

ADC

STM32 自带 12 位 ADC(模数转换器),有 1~3 个 ADC(STM32F101/102 系列只有一个 ADC),这些 ADC 可以独立使用,也可以使用双重模式(提高采样率),操作简单,使用方便。以下是本章主要内容:

- (1) STM32 自带 ADC 的主要特性及基本结构。
- (2) STM32 自带 ADC 的通道选择、转换模式。
- (3) 通过寄存器操作 STM32 自带 ADC 的方法。
- (4) 通过库函数操作 STM32 自带 ADC 的方法。

5.1 ADC 基础知识

STM32 的 ADC 是 12 位逐次逼近型的。它有 18 个通道,可测量 16 个外部信号源和 2 个内部信号源。各通道的模数转换可以按单次、连续、扫描和间断 4 种模式执行。

5.1.1 ADC 的主要特征

ADC 的主要特征如下:

- (1) 12 位分辨率。
- (2) 转换结束、注入转换结束和发生模拟看门狗事件时产生中断。
- (3) 具有单次和连续转换模式。
- (4) 从通道 0 到通道 n 的自动扫描模式。
- (5) 自校准。
- (6) 带内嵌数据一致性的数据对齐。
- (7) 采样间隔可以按通道分别编程。
- (8) 规则转换和注入转换均有外部触发选项。
- (9) 具有间断模式。
- (10) 具有双重模式(带两个或以上模数转换器件)。
- (11) 转换时间如下:
 - ① STM32F101xx(基本型产品)时钟为 28MHz 时为 $1\mu\text{s}$,时钟为 36MHz 时为 $1.55\mu\text{s}$ 。
 - ② STM32F102xx(USB 型产品)时钟为 48MHz 时为 $1.2\mu\text{s}$ 。
 - ③ STM32F103xx(增强型产品)时钟为 56MHz 时为 $1\mu\text{s}$,时钟为 72MHz 时为 $1.17\mu\text{s}$ 。
 - ④ STM32F105xx 和 STM32F107xx 时钟为 56MHz 时为 $1\mu\text{s}$,时钟为 72MHz 时为 $1.17\mu\text{s}$ 。
- (12) 供电要求为 2.4~3.6V。

