AN2515

AVR® 低功耗技术

简介

作者：Per Andreas Gulbrandsen，Microchip Technology Inc.

本应用笔记将讨论几种有助于限制 AVR®单片机功耗的技术。其中涵盖休眠模式、振荡器选型及工作频率、使用事件系统（EVSYS）、独立于内核的外设（Core Independent Peripherals，CIP）以及欠压检测器（Brown-out Detector，BOD）等技术和概念，另外还包括如何处理未使用的引脚。

© 2022 Microchip Technology Inc.
及其子公司

目录

简介 1

1. 相关器件 3

2. 概念应用 6

3. 工作外设 7

4. 工作模式 8
   - 4.1. 概述 8
   - 4.2. 工作模式操作 8
   - 4.3. 休眠模式 9
   - 4.4. 将工作模式应用到概念应用中 9
   - 4.5. 休眠指令执行以及 ISR 与主函数之间的共享变量 9

5. 事件系统 11
   - 5.1. 概述 11
   - 5.2. 将事件应用到概念应用中 11

6. 独立于内核的外设 12
   - 6.1. 将独立于内核的外设应用到概念应用中 12

7. 振荡器选型 13
   - 7.1. 将振荡器选型应用到概念应用中 13

8. BOD 14
   - 8.1. 休眠模式下的 BOD 配置 14
   - 8.2. 将 BOD 应用到概念应用中 14

9. 未使用的引脚 15

10. 稳压器配置 16
    - 10.1. 将稳压器配置应用到概念应用中 16

11. 版本历史 17

Microchip 网站 18

产品变更通知服务 18

客户支持 18

Microchip 器件代码保护功能 18

法律声明 18

商标 19

质量管理体系 19

全球销售及服务网点 20

1. 相关器件

本章列出了本文档的相关器件。下图给出了不同系列的器件之间的关系，并注明了不同的引脚数与存储器大小：

- 从下到上迁移无需修改代码，因为这些器件的引脚彼此兼容，后者可提供相同甚至更多的功能。向下移植到 tinyAVR® 1 系列可能需要修改代码，因为某些外设的可用引脚数较少。
- 水平向左移植会减少引脚数，进而减少可用的功能
- 具有不同闪存大小的器件通常也具有不同的 SRAM 和 EEPROM

