

# PFC电感计算

南京航空航天大学

周洁敏

[jieminzh@nuaa.edu.cn](mailto:jieminzh@nuaa.edu.cn)

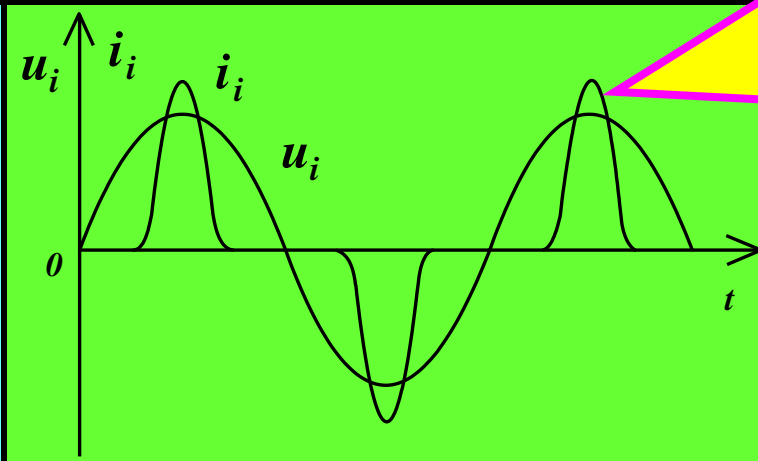
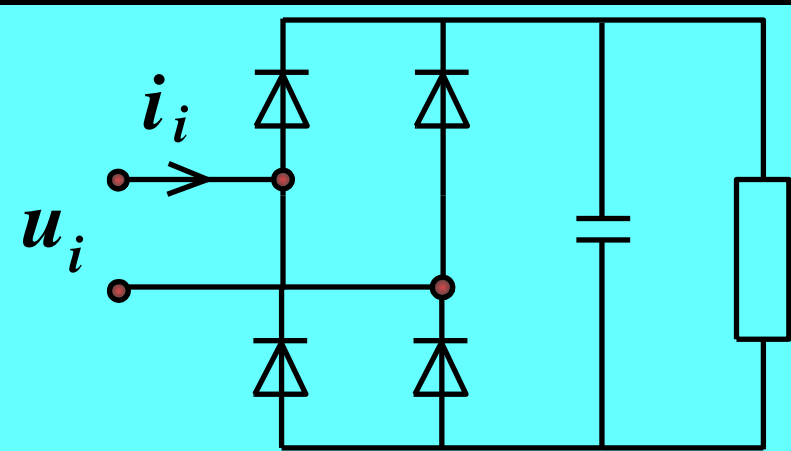
功率因数校正即PFC是十几年电源技术进步的**重大领域**，它的基本原理是：

(1) 电源输入电流实现正弦波，正弦化就是要使其谐波为零，电流失真因数 $THD=1$ 。

(2) 保证电流相位与输入电压相位同相位，相移因数1。

(3) 最终实现 $PF=1$ 的设计工作目标。

# AC/DC整流电路中电流波形

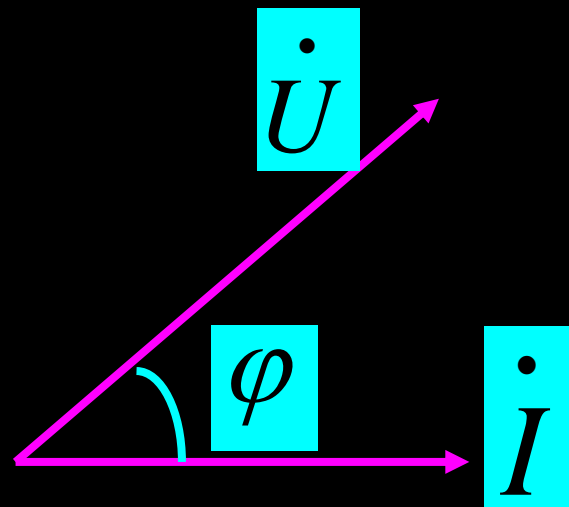


二极管的非线性特性引起

电路中功率因数定义:

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

$$PF = \cos \varphi$$



# 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

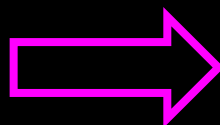
(2) 造成谐波压降

(3) 正弦电压波形畸变

(4) 产生电路故障，  
变电设备损坏。

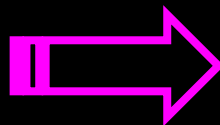
# 名词术语与PFC校正任务

总谐波失真率



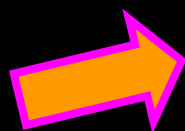
$$\text{THD} = \sqrt{\frac{\sum_{n \neq 1} I_n^2}{I_1^2}}$$

功率因数与  
失真度的关系

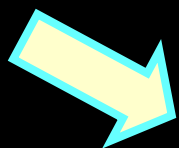


$$\text{PF} = \sqrt{\frac{1}{1 + \text{THD}^2}}$$

功率因数  
校正的任务与目的



正弦化：电流失真  
因数 $\text{THD}=1$ 。



同相位：电流与电压  
相位相同， $\text{PF}=1$ 。

# PFC校正电路的选择

PFC校正电路有

buck

boost

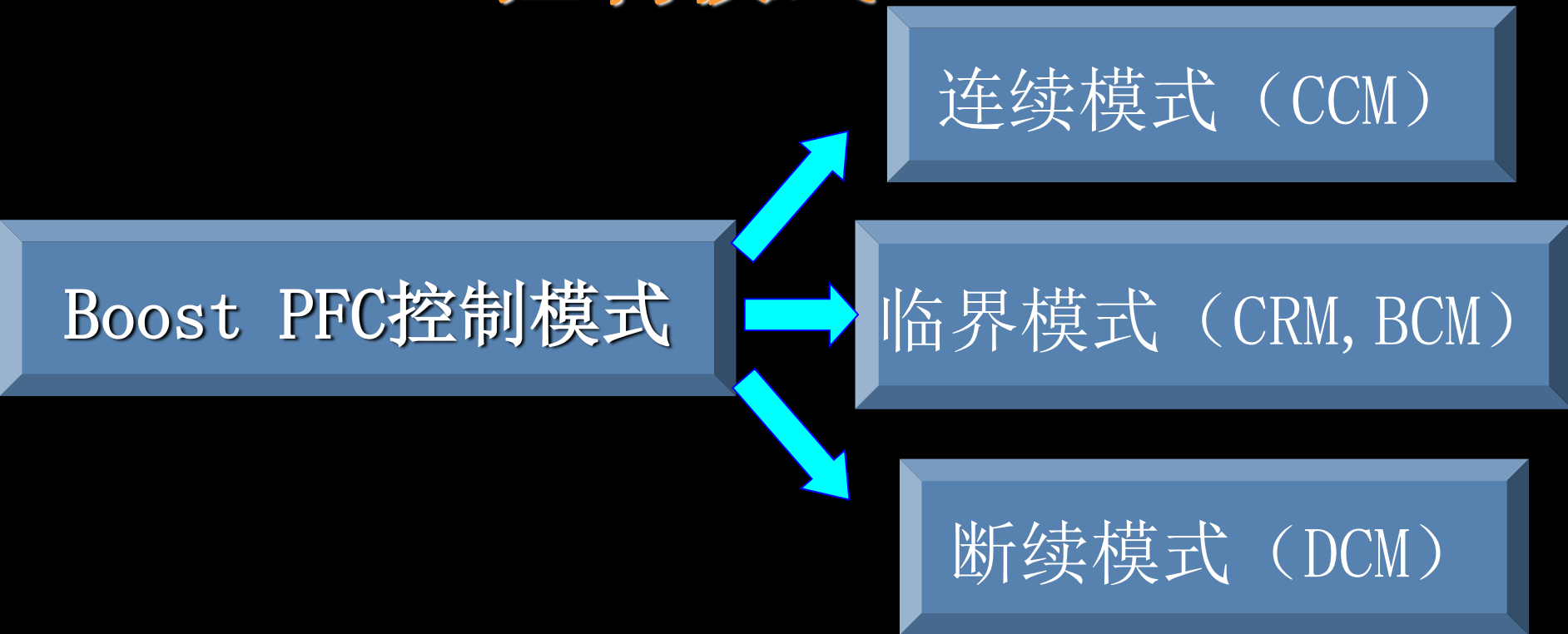
Cuk

Flyback

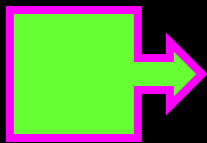
SEPIC

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，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电路的PFC控制模式——CCM

