

# 2 SPWM原理及控制方法

# 2 SPWM原理及控制方法

**2.1 SPWM基本原理**

**2.2 SPWM逆变及其控制方法**

**2.3 SPWM整流及其控制方法**

## 2.1 SPWM基本原理

- 电能最基本的形态为：DC、AC

四大基本状态转换：

DC→AC、DC→DC、AC→DC、AC→AC

- 电力电子器件只是工作在两种状态

开通、关断

开通：即工作在高度饱和导通状态

如何利用电力电子器件的开通和关断两种状态实现电能四大基本状态之间的转换就是电力电子学所要研究的核心内容

## 2.1 SPWM基本原理

### 理想开关：

- 导通电阻为0，即：通态压降为0
- 关断电阻为 $\infty$
- 不考虑开通和关断时间，即：瞬时开通和关断

### 实际电力电子器件（开关）：

- 导通电阻不为0，通态压降为2V左右
- 关断电阻也不为 $\infty$ ，有少量漏电流
- 需要一定时间才能完全开通和关断，一般在10us以下

理论分析一般都采用理想开关。在涉及散热系统设计、死区时间选取、器件串并联设计、器件保护等方面时，将必须按实际电力电子器件考虑

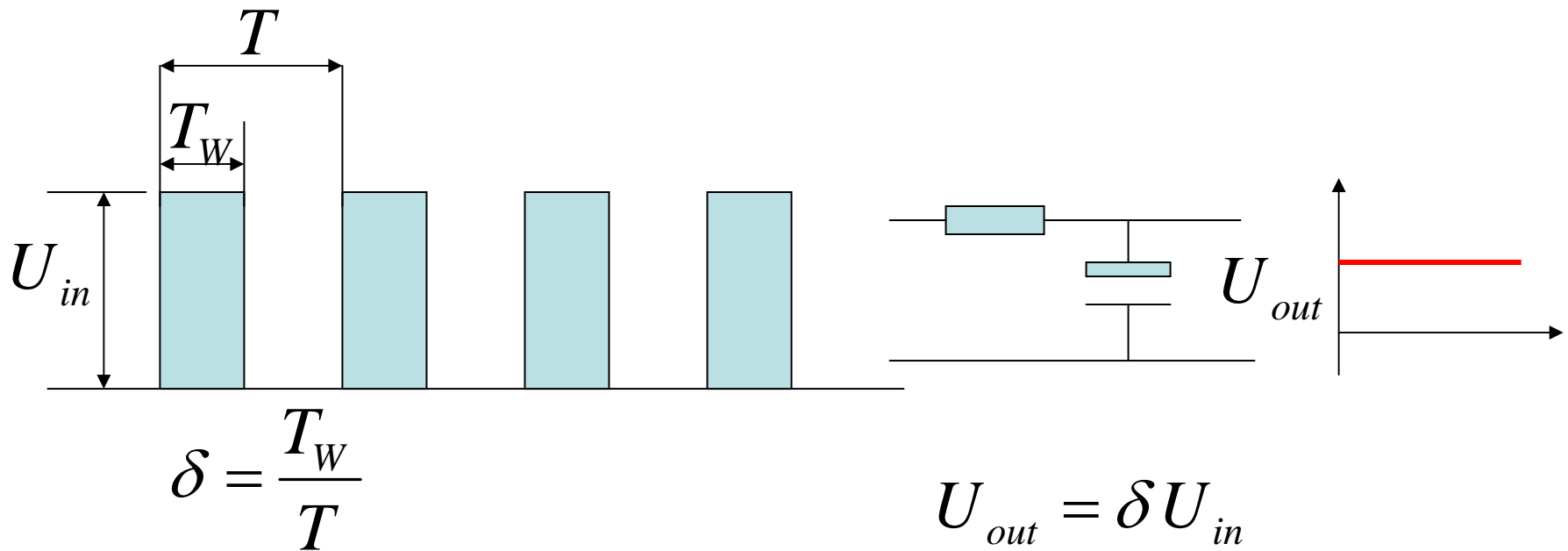
## 2.1 SPWM基本原理

实现电能四种基本形态的转换就是利用PWM调制

- PWM（**Pulse Width Modulation**）脉宽调制技术：通过对一系列脉冲的宽度进行调制，来等效的获得所需要的波形（形状和幅值）
- SPWM（**Sinusoidal Pulse Width Modulation**）正弦脉宽调制技术：通过对一系列宽窄不等的脉冲进行调制，来等效正弦波形（幅值、相位和频率）

