

# 学子专区——2018年9月

## ADALM1000 SMU培训

### 主题9：交流电路中的功率和功率因数

作者：Doug Mercer和Antoniu Miclaus

共享



在《模拟对话》2017年12月文章中介绍SMU ADALM1000之后，我们希望在系列的下一部分进行一些小的基本测量。如需参阅之前的ADALM1000文章，请点击[此处](#)。

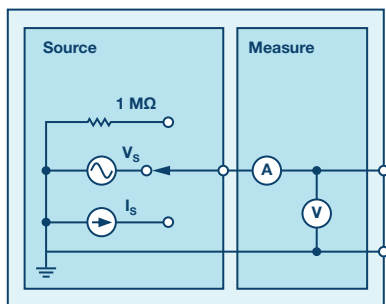


图1. ADALM1000原理图。

#### 目标：

在本次实验活动中，您将确定RC、RL和RLC电路的实际功率、无功功率和视在功率。您还将确定串联RL电路中校正功率因数所需的电容量。

#### 背景：

对于随时间变化的电压和电流，输送到给定负载的功率也随时间变化。此时，变化的功率称为瞬时功率。任何时刻的功率可以是正的，也可以是负的。正功率进入负载并作为热量消散或作为能量储存在负载中，而负功率则从负载中流出（负载中储存的能量）。输送给负载的实际功率是瞬时功率的平均值。

对于交流正弦电压和电流，RC、RL或RLC负载电路消耗的实际功率（P，单位为W）仅在阻性部分中消耗。理想电抗元件（如电容或电感）不消耗实际功率。电抗元件在交流周期的一半时间内储存能量，在另一半时间内释放（提供）能量。无功元件中的功率称为无功功率(Q)，其单位为var（伏安无功）。

负载消耗的实际功率(P)可以计算如下：

$$P = I^2 R$$

其中，R为负载的阻性部分，I为（真）有效值电流。

负载的无功功率可以计算如下：

$$Q = I^2 X$$

其中，X为负载的电抗，I为交流有效值电流。

当负载两端有交流有效值电压(V)且负载中有交流有效值电流(I)通过时，视在功率(S)为有效值电压和有效值电流的乘积，单位为伏安(VA)。视在功率可以计算如下：

$$S = VI$$

如果负载兼有阻性部分和电抗部分，则视在功率既不代表实际功率，也不代表无功功率。它之所以被称为视在功率，是因为它使用与直流功率相同的公式，而不考虑电压和电流波形之间可能的相位差。

利用实际功率、无功功率和视在功率可以绘制功率三角形（矢量图）。实际功率沿水平轴，无功功率沿垂直轴，视在功率形成三角形的斜边，如图2所示。

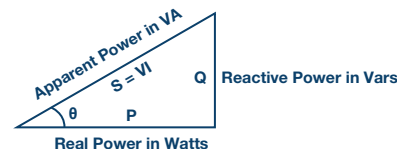


图2. 功率三角形。

使用几何知识，S可以计算如下：

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

角度θ的余弦值定义为功率因数(pf)。功率因数是实际功率(P)与视在功率(S)之比，计算如下：

$$pf = \cos \theta = \frac{P}{S} = \frac{P}{VI}$$

其中θ为电压波形（负载两端）和电流波形（通过负载）之间的相位差。当负载电流滞后于负载电压（感性）时，功率因数被认为是滞后的，而当负载电流超前于负载电压（容性）时，功率因数被认为是超前的。

实际功率也可以从视在功率求得，即将视在功率乘以功率因数：

$$P = VI \cos \theta$$

负载消耗的实际功率（单位为W）可以通过真有效值电阻电流和电阻计算，如下所示：

$$P = I^2 R$$

RC电路中的无功功率（如图3所示）可以使用以下公式计算：

$$Q = V_C I = I^2 X_C$$

其中， $V_C$ 为电容两端的有效值电压， $I$ 为有效值电容电流， $X_C$ 为容抗。

RL电路中的无功功率（如图4所示）可以使用以下公式计算：

$$Q = V_L I = I^2 X_L$$

其中， $V_L$ 为电感两端的有效值电压， $I$ 为有效值电感电流， $X_L$ 为感抗。

RLC电路中的无功功率（如图5所示）可以使用以下公式计算：

$$Q = V_X I = I^2 X$$

其中， $V_X = V_C - V_L$ 为组合总电抗上的有效值电压， $I$ 为电抗中的有效值电流， $X = X_C - X_L$ 为组合总电抗。总电抗上的有效值电压等于电容电压( $V_C$ )和电感电压( $V_L$ )之差，因为这两个电压之间有 $180^\circ$ 相位差（错相）。

