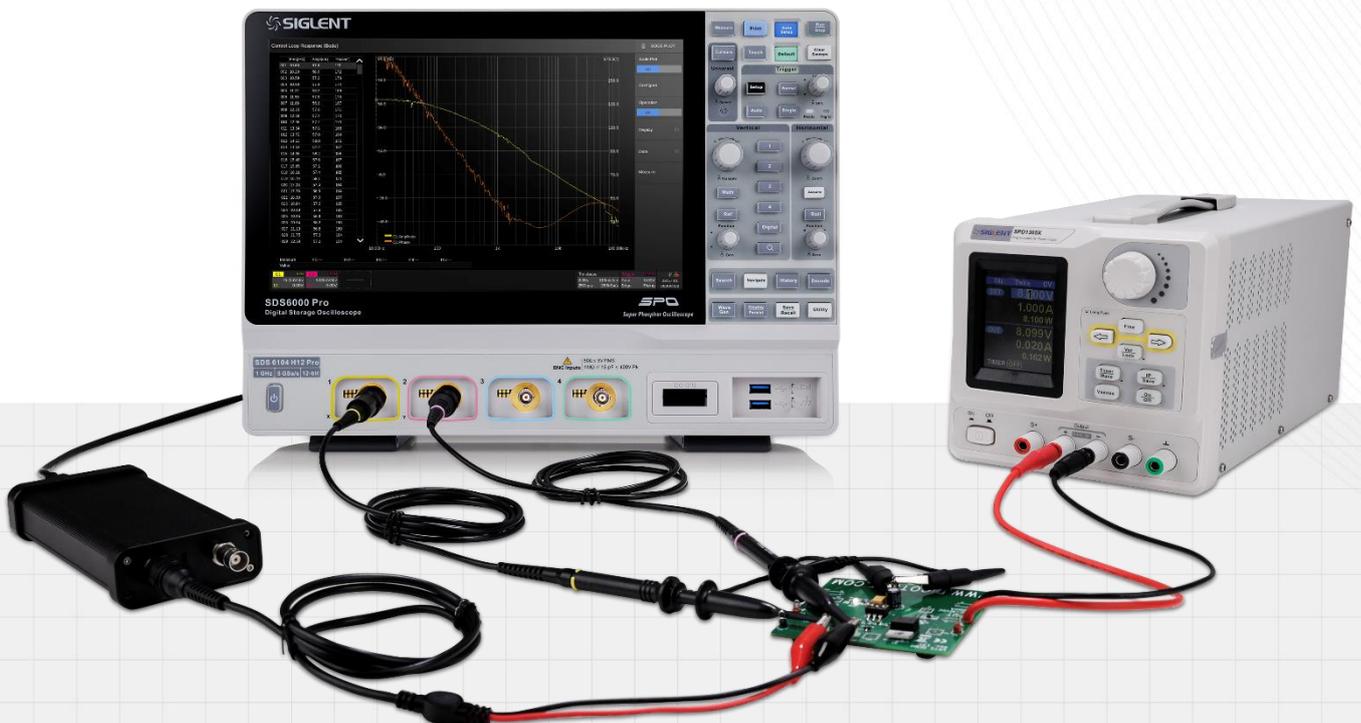


# 波特图解决方案

PSO2406-0006CN01



## 版权和声明

修改人	修改时间	修改内容
唐满丽	2024年6月4日	初始版本

## 版权

深圳市鼎阳科技股份有限公司版权所有

## 商标信息

**SIGLENT** 是深圳市鼎阳科技股份有限公司的注册商标

## 声明

- 本公司产品受已获准及尚在审批的中华人民共和国专利的保护
- 本公司保留改变规格及价格的权利
- 本手册提供的信息取代以往出版的所有资料
- 未经本公司同意，不得以任何形式或手段复制、摘抄、翻译本手册的内容

## 产品认证

**SIGLENT** 认证本产品符合中国国家产品标准和行业产品标准，并进一步认证本产品符合其他国际标准组织成员的相关标准。

## 联系我们

深圳市鼎阳科技股份有限公司

地址：广东省深圳市宝安区 68 区安通达工业园一栋&四栋&五栋

服务热线：400-878-0807

E-mail: [support@siglent.com](mailto:support@siglent.com)

