

应用笔记

使用外部SMPS的STM32L4xxxx的设计建议， 超低功耗高性能应用指南

引言

STM32L4xxxx微控制器使用具有高度灵活性和高级外设集的新型架构，获得一流的超低功耗值。STM32L4和STM32L4+系列产品提供最佳能效，在超低功耗领域首屈一指。

STM32L4xxxx器件基于Arm® Cortex®-M4，具有FPU内核。

STM32L4系列微控制器的工作频率最高80MHz，在频率为80MHz时达到100DMIPS的性能，而STM32L4+系列的工作频率最高120MHz，在频率为120MHz时达到150DMIPS的性能。它们全部集成了Chrom_ART Accelerator™，同时还能保持尽可能小的动态功耗。

STM32L4和STM32L4+系列采用灵活的功耗模式管理，可降低应用的整体功耗。 为了进一步使蓄电池使用寿命最大化，STM32L4xxxx超低功耗控制器具有外部SMPS（开关模式电源）版本通过从外部DC/DC（直流/直流）转换器而不是集成LDO生成V_{CORE}逻辑供电来提高运行模式下的能效。这些器件（标有后缀“P”）使用不同的引脚排列，用两个必须连接到外部SMPS的VDD12供电引脚取代两个GPIO引脚。因此，可用GPIO的数量减少了2个。“运行”模式下的预期功耗增益可高至~60%。

本应用笔记仅适用于表 1中所列产品（详情请参见相应数据手册[3]的订货代码）。

表1. 适用产品⁽¹⁾

类型	产品编号
STM32L4xxxx	STM32L433RC
	STM32L452RE
	STM32L476JG、STM32L476ZG
	STM32L496AG、STM32L496VG、STM32L496ZG
	STM32L4R5ZI、STM32L4R9ZI

1. 仅适用于标有后缀“P”的器件

目录

1	预期功率增益	5
2	硬件说明	6
2.1	硬件概述	6
2.2	V _{DD12} 供电规则	7
2.2.1	STM32L4系列	7
2.2.2	STM32L4+系列	7
2.3	如何合适的外部元件	9
2.4	选择SMPS	10
2.5	开关和控制方案的选择	10
3	HAL和BSP中提供的SMPS管理	12
3.1	打开/关闭SMPS	13
3.1.1	SMPS切换（关闭至打开）	13
3.1.2	SMPS切换（打开至关闭）	14
3.2	功耗状态转换	15
4	计算电流消耗	17
5	优化IoT和极低功耗应用	19
6	参考文档	20
7	版本历史	21

表格索引

表1. 适用产品 1

表2. Nucleo -144 SMPS板的典型增益，其中 $V_{DD12} = 1.1\text{ V}$ 且 $V_{DD} = 3.3\text{ V}$ （在运行模式下） ... 5

表3. Nucleo -144 SMPS板的典型增益，其中 $V_{DD12} = 1.05\text{ V}$ 且 $V_{DD} = 3.3\text{ V}$ 5

表4. SMPS引脚定义 12

表5. 参考文档 20

表6. 文档版本历史 21

表7. 中文文档版本历史 21

图片索引

图1.	内部主调压器概述	6
图2.	典型SMPS实现	9
图3.	异步复位典型波形	11
图4.	SMPS关闭至打开切换控制引脚序列	13
图5.	SMPS打开至关闭切换控制引脚序列	14
图6.	基于SMPS电压的可能转换, STM32L4系列	15
图7.	基于SMPS电压的可能转换, STM32L4+系列	16
图8.	无SMPS时的功耗	17
图9.	有SMPS时的功耗	18
图10.	系统频率等于80 MHz时的CoreMark™功耗与VDD供电	19

1 预期功率增益

通过使用外部开关模式电源（SMPS）而不是集成低压降调节器（LDO），可使用等于内部 V_{CORE} 供电电压与 V_{DD} 电压之比的因子来优化功耗。SMPS带来的改善只取决于SMPS效率和 V_{DD} 电压。

表 2代表了在Nucleo -144 SMPS板[2]上使用STM32L496器件获得的典型增益，其中 $V_{\text{DD12}} = 1.1 \text{ V}$ 且 $V_{\text{DD}} = 3.3 \text{ V}$ （在运行模式下）。

表2. Nucleo -144 SMPS板的典型增益，其中 $V_{\text{DD12}} = 1.1 \text{ V}$ 且 $V_{\text{DD}} = 3.3 \text{ V}$
（在运行模式下）

主调压器 电压范围	频率 (MHz)	代码	I _{DD}				
			SMPS 关闭		SMPS 打开		增益
			mA	μA/MHz	mA	μA/MHz	
Range 2	24	While	2.23	93	1.01	42	51%
		CoreMark™	2.69	112	1.19	50	52%
		精简代码	2.54	106	1.09	45	51%
范围1（SMPS关闭）或 范围2（SMPS打开）	80	While	8.88	111	3.33	42	63%
		CoreMark™	10.6	132	3.88	48	63%
		精简代码	9.66	121	3.55	44	63%

表3. Nucleo -144 SMPS板的典型增益，其中 $V_{\text{DD12}} = 1.05 \text{ V}$ 且 $V_{\text{DD}} = 3.3 \text{ V}$

主调压器 电压范围	频率 (MHz)	代码	I _{DD}				
			SMPS 关闭		SMPS 打开		增益
			mA	μA/MHz	mA	μA/MHz	
Range 2	24	While	2.23	93	0.96	40	57%
		CoreMark™	2.69	112	1.08	45	60%
		精简代码	2.54	102	1.02	42	60%

