

# Bode 100 环路分析仪

The solution for your measurement tasks  
from 1 Hz to 40 MHz

Three devices in one



Vector Network Analyzer Bode 100 shown with a Tablet PC (PC not included in delivery).



**稳定性分析**  
分析电路控制系统  
生成伯德图和奈奎斯特图



**谐振频率**  
高Q值谐振峰值, ESR  
测量, RFID



**复阻抗**  
分析被动电子元件和有源电子电路



**传输/反射系数**  
表征电缆, 滤波器,  
放大器, S参数测量



**频率响应**  
电子系统的复杂传递函数  
(增益/相位)



**自动化测量**  
通过USB接口很方便  
集成到自动化系统

[www.omicron-lab.com](http://www.omicron-lab.com)

奥地利欧米克朗



Smart Measurement Solutions

# Bode 100

Bode100包括硬件和软件，高品质的硬件确保了频率从1Hz-40MHz宽范围内量测的准确度，紧凑和便携的设计外形让客户可以随时随地测量，而基于多功能系统设计，使得产品集成如下三大功能。

## 1. 矢量网络分析仪

Bode100的矢量网络分析功能应用领域

- 50Ω系统S参数测量
- 滤波器的插入损耗
- 反射系数和回波损耗
- 群延时特性

## 2. 频率响应分析仪

Bode100能提供增益和相位分析，完全胜任如下测量

- 各类电源控制环路稳定性
- 电路传递函数分析
- 电源抑制比PSRR



## 3. 阻抗分析仪

Bode100非常容易量测被动器件的阻抗

- 磁性元件如变压器，电感
- 电容及其寄生参数
- 超声和压电类器件或系统
- 石英晶体和振荡器的高Q电路
- 电路的输入、输出阻抗

### 总体优势

- 一台仪器集成多个应用功能
- 准确的量测结果
- 设置简单，测量快速
- 数据图片保存方便



## Bode 软件分析界面

通过软件分析界面能完全控制Bode100，界面易于使用和直观，你可以通过背面的USB接口来实现和电脑的通讯，软件帮助你能快速量测并提供强大的数据分析，图片保存功能。

