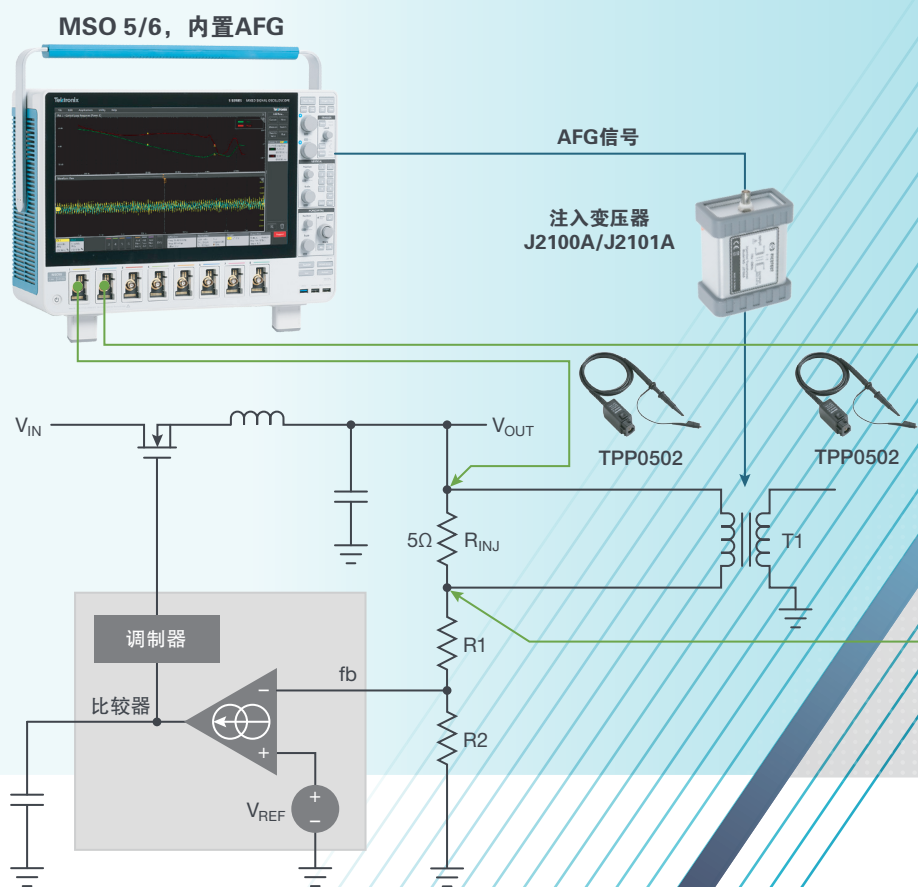


使用示波器测量电源的控制环路响应

应用指南



大多数电源和稳压器是为在指定电流范围内保持恒定电压而设计的。为实现这一目标，它们在本质上都是带有闭合反馈环路的放大器。理想的电源必需响应快，保持恒定输出，而又没有过多的振铃或振荡。控制环路测量有助于表征电源怎样对输出负载条件变化作出响应。

尽管我们可以使用专用设备进行频响分析，但我们可以使用新型示波器来测量电源控制环路的响应。通过使用示波器、信号源和自动软件，我们可以迅速进行测量，并表示为熟悉的波德图，简便地评估裕量，与模型比较电路性能。波德图通过两个图绘制系统频响：幅度图和相位图（用度表示相移）。从这些图中，我们可以确定增益裕量和相位裕量，测量电源的稳定性。

在本应用指南中，你将了解到：

- 概括介绍控制环路、频响分析和波德图基础知识
- 回顾增益裕量和相位裕量
- 怎样在示波器上设置控制环路响应分析
- 怎样理解频响图和测量

本应用指南使用 5 系 MSO 示波器及选项 5-PWR 高级功率测量和分析应用来演示波德图的原理。4 系 MSO 和 6 系 MSO 拥有类似的功率分析选项，功能也类似。这三种仪器之间的控制功能很像，所以本应用指南可以了解这三种示波器在频响分析中的操作。

频响分析简介

系统频响是一种与频率相关的函数，表示系统输入（激发）上特定频率的基准信号（通常是一个正弦曲线波形）怎样传送通过系统。

图 1 是概括性的控制环路，其中正弦波 $a(t)$ 应用到拥有传递函数 $G(s)$ 的系统中。在初始条件引起的瞬态信号衰落消失后，输出 $b(t)$ 变成正弦波，但有不同的幅度 B 和相对相位 Φ 。输出 $b(t)$ 的幅度和相位实际上与输入正弦曲线的频率 (ω rad/s) 上的传递函数 $G(s)$ 有关。反馈系数 ‘ k ’ 决定了怎样根据输出上的负载调节输入信号。