网址: <https://www.siglent.com>

## 1 概述

波特图由荷兰裔科学家波特在 1930 年发明，他用简单但准确的方法绘制出了增益及相位的图，因为是音译过来的，波特图有时也被称作波德图以及伯德图。

通常我们使用波特图来分析系统的频率响应，在交流信号处理电路中，信号的频率范围较宽，从 Hz 级到 kHz 级，甚至 MHz 级，电压增益也能从几倍到上百万倍，为了能够在同一坐标中表示如此宽的一个变化范围，我们常常使用波特图来缩短坐标。

波特图应用比较广泛的是电源领域，涉及到电源环路分析，这其实就是将输出电压的增益和相位随注入信号频率变化而变化的测量结果绘制成波特图，然后利用波特图来分析开关电源电路的参数，从而判定其稳定性。波特图有增益曲线以及相频曲线，横轴为频率，单位是 Hz，增益曲线的纵轴为幅值的对数，单位是 dB，相频曲线的纵轴为相位，单位是 $^{\circ}$ ，主要参考参数有这三个，增益裕度、相位裕度以及穿越频率。

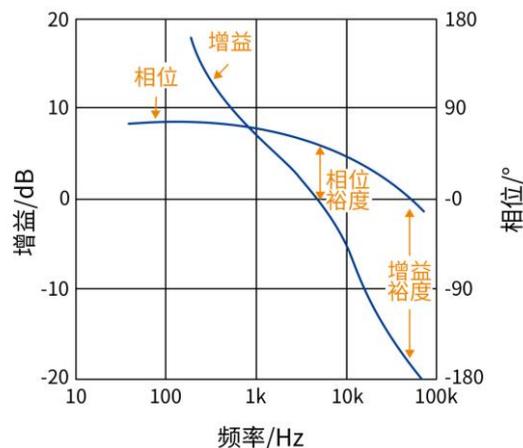


图 1 波特图

增益裕度指相位为  $0^{\circ}$  时对应的电压增益差，为了远离不稳定点，一般要求 12dB 以上。

相位裕度指电压增益为 0dB 时对应的相位差，工程中一般认为在室温和标准输入、正常负载条件下，环路的相位裕量要求大于  $45^{\circ}$ ，以确保系统在各种误差和参数变化情况下的稳定性。当负载特性、输入电压变化较大时，环路相位裕量应大于  $30^{\circ}$ ，不过需注意，相位裕度越大，系统越稳定，但系统响应速度会减慢，所以一般要求相位裕度要小于  $80^{\circ}$ 。

穿越频率也叫频带宽度，它是指增益为 0dB 时对应的频率，可以反映控制环路响应的快慢，一般认为带宽越宽，其对负载动态响应的抑制能力就越好，过冲、欠冲越小，恢复时间也就越快，系统就更稳定，一般取开关频率的 5%~20% 左右。

## 2 挑战

通过波特图可以量化电源的频率响应特性，可以让电源朝着更加稳定的方向去优化，而不需要进行盲目的反复尝试，但中间也会存在一些难点：如干扰信号注入点的选定、扫描频率范围的设定、注入信号幅度的设定等。此外，部分工程师可能会选择环路分析仪或是频率响应分析仪等，利用场景比较单一且价格相对来说会比较昂贵。

## 3 解决方案

### 3.1 反馈系统的稳定性

稳压电源本质上是一个能输出非常大电流的反馈放大器，所以适用于反馈放大器的理论同样适用于稳压电源（以下简称电源）。根据反馈理论，一个反馈系统的稳定性可以通过其系统传递函数得出，工程实践上通常会使用环路增益的波特图来判断系统的稳定性。图 2 典型的反馈系统是一个典型的反馈系统，系统的闭环传递函数  $A$  是输入  $x$  和输出  $y$  的数学关系表达式，环路增益  $T$  则是信号经过环路一周所得到的增益。