如上面的表格所示，使用SMPS可以显著降低微控制器的能耗，在该Nucleo板下增益可达63%。

2 硬件说明

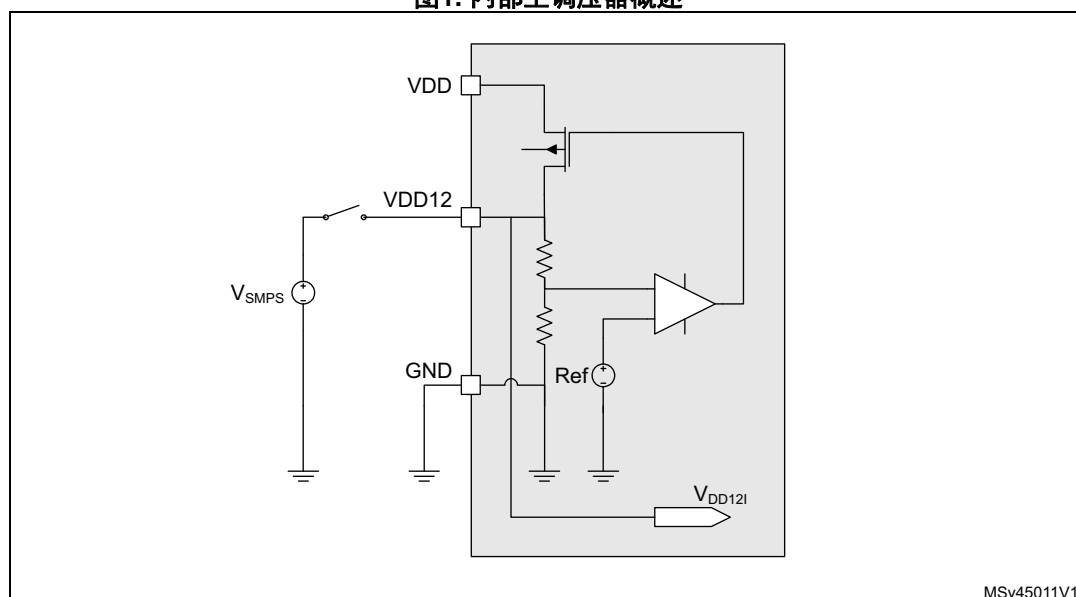
2.1 硬件概述

STM32L4xxxx超低功耗微控制器内置两个线性调压器，用于为其数字部分供电。

关于STM32L4系列各种功耗状态的详细信息，请参见AN4621[5]。

当STM32L4xxxx处于运行、睡眠或停止0模式时，它使用其内部主调压器。STM32L4 SMPS封装允许将外部电源连接到VDD12引脚。这种情况下，如果连接到VDD12引脚的外部电源超过内部生成的电压（ V_{DD12I} ）50 mV或更多，主调压器（MR）会被自动禁用，并由外部源提供数字电流。

图1. 内部主调压器概述



2.2 V_{DD12} 供电规则

2.2.1 STM32L4系列

由于 V_{DD12} 电压直接为内部逻辑供电，它必须符合以下规则：

1. V_{DD12} 在任何情况下都不得超过1.32 V的绝对最高电压（包括SMPS的波动和尖峰），否则存在可靠性和硬件退化的风险。
2. 如果应用只适合26 MHz以下的SYSCLK频率，则 V_{DD12} 电压必须高于1.05 V。这种情况下，必须应用主调压器范围2的闪存延迟和外设参数的限制（USB，RNG）。
3. 如果应用需要完整SYSCLK频率范围（最高80MHz），则 V_{DD12} 电压必须高于1.08V。这种情况下，必须应用主调压器范围1的闪存延迟参数。
4. 在为MCU通电时，必须断开SMPS。用户必须确保开关关闭，直至SMPS输出电压稳定下来。
5. 当发生复位时，以下规则适用：
 - a) 如果 V_{DD12} 低于1.25 V，则在复位信号传输期间（最长延时1 μ s），外部SMPS必须从VDD12引脚断开。
 - b) 如果 V_{DD12} 高于1.25 V，则无需断开SMPS。
6. 仅当SYSCLK频率 \leq 26MHz时，才允许 V_{DD12} 的SMPS从连接过渡到断开，避免主LDO重启时发生大压降。
7. 仅当处于运行、睡眠或停止0模式，并且仅当 V_{DD12} 高于主调压器输出电压至少50 mV时，才可以连接SMPS。在其他模式下，必须将SMPS断开。
8. V_{DD12} 必须在 V_{DD} 和内部LDO就绪后被输入。

2.2.2 STM32L4+系列

由于 V_{DD12} 电压直接为内部逻辑供电，它必须符合以下规则：

1. V_{DD12} 在任何情况下都不得超过1.32 V的绝对最高电压（包括SMPS的波动和尖峰），否则存在可靠性和硬件退化的风险。
2. 如果应用只适合26 MHz以下的SYSCLK频率，则 V_{DD12} 电压必须高于1.05 V（且可能是1.08 V）才能支持闪存写/擦除操作。这种情况下，必须应用主调压器范围2的闪存延迟和外设参数的限制（USB，RNG）。

