

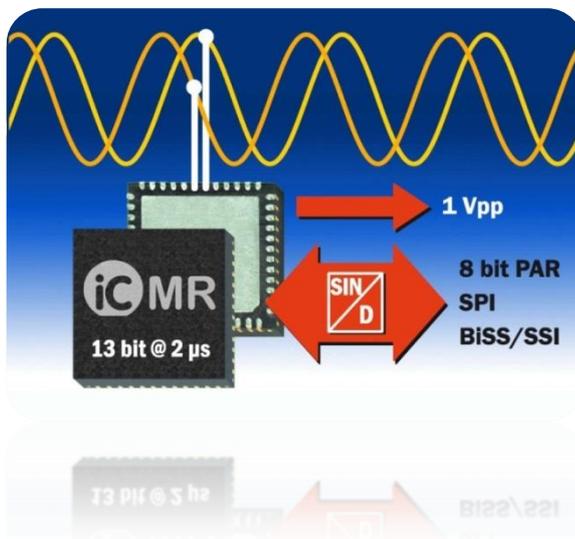
高精度-正弦/余弦插值细分法

现有的驱动控制器需要配备有高分辨率的磁电或光电定位传感器以实现速度控制或者定位的功能。所使用的传感器需要专门配备集成电路，用于传感器信号的调节以及正弦/余弦信号向数字信号的转换。

此份白皮书描述了“细分器”在正弦/余弦信号向数字信号转换(S/D 转换)的方法以及相关技术挑战,其同样也讨论了与传感器相关的测量误差以及对其补偿措施，并展示了最新的芯片解决方案以及如何对其进行选择。

目录:

- 1. 正弦/余弦信号向数字信号的转换方法.....2
 - 1.1 快闪型 (Flash) 转换器 2
 - 1.2 矢量跟踪转换器 3
 - 1.3 采样保持型的 SAR 转换器 4
 - 1.4 持续采样 A/D 转换器 4
 - 1.5 插值细分组件对比 5
- 2. 带有示例的测量误差 6
 - 2.1 信号调节的概念 9
- 3. 总结 13
- 4. 参考文献 13



1. 正弦/余弦信号向数字信号的转换方法

高精度的磁力或者光电传感器[1]可以将角度信息或者长度信息以 90 度角的形式进行编码并转换为正弦或者余弦信号。其中使用细分器进行非线性的 A/D 转换，其用于将正弦/余弦信号转换为转角阶跃（参见图 1），其可以用增量信号也被称为正交信号进行展示，也可以用绝对数值字段进行展示该字段所表达的正弦信号的相位角。

