

两款新器件重塑信号发生器

作者: David Hunter

过去, 任意波形发生器最棘手的部分是输出级的设计。典型信号发生器的输出范围在 25 mV 到 5 V 之间。为了驱动一个 50 Ω 的负载, 传统设计采用高性能分立式器件, 并大量集成器件, 或者成本昂贵的 ASIC, 而要构造出稳定且可编程范围较宽的高性能输出级, 设计师往往要投入无数小时的时间。现在, 技术进步带来的放大器可以驱动这些负载, 降低输出级的复杂性, 同时还能减少成本、缩短上市时间。

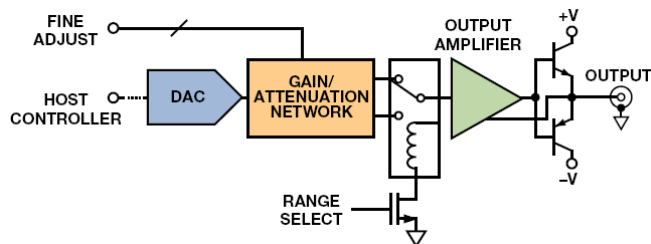


图1. 典型信号发生器模型。

在使用通用信号发生器时, 先输入一个频率, 然后按下一个按钮, 最后仪器产生一个新的频率。接下来, 输入所需输出功率, 再按下另一个按钮。在切换内部网络、调整输出电平时, 继电器发出咔哒声。这种非连续运行模式是补偿宽可编程范围缺失问题的必要条件。本文提出一种新的架构, 它可以解决输出级设计中的一半问题。

克服这个前端设计挑战的两个关键组件是: 提供高速、高电压和高输出电流的高性能输出级; 以及带连续线性 dB 调谐的可变增益放大器(VGA)。这种设计以 20 MHz 的性能为目标, 幅度为 22.4 V (+39 dBm), 负载为 50 Ω。

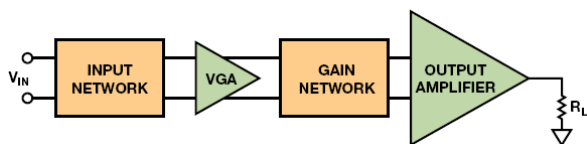


图2. 更小、更简单的信号发生器输出级。

新型紧凑式输出级

初始信号可能来自数模转换器(DAC)以产生复杂波形, 也可能来自直接数字频率合成(DDS)器件以产生正弦波。任一情况下, 其规格和功率调整能力都可能达不到理想状态。第一个要求是用 VGA 提供衰减或增益。但许多 VGA 提供的增益是有限的, 往往不足以在本应用中发挥作用。

如果 VGA 的输出可以设为目标电平, 则无论输入为何, 都可以强

制输出已知幅度。例如, 如果所需输出幅度为 2 V, 且功率输出级的增益为 10, 则 VGA 的输出幅度应调节至 0.2 V。当输出级设计正确时, 输出幅度最终由 VGA 输出设定。不幸的是, 多数 VGA 因可编程范围有限而成了瓶颈问题。

AD8330 是实现 50 dB 范围的首款 VGA, 但 AD8338 则树立了新的标杆, 这款新型低功耗 VGA 拥有高达 80 dB 的可编程范围。典型的高品质信号发生器的输出幅度范围为 25 mV 至 5 V。高达 46 dB 的可调范围超过了市面上多数现有 VGA 的能力范围。理想条件下, 经典信号发生器的输出幅度可能为 0.5 mV 至 5 V, 无需使用继电器或开关网络。满量程连续可调, 不存在开关和继电器的非连续性问题。另外, 不用继电器还可以延长仪器寿命, 提高系统可靠性。

现代 DAC 和 DDS 器件一般搭载差分输出, 要求设计师使用一个变压器, 用单端连接损失一半信号, 或者添加一个差分转单端转换器。AD8338 具有天然的适用性, 提供全差分接口, 如图 3 所示。对于正弦波应用, 用 DDS 取代 DAC。