- (13) 输入范围为 $V_{REF-} \leq V_{IN} \leq V_{REF+}$ 。
- (14) 规则通道转换期间有 DMA 请求产生。

5.1.2 ADC 模块框图及引脚

图 5.1 为 ADC 模块框图,表 5.1 为 ADC 引脚。

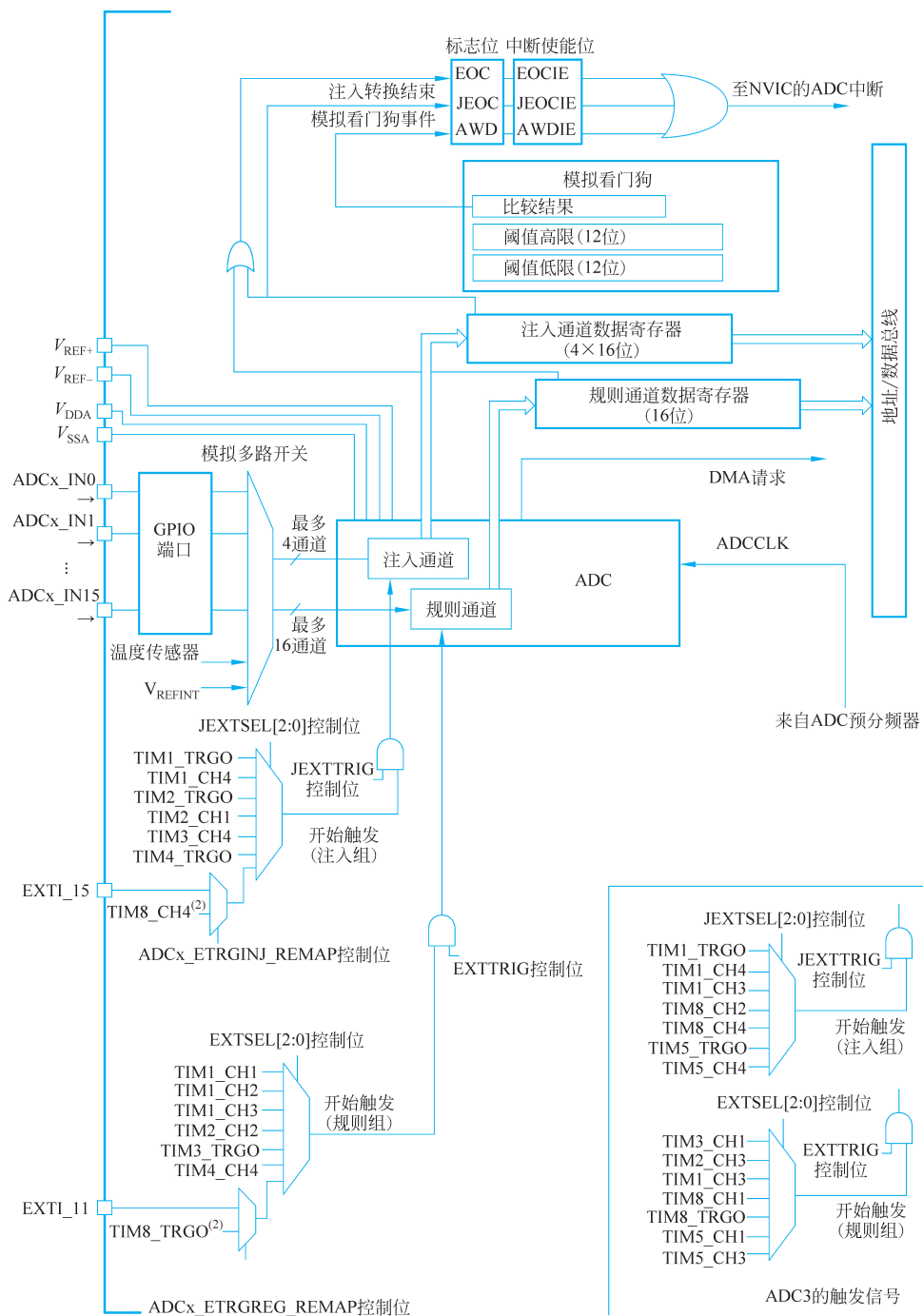


图 5.1 ADC 模块框图



表 5.1 ADC 引脚

名 称	信号类型	注 解
V_{REF+}	输入,模拟参考正极	ADC 使用的高端/正极参考电压, $2.4V \leq V_{REF+} \leq V_{DDA}$
V_{REF-}	输入,模拟参考负极	ADC 使用的低端/负极参考电压, $V_{REF-} = V_{SSA}$
V_{DDA}	输入,模拟电源	等效于 V_{DD} 的模拟电源且 $2.4V \leq V_{DDA} \leq V_{DD} (3.6V)$
V_{SSA}	输入,模拟电源地	等效于 V_{SS} 的模拟电源地
ADC _x _IN[15:0]	模拟输入信号	16 个模拟输入通道

STM32F103 系列最少拥有两个 ADC,其中 STM32F103ZET 包含 3 个 ADC。

STM32 的 ADC 最大的转换速率为 1MHz,也就是转换时间为 $1\mu s$ (在 $ADCCLK = 14MHz$ 、采样周期为 1.5 个 ADC 时钟下得到)。不要让 ADC 的时钟超过 14MHz,否则将导致结果准确度下降。

5.1.3 通道选择

STM32 有 16 个多路通道。可以把转换组织成两组,分别为规则通道组和注入通道组。规则通道相当于正常运行的程序,而注入通道相当于中断。程序正常运行时,中断是可以打断程序运行的。类似地,注入通道的转换可以打断规则通道的转换,注入通道的转换完成之后,规则通道才能继续转换。

