

# 是德科技电源完整性测试解决方案

## 一、背景介绍：

电子产品都离不开电源，而电源部件也是大多数电子产品故障的最主要原因。高速数字电路电源完整性精确测量一直是个难题，以前大部分研发单位和公司并不进行这些电源完整性参数的测量。但是，随着数字信号速率的不断提升，特别是提升到 10Gbps 以上数量级后，电源完整性的测量成为关键测试项目之一，另外芯片和 CPU 的供电电平也越来越小，使得它对电平的变化更加敏感。

对于高速数字电路和系统，电源完整性 (PI) 的研究对象是电源分配网络 PDN (Power Distribution Network)。如 Intel 公司致力于高性能、低功耗集成电路芯片 (CPU、ASIC、SoC) 的设计，其封装均为 BGA 封装，管脚数多大 1150 个，集成了 DDR4、PCIe3 等高速通信接口，对电源完整性测试有较高要求。其 AC 到 DC 电源适配器供给主板一个约 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：±5V, +1.5V, +1.8V, +1.2V 等)，给 CPU 供电，给各个芯片供电。CPU 和 IC 用电量很大，而且是动态耗电的，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，这都对 PDN 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，传统的方案有很多局限性，我们希望随着 Keysight 的优异方案的普及，电脑蓝屏和其它电源完整性现象逐渐减少。

## 二、电源完整性时域分析----电压纹波和噪声测试

输出电压纹波是指叠加在直流电压上的交流成分，是电源测试中的一个很重要的指标。开关电源的电压纹波一般由开关电压经电感电容滤波后产生 (由开关频率，输入输出电压，拓扑结构，电感，电容决定)，同时还受工频电压整流，干扰，负载波动等的影响。电压纹波做为一个输出电压指标，要满足后端元器件或设备使用要求。如果测试结果不满足要求，一般需要增加滤波器件或者改变设计，造成项目成本的增加或交期延长。注意事项如下：

- (1) 尽量使用示波器最灵敏的量程档，以降低示波器本底噪声
- (2) 尽量使用 AC 耦合
- (3) 尽量使用小衰减比探头 (1:1)：N7020A, N2820A, N2870A；
- (4) 尽量使用探头的短底线，构成的环路面积尽可能小
- (5) 尽量使用差分探头
- (6) 根据需要使用带宽限制
- (7) 尽量使用低噪声、分辨率高的示波器，如 10 位的 S 系列示波器 DSOS204A，见图 1

