



# 电源完整性测试白皮书

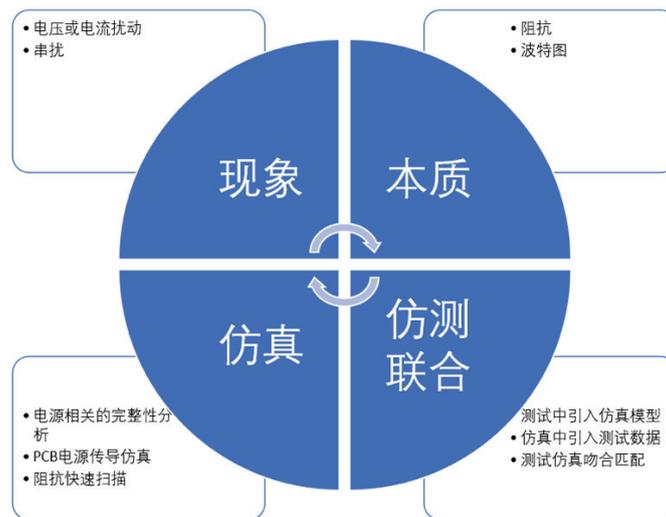
2023 年 1 月

# 目录

简介 .....	03
第一章 电源完整性时域分析之示波器.....	05
第二章 电源完整性时域分析之测试探头.....	09
第三章 电源完整性频域分析之网络分析仪 .....	12
第四章 电源完整性仿真域之仿真软件.....	16
第五章 电源完整性激励域测试之码型发生器 .....	25
第六章 电源完整性测试之直流瞬态电压及纹波噪声模拟 .....	28

# 简介

电源完整性，是指电源分配网络的电压和电流经过直流转换器、芯片、板卡和系统后，是否仍然符合要求。以笔记本电脑为例，AC 到 DC 电源适配器供给计算机主板的是一个约 16V 的直流电源，主板上的电源分配网络要把这个 16V 直流电源变成各种电压的直流电源（如： $\pm 5V$ ， $+1.5V$ ， $+1.8V$ ， $+1.2V$  等），给 CPU 供电，给各个芯片供电。CPU 和 IC 是动态耗电的，瞬时电流可能很大，大到几十甚至 100 多安培，也可能很小，小到低于 1mA，但无论电流如何变化，电压必须平稳（即纹波和噪声必须较小），以保持 CPU 和 IC 的正常工作，这对电源分配网络的设计提出了苛刻的要求。我们常见的电脑蓝屏现象，往往和电源完整性密切相关。



电源完整性，以前隶属于信号完整性分析专题，但是因为它足够复杂和关键，现在已经把其单独拿出来作为一个专题去研究。从测试和仿真的角度看，电源完整性和信号完整性是密不可分，相互关联的，只不过侧重有所不同。

不同的工程师日常所用的测试和验证手段各不同的，对问题解读和测试结果分析上也有差异，但总的来讲，如上图所示，有些工程师局限于电压纹波测试，有些局限于使用网络分析仪，也有一部分工程师使用专用的波特图测试仪，近年来，越来越多的工程师使用内置任意波发生器的示波器做波特图测试。

示波器是一台观察信号表象的仪器，主要用来测量电源纹波和串扰等（MXR 示波器内置频谱分析仪还可测试频段干扰），网络分析仪则可以观察问题本质，在低频几个 Hz 到 3GHz 频段内分析阻抗和相位，而仿真软件则可以实现仿测联合，在仿真阶段实现一致性测试，在测试阶段实现不可测点的仿真，因而，对于电源完整性工程师来说，时域、频域和仿真软件三种不同的工具都是比不可以少的。

电源完整性测试系统的技术背景、方案配置和关键性能指标整理如下。感谢是德科技的技术工程师，汪世龙、万俊辉、蒋修国、闫振龙和朱杰新，他们提供了更详细的章节内容，对每一部分进一步展开。

## 本文设计到的电源完整性测试系统配置：

### 示波器部分

- MXR254A ( 或 EXR254A) 2.5GHz 带宽 10 比特示波器
- N7020A 2GHz 1:1 电源完整性探头 (2 根)
- N2870A 35MHz 1:1 无源探头 (2 根)
- 建议但不必须：D9110POWA 电源完整性分析软件
- 建议但不必须：N2820A 极小信号测试差分电压和电流探头 (500nA 或 3uV)
- 建议但不必须：CX3300 电流波形分析仪，14 或 16 比特分辨率，1GSa/s 采样率

### 网络分析仪部分

- E5061B(Opt 005, 3L5) 网络分析仪
- 1250-1250(x2), 15442A
- 85033E
- 11667L
- 8120-1840(x4)
- 16201A(Opt 001), 16195B
- 16092A, 16192A(16192A/B/C/D, 16197A 根据需要选择), 16047E

### 直流源激励部分

- N7900 系列高级电源
- N6705B 直流电源分析仪 + N6762A DPS 模块 + N6781A SMU 模块

### 高速数字信号的电源完整性激励部分

- 81160A 脉冲码型任意波发生器

### 仿真部分

- W2200 ADS 核心环境, W2302 瞬态卷积仿真软件模块, W2321 版图编辑软件模块
- W2324 大规模版图预处理器元件, W2341 Momentum G2 电路板电磁场分析及高级建模器软件模块
- W2342 FEM 频域有限元电磁场仿真软件模块, W2401 EMPro 核心环境

## 电源完整性测试系统关键性能指标：

- 纹波测试能力： $\leq 3\text{mV}$  (P-P)，具体取决于具体的被测对象，也有场合是 20mV 左右。
- 阻抗测试能力：1 毫欧 ~ 50K 欧姆
- 频率范围：5Hz ~ 3GHz
- 基本测试精度： $\pm 2\%$
- SMD 器件测试能力：频率 DC ~ 3GHz
- 引脚器件测试能力：频率 DC ~ 110MHz
- 直流偏置范围：0 ~  $\pm 40\text{V}$

## 电源完整性测试系统实现的测试功能：

- 电源纹波 / 噪声 / 串扰测量，干扰源定位
- 直流 - 直流转换器环路增益（幅度和相位）测量
- PDN（电源分配网络）毫欧姆级阻抗测量
- 滤波电容 / 旁路电容 / 磁珠等用于电源分配网络的器件的阻抗和参数测量
- 激励响应测试
- 仿真、仿测联合

# 第一章 电源完整性时域分析之示波器

## 电源纹波和噪声测量

选择纹波和噪声测量的方法，首先要确定是在系统中测量还是在系统外测量，然后再确定采用直接测量还是间接测量。当然，还要选择测量的域（时域或者频域）。（就像测量信号幅值一样，直接测量就是对纹波和 / 或噪声进行测量。这是噪声的一种绝对测试。另一个方面，间接测量测量的不是噪声，而是噪声影响。模数转换器 ADC 的时钟就是一个很好的例子。ADC 的噪声水平与时钟抖动密切相关，而时钟抖动与电源噪声紧密相关。在很多情况下，通过测量抖动来评估电源噪声比直接测量信号噪声更有意义）

因此，工程师选择示波器做电源纹波和噪声测量通常有如下几个优点：

- 1) 时域层面，示波器能对纹波和噪声进行最直观的测量；
- 2) 频域层面，MXR 示波器虽然不支持阻抗测试，但其内置的实时频谱分析仪功能，可帮助快速定位射频干扰源；
- 3) 系统内测量 / 直接测量层面，灵活的探头配置，胜任低本底噪声下的纹波和噪声测试；

4) 系统外测量 / 间接测量层面，内置丰富软硬件功能支持多种系统级测试；

- i. 基于电源完整性的串扰分析软件
- ii. 内置任意波形发生器支持波特图分析（环路响应测试）
- iii. 内置任意波形发生器支持 PSRR 分析

实时数字示波器测试波形没有问题，但示波器及其探头都有其固有的本底噪声。如果要测量的噪声与“示波器和探头”的噪声在相同数量级，那么要进行精确测量将是非常困难的一件事情。

示波器的主要噪声来源于 2 个方面：示波器本身的噪声和探头的噪声。

所有的实时示波器都使用衰减器和放大器来调整垂直量程，在不同的量程设置下，其对应的放大比或衰减比是不同的，示波器的本底噪声也是不同的。以 MXR 系列示波器的 2GHz 型号 MXR0254A 为例，在满带宽，1mV/div 设置下，其本底噪声是 91uVrms，在 10mV/div 设置下其本底噪声就变为 131uVrms，表 1 是 MXR 系列示波器在不同量程设置下的本底噪声。从该表 1 我们可以得出一个结论，测量噪声时应尽可能使用示波器最灵敏，也就是最小，的量程档。但是示波器在最灵敏档下通常不具有足够的偏置范围可以把被测直流电压拉到示波器屏幕中心范围进行测试，表 2 是常见示波器支持的偏置范围，从表 2 我们可以得出第二个结论，没有一台示波器支持的偏置范围可以覆盖常见的直流电源被测对象，因此通常需要利用 N7020A 这样的电源完整性专用探头将直流偏置范围提升到 +/-24V，否则，你要么使用 AC 耦合把直流电平滤掉只测量 AC 成分，要么使用隔直电容来完成测试，但所有示波器仅在 1M 欧姆输入阻抗情况下支持 AC 耦合，在此条件下，示波器带宽会降到 500MHz，示波器自身的本底噪声会变大；使用隔直电容的缺点是将直流成分去掉的同时，也会把极低频信号滤除，电源信号本身就是低频的，所以有机会把诸如电压缓慢跌落等现象掩盖了。表 1-1：MXR 系列示波器在不同量程设置下的本底噪声，适用于电源完整性测试的设置最多只有 4 个，在图中以绿色标示。大部分情况下，应该使用每格 1mV ~ 10mV 的设置。

RMS noise floor ( $V_{RMS AC}$ ) on 50 $\Omega$ inputs						
Vertical setting	MXR05xA	MXR10xA	MXR20xA	MXR25xA	MXR40xA	MXR60xA
1 mV/div, 2 mV/div	63 $\mu V$	73 $\mu V$	91 $\mu V$	100 $\mu V$	132 $\mu V$	193 $\mu V$
5mV/div	70 $\mu V$	81 $\mu V$	102 $\mu V$	112 $\mu V$	149 $\mu V$	216 $\mu V$
10 mV/div	81 $\mu V$	99 $\mu V$	131 $\mu V$	144 $\mu V$	189 $\mu V$	251 $\mu V$
20 mV/div	122 $\mu V$	156 $\mu V$	209 $\mu V$	233 $\mu V$	297 $\mu V$	401 $\mu V$
50 mV/div	328 $\mu V$	401 $\mu V$	520 $\mu V$	569 $\mu V$	719 $\mu V$	971 $\mu V$
100 mV/div	681 $\mu V$	821 $\mu V$	1.06 mV	1.17 mV	1.46 mV	2.03 mV
1 V/div	5.07 mV	6.33 mV	8.4 mV	9.31 mV	11.91 mV	16.26 mV

