

充分利用高分辨率数模转换器

作者: Scott Wayne

深入探讨数模转换器的规格、要求、误差源、测试方法及其如何影响电路设计

高分辨率数模转换器适合许多不同的应用，这些应用大致可以分为两类：仪器仪表和波形重建。仪器仪表应用包括光栅扫描、过程控制、自动测试设备、机器人及其它应用。波形重构应用包括数字音频、声纳、电信及专用波形生成。每类应用对数模转换器均有各种不同的规格和要求。例如，仪器仪表应用通常要求具有良好线性度和高稳定性等；而波形重建应用则要求低总谐波失真(THD)和高信噪比(S/N)。

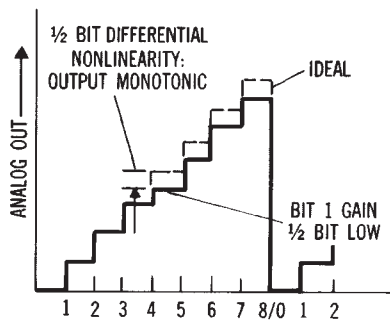
仪器仪表用数模转换器(DAC)

仪器仪表用高分辨率DAC在整个温度范围内，必须具有低微分非线性(DNL)误差和低积分非线性(INL)误差。此外，它还必须具有低失调和增益漂移、高电源抑制比(PSRR)以及低噪

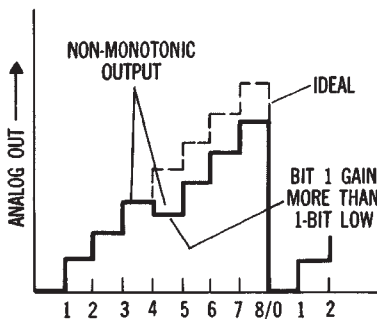
声。本文将阐明仪器仪表对一些重要特性的要求，以及用于测量和改善这些特性的技术，以期对高分辨率DAC的应用有所助益。

DAC的数字输入改变一位，模拟输出也会发生一定量的改变。理想情况下，一位的数字输入变化应在输入至输出传递函数全程内产生恒定的1 LSB(最低有效位)输出变化。微分非线性是对实际模拟输出变化与1 LSB理论变化二者之间的偏差的量度，它通常是仪器仪表用转换器的最重要特性。规格测定条件为室温，单位为LSB，或者表示为满量程(FSR)的百分比。微分非线性是时间和温度的函数，其漂移以ppm/1000小时或ppm/°C为单位给出。

单调性是对微分非线性的另一个量度。如果转换器是单调的，则模拟输出保持不变，或者随着数字输入的增加而增加。非单调表示微分线性误差大于1 LSB。计算转换器单调温度范围的方法是，先从1 LSB中减去DAC的初始微分非线性，然后将结果除以DNL漂移温度系数。由此将得到以室温为中心、转换器保持单调的最小温度偏差范围。例如，假设有一个16位器件，其初始线性误差为 $\frac{1}{2}$ LSB (30 ppm)，线性漂移为1 ppm/°C，则单调温度范围是25°C至 ± 30 °C或-5°C至+55°C。单调性对于过程控制应用非常重要，因为非单调转换器将导致控制环路无休止地振荡。直接比较一个数字输入所产生的模拟输出与下一个数字输入所产生的模拟输出，便可测量微分非线性。微分非线性和非单调性误差的影响如图1所示。



(a) 微分非线性



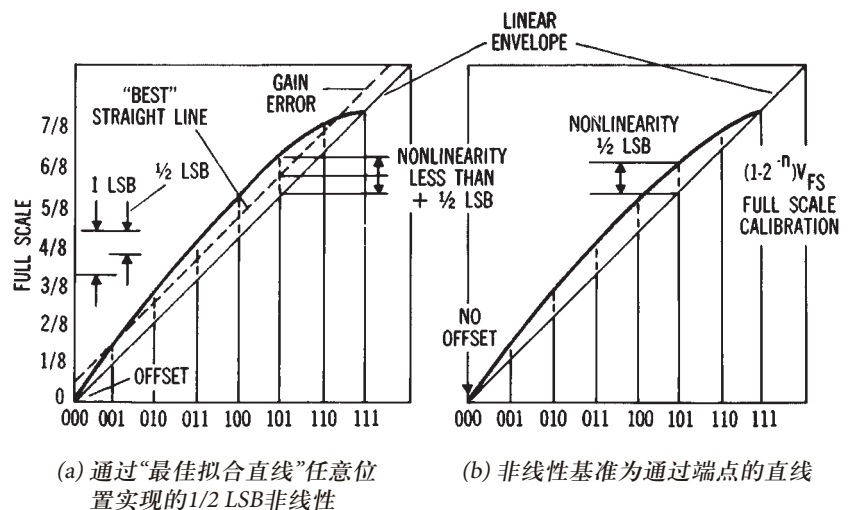
(b) 非单调性

图1. 微分非线性和单调性误差

测量积分非线性

积分非线性(INL)也称为非线性或相对精度，是指转换器实际输出与转换器输入至输出传递函数的端点之间所画直线的偏差(参见图2)。INL的测量涉及到找出两个大数之间的差异，因此非常困难。为了精确测量16位转换器的积分非线性，需要使用精度优于0.0002%的 $6\frac{1}{2}$ 数字电压表。因此，积分非线性的测量多数是将被测转换器与已知精度的参考转换器进行比较，然后用零表读出误差。可以使用精密18位转换器来测试最高16位精度的转换器。而为了正确测试18位转换器，必须使用在国家标准局备案的精密分压器。

只要任何数字位组合所导致的模拟输出不等于其中各数字输入位单独所导致的模拟输出的算术和，就会出现求和误差或叠加误差。DAC中的许多求和误差源主要与其内部结构有关。例如，在典型的R-2R梯形电阻配置中，如果两路输出的电位不同，就会出现求和误差。这在图3所示的2位转换器中很容易看到。此外，如果开关电阻在开位置与在关位置不同，则也会出现求和误差。

(a) 通过“最佳拟合直线”任意位置实现的 $1/2$ LSB非线性

(b) 非线性基准为通过端点的直线

图2. 3位DAC的线性度标准对比 (通过端点的直线更易于测量，所得出的结果也更为保守)

求和误差的另一个原因是电压输出转换器中的反馈电阻。当模拟输出从0 V提高到满量程时，反馈电阻的功耗也会增加，导致电阻发热。这将引起电阻值的改变，并相应地通过传递函数改变增益。对于各位之和与各位单独计算这两种情况，增益是明显不同的，因而出现求和误差。在混合和单芯片转换器中，反馈电阻的功耗受其较小的尺寸限制，增益变化尤其棘手。

测量微分非线性的最简单方法是将并行加载递减计数器与受测器件相连(参见图4)。首先将计数器的输入预设为初始目标数字输入值。当时钟变为低电平时，数字输入异步载入计数器，并提供给转换器。在时钟脉冲的上升沿，计数器减一，并将比预设输入小一位的数字输入值提供给转换器。理想情况下，将一个连续时钟信号施加于计数器时，对于任何数字输入，所得模拟输出均将是一个幅度为1 LSB的方波。此幅度与1 LSB的偏差即为所观察的数字输入端的微分非线性。如果需要，可以为模拟输出添加放大器。

