

支持超低功耗物联网节点信号处理设计的ECG前端IC

作者: David Plourde



当系统设计师寻找高能效的信号调理器件时,他们可能会发现,市面上能够在 $100\text{ }\mu\text{A}$ 电源电流下工作的IC很少,而其中具有小型封装的器件就更是屈指可数了。对于日益增多的无线传感器网络(WSN),电池寿命和电路板空间逐渐成为关键性规范,因此缺少可供使用的选项也许会令人沮丧。在搜索低功耗边缘节点物联网器件的过程中,某些模拟前端IC(比如可穿戴产品的心率监测器)可能根本不会出现,或因其针对特定应用而不予考虑。然而有一款ADI ECG前端IC,它可以工作于 $50\text{ }\mu\text{A}$ 电源电流下并具有小巧的 $2\text{ mm}\times 1.7\text{ mm}$ WLCSP封装,这款器件值得您在设计物联网节点应用时稍加考虑。如果更深入地研究,人们会发现其灵活架构实质上是一个仪表放大器(IA)和几个运算放大器,可通过配置形成一些实用的超低功耗信号处理电路,其适用范围不仅仅限于医疗或保健应用。

简化的单导联心电图(ECG)前端如图1所示。它包括一个间接电流模式IA,具有独立的传递函数:

$$IA_{OUT} = \left(1 + \frac{Rf/b}{Rg}\right) (V_{IN}) + Ref$$

在此前端示例中,固定增益为100。IA的基准源由高通放大器(HPA)驱动,该放大器配置为反馈网络中的积分器,其输入连接到 IA_{OUT} ,通过外部电容和电阻设置截止频率。HPA将迫使HPDRIVE达到任何所需电压以保持HPSENSE以及 IA_{OUT} 处于基准电压。该电路形成一个一阶高通滤波器:

$$fc = \frac{100}{2\pi RC}$$

对于诊断级ECG,截止频率通常设为 0.05 Hz ,而对于仅检测心率的保健应用,设为 7 Hz 可能比较合适。高通滤波器函数能够解如何在放大高频ECG信号(1 mV 至 2 mV)的同时抑制大直流半电池电位(因电极/皮肤接触而导致)以及与ECG测量相关的低频基线漂移的问题。由于直流半电池电位(高达 300 mV)抑制发生在IA的输入端,因此这种架构能够获得很大的增益。另一个益处就是可以抑制IA的失调和失调漂移。监测关于基准电压HPDRIVE将显示自动校正输入失调的反相形式。

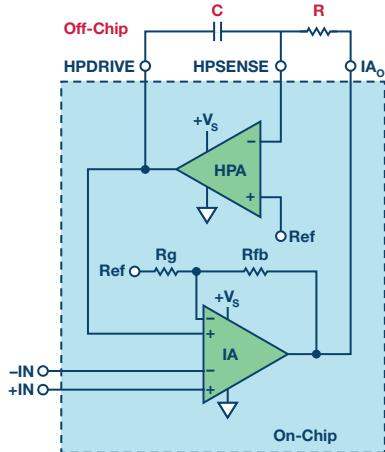


图1. 简化的单导联ECG前端。

虽然此设计的初衷是针对ECG应用,但实际上任何需要放大低频小信号(IA带宽 $<1\text{ kHz}$)的应用都可受益于其低功耗和小尺寸。如果要进行直流测量,则仅需对此电路进行简单修改。图2显示固定增益为100的直流耦合IA。就是将图1中的R和C去掉,并将HPSENSE短接到HPDRIVEA,从而使HPA成为一个单位增益缓冲器。这种方式也会迫使IA基准保持基准电压。在此情况下应考虑到IA的失调电压。

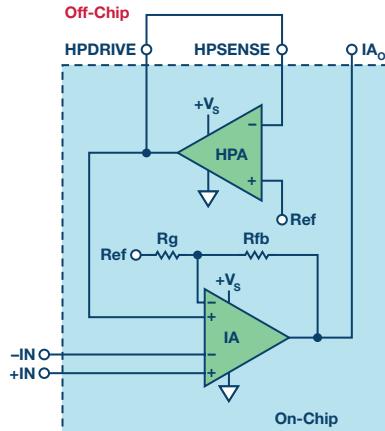


图2. 固定增益为100的直流耦合IA。

如果增益为100太高,或带宽为1 kHz太低,则可按照图3所示修改此电路。这时HPA配置为一个反相放大器,增益为 $-R2/R1$,其输入为 IA_{OUT} 的反馈。新的传递函数可简化如下:

$$IA_{OUT} = \frac{V_{IN}}{\left(\frac{1}{100} + \frac{R2}{R1}\right)} + Ref$$

将HPA配置为衰减器($R2 < R1$)可实现低于100的增益。由于差分输入的限值为300 mV,为确保电路的稳定性,建议增益不应低于10。下表中列出了一些可供考虑的增益配置。

