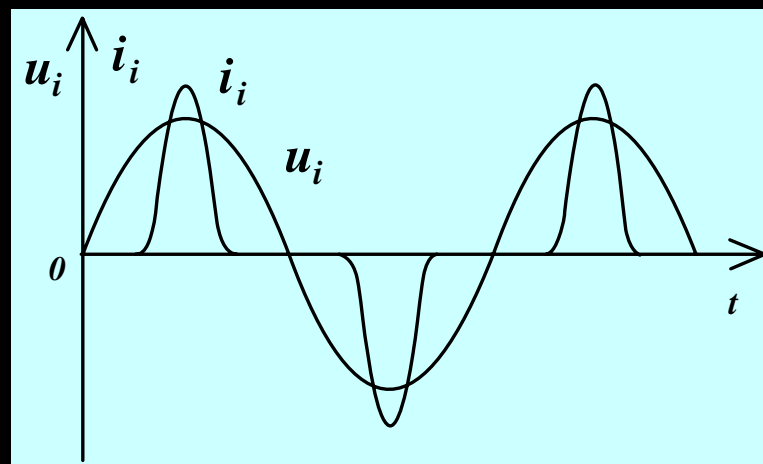
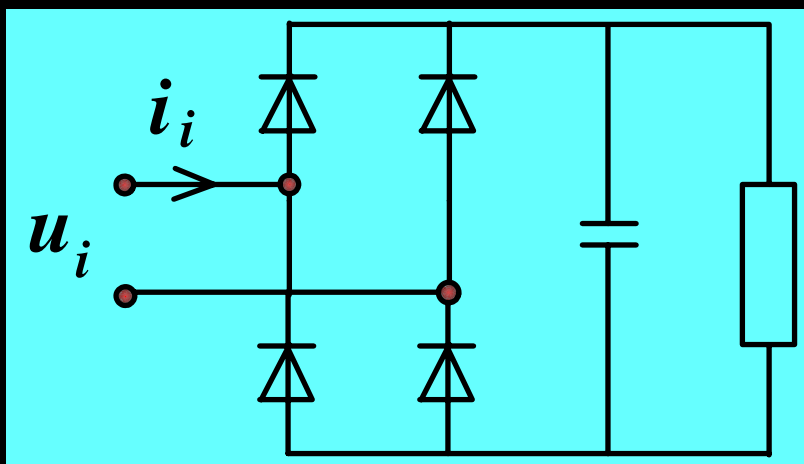


PFC电感计算

南京航空航天大学

周洁敏

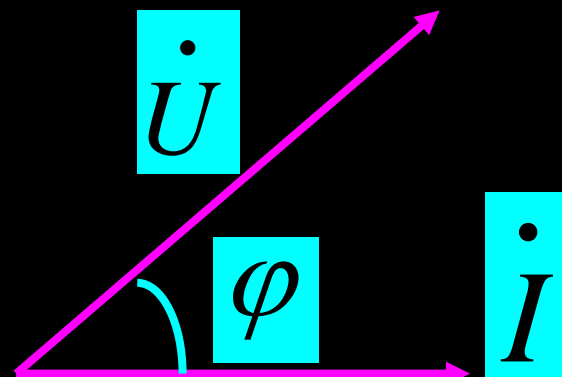
AC/DC整流电路中电流波形



功率因数定义:

$$PF = \frac{P}{S} = \frac{\text{有功功率}}{\text{视在功率}}$$

$$PF = \cos \varphi$$



谐波电流对电网的危害

谐波的危害

(1)对电网产生谐波污染

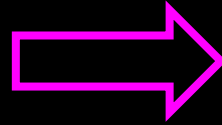
(2) 造成谐波压降

(3) 正弦电压波形畸变

(4) 产生电路故障，
变电设备损坏。

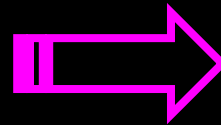
利用Boost电路进行PFC校正

总谐波失真率



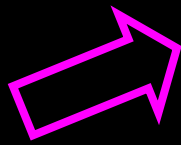
$$\text{THD} = \sqrt{\frac{\sum_{n \neq 1} I_n^2}{I_1^2}}$$

功率因数与失真度的关系

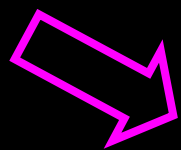


$$\text{PF} = \sqrt{\frac{1}{1 + \text{THD}^2}}$$

功率因数校正的目的



电流相位与输入电压保持同相位，PF为1。



输入电流实现正弦波，使电流失真因数为0。

研究对象的选择:

PFC校正电路有

buck

boost

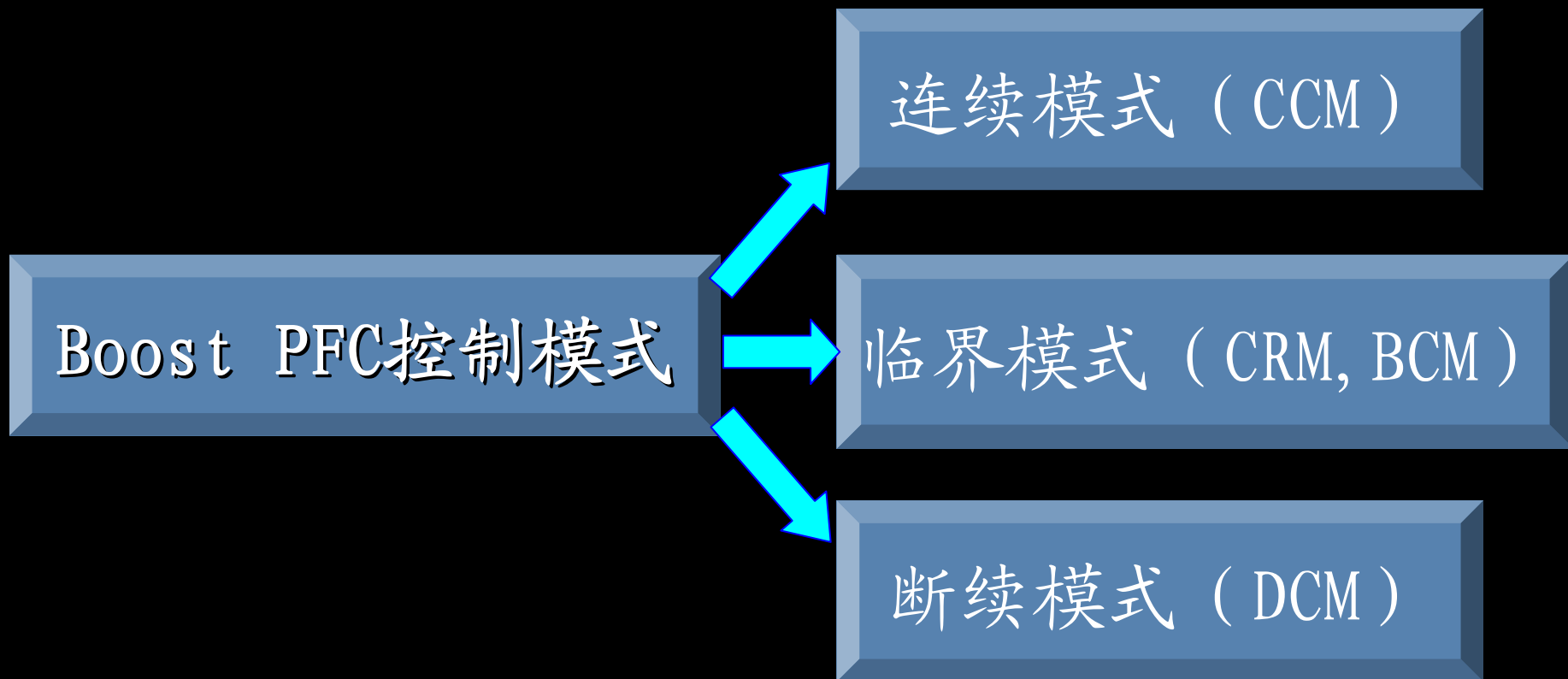
Cuk

Flyback

SEPIC

一般以Boost 电路和反激式电路为讨论对象，前者常用于电流连续和临界连续工作方式，后者用于断续模式，这儿由于时间关系只讨论Boost电路电感的计算与设计。

Boost PFC控制模式



小知识

CCM(Continuous Current Mode)

BCM (Boundary Conduction Mode)

CRM(Critical Conduction Mode)

DCM (Discontinuous Current Mode)

BOOST PFC控制模式——CCM

CCM特点:

控制方法三种

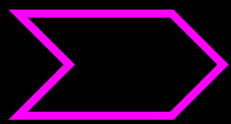


- (1) 峰值电流控制
- (2) 滞环电流控制
- (3) 平均电流控制

适用场合

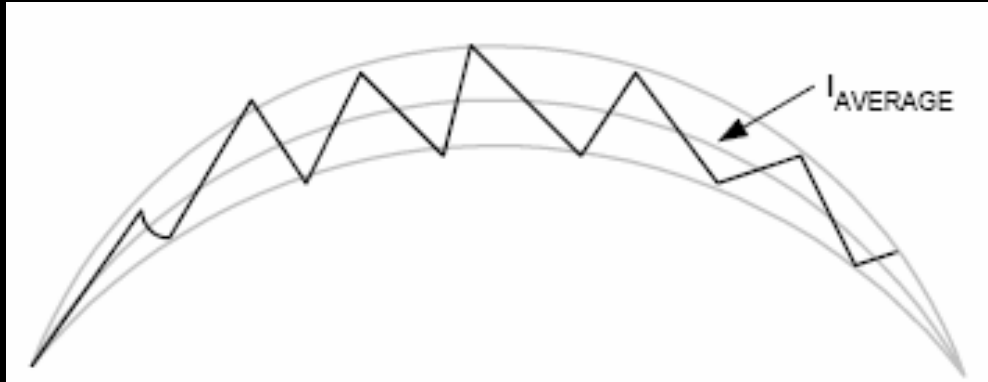
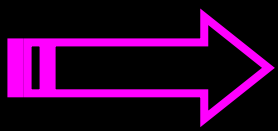
大功率场合

