

## 基于 ADS1299 的可穿戴式脑电信号采集系统前端设计\*

谢 宏, 李亚男, 夏 斌, 姚 楠

(上海海事大学 信息工程学院, 上海 201306)

**摘 要:** 设计了一款可穿戴式脑电采集前端, 具有采集精度高、体积小、功耗低、抗干扰性强等特点。采用 ADS1299 内部集成的可编程放大器 (PGA) 实现微弱信号的放大; 同时为了消除干扰, 使用限幅滤波预处理电路和 ADS1299 内部集成的偏置驱动放大器。实验测试表明, 该脑电采集前端设计能较好地提取微弱的脑电信号, 并且具有较好的抗干扰能力和实用价值。

**关键词:** 脑电信号; 可编程放大器; 偏置驱动放大器; 便携式; 低功耗

中图分类号: TN98

文献标识码: A

文章编号: 0258-7998(2014)03-0086-04

## The front-end design of wearable EEG acquisition system based on the ADS1299

Xie Hong, Li Ya'nan, Xia Bin, Yao Nan

(Institute of Information Engineering, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China)

**Abstract:** A wearable EEG acquisition system front-end is designed in this paper. It has the advantages of high precision, small in size, low power consumption, strong anti-jamming, etc. Using ADS1299 internal integration of programmable amplifier (PGA) to realize the weak EEG signal amplification; meanwhile, in order to eliminate the interference, we're using the pretreatment circuit of amplitude limiting and filtering and using ADS1299 internal integration of bias driver amplifier. The result from the experiment indicates that the design can extract the weak EEG signal and have strong anti-jamming ability and practical value.

**Key words:** EEG; programmable gain amplifier (PGA); bias driven amplifier (BIAS); portable type; low-power

脑电信号 EEG (Electroencephalogram) 是大脑神经元细胞体生理活动所产生的电位综合, 具有丰富的大脑活动信息<sup>[1]</sup>, 广泛应用于脑部疾病的医疗诊断、功能康复、疲劳驾驶脑电活动监测、脑-机接口 (BCI) 及其他脑科学方面的研究。对于脑电信号的研究必然离不开脑电信号的采集获取, 而脑电信号的获取都是通过脑电采集系统来完成的。传统脑电采集系统虽然在采集精度上能够很好地满足医疗和研究的要求, 但是其体积较大、操作不便、功耗高等缺点限制了其研究和应用的范围。因此设计出一款体积小、功耗低、便于操作的脑电信号采集系统具有重要的实际意义和应用价值<sup>[2]</sup>。

由于脑电信号非常微弱, 加之人体阻抗的特殊性、外界和内部干扰等原因, 传统脑电采集系统通过复杂的放大滤波电路设计, 以满足脑电信号采集的要求<sup>[3]</sup>, 但是这样会导致电路板体积过大、功耗高, 不利于设计采集系统的便携化。为了实现脑电采集系统的小型化, 人们常采用针对特殊应用和特殊设计来简化脑电信号调

理电路, 如参考文献[4]为实现 6 通道脑电信号的便携式采集, 将调理电路分成主动电极端和后端两部分, 通过这样特殊的设计使得整个系统的体积大为减小, 但体积仍然偏大使用不便。参考文献[5]针对驾驶疲劳检测研制了 6 通道的脑电信号采集系统, 采集前端基于多层电路板模块, 该设计虽然大大地缩小了采集前端的体积, 但对便携式应用体积仍然偏大。通过抑制脑电信号源中共模干扰成分可以降低对滤波和陷波电路的要求, 而右腿驱动电路是常用的有效手段<sup>[6]</sup>, 在提高系统对共模干扰抑制能力的同时可以减小系统的体积<sup>[3,7-8]</sup>。参考文献[9]将采集前端中各种元器件包括放大器、滤波器、控制器等都集成到一个片上系统 (SoC) 上, 以达到减小系统体积和功耗的目的, 这种方案对开发工具和技术水平要求都非常高, 成本高难度大。参考文献[7]利用 TI 公司的 ADS1298 芯片的高精度作为保证, 通过在数字侧实现滤波和陷波来简化采集前端模拟部分的设计, 由于该芯片是针对心电信号采集设计的, 其漂移和模数转换速率等性能仍然有一定的局限性, 当用于脑电信号采集时该芯片内的一些性能无法得到充分利用。

