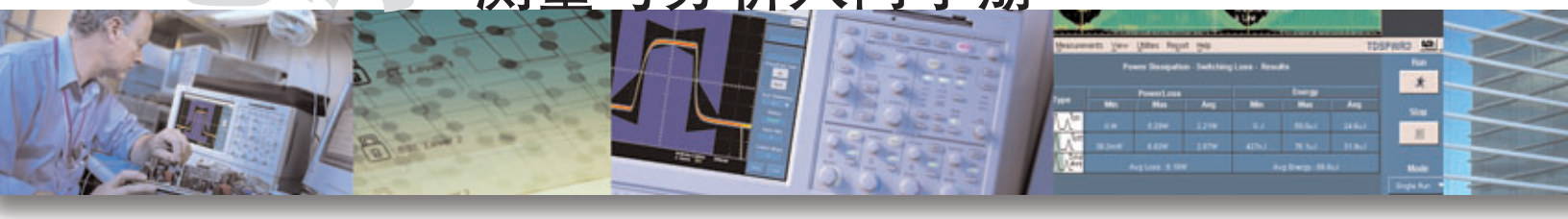
电源测量与分析入门手册



Tektronix

Enabling Innovation

目录

简介 ----------3

电源设计中的问题以及测量要求 ----------3

示波器与电源测量 ----------3

开关电源基础 ----------4

准备进行电源测量 ----------4 – 8

在一次采集中同时测量 100 伏和 100 毫伏电压 5

消除电压探头和电流探头之间的时间偏差 6

消除探头零偏和噪声 7

电源测量中记录长度的作用 8

识别真正的 T_{on} 与 T_{off} 转换 8

有源器件测量：开关元件 ----------8 – 12

开关器件的功率损耗理论 8

截止损耗 9

开通损耗 10

详细了解 SMPS 的功率损耗 10

安全工作区 11

动态导通电阻 12

di/dt 12

dv/dt 12

无源器件测量：磁性元件 ----------12 – 17

电感基础 13

用示波器进行电感测量 13

磁性元件功率损耗基础 13

用示波器进行磁性元件功率损耗测量 14

磁特性基础 15

用示波器测量磁性元件特性 17

输入交流供电测量 ----------17

电源质量测量基础 ----------18

SMPS 的电源质量测量 18

用示波器测量电源质量 ----------18 – 19

使用正确的工具 18

用示波器进行电源质量测量 19

结论 ----------19

简介

电源是将电能从一种形式转换成另一种形式的部件、子系统或系统，通常是从交流 (AC) 市电电源转换成直流 (DC) 电。从个人电脑到军事装备和工业机器，电子设备的正常工作都离不开直流电源的性能和可靠性。

从传统的模拟型电源到高效的开关电源，电源的种类和大小千差万别。它们都要面对复杂、动态的工作环境。设备负载和需求可能在瞬间发生很大变化。即使是“日用的”开关电源，也要能够承受远远超过其平均工作电平的瞬间峰值。设计电源或系统中要使用电源的工程师需要了解在静态条件以及最差条件下电源的工作情况。

过去，要描述电源的行为特征，就意味着要使用数字万用表测量静态电流和电压，并用计算器或 PC 进行艰苦的计算。今天，大多数工程师转而将示波器作为他们的首选电源测量平台。现代示波器可以配备集成的电源测量和分析软件，简化了设置，并使得动态测量更为容易。用户可以定制关键参数、自动计算，并能在数秒钟内看到结果，而不只是原始数据。

本入门手册将主要介绍如何使用示波器和专用软件进行开关电源设计测量。

电源设计问题及其测量需求

理想情况下，每部电源都应该像为它设计的数学模型那样地工作。但在现实世界中，元器件是有缺陷的，负载会变化，供电电源可能失真，环境变化会改变性能。而且，不断变化的性能和成本要求也使电源设计更加复杂。考虑这些问题：

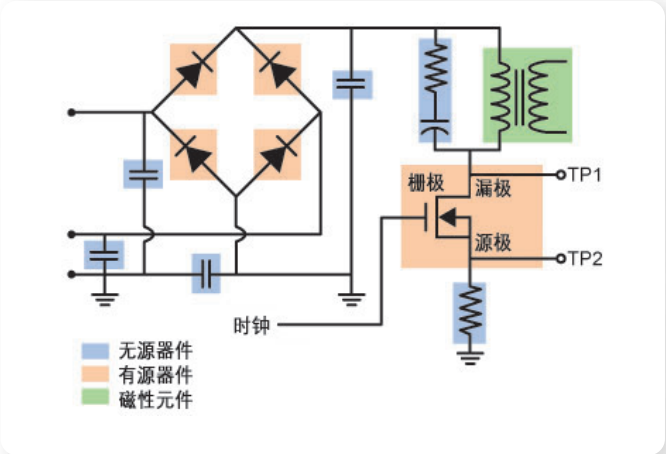
- 电源在额定功率之外能维持多少瓦的功率？能持续多长时间？
- 电源散发多少热量？过热时会怎样？它需要多少冷却气流？
- 负载电流大幅增加时会怎样？设备能保持额定输出电压吗？电源如何应对输出端的完全短路？
- 电源的输入电压变化时会怎样？

人们要求设计师设计出的电源占用更少的空间，减少散热，降低制造成本，并满足日益苛刻的 EMI/EMC 标准。 只有一套严格的测量体系才能让工程师达到这些目标。

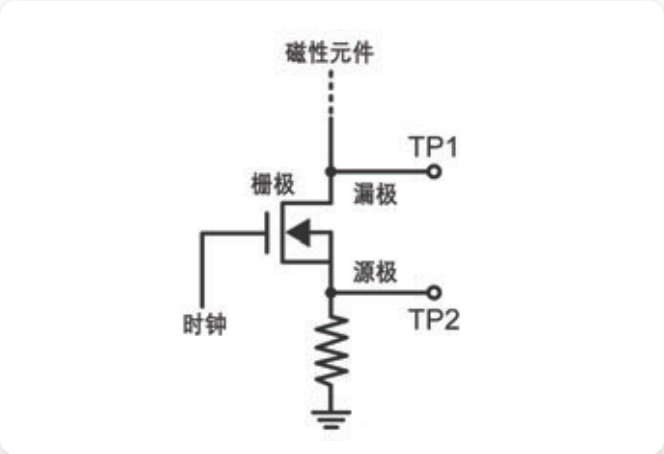
示波器和电源测量

对那些习惯于用示波器进行高带宽测量的人来说，电源测量可能很简单，因为其频率相对较低。实际上，电源测量中也有很多高速电路设计师从来不必面对的挑战。

整个开关设备的电压可能很高，而且是“浮动的”，也就是说，不接地。信号的脉冲宽度、周期、频率和占空比都会变化。必须如实捕获并分析波形，发现波形的异常。



▶ **图 1.** *开关电源简化示意图。*



▶ **图 2.** *MOSFET 开关器件，显示了测量点。*

对示波器的要求是苛刻的。多种探头 – 同时需要单端探头、差分探头以及电流探头。仪器必须有较大的存储器，以提供长时间低频采集结果的记录空间。并且可能要求在一次采集中捕获幅度相差很大的不同信号。

开关电源基础

大多数现代系统中主流的直流电源体系结构是开关电源 (SMPS)，它因为能够有效地应对变化负载而众所周知。典型 SMPS 的电能“信号通路”包括无源器件、有源器件和磁性元件。SMPS 尽可能少地使用损耗性元器件（如电阻和线性晶体管），而主要使用（理想情况下）无损耗的元器件：开关晶体管、电容和磁性元件。

SMPS 设备还有一个控制部分，其中包括脉宽调制调节器、脉频调制调节器以及反馈环路[1] 等组成部分。控制部分可能有自己的电源。图 1 是简化的 SMPS 示意图，图中显示了电能转换部分，包括有源器件、无源器件以及磁性元件。

SMPS 技术使用了金属氧化物场效应晶体管 (MOSFET) 与绝缘栅双极晶体管 (IGBT) 等功率半导体开关器件。这些器件开关时间短，能承受不稳定的电压尖峰。同样重要的是，它们不论在开通还是断开状态，消耗的能量都极少，效率高而发热低。开关器件在很大程度上决定了 SMPS 的总体性能。对开关器件的主要测量包括：开关损耗、平均功率损耗、安全工作区及其他。

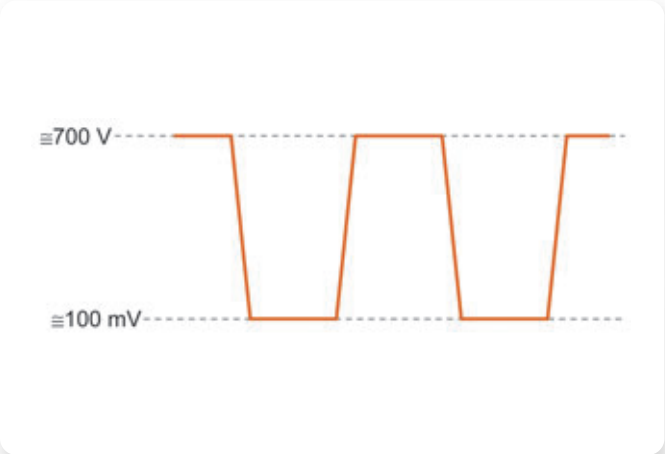
准备进行电源测量

准备进行开关电源的测量时，一定要选择合适的工具，并且设置这些工具，使它们能够准确、可重复地工作。

示波器当然必须具备基本的带宽和采样速率，以适应 SMPS 的开关频率。电源测量最少需要两个通道，一个用于电压，一个用于电流。有些设施同样重要，它们可以使电源测量更容易、更可靠。下面是一部分要考虑的事项：

