

图表分析和 WEBENCH 仿真——确定开关电源最恶劣的情况

设计一个可以工作的开关电源也许不是一件难事，但是设计一个性能良好，可靠性高的开关电源不是一件容易的事情。根据前面的分析，我们知道开关电源里的电流是周期性变化的，电流的变化跟哪些变量有关，电流变化最恶劣的情况又是如何？本节对这个问题进行分析，并充分利用图示和仿真的方法说明电流变化情况。也希望读者在以后的电源学习和开发中利用图表帮助理解电源并解决问题。在初学开关电源的时候，建议读者先把各个器件当做理想器件，暂不考虑无效的压降和损失的电流，搞清楚开关电源的规律后再将各种实际因素加入。

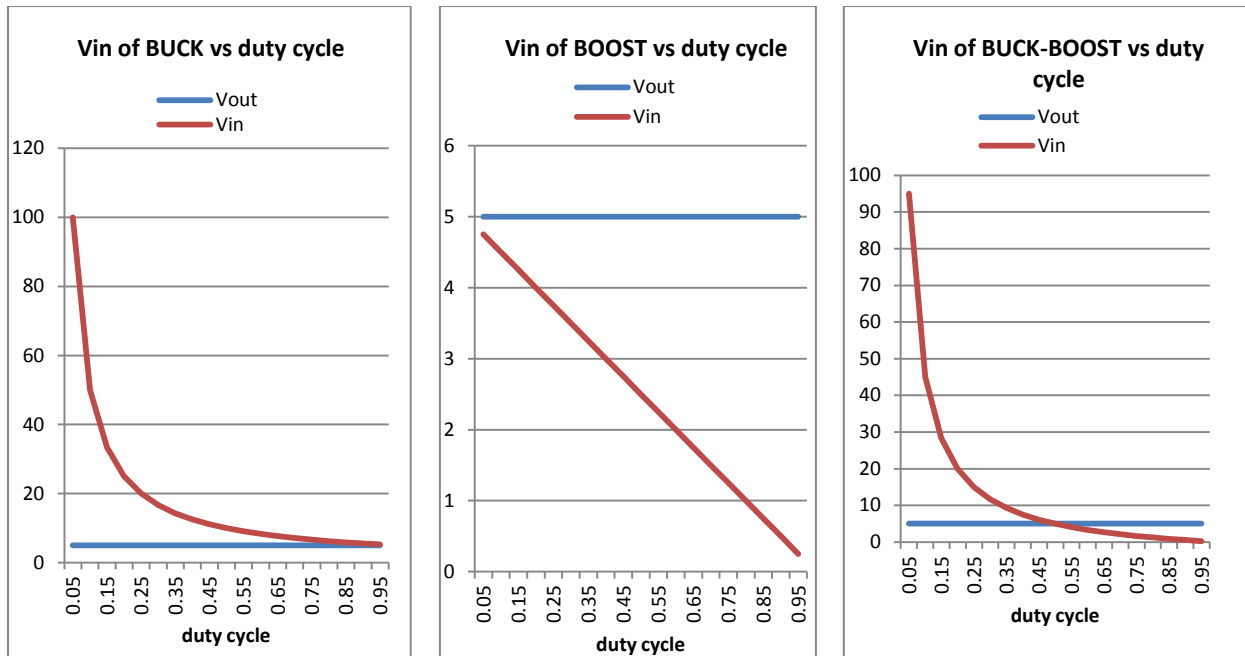
将电源看做一个黑盒，它的输入是 V_{in} ，开关频率是 f ，输出是 V_{out} ，输出电流是 $I_{load} = \frac{V_{out}}{R_{Load}}$ 。应用当中由于电源的负反馈作用， V_{out} 可以保持不变（恒压源），这样分析电源的变化规律就方便一些。 V_{in} 和 f 的变化会引起电源内部的调节，以维持 V_{out} 和 I_{load} 不变。所以理解 V_{in} 、 f 跟电源内部参数的变化规律至关重要。

1)、先看一下 V_{in} 和占空比 D 的关系。

回顾一下 4.1 节前的内容，根据伏秒定理得到 V_{in} 和 V_{out} 、 D 的公式：

类型	输出电压
BUCK	$V_o = V_{in} * D$
BOOST	$V_o = V_{in} / (1 - D)$
BUCK-BOOST	$V_o = V_{in} * D / (1 - D)$

从公式可以看出 V_{in} 只跟 V_{out} 和 D 有关，跟开关频率 f 无关。我们将这个关系绘制出曲线更为直接，根据一般应用可以固定 $V_{out} = 5V$ ， D 从 0.05 线性变化到 0.95，用电子表格计算 V_{in} 的变化，然后将 V_{in} 作为 Y 轴， D 作为 X 轴绘图：

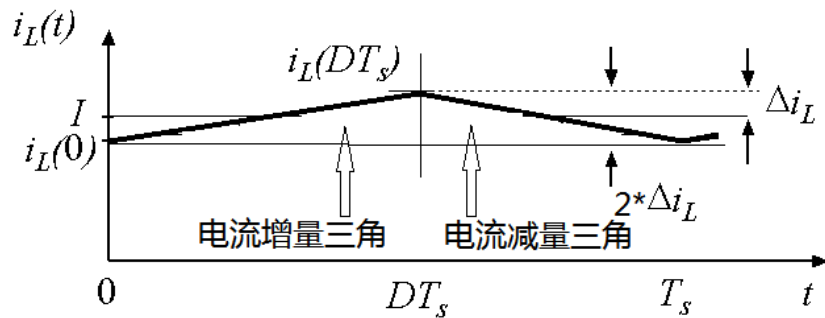


从图中可以看出 V_{in} 跟 D 成反比，虽然变化的速率不同，但是变化的趋势是一致的。图中 V_{in} 随 D 的变化规律也有各自的特点。

- 对于 BUCK 电路，当 V_{in} 很高的时候需要电路能提供很小的 D 以维持 V_{out} 的恒定，所以对于 BUCK 电路芯片，如果允许的输入电压范围越宽，则芯片的占空比调节能力越强。输入电压范围同时跟芯片的最高耐压有关。
- 对于 BOOST 电路，当 V_{in} 小于 V_{out} 较多时，需要电路提供较大的 D 才能满足升压需要。所以输入电压范围越宽，芯片占空比调节能力越大。
- 对于 BUCK-BOOST 电路，在 $D=0.5$ 时， $V_{in}=V_{out}$ 。 D 大于 0.5 则工作在升压， D 小于 0.5 则工作在降压。

