

---

# 频率特性分析仪使用手册

## 目录

1.	仪器简介 .....	2
2.	仪器使用 .....	2
2.1	环路增益测试 .....	2
2.1.1	环路增益测试的意义.....	2
2.1.2	负反馈环路稳定性判断标准.....	2
2.1.3	环路稳定性和输出动态响应的影响.....	3
2.1.4	环路增益测试连接方法及注意事项.....	5
2.1.5	软件设置和结果处理.....	6
2.2	传输特性测试 .....	9
2.2.1	并联稳压器的测量.....	9
2.2.2	光电耦合器的测量.....	10
2.2.3	由并联稳压器构成的光电耦合器驱动回路测量.....	11
2.2.4	滤波器的测量 .....	11
2.2.5	软件设置和结果处理.....	12
2.3	阻抗测试 .....	15
2.3.1	电源的输出阻抗测量原理和方法.....	15
2.3.2	元器件的阻抗测量原理和方法.....	16
2.3.3	利用夹具进行电源输出阻抗测试和元器件的阻抗测试.....	17
2.3.4	软件设置和结果处理.....	18
2.4	LCR 测试 .....	20
2.4.1	利用夹具进行 LCR 测试之阻抗测试.....	21
2.4.2	利用夹具进行 LCR 测试之电阻测试.....	22
2.4.3	利用夹具进行 LCR 测试之电感测试.....	23
2.4.4	利用夹具进行 LCR 测试之电容测试.....	24
2.5	阻抗和 LCR 的测量范围 .....	25
2.6	幅度/相位 (Amplitude Phase) 测试 .....	27
2.7	波形测试 .....	28
2.8	软件中英文切换及文档信息 .....	29

## 1. 仪器简介

频率特性分析仪（FRA）是一款能够在 1Hz~15MHz 频率范围内精确测量输入信号的振幅（增益）和相位差的精密仪器。包含一路信号源输出（OSC）和两路测试输入通道（CH1、CH2）。可用于负反馈环路的稳定性分析（特别是针对开关电源的环路特性的测试），电路输出阻抗测试，电路的传输特性测试，元器件的阻抗测试等。

仪器需配合上位机软件使用，仪器通过 USB 数据线和上位机（PC）进行通讯。利用上位机软件可以非常方便地对仪器进行操作，并完成相应的测试项目。软件中共包含六种测试模式供用户选择，分别是：环路增益测试（Loop Gain）、传输特性测试（Transfer）、阻抗测试（impetance）、LCR 模式（Component LCR）、幅度/相位模式（Amplitude/phase）、波形模式（Waveform Scope）。

## 2. 仪器使用

### 2.1 环路增益测试

#### 2.1.1 环路增益测试的意义

AC-DC/DC-DC 开关电源作为电路系统的供电模块，因其小巧、重量轻、效率高而被广泛应用。开关电源内部采用开关回路和 PWM 技术，为使其输出恒定电压并保证输出阻抗足够低，其整体使用了负反馈电路技术。负反馈电路是早就为人所知的有用技术，但若设计稍有差错，就会引起异常的振荡，因此其稳定性的评估就显得尤为重要。环路增益测试就是用来评估负反馈电路的稳定性及响应特性一项测试。

#### 2.1.2 负反馈环路稳定性判断标准

负反馈电路框图如下：

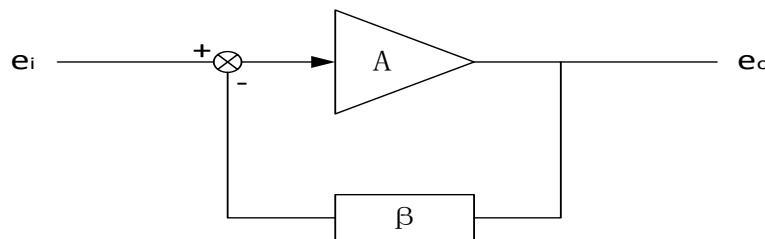


图 1.1 负反馈回路框图

负反馈电路的传递函数可由下列公式求得：

$$\frac{e_o}{e_i} = \frac{A}{1 + A\beta}$$

放大器开环增益  $A$  是频率的函数，会随着频率增加而减小，同时输入输出间相位也会发生变化，当  $A\beta = -1$  时，其传递值为  $\infty$ ，增益无穷大，可以认为任意小的输入扰动都能引起输出的无穷大，如果情况出现在实际的反馈系统中，势必会造成最后输出的振荡，整个系统不再稳定。所以说可以通过分析环路增益  $A\beta$  的频率特性即可判断系统的稳定性。

环路增益  $|A\beta|$  及环路相位差  $\angle A\beta$  的频率特性用波特（Bode）图表示时，系统的稳定性可以通过相位余量和增益余量来判断。注意需要同时关注增益和相位余量，不能只控制器中一方，其中：

**相位余量（Phase margin）**是指：增益降到 0dB 时所对应的相位，以度（deg）为单位表示（图 1.2）。

**增益余量（gain margin）**是指：相位为 0 时所对应的增益大小，以分贝（dB）为单位来表示（图 1.2）。

**穿越频率（crossover frequency）**是指：增益曲线穿越 0dB 时的频率点（图 1.2）。

穿越频率频带宽度（**环路带宽**）的大小可以反映控制环路响应的快慢。一般认为环路带宽越宽，其对

负载动态响应的抑制能力就越好，过冲、欠冲越小，恢复时间就越快，系统从而可以更稳定，一般取开关频率的  $1/20 \sim 1/6$ 。

表 1 相位余量及增益余量的值

相位余量[度]	增益余量[dB]	
20	3	严重的振荡，数据极差
30	5	少量的振荡，数据较差
45	7	临界阻尼，最佳响应时间
60	10	一般性的合适数据
72	12	希望作为基准的值 闭环响应无峰值

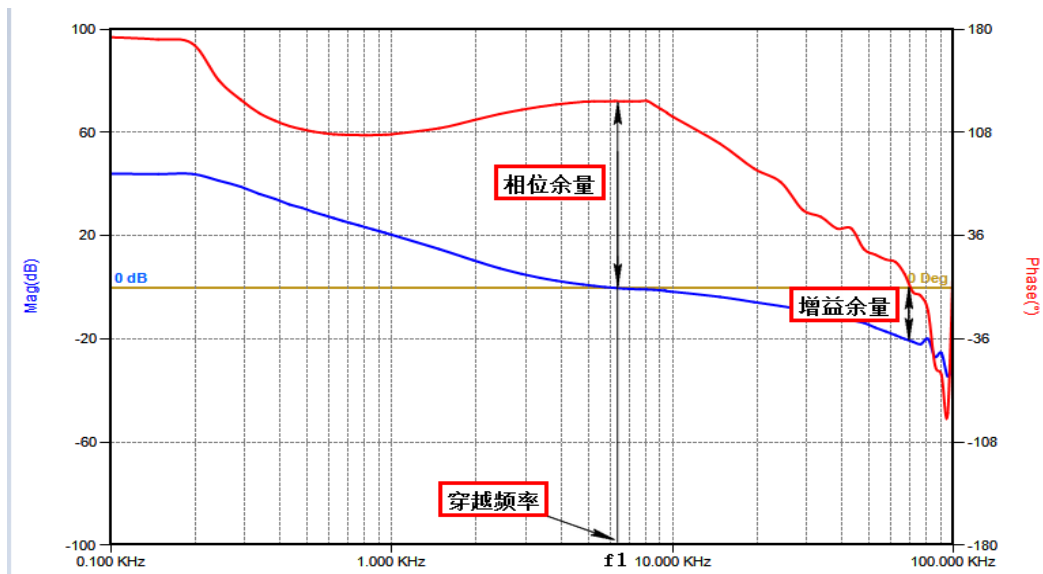


图 1.2 波特图-增益余量和相位余量

## 2.1.3 环路稳定性和输出动态响应的影响

### 一、穿越频率（环路带宽）对电源动态响应的影响

以下为一测试实例，通过该实例我们可以直观的看到环路带宽对电源动态响应的影响，测试条件为给电源加上一个动态负载，负载电流从 0.1A 跳变至 2A，重复频率为 1KHz。调节电源的穿越频率，依次从小到大，测试输出电压的变化情况。

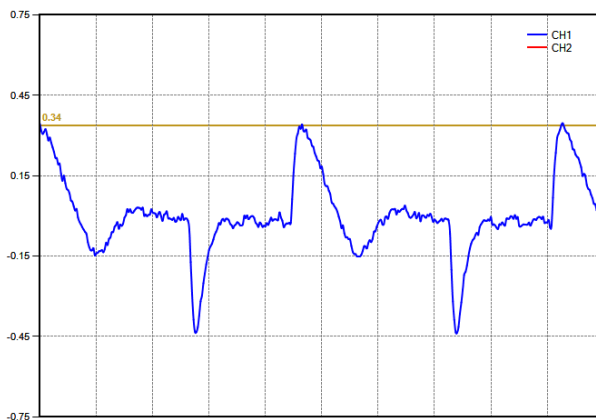


图 1.3 环路带宽 15KHz 时电源输出响应

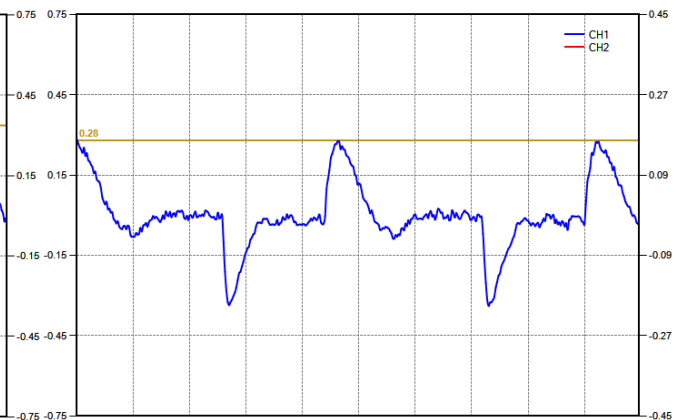


图 1.4 环路带宽 25KHz 时电源输出响应

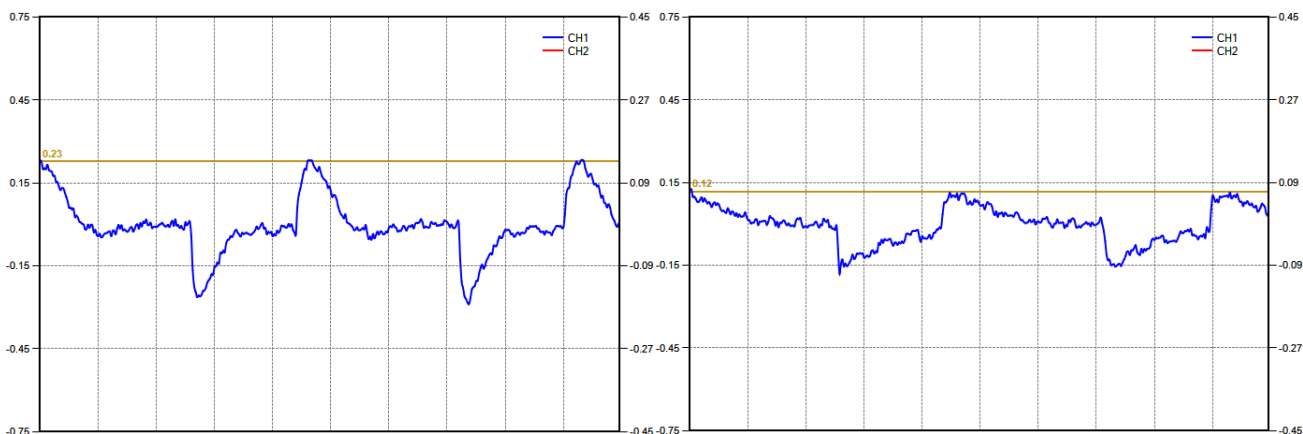


图 1.5 环路带宽 35KHz 时电源输出响应

图 1.6 环路带宽 50KHz 时电源输出响应

从测试结果可知，当电源负载变动时，电源无法及时响应负载的变化，输出电压将产生波动。当环路带宽分别从 15K 变化到 50KHz 时，输出电压波动逐渐减小，波动峰值由 0.34V 变化至 0.12V。可见，增大环路带宽对提高电源输出动态响应很有帮助。

## 二、相位余量对电源稳定性的影响

以下同样给定测试条件：给电源加上一个动态负载，负载电流从 0.1A 跳变至 2A，重复频率为 1KHz。调节电源的相位余量，依次从大到小，测试输出电压的变化情况。