表1. 具有不同增益和带宽配置的直流耦合IA

R2	R1	增益	带宽
短路	开路	100	1.2 kHz
10 kΩ	1 MΩ	50	2.4 kHz
40 kΩ	1 MΩ	20	6.5 kHz
90 kΩ	1 MΩ	10	15.2 kHz

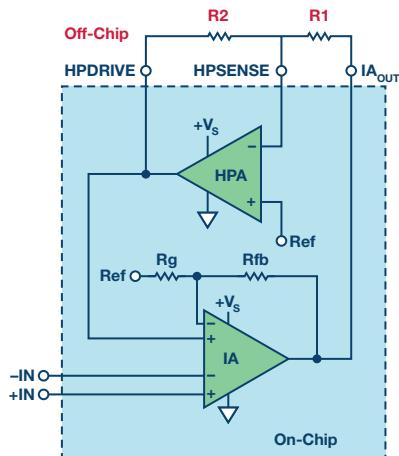


图3. 具有可调增益和带宽的直流耦合IA。

如果直流精度依然很重要,则保留IA增益为100,并按照图4修改电路,以补偿IA及任何附加传感器的失调。调节后的传递函数如下:

$$IA_{OUT} = 100 \left(V_{IN} - \left(\frac{R2}{R1} \right) V_{TUNE} \right) + Ref$$

V_{TUNE} 是用来校正失调电压的源电压,可由微控制器发出的PWM滤波信号提供或由低功耗DAC直接驱动。HPA仍配置为一个增益为 $-R2/R1$ 的反相放大器,可用于进一步调节失调校正范围和分辨率。

对 V_{IN} 进行分解,然后带入上式中,可得目标传递函数:

$$V_{IN} = V_{SIGNAL} + V_{OS}$$

$$V_{OS} = \left(\frac{R2}{R1} \right) V_{TUNE}$$

$$IA_{OUT} = (100) V_{SIGNAL} + Ref$$

总体失调可通过添加未施加 V_{SIGNAL} 的传感器进行补偿。仅需相对于基准源测量 IA_{OUT} ,并调节 $(R2/R1)$ V_{TUNE} 直到该电压足够接近于零。

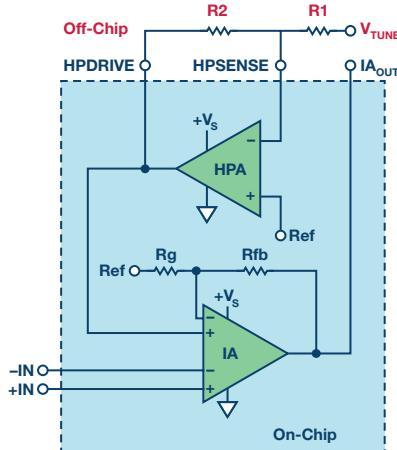


图4. 提供失调补偿的直流耦合IA。

将上述电路配置用于低功耗物联网设计之前,还应了解AD8233 ECG前端解决方案的其他部分。详细电路如图5所示。第一个运算放大器A1并非专用,通常用于提供IA级后的附加增益和/或滤波功能。对于其他传感器应用也同样有益。放大器A2通常用作ECG解决方案中的右腿驱动。IA输入共模的缓冲形式出现在A2负输入端,此时:

$$V_{CM} \sim \frac{+IN + -IN}{2}$$

通常会将此放大器配置成一个积分器,在RLDFB与RLD之间放置一个电容,通过RLD驱动第三电极改善整体系统的共模抑制比(CMRR)。除非此放大器可以构成有用的电路,否则最好是将RLDSDN数字输入接地,同时保持RLD和RLDFB引脚浮空,从而降低放大器的功耗。

