

C8051F MCU 应用笔记

AN019 — 计算开关电容 ADC 的建立时间

相关器件

本应用笔记适用于下列器件：

C8051F000、C8051F001、C8051F002、C8051F005、C8051F006、C8051F007、C8051F010、C8051F011、C8051F012、C8051F015、C8051F016、C8051F017、C8051F206、C8051F220、C8051F221 和 C8051F226。

1. 引言

很多Cygnal器件具有片内模/数转换器（ADC）。这些ADC使用一个采样电容，该电容被充电到输入信号电压，由SAR逻辑进行数据转换。由于存在ADC采样电容、输入阻抗和外部输入电路，采样电容需要经过一个建立时间才能达到被测输入信号电压。本应用笔记介绍一种计算有效ADC测量所需建立时间的方法和为满足建立时间需求要采取的一些措施。

2. 关键点

- 一个应用必须考虑片内ADC电路和片外输入电路（例如，反混叠滤波器）的建立时间。
- ADC输入电路的最小建立时间是 $1.5\mu s$ 。
- 使用戴维南等效输入电路估算对应所需精度的建立时间需求。

3. 等效电路

为了估算建立时间，我们介绍一个能逼近 ADC 跟踪电路（即模拟多路选择器 AMUX、传输门、寄生电容、采样电容等）的阻抗和电容的等效电路。图 1 给出了能逼近这些参数的集总参数电路。输入信号通常要经过系统设计者设计的外部输入电路滤波。大多数外部输入电路都包含一个反混叠滤波器。AMUX 将输入信号从输入引脚连到 ADC。作为一个保守的估计，输入阻抗和电容等价于一个 $5k\Omega$ 电阻和一个 $10pF$ 电容的串联。注意，这是 ADC 电路工作在跟踪方式时的简化表达形式。

AN019 — 计算开关电容 ADC 的建立时间

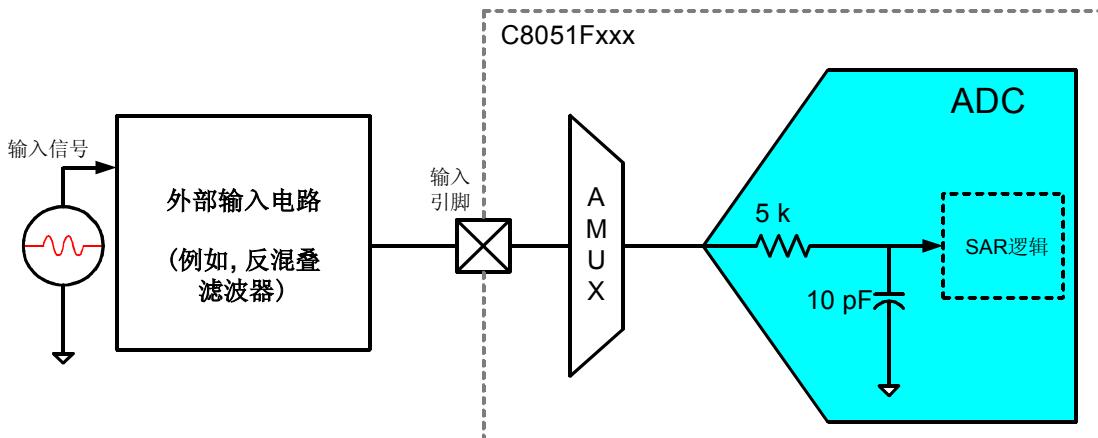


图 1. 用于估算建立时间的 ADC 等效电路

差分输入测量

图 1 给出了单端测量时的等效跟踪电路。该电路对很多使用 ADC 的测量类型有很好的逼近效果。戴维南等效电路的时间常数是图中电阻和电容的乘积。但是很多 Cygnal 的 ADC 具有差分测量的能力。在差分测量的情况下，等效电路如图 2 所示，与图 1 的等效电路不同。为了考查对建立时间的影响，我们计算新的时间常数。如图所示，新等效电路的时间常数与单端测量时一样。新电路有不同的电阻和电容，但它们的乘积相同，因而建立时间将保持不变：