(1) 规则通道组由多达 16 个转换组成。规则通道和它们的转换顺序在 ADC_SQR_x 寄存器中选择。规则通道组中的转换总数应写入 ADC_SQR1 寄存器的 L[3:0]位。

(2) 注入通道组由多达 4 个转换组成。注入通道和它们的转换顺序在 ADC_JSQR 寄存器中选择。注入通道组中的转换总数应写入 ADC_JSQR 寄存器的 L[1:0]位。

如果 ADC_SQR_x 或 ADC_JSQR 寄存器在转换期间更改,当前的转换被清除,一个新的启动脉冲将发送到 ADC 以转换新选择的组。

5.1.4 ADC 的转换模式

本节仅介绍单次转换模式和连续转换模式。

1. 单次转换模式

单次转换模式是指 ADC 只执行一次转换。该模式既可通过设置 ADC_CR2 寄存器的 ADON 位(只适用于规则通道)启动,也可通过外部触发启动(适用于规则通道和注入通道),这时 CONT 位为 0。

当一个规则通道的转换完成后:

- (1) 转换数据存储在 16 位 ADC_DR 寄存器中。
- (2) EOC(转换结束)标志被置位。
- (3) 如果设置了 EOCIE,则产生中断。

当一个注入通道的转换完成后:

- (1) 转换数据存储在 16 位的 ADC_DRJ1 寄存器中。
- (2) JEOC(注入转换结束)标志被置位。
- (3) 如果设置了 JEOCIE,则产生中断。

2. 连续转换模式

连续转换模式指本次转换结束时马上就启动下一次转换。此模式可通过外部触发启动或通过设置 ADC_CR2 寄存器上的 ADON 位启动,此时 CONT 位是 1。

当一个规则通道的转换完成后:

- (1) 转换数据存储于 16 位的 ADC_DR 寄存器中。
- (2) EOC(转换结束)标志被置位。
- (3) 如果设置了 EOCIE,则产生中断。

当一个注入通道的转换完成后:

- (1) 转换数据存储于 16 位的 ADC_DRJ1 寄存器中。
- (2) JEOP(注入转换结束)标志被置位。
- (3) 如果设置了 JEOCIE,则产生中断。

5.2 操作 ADC

和其他功能的实现类似,操作 ADC 分为两种方式,分别为寄存器方式和库函数方式。

5.2.1 寄存器方式操作 ADC

以规则通道为例,一旦选择的通道转换完成,转换结果将保存在 ADC_DR 寄存器中,EOC(转换结束)标志将被置位,如果设置了 EOCIE,则会产生中断,然后 ADC 将停止,直到下次启动。

ADC 常用寄存器如表 5.2 所示。

表 5.2 ADC 常用寄存器

寄存器	描述	寄存器	描述
ADC_SR	ADC 状态寄存器	ADC_LTR	ADC 看门狗低阈值寄存器
ADC_CR1	ADC 控制寄存器 1	ADC_SQR1	ADC 规则序列寄存器 1
ADC_CR2	ADC 控制寄存器 2	ADC_SQR2	ADC 规则序列寄存器 2
ADC_SMPR1	ADC 采样时间寄存器 1	ADC_SQR3	ADC 规则序列寄存器 3
ADC_SMPR2	ADC 采样时间寄存器 2	ADC_JSQR1	ADC 注入序列寄存器
ADC_JOFR1	ADC 注入通道偏移寄存器 1	ADC_DR1	ADC 规则数据寄存器 1
ADC_JOFR2	ADC 注入通道偏移寄存器 2	ADC_DR2	ADC 规则数据寄存器 2
ADC_JOFR3	ADC 注入通道偏移寄存器 3	ADC_DR3	ADC 规则数据寄存器 3
ADC_JOFR4	ADC 注入通道偏移寄存器 4	ADC_DR4	ADC 规则数据寄存器 4
ADC_HTR	ADC 看门狗高阈值寄存器		