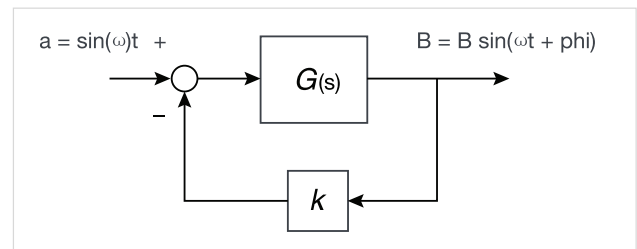


图 1. 概括性的控制环路，其拥有传递函数 $G(s)$ 。

这里， $B/A = |G(j\omega)|$ 是 ω 处的增益， $\Phi = \angle G(j\omega)$ 是 ω 处的相位。

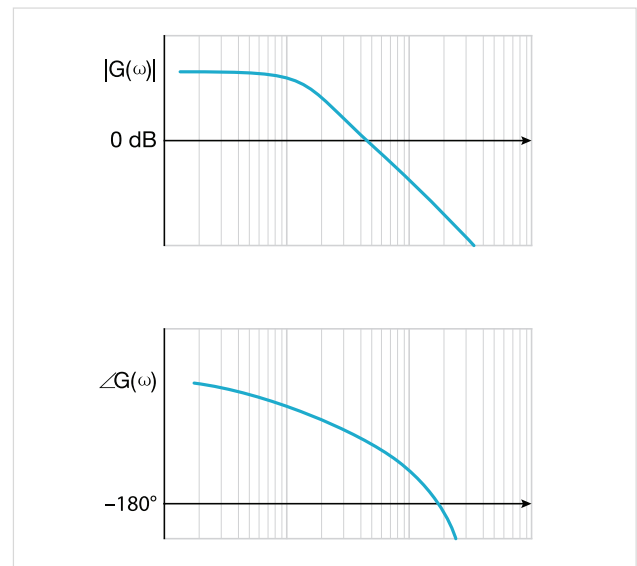


图 2.

为了解系统特点，我们以变化幅度在频率范围内扫描输入正弦曲线信号。这有助于表示在某个频率范围内获得的环路的增益和相位，提供与控制环路和电源稳定性有关的重要信息。通过顺序测量各个频率上的增益和相位，可以绘制增益和相位相对于频率关系图。通过使用对数频率标度，这些图可以覆盖非常宽的频率范围。这些图通常称为波德图，因为 Hendrik Wade Bode 最早在控制系统设计方法中使用这些图。

波德本人 1940 年在《贝尔系统技术杂志》发表的文章（“反馈放大器设计中衰减与相位之间的关系”）中说：

着手反馈放大器设计的工程师必须是拥有混合情绪的人。一方面，他可能会对结构特点的改进欣喜若狂，因为反馈结果非常好，前景一片光明。另一方面，他深知，除非自己最终能够围绕反馈环路调节相位和衰减特点，放大器不会自发地突然不可控地唱起来，否则这些优势实际上根本实现不了。

在电源设计中，控制环路测量有助于表征电源对输出负载条件变化、输入电压变化、温度变化等怎样作出响应。理想的电源必需响应快，保持恒定输出，而又不会有过多的振铃或振荡。这通常通过控制电源和负载之间元器件（一般是 MOSFET）的快速开关来实现。开关打开的时间相对关闭的时间越长，为负载提供的功率越高。

不稳定的电源或稳压器可能会振荡，导致控制环路带宽上出现非常大的明显纹波。这种振荡还可能会导致 EMI 问题。

增益裕量和相位裕量

环路的增益为正（ ≥ 1 ）时，也会出现不稳定性，因为相移接近 -180° 。在这些情况下，环路会出现正反馈，变得不稳定。波德图显示相同频率标度上的增益和相位，让你看到与这种不想要的情况的接近程度。从波德图获得的两项测量会衡量电源控制环路的安全裕量：相位裕量和增益裕量。

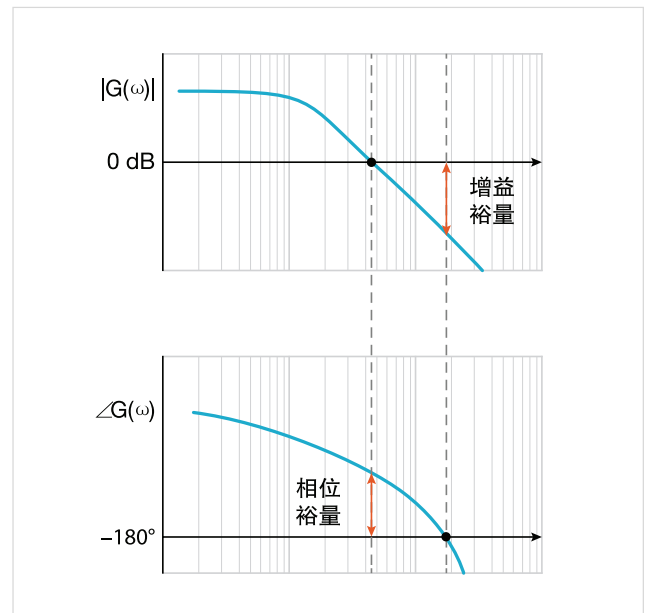


图 3. 增益裕量是在相位下跌到 -180° 时的频率上测得的，相位裕量则是在增益下跌到 0 dB 的频率上测得的（这时输出的幅度 = 输入的幅度）。

如前所述，波德图由增益相对于频率关系图和相位相对于频率关系图组成。我们用下面的公式来计算指定扫描频段上的增益图：

$$G = 20 \log \frac{V_{OUT}}{V_{IN}}$$

其中 V_{IN} 是应用到控制环路反馈上的激励电压， V_{OUT} 是频段中多个点上每个点的环路响应。

相位图表示扫描频段内每个频率上 V_{IN} 和 V_{OUT} 之间的相位差。如果测得的相位大于 180° ，那么绘制的相位角为测得的相位 -360° 。如果测得的相位小于 -180° ，那么绘制的相位角为测得的相位 $+360^\circ$ 。

