

电源测量和分析

入门手册

目录

引言	3	无源元件测量: 磁性元件	12-17
电源设计问题指向测量需求	3	电感基础知识	12
开关式电源基础知识	3-4	使用示波器测量电感	12
有源元件测量: 开关单元	4-11	磁性功率损耗基础知识	13
开关式设备中的功率损耗原理	4	磁芯损耗	13
关闭损耗	4	铜线损耗	13
启动损耗	5	使用示波器测量磁性功率损耗	14
功率损耗	5	磁性属性基础知识	14
安全工作区	6	B-H曲线	15
动态开点电阻	6	磁性属性测量	16
进行有源元件测量	6	使用示波器测量磁性属性	17
选择适当的测量解决方案	7	电源线测量	18-19
示波器的性能指标	7	电源质量测量基础知识	18
上升时间	7	使用示波器测量电源质量	19
采样率	7	总结	20
记录长度	7	产品比较图	21
电源测量和分析软件	7		
电源探头	9		
消除探头偏置和噪声	11		
自动消除偏置	11		
手动去掉偏置	11		

引言

电源是把电能从一台设备转换到另一台设备的元件、子系统或系统，其通常从交流(AC)电源转换成直流(DC)电源。从个人电脑到军事设备和工用机械，电子设备的正常运转离不开DC电源的性能和可靠性。

电源分成许多不同的类型和规格，包括传统模拟式电源到高效的开关式电源。所有这些电源都面临着复杂的动态工作环境。设备负载和需求在不同时间之间可能会大幅度变化。即使是商用开关电源，也必须能够承受突然出现的远远超过平均工作电流的峰值电流。设计电源或设计采用电源的系统的工程师必需了解电源在静止条件到最坏条件下的行为。

从历史上看，检定电源行为意味着使用数字万用表进行静态电流和电压测量，然后在计算器或PC上麻烦地进行计算。今天，大多数工程师正转向示波器，作为首选的电源测量平台。

现代示波器可以配备集成电源测量和分析软件，简化设置，更轻松地进行测量。用户可以定制关键参数，自动进行计算，在几秒钟内查看结构，而不只是原始数字。

本入门手册将重点介绍怎样使用示波器和专用软件测量开关式电源设计。

电源设计问题指向测量需求

在理想状态下，每个电源的行为方式都应与设计使用的数学模型类似。但在实际环境中，元件是不理想的，负载会变化，线路电源可能会失真，环境变化会改变性能。此外，性能和成本需求变化也进一步提高了电源设计的复杂性。考虑一下下面的问题：

- 电源可以保持高于额定输出容量多少瓦？保持多长时间？
- 电源散发多少热量？在过热时会出现什么情况？要求多少冷却气流？
- 在负载电流大幅度提高时会发生什么情况？设备能够保持额定输出电压(负载稳压)？电源对输出完全短路会作出什么样的反应？
- 在电源输入电压变化时会发生什么情况(线路稳压)？

设计人员需要开发出占用空间更少、能耗效率更高、减少散热量、降低制造成本、满足更严格的EMI/EMC标准的电源。只有严格的测量体系，才能引导工程师实现上述目标。

开关式电源基础知识

在大多数现代系统中，流行的DC电源结构是开关式电源(SMPS)，这种电源因能够高效处理负载变化而闻名。典型SMPS的电源信号路径包括无源元件、有源元件和磁性元件。SMPS最大限度地减少了有损耗的元件的使用量，如电阻器和线性模式晶体管，重点采用(在理想条件下)没有损耗的元件，如开关式晶体管、电容器和磁性元件。

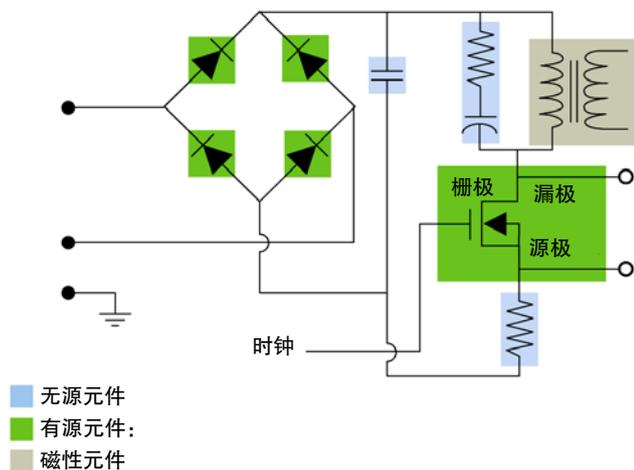


图 1. 开关式电源简化的示意图。

SMPS设备还包括一个控制段，其中包含脉宽调制稳定器、脉冲速率调制稳定器和反馈环路等单元¹。控制段可以有自己电源。图 1 是简化的 SMPS 示意图，其中显示了包括有源单元、无源单元和磁性单元电源转换段。

SMPS技术依托电源半导体开关设备，如金属氧化物场效应晶体管(MOSFET)和绝缘门双极晶体管(IGBT)。这些设备提供了快速开关时间，能够耐受没有规律的电压峰值。同样重要的是，其在 On 状态或 Off 状态下消耗的功率非常小，实现了很高的效率，而生成的热量很低。开关设备在极大程度上决定着 SMPS 的整体性能。开关设备的关键测量项目包括开关损耗、平均功率损耗、安全工作区等等。

¹ 本入门手册介绍与电源路径有关的测量，包括与输出有关的内部单元的测试。控制段测量是比较传统的基于波形和基于逻辑的观测项目，本文中不涉及这些测量。

有源元件测量：开关单元

开关式设备中的功率损耗原理

晶体管开关电路在转换过程中消耗的能量通常会达到最大，因为电路寄生信号会阻止设备立即开关。“关闭损耗”是指开关设备从 ON 转换成 OFF 时损耗的能量，“启动损耗”则是指开关设备从 OFF 转换成 ON 时损耗的能量。

关闭损耗

图 2 说明了怎样计算关闭损耗。在 t_1 后，开关电流下降，二极管电流上升，时间 $(t_2 - t_1)$ 取决于驱动器对 MOSFET 的栅极到漏极电容 C_{gd} 的充电速度。

可以使用下面的公式估算转换过程中损耗的能量：

$$E_{off} = \frac{1}{2} \cdot V_g \cdot i_L \cdot [t_2 - t_0]$$

其中：

- E_{off} 是转换过程中开关损耗的平均能量。
- V_g 是栅极电压。
- i_L 是流经电感器的电流。
- t_2 是转换结束时间。
- t_0 是转换开始时间。

这个公式假设流经 C_{ds} 和 C_{gd} 的电压(从漏极到源极的电容)呈线性上升。 C_{ds} 和 C_{gd} 是寄生电容。

在实际环境器件中，电容 C_{ds} 和 C_{gd} 呈高度非线性化，一般会随着漏极到源极电压变化。这在一定程度上会影响上面介绍的理论计算。在 IGBT 中，由于尾电流现象，电流的下降时间会比较高。这些差异使得工程师必须捕获电压不一致的实际曲线。带有专用电源测量软件的示波器可以大大简化这些测量。

