



## 摘要

MSPM0Lxx 系列微控制器 (MCU) 产品系列是 MSPM0 的子系列，提供多种具有超低功耗和集成式模拟数字外设的 32 位 MCU，适用于检测、测量和控制应用。在执行复杂的实时应用的同时降低功耗是近期嵌入式应用面临的一项主要挑战。本文旨在构建一个简单的框架，以帮助开发人员了解 MSPM0Lxx 系列低功耗特性、如何降低功耗以满足基于 MSPM0 的特定需求以及如何评估和测量功耗。

## 内容

1 概述.....	2
2 PMCU 中的低功耗特性.....	4
2.1 概述 .....	4
2.2 电源管理 (PMU).....	5
2.3 时钟模块 (CKM).....	7
3 低功耗优化.....	9
3.1 低功耗基础知识.....	9
3.2 MSPM0 低功耗特性用法.....	10
3.3 软件编码策略.....	11
3.4 硬件设计策略.....	11
4 功耗测量与评估.....	13
4.1 电流评估.....	13
4.2 电流测量.....	13

## 商标

EnergyTrace™ and LaunchPad™ are trademarks of Texas Instruments.

Arm® and Cortex® are registered trademarks of Arm Limited.

所有商标均为其各自所有者的财产。

## 1 概述

TI 的可扩展 MSPM0Lxx MCU 基于 Arm® Cortex®-M0+ 内核，最大 CPU 速度为 32MHz，可提供具有低功耗特性的基本通用功能。这些 MCU 具有高达 256KB 的片上闪存和高达 32KB 的片上 SRAM，并具有扩展的可扩展模拟集成。它们还集成了高效的电源架构和各种功耗模式，有助于降低功耗并简化应用设计。其总体低功耗性能如表 1-1 所示。有关更多详细信息，请参阅器件特定的数据表。

表 1-1. MSPM0Lxx 系列低功耗性能

低功耗模式	MSPM0Lxx
运行 <sup>(1)</sup> <sup>(5)</sup>	85 $\mu$ A/MHz
睡眠 <sup>(2)</sup> <sup>(5)</sup>	4MHz 时为 200 $\mu$ A
停止 <sup>(3)</sup> <sup>(5)</sup>	32kHz 时为 50 $\mu$ A
待机 <sup>(4)</sup> <sup>(5)</sup>	1.1 $\mu$ A
关断 <sup>(5)</sup>	50nA，具有 IO 唤醒能力

- (1) MCLK = SYSOSC = 32MHz，CoreMark，从闪存执行
- (2) MCLK=SYSOSC，CPU 暂停
- (3) SYSOSC 关闭，DISABLESTOP = 1，ULPCLK = LFCLK，SRAM 和闪存处于保持状态
- (4) STOPCLKSTBY=1，TIMG0 启用
- (5) 25°C 且 VDD = 3.3V 时的典型值。所有输入连接至 0V 或 VDD。输出不供应或吸收任何电流。所有外设均禁用。

本应用手册旨在构建一个简单的框架，以帮助开发人员了解 MSPM0Lxx 系列低功耗特性、如何优化功耗以满足基于 MSPM0 的特定需求以及如何评估和测量功耗。图 1-1 显示了低功耗设计的设计流程。

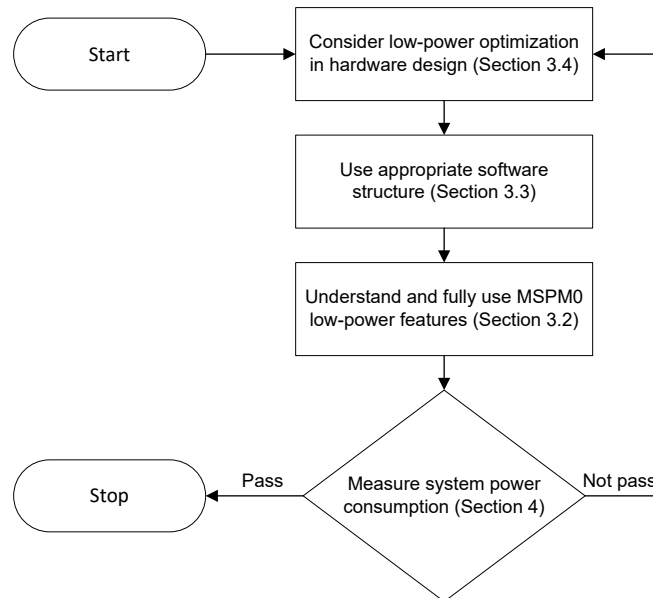


图 1-1. 低功耗开发流程

表 1-2 列出了开发期间要检查的项目。

表 1-2. 低功耗开发清单

数量	分类	条目	备注
1	硬件设计	MCU 电源	将 MCU 电源电压降至 1.62V 以下。
2		电阻器	在满足系统要求后选择大电阻器。
3		电容器	选择低泄漏电容器。
4		电源 IC	通常选择线性稳压器。

表 1-2. 低功耗开发清单 (continued)

