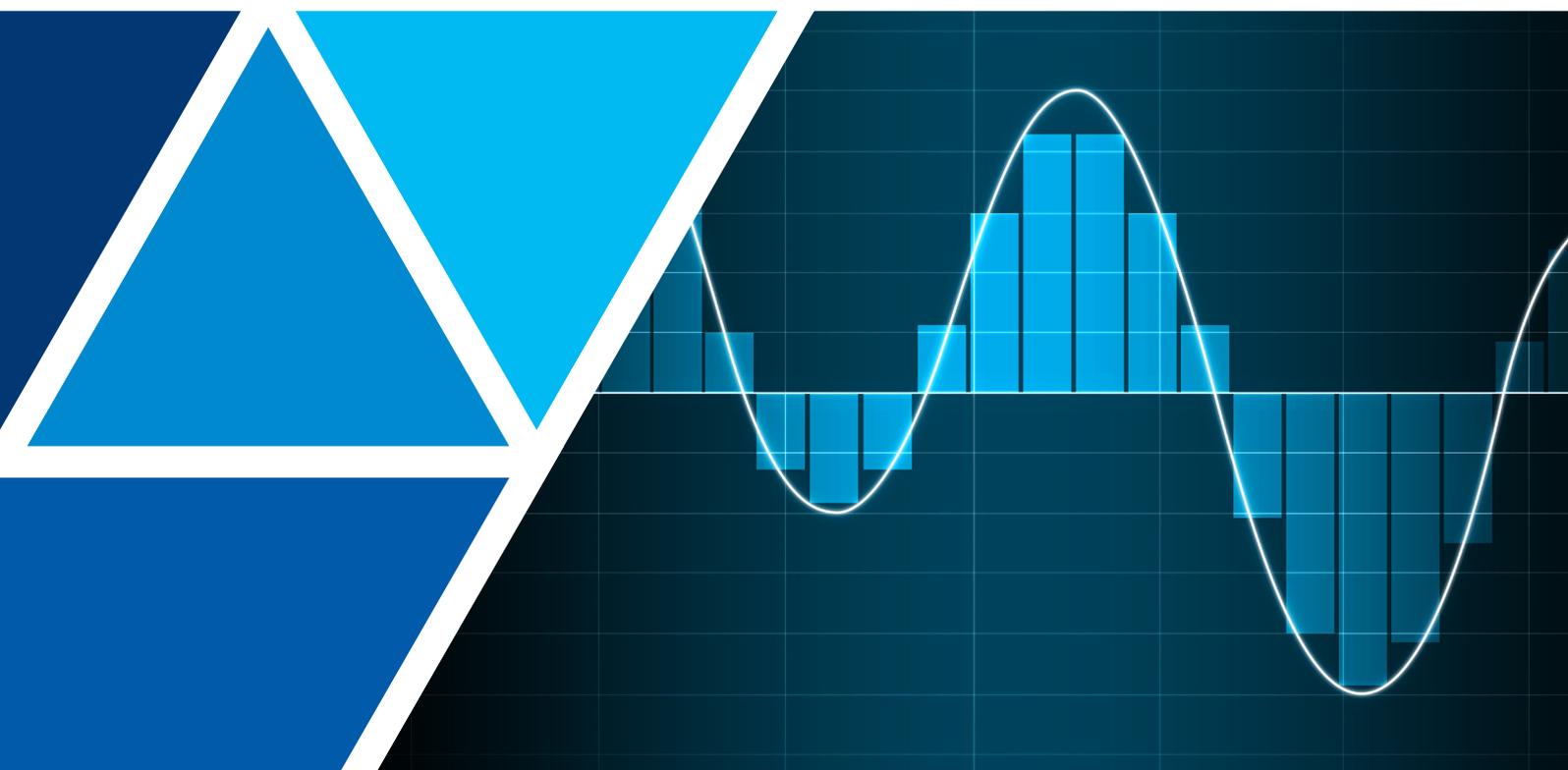


白皮书

从模拟信号到数字信号： 解码传感器信号

探索获取并数字化模拟信号以进行后续处理的过程



DEWETRON

摘要

这份白皮书阐述了测量链的基本任务，以及从物理变量到可输入至个人电脑或微控制器以进行可视化或进一步处理的数字信号的转换路径。特别是对模拟信号到数字信号转换器的通用功能以及最常见模数转换器的功能原理进行了简化的说明。此外，还介绍了为了使模拟信号能够被AD转换器正确转换成数字信号所需的信号预处理，以及整个过程中可能出现的错误。

引言

测量技术的基本要求之一是获取物理量，并将传感器获取的模拟信号转换为数字形式，以便进一步进行处理。一个模拟信号可以是麦克风记录的声音、相机记录的光线或者各种传感器检测到的电压或电流。在本文中，我们通过以简化形式探讨从物理量的获取到数字值的转换这一过程来，更深入地研究这一问题。为了对该过程有一个全面的了解，本文讨论了以下几点：

- ▶ 测量链是如何工作的？
- ▶ 采样保持电路
- ▶ 什么是混叠？
- ▶ 什么是模数转换（ADC）？
- ▶ A/D 转换器的基本功能以及逐次逼近转换器（SAR）与 $\Sigma\Delta$ 之间的区别
- ▶ 逐次逼近转换器（SAR）型 ADC
