

非常见问题第220期： 开关模式电源问题分析 及其纠正措施：电感器 不符合规格要求

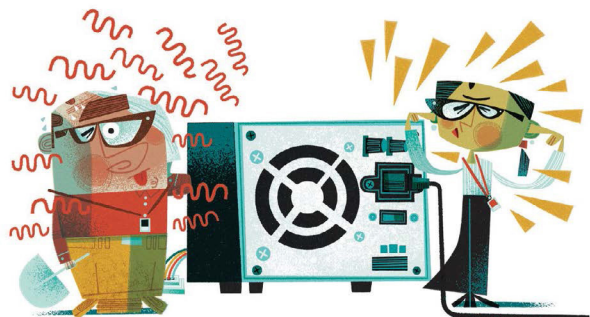
Abe Ibraheim，核心应用部实习生

Kenneth Armijo，核心应用部工程师

Piyu Dhaker，资深工程师

问题

为什么我的电源会出现振铃和过热？



回答

电感器尺寸不当和超出电感饱和电流额定值可能会导致DC-DC转换器出现多种问题，其中两个问题是振铃和过热。

摘要

本文是系列文章中的第一篇，该系列文章将讨论常见的开关模式电源(SMPS)的设计问题及其纠正方案。本文旨在解决DC-DC开关稳压器的功率级设计中面临的复杂难题，重点分析电感问题。设计人员为了获得各种优势，例如减少输出纹波和尽量缩减解决方案尺寸，往往会选择超出推荐范围的电感值。然而，选择电感值过大或过小的元件都会导致意想不到的后果，可能会造成芯片严重损坏并降低效率。本文还将分析探讨：如果不采取适当的措施，确保负载电流不会超过电感的最大饱和额定值，会出现什么情况。

什么是开关模式电源

SMPS是一种高效稳压器，可降低输入电压（降压转换器）、升高输入电压（升压转换器），或同时执行这两种操作（降压-升压转换器）。图1所示为基本开关转换器拓扑。

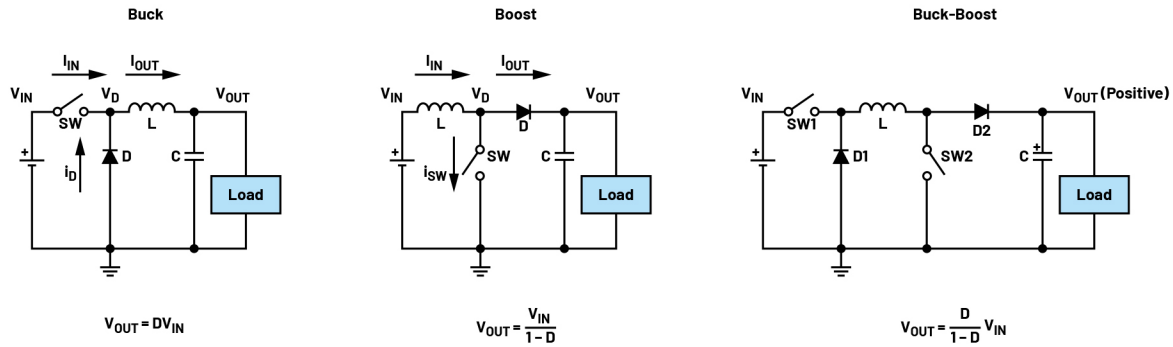


图1. 常见的SMPS拓扑及其输出公式。

每个SMPS都以同样的方式工作：将能量存储在电感器中，并利用脉宽调制(PWM)技术来获得所需的输出。这些转换器都应遵循伏秒平衡定律，即在稳态下工作时，电感在一个周期内的平均电流必须为零。因此，电感器必须在另一个周期开始之前，将充电阶段存储的所有电流放电。

降压转换器操作

本文仅使用降压转换器来演示常见的设计错误。降压转换器的功率级由以下四个元件组成：电感器、输出电容器、顶部FET（由开关表示）和底部FET（由二极管表示），见图2。

