

使用示波器测量电源开关损耗

应用指南



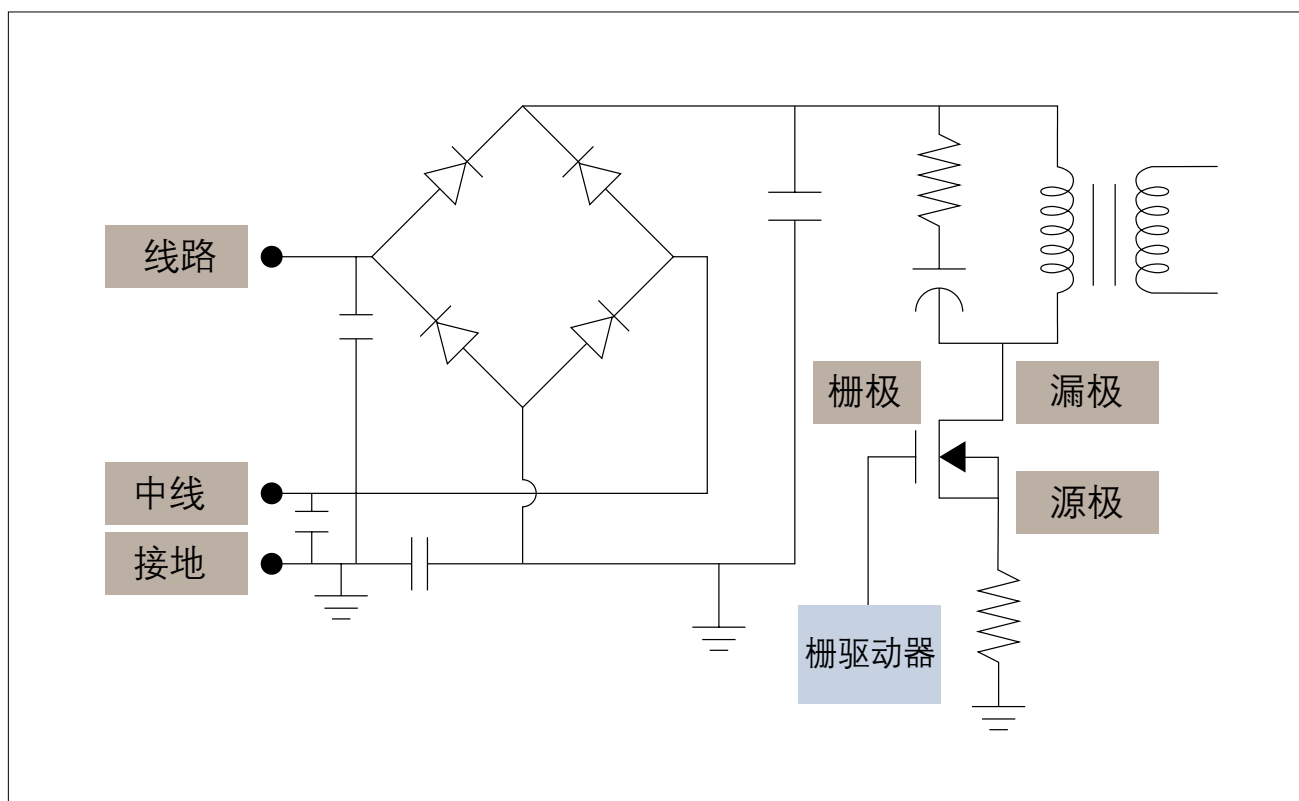


图 1. 简化的开关式电源开关电路。

简介

随着人们需要改善功率效率，延长电池供电的设备的工作时间，分析功率损耗及优化电源效率的能力比以前变得更加关键。效率中一个关键因素是开关器件的损耗。

本应用指南将概括介绍这些测量，以及使用示波器和探头进行更好、更可重复的测量的部分技巧。

典型开关式电源的效率可能约为 87%，也就是 13% 的输入功率在电源内部耗散了，主要以废热的形式。在这些损耗中，很大一部分耗散在开关器件扣，通常是 MOSFETs 或 IGBTs。