2)、分析一下 ΔI 随 V_{in} 变化规律。

先回顾一下 4.3 小节中分析 ΔI 的过程，其中是用 BUCK 举例分析。基本原理就是 $2 * \Delta I = \text{充电斜率} \times \text{充电时间}$ 。细心的读者可以发现 $2 * \Delta I$ 也等于放电斜率 \times 放电时间。这是因为电感在开关电源稳定工作的时候，吸收的能量等于释放的能量。 ΔI 重要的原因是 ΔI 是叠加在直流电流 I_{DC} 上的分量，它的峰值影响到电流最大值，也就是影响到开关电源中元件的最大电流选取。



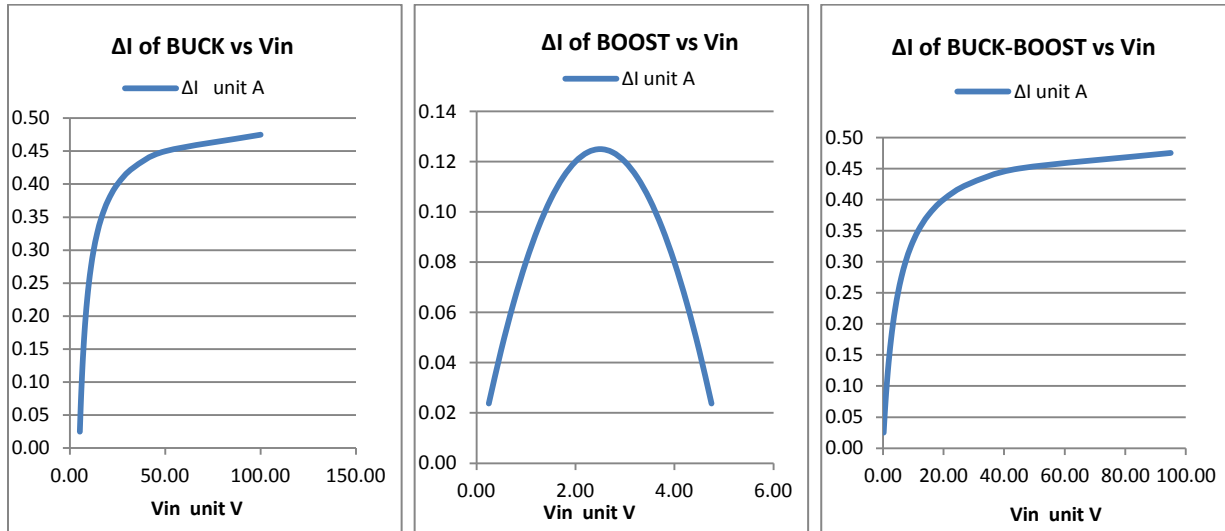
在电感 L 两端加恒压时，电感中的电流以固定斜率增加，同理电感中的电流以固定斜率释放时，产生恒定电压。这个原理跟电容相似，电容给予恒定电流时，电容上的电压以固定斜率增加，电容上的电压以固定斜率放电时，电容产生恒定电流输出。电感和电容的对偶特定在电源分析中很有帮助。（开关电源频率 f ，占空时间分别为 $D \times 1/f$ ， $(1-D) \times 1/f$ ）

ΔI 求解表格			
Topology	BUCK	BOOST	BUCK-BOOST
Circuit			
充电周期电感电流斜率	$\frac{V_{in} - V_{out}}{L}$	$\frac{V_{in}}{L}$	$\frac{V_{in}}{L}$
放电周期电感电流斜率	$\frac{V_{out}}{L}$	$\frac{V_{out} - V_{in}}{L}$	$\frac{V_{out}}{L}$
充电时间	$D \times 1/f$	$D \times 1/f$	$D \times 1/f$
放电时间	$(1-D) \times 1/f$	$(1-D) \times 1/f$	$(1-D) \times 1/f$
$\Delta I = 0.5 \times \text{充电斜率}$	$\Delta I = 0.5 * \frac{V_{in} - V_{out}}{L} * D \times 1/f$	$\Delta I = 0.5 * \frac{V_{in}}{L} * D \times 1/f$	$\Delta I = 0.5 * \frac{V_{in}}{L} * D \times 1/f$

×充电时间			
伏秒原理	$V_{out}=V_{in}*D$	$V_{out}=V_{in}/(1-D)$	$V_{out}=V_{in}*D/(1-D)$
用伏秒原理消去 ΔI 中的 D	$\Delta I = 0.5 * \frac{V_{in}-V_{out}}{L} * \frac{V_{out}}{V_{in}} \times 1/f$	$\Delta I = 0.5 * \frac{V_{in}}{L} * \frac{V_{out}-V_{in}}{V_{out}} \times 1/f$	$\Delta I = 0.5 * \frac{V_{in}}{L} * \frac{V_{out}}{V_{in}+V_{out}} \times 1/f$

(注：从 ΔI 的公式可以看出，f在分母上，当其他变量不变化时，增大f可以减小 ΔI ，也就是提高开关频率可以使输出电压纹波变小)

从公式中很难直观看出 ΔI 的变化规律，所以我们在理解了公式推导后，就需要借助图表的方法画出曲线来分析规律，直观的看出变化趋势。将 $V_{out}=5V$ ，开关频率 $f=1MHz$ ， V_{in} 作为X轴， ΔI 作为Y轴，绘图。