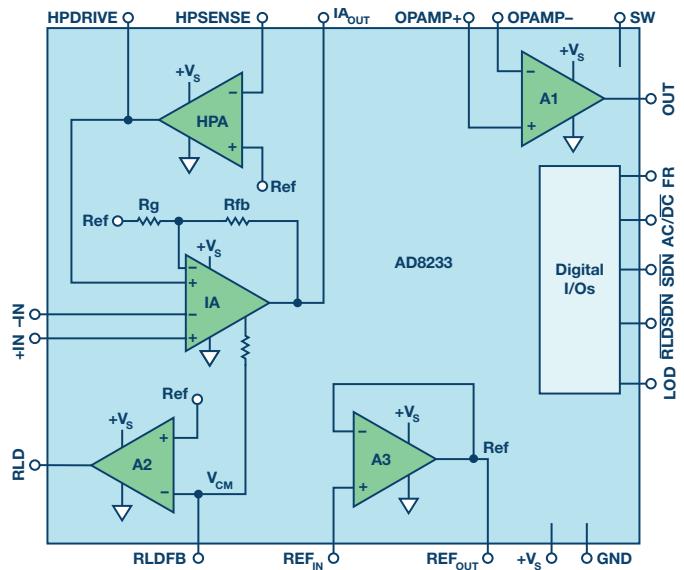


图5. 完整ECG和低功耗信号调理前端。

第三个运算放大器A3是一个集成式基准电压源缓冲器，可同时驱动片内和片外REF_{OUT}处的基准电压。REF_{IN}通常设为+Vs/2，其中单电源+Vs的范围是1.7V至3.5V。可采用一种简易的低功耗解决方案，接入两个10 MΩ电阻作为+Vs至地的分压器，如图6所示。在REFIN和GND之间添加一个电容以协助任何噪声拾取。REF_{IN}也可以由ADC基准源驱动或用于IA输出的电平转换。

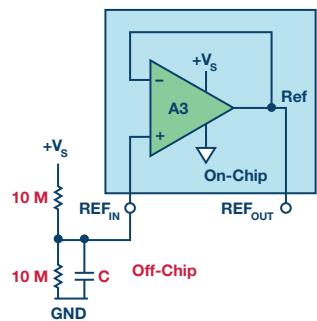


图6. 低功耗基准电压源。

数字输入FR支持快速恢复功能，这对于图1中的交流耦合电路十分有利。在启动过程中或输入端出现直流阶跃事件时，外部电容需要一段时间进行充电。在此情况下，IA将进入轨到轨模式，直到积分器已建立。自动快速恢复可检测到该事件，然后转向与外部电阻并联的更小电阻上并保持一定的时间，从而大幅加速了建立过程。SW引脚用于在必要时快速建立第二个外部高通滤波器。

AC/DC数字输入决定了ECG应用中使用的导联脱落检测方法，但也可用于输入端为其他传感器的断线检测。如果正确配置，当IA的某个输入与传感器断开连接时，数字输出LOD将发出指示。

除了具有尺寸小和活动功耗低的特点，AD8233还具有一个关断引脚(SDN)，可使总电源电流降至1 μA以下。这对于不常进行传感器测量的应用来说十分方便，可以显著延长总体电池寿命。即使在关断模式下，断线检测仍将保持正常工作。

