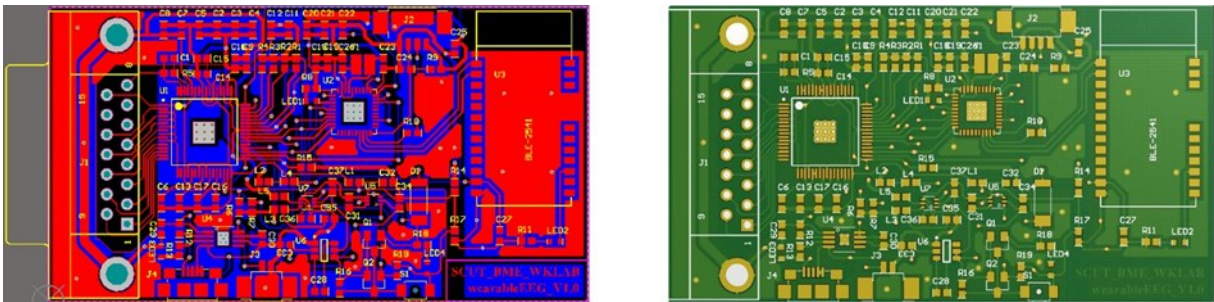
便携式脑电检测设备的基本参数测试,通过单片机配置寄存器产生内部方波测试信号与输入短接测试信号,用于测试设备的精确性与低噪声特性。本设计中内部方波测试信号的幅度为 $(V_{REFP}-V_{REFN})/2.4$ ,频率为 $F_{clk}/2^{21}$ ,式中 $V_{REFP}-V_{REFN}=V_{REF}=4.5\text{ V}$ , $F_{clk}=2.048\text{ MHz}$ ,便携式脑电检测设备检测到的测试信号通过 Matlab 进行波形显示(图 10),分析可知 $V_{pp}=3.74\text{ mV}$ ,频率为 1 Hz,与给定的内部测试信号幅值与频率相一致。当输入信号配置为输入短路测试信号时,通过 Matlab 进行波形显示(图 11),截取内部方波测试信号 4 000 采样点数据,分析可知输入短接后器件内部噪声有大约 19  $\mu\text{V}$  的基线漂移,信号峰峰值小于 1  $\mu\text{V}$ ,由此可见 ADS1299 具有非常低的器件噪声,对于脑电  $\mu\text{V}$  级别的信号具有很好的器件噪声性能,适用于微弱脑电信号的前端采集。

通过示波器的 4 个通道分别连接至 ADS1299 的 CS、SCLK、DIN 和 DOUT 引脚,同步测试 SPI 的时序电平,可以用来测试便携式脑电检测设备的 SPI 通信是否正常配置,测试结果如图 12 所示。其中蓝色线为 CS 低电平使能状态波形,黄色线为 SCLK 时钟信



图5 各单元电路的搭建模型与测试实验图

Fig.5 Construction model of each unit circuit and test experiment



a:PCB布线图与3D图



b:脑电检测装置实物图

图6 脑电检测装置PCB布线图与3D图及装置实物图

Fig.6 PCB wiring diagram and 3D graph of EEG detection device and its picture



图7 脑电检测装置佩戴图

Fig.7 EEG detection device wearer

号,紫色线为DIN高足状态信号波形,荧光线为DOUT数据输出波形,对比ADS1299的SPI时序图,

可知示波器的时序测试结果与之相一致,从而保证ADS1299进行寄存器指令配置的正确性与数据通讯的正确性。

MiniSim330是由Nitech公司生产的一款便携小巧的脑电模拟仪,该仪器可模拟ABR、方波、正弦波和三角波等波形,具有5个独立的输出通道,可用于脑电图机等设备的性能测试。该款模拟仪具有专用的脑电电极接头,可输出多种信号波形,且频率和幅值可通过按键调节,体积小、重量轻、操作简便。输出的ABR波幅值为0.64  $\mu\text{V}$ ,频率为1 kHz,另外输出的正弦波、方波和三角波,频率可在0.1、2、5、50、60 Hz之间选择,幅值最低可达10  $\mu\text{V}$ ,最高可达2.5 mV,进度为 $\pm 1\%$ <sup>[17-18]</sup>。

