

应用工程师问答 — 38

更好、更快的开环增益测量

作者: David Hunter [david.hunter@analog.com]

在使用反馈的系统中, 反馈网络是一种经过配置而获得特定增益和相位关系的电路。可调比例-积分-微分(PID)控制器就是一个例子, 它用于控制环路增益和/或相位以保证稳定性(见图1)。我们常常需要测量这种反馈网络在特定配置下的性能, 以便为其开环特性建立模型。但是, 此类测量往往很困难。例如, 积分器的低频增益可能非常高, 一般会超过传统测试与测量设备的测量范围。因此, 这种测量的目标是使用现有工具和少量特殊电路, 以最小的工作量迅速获得反馈网络的频率响应特性。

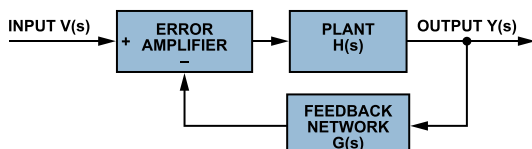


图1. 基本反馈系统

问: 您说得很有道理。我有一个实际的项目, 希望得到您的建议。

答: 请讲。

问: 为验证最近的一项设计是否合格, 我构建了一个可编程反馈网络, 需要收集确凿的数据来验证其是否达到了预期的性能。为了收集数据, 我评估了已有的测试设备, 然后使用一块通用接口总线(GPIB) IEEE-488接口卡、一个简易数字示波器和一个任意函数发生器, 搭建了一个简单的开环测量系统(见图2)。

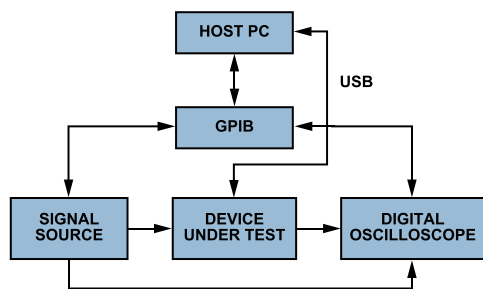


图2. 测试系统的功能模型

我利用GPIB接口的现有开发库编写了软件, 以收集绘制波特图所用的数据点。我将函数发生器设置为输出正弦波, 逐点改变正弦波的频率, 以此作为系统的“输入”; 这与我们在工科大学学校学到的手绘波特图方法非常相似。然后, 用示波器测量系统的输入和输出, 以计算给定频率点的增益。

答: 结果怎样?

问: 对受测器件重复执行多次测量之后, 使用标准实验室设备在有限的预算内执行开环测量的缺陷变得很明显。高精度的测量需要许多数据点, 而仅仅为了在软件与测试设备之间交换信息, 每个数据点就需要花费大量时间。

示波器的分辨率也是一个影响因素: 当输入幅度很小时, 系统以噪声为主, 触发变得非常困难。我还观察到间歇性的错误样点(见图3)。经过分析, 我发现这些错误样点是在测试设备完成设置更新之前出现的, 这实际上是一个系统建立时间的问题。最后, 每次测试不可思议地花费了大约35分钟的时间。对测试的时间使用情况进行分析后, 我发现, 对于每个样点, 大部分时间是用于主机与测试设备之间的通信, 而不是用于实际的测量。

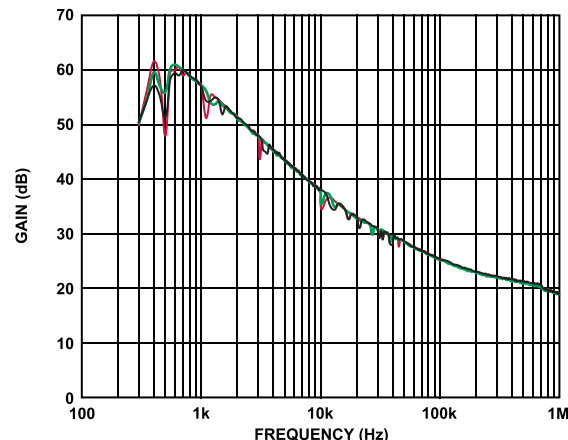


图3. 同一配置的三次不同测试所采集到的数据样点

答: 如果用硬件功能来代替软件程序, 那么执行时间将得到改善。例如, 在可编程器件上使用已有的I²C串行总线, 则发送ASCII字符以形成文本式命令消息所占用的时间就会较短。这样调整之后, 测试环路中将省去多个抽象层和解释操作, 从而实现了对系统操作的精确和直接控制。