CCM基本特征

常用的  
控制  
方法

(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

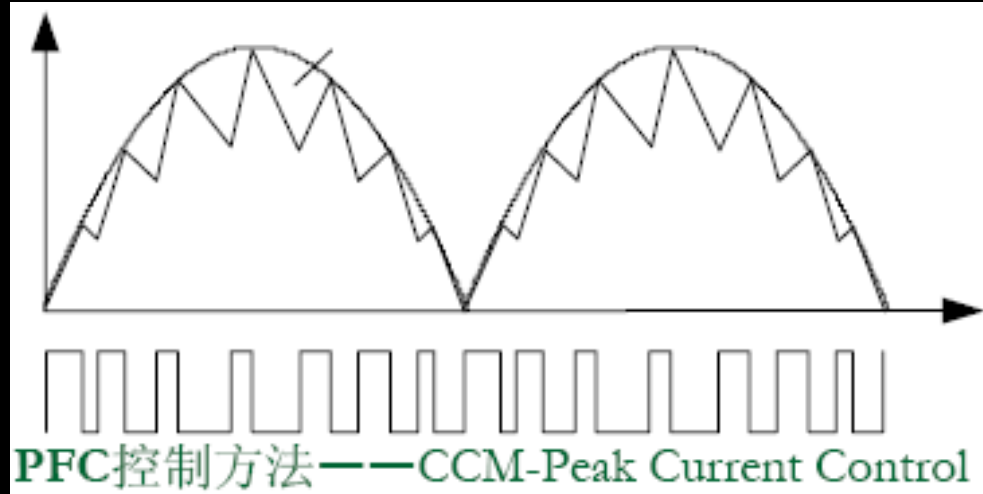
可恒定（平均电流控制）

可变化：滞环电流控制  
峰值电流控制

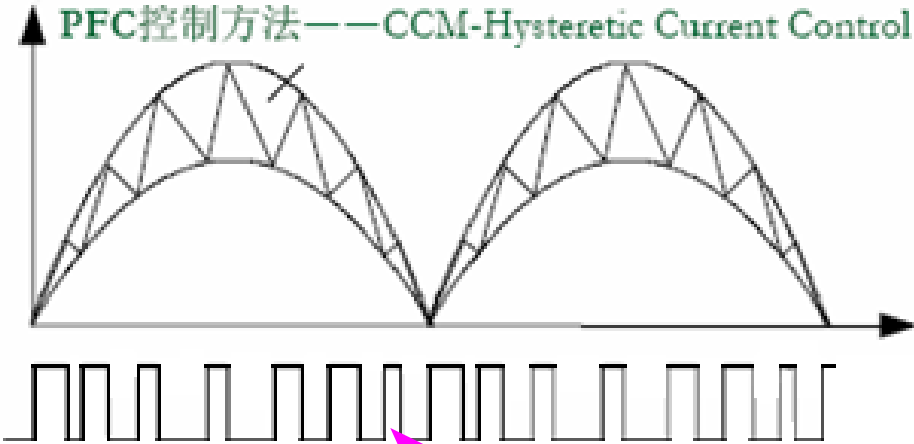


# PFC的控制方法: CCM的控制方法

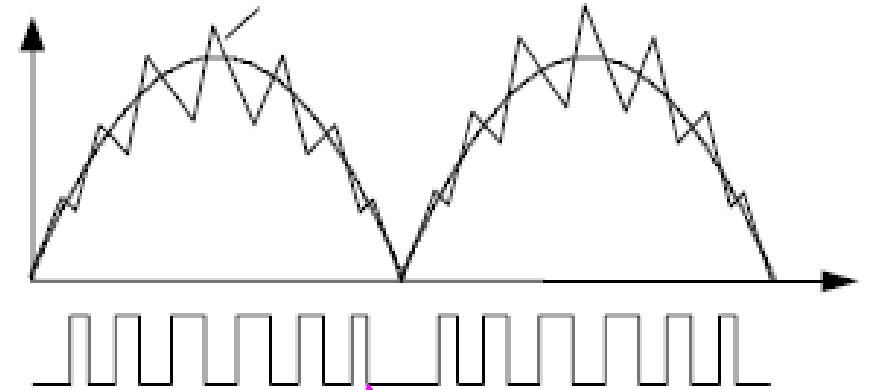
峰值电  
流控制



PFC控制方法——CCM-Hysteretic Current Control



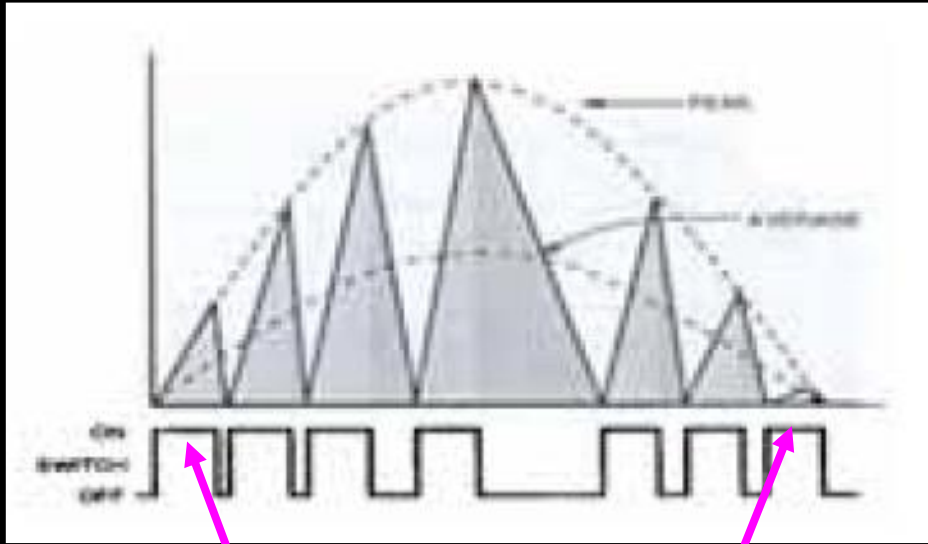
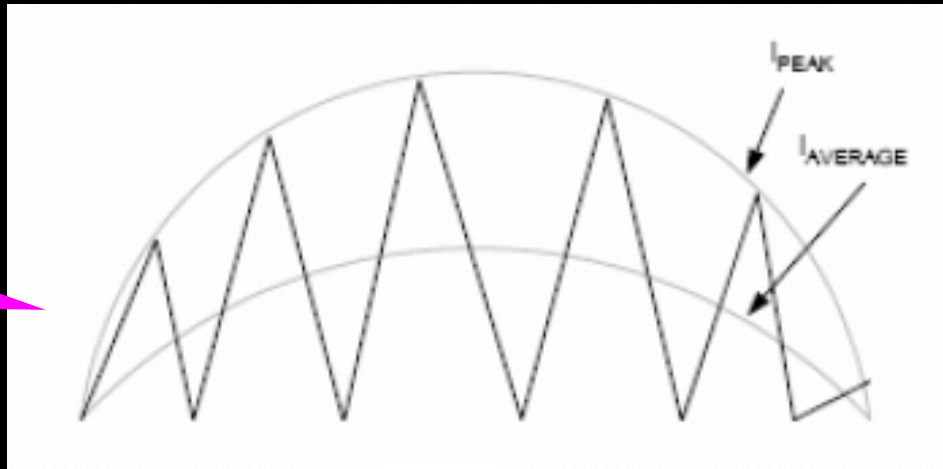
PFC控制方法——CCM-Average Current Control



