

第 10 章 省电特性

目录

本章包括下列主题：

10.1 简介	10-2
10.2 单片机时钟控制	10-2
10.3 基于指令的省电模式	10-2
10.4 打盹模式	10-6
10.5 选择性外设功耗控制	10-6
10.6 设计技巧	10-9
10.7 相关应用笔记	10-10
10.8 版本历史	10-11

10.1 简介

所有 PIC24F 器件均提供多种内置设计以降低功耗。这些对于受功率限制（例如电池操作）、并且对于时序敏感程序（例如串行通信）需要全功率操作的应用尤为有用。本章讨论在硬件中实现的 4 种省电特性：

- 单片机时钟控制
- 基于指令的省电模式（休眠和空闲）
- 基于硬件的打盹模式
- 选择性外设控制

10.2 单片机时钟控制

一般来说，降低任何应用中的单片机时钟速率都会节省功耗，这与时钟频率的减少量大致成正比。PIC24F 器件允许在应用控制下选择较宽范围的时钟频率。如果系统时钟配置没有锁定，则用户可以在使用内部 RC 振荡器的低功耗操作与使用晶体振荡器的高速高精度操作之间切换，这只需更改 NOSC 配置位即可。事实上，用户可以随时在多达 4 种的不同振荡器之间进行选择，在配置应用速度、频率精度和功耗上实现了最大的灵活性。

第 6 章“振荡器”中将对工作期间更改系统时钟的操作以及时钟更改的限制进行更详细的讨论。

10.3 基于指令的省电模式

PIC24F 器件有两种特殊的省电模式，可以通过执行特殊的 PWRSAV 指令进入这两种模式：

- 休眠模式：CPU、系统时钟和工作在系统时钟源下的任何外设都被禁止。这是器件的最低功耗模式。
- 空闲模式：CPU 被禁止，但系统时钟源继续工作。外设继续工作，但可以选择将其禁止。

例 10-1 中给出了 PWRSAV 指令的汇编语法。

例 10-1: PWRSAV 汇编语法

PWRSAV	#SLEEP_MODE	; Put the device into Sleep mode
PWRSAV	#IDLE_MODE	; Put the device into Idle mode

注： SLEEP_MODE 和 IDLE_MODE 是所选器件的汇编器包含（include）文件中定义的常数。

发生已允许的中断、WDT 超时或器件复位时，器件会退出省电模式。当器件退出这两种工作模式之一时，称为“唤醒”。以下各节中将说明省电模式的特性。

10.3.1 休眠模式

休眠模式具有如下特性：

- 系统时钟源关闭。如果使用了片上振荡器，就将其关闭。
- 在没有 I/O 引脚输出电流的前提下，器件电流消耗最小。
- 由于系统时钟源被禁止，所以故障保护时钟监视器（FSCM）在休眠模式下不工作。
- 如果使能了 WDT，则 LPRC 时钟将继续在休眠模式下运行。
- 如果使能了片上稳压器，则其 BOR 电路在休眠模式下保持工作。
- 如果使能了 WDT，则在进入休眠模式之前自动清零。
- 某些外设可能会继续在休眠模式下工作。这些外设包括检测输入信号电平变化的 I/O 引脚，或使用外部时钟输入的外设。任何根据系统时钟源工作的外设都会在休眠模式禁止。

发生以下事件之一时，处理器将从休眠模式退出或被唤醒：

- 任何单独允许的中断源
- 任何形式的器件复位
- WDT 超时

10.3.1.1 从休眠模式唤醒时的时钟选择

处理器将重新启用在进入休眠模式之前有效的时钟源。

10.3.1.2 从休眠模式唤醒时的延时

表 10-1 给出了不同振荡器模式下与从休眠模式唤醒相关的重启延时。

表 10-1: 从休眠模式退出的延时

时钟源		休眠退出延时	振荡器延时	FSCM 延时	注
EC		TVREG	—	—	1
ECPLL		TVREG	TLOCK	TFSCM	1, 3, 4
XT 和 HS		TVREG	TOST	TFSCM	1, 2, 4
XTPLL		TVREG	TOST + TLOCK	TFSCM	1, 2, 3, 4
HSPLL		TVREG	TOST + TLOCK	TFSCM	1, 2, 3, 4, 5
SOSC	（休眠期间关闭）	TVREG	TOST	TFSCM	1, 2, 4
	（休眠期间开启）	TVREG	—	—	1
FRC、FRCDIV 和 LPRC		TVREG	—	—	1
FRCPLL		TVREG	TLOCK	—	1, 3

