



MASTERS 2009

THE WORLDWIDE CONFERENCE FOR EMBEDDED CONTROL ENGINEERS

C10L18 PFC

功率因数校正 (PFC) 功能的实现

课程目标

□ 学习完本课程后，您将能够：

- 理解在电源变换中，dsPIC[®] DSC 如何实现不同的拓扑结构
- 学习如何设计及实现一个单阶的交错式功率因数校正器-IPFC
- 知晓在升压式电源变换器中，如何利用dsPIC[®] DSC 来实现各种数字环
- 观摩Microchip的交错式功率因数校正器参考设计的演示

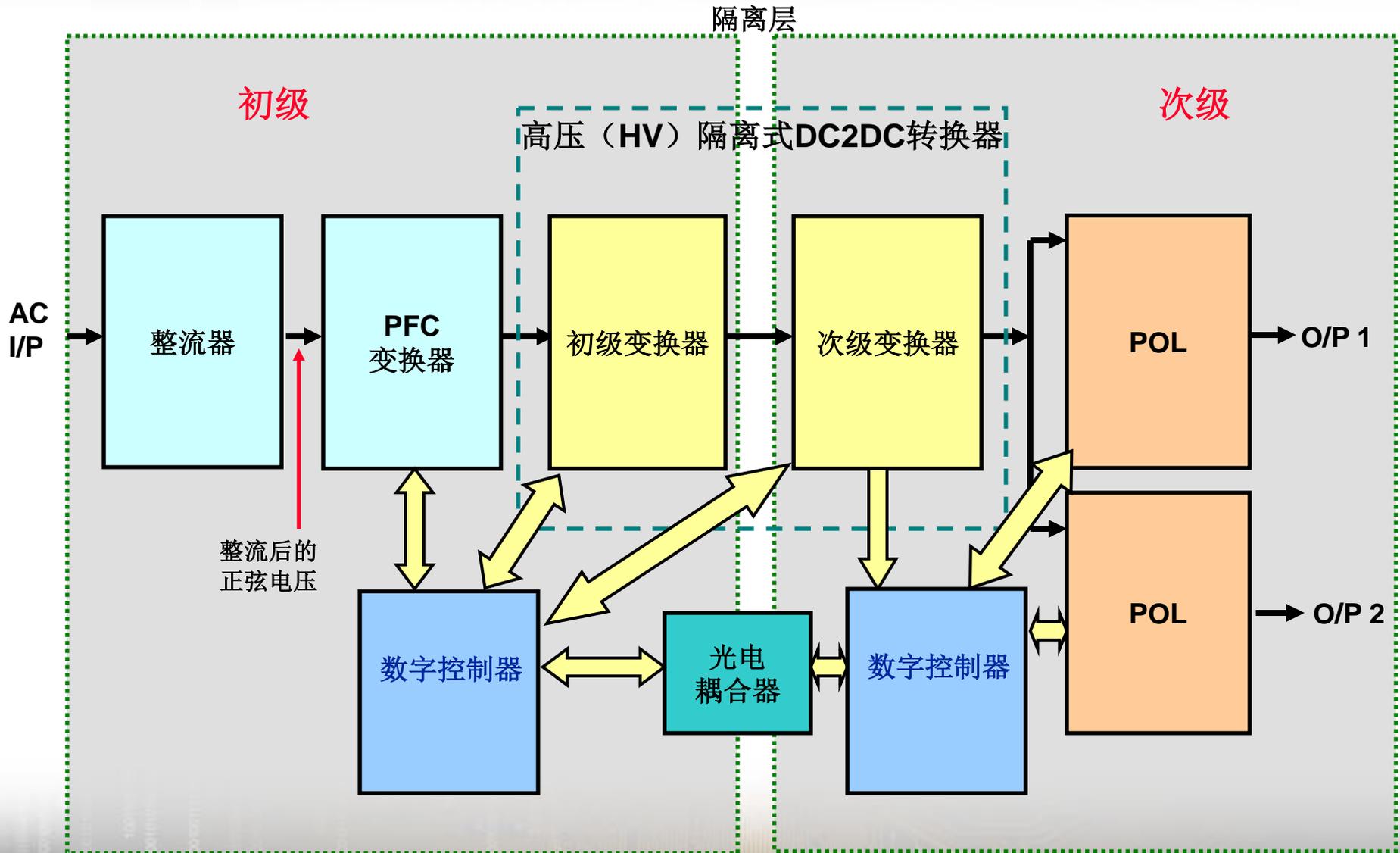
课程安排

- 功率因数在电源变换系统中的意义
- 如何实现功率因数校正？
- 单阶的交错式功率因数校正器的设计
- 基于dsPIC[®] DSC的数字环的实现
- 调节器设计及负载均衡技术
- 演示

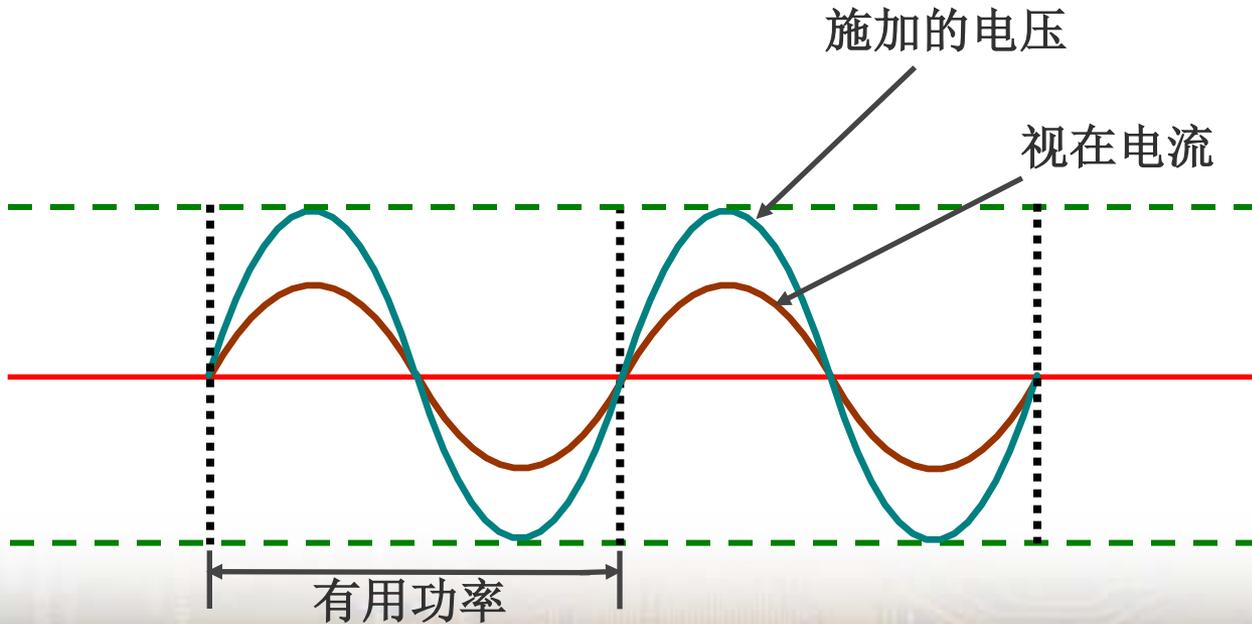
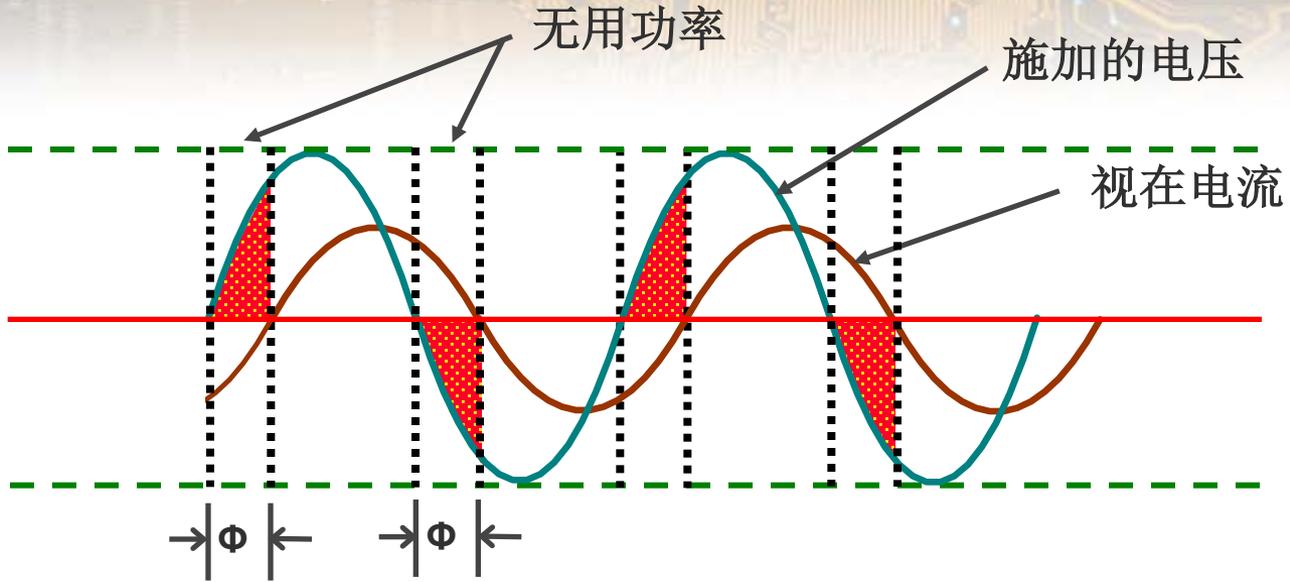
课程安排

- 功率因数在电源变换系统中的意义
- 如何实现功率因数校正?
- 单阶的交错式功率因数校正器的设计
- 基于dsPIC[®] DSC的数字环的实现
- 调节器设计及负载均衡技术
- 演示

伺服电源系统之 典型结构框图



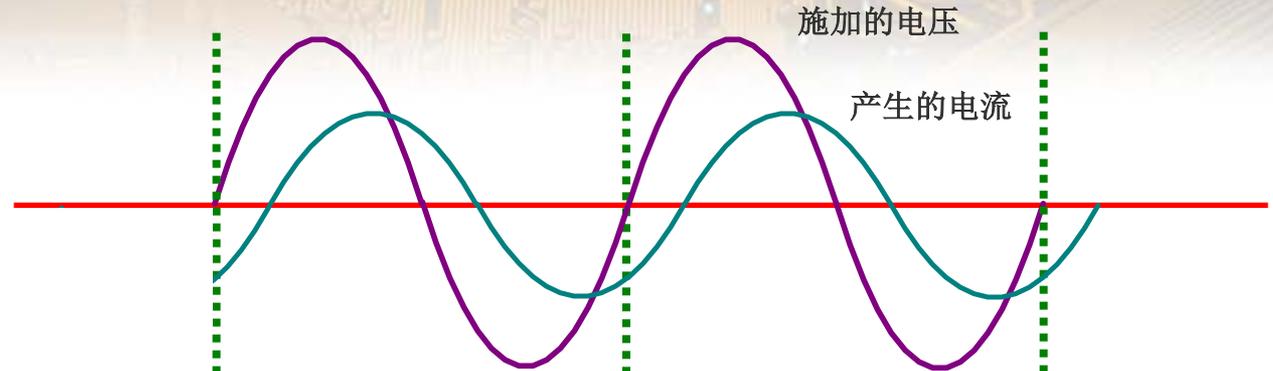
有用功率?