### 功率因数校正

大型交流电动机等感性负载一般需要进行功率因数校正。功率因数1（单位）要求峰值电流较小，因此补偿电感以使功率因数尽可能接近1是有利的。这样做的话，实际功率将接近等于视在功率( $VI$ )。功率因数通过将一个电容与感性负载并联来进行校正。

为了求出所需的正确电容值（图6），首先需要知道原始RL电路的无功功率。这是通过绘制功率三角形并求解无功功率来完成的。功率三角形可以根据实际功率和视在功率以及功率因数角 $\theta$ 来绘制。一旦求出原始负载电路的无功功率，校正功率因数所需的容抗 $X_C$ 便可计算如下：

$$Q = \frac{V^2}{X_C}$$

其中 $V$ 为RL电路两端的有效值电压。整理公式：

$$X_C = \frac{V^2}{Q}$$

利用 $X_C$ 的值，所需电容可以根据频率( $F$ )求得，如下所示：

$$X_C = \frac{1}{(2\pi FC)}$$

整理公式：

$$C = \frac{1}{(2\pi F X_C)}$$

将正确的电容与RL负载（电动机）并联，功率因数将接近于1，即电压和电流彼此同相。实际功率将接近等于视在功率。

### 材料：

- ▶ ADALM1000硬件模块
- ▶ 无焊试验板和跳线
- ▶ 一个 $47 \Omega$ 电阻
- ▶ 一个 $100 \Omega$ 电阻
- ▶ 一个 $10 \mu F$ 电容
- ▶ 一个 $47 mH$ 电感

### 关于RC电路的指导：

在无焊试验板上搭建图3所示的RC电路，使用的元件为 $R_1 = 100 \Omega$ ， $C_1 = 10 \mu F$ 。ALM1000需要三个连接，如绿框所示。打开ALICE示波器软件。

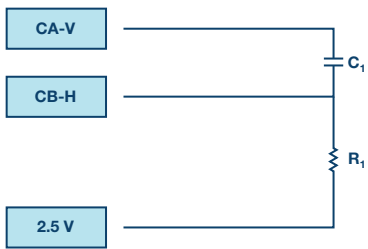


图3. RC交流负载电路。

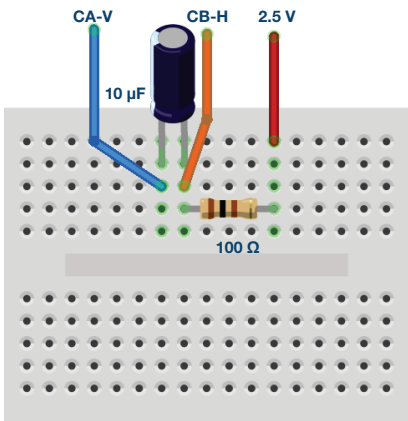
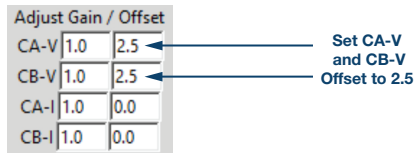


图4. RC交流负载试验板。

## 步骤:

在示波器主窗口的右侧，**CA-V**和**CB-V**失调电压调整输入2.5。在本实验中，我们需要在负载上施加交流信号（±电压），所有测量都以2.5V共模轨为基准。另外，**CH-A**和**CH-B**垂直位置设置（示波器窗口底部）输入0。现在，垂直刻度应该以0为中心，从-2.5到+2.5。将**CA-I**垂直刻度设置为5 mA/Div。



将通道**A** **AWG**最小值设为1.08V，最大值设为3.92V，从而生成一个峰峰值为2.84V，中心为2.5V的1Vrms正弦波，作为输入电压施加于电路。将频率设置为250Hz，相位设置为90°。在**AWG A**模式下下拉菜单中选择**SVMi**模式。在**AWG A**波形下拉菜单中选择“正弦波”。在**AWG B**模式下下拉菜单中选择高阻抗模式。