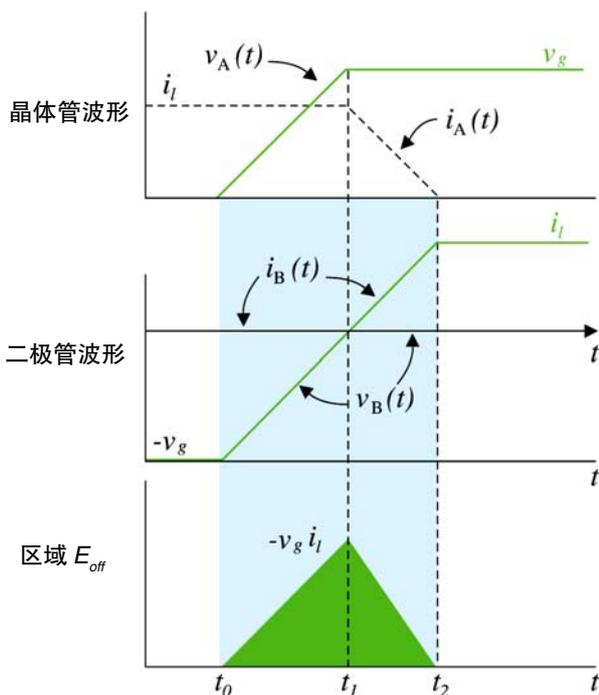


图 2. 关闭损耗的计算。

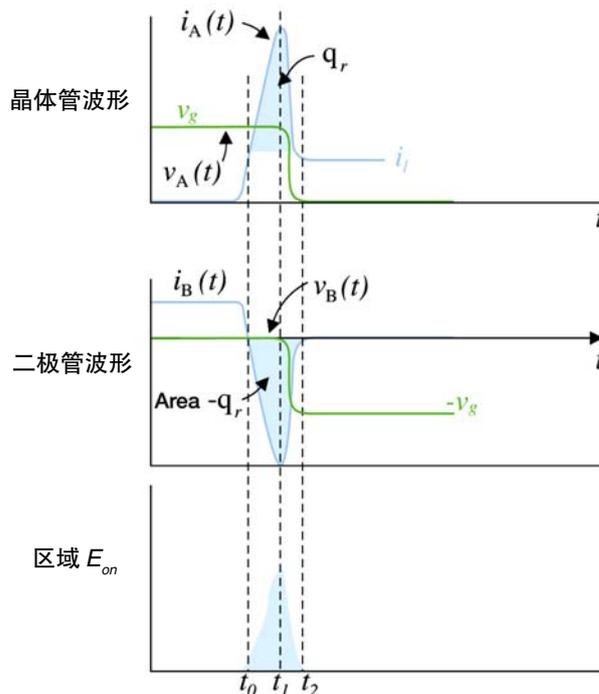


图 3. 启动损耗的计算。

启动损耗

图 3 是带有箝位电感负载和二极管恢复电荷的 MOSFET 的启动损耗。在使用箝位电感负载启动 MOSFET 时，直到存储的电荷恢复时才能积聚二极管电压。因此，二极管会在负方向上持续传导电流，直到阻塞电压，这会导致开关发生巨大的损耗。反向恢复电流依赖于二极管路径中的外部电路。二极管中的电荷取决于正向电流及二极管关闭转换过程中电流下降的 di/dt 。

可以使用下面的公式估算转换过程中损耗的能量：

$$E_{on} = \int_{t_0}^{t_1} v_a(t) \cdot i_a(t) \cdot dt$$

² 摘自美国科罗拉多大学 Rober A. Erickson 所作的《电源电子基础知识》，有所简化。

其中：

- E_{on} 是转换过程中开关损耗的平均能量。
- $v_a(t)$ 是瞬时栅极电压。
- $i_a(t)$ 是流经开关的瞬时电流。
- t_1 是转换结束时间。
- t_0 是转换开始时间。

功率损耗

总损耗是开关中的平均功率损耗，包括开关损耗和传导损耗。总损耗的计算公式如下：

$$P_{Loss} = \frac{1}{T_s} \cdot \int_0^{T_s} V_{switch}(t) \cdot I_{switch}(t) \cdot dt$$

其中：

- P_{Loss} 是开关中的平均功率损耗。
- V_{switch} 是流经开关的瞬时电压。
- I_{switch} 是流经开关的瞬时电流。
- T_s 是开关周期。

安全工作区

开关设备安全工作区(SOA)指标汇制了电压对电流图,以检定设备的工作区域,其通常用来创建电源预计将遇到的各种工作条件的 SOA 曲线。

开关设备制造商的产品技术资料会概括对开关设备的某些限制。其目标是保证开关设备将容忍电源在最终用户环境中必须处理的工作边界。SOA 测试变量可能包括各种负荷方案、工作温度变化、高和低线路输入电压等等。图 4 是 SOA 曲线实例。

SOA 测试通常使用下面的公式计算功率:

$$P_n = V_n I_n$$

其中:

- P_n 是瞬时功率。
- V_n 是电压。
- I_n 是电流。
- n 是样点数。

计算平均功率的公式如下:

$$P_{Avg} = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{n=N} V_n I_n$$

其中:

- N 是开关周期中的样点数。

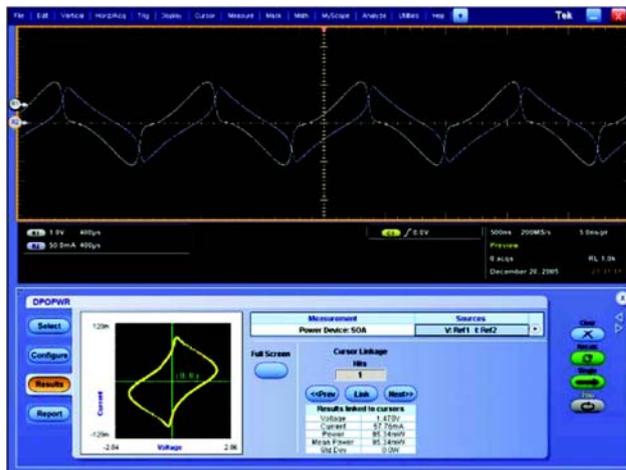


图 4. 这个实例摘自泰克 DPOPOWER, 说明了 SMPS 的 SOA 曲线。可以把这个曲线与开关设备制造商公布的数据进行对比。

动态开点电阻

可以使用元件产品技术资料中给出的 $R_{DS(on)}$ 值, 估算开关设备在“on”状态下的电阻。但是, 实际电阻(进而是开关传导损耗)并不是恒定不变的, 可能会随着开关电压或电流变化而明显变化。

di/dt 和 dv/dt

di/dt 指标表示电流在开关过程中的变化速率, dv/dt 指标则表示电压在开关过程中的变化速率。

进行有源元件测量

对习惯了使用示波器进行高带宽测量的工程师来说, 电源测量由于频率相对较低, 似乎会比较简单。但实际上, 电源测量带来了高速电路设计人员从未面对的一系列挑战。

流经开关设备的电压可能会非常大, 通常是“浮动的”, 即不参考地电平, 信号的脉宽、周期、频率和占空比会不一致。必须真实地捕获和分析波形的不理想特点。

选择适当的测量解决方案

在测量开关电源时，必需选择能够胜任工作的工具。为在测试过程中启动和关闭SMPS，可能要求来自信号源的脉冲激励信号。为准确地仿真正常工作条件下的门驱动信号，激励信号必须有可以调节的占空比、边沿跳变时间和频率。为驱动IGBT设备，激励源还必须能够生成要求的电压，一般在12 V – 15 V。

当然，示波器必须有基本带宽和采样率，处理SMPS内部的开关频率。此外，示波器必须有深存储器，提供在以高定时分辨率进行低频长采集时所需的记录长度。电源测量还要求至少两条通道，一条用于电压测量，一条用于电流测量。

把设备连接到示波器的探头也同样重要。测试中要求同时使用多种探头，如单端探头、差分探头和电流探头。应用软件可以提高电源测量的简便性和可靠性，进一步完善了这一系列工具。

示波器的性能指标

选择示波器时考虑的主要性能指标有上升时间、采样率、记录长度及提供的电源测量分析软件。

上升时间

尽管开关信号速度相对较低，但信号的上升时间可能会相当快。为准确地进行测量，示波器的上升时间至少要快五倍，才能捕获快速跳变的关键细节。

$$RiseTime_{oscilloscope} = \frac{RiseTime_{SwitchingSignal}}{5}$$

例如，如果开关信号的上升时间为5 ns，那么示波器的上升时间至少应该是1 ns，才能准确地进行测量。为提供这么快的上升时间，示波器的带宽一般至少要达到350 MHz。

采样率

采样率用每秒样点数(S/s)表示，指数字示波器采集信号样点的频率。采样率越快，波形分辨率越高，波形越详细，关键信息或事件丢失的可能性越低。为检定SMPS开关过程中一般出现的振铃，示波器的采样率必须足够快，以便捕获开关信号边沿上的多个样点。

记录长度

示波器捕获测量期间事件的能力取决于使用的采样率及存储采集的信号样点的存储器的深度(记录长度)。存储器的填充速度与采样率直接成正比。在采样率设置得足够高，能够以高分辨率详细地信号时，存储器会迅速填充。

对许多SMPS电源测量，必需捕获1/4周期或1/2周期(90度或180度)的工频信号；有些测量甚至要求捕获整个周期。60 Hz工频的1/2周期的时间是8 ms多。在采样率为1 GS/s时，需要8M点的记录长度，才能捕获这么长的时间。

电源测量和分析软件

应用软件可以大大提高示波器上电源测量和分析的简便程度，其自动执行常用测量，提供详细的测试报告，简化了某些复杂的测量情况，如测量高低压信号，进行开关损耗和功率损耗测量。