$$\tau_{\text{differential}} = (2R) \times (C/2) = RC = \tau_{\text{single}}$$

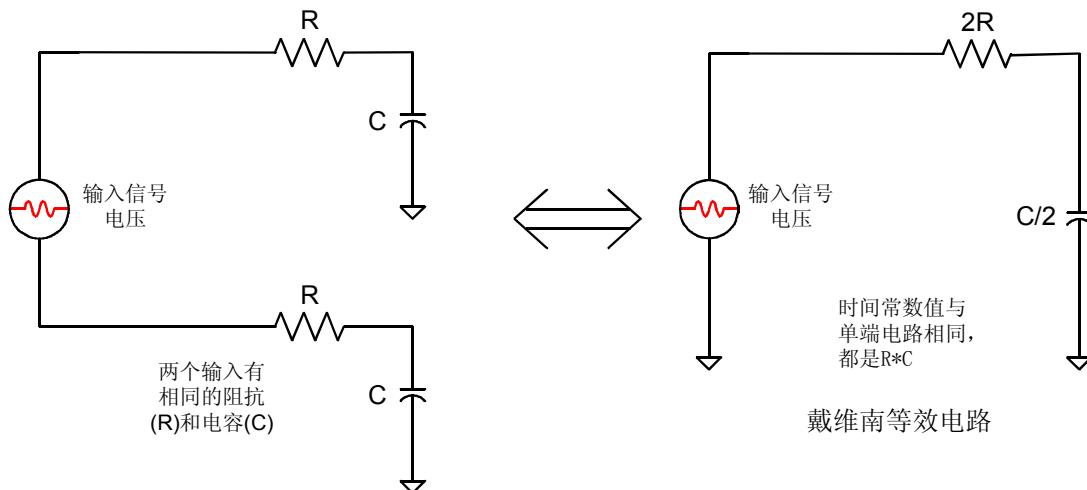


图 2. 差分测量时的时间常数

4. 确定建立时间

一个给定应用所需要的建立时间由 ADC 输入电路、外部电路（例如，反混叠滤波器）和 ADC 的建立时间指标决定。如果不能满足建立时间要求，ADC 可能达不到数据表中给出的技术指标。为了计算建立时间需求，我们必须考虑 ADC 输入电路和外部电路的建立时间以及 ADC 技术指标

AN019 — 计算开关电容 ADC 的建立时间

所要求的最小建立时间。

4.1 最小建立时间指标

Cygnal 的 ADC 技术指标要求 $1.5\mu s$ 的跟踪时间。尽管图 1 给出了用于估算建立时间的等效电路，但实际的 ADC 外设会有很多的元件影响建立时间，例如：开关电容、传输门等。因此规定的最小建立时间是 $1.5\mu s$ 。如果用图 1 中的等效电路或外部电路计算出的建立时间大于 $1.5\mu s$ ，则建立时间将由外部元件决定。

4.2 ADC 输入电路的建立时间

因为 ADC 的等效输入跟踪电路是一个 RC 电路，所以我们将根据时间常数计算建立时间。用时间常数的倍数表示建立时间是很有用的。建立时间被规定为精度达到 LSB 的一个分数所需要的时间：

$$LSB = \frac{V_{ref}}{2^N}$$

方程 1. LSB 代码宽度计算

为了计算采样电容的电压稳定在输入电压 $LSB/4$ 的时间 (t)，我们导出一个计算方程：

$$V(t) = V_{in} \times (1 - e^{-t/\tau})$$

其中 V_{in} 是器件输入引脚的输入电压，时间常数是 $\tau = RC$

方程 2. ADC 跟踪电路充电电压

我们解上面的方程得到用时间常数 τ 表示的时间 t ：

$$t = -\ln\left[1 - \frac{V(t)}{V_{in}}\right] \times \tau$$

方程 3. 以时间常数 τ 表示的建立时间

假设输入电压是一个满度阶跃输入 ($V_{in} = V_{ref}$)，计算输出达到输入电压 $1/4$ LSB 以内所对应的电压：

$$V(t)_{\frac{1}{4}LSB} = V_{ref} \times \left(1 - \frac{1}{2^N \times 4}\right)$$

