

MASTERS 2009

THE WORLDWIDE CONFERENCE FOR EMBEDDED CONTROL ENGINEERS



C10L16 DPC

基于dsPIC® DSC的数字电源转换：
正弦波逆变器

课程目的

- 完成本课程后，您将知道：
 - 离线式**UPS**基本知识
 - 纯正弦波逆变器基本知识
 - 正弦波逆变器建模
 - 使用**dsPIC[®] DSC**以数字化的方式实现控制回路
 - 控制软件实现

课程安排

- 离线式**UPS**参考设计概述
 - 纯正弦波逆变器的意义
- 正弦波逆变器的硬件设计
- 数字信号控制器需求
- 建模及控制系数的数字化
- 控制回路的数字化实现
- 软件实现

不间断电源

UPS是什么？

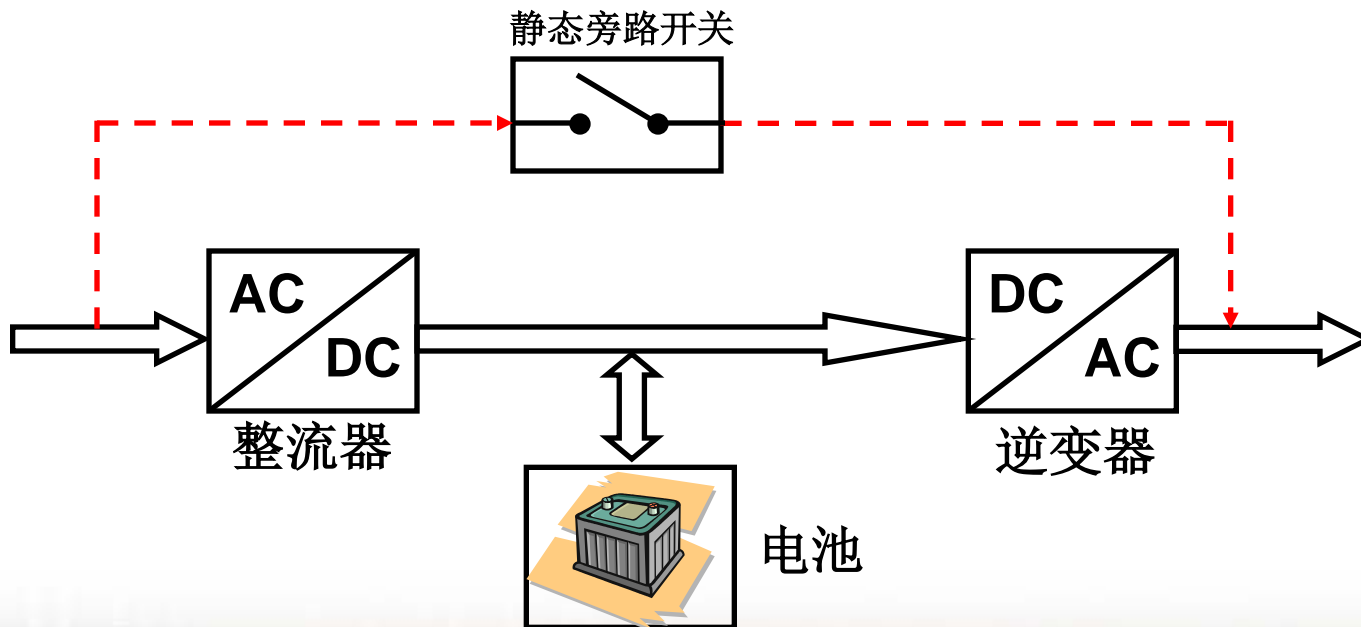
包括电池在内的一种电源，可在停电时维持供电

- 在线式UPS
- 离线式UPS

在线式UPS

□ 在线式UPS

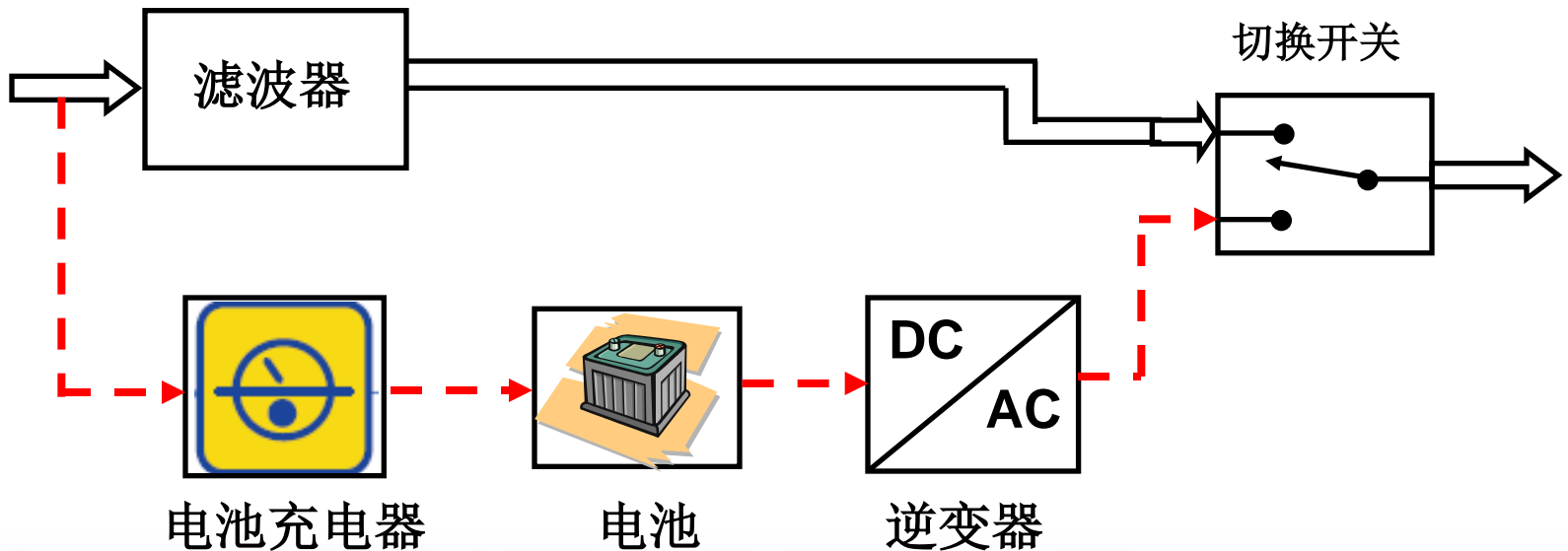
- 从逆变器持续供电
- 电源故障时不存在切换时间



离线式UPS

离线式UPS

- 检测到电源故障时切换到电池
- 电源故障时有几毫秒的切换时间



课程安排

- **离线式UPS参考设计概述**
 - 纯正弦波逆变器的意义
- 正弦波逆变器的硬件设计
- 数字信号控制器需求
- 建模及控制系数的数字化
- 控制回路的数字化实现
- 软件实现

设计参数

Microchip 离线式UPS参考设计:

- 1000W 稳态输出功率
- AC 主电源输入电压范围
 - **85 - 135V**
 - **145 - 280V**
- AC 输出电压纯正弦波
 - **120V @ 60Hz**
 - **220V @ 50Hz**
- 满负载时，目标效率 > 85%
- 切换时间 < 10ms（从主电源到电池电源）

● 输出电压纯正弦波

- ❖ 满阻性负载时, $\text{THD} < 2\%$
 - ❖ 满整流性负载 (且振幅因数为 3:1) 时, $\text{THD} < 3\%$
 - ❖ 满整流性负载 (且振幅因数为 5:1) 时, $\text{THD} < 5\%$
 - ❖ 满感性负载时, $\text{THD} < 3\%$
- 负载可以是滞后负载或者超前功率因数 (Power Factor, P.F.) 负载
 - 滞后负载的功率因数可低至 0.2 P.F.
 - 在更低的超前功率因数时, 输出功率降级
 - 在更高的振幅因数负载时, 输出功率降级

纯正弦波输出——为什么？

- 谐波失真很小、电源干净，就像发电厂的供电一样
- 像微波炉和电机这样的感性负载运行更快、更安静且不易发热
- 降低风扇、音频放大器、电视机、游戏控制杆、传真机和应答机中的音频及电子噪声
- 避免计算机崩溃、错误的打印输出以及监视器上的毛刺和噪声

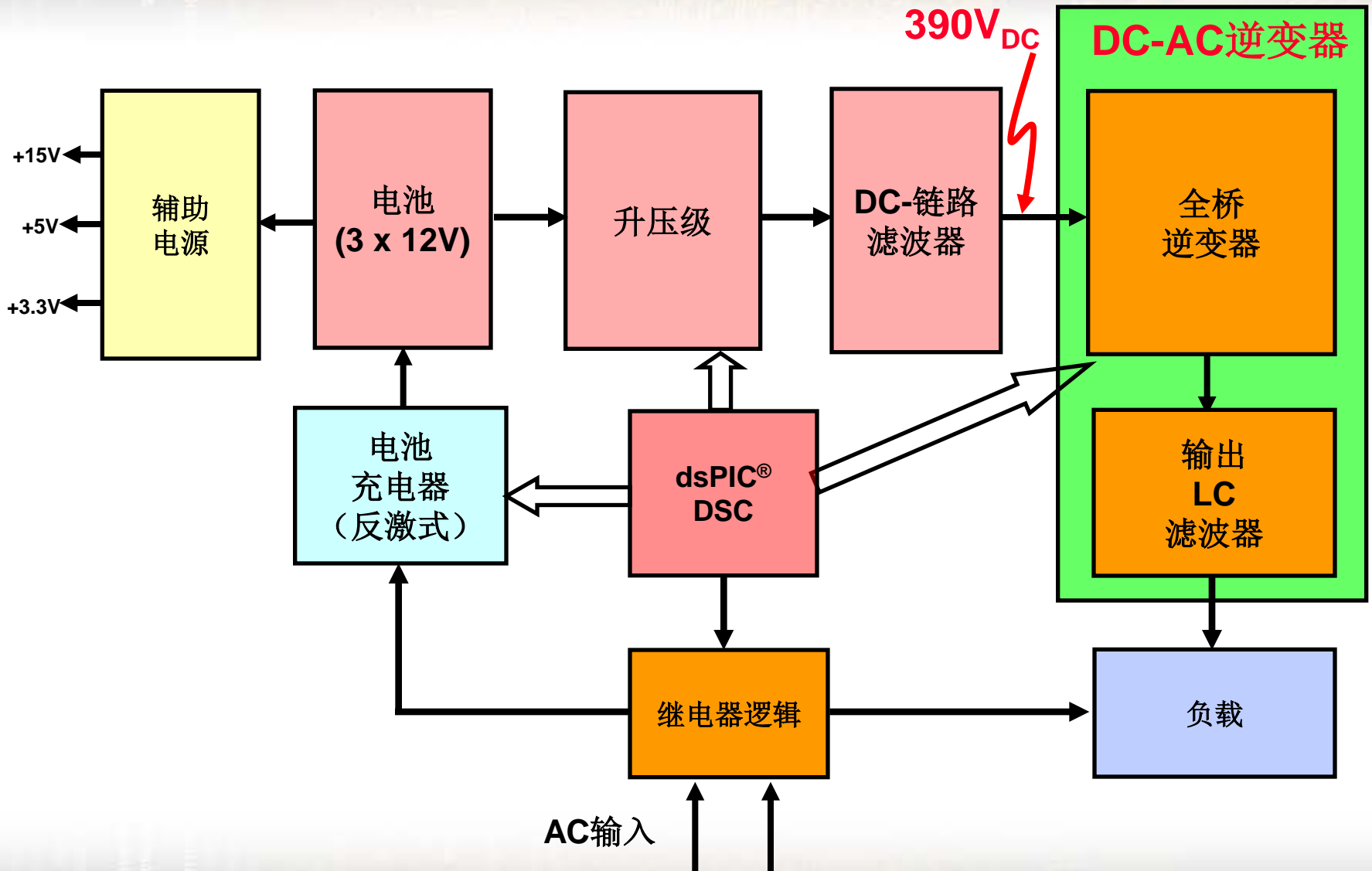
纯正弦波输出——为什么？

- 可靠地为下列设备供电，这些设备通常不能使用近似正弦波逆变器供电：
 - 激光打印机、复印机和磁光硬盘
 - 某些笔记本电脑（应联系生厂商以便确认）
 - 一些带电子镇流器的荧光灯
 - 使用“固态”电源或变速控制的电动工具
 - 电池供电工具的某些电池充电器
 - 带收音机的数字时钟
 - 带速度/微处理器控制的缝纫机
 - 医疗设备，诸如制氧机等

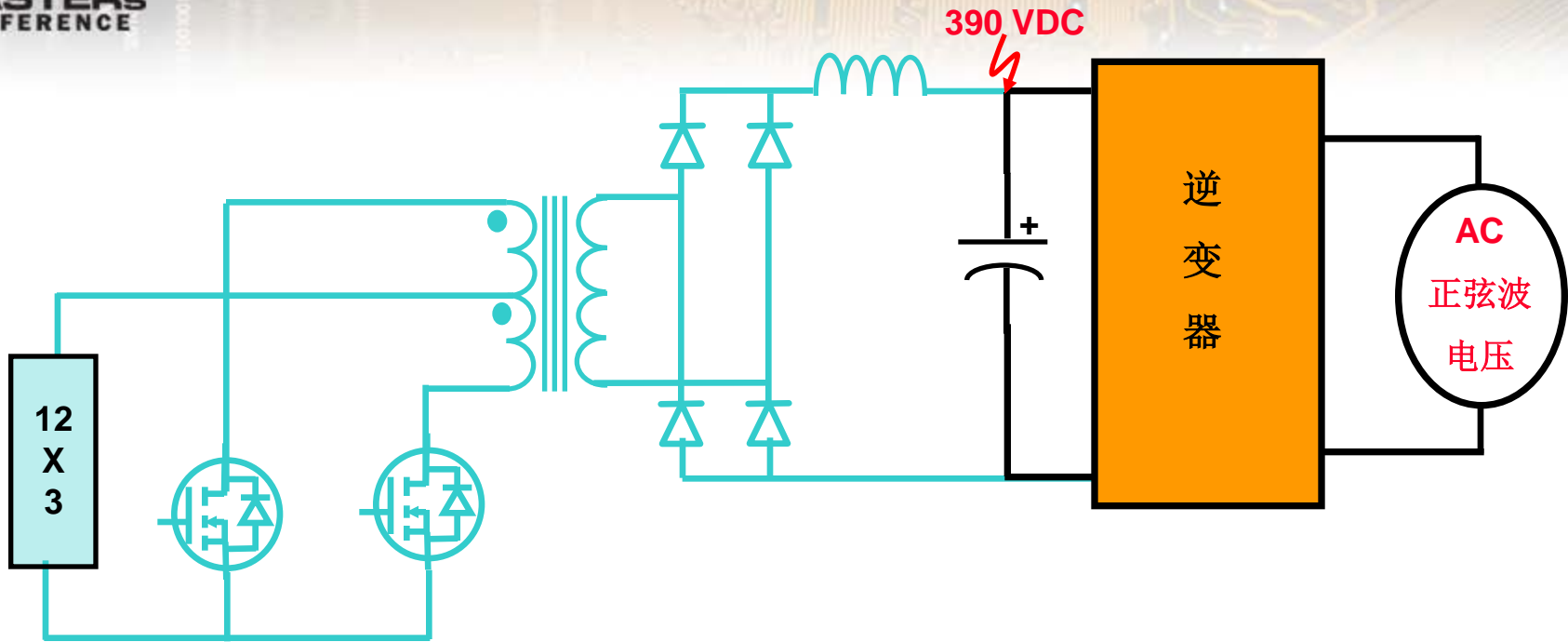
课程安排

- 离线式UPS参考设计概述
 - 纯正弦波逆变器的意义
- **正弦波逆变器的硬件设计**
- 数字信号控制器需求
- 建模及控制系数的数字化
- 控制回路的数字化实现
- 软件实现