使用示波器测量电源的控制环路响应

相位裕量和增益裕量测量以这些图为基础。相位裕量 (PM) 的计算公式如下:

$$PM = \Phi - (-180^\circ)$$

其中 Φ 是增益为 0 dB 时测得的相位延迟。

相位裕量 (PM) 表明了系统距不稳定 (-180° 和统一增益) 有多远, 单位为相位度数。它表示在增益接近 0 dB (统一增益) 时环路可以容忍的相移量。换句话说, 相位裕量描述了在未使系统变得不稳定的情况下可以提高或降低的相移量, 其通常用度表示。相位裕量越大, 系统稳定性越高。

通过计算波德幅度图 = 0 dB 的频率上相位曲线 (在波德相位图上) 与 x 轴之间的垂直距离, 我们可以从波德图中读出相位裕量。这个点称为增益交叉频率。增益裕量表明了系统距 -180° 和统一增益有多远, 用增益的 dB 表示。这是在命中 0 dB 前可以增加的增益量, 也就是相移 = -180° 之前。增益裕量描述了在未使系统变得不稳定的情况下可以提高或降低的增益量。增益裕量 (GM) 越大, 系统的稳定性越好。

增益裕量 (GM) 的计算公式如下:

$$GM = 0 - G \text{ dB}$$

其中 G 是相移为 0° 时测得的增益。通过计算波德相位图 = 0 dB 的频率上幅度曲线 (在波德幅度图上) 与 x 轴之间的垂直距离, 我们可以从波德图中读出增益裕量。这个点称为相位交叉频率。在上图所示的实例中, 增益 (G) 是 20。通过使用增益裕量公式, 可知增益裕量等于 $0 - 20 \text{ dB} = -20 \text{ dB}$ (不稳定)。

简而言之, 在控制环路中保持充足的相位裕量和增益裕量可以保证电源运行时不会过于接近不稳定。

使用自动频响分析进行示波器测量

通过测量某个频率范围内电路的实际增益和相位, 我们可以对设计的稳定性树立信心, 这种信心要高于单纯依赖仿真。

在执行控制环路响应测量时, 用户必须在某个频率范围内把激励源注入控制环路的反馈路径中。通过使用示波器、信号源和自动软件, 我们可以迅速进行测量, 并表示为熟悉的波德图, 简便地评估裕量, 与模型比较电路性能。