## 量测

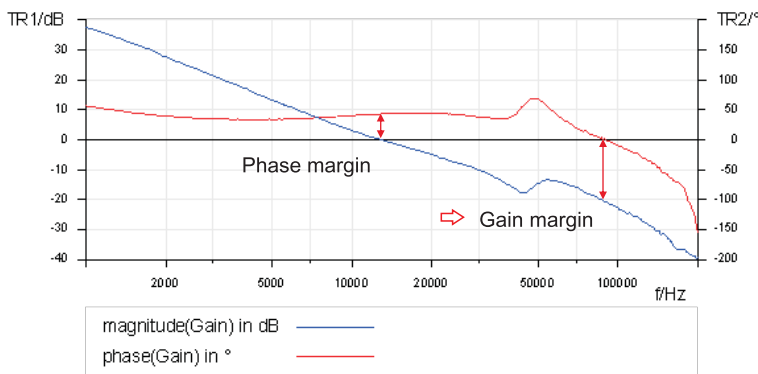
只要你的硬件设备连接是正确的，你就可以在预先设定的模式中快速切换测量。



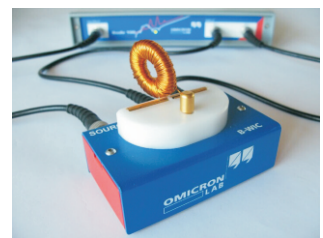
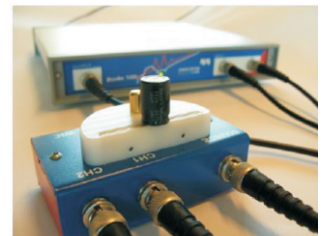
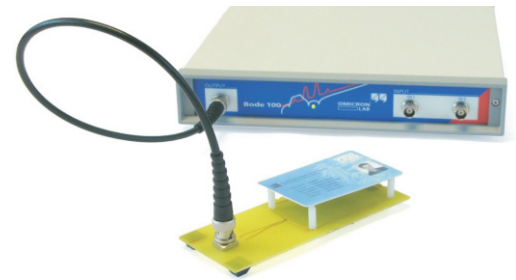
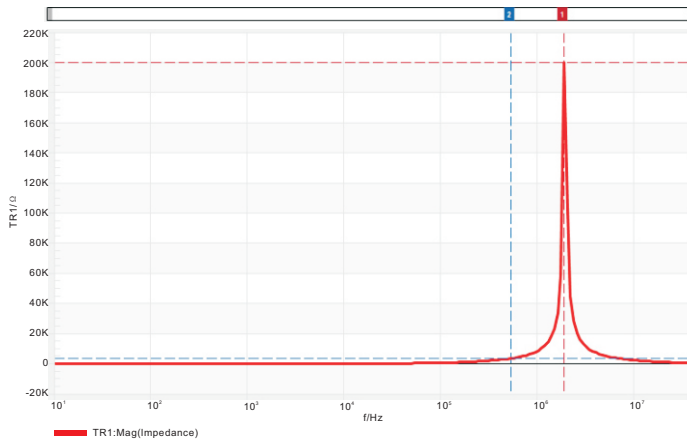
## 分析

为了了解和优化你的系统，软件能生成各种类型的图表，如史密斯图，极坐标图，奈奎斯特图，伯德图，你可以利用各种分析功能获取所有的测试数据和特性曲线。

## Power Supply Stability Analysis



|             | Frequency     | TR1: Mag    |
|-------------|---------------|-------------|
| Cursor 1    | 1.912705 MHz  | 200.186 kΩ  |
| Cursor 2    | 532.188 kHz   | 3.529 kΩ    |
| delta C2-C1 | -1.380517 MHz | -196.657 kΩ |



## 数据保存

你可以很方便得到测量数据，你也可以复制、粘贴特性曲线图和参数设置一同放进报告，分享和保存结果，当然数据也可以用CSV格式导出。



# Technical Data

## Signal Source

Frequency range: 1 Hz to 40 MHz  
Output impedance: 50  $\Omega$   
Waveform: Sinusoidal signal  
Signal level: -27 dBm to 13 dBm  
(at 50  $\Omega$  load)  
Connector: BNC

## Inputs: CH1, CH2

Input impedance: 50  $\Omega$  or 1 M $\Omega$  // 50 pF  
(software selectable)  
Receiver bandwidth: 1 Hz to 3 kHz  
Input attenuator: 0 dB, 10 dB, 20 dB, 30 dB, 40 dB  
Input sensitivity: 100 mV<sub>RMS</sub> full scale  
(for 0 dB input attenuator)  
Dynamic range: > 100 dB  
Gain error: < 0.1 dB (calibrated)  
Phase error: < 0.5° (calibrated)  
Connector: BNC

## PC Requirements

Interface: USB  
Operating system: Windows® XP SP3 (32 bit),  
Windows® Vista  
Windows® 7  
Windows® 8  
Processor: Pentium 1GHz (minimum)  
Pentium 2.5 GHz  
(recommended)  
Memory: 512 MB RAM (minimum)  
1 GB RAM (recommended)

## General

Weight Bode 100: < 2 kg / 4.4 lbs  
Weight Accessories: < 0.5 kg / 1.1 lbs  
Dimensions: 26 x 5 x 26.5 cm  
10.25 x 2 x 10.5 inch  
DC power supply: 10 V - 24 V / 10 W  
AC power supply: 100 V - 240 V / 47 Hz - 63 Hz

## Delivery Includes

Bode 100 Vector Network Analyzer  
Bode Analyzer Suite on CD  
User Manual (English)  
Wide range power supply  
USB cable  
4 x BNC cable 50  $\Omega$  (m - m)  
1 x BNC T-adapter (f - f - f)  
1 x BNC straight adapter (f - f)  
1 x BNC 50  $\Omega$  load (m)  
1 x BNC short circuit (m)  
Test objects: quartz filter and IF filter on a PCB

**Order number:** OL000100

## Additional Accessories



### B-WIT 100

Wideband injection transformer for the signal insertion into control loops  
**Order number:** OL000151



### B-SMC

Impedance test adapter for surface mount components  
**Order number:** OL000152



### B-WIC

Impedance test adapter for through-hole type components  
**Order number:** OL000153

<sup>1</sup> Excel, C#, Visual Basic and Windows are registered trademarks of the Microsoft Corporation

<sup>2</sup> MATLAB is a registered trademark of the MathWorks, Inc.