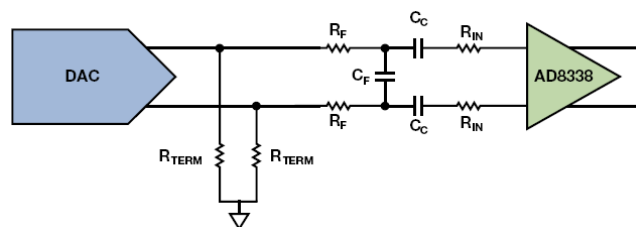


图3. 把 DAC 连接至 AD8338 的网络示例。

AD8338 的一个主要特点是灵活的输入级。作为一款输入 VGA, 它通过 ADI 研究员 Barrie Gilbert 发明的“H-amp”拓扑结构来控制输入电流。该设计用反馈来平衡输入电流, 同时使内部节点电压维持于 1.5 V。正常条件下, 使用 500 Ω 输入电阻, 最大 1.5 V 输入信号会产生 3 mA 的电流。如果输入幅度较大, 比如 15 V, 则将一个较大的电阻连接至“直接”输入引脚。该电阻的大小必须合适, 以得到相同的 3 mA 电流:

$$\frac{15.00 \text{ V}}{3 \text{ mA}} = 5 \text{ k}\Omega \quad (1)$$

单端 15 V 信号将以差分方式输出 1.141 V。此时, 最小增益条件下, AD8338 提供 28.4 dB 衰减, 因此, 最大可能增益为+51.6 dB。作为一种低功耗器件, 在 1 kΩ 负载条件下, 典型输出摆幅为 1.5 V。

输入 VGA 的功率必须满足以下条件:其总增益范围在不同设定点周围。首先,确定信号发生器产生最大输出需要的输出电平。许多商用发生器为 50 Ω 负载(正弦波)只提供 250 mW rms (+24 dBm) 的最大输出功率。这无法满足需要更多输出功率的应用需求,比如测试高输出高频放大器、超声脉冲发生等。

电流反馈放大器(CFA)技术的进步意味着,这不再是个问题。[ADA4870](#) CFA 可以用 ± 20 V 电源驱动 1 A (17 V)。对于正弦波,可以在满负载条件下输出最高 23 MHz 的频率,使其成为新一代通用任意波形/信号发生器的理想前端驱动器。

对于反射敏感型 50 Ω 系统来说,ADA4870 要求一些无源器件使源阻抗与 50 Ω 负载相匹配:一个阻性焊盘和一个 1.5:1 RF 自动变压器。在 1 V 裕量条件下,当放大器有效负载为 16 Ω 时,可取得 8 W 峰值功率。另外,如果反射不构成问题,则可移除阻性焊盘,并用匝数比为 0.77:1 的变压器代替自动变压器。无阻性焊盘地,输出功率增至 16 W 峰值 (28.3 V 幅度)。

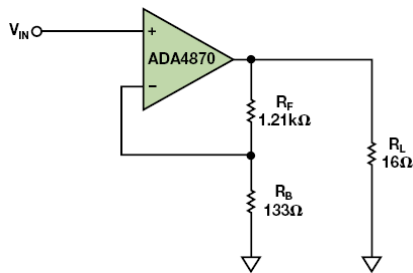


图 4. ADA4870 驱动 16 Ω (增益=10) 时的基本连接。

为优化输出信号摆幅,我们将 ADA4870 的增益倍数配置为 10,因此,所需输入幅度为 1.6 V。ADA4870 有一个单端输入,AD8338 有一个差分输出,因此,AD8130 差分接收放大器及其 270 MHz 增益带宽积和 1090 V/ μ s 压摆率可同时提供差分至单端转换和所需增益。AD8338 的输出限制为 ± 1.0 V,因此,AD8130 必须提供 1.6 V/V 的中间增益。组合起来时,三个器件形成一个完整的信号发生器输出级。