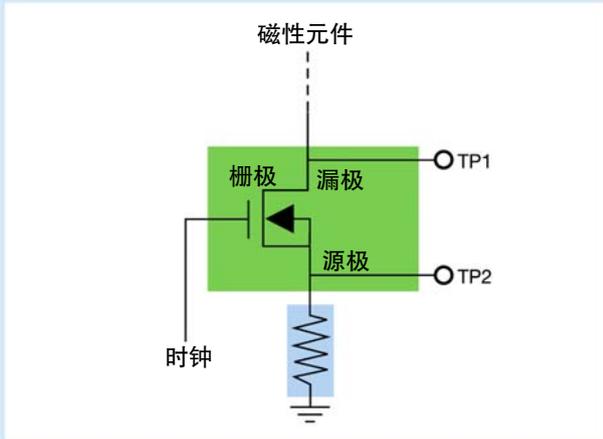


图 5. MOSFET 开关设备，显示了测量点。

在一个采集中测量 100 V 和 100 mV

为测量开关设备的开关损耗和平均功率损耗，示波器必须先分别确定 OFF 期间和 ON 期间流经开关设备的电压。

在 AC/DC 转换器中，流经开关设备的电压拥有非常高的动态范围。在 ON 状态期间流经开关设备的电压取决于开关设备的类型。在图 5 所示的 MOSFET 中，ON 电压是信道电阻和电流之积。在双极晶体管 (BJT) 和 IGBT 设备中，电压主要基于饱和电压下跌幅 (V_{CEsat})。OFF 状态电压取决于开关式转换器的工作输入电压和拓扑。为计算设备设计的典型 DC 电源通常会在 $80 V_{rms} - 264 V_{rms}$ 的通用市政电压上工作。在最大输入电压下，流经开关设备的 OFF 状态电压 (在 TP1 和 TP2 之间) 可以高达 750 V。在 ON 状态下，流经相同端子的电压可以在几 mV 到大约 1 V 之间。图 6 说明了开关设备上的典型信号特点。

必须先测量这些 OFF 电压和 ON 电压，才能准确地测量开关设备上的功率。但是，普通 8 位示波器则很难准确采集 (在同一采集周期内) ON 期间发生的 mV 级信号及 OFF 期间发生的高压信号。

Eliminating Skew Between Voltage and

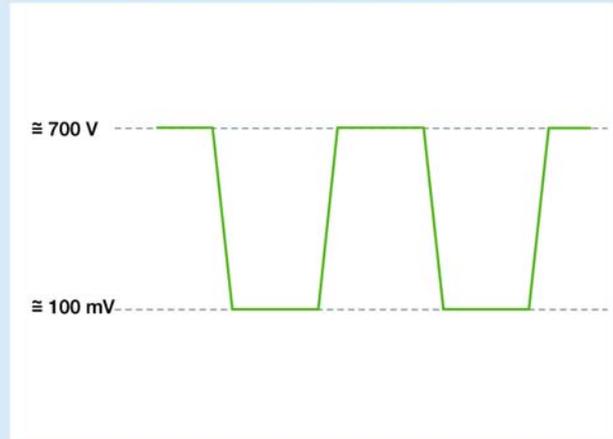


图 6. 开关设备的典型信号。

图 7. DPOWPR 输入页面允许用户输入 R_{DSon} 和 V_{CEsat} 的产品技术资料值。

为捕获这个信号，示波器的垂直范围设置为每格 100 V。在这个设置下，示波器将接受高达 1000 V 的电压，因此可以采集 700 V 信号，而不会使示波器超载。使用这种设置的问题是，其可以解析的最小信号幅度是 $1000/256$ 或大约 4 V。

借助现代示波器所带的电源测量应用软件，用户可以把设备产品技术资料中的 R_{DSon} 或 V_{CEsat} 值输入测量菜单，如图 7 所示。或者在测得的电压位于示波器灵敏度范围内时，应用软件可以使用采集的数据计算数值，而不用手动输入数值。

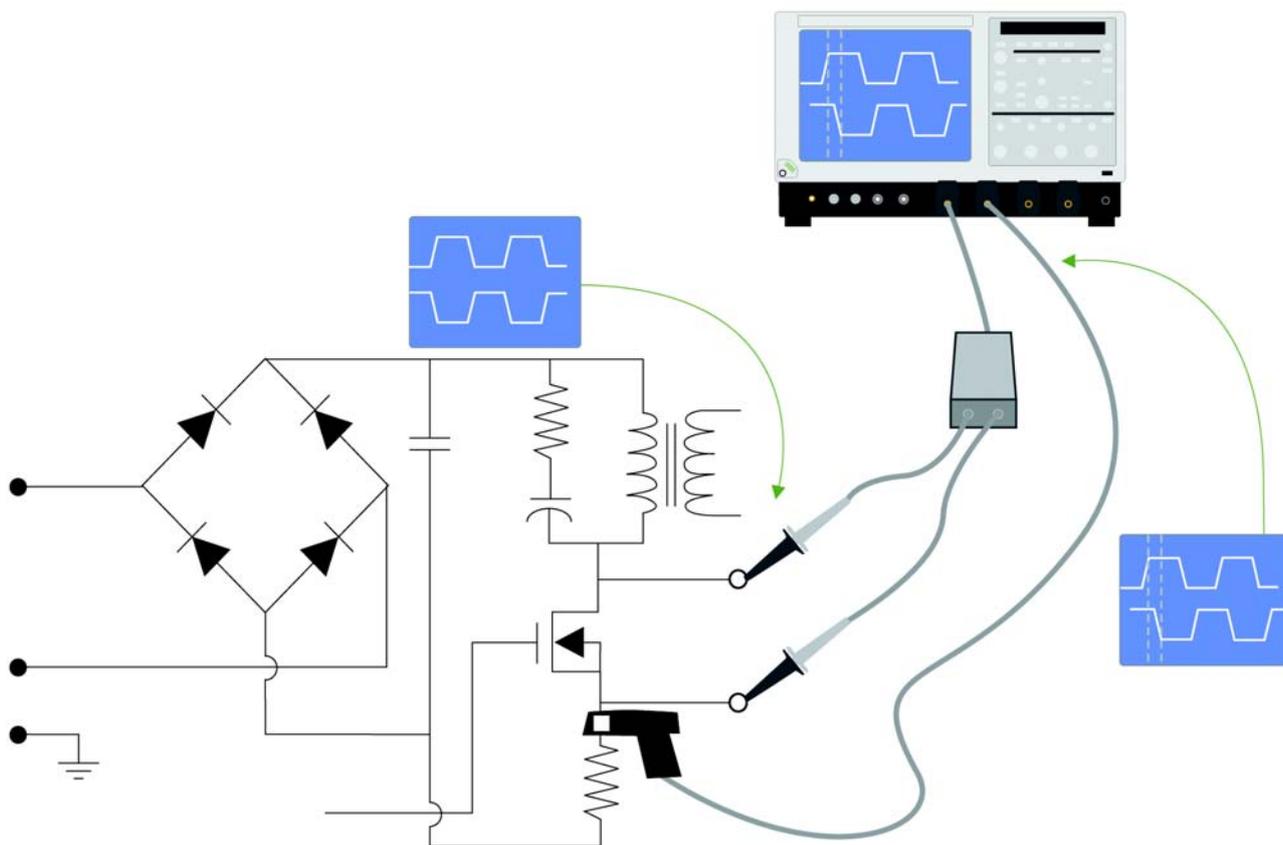


图 8. 传播延迟对电源测量的影响。

电流探头

数字示波器进行电源测量时，必需测量流经 MOSFET 开关设备漏极到源极的电压和电流或流经 IGBT 的集电极到发射器电压。这一任务要求使用两只不同的探头：一只高压差分探头和一只电流探头。后一种探头通常是非插入式霍尔效应型探头。每种探头都有自己的特性传播延迟。这两种延迟之差称为偏移，会导致定时测量不准确及功率波形失真。

必需了解探头的传播延迟对最大峰值功率和区域测量的影响。毕竟，功率是电压和电流之积。如果相乘的两个变量并没有在时间完美对准，那么结果会不正确。在探头没有正确校正偏移时，会损害测量精度，如开关损耗。