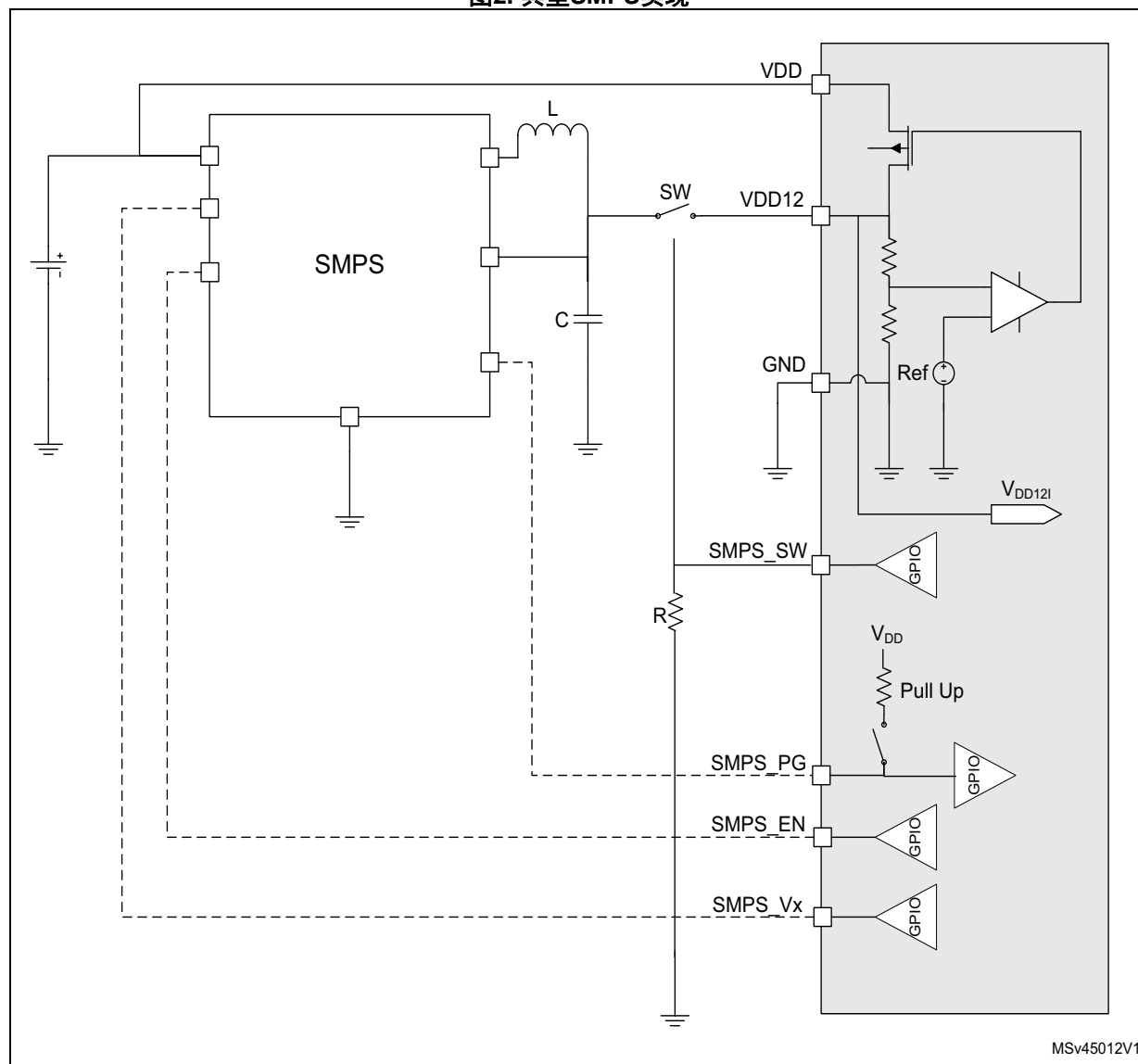
3. 如果应用需要完整SYSCLK频率范围（最高80MHz），则 V_{DD12} 电压必须高于1.08V。这种情况下，必须应用主调压器范围1闪存延迟参数。
4. 如果应用需要完整SYSCLK频率范围（最高120 MHz），则 V_{DD12} 电压必须高于1.14 V。这种情况下，必须应用主调压器范围1闪存延迟参数。
5. 在为MCU通电时，必须断开SMPS。用户必须确保开关关闭，直至SMPS输出电压稳定下来。
6. 当发生复位时，以下规则适用：
 - a) 如果 V_{DD12} 低于1.25 V，则在复位信号传输期间（最长延时1 μ s），外部SMPS必须从VDD12引脚断开。
 - b) 如果 V_{DD12} 高于1.25 V，则无需断开SMPS。
7. 仅当SYSCLK频率小于20MHz时，才允许 V_{DD12} 的SMPS从连接过渡到断开，避免主LDO重启时发生大压降。
8. 仅当处于运行、睡眠或停止0模式，并且仅当 V_{DD12} 高于主调压器输出电压至少50 mV时，才可以连接SMPS。在其他模式下，必须将SMPS断开。
9. V_{DD12} 必须在 V_{DD} 和内部LDO就绪后被输入。

2.3 如何合适的外部元件

在常规实现中，用户必须考虑两个要素，即SMPS和开关（请注意，一些SMPS器件集成了开关）。为了选择这两个关键要素，用户必须定义应用需要的最大电流（ I_{\max} ）和频率。

STM32CubeMX PCC工具使用给定CPU频率和外设配置计算电流。

图2. 典型SMPS实现



2.4 选择SMPS

对于STM32L4和STM32L4+系列，SMPS最高电压不得超过1.32 V，无论是SMPS波动还是瞬态（分别参见第 2.2.1 节中的规则1和第 2.2.2 节中的规则1）。

在选择SMPS最低电压时（第 2.2.1 节中的规则2和3，第 2.2.2 节中的规则2和3），必须考虑：

- R_{on} ：开关在给定输出电压和温度下“打开”电阻
- I_{max} ：应用的最大峰值电流
- V_{error} ：SMPS精度（通常为百分之几）加上有载时的电压变化量（负载瞬态）以及所选SMPS外部C和L导致的波动（参见SMPS供应商的应用笔记）。

$$V_{SMPS} > 1.05 + R_{on} \cdot I_{max} + V_{error} \text{ (for SYSCLK} \leq 26 \text{ MHz)}$$

$$V_{SMPS} > 1.08 + R_{on} \cdot I_{max} + V_{error} \text{ (for SYSCLK} \leq 80 \text{ MHz)}$$

$$V_{SMPS} > 1.14 + R_{on} \cdot I_{max} + V_{error} \text{ (for SYSCLK} \leq 120 \text{ MHz)}$$

某些情况下，当不需要SMPS时，可以在低功耗模式下的长周期内打开和关闭SMPS。但是，某些SMPS器件需要较长的设置时间（几ms），并且由于外部输出电容的再充电等原因，重启期间功耗较大（几mj）。

2.5 开关和控制方案的选择

选择开关时要考虑的主要参数是它在相应 V_{SMPS} 输出电压时的 R_{on} ，如上一组等式所表达的。

板设计者有责任证明VDD12引脚上的电压从未超过1.32 V且从未低于1.05 V（或1.08 V），即使是在开关打开或关闭时的瞬态期间。这意味着开关与VDD12引脚之间的PCB走线足够短，能够避免在阻抗变化（开/关或关/开）时形成显著波动。一种明智的做法是在每个VDD12引脚上添加一个1 nF去耦电容，以便减弱因开关栅极电容导致的波动和瞬变（例如在Nucleo-144 SMPS板[2]和Nucleo-64 SMPS板[6]上）。