1. ADC 控制寄存器

执行规则通道的单次转换需要用到 ADC 的寄存器。首先要介绍的是 ADC 控制寄存器 ADC_CR1 和 ADC_CR2。

ADC_CR1 寄存器如图 5.2 所示。

ADC_CR1 寄存器的 SCAN 位用于设置扫描模式,由软件设置和清除。该位如果为 1,



31	30	29	28	27	26	25	24	23	22	21	20	19	18	17	16
保留								AWDEN	JAWDEN	保留			DUALMOD[3:0]		
								rw	rw				rw		
15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
DISCNUM[2:0]		JDISCEN	DISCEN	JAUTO	AWDSGL	SCAN	JEOCIE	AWDIE	EOCIE	AWDCH[4:0]					
rw		rw	rw	rw	rw	rw	rw	rw	rw	rw					

图 5.2 ADC_CR1 寄存器

则启用扫描模式；如果为 0，则关闭扫描模式。在扫描模式下，由 ADC_SQRx 或 ADC_JSQRx 寄存器选中的通道被转换。如果设置了 EOCIE 或 JEOCIE，只在最后一个通道转换完毕后才产生 EOC 或 JEOC 中断。

ADC_CR1 寄存器的各位描述如表 5.3 所示。

表 5.3 ADC_CR1 寄存器的各位描述

位	描 述
位 31~24	保留,始终为 0
位 23 AWDEN	在规则通道上禁用/使能模拟看门狗,该位由软件设置和清除。 0: 在规则通道上禁用模拟看门狗。 1: 在规则通道上使能模拟看门狗
位 22 JAWDEN	在注入通道上禁用/使能模拟看门狗,该位由软件设置和清除。 0: 在注入通道上禁用模拟看门狗。 1: 在注入通道上使能模拟看门狗
位 21、20	保留,始终为 0
位 19~16 DUALMOD[3:0]	双模式选择,软件使用这些位选择操作模式。 0000: 独立模式。 0001: 混合的同步规则+注入同步模式。 0010: 混合的同步规则+交替触发模式。 0011: 混合同步注入+快速交叉模式。 0100: 混合同步注入+慢速交叉模式。 0101: 注入同步模式。 0110: 规则同步模式。 0111: 快速交叉模式。 1000: 慢速交叉模式。 1001: 交替触发模式。 注: 在 ADC2 和 ADC3 中这些位为保留位。在双模式中,改变通道的配置会产生一个重新开始的条件,这将导致同步丢失。建议在在进行任何配置改变前关闭双模式
位 15~13 DISCNUM[2:0]	间断模式通道计数,软件通过这些位定义在间断模式下收到外部触发后转换规则通道的数目。 000: 1 个通道。 001: 2 个通道。 111: 8 个通道

