



RIGOL

# MHO/DHO5000系列

## 数字示波器伯德图功能

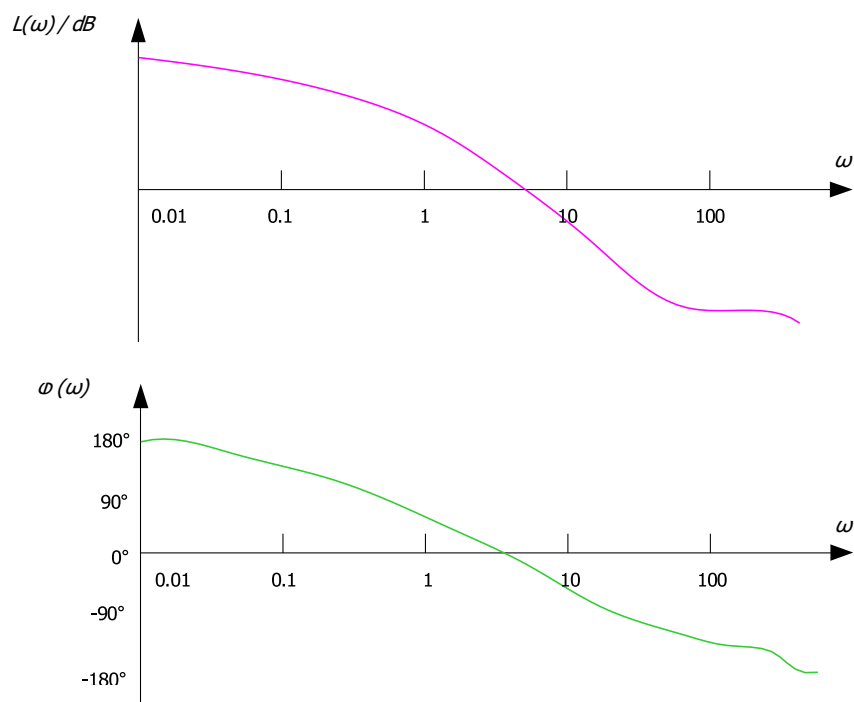


应用案例

ANW01000-1220-0033

## 引言

伯德图是系统频率响应的一种图示方法，由荷兰裔科学家亨Bode, H.W. 在1940年提出。伯德图由幅频特性图和相频特性图两部分组成，两者的横轴都是频率的对数 $\lg\omega$ ，采用对数分度。幅频特性图的纵轴为幅值的对数 $20\lg(\text{dB})$ ，采用线性分度，单位是分贝。相频特性图的纵轴也采用线性分度，单位是度。通常幅频特性图和相频特性图上下放置，幅频特性图在上相频特性图在下，且将纵轴对齐，可以方便观察同一频率的幅值和相位的大小。坐标图如下：

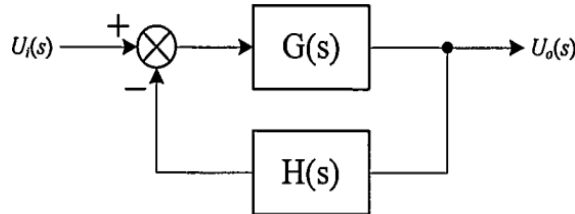


环路分析测试方法是指，给开关电源电路注入一个频率不断变化的正弦波信号作为干扰信号，然后根据其输出情况来判断该电路系统对各个频率干扰信号的调整能力。

对开关电源电路的测试，经常会使用环路分析方法。将输出电压的增益和相位随注入信号的频率变化而产生变化的测量结果绘制成曲线即伯德图。然后运用伯德图来分析开关电源电路的增益裕度和相位裕度，以判定其的稳定性。