在理想情况下，开关器件象照明开关一样要么“开”、要么“关”，并在这两种状态之间瞬时切换。在“开”的状态下，开关的阻抗是零，开关中没有功率耗散，而不管有多少电流流经开关。在“关”的状态下，开关的阻抗是无穷大，流经的电流是零，因此也没有功率耗散。

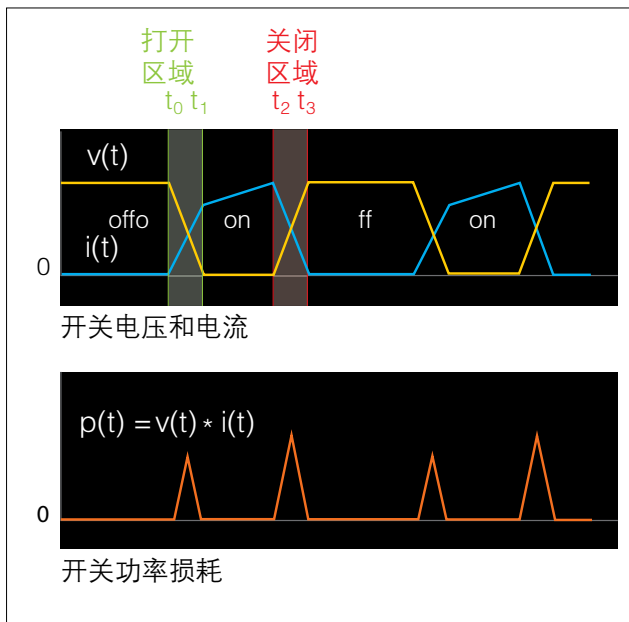


图 2. 把流经开关器件的瞬时电压乘以电流，得到整个开关周期中的瞬时功率。

在实践中，某些功率是在“开”（传导）的状态过程中耗散的，而通常来说，在“开”和“关”（关闭）转换及在“关”和“开”（打开）转换期间耗散的功率要明显高得多。

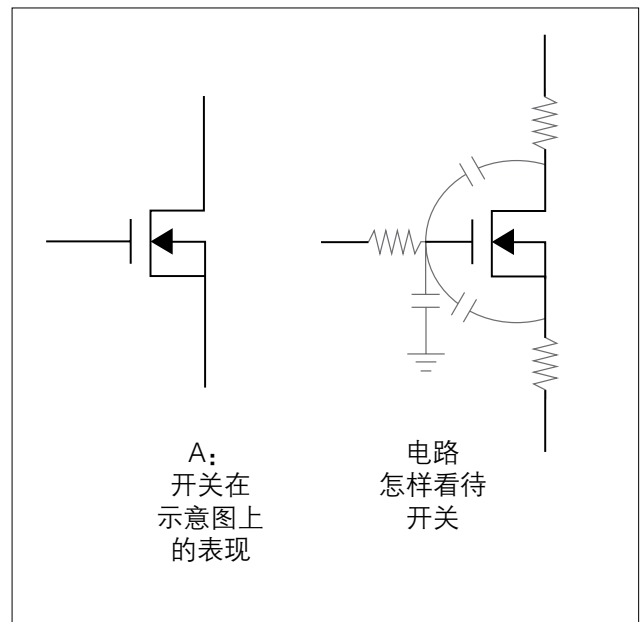


图 3. A: 开关在示意图上的表现；B: 电路怎样看待开关。

之所以发生这些不理想的特点，是因为电路中存在着寄生要素。如图 3b 所示，栅极上的寄生电容会降慢器件的开关速度，延长打开时间和关闭时间。在漏极电流流动时，MOSFET 漏极和源极之间的寄生电阻都会耗散功率。

传导损耗

在传导状态下，开关中的电阻和电压确实会有小的下降，开关耗散的功率与流经的电流有关。

对 MOSFET，这种功率的模型一般为：

$$P = I_D^2 * R_{DSon} = I_D * V_{DS}$$

- 其中 I_D 是漏极电流
- R_{DSon} 是漏极和源极之间的动态开点电阻，通常 $< 1 \Omega$
- V_{DS} 是漏极和源极之间的饱和电压，通常 $< 1 V$