<sup>3</sup> LabVIEW is a registered trademark of the National Instruments Corporation

Product specifications and descriptions in this document are subject to change without notice.

© OMICRON Lab  
V3 - 1410



# B-WIT 100

Wideband Injection Transformer 变压器夹具



通过高带宽变压器的转换向控制回路譬如开关电源注入信号的方式 分析环路，是一个完美的选择方案。利用环路分析仪Bode100和选件B-WIT100大大简化了电子控制回路的稳定性分析。

## 核心优势

- 更容易向各种类型的控制回路注入信号
- 高频率范围1 Hz-10 MHz
- 高线性度
- 低插入损耗
- 600 V CAT II绝缘等级
- CE认证，符合ROHS

## 连接方式

- 输入：BNC接口
- 隔离输出：4毫米的香蕉插孔  
(配送一个BNC转香蕉头的转接头)
- 保护地：通过4mm的香蕉头组成的连接器



### Electrical characteristics

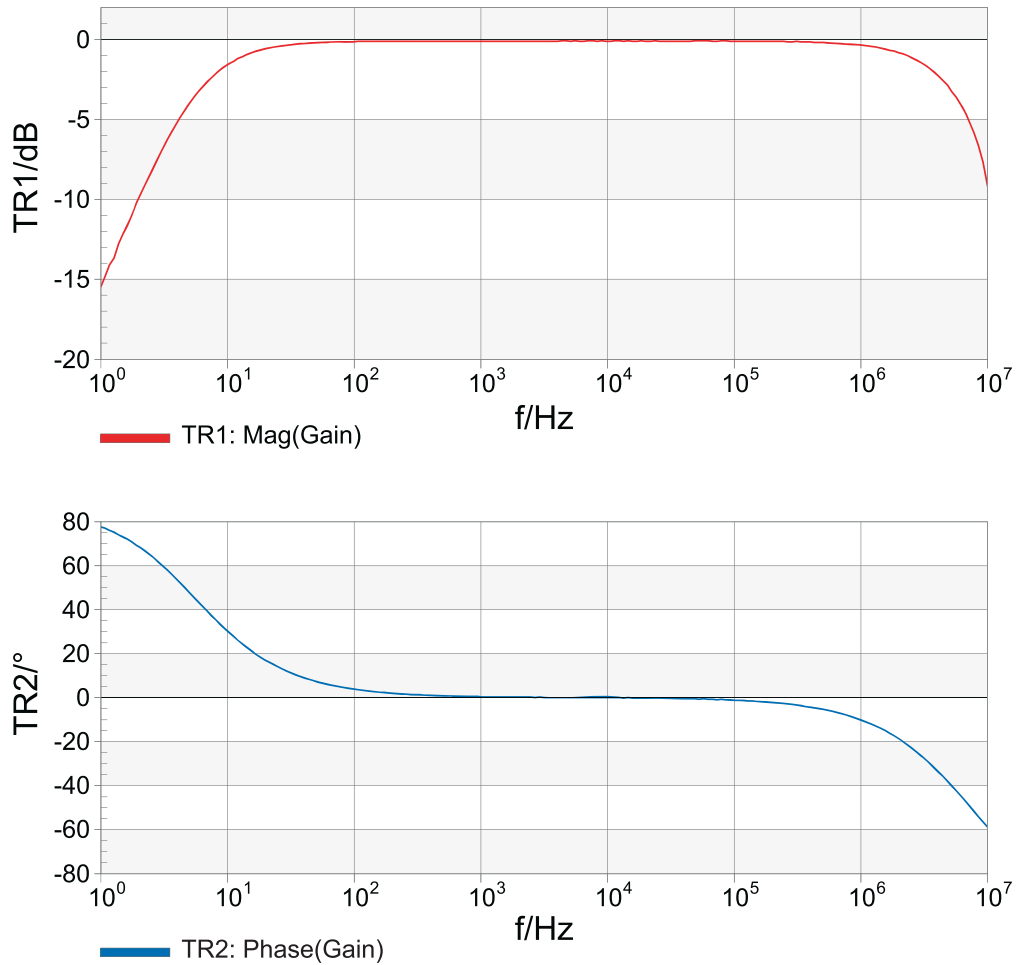
Usable frequency range: 1 Hz – 10 MHz  
3 dB frequency range<sup>1</sup>: typ. 7 Hz – 5 MHz  
Insertion loss<sup>2</sup>: typ. < 0.5 dB  
Winding capacity<sup>3</sup>: typ. 110 pF  
Max. input voltage: 4 Vrms  
Max. DC current: 10 mA