- ▶ DEWETRON的A/D转换器

测量链是如何工作的？

测量链的目的是借助传感器（此处我们不再详细阐述）将物理量转换为模拟电信号，并最终以尽可能准确的数字形式输出这些量（该数字值随后可以进行进一步处理）。图 1 展示了从模拟信号到数字信号的一般转换过程。

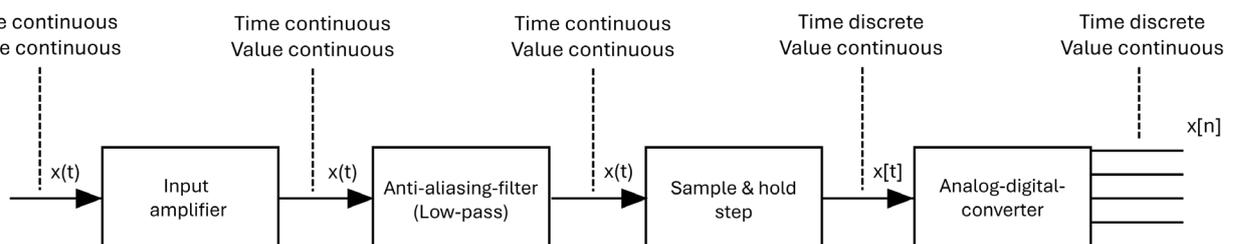


图 1: 测量链

在通过模数转换器（ADC）将模拟信号转换为数字信号之前，必须先进行信号预处理。由于模数转换器的工作范围是有限的，因此信号必须首先被调整到相应的范围内。例如，如果 ADC 的工作电压范围是 $\pm 5\text{ V}$ ，那么就无法测量 100 V 的信号。因此，电流或电压信号必须被限制在一定范围内。

在将模拟信号转换为数字信号之前，另一个必要的步骤是抗混叠滤波。这会将模拟信号限制在一定的带宽内，以满足奈奎斯特定理的要求。我们将在 [“什么是混叠？”](#) 一章中更详细地探讨奈奎斯特定理的内容以及混叠的含义。

现在，我们已经将模拟输入信号限制在必要的范围内，并将信号限制在一定的带宽内。为了能够以数字方式转换信号，需要在一定的时间间隔内对模拟信号进行采样。这一过程是由采样保持电路实现的，该电路会在特定的时间点将信号的值保持一段时间。