\* 基金项目: 中国交通部科技司应用基础研究项目 (2012-319-810-190);

上海市科学技术委员会资助项目 (12441903500)

近年来 TI 公司继 ADS1298 之后又推出了专门用于脑电信号采集的模数转换芯片 ADS1299, 本文以高精度、便携式、低功耗的脑电采集系统研制为背景, 尝试采用该款芯片作为核心器件设计出可穿戴式脑电信号采集系统前端。

## 1 可穿戴式脑电采集系统总体结构

本文研制的脑电信号采集系统由干电极、采集前端、GS1011 控制模块(集成有 WiFi 和 ARM)、电源模块和上位机接收控制组成, 系统组成如图 1 所示。

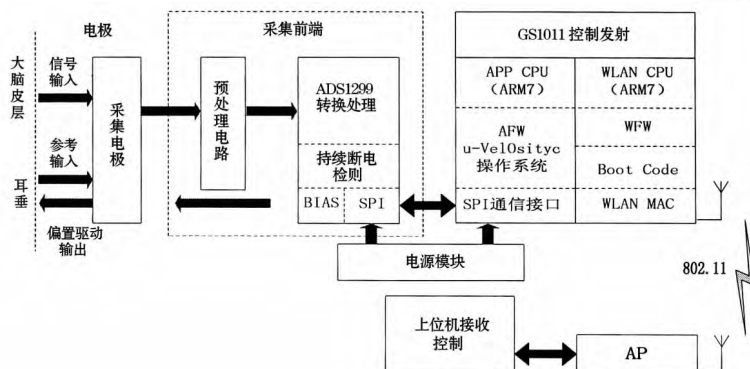


图 1 穿戴式脑电采集系统功能框图

该系统是一个网络化的嵌入式系统平台, GS1011 通过其 WiFi 模块与上位机通信, 根据上位机指令控制 ADS1299 进行脑电信号的模数转换, 并将转换后的脑电信号数据通过设置的无线 WiFi 发送到指定的 IP 地址上位机上。该系统改善了传统脑电采集系统在时间和空间上的局限性, 满足了脑电采集所需要的便携式、可移动、低功耗以及实时性等特点。

该系统中模拟前端部分是保障系统整体性能的关键, 其中采用 TI 公司的 ADS1299 为核心器件, 主要是考虑到该芯片是专门为脑电信号采集而设计的, 其具有如下突出的特性:

(1) 具有 8 个低噪声可编程放大器(PGA, 放大倍数 1~24 倍可调)与 8 个同步采样模/数转换器(ADC), 模/数转换速率介于 250 S/s~16 kS/s 之间, 不超过 8 kS/s 时其精度为 24 bit;

(2) 每个通道的功耗仅有 5 mW, 共模抑制比(CMRR)高达 -110 dB, 直流输入阻抗高达 1 000 M $\Omega$ ;