- 仪器能在同一次采集中处理开关器件的开通和断开电压吗？这些信号的比例可能达到 100000:1。

[1] 本入门手册介绍与电能通路有关的测量，包括对影响输出的内部元件的测量。控制部分测量是更传统的基于波形和逻辑的观测，本文档将不讨论这些内容。



▶ **图 3.** *SMPS 开关器件上的典型电压值。*

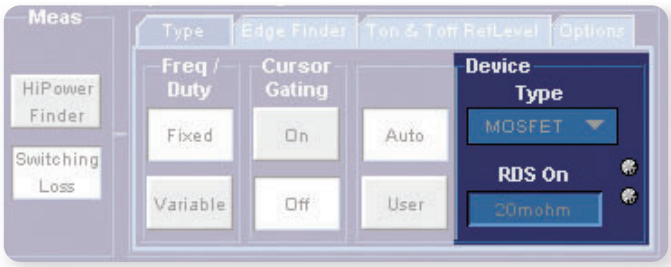
- 有可靠、准确的电压探头和电流探头吗？有可以校正它们的不同延迟的有效方法吗？
- 有没有有效的方法来将探头的静态噪声降至最低？
- 仪器能够配备足够的记录长度，以很高的采样速率捕获较长的完整工频波形吗？

这些特征是进行有意义且有效的电源设计测量的基础。

测量一次采集中的 100 伏和 100 毫伏电压

要测量开关器件的开关损耗和平均功率损耗，示波器首先必须分别确定在断开和开通时开关器件上的电压。

在 AC/DC 变流器中，开关器件上的电压动态范围非常大。开通状态下开关器件上通过的电压取决于开关器件的类型。在图 2 所示的 MOSFET 管中，开通电压为导通电阻和电流的乘积。在双极结型晶体管 (BJT) 和 IGBT 器件中，该电压主要取决于饱和导通压 (VCE_{sat})。断开状态的电压取决于工作输入电压和开关变换器的拓扑。为计算设备设计的典型直流电源使用 80 V_{rms} 到 264 V_{rms} 之间的通用市电电压。



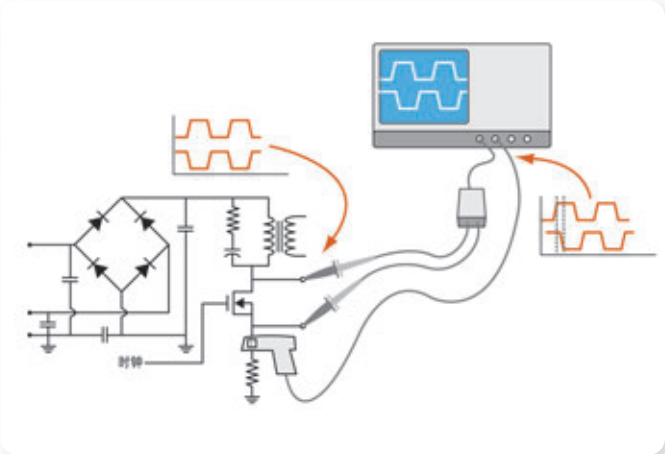
▶ **图 4.** *用户可以通过 TDSPWR3 输入页面输入数据表中的 RDS_{ON} 和 VCE_{sat} 值。*

在最高输入电压下开关器件上的断开状态电压（TP1 和 TP2 之间）可能高达 750 V。在开通状态，相同端子间的电压可能在几毫伏到大约 1 伏之间。图 3 显示了开关器件的典型信号特性。

为了准确地进行开关器件电源测量，必须先测量断开和开通电压。然而，典型的 8 位数字示波器的动态范围不足以在同一个采集周期中既准确采集开通期间的毫伏级信号，又准确采集断开期间出现的高电压。

要捕获该信号，示波器的垂直范围应设为每分度 100 伏。在此设置下，示波器可以接受高达 1000 V 的电压，这样就可以采集 700 V 的信号而不会使示波器过载。 使用该设置的问题在于最大灵敏度（能解析的最小信号幅度）变成了 1000/256，即约为 4 V。

Tektronix DPO 通过一个 TDSPWR3 应用程序功能解决了该问题，用户可以将器件数据表中的 RDS_{ON} 或 VCE_{sat} 值输入测量菜单（如图 4）。或者，如果测得电压在示波器的灵敏度范围内，那么 TDSPWR3 就可以使用实际采集的数据，而不是手工输入的值进行计算。



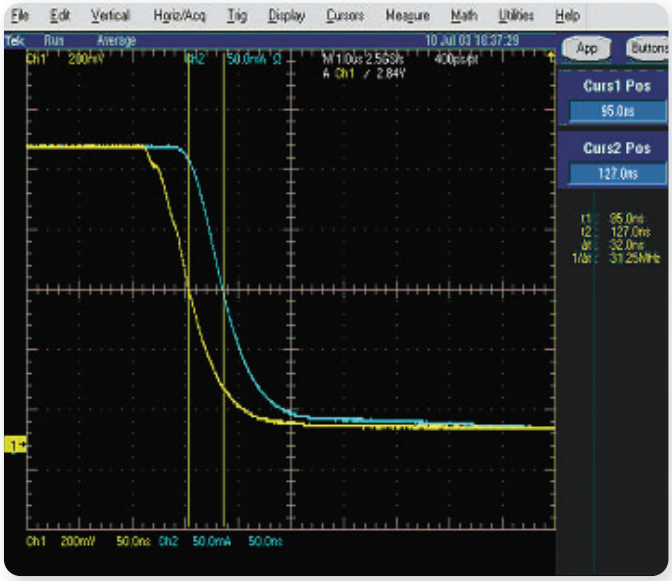
▶ **图 5.** *传输延迟效应对电源测量的影响。*

消除电压探头和电流探头之间的时间偏差

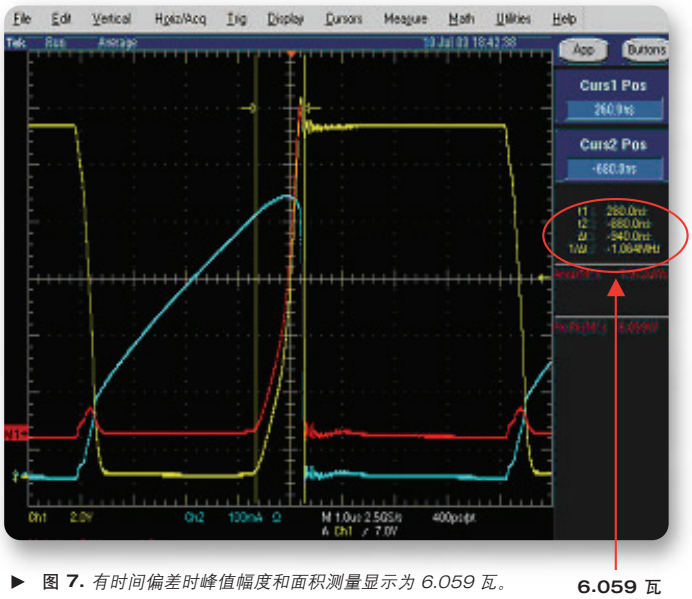
要使用数字示波器进行电源测量，就必须测量 MOSFET 开关器件（如图 2 所示）漏极、源极间的电压和电流，或 IGBT 集电极、发射极间的电压。该任务需要两个不同的探头：一支高压差分探头和一支电流探头。后者通常是非插入式霍尔效应型探头。这两种探头各有其独特的传输延迟。这两个延迟的差（称为时间偏差），会造成幅度测量以及与时间有关的测量不准确。

一定要了解探头传输延迟对最大峰值功率和面积测量的影响。毕竟，功率是电压和电流的积。如果两个相乘的变量没有很好地校正，结果就会是错误的。探头没有正确进行“时间偏差校正”时，开关损耗之类测量的准确性就会受影响。