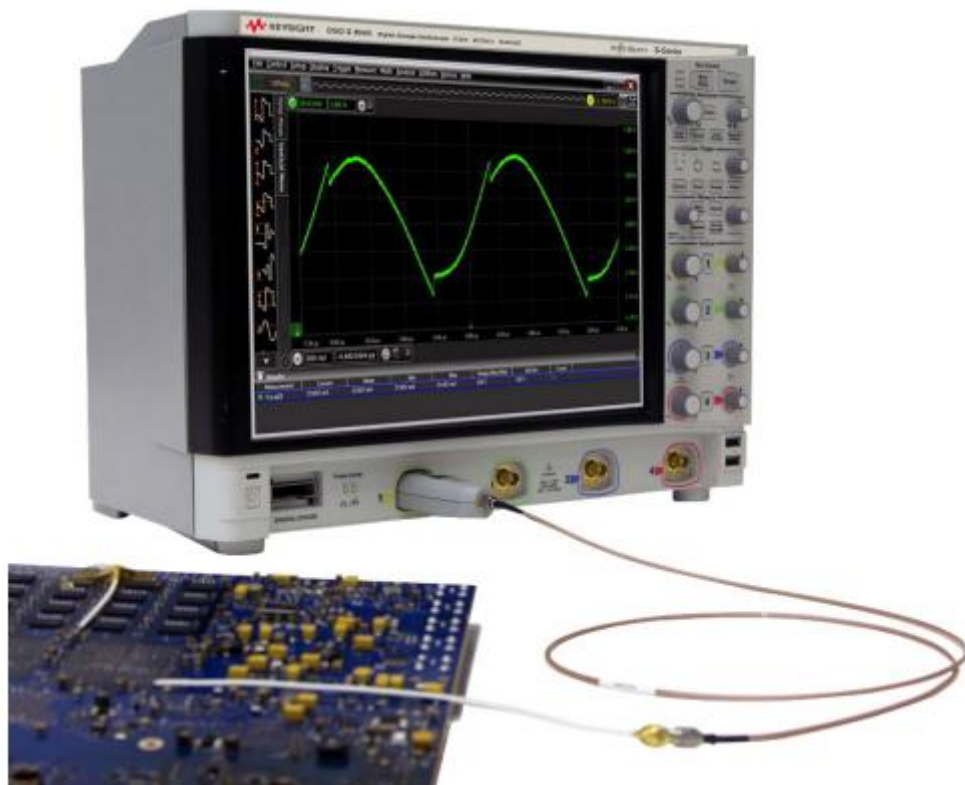


Figure 1 10 位分辨率高清晰度示波器 DSOS204A 与 N7020A 电源完整性探头测开关电源纹波噪声

根据以上推荐，是德科技推出了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。否则示波器的噪声也会被放大。目前 **N7020A 2GHz 1:1 单端有源探头（见图 1）**，N2820A 500kHz~3MHz 3uV 最小可测信号探头，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  $3\mu\text{V}\sim 1.2\text{V}$ ，电流测量范围为  $500\text{nA}\sim 5\text{A}$ ，但带宽仅为  $500\text{kHz}\sim 3\text{MHz}$ 。

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。

### 三、电源完整性频域分析--→E5061B-3L5

电源完整性的测量对象是电源分配网络 PDN。主要测量内容包括四部分：

- 纹波和噪声的测量；
- 输出阻抗的测量；
- 环路增益的测量；
- 滤波器件（电容/磁珠等）性能参数的测量。

除了纹波和噪声的测量用示波器，剩下三点可用 Keysight 台式网络分析仪 E5061B-3L5。

北京东方中科集成科技股份有限公司

地址：北京市海淀区阜成路 67 号银都大厦 12、14、15 层

电话：010-68715566

传真：010-68728001

邮编：100142

服务咨询热线：400-650-5566

网址：<http://www.jicheng.net.cn>

## 1、输出阻抗测量:

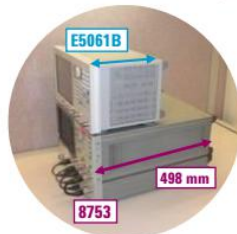
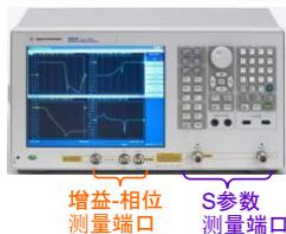
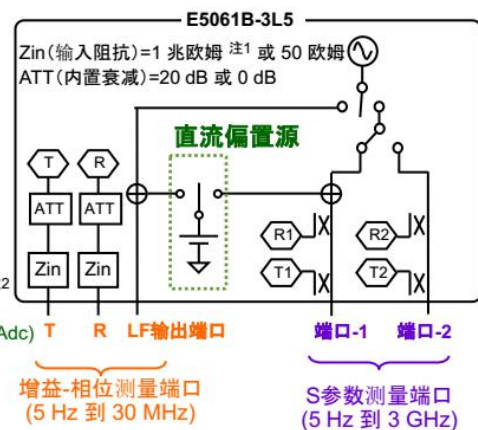
用网络分析仪测试毫欧级 (Very low impedance in the high frequency range) 的输出阻抗, 不能简单的用一端口测试方法, 因为阻抗太小, 反射太大。这时比较好的方法是用双端口测试方法 (Port1-2Shunt), 如图 2 所示。测试时用  $S_{21}$  代替  $S_{11}$ 。该公式为  $Z_{dut} = 50 \times S_{21} / (2 \times (1 - S_{21}))$ 。假设探测试电缆电感约为 0,  $Z(DUT)$  远小于  $Z_0$  (VNA 端口阻抗), PDN 输出阻抗的计算公式如下:  $Z(DUT) = Z_{11} = S_{21} \times 25(\text{ohm})$ 。针对这种的特殊测量要求, 是德科技矢量网络分析仪 E5061B 的选件 3L5 可完成测试。