### Mechanical characteristics

Dimensions<sup>4</sup>: 114.3 x 63.5 x 29.5 mm  
4.5 x 2.5 x 1.16 inch  
Weight: < 0.25 kg / 0.6 lbs

Order number: OL000151

### Typical frequency response<sup>1</sup>:



<sup>1</sup> measured with source signal level of -10 dBm and a load resistance of 10  $\Omega$

<sup>2</sup> measured at 1 kHz

<sup>3</sup> between primary and secondary winding, measured at 1 kHz

<sup>4</sup> without connectors

Product specifications and descriptions in this document are subject to change without notice.

© OMICRON Lab  
V 1 - 1403



# B-WIC & B-SMC

Impedance Test Adapters 阻抗夹具



环路分析仪Bode100搭配高带宽的夹具B-WIC和B-SMC对被动元件进行阻抗测量是完美的组合，通过软件快速分析电容，电感频率特性曲线，进而分析器件对电路的影响。夹具B-WIC特别针对穿孔式元件譬如电容，电感，而夹具B-SMC则针对常见的贴片被动元件。

## 核心优势

- 更容易测量被动元件LCR-Q值测量
- 复阻抗测量(幅度和相位)
- 高频率范围1Hz-40MHz
- 不同参数测量转换快速
- CE认证，符合ROHS

## 连接方式

- 输入源接口：BNC
- CH1/CH2输出测量接口：BNC
- 测试接头：镀金电极，确保低接触电阻和数据的高重复一致性



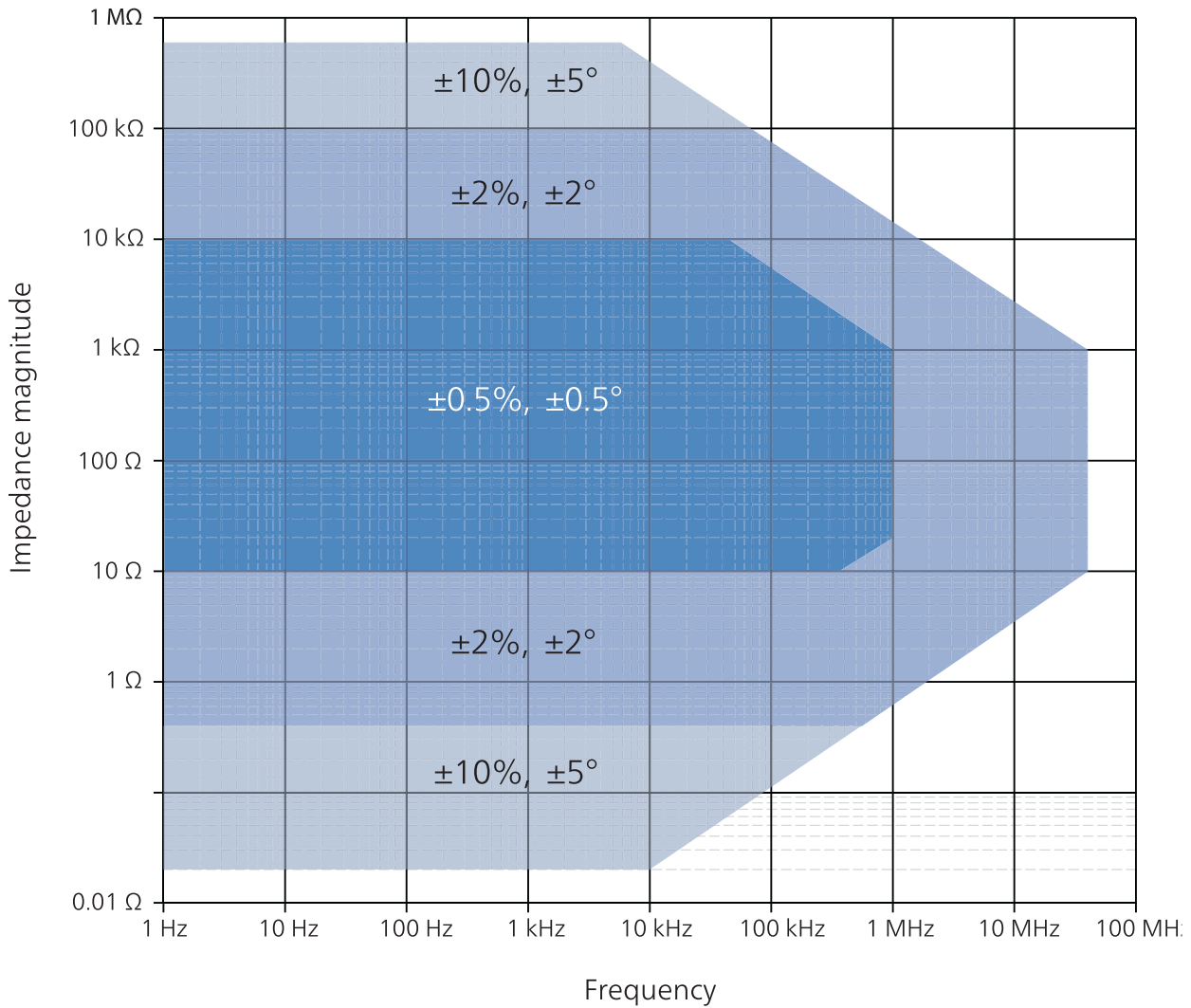
## Electrical characteristics

Usable frequency range: 1 Hz – 40 MHz  
Typical impedance range<sup>1</sup>: 0.02 Ω – 600 kΩ

## Mechanical characteristics

Dimensions<sup>2</sup>: 100.5 x 68.2 x 55.5 mm  
3.96" x 2.69" x 2.19"  
Weight: B-SMC 0.13 kg / 0.29 lbs  
B-WIC 0.16 kg / 0.35 lbs