问: 实现这样的测试方式将需要哪些硬件?

答: 使用宽带直接数字频率合成器(DDS) IC, 例如AD5932¹以取代函数发生器。该DDS可以给你的设计提供出色的频率范围和高质量的正弦输出。应用一对对数放大器IC(例如AD8307²)和一个差分放大器之后, 增益测量将变得非常简单。采集系统的最后一个关键硬件是模数转换器IC, 用以取代数字示波器。利用一个多通道输入ADC(例如AD79923或AD7994⁴), 可降低系统的整体成本; 我们可以使用其中的两个可用通道来采集对数放大器的结果, 然后用软件来完成差值计算。修改之后的配置如图4所示。

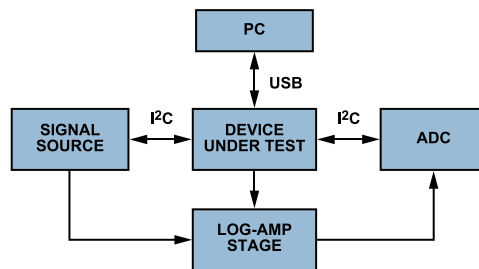


图4. 新测试系统框图

问：采用对数放大器的增益测量是如何进行的？

答：在交流输入的情况下，低成本、易于使用的对数放大器AD8307会在50 Ω负载上产生一个直流输出，该输出相当于25 mV/dB的输入功率（每十倍电压0.5 V）。AD8307具有92 dB的宽动态范围，可以用来测量高增益开环电路中存在的微小输入信号。当您实际上不是去驱动50 Ω负载时，这一标准允许将增益（单位dB）计算为两个AD8307器件输出之间的差值，而这两个放大器分别测量信号的输入和输出。

问：能否再详细解释一下？

答：我们简单地回顾一下对数的计算法则。

$$\log\left(\frac{A}{B}\right) = \log A - \log B \quad (1)$$

$$\log(A \times B) = \log A + \log B \quad (2)$$

$$\log(A^B) = B \times \log A \quad (3)$$

功率的增益或衰减通常表示为比值的对数：dB一般用来描述交流电压， V_A 和 V_B 为均方根电压，因此 P_A 和 P_B 为平均功率水平。

$$\begin{aligned} \text{decibels (dB)} &= 10 \log\left(\frac{P_A}{P_B}\right) \\ &= 10 \log\left(\frac{V_A^2 / R_A}{V_B^2 / R_B}\right) = 20 \log\left(\frac{V_A}{V_B}\right) + 10 \log\left(\frac{R_B}{R_A}\right) \end{aligned} \quad (4)$$

当阻抗之比等于1时， $\log 1 = 0$ 。因此，在电阻负载相等的条件下，

$$\text{dB} = 20 \log\left(\frac{V_A}{V_B}\right) \quad (5)$$

对于高阻抗电压放大器电路，重点关注的是信号增益，而不是功率增益。因此，dB是输出幅度与输入幅度之比的对数表示法。

0 dB对应的电压之比为1。为了用dB来表示给定功率的测量值，必须以某个基准功率水平作为参考。常规做法是，如果测得的功率等于1 mW，则绝对功率水平为0 dBm（或者表示为超过1 mW的dB数）。对于一个50 Ω负载，

$$\begin{aligned} \text{dBm} &= 10 \log\left(\frac{P_{rms} \text{ (watts)}}{0.001 \text{ W}}\right) = 10 \log\left(\frac{V_{rms}^2 / 50 \Omega}{0.001 \text{ W}}\right) \\ &= 10 \log\left(1000 \times \frac{V_{rms}^2}{50 \Omega}\right) = 10 \log(20 \times V_{rms}^2) = 20 \log(V_{rms}) + 13 \end{aligned} \quad (6)$$

