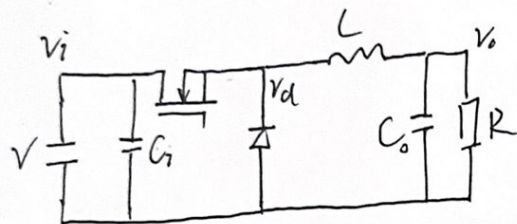


Buck 变换推导.

已知: 输入  $V_i$  输出  $V_o$ , 开关频率  $f$ , 输入纹波  $\Delta V_i$ , 输出纹波  $\Delta V_o$ , 负载电阻  $R$

求解: 电感  $L$ , 输入滤波电容  $C_i$ , 输出滤波电容  $C_o$



ON:  $V_L = V_i - V_o = \frac{di_L}{dt} L \Rightarrow \frac{di_L}{dt} = \frac{V_i - V_o}{L}$  线性上升

OFF:  $V_L = -V_d - V_o = \frac{di_L}{dt} L \Rightarrow \frac{di_L}{dt} = -\frac{V_o + V_d}{L}$  线性下降

在上升、下降均为线性, 且上升和下降高度是相同的

$$\frac{T_{on}}{T_{off}} = \frac{V_i - V_o}{V_o + V_d} \therefore T_{on} \text{ 和 } T_{off} \text{ 与上升斜率成反比}$$

$$\frac{T_{on}}{T_{off}} = \frac{V_o + V_d}{V_i - V_o}$$

伏秒积:  $(V_i - V_o) T_{on} = T_{off} (V_o + V_d)$

$$T_{on} + T_{off} = T = \frac{1}{f}$$

$$T_{on} = \frac{V_o + V_d}{V_i - V_o} \cdot \frac{1}{f} \quad T_{off} = \frac{V_i - V_o}{V_i + V_d} \cdot \frac{1}{f}$$

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

以上为异步 Buck, 同步时需对  $V_d$  进行修正.

电感选择: 考虑两个方面, 电感量 和 电流

电感电流又分为: 平均电流  $I_L$  和纹波电流

平均电流: 输出电压  $V_o$  不变, 那么滤波电容

周围也就设计以电流

则: 平均电流  $I_L = I_o$

纹波电流: 由前面推导可知上升和下降均为线性故电感电流即为三角波.

$$\text{纹波电流 } \Delta i_L = di = \frac{V_i - V_o}{L} \cdot T_{on} = \frac{V_o + V_d}{L} \cdot T_{off}$$

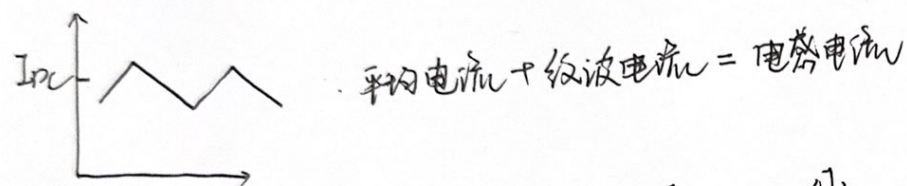
$$\Delta i_L = \frac{V_i - V_o}{L} \cdot \frac{V_o + V_d}{V_i + V_d} \cdot \frac{1}{f} = \frac{V_o + V_d}{L} \cdot \frac{V_i - V_o}{V_i + V_d} \cdot \frac{1}{f}$$

通过上述的纹波电流可知

$$\Delta I_L = \frac{V_{in} - V_o}{L} \cdot \frac{V_o + V_d}{V_{in} + V_d} \cdot \frac{1}{f} = \frac{V_d + V_o}{L} \cdot \frac{V_{in} - V_o}{V_{in} + V_d} \cdot \frac{1}{f}$$

纹波电流大小和负载没有关系。

电感电流：



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

$$I_{LP} = I_o + \frac{V_o + V_d}{V_{in} + V_d} \cdot \frac{1}{2fL} (V_{in} - V_o)$$

电感选型时注意：感值，直流内阻，饱和电流，温升电流

饱和电流应当要比  $I_{LP}$  峰值电流大 30% 左右。

纹波电流  $\Delta I_L$  一般设计为  $I_o$  的 40%、20% ~ 40% 为宜。

也就是  $\Delta I_L = (0.2 \sim 0.4) I_o$ 。通过这个就可以求得电感值范围了。

$$\begin{cases} I_L = I_o \\ \Delta I_L = (0.2 \sim 0.4) I_o \\ \Delta I_L = \frac{V_o + V_d}{V_{in} + V_d} \cdot \frac{1}{fL} (V_{in} - V_o) \end{cases} \Rightarrow L = \frac{V_o + V_d}{f I_o (0.2 \sim 0.4)} \cdot \frac{V_{in} - V_o}{V_{in} + V_d}$$

$$L = \frac{V_o + V_d}{V_{in} + V_d} \cdot \frac{V_{in} - V_o}{f I_o (0.2 \sim 0.4)}$$



输入滤波电容计算.