系统框图

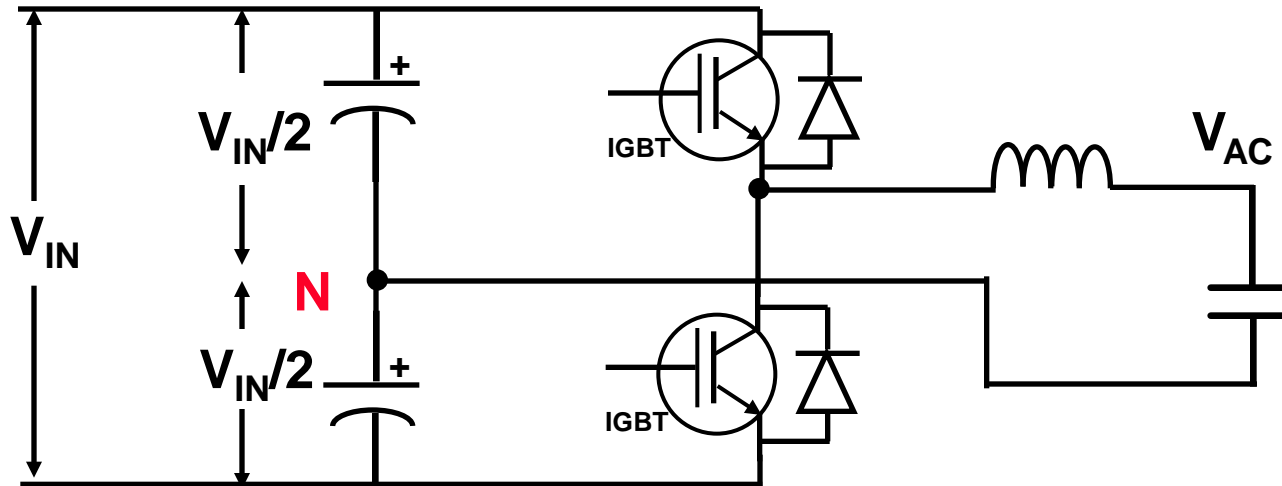


原理框图



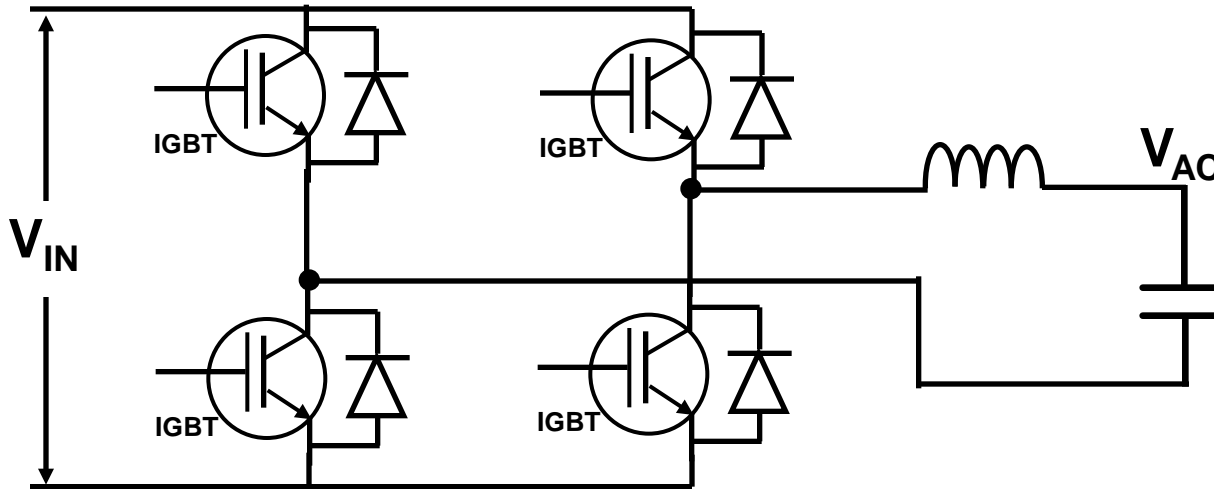
- 输入电压范围 = **390V_{DC}**
- 输出电压 = **220V_{AC}**
- 逆变器开关频率 = 50kHz
- 控制回路频率 = 50kHz
- 目标效率 > **94%**

逆变器拓扑结构——半桥



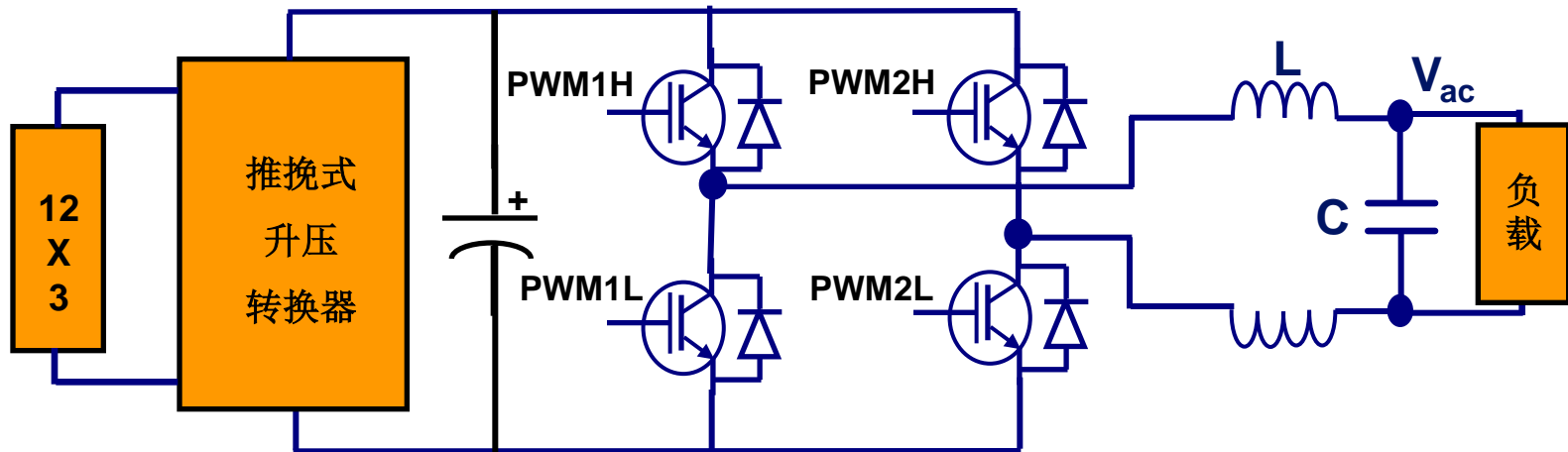
- $V_{IN}/2 > V_{AC} * 1.414$
- 中点 (N) 平衡
- 额定开关电压 $> 2 * V_{AC} * 1.414$
- 只需要两个开关
- 只需要两个PWM输出

逆变器拓扑结构——全桥



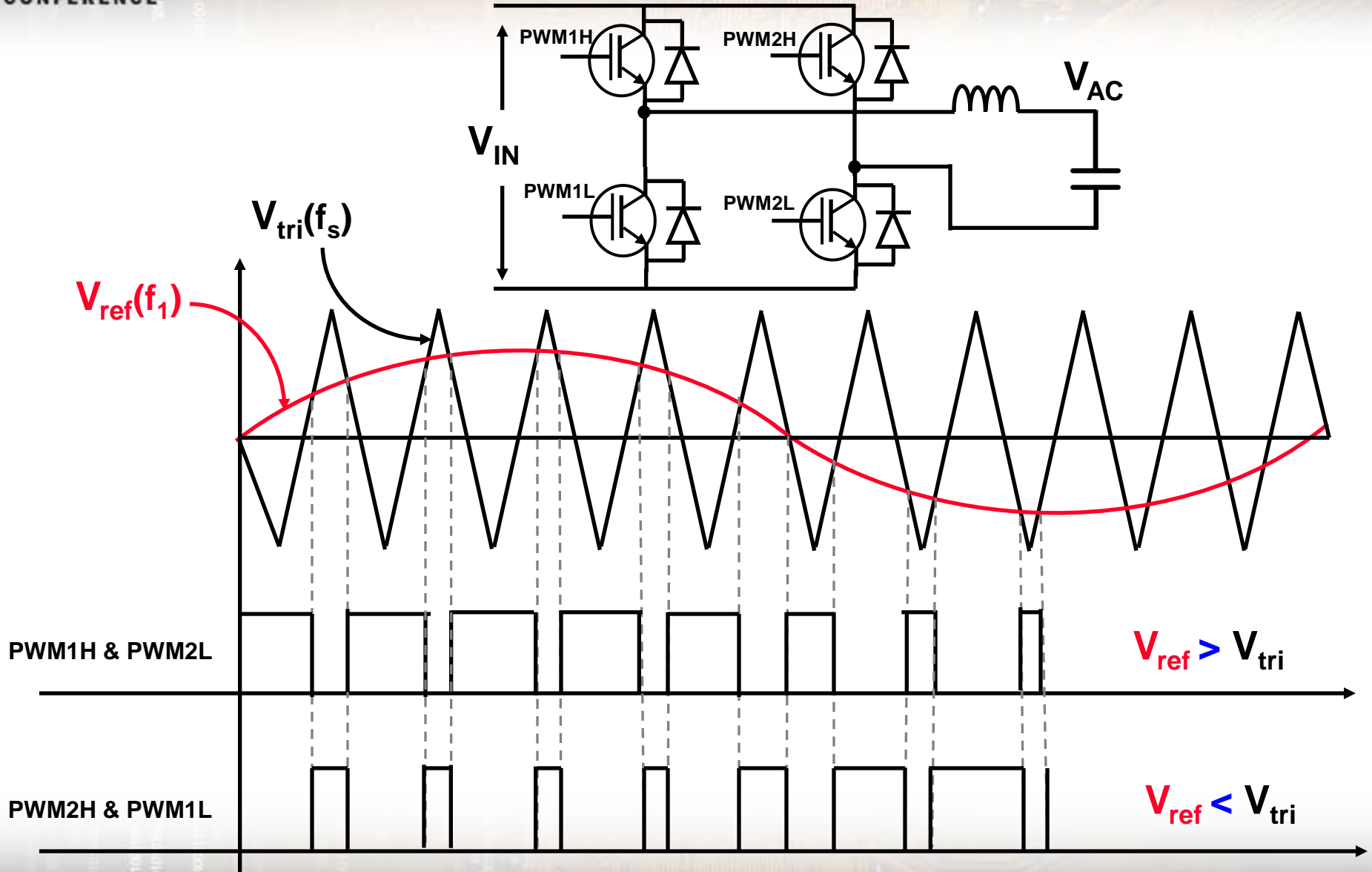
- $V_{IN} > V_{AC} * 1.414$
- 无中点平衡问题
- 额定开关电压 $> V_{AC} * 1.414$
- 需要四个开关
- 需要四个PWM输出

全桥逆变器——调制方式



- 双极性调制
- 单极性调制

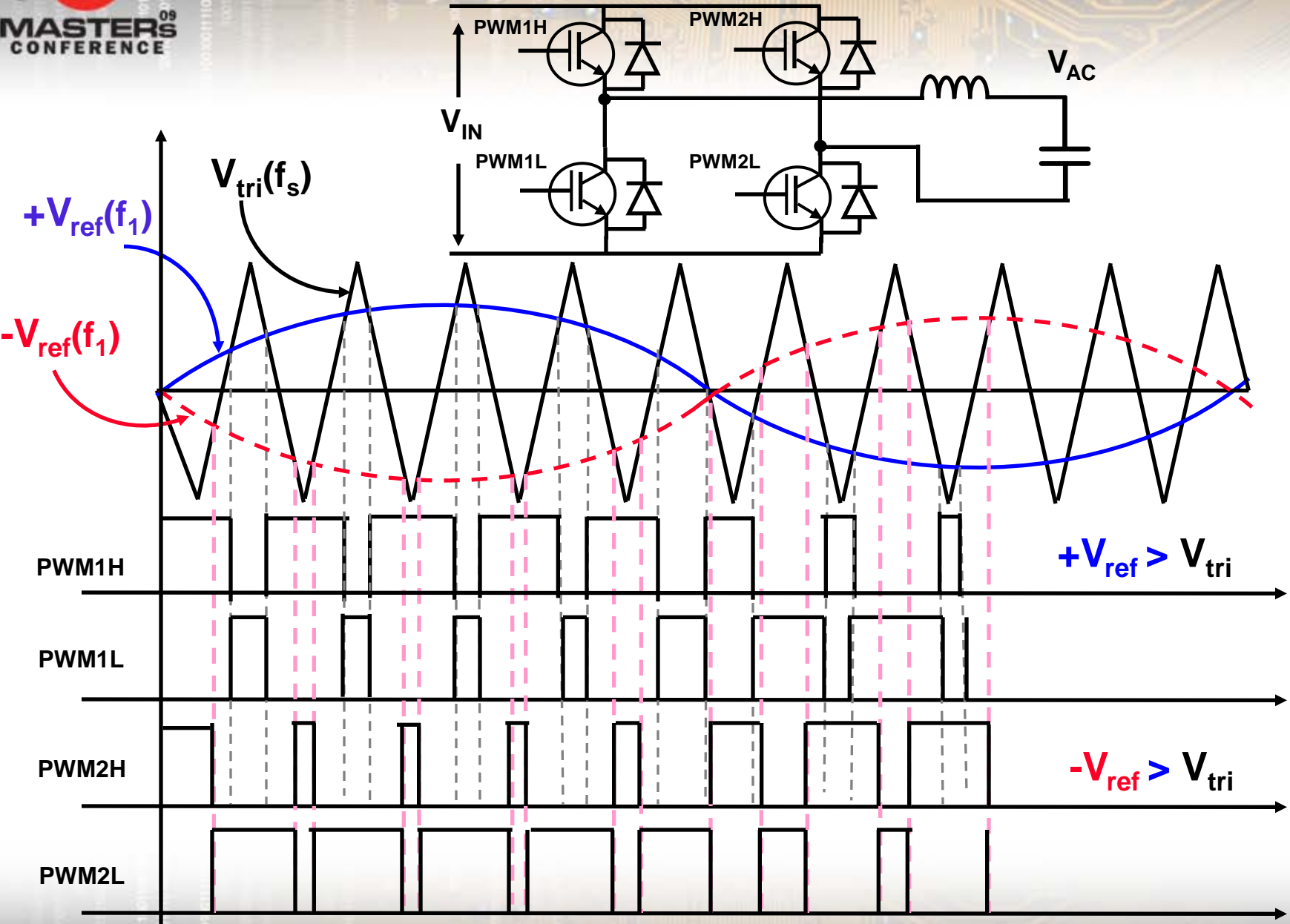
双极性调制



双极性调制

- 把开关PWM1H、PWM2L和PWM2H、PWM1L作为两对开关
- 两对开关中始终有一对是导通的
- 输出“LC滤波器”上的电压为 $+V_{IN}$ 或 $-V_{IN}$
- 需要较大的输出“LC滤波器”
- 在两个开关脉冲之间不存在零状态
- 谐波出现在以 $m_f (f_1/f_s)$ 的倍频为中心的带宽上

