UNI-T

高级电源分析解决方案

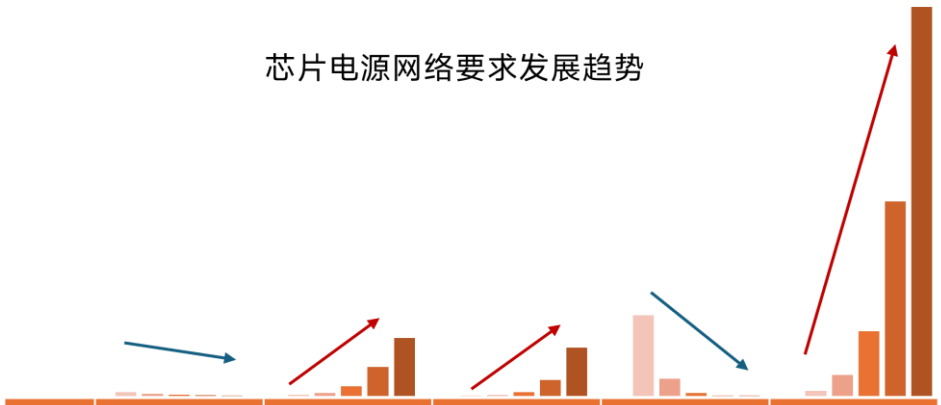
Advanced Power Analysis Solution



简介

现代电源设计需要更低的工作电压、更高的功率、更大的电流、更高的工作频率。这些严苛的要求，给电源设计带来诸多的挑战。甚至随着高速信号的发展，电源质量也成为影响信号质量的一个重要因素，所以在电源系统中对电源完整性进行分析也势在必行。

芯片电源网络要求发展趋势



Year	Voltage/V	Power/W	Current/A	Z_{target}/mΩ	Frequency /MHz
1990	5.0	5	1	250	16
1993	3.3	10	3	54	66
1996	2.5	30	12	10	200
1999	1.8	90	50	1.8	600
2002	1.2	180	150	0.4	1200

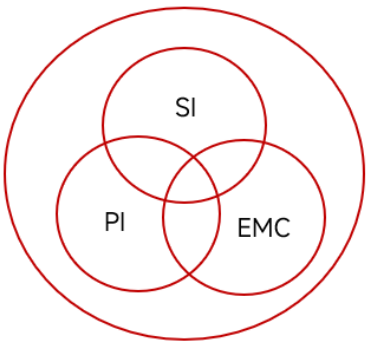
电源完整性（Power Integrity，PI），指通过合理的电源平面和滤波设计，控制纹波、压降和瞬态响应，维持电源分配网络（PDN）低阻抗，为负载提供稳定的电源。过去曾被视为信号完整性的一部分，主要关注电源噪声对信号质量的影响。

随着多核处理器、GPU 等高性能芯片的普及，电路的运行状态越来越复杂，电源完整性也正式从信号完整性中分离出来，成为独立的专题，专注于 PDN 的设计与验证。如今，在高速数字电路设计领域，已经形成了三大重点指标：

电源完整性 PI：电源供给质量-确保各部分电路和芯片的可靠供电和噪声抑制；

信号完整性 SI：信号供给质量-确保信号在数字电路各芯片之间信号的准确传递；

电磁兼容 EMC：干扰/抗干扰能力-确保设备具备足够抗扰度(EMS)和不对外发射过量电磁干扰(EMI)。



这三大指标是现代高速电子系统设计中三大关键验证环节，三者相互关联，共同决定产品的性能、稳定性。

其中，电源完整性相关问题的分析，是高速数字电路设计的第一步。

电源完整性测试

在电源分析测试中，工程师使用示波器测量电路中的电流和电压信号，频谱分析仪测试频域干扰，网络分析仪进行 PDN 阻抗分析。这些硬件设备可以帮助工程师查找电路中的问题，为优化设计、故障分析提供数据支撑。除了硬件设备，自动化地测试软件对于电源分析的重要性也不可忽略。它帮助工程师快速地分析参数结果，减少测试中地人为误差。

常见的电源完整性测试项目：

测试项目	定义	测试需求
信号质量相关	电路中各种电参数的质量，包括幅值，相位，频率，有效值，相角，阻抗，波峰因数，谐波等。	示波器、电压探头、电流探头
纹波和噪声	纹波：信号中的周期性抖扰动 噪声：随机耦合到信号中的高频成分	示波器、电源轨探头
动态响应能力	电路在动态变化时，如上/下电，负载突变等情况下电参数的变化情况。	示波器、电压探头、电流探头
频率响应分析	电路在不同频率信号输入下的响应情况，包括波特图和电源抑制比分析。	示波器、频谱分析仪，信号源、隔离变压器、线性注入器

高级电源分析解决方案

优利德高级电源分析解决方案，提供支持电源分析的高带宽示波器，可测量 14+种电路参数的电源分析选件，与频率响应分析相关的 AWG/波特图选件，覆盖全面的探头和测试配件，助您系统地/迅速地分析电源相关参数。