开关频率



可恒定 (平均电流控制)
可变化 (如滞环控制)

滞环电流控制CCM



BOOST PFC控制模式——CRM

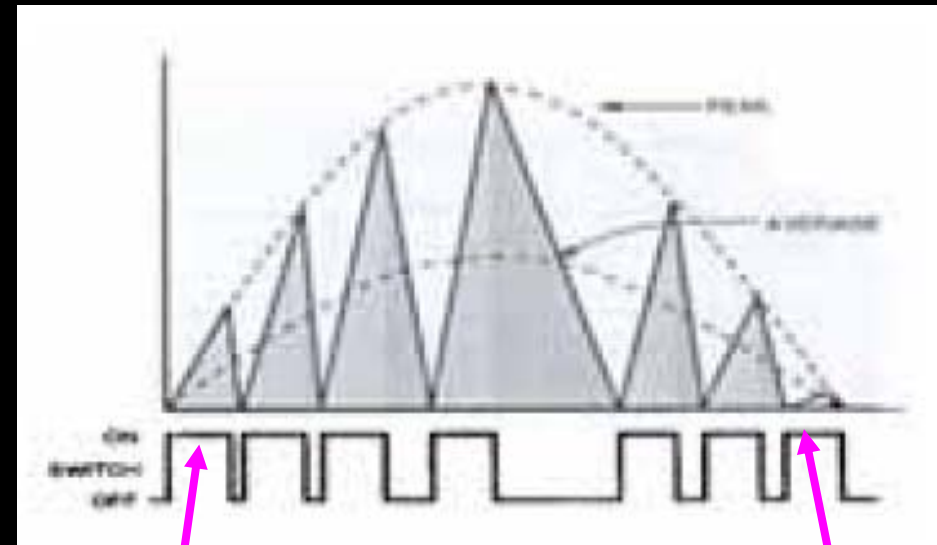
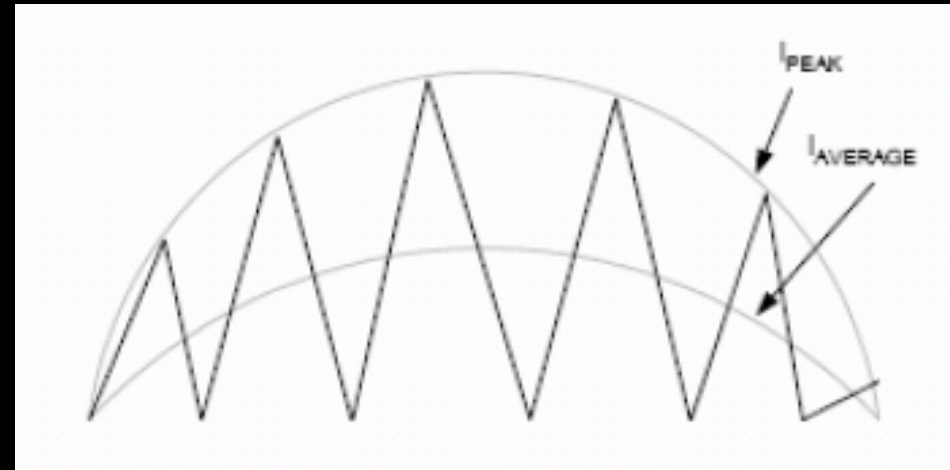
BCM特点:

使电感电流始终处于BCM模式

可获得单位功率因数1

适用中小功率场合

开关频率不固定



导通时间固定

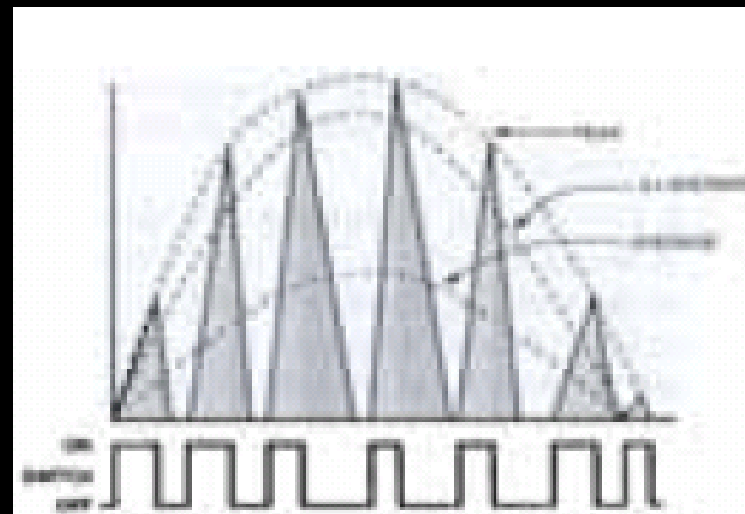
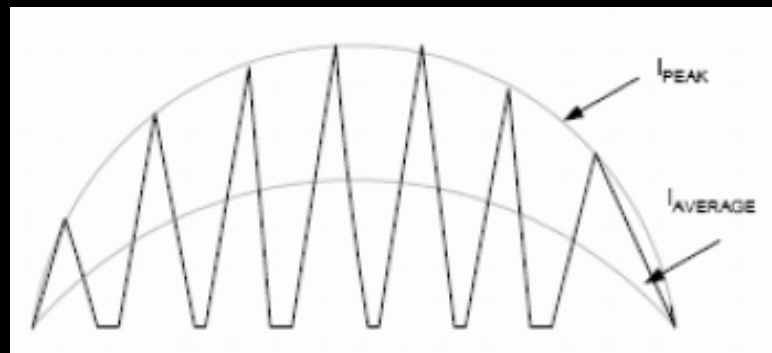
BOOST PFC控制模式——DCM

DCM特点

1、占空比近似不变时电感电流的峰值与输入电压成正比。

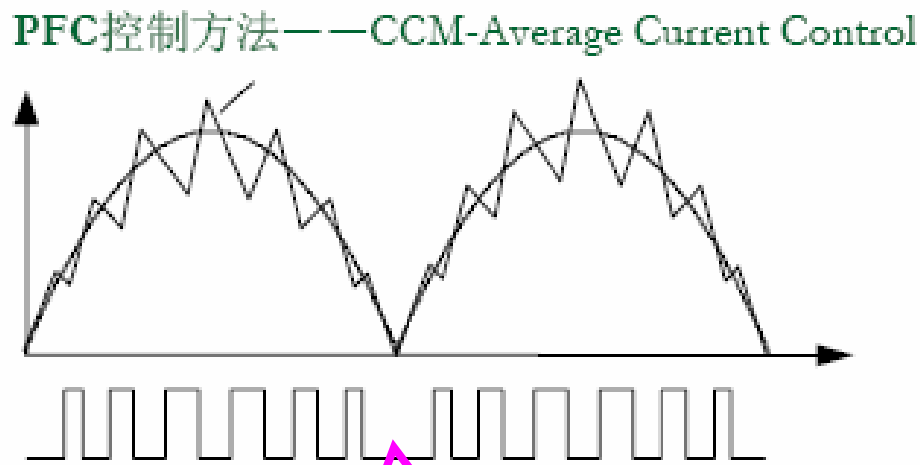
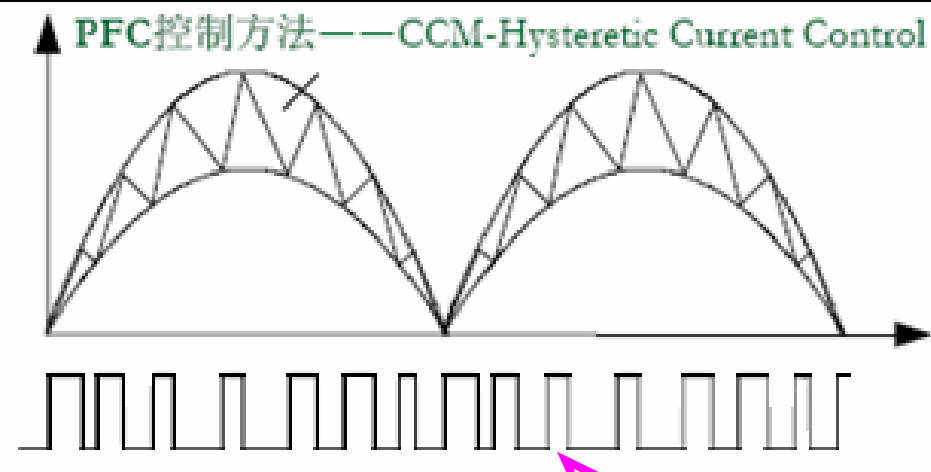
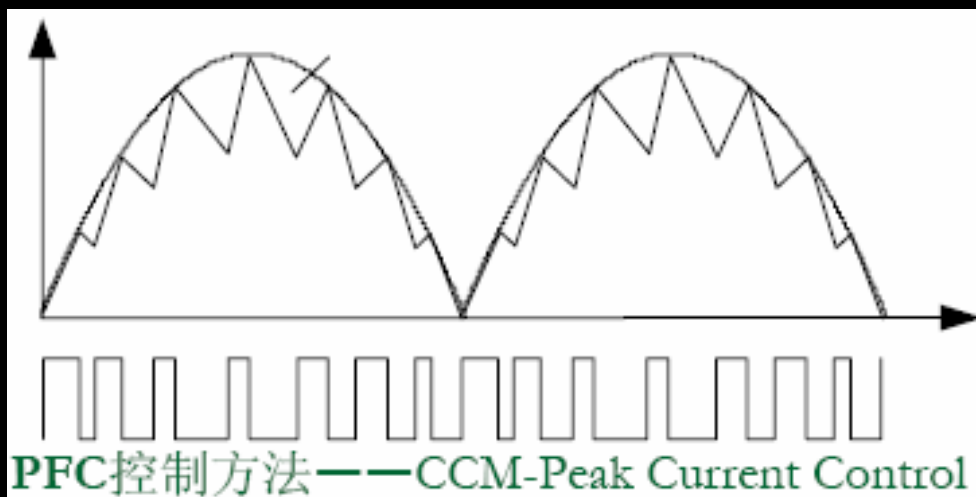
2、输入电流波形自然跟随输入电压波形