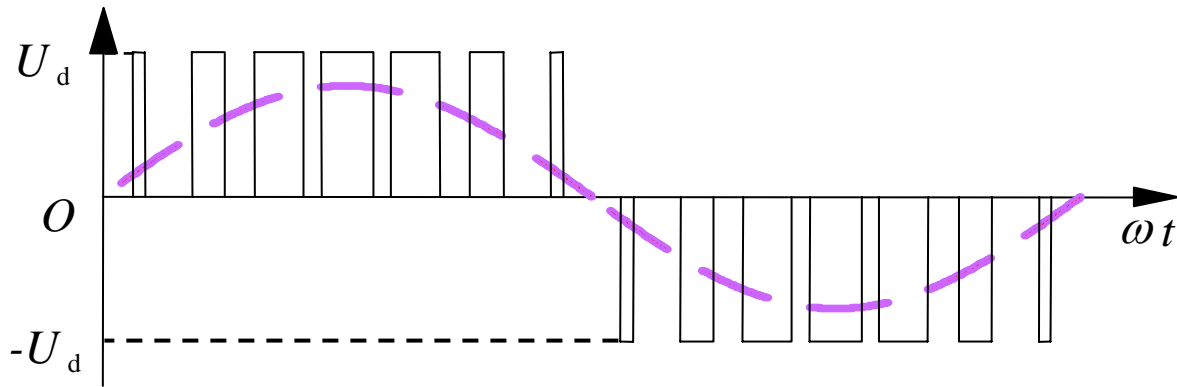
## 2.1 SPWM基本原理

- PWM占空比调制 (DC↔DC)



## 2.1 SPWM基本原理

- **SPWM调制思想 (DC→AC)**



如何利用宽窄不等的方波来等效正弦波就是**SPWM**调制的基本思路，保证宽窄不等的方波所对应的基波与所需要等效的正弦波的幅值、相位和频率均相等

需要重点关注的问题：

谐波、直流电压利用率、开关损耗、跟踪（响应）速度、不同应用场合的特殊问题

## 2.1 SPWM基本原理

- **PWM**控制的思想源于通信技术，全控型器件的发展使得实现**PWM**控制变得十分容易
- **PWM**技术的应用十分广泛，它使电力电子装置的性能大大提高，因此它在电力电子技术的发展史上占有十分重要的地位
- **PWM**控制技术正是有赖于在逆变电路中的成功应用，才确定了它在电力电子技术中的重要地位