# BOOST PFC控制模式——CRM

CRM (BCM) 特点

电感电感电流始终处于CRM模式



可获得单位功率因数1

适用中小功率场合

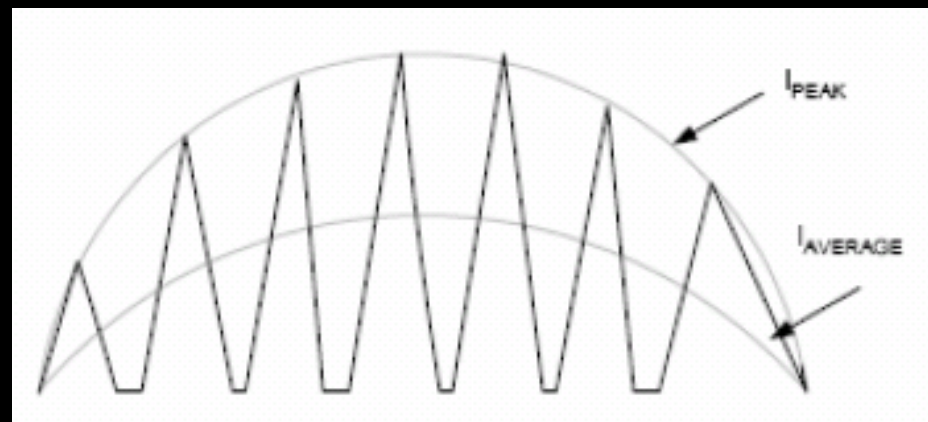
开关频率可变，  
峰值处最低

导通时间固定

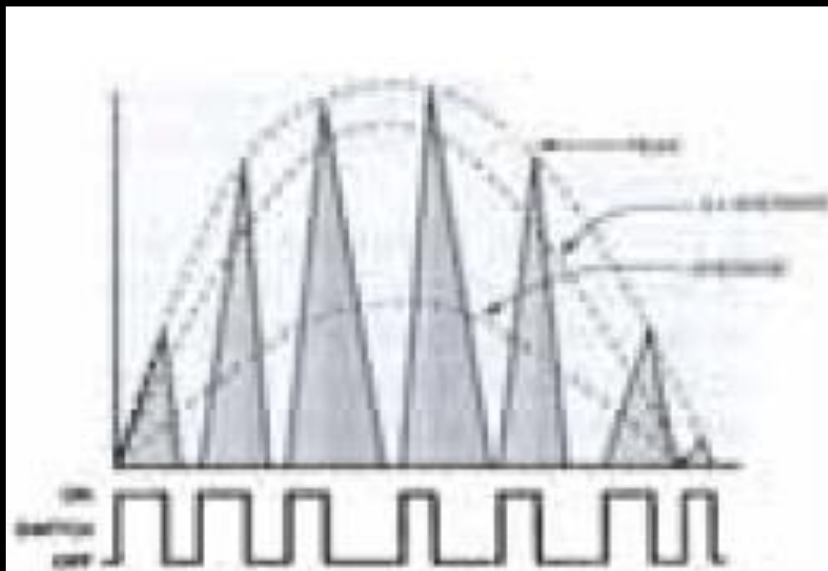
# BOOST PFC控制模式——DCM

## 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、代价：功率管峰值电流大。

# 讨论的内容

一、连续模式的电感设计

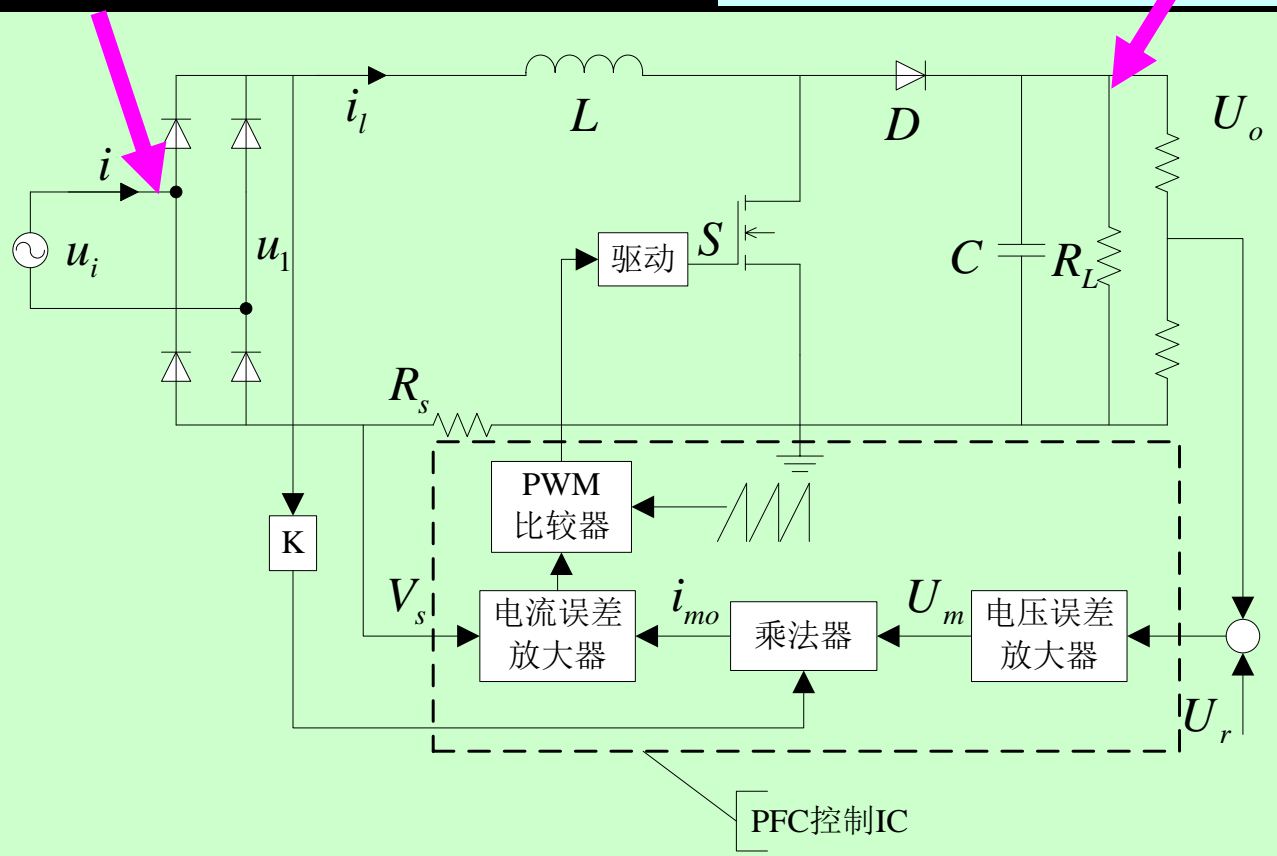
二、临界连续模式电感设计

# 1、确定输出电压

# CCM的电感设计

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

$$U_0 = 390 \sim 410(V)$$



输出电压一般是输入最高峰值电压的1.05~1.1倍。

输出电压高于输入最高电压的峰值。

**最高峰值电压**

输入220V，50Hz，变化范围是额定值的20% ( $\Delta=20$ )