续表

位	描 述
位 12 JDISCEN	在注入通道上的间断模式,该位由软件设置和清除,用于关闭或开启注入通道组上的间断模式。 0: 注入通道组上禁用间断模式。 1: 注入通道组上使用间断模式
位 11 DISCEN	在规则通道上的间断模式,该位由软件设置和清除,用于关闭或开启规则通道组上的间断模式。 0: 规则通道组上禁用间断模式。 1: 规则通道组上使用间断模式
位 10 JAUTO	自动注入通道组转换,该位由软件设置和清除,用于关闭或开启规则通道组转换结束后自动注入通道组的转换。 0: 关闭自动注入通道组的转换。 1: 开启自动注入通道组的转换
位 9 AWDSGL	扫描模式时在一个单一通道上使用看门狗,该位由软件设置和清除,用于开启由 AWDCH[4:0]位指定的通道上的模拟看门狗功能。 0: 在所有通道上使用模拟看门狗。 1: 在单一通道上使用模拟看门狗
位 8 SCAN	关闭/开启扫描模式,该位由软件设置和清除,用于关闭或开启扫描模式。开启扫描模式时,转换由 ADC_SQRx 或 ADC_JSQRx 寄存器选中的通道。 0: 关闭扫描模式。 1: 开启扫描模式。 注: 如果分别设置了 EOCIE 位或 JEOCIE 位,只在最后一个通道转换完毕后才产生 EOC 或 JEOC 中断
位 7 JEOCIE	禁止/允许产生注入通道转换结束中断,该位由软件设置和清除,用于禁止或允许所有注入通道转换结束后产生中断。 0: 禁止 JEOC 中断。 1: 允许 JEOC 中断。当硬件设置 JEOC 位时产生中断
位 6 AWDIE	禁止/允许产生模拟看门狗中断,该位由软件设置和清除,用于禁止或允许模拟看门狗产生中断。在扫描模式下,如果看门狗检测到超范围的数值,只有在设置了该位时扫描才会中止。 0: 禁止模拟看门狗中断。 1: 允许模拟看门狗中断
位 5 EOCIE	禁止/允许产生 EOC 中断,该位由软件设置和清除,用于禁止或允许转换结束后产生中断。 0: 禁止 EOC 中断。 1: 允许 EOC 中断。当硬件设置 EOC 位时产生中断
位 4~0 AWDCH[4:0]	模拟看门狗通道选择位,这些位由软件设置和清除,用于选择模拟看门狗保护的输入通道。 00000: ADC 模拟输入通道 0。 00001: ADC 模拟输入通道 1。 10001: ADC 模拟输入通道 17。 注: ADC1 的模拟输入通道 16 和 17 在芯片内部分别连到温度传感器和 V _{REFINT} 引脚, ADC2 的模拟输入通道 16 和通道 17 在芯片内部连到 V _{SS} 引脚, ADC3 模拟输入通道 9、14、15、16、17 与 V _{SS} 引脚相连

这里使用独立模式,所以设置这几位为 0。



ADC_CR2 寄存器如图 5.3 所示。



图 5.3 ADC_CR2 寄存器

ADON 用于启动和关闭 ADC。CONT 用于设置是否进行连续转换,使用单次转换时 CONT 位必须为 0。CAL 和 RSTCAL 用于 AD 校准。ALIGN 用于设置数据对齐,这里使用右对齐,该位设置为 0。EXTSEL[2:0]用于选择启动规则转换组转换的外部事件。ADC_CR2 寄存器的各位描述如表 5.4 所示。

表 5.4 ADC_CR2 寄存器的各位描述

位	描 述
位 31~24	保留,始终为 0
位 23 TSVREFE	温度传感器和 V_{REFINT} 使能,该位由软件设置和清除,用于禁止或开启温度传感器和 V_{REFINT} 通道。当 ADC 不止一个时,该位仅出现在 ADC1 中。 0: 禁止温度传感器和 V_{REFINT} 。 1: 开启温度传感器和 V_{REFINT}
位 22 SWSTART	开始规则通道转换,该位由软件设置以启动转换,转换开始后硬件马上清除该位。如果在 EXTSEL[2:0]位中选择了 SWSTART 为触发事件,该位用于启动一组规则通道的转换。 0: 复位状态。 1: 开始规则通道的转换
位 21 JSWSTART	开始注入通道转换,该位由软件设置以启动转换,软件可清除该位或在转换开始后硬件马上清除该位。如果在 JEXTSEL[2:0]位中选择了 JSWSTART 为触发事件,该位用于启动一组注入通道的转换。 0: 复位状态。 1: 开始注入通道的转换