### 重点讲述

**DC→AC**（逆变）      **AC→DC**（整流）



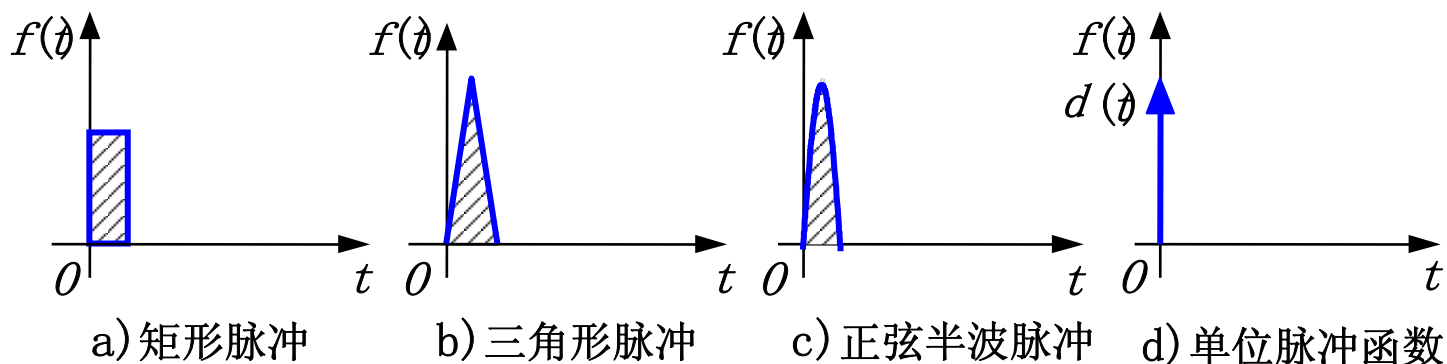
## 2.1 SPWM基本原理

### 1) 重要理论基础——面积等效原理

冲量相等而形状不同的窄脉冲加在具有惯性的环节上时，其效果基本相同。

冲量  $\longrightarrow$  窄脉冲的面积

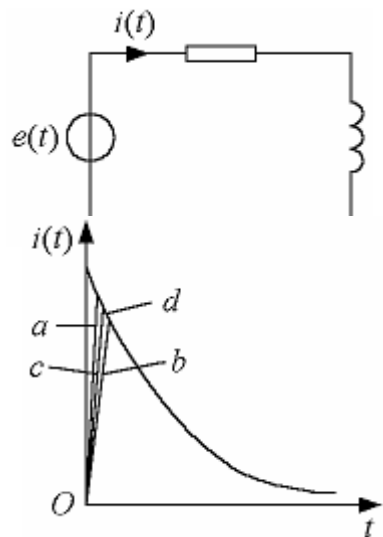
效果基本相同  $\longrightarrow$  环节的输出响应波形基本相同



形状不同而冲量相同的各种窄脉冲

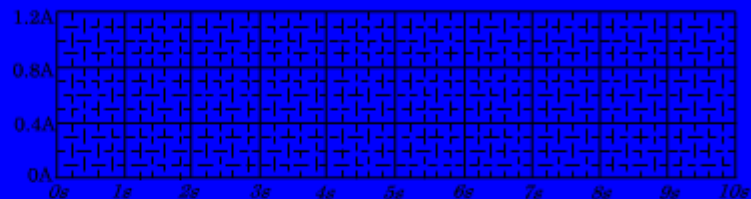
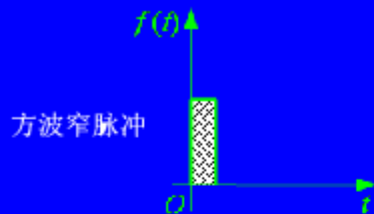
# 2.1 SPWM基本原理

具体的实例说明  
“面积等效原理”