3、功率管峰值电流大



PFC的控制方法：连续模式的控制方法

峰值电
流控制



滞环控制方法

平均电
流控制

讨论的内容

一、连续模式的电感设计

二、临界连续模式电感设计

1、确定输出电压

连续模式的电感设计

(1) 输入电网电压变化范围

$$(U_{in} \pm \Delta \%)$$

(2) 输出电压高于输入最高电压的峰值

(3) 输出电压一般是输入最高峰值的

1.05~1.1倍

例如

输入电压220V，50Hz，变化范围是额定值的20% ($\Delta=20$)，最高峰值电压是：

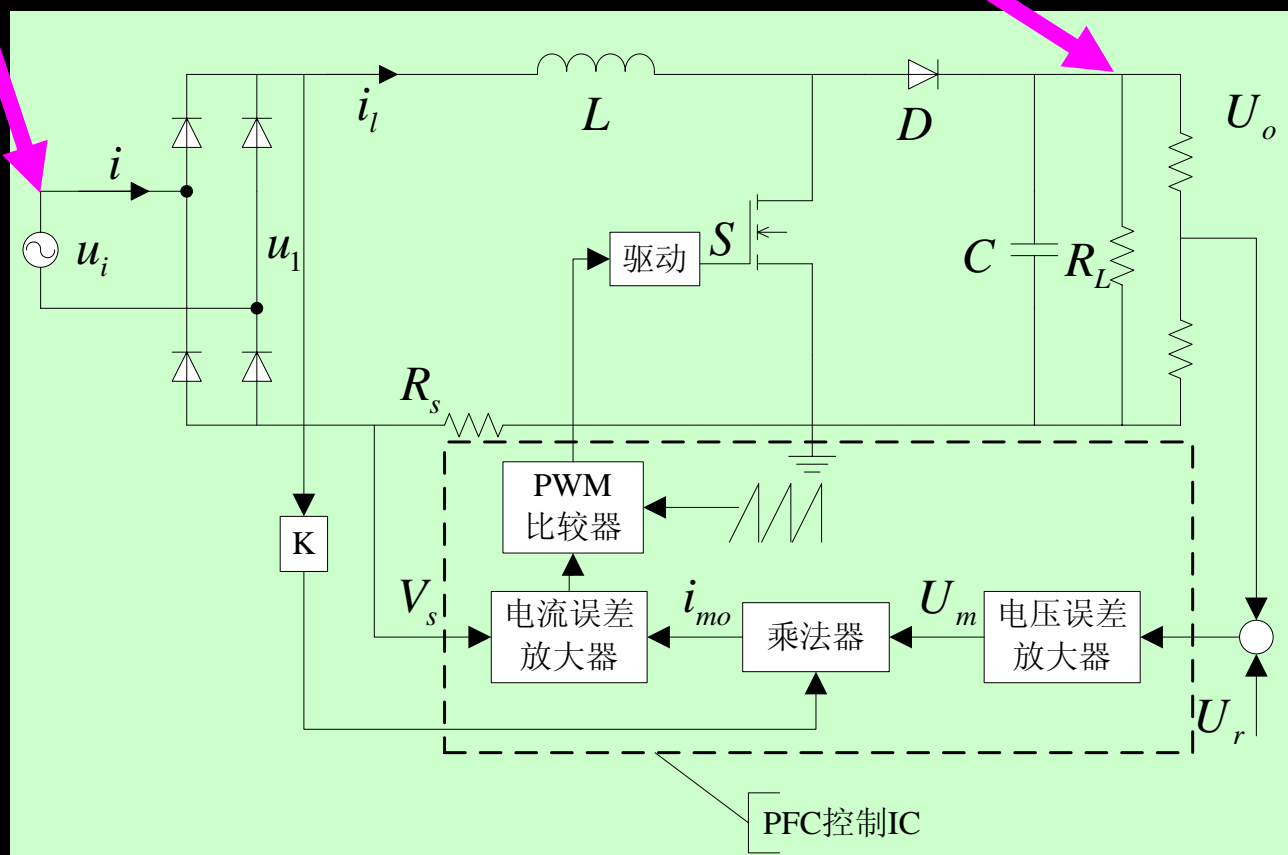
$$U_{p \max} = 220 \times 1.2 \times \sqrt{2} = 373.45(\text{V})$$

1、确定输出电压

连续模式的电感设计

$(U_{in} \pm \Delta\%)$

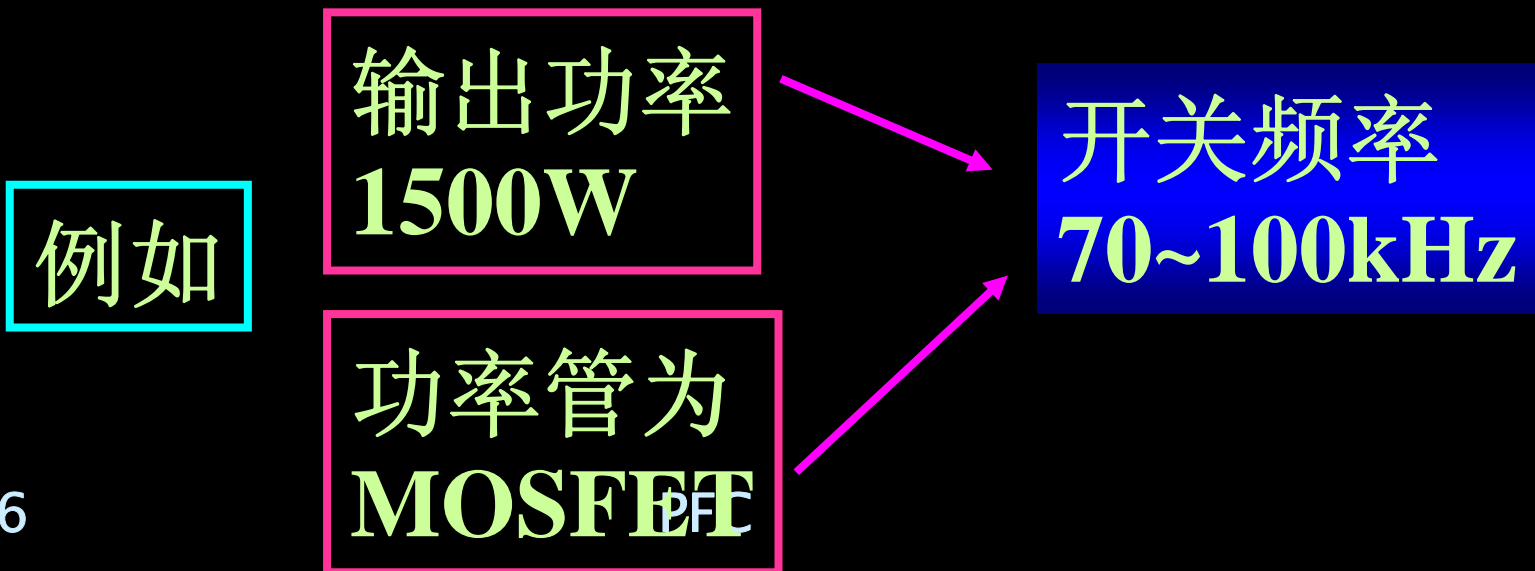
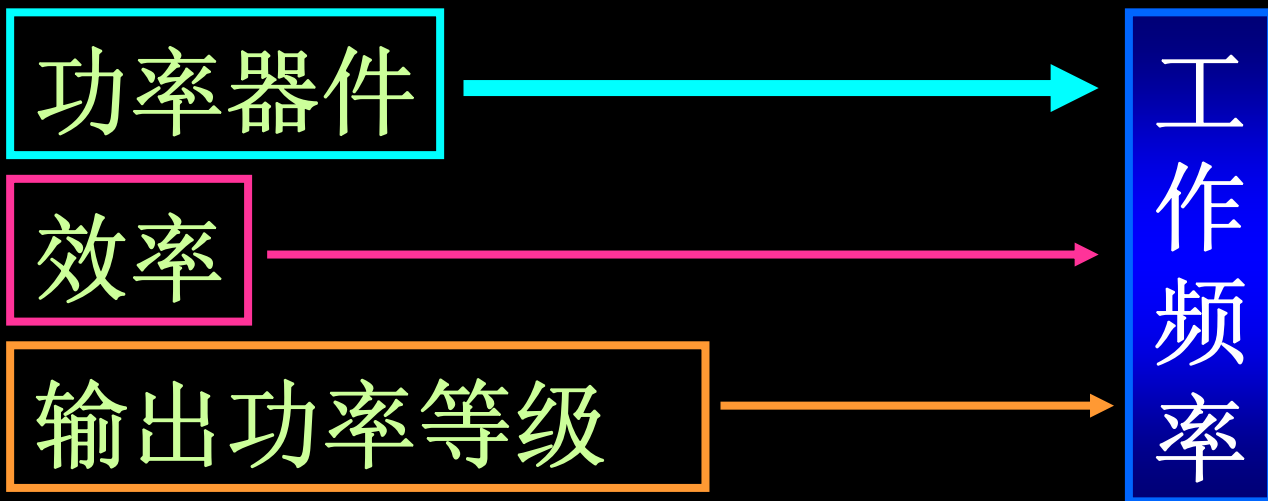
$U_o = 390 \sim 410(V)$



