

引言：DC-DC 的电感值通常我们很少计算，会直接选择手册里面推荐的值，这在通常场景下快速展开设计和选型没有问题，但是当有特别的电源需求时，就需要自己手动计算电感并选型，才能满足我们的设计指标，本节以降压 DC-DC 为例讲解如何计算并选择电感。

## 1. 降压 DC-DC 的运转环路

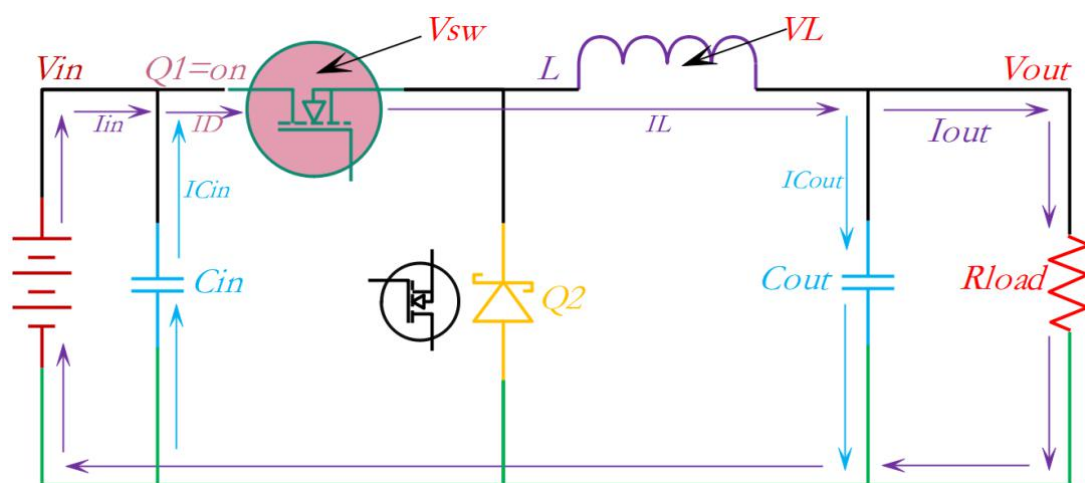


图 15-1：Q1 导通时的电流环路

如图 15-1 是在降压型 DC-DC 中，当开关器件 Q1 导通时，电流从  $V_{in}$  通过电感  $L$  给输出平滑电容  $C_{out}$  充电，并提供输出电流  $I_{out}$ 。此时电

感 L 上流过的电流会产生磁场，以此将电能变换成磁能并储存起来。

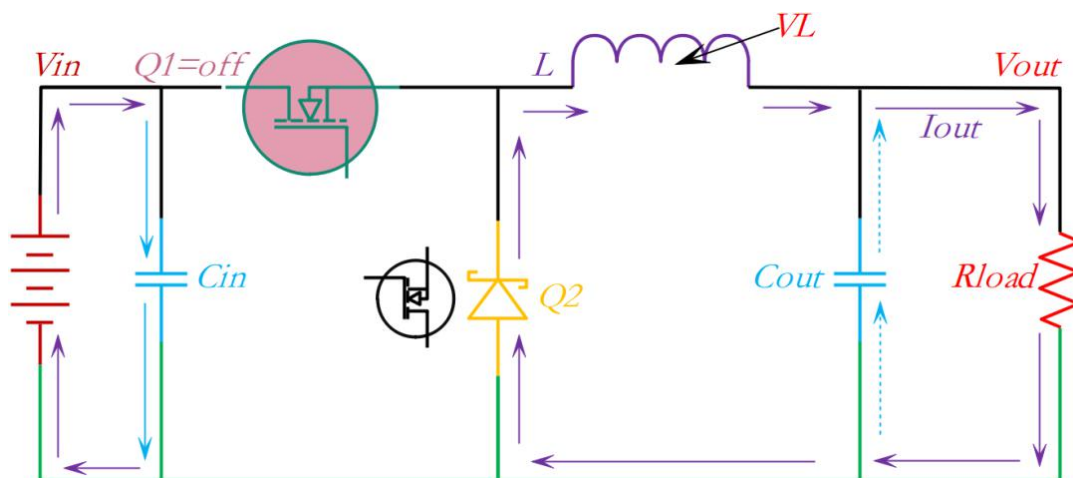


图 15-2：Q2 关断时的电流环路

如图 15-2，当开关器件 Q1 关断时，续流二极管 Q2 导通，电感 L 里储存的能量向输出侧释放。在 Q1 导通阶段 Cout 已经储满电量，Q 刚进入关断时，电感 L 反向电动势维持输出电流 Iout，而后电感能量减弱，Cout 就会开始参与放电维持 Iout，注意看电容蓝色电流虚线。