其中 N 是 ADC 位数

方程 4. 达到被测输入电压 $1/4$ LSB 之内的输出电压

将方程 4 代入方程 3，并假设输入电压是一个满度阶跃输入 ($V_{in} = V_{ref}$)，我们得到下面的结果：

$$t = -\ln\left(\frac{1}{2^N \times 4}\right) \times \tau$$

AN019 — 计算开关电容 ADC 的建立时间

其中 N 是 ADC 位数

方程 5. 稳定在 1/4 LSB 以内所需要的时间

假设使用 12 位的 ADC，则上面的方程 5 变为：

$$t = -\ln\left(\frac{1}{4096 \times 4}\right) \times \tau = \ln(4096.4) \times \tau = 9.7\tau$$

注意，这是针对 12 位 ADC 和 1/4 LSB 精度的情况。如果我们使用 8 位的 ADC 并希望达到 1/8 LSB 的精度，则方程 5 变为：

$$t = \ln(256 \times 8) \times \tau = 7.6\tau$$

如图 1 所示，我们估计方程 2 中的电阻和电容为 $R = 5 \text{ k}\Omega$, $C = 10 \text{ pF}$ 。用 R 和 C 的值代入，得到 $\tau = 50 \text{ ns}$ 。因此，12 位 ADC 和 1/4 LSB 精度情况下的建立时间为 500 ns，8 位 ADC 和 1/8 LSB 精度情况下的建立时间为 380 ns。但是 ADC 的最小建立时间指标是 $1.5\mu\text{s}$ ，对这两种情况而言，ADC 建立时间指标决定系统的建立时间。

4.3 外部电路建立时间

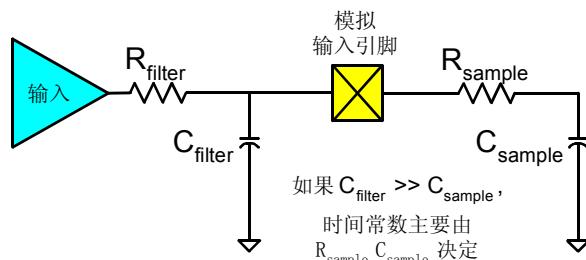
当外部电路连接到模拟输入引脚时，建立时间可能会受影响。外部电路通常都包含一个反混叠滤波器，用于滤出会混叠到有用信号带宽的高频噪声。有很多种不同的滤波器设计方案，所有这些滤波器都将影响输入阻抗并具有一定的建立时间。外部电路的电容和输出阻抗将影响建立时间。反混叠滤波器应被设计为能驱动 ADC 输入电路中大约 10 pF 的电容。在计算 ADC 测量的建立时间时必须考虑这些影响。如果输入滤波器的建立时间特别长，则该建立时间将决定系统的建立时间。

4.4 外部电路举例

下面是常见的与 ADC 输入接口的外部电路实例。

一、无源 RC 反混叠滤波器

这类低通滤波器使用无源元件（电阻和电容）。单极点无源滤波器具有较高的阻抗和较长的建立时间。但是如果滤波器的电容比采样电容的数量级高，则滤波器电容会对采样电容快速充电。一旦滤波器的建立时间得到满足，应用系统将被切换到那个输入，滤波器电容可以在内部 ADC 电路的建立时间指标 ($1.5\mu\text{s}$) 之内完成对采样电容的充电。



AN019 — 计算开关电容 ADC 的建立时间

图 3. 无源反混叠滤波器

二、有源反混叠滤波器

这类滤波器使用运算放大器（运放）和电阻、电容实现低通滤波器。这些滤波器形成很好的缓冲级，因为他们具有较高的输入阻抗和较低的输出阻抗。运放可能会引入某些噪声，因此在用运放设计滤波器时应参考生产厂商提供的数据表中的相关信息。

