

使用指南

N32G401系列ADC使用指南

简介

国民技术微控制器内置 1 个高级 12 位 ADC，具有校准功能，用于提高环境条件变化时的 ADC 精度。

本文档旨在帮助用户正确使用 ADC，减少误差，提高 ADC 工作稳定性，主要有：

- ADC 三种时钟正确配置
- ADC 校准
- ADC 多次开关应用
- MR 电压配置
- ADC 常见干扰及误差
- ADC 小信号采集
- 差分计算公式

目录

1. N32 ADC 简介	1
1.1 SAR 型 ADC	1
1.2 基本工作原理	1
2. N32 ADC 应用注意事项	3
2.1 ADC 时钟配置	3
2.2 ADC 校准	5
2.3 MR 电压	5
2.4 ADC 状态切换	6
2.5 ADC 误差	7
2.6 小信号测量	11
2.7 差分计算公式	11
3. 结论	13
4. 历史版本	14
5. 声明	15

1. N32 ADC 简介

1.1 SAR 型 ADC

N32微控制器ADC 都为12 位逐次逼近的模数转换器，支持多种工作模式，能满足大多数模数转换应用场景。N32 ADC有三种时钟，分别为工作时钟、采样时钟和计时时钟，保证ADC采集速率和精度。

外部输入信号采集过程中，会通过MUX连接通道和芯片引脚，对芯片内部采样电容进行充电，等待采样完成MUX断开通道连接，使输入信号保持在采样电容，最后通过转换器逐次比较计算出码值，搬运到ADC数据寄存器中，N32 ADC典型连接如下图：

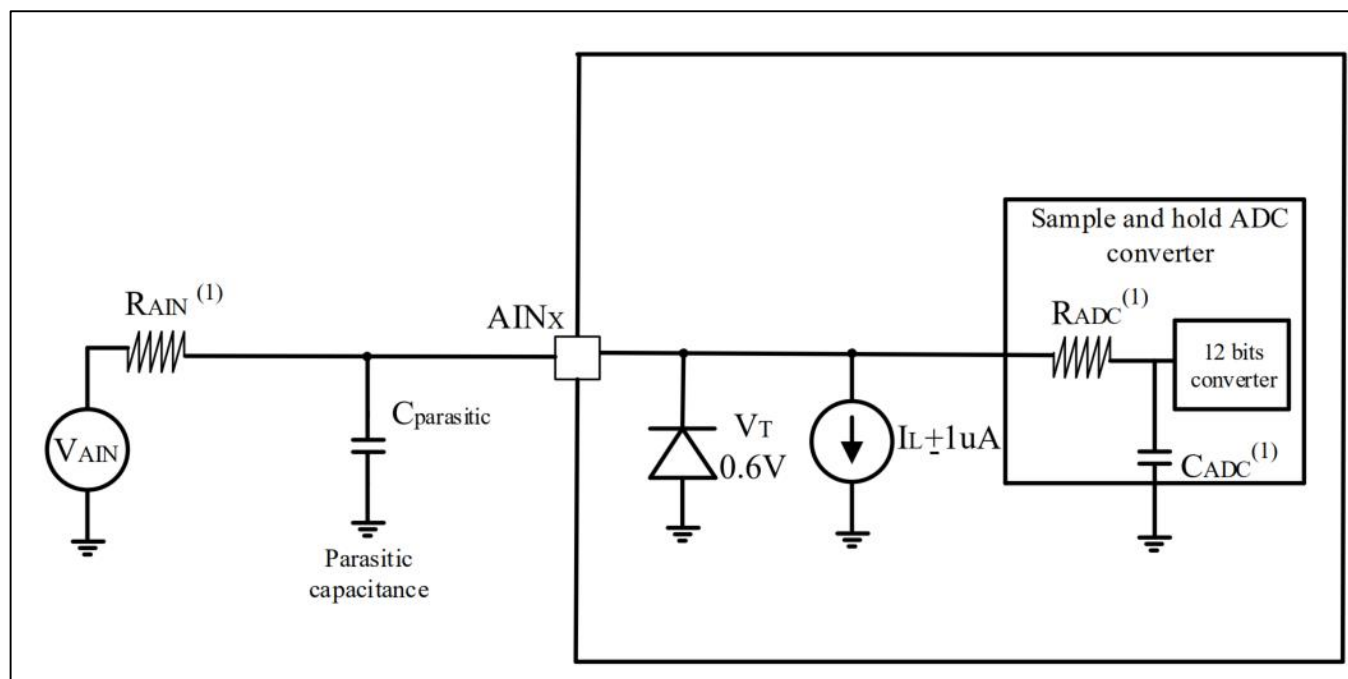


图 1.1-1 N32 ADC 典型连接图

图中参数标志分别为： V_{AIN} ：输入信号， R_{AIN} ：外部输入阻抗， $C_{parasitic}$ ：PCB与焊盘上的寄生电容， AIN_X ：信号输入端口， R_{ADC} ：采样开关电阻， C_{ADC} ：内部采样和保持电容。