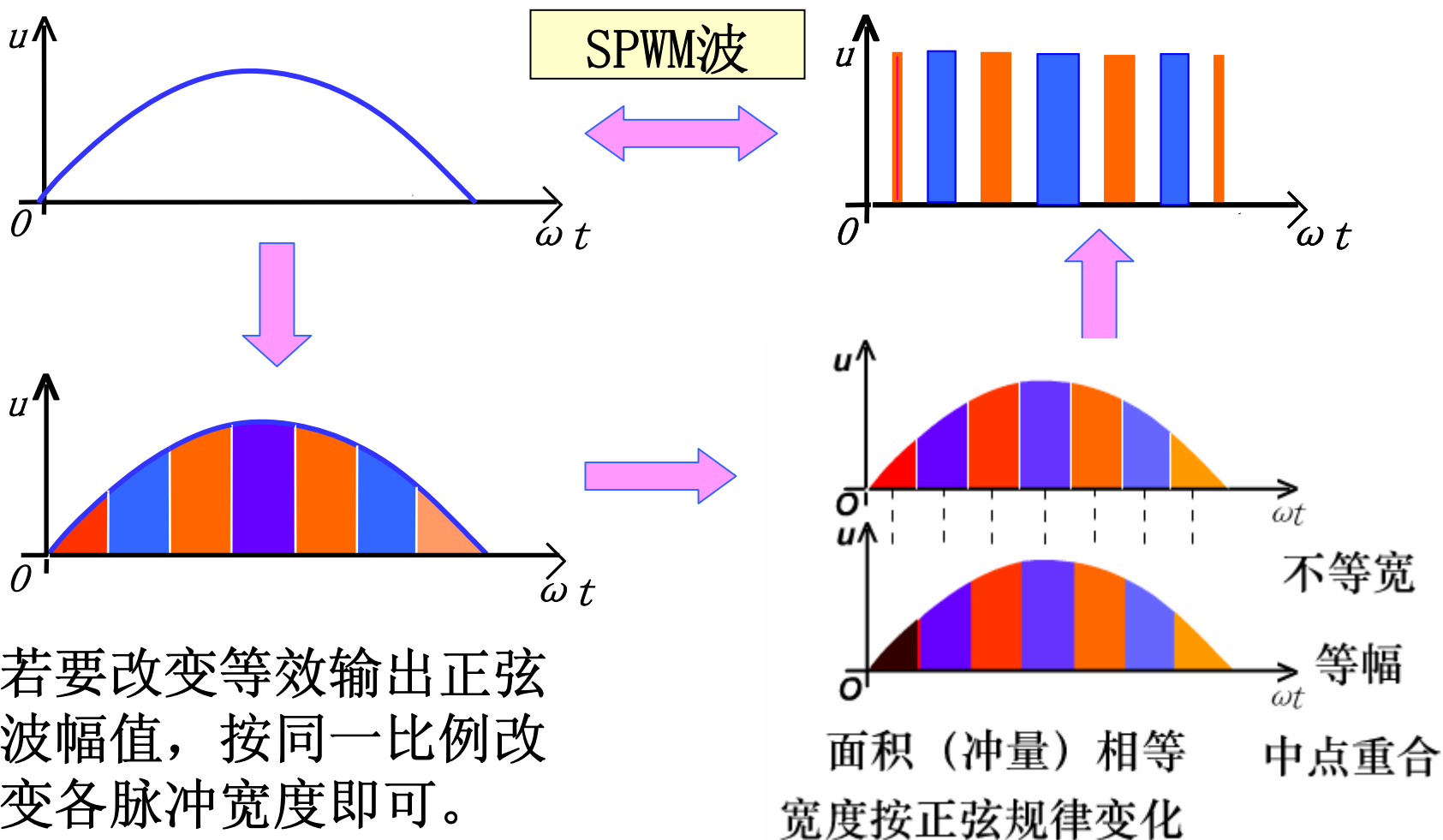
冲量相等的各种窄脉冲的响应波形

$u(t)$  — 电压窄脉冲，是电路的输入  
 $i(t)$  — 输出电流，是电路的响应



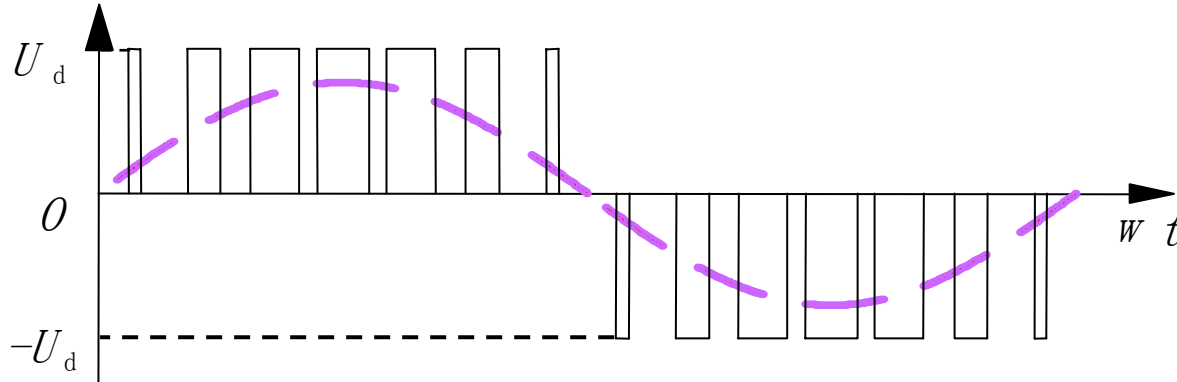
## 2.1 SPWM基本原理

如何用一个系列等幅不等宽的脉冲来代替一个正弦半波

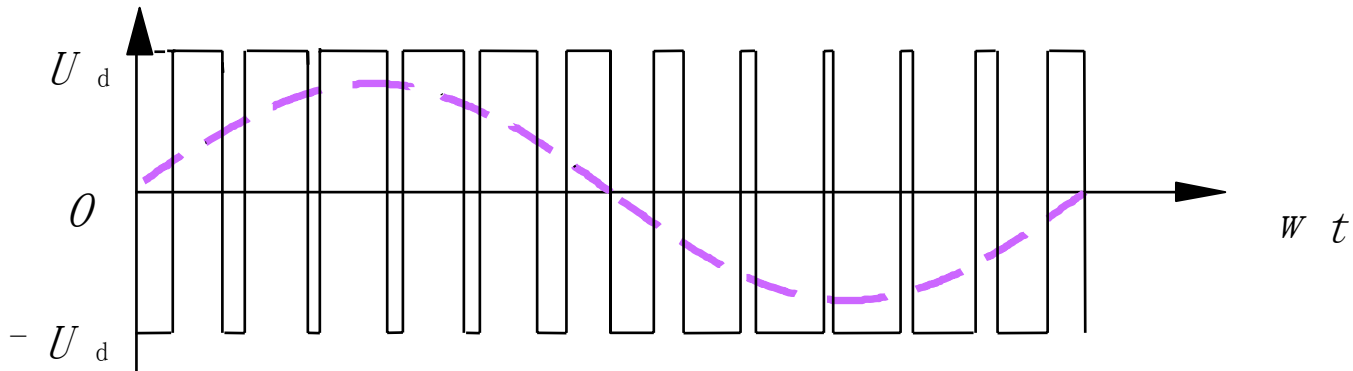