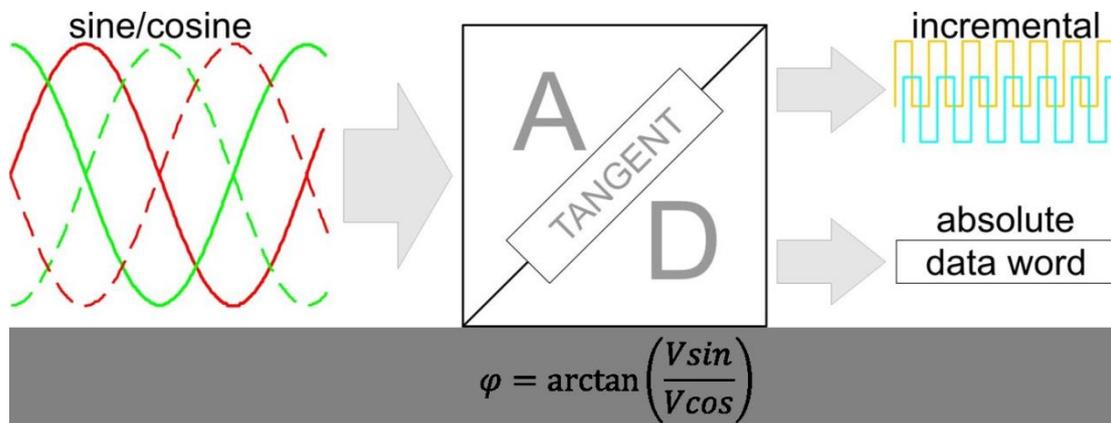


图 1：通过“细分器”的角度转换

非线性转换函数通常使用反正切函数，这样相位角 PHI 可以直接从正弦和余弦电压中获得。

多种 A/D 转换概念可应用于：

- 快闪型转换器，例如 [iC-NV](#)，使用了多个独立的比较器；
- 矢量跟踪转换器，例如 [iC-NQC](#) 以及 [iC-MQE](#)，其仅配备了几个比较器，用于对控制器在向上或者向下的方向上进行初次信号采集，然后对所输入的角度进行跟踪；
- SAR 转换器，例如在 [iC-MR](#) 中提及的，在基本原理上与矢量跟踪转换器相似，但会保持输入信号直至获得相应的计数值；
- 使用线性 A/D 转换器(例如在 [iC-TW8](#) 中使用的)也可以进行角度计算,其中该 A/D 转换器可以分别将正弦和余弦信号进行数字化处理.

完全集成了磁电和光电感应的单芯片编码器，例如 [iC-MU](#) 或者 [iC-LNB](#)，使用矢量跟踪转换器来实时提供位置数据[1, 2]。

1.1 快闪型 (Flash) 转换器

图 2 展示了一种带有多个独立比较器的快闪型转换器，在不同正切函数阈值时进行切换。至少一个比较器用于定义一位角解析度，也意味着对其配备的硬件要求非常高，所以需要使用很大的芯片面积 – 除非放弃精密电路。因此，这种形式适用于较低分辨率同时精度要求也并不是特别高的方案。

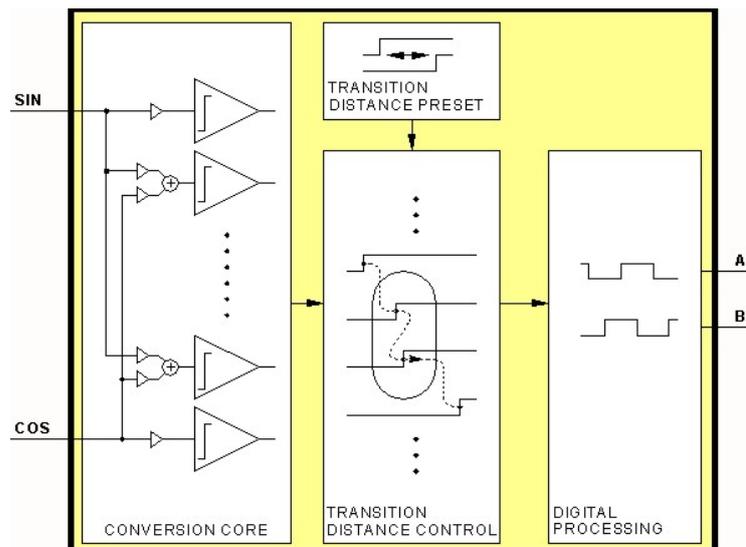


图 2: 快闪型转换器

快闪型转换器有很多优点：其比较器可以并行工作并且几乎同时完成信号转换。由于在建立稳定的过程中会形成转换毛刺，因此使用了边沿距离控制的专利技术用于建立均衡。

当连续边沿到来时，如果其间隔过近会推迟，则会产生一个可计数的输出信号 - 电路起到滤波器的作用，而且未受干扰的输入信号在通过时并不会产生延迟，也就是说该滤波器的作用不会产生任何延迟效果。

快闪型转换不需要进行采样。因此，由于产生的正交信号不会和任何时钟信号同步，所以此信号带有“模拟的”抖动特征 - 这种特性对于速度控制非常适用。典型应用于光电或磁性电机编码器。

1.2 矢量跟踪转换器

矢量跟踪转换技术主要应用于进行更高的解析（参见图 3）。其配备有一个初级比较器，该比较器用于控制计数器向上或向下计数。数字计数器将数值输入一个 D/A 转换器并生成模拟正切信号。该正切信号同余弦信号混合，并生成一个正弦信号 - 然后将正弦信号进行对比。