数量	分类	条目	备注
5	软件编码	条件代码执行	使用条件唤醒和代码执行结构。
6		非阻塞编程	使用 <code>while</code> 循环避免阻塞模式。
7		优化代码大小	选择 TI Arm Clang，完全使用编译器功能并编写具有良好编码风格的代码。
8	MSPM0 低功耗特性用法	使用低功耗模式	根据应用要求使用不同的功耗模式 ( <code>RUN</code> 、 <code>SLEEP</code> 、 <code>STOP</code> 、 <code>STANDBY</code> 和 <code>SHUTDOWN</code> ) 和三个低功耗模式策略选项 ( <code>XX0</code> 、 <code>XX1</code> 、 <code>XX2</code> )。
9		降低系统时钟和外设工作频率	仅使用所需的系统时钟频率。降低外设工作频率，并在不使用时将其关闭。
10		I/O 配置	将未使用的引脚保留为默认的高阻态配置。减少使用内部上拉或下拉电阻器。请注意低功耗模式下的 IO 锁存器。
11		使用事件管理器	使用事件管理器实现外设触发 DMA 或外设触发外设以减少 CPU 使用量。
12		使用模拟外设的低功耗特性	在 ADC、COMP、OPA 和 GPAMP 的性能和低功耗之间实现折衷。
13		从 RAM 运行代码	将部分常用代码从闪存移动到 RAM。

## 2 PMCU 中的低功耗特性

电源管理和时钟单元 (PMCU) 为器件提供所有电源、时钟、复位和系统控制服务，是影响该器件低功耗性能的关键外设。以下各节将帮助用户更好地了解此外设，以便更轻松地在第 3 节中的策略。电流部分介绍了 PMCU 中与低功耗相关的特性和衰减。有关其他特性、详细外设说明和寄存器控制，请参阅相关的技术参考手册。

### 2.1 概述

为提供此功能，PMCU 包含三个子模块：电源管理单元 (PMU)、时钟模块 (CKM) 和系统控制器 (SYSCTL)。

#### 2.1.1 电源域和电源模式

为了实现不同的功率级别，器件上提供了两个内核电源域：提供了 PD1 和 PD0 以及五种工作模式（功耗模式），以降低器件功耗：运行、睡眠、停止、待机和关断。图 2-1 展示了器件每个工作模式下可用的域。

