

利用 SimpleLink™ MSP432P4xx 微控制器的低频功耗模式

G. Anand Kumar
 Dung Dang
 Evan Wakefield

MSP Systems Architect
 MSP Applications
 MSP Applications

摘要

低功耗在所有电池供电的嵌入式应用中非常重要。但这些嵌入式应用的工作频率会因应用需求而异。某些应用需要在较高的频率下工作，大约几兆赫兹；而另外一些应用可能需要在较低的频率下工作，大约几十或几百千赫兹。市场中有几款微控制器在几兆赫兹左右的频率下工作时，可展现出出色的低功耗性能。但工作频率降至几千赫兹左右时，便很难实现低功耗。当目标应用使用较低工作频率时，SimpleLink™MSP432P4xx 微控制器的低频功耗模式可展现超低功耗性能。在使用 SimpleLink MSP432™ 软件开发套件 (SDK) 与编程工具进行开发的过程中，可利用上述及更多特性。

内容

| | | |
|----|------------------------------|----|
| 1 | SimpleLink SDK 和低频功耗模式 | 2 |
| 2 | 低功耗模式的应用视图..... | 2 |
| 3 | 核心稳压器..... | 3 |
| 4 | 时钟源相关注意事项 | 3 |
| 5 | 进入低频工作模式..... | 3 |
| 6 | 进入和退出低频 LPM0 模式 | 5 |
| 7 | 典型电流特性 | 6 |
| 8 | 其他应用注意事项 | 10 |
| 9 | 总结 | 10 |
| 10 | 参考资料..... | 10 |

附图目录

| | | |
|---|--|---|
| 1 | 有效的工作模式切换 | 4 |
| 2 | 有效的 LPM0 切换 | 5 |
| 3 | AM_LF_VCORE0 与 AM_LDO_VCORE0 电流对比 – 以 128kHz 的频率从闪存执行 | 6 |
| 4 | AM_LF_VCORE0 与 AM_LDO_VCORE0 电流对比 – 以 128kHz 的频率从 SRAM 执行 | 7 |
| 5 | AM_LF_VCORE0 与 AM_LDO_VCORE0 电流对比 – 以 32.768 kHz 的频率从闪存执行..... | 8 |
| 6 | AM_LF_VCORE0 与 AM_LDO_VCORE0 电流对比 – 以 32.768 kHz 的频率从 SRAM 执行..... | 9 |

商标

SimpleLink, MSP432 are trademarks of Texas Instruments.
 Bluetooth is a registered trademark of Bluetooth SIG.
 Wi-Fi is a registered trademark of Wi-Fi Alliance.

1 SimpleLink SDK 和低频功耗模式

SimpleLink MCU 产品组合提供了单一开发环境，为客户开发有线和无线应用提供灵活的硬件、软件和工具选项。为了最终能够在主机 MCU、Wi-Fi®、Bluetooth®低功耗、1GHz 以下器件等平台中完全重复使用代码，可根据客户的设计选择 MCU 或连接标准。只需购买一次 SimpleLink 软件开发套件 (SDK) 即可重复使用，为用户开启创造无限应用的大门。。更多详细信息，请访问 www.ti.com/simplelink。

在 SimpleLink MSP432 SDK 中，提供有多种软件工具和库，可用于自动集成电源优化向量，例如使用 TI-RTOS 或 FreeRTOS 等实时操作系统 (RTOS) 和 SimpleLink SDK 中包含的电源管理器 API 自动处理低频功耗模式之间的切换。SimpleLink MCU SDK 包括支持 CC13xx/CC26xx、CC32xx 和 MSP432 器件的电源管理器框架。所有三个 MCU 系列均使用相同的顶层 API、概念和惯例约定。

SimpleLink MSP432 SDK 中集成有采用 TI-RTOS 和 Free-RTOS 的电源管理方案。若启用电源管理器并使用 TI 驱动程序，可在处理器空闲时自动降低功耗。应用开发人员无需编写电源管理代码；默认情况下会提供。