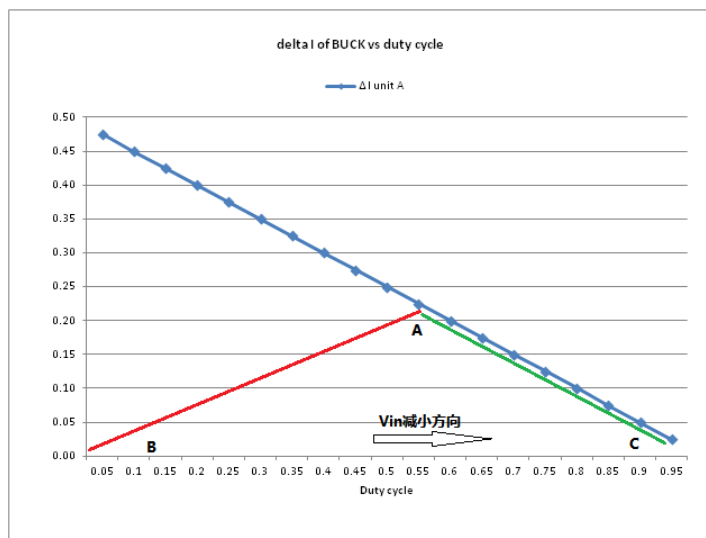


从图中可以看出 ΔI 的变化规律

- 对于BUCK和BUCK-BOOST电路， ΔI 随 V_{in} 的增加而增加。这说明 V_{in} 的增加会使电流波动增加。
- 对于BOOST电路， ΔI 随 V_{in} 的增加有从小到大再到小的过程，所以在 V_{in} 处于中间电压时（ $D=0.5$ ）电流波动最大。

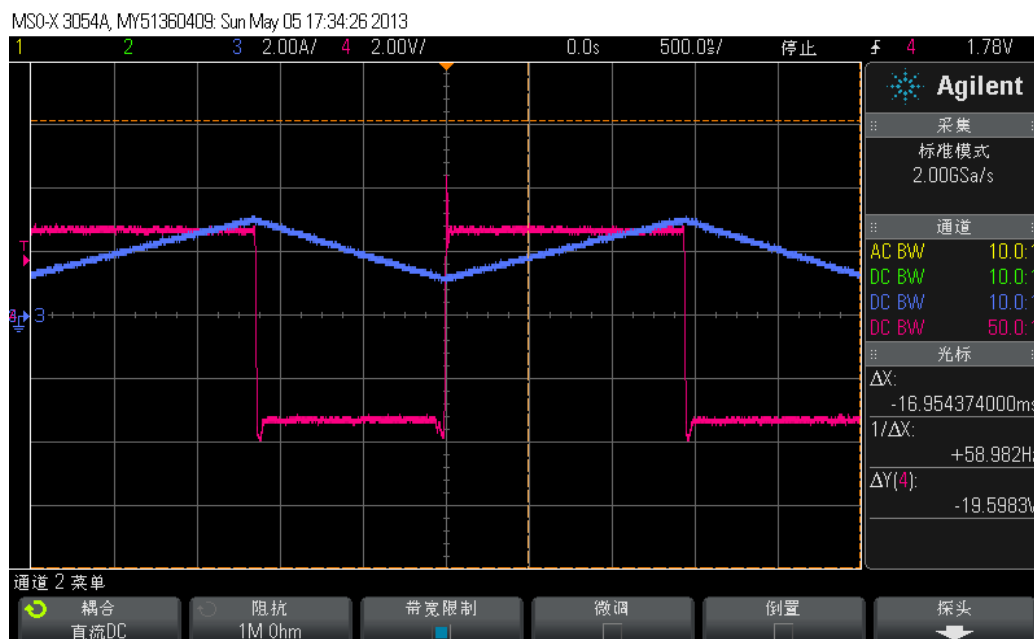
3)、分析 ΔI 和D的变化关系

在求解 ΔI 的表格中，如果利用伏秒原理将 V_{in} 消去，就可以得到 ΔI 和D的关系，绘制曲线如下，这个曲线有用的地方在于横坐标是D，占空比 $D*开关周期T$ 就变换到时间，就相当于X轴是时间。这样Y轴电流I的变化量的斜率就是电感L的充电和放电速率（电流变化量=电流斜率*时间）。例如下图BUCK电源的 ΔI 和D曲线：

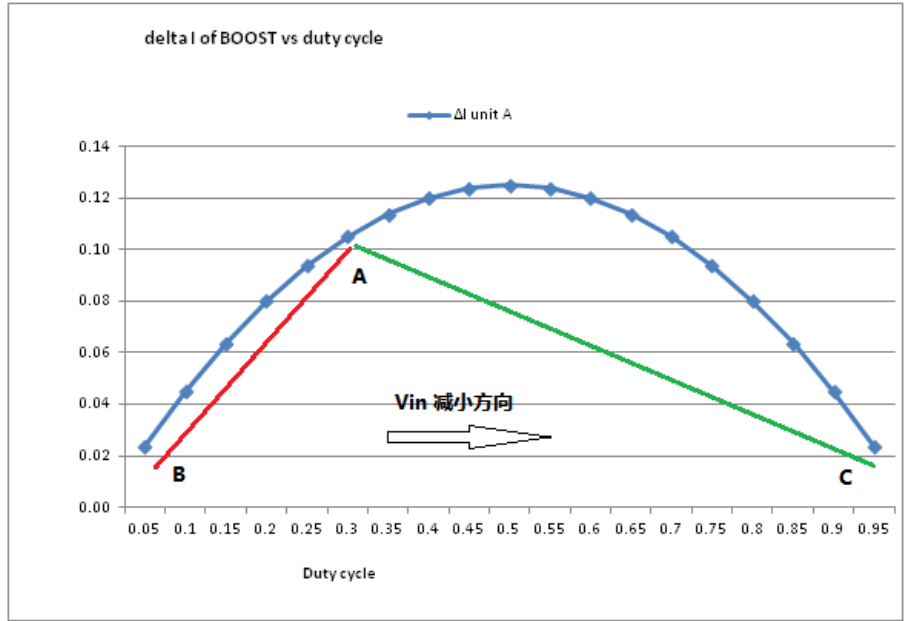


AB 段对应 X 轴的 D，AC 段对应 (1-D)，AB 段就是 L 的充电速率，AC 段就是 L 的放电速率，可以看出 AC 段的斜率是不变的，也就是 V_{out} 恒定（BUCK 放电速率 = $\frac{V_{out}}{L}$ ， V_{out} = 放电斜率 * L）。AB 段随着 A 点位置变化（也就是 D 变化），AB 段的斜率从大到小变化。结合前面 V_{in} 和 D 的曲线图可以看到： **V_{in} 和 V_{out} 越接近，充电斜率越小，并且 ΔI 越小。**