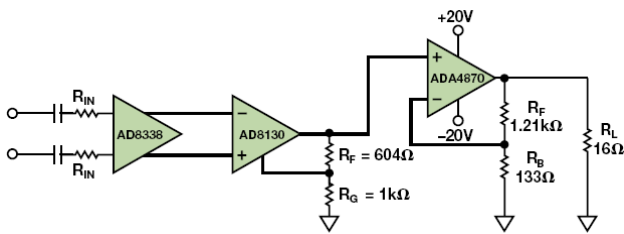


图 5. 信号发生器输出级。

完成整个设计还需要最后两个步骤:配置输入网络以实现最大输入信号和抗混叠,设计输出网络以实现阻抗转换。

AD8338 输入网络

对于该设计,差分输出幅度为 ± 1.0 V。在工厂默认设置、内部 500 Ω 电阻和最大增益条件下,输入幅度一定是 100 μ V。通过向直接输入引脚增加电阻,设计师可以调节该要求。由输入电阻决定的增益范围为:

$$\text{增益(dB)} = 80 \times (V_{\text{GAIN}} - 0.1) + 20 \log \left(\frac{19000}{R_p + R_N} \right) - 34 \quad (2)$$

在各输入端使用 40.2 k Ω 的电阻,可以在噪声功率与输入衰减之间实现良好平衡。当 $V_{\text{GAIN}} = 1.1$ V (最大增益) 时,增益为:

$$\text{增益(dB)} = 80 + 20 \log \left(\frac{19000}{80400} \right) - 34 = 33.5 \text{ dB} \quad (3)$$

此时,差分输入只需为 21 mV。

当 $V_{\text{GAIN}} = 0.1$ V 时,增益为:

$$\text{增益(dB)} = 0 - 12.5 - 34 = -46.5 \text{ dB} \quad (4)$$

对于相同的 21 mV 输入,输出约为 100 μ V。

考虑 [AD8130](#) 和 ADA4870 的总增益,约为 24.1 dB,ADA4870 的输出幅度范围为 1.6 mV 至 16 V。在阻性焊盘和自动变压器之后,输出端的电压将在 2 mV 到 20 V 之间。

把 AD8338 连接至 DDS 等器件,要求考虑抗混叠和输入衰减。例如,差分输出 [AD9834C](#) DDS 要求 200 Ω 电阻接地,以实现正确的摆幅。每个输出只会产生一半的正弦波信号,如图 6 所示。

每个输出峰值为 0.6 V,使得有效输入为 ± 0.6 V,所需衰减为 26 dB。在使用 200 Ω 电阻时,通过构建简单的电阻分压器,可以轻松实现衰减。由于信号摆幅并不统一,因此,信号峰值应该会达到预期衰减值。

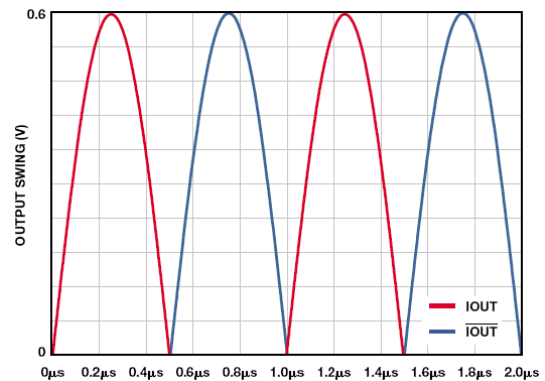


图 6. 9834C IOUT 和 IOUT 的输出摆幅。未显示混叠伪像。

$$0.021 = 0.6 \left(\frac{R_{\text{BOT}}}{R_{\text{TOP}} + R_{\text{BOT}}} \right); R_{\text{TOP}} = 193 \Omega \text{ 且 } R_{\text{BOT}} = 7 \Omega \quad (5)$$