采样保持电路

采样保持电路是一种电子电路，它能够将连续变化的模拟值保持在特定的电平上，以便后续电路有足够的时间对其进行转换。下图（图 2）展示了采样保持电路的简化原理。

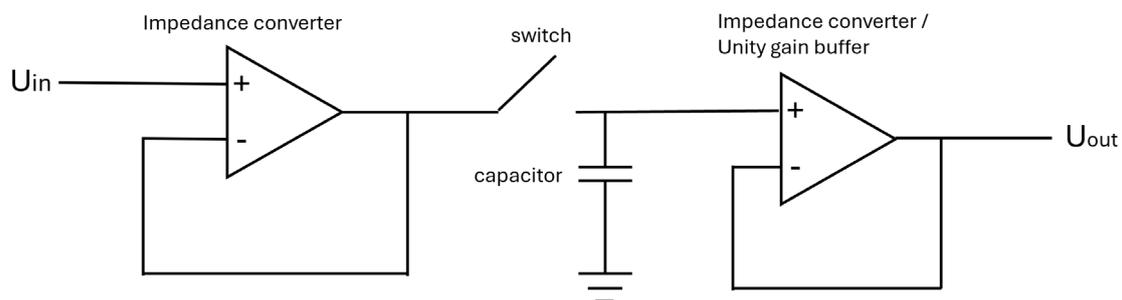


图 2: 简化型采样保持电路

该电路的核心元件是电容器，它能够将输入信号的值保持在尽可能稳定的特定水平。图 2 中左侧的阻抗转换器会在开关（位于电容器上方）闭合的瞬间为电容器充电。该阻抗转换器还起到避免电压源过载的作用，从而导致结果失真。如果此时打开开关，电容器会保持电压相对稳定，因为电容只能通过电路右侧的非常高的输入电阻（单位增益缓冲器）来放电。这样就能保持输出端的电压水平，并将模拟信号（现在不再是连续的，而是时间离散的）转换为数字值，以便在下一步中进行处理。

什么是混叠？

在信号处理领域，混叠或混叠效应指的是当信号中的频率成分高于采样频率的一半时所产生的误差。这个频率也被称为奈奎斯特频率。

混叠现象有多种表现形式。在图形或图像中，图像中会出现一些实际上并不存在的颜色或各种图案。在声学领域，会出现原本音频轨道中不存在的噪音。

图 3 展示了一个混叠现象的示例。图中红色所示的信号是一个频率为 90Hz 的正弦波振荡，图中显示的 x 轴代表 0.1 秒的时间窗口。如果我们以过低的采样率（在此例中为 100Hz）来测量这个信号，就会发现该信号未能被正确捕获。我们所测量到的信号已不再代表原始的 90Hz 正弦波，而是一个频率为 10Hz 的正弦波（蓝色信号）。这个信号并非原始测量信号的一部分，而是由混叠效应所导致的。