便携式脑电检测设备对 $\mu\text{V}$ 级脑电信号的检测性能主要通过MiniSim330脑电模拟仪产生 $\mu\text{V}$ 级别



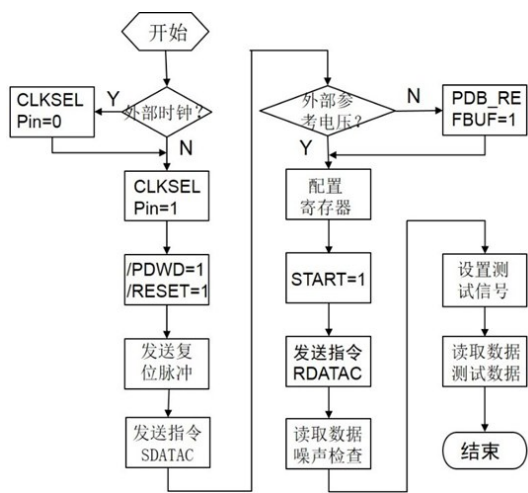


图 8 ADS1299 内部测试信号程序流程图  
Fig.8 Flow chart of ADS1299 internal test signal program



图 9 ADS1299 评估板  
Fig.9 ADS1299 evaluation board

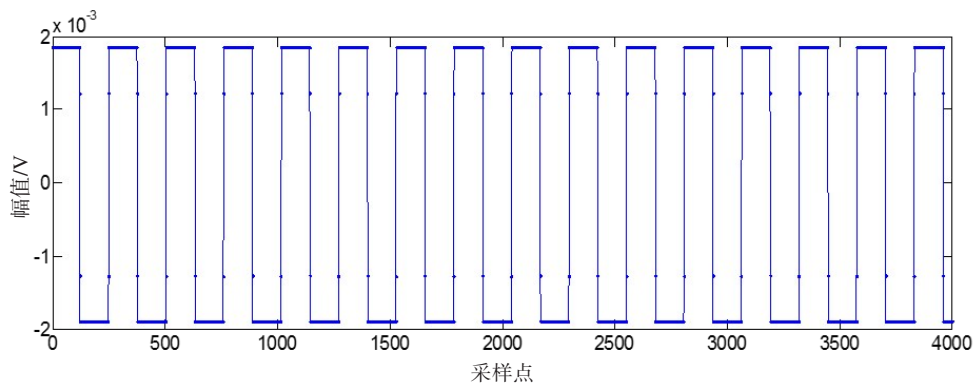


图 10 脑电检测装置内部方波测试信号  
Fig.10 Internal square wave test signals of EEG detection device

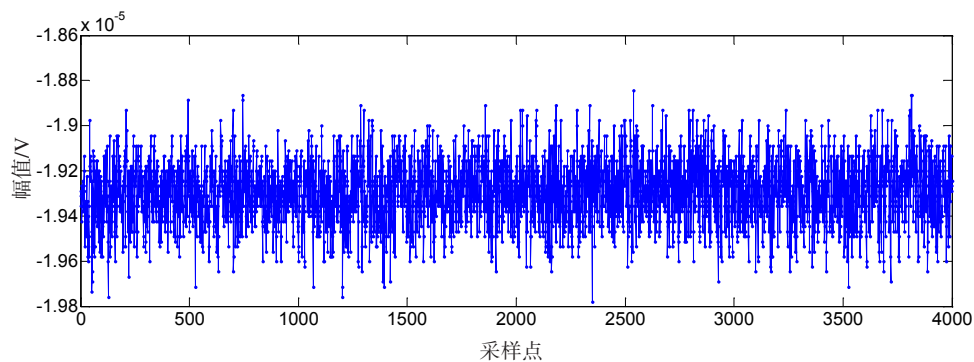


图 11 脑电检测装置输入短接测试信号  
Fig.11 Input short connection test signals for EEG detection device