包括电源管理器框架的应用可降低功耗，因为在应用空闲期间会调用目标特定的电源策略，以便制定有关何时激活和最大化节能的明智决策。这些目标特定的电源策略了解目标上可用的更低功耗状态。TI 驱动程序与电源管理器通信，以启用和禁用外设资源和模式切换。

从应用开发角度来看，管理功耗只需很少甚至不需要应用程序代码。然而，应用程序可使用 API 根据需要定制功耗。有关电源管理器 API 的详细信息，请参见《[SDK 电源管理：MSP432、CC13xx/CC26xx、和 CC32xx SimpleLink MCU](#)》。

SimpleLink MSP432P4xx 微控制器的低频功耗模式能够将最大工作频率限制在 128kHz，以此实现非常低的功耗。微控制器上的电源系统 (PSS)、存储器子系统和时钟系统采用优化设计，在这些工作模式下可实现非常低的功耗，这些系统可通过 Power Manager API 加以利用。

所有外设低频功耗模式下均可完全正常工作。CPU、DMA 和所有外设的最大工作频率限制为 128kHz。外部复位、所有外部中断和唤醒源在低频功耗模式下均可用。外设中断的触发和处理方式与常规工作模式相同。低频功耗模式有两种。分别是低频工作模式 (AM_LF) 和低频 LPM0 模式 (LPM0_LF)。除 CPU 禁用并且无法执行程序之外，低频 LPM0 模式与低频工作模式相同。

在低频工作模式下，通过闪存以 128kHz 执行 Dhrystone 2.1 程序时，典型流耗为 90μA。当通过闪存和 SRAM 存储器在不同的低频条件下执行 Dhrystone 2.1 程序时，低频工作模式下的典型流耗特性，请参见 [7 节](#)。低频 LPM0 模式下禁用所有外设时典型的流耗为 70μA。

2 低频功耗模式的应用视图

应用需要在电流预算较低的情况下执行激活任务，且时序要求不严格时，低频工作模式尤为实用。激活任务可以是 CPU 密集型工作负荷，如计算数学密集型公式或执行某类算法。该任务还可以利用硬件引擎实现数字滤波器、使用内置数字信号处理器 (DSP) 或浮点单元 (FPU) 引擎进行浮点运算、或使用集成高级加密标准 (AES) 硬件引擎加密数据块或解密经 AES 加密的数据块。

许多嵌入式应用电流或功率预算有限，无论是由纽扣电池供电还是由输出或储能能力受限的能量采集源供电都是如此。对于这类在大部分运行时间具有允许的最大电流的应用，可从 MSP432P4xx 特有的这些低频模式中大大收益。

由于 CPU 和所有外设时钟在这些低频功耗模式下以 128kHz 的最大频率工作，因此执行时间明显长于功能完全正常的模式 (几 MHz)。虽然这些模式不适合具有高速处理要求或响应时间要求的应用，但这些模式可用于允许充分处理或延迟响应的应用。

在低频 LPM0 模式下，除 CPU 外，所有外设仍处于激活状态。对于多个外设均需要以相对较低的速度（例如，低波特率串行通信、低速定时器捕捉、比较或脉宽调制 (PWM) 活动）运行的应用，此模式尤为有用，并已针对这类应用优化了功耗。

3 核心稳压器

MSP432P4xx 微控制器具有两个核心稳压器，分别为低压降稳压器 (LDO) 和 DC-DC 稳压器。常规工作模式可以基于 LDO 或 DC-DC 稳压器，具体根据应用的频率性能要求选择。但是低频功耗模式始终基于 LDO 稳压器。由于 DC-DC 稳压器在输出低负载电流时核心稳压效率较低，这种稳压器不能用于低频功率模式。

LDO 稳压器可以生成两种核心电压：1.2V 和 1.4V（典型值）。1.2V 核心电压表示为 VCORE0，1.4V 核心电压表示为 VCORE1。这表示低频功耗模式还可基于 VCORE0 或 VCORE1，但是 128kHz 的最大工作频率限制在两种情况下均适用。