## 2.1 SPWM基本原理

- 对于正弦波的负半周，采取同样的方法，得到PWM波形，因此正弦波一个完整周期的等效PWM波为：



- 根据面积等效原理，正弦波还可等效为下图中的PWM波，而且这种方式在实际应用中更为广泛。



## 2.1 SPWM基本原理

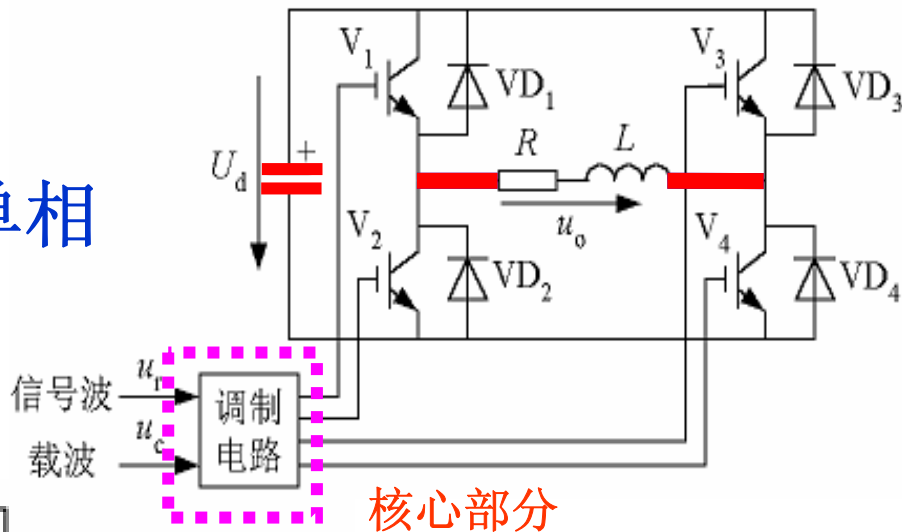
- 目前中小功率的逆变电路几乎都采用**PWM**技术
- 逆变电路是**PWM**控制技术最为重要的应用场合
- **PWM**逆变电路也可分为**电压型**和**电流型**两种，目前实用的**PWM**逆变电路几乎都是电压型电路