使用标准的 6.98 Ω 和 191 Ω 电阻值,结果会产生 0.7% 的误差。

最后,需要一定的抗混叠处理。在 75-MSPS 采样速率下,奈奎斯特速率输出为 37.5 MHz,超过了该设计的 20 MHz 带宽。将抗混叠极点设为 20 MHz,则所需电容为:

$$C_{\text{FILT}} = \frac{1/R_{\text{BOT}}}{2\pi \times f} = \frac{0.142}{2\pi \times 20 \times 10^6} = 1100 \text{ pF} \quad (6)$$

这是一个标准值，因此，完整的输入网络如图 7 所示：

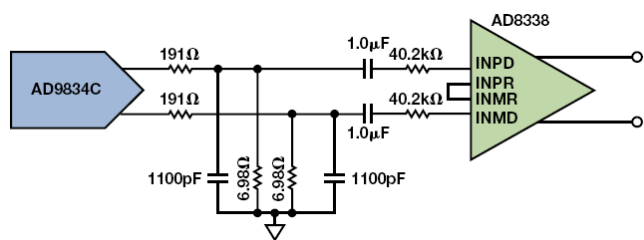


图 7. DDS + 衰减和滤波器网络 + AD8338。

构建该级并进行测量。总体变化在 ± 0.6 dB 之内，如图 8 所示。

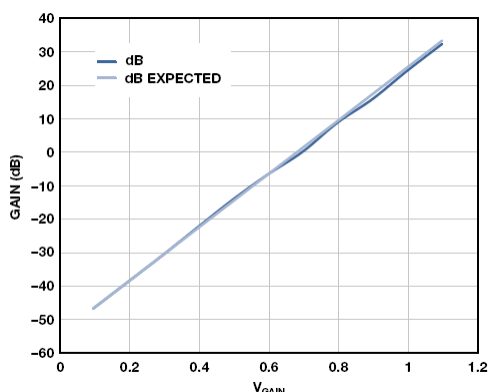


图 8. AD8338 配置的计算所得增益和实测增益。

ADA4870 输出级

在单端输出由 AD8130 提供的情况下，ADA4870 将执行最终 10 倍增益。设置该增益需要两个电阻，无外部补偿情况下，该级很稳定。未完成的唯一工作是调整输出网络，以满足应用需求。有三种通用实现方案：

1. 从放大器直接输出至 $50\ \Omega$
2. 填充自动变压器输出至 $50\ \Omega$
3. 未填充自动变压器输出至 $50\ \Omega$

对于直接输出，放大器输出直接连接输出连接器，无需用任何网络来转换源，如图 9 所示。这种方法是真直流连接源的完美选择，虽然不能发挥出器件的全部潜力，但仍然比典型信号发生器的 10 V 输出幅度要好得多。在这种情况下，最大峰值功率为 5.12 W。