## 原理描述

开关电源是一个典型的反馈回路控制系统，其反馈增益模型如下：



在反馈电路系统中，输出电压 $U_o(s)$ 和参考电压 $U_i(s)$ 之间的关系如下：

开环传递函数： $T(s) = G(s) * H(s)$

闭环传递函数： $\frac{U_o(s)}{U_i(s)} = \frac{G(s)}{1+G(s)*H(s)} = \frac{G(s)}{1+T(s)}$

电压波动表达式： $\Delta U_o(s) = \frac{G(s)}{1+T(s)} * \Delta U_i(s)$

由此可以看出闭环系统不稳定的条件：当  $1 + T(s) = 0$  时，系统的干扰波动无限大。不稳定条件包含两个方面：

- 1) 开环传递函数的幅值为  $|T(s)| = 1 = 0dB$
- 2) 开环传递函数的相位为  $\angle T(s) = -180^\circ$

如上为理论值，在工程实现上如果要保持电路系统的稳定还需留出一定的裕量，涉及到以下两个重要指标：

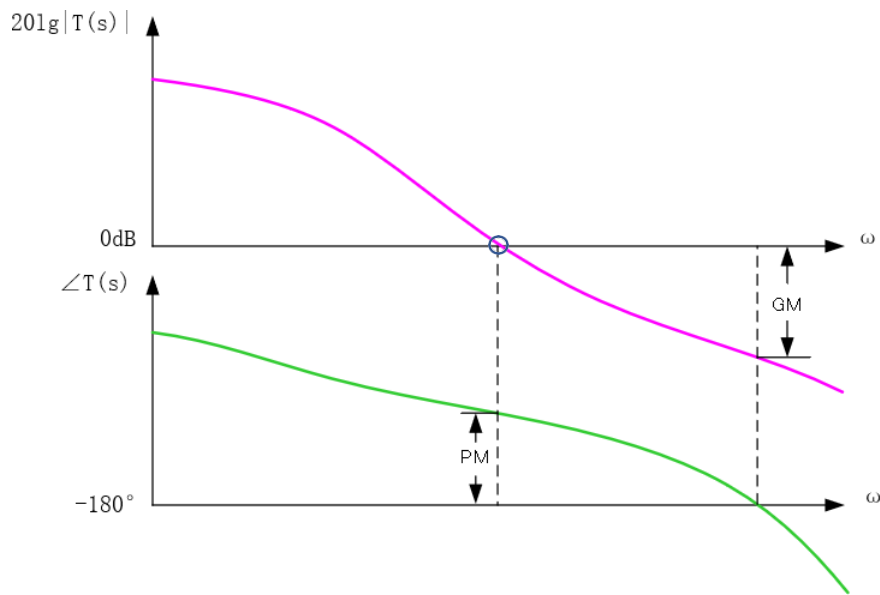
- 相位裕度 (Phase Margin, PM)

当增益 $|T(s)|$ 为1时，相位 $\angle T(s)$  不能为 $-180^\circ$ ，此时相位 $\angle T(s)$ 和  $-180^\circ$ 之间的距离为相位裕度。相位裕度可以看作是系统进入不稳定状态之前可以增加的相位变化，相位裕度越大，系统越稳定，但系统响应速度会减慢。

- 增益裕度 (Gain Margin, GM)

当相位 $\angle T(s)$  为 $-180^\circ$ 时，增益 $|T(s)|$ 不能为1，此时增益 $|T(s)|$  和1之间的距离就是增益裕度。增益裕度采用分贝(dB)表示，如果 $|T(s)| > 1$ ，则增益裕量为正值；如果 $|T(s)| < 1$ ，则增益裕量为负值。正增益裕度表明系统是稳定的，负增益裕量表明系统是不稳定的。