图 1-1. tinyAVR® 0 系列概览

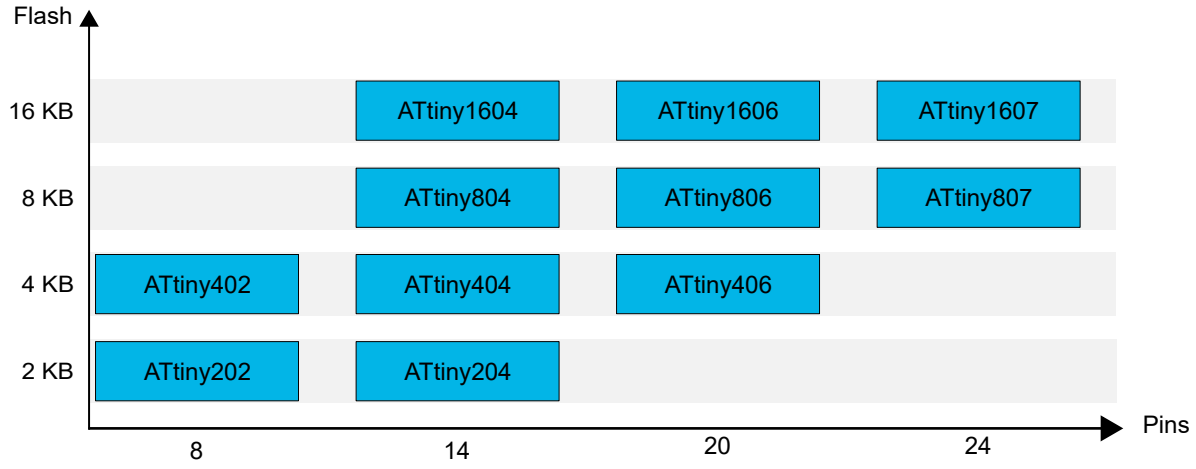


图 1-2. tinyAVR® 1 系列概览

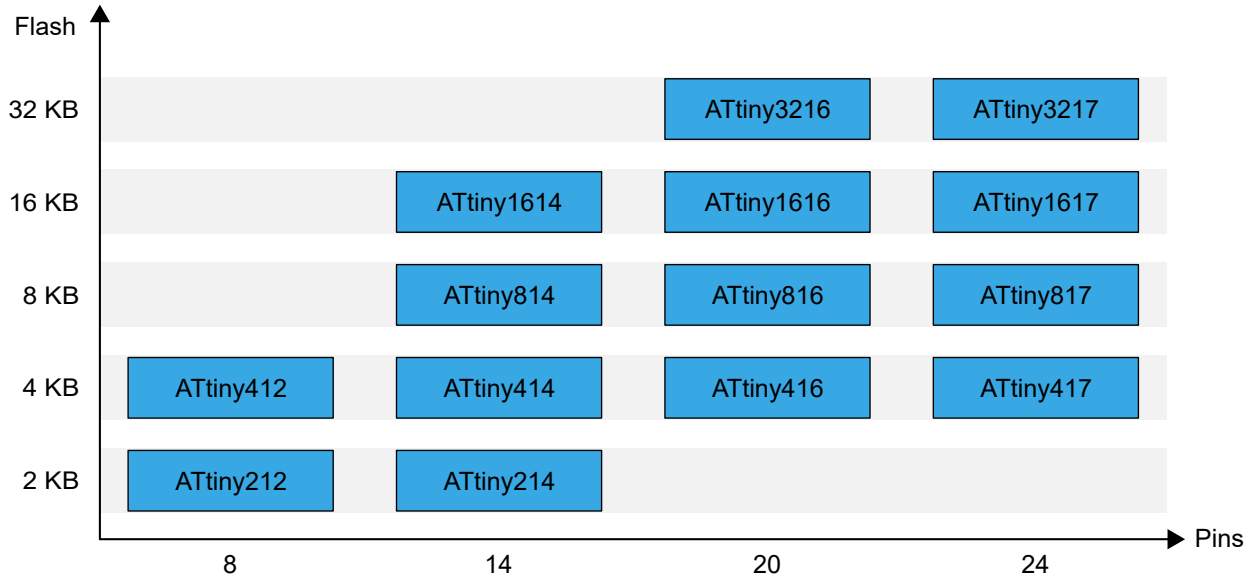


图 1-3. tinyAVR® 2 系列概览

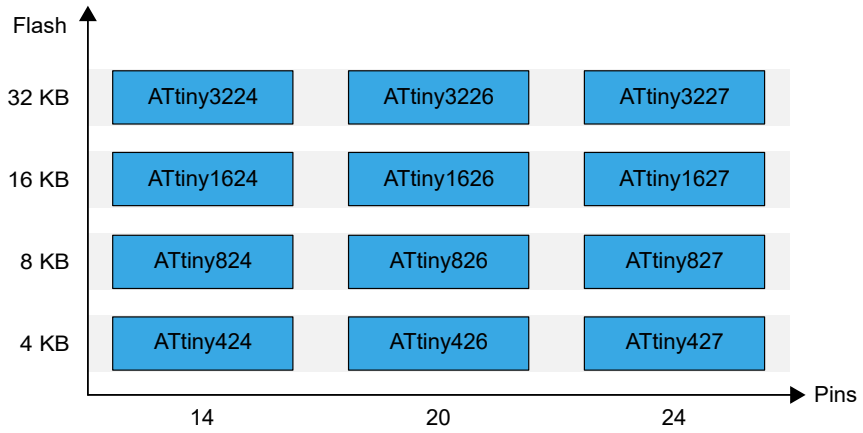


图 1-4. megaAVR® 0 系列概览

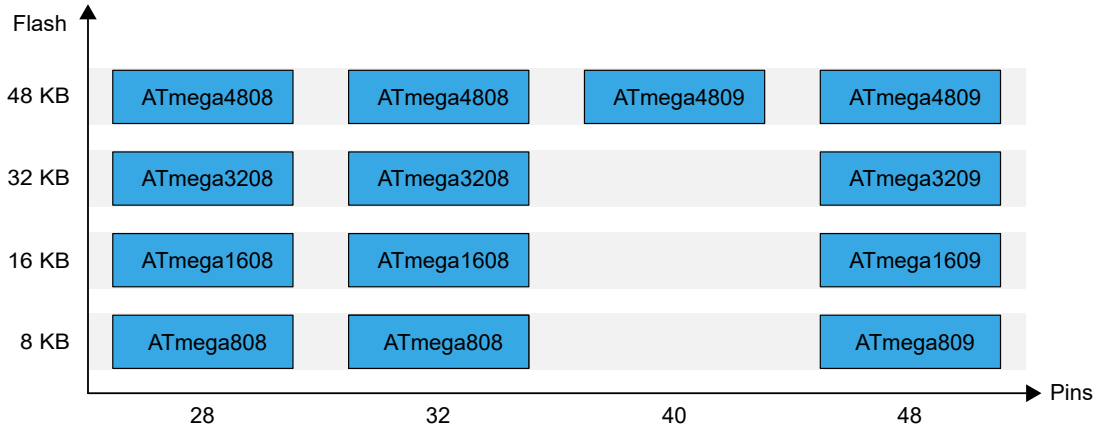


图 1-5. AVR® DA 系列概览

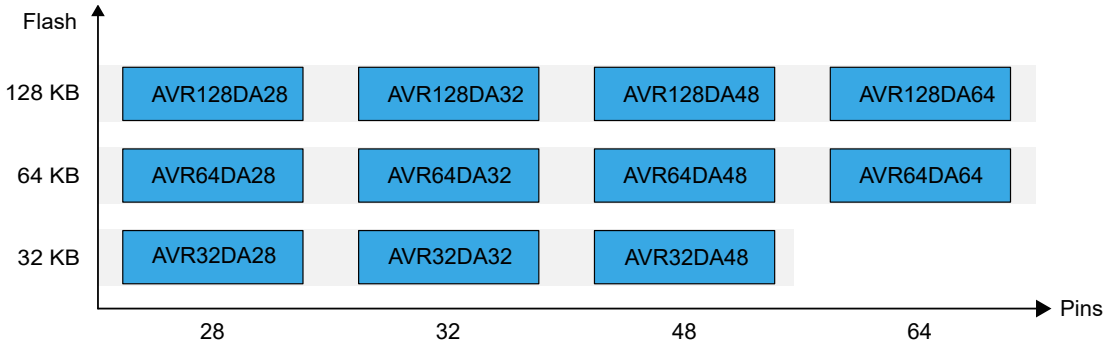
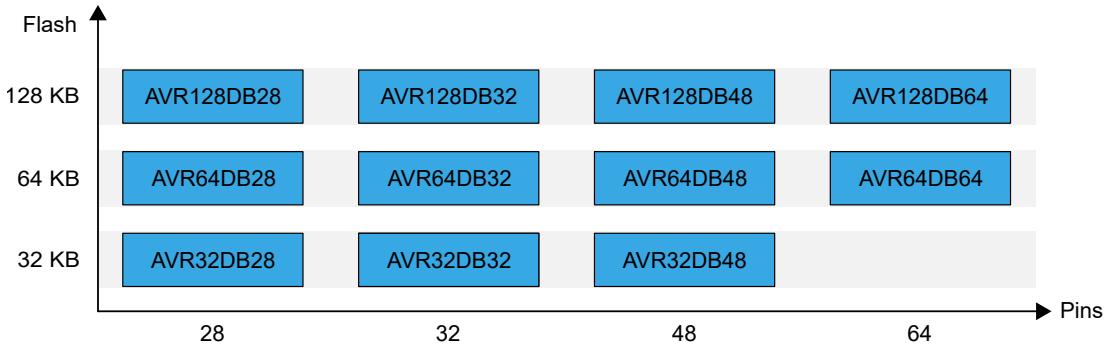