## Typical impedance measurement accuracy<sup>3</sup>:



<sup>1</sup> Usable impedance magnitude range depends on frequency.

<sup>2</sup> Overall dimensions including connectors.

<sup>3</sup> Maximum deviation from results achieved with Agilent E4980A precision LCR-meter. Open calibration of B-SMC adapter performed with an adapter electrode distance equal to the test object size. Measurement done with 10 Hz receiver bandwidth. Above 2 MHz the basic equipment accuracy of the Bode 100 applies.

Product specifications and descriptions in this document are subject to change without notice.

© OMICRON Lab  
V 1 - 1403



# 开关电源环路增益相位裕量测量与稳定性分析

**摘要：**本文从自动控制理论的角度分析通过向负反馈环路注入一扰动信号对整个电源造成的影响，再利用环路分析仪对回路做定量的分析，进而评估电源的稳定性。

**关键词：**反馈环路、带宽、相位裕量、增益裕量、稳定性、Bode100、ESR

随着电子，自控，航天，通讯，医疗器械等技术不断向深度和广度的发展，势必要求为其供电的电源要有更高的稳定性，即不仅要有好的线性调节率、负载调节率还要有快速的动态负载响应。而这些因素都和控制环路有关，控制环路一般工作在负反馈状态，称之为电压负反馈。如果变换器中没有用到反馈控制环路（即下图1中H部分），其传递函数一般为 $C/R=G$ ，其中G为输入滤波、功率变换、整流滤波部分等因数的乘积（因为其为级联的形式，所以本文中以总的乘积因子G表示），可以看出输出随着输入的变化而成线性的变化，但是由于整流、滤波网络在整个时域的非线性，实际上这种变化应该是近似于线性，所以当输入电压改变的时候并不能很好的起到稳压的作用；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，那么输出电压瞬间会偏高或者偏低，甚至有可能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，那么环路部分又是怎样影响整个回路的呢？参考DELTA公司AC-DC系列产品，下图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 $C/R=G/(1+GH)$ 其中G：开环增益，H：反馈系数，GH：环增益（可以通过图1推导得出）