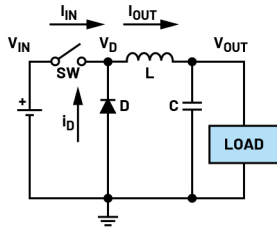


图2. 简化的降压转换器功率级。

电感器两端的电压通过以下公式计算： $V_L = L \, di_L/dt$ 。该电压是开关节点与输出电压之间的差值。当顶部FET导通时， V_L 是输入电压和输出电压之间的差值。当顶部FET关断时，由于开关节点接地，因此差值为0 V减去输出。 di_L/dt （或 Δi_L ）是电感电流随时间的变化量，通常称为电感电流纹波。当顶部FET闭合（底部FET断开）时，随着流经电感器的电流增加，电感器以磁通量的形式存储能量。当顶部FET断开，磁场消失时，底部FET会形成接地路径，从而使电流在减小时仍能够流向负载。图3所示的电感电流波形中可以看出这一点。输出电容用于获得平稳的输出纹波，并协助保持所需的输出电压。降压转换器的输出电压由 $V_{OUT} = D V_{IN}$ 得出，其中D是占空比，定义为顶部FET导通并对电感器充电的时间占总周期时间的百分比。

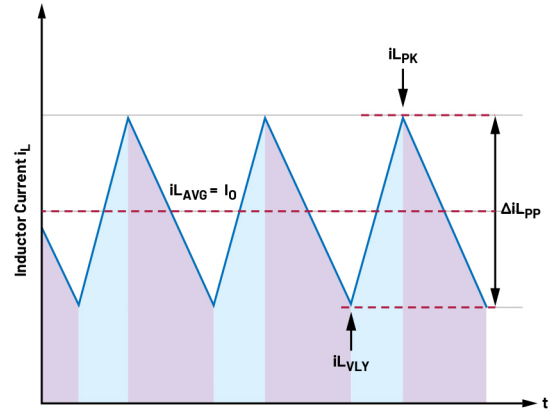


图3. 电感电流波形。当顶部FET导通时，流经电感器的电流充电；当顶部FET关断时，流经电感器的电流放电。

推荐的电感器尺寸

在设计SMPS时，必须选择正确的电感值，以确保电感电流纹波(Δi_L)在可接受范围内。建议降压转换器的电感纹波应介于所施加负载电流的30%至40%之间。通常认为此范围比较理想，既足以捕获准确的信号并将其传送到电流模式控制反馈系统，又不会过大，导致电源进入断续导通模式(DCM)。DCM是一种状态，在该状态下，因电流纹波太大而迫使电流低于0 A，以便将负载电流维持在所需值。然而，一旦达到0 A，FET内部的二极管就不再导通，从而防止电流降至0 A以下。一般基于以下公式来正确选择电感：

$$L = \frac{V_{OUT} \times (V_{OUT} - V_{IN})}{\Delta i_L \times f_{Switching} \times V_{IN}} \quad (1)$$

此公式表明，开关频率与电感成反比，这意味着频率越高，充电时间就越短，从而可以使用更小的电感实现正常操作（节省占用空间和成本）。

电感器饱和

在SMPS设计中，常见的一种灾难性错误就是在选择功率电感时忽略了电流饱和额定值。当流经电感的电流超过饱和电流额定值时，电感器铁芯饱和，这意味着产生的磁场将不再与消耗的电流成比例地增加。这会破坏伏秒平衡定律，导致电感电流纹波和输出电压纹波失去线性特性。当铁芯饱和时，电感值会迅速降低，其行为更像电阻而不是电感。由于电感器的有效串联电阻(ESR)增加，而实际电感减小，因此，为了满足伏秒特平衡，电流变化量将被迫增加。在饱和电流波形中观测到尖峰是电流斜率呈指数增加造成的，如图4所示。该电流尖峰会影响到输出电压，从而导致更多噪声和电压尖峰，如图5所示。如果电压尖峰过大，超过下游元件的最大电压额定值，噪声和电压尖峰可能会损坏下游元件，并降低EMI性能。

