

学子专区—2019年7月

ADALM2000

测量环路增益

作者：Antoniu Miclaus和Doug Mercers

目标

本实验的目标是采用电压注入法，利用ADALM2000网络分析仪功能和变压器来测量负反馈系统的环路增益，例如测量反相运算放大器增益。

背景知识

负反馈常用于控制系统中。图1显示了一个简单的负反馈系统。

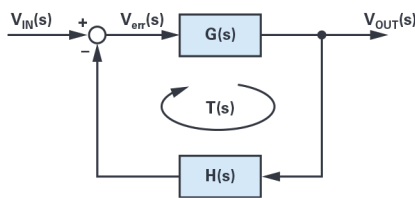


图1 负反馈系统。

其中输出电压与输入电压的关系如下所示：

$$\frac{V_{OUT}(s)}{V_{IN}(s)} = \frac{G(s)}{1 + T(s)}$$

这个关系式被称作闭环传递函数。T(s)被称为环路增益，由该环路上所有增益得出，在本例中， $T(s) = G(s) \times H(s)$ 。

有了环路增益，我们可以利用奈奎斯特稳定性判据来确定增益和相位裕量，以及确定闭环系统的稳定性。

系统的环路增益可从系统的数学模型中得出。这类模型往往不会考虑现实中可能存在的寄生和有害影响。但这些模型对于测量负反馈系统的环路增益是极为有用的。

环路增益测量

电压注入法是测量负反馈系统环路增益的一种方法。以下部分将详细说明如何实施电压注入法，以及为了获得正确的结果应注意什么。

通过使用合适的注入变压器（如ADALP2000模拟套件中包含的HPH1-1400L），我们可以在系统反馈环路合适的注入点注入测试电压。然后，使用网络分析仪（例如ADALM2000）来测量环路响应。

图2显示了使用电压注入法测量反馈系统环路增益时的设置。在反馈环路的注入点插入一个额定值较低的电阻，注入变压器二次绕组跨接在注入电阻两端，以施加测试电压。这种连接方法可以实现测试电压注入的同时，不改变系统的直流偏置工作点。

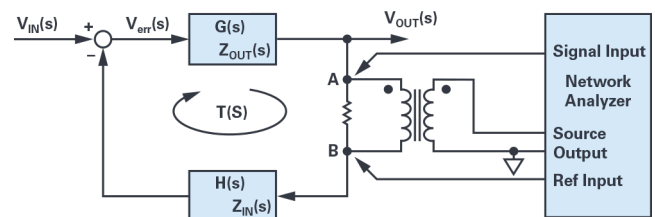


图2 电压注入方法。

通过电压探针，将网络分析仪输入连接至注入电阻的两端。然后，通过测量从点A到B的复杂电压增益来测量环路增益：

$$T(s) = \frac{V_{SIG}(s)}{V_{REF}(s)}$$

其中T(s)表示测量得出的环路增益， V_{SIG} 和 V_{REF} 表示网络分析仪测量得出的电压。

如果满足以下两个条件，则得出的环路增益T(s)约等于实际的环路增益。

条件1

反馈环路上注入点处的前向电阻（H(s)部分的 $Z_{IN}(s)$ ）远远大于从注入点处后向的电阻（G(s)部分的 $Z_{OUT}(s)$ ）。

$$|Z_{IN}(s)| \gg |Z_{OUT}(s)|$$

条件2

为保证测量得出的环路增益约等于实际的环路增益，必须满足的第二个条件是：

$$|T(s)| \gg \frac{|Z_{OUT}(s)|}{|Z_{IN}(s)|}$$

从这些条件我们可以看出，需要选择一个满足条件的注入点，是非常重要的。

第一个条件通常运算放大器的输出端可以满足，一般情况下输出端是低阻抗。其他合适的注入点通常位于高阻抗输入端，例如运算放大器的输入。

第二个条件的检测难度较大,尤其是对于小环路增益时。当测量结果高于交越频率时,需要仔细检查。

同时应尽量将注入电压的量级保持在最低水平，以避免信号产生较大影响，例如饱和度或其他会影响到测量结果非线性度的问题。

如果注入电阻的阻值相对较小，则不会直接影响到测量结果。
电阻阻值一般可以设置为50Ω或小于50Ω。

变压器的频率响应和网络分析仪的动态范围会限制环路增益的测量结果。在以下实验设置中，我们会使用HPH1-1400L变压器，它具备约10 kHz到5 MHz的可用频率响应范围。如果要测量更低频率的环路响应，则需要使用绕组电感更高的变压器。将运放连接为反相放大电路，电阻比设置为 $H(s)$ ，使用类似HPH1-1400L的宽带变压器（例如T1-6T (Mini-Circuits)或WB1010 (Coilcraft)）足以观测ADALP2000模拟套件中的某些运算放大器的环路响应近单位增益(0 dB)。