低功率因数的几种原因

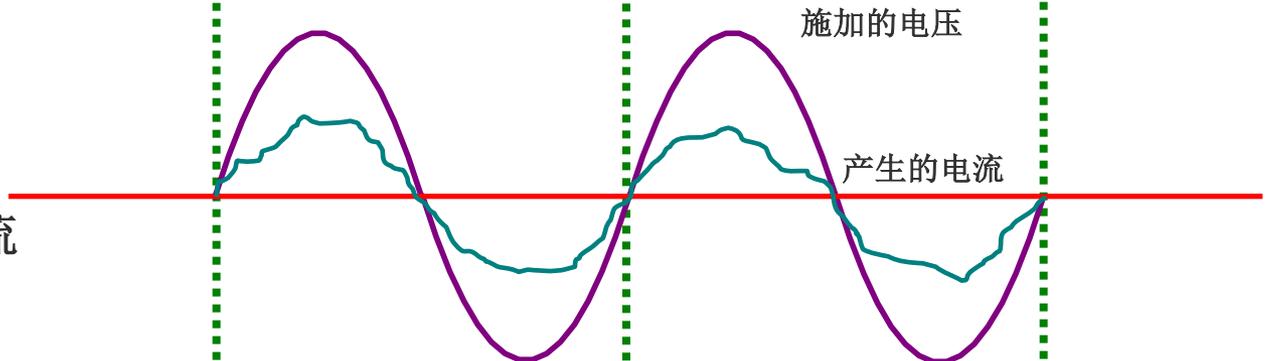
情形1

有相移的正弦电流



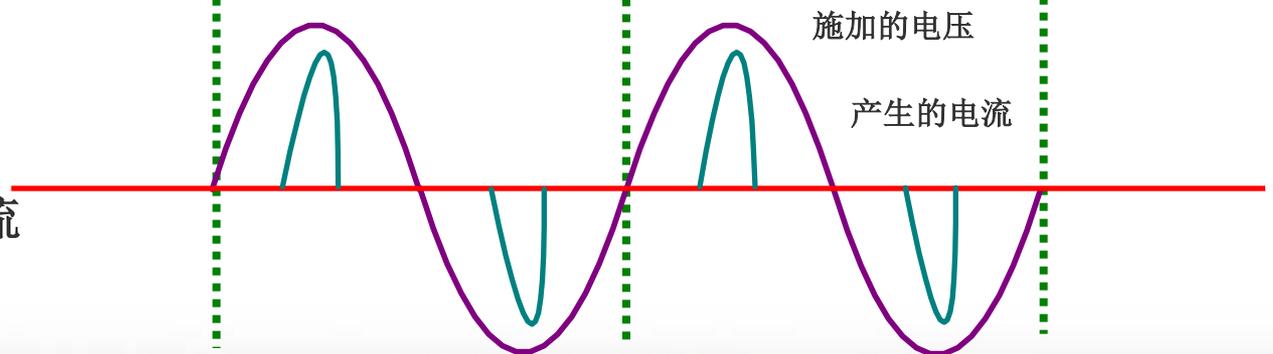
情形2

无相移的非正弦电流

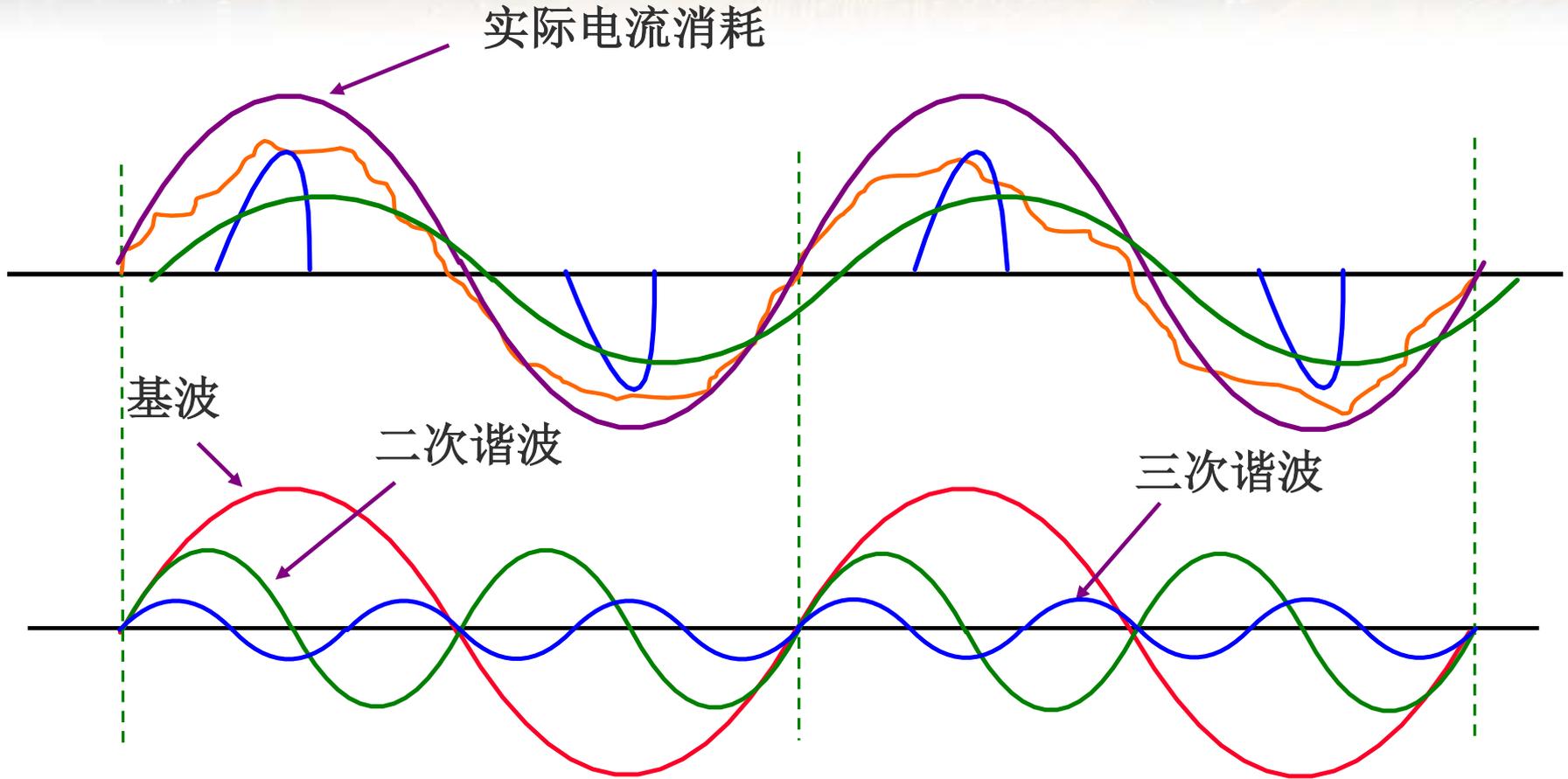


情形3

有相移的非正弦电流



电流谐波



功率因数PF的完全定义

PF表示为有功功率 P_a 与视在功率 P_s 之比: $PF = P_a / P_s$



$$PF = P_a / P_s = P_a / (P_r + P_a)$$

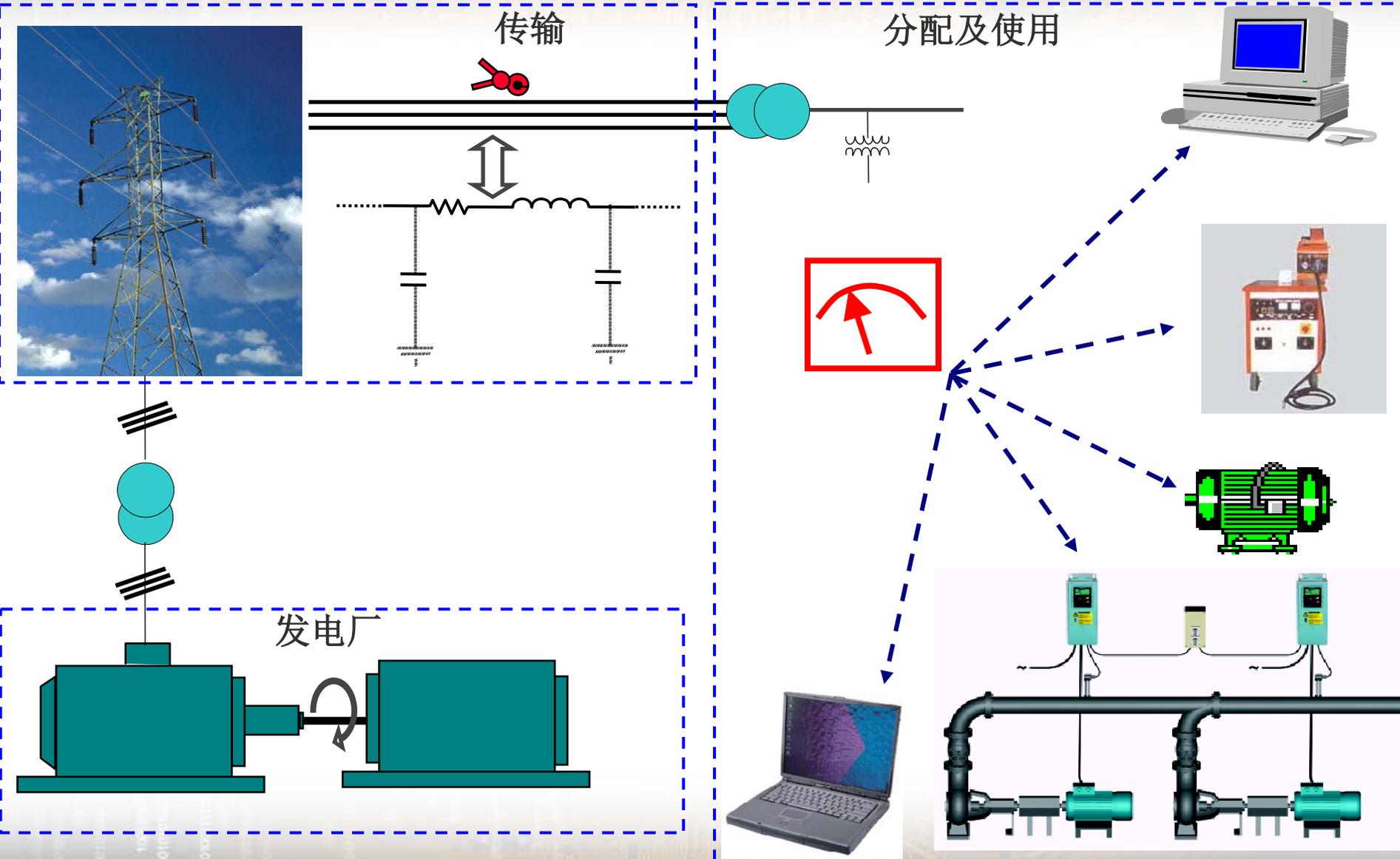
功率因数PF的完全定义

- 定义基波电流为 I_1 ，谐波电流分别为 I_2 、 I_3 、 I_4 ...
- **PF**可另表示为：

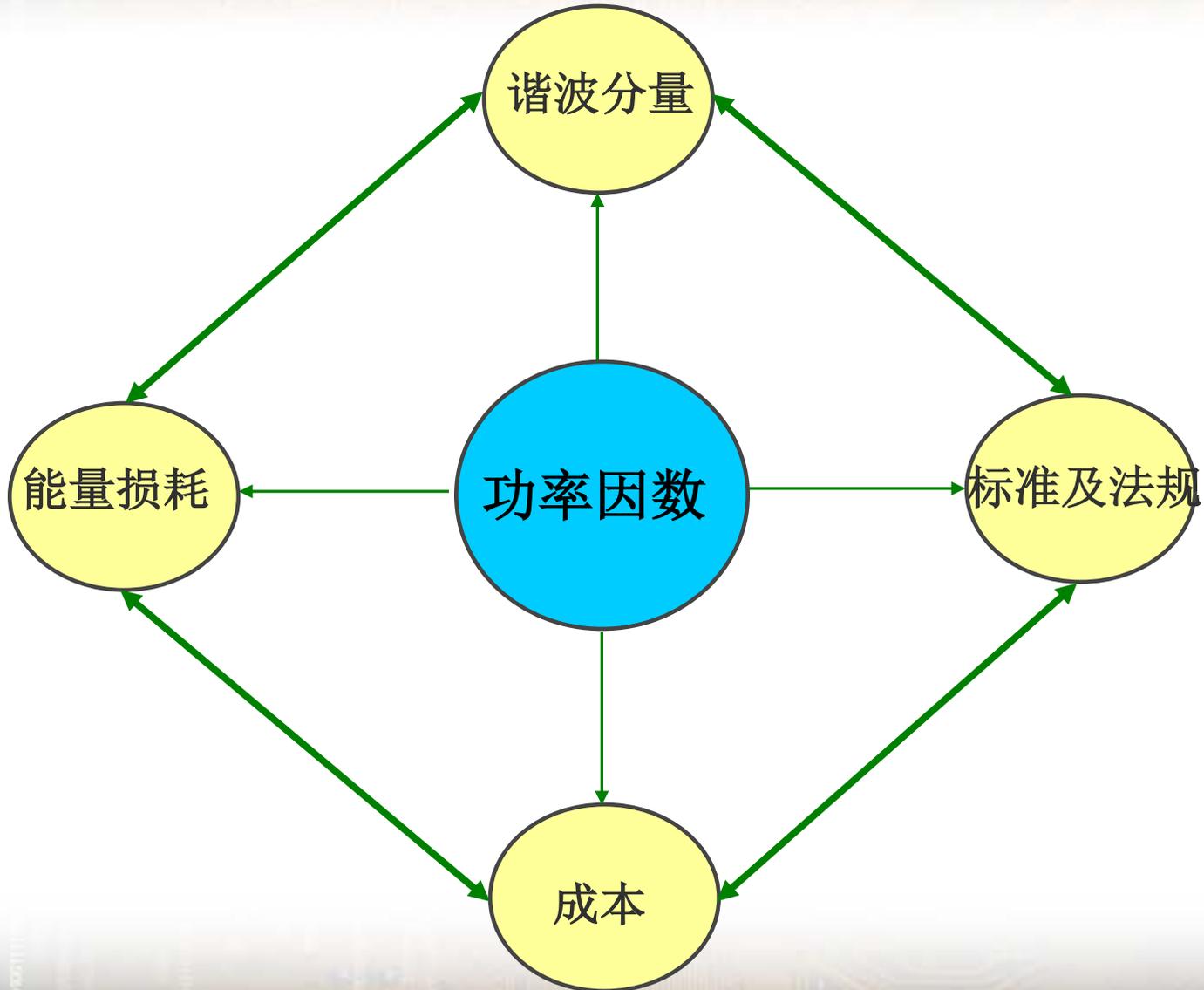
$$PF = \cos \phi * \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{I_2}{I_1}\right)^2 + \left(\frac{I_3}{I_1}\right)^2 + \left(\frac{I_4}{I_1}\right)^2 + \dots}} = \frac{\cos \phi}{\sqrt{1 + THD^2}}$$

- **THD**：总谐波比

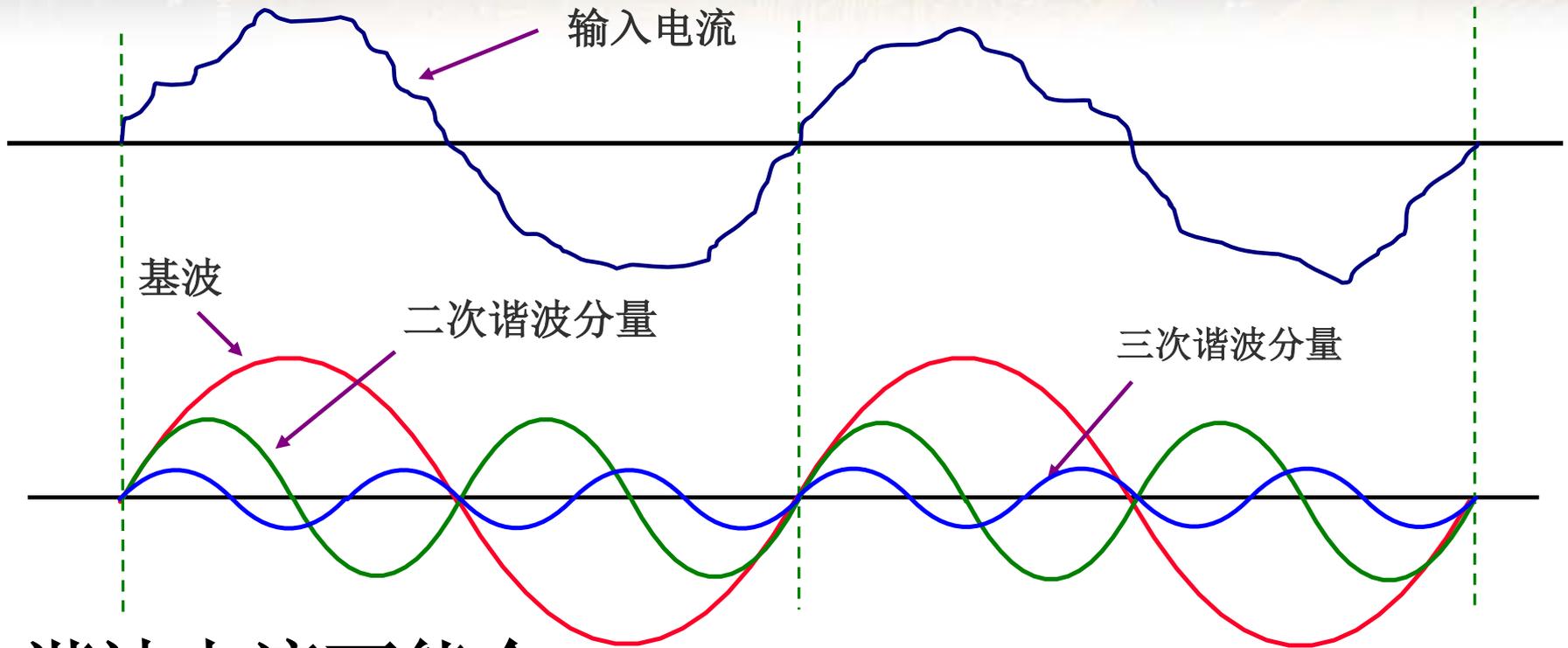
影响功率因数的环节



提高功率因数的意义



谐波电流的危害



谐波电流可能会

- 引发器件的误动作
- 干扰相邻的电子电气设备
- 导致变压器和电机等相关设备出现过热现象

成本



- 电力公司只依据有功功率收费，但是...
- 低功率因数往往会导致用户费用增大
 - 发电厂、电力传输和电力分配设备的容量更大
 - 电力传输，分配的损耗加大
 - 过热，谐波电流冲击导致设备寿命缩短
 - 用户端的设备，器件容量更大