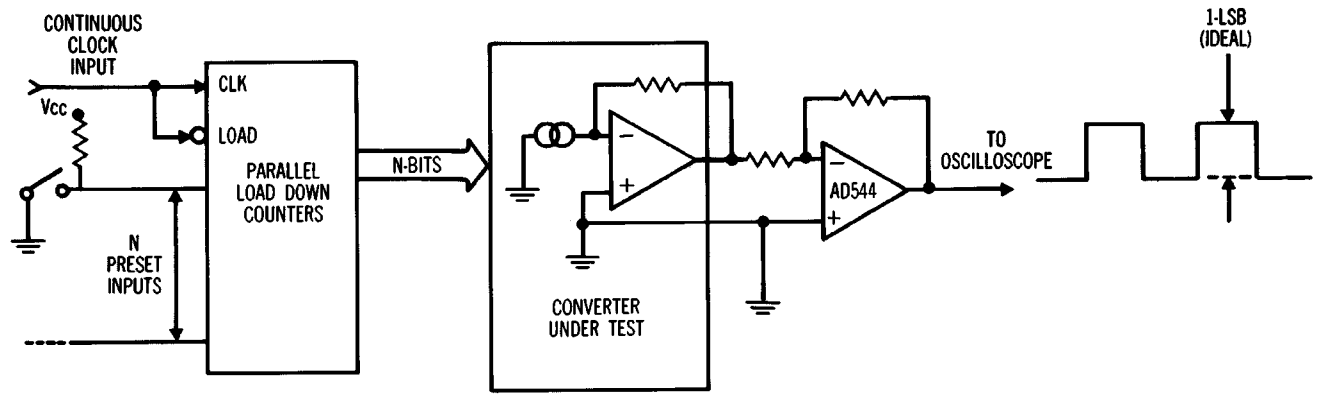
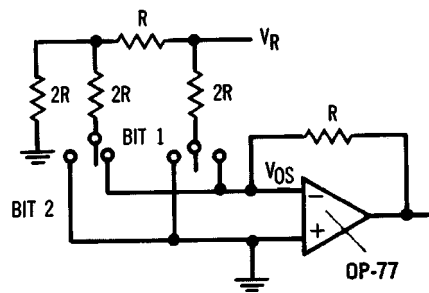


图4. 简易DNL测试仪

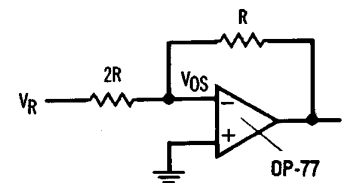
18位转换器有 2^N 或262,144种可能的数字输入组合。用拨动开关设置如此多的输入组合将非常繁琐。即使使用每次测试只需10 ms的自动化测试仪，完成整个序列也将需要近一个小时。幸运的是，在无求和误差的情况下，获得高分辨率器件的特性并不需要测试所有输入组合，只需测试N次即可。如果求和误差在合理范围内并且很小，总计 $2N$ 次测试可能就足够了。执行这些测试通常是在主要进位时、测试位ON与所有低于测试位ON的有效位之间的跃迁时以及测试位OFF。测量积分非线性的一种简单方法是将转换器与并行加载从右至左移位寄存器相连(参见图5)。寄存器预设为00 ... 01。只要MSB为0，就从右边移入0。当高位到达MSB时，从左边移入1。当寄存器达到11...11时，重新预设寄存器并继续执行这一流程。一个精度比被测转换器至少高两位的参考转换器与同一寄存器相连。两个转换器的模拟输出相减，并且经仪表放大器放大。放大器输出的理想值为0 V。该输出与0 V的偏差即为被测转换器的积分非线性。为了改善测试效果，也可以添加零和增益伺服。

测量编程

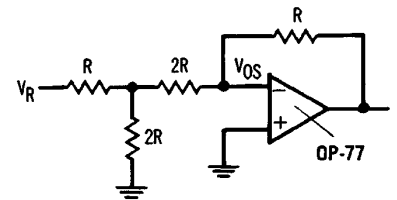
一种用于同时测量积分非线性和微分非线性的实用方法是将所需数字输入编程至PROM中(参见图6)。PROM循环变化时，受测转换器会经历从单一输入位ON到所有低于ON的有效位的跃迁，而参考转换器的输入只会是单一位ON。每次较低有效位变为ON，就会向被测转换器的输出增加1LSB的电流。对两个模拟输出求差、放大，然后显示结果。理想情况下，放大器的输出为0 V。各输入导致的输出电压的偏差即为积分非线性。相邻数字输入导致的输出电压差即为微分非线性。



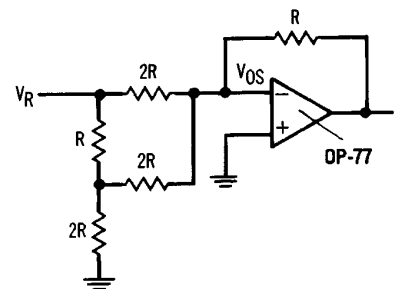
(a) 2位电压输出R-2R梯形电阻DAC



(b) 第1位为ON, $VO = -VR/2 + 3/2VOS$



(c) 第2位为ON, $VO = -VR/4 + 11/8VOS$



(d) 第1位和第2位均为ON, $VO = -3/4VR + 15/8VOS \neq \Sigma 1+2$

图3. 2位DAC中的求和误差

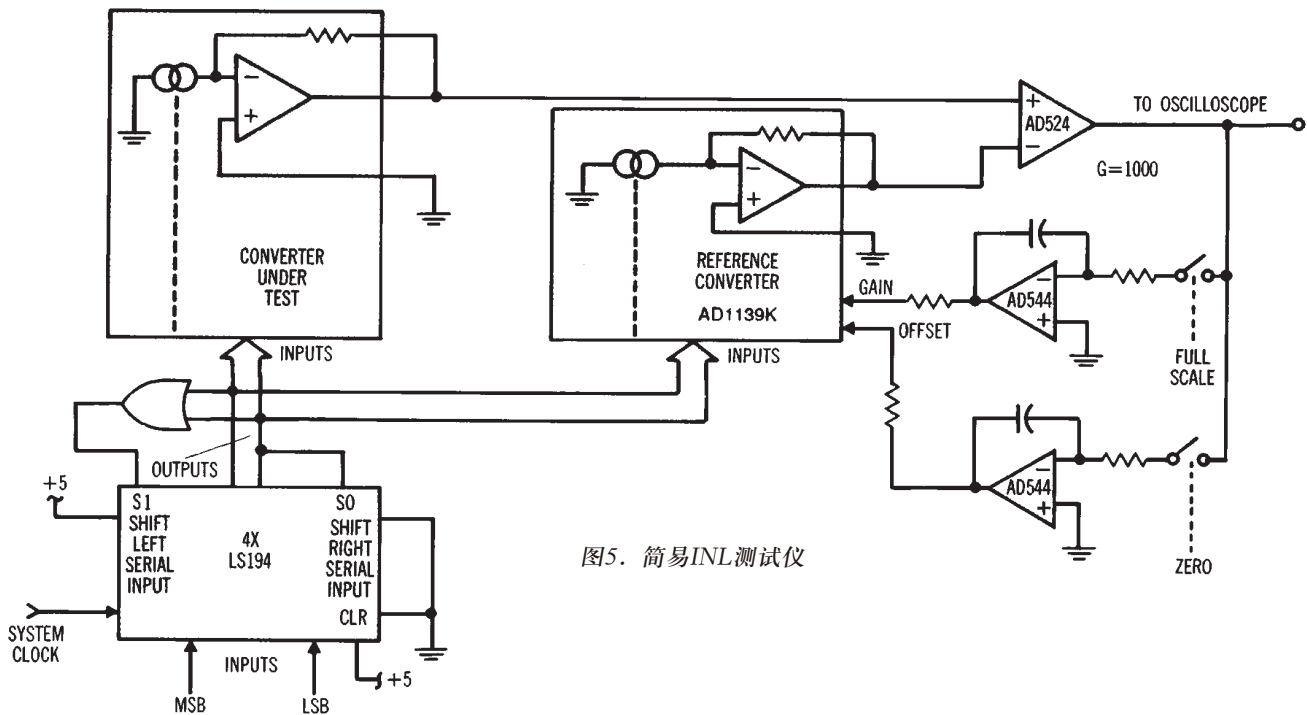


图5. 简易INL测试仪

用微处理器代替PROM，并用可与总线接口的电压表代替示波器，便可使本测试自动化。针对每个数字输入，测量并记录放大器的输出电压。此电压代表积分非线性。然后使电压表归零，并切换数字输入。再次测量并记录输出电压，以确定微分非线性。再次切换数字输入，并重复该过程，直到完成测试为止。