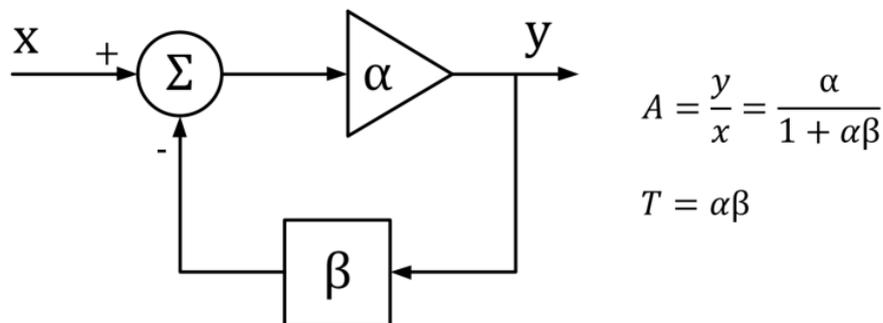


图 2 典型的反馈系统

在实际的系统中，因为前向增益  $\alpha$  和反馈系数  $\beta$  都是复数，所以闭环传递函数  $A$  和环路增益  $T$  也是复数，也就是既有模值也有相角。当环路增益  $T$  的模值为 1 相角为  $-180^\circ$  的时候，闭环传递函数的分母为 0，其结果变为无穷大，这意味着一个系统在没有输入的情况下会维持一个输出，系统是一个振荡器，这与稳定系统有界的输入产生有界的响应相矛盾，也就是说此时系统是不稳定的。

### 3.2 断开环路

我们只需要简单的把环路断开就可以得到环路增益。图 3 展示了如何在反馈系统中把环路断开，理论

计算时可以从任何地方把环路断开，不过我们通常选择在输出和反馈之间把环路断开，断开环路后，我们在断点处注入一个测试信号  $i$ ， $i$  经过环路一周后到达输出得到信号  $y$ ， $y$  和  $i$  的数学关系式就是我们要求的环路增益。

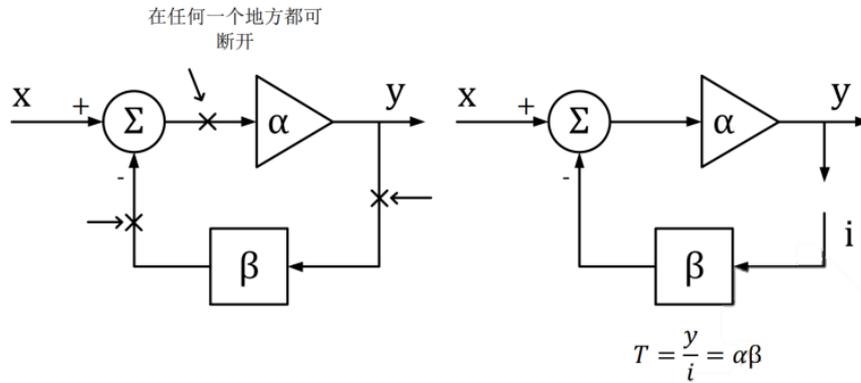


图 3 断开环路

### 3.3 环路注入

现实中反馈环路往往起到了稳定电路静态工作点的作用，所以我们不能简单的把环路断开去测环路增益。反馈环断开后，电路因为输入失调等原因，输出会直接饱和，这种情况下无法进行任何有意义的测量。为了克服这个问题，我们必须在闭环的情况下进行测量，一种可行的手段是环路注入。图 4 展示了典型的环路注入方法，为了尽可能降低误差，我们对注入点的选取有特殊的要求，一般要让从注入点一端看进去的阻抗远远大于另一端看进去的阻抗，一个比较理想的注入点是输出和反馈网络之间，其他注入点如误差放大器和功率晶体管之间也是可行的。