表 1: 对于电源纹波测试，建议使用最灵敏的垂直刻度，尽可能使用示波器的小量程，否则，示波器自身的本底噪声会带来较大的测量误差，该表给出 MXR 系列示波器在不同量程设置下的本底噪声。

DC offset	Range	$\pm(8 V_{DC} - \text{Peak AC})$ into $1 M\Omega$ $\pm(4 V_{DC} - \text{Peak AC})$ into $50 \Omega$
	Resolution	$100 \mu\text{V}$ or 3 digits, whichever is higher
	Accuracy	Waveform modes: $\pm 1.5\%$ of offset setting $\pm 1\%$ of amplitude $\pm 1 \text{ mV}$ DC mode: $\pm 1.5\%$ of offset setting $\pm 3 \text{ mV}$

表 2：MXR 系列示波器本身的直流偏置范围如上表所示，电源纹波测试一般使用示波器 50 欧姆输入阻抗，这时，其直流偏置范围有限。

### MXR/EXR 系列示波器提供多款电源完整性分析套件：

1. 时域分析工具，开关电源分析软件 D9010PWRA，可通过输入分析、开关器件表征和输出分析实现自动化的电源特性测量；
2. 频域分析工具，内置任意波形发生器搭配软件 D9010PWRA 进行频率响应测量，例如电源抑制比 (PSRR) 和波特图测试 (控制环路响应分析)；
3. 电源轨和 PMIC 完整性— D9010POWA (可按此型号搜索技术资料) 分析工具，搭配 N7020A 或 N7024A 电源轨探头。该分析应用程序让用户可以将直流电源定义为“受害者信号”或“侵略者信号”并量化所涉及的不利影响。

### 举例 1：基于示波器平台进行的环路响应测试 (波特图测试)

波特图主要通过两个裕量 (增益裕量和相位裕量) 来评估电源的稳定性。若两个裕量都大于 0，则电路不会震荡。裕量越大，电路越稳定。

#### 环路响应测试

使用 EXR/MXR 测试需要哪些配置？

- ① EXR/MXR 系列示波器
- ② D9010PWRA 电源分析软件+AWG 选项
- ③ PICOTEST Injection Transformer J2101
- ④ 探头\*2

## 举例 2：基于示波器平台进行的 PSRR 测试 (电源抑制比)

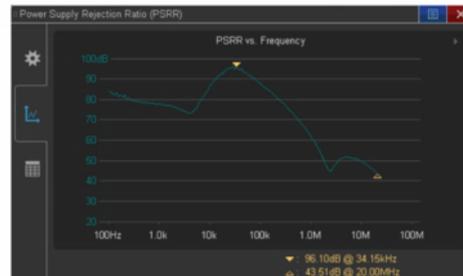
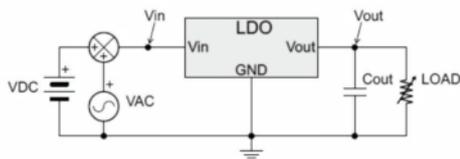
PSRR 是衡量 dc - dc 变换器从输入到输出抑制噪声的能力的指标。它被定义为在较宽的频率范围内输入纹波与输出纹波的比值，并以 dB 为单位对频率进行对数绘制。为了进行测量，Infiniium MXR (和 EXR) - 系列示波器使用自己内置的 WaveGen 从用户定义的开始频率到用户定义的停止频率扫描输入，同时测量每个步进频率的 VIN 和 VOUT。

### PSRR

#### POWER SUPPLY REJECTION RATIO (PSRR)

PSRR是Power Supply Rejection Ratio的缩写，即电源纹波抑制比。它是指输入纹波与输出纹波的比值，通常是以对数形式表示。

$$PSRR=20*\log[Ripple(VIN)/Ripple(VOUT)]$$



举例 3：基于 D9010POWA 搭配 N7020A/N7024A 的电源和数据线间的串扰测试，图中所示为定义直流电源为“侵略者信号”，以此量化该“侵略者信号”对串行链路数据——“受害者信号”所涉及的不利影响。

在这个例子中，N7020A 电源轨探头被用来测量一个正在传输串行数据流的 FPGA 的 1.1V 电源。1.1 V 电源有大约 115 mVpp 的噪声或大约 ±5% 的噪声。



上图：左图，FPGA 直流电源和 MXR/EXR 系列示波器捕获的串行数据。数据线（黄线）；电源（蓝线）。

通过 D9010POWA 的分析软件，我们可以不用实际在直流电源上让这个 1.1V 的供电变“干净”，而是通过软件分析出 1.1V 电源上的噪声造成了多大的影响。下图展示的就是通过 D9010POWA 搭配 N7020A/N7024A 探头测量，来剔除由于 1.1V “不干净” 的电源对串行数据信号带来的串扰影响的。



上图：从上之下，串行数据和“不干净”的 1.1V 直流电源信号，实测的由于电源串扰所影响的串行数据眼图（眼宽 63ps），D9010POWA 软件推测的去除 1.1V “不干净” 直流电源信号后的串行数据眼图（眼宽 117ps）。

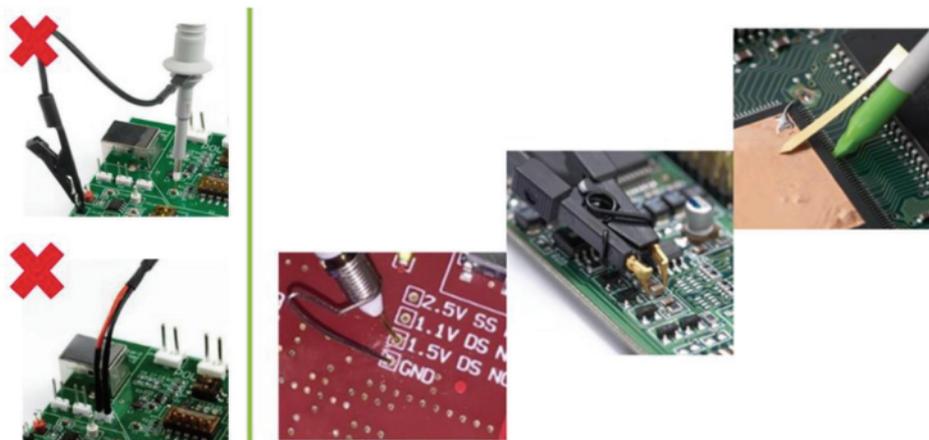
## 第二章 电源完整性时域分析之专用测试探头

基于同样的原因，在电源测量中也应该尽量使用 1:1 的探头而不是示波器标配的 10:1 的探头，使用 10:1 的探头，示波器的最小量程会被放大十倍，示波器的噪声也会被放大。目前 N7020A 2GHz 1:1 单端有源探头，N7024A 6GHz 带宽单端有源探头，N2870A 1:1 35MHz 无源探头是最常被工程师认可的探头。其中 N7020A 是最适合电源完整性测试的探头，可测量毫伏以及亚毫伏级的信号，N2870A 是最便宜的探头，可测量 10mV 或以上的信号，N2820A 是最精密的探头，即可用作差分探头，也可用作电流探头，电压测量范围为 3uV ~ 1.2V，电流测量范围为 500nA ~ 5A，但带宽仅为 500kHz ~ 3MHz。

Attribute	N7020A	N7024A
Probe Bandwidth (-3dB)	2GHz	6GHz
Attenuation Ratio	1.1:1	1.3:1
Offset Range	± 24V	±15.25V
Input Impedance @ DC	50kΩ +/-2%	50kΩ +/-2%
Probe Noise	0.1 * Scope Noise	0.3 * Scope Noise
Active Signal Range	± 850mV about offset voltage	± 600mV about offset voltage
Probe Type	Single-ended	Single-ended
Included Accessories (orderable separately)	N7021A—Coaxial Pigtail Probe Head (qty 3): 8"	
	N7022A—Main Cable: 48"	
	N7023A—350MHz Browser: 45"	
	Compatible, not included	N7032A 4GHz browser for 0603 and 0805 packages (inch code) N7033A 5GHz browser for 0201 and 0402 packages (inch code) 1250-4403 Rotating SMA adapter
Output Impedance	50Ω	50Ω
Extended Temperature Range	N7021A Main Cable, N7022A Pigtail Probe Head: -40° to + 85° C	



探头带来的噪声是在衰减器前面耦合进来的，在某些不正确的使用方法下，探头可能会带来额外的噪声，一个典型的例子就是使用长地线。为了方便测试，示波器的无源探头通常会使用 15cm 左右的鳄鱼夹形式的长地线，这对于电源纹波的测试是不适用的，特别是板上存在开关电源的场合。由于开关电源的切换会在空间产生大量的电磁辐射，而示波器探头的长地线又恰恰相当于一个天线，所以会从空间把大的电磁干扰引入测量电路。一个简单的验证方法就是把地线和探头前端接在一起，靠近被测电路（不直接接触）就可能在示波器上看到比较大的开关噪声。因此测量过程中应该使用尽可能短的地线。



★ 应该尽量使地线变短，减少回路面积

现在很多被测件要求测量出峰峰值为几毫伏的纹波和噪声，比如有些 10Gbps 以上的 SerDes 要求 3mv 峰峰值的电源纹波和噪声。这时候最好用 N7020A 来进行测量，它的直流阻抗为 50K 欧姆，对于毫欧甚至更高阻抗级别的被测电源来说，负载影响很小，测试精度非常高。

这里要强调的一点是，通常电源测试都规定了某个频率范围内的纹波和噪声，比如 20MHz 以内的，但为了分析电源噪声来源，需要在更宽的频率范围内分析，一般示波器的带宽在满足分析要求的同时，还要支持灵活的带宽限制功能，这对于减小高频噪声会有比较好的效果。

电源完整性时域分析大部分情况下,可以使用上面的测试硬件和软件来分析电压纹波,但在较低纹波测量环境(如LDO输出电压纹波),测试仪器的本地噪声直接影响对系统稳定的判断。因此,是德科技推出CX3300 电流波形分析,它拥有14或16比特分辨率,1GSa/s采样率,超低150pA的电流底噪常常用于功耗测试和分析。同时CX1105A 差分传感器同样拥有非常低的电压噪声,底噪小于20 $\mu$ V (rms) @20MHz, 400nV (rms) @2.5kHz。