# 2.2 SPWM逆变及其控制方法

SPWM逆变就是研究

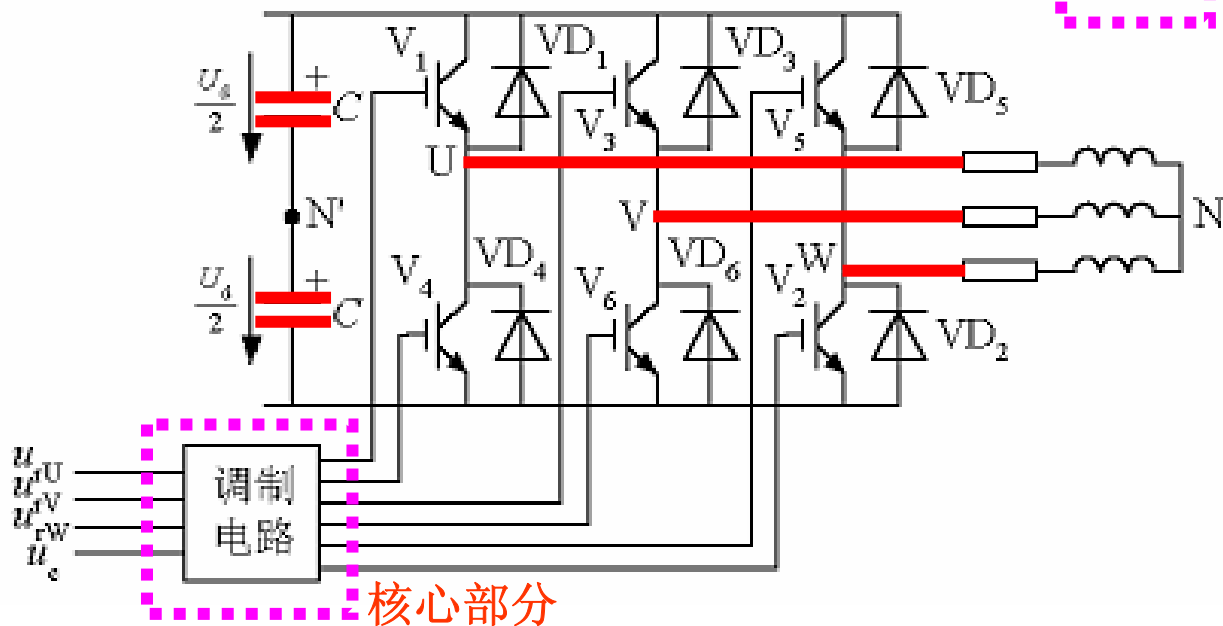
DC → AC

单相



核心部分

三相



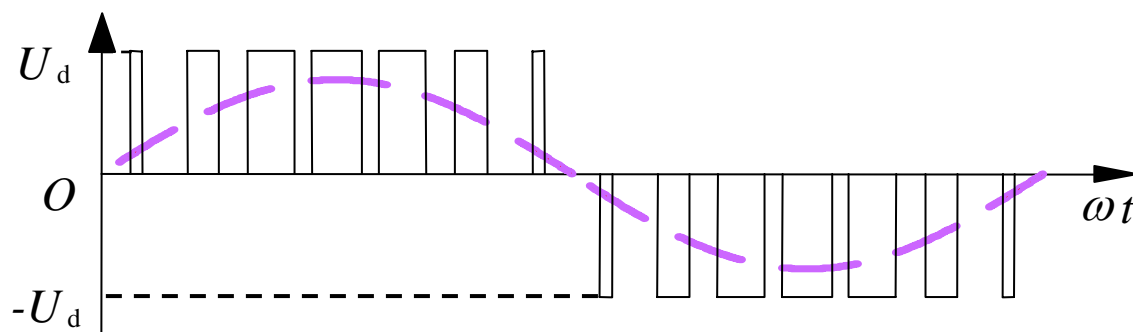
核心部分

## 2.2 SPWM逆变及其控制方法

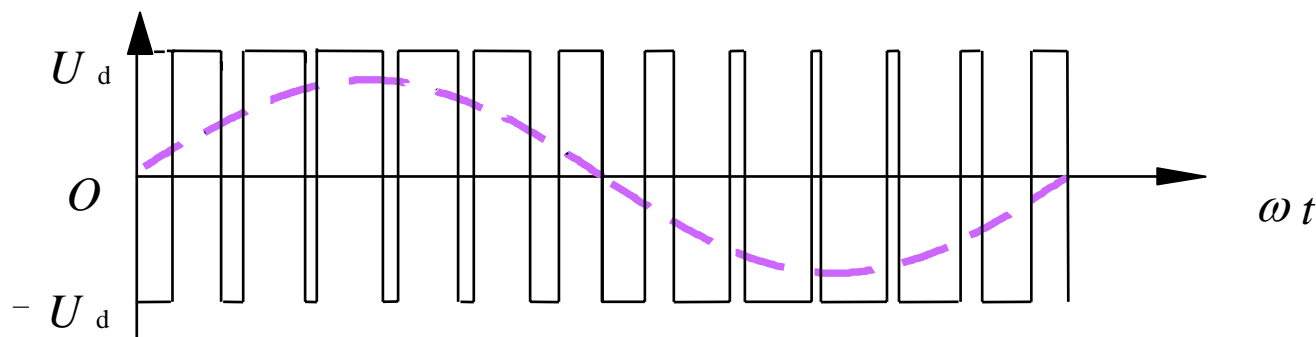
如何通过电力电子器件开通和关断，将直流变换成宽窄不等的方波

关键是如何确定脉冲宽度，**SPWM波产生方法**