1.2 基本工作原理

ADC的基本工作原理分为三个过程：采样、保持和量化。采样是将时间上连续变化的模拟量转化为离散的模拟量，保持是将信号存储至下一次采样的过程，量化是将保持的模拟信号转换成数字信号的过程。

如果将N32 ADC内部采样转换电路简化，可以等效三个工作阶段：

- 采样阶段

$S_0 \sim S_{15}$ 根据配置通道选择连接芯片引脚（输入信号源），采样电容为 C_0 至 C_{11} ，此时电容的下级板连接到信号源上，上极板(COMP端)接VCM，进行输入信号采样。

图1.2-1 ADC采样阶段等效电路

➤ 保持阶段

断开 $S_0 \sim S_{15}$ 与输入信号的连接，电容的上极板(COMP端)悬空，下级板接地。

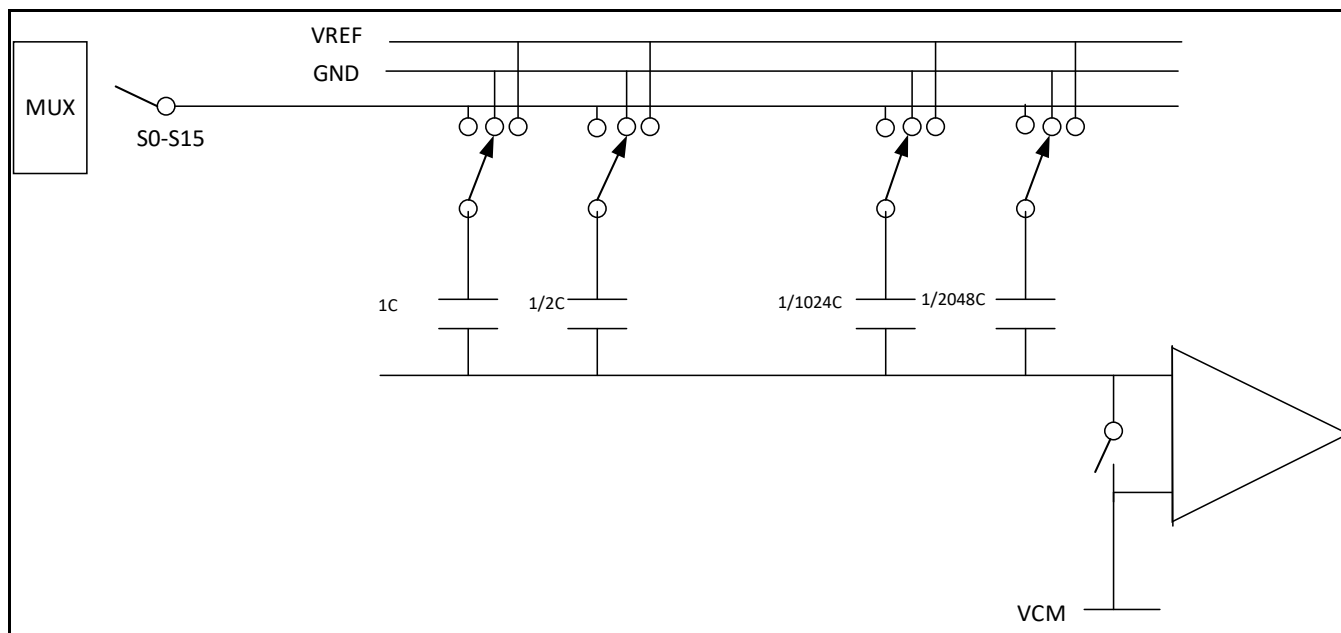


图1.2-2 ADC保持阶段等效电路

➤ 逐次比较阶段

初始阶段, 电容下级板从高到低接VREF,GND...GND, 从 $C_{11} \sim C_0$ 根据比较器输出结果对电容开关进行裁决:

- MSB: C_{11} 接成VREF, 进行比较, 如比较器输出高维持接VREF, 否则改成接GND;
- (M-1)SB: C_{10} 接成VREF, 进行比较, 比较器输出高则维持该状态, 否则改成接GND;
- 重复上述比较过程
- LSB: C_0 接成VREF, 进行比较, 比较器输出高则维持该状态, 否则改成接GND。
- 转换结束后, 将量化值搬移到数据寄存器中

