

使用 MSP430FR4xx 和 MSP430FR2xx MCU 的片上 VREF 和 10 位 ADC 进行低功耗电池电压测量



Chao Gao, Louis Lu

摘要

MSP430™ MCU 具有低功耗特性，因此广泛用于电池供电型产品。为确保系统电源的稳定性，本应用报告介绍了如何检测电源电压。当电压低于所设电源电压安全阈值时，将出现低压警告。以前的电池电压检测方法通常是使用电源分压器电路并使用 ADC 来采样，而分压器检测法需要额外的外部电路，这会增加系统成本、体积和功耗。

针对电池直接供电的应用，可采用一种基于 MSP430 FRAM 系列 MCU 的低功耗电源电压检测方案，该方案采用片上 10 位 ADC，无需外部分压器电路。本文档同时提供了该方案的验证结果。

关键字：低功耗采样，电池供电

内容

1 引言.....	2
2 ADC 低功耗采样软件设计.....	3
2.1 系统时钟源选择.....	3
2.2 ADC 时钟源选择.....	3
2.3 初始化未使用的 GPIO 引脚.....	4
3 ADC 纠错和实验测试.....	5
3.1 误差校正.....	5
3.2 准确度测试.....	5
4 ADC 时分复用功能实现额外的通道采集.....	5
5 总结.....	5
6 参考文献.....	6
7 修订历史记录.....	6

插图清单

图 1-1. 电池电压片上测量图.....	2
-----------------------	---

表格清单

表 2-1. 不同系统时钟源的功耗.....	3
表 2-2. LPM3 中 XT1CLK 不同时钟源的功耗数据.....	3
表 2-3. GPIO 引脚初始化配置功耗对比.....	4
表 3-1. 使用 10 位 ADC 检测电源电压的测试数据.....	5

商标

MSP430™ and LaunchPad™ are trademarks of Texas Instruments.

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 引言

MSP430FR2xx 和 MSP430FR4xx 产品的 10 位 ADC 模块如图 1-1 所示。ADC 采集通道可直接对内部电压基准（一般为 1.5V，详见数据表）进行采样，ADC 基准电压可配置为电源电压。ADC 输入通道的详细信息可在器件数据表的“ADC 通道连接”表中找到。按照表中的定义配置 ADCMCTL0 寄存器中的 ADCINCHx 位，将 1.5V 基准作为输入电压。对于 ADCSREFx 位，ADC 的基准电压配置为 000b。

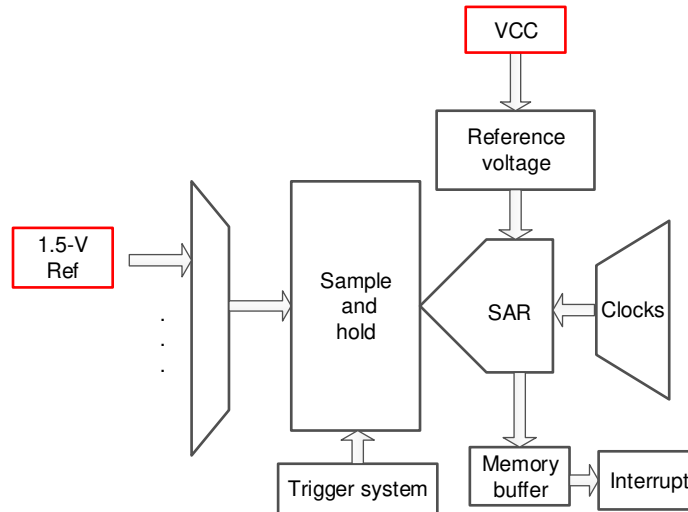


图 1-1. 电池电压片上测量图

方程式 1 所示为如何计算 10 位 ADC 转换结果。

$$N_{\text{ADC}} = 2^{10} \times \frac{V_{\text{in}} - V_{\text{R-}}}{V_{\text{R+}} - V_{\text{R-}}} \quad (1)$$

其中

- N_{ADC} = ADC 转换结果
- V_{in} = 通道采集电压
- $V_{\text{R+}}$ = 正基准电压
- $V_{\text{R-}}$ = 负基准电压

将 V_{in} 设为片上 1.5V 基准源， $V_{\text{R+}}$ 设为 V_{CC} ， $V_{\text{R-}}$ 设为 V_{SS} 。方程式 2 为电源电压计算公式。

$$V_{\text{CC}} = \frac{2^{10}}{N_{\text{ADC}}} \times 1.5 \text{ V} \quad (2)$$

与传统方法相比，片上 ADC 检测法具有以下优势：

- 功耗：传统方法需要外围分压电路，而分压电路会给系统造成额外功耗。
- 成本：采用片上测量法可省去四个电阻和一个晶体管；此外，还可节省 1 到 2 个 I/O 资源。
- 体积：没有外围分压电路，可为用户减小 PCB 尺寸。

