



Buck Training

Shawn Chen

6/14/2022

ALSH-EE-HW

Contents

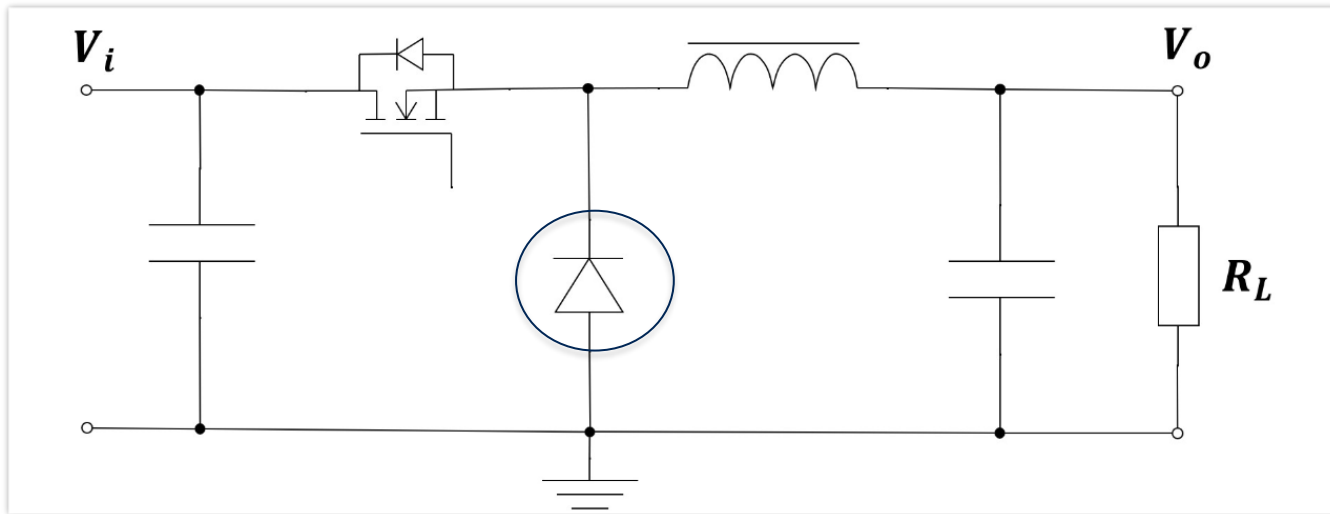


- buck的拓扑结构，工作原理
- 输入输出电容取值的推导过程，电感感量的计算过程
- boost各处电压，电流波形
- buck, boost公式汇总
- 实际电路应用情况

Buck

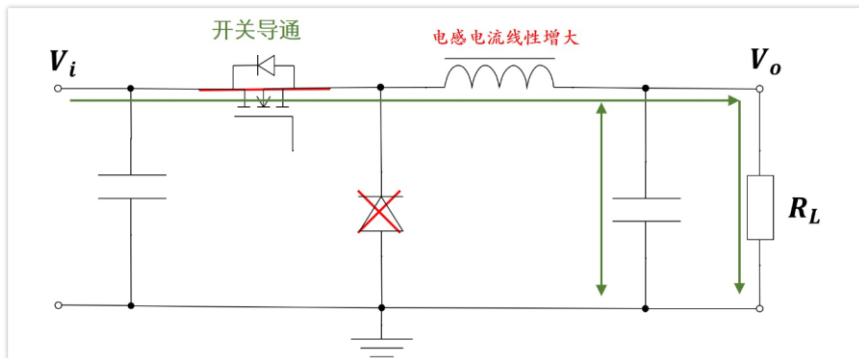
➤ 拓扑结构

Buck是直流转直流的降压电路，下面是拓扑结构，这是个异步buck，同步buck就是将里面的二极管换成MOS管。工作原理其实非常简单，图中MOS管就是一个开关，只要这个速度够快（开关频率够高），控制好导通与关断时间（电感充放电时间），配合输出滤波电容，就可以得到基本稳定的 V_o 了，也就是输出电压。

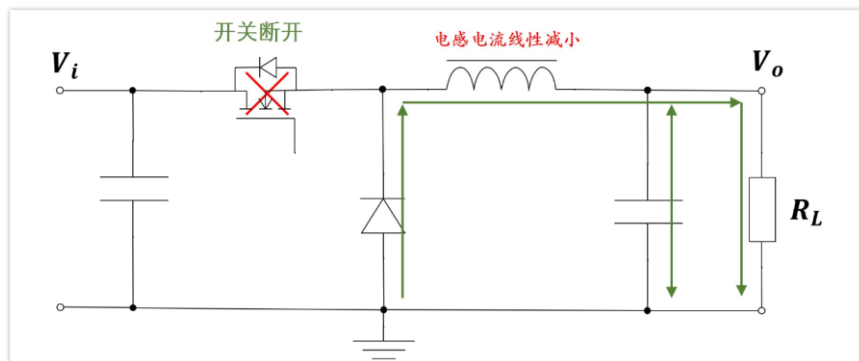


Buck

工作原理



开关导通时，二极管不导通，我们看电感，电感左边是 V_i ，右边是 V_o ，因为是降压，所以左边大于右边，那么电感两端电压是 $V_i - V_o$ ，为恒定值。如果把电感电流向右定义为正，那么电感电流是线性增大的，因为 $L \cdot di/dt = V_i - V_o$ ，那么 $di/dt = (V_i - V_o)/L = \text{常数}$ 。



开关断开时，电感要续流，会产生反向电动势，让二极管导通，二极管导通电压是 V_d 。因为二极管阳极接地，所以阴极电压是 $-V_d$ ，也就是电感左边的电压就是 $-V_d$ ，右边的电压是 V_o 不变，因此电感两端电压是 $-V_d - V_o$ 。此时电感电流是线性减小的，因为 $L \cdot di/dt = -V_d - V_o$ ， $di/dt = -(V_o + V_d)/L = \text{常数}$ ，并且是负值，所以是线性减小的。