注： 不能将此类额外电容增加到超过几nF，否则会导致STM32L4/L4+内部调压器不稳定。

另一个参数是发生异步复位时从SMPS隔离 V_{DD12} 的1 μ s（最大值）开关打开时间（第 2.2.1 节中的规则5，第 2.2.2 节中的规则6）。

图 2 中电阻 R 的用途如下：

- 它保证在带电复位时，开关的控制电压将开关配置为打开。请注意，还必须检查并确认 V_{DD} 升高时开关是打开的。另请参见开关数据手册。
- 它保证在打开时，开关控制信号被驱动为低，在发生异步复位时打开开关。这是因为 GPIO 在复位时处于 Hi-Z 状态。

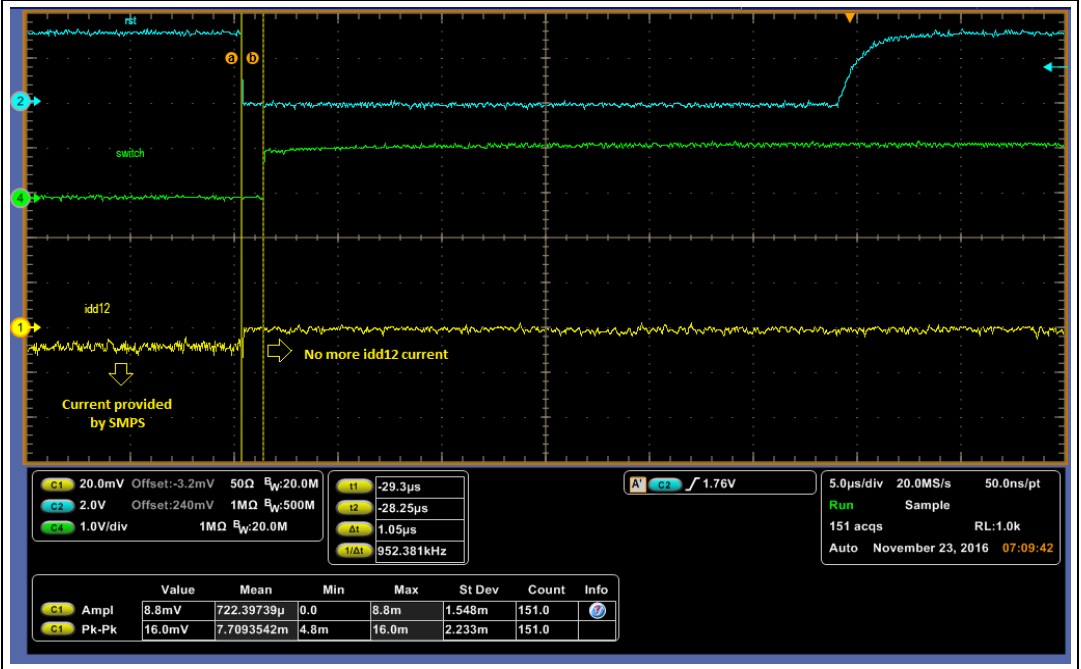
选择满足以下参数的 R 值：

- 当发生异步复位时，关闭开关的时间常量为 $1\mu s$ 。R 值越小，开关关闭速度越快。因此，R 值取决于开关控制信号输入电容，参见图 3。
- 仅运行模式下容许额外功耗。在这里，大 R 值减小了处于运行/睡眠/停止 0 模式时的额外电流。

注：可以使用其他硬件方案，具体取决于应用以及运行和/或低功耗模式下的容许电流。

图 3 所示为 $R = 33\text{ k}\Omega$ 时异步复位的捕获。

图3. 异步复位典型波形



- 蓝绿色线显示了 nRST 引脚上的异步复位。
- 绿线显示了开关反向控制信号 (nSMPS_SW)。
- 黄线是 SMPS 通过 VDD12 引脚上的开关提供的 (反向) I_{DD12} 。

此图显示，使用电阻 $R = 33\text{ k}\Omega$ 时，需要 $1\mu s$ 的断开时间（第 2.2.1 节中的规则 5）。

3 HAL和BSP中提供的SMPS管理

SMPS是由微控制器GPIO管理的外部元件，因此，用于控制它的软件功能位于BSP（板级支持包）中。用户应用负责确保第 2.2 节: *V_{DD12}供电规则*中所述规则的实施并允许功耗状态转换，因为HAL或BSP中没有防护机制。

表 4中定义了SPMS引脚。

表4. SMPS引脚定义

引脚	强制	类型	功能
SMPS_SW	有	输出	用于在VDD12引脚上使能SMPS供电的控制开关
SMPS_EN	无	输出	控制SMPS开/关
SMPS_PG	无	输入	检查SMPS供电是否正常
SMPS_V1	无	输出	选择SMPS电压

- HAL或BSP提供的主要SMPS功能如下：
- BSP_SMPS_Init(uint32_t Voltage);
初始化外部SMPS引脚：SMPS_EN、SMPS_SW、SMPS_PG、SMPS_V1。
 - BSP_SMPS_DeInit(void);
取消外部SMPS元件初始化。
 - BSP_SMPS_Enable(uint32_t Delay, uint32_t Power_Good_Check);
通过将SMPS_EN引脚置为“1”使能外部SMPS元件。
 - BSP_SMPS_Disable(void);
仅在SMPS_SW已经置为0时通过将SMPS_EN引脚清除为0禁用外部SMPS元件。否则，函数返回错误代码）。
 - BSP_SMPS_Supply_Enable(uint32_t Delay, uint32_t Power_Good_Check);
闭合开关， 通过将SMPS_SW引脚置为“1”使能VDD12引脚上的电源。
 - BSP_SMPS_Supply_Disable(void);
通过将SMPS_SW引脚清“0”禁用VDD12引脚上的SMPS供电。