### CX1105A Ultra-Low Noise Differential Sensor Characteristics

CX1105A current measurement characteristics overview <sup>1</sup>

Range	Noise (rms) at 20 MHz NBW	Noise (rms) at 2.5 kHz NBW <sup>1</sup>	Maximum bandwidth (-3 dB)
2.5 V	1100 $\mu$ V	200 $\mu$ V	100 MHz
1 V	1100 $\mu$ V	200 $\mu$ V	
250 mV	45 $\mu$ V	3.0 $\mu$ V	
100 mV	24 $\mu$ V	1.3 $\mu$ V	
25 mV	20 $\mu$ V	400 nV	

1. High-resolution mode (16-bit) is enabled.

因此,可以通过CX3300+CX1105A 差分探头对电源纹波噪声进行测试。

### 小结一下,对于电源纹波噪声的测试,通常需要注意以下几点:

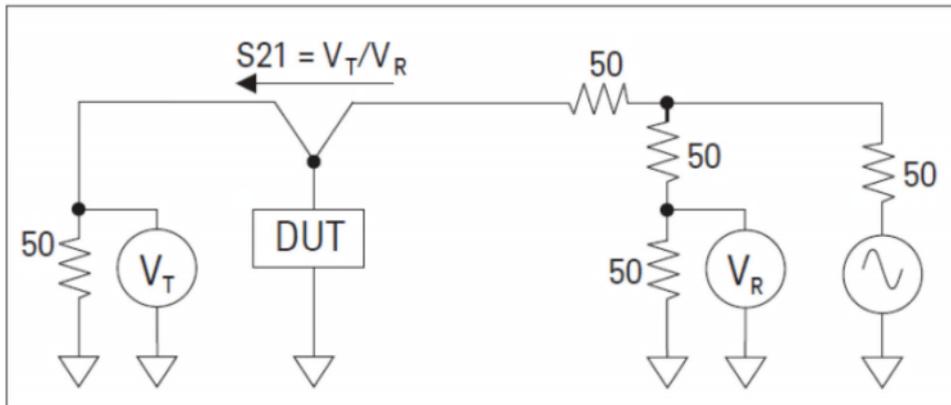
- 尽量使用专用的电源测试探头 N7020A
- 尽量使用小衰减比的探头,如 N7020A, N2820A, N2870A;
- 尽量使用示波器最小量程(硬件实现的量程,不是软件放大),以降低示波器本底噪声;
- 探头的接地线尽量短,构成的环路面积尽可能小
- 根据需要使用带宽限制功能,低通滤波器和高通滤波器,甚至带通滤波器。
- 超低波纹、电压和电流噪声测试,可选用CX3300进行测试

# 第三章 电源完整性频域分析之网络分析仪

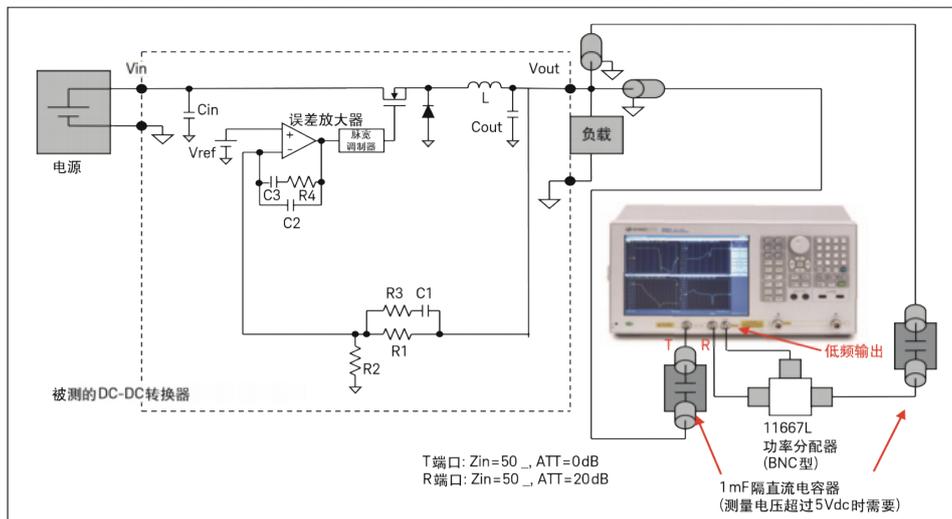
电源完整性分析对象主要是电源分配网络 PDN (Power Distribution Network)，要测量 PDN 性能，首先需要用示波器测试 GPU 和 IC 管脚的电源纹波和噪声。但是要进一步诊断 PDN 的性能,还需要测试 PDN 的输出阻抗(随频率变化的阻抗)。由于现在的 PDN 大都是开关电源结构,还需要测量 PDN 或关键 DC-DC 转换器件的环路增益。

开关式直流-直流 (DC-DC) 转换器 / 电压调节器在保证电路板供电电路 (PDN) 中的电源完整性方面发挥着重要作用 (无论负载如何变化, 都可以提供稳定的 Vdd 电压)。PDN 通常包括裸露印刷电路 (PC) 板电源布线层、DC-DC 转换器和无源 PDN 器件 (例如在电源布线层上的旁路电容)。随着算力大幅增加, PDN 的一个最重要发展趋势就是, 其负载器件 (例如 GPU、FPGA、ASIC) 的工作速度越来越快, 而工作电压越来越低 (0.8 V、0.65 V 等), 工作电流却是越来越大 (100A、200A 甚至更大)。为了适应这种趋势, 业界开始非常普遍地在电子设备中采用分布式供电的设计, 其中低电压 DC-DC 变换器总是放置在与负载器件非常接近的位置 — 即所谓负载点 (point-of-load) 的附近, 以提高高性能计算系统供电的完整性, 为使 DC-DC 转换器能对高速大规模集成电路的负载变化快速做出响应, 在对 PDN 进行设计时, 充分考虑其性能的优化比以往任何时候都显得很重要, 因为在实际应用中往往需要在反馈环路的响应速度和工作的稳定性之间取得很好的平衡。为了最大程度地降低由于较大的负载电流变化造成的供电电压的瞬时波动, 确保供电电压稳定在非常小的波动范围内, 验证 DC-DC 转换器的输出阻抗是否被限制在毫欧量级的极低范围内是非常重要的。另外, PDN 设计还需要超出 DC-DC 变换器环路带宽的频率范围 — 这是无源 PDN 器件抑制电源和接地布线层之间的阻抗的频率范围。实际上对无源 PDN 器件, 精确地了解每个无源 PDN 器件的特征性能有助于在使用仿真工具设计 PDN 时提高设计质量。另外, 在把无源器件都安装到 PDN 上之后再测量出 PCB 板的整个 PDN 阻抗, 我们就可以验证产品的最终阻抗是不是理想地达到了在仿真中所期望的值。通常情况下, 需要进行测量的频率可以高达几百 MHz 甚至 GHz 的范围, 这是抑制已经在电路板上装有无源器件的 PDN 的阻抗的上限频率。

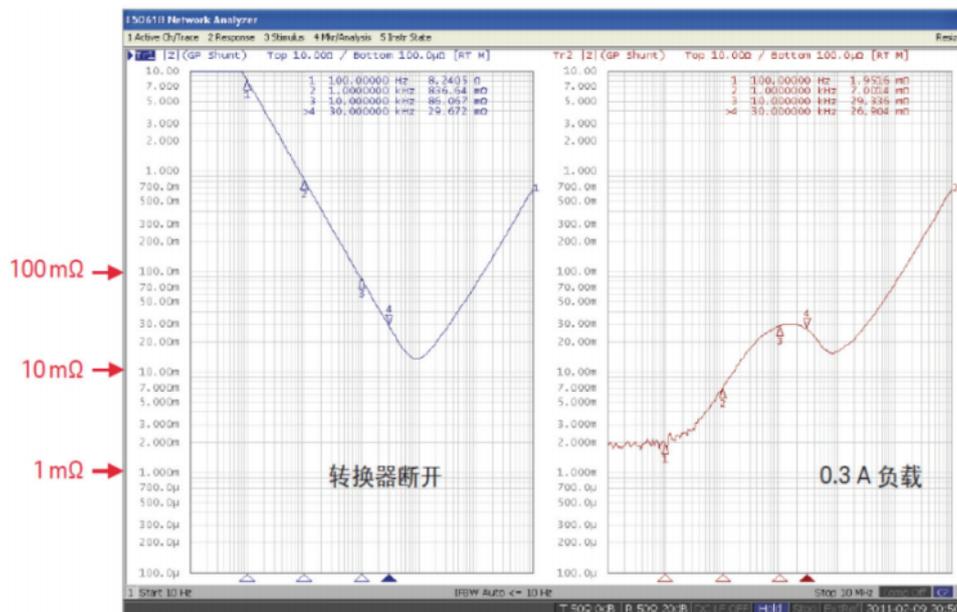
能够对毫欧量级的微小阻抗进行精确测量的方法是并联-直通法, 并联-直通法在 50 Ω 以下直到非常小的阻抗范围的阻抗都具有非常高的灵敏度, 是测量 PDN 阻抗的常用方法。下图是测量方法的简化示意图。将被测器件并联在激励信号线和接地线之间, 然后测量传输系数 S21。然后从 S21 推导出被测器件的阻抗, S21 表示由非常小的并联阻抗导致的很大的衰减。被测器件的阻抗 Zdut 和 S21 之间的关系为:  $Z_{dut} = 25 \times S_{21} / (1 - S_{21})$ 。



下图是采用并联-直通方法进行测量的配置。E5061B 网络分析仪的 TR 端口的输入阻抗设置为  $50\ \Omega$ 。用下图所示的配置方式，不用外接隔直流电容器就可以测量输出电压在  $5\ \text{Vdc}$  以下的 DC-DC 转换器的参数。如果施加到该端口上的直流信号的电压比较高，超过了  $5\ \text{Vdc}$ ，仪表的过载保护功能会启动，E5061B 的测量端口的功能将关闭。通过外接的隔直流电容器，您可以测量输出电压高达  $10\ \text{Vdc}$  的转换器。



下图左边的轨迹是在转换器和电子负载关闭的情况下表示的  $|Z|$  的测量结果。如图所示，转换器在断电状态下的输出阻抗指示的是转换器的输出电容器的自谐振阻抗响应。右边的轨迹是在  $0.3\ \text{A}$  负载条件下测量到的  $|Z|$  的轨迹。如图所示，通过转换器的反馈回路的作用，在低频范围内  $|Z|$  值被限制在  $2\ \text{m}\Omega$  以下。由于增益相位 TR 测试端口独特的接收机体系结构，E5061B 能够正确测量毫欧级的小阻抗，甚至在  $10\ \text{Hz}$  以下的测量频率，测量结果也不会受到激励源和接收机之间测试电缆接地环路的影响。



