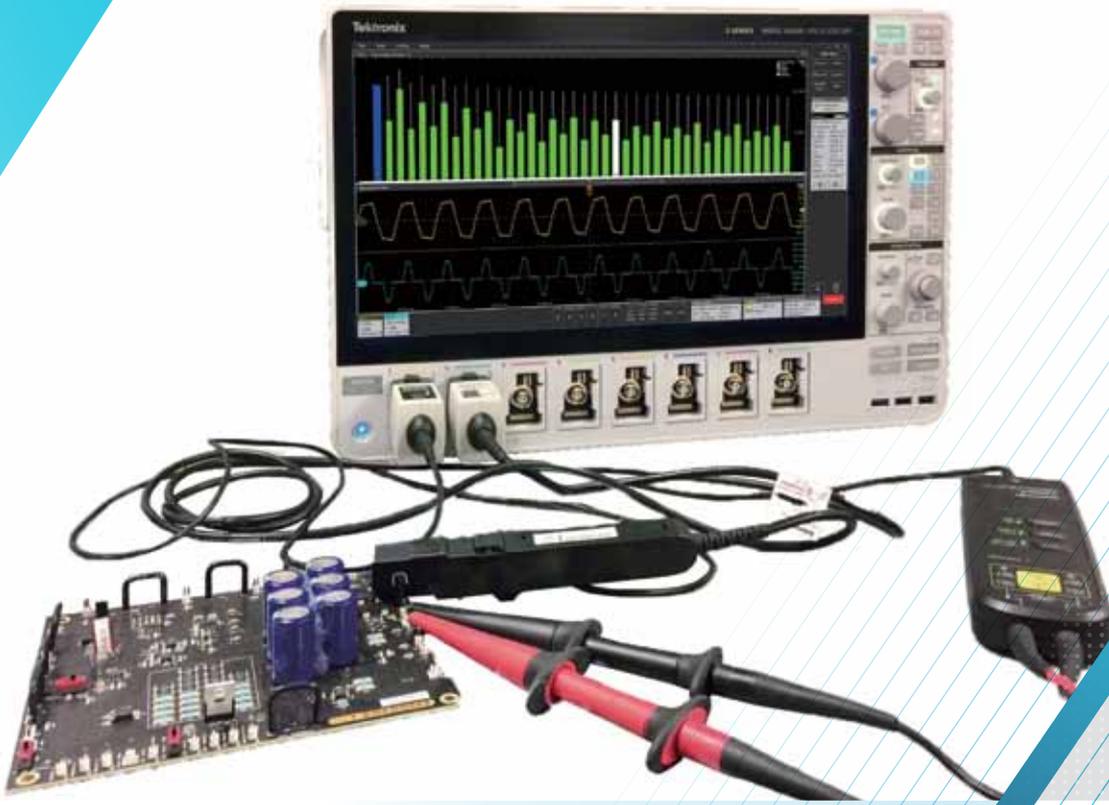


# 使用 5-PWR 应用软件进行 电源测量和分析

应用指南



## 引言

当今电源设计人员面临着越来越大的压力，需要实现 90%、甚至更高的功率转换效率。推动这种发展趋势的因素，包括延长便携式电子器件中的电池续航时间、物联网以及对功耗更低的“更加绿色的”产品的需求。许多设计正在使用 GaN 或 SiC 开关器件代替硅 FETs 和 IGBTs。一如既往，产品上市时间压力正不断推动着测试速度加快（同时还要非常准确）。

5 系列 MSO 提供了 FlexChannel® 输入及新型图形用户界面，设计人员可以一次测试多个测试点，从而加快测试速度。高级功率测量和分析选项 (5-PWR) 为关键功率测量自动完成设置过程，并提供了多种工具，根据电源设计指标和标准评估测试结果。

本应用指南将概括介绍怎样使用泰克 5 系列 MSO 示波器及 5-PWR 功率分析软件进行重要的电源测量。

## 准备电源测量

为进行准确测量，必须正确设置功率测量系统，精确地捕获波形，进行分析和调试。要考虑的重要课题有：

- 消除电压探头和电流探头之间的时延
- 消除探头偏置
- 对电流探头消磁

### 消除电压探头和电流探头之间的时延

在使用示波器进行功率测量时，必需测量经过被测器件的电压及流经被测器件的电流。这项任务要求两只单独的探头：一只电压探头（通常是高压差分探头）和一只电流探头。每只电压探头和电流探头都有自己的特性传播延迟，这些波形中产生的边沿可能并没有对准。电流探头和电压探头之间的延迟差称为时延，会导致幅度和定时测量不准确。

由于时延产生了定时延迟，因此它会导致定时差、相位和功率系数测量不准确。许多测量系统可以“自动校准”仪器内部的延迟，但在系统中增加探头时，必须补偿探头放大器和电缆长度的差异。

泰克 5 系列 MSO 可以补偿从探头尖端到测量系统的延迟，确保进行最准确的定时测量。您可以手动校正探头时延，把探头连接到相同的波形源，然后把延迟加到较快信号的信号路径中，这样就可以在时间上对准信号，而不必以物理方式在较短的探头电缆中增加电缆长度。