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

## 2、确定最大输入电流

设计要点

电感在最大电流时避免饱和

最大电流发生在输入电压最低，输出功率最大时。

最大输入电流

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

式中三个参数

$$U_{i \min} = U_{in} (100 - \Delta)\%$$

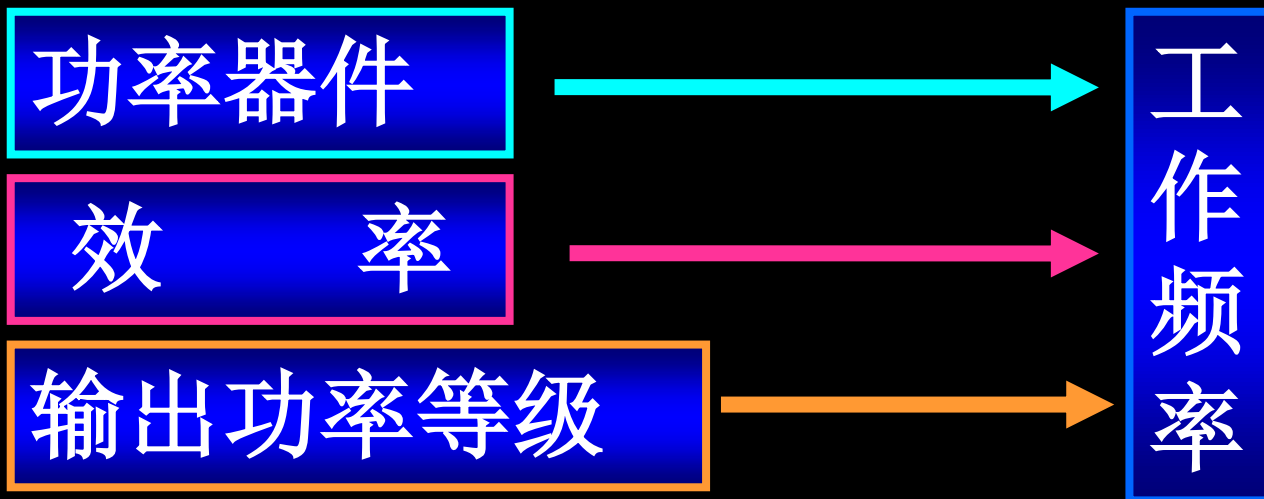
$$\eta \approx 95\%$$

$$P_o = U_o I_o$$

PFC

# 3、确定工作频率

# CCM的电感设计

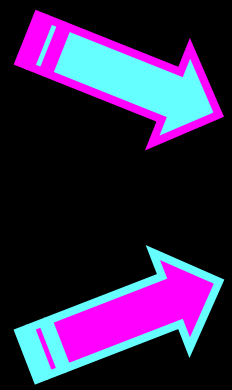


例如

输出功率  
1500W

功率管为  
MOSFET  
PFC

开关频率  
70~100kHz



## 4. 确定最低输入电压峰值时的最大占空度

根据Boost  
电路的公式

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

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

最大占  
空度

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

输入电压  
最小峰值

输出电压 $U_o$ 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

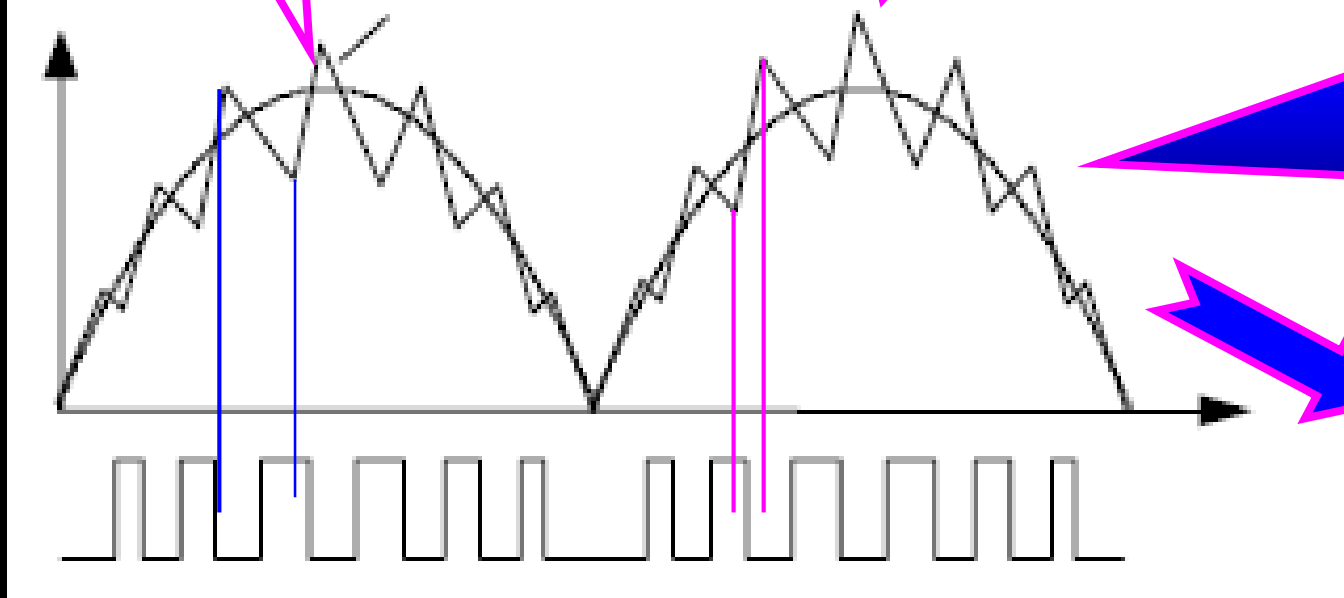
电感中  
电流波形

一般情况下：电感中的纹波  
电流等于峰值电流的20%。

跟踪的  
是输入  
电流平  
均值

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

PFC控制方法——CCM-Average Current Control

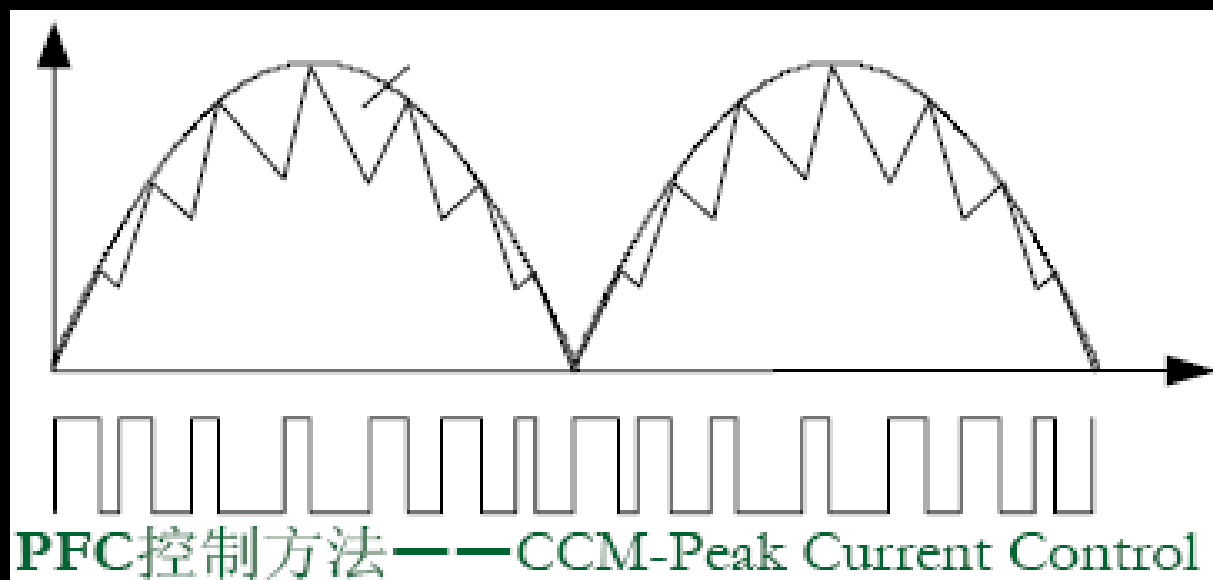
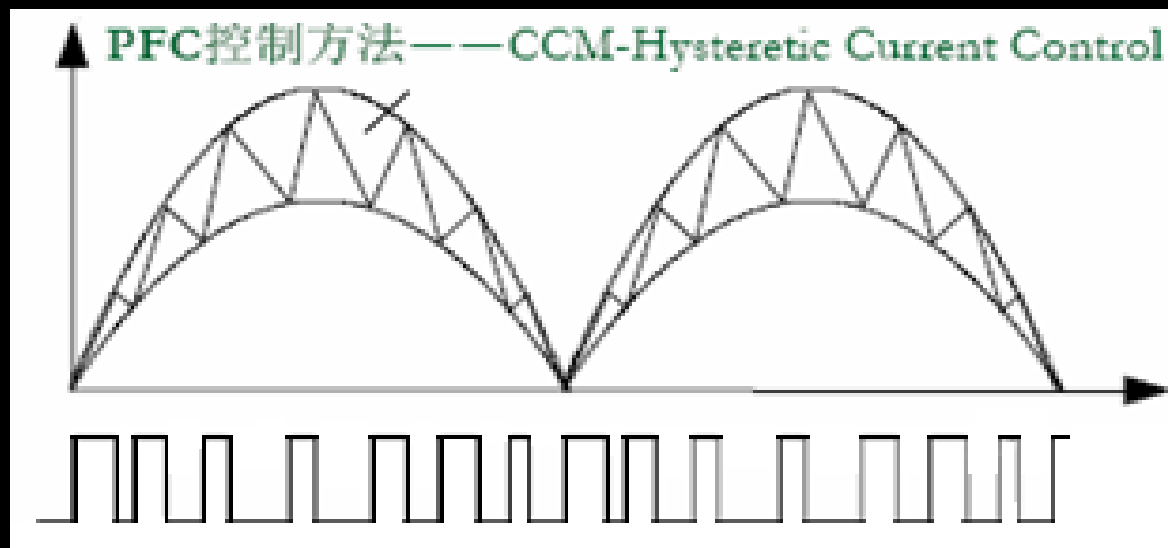