$$U_{p\max} = 220 \times 1.2 \times \sqrt{2} = 373.45(V)$$

3、确定工作频率

连续模式的电感设计



4. 确定最低输入电压峰值时最大占空度

(1) 根据Boost电路的公式，占空度最大发生在什么时候？

$$U_o = U_i / (1 - D)$$

最大占空度

$$D_{p \max} = \frac{U_o - \sqrt{2U_{imim}}}{U_o}$$

输入电压最小（峰值）

(2) 极限情况，不应造成输入电流失真。

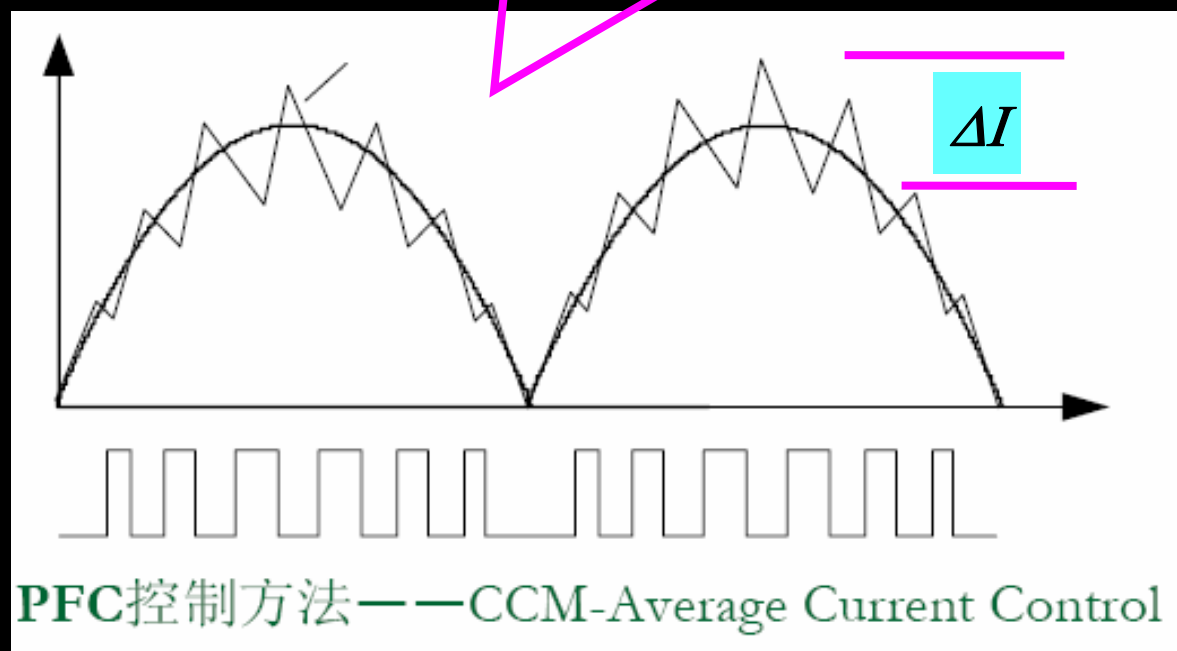
输出电压 U_0 太低，在最高输入电压峰值时占空度非常小，由于功率开关的开关时间限制，可能输入电流不能跟踪输入电压，造成THD加大。

5、求需要的电感量

连续模式的电感设计

$$U = L \frac{\Delta I}{\Delta t}$$

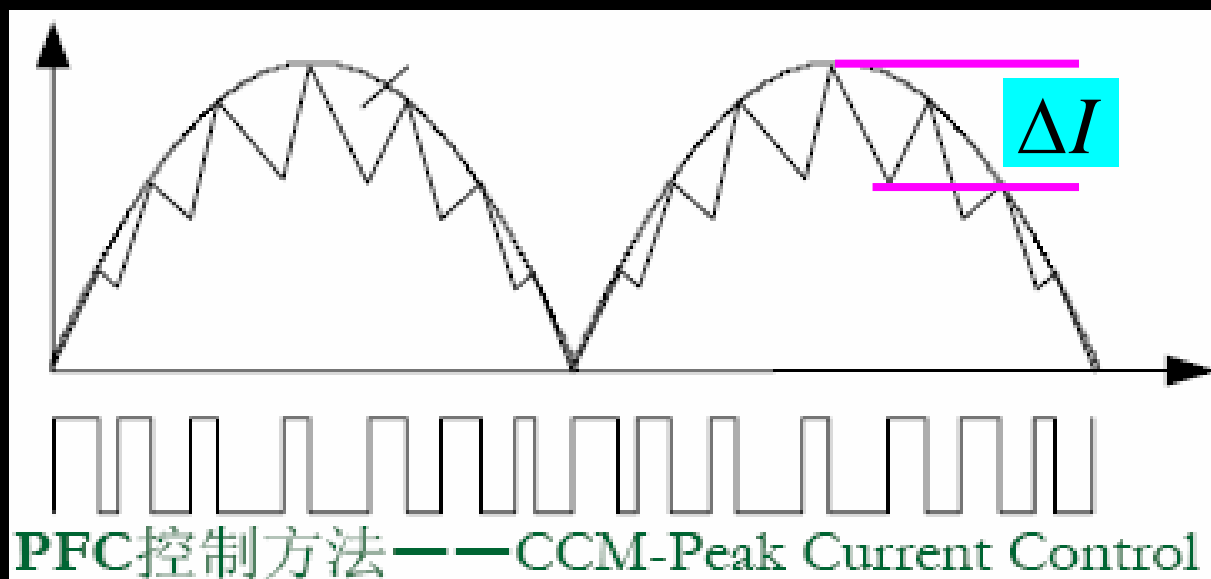
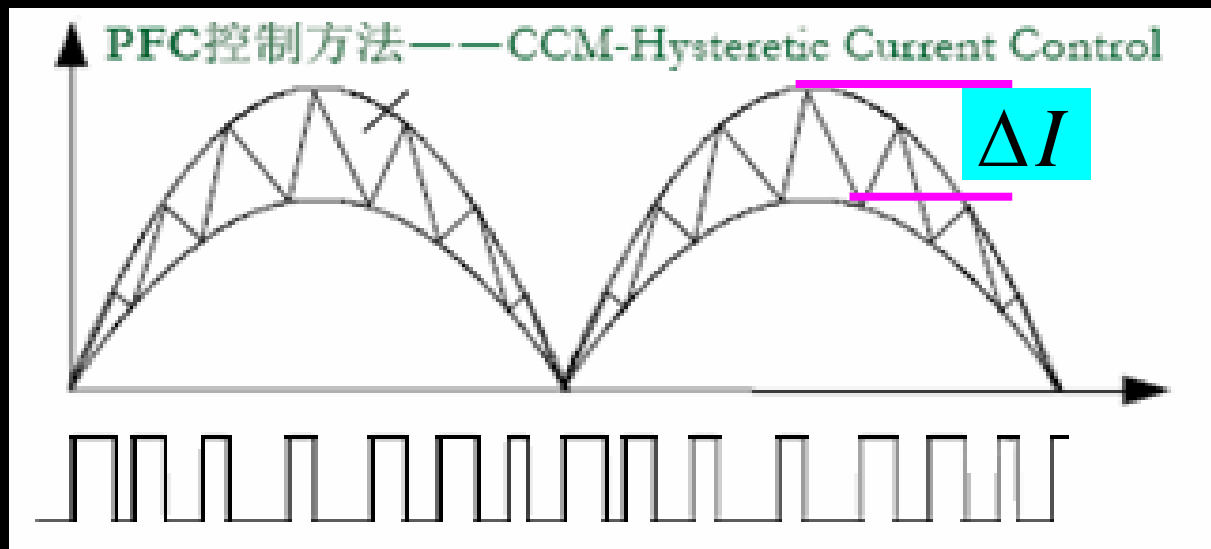
电感中电流波形