## 2.电感的电流波形

$$\textcircled{1} \quad dI_L = \frac{V_L(\text{ON})}{L} \bullet dt$$

$$\textcircled{2} \quad dI_L = \frac{V_L(\text{OFF})}{L} \bullet dt$$

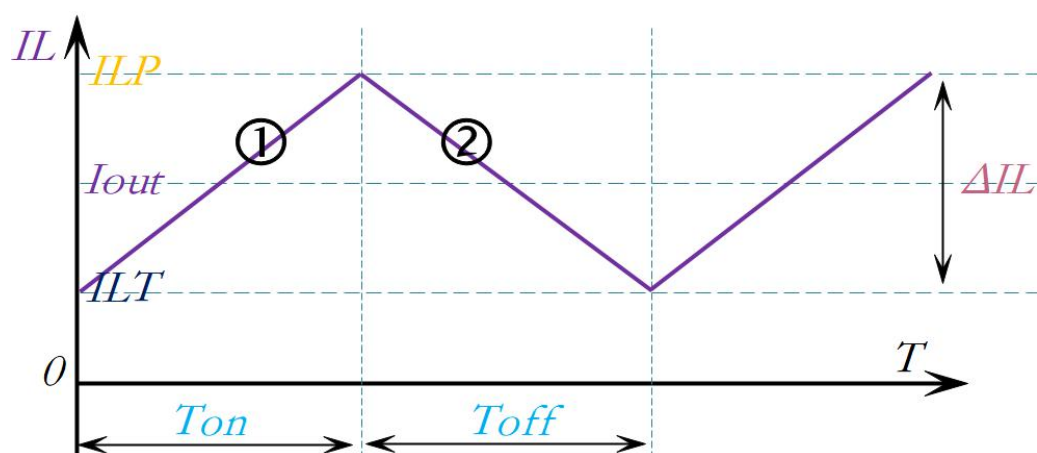


图 15-3：流经电感 L 的电流波形

如图 15-3 是流经电感 L 的电流波形， $I_{out}$  是电感电流的平均值。

图 15-1 里开关器件 Q1 导通时电感 L 流过的电流，Q1 导通 ON 的时间

$T_{on}$ ，电感 L 上施加的电压  $V_L(ON)$  用下式来表示：

$$\textcircled{1} \quad V_L(ON) = -(V_{IN} - V_{SW} - V_{OUT})$$

其中  $V_{IN}$ ：输入电压； $V_{SW}$ ：Q1 导通时的压降； $V_{OUT}$ ：输出电压

本身具有电感成分的电感 L 的电压  $V_L$  和电流  $I_L$  的关系用下式表示：

$$\textcircled{2} \quad V_L = -L \bullet \frac{dI_L}{dt}$$

由公式(2)可以判断出给电感施加一定的电压，电压和反向电流会按照

$V/L$  的斜率增加， $I_{LT}$  是开关器件 Q1 在导通之前瞬间的电流， $I_{LP}$  是开

关器件 Q1 在关断之前瞬间的电流。Ton 时间段中电感流过的电流变化量可以根据公式(1)和公式(2)表示为下面公式。

$$\textcircled{3} \quad ILP - ILT = - \frac{(V_{SW} - V_{IN} + V_{OUT}) \bullet T_{on}}{L}$$

接着我们来求开关器件 Q1 在 OFF 时电感 L 流过的电流 ,Q1 在 OFF 时 , 电感 L 上应加的电压 VL(OFF)根据图 15-2 可以表示为下面公式：

$$\textcircled{4} \quad V_{L(OFF)} = V_D + V_{OUT}$$

其中 VD：Q2 的正向压降；VOUT：输出电压

通过公式(2)和公式(4)，可以计算 OFF 时器件电感 L 的电流变化量

$$\textcircled{5} \quad ILP - ILT = \frac{(V_D + V_{OUT}) \bullet T_{off}}{L}$$

因为电感 L 流过电流的电荷量与输出电流的电荷量基本相等( 伏秒定律 )，所以下面公式成立：

$$\textcircled{6} \quad ILP + ILT = 2 \bullet I_{out}$$

用公式(3)和公式(6)可以求出 ON 时器件的 ILP：

$$\textcircled{7} \quad ILP = I_{out} + \frac{(V_{IN} - V_{SW} - V_{OUT}) \bullet T_{on}}{2 \bullet L}$$