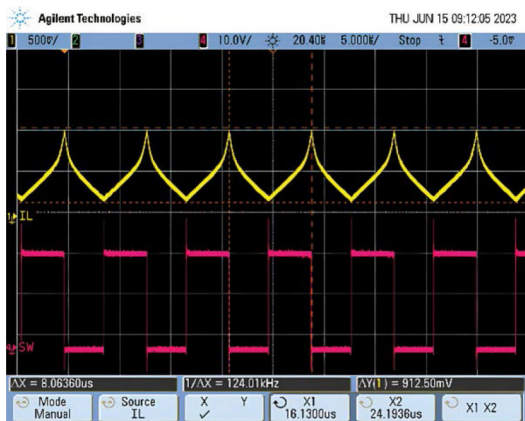


图4. 饱和电感电流波形。波形在电流超过饱和额定值之前表现正常。

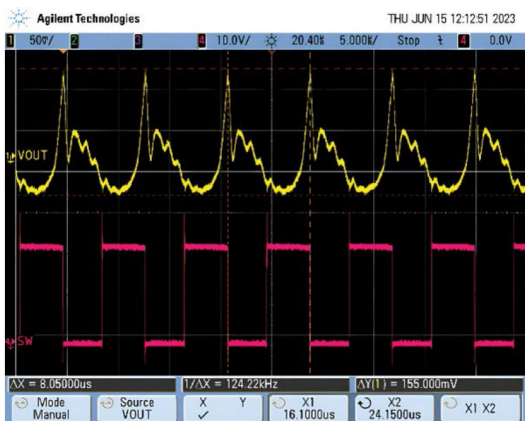


图5. 饱和电感输出纹波。尖峰会延续到输出，其中包含噪声和电压尖峰。

此外，在电流波动较大的情况下，电感器会经历快速磁滞损耗，从而导致电感器散热过多（如图6所示）并产生可闻噪声。过多的热量可能会损坏附近的其它元件（尤其是稳压器芯片本身）。

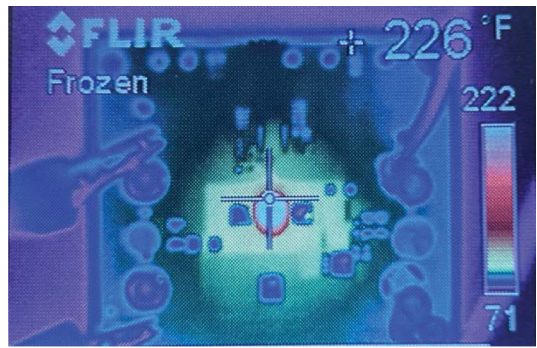


图6. 电感器饱和和散热温度为226°F (107.78°C)。

为避免出现此问题，设计人员应选择额定电流至少比预期最大电流高两倍的电感器。在计算最大电流时，一定要考虑电感电流纹波以及输出端消耗的负载电流。此外，设计人员还可以参考所选电感器的数据手册，了解在多大电流下电感值会降低10%到30%，这就是饱和的定义。选择具有适当饱和电流额定值的电感器将会使系统正常运行，如图7中流经电感器的线性电流所示。输出电压尖峰将会消失，如图8所示。最后，系统将在更低的温度下运行（如图9所示），从而减少对设备的影响并延长设备的使用寿命。

