

环路分析测试应用指南

ZDS3000/4000 系列

TN01708081 V1.01 Date:2019/03/13

工程技术笔记

类别	内容
关键词	ZDS3000/4000 系列示波器、环路分析
摘要	环路分析的应用场合很广，在开关电源、运放反馈网络中，环路分析可以测量系统的增益、相位随频率变化的曲线(伯德图)，分析系统的增益余量与相位余量，以判定系统的稳定性。

修订历史

版本	日期	原因
V1.00	2018/08/22	创建文档
V1.01	2019/02/21	更新文档页眉页脚、“销售与服务网络”内容和新增“免责声明”内容

目 录

1. 适用范围.....	1
2. 原理概述.....	2
3. 技术实现.....	3
3.1 环路增益模型.....	3
3.2 环路分析如何接线.....	4
3.3 扫频测试的参数设置.....	5
3.4 扫频界面说明.....	7
3.5 环路分析的结果分析.....	8
3.6 环路分析的注意事项.....	10
4. 总结.....	11
5. 免责声明.....	12

1. 适用范围

环路分析的应用场合很广，在开关电源、运放反馈网络中，环路分析可以测量系统的增益、相位随频率变化的曲线(伯德图)，分析系统的增益余量与相位余量，以判定系统的稳定性；在被动器件的阻抗分析中，环路分析可以观察电容、电感的高频阻抗曲线，测量电容ESR等。本文将介绍环路分析在开关电源上的实际使用。

2. 原理概述

环路分析的一个重要作用就是分析开关电源的稳定性。扫频测试原理主要是给开关电源电路注入一个频率变化的正弦信号，测量开关电源在频域上的特性，通过分析穿越频率、增益裕度和相位裕度来判断环路是否稳定，可以为电子工程师设计稳定的控制电路提供直观的数据。另外，环路分析也有单频点测试功能。

开关电源的稳定性关系到整个应用系统的可靠性，利用伯德图可以看出在不同频率下系统增益的大小和相位。通过伯德图来对开关电源的环路稳定性进行判断和分析已经成为评估开关电源可靠性必不可少的方法。

在研发期间，反复的修改和调试电路时，环路分析可以提供直观的数据对比，同时测量非常便捷，能快速的判断系统是否达到稳定状态，增强工程师对设计产品的信心。

3. 技术实现

3.1 环路增益模型

稳定可靠的系统通常是闭环系统（带反馈）。控制器根据系统的实际输出与理想输出的偏差来设计算法，使输出值逼近设定值。图 3.1 表示的是反馈环路控制部分中的运放的环增益模型，其传递函数为：

$$\frac{X_o(s)}{X_i(s)} = \frac{G(s)}{1 + G(s)H(s)}$$

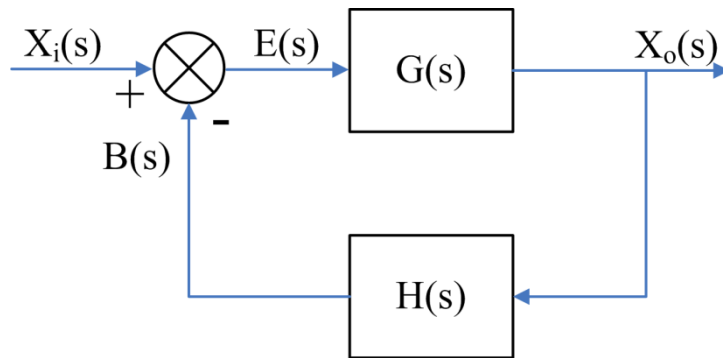


图 3.1 环增益模型

如果变换器中没有用到反馈控制环路（即图 3.1 中 $H(s)$ 部分），其传递函数一般为

$\frac{X_o(s)}{X_i(s)} = G(s)$ ，可以看出输出随输入的变化而成线性的变化，没有稳压的作用。如果反馈环

路设计的不好，对于负载的瞬态改变，环路就不能做出及时恰当的调整，那么输出电源瞬间会偏高或者偏低，会造成电源系统的振荡，对下一级构成损坏。此时若能够对环路测量就显得很重要了。