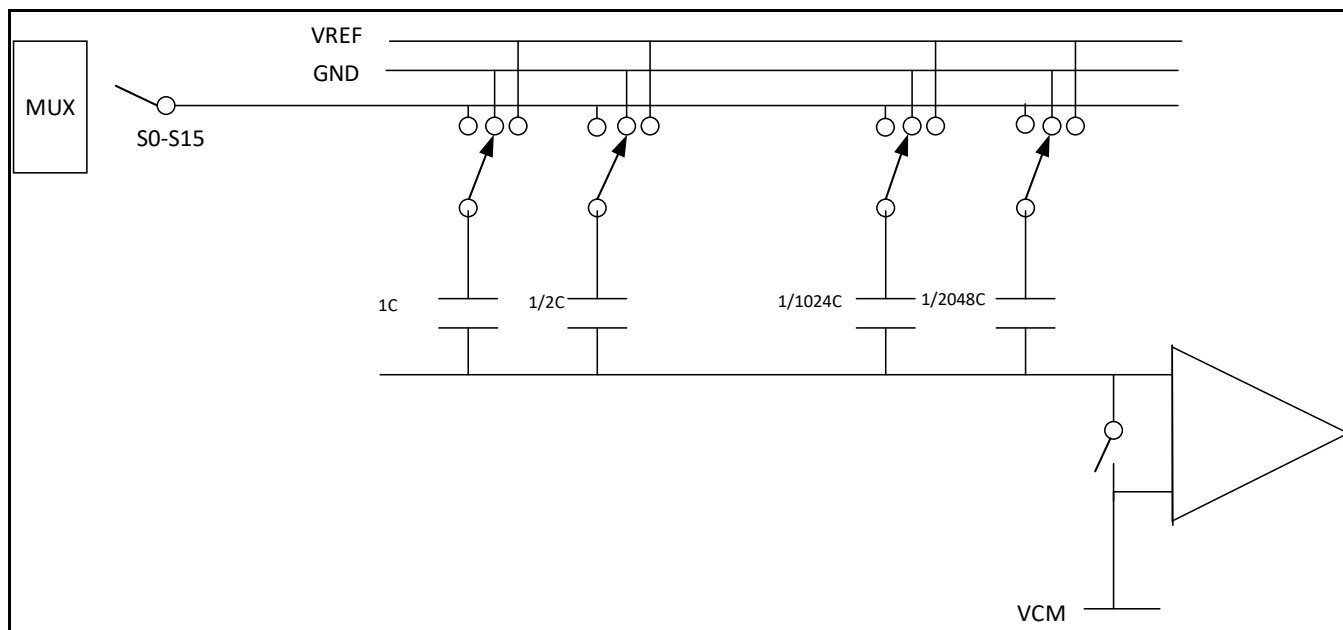


图1.2-3 ADC逐次比较阶段等效电路

2. N32 ADC 应用注意事项

产品很多应用中需要实现采集模拟量计算，实现一系列功能，因此 ADC 也是芯片中一个重要外设。高精度 ADC 可以保证输入信号转换值更接近原始信号源，同时误差便成为 ADC 绕不开的话题，为了降低采样信号误差，不仅要对输入信号做噪声滤波处理，也需要正确配置和使用 ADC。

下面会详细介绍 N32 ADC 的应用注意事项，减小采集中的误差，获取高精度采样数据，发挥 N32 ADC 强大性能。

2.1 ADC 时钟配置

N32 ADC 正常工作需要配置 3 种时钟，其分别为工作时钟、采样时钟和计时时钟，不合理的时钟配置，会影响 ADC 采样精度和工作状态。

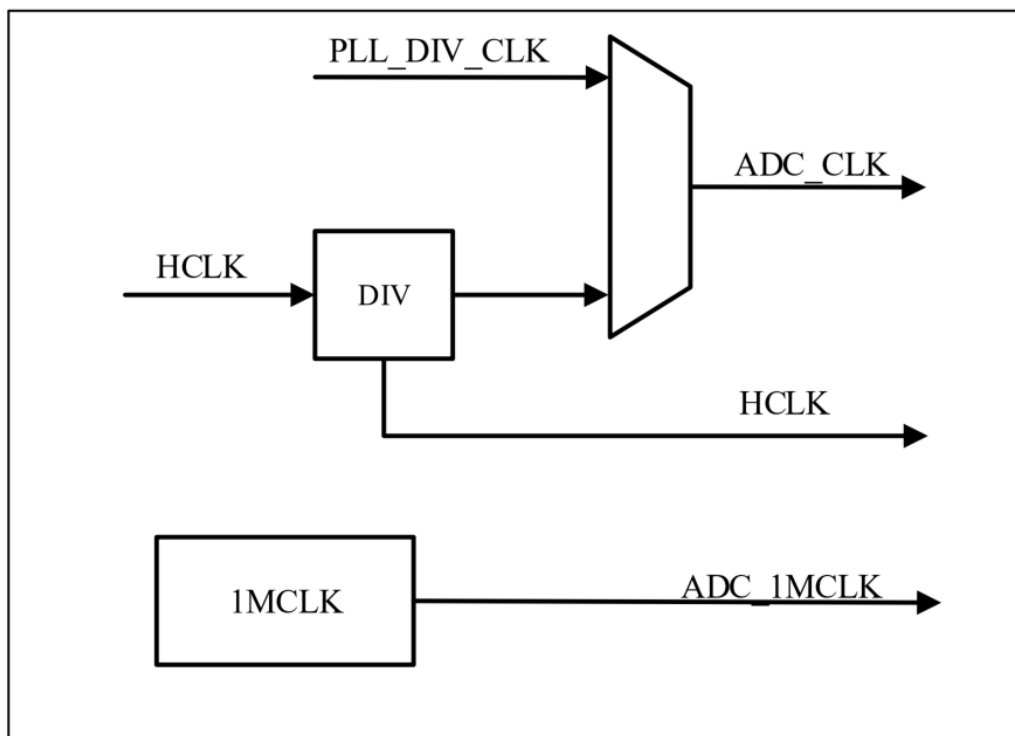


图 2.1-1 ADC 时钟

➤ ADC 工作时钟

工作时钟为 HCLK，主要用于访问寄存器；

各系列库函数配置 ADC 工作时钟示例：

N32G401 系列：
RCC_AHB_Peripheral_Clock_Enable(RCC_AHB_PERIPH_ADC);