能量损耗



- 几乎所有元器件皆消耗能量
 - 更大的等效电流与峰值电流
- 不做功器件也消耗能量
 - 无功能量返送至电网
- 电力传输与电力分配

我们需要改善功率因数

功率因数校正

功率因数校正的目标



- 合格的功率因数校正器具备以下特征：
 - 能调节输入电流，并使相位和波形与输入电压保持一致
 - 减小电流各谐波分量，改善THD
 - 减小无功功率的往返
 - 降低器件额定电流的标准
 - 可调节输出电压
 - 符合相关标准，法规
 - 降低运行成本
 - 系统损耗低
 - 视在功率的利用率高

课程安排

- 功率因数在电源变换系统中的意义
- 如何实现功率因数校正?
- 单阶的交错式功率因数校正器的设计
- 基于dsPIC[®] DSC的数字环的实现
- 调节器设计及负载均衡技术
- 演示

PF的基本概念及PFC的实现

□ PFC的实现

— 无源PFC

□ 主要由无源元件组成

✓ 电感续流型

✓ 电容倍压型

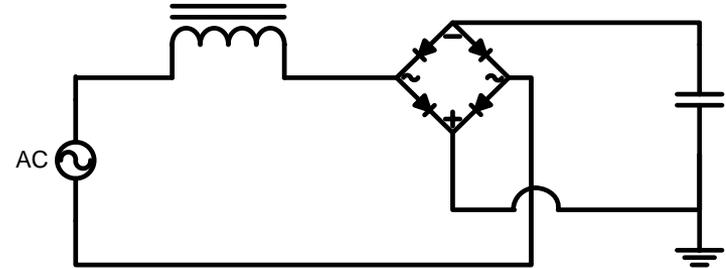
— 有源PFC

□ 模拟有源PFC

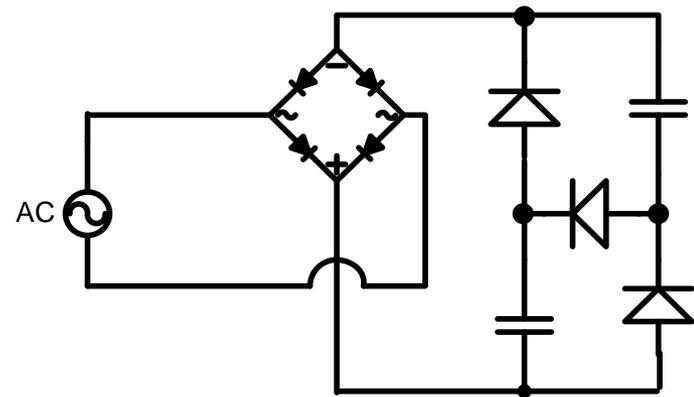
□ 数字有源PFC

无源PFC

电感续流型

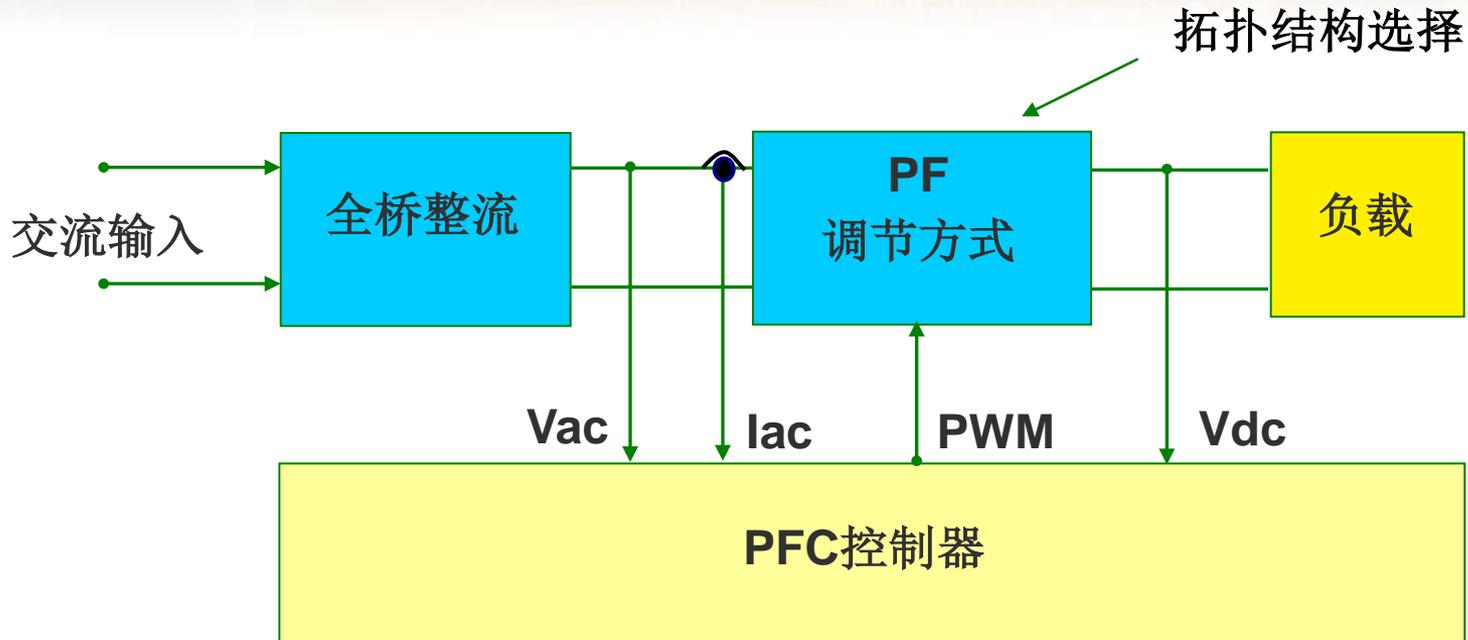


电容倍压型



- 无源PFC的缺点
 - 适用于功率应用
 - 通用性不高
 - 体积大，重量大
 - PF改善性能有限

有源PFC之功能框图



PFC所用关键元件

功率开关管



电容



电感

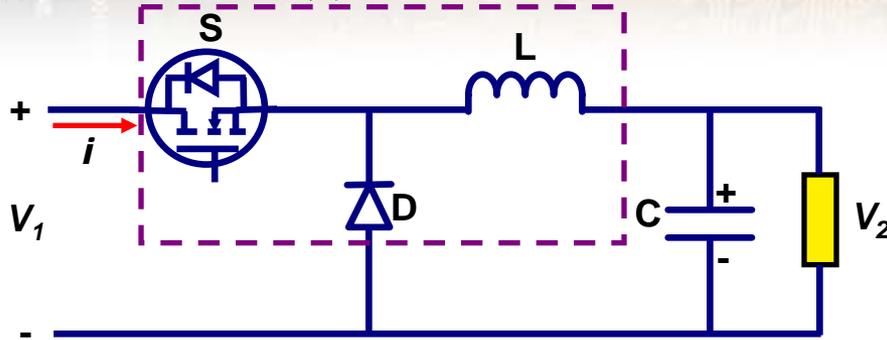


二极管

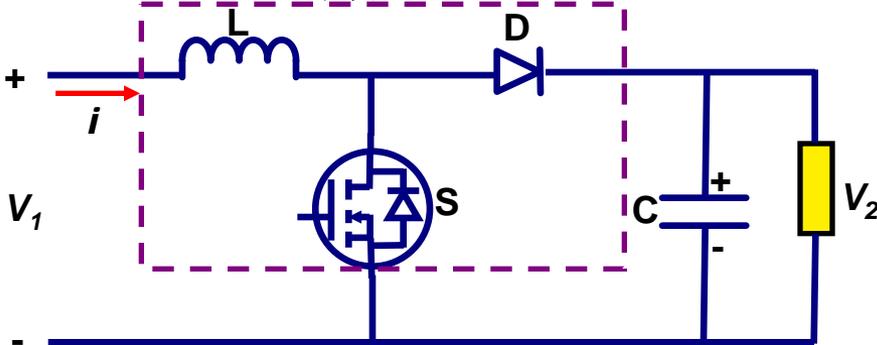


PFC的实现方式...

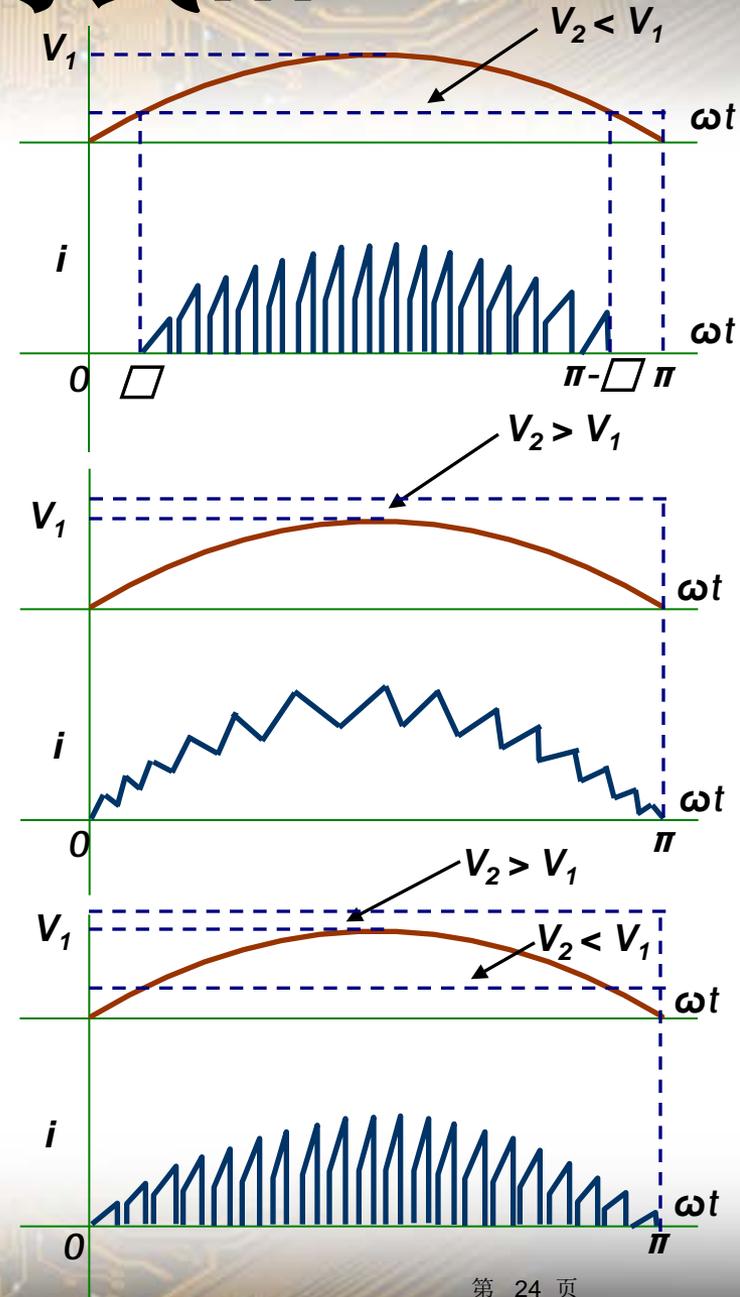
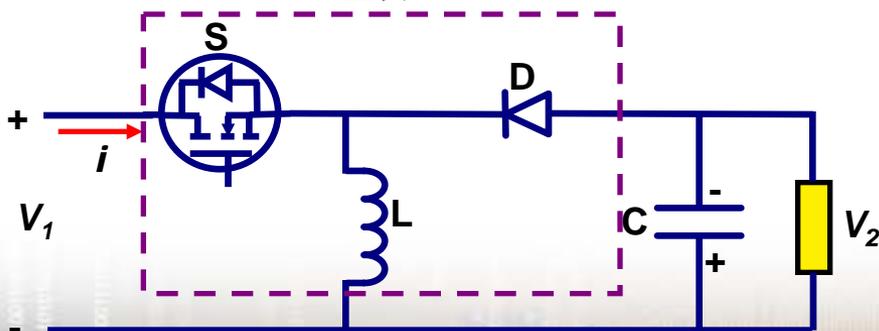
降压型



升压型



组合型



选择合适的PFC电路

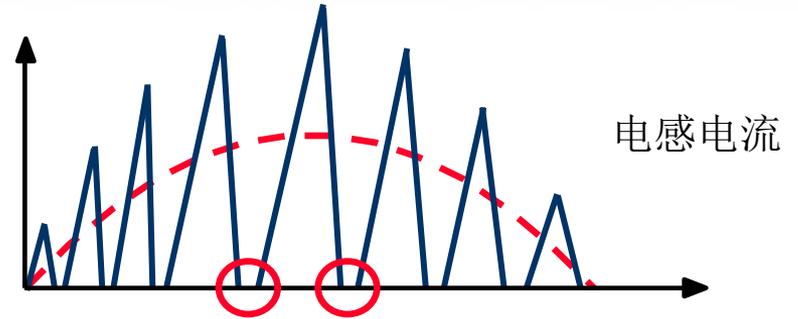
三种拓扑结构的比较:

电路类型	输出电压极性	交越失真	电感电流特性
降压型	正极性	有	不连续型
升压型	正极性	无	连续型*
混合型	负极性	无	不连续型

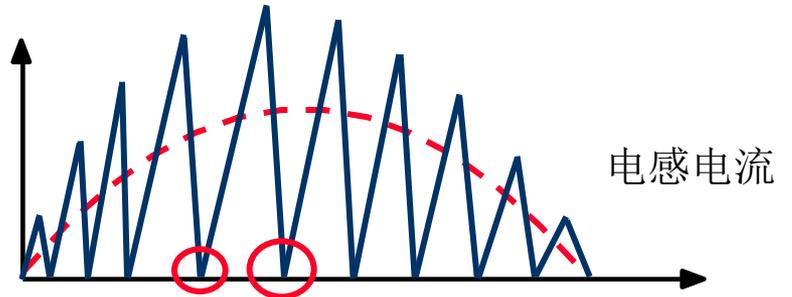
* 与负载特性及电感选择相关

电感电流模式

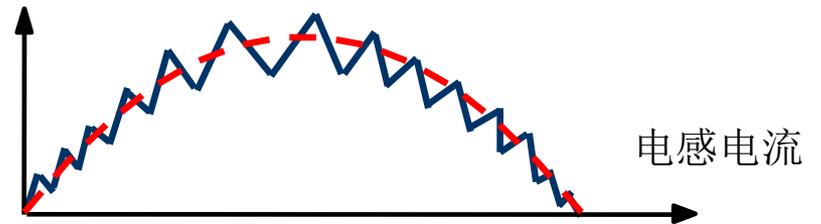
非连续模式



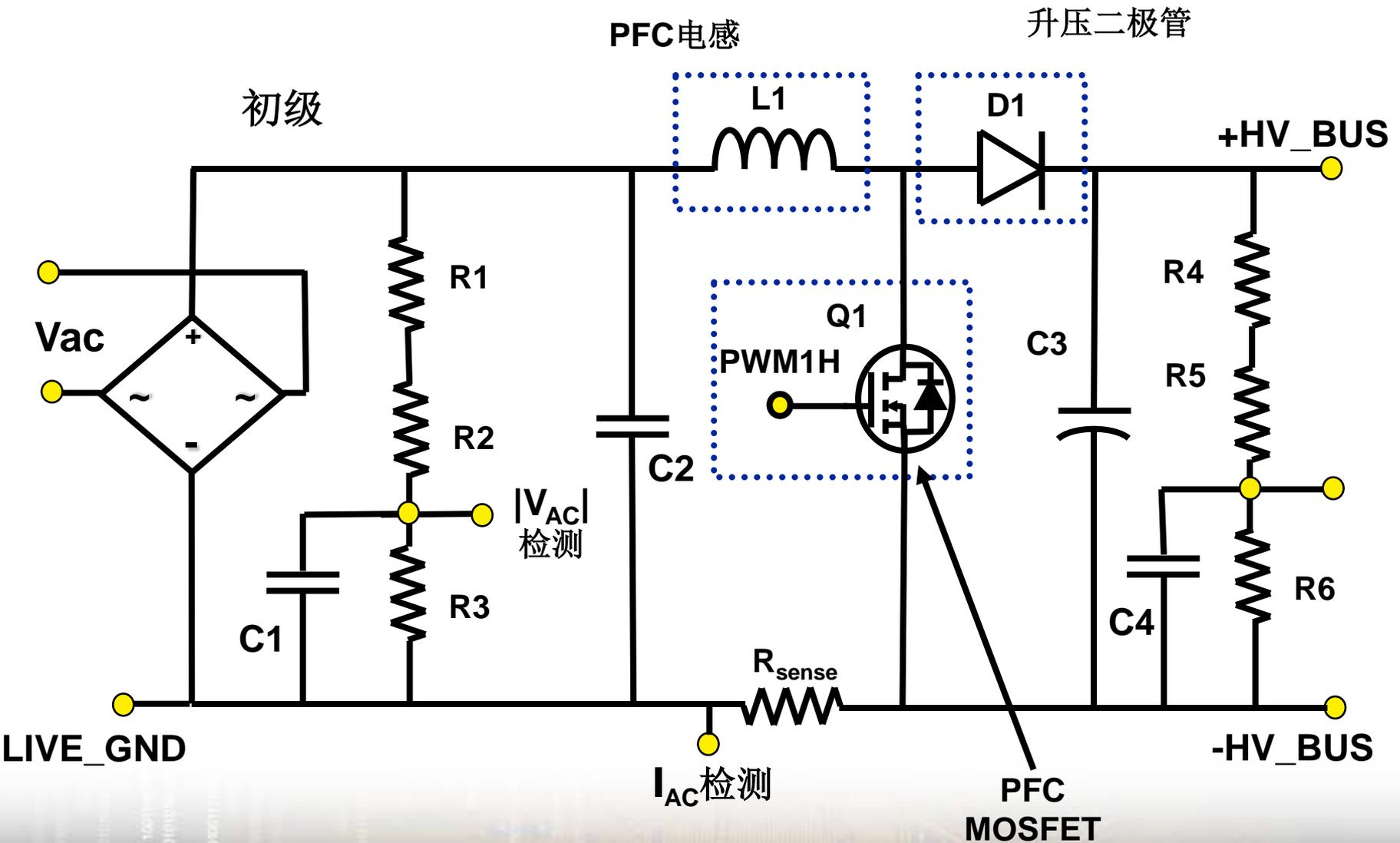
临界模式



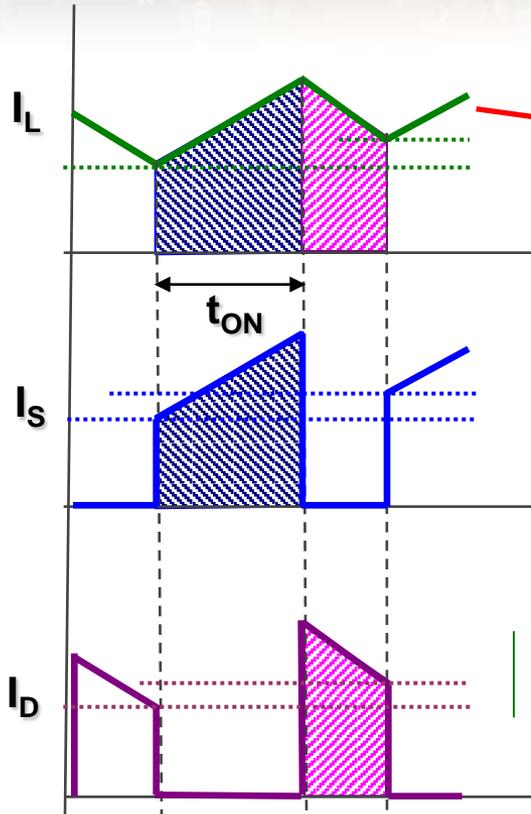
连续模式



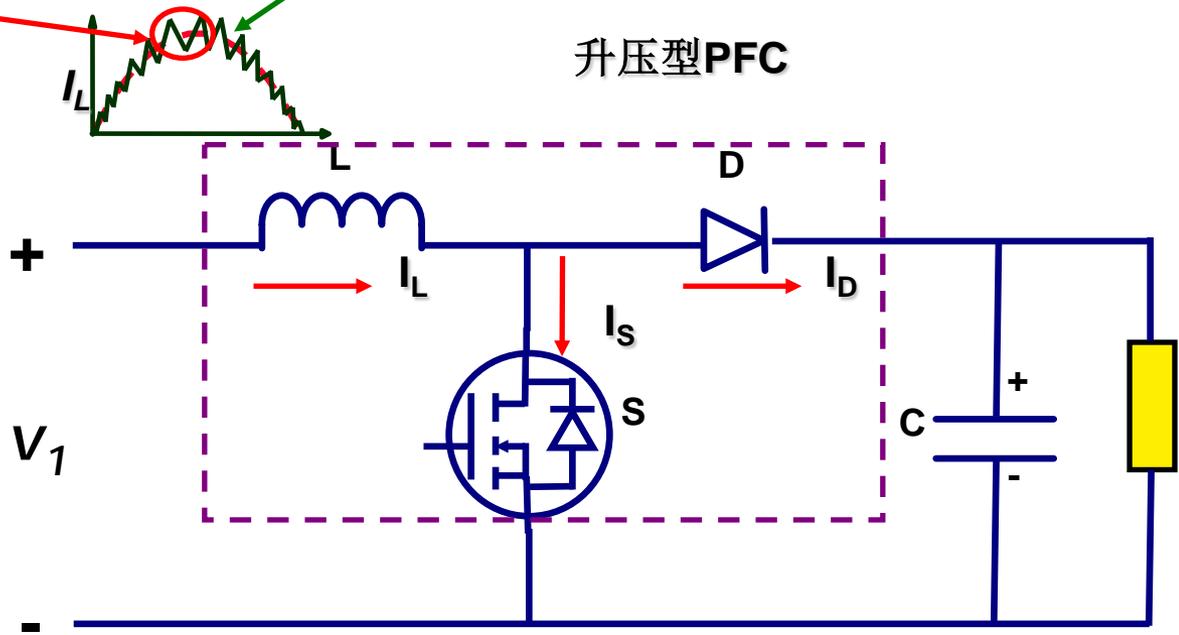
PFC升压转换器



控制策略之平均电流控制



控制流经电感的平均电流



平均电流控制

控制流经电感的平均电流 I_L ，使其跟随瞬时输入电压，并将谐波抑制到最低，同时能根据负载状况，自动调节平均电流幅值，并抑制输出电压波动。

电流控制策略

□ 电感电流 i_L 模型（整流前）

$$i_L = K_m * v_{out} * v_{ac-rms} * \sin(\omega_0 t)$$

□ 电感电流 i_L 模型（整流后）

$$i_L = K_m * v_{out} * v_{ac-rms} * |\sin(\omega_0 t)|$$

□ 其中：

K_m : 电流幅度 V_{out} : 直流输出电压
 V_{ac-rms} : 交流电压有效值 ω_0 : 交流电压频率

数字PFC vs 模拟PFC

	数字PFC	模拟PFC
灵活性	高	低
集成度	高	中
动态响应	可调节	固定
工作模式	可调节	固定
智能化	智能型	非智能型
成本	低	中/低

数字PFC优于模拟PFC

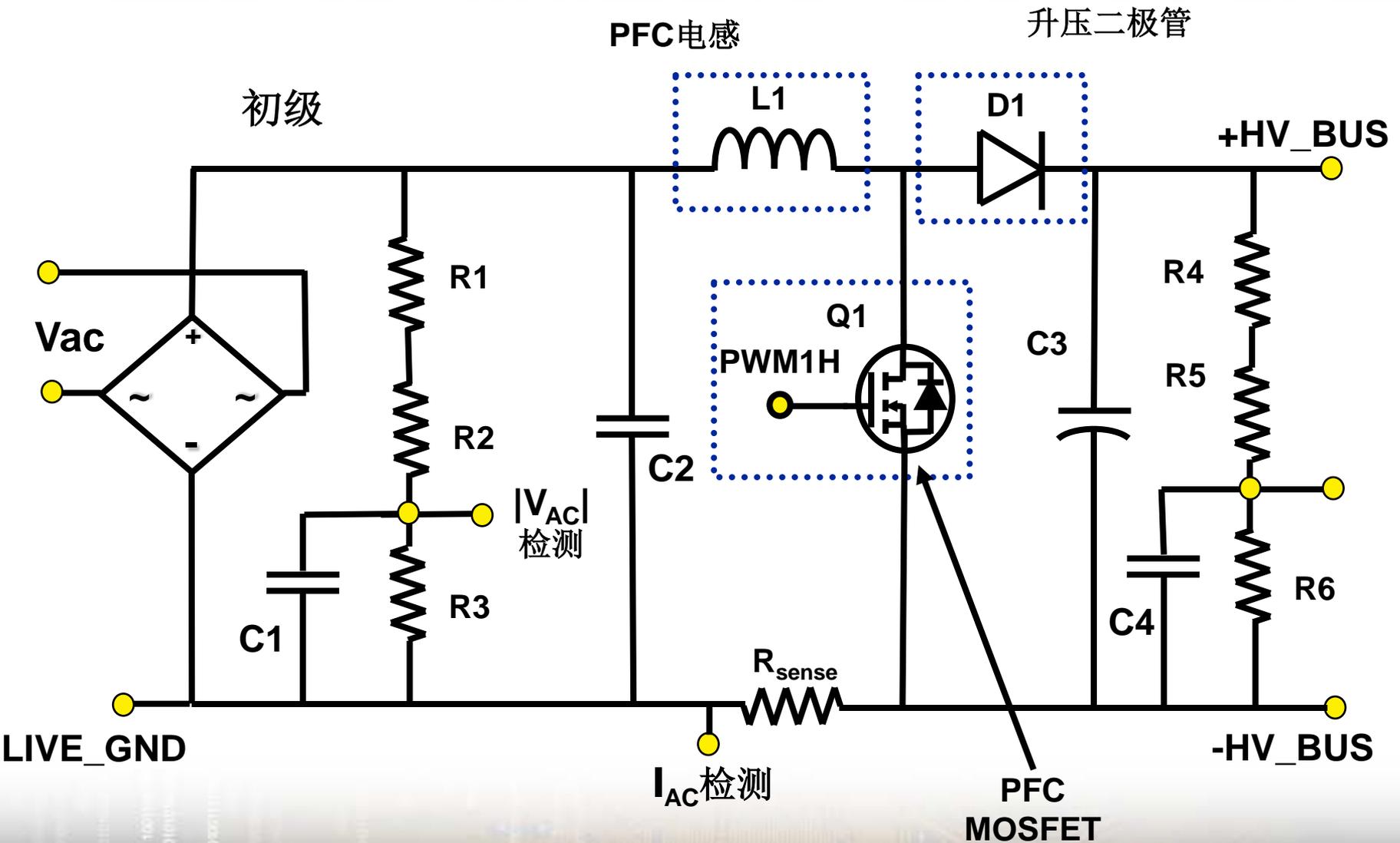
课程安排

- 功率因数在电源变换系统中的意义
- 如何实现功率因数校正?
- 单阶的交错式功率因数校正器的设计
- 基于dsPIC[®] DSC的数字环的实现
- 调节器设计及负载均衡技术
- 演示

