

LED驱动器小型化为固态照明开辟新机遇

Mickey Madsen

Nordic 电源转换器公司

虽然 LED 在过去十年中有了显著的改进，但驱动器技术并未跟上步伐，并且在某些方面是新应用的限制因素。尺寸是一个特殊问题。大幅提升开关频率有助于减小尺寸，但通常会导致其他问题或成本高昂。Nordic 电源转换器公司 CEO Mickey Madsen 解释了他的公司如何克服障碍，并通过设计超高频 LED 驱动器使其成为可行。

LED 技术通过效率、外形、寿命和可控性彻底改变了照明市场，并不断提供新的解决方案。LED 驱动器在过去十年中略有改进并进行了优化，但基本问题仍然存在：自 20 世纪 70 年代引入开关模式电源以来，电源转换技术基本没有变化。在尺寸、寿命和控制方面，LED 已经超过了为它们供电的 LED 驱动器。缩小这一差距的一种方法是大幅提高开关频率。这个想法并不新鲜，但是以商业可行的方式这样做的可能性是新鲜的。增加开关频率的应用技术尤其减小了无源储能元件的尺寸。因此，它减小了尺寸、重量并因此降低了 LED 驱动器的成本，同时提高了可靠性和寿命。

LED 驱动器导致的 LED 系统限制

在过去的十年中，LED 的效率已经提高了很多倍，价格也相应下降很多，并且还将继续演进。效率的提高使得功耗降低，因此降低了对散热的需求。所有这些进步都使得更小的灯具具有更高的设计自由度和更低的成本。然而，提供和控制 LED 所需的 LED 驱动器没有迎来相同的重大改进。

首先，LED 驱动器的尺寸和物理外形由所需的部件决定，例如无源储能元件（电感器和电容器）。其次，所需组件的有限寿命限制了 LED 驱动器的寿命和可靠性，导致它们成为 LED 系统故障的关键原因——并且通常早于用户预期。第三，虽然 LED 驱动器的成本随着数量的增加而减少，但进一步降低成本却受到铜等传统组件原材料的限制。因此，LED 驱动器需要新的创新以赶上 LED 的发展并满足市场需求。

LED 驱动器中无源元件的价值、尺寸和价格与开关

频率成反比，开关频率的急剧增加将导致功率密度大大增加并降低成本。这个概念的好处是众所周知的，但同样也是问题所在。接下来我们将解释，为何增加开关频率会导致严重的开关损耗，从而破坏硬开关开关电源（SMPS）的效率并导致系统故障。

传统电源技术

第一款开关电源是在 20 世纪 70 年代早期开发的，从此成为电源和 LED 驱动器的市场标准。在 40 多年的研发中，电源的效率和功率密度得到了提高，从那时起，随着技术的成熟和组件的优化，电源的性能也得到了提升。然而，改善步伐大大放缓。

对于大多数 LED 驱动器的功率水平，现已公布的一些最佳效率结果是约为 95%，功率密度为 0.88 W/cm^3 。这些结果是在具有受控环境且不关注成本的实验室中实现的。对于商业产品，则要接受较低效率和功率密度以降低成本。

苹果公司的方糖笔记本电脑充电器采用了市场上最小的电源。60W 版本的功率密度为 0.59 W/cm^3 。（包括外壳和插头），效率为 90%。而 USB 充电器方面，效率和功率密度较低，效率约为 75%，功率密度约为 0.31 W/cm^3 。同样的趋势适用于具有差异的 LED 驱动器，具体取决于功率水平、规格、性能和价格。在较低功率水平下，效率和功率密度的下降部分原因是外壳、插头、控制、启动、保护和其他壳内处理电路与功率水平无关，部分原因是与价格的权衡。随着功率水平的提高，效率变得更加重要，通过提高效率，价格上涨通常更容易被接受。

开关损耗会影响开关频率

传统的 SMPS 拓扑结构，如降压、升压和反激是硬切换，这意味着要采用电路板上的 MOSFET 半导体进行切换，同时电压和电流要流经 MOSFET。结果是每次导通时 MOSFET 中的能量都会被耗散掉。这被称为开关损耗。在

传统的转换器中，开关频率被选择作为效率（开关损耗）、尺寸和成本之间的权衡。在大多数商业产品中，选择了 50-400 kHz 范围内的开关频率，因为这是更好的权衡。