这个曲线的另一个有用之处在于，它上面画出的折线跟用示波器测试电感电流的交流分量是一致的，反应的就是 ΔI 随时间的变化。一副 BUCK 电源的电感电流实测图如下，方波是 MOSFET 的 V_{ds} 电压，用于标明占空比 D，三角形的是电感电流波形，其中的直流分量是 I_{DC} 后面小节会讲到。（读者可以用示波器实测一下，当改变 V_{in} 时，占空比 D 变化，但是放电斜率不变。）

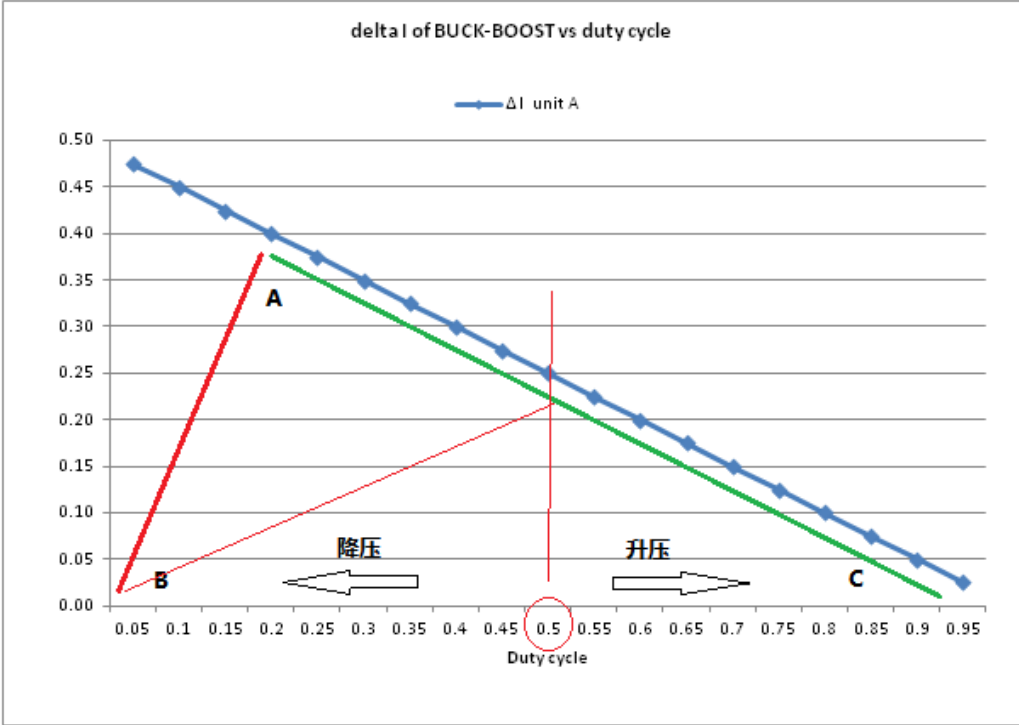


再看一下 BOOST 的 ΔI 和 D 关系曲线。跟 BUCK 的绘制方法类似，如下图:



图中画出 AB 和 AC 折线，这里的折线斜率也是 L 的充电和放电斜率。由于 BOOST 的电路结构，放电斜率不恒定（公式见前面表格， $V_{out} = \text{放电斜率} \cdot L + V_{in}$ ）。同理折线跟用示波器观察 L 的交流分量一致。

最后看一下 BUCK-BOOST 的 ΔI 和 D 关系曲线，参考前面 BUCK-BOOST 电路结构和公式表格，电感充电时跟 V_{in} 相连，充电斜率 $\frac{V_{in}}{L}$ ，放电时电感和负载相连，放电斜率 $\frac{V_{out}}{L}$ 。所以 AB 端的斜率表示 V_{in} 电压，AC 端的斜率表示 V_{out} 。



在 $D=0.5$ 时, $V_{in}=V_{out}$, 两直线斜率相等。0.5 右边 AB 斜率小于 AC 斜率, 即 $V_{in}<V_{out}$ 是升压功能。同理小于 0.5 的部分是降压。可以看到通过图形分析 BUCK-BOOST 电路特点一目了然。

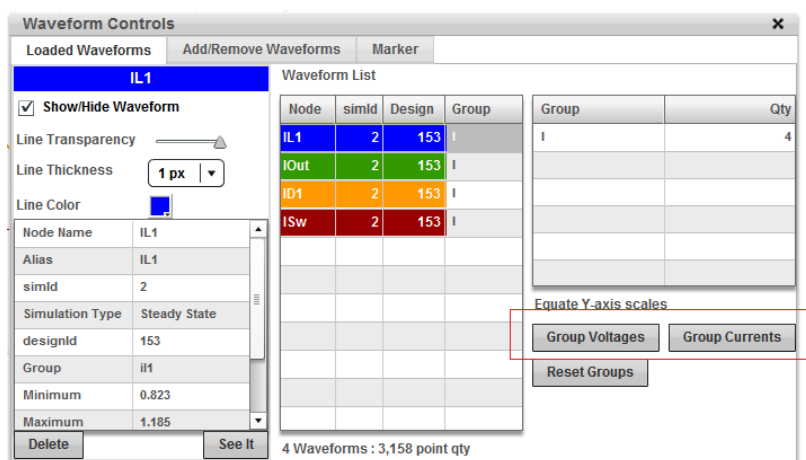
4)、电流直流分量 I_{DC} 分析

分析完了交流分量 ΔI , 再来看看直流分量 I_{DC} 。 I_{DC} 分量十分重要, 因为 $I_{DC} + \Delta I$ 可以得到电流的峰值。在分析 I_{DC} 前, 我们先看看输出电容 C_{out} 的影响。由于 V_{out} 恒定, 所以 C_{out} 流入的电流和流出的电流相同, 也就是说 C_{out} 提供的电流只影响输出电流的交流分量, 对电流直流分量的贡献为零。