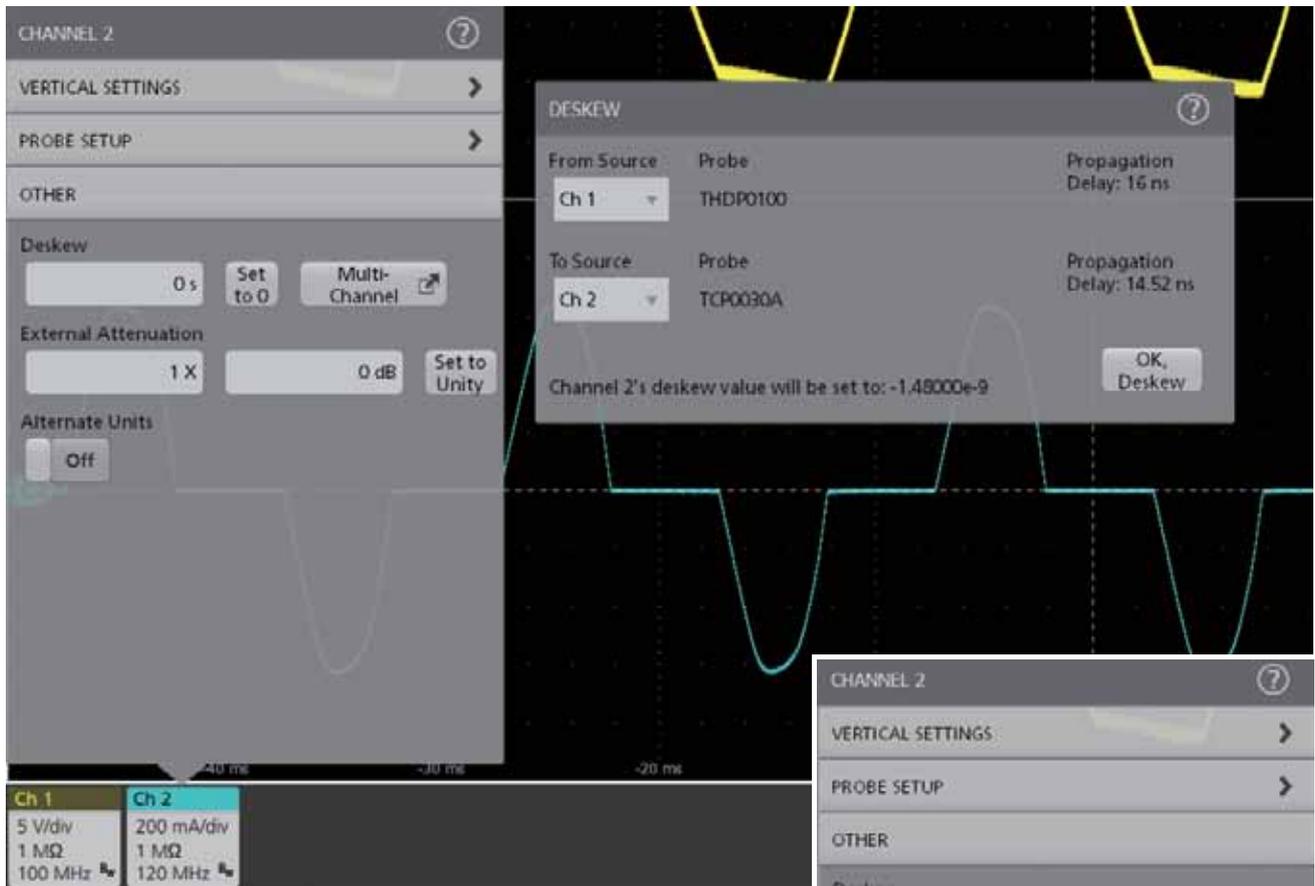


图 1. 在调节前对差分电压探头和电流探头之间的时延进行静态补偿。这些探头有机载内存，存储着标称传播延迟。

5 系列 MSO 还提供了单键“静态”时延校正功能。图 1 是两个 TekVPI® 功率探头之间的时延实例。示波器从探头中读取标称传播延迟，计算出两只探头之间的延迟差约为 1.48 ns。您只需按 OK，Deskew 按钮就会调节信号之间的相对定时。

图 2 显示了图 1 中使用的相同的测试设置在运行静态时延校正功能之后的结果。如果使用的是非泰克探头，您需要手动校正电压和电流波形时延，配置电流探头设置。

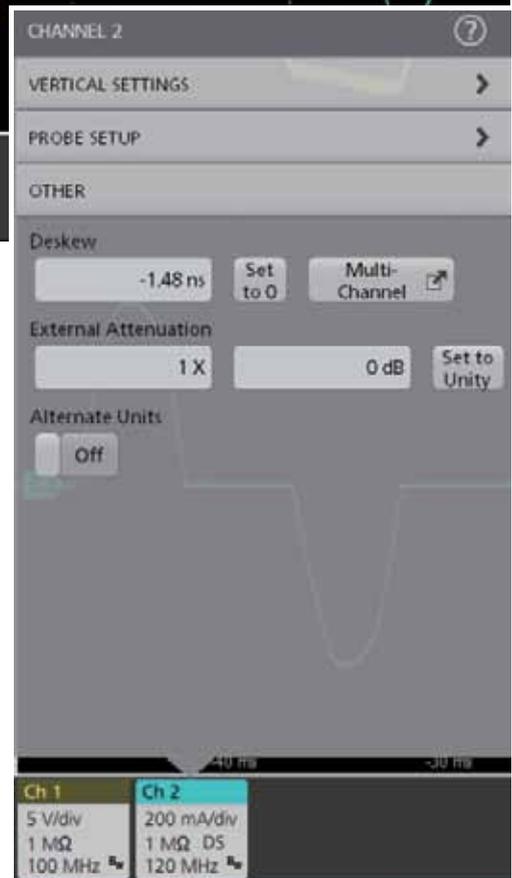


图 2. 调节后静态时延补偿。注意根据探头中存储的传播延迟，已经增加了 -1.48 ns 的时延校正。

### 消除探头偏置

差分探头可能有很小的电压偏置。这个偏置可能会影响精度，应先消除这个偏置后再继续测量。大多数差分电压探头有内置 DC 偏置调节控制，因此去除偏置相对简单。

类似的，可能必需先调节电流探头上的偏置，然后才能进行测量。通过把 DC 电流清零到 0A 的中位数值或尽可能接近 0A，可以调节电流探头偏置。TekVPI 探头，如 TCP0030A AC/DC 电流探头，内置了自动 Degauss/AutoZero（消磁 / 自动清零）程序，只需按探头补偿盒上的按钮，就可以完成操作，如图 3 所示。

### 对电流探头消磁

消磁功能会消除变压器磁芯中任何残留的 DC 流量，这可能是由大量的输入电流引起的。这种残余流量会导致偏置误差，应消除这种误差，提高测量的准确度。

泰克 TekVPI 电流探头提供了一个消磁警告指示灯，会警告用户执行消磁操作。消磁警告指示灯非常重要，因为电流探头会随着时间推移产生漂移，可能会明显影响测量。

### 解决宽带隙测试挑战

直到最近，半桥开关阶段高侧的开关测量几乎都是不可能实现的。任何相对于开关节点的测量，包括高侧 VDS 和经过电流并联装置的电压，都会遭受明显共模电压信号冲击差分信号导致的失真。这个问题在宽带隙器件中变得更加严重，比如 GaN 和 SiC 晶体管，因为开关频率提高了，必须优化全新设计。IsoVu 探头无可比拟的共模抑制功能以及高级功率测量和分析自动化功能，为优化最新 GaN 和 SiC 设计提供了杰出的解决方案。



图 3. 泰克 TCP0030A AC/DC 电流探头拥有 Degauss/AutoZero(消磁 / 自动清零) 功能。



图 4. 许多电源拓扑要求在存在大的共模信号时测量小的差分电压。例如，半桥开关阶段高侧的  $V_{GS}$  和  $V_{DS}$  通常会相对于地电平上下移动几百或几千伏的电压。IsoVu™ 隔离测量系统可以与 5 系列 MSO 结合使用，提供超高共模抑制功能。