该频率范围内的典型 SMPS 如图 1 所示。这里可以清楚地看到，无源储能元件，电容器和磁性元件，构成了大部分体积。物料清单（BOM）细分开来，通常无源和有源组件分别占 60% 和 40%。因此，通过减少无源元件可以实现显着的尺寸和成本优势。由于这些元件的数值、尺寸和成本与开关频率成反比，直接的方法是将开关频率显著提高到 MHz 范围，甚至达到更高频（VHF）范围（30-300 MHz）。然而，将频率简单地增加到 VHF 范围将使开关损耗增加近 1,000 倍。这种能量会破坏效率并导致电源过热和故障。

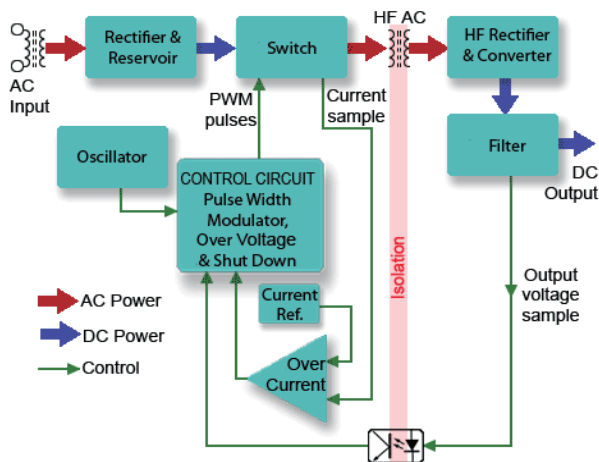


图 1 典型 SMPS 架构

为了避免开关损耗并且能够在保持高效率的同时增加频率，必须使用新的拓扑结构。利用谐振转换器，可以实现零电压开关（ZVS），从而可以避免由寄生开关电容引起的开关损耗。现有三组谐振转换器：串联谐振、并联谐振和串并联谐振转换器。

串联谐振转换器具有最高的效率和最低的复杂性，但在输出调节方面存在基本挑战，特别是对于轻载和空载情况。

并联谐振转换器具有更好的负载调节，但它们的谐振电流不随输出功率而变化。即使在轻负载时也会导致满负载损耗，从而导致轻负载效率非常低。

串并联谐振转换器具有串联谐振和并联谐振元件。这些元件可以平衡，以获得串联谐振和并联谐振拓扑的优点，同时显著降低其缺点。LLC 转换器是谐振转换器最常用的

拓扑结构。它可以设计为零电压开关（ZVS），以减少开关损耗并提高频率。LLC 转换器通常用于降压应用，从几百伏到几十伏，通常功率范围为 400-4000 瓦。

自 20 世纪 80 年代以来，已经进行了研究，将谐振 RF 放大器（转换器）与整流器结合用在 DC/DC 转换器上。利用这些类型的转换器，可以实现 ZVS 和 / 或零电流开关（ZCS）。在这种情况下，当跨越 / 通过它的电压和 / 或电流为零时，MOSFET 导通。从理论上讲，如果切换是在瞬间和恰当的时间完成的，那么这应该可以消除开关损耗。在实践中，可以通过与理想情况的轻微偏差来实现非常高的效率。

VHF 谐振转换器

在过去十年中，在 VHF 范围中运行的这类转换器的重点和研究不断增加。进入这个频率范围可以大大减少对无源储能和磁件的需求。可以用空心磁性元件和陶瓷电容器来代替电解电容器，从而最大限度地减小尺寸和价格，同时延长使用寿命。

由于开关频率在 30 到 300MHz 之间，因此选择拓扑时的主要问题是开关损耗。由寄生输出电容引起的 MOSFET 开关损耗会随开关频率线性增加，并成为这些频率的主要损耗机制，如果拓扑结构没有考虑到这一点。

E 类

大多数拓扑结构都来自 E 类转换器，它利用了设计中开关的输出电容，并确保在 MOSFET 导通之前电容完全放电。一些拓扑结构也可以实现零电流开关（ZCS）。这消除了由例如 MOSFET 封装中的寄生电感引起的损耗。尽管在功率转换器中通常不是很大的损耗机制，但这导致电压的导数在开关实例（ZdVS 或 ZDS）处为零，因此是相关的。如果 MOSFET 没有在正确的时间完全导通，它可以减少影响，因为它上面的电压将在一段时间内接近零。