5、求需要的电感量

连续模式的电感设计

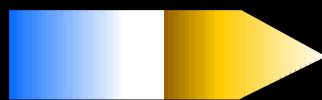
$$U = L \frac{\Delta I}{\Delta t}$$



5、求需要的电感量

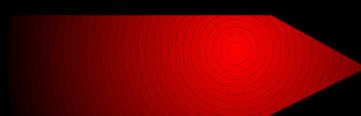
连续模式的电感设计

$$D_{p \max} = \frac{T_{onp}}{T} = T_{onp} \cdot f$$



$$T_{onp} = \frac{D_{p \max}}{f}$$

$$L \frac{\Delta I}{T_{onp}} = \sqrt{2} U_{i \min}$$



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

电感电流
变化量

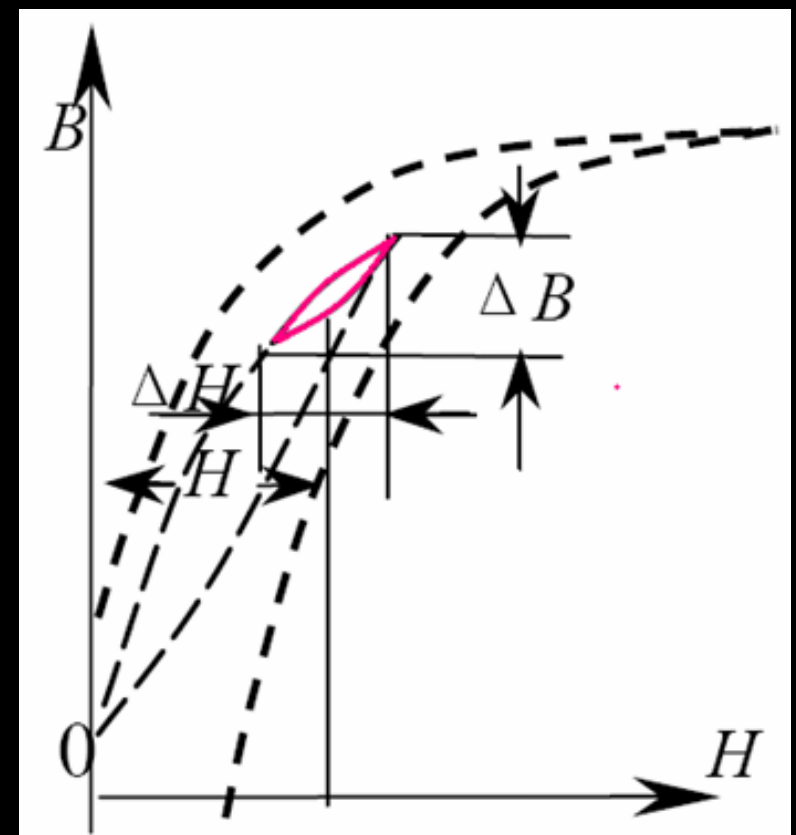
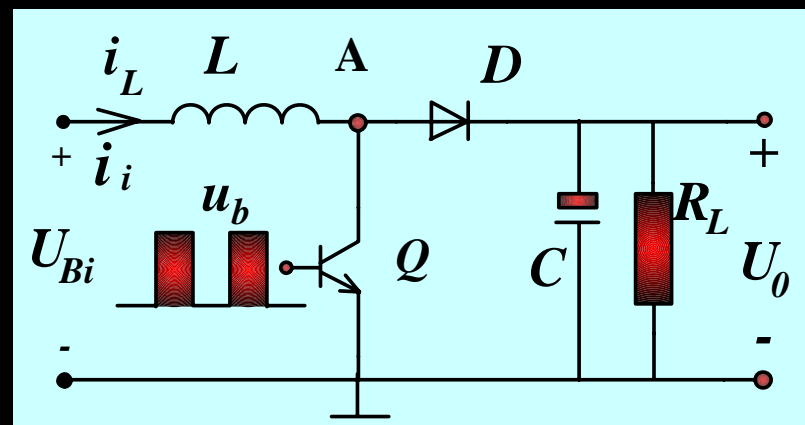
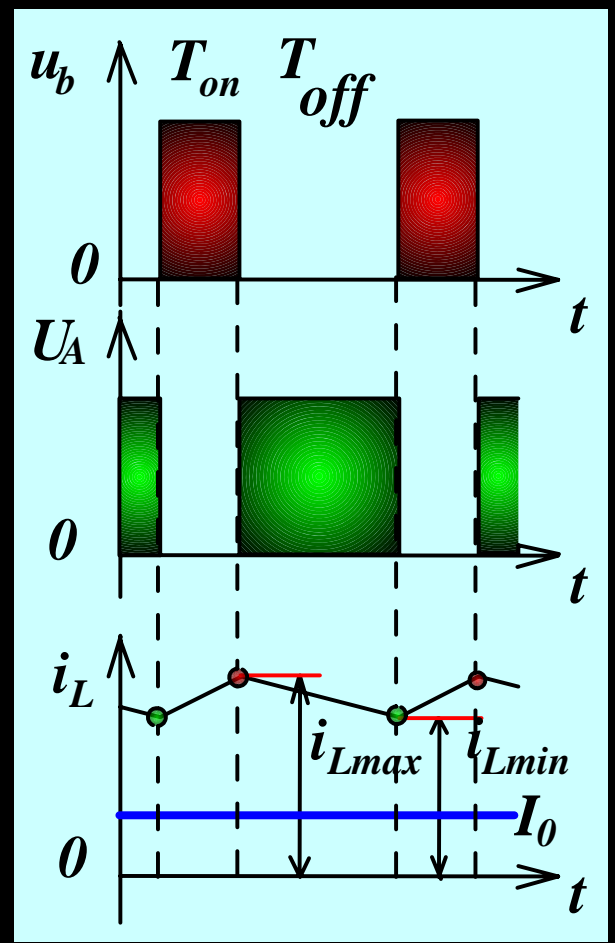
$$\Delta I = 2k \sqrt{2} I_{i \max}$$

定义系数:

$$k = 0.15 \sim 0.2$$

6、利用AP法选择磁芯尺寸

连续模式的电感设计



Boost电路磁芯工作在磁化曲线的第一象限。

6、利用AP法选择磁芯尺寸

连续模式的电感设计

小知识

AP法选择磁芯:

$$AP = A_e \times A_w$$

(1)求磁芯有效截面积 A_e

(2)求窗口面积 A_w

查表选磁芯型号

求 A_e

$$\sqrt{2U} i_{\min} T_{on\max} = N\Delta\Phi = N\Delta B A_e$$

$$T_{onp} = \frac{D_{p\max}}{f}$$

$$A_e = \frac{\sqrt{2U} i_{\min} T_{on\max}}{N\Delta B} = \frac{\sqrt{2U} i_{\min} D_{p\max}}{fN\Delta B}$$

