

## Silabs MCU 低功耗优势及其实现方法

世强电讯 肖建云

### 引言

现在的电子产品，对低功耗的要求越来越高。产品低功耗的问题是经常让产品设计者头痛而又不得不面对的一个问题。以单片机为核心的系统，其功耗主要由单片机功耗和单片机外围电路功耗组成。要降低单片机系统的功耗，需要从硬件和软件两方面入手。美国公司 Silicon laboratories（以下简称 Silabs）设计的高速 C8051F 系列单片机是一种高度集成的 SOC 型芯片，兼容传统的 8051 单片机内核和指令系统，但其各方面的性能都远远超越了传统的 8051 单片机。C8051F 系列单片机中增加的外设或功能部件有：模拟多路选择器、可编程增益放大器、ADC、DAC、电压比较器、电压基准、温度传感器、SMBus(I2C)、增强型 UART、SPI、可编程计数/定时器阵列（PCA）、电源监视器、看门狗定时器（WDT）和时钟振荡器等。另外还有片上的 FLASH 程序存储器和 RAM。特别是在低功耗设计方面，提供了多种低功耗模式供用户选择，方便客户设计出不同低功耗要求的产品。

本文将从以下三个方面来谈 Silabs MCU 低功耗优势及其实现方法：

- 一、如何设计低功耗单片机系统；
- 二、Silabs MCU 在低功耗方面的优势；
- 三、Silabs MCU 低功耗实现方法。

### 一、如何设计低功耗单片机系统

低功耗单片机系统设计，需要从硬件设计和应用软件设计两方面入手。

#### 1、硬件设计

要满足单片机系统的低功耗要求，选用具有低功耗特性的单片机可以很容易实现。因为具有低功耗特性的单片机可以大大降低系统功耗，这可以从单片机的供电电压、内部结构、系统时钟和低功耗模式等几方面来考察一款单片机的低功耗特性。

##### (1) 选择简单的 CPU 内核

选择 CPU 内核时切忌一味追求性能，以“够用就好”为原则。8 位机够用，就没有必要选用 16 位机、32 位机；单片机的运行速度越快，往往其功耗也越大。一个 CPU 越复杂、集成度越高、功能越强，片内晶体管越多，总漏电流也越大，即使进入 STOP 状态，漏电流也会变得不可忽视；而简单的 CPU 内核不仅功耗低，成本也低。

##### (2) 选择低电压供电的单片机系统

单片机系统的供电电压低，可以有效的降低其系统功耗。由于半导体制造工艺的发展，现在单片机的供电电压从 5V 供电降低到 3.3 V、3 V、2 V 乃至 1.8 V。供电电压低，不紧可以降低单片机的功耗，还可以降低单片机外围电路的功耗。

### (3) 选择带有低功耗模式的单片机系统

低功耗模式指的是系统的 Idle、Stop 和 Suspend 等模式。处于这些模式下的功耗将远远小于正常运行下的功耗。

Idle 模式下，CPU 停止工作，但内部系统时钟并不停止，单片机的外围 I/O 模块也不停止工作；系统功耗一般降低有限，相当于工作模式功耗的 50%左右。

Stop 模式下，CPU 和内部系统时钟停止工作，所有的数字外设也自动停止工作，内部 RAM 的信息以最小功耗被保持，CPU 消耗电流可降到  $\mu\text{A}$  级，由外部或内部的复位使系统退出 Stop 模式，进而唤醒 CPU 继续工作。如果在 CPU 进入 Stop 模式时，将各个模拟外设关掉，这时的功耗可以降低到 nA 级。但是在 Stop 模式下，CPU 被唤醒后要重新对系统作初始化，所有特殊功能寄存器的内容将被重新初始化。这在某些低功耗应用场合需要注意。

Suspend 模式下，CPU、内部系统时钟停止工作，I/O 模块等被悬挂起来，片内 RAM 中存储的数据将被保持，CPU 的功耗可以降低到 nA 级，由唤醒事件唤醒。当 CPU 被唤醒后，系统不会被 CPU 复位，继续从进入 Suspend 模式的地方开始执行程序。这是一种非常理想的低功耗模式。

### (4) 选择合适的时钟方案

时钟的选择对于系统的功耗相当敏感，需要注意三方面的问题：

#### A 系统总线频率应当尽量低

单片机内部的总电流消耗可分为运行电流和漏电流两部份。单片机集成度越高，环境温度越高，漏电流也越大。在单片机运行时，开关电路不断地由“1”变“0”、由“0”变“1”，内部电容不停地充放电，这些都是单片机运行时电流的主要来源。要实现开关电路快速关断和电容的快速充放电，需要比较大的电流。运行电流几乎是和单片机的时钟频率成正比的，因此尽量降低系统时钟的运行频率可以有效地降低系统功耗。