示波器



电源分析选件PWR

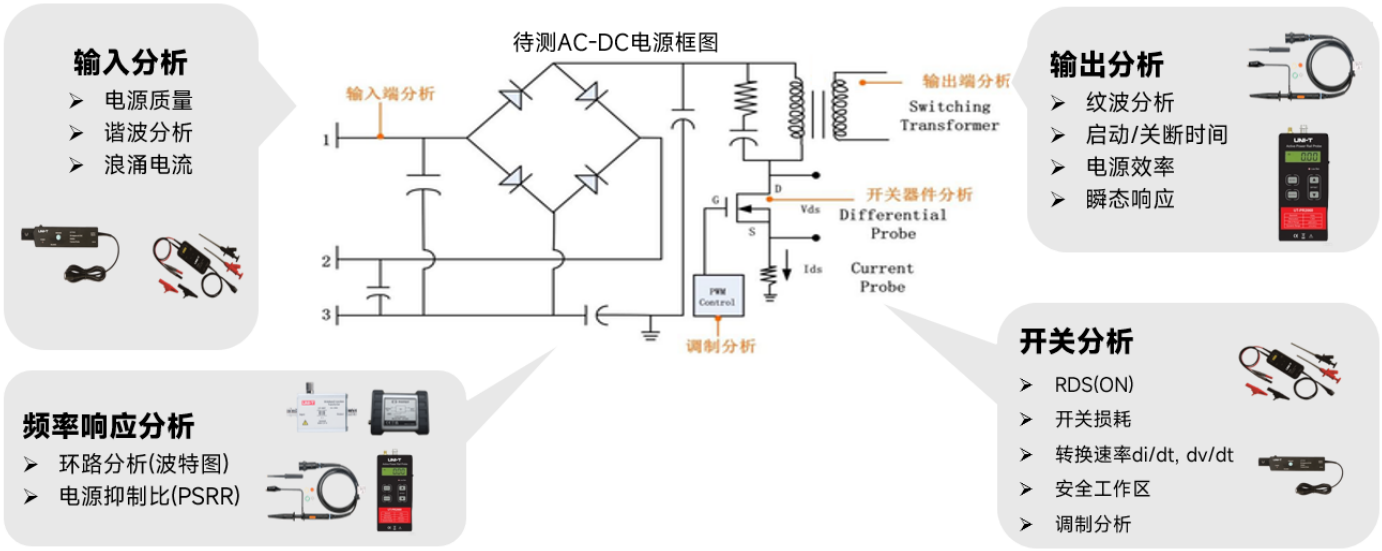


全面的探头及测试配件

- 性能优越的 MSO6000HDP 系列示波器，12 位 ADC 平台，2GHz 带宽、10GSa/s 采样率、1Gpts 存储深度确保测试信号准确无遗漏。集成 AWG，波特图等功能选件让你只需使用一台设备即可进行多项测试。
- 功能完备地自动化电源分析选件 PWR，选件提供了直观的用户界面，可修改的判定参数配置，自动化地参数计算等功能，大大地增加了电源分析测试的便捷性和准确度，减小测试的人为误差。
- 覆盖全面的探头和测试配件，包含 UT-PR2060 电源轨探头，1.25X 衰减比，1GHz 带宽，精准测试噪声和纹波；高压差分探头；电流探头；隔离变压器等。

电源分析测量项

本文以 AC-DC 开关电源为待测设备，使用 MSO6204HDP 示波器进行解决方案演示。



输入分析

- **电源质量**测量输入端的电压/电流/功率/相位等参数，评估输入电源质量。
- **谐波分析**测量输入电源的谐波值、状态、总谐波失真等参数。
- **浪涌电流**测量接通电气设备电源瞬间，电源输入端流过的峰值电流。

开关分析

- **开关损耗**测量功率器件在开/关阶段和传导阶段的功率和能量损失。
- **安全工作区**提供了可以量身定制的安全作业区模板测试功能，并输出测试结果图。
- **转换速率（dv/dt 和 di/dt)**测量开/关期间电压或电流的变化速率。
- **动态导通电阻 RDS(ON)**测量开关器件导通时的动态电阻值。

输出分析

- **纹波分析**测量工频纹波、开关纹波以及周围信号产生的交流信号信息。
- **调制分析**测量开关器件控制环路调制波。
- **电源效率**测量计算电源的整体效率。
- **启动分析**测量输出电源重新达到其稳定状态输出 90% 的时间。

  关断分析测量输出电源降至其稳定状态输出电压 10% 的时间。
- **瞬态响应：**瞬变响应分析可确定电源的输出电压应对输出负载变化的响应速度。

频率响应分析

- **环路分析（波特图）**通过绘制增益、相位曲线并读取交越频率与裕量，量化开关电源控制环路的稳态精度与瞬态稳定能力。
- **电源抑制比（PSRR)**测试用于确定电路在不同频率范围下的波纹噪声的抑制情况。

输入分析

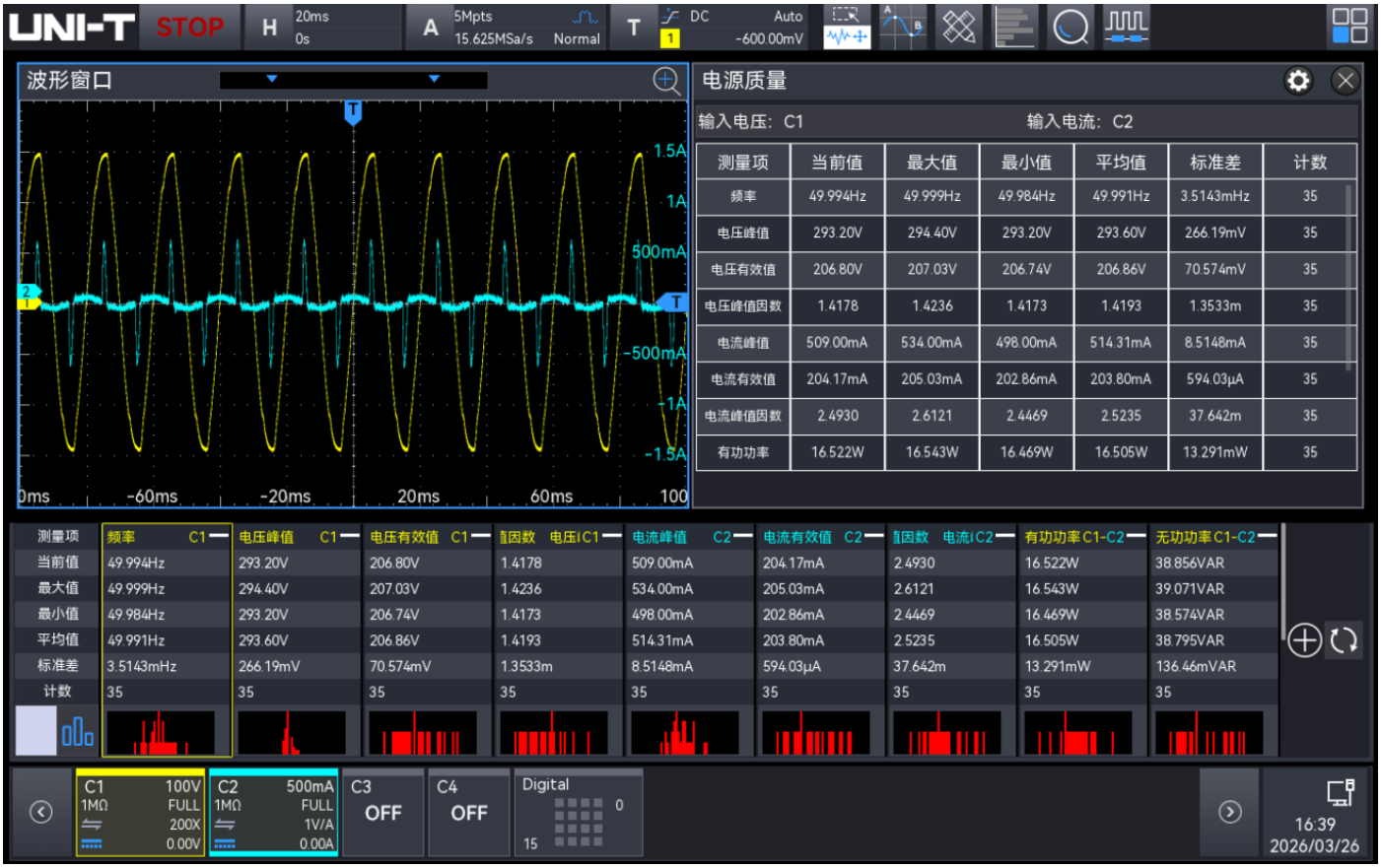
输入端分析用于验证电源的源头是否干净、合规，分析电源系统对工频网络的影响，是所有性能、故障分析的起点。输入端测试包含电源质量分析，谐波分析，浪涌电流分析。输入端分析几乎全部集中在 AC 电源上，需要使用高压差分探头和电流探头。