材料

- ▶ ADALM2000主动学习模块
- ▶ 面包板和跳线
- ▶ 2个10 Ω 电阻

- ▶ 1个100Ω电阻
- ▶ 2个1 kΩ电阻
- ▶ 1个10 kΩ电阻
- ▶ 1个OP27运算放大器
- ▶ 1个OP37运算放大器
- ▶ 1个OP97运算放大器
- ▶ 1个HPH1-1400L变压器（或者其他变压器，例如Mini-Circuits的T1-6T，或者Coilcraft的WB1010）
- ▶ 2个0.1 μF电容（用于Vp和Vn电源的去耦）

指导

如图3所示构建测量设置。注意Vn、Vp电源需要做去耦处理，需要在运算放大器电源引脚（引脚7为+5 V，引脚4为-5 V）增加0.1 μ F的电容（为简化示意图，该部分未在示意图中显示）。如果T1处使用的是HPH1-1400L变压器，应将六个绕组中的三个在串联起来作为原边，将剩余的三个绕组串联起来作为副边（查看变压器组上的操作，了解更多详细信息）。电阻R1设置为1 k Ω ，为了测量三个运算放大器的不同环路增益，电阻R2设置为1 k Ω 或10 k Ω ，使用R4和R5进行分压的目的有两个：第一，R4的电阻为10 Ω 与反馈环路中插入的电阻R3的阻抗匹配。ADALM2000中的AWG无法直接驱动R4，100 Ω 电阻R5的引入可以增加负载电阻，使AWG可以安全驱动。第二，R4、R5可以实现对信号的衰减，我们可以将AWG的幅度设置地足够高，以提供低噪声信号，同时保证向环路注入的信号足够小。