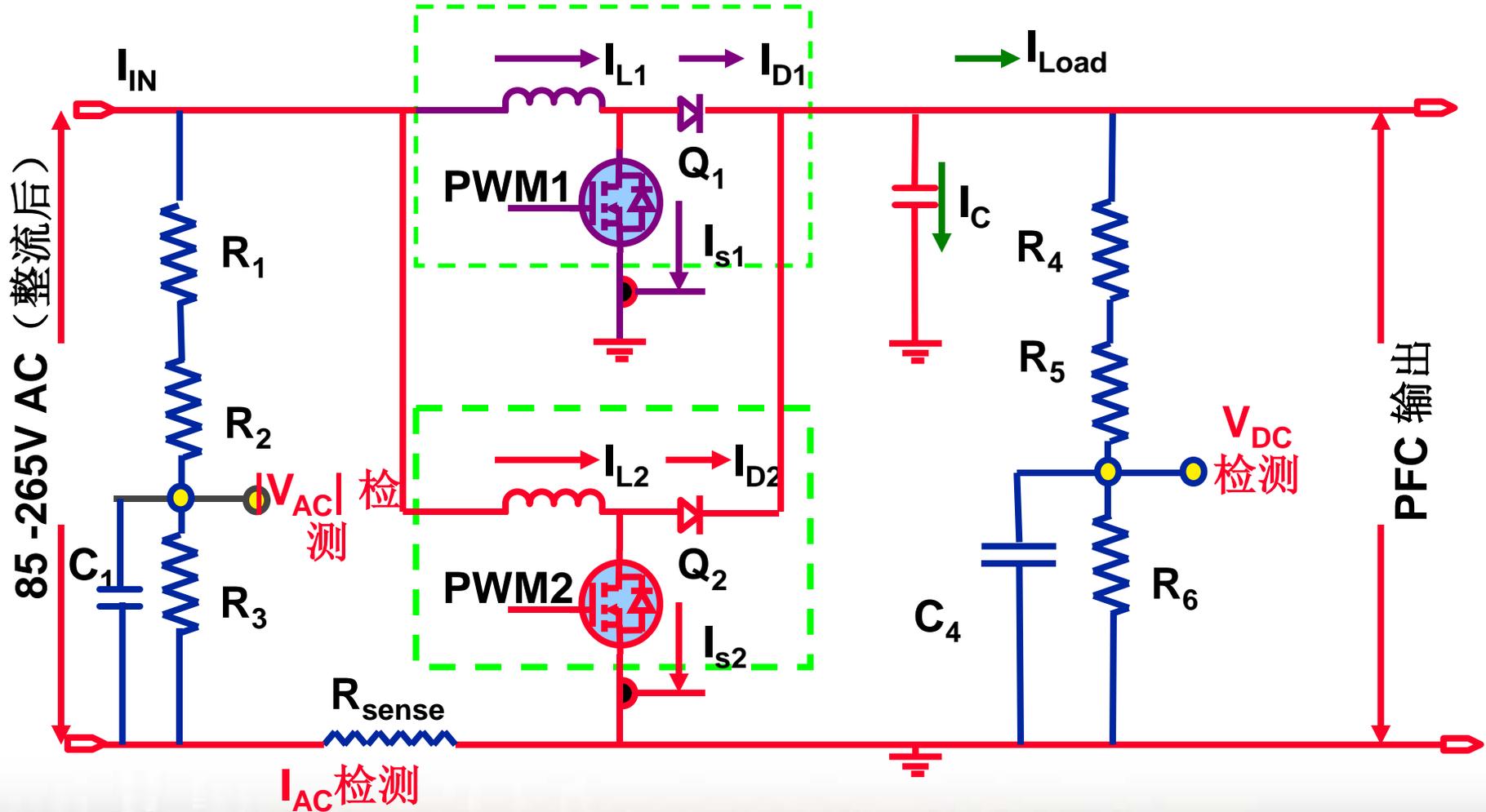
设计指标

参数	符号	目标
输出功率	P	350W
交流输入电压	V_{ACmin} , V_{ACmax}	85V--264V
交流输入频率	f_{min} , f_{max}	45Hz--66Hz
输出电压	V_{DC}	400V (± 1.5%)
效率	ρ	95% (额定状况)
功率因数	PF	0.99 (额定状况)

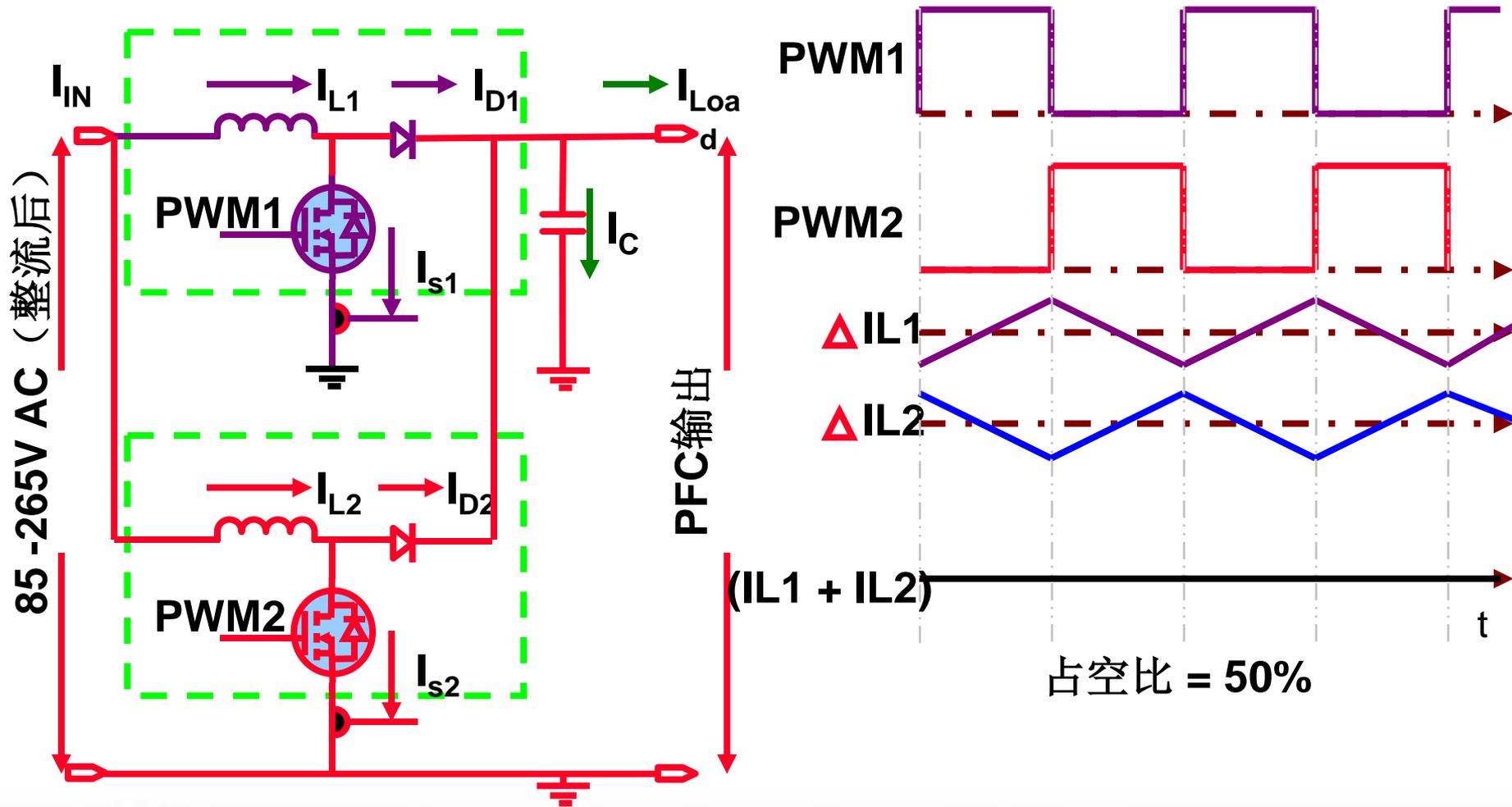
PFC升压转换器



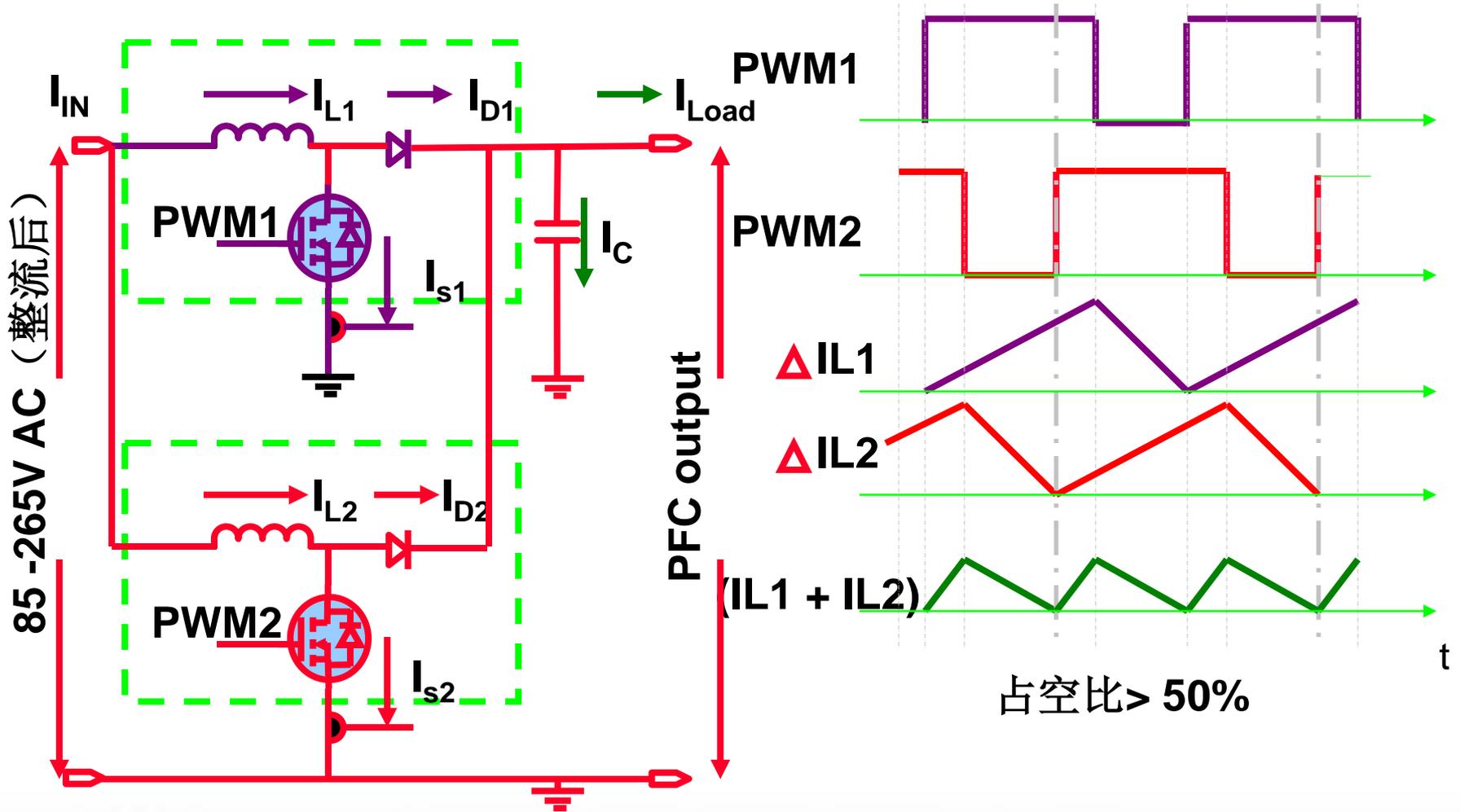
IPFC 工作过程 (1/3)



IPFC 工作过程 (2/3)



IPFC 工作过程 (3/3)



IPFC 的优点

- 降低蓄能电容器的充放电电流
→ 降低蓄能电容器的容量
- 交流侧输入电流更平滑
→ 得益于电感电流波动的相互抵消
- 电感
→ 电感量小
→ 尺寸小

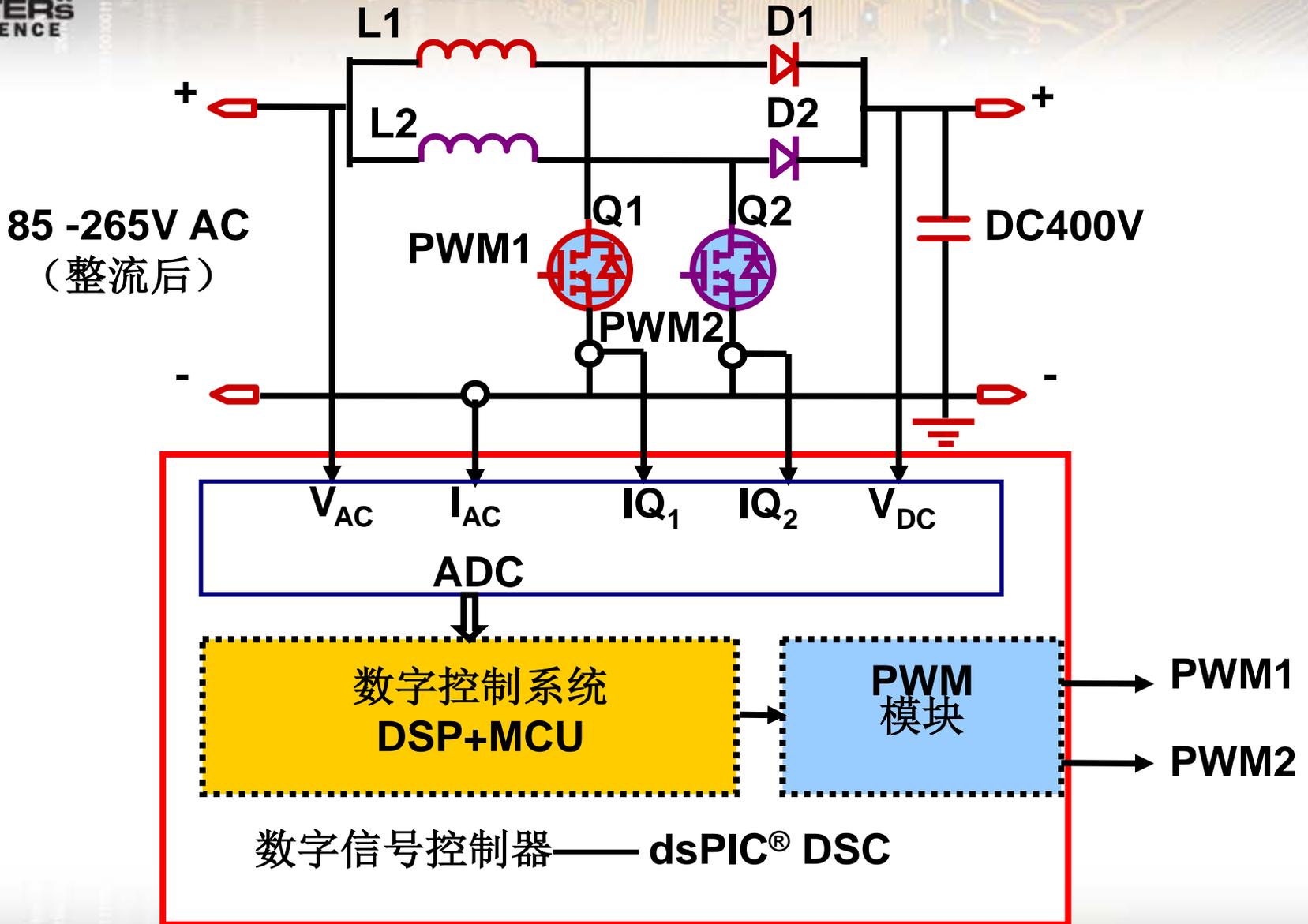
课程安排

- 功率因数在电源变换系统中的意义
- 如何实现功率因数校正?
- 单阶的交错式功率因数校正器的设计
- 基于dsPIC[®] DSC的数字环的实现
- 调节器设计及负载均衡技术
- 演示