基于 VCORE0 的低频工作模式表示为 AM_LF_VCORE0，基于 VCORE1 的低频工作模式表示为 AM_LF_VCORE1。类似地，基于 VCORE0 的低频 LPM0 模式表示为 LPM0_LF_VCORE0，而基于 VCORE1 的低频 LPM0 模式表示为 LPM0_LF_VCORE1。图 1 显示了各种可能的工作模式之间的切换。

由于低频功耗模式不需要功耗高于 VCORE0 的 VCORE1，使用 VCORE0 使器件以低频模式运行通常非常有利，特别是长时间运行的情况。然而，如果应用需要在低频模式和需要 VCORE1 的工作模式（例如，MCLK > 24MHz）之间不断切换，由于 VCORE0 与 VCORE1 之间频繁切换既耗能又耗时，因此使器件保持以 VCORE1 工作则可能更有利，此时的益处会超过低频功率模式流耗较低的益处。

4 时钟源相关注意事项

MSP432P4xx 微控制器上具有多个时钟源。分别为可调内部数控振荡器 (DCO)、高频晶振 (HFXT)、内部 ADC 振荡器 (MODOSC)、系统振荡器 (SYSOSC)、低频晶振 (LFXT)、低频内部基准振荡器 (REFO) 和 VLO。DCO、HFXT、MODOSC 和 SYSOSC 为高频时钟源，而 LFXT、REFO 和 VLO 则为低频时钟源。LFXT 是一种低频晶体振荡器，能够提供 32.768kHz 时钟。REFO 是经工厂校准的内部低频时钟源，可以将其设定为生成 32.768kHz 或 128kHz 时钟。VLO 是一种功耗极低的低频振荡器，可提供 9.4kHz 的时钟（典型值）。

在低频功耗模式下，必须由应用关闭所有高频时钟源。工作时钟必须始终仅由任意低频时钟源生成。不建议使用内部时钟分频器从任何高频时钟源生成以低频功率模式工作的时钟，即使生成的时钟频率低于 128kHz 也如此。提供的低频时钟源 LFXT、REFO 和 VLO 在低频功耗模式的工作频率、时钟精度和流耗之间实现了良好平衡。

该应用需要考虑适合外设运行的时钟频率配置，因为低频功耗模式下允许的最大时钟频率为 128kHz。这表明在使用 MSP432P4xx 微控制器的低频功耗模式时，需要针对应用仔细考虑通用异步收发器 (UART) 波特率、I²C 通信频率、定时器工作频率或模数转换器 (ADC) 采样率等。

5 进入低频工作模式

MSP432P4xx 微控制器上电或每次硬复位后，微控制器进入 AM_LDO_VCORE0 工作模式。这是基于 LDO，核心电压为 0 的常规工作模式。可从 AM_LDO_VCORE0 或 AM_LDO_VCORE1 工作模式进入低频工作模式。有关所有有效的工作模式切换，请参见图 1。AM_LDO_VCOREx 和 AM_LF_VCOREx 之间的切换延迟在器件特定的数据表中指定。

必须将电源控制管理器 (PCM) 模块 PCMCTL0 寄存器中的工作模式请求 (AMR) 字段编程为进入所需的低频工作模式。如需更多信息，请参见《MSP432P4xx SimpleLink™ 微控制器技术参考手册》中的电源控制管理器 (PCM) 章节。可利用驱动程序库 API 函数（包括 PCM_setPowerMode() 和 PCM_setPowerState()）促进代码的快速开发及在不同功耗模式之间实现稳健且完全兼容的切换。