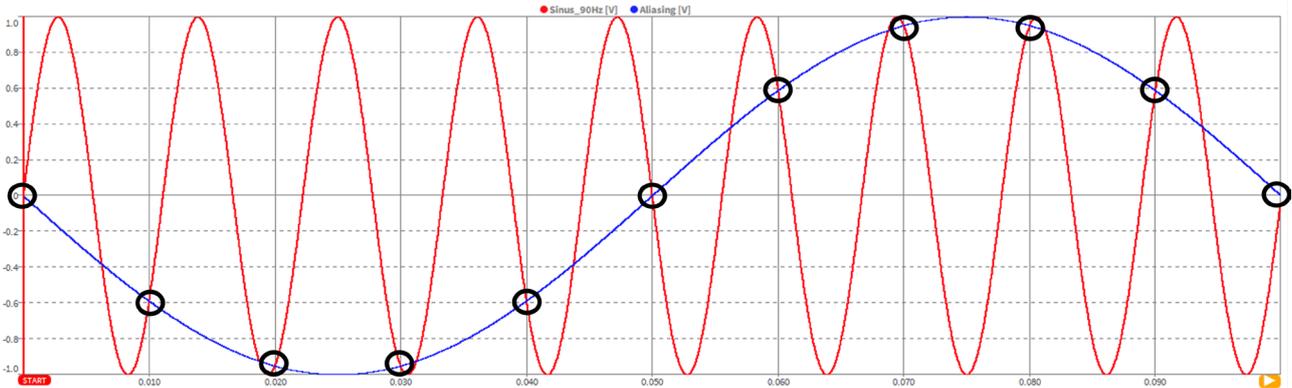


图 3: 以 100 Hz 采样频率对 90 Hz 正弦波进行采样

什么是 ADC?

模数转换器 (ADC) 的基本功能是在特定时间点对模拟信号进行采样，并将该值转换为可以进一步处理的数字值。这是因为数字设备无法处理模拟信号。

模拟信号以特定的时间间隔进行采样，即以特定的采样率进行采样，从而将连续的时间和数值信号转换为离散的时间和离散数值信号。通过在特定的时间间隔进行采样，连续的时间信号被转换为离散的时间信号。将模拟信号的连续幅值转换为离散值的过程称为量化。根据 ADC 的位深度，这会导致模拟幅值表示的精度出现误差。这种误差被称为量化误差。

例如，如果 ADC 使用 16 位，这意味着 ADC 可以表示 $2^{16} = 65,536$ 个量化分区。根据 ADC 的测量范围，这会导致精度误差。以下表格 (表 1) 展示了在不同位深度下的量化误差的一些示例。

ADC Resolution [bit]	16	18	24
2^n steps	$2^{16} = 65,536$	$2^{18} = 262,144$	$2^{24} = 16,777,216$
Resolution for ± 1 V range	30.5 μ V	7.62 μ V	119 nV
Resolution for ± 10 V range	305 μ V	76.2 μ V	1.19 μ V
Resolution for ± 100 V range	3.05 mV	762 μ V	11.9 μ V

表 1: 位数与分辨率

为了更好地理解，请查看以下正弦波图 (图 4)，它将由一个 3 位的模数转换器 (ADC) 进行数字化处理，并以 10 次采样方式获取数据。蓝色的正弦波是我们所使用的模拟信号。样本点用黄色表示。红色信号代表 3 位 ADC 的转换结果。如果我们通过使用数模转换器 (DAC) 将数字化信号转换回模拟信号，那么该信号将与原始正弦波不同，因为在这个特定范围内，我们只有 8 个量化分区来表示模拟正弦波。如果 ADC 以 16 位 (2 的 16 次方 = 65,536 个量化分区) 为例工作，我们将有 65,536 个量化分区表示原始信号，这将最小化量化误差，我们的数字化信号也将非常精确。