3.1 打开/关闭SMPS

本节提供在电压介于1.05 V和1.2 V之间时打开/关闭SMPS的示例代码，在Nucleo -144 SMPS板上测试和使用[2]。

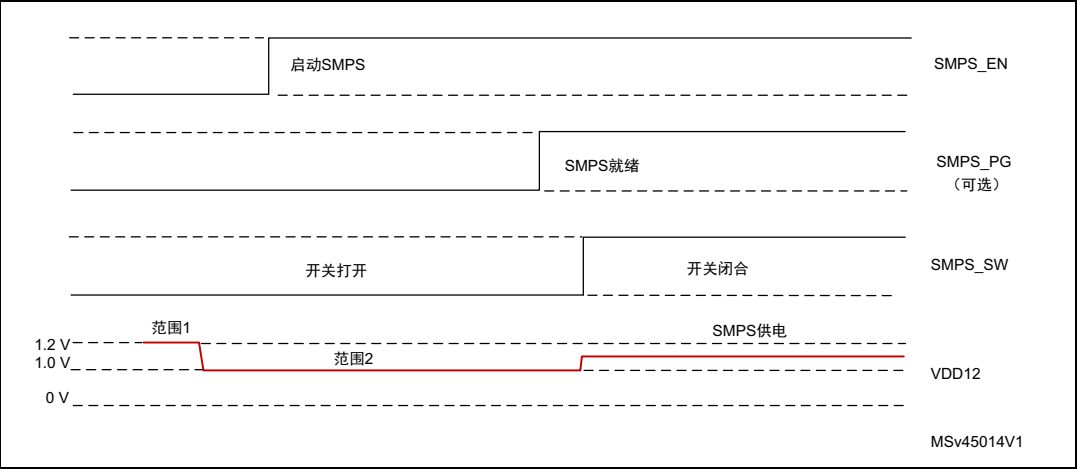
3.1.1 SMPS切换（关闭至打开）

```
/* Reduce main freq below 26MHz */
HAL_PWREx_ControlVoltageScaling(PWR_REGULATOR_VOLTAGE_SCALE2);
BSP_SMPS_Init(0);
/* Start SMPS and wait for 5 ms */
BSP_SMPS_Enable(5 /* in ms */, 0 /* no PG check*/);
/* Close switch if SMPS power good is ok */
if(BSP_SMPS_Supply_Enable(0, 1 /* Check PG*/) == SMPS_OK){
/* SMPS is used */
/* Increase Flash latency and then frequency to high performance range 1 if rule #3 is satisfied
(>1.08V) */
}
```

对于STM32L4+系列，BSP自动将FLASH_CFGR寄存器的LVEN位设置为1，以减少闪存存取时间，因为在Nucleo-144 V上，DD12高于1.08V。

图 3所示为SMPS控制引脚上上述序列的结果。

图4. SMPS关闭至打开切换控制引脚序列

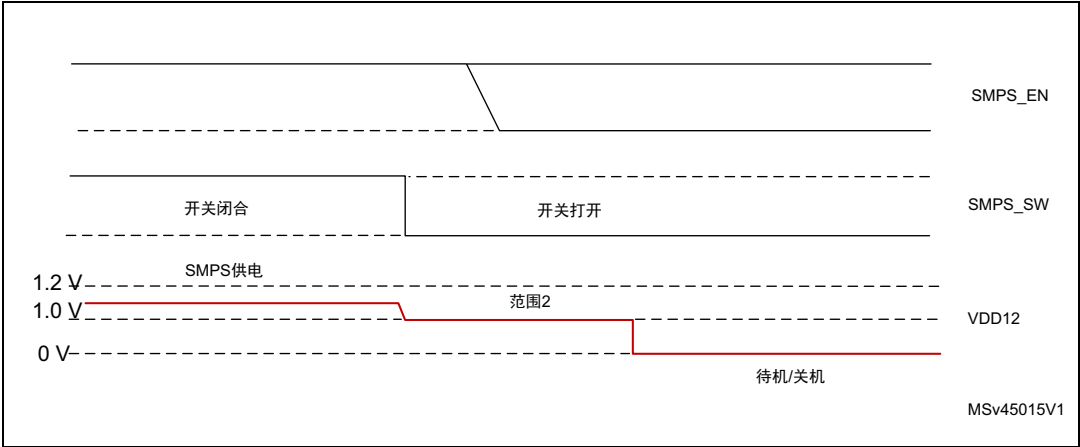


3.1.2 SMPS切换（打开至关闭）

```
/* Reduce Frequency and then Flash latency to performance range 2 (rule #6) */
/* Switch off */
BSP_SMPS_Supply_Disable();
/* Stop SMPS only if required */
BSP_SMPS_Disable();
/* Enter standby, STOP2 mode etc.. */
```

图 5所示为所有可能的转换，具体取决于SMPS的电压。

图5. SMPS打开至关闭切换控制引脚序列



3.2 功耗状态转换

如第 2 节所述，SMPS供电模式仅支持运行、睡眠或停止0模式，因此在从一个功耗模式切换至另一个时，在应用层面应特别注意。

STM32CubeMX PCC工具可用于检查可能的功耗模式转换。图 6和图 7总结了以下内容：

- 在SMPS_SW OFF和SMPS_SW ON之间切换时要执行的步骤
- 允许的功耗模式转换[5]