的方波与正弦波信号以及三角波信号,本测试选取  $30\text{ }\mu\text{V}$ ,  $2\text{ Hz}$  的正弦波作为输入信号,输入给便携式脑电检测设备进行模数转换与蓝牙无线传输,PC 端基于 Matlab 编写的 GUI 对接收到的测试信号进行显示分析,波形显示如图 13 所示。由图 13 可知便携式脑电检测设备具有很低的器件噪声,对于  $\mu\text{V}$  级脑电信号具有较强的检测能力。

本装置的最小分辨率为  $0.16\text{ }\mu\text{V}$ ,数据输出率为  $250\text{ Hz}$ ,信号带宽为  $70\text{ Hz}$ ,系统噪声小于  $1\text{ }\mu\text{V}$ ,因此可满足便携式脑电检测设备对于信号可靠性、低功耗以及便携性的需求。

5 总结

通过对传统脑电采集装置相对笨重、体积庞大、

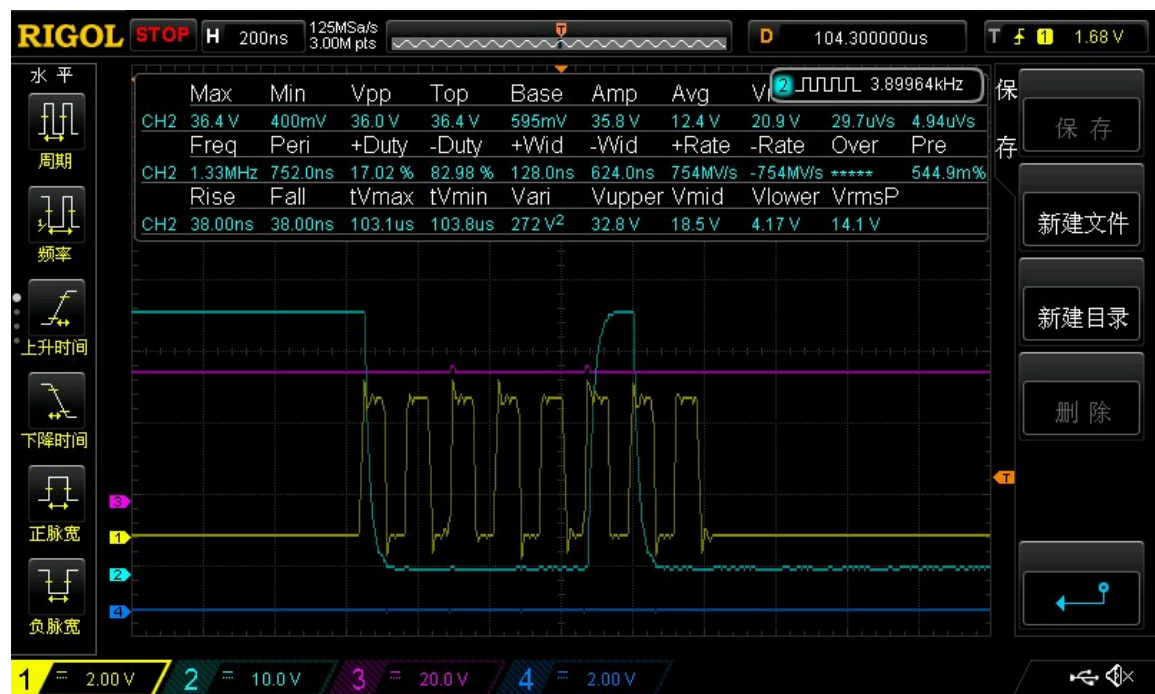


图 12 集成模拟前端ADS1299 的SPI时序测试  
Fig.12 SPI timing test by integrated analog front-end ADS1299