基本的 E 类转换器是迄今为止最不复杂的拓扑结构，并且有很好的研究。在各个组件不会相互严重影响的情况下，可以使用简单的设计流程。这种转换器仅由一个 MOSFET、两个电感器和一个电容器组成。它非常适合低输入电压的应用，但对于高输入电压的应用（例如电源），由于电压应力是开关上输入电压的 3.5 倍，这成为了这种拓扑结构的主要缺点。如果设计为在最佳情况下工作，则电感器对于限制瞬态响应和功率密度的任何拓扑结构而言是最大的。然而，转换器可以设计成在较小的标称情况下

操作，并具有较小的电感器和较快的瞬态响应。

SEPIC 转换器可以看作 E 类转换器的略微修改版本，原理图中唯一的区别是谐振回路中的电感器被移除。这不仅减少了电感器的数量，而且其余两个电感器也将小于 E 类(如果操作设计接近最佳值)。然而，SEPIC 的设计更复杂，因为转换器和整流器不能单独设计，因此所有部件相互影响。因此，使用 SEPIC 可以在效率、瞬态响应、尺寸和成本方面实现更好的性能，但设计更复杂。

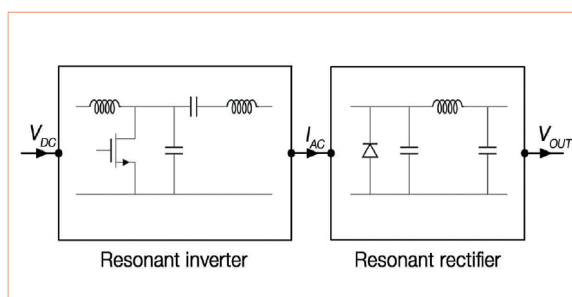


图 2 E 类转换器的原理图

φ 2 级

φ2 类转换器也是 E 类的改进版本，唯一的区别是增加了 LC 电路，通过使其更加梯形来降低 MOSFET 两端的电压。虽然这是降低电压应力的好方法，但陡峭的电压曲线需要更大的电流，从而导致其损耗大于 E 类转换器。虽然它有 2 个额外的元件，但与 E 类转换器相比，物理尺寸可以或多或少与电感器相同。由于较高的谐振电流，其总损耗大于 E 类转换器。如果能够选择另一类 MOSFET，例如 100 V 器件而不是 150 V 器件，这可能是可以接受的。但如果不是这样的话，E 类或 SEPIC 是更好的选择。

DE 类

DE 类转换器是一个由与 E 类转换器相同数量的部件组成的半桥转换器；只有最大的电感被开关取代。因此，该拓扑仅具有一个电感器，其同时小于其他拓扑中的任何电感器。其 MOSFET 上的峰值电压是迄今为止任何转换器中最低的，电流也是最低的。

φ2 类转换器是具有最低电压应力的单开关转换器。该拓扑结构的电压应力约为输入电压的 2.5 倍，是 DE 的 2.5 倍。这导致 MOSFET 的输出电容中存储的能量超过 6 倍。为了获得 ZVS，这是需要共振的最小能量。对于具有高输入电压的低功率应用（例如电源连接的 SELV LED 驱动

器），这因此设定了谐振电流的量。此外，φ2 类具有甚至更多的谐振电流，这是由于导通第三谐波以降低峰值电压。避免开关损耗并同时保持低谐振电流是实现高效率的关键。因此，DE 类转换器是具有实现最高效率的基本潜力拓扑。

因此，如果可以设计有效的高侧栅极驱动，则 DE 转换器优于所有单开关拓扑。

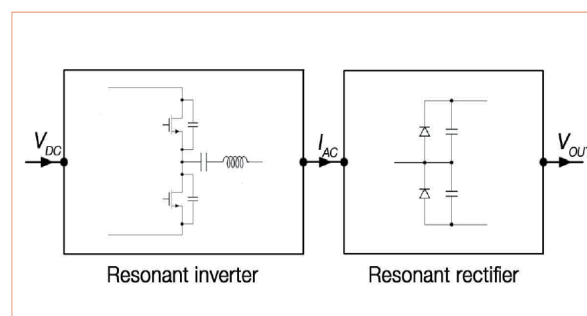


图 3 DE 类转换器的示意图

VHF 的技术优势

转向更高频率有几个好处；其主要优点是小型化、可靠性 / 寿命和调光效率。

微型化

图 1 示出了无源能量存储元件构成 SMPS 的大部分体积。作为粗略平均值，这些组件构成体积的 95%，有源组件与电阻器等一起构成剩余的 5%。尽管开关频率的增加并未一对一减小尺寸，但将频率从 100 kHz 增加到 30 MHz，尺寸将减少大约 10 倍。因此，整体 SMPS 将减少至原始体积的约 15%。图 4 比较了开关频率为 100 kHz 的传统 20 W LED 驱动器与以 30 MHz 的 20 W LED 驱动器。