## 输入分析

工频测量表征设计对输入变化、设计吸收的电流和功率以及设计的工频电流失真的反应。某些测量如功耗是关键指标。其他测量如功率因数和谐波，可能会有法规限制。

## 功率质量测量

在 5-PWR 中，功率质量测量是一套标准功率测量。它们通常在 AC 线路输入上执行，但也可以应用到器件的 AC 输出上，如功率逆变器。这些测量包括：

- 频率
- RMS 电压和电流
- 波峰因数 (电压和电流)
- 真实功率、无功功率和视在功率
- 功率因数和相位

## 进行测量

通过使用差分探头测量系统的工频电压，使用电流探头测量系统的工频电流，可以简便地进行功率质量测量。也可以使用相同的设置，来测量电流谐波。



## 谐波

当非线性器件使流入电路的电流失真时，就会发生电流谐波。线性电路只在基础工频吸收电流，但非线性电路在基础频率的倍数上吸收电流，每个谐波有不同的幅度和相位。

在电流与谐波流经配电系统的阻抗时，会产生电压失真。热量会在线缆和变压器中积聚，在连接到电网的开关电源数量提高时，电网上的谐波失真也会提高。

因此，业内已经设计了多项标准，限制非线性负载对功率质量的影响。业内已经开发了 IEC61000-3-2 和 MIL-STD-1399 之类的标准，来限制谐波。

IEC61000-3-2 标准限制的是注入市电电源系统的电流谐波。它适用于每一相输入电流最高 16A、连接到公共低压配电系统 (230V AC 或 415V AC 三相) 的所有电气和电子设备。该标准进一步分成 A 级 (平衡三相设备)、B 级 (便携式工具)、C 级 (照明设备和调光装置) 和 D 级 (拥有独特的电流波形要求的设备)。

MIL-STD-1399 对设备 (负载) 提出了技术规范和测试要求，以保持兼容舰载 AC 功率系统，从计算机和通信设备直到空调。

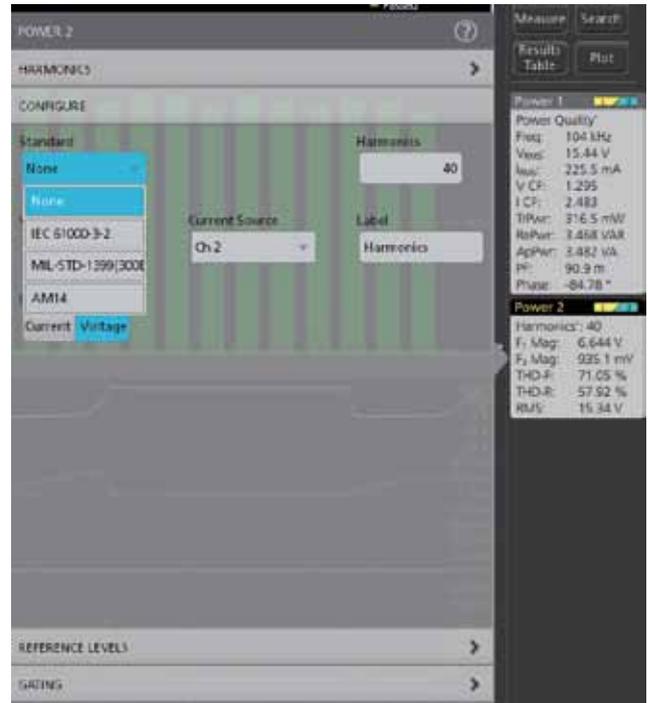


图 6. 设置基本电流谐波分析只要求几个简单的设置。这个实例显示了针对行业标准进行预一致性检查的设置。

5-PWR 分析应用可以简便地测量电流谐波。它可以以表格方式和图形方式显示测量结果。设计人员还可以在认证之前，迅速比较器件性能与满足的标准，因为认证通常会耗费大量时间，而且成本非常高。在示波器中提供测量功能，不仅可以加快调试速度，还可以帮助避免最后再为了满足法规要求而改变设计。

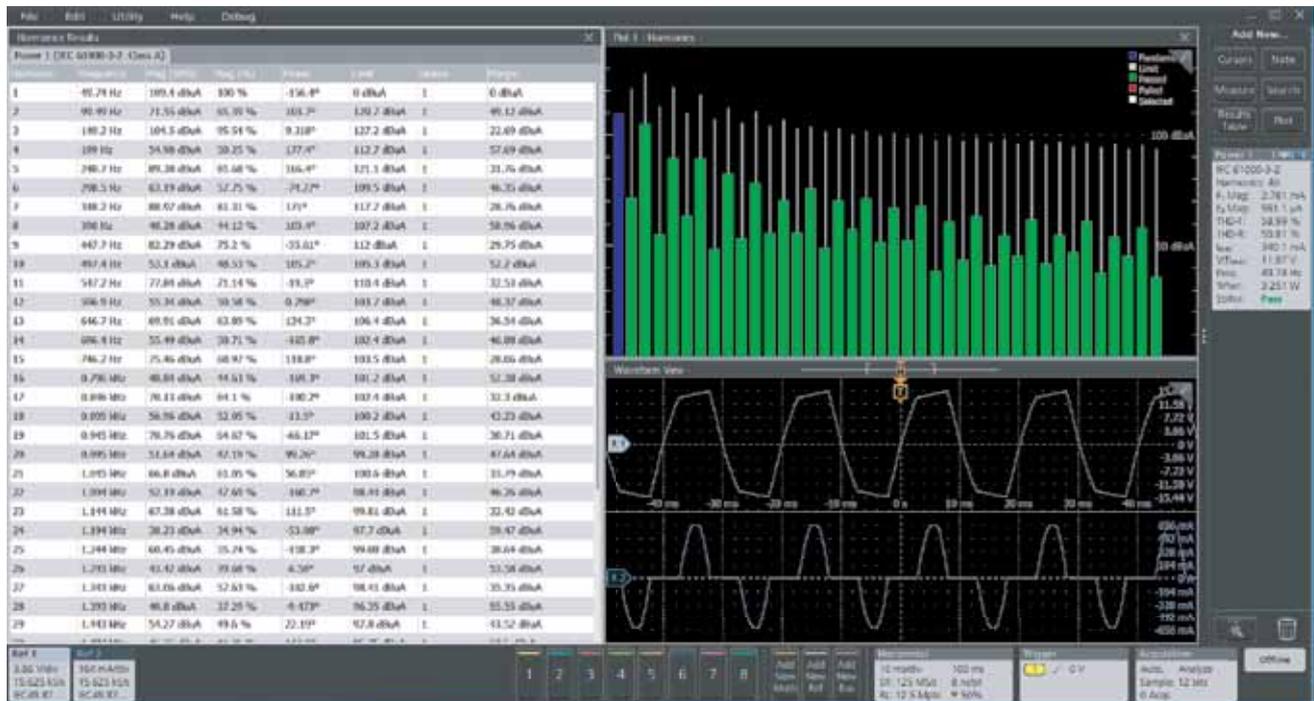


图 7. 使用 5-PWR 获得的谐波结果。右下方可以看到非正弦电流波形及谐波。谐波条形图用分贝显示了谐波内容。奇数谐波最明显，但完全落在 IEC 61000-3-2 极限范围内。

## 进行测量

使用差分电压探头测量工频电压，使用电流探头测量工频电流。

如果您想比较设计中的谐波与 IEC 61000-3-2 标准中的极限，那么必须确定工频，必需选择等级类型。在 C 级和 D 级标准中，还需要把输入功率、功率因数和基础电流输入到系统中。分析软件包将加载预先确定的极限表，对比测得谐波与极限，然后将显示预一致性测试结果，如图 8 所示。