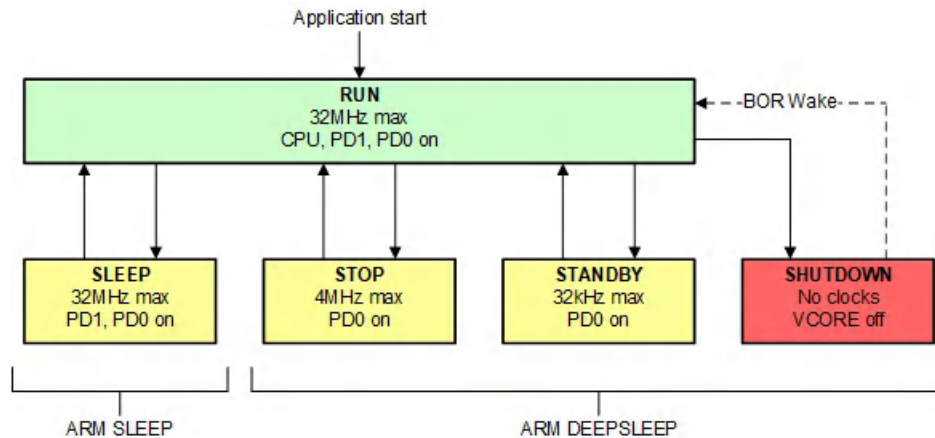


图 2-1. MSPM0Lxx 工作模式

表 2-1 详细介绍了每种工作模式下支持的功能。用户可以根据您的应用选择合适的工作条件，以满足对时钟频率、唤醒源、CPU 和外设要求的有限需求。

表 2-1 中使用的缩写：

EN：该功能会在指定的模式下启用。

DIS：该功能会在指定的模式下被禁用，但该功能的配置会保留。

OPT：该功能在指定的模式下是可选的，如果配置为启用，则保持启用状态。

NS：该功能在指定的模式下不会自动禁用，但不受支持。

OFF：该功能在指定的模式下会断电，不会保留任何配置信息。

表 2-1. MSPM0Lxx 不同工作模式下支持的功能

工作模式		运行			睡眠			停止			待机		判断	
		RUN0	RUN1	RUN2	SLEEP0	SLEEP1	SLEEP2	STOP0	STOP1	STOP2	STANDBY0	STANDBY1		
振荡器	SYSOSC	EN	EN	DIS	EN	EN	DIS	OPT	EN	DIS	DIS	DIS	OFF	
	LFOSC	EN											OFF	
时钟	CPUCLK	32 MHz (最大值)	32 kHz	32 kHz	DIS								OFF	
	MCLK 至 PD1	32MHz (最大值)	32 kHz	32 kHz	32 MHz (最大值)	32 kHz	32 kHz	DIS					OFF	
	ULPCLK 至 PD0	32 MHz (最大值)	32 kHz	32 kHz	32 MHz (最大值)	32 kHz	32 kHz	4 MHz (最大值)	4MHz	32 kHz	DIS	DIS	OFF	
	ULPCLK 至 TIMG0/1	32 MHz (最大值)	32 kHz	32 kHz	32 MHz (最大值)	32 kHz	32 kHz	4 MHz (最大值)	4MHz	32 kHz		DIS	OFF	
	MFCLK	OPT	DIS		OPT	DIS		OPT		DIS			OFF	
	LFCLK	32 kHz											DIS	OFF
	LFCLK 到 TIMG0/1	32 kHz											DIS	OFF
	MCLK 监测器	OPT										DIS	OFF	
PMU	POR 监测器	EN											OFF	
	BOR 监测器	EN											OFF	
	内核稳压器	全驱动					减速驱动			低驱动			OFF	
核心功能	CPU	EN			DIS								OFF	
	DMA	OPT					DIS (支持的触发器)						OFF	
	闪存	EN					OPT			DIS			OFF	
	SRAM	EN					OPT			DIS			OFF	
外设	PD1 外设	OPT					DIS 或 OFF (取决于外设)						OFF	
	PD0 外设	OPT										OPT	OFF	
模拟	ADC	OPT							NS (支持的触发器)				OFF	
	OPA	OPT	NS		OPT	NS		OPT			NS		OFF	
	GPAMP	OPT											OFF	
	COMP/8 位 DAC	OPT	OPT (仅 ULP)		OPT	OPT (仅 ULP)		OPT			OPT (仅 ULP)			OFF
IOMUX 和 IO 唤醒		EN											具有 WAKE 的 DIS	
唤醒源		不适用			任何 IRQ			PD0 IRQ					IOMUX、NRST	

## 2.2 电源管理 (PMU)

电源管理单元 (PMU) 为器件生成稳压内核电源，并对外部电源进行监控。此外，还包含供 PMU 和其他模拟外设使用的带隙电压基准。

从图 2-2 中看到，电源管理单元 (PMU) 可以提供对外部电源的监控，这是低功耗应用中的一个常见功能。此外，可对数字和模拟外设进行专用控制，以实现不同的功率级别。

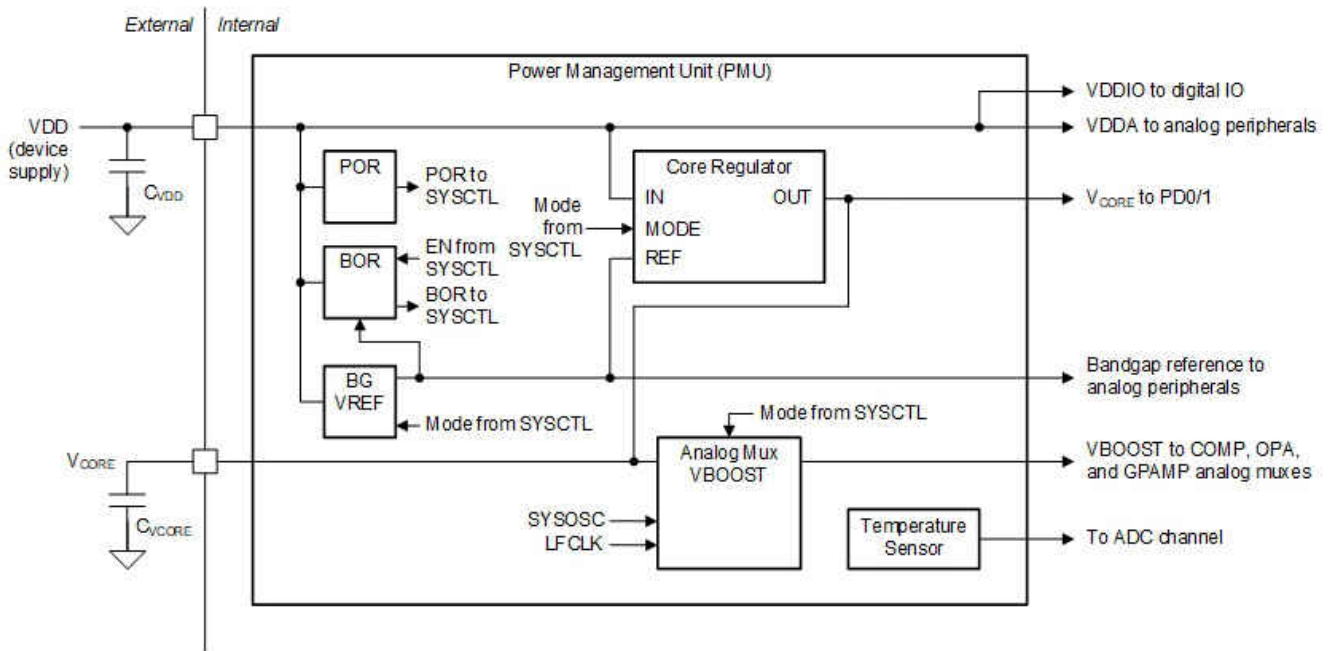


图 2-2. MSPM0Lxx PMU 方框图

### 2.2.1 电源监控器

有两个电源监控电路可供使用：

固定上电复位 (POR) 电路用于指示外部电源足以保证器件正常运行。

用户可编程的欠压复位 (BOR) 电路可确保外部电源保持足够的电压来支持器件的正确运行，可在启动后将此电压配置为其他 3 个 BOR 电平。

### 2.2.2 外设功耗控制

根据功耗模式设置，SYSCCTL 会自动控制 PD0 和 PD1 电源。用户无需手动控制电源。

进入停止或待机模式时，SYSCCTL 会强制 PD1 外设进入禁用状态，此时会保留大多数 PD1 外设配置设置。有关保留哪些外设寄存器的详细信息，请参阅 TRM 中的外设特定章节。

