

## 利用 MSP430FR MCU 片上 VREF 和 ADC 实现低功耗电池电压测量

---

*Gary Gao*

*Louis Lu*

*MSP430 AE*

*East CHINA FAE*

### 概述

MSP430 系列 MCU 具有低功耗特性，使其在电池供电类产品得到广泛应用。针对这类电池供电的产品，为了保证系统电源的稳定，常对供电电压进行检测，并在电压低于设定安全供电阈值时进行必要的系统保护及低电压报警。传统的电池电压检测方法一般通过对电源电压进行分压并通过 ADC 采样实现检测。这种分压采样的检测方式需要额外的外部电路，这会给系统带来成本，体积及功耗的增加。

本文基于 MSP430 FRAM 系列 MCU，针对电池直接供电的应用，提出了无需外部分压电路，利用片内 ADC 进行低功耗供电电压检测的方案，并给出了方案的验证结果。

**关键词：**供电电压测量，低功耗采样，MSP430FR MCU

## Contents

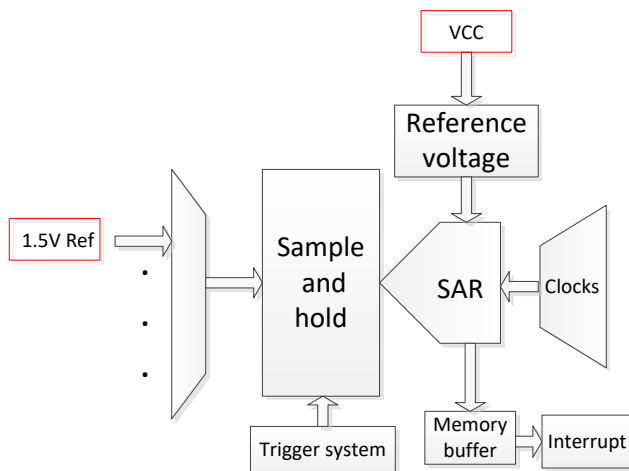
<b>1. 使用 MSP430FRAM MCU 片上 ADC 检测电源电压原理</b> .....	<b>3</b>
<b>2. ADC 低功耗采样软件设计</b> .....	<b>4</b>
<b>2.1 系统时钟源的选择</b> .....	<b>4</b>
<b>2.2 ADC 时钟源的选择</b> .....	<b>4</b>
<b>2.3 未使用的 GPIO 管脚的初始化</b> .....	<b>5</b>
<b>2.4 ADC 触发源的选择</b> .....	<b>5</b>
<b>2.5 采用 ADC 窗口比较功能</b> .....	<b>6</b>
<b>3 ADC 误差校正及实验测试</b> .....	<b>7</b>
<b>3.1 误差校正</b> .....	<b>7</b>
<b>3.2 精度实验测试</b> .....	<b>7</b>
<b>4 分时复用 ADC 实现其它通道的采集</b> .....	<b>8</b>
<b>5 总结</b> .....	<b>9</b>
<b>6 参考资料</b> .....	<b>9</b>

## List of Tables

表格 1 不同参考时钟的功耗对比数据.....	4
表格 2 LPM0 模式下有 XT1CLK 时 ADC 不同时钟源的功耗对比数据.....	4
表格 3 ADC 在 LPM0 和 LPM3 模式下的功耗对数据 .....	5
表格 4 GPIO 管脚初始化配置功耗对比数据.....	5
表格 5 ADC 不同触发源下的功耗数据 .....	6
表格 6 使用 ADC 测量供电电压的测试数据 .....	7

## 1. 使用 MSP430FRAM MCU 片上 ADC 检测电源电压原理

MSP430FR2xx/FR4xx 系列微控制器的 ADC 模块示意图如图 1。可以看出，ADC 可直接对内部参考电压（一般为 1.5V,具体请查看技术手册）进行采样，且 ADC 的参考电压可配置为电源电压。不同的 MCU 型号参考电压所对应的 ADC 通道可参考器件数据手册中的“ADC Channel Connections”表格。



图表 1 片上测量电池电压示意图

我们通过配置寄存器 ADCMCTL0 的 ADCINCHx 位设定 1.5V 参考电压设为 ADC 采样电压，配置 ADCSREFx 位选择 VCC 为采样参考电压。根据 ADC 采样结果转换公式：

$$N_{ADC} = 2^{10} \times \frac{V_{in} - V_{R-}}{V_{R+} - V_{R-}}$$

$N_{ADC}$ ：ADC 转换结果

$V_{in}$ ：通道采集电压

$V_{R+}$ ：参考电压正极

$V_{R-}$ ：参考电压负极

我们可以得到供电电压计算公式：

$$AVCC = \frac{2^{10}}{N_{ADC}} \times 1.5V \text{ Ref}$$

与传统供电电压检测方法相比，上述方法不需要额外的分压电路（部分外部采样电路为了降低功耗还会采用三极管作为采样供电开关），其功耗可以做到更低，成本更具优势，PCB 体积更小。

