

AN-1557 应用笔记

One Technology Way • P.O. Box 9106 • Norwood, MA 02062-9106, U.S.A. • Tel: 781.329.4700 • Fax: 781.461.3113 • www.analog.com/cn

AD5940和AD8233在完整生物电系统中的实现

作者: Micheal Lambe

简介

AD5940是一款高精度、超低功耗模拟前端(AFE)系统,旨在激励和测量传感器的电流、电压或阻抗响应。

AD5940搭载了两个高精度测量环路。一个超低功耗、低于 1 kHz环路和一个高速低于200 kHz环路, 使AD5940能精确 测量传感器的阻抗。

本应用笔记旨在详细介绍如何在全生物电系统中设置 AD5940和AD8233,该系统可通过同一组电极进行皮肤电活 动(EDA)、身体阻抗分析(BIA)和心电图(ECG)测量。

使用的硬件包含AD5940评估套件;其中包括基于EVAL-ADICUP3029 Arm[®]的Arduino型微控制器;EVAL-AD5940BIOZ 评估板;和AD5940 Z测试板,如图1所示。



评估套件堆叠照片

图1.

Rev. 0 | Page 1 of 20

应用笔记

目录

简介1
评估套件堆叠照片1
修订历史2
评估套件
评估套件内容3
测量系统概述
AD5940 概述4
AD5940 生物电子系统 4
2 线生物阻抗
生物阻抗测量理论5
使用 AD5940 的生物阻抗解决方案5
计算6
进行2线生物阻抗测量7
ECG
ECG 测量理论10

采用 AD5940 和 AD8233 的 ECG 解决方案1	0
进行 ECG 测量1	1
4线 BIA1	3
4线 BIA 测量理论1	3
采用 AD5940 的 4 线 BIA 解决方案1	3
计算 BIA 的分立式组件1	3
进行 BIA 测量1	5
EDA 1	7
EDA 测量理论1	7
使用 AD5940 的 EDA 解决方案 1	7
计算 EDA 的分立式组件1	7
最大限度地降低永远在线应用的功耗1	9
进行 EDA 测量1	9

修订历史

2019年3月—修订版0:初始版

评估套件

评估套件内容

AD5940评估套件包括以下内容:

- EVAL-ADICUP3029
- EVAL-AD5940BIOZ
- AD5940 Z测试板
- ECG电缆
- MicroUSB转USB电缆

EVAL-ADICUP3029

EVAL-ADICUP3029是评估套件的主要母板,该板搭配有板载ADuCM3029微控制器。ADuCM3029是ADI公司一款先进的Arm Cortex M3器件,用于通过串行外设接口(SPI)与AD5940进行通信。

EVAL-AD5940BIOZ

EVAL-AD5940BIOZ板包含用于ECG测量的AD5940和 AD8233芯片。EVAL-AD5940BIOZ是一款Arduino Uno板型 电路板,可插入EVAL-ADICUP3029。该电路板包含ECG、 EDA和BIA测量所需的必要分立式元件,包括隔离电容和限 流电阻。该电路板还搭载了连接测量电缆的接口和AD5940 Z测试板,后者用于模拟皮肤和身体阻抗。有关EVAL-AD5940BIOZ板的更多信息,请参阅AD5940用户手册维基 页面。

AD5940Z测试板

AD5940 Z测试板含有电阻、电容和开关网络,专门用于测 试和验证测量结果。AD5940 Z测试板可以模拟一系列的身 体和皮肤阻抗,并通过USB连接器插入EVAL-AD5940BIOZ 板。有关AD5940 Z测试板的更多信息,请参阅AD5940用户 手册维基页面。

ECG电缆

随评估套件提供的ECG电缆是将硬件连接到身体模拟器以进行ECG、BIA和EDA测量的一种手段。切勿将AD5940评估板连接到身体。表1详细介绍了随附电缆的名称和颜色映射关系。

表1. 电极名称和颜色映射

电极名称	颜色
F+	红
S+	绿
S–	蓝
F–	黑

测量系统概述

AD5940概述

AD5940数据采集环路由一个低带宽环路、一个高带宽环路、一个高带宽环路、一个高精度模数转换器(ADC)和一个可编程开关矩阵组成。

低带宽环路由低功耗、双输出数模转换器(DAC)组成,后 者可为低功耗跨阻放大器(TIA)(Vzero)以及恒电位器放大器(VBIAs)产生偏置电压。

低带宽环路用于低带宽信号,其中激励信号的频率低于 200Hz,例如EDA测量。

高带宽环路包括一个高速DAC (用于在进行阻抗测量时产 生高频交流激励信号)和一个高速TIA (用于将高达200 kHz 的高带宽电流信号转换为ADC测量的电压)。 高带宽环路用于身体阻抗测量,其中激励频率的范围为 50kHz。

开关矩阵是一系列可编程开关,允许将外部引脚连接到高速DAC激励放大器和高速TIA反相输入端。

开关矩阵提供了一个接口,用于将外部校准电阻连接到测量系统,同时也用于提高电极连接的灵活性。

AD5940生物电子系统

本应用笔记旨在介绍如何在软件可配置生物电系统中配合 AD8233使用AD5940。通过软件,该系统能够在同一组电极 上测量BIA、EDA或ECG。

2线生物阻抗

生物阻抗测量理论

AD5940可以进行2线生物阻抗测量,以满足通用阻抗测量 需求,也可以测量身体内部的组织。

2线生物阻抗是一种伏安测量值。若要测量未知阻抗 (Z_{UNKNOWN}),要将一个交流激励信号施加于未知阻抗上。测 量激励信号的电压。然后,测量流过未知阻抗的电流。通 过TIA将电流转换为由ADC测量的电压。对ADC数据执行 离散傅立叶变换(DFT)以获得电流和电压值。使用实部和虚 部,计算幅度,得到未知阻抗电压(V_{ZUNKNOWN})和未知阻抗 电流(I_{ZUNKNOWN})。