放大器的开环增益 $G(s)$ 是频率的函数，会随着频率的增加而减小，同时也和放大器的相位有关，当 $G(s)H(s) = -1$ ，则其传递的值为 ∞ ，即增益是无穷大的，可以认为任意小的输入扰动都能引起输出的无穷大，如果这种输出无穷大的信号在反馈到功率变换环节，势必会造成最后输出的振荡。所以说可以通过分析 $G(s)H(s)$ 的增益和相位来判断系统的稳定性。

我们可以通过环增益 GH 的频率特性来判断系统的稳定性，同时回路增益 $|GH|$ 以及回路相位差 $\angle GH$ 的频率特性可以用伯德图来表示，。伯德图及相关参数如图 3.2 所示：

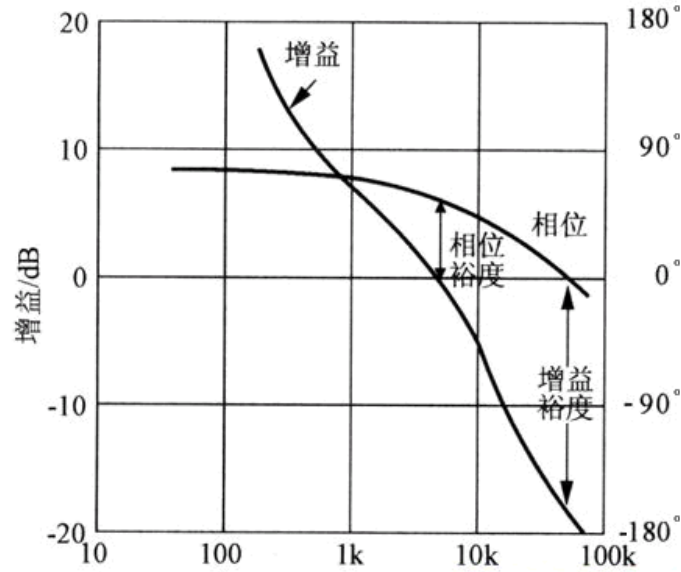


图 3.2 伯德图及相关参数

伯德图相关参数有：

1. 穿越频率：增益为 0dB 时对应的频率；
2. 相位裕度：增益为 0dB 时对应的相位差；
3. 增益裕度：相位为 0°时对应的增益差。

系统的稳定性可以通过伯德图中的相位余量，增益余量，穿越频率来衡量。

系统开发期间，研发人员可以在开发前期使用系统仿真软件 Saber、PSIM、simplis 上面进行环路电路的设计和模拟，在开发的中后期，则可以使用 ZDS3000/4000 系列示波器的环路分析功能进行实际的环路电路特性的验证和改进。

3.2 环路分析如何接线

开关电源实际上是一个包含了负反馈控制环路的放大器，会放大交流信号并对负载变化作出反馈响应。为了完成控制环路响应测试，需要把一个扰动信号（一定幅度和频率范围的扫频正弦波信号或单一频点正弦波信号）注入到控制环路的反馈路径中。这个反馈路径就是指 R1 和 R2 的电阻分压器网络。我们需要把一个阻值很小的注入电阻插入到反馈环路中，才能注入一个扰动信号。例如下图 2 所示的注入电阻为 5 Ω，注入电阻与 R1 和 R2 串联阻抗相比是微不足道的。所以，用户可以考虑把这个低阻值注入电阻器作为长久使用的测试器件。另外还需要使用一个隔离变压器来隔离这个交流干扰信号，从而不产生任何的直流偏置。

由于实际的注入和输出的电压一般都很小，因此信号注入端建议使用 BNC 头转夹子的线缆进行信号注入，并且使用 X1 的探头进行注入端和反馈端的信号测量。

环路功能的同步环路测试时，需要使用致远电子环路测试配套的信号发生模块与 ZDS3000/4000 系列示波器相连，通过示波器控制信号发生模块配合生成需要的频率信号，环路测试信号接线图如图 3.3 所示。