2 ADC 低功耗采样软件设计

本文档列出了影响 MSP430FR4xx/FR2xx 器件 (具有 10 位 ADC) 中片上 ADC 采样解决方案功耗的主要因素，并提供了不同配置下的功耗结果。本示例使用 1.5V 内部基准电压。由于 ADC 触发信号不会自动停止或启动 1.5V 内部基准电压，软件可启用 1.5V REF 并等待大约 30μs，然后在 RTC 中断过程中触发 ADC。软件也可在 ADC 转换就绪中断过程中停止基准电压。以下测试基于这种方式。开发人员可选择始终启用内部基准，但会造成更高的功耗。

某些 MSP430FR4xx 和 MSP430FR2xx 器件配有一个 12 位 ADC，其内部基准电压可在 ADC 转换时自动打开和关闭。除了这个例外，对这些器件执行电池电压测量与带 10 位 ADC 的器件相类似；但是，执行细节不属于本文档探讨的范围。

2.1 系统时钟源选择

有两个主要的 MSP430 系统时钟源可用：内部 32kHz 低频 REFOCLK 和外部晶振 XT1CLK。表 2-1 对比了使用这些时钟源的系统时钟 DCOCLK 和 ACLK 的功耗。使用外部 XT1CLK 作为系统时钟源实现了出色的功耗。

表 2-1. 不同系统时钟源的功耗

时钟源 ⁽¹⁾	REFOCLK	XT1CLK
采样频率 (Hz)	1	1
功耗 (μA)	19	1.2

(1) 实验条件：

1. 器件在 1MHz 下使用自由运行 MCLK
2. 测试硬件为 MSP430FR4133 LaunchPad™ 开发套件
3. ADC 时钟源为 SMCLK
4. LPM3 低功耗模式
5. ADC 采样保持时间为 8 个 ADCCLK 周期
6. 未使用的引脚下拉

2.2 ADC 时钟源选择

MSP430 FRAM MCU 中的 10 位 ADC 时钟源选项包括 MODCLK、ACLK 和 SMCLK。在 LPM3 中，MODCLK 和 SMCLK 默认禁用。ADC 转换启动信号可将其启用，并在 ADC 转换完成后再次自动将其禁用。为了突出不同时钟源之间的功耗差异，采样率设为 100Hz。

表 2-2. LPM3 中 XT1CLK 不同时钟源的功耗数据

ADC 时钟源 ⁽¹⁾	MODCLK (5MHz)	ACLK (32kHz)	SMCLK (5MHz)
采样频率 (Hz)	100	100	100
功耗 (mA)	0.131	0.184	0.026

(1) 实验条件：

1. 器件在 1MHz 下使用自由运行 MCLK
2. 测试硬件为 MSP430FR4133 LaunchPad 开发套件
3. XT1CLK 作为时钟源
4. ADC 采样保持时间为 8 个 ADCCLK 周期
5. 未使用的引脚下拉

2.3 初始化未使用的 GPIO 引脚

用户可通过设置寄存器 PxREN 中的相应位来启用片上的上拉或下拉电阻，避免引脚电平浮动。表 2-3 列出了这两个用例的功耗对比数据：

表 2-3. GPIO 引脚初始化配置功耗对比

未使用的 GPIO ⁽¹⁾	未配置	下拉
采样频率 (Hz)	1	1
功耗 (μA)	400	1.2

(1) 实验条件：

1. 器件在 1MHz 下使用自由运行 MCLK
2. 测试硬件为 MSP430FR4133 LaunchPad 开发套件
3. XT1CLK 作为时钟源
4. LPM3 低功耗模式
5. ADC 采样保持时间为 8 个 ADCCLK 周期
6. ADC 时钟源为 SMCLK

3 ADC 纠错和实验测试

3.1 误差校正

使用片上 ADC 测量电池电压，误差主要来自两个方面：ADC 测量误差和 1.5V 基准电压误差。数据表分别列出了 ADC 测量误差和 1.5V 基准电压误差的校准公式。

但是，用于校准 1.5V 基准电压的校准系数仅在 1.5V 基准电压用作 ADC 基准时使用。当 1.5V 基准电压用作 ADC 输入通道时，此校准系数不再适用。由于采用 1.5V 基准电压，它会通过一个基准缓冲器，该缓冲器在 ADC 输入通道上不可用。在这种情况下，仅需校准 ADC 误差。

方程式 3 显示了 ADC 的校准公式。

$$ADC_{\text{calibrated}} = ADC_{\text{raw}} \times \text{Factor}_{\text{gain}} \times \frac{1}{2^{15}} - ADC_{\text{offset}} \quad (3)$$

其中

- $ADC_{\text{calibrated}}$ = 校准值
- $\text{Factor}_{\text{gain}}$ = ADC 增益校准系数
- ADC_{offset} = ADC 失调校准系数

不同系列的校准系数具有不同的内存地址，请参阅器件特定数据表，获取系数 gain 和 ADC_{offset} 的内存地址。

3.2 准确度测试

表 3-1 列出了使用片上 10 位 ADC 检测电源电压的测试数据。

表 3-1. 使用 10 位 ADC 检测电源电压的测试数据

电源 (V) ⁽¹⁾	ADC 原始数据	未校准 (V)	校准后 (V)	误差 (校准后)
2.562	597	2.570	2.569	0.27%
2.812	544	2.820	2.819	0.24%
3.327	461	3.328	3.327	0%