用公式(5)和公式(6)可以求出 OFF 时器件的 ILP，下面公式成立：

$$\textcircled{8} \quad \text{ILP} = I_{\text{out}} + \frac{(V_D + V_{\text{OUT}}) \bullet T_{\text{off}}}{2 \bullet L}$$

### 3. On duty 的计算

On Duty 是相对于开关振荡周期  $T_{\text{sw}}$  , 开关器件的导通时间的比率。用

下面公式表示：

$$\textcircled{9} \quad D = \frac{T_{\text{on}}}{T_{\text{sw}}} = \frac{T_{\text{on}}}{T_{\text{on}} + T_{\text{off}}} = T_{\text{on}} \bullet f_{\text{sw}} = 1 - (T_{\text{off}} \bullet f_{\text{sw}})$$

从公式(7)、(8)、(9)可以求出  $D$  , 如下面公式：

$$\textcircled{10} \quad D = \frac{V_D + V_{\text{OUT}}}{V_{\text{IN}} - V_{\text{SW}} + V_D}$$

对于公式(10) ,如果忽略开关器件  $Q_1$  的压降  $V_{\text{SW}}$  和二极管  $Q_2$  的压降 ,

可以得到 On Duty 由输入电压和输出电压的比来决定：

$$\textcircled{11} \quad D \cong \frac{V_{\text{OUT}}}{V_{\text{IN}}}$$

### 4. 线圈电流的最大值

由公式(9)和公式(10)可以算出  $T_{\text{on}}$  如下式：

$$\textcircled{12} \quad T_{\text{on}} = \frac{D}{f_{\text{sw}}} = \frac{V_D + V_{\text{OUT}}}{(V_{\text{IN}} - V_{\text{SW}} + V_D) \bullet f_{\text{sw}}}$$

把公式(12)代入到公式(7)，可以得到电感 L 的电流最大值 ILP 如下式：

$$\textcircled{13} \quad ILP = I_{out} + \frac{(VIN - VSW - VOUT) \bullet (VD + VOUT)}{(VIN - VSW + VD) \bullet 2 \bullet L \bullet f_{sw}}$$

把公式(13)代入到公式(6)，可以得到电感 L 的电流最小值 ILT 如下式：

$$\textcircled{14} \quad ILT = I_{out} - \frac{(VIN - VSW - VOUT) \bullet (VD + VOUT)}{(VIN - VSW + VD) \bullet 2 \bullet L \bullet f_{sw}}$$

电流的变化量 (ILP - ILT) 如下式：

$$\textcircled{15} \quad ILP - ILT = \frac{(VIN - VSW - VOUT) \bullet (VD + VOUT)}{(VIN - VSW + VD) \bullet L \bullet f_{sw}}$$

由公式(13)和公式(15)可以推出最大电流和电流变化量随着电感 L 的增大、开关频率提高，电流值会减小。

## 5.电感值的计算

流过电感 L 电流的变化量 (ILP - ILT) 和输出电流 I<sub>out</sub> 的比是电流纹波比 R

$$\textcircled{16} \quad R = \frac{\Delta IL}{I_{out}} = \frac{ILP - ILT}{I_{out}}$$

把公式(15)代入到公式(16)

$$\textcircled{17} \quad R = \frac{(V_{IN} - V_{SW} - V_{OUT}) \bullet (V_D + V_{OUT})}{(V_{IN} - V_{SW} + V_D) \bullet f_{sw} \bullet L \bullet I_{out}}$$

由公式(17)求出的电感 L 值的公式如下：

$$\textcircled{18} \quad L = \frac{(V_{IN} - V_{SW} - V_{OUT}) \bullet (V_D + V_{OUT})}{(V_{IN} - V_{SW} + V_D) \bullet f_{sw} \bullet R \bullet I_{out}}$$