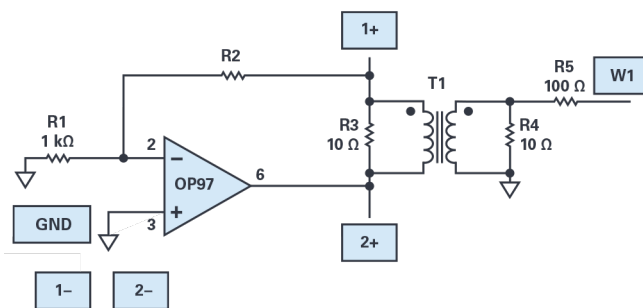


图3. 环路增益测量设置。

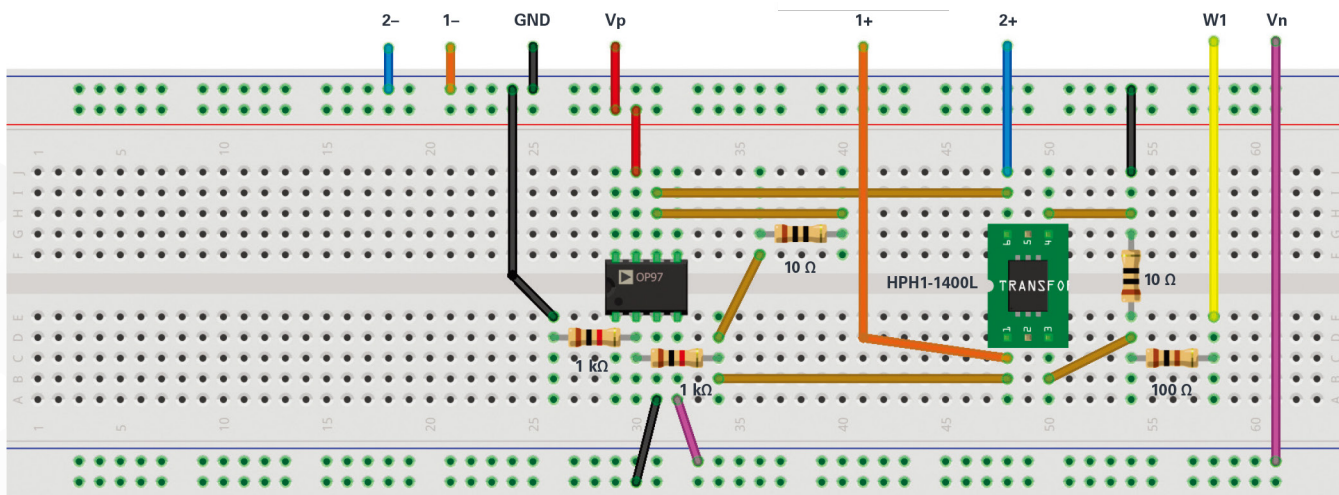


图4. 环路增益测量电路。

硬件设置

浅蓝色区间表示连接ADALM2000模块AWG、示波器通道和电源的位置。确保在反复检查接线之后，再打开电源。

打开电源控制窗口，打开设置好的+5 V和-5 V电源。打开网络分析仪工具，设置扫描起始频率为10 kHz，停止频率为5 MHz。最大增益为1×。将振幅设置为3 V，偏置设置为0 V。使用波特图显示，将可显示的最大幅度设置为40 dB，显示范围设置为80 dB。将可显示的最大相位设置为180°，显示范围设置为360°。在通道选项中，点击使用**通道1**，将其设为基准电压源。将步骤数设为500。

步骤

首次测量我们采用ADALP2000套件中的低带宽放大器OP97，其中R1和R2均设置为1 kΩ。打开电源，开始扫描。注意环路增益为单位值(0 dB)时的频率，以及该频率对应的相位。将扫描数据导出到.csv文件，以便采用MATLAB®或Excel进行深入分析。

扫描结果如图5所示。

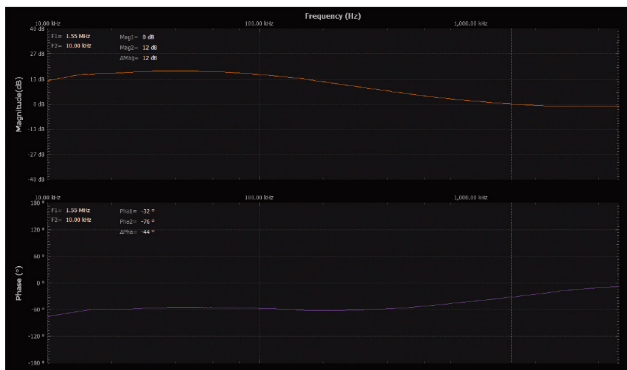


图5. 环路增益测量图。

接下来，使用套件中的高带宽放大器OP27替换OP97。在替换运算放大器之前，请务必关掉电源。替换完成后，重新打开电源，开始扫描。注意此时环路增益为单位值(0 dB)时对应的频率，以及该频率对应的相位，将测量结果与OP97的测量结果进行比较。也可以将扫描数据导出到.csv文件，采用Excel或MATLAB进行深入分析。完成以上操作后，我们使用10 kΩ电阻替代R2处原有的1 kΩ。替换后重新开始扫描。确定环路增益为单位值(0 dB)时的频率变化，以及该频率对应相位的变化，将结果与R2等于1 kΩ时的结果进行对比。

最后，使用套件中的OP37放大器替换OP27。在将运算放大器从电路中取出之前，仍需要关掉电源。替换完成后，重新打开电源并开始扫描。记录环路增益为单位值(0 dB)时的频率，以及该频率对应的相位，并将结果与使用OP27放大器(R2为10 kΩ)时的测量结果进行比较。将扫描数据导出到.csv文件，以便采用Excel或MATLAB进行深入分析。

问题：

对于图3所示的环路增益测量设置，为何要在电路中使用R2和R3？



作者简介

Doug Mercer于1977年毕业于伦斯勒理工学院(RPI)，获电子工程学士学位。自1977年加入ADI公司以来，他直接或间接贡献了30多款数据转换器产品，并拥有13项专利。他于1995年被任命为ADI研究员。2009年，他从全职工作转型，并继续以名誉研究员身份担任ADI顾问，为“主动学习计划”撰稿。2016年，他被任命为RPI ECSE系的驻校工程师。联系方式：doug.mercer@analog.com。



作者简介

Antoni Miclaus是ADI公司的系统应用工程师，从事ADI学术项目、Circuits from the Lab®嵌入式软件和QA过程管理工作。他于2017年2月在罗马尼亚克卢日-纳波卡加盟ADI公司。他目前是贝碧思鲍耶大学软件工程硕士项目的理学硕士生，拥有克卢日-纳波卡科技大学电子与电信工程学士学位。联系方式：antoni.miclaus@analog.com。