(3) 内置偏置驱动放大器和持续断电检测(LEAD-OFF Detection)功能。

这些特性保证了加入很少的元器件即可搭建脑电信号模拟采集前端。

## 2 ADS1299 内部结构

ADS1299 芯片的内部结构框图如图 2 所示。ADS1299 输入端使用的是差分方式输入, 并且每个输入端都集成有 EMI 滤波器, 能有效地抑制

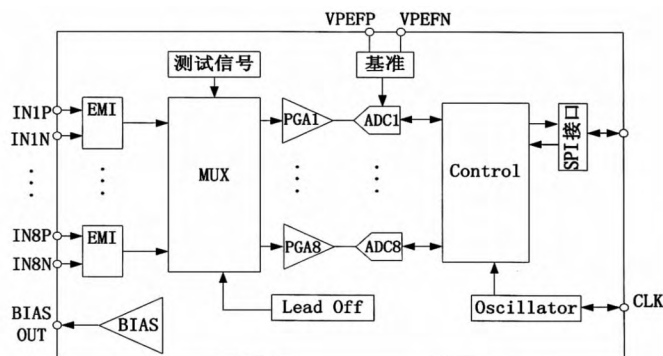


图 2 ADS1299 芯片的内部结构框图

外部射频干扰; 具有灵活的路由交换器(MUX), 可以将任何输入连接到放大器(PGA)的输入端; 集成有持续断电检测(Lead Off)电路, 可以随时监测电极是否断开; 内部集成了 8 路并行的 PGA 和 ADC, 可以提供很高的采集转换精度; 内部还集成有偏置驱动放大器, 可以有效抑制共模干扰噪声; 采用 SPI 串行通信方式设置内部控制用寄存器并输出数字信号, 当芯片完成一次采集时, 芯片会拉低引脚来通知外部 GS1011 可以通过 SPI 读取数据。

## 3 采集前端总体设计

针对脑电信号十分微弱(0.5  $\mu$ V~100  $\mu$ V)的特点, 传统采集前端通常由模拟抗混滤波器、多级放大电路和陷波电路等来提高信号的信噪比, 这也是导致其体积大不利于实现便携式设计的主要原因。由于 TI 公司的 ADS1299 在采样频率不超过 8 kHz 时模/数转换精度达到 24 位, 再结合其集成的具有高共模抑制比的差分输入可编程增益放大器(PGA), 因此本文在前端设计的模拟侧只保留了抗混滤波电路。而基线漂移、陷波等处理根据应用需要在数字侧实现, 而且基于过采样技术采用二阶无源 RC 滤波电路实现抗混滤波, 大大简化前端电路设计, 其设计结构框图如图 3 所示。

ADS1299 为差分输入, 其共模抑制比(CMRR)高达 110 dB, 且其直流输入阻抗高达 1 000 M $\Omega$ , 再配合闭环

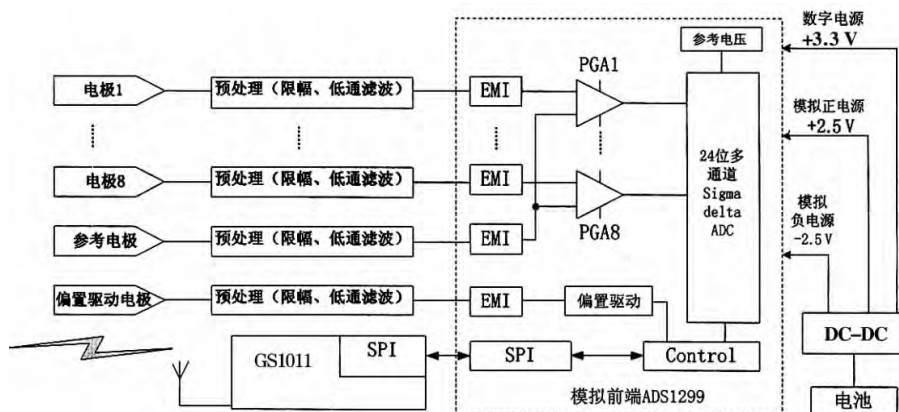


图 3 前端电路设计结构框图

偏置驱动电路设计,能够很好地保证系统的抗干扰要求;ADS1299 内部含有 8 个低噪声的可编程增益放大器(PGA)和 8 个同步采样模/数转换器(ADC),A/D 转换精度高达 24 bit,当  $V_{REF}=4.5\text{ V}$  时其信号电压的分辨率为:

$$V_{LSB} = \frac{V_{REF}}{2^{23}-1} = 0.536\text{ }\mu\text{V} \quad (1)$$

如果再将 PGA 可编程增益控制考虑进去则其信号电压分辨率可以达到  $0.0536\text{ }\mu\text{V}$ 。

## 4 预处理电路设计

由于脑电信号频率只有  $0.5\sim 100\text{ Hz}$ ,实验分析的有效范围一般在  $0.5\sim 30\text{ Hz}$ ,在模数转换前必须经过低通抗混滤波的预处理,为此本文针对每个通道设计了预处理电路,如图 4 所示。