- 注 1: TVREG = 启动延时（仅当使能片上稳压器时）（标称值为 10 μs）。
- 2: TOST = 振荡器起振定时器延时；在延时 1024 个振荡器周期后，将振荡器时钟释放给系统使用。
- 3: TLOCK = PLL 锁定时间（标称值为 20 ms）。
- 4: TFSCM = 故障保护时钟监视器延时（当使能 FSCM 时）（标称值为 100 μs）。
- 5: HSPLL 模式下超出了 PIC24F 的最大工作频率。

注： 关于最大工作频率、TVREG、TFSCM 和 TLOCK 的规范值，请参见产品数据手册的“电气特性”章节。

10.3.1.3 使用晶体振荡器或 PLL 从休眠模式唤醒

如果系统时钟源来自晶体振荡器和 / 或 PLL，则在系统时钟源供器件使用之前必须有一段振荡器起振定时器（OST）和 / 或 PLL 锁定时间。作为该规则的一个特例，如果系统时钟源为辅助振荡器且它在休眠模式下运行，则不需要振荡器延时。注意，尽管采用了 TVREG（如果使能了稳压器）和其他延时，晶体振荡器（和 PLL）不一定能起振和运行。

10.3.1.4 FSCM 延时和休眠模式

如果以下条件为真，当从休眠模式唤醒时，将有一个标称值为 100 μ s 的延时（TFSCM）（在 TVREG 之后，如果使能了稳压器）：

- 在休眠模式下振荡器关闭
- 系统时钟来自晶体振荡器和 / 或 PLL

在多数情况下，在器件恢复执行指令前，FSCM 延时为 OST 超时和 PLL 进入稳定状态提供足够延时。如果使能了 FSCM，它将在 FSCM 延时超时后开始监视系统时钟源。

10.3.1.5 振荡器缓慢起振

当上电延时超时后，OST 和 PLL 锁定时间可能还没有超时。

如果使能了 FSCM，器件将检测到此条件并将其作为一个时钟故障，然后产生时钟故障陷阱。器件将切换到 FRC 振荡器，用户可以在时钟故障陷阱服务程序中重新使能晶体振荡源。

如果未使能 FSCM，器件在时钟稳定之前不会开始执行代码。从用户角度来看，器件将处于休眠状态直到振荡器时钟起振。

10.3.1.6 中断时从休眠模式唤醒

CPU 优先级分配为 0 的用户中断源不能将 CPU 从休眠模式唤醒，因为此中断源被有效禁止了。要使用中断作为唤醒源，此中断的 CPU 优先级必须被分配为 CPU 优先级 1 或更高。

任何使用 IECx 寄存器中相应的 IE 控制位单独允许的中断源都可以将处理器从休眠模式唤醒。当器件从休眠模式唤醒时，将发生以下两种情况之一：

- 如果中断所分配的优先级低于或等于当前 CPU 的优先级，则器件将被唤醒并继续执行启动休眠模式的 PWRSAV 指令之后的代码。
- 如果中断源所分配的优先级大于当前 CPU 的优先级，则器件将被唤醒并开始进入 CPU 异常处理。代码将从 ISR 的第一条指令处继续执行。

休眠状态位（RCON<3>）在唤醒时被置 1。

10.3.1.7 复位时从休眠模式唤醒

所有器件复位都会将处理器从休眠模式唤醒。任何唤醒处理器的复位源（除 POR 以外）都会将休眠状态位（RCON<3>）置 1，以表明器件先前处于休眠模式。

在上电复位时，休眠位被清零。

10.3.1.8 看门狗定时器超时时从休眠模式唤醒

如果在器件处于休眠模式时看门狗定时器（WDT）被使能并超时，则处理器将被唤醒。WDTO 和休眠状态位（RCON<4:3>）均被置 1，以表明器件由于 WDT 超时而恢复工作。注意此事件不会复位器件。器件从启动休眠模式的 PWRSAV 指令之后的指令继续运行。

10.3.2 空闲模式

当器件进入空闲模式时，将发生以下事件：

- CPU 将停止执行指令。
- WDT 被自动清零。
- 系统时钟源将保持有效，而且在默认情况下，外设模块将使用系统时钟源继续正常工作。可以在空闲模式下使用“空闲模式停止”控制位有选择地关闭外设（更多详细信息，请参见外设说明）。
- 如果使能了 WDT 或 FSCM，则 LPRC 也将保持有效。

在发生以下事件时，处理器将从空闲模式唤醒：

- 任何单独允许的中断源。
- 任何器件复位源。
- WDT 超时。

在从空闲模式唤醒时，时钟再次供 CPU 使用，并且指令立即从 PWRSAV 指令之后的一条指令或 ISR 中的第一条指令开始执行。

10.3.2.1 中断时从空闲模式唤醒

CPU 优先级分配为 0 的用户中断源不能将 CPU 从空闲模式唤醒，因为此中断源被有效禁止了。要使用中断作为唤醒源，此中断的 CPU 优先级必须被分配为 CPU 优先级 1 或更高。

