

智能硬件工程师如何能够轻松设计电源：小型指南

Frederik Dostal, 现场应用工程师

摘要

本小型教程概述了电源设计的可能性，并介绍了基本和常用隔离与非隔离电源拓扑及其优缺点。我们还将介绍电磁干扰(EMI)和滤波考虑因素。本小型教程旨在帮助大家理解并领略电源设计的艺术。

简介

大多数电子系统都需要在供电电压和需要供电的电路电压之间进行某种转换。当电池失去电荷时，电压会下降。某些DC-DC转换可确保电池中更多储存的能源用于为电路供电。此外，如果我们使用110 V交流线路，则无法直接为微控制器等半导体供电。由于每个电子系统几乎都使用电压转换器（也称为电源），因此多年来，它们针对不同的用途进行了优化。当然，优化目标通常是解决方案尺寸、转换效率、EMI和成本。

简单的电源：LDO

其中一种简单的电源形式是低压差(LDO)稳压器。LDO是与开关稳压器相对的线性稳压器。线性稳压器在输入电压和输出电压之间放置一个可调电阻，这意味着不管输入电压如何变化，哪个负载电流正在通过设备，输出电压都是固定的。图1显示了该简单电压转换器的基本原理。

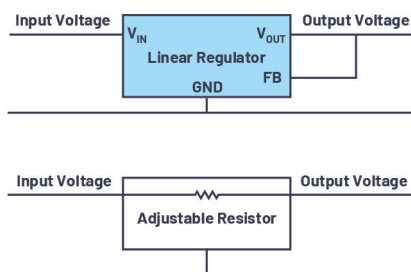


图1. 线性稳压器将一种电压转换为另一种电压。

多年来，典型电源转换器都是由一个50 Hz或60 Hz的变压器组成，连接到电网，以一定的绕线比产生不稳定的输出电压，比系统中需要的电源电压高几伏。然后使用线性稳压器将此电压转换为电子产品所需的稳定调节的电压。图2显示了此概念的方框图。

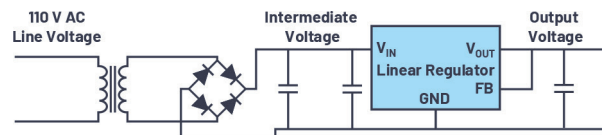


图2. 线路变压器后跟线性稳压器。

图2中基本设置的问题在于50 Hz/60 Hz变压器体积相对较大且价格昂贵。此外，线性稳压器还散发大量的热量，因此系统总效率低，并且由于系统功率高，很难消除产生的热量。

开关模式电源助一臂之力

为了避免图2所示的电源的缺点，发明了开关模式电源。它们不依赖于50 Hz或60 Hz交流电压，而是采用直流电压，有时采用整流交流电压，产生更高频率的交流电压以使用更小的变压器，或在非隔离系统中，使用LC滤波器整流电压，以产生直流输出电压。优点是解决方案尺寸小，成本相对较低。产生的交流电压不需要是正弦电压波形。简单的PWM信号波形就能很好地工作，并且可使用PWM发生器和开关轻松生成。

直到2000年，双极性晶体管都是常用的开关。它们性能不错，但是开关转换速度相对较低。功效也不高，开关频率限制为50 kHz或100 kHz。如今，我们使用开关MOSFET代替双极性晶体管，开关转换速度要快得多。反过来，开关损耗也更低，开关频率高达5 MHz。这样高的开关频率支持功率级使用非常小的电感和电容。

开关稳压器带来了许多优势。它们通常提供高效电压转换，允许升压和降压，并提供相对紧凑且低成本的设计。缺点是设计和优化过程复杂，开关转换和开关频率还会产生EMI。开关模式电源稳压器以及LTpowerCAD®和LTspice®等电源设计工具的面市极大地简化了这个困难的设计过程。利用这些工具，开关模式电源的电路设计过程可实现半自动化。

电源中的隔离

在设计电源时，要回答的第一个问题是是否需要电气隔离。使用电气隔离有多个原因。它可以提高电路的安全性，允许浮动系统操作，防止嘈杂的接地电流在一个电路中通过不同的电子设备传播。常见的两种隔离拓扑是反激转换器和正激转换器。但是，对于较高的功率，使用推挽、半桥和全桥等其他隔离拓扑。

如果不需要电气隔离，则大多数情况下使用非隔离拓扑。隔离拓扑总是需要变压器，而这种设备往往昂贵而笨重，并且满足定制电源所需的确切需求的现成设备通常很难得到。

不需要隔离时的大多数常见拓扑

常见的非隔离开关模式电源拓扑是降压转换器。也称为降压型转换器。它接受正输入电压，并生成低于该输入电压的输出电压。它是三个基本开关模式电源拓扑中的一个，只需要两个开关、一个电感和两个电容。图3显示了此拓扑的基本原理。高端开关从输入端发出脉冲电流，生成一个开关模式电压，在输入电压和地电压之间交替。LC滤波器在开关节点上获取该脉冲电压，生成一个直流输出电压。根据控制高端开关的PWM信号的占空比，生成不同电平的直流输出电压。这种DC-DC降压转换器具有很高的功效，相对容易构建，并且需要的组件很少。

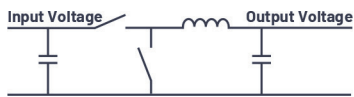


图3. 简单降压转换器的概念。

降压转换器在输入端发出脉冲电流，而输出端有来自电感的连续电流。这就是为什么降压转换器在输入端噪声很大，而在输出端噪声不那么大的原因。需要设计低噪声系统时，了解这一点很重要。

除了降压拓扑，第二个基本拓扑是升压拓扑。升压拓扑使用与降压拓扑相同的五个基本功率元件，但经过了重新排列，将电感放在输入端，高端开关放在输出端。升压拓扑用于将一个输入电压升高到高于该输入电压的输出电压。



图4. 简单升压转换器的概念。

选择升压转换器时，务必注意，升压转换器在数据手册中始终指定最大额定开关电流，而非最大输出电流。在降压转换器中，最大开关电流直接与最大可实现输出电流相关，与输入电压和输出电压之间的电压比无关。在升压稳压器中，电压比直接影响基于固定最大开关电流的可能最大输出电流。选择合适的升压稳压器IC时，不仅要知道所需的输出电流，而且要知道开发中设计的输入和输出电压。

升压转换器在输入端的噪声很低，因为与输入连接一致的电感可防止电流快速变化。但是，在输出端，这种拓扑的噪声就很大。我们只看到脉冲电流流过外部开关，因此相比降压拓扑，更关注输出纹波。

第三个基本拓扑是反相降压-升压转换器，仅由五个基本元件组成。该转换器获取正输入电压，并将其转换为负输出电压，名称由此而来。除此之外，输入电压还可能高于或低于反相输出电压的绝对值。例如，-12 V输出电压可能从输入端的5 V或24 V中产生。不进行任何特殊电路修改也可能发生这种情况。图5显示了反相降压-升压转换器的电路概念。



图5. 简单反相降压-升压转换器的概念。

在反相降压-升压拓扑中，电感从开关节点接地。转换器的输入端和输出端都有脉冲电流，因此这种拓扑的输入端和输出端的噪声均较大。在低噪声应用中，这种特性通过添加额外的输入和输出滤波来补偿。

反相降压-升压拓扑的一个有利方面是任何降压开关稳压器IC都可用于这种转换器。只要将降压电路的输出电压连接到系统接地即可。降压IC电路接地将成为经过调整的负电压。这一特性使得市场上的开关稳压器IC的选择范围很大。

专门的拓扑

除了前面讨论的三种基本非隔离开关模式电源拓扑外，还有很多拓扑可用。但是，它们都需要额外的电源组件。这通常会增加成本，并降低电源转换效率。虽然存在某些例外情况，但在电源路径中添加额外的组件通常会增加损耗。一些常用拓扑包括SEPIC、Zeta、Ćuk和4开关降压-升压。它们都有三种基本拓扑所不具备的功能。下面是每种拓扑的重要功能列表：

► SEPIC

SEPIC可从高于或低于输出电压的正输入电压产生正输出电压。升压稳压器IC可用于设计SEPIC电源。此拓扑的缺点是需要第二个电感或一个耦合电感以及一个SEPIC电容。

► Zeta

Zeta转换器类似于SEPIC，但能够产生正或负输出电压。而且，它没有右半平面零点(RHPZ)，由此简化了调节环路。降压转换器IC可用于此类拓扑。

► Čuk

Ćuk转换器可将正输入电压转换为负输出电压。它使用两个电感，一个在输入端，一个在输出端，因此输入和输出端的噪声都很低。缺点是没有很多开关模式电源转换IC支持这种拓扑，因为调节环路需要负电压反馈引脚。

► 4开关降压-升压

这种转换器类型近年来变得非常流行。它从正输入电压提供正输出电压。输入电压可能高于或低于经过调节的输出电压。这种转换器的功率转换效率更高，并且只需要一个电感，因此取代了很多SEPIC设计。

常用隔离拓扑

除了非隔离拓扑外，一些应用需要电气隔离电源转换器。原因可能是出于安全考虑，在不同电路相互连接的大型系统中需要有浮动接地，或者在噪声敏感应用中需要防止接地电流环路。常见的隔离转换器拓扑是反激转换器和正激转换器。

反激转换器通常用于高达60 W的功率电平。电路的工作方式是，在导通时间内，电能存储在变压器中。在断开时，该电能释放到转换器的副边，为输出供电。这种转换器容易构建，但需要相对较大的变压器来存储正常操作所需的所有电能。这一方面使得该拓扑仅限于较低的功率电平。图6的顶部显示了反激转换器，底部显示了正激转换器。

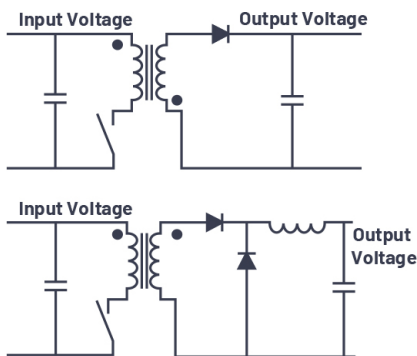


图6. 反激转换器 (顶部) 和正激转换器 (底部)。

除了反激转换器，正激转换器也很流行。它使用变压器的方式与反激转换器不同。在导通时间内，虽然有电流流过一次绕组，但也有电流流过二次绕组。电能不应存储在变压器线圈中。在每个开关周期后，我们都必须确保线圈的所有磁化释放到零，使得变压器在若干开关周期后不会饱和。利用几项不同的技术就可以从线圈中释放电能。一种常用方式是使用带有小型额外开关和电容的有源钳位。

图7显示了使用ADP1074的有源钳位正激设计的LTspice仿真环境原理图。在正激转换器中，输出路径中有一个反激转换器中所没有的额外电感，如图6所示。尽管这个额外的组件具有相关的空间和成本影响，但与反激转换器相比，它有助于产生较低噪声的输出电压。此外，在与反激转换器相同的功率电平下，正激转换器所需的变压器尺寸可能要小得多。

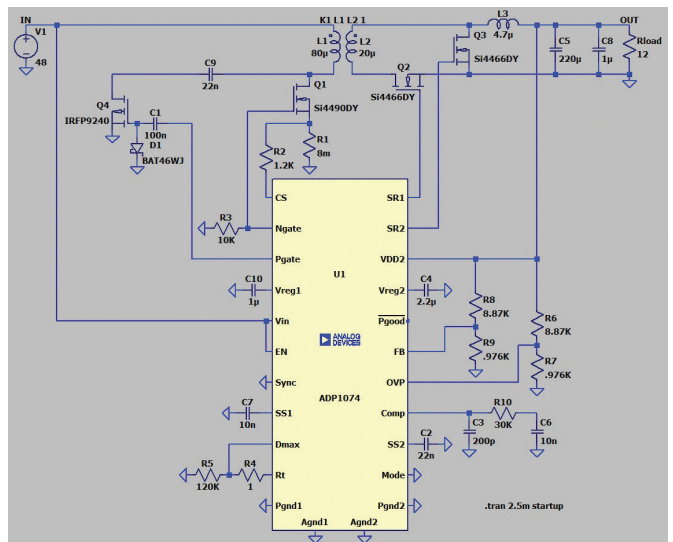


图7. 使用ADP1074产生隔离输出电压的有源钳位正激电路, 如LTspice中仿真所示。

先进隔离拓扑

除反激和正激拓扑外，还有很多基于不同变压器的电气隔离转换器概念。以下列表对常用转换器进行了一些基本解释：

► 推挽

推挽拓扑类似于正激转换器拓扑。但是，该拓扑需要两个有源低边开关，而不是一个低边开关。还需要一个带中心抽头的初级变压器。与正激转换器相比，推挽转换器的优点是运行时的噪声通常更低，而且需要的变压器更小。变压器的BH曲线的滞回在两个象限而非一个象限中使用。

► 半桥/全桥

这两种拓扑通常用于更高功率的设计，从几百瓦开始一直到几千瓦。除了低端开关，它们还需要高端开关，但可通过相对较小的变压器实现很高的电能传输。

► ZVS

讨论高功率隔离转换器时，通常会提到这个术语。它代表零电压开关。此类转换器的另一个术语是LLC（电感-电感-电容）转换器。这些架构的目的是实现高效率转换。它们会产生谐振电路，并在开关上的电压或电流接近零时开关电源开关。这样，开关损耗便降至最低。但是，此类设计很难实现，开关频率也不固定，有时会产生EMI问题。

开关电容变换器

除了线性稳压器和开关模式电源，还有第三组电源转换器：开关电容转换器。也称为电荷泵。它们使用开关和电容倍增或逆变电压。一大优点是不需要任何电感。此类转换器通常用于低于5 W的低功率电平。但是，最近取得的重大进展允许功率更大的开关电容转换器。图8显示了采用120 W设计、效率达98.5%的LTC7820，将48 V转换为24 V。

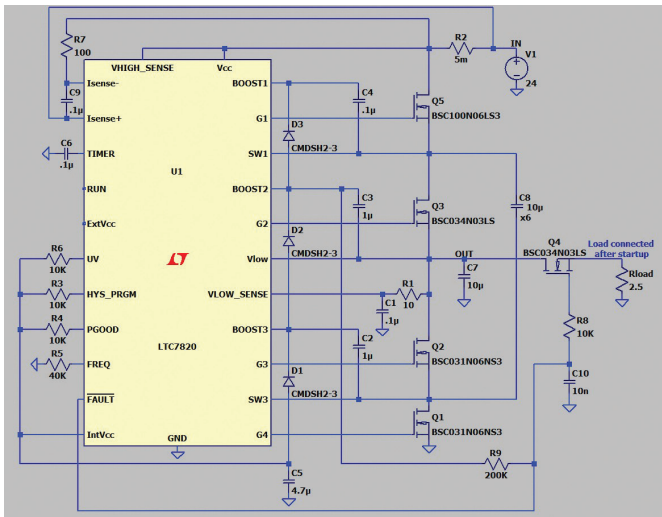


图8. LTC7820固定比率高功率电荷泵DC-DC控制器。

数字电源

本文中讨论的所有电源都可作为模拟或数字电源来实现。到底什么是数字电源？电源必须始终通过开关、电感、变压器和电容的模拟功率级。数字方面由两个数字构建模块引入。第一个是数字接口，通过该接口，电子系统可以与电源通信。可以即时设置不同的参数，以针对不同的工作条件优化电源。此外，电源还可与主处理器通信，并引发警告或故障标志。例如，系统可以轻松监控负载电流、超过预设阈值或电池温度过高的情况。

第二个数字构建模块使用数字环路代替模拟调节环路。这样做的效果很好，但对于大多数应用，最好采用对一些参数有一定数字影响的标准模拟反馈环路，例如即时调节误差放大器的增益或动态设置环路补偿参数，以实现稳定但快速的反馈环路。具有纯数字控制环路的设备的一个示例是ADI公司的ADP1046A。通过数字影响优化并具有模拟控制环路的数字接口降压稳压器的一个示例是LTC3883。

EMI考量

电磁干扰(EMI)一直是设计开关模式电源时需要注意的问题。原因是开关模式电源会在很短的时间内开关高电流。开关速度越快，系统总效率就越好。更快的开关转换速度可减少部分接通开关的时间。在这个部分接通时间内，会产生大部分开关损耗。图9所示为开关模式电源在开关节点处的波形。以降压稳压器为例。高电压由通过高端开关的电流定义，而低电压通过没有电流流过高端开关来定义。

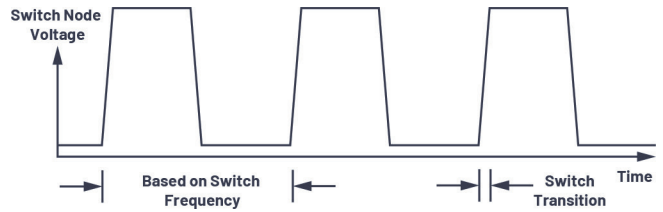


图9. 开关模式电源的开关转换速度和开关频率。

在图9中可以看到，开关模式电源产生的噪声不仅来自于调节后的开关频率，还来自于比频率高得多的开关转换速度。虽然开关频率通常在500 kHz至3 MHz之间运行，但开关转换时间可能有几纳秒长。在1 ns开关转换时间，频谱中对应的频率将为1 GHz。至少这两个频率将被视为电磁辐射骚扰和传导辐射。调节环路的振荡或电源和滤波器之间的相互作用也可能带来其它频率。

降低EMI有两个原因。第一个原因是保护特定电源供电的电子系统的功能。例如，系统信号路径中使用的16位ADC不应拾取来自电源的开关噪声。第二个原因是满足世界各国政府为同时保护不同电子系统的可靠功能而制定的某些EMI法规。

EMI有两种形式，辐射EMI和传导EMI。降低辐射EMI的有效方式是优化PCB布局，并采用诸如ADI公司Silent Switcher®这样的技术。当然，把电路放在一个屏蔽的金属盒中也有效。但是，这可能不实用，而且在大多数情况下成本很高。

传导EMI通常通过额外的滤波进行衰减。下一节将讨论减少传导辐射的额外滤波。

滤波

RC滤波器是基本低通滤波器。但是，在电源设计中，每个滤波器都是一个LC滤波器。通常，只要串联添加一些电感就够了，因为它将与开关模式电源的输入或输出电容一起形成一个LC或CLC滤波器。有时只使用电容作为滤波器，但是考虑到电源线或走线上的寄生电感，我们结合电容形成一个LC滤波器。电感L可能是一个带有线圈的电感或是一个铁氧体磁珠。LC滤波器的目的实际上是一种低通效应，使直流电源可以通过，并在很大程度上衰减较高的频率干扰。LC滤波器有一个双极点，因此可实现40 dB/十倍频程的高频率衰减。该滤波器可实现相对急剧的频降。设计滤波器并非易事；但是，由于电路的寄生组件（如走线电感）会产生效应，因此对滤波器建模也需要对主要寄生效应进行建模。这使得模拟滤波器相当耗时。很多有滤波器设计经验的设计人员知道哪些滤波器好用，可能会迭代地优化某个滤波器以获得新的设计。

在设计所有滤波器时，不仅需要考虑小信号行为，如波特图中滤波器的转换函数，而且需要注意大信号效应。在任何LC滤

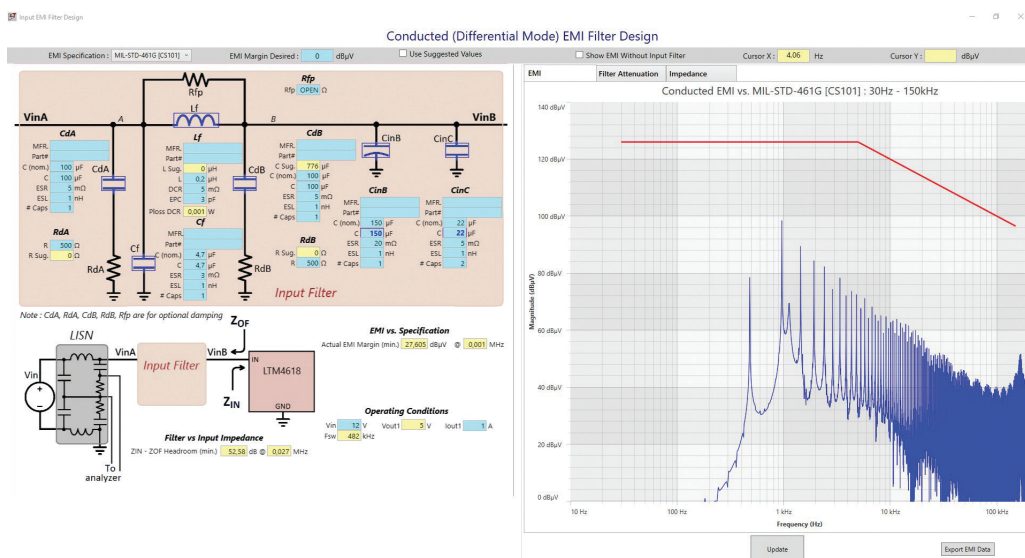


图10. 使用LTpowerCAD设计降压稳压器的输入滤波器。

波器中，电源都会通过电感。如果输出端不再需要该电源，由于突然负载瞬态，存储在电感中的电能需要释放到某个地方。它会对滤波器的电容充电。如果滤波器不是针对这种最坏的情况而设计的，存储的电能就可能会导致电压过冲，可能损坏电路。

最后，滤波器具有一定的阻抗。该阻抗与附加在滤波器上的电源转换器的阻抗相互作用。这种相互作用可能导致不稳定和振荡。ADI公司的LTspice和LTpowerCAD等仿真工具对于回答所有这些问题和设计出色滤波器很有帮助。图10所示为LTpowerCAD设计环境中滤波器设计人员的图形用户界面。使用该工具设计滤波器非常简单。

Silent Switcher

电磁辐射骚扰很难阻挡。需要采用某种金属材料制成的特殊屏蔽。这样做的成本很高。很长时间以来，工程师一直在寻找减少开关模式电源产生的电磁辐射骚扰的方式。几年前，Silent Switcher技术取得了重大突破。通过减少开关模式电源的热回路中的寄生电感，并将热回路分为两个回路，以高度对称的方式设置，电磁辐射骚扰大多相互抵消。今天的许多Silent Switcher设备所提供的电磁辐射骚扰比传统产品低得多。减少电磁辐射骚扰可提高开关转换速度，而不会产生严重的EMI。提高开关转换速度可减少开关损耗，由此提高开关频率。这种创新的一个示例是LTC3310S，其开关频率为5 MHz，使用低成本的外部组件实现非常紧凑的设计。

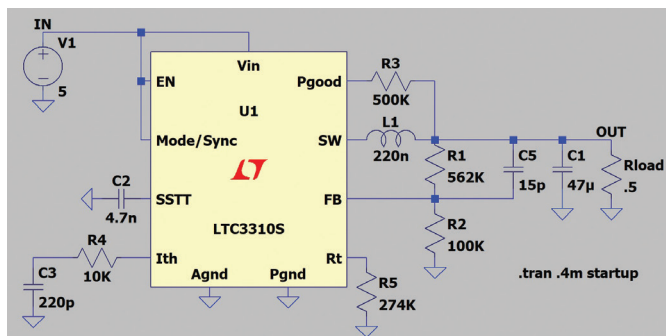


图11. 实现低电磁辐射骚扰的LTC3310S Silent Switcher设计。

电源管理是必需的，但也会带来乐趣

在本教程中，我们讨论了电源设计的许多方面，包括不同的电源拓扑及其优缺点。这些信息对于电源工程师来说非常基础，但是对于专家和非专业人士而言，在设计过程中使用LTpowerCAD和LTspice等软件工具很有帮助。借助这些工具，可在很短的时间内设计和优化电源转换器。希望本教程有助于您迎接下一次电源设计挑战。

作者简介

Frederik Dostal曾就读于德国埃尔兰根大学微电子学专业。他于2001年开始工作，涉足电源管理业务，曾担任各种应用工程师职位，并在亚利桑那州凤凰城工作了4年，负责开关模式电源。他于2009年加入ADI公司，并在慕尼黑ADI公司担任电源管理现场应用工程师。联系方式：frederik.dostal@analog.com

在线支持社区



访问ADI在线支持社区，中文技术论坛

与ADI技术专家互动。提出您的棘手设计问题、浏览常见问题解答，或参与讨论。

请访问ez.analog.com/cn



如需了解区域总部、销售和分销商，或联系客户服务和技术支持，请访问analog.com/cn/contact。

向我们的ADI技术专家提出棘手问题、浏览常见问题解答，或参与EngineerZone在线支持社区讨论。请访问ez.analog.com/cn。

©2021 Analog Devices, Inc. 保留所有权利。商标和注册商标属各自所有人所有。

“超越一切可能”是ADI公司的商标。

TA23038sc-6/21



请访问analog.com/cn