总结一下，Keysight 是德科技的矢量网络分析仪 E5061B 是专门针对测试 PDN 而设计的网络分析仪，满足测量 PDN 输出阻抗测量要求。同时还具有下面更多能力

## 1. 功能全面的低频到中频网络阻抗分析仪

E5061B 低频 - 射频网络阻抗分析仪的选件 3L5 可以在从 5 Hz 至 3 GHz 的频率范围内提供常用的网络测量和阻抗分析功能。功能全面的低频网络测量能力 (包括内置的 1 M $\Omega$  输入) 都被完美地集成到这个高性能的射频网络阻抗分析仪之中。E5061B-3L5 是研发环境中进行器件和电路测量的理想仪表和工具，选件 005 提供阻抗参数和等效电路分析。

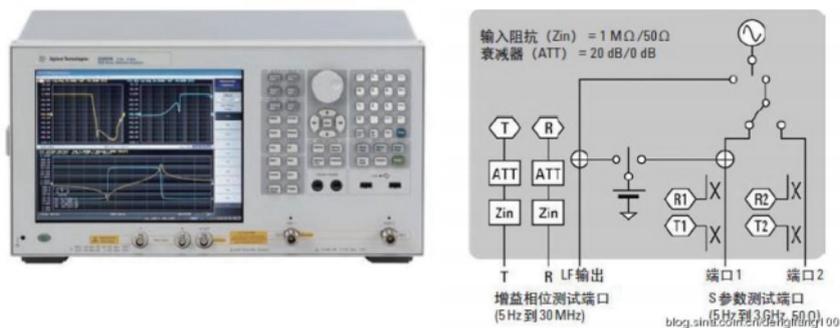


图 3-3 : E5061B-3L5 网络分析仪

## 2. S 参数测试端口

E5061B-3L5 在其完全能够测量的从 5 Hz 到 3 GHz 的频率范围都有非常高的动态范围，这可以使您对各种几乎从直流到射频的器件进行测试。

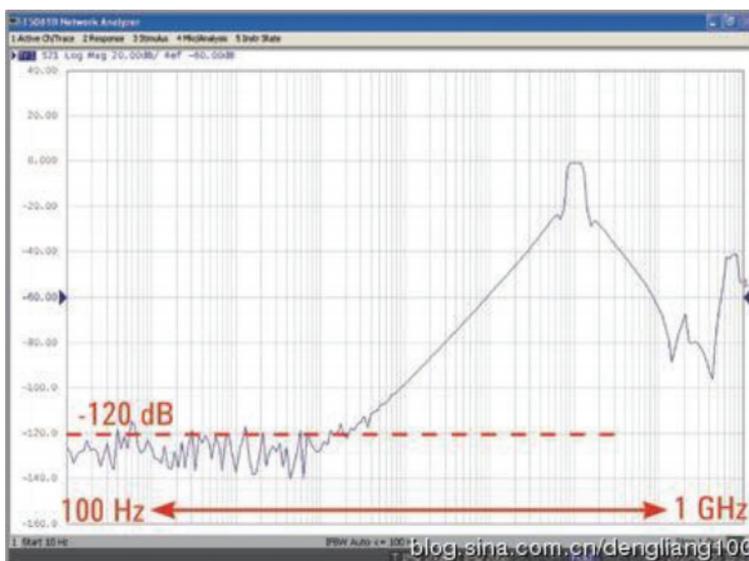


图 3-4 : 直流到直流传输阻抗测量和环路增益测量

### 3. 增益相位测试端口

增益相位测试端口可以在从 5 Hz 到 30 MHz 的低频测量范围内直接把测试信号接入测量接收机。内置的 1 M $\Omega$  输入使您能够使用测量探头轻松地对所测电路内的放大器和直流 - 直流转换器的控制环路的参数进行测量。接收机端口可以精确地测量放大器的 CMRR/PSRR 和 PDN 毫欧量级的输出阻抗，并且消除了测量中接地环路引入的测量误差。

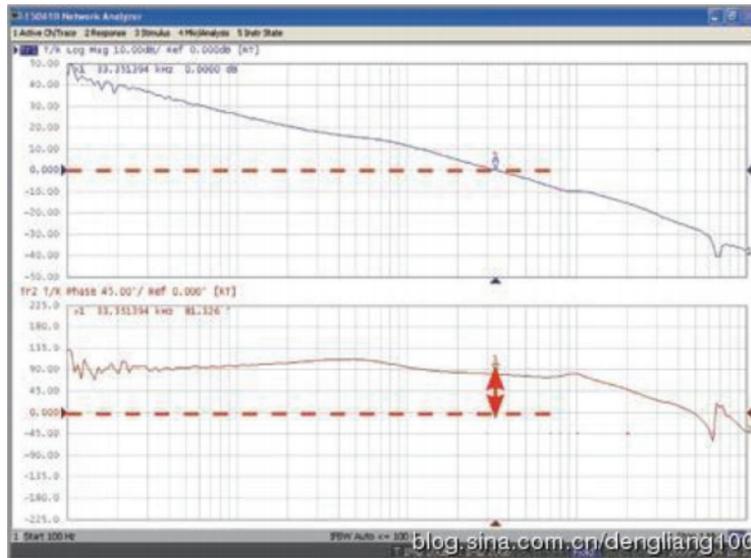


图 3-5：直流到直流传输阻抗测量和环路增益测量

### 4. 直流偏置源

E5061B-3L5 内置的直流偏置源可以从仪表内部把最高可达  $\pm 40$  Vdc 的直流偏置电压叠加到从端口 1 或 LF OUT 端口上输出的交流信号上。此外，如果在仪表的 S 参数测试端口上对被测器件进行测量时，它还可以从 LF OUT 端口输出直流电压。

# 第四章 电源完整性仿真域之仿真软件

## 电源完整性的仿真

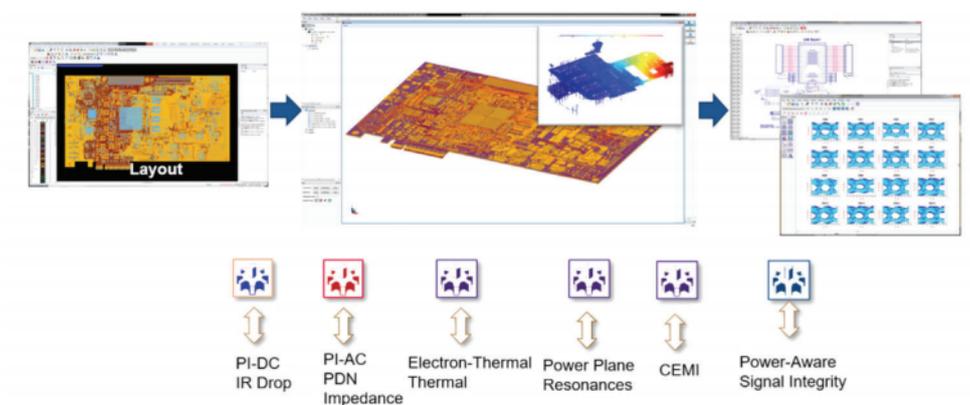
是德科技的先进设计系统 (Advanced Design System, ADS) 软件是一个完整的高速电路仿真设计平台, 提供了完整的信号与电源完整性仿真解决方案。ADS 的版图设计环境集成了全新的 SIPro/PIPro 仿真分析工具, 可以帮助工程师快速高效地完成 PCB 设计中信号与电源完整性的版图布局分析和版图后仿真。

SIPro/PIPro 是内嵌于 ADS 版图设计环境中的功能模块, 它包含独立的仿真界面及仿真器, 可以对版图设计进行分析。目前, ADS 版图支持多种不同格式的设计文件导入, 如 ODB++, Gerber, IFF, EGS, Allegro Brd 等。

SIPro/PIPro 包含以下功能:

- PI-DC, 用于直流电压降分析
- PI-AC, 用于 PDN 阻抗分析
- PPR (Power Plane Resonance Analysis), 用于电源平面谐振分析
- Electro-Thermal, 用于电热联合仿真
- Thermal, 热仿真分析
- SIPro (Power-Aware Signal Integrity Analysis), 用于与电源相关的信号完整性分析
- CEMI (Conducted EMI), 用于 PCB 电源传导仿真分析
- 阻抗快速扫描

下图为 SI/PIPro 的软件界面和仿真的基本流程。

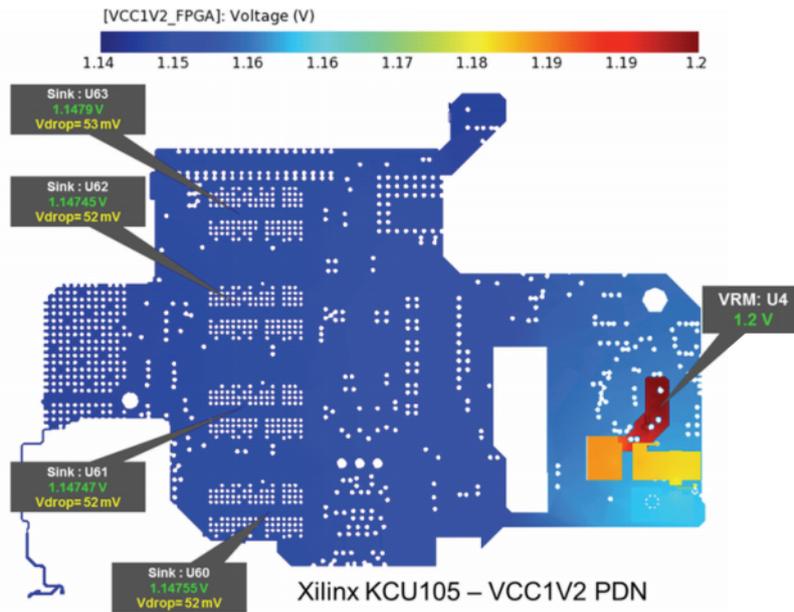


SIPro/PIPro 具有以下特点：

- 仿真速度快，比传统平面或 3D 电磁场仿真器速度提高 10 倍以上。
- 仿真精度高，可以与 3D 有限元法有相似的仿真精度。
- 仿真流程简便，界面友好。
- 可以方便地生成 ADS 原理图，进行电路分析。
- 可以仿真 Tabbed routing 等非规则 PCB 结构。
- 便捷设置 Back drill 过孔。
- 可以任意设置信号或者电源端以及相应的参考端。
- 有 Python 的接口。可以非常方便地管理电容模型库。