电感滤波, 滤波电容, 开关频率高, 输入电源的电流是恒定的  
稳态下恒定电流等于平均电流  $I_L$

求解平均电流  $I_L$  能量守恒定律.

估算 MOS 管损耗.

损耗功率: 二极管, 负载电阻.

$$P_r = V_o \cdot I_o \quad \text{负载功率}$$

~~P<sub>di</sub>~~ = 二极管功率: 二极管导通时间为  $T_{on}$ .

先计算总能量损耗: ~~电感~~ 工作电流即为电感电流, 电压为  $V_d$

$$W_D = I_L \cdot V_d \cdot T_{off} \quad P_d = \frac{W_D}{T} = I_L \cdot V_d \cdot T_{off} \cdot f \quad I_L = I_o$$

$$P_d = I_o \cdot V_d \cdot T_{off} \cdot f$$

$$P_{\Sigma} = V_o I_o + V_d I_L T_{off} \cdot f = I_L \cdot V_{in}$$

$$I_L = \frac{V_o I_o + V_d I_L T_{off} \cdot f}{V_{in}} = \frac{V_o I_o + \frac{V_d I_o (V_{in} - V_o)}{V_{in} + V_d} \cdot f \cdot \frac{1}{f}}{V_{in}}$$

$$= \frac{I_o}{V_{in}} \left( V_o + V_d \cdot \frac{V_{in} - V_o}{V_{in} + V_d} \right)$$

输入电压纹波就是输入电容上电压变化

电容纹波分为两部分

1. 电容充放电, 电荷量的变化  $\Delta Q$
2. 电容等效电阻 ESR 压降变化  $\Delta V_{ESR}$

$$\Delta V_i = V_q + V_{ESR}$$

1. 电容电荷量变化引起的压降  $V_q$

从输入端口运用 KCL.

一. 当开关断开时, MOS 管电流为 0

$I_v = I_L$ , 电流全部流经电容.

二. 开关闭合时, 电感续流, 电流由电源和电容共同提供, 电容此时放电, 开关电流变大, 则电容电流也变大.

(一个周期内电容充电量和电容放电量相等)

$$V_q: Q = C \Delta V_q = I_L t = I_L T_{off} \quad V_q = \frac{I_L \cdot T_{off}}{C}$$

$$V_q = \frac{I_L}{C} \cdot \frac{V_{in} - V_o}{V_{in} + V_d} \cdot \frac{1}{f} = \frac{I_o}{V_{in} C f} \left( V_o + V_d \cdot \frac{V_{in} - V_o}{V_{in} + V_d} \right) \frac{V_{in} - V_o}{V_{in} + V_d}$$

三. 电流流经 ESR 产生压降.

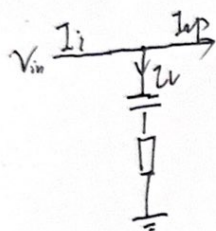
充电:  $V_{ESR} = I_L \cdot ESR$

放电: 电感电流  $I_{up} = I_o + \frac{\Delta I_L}{2}$



$$I_{up} = I_0 + \frac{\Delta I_i}{2} \quad \text{则 MOS 管最大电流也为 } I_{up}$$

由 KCL 知. 放电  
至电容最大电流



由 KCL 知  $I_v = I_{up}$

$$I_v + I_i = I_{up}$$

$$I_v = I_{up} - I_i$$

$$I_i = \frac{I_0}{V_{in}} (V_0 + V_d \frac{V_{in} - V_0}{V_{in} + V_d})$$

$$I_{up} = I_0 + \frac{\Delta I_i}{2}$$

则  $I_v = I_0 + \frac{\Delta I_i}{2} - I_i$  即电容放电时的最大电流.

开关打开时

ESR 压降为  $I_i \cdot ESR$ .

$$V_{in} = V_q + I_i ESR = \frac{I_i}{C} \frac{V_{in} - V_0}{V_{in} + V_d} \cdot \frac{1}{f} = \frac{I_0}{V_{in} C f} (V_0 + V_d \frac{V_{in} - V_0}{V_{in} + V_d}) \frac{V_{in} - V_0}{V_{in} + V_d} + I_i ESR$$