为改善DAC的线性度，首先必须测量各数字输入导致的误差电压。然后通过一个满量程值只有待校正器件的数个LSB的较低分辨率转换器，增加相应的校正信号。校正转换器的输入存储在一个PROM中，它通过公用输入存储在一个PROM中，它通过公用输入总线的LSB寻址。虽然这种方法在理论上可行，但将一个18位分辨率转换器从16位校正到18位精度将需要256K x 8比特的PROM存储器，其成本比转换器本身还高。

对于无求和误差的转换器，最差情况积分非线性误差小于或等于最差情况微分非线性误差的一半。因此，如果转换器的求和误差和微分非线性误差

得以校正，积分线性误差也将得以校正。这意味着，校正相对较少的输入就可以获得同样的最终结果，而无需校正每一个可能的输入。

抑制求和误差

许多高分辨率转换器含有数个独立的4位、8位或12位中间级。内部结构可以保证这些中间级不会有交互作用。因此，它们不可能产生求和误差。可以将较低有效级中的求和误差抑制到相对于满量程可以忽略不计的程度。关于任何给定转换器的求和误差大小和位置的信息，必须通过实验确定。18位时大于1/4 LSB的唯一求和误差发生在四个最高有效位。要校正所有求和误差，只需一个16 x 8 PROM。为确保中间级误差得到校正，可以将该PROM增大到32 x 8，但这仍然比完全校正方案小许多数量级。剩下的任务只是校正13个较低有效位的微分线性误差。最终结果等效于一个18位精度数模转换器。

图7显示一个半自动化校正方案。待校正的各数字输入所导致的模拟输出与小一位的数字输入所导致的输出相比较。在较小输入期间，向输出增加一LSB的电流。递增校正转换器的输入，直到获得正确的模拟输出为止。然后，将此输入值存储在RAM中。较低有效位的校正方法与此相似，只需用调整电位计代替校正转换器。

仪器仪表应用

数模转换器在仪器仪表中有着广泛而多样的应用。许多应用将DAC用作可编程电压源。如果转换器提供电流输出，则可以将其用作可编程电流源。必须特别注意兼容电压，即在保持额定线性度的同时，可以出现在电流输出端的最大电压。电流输出器件的一个更有用特性，是可以根据应用量身定制输出放大器。例如，精密应用可以使用低漂移放大器，而功率放大器则用来提供可编程电源所用的较大输出驱动(参见图8)。可编程电源可以用来控制回旋加速器中电磁铁所产生的磁场，用作基准电压源，或者用于测试ATE系统中的模数转换器。

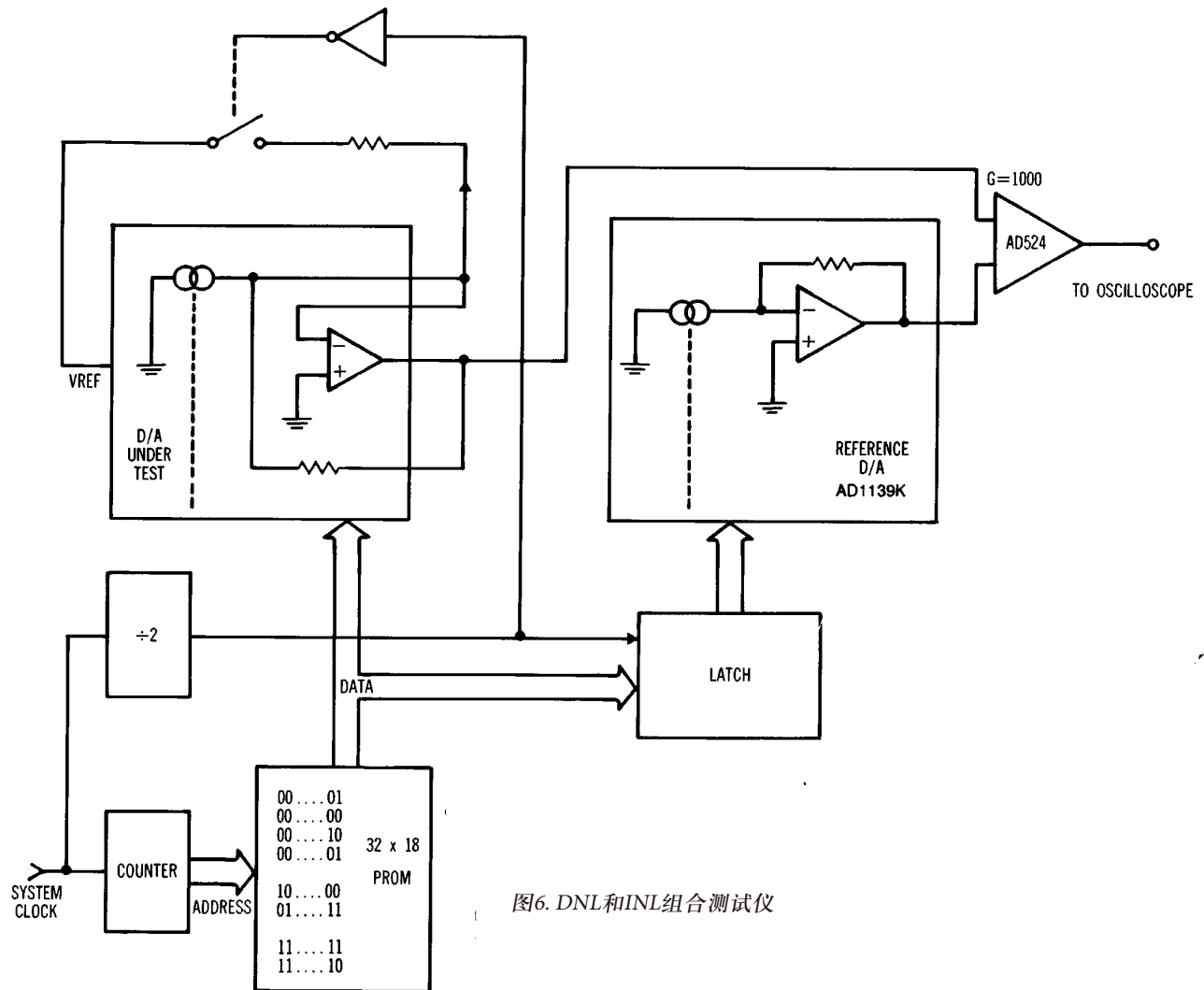


图6. DNL和INL组合测试仪

自稳零或增益校准电路经常使用高分辨率DAC作为数字控制电位计。图5的积分线性度测试设置中显示了简单的模拟失调和增益伺服。在精密应用中，这些伺服存在一些问题。开关泄漏电流和放大器偏置电流会引起电容电压下降，导致相应的失调和增益偏移。开关断开时发生的电荷注入会导致放大器输出发生步进，从而产生类似的失调和增益误差。由于电路中存在时间延迟(主要源于积分器的RC时间常数)，放大器输出会不断缓升和缓降，这也会产生增益和失调偏移。用DAC和比较器代替放大器和开关，可以解决上述所有问题(参见图9)。递增失调转换器，直到受测转换器归零为