➤ ADC 采样时钟

采样时钟 ADC_CLK 有两个源（HCLK 的分频或 PLL 的分频），HCLK 分频与系统是同步时钟，PLL 的分频与系统是异步时钟，用同步时钟的好处是在触发 ADC 响应触发时，没有不确定性，用 PLL 的分频时钟的好处是可以独立处理 ADC 的工作时钟，不会影响到挂在 HCLK 的其他模块；

N32G401 系列库函数配置 ADC 采样时钟示例：

- N32G401 系列工作主频最高为 72MHZ，可配置 PLL 作为采样时钟源，最高可到 72MHz，支持分频 1,2,4,6,8,10,12,16,32,64,128,256。可配置 AHB_CLK 作为采样时钟源，最高可到 72MHz，支持分频 1,2,4,6,8,10,12,16,32。

当系统主频大于 72MHZ 时，ADC_CLK 至少 2 分频

AHB_CLK 作为采样时钟源：ADC_Clock_Mode_Config(ADC_CKMOD_AHB, RCC_ADCHCLK_DIV16);

PLL 作为采样时钟源：ADC_Clock_Mode_Config(ADC_CKMOD_PLL, RCC_ADCPLLCLK_DIV2);

➤ ADC 计时时钟

计时时钟可以是 HSI 和 HSE，主要用于内部计时，频率大小必须配置成 1MHZ。

各系列库函数配置 ADC 计时时钟示例：

- N32G401 系列配置 ADC 计时时钟，时钟源可以是 HSI 和 HSE 内部，HSI 为 8MHZ，HSE 支持 4~32MHZ

```
HSI 为 8MHZ: RCC_ADC_1M_Clock_Config(RCC_ADC1MCLK_SRC_HSI, RCC_ADC1MCLK_DIV8);  
HSE 为 8MHZ 时: RCC_ADC_1M_Clock_Config(RCC_ADC1MCLK_SRC_HSE, RCC_ADC1MCLK_DIV8);
```

2.2 ADC 校准

校准可以增加采样精度，在 ADC 第一次上电和 ADC 从深度睡眠唤醒时，都需要进行校准，保证 ADC 的采样精度。

ADC 数字校准模块用于测量和校正 ADC 的偏移电压，校准过程通过内部连接，对理想的“0”电压进行采样，计算出 offset，在正常工作时就可以去除 offset 电压。

```
N32G401 系列，ADC 校准操作：  
/* Start ADC calibration */  
ADC_Calibration_Operation(ADC_CALIBRATION_ENABLE);  
/* Check the end of ADC calibration */  
while (ADC_Calibration_Operation(ADC_CALIBRATION_STS))
```

2.3 MR 电压

芯片供电系统由数字供电和模拟供电组成，VDD 主要为数字模块提供电源，如：CPU、USART、GPIO 等外设，VDDA 主要为模拟模块提供电源，如：ADC、COMP 等外设。建议使用相同的电源为 VDD 和 VDDA 供电，在上电和正常操作期间，VDD 和 VDDA 之间最多允许有 300mV 的差别。