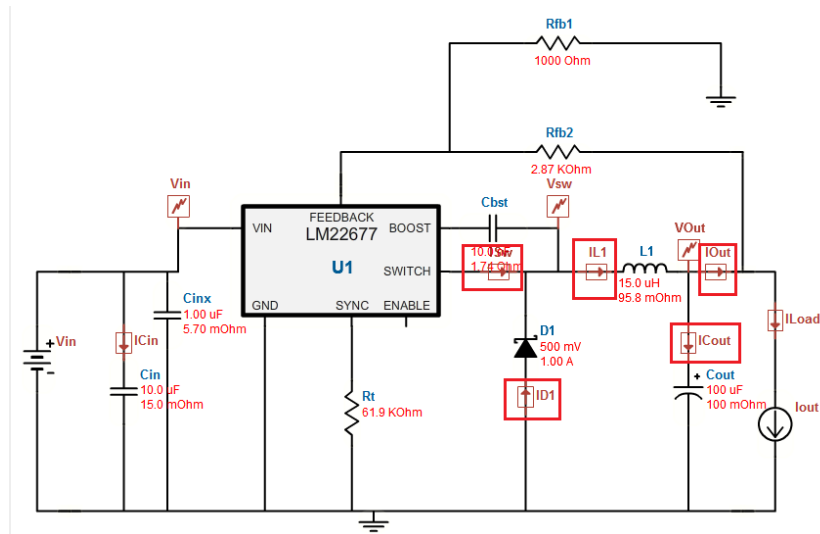
在推导 I_{DC} 前, 先看看电感, MOSFET, 二极管中的电流, 以及负载电流 I_{out} 和输出电容电流 $I_{C_{out}}$ 。通过直观的认识这些电流的关系, 帮助读者更好的理解负载电流 I_{out} 和 I_{DC} 的关系, 以及那些元件需要承受 I_{DC} , I_{DC} 随 V_{in} 变化的关系。

LM22677 是一款典型的 BUCK 开关电源, 其内部集成了 MOSFET, 外部接电感、电容和二极管即可工作。我们以 LM22677 为例, 在 WEBENCH 中进行仿真, 观察这些电流的变化关系。WEBENCH 仿真工具的使用请参考第六章。下面仅对关键步骤截图说明。

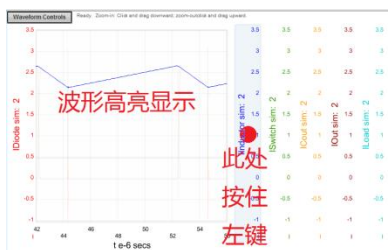
在 WEBENCH 的稳态仿真中添加各波形后, 需要对 Y 轴坐标进行统一, 这样方便观察波形间的幅度联系。打开 “wave controls” 菜单, 在 “loaded waveforms” 中点击 “group voltages” “group currents” 对 Y 轴坐标统一刻度。如下图:



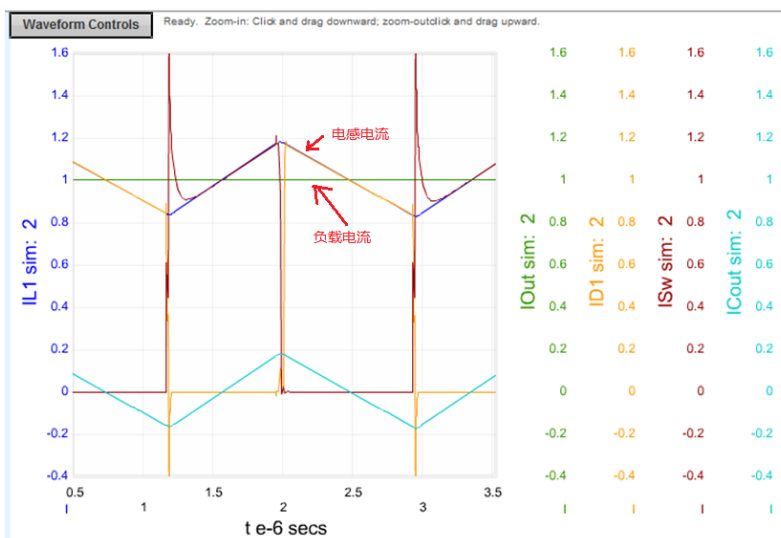
LM22677 原理图如下, 在进行完 “稳态仿真后” 双击方框中的测试点即可添加波形到显示窗口。



本例中添加了几个关键的电流波形。读者有兴趣的话可以再添加其他测试点观察。双击测试点后，波形以先后顺序显示在窗口中。（在波形名称上按住左键，相应波形会高亮显示，用于波形重叠的时候）



仿真电流波形如下图：（纸质版不清楚的可以参看电子版的彩色图）



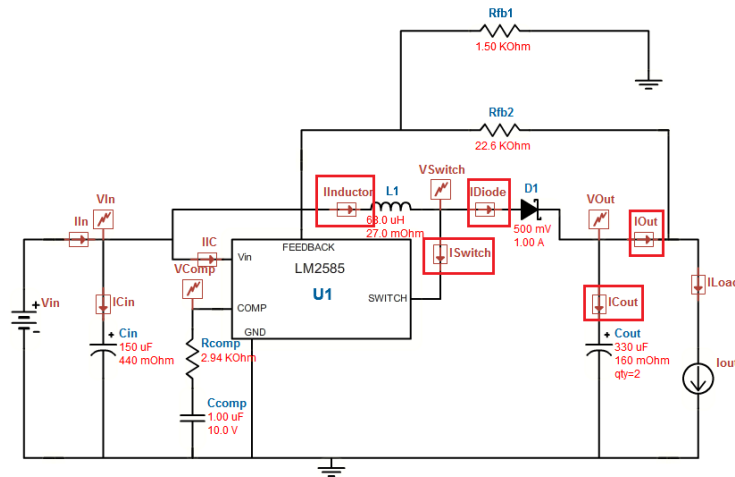
Iout 是负载电流，ID 是二极管电流，ISW 是 MOSFET 电流，ICout 是输出电容电流

