

# 基于 ADC 技术的 MCU 系统数据采集方案

使用 MCU 的系统设计人员受益于摩尔定律，即通过更小封装、更低成本获得更多的丰富特性功能。嵌入式系统设计人员和 MCU 厂商关心数据采集系统的三个基本功能：捕获、计算和通信。理解全部功能对设计大有帮助，本文将主要关注数据采集系统的捕获阶段。

## 捕获

复杂的混合信号 MCU 必须能够从模拟世界中捕获某些有用信息，并且能够把连续时间信号转换成离散的数字形式。模数转换器（ADC）是完成这项任务最重要的 MCU 外设，因此 ADC 的性能往往决定何种 MCU 适用于何种应用。MCU 也能够通过各种串行或并行数字 I/O 接口捕获来自外部信号源的数字形式的系统信息。

## 计算

信号捕获后，需要对捕获数据进行某些处理；有时仅仅需要模数转换，但是更多情况下必须对捕获的数据样本进行计算。MCU 行业中持续进行的数字化演变，带给系统开发人员更先进的信号处理水平和更高的处理器速度。因此，嵌入式开发人员现在对 8 位、16 位和 32 位混合信号 MCU 有更多的选择余地，以便适应各种成本/性能目标。开发人员也有更多片上选择（on-chip options）可用于完成系统任务。此外，MCU 的硬宏（hard-macro）能自动处理，在外设中集成的功能状态机可完成常见的处理器任务。

## 通信

最后，为了控制过程中的信息交换，某种形式的通信是必要的。此功能可以相当简单，也可以相当复杂。通信甚至可以是模拟输出的电压或电流，通常使用数模转换器（DAC）把捕获和处理的数据转换到模拟形式来实现。

## 基于多功能 MCU 的数据采集系统

MCU 数据采集系统的关键是 ADC。在电子行业中最常见的 ADC 类型一般是逐次逼近型 ADC（SAR ADC）。许多 MCU 使用 SAR ADC 是因为它在速度和性能组合上的灵活性。在 MCU 中，SAR ADC 的精确度可以从 8 位到 16 位，吞吐速率范围可以从极慢的按需转换请求到每秒超过 100 万次转换。但是 ADC 仅仅是完整数据采集系统中的一部分。数据采集系统的其他部分也可增加其灵活性，包括信号输入接口、参考电压接口、用于 ADC 的时钟和采样系统以及用于转换后 ADC 输出数据的数据管理。

通常情况下，模拟信号输入接口共享一个通用输入输出（I/O）缓冲器结构体，此结构体可配置为数字域或模拟域，或者也可以由两个域共用。多配置性实现方法允许设计人员根据其系统需求在多个芯片引脚上划分模拟和数字功能。作

为输入多路复用器的一部分，最常见的辅助输入之一是片上的温度传感器；其他的重要输入包括内部电压。

一旦系统的输入通道配置完成，嵌入式设计人员就可以利用程序代码选择任意通道，并请求 ADC 转换。设计人员也可以选择免除程序代码，而允许 ADC 通道定序器根据预先设定的通道输入进行循环，直到检测出重要事件。

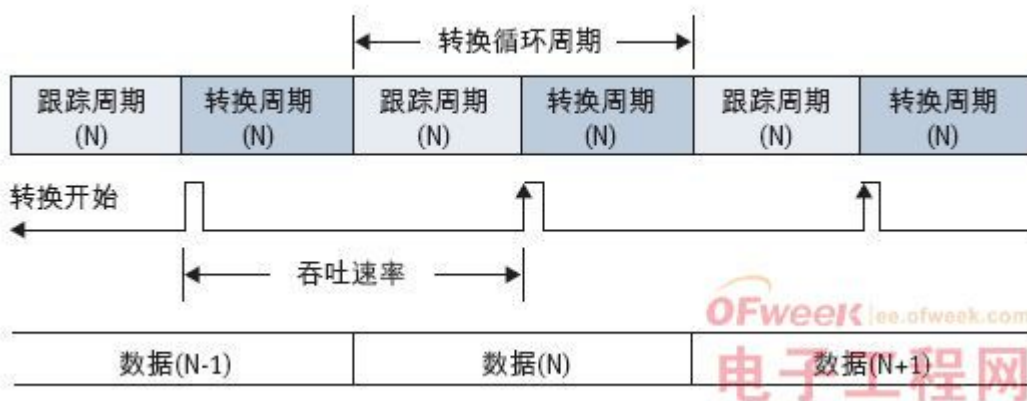
## 数据采集

系统的另一个重要方面是 ADC 参考电压 (VREF)。参考电压用来设置系统的输入动态范围或量程，并能显著影响整体噪声性能。多路转换器通常用于从多种板上和外部参考电压输入中选择 VREF。常用的参考电压包括 MCU 内部生成的缓冲带隙电压的倍频电压、片外生成的精确参考电压以及多种外部电源电压，以上可选参考电压都兼容 I/O 缓冲器结构体和 ADC 限制。

