

# 从数据手册到系统设计

## 高精度ADC的选型与应用

forest.jie@monolithicpower.com

2025/08/22



## MPS（芯源系统）公司概要

MPS公司由现任CEO Michael先生于1997年创立，是一家全球技术领先的模拟芯片公司。公司于2004年11月在纽交所上市，2024年度全球营收\$22亿。公司总部位于美国华盛顿州西雅图，研发中心坐落在加州硅谷中心地带--圣何塞市（San Jose）。

MPS目前主要给客户提供各种电源管理芯片或解决方案，可广泛用于工业自动化控制、汽车电子，数据中心，物联网，生物医学，机器人，云计算、电信机房，GPU模组及高端消费类终端产品。产品包含多种电源芯片及模块、DC/DC, AC/DC功率变换器、隔离电源、电池管理、电机驱动器, ADC及功率电感，共计4000多种型号产品。

全球公司总部位于美国华盛顿州西雅图，研发中心坐落在加州硅谷圣何塞市（San Jose）。公司在纳斯达克上市的股票代码：MPWR。

中国区运营总部位于四川成都，在北京，上海，深圳，杭州设有分公司，负责各个区域的销售与技术服务。



# MPS 产品有14大门类



Products

Applications

Design

Support

Learning

EMC Lab

About MPS

Contact

CART 0

EN

Log in

## Power Management

- Switching Converters & Controllers
- Multi Phase Controllers & Intelli-Phase
- Power Management IC (PMIC)
- Data Center
- Power Protection
- Power Over Ethernet (PoE)
- Display Power and Control
- USB, Load & Analog Switches
- LDO & Voltage Supervisory
- MOSFET Drivers

## Isolation

- Isolated Gate Drivers
- Digital Isolators
- Digital Isolators with Integrated Power
- Isolated DC/DC Converters & Modules
- Controllers

## Power Modules

- Power Modules (Integrated Inductor)
- Isolated DC/DC Converters & Modules
- 48V Modules
- Intelli-Module

## Battery Management

- Chargers
- Battery Monitors & Protectors
- Fuel Gauges
- Active Balancers
- Switched Capacitor Converters

## Motor Drivers & Motor Controllers

- Stepper Motor Drivers
- BLDC Pre Drivers and Integrated Solutions
- Brushed DC / Solenoid Drivers
- Fan Drivers
- Servo, BLDC Motor Controllers

## Automotive (AECQ Grade)

- Switching Converters and Controllers AECQ Grade
- Load Switches and Supervisors
- Motor Drivers
- Power Modules
- USB Charging Port
- LED Driver
- LDO
- Half-Bridge
- Backlight Drivers (WLED)

## Inductors

- Shielded Optimized for MPS DC DC
- Molded Optimized for MPS DC DC

## LED Drivers

- AC-DC Lighting
- DC-DC Lighting & Backlight

## Class-D Audio

- Digital Controllers & Processors
- Analog Input
- PWM Input Power Drivers

## Analog

- Ultrasound Multiplexers
- Precision Analog

## Data Converters

- Delta-Sigma ADCs
- SAR ADCs

## Sensors

- Angular Position Sensors
- Current Sensors
- 3D (XYZ) Position Sensors

## AC-DC

- HV Buck Regulators and Smart LDO
- Flyback
- PFC/LLC Controllers
- Synchronous Rectifiers
- LED Lighting & Illumination
- Power Savers

