

PFC 电感计算

PFC 即为功率因数校正器，其英文缩写为：Power Factor Correction. 通常 Boost 功率电路的 PFC 有三种工作模式：连续、临界连续和断续模式。控制方式是输入电流跟踪输入电压。连续模式有峰值电流控制，平均电流控制和滞环控制等。

一. 临界连续 Boost 电感设计

1. 临界连续特征

Boost 功率开关零电流导通，电感电流线性上升。当峰值电流达到跟踪的参考电流（正弦波）时开关关断，电感电流线性下降。当电感电流下降到零时，开关再次导通。如果完全跟踪正弦波，根据电磁感应定律有

$$\sqrt{2}U_i \sin \omega t = L \frac{\sqrt{2}I_i \sin \omega t}{T_{on}}$$

即

$$U_i = L \frac{I_i}{T_{on}} \quad (8)$$

或

$$T_{on} = \frac{LI_i}{U_i} = L \frac{P_i}{U_i^2} = L \frac{P_o}{\eta U_i^2} \quad (9)$$

其中： U_i 、 I_i 为输入电压和电流有效值。在一定输入电压和输入功率时， T_{on} 是常数。当输出功率和电感一定时，导通时间 T_{on} 与输入电压 U_i 的平方成反比。

2. 确定输出电压

电感的导通伏秒应当等于截止时伏秒：

$$U_{ip} T_{on} = (U_o - U_{ip}) T_{off}$$

则

$$T_{off} = \frac{U_{ip}}{U_o - U_{ip}} T_{on} \quad (10)$$

开关周期为

$$T = T_{off} + T_{on} = \left(\frac{U_{ip}}{U_o - U_{ip}} + 1 \right) T_{on} = \frac{U_o}{U_o - U_{ip}} T_{on} = \frac{T_{on}}{1 - U_{ip}/U_o} \quad (11)$$

U_{ip} 为整流后的输入电压，可见，输出电压 U_o 一定大于输入电压 U_{ip} ，如果输出电压接近输入电压，在输入电压峰值附近截止时间远大于导通时间，开关周期很长，即频率很低。

如果首先决定最低输入电压（ U_{min} ）对应的导通时间为 T_{onL} ，根据(9)式推导，

导通时间 T_{on} 与输入电压 U_i 的平方成反比，则最高输入电压 ($U_{i\max}$) 下的导通时间为

$$T_{onh} = T_{onL} \left(\frac{U_{i\min}}{U_{i\max}} \right)^2 \quad (12)$$

根据式 (11) 和 (12) 可以得到开关周期 (频率) 与不同电压比的关系。

例如: 输入电压为 $220V_{ac} \pm 20\%$, 假定导通时间为 $10 \mu s$, BOOST 升压至 $380V$.

$$\text{最低电压下的周期为 } T_{Min} = \frac{T_{on}}{1 - U_{ip}/U_o} = \frac{10}{1 - 1.414 * 220 * 0.8 / 380} = 29 \mu s$$

对应频率为 34.5 KHz .

由 (12) 式可得在最高输入电压下的导通时间 $T_{onh} = (0.8/1.2)^2 \times T_{onL} = 4.45 \mu s$,

$$\text{那么在峰值时的周期为 } T_{Max} = \frac{T_{on}}{1 - U_{ip}/U_o} = \frac{4.45}{1 - 1.414 * 220 * 1.2 / 380} = 252 \mu s$$

对应频率为 3.97 KHz .

如果我们。输出电压提高到 $410V$, 最低输入电压时开关周期为 $25.45 \mu s$, 开关频率为 39.3 kHz 。输入最高电压峰值时, 周期为 $49.2 \mu s$, 开关频率为 20.3 kHz 。频率变化范围大为减少。

通过以上计算可以看到, 提高输出电压, 开关频率变化范围小, 有利于输出滤波。但是功率管和整流二极管要更高的电压定额, 导通损耗和开关损耗增加。因此, $220V \pm 20\%$ 交流输入, 一般选择输出电压为 $400V$ 左右。 $110V \pm 20\%$ 交流输入, 输出电压选择 $210V$ 。

3. 最大峰值电流

最大输入电流

$$I_{i\max} = \frac{P_o}{U_{i\min} \eta}$$

电感中最大峰值电流是峰值电流的 2 倍

$$I_{p\max} = 2\sqrt{2} I_{i\max} = \frac{2\sqrt{2} P_o}{U_{i\min} \eta} \quad (13)$$