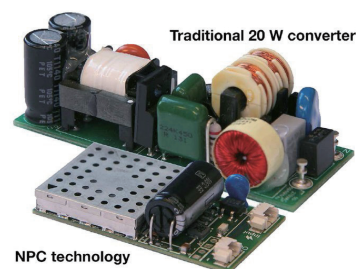


图 4 开关频率分别为 100kHz 和 30MHz 的 20W 驱动器的对比

可靠性

LED 系统故障的很大一部分是由 LED 驱动器引起的；还有人认为是绝大多数故障原因。在大多数情况下，故障的主要原因是电解电容器导致的，因为它们的寿命随温度升高而大大降低，因为其中的液体蒸发了。VHF 减少了对电容值的需求，从而消除（或显著降低）对电解电容器的需求，最终可以限制这种故障原因。

此外，对能量存储的需求减少，也使得空心磁件成为有芯磁件的可行替代方案。向空心磁件的转变需要频率的显著跳跃，因为没有磁芯可以实现更小的每体积电感。如果频率增加到 VHF 范围，则空心 PCB 嵌入式磁性元件可以成为可行的解决方案，因为这些频率所需的电感可以在较小的物理尺寸下进行，并且可以避免磁芯损耗。这不仅显著降低了 BOM，而且还提高了 LED 驱动器的坚固性和机械稳定性，因为磁性元件体积太大并且对高温敏感。

高调光效率

另一个强大的好处是提高了调光效率。由于非常高的开关频率，因此可以在调光时调整个转换器，而不会引起可见的闪烁。通过这种方式，转换器可以在最佳条件下开启并在最高效率下运行，也可以在低损耗下运行。这样可以实现非常平坦的效率曲线。这可以用于在特定灯具中实现更高的调光效率，或者在更广泛的灯具组中使用给定的驱动器，同时所有的灯具都实现高效率。

图 5 所示为在 30 MHz 下工作 20 W 室内驱动器的调光效率。

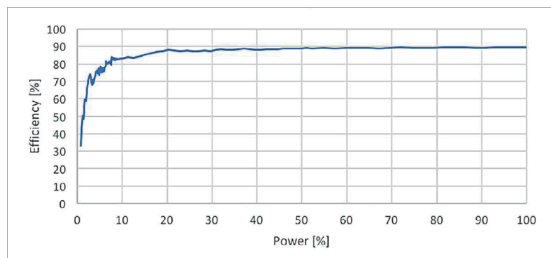


图 5 20W 驱动器在 30MHz 下工作的效率曲线

VHF LED 驱动器

VHF 功率转换器的优势突破了功率转换器的界限。然而，仍存在与传统转换器类似的权衡，因为如果放宽其他参数的规格，仍然可以进一步改进一些参数。主要优化参数通常是尺寸、效率、可靠性、成本和性能。特定的驱动器设计可以使用 VHF 的所有优点来改进一个或两个参数，

或者改进所有参数，如图 6 中的蜘蛛网所示。

接下来将介绍 VHF LED 驱动器的两个示例。这些驱动器均基于 DE 类转换器，主要针对尺寸（室内）或可靠性（室外）进行了优化。

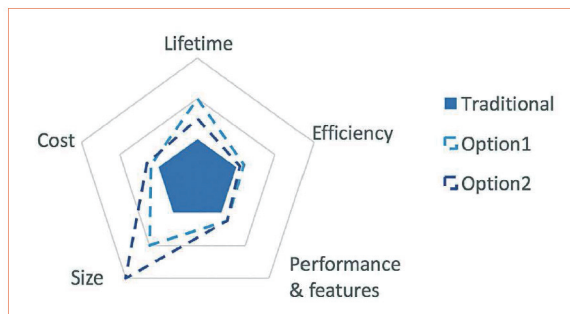


图 6 权衡参数

紧凑型室内驱动器

图 7 所示的 20W 驱动器针对室内灯具进行了优化，具有纤薄的外形、低成本和高调光效率。调光至 10% 时，效率仅下降 5%。

该驱动器的总体高度仅为 6mm。电解电容略高，但可以通过将其分成两个更薄的版本或在 PCB 中切割来减少。另一种选择是用陶瓷电容器替换电解电容器。这增加了成本，但延长了使用寿命并降低了高度。