## Complete Solution Boards

- PoE
- Motors
- Battery Management
- USB



## 1. ADC简介

- a. ADC的类型与特点
- b. 高精度ADC的应用

## 2. ADC重要参数分类

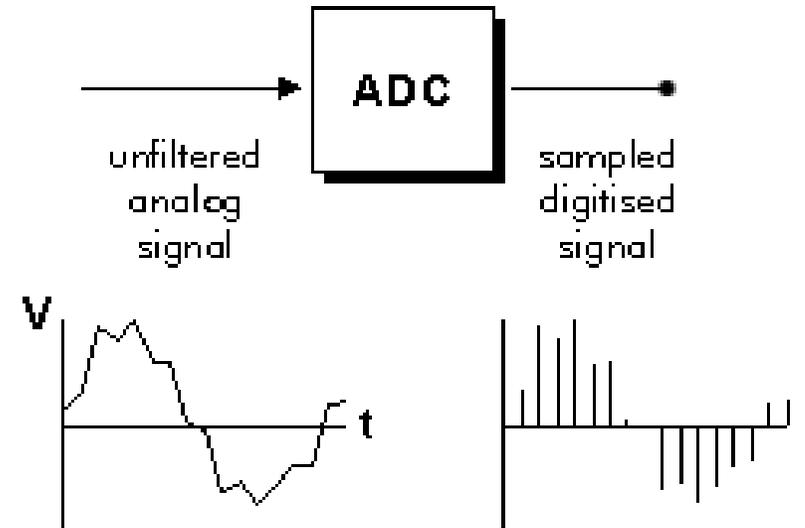
ADC的核心参数

## 3. 从ADC技术参数到应用需求

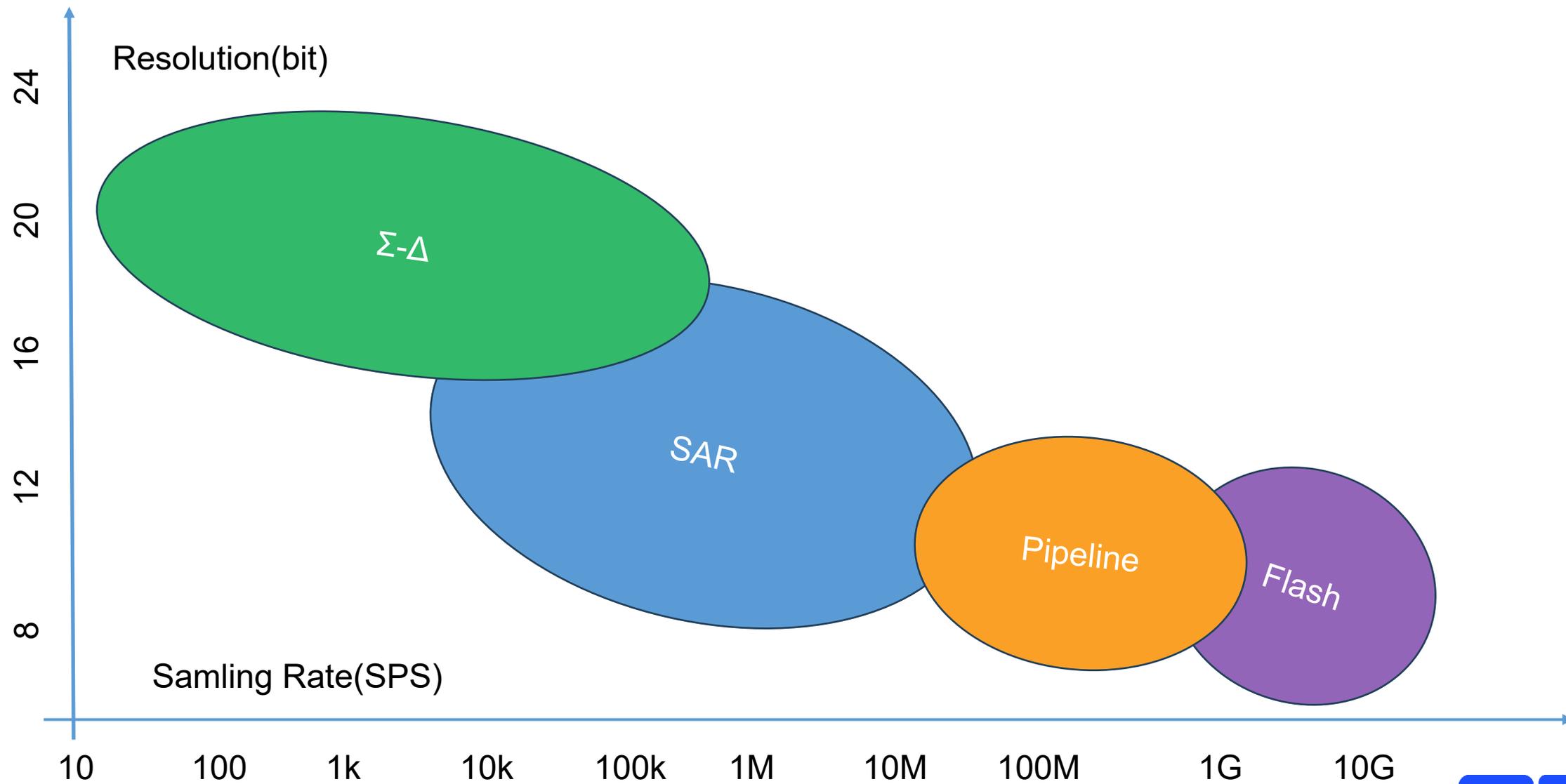
测量准确度与精确度的定义  
ADC测量时噪声叠加算法及降噪措施  
MCU内置式ADC，与独立式ADC的特点  
对比与应用场景

# ADC简介： ADC的功能与应用

- 物理环境参数都是模拟量，而当今的网络，智能设备都只能处理各种数字量。ADC就承担起将模拟信号转换成数字量的桥梁作用。
- ADC广泛用在消费类电子，工业自动化，通信终端，汽车电子模组，医疗仪器设备，航空航天器，疗科学仪器等设备中。