图6. 基于SMPS电压的可能转换，STM32L4系列

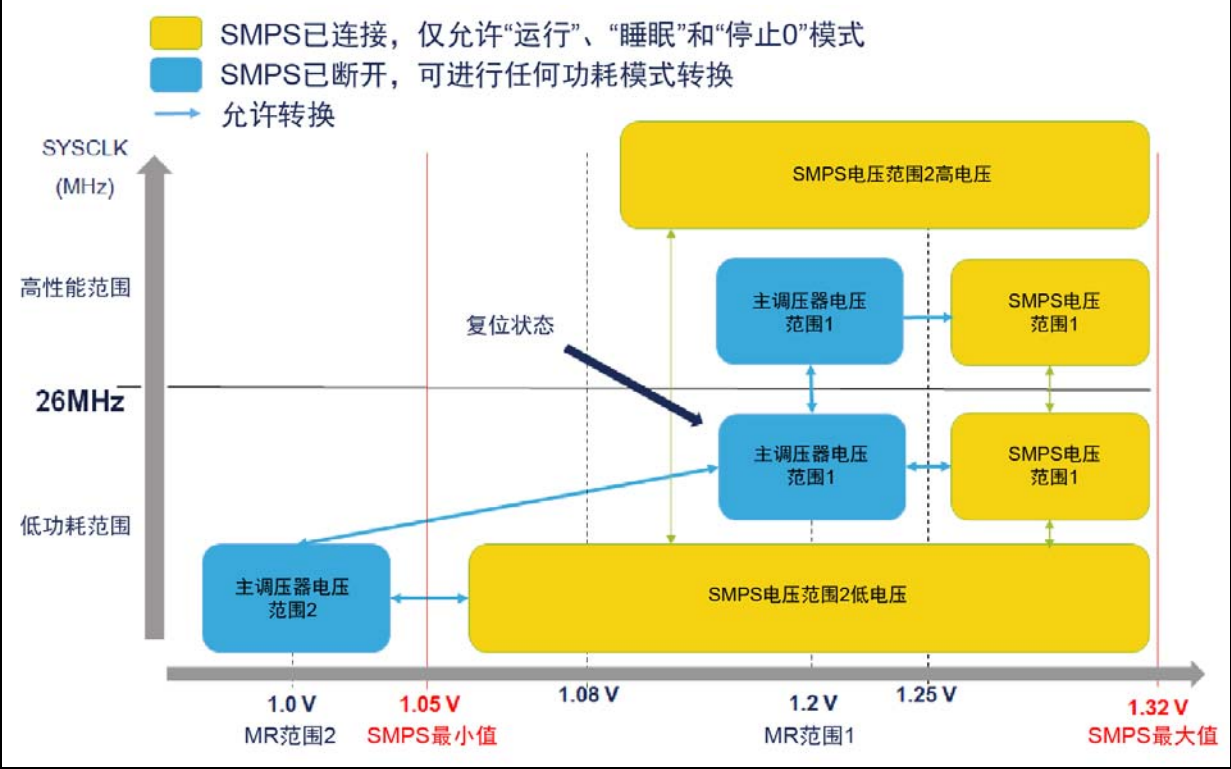
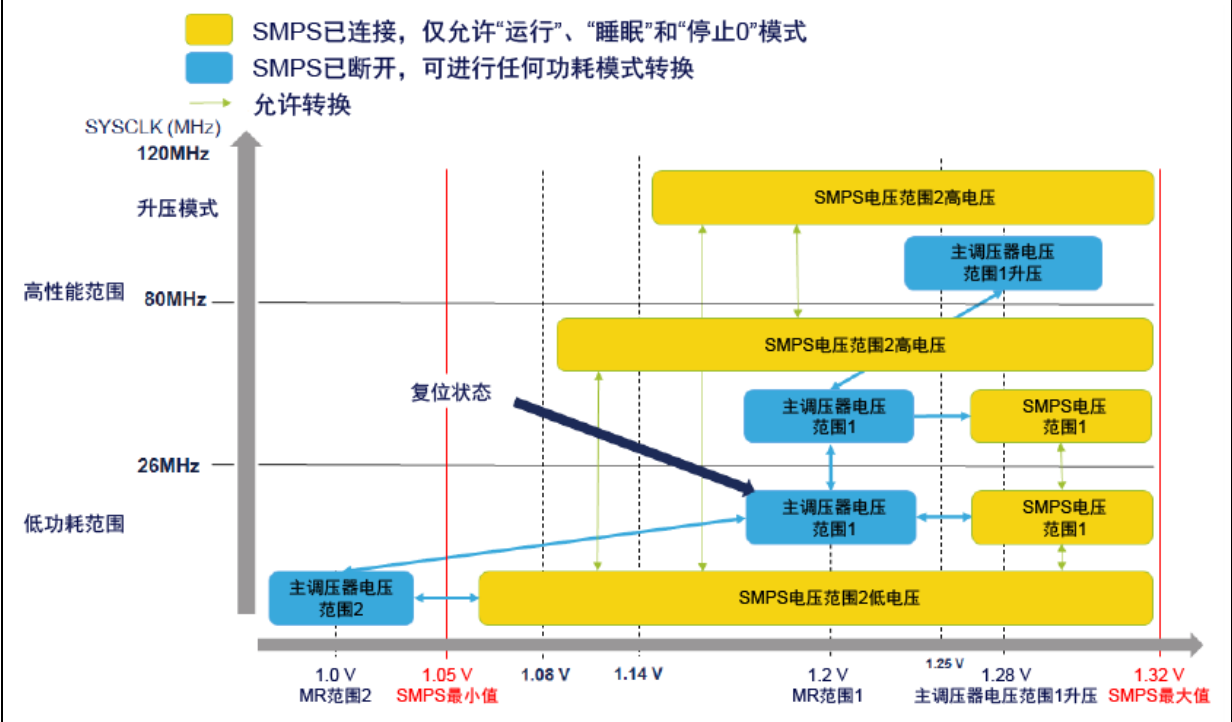