数字电源的优点

- 减少元器件数量
- 设计更灵活
- 控制更灵活
- 有效保护知识产权
- 可实现非线性/自适应控制
- 可实现多级电源的设计
- 故障记录及诊断
- 灵活故障处理

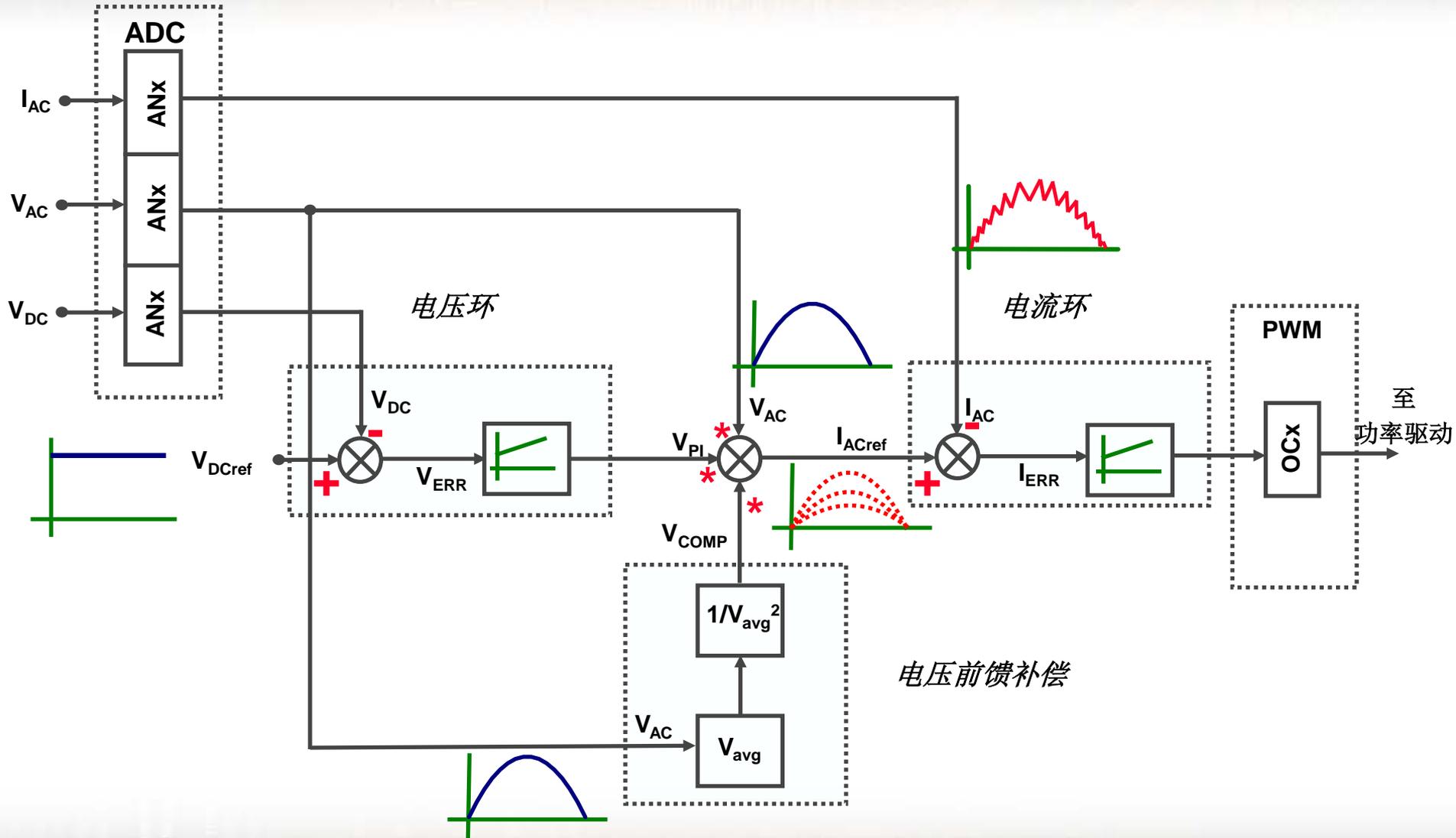
2相IPFC



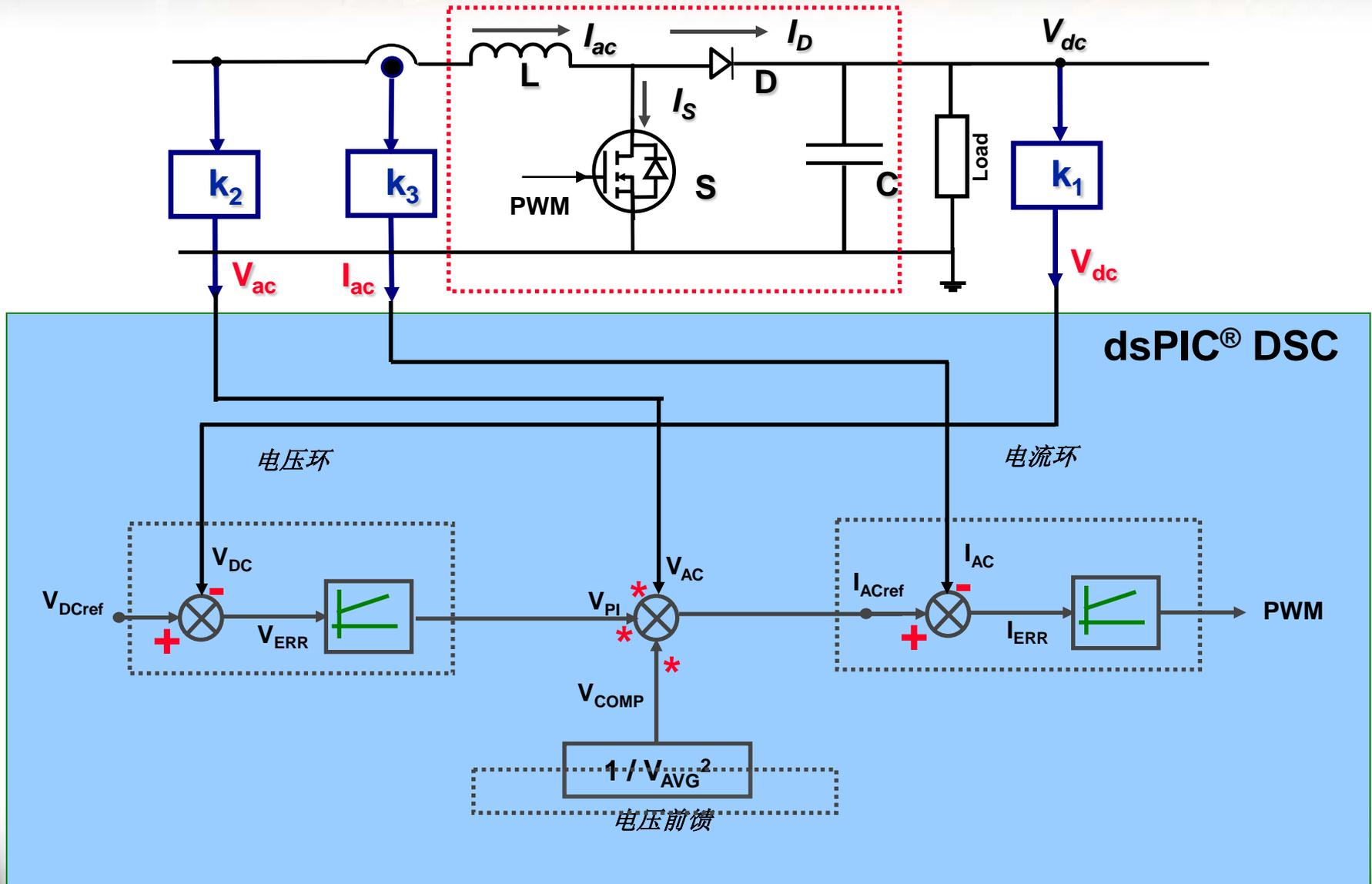
dsPIC[®] DSC 片上外设资源分配

功能描述	片上外设
栅极驱动-Q1, Q2	PWM1, PWM2
交流电流 (整流后)	ADC
交流电压 (整流后)	ADC
直流母线电压	ADC
源极电流-Q1	ADC
源极电流-Q2	ADC

算法框图



数字PFC之完全框图



数据格式

- 运算变量及常数归一化至小数格式: Q15
(1.15)

0x7FFF 32767 + 0.999

0x0000 0 0.000

0x8000 -32768 - 1.000

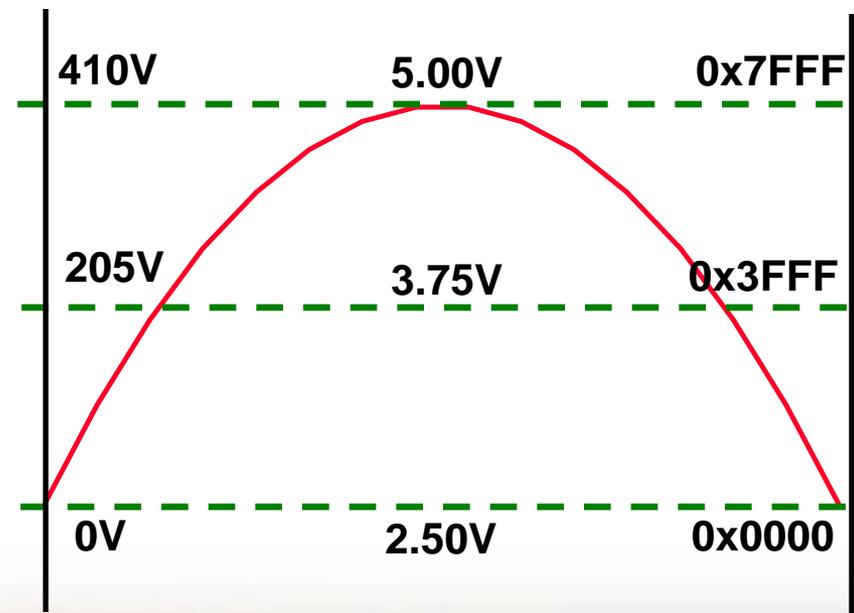
- 如何归一化:

- 设定参数的极限值 V_{MAX}
- 选定变换常数 K
- $K * V_{MAX} = 1.0$

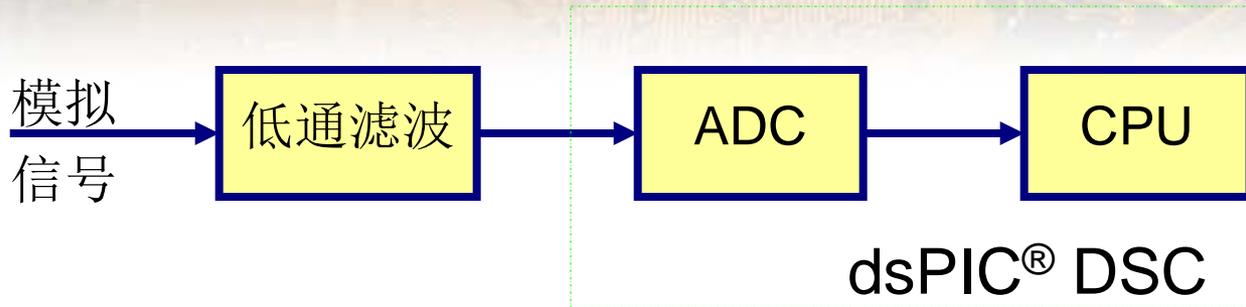
$$V_{DCmax(dig)} = V_{DCmax} * K_1 = 1$$

$$V_{ACmax(dig)} = V_{ACmax} * K_2 = 1$$

$$I_{ACmax(dig)} = I_{ACmax} * K_3 = 1$$



模拟信号的测量



- “模拟信号” 是指被测量信号
- ADC 将模拟信号的幅值变换至以10位码表示的二进制数-Q1.9 (0至1024)
- dsPIC[®] DSC 数字信号控制器的数据单元为16位-Q1.15
- ADC 可自动将变换结果转换至16位的表示方式

IPFC S/W 策略之信号检测及数字环

信号名	采样/运行频率
V_{DC}	100kHz
I_{AC}	100kHz
$ V_{AC} $	100kHz
$ V_{AC} _{AVG}$	15Hz
MOSFET 开关频率	100kHz
电流环	50kHz
电压环	2kHz
负载均衡	2KHz