## 2. ADC 低功耗采样软件设计

低功耗的设计是一个系统问题，本文针对 MSP430 FRAM MCU 片内 ADC 采样，列举了影响功耗的主要因素，并给出了这些因素在不同配置下的功耗测试结果（数据结果均在常温下测得）。考虑到实验的便利性，本文档功耗测试采用了 TI MSP430 内置的 EnergyTrace 功能。

### 2.1 系统时钟源的选择

MSP430 系统时钟源主要有两个：内部 32K 的低频 REFOCLK 和外部晶振 XT1CLK。系统时钟 DCOCLK 和 ACLK 选用上述时钟源的功耗对比数据如表 1 可以看出选用外部的 XT1CLK 作为系统时钟源功耗会更加出色。

表格 1 不同参考时钟的功耗对比数据<sup>[1]</sup>

参考时钟源	REFOCLK	XT1CLK
采样频率(Hz)	1	1
功耗 ( mA )	0.0929	0.0752

[1]实验条件：1. 功耗测量工具为 EnergyTrace™；2.测试硬件 MSP430FR4133LaunchPad；3. ADC 采集由 RTC 触发；4.ADC 时钟源为 ACLK；5.MCLK 时钟源为 DCOCLK；6. LPM3

### 2.2 ADC 时钟源的选择

MSP430FRAM 系列 ADC 时钟源选择很灵活，主要有 MODCLK，ACLK 和 SMCLK。ADC 时钟源的选择需要根据系统需求而确定，并非时钟频率越低 ADC 的功耗就越小。因为选择低频时钟，时钟功耗减小但 ADC 采样及转换时间增长，其总体功耗并不一定小。下面，本文将基于 MSP430 MCU 常用的低功耗模式 LPM0 和 LPM3，给出不同 ADC 时钟下的功耗测试结果并总结时钟设置建议。

a) LPM0 模式下，根据表 2 数据可以看出，ADC 时钟选择 MODCLK 功耗更低。

表格 2 LPM0 模式下有 XT1CLK 时 ADC 不同时钟源的功耗对比数据<sup>[1]</sup>

ADC 时钟	MODCLK(5MHz)	ACLK(32KHz)	SMCLK(5MHz)
采样频率 ( Hz )	100	100	100
功耗 ( mA )	0.2533	0.2672	0.2536

[1]实验条件：1. 功耗测量工具为 EnergyTrace™；2.测试硬件 MSP430FR4133LaunchPad；3. ADC 采集由 RTC 触发；4.参考时钟源为 XT1CLK。

- b) LPM3 模式下，需要注意，虽然 MODCLK 和 SMCLK 在 LPM3 模式下默认是关闭的，但是仍可选择其作为 ADC 的时钟源。这种情况下 ADC 被触发采样后，MCU 会自动使能 MODCLK 和 SMCLK，等采样转换完成后，MODCLK 和 SMCLK 自动关闭。（详细内容可以参考用户手册 3.2.12）。LPM3 模式下选择不同的 ADC 时钟的功耗测试结果如表 3。可见，LPM3 模式下 ADC 时钟选择 MODCLK 功耗更低。

**表格 3 ADC 在 LPM3 模式下的功耗对数据<sup>[1]</sup>**

ADC 时钟	MODCLK(5MHz)	ACLK(32KHz)	SMCLK(5MHz)
采样频率 ( Hz )	100	100	100
功耗 ( mA )	0.0754	0.0873	0.0757

[1]实验条件：1. 功耗测量工具为 EnergyTrace™；2.测试硬件 MSP430FR4133LaunchPad；3. ADC 采集由 RTC 触发；4.参考时钟源为 XT1CLK

## 2.3 未使用的 GPIO 管脚的初始化

对于未使用到的 GPIO 引脚要避免悬空，因为浮空状态下功耗波动会较大。可以通过将寄存器 PxREN 相应位置 1 使能片上的上拉或下拉电阻将管脚电平固定从而可以减小部分功耗。表 4 给出了这两种情况的功耗对比数据：

**表格 4 GPIO 管脚初始化配置功耗对比数据<sup>[1]</sup>**

未使用 GPIO 配置情况	未配置	配置（拉低）
采样频率(Hz)	1	1
功耗 ( mA )	0.7033	0.0929

[1]实验条件：1. 功耗测量工具为 EnergyTrace™；2.测试硬件 MSP430FR4133LaunchPad；3.未使用 GPIO 数量为 59 个；4.ADC 采集由 RTC 触发；5.LPM3。