单极性调制



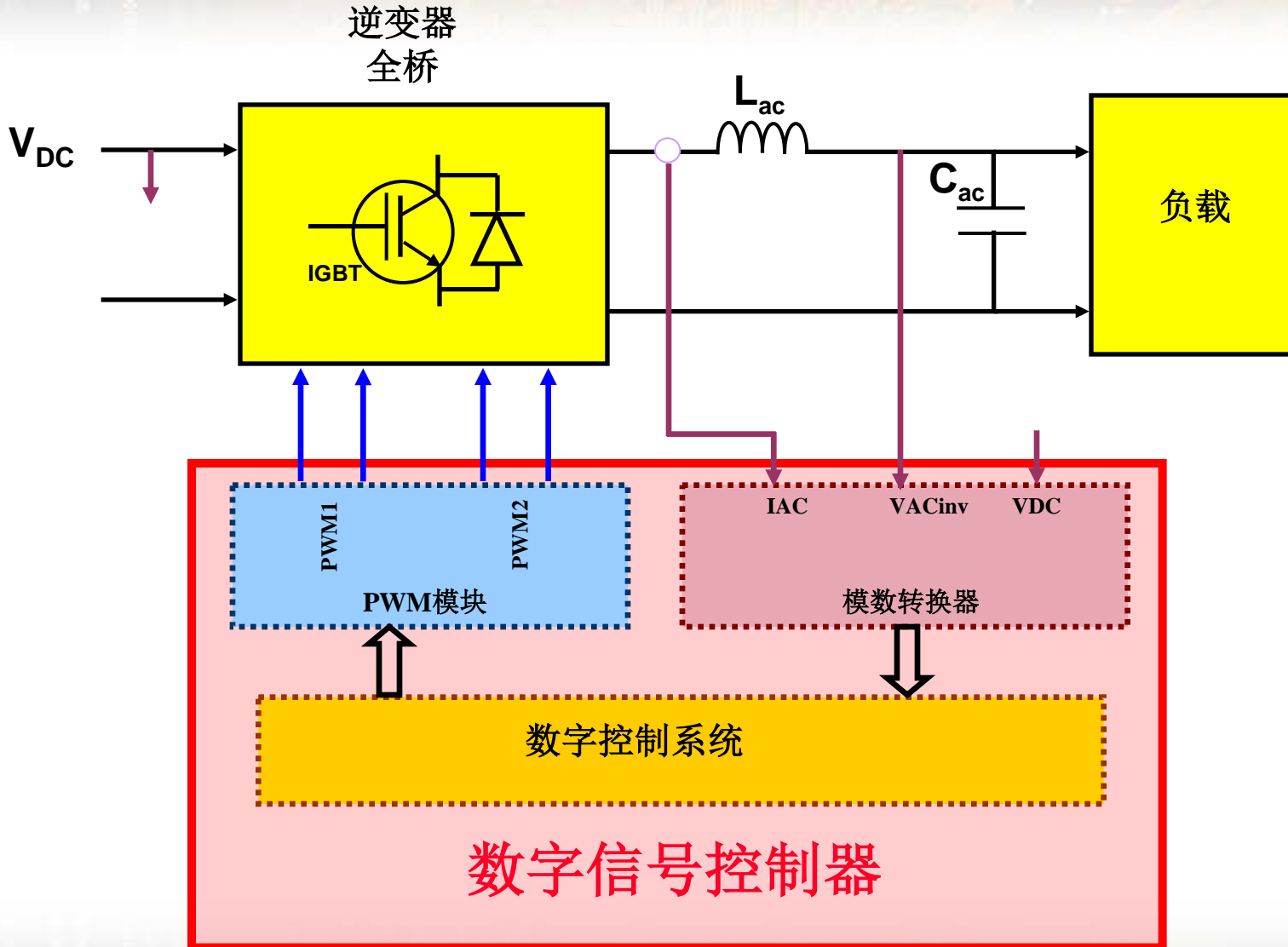
单极性调制

- PWM1H和PWM1L，PWM2H和PWM2L，他们是互补的
- 如果PWM1H和PWM2H导通，或者PWM1L和PWM2L导通，输出“LC滤波器”上的电压是零
- 输出“LC滤波器”上的电压为0、 $+V_{IN}$ 或 $-V_{IN}$
- 零状态改善了PWM输出电压的THD
- 需要较小的输出“LC滤波器”
- 谐波出现在以 $(2m_f-1) (f_1/f_s)$ 和 $(2m_f+1) (f_1/f_s)$ 的倍频为中心的带宽上

课程安排

- 离线式UPS参考设计概述
 - 纯正弦波逆变器的意义
- 正弦波逆变器的硬件设计
- **数字信号控制器需求**
- 建模及控制系数的数字化
- 控制回路的数字化实现
- 软件实现

全桥正弦波逆变器



DSC功能需求

- 为了在连续系统中实现数字控制，我们需要：
 - 模数转换器
 - 灵活的**ADC**触发选项
 - 高速而灵活的数字**PWM**
 - 片内模拟比较器
 - 高速计算
 - 通信外设
 - 数字**I/O**

问题

- **ADC的速度和分辨率:**
 - ADC将连续的输入信号离散化
 - ❖ **量化误差**
- **PWM的速度和分辨率:**
 - PWM将连续的输出信号离散化
 - ❖ **量化误差**
 - 控制回路输出抖动

对策

- **ADC:**
 - 高速模数转换器
 - 高分辨率ADC
- **PWM:**
 - 高速高分辨率PWM
 - 开关频率时的高分辨率

问题

数字延迟:

- 采样及保持电路
- 计算延迟

混叠效应:

- 定期采样连续信号
- 频率大于采样频率的一半

故障保护:

- 动作延迟

对策

- 高速采样及保持电路
- 高速处理器

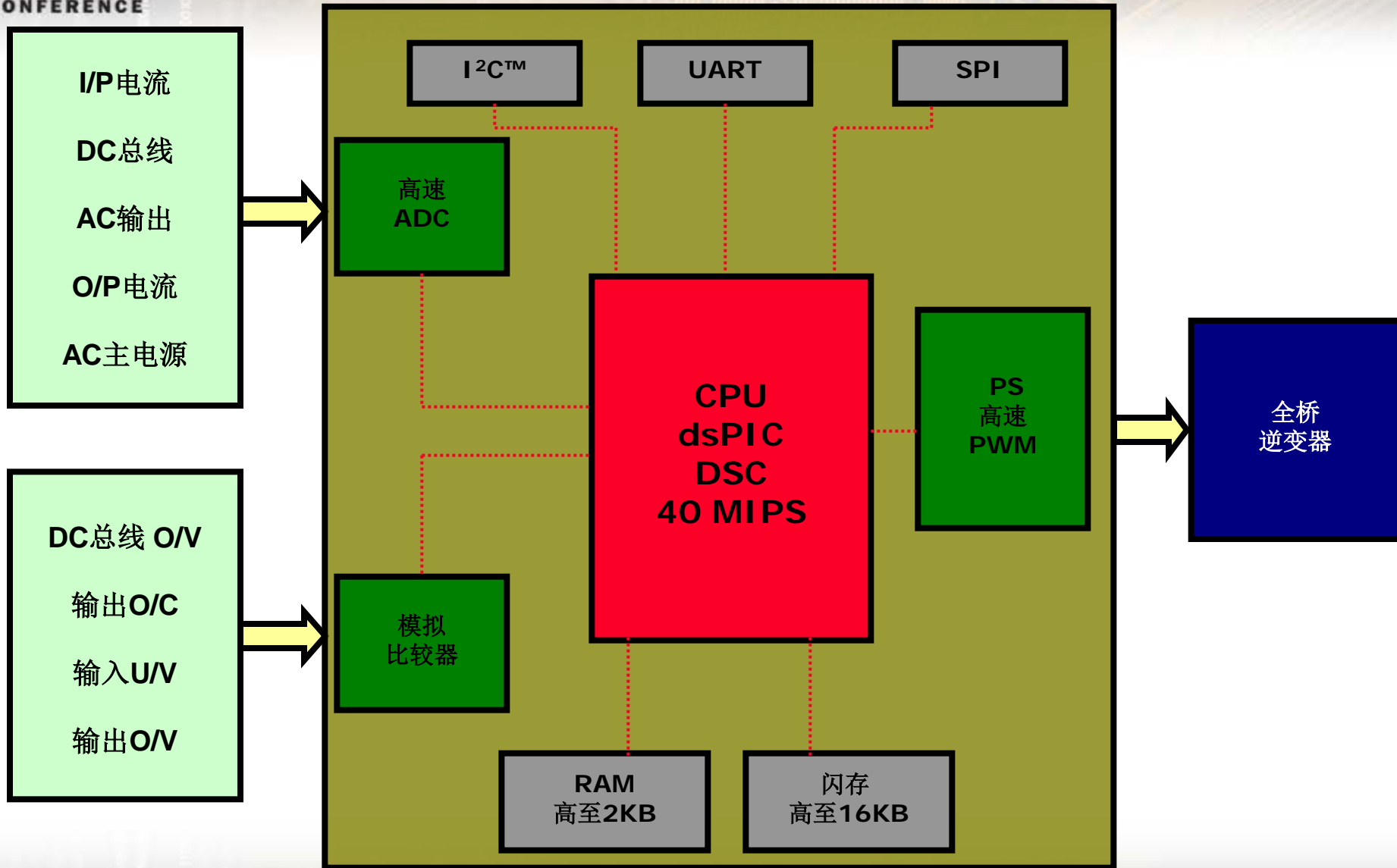
CPU:

- 高速CPU
- 高速ADC

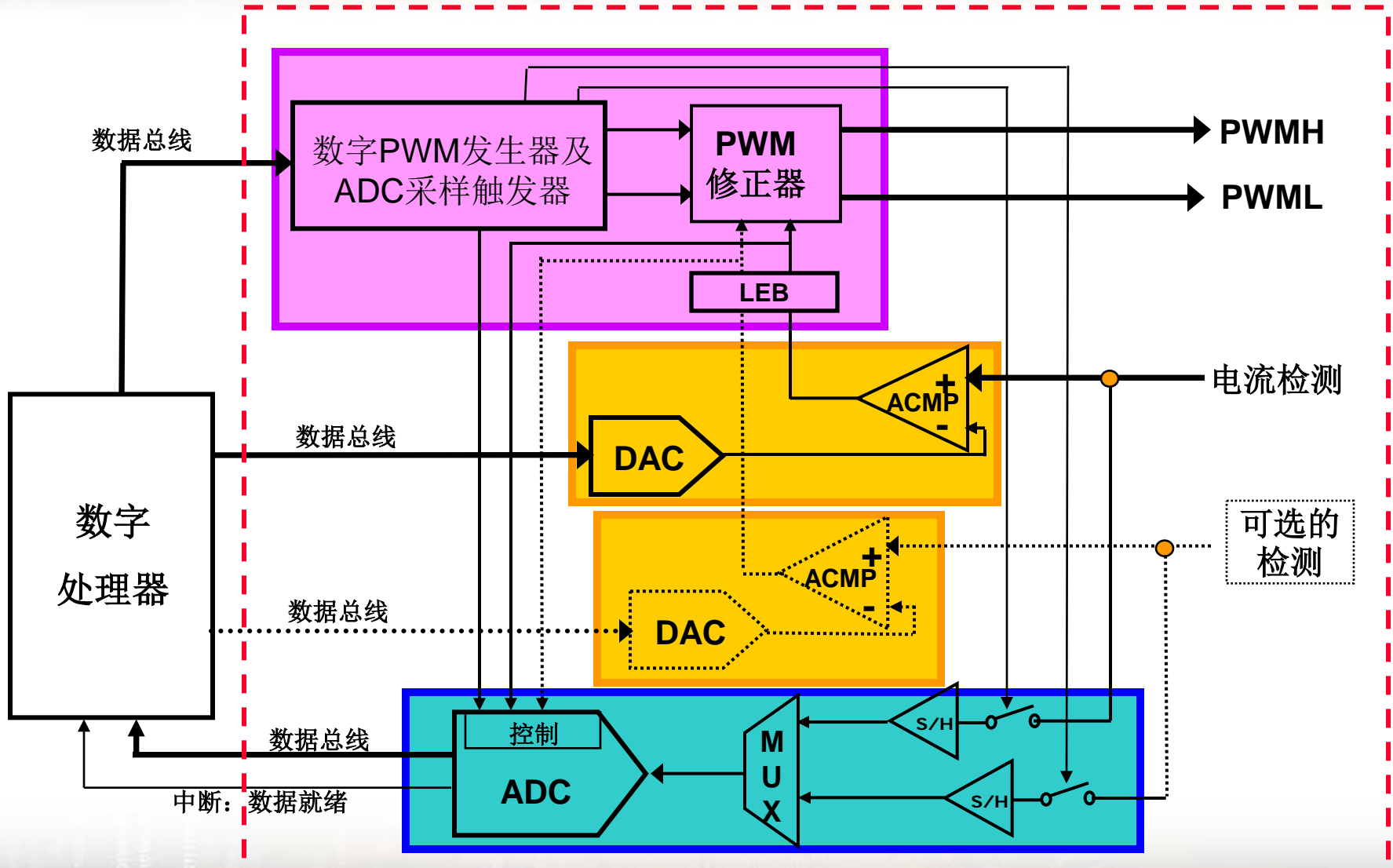
片内模拟比较器:

- 响应极快

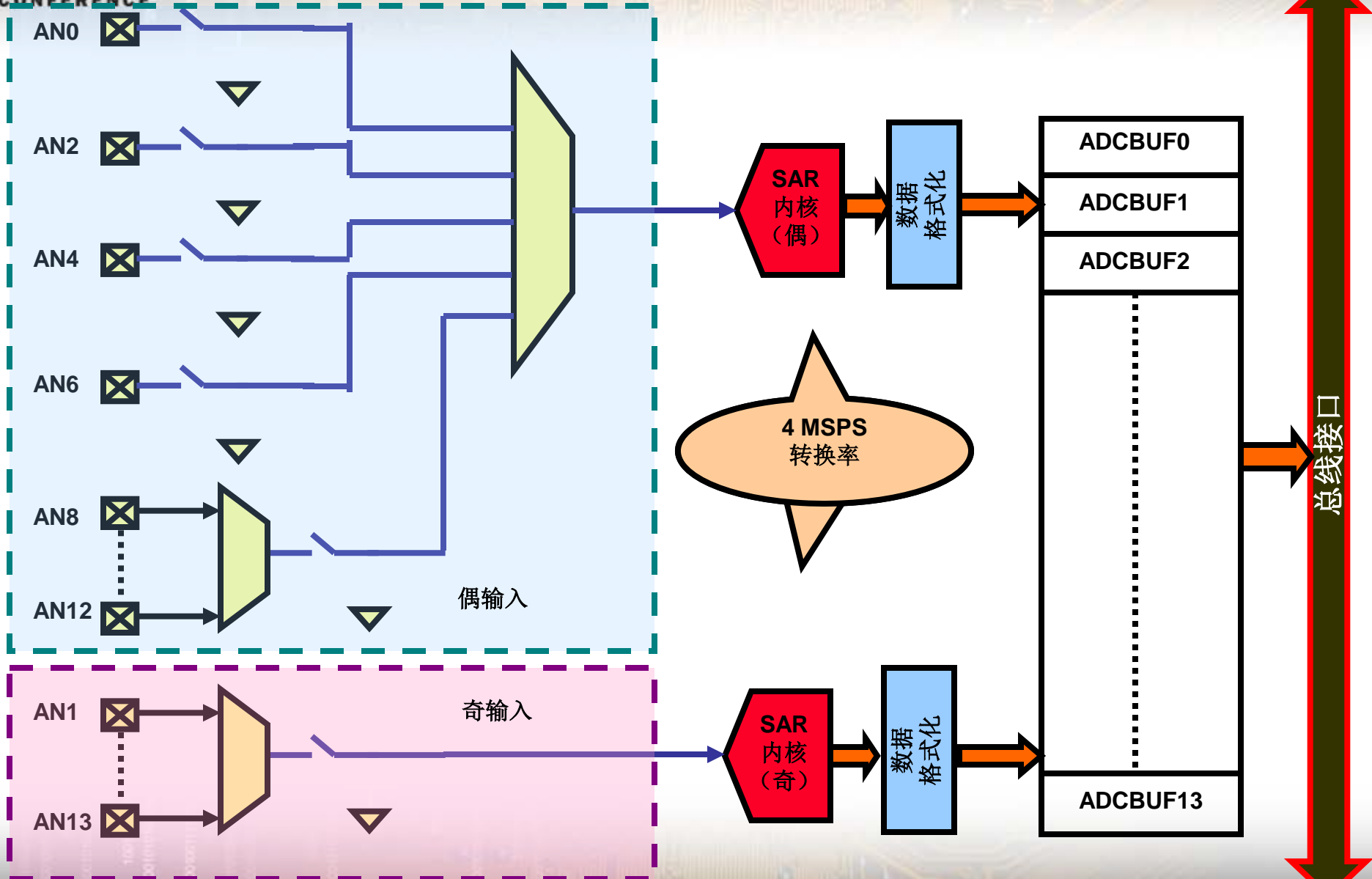
数字电源的dsPIC[®] DSC



数字电源的dsPIC[®] DSC



高速ADC

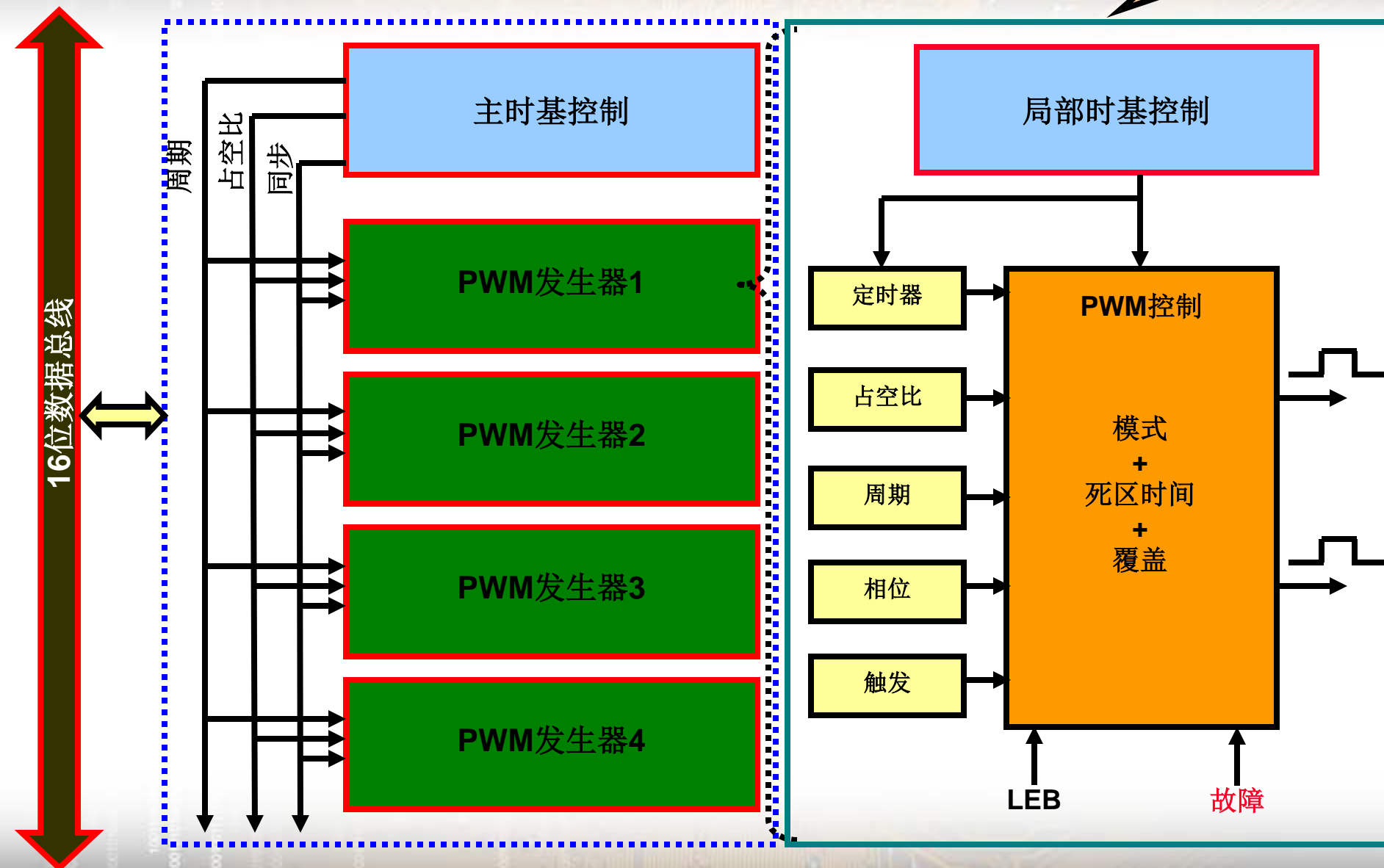


高速10位A/D转换器

- ❖ **10位分辨率， +/- 1位精度**
- ❖ **使用两个SAR时， 4 Msps的转换率**
- ❖ **使用一个 SAR时， 2 Msps的转换率**
- ❖ **6至12输入通道**
- ❖ **每个模拟输入均有专用的缓冲区寄存器**
- ❖ **模拟输入范围： 0至3.3V**
- ❖ **快速响应时间改善了控制回路的稳定性**
- ❖ **高级采样功能：**
 - ❖ **每个采样保持通道都有单独的触发器**
 - ❖ **可同时采样**
 - ❖ **可单独定时采样**
 - ❖ **精确定时采样**

高速PWM

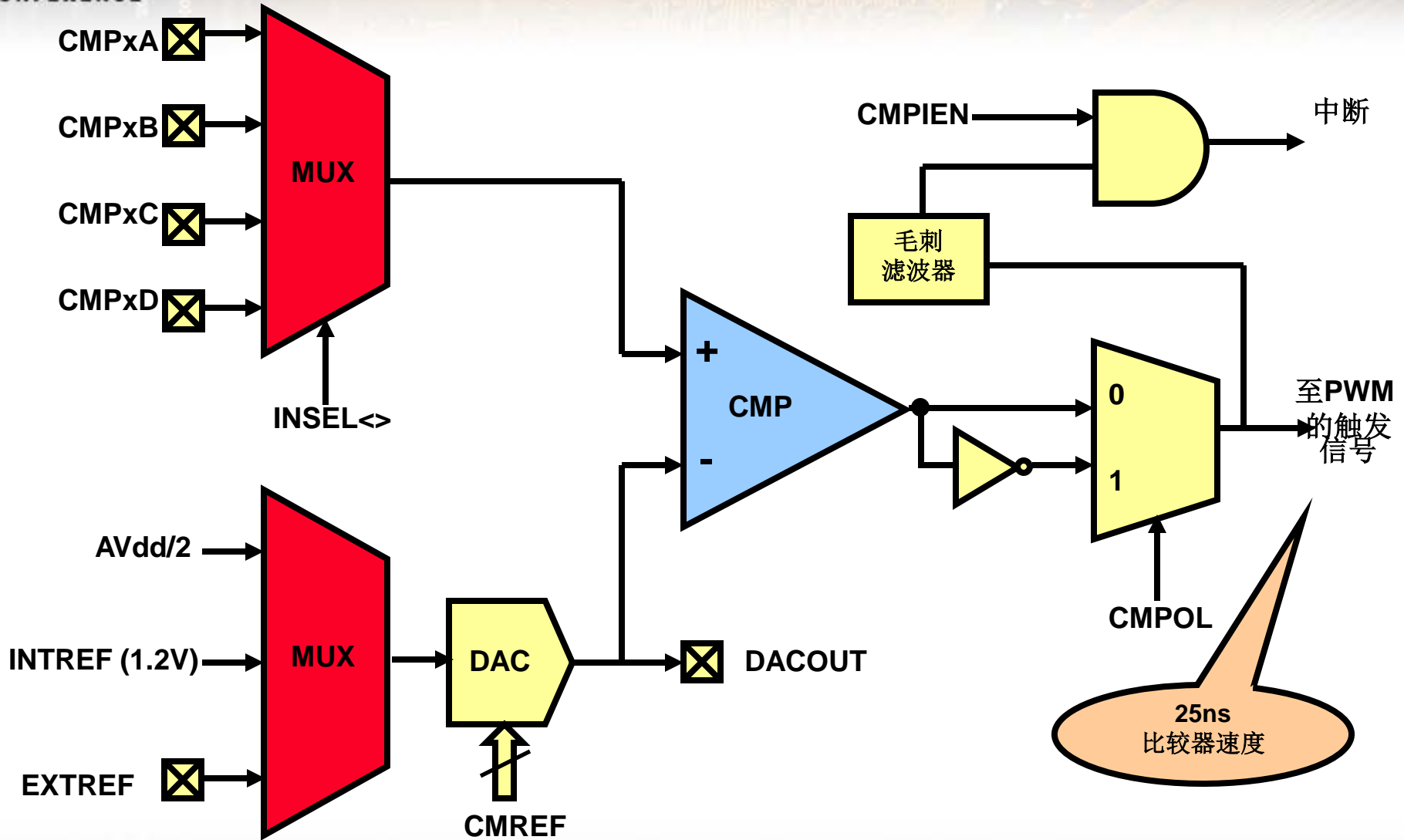
1.04ns
分辨率



SMPS PWM模块

- ❖ 高分辨率PWM：12位（@234 kHz）
 - 分辨率为1.04 ns的占空比、死区时间和周期
- ❖ 每个PWM输出都有单独的时基和占空比寄存器
- ❖ 各种PWM工作模式
 - 包括推挽、冗余和互补模式
 - 电流限制和电流复位
 - 固定和可变相位
- ❖ PWM输出可中心或边沿对齐
 - 每个PWM输出都有独立的故障和电流限制
 - 双触发器及PWM基捕捉
 - PWM输出交换和重映射功能

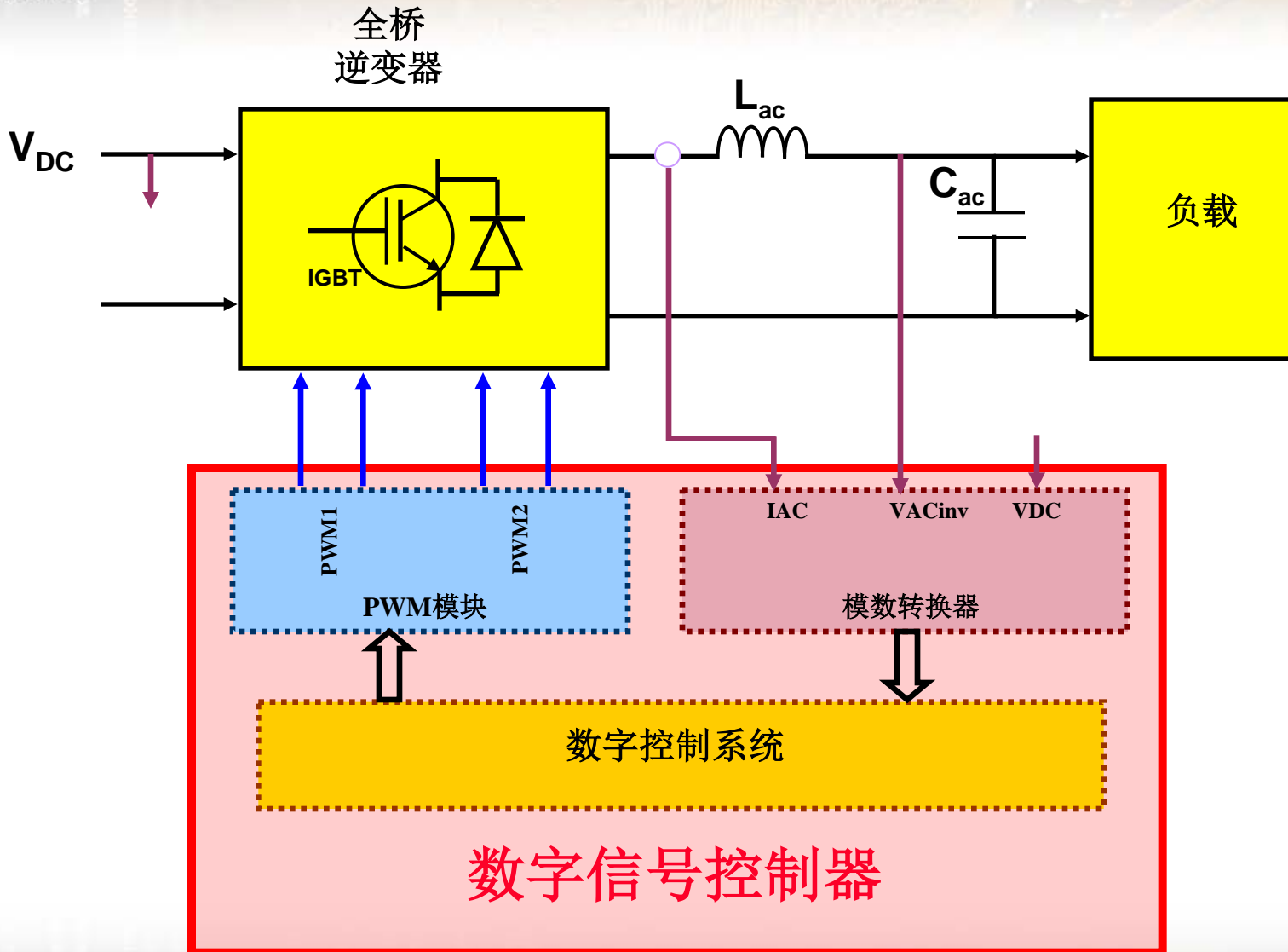
高速比较器



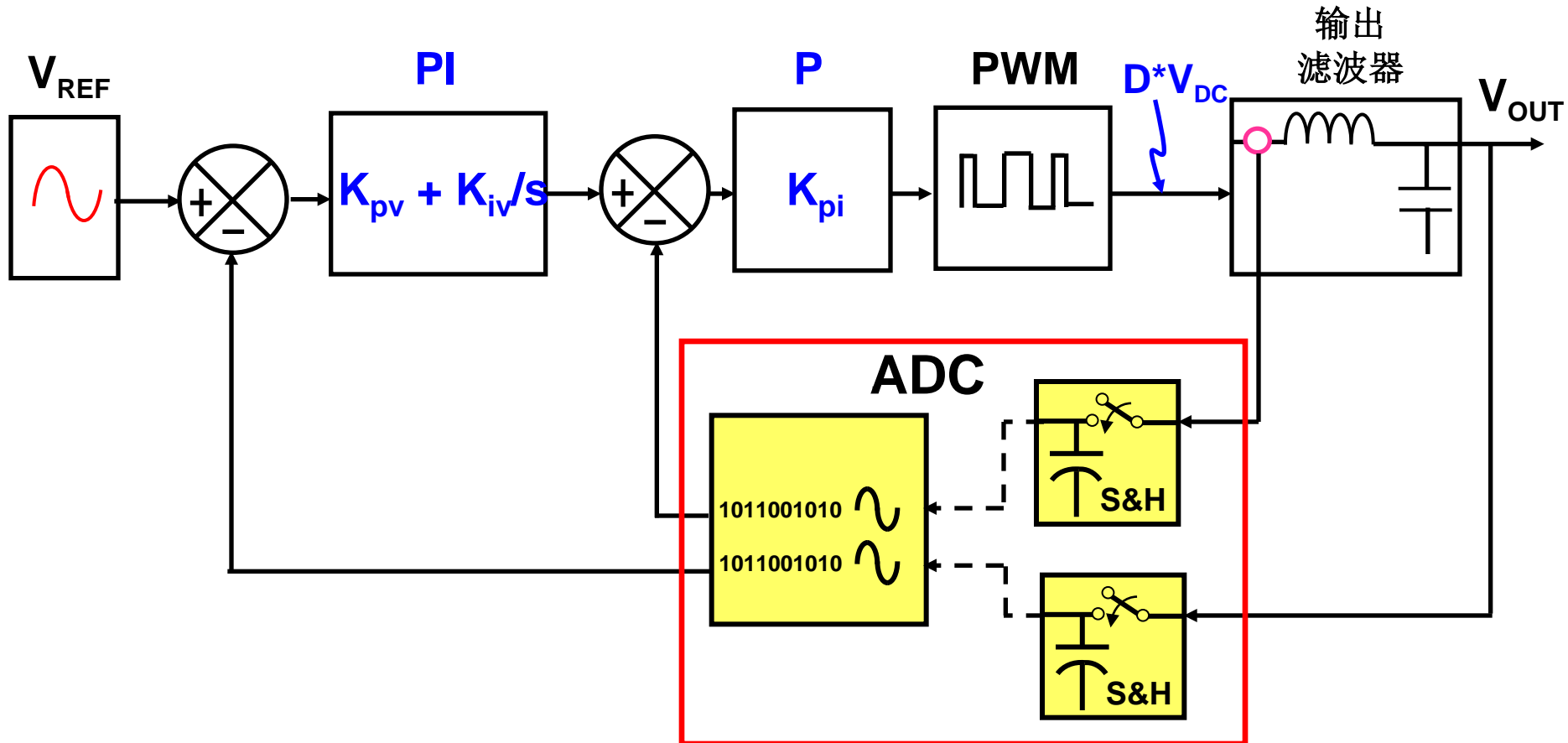
课程安排

- 离线式UPS参考设计概述
 - 纯正弦波逆变器的意义
- 正弦波逆变器的硬件设计
- 数字信号控制器需求
- **建模**及控制系数的数字化
- 控制回路的数字化实现
- 软件实现

