今日电子 Electronic PRODUCTS
The Engineer's Magazine of Product Technology

专题特写：数据转换 / Features

精准型工业系统要求新的数据转换准确度水平

凌力尔特公司 Atsushi Kawamoto JesperSteensgaard Mark Thoren Heemin Yang

许多工业系统都需要以最高的准确度来测量关键性的参数。实例包括地震监测、能源勘探、气流感测和硅晶圆制造等。在每种场合中，这些系统均拓展了尖端信号处理技术的界限并要求ppm的准确度。此类系统的设计高度精细复杂，并内置了宽动态范围传感器、高阶控制环路和最高性能的集成电路组件。

很多精准型工业系统的核心部分都是一个模数转换器(ADC)。该ADC扮演着至关重要的角色，其负责把模拟信号变换为数字信号以进行数字信号处理。ADC的准确度和性能常常决定了整体系统的准确度和性能。本文将讨论突破性的数据转换性能是怎样实现更高准确度和更低成本的新一代工业系统。

精准型工业系统要求

精准型工业系统需要采用高分辨率ADC以对实际的模拟信号进行数字化处理。模拟信号链路包括ADC和支持信号调理电路（例如，放大器、滤波器和基准），通常需要具备优秀的DC规格指标（例如，偏移、增益和线性度）。

为了实现ppm级的分辨率和准确度，许多精准型工业系统实施了数字校准，旨在清除任何的系统级偏移和增益误差。因此，系统准确度经常受限于那些无法利用偶尔校准而加以抑制的误差，而且系统设计师或许更加关注重要参数的潜在漂移，而不是其静态值。例如，精准型系统有可能不仅需要在某一固定温度下拥有ppm级的准确度，而且还要求在很宽的工作温度范围内实现低于ppm/℃的漂移准确度。

对于整体系统准确度来说，ADC的线性度是最让人关切的。ADC线性度由模拟输入信号与ADC的内部设计及架构之间的复杂相互作用所决定。ADC非线性误差极其难以在系统级上进行校准，因为此类误差在各数字代码之间差别迥异，而且还因为它们可能是温度的一个强函数。整个温度范围内的ADC线性度和稳定性对于精准型系统的总体准确度是极为重要的。

突破性的性能

为了应对这些设计挑战，一个新的20位SAR ADC系列提供了前所未有的性能和准确度水平，从而简化了高精度工业系统的设计。LTC2378-20是一个引脚和软件兼容型SAR ADC系列的旗舰产品，其具有高达20位的无漏失码分辨率和高达104dB的信噪比(SNR)，采样速率范围为250ksps~2Msps。LTC2378-20的DC精度尤其令人印象深刻：ADC积分非线性(INL)

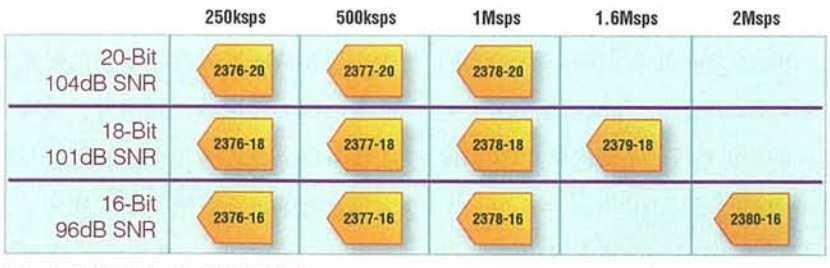

图1 完整的20/18/16位引脚兼容型SAR ADC系列

误差通常小于0.5ppm，并且在整个工作温度范围内(−40～+85℃)保证小于2ppm(对于所有代码)。最大偏移误差为 13ppm(具0.007ppm/℃漂移)，增益误差为10ppm (具0.05ppm/℃漂移)。这种异乎寻常的性能水平是在非常低的操作功耗下实现的，功耗范围从5.3mW(在250ksps)到21mW(在1Msps)。每款器件都可提供小型MSOP−16封装和DFN−16封装。图1汇总了这个新的ADC系列。

SAR ADC的特性

SAR ADC的特征是其在模拟输入信号时获得精准瞬像以及在单个时钟周期之内完成一项模数转换操作的能力。SAR ADC以执行异步“启动并运行”操作见长，而且它们由于能够在同一个时钟周期内立即获得转换结果而具备了简单易用的特点。在没有周期延迟的情况下产生准确转换结果 (即使在经历了漫长的空闲周期之后也是如此) 的能力使得SAR ADC成为众多精准型应用的理想选择，包括传感器、控制环路、数据采集和自动化测试设备。其他类型的ADC(例如，ΔΣADC和流水线型ADC)则需要多个时钟周期来完成单个转换。

电路架构

具ppm级保证线性度和准确度的LTC2378−20对于许多精准型工业系统而言是一个具颠覆性的产品。LTC2378−20采用一种专有架构进行设计，此架构可确保线性度并最大限度地减弱其对于温度和其他工作条件变化的敏感性。因此，在整个工作温度范围内保证了前所未有的2ppm INL规格指标。