图 1-6. AVR® DB 系列概览



2. 概念应用

本应用笔记将讨论几种有助于限制功耗的技术。为了便于说明，我们引入了概念应用，随后会将上述技术都应用到该应用中。

概念应用是一个非常简单的应用，即监视通过引脚连接的外部温度传感器。该应用的基本形式是忙循环一秒钟，然后使用模数转换器（Analog-to-Digital Converter，ADC）测量传感器的值并将其与两个预定义的阈值进行比较。这两个阈值用于创建一个窗口，以此避免持续切换开关状态。之后，可以基于比较结果执行多项操作，例如在温度高于上限阈值时关闭加热器或者在温度低于下限阈值时开启加热器。只要温度在窗口内部，就不需要进行任何调整。为简单起见，该应用中的操作为开启或关闭引脚。

3. 工作外设

外设一旦使能，即使未处于工作状态也会产生功耗。因此，开发人员应确保仅使能需要使用的外设。在相关器件上实现这一点十分轻松，因为所有外设都默认禁止。

在旧款 AVR 器件上，通常使用功耗降低寄存器（Power Reduction Register，PRR）寄存器来使能或禁止外设。相关器件上不存在该寄存器。但是，每个外设的寄存器接口中都有一个使能位，而且还可搭配使用更高级的时钟系统与更出色的时钟门控方案（这意味着在未使用的时钟路径中，只需为少数几个门提供时钟），因此完美取代了 PRR 功能。此外，由于使能功能内置在外设中，这一点对于用户来说更加友好，使用起来也更加方便。

外设操作也可能受休眠模式的影响。4. 工作模式对此进行了介绍。

4. 工作模式

大多数应用都不会要求 CPU 在启动后持续运行。对于这类应用，可以使用休眠模式来降低功耗。

4.1 概述

休眠模式用于关闭器件中的外设和时钟域，以节省功耗。休眠控制器（SLPCTRL）负责控制和处理在工作模式和休眠模式之间的转换。

共支持四种模式：

- 一种工作模式（执行软件）
- 三种休眠模式：
  - 空闲
  - 待机
  - 掉电

所有休眠模式均可用，也均可从工作模式切换进入。在工作模式下，CPU 执行应用程序代码。当器件进入休眠模式时，停止执行程序，此时可使用中断或复位再次将器件唤醒。应用程序代码决定进入哪种休眠模式以及何时进入。

中断用于将器件从休眠状态唤醒。可用的中断唤醒源取决于配置的休眠模式。当发生中断时，从 `SLEEP` 指令后的第一条指令起，器件将唤醒并执行中断服务程序，然后继续执行正常的程序。任何复位都将使器件退出休眠模式。

休眠期间保留寄存器文件、SRAM 和寄存器的内容。如果在休眠期间发生复位，器件将从复位向量复位、启动和执行程序。

4.2 工作模式操作

在工作模式下，所有时钟均工作，CPU 处于运行状态。工作模式下的功耗与系统时钟的工作频率成比例。如果应用无需在高频下工作，降低系统时钟的频率可以使之受益。

尽管降低频率一般也会降低功耗，但在某些情况下则不然。通常，时钟频率越高，CPU 完成任务的速度越快，返回休眠模式的速度越快，总功耗也会越低。举例来说，假设某个应用定期从待机休眠模式唤醒以执行一些计算。如果这些计算以更高的时钟频率执行，系统处于工作模式的时间会缩短而处于待机休眠模式的时间会延长，因此总功耗也会随之降低。但如果是进行 USART 通信，情况则恰恰相反，因为 USART 通信会阻止 CPU 进入休眠模式。在这种情况下，USART 事务的时序成为了限制因素，提高 CPU 频率反而不会缩短处于工作模式的时间。

对于许多应用来说，让系统以一个静态频率运行即可满足需求。但在某些应用中，使用动态频率调节会具备诸多优势。由于可以动态更改器件的工作频率，因此可以让应用的一部分以较低频率执行，同时让另一部分以较高频率执行。这对于需要在短时间内进行大量计算的应用来说会非常有用。例如，某些应用通常会在收集数据时处于休眠模式，但会定期对采样数据执行大量计算。当使用较高的时钟频率执行这些计算时，尽量功耗较高，但计算时间较短，因此总功耗仍会降低。

请注意，该技术是一种折中方案。由于更改频率需要通过执行指令来实现，这会产生相关成本，因此以较高频率执行的代码必须能够弥补这一点。也就是说，以较高频率执行代码所节省的成本必须盖过因更改频率而添加代码所产生的成本。另请注意，在进入和退出应用中被选择以高频执行的部分时很可能都必须更改频率。