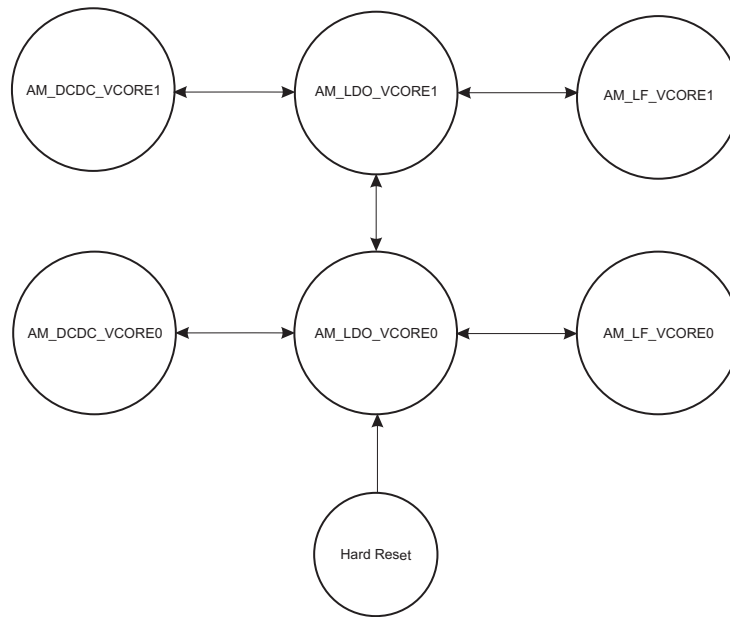


图 1. 有效的工作模式切换

6 进入和退出低频 LPM0 模式

当 CPU 执行 WFI 或 WFE 指令时，可从低频工作模式进入低频 LPM0 模式。在低频工作模式与低频 LPM0 模式之间相互切换时，核心电压保持不变。例如，从核心电压为 0 的 AM_LF_VCORE0 进入的 LPM0_LF_VCORE0，核心电压仍为 0。

在低频 LPM0 模式下无法更改核心电压。如果需要在 LPM0 模式下更改核心电压（不常见），则应用必须首先返回至工作模式，然后再更改核心电压。与低频工作模式相同，在低频 LPM0 模式下，最大外设工作频率同样限制为 128kHz。

有关所有有效的 LPM0 模式切换，请参见图 2。AM_LF_VCOREx 和 LPM0_LF_VCOREx 之间的切换延迟在器件特定的数据表中指定。可利用驱动程序库 API 函数（包括 PCM_setPowerMode() 和 PCM_setPowerState()）促进代码的快速开发及在不同功耗模式之间实现稳健且完全兼容的切换。

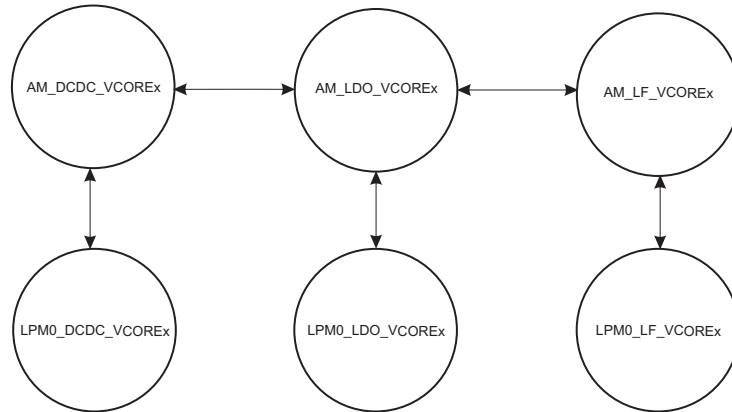


图 2. 有效的 LPM0 切换

7 典型电流特性

以下应用案例将 MSP432P4xx 微控制器以低频工作模式工作时的典型电流特性与在核心电压 0 下以常规工作模式工作时的典型电流特性进行对比，以此展示流耗降低的特性。