4. 决定电感量

为避免音频噪声, 在输入电压范围内, 开关频率应在 20 kHz 以上。从第 2 点分析可知, 在最高输入电压峰值时, 开关频率最低, 故假定在最高输入电压峰值的开关周期为 $50 \mu s$ 。因此电应在输入功率最大和输入电压最小时选择, 这时正弦波峰值电流最大, 由式 (11) 求得

$$T_{onh} = T \left(1 - \sqrt{2} U_{i\max} / U_o \right) \quad (14)$$

由式 (12) 得到最低输入电压导通时间

$$T_{onL} = T_{onh} \left(U_{i\max} / U_{i\min} \right)^2$$

根据式 (8) 得到

$$L = \frac{U_i T_{onL}}{I_i} \quad (15)$$

5. 选择磁芯

因为导通时间随输入电压平方成反比，因此应当在最低电压下选择磁芯尺寸，只要在最低输入电压峰值时避免饱和。

$$\sqrt{2}U_{i\min}T_{onL} = NA_e B_m \quad (16)$$

其中： N —电感线圈匝数； A_e —磁芯有效截面积； $B_m < B_s(100)$ —最大磁通密度，为减少损耗，选择饱和磁感应的 70% 以下。

整个窗口铜的截面积

$$A_w k_w = \frac{I_{i\max}}{j} N \quad \text{或} \quad N = \frac{A_w k_w j}{I_{i\max}} \quad (17)$$

将式 (17) 代入 (16)，整理得到

$$AP = A_e A_w = \frac{\sqrt{2}U_{i\min} I_{i\max} T_{onL}}{B_m j k_w} = \frac{\sqrt{2}P_o T_{onL}}{B j k_w}$$

(18)

用 AP 法选择磁芯尺寸。(j 通常取为 400, k_w 常取 0.4)

6. 计算线圈匝数

$$N = \frac{L_p I_p}{B_m A_e} = \frac{2\sqrt{2}L I_{i\max}}{B_m A_e}$$

7. 线圈导线截面积

$$A_{cu} = \frac{I_{i\max}}{j}$$

例：输入 220V ± 20%，输出功率 200W，采用临界连续。假定效率为 0.95。
解：输入最大电流为

$$I_{i\max} = \frac{P_o}{\eta U_{i\min}} = \frac{200}{0.95 \times 0.8 \times 220} = 1.2 \text{ A}$$

峰值电流

$$I_p = 2\sqrt{2}I_{i\max} = 3.38 \text{ A}$$

设输出电压为 400V，最高输入电压时最低频率为 20kHz。即周期为 50 μs，因此，导通时间为

$$T_{onh} = T(1 - \sqrt{2}U_{i\max}/U_o) = 50(1 - \sqrt{2} \times 1.2 \times 220/400) = 3.35 \mu\text{s}$$

输入最低电压峰值时的导通时间

$$T_{onL} = T_{onh} \left(\frac{U_{i\max}}{U_{i\min}} \right)^2 = 3.35 \times \left(\frac{264}{176} \right)^2 = 7.54 \mu\text{s}$$

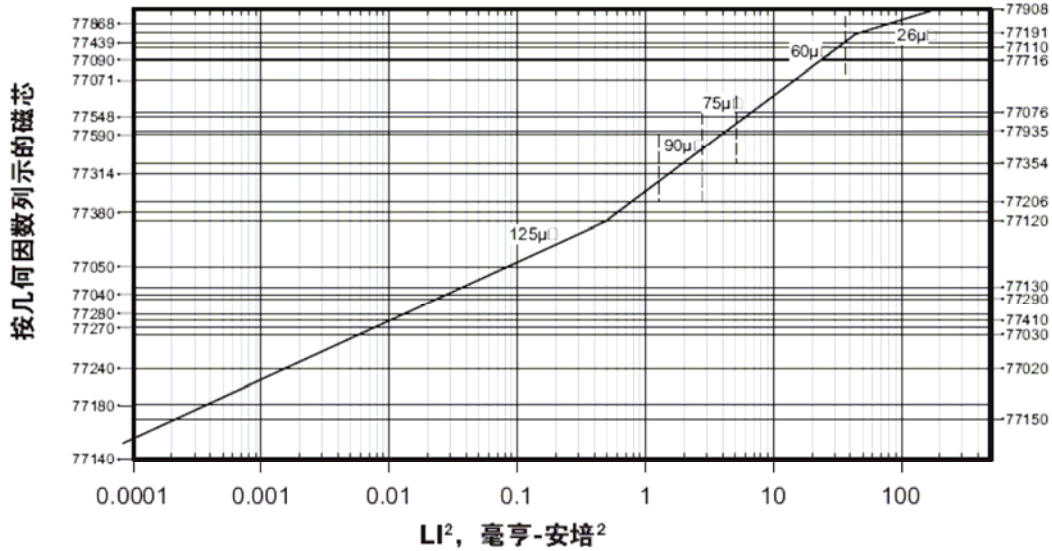
开关周期为

$$T = \frac{T_{on}}{1 - U_{ip}/U_o} = \frac{7.54}{1 - \sqrt{2} \times 0.8 \times 220/400} = 20 \mu\text{s}$$