# 常见的ADC4种架构及特点

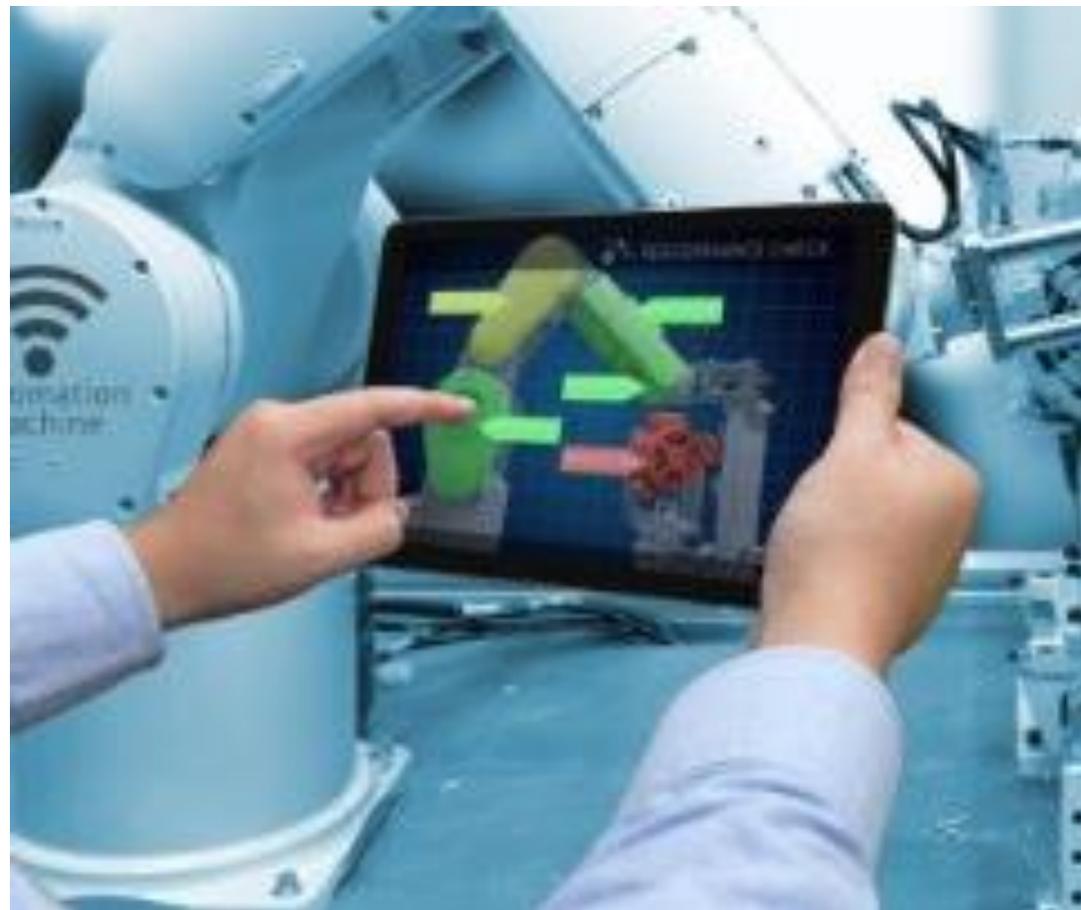


# ADC简介： 各种ADC的特点

- 1)  $\Delta\Sigma$ 型 (Delta-Sigma) ADC: 它利用超采样技术, 将输入信号转换为高频的1位数字流, 再通过滤波器得到高分辨率的数字信号。优点是分辨率高, 采样率可以到2MSPS, 适用于精密测量, 缺点是转换速度相对较慢。
- 2) 逐次比较型 (SAR) ADC: SAR型ADC是目前最常用的ADC之一, 在分辨率, 速度与功耗之间取得了很好的平衡。它通过逐次逼近输入电压来获得最终的数字值。优点是速度较快, 功耗低, 适用于中高速数据转换应用。
- 3) 流水线型 (Pipelined) ADC: Pipelined ADC是最常用的高速ADC类型。利用残余电压放大器、比较器对模拟输入进行逐级放大及转换。可以做到中、高精度的快速转换, 且功耗低于Flash类ADC。但无法达到Flash ADC的最高采样率 (> GSPS)。
- 4) 并行转换 (Flash) ADC: 使用并行比较器阵列, 能在一个时钟周期内完成转换, 速度最快, 但硬件复杂, 功耗大, 成本较高, 分辨率无法做到太高。适用于高速应用, 如视频信号处理, 射频信号处理, DRFM(Direct RF memory)。
- 5) 积分型 (Dual-slop, Tri-slope) ADC: ADC分辨率12-16bit, 成本低, 它是将输入信号在一段时间内积分, 然后与基准电压比较。优点是对低频和直流信号精度高, 抗噪声能力强, 缺点是转换速度较慢, 最高只能做到1KSPS。

## 高精度ADC的应用场景-1：工业控制与自动化系统

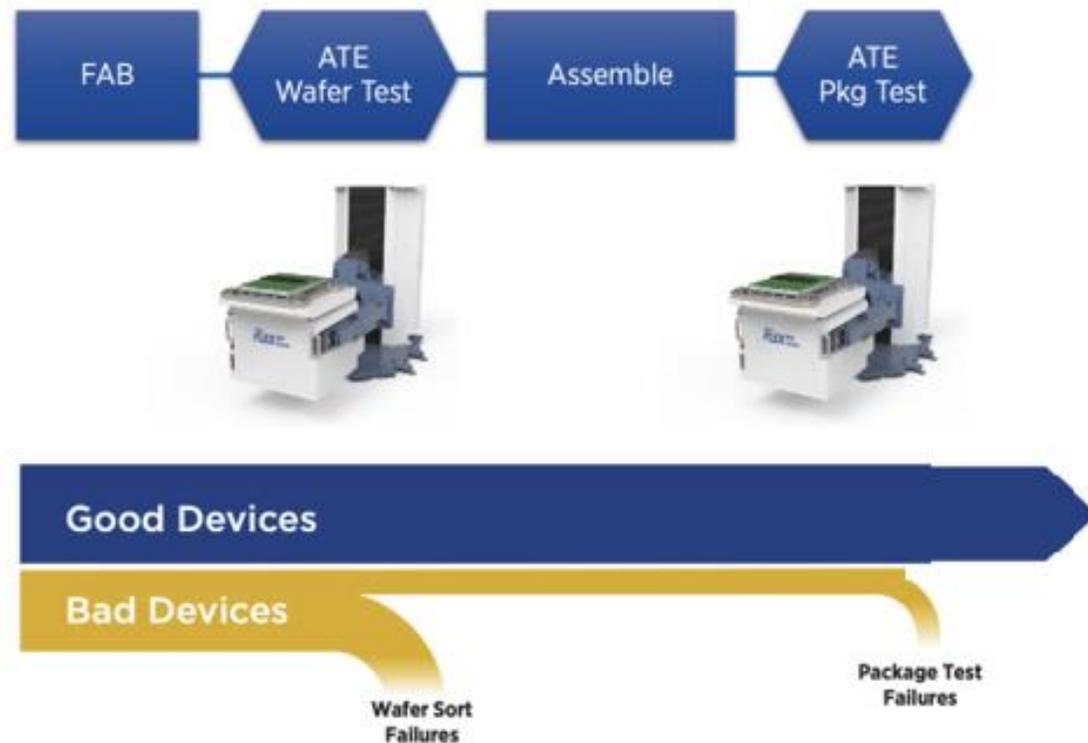
- 在工业自动化系统中，各高精度ADC 可用于采集各种传感器的信号，并将其数字化，适用于需要快速响应和高精度的自动控制系统。
- PLC（可编程逻辑控制器）、工厂自动化系统中的前端数据采集，温度、压力、速度等物理量的监测与闭环控制都需要一个具有高精度，低温度漂移，长期稳定性的测量手段。



## 高精度ADC的应用场景-2：自动测试设备（ATE）

在电子元器件，电子设备，集成电路的研发，故障分析与制造过程中，我们都需要用到ATE设备对上述被测件进行功能，性能测试以及产品等级分选。这个测试过程中，就需要用到多通道，高精度ADC进行各种参数的快速测量，精准地实现产品质量管控，提高出厂产品良率

集成电路的测试可以分为CP测试，Final Test, 老化测试，失效分析



## 高精度ADC的应用场景-3： 振动信号采集

1. 油气勘探中的多通道地震波采集与测量，便于地下油气储藏分析
2. 地震信号监测与记录
3. 状态监测维护（CBM - Condition Based Maintenance）系统, 用于工业设备的运行健康状态实时检测，便于发现早期故障征兆，对设备进行预防性维护保养, 以降低设备非计划性宕机带来的损失。



## 高精度ADC的应用场景-4： 科学测量与生物电信号测量

物理试验中的数据采集与测量，科学计量仪器  
生物电信号如ECG，EMG，血氧饱和度测量  
CT，超声波等医疗影像与诊断



## 测量值准确度 (Accuracy)与精确度(Precision)

1. 准确度和精确度（下文简称精度）是两个容易混淆的概念，定义如下：
2. **准确度**：指测量值与真实值的接近程度，反映系统误差的大小，表述的是“准”。
3. **精确度**：指多次测量结果之间的一致程度，反映随机误差的大小，表述的是“稳”
4. Case1: 用A电压表测量一个1.000V的电压信号，8次测量值为分别为：1.001, 0.999, 1.001, 0.999, 1.001, 0.999, 1.001, 1.001，则测量平均值为1.00025，系统误差为0.025%。随机误差由标准方差表示，本案例中为0.001035
5. Case2: 如果用B电压表测量同一信号，8次测量值为分别为：0.992, 0.994, 0.992, 0.994, 0.992，则其平均值为0.994，0.991, 0.995，则测量平均值为0.993，系统误差为0.7%。随机误差由标准方差表示，本案例中标准方差为0.0014142