任何使用 IECx 寄存器中相应的 IE 控制位单独允许且优先级高于当前 CPU 优先级的中断源都可以将处理器从空闲模式唤醒。当器件从空闲模式唤醒时，将发生以下两种情况之一：

- 如果中断所分配的优先级低于或等于当前 CPU 优先级，则器件将被唤醒并继续执行启动空闲模式的 PWRSAV 指令之后的代码。
- 如果中断源所分配的优先级大于当前 CPU 的优先级，则器件将被唤醒并开始进入 CPU 异常处理。代码将从 ISR 的第一条指令处继续执行。

空闲状态位（RCON<2>）在唤醒时被置 1。

10.3.2.2 复位时从空闲模式唤醒

任何复位（除 POR 以外），都会将 CPU 从空闲模式唤醒。在除 POR 之外的任何器件复位时，空闲状态位（RCON<2>）被置 1，以表明器件先前处于空闲模式。在上电复位时，空闲位被清零。

10.3.2.3 WDT 超时时从空闲模式唤醒

如果使能了 WDT，处理器将在 WDT 超时时从空闲模式唤醒并继续执行启动空闲模式的 PWRSAV 指令之后的代码。注意在这种情况下 WDT 超时不会复位器件。WDTO 和空闲状态位（RCON<4,2>）均被置 1。

10.3.2.4 从空闲模式唤醒时的延时

与从休眠模式唤醒不同的是，不存在与从空闲模式唤醒相关的延时。系统时钟在空闲模式时仍继续运行，因此在唤醒时不需要起振时间。

10.3.3 省电指令与中断同时发生

任何与 PWRSAV 指令执行同时产生的中断都将被延时响应，直到完成进入休眠或空闲模式。然后器件将从休眠或空闲模式唤醒。

10.4 打盹模式

更改时钟速度并使用基于指令的省电模式之一是降低功耗的首选方式。但是，也存在一些不适用的情况。例如，某个应用需要保持同步通信不受中断，即使不执行任何其他操作。降低系统时钟速度会造成通信错误，而使用省电模式则可能完全停止通信。

当器件仍然在执行代码时，打盹模式提供了一种降低功耗的备用方法。在该模式下，系统时钟将继续以同样的时钟源和同样的速度工作。CPU 时钟速度降低，而外设模块继续使用同样的时钟速度。两个时钟域之间保持同步，允许外设以较低速率执行代码时访问 SFR。

通过将 DOZEN 位 (CLKDIV<11>) 置 1 来使能打盹模式。外设和内核时钟速度之间的比率由 DOZE2:DOZE0 位 (CLKDIV<14:12>) 决定。有 8 种配置可供选择，范围从 1:1 到 1:256，1:1 是默认值。

10.4.1 中断时从打盹模式返回

可将打盹模式配置为在发生中断事件时自动返回全速 CPU 执行。通过将 ROI 位 (CLKDIV<15>) 置 1 可使能中断时自动返回全速 CPU 操作。在默认情况下，ROI 位被清零，中断事件对打盹模式操作没有影响。在打盹模式下发生中断事件并且 ROI 被置 1 时，DOZEN 位被自动清零。

从打盹模式返回的特性可使对时钟敏感的功能（例如同步通信）不受中断而继续工作，同时使 CPU 以极低的速度工作并等待事件调用中断程序和恢复处理。

10.5 选择性外设功耗控制

休眠、空闲和打盹模式使用户可通过降低或停止 CPU 时钟显著降低功耗。即便如此，外设模块仍然保持有时钟供应，因此会消耗一些功耗。有时应用可能有这些模式无法提供的需要：即能够将有限的用电资源分配给 CPU 而消除外设功耗。PIC24F 器件通过允许有选择地使能或禁止外设模块以降低或消除其功耗来满足这种需求。

10.5.1 禁止外设模块

对于 PIC24F 系列架构中的大多数外设模块，用户可以有选择地将其禁止，从而降低或根本消除所有操作模式下的功耗。有两个不同的选项可供用户使用，每个选项在效果上有细微差异。

10.5.1.1 模块使能位 (XXXEN)

许多外设模块都有一个模块使能位，一般命名为“XXXEN”，通常位于其控制寄存器（或更复杂模块的主控制寄存器）的第 15 个位。此处“XXX”表示模块名称中模块的助记符格式。例如，SPI 模块的使能位为“SPIEN”，等等。所有串行和并行通信模块以及实时时钟都具有该位。清零该位将禁止模块的操作；但是，模块将继续接收时钟信号并消耗最小的电流。