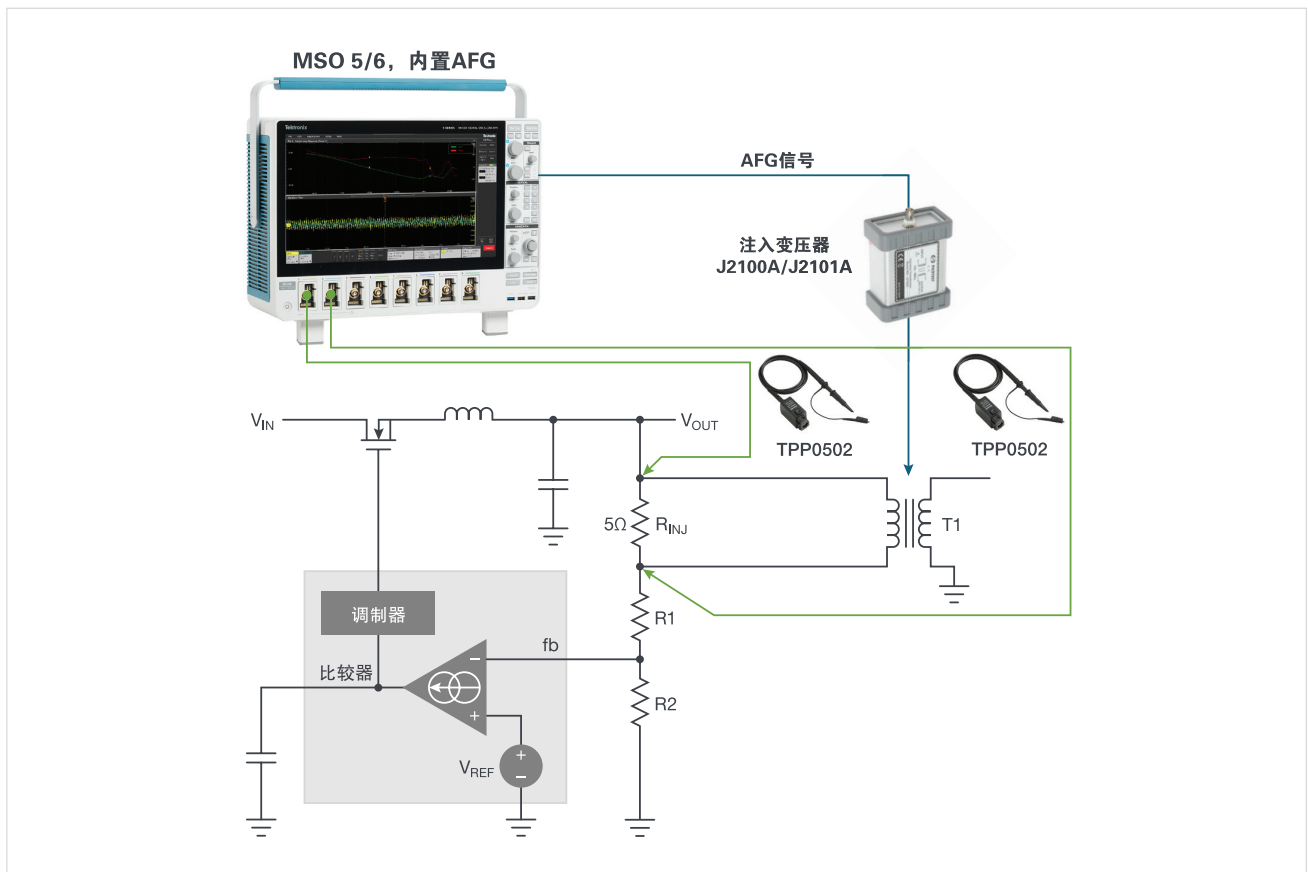


图 4. 测量控制环路响应使用的基于示波器的系统包括测量软件、函数发生器 (内置到上面的示波器中)、注入 / 隔离变压器、注入电阻器和两只低衰减无源探头。

4 系、5 系或 6 系 MSO 可以配备高级功率测量和分析软件 (4/5/6-PWR)。这个应用软件支持多种频响测量，包括：

- 控制环路响应
- 电源抑制比 (PSRR)
- 阻抗

在本应用指南中，我们重点介绍控制环路响应测量。为确定控制环路测量，分析软件执行以下重要功能：

- 控制函数发生器
- 根据两个电压输入计算和绘制增益图 ($20 \text{ Log } V_{OUT}/V_{IN}$)，其中 V_{IN} 是来自函数发生器的激励电压
- 根据两个电压输入计算和绘制 V_{IN} 和 V_{OUT} 之间的相移图
- 计算增益裕量和相位裕量

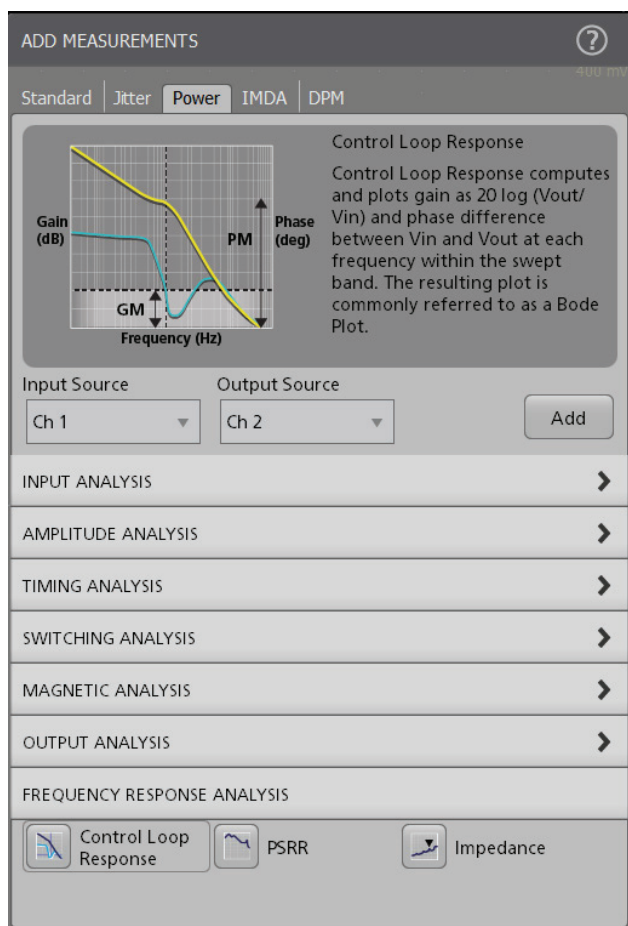


图 5. 高级功率测量和分析应用软件 (4/5/6-PWR) 中的测量。

两只探头应用在一个低值注入电阻器中，提供分析软件需要的所有信息。它测量激励和响应幅度，计算增益，测量激励和响应之间的相位延迟。

为测量电源系统的响应，必须把一个已知信号注入到反馈环路中。泰克多款示波器提供了内置信号源，可以用来通过隔离变压器把信号注入到环路的反馈中。在本例中，我们使用 5 系中的任意波形 / 函数发生器 (AFG) 选项，在指定频率范围内生成正弦波。DC-DC 转换器或 LDO 必须在其反馈环路中配置一个小型 (5–10 Ω) 注入电阻器 / 端接电阻器，这样就可以把来自函数发生器的干扰信号注入到环路中。为了避免控制环路过载，注入信号的幅度必须保持得很低。