图 5 所示的测试设置比较了探头端部的信号（下部迹线显示）和传输延迟后示波器前端面板处的信号（上部显示）。

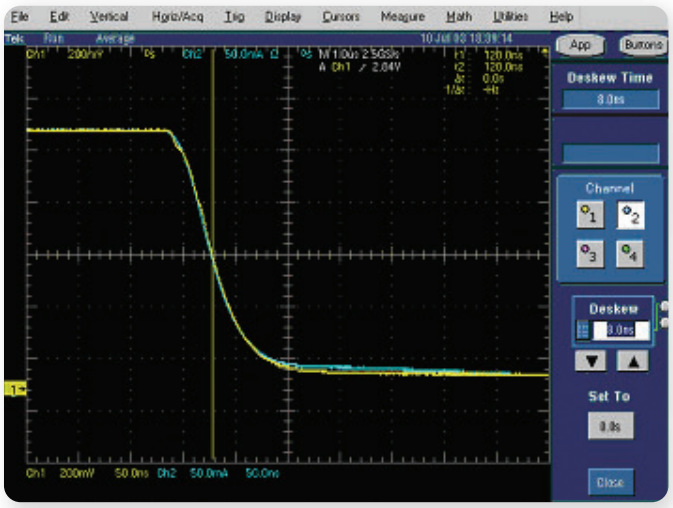


▶ **图 6.** *电压和电流信号之间的时间偏差。*



▶ **图 7.** *有时间偏差时峰值幅度和面积测量显示为 6.059 瓦。*

图 6 到 9 是实际示波器屏幕图，显示了探头时间偏差的影响。与 DUT 的连接是通过一支 Tektronix P5205 1.3 kV 差分探头和一支 TCP303 150A AC/DC 电流探头。“电压”和“电流”信号由校准夹具提供。



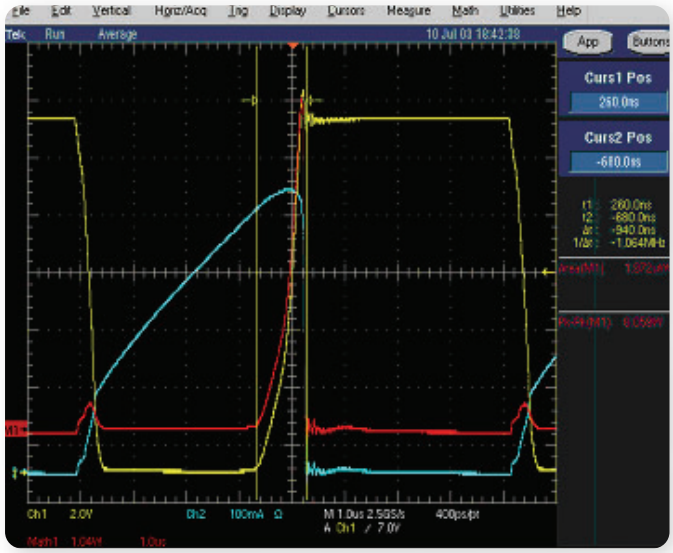
▶ **图 8.** *校正时间偏差后的电压和电流信号。*

图 6 显示电压探头和电流探头间的时间偏差，而图 7 显示了没有事先校正两支探头时间偏差的情况下的一次测量结果（6.059 瓦）。

图 8 显示校正探头时间偏差的结果。 两条参考迹线重合，说明延迟已经相同。图 9 中的测量结果说明了正确校正时间偏差的重要性。该例子证明，时间偏差造成了几乎 6% 的测量误差。准确校正时间偏差可以减小峰-峰功率损耗测量的误差。

TDSPWR3 电源测量软件可以自动校正所选探头组合的时间偏差。该软件控制示波器，并通过实时电流和电压信号调整电压通道和电流通道之间的延迟，以去除电压探头和电流探头之间传输延迟的差别。

还可以使用一种静态校正时间偏差的功能，但前提是特定的电压探头和电流探头有恒定、可重复的传输延迟。静态校正时间偏差的功能根据一张内置的传输时间表，自动为选定探头（如本文档中讨论的 Tektronix 探头）调整选定电压和电流通道之间的延迟。该技术提供了一种快速而方便的方法，可以将时间偏差降至最小。



▶ **图 9.** *校正时间偏差后的峰值幅度和面积测量。将此结果与图 7 中的结果进行比较。*

消除探头零偏和噪声

差分探头一般都有微小的电压零偏。这可能影响准确性，必须在进行测量前将其消除。

大多数差分电压探头都有内置的直流零偏修整控制，这使消除零偏成为一件相对简单的步骤：准备工作完成之后，接下来：

- 将示波器设置为测量电压波形的平均值
- 选择将在实际测量中使用的灵敏度（垂直）设置
- 不加信号，将修整器调为零，并使平均电平为 0 V（或尽量接近 0 V）。

相似地，在测量前必须调节电流探头。 在消除零偏之后：

- 将示波器灵敏度设置为实际测量中将要使用的值
- 关闭没有信号的电流探头
- 将直流平衡调为零
- 将平均值调节到 0 安培（或尽量接近该值）

▶ **图 10.** *TDSPWR3 软件菜单上的信号调节选项。 该选择在开关器件断开期间将电流设为零。*

注意，这些探头都是有源设备，即使在静态，也总会有一些低电平噪声。这种噪声可能影响那些同时依赖电压和电流波形数据的测量。TDSPWR3 软件包包含一项信号调节功能（图 10），可以将固有探头噪声的影响降至最低。

记录长度在电源测量中的作用

示波器在一段时间内捕获事件的能力取决于所用的采样速率，以及存储采集到的信号样本的存储器的深度（记录长度）。存储器填充的速度和采样速率成正比。如果为了提供详细的高分辨率信号而将采样速率设得很高，存储器很快就会充满。

对很多 SMPS 电源测量来说，必须捕获工频信号的四分之一周期或半个周期（90 或 180 度），有些甚至需要整个周期。这是为了积累足够的信号数据，以在计算中抵消工频电压波动的影响。

Tektronix TDS5000B 系列 DPO 可以配置多达 1600 万点的存储器深度。在适当的采样速率下，这足以存储所需数量的工频信号。

识别真正的 T_{on} 与 T_{off} 转换

为了精确地确定开关转换中的损耗，首先必须滤除开关信号中的振荡。开关电压信号中的振荡很容易被误认为开通或关断转换。这种大幅度振荡是 SMPS 在非持续电流模式 (DCM) 和持续电流模式 (CCM) 之间切换时电路中的寄生元件造成的。

图 11 以简化形式表示出了一个开关信号。这种振荡使示波器很难识别真正的开通或关断转换。

一种解决方法是预先定义一个信号源进行边沿识别、一个参考电平和一个磁滞电平，如图 12 所示。根据信号复杂度和测量要求的不同，也可以将测得信号本身作为边沿电平的信号源。或者，也可以指定某些其它的整洁的信号。

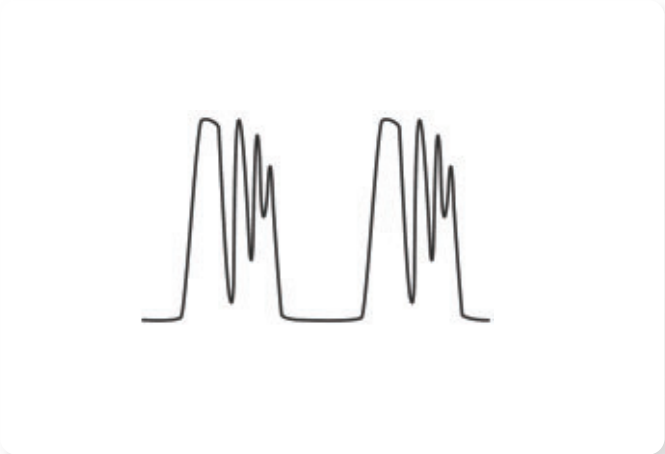
在某些开关电源设计（如有源功率因数校正变流器）中，振荡可能要严重得多。DCM 模式大大增强了振荡，因为开关电容开始和滤波电感产生共振。仅仅设置参考电平和磁滞电平可能不足以识别真正的转换。

这种情况下，开关器件的栅极驱动信号（即图 1 和图 2 中的时钟信号）可以确定真正的开通和关断转换，如图 13 所示。这样就只需要适当设置栅极驱动信号的参考电平和磁滞电平。

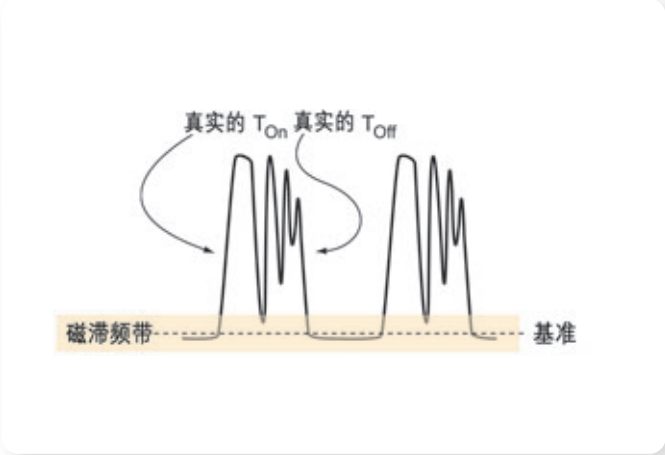
有源器件测量：开关元件

开关器件的功率损耗理论

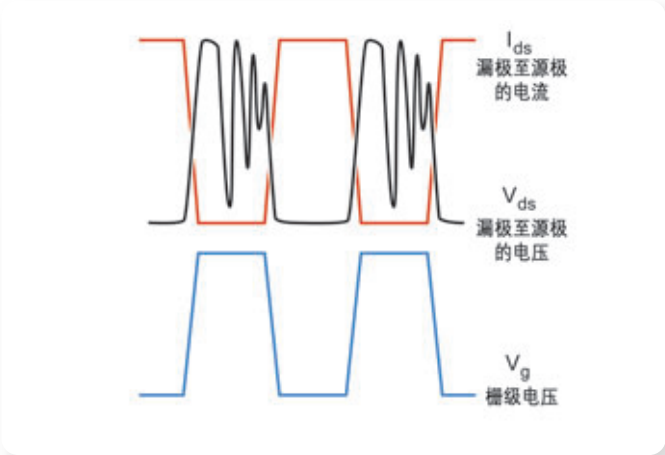
晶体管开关电路在转换期间会损耗能量，因为在开关时二极管储存的电荷被释放，寄生电感和电容也会释放能量。“开通损耗”是指开关器件从断开转换到开通时损耗的能量。“关断损耗”是指器件从开通转换到断开时的损耗。