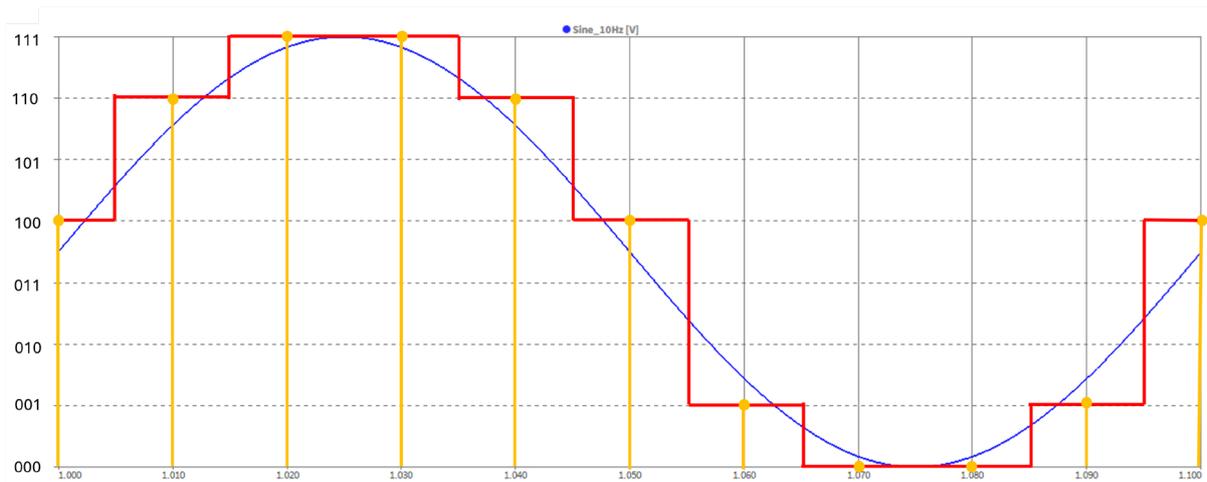


图 4: 正弦波的量化

▼ A/D 转换器的基本功能以及逐次逼近型 (SAR) 与 Δ - Σ 型的区别

在模数转换领域，存在着多种不同的 ADC（模数转换器）类型，其中 5 种类型已在电子电路中得到广泛应用。本质上，所有类型的功能相同，但其电路架构和性能各不相同。这 5 种最常见的类型分别是：

- ▶ 闪存式、直接式或并行式 ADC
- ▶ 串行化、子范围划分及两阶段式 ADC
- ▶ 集成式双斜率 ADC
- ▶ Δ - Σ ADC
- ▶ 逐次逼近ADC

在本文中，我们将探讨当今数据采集中最常用的两种模数转换器类型，即 Δ - Σ 型模数转换器和逐次逼近型模数转换器。

DELTA-SIGMA (Δ - Σ) 模数转换器

“德尔塔-西格玛转换器”这一名称直接源自该电路的功能原理。在模数转换器的输入端会形成一个差值 (Δ)，然后这个差值会被相加 (Σ)。通过下面的图示，我们现在将更详细地探讨一下 Δ - Σ 转换器的原理。

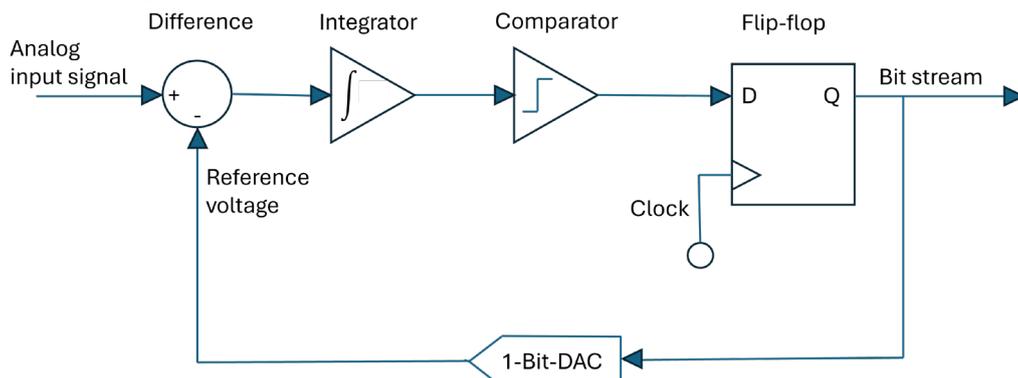


图 5: DELTA-SIGMA 转换器的简化电路图

一个模拟电压被施加到 $\Delta\Sigma$ 转换器的输入端，其值由之前的采样保持电路所保持。随后，该值被转换成一个 1 位的信号流。确定的 1 位信号流被存储在 D 触发器中，并通过 1 位 ADC 转换回一个模拟参考电压，然后该参考电压可用作 ADC 输入端的参考电压。