## 测量值准确度 (Accuracy)与精确度(Precision)

1号具有高准确度且高精确度：测量结果既接近真实值，又具有良好的可重复性，这是最佳状态。

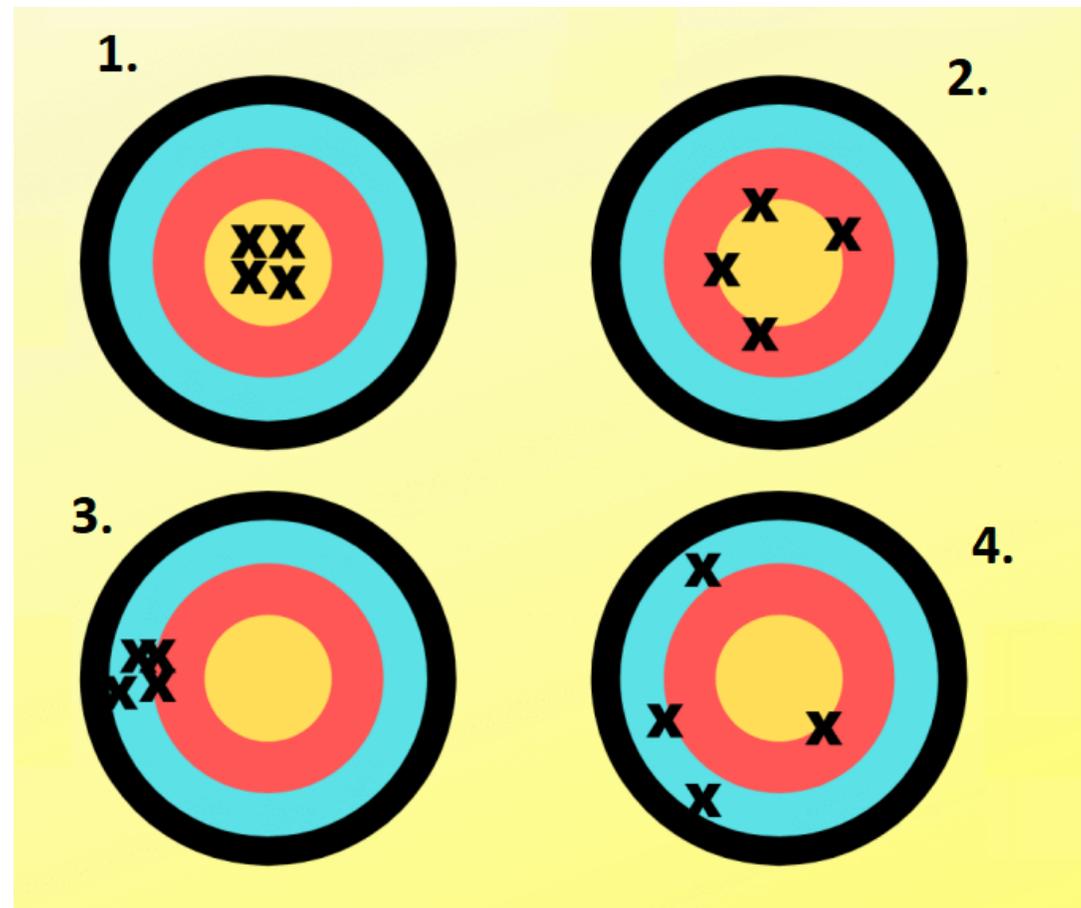
2号具有高准确度但低精确度：都落在靶心附近但位置分散，说明测量结果接近真实值，但重复性差。

3号具有高精确度但低准确度：如多次测量结果都在靶心边缘，重复性好，但与真实值误差较大。

4号是低准确度且低精确度：测量结果误差大，且重复性差。

在用ADC测量过程中，我们常需要同时追求高准确度和高精确度，以确保测量结果的可靠性和稳定性。

总结，准确度描述的是与真实值的接近程度，精确度描述的是多次测量结果的重复性，两者共同决定了测量结果的质量。



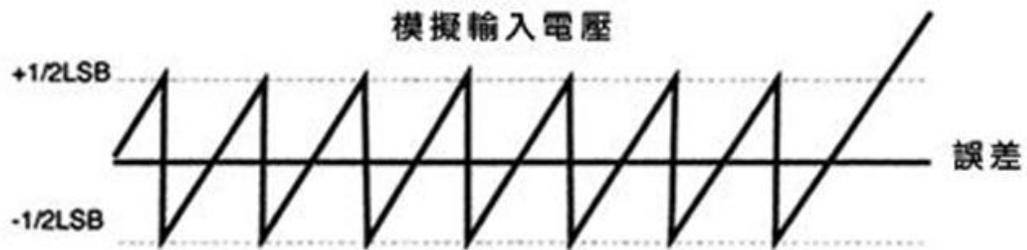
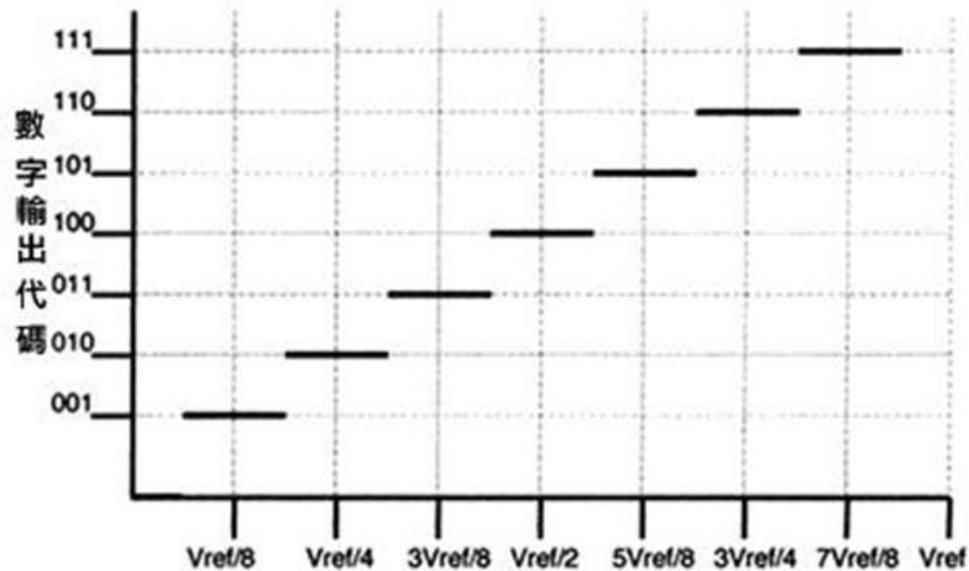
# ADC简介： ADC的主要技术参数 -1