在**ALICE**曲线下拉菜单中选择显示**CA-V**、**CA-I**和**CB-V**。在触发器下拉菜单中选择**CA-V**和自动电平。

此配置使用示波器查看驱动通道A上电路的交流电压和电流信号，以及通道B上电阻两端的电压。电容两端的电压就是通道A和通道B电压之差（从**Math**下拉菜单中选择**CAV - CBV**）。请确保已勾选**Sync AWG**选择器。

软件可以计算通道A电压和电流波形的有效值，以及通道B电压波形的有效值。此外，软件还计算通道A和通道B电压波形的逐点差的均方根值。在本实验中，这将是电容两端电压的有效值。要显示这些值，请在**Meas CA**下拉菜单的**-CA-V-**部分下选择**RMS**和**CA-CB RMS**，在**-CA-I-**部分下选择**RMS**。在**Meas CB**下拉菜单的**-CB-V-**部分下选择**RMS**。您可能还希望显示CA-V、CA-I和CB-V的最大值（或正峰值）。

单击运行按钮。调节时间基准，直到显示屏方格上显示两个周期以上的正弦波。将迟缓设为4.0 ms。应该看到四条曲线：通道A电压、通道B电压、通道A电流和CA-CB电压曲线。电阻选择100 Ω，电流的垂直刻度为5 mA/Div，因此电阻中电流的曲线将位于通道B电阻上电压曲线的正上方，其垂直刻度设置为0.5 V/Div（0.5 mA x 100Ω = 0.5 V）。

记录整个RC电路的电压有效值(**CHA V RMS**)，通过R<sub>1</sub>的电流（其也是该串联电路中通道A的电流）有效值(**CHA I RMS**)，电阻两端的电压有效值(**CHB V RMS**)，以及电容两端电压的有效值(**A-B RMS**)。

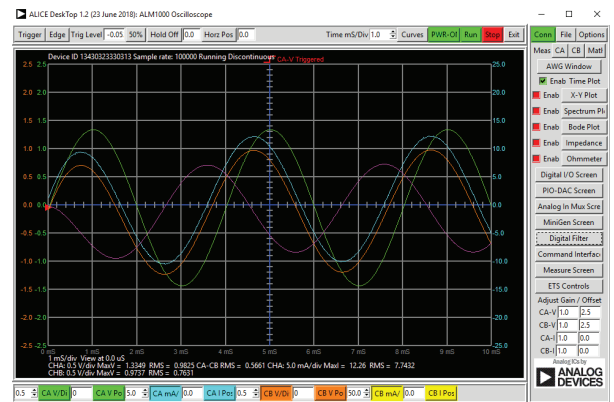


图5. RC交流负载波形和测量。

根据这些值，计算RC电路的实际功率(P)。计算无功功率(Q)。计算视在功率(S)。

根据P、Q和S的计算值，绘制功率三角形，如图2所示。确定RC电路的功率因数(pf)和 $\theta$ 。

示波器曲线显示电压（绿色通道A电压曲线）和电流（青色通道A电流曲线）之间的时间关系。使用显示标记或时间光标，测量两条曲线过零点之间的时间差，由此得出二者之间的相位角。使用此角度( $\theta$ )计算功率因数。

这与您从P、Q、S以及功率三角形获得的值相比如何？功率因数滞后还是超前？为什么？

## 关于RL电路的指导:

首先使用ALICE中的直流欧姆表工具测量47 mH电感的直流电阻。RL电路的总串联电阻为电感电阻加47 Ω外部电阻R<sub>1</sub>。在计算实际功率和无功功率时，需要考虑总电阻。

在无焊试验板上搭建图5所示的RL电路，使用的元件为R<sub>1</sub> = 47 Ω，L<sub>1</sub> = 47 mH。

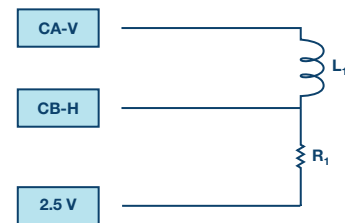


图6. RL交流负载电路。

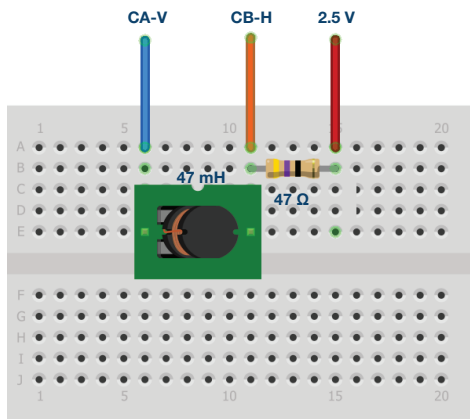


图7. RL交流负载试验板。

### 步骤：

单击运行按钮。调节时间基准，直到显示屏方格上显示两个周期以上的正弦波。将迟缓设为4.0ms。应该看到四条曲线：通道A电压、通道B电压、通道A电流和CA-CB电压曲线。