止；同时递增增益转换器，直到将受测转换器调整至满量程为止。锁存数字输入，校正电压保持不变且无抖动，直到下一个自稳零或自动增益周期开始。也可以使用这一技术来构建零下降采样保持电路或精密模数转换器。

许多波束导引应用(参见图10)，如电子束光刻、光栅扫描显示器和矢量生成显示器等，也使用高分辨率DAC。虽然高分辨率显示器可能只有4096线，只需要12位转换器，但其性能将让人无法接受，因为转换器的微分非线性会导致显示器上出现亮度不一的条纹。16位转换器将产生间距误差小于5%的4096线，这种一致性将能确保画

面不失真。

数模转换器加速装配作业

制造与自动化装配领域已经越来越多地使用高分辨率转换器来定位机械臂或支持精密加工(参见图11)。数控车床或铣床可以生产长达3英尺而公差仅0.0005英寸的构件。要控制切削深度和切口的水平位置，至少需要使用分辨率为16位的转换器。在微处理器控制之下，水平定位转换器将递增以定位加工对象，而深度控制转换器将进行调整，以便精确并重复设置切削深度。

乘法DAC的基准电压源是可变的。

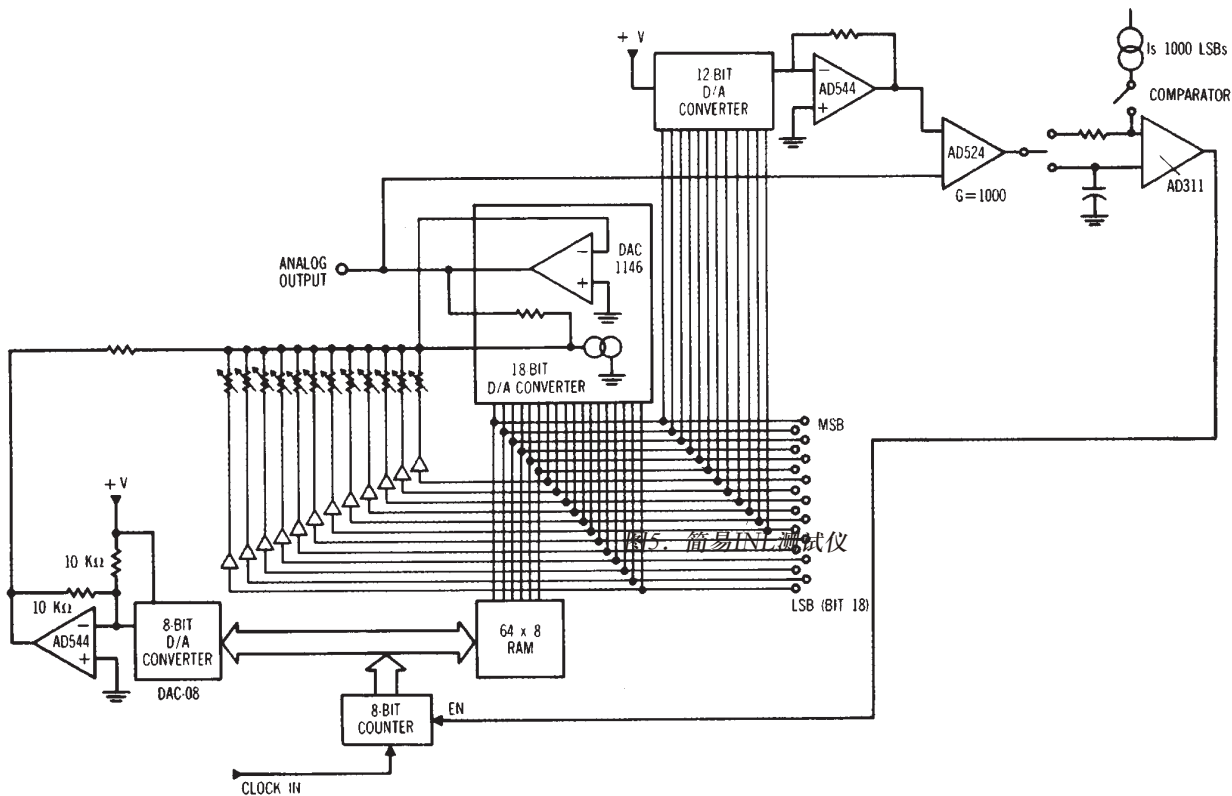


图7. 改善DAC的线性度

模拟输出为基准电压输入与数字输入的乘积。根据基准电压源和数字输入的容许极性不同，这种转换器可以实现一象限、二象限或四象限乘法。高分辨率乘法DAC的一个有趣应用是用作电阻式温度检测器(RTD)仿真器的数字编程电阻(参见图12)。为在 -220°C 至 $+850^{\circ}\text{C}$ 范围内实现 0.1°C 的分辨率和精度，RTD仿真器必须能够在 $10\ \Omega$ 至 $400\ \Omega$ 范围内以 $10\ \text{m}\Omega$ 分辨率变化，这就要求使用16位转换器。来自RTD表的激励电流可能有 $\pm 5\%$ 的变化幅度，因此，必须使用乘法转换器才能保持电阻恒定。模拟输出与激励电流和数字输入成比例。随着激励电流增大，基准电压也会增大，从而导致输出和激励电压增大。模拟电阻等于激励电压除以激励电流，因此，它只取决于数字输入码值。该系统所模拟的电阻通过转换器的数字输入端进行编程。

波形重建特性

在波形重建应用中使用高分辨率DAC时，用户一般不担心微分非线性或任何其它传统特性，而是要求一组新的、高度专门化的特性。这主要是因为，用于波形重建的许多转换器是一个更大系统的组成部分，该系统对动态波形进行数字化处理和重建。用户只关心该过程能否以最小误差完成，其表现形式有多种，最重要的是总谐波失真。其它误差源有交调失真、噪声、有限动态范围、建立时间不佳和混叠。

动态范围是指转换器可以产生的最大输出信号(满量程)与最小输出信号(1 LSB)之比。对于N位转换器，满量程等于 2^N LSB。理论上，N位转换器的动态范围为 $6N\ \text{dB}$ 。转换器噪声以及LSB的不准确，会使此理论动态范围略有降低。