现在我们对整体AD8233芯片有了更详细的了解，那么来看看关于传感器应用的几种不同思路吧。表2列出了构建非ECG电路的入门指南。

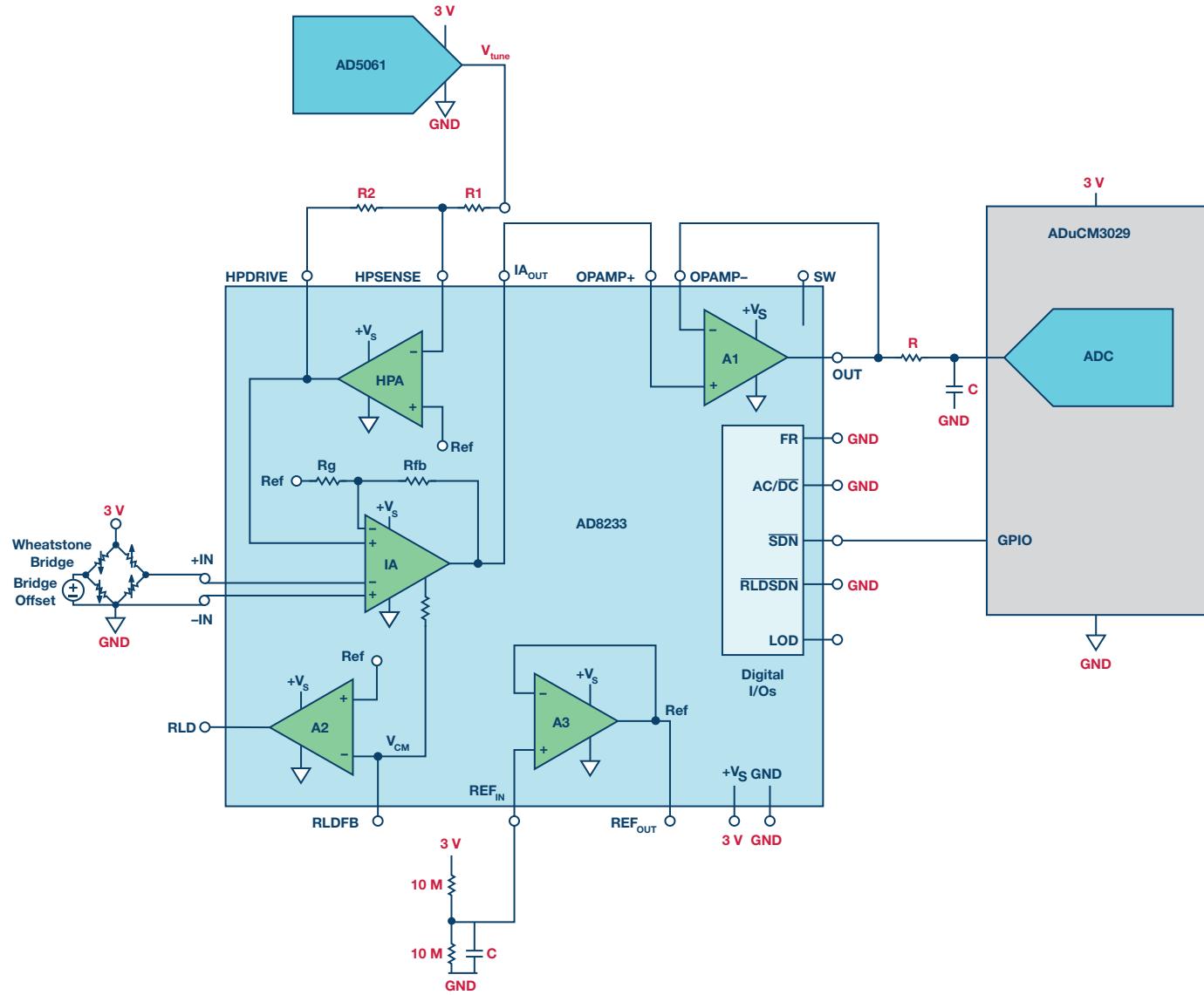


图7. 低功耗压力传感器电路。

表2. 针对非ECG应用的AD8233入门指南

引脚	操作
+Vs至地	电池或调节电压 (1.7至3.5 V)
REF _{IN}	设为+Vs/2—图6
+IN, -IN	连接传感器 (标称V _{cm} = +Vs/2)
HPSENSE, HPDRIVE, IA _{OUT}	参考图1至图4
RLD, RLDFB, SW, LOD	浮空
FR, AC/DC, RLDSDN	接至GND
SDN	接至+Vs (有效), 接至GND (关断)
OPAMP+, OPAMP-, OUT	灵活使用 (IA后的附加增益/滤波)
REF _{OUT}	A1和ADC或uC的外部基准源

针对AD8233的物联网节点应用

基于Wheatstone电桥的压力传感器应用就是适合采用固定增益100和图4失调校正电路的一个好例子。此电桥可自然地将输入共模电压设为+Vs/2。电桥可由REF_{OUT}或非专用运算放大器驱动 (具体取决于测量范围和所需电流)，使得电桥的电源电流在关断模式下被禁用。图7显示的是一个示例电路。由于AD5601 DAC具有低功耗 (在3 V下为60 μ A)、关断引脚和小巧的SC70封装，因此对于校正电桥和IA失调是一个不错的选择。运算放大器(A1)留作占位缓冲器，可用来设置附加增益/噪声滤波和60 Hz带宽。输出放大器驱动超低功耗ARM® Cortex®-M3 (ADuCM3029) 的片上ADC，ADuCM3029采用节省空间的WLCSP封装。ADuCM3029的GPIO可以控制AD8233的关断引脚。

另一个可受益于图4电路的应用就是通过热电偶进行温度测量。K型热电偶在一个很宽的温度范围内几乎呈线性，其Seebeck系数在室温下 (25°C) 约为41 μ V/°C。假设基准端或冷端已补偿，则IA输出将是测量端已获增益的信号~4.1 mV/°C (可使用NIST查询表以获得更准确的结果) 热电偶的输出就是测量端和基准端之间的差分信号，因此，必须添加一个相等的基准端漂移来将其抵消。