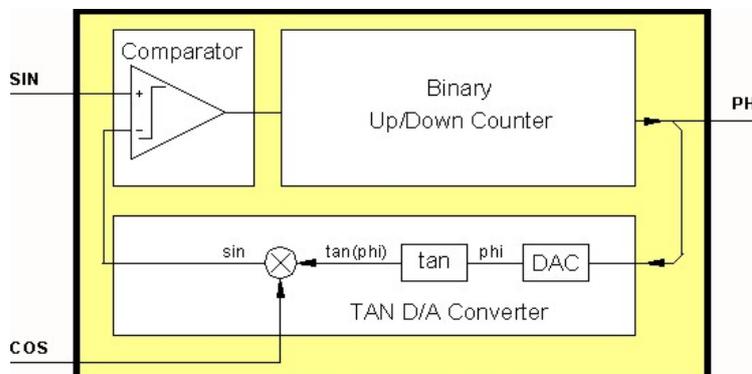


图 3: 矢量跟踪转换

当系统稳定后，计数器包含相位角并且逐步长或者说逐比特位的记录每一个输入信号的变化。这个过程中不会产生阶跃。矢量跟踪转换器的优势是该系统的功能与时钟无关，系统仅在输入发生变化时才会被触发，这样可以缩短系统的延迟时间。

由于该系统仅需要一个比较器，因此其设计可以做到更加精密。潜在的电路中的偏移误差会以同样的方式对所有切换点产生相同影响 – 可同迟滞现象比较 – 因此该系统在精度方面也具备一定优势。跟踪转换器输出递增信号时会产生相应的模拟抖动。当达到可调的最高跟踪速度的限制时，时钟同步影响才会显示出来，例如在输出信号时发生故障。

基于实时以及高解析度的特性，该类型转换器被作为线性位置测量系统的首选。

1.3 采样保持型的 SAR 转换器

对于不需要输出递增信号的绝对测量系统来说，图 4 所展示的采样转换器是一种合适的选择。SAR (逐次逼近) 转换器的工作原理同矢量跟踪转换器原理相似，不同的是逐次逼近寄存器可以更快取得相近的相位角，因为其步长可以更大且工作时不需要逐比特位进行跟踪。

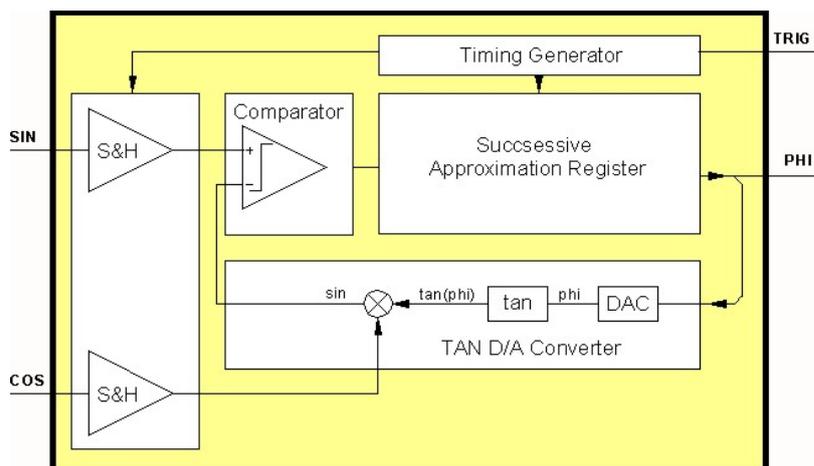


图 4: 采样保持型的 SAR 转换器

当受到外部数据请求触发时，系统通过采样保持电路对输入信号进行冻结。在该系统中，模拟信号的稳定时间主要决定了转换的速率和精度。

此类型的转换器通常应用于电机控制系统以及逆变器对于角度信号有较高解析度要求的系统中，其可以对模拟编码信号或者位置编码信号进行处理。

1.4 持续采样 A/D 转换器

典型的方法：[iC-TW8](#) 使用持续运行线性 A/D 转换器（图 5）然后对相位角进行计算。该系统的优势在于数字信号处理：信号误差既可以通过一次性按动按钮进行初始化校准后消除，也可以持续的通过自动传感器漂移补偿进行校正。