- 1) 分辨率 (Resolution): 指ADC量化后输出的数字信号位数，决定了能够区分的电压级别数量。常见的分辨率有8位、10位、12位、16，20，24位等。分辨率越高，能够表征模拟信号的细节越多，但同时转换时间也会增加。对于n位的ADC，其可以表示的电压阶梯数为  $2^n$ 。
- 2) 采样率 (Sampling Rate): 指每秒钟对模拟信号进行采样的次数，通常以KSPS或MSPS为单位。根据奈奎斯特采样理论，采样率需要至少为信号最高频率的2倍才能精确还原信号，在工程实践中采样率常为信号最高频率的2.5-4倍
- 3) 信号输入范围 (Input Range): ADC能够接受的输入信号电压范围。例如，单极性信号0V到5V或双极性信号 $\pm 5V$ 。信号输入方式又可分为单端输入，或者差分输入。
- 4) 积分非线性 (INL) : ADC在整个输入范围内是否能线性转换输入信号。理想的ADC会在输入和输出之间有线性关系。

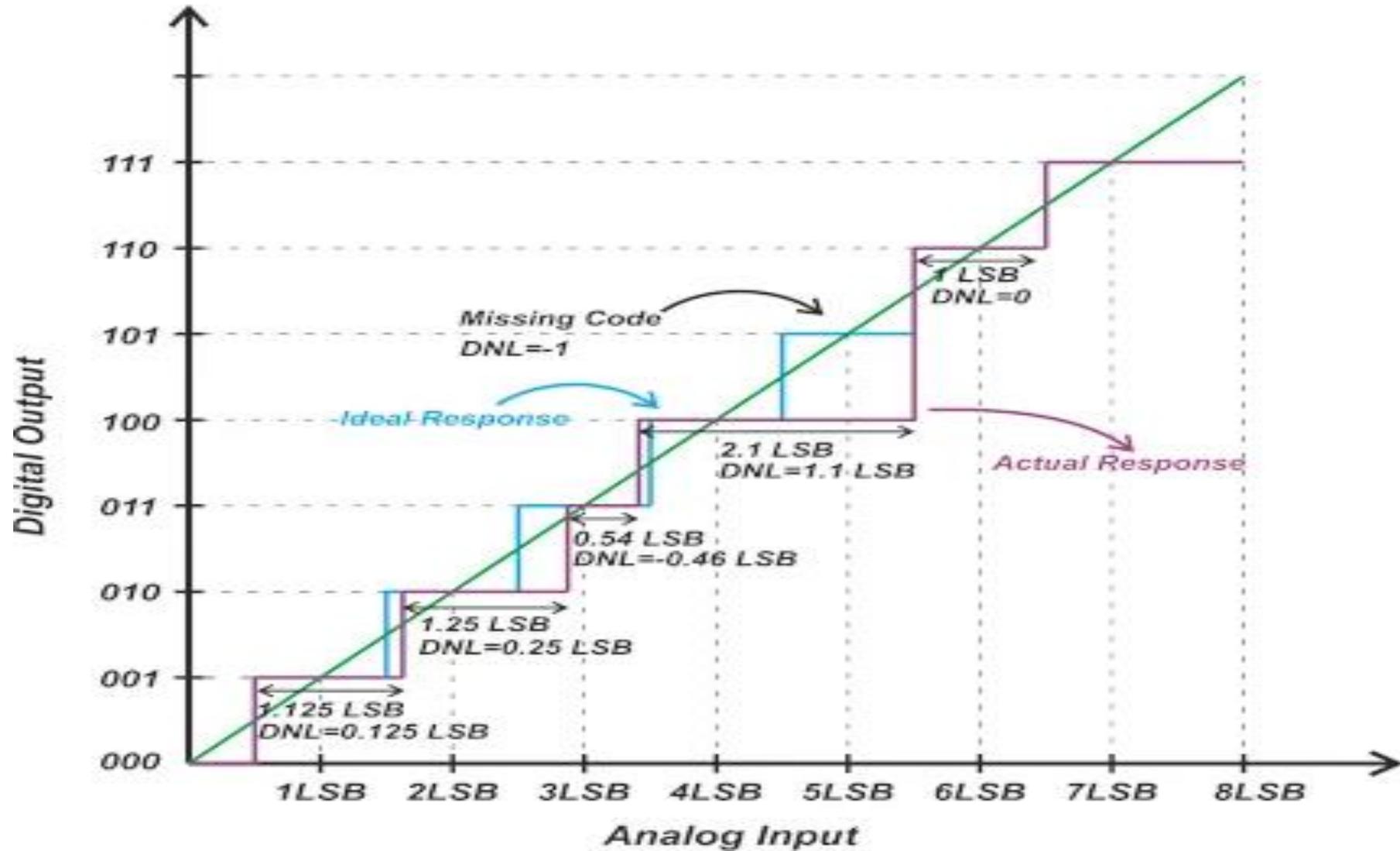
## ADC简介： ADC的主要技术参数 - 2

5. 微分非线性DNL误差， ADC中任意两个相邻码之间所测得变化值与理想的1 LSB变化值之间的差异。
6. Offset（零点偏移）误差， ADC理想转移输出与实际输出之差定义为零点偏移误差
7. Gain Error(增益误差),增益误差是预估传递函数和实际斜率的差别， 增益误差通常在模数转换器最末或最后一个传输代码的转换点计算。
8. 信噪比 (SNR, Signal-to-Noise Ratio): 描述信号中 有用部分与噪声的比例。信噪比越高，意味着有效分辨率越高、输出噪声较少。对一个理想的ADC，只存在量化噪声的条件下，信噪比值计算公式为： $SNR (dB) = (6.02 N + 1.76) dB$ ,
9. 信纳比(SINAD) 在ADC输出端测得的信号对噪声及失真比。这里的信号是基波幅值的均方根值。噪声为所有达到采样频率一半( $F_s/2$ ，直流信号除外)的非基波信号之和。在数字化过程中，这个比值的大小取决于量化级数，量化级数越多，量化噪声就越小。对于一个正弦波输入的理想N-bit ADC转换器，
10. 有效分辨率(ENOB): ADC在考虑其信噪比（SNR）及总谐波失真度（THD）情况下的有效分辨位数，会低于其ADC标称分辨率。