7.1 应用案例 1: 以 128kHz 的频率从闪存执行

电源电压: 3V

程序存储器: 闪存

时钟配置: 由 REFO 生成的 128kHz 时钟

器件状态: CPU 以 128kHz 的频率从闪存执行 Dhystone 2.1 程序。

所有外设均处于非活动状态。器件 I/O 引脚设置为输出并以值 0 驱动。

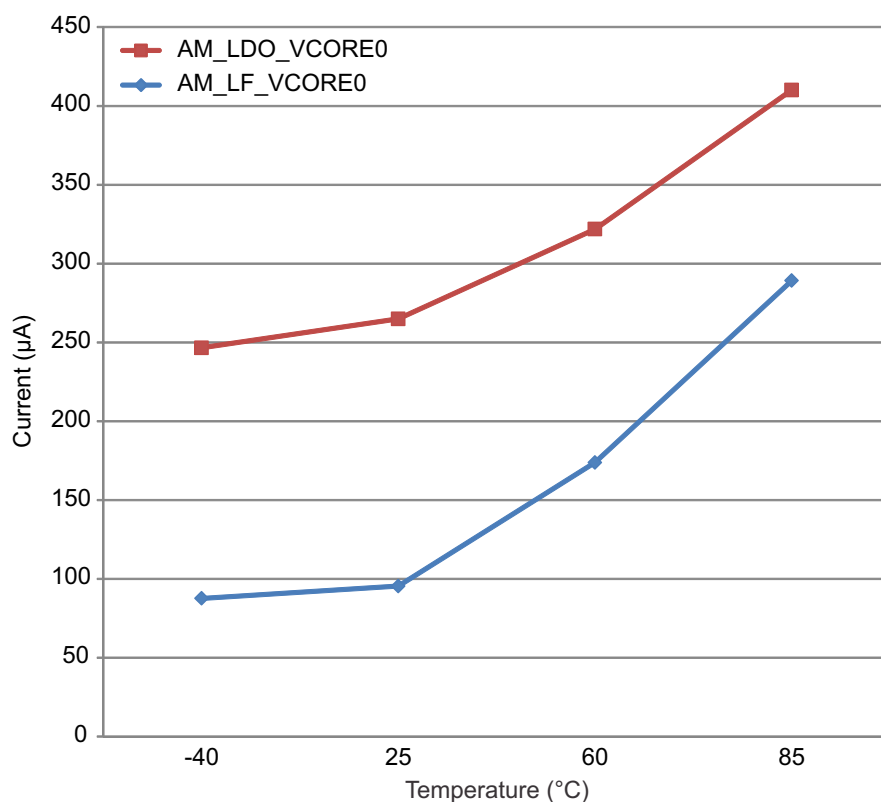


图 3. AM_LF_VCORE0 与 AM_LDO_VCORE0 电流对比 – 以 128kHz 的频率从闪存执行

7.2 应用案例 2: 以 128kHz 的频率从 SRAM 执行

电源电压: 3V

程序存储器: SRAM

时钟配置: 由 REFO 生成的 128kHz 时钟

器件状态: CPU 以 128kHz 的频率从 SRAM 执行 Dhrystone 2.1 程序。

所有外设均处于非活动状态。器件 I/O 引脚设置为输出并以值 0 驱动。

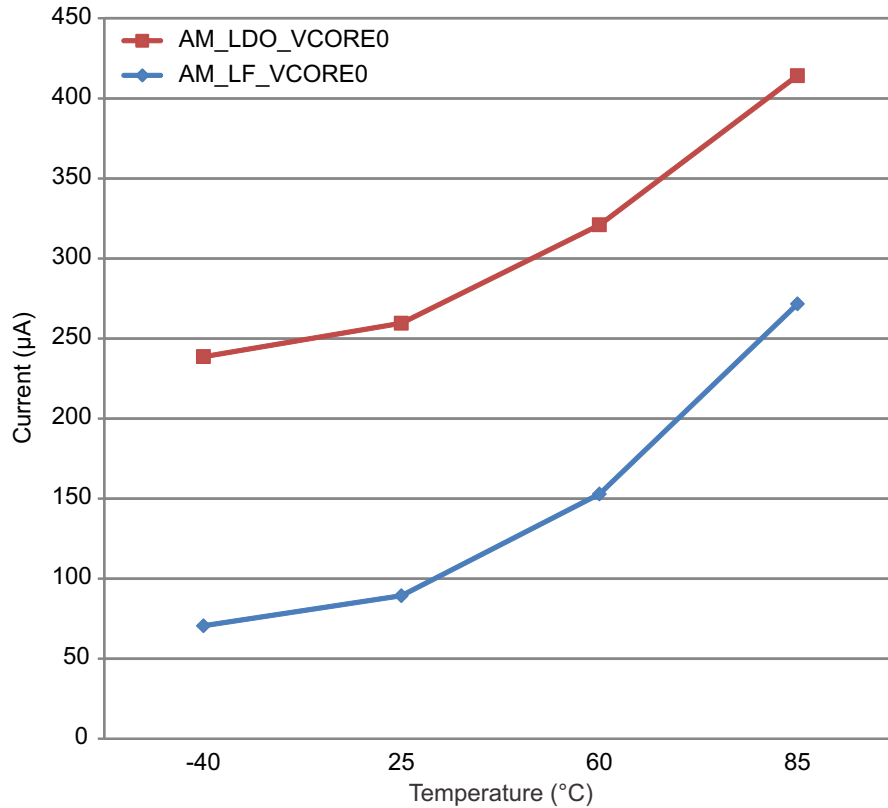


图 4. AM_LF_VCORE0 与 AM_LDO_VCORE0 电流对比 – 以 128kHz 的频率从 SRAM 执行

7.3 应用案例 3: 以 32.768 kHz 的频率从闪存执行

电源电压: 3V

程序存储器: 闪存