如果在输出配置中将 PD1 外设多路复用到 IO 引脚（通过 IOMUX），则在进入停止或待机模式时，最后一个有效 IO 输出状态将被锁存。此特性可以是漏电流源。

### 2.2.3 用于模拟多路复用器的 VBOOST

PMU 中的 VBOOST 电路会生成供模拟外设使用的内部 VBOOST 电源。它也由 SYSCCTL 模块自动管理。

由于 VBOOST 电路有启动时间要求（典型值为 12 μs），用户需要在模拟外设的上电速度和低静态电流之间做出选择。表 2-2 显示了 VBOOST 控制的行为。

表 2-2. VBOOST 控制

模式	VBOOST 启用
ONDEMAND	仅当启用 COMP、OPA 或 GPAMP 时，SYSCCTL 才会自动启用 VBOOST。
ONACTIVE	当器件处于 RUN 或 SLEEP 模式时，强制启用 VBOOST。如果启用了 COMP、OPA 或 GPAMP，VBOOST 也会在 STOP 或 STANDBY 模式下保持启用。
ONALWAYS	在除 SHUTDOWN 外的所有工作模式中，VBOOST 均被强制启用。

VBOOST 电路需要运行一个功能时钟，根据当前使用的 MCLK/ULPCLK 树源，它可以是 SYSOSC (4MHz 输出) 或 LFCLK (32kHz)，具体由 SYSCCTL 自动选择。然而，某些 VBOOST 工作条件要求它的频率是 4MHz (源自 SYSOSC)，而不是 32kHz (源自 LFCLK)。这类条件包括：

1. OPA 运行或快速模式 COMP 运行
2. VBOOST 正在启动 ( 从禁用状态转换到启用状态 )

### 2.3 时钟模块 (CKM)

时钟模块包含内部振荡器、时钟监测器以及时钟选择和控制逻辑。还提供了频率时钟计数器，用于根据 LFCLK 或 IO 引脚上提供的基准周期/脉冲来检查和/或校准高速时钟的频率。

通常，时钟源和时钟频率会对系统功耗产生很大影响。由于 SYSCTL 控制时钟源在不同功率模式之间的切换，用户只需为时钟选择合适的振荡器时钟源，并根据其典型应用使用频率范围有限的时钟。图 2-3 显示了经过简化的方框图。

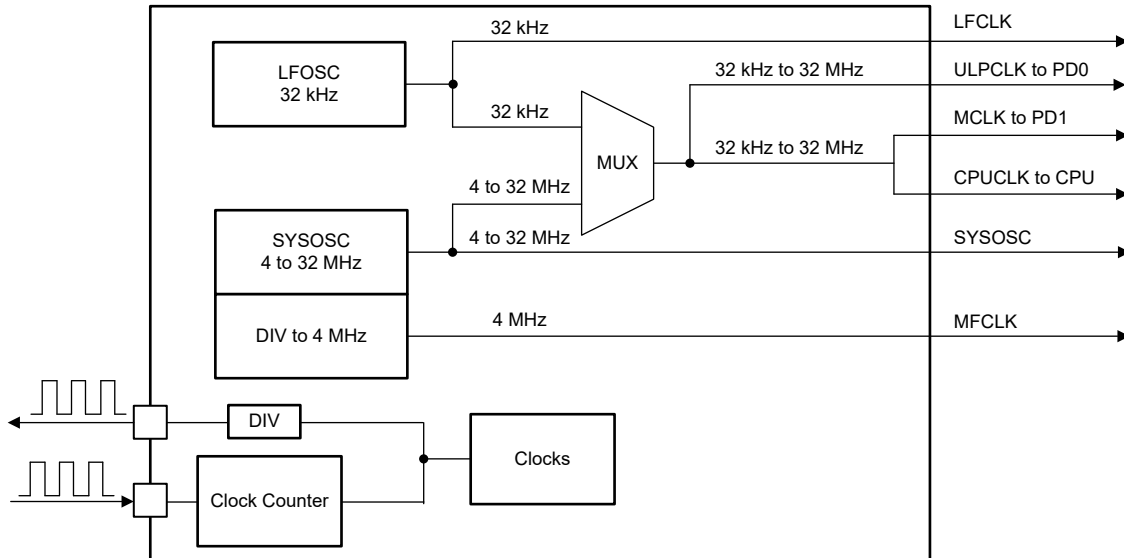


图 2-3. MSPM0Lxx CKM 方框图

#### 2.3.1 振荡器

系统中只有内部振荡器，没有外部振荡器，可实现低成本。对于低频振荡器，它主要用于帮助系统实现低功耗。

以下是内部振荡器：

- LFOSC：低频振荡器 ( 典型频率为 32kHz )
- SYSOSC：系统振荡器 ( 4MHz 或 32MHz 工厂校准频率、16MHz 或 24MHz 用户校准频率 )，具有一个时钟周期换档功能。