如下为伯德图，其中紫色为环路系统增益随频率变化的曲线，绿色为环路系统相位随频率变化的曲线。图中，当增益为0dB时对应的频率为“穿越频率”。

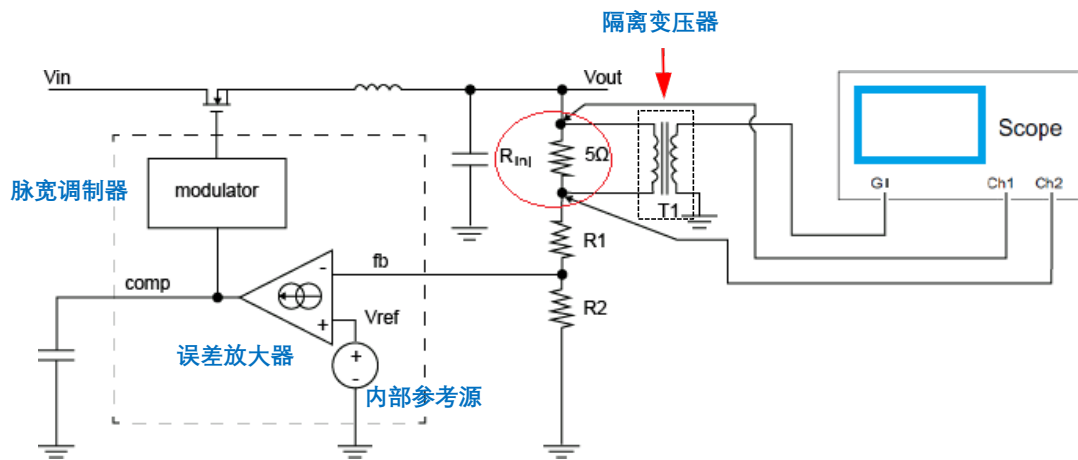


伯德图的原理简单，展示直观，运用了系统的开环增益来评价闭环系统的稳定性。

## 环路测试环境搭建

RIGOL的MHO5054和MHO5104型号支持选配内置50MHz的函数/任意波形发生器，以支持伯德图功能。下图为使用RIGOL的MHO5054数字示波器对开关电源进行环路分析测试的电路拓扑图。包括如下几个部分：

1. 将一个 $5\Omega$ 的注入电阻 $R_{inj}$ 插到反馈电路中，如图中红圈位置所示。
2. 将MHO5054系列数字示波器的GI接口连接到一个隔离变压器。将示波器内置波形发生器输出的扫频正弦波信号通过隔离变压器并联到注入电阻 $R_{inj}$ 两端。
3. 使用连接MHO5054系列数字示波器两个模拟通道的探头（例如RIGOL的RP3500A探头），对扫频信号的注入端和输出端进行测量。



如下为测试环境的实物连接图




## 操作步骤

下面我们以RIGOL的MHO5054系列数字示波器为例，介绍如何进行环路分析操作，操作流程如下图所示：

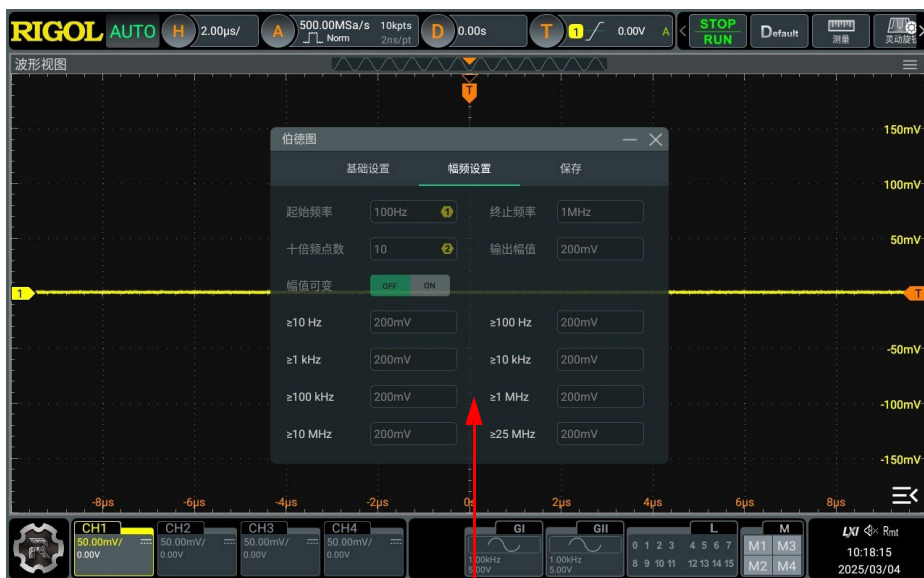


### Step1 启用伯德图功能

点击屏幕左下角的功能导航图标 ，打开功能导航菜单，然后点击“伯德图”图标，进入“伯德图”功能设置菜单。伯德图=Bode，后面不做区分。

### Step2 设置扫频信号

点击幅频设置键，进入“幅频设置”子菜单，显示以下窗口界面。您可以用触摸屏功能触摸窗口中各项参数输入框，通过触摸弹出的数字键盘，对参数进行设置。连续点击幅值可变键，可以打开或关闭设置扫频信号在不同频率范围的电压幅值。