在宽带宽上拥有平坦响应的注入变压器连接到注入电阻器中，把接地的信号源与电源隔开。注入变压器的选择取决于关心的频率。Picotest J2101A 注入变压器的频率范围为 10 Hz–45 MHz，与 4/5 系 MSO 的函数发生器选项契合度非常好。Picotest 还提供了一款 J2100A 注入变压器，用于 1 Hz ~ 5 MHz 频率范围。

在进行电压测量时，推荐使用低电容、低衰减无源探头，比如 TPP0502。低探头衰减可以实现优秀的灵敏度。TPP0502 的 2X 衰减可以在 6 系 MSO 上实现 500 $\mu\text{V}/\text{div}$ 的垂直灵敏度，在 4 系或 5 系 MSO 上实现 1 mV/div 的垂直灵敏度。12.7 pF 的低电容则最大限度地降低了探头负载影响。

进行频响测量

在正确连接 DUT 后，必须配置激励扫描。图 6 显示了设置菜单。

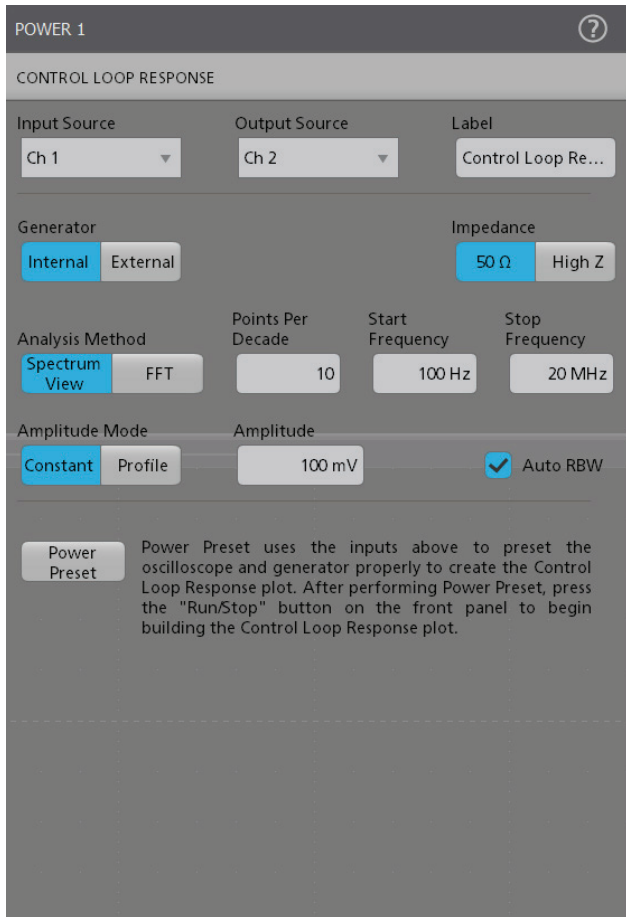


图 6. 控制环路响应设置菜单可以指定输入通道、扫描参数和频率分析方法。

波德图中的点数由每倍频程点数、开始频率和结束频率确定。(每倍频程点数默认值是 10, 最大值是 100)。

频率点数的计算公式是：

$$\text{频率点数} = \text{ppd}(\log(f_{STOP}) - \log(f_{start}))$$

例如，如果每倍频程的点数是 10，开始频率是 100 Hz，结束频率是 10 MHz，那么：

$$\text{频率点数} = 10 (\log(10^7) - \log(10^2)) = 50 \text{ 点}$$

分析方法是指频响测量中使用的方法。默认的分析方法采用 4 系、5 系和 6 系上的 Spectrum View 频谱视图。这种方法采用示波器每条通道中内置的数字下变频器。它可以灵活地控制解析带宽 (RBW)，进而控制频率分辨率 (一般为 mHz)，与传统 FFT 方法形成了鲜明的对比。我们推荐使用 Spectrum View 频谱视图方法，但可以把 FFT 方法作为备用方案。

与传统 FFT 方法相比，Spectrum View 频谱视图方法可以更精细地控制频率分辨率。测量设置包括使用“Auto RBW”选项 (图 6)，其有助于全面利用这种灵活性和分辨率。

Auto RBW 控制功能告诉仪器根据递增的扫描频率，动态地自动调节 Spectrum View 频谱视图的关键参数，如 Resolution Bandwidth 解析带宽 (RBW)、Center Frequency 中心频率 (CF) 和 Span 频宽。这有助于在不同频率中平衡 RBW 解析带宽和 Span 频宽，提供稳定的、可重复的测量结果。

表 1 说明了 Auto RBW 怎样调节 RBW 解析带宽和 Span 频宽，为 1 Hz ~ 10 MHz 以上的波德图提供最优结果。

扫频范围 (Hz)	RBW (Hz)	频宽
1 – 10	0.5	1K
10 – 100	1	1K
100 – 1K	1	10K
1K – 10K	10	1M
10K – 1M	100	10M
>10M	100	6M