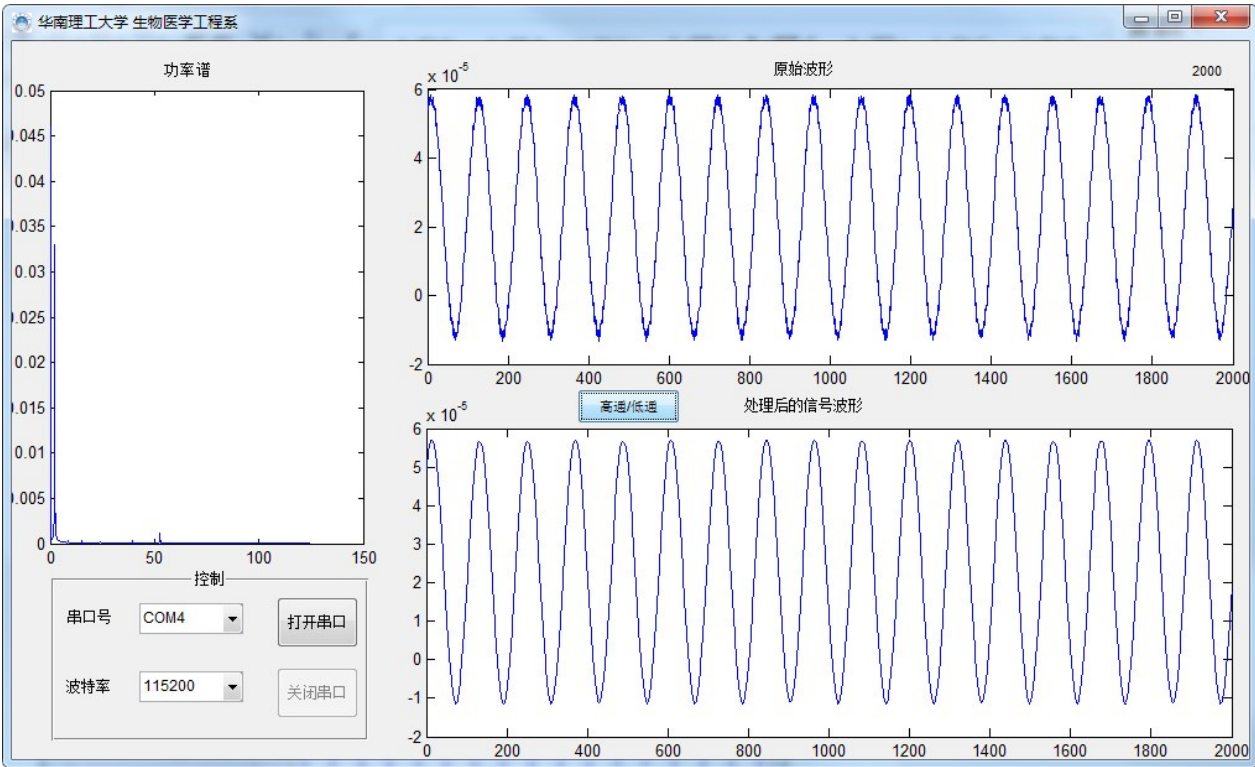


图 13 MiniSim330 正弦波测试 GUI 实时显示界面  
Fig.13 Real-time display interface of GUI for MiniSim330 sine wave test

导联线冗长、不可长时间连续监护等问题的分析,以及对便携式健康监测设备信号精确性、稳定性和系统低功耗性能的研究,设计开发了一款基于集成模拟前端 ADS1299 的便携式脑电采集装置,可以将院内传统脑电检测服务延伸到院外进行长时间、实时、在线监护。通过内部方波与器件噪声对系统参数进行测试,验证了该装置的精确性与低噪声特性,适用于脑电信号的检测,可满足日常生活中不同状态下的监护需求,对智能医疗的发展有着重要的推动和参考价值。