图8所示的测试设置比较了探头尖端上的信号(下面的轨迹显示画面)与传播延迟后示波器前面板上的信号(上面的显示画面)。

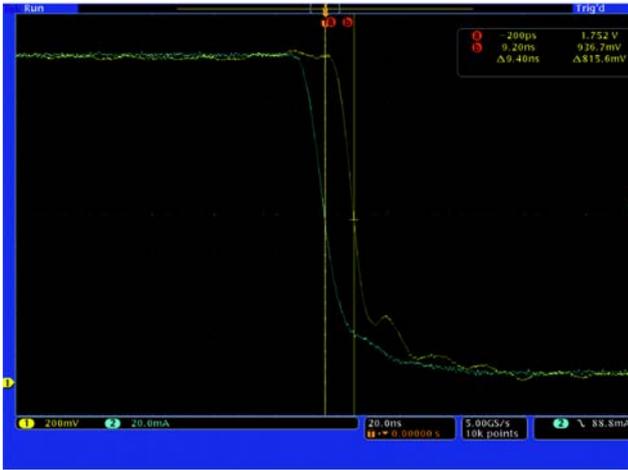


图 9. 电压信号与电流信号之间 9.4 ns 的偏移。

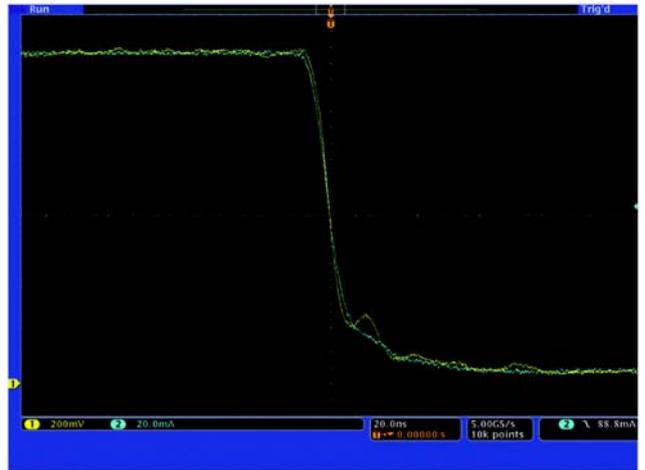


图 11. 在偏移校正过程后电压信号与电流信号对准。

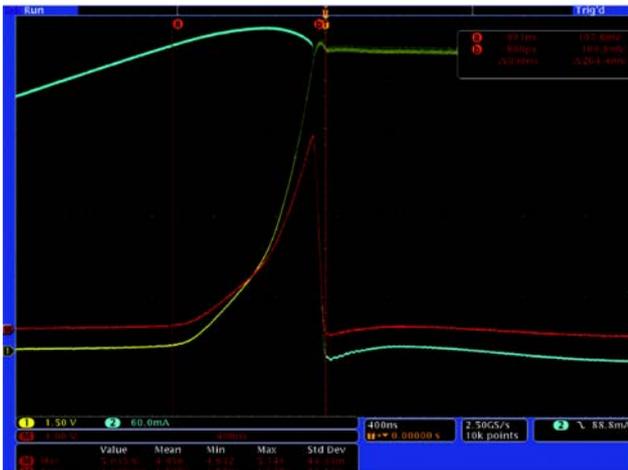


图 10. 在这一偏移下，功率波形的峰值幅度是 4.958 W。

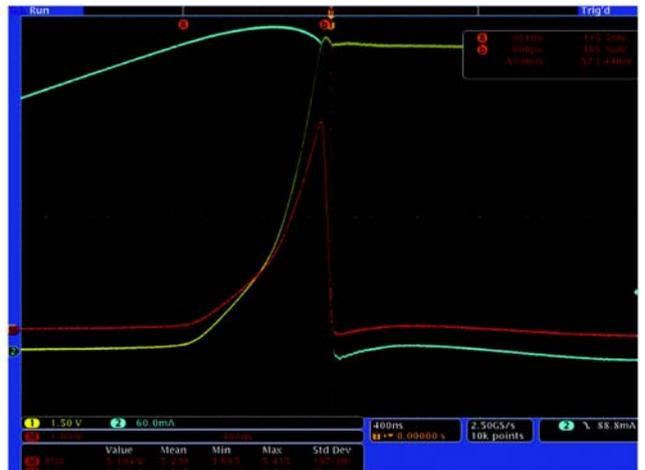


图 12. 在偏移校正后峰值幅度上升到 5.239 W (高出 5.6%)。

图9到图12是演示了探头偏移影响的实际示波器屏幕图。图9揭示了电压探头和电流探头之间的偏移，图10显示了在没有校正两只探头偏移前获得的测量结果(4.958 W)。

图11显示了校正探头偏移的影响。两条参考轨迹重叠，表明延迟已经均衡。图12中的测量结果说明了正确校正偏移的重要性。这一实例证明，偏移引入了5.6%的测量误差。准确校正偏移减少了峰峰值功率损耗测量的误差。

某些电源测量软件将自动校正选定探头组合的偏移。软件控制着示波器,使用实时电流信号和电压信号调节电压通道和电流通道之间的延迟,消除电压探头和电流探头之间的传播延迟差异。

另外还有一种静态偏移校正功能,其基于某些电压探头和电流探头拥有恒定的可重复的传播延迟。静态偏移校正功能根据选定探头的嵌入传播时间表,自动调节选定电压通道和电流通道之间的延迟。这种技术提供了快捷简便的方式,可以使偏移校正达到最小。

消除探头偏置和噪声

差分探头和电流探头可能会有较小的偏置。这会影响精度,在继续测量前必须消除这个偏置。某些探头内置自动去掉偏置的方法,其它探头则要求手动去掉偏置。

自动消除偏置

配有泰克 TekVPI™ 探头接口的探头与示波器相结合,可以去掉信号路径中的任何DC偏置误差。按TekVPI探头上的 Menu 按钮,会在示波器上调出一个 Probe Controls 框,显示 AutoZero 功能。



图 13. TDSPWR3 软件菜单上的信号调节选项。这个选项把开关设备“Off”期间的电流设为零。

选择 AutoZero 选项将自动清零测量系统中存在的任何 DC 偏置误差。TekVPI 电流探头在探头机身上还有一个 Degauss/AutoZero 按钮。压下 AutoZero 按钮将去掉测量系统中存在的任何 DC 偏置误差。

手动去掉偏置

大多数差分探头内置 DC 偏置整理控制功能,可以相对简单地去掉偏置。类似的,在进行测量前,必需先调节电流探头。

注意,差分探头和电流探头是有源设备,总会存在一定的低电平噪声,即使在静止状态下。这种噪声会影响依赖电压波形和电流波形数据的测量项目。某些电源测量软件包括信号调节功能(图 13),可以使固有探头噪声的影响达到最小。

无源元件测量：磁性元件

无源元件是指不放大信号或开关信号的元件。电源采用全系列无源元件，如电阻器和电容器，但从测量角度看，主要重点要放在磁性元件(磁性器件)上，特别是电感器和变压器。电感器和变压器都由外面缠着几圈铜线的铁芯组成。

电感器的阻抗会随着频率提高而提高，对较高频率的阻挡作用要高于较低频率，因此适合滤波电源输入和输出上的电流。

变压器把初级线圈的电压和电流耦合到次级线圈上，提高或降低信号电平(电压或电流，但不能同时是两者)。因此，变压器可以在初级线圈上接受 120 V 的电压，然后在次级线圈上逐步下降到 12 V，同时次级线圈上的电流会成比例提高。注意这不视为放大，因为信号净功率不会提高。由于变压器初级线圈和次级线圈并没有在电气上相连，因此它们也用来实现电路单元之间的隔离。

有助于确定电源性能的部分指标包括：

- 电感
- 功率损耗(磁性元件)
- 磁性属性

电感基础知识

电源使用电感器作为能量贮存设备、滤波器或变压器。作为变压器时，电感器可以帮助保持开关式电源中的振荡。设计人员需要监测这种设备在工作条件下的行为。电感值取决于电流和电压来源、激发信号、波形和工作频率。电感使用下面的公式确定：