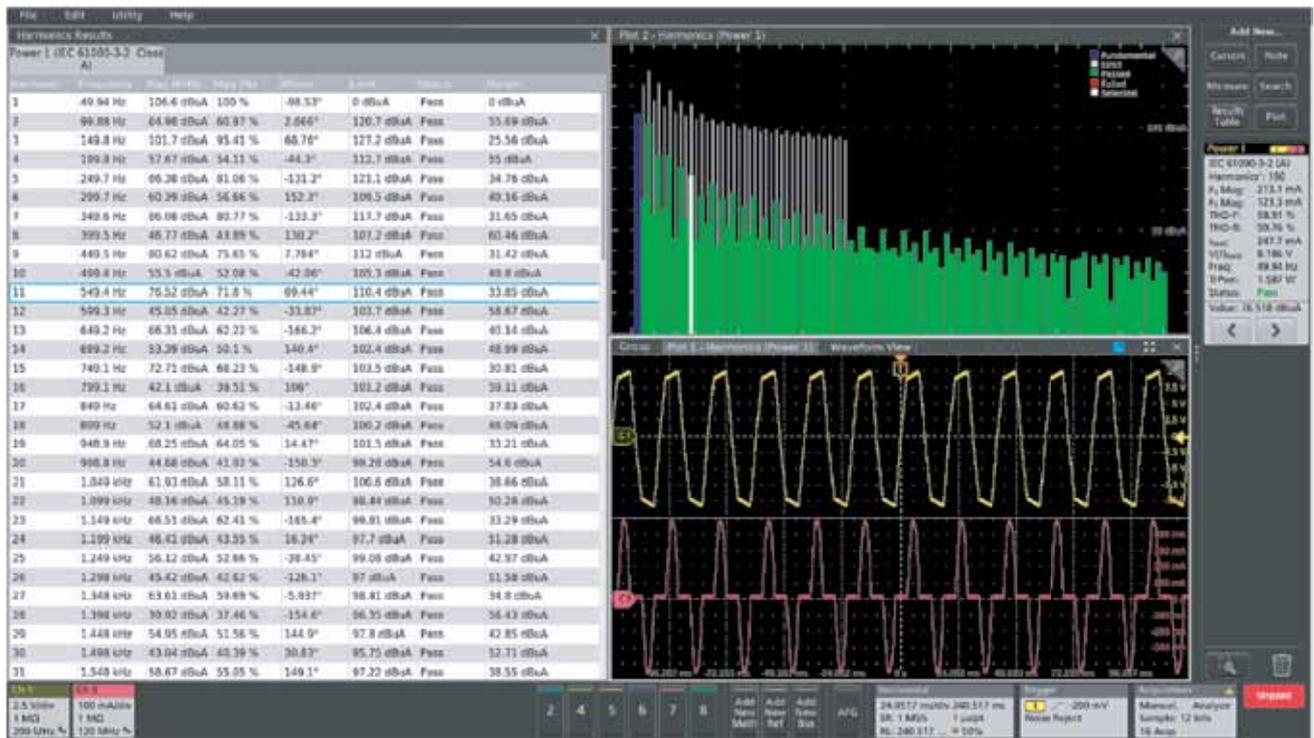


图 8. 可以以图形方式显示最多 100 个谐波。表中显示了 IEC 61000-3-2 预一致性测试结果。根据设置，分析软件包将加载预先确定的极限表，对比每个测得的谐波与极限。

### 测量结果

- Results 标签显示了选择的谐波标准、基础谐波和三阶谐波幅度、THD-F、THD-R、RMS 值和通过 / 未通过状态。
- 可以选择各个谐波，测量值在结果标签、条形图和结果表之间链接起来。
- 谐波表包括：
  - 选择的谐波标准
  - 谐波数和频率
  - 幅度 (RMS)：谐波测得的 RMS 幅度值，单位为 dB $\mu$ A 或 A
  - 幅度 (%)：相对于基础频率的谐波测得幅度
  - 相位：相对于频率基准的谐波相位，单位为度
  - 极限：指定标准规定的谐波极限
  - 状态：预一致性测试通过 / 失败状态
  - 裕量：实测值与极限之差
- 电流谐波可以用分贝微安 (dB $\mu$ A) 或安培 (A) 为单位显示

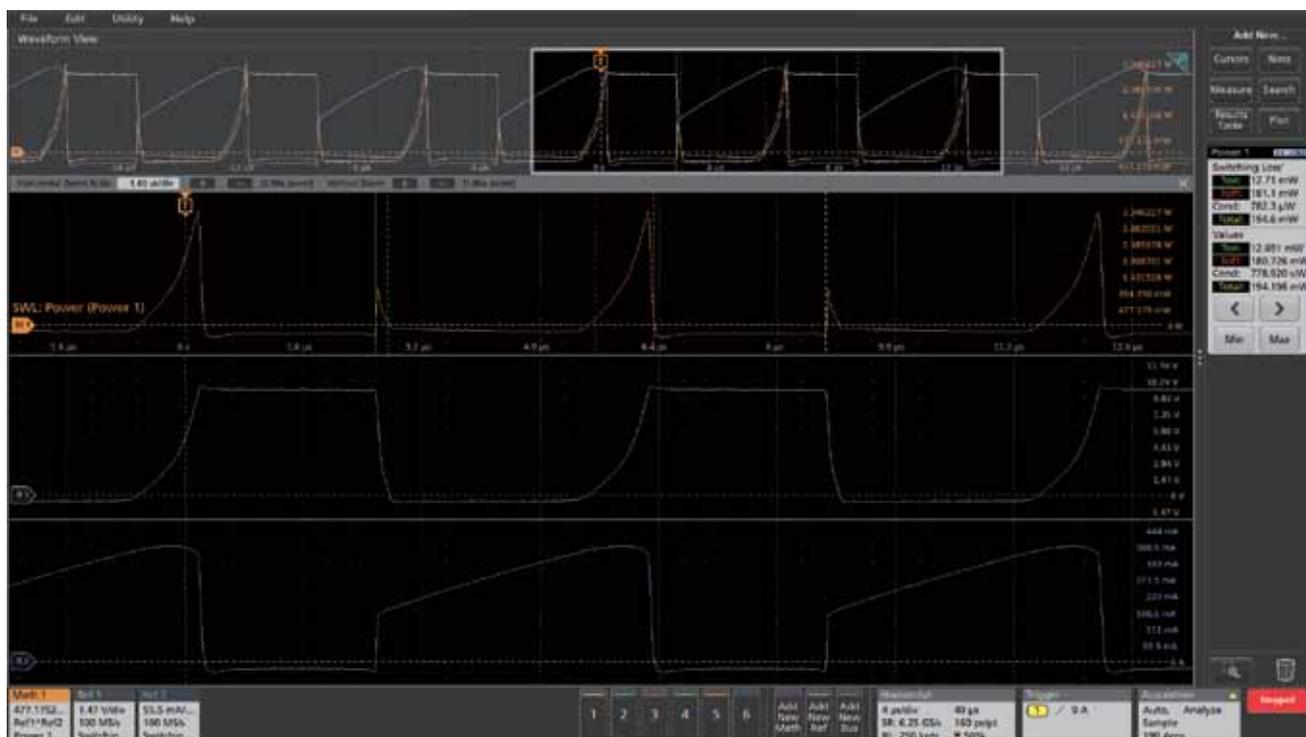


图 9. 使用 5-PWR 进行开关损耗测量。把瞬时功率的电流和电压相乘，可以得到上方轨迹（橙色）。损耗测量在瞬时功率波形上执行。每个损耗区域都用带颜色的标记标出，标记与测量标签对应。底部波形是经过开关的电压和流经开关的电流。