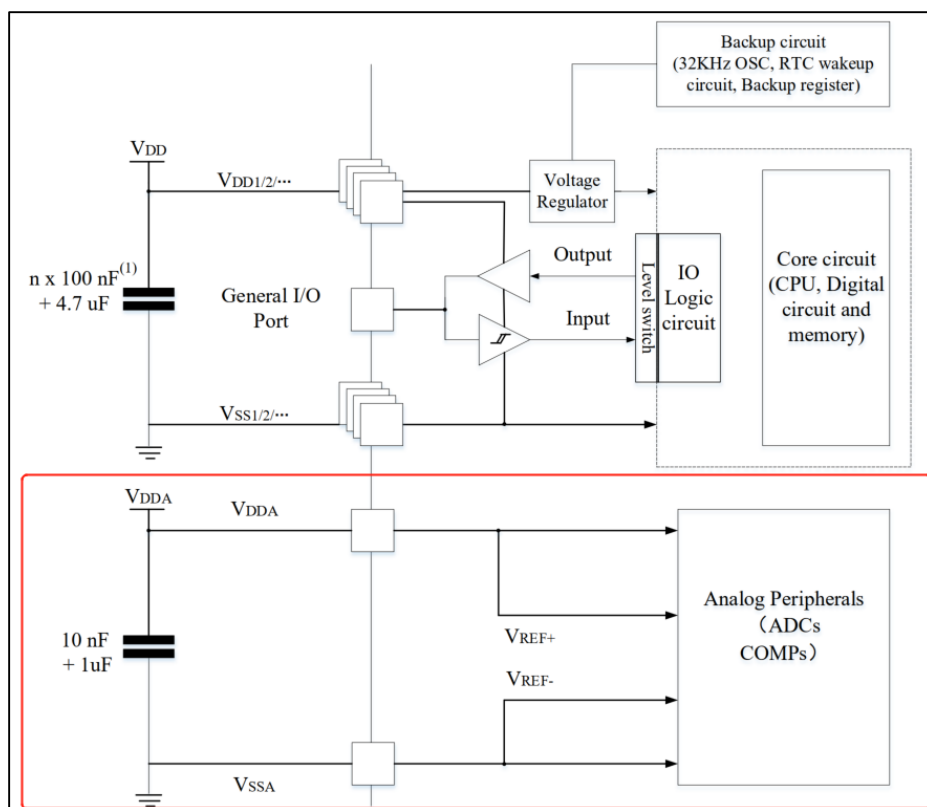


图 2.3-1 芯片供电系统

ADC 模块默认通过内部 LDO 供电，LDO 参考源初始设置为 VDDA，当 VDDA 电压波动时，会影响 ADC 采集精度和工作状态，在严苛工作环境下，会概率出现 ADC 工作异常，表现采集数值异常或停止工作，若多通道采集下使用 DMA 搬移数据还会概率出现搬移数据通道移位现象。

当 ADC 应用中遇到上述类似现象，可以调节 MR 电压，切换 ADC 供电为数字系统，不用内部 LDO 供电方式，能有效改善 ADC 工作的稳定性。

➤ N32G401 系列，MR 电压调节

- 1.定义 MR 操作寄存器：ADC_LDO_CTR (*(uint32_t*)(0x40020800+0x60));
- 2.ADC 寄存器初始化前，切换 ADC 模块数字供电：ADC_LDO_CTR |= 0x00000028;
- 3.正常初始化 ADC 寄存器参数

2.4 ADC 状态切换

在一些应用场景需多次切换 ADC 工作状态，反复开关 ADC，不能仅操作 ON 位 ENABLE 或 DSIABLE，也需要确认 ADC 状态，判断是否 ADC 状态切换完成，才可进行下一步操作。

➤ ADC 上电

ADC 第一次上电时，需等待 PowerUp 过程完成，可以通过查询 ADC_CTRL3 里面的 RDY 位确认是否上电完成，然后进行 ADC 校准。

N32G401 系列，ADC 上电操作：

```
/* Enable ADC */
ADC_ON();
/* Check ADC Ready */
while(ADC_Flag_Status_Get(ADC_RD_FLAG, ADC_FLAG_JENDCA, ADC_FLAG_RDY) == RESET)
```

➤ ADC 下电

通过清除 ON 位可以停止转换，并将 ADC 置于断电模式，在这个模式中 ADC 几乎不耗电（仅几 uA）。

ADC 下电时，用户需查询 ADC_CTRL3 里面的 PDRDY 确认是否下电完成，才可进行下一步操作。

在 ADC DISABLE 的时候默认都是 PowerDown 模式，这个模式下只要不断电，不需要重新校正，校正值会在 ADC 自动保持。为了进一步的降低功耗，ADC 有一个深睡眠模式，会在 ADC DISABLE 进入深睡眠模式，ADC 内部的校正值会丢失，需要重新校正。

N32G401 系列，ADC 下电操作：

```
/* Disable ADC ADC */
ADC_OFF();
/* Check ADC Power Down Ready */
while(ADC_Flag_Status_Get(ADC_RD_FLAG, ADC_FLAG_AWDG, ADC_FLAG_PD_RDY) == RESET);
```

➤ 低功耗模式下唤醒

当芯片从低功耗模式唤醒后，需要重新复位 ADC 模块时钟，再进行初始化配置，否则会影响 ADC 的采样精度。

N32G401 系列，低功耗模式下唤醒后，ADC 反初始换配置，以 ADC1 为例：

- 1.反初始化 ADC 时钟：ADC_DeInit(ADC1);
- 2.ADC 初始化配置；
- 3.使能 ADC 进行校准

2.5 ADC 误差

理论上 ADC 的精度就是转码最小刻度，但实际信号采集中会叠加各种误差，加上误差干扰后的才是 ADC 真实精度 $V_{ref}/4096 + V_{误差}$ 。

影响 ADC 误差的因素主要有：

- ADC 内部误差，包括偏移误差、增益误差、微分线性误差、积分线性误差等
 - 参考电压噪声，模拟信号电压采集是以参考电压为基准，参考电压上的任何噪声都会导致转换后的数字值变化
 - 模拟输入信号噪声，电气设备会在模拟信号上产生噪声，导致采集值出现波动
 - I/O 引脚串扰，相邻数字端口存在高频翻转信号会在 ADC 的模拟输入信号中产生噪声
 - 模拟信号电压超过芯片规格，模拟 I/O 端口输入低于 -0.2V 电压或者高于 VDD 电压，会拉低或者拉高采集值
 - 外部信号阻抗会影响采样精度
 - 时钟配置不合理，ADC 需要使能三个时钟，其中任何一个时钟没有规范配置都会影响 ADC 精度
- 为获取 ADC 最佳采样精度，我们可以在以下几个方面做一些措施：