Buck

➤ 推导公式

已知条件：

输入电压 V_i

输出电压 V_o

开关频率 f

输入纹波要求 ΔV_i

输出纹波要求 ΔV_o

负载电阻（电流） R

计算

需要计算的：

电感量 L

输入滤波电容 C_i

输出滤波电容 C_o

Buck

➤ 占空比

因为计算的基本原理其实就是电容和电感的充放电。所以，我们首先要求的就是开关导通的时间和断开的時間，或者说是占空比。

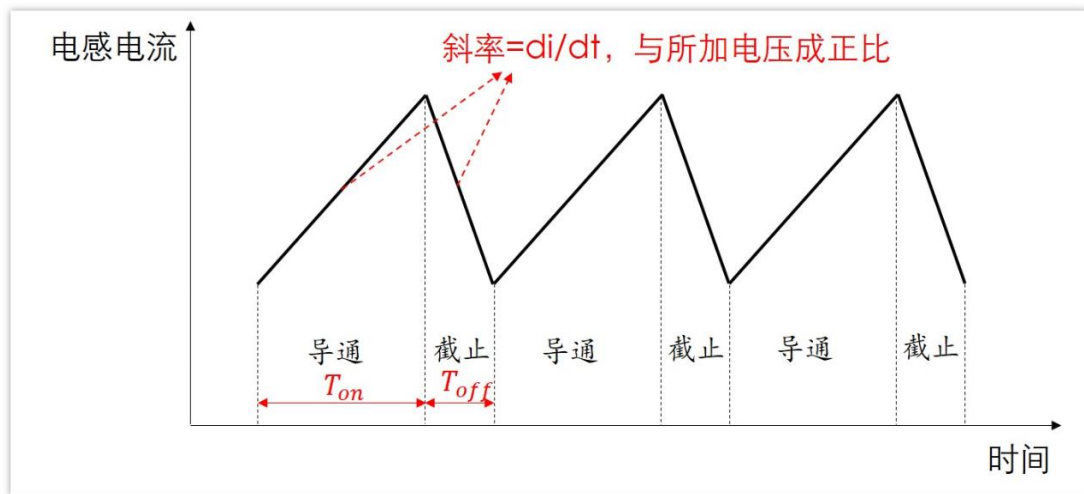
在开关导通的时候，电感两端电压是 $V_i - V_o$ 。

在开关断开的时候，输出端电压为 V_o ，二极管导通，那么电感右侧就是 V_o ，电感左侧接的是 $-V_d$ ，所以此时电感两端电压是 $V_o + V_d$ 。

整个电路稳定之后，因为负载电流恒定，那么一个周期时间之内，在开关导通时电感电流增加的量，要等于开关截止时，电感电流减小的量，即电感充了多少电就要放多少电，不然负载的电流或者电压就要发生变化。

即一个周期内，电感电流增大量等于减小量。然后又因为 $U = L di/dt$ ， $di/dt = U/L$ ， L 不变，所以电感电流变化速度与电压成正比。

简单说就是，**电感电流上升或下降的斜率与电压成正比。**



Buck

➤ 占空比

斜率与电压成正比，电感电流上升的高度与下降高度又相同，那上升时间不就和电压成反比了吗？
所以，自然就有了：

$$T_{on}/T_{off} = (V_o + V_d)/(V_i - V_o)$$

我们变换一下，就得到了的“伏秒法则”

伏秒法则：

开通时电感电压 * 开通时间 = 关断时电感电压 * 关断时间

$$V_i - V_o \quad * \quad T_{on} \quad = \quad (V_o + V_d) \quad * \quad T_{off}$$

Buck

➤ 占空比

再根据 $T = T_{on} + T_{off} = 1/f$

我们可以分别求得导通时间，关断时间，占空比。

伏秒法则：

开通时电感电压 * 开通时间 = 关断时电感电压 * 关断时间

$$\left. \begin{aligned} V_i - V_o * T_{on} &= (V_o + V_d) * T_{off} \\ \text{又已知: } T &= T_{on} + T_{off} = \frac{1}{f} \end{aligned} \right\}$$

$$\text{开通时间: } T_{on} = \frac{V_o + V_d}{V_i + V_d} * \frac{1}{f}$$



$$\text{关断时间: } T_{off} = \frac{V_i - V_o}{V_i + V_d} * \frac{1}{f}$$

$$\text{占空比: } D = \frac{T_{on}}{T} = \frac{V_o + V_d}{V_i + V_d}$$

同步buck:

令: $V_d = 0$

$$\text{开通时间: } T_{on} = \frac{V_o}{V_i} * \frac{1}{f}$$

$$\text{关断时间: } T_{off} = \left(1 - \frac{V_o}{V_i}\right) * \frac{1}{f}$$

$$\text{占空比: } D = \frac{T_{on}}{T} = \frac{V_o}{V_i}$$

如果是同步buck，那么 $V_d = 0$ ，则会见到我们经常看见的公式：

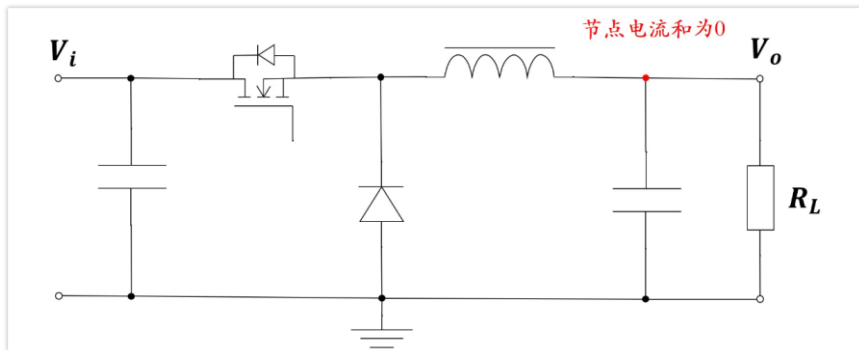
Buck

➤ 功率电感

我们电感选型首先需要考虑两个参数，电感感量和电感电流。

电感电流分为2个，平均电流 I_L 和纹波电流 ΔI_L 。

先看**平均电流**



显然，输出电压 V_o 基本不变，也就是说输出滤波电容两端电压没有变化，那么电容的平均电流为0，根据输出节点的基尔霍夫电流定律，节点电流和为0，那么电感的平均电流就等于负载的平均电流 I_o 。