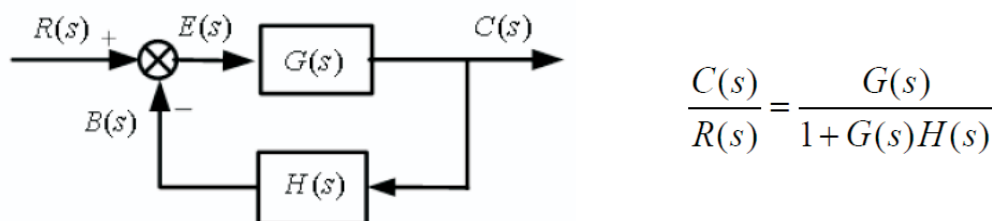


图1.负反馈模型Feed back

## 一、环增益稳定的标准

由传递函数 $C/R=G/(1+GH)$ 有，因为放大器的开环增益G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 $GH=-1$ ，则其传递函数的值为 $\infty$ ，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再反馈到功率变换环节，势必会造成最后输出的振荡，整个系统因而不再稳压。所以说可以通过分析GH的增益和相位判断系统的稳定性。

又因为当 $GH=-1$ 时是振荡的，所以有相移 $\angle GH$ 是 $180^\circ$ （因为负反馈本身就有 $180^\circ$ 的相移），回路增益 $|GH|=1$ （0dB）。所以要使运放稳定需要满足以下条件：

- 1.相位条件就是要其相移要小于 $180^\circ$ ，即要有 $45^\circ$ 以上的裕量，增益条件客户一般要求有 $-12\text{dB}$ 以上的裕量
- 2.穿越频率按 $20\text{dB/Dec}$ 闭合。相关解释下文给出。

## 二、Bode图基础

由上文知我们可以通过环增益GH的频率特性判断系统的稳定性，而回路增益 $|GH|$ 以及回路相位差 $\angle GH$ 的频率特性可以用Bode图(见图2)表示，并且系统的稳定性可以通过Bode图中的相位裕量(phase margin),增益裕量(gain margin),穿越频率(crossover frequency)衡量。其中相位裕量(phase margin)是指：增益降到0dB时所对应的相位，以度(deg)为单位表示，见图2。增益裕量(gain margin)是指：相位为零时所对应的增益大小，以分贝(dB)为单位表示，见图2。穿越频率(crossover frequency)是指：增益曲线穿越0dB时的频率点，见图2。