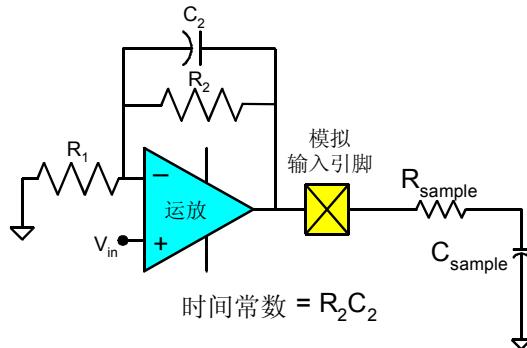


图 4. 有源反混叠滤波器

三、测量传感器电路

传感器提供与被测参数（例如，压力或重量）成正比的测量电压。这类器件通常是高阻抗电路，可以等效为一个电压源和一个大电阻。在这种情况下，建立时间由传感器的阻抗决定。

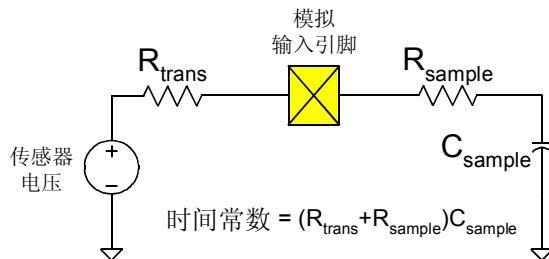


图 5. 传感器电路的等效电路

5. 保证建立时间技术指标的方法

有多种不同的方法可用于保证跟踪电路和外部电路的建立时间要求。避免建立时间错误的最佳方法取决于特定的应用。

5.1 低功耗跟踪方式

低功耗跟踪方式是保证最小建立时间要求得到满足的一种有用的方法。通过将特殊功能寄存器 ADC0CN 中的 ADCTM 位设置为 ‘1’ 使 ADC 工作于低功耗跟踪方式。如果在一次转换被启

AN019 — 计算开关电容 ADC 的建立时间

动时 ADC 处于低功耗跟踪方式，则器件在进行数据转换前会自动跟踪 3 个 SAR 时钟周期。因为最大 SAR 时钟频率的技术指标是 2MHz，所以 3 个 SAR 时钟周期将至少需要 $1.5\mu s$ 。因此，当使用低功耗跟踪方式时，最小建立时间指标可以得到满足。

图 6 和图 7 中的低功耗跟踪方式时序图给出了基于 SAR 时钟的跟踪和转换时序以及启动跟踪/转换过程的触发源。图 6 给出了使用外部 CNVSTR 信号触发源的时序，图 7 给出了使用软件触发源 ADBUSY、定时器 2 溢出或定时器 3 溢出的时序。

5.2 手动控制建立时间

一旦 AMUX 被设置为对一个输入引脚采样，跟踪电路将开始对采样电容充电。外部电路应被设计为能驱动跟踪电路中的 10 pF 电容，建立时间最好在 $1.5\mu s$ 以内。如果不使用低功耗跟踪方式（特殊功能寄存器 ADC0CN 中的 ADCTM 位为 ‘0’），ADC 将对输入信号连续跟踪，一个启动转换信号将立即启动一次数据转换。数据转换需要 16 个 SAR 时钟周期，时序图示于图 6 和图 7。用户必须正确计算建立时间并通过软件（定时器 2 溢出、定时器 3 溢出或 ADBUSY=1）或外部信号（CNVSTR）启动转换。