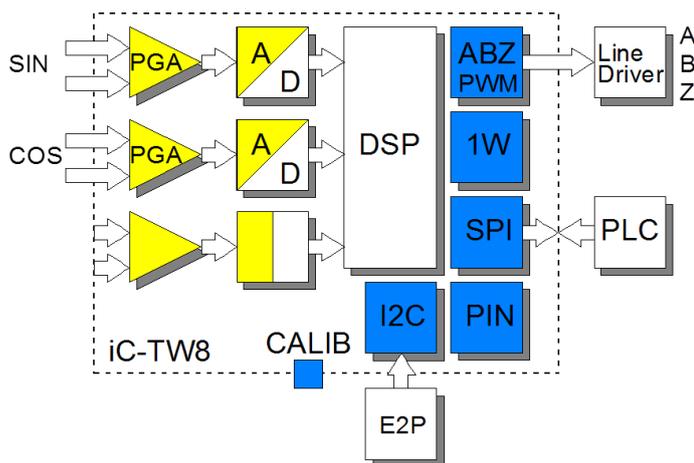


图 5: 采样 A/D 转换器

信号滤波的使用使得解析度超过实际可用 A/D 转换器解析度成为可能。合成产生的增量输出信号的完美占空比为 50% 并且几乎没有抖动。但是，在系统控制时也需要考虑对由于信号处理所导致的几微秒的恒定延迟时间。

该转换器主要应用于高解析度的线性测长仪以及受益于提供自动信号校正的旋转式编码器系统。

1.5 插值细分组件对比

无须赘言，使用什么种类的转换器由其应用范围决定：选择跟踪转换器 [iC-NQC](#) 以及 [iC-MQF](#) 的原因是因为其具有实时的特性，最小延迟时间不超过 250 ns，这通常通过模拟路径运行时间决定。

对于采样转换器 [iC-MR](#) 和 [iC-TW8](#) 来说，测量数值时的稳定时间（参见表 1）至关重要，其决定了可能实现的采样率。iC-MR 可以在 2 微秒内使用 13bit 对角度位置进行解析，而连续运行转换器 iC-TW8 需要 24 微秒并采样 6 个样本用于更新位置数据。另一方面，如果速度是恒定的，iC-TW8 可以通过可调的数字滤波器将现有的延迟期降低到 4 微秒内。和旋转变压器的处理一样普通，然而输出位置信息能在相当短的时间内追赶输入角度。

转换特性				
	iC-NQC	iC-MQF	iC-MR	iC-TW8
原理	矢量跟踪 SDC	矢量跟踪 SDC	采样保持 SAR SDC	$\Delta\Sigma$ ADC + Cordic (坐标旋转数字算法)
采样间隔	14 ns [70 MHz]	50 ns [20 MHz]	2 ns [500 MHz]	4 ns [250MHz]
延迟时间	< 250 μ s	< 250 μ s	2 μ s	24 μ s [4 μ s]
解析度	13 bit	12 bit	13 bit	16 bit
精确度 每周期	10 bit 0.35° el.	11 bit 0.13° el.	12 bit 0.1° el.	12 bit 0.1° el.

表 1: 转换特性

除解析度外，同样需要考虑精度，转换器的精度不仅同 A/D 转换器的处理器质量相关，同时也与信号调节的范围值相关。每个针对信号路径进行修正的 D/A 转换器都需要预留芯片面积，相应的也会导致成本的增加 - 因此对于电路设计者来说需要进行优化设计。表 2 中器件比较显示 iC-MQF 转换器的解析度与 iC-NQC 的解析度相比要更低。不过，由于具有更精密的分隔信号调节，因此其精度更高。

安全导向的编码器系统需要一些附加功能：iC-MR 器件具有特殊的诊断功能，例如：信号和温度监控，内存检查以及错误模拟。对于控制器通讯，一个并行接口以及多个串行接口都可用。通过设置 BiSS C 上的位置数据输出，可以增加安全计数数据及扩展至 16 位 CRC 校验。

操作特性				
	iC-NQC	iC-MQF	iC-MR	iC-TW8
供电	5V	5V	5V	3.3V, 5V
安全导向			●	
连通性				
正弦/余弦	(测试)	(测试)	●1Vpp	-
正交	●	● RS422	-	●
串行	BiSS, SSI		BiSS, SSI, SPI	SPI
并行			8-bit	
EEPROM	I ² C	I ² C multi-m.	I ² C	I ² C
多圈			●	