#### 2.3.2 时钟

CKM 接收振荡器输出并生成供器件使用的各种功能时钟。与时钟配合使用的不同振荡器时钟源有助于满足不同的低功耗要求 ( 请参阅表 2-3 )。用户可以为不同的外设选择具有合适时钟范围的时钟。

表 2-3. 时钟

时钟名称	频率范围	源	方向
CPUCLK	32 kHz 至 32 MHz	LFCLK、SYSOSC	CPU
MCLK			PD1
ULPCLK			PD0
SYSOSC	4 至 32 MHz	SYSOSC	PD1、PD0
MFCLK	4MHz	SYSOSC	PD1、PD0
LFCLK	32 kHz	LFCLK	PD1、PD0
MFCLK	4MHz	SYSOSC	PD1、PD0

**表 2-3. 时钟 (continued)**

时钟名称	频率范围	源	方向
LFCLK	32 kHz	LFCLK	PD1、PD0
RTCCLK			RTC

### 2.3.3 异步快速时钟请求

外设可配置为向 SYSCTL 异步发送硬件请求以实现一个源自 SYSOSC 的快速时钟源 (32MHz)，即使器件在 STOP 或 STANDBY 模式下运行也是如此。这种机制非常适合 MCLK/ULPCLK 树通常来自 LFCLK (32kHz) 或 SYSOSC (4MHz) 但暂时需要更快的时钟来快速处理外设事件外设活动的应用。可从表 2-4 中获取外设支持信息。

**表 2-4. 针对异步快速时钟请求的外设支持**

外设	用途	请求源
RTC	从 RTC 事件中快速唤醒 CPU	RTC IRQ 至 CPU
TIMG0 和 TIMG1	从 TIMG0/TIMG1 事件中快速唤醒 CPU	TIMG0 或 TIMG1 到 CPU 的 IRQ
GPIO	从 GPIO 事件中快速唤醒 CPU	GPIO 活动
比较器	从比较器事件中快速唤醒	比较器事件
SPI	暂时使用快速时钟生成位时钟	SPI 活动
I2C	暂时使用快速时钟生成位时钟	I2C 活动
UART	暂时使用快速时钟来生成波特率	UART 活动
ADC	在低功耗模式下临时运行 SYSOSC 以支持计时器触发的 ADC 运行	ADC

SYSCTL 可以配置为在对 32MHz 时钟速率的 CPU 发出任何 IRQ 请求时生成异步快速时钟请求。当系统以 LFCLK 速率 (32kHz) 运行时，这将提供超低延迟中断处理。

### 2.3.4 SHUTDOWN 模式处理

在配置器件并进入 SHUTDOWN 模式时，内核稳压器将断电，器件寄存器内容和 SRAM 内容将丢失。退出 SHUTDOWN 模式会产生 BOR 级别的复位。在进入 SHUTDOWN 模式时可以使用两种机制保留器件状态：IO 锁存和小型关断存储器。



## 3 低功耗优化

### 3.1 低功耗基础知识

在介绍如何优化功耗之前，以下内容可帮助读者了解有关低功耗的一些基本概念。在 MCU 中，功耗主要来自 2 部分：动态功耗和静态功耗（请参见图 3-1）。

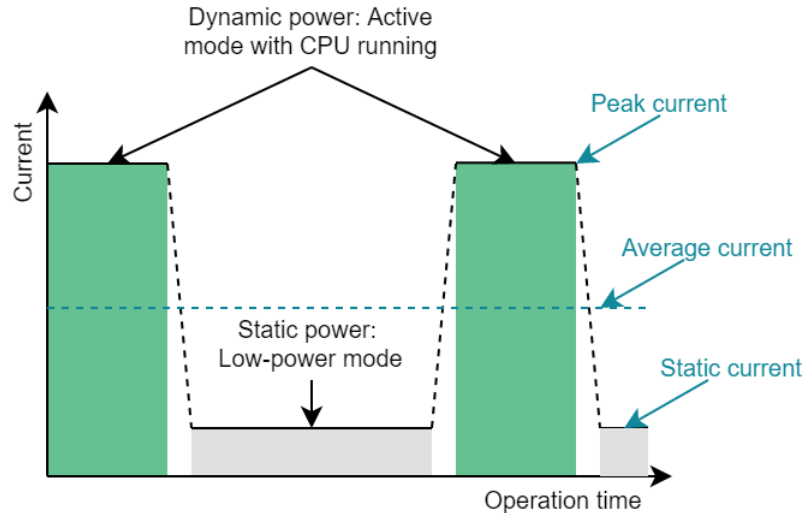


图 3-1. 功耗演示

#### 动态功耗

动态功耗是指 CPU 和大部分外设运行时的电流。这是整个运行期间的最高电流，称为峰值电流。电源可以是 CPU、闪存、RAM、电源管理单元 (PMU)、数字外设和模拟外设。动态功耗一般可分为开关 CMOS 电路时的电流和模拟电路的偏置电流。