即 $I_L = I_o = V_o / R$ 。

电感平均电流： $I_L = I_o$

Buck

➤ 功率电感

然后我们再来求**电感的纹波电流 ΔI_L**

从前面知道，电感电流就是个三角波，在开关导通时电感电流增大，在关断时，电感电流减小。

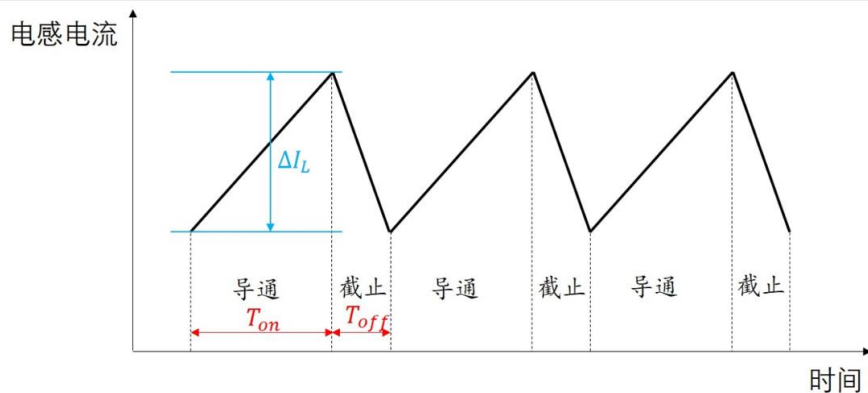
那纹波电流的大小求起来就简单了，就等于在开关导通时电感电流增大的值，也等于关断时电感电流减小的值。

我们就计算其中一个，计算开关导通时电感电流增大了多少吧。

这个也非常easy，开关导通，电感两端电压是 $V_i - V_o$ ，导通时间 T_{on} 前面已经求出来了。

根据 $U = L \frac{di}{dt}$ 就可以求出电感电流纹波 $\Delta I_L = di = U/L * T_{on}$

可以看到，电感电流的纹波跟负载电流的大小没有关系。



$$\text{开关导通时 } U = V_i - V_o \quad \text{导通时间: } dt = T_{on} = \frac{V_o + V_d}{V_i + V_d} * \frac{1}{f}$$

$$\text{根据 } U = L * \frac{di}{dt} \quad \text{则电流增大量: } di = U * \frac{dt}{L} = \frac{V_o + V_d}{V_i + V_d} * \frac{1}{f * L} * (V_i - V_o) = \Delta I_L$$

$$\text{即电流纹波: } \Delta I_L = \frac{V_o + V_d}{f * L} * \frac{V_i - V_o}{V_i + V_d}$$

$$\text{同步buck电流纹波}(V_d = 0): \quad \Delta I_L = \frac{V_o}{f * L} * \left(1 - \frac{V_o}{V_i}\right)$$

Buck

➤ 功率电感

同时呢，我们也很容易得到电感的峰值电流，就是电感的平均电流加上纹波电流的一半嘛，即
 $I_{LP} = I_L + \Delta I_L / 2 = I_o + \Delta I_L / 2$ 。

也就是：

$$\text{电感峰值电流: } I_{LP} = I_o + \frac{\Delta I_L}{2}$$

$$\text{即: } I_{LP} = I_o + \frac{V_o + V_d}{2 * f * L} * \frac{V_i - V_o}{V_i + V_d}$$

$$\text{同步buck}(V_d = 0): I_{LP} = I_o + \frac{V_o}{2 * f * L} * \left(1 - \frac{V_o}{V_i}\right)$$

计算这个峰值电流有什么用呢？

电感选型时，电感的饱和电流必须大于这个 I_{LP} ，并且要留一定的裕量。

现在我们已经写出来了电感的平均电流 I_L ，电感的纹波电流 ΔI_L ， ΔI_L 应该是 I_L 的20%-40%为宜。

即： $\Delta I_L = (0.2 \sim 0.4) * I_L$

根据这个范围，就能求得我们的电感值范围了。

$$I_L = I_o$$

$$\Delta I_L = \frac{V_o + V_d}{f * L} * \frac{V_i - V_o}{V_i + V_d}$$

$$\Delta I_L = (0.2 \sim 0.4) * I_L$$

$$L = \frac{V_o + V_d}{f * (0.2 \sim 0.4) * I_o} * \frac{V_i - V_o}{V_i + V_d}$$

$$\text{同步buck}(V_d = 0): L = \frac{V_o}{f * (0.2 \sim 0.4) * I_o} * \left(1 - \frac{V_o}{V_i}\right)$$

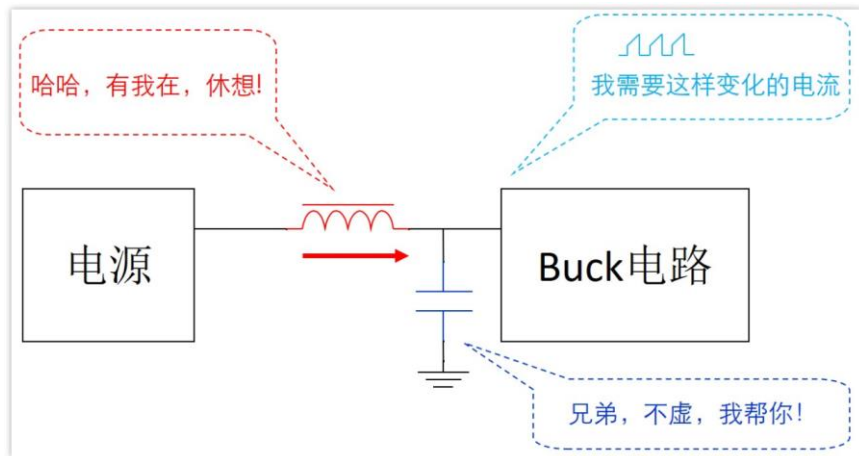
Buck

➤ 输入滤波电容

我们在确定输入滤波电容的时候，是有一个假设的，这个假设是什么呢？

输入电源默认来自远方，是没法提供快速变化的电流的。

实际应用中，输入电源可能距离很远，有了很长的走线，走线越长，寄生电感就越大，也就是说输入电源不能快速响应这个Buck输入电流的需求。



因此，我们在一个周期时间内，可以将输入电源的电流看作是恒定的，稳定状态下，这个电流也等于电源输入的平均电流 I_i ，我们先求一下电源输入的平均电流 I_i 。

Buck

➤ 输入滤波电容

怎么求电源的输入电流呢？

很简单，使用能量守恒定律就可以了。

不考虑MOS管的损耗的话，那么用耗电的器件有2个，一个是二极管，一个是负载R。

由工作原理可知，二极管只在MOS开关断开时有电流流过，其电流等于电感电流，并且一个周期内有电流流过的时间为 T_{off} ，所以二极管的平均电流也等于电感的平均电流，为 $I_L = I_o$ 。