表 2: 操作特性

2. 带有示例的测量误差

如有必要，需要对图 6 中示例指示的在磁环扫描过程中使用磁阻传感器导致的测量误差进行考虑。

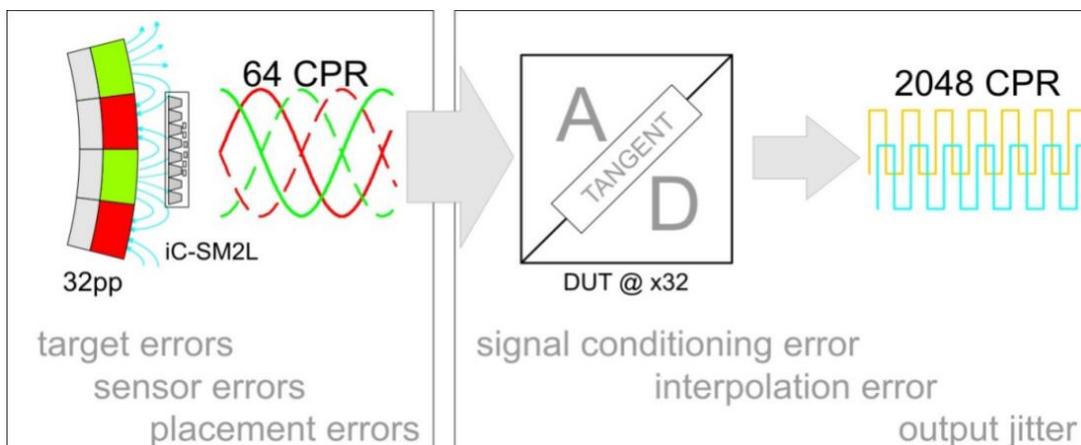


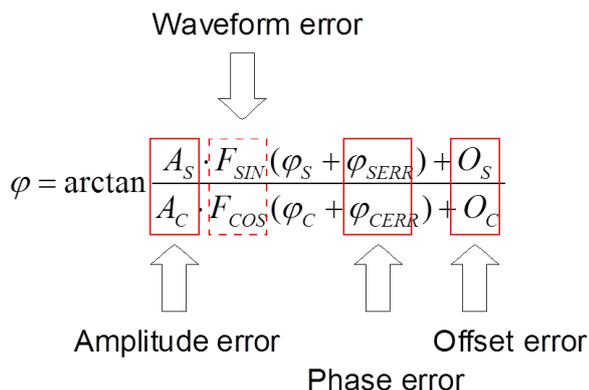
图 6: 带有误差源的应用实例

潜在的误差源可能是：

- 不精确的磁化测量目标
- 磁阻传感器偏移或者幅度导致的信号误差
- 不精确的传感器位置对齐导致的正弦/余弦相位误差
- 错误调节或调节不足导致的信号误差
- 不精确转换导致的测量误差

如果没有相应的抵消措施，会产生错误的插值细分结果，因此增量输出信号明显抖动较强。一方面机械角度变更导致的输出抖动是可以接受的，但是另一方面由于测量系统误差导致的抖动是无法接受的 - 令人遗憾的是，无法对这两者进行区分或者匹配。

因此，对于潜在误差源的精确认识是非常重要的。角度计算公式表明了我们需要对哪些信号误差进行考虑：



公式： 通过反正切函数的角度计算

与其相关的误差源有： 偏移电压，与理想相位差之间的偏差，正弦与余弦幅度之间的偏差，可能的谐波波形扭曲。因此，我们需要知道这些信号误差是否需要“调节”或者该误差可以被忽视。

三个案例估算对调节精度的要求：

- 磁性，同轴，1 CPR: 0.1 度（12 位）精度：
要求信号误差 < 0.2 % (@200Hz)
- 磁性，离轴（32 对磁极），64 CPR: 0.1 度（12 位）精度：
要求信号误差 < 12.8% (@12kHz)
- 光电，离轴，2048 CPR: 20 秒（16 位）精度：
要求信号误差 < 22% (@400kHz)

案例 1: 如果期望机械角度精度为 0.1° (12 位/每转) 同轴霍尔传感器系统, 每转提供一个正弦周期信号, 那么可以推断出每个信号误差必须低于 0.2%。

尽管人工手动调节非常费时且对于现有的测量设备也是一个很大的挑战, 但是仍然可以实现精度调节。调节工具参见: <http://www.ichaus.de/tools>