## 1. PI-DC 分析

由于过大的直流电压降，落在 IC 电源端的电压可能低于建议的最低电压。这可能导致 IC 的故障。过高的电流密度在过孔处会生成过多的热量，引起电路板裂开或烧化，导致故障。PI-DC 可以计算直流条件下的电压、电流、IR Drop (电压降) 及电源供电网络的功率损耗密度等。PIPro 可以帮助工程师用户识别芯片等器件的管脚和连接过孔等在直流工作条件下流过的电流密度，显示芯片管脚电压，并给出设计裕量。仿真结果还可以自动生成报告。如下图所示为电压跌落的结果，包括了图形化的结果以及数据表格结果。



Xilinx KCU105 – VCC1V2 PDN

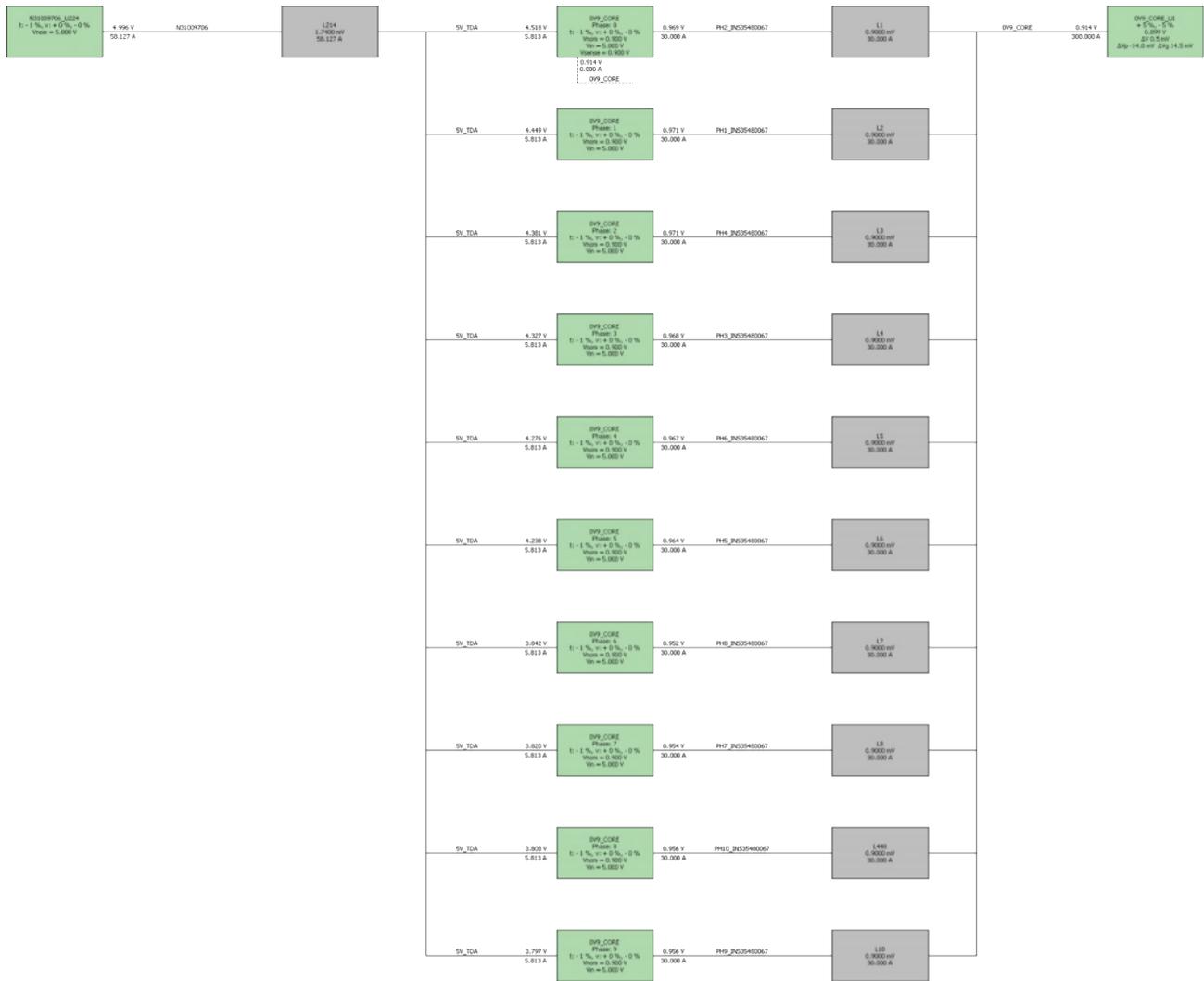
### SINKS

Name	Source Current	VRM Voltage	Input Voltage	Tolerance	Margin	Pass/Fail
VCC1V2_FPGA_U60	0.3 A	1.2 V	1.14755 V	5 %	0.00755 V	pass
VCC1V2_FPGA_U61	0.3 A	1.2 V	1.14749 V	5 %	0.00749 V	pass
VCC1V2_FPGA_U62	0.3 A	1.2 V	1.14745 V	5 %	0.00745 V	pass
VCC1V2_FPGA_U63	0.3 A	1.2 V	1.14747 V	5 %	0.00747 V	pass
VCC1V2_FPGA_U1	0.8 A	1.2 V	1.1463 V	5 %	0.0063 V	pass
VCC1V2_FPGA_U24	0.4 A	1.2 V	1.14094 V	5 %	0.00094 V	pass
VCC1V2_FPGA_U41	0.3 A	1.2 V	1.14687 V	5 %	0.00687 V	pass
VCC1V2_FPGA_U42	0.3 A	1.2 V	1.14715 V	5 %	0.00715 V	pass

### VRMs

Name	Source Voltage	Output Voltage	Output Current	Tolerance	Margin	Pass/Fail
VCC1V2_FET_SWITCH_U4	1.2 V	1.2 V	-2.99999 A	5 %	0.06 V	pass

PIPro 输出的电源结果中还包括电源树等结果。如下图所示为多相电源 300A 电流电路 PI IRdrop 的结果：

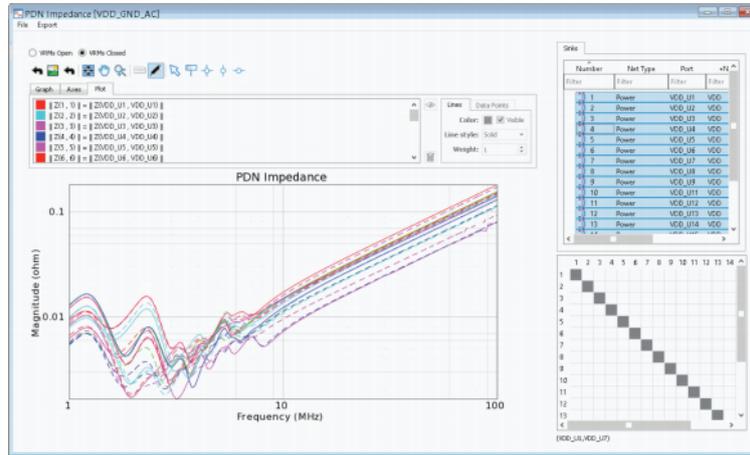


## 2. PI-AC 分析

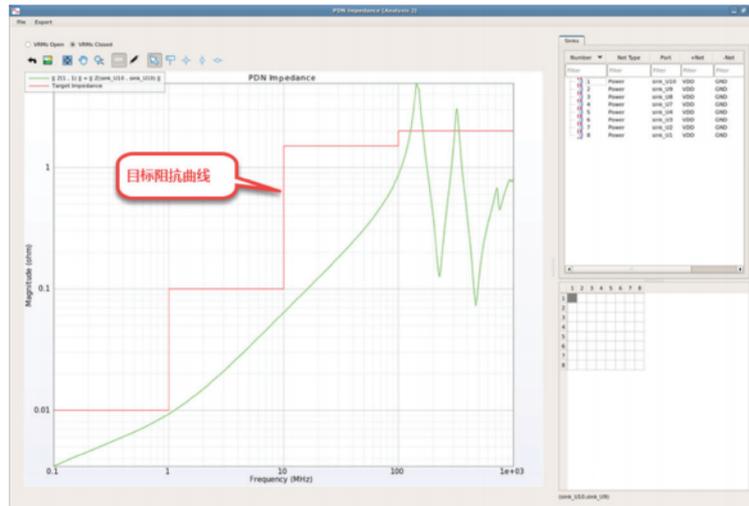
PI-AC 分析用于提取电源分布网络 (PDN) 的交流阻抗特性，并且可以显示电流密度，了解热点区域。提取的阻抗网络可以直接转化为 ADS 的原理图，与电压调节模块 (VRM) 模型和去耦电容进行优化。

PI-AC 分析允许在仿真中添加元件模型，如去耦合电容模型。软件支持多种元件模型形式，如理想集总元件，S 参数模型，元器件厂家模型库，自定义电路模型等。用户可以一次为同一个元件定义多种模型，可以方便地在多个模型间进行切换。

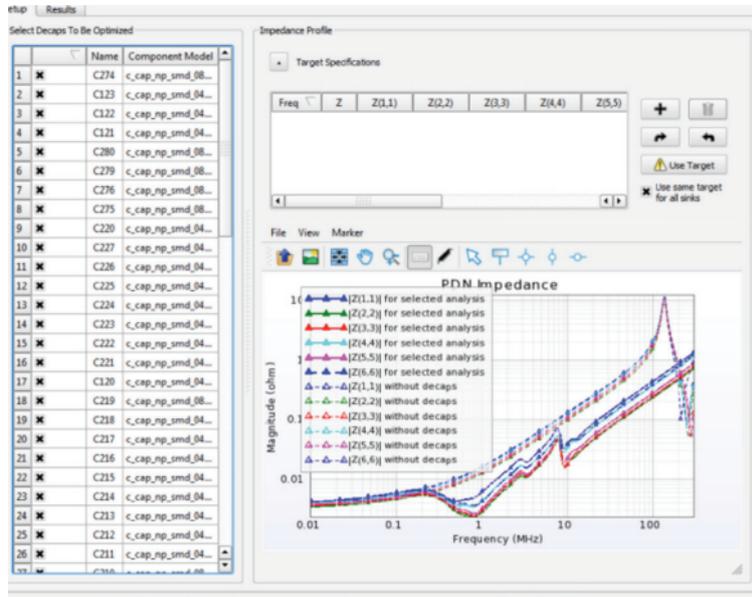
PI-AC 分析可以一次分析任意多个指定的电源网络，仅更换元件模型时不需要重复进行电磁仿真。便可获得新的结果。如下图所示为 PDN 阻抗曲线。