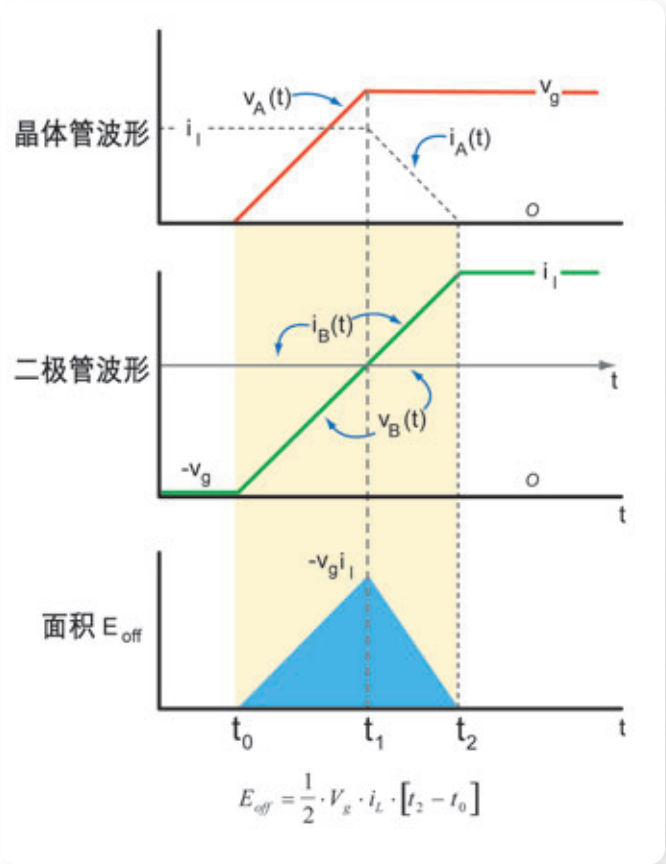
▶ **图 11.** *开关器件的典型信号特征。*



▶ **图 12.** *该信号特征的典型参考电平和磁滞电平。*



▶ **图 13.** *用于识别 T_{on} 和 T_{off} 转换的栅极信号 V_g。*



▶ **图 14.** *关断损耗的计算。*

关断损耗

图 14 以图表说明了关断损耗的计算。

t_1 之后，开关电流减小，而二极管电流增加。

时间 (t_2-t_1) 取决于驱动电路能以多快的速度对 MOSFET 的栅极-漏极电容 C_{gd} 充电。

转换时的能量损耗用以下等式表示：

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

该公式假设 C_{ds}（漏极和源极间的电容）和 C_{gd} 上的电压是线性增加的。C_{ds} 和 C_{gd} 是寄生电容。

在真实器件中，电容 C_{gd} 和 C_{ds} 是高度非线性的，一般随漏极 – 源极电压而变化。这在某种程度上会使上述的理论计算失效。由于“尾电流”现象，对于 IGBT，电流下降时间会更长。因为这些差异，必须捕获电压波动的实际特征。装有专用电源测量软件的示波器可以大大简化这种测量。

开通损耗

图 15 表示施加箝位感性负载和二极管恢复电量时 MOSFET 的开通损耗。

当 MOSFET 开通（施加箝位感性负载）时，二极管电压在储存的电量恢复前无法升高。所以二极管在截止电压之前，继续在反方向上传导电流。这造成了开关中的巨大损耗。反向恢复电流取决于二极管通路中的外部电路。二极管中的电量取决于二极管关断转换时的正向电流和下降电流的 di/dt。

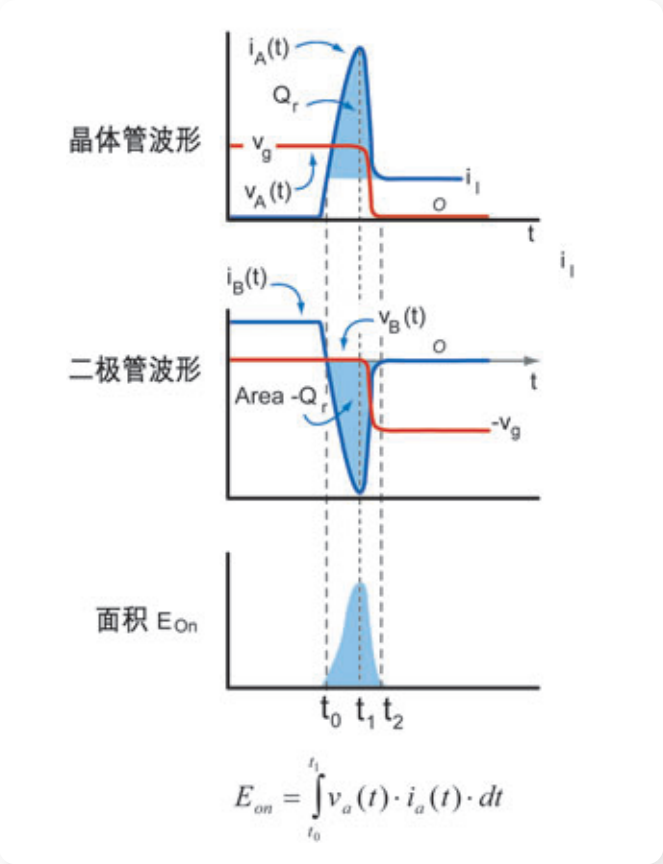
总损耗是开关中的平均功率损耗。这包括开关损耗和传导损耗。总损耗由以下公式给出，

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

其中 $V_{Switch}(t)$ 和 $I_{Switch}(t)$ 分别是开关上的瞬间电压和通过开关的瞬间电流。

详细了解 SMPS 的功率损耗

非持续电流模式中使用的“反激式”拓扑在很多额定输出在 150 W 以内的开关电源中很常见。反激式变流器将输出负载能量储存在电感中，同时提供输入/输出隔离。因为电感和开关器件之间的电流传输是在开关器件开通时发生的，所以大部分能量损耗发生在开关器件上。图 16 描述了使用反激式拓扑的 SMPS 设备中典型的开关器件信号特征。



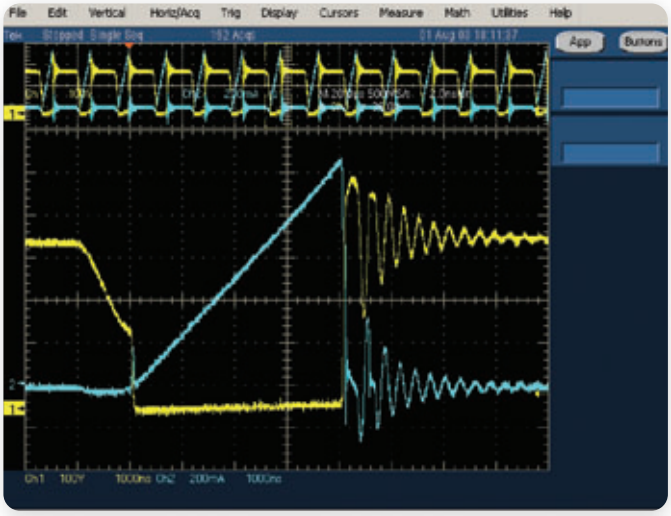
▶ **图 15.** *带箝位感性负载时 MOSFET 中的开通损耗*[2]。

该例子假设使用了 TDSPWR3 电源测量应用软件。该应用软件允许用户根据当前 DUT 的需要输入电压参数和滤波器设置。

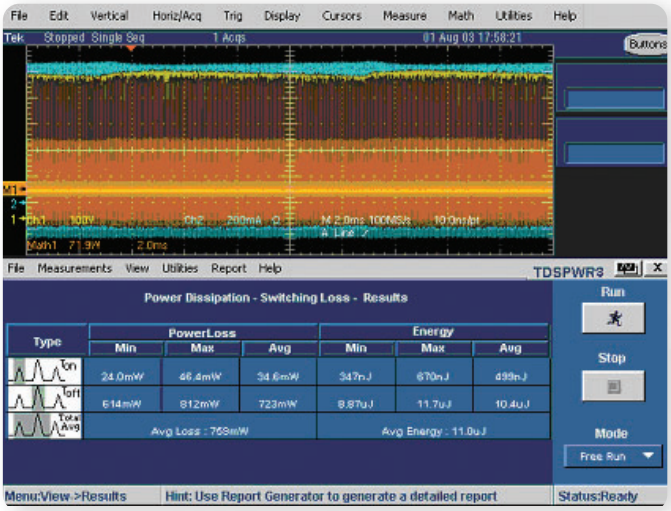
要使测量可靠准确，首先要定义参考电平，以便在开关电压信号中找到真正的 T_{on} 和 T_{off} 边沿。本例中参考电平被设为大约 150 V，磁滞电平被设为 25 V。在 150 V，T_{on} 和 T_{off} 转换很容易识别。而且，150 V 电平也排除了任何振荡。