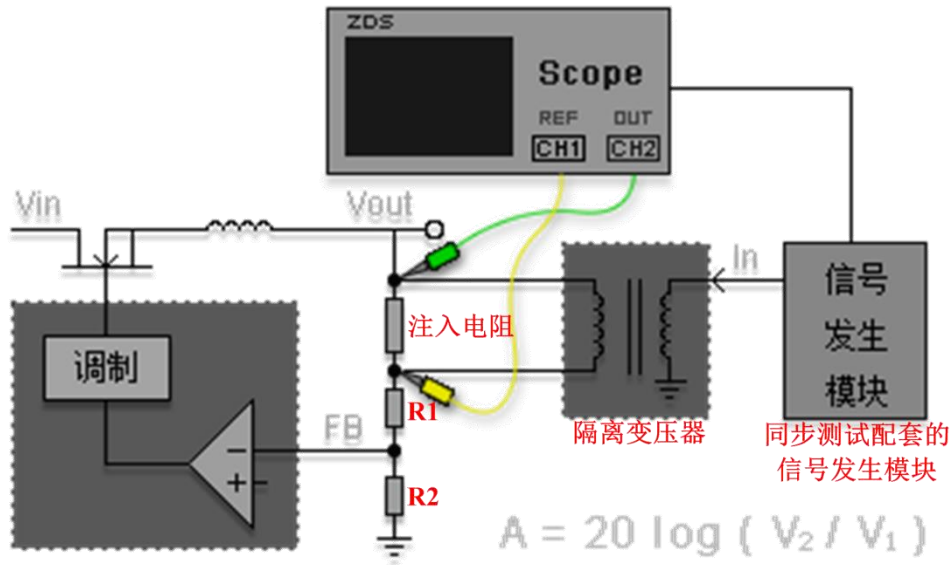


图 3.3 环路测试信号接线

同步环路测试的实物连接图如图 3.4 所示，该图中使得一根 BNC 线缆连接 ZDS3000/4000 系列背部的触发输出端与信号发生模块，信号发生模块的输出再用 BNC 线缆连接到隔离变压器，隔离变压器的输出通过 BNC 转夹子的线缆，将信号注入到被测板的注入电阻两端，然后用两根衰减比为 X1 的探头，测量注入端与输出端的信号。



图 3.4 环路测试实物连接

3.3 扫频测试的参数设置

点击示波器面板上【Analyze】键，再点击【环路测试】按钮，进入环路测试功能菜单。

点击【参数设置】按钮，会弹出参数设置窗口，旋转旋钮 A 可选择参数，短按旋钮 A 后可进行参数修改，其中包括【参数设置】、【滤波设置】和【同步设置】。如图 3.5 所示：