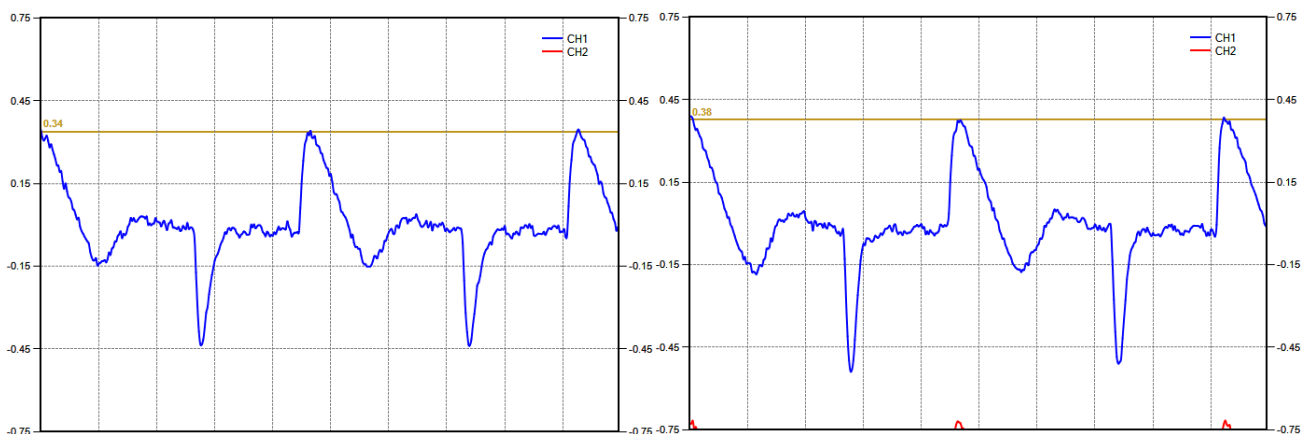


图 1.7 相位余量 60 度时电源输出响应

图 1.8 相位余量 45 度时电源输出响应

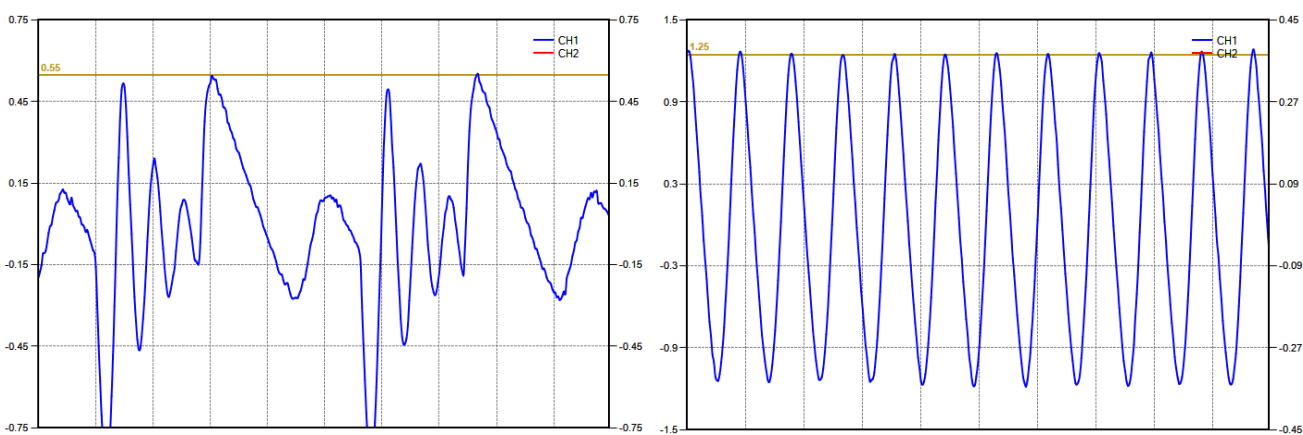


图 1.9 相位余量 12 度时电源输出响应

图 1.10 相位余量 0 度时电源输出响应

从测试结果可知，相位余量越大时，电源输出过冲（波动）越小。当相位余量低于 45 度（12 度）时，输出出现了明显的阻尼振荡现象，输出的波动变得非常之大；当相位余量为 0 时，输出出现了一个持

续稳定的振荡现象。

## 2.1.4 环路增益测试连接方法及注意事项

环路增益测试典型连接方法如图 1.11 所示。

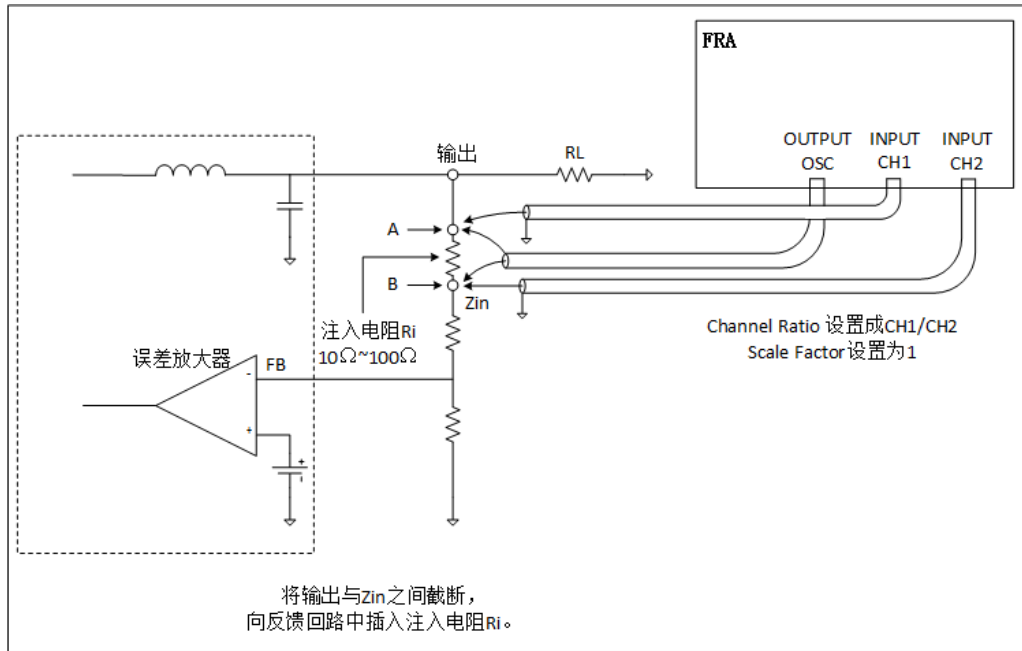


图 1.11 环路增益测试连接图

### 注意事项：

1. 注入电阻的位置必须是可以使整个环路都断开的地方，如图 1.12 所示。

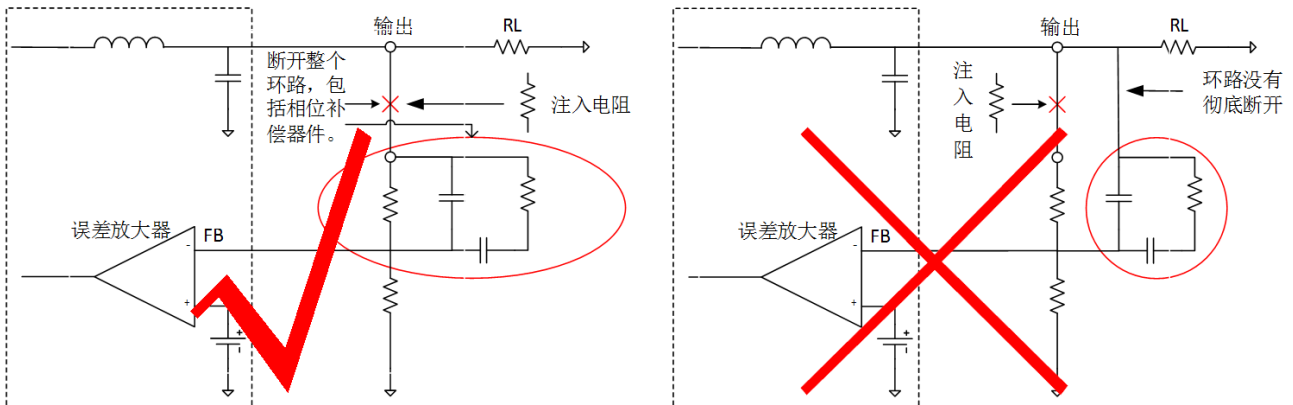


图 1.12 正确与错误的连接方式示例

2. 注入电阻  $R_i$  相对于截断点的输入阻抗  $Z_{in}$  必须足够小，通常为  $10\ \Omega \sim 100\ \Omega$ 。仪器 (FRA) 的源输出阻抗为  $50\ \Omega$ ， $R_i$  和源输出阻抗会对源输出电压进行分压； $R_i$  越小，分得的注入信号幅度越小。

3. 注入信号幅度越大，测试灵敏度越高，但一般不超过电源输出电压的 5%。过大的注入幅度将使回路进入非线性状态，导致测量误差。可以一边调节 FRA 的 OSC 输出幅度和频率，一边通过示波器测试图 1.11 中 A、B 两点的波形。测试波形 (叠加有开关噪声) 如图 1.13 所示，表明回路处于线性状态；波形如图 1.14 所示，信号有大的失真，表明回路处于非线性状态，需要减小注入信号幅度。



图 1.13 线性运行状态的波形

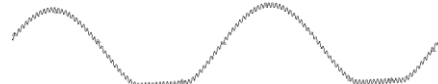


图 1.14 非线性运行状态的波形

## 2.1.5 软件设置和结果处理

### 一、软件设置

测试软件界面如图 1.15 所示，界面左侧为设置区，右侧为数据显示区。在测试前，需进行正确设置，具体如下：

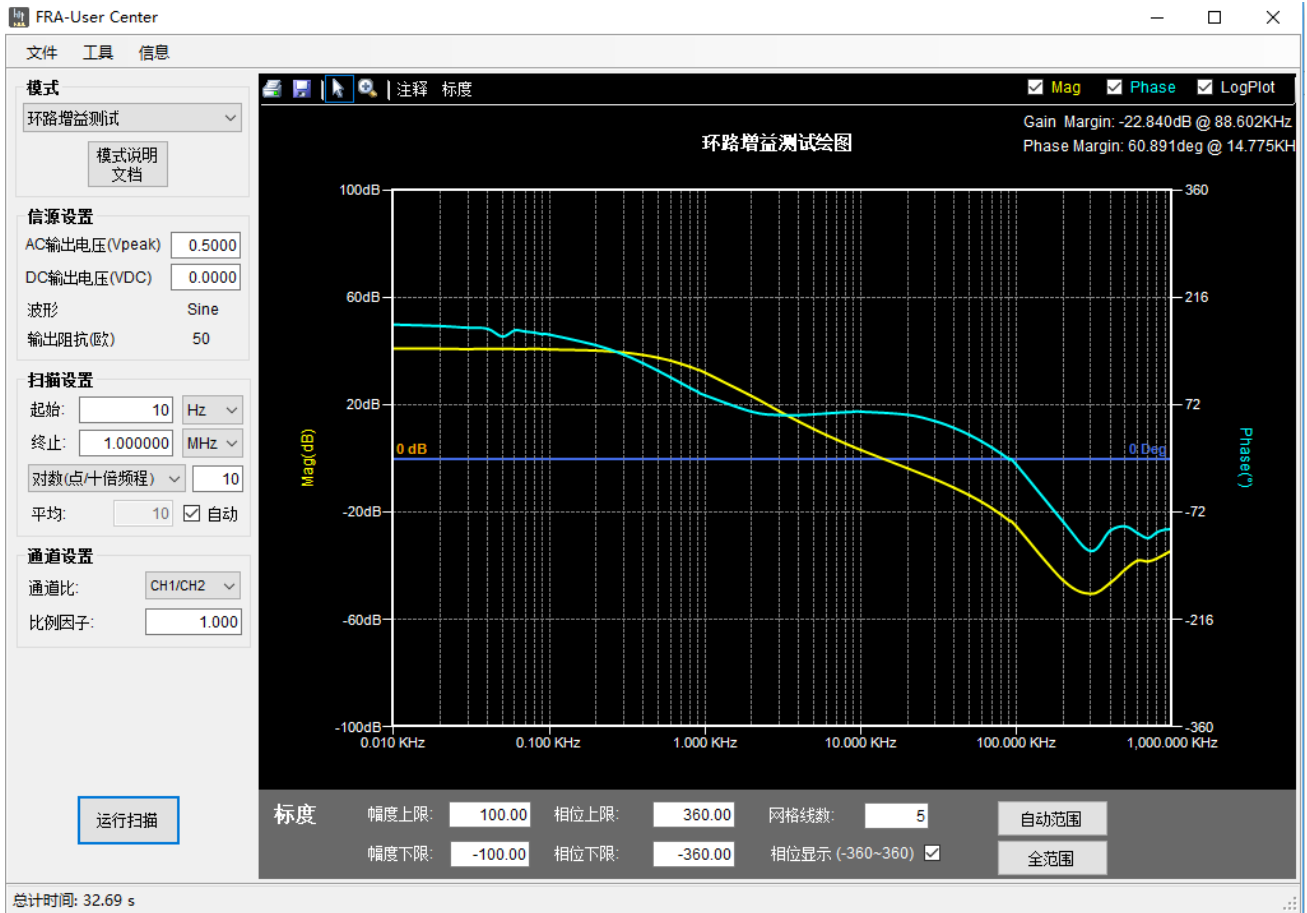


图 1.15 Loop Gain 测试软件界面

#### (1) 模式 (Mode)

模式 (Mode)：选择测试模式。

模式说明文档 (Mode help)：点击该按钮将弹出测试说明文档。

#### (2) 信源设置 (OSC Set)：

AC 输出电压 (Vpeak)：设置信号源输出电压峰值 (开路时端口电压)。

DC 输出电压 (Vdc)：设置信号源输出的直流偏移，Loop Gain 模式需设置为 0。

波形 Sine：设置信号源波形形式，默认正弦波。

输出阻抗 (欧) 50：源输出阻抗 50 欧。

#### (3) 分段注入功能：

软件提供信号源分段注入功能，当环路增益绝对值大时，信号微弱，为了获得准确稳定度测试结果，可适当增大注入幅度；当环路增益绝对值小时，信号较强，可以适当减小注入幅度，保证环路处于线性工作状态。点击软件左上角的“工具->注入源分段”(Tool->OSC Staged inject)，弹出对话框。勾选 USE Staged injection，可设置不同频率段的注入幅度，如图 1.16 所示。取消分段注入模式时，不勾选 USE Staged injection。

