

DAC IC：多少位才够用？

作者：Robert Adams

设计用于数字音频回放电路的DAC有多种架构可供选择，每种架构都在性能上有所折衷。

构成每种数字音频回放系统的核心元件，也是高保真音频最重要的元件：数模转换器(DAC)。此类转换器承担的是一项精密的任务：将编码于磁盘及磁带上的16位二进制字转换成对应的模拟信号，使其放大，最终达到可供人耳聆听的水平。

Magnavox的首款CD播放器(约1983年)采用了双14位转换器，到1989年，许多型号已开始采用20位转换器。然而，时至今日，频频亮相于许多CD播放器及其他数字重放设备表面的“位流”和“MASH”字样，指的是一种1位转换器架构，这种大放异彩的架构正引发一场数字音频工业革命。

那么这样的转换器到底需要多少位呢？既然CD采用16位PCM编码格式，为什么又出现了18位和20位的转换器呢？

本文将考察设计用于数字音频回放电路的优化型DAC，比较各种现有架构并讨论各自在设计和性能上的折衷情况。

基本理论概念

尽管并非只有专家才能理解音频数模转换，但要了解本主题，首先得弄清两个基本概念：采样和量化。

采样指利用模拟信号波形(每一时刻都有一个值)，按固定间隔对其进行采样。这样，我们只能了解波形在采样时刻的值。奈奎斯特定理认为，只要原始模拟信号所含频率不高于采样频率的一半，则可基于采样值完全重建信号。

Adams现供职于马萨诸塞州威尔明顿市的ADI半导体事业部

多数数字音频应用有两种常见的采样频率：44.1kHz(消费级标准)和48kHz(专业级标准)。两种频率都略高于最高目标频率(20kHz)的两倍。

假设有一个“完美的”采样器，完全不存在现实世界的理想状况，则我们可以说，信号可以完全复原，不会增加任何噪声或失真。我们假定，这个完美采样器的输出或者是一种无噪声模拟电压(比如，保留于电容之中)，或者是一个精度无限的数字字。为了存储采样值以便以后回放，我们必须用有限的位数来表示采样值。这就是量化。

用有限数字字长表示采样值，这本身就为采样值增添了一种不确定性，使得采样值无法在回放时完全复原。可将量化想象成多对一映射(从连续序列输入值得到单个输出值)。对于消费级数字音频设备，采样值以一种16位格式存储，其理论动态范围为98.1dB。(人们常常把它误解为6dB/位 \times 16位=96dB，实际上会比这个更复杂。)

量化引起的误差极大地取决于量化的信号。频谱复杂的高振幅信号(如流行音乐)一般会导致类似于白噪声的量化误差。除非在量化前将扰动噪声(信号中未纠正的随机噪声)添加到信号中，否则，略大于一个量化级的极软信号可能会产生严重的失真。利用扰动噪声从输入信号中解除量化误差，其重要性已引起了广泛关注，目前，多数制造商在其设计中开始应用这种方法。

一种典型的DAC电路

多年以来，人们对D/A电路进行了多种修正，从而提升了性能、降低了成本。例如，早期的CD播放器一般采用单个并行输入DAC，左、右通道相交替。其中使用的是两个输出采样保持电路——左右通道各一个——以减少在切换采样时产生的信号相关“毛刺”，同时将输出采样划分成独立的左、右通道信号。采样保持放大器的失真以及通道间的时间延迟使其大受音响发烧友的诟病。现代设计中通常各通道采用一个DAC，并在DAC本身中采用特殊设计工艺，结果极大地减少了毛刺，从而不再需要去毛刺电路。

图1所示为一种典型的D/A电路，现代CD播放器中即可找到。最重要的IC当然是D/A芯片本身。这种情况下，采用的是一款18位DAC，即我们的AD1860。与多数现代DAC类似，该器件采用一种串行接口，减少了引脚数。该串行接口由三个信号构成：串行数据输入、位时钟输入和字时钟输入。串行位流在内部转换成并行字，驱动各电流导引开关。采用内部锁存的优势之一在于，可以精细控制各位切换的时间，从而减少老式设计中存在的信号相关毛刺问题。