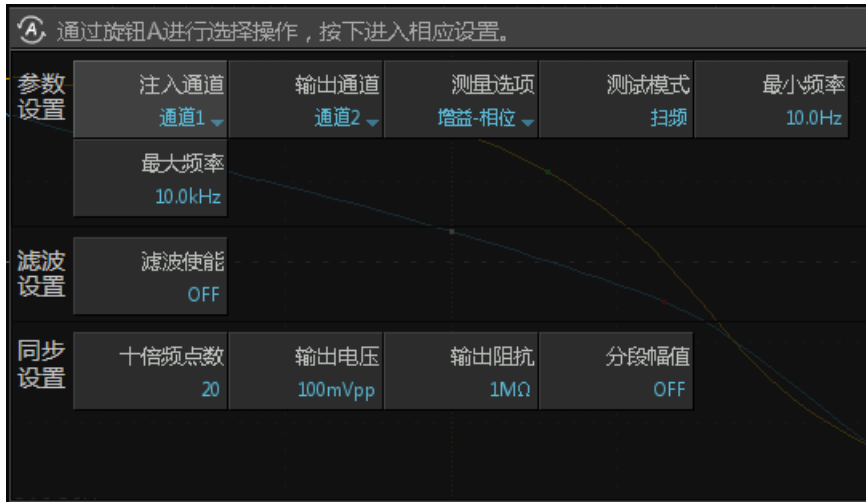


图 3.5 参数设置菜单

- 注入通道：指连接注入基准信号的通道，以该通道为当前频率的基准；
- 输出通道：指连接反馈输出信号的通道；
- 测量选项：可选增益-相位、阻抗-相位、幅值-相位和 THD-相位；
- 测试模式：可选扫频或单点；
- 最小频率：扫频的最小频率值，扫频范围最小值可选 10Hz 到 20MHz；
- 最大频率：扫频的最大频率值，扫频范围最大值可选 100Hz 到 30MHz；
- 滤波使能：是否使能扫频时开启数字滤波；
- 滤波类型：当使能滤波后，可选择低通或带通滤波；
- 截止频率/中心频率：低通滤波或带通滤波的频率设置；
- 十倍频点数：同步模式下需要设置，设置信号发生模块在对数下 10 倍频点下的输出的频点个数，例如 100Hz 到 1kHz 之间的输出频点个数；
- 输出电压：同步模式下需要设置，设置信号发生模块的输出电压峰峰值；
- 输出阻抗：同步模式下需要设置，设置信号发生模块的输出阻抗，需要与被测电路的阻抗匹配；
- 分段幅值：同步模式下需要设置，设置为 ON 时，可以当前设置的扫频范围内的每个 10 倍频点进行幅值调节，如果设置为 OFF，则统一使用一个幅值。

检测无误后，则可以启动环路功能的运行。环路功能的运行可以点击菜单的【运行停止】按钮，或者直接按示波器面板上的【RUN/STOP】按键；

测试启动后，界面会切换到环路扫频运行的界面，功能会根据当前采样到的频率、相位差、增益，不断地绘制出频率与相位、频率与增益的动态曲线，并且根据曲线的范围，自动调节显示的垂直刻度。其中，蓝色曲线为增益曲线，橙色曲线为相位曲线。如图 3.6 所示：