适合的器件: [iC-NQC](#), [iC-TW8](#), [iC-MR](#)。

案例 2: 使用磁阻传感器采样磁环时, 可降低对插值细分深度和技术上信号精度的要求。尽管如此, 更加精确的调节仍然需要依赖于测量目标磁化的精确程度。

输入频率随着极数的增加而增加 - 由于插值细分倍数的减少, 因此其对于矢量跟踪转换器来说也并不是问题。

适合的器件: [iC-TW2](#), [iC-MQ](#), [iC-NQC](#), [iC-TW8](#)。

案例 3: 关于光电编码器系统, 例如 2048 正弦周期每转, 应该进行更精确的解析, 其对于信号调节的要求似乎并不是特别高。但是, 通常光栅误差一般已达到最大允许测量误差, 这样额外的信号调节误差就无法接受了 (参见表 3)。因此, 由于较高的输入频率, 对于细分电路的要求变得相当高。采样组件例如 [iC-MR](#) 是必需的。

校准的角度精度		
调节	校准 LSB	残余角度误差
正弦偏移	0.2 % 与 Vpp 相关	0.11° el.
余弦偏移	0.2 % 与 Vpp 相关	0.11° el.
正弦/余弦幅度差	0.33 %	0.1° el.
正弦/余弦相位差	0.22°	0.11° el.
谐波扭曲	0.5% @ 第 5 次谐波	0.29° el.

表 3: 与校准相关的角度误差

2.1 信号调节的概念

为获得较好的细分结果,传感器信号需要进行调节[3]。器件 [iC-MQF](#) 及 [iC-MR](#) 应用于模拟前端(AFE, 参见图 7) 用于信号调节, 其通过多个 D/A 转换器进行调节。与之相对, [iC-TW8](#) 使用自身调节数字信号校准。

用于信号调节的模拟前端 (AFE)

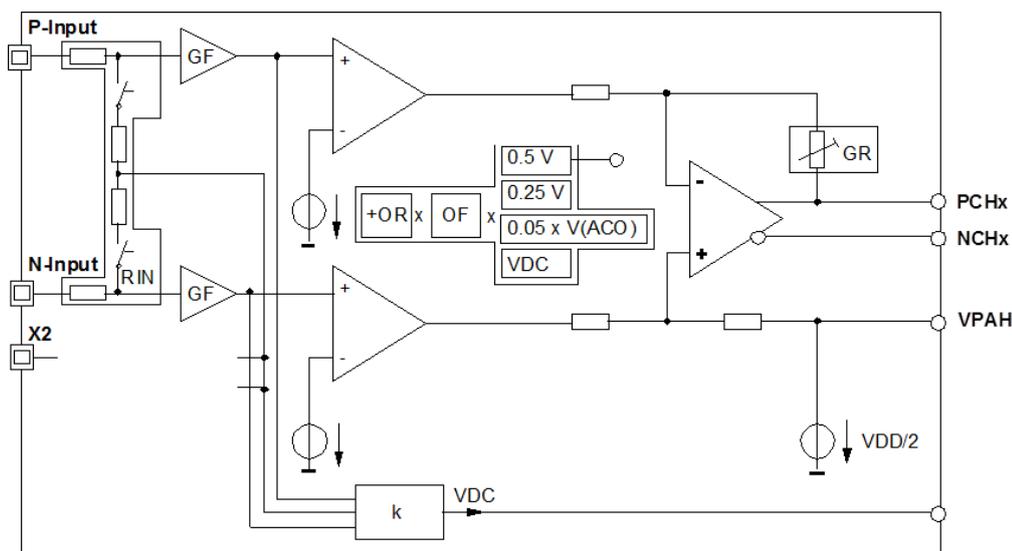


图 7: 用于信号调节的模拟前端

精密仪表放大器提供了一个粗糙的放大信号用于信号适应, 同时通过精细调节器平衡信号差异。进一步通过 D/A 转换器在前端进行偏移校正, 其可以根据信号跟踪校正。前端可以测量信号中的 DC 部分或传感器供电作为参考信号。另外, 电流控制器可以提供一个稳定的条件, 例如通过为磁阻传感器供电或为光学系统中的 LED 供电。此处的优势在于, 如果在室温下进行调节, 校准精度不会随温度的变化而变化。

关键特征:

- 集成的电流/电压转换器以及电压分配器;
- 已校正偏移的仪表放大器
- 独立的可粗调或微调的放大因子
- 通过跟踪偏移参考进行传感器漂移补偿
- 通过调节传感器供电实现信号稳定 (总计值或者李萨如图)