全桥正弦波逆变器



控制回路——框图



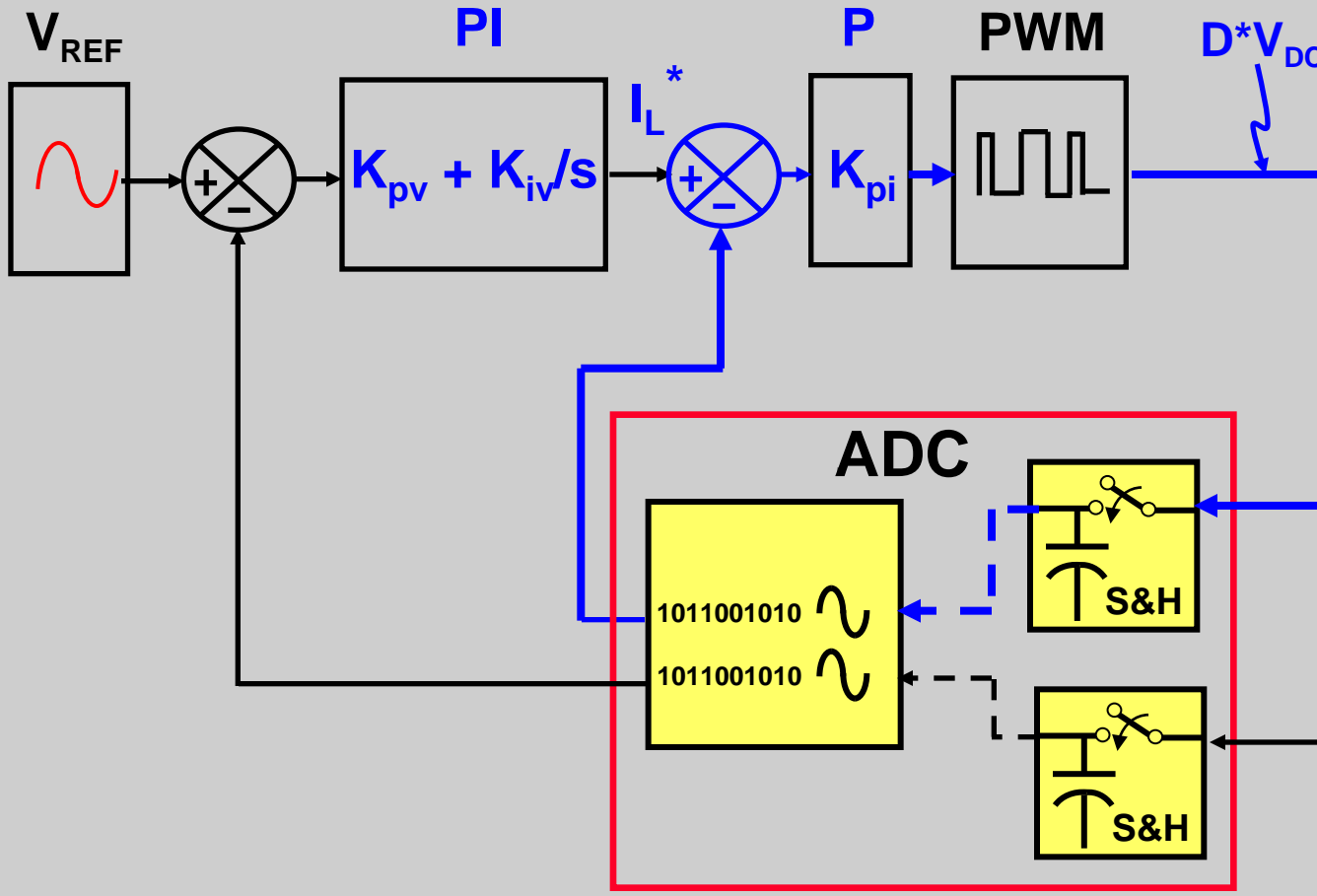
注：**D**是占空比
 V_{DC} 是输入电压

电流模式控制

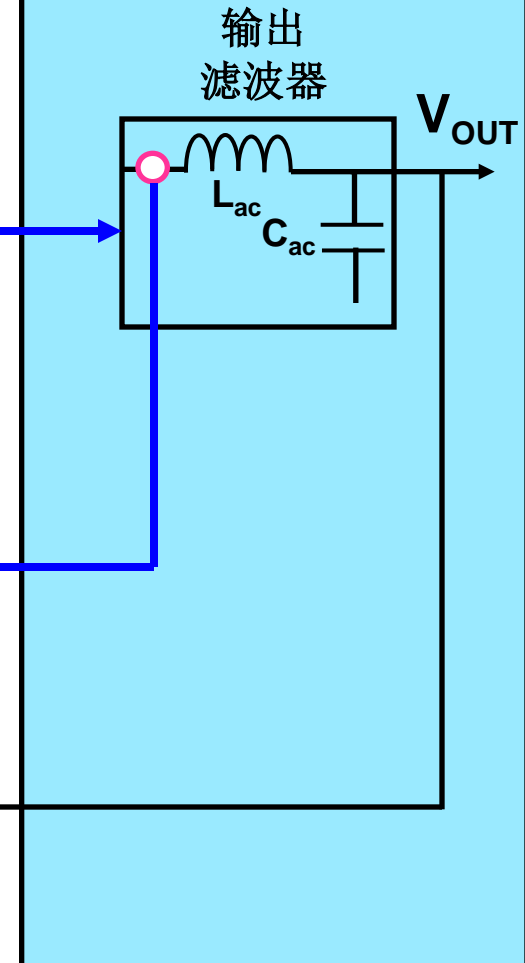
- 测量反馈电流，使用内部**P**电流控制
- 提供更好的稳定性、负载调整、抗干扰性以及电压调节率
- 内部快速电流环提供快速电流控制
- 微分项由电流环实现