可变幅值

屏幕中各个参数的含义如下表：

参数	含义
起始频率	扫频正弦波的频率起始值。默认为100Hz，可调节范围为10Hz至3MHz。
终止频率	扫频正弦波的频率终止值。默认为1MHz，可调节范围为100Hz至30MHz。
十倍频点	每十倍频显示的点数。默认为10，可调节范围为10至100。
输出幅值	幅值可变键为关闭状态下，扫频正弦波的电压幅值。
可变幅值	幅值可变键为打开状态下，扫频正弦波在不同频率范围的电压幅值。

### 注意：


设置的“终止频率”值应大于“起始频率”值。


点击**扫频类型**键，进入“扫频类型”子菜单，旋转多功能旋钮  选择所需扫频类型并按下该旋钮选中。您也可以使用触摸屏功能进行选择。

- 线性：扫频正弦波的频率随时间线性变化。
- 对数：扫频正弦波的频率按对数规律变化。




### Step3 设置输入输出源


如[环路测试环境搭建](#)章节中的电路拓扑图所示，输入源通过示波器的模拟通道采集注入信号，输出源通过示波器模拟通道采集被测设备的输出信号。可以通过以下方法为输入源和输出源设置对应的通道号。


点击**输入源**键，旋转多功能旋钮  选择所需通道号并按下该旋钮选中。您也可以使用触摸屏功能，点击**输入源**键，进入“输入源”子菜单进行选择。

点击**输出源**键，旋转多功能旋钮  选择所需通道号并按下该旋钮选中。您也可以使用触摸屏功能，按**输出源**键，进入“输出源”子菜单进行选择。

### Step4 启动环路分析测试

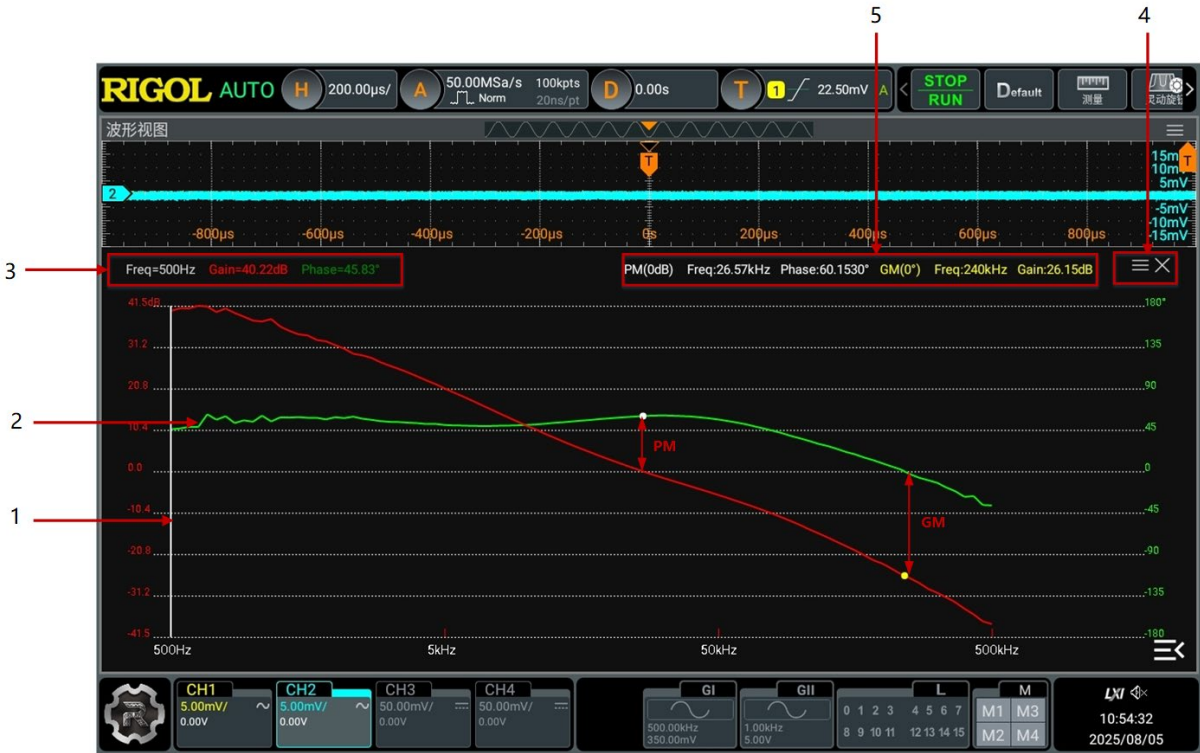
打开伯德图功能后，在伯德图设置菜单中，点击**运行**项按键 ，启动环路分析测试和绘制伯德图操作，示波器将根据当前的伯德图设置对环路进行测试并绘制伯德图。运行状态下**运行**项按键显示为 ，等待伯德图绘制完成后，**运行**键恢复为 。