## 【参考文献】

- [1] 黄海诚, 汪丰. 可穿戴技术在医疗中的应用[J]. 中国医疗设备, 2015, 30(1): 1-5.  
HUANG H C, WANG F. A review of wearable technology in medical research and application [J]. China Medical Devices, 2015, 30(1): 1-5.
- [2] Texas Instruments, Inc. ADS1299 EEG front-end performance demonstration kit user's guide[EB/OL]. <http://www.ti.com.cn/cn/lit/ug/slau443b/slau443b.pdf>.
- [3] RASHID U, NIAZI I K, SIGNAL N, et al. An EEG experimental study evaluating the performance of Texas Instruments ADS1299[J]. Sensors (Basel), 2018, 18(11): 3721.
- [4] Texas Instruments, Inc. MSP-EXP430FR5739 FRAM experimenter board user's guide[EB/OL]. <http://www.ti.com.cn/cn/lit/ug/slau343b/slau343b.pdf>.
- [5] WANG Z Y, CHEN C, LI W, et al. A multichannel EEG acquisition system with novel Ag NWs/PDMS flexible dry electrodes[J]. Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc, 2018: 1299-1302.
- [6] 钱世猛. 8通道便携式脑电放大器设计[D]. 成都: 电子科技大学, 2014.  
QIAN S M. Design of 8-channel portable EEG amplifier [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2014.
- [7] BAI Y, WEI Y, LU Y, et al. ADS1299-based wearable electroencephalogram (EEG) signal and electromyogram (EMG) signal amplifier, has controller which is configured to send received EEG signal and EMG signal to host computer through communication circuit: CN108968954-A[P]. 2018-11-12.
- [8] PARADISO R, LORIGA G, TACCINI N. A wearable health care system based on knitted integrated sensors[J]. IEEE Trans Inf Technol Biomed, 2005, 9(3): 337-344.
- [9] CHI Y M, CAUWENBERGHS G. Wireless non-contact EEG/ECG electrodes for body sensor networks[C]. International Conference on Body Sensor Networks, 2010: 297-301.
- [10] GRAHAM K. Development of a compact, low-cost wireless device for biopotential acquisition[D]. Richmond: Virginia Commonwealth University, 2014.
- [11] 陈泽涛. 基于脑电信号分析的AD早期评估系统的设计与实现[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2015.  
CHEN Z T. Design and implementation of AD early evaluation system based on EEG analysis[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2015.
- [12] 蔡佳. 16导脑电采集系统硬件设计[D]. 成都: 电子科技大学, 2010.  
CAI J. Hardware design of 16-lead EEG acquisition system [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2010.
- [13] 刘志焯. 32导高性能脑电采集系统硬件设计[D]. 成都: 电子科技大学, 2015.  
LIU Z X. Hardware design of 32 guide high performance EEG acquisition system[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2015.
- [14] HEUNG-NO L, SEUNGCHAN L, YOUNGHAK S, et al. Dry electrode-based fully isolated EEG/fNIRS hybrid brain-monitoring system[J]. IEEE Trans Biomed Eng, 2019, 66(4): 1055-1068.
- [15] 李承炜. 面向精神分裂症辅助诊断系统的穿戴式心电与脑电检测设备研制[D]. 广州: 华南理工大学, 2018.  
LI C W. Development of wearable ECG and EEG equipment for computer aided diagnosis system of schizophrenia patients [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2018.
- [16] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 脑电图机检定规程: JJG1043-2008[S]. 北京: 中国计量出版社, 2008.  
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Verification regulation of electroencephalograph: JJG1043-2008 [S]. Beijing: China Metrology Publishing House, 2008.
- [17] Netech Biomedical & Industrial Test Instrument, Inc. Minisim 330-EEG patient simulator[EB/OL]. [http://www.netechcorp.us/Products/details/330-EEG-Simulator\\_71](http://www.netechcorp.us/Products/details/330-EEG-Simulator_71).
- [18] TORESANO L O, WIJAYA S K, PRAJITNO P, et al. Data acquisition system of 16-channel EEG based on ATSAM3X8E ARM Cortex-M3 32-bit microcontroller and ADS1299 [C]. Proceedings of the 2nd International Symposium on Current Progress in Mathematics and Sciences, 2017, 1862(1): 030149.

(编辑: 薛泽玲)