使用以下公式计算传感器的未知阻抗大小:

$$Z_{UNKNOWN} = \frac{V_{Z_{UNKNOWN}MAG}}{I_{Z_{UNKNOWN}MAG}} \times R_{TIA}$$

其中:

VZUNKNOWINMAG是未知阻抗电压的大小。 IZUNKNOWINMAG是未知阻抗电流的大小。 RTTA是高速TIA增益电阻的值,单位为Ω。



图2.2线生物阻抗测量图

生物阻抗测量必须符合IEC 60601标准,该标准为可进入身体的最大允许电流设定了指导意见。电阻限制(RLIMIT)电流。 CISOx是隔离电容器,可确保无直流电流进入身体。可以在"计算"部分中找到关于如何选择正确值的指导意见。

使用AD5940的生物阻抗解决方案

本节介绍用于执行2线生物阻抗测量的AD5940模块。如"生物阻抗测量理论"部分所述,2线生物阻抗测量需要一个交流电压源、一个电压测量通道和一个电流测量通道。

对于2线生物阻抗测量,被测阻抗可以连接于CE0引脚与 SE0、DE0或AINx之间。出于本应用笔记的需要,Z_{UNKNOWN} 连接在CE0和AIN1之间。

激励信号

AD5940使用其波形发生器、高速DAC和激励放大器来产生 高频激励信号。频率可编程,范围为DC至200 kHz。信号 通过CE0引脚施加到传感器,如图3所示。信号幅度可编程, 最高可达±607 mV。

测量电压

当电压被施加到传感器时,测量激励信号的电压。ADC的 正输入是P节点,它通过开关矩阵连接到CE0,如图3所示。 ADC的负输入是N节点,它连接到高速TIA的负输入。使用 DFT硬件加速器,对ADC数据执行DFT,此时计算实部和 虚部,并将其存储在数据先进先出(FIFO)寄存器中。

测量ZUNKNOWN电流

为测量Z_{UNKNOWN}电流,将相同的激励信号施加到传感器。高速TIA将电流转换为电压,由ADC通过增益电阻R_{TIA}读取。 类似地,对ADC结果执行DFT,并且将实部和虚部存储在数据FIFO中,由主微控制器读取。

计算ZUNKNOWN

AD5940用序列器存储命令。主微控制器(在本例中为 EVAL-ADICUP3029)将所需命令写入序列器。这些命令设 置DAC、ADC和TIA以进行测量。序列器自动执行命令, 与微控制器无关。首先执行电压测量。数据FIFO已满时会 产生中断。然后微控制器读取FIFO并存储DFT结果的实部 和虚部。然后,配置ADC多路复用器为将高速TIA输出连接 到ADC以测量电流。重新运行以上序列, AD5940在数据 FIFO已满时产生中断,提醒主控制器读取数据。

通过下式确定ZUNKNOWN:

$$\begin{aligned} \left| V_{MAG} \right| &= \sqrt{r^2 + i^2} \\ \left| I_{Z_{UNKNUWN}MAG} \right| &= \sqrt{r^2 + i^2} \\ \left| Z_{UNKNOWN} \right| &= \frac{\left| V_{MAG} \right|}{\left| I_{Z_{UNKNOWN}MAG} \right|} \times R_{TTA} \end{aligned}$$

其中:

V_{MAG}为传感器两端电压的大小。 r和i分别为电流和电压DFT测量值的实部和虚部。

计算

为优化AD5940以进行2线生物阻抗测量,请计算RLIMIT值,添加隔离电容(RTTA),并计算精密电阻(RCAL)值。

计算RLIMIT

为达到IEC 60601标准的要求,要限制进入身体的交流电量。 最大允许交流电流为:50 kHz时为500μA,60 kHz时为 600μA。计算RLIMIT电阻值时,AD5940的最大输出电压为 1.2 V pp (0.4243 V rms)。将最大允许交流电流设为最大 值的80%或400μA rms。下式是这些值的结果:

$$R_{LIMIT} = \frac{0.4243 \text{ V rms}}{400 \text{ }\mu\text{A rms}} = 1060.66$$

这样,选择了一个1 kΩ R_{LIMIT},并将其连接到在AD5940的 CEO引脚上。这里的计算忽略了C_{ISOx},因其太小。

隔离电容

为达到IEC 60601标准,允许进入身体的最大直流电流为 10μA。在此应用中,由于增加了隔离电容,可保证直流电 流为零。为隔离电容选择的值为0.47μF,因为0.47μF电容足 够大,有适用于可穿戴电子设备的小型封装可选。将CE0 上的隔离电容Clso1修改为15 nF,如此,该电容就可用于EDA 和BIA测量。有关计算细节,请参阅EDA部分。



图3.2线生物阻抗框图

AN-1557

*计算*R_{TIA}

为了计算高速TIA的增益电阻R_{TIA},首先要计算高速TIA的 最小阻抗和最大电流。在下面的等式中,Raccessimn和 Raccessim表示连接传感器的引脚的电阻,假设为0Ω。求解 该式可得:Z_{MIN}=1.2kΩ。

$$\begin{split} Z_{MIN} &= \sqrt{r^2 + i^2} \\ &= \sqrt{ \begin{pmatrix} R_{LIMIT} + R_{ACCESS1_{MIN}} + Z_{UNKNOWN_{MIN}} + R_{ACCESS2_{MIN}} \end{pmatrix}^2 } \\ &+ \left(XC_{ISO1_{MIN}} + XC_{ISO2_{MIN}} \right)^2 \end{split}$$

其中:

ZMIN为最小阻抗。

ZUNKNOWNMIN为最小未知阻抗。本式中假设为100Ω。

XCISOIMIN和XCISO2MIN在50kHz时为67.73Ω。

高速DAC的最大输出电压为600 mV峰值。按以下方式计算进入TIA的最大电流(IMAX):