6、利用AP法选择磁芯尺寸

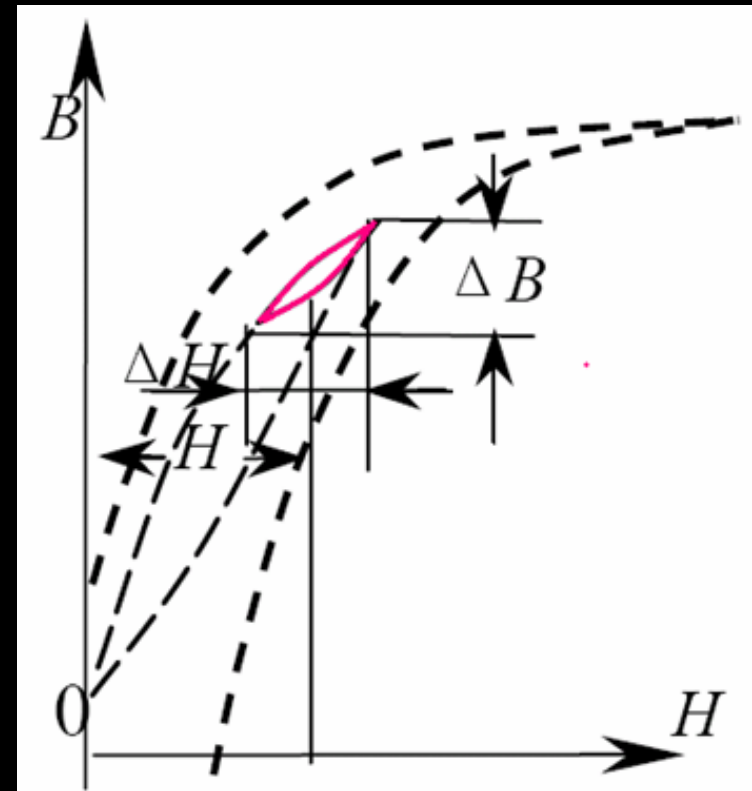
连续模式的电感设计

求磁感应B的工作范围

如果电感线性的

$$\frac{\Delta I}{\sqrt{2}I_{i\max}} = \frac{\Delta B}{B} = 2k$$

$$\frac{\Delta B}{2} = kB$$



电感磁芯的工作在磁化曲线的第一象限

6、利用AP法选择磁芯尺寸

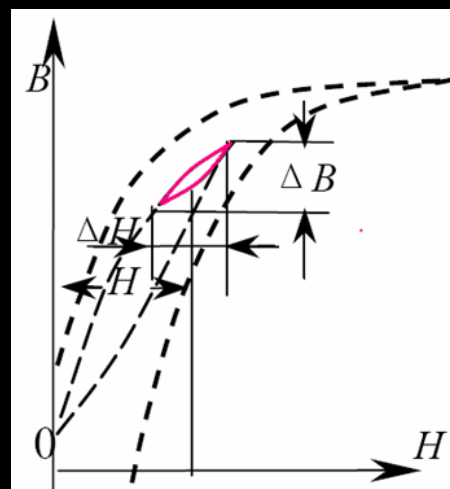
连续模式的电感设计

Boost电感特点

(A) 直流分量很大

(B) 磁芯损耗小于铜损耗

(C) 最大输入电流不饱和



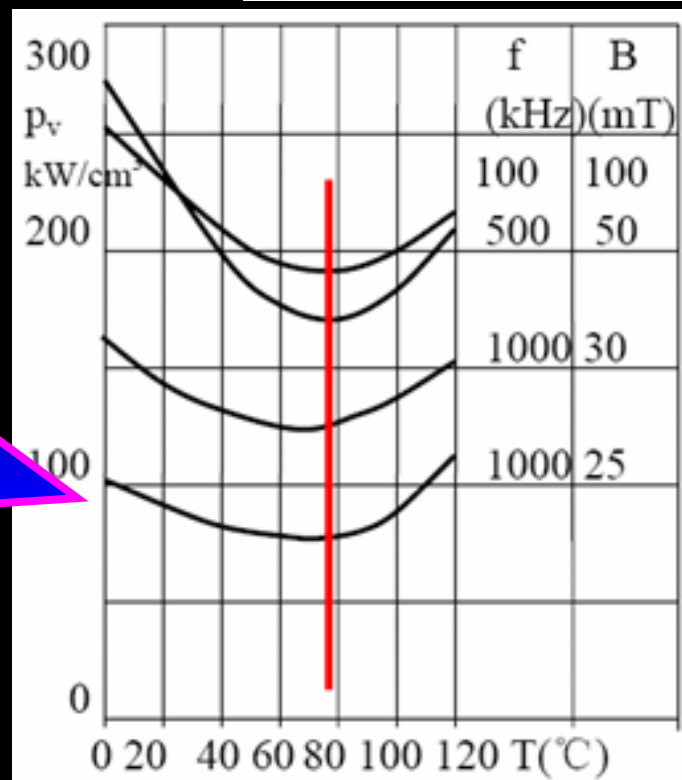
B的选择

$$B + \frac{\Delta B}{2} = B(1 + k) < B_{s(100^\circ \text{左右})}$$

$$\frac{\Delta B}{2} = kB$$



损耗
与温
度的
关系



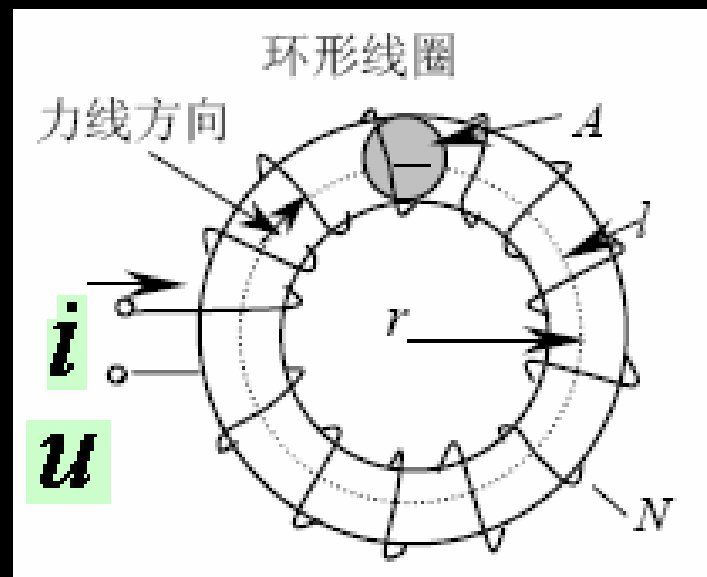
6、利用AP法选择磁芯尺寸

连续模式的电感设计

求 A_w

N匝导线的面积

$$NA = N \cdot \frac{I_{i \max}}{j}$$



磁芯窗口
面积 A_w

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

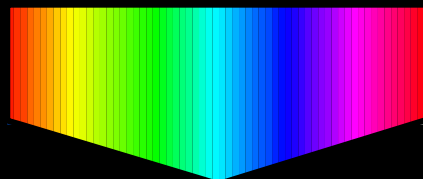
电流密度

窗口系数

6、利用AP法选择磁芯尺寸 连续模式的电感设计

$$A_e = \frac{\sqrt{2}U_{i \min} T_{on \max}}{N \Delta B} = \frac{\sqrt{2}U_{i \min} D_{p \max}}{f N \Delta B}$$

$$A_w = \frac{I_{i \max} N}{j k_w}$$



$$AP = A_e A_w = \frac{\sqrt{2}U_{i \min} D_{p \max}}{f N \Delta B} \cdot \frac{I_{i \max} N}{j k_w} = \frac{\sqrt{2}U_{i \min} I_{i \max} D_{p \max}}{2 k k_w j f B}$$

窗口利
用系数

$$k_w = 0.3 \sim 0.5$$

$$\frac{\Delta B}{2} = k B$$

B的选择依据:

小于 $B/(1+k)$

6、利用AP法选择磁芯尺寸 连续模式的电感设计

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。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

$$N = \frac{L\Delta I}{\Delta BA_e}$$

临界Boost电感设计

1、临界连续特征

CRM电感设计

CRM控制法

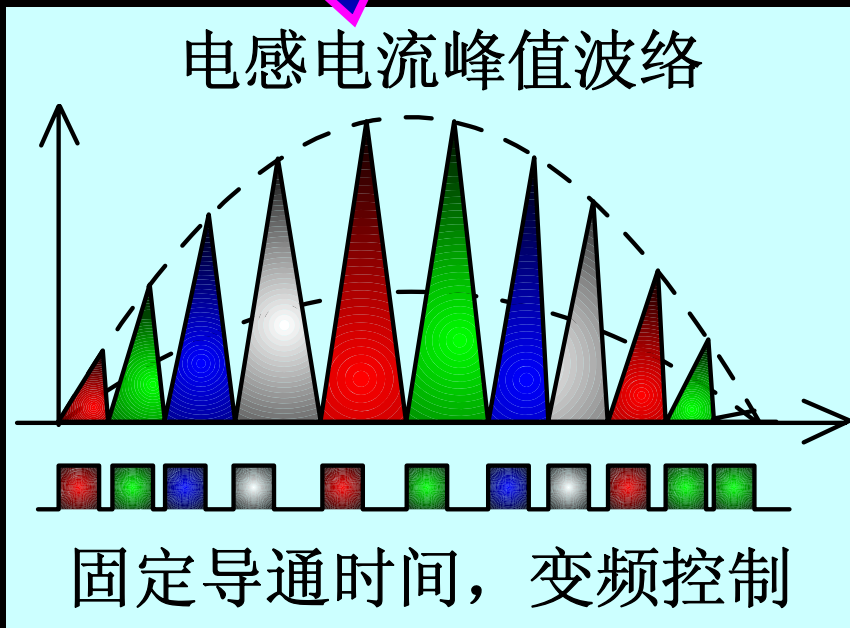
(1) 功率开关零电流导通

(2) 电感电流线性上升

(3) 当峰值电流达到跟踪的参考电流（正弦波）时开关关断，电感电流线性下降到零。

(4) 开关再次开通。

以峰值控制法为例说明控制概念。



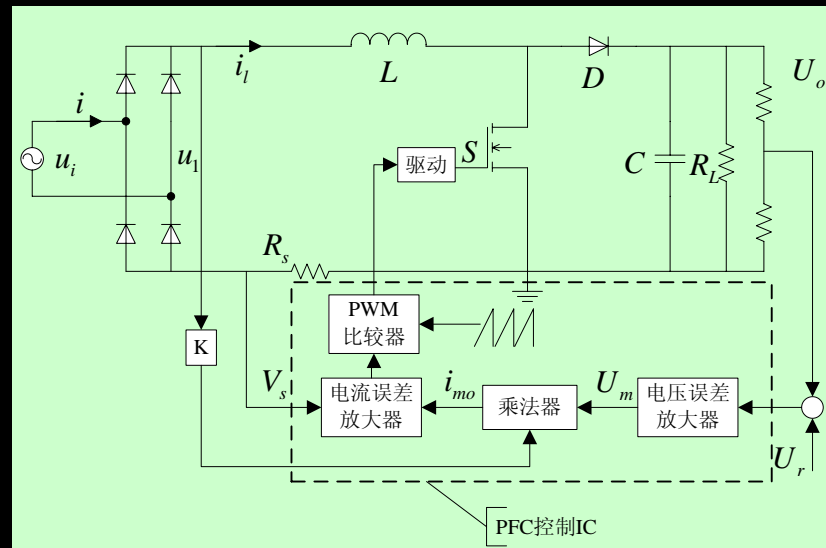
1、临界连续特征

CRM电感设计

输入电压有效值

输入电流有效值

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



即

或

$$U_i = L \frac{I_i}{T_{on}}$$

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

输入功率

输出功率

效率

导通时间与输入电压的平方成正比

2、确定输出电压

CRM电感设计

电感的导通伏秒应当等于截止时伏秒

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

$$T_{of} = \frac{U_{ip}}{U_o - U_{ip}} T_{on}$$

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

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。

2、确定输出电压

CRM电感设计

符号 定义

T_{onh} : 最高输入电压 $U_{i\max}$ 对应的导通时间

T_{onL} : 最低输入电压 $U_{i\min}$ 对应的导通时间

输入电压高，导通
时间长，输入的电
压低，导通时间短

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

假定导通时间为： $T_{on}=10 \mu s$;

输入电压最小峰值： $1.414U_{imin}/U_o=0.65$;

根据 $U_o=U_i/(1-D)$ 得 $D=0.35$

周期为： $T=T_{on}/D=10/0.35=28.57 \mu s$,

频率 $f=1/28.75 \mu s=35kHz$ 。

如果输入电压在 $\pm 20\%$ 范围变化;

最低输入电压为 $220 \times 0.8=176V$;