一个周期内二极管流过电流的时间为 T_{off} ，电流为 I_L ，导通压降为 V_d 。

所以二极管的功率为：

$$P_d = V_d * I_o * T_{off} * f = V_d * I_o * (V_i - V_o) / (V_i + V_d)$$

负载的功率是 $P_r = I_o * V_o$

电源输入功率 $P_i = V_i * I_i$

根据能量守恒， $P_i = P_r + P_d$ ，可以得到输入电源的平均电流 I_i 为：

$$\text{关断时间: } T_{off} = \frac{V_i - V_o}{V_i + V_d} * \frac{1}{f}$$

$$\text{二极管功率: } P_d = V_d * I_o * T_{off} * f$$

$$\text{电源输入功率: } P_i = V_i * I_i$$

$$\text{负载功率: } P_r = V_o * I_o$$

$$\text{能量守恒: } P_i = P_r + P_d$$

$$\text{输入平均电流: } I_i = \frac{I_o}{V_i} * (V_o + V_d * \frac{V_i - V_o}{V_i + V_d})$$

$$\text{同步buck}(V_d = 0): I_i = \frac{V_o}{V_i} * I_o \quad (\text{没有考虑效率, 考虑则是: } I_i = \frac{V_o}{\eta * V_i} * I_o)$$

现在已经求出 I_i ，在一个周期内，电源的输入电流可以看成恒定值，为 I_i 。

Buck

➤ 输入滤波电容

了解了这个前提条件，我们回到目标：计算输入滤波电容的容量

我们先理清下思路，输入电压纹波就是输入电容上面的电压变化。电容上面的纹波变化可以分成两个部分。

一个是电容放电或者是充电，存储了电荷量发生了变化，这个变化会导致电压变化，可以用公式 $Q=CU_q$ 来表示， U_q 即是电压的变化。

另一个是电容有等效串联电阻ESR，电容充放电时有电流流过，电流流过ESR会产生压降，这个压降用 U_{esr} 表示吧。

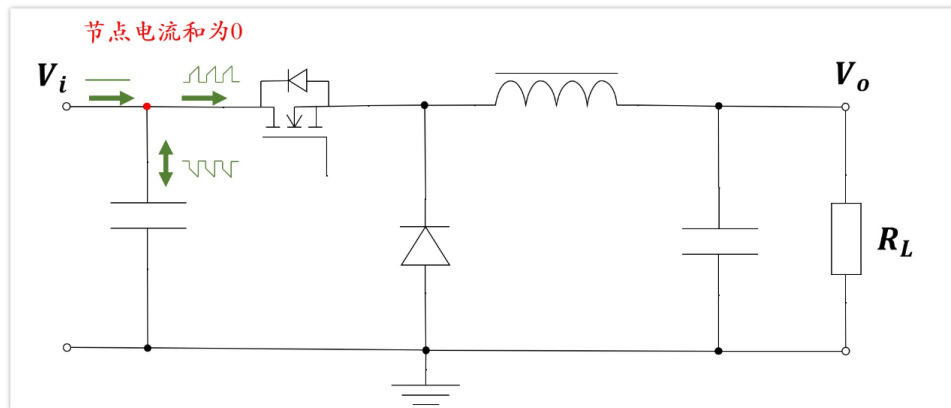
所以，电压纹波应该是： $\Delta V_i = U_q + U_{esr}$

Buck

➤ 输入滤波电容

1、电容电荷量变化引起的压降 ΔU_q

我们看输入节点，这个节点的电流有3个，一个是来自电源 V_i 输入的，前面说了，在一个周期内，它可以看作是恒定的，一个节点是电容，另外一个节点是开关。



根据基尔霍夫电流定律，节点电流和为0，并且电源输入的电流恒定为 I_i ，那么输入电容电流的变化量必然等于开关电流的变化量，因为最终3者的和为0。

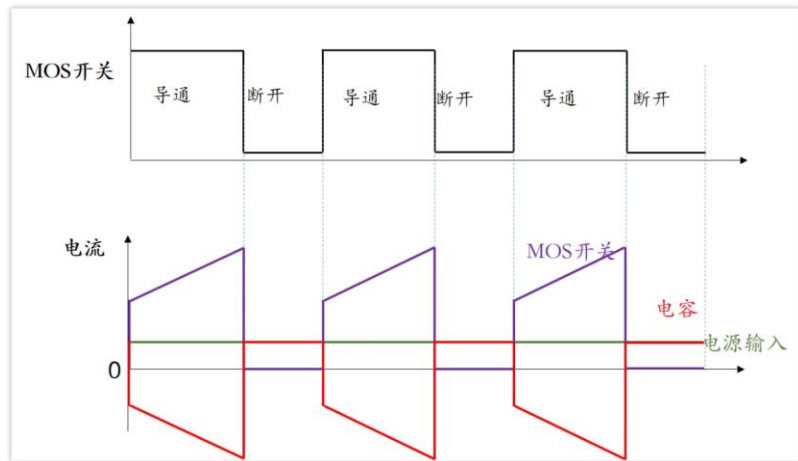
也就是说，开关断开时，开关电流为0，那么电源输入的电流全都流进输入电容，电容被充电，此时电容的充电电流为 I_i 。而开关导通时，电感需要续流，这个电流由电源输入和输入滤波电容二者共同提供，电容此时放电。

并且，开关切换的时候，开关电流是突变的。而三者电流和为0，那么电容的电流必然也是突变的。

Buck

➤ 输入滤波电容

我们画出三者的电流波形如下：



一个周期内，电容的充电电荷量和放电电荷量必然一样，我们计算出其中一个就行了。

显然，充电的时候更好计算，因为充电时开关断开，电容的电流就是电源的输入电流，是恒定的，为 I_i 。

根据 $Q=I \cdot t$ ，那么充入的电荷量为 $Q=I_i \cdot T_{off}$ ，电容充入电荷，会导致电压变大，这个电压的增量这里取个名字叫 U_q ，那么 $Q=U_q \cdot C$ ，也就是 $U_q=Q/C=I_i \cdot T_{off}/C$