对 IGBT 或 BJT，这种功率的模型一般为：

$$P = I_C * V_{CEsat}$$

- 其中 I_C 是集电极电流
- V_{CEsat} 是集电极和发射器之间的饱和电压，通常 $< 1 V$

打开损耗

在打开过程中，流经开关的电流迅速提高，器件中的电压下降迅速减少。但是，电容要素比如 MOSFET 中的栅极到漏极电容，会阻止开关瞬时打开。在器件将要打开时，会有明显的电流流经器件，器件中会有明显的电压，会发生明显的功率损耗。

对 MOSFET，在打开过程中，这种功率的模型一般为：

$$P = I_D * V_{DS}$$

- 其中 I_D 是漏极电流
- V_{DS} 是漏极和源极之间的电压

对 IGBT 或 BJT，在打开过程中，这种功率的模型一般为：

$$P = I_C * V_{CE}$$

- 其中 I_C 是集电极电流
- V_{CE} 是集电极到发射器电压

关闭损耗

同样，在关闭过程中，流经开关的电流迅速下降，器件中的电压下降迅速提高，但电路寄生要素会阻止开关瞬时关闭。在器件将要关闭时，会有明显的电流流经器件，器件中会有明显的电压，会发生明显的功率损耗。其同样适用上面的公式。

测量开关损耗

测量开关损耗有两种方法：可以使用手动设置及内置示波器测量功能测量，某些示波器上还提供了自动测量系统。自动测量的优势是设置简便，提供了简便的可重复的结果。不管采用哪种技术，审慎的探测和优化都将帮助您获得优异的结果。

探测和测量设置

在讨论具体功率测量前，进行准确的、可重复的测量有六个关键步骤：

1. **消除电压偏置误差：**差分探头中的放大器可能会有略微的 DC 电压偏置，会影响测量精度。使输入短路，不应用信号，在探头中把 DC 偏置自动或手动调节为零。
2. **消除电流偏置误差：**电流探头还可能会由于探头的残余磁性而产生 DC 偏置误差，及产生放大器偏置。关闭下鄂，不应用信号，在探头中自动或手动清零 DC 偏置。
3. **消除定时误差：**由于瞬时功率测量是在多个信号基础上计算得出的，因此信号必须正确对准时间。可以使用不同的技术，测量电压和电流；流经这些器件的传播延迟可能会明显不同，导致测量误差。通过调节通道间定时，考虑时延校正菜单中的标称传播时延，一般可以获得优异的结果。为获得最准确的结果，对所有信号使用高转换速率信号，审慎地消除所有通道之间的任何相对定时偏置（时延）。
4. **优化信噪比：**在所有测量系统中，尤其是在现代示波器等数字设备中，优秀的测量技术要求把信号保持得尽可能大（没有削波），以使噪声的影响达到最小，使垂直分辨率达到最大。这包括在探测信号时使用最低的必要衰减，使用示波器的全部动态范围。
5. **信号调节：**通过调节输入信号，也可以改善测量质量。可以使用带宽限制功能，选择性地降低关心的频率以上的噪声，可以使用平均功能，降低信号上不相关的噪声或随机噪声。HiRes 采集模式（一种波形串平均技术）提供了带宽限制和降低噪声功能，提高了垂直分辨率，甚至可以用于单次采集的信号。
6. **精度和安全：**为实现最佳精度，一定要在正常工作范围内及低于额定峰值水平使用设备。为确保安全，一定要在设备的绝对最大指标范围内操作，并遵守制造商的使用说明。

测量开关损耗 – 手动设置和内置测量

测量关闭损耗的方式之一是使用选通测量，其目标是测量关闭阶段中耗散的平均功率。在本例中，我们使用差分电压探头采集 MOSFET 的 VDS，在图 4 中用黄色显示。我们使用 AC/DC 电流探头采集漏极电流，在图中用青色显示。我们调节每条通道的垂直灵敏度和偏置，因此信号占用垂直范围的一半以上，但没有扩展到格线的顶部和底部。