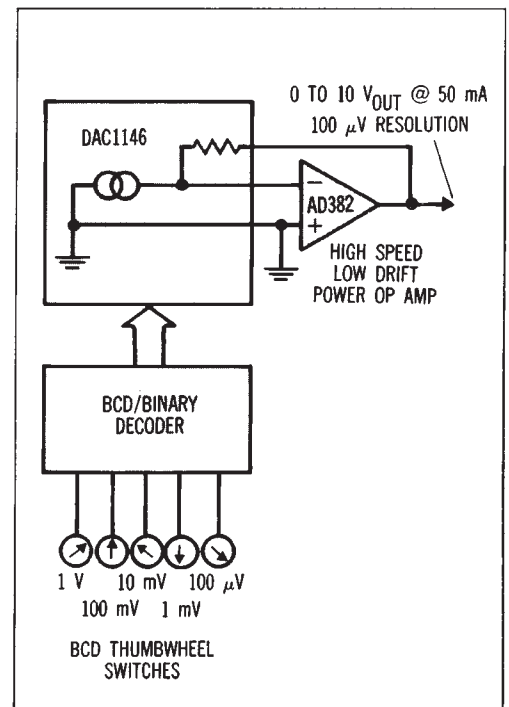


图8. 可编程电源

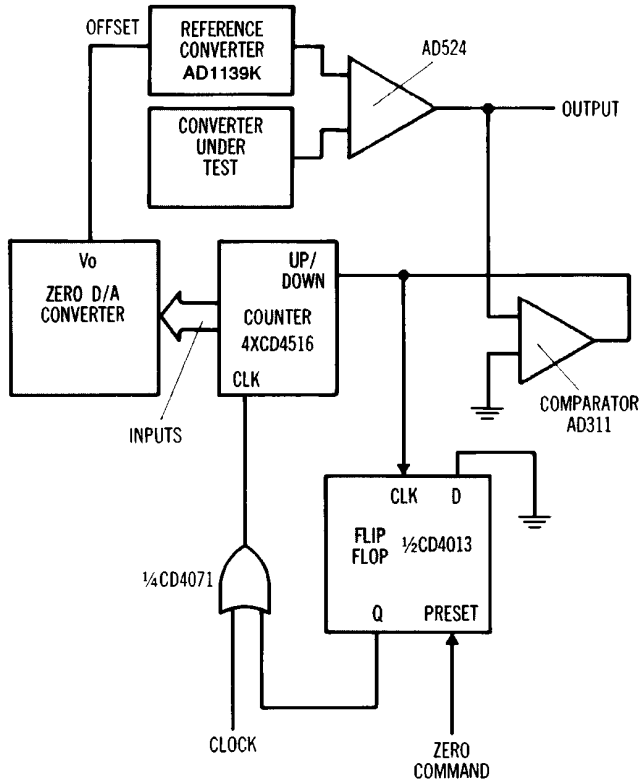


图9. 失调校准

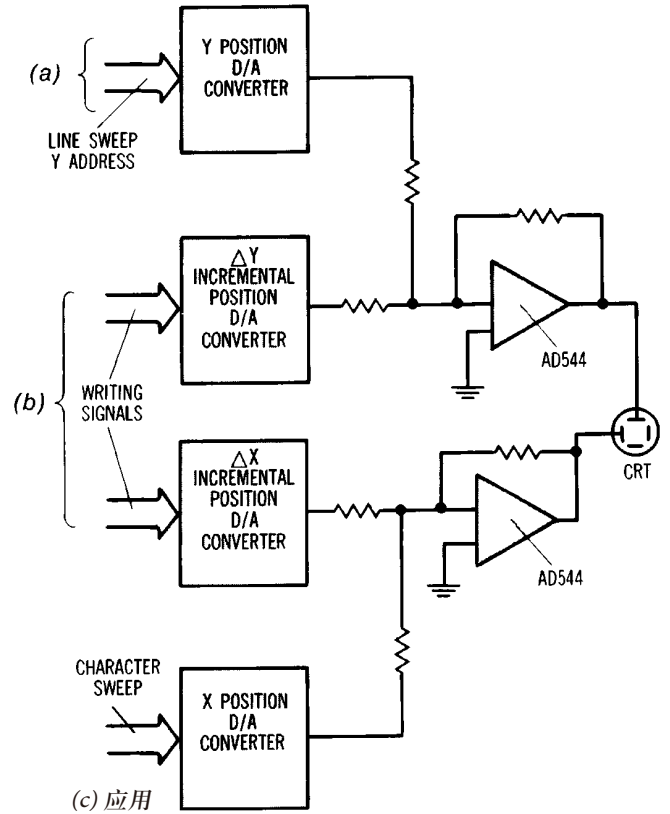


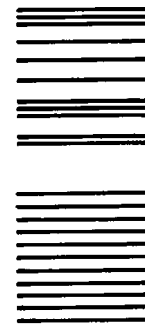
图10. 波束导引

信噪比(S/N)是指最大均方根信号与均方根量化误差之比(参见图13)。转换器可以产生的最大正弦波的均方根值等于峰值输出除以2的平方根, 即 $Q \cdot 2^{N-1} / \sqrt{2}$, 其中Q表示量化间隔。量化误差从 $-Q/2$ 线性递增至 $+Q/2$, 然后陡然返回 $-Q/2$ 。此锯齿波的均方根值等于峰值输出除以3的平方根, 即 $Q/\sqrt{12}$ 。因此, 信噪比为 $2^N \sqrt{1.5}$ 。用dB表示即为: $S/N = 6.02N + 1.76 \text{ dB}$ 。

波形重建是一个动态过程, 要求所选转换器具有良好的动态性能。这意味着, 其建立时间必须短于过程所分配的时间。(建立时间是指以下两个时间点之间的时长: 首先是转换器的数字输入切换, 然后是输出达到并保持在以最终值为中心的特定误差带以内。) 总谐波失真(THD)是用于波形生成或

重建的转换器的最重要特性。粗略地说, 它是指理想正弦波与转换器输出端的重构版本之间的差异。THD定义为谐波的均方根值的平方和的平方根与基波的均方根值之比。这意味着, 各谐波的均方根能量必须平方并相加, 然后求取平方根, 并除以基波的均方根能量, 其结果即为转换器的THD。对于具有有限数量数字输入N和相关输出电压的转换器, THD可以用下式计算:

$$THD = \frac{\text{均方根误差}}{\text{均方根信号}} = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [E_l(i) + E_Q(i)]^2}}{E_{RMS}} \times 100\%$$



(a) 以12位精度定位的4096线中的11条, 线条明暗不均。

(b) 以16位精度定位的4096线中的11条, 线条均匀。

其中 $E_l(i)$ 表示转换器在采样点i的线性误差, $E_Q(i)$ 表示在采样点i的量化误差。如果理想输出由频率不同的两个正弦波组成, 则将产生额外误差成分, 由此导致交调失真。当DAC改变状态时, 并非所有开关同时断开和闭合。内部电压和电流需要

一定的时间才能达到其最终值。CMOS转换器中，大量电荷存储在各开关的栅极-源极和栅极-漏极电容上。随着开关断开和闭合，此电荷来回出入模拟输出端。所有这些效应叠加会产生输出电压或电流尖峰，一般称为“毛刺”。毛刺的幅度与转换器输入非线性相关；因此，毛刺会在基频的谐波上产生能量，引起谐波失真。如果模拟输出关于0 V不对称，则将产生二次谐波。递增或递减信号的不对称行为会产生三次谐波。其它不对称行为会产生其它谐波(参见图14)。

消除毛刺

限变器(参见图15)是一种特殊的跟踪保持放大器，它可以在输入码改变之前的一刻至毛刺消亡之后的一刻的期间内，保持输出不变，然后获取新的稳定输出。由于开关电路会造成电荷注入，因此限变器会产生其自己的输出毛刺。但此毛刺通常很小，幅度稳定，且与数字输入码无关。它在采样频率上产生能量，而不是在信号频率或其任何谐波上，因此不会引起谐波失真。用固定时间常数对限变器输出进行限带，可以抑制输出放大器压摆率限制所引起的失真。