如果在伯德图的绘制过程中想要停止绘图，可以点击  键。



注：启动伯德图测试后，会自动关闭伯德图设置菜单，您可点击伯德图窗口右上角的  图标打开伯德图设置菜单。


### Step5 查看伯德图测量结果

伯德图绘制完成后，可在 Bode Wave 窗口中查看伯德图，如下。



屏幕中各个标号的含义如下表：

标号	含义
1	光标：旋转多功能旋钮可以移动光标，光标信息在左上角显示。
2	伯德图曲线：幅频曲线（红色）和相频曲线（绿色）。
3	光标信息显示： <ul style="list-style-type: none"> <li>频率，光标所在的横坐标值。</li> <li>增益，光标与红色的幅频曲线交点的纵坐标值。</li> <li>相位，光标与绿色的相频曲线交点的纵坐标值。</li> </ul>
4	操作按钮：点击  可打开伯德图设置菜单，点击  可关闭伯德图波形显示并关闭伯德图功能。
5	裕度结果：PM：相位裕度(Phase Margin)值；GM：增益裕度(Gain Margin)值

也可以点击**显示类型**键，进入“显示类型”子菜单，旋转多功能旋钮选择伯德图显示的方式为如下的表格形式，查看环路分析测试结果的各项参考。

Index	Freq	Gain	Phase
1	500Hz	40.22dB	45.83°
2	539.88Hz	40.94dB	46.66°
3	582.95Hz	40.89dB	48.42°
4	629.46Hz	41.54dB	48.21°
5	679.67Hz	41.35dB	62.05°
6	733.9Hz	39.96dB	56.17°
7	792.44Hz	40.86dB	59.97°
8	855.66Hz	39.73dB	52.56°
9	923.92Hz	38.82dB	55.50°
10	997.63Hz	37.83dB	53.98°
11	1.0772kHz	37.60dB	60.58°
12	1.1631kHz	38.23dB	54.29°
13	1.2559kHz	36.31dB	58.77°
14	1.3561kHz	35.25dB	58.53°
15	1.4643kHz	34.38dB	58.98°
16	1.5811kHz	34.11dB	58.27°
17	1.7072kHz	32.96dB	58.30°
18	1.8434kHz	32.64dB	56.51°
19	1.9905kHz	31.70dB	58.90°

## Step6 保存伯德图文件

完成测试后，可以将环路分析的测试结果按照指定的文件名和文件类型进行保存。

点击**保存**键，进入“保存”子菜单，选择保存伯德图的文件类型，可选择的文件类型包括\*.csv 和\*.html，此时保存的伯德图文件为表格形式。

此外，也可通过截图方式保存伯德图文件。打开功能导航菜单，点击**存储**，进入“存储”功能设置菜单。在保存栏下，点击图像类型，可选择文件类型为\*.png，\*.bmp 和 \*.jpg，通过该方式保存的伯德图文件为波形图。

按**文件名**键，在弹出的字母键盘输入存储伯德图文件的文件名称。

## 操作要点

在进行开关电源的环路分析测试时，可以参考以下几点进行测试激励信号的注入。

### 1. 干扰信号注入位置的选择

利用反馈来注入干扰信号。一般情况下，在电压反馈型的开关电源电路中，选择将注入电阻放在输出电压点和反馈回路的分压电阻之间。在电流反馈型的开关电源电路中，将注入电阻放在反馈电路之后即可。