## 2.4 ADC 触发源的选择

TI MSP430 系列 MCU 的 ADC 能工作在多种工作模式，并支持触发进行采样。触发采样模式下, ADC 无需 CPU 干预，大部分时间处于低功耗状态，从而达到更低的系统功耗。ADC 的触发源可灵活设置，具体请参考用户手册。这里，我们针对使用 RTC 或 Timer 作为触发源，结合不同 CPU 功耗模式进行了功耗测试，试验结果如表 5。

**表格 5 ADC 不同触发源下的功耗数据<sup>[1]</sup>**

ADC 触发源	RTC	TimerA	RTC	TimerA
低功耗模式	LPM0	LPM0	LPM3	LPM3
定时器时钟源	SMCLK(1MHz)	SMCLK(1MHz)	VLCLK	ACLK
功耗 ( mA )	0.2554	0.2569	0.075	0.075

[1]实验条件：1. 功耗测量工具为 EnergyTrace™；2.测试硬件 MSP430FR4133LaunchPad；3.ADC 采样频率为 1Hz；4.参考时钟源为 XT1；5. ADC 时钟源为 ACLK

以上数据表明两种触发源的功耗相当，但 RTC 的时钟源在使用 VLOCLK ( 10KHz ) 时具有以下两点优势：

- a) VLOCLK 可以结合 RTC 时钟分频器将溢出中断周期延长至 1.8 个小时 ( TimerA 使用 ACLK 最长溢出中断时间为 2 分钟 )。
- b) VLOCLK 可以运行在 LPM3.5 模式下，在这种模式下 ADC 每次采样需唤醒一次 CPU 所以适用于采样间隔较长的应用。

## 2.5 采用 ADC 窗口比较功能

MSP430 的 ADC 还具有窗口比较的功能。这种模式下，可以设定一个阈值，当 ADC 的采样值低于阈值时，唤醒 CPU 进行相关的处理操作。这种模式适合不需要获取 ADC 采样的实时值，只需要进行阈值报警的应用。

综上所述，根据系统应用来灵活选择设定 MCU 的工作模式，系统时钟，ADC 的工作模式及参考时钟源，可以大幅度的优化 ADC 的采样功耗。

## 3 ADC 误差校正及实验测试

### 3.1 误差校正

使用片上 ADC 测量电池电压，其误差主要来源于两个方面：ADC 的测量误差和 1.5V 参考电压的误差。其中数据手册中分别给出了针对于 ADC 的测量误差和 1.5V 参考电压的误差的校准公式。

但对于 1.5V 参考电压的校准中所用到的校准系数是针对于 1.5V 作为 ADC 参考电压时测试得到的系数。而当使用 1.5V 作为 ADC 输入时，此校准系数不再适用。因为 1.5V 作为参考电压时会经过一个 Reference Buffer，而当 1.5V 作为 ADC 输入时是没有这个 Reference Buffer 的。此处只需校准 ADC 的误差即可。

对于 ADC 的校准可以参考如下公式：

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

其中：

$ADC_{\text{calibrated}}$  为校准后的数值；

$\text{Factor}_{\text{gain}}$  为 ADC 增益误差校准系数；

$ADC_{\text{offset}}$  为 ADC 偏移误差校准系数；

因为不同系列的校准系数存储地址不同， $\text{Factor}_{\text{gain}}$  和  $ADC_{\text{offset}}$  需要通过查询对应器件数据手册得到它的存储地址。

### 3.2 精度实验测试

使用片上 ADC 检测供电电压的测试数据如表 6：

表格 6 使用 ADC 测量供电电压的测试数据<sup>[1]</sup>

Power supply (v)	$ADC_{\text{raw}}$	Without calibration	With calibration(v)	Error(With calibration)
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 MSP430FR2311LaunchPad；2.  $\text{Factor}_{\text{gain}}=0x8011$ ， $ADC_{\text{offset}}=0$ ；3.常温。

## 4 分时复用 ADC 实现其它通道的采集

在使用 ADC 作为电池电压采集功能时，ADC 也可以用作其它模拟量的采集。因为电池电压的变化比较缓慢，所以电池电压的采集时间间隔可以很长。在 ADC 闲置期间，用户就可以使用 ADC 去采集其它模拟量。因为电池电压是在不断的监控中，所以参考电压可以继续采用电池电压，也可以切换到 1.5V 的内部参考电压。而且采用电池电压作为参考电压，可以提高测量范围，测量期间可以关断 1.5V 以降低功耗。但采用电池电压的误差会比内部参考 1.5V 要大。



## 5 总结

本文基于 MSP430FR MCU，提出了利用片内 ADC 直接采样电池供电电压的方案。该方案不仅节省了用户成本，且节约了 PCB 体积和系统功耗。接着，本文针对低功耗的采样设计进行了详细介绍并给出了不同情景下的实验结果。最后对测量精度进行了校准和测试。