电源质量

输入端电源质量分析可以评估交流输入的质量，通过对电源输入端功率、相位角、阻抗、波峰因数等参数的计算可反映输入端的电能的消耗的状况，为工程师评估输入的功率及失真水平提供数据支撑。

测试项目：电压/电流：峰值、有效值、波峰因素、频率。功率：有功/视在/无功功率、功率因素以及相角等。



电源质量分析提供多种形式的结果展示，包括波形图（左），参数测量（下），表格（右）

谐波分析

电流流过非线性负载(UPS、开关电源、整流器、变频器、逆变器)后基波电流会发生畸变形成非正弦电流，产生谐波。这些谐波在电路中，会影响与电源线相连的其他设备的运行，造成设备损坏，更会对 AC 电网造成污染。



谐波分析功能帮助工程师分析电源的谐波水平，测试时可设置不同判定标准（IEC61000-3-2 A/B/C/D 等四种标准），您可根据产品所属的行业标准，选择对应的规范。每次测试过程会对电流波形进行 FFT 测量，并在 IRMS 中基于所选规范创建一个直到 40 次谐波的电流测量结果，自动比较得出合格/不合格结果，同时输出各次谐波直方图、结果表。

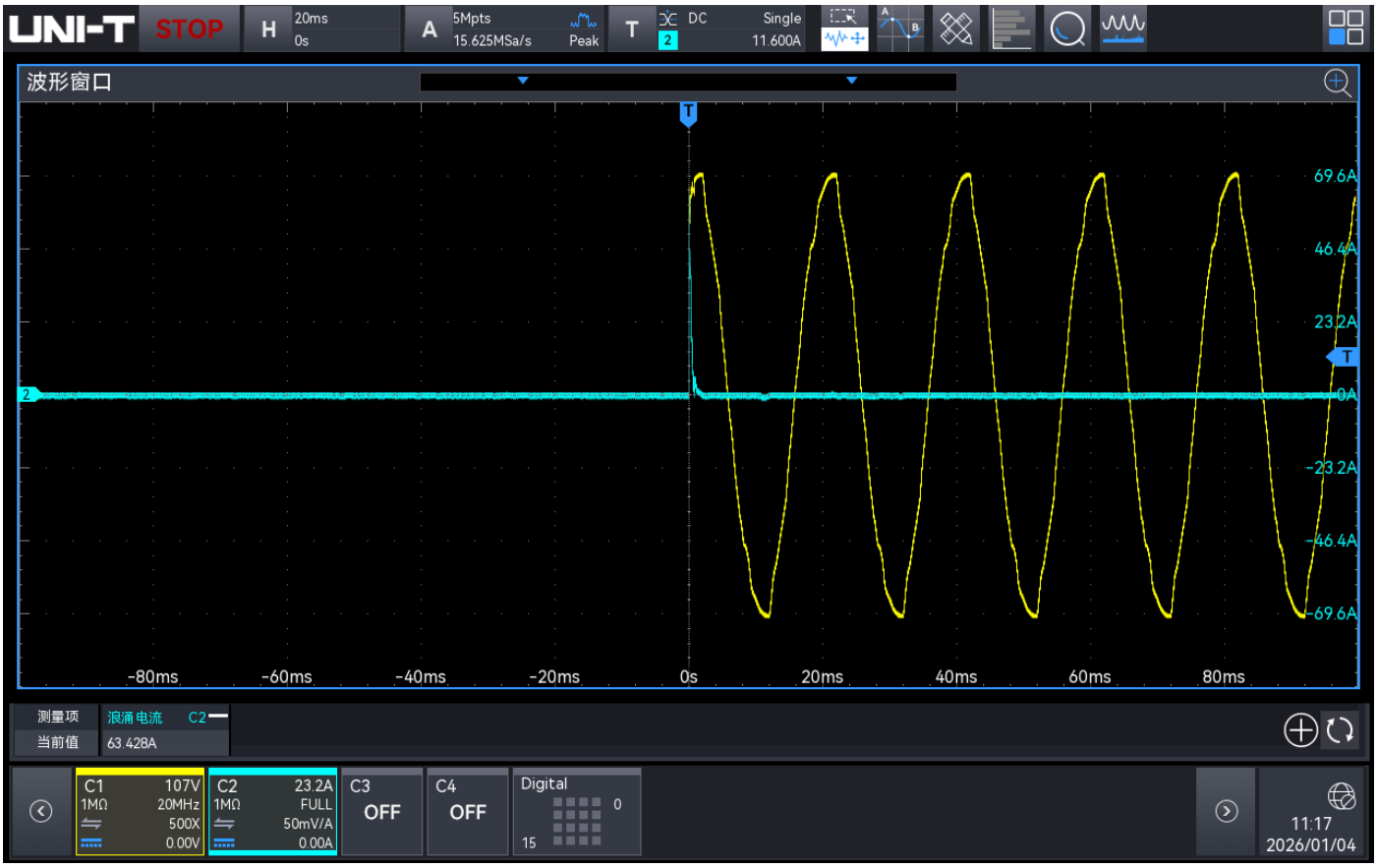


谐波分析提供多种形式的结果展示，包括直方图，通过/失败表格

浪涌电流

电气设备在接通电源瞬间，输入端会产生数倍于正常工作电流幅值的电流，在持续数微秒至数十毫秒的时间后消失。过大的浪涌电流会造成器件过流损坏、断路器误跳闸等危害，严重影响设备的稳定运行。

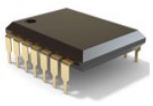
浪涌电流测试功能依托示波器的高采样率，精准抓取启动瞬间的电流波形并计算电流幅值，帮助工程师分析浪涌电流，优化电源设计。



浪涌电流功能抓取启动瞬间的尖峰电流并显示波形和测量结果

开关分析

随着工业控制市场、新能源汽车市场、新能源发电领域的需求增长，开关器件的相关需求和性能要求也在逐渐提高。如小功率应用的 MOSFET，大功率高压应用的 IGBT，以及新能源汽车领域的 SiC/GaN 等器件应用更加广泛。这些开关器件作为核心功率元件，工作在高压、大电流、高速开关状态，重要性极高，失效风险最高。因此必须做专项测试，其可靠性才有保障。




开关分析可帮助工程师快速地获取开关器件参数，包括开关损耗，动态导通电阻，转换速率，安全工作区等；软件支持可修改的判定参数设置，可确保待测设备的测试结果更符合真实的应用场景。

开关损耗

开关器件的导通阶段并不是理想的，在实际应用中会有电流流过，产生功率损耗，这些损耗在电路中会转换为热量，引起周围环境温度升高，造成电源系统过热，严重时会引起炸机等事故。

开关损耗测试功能可帮助工程师评估开关器件的发热水平，优化产品的散热和结构设计。其提供的自定义的电压/电流参考设置可用于灵活识别导通/关闭状态；内置地多重计算方法在不通阶段使用不同的计算公式，让测试结果更接近真实使用场景。