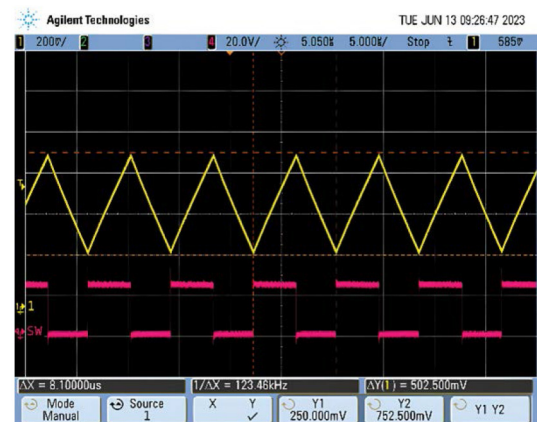


图7. 标称电感电流波形。

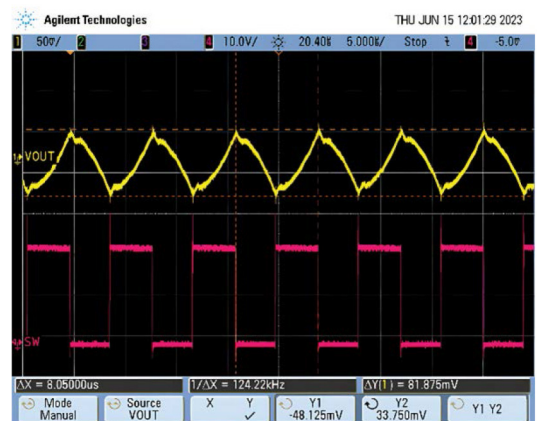


图8. 标称电感输出纹波。

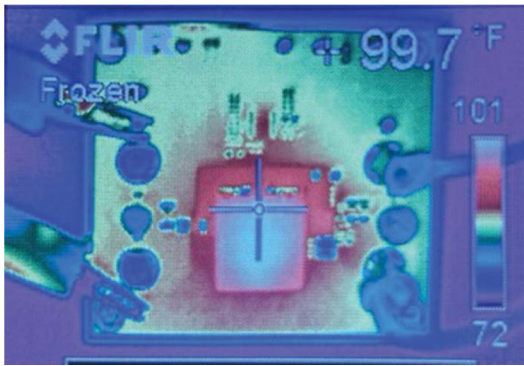


图9. 标称电感散热温度为99.7°F (37.61°C)。

超小电感器面临的难题

设计人员通常为了节省占用空间更倾向选择电感值较小的电感，这样的电感器线圈数量较少，因此外形尺寸较小。然而，如果电感器太小，纹波电流就会很大，并会迫使转换器进入DCM模式，这对于SMPS来说是不可取的，因为器件的效率会降低，电磁干扰(EMI)性能也会变差。当开关节点出现振铃时，可能会观测到这种EMI性能下降现象，这是由寄生效应和LC谐振电路（产生谐振电路）引起的，如图10所示。这种振铃会影响输出电压，从而导致更大的纹波和更多的电压尖峰，如图11所示。此外，电源不再处于连续导通模式(CCM)，并且推导出的SMPS输出公式不再适用。

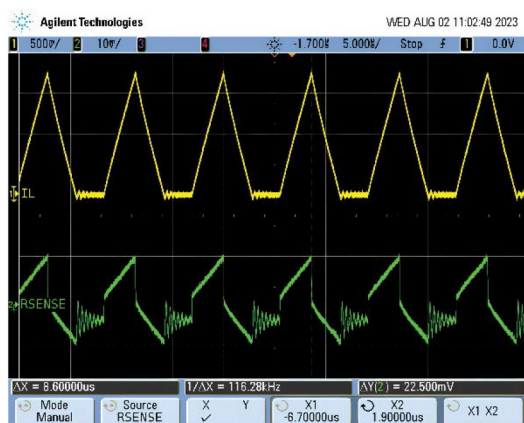


图10. 超小电感输出波形。如果无法获得电感电流，也会在开关节点处观测到振铃现象。

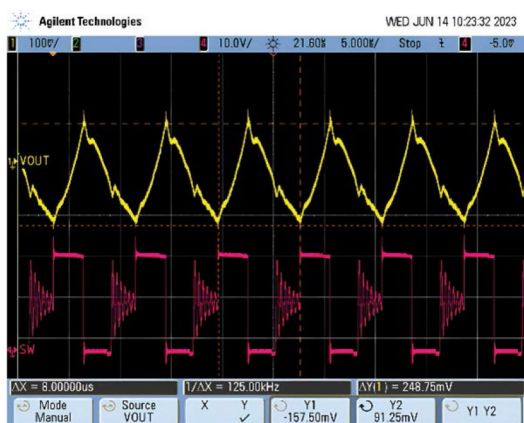


图11. 超小电感电流波形。电流和 R_{SENSE} 中出现振铃表明电源处于DCM模式。

为了解决此问题，设计人员应选择能够提供约30%至40%电流纹波的电感。这样就会降低电感电流纹波的幅度，使器件从DCM返回CCM模式，如图12所示。这也会改善输出电压纹波，消除电压尖峰，如图8所示。如果设计人员在计算所需电感值和选择适用元件时遇到困难，可以使用LTPowerCAD来协助设计和选择功率级元件。

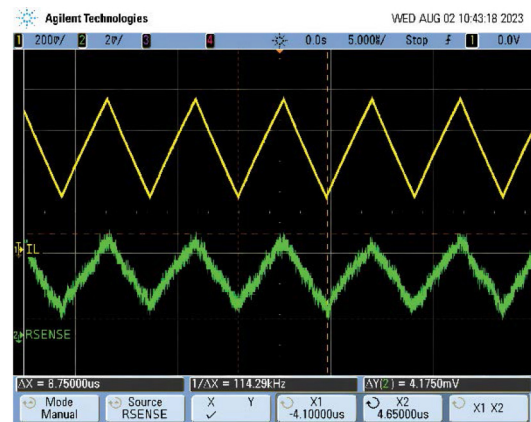


图12. 标称电感电流波形。

超大电感器面临的难题

连接到SMPS的下游电子元件通常具有指定的电源电压和相关容差。如果电压轨上的纹波过大，将严重影响系统的运行。例如，如果微控制器的电源规格为3.3 V $\pm$ 50 mV，则纹波大于 $\pm$ 50 mV可能会导致微控制器关闭。设计人员一般通过增加电感器的尺寸来减少这种纹波。然而，如果电感器尺寸过大，电流纹波以及输出电压纹波会显著减少。尽管这听起来可取，但它会导致反馈系统出现问题，而且还会导致瞬态响应变慢。小纹波将使串联检测电阻很难检测到变化，从而使传递到反馈环路的常见三角波形失真。当电感电流纹波较小时，信噪比(SNR)会降低。这会导致反馈环路将噪声记录为电感器信号，从而导致输出信号不稳定（表现为抖动），如图13所示。