#### B 选择适合低功耗的单时钟方案

单片机时钟是使用锁相环、外部振荡器，还是内部振荡器，这与单片机的功耗有很大关系。现代单片机普遍采用锁相环技术，允许用户在片外使用频率较低的振荡器，通过程序控制，系统时钟可以在一个很宽的范围内调整，总线频率往往能升得很高，但是会带来额外的功率消耗。仅仅就时钟方案来讲，使用外部振荡器且不使用锁相环是功率消耗最小的一种。

#### C 选择适合低功耗的双时钟方案

有些场合的应用比较复杂，对 MCU 的速度要求也很高。尽管采用新的半导体工艺，但 MCU 速度越高，一般来说功耗也越大。因此很多高速 MCU 提供了双时钟系统，并允许 MCU 在运行中实时快速的进行时钟切换，以达到降低功耗的目的。

Silabs MCU 带有内部高速振荡器，又可以使用外部振荡器，并且可以在 CPU 运行中

实时高速地进行内、外振荡器切换。这对于间歇工作的系统是一种非常好的低功耗方式。当要处理数据时，使用内部高速振荡器；当 CPU 空闲时，切换到外部低速振荡器，以降低功耗。

### (5) 使用每 MIPS 功耗来衡量 MCU 的低功耗性能是相对比较准确

尽管我们强调要降低单片机系统的功耗，必须尽量降低单片机的系统时钟。但使用每 MIPS 功耗来衡量 MCU 的功耗与之并不矛盾。这是相对的，要具体问题具体分析。

例如，执行一个需要 10K 条指令的任务，甲 MCU 的工作电流为 3mA，速度为 10MIPS，则甲 MCU 需要工作 1mS 完成该任务，消耗  $3\text{mA} \times 1\text{mS} \times V_{\text{cc}}$ ，然后甲 MCU 就可以进入低功耗模式了。而乙 MCU 的工作电流为 1mA，速度为 2MIPS，则乙 MCU 需要工作 5mS 完成，这样乙 MCU 完成该任务的消耗为  $1\text{mA} \times 5\text{mS} \times V_{\text{cc}}$ 。

从上面的例子我们可以得出结论：电流大但速度快的 MCU 可能更省电。

## 2、应用软件设计

应用软件设计对于一个低功耗系统的重要性常常被人们忽略。一个重要的原因是，软件设计上的缺陷并不像硬件那样容易发现，同时也没有一个严格的标准来判断一个软件的低功耗特性。但是设计者如果能尽量将应用的低功耗特性反映在软件中，就可以避免那些“看不见”的功耗损失。

### (1) 用“中断”代替“查询”

在没有要求低功耗的场合，程序使用中断方式还是查询方式并不重要。但在要求低功耗场合，这两种方式相差甚远。使用中断方式，CPU 可以什么都不做，甚至可以进入等待模式或停止模式；而查询方式下，CPU 必须不停地访问 I/O 寄存器，这会带来很多额外的功耗。

### (2) 用“宏”代替“子程序”

子程序调用的入栈出栈操作，要对 RAM 进行两次操作，会带来更大的功耗。宏在编译时展开，CPU 按顺序执行指令。使用宏，会增加程序的代码量，但对不在乎程序代码量大的应用，使用宏无疑会降低系统的功耗。

### (3) 尽量减少 CPU 的运算量

减少 CPU 的运算工作量，可以有效地降低 CPU 的功耗。减少 CPU 运算的工作可以从很多方面入手：

A 用查表的方法替代实时的计算；

B 不可避免的实时计算，算到精度够了就结束，避免“过度”的计算；

C 尽量使用短的数据类型，例如，尽量使用字符型的 8 位数据替代 16 位的整型数据，尽量使用分数运算而避免浮点数运算等。

#### (4) 让 I/O 模块间歇运行

- A 不用的 I/O 模块要关掉，间歇使用的 I/O 模块要及时关掉，以节省电能。
- B 不用的 I/O 引脚要设置成输出或设置成输入，用上拉电阻拉高。

总之，在单片机系统设计过程中，深入理解单片机低功耗的特性，并在硬件和应用软件的设计过程中充分利用单片机的低功耗特性，来设计出符合低功耗要求的产品。

## 二、Silabs MCU 在低功耗方面的优势

Silabs 的 C8051F 系列单片机是从传统的 8051 单片机衍生出来的一种新型高速单片机。它属于 CISC 指令系统，但由于采用“流水线”结构方式处理指令，70% 的指令的执行时间为 1 个或 2 个系统时钟，指令执行的峰值速度为 MIPS 级别。虽然它的运行速度很高，但是在低功耗设计方面具有独特的优势。这主要体现在：