续表

位	描 述
位 20 EXTTRIG	规则通道的外部触发转换模式,该位由软件设置和清除,用于开启或禁止可以启动规则通道转换的外部触发事件。 0: 不用外部触发事件启动转换。 1: 使用外部触发事件启动转换
位 19~17 EXTSEL[2:0]	选择开启规则通道转换的外部事件。 ADC1 和 ADC2 的触发配置如下: 000: 定时器 1 的 CC1 事件。 001: 定时器 1 的 CC2 事件。 010: 定时器 1 的 CC3 事件。 011: 定时器 2 的 CC2 事件。 100: 定时器 3 的 TRGO 事件。 101: 定时器 4 的 CC4 事件。 110: EXTI 线 11/TIM8_TRGO 事件,仅大容量产品具有 TIM8_TRGO 功能。 111: SWSTART。 ADC3 的触发配置如下: 000: 定时器 3 的 CC1 事件。 001: 定时器 2 的 CC3 事件。 010: 定时器 1 的 CC3 事件。 011: 定时器 8 的 CC1 事件。 100: 定时器 8 的 TRGO 事件。 101: 定时器 5 的 CC1 事件。 110: 定时器 5 的 CC3 事件。 111: SWSTART
位 16	保留,始终为 0
位 15 JEXTTRIG	注入通道的外部触发转换模式。该位由软件设置和清除,用于开启或禁止可以启动注入通道组转换的外部触发信号。 0: 不使用外部触发信号启动转换。 1: 使用外部触发信号启动转换
位 14~12 JEXTSEL[2:0]	选择启动注入通道转换的外部事件。 ADC1 和 ADC2 的触发配置如下: 000: 定时器 1 的 TRGO 事件。 001: 定时器 1 的 CC4 事件。 010: 定时器 2 的 TRGO 事件。 011: 定时器 2 的 CC1 事件。 100: 定时器 3 的 CC4 事件。 101: 定时器 4 的 TRGO 事件。 110: EXTI 线 15/TIM8_CC4 事件,仅大容量产品具有 TIM8_CC4。 111: JSWSTART。 ADC3 的触发配置如下: 000: 定时器 1 的 TRGO 事件。 001: 定时器 1 的 CC4 事件。 010: 定时器 4 的 CC3 事件。 011: 定时器 8 的 CC2 事件。 100: 定时器 8 的 CC4 事件。 101: 定时器 5 的 TRGO 事件。 110: 定时器 5 的 CC4 事件。 111: JSWSTART



续表

位	描 述
位 11 ALIGN	数据对齐,该位由软件设置和清除。 0: 右对齐。 1: 左对齐
位 10、9	保留,始终为 0
位 8 DMA	直接存储器访问模式,该位由软件设置和清除。 0: 不使用 DMA 模式。 1: 使用 DMA 模式。 注: 只有 ADC1 和 ADC3 能产生 DMA 请求
位 7~4	保留,始终为 0
位 3 RSTCAL	复位校准,该位由软件设置并由硬件清除。在校准寄存器被初始化后该位将被清除。 0: 校准寄存器已初始化。 1: 初始化校准寄存器。 注: 如果正在进行转换时设置 RSTCAL,初始化校准寄存器需要额外的周期
位 2 CAL	AD 校准,该位由软件设置,在校准结束时由硬件清除。 0: 校准完成。 1: 开始校准
位 1 CONT	单次/连续转换,该位由软件设置和清除。如果设置了该位,则转换将连续进行,直到该位被清除。 0: 单次转换模式。 1: 连续转换模式
位 0 ADON	开启和关闭 ADC,该位由软件设置和清除。当该位为 0 时,写入 1 将把 ADC 从断电模式唤醒;当该位为 1 时,写入 1 将启动转换。在编写应用程序时需注意,在转换器上电至转换开始有一个延迟 t_{STAB} 。 0: 关闭 ADC 转换/校准,并进入断电模式。 1: 开启 ADC 并启动转换。 注: 如果在 ADC_CR2 寄存器中还有其他位与 ADON 一起改变,则不触发转换,这是为了防止触发错误的转换

这里使用软件触发(SWSTART),所以设置位 19~17 为 111。ADC_CR2 寄存器的 SWSTART 用于开始规则通道的转换,每次转换(单次转换模式下)都需要向该位写入 1。