另一关键功能元件是数字过采样滤波器芯片，基于44.1kHz(或48kHz)的输入数据产生采样率更高的输出信号(两倍、四倍、八倍甚至十六倍于输入采样率)。接下来，我们将讨论DAC滤波器背后的理论问题，并探讨为什么模拟“砖墙式”滤波器几乎已完全让位于数字插值滤波器。

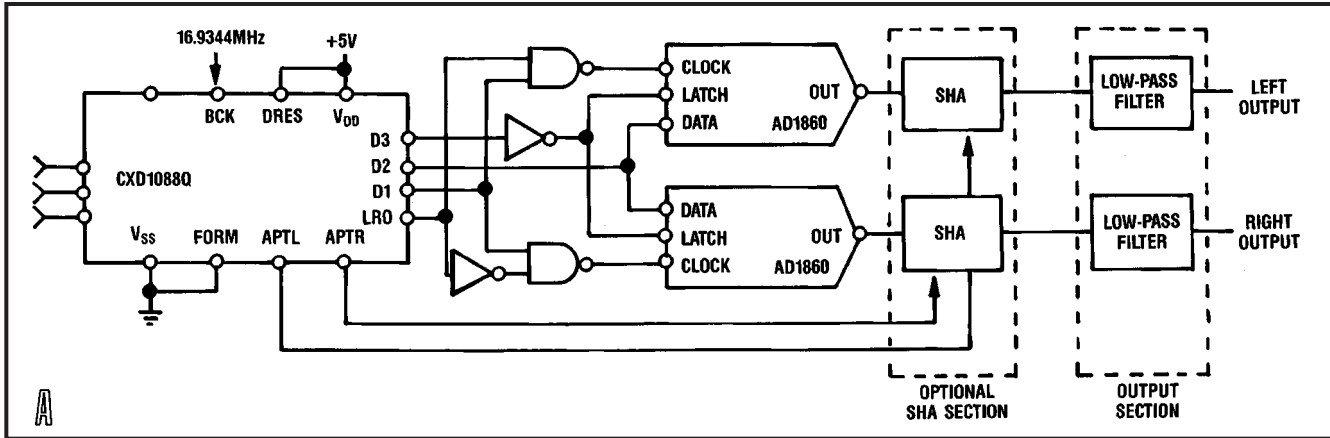
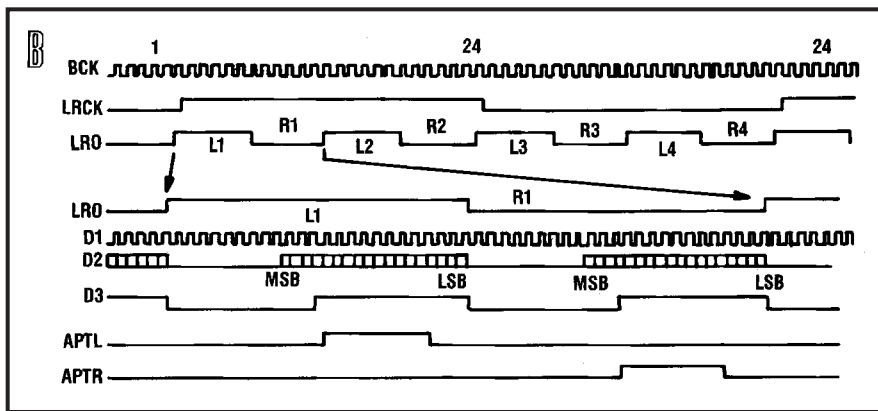


图1. 典型D/A电路采用一个18位DAC, 通过串行接口减少引脚数。

D/A重构滤波器：数字更好？

就回放而言，采样理论预测道，采样频率倍数周围会存在原始信号的“镜像”。例如，对于1kHz的信号，如果原始采样频率为44.1kHz，则会存在43.1kHz、45.1kHz、87.2kHz、89.2kHz等频率分量，如图2所示。