SAR ADC算法基于二进制搜索原理。把模拟输入采样至一个电容器，并与一个利用SAR算法选择的基准电压之分数进行顺序比较。SAR ADC包括3个关键性组件：一个基于电容器的数−模转换器(CDAC)、一个快速低噪声比较器电路和一个逐次逼近寄存器。传统 SAR ADC 的 INL 性能有可能受限于CDAC中个别电容器的有限匹配准确度，而且很多高精度SAR ADC均采用模拟或数字修整方法以改善匹配准确度。然而，当温度变化以及施加封装和电路板应力时，CDAC 电容器匹配准确度总是会下降，并有可能限制 ADC 的线性度。

通过运用一种专有架构(该架构使得INL不受CDAC电容器失配的影响)，LTC2378−20实现了其最先进的INL性能，从而使其拥有了针对严酷工业环境中所存在的那一类温度变化和封装应力效应的出色坚固性。此外，还对比较器电路进行了谨慎的设计以平衡速度、功率和噪声指标，最终使LTC2378−20实现了前所未有的104dB信噪比(SNR)以及仅21mW的功耗(在1Msps)，且并未引入任何的周期延迟。SAR ADC系列的LTC2378−20之功耗与采样速率成比例，所以当它们工作在 1ksps时功耗仅为微瓦级。

准确度和速度

LTC2378−20所实现的准确度水平以前只可通过使用速度低得多的ADC架构(例如，ΔΣADC或多斜率ADC)来获得。高通道数自动化测试设备常常采用这种慢速 ADC 架构以完成高精度 DC 测量，并利用多路复用器以使单个仪表能够服务于多个输入。ADC转换时间通常可在很宽的范围内调节，以牺牲速度来提高分辨率。不过，当采样速率高于100ksps时，测量分辨率常常被限制在16位以下。LTC2378−20每秒能获取百万个读数，每个读数具有2.3ppm的噪声分辨率 (噪声的标准偏差，104dB SNR)。可采用数字方式将同一模拟信号多个读数的结果组合起来以改善噪声分辨率，并产生超过多斜率ADC的性能。例如，通过对10个样本块进行平均处理，LTC2378−20实际上工作在1Msps/10=100ksps下，并具有一个0.7ppm 的噪声分辨率(114dB SNR)。

ΔΣADC和多斜率ADC可通过配置而在一个观测/积分周期中对一个模拟输入信号进行平均处理，以抑制噪声和干扰。通常采用一个100ms的观测周期来同时抑制50Hz和60Hz线路频率干扰，从而产生一个仅为10sps的吞吐速率。相应地，当采用一个多斜率ADC时，服务于10个多路复用通道将需要整整一秒钟的时间。图2示出

了单个工作在102.4ksps采样速率下的LTC2378-20 ADC，其配置有一个多路复用电路，以在100ms的观测周期内同时测量所有10个信号(交错式)。在保持与100ms观测周期相对应的线路频率干扰抑制的同时，吞吐速率有所增加，增加倍数为复用通道数(这里是10倍，但还可以更高)，从而大幅度提高了自动化测试设备的生产率。在此实例中，通过对在观测周期中取自每个通道的1024个样本进行平均处理可增加噪声分辨率，并提供22位的噪声分辨率(0.07ppm或70nVrms)。平均运算可利用一个简单的加法器(用可编程逻辑或处理器可轻松实现)来完成。因此，LTC2378-20显著提升了测量速度，同时保持了先前架构的重要优势。

由于单个LTC2378-20器件有可能取代多斜率设计所需的多个分立组件，因而为平衡成本、电路板空间和通道数开辟了一个颇具价值的设计自由度。利用一个或多个LTC2378-20 ADC来替代一个多路复用仪表可缩减系统尺寸、降低功率、减少解决方案成本、并使速度提升至比传统方法高几个数量级。此外，由于该器件能够以高达1Msps速率工作于其本机模式，如充当一个奈奎斯特(Nyquist) ADC，因此单个LTC2378-20 ADC非常适用于那些有可能需要使用不止一种ADC的系统，例如，用一个多斜率ADC进行高准确度低噪声测量，而用一个SAR ADC来提高较低分辨率测量的速度。

简化并减少信号链路元件

使用高分辨率ADC能带来一个有趣的好处：模拟信号链路的简化。较高分辨率的ADC可降低甚至免除增设模拟信号调理功能块的需要。由于模拟部件常常产生非线性、漂移和其他误差源，因此它们的减少甚至免除将使最终的系统设计既更加简单，也更加准确。