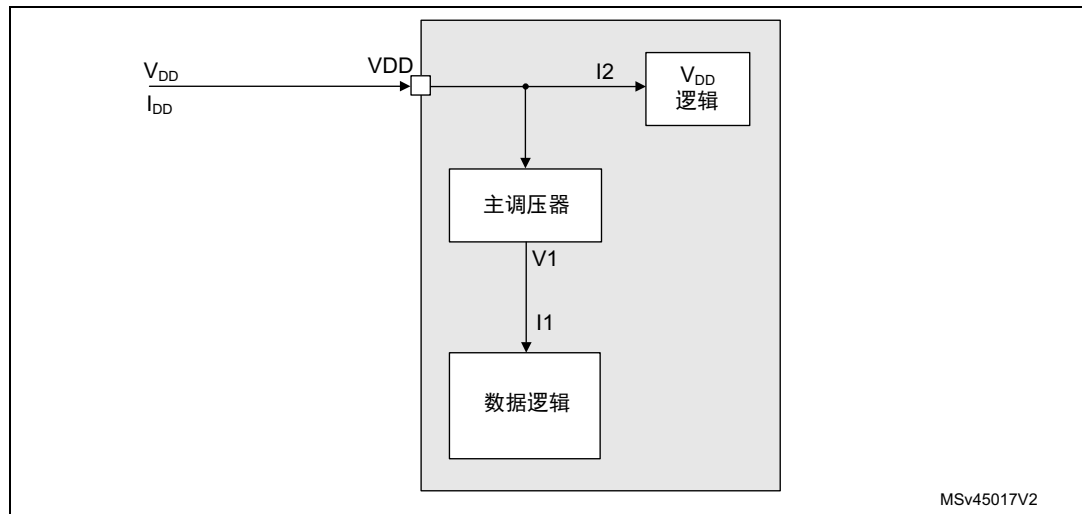
图7. 基于SMPS电压的可能转换，STM32L4+系列



4 计算电流消耗

图 8显示了使用SMPS时电流消耗的简单近似计算。

图8. 无SMPS时的功耗

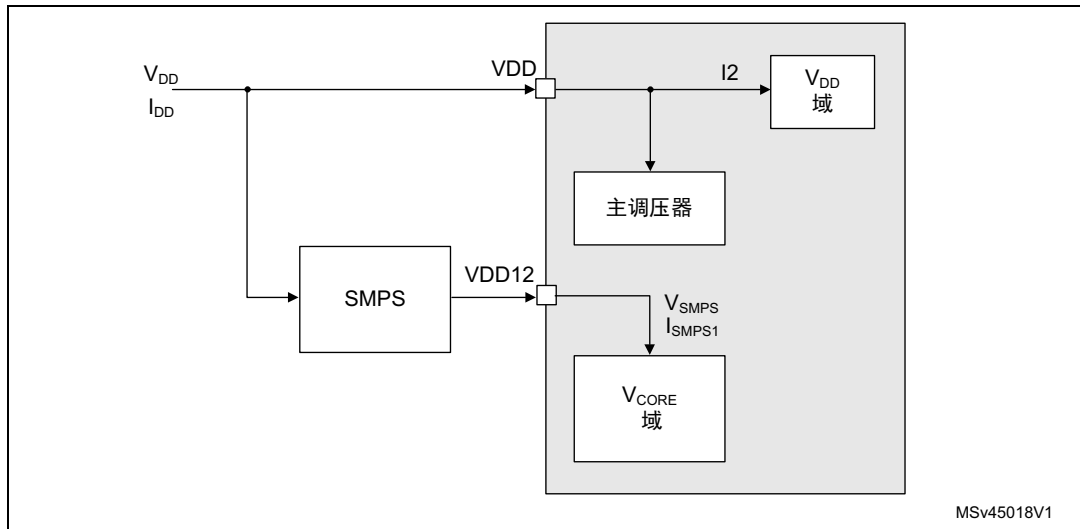


在这里，芯片 (I_{DD}) 消耗的总电流分为数字逻辑 (CPU、Flash、RAM和数字外设) 消耗的 $I1$ 和主要被模拟外设消耗的 $I2$ 。

根据主调压器电压范围，数字逻辑 V_{CORE} 通过 1.2 V (范围1) 的 $V1$ 、1.28 V (范围1升压模式) 或 1.0 V (范围2) 的 $V1$ 供应。

在使用外部SMPS时，图 9所示的方案适用。

图9. 有SMPS时的功耗



数字逻辑由SMPS供电，因此其电流消耗为：

$$I_{SMPS1} = I_1 * V_{SMPS} / V_1$$

其电源的变化（增大或减小）。

如果考虑SMPS（h）的效率，则总电流消耗为：

$$I_{DD} = I_2 + I_{SMPS1} * V_{SMPS} / (h * V_{DD})$$

将两个等式合并，得到：

$$I_{DD} = I_2 + I_1 * V_{SMPS}^2 / (h * V_{DD} * V_1)$$

在运行模式下，我们可以认为I2部分可忽略不计，原因在于：

$$I_{DD} = I * V_{SMPS}^2 / (h * V_{DD} * V_1)$$

其中，I是无SMPS时的电流消耗。

该等式展示了使用SMPS的优势，特别是在高V_{DD}时，另一项优势是尽可能降低了V_{SMPS}电压。

注： 必须加上SMPS本身消耗的额外电流（通常称为“静态电流”或“无载电流”），特别是对极低的I_{SMPS1}值。

5 优化IoT和极低功耗应用

STM32L4xxxx产品相关的SMPS非常适合IOT蓄电池供电的应用，此类应用中的电压足够高，能够利用直流/直流转换器。此类应用通常有一个PROCESS阶段，其中要执行大量计算，然后是INACTIVE阶段（更多详情请参见AN4746）。

根据选择的SMPS，在PROCESS和INACTIVE阶段之间停止SMPS可能的好处。但是，某些SMPS器件的重启能量非常高，这可能会抵消在INACTIVE阶段关闭它们所带来的任何好处。