### 1、供电电压范围宽

Silabs MCU 的供电电压范围为 2~5.25V。宽的供电电压范围不仅为单片机系统设计带来方便，而且低的供电电压可以有效地降低整个单片机系统的功耗。

### 2、有多种低功耗模式

Silabs MCU 有 Idle、Stop 和 Suspend 三种低功耗模式。各种模式下片上资源状态、功耗及唤醒的情况如表 1 所示。在 Stop 和 Suspend 模式下，MCU 的功耗可以降低到 nA 级。在 Suspend 模式下，有多种唤醒源，当被唤醒时（非复位源唤醒），CPU 不会对系统复位。在 Stop 模式下，Silabs MCU 有丰富的复位源使 CPU 被唤醒，如图 1 所示。

表 1

项目 模式	CPU	时钟 (内部)	片上数 字外设	片上模拟 外设	内部寄存 器和 RAM	功耗	退出 条件	PC 指针
IDLE	Inactive	active	active	active	保持	小于正常模 式的功耗 (C8051F 410 5mA)	任何使能的中断 或复位	0000 或从进入 IDLE 模式的指令 的下一条指令开 始执行
STOP	Inactive	Inactive	Inactive	使能但不运 行或用户设 定关闭	RAM 保持, 内部寄存器 在唤醒时被 复位	功耗非常低 (C8051F4 10 15nA)	比较器 0 复位、外 部 CNVSTR 引脚 复位或其他复位 等	0000

<b>SUSPEND</b>	Inactive	Inactive	使能但不运行或用户设定关闭	使能但不运行或用户设定关闭	保持	功耗低 (C8051F4 10 15nA)	唤醒事件: I/O 事件、比较器事件、smaRTClock 振荡器失效事件、smaRTClock 报警事件。 复位事件: 内部或外部的复位。	0000 或从进入 SUSPEND 模式的指令的下一条指令开始执行
----------------	----------	----------	---------------	---------------	----	-----------------------------	---	-----------------------------------