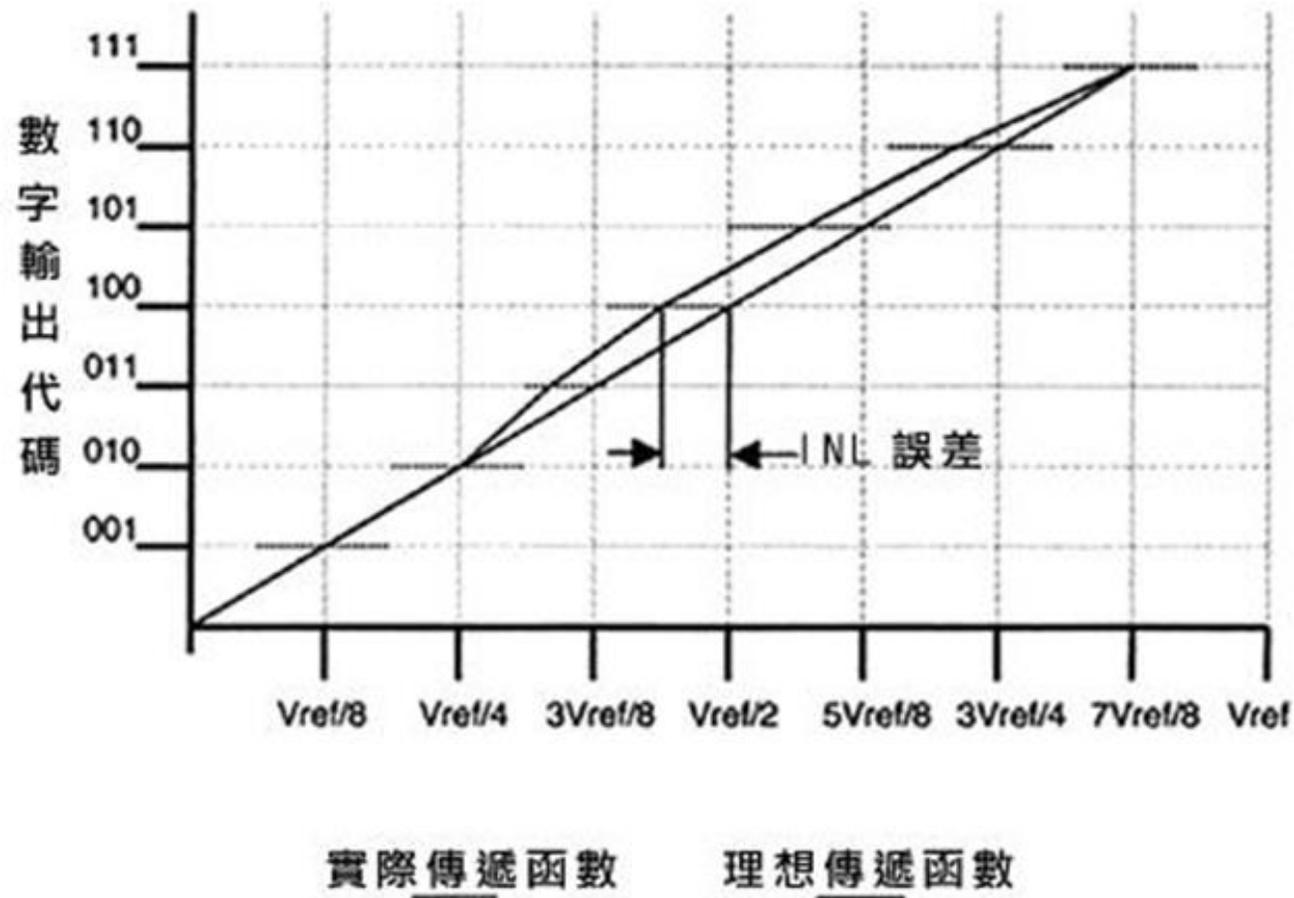
# Quantitation Error(量化误差)