记录整个RL电路的电压有效值( $CH_A$  V RMS)，通过 $R_1$ 的电流（其也是该串联电路中通道A的电流）有效值( $CH_A$  I RMS)，电阻两端的电压有效值( $CH_B$  V RMS)，以及电感两端电压的有效值(A-B RMS)。

根据这些值，计算RL电路的实际功率(P)。计算无功功率(Q)。计算视在功率(S)。

根据P、Q和S的计算值，绘制功率三角形，如图2所示。确定RL电路的功率因数(pf)和 $\theta$ 。

示波器曲线显示电压（绿色通道A电压曲线）和电流（青色通道A电流曲线）之间的时间关系。使用显示标记或时间光标，测量两条曲线过零点之间的时间差，由此得出二者之间的相位角。使用此角度( $\theta$ )计算功率因数。

这与您从P、Q、S以及功率三角形获得的值相比如何？功率因数滞后还是超前？为什么？

### 关于RLC电路的指导：

在无焊试验板上搭建图8(a)所示的RLC电路，使用的元件为 $R_1 = 47\ \Omega$ ， $C_1 = 10\ \mu\text{F}$ ， $L_1 = 47\ \text{mH}$ 。

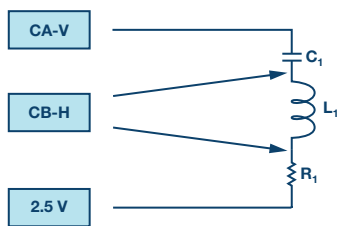


图8 (a). 测量电容的RLC交流负载电路。

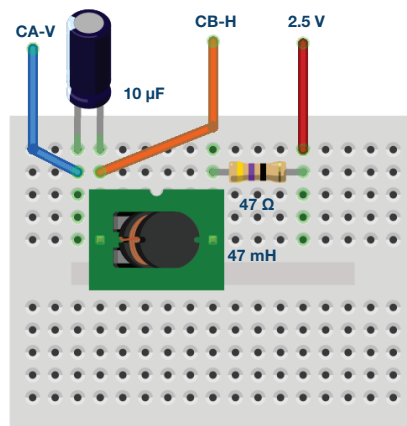


图8 (b). 测量电感的RLC交流负载电路试验板。

### 步骤：

对于RLC电路，您需要测量每个元件上的交流有效值电压。在图8(a)所示的配置中，通道B连接到 $C_1$ 和 $L_1$ 的接合点，我们可以从CA和CB波形之差得到 $C_1$ 上的有效值电压。通道B连接到 $L_1$ 和 $R_1$ 的接合点，我们可以直接从CB波形获得 $R_1$ 上的有效值电压。记录整个RLC电路的电压有效值( $CH_A$  V RMS)，通过 $R_1$ 的电流（其也是该串联电路中通道A的电流）有效值( $CH_A$  I RMS)，电阻两端的电压有效值( $CH_B$  V RMS)，电容两端电压的有效值（A-B RMS，当CHB连接到 $C_1$ 和 $L_1$ 的接合点时），以及 $L_1$ 和 $C_1$ 的组合电抗（当CHB连接到 $L_1$ 和 $R_1$ 的接合点时）。

我们仍然需要电感 $L_1$ 上的有效值电压。交换该串联电路中元件的顺序，如图8(c)所示，不会改变负载电路的总阻抗。但是，现在可以从CA和CB波形之差获得 $L_1$ 上的有效值电压，就像我们对图8(a)中的电容所做的那样。记录整个RLC电路的电压有效值( $CH_A$  V RMS)，通过 $R_1$ 的电流（其也是该串联电路中通道A的电流）有效值( $CH_A$  I RMS)，电阻两端的电压有效值( $CH_B$  V RMS)，以及电感两端电压的有效值(A-B RMS)。检查整个电路的值以及通过负载的电流和 $R_1$ 上的电压值是否与图8(a)中的测量值相同。为什么会这样？