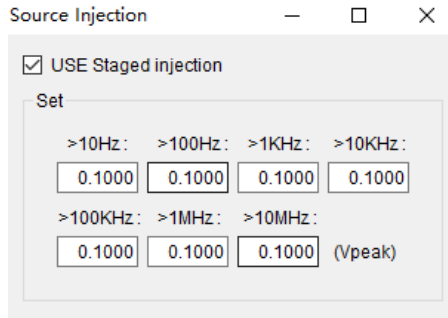


图 1.16 分段注入设置界面

(4) 扫描设置 (Sweep Set) :

起始 (Start): 设置扫描起始频率。

终止 (Stop): 设置扫描终止频率。

对数 (点/十倍频程) (Log(Steps/Decade)) : 扫描频率范围内进行对数扫描, 每 10 倍频程设置 N 个点待测频点。

线性 (总点数) (Line(Total Points)) : 扫描频率范围内进行线性扫描, 设置 N 个平均分布在扫描频率区间内的待测频点。

平均 (Circles) : 当测试曲线毛刺较多、波动大时, 可适当增加 Circles 值, 提高灵敏度, 默认 Auto。



图 1.17 相位显示范围设置图

相位显示 (Phase View): 复选框勾选上, 相位显示范围为-360~360 度; 复选框去掉时, 相位显示范围-180~180 度。设置完后需要重新“运行扫描” (Run Sweep) 才能生效。

(5) 结果设置 (Result Set)

通道比 (Channel Ratio): 设置为 CH1/CH2 时, 实际测量的幅度比为 CH1/CH2, 相位差为 CH1-CH2; 设置为 CH2/CH1 时, 实际测量的幅度比为 CH2/CH1。相位差为 CH2-CH1。环路增益模式 (Loop Gain) 模式下, 按图 1.11 连接时, Channel Ratio 应设置为 CH1/CH2。

比例因子 (Scale Factor): 数据显示结果为仪器测量结果 (CH1/CH2 或 CH2/CH1) 乘以 Scale Factor, 默认设置为 1。

(6) 运行扫描 (Run Sweep)

扫描开始按钮, 点击该按钮开始扫描。

## 二、结果处理

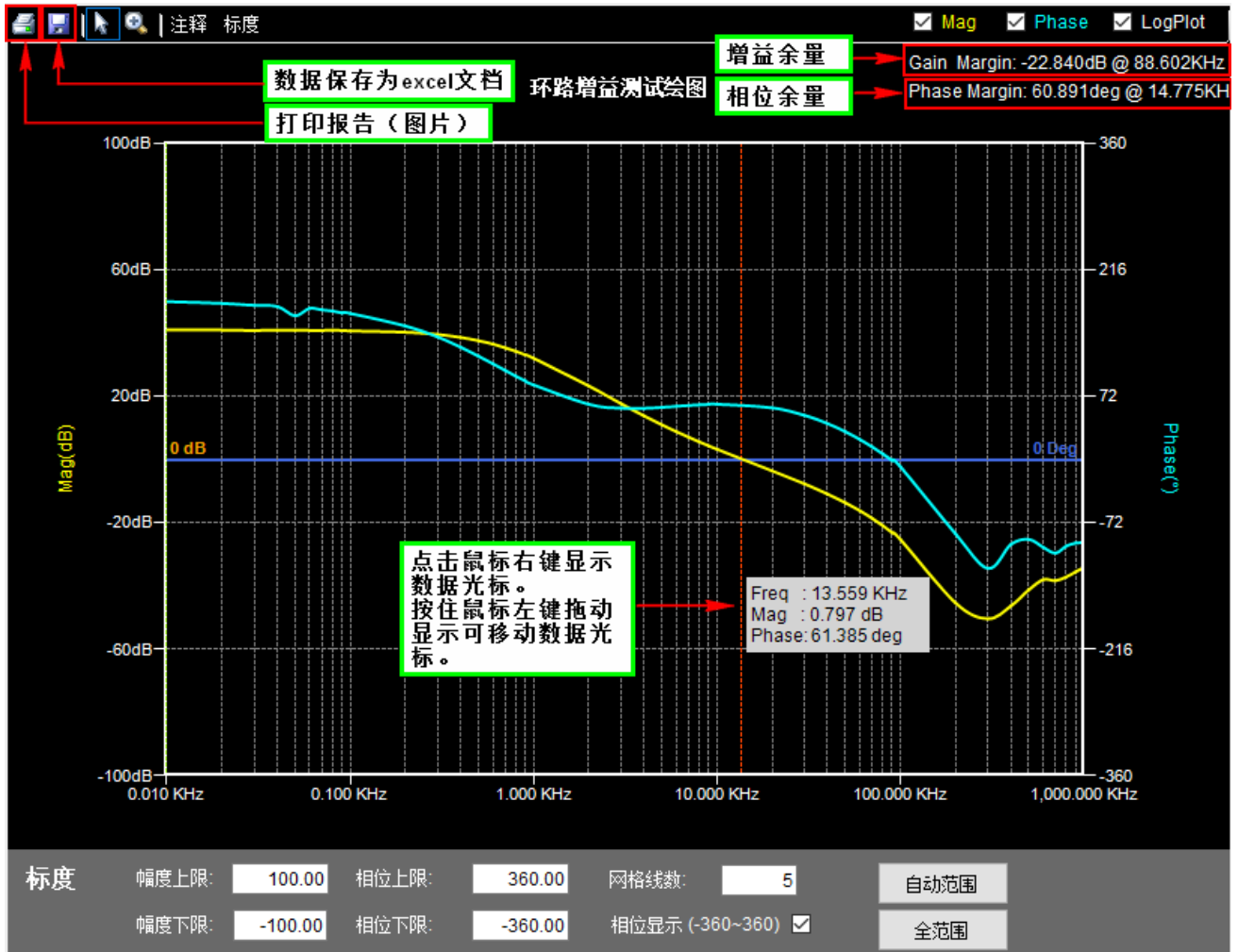


图 1.18 数据显示窗口

(1) 完成一次扫描后，软件右上角将自动显示相位余量（Phase Margin）以及增益余量（Gain Margin）。

(2) 可以在曲线区域按住鼠标左键并拖动，或者直接点击鼠标右键，将显示数据光标轴，光标轴与曲线相交处的数据将以数据框的形式自动显示出来，以获得更精确的结果。对准光标轴或数据框，再次单击鼠标左键（绿色光标轴）或右键（红色光标轴）将取消光标轴及对应数据的显示。

(3) 窗口右下角，选择自动范围（Auto Scale），可将坐标轴范围自动适应曲线，使图表更完整清晰。选择全范围（Full Scale），将显示最大坐标范围。

(4) 数据窗口左上角，可选择打印（图文报告）、保存数据（excel 表格）、放大等操作。

## 2.2 传输特性测试

决定开关电源稳定程度的环路增益，可认为是包含在回路中的各个零部件的传输特性串联而成。通过掌握各个零部件的传输特性，就可以比较容易地预测由于零部件的特性离散和品种差异引起的环路增益变化。

FRA 也可以用于某些零部件传输特性的测量，如并联稳压器、光电耦合器、LC 滤波器等，测试方法与回路增益相似。这里介绍关于在开关电源的二次侧具有代表性的有源零部件即并联稳压器和承担从二次侧向一次侧起反馈作用的光电耦合器、以及这两者组合一起的回路、还有作为无源输出的 LC 滤波器的传递特性的测量方法。

### 2.2.1 并联稳压器的测量

在并联稳压器使用方法中，有将其作为电压稳定元件和误差放大器的情况。电压稳定元件的传输特性，可以用对于输入电压变化所引起的输出电压（阴极电压）的变化作为频率特性来表示。作为误差放大器的传输特性，可以用对于电压的变化所引起的阴极电流作为频率特性表示。无论哪一种情况下，因为在高频区域中运行时其功能都会丧失，所以确认所需的频带中能否充分正常的运行，就变得尤为重要。

#### 1) 作为电压稳定元件时的测量

##### ●测量方法

测量时的回路如图 2.1 所示。使用并联稳压器，可 FRA 内部提供稳定的直流电压，不需要外接直流电源。由并联稳压器供应的稳定的电压是相对于负荷供给 5V、3mA 的设定。因为 FRA 对直流不具有感应度，所以即使是重叠在直流上面的交流信号，也能以最佳的感应度对其交流信号振幅来进行测量。

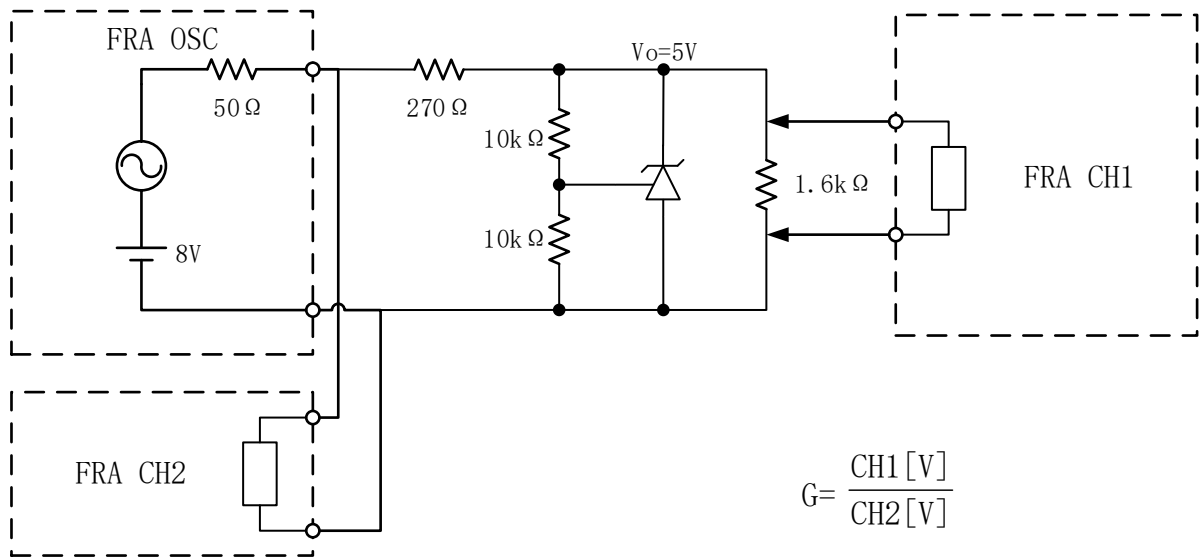


图 2.1 由并联稳压器实现电压稳定的传输回路测试

#### 2) 作为误差放大器时的测量

##### ●测量方法

测量时的回路如图 2.2 所示。使用并联稳压器进行误差检测时，可由 FRA 内部提供稳定的直流电压，不需要外接直流电源。因为并联稳压器的响应是电流形式的，所以通过采用较小的电阻将其转换成电压而加以检测。FRA 的输入、输出端子相互绝缘、而且与机壳之间也绝缘，所以分别能与任意的电位连接、进行测量。此外 FRA 对直流不具有感应度，所以即使是重叠在直流上面的交流信号，也能以最佳的感应度对

其交流信号振幅来进行测量。

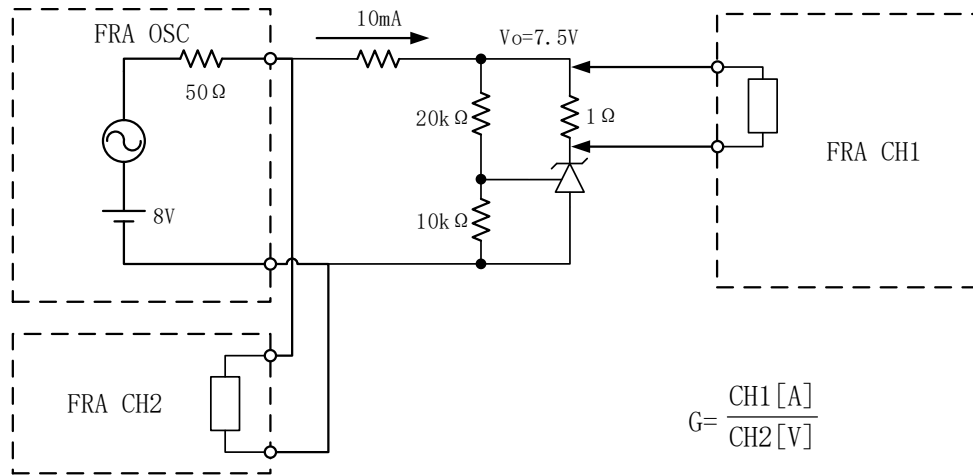


图 2.2 由并联稳压器组成的误差放大回路传输测试

## 2.2.2 光电耦合器的测量

光电耦合器的传输特性，可以由光晶体管的输出电流对驱动光二极管的电流的比值的频率特性来表示。

### ●测量方法

测量时的回路如图 2.3 所示。光电耦合器是在输出电流不饱和度区域（线性工作区域）中使用并进行测量的。驱动光电耦合器的电流能从 FRA 供给，所以只需要在晶体管一侧使用直流电源。对于光电耦合器的输入和输出电流，两者都采用电流限制电阻将电流转换成电压而被检测出来，再用 FRA 的 Scale Factor 功能转换成电流值。