最终可以求得 U_q

$$\text{充电量: } Q = U_q \cdot C_i = I_i \cdot T_{off}$$

$$\text{放电时间: } T_{off} = \frac{V_i - V_o}{V_i + V_d} \cdot \frac{1}{f}$$

$$I_i = \frac{I_o}{V_i} \cdot (V_o + V_d \cdot \frac{V_i - V_o}{V_i + V_d})$$



$$U_q = \frac{I_o}{C_i \cdot V_i \cdot f} \cdot \left(V_o + V_d \cdot \frac{V_i - V_o}{V_i + V_d} \right) \cdot \frac{V_i - V_o}{V_i + V_d}$$

$$\text{同步buck}(V_d=0): U_q = \frac{I_o}{C_i \cdot f} \cdot \frac{V_o}{V_i} \cdot \left(1 - \frac{V_o}{V_i} \right)$$

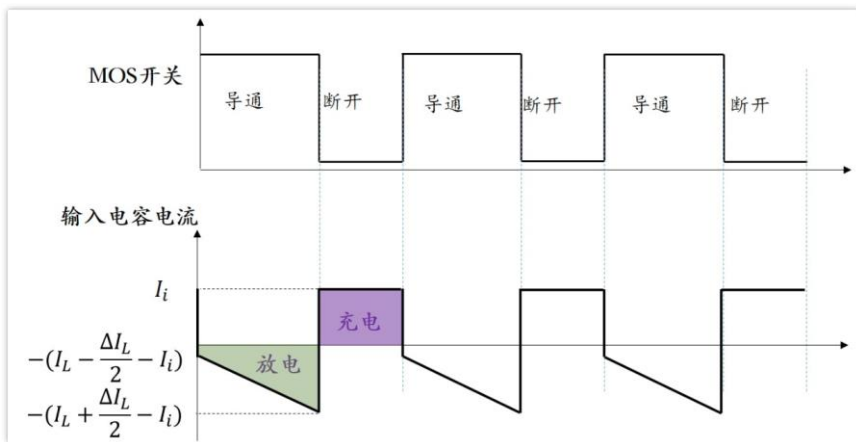
Buck

➤ 输入滤波电容

2、电流流过电容的ESR造成的压降 U_{esr}

想要知道ESR造成的纹波大小，我们只需要知道流过电容的电流就知道了，因为电压等于电流乘以ESR。

我们把电容的电流波形单独画一下。



这个波形下面解释下：

在开关断开的时候，电源输入电流 I_i 全部进入输入滤波电容，因为 I_i 恒定，因此输入滤波电容的电流就是恒定为 I_i ，此时电容充电，如果我们把充电电流定义为正，那么电流就是 $+I_i$ 。

在开关导通之后，电感原本从二极管续流，变成了从MOS管续流，因为之前电感一直在放电，所以切换时电感电流最小，等于 $I_L - \Delta I_L / 2$ ，在整个 T_{on} 时间段内，电感是被充电的，所以电感电流一直在增大，直到达到峰值电流 $I_L + \Delta I_L / 2$ 。

并且在 T_{on} 时间内，电感电流走的是MOS管通路，因此，MOS管电流最大也是 $I_L + \Delta I_L / 2$ 。根据输入节点电流和为0，这个电流等于输入电源电流 I_i 和滤波电容的放电电流，所以滤波电容的最大放电电流为 $I_L + \Delta I_L / 2 - I_i$ 。因为前面定义了充电电流为正，那么放电电流就为负，即滤波电容电流是： $-(I_L + \Delta I_L / 2 - I_i)$ 。

Buck

➤ 输入滤波电容

知道了电流，ESR，那么我们就知道了纹波大小。

在开关断开时，ESR上面产生的压降是恒定的，为： $I_i * ESR$

在开关导通后，ESR上面产生的最大压降是： $-(I_L + \Delta I_L / 2 - I_i) * ESR$

两者相减，得到的就是一个周期内ESR引起的纹波大小，也就是：

$$U_{esr} = (I_L + \Delta I_L / 2) * ESR$$

计算过程如下：

$$\left. \begin{aligned} I_L &= I_o \\ \Delta I_L &= \frac{V_o + V_d}{f * L} * \frac{V_i - V_o}{V_i + V_d} \\ U_{esr} &= \left(I_L + \frac{\Delta I_L}{2} \right) * ESR \end{aligned} \right\}$$



ESR产生的纹波电压：

$$U_{esr} = \left(I_o + \frac{V_o + V_d}{2 * f * L} * \frac{V_i - V_o}{V_i + V_d} \right) * ESR$$

$$\text{同步buck}(V_d = 0): U_{esr} = \left(I_o + \frac{V_o}{2 * f * L} * \left(1 - \frac{V_o}{V_i} \right) \right) * ESR$$

Buck

➤ 输入滤波电容

好，我们已经算出 U_{esr} 和 U_q 。

那么根据 $\Delta V_i = U_{esr} + U_q$ ，我们就可以 ΔV_o 的表达式了，如果知道 ΔV_o ，我们也能得到输入滤波电容 C_i 的大小或者是ESR了。

输入总的纹波公式：

$$\begin{cases} U_q = \frac{I_o}{C_i * V_i * f} * \left(V_o + V_d * \frac{V_i - V_o}{V_i + V_d} \right) * \frac{V_i - V_o}{V_i + V_d} \\ U_{esr} = \left(I_o + \frac{V_o + V_d}{2 * f * L} * \frac{V_i - V_o}{V_i + V_d} \right) * ESR \\ \Delta V_i = U_q + U_{esr} \end{cases}$$

↓

$$\Delta V_i = \frac{I_o}{C_i * V_i * f} * \left(V_o + V_d * \frac{V_i - V_o}{V_i + V_d} \right) * \frac{V_i - V_o}{V_i + V_d} + \left(I_o + \frac{V_o + V_d}{2 * f * L} * \frac{V_i - V_o}{V_i + V_d} \right) * ESR$$

同步buck($V_d = 0$): $\Delta V_i = \frac{I_o}{C_i * f} * \frac{V_o}{V_i} * \left(1 - \frac{V_o}{V_i} \right) + \left(I_o + \frac{V_o}{2 * f * L} * \left(1 - \frac{V_o}{V_i} \right) \right) * ESR$