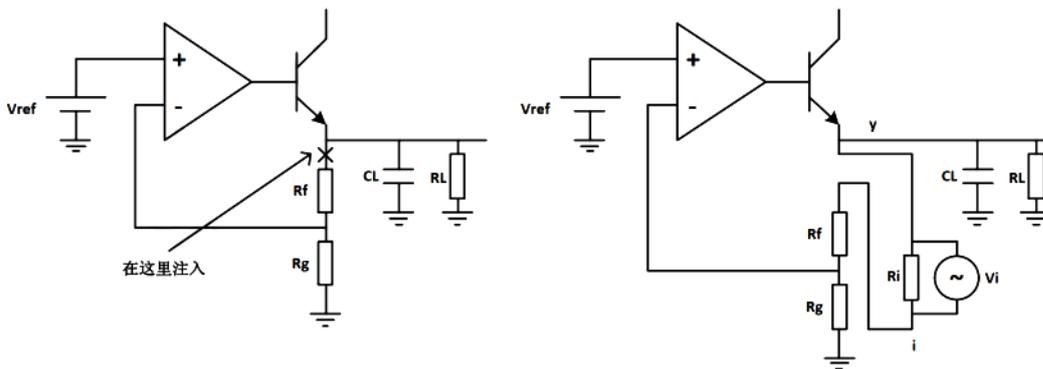


图 4 环路注入

为了维持闭环，我们在注入点的位置插入一个很小的电阻而不是把环路在注入点断开，注入信号将通过这个注入电阻注入到环路中去。这个注入电阻的取值要足够的小，通常要远远小于反馈网络的等效阻抗，这样才能保证注入电阻对反馈环路的影响可以忽略不计。Picotest 建议当使用 J2100A 型变压器或直接使用 Siglent SAG1021I 时，使用  $4.99 \Omega$  的注入电阻，当然适当大一点的注入电阻也是可以的。另外一方

面，因为注入电阻和注入变压器并联，小一点的注入电阻能降低变压器工作的下限频率，这在需要测量极低频率的时候非常有用。原则上信号的注入不能影响环路的静态工作点，为了解决现实的电路中信号源和被测件共地的问题，往往需要使用注入变压器，如图 5 所示，或者直接使用带隔离的信号源。

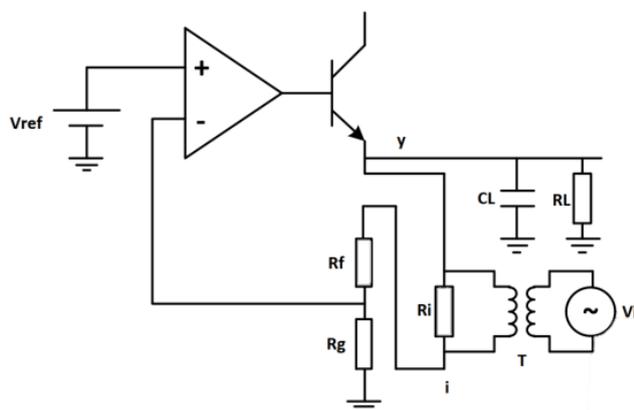


图 5 使用注入变压器注入环路

注入信号从注入电阻的一端注入到环路中，经过反馈网络、误差放大器和功率晶体管到达输出，也就是注入电阻的另一端。这样输出信号  $y$  和注入信号  $i$  的数学关系就是我们要求的环路增益，需要注意的是我们在闭环的情况下测量开环参数，测试结果的相位会从  $180^\circ$  开始逐步将到  $0^\circ$ ，这与理论上直接断开环路求环路增益得到的从  $0^\circ$  开始降到  $-180^\circ$  不同，所以这种情况下我们计算相位裕度的时候应该是参考  $0^\circ$  而不是  $-180^\circ$ 。

### 3.4 测试设备

图片	设备	说明
	示波器	标配波特图功能，如 SDS800X HD、SDS2000X HD 系列等
	隔离信号发生器 信号源	隔离信号发生器属于示波器的硬件配件，搭配示波器可发出最高 25/50MHz 的信号。
	电源	如 SPD3000X、SPD4000X 系列等
	探头	1: 1 无源探头 (6MHz 带宽)，如 PP215

	被测件	Picotest VRTS v1.51 输入电压建议在 7-10V，输入电流小于 100mA
---	-----	---

### 3.5 测试接线

Picotest 的 VRTS v1.51 是一款稳压电源测试板，上面的电路是用 TL431 和分立晶体管所搭建的线性电源，上面有一个开关可以切换输出电容来获得不同的环路响应，电路原理图如图 6。