FRA 的输入、输出端子相互绝缘、而且与机壳之间也绝缘，所以分别能与任意的电位连接、进行测量。此外 FRA 对直流不具有感应度，所以即使是重叠在直流上面的交流信号，也能以最佳的感应度对其交流信号振幅来进行测量。

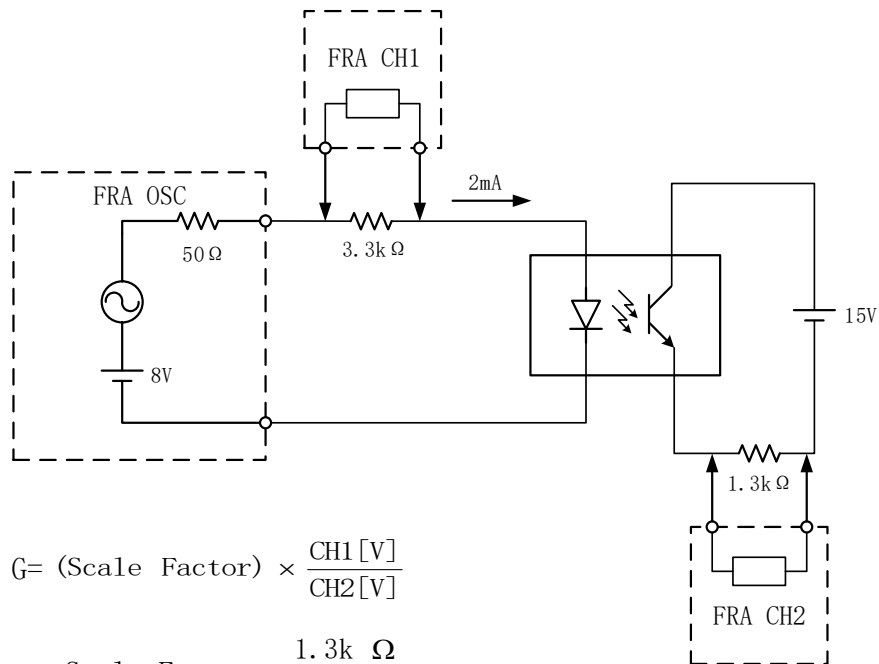


图 2.3 光电耦合器的传输特性测量

### 2.2.3 由并联稳压器构成的光电耦合器驱动回路测量

这是一个将并联稳压器作为误差放大器使用以驱动光电耦合器回路、测量其传输特性的例子。传输特性可以用相对于电压变动分量的光电耦合器的输出电压（射极跟随器）来表示。

#### ●测量方法

测量时的回路如图 2.4 所示。驱动并联稳压器和光电耦合器的电流可以由 FRA 提供，所以只需要在晶体管一侧使用直流电源。光电耦合器是以射极跟随器的方式运行的，能够检测其发射极的电压。

FRA 的输入、输出端子相互绝缘、而且与机壳之间也绝缘，所以分别能与任意的电位连接、进行测量。此外 FRA 对直流不具有感应度，所以即使是重叠在直流上面的交流信号，也能以最佳的感应度对其交流信号振幅来进行测量。

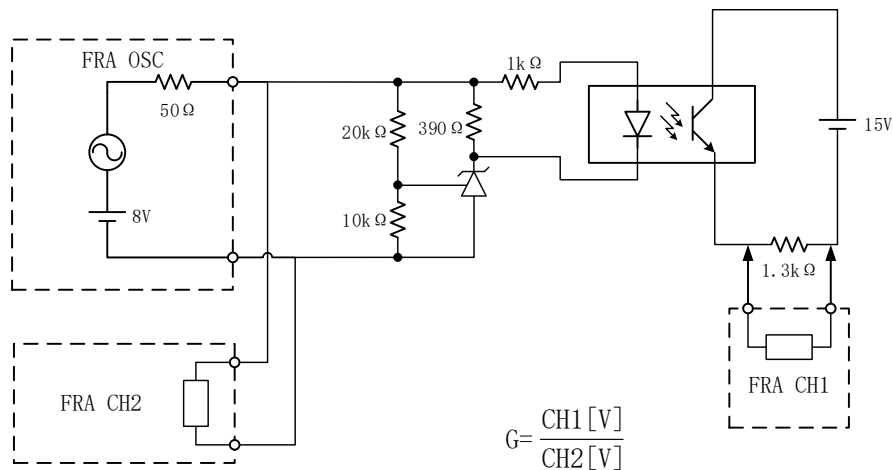


图 2.4 由并联稳压器构成的光电耦合器驱动回路的传输特性测量

### 2.2.4 滤波器的测量

LC 滤波器是作为用于去除输出中的脉动成分的低通滤波器而运作的。同时，作为在截止频率上的 LC 谐振电路也发挥作用，所以与 RC 滤波器不同，在截止频率（谐振点）附近产生增益。谐振的强度与 L、C 各零部件实际的阻抗有关，但是也随着负载的轻重不同而变化。传输特性可以用输出电压对于输入电压的比值来表示。

#### ●测量方法

测量回路如图 2.5 所示。如果改变负载电阻的大小，其响应也发生变化。

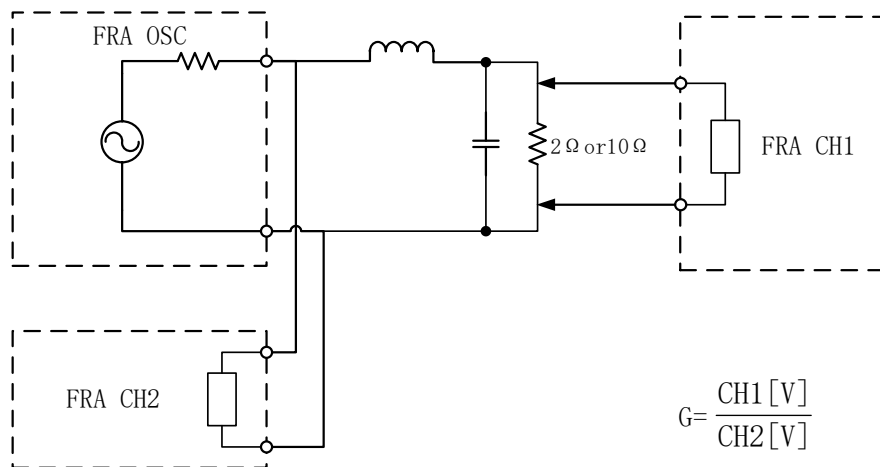


图 2.5 LC 滤波器的传输特性测量回路

## 2.2.5 软件设置和结果处理

### 一、软件设置

测试软件界面如图 2.6 所示，界面左侧为设置区，右侧为数据显示区。在测试前，需进行正确设置，具体如下：

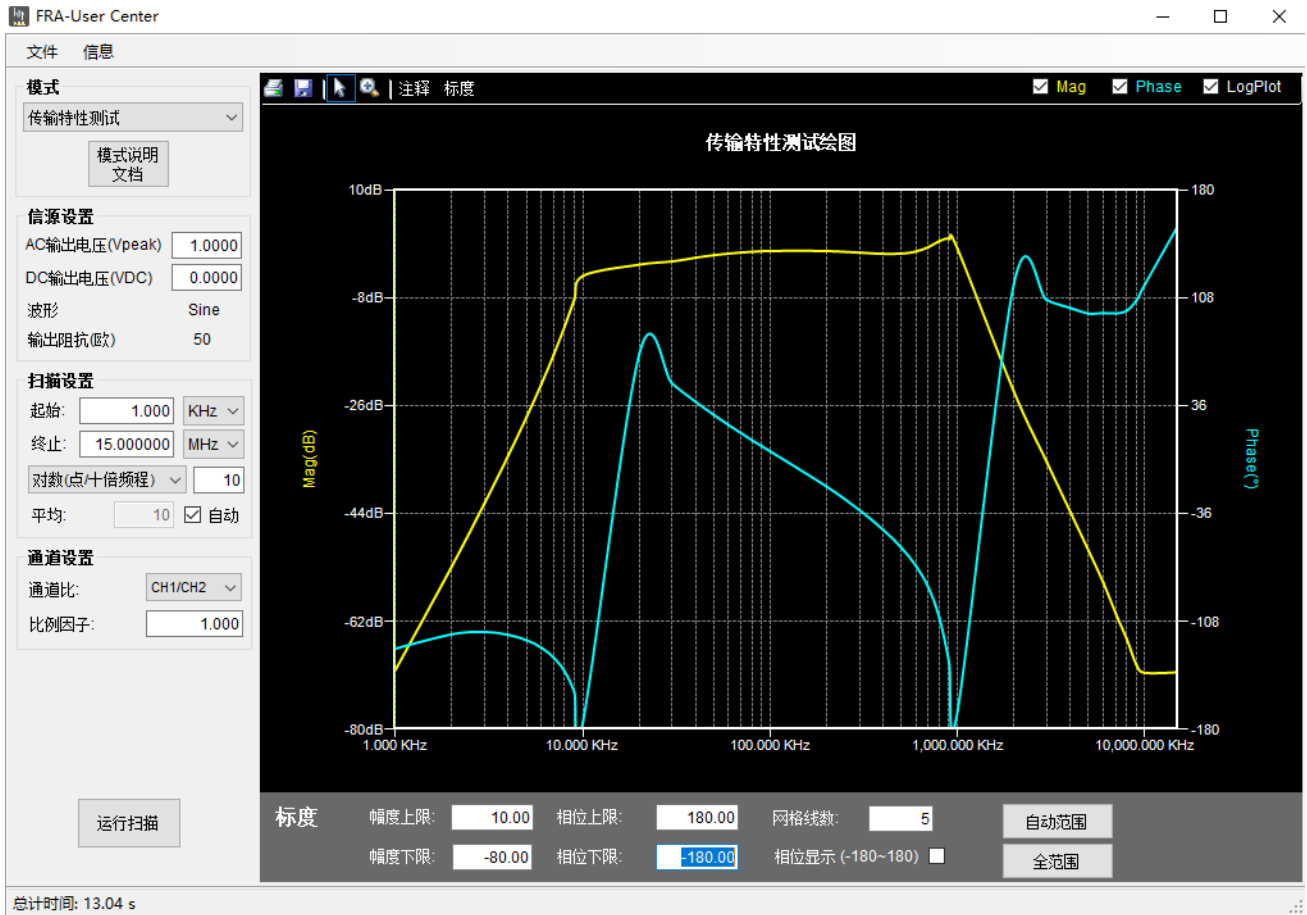


图 2.6 传输特性测试软件界面

#### (1) 模式 (Mode)

模式 (Mode)：选择测试模式。

模式说明文档 (Mode help)：点击该按钮将弹出测试说明文档。

#### (2) 信源设置 (OSC Set)：

AC 输出电压 (Vpeak)：设置信号源输出电压峰值 (开路时端口电压)。

DC 输出电压 (Vdc)：设置信号源输出的直流偏移，Loop Gain 模式需设置为 0。

波形 Sine：设置信号源波形形式，默认正弦波。

输出阻抗 (欧) 50：源输出阻抗 50 欧。

#### (3) 扫描设置 (Sweep Set)：

起始 (Start)：设置扫描起始频率。

终止 (Stop)：设置扫描终止频率。

对数 (点/十倍频程) (Log(Steps/Decade))：扫描频率范围内进行对数扫描，每 10 倍频程设置 N 个点待测频点。

线性 (总点数) (Line(Total Points))：扫描频率范围内进行线性扫描，设置 N 个平均分布在扫描频率区间内的待测频点。

平均 (Circles) : 当测试曲线毛刺较多、波动大时, 可适当增加 Circles 值, 提高灵敏度, 默认 Auto。



图 2.7 相位显示范围设置图

相位显示 (Phase View): 复选框勾选上, 相位显示范围为-360~360 度; 复选框去掉时, 相位显示范围-180~180 度。设置完后需要重新“运行扫描” (Run Sweep) 才能生效。

(4) 结果设置 (Result Set)

通道比 (Channel Ratio): 设置为 CH1/CH2 时, 实际测量的幅度比为 CH1/CH2, 相位差为 CH1-CH2; 设置为 CH2/CH1 时, 实际测量的幅度比为 CH2/CH1。相位差为 CH2-CH1。比例因子 (Scale Factor): 数据显示结果为仪器测量结果 (CH1/CH2 或 CH2/CH1) 乘以 Scale Factor, 默认设置为 1。

(5) 运行扫描 (Run Sweep)