如前所述，示波器的垂直范围被设为 100 V/div，以捕获开关电压波形。在如此高的设置下，示波器（任何数字示波器）的动态范围不足以分辨出现在同一信号中的饱和电压值。这里 TDSPWR3 的用户输入功能就很有用。

[2] 简化并改编自一篇题为 Fundamentals of Power Electronics（电源电子学基础）的报告（Robert A. Erickson，科罗拉多大学）。



▶ **图 16.** *反激式拓扑开关器件的典型信号特征。*



▶ **图 17.** *开关器件功率损耗测量结果。*

输入值 MOSFET 的 RDS_{on} 或 BJT/IGBT 的 VCE_{sat} 可以从开关器件的数据表获得并手工输入。该应用软件通过图形计算总损耗。

在开关信号断开时，可以看到振荡和噪声。当然必须将这些影响降至最低。TDSPWR3 又有一种解决方法。它的信号调节和平滑（滤波）功能可以将噪声的影响降至最低，从而提高测量准确性。

图 17 显示了 TDSPWR3 的功率损耗自动测量结果。

为得到准确的结果，测量应该尽可能包括被测信号的一个完整的工频周期。另外，采集电压和电流信号的垂直范围设置应该使被测信号至少占据 6 个垂直分度。这样可以充分利用示波器模数变流器 (ADC) 的动态范围。

安全工作区

开关器件安全工作区 (SOA) 测量绘出电压相对于电流的轨迹图，以描述器件的工作区域的特征。绘出在电源可能面临的各种工作条件下的 SOA 轨迹图常常是很有用的。

开关器件制造商的数据表简要列出了开关器件的某些限制。目标是确保开关器件能够承受电源在最终用户环境中必须面对的边界工作条件。SOA 测试变量可能包括各种负载情况、工作温度变化、高/低线路输入电压等等。

SOA 测试常常使用下面的公式计算功率值：

$$P_n = V_n I_n$$

其中：

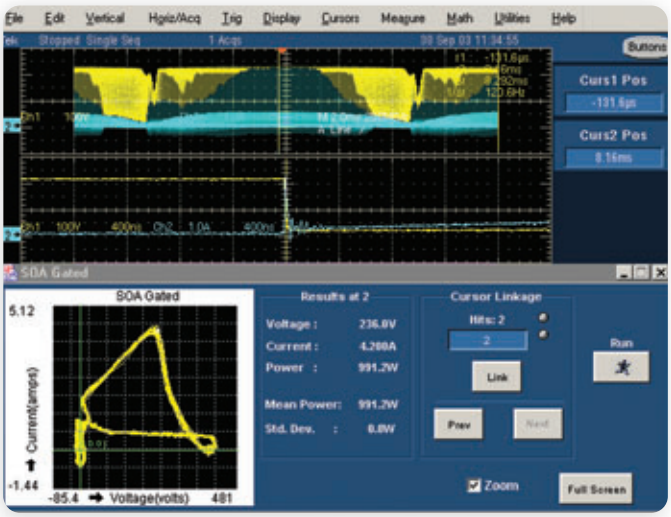
- P_n 为瞬间功率值
- V_n 为电压值
- I_n 为电流值
- n 为特定点的样本

下面的公式计算平均功率：

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

其中：

- N 为轨迹图中具有相同数值的样本数目



▶ **图 18.** *这个从 TDSPWR3 得到的例子描绘了一部有源功率因数校正电源的 SOA 轨迹图。可以将该轨迹图和开关器件制造商公布的数据进行比较。*

图 18 是用 TDSPWR3 应用软件得到的一个 SOA 轨迹图。

动态导通电阻

动态导通电阻是开关器件在导通状态具有的阻抗。有时根据开关器件制造商数据表修正 RDS_{on} 值是有用的。当信号的动态范围过大时，它有助于进行更准确的功率损耗测量（请参阅前面功率损耗测量的讨论）。

di/dt

di/dt 测量表示开关期间电流变化的速率。下面的公式计算值 di/dt：

$$\frac{di}{dt} = \frac{\sum (x_2 - \bar{x}_1) \times (y_1 - \bar{y}_1)}{\sum (x_1 - \bar{x}_1)^2}$$

其中：

- X = 时间值
- Y = 波形数据垂直方向的值
- 术语 "d" 或 delta 代表变化，所以 "di" 表示变化的电流

dv/dt

dv/dt 表示开关期间电压变化的速率。下面的公式计算值 dv/dt：

$$\frac{dv}{dt} = \frac{\sum (x_2 - \bar{x}_1) \times (y_1 - \bar{y}_1)}{\sum (x_1 - \bar{x}_1)^2}$$

其中：

- X = 时间值
- Y= 光标之间波形数据垂直方向（电压）的值

无源器件测量：磁性元件

无源器件是那些不放大或开关信号的器件。电源使用了各种各样的无源器件，如电阻和电容，但从测量的角度来说，主要着重于磁性元件，特别是电感和变压器。电感和变压器都由缠绕着一圈圈铜线的铁芯组成。

电感的阻抗随着频率增加，对高频的“阻力”比对低频大。这使它们可以在电源输入端和输出端用来滤波。

变压器将电压和电流从初级线圈耦合到次级线圈，增大或减小信号幅度（电压或者电流，但不是两者同时）。这样，变压器可以在初级接受 120 伏，在次级将电压降为 12 伏，而次级电流呈正比增加。注意这不能认为是“放大”，因为信号的净功率并未增加。因为变压器初级和次级并没有电连接，所以它们也用于隔离电路元件。

下面的测量结果有助于确定电源性能：

- 电感
- 功率损耗（磁性）
- 磁性元件特性

电感基础

电源使用电感作为能量储存器件、滤波器或变压器。用作变压器时，在开关电源系统中帮助维持振荡。设计师需要监测这种器件在各种工作条件下的行为。电感值取决于电流和电压源、激励信号、波形以及工作频率。

电感定义为：

$$L = \frac{\int - edt}{I} \; Henry$$

其中：

- ▶ L 为电感
- ▶ e 为电感上的电压
- ▶ I 为通过电感的电流
- ▶ dt 为信号的变化速率（转换速率）

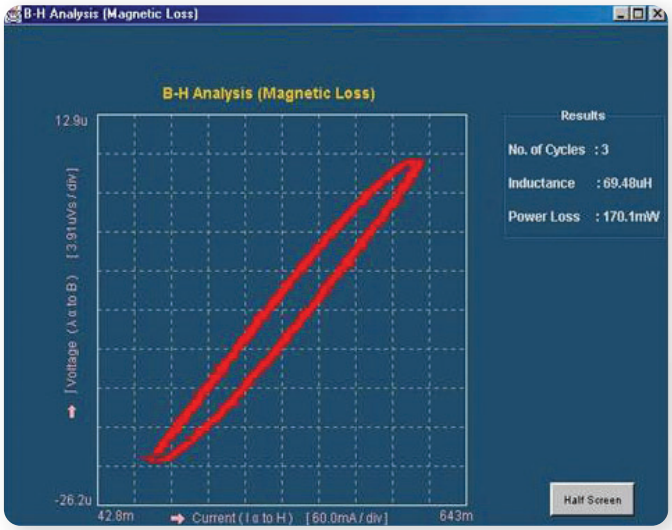
有几种不同类型的电感测量设备。过去，这些设备通过在电感上施加已知的激励信号来测量电感。

例如，LCR 表使用内置信号发生器激励待测电感，再通过桥接平衡技术来测量器件阻抗。LCR 表使用正弦波作为信号源。

但在实际电源中，信号是高电压、强电流的方波。所以，大多数电源设计师更喜欢通过观察电感在动态变化的电源环境中的行为，得到更准确的图形。

用示波器进行电感测量

在“真实”电源中进行电感测量的最好的工具是示波器，如装有 TDSPWR3 电源测量软件的 Tektronix TDS5000B 系列 DPO。电感测量本身就象测量磁性元件上的电压和通过磁性元件的电流一样简单，与上述开关器件测量很相似。



▶ **图 19.** *从 TDSPWR3 应用软件得到的电感测量结果。*

图 19 显示了这样一个电感测量的结果。这里，软件已经计算出电感为 69.48 微亨。

磁性元件功率损耗基础

磁性元件功率损耗影响电源的效率、可靠性以及散热性能。与磁性元件有关的功率损耗有两种： 铁损和铜损。

铁损：铁损由磁滞损耗和涡流损耗组成。磁滞损耗是工作频率和交流磁通量的函数。它几乎与直流磁通量无关。每单位体积的磁滞损耗用下面的公式表示：

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

其中：

- ▶ P_{Hyst} 为每单位体积的磁滞损耗。
- ▶ H 为场强。
- ▶ B 为磁通密度。

可以通过铁芯制造商的数据表（如图 20 所示）计算铁损。其中，制造商已经列出了 I、III 象限工作区内正弦激励引起的损耗。制造商还提出了一个在不同交流磁通密度和频率下计算铁损的经验关系式。

