

LED 驱动拓扑结构汇总

—— OFweek 光电新闻网 (www.ofweek.com)

目录

前言	2
分析 Boost 和 Buck-Boost 等拓扑结构的 LED 驱动	2
需要恒定电流	2
Boost 调节器	3
Buck-boost 调节器	4
其它拓扑	5
LED 照明的电源拓扑结构	6
恒流驱动 LED	7
拓扑选择	7
降压和升压型电路拓扑	8
反激式转换器	10
调光技术	11
小结	11

前言

市面上的 LED 驱动电源方案数不胜数，工程师在设计方案时，往往会困惑不知道采用什么方法，其实 LED 驱动电源常用的拓扑结构只有以下 6 种，依次为 buck, boost, buck-boost, cuk, zeta, sepic 变换器。只要掌握着这 6 种基本结构，设计各种不同应用，不同需求的 LED 驱动电源时，就会有明确的思路。

分析 Boost 和 Buck-Boost 等拓扑结构的 LED 驱动

LED 光源生产商和设计者经常会提到固态发光的应用，最明显的优势就像是“树上挂得很低的水果”。例如花园路径照明或者 MR16 杯灯常常只需要一些甚至只要一个 LED。对于低压应用来说，最通用的电压是 12VDC、24VDC 和 12VAC，这些应用常常要用到一个 Bulk 调节器。虽然如前所述，Bulk 是首选，但是在 LED 照明应用中，随着 LED 数量的增加，Boost 调节器也得到了越来越多的应用。设计者们不再满足于手电筒或者单个杯灯应用，而把目光投到大尺寸通用照明和达到几千流明的照明系统。例如街灯、公寓和商业照明、体育场照明和建筑内外装饰照明。

需要恒定电流

如同线性和 Buck 衍生 LED 驱动一样，Boost LED 驱动设计中的主要技术挑战是要给阵列中的每个 LED 提供一个可控前向电流 I_F 。理想状态下，每个 LED 都有安装一个单组链来确保通过每个设备的电流都相同。当需要把输入 DC 电压提升到一个高 DC 输出电压的时候，Boost 调节器是最简单的选择，因为它允许在给定电压下串联更多的 LED。

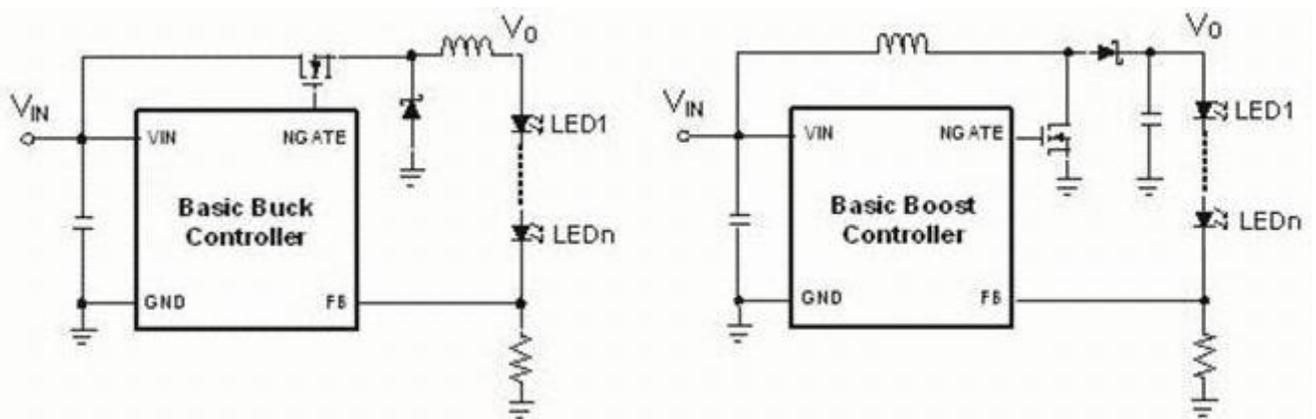


图 1: 带有 V_o 计算的 Bulk 和 BoostLED 驱动:
buck: $V_o = n \times V_f$, $V_o < V_{IN}$; boost: $V_o = n \times V_f$, $V_o > V_{IN}$ 。

通用照明系统设计者通常需把线路电压设计成 110VAC 或者 220VAC。如果功率因数校正 (PFC)、隔离和线路谐波滤波都不需要的话,那么单级非隔离转换器 (buck, boost, 或各种 buck-boost 拓扑) 就可以使用 AC 电压的校正输出来直接驱动长串的串接 LED。

然而,在很多情况下,我们需要使用一个中间 DC 总线电压,它是由一个采用了通用 AC 输入并且 PFC、隔离和滤波的 AC/DC 调节器产生的。包括法律要求在内,一个低中间电压总线降低了电介质击穿和电弧问题,使维修人员的工作更安全。

欧盟提出了世界上最严格的法律规定:任何高于 25 瓦的光源都要具有 PFC。没有几年,北美和亚洲也做出了同样的规定。诸如 UL 和 CE 这样的安全标准电气规定限制了供给 boostLED 驱动的 AC/DC 供电输出电压。通常电压规定为 12 和 24V,有时是 48V。这些中间电压总线很少超过 60V,也就是 ULClass2 定为 DC 电压的最高值。

Boost 调节器

不管我们是否要控制输出电压或输出电流,Boost 调节器都要比 Buck 调节器更难设计。持续导通状态 (CCM) Boost 转换器中的平均感应电流等于负载电流 (LED 电流) 乘以 $1/(1-D)$, 这里 D 是占空度。Boost 电压调节器需要设计者考虑到输入电压的限制来保证电感的正确设计,特别是额定峰值电流。

Boost LED 驱动加了一个可变输出电压,这个电压影响了占空比,因此也影响了主电感器的电感值和额定电流。为了避免电感饱和,最大平均值和电流峰值必须由 V_{IN-MIN} 和 V_{O-MAX} 同时求出。例如,历数加工、驱动电流和模具温度,一个标准的白 InGaN LED 的 V_f 可以从 3V 变到 4V。串联的 LED 越多, V_{O-MIN} 和 V_{O-MAX} 的间距就越大。

不同于带有输出电感的 Bulk 调节器,Boost 转换器有一个非持续输出电流。因此,输出电容需要输出电压要持续 (输出电流也如此)。这里,电压调节器中的输出电容被设计成兼有滤波器并且在负载瞬变时可以保持输出电压,在电流调节中,它只是起到了类似一个 AC 电流滤波器的作用。电容值要尽量低,并且要与所期望的 LED 波动电流保持一致。输出电容越小 (同时也可以尽量降低成本和大小),转换器对输出电流的回应就越快,这样 LED 的调光反应就越好。

Boost 转换器的另外一个严峻挑战是控制环。Buck 调节器允许电压模式的 PWM 控制、峰值电流模式的 PWM 控制、constant/controlled-on-time 以及其它的滞后控制。注意到处于 CCM 的 Boost 调节器（低功率、便携设备除外）的右半平面零和在控制开关关闭的时候还在向输出供电的特性，它们几乎被限定在峰值电流模式 PWM 控制。要设计一个控制输出电流的 BoostLED 驱动，控制环必须要把 LED 看作是负载来分析，这与 Boost 电压调节器的典型负载非常不同。

在峰值电流模式控制中，负载阻抗对 DC 增益和控制到输出转换函数的低频极点有很大影响。对电压调节器来说，负载阻抗由输出电压与输出电流的比值来决定。LED 是个拥有动态电阻的二极管。这个动态电阻只能通过做出 VF(IF) 曲线，然后用切线来找到希望的前向电流的斜率来决定。如图 1 所示，电流调节器使用负载本身来作为反馈分频器来闭环。这就使 DC 增益降低了 $(RSNS / (RSNS + rD))$ 倍。

我们趋向于用一个简单的积分器牺牲稳定带宽来补偿 BoostLED 驱动。事实上是大多数或者说许多 LED 驱动应用需要调光。无论调光是通过 IF 的线性调节（模拟调光）来完成，还是通过高频打开或切断输出（数字或 PWM 调光）来实现，系统都需要像电压调节器实现的高带宽和快速瞬变回应。

Buck-boost 调节器

照明用 LED 的开发要比固态光源标准的发展快得多。大量不同种类的 LED 拥有很多不同的供电电压。串联的 LED 的数目、种类及其不同的加工和模具温度都产生了不同的输出电压。例如，高端汽车正在过渡到利用 LED 来作为日间行驶灯。三个 3 瓦白色 LED 组成了一个 12V1A 的负载。汽车电压系统通常需要持续工作于 9 到 16V，并且可以延伸到 6 到 42V，使系统可以无损运行，但是其性能可能要有折扣。通常来说，Buck 调节器是最好的 LED 驱动器，其次是 Boost，但是在这个应用中，他们没有优劣之分。如果一定要用 Buck-boost 调节器，最难的决定就是采用哪种拓扑。

任何拓扑的 Buck-boost 调节器和 Buck 调节器或 Boost 调节器的最基本的区别是 Buck-boost 从来没有把输入供电直接连接到输出。在一部分转换环中，Buck 和 Boost 调节器把 VIN 连接到 VO（通过电感和开关/二极管），这个直连使它们更有效率。

所有的 Buck-boost 都把所有要传送给负载的能量储存或者磁场（电感或变压器）或者电场（电容）中，这样就导致了电源转换中的高峰值电流或者更高电压。特别的一点是要考虑在输入电压和输出电压的拐角，因为峰值转换电流发生在 VIN-MIN 和 VO-MAX，但是峰值转换电压发生在 VIN-MAX、VIN-MAX 和 VO-MAX。一般来说，这意味着拥有一个这样的输出功率的 Buck-boost 调节器要比一个同样输出功率的 Buck 或 Boost 调节器更大且效率更低。

单电感 Buck-boost 可以像 Buck 或 Boost 调节器一样组建，使它在系统成本的角度来讲很吸引人。这种拓扑的一个缺点是 V_o 被反置（图 2a）或者以 V_{IN} 为参照（图 2b）。测平移动或者反偏电路必须要用一些转换器。像 boost 转换器，它们有一个不连续输出电流，并且需要一个输出电容来维持一个持续 LED 电流。功率 MOSFET 要承受一个峰值为 I_{IN} 加上 I_F 的电流还有一个峰值为 V_{IN} 加上 V_O 的电压。

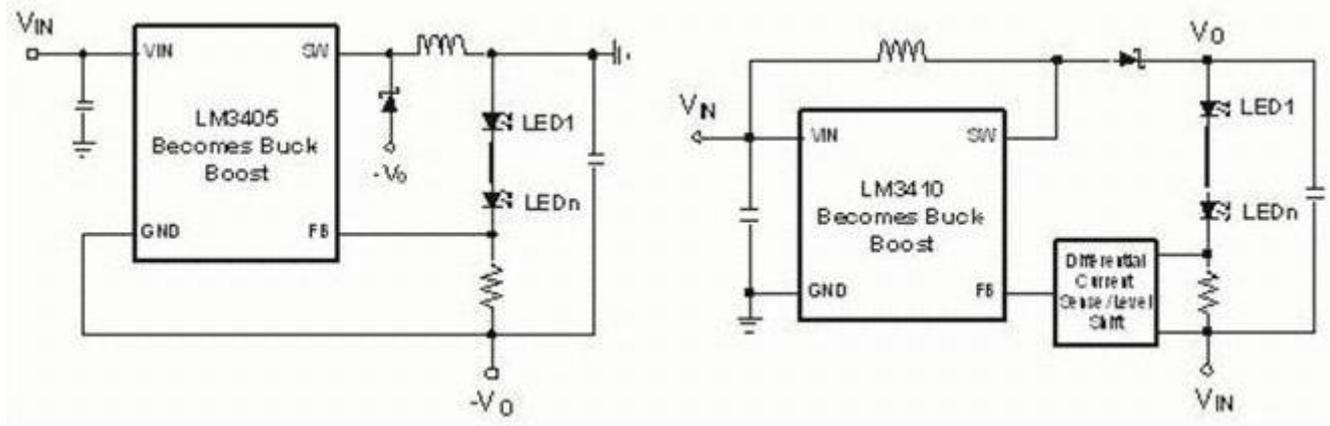


图2: (a) 高端 buck-boost

(b) 低端 buck-boost

其它拓扑

SEPIC 转换器拥有连续输入电流的优点，这个连续输入电流是由输入电感和正输出电压产生的。像 boost 和单电感 buck-boost，它们需要一个输出电容来维持一个平滑 LED 电流。另外一个 SEPIC 转换器的优点是几乎任何一个低端调节器或者控制器都可以被设置成为一个毋需反偏或测平移动电路的 SEPIC。

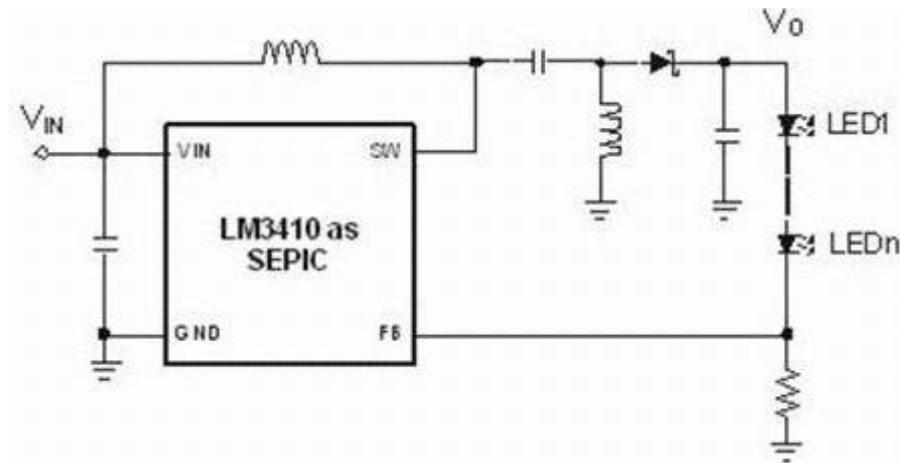


图 3: SEPICLED 驱动

少被用作电压调节的 Cuk 转换器作为 LED 驱动而崭露头角。输入和输出电流都是连续的。输出电压的极性就像高端 buck-boost 一样被反置，但是输出电容像 buck 转换器一样被消除。除 Buck-boost 和 boost 以外，Cuk 是拥有这种能力的唯一的实用型非隔离调节器。

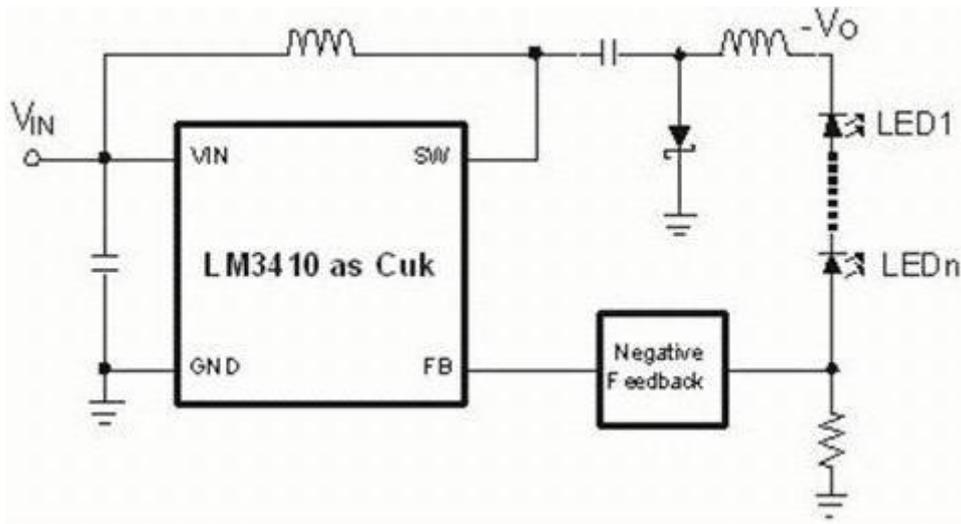


图 4: Cuk 调节器

由于 Boost 和 Buck-boost 调节器的高度复杂性及其外围电路、低效（特别是 Buck-boost）和控制拓扑的选择不足，致使它们都不是转换 LED 驱动的首选。但是它们都是 LED 越来越多的照明应用必不可少的。某些系统结构可以用 buck 或者甚至是线性以调节器为基础的 LED 驱动来替代。比如类似于街灯的大型光源需要一百甚至更多的 1W+LED。一般来说，针对通用照明的 LED 从低功耗走向高功耗，并且在其中间舞台，比如汽车前灯和小型光部件，boost 和 buck-boost 调节器代表了常电流驱动的最佳选择。

LED 照明的电源拓扑结构

随着 LED 的生产成本下降，其使用愈发普遍，所涵盖的应用范围从手持终端设备到车载，再到建筑照明。LED 的高可靠性(使用寿命超过 50,000 个小时)、较高的效率(>120 流明/瓦)以及近乎瞬时的响应能力使其成为极具吸引力的光源。与白炽灯泡 200ms 的响应时间相比，LED 会在短短 5ns 响应时间内发光。因此，目前它们已在汽车行业的刹车灯中得到广泛采用。

恒流驱动 LED

驱动 LED 并非没有挑战。可调的亮度需要用恒定电流来驱动 LED，并且无论输入电压如何都必须要保持该电流的恒定。这与仅仅将白炽灯泡连接到电池来为其供电相比更具有挑战性。

LED 具有类似于二极管的正向 V-I 特性。在低于 LED 开启阈值(白光 LED 的开启电压阈值大约为 3.5V)时，流经该 LED 的电流非常小。在高于该阈值时，电流会以正向电压形式成指数倍递增。这就允许将 LED 定型为带有一个串联电阻的电压源，其中带有一则警示说明：本模型仅在单一的工作 DC 电流下才有效。如果 LED 中的 DC 电流发生改变，那么该模型的电阻也应随即改变，以反映新的工作电流。在大的正向电流下，LED 中的功率耗散会使设备发热，此举将改变正向压降和动态阻抗。在确定 LED 阻抗时充分考虑散热环境是非常重要的。

当通过降压稳压器驱动 LED 时，LED 常常会根据所选的输出滤波器排列来传导电感的 AC 纹波电流和 DC 电流。这不仅会提高 LED 中电流的 RMS 振幅，而且还会增大其功耗。这样就可提高结温并对 LED 的使用寿命产生重要影响。如果我们设定一个 70% 的光输出限制作为 LED 的使用寿命，那么 LED 的寿命就会从 74 摄氏度下的 15,000 小时延长到 63 摄氏度下的 40,000 小时。LED 的功率损耗由 LED 电阻乘以 RMS 电流的平方再加上平均电流乘以正向压降来确定。由于结温可通过平均功耗来确定，因此即使是较大的纹波电流对功耗产生的影响也不大。例如，在降压转换器中，等于 DC 输出电流 ($I_{pk-pk}=I_{out}$) 的峰至峰纹波电流会增加不超过 10% 的总功率损耗。如果远远超过上面的损耗水平，那么就需要降低来自电源的 AC 纹波电流以便使结温和工作寿命保持不变。一条非常有用的经验法则是结温每降低 10 摄氏度，半导体寿命就会提高两倍。实际上，由于电感器的抑制作用，因此大多数设计就趋向于更低的纹波电流。此外，LED 中的峰值电流不应超过厂商所规定的最大安全工作电流额定值。

拓扑选择

表 1 中所显示的信息有助于为 LED 驱动器选择最佳的开关拓扑。除这些拓扑之外，您还可使用简明的限流电阻器或线性稳压器来驱动 LED，但是此类方法通常会浪费过多功率。所有相关的设计参数包括输入电压范围、驱动的 LED 数量、LED 电流、隔离、EMI 抑制以及效率。大多数的 LED 驱动电路都属于下列拓扑类型：降压型、升压型、降压-升压型、SEPIC 和反激式拓扑。

表 1 备选的 LED 电源拓扑

拓扑结构	输入电压(Vin)总大于输出电压(Vout)	输入电压(Vin)总小于输出电压(Vout)	输入电压(Vin) < 输出电压(Vout) 和 输入电压(Vin) > 输出电压(Vout)	隔离式
降压拓扑	√			
升压拓扑		√		
降压-升压拓扑			√	
降压或升压拓扑			√	
Sepic拓扑		√	√	
反激式拓扑	√	√	√	√

降压和升压型电路拓扑

图 1 显示了三种基本的电源拓扑示例。第一个示意图所显示的降压稳压器适用于输出电压总小于输入电压的情形。在图 1 中，降压稳压器会通过改变 MOSFET 的开启时间来控制电流进入 LED。电流感应可通过测量电阻器两端的电压获得，其中该电阻器应与 LED 串联。对该方法来说，重要的设计难题是如何驱动 MOSFET。从性价比的角度来说，推荐使用需要浮动栅极驱动的 N 通道场效应晶体管(FET)。这需要一个驱动变压器或浮动驱动电路(其可用于维持内部电压高于输入电压)。

图 1 还显示了备选的降压稳压器(buck#2)。在此电路中，MOSFET 对接地进行驱动，从而大大降低了驱动电路要求。该电路可选择通过监测 FET 电流或与 LED 串联的电流感应电阻来感应 LED 电流。后者需要一个电平移位电路来获得电源接地的信息，但这会使简单的设计复杂化。另外，图 1 中还显示了一个升压转换器，该转换器可在输出电压总是大于输入电压时使用。由于 MOSFET 对接地进行驱动并且电流感应电阻也采用接地参考，因此此类拓扑设计起来就很容易。该电路的一个不足之处是在短路期间，通过电感器的电流会毫无限制。您可以通过保险丝或电子断路器的形式来增加故障保护。此外，某些更为复杂的拓扑也可提供此类保护。

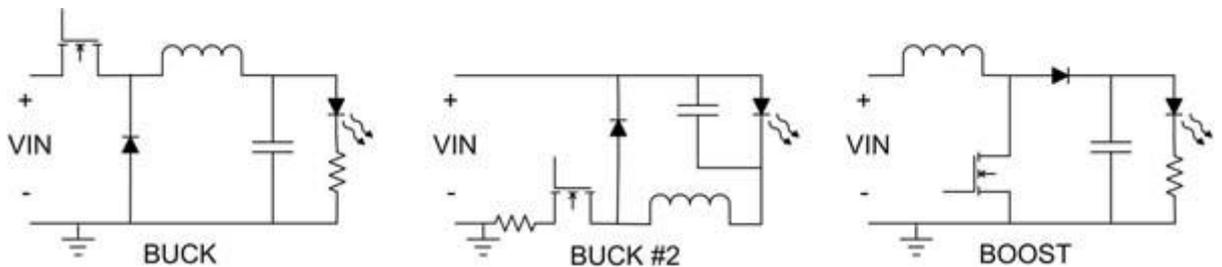


图 1 简单的降压和升压型拓扑为 LED 供电

图 2 显示了两款降压-升压型电路，该电路可在输入电压和输出电压相比时高时低时使用。两者具有相同的折衷特性(其中折衷可在有关电流感应电阻和栅极驱动位置的两个降压型拓扑中显现)。图 2 中的降压-升压型拓扑显示了一个接地参考的栅极驱动。它需要一个电平移位的电流感应信号，但是该反向降压-升压型电路具有一个接地参考的电流感应和电平移位的栅极驱动。如果控制 IC 与负输出有关，并且电流感应电阻和 LED 可交换，那么该反向降压-升压型电路就能以非常有用的方式进行配置。适当的控制 IC，就能直接测量输出电流，并且 MOSFET 也可被直接驱动。