对于动态频率调节，传统方法是使用主时钟预分频器。使用该预分频器，可以先对时钟进行调节，然后再提供给 CPU 和外设。请注意，由于该预分频器同时作用于 CPU 和外设的时钟，因此配置为使用特定时钟速度的任何外设都会发生故障。例如，更改外设时钟时可能违反 ADC 的最大时钟速度或者改变 USART 的波特率。有关详细信息，请参见相应数据手册中的时钟控制器（CLKCTRL）章节。

开发低功耗应用时，制定功耗预算会很有用。首先，计算每种工作模式下的功耗（使用数据手册中“电气特性”章节的数据）。然后，计算处于每种模式的时间。最后，使用前两个步骤中的计算结果来计算平均功耗和峰值功耗。之后，开发人员便可基于这两个功耗值来计算该应用的电池使用寿命等。此外，这还有助于对应用进行性能分析和优化。

4.3 休眠模式

除了工作模式之外，还有三种不同的休眠模式（功耗降低，功能减少）。在空闲模式下，CPU 停止执行代码，但不禁止外设。另外，所有中断源都可以唤醒器件。在待机模式下，用户可以选择是否使能各个外设，因此功耗主要取决于使能了哪项功能。在掉电模式下，只要少数几个外设工作，唤醒源也不多。有关各种休眠模式的完整说明以及各种休眠模式下工作的外设和可用的唤醒源，请参见相应数据手册中的休眠控制器（SLPCTRL）章节。

4.4 将工作模式应用到概念应用中

2. 概念应用在等待采样完成转换的过程中处于非工作状态，如果此时进入休眠模式，则可以节省大量功耗。为此，应用需要唤醒源。这实现起来非常简单，只需设置 RTC 每秒发出一次中断以唤醒系统即可。CPU 唤醒后会启动 ADC 转换，比较结果，必要时执行相应的操作，然后返回休眠模式。

据粗略估计，假设系统每秒针对每个采样唤醒 1 ms（启动系统时钟和 CPU，启动 ADC 转换，等待 ADC 中断，读取结果并进行比较，必要时可能需要翻转引脚，然后返回休眠模式），则预计处于工作模式的时间为 0.1%。这是与未使用休眠模式、CPU 始终保持唤醒状态的情况相比。预计功耗将略高于 0.1%，因为休眠模式下的功耗也必须考虑在内。

此外，也可以将动态时钟调节应用到概念应用中。在 CPU 等待 ADC 完成相关操作的过程中，无需提高 CPU 频率。应用随后会根据输出值来决定是否需要执行进一步的操作。如果需要，系统会切换到较高的时钟频率，以便能够快速完成进一步的操作，从而缩短处于工作模式的时间。但是，在概念应用中，完成比较操作后只会执行少数几条指令，因此使用该技术并不会带来任何益处。

4.5 休眠指令执行以及 ISR 与主函数之间的共享变量

休眠指令有一个潜在的问题，即可能有 ISR 先于休眠指令执行。如果该 ISR 写入的标志需要在主循环中处理，则需要等到出现下一个中断导致器件唤醒后才能得到处理。以下代码给出了一个可能发生这种情况的示例：

```
volatile uint8_t shared_flag;
ISR(perip_vector){
    uint8_t i_flags = PERIP_INTFLAGS;
    shared_flag = 0x01;
    PERIP_INTFLAGS = i_flags;
}

main(){
    while(1){
        cli();
        if(shared_flag == 0x01){
            shared_flag &= ~0x01;
            sei();
            handle_event_etc();
        }
        sei();
        sleep();
    }
}
```

在这种情况下，*shared_flag* 受保护，在被检查和清零时不会遭到 ISR 更改。但是，如果 ISR 在 if 语句内的第一个 *sei()*之后写入 *shared_flag*，则执行休眠指令时将不会再次检查该标志。因此，原本需要在 *main()*中发生的事件会等到出现下一个中断将器件从休眠模式唤醒之后才会发生。

要处理主循环内的所有标志，应使用以下代码：

```
main(){
    while(1){
        cli();
        if(shared_flag == 0){
            sei();
            sleep();
        }
        sei();
```

```
        //处理 shared_flag 并运行应用程序
    }
}
```

该代码可确保在进入休眠模式之前，ISR 与主循环之间的所有共享标志均得到处理。之所以这样做是因为将允许 *sei()* 指令后执行的任何指令在跳转到待处理的中断之前执行。*shared_flag* 变量可在多个 ISR 之间共享。请注意，对主循环内部的 *shared_flag* 的任何读-修改-写操作将被迫受到 *cli()*和 *sei()*保护，如下面的代码所示：

```
cli();
shared_flag &= ~0x01;
sei();
```

这会让读-修改-写操作成为原子操作，即无法被任何 ISR 中断。但是，应使用通用寄存器（General Purpose Register，GPR）作为 ISR 之间的共享变量来避免发生上述情况。这类寄存器允许编译器对将在单个 CPU 周期内执行的一行汇编代码进行任何单个位的修改。相比之下，使用对 *uint8_t* 变量的读-修改-写操作将需要三个周期，如果 *cli()* 和 *sei()*指令也考虑在内的话，甚至需要五个周期。

5. 事件系统

5.1 概述

事件系统（EVSYS）支持在外设之间直接传输信号。一个外设（事件生成器）中的变化可通过事件系统的事件通道来触发其他外设（事件用户）中的操作，而无需使用 CPU。该系统经过专门设计，可在外设之间提供短暂且可预测的响应时间，从而实现自主外设控制和交互，以及多个外设模块操作之间的时序同步。因此，EVSYS 外设有助于实现独立于内核的外设（CIP）。另外，这是一款可降低软件复杂度和尺寸并缩短软件执行时间的强大工具。