从图中可以看到负载电流在电感 i_L 波动的中间。也就是负载电流 I_{out} =电感的直流分量 I_{DC} 。这是因为BUCK电路结构将L连接到输出端。L的充电和放电时的电流都会传递到输出端。所以电感电流直流分量 I_{DC} 等于 I_{out} 。

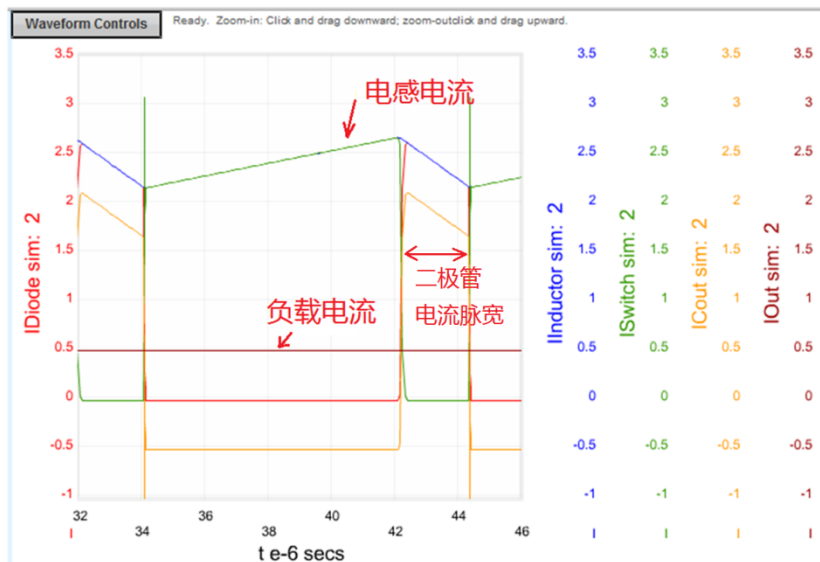
另外图中电容电流 i_C 的正向电流面积和反向电流面积相同，也就是流入电容电流和流出相等，输出电容对 I_{out} 的直流分量不影响。

图中跟电感L电流曲线重合部分是ISW和ID电流，ISW在D内给电感充电，ID在1-D内给电感提供放电路径，一个电流存在时另一个电流为零。所以ISW和ID电流组合起来就得到电感电流。

再看一下BOOST电路中的电流情况。LM2585是一款典型的BOOST电路，内部集成了MOSFET，外部接电感、电容和二极管就可以工作。进行稳态仿真后，同样将下图方框中的电流测试点加入波形显示。



依次加入关键电流后的仿真波形如下图：



图中可以看到负载电流远低于电感电流直流分量 I_{DC} 。这是因为 BOOST 电路结构将二极管跟负载相连，二极管的脉冲电流直流分量提供给 I_{out} 。所以二极管电流脉宽 $(1-D)$ 越窄，所需的 I_{DC} 越大。从二极管的脉冲电流面积跟 I_{out} 面积相等可以得出

$$I_{out} = (1 - D) * I_{DC}$$

另外从 I_{Cout} 电流可以看出，在电感充电期间 (D) 内， I_{Cout} 等于 I_{out} (图中-0.5)，此时电容放电；在电感放电期间 $I_{Cout} = I_D - I_{out}$ ，电容充电。电感充电期间的能量完全由 C_{out} 提供，所以可以看到 C_{out} 中的电流流动比 BUCK 电路大得多，也就是对于 BOOST 电路， C_{out} 要承受更大的应力。

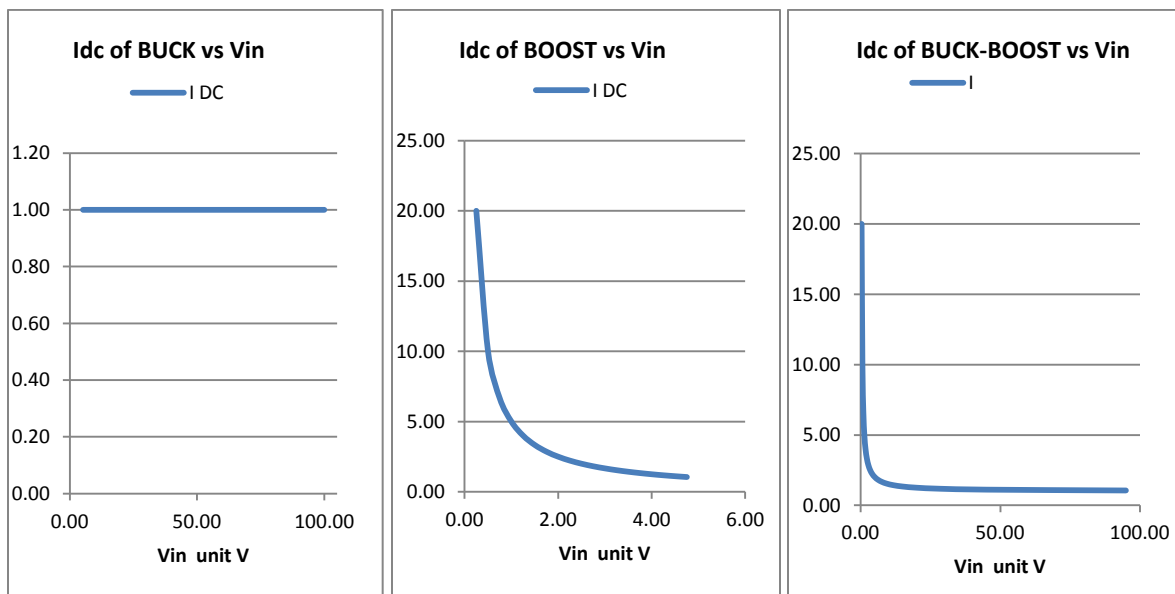
BUCK-BOOST 电源与 BOOST 类似，都是二极管作为输出电流开关，可以得到跟 BOOST 相同的结果

$$I_{out} = (1 - D) * I_{DC}$$

通过上面的分析，我们直观的了解了 I_{DC} 的变化规律。将 I_{DC} 和 I_{out} 的关系汇总在表格中

类型	I_{DC} 和 I_{out} 的关系
BUCK	$I_{out} = I_{DC}$
BOOST	$I_{out} = (1 - D) * I_{DC}$
BUCK-BOOST	$I_{out} = (1 - D) * I_{DC}$