Figure2 用双端口方法测试 PDN 输出阻抗

E5061B 低频——射频网络分析仪的选件 **3L5** 可以在从 5Hz 至 3GHz 的频率范围内提供常用的网络测量和分析功能。功能全面的低频网络测量能力 (包括内置的 1MΩ 输入) 都被完美地集成到这个高性能的射频网络分析仪之中。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。其产品结构框图如图 3 所示。

- 测量频率范围从 5 Hz 到 3 GHz
- S 参数测量端口 (5 Hz 到 3 GHz, 50 欧姆)
- 增益—相位测量端口  
(5 Hz 到 30 MHz, 端口输入阻抗 ( $Z_{in}$ ) 可以设置为 1 兆欧姆 注1 或 50 欧姆, 可根据测量需要进行切换)
- 从低频到射频都有很高的测量动态范围  
(100 Hz 以下为 90 dB, 100 Hz 到 10 kHz 为 100 dB, 1 MHz 以上为 120 dB) 注2
- 内置直流偏置源 (电压范围: 0 到 +40 Vdc, 最大偏流 100 mAdc)
- 其它更多便于测量应用的特性



注 1: 并联电容值  $C_{in}$  约为 30 pF.  
注 2: 指的是 S 参数测量端口上的动态范围

Figure3 E5061B-3L5 LF-RF 矢量网络分析仪概述

## 2、环路增益的测量

北京东方中科集成科技股份有限公司

地址: 北京市海淀区阜成路 67 号银都大厦 12、14、15 层

电话: 010-68715566

传真: 010-68728001

邮编: 100142

服务咨询热线: 400-650-5566

网址: <http://www.jicheng.net.cn>

常见的稳定性测试主要有增益裕量、相位裕量、及延时裕量。E5061B-3L5 增益相位测试端口可以在从 5Hz 到 30MHz 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  $1M\Omega$  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。其环路增益的测试框图见图 4。网络分析仪在一定带宽范围内扫描，在 LF 输出口产生激励信号，用 Picotest 公司的注入变压器 J2100A（见图 5），注入环路的电压比 T/R，提供幅值和相位信息，结果显示为伯德图。这里 T、R 端口可用 10x 的示波器探头来探测增益和相位。