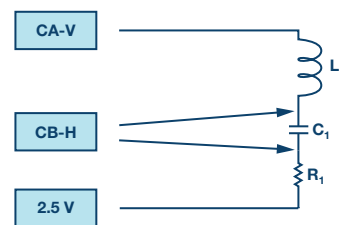


图8(c). 测量电感的RLC交流负载电路。

根据这些值，计算RLC电路的实际功率(P)。计算LC组合电抗的无功功率(Q)以及L和C单独的无功功率。计算视在功率(S)。

将通道A的频率从250 Hz增加到500 Hz，重新测量RLC电路的有效值电压。这如何改变实际功率、无功功率和视在功率？负载电流是滞后还是超前？为什么？

将通道A的频率降到125 Hz，重新测量RLC电路的有效值电压。这如何改变实际功率、无功功率和视在功率？负载电流是滞后还是超前？为什么？

关于功率因数校正的指导：

图9所示用于功率因数校正的电路与图6相同，不过增加了一个电容 $C_1$ 与 $L_1$ 并联。

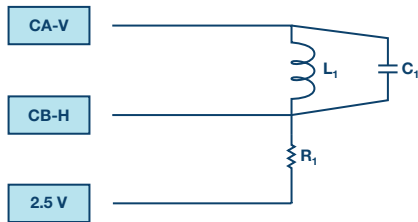


图9. RL交流负载的功率因数校正。

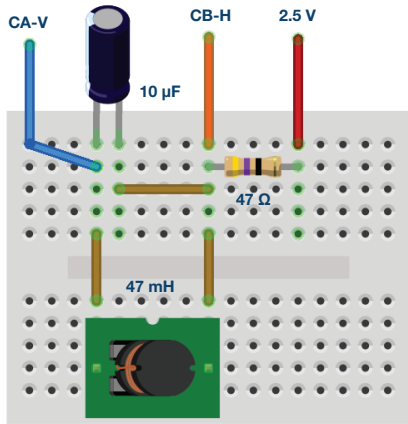


图10. RL交流负载的功率因数校正试验板。

根据图6中的测量结果和本实验活动背景信息中功率因数校正部分中的公式，计算 $C_1$ 在250 Hz时的适当值。 $C_1$ 使用最接近的标准值（或标准值的并联组合）电容。

步骤：

正如针对简单RL电路所做的那样，记录整个RL电路的电压有效值( $CHAV_{RMS}$ )，通过 $R_1$ 的电流（其也是该串联电路中通道A的电流）有效值( $CHAI_{RMS}$ )，电阻两端的电压有效值( $CHBV_{RMS}$ )，以及电感两端电压的有效值( $A-B_{RMS}$ )。

根据这些值，计算RL电路的实际功率(P)。计算无功功率(Q)。计算视在功率(S)。

根据P、Q和S的计算值，绘制功率三角形，如图2所示。确定pf校正的RL电路的功率因数(pf)和 $\theta$ 。将此pf与您就RL负载电路计算出

的pf进行比较。计算出的电容值与使pf等于1所需的最佳值有多接近？解释为何存在差异。

附录：

使用其他元件值

在指定值不易获得的情况下，可以用其他元件值代替。元件的电抗( $X_C$ 或 $X_L$ )随频率而变化。例如，若有4.7 mH电感可用，而没有47 mH电感，那么只需将测试频率从250 Hz提高到2.5 kHz。用1.0μF电容替换指定的10.0μF电容时也是如此。

使用RLC阻抗计工具

ALICE桌面工具包括一个阻抗分析仪/RLC仪，可用于测量串联电阻(R)和电抗(X)。作为本实验活动的一部分，使用此工具测量元件R、L和C以确认测试结果可能是有益的。