稳定的显示对可视分析非常重要，因此示波器的边沿触发设置成电压波形上的 50% 点。然后设置采样率，在信号边沿上保证充足的定时分辨率。在本例中，10 MS/s 的采样率在开关波形的每个边沿上导致许多样点。最后，启用 HiRes 采集模式，把信号带宽降低到大约 4.4 MHz，把垂直分辨率提高到大约 12 位。

然后使用波形数学运算，把电流乘以电压，得到橙色瞬时功率波形。使用自动测量功能测量功率波形的平均值或中间值，采用光标选通功能把该测量限定在关闭区域。为提高平均功率测量的分辨率和可重复性，可以平均多次采集中的测量值，消除随机噪声的影响。



图 4. 选通功能自动测量 MOSFET 开关中的关闭功率损耗。

在本例中，图 4 画面左下角显示了得到的 1000 多次关闭功率测量的平均值。

在本例中，工程师手动调节示波器，优化关闭损耗测量的质量。日后，这名工程师或另一名工程师可能会以略微不同的方式设置测量，得到不同的测量结果。通过功率分析软件自动进行测量，可以消除许多变化来源。



图 5. DPOWPR 自动开关损耗测量。



图 6. DPOWPR 可以显示多个周期上打开过程中 (黄色轨迹) 和关闭过程中 (红色轨迹) 电压相对于电流的关系, 查看这些特点怎样随时间变化。这条电路的打开和关闭慢且均衡, 因此示图是线性的。

测量开关损耗 – 使用功率分析软件自动进行测量

为统一优化设置, 改善测量重复能力, 可以使用功率测量应用软件。在本例中, DPOWPR 高级功率分析应用软件为开关损耗测量提供了定制自动设置功能, 只需按一个按钮, 就可以执行全套开关损耗功率和能量测量。

转换速率和开关损耗

正如检测瞬时功率波形预计的及图 5 中开关损耗测量值所示的那样, 关闭损耗是总开关损耗中主要的损耗机制。这么高的损耗的潜在原因是开关驱动电路的性能。如果驱动信号的跳变时间或转换速率低于预期, 那么开关在开态和关态之间保持的时间要长于预期, 开关损耗将高于预期。

转换速率测量一定时间间隔中 (通常在边沿上 10% 点和 90% 点之间) 的电压变化, 单位为伏 / 秒。由于数学导数本身是一个高通滤波器, 因此会加重噪声, 建议使用平均功能, 降低随机噪声对这些测量的影响。

通过把一个波形光标放在信号边沿的 10% 点上, 把另一个光标放在波形边沿的 90% 点上, 可以使用光标手动进行转换速率测量。然后把电压测量值除以光标之间的时间差, 计算得出转换速率。这种技术要求用户估算波形上的 10% 和 90% 点, 计算结果。



图 7. 自动测量 MOSFET 栅极转换速率。

许多示波器可以使用自动测量改善这一过程。可以使用自动幅度和上升时间测量，确定信号的幅度，设置 10% 和 90% 幅度时的测量门限值，然后测量信号的上升时间。此外，在复杂的信号中，可以使用光标选通功能，把测量重点放在波形的特定部分。然后把幅度乘以 80%，除以上升时间指标，计算得出转换速率。

但是，功率分析软件可以简便地设置转换速率测量，减少了测量结果中的变化，因为设计工程师会调节电路中的分量值。

对 MOSFET 栅极 (VGS, 图 7 中用通道 3 上的紫色显示) 进行光标选通转换速率测量显示，开关信号要比设计指标慢得多，因为开关器件栅级的电容要高于预期。