$$L = \frac{\int -Vdt}{I}$$

其中：

- L 是电感(单位为亨利)。
- V 是流经电感器的电压。
- I 是流经电感器的电流。
- dt 是信号中的变化速率或转换速率。

可以使用几种不同的解决方案测量电感。例如，LCR 仪表使用内置信号发生器激励被测电感器，然后使用电桥平衡技术，测量设备阻抗。LCR 仪表使用正弦波作为信号源。

但在实际环境的电源中，信号是高电压高电流方波，因此，大多数电源设计人员首选在电源动态变化的环境下监测电感器行为，以获得更准确的信息。

使用示波器测量电感

测量实际电源中电感器最常用的工具是示波器。电感测量本身非常简单，只是探测流经磁性元件的电压和电流，在很大程度上与前面介绍的开关设备测量类似。

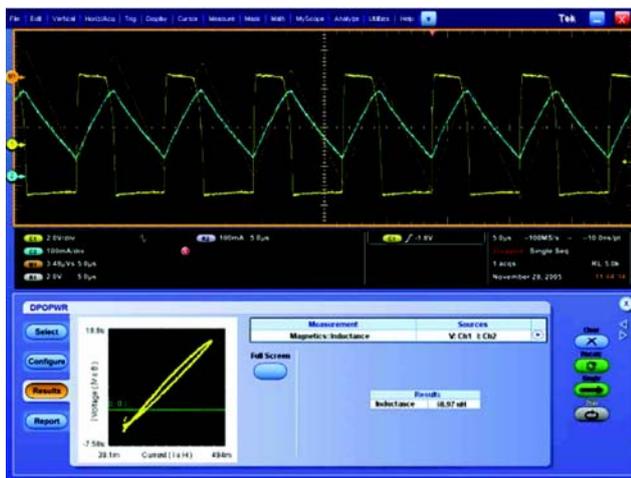


图 14. DPOPWR 应用程序的电感测量结果。

图 14 是电感测量结果。这里，软件计算的电感为 58.97 微亨。

磁性功率损耗基础知识

磁性功率损耗影响着电源的效率、可靠性和热性能。有两种功率损耗与磁性单元有关：磁芯损耗和铜线损耗。

磁芯损耗

磁芯损耗由磁滞损耗和涡流损耗构成。磁滞损耗与 DC 通量频率有关，每单位容量磁滞损耗用下面的公式表示：

$$P_{Hyst} = \int H \cdot dB$$

其中：

- P_{Hyst} 是每单位容量的磁滞损耗。
- H 是场强
- B 是通量密度。

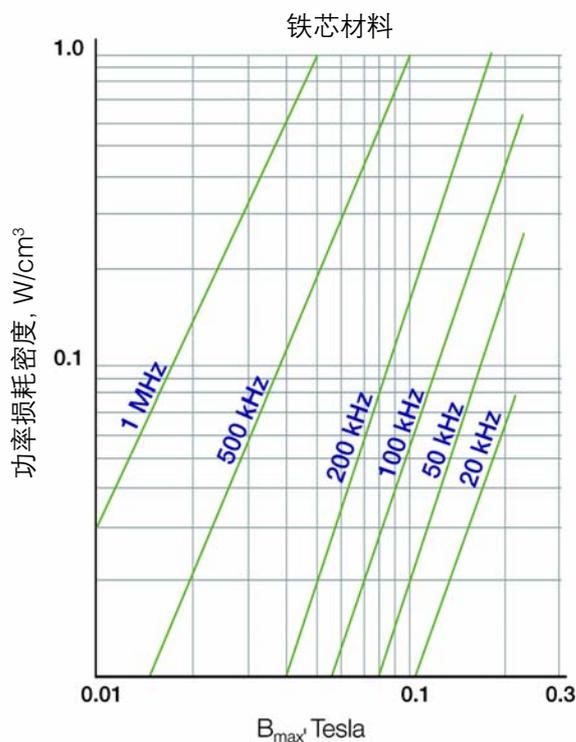


图 15. 各种开关频率下的磁芯损耗与通量密度曲线。

可以使用磁芯制造商的产品技术资料计算磁芯损耗，如图 15 所示。这里，制造商指定了一三象限工作时正弦激励的损耗。制造商还指定了经验关系，来计算不同 AC 通量密度和频率下的磁芯损耗。

铜线损耗

铜线损耗源于铜绕组线的电阻。计算铜线损耗的公式如下：

$$P_{cu} = I_{rms}^2 \cdot R_{wdg}$$

其中：

- P_{cu} 是铜线损耗。
- I_{rms} 是流经磁性元件的 rms 电流。
- R_{wdg} 是线圈电阻，这个电阻取决于 DC 电阻、趋肤效应和接近效应。

使用示波器测量磁性功率损耗

可以使用磁芯厂商的产品技术资料及运行电源测量软件的示波器测量结果，迅速得出总功率损耗和磁芯损耗。可以使用这两个值，计算铜线损耗。在知道了不同的功率损耗成分后，可以确定磁性元件上的功率损耗成因。

磁性元件功率损耗计算方法在一定程度上取决于被测的元件类型。被测设备可以是单线圈电感器，也可以是多线圈电感器，还可以是变压器。图 16 显示了单线圈电感器的测量结果。

通道 1 (黄色轨迹) 是流经电感器的电压，通道 2 (蓝色轨迹) 是使用非插入型电流探头测得的流经电感器的电流。电源测量软件自动计算和显示功率损耗值，这里显示的是 173.95 mW。

多线圈电感器要求的方法略有不同。总功率损耗是各个线圈的损耗之和。

$$TotalPowerLoss = PowerLoss_{L1} + PowerLoss_{L2} + PowerLoss_{L3} + \dots$$

计算变压器上的功率损耗，进一步把公式变为：

$$TotalPowerLoss = PowerLoss_{PR} - (PowerLoss_{S1} + PowerLoss_{S2} + \dots)$$

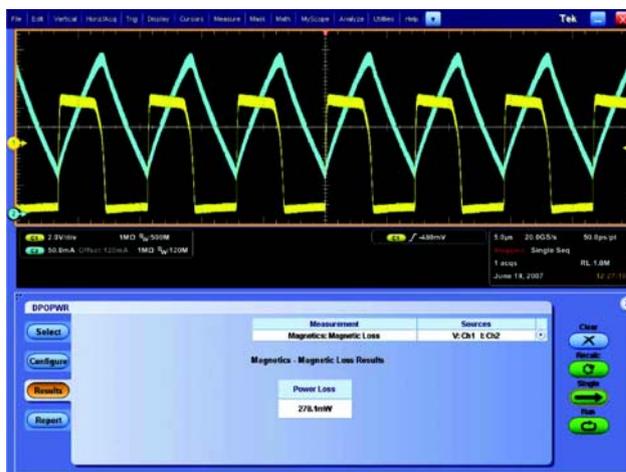


图 16. DPOWPR 测量的单线圈电感器上的功率损耗。

在初级线圈上测得的功率损耗将包括次级线圈反射的功率，因此，必需测量初级线圈和次级线圈上的功率，然后使用变压器公式计算功率损耗。

磁性属性基础知识

开关式电源必须在各种工作条件下保持可靠性。为实现最优性能，设计人员一般会使用制造商提供的B-H (磁滞) 曲线，指定磁性元件、变压器和电感器。这些曲线定义了磁性元件磁芯材料的性能包络，必须在磁滞曲线的线性区域内，维护工作电压、电流、拓扑和转换器类型等因素。很明显，变量这么多，维护起来相当不易。

检定磁性元件的工作区域，同时在 SMPS 内保持工作，对确定电源的稳定性至关重要。测量程序包括绘制磁滞环路曲线及考察电感器和变压器的磁性属性。

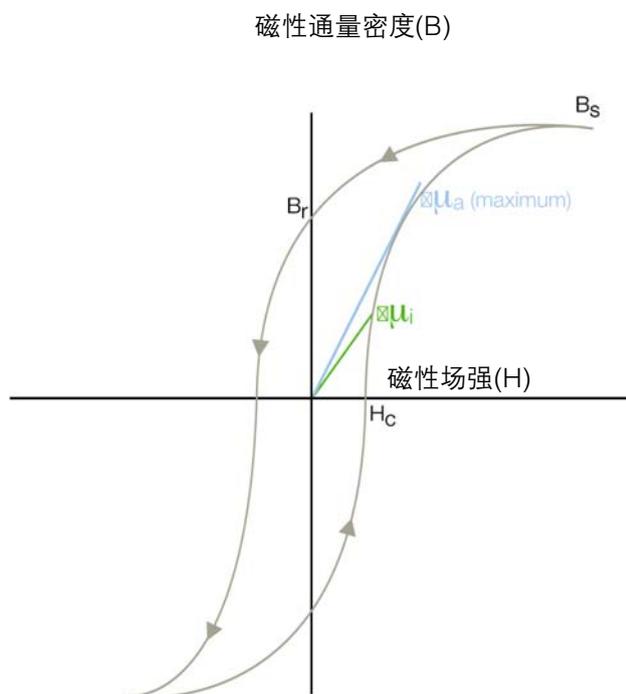


图 17. 磁性元件典型的 B-H (磁滞) 曲线。

B-H 曲线

B-H 曲线检定磁性属性，图 17 是正弦激励典型的 B-H 曲线。

为进行 B-H 曲线测量，一开始时需要下述信息：

- 流经磁性元件的电压, V
- 磁性电流, I
- 圈数, N
- 磁长度, L
- 横截面面积, A
- 表面积, S

与图 17 有关的下述定义都使用这些变量：

磁场强度(H)是用来感应被测材料中磁通量的磁场,单位为每秒安培。

$$H_k(t) = I_k(t) \cdot \frac{N}{l}$$

饱和通量密度(Bs)是材料中感应的最大磁性通量密度,而不管外部应用的场幅度H如何。

$$\Phi_k = \int V_k(t) dt$$

和：

$$B_k(t) = \frac{\Phi_k}{(N \cdot S)}$$

剩磁(Br)是在生成磁滞环路时在外部应用的磁场(H)返回零后材料中剩余的感应的磁性通量密度。

矫磁力(Hc)是H轴和磁滞环路的截距上的H值,表示导致感应的通量密度(B)在磁滞环路测量期间到达零所需的外部场。Hc与正负轴对称。

初始导磁系数(μi)是在H接近零时感应的磁性通量密度(B)与应用场(H)之比,这是磁滞环路上任一点的B与H之比。此外,最大幅度导磁系数是磁滞环路正周期第一象限上的B与H之比,是从原点画出的直线斜率。