扫描开始按钮, 点击该按钮开始扫描。

二、结果处理

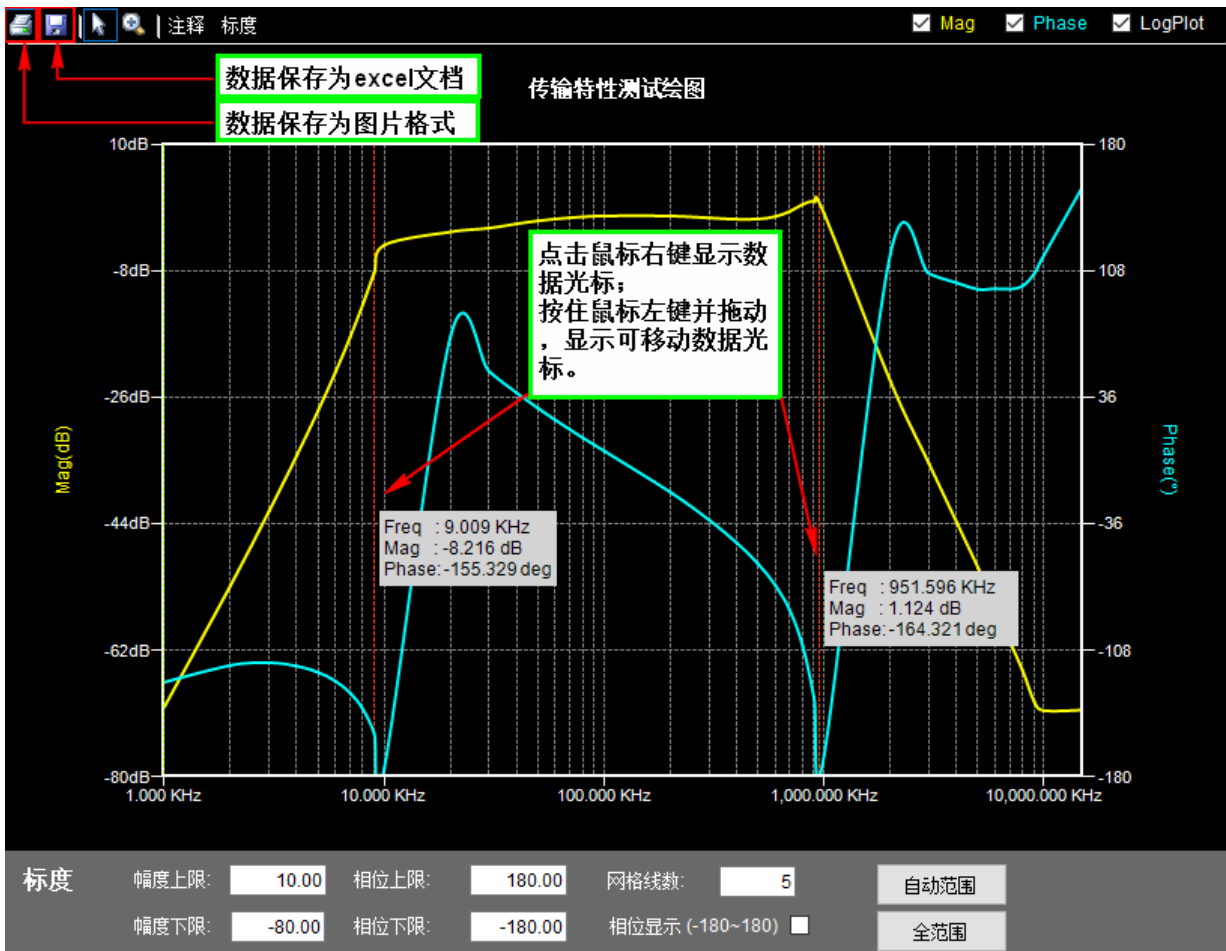


图 2.8 数据显示窗口

---

(1) 完成一次扫描后，软件右侧绘图区将显示数据曲线。

(2) 可以在曲线区域按住鼠标左键并拖动，或者直接点击鼠标右键，将显示数据光标轴，光标轴与曲线相交处的数据将以数据框的形式自动显示出来，以获得更精确的结果。对准光标轴或数据框，再次单击鼠标左键（绿色光标轴）或右键（红色光标轴）将取消光标轴及对应数据的显示。

(3) 窗口右下角，选择自动范围（**Auto Scale**），可将坐标轴范围自动适应曲线，使图表更完整清晰。选择全范围（**Full Scale**），将显示最大坐标范围。

(4) 数据窗口左上角，可选择打印（图文报告）、保存数据（**excel** 表格）、放大等操作。

## 2.3 阻抗测试

阻抗测试包含两部分内容：1) 开关电源的输出阻抗测试。2) 器件的阻抗测试。

### 2.3.1 电源的输出阻抗测量原理和方法

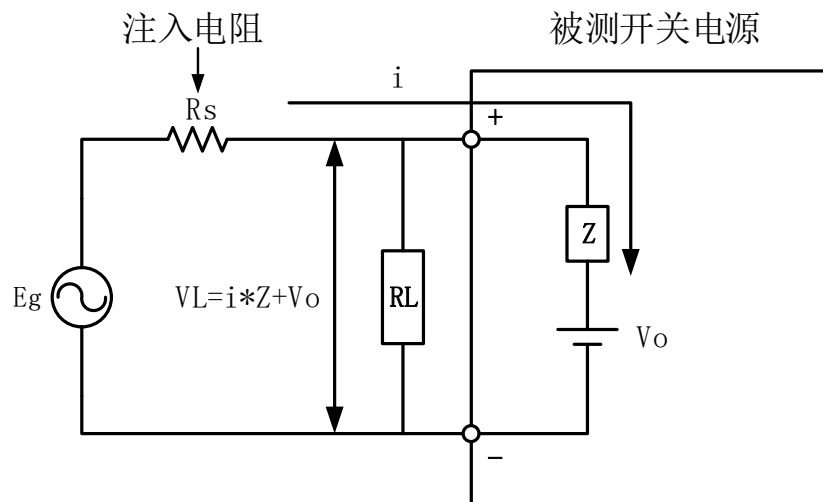
除了回路增益测量之外，输出阻抗特性也是开关电源的一项主要性能。由于用作输出电压的开关电源都是恒压源，其输出阻抗非常低（理想恒压源输出阻抗为 0，实际中输出阻抗虽小，仍有一定的值）。当输出阻抗较大，连接负载时输出电压就会降低。无负载与额定负载时的输出电压变化（负载调整率），只表示对直流的输出阻抗，因此当负载高速变动时、或连接电抗性负载时，只用直流输出阻抗就不能掌握电源的动态情况了，此时需要知道不同频率处的输出阻抗，越低的高频输出阻抗意味着电源动态响应能力越强。

采用频率特性分析仪（FRA）就可以在频域中测量输出阻抗，采用本测量有如下优点：

- 可在开关电源实际运行状态下，短时间内、高精度的对输出阻抗和相位特性进行测量。
- 因为能在 15MHz 内的宽频范围进行阻抗测量，所以可以掌握由高速变动的负荷所产生的影响。
- 测量结果直接以图形方式即时显示确认，可以立即确认由常数变更等所引起的输出阻抗变化。

#### 测量原理和方法：

对于输出阻抗的测量，采用的方法是使微小的测量信号电流流过开关电源的输出回路，并对输出阻抗引起的电压降进行测量。测试原理框图和实际接线图如图 3.1、图 3.2 所示。



- Z：开关电源输出阻抗
  - Vo：开关电源输出电压
  - VL：由于输出阻抗而产生的电压降+输出电压
  - Eg：注入信号源
  - i：作为注入信号而通过开关电源的电流
- 其中，负载  $R_L \gg Z$

图 3.1 输出阻抗测试原理框图

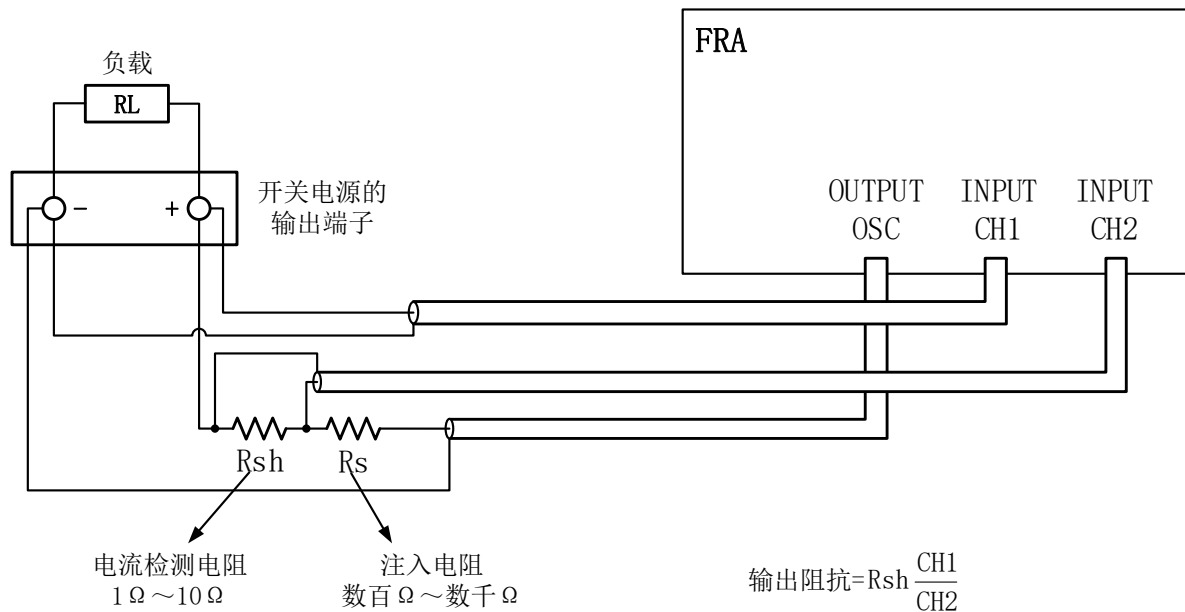


图 3.2 输出阻抗实际测量接线图

在框图中， $R_s$  用来产生注入电流信号，当  $R_s \gg Z$ （一般情况下，负载阻抗远大于开关电源输出阻抗  $Z$ ，可以忽略），可认为注入电流为  $E_g/R_s$  的恒流源；同时， $R_s$  还可以抑制大大开关电源输出电流反向注入信号源  $E_g$ （OSC 端口）。 $R_s$  的取值应使得开关电源反向注入电流  $V_o/R_s$  为数十 mA 以下。对于 48V 以下的开关电源可取  $R_s$  为  $1k\Omega$ 。

设置电流检测电阻  $R_{sh}$  是为了获得更高的测量精度，通过 CH1 和 CH2 端口测得的电压比值以及  $R_{sh}$  的值即可换算出开关电源输出阻抗。 $R_{sh}$  一般取  $1\Omega$  即可。

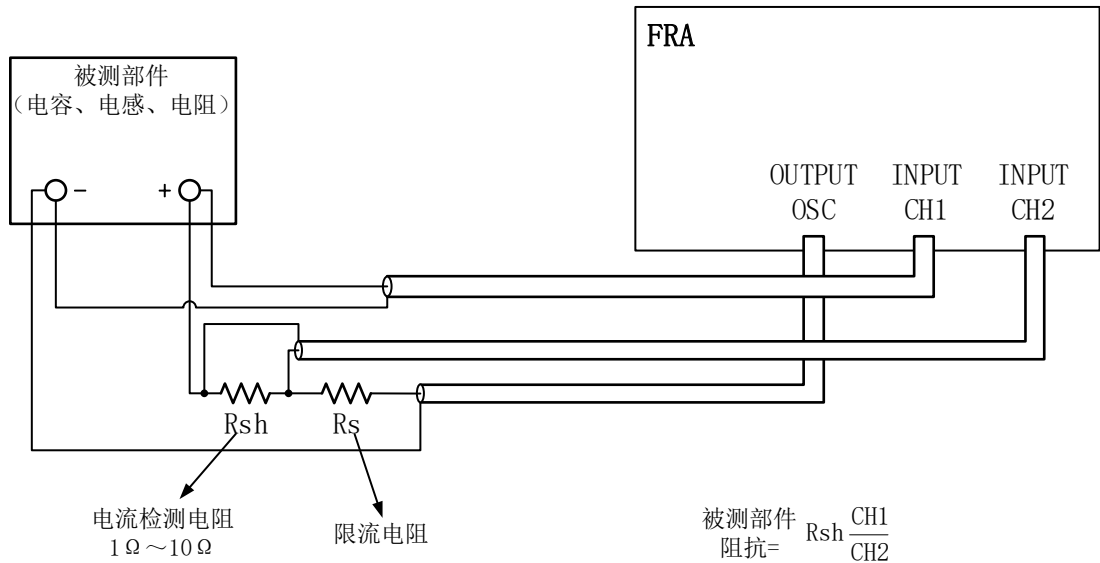
由于开关电源阻抗  $Z$  较小，注入电阻  $R_s$  较大，为获得较大的测量灵敏度，一般需要设置较大的注入电压。

### 2.3.2 元器件的阻抗测量原理和方法

FRA 可以对电容、电感、电阻等零部件进行阻抗测试，可测出 15MHz 范围内阻抗特性。测量方法如图 3.3 所示。对于电容，可能需要测量不同直流偏置下的阻抗特性，FRA 内部可提供  $\pm 10V$  的直流输出电压；对于电感，可能需要测量不同偏置电流下的阻抗特性，可使用 FRA 内部的直流源提供偏置电流，需要注意的是 FRA 源（OSC）输出阻抗为  $50\Omega$ ，最大可提供的输出电流为 200mA。