铜损：铜损是线圈铜导线的阻抗引起的。铜损由下式给出：

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

其中：

- P_{cu} 为铜损
- I_{rms} 为通过磁性元件的均方根电流
- R_{wdg} 为线圈阻抗。 该阻抗取决于直流电阻、趋肤效应和邻近效应。

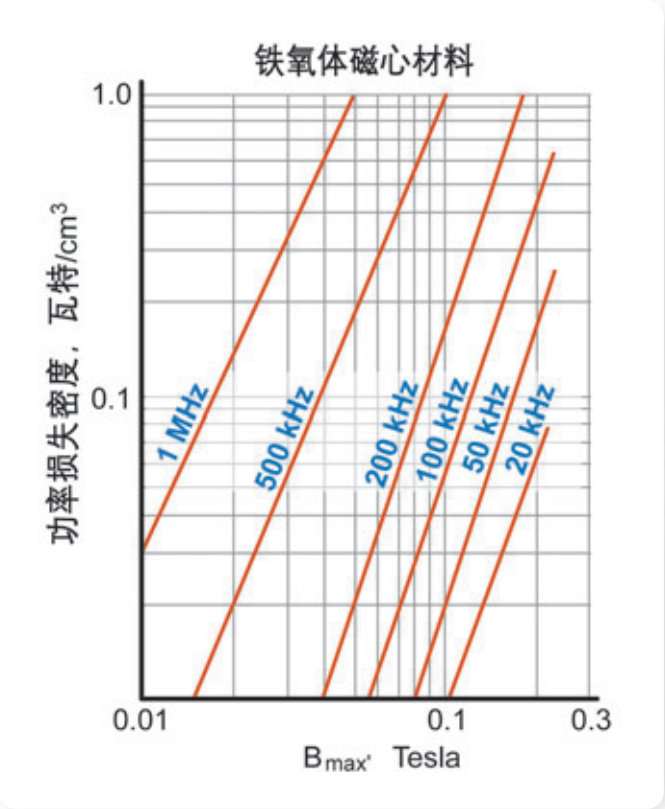
用示波器进行磁性元件功率损耗测量

通过铁芯供应商数据表的信息以及在示波器上用电源测量软件得到的结果，可以很快得出总功率损耗和铁损。用这两个数值计算铜损。知道了功率损耗的不同组成部分，就可以确定磁性元件功率损耗的原因。

计算磁性元件功率损耗的方法部分地取决于要测量的元件类型。待测元件可能是单绕组电感、多绕组电感或变压器。图 21 显示了使用 TDSPWR3 软件测量一个单绕组电感的结果。

通道 1（黄色迹线）是电感上的电压，通道 2（蓝色迹线）是通过电感的电流（通过非插入式电流探头测量）。TDSPWR3 软件包自动计算并显示功率损耗数值，此处所示为 173.95 毫瓦。

TDSPWR3 软件包提供了门控测量，以处理非周期性波形或具有“突发”特征的信号。在具有有源功率因数控制 (PFC) 的设备中，电感的典型信号模式如图 22 所示，图中显示了门控测量的结果。



▶ **图 20.** *各种开关频率处磁心损失与通量密度关系图。*

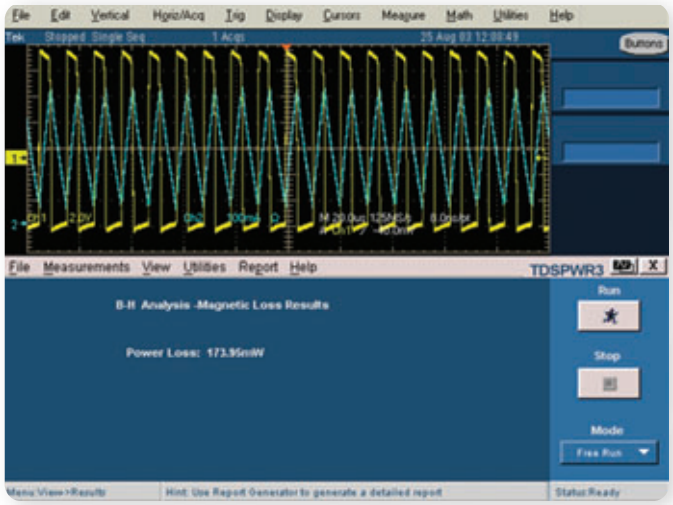
多绕组电感要使用稍为不同的方式。总功率损耗是各圈损耗的总和：

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

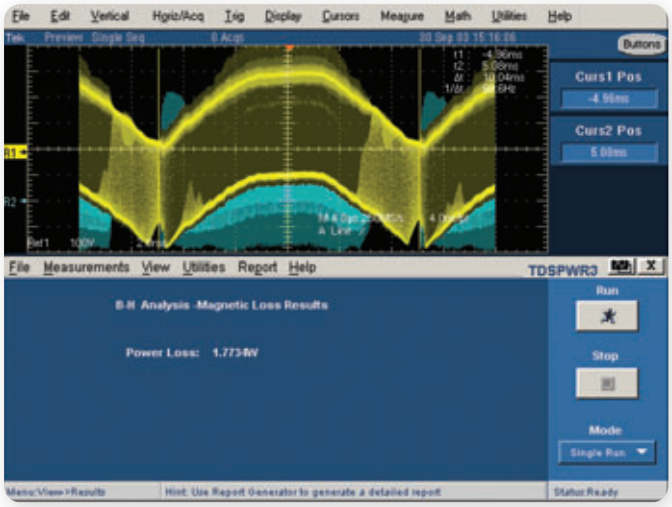
计算变压器功率损耗使公式有进一步的变化：

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

在初级线圈测得的功率损耗将包括反射的次级线圈功率。所以，必须测量初级线圈和次级线圈的功率，并通过变压器公式计算功率损耗。



▶ 图 21. *TDSPWR3 测得的单绕组电感功率损耗。*

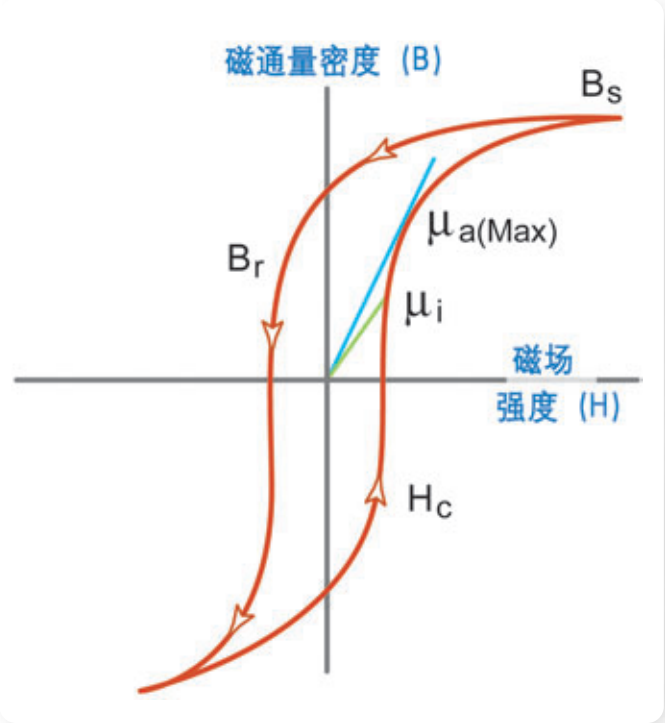


▶ 图 22. *有源 PFC 电路中电感的功率损耗。*

磁性元件特性基础

开关电源必须在多种工作条件下可靠工作。为达到最优性能，设计师一般通过制造商提供的 B-H（磁滞）曲线来指定磁性元件（变压器和电感）。这些曲线定义了磁性元件的铁芯材料的性能包络。包括工作电压、电流、拓扑、变流器类型在内的各种因素都必须保持在磁滞曲线的线性区域内。很明显，考虑这么多变量并不是一件容易的事情。

描述磁性元件在 SMPS 中*工作时*的工作区特征对于确定电源的稳定性至关重要。测量过程包括绘制磁滞回线以及：



▶ 图 23. *磁性器件典型 B-H（磁滞）关系图。*

饱和磁通密度 (B_{peak})

如果测得的峰值磁通密度与供应商数据表中的饱和磁通密度一致，说明该磁性元件已经达到饱和。这会影响电源的稳定性。

剩磁磁通密度 (B_r)

矫顽力 (H_c)

导磁率 (U)

B-H 轨迹图可以描述磁性元件的特性。图 23 是正弦激励下的一个典型 B-H 轨迹图。

在开始进行 B-H 轨迹图测量之前，需要以下信息：

磁性元件上的电压

磁化电流

匝数 (N)

磁性元件长度 (l)

截面积 (A_e)