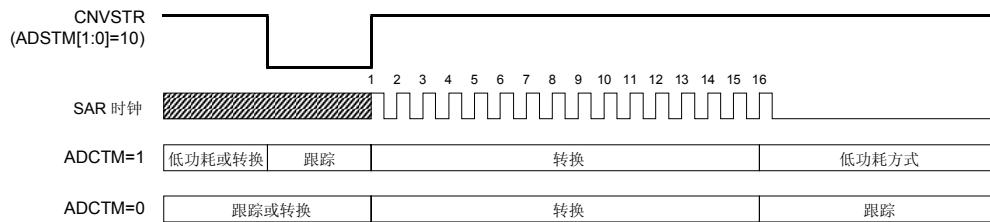


图 6. 使用外部 CNVSTR 触发源的低功耗时序图

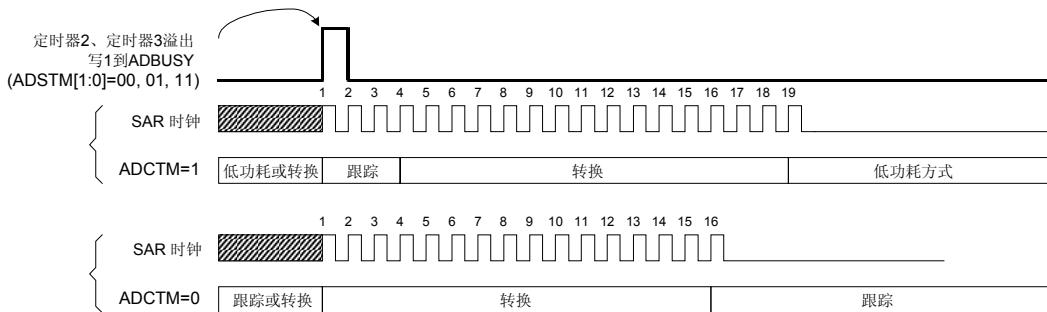


图 7. 使用软件触发源的低功耗时序图

5.3 多个 ADC 输入

很多应用通过切换 ADC 输入模拟多路选择器 (AMUX) 来用一个 ADC 测量几个参数。这是一个很有用的技术，但在切换 AMUX 设置（即改变 ADC 的输入）时必须考虑建立时间指标。应用软件每从一个 ADC 输入切换到另一个时，在启动 ADC 转换之前必须有至少 $1.5\mu s$ 的建立时间。

注意：如果在切换输入通道和启动数据转换之间没有等待合适的建立时间，会出现采样前一输入通道的现象。这是因为采样电容仍保持着与最后一次数据转换几乎等量的电荷。

我们建议将 ADC 置于低功耗跟踪方式并在切换 ADC 设置之后启动 ADC 转换。这样一来，

AN019 — 计算开关电容 ADC 的建立时间

在用 AMUX 改变 ADC 输入之后，ADC 将在转换之前进行 3 个 SAR 时钟周期的跟踪。

5.4 低功耗应用

如果设计者希望使用节电方式（例如等待方式），建议同时使用低功耗跟踪方式以保证在器件被“唤醒”时最小建立时间要求得到满足。在两次采样之间 MCU 被置于节电方式。器件在 ADC 转换完成后回到正常方式，对 ADC 样本进行处理和存储。如果应用软件需要查询 ADBUSY 位，则 MCU 必须在数据转换期间也处于正常方式。ADC 在进行 3 个 SAR 时钟周期的跟踪后进行数据转换，在样本被处理完之后 MCU 又重新被置于节电方式。当在低功耗应用中使用 ADC 时（即只在需要进行样本处理时将器件从等待方式“唤醒”），低功耗跟踪方式可以保证最小建立时间要求得到满足。见下面的图 8。

此外，在器件工作于节电方式时，外部电路的建立时间也可以得到满足。例如，在器件处于节电方式时，输入信号可以在反混叠滤波器中达到稳定。一旦达到建立时间，发出一个“唤醒”器件和启动跟踪及转换的信号，这样可以使器件在低功耗方式保持尽可能长的时间。由于外部电路的建立时间已经得到保证， $1.5\mu\text{s}$ 的建立时间指标将得到满足。