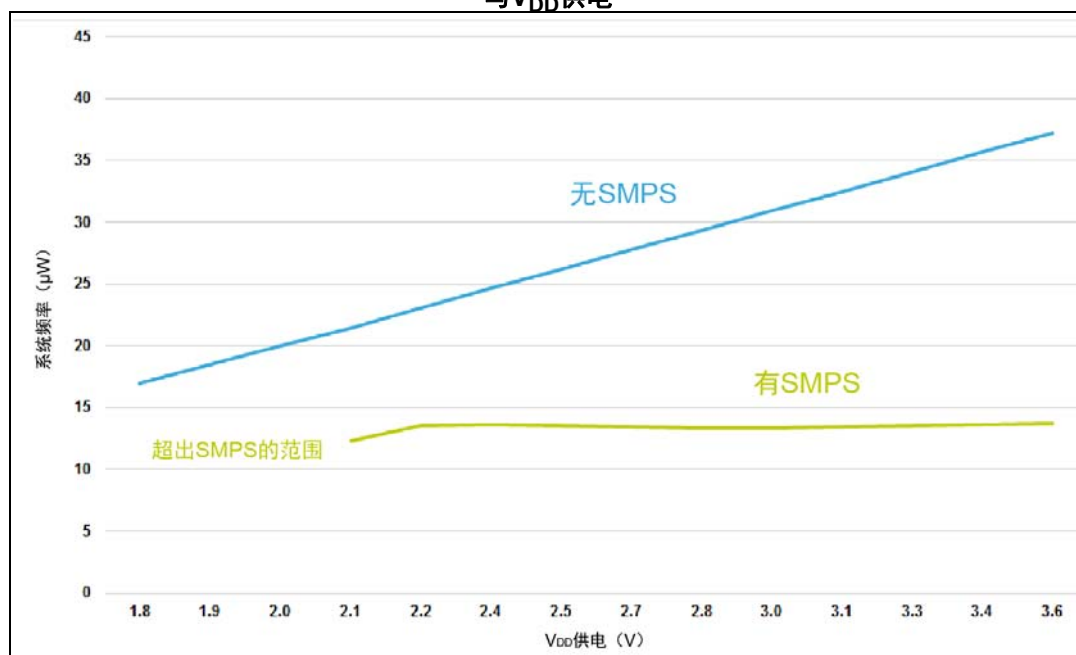
注：对于待机模式，当进入INACTIVE状态时，HAL/BSP可使SMPS保持使能。当进入待机模式时，如果没有调用BSP_SMPS_Disable()，SMPS将保持使能，直至下一次唤醒，以便节约其重启能量。

SMPS输出电容代表高能储存器（几 μ J），可以在INACTIVE阶段保持充电，从而避免SMPS器件禁用时其输出放电。

使用SMPS_PG供电正常信号会稍微增加功耗，最好不要使用。然而，我们的HAL/BSP实现在Nucleo -144 SMPS板[2]上配置了仅在检查供电正常信号时动态上拉，从而使功耗最小化。

下面是以 V_{DD} 电源的函数的形式表示的CoreMark™功耗。

图10. 系统频率等于80 MHz时的CoreMark™功耗
与 V_{DD} 供电



要进一步降低INACTIVE阶段的功耗，可使用VDDIOSMPS供应低至1.8V的 V_{DD} 。因此，改善了标准IoT应用并提高了基准测试分数（例如ULPBench™）。参见AN4746[4]了解ULPBench配置，以及EEMBC网站了解详细信息。

6 参考文档

表5. 参考文档

参考	版本	标题
[1]	最新版本	参考手册：STM32L4x5基于Arm®的高级32位MCU（RM0351）
[2]	最新版本	用户手册：STM32 Nucleo-144板（UM2179）
[3]	最新版本	STM32L4和STM32L4+系列数据手册： – 用于STM32L452xx器件的DS11912 – 用于STM32L433xx器件的DS11449 – 用于STM32L476xx器件的DS10198 – 用于STM32L496xx器件的DS11585 – 用于STM32L4R5xx、STM32L4R7xx和STM32L4R9xx器件的DS12023
[4]	最新版本	应用笔记：利用STM32L4系列微控制器优化功耗和性能（AN4746）
[5]	最新版本	应用笔记：STM32L4超低功耗特性概览（AN 4621）
[6]	最新版本	用户手册：STM32 Nucleo-64板（UM2206）



7 版本历史

表6. 文档版本历史

日期	版本	变更
2017年3月17日	1	初始版本。
2017年4月10日	2	在 第 2.2 节: V_{DD12} 供电规则 中增加了规则7。
2017年9月7日	3	更新了: – 封面上的文档标题 – 表 1: 适用产品 – 第 2.2 节: V_{DD12} 供电规则 (7点) – 第 2.5 节: 开关和控制方案的选择
2018 年 2 月 13 日	4	引入了STM32L4+系列。 更新了 引言 , 第 2.4 节: 选择SMPS , 第 2.5 节: 开关和控制方案的选择 , 第 3.1.1 节: SMPS切换 (关闭至打开) , 第 3.2 节: 功耗状态转换 以及 第 4 节: 计算电流消耗 。 将 第 2.2 节: V_{DD12} 供电规则 分成 第 2.2.1 节: STM32L4系列 和 第 2.2.2 节: STM32L4+系列 。 更新了 表 1: 适用产品 和 表 5: 参考文档 。 更新了 图 6: 基于SMPS电压的可能转换, STM32L4系列 和 图 8: 无SMPS时的功耗 。 增加了 图 7: 基于SMPS电压的可能转换, STM32L4+系列 。

表7. 中文文档版本历史

日期	版本	变更
2018年9月27日	1	中文初始版本。

重要通知 - 请仔细阅读

意法半导体公司及其子公司（“ST”）保留随时对 ST 产品和 / 或本文档进行变更、更正、增强、修改和改进的权利，恕不另行通知。买方在订货之前应获取关于 ST 产品的最新信息。ST 产品的销售依照订单确认时的相关 ST 销售条款。

买方自行负责对 ST 产品的选择和使用，ST 概不承担与应用协助或买方产品设计相关的任何责任。

ST 不对任何知识产权进行任何明示或默示的授权或许可。

转售的 ST 产品如有不同于此处提供的信息的规定，将导致 ST 针对该产品授予的任何保证失效。

ST 和 ST 徽标是 ST 的商标。所有其他产品或服务名称均为其各自所有者的财产。

本文档中的信息取代本文档所有早期版本中提供的信息。本文档的中文版本为英文版本的翻译件，仅供参考之用；若中文版本与英文版本有任何冲突或不一致，则以英文版本为准。

© 2018 STMicroelectronics - 保留所有权利