## 开关分析

电源开关阶段的测量确认转换器是否正确运行，量化损耗来源，确认器件在正常范围内工作。

### 开关损耗测量

在各种物理电容器和寄生电容器充电时，会发生启动损耗，电感器会产生磁场，会发生相关的瞬态电阻损耗。同样，在开关电源关闭时，即使市电已经拔下，仍会有能量放电并与各种元件交互，因此也会发生损耗。

### 进行测量

为了进行开关损耗测量，示波器必须测量经过开关器件的电压和流经器件的电流。开关损耗结果如图 9 所示。

### 测量结果

- Ton：每个周期启动功率和能量损耗值的中位数
- Toff：每个周期启动功率和能量损耗值的中位数
- Total：每个周期总平均功率损耗和平均能量值的中位数
- 左右箭头按钮可以遍历开关周期，放大查看问题区域
- 还可以在结果表中查看测量数据。这个表格会显示所有开关周期的累积测量结果，迅速进行复核。



图 10. RDS(on) 测量。Ch1 (黄色) 波形是 FET VDS 电压, Ch2 (青色) 波形是 FET 电流。波形的相位颠倒, 以正确指明电流在传导区域中为高。结果标签 (右上方) 在默认情况下显示了中位数 RDS(on) 值, 但也可以配置成显示最小值。在本例中, 我们使用光标选通查找最小 RDS(on) 值, 其一般接近 1 欧姆 (图中为 1.58 欧姆)。

## RDS (ON)

这项测量表征开关器件在开关周期传导部分期间的漏极到源极电阻, 在此期间, 器件会启动并传导电流。动态开点电阻是启动时经过器件的电压与流经器件的电流之比。通过使用光标选通功能, 您可以准确地测量 RDS(on), 这是导致开关器件损耗的一个重要因素。

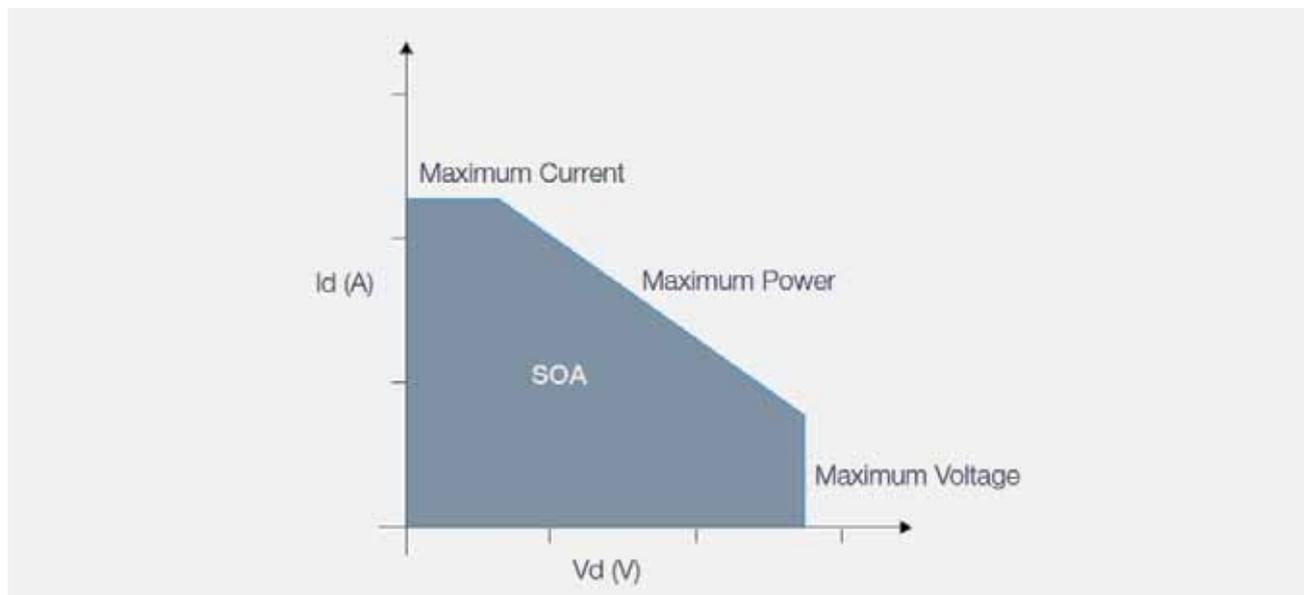


图 11. 晶体管的安全工作区 (SOA) 图。

## 安全工作区

开关晶体管的安全工作区 (SOA) 决定着电压一定时可以安全流经晶体管的电流。SOA 通常在 BJT、MOSFET 或 IGBT 开关晶体管的产品技术资料中作出规定。它表示为 VCE (对 FET 为 VDS) 相对于 ICE (或 IDS) 关系图，描述了晶体管在不劣化或不损坏的情况下可以工作的范围。

功率分析软件可以把器件产品技术资料中的 SOA 传递到 5 系列 MSO 中，然后您可以在实际在线器件上，改变电源设计的工作条件，测量电压和电流。示波器记录 V-I 图，可以指明任何参数是否超出 SOA。

## 进行测量

在电源中运行晶体管时，确定晶体管的 SOA 的主要挑战之一，是在各种负载场景、温度变动和工频输入电压变化下准确地捕获电压和电流数据。5-PWR 自动实现数据捕获和分析，简化了这一任务。测量设置要求探测经过开关晶体管的电压和流经开关晶体管的电流。