控制回路——建模

控制系统

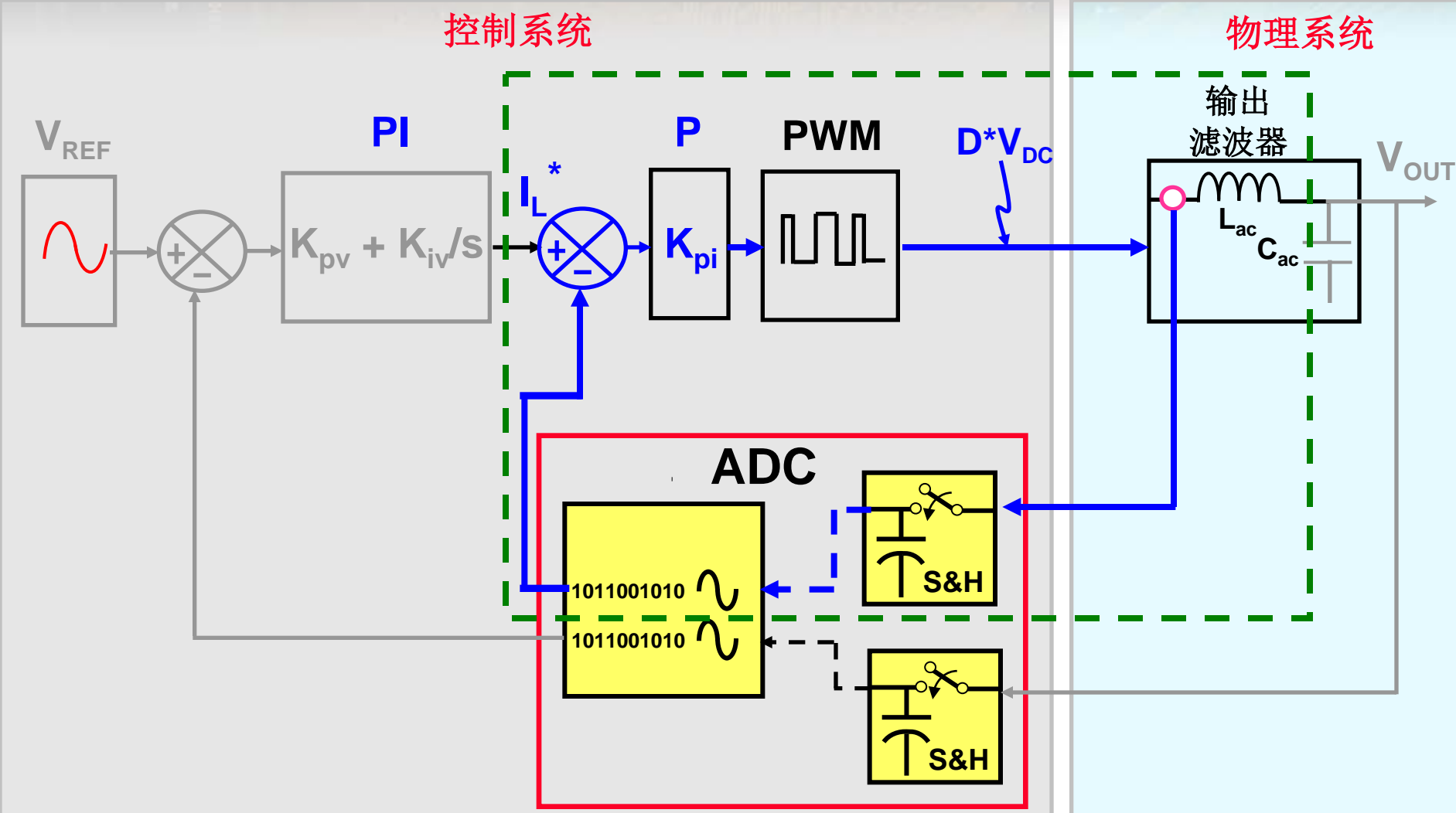


物理系统



注：**D**是占空比
V_{DC}是输入电压

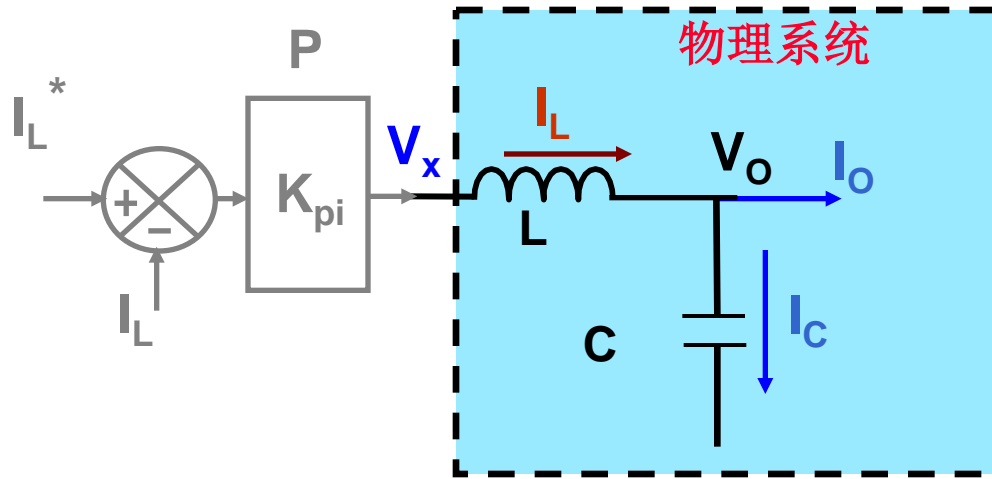
控制回路——建模



注：**D**是占空比
V_{DC}是输入电压

控制回路——建模

内部电流环



$$I_L = I_o + I_c$$

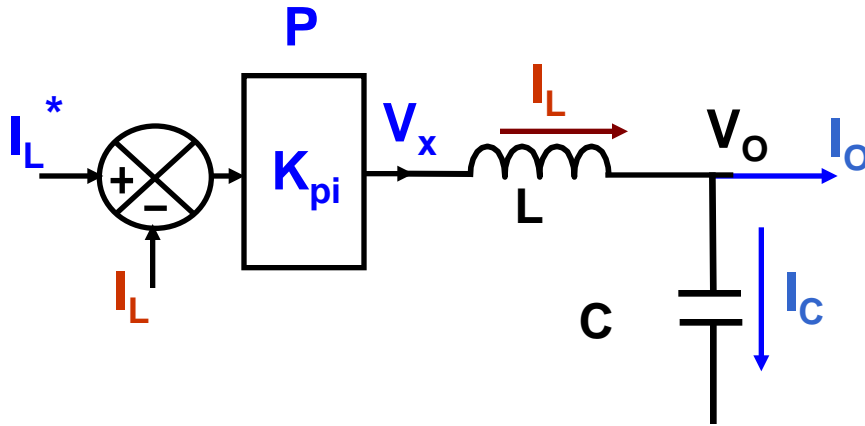
$$I_c = sCV_o$$

$$V_x = V_o + (sL + R_p)I_L$$

注: $V_x = D \cdot V_{IN}$
 D 是占空比
 R_p = 串联集总电阻

控制回路——建模

内部电流环



$$I_L = I_o + I_c$$

$$I_c = sCV_o$$

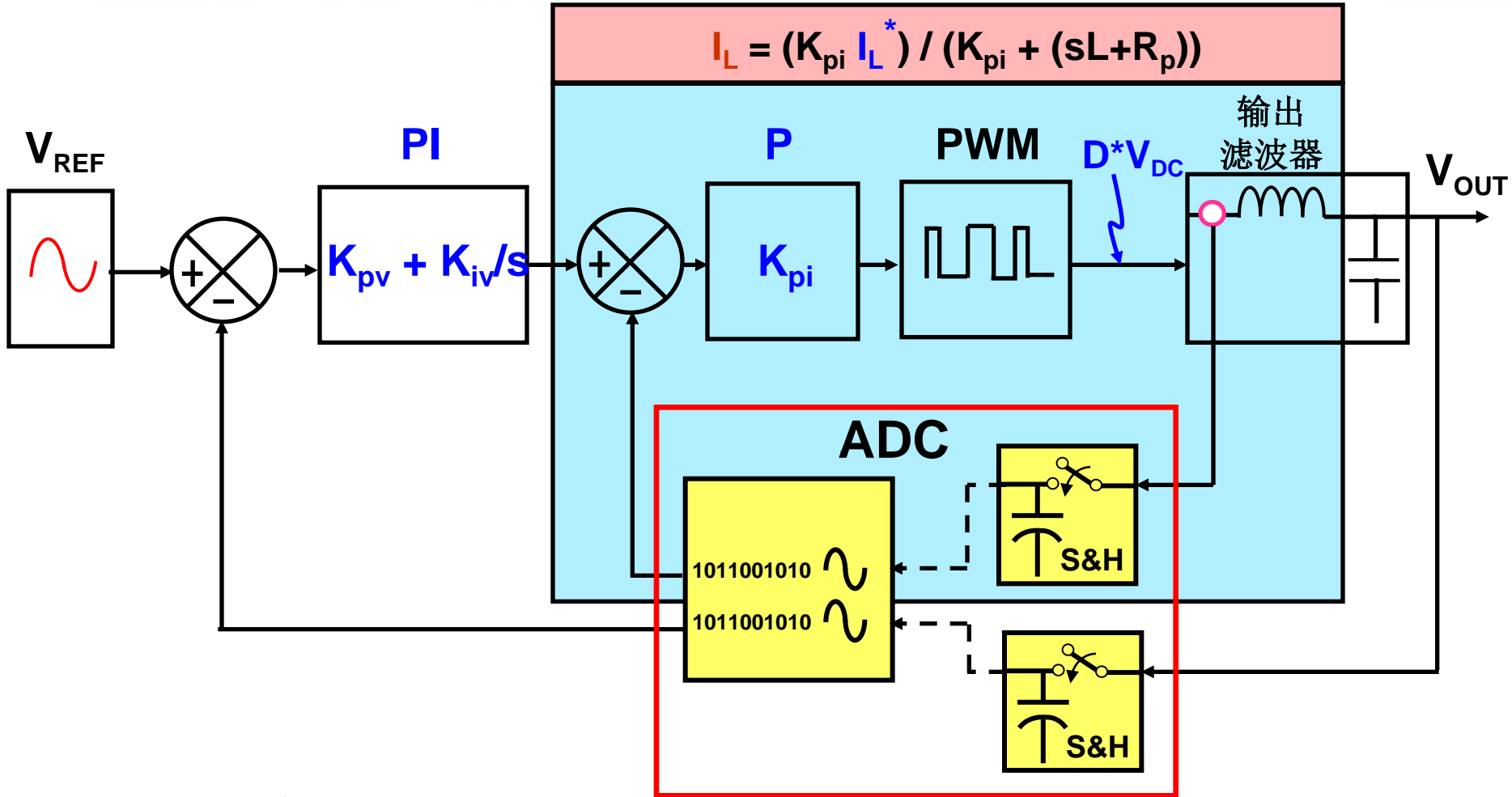
$$V_x = V_o + (sL + R_p)I_L$$

$$V_x = K_{pi} (I_L^* - I_L) + V_o$$

$$I_L = (K_{pi} I_L^*) / (K_{pi} + (sL + R_p))$$

注: $V_x = D \cdot V_{IN}$
 D 是占空比
 R_p = 串联集总电阻

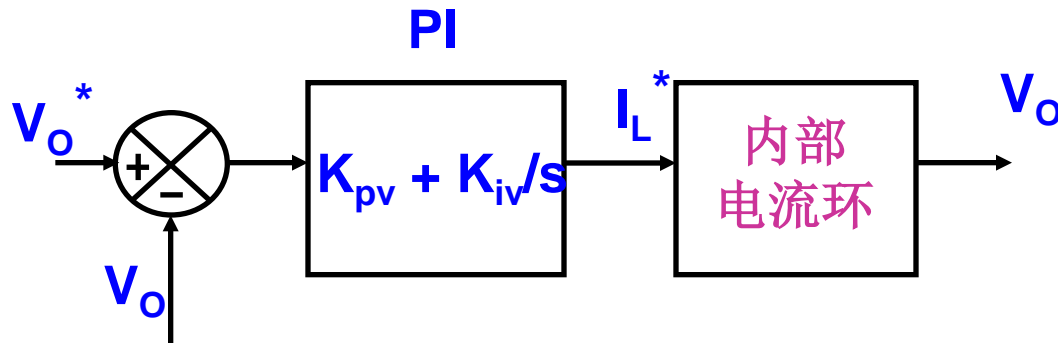
控制回路——框图



注：**D**是占空比
 V_{DC} 是输入电压

控制回路——建模

外部电压环



$$I_L = I_o + I_c$$

$$I_c = sCV_o$$

$$I_L = (K_{pi} I_L^*) / (K_{pi} + (sL + R_p))$$

$$I_L^* = (V_o^* - V_o) * (K_{pv} + K_{iv}/s)$$

$$\frac{V_o}{V_o^*} = \frac{(K_{pv}K_{pi} + K_{iv}K_{pi}/s)}{s(sL + R_p)C + sCK_{pi} + (K_{pv}K_{pi} + K_{iv}K_{pi}/s)}$$

特征方程

特征方程: $s(sL+R_p)C + sCK_{pi} + (K_{pv}K_{pi} + K_{iv}K_{pi}/s)$

$L = 250E-6$ 亨利

$C = 4.7E-6$ 法拉

$R_p = 1.8$ 欧姆

$f_{sw} = 50k$ 赫兹

$f_{sample} = 50k$ 赫兹

- 特征方程决定系统性能
- 特征方程是三次的
- 三个未知量（增益） K_{pv} 、 K_{iv} 及 K_{pi}
- 三次方程有三个根
- 通过求解3个联立方程来确定增益

特征方程: $s(sL+R_p)C + sCK_{pi} + (K_{pv}K_{pi} + K_{iv}K_{pi}/s)$

$L = 250E-6$ 亨利

$C = 4.7E-6$ 法拉

$R_p = 1.8$ 欧姆

$f_{sw} = 50k$ 赫兹

$f_{sample} = 50k$ 赫兹

- $-2pf1$ 、 $-2pf2$ 和 $-2pf3$ 是特征方程的根， $f1$ 、 $f2$ 和 $f3$ Hz是其带宽
- 带宽由三个因子 ($f1 > f2 > f3$) 之一分隔开
- $f3$ 由稳定时间 ($K_{iv} \cdot K_{pi}$) 确定
- $f2$ 是主要的电压环带宽 ($K_{pv} \cdot K_{pi}$)
- $f1$ 是电流环带宽 (K_{pi})

控制回路——建模

特征方程: $s(sL+R_p)C + sCK_{pi} + (K_{pv}K_{pi} + K_{iv}K_{pi}/s)$

$$T_s = 1/50000 \text{ s}$$

$$f1 = -2\pi 3000$$

$$f2 = -2\pi 2000$$

$$f3 = -2\pi 1000$$

$$K_{pv} = 0.0541$$

$$K_{iv} = 185.548$$

$$K_{pi} = 9.428$$

- $-2pf1$ 、 $-2pf2$ 和 $-2pf3$ 是特征方程的根， $f1$ 、 $f2$ 和 $f3$ Hz是带宽
- $f3$ 由稳定时间 ($K_{iv} \cdot K_{pi}$) 确定
- $f2$ 是主要的电压环带宽 ($K_{pv} \cdot K_{pi}$)
- $f1$ 是电流环带宽 (K_{pi})

课程安排

- 离线式UPS参考设计概述
 - 纯正弦波逆变器的意义
- 正弦波逆变器的硬件设计
- 数字信号控制器需求
- 建模及**控制系数的数字化**
- 控制回路的数字化实现
- 软件实现

数字表述

- 参数和常量以Q15（1.15）格式表示：

0x7FFF 32767 + 0.999

0x0000 0 0.000

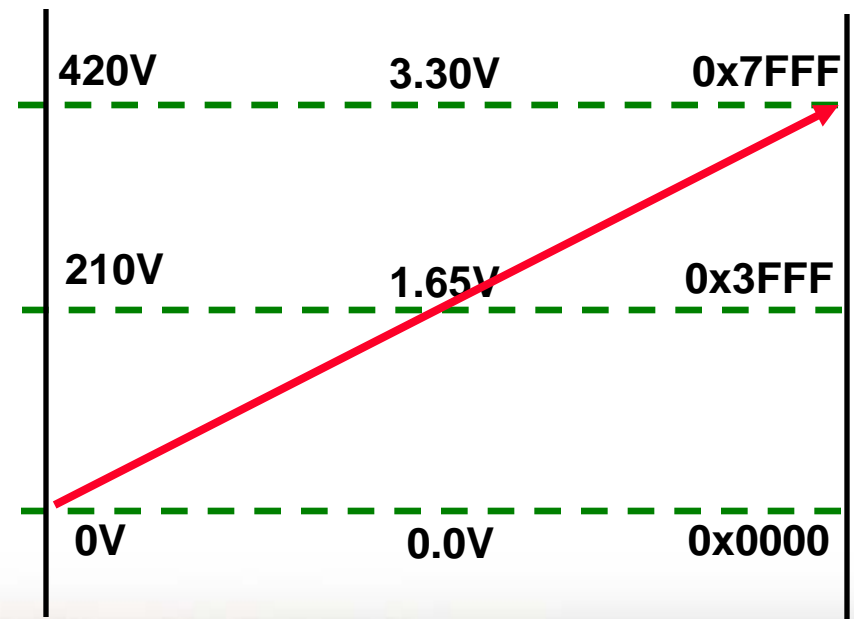
0x8000 -32768 - 1.000

- 根据最大条件来定义比例因数：

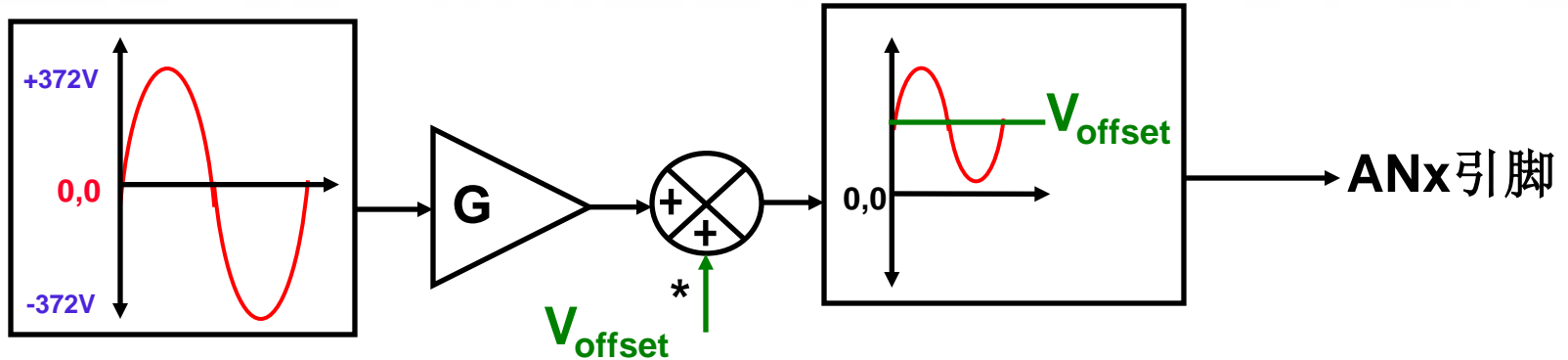
$$V_{DCmax(dig)} = V_{DCmax} * K_1 = 1$$

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

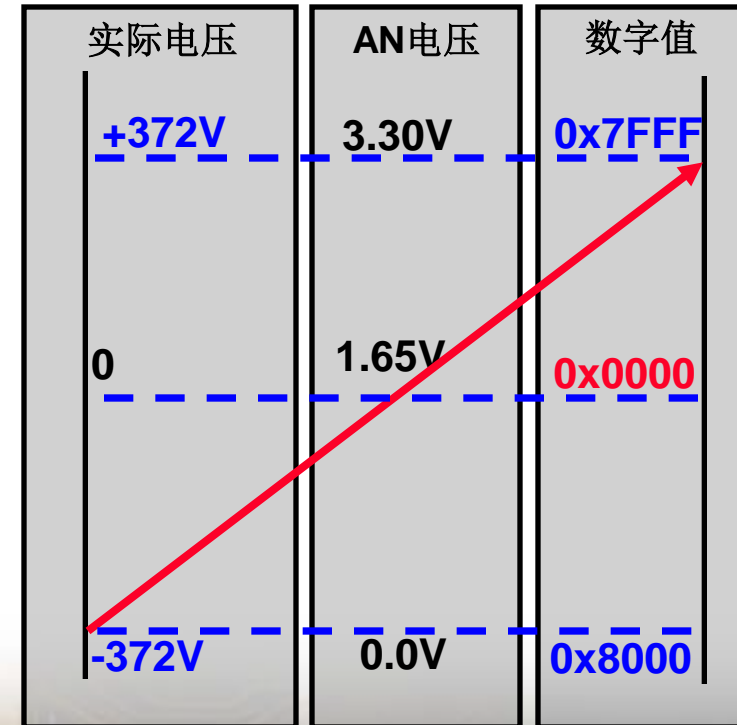
$$I_{ACmax(dig)} = I_{ACmax} * K_3 = 1$$



数字表述———交易量



- 把AC信号降低到模拟输入电压范围
- 转换器AC量抬高 V_{offset} ，变成DC量
- 从DC检测量中减去（数字） V_{offset} （ $0x3FFF$ ）值，再次得到AC量



* $\Rightarrow 1.65V = 0x3FFF$

数字表述

$$K_{pv} = 0.0541$$

$$K_{iv} = 185.548$$

$$K_{pi} = 9.428$$

- 反馈以**Q15**格式表示
- **Q15**有助于代码在设计间轻松迁移
- **Q15**允许有符号运算
- **Q15**使用处理器提供的所有**16**位——分辨率最高
- **Q15**允许使用 **MAC**——有效使用**dsPIC[®] DSC**
- **10**位**ADC**值（**0-1023**）乘以**32**，成为 **Q15**格式（**+/- 32767**）

数字表述

$$K_{pv} = 0.0541$$

$$K_{iv} = 185.548$$

$$K_{pi} = 9.428$$

- 计算的增益以实际单位表示
- **ADC**是定点处理器
- 处理器中的数与实际物理量之间是线性关系
- 为了一致性起见，需要对增益按比例进行缩放
- 比例缩放不会影响控制系统框图的结构
- 比例缩放仅影响各种量在软件中的表述

数字表述

按比例缩放——反馈

$$K_{pv} = 0.0541$$

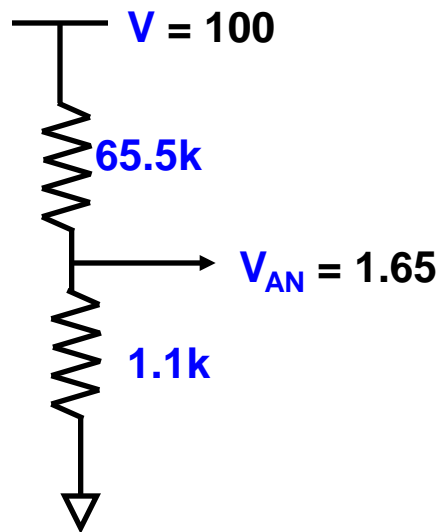
$$K_{iv} = 185.548$$

$$K_{pi} = 9.428$$

模拟输入电压最大值 = 3.3V \Rightarrow 1023 - 数字值

= 1.65 \Rightarrow 16383 - Q15

示例:



V_N = 归一化电压

= 在ADC引脚上产生最大模拟电压

在软件中，电压按比例缩放为一个分数 (V/V_N)