如此多的输入通道，使人们很容易想象到，在某些系统中一个或多个引脚的输入动态范围可能不兼容单一 VREF 电压。为了解决这个问题，Silicon Labs Precision32 MCU 集成输入级联增益，根据 ADC 型号不同可能有 0.5 或 1 倍的增益，这样通过调整输入信号可更好的兼容选择 VREF。

## ADC 转换循环

ADC 的时钟系统要易于配置，以便支持 MCU 应用的多种用途。SAR ADC 属于奈奎斯特率转换器，系统设计人员要仔细选择以满足采样率至少两倍于输入信号带宽的奈奎斯特准则。当配置 ADC 时，开发人员还必须考虑两个计时任务。这两个任务涉及 ADC 转换循环和 MCU 系统内的可用时钟源。转换循环有两部分组成：一个是跟踪周期，一个是转换周期，如图 1 所示。



▲ 图 1:ADC 转换循环。

跟踪周期是转换循环中当 ADC 输入电路连接到输入信号时所花费的那部分时间。输入采样发生在跟踪周期结束并且输入电路从输入源断开时。这一时刻是由

连接到 ADC 的数字控制信号引起的，称为转换启动（CNVST）。该命名恰如其分，CNVST 标志着跟踪周期的结束和转换周期的开始。

转换周期是 ADC 执行逐次逼近寄存器（SAR）逻辑时的那部分 ADC 转换循环。ADC 用于跟踪输入信号的时间量与 ADC 的输入负载特性、信号源的驱动能力和测量所需的精度要求相关。MCU 器件规格手册列出 ADC 输入模型，给出 ADC 输入的输入电容、电阻和漏电流值。为了精确测量，开发人员应当为输入信号稳定保留足够的跟踪时间，最好超过 0.5 LSB。

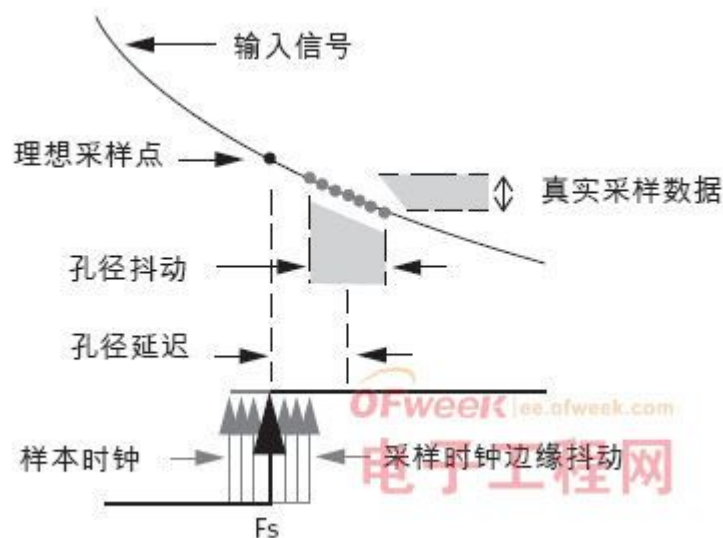
虽然转换周期通常是一个与 SAR ADC 时钟周期有关的可配置时间量，即对于每一位的判别时间，但他最好是采用 CNVST 请求之间的时间量描述跟踪时间，而不是 SAR 转换周期。简单的说，如果 ADC 没有处于转换状态，那你就处于跟踪状态。转换请求之间的过长时间会导致更多的跟踪时间。为了解决这个问题，Silicon Labs MCU 系列产品提供在转换请求之间关闭跟踪电路的功能，从而可降低系统功耗。

ADC 转换吞吐速率是转换请求的频率，通常命名为符号  $F_s$ 。最大吞吐速率的设定通常由 ADC 的最小跟踪时间以及最小转换时间限定。恒定的吞吐速率是通过发送同样时间间隔的转换请求流来实现的。对于管理两个关键的计时任务来说，可配置的 ADC 时钟系统是必不可少的。

计时任务之一是生成用于转换周期期间的时钟，用于执行 SAR 算法。与转换周期相关的 SAR 时钟（SARCLK）通常来自 MCU 系统时钟。SARCLK 的可配性需要适应 MCU 系统时钟，时钟频率范围从不到 1MHz 到超过 100MHz。由于 ADC 内部的比较器设计，将产生 SAR 转换逻辑被定时的最大速率。系统设计人员必须小心配置 SARCLK 频率，避免超过其最大时钟速率规格。另一个计时任务是生成转换请求采样速率，其不能超过给定适当转换周期配置的 ADC 转换器的最大吞吐速率。