Figure 13.1. Reset Sources

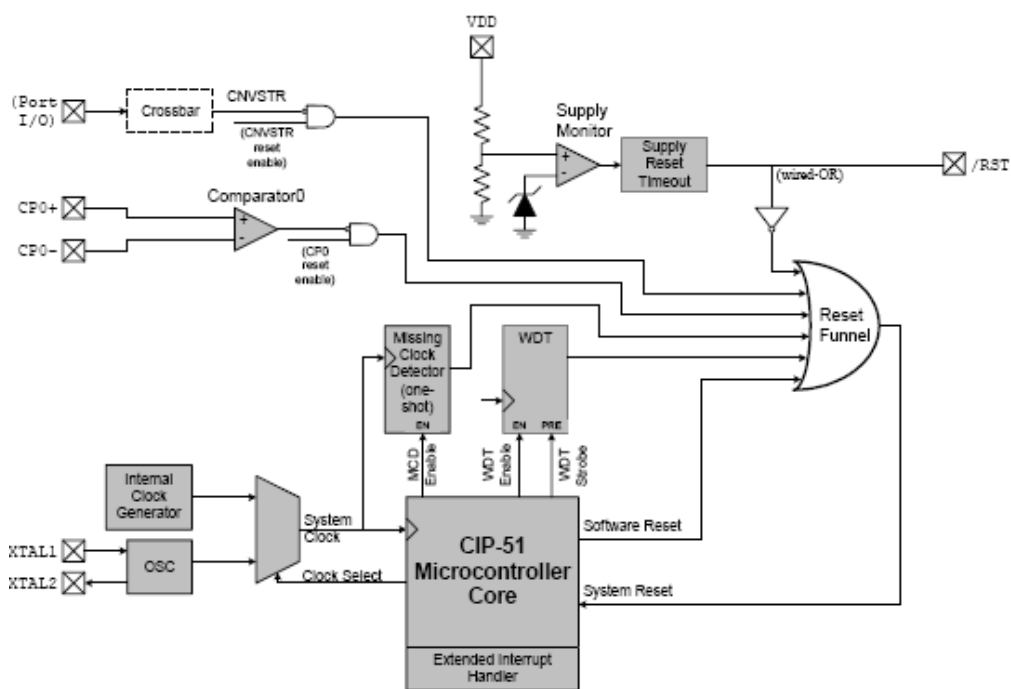


图 1

### 3、有多种时钟方案供选择

Silabs MCU 都设计有两套时钟方案供选择。用户可以根据实际需要选择内部振荡器或外部振荡器，或者同时选择内、外振荡器。内部振荡器可以通过相关寄存器设置来选择不同的频率。其频率范围为：80KHZ~100MHZ。更为重要的是在 MCU 运行中，可以实时高速地进行内、外时钟切换。时钟切换速度快，切换产生的功耗小。这种特性，对于间歇工作的单片机系统低功耗设计，特别有帮助。

### 4、灵活的 I/O 设计

Silabs MCU 的 I/O 口资源丰富，配置灵活。有三种配置方式：漏极开路、推拉输出和

弱上拉方

式。用户可以根据实际需要通过相关寄存器的设置来禁止或使能这些方式。其中将端口配置成漏极开路方式是最省电的方式。

**5、高速实时的中断响应**

Silabs MCU 响应中断的时间非常快，一般只需要 5 个系统时钟周期。中断响应速度快，CPU 花费在等待方面的时间少，这可以节省不少的等待功耗。

**6、运算速度快，处理数据能力强**

虽然 Silabs 的 C8051F 系列单片机属于 CISC 指令系统，但由于它采用了“流水线”结构方式

处理指令，70%的指令的执行时间为 1 个或 2 个系统时钟，突破了传统的 8051 单片机运行效率低的弱点，特别是它执行乘法指令只要 4 个系统时钟，执行除法指令只要 8 个系统时钟。与那些 RISC 指令系统的单片机和那些速度低的 CISC 单片机相比，这不仅仅带来了数据运算的高效率，同时也极大地降低了系统的功耗。因此，使用每 MIPS 功耗来衡量 Silabs 的 C8051F 系列单片机的功耗，无论是处理一般事件，还是做数据运算，它都是非常低的，具有明显的优势。图 2 是和其他 MCU 做除法运算的速度对比。从对比中我们可以看出 Silabs MCU 具有高速处理数据能力的同时也带来了更低的功耗。