#### 注意：

元器件的阻抗测试与电源输出的阻抗测试原理上是一致。不同点在于，对于电源的输出阻抗测试，由于电源存在大的直流输出分量，为了避免电源向仪器的 OSC 端子倒灌大的电流，需要增加限流电阻  $R_s$ ；而对于器件的阻抗测试，为了尽可能的增加测试范围，不需要增加限流电流（将限流电阻  $R_s$  设置为 0 欧）。



一般取  $R_{sh}=1\ \Omega$  ,  $R_s=0\ \Omega$  。

图 3.3 零部件的阻抗测试连接图

### 2.3.3 利用夹具进行电源输出阻抗测试和元器件的阻抗测试

为了方便用户使用以及让用户更准确地进行阻抗测试，仪器可搭配 X618A-FIX 夹具进行相应测试。如图 3.4 所示。



图 3.4 X618A-FIX 夹具示意图

### 采用夹具进行阻抗测试步骤如下：

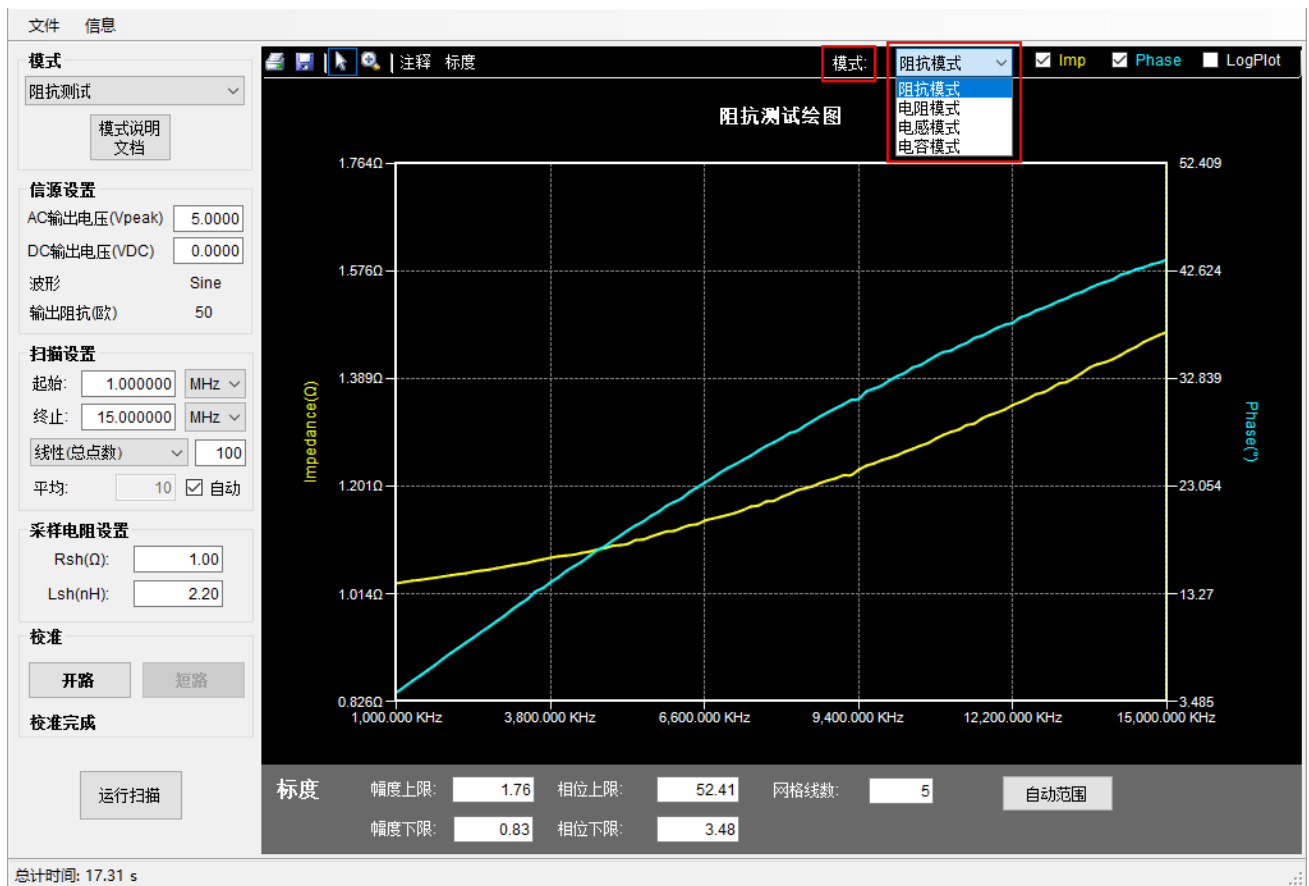
1. 使用三条短同轴线将夹具的三个 BNC 端子和仪器面板上的端子对应连接。
2. 设置阻抗模式切换开关。（注意：测试电源输出阻抗时，必须将开关打向电源输出阻抗档，否则将造成仪器损伤。）
3. 进行夹具校准，补偿夹具误差。
  - 1) 如果是测量插件类器件阻抗，则使用插件测试夹进行校准。开路校准时，不接任何物体；短路校准时，先按压插件夹控制按钮，在插件测试夹中放入短路片，再进行校准。
  - 2) 如果是测量表贴类器件阻抗或是对电源测试点进行输出阻抗测试，可使用 SMD 测试夹进行校准。开路校准时，夹子不夹任何物体；短路校准时，按压夹子顶端，使顶端的两个金属触点短接，再进行短路校准。
4. 校准完成后，即可进行阻抗测试。

### 注意事项：

- 1) 阻抗模式切换开关必须正确设置，否则将对仪器造成损伤。
- 2) 使用插件测试夹时，需要拔掉 SMD 测试夹。
- 3) 型号 X618A-FIX 夹具进行电源输出阻抗测试时，电源输出电压不能超过 48V。

## 2.3.4 软件设置和结果处理

测试软件界面如图 3.5 所示，界面左侧为设置区，右侧为数据显示区。在测试前，需进行正确设置，具体如下：



### (1) 模式 (Mode)

---

模式 (Mode): 选择测试模式 (注意, 此处模式为左侧设置区的模式)。

模式说明文档 (Mode help): 点击该按钮将弹出测试说明文档。

(2) 信源设置 (OSC Set):

AC 输出电压 (Vpeak): 设置信号源输出电压峰值 (开路时端口电压)。

DC 输出电压 (Vdc): 设置信号源输出的直流偏移, Loop Gain 模式需设置为 0。

波形 Sine: 设置信号源波形形式, 默认正弦波。

输出阻抗 (欧) 50: 源输出阻抗 50 欧。

(3) 扫描设置 (Sweep Set):

起始 (Start): 设置扫描起始频率。

终止 (Stop): 设置扫描终止频率。

对数 (点/十倍频程) (Log(Steps/Decade)): 扫描频率范围内进行对数扫描, 每 10 倍频程设置 N 个待测频点。

线性 (总点数) (Line(Total Points)): 扫描频率范围内进行线性扫描, 设置 N 个平均分布在扫描频率区间内的待测频点。

平均 (Circles): 当测试曲线毛刺较多、波动大时, 可适当增加 Circles 值, 提高灵敏度, 默认 Auto。

(4) 采样电阻设置 (Sample Set)

Rsh ( $\Omega$ ): 设置电流取样电阻值。

Lsh (nH): 设置电流取样电感值, 该值实际为取样电阻的分布电感。测试频率较高时不可忽略。

(5) 校准。分开路校准和短路校准, 用来补偿接线和夹具的误差。

(6) 模式选择。位于右侧绘图区, 有四种模式可选: 阻抗模式、电阻模式、电容模式、电感模式, 四种模式均为串联等效模型。在校准完成后, 可选择需要查看的模型, 进行测试。

(7) 运行扫描 (Run Sweep)

扫描开始按钮, 点击该按钮开始扫描。

## 二、结果处理

操作同上面章节, 略!

## 2.4 LCR 测试

频率特性分析仪（FRA）还可以进行 LCR 测试。LCR 测试中有四种模式：阻抗模式、电阻模式、电感模式、电容模式，四个模式均为串联等效模型。该项测试为点频测试，即一次只能测试一个频点的特性。LCR 测试的原理同器件阻抗测试原理。

同样可以使用 X618A-FIX 夹具进行 LCR 测试，如下图。LCR 测试前需要进行校准，以补偿夹具的自身误差。以下针对四种模式进行一一说明。

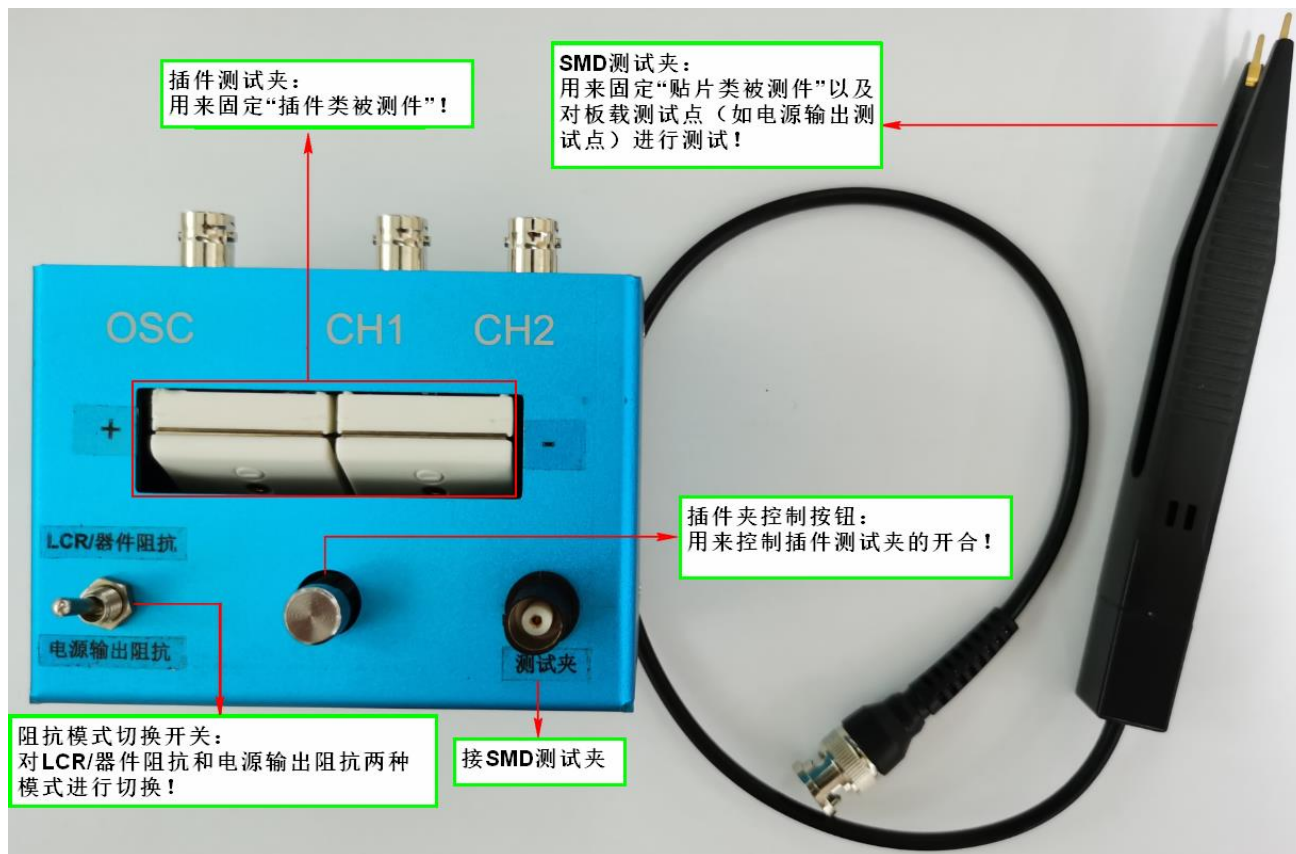


图 4.1 X618A-FIX 夹具示意图

## 2.4.1 利用夹具进行 LCR 测试之阻抗测试

阻抗测试模式的测试界面如下图所示，测试步骤如下：

- 1) 将阻抗模式开关切换至 LCR/器件阻抗档位。
- 2) 设置采样电阻值 Rsh, Lsh, Lsh 为采样电阻的分布电感，高频时不可忽略。夹具上标有 Rsh 和 Lsh 的具体值。
- 3) 校准前的准备设置：设置 AC 输出电压和源频率。
- 4) 校准。如果是插件类器件，则使用插件测试夹进行校准；如果是贴片类器件则使用 SMD 测试夹进行校准。**注意：使用插件测试夹时，需要拔掉 SMD 测试夹。**  
**开路校准：**测试夹保持原样，不夹任何物体。点击开路校准按钮进行校准。  
**短路校准：**对于插件测试夹，按压插件夹控制按钮，将**短路片**放入夹子并夹住（注意短路片是否夹好）。点击短路校准按钮进行校准。
- 5) 夹好被测器件，点击运行按钮进行测试。
- 6) 阻抗测试页面将显示阻抗和相位的值。