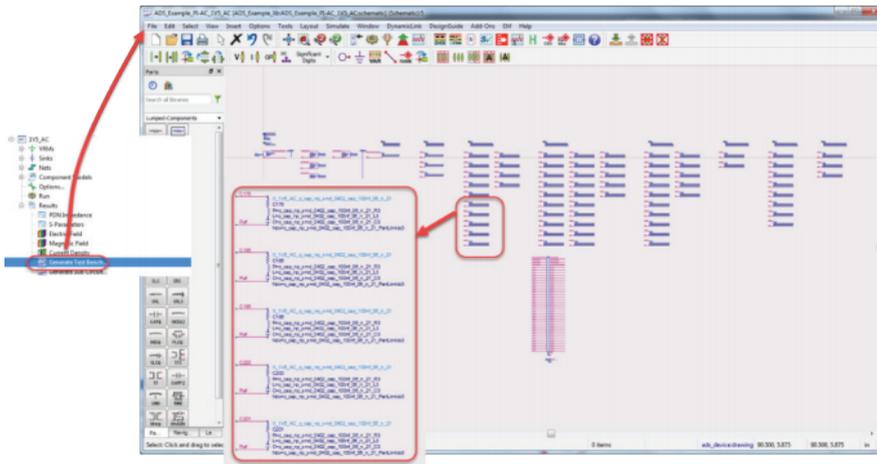
在 PIPro 中可以导入目标阻抗曲线，通过与设定的目标阻抗进行比较，可以确定当前设计是否满足阻抗要求。



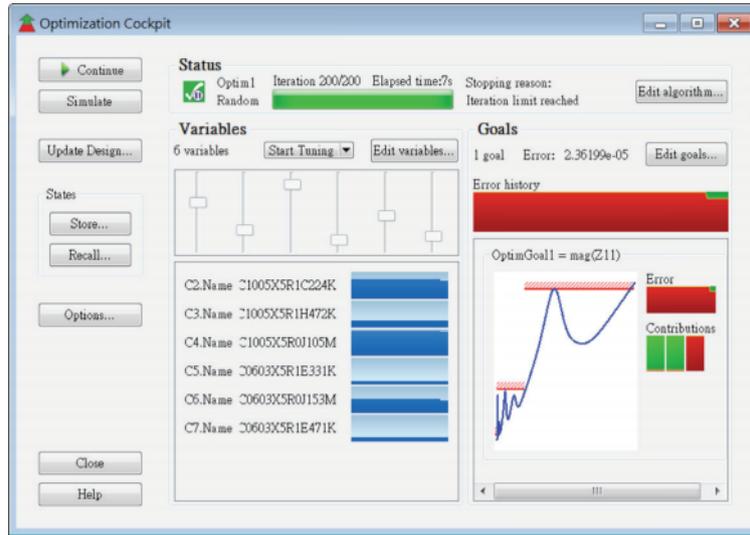
当设计阻抗不满足要求时，需要进行阻抗优化。PIPro 本身自带自动优化仿真。



PIPro 可以自动生成仿真电路原理图，用户可以在 ADS 原理图中优化或调谐元件模型，选择合适的元件组合。

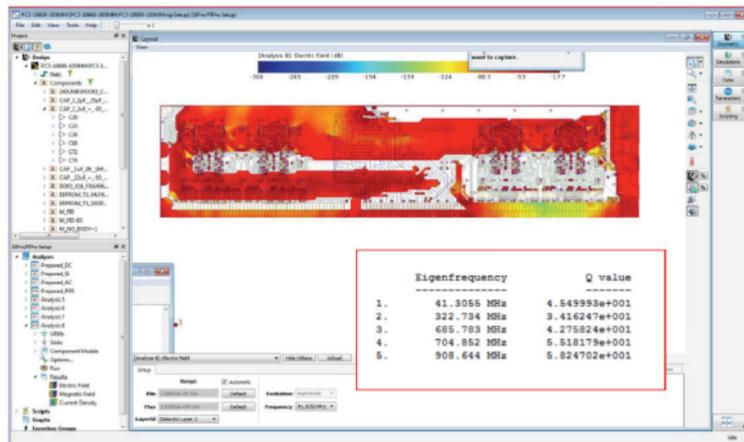


ADS 提供了 10 余种优化方法，可以实现去耦电容参数的快速搜索，实现最佳性能。通过分析去耦电容通过电流的大小，可以剔除冗余电容，降低设计成本。



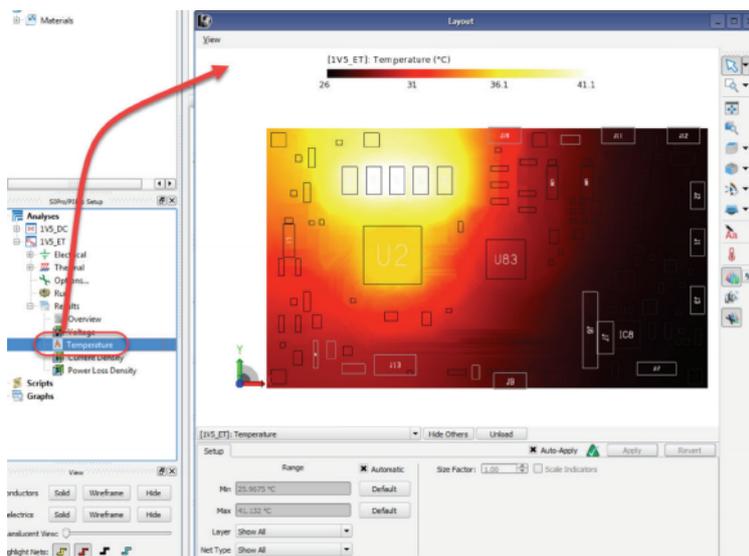
### 3. 电源平面谐振 (PPR) 分析

电源平面谐振分析可以计算配电网 络 (PDN) 的自谐振频率和相应的 Q 值。它可以帮助你实现去耦电容和过孔的优化布置。电源平面谐振会干扰敏感的模拟电路，并生成过量的辐射。这可能导致设计不能满足 EMC 规范。



## 4. 电热联合仿真

电源完整性分析中还集成了电热仿真功能，能够实现电 / 热协同仿真。电源完整性仿真引擎 (DC Drop) 对电源网络进行仿真，提供功率密度给热分析器，热分析器再根据器件功耗运行热分析，系统多次迭代上述过程，获取更新后的温度值直到仿真收敛。电热联合仿真温度显示分布图。



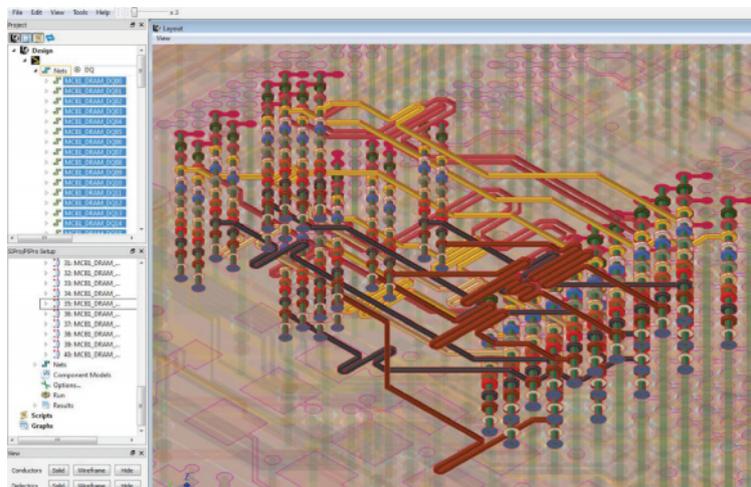
## 5. 与电源相关的信号完整性分析 (SIPro)

在高速电路信号完整性设计中，信号电流的最短回流不仅包含地平面，还往往包含电源平面。如果在提取信号走线 S 参数时，仅考虑参考地平面，不考虑电源平面，仿真的结果会有很大的误差。SIPro 使用独有的混合算法，可以快速提取信号走线(包含过孔)与地平面和电源平面的频域模型。这一频域模型可以直接转换成 ADS 的原理图，用于电路仿真，如时域瞬态 (Transient) 仿真，通道 (Channel) 仿真，DDR 总线仿真等。

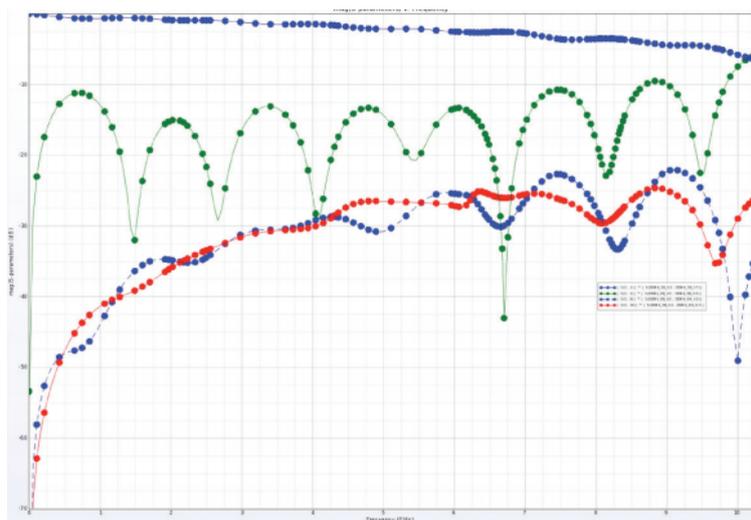
与其他仿真技术相比，SIPro 具有以下特点：

- 可以考虑电源平面对回流路径的影响。
- 不需要对版图设计进行切割或简化，保持了地平面和电源平面的完整。
- 基于 FEM 和平面电磁场技术的求解器，相比基于传输线等效电路的算法精度大大提高。
- 端口设置快速简便。
- 仿真速度快。
- 可以快速查看 TDR/TDT 及单端、混合模式的 S 参数结果。
- 自动生成电路原理图。