# 5、求需要的电感量

# CCM的电感设计

另外两种控制方法也类似。

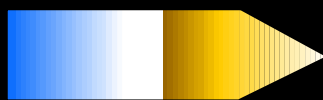
$$U_L = L \frac{\Delta I}{\Delta t}$$



## 5、求需要的电感量

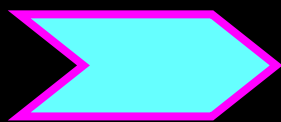
## CCM的电感设计

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



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

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



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

定义电感纹波电流与峰值电流的比例系数

$$k = \frac{\Delta I / 2}{I_{LP}}$$

即

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

取

$$k = 0.1 \sim 0.15$$

## 6、利用AP法选择磁芯尺寸

## CCM模式电感设计

求磁芯有效截面积  $A_e$

$$\sqrt{2}U_{i \min} T_{on \max} = N\Delta\Phi = N\Delta BA_e$$

其中

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

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

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

# 6、利用AP法选择磁芯尺寸

# 连续模式的电感设计

确定磁芯的工作情况前，先研究Boost电感特点：

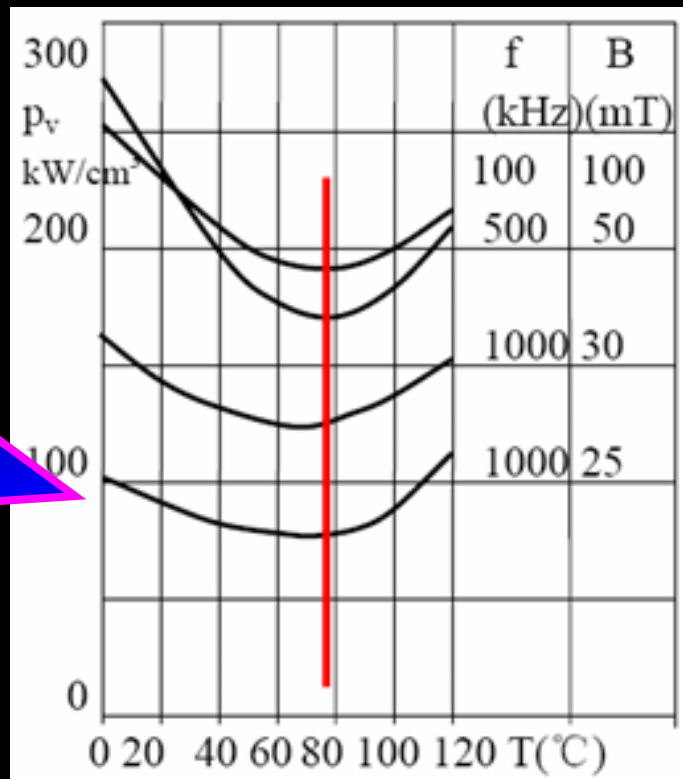
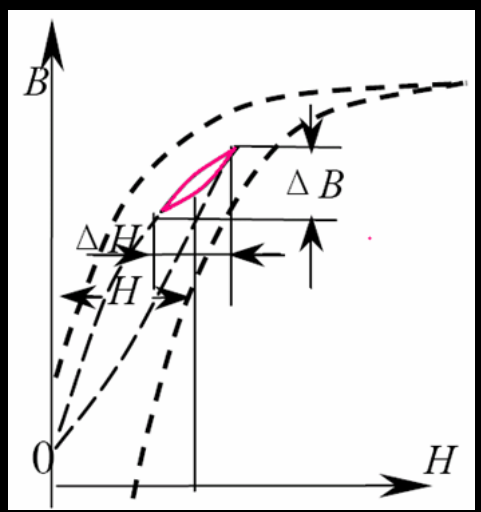
- (A) 直流分量很大
- (B) 磁芯损耗小于铜损耗
- (C) 最大输入电流不饱和