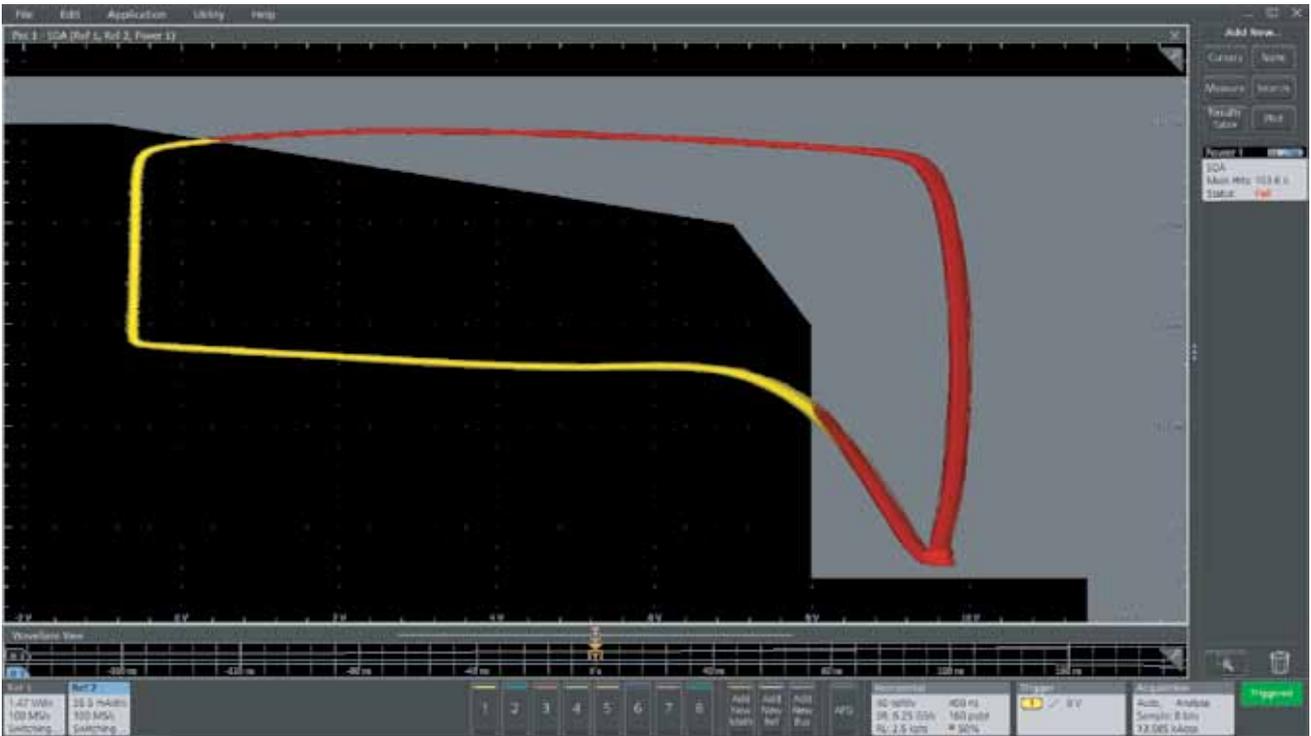


图 12. 使用 5-PWR 进行 SOA 测试。如果数据点落在模板区域内，那么它们是黄色的，表示“通过”；如果落在模板区域外面，那么它们是红色的，表示“未通过”。在本例中，V-I 曲线落在 SOA 外面，表明开关器件受到的压力过大。



图 13. SOA 模板编辑器窗口。模板由一套（电压，电流）坐标确定，坐标来自开关器件产品技术资料，也可以由用户自己确定。

下一步是设置 SOA 模板，如图 13 所示，SOA 模板编辑器允许输入晶体管的 SOA 极限，极限在晶体管产品技术资料中确定，或由您自己的标准确定。

### 测量结果

在设置完成后，会显示 SOA 测试结果，如图 12 所示。电压和电流波形在 XY 模式下在一条记录中绘制。示图显示了一个采集周期的所有数据。

结果标签显示了器件落在 SOA 模板外面的次数，给出了测试通过 / 未通过结果。

## 磁性分析

电感器和变压器用来为开关模式及线性电源中的存储器件加电。某些电源还在输出上，在滤波器中使用电感器。考虑到其在功率转换器中的重要作用，表征这些磁性器件对确定电源的稳定性和整体效率具有至关重要的作用。

5-PWR 中的磁性分析功能自动完成以下几组测量：电感、磁性损耗和 B-H 参数。

### 电感

电感器的阻抗会随着频率提高，较高频率的阻抗要高于较低频率的阻抗。这种特点称为电感，用亨利为单位表示。可以使用配备功率分析软件的示波器自动测量器件的电感。

### 进行测量

5-PWR 应用对测量期间的电压求积分，然后除以电流变化，计算出电感值。它探测经过磁性器件的电压及流经磁性器件的电流，来进行测量。电感测量结果与图 14 中多种其他测量一起显示。黄色 (Ch1) 波形是经过电感器的电压，青色波形 (Ch2) 是流经电感器的电流。注意还显示了 B-H 曲线。

### 测量结果

- 电感：器件或电路的电感值

### 磁性损耗

分析磁性功率损耗是全面分析开关电源损耗的基本组成部分。两种主要磁性损耗是磁芯损耗和铜缆损耗。铜缆线圈的电阻会在电源中产生铜缆损耗。磁芯损耗与磁芯中的涡流损耗和磁滞损耗有关。磁芯损耗与 DC 通量无关，但受到 AC 通量摆幅和工作频率的影响。

### 进行测量

5-PWR 能够计算单线圈电感器、多线圈电感器、甚至变压器中的磁性损耗。

在单线圈变压器中，会连接一只差分探头，测量经过主线圈的电压。电流探头则测量流经变压器的电流。然后示波器和功率测量软件可以自动计算磁性功率损耗。然后会显示磁性功率损耗结果，如图 14 所示。

### 测量结果

- 功率损耗：由于磁性元件导致的总功率损耗

### 磁性性性 (B-H 曲线)

磁性通量密度 B 指磁场的强度，单位为特斯拉，它决定着磁场在运动电荷上施加的力。磁场强度或场强 H 指磁化力，单位为 A/m。材料的磁导率  $\mu$  的单位为 H/m，衡量的是材料由于应用的磁场而产生的磁化程度。

磁长和磁芯周围的线圈数等物理特点有助于确定磁性材料的 B 和 H。B-H 曲线图通常用来检验开关电源中磁性成分的饱和度（或匮乏度），用来衡量磁芯材料单位容量中每个周期损耗的能量。会针对场强 H 绘制磁性通量密度 B 的曲线。由于 B 和 H 都依赖磁性元件的物理特点，如磁长和磁芯周围的线圈数，因此这些曲线决定着元件磁芯材料的性能包络。

### 进行测量

为生成 B-H 图，要测量经过磁性元素的电压和流经磁性元素的电流。在变压器中，主要是经过一级线圈和二级线圈的电流。必须先配置面板中输入电感器的圈数 (N)、磁长 (l) 和磁芯的横截面面积 (Ae)，然后功率分析软件就可以计算 B-H 曲线图。

高压差分探头连接到示波器的通道 1 上，经过变压器的一级线圈。测得的这个电压是磁性元件中磁感应 B 的结果。通道 2 使用电流探头测量流经一级线圈的电流。如果需要，电流探头还用来测量流经通道 3 和通道 4 上二级线圈的电流。然后功率分析软件使用示波器通道 2、3、4 的数据计算磁化电流，然后使用磁化电流值，确定 H 成分。

