

RIGOL

应用指南

MSO5000 系列数字示波器 伯德图功能应用指南

文档版本 1.0

发布日期 2020 年 4 月
RIGOL TECHNOLOGIES CO., LTD.

前言

版权

© 2020 普源精电科技股份有限公司

商标信息

RIGOL 是普源精电科技股份有限公司的注册商标。

声明

- 本公司产品受中国及其它国家和地区的专利（包括已取得的和正在申请的专利）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。
- 本手册提供的信息如有变更，恕不另行通知。
- 对于本手册可能包含的错误，或因手册所提供的信息及演绎的功能，以及因使用本手册而导致的任何偶然或继发的损失，**RIGOL** 概不负责。
- 未经 **RIGOL** 事先书面许可，不得影印、复制或改编本手册的任何部分。

产品认证

RIGOL 认证本产品符合中国国家产品标准和行业产品标准及 ISO9001:2015 标准和 ISO14001:2015 标准，并进一步认证本产品符合其它国际标准组织成员的相关标准。

联系我们

如您在使用此产品或本手册的过程中有任何问题或需求，可与 **RIGOL** 联系：

电子邮箱：service@rigol.com

网址：www.rigol.com

本应用指南

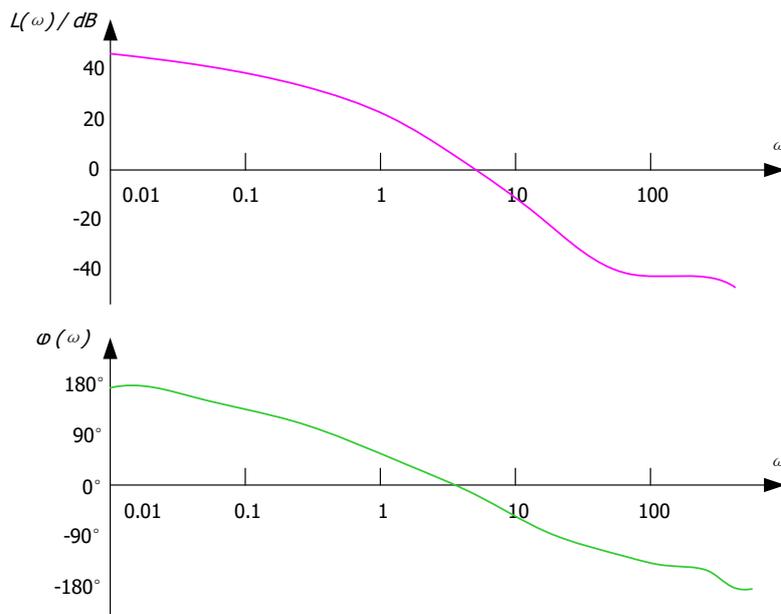
- 简要介绍伯德图的概念。
- 阐述了伯德图的基本原理。
- 提供了环路测试环境搭建的方法。
- 详细描述了操作步骤和操作要点以及操作经验。
- 总结了 RIGOL 现有提供伯德图的功能的设备型号。
- 提供了 RIGOL 原有设备通过软件升级获取伯德图功能的方法。

完成全文阅读，大概需要 17 分钟时间。

简介

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：

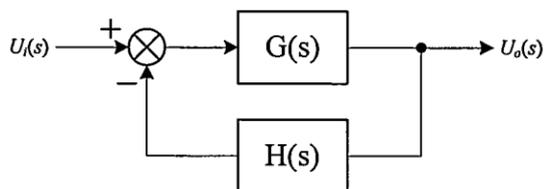


环路分析测试方法是指，给开关电源电路注入一个频率不断变化的正弦波信号作为干扰信号，然后根据其输出情况来判断该电路系统对各个频率干扰信号的调整能力。

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: $\frac{Uo(s)}{Ui(s)} = \frac{G(s)}{1+G(s)*H(s)} = \frac{G(s)}{1+T(s)}$

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

由此可以看出这个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。

这个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要留出一定的裕量, 就涉及到下面两个重要指标:

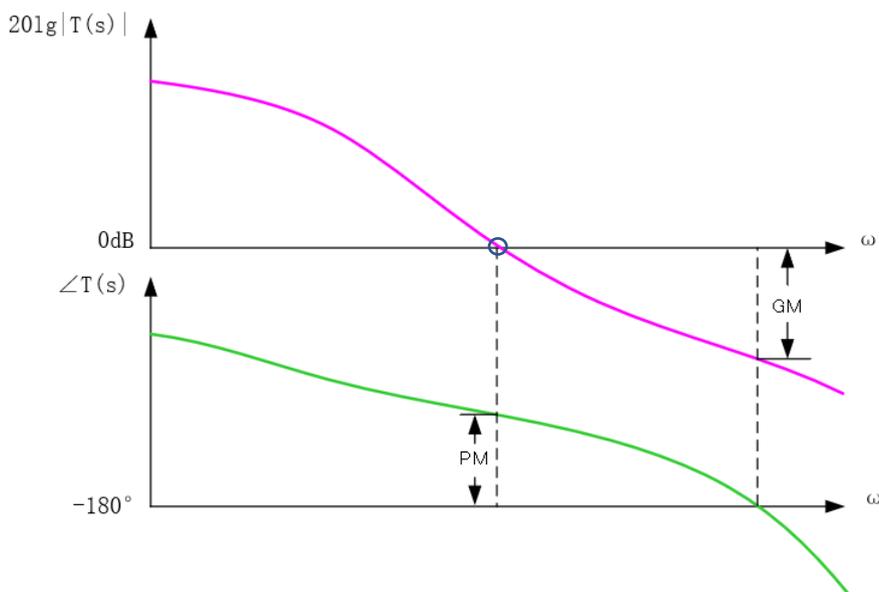
●相位裕度 (Phase Margin, PM)

当增益 $|T(s)|$ 为 1 时, 相位 $\angle T(s)$ 不能为 -180° , 此时相位 $\angle T(s)$ 和 -180° 之间的距离就是相位裕度。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° 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”。

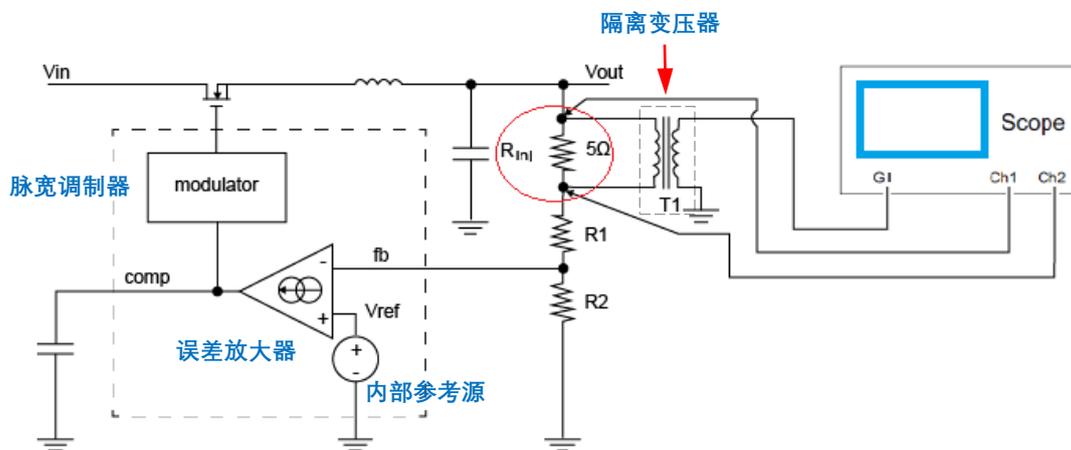


伯德图的原理简单, 展示直观, 运用了系统的开环增益来评价闭环系统的稳定性。

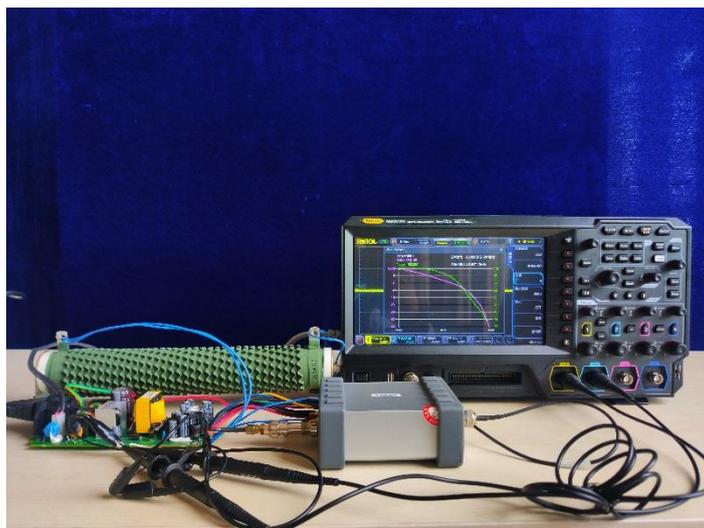
环路测试环境搭建

下图为使用 RIGOL 的 MSO5000 系列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 5Ω 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 MSO5000 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 MSO5000 系列数字示波器两个模拟通道的探头（例如 RIGOL 的 PVP2350 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 MSO5000 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