如果希望完美重构原始连续波形，我们必须首先滤掉或以其他方式消除这些无用的类似或镜像分量，然后将其馈入音频系统其余部分。然而，严格说来，这种过滤并无必要。所有无用分量均处于超声域，消除它们的唯一



原因是，为了确保在出现大的超高频信号时，典型功率放大器或前置放大器中的模拟电路不会非线性化。图3展示了消除这类无用镜像信号的方法。第一种方法在DAC之后采

用了一个“砖墙式”模拟滤波器，其在各种音频下响应平坦，当频率超过20kHz时会急剧截止。第二种方法以数字滤波为主，在DAC输出端采用了一个简单的模拟滤波器。

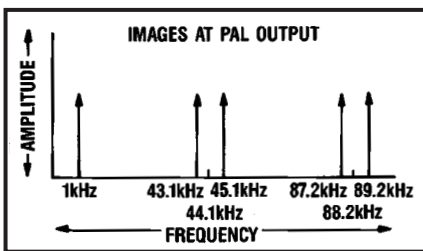


图2. 采样理论预测，采样频率倍数周围会存在原始信号的“镜像”。要完美重构原始连续波形，必须消除这些无用的类似或镜像分量。

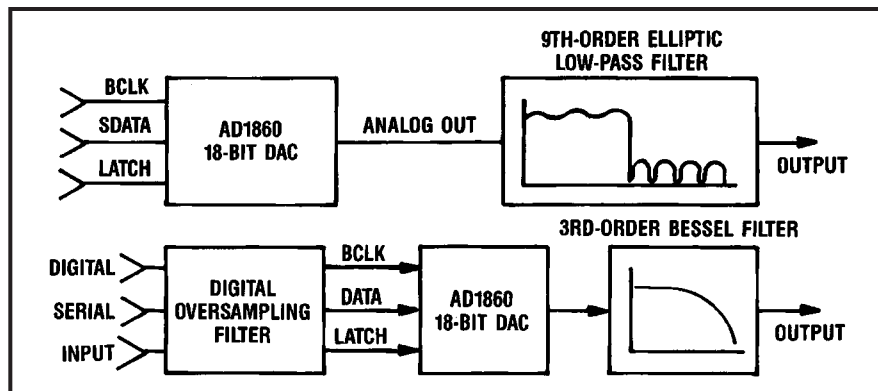


图3. 消除无用镜像信号有两种方法：在DAC之后采用一个“砖墙式”模拟滤波器，其在各种音频下响应平坦，当频率超过20kHz时会急剧截止；或者主要采用数字滤波模式，并在DAC输出端采用一个简单的模拟滤波器。

模拟重构滤波器：快速消失

在数字音频早期，重构滤波器通常为一种复杂的模拟有源(或无源)滤波器。这种滤波器在音频段的频率响应必须极其平坦，并在频率超过20kHz时急剧下降，最终衰减至少80dB。

这类滤波器后来被人称为“砖墙式”滤波器，必须配合极高容限元件，才可达音频标准的要求。此类滤波器还会在接近音频段边缘处产生较大相移。这种相移是否产生人耳可闻的音频干扰是个充满争议的话题，数字音频的早期批评者经常把数字唱片中所谓的“沙沙”声归罪于这种滤波器引起的高相移，而实际上，他们听见的很可能是ADC或DAC中较差低电平线性度产生的效应(详见后文)。

任何情况下，高成本、高功耗和大相移，这几种因素共同促进了数字过采样滤波器的发展，这种滤波器几乎已取代了多数应用中的“砖墙式”模拟滤波器。

如何解决.....