现在将 I_{DC} 跟 V_{in} 的关系绘制为曲线图，如下 ($V_{out}=5V$, $I_{out}=1A$, 用伏秒定理将公式中的 D 用 V_{in} 和 V_{out} 代替，即可画出 V_{in} 和 I_{DC} 曲线图)：



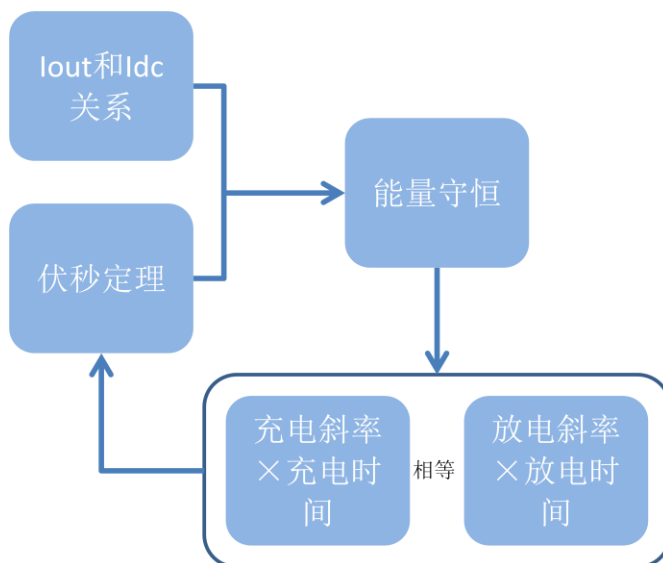
从图中可以看到 BUCK 电路中， I_{DC} 不随 V_{in} 变化。BOOST 和 BUCK-BOOST 中的 I_{DC} 随 V_{in} 增大而减小，参考之前分析的 V_{in} 和 D 的关系，这是因为 V_{in} 增大后 D 减小，二极管的脉宽 $1-D$ 增大，面积增大， I_{out} 不变时 I_{DC} 降低。

5)、开关电源中的功率分析

前面的分析中我们了解了伏秒定理以及 I_{out} 和 I_{DC} 的关系，这里用这两个规律推导一下 P_{in} 和 P_{out} 的关系。

	BUCK	BOOST	BUCK-BOOST
I_{out} 和 I_{DC} 的关系	$I_{out} = I_{DC}$	$I_{out} = (1 - D) * I_{DC}$	$I_{out} = (1 - D) * I_{DC}$
V_{in} 接入电源时间	$D * T$	T	$D * T$
V_{out} 输出时间	T	T	T
输入功率 P_{in}	$V_{in} * I_{DC} * D * T$	$V_{in} * I_{DC} * T$	$V_{in} * I_{DC} * D * T$
输出功率 P_{out}	$V_{out} * I_{out} * T$	$V_{out} * I_{out} * T$	$V_{out} * I_{out} * T$
伏秒定理	$V_{out} = V_{in} * D$	$V_{out} = V_{in} / (1 - D)$	$V_{out} = V_{in} * D / (1 - D)$
输出功率 (将伏秒定理代入)	$V_{in} * D * I_{out} * T$	$V_{in} / (1 - D) * I_{out} * T$	$V_{in} * D / (1 - D) * I_{out} * T$
输出功率 (将 I_{out} 代入)	$V_{in} * D * I_{DC} * T$	$V_{in} * I_{DC} * T$	$V_{in} * D * I_{DC} * T$
结果	$P_{in} = P_{out}$	$P_{in} = P_{out}$	$P_{in} = P_{out}$

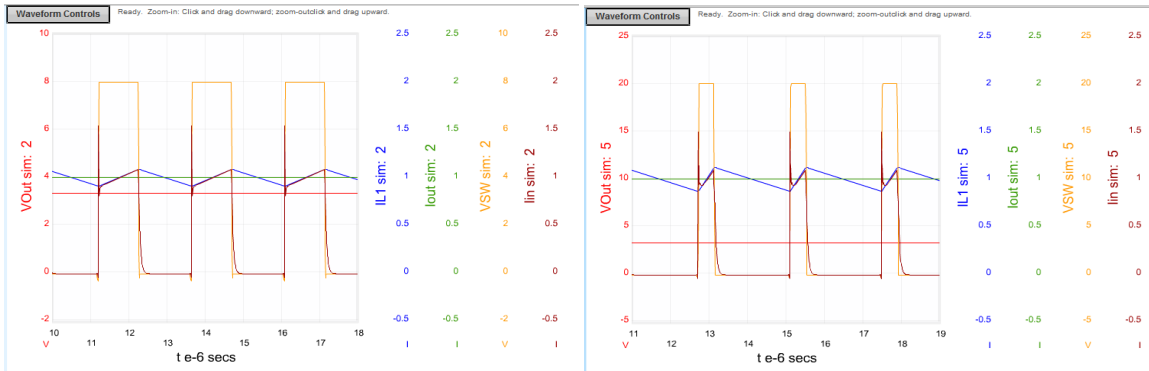
从这个表格推导过程可以看出，这些物理关系的最终情况都是能量守恒（理想器件，不计损耗情况下）。所以在学习电源的过程中，把握住能量的流动方向、流动规律是学好电源的捷径。



6)、WEBENCH 仿真验证

用 WEBENCH 仿真工具来看一下 I_{DC} 随 V_{in} 的变化情况，对前面的分析做一下验证。考虑到 BUCK-BOOST 跟 BOOST 的情况类似，这里用 BUCK 和 BOOST 电路来仿真。