测试项目：开通功率损耗、导通功率损耗、关断功率损耗、非导通功率损耗、功率损耗总计、开通能量损耗、导通能量损耗、关断能量损耗、非导通能量损耗、能量损耗总计、开关周期数等。

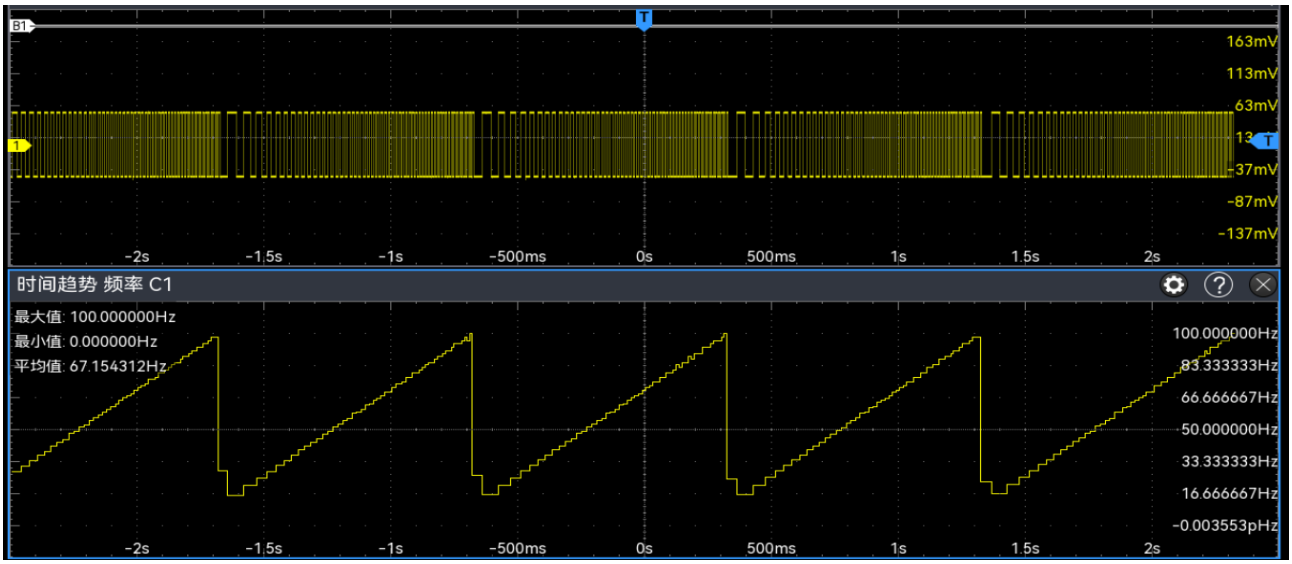


开关损耗分析提供多种形式的结果展示，包括分区展示的电压电流图和功率图，参数测量结果

调制分析

调制分析用于开关器件控制端的测量，通过解析调制波的幅值、频率或占空比畸变等参数，可排查调制波的异常。软件提供了时间趋势图分析让异常数据点一眼可见。

时间趋势图：可设置周期、频率、上升时间和下降时间、脉冲分析、正占空比和负占空比。



上图为扫频信号的频率时间趋势图

转换速率（dv/dt 和 di/dt）

转换速率指标用来衡量开关管传导功率的极限，为工程师优化效率、体积、EMI 的平衡提供了数据支撑。该功能会测量多个导通阶段并进行数学处理，让结果更符合真实值。



转换速率测量以及结果显示

动态导通电阻 RDS(ON)

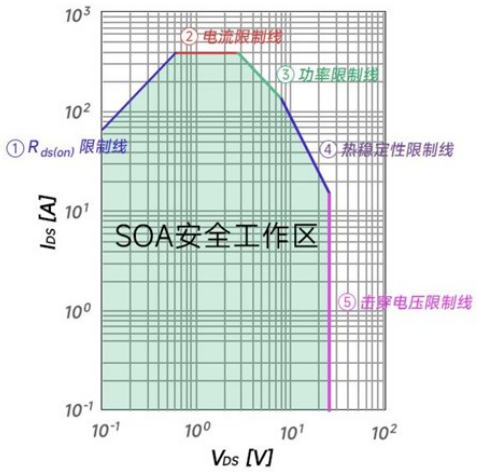
动态导通电阻指标反映了开关器件传导过程中的电阻，是导通时经过器件的电压与电流之比，可以帮助工程师更全面地分析热损耗。该功能会测量多个导通阶段并进行数学处理，让结果更符合真实值。



动态导通电阻测量及结果显示

安全工作区（SOA）

安全工作区（SOA）定义了开关器件的电压、电流和功耗限制条件，在这些条件下，器件可以在无损坏的情况下运行。





软件提供了 SOA 压力模板测试，以测试包括 IGBT，MSOFET，以及新型宽禁带半导体制程的功率芯片。您可以通过设置 SOA 模板边界，保存及导入这些模板来进行压力测试。测试结果提供了可视化地模板测试显示，测试过程中可清晰地查看检测结果，对工程师判断电源工作极限提供了有力地数据支撑。



安全工作区测试提供了直观的模板检测图和测试结果

输出分析

作为直接连接负载的端口，输出端的性能直接关系到负载能否正常工作。在输出端进行的测试有纹波分析，启动/关闭时间分析，瞬态响应分析等。其中，电源纹波是评估输出端质量的重要参数，它反映了电源输出的稳定性和干扰情况。大的纹波可能会导致电源使用效率低、负载系统工作不稳定、加速设备老化等问题。



需要注意的是，示波器和探头会引入噪声，不同于输入端和开关器件的高压测量，输出端负载的工作电压都趋于小电压，此时示波器和探头带来的噪声水平对测试结果的影响就无法忽略。所以，在进行电源输出端测量时，应尽可能减小测试系统的影响。

选择最佳的测量路径：

示波器带宽：

示波器的带宽并不是越高越好，应根据不同测试目标来限制带宽，只保留满足测试需要的带宽，让示波器的噪声降到最低。MSO6000HDP 系列示波器的带宽限制功能可支持 20MHz，全带宽以及数字带宽功能。

示波器垂直刻度：

观察各个厂商提供的底噪数据可以看到，垂直档位越低，示波器系统底噪就越小，因此在测量微小信号，尤其是纹波时应尽量使用最小的垂直档位，降低底噪。

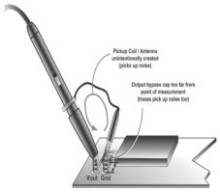
采样率的大小：

高采样率能够减少测试波形的失真，让测试结果更符合真实情况。

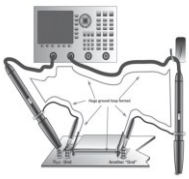
探头接地方法：

当使用普通无源探头时，为避免过多的噪声耦合到纹波测试，探头 GND 与测试点的距离应尽可能短，避免因待测信号的环路过大将 EMI 信号引入测试结果，正确的方法是使用探头针尖点测和短弹簧地针以减小电磁干扰的引入。