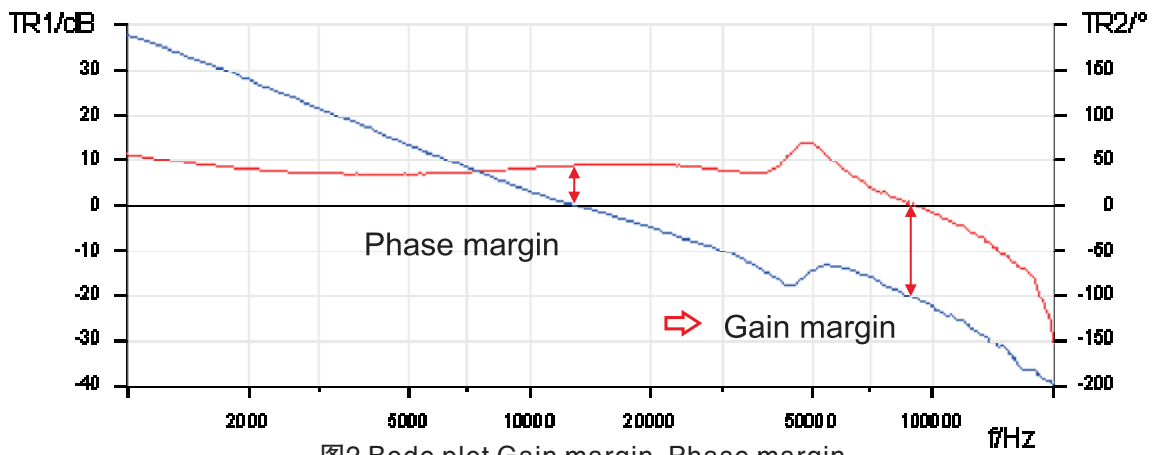


图2 Bode plot Gain margin Phase margin

相位裕量(phase margin)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度的裕量;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度。增益裕量(gain margin)为了不接近不稳定点,一般认为-12dB以上是必要的。

穿越频率(crossover frequency)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。但是由于到半平面零点的影响,以及原材料、运放的带宽不可能无穷大等综合因素的限制,电源的带宽也不能无限制提高,一般取开关频率的1/20~1/6。

### 三、环路的测试

对环路的增益和相位的测量,我们通常可利用环路分析仪(FRA)或增益-相位分析仪进行测量。这些仪器是通过对采样获得的模拟信号进行预处理,然后通过A/D转换,再利用DFT(离散傅里叶变换)运算求得增益和相位,最后用曲线(Bode plot)表示出。

本文将以OMICRON-LAB公司的环路分析仪(Bode100)做分析,主要按照下边的接线图进行,特别需要注意的是注入电阻的位置,以及大小,为了减小测量误差,实验一般选取10~100Ω的电阻;有关扰动信号的大小我们可以在测试的过程中通过示波器读出,也可以利用FRA的振幅压缩(Amplitude compression)功能设置,不过要求扰动的幅度不能超过输出电压的5%。否则测出的结果是不准确的。

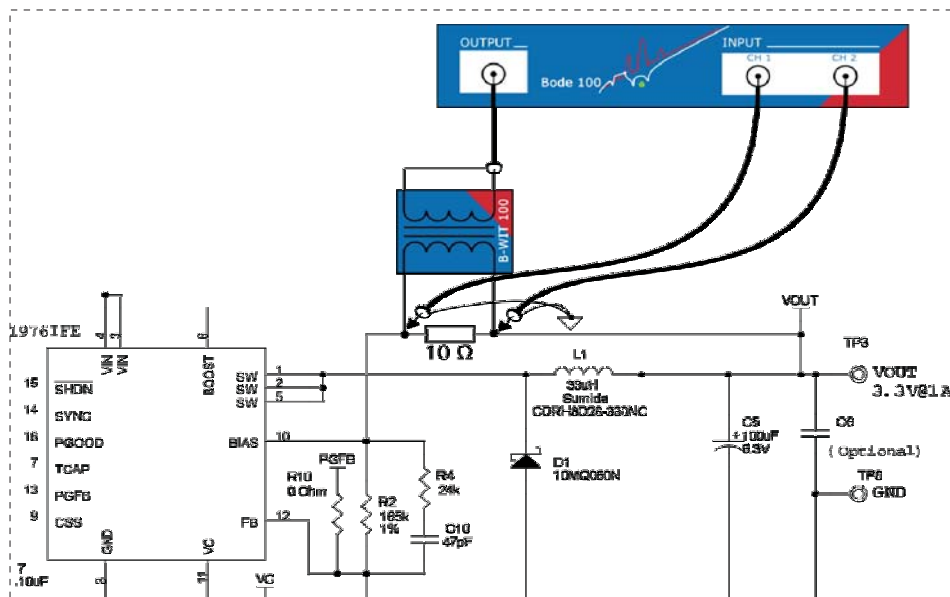


图3 Bode100测量时注入信号位置及接线



#### 四、开关电源稳定性测试举例：

在了解影响产品稳定性的因素和判定准则以及怎样检测产品后，就可以对所测的产品的结果进行分析了，下面就以DELTA公司宽压系列的一款产品做实验，实际接线部分见图3，测试结果如图4。增益（可以通过图1中推导得出）