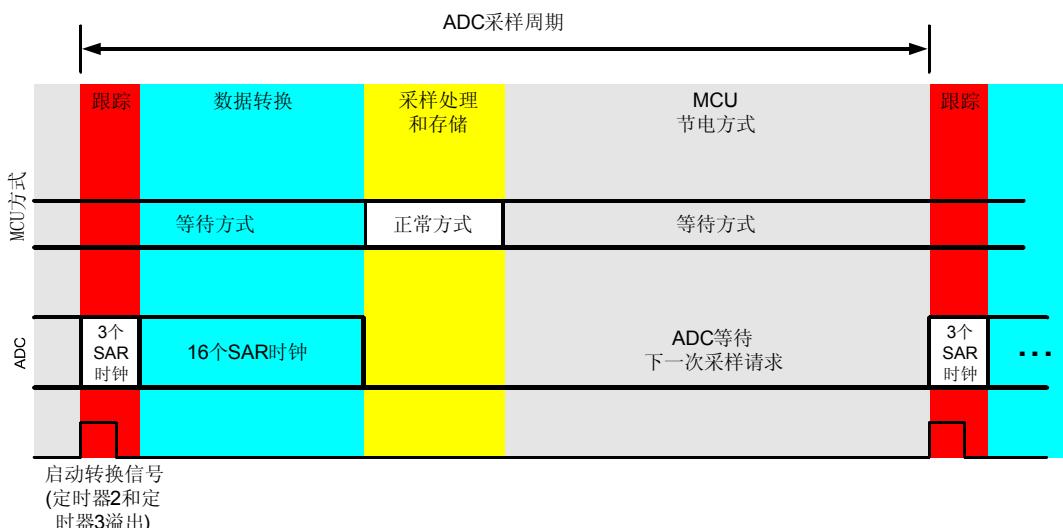


图 8. 与节电方式同时使用的低功耗跟踪方式

6. 小结

在用 ADC 进行测量的设计中必须考虑建立时间。如果建立时间要求得不到满足，ADC 测量可能达不到公布的技术指标。

一个系统的建立时间需求可能受外部电路（时间常数和输出阻抗）、ADC 输入电路及 ADC 数据表中公布的建立时间指标（ $1.5\mu\text{s}$ ）的影响。

应使用 ADC 输入电路和外部电路的戴维南等效电路来估算最保守的建立时间要求。如果这个建立时间要求小于 $1.5\mu\text{s}$ 的 ADC 技术指标，则应使用 $1.5\mu\text{s}$ 的建立时间。

下表给出了确定满足系统建立时间要求之最佳方法的指导原则。

AN019 — 计算开关电容 ADC 的建立时间

注意: $1.5\mu s$ 的建立时间可能不是决定系统建立时间要求的最长时间!

表 1. 满足建立时间要求的方法

ADC 采样技术	如何实现	说 明
手动	软件延时	设计者具有更多的控制, 但必须保证 $1.5\mu s$ 的 ADC 建立时间指标得到满足。
低功耗跟踪方式	将 ADCTM 位置 1 (在 SFR ADC0CN 中)	在进行数据转换前自动跟踪 3 个 SAR 时钟。 在收到启动转换信号后强制加入 $1.5\mu s$ 的建立时间。
多个 ADC 输入	在软件中用 AMUX 切换 ADC 输入	建议使用低功耗跟踪方式。当 AMUX 设置被改变并启动转换时, ADC 将在进行数据转换前自动跟踪 3 个 SAR 时钟。 每次改变 ADC 输入时都需要跟踪至少 $1.5\mu s$。
低功耗应用	使用低功耗跟踪方式, 在不用 ADC 时将其禁止, 使用 MCU 的节电方式	使用低功耗跟踪方式, 以保证在两次采样之间将 MCU 从等待方式唤醒时能满足 $1.5\mu s$ 的建立时间指标。低功耗跟踪能节省一定的功耗 (与连续跟踪相比), 但最好在不用 ADC 时将其禁止。