当使用一个低失真正弦波时，电压均方根值和平均功率（对于一个50 Ω系统）可以用公式7和8来计算：

$$V_{rms} = \frac{V_{amplitude}}{\sqrt{2}} \quad (7)$$

$$\text{Power} = \left(\frac{V_{rms}^2}{Z_0}\right) = \frac{(V_{amplitude})^2}{2 \times 50} \quad (8)$$

因此，对于0 dBm，或者1 mW，输入电压的幅度为316.2 mV（或223.6 mV均方根值）。如果这是输入电平，而受测器件的输出幅度为3.162 V（2.236 V均方根值，增益等于10），则由公式6可知，输出功率为+20 dBm，这与使用公式5中的比率来表示电压增益时所得到的结果是一样的。只要基准值是一致的，这些数值也将是一致的。这样，我们就可以轻松得出系统增益。

合并公式8和公式6可得，

$$\begin{aligned} \text{dBm} &= 10 \log\left(1000 \times \frac{V_{rms}^2}{50}\right) \\ &= 10 \log(1000) + 10 \log\left(\frac{V_{amplitude}^2}{100}\right) \\ &= 30 + 20 \log(V_{amplitude}) - 20 \\ &= 20 \log(V_{amplitude}) + 10 \end{aligned} \quad (9)$$

应用对数放大器的转换增益25 mV/dB：

$$V_{output} = 0.5 \log(V_{p-p}) + 0.25 \quad (10)$$

应用公式1，使用两个AD8307对数放大器来测量输出和输入，再计算出两者之差，便很容易得到增益测量结果。

$$\begin{aligned} V_{gain} &= [0.5 \log(V_{output}) + 0.25] - [0.5 \log(V_{input}) + 0.25] \\ &= 0.5 \log\left(\frac{V_{output}}{V_{input}}\right) \\ &= 0.5 \text{ V}/20 \text{ dB} \end{aligned} \quad (11)$$

AD8307固有的0 dB输出约为2.0 V。但是，把输出计算为两个对数放大器输出之间的差值时，这些（经过校准的）常量就会从公式中消除。

问：如何获得该差值？

答：有许多方法可以获得该差值，既可采用方便的仪表放大器，比如AD6225或AD6276，也可采用分立式多运放解决方案，甚至可以在转换成数字量（如利用多通道ADC AD7994）之后通过软件获得。为实现最佳精度，设计者必须进行校准，以消除器件之间的增益和失调误差。ADI公司网站上的数据手册提供了这些信息，同时还有与频率相关问题的极佳提示。

问：您提到了直接数字频率合成器AD5932。它是一个什么样的器件？

答：AD5932 DDS是一种简单的可编程数字控制波形发生器。用户只需使用几个简单的命令就可以生成各种正弦波，例如，构成完整的频率和相位特性曲线。虽然该器件没有I²C接口，但一个连接在I²C总线上的GPIO器件可以执行位撕裂(bit-banging)操作，以模仿所需的接口功能。完成配置后，只要对GPIO器件执行一次写操作，就可以使输出频率递增。

AD5932的输出峰峰值为580 mV，当把这样一个数值用作开环增益测量的输入时，在大多数情况下显得过大。所需的衰减取决于增益测量时受测器件达到规定的输出电压所需的恰当输入电平。如果输入信号太大，输出将会失真，甚至于被限幅，因而得出错误的测量结果。如果信号太小，输出波形将以失调误差和噪声为主，因而产生问题。一个典型的信号是从10 mV开始，然后增加幅度以产生规定的器件输出值，或者使输出增加到不产生限幅或失真的可能最大值，因为失真会引起测量误差。