磁性属性结果如图 14 所示。

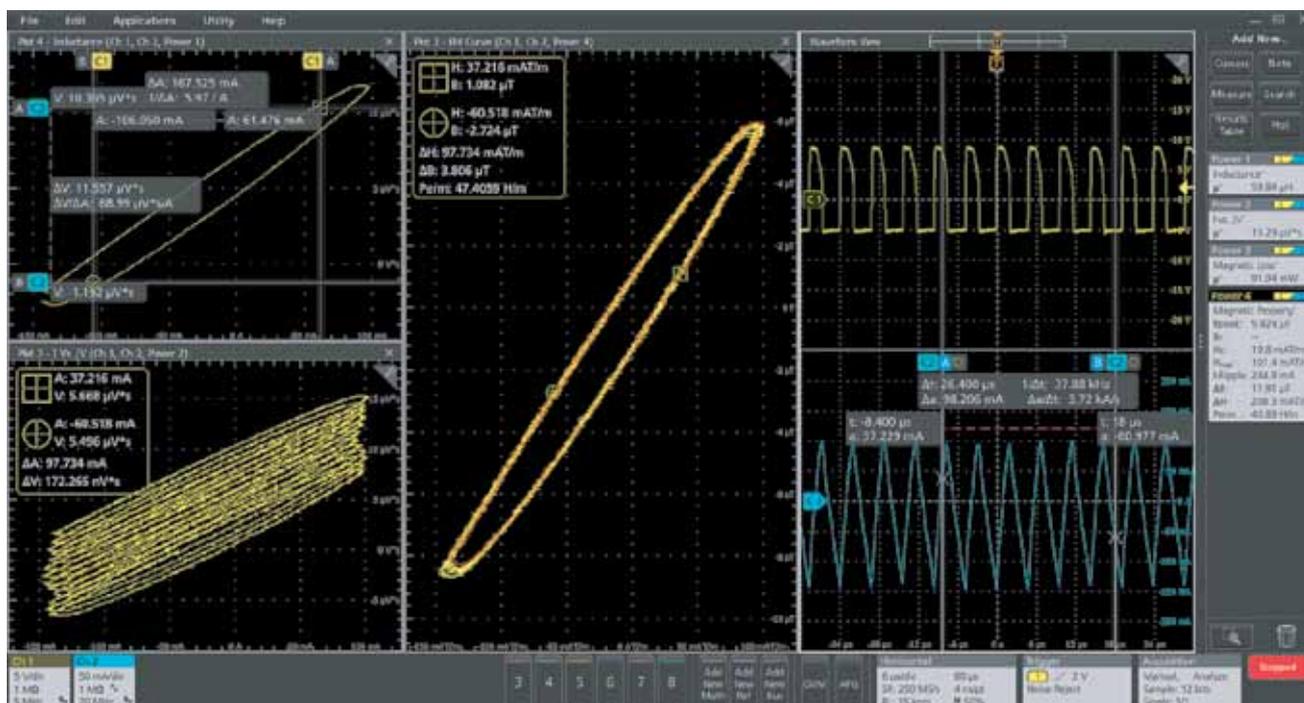


图 14. 电感器上的磁性测量。Ch1 (黄色) 波形是经过电感器的电压, Ch2 (青色) 波形是流经电感器的电流。B-H 曲线在显示器中心显示。电感、磁性损耗和磁性属性显示在右面的结果标签中。

## 测量结果

- $\Delta B$ : 通量密度变化。
- $\Delta H$ : 场强变化。
- 磁导率: 材料的磁化程度。
- $B_{peak}$ : 磁性元件中感应的最大磁性通量密度。
- $B_r$ : 曲线上  $H = 0$ 、且  $B$  仍为正值点, 这称为元件的剩磁, 是衡量元件顽磁性的一个指标。剩磁越高, 材料保留磁化的程度越高。
- $H_c$ : 曲线上  $B = 0$ 、且  $H$  是负值的点。这代表着导致  $B$  达到零所要求的外部场。这个  $H$  值称为抗磁力。抗磁力小, 意味着元件可以简便地去磁。
- $H_{max}$ :  $H$  轴和磁滞环横截面上  $H$  的最大值。
- 纹波: 电流的峰峰值。

## 输出分析

必须评估任何 DC 电源输出的稳定性和噪声。5-PWR 高级功率测量和分析软件为量化和分类纹波提供了多种工具。

### 工频纹波和开关纹波

简而言之, 纹波是叠加到电源 DC 输出上的 AC 电压, 用正常输出电压的百分比或峰峰值电压表示。

电源输出上显示两类纹波: 工频纹波度量的是与工频频率有关的纹波, 开关纹波度量的是根据确定的开关频率从开关电源输出检测到的纹波数量。

输出工频纹波通常是工频频率的两倍，开关纹波则一般与噪声耦合，在 kHz 频率范围内。把工频纹波与开关纹波分开，是电源表征中最大的挑战之一。功率分析软件大大简化了这项任务。

### 进行测量

只需使用一只电压探头，就可以测量系统的纹波。差分探头必须连接到系统的输出上，才能测量输出工频和开关纹波电压。

工频纹波和开关纹波的配置标签 (参见图 15) 非常像。这两种纹波测量都要求选择输入耦合 (AC 或 DC) 模式、要求的带宽极限 (20MHz、150/250MHz 或全部) 及示波器的采集模式 - 采样、峰值检测或高分辨率 (High Res)。在工频纹波测量中，必须确定系统的工频频率：50 Hz 或 60 Hz 或 400 Hz。开关纹波测量要求开关频率指标。