课程安排

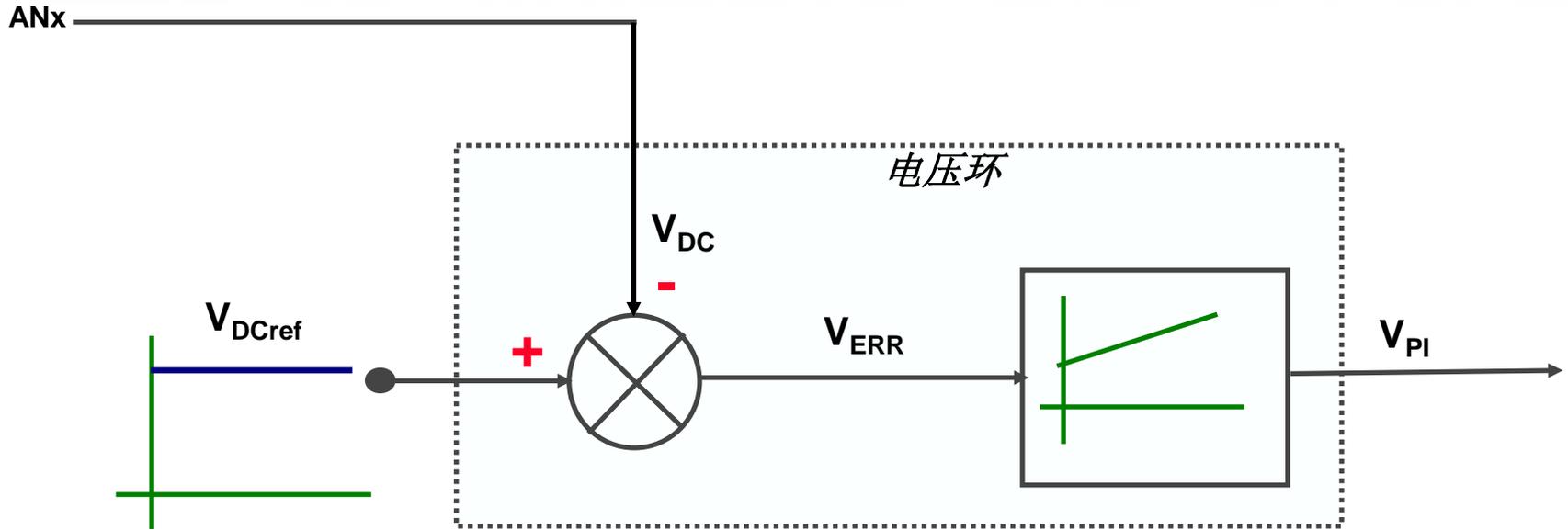
- 功率因数在电源变换系统中的意义
- 如何实现功率因数校正?
- 单阶的交错式功率因数校正器的设计
- 基于dsPIC[®] DSC的数字环的实现
- 调节器设计及负载均衡技术
- 演示

PFC关键技术之电压环

□ 电压环

- 稳定输出电压
- 限定输出电压波动
- 电压环带宽
 - **10-20 Hz**
 - 小于输入电压频率及其二次谐波

PFC关键技术之电压环



带宽: 10 Hz

转折频率: 10 Hz

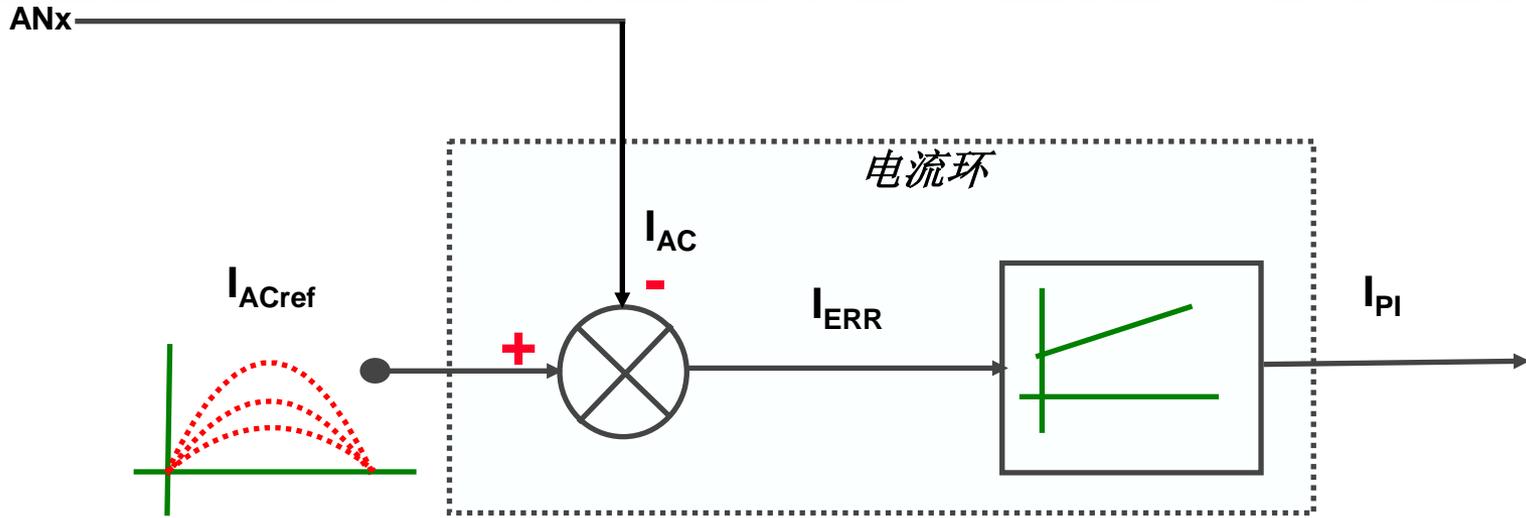
积分项带宽: 2.5 Hz

电流环

□ 电流环

- 调节输入电流，跟随输入电压
- 保持输入电流与输入电压同相
- 电流环带宽
 - **2-10 kHz (4kHz)**
 - **受控电流带宽：80-135 Hz**

电流环框图

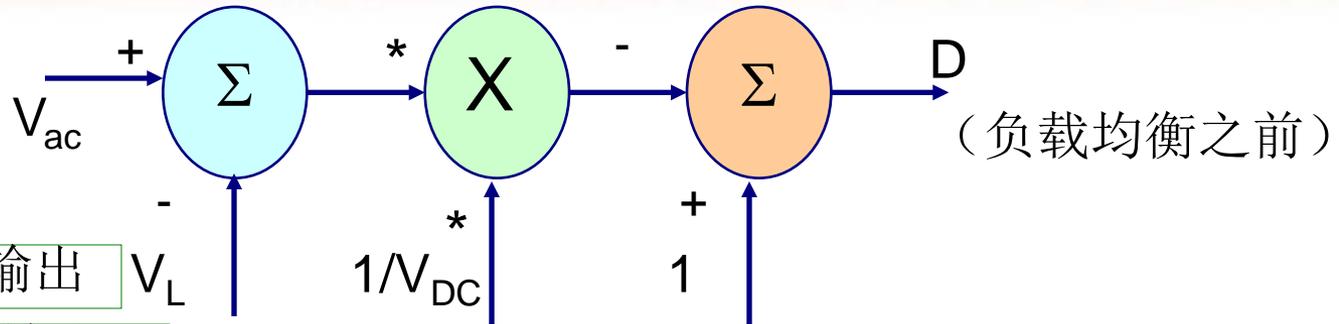


带宽: 4 kHz

转折频率 (通带频率): 8 kHz

积分项带宽: 1000Hz

电压解耦



V_L : 电流环之输出

V_{DC} : 电压环之输出

- 抑制 V_{ac} 和 V_{dc} 的瞬态变化
- 占空比近似于: $D = 1 - V_{ac}/V_{dc}$
- 控制环只提供占空比在此基础上的微小变化
- 减轻系统负担, 提高IPFC性能
- 实际应用的占空比为: $D = 1 - [(V_{ac} - V_L)/V_{dc}]$

负载均衡的实现

- 应用需求：平等分担负载
- 寿命/可靠性：安全工作区**SOA**
- 实现方法：相对电流控制
- 反馈：**MOSFET**平均电流检测

负载均衡的实现

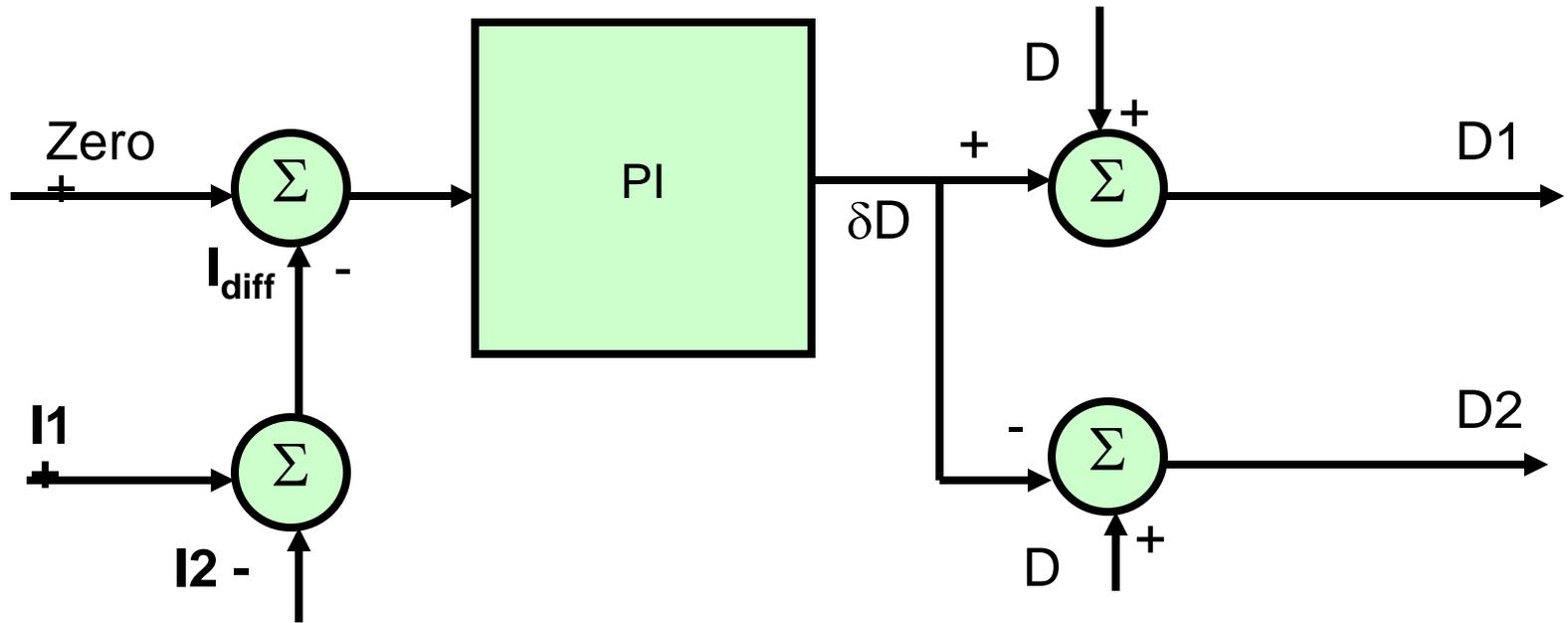
选择 1

- 分支电流被简单地设定为 $I^*(1/2)$
- 各分支需高等级的电流传感器

选择 2

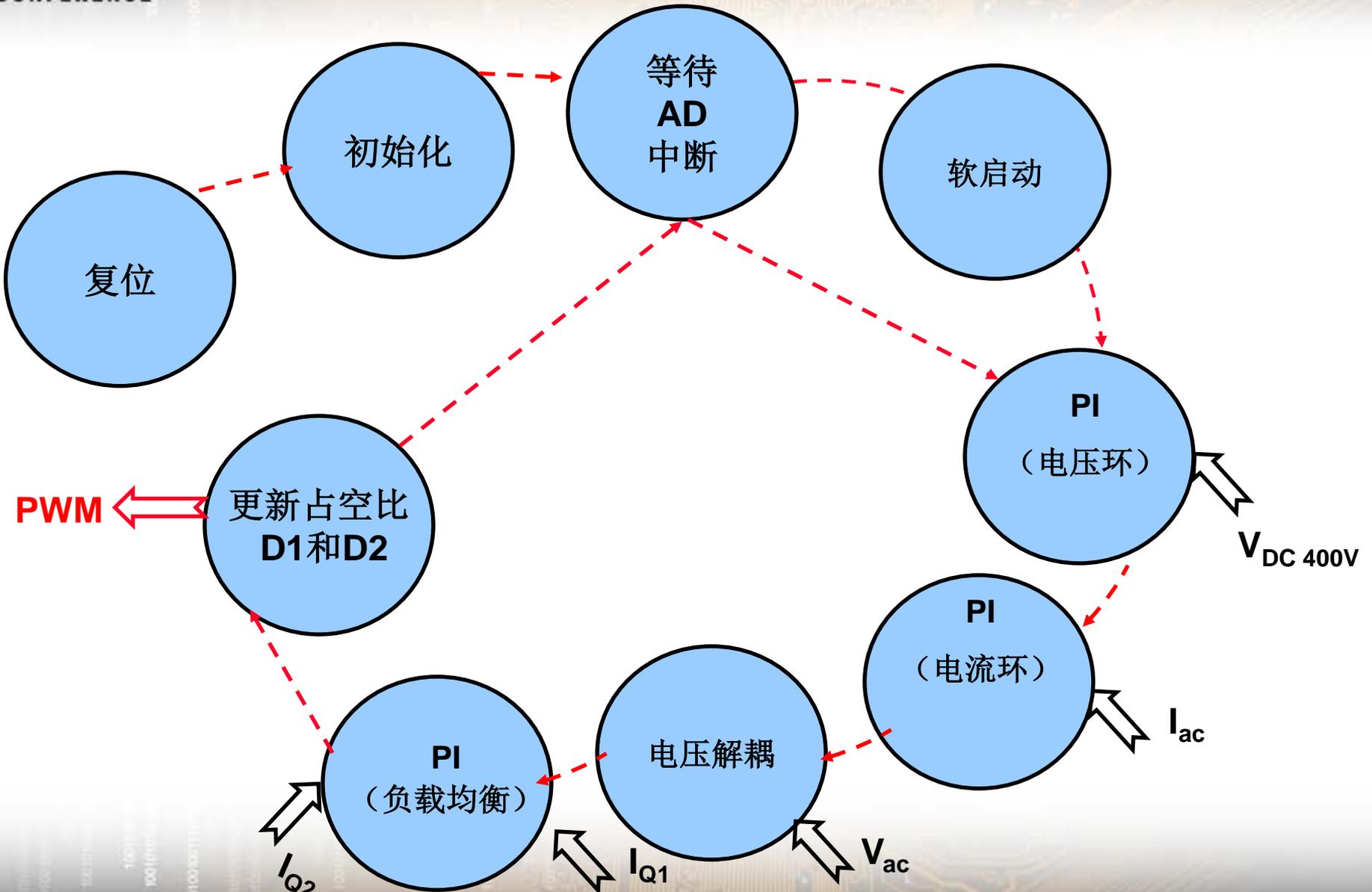
- 相对电流控制
- 利用分支电流差异PI调节器产生一占空比微调分量
- 占空比微调分量（最大5%）实现对实际占空比的二次调整
- 分支电流信号经深度滤波
- 分支电流差异PI补偿器的带宽较低（约10Hz）