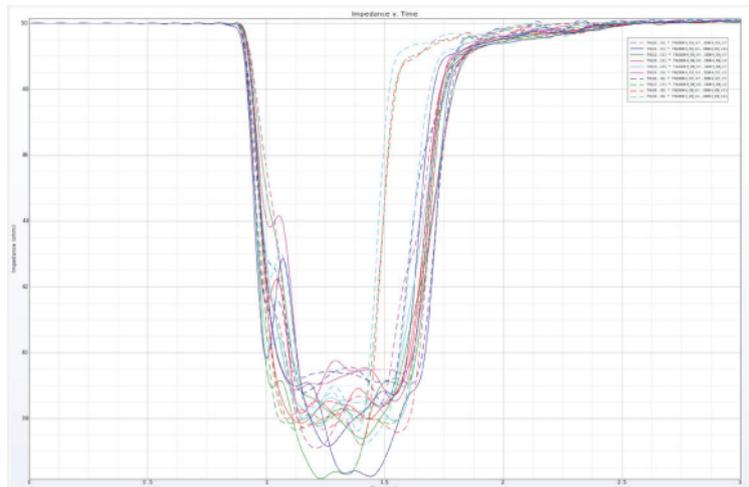
同时仿真多路传输线的 S 参数，如下是选中的信号网络：



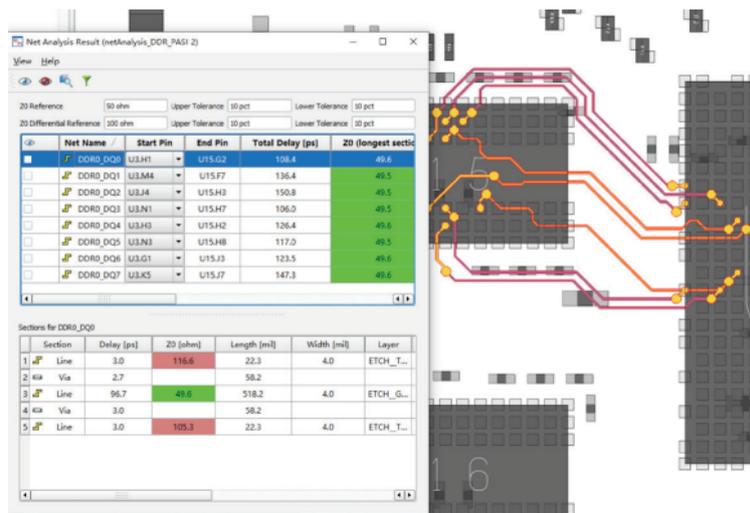
仿真后能快速的查看传输线的插入损耗、回波损耗及串扰，如下图所示：



下图所示为 SIPro 中仿真后查看传输线的 TDR /TDT 结果：



Layout 工程师在设计的时候，总希望能快速地找到设计不规范或者不满足要求的点，尤其是对于一些对成本要求非常严苛的 2layers 高速板，总是会存在很多阻抗不连续点的设计。SIPro 中的 Rapid Scan 就能满足这种快速分析的要求。下图所示是在 SIPro 中快速的查看传输线的阻抗情况：



## 6. 传导仿真分析 (CEMI)

随着在电子产品中往往需要进行 EMC 的检测分析，传导就是 EMC 的一种。为了更好的发现、避免以及解决传导的问题。在 PIPro 中可以利用 CEMI 对电路进行传导的仿真分析。下图所示为 CE 的仿真结果。



仿真后，还可以生成 test bench，在 ADS 原理图中做进一步的电路分析，以找到解决问题的方法。

总之，使用 SIPro/PIPro 可以非常快捷方便地完成 PCB 的信号完整性、电源完整性和 PCB 传导的仿真以及提取传输线和电源系统参数模型的。

# 第五章 电源完整性激励域测试之码型发生器

## 引言

### 脉冲函数任意波形噪声发生器在压力测试应用中的重要作用

#### 情况分析

集成电路芯片通常安装在印刷电路板 (PCB) 上，由电源分布网络 (PDN) 供电。使用每个集成电路芯片时，都必须考虑到它对电源分布网络的影响。大多数集成电路芯片只在改变状态时消耗电流，这种不规则的用电给 PDN 带来了很大失真，产生电源完整性的问题。

电源分布网络出问题，会对其它电路产生干扰，增加噪声，进而导致信噪比降低，影响集成电路芯片输出端口处的信号完整性。在最坏的场景中，电源噪声有可能对集成电路的工作产生负面影响。同样，直流电源电平的波动也会干扰集成电路的正确工作。

为了限制这些不利因素的影响，硬件工程师设计了一系列保护电路。保护集成电路芯片的常用方法包括：使用去耦电容抑制电压波动，加入电感器限制噪声电平。可是所有补偿方法在最大限度减少直流电源失真的同时，也都存在各自的限制。

例如使用去耦电容时，电容器中的材料缺陷会产生等效的串联电阻。电容器和封装会产生等效的串联电感。这些寄生效应会严重影响电容器的技术特性。电容器在高频范围内的特性更像是电感或电阻器——有违于它在电路中的最初用途。

## 方案配置

在真实条件下测试元器件和电路是一个必不可少的环节。在这个过程中，工程师可以评估 PCB 的设计和功耗。测试还可以使工程师深入了解被测对象，增强被测件的总体性能。

图 5-1 显示了在设计过程中模拟真实环境的有效方法。表 5-1 中汇总了该方案的组成部分。在图 5-1 所示的配置中，Keysight E3631A 直流电源用于模拟被测电路中的电压源。Keysight 81160A 任意波形噪声发生器用于模拟信号失真。电源和噪声发生器的输出通过电感和电容器所构成的网络合并。电感 L 可以防止信号的射频分量进入直流电源。电容器 C 可以避免信号发生器 (81160A) 直流负载效应。这个网络在技术资料中经常被称为偏置 T 形接头，因为它的形状为 T 形，并可以提供“直流偏置”。

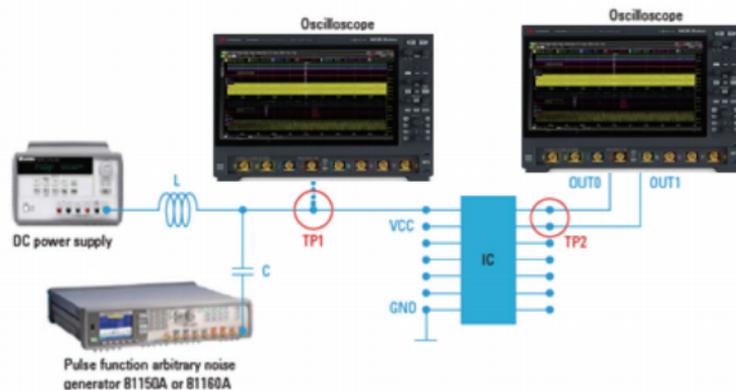


图 5-1：模拟真实条件的测试装置

### 是德科技解决方案

直流电源	E3631A 80W 三路输出电源, 6 V, 5 A, 以及 $\pm 25$ V, 1 A 或类似型号
发生器	81160A 或 81150A 脉冲函数任意波形噪声发生器
示波器	MXR/ EXR 系列示波器

1. 81150A 的噪声码型重复速率为 26 天。

表 5-1

## 实现深入分析

Keysight MXR/EXR 系列示波器的一个主要特性是它能够校准测试配置。换句话说，示波器能够确认向被测器件 (DUT) 的输入端，是否施加了正确的直流电压和失真。(参见图 5-1 中测试点 (TP1) 处的连接。)

在图 5-1 中的测试点 (TP2) 上,使用同一台 MXR 系列示波器来分析集成电路芯片输出信号 (图中画了两台示波器,但你可以只用一台示波器)。一旦 81160A 添加的失真变得太大而无法补偿时,集成电路芯片将产生物理层错误或协议层错误。这两类错误可以用示波器检测和分析。

为了仿真真实条件下的功率失真,81160A 能够生成上升时间 / 下降时间仅为 1 ns 的快速脉冲、随机噪声和各种任意波形。该发生器的另一个关键特性是能够内部合并不同类型的信号,因此可以同时叠加电源分布网络中的高斯白噪声和间歇性毛刺。这种通道叠加 (Channel Add) 功能不仅能够灵活地生成复杂波形,而且避免了外部接线的麻烦。可选择的噪声发生器波峰因数,以及可以在  $20^1$  天内不重复噪声码型的功能,确保噪声接近于随机噪声,而不是确定性噪声 (这些功能是其它同类仪器无法提供的)。图 5-2 显示了通道叠加和噪声产生功能的示例。在此例中,81160A 在通道 1 生成高斯白噪声,在通道 2 生成高斯脉冲,然后在内部合并这两种信号,再与电源的直流信号叠加,得到黄色轨迹。这是在时域中测得的结果。图 5-2 所示的绿色轨迹是 FFT 频谱分析结果。利用这个功能,工程师可以深入分析被测器件的输出性能。

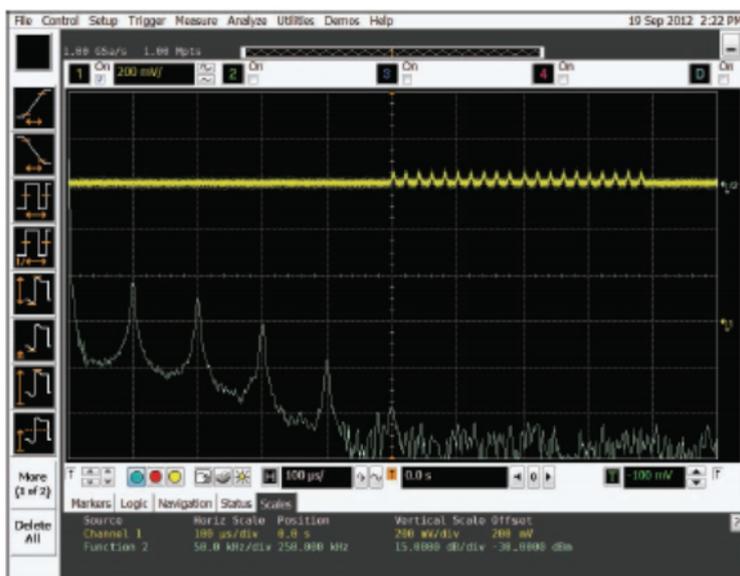


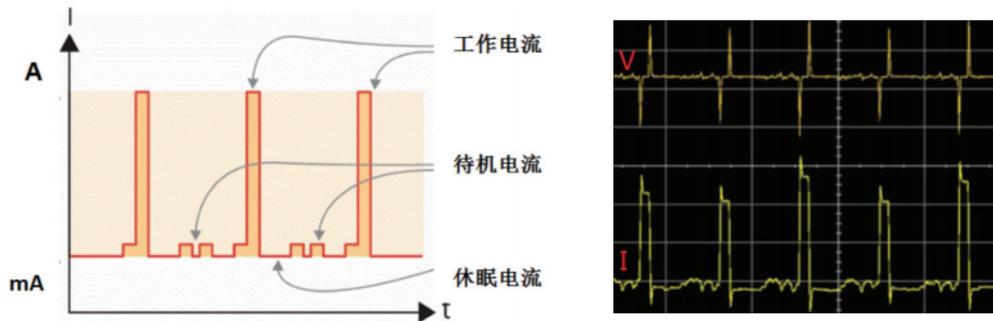
图 5-2：81160A 的通道叠加功能在时域 (黄色) 和 频域 (绿色) 下生成的压力信号示例