表 1. Auto RBW 模式在整个波德图中调节 RBW 解析带宽和频宽，提供最优结果。

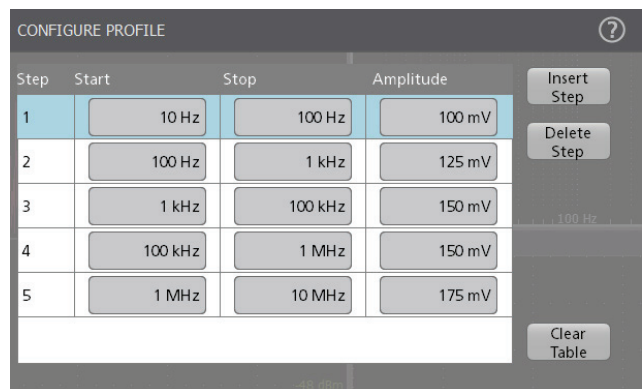


图 7. 可以配置幅度廓线，改善 SNR。

4/5/6-PWR 软件支持恒定幅度和廓线幅度扫描。

- 恒定幅度扫描在所有频率上保持相同的幅度。开始频率和结束频率、幅度每倍频程点数决定着扫描。
- 廓线扫描允许在确定的频段上指定不同的幅度，从而可以改善 SNR (信噪比)。例如，你可以在 DUT 对失真灵敏的频率上在较低幅度下测试，然后在不太灵敏的较高幅度上测试。

理解测量结果

为开始测试，按前面板上的 Run 按钮。测量开始，画面上绘制相位和增益曲线。一旦绿色增益曲线越过 0 dB 线，那么将显示相位裕量。当红色曲线越过 0° 阈值时，将显示增益裕量。

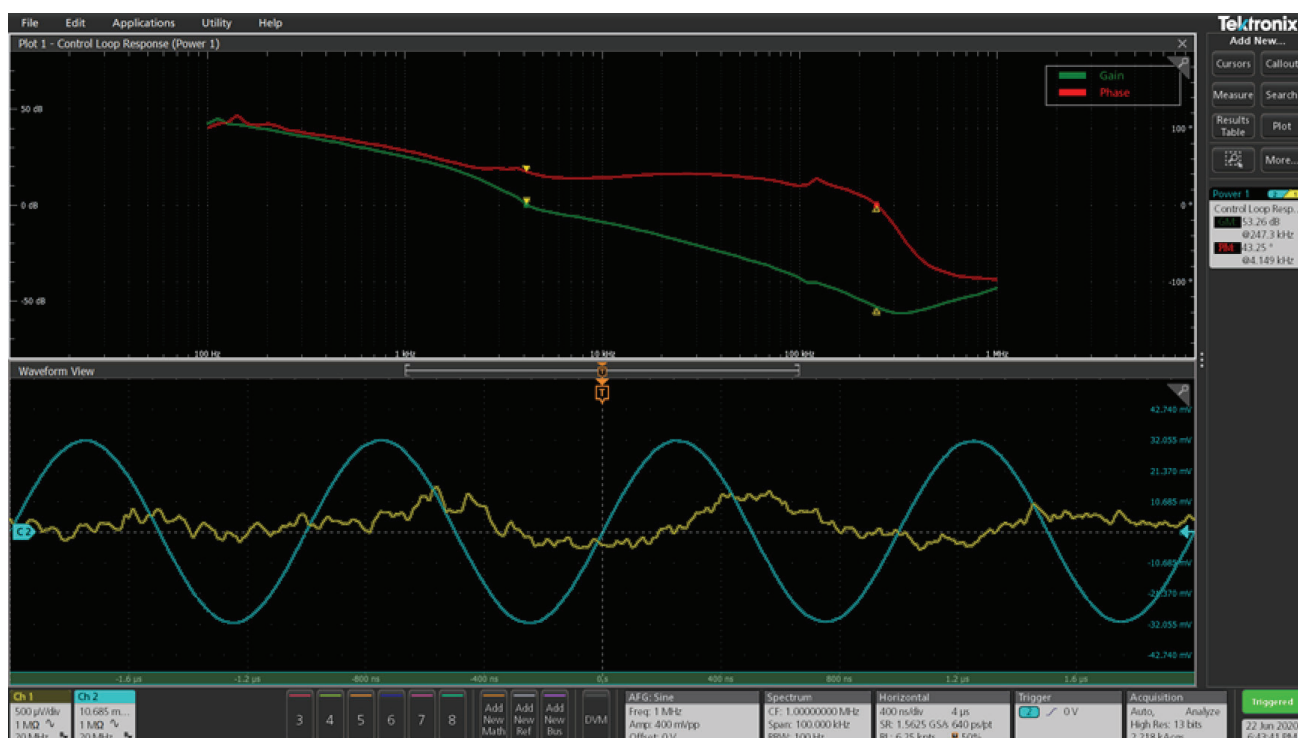


图 8.5 系 MSO 示波器上测得的增益和相位相对于频率关系、增益裕量和相位裕量。

图 8 显示了 5 系 MSO 上的增益图和相位图，其中使用下面的设置在负载点电压器上进行测量：

开始频率	100 Hz
结束频率	1 MHz
每倍频程点数	20
频率分析	Spectrum View 频谱视图
解析带宽 (参见画面底部 Spectrum 频谱标记)	100 Hz
激励幅度	恒定幅度在发生器输出中设为 400 mVpp