负载均衡的实现



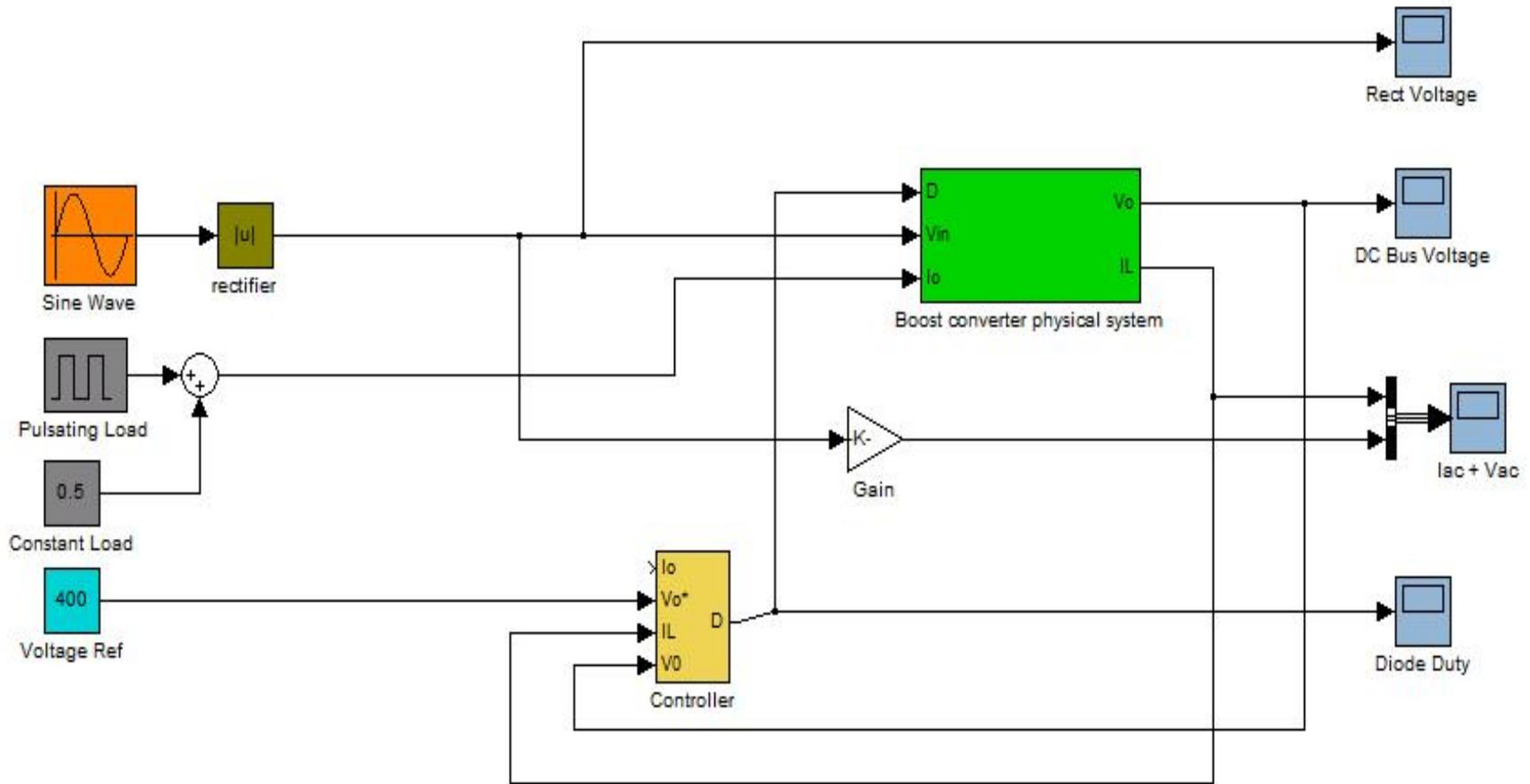
- 负载均衡环带宽：200Hz
- 负载均衡PI 补偿器零点位置：50 Hz

软件状态转移图



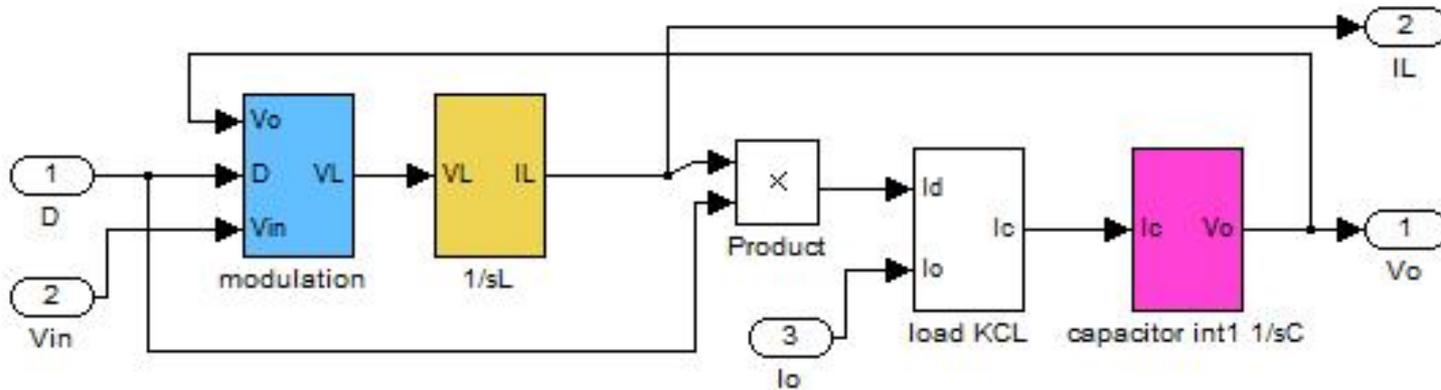
Simulink仿真框图

PFC系统模型

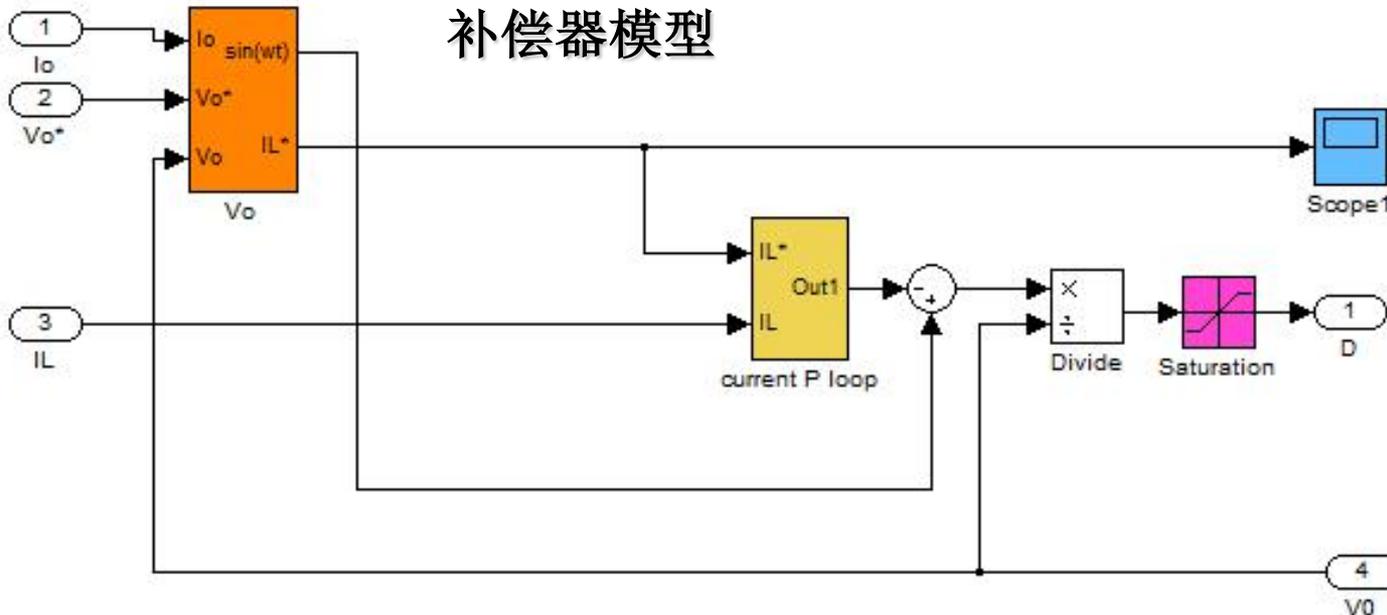


Simulink仿真框图

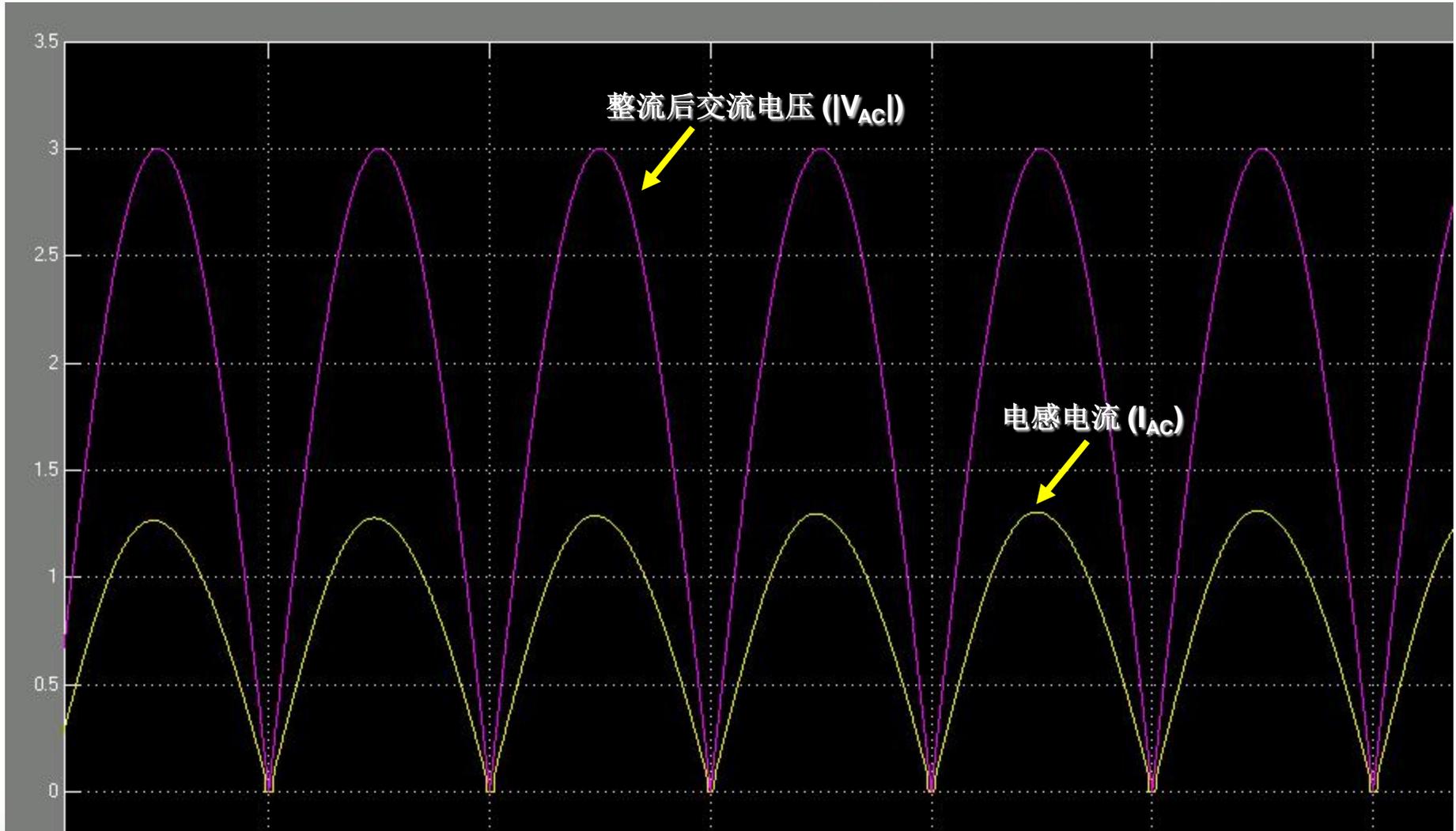
升压电路模型



补偿器模型



Simulink仿真框图



课程安排

- 功率因数在电源变换系统中的意义
- 如何实现功率因数校正?
- 单阶的交错式功率因数校正器的设计
- 基于dsPIC[®] DSC的数字环的实现
- 调节器设计及负载均衡技术
- 演示

总结

- 功率因数的意义
- **PFC** 基本概念
- 单阶**IPFC**
- 数字 **PFC** 的实现
- 软件控制系统的实现

演示

- 交流电流
- 分支电流
- 功率因数：**PF**和**THD**

反馈?

参考资料

- **A.I. Pressman, “Switching Power Supply Design”**
- **N.S. Nise, “Control Systems Engineering”**
- **C.K. Tse, “Circuit Theory of Power Factor Correction in Switching Converters”**
- **A. Hofmann, A.Baumuller, T. Gerhardt, M. Marz, E. Schimanek, “A robust digital PFC control method suitable for low-cost microcontroller”**
- **L. Rossetto, G.Spiazzi, P. Tenti, “Control Techniques for Power Factor Correction Converters”**
- **L.Rossetto, G.Spiazzi, “Design Considerations on Current-Mode and Voltage-Mode control Methods for Half-Bridge Converters”**
- **W.Gu, J.Abu-Qahouq, S.Luo, I.Batarseh, “A ZVT-PWM single stage PFC converter with an active snubber”**
- **M. Brown, “Power Supply Cookbook”**
- **M. Kazimierczuk, D. Czarkowski, “Resonant Power Converters”**

商标

Microchip的名称和徽标组合、Microchip徽标、dsPIC、KeeLoq、KeeLoq徽标、MPLAB、PIC、PICmicro、PICSTART、rfPIC和UNI/O均为Microchip Technology Inc.在美国和其他国家或地区的注册商标。

FilterLab、Hampshire、HI-TECH C、Linear Active Thermistor、MXDEV、MXLAB、SEEVAL和The Embedded Control Solutions Company 均为Microchip Technology Inc.在美国的注册商标。

Analog-for-the-Digital Age、Application Maestro、CodeGuard、dsPICDEM、dsPICDEM.net、dsPICworks、dsSPEAK、ECAN、ECONOMONITOR、FanSense、HI-TIDE、In-Circuit Serial Programming、ICSP、Mindi、MiWi、MPASM、MPLAB Certified徽标、MPLIB、MPLINK、mTouch、Octopus、Omniscient Code Generation、PICC、PICC-18、PICDEM、PICDEM.net、PICKit、PICKtail、PIC32徽标、REAL ICE、rfLAB、Select Mode、Total Endurance、TSHARC、UniWinDriver、WiperLock和ZENA均为Microchip Technology Inc.在美国和其他国家或地区的商标。

SQTP是Microchip Technology Inc.在美国的服务标记。

在此提及的所有其他商标均为各持有公司所有。

© 2009, Microchip Technology Inc.版权所有。