由于 CMOS 反相器的结构，主要在切换输入电压时产生功耗。此功耗可以用下面的等式来描述。 $U$  是系统电压， $f$  是开关频率， $C$  是负载电容。

$$P = U^2 * f * C \quad (1)$$

从该公式可以看出，考虑到负载电容无法改变，有两种方法可帮助降低动态功耗。第一种方法是降低系统电压，这种方法非常有用，但受到 MSPM0 工作电压范围的限制。设计人员还需要检查外设的工作电压，该电压可能高于 MCU 的最小工作电压。此外，还应为电源留有一定的电压裕度。

第二种方法是降低系统频率。但是，因为高工作频率所需的工作时间较少，但偏置电流产生的功耗会增加，所以这种方法通常并不理想。通常，最好的选择是快速完成任务并返回低功耗模式。

#### 静态功耗

静态功耗主要是指 CPU 和大多数外设器件关闭时模拟电路和数字电路的偏置电流和漏电流。这将是整个运行期间的最低电流，称为静态电流。

在这种模式下，系统控制器、PMU 和 IO 等模拟电路以及实时时钟 (RTC) 和看门狗计时器等数字电路需要一定的偏置电流来维持基本功能和唤醒可能性。最佳策略是关闭未使用的模块，并在合适的工作频率和适当的 MCU 工作模式下使用这些模块。

漏电流是因 CMOS 器件中使用的 MOSFET 运行状态不理想造成的，尤其是在工艺技术水平下滑的情况下。漏电流随着电源电压和工作温度的升高而增加。这部分功耗取决于您选择的 MCU。

#### 优化方向

对于某些应用，最关心的部分是峰值电流。它可能取决于有限的电流源（如 4-20mA 电流环路应用），或者设计人员希望充分利用电池容量，因为大电流会更快地达到端接电压。优化方向应该集中在动态功耗范围和降低峰值电流上面。

对于大多数应用，尤其是电池工具，最关心的电流是平均电流，它决定了系统可以运行多长时间。优化方向应关注于缩小动态功耗范围、降低峰值电流和静态电流。公式如下所示。公式中的电流指的是平均电流。

$$A) \text{verage current} \approx \frac{I_{Active}t_{Active} + I_{PoWer - doWn}t_{PoWer - doWn}}{t_{Active} + t_{PoWer - doWn}} \quad (2)$$

计算不同模式下的平均电流并不容易，因此如需更精确的低成本方法，请参阅节 4.2。

## 3.2 MSPM0 低功耗特性用法

此部分简要介绍了基于 MSPM0 的器件级节能特性。有关外设配置，请参阅相关的 TRM。有关一些详细的负载电流值，请参阅器件特定数据表。

### 3.2.1 低功耗模式

使用低功耗模式，可以使器件在运行时尽可能正常工作，因此是行之有效的降低总平均功耗的解决方案。关键方法是提供不同的时钟源、时钟频率和电源域，以实现不同的功耗级别。

常用方法包括在不同的功耗模式（运行、睡眠、停止、待机和关断）和三个低功耗模式策略选项（XX0、XX1、XX2）之间切换。请记住同时利用功耗、唤醒源/时间和外设方面的应用要求。有关低功耗模式的基础知识，请参阅第 2 节。

### 3.2.2 系统时钟和外设工作频率

可使用多个时钟分频器来配置系统时钟和外设时钟。通过将寄存器时钟分频器编程为最高值来提供所需的最低时钟频率，可以进一步降低功耗。

降低外设工作频率也有帮助。例如，降低 ADC 采样和转换频率以及 UART、SPI 或 I2C 传输频率。

### 3.2.3 I/O 配置

I/O 设置是导致意外高功耗的最常见问题。

对于未使用的引脚，IOMUX 配置应保持默认（高阻态）状态。

对于使用的数字输入引脚，请注意内部的上拉电阻或下拉电阻。如果输入电压不兼容，会造成漏电流。当输入电压为 VCC 或 VSS 时，数字输入引脚的功耗最低。如果电压介于 VCC 或 VSS 之间，内部 MOSFET 将在线性区内偏置，并且会产生大量功耗。当未使用的数字输入引脚悬空时，通常会发生这种情况。

对于使用的数字输出引脚，在进入低功耗模式时，请注意如果不进行进一步的反转控制，最后一个有效 IO 输出状态可能会被锁存。它可能会导致额外的功耗。

### 3.2.4 事件管理器

事件管理器是一个模块，可将数字事件从一个实体传输到另一个实体。它通过一组定义的事件发布者（发生器）和订阅者（接收器）实现事件传输，这些事件发布者和订阅者通过包含静态路由和可编程路由组合的事件结构进行互连。