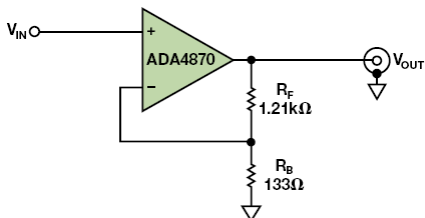


图 9. 直接输出驱动连接。

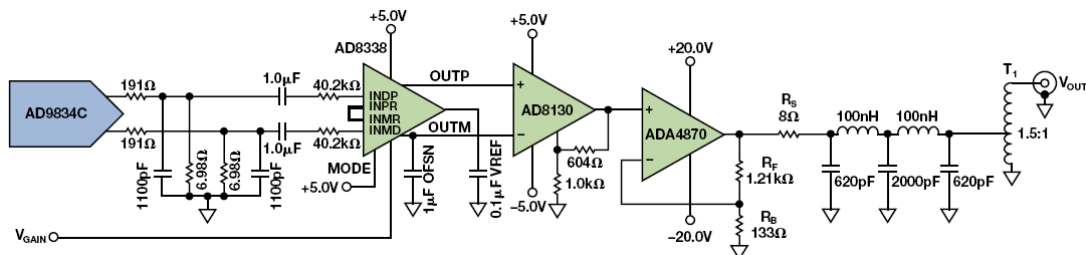


图 12. 完整的简化原理图。

对于焊盘式设计， $16\ \Omega$ 负载在一个 $8\ \Omega$ 的串联焊盘与经滤波处理的 1.5:1 自动变压器之间分配，如图 10 所示。在该模式下，由于设计具有低阻抗特性，因此，设计师使用的电感值可以比用于 $50\ \Omega$ 设计的电感小 6.25 倍。低通滤波器和自动变压器把 $8\ \Omega$ 有效源阻抗转换成匹配良好的 $50\ \Omega$ 负载。这种设计方法的总峰值输出功率为 8 W，最适合需要 $50\ \Omega$ 匹配源的应用，在这类应用中，反射可能成为一个问题，比如，传输线路较长时。

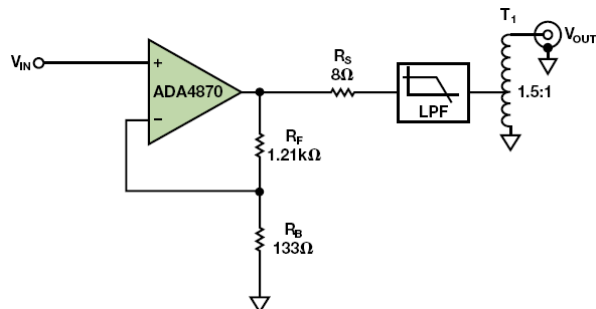


图 10. 焊盘式输出设计的 ADA4870 连接。在目标频段内，对于任何反射，输入阻抗均表现为 $50\ \Omega$ 。

最后一个选项，也可能是信号发生器最有用的选项，不使用 $8\ \Omega$ 焊盘，而且输出功率提高了一倍。我们仍然建议使用 LC 阶梯式滤波器，如图 11 所示，但阶梯值比用于 $50\ \Omega$ 系统（设计的标称阻抗为 $16\ \Omega$ ）的值小 3.125 倍。在这种情况下，自动变压器使用的匝数比为 0.77:1。该模式下，峰值正弦波输出幅度为 28.3 V，ADA4870 将驱动约 16 W 至 $50\ \Omega$ 负载（8 W rms 或 39 dBm）。

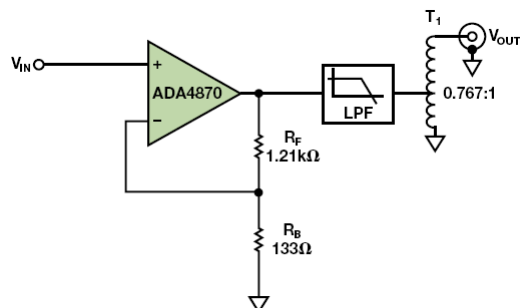


图 11. 用于驱动 $50\ \Omega$ 负载的最佳功率输出连接。

整体解决方案

在现实世界中，如果与真实世界不相符，仿真和等式毫无意义。因此，有必要构建一个完整的系统，基于预期值测量其性能。图 12 所示为一种实际焊盘式输出设计的原理图。

图 13 所示为无滤波器条件下的实测结果。系统增益一致性误差为 ± 1 dB，最差条件下输出功率高达 2.75 W rms (5.5 W 峰值) (P1dB 压缩点, 34 dBm)。值得注意的是，总增益范围超过 62 dB，范围比许多标准发生器多 16 dB。