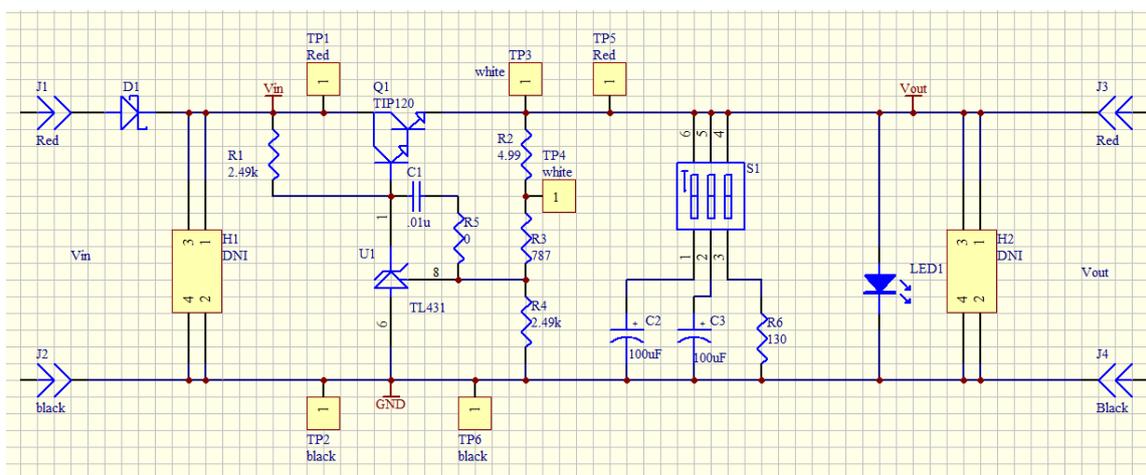


图 6 VRTS v1.51 原理图

测试 VRTS v1.51 上的电源环路响应时，TP3 和 TP4 是注入点，接线的方法如图 7 和图 8 所示。信号源 SAG1021I 通过 USB 接到示波器上，输出端夹子与注入电阻并联，这样信号注入到环路的同时，环路的直流工作点也不会被信号源和被测件的接地问题所影响。TP3 和 TP4 同时也要接到示波器上，其中 TP3 在 Bode Plot II 中定义为 DUT Output，TP4 定义为 DUT Input。