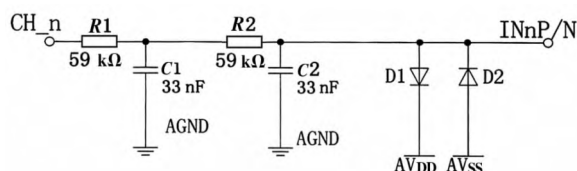


图 4 信号预处理电路

该电路由二阶无源 RC 低通滤波和限幅电路组成,其中二阶无源 RC 低通滤波电路的频率响应函数如式(2)所示:

$$H(jf) = \frac{1}{1 - (2\pi f)^2 C_1 C_2 R_1 R_2 + 2j\pi f [R_1(C_1 + C_2) + R_2 C_2]} \quad (2)$$

当  $C_1=C_2=C$ ,  $R_1=R_2=R$  时,可得:

$$|H(jf)| = \frac{1}{\sqrt{(1 - R^2 C^2 (2\pi f)^2)^2 + 9 R^2 C^2 (2\pi f)^2}} \quad (3)$$

其-3dB 截止频率为:

$$f_h = \frac{1}{5.3448\pi RC} \quad (4)$$

取  $R=59\text{ k}\Omega$ ,  $C=33\text{ nF}$  时,可得:  $f_h=30.46\text{ Hz}$ 。图 5 为该二阶无源 RC 低通滤波器的对数幅频特性曲线。

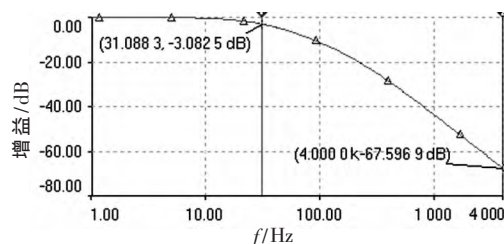


图 5 二阶无源低通滤波器对数坐标频率特性

从该幅频特性曲线可以看出,当选取  $8\text{ kHz}$  的采样频率时,可知频率在  $4\text{ kHz}$  处衰减达到  $67\text{ dB}$ 。因此该二阶无源 RC 低通滤波器具有较好抗频率混叠效果,通过过采样技术可以使该滤波器满足性能要求。

限幅电路则是由两个二极管组成,其单向导通特性可以将电压幅值钳制在  $\pm 700\text{ mV}$  以内。

## 5 基准电压电路

对于 ADC 的基准电压选择,既可以选择内部基准电

压,也可以选择外部基准电压。为了减小电路规模,选择 ADS1299 内部基准电压  $V_{REF}=4.5\text{ V}$ 。图 6 是 ADS1299 内部基准电压的简化框图。

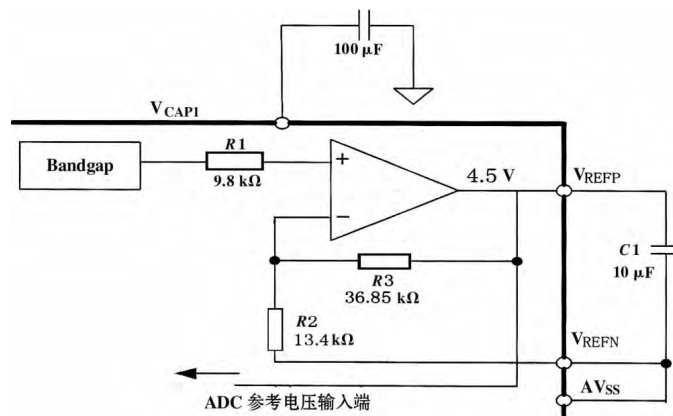


图 6 内部基准电压的简化框图

图中基准电压是将  $V_{REFN}$  与  $AV_{SS}$  连接起来并加上限频电容由  $AV_{SS}$  产生的,限频电容的作用是使基准电压的输入噪声不会对系统产生干扰,使得频率带宽至少限制在  $10\text{ Hz}$  以内。