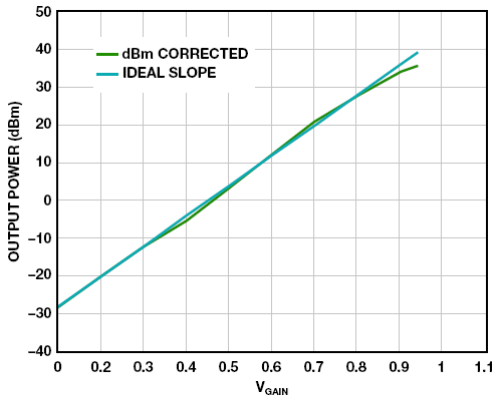


图 13. 焊盘式、未滤波输出功率结果。无滤波器时，系统在 36 dBm 时出现一个 P1dB 点。 $F_{\text{TEST}} = 14.0956$ MHz。

增益范围可通过改善 DDS 输出端滤波机制以及降低系统噪声的方式提高。图 14 所示为采用滤波器时的相同测量值。滤波输出不存在同样的 P1dB 问题，结果将满量程+36 dBm 输出转换成 50 Ω 负载。总增益线性度更佳(≤ 0.65 dB)，误差仅出现在中间电平周围。

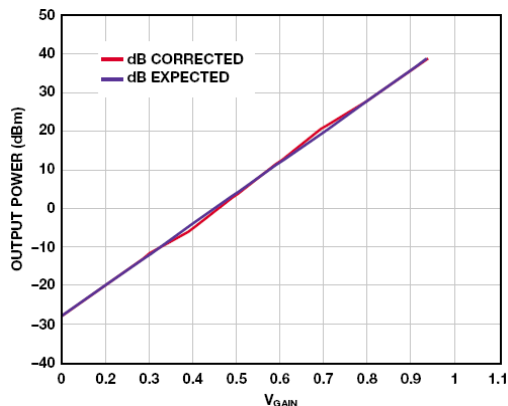


图 14. 5 阶低通滤波器的实测输出($f_c = 20$ MHz)。 $F_{\text{TEST}} = 14.0956$ MHz。

如果具体运行模式需要甚至更高的输出功率，则针对给定应用，

可以将多个输出放大用于驱动专业变压器。或者，可以将这里描述的设计方法用于电源较低的系统，但这些方法必须符合替代设计的限制要求。

注意，受累积输入衰减和增益误差影响，测量上限止于 $V_{\text{GAIN}} = 0.9375$ V。通过调整初始衰减网络，充分考虑总系统误差，可以解决这个问题。校正后，总系统增益范围将增至 74 dB。

结论

配合高性能 VGA 使用高性能、高输出 CFA，可以为新一代信号发生器构建一种简单前端。这些器件的高度集成可以降低 PCB 电路板的总面积和成本。

要获得更多功能，可以在闭环反馈系统中使用 AD8310 等对数放大器。增加对数放大器后，配合 AD9834C 等 DDS，设计师可以集成各种形式的包络调制，如频移键控(FSK)、开关键控(OOK)和相移键控(PSK)，将其作为一项内在功能；通过创造性地使用两个基本模块，实现不尽其数的选项。

参考文献

电流反馈放大器。

对数放大器/检测器。

可变增益放大器(VGA)。

MT-034 指南，电流反馈(CFB)运算放大器。

MT-057 指南，高速电流反馈运算放大器。

MT-060 指南，在电压反馈和电流反馈运算放大器之间选择。

MT-072 指南，精密可变增益放大器。

MT-073 指南，高速可变增益放大器。



David Hunter [david.hunter@analog.com]是 ADI 公司威尔明顿园区线性产品部的一名应用工程师。他 2006 年加盟 ADI 公司，担任现场应用工程师，在西北实验室设计中心工作，为测试和测量领域以及工业客户提供服务。David 2007 年毕业于波特兰州立大学，获电子工程学士学位，专业为 RF 工程。毕业前，他出版并合著了多篇关于自愈硬件系统和进化型硬件的论文。他同时也是一名活跃的业余无线电话务员，呼叫代号为 KE7BJB。



David Hunter