事件生成器的状态变化被称为事件，通常与外设的其中一个中断条件相对应。事件可通过专用的事件路由网络直接转发到其他外设。每个通道的路由均使用软件配置，其中包括事件的生成和使用。

每个通道上只能路由一个事件信号。多个外设可以使用来自同一通道的事件。

EVSYS 可连接多种外设，例如 ADC、模拟比较器、I/O 端口引脚、实时计数器、定时器/计数器以及可配置定制逻辑外设。也可通过软件生成事件。

5.2 将事件应用到概念应用中

使用事件可以使 2. 概念应用受益。RTC 可以对操作计时，必要时使用事件来通知 ADC 必须执行转换，而不必唤醒 CPU 来启动转换。这样，当 ADC 执行转换时，CPU 可以处于休眠模式，因此可以略微延长处于休眠模式的时间。由于 ADC 转换非常快（ADC 只需要 13 个周期，而 CPU 则需要 52 个周期），处于工作模式的时间也比较短，因此功耗也比较低。当添加 ADC 窗口模式时，使用事件的益处会更加显著（如 6. 独立于内核的外设所示）。

6. 独立于内核的外设

独立于内核的外设（CIP）可以独立处理任务，无需 CPU 的干预，因此 CPU 可以与之并行处理其他任务，但在概念应用中，我们让 CPU 进入低功耗模式。CIP 还有许多其他优势，具体包括在外设之间提供短且可预测的响应时间，以及降低软件复杂度并缩短软件执行时间。在 5. 事件系统中，我们给出了 CIP 的一个示例。其他示例包括可配置定制逻辑（Configurable Custom Logic，CCL）、定时器/计数器 A 和 B（TCA/TCB）、实时定时器计数器（Real Timer Counter，RTC）、模数转换器（ADC）和 CRCSCAN。

一些外设可以在不唤醒 CPU 的情况下处理传入数据。此类外设可以根据具体的传入数据来决定是否应唤醒 CPU，或者是否需要采取进一步的操作。双线接口（Two-Wire Interface，TWI）和 ADC 是此类外设的两个示例。TWI 支持在地址匹配时唤醒，具体操作为检查传入数据帧起始，然后仅在传入帧的地址与其自身的地址匹配时唤醒 CPU。ADC 支持窗口模式，具体操作为将每个采样与表示窗口的两个值进行比较。ADC 可以根据具体的配置（采样低于窗口、采样高于窗口、采样在窗口内部或采样在窗口外部）来唤醒 CPU。

6.1 将独立于内核的外设应用到概念应用中

例如，在概念应用中实现 ADC 窗口模式可以让 CPU 延长在待机休眠模式下的时间。ADC 本身可以对转换后的值进行比较，然后确认该值是否低于窗口（加热器关闭时）或高于窗口（加热器开启时）。CPU 只会在需要开启或关闭加热器时唤醒。在非常稳定的环境下，CPU 始终不会唤醒，这种情况下的总功耗即是休眠模式下的功耗。在不断波动的环境下，每次采样（即每秒）的温度会在低于阈值与高于阈值之间交替变化，这种情况下的功耗将是 CPU 唤醒以对每个 ADC 采样转换后的值进行比较时的功耗。

7. 振荡器选型

如前文所述，系统时钟会极大地影响系统的功耗。除此之外，振荡器选型的影响也不容小觑。振荡器选型一般就是在精度与功耗之间进行权衡取舍。例如，在挑选 32 kHz 时钟时，与外部晶振相比，内部 32K 超低功耗（Ultra-Low Power，ULP）振荡器的功耗明显要更低，但精度也更低。如果应用对精度的要求并不高，选择 ULP 振荡器将有助于降低功耗预算。

允许时钟源在休眠模式期间禁止将会降低振荡器的功耗。但是，如果振荡器的唤醒时间较长，则会导致处于休眠模式的时间变短。如果应用对时序精度的要求较高，则可以写入相应的 RUNSTDBY 位（例如，对应于外部 32K 振荡器的 XOSC32KCTRLA.RUNSTDBY）来允许振荡器在待机模式下运行，从而消除启动时间并因此提高时序精度。有关唤醒时间的详细信息，请参见相应数据手册中的休眠控制器（SLPCTRL）和时钟控制器（CLKCTRL）章节。

可以采用一些技术来提高 32K ULP 的精度。例如，使用高精度外部晶振执行周期性运行时校准即可显著提高内部 32K ULP 振荡器的精度。请参见相关应用笔记以了解如何通过周期性使能 32.768 kHz 外部晶振重新校准 ULP 内部振荡器来实现精确、超低功耗的时序。

7.1 将振荡器选型应用到概念应用中

2. 概念应用对精度的要求并不高，因此可以使用内部 32K ULP 振荡器作为 RTC 的时钟源，以便在休眠期间跟踪时间。

8. BOD

欠压检测器（BOD）会在单片机的电源电压降至其工作阈值以下时将其复位加以保护。这样，当 V_{CC} 低于单片机的工作阈值时，单片机便可保持在指定的状态。当单片机处于休眠模式时，BOD 无关紧要；但当单片机唤醒时，BOD 极为重要。因此，大多数单片机通常都会在休眠模式下使 BOD 保持工作状态，但这样会显著增加休眠模式下的功耗。