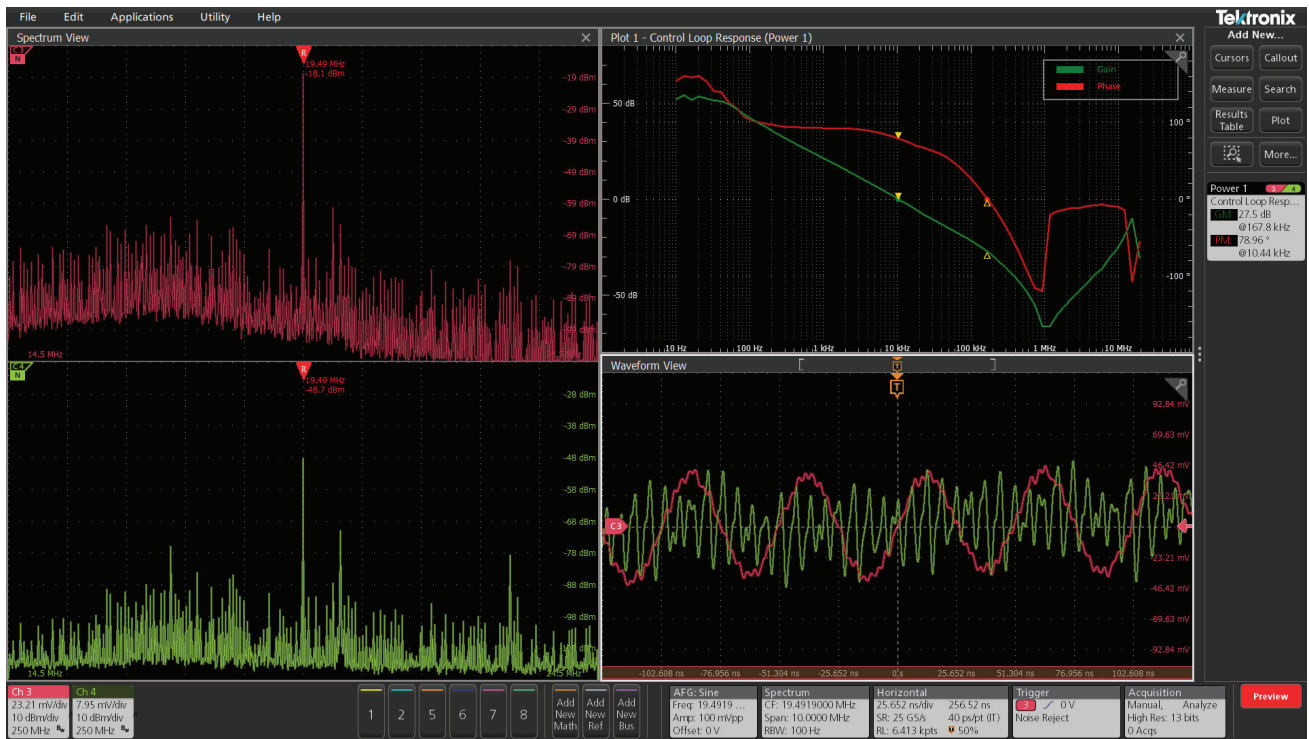


图9. 波德图(右上),扫描范围为10 Hz ~ 20 MHz。左面是Spectrum View 频谱视图窗口。这些测量都是在5系MSO上进行的。

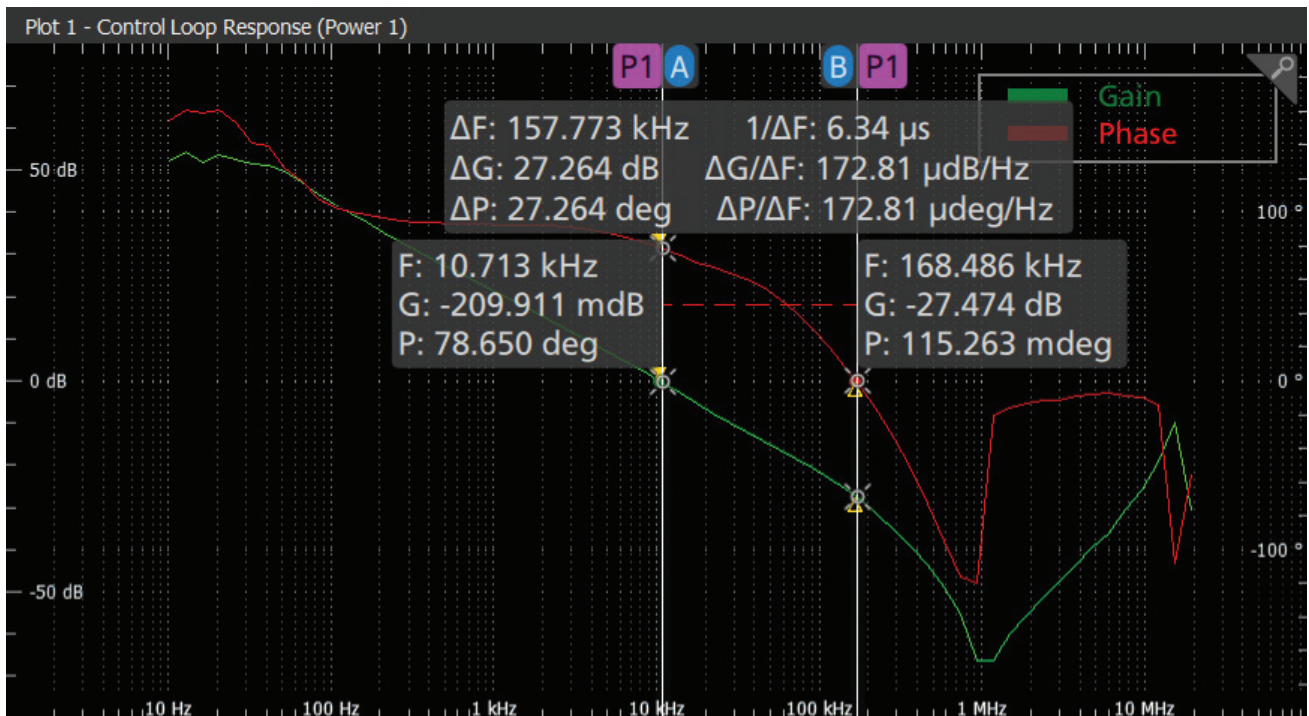


图10. 光标表明特定频率上的增益和相位,以及这些点之间的差。

使用示波器测量电源的控制环路响应

得到的波德图和测量显示了：

- x 轴上是频率，用对数标度绘制。
- y 轴上是增益 (绿色轨迹)，左面是标度。它用 dB 给出，计算公式为 $20 \log (V_{out} / V_{in})$ 。
- 激励和响应之间的相位 (红色轨迹) 在 y 轴上绘制，右面是标度。它用度给出，绘制为线性标度。
- 为输入和输出通道配置的 Spectrum View 窗口。

增益裕量和相位裕量在右面的“标牌”中表示。对图 8 所示的实例，增益裕量测得 53 dB，相位裕量测得 43° 。如图 10 所示，我们可以在波德图上使用光标，表明任意频率上的增益和相位。另外还会显示两个光标之间的差。能够迅速启动测量有助于加快调试速度。

小结

大多数电源和稳压器本质上都是带有闭合反馈环路的放大器。控制环路测量有助于确保电源设计能够对输出负载作出响应，而没有过多的振铃或振荡。

尽管我们可以使用专用设备进行频响分析，但我们可以使用新型示波器来测量电源控制环路的响应。4 系、5 系和 6 系 MSO 可以进一步配置内置函数发生器，减少对专用设备的需求，不需要频响分析仪或 VNA。

通过使用示波器、信号源和自动软件，我们可以迅速进行测量，并表示为熟悉的波德图，简便地评估裕量，与模型比较电路性能。



泰克官方微信

如需所有最新配套资料，请立即与泰克本地代表联系！

或登录泰克公司中文网站：www.tek.com.cn

泰克中国客户服务中心全国热线：400-820-5835

泰克科技(中国)有限公司