用 BUCK 电路仿真

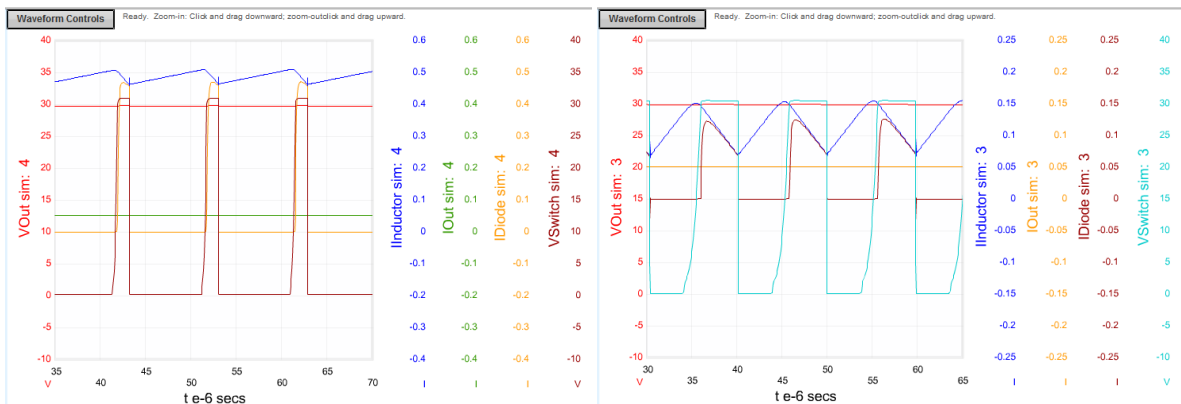


IL 电感电流，Iout 负载电流，VSW 为 MOSFET 源极电压，Iin 输出电流

	Vin	Vout	L uH	F kHz	delta I A	I_{DC} A	I_{out} A
左图	8	3.3	27	324	0.171	1	1
右图	20	3.3	27	324	0.247	1	1

可以看到 V_{in} 变化后 I_{DC} 不变，但是 ΔI 变大，这跟之前的分析一致。

用 BOOST 电路仿真



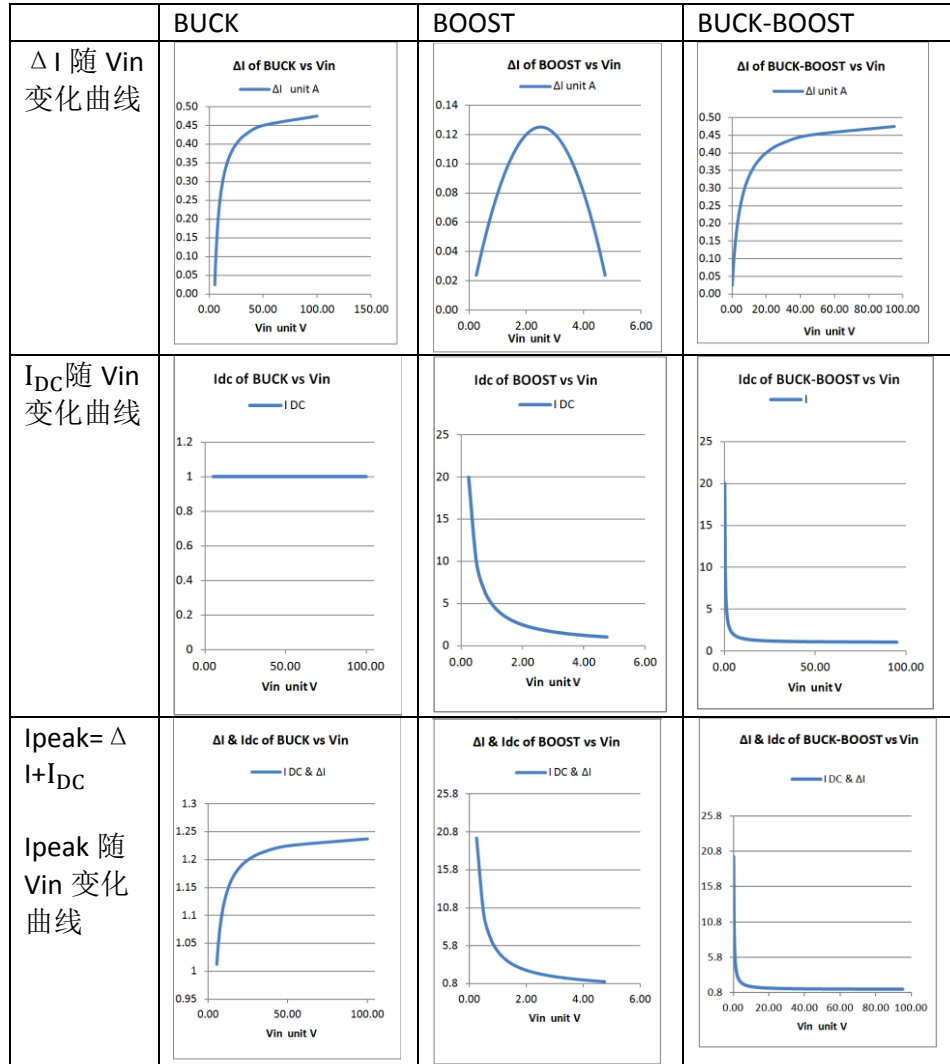
IL 电感电流，Iout 负载电流，VSW 为 MOSFET 源极电压，Iin 输出电流

	Vin	Vout	L uH	F kHz	delta I A	I_{DC} A	I_{out} A
左图	5	30	820	100	0.044	0.48	0.05
右图	15	30	820	100	0.086	0.12	0.05

可以看到 V_{in} 变大后 I_{DC} 减小， ΔI 变大 ($V_{in}=15V$ 时 $D=0.5$ ， ΔI 最大)，这跟之前的分析一致。

7)、总结

通过本节分析，读者可以看到图表的重要性，更能帮助工程师找到电源参数变化的规律。并且结合仿真工具 WEBENCH，对电源的学习起到事半功倍的效果。下面将 ΔI 和 I_{DC} 随 V_{in} 变化图放在一起，只需要看到变化趋势即可。



从 I_{peak} 随 V_{in} 变化的曲线可以看出：设计 BUCK 电路时要按照最大输入电压设计，在最大输入电压时条件最苛刻。设计 BOOST 和 BUCK-BOOST 时要按照最小输入电压设计，在最小输入电压时条件最苛刻。