图 4.2 LCR 阻抗模式测试侧面

## 2.4.2 利用夹具进行 LCR 测试之电阻测试

电阻测试模式的测试界面如下图所示，测试步骤如下：

- 1) 将阻抗模式开关切换至 LCR/器件阻抗档位。
- 2) 设置采样电阻值 Rsh, Lsh, Lsh 为采样电阻的分布电感，高频时不可忽略。夹具上标有 Rsh 和 Lsh 的具体值。
- 3) 校准前的准备设置：设置 AC 输出电压和源频率。
- 4) 校准。如果是插件类器件，则使用插件测试夹进行校准；如果是贴片类器件则使用 SMD 测试夹进行校准。**注意：使用插件测试夹时，需要拔掉 SMD 测试夹。**  
**开路校准：**测试夹保持原样，不夹任何物体。点击开路校准按钮进行校准。  
**短路校准：**对于插件测试夹，按压插件夹控制按钮，将**短路片**放入夹子并夹住（注意短路片是否夹好）。点击短路校准按钮进行校准。
- 5) 夹好被测器件，点击运行按钮进行测试。
- 6) 电阻模式界面将显示串联电阻值和串联电抗值（ $Z=R_s+j*X$ ）

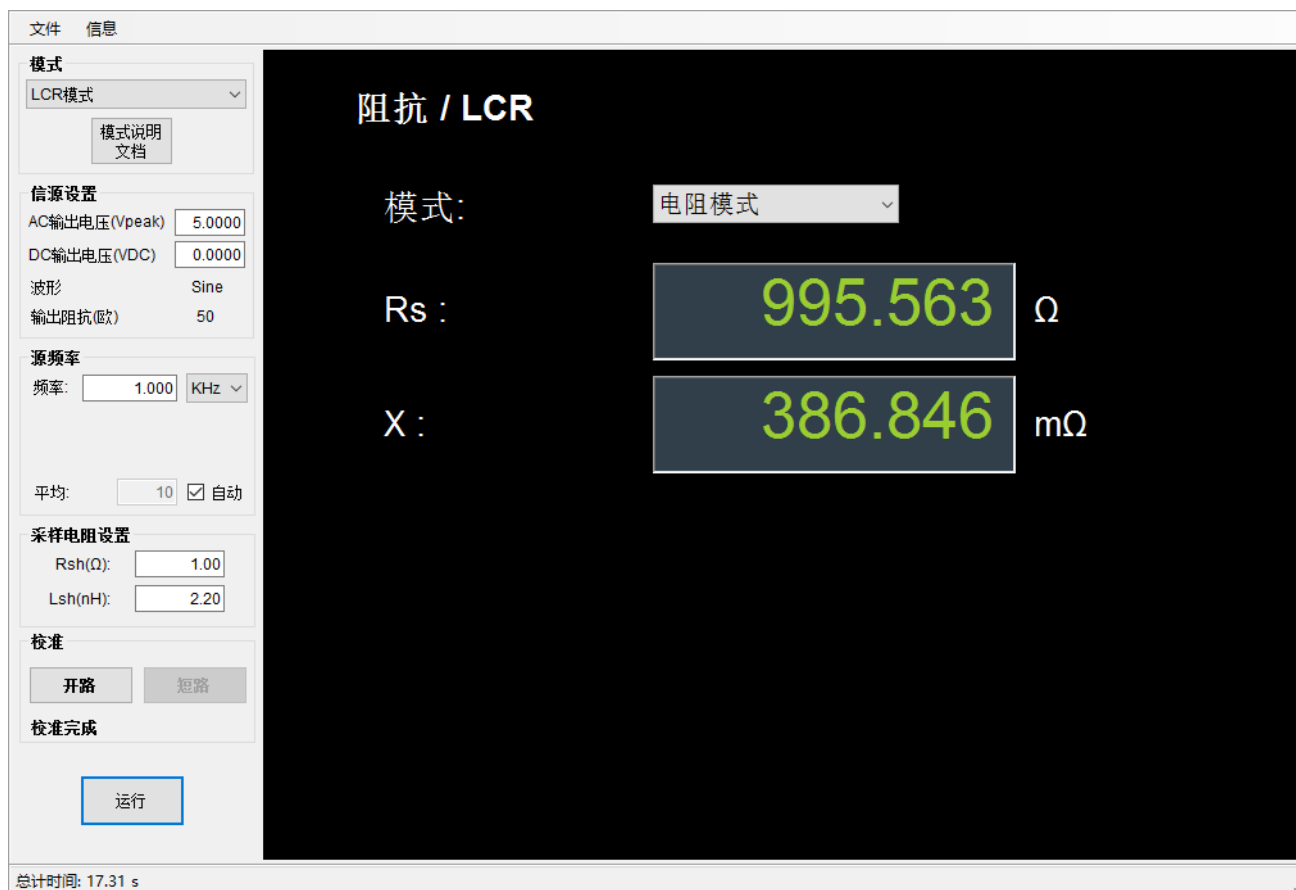


图 4.3 LCR 测试之电阻模式

## 2.4.3 利用夹具进行 LCR 测试之电感测试

电感测试模式的测试界面如下图所示，测试步骤如下：

- 1) 将阻抗模式开关切换至 LCR/器件阻抗档位。
- 2) 设置采样电阻值 Rsh, Lsh, Lsh 为采样电阻的分布电感，高频时不可忽略。夹具上标有 Rsh 和 Lsh 的具体值。
- 3) 校准前的准备设置：设置 AC 输出电压和源频率。
- 4) 校准。如果是插件类器件，则使用插件测试夹进行校准；如果是贴片类器件则使用 SMD 测试夹进行校准。**注意：使用插件测试夹时，需要拔掉 SMD 测试夹。**  
**开路校准：**测试夹保持原样，不夹任何物体。点击开路校准按钮进行校准。  
**短路校准：**对于插件测试夹，按压插件夹控制按钮，将**短路片**放入夹子并夹住（注意短路片是否夹好）。点击短路校准按钮进行校准。
- 5) 夹好被测器件，根据需求设置 AC 和 DC 输出电压，点击运行按钮进行测试。
- 6) 电感模式界面将显示串联电感值  $L_s$ 、品质因素  $Q$  值，以及串联等效电阻和电抗值  $R_s$  和  $X$  ( $Z=R_s+j*X$ )。



图 4.4 LCR 测试之电感模式

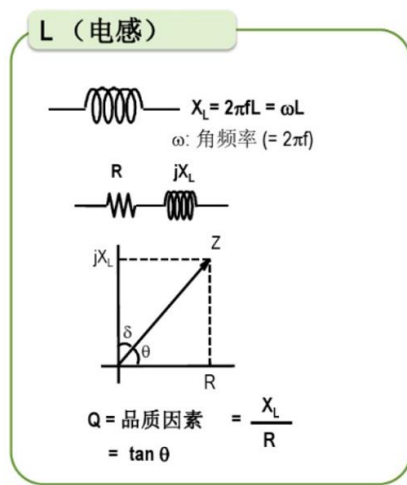


图 4.5 电感 Q 值计算

## 2.4.4 利用夹具进行 LCR 测试之电容测试

电容测试模式的测试界面如下图所示，测试步骤如下：

- 1) 将阻抗模式开关切换至 LCR/器件阻抗档位。
- 2) 设置采样电阻值 Rsh, Lsh, Lsh 为采样电阻的分布电感，高频时不可忽略。夹具上标有 Rsh 和 Lsh 的具体值。
- 3) 校准前的准备设置：设置 AC 输出电压和源频率。
- 4) 校准。如果是插件类器件，则使用插件测试夹进行校准；如果是贴片类器件则使用 SMD 测试夹进行校准。**注意：使用插件测试夹时，需要拔掉 SMD 测试夹。**  
**开路校准：**测试夹保持原样，不夹任何物体。点击开路校准按钮进行校准。  
**短路校准：**对于插件测试夹，按压插件夹控制按钮，将**短路片**放入夹子并夹住（注意短路片是否夹好）。点击短路校准按钮进行校准。
- 5) 夹好被测器件，根据需求设置 AC 和 DC 输出电压，点击运行按钮进行测试。
- 6) 电感模式界面将显示串联电感值 C、损耗因素 D 值，以及串联等效电阻和电抗值 Rs 和 X ( $Z=Rs+j*X$ )。



图 4.6 LCR 测试之电感模式

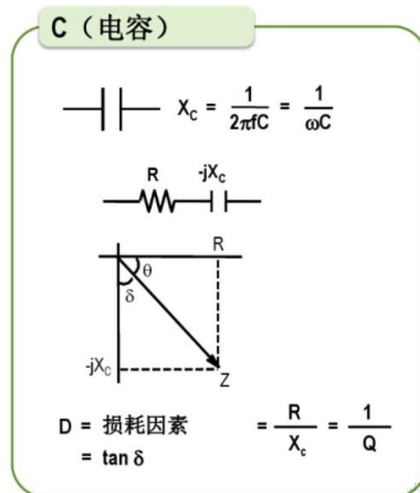


图 4.7 电容 D 值计算

## 2.5 阻抗和 LCR 的测量范围

仪器阻抗及 LCR 测试采用的是“i-v”检测法，其等效测量模型见图 5.1 所示。仪器的理论测量动态范围（不考虑夹具的影响）受注入电阻（ $R_s$ ）、电流检测电阻（ $R_{sh}$ ）、信源输出电压（ $V_{osc}$ ）、仪器的最小检测灵敏度以及工作频率的影响。

其中， $R_o$  为仪器输出电阻，固定为 50 欧； $R_{sh}$  一般取值为 1 欧，需要测量大阻抗时，可以增大  $R_{sh}$  的值； $R_s$  为注入电阻，用来限制回路电流，在测量开关电源（ $<48V$ ）阻抗下可设置为  $1K\Omega$ ，测量更大电压的开关电源阻抗时，可以适当增加  $R_s$  的值； $V_{osc}$  范围为（ $0\sim 10V_{peak}$ ）； $V_{CH1}$  和  $V_{CH2}$  具有相同的最小检测电压  $V_{min}$ 。具体计算如下：

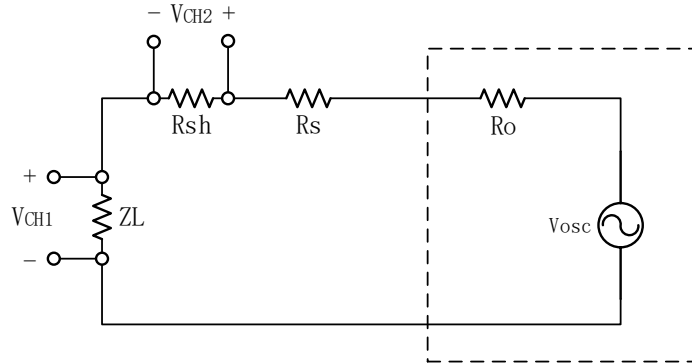


图 5.1 I-V 阻抗检测法等效回路图

1) 阻抗（电阻）的测量动态范围：

$$ZL_{min} = \frac{V_{min}(R_{sh} + R_s + R_o)}{V_{osc} - V_{min}}$$

$$ZL_{max} = V_{osc} \frac{R_{sh}}{V_{min}} - (R_{sh} + R_s + R_o)$$

其中， $V_{min}$  代表仪器的最小检测电压， $R_o$  为仪器信源输出电阻（50 欧）。

2) 电感的测量动态范围：

$$L_{min} = \frac{ZL_{min}}{2\pi f}$$

$$L_{max} = \frac{ZL_{max}}{2\pi f}$$

3) 电容的测量动态范围：

$$C_{min} = \frac{1}{2\pi f ZL_{max}}$$

$$C_{max} = \frac{1}{2\pi f ZL_{min}}$$

以下是仪器在不同参数下的典型理论测量动态范围（未考虑夹具参数的影响）：

表 5.1 仪器理论极限测量动态范围 1

仪器参数: $V_{min}=10\mu V$ , $R_{sh}=1\Omega$ , $R_s=0\Omega$ , $R_o=50\Omega$ , $V_{osc}=1V_{peak}$							
	100Hz	1KHz	10KHz	100KHz	1MHz	10MHz	15MHz
阻抗/电阻	0.5m $\Omega$ ~ 99.9K $\Omega$						
电感	0.8 $\mu H$ ~ 160H	80nH ~ 16H	8nH ~ 1.6H	0.8nH ~ 160mH	80pH ~ 16mH	8pH ~ 1.6mH	5.4pH ~ 1.6mH
电容	16nF ~ 3F	1.6nF ~ 300mF	160pF ~ 30mF	16pF ~ 3mF	1.6pF ~ 300 $\mu F$	160fF ~ 30 $\mu F$	106fF ~ 21 $\mu F$

表 5.2 仪器理论极限测量动态范围 2

仪器参数: $V_{min}=10\mu V$ , $R_{sh}=1\Omega$ , $R_s=0\Omega$ , $R_o=50\Omega$ , $V_{osc}=10V_{peak}$							
	100Hz	1KHz	10KHz	100KHz	1MHz	10MHz	15MHz
阻抗/ 电阻	0.05m $\Omega$ ~999.9K $\Omega$						
电感	80nH~1590H	8nH~160H	0.8nH~16H	80pH~1.6H	8pH~160mH	0.8pH~16mH	0.54pH~10.6mH
电容	1.6nF~31.2F	160pF~3.12F	16pF~312mF	1.6pF~31.2mF	160fF~3.12mF	16fF~312uF	10.6fF~208uF