时钟配置: 由 REFO 生成的 32.768 kHz 时钟

器件状态: CPU 以 32.768 kHz 的频率从闪存执行 Dhrystone 2.1 程序。

所有外设均处于非活动状态。器件 I/O 引脚设置为输出并以值 0 驱动。

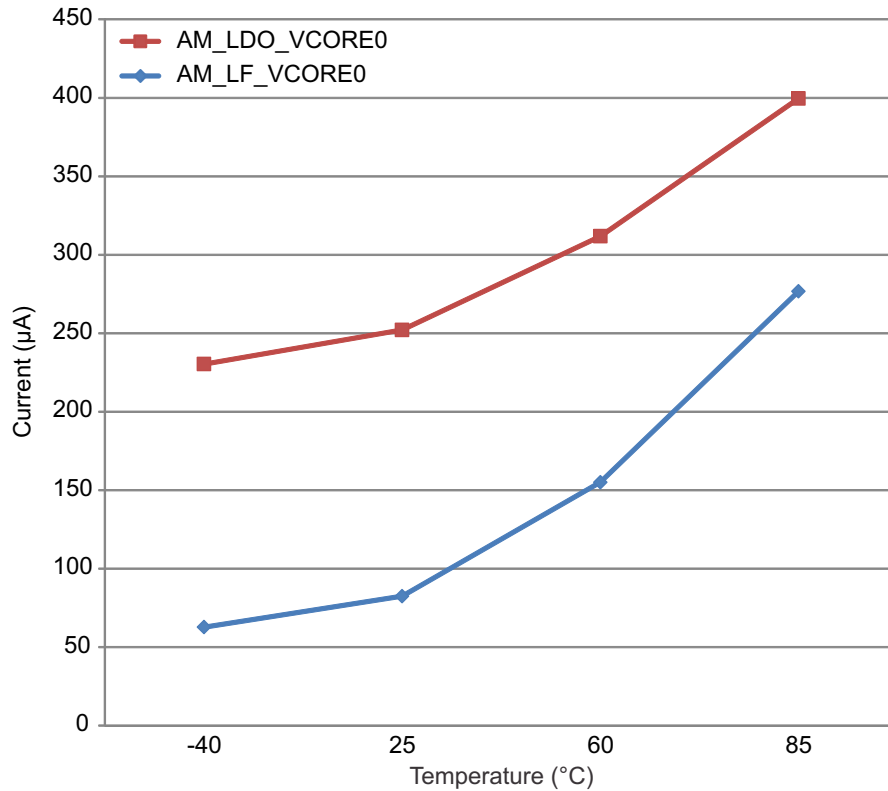


图 5. AM_LF_VCORE0 与 AM_LDO_VCORE0 电流对比 – 以 32.768 kHz 的频率从闪存执行

7.4 应用案例 4: 以 32.768 kHz 的频率从 SRAM 执行

电源电压: 3V

程序存储器: SRAM

时钟配置: 由 REFO 生成的 32.768 kHz 时钟

器件状态: CPU 以 32.768kHz 的频率从 SRAM 执行 Dhrystone 2.1 程序。

所有外设均处于非活动状态。器件 I/O 引脚设置为输出并以值 0 驱动。

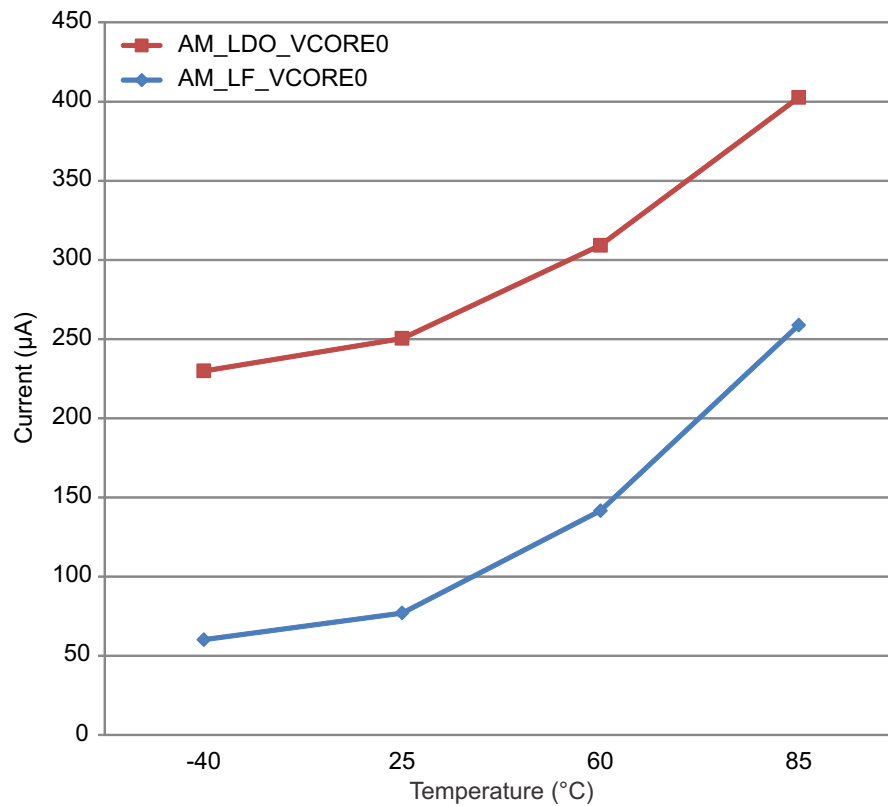


图 6. AM_LF_VCORE0 与 AM_LDO_VCORE0 电流对比 – 以 32.768 kHz 的频率从 SRAM 执行

8 其他应用注意事项