表 3-1 显示了事件传输类型。用户可以充分利用事件外设的特性，减少对 CPU 的访问。

表 3-1. 事件传输类型

活动类型	发布者	订阅者
IRQ	外设	CPU
DMA 触发	外设	DMA
常规触发器	外设	外设

**将事件管理器与 DMA 配合使用：**它可以提高数据处理速度，CPU 可以进入休眠模式，直到 DMA 传输完成。

**将事件管理器与外设配合使用：**可以减少 CPU 注入，并实现快速反应。您可以根据应用设置自定义硬件触发路由，例如计时器触发 ADC 进行采样或比较器触发 GPIO 来关闭。

### 3.2.5 模拟外设低功耗特性

MSPM0 设备的外设具有特定的功耗特性，因而支持低功耗应用的设计和开发，同时保持高度灵活性。有关详细参数，请参阅数据表。

#### ADC

ADC 支持 12 位、10 位和 8 位模数转换模式。选择低转换模式可以使用更少的转换周期并降低功耗。

ADC 有两种断电模式，由 PWRDN 配置。第一种模式是 ADC 在转换结束以及无需立即使下一个采样信号有效时自动断电。第二种模式是当启用外设时 ADC 保持通电状态。使用默认模式时消耗的电流较小。

#### COMP

MSPM0 上的比较器有两种功耗模式。快速模式对信号变化的反应最快。低功耗模式可在功能和功耗之间实现平衡。请注意，比较器的默认配置是快速模式。

#### OPA

OPA 是一款具有可编程增益级的零漂移斩波稳定型运算放大器。除了输出电流之外，还有两种高性能配置也会影响电流消耗，如表 3-2 所示。在默认低性能设置下，OPA 的功耗更低。

**表 3-2. OPA 运行模式**

参数	配置选项
轨到轨输入 (RRI)	启用/禁用
增益带宽积 (GBW)	6MHz ( STD 模式 ) /1MHz ( LP 模式 )

#### GPAMP

GPAMP 是一款具有轨到轨输入和输出的斩波稳定型通用运算放大器。轨到轨输入范围会影响电流消耗。在默认低性能设置下，GPAMP 的功耗更低。

### 3.2.6 从 RAM 运行代码

将部分代码从闪存移动到 RAM 也有助于降低功耗。首先，代码在 RAM 中的运行速度更快。对于 MSPM0，RAM 时钟与 CPU 时钟相同，最高为 80MHz。但是，通常需要经历闪存等待状态。其次，在 RAM 中运行的代码可能需要的  $\mu\text{A}/\text{MHz}$  更低。有关详细信息，请参阅特定器件数据表。

## 3.3 软件编码策略

### 条件代码执行

一种常用的软件结构是使用条件唤醒和代码执行结构。RTC 是一种常见的唤醒源。如果 MCU 没有 RTC，应用程序可以使用 TIMG 作为替代。有关静态电流信息，请参阅数据表。

### 非阻塞编程

在低功耗应用中，需要使用 while 循环来避免阻塞模式。更容易接受的方法是，将非阻塞模式与中断和轮询配合使用以唤醒 CPU 来处理任务。虽然它会牺牲时间和资源来唤醒和响应中断源、压入并弹出栈，但却可以降低更多功耗。

### 优化代码大小

较小的代码大小意味着 CPU 在运行模式下完成任务所需的时间更短。最简单的方法是选择高度优化的编译器（例如 TI Arm Clang 编译器）并利用提供的代码优化级别。您还可以花些时间或借助编码技巧来实现这一目标。

## 3.4 硬件设计策略

### MCU 电源

MSPM0 支持在 1.62V 至 3.6V 电压范围内运行。为了降低功耗，用户可以为 MCU 提供不低于 1.62V 的电压。但是，需要注意一些外设工作限制，例如内部基准。当电源电压低于 2.7V 时，只能使用 1.4V 基准电压，不能使用 2.5V 基准电压。

### 电阻器

电阻广泛应用于电路中，起到限流或分压的作用。在考虑驱动强度和电压稳定时间后，请确保所选电阻值足够大。用作分压器时需要特别注意，因为可能存在恒定的漏电流。对于一些低成本应用，可以使用可控的 GPIO 作为电压源。

### 电容器

电路中使用的电容器的类型和尺寸比电阻更多。所有电容的漏电流损耗都较小。铝电解电容和钽电容可提供较大的电容和漏电流，漏电流的典型值为  $\mu\text{A}$  级，接近 MSPM0 的待机电流。而陶瓷电容和箔电容的容量和漏电流较小，漏电流的典型值为  $\text{nA}$  级。

通常，电容值较高的电容器往往具有较高的漏电流，额定电压较高的电容器具有较低的漏电流，而且相对于封装尺寸，电容也较小。此外，施加高电压和提高工作温度也会增加漏电流。请记得在硬件设计中参阅电容器数据表。

但是，在一些典型使用场合下仍然需要使用大电容。如果用户更关心峰值电流，可以使用大电容来降低峰值电流并将其分散到静态电流中。在这种情况下，用户需要协调峰值电流与静态电流。