宽动态范围传感器通常与可变增益放大器配对使用，以在传感器的整个输入范围内实现足够的测量分辨率。例如，一个光学功率传感器可能具有横跨6个测量数量级(从nW到mW)的可用范围。传统的方法是采用一个对数放大器把高动态范围信号调节至一个较低动态范围 ADC 的输入范围之中。增益在小输入幅度时很高，并随着输入幅度的增加而滚降。这种方法的缺点是模拟对数功能部件会发生漂移，而且带宽随输入而变化。热流量表是另一个传统上需要可变增益的非线性传感器实例。低热流具有较高的灵敏度，因而导致测量指示需要较高的分辨率，而高热流则具有较低的灵敏度和分辨率。LTC2378-20在噪声方面具有超过 5 个数量级的动态范围，而且它提供了6位级的DC准确度(1ppm)，这对于直接对此类信号进行数字处理是足够了。可采用数字信号处理方法来增加噪声动态范围 (通过减小带宽)，或实现一种对数功能 (例如，数字代码的简单右移或左移)，或者补偿传感器的非线性。

采用可编程增益放大器(PGA)和步进衰减器是在具有一个低分辨率ADC的系统中实现宽动态范围的其他方法。自动量程电压表即为一例；该仪表在其最灵敏的量程中启动，并在输入超过低量程限值时立即切换至一个较高的量程(通常大10倍)。不过，在切换量程时将出现中断。理想的情况是：一个输入量程的100%应精确地等于下一个较大量程的10%，但实际上始终存在着一定的误差。同样，LTC2378-20出色的线性和动态范围特

(下转第36页)

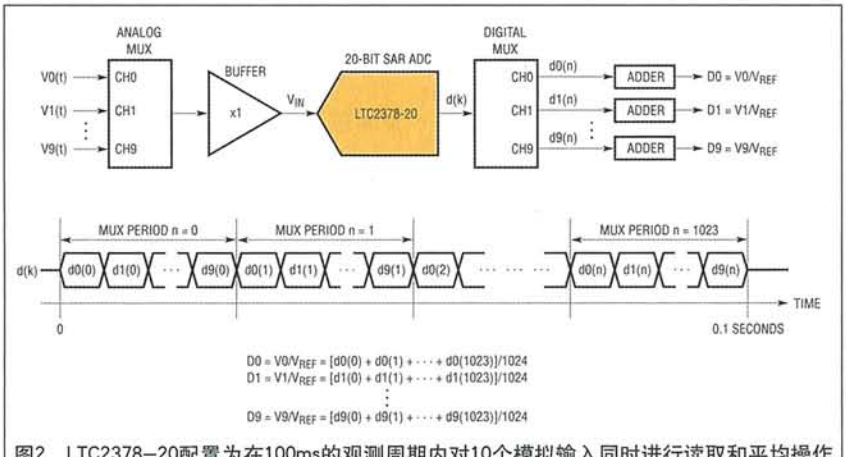

图2 LTC2378-20配置为在100ms的观测周期内对10个模拟输入同时进行读取和平均操作

（上接第32页）

性允许将多个量程组合起来，从而消除了因切换量程而引起的中断现象。

控制系统

对于在混合模式控制系统中使用的ADC来说，延迟是一项重要的参数，因为过多的延迟有可能导致不稳定性。虽然市面上有线性度达ppm级的ΔΣADC销售，但它们只能在具有低调节带宽的非常低速之控制系统中使用。LTC2378-20的无周期延迟特性与其卓越的线性度相结合，可造就速度快得多且高度准确的成本效益型混合模式控制系统实现方案。控制系统的调节带宽与其噪声带宽有关，而且它只是影响控制系统整体噪声之ADC噪声的带内部分。

LTC2378-20可提供104dB SNR，在1Msps的采样速率下，这意味着其22.5μVrms的输入参考噪声对应一个仅31.5nV/$\sqrt{Hz}$的噪声功率频谱密度(PSD)。相应地，当应用于一个具10kHz调节带宽的1Msps控制系统时，带内噪声仅为3.2μV，对应于一个121dB的动态范围。在该例中，3.2μV的噪声分辨率与由非线性引起的不确定性(仅为±0.5ppm×10V=±5μV)大致相同。控制系统实际上在1Msps/(2×10kHz)=50个样本上进行噪声平均运算，以实现ppm级的噪声和线性性能。不管平均运算是采用一个数字滤波器(控制器)来完成、抑或是采用某个用于限制带宽的模拟系统组件来完成，都不会对性能造成影响。图3示出了一个混合模式控制系统，其中的带宽部分地受限于飞轮的惯性。EPC

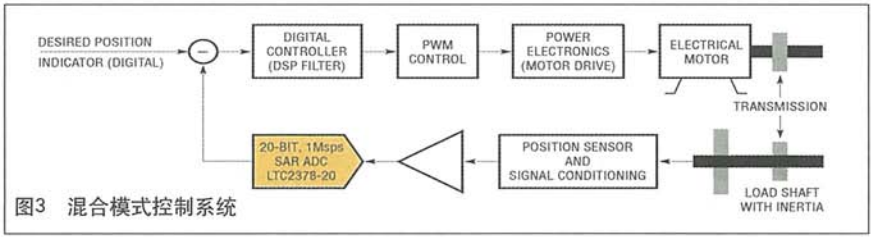

图3 混合模式控制系统