## 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

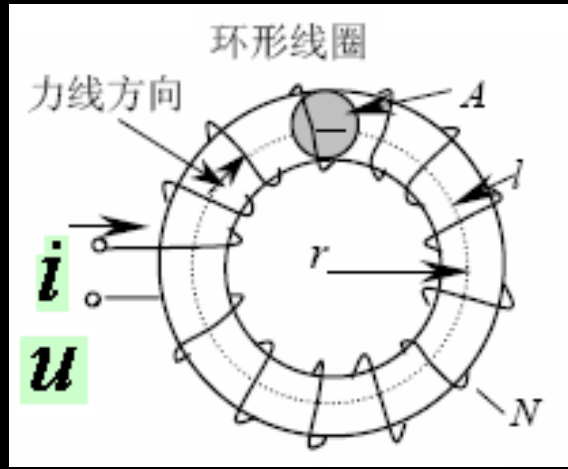


# 6、利用AP法选择磁芯尺寸 连续模式的电感设计

求窗口面积  $A_w$

N匝导线的面积

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



A=area

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

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

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

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

保证任何情况下磁芯不  
饱和使用。

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

$$< B / (1 + k)$$

$$k_w = 0.3 \sim 0.5$$

# 7、计算匝数

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

上述就是以Boost电路PFC校正电路为例，在连续电流模式情况下的PFC电感计算。



## 二、临界Boost电感设计

以峰值控制法  
为例说明控制  
概念。

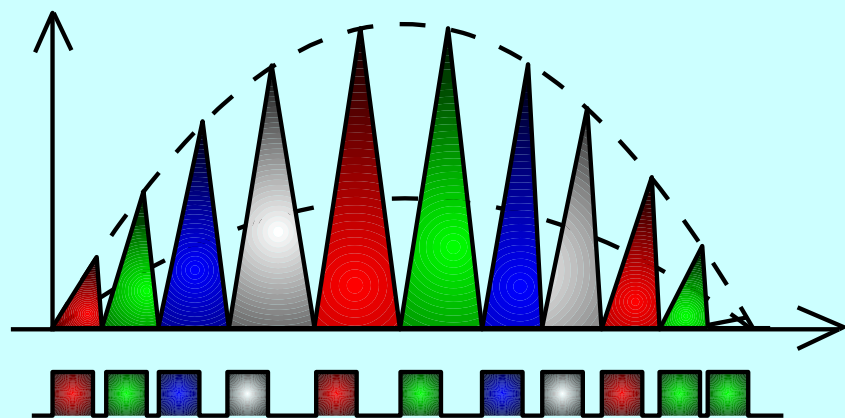
## CRM控制法

(1) 功率开关零电流导通电感电流线性上升。

(2) 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。

(3) 开关再次开通。

电感电流峰值波络



固定导通时间，变频控制

# CRM电感设计方法一

## 临界连续特征

$$I_{LP} = \frac{2\sqrt{2}P_{i\max}}{U_i}$$

$$\Delta i_{on} = \frac{T_{on} \cdot \sqrt{2} \cdot U_i}{L}$$

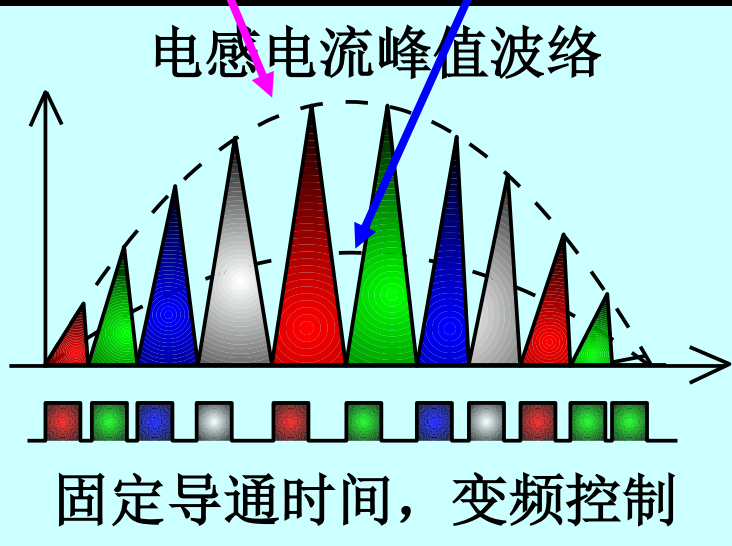
$$T_{on} = \frac{2 \cdot P_{i\max} \cdot L}{U_i^2}$$

$$\Delta i_{off} = \frac{T_{off} (U_0 - \sqrt{2}U_i)}{L}$$

$$T_{off} = \frac{2\sqrt{2} \cdot P_{i\max} \cdot L}{U_i (U_0 - \sqrt{2}U_i \sin \omega t)}$$

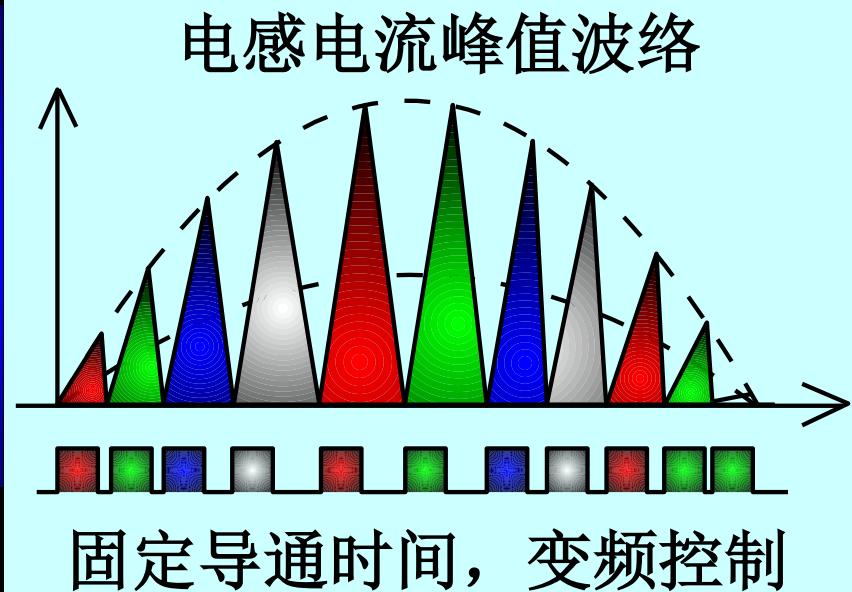
$$f_s = \frac{1}{T_{on} + T_{off}} = \frac{P_{i\max} (U_0 - \sqrt{2} \cdot U_i \sin \omega t)}{2LU_0}$$

$$L = \frac{U_i^2 \cdot (U_0 - \sqrt{2}U_i)}{2f_{\min} U_0 P_{i\max}}$$



为什么？

对于给定输入电压和负载，开关频率也是要随着输入交流电压瞬时值的变化而变化的。



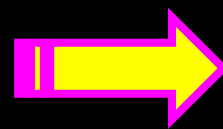
因此选择正弦交流输入的峰值点设计，开关频率最小，正弦值等于1，所以得到电感的表达式。

$$L = \frac{U_i^2 \cdot (U_0 - \sqrt{2}U_i)}{2f_{\min} U_0 P_{i\max}}$$

方法二的理论依据：

电感的导通伏秒应当等于截止时伏秒

$$U_i T_{on} = (U_o - U_i) T_{off}$$



$$T_{off} = \frac{U_i}{U_o - U_i} T_{on}$$

开关周期

$$T_s = T_{off} + T_{on} = \left( \frac{U_i}{U_o - U_i} + 1 \right) T_{on} = \frac{U_o}{U_o - U_i} T_{on} = \frac{T_{on}}{1 - U_i/U_o}$$

应当注意：输出电压 $U_o$ 一定大于输入电压 $U_i$ ，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。

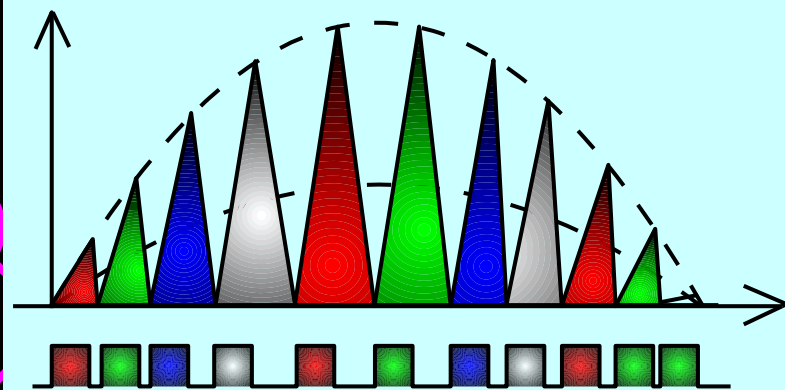
## 符号 定义

$T_{onh}$  : 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，导通时间短，输入的电压低，导通时间长