➤ PCB 设计上减小电源噪声

电源端：小容量的电容过滤高频率的噪声，大容量的电容过滤低频率的噪声。建议在靠近模拟电 (VDDA 和 VSSA) 管脚的地方放置瓷器电容。这样的电容可以过滤由 PCB 线路引出的噪声。小容值的电容可以响应电流的快速变化，并快速地放电适应快速的电流变化。

靠近芯片端：10nF 瓷器电容+1uF 钽电容/瓷器电容。

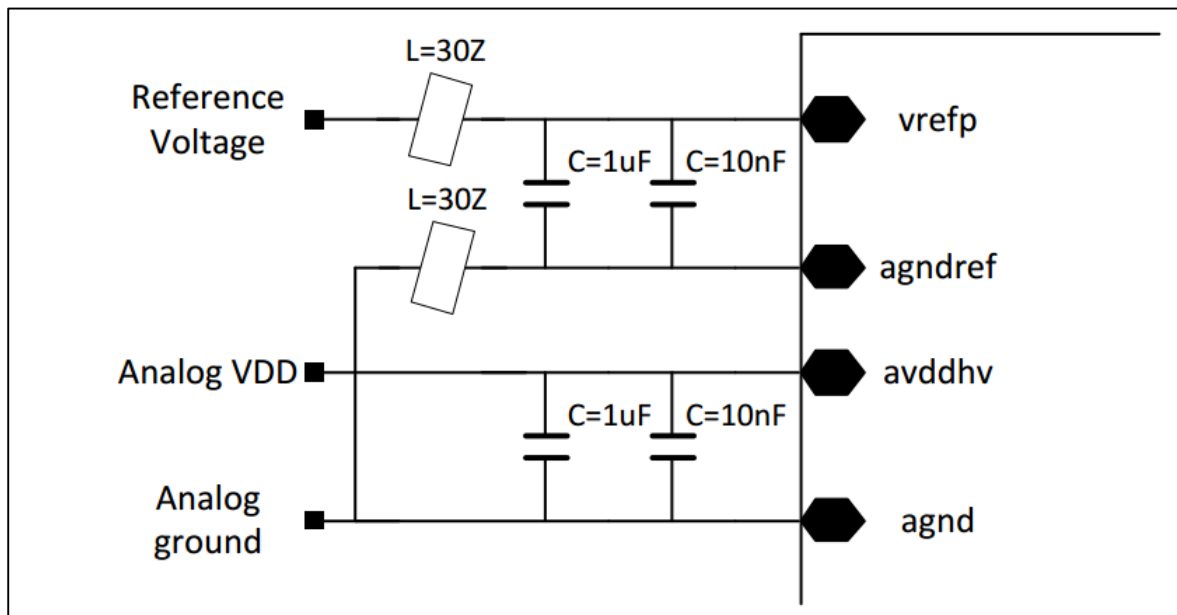
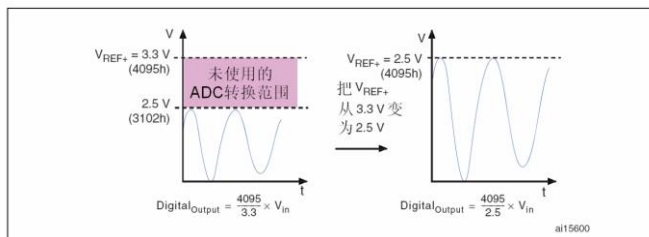


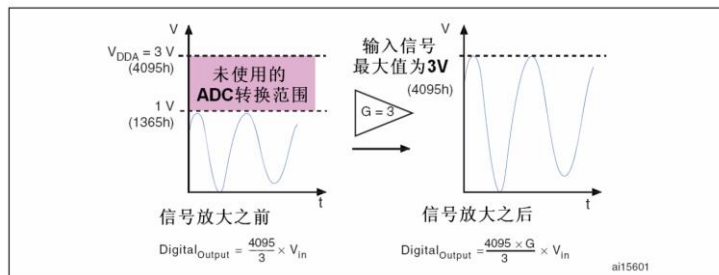
图 2.5-1 电源系统设计

➤ 处理信号源

1. 输入信号采样值进行平均值滤波
2. 使用更加符合输入范围的 VREF



3. 信号输入端增加外部滤波器
4. 增大信号幅度，使其输入更加适配 ADC 量程



➤ 输入信号电压符合芯片规格

在使用某一 ADC 通道时，不能在其它未使用的 ADC 采样通道施加负压（比如-0.2V），如果施加了此负电压，会导致正常采样的 ADC 通道电压被拉低，导致采样的数据不准；

在使用某一 ADC 通道时，不能在其它未使用的 ADC 采样通道施加高压（大于 VDD 电压），如果施加了此高电压，会导致正常采样的 ADC 通道电压被拉高，导致读取的数据不准。

➤ 选择合适的采样周期

ADC 的采样过程中实际可以等效成电容对外部信号源进行采样，在实际电路中 开关本身有阻抗，I/O 通道走线也有会阻抗。具体的输入阻抗与采样周期的选择，通过查下表 2.5-1 可间接得到：