数字过采样滤波器减轻了模拟滤波器的负担，在信号进入DAC之前，即已在数字域中滤掉大部分无用信息(镜像)。虽然仍需要使用模拟输出滤波器，但相移小的简单三阶设计即可胜任。

图4展示了过采样滤波器在时域和频域中的工作方式。我们从44.1kHz(图4a)的采样信号开始，该信号的镜像存在于频域之中(图4b)。下一步是提高数字信号的采样率，在现有采样点之间插入零值采样(图4c)，结果得到图4d所示频谱。

本操作似乎微不足道，因为我们实际上并未改变信号的频谱。但事实上，这是个非常重要的概念步骤；图4a中的信号以44.1kHz采样，其镜像存在于44.1kHz的倍数周围，但图4c中的信号以四倍于44.1kHz的频率进行采样，其镜像存在于44.1kHz的四倍周围。

尽管频谱看似相同，但我们现在把44.1kHz的镜像看作实际信号本身，只不过其区域在44.1kHz倍数处重复而已。

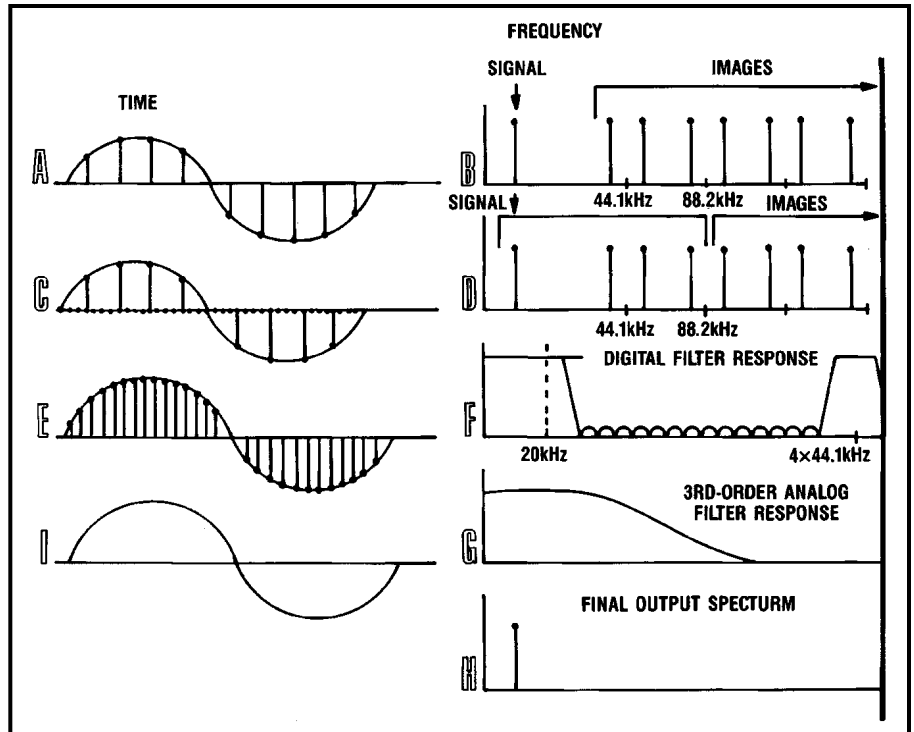


图4. 对于数字过采样，我们从44.1kHz(图4a)的采样信号开始，该信号的镜像存在于频域之中(图4b)。在现有采样点之间插入零值采样(图4c)以提高数字信号的采样率，结果得到图4d所示频谱。再将经零值填充的信号馈入数字低通滤波器。4x插值器的滤波器响应如图4f所示，平滑处理后的时域信号如图4e所示。最后采用一个简单的模拟滤波器，消除高频镜像，如图4g和4h所示，结果得到图4i所示重构波形。

这个概念步骤是十分必要的，因为我们制造的任何数字滤波器在输入采样率倍数处都有自己的镜像响应。由于我们希望自己的滤波器响应能够衰减超过44.1kHz的频率，因此其工作采样率必须大于44.1kHz。

第三步是将经零值填充的信号馈入数字低通滤波器。4x插值器的滤波器响应如图4f所示，平滑处理后的时域信号如图4e所示。请注意，该滤波器响应在4倍过采样率周围有一个镜像。结果，在该频率附近，一个基带信号的镜像会出现在DAC输出端，必须通过外部模拟滤波器消除。但数字滤波器已解决了大部分难题，最后可采用一个简单的模拟滤波器，消除该高频镜像，如图4g和4h所示，结果得到图4i所示重构波形。

采用有限脉冲响应(FIR)数字滤波器的优势之一是，可将相位响应转换成线性。(请参阅分别于1989年10月和1990年9月刊载的“数字过采样性能面面观”