错误探头测量法：



长的接地环路

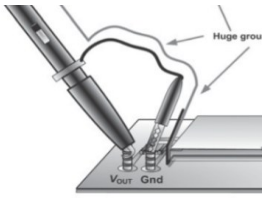


多余探头引入噪声

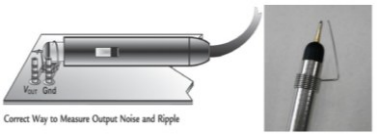


探头倾斜碰到电感

正确探头测量方法：



探头应垂直点测



移除多余探头，使用接地弹簧或纹波帽

使用衰减比小的探头：

$$SNR = \frac{V_{in}}{Attenuation * V_{noise}}$$

SNR：信噪比，指被测信号幅值与测量系统噪声幅值的比值，数值越大，信号越清晰。在电源测量中尽量使用 1:1 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。

C1：1X 衰减比，C2：10X 衰减比。可以看到，10X 衰减比的探头会引入更多的噪声：



上图为无源探头在 1X 和 10X 的衰减比下测得的噪声水平

使用偏置范围大的电源轨探头：

探头偏置是有源探头的一项功能，可以让用户从被测信号中去除直流成分。这一功能在测试电源噪声时尤为重要。这类噪声往往是叠加在直流电压上的微小交流信号，需要使用到示波器的最小档位去进行测试。但常规的示波器和有源探头没有足够的偏置范围去抵消直流分量，导致无法进行有效测量。

推荐使用 UT-PR2060 电源轨探头，1.25X 的衰减比确保引入的噪声极低，±60V 的偏置范围可在极小档位下进行测量，1GHz 的带宽确保不漏掉信号中的高频成分。

型号	UT-PR2060
类型	电源轨探头
带宽	1GHz
本底噪声	<300μVpp(20MHz 带宽 <3mVpp(1GHz 带宽)
衰减比	1.25X
偏置范围	±60V
精度	≤±1%
输入阻抗	56kΩ，（DC-10kHz）50Ω，(AC>100kHz)



纹波分析

纹波分析是评价直流电源的重要参数，表示输出直流电压的交流波动量。工频频率和开关频率都会产生纹波。纹波分析能够准确测量电源输出端纹波的峰峰值，同时，支持用户自行增加参加参数测量，包括当前值、平均值、最小值、最大值、标准差和计数值等，测试结果可选电压/电流作为信源参考进行分析。