因此，需要的电感量（式（15））

$$L = \frac{U_i T_{onL}}{I_i} = \frac{176}{1.2} \times 7.54 \times 10^{-6} = 1.12 \text{ mH} \text{ 取 } 1.2 \text{ mH}$$

如果采用磁粉芯，可选用铁硅铝磁芯。计算 $LI^2 = 1.2 \times 3.38^2 \times 10^{-3} = 13.7 \text{ mJ}$,



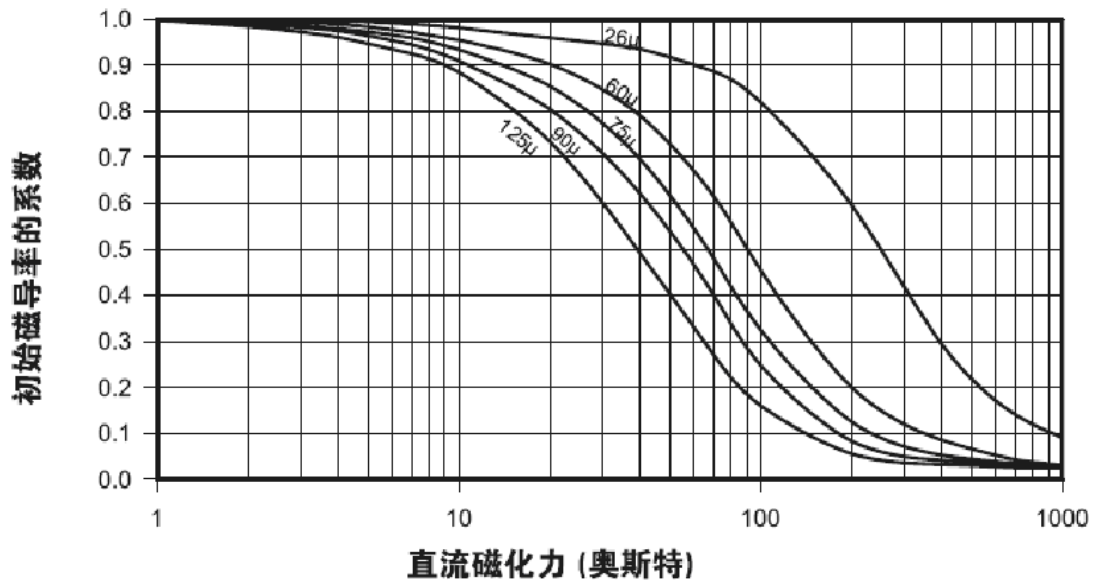
(图一)铁硅铝磁芯选择图

根据上图选择 77439。有效磁导率为 60，其电感系数 $A_L = 135 \text{ nH} \pm 8\%$ ，电感 1.2mH 需要的匝数为

$$N = \sqrt{\frac{L * 10^6}{A_L}} = \sqrt{\frac{1.2 * 10^6}{135 * 0.92}} = 98.3 \text{ 匝 取 } N = 99 \text{ 匝}$$

77439 的平均磁路长度 $l_e = 10.74 \text{ cm}$ ，磁场强度（奥斯特 0e）为

$$H = \frac{0.4\pi NI}{l_e} = \frac{0.4 \times 3.14 \times 99 \times 3.38}{10.74} = 39 \text{ Oe}$$



该曲线只适用于铁硅铝 (Kool Mμ) 环形磁芯

(图二) 磁导率对应直流偏置曲线 (铁硅铝)

由上图得到磁导率为 60, $H=390e$, 磁导率下降到 78%, 为了在给定峰值电流时保持给定电感量, 需增加匝数为

$$N = 99 \times \sqrt{\frac{1}{0.78}} = 112.1 \text{ 匝, 选取 } 112 \text{ 匝。}$$

此时磁场强度 $H=112 \times 39/99=44.120e$, μ 下降到 0.7, 此时电感量

$$L = N^2 A_L = 0.135 \times 0.7 \times 112^2 = 1185.4 \mu H = 1.19 \text{ mH}$$

满足设计要求。最高电压时开关频率提高大约 1%。应当注意到这里使用的是平均电流, 实际峰值电流大一倍, 最大磁场强度大一倍, 从图上得到磁导率下降到 80%, 磁场强度从零到最大, 平均磁导率为 $(0.8+1)/2=0.9$, 接近 0.88。