表 5.3 仪器理论极限测量动态范围 3

仪器参数: $V_{min}=10\mu V$ , $R_{sh}=1\Omega$ , $R_s=1000\Omega$ , $R_o=50\Omega$ , $V_{osc}=1V_{peak}$							
	100Hz	1KHz	10KHz	100KHz	1MHz	10MHz	15MHz
阻抗/ 电阻	10.5m $\Omega$ ~98.9K $\Omega$						
电感	16uH~157H	1.6uH~15.7H	160nH~1.57H	16nH~157mH	1.6nH~15.7mH	160pH ~1.57mH	110pH ~1.05mH
电容	16nF~151mF	1.6nF~15.1mF	160pF~1.51mF	16pF~151uF	1.6pF~15.1uF	160fF ~1.51uF	107fF ~1uF

表 5.4 仪器理论极限测量动态范围 4

仪器参数: $V_{min}=10\mu V$ , $R_{sh}=1\Omega$ , $R_s=1000\Omega$ , $R_o=50\Omega$ , $V_{osc}=10V_{peak}$							
	100Hz	1KHz	10KHz	100KHz	1MHz	10MHz	15MHz
阻抗/ 电阻	1m $\Omega$ ~998.9K $\Omega$						
电感	1.6uH~1590H	160nH~159H	16nH~15.9H	1.6nH~1.59H	160pH~159mH	16pH~15.9mH	11pH~10.5mH
电容	1.6nF~1.5F	160pF~150mF	16pF~15mF	1.6pF~1.5mF	160fF~150uF	16fF~15uF	10.6fF~10uF

**注意:**

实际的测量动态范围还取决于夹具的设计, 设计良好的夹具能够最大限度地使仪器的测量范围逼近理想值, 具体的测量范围见相应夹具的说明。

## 2.6 幅度/相位 (Amplitude Phase) 测试

频率特性分析仪(FRA)提供一种测试模式，可以测量外部接入信号的绝对幅度值  $V_{peak}$ 、Amplitude ratio (幅度比) ( $20 \cdot \log(CH1/CH2)$ )、Phase difference (相位差)。软件测试界面如下图所示。进入该模式需要在模式(Mode)下拉框选中幅度/相位 (Amplitude/ Phase)。

1) 其中，信源设置 (OSC Set) 并非必要的，只有当需要自测 OSC 端口信号时才需要进行源设置。

2) 源频率是必须要设置的项目，FRA 只测量源频率设置所对应的频率信号，偏离该设置频率的信号均无法正确测量。当实际输入信号频率与源频率设置的频率存在一定频偏时，也会导致无法正确测量。该模式下，FRA 等效成一个极窄带宽的带通滤波器。

3) 平均 (Circles)：当测试结果波动大时，可适当增加 Circles 值，提高灵敏度，默认 Auto。

4) 通道比 (Channel Ratio)：设置为 CH1/CH2 时，实际测量的幅度比 (Amplitude ratio) 为 CH1/CH2，相位差 (Phase difference) 为 CH1-CH2；设置为 CH2/CH1 时，实际测量的幅度比 (Amplitude ratio) 为 CH2/CH1。相位差 (Phase difference) 为 CH2-CH1。CH1 ( $V_{peak}$ ) 和 CH2 ( $V_{peak}$ ) 的值不受该项设置影响。

5) 比例因子 (Scale Factor)：幅度比 (Amplitude ratio) 数值结果乘以比例因子 (Scale Factor) 后再以对数结果显示。

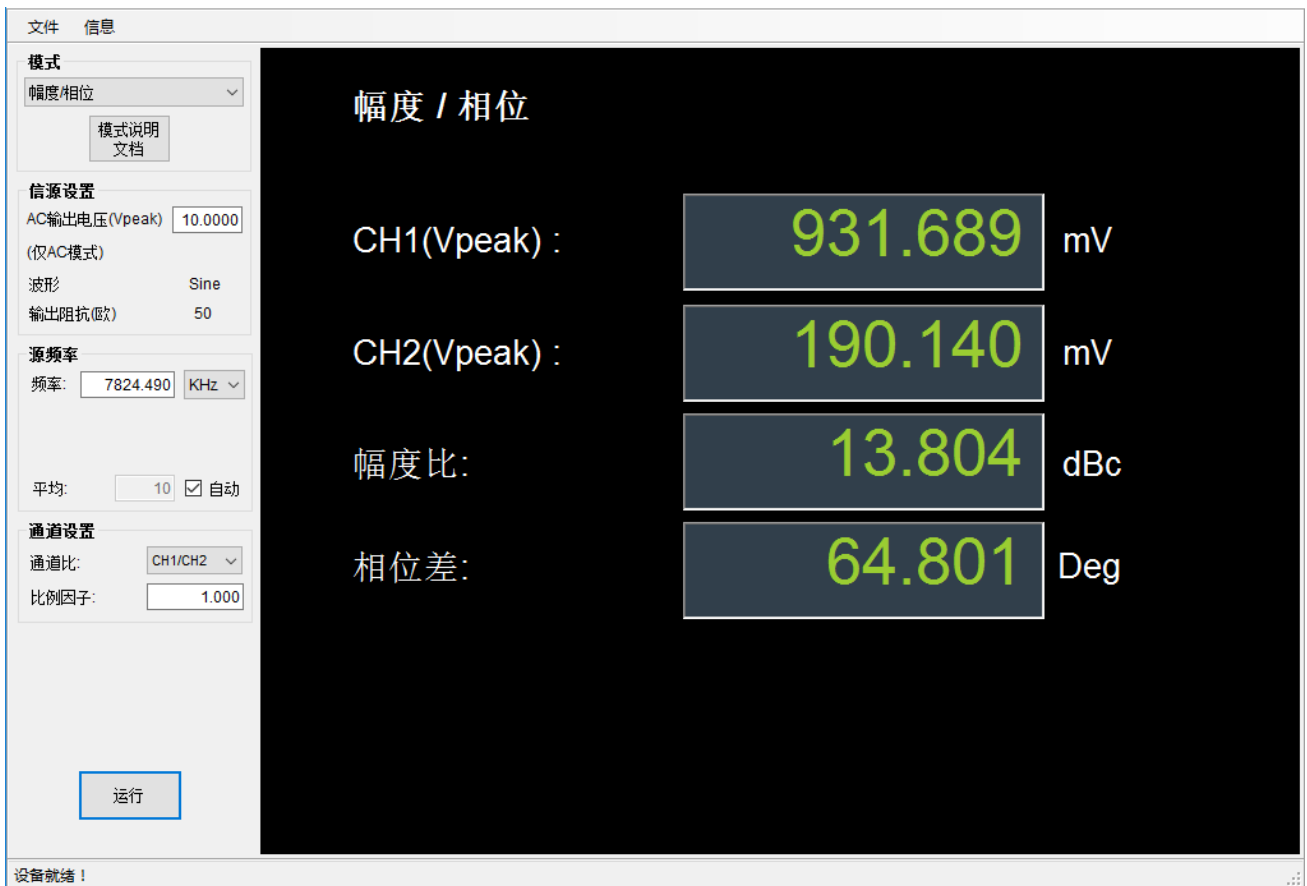


图 6.1 幅度相位 (Amplitude Phase) 模式测试界面

## 2.7 波形测试

FRA 提供波形（示波）模式（Waveform Scope），可以简单查看 CH1、CH2 端口接入的信号波形，测量带宽为 200KHz。软件测试界面见下图所示。进入该模式需要在 Mode 下拉框选择 Waveform Scope。

具体设置说明如下：

- 1) 信源设置（OSC Set）和源频率（Source Freq）是非必要设置项，只有当需要查看 OSC 端波形时才进行设置。
- 2) 档位设置（PGA Set）处有 CH1、CH2 两个旋钮，该旋钮用来调节仪器内部程控放大器的增益档位，往左旋减小通道增益，往右旋为增大通道增益。可根据实际输入幅度进行调节。
- 3) 可以设置交流和直流耦合。
- 4) 显示界面下方可设置扫描时间（time）：单个显示画面总的时间长度；电平（Level）：触发电平幅度；通道选择（CH Select）可设置采用 CH1 或 CH2 做触发。

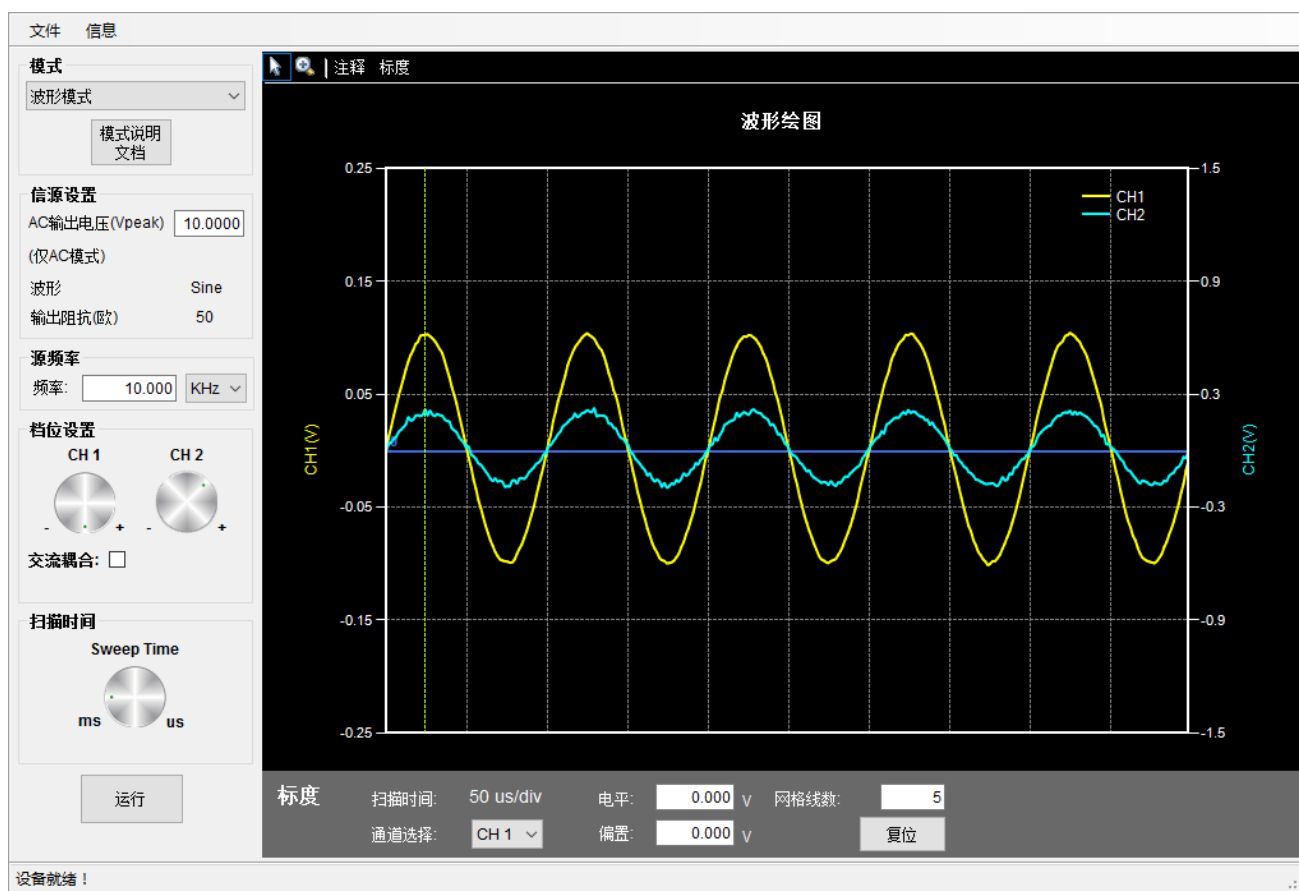


图 7.1 示波模式软件测试界面

## 2.8 软件中英文切换及文档信息

软件支持中英文切换，操作如下图，点软件左上角—>文件—>English/中文进行中英文切换。点击软件左上角—>信息—>文档，可以弹出软件说明文档。

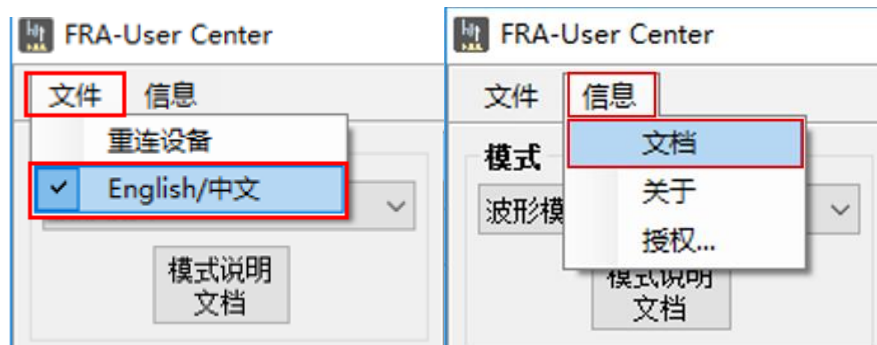


图 8.1 软件中英文切换及文档信息