使用触摸屏功能，按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

按 **幅/频设置** 键，进入“幅/频设置”子菜单，弹出 **Bode Set** 窗口。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。连续按 **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 10Hz，可调节范围为 10Hz 至 25MHz。
终止频率	扫频正弦波的频率终止值。默认为 100Hz，可调节范围为 100Hz 至 25MHz。
点数/十倍频	每十倍频显示的点数。默认为 10，可调节范围为 10 至 300。
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。

按 **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，按 **扫频类型** 键，进入“扫频类型”子菜单进行选择。

- 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。

按 **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，按 **输入源** 键，进入“输入源”子菜单进行选择。

按 **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

在伯德图功能设置菜单中 **运行状态** 键初始显示其功能为“启动”，按 **运行状态** 键，弹出 Bode Wave 窗口。Bode Wave 窗口开始绘制伯德图，此时 **运行状态** 键显示其功能为“停止”。

Step5 查看伯德图测量结果

伯德图绘制完成后，**运行状态** 键恢复显示其功能为“启动”。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	伯德图中光标所在的横坐标的值。
2	光标与紫色的增益曲线交点的纵坐标值。
3	光标与绿色的相位曲线交点的纵坐标值。
4	光标线，按 光标 键，旋转多功能旋钮  可以水平调整 Bode Wave 窗口中光标在横坐标的位置。随着光标位置的变化，Bode Wave 窗口左上角的数值相应变化。
5	增益裕度 (GM)。
6	相位裕度 (PM)。

也可以按 **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	Frequency	Gain	Phase
50	3.162kHz	-0.031719dB	4.65101°
51	3.548kHz	-0.0177478dB	4.1426°
52	3.981kHz	-0.0661011dB	3.69999°
53	4.466kHz	-0.0135137dB	3.28801°
54	5.011kHz	-0.0040005dB	2.90366°
55	5.623kHz	-0.0592511dB	2.58402°
56	6.309kHz	0.0640327dB	2.23312°
57	7.079kHz	0.0161236dB	1.97429°
58	7.943kHz	-0.0172334dB	1.75739°
59	8.912kHz	0.0126655dB	1.4877°

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。

按 **文件类型** 键，进入“文件类型”子菜单，选择保存的伯德图的文件类型。其中可选的文

件类型包括*.png、*.bmp、*.csv和*.html。其中选择文件类型为*.png和*.bmp时保存的伯德图文件为波形图，选择文件类型为*.csv和*.html时保存的伯德图文件为表格形式。

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。

干扰信号注入位置的选择

我们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。

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 5Ω 至 10Ω 之间的注入电阻是较为合适的。

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。

通常我们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。

MSO5000 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。

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。

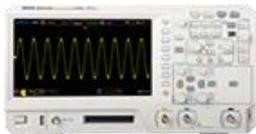
当系统的相位裕度越大时，系统的反映速度越慢；相位裕度越小时，系统的稳定性越差。同样穿越频率过高则影响稳定性，过低则响应速度慢。为了在响应速度和稳定性做平衡，一般有如下经验值要求：

- 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 10dB。

总结

由 RIGOL 生产的 MSO5000 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	 MSO5000 系列	 MSO5000-E 系列
模拟带宽	70MHz~350MHz	150MHz
模拟通道数	4	2
最高实时采样率	8GSa/s	4GSa/s
最大存储深度	200Mpts	100Mpts
最高波形捕获率	500,000 wfms/s	300,000 wfms/s
数字通道	16	16

升级方法

在线升级

通过 LAN 接口将示波器连接至网络后（如有权限限制，请开通相应的网络权限），对系统软件进行在线升级：

- 1) 使用触摸屏功能，点击屏幕左下角的功能导航图标 ，打开功能导航；
- 2) 点击“帮助”图标，屏幕弹出“帮助”菜单；
- 3) 按 **在线升级** 键或点击“在线升级”菜单项，屏幕弹出是否同意服务条款提示。点击“同意”，则屏幕弹出是否进行在线升级提示；点击“是”，则开始进行在线升级；点击“否”，取消在线升级。

本地升级，将最新版本固件下载到本地进行升级，网址如下：

- MSO5000
<https://www.rigol.com/Cn/Index/listView/catid/28/tp/6/cat/7/xl/24>
- MSO5000-E
<https://www.rigol.com/Cn/Index/listView/catid/28/tp/6/cat/7/xl/43>