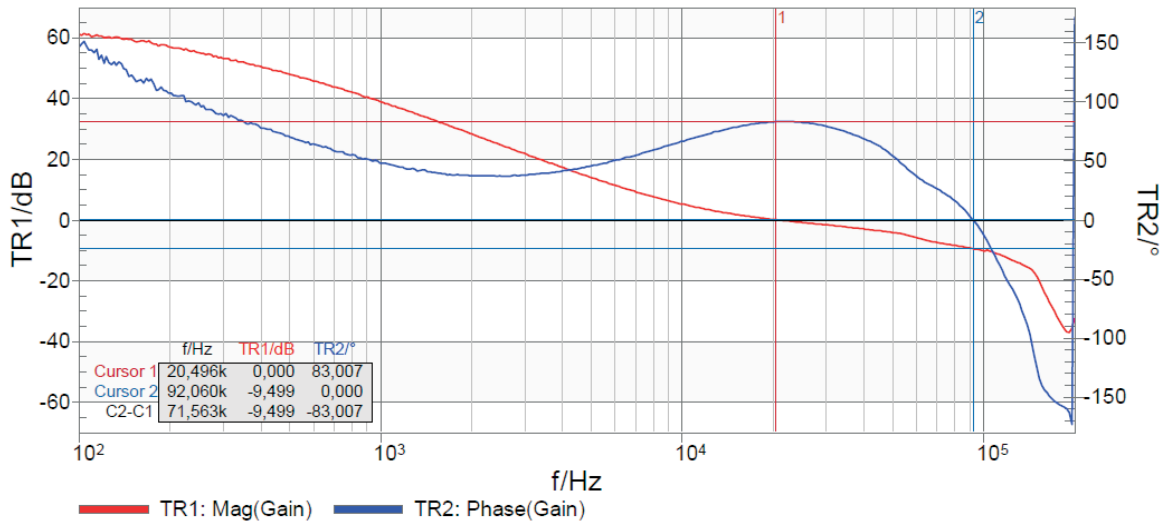


图4 Magnitude and phase of loop gain 12V input voltage and 1A load Current

在这一例子中，从上图可以看出其增益裕量是-9.499dB，相位裕量是83deg，带宽是20.49KHz，但是83deg的相位裕量其动态响应是欠阻尼的，其实可以通过对误差放大器补偿网络在稍低的频率下滑落（roll off）实现。在保证相位裕量的前提下，在0dB以下增益可以按-40dB/decade衰减，从而更有利于抑制高频干扰，其达到最佳响应；

0dB交点对应的频率为20.49KHz，若需要更高的带宽，可以使用更小的输出滤波电容便可以产生较小的纹波电压，这样也可以减少原材料的使用和模块电源的体积，从而使模块电源变得更节能。考虑到非常保守的增益和相位裕量，当然也可以对误差放大器的补偿环节进行一些小的改动，合理的提升带宽，使系统达到更快的响应，提高稳定性。

另外，在测试过程中，开关电源的环路增益和相位通常建议在空载，半载和满载的情况下分别测试。至于激励信号的功率高低的选择，一般情况下需要在测量频率比较低时要把注入的交流激励信号的功率设得高一些，例如-20 dBm或-30 dBm。环路测试过程中电容ESR测试也是非常重要的，而OMICRON-LAB公司的环路分析仪Bode100高达40MHz频率，极大方便了被动器件频率特性测量。

#### 五、总结：

本文从反馈环路增益相位的角度讲述了如何测试开关电源稳定性，给出稳定性的标准，Bode图的认识，FRA的使用包括连接示意图、环路特性的测量，以及实验结果的简单分析，最后提出改善的建议。当然系统的稳定性也可以由时域的方式做定性的分析，但是通过环路分析仪却可以在频率域上定量的求出，从而对系统的性能做出更直观的判断。尤其在业界激烈竞争及客户交期非常短的情况下对电源进行频域稳定性分析就显得极为重要。

#### 六、建议：

测量开关电源负反馈环路频率响应，建议使用专用的环路分析仪或矢量网络分析仪。如Bode100,E5061B。





欧洲奥地利欧米克隆 [www.omicron-lab.com](http://www.omicron-lab.com)