磁性属性测量

电感器作为电源输入和输出上的滤波器使用,可以有单个线圈,也可以有多个线圈。

在进行磁性属性测量时需要下述信息:

- 流经磁性元件的电压, V
- 磁性电流, I
- 圈数, N
- 磁长度, L
- 横截面积, A

电感器电压和电流的公式如下:

$$V_L(t) = R \cdot i_L(t) + L \cdot \frac{di_L(t)}{dt}$$

在典型的DC到DC转换器中,线圈中的通量计算公式如下:

$$L \cdot \frac{di_L(t)}{dt} = N \cdot \frac{d\phi_L(t)}{dt}$$

和

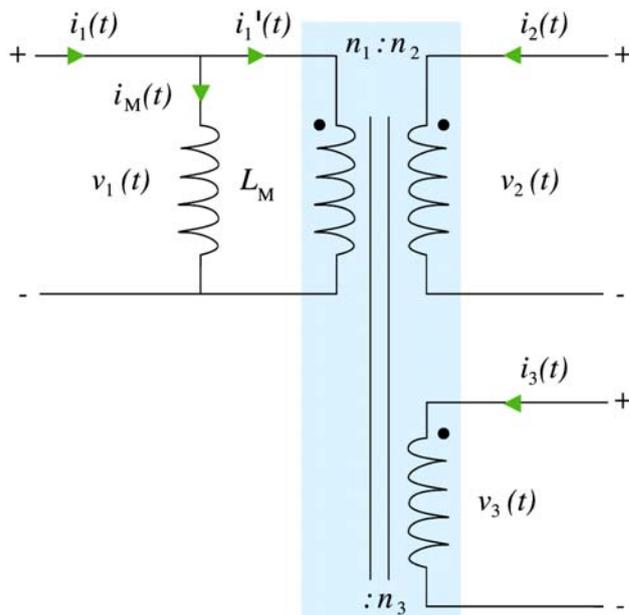
$$\phi_L [(n+1)T_s] = \phi_L [nT_s]$$

图 18 是可以作为耦合电感器或变压器使用的典型的多线圈磁性单元。计算这一电路操作的电气公式如下:

$$\frac{v_1(t)}{n_1} = \frac{v_2(t)}{n_2} = \frac{v_3(t)}{n_3}$$

和

$$i_1'(t) \cdot n_1 = -i_2(t) \cdot n_2 - i_3(t) \cdot n_3$$



理想的变压器

图 18. 多线圈磁性单元。

和

$$i_1(t) = i_M(t) + i_1'(t)$$

为计算净磁化电流,必需测量 $i_1(t)$ 、 $i_2(t)$ 和 $i_3(t)$ 。在净磁化电流一定时, B-H 分析程序与单线圈电感器使用的程序类似。通量取决于净磁化电流。在所有线圈中测得的矢量和为磁化电流。

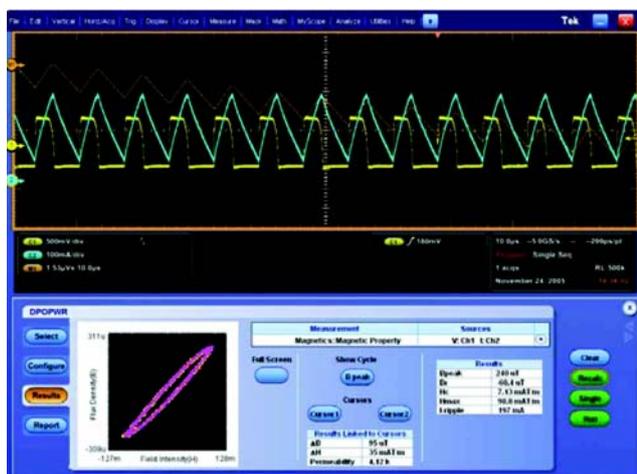


图 19. 单线圈电感器的 B-H 曲线。

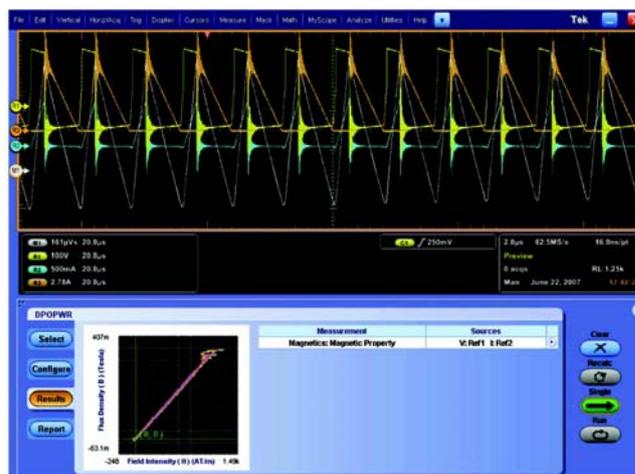


图 20. 变压器的 B-H 曲线。

使用示波器测量磁性属性

专用电源测量软件可以大大简化示波器测量磁性属性的过程。在许多情况下，只需测量电压和磁化电流就可以了，软件会为您完成磁性属性指标的计算过程。图 19 说明了单线圈电感器上的磁性属性测量结果。还可以使用初级电流源和次级电流源在变压器上执行测量。

在图 20 中，通道 1 (黄色轨迹) 是流经变压器的电压，通道 2 (蓝色轨迹) 是流经初级线圈的电流，通道 3 (洋红色轨迹) 是流经次级线圈的电流。软件使用通道 2 和通道 3 数据，确定磁化电流。

某些电源测量软件还为磁性元件创建具体的 B-H 曲线，检定其性能。首先输入磁芯圈数、磁长度和横截面面积，然后软件会计算 B-H 曲线。

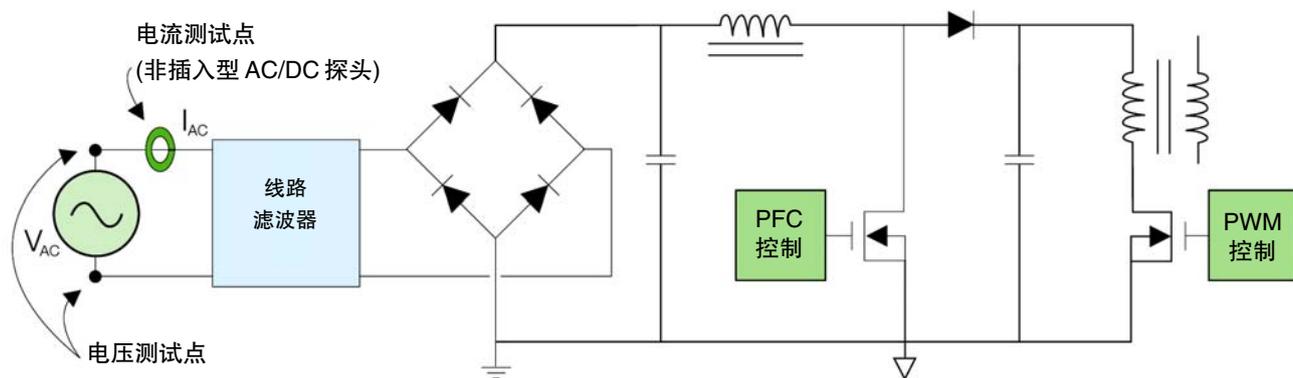


图 21. SMPS 电源(仅初级侧)和电源质量测试点简化的示意图。测量电源质量需要同时输入 V_{AC} 和 I_{AC} 读数。

电源线测量

电源线测量检定电源与其使用环境之间的交互情况。要注意的是，电源可以采用任何规格，从个人电脑中的小型风扇盒，到工厂内大小适中为设备提供动力的发动机，到为电话群和服务器群提供支持的大规模电源。每种电源都对馈电的输入电源(一般是市政电源)有一定影响。

为确定插入电源的影响，必须直接在输入电源线上测量电源电压和电流参数。

电源质量测量基础知识

电源质量并不单纯依赖发电厂，还依赖于电源设计和制造及最终用户的负载。电源的电源质量特点决定着电源的“健康状况”。

实际环境中的电源线永远不会提供理想的正弦波，而是在线路上总有一定的失真和非理想特点。开关电源给电源带来了非线性负载。因此，电压波形和电流波形并不是完全相同。输入周期的某个部分会吸收电流，在输入电流波形上产生谐波。确定这些失真的影响是电源工程设计中的重要组成部分。

为确定电源线上的功耗和失真，必需在输入阶段测量电源质量，如图 21 所示的电压测试点和电流测量点所示。

电源质量指标包括：

- 真实功率
- 视在功率或无功功率
- 功率因数
- 波峰因数
- 根据 EN61000-3-2 标准进行电流谐波测量
- 总谐波失真(THD)