## 6 偏置驱动电路

通过右腿驱动电路设计可以进一步抑制脑电信号的共模噪声。利用 ADS1299 内置的偏置驱动放大器加上很少的元器件就可以设计出偏置驱动电路,该电路功能与右腿驱动电路一样,电路如图 7 所示。

该电路是由 ADS1299 内置偏置驱动放大器以及外围的  $R_F$ 、 $C_F$ 、 $R$  组成。 $R_F$  为反馈电阻,电阻  $R_s$  为限流电阻,通过选取合适的保护电阻阻值,可以将位移电流限制在安全的范围内 (IEC 规定流经人体的最大单级故障电流不得超过  $50\text{ }\mu\text{A}$ ),防止器件对人体造成电击的危险。反馈电容  $C_F$  的作用是进行相位补偿,用来防止自激。电极 A、B、C 分别是采集电极、参考电极、偏置驱动输出电极。选择 BIAS AMP 运放的正参考端 BIASREF 为  $(AV_{DD}+AV_{SS})/2$  即系统地 AGND,能够形成一个闭环回路结构。该闭环回路电路实际上就是一个对消驱动电路,共模信号  $V_c$  通过该反馈电路可以在人体上产生一个极性相反的共模信号  $V_{cd}$ ,将共模干扰噪声限制在一个很窄的范围内,该范围大小取决于该环路的增益 A:

$$A = 2 \cdot \frac{Z_F}{R_{CM}} \quad (5)$$

其中  $Z_F$  为:

$$Z_F = \frac{R_F}{1 + s \cdot R_F \cdot C_F} \quad (6)$$

通过选取合适的  $R_F$ 、 $R_{CM}$ 、 $C_F$  值,可以使得  $V_{cd}=-V_c$ ,这样绝大部分共模干扰信号可以被抵消掉,从而在输入端实现对共模噪声信号的抑制,大大提高了整个电路的信噪比。

EEG 信号采集是一种强噪声背景下的微弱信号的



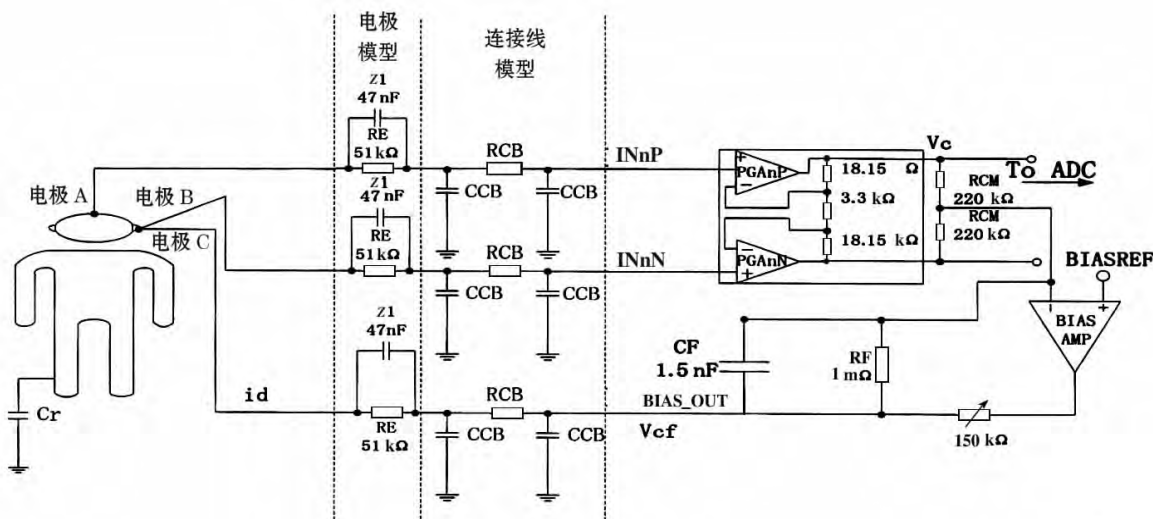


图 7 偏置驱动电路

采集, 这对于 EEG 信号的采集前端电路设计提出了很高的技术要求。本文提出一种使用高性能生理信号采集芯片 ADS1299 为核心的可穿戴式脑电采集系统前端。根据实验测试, 该采集前端采集精度、采集速度、电气安全和抗干扰能力都能够满足要求。利用 ADS1299 内部集成的各种特有 EEG 功能可以大幅简化采集前端设计的电路规模。为设计出新一代的便携式、低功耗、高性能的实时穿戴式脑电采集系统提供了有力的技术支持。