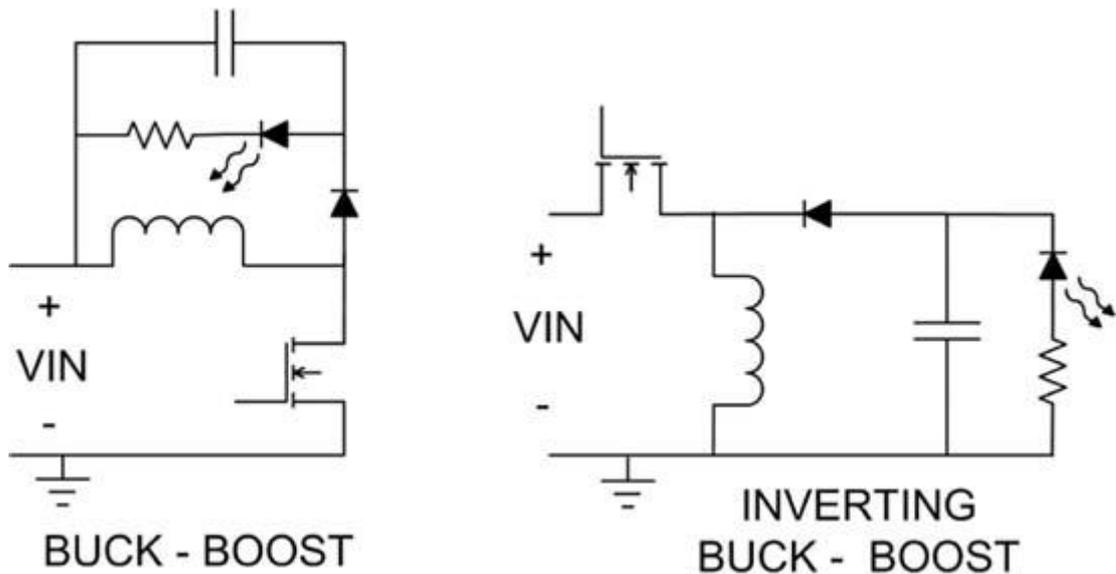


图 2 降压-升压型拓扑可调节大于或小于 V_{out} 的输入电压

该降压-升压方法的一个缺陷是电流相当高。例如，当输入和输出电压相同时，电感和电源开关电流则为输出电流的两倍。这会对效率和功耗产生负面的影响。在许多情况下，图 3 中的“降压或升压型”拓扑将缓和这些问题。在该电路中，降压功率级之后是一个升压。如果输入电压高于输出电压，则在升压级刚好通电时，降压级会进行电压调节。如果输入电压小于输出电压，则升压级会进行调节而降压级则通电。通常要为升压和降压操作预留一些重叠，因此从一个模型转到另一模型时就不存在静带。

当输入和输出电压几乎相等时，该电路的好处是开关和电感器电流也近乎等同于输出电流。电感纹波电流也趋向于变小。即使该电路中有四个电源开关，通常效率也会得到显著的提高，在电池应用中这一点至关重要。图 3 中还显示了 SEPIC 拓扑，此类拓扑要求较少的 FET，但需要更多的无源组件。其好处是简单的接地参考 FET 驱动器和控制电路。此外，可将双电感组合到单一的耦合电感中，从而节省空间和成本。但是像降压-升压拓扑一样，它具有比“降压或升压”和脉动输出电流更高的开关电流，这就要求电容器可通过更大的 RMS 电流。

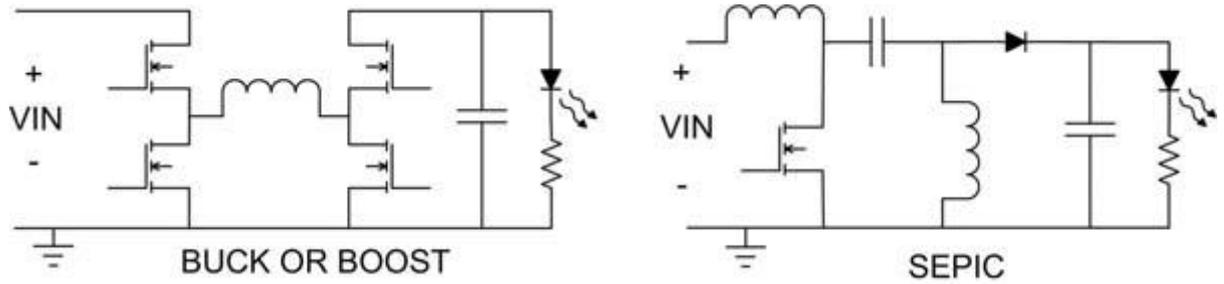


图 3 降压或升压型以及 SEPIC 拓扑提供了更高的效率

反激式转换器

出于安全考虑,可能规定在离线电压和输出电压之间使用隔离。在此应用中,最具性价比的解决方案是反激式转换器(请参见图 4)。它要求所有隔离拓扑的组件数最少。变压器匝比可设计为降压、升压或降压-升压输出电压,这样就提供了极大的设计灵活性。但其缺点是电源变压器通常为定制组件。此外,在 FET 以及输入和输出电容器中存在很高的组件应力。在稳定照明应用中,可通过使用一个“慢速”反馈控制环路(可调节与输入电压同相的 LED 电流)来实现功率因数校正(PFC)功能。通过调节所需的平均 LED 电流以及与输入电压同相的输入电流,即可获得较高的功率因数。

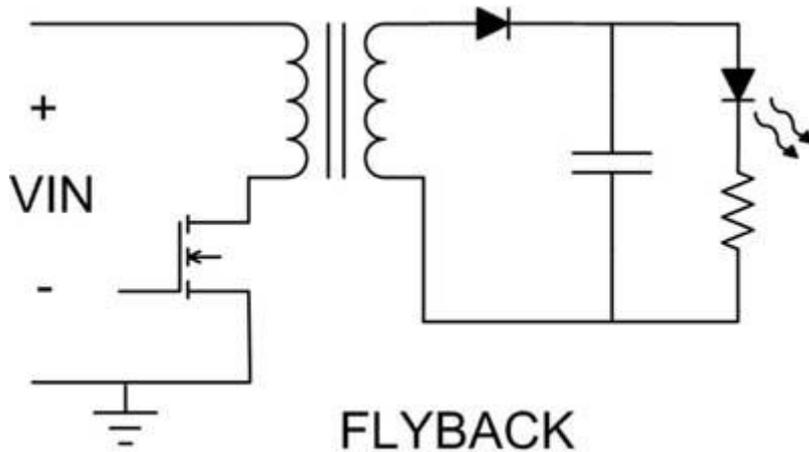


图 4 反激式转换器可提供隔离和功率因数校正功能

调光技术

需要对 LED 进行调光是一件很平常的事。例如，可能需要调节显示屏或调节建筑灯的亮度。实现此操作的方式有两种：即降低 LED 电流或快速打开 LED 再关闭，然后使眼睛最终得到平衡。因为光输出并非完全与电流呈线性关系，因此降低电流的方法效率最低。此外，LED 色谱通常会在电流低于额定值时发生改变。请记住：人对亮度的感知成指数倍增，因此调光就需要电流出现更大的百分比变动。因为在全电流下，3%的调节误差由于电路容差缘故可在 10%的负载下放大成 30%甚至更大的误差，因此这会对电路设计产生重大的影响。尽管存在响应速度问题，但通过脉宽调制(PWM)来调节电流仍更为精确。当照明和显示时，需要 100Hz 以上的 PWM 才能使人眼不会察觉到闪烁。10%的脉冲宽度处于毫秒范围内，并且要求电源具有高于 10kHz 以上的带宽。

小结

如表 2 所示，在许多应用中使用 LED 正变得日益普遍。它将会采用各种电源拓扑来为这些应用提供支持。通常，输入电压、输出电压和隔离需求将规定正确的选择。在输入电压与输出电压相比总是时高时低时，采用降压或升压可能是显而易见的选择。但是，当输入和输出电压的关系并非如此受抑制时，该选择就变的更加困难，需要权衡许多因素，其中包括效率、成本和可靠性。

表 2 许多 LED 应用都规定了多种电源拓扑

拓扑结构	典型应用
降压拓扑	车载、标牌、投影仪、建筑
升压拓扑	车载、LCD背光、手电筒(闪光灯)
降压升压、降压或升压、Sepic拓扑	医疗、车载照明灯；手电筒(闪光灯)、紧急照明灯、标牌
反激式拓扑	建筑照明

[推荐阅读：LED 设计专题。包括 LED 设计驱动原理、电路方案汇总、拓扑结构详解、白皮书下载，以及最新驱动产品介绍：](#)

<http://www.ofweek.com/topic/09/ledqd/>