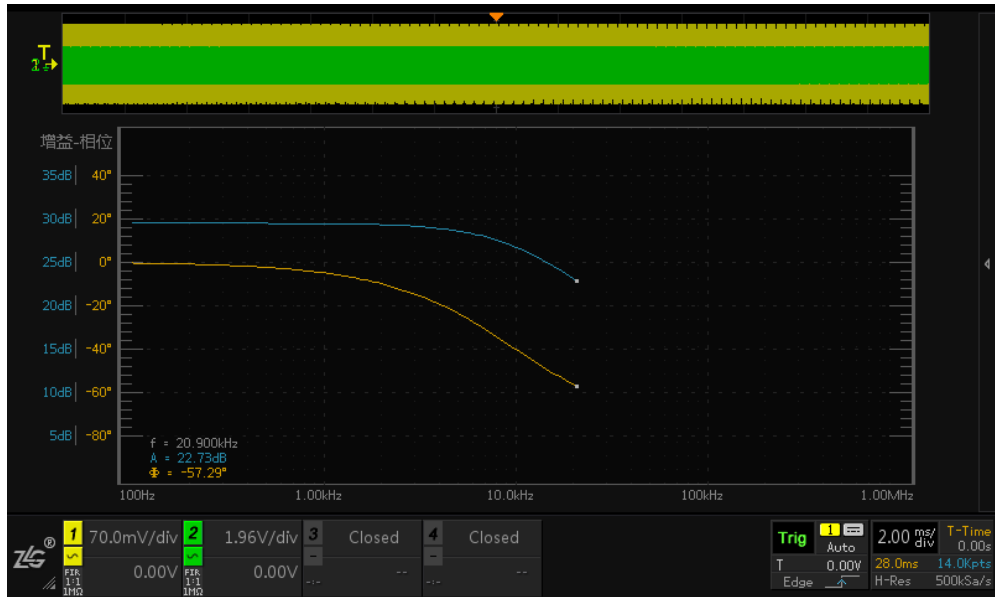


图 3.6 扫频测试运行中

3.4 扫频界面说明

ZDS3000/4000 系列环路分析功能拥有独特的扫频分析操作界面，对测试操作和用户体验进行了创新性地设计，如图 3.7 所示：

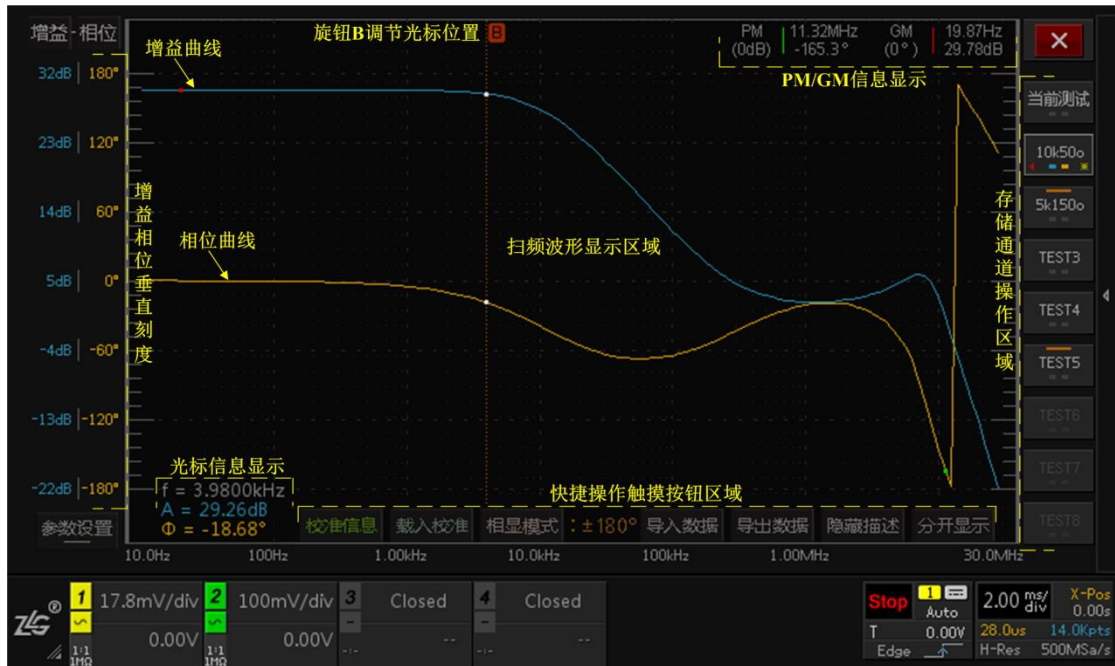


图 3.7 环路测试扫频界面

包含有如下区域：

1. 扫频波形显示区域：蓝色曲线为增益曲线，橙色曲线为相位曲线，PM/GM 信息显示在右上角，可通过旋钮 B 进行滚动查看每个测量点，并可放大显示；
2. 快捷操作触摸按钮区域：这个区域拥有一排快捷操作按钮，触摸点击操作，例如可以载入校准参数，可以切换增益和相位曲线的显示方式；
3. 增益相位垂直刻度：显示当前增益曲线和相位曲线的垂直刻度，在扫频运行过程中，

功能会自动调节垂直刻度，以满足变化的曲线显示范围。在扫频结束后，用户可以自己手动修改垂直档位和范围。

存储通道操作区域：功能可支持存储 8 组之前的扫频曲线，方便进行测试之间的对比。可对每组存储通道进行显示隐藏、重命令、导入导出等操作。

3.5 环路分析的结果分析

通过扫频曲线伯德图，可以直观地看到整个频率范围内的增益和相位变化趋势，方便观察和分析，做到心中有数。实测电源的扫频曲线如图 3.8 所示，增益裕量（GM）和相位裕量（PM）信息显示在扫频界面的右上角，相位裕度（PM）是指增益穿越 0dB 时的相位值，增益裕度（GM）是指相位穿越 0 的增益值。PM 和 GM 是衡量开关电源稳定的一个重要指标。



图 3.8 实测扫频曲线

从上图的伯德图和测量数据分析，增益和相位曲线比较平滑，穿越斜率（近似-1）也很好，穿越频率（621.4Hz）在该开关电源的合适范围内，同时相位裕量（45.43°）满足要求，增益裕量（9.655dB）也基本满足需求。

但在我们实际的使用测试过程中，可能会遇到一些疑问和状况，下面从以下 4 个常见问题来分析结果：

问题 1：扫频曲线的低频段，增益和相位曲线有抖动，是怎么回事？

分析：这种结果说明在这种频率下信噪比可能太低了，干扰较大。一个简单的提高信噪比的方法是把所有频段的注入电压幅值提高。但是提高注入电压可能会造成信号失真或者 0dB 穿越时对应的相位裕度结果不对。一种比较好的改进方法是使用环路分析的分段幅值输出功能，可以通过设置每 10 倍频范围的不同输出幅值，来实现不同频率范围的不同注入电压幅值。分段幅值的参数设置如图 3.9 所示：

同步设置	十倍频点数	输出阻抗	分段幅值	$\geq 10.0\text{Hz}$	$\geq 100\text{Hz}$
	20	1M Ω	ON	200mVpp	150mVpp
	$\geq 1.00\text{kHz}$			100mVpp	

图 3.9 分段幅值参数设置

问题 2: 如何判断系统是否稳定?