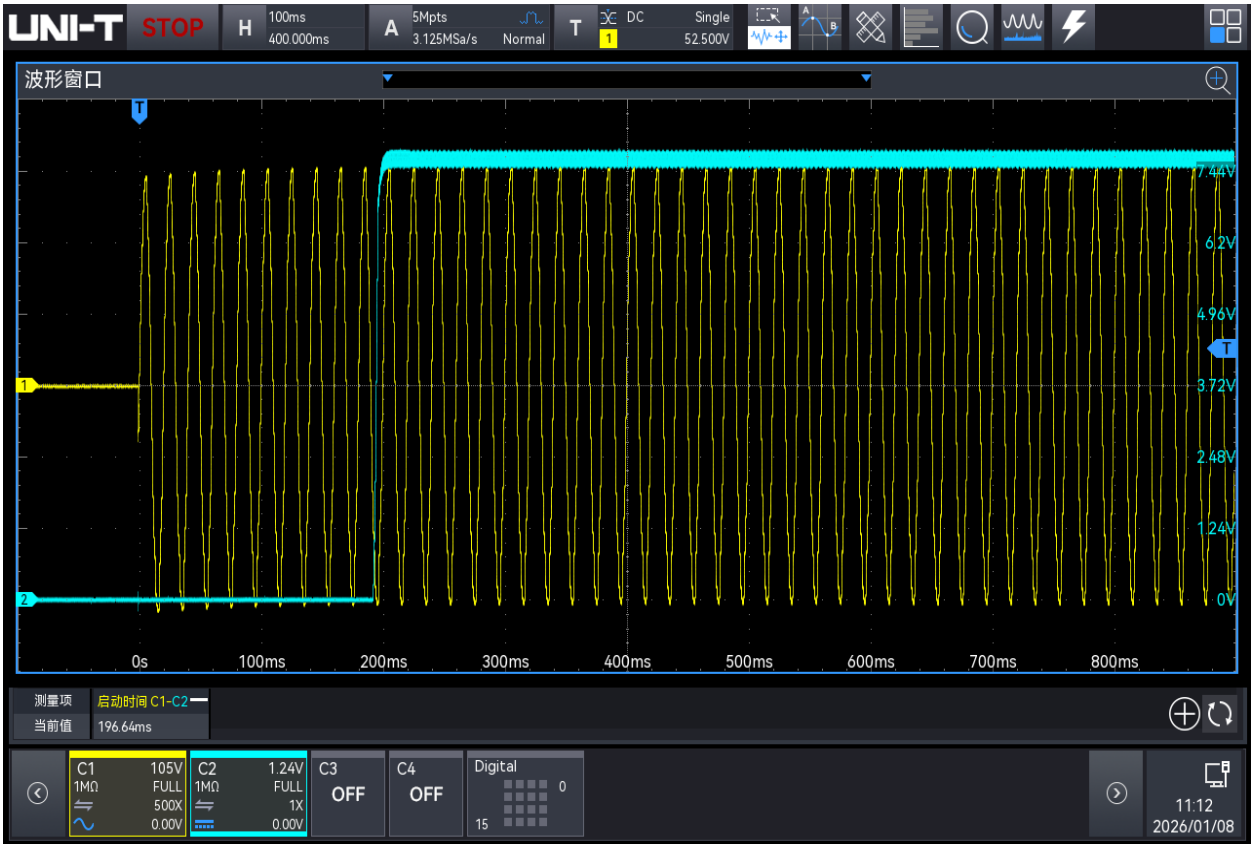


纹波分析测量结果

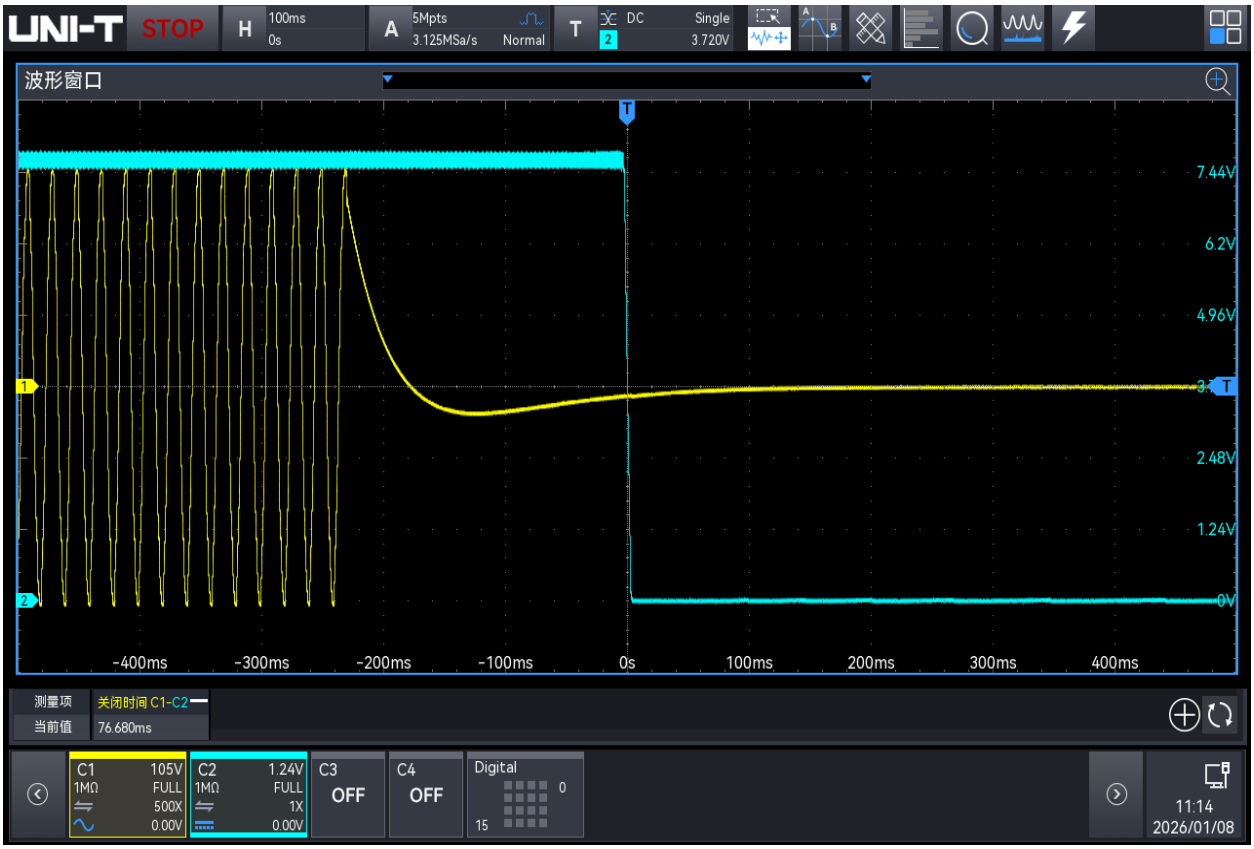
启动/关断时间分析

在芯片多核处理器系统或功率器件驱动应用类场合，对上下电时序具有严格的要求。如芯片要求内核先上电 → 内存 → I/O 后上电；功率器件要求逻辑先上电 → 驱动后上电，下电驱动先断 → 逻辑后断。