## 6 参考资料

1. *MSP430FR4xx and MSP430FR2xx Family user's guide(SLAU445G)*
2. *MSP430FR413x Mixed-Signal Microcontrollers(SLAS865B)*

## IMPORTANT NOTICE FOR TI DESIGN INFORMATION AND RESOURCES

Texas Instruments Incorporated ("TI") technical, application or other design advice, services or information, including, but not limited to, reference designs and materials relating to evaluation modules, (collectively, "TI Resources") are intended to assist designers who are developing applications that incorporate TI products; by downloading, accessing or using any particular TI Resource in any way, you (individually or, if you are acting on behalf of a company, your company) agree to use it solely for this purpose and subject to the terms of this Notice.

TI's provision of TI Resources does not expand or otherwise alter TI's applicable published warranties or warranty disclaimers for TI products, and no additional obligations or liabilities arise from TI providing such TI Resources. TI reserves the right to make corrections, enhancements, improvements and other changes to its TI Resources.

You understand and agree that you remain responsible for using your independent analysis, evaluation and judgment in designing your applications and that you have full and exclusive responsibility to assure the safety of your applications and compliance of your applications (and of all TI products used in or for your applications) with all applicable regulations, laws and other applicable requirements. You represent that, with respect to your applications, you have all the necessary expertise to create and implement safeguards that (1) anticipate dangerous consequences of failures, (2) monitor failures and their consequences, and (3) lessen the likelihood of failures that might cause harm and take appropriate actions. You agree that prior to using or distributing any applications that include TI products, you will thoroughly test such applications and the functionality of such TI products as used in such applications. TI has not conducted any testing other than that specifically described in the published documentation for a particular TI Resource.

You are authorized to use, copy and modify any individual TI Resource only in connection with the development of applications that include the TI product(s) identified in such TI Resource. NO OTHER LICENSE, EXPRESS OR IMPLIED, BY ESTOPPEL OR OTHERWISE TO ANY OTHER TI INTELLECTUAL PROPERTY RIGHT, AND NO LICENSE TO ANY TECHNOLOGY OR INTELLECTUAL PROPERTY RIGHT OF TI OR ANY THIRD PARTY IS GRANTED HEREIN, including but not limited to any patent right, copyright, mask work right, or other intellectual property right relating to any combination, machine, or process in which TI products or services are used. Information regarding or referencing third-party products or services does not constitute a license to use such products or services, or a warranty or endorsement thereof. Use of TI Resources may require a license from a third party under the patents or other intellectual property of the third party, or a license from TI under the patents or other intellectual property of TI.

TI RESOURCES ARE PROVIDED "AS IS" AND WITH ALL FAULTS. TI DISCLAIMS ALL OTHER WARRANTIES OR REPRESENTATIONS, EXPRESS OR IMPLIED, REGARDING TI RESOURCES OR USE THEREOF, INCLUDING BUT NOT LIMITED TO ACCURACY OR COMPLETENESS, TITLE, ANY EPIDEMIC FAILURE WARRANTY AND ANY IMPLIED WARRANTIES OF MERCHANTABILITY, FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE, AND NON-INFRINGEMENT OF ANY THIRD PARTY INTELLECTUAL PROPERTY RIGHTS.

TI SHALL NOT BE LIABLE FOR AND SHALL NOT DEFEND OR INDEMNIFY YOU AGAINST ANY CLAIM, INCLUDING BUT NOT LIMITED TO ANY INFRINGEMENT CLAIM THAT RELATES TO OR IS BASED ON ANY COMBINATION OF PRODUCTS EVEN IF DESCRIBED IN TI RESOURCES OR OTHERWISE. IN NO EVENT SHALL TI BE LIABLE FOR ANY ACTUAL, DIRECT, SPECIAL, COLLATERAL, INDIRECT, PUNITIVE, INCIDENTAL, CONSEQUENTIAL OR EXEMPLARY DAMAGES IN CONNECTION WITH OR ARISING OUT OF TI RESOURCES OR USE THEREOF, AND REGARDLESS OF WHETHER TI HAS BEEN ADVISED OF THE POSSIBILITY OF SUCH DAMAGES.

You agree to fully indemnify TI and its representatives against any damages, costs, losses, and/or liabilities arising out of your non-compliance with the terms and provisions of this Notice.

This Notice applies to TI Resources. Additional terms apply to the use and purchase of certain types of materials, TI products and services. These include; without limitation, TI's standard terms for semiconductor products (<http://www.ti.com/sc/docs/stdterms.htm>), [evaluation modules](#), and [samples](http://www.ti.com/sc/docs/sampterm.htm) (<http://www.ti.com/sc/docs/sampterm.htm>).

Mailing Address: Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265  
Copyright © 2018, Texas Instruments Incorporated