除法运算：128÷7=18余2

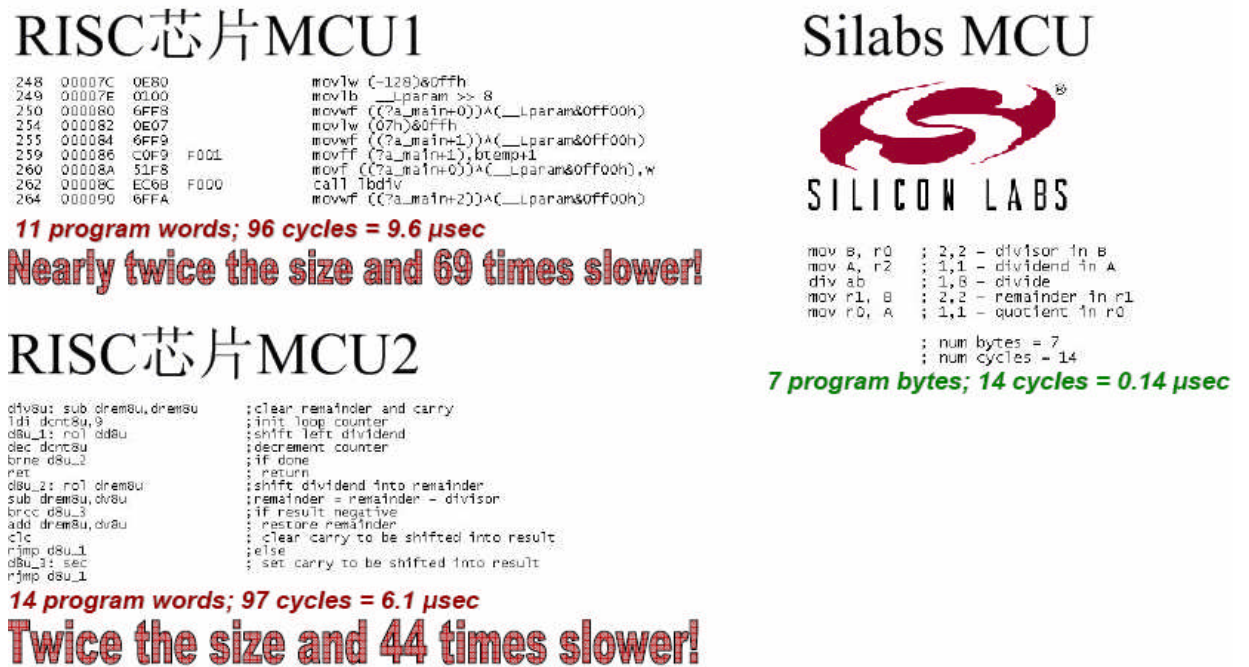


图 2

总之，深入理解 Silabs mcu 低功耗的特性，根据实际情况，灵活运用，就可以设计出满足要求的低功耗产品。

### 三、Silabs MCU 低功耗实现方法

这里举一个运动装置的应用,采用3V 电池供电,间歇工作,要求平均功耗不大于 200uA。使用 Silabs mcu C8051F333 成功地实现了低功耗的应用。选择双时钟系统,即处理数据时使用内部高速振荡器 25MHZ,空闲时使用外部晶振 32.768KHZ (如图 3 所示),并进入 Idle 模式。没有使用到的片上模拟和数字外设全部关闭,没有用到的 I/O 全部设置成漏极开路方式。

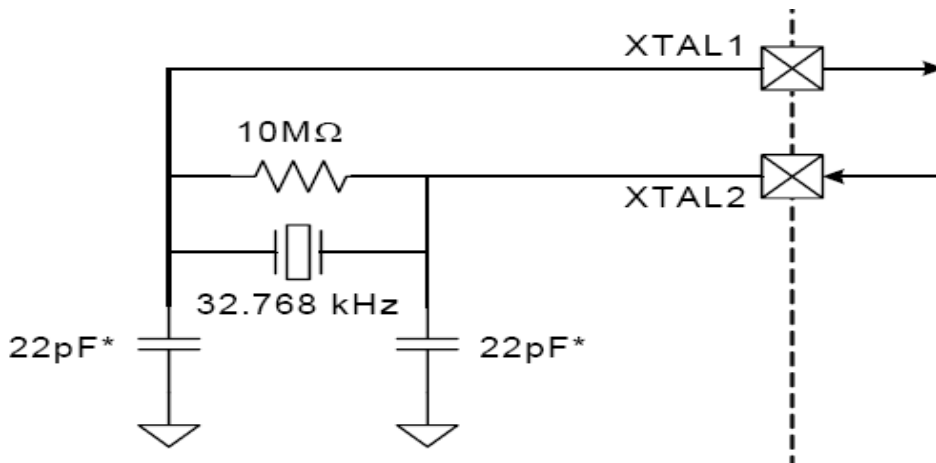


图 3

下面我们分析一下在不同情况下, CPU 的功耗情况。

在温度 $-40^{\circ}\text{C} \sim 85^{\circ}\text{C}$ 范围内,工作电压 3V,系统时钟 25MHZ 的情况下, CPU 的功耗典型值是 7.8mA。其电气特性参数表如表 2 所示。

Digital Supply Current—CPU Active (Normal Mode, fetching instructions from Flash)					
$I_{DD}$ (Note 3)	$V_{DD} = 3.6 \text{ V}, F = 25 \text{ MHz}$	—	10.7	11.7	mA
	$V_{DD} = 3.0 \text{ V}, F = 25 \text{ MHz}$	—	7.8	8.3	mA
	$V_{DD} = 3.0 \text{ V}, F = 1 \text{ MHz}$	—	0.38	—	mA
	$V_{DD} = 3.0 \text{ V}, F = 80 \text{ kHz}$	—	31	—	$\mu\text{A}$
$I_{DD}$ Supply Sensitivity (Note 3)	$F = 25 \text{ MHz}$	—	65	—	%/V
	$F = 1 \text{ MHz}$	—	61	—	%/V
$I_{DD}$ Frequency Sensitivity (Note 3, Note 4)	$V_{DD} = 3.0 \text{ V}, F \leq 15 \text{ MHz}, T = 25^{\circ}\text{C}$	—	0.38	—	mA/MHz
	$V_{DD} = 3.0 \text{ V}, F > 15 \text{ MHz}, T = 25^{\circ}\text{C}$	—	0.21	—	mA/MHz
	$V_{DD} = 3.6 \text{ V}, F \leq 15 \text{ MHz}, T = 25^{\circ}\text{C}$	—	0.53	—	mA/MHz
	$V_{DD} = 3.6 \text{ V}, F > 15 \text{ MHz}, T = 25^{\circ}\text{C}$	—	0.27	—	mA/MHz