与所有早期的 PIC® 器件一样，定时器继续处于可选择操作，并由其自身的 TON 位控制，而且也位于第 15 个位置。A/D 转换器也具有使能位 ADON，它和 XXXEN 位具有同样的功能。I/O 端口以及相关功能（例如，输入变化通知和输入捕捉）不具有自身的模块使能位，因为它们的操作从属于其他模块。

通过这种方式禁止特定应用所不需要的模块，使得在应用运行时可通过软件控制有选择并动态地调整功耗。

10.5.1.2 外设模块禁止位 (XXXXPMD)

所有外设模块（除 I/O 端口以外）都还有一个可以禁止模块功能的辅助控制位。这些位被称为外设模块禁止 (PMD) 位，一般命名为 “XXXXPMD”（和前面一样，使用 “XXX” 作为模块名称的助记符）。这些位位于 PMD_x 特殊功能寄存器中。与模块使能位不同的是，必须将 PMD 位置 1 (= 1) 来禁止模块。

虽然 PMD 和模块使能位都禁止外设功能，但 PMD 位是完全关闭外设，有效地关断了所有电路的电源并切断了所有时钟源。这还有另一种效果，就是使映射到 SFR 空间的任何模块控制和缓冲寄存器都不能工作。也就是说，当使用 PMD 位禁止模块时，外设是不存在的，直到 PMD 位清零。这不同于使用模块使能位，使用模块使能位时，即使禁止了外设操作，但仍然允许重新配置外设以及预装入缓冲寄存器。

PMD 位在对电源高度敏感的应用中最为有用，在这些应用中，即使节省微小的功耗也会对应用的工作能力有决定性的作用。在这些情况下，在应用主体断开完全不再需要的外设之前，可以将这些位置 1。

10.5.2 在空闲模式下有选择地禁止模块

要进一步实现省电，可以在器件进入空闲模式后有选择地禁止外设模块。这可通过 “空闲模式停止” (SIDL) 控制位实现，对于大多数外设模块，该位通常位于控制寄存器的第 13 个位。通用名称格式为 “XXXXSIDL”（和前面一样，使用 “XXX” 作为模块名称的助记符）。“空闲模式停止” 功能使得功耗在空闲模式下得到进一步降低，从而增强了对电源要求异常严格的应用的省电功能。

几乎所有外设模块都有一个 “空闲模式停止” 位，包括缺少模块使能位的模块（例如，输入捕捉和输出比较）。实时时钟模块是一个例外，因为包含实时时钟的应用需要保持模块连续运行。

表 10-2: 省电特性映射图

寄存器名称	Bit 15	Bit 14	Bit 13	Bit 12	Bit 11	Bit 10	Bit 9	Bit 8	Bit 7	Bit 6	Bit 5	Bit 4	Bit 3	Bit 2	Bit 1	Bit 0	所有复位时
RCON	TRAPR	IOPUWR	—	—	—	—	CM	VREGS	EXTR	SWR	SWDTEN	WDTO	SLEEP	IDLE	BOR	POR	xxxx ⁽¹⁾
CLKDIV	ROI	DOZE2	DOZE1	DOZE0	DOZEN	RCDIV2	RCDIV1	RCDIV0	—	—	—	—	—	—	—	—	0300
PMDx	XXMD	XXMD	XXMD	XXMD	XXMD	XXMD	XXMD	XXMD	XXMD	XXMD	XXMD	XXMD	XXMD	XXMD	XXMD	XXMD	0000

图注: x = 复位时的未知值，— = 未实现，读为 0。显示的复位值为十六进制。

注 1: RCON 寄存器复位值取决于复位类型。

10.6 设计技巧

问 1: *在进入休眠或空闲模式之前应在软件中如何处理？*

答: 确保将要唤醒器件的中断源的 IE 位置 1。此外，确保特定中断源具有唤醒器件的能力。部分中断源不能在器件处于休眠模式时工作。

如果要使器件进入空闲模式，确保正确设置每个器件外设的“空闲模式停止”控制位。这些控制位将决定外设空闲模式下是否继续工作。更多详细信息，请参见本手册的各个外设章节。

问 2: *如何识别是哪个外设将器件从休眠或空闲模式唤醒的？*

答: 您可以通过查询每个已允许的中断源的 IF 位来确定唤醒的中断源。

10.7 相关应用笔记

本节列出了与手册本章内容相关的应用笔记。这些应用笔记可能并不是专为 PIC24F 器件系列而编写的，但其概念是相关的，通过适当修改即可使用，但在使用中可能会受到一定限制。当前与省电特性相关的应用笔记有：

标题	应用笔记编号
Low-Power Design using PICmicro® Microcontrollers	AN606

注：如需获取更多 PIC24F 系列器件的应用笔记和代码示例，请访问 Microchip 网站（www.microchip.com）。

10.8 版本历史

版本 A（2006 年 8 月）

这是本文档的初始发行版。

注: