

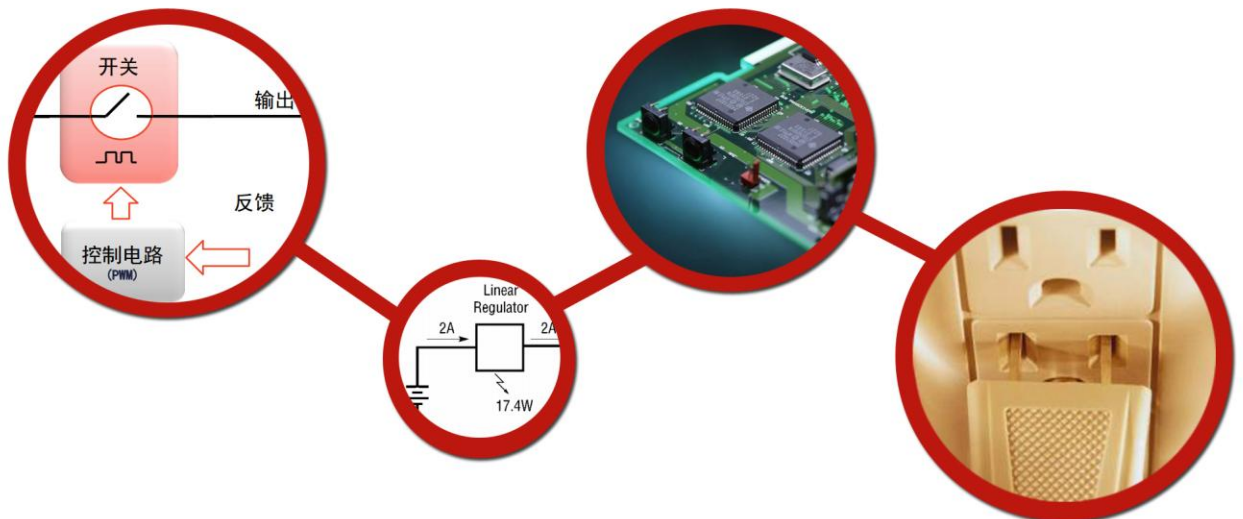
TI-dianyuan.com



【开关电源基础知识】

开关电源基础知识

—TI培训电子书籍系列



序

作为电源行业的技术编辑，每天编写及整理出一篇篇技术文章便是我们工作的乐趣与重心。在常人眼里，编辑工作似乎既繁琐又枯燥无味。但是身为编辑的我却可以深刻地体会到：虽然工作非常辛苦，但却异常幸福。

因为这是一个可以不停地思考、不停地接触新知识、不停地读书、不停地将灵感转化为现实的工作；同时，把自己编辑过程中的点滴努力都体现在文章中，留下一个个实实在在的印记。而今天我有幸将这些我所了解的知识变成一本小小的电子书，这一份强烈的欣喜感油然而生。

熟悉我们网站的网友都知道，一直以来，TI 在技术培训上面投入了很大的人力物力，而作为行业门户网站的我们也不停在思考，以何种方式给网友提供更好的培训课程。一直以来，我们联合 TI 进行在线课程的培训讲解，为的就是能够让大家不受地域、时间的限制的了解自己需要的知识。

《开关电源基础知识》是电源网的第一本电子书，之后我们联合 TI 还会继续推出更多更好的培训及相应电子书。我们希望能将视频中最有参考与学习价值的东西以电子书的形式呈现给大家。所以，也恳请广大读者以及工程师批评指正，以便在以后的版本中及时修正。在此也想对部分已经观看过培训视频、并给出很多积极反馈的工程师朋友表示感谢。希望更多工程师朋友加入到与我们互动的行列中，分享你的学习经验。

Jealy 兔子

电源网技术编辑

 [学习开关电源基础知识课程](#)  [更多 TI 培训课程](#)

 电源网
DianYuan.com



【开关电源基础知识】



前言

开关电源是利用现代电力电子技术，控制开关管开通和关断的时间比率，维持稳定输出电压的一种电源，开关电源一般由脉冲宽度调制（PWM）控制 IC 和 MOSFET 构成。随着电力电子技术的发展和创新，使得开关电源技术也在不断地创新。目前，开关电源以小型、轻量和高效率的特点被广泛应用几乎所有的电子设备，是当今电子信息产业飞速发展不可缺少的一种电源方式。

随着电力电子技术的高速发展，电力电子设备与人们的工作、生活的关系日益密切，而电子设备都离不开可靠的电源，进入 80 年代计算机电源全面实现了开关电源化，率先完成计算机的电源换代，进入 90 年代开关电源相继进入各种电子、电器设备领域，程控交换机、通讯、电子检测设备电源、控制设备电源等都已广泛地使用了开关电源，更促进了开关电源技术的迅速发展。

开关电源和线性电源相比，二者的成本都随着输出功率的增加而增长，但二者增长速率各异。线性电源成本在某一输出功率点上，反而高于开关电源。随着电力电子技术的发展和创新，使得开关电源技术在不断地创新，这一成本反转点日益向低输出电力端移动，这为开关电源提供了广泛的发展空间。

开关电源基础知识 (Switcher-Fundamentals) 培训课程共计五个章节：本拓扑类型、效率与输入输出及占空比的关系、同步与非同步的定义、隔离与非隔离、脉宽调制与变频各类控制方式特点。其深入浅出的说明了基础概念，建立电源设计沟通的平台。

 [学习开关电源基础知识课程](#)  [更多 TI 培训课程](#)

 电源网
DianYuan.com



【开关电源基础知识】



目录

第一章 开关电源基础知识

1.1 开关电源的类型	1
1.2 什么是开关稳压器	3
1.3 脉宽调制方式 (PWM)	3
1.4 实例:简化的降压开关电源.....	4
1.5 开关电源的类型(非隔离式).....	5
1.6 降压转换器(降压型开关稳压器)的工作模型.....	5
1.7 降压转换器基础(电流和电压波形).....	5
1.8 降压转换器拓扑	6
1.9 升压转换器(升压型开关稳压器).....	6
1.10 升压转换器(电流和电压波形).....	7
1.11 升压转换器拓扑和电路示例.....	7
1.12 降压-升压转换器(电流和电压波形).....	8
1.13 降压-升压转换器拓扑	8
1.14 控制器与稳压器.....	9
1.15 开关稳压器总结	10

第二章 效率与 V_{out} 的关系

效率与 V_{out} 的关系.....	11
------------------------	----

第三章 同步于非同步

3.1 什么是同步与非同步.....	13
--------------------	----

3.2 区分同步、非同步.....13

3.3 同步，非同步的优缺点.....14

3.4 同步于非同步的选择.....15

第四章 隔离式与非隔离式

4.1 非隔离式拓扑结构.....17

4.2 隔离式拓扑结构.....18

第五章 脉宽调制与脉冲频率调制

5.1 概述.....25

5.2 典型便携式电源应用实例.....25

5.3 定义 - PWM 和 PFM25

5.4 PWM 控制架构26

5.5 滞环模式控制.....26

5.6 脉冲跳跃/ 省电模式 Burst Mode27

5.7 PWM 模式和跳跃模式波形图27

5.8 转换器效率和损耗.....27

5.9 双模式降压转换器.....28

5.10 输出纹波差异29

5.11 省电模式与强制 PWM 模式的对比.....29

5.12 多种省电模式30

5.13 概要/ 结论（可变频率转换器）31

附录一： 编委信息与后记

附录二： 版权说明

 [学习开关电源基础知识课程](#)  [更多 TI 培训课程](#)

第一章 开关电源基础知识

1.1 开关电源的类型

1.1.1 线性稳压器，所谓线性稳压器，也就是我们俗话说的 LDO，一般有这么两种特点：

- 传输元件工作在线性区，它没有开关的跳变；
- 仅限于降压转换，很少会看到升压的应用。

1.1.2 开关稳压器

- 传输器件开关(场效应管)，在每个周期完全接通和完全切断的状态；
- 里面至少包括一个电能储能的元件，如：电感器或者电容器；
- 多种拓扑（降压、升压、降压-升压等）

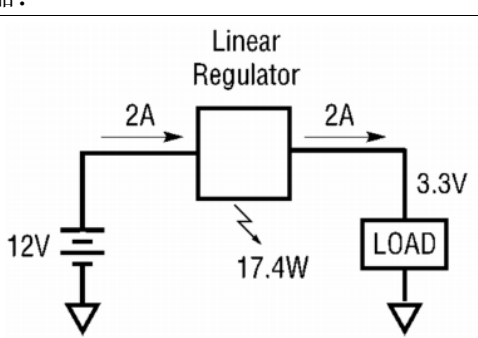
1.1.3 充电泵，一般在一些小电流的应用

- 传输器件开关(如：场效应管、三极管)，有些完全导通，而有些则工作在线性区；
- 在电能转换或者储能的过程中，仅限使用了电容器，如一些倍压电路。

答疑：有些情况为什么要使用开关稳压器？为什么不用 LDO 和充电泵？

我们知道，所有的能量都不会凭空消失，损耗的能量最终会以热的形式传递出去，这样，工程师在设计中就会产生很大的挑战，比如说，损耗最终以热的形式传递，那么电路中就需要增加更大的散热片，结果电源的体积就变大了，而且整机的效率也很低。如果在开关模式的开关电源，不仅可以提高效率，还可以降低了热管理的设计难度。

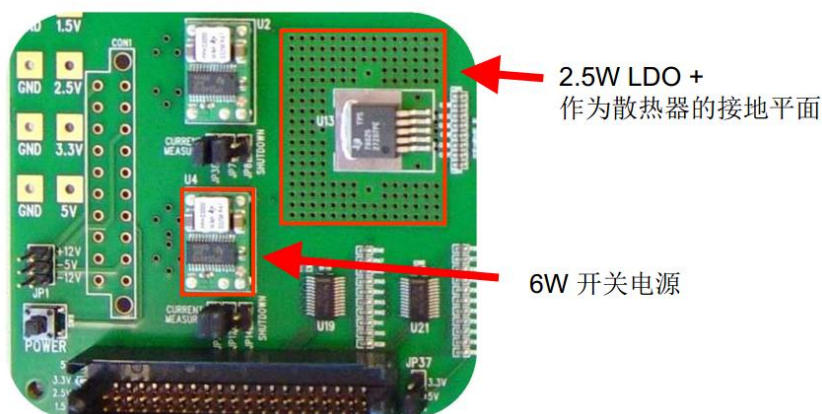
我们可以举一个例子来对比线性电源和开关电源的效率和体积：

线性稳压器：	
	
根据上图我们可以算出它的最大输出效率为：	
$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\%$	效率 = $\frac{6.6W}{(2A)(12V)} \times 100 = 28\%$
它的功率损耗为：	
$P_d = (V_{in} - V_{out}) \times I$	$P_d = (12 - 3.3) \times 2A = 17.4W !!$

开关稳压器:	
根据上图我们可算出它的最大输出效率为:	
$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\%$	效率 = $\frac{6.6W}{(0.61A)(12V)} \times 100 = 90\%$
它的功率损耗为:	
$P_d = P_{in} \times (1 - \eta)$	$P_d = 12 \times 0.61 \times 10\% = 0.73W$

从它们的效率来看，一个 12V 输入，3.3V/2A 输出的电源，如果用线性稳压器来实现的话，它输出效率只有 28%，而用开关电源来做的话，它的输出效率能达到 90% 以上。所以线性电源在高输入电压，低输出电压的情况下的效率是非常的低，它只适用于一些输入和输出的压差比较低的场合。像这些情况下使用开关电源的优势是显而易见的。线性稳压器的损耗为 17.4W，开关稳压器的损耗只有 0.73W，这些损耗最终会以热量的形式传递出去，器件的工作温度=器件温升+环境温度，温升=热阻 × 损耗的情况下：假如器件的热阻 $\theta = 35^{\circ}\text{C/W}$ 来计算，LDO 的温升= $35^{\circ}\text{C} \times 17.4\text{W} = 609^{\circ}\text{C}$ ，开关稳压器温升= $35^{\circ}\text{C} \times 0.73\text{W} = 25.55^{\circ}\text{C}$ 。可见，开关稳压器可以工作在 60~70℃ 的环境温度也是没问题的，而 LDO 在这种情况下，发热非常严重，必须得降低它的热阻，而热阻的大小就取决于散热面积，散热面积越大，热阻就越小，所以 LDO 需要很大的散热面积(如下图)，来减少它的热阻以获得较低的温升。

1.1.4 下图为线性电源和开关电源体积的比较



上图红色标注地方分别是一个 2.5W 的 LDO 和一个 6W 的开关电源，两者功率相差 2.4 倍，但开关电源的面积仅是 LDO 的 1/4 不到，也就是说开关电源的损耗大大减少了，能够承受更高的热阻，减少散热的面积。

再次强调一遍，如果说输入与输出之间压差较低的情况下，可以使用 LDO，但压差较大的情况下，建议使用开关电源。当然，开关电源也有它的劣势，它的输出会有噪声、振铃、跳变，而 LDO 则不会。某些场合的负载对电源的电压是很敏感的话，可以在开关电源后面载加一级 LDO。例如我们要把 5V 转为 1.2V，如果直接有 LDO 的话，效率可能只有 20%，但我们可以把 5V 用开关电源变为 1.5V，再用 LDO 把 1.5V 转为 1.2V，这样，效率就会高，是一个比较优化的设计。

1.1.5 总结：开关电源 VS 线性稳压器

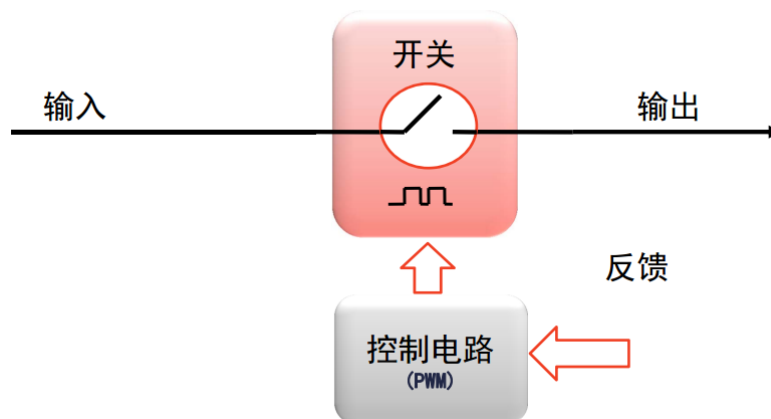
(1) 开关电源

- ① 能够提升电压（升压）
- ② 以及使电压减低（降压）甚至反相
- ③ 具有较高的效率和功率密度

(2) 线性稳压器

- ① 只能实现降压
- ② 输出电压相对更稳定
- ③

1.2 什么是开关稳压器？

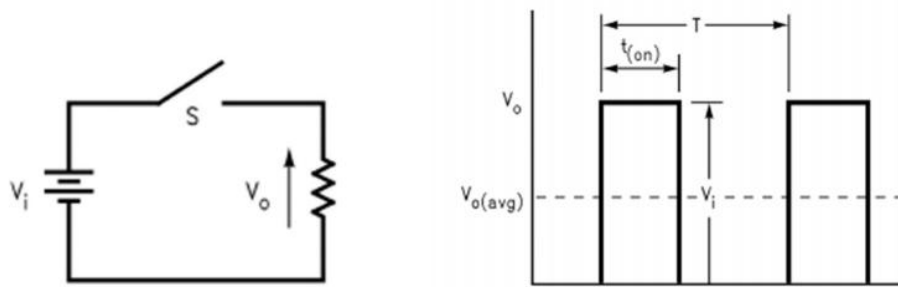


开关稳压器，英文(regulator)，有人叫它调节器、稳压源。实现稳压，就是需要控制系统(负反馈)，从自动控制理论中我们知道，当电压上升的时候通过负反馈把它降低，当电压下降的时候就把它升上去，这样形成了一个控制的环路。如图中的方框图是 PWM(脉宽控制方式)，当然还有其他如：PFM(频率控制方式)、移相控制方式等。

1.3 脉宽调试方式(PWM)

1.3.1 周期性的改变开关的导通与关断时间的简单方法

[👉 学习开关电源基础知识课程](#) [👉 更多 TI 培训课程](#)



占空比：开通的时间 T_{on} 与开关周期 T 的比值， t_{on} (开通时间) + t_{off} (关断时间) = T (开关周期)，占空比 $D=t_{on}/T$ 。但是，我们不能采用一个脉冲输出！需要一种实现能量流动平稳化的方法。通过很多的脉冲，高频地切换，将在开关接通期间存储能量而在开关切断时提供此能量的手段，从而实现平稳的电压。

1.3.2 在电子行业中两种主要储能器件

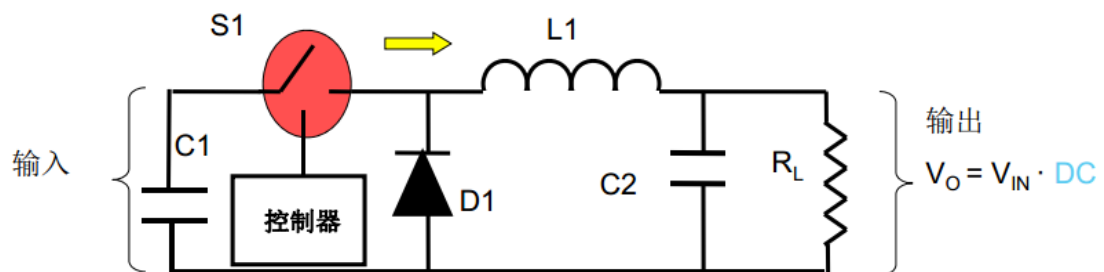


左图：电容器



右图：电感器

1.4 实例：简化的降压开关电源



如图是一个简化的降压的开关电源，为了方便电路的分析，先不加入反馈控制部分。

状态一：当 $S1$ 闭合时，输入的能量从电容 $C1$ ，通过 $S1$ →电感器 $L1$ →电容器 $C2$ →负载 R_L 供电，此时电感器 $L1$ 同时也在储存能量，可以得到加在 $L1$ 上的电压为： $V_{in}-V_o=L \cdot di/dt_{on}$ 。

状态二：当 $S2$ 关断时，能量不再是从输入端获得，而是通过续流回路，从电感器 $L1$ 存储的能量→电容 $C2$ →负载 R_L →二极管 $D1$ ，此时可得式子： $L \cdot di/dt_{off}=V_o$ ，最后我们可以得出 $V_o/V_{in}=D$ ，而 V_o 永远是小于 V_{in} 的，因为占空比 $D \leq 1$ 。

各个器件的作用：

- 1、输入电容器($C1$) 用于使输入电压平稳；
- 2、输出电容器($C2$) 负责使输出电压平稳；
- 3、箝位二极管($D1$) 在开关开路时为电感器提供一条电流通路；
- 4、电感器($L1$) 用于存储即将传送至负载的能量。

1.5 开关电源的类型（非隔离式）

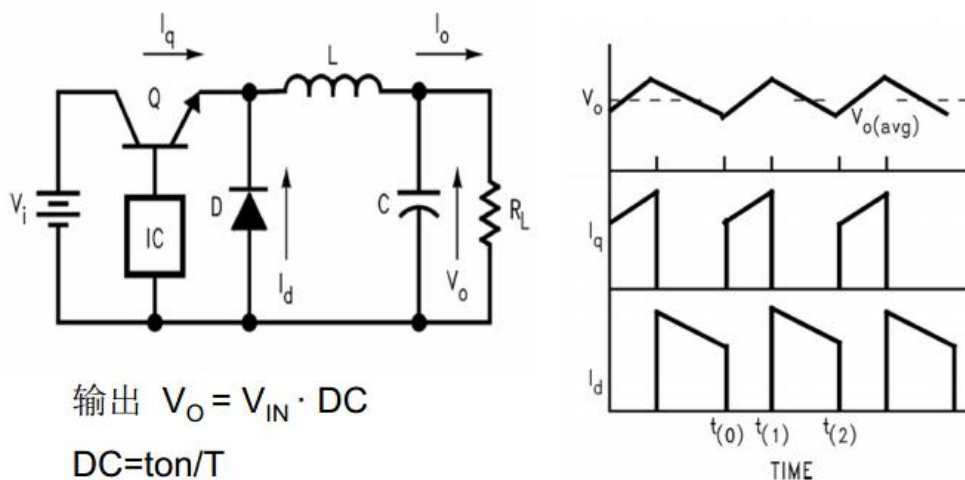
1.按输出电压分: 减低: 降压; 提升: 升压; 提升/减低: 降压/升压	
2.按拓扑结构分: Buck、Boost、Cuk、SEPIC、 Zeta、Buck-Boost、其他...	

1.6 降压转换器（降压型开关稳压器）的工作模型



开关电源是一个闭环的控制系统，我们可以把开关电源的电流比喻为水流，输入电容就是一个高的蓄水池、输出电容是一个小的蓄水池，把一小杯一小杯的水从大水池传送到小水池，通过控制传送的间隔时间和水杯的水量从而实现小水池固定的水量，当输出的水量低了，就增加杯子的水量，当输出的水量高了，就减少杯子的水量。

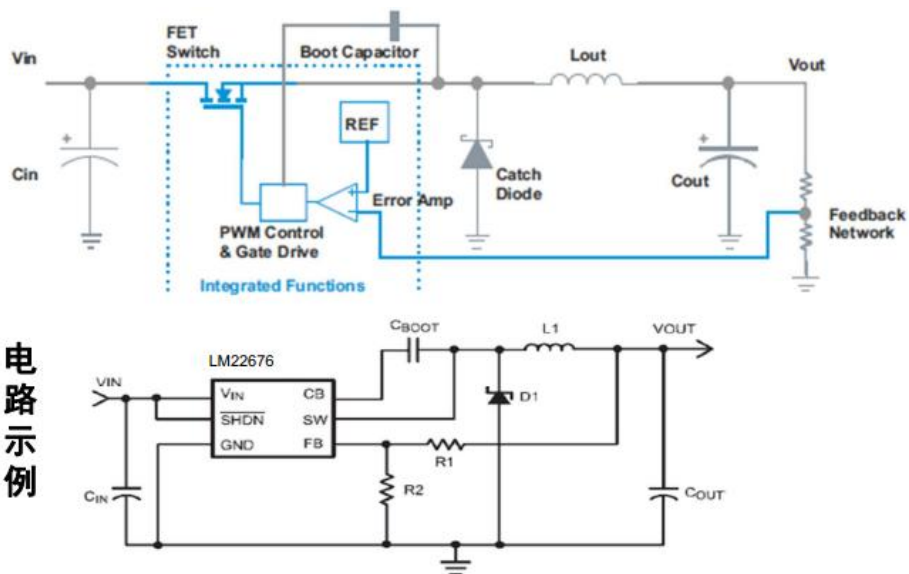
1.7 降压转换器基础（电流和电压波形）



[👉 学习开关电源基础知识课程](#)
[👉 更多 TI 培训课程](#)

当开关开通的时候，能量从输入向输出传递，电流是斜线上升的，好比模型里杯子的水往小水池传送；当小水池的水偏高了，开关就关断，这时电感、负载、二极管形成自然的续流回路，电流开始线性减少；当小水池的水低到一定程度后，重新开始开通开关；通过这样高频率的开通和关断，就形成一个稳定的输出电压。

1.8 降压转换器拓扑



上图就是一个电路结构，我们可以通过两个电阻的分压采样输出的电压，再经过一个比较器和基准比较，如果输出小于基准，MOS管就开通；如果输出大于基准，就关断MOS管。

下图是用LM22670芯片做的电路示例，这就是一个典型的非同步降压转换器，因为他下管是用了一个快恢复或者肖特基二极管。为什么要用肖特基呢？因二极管的寄生参数和漏感会导致在MOS管在开通时产生一个高压的震荡，这个震荡最终会导致芯片的SW引脚高压损坏和开关损耗非常大，导致效率很低，所以一般会使用快恢复或者肖特基二极管。

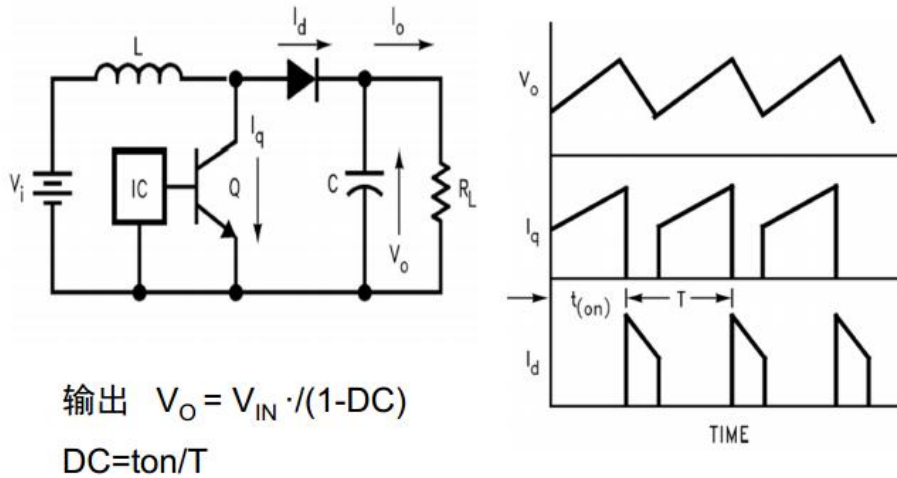
1.9 升压转换器（升压型开关稳压器）



升压转换器也可以用水流的模型来比喻，和降压转换器不同的只是把低处的水流往高处传送。我们可以用拓扑结构图和波形图来分析。

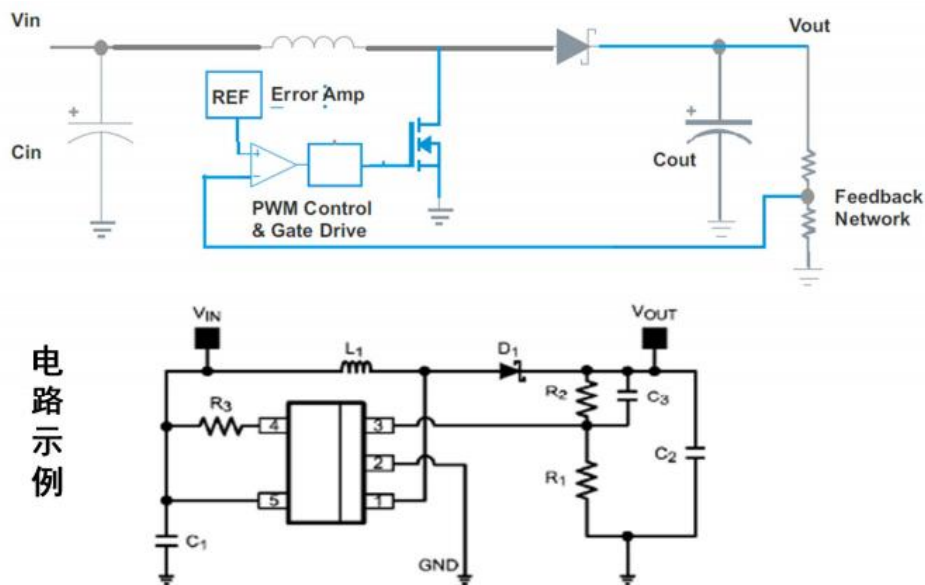
[学习开关电源基础知识课程](#) [更多 TI 培训课程](#)

1.10 升压转换器（电流和电压波形）



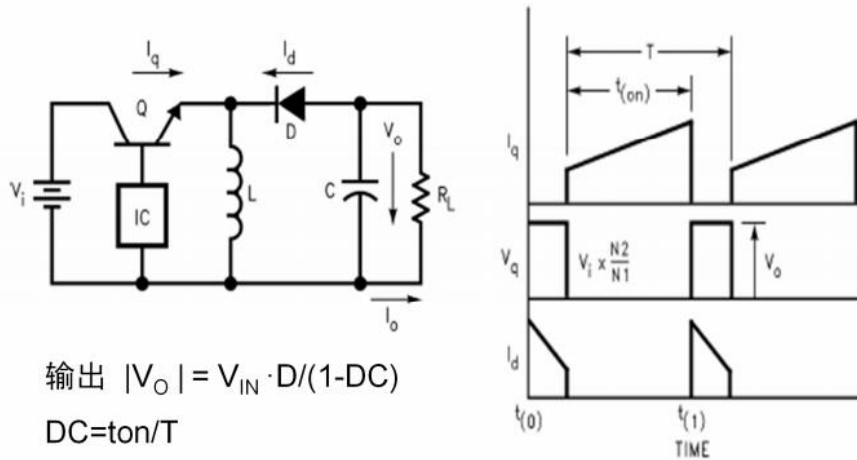
上图就是升压转换器(Boost)的拓扑结构，我们前面讲过，电感 L 是一个储能元件，当开关管导通的时候，输入的电压对电感充电，形成的回路是：输入 $V_i \rightarrow$ 电感 L \rightarrow 开关管 Q；当开关管关断时，输入的能量和电感能量一起向输出提供能量，形成的回路是：输入 $V_i \rightarrow$ 电感 L \rightarrow 二极管 D \rightarrow 电容 C \rightarrow 负载 R_L ，因此这时候输出的电压肯定就比输入的电压高，从而实现升压。

1.11 升压转换器拓扑和电路示例



上图所示升压转换器的控制回路是通过分压电阻的采样，然后经过误差比较器和基准源比较，最后输出 PWM。需要注意的是这种电路在芯片不工作的时候，它的输入到输出就已自然经形成了回路，从输入 \rightarrow 电感 \rightarrow 二极管 \rightarrow 电容 \rightarrow 负载，所以如果不是在同步的升压拓扑结构里面，在输入电路部分应该增加一个切换电路，否则在电池供电的时候，电池的电量就白白用完了。

1.12 降压-升压转换器（电流和电压波形）

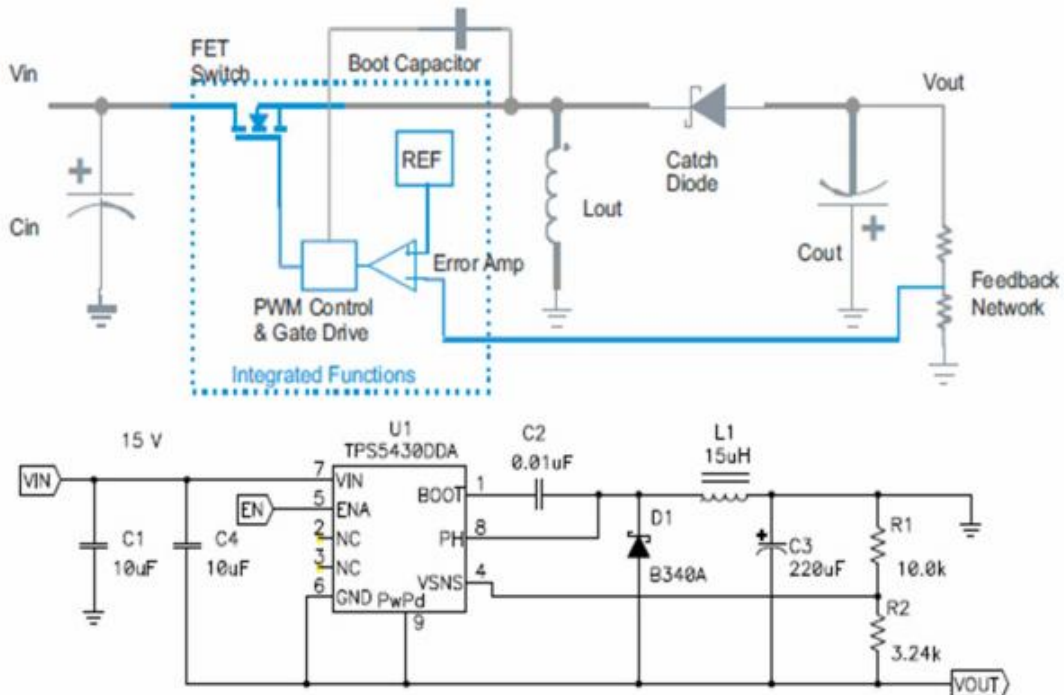


状态一： 开关管开通，二极管 D 反向截止，电感器储能，电流回路为：输入 V_{in} → 开关管 Q → 电感器 L；

状态二： 开关管关断，二极管 D 正向导通续流，电流回路为：电感器 L → 电容 C → 负载 R_L → 二极管 D；

输出什么时候是升压，什么时候是降压呢？我们可以根据公式 $V_o = V_{in} \times D / (1-D)$ 中知道，当 $D=0.5$ 时， $V_o = V_{in}$ ；当 $D < 0.5$ 时， $V_o < V_{in}$ ；当 $D > 0.5$ 时， $V_o > V_{in}$ 。而且我们可以看到，这种拓扑结构我们很容易得到了负向的电压，当某些场合不想用隔离变压器拉抽头的方式的时候我们可以用这种方式来实现负电压。

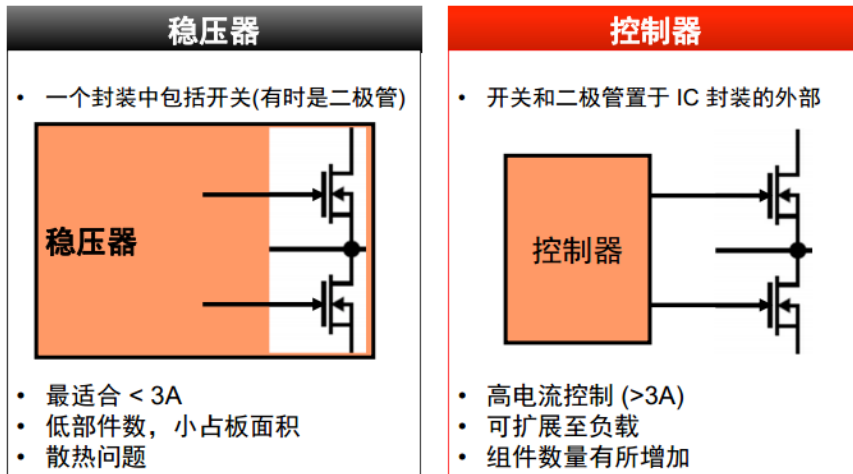
1.13 降压-升压转换器拓扑



[学习开关电源基础知识课程](#) [更多 TI 培训课程](#)

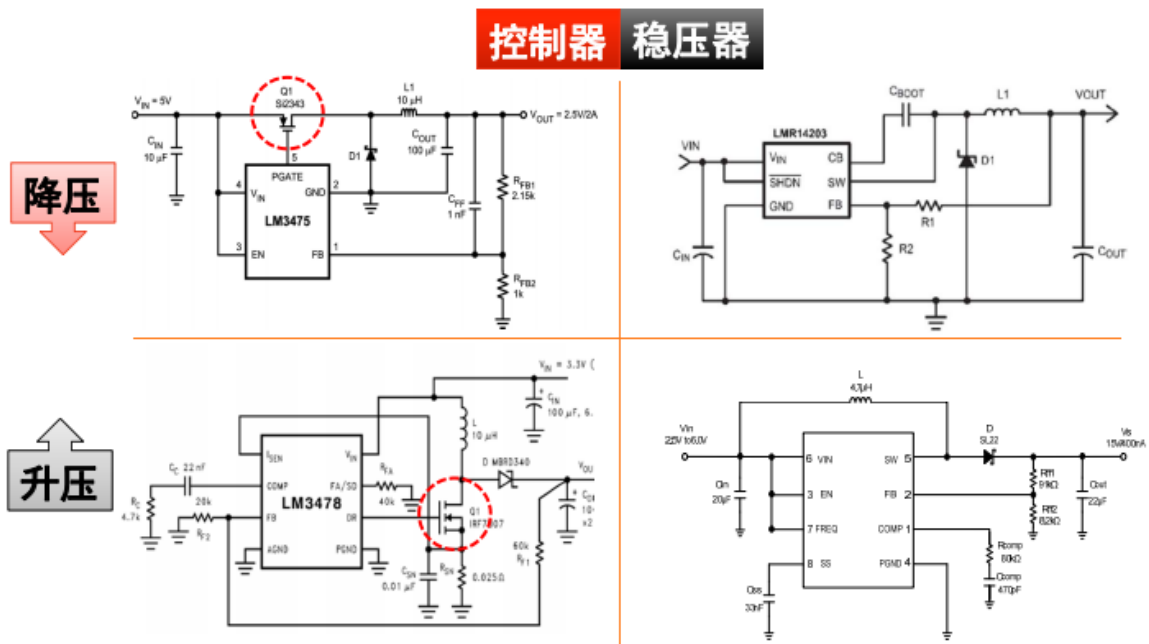
上图是用 TPS5430DA 实现的一个负电压输出的电路,TPS5430DA 和 LM22670 的引脚相同,两者可以互换。

1.14 控制器与稳压器

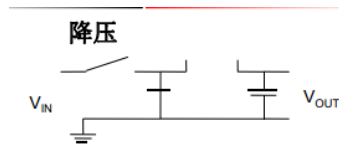


控制器(Controler)和稳压器(Regularlator), 上图是一个控制器和稳压器的区分参考, 集成开关管的 IC 我们一般称之为稳压器, 需要外置开关管的 IC 我们称之为控制器, 而图中的描述我们只能作为一个参考, 现在很多的稳压器已经可以做到大于 3A, 而且热阻低到 10°C/W 也有很多, 但很多大功率的开关电源还是需要控制器, 外置 MOS 管。

控制器与稳压器实例对比

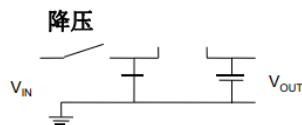
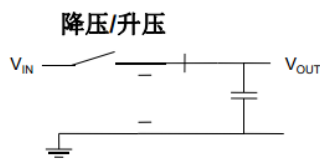
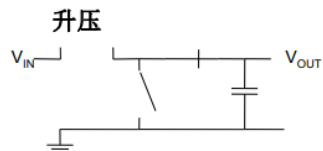


1.15 开关稳压器总结



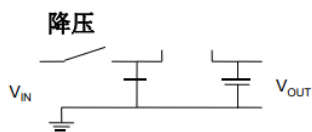
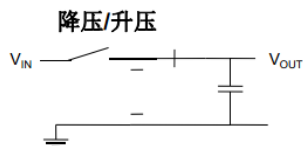
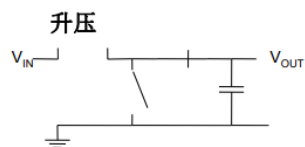
优点:

- 高效率
- $V_{OUT} \leq V_{IN}$
- 宽输入电压范围
- 低功率耗散 (小型散热器)
- 高功率密度 (Watt/cm²)
- 提供隔离 (利用变压器)
- 提供多个输出 (O/P) (利用变压器)



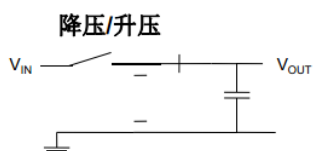
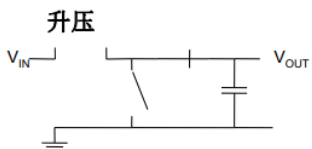
缺点:

- EMI
- 瞬态响应较慢
- 设计难度加大
- 较高的输出纹波和噪声



应用:

- 高效型电源
- 高环境温度
- 大的输入至输出电压差
- 空间受限
- 高输出功率



第二章 效率与 VOUT 的关系

在开关稳压电源中，输入电源的范围是知道的，输出稳压点的设置也是知道的，但是输出 Vout 和效率的关系是什么呢？

我们经常的说的是占空比越大，效率越高，损耗越小，那么它是怎么得到的呢？有经验的工程师就会根据公式去推导出来。占空比最大的时候为什么效率最高？下面举个案例来更大家解释一下。

电源的效率 η ：

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{out} + P_d}$$

上式中 Pout 为输出功率，Pd 为耗散功率

下面用一个简化的功耗计算公式来计算一下，为什么说是简化呢，我们的开关损耗有开通损耗、关断损耗、导通损耗、驱动损耗，为了演示更加明显下面的计算只是写了一个导通损耗。假设没有电感器电流纹波，输入 Vin=5V，输出 Io=1A，那么在输出为 3.3V 和 1V 的情况下的损耗好如下表：

	3.3V 输出	1V 输出
功率 FET 传导损耗	$P_{FET_PWR} = (I_{out} \cdot \sqrt{D})^2 \cdot R_{dson}$ $P_{FET_PWR} = (1A \cdot \sqrt{0.67})^2 \cdot 0.200 \Omega$ $P_{FET_PWR} = 0.132W$	$P_{FET_PWR} = (I_{out} \cdot \sqrt{D})^2 \cdot R_{dson}$ $P_{FET_PWR} = (1A \cdot \sqrt{0.2})^2 \cdot 0.200 \Omega$ $P_{FET_PWR} = 0.040W$
同步 FET 传导损耗	$P_{FET_SYNC} = (I_{out} \cdot \sqrt{1-D})^2 \cdot R_{dson}$ $P_{FET_SYNC} = (1A \cdot \sqrt{0.33})^2 \cdot 0.120 \Omega$ $P_{FET_SYNC} = 0.041W$	$P_{FET_SYNC} = (I_{out} \cdot \sqrt{1-D})^2 \cdot R_{dson}$ $P_{FET_SYNC} = (1A \cdot \sqrt{0.8})^2 \cdot 0.120 \Omega$ $P_{FET_SYNC} = 0.096W$
总 FET 损耗 (不包括其他电路损耗)	0.173 W	0.136 W

其实上面计算 mos 管的电流有效值的计算是错误的，正确的式子是 $I_o \sqrt{1 + \frac{\Delta I^2}{12}}$ ，上面的只是一个简化后的计算公式，只是为了更加容易计算而已。

由上面的计算可以知道在 3.3V 输出的时候，效率为：

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{out} + P_d}$$

$$\eta = \frac{3.3W}{3.3W + 0.173W}$$

$$\eta = 95.0\%$$

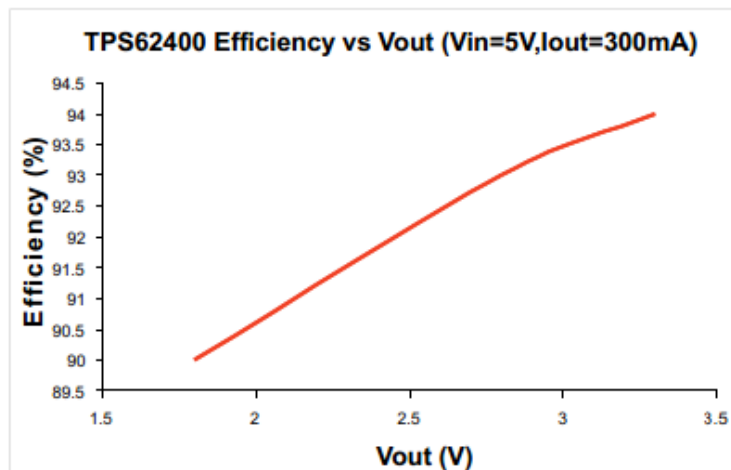
在输出为 1V 的时候，效率为：

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{out} + P_d}$$

$$\eta = \frac{1W}{1W + 0.136W}$$

$$\eta = 88.0\%$$

由此可见 3.3V 输入的效率比较高，根据这个特性我们也描出了同等条件下输出与功率的关系，有下图我们可以看出输出越大，也就是占空比越大，效率就越高。



第三章 同步于非同步

3.1 什么是同步与非同步

(1) 非同步

如果说我们的 high mosfes 和 LOW mosfes 同步的时候，会发现有些应用它就叫开关管，并没有叫 high mosfes 和 LOW mosfes ，也就是高端 mos 管和低端 mos 管；那么这种情况的肯定就是非同步的，因为他只有一个 mos 管（或者说开关管）所以他不用去强调同步于非同步了。

(2) 同步

同步是采用通态电阻极低的专用功率 MOSFET，来取代整流二极管以降低整流损耗的一项新技术。它能大大提高 DC/DC 变换器的效率并且不存在由肖特基势垒电压而造成的死区电压。功率 MOSFET 属于电压控制型器件，它在导通时的伏安特性呈线性关系。用功率 MOSFET 做整流器时，要求栅极电压必须与被整流电压的相位保持同步才能完成整流功能，故称之为同步整流。

3.2 区分同步、非同步

在应用中上下管都有场效应管的都有场效应管的就同步的，只有一个上管的开关的就是非同步的，或者说如下图两个的 buck 电路，在主功率那一级中的功率开关管是我们常见的如图 1，而下的续流二极管变成了开关管，那么这个开关管就叫同步场效应管如图 2。那么图 1 就是非同步的，而图 2 就是同步的。

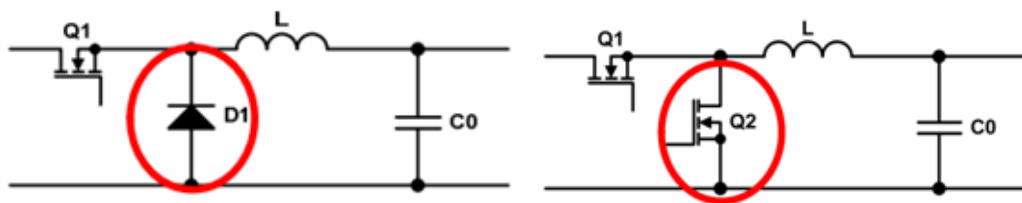


图 1

图 2

如下图：

一个控制器，外围加上上下两个 MOS 管，那么上管就可以当功率管，下管当做同步的场效应管，如此就可以看出他是一个同步结构的 Buck 电路。

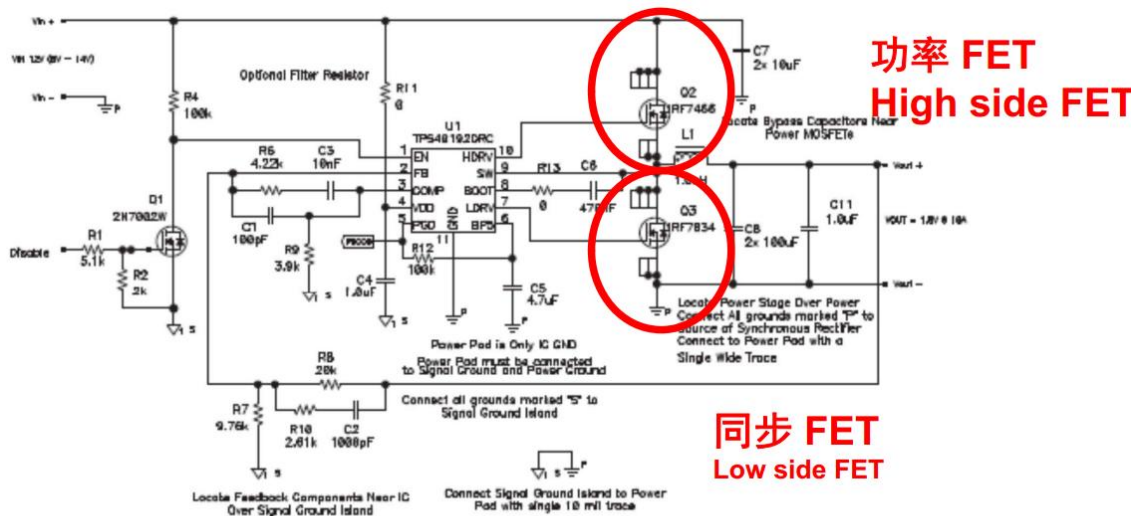


Figure 17. TPS40192 Sample Schematic

3.3 同步，非同步的优缺点

(1) 非同步的优缺点

- 在输出电流变化的情况下，二极管的电压降相当恒定

当续流二极管正向导通时，输出电流变化，二极管的正向压降是恒定不变的，锗管的压降为 0.2-0.3V，硅管的压降为 0.7V。

- 效率低

因为二极管的电压降恒定，所以当流过二极管的电流很大的时候，原本在二极管上很小的电压再乘以电流之后，输出的电压很低的时候，这时候的二极管的小电压降就占了很大的比重，它的消耗功率就很可观了，所以在大电流的时候效率就会减低了。

- 比较便宜

大家都知道的二极管的价格肯定是比 MOS 的价格便宜的，这里说可以是同等条件下的，大家都是用同一个衬底的情况下。如果说一个是普通衬底的 mos 管，而另外一个碳化硅衬底二极管，或者说一个是低压的 mos 管和一个高压的二极管，那么他们的价格就不一定是二极管的比 mos 管的便宜了。

- 可采用较高的输出电压

在输入电压比较高的时候使用是比较好的，因为在输出电压高时，二极管的正向导通压价所占的比重就很小，对效率的影响就比较低，而且它的电路结构比较简单，不需要外加控制电路，生产的工艺流程也会比较简单。

(2) 同步的优缺点

- **MOSFET 具有较低的电压降**

在 MOSFES 的参数中有一个很重要的参数那就是 MOSFES 的导通电阻 $R_{ds\ on}$ ，一般情况 MOSFES 的导通电阻 $R_{ds\ on}$ 是非常小的，一般都为毫欧级别，所以 MOSFES 在导通之后的压降非常比较低的。

- **效率较高**

在相同的条件下，一般的 MOS 管的导通电压降远远小于普通肖特基二极管的正向导通压降的，所以在电流不变的情况下，MOS 管的损耗功率是远远比二极管小的，所以说使用 MOS 管的效率会比使用二极管的效率会高

- **需要额外的控制电路**

Mos 管需要驱动电路的，所以说同步的需要为 MOS 管额外添加一个控制电路，使得上下两个 MOS 管能够同步，而非同步的二极管是自然整流的，所以不需要额外添加驱动控制电路，所以所先对非同步，同步的电路也会比较复杂。

- **成本比较高**

由于一般相同 mos 管的价格比二极管高，而且 mos 管还需要驱动电路，驱动 ic，所以在成本上同步的比非同步的制造成本相对会贵一些，生产的流程工艺也会复杂一些。

3.4 同步于非同步的选择

- **效率**

在看完各自的优缺点之后，在制作时到底该如何选择同步于非同步呢？如果要求效率比较高，而成本高一点无所谓的话，那么必定是要选择的同步的。上面也提到了，mos 管损耗小，可以提高效率，但它也比较贵，成本也高。

- **成本**

同步也非同步之间，非同步的续流是二极管，它的的价格比 mos 管便宜，而且不需要额外的控制电路，电路简单的多，所以它无论是材料成本还是制作成本都要比同步的低，所以在要求效率不是很高的时候也可以选择非同步。

- **可靠性**

还有一个就是可靠性，非同步的可靠性肯定比同步的更加可靠的，为什么呢，因为 mos 管不可能是理想的开关，它也是有开通时间和关断时间的，所以如果上下两个管子的死区时间没有控制好，使上管的关断时间和下管的开通时间有重叠，造成有直通现象，那么 mos 管就会因电流过大而损坏。

所以在选择同步的时候时序的选择也是一个很重要的问题。因此同步的时候控制 IC 的选择也是个比较重要的问题图 4, IC 只是个集成功率 FET 的控制器, 如果要把它的整流二极管换成 mos 管做同步的时候, 那么它的死区就要严格的控制了, 但是如果像图 5 中的 IC, 它集成了上下管, 这些就不需要担心的太多了。

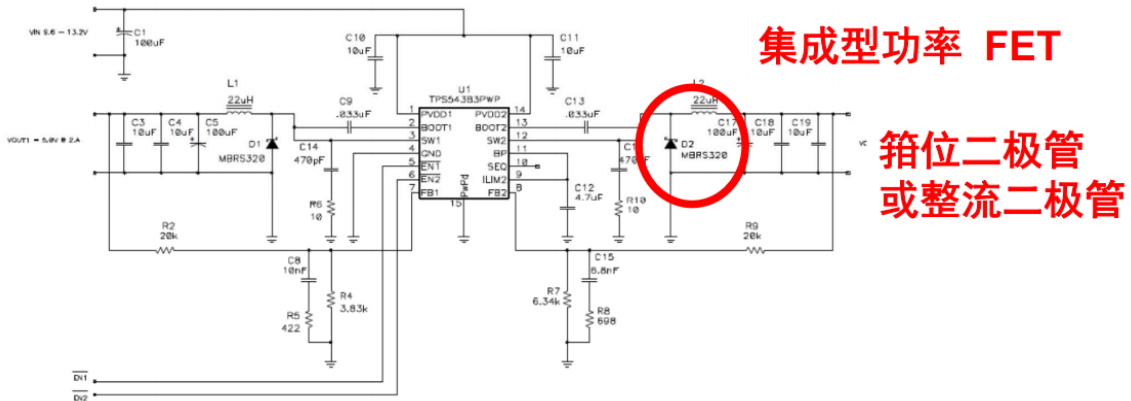


图 4

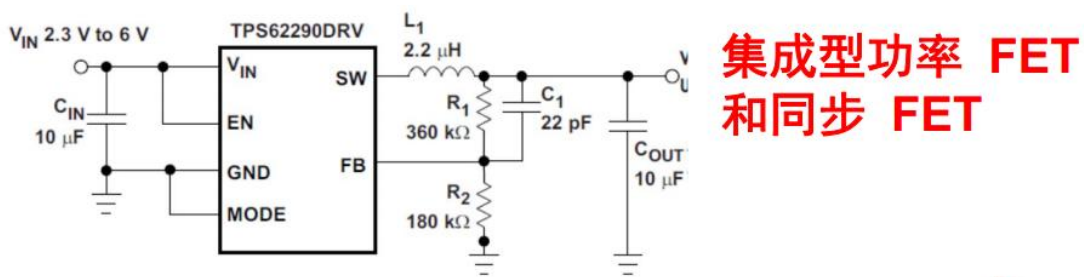


图 5

为了更加凸显同步于非同步的效率问题, 下面举个例子来说明一下:

输入电压: $V_{in}=5V$ 同步 mos 管内阻 $R_{ds\ on_sync}=0.12ohm$
 输出电压: $V_{out}=1V$ 功率 mos 管内阻: $R_{ds\ on_PWR}=0.2\ ohm$
 输出电流: $I_{out}=1A$ 非同步续流二极管正向导通压降 $V_{F_DIONDE}=0.5V$

1V 输出同步

$$P_{FET_SYNC} = (I_{out} \cdot \sqrt{1-D})^2 \cdot R_{dson}$$

$$P_{FET_SYNC} = (1A \cdot \sqrt{0.8})^2 \cdot 0.12\Omega$$

$$P_{FET_SYNC} = 0.096W$$

1V 输出非同步

$$P_{diode} = I_{diode_avg} \cdot V_{diode}$$

$$P_{diode} = (1-D) \cdot I_{out} \cdot 0.5V$$

$$P_{diode} = 0.4W$$

$$PPWR = (I_{out} \cdot \sqrt{D})^2 \cdot R_{ds\ on_PWR}$$

$$PPWR = (I_{out} \cdot \sqrt{D})^2 \cdot R_{ds\ on_PWR}$$

$$PPWR = (1A \cdot \sqrt{0.2})^2 \cdot 0.2\Omega$$

$$PPWR = (1A \cdot \sqrt{0.2})^2 \cdot 0.2\Omega$$

$$PPWR = 0.04W$$

$$PPWR = 0.04W$$

$$\eta = \frac{P}{P + PEFT_{SYNCU} + PPWR}$$

$$\eta = \frac{P}{P + PEFT_{SYNCU} + PPWR}$$

$$\eta = \frac{1w}{1 + 0.096 + 0.04}$$

$$\eta = \frac{1w}{1 + 0.4 + 0.04}$$

$$\eta = 88\%$$

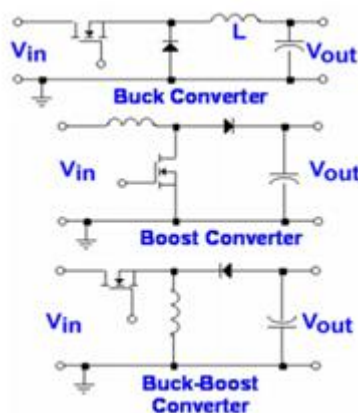
$$\eta = 69.4\%$$

从上面的比较可以看出影响效率的主要就是续流二极管的损耗,对于低输出电压的来说采用同步的效果是非常明显的,而对于较高的 V_{OUT} ,采用同步还是非同步并不太成问题,较高的占空比,同步 FET 或箝位至二极管中的功耗较少。

第四章 隔离式与非隔离式

4.1 非隔离式拓扑结构

在电源中电源的拓扑结构有着不同的形式,这里图 1 所给出的图形示出了三种基础的 DC-DC 电源转换拓扑它们分别是, Buck、Boost、Buck-Boost。



优点: 结构简单、体积小、成本较低; 输出电压调节范围宽。

缺点: 前后不隔离, 如果用市电供电, 人接触电源的输出端或地端可能有触电危险, 还有就是在下雨天打雷的时候, 由于没有隔离很有可能就会把整个电路的都会烧坏; 只能升压或降压或极性转换, 输出电压不能与输入电压相等。

图 1

 [学习开关电源基础知识课程](#)  [更多 TI 培训课程](#)

4.2 隔离式拓扑结构

由于许多应用中都需要输入/输出隔离，所以基于 Buck、Boost、Buck-Boost 这三种拓扑，推导出了其他的常用拓扑：反激式，正激式，推挽式，半桥式，全桥式

优点：

- 保护人员、设备免遭感应在隔离另一端的危险瞬态电压损害
- 去除隔离电路之间的接地环路以改善抗噪声能力。
- 在系统中轻松完成输出接线，而不与主接地发生冲突。

缺点：

- 体积较大，或同等体积的功率较小

4.2.1 正激变换器

单端正激变换器是由 BUCK 变换器派生而来的。图 2 上图为 BUCK 变换器的原理图，将开关管右边插入一个隔离变压器，就可以得到图 2 下图的单端正激变换器

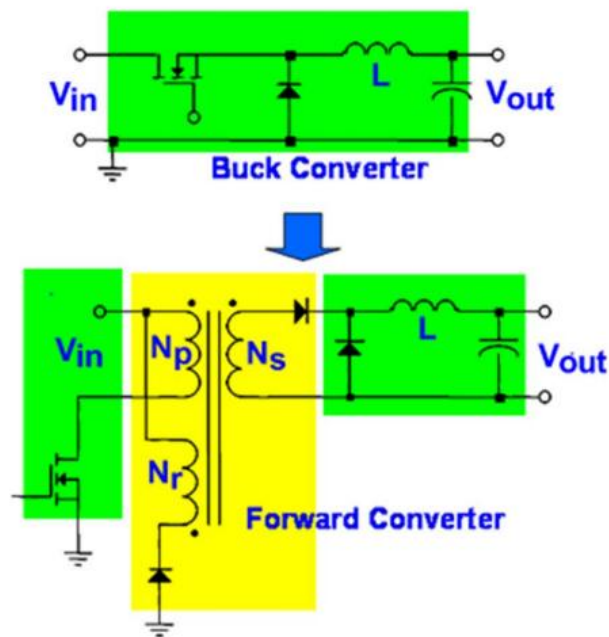


图 2 上图

4.2.2 反激变换器

反激变换器是由 BUCK-BOOST 变换器推演而来的。图 2 上图为 BUCK-BOOST 变换器的原理图，将电感变换一个隔离变压器，就可以得到图 2 下图的反激变换器。

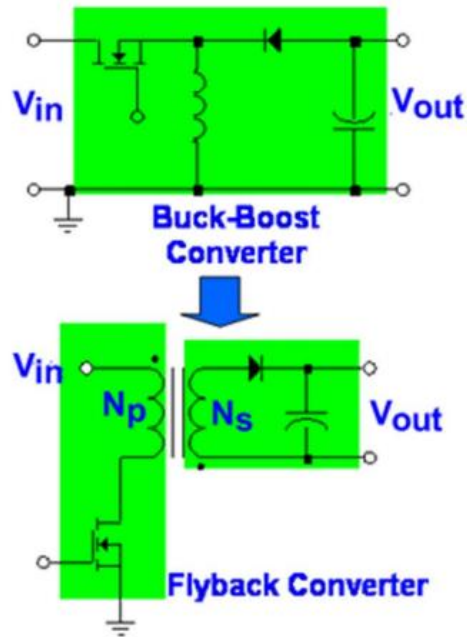
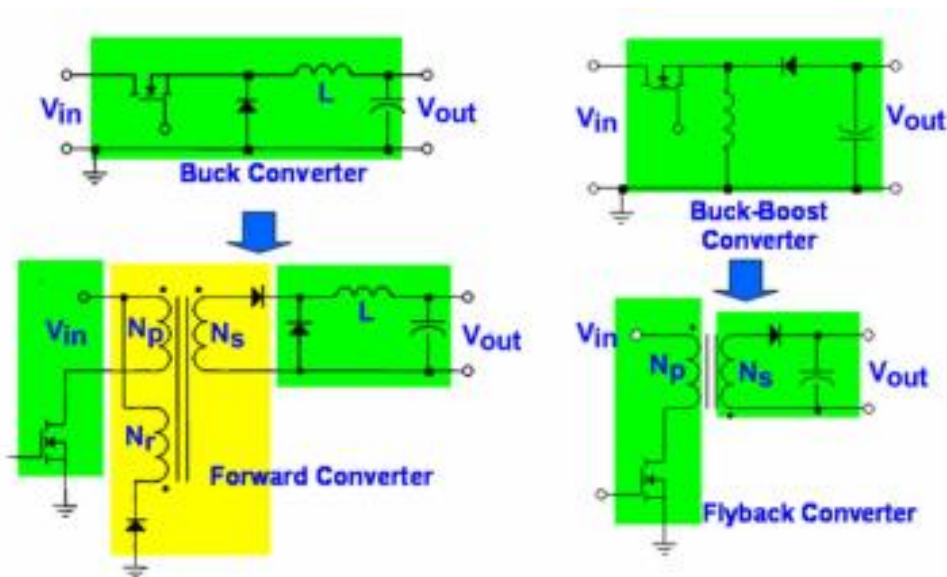


图 2 下图

4.2.3 正激式/反激式拓扑比较



原理图上的区别，在上图的比较中可以看到黄色部分，正激变换器在加入隔离变压器器的同时也加入了一个辅助电感 N_r ，它是一个磁复位的电感。但是由 Buck-boost 改造出来的反激变换器去没有这个复位绕组，为什么呢，因为反激变换器的变压器它既是电感又是变压器，所以电感的特性来讲，它是不需要复位绕组的，电感就是一个储能的器件，它在 MOS 开通时储存能量，MOS 关断时释放能量，所以一直在平衡的状态，它是不会到达饱和。

正激变换器，它的 VIN 一直都是加在上面的，当 mos 不断的开通，它的能量也不停的加在原边，所以它的磁芯就会容易饱和，所以这个时候我们就需要加一个复位的电感，释放它原边电感的能量。

下面再对比一下正激和反激的其他特性：

Feature	Forward正激	Flyback反激
输入滤波	中等，脉冲	中等，脉冲
输出滤波	从电感器提供低的连续输出电流	高的脉冲输出电流需要采用大的输出电容器
效率	中等	低至中等
多输出能力	有，耦合输出电感器设计会很困难	有，利用谨慎的变压器设计实现了优良的交叉调节
成本	中等	低，无输出电感器
典型功率范围	20 – 400W	< 150W
复杂性	中等，需要变压器复位	低

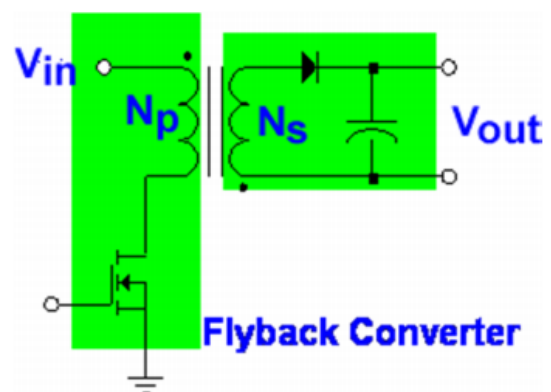
4.2.4 反激式转换器特性

优点：

- 采用一个耦合电感器来充当隔离变压器并用于储能。
- 输入和输出地是隔离的。
- 利用占空比和匝数比来实现电压的降低或提升。
- 易于实现多个输出。
- 不需要采用一个单独的输出电感器。
- 最适合较低的功率级别。

缺点：

- 高输出纹波电流。
- 高输入纹波电流。
- 环路带宽可能受限于右半平面(RHP) 零点。

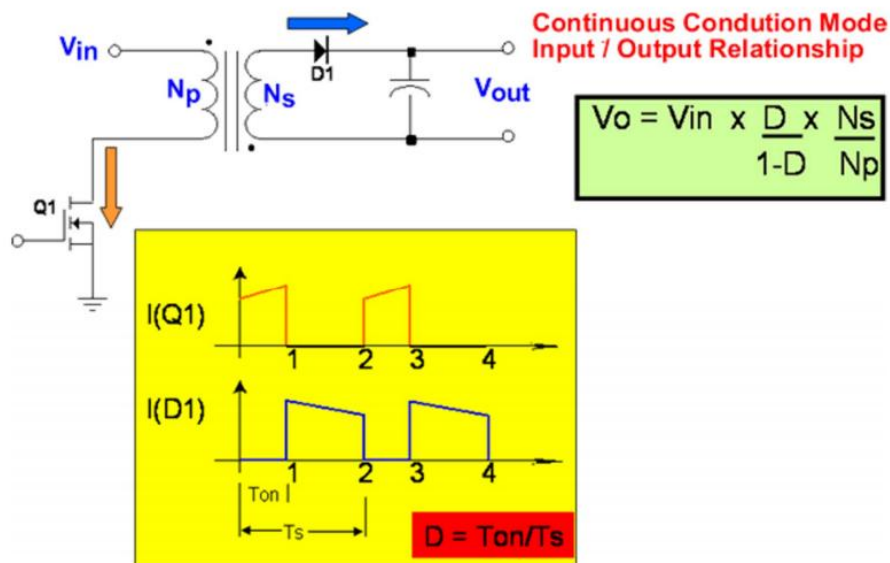


4.2.5 反激式的优点及应用

- 采用最简单的隔离式拓扑，因而具有最低的成本
- 使用了数量最少的功率组件：4 个
- 最为人们所了解、实现的数量最多而且得到最广泛支持的拓扑之一

由于上述原因，对于功率范围<150W 的应用而言反激式转换器是一种上佳的选择。

4.2.6 反激的重要波形



当开关管开通，电感的电流上升，可以看出它的电流的图形和 BUCK-BOOST 的图形是非常的相似的，它的区别就是在一个原副边的匝比上面而已，这里也可以看出其变压器的就是一个电感的作用。

4.2.7 反激的稳态分析

Duty Cycle:
$$D = \frac{V_o + V_F}{V_o + V_F + \frac{N_s}{N_p} \cdot V_{in}}$$

Primary Current:

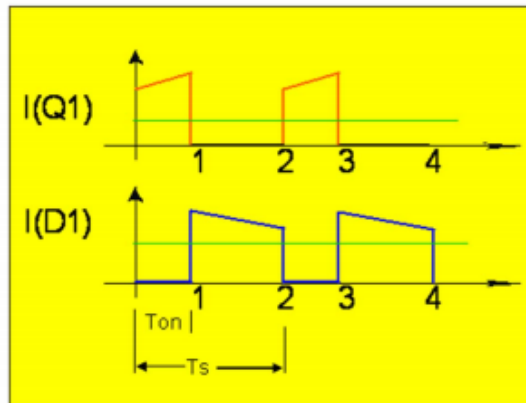
Average:
$$I_{avg} = \frac{P_o}{V_{in} \cdot \text{Eff}}$$

Peak:
$$I_{pk} = \frac{1}{2} \cdot \frac{V_{in}}{L_m} \cdot \frac{D}{f_{sw}} + \frac{I_{avg}}{D}$$

RMS:
$$I_{rms} = \frac{I_{avg}}{\sqrt{D}}$$

Ripple:
$$I_{ac} = \sqrt{I_{rms}^2 - I_{avg}^2}$$

$$= I_{avg} \cdot \sqrt{\frac{1-D}{D}}$$

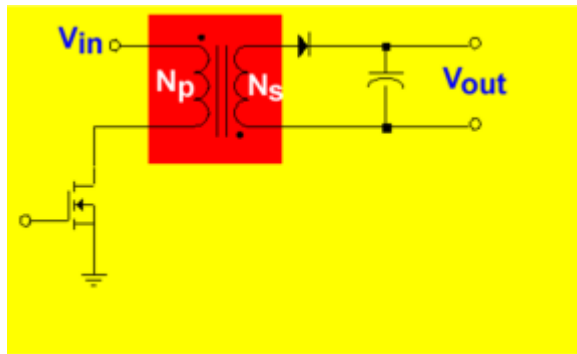


Values are transformer related (turns ratio, inductance).

上图是开关管的开通电流波形和续流二极管导通的波形，由波形我们也可以看出，开关管的波形加上续流二极管的电流波形就是电感的电流波形。

4.2.8 反激变换器的设计问题

必须选择合适的反激式转换器组件，以便能够处理必要的电流和电压应力。这些应力由前一章节里给出的公式确定。所有这些应力均与变压器有关：匝数比、电感。



占空比、匝比这些都是要工程师来设计的，在输入的有最小电压，最大电压，它都有对应的占空比，中间还有一个稳态的工作电压，你要优化在这个点上的效率，当然很少有工程师想的那么多，因为一般反激的应用都是在小功率的场合，对应效率的要求也不是那么苛刻。而且对于尺寸大小要求很高，所以频率要做得很高，应用的功率也不是很大，效率低一点，这个做出来的损耗也不是很大。

下图所示说明了针对反激式变压器的基本要求：

- **Basic Requirements:**
 - Does not saturate at full load.
 - Inductance is as high as possible.
 - Physically as small as possible.
 - Low power losses (<3%):
 - Core losses
 - Copper losses
 - Skin effects for copper

- 请注意，由于集肤效应的原因，在高开关频率变压器中需要采用多股细导线。
- 为使操作在较宽的负载范围内保持于连续导通模式，需要高电感。
- 由于使用了较高的电感，初级和次级电路中的纹波电流都将较低。

4.2.9 实例 - 设计规范

一项设计总是从制定设计规范开始的，包括输入电压范围、功率级别、输出电压等等。占空比和开关频率一般都是预先确定的。通常而言，采用一个介于 200 kHz 和 300 kHz 之间的开关频率可以很好地兼顾开关损耗与滤波器要求。事实上在 65kHz-300 kHz 都有人用，要知道我们的频率和开关损耗是成正比的，和体积是成反比的，当你的设计体积不是很严格的时候，可以用 65 kHz 来做，那样它的效率可以达到更好的效果。如果用 200 kHz 和 300 kHz 之间那么磁芯就可以做小，电源的体积就可以做得更小，纹波也可以做得更好。

Application Specifications

Pin = Maximum power 18W (15W output)