(1) 实验条件：

1. 测试硬件为 MSP430FR4133 LaunchPad 开发套件
2. $\text{Factor}_{\text{gain}} = 0x8011$ ， $ADC_{\text{offset}} = 0$
3. 室温

4 ADC 时分复用功能实现额外的通道采集

由于电池电压变化缓慢，电池电压采集间隔可以较长。在空闲时间，软件可使用 ADC 来获取其他模拟信号。测量其他信号时，ADC 可使用电池电压作为基准电压，比使用 1.5V 基准电压的测量范围更大。此外，可禁用 1.5V 基准电压以降低功耗。但是，使用电池电压作为基准的精度会低于使用 1.5V 基准电压。

5 总结

本文档提出了一种基于 MSP430FR4133 MCU 的解决方案，该方案使用片上 10 位 ADC 对电池电压进行采样，有助于节省成本、PCB 体积和系统功耗。本文档还介绍了低功耗采样软件解决方案，并给出了不同场景下的功耗结果，最后对测量精度进行了校准和测试。

6 参考文献

1. 《MSP430FR4xx 和 MSP430FR2xx 系列用户指南》
2. 《MSP430FR413x 混合信号微控制器》

7 修订历史记录

注：以前版本的页码可能与当前版本的页码不同

Changes from Revision A (November 2019) to Revision B (August 2021) Page

- 更新了整个文档中的表格、图和交叉引用的编号格式。..... 2
-

Changes from MARCH 23, 2018 to NOVEMBER 4, 2019 Page

- 更改了文档标题..... 1
 - 更新了节 2 ADC 低功耗采样软件设计中的文字..... 3
 - 更改了表 2-1 不同系统时钟源的功耗中的功耗值和实验条件..... 3
 - 修改了节 2.2 ADC 时钟源选择中的所有内容..... 3
 - 更改了表 2-3 GPIO 引脚初始化配置功耗对比中的功耗值和实验条件..... 4
 - 删除了原第 2.4 部分 ADC 触发源选择和原第 2.5 部分 ADC 窗口对比功能..... 4
 - 更新了节 5 总结..... 5
-

重要声明和免责声明

TI 提供技术和可靠性数据 (包括数据表)、设计资源 (包括参考设计)、应用或其他设计建议、网络工具、安全信息和其他资源, 不保证没有瑕疵且不做任何明示或暗示的担保, 包括但不限于对适销性、某特定用途方面的适用性或不侵犯任何第三方知识产权的暗示担保。

这些资源可供使用 TI 产品进行设计的熟练开发人员使用。您将自行承担以下全部责任: (1) 针对您的应用选择合适的 TI 产品, (2) 设计、验证并测试您的应用, (3) 确保您的应用满足相应标准以及任何其他安全、安保或其他要求。这些资源如有变更, 恕不另行通知。TI 授权您仅可将这些资源用于研发本资源所述的 TI 产品的应用。严禁对这些资源进行其他复制或展示。您无权使用任何其他 TI 知识产权或任何第三方知识产权。您应全额赔偿因在这些资源的使用中对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务, TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 TI 的销售条款 (<https://www.ti.com/legal/termsofsale.html>) 或 [ti.com](https://www.ti.com) 上其他适用条款/TI 产品随附的其他适用条款的约束。TI 提供这些资源并不会扩展或以其他方式更改 TI 针对 TI 产品发布的适用的担保或担保免责声明。

邮寄地址: Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265

Copyright © 2021, 德州仪器 (TI) 公司

重要声明和免责声明

TI“按原样”提供技术和可靠性数据（包括数据表）、设计资源（包括参考设计）、应用或其他设计建议、网络工具、安全信息和其他资源，不保证没有瑕疵且不做任何明示或暗示的担保，包括但不限于对适销性、某特定用途方面的适用性或不侵犯任何第三方知识产权的暗示担保。

这些资源可供使用 TI 产品进行设计的熟练开发人员使用。您将自行承担以下全部责任：(1) 针对您的应用选择合适的 TI 产品，(2) 设计、验证并测试您的应用，(3) 确保您的应用满足相应标准以及任何其他功能安全、信息安全、监管或其他要求。

这些资源如有变更，恕不另行通知。TI 授权您仅可将这些资源用于研发本资源所述的 TI 产品的应用。严禁对这些资源进行其他复制或展示。您无权使用任何其他 TI 知识产权或任何第三方知识产权。您应全额赔偿因在这些资源的使用中对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 [TI 的销售条款](#) 或 [ti.com](#) 上其他适用条款/TI 产品随附的其他适用条款的约束。TI 提供这些资源并不会扩展或以其他方式更改 TI 针对 TI 产品发布的适用的担保或担保免责声明。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

邮寄地址：Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265

Copyright © 2022，德州仪器 (TI) 公司