数字表述

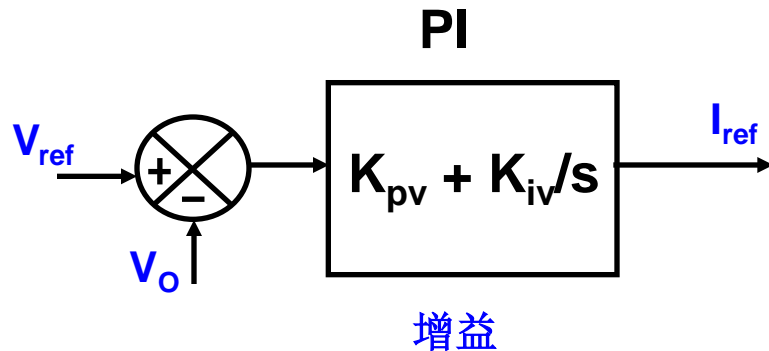
按比例缩放——增益

$$K_{pv} = 0.0541$$

$$K_{iv} = 185.548$$

$$K_{pi} = 9.428$$

模拟时，控制增益以实际单位进行计算



$$V \Rightarrow \text{增益} \Rightarrow I_{ref}$$

$$\text{电流 (Q15)} = \text{Q15 (I/IN)}$$

$$\text{电压 (Q15)} = \text{Q15 (V/VN)}$$

$$\text{增益系数为} = G * \text{VN/IN}$$

按比例缩放的增益值将在软件中使用，作用在电压量上，产生输出的电流量

数字表述

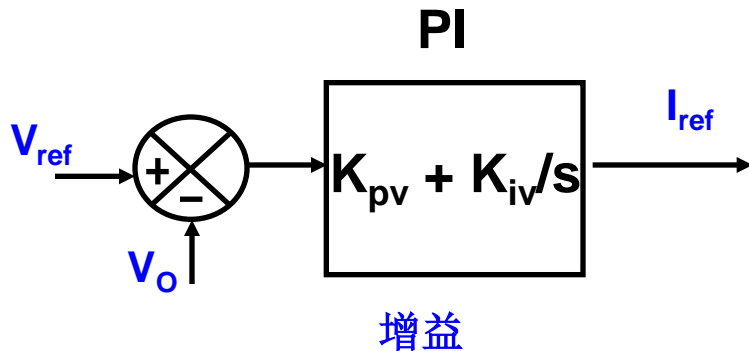
按比例缩放——增益

$$K_{pv} = 0.0541$$

$$K_{iv} = 185.548$$

$$K_{pi} = 9.428$$

模拟时，控制增益以实际单位进行计算



增益系数为 = $G \cdot VN/IN$

采样时间 = 常数 (T_s)

积分增益 (G_{si}) = $K_i \cdot T_s \cdot VN/IN$

比例增益 (G_{sp}) = $K_p \cdot VN/IN$

按比例缩放的增益值将在软件中使用

数字表述

按比例缩放——增益

$$L = 250E-6 \text{ 亨利}$$

$$C = 4.7E-6 \text{ 法拉}$$

$$R_p = 1.8 \text{ 欧姆}$$

$$K_{pv} = 0.0541$$

$$K_{iv} = 185.548$$

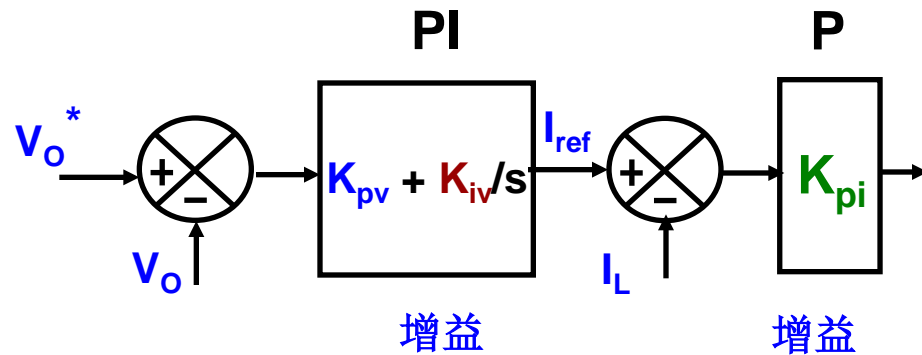
$$K_{pi} = 9.428$$

$$K1 = K_{pv} * VN / IN = 0.51$$

$$K2 = K_{iv} * Ts * VN / IN = 0.035$$

$$K3 = K_{pi} / (2 * Vinom * IN) = 0.91$$

$$K4 = VIN / (2 * Vinom) = 0.91$$



按比例缩放的增益值将在软件中使用

数字表述

按比例缩放——增益

$$L = 250E-6 \text{ 亨利}$$

$$C = 4.7E-6 \text{ 法拉}$$

$$R_p = 1.8 \text{ 欧姆}$$

$$K_{pv} = 0.0541$$

$$K_{iv} = 185.548$$

$$K_{pi} = 9.428$$

$$K1 = K_{pv} * VN / IN = 0.51 \implies Q15 (K1) = 16711$$

$$K2 = K_{iv} * Ts * VN / IN = 0.035 \implies Q15 (K2) = 1147$$

$$K3 = K_{pi} / (2 * Vinom * IN) = 0.91 \implies Q15 (K3) = 29817$$

$$K4 = VIN / (2 * Vinom) = 0.91 \implies Q15 (K4) = 29817$$

Q15数字值将在软件中使用

课程安排

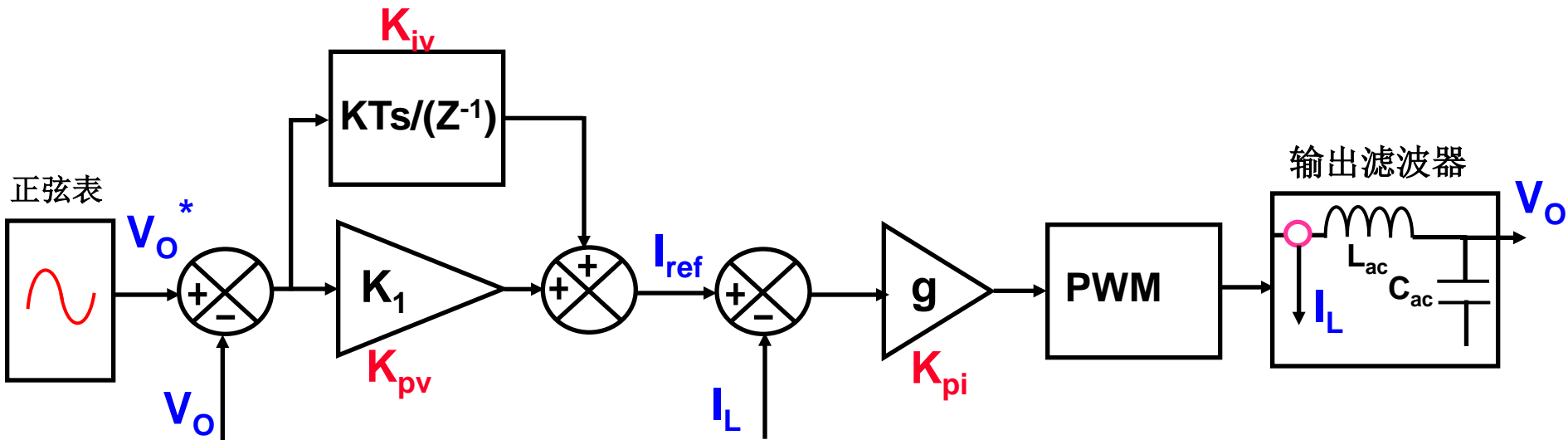
- 离线式UPS参考设计概述
 - 纯正弦波逆变器的意义
- 正弦波逆变器的硬件设计
- 数字信号控制器需求
- 建模及控制系数的数字化
- **控制回路的数字化实现**
- 软件实现

数字化实现——控制回路

$$K_1 = 0.5166$$

$$K_2 = 0.0354$$

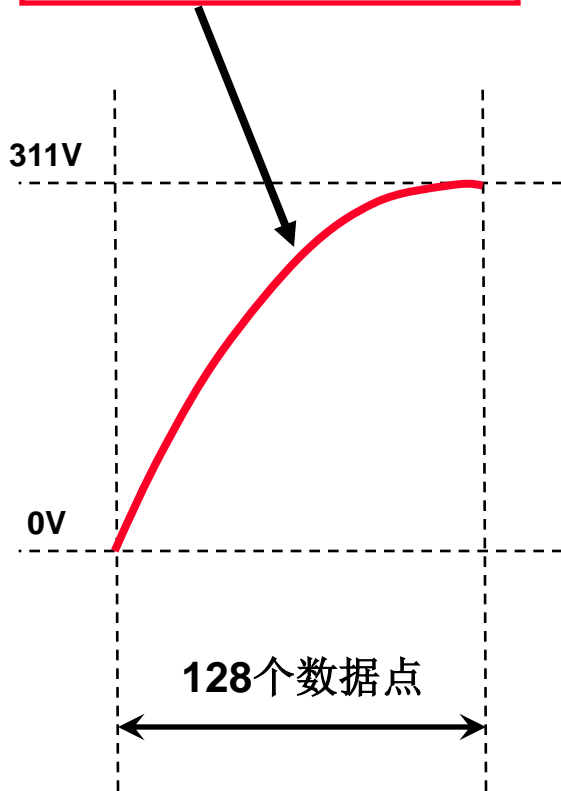
$$K_3 = 0.916$$



按比例缩放的增益值将在软件中使用

正弦参考查找表

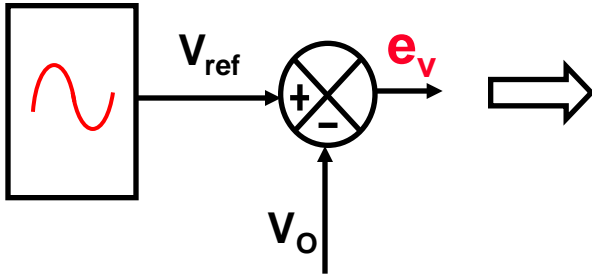
把一个象限的正弦波
存储在RAM中



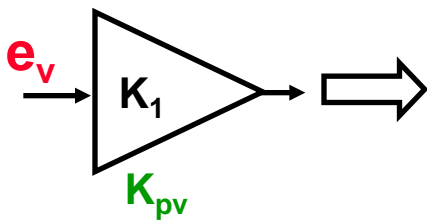
象限	方向	符号
1 st	从0至127递增采样	正
2 nd	从127至0递减采样	正
3 rd	从0至127递增采样	负
4 th	从127至0递减采样	负

软件实现——控制回路

正弦表

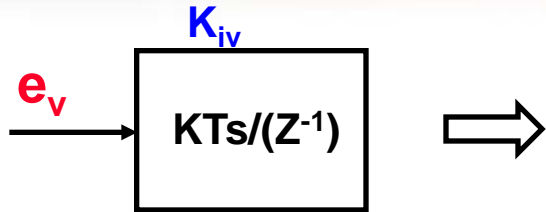


$e_v = \text{inverterVoltageError} = (\text{inverterVoltageRef} - \text{inverterOutputVoltage});$



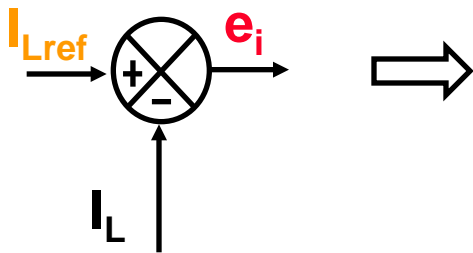
`temp1 = ((__builtin_mulss((int)InvCMvoltageKp,inverterVoltageError))>>15);`

软件实现——控制回路



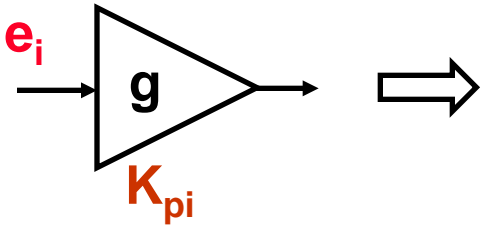
```
temp4 = temp4 + ((__builtin_mulss((int)InvCMvoltageKi,inverterVoltageError))>>15);
```

```
inverterCurrentRef = (long)temp1 + temp4
```



```
e_i = inverterCurrentError = (inverterCurrentRef - inverterOutputCurrent);
```


软件实现——控制回路



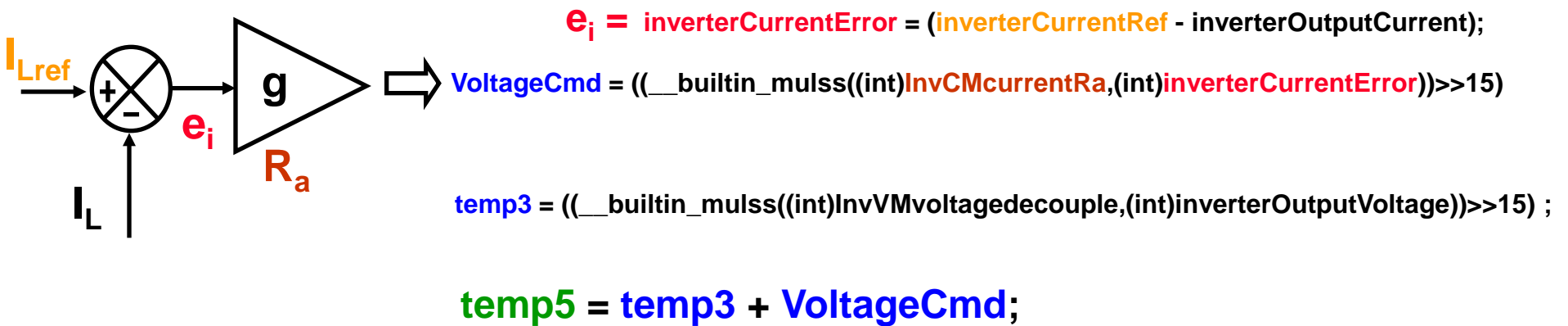
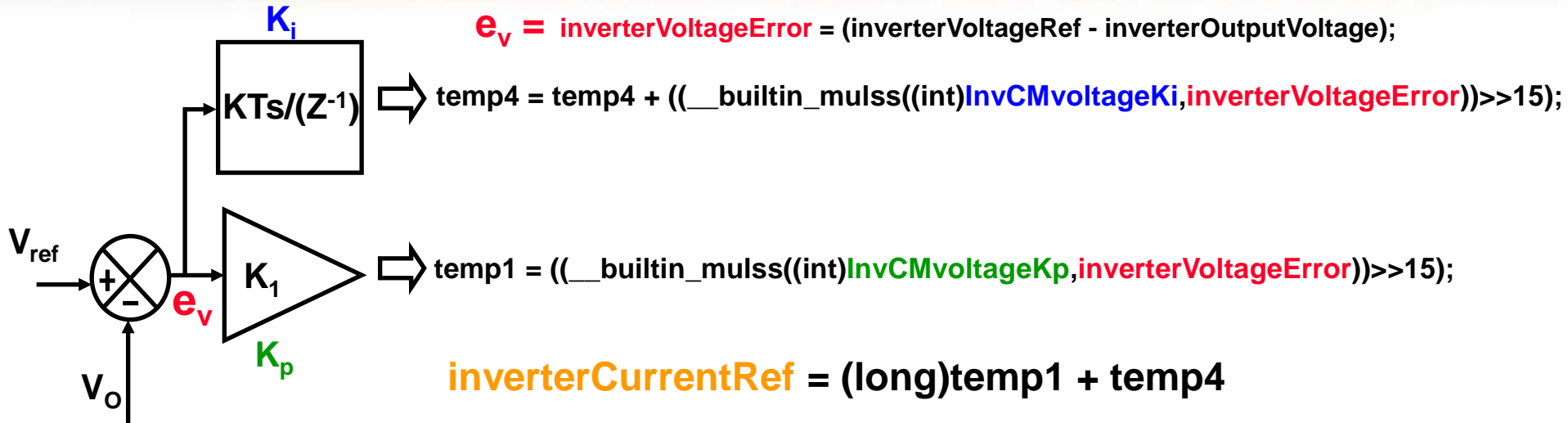
```
VoltageCmd = ((__builtin_mulss((int)InvCMcurrentRa,(int)inverterCurrentError))>>15);
```

```
temp3 = ((__builtin_mulss((int)InvVMvoltagedecouple,(int)inverterOutputVoltage))>>15) ;
```

```
temp5 = temp3 + VoltageCmd;
```

```
inverterCurrentControlOutput = (int)((__builtin_mulss((int)temp5,(int)InvPERIOD))>>15);
```

软件实现——控制回路



$\text{inverterCurrentControlOutput} = (\text{int})((\text{__builtin_mulss}((\text{int})\text{temp5}, (\text{int})\text{InvPERIOD})) \gg 15);$

控制回路——电流模式

- 测量电流和电压
- 逆变器控制回路由两个控制回路**PI**和**P**组成
- 输出参考电压由正弦曲线查找表产生
- 电压环调节器由**P**和**I**组成
- 电流环调节器仅由**P**组成
- 单极性调制用于逆变器桥