要开始此过程，应先确定期望的基准端温度范围，并通过NIST表确定期望漂移。例如：

$$0^\circ\text{C} \text{ 至 } 50^\circ\text{C}: \frac{2.023 \text{ mV} - 0 \text{ mV}}{50^\circ\text{C}} = 40.46 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$$

$$25^\circ\text{C} \text{ 至 } 100^\circ\text{C}: \frac{4.096 \text{ mV} - 1 \text{ mV}}{75^\circ\text{C}} = 41.28 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$$

若在基准端放置一个精确的温度传感器，则测量结果可反馈至V_{TUNE}，并通过-R2/R1调节以获得合适的漂移。请注意，应使温度传感器负向漂移，或者交换IA输入，以确保在IA输出得到正向漂移。为了隔离失调和漂移校正，可将该电路分解成一个加法节点，其中V_{TUNE2}处的失调在-R2/R3作用下固定不变。更新后的传递函数如下：

$$IA_{OUT} = 100 \left(V_{IN} - \left(\frac{R2}{R1} \right) V_{TUNE} - \left(\frac{R2}{R3} \right) V_{TUNE2} \right) + Ref$$

$$V_{IN} = V_{MEAS_{TC}} - V_{REF_{TC}} + V_{OS_{IA}}$$

经过修改的电路如图8所示。请注意，输入共模电压通过+IN上的10 MΩ上拉电阻和-IN上的10 MΩ下拉电阻设置为+Vs/2。此配置可在出现断线事件时将+IN上拉至+Vs，从而实现AD8233的导联脱落检测功能。这种情况可通过LOD引脚监测。AD8233还具有一个集成RFI滤波器，有助于从热电偶进行任何高频拾取。在输入端串联附加电阻可以降低截止频率。

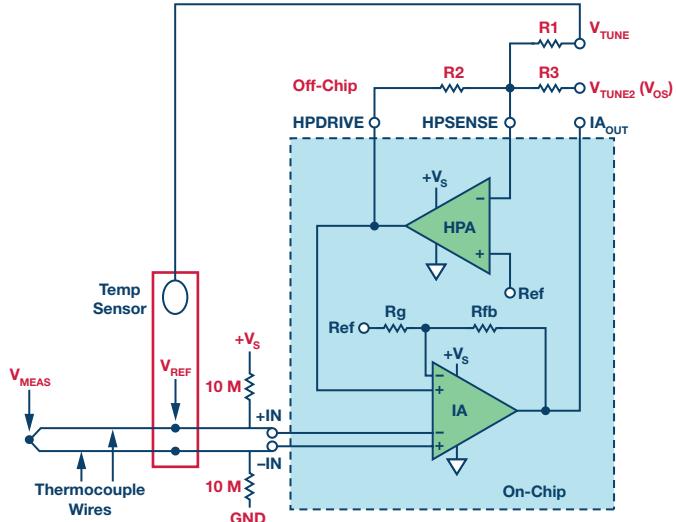


图8. 集成参考结补偿和断线检测特性的热电偶电路。

结语：

对AD8233进行的分析表明，其应用范围不仅仅限于ECG前端。该器件无与伦比地结合了有效低功耗 (50 μ A)、小巧的2 mm x 1.7 mm WLCSP封装、关断引脚以及灵活架构，从而实现了体积更小、重量更轻且电池寿命更长的设计。因此，下次您进行物联网、WSN或任何其他低功耗设计时，不妨考虑一下AD8233器件，想想您能用它实现什么电路。电池的寿命可能就取决于它了。

参考文献

Castro, Gustavo和Scott Hunt。[如何在对电桥传感器进行电路设计时避免陷入困境](#)。模拟对话，第48卷，2014年。

Duff, Matthew和Joseph Towey。[两种简单、精确、灵活的热电偶温度测量方法](#)。模拟对话，第44卷，2010年。

[ITS-90 K型热电偶表](#)。

David Plourde [david.plourde@analog.com] 是ADI公司的模拟IC设计工程师，目前在位于马萨诸塞州威明顿市的线性和精密技术部门工作。他的兴趣相当广泛，包括各种低功耗设计和系统级解决方案，主攻医疗保健应用。David拥有伍斯特理工学院的学士学位 (BS) 和硕士学位 (MS)。他于2006年加入ADI公司担任产品/测试工程师。



David Plourde