要解决这一问题，可以让单片机在进入休眠模式时关断 BOD，然后在退出休眠模式前再次将其启动。该方案可确保 BOD 在需要时正常工作，并且在休眠模式下不会增加功耗。但是，器件的启动时间会变长，因为 BOD 需要额外的启动时间。

8.1 休眠模式下的 BOD 配置

在工作模式下，BOD 支持四种配置：禁止、使能、采样以及使能但暂停唤醒直至 BOD 就绪。

- 禁止：禁止 BOD。
- 使能：BOD 连续采样电源电压并将其与所选阈值进行比较。
- 采样：以 125 Hz 或 1 kHz 的频率采样电源电压并将其与阈值进行比较。
- 使能但暂停唤醒直至 BOD 就绪：BOD 将在单片机唤醒时采样电源电压，但在收到指示电源电压高于所选阈值的 BOD 信号之前会暂停唤醒。这会导致唤醒时间变长。在工作模式下，BOD 连续采样电源电压并将其与所选阈值进行比较。

在休眠模式下，BOD 支持三种配置：禁止、使能和采样。

在工作模式下，只能使用熔丝进行配置；而在休眠模式下，可以使用熔丝和寄存器进行配置。有关详细信息，请参见相应的数据手册。

8.2 将 BOD 应用到概念应用中

概念应用在休眠模式下不需要 BOD。在休眠模式下禁止 BOD 会降低功耗。

在工作模式下，概念应用可以使用“使能但暂停唤醒”模式。该配置是指 BOD 将在需要（工作模式）时监视电源电流，而在休眠模式下则不会工作。唤醒后会检查电源电流，以此确保正常工作安全进行。虽然这会导致唤醒时间略微延长，但概念应用对时间要求并不严格，因此可以接受。

9. 未使用的引脚

所有数字 I/O 引脚均默认悬空，以避免发生硬件冲突。但是，由于引脚具有数字输入缓冲器，因此务必要确保明确定义 I/O 引脚的电平，以避免偶发性的内部切换和泄漏。I/O 悬空引起的泄漏相对较小，主要是在休眠模式下看起来比较明显，不过可通过使能内部上拉来实现最小化。另外，使用外部上拉也不失为一种选择。

此外，将未使用引脚上的数字输入缓冲器禁止会进一步降低功耗，这对于连接到模拟外设（如 ADC）的引脚同样适用。在 PINCTRLn 寄存器中，可以针对各个端口禁止数字输入缓冲器和使能内部上拉。有关详细信息，请参见相应的数据手册。

10. 稳压器配置

如果应用对时序精度的要求较高，则使用 AVR DA 和 DB 器件时，有另一项技术值得注意。稳压器可以在休眠控制器（SLPCTRL）中进行配置，从而在功耗、唤醒时间与最大时钟速度之间进行平衡取舍。稳压器默认配置为正常（AUTO）模式。在该模式下，稳压器将在待机/掉电休眠模式下或者仅使能 32 kHz 振荡器时产生少量功耗，但唤醒时间会较长。而如果将稳压器配置为性能（FULL）模式，则在所有模式下都会产生最大功耗，但是从休眠模式唤醒的时间会缩短，即在唤醒时间与功耗之间进行权衡取舍。如7. 振荡器选型所述，唤醒时间越长，处于休眠模式的时间越短。将稳压器配置为性能模式会缩短唤醒时间，同时确保时钟源在休眠模式期间仍处于禁止状态。有关功耗和启动时间的确切值，请参见相应数据手册中的“电气特性”章节。

10.1 将稳压器配置应用到概念应用中

2.概念应用对精度的要求并不高。因此，可以使用正常（AUTO）模式的稳压器。另请注意，只有使用 DA 或 DB 器件时才需要配置稳压器。

11. 版本历史

文档版本	日期	备注
D	2022 年 1 月	• 更新了相关器件的相关章节 • 将 Sleepwalking 的相关章节更改为“独立于内核的外设”并进行了更新 • 针对 DA 和 DB 器件的稳压器配置新增了一个章节 • 更新了休眠模式和事件系统的相关章节
C	2018 年 10 月	更新了tinyAVR®和 megaAVR®相关器件的列表
B	2018 年 1 月	新增章节： • *tinyAVR 0 系列* • *megaAVR 0 系列* • *休眠指令执行以及 ISR 与主函数之间的共享变量*
A	2017 年 7 月	文档初始版本。

Microchip 网站

Microchip 网站（www.microchip.com）为客户提供在线支持。客户可通过该网站方便地获取文件和信息。我们的网站提供以下内容：

- **产品支持**——数据手册和勘误表、应用笔记和示例程序、设计资源、用户指南以及硬件支持文档、最新的软件版本以及归档软件
- **一般技术支持**——常见问题解答（FAQ）、技术支持请求、在线讨论组以及 Microchip 设计伙伴计划成员名单
- **Microchip 业务**——产品选型和订购指南、最新 Microchip 新闻稿、研讨会和活动安排表、Microchip 销售办事处、代理商以及工厂代表列表

产品变更通知服务

Microchip 的产品变更通知服务有助于客户了解 Microchip 产品的最新信息。注册客户可在他们感兴趣的某个产品系列或开发工具发生变更、更新、发布新版本或勘误表时，收到电子邮件通知。