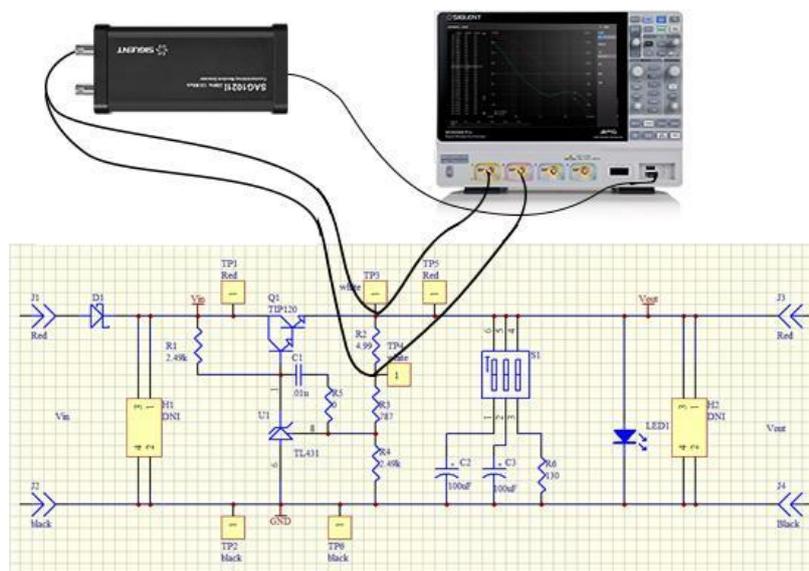


图 7 接线图

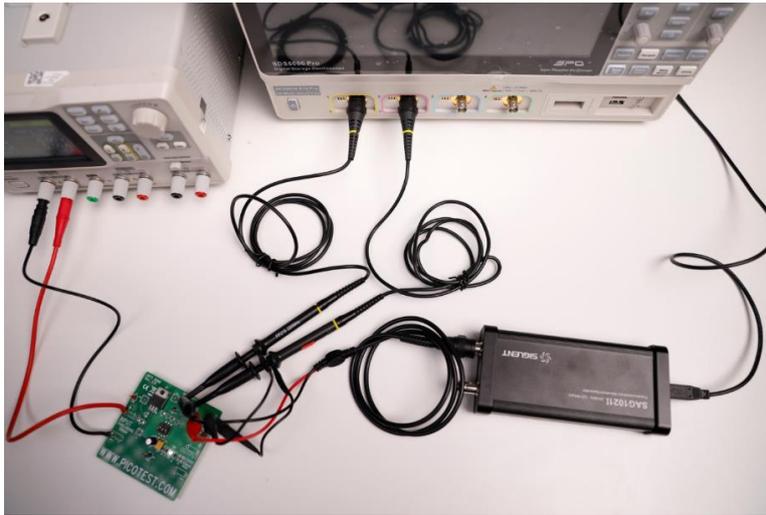
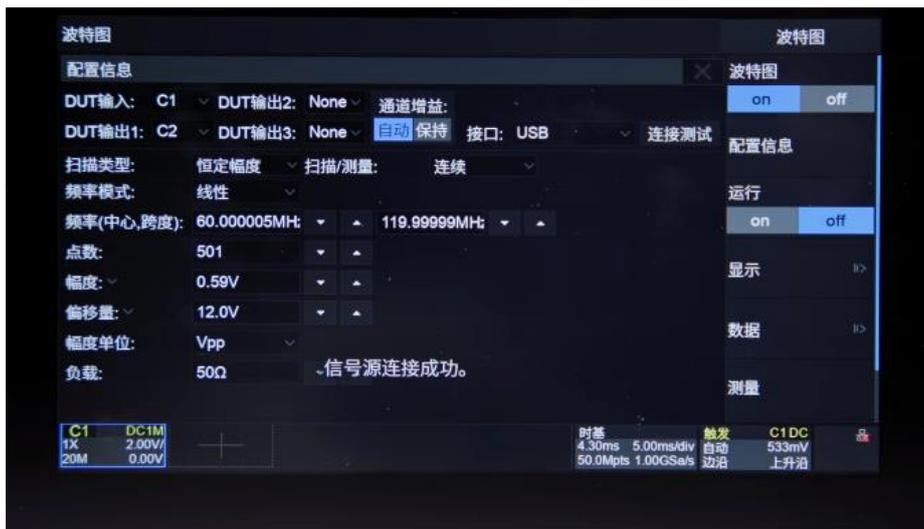


图 8 接线示例

### 3.6 仪器设置

- 连接好之后开始设置，先设置示波器，由于本次被测物的预期穿越频率在 10kHz，测量的频率范围设置 10 Hz 到 100 kHz 足够，因此在进入 Bode Plot 软件之前，建议先把要用到的通道设置为 20 MHz 带宽限制。
- 点击分析进入波特图界面，点击配置信息，先是通道设置，按照刚才所连，DUT 输入设置为 C1，DUT 输出设置为 C2，通道增益可设置为自动或者保持，设置为自动时，示波器将根据信号幅度自动适配档位；设置为保持时，将始终保持运行前的档位进行测试，我们选择自动，接口选择 USB，若是选择 LAN 接口，则还需进行 IP 设置并保存，然后点击连接测试检验示波器是否与 SAG1021I 连接成功。



- 扫描类型中有两种方式，一种恒定幅度扫描，一种可变幅度扫描。在恒定幅度扫描中，仅需设置起始频率及终止频率，在该范围内幅度不变，而可变幅度顾名思义是指激励信号的幅度能够随着频率而变

化。在低频的时候可将激励幅度设置大一些以提高测量精度，再在穿越频率附近把幅度降低到一定程度以减小失真，这样得到的结果会比较理想，不过这需要能够提前预估穿越频率的大概大小。