# DNL (差分非线性) 误差

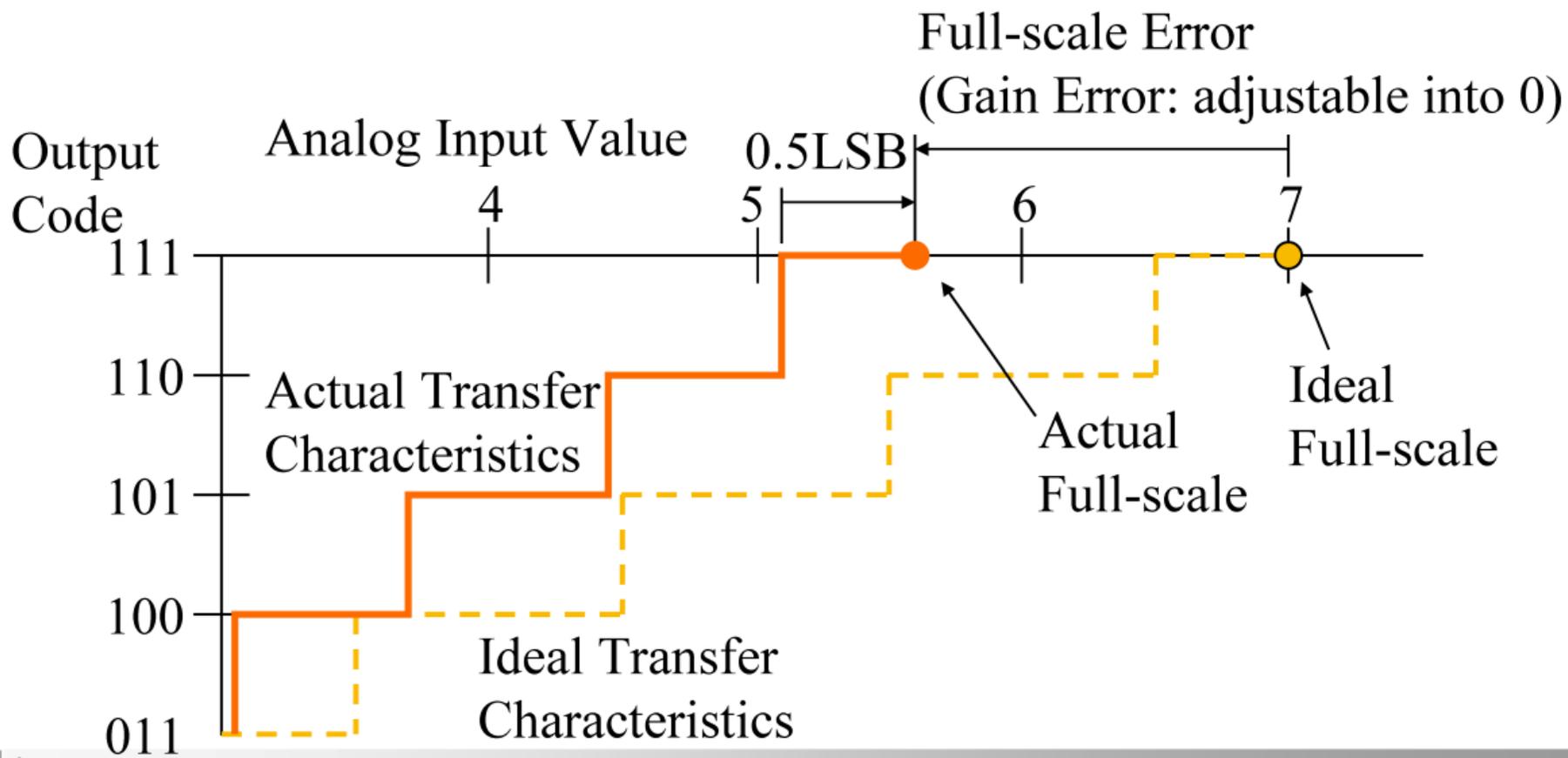


# INL(积分非线性误差)

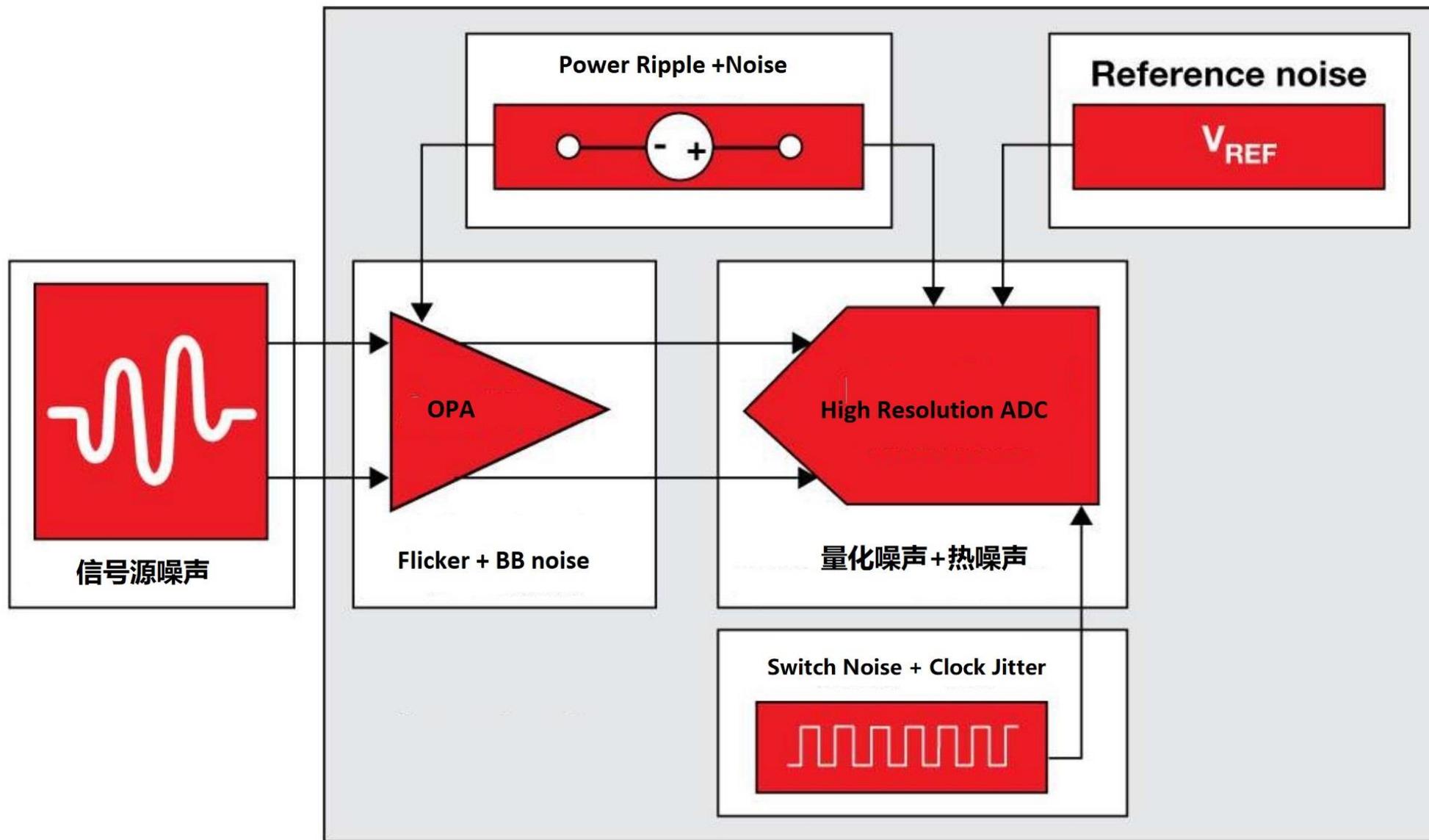


# Offset and Gain Error (零点偏移与增益误差)

## Full-scale Error



# ADC噪声源与干扰



# 16bit ADC及其噪声叠加方法及有效位数

一个案例来演示计算过程，假设一个16 bit 的ADC，  
采样率=1MSPS, FSR=5V,  $V_{fsr\_rms}=0.5*5V*0.707$   
 $=1.767V$

考虑到ADC还有内部噪声叠加，INL=2.0 LSB,其实际  
SNR=91 dB, 比16bit ADC 的理论SNR值98.08dB小约7 dB  
这样求得ADC本身的前端等效噪声为 $50\mu V_{rms}$