电感电流峰值波络



固定导通时间，变频控制

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

# 最大峰值电流

# CRM电感设计方法二

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

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

## 电感选择原则

(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50μs。

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

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

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



# 磁芯的选择

# 选择磁芯

# CRM电感设计方法

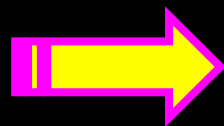
磁芯选择原则应考虑最恶劣情况下磁芯不饱和

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%。

# 选择磁芯

# CRM电感设计

窗口系数

单根导线面积

整个窗口铜线的截面积

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

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

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

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

电感线圈圈数

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

用AP法选择磁芯尺寸

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

## 线圈导线截面积

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

# 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，那么在任何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，选择磁芯  
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。

# PFC电感设计

谢谢光临，请批评指正！

# 附录

附录1 常规Boost电路工作的三种模式

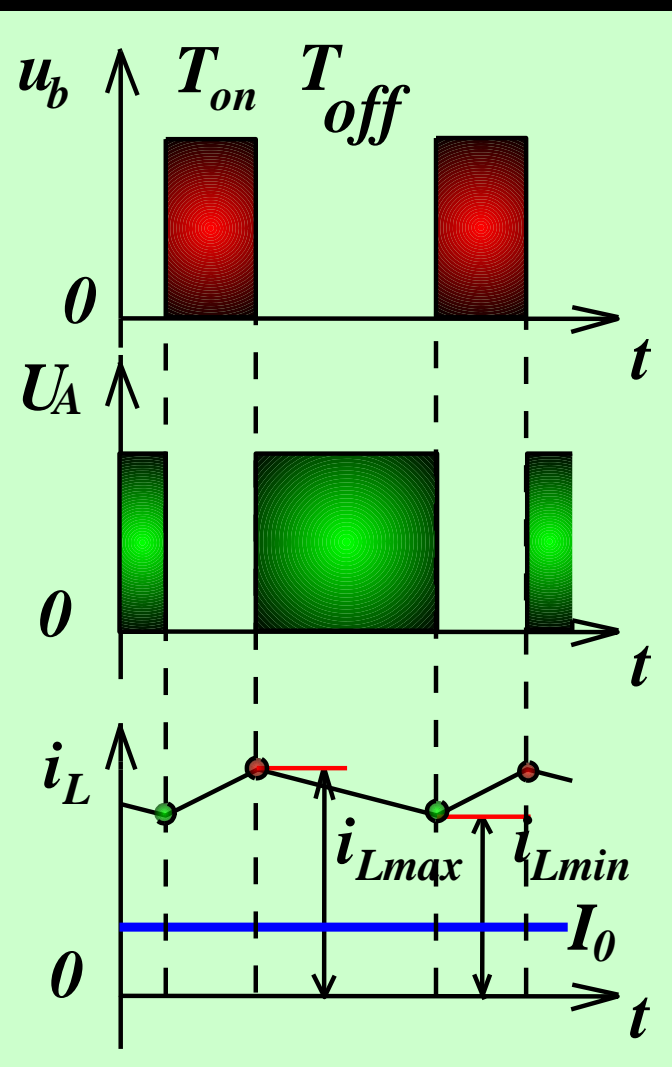
附录2 直流输入与交流输入模式比较

附录3 例子说明 CRM电感设计

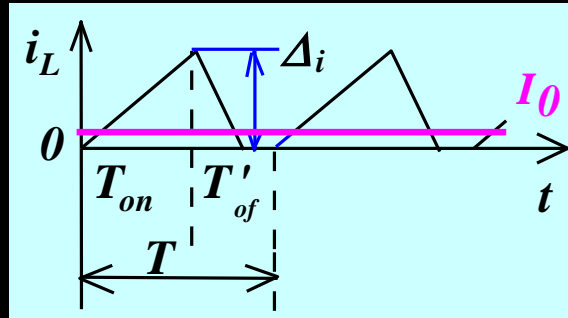
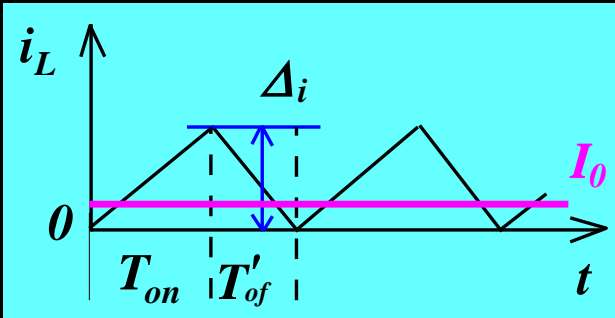
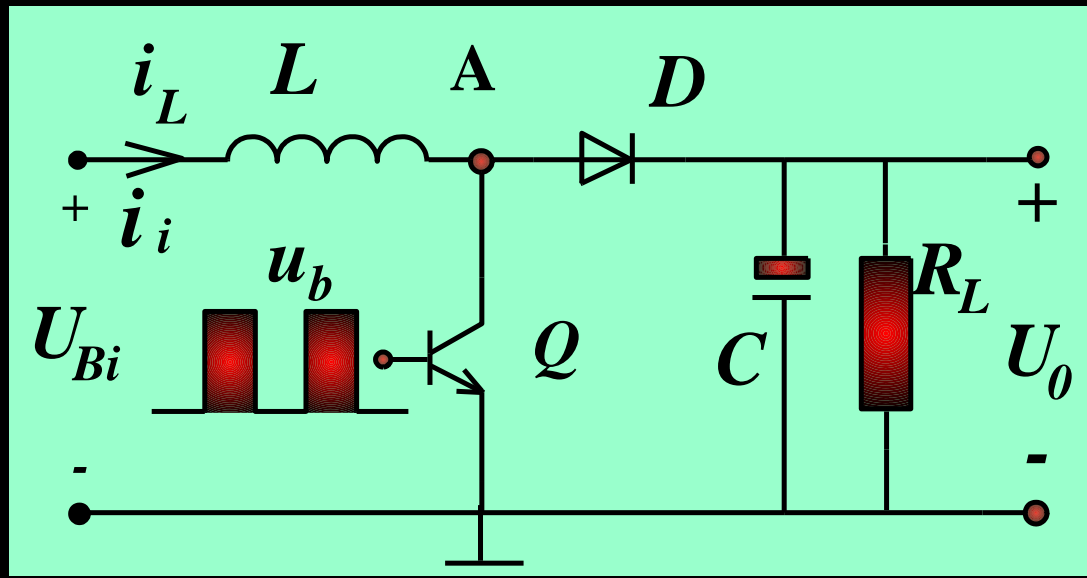
附录4 例题 CRM电感设计