欲注册，请访问 www.microchip.com/pcn，然后按照注册说明进行操作。

客户支持

Microchip 产品的用户可通过以下渠道获得帮助：

- 代理商或代表
- 当地销售办事处
- 应用工程师（ESE）
- 技术支持

客户应联系其代理商、代表或 ESE 寻求支持。当地销售办事处也可为客户提供帮助。本文档后附有销售办事处的联系方式。

也可通过 www.microchip.com/support 获得网上技术支持。

Microchip 器件代码保护功能

请注意以下有关 Microchip 产品代码保护功能的要点：

- Microchip 的产品均达到 Microchip 数据手册中所述的技术规范。
- Microchip 确信：在按照操作规范正常使用的情况下，Microchip 系列产品非常安全。
- Microchip 重视并积极保护其知识产权。任何试图破坏 Microchip 产品代码保护功能的行为均可视为违反了《数字器件千年版权法案（Digital Millennium Copyright Act）》并予以严禁。
- Microchip 或任何其他半导体厂商均无法保证其代码的安全性。代码保护并不意味着我们保证产品是“牢不可破”的。代码保护功能处于持续发展中。Microchip 承诺将不断改进产品的代码保护功能。

法律声明

本出版物中提供的信息仅仅是为方便您使用 Microchip 产品或使用这些产品来进行设计、测试以及与应用相集成。以任何其他方式使用这些信息，都将违反相关条款。器件应用信息仅为您提供便利，它们可能由更新之信息所替代。确保应用符合技术规范，是您自身应负的责任。如需更多支持，请联系您当地的 Microchip 销售办事处，或访问 www.microchip.com/en-us/support/design-help/client-support-services。

Microchip“按原样”提供这些信息。Microchip 对这些信息不作任何明示或暗示、书面或口头、法定或其他形式的声明或担保，包括但不限于针对非侵权性、适销性和特定用途的适用性的暗示担保，或针对其使用情况、质量或性能的担保。

在任何情况下，对于因这些信息或使用这些信息而产生的任何间接的、特殊的、惩罚性的、偶然的或间接的损失、损害或任何类型的开销，Microchip 概不承担任何责任，即使 Microchip 已被告知可能发生损害或损害可以预见。在法律

允许的最大范围内，对于因这些信息或使用这些信息而产生的所有索赔，Microchip 在任何情况下所承担的全部责任均不超出您为获得这些信息向 Microchip 直接支付的金额（如有）。

如果将 Microchip 器件用于生命维持和/或生命安全应用，一切风险由买方自负。买方同意在由此引发任何一切损害、索赔、诉讼或费用时，会维护和保障 Microchip 免于承担法律责任。除非另外声明，在 Microchip 知识产权保护下，不得暗中或以其他方式转让任何许可证。

商标

Microchip 的名称和徽标组合、Microchip 徽标、Adaptec、AnyRate、AVR、AVR 徽标、AVR Freaks、BesTime、BitCloud、CryptoMemory、CryptoRF、dsPIC、flexPWR、HELDO、IGLOO、JukeBlox、KeeLoq、Kleer、LANCheck、LinkMD、maXStylus、maXTouch、MediaLB、megaAVR、Microsemi、Microsemi 徽标、MOST、MOST 徽标、MPLAB、OptoLyzer、PIC、picoPower、PICSTART、PIC32 徽标、PolarFire、Prochip Designer、QTouch、SAM-BA、SenGenuity、SpyNIC、SST、SST 徽标、SuperFlash、Symmetricom、SyncServer、Tachyon、TimeSource、tinyAVR、UNI/O、Vectron 和 XMEGA 是 Microchip Technology Incorporated 在美国和其他国家/地区的注册商标。

AgileSwitch、APT、ClockWorks、The Embedded Control Solutions Company、EtherSynch、Flashtec、Hyper Speed Control、HyperLight Load、IntelliMOS、Libero、motorBench、mTouch、Powermite 3、Precision Edge、ProASIC、ProASIC Plus、ProASIC Plus 徽标、Quiet- Wire、SmartFusion、SyncWorld、Temux、TimeCesium、TimeHub、TimePictra、TimeProvider、TrueTime、WinPath 和 ZL 是 Microchip Technology Incorporated 在美国的注册商标。

Adjacent Key Suppression、AKS、Analog-for-the-Digital Age、Any Capacitor、AnyIn、AnyOut、Augmented Switching、BlueSky、BodyCom、CodeGuard、CryptoAuthentication、CryptoAutomotive、CryptoCompanion、CryptoController、dsPICDEM、dsPICDEM.net、Dynamic Average Matching、DAM、ECAN、Espresso T1S、EtherGREEN、GridTime、IdealBridge、In-Circuit Serial Programming、ICSP、INICnet、Intelligent Paralleling、Inter-Chip Connectivity、JitterBlocker、Knob-on-Display、maxCrypto、maxView、memBrain、Mindi、MiWi、MPASM、MPF、MPLAB Certified 徽标、MPLIB、MPLINK、MultiTRAK、NetDetach、NVM Express、NVMe、Omniscient Code Generation、PICDEM、PICDEM.net、PICkit、PICtail、PowerSmart、PureSilicon、QMatrix、REAL ICE、Ripple Blocker、RTAX、RTG4、SAM-ICE、Serial Quad I/O、simpleMAP、SimpliPHY、SmartBuffer、SmartHLS、SMART-I.S.、storClad、SQI、SuperSwitcher、SuperSwitcher II、Switchtec、SynchroPHY、Total Endurance、TSHARC、USBCheck、VariSense、VectorBlox、VeriPHY、ViewSpan、WiperLock、XpressConnect 和 ZENA 是 Microchip Technology Incorporated 在美国和其他国家/地区的商标。

SQTP 是 Microchip Technology Incorporated 在美国的服务标记。

Adaptec 徽标、Frequency on Demand、Silicon Storage Technology、Symmcom 和 Trusted Time 是 Microchip Technology Inc.在其他国家/地区的注册商标。