 $\mathit{I_{MAX}} = 600 \text{ mV}/\mathit{Z_{MIN}} = 500 \text{ }\mu\text{A}$

其中,ZMIN为最小阻抗。

当ADC可编程增益放大器(PGA)的增益为1或1.5时, TIA输 出端允许的峰值电压为900 mV峰值。故,

R_{TIA} = 900 mV 峰值/500 μA 峰值 = 1.8 kΩ。

AD5940未提供1.8kΩ RTIA选项。故选择1kΩ选项。

选择RCAL

Rcal是一个精密电阻,与高速DAC和激励放大器配合使用,可产生精确的电流。Rcal校准高速TIA增益电阻。理想情况下,选择接近Rtta的Rcal值。在这种情况下,Rcal必须为1kΩ。为保证精度,电阻必须具有0.1%的容差。

计算ZUNKNOWN

AD5940用序列器存储命令。主微控制器将所需命令写入命 令存储器,AD5940自动执行命令。第一次测量的是电压测 量。电压只需测量一次,因为其结果会存储起来。然后, 序列器运行测量序列,施加激励电压并测量对数据执行 DFT的响应电流。实部和虚部存储在FIFO中。可以将序列 器配置为使用睡眠和唤醒定时器定期运行。 主微控制器读取数据FIFO,获得当前测量的实部和虚部结 果。基于这些值,以下等式可确定电压测量幅度和电压测 量相位:

电压测量幅度 =
$$\sqrt{r^2 + i^2}$$

电压测量相位 = $\tan \frac{-1i}{r}$

若要计算阻抗,请使用欧姆定律,将电压幅度除以电流幅度。使用R_{TIA}将电流测量值转换为电压。必须考虑该增益。因此,用于确定未知阻抗的等式如下,

$$|Z_{UNKNOWN}| = \frac{\overline{eEMB}}{\overline{enfmin}} \times R_{TIA}$$

进行2线生物阻抗测量

硬件设置

执行2线生物阻抗测量需要EVAL-ADICUP3029、EVAL-AD5940BIOZ和AD5940Z测试板。按图1所示方式把板堆叠起来。

AD5940 Z测试板上有五个开关组,即S1到S5。S2和S4模拟 接触电阻和引脚阻抗。S1模拟生物阻抗。请注意,S3和S5 不适用于2线生物阻抗测量。要测试测量精度,请将S2和S4 上的所有开关设为开启位置,结果会将接触阻抗和引脚阻 抗设为零。切换S1上的开关7,将未知阻抗值设为2kΩ,如 图4所示。



图4. 阻抗测试板

固件设置

AD5940软件开发套件有一个专用的2线的生物阻抗测量示例。若要在评估硬件上执行BIA测量,用户可以使用ADI公司的SensorPal图形用户界面(GUI)工具(见AD5940)或IAR Embedded Workbench固件示例。

若要快速进行原型设计,请使用SensorPal工具。SensorPal 提供了许多可配置的参数来定义测量,还提供了快速绘图 机制。

或者,打开软件开发套件中的Examples文件夹,然后依次选 择AD5940_BIOZ-2WIRE > ADICUP3029 > ADICUP3029. eww。打开ADICUP3029.eww文件,在IAR Embedded Workbench中打开项目工作区。

按照下述步骤运行项目:

- 1. 编译并构建项目。
- 2. 启动调试器,开始执行代码。

- 3. 打开RealTerm等终端程序,将波特率配置为230400。
- 4. 选择EVAL-ADICUP3029连接的通信端口(COM)。

测量结果通过通用异步接收发射器(UART)流式传输,可以 保存到文件中以进行分析。

要修改默认应用程序参数,请使用AD5940Main.c文件中的AD5940BIOZStructInit(void)函数。AppBIOZCfg_Type数据结构包含应用程序的可配置参数。有关固件的更多详细信息,请参阅软件开发套件doc文件夹中的AD5940_Library_and_examples.chm文件。

Vorkspace - 3	X Sochimondarca: manual ADS940Main.4 X Intrins: ADC147001Mont. ADS940.0 Socializations.8		
uite en			ĥ
ter Φ. Φ. Φ. Φ. Φ. Φ. Φ. Φ. Φ. Φ.	<pre>/* 'Phones' the application parameters have if you want to Change it to none-default value '/ ** 'Phones' the application marketers have if you want to Change it to none-default value '/ ** *********************************</pre>		Î
	<pre>med_dista_functions) india dista_functions india dista_functions india dista_function india dindia dista_func</pre>		
ADOUP2029			1.7
Ad			* 3 X
Messages		File	Line
c.od Converting Totel number of errors 8 Totel number of vennings: 8			1
(L.	W.		193
Ald Debug Log Finder Files			
adv		Ferrir & Warnines B. In 145 Cel 2	System CAP NUM DVR

图5. IAR中的BIA项目

Freg:10000.00 RzMag:	4161.961914	Ohm .	RzPhase:	-14.760194	LF
Freg:10000.00 RzMag:	4162.443359	Ohm ,	RzPhase:	-14.762573	t LF
Freq:10000.00 RzMag:	4162.443359	Ohm 🖕	RzPhase:	-14.762573	; LF
Freq:10000.00 RzMag:	4162.443359	Ohm ,	RzPhase:	-14.762573	LF
Freq:10000.00 RzMag:	4162.289063	Ohm ,	RzPhase:	-14.758065	LF
Freq:10000.00 RzMag:	4161.961914	Ohm ,	RzPhase:	-14.760194	L F
Freq:10000.00 RzMag:	4162.116211	Ohn ,	RzPhase:	-14.764697	LF
Freq:10000.00 RzMag:	4162.443359	Ohm ,	RzPhase:	-14.762573	LF .
Freq:10000.00 RzMag:	4162.443359	Ohm ,	RzPhase:	-14.762573	; LF