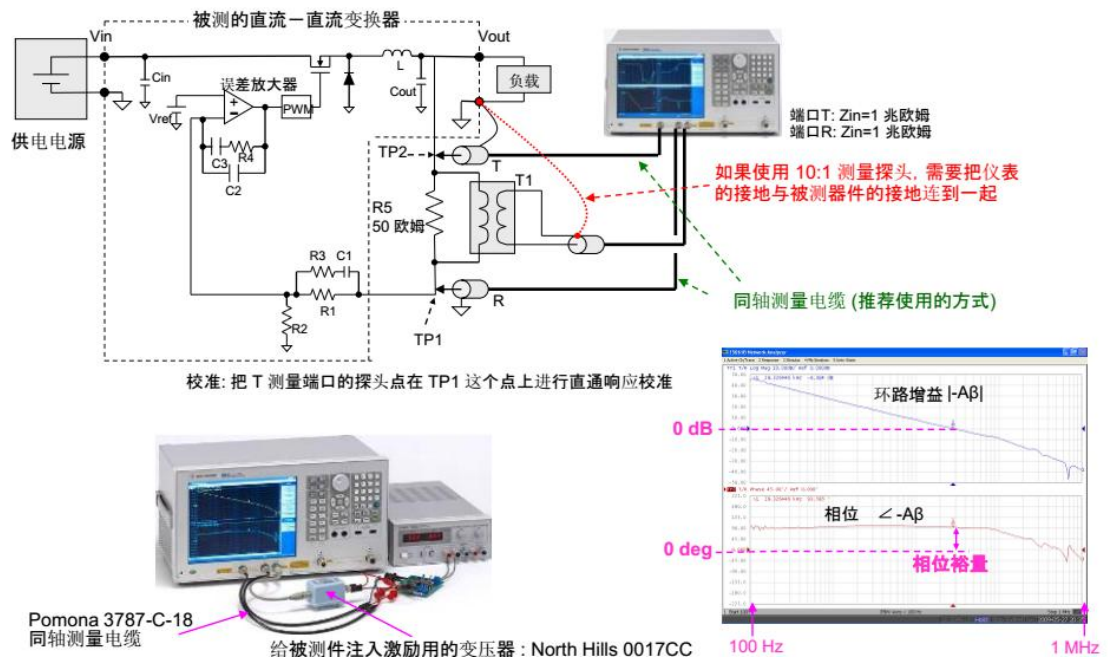


Figure4 直流-直流变换器环路增益的测量



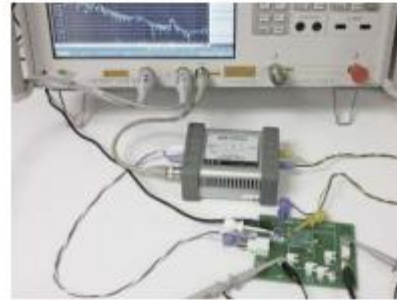
Picotest J2100A Injection Transformer



Picotest J2120A Line Injector



Picotest J2111A Current Injector



Picotest J2120A Line Injector  
(Banana-to-test clip leads connected to its banana jacks)



North Hills Signal Processing 0017CC



Pomona 3787-C-18 test lead (connected to gain-phase receiver ports)  
Pomona 2885 BNC breakout (connected to 0017CC)

Figure5 icotest 注入设备

### 3、滤波器件（电容/磁珠等）性能参数的测量

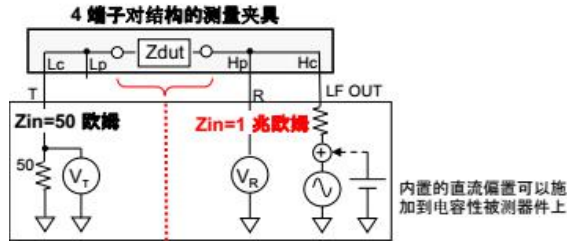
2MHz 以下可用 LCR 表 E4980A 来测；30MHz 以下，可考虑是德科技 E5061B-3L5 加 005 选件，加上 16047E 夹具来测，如下图 6 所示；5Hz~3GHz 的器件参数，可配合 16201A（N 转 7mm+16192A+16195A）用反射测量法来测，见图 7。

### 测量频率低于 30 MHz 的测量应用

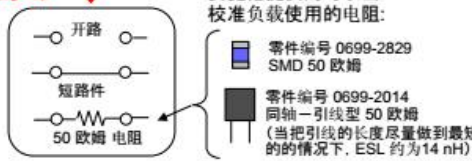
- 测量阻抗值适中的器件的输出阻抗( $Z_{out}$  的范围从1 欧姆到100 千欧姆以上)
- 需要在测量夹具端连接开路/短路/负载件进行校准  
(→ 实现 1 端口完全校准, 在T/R端口实现从 S11 测量结果到 阻抗测量结果的转换)



16047E 4TP 夹具



#### 校准步骤



(→ 可以使用以下的负载定义来设置 ESL 为 14 nH 的负载:  
偏置  $Z_0=50$  欧姆, 偏置延迟=14 nH / 500 欧姆 = 28 皮秒)