# 附录1：常规Boost电路工作的三种模式

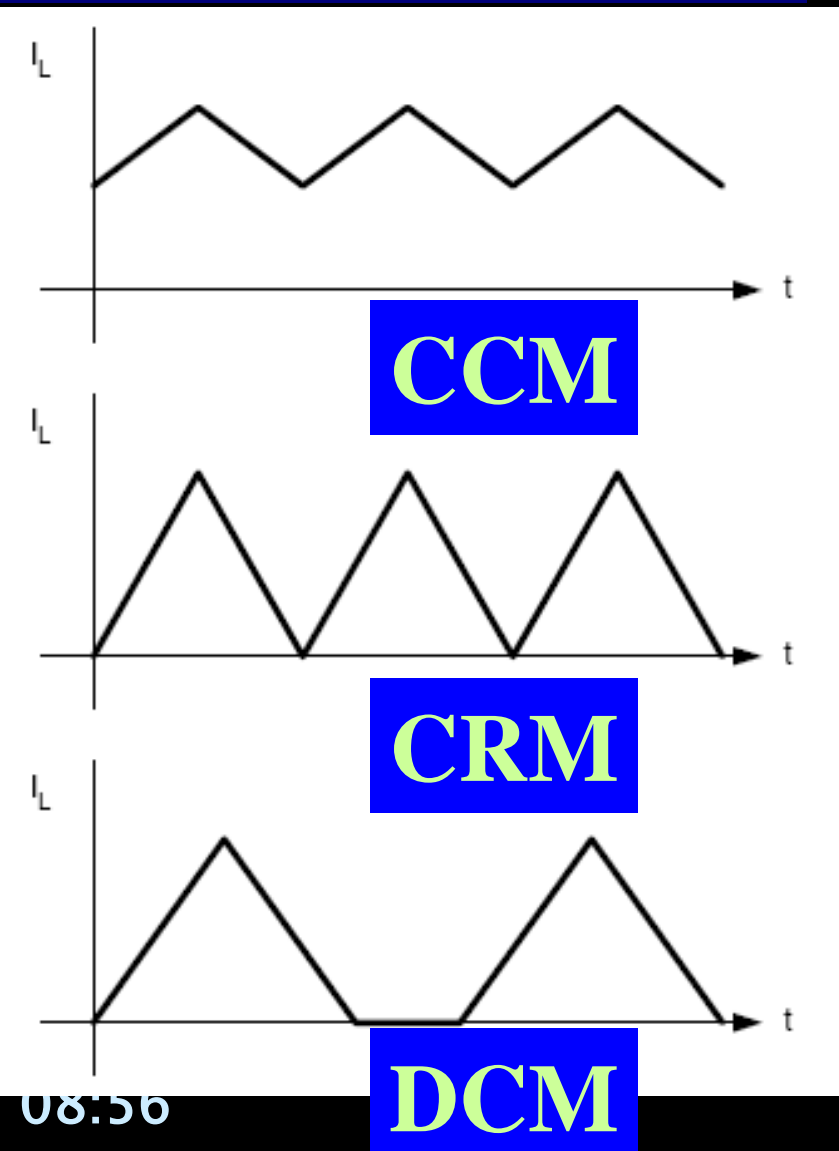


$$U_o = U_i / (1 - D)$$

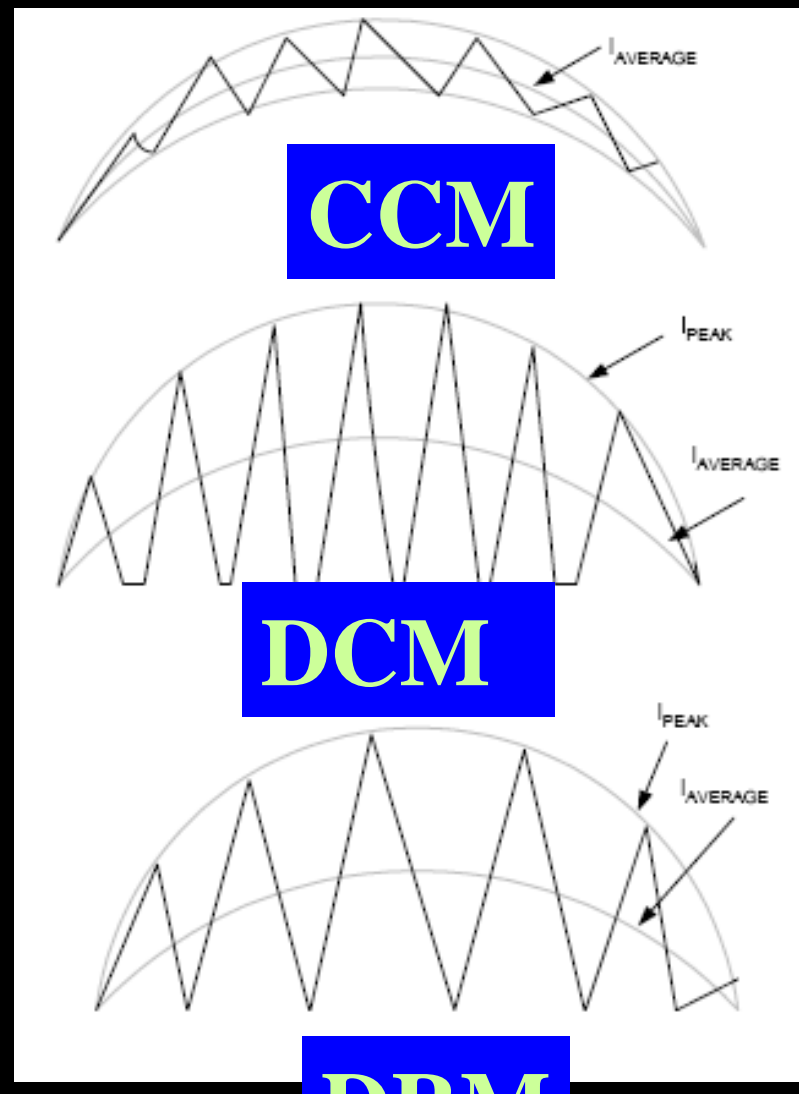


# 附录2：直流输入与交流输入模式比较

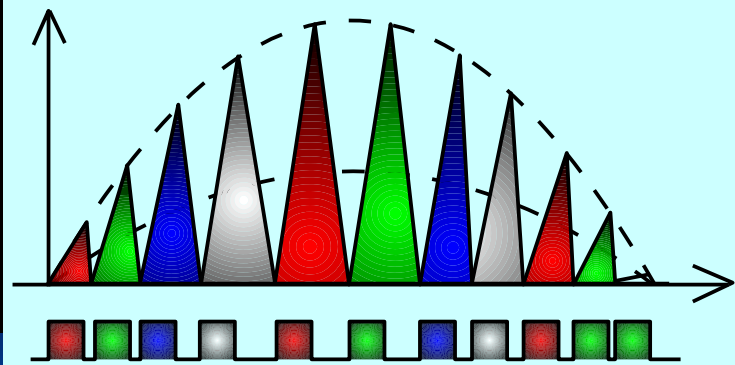
## 三种电感电流模式



## PFC电感电流形状



电感电流峰值波络



固定导通时间，变频控制

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 $f=1/28.57\mu s=35kHz$ 。

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

# 附录3 例子说明

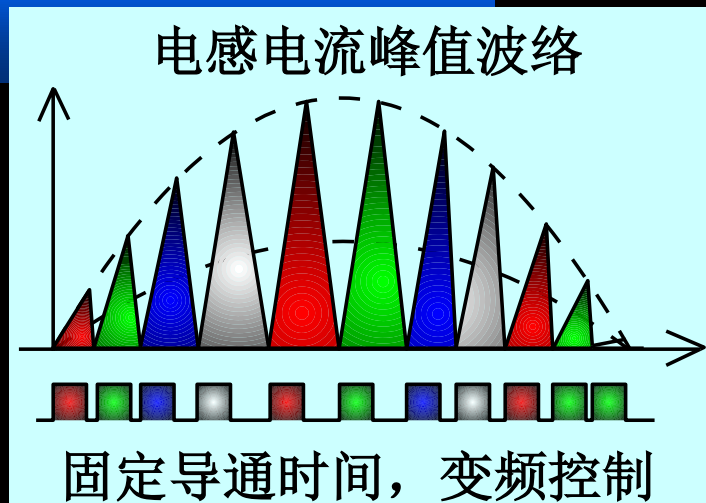
# CRM电感设计方法二

在 $15^\circ$  时，周期为 $12\mu\text{s}$ ，相当于开关频率为 $83\text{kHz}$

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

在峰值时的开关周期为

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



## 附录3 例子说明 CRM电感设计方法二

如果将输出电压提高到410V

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

(2) $15^\circ$  时为 $11.864\mu\text{s}$ ,开关周期为 $84.5\text{kHz}$ 。

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

(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 $100\text{kHz}$ 。最高频率约为最低频率只有5倍。而在 $383\text{V}$ 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 $410\text{V}$ 左右。

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

例：输入220V±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

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

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 $\mu$ s，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

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

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。

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

电感系数  $A_L = 135nH$  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 $H=111 \times 21/105=22.2\text{Oe}$ ， $\mu$ 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。

完