图6. 测量结果显示在终端上

AN-1557

测量结果

终端上显示的测量结果如图6所示。由于2线生物阻抗测量 测量的是被测阻抗、接触阻抗、限流电阻和隔离电容,因 此幅度约为4162Ω。

对于图7,

 $\begin{aligned} RzMag &= R_{LIMIT1} + XC_{ISO1} + R_{EC1} + R1 \parallel R2 + XC_{ISO1} + R_{EC2} \\ &+ XC_{ISO2} + R_{LIMIT2} \end{aligned}$

其中:

RzMag为幅度,或R1||R2+C1。 RLIMIT1是一个符合IEC 60601的限流电阻。 XCIS01为CIS01的电抗。 REC1是接触阻抗。 R1用于模拟生物阻抗。 R2用于模拟生物阻抗。 REC2是接触阻抗。

XCISO2为CISO2的电抗。

RLIMIT2是一个符合IEC 60601的限流电阻。



图7. 带限流电阻和隔离电容的电路

Impedance Profiling_2wireIEC.xls工作簿提供了计算预期 结果的公式,其中考虑了限流电阻、隔离电容和接触阻抗。

在EVAL-AD5940BIOZ评估板上, RLIMIT1和RLIMIT2均为1 k, CISO1为15 nF, CISO2为470 nF。假设REC1为0。将这些值输入 工作簿 (如图8所示),理论值非常接近测量值。误差小得 益于组件的容差。

User Input	Value	Default on Bio-Electric
Frequency	10000	
C_ISO1	1.50E-08	1.50E-08
R_Limit	1.00E+03	1.00E+03
R_EC1	0	0
R1	2.00E+03	
R2	1.00E+10	
C1	1.00E+04	
R_EC2	1000	0
C_ISO2	4.70E-07	4.70E-07
	Magnitude	Phase
ZTOTAL =	4147.142801	-0.267179495
ZTOTAL =	4147.142801	-15.30825742

图8. Impedance Profiling_2wireIEC.xls工作簿

ECG

ECG测量理论

ECG在每个心动周期期间,测量心脏的电活动如何随着动作 电位在整个心脏传播而随时间变化。ECG不直接测量心脏中 的细胞去极化和复极化,而是测量在给定时间点引起其膜电 位变化的细胞群的相对累积量。当这些心房和心室细胞发生 去极化和复极化时,ECG显示心脏的电位差。

通常是将两个电极直接放置在皮肤上并读取电极之间的电位 差来执行ECG。这种方法是可行的,因为这些信号在全身传 播。检测到的波形特征不仅取决于所涉及的心脏组织的量, 还取决于电极相对于心脏中偶极的方向。当从不同的电极位 测量时,ECG波形看起来略有不同,并且通常是使用许多不 同的电极位 (例如肢体导联或心前区)或配置 (如单极、双 极和改进双极)获得ECG。

出于ECG需要,可将身体视为大体积导体。身体充满被导电 离子流体包围的组织。心脏悬浮在这些导电介质的内部。在 心动周期期间,心脏响应沿心脏腔室移动的动作电位而收缩。



图9. 典型的心电图波形与房室和半月瓣活动的时间相比, 心室处于收缩期或舒张期的心动周期时段

采用AD5940和AD8233的ECG解决方案

本节介绍如何使用AD5940和AD8233进行ECG测量。将四个 测量电极连接到AD5940的开关矩阵。图10突出显示了ECG测 量的信号链。将电极E4直接连接到AD8233的右腿驱动(RLD) 输入端。闭合AD5940开关矩阵上的内部开关,同时闭合开关 P5和P6,并通过AFE2连接到AD8233 IN +输入端,从而把E1 和E2连接起来。闭合内部开关N7和内部开关N1,通过AIN0 和AFE3将E3连接到AD8233。将AD8233的输出连接到AD5940 上的辅助输入端AIN6。

AD5940使用序列器存储测量命令。主微控制器(本例中为 ADuCM3029)将所需命令写入命令存储器。序列器运行命令, 与微控制器无关。首先运行初始化序列以配置基准电压源、 开关矩阵、ADC输入源和ADC滤波器。测量序列定期运行, 使用用户自定义采样频率,从AIN6引脚上的AD8233采样的 ECG数据。



图10. AD5940和AD8233的信号链

进行ECG测量

硬件设置

评估套件中包含的EVAL-AD5940BIOZ板无需修改硬件即可 使用。AD8233引脚上连接了许多表贴电阻和电容,用于设置 系统带宽。在EVAL-AD5940BIOZ板上,选择的元件用于监护 带宽(0.34 Hz至38 Hz),系统增益为296。为了计算不同截 止频率下的适当滤波器无源器件选取值,下载AD8232产品页 面上列出的AD8232_Filter_Design_Tool.zip文件。

此运动带宽(7Hz至21Hz)适用于非临床应用,如注重ECG 峰值的保健手表。对于关注ECG波形的其他方面(如P波、Q 波、S波或T波)的应用,则需要监护带宽。

AD5940评估套件配有定制型的心电图电缆。这些电缆可以 连接到ECG模拟器以测试硬件。将RLD电极连接到F-。将 右手(RH)连接到F+和S+。将左手(LH)连接到S-,如图11 所示。

切勿将EVAL-AD5940BIOZ评估板连接到身体。



AN-1557

图11. ECG模拟器连接到评估板

固件设置

AD5940软件开发套件有一个专门的ECG测量的示例。若要在 评估硬件上执行ECG测量, 用户可以使用ADI公司的 SensorPal GUI工具或IAR Embedded Workbench固件示例。

若要快速进行原型设计,请使用SensorPal工具。SensorPal提 供了许多可配置的参数来定义测量,还提供了快速绘图机制。

或者,打开软件开发套件中的Examples文件夹,然后依次选 择AD5940_ECG > ADICUP3029 > ADICUP3029.eww。打开 ADICUP3029.eww文件,在IAR Embedded Workbench中打开 项目工作区。

按照下述步骤编译和运行项目:

- 1. 编译和构建项目(请参阅AD5940用户指南维基页面)。
- 2. 启动调试器,开始执行代码。
- 3. 打开RealTerm等终端程序,将波特率配置为230400。

4. 选择EVAL-ADICUP3029将连接的COM端口。

然后,通过UART流式传输测量结果,这些结果也可以保存 为文件,以便进行分析并创建图形。

要修改应用程序默认参数,请使用AD5940ECGStructInit (void)函数。AppECGCfg_Type数据结构包含应用程序的可配 置参数。有关固件的更多详细信息,请参阅软件开发套件doc 文件夹中的AD5940_Library_and_examples.chm文件。

<pre>>bbig File Display to the second symph to the second symph to the second symph to show to prist date to DMET. Limited to isonet. "/ ## Shanp ## Sha</pre>	Vorkspace	• 4 ×	AD5940Main.c ×
First view is A054020500000000000000000000000000000000	hebwg		1 stars h
ADIOL/1903	Fee A SUCUP3129 - Chebug - A SUCUP3129 - Chebug -		<pre>vmid ASSM00505C05CutLinit(wmid) { septCosts_Type *pCGp; septCosts_Type *pCGp; septCosts_Type *pCGp; septCosts_Type *pCGp; septCosts_Type *pCGp; septCosts_Type * Type * Seter KnownerD is too slow to print data to UMET. Limited to 1000Et. ** septCosts_Type * Type * Seter KnownerD is too slow to print data to UMET. Limited to 1000Et. ** septCosts_Type * Type ** septCosts_Type *</pre>
	ADICUP3029		
ald	ald		

图12. IAR Embedded Workbench中的ECG固件

🎭 RealTerm: Serial Capture Program 2.0.0.	70 - • •
$\begin{array}{l} 1:185 = 326464i\\ 1:186 = 32669ii\\ 1:186 = 32669ii\\ 1:188 = 32669ii\\ 1:188 = 32661ii\\ 1:190 = 32660ii\\ 1:190 = 32660ii\\ 1:190 = 32660ii\\ 1:190 = 32760ii\\ 1:190 = 32760ii\\ 1:190 = 32266ii\\ 1:190 = 32266ii\\ 1:190 = 32266ii\\ 1:190 = 32266ii\\ 1:190 = 32265ii\\ 1:190 = 32265ii\\ 1:190 = 32260ii\\ 1:190 = 3260ii\\ 1:190 = 3260ii\\$	
Display Port Capture Pins Send E	Echo Port I2C I2C-2 In Clear Fre
Start: Overwrite Start: Append	Stop Capture 6 Bytes 0000000
File C:\Users\mlambe\Desktop\ECG.csv	
Capture as Hex	TimeStamp © None C Matlab C Unix C YMDHS C UnixHex
	Char Count:67727 CPS:0 Port

图13. ECG ADC结果

4线BIA

4线BIA测量理论

4线BIA测量法用高精度交流电压源激励交流电压(V_Ac)已知 的传感器。同时,在传感器上施加共模电压。若要计算阻抗, 请测量从未知阻抗流过的电流(I)和未知阻抗上的电压。

用下式计算阻抗:

 $\left|Z\right| = V_{Z_{UNKNOWN}} / I$



图14.4线生物阻抗拓扑结构

在实际应用中, 医疗设备必须符合IEC 60601标准。该标准限 制了可以施加到身体的直流和交流电压的量。在图14中, 用 分立隔离电容 (C_{IS01}、C_{IS02}、C_{IS03}和C_{IS04})确保在整个身体中 不会发生直流电压。R_{LIMT}限制提供给传感器的电流, 以达到 IEC 60601标准的要求。R_{ACCESSx}表示连接到未知阻抗的电极的 电阻。

采用AD5940的4线BIA解决方案

如4线BIA测量理论部分所述,4线生物阻抗解决方案需要精 密交流电压源、高精度电流表和精密差分电压表。

精密交流电压源部分、高精度电流表部分和精密差分电压表部分描述了在AD5940上实现这些元件的方式。

精密交流电压源

AD5940使用高速DAC和波形发生器来产生精密交流电压。内 部差分检测配置将CE0和AIN1连接回激励缓冲器,从而保证 了电压源的精度。可编程开关矩阵中的开关D5将激励环路的 输出端连接到与传感器相连的CE0引脚。正弦波发生器产生 正弦波,并通过12位高速DAC和激励放大器输出。

高精度电流表

AD5940采用高速、高精度TIA,将来自传感器的电流转换为 电流,由ADC进行测量(见图15)。TIA通道测量响应电流, 并由内部1.11 V源精确偏置。使用开关矩阵将T通道和N通道 连接在一起,以便在测量的电流上实现精确的检测能力。图 15显示了AD5940的传感器、高速TIA和ADC之间的连接。在 图15中,HSTIA_P是从高速TIA到ADC多路复用器的复用信 号。ADC以800 kSPS的速率转换电流测量结果。对数据执行 DFT。在AD5940上实施了DFT。DFT点的数量最多可配置为 16,384个。AD5940计算实部和虚部,主微控制器计算传感器 的未知阻抗。

精密差分电压表

AD5940使用低功耗DAC和低功耗TIA,通过AIN4/LPF0引脚 设置AIN2和AIN3/BUF_VREF1V8之间的共模电压。将低功耗 DAC的V_{BIAS}输出端连接到低功耗TIA正输入端。低功耗DAC 配置为输出精确的1.1 V。连接低功耗TIA输出端的内部R_{FILTER} 电阻。将共模电压(V_{CM})连接到AIN4/LPF0,后者有一个接地 电容,可形成低通滤波器。

计算BIA的分立式组件

系统中需要许多分立式组件以确保安全性和准确性。本节介 绍用于选择合适的隔离电容、面向高速TIA的增益电阻和限 流电阻的各种计算。

限流电阻

为达到IEC 60601标准的要求,要限制进入身体的交流电量。 最大允许交流电流为:50 kHz时为500μA,60 kHz时为600μA。 计算RLIMIT电阻值时,AD5940的最大输出电压为1.2 V pp (0.4243 V rms)。将最大允许交流电流设为最大值的80%或 400μA rms。下式是这些值的结果:

$$R_{LIMIT} = \frac{0.4243 \text{ V rms}}{400 \ \mu\text{A rms}} = 1060.66$$

这样,选择了一个1 kΩ RLIMIT,并将其连接到在AD5940的CE0 引脚上。这里的计算忽略了CISOx,因其太小。

隔离电容

为达到IEC 60601标准, 允许进入身体的最大直流电流为 10μA。在此应用中,由于增加了隔离电容,可保证直流电流 为零。为隔离电容选择的值为0.47μF,因为0.47μF电容足够大, 有适用于可穿戴电子设备的小型封装可选。将CE0上的隔离 电容Cisoi修改为15 nF,如此,该电容就可用于EDA和BIA测 量。有关计算细节,请参阅EDA部分。

高速TIA增益电阻

为了计算高速TIA的增益电阻R_{TIA},首先要计算高速TIA的最小阻抗和最大电流。在下面的等式中,R_{ACCESSIMIN}和R_{ACCESS2MIN}表示连接传感器的引脚的电阻,假设为0Ω。求解该式可得: Z_{MIN} =1.2kΩ。

$$\begin{split} Z_{MIN} = &\sqrt{r^2 + i^2} \\ = &\sqrt{ \begin{pmatrix} R_{LIMIT} + R_{ACCESS1_{MIN}} + Z_{UNKNOWN_{MIN}} + R_{ACCESS2_{MIN}} \end{pmatrix}^2 } \\ + & \left(XC_{ISO1_{MIN}} + XC_{ISO2_{MIN}} \right)^2 \end{split}$$

其中:

ZUNKNOWNMIN在本式中假定为200Ω。 XCISO1MIN和XCISO2MIN在50kHz时为67.73Ω。

最大电压为600 mV峰值。进入TIA的最大电流 = 600 mV,进 入Z_{MIN} =500μA。TIA输出端的峰值电压= 900 mV峰值,在ADC 范围内。故, R_{TIA} = 900 mV 峰值 (500 μA峰值) = 1.8 kΩ。 无1.8kΩ。AD5940上的R_{TIA}选项。故选择1kΩ选项。



图15. 生物阻抗信号路径

计算ZUNKNOWN

AD5940用序列器存储命令。主微控制器将所需命令写入命令存储器, AD5940自动执行命令。序列器运行命令并使用DFT 实部和虚部结果填充数据FIFO, 用于电压和电流测量(总共 四个数据点)。

主微控制器读取数据FIFO并使用实部和虚部DFT结果,计算 未知阻抗。使用以下各式计算传感器的阻抗:

电压测量幅度 =
$$\sqrt{r^2 + i^2}$$

电压测量相位 = $\tan \frac{-1i}{r}$

若要计算阻抗,请使用欧姆定律,将电压幅度除以电流幅度。 使用RTTA将电流测量值转换为电压。必须考虑该增益。因此, 用于确定未知阻抗的等式如下:

$$|Z_{UNKNOWN}| = \frac{e E E E E}{e i \pi E} \times R_{TIA}$$

进行BIA测量

硬件设置

执行BIA测量需要EVAL-ADICUP3029、EVAL-AD5940BIOZ 和AD5940 Z测试板。按图1所示方式把板堆叠起来。

EVAL-AD5940BIOZ板上的跳线对BIA测量没有任何影响,可以保持默认位置。

在AD5940 Z测试板上有五个开关组S1至S5。S2、S3、S4和S5 用于模拟接触阻抗和引脚阻抗。S1用于模拟身体阻抗。要测 试测量精度,请将S2至S4上的所有开关设置为开启位置,这 会将接触阻抗和引脚阻抗设为零。打开S1上的开关组9,将未 知阻抗值设为2kΩ,如图16所示。



图16. AD5940 Z测试板配置

固件设置

AD5940软件开发套件有一个专门的BIA测量示例。若要在评估硬件上执行BIA测量,用户可以使用ADI公司的SensorPal GUI工具或IAR Embedded Workbench固件示例。

若要快速进行原型设计,请使用SensorPal工具。SensorPal提 供了许多可配置的参数来定义测量,还提供了快速绘图机制。

或者,打开软件开发套件中的Examples文件夹,然后依次选 择AD5940_BIA > ADICUP3029 > ADICUP3029.eww。打开 ADICUP3029.eww文件,在IAR Embedded Workbench中打开 项目工作区。

按照下述步骤行动项目:

- 1. 编译并构建项目。
- 2. 启动调试器,开始执行代码。
- 3. 打开RealTerm等终端程序,将波特率配置为230400。
- 4. 选择EVAL-ADICUP3029将连接的COM端口。

测量结果通过UART流式传输,可以保存到文件中以进行分析。

要修改应用程序默认参数,请使用AD5940BIAStructInit(void) 函数。AppECGCfg_Type数据结构包含应用程序的可配置参数。有关固件的更多详细信息,请参阅软件开发套件doc文件 夹中的AD5940_Library_and_examples.chm文件。

AN-1557

ADEDUP3028 - IAR Embedded Work	Seruh DE ARM \$201		0 0 0
File Edit View Project CNSIS-CAP	Tools Window Help		
DOBP B KOG DC	- · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·		
Workspace + a 3	Configuration and ADSIdeMains × stamps ADDIFFORM ACTABATH Statistication		
Debeg -			40
The OLDERATING UNDER CONTROL OF	<pre>Ministry to make the second seco</pre>		, E
2000-361			1.5
lord :			* # X
Missiegen E.Ovf Cotiverling Totel number of errors 8 Totel number of errors 8		Fie	Lee •
4			
Late Canadian Environment			
And the second se			

应用笔词

图17. IAR中的BIA项目

reg:50000.00 ReHai caption (application (application)) reg:50000.00 ReHai (application)) RePhineq: 50000.00 reg:500000.00 ReHai (application)) R	Acc: 0.070154 Lt Acc: 0.072517 Lt Acc: 0.070154 Lt
Display Port Capture Pins Send Echo Port Baud 230400 Port 69 Echo Port 90 Bits 1 bit 2 bits 3 bits 3 bits 3 bits 3 bits 4 bits	I2C I2C-2 \n Clear Free: Open Spy ✓ Change _D Software Flow Control
C Mark C 6 bits C Space C 5 bits C DTR/DSR C RS485-rts	Winsockis D C Rew R Telnet BI

图18. 测量结果显示在终端上

EDA

EDA测量理论

EDA是伏安测量值。若要测量未知阻抗,要将一个交流激励 信号施加于未知阻抗上。测量未知阻抗两端的电压。然后, 测量流过未知阻抗的电流。通过TIA将电流转换为由ADC测 量的电压。对ADC数据执行DFT以获得电流值和电压值。使 用实部和虚部,计算幅度,求出Vzunknown和Izunknown。

使用以下公式计算传感器的未知阻抗大小:



图19. EDA 测量图

使用AD5940的EDA解决方案

本节介绍用于执行EDA阻抗测量的AD5940的模块。如EDA测量理论部分所述,EDA测量需要激励电压、测量Vzunknown和测量Zunknown电流。

激励信号

AD5940使用其波形发生器和低功耗DAC,产生低频正弦波 (≈100 Hz)。正弦波通过连接到CE0引脚的恒电位器放大器施 加到传感器上(如图21所示)。

测量电压

连接CE0引脚和SE0引脚之间的未知阻抗。将SE0连接到低功 耗TIA的反相输入端。将高精度基准电压源连接到TIA以维持 共模。若要测量ZUNKNOWN两端的电压,测量CE0上的电压,选 择CE0引脚上的电压(VCE0)作为ADC的输入。然后启动测量序 列,并对测量数据执行DFT。

实部和虚部存储在数据FIFO中,由主控制器读取。

测量ZUNKNOWN电流

要测量ZUNKNOWN电流,请使用与电压测量时相同的设置。但 是,此时电流是通过TIA测量的。选择低通滤波器输出 (LPTIA_LPF0)作为ADC的输入。重新运行测量序列,然后对 ADC数据执行DFT。实部和虚部存储在数据FIFO中,并由主 控制器读取。

计算ZUNKNOWN

AD5940用序列器存储命令。主微控制器(在本例中为 EVAL-ADICUP3029)将所需命令写入序列器。这些命令设置 DAC、ADC和TIA以进行测量。序列器自动执行命令,与微 控制器无关。首先执行电压测量。数据FIFO已满时会产生中 断。然后微控制器读取FIFO并存储DFT结果的实部和虚部。 然后,配置ADC多路复用器为将低功耗TIA、低通滤波器输 出连接到ADC以测量电流。重新运行以上序列,AD5940在数 据FIFO已满时产生中断,提醒主控制器读取数据。

通过下式确定ZUNKNOWN:

$$\begin{split} \left| V_{\text{MAG}} \right| &= \sqrt{r^2 + i^2} \\ \left| I_{Z_{\text{UNKNOWN} MAG}} \right| &= \sqrt{r^2 + i^2} \\ \left| Z_{\text{UNKNOWN}} \right| &= \frac{\left| V_{\text{MAG}} \right|}{\left| I_{Z_{\text{UNKNOWN} MAG}} \right|} \times R_{TIA} \end{split}$$

其中r和i分别为电流和电压DFT测量值的实部和虚部。

计算EDA的分立式组件

系统中需要许多分立式组件以确保安全性和准确性。本节介 绍用于选择合适的限流电阻和隔离电容的各种计算。

计算限流电阻

用一个1kΩ R_{LIMIT}进行BIA测量。由于两种测量共用同一电极, 因此EDA的R_{LIMIT}也为1kΩ。

隔离电容

CISO2是EDA回路上的电容,为0.47µA,与BIA测量值相匹配。 选择合适的CISO1值,确保在最坏的情况下身体中的交流电流 均不会超过10µA。

有关最坏情况,请参见图20,其中,电阻体=0Ω且电容体短路。在这些条件下,电路中流过的电流最大。使用以下等式 计算EDA应用的合适隔离值。



$$V_{EXC_{RMS}} = 1.1 V_{PEAK} / \sqrt{2} = 0.777$$

其中:

IACRMSLIMIT是人体内允许的最大交流电流。

*I*_{EXCRMS} = 1.1 *V*_{PEAK} /√2, 其中, 1.1 V是低功耗DAC的最大范围。 *f*_{EXC}为100 Hz。

要查找Cisoi的最大值,请重新分配前两个等式,如下所示:



考虑电阻和电容在最差情况下的容差,如下所示:

- RLIMIT 为1%
- C_{ISO2}为5%
- CISO1为20%
- f_{EXC}为10%

使用这些值,计算CISOI的等式如下:



其中, CISO1 < 14 nF。



图20. EDA 等效电路



图21. EDA信号路径

最大限度地降低永远开启应用的功耗

EDA应用案例利用了AD5940的一项关键省电特性。AD5940 有这样一项特性,其中,低功耗回路可以在32kHz时钟下运 行。从休眠状态唤醒后,AD5940系统时钟切换到32kHz振荡 器(LPMODECLKSEL位0 = 0x1)。波形发生器、低功耗DAC、 ADC和DFT引擎在32kHz振荡器上运行。在此模式下捕获所 有数据和DFT结果,最大限度地降低AD5940的功耗。在测量 序列结束时,AD5940切换回16 MHz时钟,禁用所有模块, 然后返回休眠状态。AD5940的采样率为4Hz,DFT数为16, 总平均功耗为 66μA。

读回数据

当AD5940基于32 kHz振荡器上运行时,无法通过SPI接口与器件通信。确保SPI事务在正确的时间发生。图22显示了采样率为4 Hz时,EDA测量的时间线。测量完成后,主微控制器可以在200 ms窗口内回读数据。确保不违反此限值。



图22. EDA测量时间线

进行EDA测量

硬件设置

执行EDA测量,需要EVAL-ADICUP3029、EVAL-AD5940ARDZ、 EVAL-AD5940BIOZ和AD5940 Z测试板。

EVAL-AD5940BIOZ上的默认跳线设置与EDA测量无关,可以保留原样。

在AD5940 Z测试板上, S2和S3用于EDA测量。取下P1跳线, 然后闭合S9。



图23. 用于EDA的AD5940 Z测试板设置

固件设置

AD5940软件开发套件有一个专用的EDA测量示例。若要在评估硬件上执行EDA测量,用户可以使用SensorPal GUI工具或IAR Embedded Workbench固件示例。

若要快速进行原型设计,请使用SensorPal工具。SensorPal提 供了许多可配置的参数来定义测量,还提供了快速绘图机制。

或者,打开软件开发套件中的Examples文件夹,然后依次选 择AD5940_EDA > ADICUP3029 > ADICUP3029.eww。打开 ADICUP3029.eww文件,在IAR Embedded Workbench中打开 项目工作区。

按照下述步骤行动项目:

- 1. 编译并构建项目。
- 2. 启动调试器,开始执行代码。
- 3. 打开RealTerm等终端程序,将波特率配置为230400。
- 4. 选择EVAL-ADICUP3029所连接的COM端口。

测量结果通过UART流式传输,可以保存到文件中以进行 分析。

要修改应用程序默认参数,请使用AD5940EDAStructInit (void)函数。AppEDACfg_Type数据结构包含应用程序的可配 置参数。有关固件的更多详细信息,请参阅软件开发套件doc 文件夹中的AD5940_Library_and_examples.chm文件。

AN-1557

0 13 HOEDAStructinit) -----NOT THE AppEDALED, Type *plitp: AppEDAtesCfg(apCfg); pCfg->fundegim = 512; ptdp-sideoctik/ang + L/t00Fing west spinster man statke unstil_t latter unstil_t temp: AppEndicationphoff, APHOFF_SIER;) /* Initiatize Kik application. Previde a buffer, which is used to store sequence comments */ AppEndicationFTMs_Had7, Si; /* Control Eik sessiment to store, Second parameter has no sensing with this romand. */ 43+(1) /* Check of interrupt flag which will be not when in ##(#1500_GerMCDarPing()) 210 fordrawt + in $^{\prime\prime}$ Control the application at any time M $^{\prime\prime}$ Control the application at any time M excitation moltage periodically 4 (24)(adapt \sim 34) (3 DDA 4000 82929 Messeges c.o.d. Converting 6807-026 Total number of errors 0 Total number of warnings

图24. IAR中的EDA可配置参数

IA:108.12) Slf IA:108.12) Slf IA:108.12) IA:108.12)	(Ohn , I = -23 (Ohn , I = -23 (Ohn , I = -23	1832,-42562 1832,-42539 1832,-42533	[mag:48779.996 [mag:48759.929 [mag:48754.699	6094 EDA_Mag 688 EDA_Mag 6313 EDA_Mag	108.645927) 108.690643) 108.702301)	:Ohn,9.20421 :Ohn,9.20042 :Ohn,9.19943	
SLF A:108.12 SLF A:108.12 SLF	0hn,I=-23 0hn,I=-23	844,-42532 836,-42569	[mag:48759.69] [mag:48788.058	406 EDA_Mag 1594 EDA_Mag	108.691170) 108.627975)	:0hm,9.20037 :0hm,9.20573	
and an Boat	la i	low low	. Is . s .l	in luce	lucha Clas	- Eronaul 2	
Isplay Port	Capture	Pins Sei	nd Echo Port	120-2		Status	1
aud 230400	Port Data Bits	Stop Bits	C 2 bits	Open Spy Software Flo	Change W Control Xon Char: 17	Status Disconnee RXD (2) TXD (3)	1
Parity None C Odd C Even C Mark C Space	Port E Data Bits	Stop Bits Top B	C 2 bits	Open Spy Software Fid Receive	Change Change Control Xon Cher: 17 Xoff Cher: 19 Control Con	Status Disconner RXD (2) TXD (3) CTS (8) DCD (1) DSR (6) Bing (9)	H H

图25. EDA 测量结果

使用与责任限制

本应用笔记中描述的应用是用于EVAL-ADICUP3029的AD5940和AD8233。除了评估板用户指南中包含的使用条款外,还应理解并同意,不得将评估板或设计用 于诊断目的,并且不得与人或动物连接。本评估板仅限评估和开发使用,不可用作最终产品,或作为最终产品的一部分使用。在这些应用中以任何方式使用本 评估板或设计,则由使用者自行承担相关风险;由于未经授权使用而给ADI公司、其附属机构、员工、董事、管理层、委托人和代理人带来的全部责任和费用, 应由使用方赔偿全部损失。使用方全权负责遵守与此类使用相关的所有法律和法规要求。

©2019 Analog Devices, Inc. All rights reserved. Trademarks and registered trademarks are the property of their respective owners. AN16807sc-0-3/19(0)



www.analog.com/cn

应用笔记