## 结论

工程师在开发新的电子器件时会遇到许多挑战。印刷电路板上的集成电路芯片密度日益提高,因此评测直流电源性能以及电源分布网络 (PDN) 对设计中其他元器件的影响也变得越来越重要。要正确评测设计,工程师需要使用能够模拟真实条件的测试配置。当工程师分析自己的设计时,测试方案各组件可以发挥重要作用,帮助他们最大限度减少失真并提高电源和信号的完整性。

# 第六章 电源完整性测试之直流瞬态电压及纹波噪声模拟

如下图所示，智能手机或笔记本电脑在待机或休眠状态时，通常电流较小（mA 级别），但处于工作状态下，消耗电流会瞬间提升至安培（A）级别。这种高达上千倍的电流动态会通常会导致供电电压出现明显的毛刺（幅度高达数十甚至数百 mV），造成处理器、存储芯片等 IC 无法正常工作。



如何对电源在上述动态电流的条件下输出电压瞬态特性，或者芯片设计时进行 IC 对上述供电电压瞬态的变化时的稳定性进行验证？

## 动态负载模拟验证电源的瞬态特性：

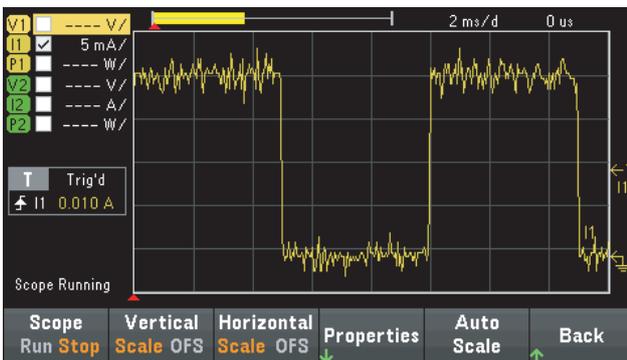
瞬态响应是衡量电源输出稳定性的重要指标，通常由负载电流的快速变化引起，测试中可以用电子负载模拟负载电流的快速变化，电子负载的拉载电流斜率（A/us）、最低工作电压、波形编辑的特性决定瞬态响应测试的准确性。

EL30000A 直流电子负载不仅具备了 CC，CV，CR 和 CP 模式，它还配备了高端分析仪的功能。

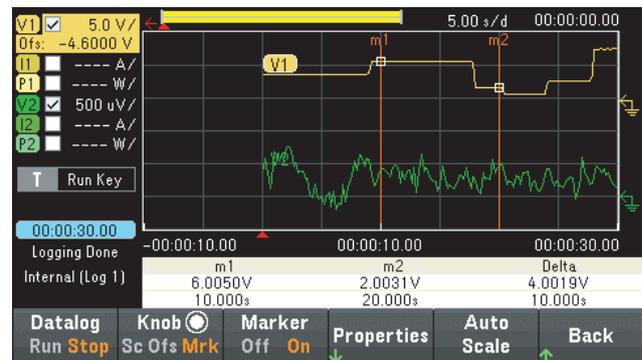


可在前面板可轻松实现图形化波形编辑，搭配自带的示波器功能 (Scope)，记录仪功能 (DataLog) 可对测试波形进行监测，其功率在 350W-600W 能快速实现电流动态变化验证瞬态响应。

### Scope view function



### Data logger function



EL30000 电子负载基本参数：

型号	EL34143A			
功率	350W			
电压范围	0-150V			
电流范围	0-60A			
保护响应时间	<5uS			
15V量程电压精度	0.02%+3mV			
150V高量程电压精度	0.02%+15mV			
信号带宽	30KHz			
CC 模式参数	精度	分辨率	斜率	满量程@电压
低量程 0.6A	0.04%+130uA	15uA	40KA/s	0.15V
中量程 6A	0.04%+2mA	100uA	400KA/s	0.15V
高量程 60A	0.04%+12mA	1mA	4.8MA/s	1.5V

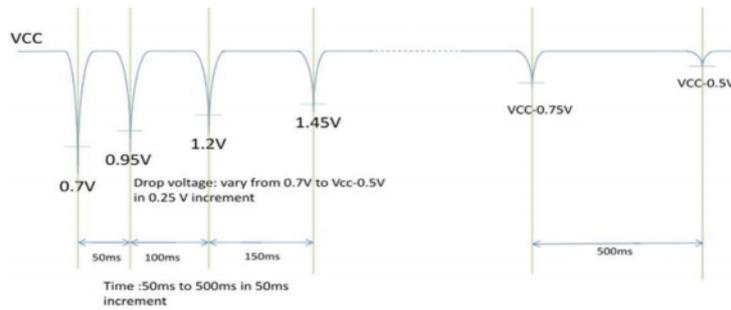
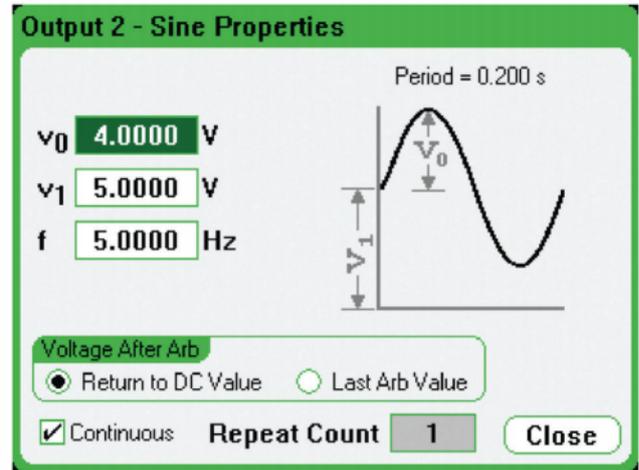
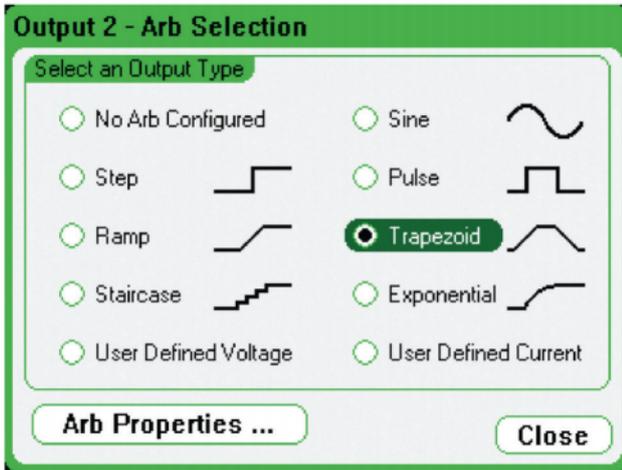
N6705C 直流电源分析仪是一款多功能仪表，内置示波器 (200KSa/s)，数据记录仪 (50KSa/s)，任意波形发生器，搭配 N678x(SMU) 源表模块或者 N679xA 电子负载模块也可以用于模拟幅度从 uA 级至 A 级的大动态负载电流变化。N6705C 一体化机箱的设计和多功能性可以减小测试连接的复杂性，并实现对测试结果分析和记录。



N6781xA (SMU)  
N6791xA (E-Load)

## 模拟瞬态变化的供电电压验证 IC 稳定性：

在设计阶段异常波形造成的问题往往需要修改设计后再次进行验证，因此复现和重复异常波形对设计至关重要。N6705C 直流电源分析仪 ( 可选择搭配 BV9200 APS 程控和分析软件 ) 可实现常见标准波形、波形拼接序列、数学公式，波形文件导入等多种方式，支持任意波形的电压或电流波形模拟。不仅用于模拟幅度从 uA 级至 A 级的大动态负载电流波形，也可以模拟产生 us 至 s 级的脉冲瞬态电压波形，并且支持高速，高精度的电压及电流实时波形的测量，用于精确评估 PMU, PMIC, LDO 电源的瞬态性能和瞬态波形模拟，测试电路或 IC 在电压瞬态时的可靠性。



## 典型配置

型号	描述
N6705C	直流电源分析仪主机，支持任意波形，示波器，数据记录仪，电压、电流表等功能
N6781A	20V, ±1A 或 6V, ±3A SMU 模块
N6782A	20V, ±1A 或 6V, ±3A SMU 模块
N6784A	±20V, ±1A 或 ±6V, ±3A SMU 模块
N6785A	20V, ±4A 或 6V, ±8A SMU 模块
N6786A	20V, ±4A 或 6V, ±8A SMU 模块
N6761A	50V, 1.5A 精密模块
N6762A	50V, 3A 精密模块
N6791A	60V, 20A 电子负载模块
N6792A	60V, 40A 电子负载模块
BV9200B	PC 端直流电源分析及控制软件

电源性能测试除了瞬态响应外，效率测试也是衡量电源好坏的另外一个重要指标，它包含在不同输入电压与不同负载条件下的组合测试，往往仪器连接和数据的处理需要花费大量时间。BenchVue / Test Flow 软件平台，无需任何代码编程经验，就能快速、灵活地拖拽出自己的程序，从而实现自动化测试，可大幅提升工作效率。



## 参考资料：

1. Accuracy Improvements of PDN Impedance Measurements in the Low to Middle Frequency Range. DesignCon 2010. 2010.
2. Keysight E5061B 网络分析仪技术资料。
3. 《高速数字接口原理与测试指南》清华大学出版社，作者 李凯 (是德科技资深技术专家)
4. 《现代示波器高级应用：测试及使用技巧》清华大学出版社，作者 李凯 (是德科技资深技术专家)
5. 《高速数字接口与光电测试》清华大学出版社，作者 李凯 (是德科技资深技术专家)
6. 《ADS 高速电路信号完整性应用实例》中国工信出版集团，作者 蒋修国 (是德科技资深技术专家)

如欲了解更多信息，请访问：[www.keysight.com](http://www.keysight.com)

如需了解关于是德科技产品、应用和服务的更多信息，请与是德科技联系。

如欲获得完整的产品列表，请访问：[www.keysight.com/find/contactus](http://www.keysight.com/find/contactus)



本文中的信息可不经通知而更改。© Keysight Technologies, 2023, Published in USA, January 3, 2023