这个公式看着有点复杂，有两个参数都跟电容本身有关系，ESR和容量 C_i 。

Buck

➤ 输入滤波电容

考虑到我们的电容实际使用情况

陶瓷电容ESR小，容量小， U_q 对纹波起决定作用，所以输入纹波电压可以近似为 U_q ，如果我们要限定纹波不能大于 ΔV_i ，那么 $U_q \leq \Delta V_i$ 。

铝电解电容容量大，ESR大， U_{esr} 对纹波起决定作用，所以输入纹波电压可以近似 U_{esr} ，如果我们要限定纹波不能大于 ΔV_i ，那么 $U_{esr} \leq \Delta V_i$

根据上面两点，我们就可以去选择合适的电容了。

陶瓷电容根据容量值去选

$$U_q = \frac{I_o}{C_i * V_i * f} * \left(V_o + V_d * \frac{V_i - V_o}{V_i + V_d} \right) * \frac{V_i - V_o}{V_i + V_d}$$

$$U_q \leq \Delta V_i$$

使用陶瓷电容滤波： $C_i \geq \frac{I_o}{\Delta V_i * V_i * f} * \left(V_o + V_d * \frac{V_i - V_o}{V_i + V_d} \right) * \frac{V_i - V_o}{V_i + V_d}$

同步buck($V_d = 0$)时： $C_i \geq \frac{I_o}{\Delta V_i * f} * \frac{V_o}{V_i} * \left(1 - \frac{V_o}{V_i} \right)$

铝电解电容根据ESR去选

$$U_{esr} = \left(I_o + \frac{V_o + V_d}{2 * f * L} * \frac{V_i - V_o}{V_i + V_d} \right) * ESR$$

$$U_{esr} \leq \Delta V_i$$

使用电解电容滤波： $ESR \leq \frac{\Delta V_i}{I_o + \frac{V_o + V_d}{2 * f * L} * \frac{V_i - V_o}{V_i + V_d}}$

同步buck($V_d = 0$)时： $ESR \leq \frac{\Delta V_i}{I_o + \frac{V_o}{2 * f * L} * \left(1 - \frac{V_o}{V_i} \right)}$

Buck

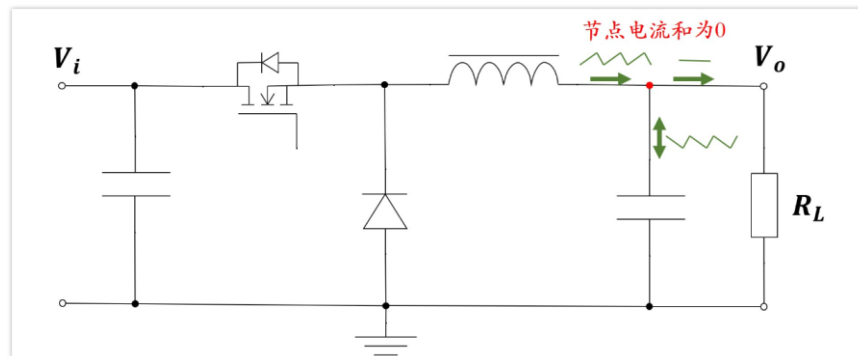
➤ 输出滤波电容

相比输入纹波 ΔV_i 大小，我们可能更关心输出纹波 ΔV_o 的大小，毕竟是要带负载的。同样，纹波由电容容量和ESR决定。

1、电容电荷量变化引起的压降 U_q

我们看输出节点，这个节点的电流有3个，一个是来自负载的，它可以看作是恒定的，为 $I_o = V_o / R_L$ ，一个节点是输出滤波电容，另外一个节点是电感。

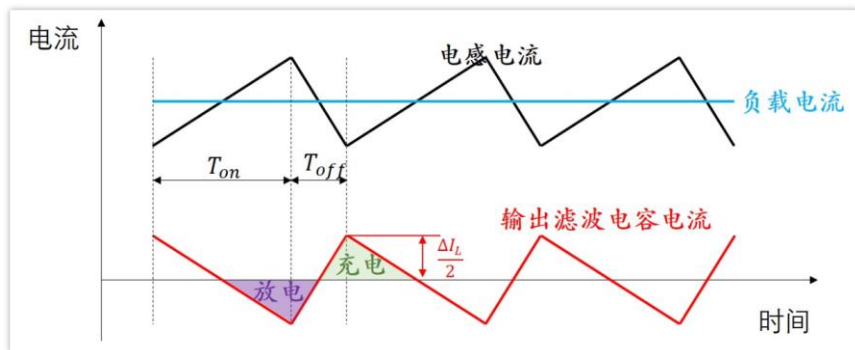
根据基尔霍夫电流定律，节点电流和为0，并且负载的电流恒定，那么电感电流的变化量必然等于电容电流的变化量，因为最终3者的和为0。



Buck

➤ 输出滤波电容

我们画出三者的电流波形如下：



根据节点电流和为0，那么输出电容的电流变化就是功率电感的电流变化（你增大时我减小，你减小时我增大）。我们从上图也可以很直观的看出来。

显然，电容电流大于0时，电容在充电，电容电流小于0时，电容在放电。并且图中也可以看到，电容充电和放电时间长度是一样的，都是周期的一半， $T/2$ 。

Buck

➤ 输出滤波电容

那充放电的电荷量是多少呢？

从前面知道，输出电容的电流变化就是功率电感的电流变化，因为电感的纹波电流是 ΔI_L ，那么电容的纹波电流也是 ΔI_L 。又因为电容的平均电流是0，所以电容的充电电流和放电电流都是 $\Delta I_L/2$ 。