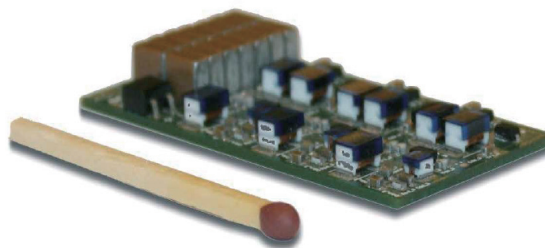


图 7 不带电解的紧凑型 20W LED 驱动器

可靠的户外驱动器

户外照明的要求与室内照明不同。虽然尺寸仍然重要，但从更换故障驱动器的成本方面来看，寿命和可靠性才是关键参数。图 8 中的 60W 驱动器针对此应用进行了优化。

该驱动器不含电解质，结合良好的电气和热设计，从而确保在 75° 时的使用寿命超过 120,000 小时。此外，它还具有 8kV/4kA 共模和 10kV/5kA 差模的内置浪涌保

护, 以确保高可靠性和长寿命。该驱动完全可编程, 并具有所有标准控制接口。该驱动器外形纤薄, 仅 25mm, 体积约为传统 SMPS 最接近的解决方案的一半。



图 8 无电解 60W LED 驱动器

总结

在尺寸和可靠性方面, LED 驱动器已成为 LED 照明的主要瓶颈之一。VHF LED 驱动器背后的技术具有更小的外形、更高的可靠性和更高的调光曲线效率, 为 LED 照明提供了基本优势。驱动器设计可以调整为给定照明应用带来相关的益处。

由于传统电源解决方案的进步停滞, 以及 LED 的改进而对小型化的要求不断增加, 因此下一代 LED 照明需要新的技术和解决方案。通过将 RF 行业的电路与电力电子设计方法相结合, 可以设计出新的没有开关损耗的 VHF SMPS 拓扑。因此, 减少了对无源能量存储元件的需求, 使得能够去除笨重且体积大的磁性部件和温度敏感的电解电容器。

参考文献

[1] M.D. Seeman. Gan devices in resonant llc converters:

System-level considerations. Power Electronics Magazine, IEEE, 2(1):36-41, March 2015. ISSN 2329-9207. doi: 10.1109/MPEL.2014.2381456.

[2] J. Rivas. Radio Frequency dc-dc Power Conversion. PhD thesis, Massachusetts Institute of Technology, 2006.

[3] M. Madsen. Very High Frequency Switch-Mode Power Supplies - Miniaturization of Power Electronics. PhD thesis, Technical University of Denmark, 2015.

[4] D.J. Perreault, Jingying Hu, J.M. Rivas, Yehui Han, O. Leitermann, R.C.N. Pilawa-Podgurski, A. Sagneri, and C.R. Sullivan. Opportunities and challenges in very high frequency power conversion. In Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2009. APEC 2009. Twenty-Fourth Annual IEEE, pages 1-14, Feb 2009. doi: 10.1109/APEC.2009.4802625.

[5] J.M. Rivas, D. Jackson, O. Leitermann, A.D. Sagneri, Yehui Han, and D.J. Perreault. Design considerations for very high frequency dc-dc converters. In Power Electronics Specialists Conference, 2006. PESC '06. 37th IEEE, pages 1-11, June 2006. doi: 10.1109/PESC.2006.1712114.

[6] M. Madsen, A. Knott, M. A.E. Andersen. Low Power Very High Frequency Switch-Mode Power Supply with 50 V Input and 5 V Output, IEEE Transactions on Power Electronics, December 2014, vol.29, no.12, pp.6569-6580.

[7] M. Madsen, A. Knott, M. A.E. Andersen, A. P. Mynster. Printed Circuit Board Embedded Inductors for Very High Frequency Switch-Mode Power Supplies, IEEE Energy Conversion Congress and Exhibition Asia DownUnder, Melbourne, Australia, June 2013. Conference Proceedings p1071-1078.