在 ADC 的输入端，施加的参考电压从施加的模拟输入信号中减去。结果被转发到积分器，积分器将该值与之前积分器的值相加。然后，比较器通过简单地检查确定的值是否高于或低于阈值来将该值转换为 1 位信号流。例如，如果 ADC 使用 $U_{ref+} = +5\text{ V}$ 和 $U_{ref-} = -5\text{ V}$ 的参考电压，当积分器值大于或等于 0，则该位设置为 1，当值低于 0，则将其设置为 0。这个过程执行得越频繁，数字化值的精度就越高。

以下表格（表 2）展示了一个示例计算。ADC 使用参考电压 U_{ref} 为 $\pm 5\text{ V}$ 。在模数转换器的输入端，存在一个 1 伏的模拟信号。在第一个计算步骤中，用于在输入端形成差值的参考电压仍为 0，这与积分器的参考电压相同。从第二步开始，将使用上一步计算得到的值，如上述所述。

Cycle	Difference	Integrator	Comparator	Corresponding analog value [V]
1	$1\text{ V} - 0\text{ V} = 1\text{ V}$	$0\text{ V} + 1\text{ V} = 1\text{ V}$	1 (value > 0)	5
2	$1\text{ V} - 5\text{ V} = -4\text{ V}$	$1\text{ V} + (-4\text{ V}) = -3\text{ V}$	0 (value < 0)	-5
3	$1\text{ V} - (-5\text{ V}) = 6\text{ V}$	$-3\text{ V} + 6\text{ V} = 3\text{ V}$	1 (value > 0)	5
4	$1\text{ V} - 5\text{ V} = -4\text{ V}$	$3\text{ V} + (-4\text{ V}) = -1\text{ V}$	0 (value < 0)	-5
5	$1\text{ V} - (-5\text{ V}) = 6\text{ V}$	$-1\text{ V} + 6\text{ V} = 5\text{ V}$	1 (value > 0)	5
6	Average			$(3*5 - 2*5)/5 = 1\text{ V}$

表 2: DELTA-SIGMA 转换器的计算步骤

逐次逼近型模数转换器(SAR)ADC

“逐次逼近”是一个数学术语，它描述了一种逐步进行的方法。SAR（逐次逼近型模数转换器）使用一个参考电压，该电压会在 n 个循环步骤中逐渐接近输入信号。在每次循环中，都会检查输入信号是大于还是小于参考电压，并且如果输入信号大于或等于参考电压，则将该位设置为 1，否则将该位设置为 0。数模转换器（DAC）根据相应样本的数字输出信号生成一个新的参考电压，该电压用作下一步的新参考值，然后结果再传输回 SAR-ADC。根据 ADC 的位深度，这个过程会进行 n 次，最终得到一个与模拟输入信号相对应的二进制数。