使用示波器测量电源质量

运行电源测量应用软件的数字示波器为替代测量电源质量的传统工具—功率计和谐波分析仪提供了强大的解决方案。

必须使用示波器，而不是老式工具。仪器必须能够捕获直到基础谐波 50 阶谐波的谐波成分。根据相应的本地标准，电源工频通常是 50 Hz 或 60 Hz。在某些军事应用和航空应用中，工频可以是 400 Hz。当然，信号畸变可能会包含更高的频率。由于现代示波器采样率高，它可以以非常高的细节(分辨率)捕获快速变化的事件。相比之下，传统功率计由于响应时间相对较慢，可能会漏掉信号细节。此外，示波器记录长度足以采集所需的周期数，即使在非常高的采样分辨率下也不例外。

软件工具加快了测量过程，使设置时间达到最小。通过在示波器上运行的全功能电源测量软件，在几秒钟内执行冗长的程序，可以自动完成大多数电源质量测量。通过减少手动计算数量，示波器可以作为用途非常广泛、非常高效的功率计。图22是强大的电源测量软件实例。

示波器探头也有助于安全可靠地进行电源测量。为电源应用设计的高压差分探头是观测浮动电压信号的首选工具。

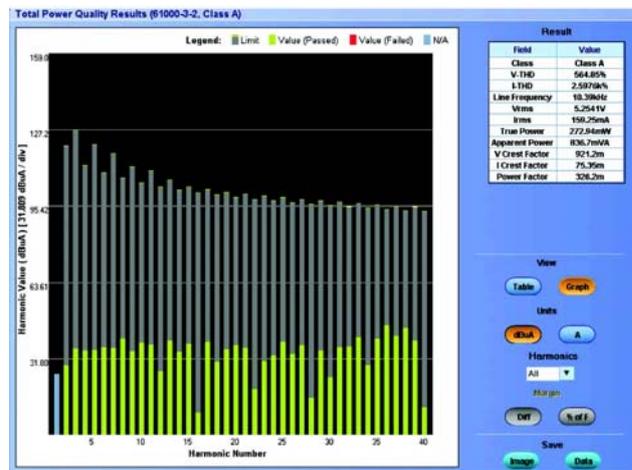


图 22. 使用 DPOPOWER 测量和分析软件获得的电源质量结果，测量指标包括真实功率、视在功率、波峰因数、总谐波失真、功率因数及电流谐波柱状图。

要特别注意电流探头，可以通过多种方式实现电流探头结构：

- AC 电流探头基于电流变压器(CT)技术。CT 探头是非插入型探头，但不能感应信号中的 DC 成分，可能会导致测量不准确。
- 电流并联。这种设计要求中断电路，可能会导致探头本身内部的电压下跌，可能会影响电源测量精度。
- AC/DC 电流探头一般基于霍尔效应传感器技术。这种设备以非插入方式传感 AC/DC 电流，能够使用一条连接读取 AC 成分和 DC 成分。

AC/DC 电流探头已经成为迎接开关式电源中电源质量测量挑战的首选工具。

总结

电源是几乎每种电源供电的电子产品不可分割的组成部分，开关式电源(SMPS)已经成为数字计算、联网和通信系统中的主导结构。一个开关式电源的性能或故障可能会影响昂贵的大型系统的命运。

为保证新兴SMPS设计的可靠性、稳定性、性能和一致性，唯一的方式是进行测量。SMPS测量分成几大类，如有源设备测量、无源设备测量(主要是磁性元件)和电源质量测量。某些测量可以处理浮动电压和高电流，其它测量则要求数学密集型分析，提供有意义的结果。电源测量可能会非常复杂。

现代数字示波器已经成为检定和调试测量的首选工具。在配备相应的探测工具和自动测量软件时，示波器简化了挑战性的SMPS测量，提供了快速准确的测量结果。

产品比较图

电源测量

哪种泰克仪器适合您的电源应用？

- 自动
- 手动



TPS2000 系列
带 TPS2PWR1 模块



TDS3000C 系列
带 TDS3AAM 模块



MSO/DPO4000 和
MSO/DPO3000 系列
带 DPO4PWR 或
DPO3PWR 模块



TDS5000B 系列
带 TDS3PWR3 选项



DPO7000 系列
带 DPOPWR 选项

技术指标	带宽	100 MHz–200 MHz	100 MHz–500 MHz	100 MHz–1 GHz	350 MHz–1 GHz	500 MHz–3.5 GHz
	记录长度	2.5k	10k	高达 10M	高达 16M	高达 200M
	采样率(在所有通道上)	最高 2 GS/s	最高 5 GS/s	最高 5 GS/s	最高 5 GS/s ¹	最高 40 GS/s ¹
	最大输入电压(另请第 22 页电压探头)	300 V _{RMS} CAT II	150 V _{RMS}	250V _{RMS} , 400V _{pk-pk}	150 V CAT I	150 V CAT I
专用功能	自动校正偏移			X	X	X
	隔离和浮动通道	X				
	Windows 操作系统和桌面				X	X
	电池供电操作	X	X			
	FFT 插槽	X	X	X	X	X
线路电源质量测量	V _{RMS}	■	■	■	■	■
	I _{RMS}	■	■	■	■	■
	真实(实际)功率	■	■	■	■	■
	无功功率	■		■	■	■
	视在功率	■	■	■	■	■
	功率因数	■	■	■	■	■
	波峰因数	■	■	■	■	■
	相角	■	■	■	■	■
	谐波	■	■	■	■	■
	总谐波失真	■		■	■	■
I/O 分析	线路纹波	■	■	■	■	■
	开关噪声	■	■	■	■	■
辐射一致性测试	EN61000–3–2 预一致性测试	■		■		■
	MIL Standard 1399	■		■		■
有源器件测量	开关损耗测量	■	■	■	■	■
	安全工作区域	■	■	■	■	■
	动态电阻(dv/dt, di/dt)	■	■	■	■	■
	调制分析			■	■	■
无源器件测量	电感				■	■
	磁性功率损耗				■	■
	通量密度			■	■	■
	B–H 曲线				■	■