上海市浦东新区川桥路1227号
邮编：201206
电话：(86 21) 5031 2000
传真：(86 21) 5899 3156

泰克北京办事处

北京市朝阳区酒仙桥路6号院
电子城·国际电子总部二期
七号楼2层203单元
邮编：100015
电话：(86 10) 5795 0700
传真：(86 10) 6235 1236

泰克上海办事处

上海市长宁区福泉北路518号
9座5楼
邮编：200335
电话：(86 21) 3397 0800
传真：(86 21) 6289 7267

泰克深圳办事处

深圳市深南东路5002号
信兴广场地王商业大厦3001-3002室
邮编：518008
电话：(86 755) 8246 0909
传真：(86 755) 8246 1539

泰克成都办事处

成都市锦江区三色路38号
博瑞创意成都B座1604
邮编：610063
电话：(86 28) 6530 4900
传真：(86 28) 8527 0053

泰克西安办事处

西安市二环南路西段88号
老三届世纪星大厦26层L座
邮编：710065
电话：(86 29) 8723 1794
传真：(86 29) 8721 8549

泰克武汉办事处

武汉市洪山区珞喻路726号
华美达大酒店702室
邮编：430074
电话：(86 27) 8781 2760

泰克香港办事处

香港九龙尖沙咀弥敦道132号
美丽华大厦808-809室
电话：(852) 3168 6695
传真：(852) 2598 6260

更多宝贵资源，尽在 WWW.TEK.COM.CN

© 泰克科技公司版权所有，侵权必究。泰克产品受到已经签发及正在申请的美国专利和国外专利保护。本文中的信息代替所有以前出版的材料中的信息。技术数据和价格如有变更，恕不另行通告。TEKTRONIX 和泰克徽标是泰克公司的注册商标。本文提到的所有其他商号均为各自公司的服务标志、商标或注册商标。

032321 SBG 48C-73793-0