选取电流密度 $j=5A/mm^2$, 导线尺寸为

$$d = 1.13 \sqrt{\frac{I}{j}} = 1.13 \sqrt{\frac{1.2}{4}} = 0.619 \text{ mm}$$

选择 $d=0.63\text{mm}$, $d'=0.70\text{mm}$, 截面积 $A_{cu}=0.312\text{mm}^2$ 。
核算窗口利用系数。 $A_w=4.27\text{cm}^2$, 则

$$k_w = \frac{N \times A_{cu}}{A_w} = \frac{111 \times 0.312 \times 10^{-2}}{4.27} = 0.08$$

77439 铁硅铝粉芯外径 $OD=47.6\text{mm}$, 内径 $ID=23.3\text{mm}$ 。考虑第一层

$$N_{m1} = (\pi (ID - 0.5d' - 0.05) / 1.05d') - 1 = 96.9 \quad \text{实际 } 96 \text{ 匝。}$$

第二层只要 16 匝

二. 连续 BOOST 电感设计

1. 确定输出电压 U_o

输入电网电压一般都有一定的变化范围 ($U_{in} \pm \Delta\%$), 为了输入电流很好地跟踪输入电压, Boost 级的输出电压应当高于输入最高电压的峰值, 但因为功率耐压由输出电压决定, 输出电压一般是输入最高峰值电压的 1.05~1.1 倍。例如, 输入电压 220V, 50Hz 交流电, 变化范围是额定值的 20% ($\Delta=20$), 最高峰值电压是 $220 \times 1.2 \times 1.414 = 373.45\text{V}$ 。输出电压可以选择 390~410V。

2. 决定最大输入电流

电感应当在最大电流时避免饱和。最大交流输入电流发生在输入电压最低, 同时输出功率最大时

$$I_{i\max} = \frac{P_o}{U_{i\min}\eta} \quad (1)$$

其中: $P_o = U_o I_o$; $U_{i\min} = U_{in}(100 - \Delta)\%$ — 最低输入电压; η — Boost 级效率, 通常在 95% 以上。

3. 决定工作频率

由功率器件, 效率和功率等级等因素决定。例如输出功率 1.5kW, 功率管为 MOSFET, 开关频率 70~100kHz。

4. 决定最低输入电压峰值时最大占空度

因为连续模式 Boost 变换器输出 U_o 与输入 U_{in} 关系为 $U_o = U_{in}/(1-D)$, 所以

$$D_{p\max} = \frac{U_o - \sqrt{2}U_{i\min}}{U_o} \quad (2)$$

从上式可见, 如果 U_o 选取较低, 在最高输入电压峰值时对应的占空度非常小, 由于功率开关的开关时间限制 (否则降低开关频率), 可能输入电流不能跟踪输入电压, 造成输入电流的 THD 加大。

5. 求需要的电感量

为保证电流连续, Boost 电感应当大于

$$L = \frac{\sqrt{2}U_{i\min} D_{p\max}}{\Delta I f} \quad (3)$$

其中: $\Delta I = 2k\sqrt{2}I_{i\max}$, $k=0.15\sim 0.2$ 。

6. 利用 AP 法选择磁芯尺寸

根据电磁感应定律, 磁芯有效截面积

$$A_e = \frac{\sqrt{2}U_{i\min} T_{on\max}}{N\Delta B} = \frac{\sqrt{2}U_{i\min} D_{p\max}}{fN\Delta B} \quad (4)$$

如果电感是线性的, 有

$$\frac{\Delta I}{\sqrt{2}I_{i\max}} = \frac{\Delta B}{B} = 2k \quad (5a)$$

因为 Boost 电感直流分量很大,磁芯损耗小于铜损耗,饱和磁通密度限制最大值。为保证在最大输入电流时磁芯不饱和,应当有

$$B + \frac{\Delta B}{2} = B(1+k) < B_{s(100')} \quad (5b)$$

磁芯窗口面积

$$A_w = \frac{I_{i\max} N}{jk_w}$$

因此,面积乘积

$$AP = A_e A_w = \frac{\sqrt{2} U_{i\min} D_{p\max}}{fN\Delta B} \cdot \frac{I_{i\max} N}{jk_w} = \frac{\sqrt{2} U_{i\min} I_{i\max} D_{p\max}}{2kk_w jfB} \quad (6)$$

其中 $k_w=0.3\sim 0.5$ 窗口填充系数,也称为窗口利用系数。 $B < B_s/(1+k)$ 。由此选择磁芯。

输出功率在 1kW 以上,一般采用气隙磁芯。因环形磁粉芯价格高,且加工困难,成本高。但是气隙磁芯在气隙附近边缘磁通穿过线圈,造成附加损耗,这在工艺上应当注意的。

7. 计算匝数

$$N = \frac{L\Delta I}{\Delta B A_e} \quad (7)$$

8. 计算导线尺寸 (略)