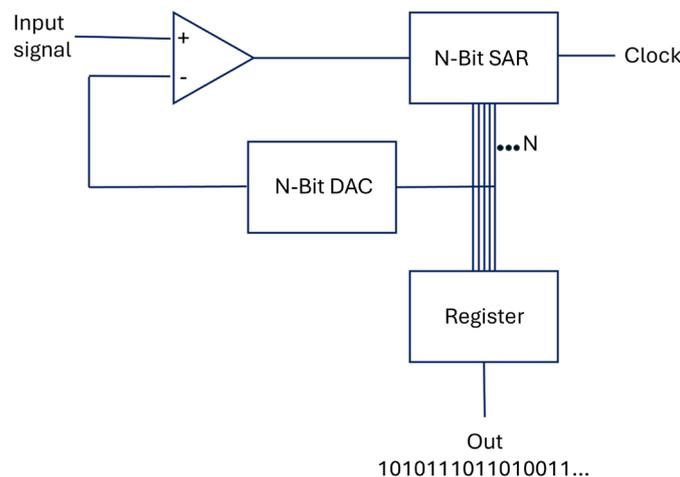


图 6: SAR 转换器的简化电路图

以一个具有 6 位数模转换器 (SAR-ADC) 且参考电压为 64 伏的电路为例, 通过采样保持电路向其输入 10.5 伏的信号。计算过程可以想象成一种传统的天平, 如下面的图示所示。将 10.5 伏的输入信号施加到天平的一侧, 而 SAR-ADC 的测量范围的一半 (即 32 伏) 施加到另一侧。现在我们看到 $10.5 \text{ V} < 32 \text{ V}$, 这使得我们的第一个位 = 0。接下来, 从之前使用的参考值 (32 伏) 中减去一半的值, 并将其用作新的参考值。 $10.5 \text{ V} < 16 \text{ V}$, 因此我们得到第 2 位为 0, 依此类推。当我们的输入信号高于或等于参考电压时, 相应的位将被设置为 1, 否则将被设置为 0。

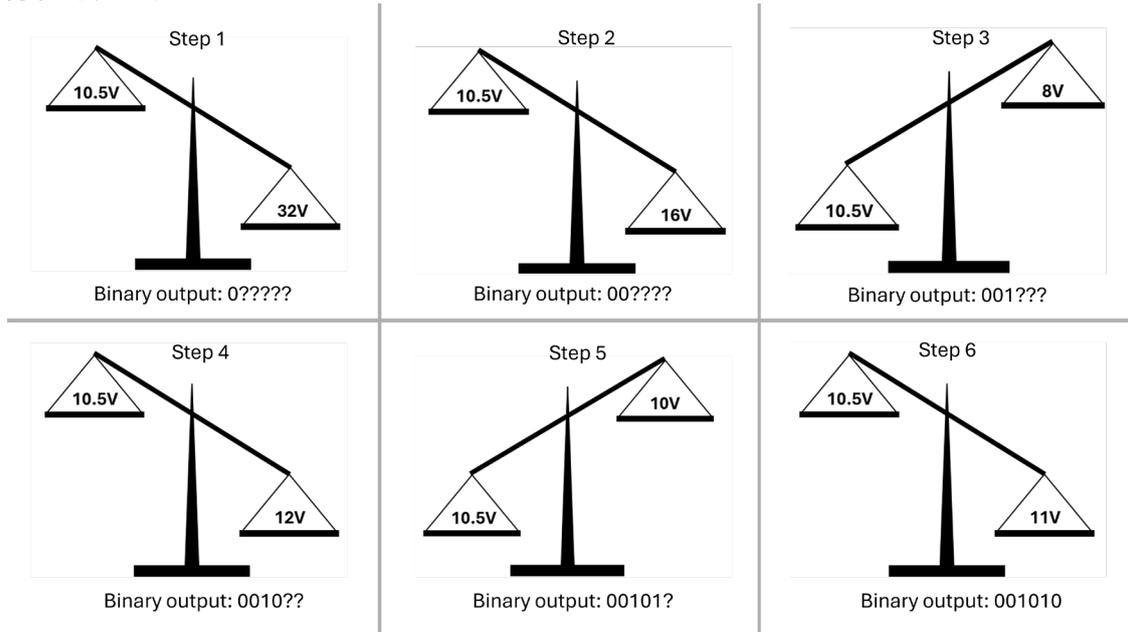


图7: SAR转换器的计算原理

Cycle	DAC (6-Bit binary)	Comparator	Input signal interval	Result (6-Bit binary)
1	100000	$10.5 \text{ V} < 32 \text{ V}$	0 V .. 32 V	0?????
2	010000	$10.5 \text{ V} < 16 \text{ V}$	0 V .. 16 V	00????
3	001000	$10.5 \text{ V} > 8 \text{ V}$	8 V .. 16 V	001???
4	001100	$10.5 \text{ V} < 12 \text{ V}$	8 V .. 12 V	0010??
5	001010	$10.5 \text{ V} > 10 \text{ V}$	10 V .. 12 V	00101?
6	001011	$10.5 \text{ V} < 11 \text{ V}$	10 V .. 11 V	001010