输出电压： $U_o=1.414 \times 220 \times 0.8/0.65=383V$ 。

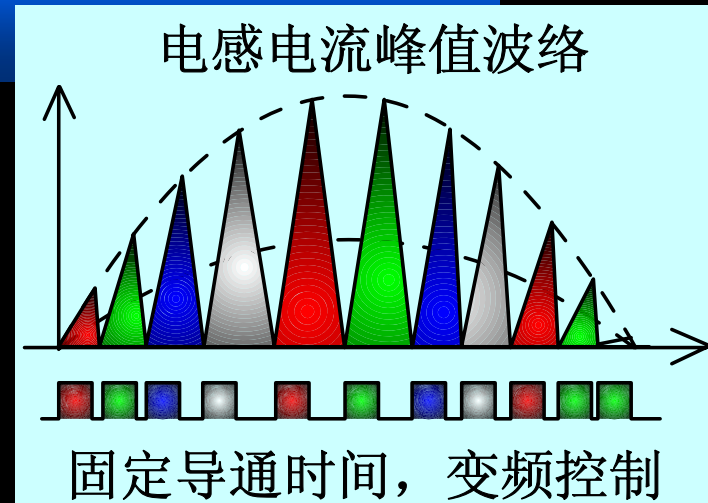
CRM电感设计

在 15° 时，周期为 $12 \mu s$,相当于开关频率为 $83kHz$

在最高输入电压时，得到最高电压导通时间
 $T_{onh} = (0.8/1.2)2 \times TonL = 4.444 \mu s$,

在峰值时的开关周期为

$T = Tonh / (1 - 1.414 \times 1.2 \times 220/383) = 176 \mu s$,
相当于开关频率为 $5.66kHz$ 。



如果将输出电压提高到410V

(1)最低输入电压时开关周期为 $25.45 \mu s$ ，开关频率为39.3kHz。

(2) 15° 时为 $11.864 \mu s$,开关周期为84.5kHz。

(3)输入最高电压峰值时，周期为 $49.2 \mu s$,开关频率为20.3kHz。

(4)频率变化范围大为减少。即使在输入电压过零处，截止时间趋近零，开关频率约为100kHz。最高频率约为最低频率只有5倍。而在383V输出电压时，却为18倍。

(1) 提高输出电压，开关频率变化范围小，有利于输出滤波。

(2) 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。

(3) $220\text{V} \pm 20\%$ 交流输入，一般选择输出电压为 410V 左右。

(4) $110\text{V} \pm 20\%$ 交流输入，输出电压选择 210V 。

3、最大峰值电流

CRM电感设计

最大输入
电流有效值

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

电感中最大
峰值电流

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

4、决定电感量

CRM电感设计

选择原则

(1) 开关频率应在**20kHz**以上，避免噪音。

(2) 最高输入电压峰值时，开关频率最低。

假定最高输入电压峰值的开关周期为

50 μs。

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

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

取

$$L = \frac{U_i T_{onL}}{I_i}$$



5、选择磁芯

CRM电感设计

磁芯选择原则应考虑最恶劣情况不饱和

最低电压输入
峰值不饱和

最大

$$\sqrt{2}U_{i \min} T_{on} L = N A_e B_m$$

最大磁通密度

$$B_m < B_{S(100^\circ\text{C})}$$

为减少损耗，应选择饱和磁感应的

70%。

5、选择磁芯

CRM电感设计

窗口系数

单根导线面积

整个窗口
铜的截面积

$$A_w k_w = \frac{I_{i \max}}{j} N$$

电感线
圈圈数

$$\sqrt{2} U_{i \min} T_{onL} = N A_e B_m$$

$$N = \frac{A_w k_w j}{I_{i \max}}$$

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

6、计算线圈匝数

CRM电感设计

$$N = \frac{2\sqrt{2}LI_{i\max}}{B_m A_e}$$

7、线圈导线截面积

CRM电感设计

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

例：输入 $220V \pm 20\%$ ，输出功率 $200W$ ，采用临界连续（CRM），假定效率为 0.95 。

解：输入最大电流为

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

峰值电流

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

设输出电压为410V，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

$$T_{onh} = T \left(1 - \sqrt{2} U_{i \max} / U_o \right) = 50 \left(1 - \sqrt{2} \times 1.2 \times 220 / 410 \right) = 4.47 \mu s$$

输入最低电压峰值时的导通时间

$$T_{onL} = T_{onh} \left(\frac{U_{i \max}}{U_{i \min}} \right)^2 = 4.47 \times \left(\frac{264}{176} \right)^2 = 10.1 \mu s$$

开关周期为

$$T = \frac{T_{on}}{1 - U_{ip}/U_o} = \frac{10.1}{1 - \sqrt{2} \times 0.8 \times 220/410} = 25.7 \mu s$$

需要的电感量

$$L = \frac{U_i T_{on} L}{I_i} = \frac{176}{1.2} \times 10.1 \times 10^{-6} = 1.48 \text{mH}$$

如果采用磁粉芯，选用铁硅铝磁芯。

$$LI^2 = 1.48 \times 3.382 \times 10^{-3} = 16.9 \text{mJ}$$

电感系数 $A_L = 135 \text{nH}$ 电感 1.48mH

选择77439,有效磁导率为60.

需要的匝数为

$$N = \sqrt{\frac{1480}{0.135}} = 104.7$$

$$N = 105 \text{匝}$$

77439的平均磁路长度 $l=10.74\text{cm}$ ，磁场强度为

$$H = \frac{0.4\pi NI}{l} = \frac{0.4\pi \times 105 \times 1.2 \times 1.414}{10.74} = 210_e$$

磁导率为60， $H=210_e$ ，当磁导率下降到90%时，为了在给定峰值电流时保持给定电感量，需增加匝数为：

$$N = 105 \times \sqrt{\frac{1}{0.9}} = 110.6 \text{匝}$$

$$N = 111 \text{匝}$$

此时磁场强度 $H=111 \times 21/105=22.2\text{Oe}$,
 μ 下降到0.88,此时电感量:

$$L = N^2 A_L = 0.135 \times 0.88 \times 111^2 = 1464 \mu\text{H} = 1.464\text{mH}$$

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 $j=5\text{A/mm}^2$ ，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： $d = 0.63\text{mm}$ | $d' = 0.70\text{mm}$ | $A_{cu} = 0.312\text{mm}^2$