输入	分辨率	Rin (kΩ)	最小采样时间 (ns)	输入	分辨率	Rin (kΩ)	最小采样时间 (ns)
快速通道	12-bit	0	39.6	慢速通道	12-bit	0	79.2
		0.05	43.5			0.05	83.1
		0.1	47.4			0.1	86.9
		0.2	55.1			0.2	94.7
		0.5	78.4			0.5	118.0
		1	117.2			1	156.8
		10	815.9			10	855.5
		20	1592.2			20	1631.8
		50	3921.2			50	3960.8
		100	7802.8			100	7842.4
快速通道	10-bit	0	33.9	慢速通道	10-bit	0	67.9
		0.05	37.3			0.05	71.2
		0.1	40.6			0.1	74.5
		0.2	47.2			0.2	81.2
		0.5	67.2			0.5	101.1
		1	100.5			1	134.4
		10	699.4			10	733.3
		20	1364.8			20	1398.7
		50	3361.0			50	3395.0
		100	6688.1			100	6722.1
快速通道	8-bit	0	28.3	慢速通道	8-bit	0	56.6
		0.05	31.1			0.05	59.3
		0.1	33.8			0.1	62.1
		0.2	39.4			0.2	67.7
		0.5	56.0			0.5	84.3
		1	83.7			1	112.0
		10	582.8			10	611.1
		20	1137.3			20	1165.6
		50	2800.9			50	2829.1
		100	5573.5			100	5601.7
快速通道	6-bit	0	22.6	慢速通道	6-bit	0	45.2
		0.05	24.8			0.05	47.5
		0.1	27.1			0.1	49.7
		0.2	31.5			0.2	54.1
		0.5	44.8			0.5	67.4
		1	67.0			1	89.6
		10	466.2			10	488.9
		20	909.9			20	932.5
		50	2240.7			50	2263.3
		100	4458.8			100	4481.4

表 2.5-1 ADC 采样时间

以 N32G401 系列举例：在使用 12-bit ADC 时，当采样时钟为 72MHz，外部模拟信号输入阻抗为 10kΩ，为匹配合适的采样周期，通过查表得到，最小的时间为 815.9ns，对应的采样时间必须大于 46.2 个周期（对应的 ADC_SAMPT. SAMPx 的配置值）：

➤ 正确配置 ADC 时钟

ADC 需要三个时钟，工作时钟、采样时钟和计数时钟，在进行 ADC 初始化时，三个时钟都需要进行正确配置，否则会影响信号采集转换的数字值。

2.6 小信号测量

当需要采集 mV 级输入信号时，可以采用以下几种方式

1. 使用外部放大电路，先将输入的小信号进行放大，然后输出到 ADC 进行采集；
2. 选择 ADC 快速通道，增加 ADC 采样周期；
3. 输入通道上增加合适参数的电容；
4. 通过软件过采样+软件滤波的方式，筛出符合自己需求的值。

2.7 差分计算公式

N32 微控制器一些系列的 ADC 支持差分输入，作为差分输入的正、反向端需要是相邻 ADC 通道（详见下图 2.7-1 ADC 通道和 PIN 脚关系），可在寄存器 ADC_DIFSEL 配置通道为差分模式。

差分信号输入范围在 0~VREF 之间，输出范围为 -VREF~+VREF，共模电压范围为 $\frac{VDD}{2}-0.18 \sim \frac{VDD}{2}+0.18$ ，转换值计算可以换算成： $ADC_DAT = 4095 * (\frac{1}{2} * \frac{Vin}{VREF} + \frac{1}{2})$ ，例：