及“Saori信号处理器”两篇文章，其中详细讨论了FIR滤波器。)这就解决了音频段中存在过多相移的问题，但我们必须记住，从任何一点来看，就像老式模拟滤波器一样，数字滤波器同样是“砖墙式”滤波器。它并不能解决那些可听见20kHz以上频率音频的人提出的问题。

采用数字滤波器还存在一个更具体的优势：我们将需要高精度元件及大量的复杂模拟电路，代之以一种成本不高且性能相对稳定的单芯片集成电路。成本经济性，再加上更加出众的性能，这正是促使所有制造商在其设计中采用数字过采样滤波器的原因。

目前，采用18位甚至20位DAC的数字音频设备已屡见不鲜。DAC所用位数通常醒目地展示在前面板上，设备价格越高，位数越大。技术行家往往会提出以下问题：既然原始信号只有16位，为何还需要18位或20位的转换器？

这个问题有多种答案，有些属于技术层面，有些更是市场使然。(如果低端CD播放器与高端产品在音质上并无差异，那么制造商如何体现二者之间的差别?)技术答案是：数字过采样滤波器产生的数字输出远远超越了16位。这并不是说，数字滤波器魔法般地消除了信号中的噪声，或者大幅提高了唱片的动态范围。仅仅意味着，滤波器计算的插入值一般不与16位整数重合。它们通常位于16位值之间，因而需要更长的数字字来表示插入值。如此，我们就面临着如何处理该长数字字(通常超过30位)的问题。

如果我们简单地放弃低位，而将上部16位馈入16位DAC，实际上相当于对信号进行再量化，结果会为信号增加一些原始数字信号中不存在的量化噪声。如果假设，原始唱片采用理论16位动态范围为98.1dB的完美16位ADC制作，则我们为信号增加了幅度相同的另一噪声源。

由于这种再量化产生于插值速率而非原始的44.1kHz，因此，其噪声会扩散到更宽的频率范围，较少以音频出现。对于8:1的插值比，总噪声约比理

论16位性能高1.5dB，结果产生96.6dB的本底噪声。其前提假设是，不对信号中的截断噪声进行纠正，对低电平信号而言，这可能是比较乐观的假设。略微悲观的降噪值可能为3dB，结果使信噪比达95.1dB。

然而，如果我们保留数字滤波器上部18位的输出信号并馈入18位DAC，则增加的噪声源比ADC产生的原始16位理论噪声低12dB。如果我们同时添加这两种噪声源，结果仅比理论16位本底噪声高出一分贝的一小部分，几乎不会导致信号质量下降。这是数字音频回放系统经常采用18位和20位转换器的主要技术原因。

但需要记住的是，如果转换器中的量化噪声不是信号中的主要噪声源，则这种1.5dB(或3dB最差情况)的小噪声优势将丧失殆尽。在多数消费级应用中，原始唱片及回放环境中的噪声远远超过量化噪声，而且人耳是否能分辨出这种改善也是个极具争议的问题。

使用高分辨率转换器的另一原因在于，高分辨率转换器的失真性能(线性度)一般优于低分辨率产品。例如，16位

DAC(如我们的AD1856)的典型满量程失真为0.002%；20位器件(如AD1862J)的失真值不到0.0012%。而高分辨率转换器的另一优势在于，其热噪声性能(数字代码不变时的噪声)一般优于同类16位产品的噪声性能。

专业音频市场的要求与消费级市场完全不同。录制现场、未压缩素材时，必然需要极高分辨率的ADC和DAC。通过低噪电容麦克风近距离录制打击乐器时，其动态范围完全可能超过120dB!

为了满足此类需要，专业录音行业正加快步伐，走向18位甚至20位转换器。目前，少有产品具有这种性能，而且多数此类产品都是昂贵的混合产品。但在不久的将来，价格不高的单芯片集成电路即可提供这种性能，其采用的是一种完全不同的设计模式，称为“ Σ - Δ 转换”。

在第II部分，我们将讨论关于数模转换的各种设计模式，以及产品文献中的规格。