### 孔径抖动和延迟

转换启动请求信号可以看作是采样时钟，因此它决定 ADC 采样和保持电路实际捕获输入信号的时间点。当配置 ADC 转换请求时基时，需要考虑与采样和保持电路相关的规格，即孔径抖动和孔径延迟。这两个规格影响输入信号采样的精确度，因为输入信号相对于孔径时间延迟在不断快速变化，如图 2 所示。



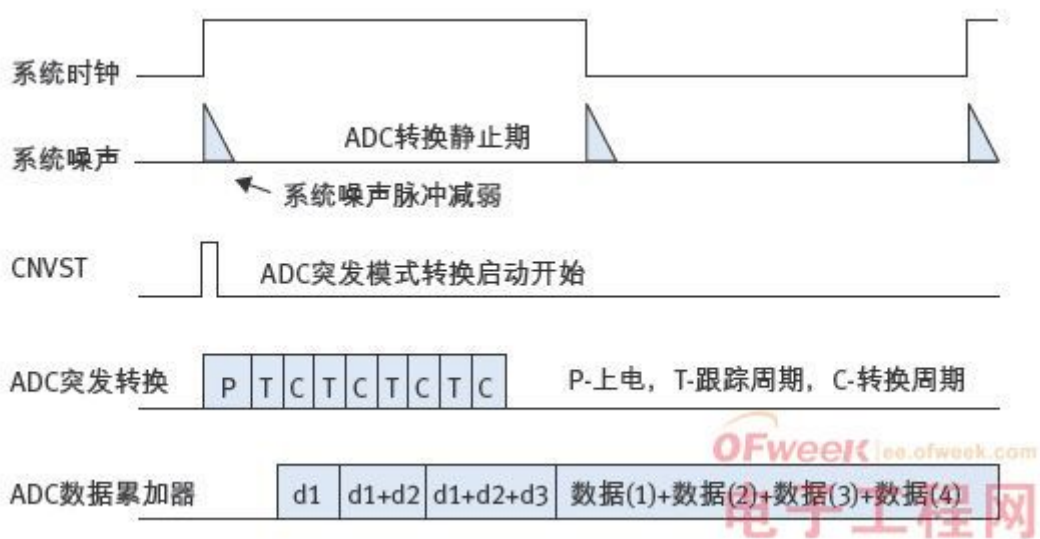
▲ 图 2:孔径抖动和延迟。

孔径抖动在生成转换启动信号的时钟系统和其他电路中将导致误差(即时钟抖动),同时孔径延迟导致转换启动信号和采样开关之间电路延迟。孔径抖动在数据采集系统中会引入噪声和失真。孔径延迟可以由MCU设计人员内部管理,使其最小化,以避免由于长延迟而增加更多抖动的风险。孔径延迟在数据采集系统中引起延迟误差。太长的孔径延迟类似于水池在“水池满”信号发出之前就开始溢出。

由于上述原因,需要精确的时基用于产生稳定的转换启动请求时序。MCU提供一系列板上时钟或外部时钟源作为系统时钟选择。系统设计人员必须仔细选择具有足够精度的时钟源,以满足其数据采集系统的需求。对于高速输入源,需要非常精确的晶体振荡器。另一方面,直流(DC)或慢速输入可以更好地容忍时钟系统错误,但仍然需要在转换之间保留足够的稳定时间。

### 突发模式特性

Silicon Labs MCU系列产品中两个特别有用的特性是突发模式和标记跟踪模式。突发模式根据可编程的连续ADC转换数量生成累积的或平均结果,所有触发来自一个转换请求。标记跟踪模式通过改变转换启动请求操作来分担MCU系统所需的跟踪时间管理。通常,转换启动标记在跟踪周期终点和转换周期起点。但在标记跟踪模式中,转换启动请求却在跟踪周期起点触发,然后持续一段时间,此时长为基于预配置的SARADC时钟周期的可编程时长,最后才开始转换。带有标记跟踪的触发模式可为低频运行的MCU在单MCU时钟循环中获得累积的ADC结果,因此减少系统循环数和降低功耗,如图3所示。



▲ 图 3:ADC 突发模式，在单个系统时钟循环下实现 4 个数据累加。

### ADC 数据窗口

Silicon Labs 8 位和 32 位混合信号 MCU 具有 ADC 输出数据窗口比较器。ADC 输出数据与可编程的高低限制进行比较，并可为 ADC 输出数据在设定的门限值内、外、高或低自动生成可编程中断。使用数据窗口比较器，设计人员能够配置 ADC 来自动检查“水池满”液面监测器输入，直到数据窗口比较器发出一个中断信号给 MCU 程序为止。当触发中断时，MCU 可以中断当前执行的任务并切换到严密控制水池系统的任务中。