以低频功耗模式工作时，还需考虑其他一些应用注意事项。在低频功耗模式下，应用程序无法对闪存进行编程，也无法擦除闪存。此外，以低频功耗模式工作时，不得更改 `SYS_SRAM_BANKEN` 寄存器中的 `SRAM` 存储区使能配置或系统控制模块 (SYS) 的 `SYS_SRAM_BANKRET` 寄存器的 `SRAM` 存储区保持配置。这些限制条件可确保不会违反电源系统 (PSS) 在低频功耗模式下的电流传输限制。建议在常规工作模式下根据应用程序需要配置 `SRAM` 存储区使能或 `SRAM` 保持控制寄存器，然后再进入低频功耗模式。

9 总结

MSP432P4xx 微控制器的低频功耗模式可在工作频率不超过 128kHz 时提供极低的功耗。微控制器电源系统、存储器和时钟系统已经过优化设计，在这种工作模式下功耗非常低。本应用手册中还介绍了与时钟选择和存储器运行相关的应用注意事项。对于始终或在执行期间需要以低频率运行的且由电池供电的嵌入式应用，可从 MSP432P4xx 微控制器的低频功耗模式受益，可降低系统整体功耗。

10 参考资料

1. 《[SDK 电源管理：MSP432、CC13xx/CC26xx 和 CC32xx SimpleLink MCU](#)》
2. 《[MSP432P4xx SimpleLink™ 微控制器技术参考手册](#)》
3. 《[MSP432P401xx SimpleLink™ 混合信号微控制器](#)》
4. 《[SimpleLink MSP432 软件开发套件 \(SDK\)](#)》