音频信号属于双极性信号，因此用来重建音频信号的转换器必须是双极性的(参见图16)。配置这种器件的一种可行方法是将标准二进制转换器偏移半量程。另一种方法是检测信号的极性，然后根据需要输出放大器切换为反相器或缓冲器。输入的其余部分确定输出电压的幅度。偏移二进制转换器结构简洁，与性能相同的有符号幅度转换器相比，前者更小、更可靠且成本更低。另一方面，可以利用多余资金构建更好的电阻网络，使偏移二进制转换器的性能比成本相同的有符号幅度转换器更优越。不过，音频应用有大量信号位于0 V附近。偏移二进制转换器在0 V附近时的温度性能最差，因为它依赖MSB来跟踪所有较低有效位之和以及双极性偏移电阻。有符号幅度转换器在0 V附近时的性能则最佳，因为所有位均为OFF。考虑到对信噪比的影响，0 V附近的良好性能十分重要。大信号往往会遮蔽误差引起的噪声，而小信号则会被这种噪声淹没。增加一个低漂移放大器、一个单刀双掷CMOS开关和一个输出缓冲器，可以将电流输出二进制转换器改造为有符号幅度结构(参见图17)。其结果是，最大DNL漂移为 $\pm 1/2$ ppm/ $^{\circ}\text{C}$ ($\pm 1/8$ 满量程范围)和 ± 1 ppm/ $^{\circ}\text{C}$ (满量程范围)，典型漂移为 $\pm 1/4$ ppm/ $^{\circ}\text{C}$ (零电平附近)和 $\pm 1/2$ ppm/ $^{\circ}\text{C}$ (满量程范围)。