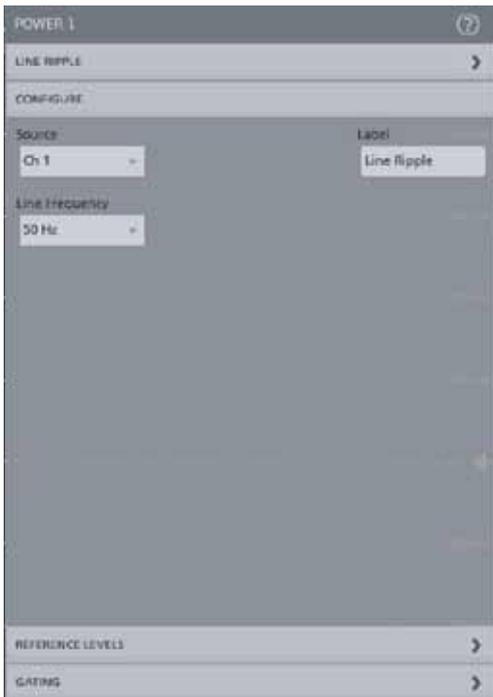


图 15. 5-PWR 的工频纹波配置标签。

一旦测量配置完毕，会显示结果，如图 16 所示。

### 测量结果

峰峰值和 RMS 纹波值：这些是系统工频或开关纹波的峰峰值和 RMS 电压。



图 16. 使用 5-PWR 测量开关纹波。

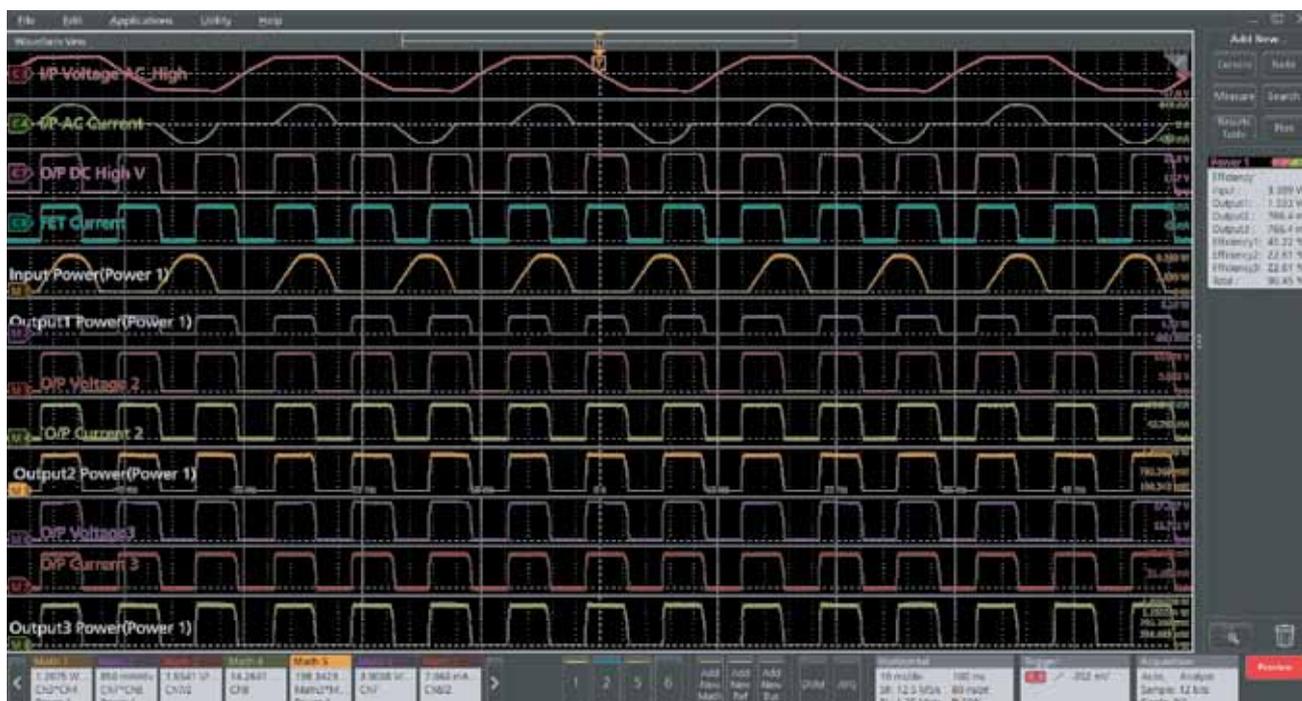


图 17. 使用 5-PWR 进行效率测量。

## 效率

器件或产品效率高，是当今激烈竞争的市场环境中决定成败的一个关键因素。高级功率测量和分析软件可以简便地测量功率转换（AC-DC，AC-AC，DC-DC，DC-AC）产品的效率。对拥有最多 3 个输出的功率产品，高级功率测量和分析软件使得设计人员可以立刻测试整个系统的效率，加快测试和验证速度。

图 17 显示了拥有 1 个输入和 3 个输出的 AC-AC 转换器上的效率测量结果，其中使用演示电路板和数学信号仿真多输出器件。我们测量（在本例中仿真）了每个输入和输出的电压和电流：

- Ch 3: 输入电压
- Ch 4: 输入电流
- Ch 7: 输出 1 电压
- Ch 8: 输出 1 电流
- Math 3: 输出 2 电压
- Math 4: 输出 2 电流
- Math 6: 输出 3 电压
- Math 7: 输出 3 电流



图 18. 效率测量配置允许用户配置信号类型及最多 3 个输出。

注意上例中使用了自定义标签，识别起来非常简便。应用软件根据需要自动创建数学功率波形。在上面的实例中，这些波形都是自动创建的：

- Math 1: 输入 1 功率
- Math 2: 输出 1 功率
- Math 5: 输出 2 功率
- Math 8: 输出 3 功率

应用会计算被测器件的各种效率和总效率，在结果标签中显示。还可以打开结果表，用 .MHT 或 PDF 格式保存报告。

图 19. 报告以 .MHT 或 .PDF 文件格式提供。

## 生成报告

数据采集、归档和文档管理通常是设计和开发过程中繁琐而又必要的任务。5-PWR 配有一个报告生成工具，在实践中可以轻松编制测量结果文档。

通过使用示波器的 "Save as" (另存为) 功能，可以生成、并在示波器屏幕上显示指定布局的报告成品。

## 小结

通过结合使用 5-PWR 应用与 5 系列 MSO 示波器，工程师可以迅速进行准确的、可重复的测量，而且设置时间非常短。最重要的是，他们不需要进行手动计算，示波器应用完成了计算工作。通过使用截图和报告，工程师可以简便地提供仪器设置方式、波形和测量结果等完整的文档。

## 哪款探头适合您的应用？

在与适当的功率探头相结合时，5 系列 MSO 示波器实现了最好的功率测量性能。5 系列 MSO 配有 TekVPI 探头接口，在示波器和探头之间实现通信。如需了解具体推荐型号的差分探头和电流探头，包括 IsoVu 隔离探头和 Rogowski 探头及必要的探头转接头，敬请参阅 [www.tek.com.cn/accessories](http://www.tek.com.cn/accessories)。如有任何技术问题，请拨打：400-820-5835

探头类型	说明	
高压差分探头	THDP0100/THDP0200/TMDP0200 高压差分探头是进行通用非参考地电平、浮动测量的最佳选择。这些探头提供了高达 200 MHz 的带宽和高达 6000 V 的电压范围。	
	P5200A/P5202A/P5205A/P5210A 高压差分探头是进行非参考地电平、浮动或隔离测量的完美选择。这些探头提供了高达 100 MHz 的带宽和高达 5600 V 的电压范围。	
光隔离差分探头	TIVM1、TIVH08、TIVH05 和 TIVH02 光隔离差分探头是准确地解析高带宽差分信号的最佳选择，为测试宽带隙设计提供了理想的解决方案。探头分成 3 m 和 10 m 两种长度。 TIVM1 提供了 1 GHz 带宽，在存在最高 60 kV 的共模电压时，可以测量最高 $\pm 50$ Vpk 的差分信号。TIVH08、TIVH05 和 TIVH02 分别提供了 800 MHz、500 MHz 和 200 MHz 的带宽，在存在最高 60 kV 的共模电压时，可以测量最高 $\pm 2500$ Vpk 的差分信号。	
电流探头	泰克提供了各种电流探头，包括 AC/DC 电流探头，实现了最高 120 MHz 的带宽及最低 1 mA 的同类最优秀的电流钳夹灵敏度。	
	仅 AC Rogowski 探头包括 TRCP300 (9 Hz ~ 30 MHz, 250 mA ~ 300 A 峰值), TRCP600 (12 Hz ~ 30 MHz, 500 mA ~ 600 A 峰值) 和 TRCP3000 (1 Hz ~ 16 MHz, 500 mA ~ 3000 A 峰值)。	
中压差分探头	TDP0500/TDP1000 中压差分探头为进行非参考地电平、浮动或隔离测量提供了最佳选择。这些探头提供了高达 1 GHz 的带宽和高达 $\pm 42$ V (DC + 峰值 AC) 的电压范围。	