需要注意，电容电流是在大于0时充电，电流小于0时放电，也就是图中阴影部分，充电与放电的切换的时刻并不是开关导通与断开的时候，而是在中间时刻。

然后电容放电/充电的总电荷量 Q 等于电流乘以时间，这不就是图中阴影三角形的面积吗？

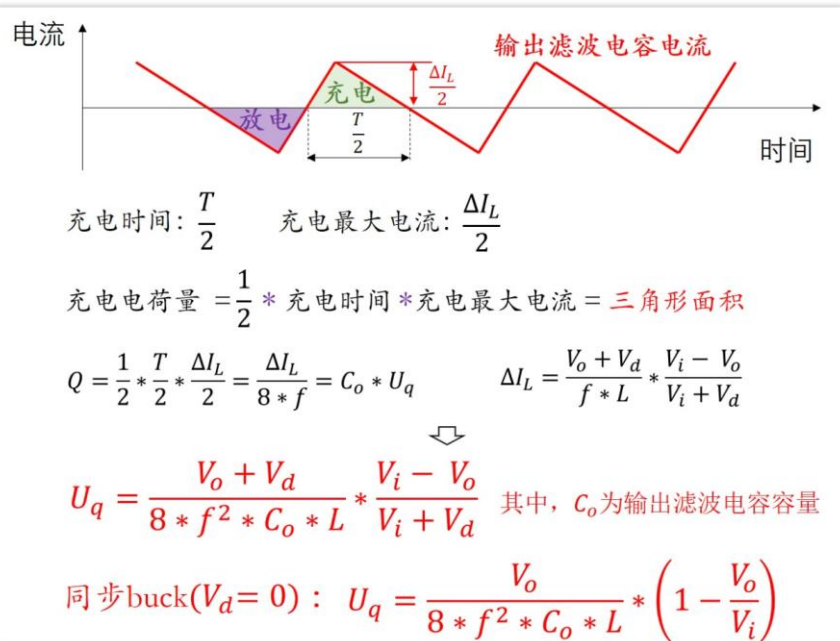
三角形底部是时间，充电/放电时间等于 $T/2$

三角形的高为电感纹波电流的一半， $\Delta I_L/2$ 。

所以总放电量 $Q=1/2 \times \text{底} \times \text{高}$

再结合 $Q=CU_q$ ，即可求得 U_q 了。

具体计算如下图所示：



➤ 输出滤波电容

2、电流流过电容的ESR造成的压降 U_{esr}

前面波形图知道，电容的充电电流最大是 $\Delta I_L/2$ ，放电电流最大就是 $-\Delta I_L/2$ ，负号表示电流方向，方向的不同，引起的压降的电压也是相反的。

那么ESR引起的总的压降是：

$$U_{esr} = \Delta I_L/2 * ESR - (-\Delta I_L/2 * ESR) = \Delta I_L * ESR$$

最终，我们求得 U_{esr} 的公式如下：

$$\Delta I_L = \frac{V_o + V_d}{f * L} * \frac{V_i - V_o}{V_i + V_d}$$

$$U_{esr} = \Delta I_L * ESR$$



$$U_{esr} = \frac{V_o + V_d}{f * L} * \frac{V_i - V_o}{V_i + V_d} * ESR$$

$$\text{同步buck}(V_d = 0) : U_{esr} = \frac{V_o}{f * L} * \left(1 - \frac{V_o}{V_i}\right) * ESR$$

Buck

➤ 输出滤波电容

好，我们已经算出 U_{esr} 和 U_q ，那么根据 $\Delta V_o = U_{esr} + U_q$ ，就可以求出总的输出纹波大小 ΔV_o 。

$$\begin{cases} U_q = \frac{V_o + V_d}{8 * f^2 * C_o * L} * \frac{V_i - V_o}{V_i + V_d} \\ U_{esr} = \frac{V_o + V_d}{f * L} * \frac{V_i - V_o}{V_i + V_d} * ESR \\ \Delta V_o = U_q + U_{esr} \end{cases}$$



$$\Delta V_o = \frac{V_o + V_d}{f * L} * \frac{V_i - V_o}{V_i + V_d} * \left(ESR + \frac{1}{8 * f * C_o} \right)$$

$$\text{同步buck}(V_d = 0): \Delta V_o = \frac{V_o}{f * L} * \left(1 - \frac{V_o}{V_i} \right) * \left(ESR + \frac{1}{8 * f * C_o} \right)$$

根据上面两点，我们就可以去选择合适的电容了。

陶瓷电容根据容量值去选

陶瓷电容ESR小，容量小， U_q 对纹波起决定作用，所以可以近似为 U_q ，如果我们要限定纹波不能大于 ΔV_o ，那么 $U_q \leq \Delta V_o$



$$U_q = \frac{V_o + V_d}{8 * f^2 * C_o * L} * \frac{V_i - V_o}{V_i + V_d}$$

$$U_q \leq \Delta V_o$$

$$\text{使用陶瓷电容滤波: } C_o \geq \frac{V_o + V_d}{8 * f^2 * \Delta V_o * L} * \frac{V_i - V_o}{V_i + V_d}$$

$$\text{同步buck}(V_d = 0) \text{ 时: } C_o \geq \frac{V_o}{8 * f^2 * \Delta V_o * L} * \left(1 - \frac{V_o}{V_i} \right)$$

铝电解电容根据ESR去选

$$U_{esr} = \frac{V_o + V_d}{f * L} * \frac{V_i - V_o}{V_i + V_d} * ESR$$

$$U_{esr} \leq \Delta V_o$$

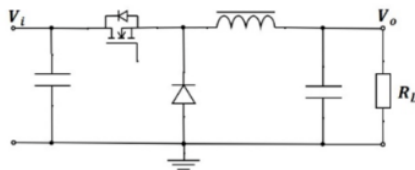
$$\text{使用陶瓷电容滤波: } ESR \leq \frac{\Delta V_o * f * L * (V_i + V_d)}{(V_o + V_d) * (V_i - V_o)}$$

$$\text{同步buck}(V_d = 0) \text{ 时: } ESR \leq \frac{\Delta V_o * f * L * V_i}{V_o * (V_i - V_o)}$$

Buck

➤ 公式汇总

异步buck



$$\text{开通时间: } T_{on} = \frac{V_o + V_d}{V_i + V_d} * \frac{1}{f}$$

$$\text{关断时间: } T_{off} = \frac{V_i - V_o}{V_i + V_d} * \frac{1}{f}$$

$$\text{占空比: } D = \frac{T_{on}}{T} = \frac{V_o + V_d}{V_i + V_d}$$

$$\text{电感平均电流: } I_L = I_o$$

$$\text{电感纹波电流: } \Delta I_L = \frac{V_o + V_d}{f * L} * \frac{V_i - V_o}{V_i + V_d}$$

电感峰值电流: (选型时饱和电流需大于这个)

$$I_{LP} = I_L + \frac{\Delta I_L}{2} = I_o + \frac{V_o + V_d}{2 * f * L} * \frac{V_i - V_o}{V_i + V_d}$$