启动时间分析可确定开启的电源达到其稳定状态输出 90%所耗用的时间。

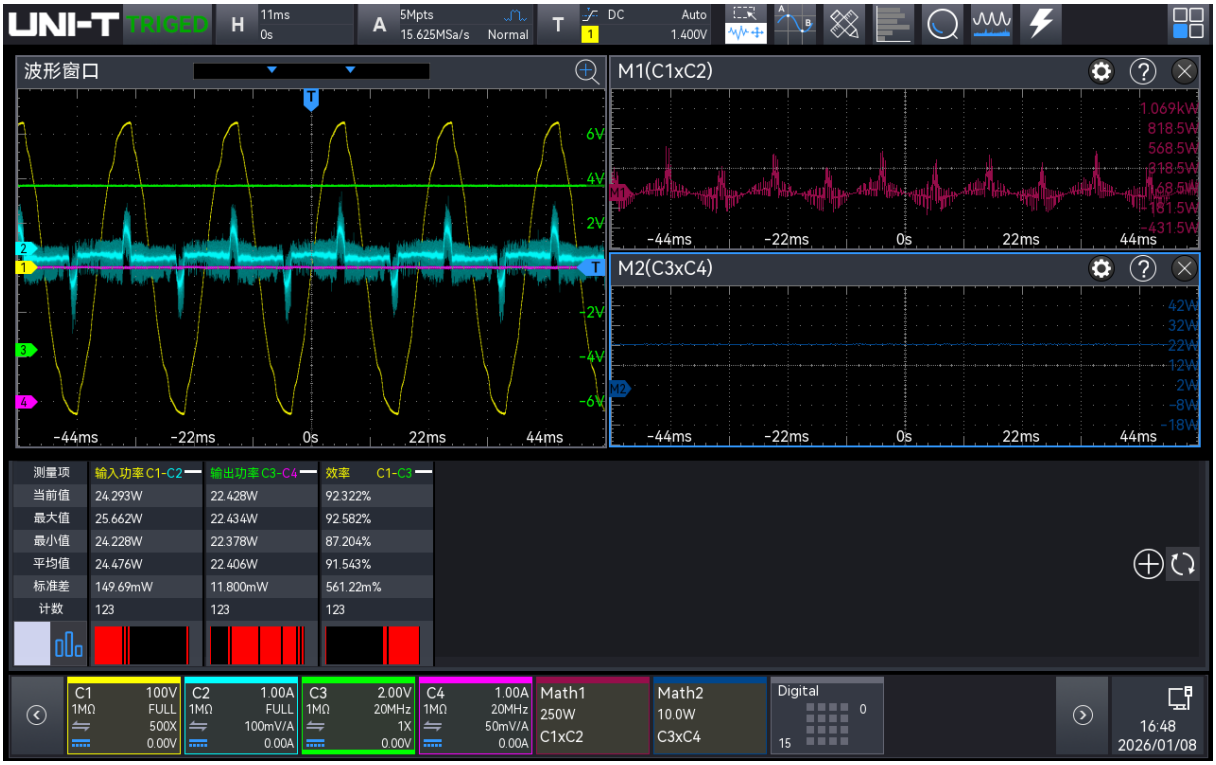


关断时间分析可确定关闭的电源降至其稳定状态输出电压 10%所耗用的时间。



电源效率

节能理念深入人心，产品效率已经成为众多厂家在设计时重点关注的指标。效率分析功能通过测量设备输出功率和输入功率，计算电源的整体效率。此分析需要 4 通道示波器。

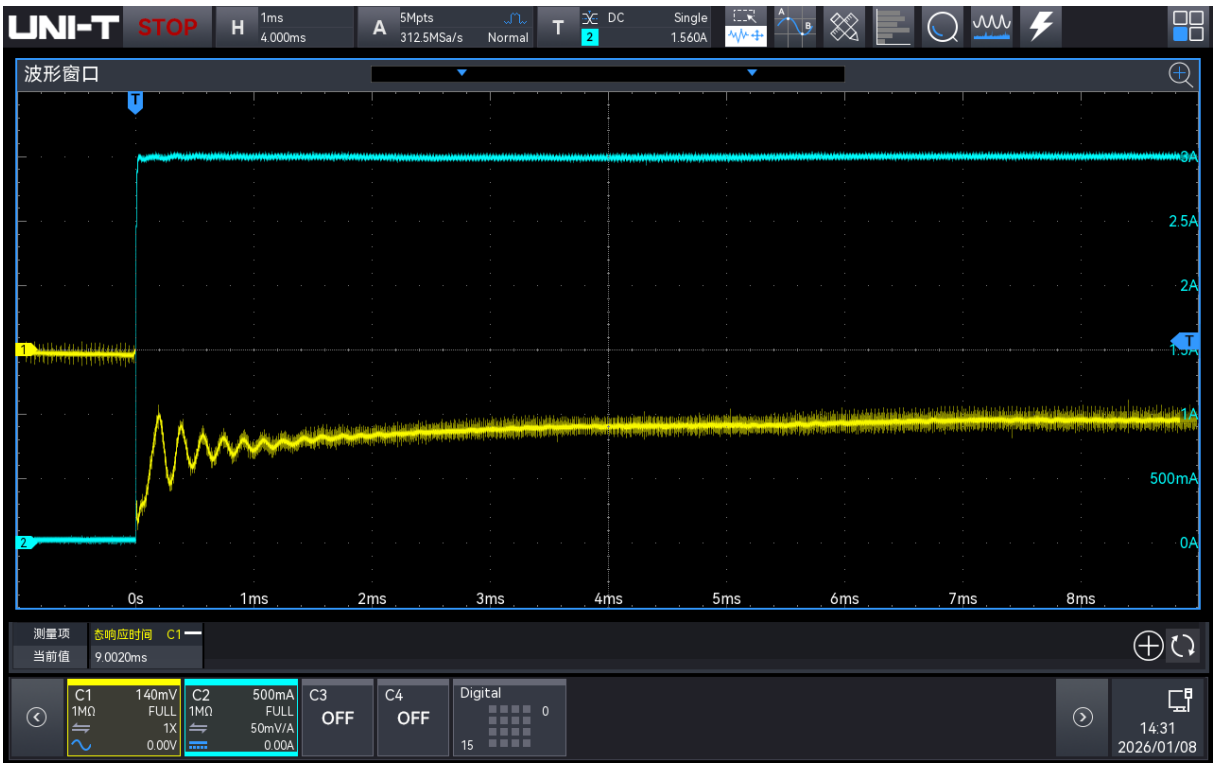


效率分析提供输入功率和输出功率的波形结果展示

瞬态响应

注入 CPU 和 IC 等负载是动态耗电的，电流会在 1mA 到几十安培间变化。但无论电流如何变化，电压需要保证足够平稳，这对电路的瞬态响应能力提出了要求。

瞬态响应分析功能可确定电源的输出电压在输出负载变化时的响应速度，帮助工程师判断电路地稳定能力是否符合要求。您可自定义过冲值用于确定瞬态响应稳定带边界，该时间计算从输出电压首次退出稳定带开始，到最后一次进入稳定带结束。



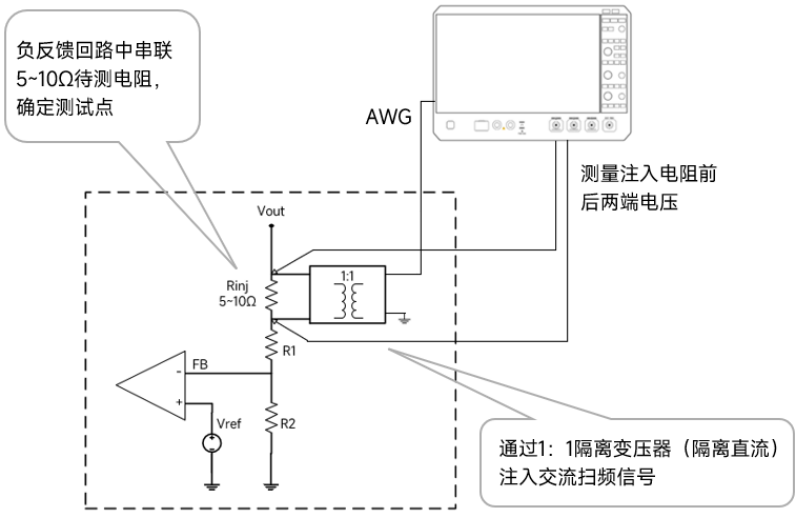
瞬态响应测试

频率响应分析

频率响应分析依托扫频生成波特曲线，通过增益、相位变化等参数量化电路全频段传输与闭环稳定性能。其中环路分析（波特图）用于检验控制系统的稳定性；电源抑制比(PSRR)用于衡量电路从输入到输出的噪声抑制能力。优利德 MSO6000HDP 系列示波器内置了 AWG 选件和电路频响分析功能，工程师仅需使用一台示波器即可完成电路的频响分析。

环路分析（波特图）

波特图功能使用示波器自带的 AWG 作为输入激励源，使用 1:1 隔离变压器（隔离直流分量）将扫频信号注入控制环路中，示波器扫描指定的频率范围，得到对应的增益曲线和相位曲线，自动计算增益裕度和相位裕度，用以确认控制环路的稳定性。裕度越高，表示环路稳定性越好。



用户可设置起止频率，选择恒定/幅度特点、阻抗和绘制点数，以更好地展示结果图。软件会同时输出结果表，用户可查看每一个扫描点地数据。

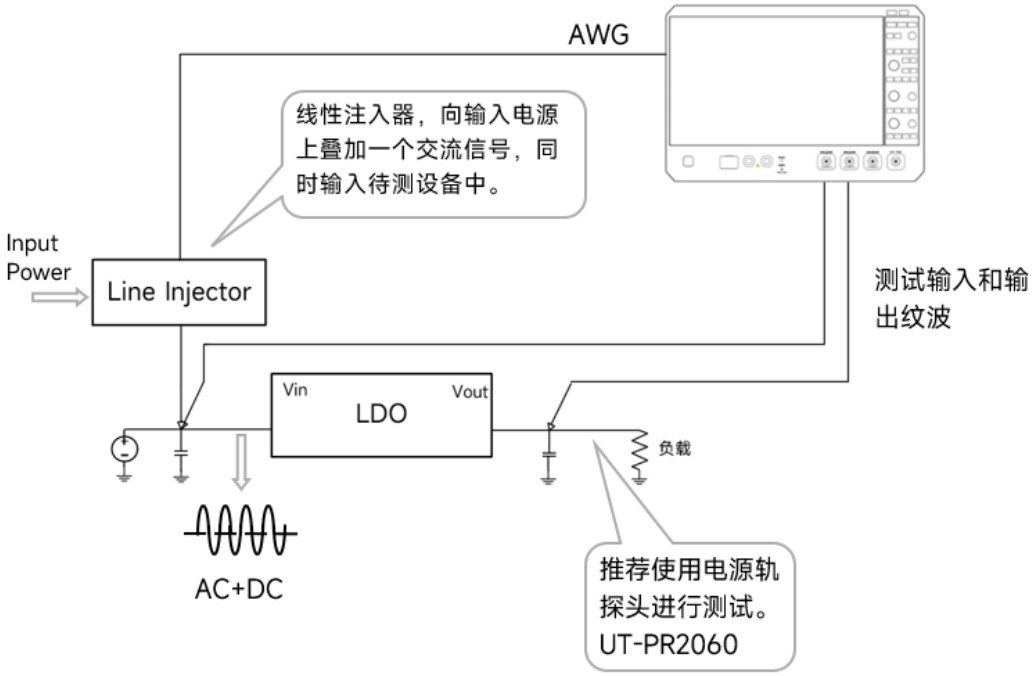


增益裕度(GM)：当相位曲线在 0°时，增益曲线距离 0dB 的增益值。GM =28.046dB

相位裕度(PM)：当增益曲线在 0dB 时，相位曲线距离 0°的相位值。PM = 74.159°

电源抑制比（PSRR）

PSRR 功能测试时使用示波器自带的 AWG 作为输入激励源，使用线性注入器将扫频信号注入控制环路中，示波器扫描指定的频率范围，同时测量每个频点下的输入噪声和输出噪声。PSRR=20*Lg[Ripple(Vin)/Ripple(Vout)]。