这些变量用于下列关于图 22 的定义中：

磁场强度 (H) 是用于在待测材料中产生磁通的磁场。单位用安培每米表示。

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

其中 N 为匝数，l 为磁性元件的长度。

饱和磁通密度 (Bs) 是材料中能产生的最大磁通密度，与外加磁场 H 的大小无关。

$$\varphi_k = \int V(t)_k \, dt$$

以及：

$$B_k(t) = \varphi_k / N * S$$

剩磁 (Br) 是在生成磁滞回线时，外加磁场 (H) 返回零后仍然保留在材料中的导入磁通密度。

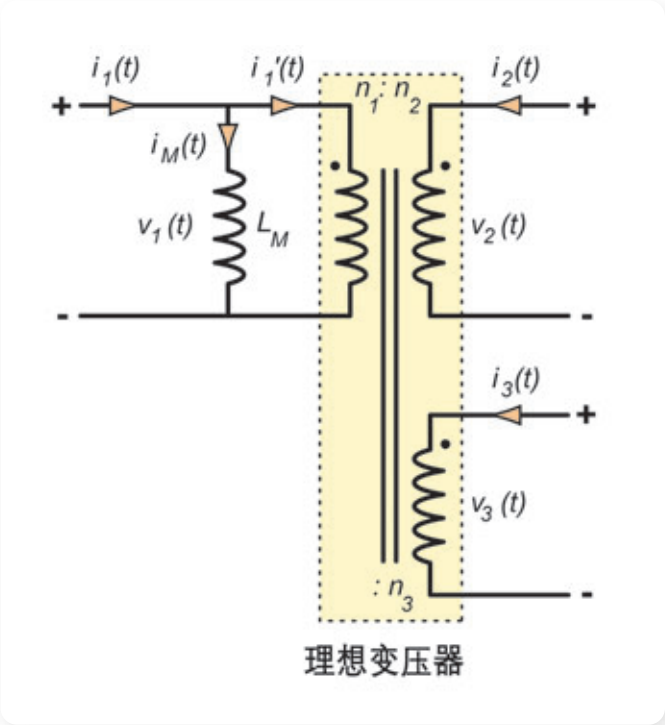
矫顽力 (Hc) 是 H 轴和磁滞回线相交处的 H 值。它表示在磁滞回线测量周期使导入磁通密度 (B) 达到零所需的外界磁场。H_c 在正轴和负轴上对称。

初始导磁率 (μi) 是 H 趋于零时导入磁通密度 (B) 和外加磁场 (H) 之比。它是磁滞回线上任意点的 B 和 H 之比。

另外，最大幅度导磁率是磁滞回线正向周期第一象限上 B 和 H 的最大比值，是通过原点的斜线。

要进行磁性元件特性测量，必须知道以下信息：

- 磁性元件上的电压
- 磁化电流
- 匝数 (N)
- 磁性元件长度 (l)
- 截面积 (A_e)



▶ **图 24.** *多绕组磁性器件。*

电感在电源输入端和输出端用作滤波器，可能有单绕组或多绕组线圈。

电感电压和电流服从以下公式：

$$V_L(t) = R \cdot i_l(t) + L \cdot \frac{di_l(t)}{dt}$$

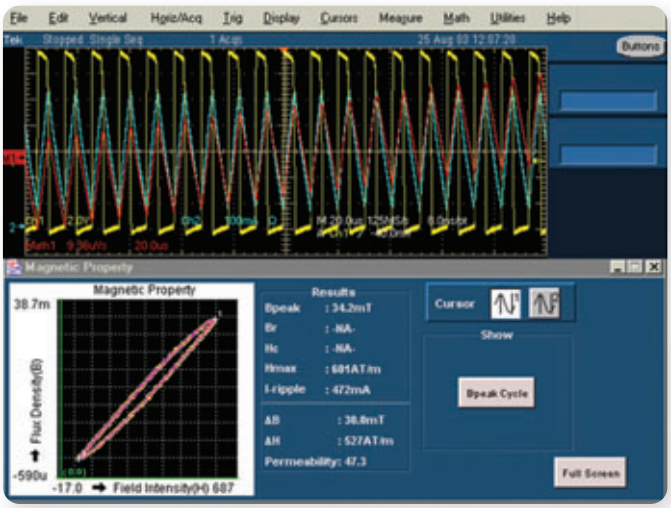
在典型的直流－直流变流器中，线圈中的磁通量用下式表示：

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

以及：

$$\varphi_L\left[(n+1)T_S\right] = \varphi_L\left[nT_S\right]$$

图 24 是一个典型的多绕组磁性元件，可以用作耦合电感或变压器。



▶ **图 25.** *单绕组电感器 B-H 关系图。*

▶ **图 26.** *变压器 B-H 关系图。*

该电路的工作服从以下电学等式：

$$\frac{V_1(t)}{n_1} = \frac{V_2(t)}{n_2} = \frac{V_3(t)}{n_3}$$

以及：

$$i_1^{'}(t) \cdot n_1 = -\, i_2(t) \cdot n_2 - i_3(t) \cdot n_3$$

以及：

$$i_1(t) = i_M(t) + i_1^{'}(t)$$

要计算净磁化电流，必须测量 i_1 (t)、i_2 (t) 和 i_3 (t)。得到净磁化电流后，B-H 分析过程与用于分析单绕组电感的过程相似。磁通量取决于净磁化电流。所有线圈中测得的电流的矢量和形成磁化电流。

用示波器测量磁性元件特性

专用电源测量软件（如 Tektronix TDSPWR3 软件包）能大大简化用示波器测量磁性元件特性的过程。在很多情况下只需要测量电压和磁化电流。软件可以为您进行磁性元件特性测量的计算。图 25 显示了 TDSPWR3 对单绕组电感的磁性元件特性测量结果，而图 26 显示了变压器测量的相应屏。

在图 26 中，通道 1（黄色迹线）是变压器上的电压，通道 2（蓝色迹线）是通过初级的电流，通道 3（紫红色迹线）是通过次级的电流。软件用通道 2 和通道 3 的数据确定磁化电流。

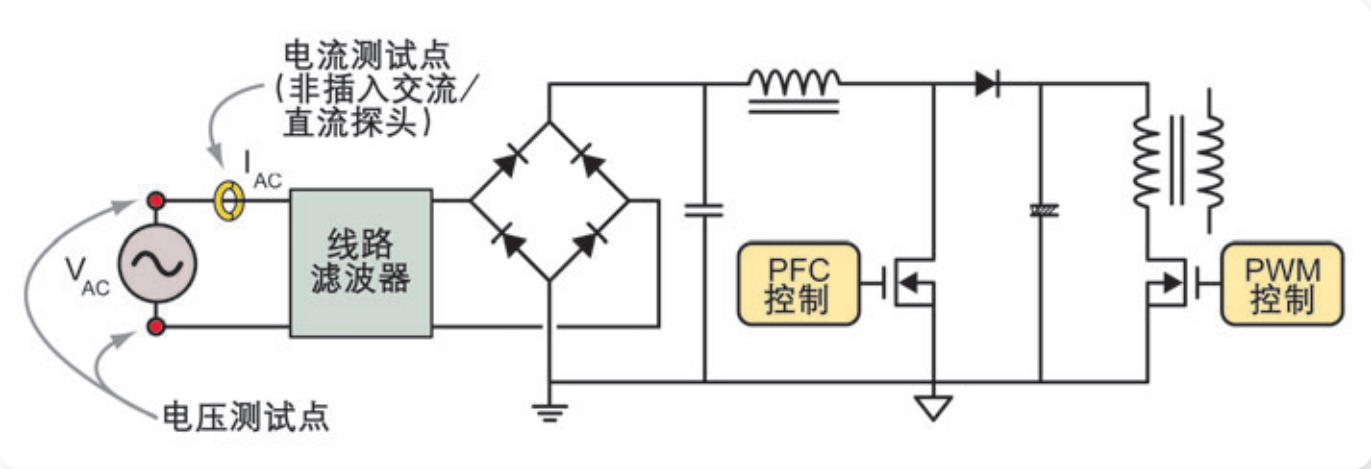
要设置进行测试，必须首先输入匝数、磁路径长度以及铁芯的截面积。利用这些信息，软件可以绘制出磁性元件的准确的 B-H 轨迹图，并描述其性能的特征。TDSPWR3 软件为采集到存储器中的每个周期都计算出一个 B-H 轨迹图。

磁通密度最大的 B-H 轨迹图显示在图 26 左下角的窗口中。该 B-H 轨迹图中测量并显示了 B_{peak}、H_{max} 和导磁率。TDSPWR3 软件还能测量脉动电流，因为它和铁损成比例。

工频线路测量

工频线路测量描述电源与其工作环境之间相互作用的特征。应该知道电源的尺寸千差万别，从个人电脑中用风扇散热的小盒，到为工厂电机供电的大型设备，再到支持电话银行和服务器群的庞大电源。这些电源的每一种都会给向它提供电能的输入电源（一般是市电）带来某些影响。