2. ADC 采样时间寄存器

ADC 采样时间寄存器 ADC_SMPR1 和 ADC_SMPR2 用于设置通道 0~17 的采样时间,每个通道占用 3 位。ADC_SMPR1 寄存器如图 5.4 所示。表 5.5 给出了 ADC_SMPR1 寄存器的各位描述。

31	30	29	28	27	26	25	24	23	22	21	20	19	18	17	16	15	
保留									SMP17[2:0]			SMP16[2:0]			SMP15[2:0]		
								rw	rw	rw	rw	rw	rw	rw	rw	rw	
14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0			
SMP14[2:0]			SMP13[2:0]			SMP12[2:0]			SMP11[2:0]			SMP0[2:0]					
rw	rw	rw	rw	rw	rw	rw	rw	rw	rw	rw	rw	rw	rw	rw	rw	rw	

图 5.4 ADC_SMPR1 寄存器

表 5.5 ADC_SMPR1 寄存器的各位描述

位	描 述
位 31~24	保留,始终为 0
位 23~0 SMPx[2:0]	<p>选择通道 x 的采样时间,这些位用于独立地选择每个通道的采样时间。在采样时间中通道选择位必须保持不变。</p> <p>000: 1.5 个周期。 001: 7.5 个周期。 010: 13.5 个周期。 011: 28.5 个周期。 100: 41.5 个周期。 101: 55.5 个周期。 110: 71.5 个周期。 111: 239.5 个周期。</p> <p>注: ADC1 的模拟输入通道 16 和 17 在芯片内部分别连到温度传感器和 V_{REFINT} 引脚, ADC2 的模拟输入通道 16 和 17 在芯片内部连到 V_{SS} 引脚, ADC3 模拟输入通道 14~17 与 V_{SS} 引脚相连</p>

ADC_SMPR2 寄存器如图 5.5 所示。表 5.6 给出了 ADC_SMPR2 寄存器的各位描述。

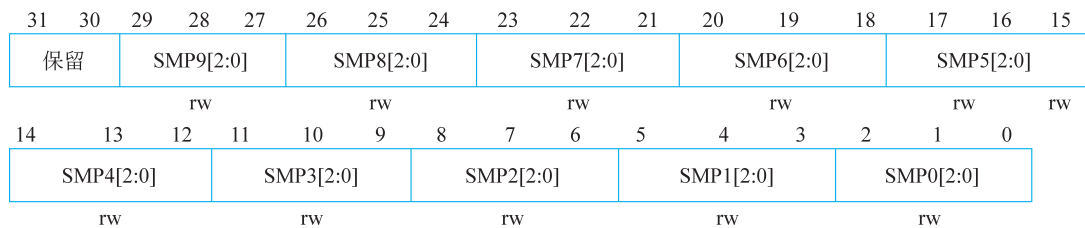


图 5.5 ADC_SMPR2 寄存器

表 5.6 ADC_SMPR2 寄存器的各位描述

位	描 述
位 31,30	保留,始终为 0
位 29~0 SMPx[2:0]	<p>选择通道 x 的采样时间,这些位用于独立地选择每个通道的采样时间。在采样时间中通道选择位必须保持不变。</p> <p>000: 1.5 个周期。 001: 7.5 个周期。 010: 13.5 个周期。 011: 28.5 个周期。 100: 41.5 个周期。 101: 55.5 个周期。 110: 71.5 个周期。 111: 239.5 个周期。</p> <p>注: ADC3 模拟输入通道 9 与 V_{SS} 引脚相连</p>

对于每个要转换的通道,采样时间应长一点,以获得较高的准确度,但是这样会降低转换速度。ADC 的转换时间由以下公式计算:

$$T_{conv} = \text{采样时间} + 12.5 \text{ 个周期}$$

其中, T_{conv} 为总转换时间,采样时间根据每个通道的 $SMPx[2:0]$ 的设置决定。例如,