### 电源 IC

开关稳压器可在重负载下实现高效率。然而，它的效率较低，并且通常在弱负载下功率噪声较高。对于线性稳压器，其效率取决于输入和输出电压设置，并且功率噪声和成本较低。对于某些电池应用，如果电池输入电压全部由 MCU 提供，移除电源 IC 可能是一个不错的选择。用户需要根据自己的应用进行选择。

### 晶体

通常，在低功耗模式下，使用外部低频 32kHz 晶体的功耗比使用内部晶体的功耗更低。使用外部晶体时，请记得参阅晶体数据表以了解合适的负载电容值和布局规则。电容使用不当会导致晶体频率偏移，甚至起振失败。

如使用外部高频晶体，由于使用不同的高频时钟来提供 MCLK (例如 HFCLK 或 PLL) 时无法禁用 SYSOSC，因此功耗甚至比使用内部高频晶体高。这是因为当 MCLK 源自 HFCLK 或 PLL 时，由 SYSCTL 逻辑使用 SYSOSC。

## 4 功耗测量与评估

### 4.1 电流评估

电流评估是低功耗应用的常见要求，可用于评估系统运行时间并选择合适的电源 IC。有两种方法可以评估电流。

首先，使用 **SysConfig** 中的配置并估算电流消耗。将来，**MSPM0** 将包含此功能。您需要输入 **ADC** 转换频率、运算放大器功耗模式、时钟频率等。它将输出以下值：

- 平均电流、功率
- 峰值电流、功率
- 估算电池寿命

其次，可以根据数据表中的参数计算电流。首先，请参阅数据表中的 **电源电流特性** 部分，了解特定功耗模式下的基本 **MCU** 电流消耗。其次，请参阅所有外设用于计算其电流消耗的规格。第三，将这些值相加以计算总电流消耗。

### 4.2 电流测量

常用工具包括万用表和示波器。普通万用表可能是最简单的功耗评估工具，但受到采样速度低和无时间戳的限制。示波器可与电流钳位或简单电阻结合使用，是检测最大功耗的出色工具。但是由于其分辨率和整个空间中存在的常见噪声，因而很难检测到 **uA** 级电流。

#### 4.2.1 电流测量

**EnergyTrace™** 技术是一种功率分析仪硬件工具，用于检测与 **Code Composer Studio IDE (CCS)** 配合使用时的平均功耗。它通过每个 **MSPM0 LaunchPad™** 开发套件上 **XDS110** 调试探针中的 **USB** 批量端点导出。工作系统如图 4-1 所示。

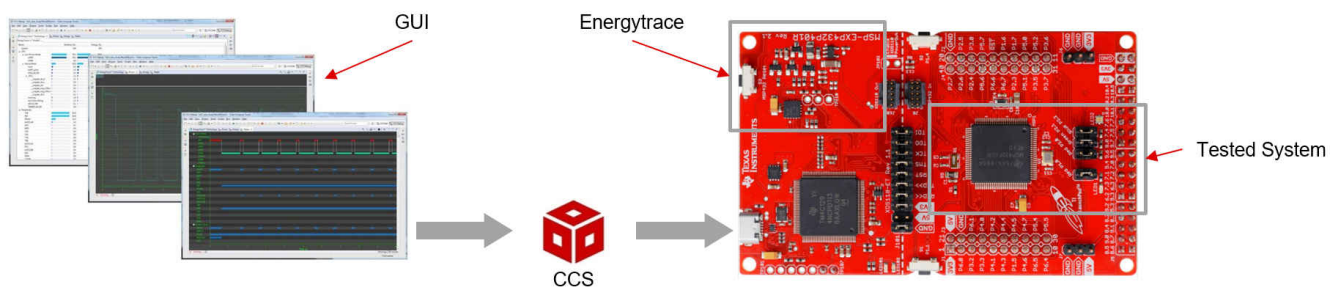


图 4-1. EnergyTrace 技术工作流程

**EnergyTrace** 实施了一种新方法测量超低功耗电流的电流消耗。软件控制的直流/直流转换器会生成目标电源并通过脉冲序列保持其稳定。直流/直流转换器电荷脉冲的密度与目标微控制器的能耗成正比。由于各个电荷脉冲的宽度保持不变，调试探针只需对每个电荷脉冲进行计数，然后对一段时间内的脉冲总数求和，进而计算出平均电流。测量精度由调试探针中的内置校准电路控制，该电路可量化单个电荷脉冲的能耗等价数值。采用这种方法时，即使是超短暂的器件耗能活动也会增加总耗能。[XDS110 用户指南](#)和 [EnergyTrace 技术](#)网站包含更多详细信息。

表 4-1 列出了基本电气规格。

**表 4-1. EnergyTrace 技术电气规格**

范围	精度	观察结果
$I < 25\text{mA}$	$\pm 2\% \pm 500\text{nA}$	校准期间和校准后 VBUS = 5V 保持恒定
$I > 25\text{mA}$ 且 $I < 75\text{mA}$	$\pm 5\% \pm 500\text{nA}$	校准期间和校准后 VBUS = 5V 保持恒定

## 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 © 2023，德州仪器 (TI) 公司