GestIC 是 Microchip Technology Inc.子公司 Microchip Technology Germany II GmbH & Co. KG 在其他国家/地区的注册商标。

在此提及的所有其他商标均为各持有公司所有。

© 2022, Microchip Technology Incorporated 及其子公司。版权所有。

ISBN：978-1-6683-1321-3

质量管理体系

有关 Microchip 的质量管理体系的信息，请访问 www.microchip.com/quality。

全球销售及服务网点

美洲	亚太地区	亚太地区	欧洲
公司总部 2355 West Chandler Blvd. Chandler, AZ 85224-6199 电话：480-792-7200 传真：480-792-7277 技术支持： www.microchip.com/support 网址： www.microchip.com **亚特兰大** 德卢斯，佐治亚州 电话：678-957-9614 传真：678-957-1455 **奥斯汀，德克萨斯州** 电话：512-257-3370 **波士顿** 韦斯特伯鲁，马萨诸塞州 电话：774-760-0087 传真：774-760-0088 **芝加哥** 艾塔斯卡，伊利诺伊州 电话：630-285-0071 传真：630-285-0075 **达拉斯** 阿迪森，德克萨斯州 电话：972-818-7423 传真：972-818-2924 **底特律** 诺维，密歇根州 电话：248-848-4000 **休斯顿，德克萨斯州** 电话：281-894-5983 **印第安纳波利斯** 诺布尔斯维尔，印第安纳州 电话：317-773-8323 传真：317-773-5453 电话：317-536-2380 **洛杉矶** 米慎维荷，加利福尼亚州 电话：949-462-9523 传真：949-462-9608 电话：951-273-7800 **罗利，北卡罗来纳州** 电话：919-844-7510 **纽约，纽约州** 电话：631-435-6000 **圣何塞，加利福尼亚州** 电话：408-735-9110 电话：408-436-4270 **加拿大 - 多伦多** 电话：905-695-1980 传真：905-695-2078	**澳大利亚 - 悉尼** 电话：61-2-9868-6733 **中国 - 北京** 电话：86-10-8569-7000 **中国 - 成都** 电话：86-28-8665-5511 **中国 - 重庆** 电话：86-23-8980-9588 **中国 - 东莞** 电话：86-769-8702-9880 **中国 - 广州** 电话：86-20-8755-8029 **中国 - 杭州** 电话：86-571-8792-8115 **中国 - 香港特别行政区** 电话：852-2943-5100 **中国 - 南京** 电话：86-25-8473-2460 **中国 - 青岛** 电话：86-532-8502-7355 **中国 - 上海** 电话：86-21-3326-8000 **中国 - 沈阳** 电话：86-24-2334-2829 **中国 - 深圳** 电话：86-755-8864-2200 **中国 - 苏州** 电话：86-186-6233-1526 **中国 - 武汉** 电话：86-27-5980-5300 **中国 - 西安** 电话：86-29-8833-7252 **中国 - 厦门** 电话：86-592-2388138 **中国 - 珠海** 电话：86-756-3210040	**印度 - 班加罗尔** 电话：91-80-3090-4444 **印度 - 新德里** 电话：91-11-4160-8631 **印度 - 浦那** 电话：91-20-4121-0141 **日本 - 大阪** 电话：81-6-6152-7160 **日本 - 东京** 电话：81-3-6880-3770 **韩国 - 大邱** 电话：82-53-744-4301 **韩国 - 首尔** 电话：82-2-554-7200 **马来西亚 - 吉隆坡** 电话：60-3-7651-7906 **马来西亚 - 槟榔屿** 电话：60-4-227-8870 **菲律宾 - 马尼拉** 电话：63-2-634-9065 **新加坡** 电话：65-6334-8870 **台湾地区 - 新竹** 电话：886-3-577-8366 **台湾地区 - 高雄** 电话：886-7-213-7830 **台湾地区 - 台北** 电话：886-2-2508-8600 **泰国 - 曼谷** 电话：66-2-694-1351 **越南 - 胡志明市** 电话：84-28-5448-2100	**奥地利 - 韦尔斯** 电话：43-7242-2244-39 传真：43-7242-2244-393 **丹麦 - 哥本哈根** 电话：45-4485-5910 传真：45-4485-2829 **芬兰 - 埃斯波** 电话：358-9-4520-820 **法国 - 巴黎** 电话：33-1-69-53-63-20 传真：33-1-69-30-90-79 **德国 - 加兴** 电话：49-8931-9700 **德国 - 哈恩** 电话：49-2129-3766400 **德国 - 海尔布隆** 电话：49-7131-72400 **德国 - 卡尔斯鲁厄** 电话：49-721-625370 **德国 - 慕尼黑** 电话：49-89-627-144-0 传真：49-89-627-144-44 **德国 - 罗森海姆** 电话：49-8031-354-560 **以色列 - 若那那市** 电话：972-9-744-7705 **意大利 - 米兰** 电话：39-0331-742611 传真：39-0331-466781 **意大利 - 帕多瓦** 电话：39-049-7625286 **荷兰 - 德卢内市** 电话：31-416-690399 传真：31-416-690340 **挪威 - 特隆赫姆** 电话：47-72884388 **波兰 - 华沙** 电话：48-22-3325737 **罗马尼亚 - 布加勒斯特** 电话：40-21-407-87-50 **西班牙 - 马德里** 电话：34-91-708-08-90 传真：34-91-708-08-91 **瑞典 - 哥德堡** 电话：46-31-704-60-40 **瑞典 - 斯德哥尔摩** 电话：46-8-5090-4654 **英国 - 沃金厄姆** 电话：44-118-921-5800 传真：44-118-921-5820