用户可设置起止频率，选择恒定/幅度特点、阻抗和绘制点数，以更好地展示结果图。软件会同时输出结果表，用户可查看每一个扫描点地数据。



PSRR 测试结果，曲线在高频突然下贱，表示高频抑制失效，需要优化滤波/布局

技术规格

电源质量	测量参数：电压均方根、电压波峰因素、频率、电流均方根、电流波峰因素、有效功率、视在功率、无效功率、功率因素、相角
谐波分析	谐波失真 THD：THD-R/THD-F，均方根，频率，量值，相位 谐波类型：奇次谐波、偶次谐波、全部谐波 谐波个数：40 频率参考：谐波源、电压源、电流源
浪涌电流	测量参数：电流幅值
开关损耗	功率参数：开通功率损耗、导通功率损耗、关断功率损耗、非导通功率损耗、总功率损耗 能量参数：开通能量损耗、导通能量损耗、关断能量损耗、非导通能量损耗、能量损耗总计、周期数 测量统计：最大值、最小值、平均值
转换速率	测量参数：di/dt，dv/dt
安全工作区	SOA 坐标系：线性/对数，可设置违例时停止/无动作
调制分析	时间趋势：周期、频率、上升时间和下降时间、脉冲分析、 正占空比和负占空比
动态导通电阻 RDS(ON)	测量参数：导通电压，导通电流，Rds(on) 测量统计：最大值、最小值、平均值，乘积
纹波分析	测量参数：峰峰值
启动/关断时间	测量启动时间间隔/关闭时间间隔
电源效率	测量参数：输入电压/电流，输出电压/电流 测量统计：乘积
瞬态响应	测量参数：电压，时间间隔
环路分析	测量参数：频率、幅度、增益、相位 扫描模式：连续、单次 阻抗：50Ω、高阻 频率：最高 60MHz（需选配 AWG） 幅度：最高 6V（需选配 AWG）
电源抑制比(PSRR)	测量参数：电压，噪声，频率 扫描模式：连续、单次 阻抗：50Ω、高阻 AWG 源：最高 60MHz（需选配 AWG） 频率：开始频率，停止频率 幅度：恒定模式，可变模式

订购信息

优利德电源分析方案具备高度自动化的测试控制流程，提供直观的指导界面和结果显示。您可以根据自己所需的测试场景配置您的测试方案。

支持电源分析功能的示波器

型号	带宽，采样率，存储深度，模拟通道数
MSO8000HDP	8/6GHz，20GSa/s，4Gpts，4CH
MSO8000HD	8/6/5GHz，20GSa/s，2Gpts，4CH
MSO7000HD	3/2GHz，10GSa/s，1Gpts，8CH
MSO7000X	2/1GHz，10GSa/s，1Gpts，4CH
UPO7000L	2/1GHz，10GSa/s，1Gpts，4CH
MSO6000HDP	2/1GHz，10GSa/s，1Gpts，4CH
UPO6000HD	1G/500M/350MHz，5GSa/s，500Mpts，6/8CH
UPO6000LP	1G/500M/350MHz，5GSa/s，500Mpts，4/8CH
MSO5000HD	1G/500M/350MHz，5GSa/s，500Mpts，4CH
MSO3000HD	500M/350M/200MHz，2.5GSa/s，500Mpts，4CH
MSO3000X	500M/350M/200MHz，5GSa/s，500Mpts，4CH
MSO2000X	300M/200M/100MHz，5GSa/s，100Mpts，4CH
UPO2000HD	200M/100M/70MHz，2.5GSa/s，100Mpts，4/2CH
MSO1000HD	250M/150MHz，2.5GSa/s，100Mpts，4CH
UPO1000HD	150M/80MHz，1.25GSa/s，100Mpts，4/2CH

注：1：MSO8000HDP 系列，MSO8804HD 示波器无高阻通道，使用电源分析功能需要搭配高阻适配器（UT-OA-1M）

2：不同系列示波器支持的电源分析测试项种类数略有区别。

分析软件

PWR	电源分析选件
AWG	函数/任意波形发生器选件，用于频率响应分析项

探头及配件

差分探头	推荐 UT-P3X 系列高压差分探头（输入差动电压±800Vpp~14kVpp）
电流探头	推荐 UT-P4X 系列电流探头，最大测量电压 20A~500A
电源轨探头	推荐 UT-PR2060 系列电源轨探头，1.25X 衰减比，1GHz 带宽，±60V 偏置范围
无源探头	推荐 UT-P0X 系列，支持 1X 衰减比
1:1 隔离变压器	UT-ISOT(2Hz-2MHz)

用户自配

线性注入器，推荐 PICOTEST：J2120A。用于 PSRR 测试。

若需要选件和测试方案详情请咨询优利德销售或代理商

销售网络

测试仪器华中区办事处：

武汉：湖北省武汉市东湖新技术开发区高新大道 668 号光谷金融中心 A 座 712-713 室

联系电话：18922986656

销售区域：河南、江西、湖南、湖北

测试仪器华东区办事处：

南京：南京市江宁区 富塘街 7 号深蓝中心 4 栋 2 201、2202 室

苏州：苏州市苏州大道东 409 号国际金融中心 1 幢 2802 室

联系电话：18916111209

销售区域：江苏、浙江、安徽、上海

测试仪器华西区办事处：

成都：成都市高新区合顺路 2 号 IC 设计产业园 2 栋 1 单元 21 楼

西安：西安市雁塔区城南南二环西段 88 号老三届世纪星 19 楼 19 号

联系电话：18922981286

销售区域：四川、贵州、重庆、云南、西藏、甘肃、陕西、青海、新疆、宁夏

测试仪器华北区办事处：

北京：北京市海淀区海淀北二街 8 号 中关村 SOHO 1215 室

联系电话：18922986036

销售区域：山西、河北、天津、北京、黑龙江、吉林、山东、内蒙古、辽宁

测试仪器华南区办事处：

东莞：广东省东莞市松山湖园区工业北一路 6 号

联系电话：13510557637

销售区域：广东、福建、广西、海南

全国技术支持热线：

400-876-7822

优利德公众号：