数字信号校正

在模拟路径中，[iC-TW8](#) 仅具有粗放大和粗偏移调节器，以便使输入信号处于 A/D 转换器的最佳工作范围中。（参见图 8）

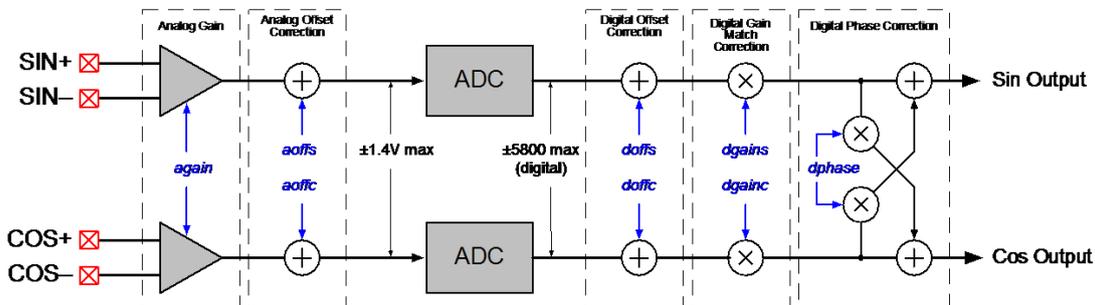


图 8: 带有 A/D 转换器的 PGA 前端以及数字信号校正器

相应的，仅有数字信号进行校正计算。可以通过一个精密的漂移监控器对出厂校准进行评估偏差，用于设置警报。角度位置通过 CORDIC 算法（坐标旋转数字计算法）进行计算。

关键特征：

- 可调的粗放大因子（6 到 45 dB, 3 dB 每步）
- 可调的模拟偏移校正（100 mV 每步）
- 数字偏移以及偏移漂移校正（244 μ V 每步）
- 对幅度差的数字补偿（0.02%每步）
- 数字相位校正（ 0.056° 每步）

概念优势

两个概念都展示的优势：电源接通后，当系统处于停止状态时，模拟信号路径已校正稳定，因为传感器供电在校准时已调到最佳信号状态。在信号路径上没有额外的延迟时间，因此可以很快地获得细分结果。对于初始化出厂校准，可能需要配备自动的测量设备。

数字校正利用现有的运动，要么通过最初定义的最合适的静态适应，要么在应用中对其动态漂移进行长期不断的补偿。校准的测试设备不是必须的，且可以通过自动方式或按动按钮进行现场重新校准。这有利于由客户自行安装的模块化系统。

表 4 显示关于实现的补偿功能的器件对比

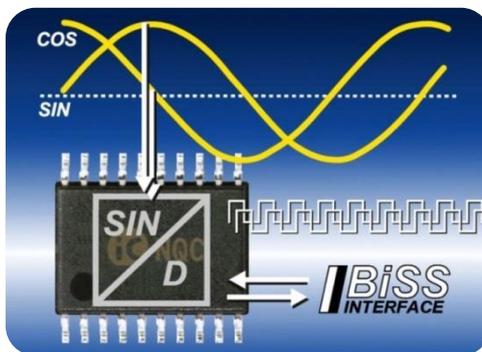
信号调节特性				
	iC-NQC	iC-MQF	iC-MR	iC-TW8
输入	PGA	PGA 零偏移	PGA 零偏移	PGA
输入频率	1 (250) kHz	2 kHz	500 kHz	125 kHz
信号校正 模拟/数字				
幅度差	●/-	●/-	●/-	-/● 自动
偏移	● (Vdd)	● (跟踪)	● (跟踪)	●/●自动
相位	●	●	●	-/●自动
漂移补偿	-	模拟控制输出, 数字 (I ² C)	模拟控制输出	数字
扭曲				LUT
信号校正 精度				
电子角度	0.35°	0.05°	0.05°	0.1°