ADC_DAT	VINP	VINN	VIN	VREF
0	0V	3.3V	-3.3V	3.3V
2048	1.65V	1.65V	0V	3.3V
4095	3.3V	0V	3.3V	3.3V

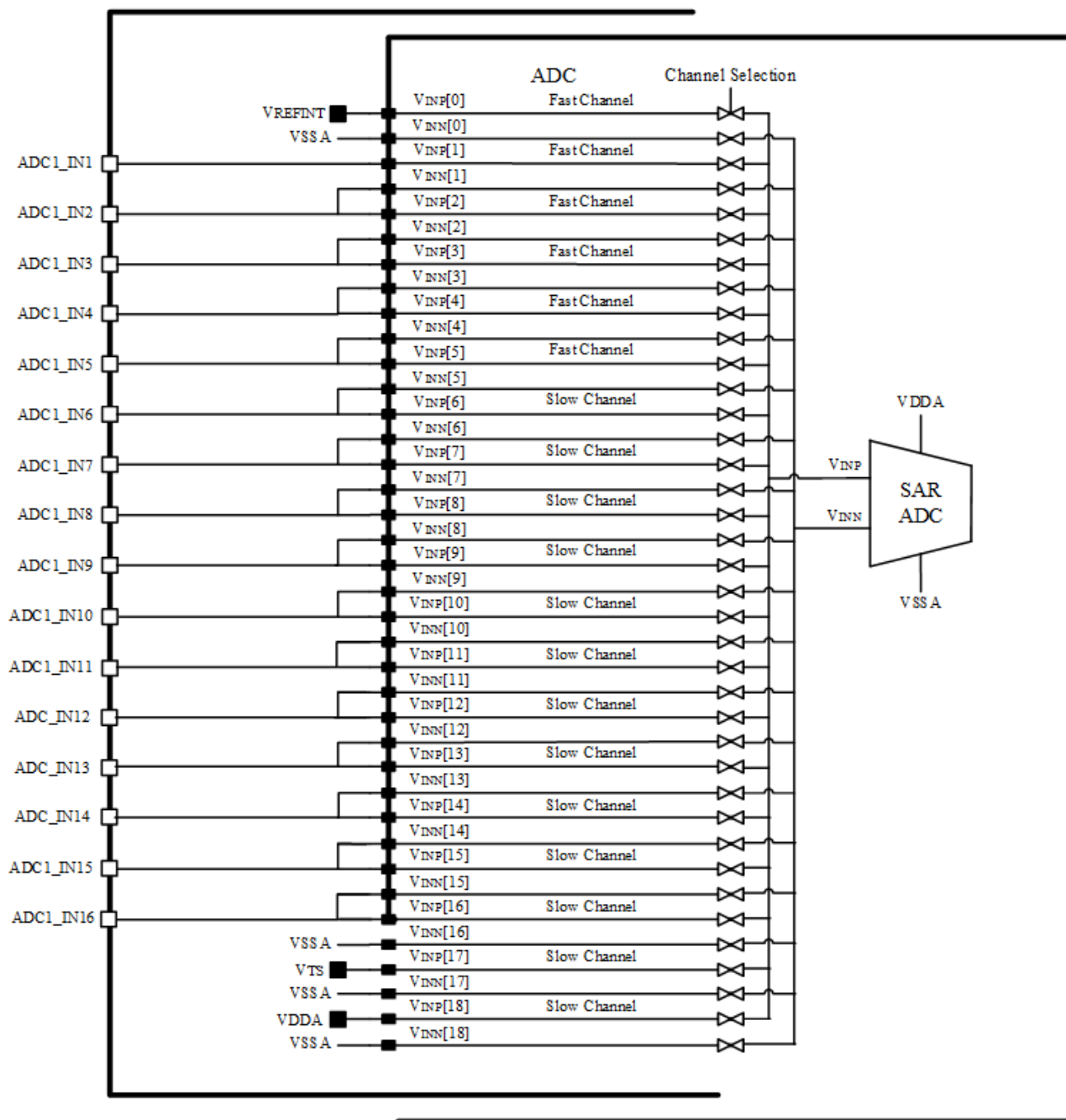


图 2.7-1 ADC 通道和 PIN 脚关系

3. 结论

此应用笔记主要介绍 N32 控制器 ADC 模块，方便用户快速熟悉 ADC 的应用和配置。

本文中所涉及到的参数，如有疑问，请以产品数据手册中描述为准。

4. 历史版本

版本	日期	备注
V1.0.0	2023.5.26	初始版本
V1.0.1	2024.5.30	1. 修改图 1.2-1, 图 1.2-2 和图 1.2-3 格式 2. 修改 ADC 最高时钟为 72MHz

5. 声明

国民技术股份有限公司（下称“国民技术”）对此文档拥有专属产权。依据中华人民共和国的法律、条约以及世界其他法域相适用的管辖，此文档及其中描述的国民技术产品（下称“产品”）为公司所有。

国民技术在此并未授予专利权、著作权、商标权或其他任何知识产权许可。所提到或引用的第三方名称或品牌（如有）仅用作区别之目的。

国民技术保留随时变更、订正、增强、修改和改良此文档的权利，恕不另行通知。请使用人在下单购买前联系国民技术获取此文档的最新版本。

国民技术竭力提供准确可信的资讯，但即便如此，并不推定国民技术对此文档准确性和可靠性承担责任。

使用此文档信息以及生成产品时，使用者应当进行合理的设计、编程并测试其功能性和安全性，国民技术不对任何因使用此文档或本产品而产生的任何直接、间接、意外、特殊、惩罚性或衍生性损害结果承担责任。

国民技术对于产品在系统或设备中的应用效果没有任何故意或保证，如有任何应用在其发生操作不当或故障情况下，有可能致使人员伤亡、人身伤害或严重财产损失，则此类应用被视为“不安全使用”。

不安全使用包括但不限于：外科手术设备、原子能控制仪器、飞机或宇宙飞船仪器、所有类型的安全装置以及其他旨在支持或维持生命的应用。

所有不安全使用的风险应由使用人承担，同时使用人应使国民技术免于因为这类不安全使用而导致被诉、支付费用、发生损害或承担责任时的赔偿。

对于此文档和产品的任何明示、默示之保证，包括但不限于适销性、特定用途适用性和不侵权的保证责任，国民技术可在法律允许范围内进行免责。

未经明确许可，任何人不得以任何理由对此文档的全部或部分进行使用、复制、修改、抄录和传播。