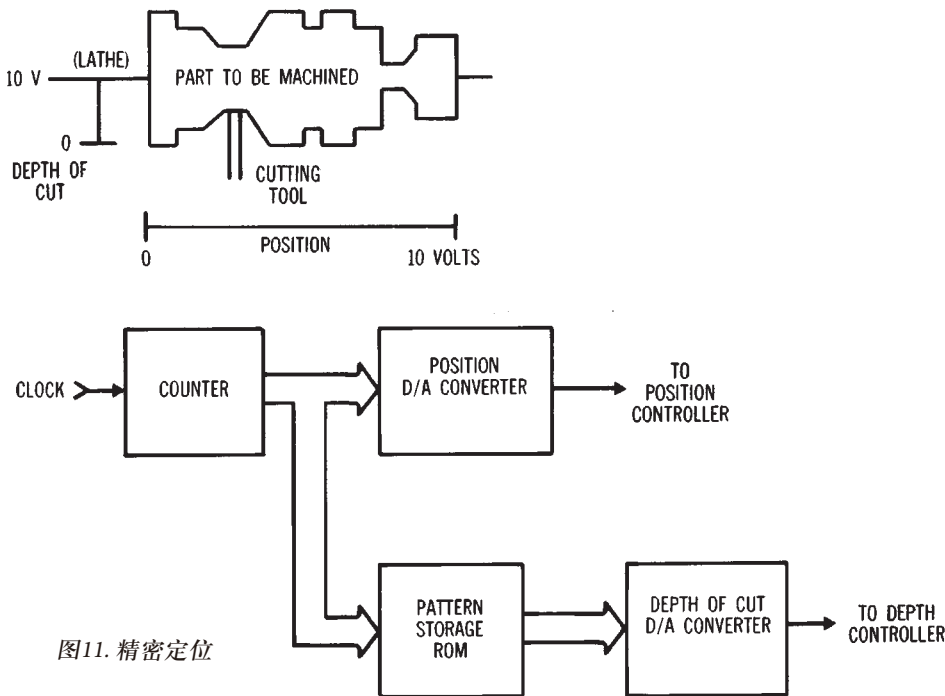


图11. 精密定位

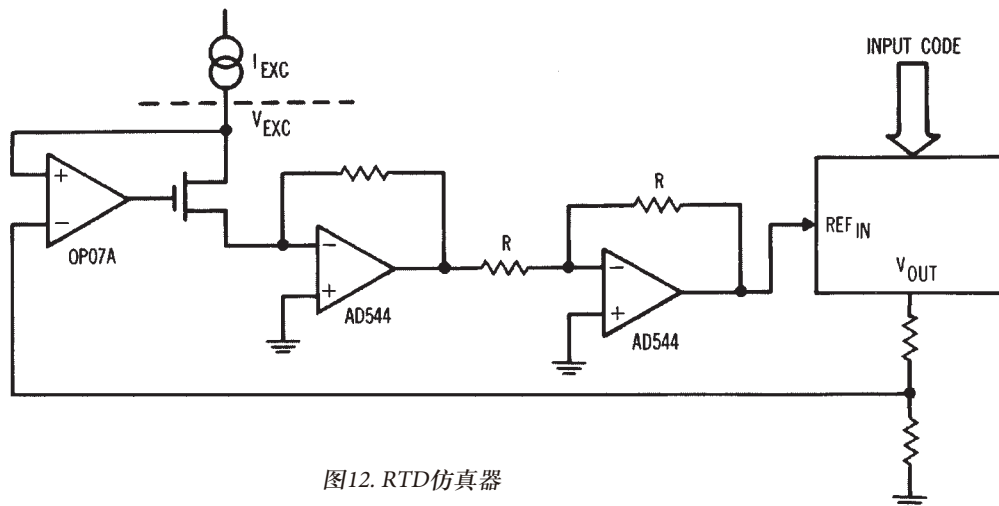


图12. RTD仿真器

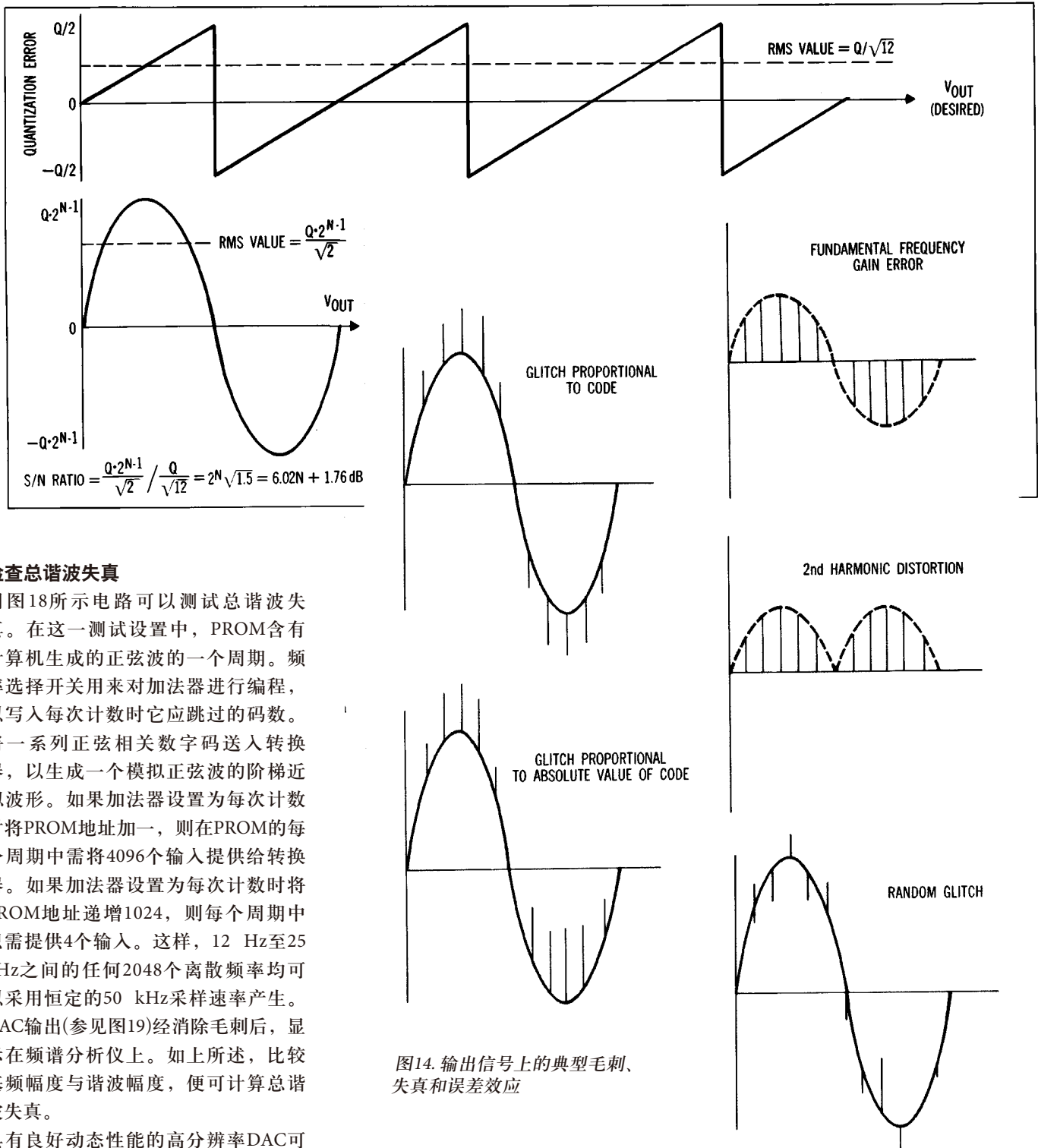


图14. 输出信号上的典型毛刺、失真和误差效应

检查总谐波失真

用图18所示电路可以测试总谐波失真。在这一测试设置中，PROM含有计算机生成的正弦波的一个周期。频率选择开关用来对加法器进行编程，以写入每次计数时它应跳过的码数。将一系列正弦相关数字码送入转换器，以生成一个模拟正弦波的阶梯近似波形。如果加法器设置为每次计数时将PROM地址加一，则在PROM的每个周期中需将4096个输入提供给转换器。如果加法器设置为每次计数时将PROM地址递增1024，则每个周期中只需提供4个输入。这样，12 Hz至25 kHz之间的任何2048个离散频率均可以采用恒定的50 kHz采样速率产生。DAC输出(参见图19)经消除毛刺后，显示在频谱分析仪上。如上所述，比较基频幅度与谐波幅度，便可计算总谐波失真。

具有良好动态性能的高分辨率DAC可以用作精密函数发生器。利用微处理器进行控制，转换器可以产生标准输出函数。正弦波、方波、脉冲、三角偏移和倒数都可通过适当调整输入来控制。频率和占空比则可通过处理器时序来控制。更复杂的函数，如双脉

冲、突发脉冲和脉冲序列等，同样可以轻松实现。高分辨率DAC用作函数发生器的真正好处是可以产生任意波形：可以模拟复杂波形，设置测试码，

或者产生双曲线及其它超越函数。建立时间小于5 μs的16位转换器可以产生高达200 kHz、失真小于0.002%的输出。

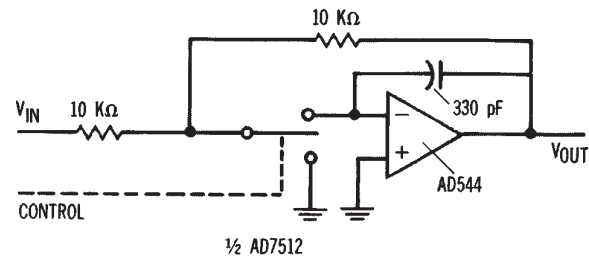
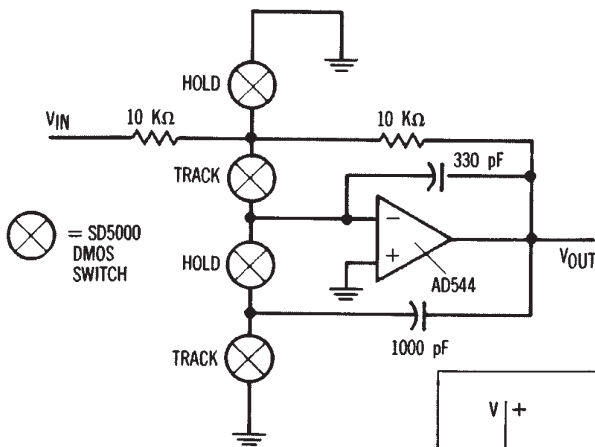


图15. 用于DAC的限变器电路

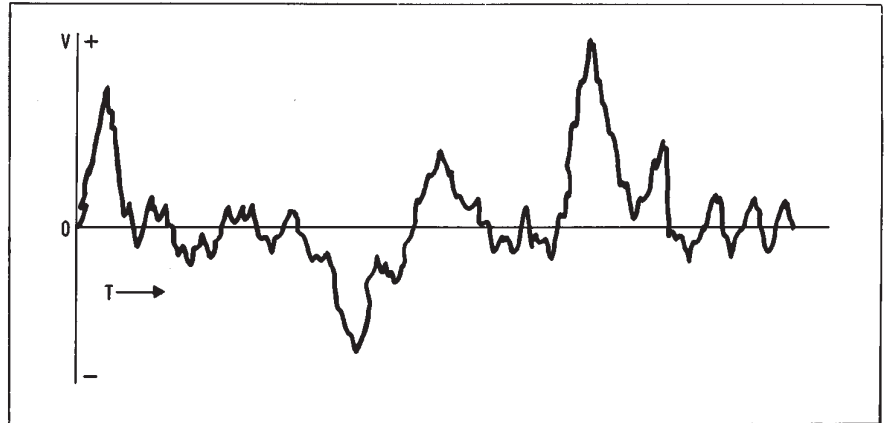


图16. 典型音频波形

将内置跟踪保持放大器的快速、高分辨率转换器与两个限变器结合，可以实现极高性能、成本合理的双通道数字音频系统。这种方法允许一对立体声模拟输出以50 kHz同时更新。在左通道提供给转换器输入的时候，跟踪

保持电路存储右通道输出。然后，两个限变器从保持模式切换到跟随模式，而且其输出从前一样本切换到新的样本。限变器响应经过限带处理，以消除放大器压摆率限制所引起的失真。3.4 μs的时间常数可以确保全功率