分析: 系统稳定的判断分析依据大致有:

1. 穿越频率 (增益为 0dB 时对应的频率): 建议为开关频率的 5%到 20%
2. 相位裕度 (增益为 0dB 时对应的相位): 要求一定要大于 45°, 建议 45°到 80°
3. 穿越斜率 (0dB 附近): 要求为单极点穿越, 一般是要求穿越斜率在-1 左右, 即-20db/每十倍频
4. 增益裕度 (相位为 0°时对应的增益差): 建议大于 10dB (注意, GM 是正值, 实际测量的增益值为负值, 增益裕度 = 0db - 测量值)

相位裕量的作用, 是确保在一定的条件下 (包括元器件的误差、输入电压变化、负载变化、温升等) 系统都能够稳定, 使用在标称输入额定负载室温下, 要有 45°的裕量; 如果输入电压、负载、温度变化范围非常大, 相位裕量不应小于 30°。

相位裕量应保持在一定范围内, 太小或太大都会影响系统对抗扰动的调节能力, 因此建议是 45°到 80°为合适范围。如图 3.10 所示。

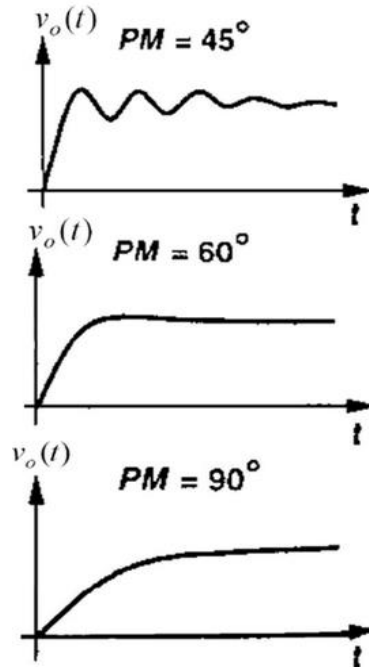


图 3.10 同一条件下, 不同相位裕量的调节能力

增益裕量为了不接近不稳定点, 一般认为 10dB 以上是必要的。

对于穿越斜率在-1 左右的条件, 应当注意, 并不是绝对要求开环增益曲线在穿越频率附近的增益斜率为必须为-1, 但是由于-1 增益斜率对应的相位曲线相位延迟较小, 且变化相对缓慢, 因此它能够保证, 当某些环节的相位变化被忽略时, 相位曲线仍将具有足够的相位裕量, 使系统保持稳定。

穿越频率的频带宽度的大小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, 系统从而可以更稳定。但是由于受到右半平面零点的影响, 以及开关频率等其他因素的限制, 电源的带宽也不能无限提高, 一般取开关频率的 1/20 到 1/5。

问题 3: 如何查看所有频点的值?

分析: 扫频曲线可以通过旋钮 B 来移动观察每一个光标线处的测量值, 同时, 当前扫频测试的数据, 以及 8 个扫频存储通道的数据, 都可以在【数据报表】菜单中, 通过表格浏

览所有的测试数据，以及对数据进行 html 和 csv 类型的报表导出。如图 3.11 所示：

Index	Frequency	Gain	Phase
1	100.00Hz	29.44dB	-0.566°
2	104.00Hz	29.44dB	-0.602°
3	110.00Hz	29.43dB	-0.617°
4	114.00Hz	29.44dB	-0.639°
5	120.00Hz	29.44dB	-0.668°
6	126.00Hz	29.44dB	-0.694°
7	132.00Hz	29.44dB	-0.718°
8	138.00Hz	29.44dB	-0.758°
9	144.00Hz	29.44dB	-0.792°
10	152.00Hz	29.44dB	-0.815°
11	158.00Hz	29.44dB	-0.850°
12	166.00Hz	29.44dB	-0.885°
13	174.00Hz	29.44dB	-0.924°
14	182.00Hz	29.44dB	-0.970°
15	190.00Hz	29.44dB	-1.001°