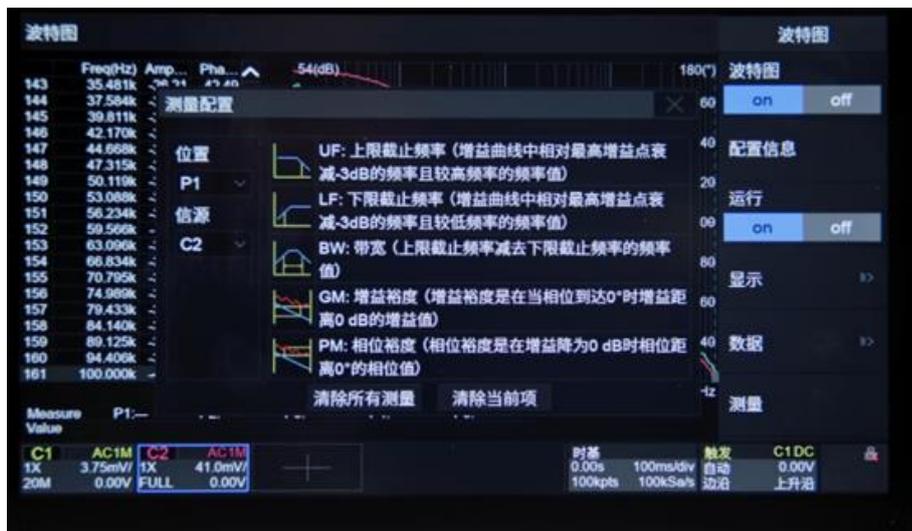
- d) 配置文件中最多支持编辑并保存 4 组，设置频率模式为对数，点数是指信号发生器在对数 10 倍频点下的输出频点个数，例如 100Hz 到 1kHz 之间的输出频点个数，这里我们设置 40，点数越大扫描分辨率也就越高，幅度单位选择 V，负载设置为高阻，然后编辑配置文件，我们建立 5 个结点，频率分别设置为 10Hz，100Hz，1kHz，10kHz 及 100kHz，幅度我们在 10kHz 频率附近设置小一点，因此幅度分别设置为 2V，2V，100mV，100mV，1V，设置完成后，这条折线就能很清晰地看到激励信号的幅度分布，在实际的测试过程中呢，刚刚所设置的这些参数，测试人员往往需要不断尝试才能找到适合当前电路的配置信息。



- e) 全部设置完成后，设置电源输出电压为 8V，电流为 0.05A，点击输出。此时被测板 LED 灯亮起，点击运行开始扫描，最终扫描结果如下图所示，红色曲线代表幅度，绿色曲线代表相位。



- f) 接着开始进行数据分析，有三种方法可供选择，第一种直接点击数据打开数据列表，表中显示了各个频率点对应的幅度与相位，第二种是自动测量，点击测量，有上限截止频率、下限截止频率、带宽、增益裕度、相位裕度这五个测量项可供选择，第三种方法则是利用光标，通过使用旋钮缓慢挪动光标，显示区会不断更新当前频点下的相位及幅度等信息。



Tip: 当增益曲线或者相频曲线不光滑的时候，有可能是注入电压过大或者不足导致 C1/C2 的波形失真，或者 C1/C2 电压过小导致示波器检测不出来，此时可以退出波特图看该异常频点的 C1 和 C2 的表现是否可以很好地在屏幕中看到清晰的迹线来判断。如果 C1 和 C2 的迹线不能很好地显示在屏幕上，可以根据自己需求来修改不同频段中，SAG1021I 的输出幅度。

## 4 小结

鼎阳科技提供的波特图解决方案，配合 SAG1021I，可以用于电源控制环路响应的测量，以经济的价格获得理想的测试效果。

## 关于鼎阳

鼎阳科技 (SIGLENT) 是通用电子测试测量仪器领域的行业领军企业，A股上市公司。

2002年，鼎阳科技创始人开始专注于示波器研发，2005年成功研制出鼎阳第一款数字示波器。历经多年发展，鼎阳产品已扩展到数字示波器、手持示波表、函数/任意波形发生器、频谱分析仪、矢量网络分析仪、射频/微波信号源、台式万用表、直流电源、电子负载等基础测试测量仪器产品，是全球极少数能够同时研发、生产、销售数字示波器、信号发生器、频谱分析仪和矢量网络分析仪四大通用电子测试测量仪器主力产品的厂家之一，国家重点“小巨人”企业。同时也是国内主要竞争对手中极少数同时拥有这四大主力产品并且四大主力产品全线进入高端领域的厂家。公司总部位于深圳，在美国克利夫兰、德国奥格斯堡、日本东京成立了子公司，在成都成立了分公司，产品远销全球80多个国家和地区，SIGLENT已经成为全球知名的测试测量仪器品牌。

## 联系我们

深圳市鼎阳科技股份有限公司  
全国免费服务热线：400-878-0807  
网址：[www.siglent.com](http://www.siglent.com)

## 声明

 SIGLENT 鼎阳 是深圳市鼎阳科技股份有限公司的注册商标，事先未经允许，不得以任何形式或通过任何方式复制本手册中的任何内容。  
本资料中的信息代替原先的此前所有版本。技术数据如有变更，恕不另行通告。

## 技术许可

对于本文档中描述的硬件和软件，仅在得到许可的情况下才会提供，并且只能根据许可进行使用或复制。