20 kHz正弦波无失真通过。结合跟踪保持放大器和限变器使用的16位转换器可以产生失真低于0.005%的音频信号。

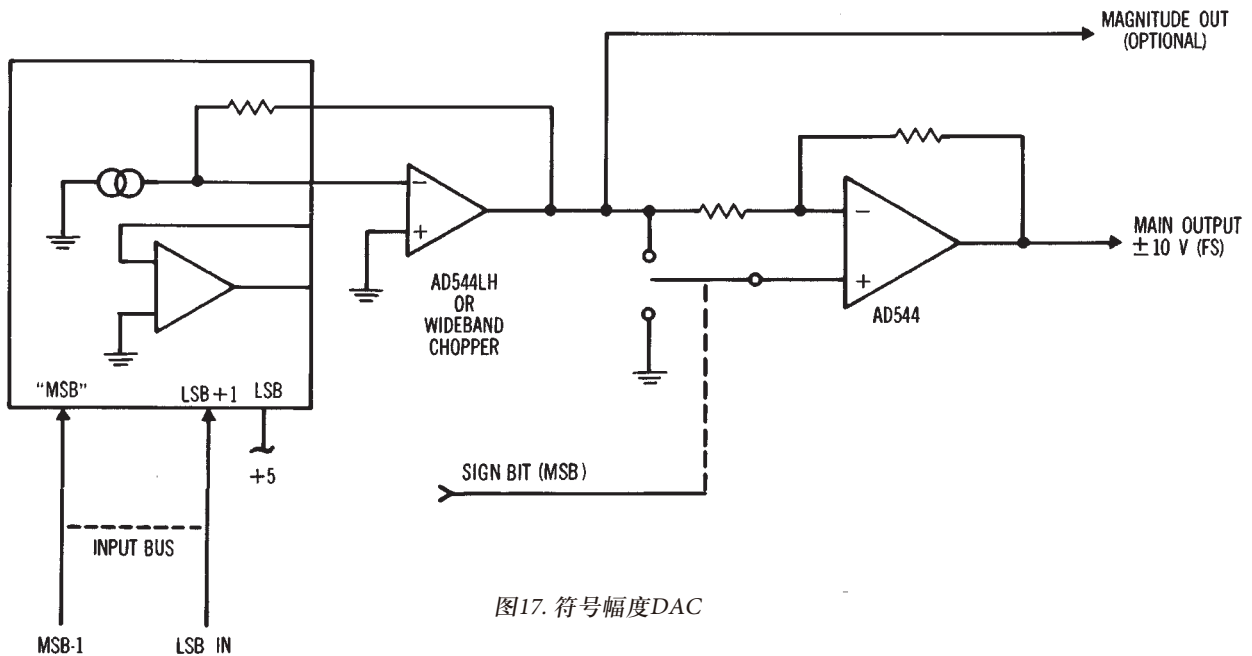


图17. 符号幅度DAC

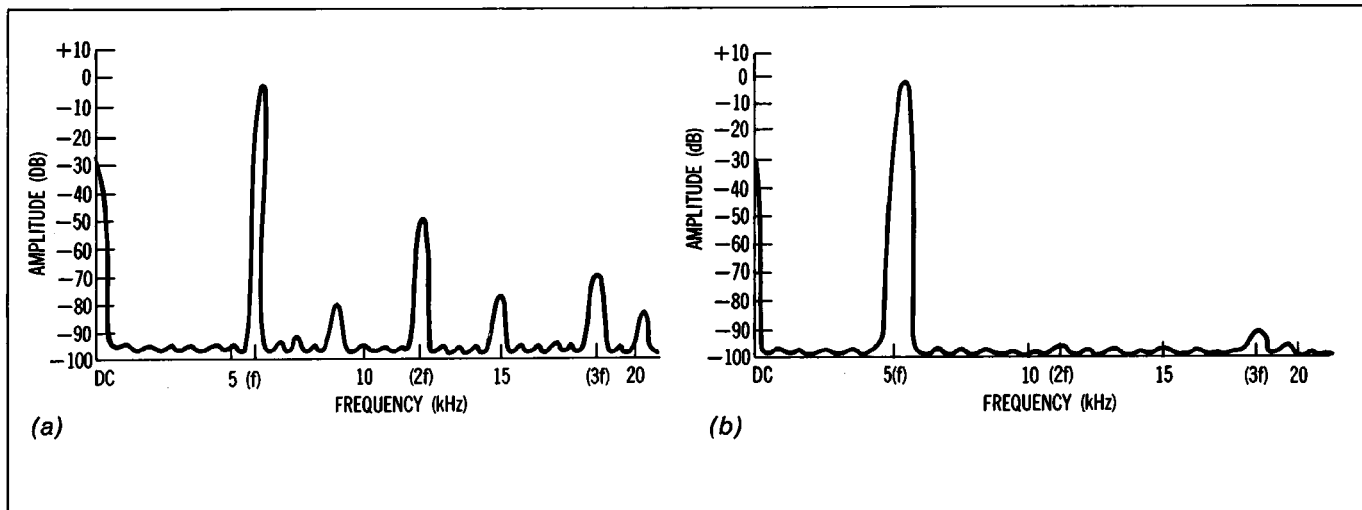


图19. DAC输出信号的频谱分布：(a)去毛刺前；(b)增加去毛刺电路后

电信是高分辨率转换器的另一主要应用领域。数据经过数字化处理，通过电话、广播或卫星通信链路传输，然后在接收端重建。同样，THD和建立时间是重要参数，传输速率会受其限制。

高分辨率转换器的其它波形重建应用包括声纳和地震研究。声纳需要测量信号发射后至信号反射回接收器所需的时间。该时间以数字格式存储，并提供给转换器，随后便可获得海底图片。地震研究所采用的过程与此相

似。引爆炸药后，利用位于特定位置的ADC测量震动。数据经过计算机处理后，提供给DAC，以便产生地震剖面。

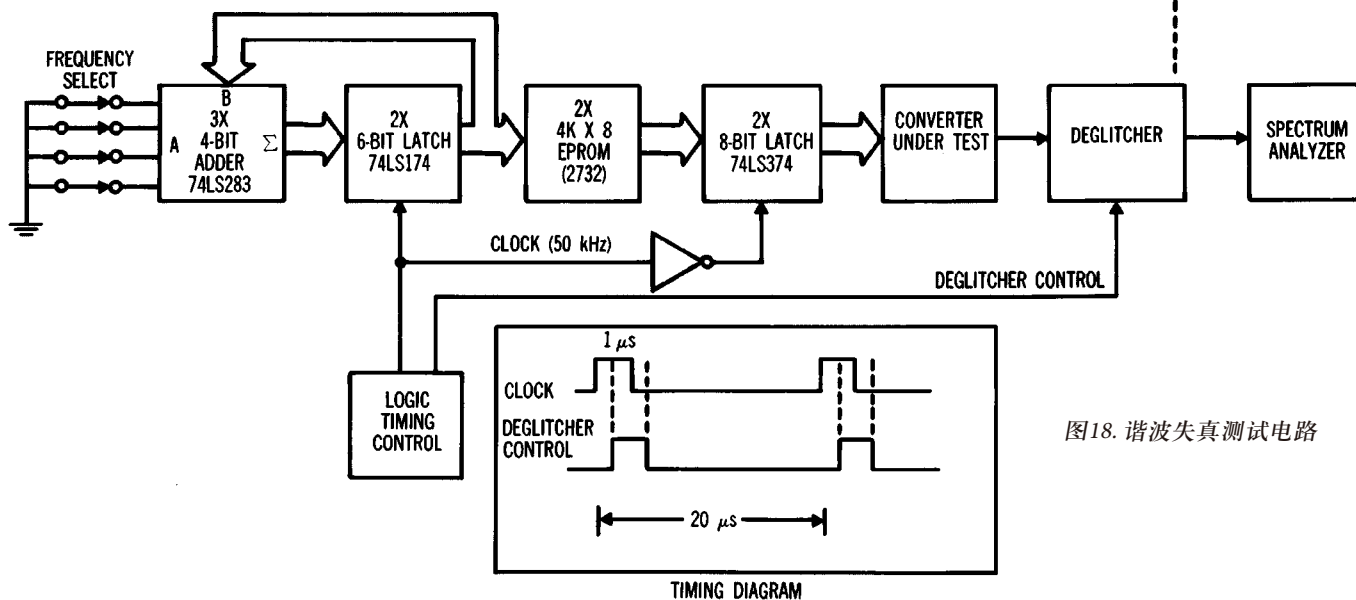
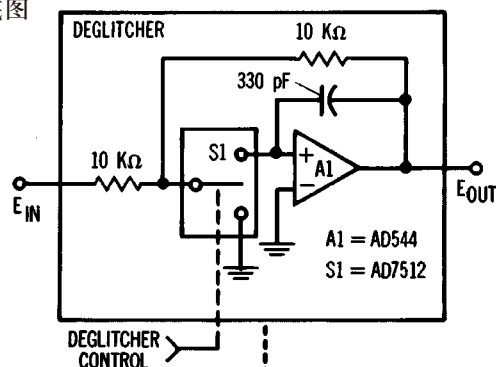


图18. 谐波失真测试电路