课程安排

- 离线式UPS参考设计概述
 - 纯正弦波逆变器的意义
- 正弦波逆变器的硬件设计
- 数字信号控制器需求
- 建模及控制系数的数字化
- 控制回路的数字化实现
- **软件实现**

离线式UPS软件

UPS状态机
(基于中断)

优先级: 中
执行率: 中

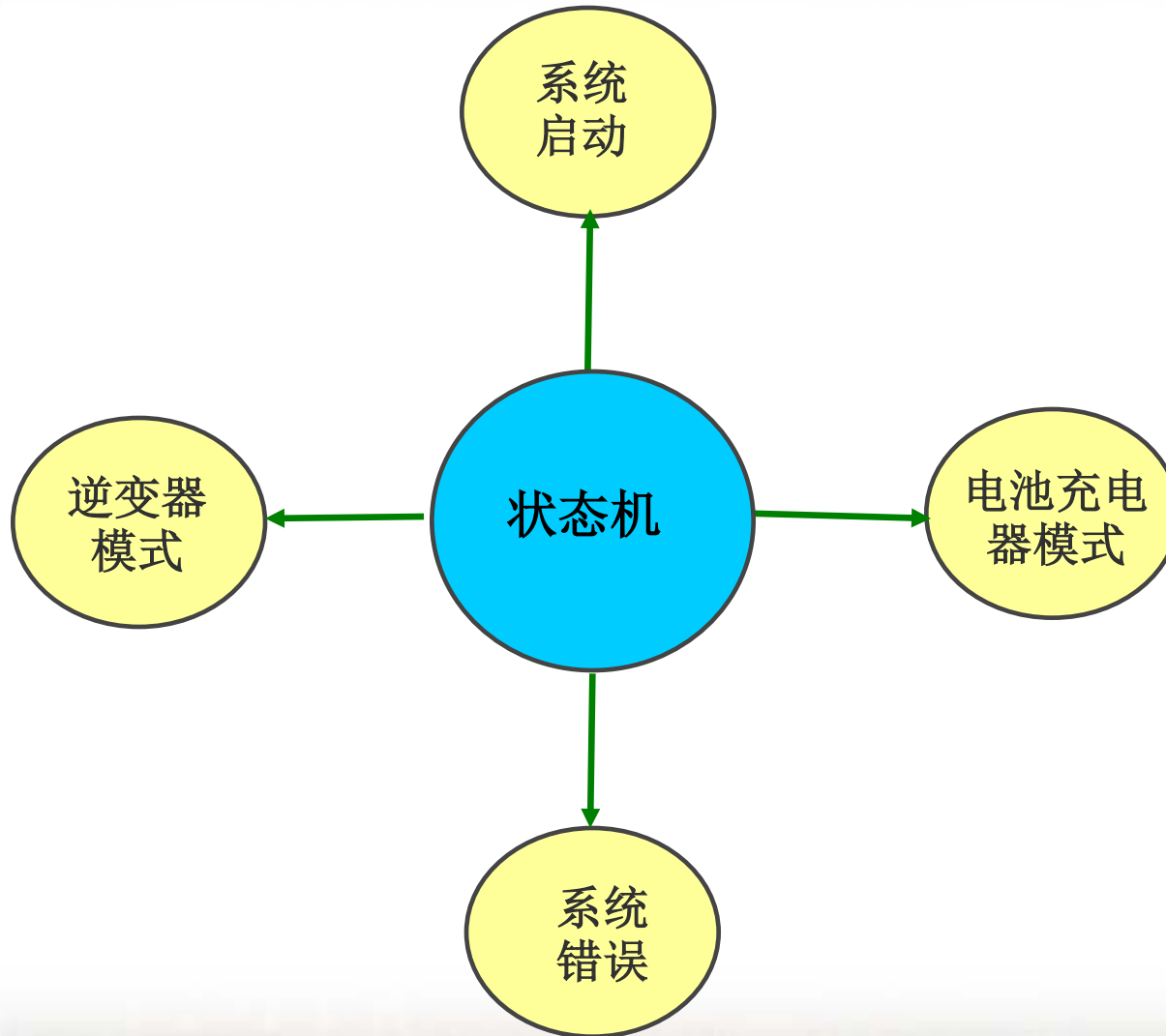
电源变换算法
(基于中断)

优先级: 高
执行率: 高

用户接口软件

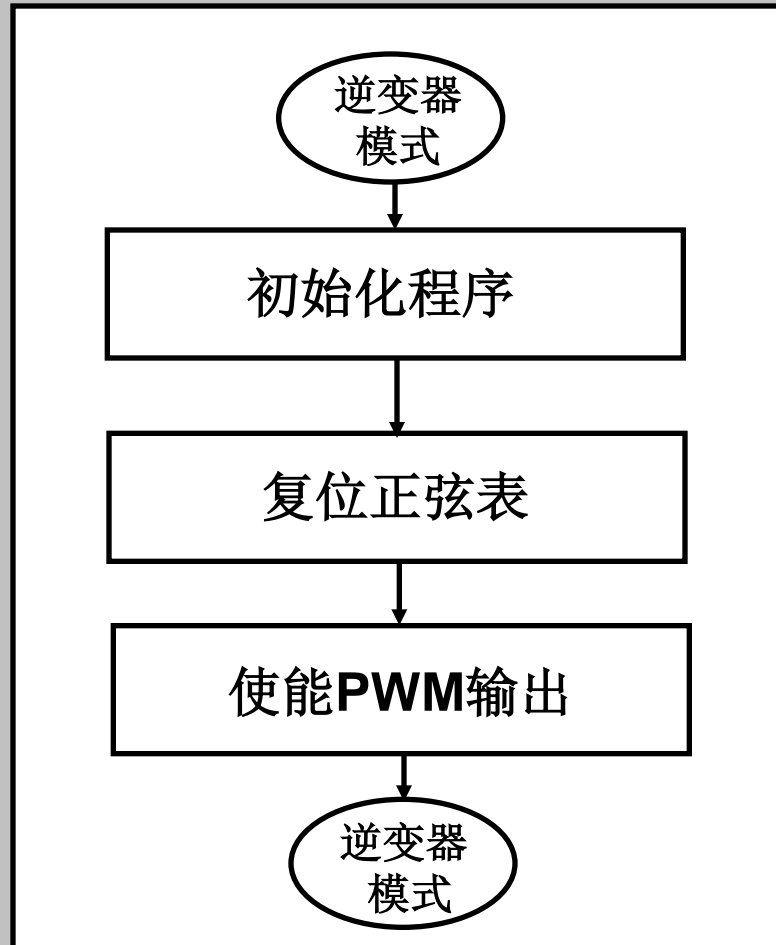
优先级: 低
执行率: 低

软件框图



软件——实现

逆变器软件



切换——主电源至逆变器

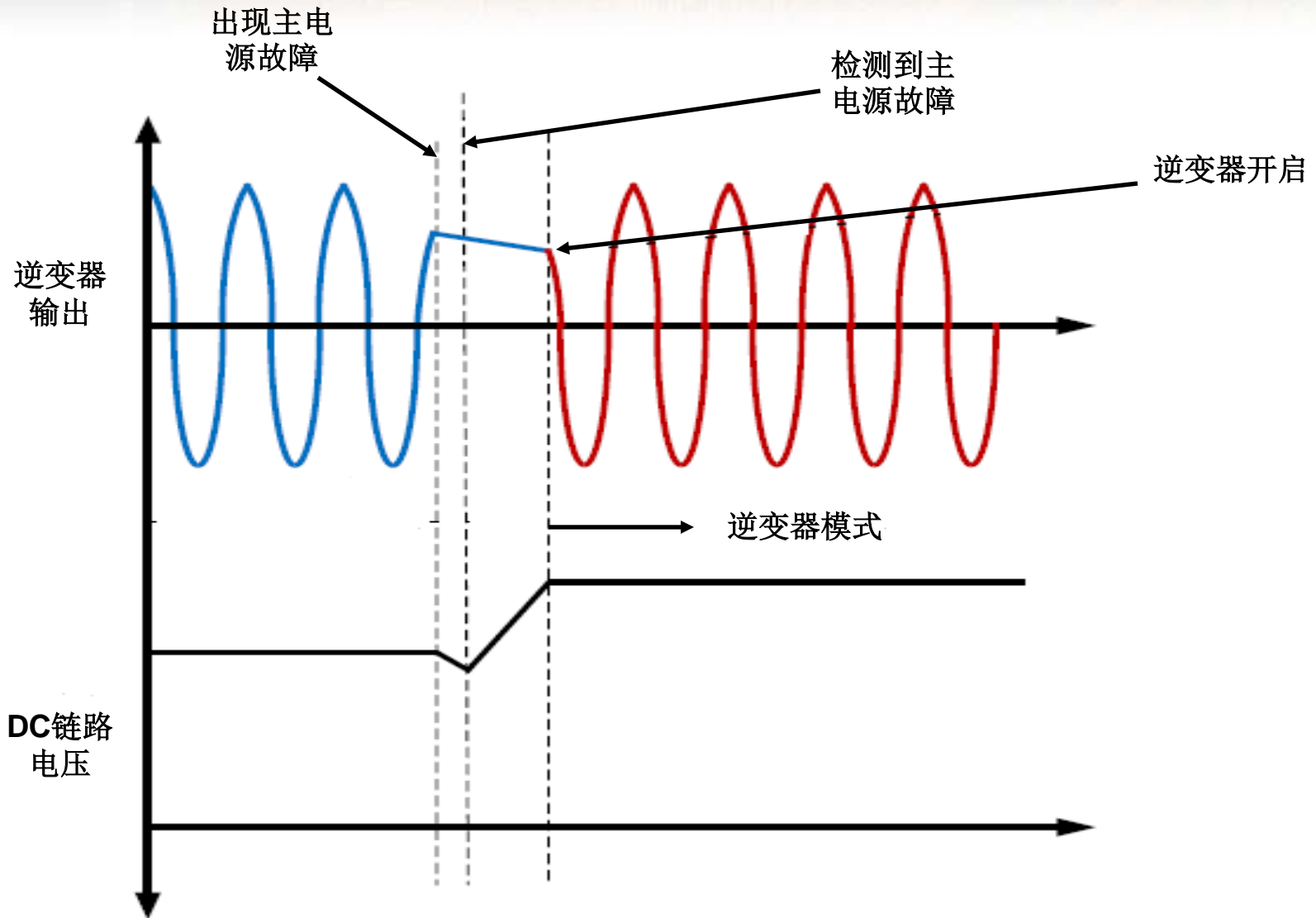
□ 软件检查AC主电源

- 主电源电压与主电源参考电压进行比较
- 如果电压差大于 $\pm 20V$ ，则认为检测到故障
- 如果在1 ms内连续检测到故障，系统改变至逆变器模式

□ 切换到逆变器

- 推挽模块的软启动（斜坡上升至380Vdc）
- 使能逆变器——使用二分搜索法来确定查找表中的参考点（从何处启动逆变器）
- 输出继电器动作

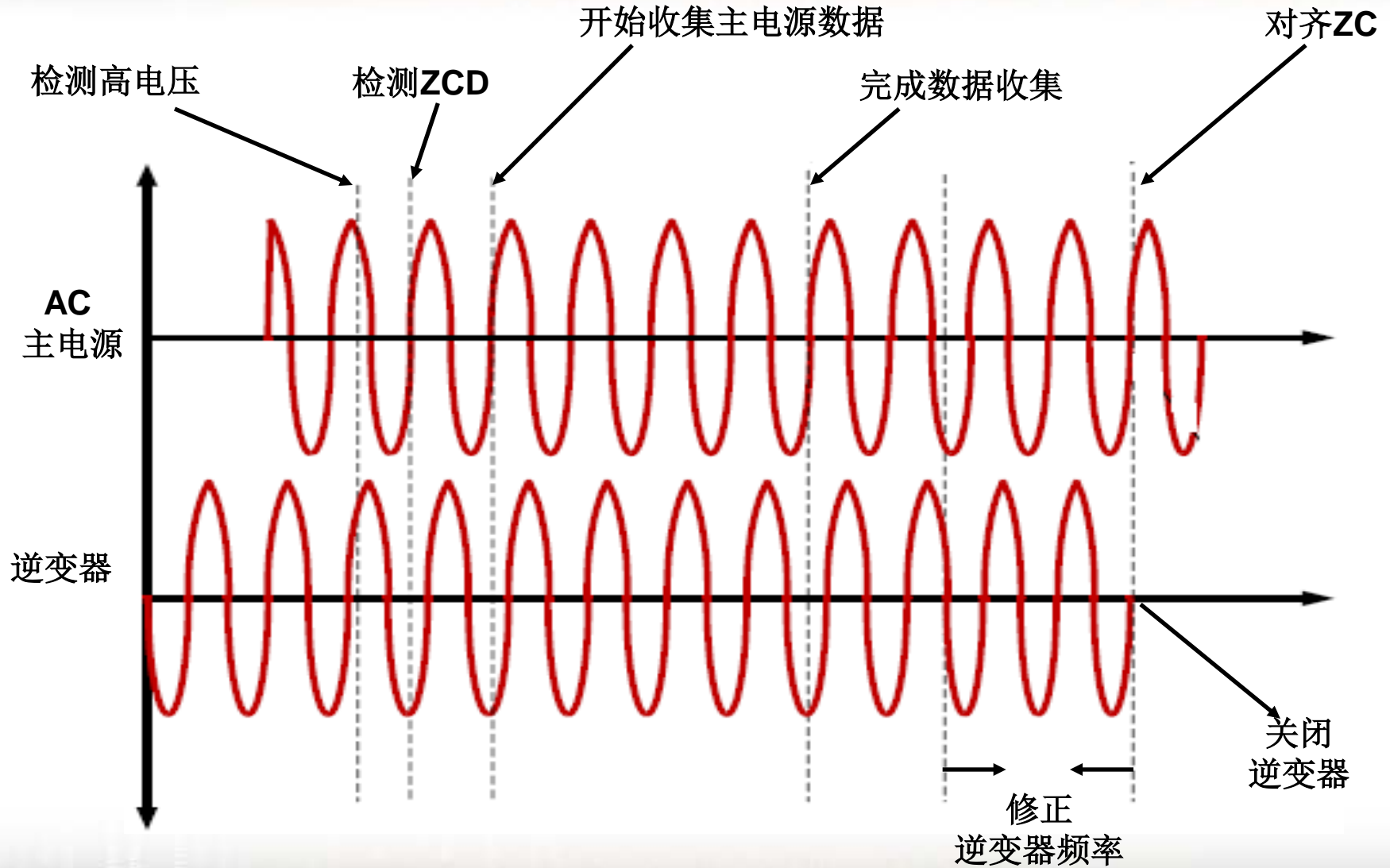
切换——主电源至逆变器



切换——逆变器至主电源

1. 主电源高电压检测
 - 如果连续5 ms检测到主电源高电压，切换到过零检测
2. 过零检测
 - 软件查询主电源电压
 - 如果前一个电压值为负，而现值为正，且两个采样值之间的差有效，则切换到主电源数据收集
3. 主电源数据收集
 - 收集四个正弦波周期的数据和平均值
 - 切换至同步程序
4. 主电源同步
 - 测量电压与参考电压进行比较
 - 把逆变器与主电源同步，然后切换
5. 从逆变器切换到主电源（电池充电模式）

切换——逆变器至主电源



总结

- 离线式**UPS**参考设计概述
- 为何使用纯正弦波逆变器
- 纯正弦波逆变器的数字信号控制器需求
- 全桥正弦波逆变器的建模
- 反馈信号及控制系数的数字化
- 控制回路的数字化实现
- 软件实现

数字控制全桥逆变器演示

谢谢您

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 Incorporated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 Incorporated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、WiperLock和ZENA在Microchip Technology Incorporated在美国和其他国家或地区的商标。

SQTP是Microchip Technology Incorporated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 Incorporated. 版权所有。