#### 参考文献

- [1] 韩丰谈, 朱险峰. 医学影像设备安装与维修学[M]. 北京: 人民卫生出版社, 2008:162-172.
- [2] 张雪燕, 冯姚震, 马敏飞, 等. 脑电信号的分析和监测[J]. 电子技术应用, 2011, 37(1):128-131.
- [3] 江洪. 基于 DSP 的脑电信号采集系统的设计[D]. 合肥: 安徽大学, 2006.
- [4] 蔡百原. 以数位信号处理单晶片实现便携式即时睡意辨识系统[D]. 中国台湾: 台湾中原大学, 2007.
- [5] LIN C T, et al. Development of wireless brain computer interface with embedded multitask scheduling and its application on real-time driver's drowsiness detection and

warning[J]. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 2008, 55(3):1582-1591.

- [6] WINTER B B, WEBSTER J G. Driven-right-leg circuit design[J]. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 1983, 30(1):62-66.
- [7] 谢宏, 颜林, 姚楠, 等. 基于 ADS1298 的新型脑电信号采集前端设计[J]. 电子技术应用, 2013, 39(4):75-78.
- [8] 孙宇舸, 叶柠, 于艳波. 基于右腿驱动技术的脑电信号放大器的设计[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2010, 31(6):777-781.
- [9] HELLEPUTTE N V, TOMASIK J M, et al. Aflexible system-on-chip(SoC) for biomedical signal acquisition and processing[J]. Sensors and Actuators a-Physical, 2008, 142(1):361-368.

(收稿日期: 2013-10-14)

#### 作者简介:

谢宏, 男, 1962 年生, 博士, 教授, 主要研究方向: 人工智能技术及其应用系统。

李亚男, 男, 1990 年生, 硕士研究生, 主要研究方向: 智能信息处理及应用。

(上接第 85 页)

等。在我国智能路灯尚处于起步阶段, 相信随着物联网技术的迅猛发展, 智能路灯系统必将得到广泛的应用。

#### 参考文献

- [1] 王海涛, 朱兆优. 基于 ZigBee 的 LED 节能街灯控制系统[J]. 东华理工大学学报(自然科学版), 2009, 32(4):394-396.
- [2] 金纯, 罗祖秋. ZigBee 技术基础及案例分析[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.
- [3] 宁炳武, 刘军民. 基于 CC2430 的 ZigBee 网络节点设计[J]. 电子技术应用, 2008, 34(3):95-99.
- [4] 任秀丽, 于海滨. ZigBee 无线通信协议实现技术的研究[J]. 计算机工程应用, 2007(6):143-145.
- [5] 孙其博, 刘杰. 物联网: 概念、架构与关键技术研究综

述[J]. 北京邮电大学学报, 2010, 33(4):1-9.

- [6] 田裕康, 马双宝. 基于 ZigBee 的光伏照明控制系统[J]. 单片机与嵌入式系统应用, 2010(7):52-55.
- [7] 王淑茹. GPRS 远传抄表及能源管理系统[J]. 信息时代, 2012(1):57-59.
- [8] 李娟, 胡方明. 基于 ZigBee 的高层建筑无线火灾报警系统[J]. 电子科技, 2012, 25(6):34-37.

(收稿日期: 2013-10-14)

#### 作者简介:

白成林, 男, 1986 年生, 在读研究生, 主要研究方向: 新型传感器技术与智能控制。

马珺, 女, 1980 年生, 副教授, 主要研究方向: 新型传感器技术与智能控制。