OPA 及参考源的噪声有效值分别如下：

$$V_{ADC-noise} = 50\mu V_{rms}$$

$$V_{OPA-noise} = 130\mu V_{rms}$$

$$V_{Ref-noise} = 5\mu V_{rms} \text{ (0.1Hz-10Hz bandwidth)}$$

$$V_{PS-noise} = 10\mu V_{rms} \text{ (10Hz-100kHz bandwidth)}$$

$$V_{S-noise} = \sqrt{V_{ADC-noise}^2 + V_{OPA-noise}^2 + V_{Ref-noise}^2 + V_{PS-noise}^2}$$

$$= \text{Sqr} (50*50+130*130+5*5+10*10)$$

$$= 139 \mu V_{rms}$$

用叠的等效前端噪声 $139 \mu V_{rms}$ 来重新计算,此前端数采电路的SNR及ENOB为：

$$\text{SNR}=20\log(1.767/0.000139)=82.1\text{dB},$$

$$\text{ENOB}=(82.1-1.76)/6.02=13.3\text{bit}$$

# ADC 噪声来源及改善方法

- 1) 量化噪声 -- 选择更高分辨率ADC才能降低
- 2) 热噪声 – 限制放大器输入带宽，选低噪声系数（NF）运放
- 3) 参考电压源噪声 –选择低噪声参考电压源
- 4) 前端放大器噪声 --选低噪声系数（NF）前置放大器
- 5) 放大器谐波失真 –选择低失真放大器。
- 6) 数字开关噪声 – 保持数字电路与ADC的空间隔离
- 7) 时钟抖动 – 选择低相位噪声时钟
- 8) 电源纹波干扰，使用具有高PSRR的LDO 给ADC供电

## MCU内置ADC与独立式ADC

**单片机内置ADC：**ADC电路内置于单片机内部，与MCU的数字电路功能模块集成到同一个晶圆上，因此ADC也采用对MCU相同的制造工艺。通常采用28nm-130nm数字电路制造工艺，适合对制造成本、功耗和集成度有较高要求，但无需高性能及强抗干扰能力的应用场景，如物联网设备、消费内电子、慢速变化的模拟信号采集等。

**外部ADC：**高精度ADC电路拥有独立的晶圆及封装，为了满足高测量准确度及低噪声，多数会采用成熟制造工艺，通常为180nm –350nm，适合对采样精度、采样速率和抗干扰能力要求较高，环境温度恶劣的场合，如工业4-20mA变送器、工业自动化控制系统，医疗设备，通讯基站，电子吊舱，雷达，航电系统。

## MCU内置ADC与外部ADC --分辨率与采样精度

**单片机内置ADC：**绝大多数内置的ADC的分辨率为8位、10位或12位，部分高端单片机提供了16位的内置ADC，但ADC实际采样准确度受到MCU内部电路设计、数字噪声和电源稳定性的影响，会比独立的ADC的实际精度低。我们找到1个内置16位ADC的MCU，数据手册上表面其有效位数（ENOB）只能达到11.3位。常用于对转换精度要求不高的应用场景，如在一些温度传感器、光敏电阻、压力传感器应用当中。

**外部独立ADC：**可以提供更高的分辨率（16位、18位及24位），并且在设计上专门针对高精度信号处理，具有更好的线性度、低噪声特性和高转换精度。即使在12位也对MCU内置ADC具有很大的性能优势（ENOB>11.5b）。独立ADC通常用于高精度传感器、工业控制系统及实时信号处理等领域。

# 独立式ADC制程及其优点

**独立式ADC使用成熟制程带来的优势：**

1. 高测试准确度，
2. 高纳米数制程带来低本底噪声
3. 隔离了数字电路，减低数字开关噪声
4. 低温漂系数，易做温度补偿
5. 高测试覆盖率，关键性能参数有保障

## MCU内置ADC与外部ADC --抗干扰性

**单片机内置ADC：**由于ADC内置在单片机内部，其抗干扰能力通常会受到单片机其他模块的影响，如CPU、PWM、电源模块等。这些模块的切换和操作可能会在ADC工作时引入数字噪声耦合，显著降低ADC的有效位数(ENOB)。

**外部ADC：**由于其设计，制造过程更为专业，通常在芯片内部模拟和数字接口部分做了更好的隔离，抗干扰能力强，本底噪声低，特别是在恶劣外部干扰环境下工作时，独立ADC的性能优势非常明显。

## MCU内置ADC与外部ADC --成本控制

**单片机内置ADC：**ADC集成在单片机内部，降低了系统的硬件采购及生产成本，特别是在低成本预算项目的消费类电子产品。

如果单片机还需要担负多个实时多时，会显著增加其控制软件开发及调试成本。

**外部ADC：**由于需要另行采购独立的ADC及其辅助电子元器件，生产制造成本会高一些，常用在需要高附加值的终端产品中。

对独立ADC的应用程序的编写与调试都会相对容易，会显著降低控制软件开发成本。

# MCU内置ADC与外部ADC--STM32H750VBT6内置ADC

STM32H750VBT6。其内置ADC特征如下：

1. MCU内置 3 个16bit ADC
2. 每路ADC通过MUX切换接入20路模拟信号
3. 支持3种数据采样模式：
  - 单次采样
  - 连续采样
  - 扫描采样
4. 支持软件定时器触发 (TIM1, TIM2, TIM3, TIM4, TIM6, TIM8, TIM15, HRTIM1, LPTIM1)
5. 最高频率: 3.6MHz@16bit
6. 输入电压范围: 0V to Vref (最大值3.6V).
7. 工作温度范围: -40 至85 °C

# STM32H750VBT6, 内置16bit ADC案例分析

Home Tools STM32H750.pdf x 160 / 337 125%

Parameter	Mode	BOOST = 1	BOOST = 0	Value	Unit
Linearity error	Differential	-	-	8	
	Differential	-	-	2	
EL	Single ended	BOOST = 1	-	±6	
		BOOST = 0	-	±4	
	Differential	BOOST = 1	-	±6	
		BOOST = 0	-	±4	
ENOB <sup>(5)</sup>	Single ended	BOOST = 1	-	11.6	bits
		BOOST = 0	-	12	
	Differential	BOOST = 1	-	13.3	
		BOOST = 0	-	13.5	
SINAD <sup>(5)</sup>	Single ended	BOOST = 1	-	71.6	
		BOOST = 0	-	74	
	Differential	BOOST = 1	-	81.83	
		BOOST = 0	-	83	
	Single	BOOST = 1	-	72	

8.26 x 11.69 in <

# MPS 微信公众号

## 超多实用功能等你来解锁！

资料中心 | 在线商城 | 一对一咨询

一键直达所有入口



“MPS 芯源系统”  
微信公众号



资料中心



MPS 小程序

数据手册 | 技术文章视频 | 应用案例

工程师的便携资源库

在线商城



MPS 在线商城

样品直购 | 顺丰速递 | 增值税发票

选型验证快人一步

一对一咨询



MPS NOW 在线技术支持

产品推荐 | 在线调试 | 技术咨询

MPS工程师一对一专业服务