#### 对 1 nF 电容的测量

测量频率范围从 100 Hz 到 30 MHz  
激励源电平为 7 dBm, IFBW 设为自动模式, 且上限为 20 Hz  
使用公式编辑器功能得到阻抗参数随频率变化的曲线  
(公式编辑器计算从 S11 到 阻抗值的转换)



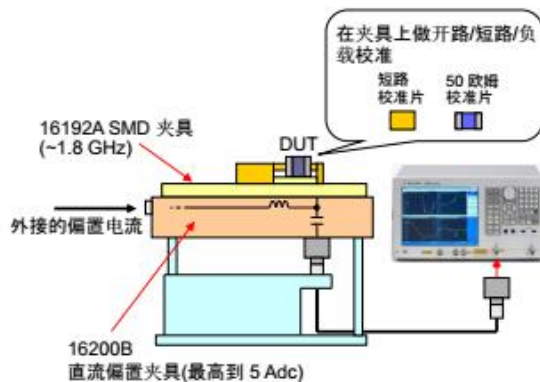
使用 VBA 程序可以让公式编辑器的设置非常容易进行

Figure6 用增益—相位测量端口, 采用串联一直通法测量阻抗

- 进行阻抗值为中等量的测量 (阻抗在 0.1 欧姆到 1 千欧姆)
- 需要进行开路/短路/负载校准  
(注意:在校准之后不要激励源的输出电平)



### 直流电流偏置的测量配置方法



#### 铁氧体珠的阻抗测量结果

测量频率从 1 MHz 到 1 GHz, 直流偏置为 0 到 2 A dc  
阻抗的测量结果通过换算得到

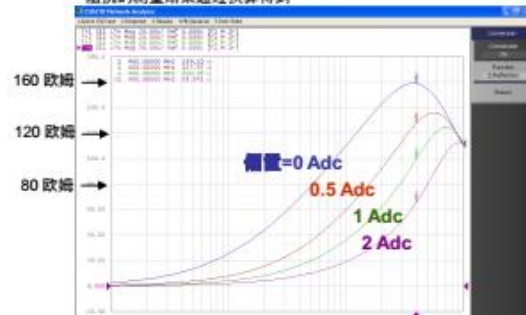


Figure7 反射测量法

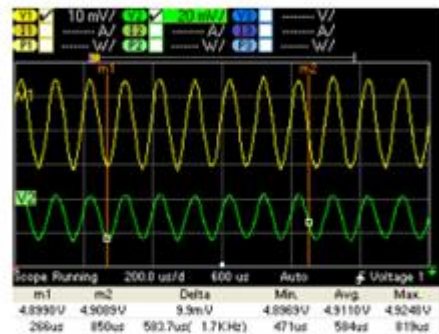
## 四、直流源激励部分

是德科技推荐 N6705C 主机+N6762A 模块 (做为源)+N6781A 模块 (作为负载) 来搭建 PSRR 电源芯片的测试系统, 见图 8。若输出功率大, 也可考虑用 N7900 做负载。

## 搭建电源芯片的纹波抑制比



## 测量输入输出纹波抑制比



在源端注入特定幅度频率的纹波噪声, 同时在输出端测量纹波的幅度值, 并计算纹波抑制比

Figure8 PSRR 电源芯片的测试系统

## 五、Keysight 电源完整性测试方案总结:

- 示波器部分: 精确电源纹波、噪声
  - DSOS204A 10 位分辨率、高清晰度示波器: 2 GHz, 4 个模拟通道
  - 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: 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: N8833B-1FP 串扰分析软件
- 网络分析仪部分: 测输出阻抗和环路增益
  - E5061B-3L5(选件 005, 3L5)网络分析仪
  - 1250-1250(x2), 15442A
  - 85033E
  - 11667L
  - 8120-1840(x4)
  - 16201A(Opt001), 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
  - N6705C 直流电源分析仪+N6762A 模块+N6781ASMU 模块