修订历史记录

注：之前版本的页码可能与当前版本有所不同。

| Changes from June 8, 2016 to March 6, 2017 | Page |
|---|------|
| • 添加了作者列表 | 1 |
| • 根据需要在通篇新增“SimpleLink”品牌并更新了参考文档标题 | 1 |
| • 更新摘要内容 | 1 |
| • 更新了 1 节 <i>SimpleLink SDK</i> 和低频功耗模式中的所有内容 | 2 |

有关 TI 设计信息和资源的重要通知

德州仪器 (TI) 公司提供的技术、应用或其他设计建议、服务或信息，包括但不限于与评估模块有关的参考设计和材料（总称“TI 资源”），旨在帮助设计人员开发整合了 TI 产品的应用；如果您（个人，或如果是代表贵公司，则为贵公司）以任何方式下载、访问或使用了任何特定的 TI 资源，即表示贵方同意仅为该等目标，按照本通知的条款进行使用。

TI 所提供的 TI 资源，并未扩大或以其他方式修改 TI 对 TI 产品的公开适用的质保及质保免责声明；也未导致 TI 承担任何额外的义务或责任。TI 有权对其 TI 资源进行纠正、增强、改进和其他修改。

您理解并同意，在设计应用时应自行实施独立的分析、评价和判断，且应全权负责并确保应用的安全性，以及您的应用（包括应用中使用的 TI 产品）应符合所有适用的法律法规及其他相关要求。您就您的应用声明，您具备制订和实施下列保障措施所需的一切必要专业知识，能够 (1) 预见故障的危险后果，(2) 监视故障及其后果，以及 (3) 降低可能导致危险的故障几率并采取适当措施。您同意，在使用或分发包含 TI 产品的任何应用前，您将彻底测试该等应用和该等应用所用 TI 产品的功能。除特定 TI 资源的公开文档中明确列出的测试外，TI 未进行任何其他测试。

您只有在为开发包含该等 TI 资源所列 TI 产品的应用时，才被授权使用、复制和修改任何相关单项 TI 资源。但并未依据禁止反言原则或其他法律授予您任何 TI 知识产权的任何其他明示或默示的许可，也未授予您 TI 或第三方的任何技术或知识产权的许可，该等产权包括但不限于任何专利权、版权、屏蔽作品权或与使用 TI 产品或服务的任何整合、机器制作、流程相关的其他知识产权。涉及或参考了第三方产品或服务的信息不构成使用此类产品或服务的许可或与其相关的保证或认可。使用 TI 资源可能需要您向第三方获得对该等第三方专利或其他知识产权的许可。

TI 资源系“按原样”提供。TI 兹免除对 TI 资源及其使用作出所有其他明确或默认的保证或陈述，包括但不限于对准确性或完整性、产权保证、无复发故障保证，以及适销性、适合特定用途和不侵犯任何第三方知识产权的任何默认保证。

TI 不负责任何申索，包括但不限于因组合产品所致或与之有关的申索，也不为您辩护或赔偿，即使该等产品组合已列于 TI 资源或其他地方。对因 TI 资源或其使用引起或与之有关的任何实际的、直接的、特殊的、附带的、间接的、惩罚性的、偶发的、从属或惩戒性损害赔偿，不管 TI 是否获悉可能会产生上述损害赔偿，TI 概不负责。

您同意向 TI 及其代表全额赔偿因您不遵守本通知条款和条件而引起的任何损害、费用、损失和/或责任。

本通知适用于 TI 资源。另有其他条款适用于某些类型的材料、TI 产品和服务的使用和采购。这些条款包括但不限于适用于 TI 的半导体产品 (<http://www.ti.com/sc/docs/stdterms.htm>)、[评估模块](http://www.ti.com/sc/docs/sampters.htm)和样品 (<http://www.ti.com/sc/docs/sampters.htm>) 的标准条款。

邮寄地址：上海市浦东新区世纪大道 1568 号中建大厦 32 楼，邮政编码：200122
Copyright © 2017 德州仪器半导体技术（上海）有限公司