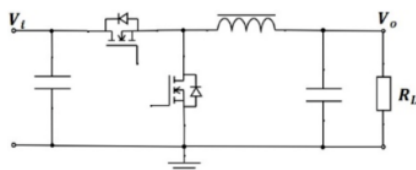
电感取值范围:

$$L = \frac{V_o + V_d}{f * (0.2 \sim 0.4) * I_o} * \frac{V_i - V_o}{V_i + V_d}$$

输入平均电流:

$$I_i = \frac{I_o}{V_i} * (V_o + V_d * \frac{V_i - V_o}{V_i + V_d})$$

同步buck



$$\text{开通时间: } T_{on} = \frac{V_o}{V_i} * \frac{1}{f}$$

$$\text{关断时间: } T_{off} = (1 - \frac{V_o}{V_i}) * \frac{1}{f}$$

$$\text{占空比: } D = \frac{T_{on}}{T} = \frac{V_o}{V_i}$$

$$\text{电感平均电流: } I_L = I_o$$

$$\text{电感纹波电流: } \Delta I_L = \frac{V_o}{f * L} * \left(1 - \frac{V_o}{V_i}\right)$$

电感峰值电流: (选型时饱和电流需大于这个)

$$I_{LP} = I_L + \frac{\Delta I_L}{2} = I_o + \frac{V_o}{2 * f * L} * \left(1 - \frac{V_o}{V_i}\right)$$

电感取值范围:

$$L = \frac{V_o}{f * (0.2 \sim 0.4) * I_o} * \left(1 - \frac{V_o}{V_i}\right)$$

输入平均电流:

$$I_i = \frac{V_o}{V_i} * I_o \quad I_i = \frac{V_o}{\eta * V_i} * I_o \text{ (考虑效率)}$$

输入电容容量引起的纹波:

$$U_q = \frac{I_o}{C_i * V_i * f} * \left(V_o + V_d * \frac{V_i - V_o}{V_i + V_d} \right) * \frac{V_i - V_o}{V_i + V_d}$$

输入电容 ESR 引起的纹波:

$$U_{esr} = \left(I_o + \frac{V_o + V_d}{2 * f * L} * \frac{V_i - V_o}{V_i + V_d} \right) * ESR$$

输入电容总纹波: $\Delta V_i = U_q + U_{esr}$

$$\Delta V_i = \frac{I_o}{C_i * V_i * f} * \left(V_o + V_d * \frac{V_i - V_o}{V_i + V_d} \right) * \frac{V_i - V_o}{V_i + V_d} + \left(I_o + \frac{V_o + V_d}{2 * f * L} * \frac{V_i - V_o}{V_i + V_d} \right) * ESR$$

输入使用陶瓷电容滤波:

$$C_i \geq \frac{I_o}{\Delta V_i * V_i * f} * \left(V_o + V_d * \frac{V_i - V_o}{V_i + V_d} \right) * \frac{V_i - V_o}{V_i + V_d}$$

输入使用电解电容滤波:

$$ESR \leq \frac{\Delta V_i}{I_o + \frac{V_o + V_d}{2 * f * L} * \frac{V_i - V_o}{V_i + V_d}}$$

输入电容容量引起的纹波:

$$U_q = \frac{I_o}{C_i * f} * \frac{V_o}{V_i} * \left(1 - \frac{V_o}{V_i} \right)$$

输入电容 ESR 引起的纹波:

$$U_{esr} = \left(I_o + \frac{V_o}{2 * f * L} * \left(1 - \frac{V_o}{V_i} \right) \right) * ESR$$

输入电容总纹波: $\Delta V_i = U_q + U_{esr}$

$$\Delta V_i = \frac{I_o}{C_i * f} * \frac{V_o}{V_i} * \left(1 - \frac{V_o}{V_i} \right) + \left(I_o + \frac{V_o}{2 * f * L} * \left(1 - \frac{V_o}{V_i} \right) \right) * ESR$$

输入使用陶瓷电容滤波:

$$C_i \geq \frac{I_o}{\Delta V_i * f} * \frac{V_o}{V_i} * \left(1 - \frac{V_o}{V_i} \right)$$

输入使用电解电容滤波:

$$ESR \leq \frac{\Delta V_i}{I_o + \frac{V_o}{2 * f * L} * \left(1 - \frac{V_o}{V_i} \right)}$$

输出电容容量引起的纹波:

$$U_q = \frac{V_o + V_d}{8 * f^2 * C_o * L} * \frac{V_i - V_o}{V_i + V_d}$$

输出电容 ESR 引起的纹波:

$$U_{esr} = \frac{V_o + V_d}{f * L} * \frac{V_i - V_o}{V_i + V_d} * ESR$$

输出电容总纹波: $\Delta V_o = U_q + U_{esr}$

$$\Delta V_o = \frac{V_o + V_d}{f * L} * \frac{V_i - V_o}{V_i + V_d} * \left(ESR + \frac{1}{8 * f * C_o} \right)$$

输出使用陶瓷电容滤波:

$$C_o \geq \frac{V_o + V_d}{8 * f^2 * \Delta V_o * L} * \frac{V_i - V_o}{V_i + V_d}$$

输出使用电解电容滤波:

$$ESR \leq \frac{\Delta V_o * f * L * (V_i + V_d)}{(V_o + V_d) * (V_i - V_o)}$$

输入电容容量引起的纹波:

$$U_q = \frac{V_o}{8 * f^2 * C_o * L} * \left(1 - \frac{V_o}{V_i} \right)$$

输出电容 ESR 引起的纹波:

$$U_{esr} = \frac{V_o}{f * L} * \left(1 - \frac{V_o}{V_i} \right) * ESR$$

输出电容总纹波: $\Delta V_o = U_q + U_{esr}$

$$\Delta V_o = \frac{V_o}{f * L} * \left(1 - \frac{V_o}{V_i} \right) * \left(ESR + \frac{1}{8 * f * C_o} \right)$$

输出使用陶瓷电容滤波:

$$C_o \geq \frac{V_o}{8 * f^2 * \Delta V_o * L} * \left(1 - \frac{V_o}{V_i} \right)$$

输出使用电解电容滤波:

$$ESR \leq \frac{\Delta V_o * f * L * V_i}{V_o * (V_i - V_o)}$$



Thanks!