图 3.11 数据报表

3.6 环路分析的注意事项

1、寻找干扰信号注入点

在电压反馈型的开关电源电路中，测试信号注入点为反馈回路的取样点与输出电压点之间。要辨别采样点比较简单，只需观察反馈电压由输出电压的哪条支路分压得到即可。

注入电阻可选择 5 到 100 欧的电阻，这种电阻在反馈电路中影响不大，推荐在系统设计时就提前预留此电阻。

2、注入信号幅度调节

注入信号的幅度经验值可设为输出电压的 5%。如果幅度不能过小，示波器可能无法识别；过大则可能使系统出现非线性导致测量失真。另外环路分析功能还具备分段幅值的设置功能。

3、扫描频率范围设定

由于系统的穿越频率大致为开关频率的 1/20 到 1/5 左右，因此扫频范围应设在穿越频率附近的范围，在这个范围内，一般可以找到环路的穿越频率点。此处留意环路系统穿越频率不能过低，否则环路无法响应高频的负载波动，从而引起输出电压的噪声。

4、测试探头的使用

由于注入信号幅度微弱，推荐选用 1X 衰减的探头测试。若使用 10X，则信号衰减后很容易被噪声淹没。在接地时也尽量使用接地弹簧，而不是接地夹子。

5、PM/GM 显示值

环路扫频结束后会计算 PM 和 GM 值，GM 值是当相位曲线第一次穿越 0° 时的频率点，0db 与该频率点的增益测量值的差值，即 $GM=0db - \text{增益测量值}@\text{相位第一次穿越 } 0^\circ \text{ 的频点}$ ，因此正常情况下该频点的增益测量值为负值，GM 值为正值。而 PM 值为增益曲线第一次穿越 0db 的频点对应的相位测量值与 0° 的差值，如果该频点之前相位曲线存在 360° 的翻转，则 PM 值会在 0db 频点的相位测量值的基础上加上翻转相位值。

4. 总结

致远电子 ZDS3000/4000 系列示波器支持环路测试分析软件。相对于几十万的专业环路分析仪器，ZDS3000/4000 系列内嵌的环路测试分析软件不仅有完善的环路测试方法和精准的测量精度，并且对测试操作和用户体验进行了创新性地设计。

该分析软件具有独特设计的波形显示和快捷操作的界面，具有多种显示方式和测量方式，主要特点如下：

- 支持扫频测试模式和单点测试模式
- 支持多种测量选项：增益-相位（FRA）、阻抗-相位、幅值-相位、THD-相位
- 支持扫频曲线的合并显示和分开显示
- 支持扫频曲线的档位可调、偏移可调，可设置曲线的显示隐藏
- 支持正向和反向放大器，相位范围可选 $[-180^{\circ} \sim 180^{\circ}]$ 和 $[-360^{\circ} \sim 0^{\circ}]$
- 支持开启硬件滤波，支持低通滤波和带通滤波
- 支持光标测量，自动 PM/GM 测量
- 支持相位校准，以及校准参数的导入导出
- 扫频模式的频率范围可选从 10Hz 到 30MHz
- 单点模式支持自动和手动方式
- 扫频模式的每种测量方式支持存储 8 个暂存波形，并且自动存储
- 所有存储波形支持重命名、设置描述信息、显示隐藏、相位校准、查看数据、指定存储通道波形数据的导入导出，清除指定存储通道波形的数据，同时可指定显示某个存储通道的波形或显示、隐藏所有存储通道波形
- 测试结果数据的导出，导出的数据类型支持 html 和 CSV
- 独特的环路界面显示，多种一键快捷操作

5. 免责声明

广州致远电子股份有限公司隶属于广州立功科技股份有限公司。本着为用户提供更好服务的原则，广州致远电子股份有限公司（下称“致远电子”）在本手册中将尽可能地向用户呈现详实、准确的产品信息。但鉴于本手册的内容具有一定的时效性，致远电子不能完全保证该文档在任何时段的时效性与适用性。致远电子有权在没有通知的情况下对本手册上的内容进行更新，恕不另行通知。为了得到最新版本的信息，请尊敬的用户定时访问致远电子官方网站或者与致远电子工作人员联系。感谢您的包容与支持！