开关闭合时

ESR 压降为  $I_v \cdot ESR$  电容降为 0

$V_{out} = ESR \cdot (-I_v)$ . 如果充电电流方向为右. 则放电即为 (-)

$$V_{out} = ESR \cdot (-I_v) = ESR (I_i - I_0 - \frac{\Delta I_i}{2})$$

$\Delta V = V_{in} - V_{out}$  即电压变化量

$$= \frac{I_0}{V_{in} C f} (V_0 + V_d \frac{V_{in} - V_0}{V_{in} + V_d}) \frac{V_{in} - V_0}{V_{in} + V_d} + ESR (I_0 + \frac{\Delta I_i}{2})$$

$$\text{代入 } \Delta I_i = \frac{V_{in} - V_0}{L} \cdot \frac{V_{in} V_d + V_0}{V_{in} + V_d} \cdot \frac{1}{f}$$

$$= \frac{I_0}{V_{in} C f} (V_0 + V_d \frac{V_{in} - V_0}{V_{in} + V_d}) \frac{V_{in} - V_0}{V_{in} + V_d} + ESR (I_0 + \frac{V_{in} - V_0}{2fL} \cdot \frac{V_d + V_0}{V_{in} + V_d})$$

$$\Rightarrow \begin{cases} V_{esr} = ESR I_0 + \frac{V_{in} - V_0}{2fL} \frac{V_d + V_0}{V_{in} + V_d} \\ V_q = \frac{I_0}{V_{in} C f} (V_0 + V_d \frac{V_{in} - V_0}{V_{in} + V_d}) \frac{V_{in} - V_0}{V_{in} + V_d} \\ \Delta V = V_q + V_{esr} \end{cases}$$

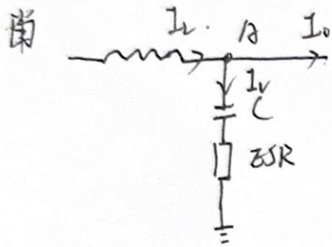
电压

其中. 可以看出输入电容纹波大小与电容值  $C$  和电容内阻均有关. 同时还和选用的电感也有关系. 挑选电容时可以根据电容容量和 ESR 两个指标来进行设计.



输出滤波电容.

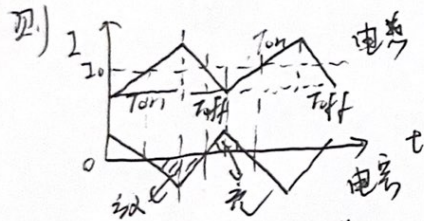
与输入滤波电容相类似, 也由  $I_L$  和 ESR 共同决定.



由 KCL 可知, 节点另外电流和为 0. 令电容充电电流为正方向

电容电压

其中, 流向负载  $R$  的电流  $I_O$  可以看作是恒定的, 为  $I_O = \frac{V_O}{R}$ . 则电容的电流变化即为电容的电流变化, 且总和为 0



电容电流大于 0 时, 电容充电  
反放电

由电感电压和电容电压积分, 可得和 1. 电感上电流变化为  $\Delta I_L$  时, 电容电压变化是 - 一致的

而电容充放电仅由电流大小决定. 由几何关系知放电和充电面积相同. 且电容充放电都是周期的一半.  $\frac{T}{2}$  充放电电流均为  $\frac{\Delta I_L}{2}$ . 充放电的切换不是由开关通断决定, 而是中间时刻

可用  $Q = It$  证明

总充电量为  $\frac{T}{2} \cdot \frac{\Delta I_L}{2} = \frac{\Delta I_L}{4f}$

$$Q = It = CV_q \quad V_q = \frac{\Delta I_L}{4fC} = \frac{1}{4fC} \left( \frac{V_{in} - V_O}{L_f} \cdot \frac{V_O + V_d}{V_{in} + V_d} \right)$$

$$V_q = \frac{V_{in} - V_O}{8f^2 LC} \cdot \frac{V_O + V_d}{V_{in} + V_d}$$

ESR 压降:

$$\text{充电: 最大电流 } \frac{\Delta I_L}{2} \quad V_{ch} = \frac{\Delta I_L}{2} \text{ ESR}$$

$$\text{放电: 最小电流 } -\frac{\Delta I_L}{2} \quad V_{dis} = -\frac{\Delta I_L}{2} \text{ ESR}$$

$$\begin{aligned} V_{esr} &= \Delta I_L \text{ ESR} \\ &= \frac{V_{in} - V_O}{L_f} \cdot \frac{V_O + V_d}{V_{in} + V_d} \cdot \text{ESR} \end{aligned}$$

$$\Delta V_O = V_q + V_{esr}$$

$$= \frac{V_{in} - V_O}{8f^2 LC} \cdot \frac{V_O + V_d}{V_{in} + V_d} + \frac{V_{in} - V_O}{L_f} \cdot \frac{V_O + V_d}{V_{in} + V_d} \cdot \text{ESR}$$

可见  $\Delta V_O$  也由 ESR 和  $C$  两部分影响

其中, 陶瓷电容, ESR 小, 容量小.  $V_q$  起主要作用  
铝电解电容: 根据 ESR 选取