要确定接入电源的影响，就必须在输入电源线上直接测量电源电压和电流参数。



► **图 27.** *SMPS 电源简图（只有初级一侧）以及电源质量测量测试点。电源质量测量必须使用同一时刻的输入 V_{AC} 和 I_{AC} 读数。*

电源质量测量基础

SMPS 的电源质量测量

电源质量不仅仅取决于发电机。它还取决于电源的设计和制造以及最终用户负载。电源的电源质量特征定义了电源的“健康”状况。

现实的电线从来不会提供理想的正弦波，线路上总是有一些失真和杂波。开关电源给供电电源施加了一个非线性负载。因此，电压和电流波形不是完全相同的。电流在输入周期的某一部分被吸收，使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的一个重要部分。

为了确定电源线上的功率消耗和失真，应该在输入阶段进行电源质量测量，如图 27 所示的电压和电流测试点。
电源质量测量包括：

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

用示波器测量电源质量

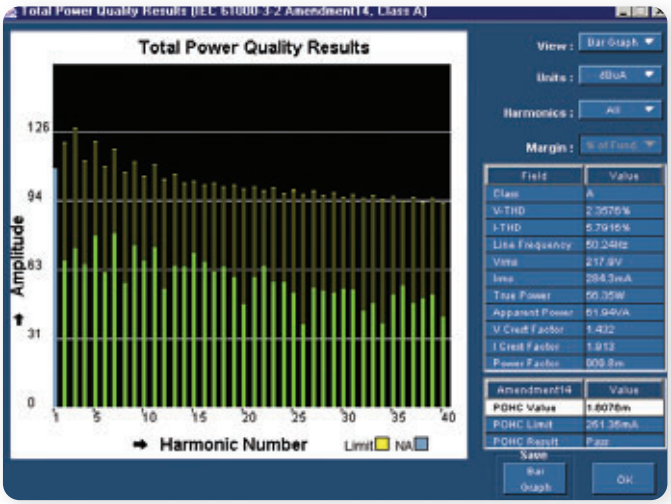
使用正确的工具

运行软件包（如 TDSPWR3）的数字示波器（DSO 或 DPO，如 TDS5000B 系列）是替代传统的功率表和谐波分析仪进行电源质量测量的有力工具。

使用示波器比传统工具有明显的优势。仪器必须能捕获到基波的高达 50 次谐波分量。根据各地使用的标准，电源工频频率通常是 50 Hz 或 60 Hz。在某些军事与航空电子应用中，线频率可能达到 400 Hz。当然，失常信号可能包含更高的频率。在当今的高速示波器中，过采样（在 TDS5000B 系列中，每秒达到 50 亿个采样）确保能够详细地（高分辨率）捕获快速变化的事件。相反，由于响应时间相对较长，传统功率表可能忽略信号细节。

即时在非常高的采样分辨率下，示波器的记录长度也足以采集整数个周期。

软件工具能加快测量过程，并将设置时间降至最低。大多数电源质量测量都能由示波器上运行的功能完备的电源测量软件自动进行，数秒中内就能完成漫长的过程。示波器减少了手工计算，成为非常通用高效的功率表。



▶ **图 28.** *使用 TDS5000B 系列示波器和 TDSPWR3 测量分析软件的电源质量结果。*

示波器探头也有助于进行安全、可靠的电源测量。用于电源应用的高压差分探头是观察浮动电压信号的首选工具。

电流探测需要特殊的考虑。有几种电流探头结构的实现：

- 交流电流探头基于电流互感器 (CT) 技术。CT 探头是非插入的，不能感应信号中的直流分量，这可能会造成测量不准确。
- 分流器。该设计要求切断电路，会在探头内部形成电压降，可能影响电源测量的准确性。
- 交流/直流电流探头一般基于霍尔效应传感器技术。该设备以非插入方式感应交流/直流电流，能够用一个连接同时读取交流和直流分量。

交流/直流电流探头已经成为开关电源高要求电源质量测量中的首选工具。

用示波器进行电源质量测量

当给一台 DPO（如 TDS5054B）配备了 TDSPWR3 软件时，它就变成了一个真正的自动电源测量平台。该软件自动设置示波器及其初始测量参数。如果需要，可以手工对这些设置进行细调。

图 28 显示了用 TDS5000B 系列示波器和 TDSPWR3 测量分析软件得到的电源质量和电流谐波读数。显示器显示了一系列丰富的测量，包括有功功率、视在功率、波峰因数、总谐波失真、功率因数、以及电流谐波的条形图显示。

结论

电源几乎对于每种外接电源的电子产品都必不可少，开关电源 (SMPS) 已成为数字计算、网络、通信系统中的主流结构。一部开关电源的性能（或者故障）就可能对一个昂贵的大型系统产生重要影响。

要确保即将实现的 SMPS 设计的可靠性、稳定性、兼容性、安全性，测量是唯一的办法。SMPS 测量分为三个主要部分：有源器件测量、无源器件测量（主要是磁性元件）以及电源质量测试。有些测量可能要面对浮动电压和强电流；有些测量需要大量数学分析，才能得到有意义的结果。 电源测量可能很复杂。

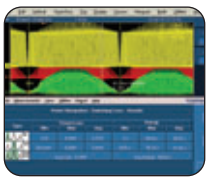
现代数字示波器已经成为测量特征描述和故障排查的首选工具。

当示波器（如 Tektronix TDS5000B 系列中的 DPO）配备了适当的探测工具和自动测量软件后，就可以极大地简化高要求的 SMPS 测量，并能迅速地提供准确结果。非插入式电流探测这样的技术能保持电路的完整性，而基于软件的工具（如平滑滤波器）可以确保结果能够重现。复杂的数学计算也由集成软件自动进行。由于其通用性和易用性，示波器在电源设计实验室中已经取代了很多传统的功能单一的工具。

TDS5000B

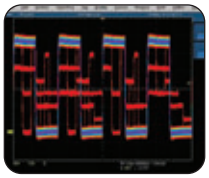
TDS5000B 系列最先在业内提供了易于定制的示波器用户界面。MyScope® 控制窗口是一项革命性的新功能，可以只用那些您关心的和工作中需要的控制、功能和能力组成自己的控制窗口。您首次可以将所有需要的功能从示波器的各个部分拖入一个控制窗口，从而有效地创建自己个性化的示波器功能“工具箱”。

TDSPWR3



TDSPWR3 电源测量分析软件可以将 Tektronix 数字示波器变成高级分析工具，可以快速测量并分析电源开关器件和磁性元件中的功率损耗，然后以自定义格式生成详细的测试报告。TDSPWR3 与 Tektronix TDS5000B、TDS/CSA7000B 或 TDS6000 系列示波器以及差分电压和电流探头一起使用，就形成了完整的电源设计和测试的测量系统。

数字荧光示波器 (DPO)



使用数字荧光示波器 (DPO)，设计师可以比使用其它示波器更快、更容易、更准确地实时捕获、观察并测量动态信号信息；可以加快串行总线设计，以满足紧张的进度要求；还可以快速解决难以捉摸的故障问题。

与 Tektronix 联系：

奥地利 +41 52 675 3777
巴尔干半岛、以色列、南非及其它 ISE 国家/地区 +41 52 675 3777
巴西和南美 55 (11) 3741-8360
比利时 07 81 60166
波兰 +41 52 675 3777
丹麦 80 88 1401
德国 +49 (221) 94 77 400
东南亚国家联盟/澳大拉西亚/巴基斯坦 (65) 6356 3900
俄罗斯、独联体和波罗的海诸国 7 095 775 1064
法国和北非 +33 (0) 1 69 81 81
芬兰 +41 52 675 3777
韩国 82 (2) 528-5299
荷兰 090 02 021797
加拿大 1 (800) 661-5625
卢森堡 +44 (0) 1344 392400
美国 1 (800) 426-2200
美国 1（出口销售） 1 (503) 627-1916
墨西哥、中美洲和加勒比海 52 (55) 56666-333
南非 +27 11 254 8360
挪威 800 16098
欧洲中东地区、乌克兰和波罗地海 +41 52 675 3777
葡萄牙 80 08 12370
日本 81 (3) 6714-3010
瑞典 020 08 80371
瑞士 +41 52 675 3777
台湾 886 (2) 2722-9622
西班牙 (+34) 901 988 054
香港 (852) 2585-6688
意大利 +39 (02) 25086 1
印度 (91) 80-22275577
英国和爱尔兰 +44 (0) 1344 392400
中东、亚洲和北非 +41 52 675 3777
中华人民共和国 86 (10) 6235 1230
中欧和希腊 +41 52 675 3777
其他地区请联系 Tektronix 公司 1 (503) 627-7111

最后更新日期：2004 年 11 月 3 日

了解更多信息

Tektronix 维护一个全面的和不断扩展的应用文章、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**

版权所有 © 2005, Tektronix, Inc. 保留所有权利。Tektronix 产品受美国和外国专利权（包括已取得的和正在申请的专利权）的保护。本文中的信息将取代所有以前出版的资料中的信息。保留更改产品规格和价格的权利。TEKTRONIX 和 TEK 是 Tektronix, Inc 的注册商标。引用的其他所有商标名称均为他们各自公司的服务标志、商标或注册商标。

01/05 DM/BT 55C-18412-0

Tektronix

Enabling Innovation