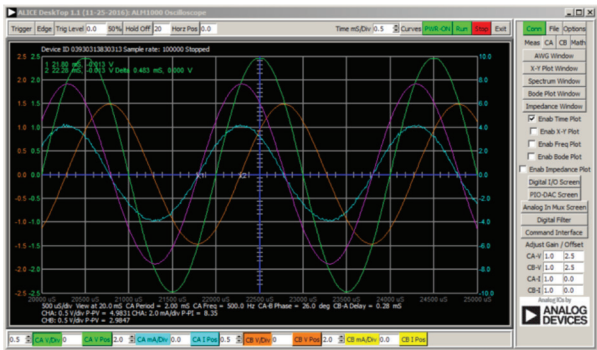


图11. 使用附录中的新值的屏幕截图，Time/Div设置为0.5 mS。

您可以在[学子专区博客](#)上找到问题答案。

问题：

- ▶ 一般而言，提高功率因数有何效果？
- ▶ 提高功率因数最常见的方法是什么？

注释

与所有ALM实验室一样，当涉及与ALM1000连接器的连接和配置硬件时，我们使用以下术语。绿色阴影矩形表示与ADALM1000模拟I/O连接器的连接。模拟I/O通道引脚被称为CA和CB。当配置为驱动电压/测量电流时，添加-V，例如CA-V；当配置为驱动电流/测量电压时，添加-I，例如CA-I。当通道配置为高阻态模式以仅测量电压时，添加-H，例如CA-H。

示波器迹线同样按照通道和电压/电流来指称，例如：CA-V和CB-V指电压波形，CA-I和CB-I指电流波形。

对于本文示例，我们使用的是ALICE 1.1版软件。

文件：alice-desktop-1.1-setup.zip。请点击[此处](#)下载。

ALICE桌面软件提供如下功能：

- ▶ 双通道示波器，用于时域显示和电压/电流波形分析。
- ▶ 双通道任意波形发生器(AWG)控制。
- ▶ X和Y显示，用于绘制捕捉的电压/电流与电压/电流数据，以及电压波形直方图。
- ▶ 双通道频谱分析仪，用于频域显示和电压波形分析。
- ▶ 波特图绘图仪和内置扫描发生器的网络分析仪。
- ▶ 阻抗分析仪，用于分析复杂RLC网络，以及用作RLC仪和矢量电压表。
- ▶ 一个直流欧姆表相对于已知外部电阻或已知内部50 Ω电阻测量未知电阻。

- ▶ 使用ADALP2000模拟器件套件中的AD584精密2.5 V基准电压源进行电路板自校准。
- ▶ ALICE M1K电压表。
- ▶ ALICE M1K表源。
- ▶ ALICE M1K桌面工具。

欲了解更多信息，请点击[此处](#)。

注：需要将ADALM1000连接到你的PC才能使用该软件。

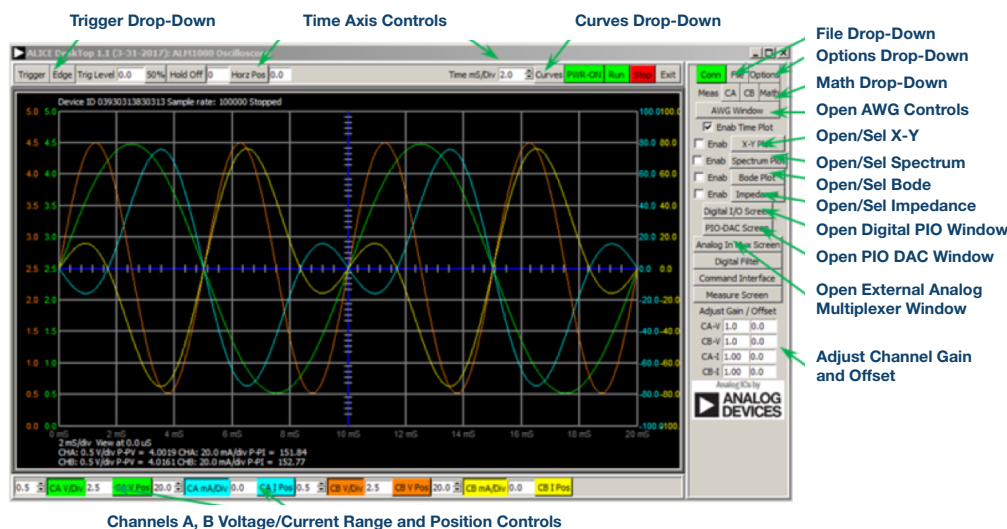


图12. ALICE桌面1.1菜单。

Doug Mercer [doug.mercer@analog.com]于1977年获得伦斯勒理工学院(RPI)电气工程学士学位。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。



Doug Mercer

该作者的其他文章：  
[ADALM1000 SMU培训](#)  
[主题7：RLC电路中的谐振](#)  
[学子专区—2018年7月](#)

Antoniu Miclaus [antoni.miclaus@analog.com]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-纳波卡开始在ADI公司工作。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。



Antoniu Miclaus

该作者的其他文章：  
[ADALM1000 SMU培训](#)  
[主题7：RLC电路中的谐振](#)  
[学子专区—2018年7月](#)