当输出电压 VOUT 很高的时候，公式可以简化如下：

$$\textcircled{18} \quad L = \frac{(V_{IN} - V_{OUT}) \bullet V_{OUT}}{V_{IN} \bullet f_{sw} \bullet R \bullet I_{out}}$$

要缩小 R 的话，增大电感，抑制  $\Delta I_L$  就可以了，但是电感器变大，变得不实用，所以降压型转换器通常设定在 0.2 ~ 0.5 的范围内。

## 6. 线圈能流过的最大电流

电感能流过的最大电流可以用下式求得：

$$\textcircled{19} \quad I_{Lpeak} = I_{out} + \frac{R \bullet I_{out}}{2} \quad \text{or} \quad I_{Lpeak} = I_{out} + \frac{V_{OUT} \bullet (V_{IN} - V_{OUT})}{2 \bullet V_{IN} \bullet f_{sw} \bullet L}$$

电感流过的电流是输出电流 + 纹波电流。输出短路等故障发生时，负载过渡状态中，没有软启动功能的 IC 在电源上升时，有时电感电流会超过上述计算的最大电流。在过渡状态下，电感电流可能会增加到 IC 的开关电流限制值。因此，最安全的方法不是按照大于电感电流最大值选择电感，而是选择额定饱和电流大于开关电流限制值的电感。

## 7.线圈流过的有效电流

三角波的有效值如下式表示：

$$\textcircled{20} \quad I_{Lrms} = \sqrt{\frac{I_{LP}^2 + I_{LT}^2 + I_{LP} \cdot I_{LT}}{3}}$$

把公式(13)和公式(14)代入公式(20)可以得到下列公式：

$$\textcircled{21} \quad I_{Lrms} = \sqrt{I_{out}^2 + \frac{1}{12} \cdot \left\{ \frac{(V_{IN} - V_{SW} - V_{OUT}) \cdot (V_D + V_{OUT})}{(V_{IN} - V_{SW} + V_D) \cdot L \cdot f_{sw}} \right\}^2}$$

## 8.电感计算实例

首先列出降压型转换器的动作条件

- 输入电压： $V_{IN}=12V$
- 输出电压： $V_{OUT}=3.3V$
- 输出电流： $I_{out}=2A$
- 输出电流纹波比： $R=0.3$
- 开关器件 Q1 导通时的压降： $V_{SW}=0.30$
- 续流二极管 Q2 的正向压降： $V_D=0.26$ ，同步整流的时候，按照下管开关器件 Q2 在导通时的压降进行计算。
- 开关频率： $f_{sw}=380kHz$



代入公式(18-1)和公式(18-2)，求电感的感量，由公式(18-1)得：

$$L = \frac{(12 - 0.3 - 3.3) \bullet (0.26 + 3.3)}{(12 - 0.3 + 0.26) \bullet 380000 \bullet 0.3 \bullet 2} = 10.663 \text{ uH}$$

由公式(18-2)得：

$$L = \frac{(12 - 3.3) \bullet 3.3}{12 \bullet 380000 \bullet 0.3 \bullet 2} = 10.493 \text{ uH}$$

由公式(19)计算电感的最大电流：

$$I_{Lpeak} = I_{out} + \frac{R \bullet I_{out}}{2} = 2 + \frac{0.3 \bullet 2}{2} = 2.3 \text{ A}$$

由公式(20)计算电感的额定有效电流：

$$I_{Lrms} = \sqrt{2^2 + \frac{1}{12} \bullet \left\{ \frac{(12 - 0.3 - 3.3) \bullet (0.26 + 3.3)}{(12 - 0.3 + 0.26) \bullet 10.663 \bullet 10^{-6} \bullet 380000} \right\}^2} = 2.008 \text{ A}$$

在设计的时候，选择满足计算值的电感，选择最接近的标准值 10μH。选

择的电感值和计算值有差异的时候，用公式(17)计算电流纹波值 R，把

这个值代入公式（19），再次计算线圈的最大电流：

$$R = \frac{(12 - 0.3 - 3.3) \bullet (0.26 + 3.3)}{(12 - 0.3 + 0.26) \bullet 380000 \bullet 10 \bullet 10^{-6} \bullet 2} = 0.329$$

$$I_{Lpeak} = 2 + \frac{0.329 \bullet 2}{2} = 2.33 \text{ A}$$