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

$$ID = 23.3\text{mm}$$

内径

$$OD = 47.6\text{mm}$$

考虑第一层

$$N_{m1} = \frac{\pi(ID - 0.5d' - 0.05)}{1.5d'} - 1 = 96.9$$

实际96匝

第二层只要15匝。

PFC的电感计算方法总结

(1) 弄清所选择的控制方法

一般来讲连续模式有：峰值电流控制、平均电流控制和滞环控制等方法。此外还有电感电流临界模式和断续模式，可以参考相关书籍。

(2) 弄清输入参数和输出参数对电感设计的影响，寻找最恶劣条件的情况下，如果电感参数满足设计要求，那么在任意工作范围内电感设计满足要求。

(3) 计算电感时应密切关注电感上的电流变化，电感上电压的变化及其变化的时间即伏秒面积。并遵循能量守恒下电感电流不能突变的原则分析。

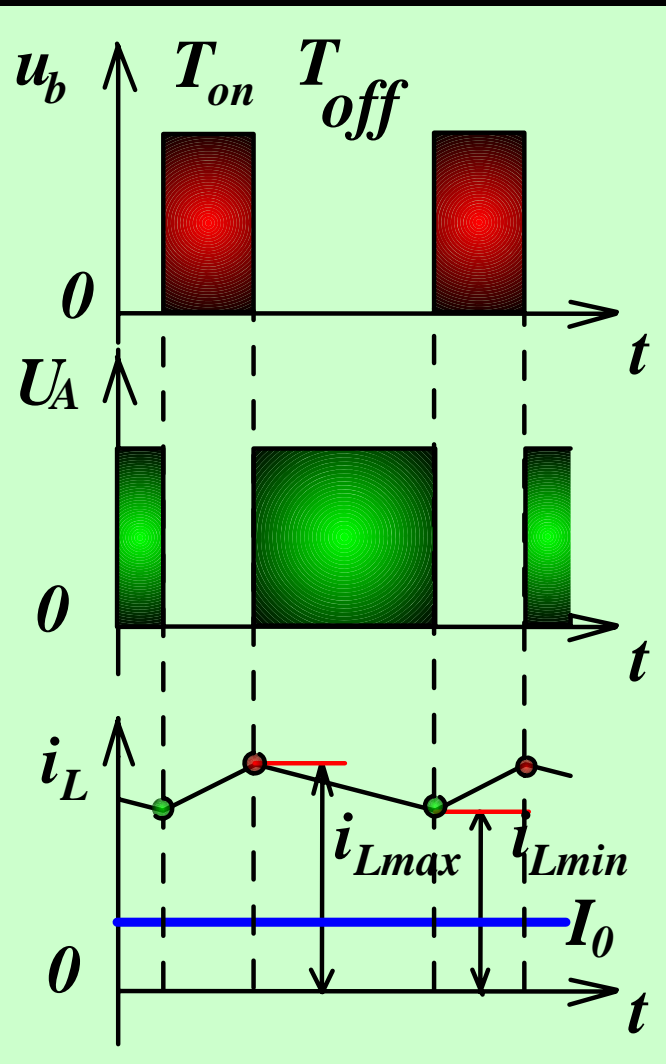
PFC的电感计算方法总结

(4) 磁性材料设计时应注意磁芯磁场的工作范围，确保在整个工作时间内磁感应密度不饱和。并在考虑磁芯损耗、工作频率和工作温度等条件下选择 B_s 。

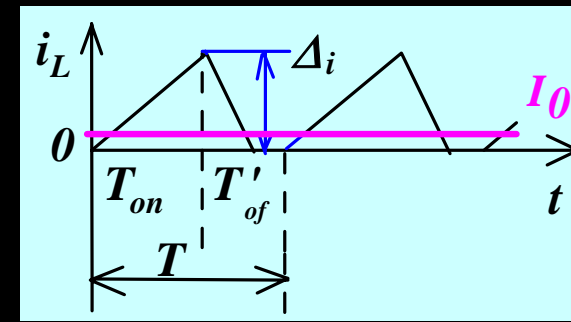
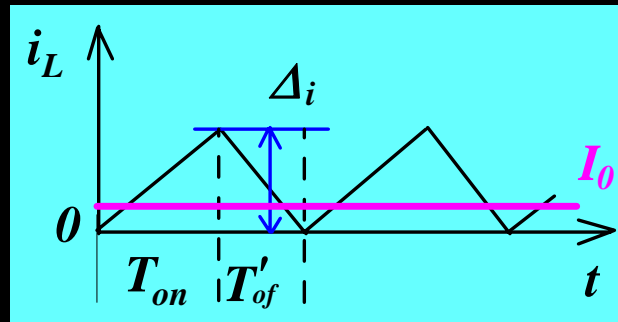
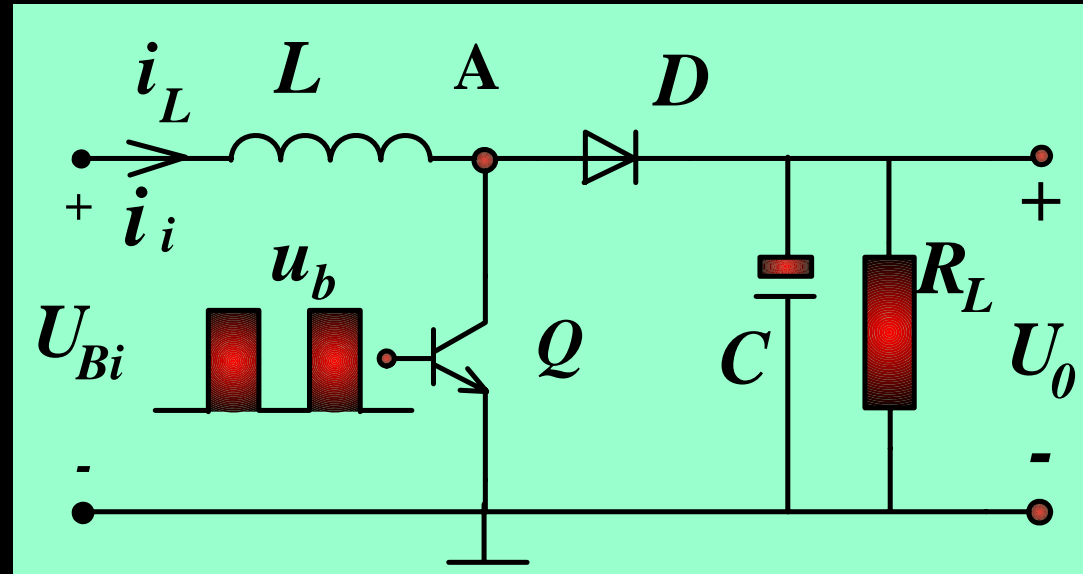
(5) 利用AP法计算

计算磁芯的有效磁芯面积和磁芯窗口面积，再查表选择磁芯。初步设计后并核算窗口利用系数。

附录1：常规Boost电路工作的三种模式

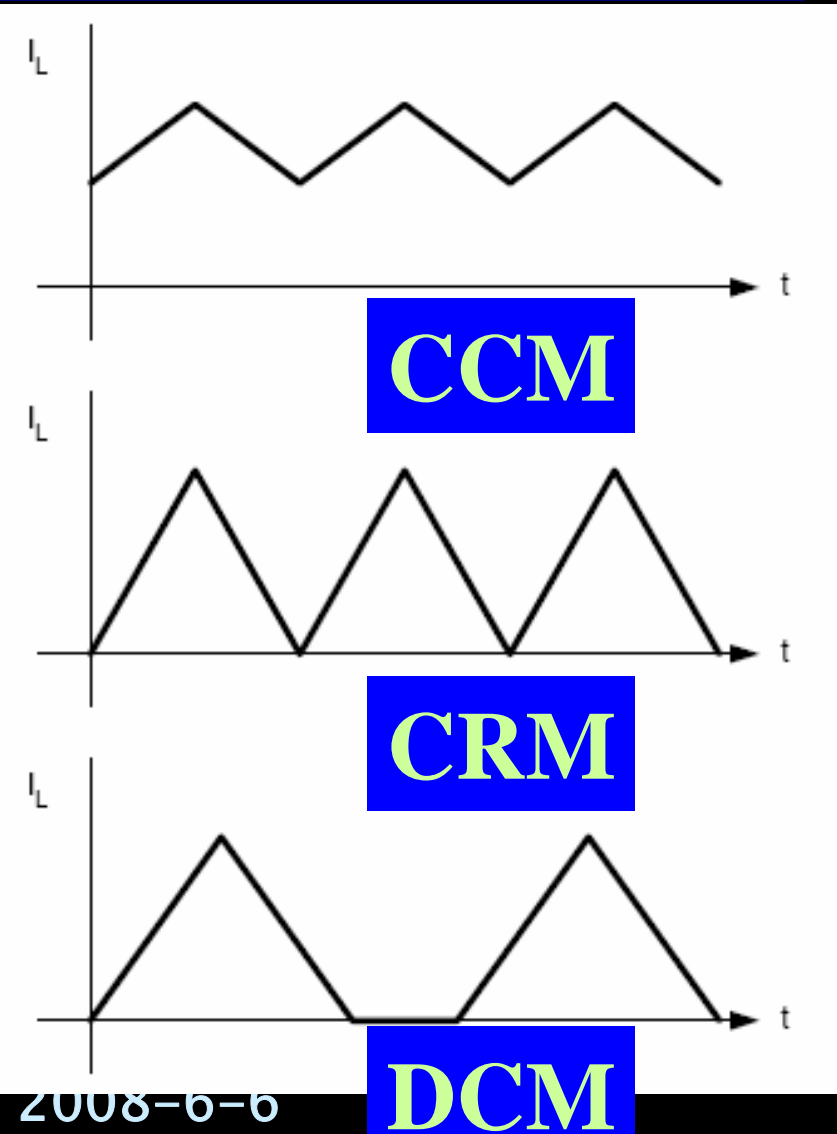


$$U_o = U_i / (1 - D)$$

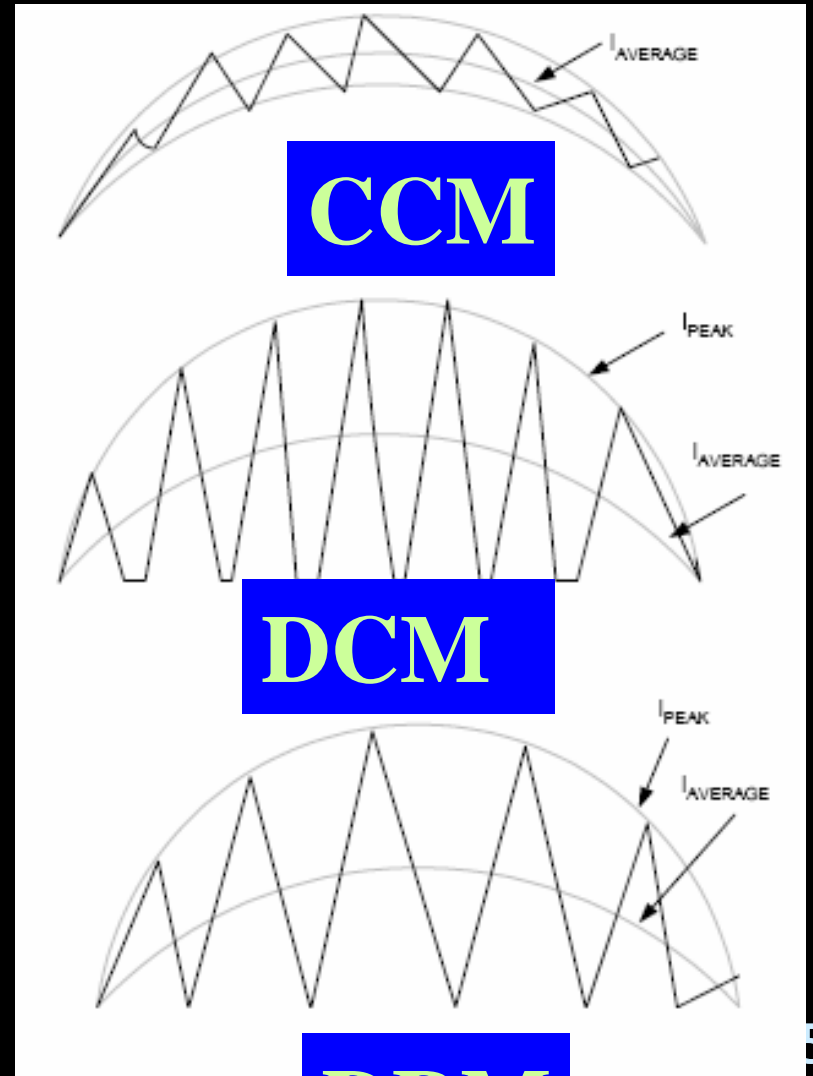


附录2：直流输入与交流输入模式比较

三种电感电流模式



PFC电感电流形状



PFC电感设计

谢谢光临，请批评指正！