表 2

根据图 2 参数, 我们还可以大概估算出在不同频率下 CPU 的功耗。当  $F > 15\text{MHz}$  时, 可以用下面的公式来估算:

$$I_{DD} = I_{DD1} - (F1 - F) \times I_{DD2} \quad (1)$$

其中  $I_{DD1}$  是在不同电压、最高频率下正常工作时的最小功耗,  $F1$  是最高工作频率,  $I_{DD2}$  是  $F > 15\text{MHz}$ , 不同电压下的  **$I_{DD}$  Frequency Sensitivity**。例如,  $V_{DD} = 3.0\text{V}$ ;  $F = 20\text{MHz}$  时, 根据图 2 可以算出:

$$I_{DD} = 7.8\text{mA} - (25\text{MHz} - 20\text{MHz}) \times 0.21\text{mA/MHz} = 6.75\text{mA}$$

当  $F \leq 15\text{MHz}$  时, CPU 的功耗可以用下面的公式来估算:

$$I_{DD} = F \div 1\text{MHz} \times I_{DD2} \quad (2)$$

例如,  $V_{DD} = 3.0\text{V}$ ;  $F = 32.768\text{KHz}$  时, 根据图 2 可以算出:

$$I_{DD} = 32.768\text{KHz} \div 1\text{MHz} \times 0.38\text{mA/MHz} = 12.45184\text{uA}$$

在温度  $-40^{\circ}\text{C} \sim 85^{\circ}\text{C}$  范围内, 工作电压  $3\text{V}$ , 系统时钟  $32.768\text{KHz}$  的情况下, CPU 的功耗可以通过 **Idle** 模式下的电气特性参数来计算。**Idle** 模式下的电气特性参数表如表 3 所示。

根据公式 (2), **Idle** 模式下的功耗为:

$$I_{DD} = 32.768\text{KHz} \div 1\text{MHz} \times 0.20\text{mA/MHz} = 6.5536\text{uA}$$



-40 to +85 °C, 25 MHz system clock unless otherwise specified.

Parameter	Conditions	Min	Typ	Max	Units
<b>Digital Supply Current—CPU Inactive (Idle Mode, not fetching instructions from Flash)</b>					
I <sub>DD</sub> (Note 3)	V <sub>DD</sub> = 3.6 V, F = 25 MHz	—	4.8	5.2	mA
	V <sub>DD</sub> = 3.0 V, F = 25 MHz	—	3.8	4.1	mA
	V <sub>DD</sub> = 3.0 V, F = 1 MHz	—	0.20	—	mA
	V <sub>DD</sub> = 3.0 V, F = 80 kHz	—	16	—	μA
I <sub>DD</sub> Supply Sensitivity (Note 3)	F = 25 MHz	—	43	—	%/V
	F = 1 MHz	—	55	—	%/V
I <sub>DD</sub> Frequency Sensitivity (Note 3, Note 5)	V <sub>DD</sub> = 3.0 V, F ≤ 1 MHz, T = 25 °C	—	0.20	—	mA/MHz
	V <sub>DD</sub> = 3.0 V, F > 1 MHz, T = 25 °C	—	0.15	—	mA/MHz
	V <sub>DD</sub> = 3.6 V, F ≤ 1 MHz, T = 25 °C	—	0.24	—	mA/MHz
	V <sub>DD</sub> = 3.6 V, F > 1 MHz, T = 25 °C	—	0.19	—	mA/MHz
Digital Supply Current (Stop Mode, shutdown)	Oscillator not running, V <sub>DD</sub> Monitor Disabled	—	< 0.1	—	μA

表 3

从上面的分析我们可以看出，使用外部低频振荡器，并进入 Idle 模式，CPU 的功耗可以降的很低。如果能用上 Stop 模式，功耗可以降低到 0.1μA 以下。在模拟该运动装置真实使用环境的条件下，经过使用仪器测试，平均功耗降低到了 150μA 以下。该产品目前已经批量上市了。

## 结束

C8051F 系列单片机封装小，高集成度，低功耗特性好。只要根据项目的实际情况，认真细致地分析产品的低功耗要求，灵活应用 Silabs MCU 的低功耗特性，从硬件和应用软件两方面入手，就可以设计出满足不同要求的低功耗产品。