Duty = Maximum duty cycle 0.42

Vbus = Minimum input voltage 25V

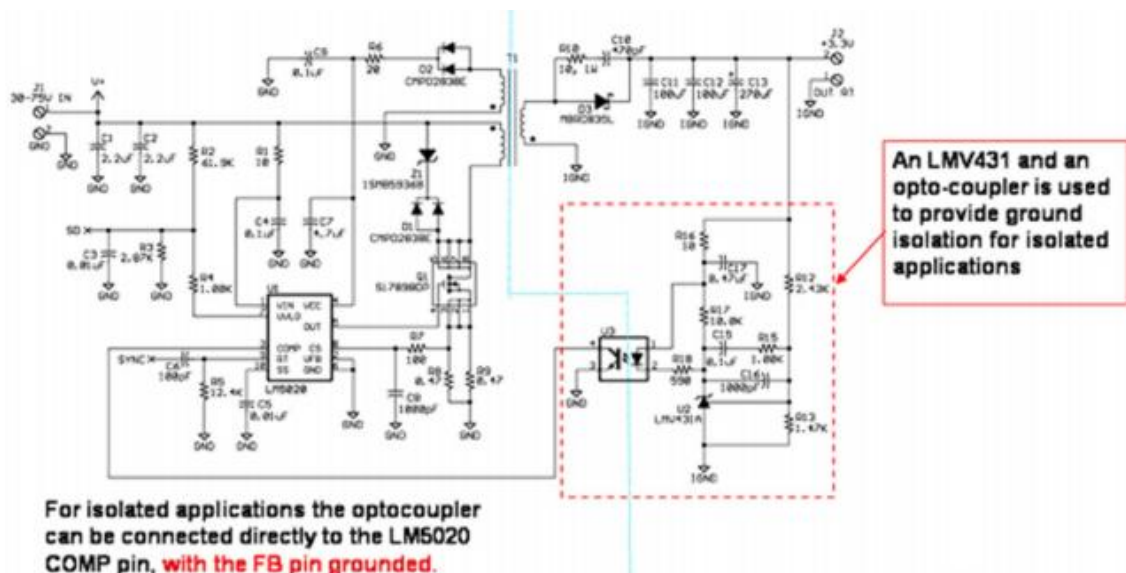
Vin_max = Maximum input voltage 75V

Vo = Output voltage 3.3V

fsw = Switching frequency 250kHz

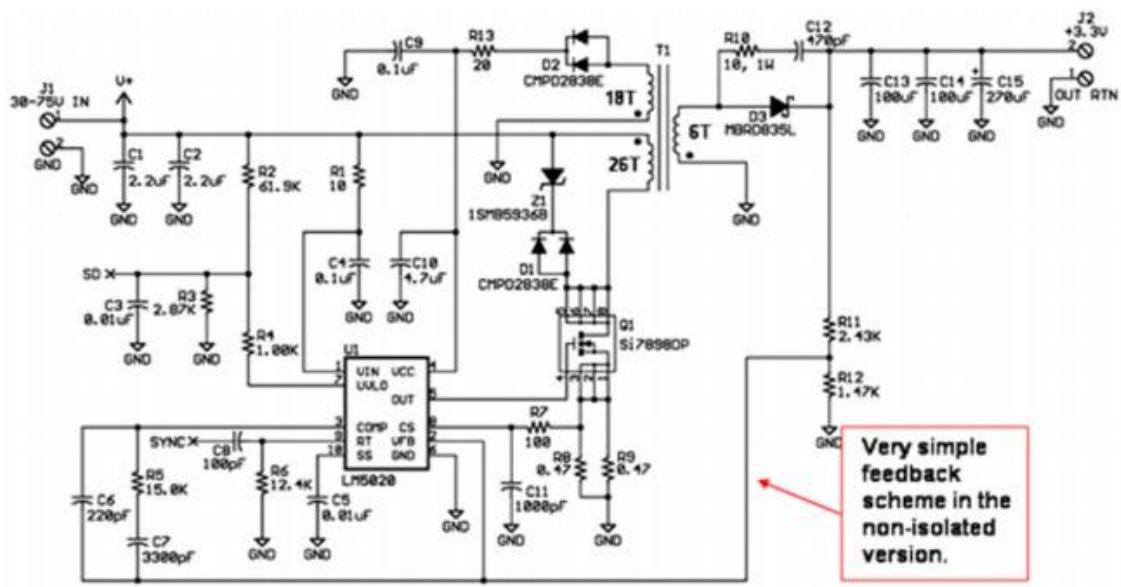
4.2.10 反激式电路实例

(1) 隔离型



上图是国半 LM5020 做的反激变换器，这是一个隔离型的反激变换器，大家可以看到它上面有个光耦，光耦一定要把 CTR（电流传输比）设置在线性区域，如果不在线性区域当控制环路在调整的时候，CTR 就会变，那么它就会影响到反馈的环路，影响到整个电路的稳定性。这里大家可以参考一下啊，这个电路无论是光耦的供电还是型号的传输都是隔离的，它真正的起到了电气隔离和型号的隔离。

(2) 非隔离型



对于这种非隔离的反激变换器我们可以认为它是优化 DC-DC 里面 BUCK-BOOST 效率的时候，加入了变压器的匝比那么它可以更加优化占空比工作范围。对于这个电路信号不是隔离的，所以对于 EMI 的优化起到了一定的难度。

4.2.11 结论

- 反激式拓扑是适合隔离式电源的最简单拓扑。大多数应用是在通信和以太网供电(PoE)领域，这里的功率级别低于 50W，现在，802.11 AF, AT 之外的 POE 电源标准还未发布。
- 讨论了反激式工作原理并介绍了稳态分析，旨在提供设计指引。
- 主要的设计问题是反激式电源变压器。
- 采用一个实例来演示设计。
- 环路补偿简单，比例积分即可。

第五章 脉宽调制与脉冲频率调制

5.1 概述

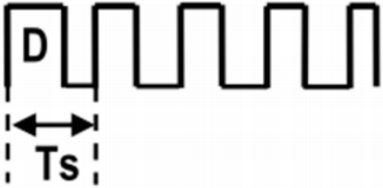
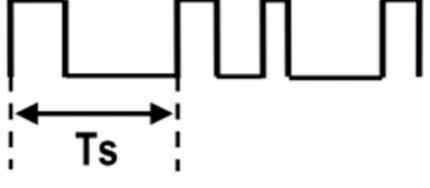
- PWM 和 PFM 是两大类 DC-DC 转换器架构
- 每种类型的性能特征是不一样的
- 重负载和轻负载时的效率
- 负载调节
- 设计复杂性
- EMI / 噪声考虑
- 集成型转换器解决方案可整合这两种操作模式以利用它们各自的优势

5.2 典型便携式电源应用实例

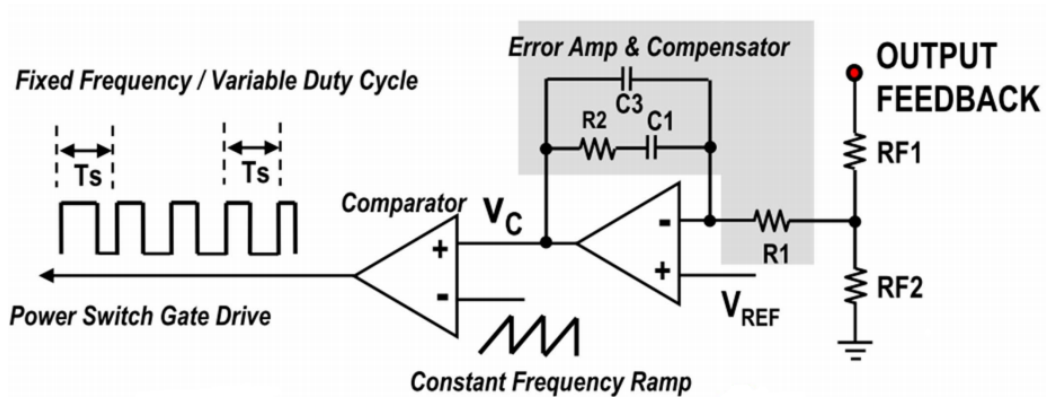
降压转换器 - 电源处理器或“数字负载”

- (1) 负载水平有可能发生显著的变化：在“睡眠”时为 1~2 mA，而在“主动”操作期间则可达几百 mA
- (2) 期盼 / 需要在整个负载范围内实现高效率
- (3) 需要上佳（足够的）负载调节以处理瞬态状况
- (4) 升压转换器 - LED 背光灯、音频偏置电源轨或其他的“模拟”负载
- (5) 对于噪声 / 纹波的敏感度在很大程度上取决于应用
- (6) 对于 LED 应用，可以采用不同类型的亮度控制方法

5.3 定义 - PWM 和 PFM

PWM 转换器	PFM 转换器
<ul style="list-style-type: none"> • PWM = 脉宽调制 • 一种转换器架构：固定频率振荡器 • 驱动信号：恒定频率，具有可变的占空比（功率 FET 导通时间与总开关周期之比） 	<ul style="list-style-type: none"> • PFM = 脉冲频率调制 • 采用了一个可变频率时钟 • PFM 转换器实例：“恒定导通时间”或“恒定关断时间”控制 DC-DC 转换器。 • 有几种 PFM 变种，而且该术语用于指后面讨论的其他操作模式...
	

5.4 PWM 控制架构



如图是教科书上经典设计的架构图，输出的两个分压电阻出来做采样信号，然后通过一个补偿器和精准源的比较，再把输出的误差信号和一个 Ramp(三角波比较)，得到固定周期的脉冲。

PWM 控制的优缺点：

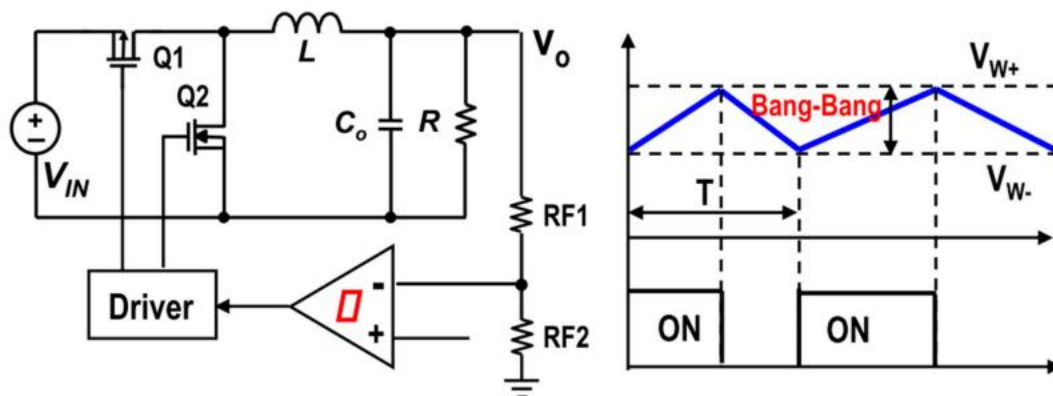
- **优点：**

- 1、中等和重负载条件下可实现良好的效率
- 2、开关频率由 PWM 斜坡信号频率设定

- **缺点：**

- 3、效率在轻负载条件下显著下降，因为开关频率固定导致了开关损耗在轻载时效率不高
- 4、快速瞬态响应和高稳定性需要仰仗上佳的补偿网络设计

5.5 滞环模式控制



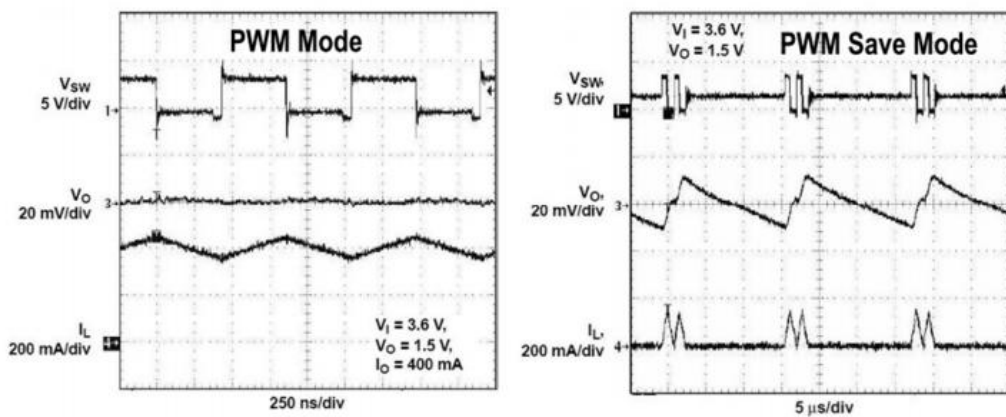
[👉 学习开关电源基础知识课程](#) [👉 更多 TI 培训课程](#)

开关式(Bang-Bang) 控制，也称滞环模式控制，其实就是一个窗口比较器的概念，MOSFET 的接通和关断基于输出电压的检测，所以它的响应速度是最快，输出电压始终恰好高于或低于理想设定点，比较器迟滞用于保持可预测的操作并避免开关“跳动”。

5.6 脉冲跳跃/ 省电模式 Burst Mode

在轻负载时，PWM 转换器能自动切换至一种“低功耗”模式以最大限度地减少电池电流消耗，该模式有时被称为“PFM” - 但实际上是一个间歇式地接通和关断的固定频率(PWM) 转换器。

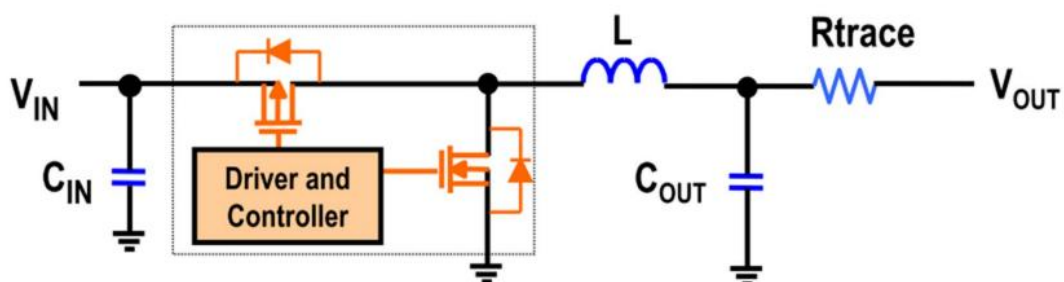
5.7 PWM 模式和跳跃模式波形图



根据左边和右边的波形我们可以看到，左边的是经典的 PWM 模式，右边的图是在轻载或者时的 PWM 跳跃模式的波形，跳跃模式中的 PWM 的频率降低，所以开关损耗减少了。如果我们从输出电压纹波来看的话，纹波是变大了，因为它这种模式下已经不是每个周期都调整 PWM，而是反馈信号到了窗口比较器的上限或者下限的时候才做出调整。