表 4: 信号调节对比

器件特征概览

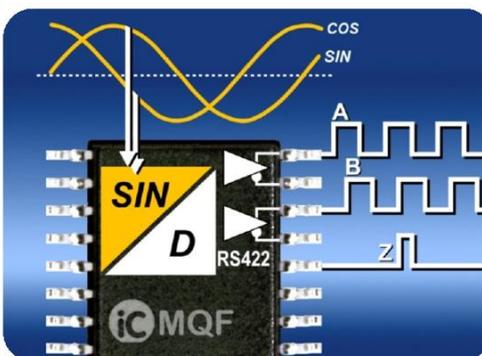
iC-NQC 13 位信号调节插值细分芯片

- ✓ 实时增量输出
- ✓ BiSS 绝对接口具备周期计算
- ✓ BiSS 从机 BP1, SSI



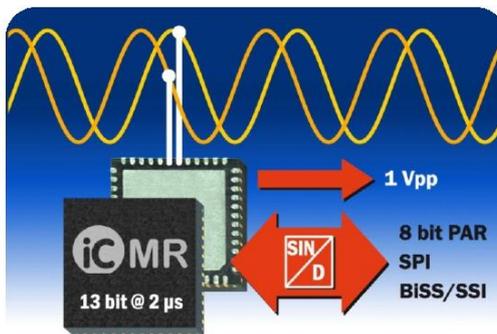
iC-MQF 可编程带 RS422 驱动的 12 位正弦/余弦插值细分芯片

- ✓ 实时十进制增量输出
- ✓ RS422 故障保险
- ✓ 传感器供电控制



iC-MR 带控制器接口的 13 位采样保持正弦/余弦插值细分器

- ✓ BiSS 或嵌入式
- ✓ 单圈和多圈处理
- ✓ 安全监控特性

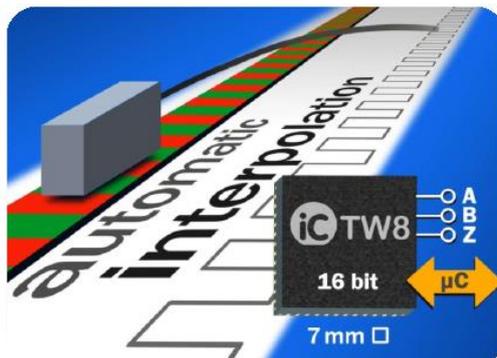


关键特性:

快速采样保持细分: 2 μs,
 精密信号调节,
 源控制输出 (ACO), 1 Vpp 线驱动输出,
 并行 8 位单片机接口,
 串行接口 (BiSS/SSI, SPI),
 I²C, 12 位 A/D 转换器 (温度感应)
 安全特性

iC-TW8 带有自动校准 16 位正弦/余弦插值细分器

- ✓ 自身校准 单次/不断
- ✓ 完美增量信号



关键特性:

250 ksps, 16 位,
 恒定延迟时间 (24 μs),
 延迟恢复到 4 μs (伺服环路),
 二进制/十进制 0.25 倍至 16384 倍,
 后置 AB 分配器[1/1 到 1/32],
 输入频率 125 kHz, A/B/Z 8 MHz,
 最小边沿距离 t_{MTD} 31 ns,
 自动偏移, 放大, 相位,
 按钮校准, 通过 LUT 进行扭曲补偿,
 信号质量监测, 使用引脚设置,
 I²C, SPI, 3.3 V (15 mA), 5 V

3. 总结

使用不同方式对 S/D 转换器进行了展示，专门为插值细分，在选择最优解决方案时应考虑多个重要准则。本章的表格[4]包含最新芯片解决方案，也可以[在线下载](#)。

4. 参考文献

- [1] [Encoder Technologies in Comparison: Magnetic vs. Optical, Elektronik 10/2012](#)
- [2] [18 Bit Absolut Encoder-IC, Elektronik Industrie 03/2012](#)
- [3] [EasyConditioning and Safe Transfer of Sensor Signals, Elektronik Industrie 4/2010](#)
- [4] [Product Selector Interpolator IC](#)

关于 iC-Haus

iC-Haus GmbH是一家行业领先独立的德国制造商，为标准集成电路（ASSP）和定制ASIC半导体提供解决方案的全球代表。30多年来，公司一直致力于在工业，汽车，医疗应用的专用集成电路的设计，生产和销售。

iC-Haus在CMOS技术，双极技术以及BCD技术方面的单元数据库专门用于设计实现传感器，激光/光学以及驱动器ASIC。集成电路组装在标准的塑料封装内，或使用iC-Haus板上芯片技术制造完整的微系统，多芯片模块，和连同传感器的optoBGA / QFN。

更多信息请访问

<http://www.ichauschina.com>

<http://www.ichaus.com>