¹ 在一通道上



TPS2000 系列
带 TPS2PWR1 模块

TDS3000C 系列
带 TDS3AAM 模块

TDS5000B 系列
带 TDS PWR3 选项

MSO/DPO4000 和
MSO/DPO3000 系列
带 DPO4PWR
DPO3PWR 模块

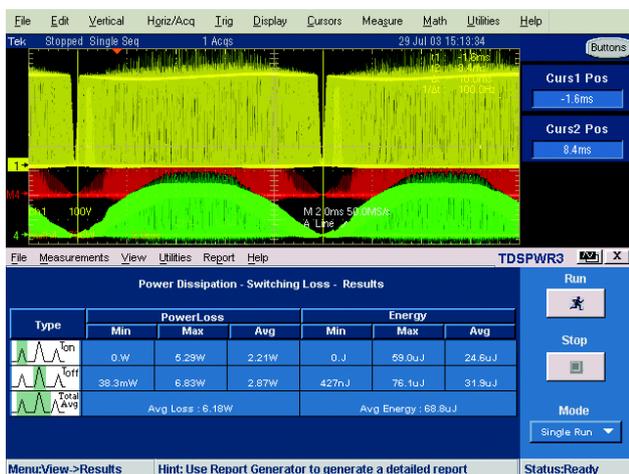
DPO7000 系列
带 DPOPWR 选项

<p>电源应用:</p>	<ul style="list-style-type: none"> 工业电源 汽车 	<ul style="list-style-type: none"> 电源调试 教育 	<ul style="list-style-type: none"> SMPS 设计和开发 预一致性测试 (军事和工业) 	<ul style="list-style-type: none"> 电源调试 SMPS设计和开发 	<ul style="list-style-type: none"> SMPS 设计和开发 预一致性测试 (军事和工业) 																
<p>探头</p>	<p>在与下述探头结合使用时, TPS2000、TDS3000C 和 TDS5000B 系列示波器可以实现最佳的电源测量性能:</p> <div data-bbox="384 756 660 976" data-label="Image"> </div> <p>高压差分探头</p> <table border="1" data-bbox="384 1021 991 1194"> <thead> <tr> <th>特点</th> <th>型号</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td> <ul style="list-style-type: none"> 使用使示波器接地, 安全地测量浮动电路或提升电路。 从几毫伏到几千伏, 动态电压范围宽。 </td> <td> <ul style="list-style-type: none"> P5205 (测量最高1000 V_{RMS} CAT II 的电压) P5210¹ (测量最高4400 V_{RMS} 的电压) </td> </tr> </tbody> </table> <div data-bbox="384 1209 730 1366" data-label="Image"> </div> <p>电流探头</p> <table border="1" data-bbox="384 1412 991 1584"> <thead> <tr> <th>特点</th> <th>型号</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td> <ul style="list-style-type: none"> 变压器和霍尔效应技术, 增强 AC/DC 测量功能。 从几毫安到几千安, 动态电流范围宽。 </td> <td> <ul style="list-style-type: none"> TCP202 TCPA300, 带 TCP303/ TCP305/TCP312 </td> </tr> </tbody> </table>			特点	型号	<ul style="list-style-type: none"> 使用使示波器接地, 安全地测量浮动电路或提升电路。 从几毫伏到几千伏, 动态电压范围宽。 	<ul style="list-style-type: none"> P5205 (测量最高1000 V_{RMS} CAT II 的电压) P5210¹ (测量最高4400 V_{RMS} 的电压) 	特点	型号	<ul style="list-style-type: none"> 变压器和霍尔效应技术, 增强 AC/DC 测量功能。 从几毫安到几千安, 动态电流范围宽。 	<ul style="list-style-type: none"> TCP202 TCPA300, 带 TCP303/ TCP305/TCP312 	<p>MSO/DPO4000、MSO/DPO3000 和 DPO7000 系列数字荧光示波器配有泰克通用探头接口(TekVPI)。TekVPI™ 探头用途广泛、功能丰富、简便易用。</p> <div data-bbox="1034 799 1214 976" data-label="Image"> </div> <p>TekVPI 高压差分探头</p> <table border="1" data-bbox="1034 1021 1420 1194"> <thead> <tr> <th>特点</th> <th>型号</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td> <ul style="list-style-type: none"> 提供GHz性能, 分析开关电源(SMPS)设计。 使用多种方式连接被测设备(DUT), 简便易用。 </td> <td> <ul style="list-style-type: none"> TDP1000² TDP0500² </td> </tr> </tbody> </table> <div data-bbox="1034 1209 1294 1366" data-label="Image"> </div> <p>TekVPI 电流探头</p> <table border="1" data-bbox="1034 1412 1420 1584"> <thead> <tr> <th>特点</th> <th>型号</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td> <ul style="list-style-type: none"> 杰出的带宽(DC-120 MHz)和广泛的动态范围(几毫安到几百安)。 分芯结构, 可以更简便、更迅速地连接被测设备(DUT)。 </td> <td> <ul style="list-style-type: none"> TCP0030² </td> </tr> </tbody> </table>		特点	型号	<ul style="list-style-type: none"> 提供GHz性能, 分析开关电源(SMPS)设计。 使用多种方式连接被测设备(DUT), 简便易用。 	<ul style="list-style-type: none"> TDP1000² TDP0500² 	特点	型号	<ul style="list-style-type: none"> 杰出的带宽(DC-120 MHz)和广泛的动态范围(几毫安到几百安)。 分芯结构, 可以更简便、更迅速地连接被测设备(DUT)。 	<ul style="list-style-type: none"> TCP0030²
特点	型号																				
<ul style="list-style-type: none"> 使用使示波器接地, 安全地测量浮动电路或提升电路。 从几毫伏到几千伏, 动态电压范围宽。 	<ul style="list-style-type: none"> P5205 (测量最高1000 V_{RMS} CAT II 的电压) P5210¹ (测量最高4400 V_{RMS} 的电压) 																				
特点	型号																				
<ul style="list-style-type: none"> 变压器和霍尔效应技术, 增强 AC/DC 测量功能。 从几毫安到几千安, 动态电流范围宽。 	<ul style="list-style-type: none"> TCP202 TCPA300, 带 TCP303/ TCP305/TCP312 																				
特点	型号																				
<ul style="list-style-type: none"> 提供GHz性能, 分析开关电源(SMPS)设计。 使用多种方式连接被测设备(DUT), 简便易用。 	<ul style="list-style-type: none"> TDP1000² TDP0500² 																				
特点	型号																				
<ul style="list-style-type: none"> 杰出的带宽(DC-120 MHz)和广泛的动态范围(几毫安到几百安)。 分芯结构, 可以更简便、更迅速地连接被测设备(DUT)。 	<ul style="list-style-type: none"> TCP0030² 																				

¹ TPS2000 系列要求 1103 电源。

² 在示波器探头功耗总和超过 20W 时, MSO/DPO3000 系列要求 TekVPI 外部电源 19-7465-XX。

电源测量和分析应用软件



DPO7000 系列示波器 DPOPWR 模块

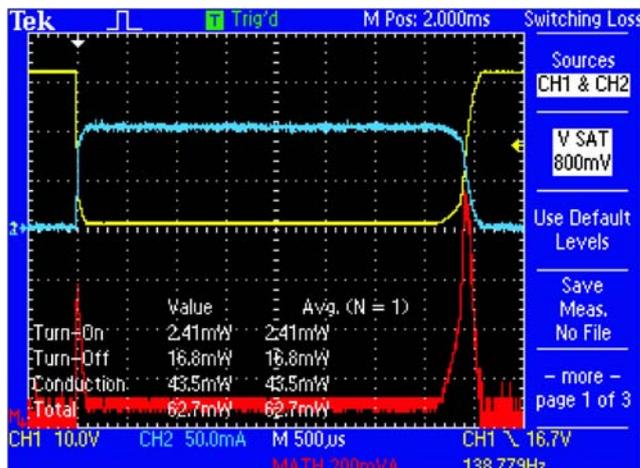
- 自动偏移校正功能，支持多厂商探头
- 迅速测量和分析电源开关设备和磁性元件中的功耗
- 可以定制的格式生成详细的测试报告

TDS5000B 系列示波器 TDSPWR3 模块

- 自动偏移校正功能，支持 TEKPROBE™ 探头
- 迅速测量和分析电源开关设备和磁性元件中的功耗
- 可以定制的格式生成详细的测试报告

MSO/DPO4000 系列示波器 DPO4PWR 模块和 MSO/DPO3000 系列示波器 DPO3PWR 模块

- 自动偏移校正功能，支持 TekVPI 探头
- 迅速测量和测量电源开关设备中的电源质量、开关损耗、谐波、SOA、调制、纹波和转换速率



TPS2000 系列示波器 TPS2PWR1 模块

迅速测量和分析瞬时功率、谐波、开关损耗、相角、dv/dt 和 di/dt

信号源为您提供完整的测量解决方案



AFG3000 系列任意波形 / 函数发生器

通过创建高幅度信号，仿真设备，而不使用外部放大器，您可以节约成本和设置时间。AFG3011在高达 10 MHz 的频率上提供了高达 20 Vp-p 幅度(到 50Ω 负载)。AFG3000 系列其它型号提供了高达 240 MHz 的频率及一条或两条通道，创建最多两个同步信号或完全独立的信号。

泰克科技(中国)有限公司
上海市浦东新区川桥路1227号
邮编: 201206
电话: (86 21) 5031 2000
传真: (86 21) 5899 3156

泰克北京办事处
北京市海淀区花园路4号
通恒大厦1楼101室
邮编: 100088
电话: (86 10) 6235 1210/1230
传真: (86 10) 6235 1236

泰克上海办事处
上海市静安区延安中路841号
东方海外大厦18楼1802-06室
邮编: 200040
电话: (86 21) 6289 6908
传真: (86 21) 6289 7267

泰克深圳办事处
深圳市罗湖区深南东路5002号
信兴广场地王商业大厦G1-02室
邮编: 518008
电话: (86 755) 8246 0909
传真: (86 755) 8246 1539

泰克成都办事处
成都市人民南路一段86号
城市之心23层D-F座
邮编: 610016
电话: (86 28) 8620 3028
传真: (86 28) 8620 3038

泰克西安办事处
西安市东大街
西安凯悦(阿房宫)饭店345室
邮编: 710001
电话: (86 29) 8723 1794
传真: (86 29) 8721 8549

泰克武汉办事处
武汉市汉口建设大道518号
招银大厦1611室
邮编: 430022
电话: (86 27) 8781 2760/2831

泰克香港办事处
香港铜锣湾希慎道33号
利园3501室
电话: (852) 2585 6688
传真: (852) 2598 6260

了解更多信息

Tektronix 维护一个全面的和不断扩展的应该文章、技术简介和其他资源的集锦, 可帮助工程师使用最新的技术。请访问 www.tektronix.com.cn



版权©2009年, 泰克公司保留所有权利。泰克产品受已经签发和正在申请的美国和国外专利保护。本文中的信息代替以前出版的所有材料。泰克保留改变本文中的技术数据和价格的权利。TEKTRONIX和TEK是泰克公司的注册商标。本文中提到的所有其它商号均为各自公司的服务标志、商标或注册商标。

05/09 EA/

55C-18412-4

Tektronix®