5.8 转换器效率和损耗

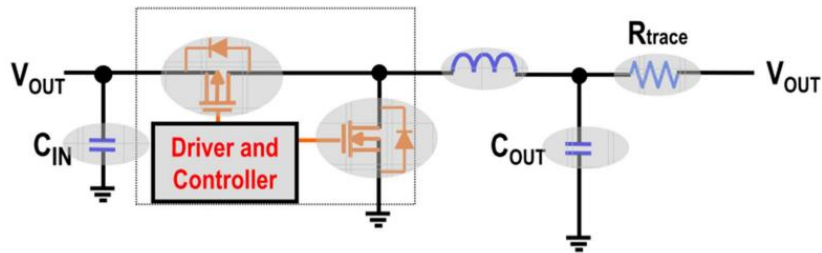
“损耗” = 任何从输入吸收而未传送至输出的能量



损耗的组成部分:

- MOSFET: 开关损耗、栅极驱动器损耗、传导损耗。
- 无源组件: 电感上的绕组和磁芯损耗、阻性损耗、电容器 ESR 损耗。
- 转换器 IC: 内部基准、振荡器电路、栅极驱动电路损耗。

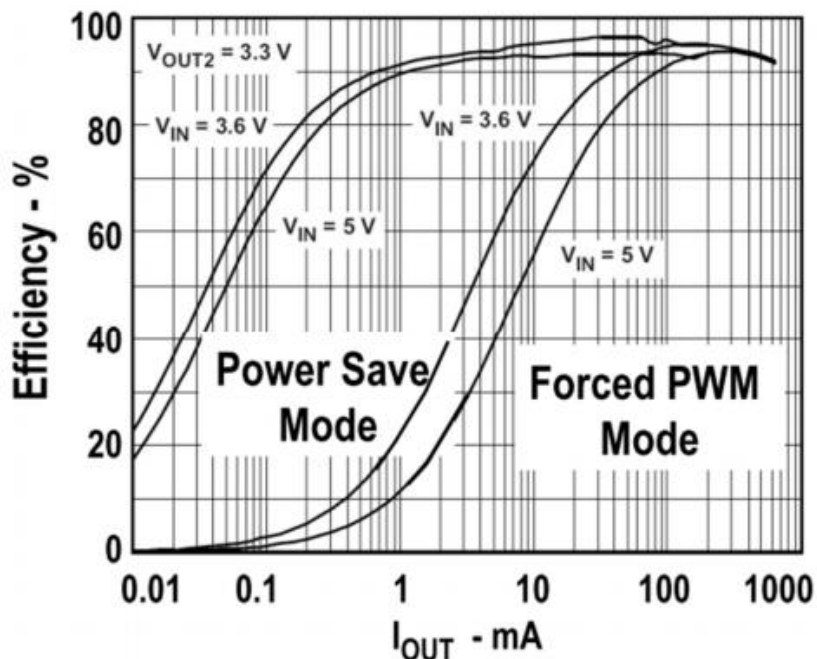
转换器 IC 损耗:



在轻负载时, 无源组件和 FET 损耗显著下降, IC 内部电流受振荡器的支配, 某个固定频率上, IC 工作电流不会随负载而减小。IC 的工作电流会影响轻负载效率, 假如负载电流约为 1 mA, 则 IC 的内部电流在 4 mA 左右, 这时“最好情况”也只有效率 < 20%。如果负载电流约为 200 mA, 则 IC 的内部电流为 4 mA 左右, 这时“最好情况”效率 > 90%。

5.9 双模式降压转换器

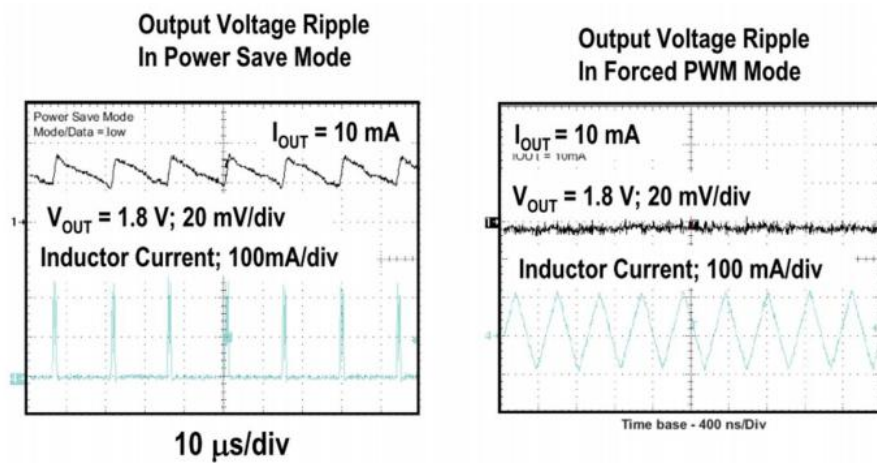
假如转换器是在双模式下工作, IC 运行在 PWM 模式的时候的工作电流为 3.5mA, 在轻载或空载的情况下 IC 进入省电模式, 这时 IC 的工作电流约为 23 μ A, 这样, 效率就提高了。



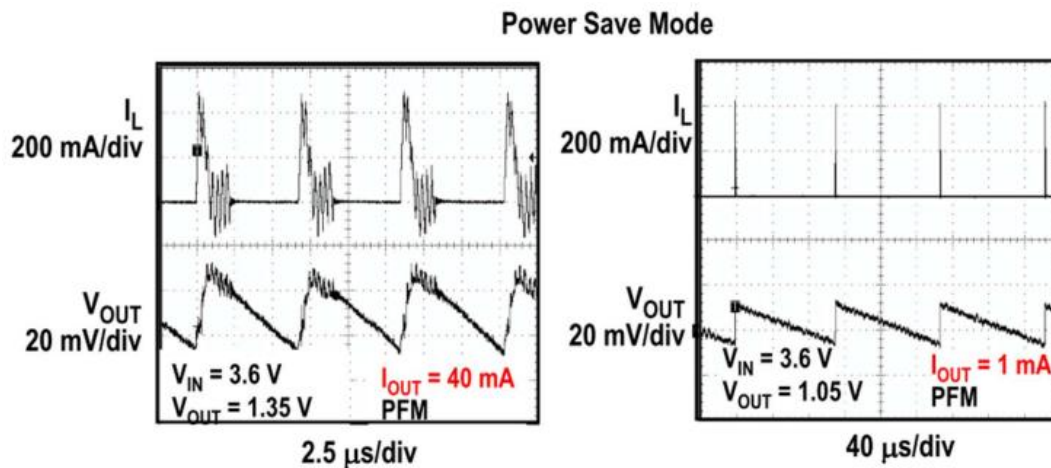
[学习开关电源基础知识课程](#) [更多 TI 培训课程](#)

5.10 输出纹波差异

采用省电模式时的一项折衷：在某一给定的负载电流条件下输出纹波较高，在本例中达到了 15 mV_{pp} ，而 PWM 模式则仅为 $< 5\text{ mV}_{\text{pp}}$ ，如下图：

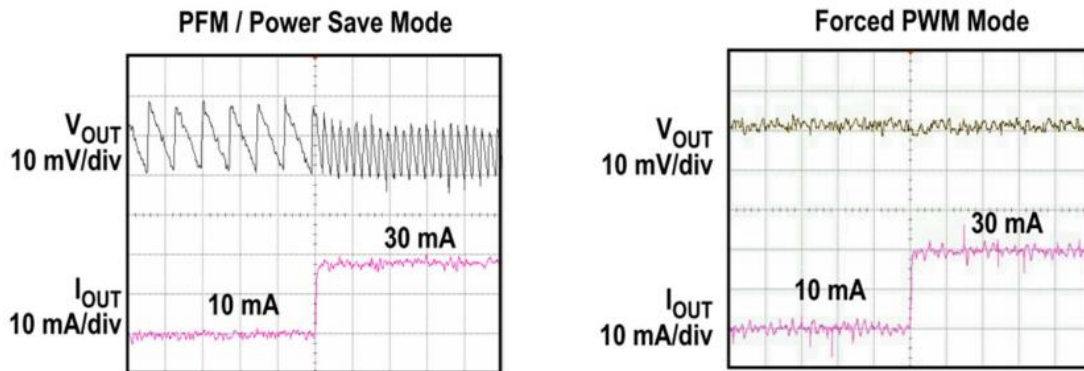


脉冲跳跃间隔取决于负载，随着负载的增加，开关脉冲出现的频度增高（在 40 mA 时每 $6.5\text{ }\mu\text{s}$ 出现一次，而在 1 mA 时则是每 $100\text{ }\mu\text{s}$ 出现一次），如果负载充分增加，则转换器将恢复恒定频率操作。如下图波形所示：



5.11 省电模式与强制 PWM 模式的对比

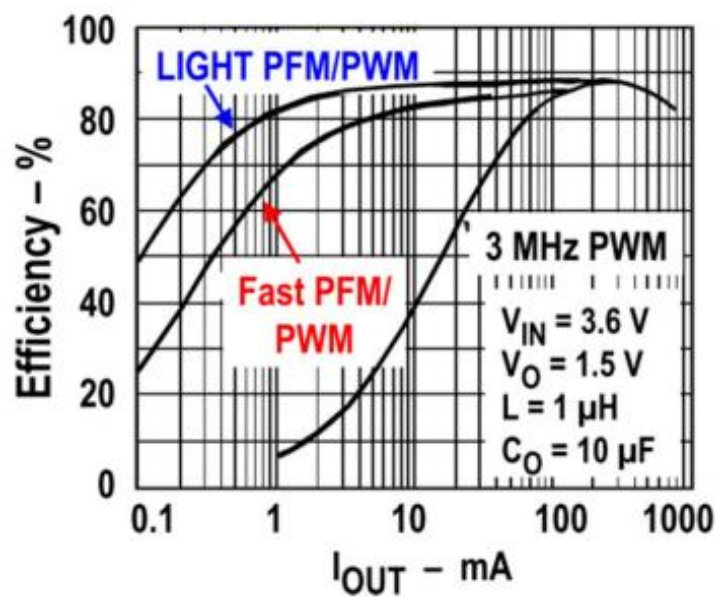
下图为在 10 至 30 mA 负载瞬变条件下的测试结果。



为了提高全范围负载的效率，轻载时，芯片进入 PFM 控制模式；重载时，芯片强制进入 PWM 模式。

5.12 多种省电模式

所谓的快速 PFM 和轻 PFM，它们是根据输出的负载电流而定的，当我们设定好电流的阈值门槛的话，电路就可以自然地切换。快速 PFM 的效率高于 PWM，但低于轻 PFM (LPM)，需要权衡折衷，如下图：为两种模式的输出电流和效率之间的关系图。



如果需要在非常轻负载时实现最高的效率，则采用“轻 PFM”模式；如需在轻负载和重负载之间频繁切换，且具有上佳的瞬态响应，则可使用“快速 PFM”模式。省电模式的选择由用户通过向转换器发送 I²C 命令来完成。

5.13 概要/ 结论（可变频率转换器）

优势

- 在轻负载条件下可实现更好的效率
- 无需补偿器
- 易于实现：允许使用多种电感器

可变频率架构可能存在一些问题

- EMI 频谱散布在所有的频率上，可能很难滤除
- 可听噪声（对于 $f < 20 \text{ kHz}$ ）

与 EMI 有关的问题有时可以得到缓解：

- EMI 由快速 dv/dt 和 di/dt 引起
- 在高功率条件下采用固定频率 PWM
- 在省电模式中采用可变频率，总输出功率级别非常低。
- EMI 可能不是问题
- 需要时可将转换器设定至“强制 PWM”模式

附录一：编委信息与后记

- 《开关电源基础知识》通过对 TI 培训班视频课程的整理，以帮助更多工程师能够更好的学习 TI 的课程知识。
- 在此特别感谢：TI 公司的大力支持
- 希望《开关电源基础知识》，能够为工程师朋友们带来更加详细全面的讲解！

电源网

2013. 4. 10

 [学习开关电源基础知识课程](#)  [更多 TI 培训课程](#)

附录二：版权说明

- 1、《开关电源基础知识》著作权属 TI 和电源网共同所拥有；
- 2、本着开源思想，我们授权任何对《开关电源基础知识》有兴趣的工程师免费下载、复制、传播该书；
- 3、用于商业用途须经 TI 和电源网的书面同意。