## 2. 注入电阻的选择

注入电阻不应该影响系统原有的稳定性，由于分压电路的电阻一般在  $k\Omega$  级别以上，所以选择一个在  $5\ \Omega$  至  $10\ \Omega$  之间的注入电阻是较为合适的。

## 3. 注入干扰信号电压幅值的选择

一般情况下注入信号的幅度可以从输出电压的  $1/20$  至  $1/5$  开始，进行试探。

如果注入信号电压过大会使开关电源成为非线性电路，导致测量失真。如果在低频段注入信号电压过小，会造成低信噪比，干扰较大。

通常设置在注入信号频率较低时采用较高的电压幅值，在注入信号频率较高时采用较低的电压幅值，通过在注入信号的不同频段选择不同的电压幅值获得较为准确的测量结果。

MHO/DHO5000 系列数字示波器支持输出频率可变的扫频信号，请参考 [Step2 设置扫频信号](#) 中的幅值可变功能键。

## 4. 注入干扰信号频率段的选择

注入信号的扫频范围应在穿越频率附近，这样便于在生成的伯德图中观察相位裕度和增益裕度。一般情况下，系统的穿越频率在开关频率的  $1/20$  至  $1/5$  之间，可以在这个频率范围内选择注入信号的频率段。

## 经验值

开关电源是一种典型的反馈控制系统，其有响应速度和稳定性两个重要的指标。响应速度就是当负载变化或者输入电压变化时，电源能迅速做出调整的速度。稳定性就是对输入的不同频率的干扰信号的抑制能力。



当系统的相位裕度越大时，系统的反映速度越慢；相位裕度越小时，系统的稳定性越差。同样穿越频率过高则影响稳定性，过低则响应速度慢。为了在响应速度和稳定性做平衡，一般有如下经验值要求：

- 穿越频率建议为开关频率的 1/20 至 1/5。
- 相位裕度应大于 45°，建议在 45°至 80°之间。
- 增益裕度建议大于 10 dB。

## 总结

由 RIGOL 生产的 MHO/DHO5000 系列数字示波器通过控制内置的信号发生模块，产生指定频率范围内的扫频信号，注入到开关电源电路进行环路分析测试。通过测试生成的伯德图可以直观展现在不同频率下系统的增益大小和相位变化，并标识出相位裕度、增益裕度和穿越频率等重要参数。伯德图功能操作简单，为工程师分析电路系统的稳定性提供便利手段。

目前支持伯德图功能的 RIGOL 示波器如下表：

型号	 MHO5054	 MHO5104
模拟带宽	500 MHz	1 GHz
模拟通道数	4	4
最高实时采样率	4 GSa/s	4 GSa/s
最大存储深度	500 Mpts	500 Mpts
最高波形捕获率	1,000,000 wfms/s	1,000,000 wfms/s
数字通道	16	16
AFG选件	50 MHz, 2-CH	50 MHz, 2-CH

# 全面助力智慧世界和科技创新



- 蜂窝-5G/WIFI
- UWB/RFID/ ZIGBEE
- 数字总线/以太网
- 光通信

- 数字/模拟/射频芯片
- 存储器及MCU芯片
- 第三代半导体
- 太阳能光伏电池

- 新能源汽车
- 光伏/逆变器
- 电源测试
- 汽车电子

## 为行业客户提供测试测量产品和解决方案

### RIGOL开放实验室

地址：北京、苏州、深圳、西安  
开放时间：工作日 9:00 am~6:00 pm  
预约方式：实验室工程师小源 18061921901  
实验室微信号 18061921901  
RIGOL客服热线：400-620-0002  
官网预约网址：  
<https://www.rigol.com/quote/Lab-appoint.html>

RIGOL®是普源精电科技股份有限公司的英文名称和商标。  
本文档中的产品信息可不经通知而变更，有关RIGOL最新的产品、应用、服务等方面的信息，请访问RIGOL官方网站：

[www.rigol.com](http://www.rigol.com)



RIGOL开放实验室微信号



RIGOL实验室视频号



RIGOL官方微信



RIGOL官网