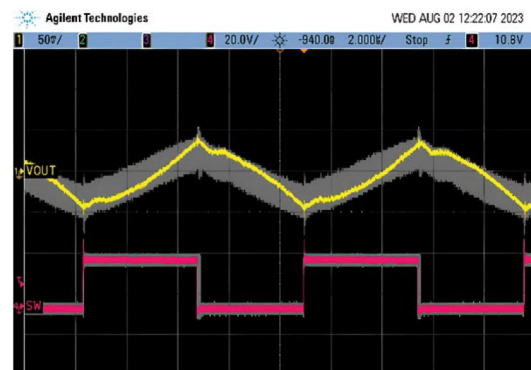


图13. 输出不稳定造成抖动。超大电感输出波形表现出持续特性。突出显示的波形采用标称电感捕获。

此外，电感值越大，饱和电流额定值通常越小。这可能会导致电感饱和，对于器件而言非常危险，如“电感器饱和”部分所述。超大电感饱和带来的影响如图14所示。

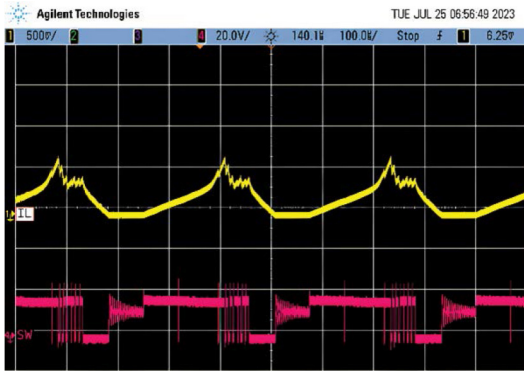


图14. 电感值为标称值22倍的电感器的饱和和电感输出波形。额定电流不会随电感成比例增加。

为了缓解此问题，设计人员切记，输出电压纹波可通过改变输出电容选择来控制。通过增加输出电容器的值或降低其ESR，可以减少输出电压纹波，而无需增加电感器的值。这样电感电流纹波值保持在30%到40%之间，从而使检测架构能够正确获取信号。这一点可以从图15中看出。

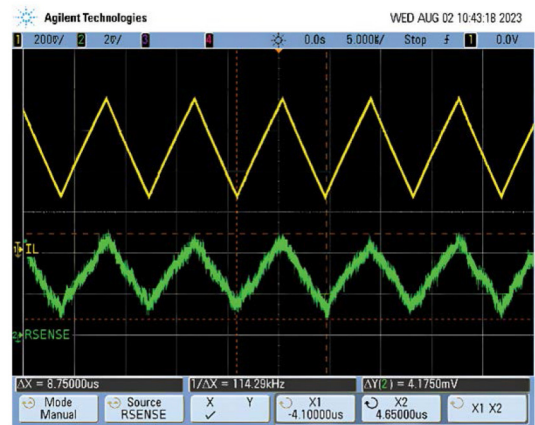


图15. 标称检测电阻波形。

结论

本文可作为分析降压转换器中电感器设计问题的指南。此外，本文旨在为设计人员提供实用解决方案，避免出现文中所述的任何干扰行为。通过适当调整电感大小，将电感纹波保持在输出的30%至40%范围内，对于确保器件保持在CCM状态，并且不会引起干扰抖动或饱和至关重要，这种抖动或饱和可能会对负载或稳压器芯片本身造成致命影响。



作者简介

Abe Ibrahim是核心应用部的实习生，于2023年夏加入ADI公司。Abe是伍斯特理工学院一名大三学生，正在攻读电气和计算机工程学士和硕士学位。他的专业方向是微电子和电力系统。



作者简介

Kenneth Armijo于2022年加入ADI公司，担任核心应用部助理工程师。他拥有伍斯特理工学院电气工程和机器人工程两个学士学位，还拥有电气工程硕士学位。他专注于电源管理电路（主要是开关稳压器）的设计和实现。



作者简介

Piyu Dhaker是ADI公司北美核心应用部的一名应用工程师。2007年毕业于圣何塞大学，获电气工程硕士学位。2017年6月加入北美核心应用部。她还曾在ADI的汽车动力总成部和电源管理部工作。