表 3: SAR 转换器的计算步骤

经过 6 次循环后, 我们得到一个 6 位的二进制数值 (001010), 其在十进制中表示为 10。

DEWETRON 的 A/D 转换器

在 DEWETRON, 所有测量模块都使用了 SAR ADC (模数转换器)。任意 TRION-2402 系列模块都配备了多达 8 个 Δ - Σ A/D 转换器。如果以 102.4 千赫兹的数据速率进行采样, 该 ADC 实际上将以 13.1072 千兆赫兹将数据速率乘以 128) 的速度对输入信号进行采样, 并生成 1 位样本, 这些样本将被应用于数字滤波器。该滤波器将数据扩展至 24 位, 并滤除高于 51.2 千赫兹 (奈奎斯特频率) 的信号部分。它还将数据重新采样至所需的 102.4 千赫兹的数据速率。

一位比特量化器会给信号引入大量量化误差。来自 ADC 的 1 位、13.1072 千兆赫兹的数据包含了所有信息，从而以 102.4 千赫兹的速率生成 24 位样本。 Δ - Σ 型 ADC 通过向信号添加随机噪声来实现从高速到高分辨率的转换。这样，产生的量化噪声就被限制在 100 kHz 以上的频率范围内。这种噪声与有用信号无关，并被数字滤波器滤除。

DEWETRON的所有采集板卡都使用逐次逼近型 ADC。例如，TRION(3)-18x x-MULTI 系列每个通道都使用一个 18 位、5 兆赫兹的超低噪声逐次逼近型 ADC。这使得能够以极低的噪声和出色的精度测量高达 2 MHz 的信号带宽。

您是否对DEWETRON的测量模块及其功能感兴趣？请浏览链接[measurement boards](#)，如需更多信息，请访问我们的主页。 <https://www.dewetron.com/>

结论

对于应选用何种类型的模数转换器（ADC）并没有标准答案，因为这种选择取决于具体的应用场景。 Δ - Σ 型 ADC 具有高达 32 位的高分辨率和较低的功耗。而逐次逼近型 ADC虽然分辨率较低，但相较于 Δ - Σ 模数转换器能实现更高的采样速率，且通常具有更高的性价比。与 Δ - Σ 型转换器相比，逐次逼近型转换器具有完美的阶跃响应。在时域中需要测量方波信号时，应使用逐次逼近型或闪存型 ADC。

作者介绍

Michael Fuchs



Michael Fuchs 自 2011 年起就在一家位于格拉茨的汽车供应公司担任应用工程师。在其任职期间，他专注于根据全球技术规范对排放测试系统的测量数据进行后处理工作。2022年，他加入DEWETRON公司，担任汽车、电动出行、能源应用、测试台以及通用测试和测量解决方案的应用工程师。



About DEWETRON

DEWETRON is a manufacturer of precision test & measurement systems designed to help our customers make the world more predictable, efficient and safe. Our strengths lie in customized solutions that are immediately ready for use while also being quickly adaptable to the changing needs of the test environment and sophisticated technology of the energy, automotive, transportation and aerospace industries.

More than 35 years of experience and innovation have awarded DEWETRON the trust and respect of the global market. There are more than 25,000 DEWETRON measurement systems and over 400,000 measurement channels in use in well-known companies worldwide.

DEWETRON employs over 120 people in 25 countries and is part of the TKH Group, a global corporation, that specializes in the development and supply of innovative solutions worldwide.

DEWETRON's quality is certified in compliance with ISO9001 and ISO14001. The high integrity of the measurement data is guaranteed by our own accredited calibration lab according to ISO17025.

*Get to know our
GLOBAL OFFICES*



THE MEASURABLE DIFFERENCE.



DEWETRON

HEADQUARTERS
DEWETRON GmbH
Parkring 4, 8074 Grambach
AUSTRIA

+43 (0) 316 3070-0
info@dewetron.com
www.dewetron.com