问：能否举一个例子说明这是如何工作的？

答：把各个电路模块如图4那样连接起来之后，就可以验证（或校准）其性能：首先使用一个单位增益放大器，然后用一个增益为10的放大器代替受测器件。

图5是单位增益和增益为10的测量实例，实际上大约高出1 dB，而变化范围很好地保持在±1 dB以内。

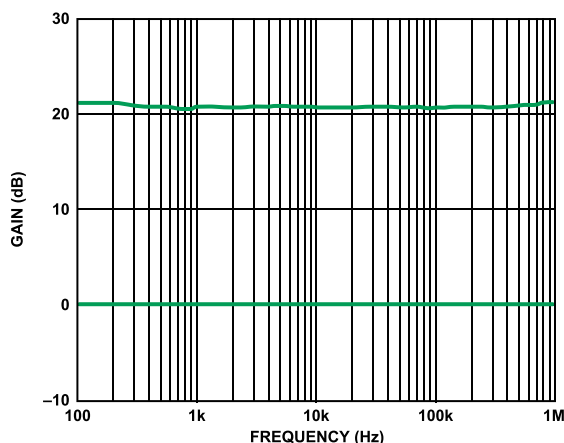


图5. 为验证性能而进行增益数据校准的实例。请注意，当设置为20 dB时，未校准超额增益为+1 dB。

另一个例子是，一旦我们对这一技术有信心之后，我们就可以对一个已知特性的样品器件进行测试。图6显示了典型结果，它叠加于之前采集的数据之上，以验证此方法的精度与您所述方法的精度。测试结果显示存在大约±0.5 dB的误差，表明新系统具有相同的测量性能，但噪声则低得多，而且建立时间更快。

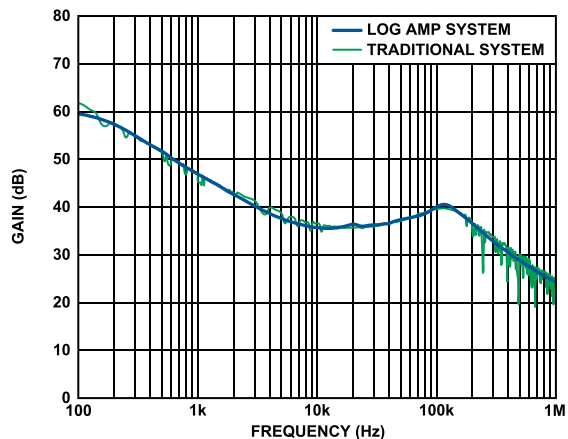


图6. 包含新（蓝色）数据和旧（绿色）数据的波特图数据。请注意传统系统的“采样噪声”。

设备：

1. National Instruments Cardbus GPIB适配器
2. Tektronix TDS3032B, 带GPIB
3. Tektronix AFG320, 带GPIB

问：相关性看来很好，而且看不到以前方法中出现的离群值。完成这一组测量总共用了多长时间？

答：每一次测试所用的时间不到35秒。

问：哇！约提高6000%。

答：是的，除此之外，该设计简单易行，很容易用于嵌入式系统，因为大部分的数学运算是对数放大器完成的。聪明的设计者也可以集成一个相位测量器件，从而把这个系统变成真正的波特图绘图仪。另外，对于高频应用，可以使用单芯片增益和相位测量对数放大器AD8302⁷，实现一体化解决方案。

参考文献—2007年11月有效

- ¹ADI website: www.analog.com (Search) AD5932 (Go)
- ²ADI website: www.analog.com (Search) AD8307 (Go)
- ³ADI website: www.analog.com (Search) AD7992 (Go)
- ⁴ADI website: www.analog.com (Search) AD7994 (Go)
- ⁵ADI website: www.analog.com (Search) AD622 (Go)
- ⁶ADI website: www.analog.com (Search) AD627 (Go)
- ⁷ADI website: www.analog.com (Search) AD8302 (Go)