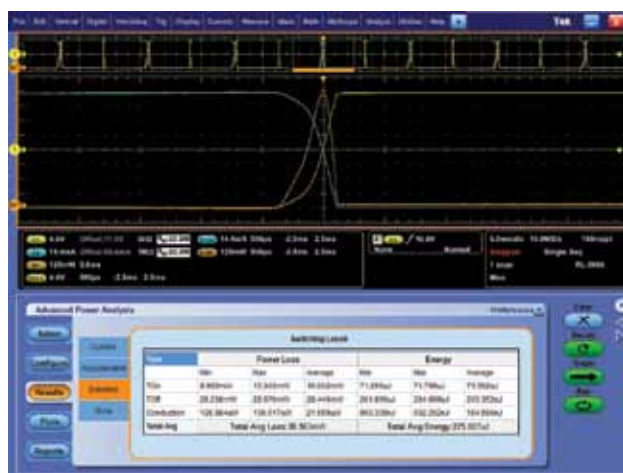


图 8. DPOWPR 自动开关损耗测量，显示结果得到明显改善。

如图 7 中的垂直光标之间所示，指数衰落与栅极驱动电路的输出阻抗、开关 MOSFET 器件的寄生栅极电容和栅极的电路板电容有关。在驱动信号的速度提高时，通过降低栅极驱动输出阻抗及栅极节点的电容，开关损耗改善了大约 30%，如图 8 所示。

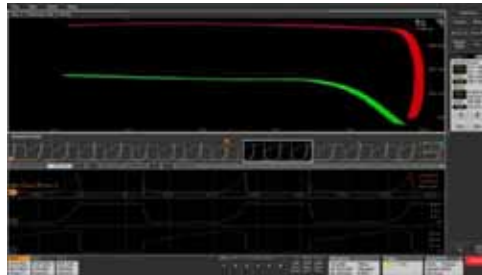
开关损耗测量是优化开关式电源效率的关键部分。通过使用优秀的测量技术及自动进行功率测量，可以简便、迅速、可重复地进行一系列复杂的开关损耗测量。

本应用指南中的测试仪器组合一：

MSO5 系列混合信号示波器



5-PWR 功率测量和分析



TDP1000 1 GHz差分探头



TCP0030A 120 MHz AC/DC电流探头



组合促销活动：购买一台 MSO5 系任意型号的示波器，可半价获得用于 5-PWR 和指定探头
了解详情点击此处 <https://www.tek.com.cn/cn-power-nurture-bofu-elemental-ps2>

组合二：

MSO5204B混合信号示波器



DPO/PWR高级功率分析应用软件



TDP1000 1 GHz差分探头



TCP0030A 120 MHz AC/DC电流探头





泰克官方微信

如需所有最新配套资料，请立即与泰克本地代表联系！

或登录泰克公司中文网站：www.tek.com.cn

泰克中国客户服务中心全国热线：400-820-5835

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3楼301室
邮编：100088
电话：(86 10) 5795 0700
传真：(86 10) 6235 1236

泰克上海办事处
上海市长宁区福泉北路518号
9座5楼
邮编：200335
电话：(86 21) 3397 0800
传真：(86 21) 6289 7267

泰克深圳办事处
深圳市深南东路5002号
信兴广场地王商业大厦3001-3002室
邮编：518008
电话：(86 755) 8246 0909
传真：(86 755) 8246 1539

泰克成都办事处
成都市锦江区三色路38号
博瑞创意成都B座1604
邮编：610063
电话：(86 28) 6530 4900
传真：(86 28) 8527 0053

泰克西安办事处
西安市二环南路西段88号
老三届世纪星大厦26层L座
邮编：710065
电话：(86 29) 8723 1794
传真：(86 29) 8721 8549

泰克武汉办事处
武汉市洪山区珞喻路726号
华美达大酒店702室
邮编：430074
电话：(86 27) 8781 2760

泰克香港办事处
香港九龙尖沙咀弥敦道132号
美丽华大厦808-809室
电话：(852) 2585 6688
传真：(852) 2598 6260

有关信息

泰克公司备有内容丰富的各种应用文章、技术简介和其他资料，并不断予以充实，可为从事前沿技术研究的工程师提供帮助。请访问泰克公司网站 cn.tektronix.com



©2015 年泰克公司版权所有，侵权必究。泰克产品受到已经签发及正在申请的美国专利及外国专利的保护。本文中的信息代替以前出版的材料中的所有信息。本文中的技术数据和价格如有变更，恕不另行通告。TEKTRONIX 和 TEK 是泰克公司的注册商标。本文中提到的所有商号均为各自公司的服务标志、商标或注册商标。

02/14 DM/WWW

46C-60010-0

Tektronix®