单极性  
**SPWM**



双极性  
**SPWM**



## 2.2 SPWM逆变及其控制方法

- 计算法和调制法
- 谐波消除法
- 智能优化法
- 异步调制和同步调制
- 自然采样法
- 规则采样法
- **PWM跟踪控制技术**
- 矢量控制
- 多重化结构

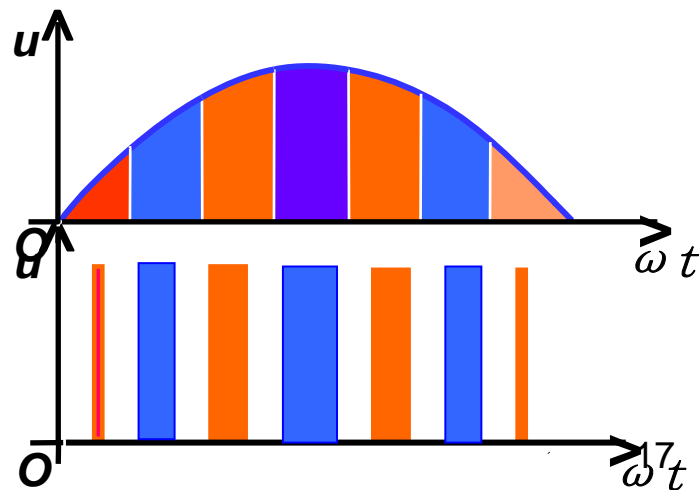


## 2.2 SPWM逆变及其控制方法

- 计算法

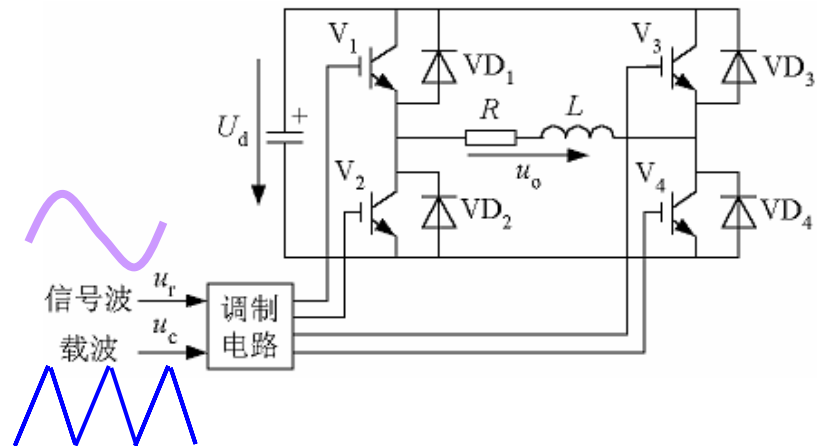
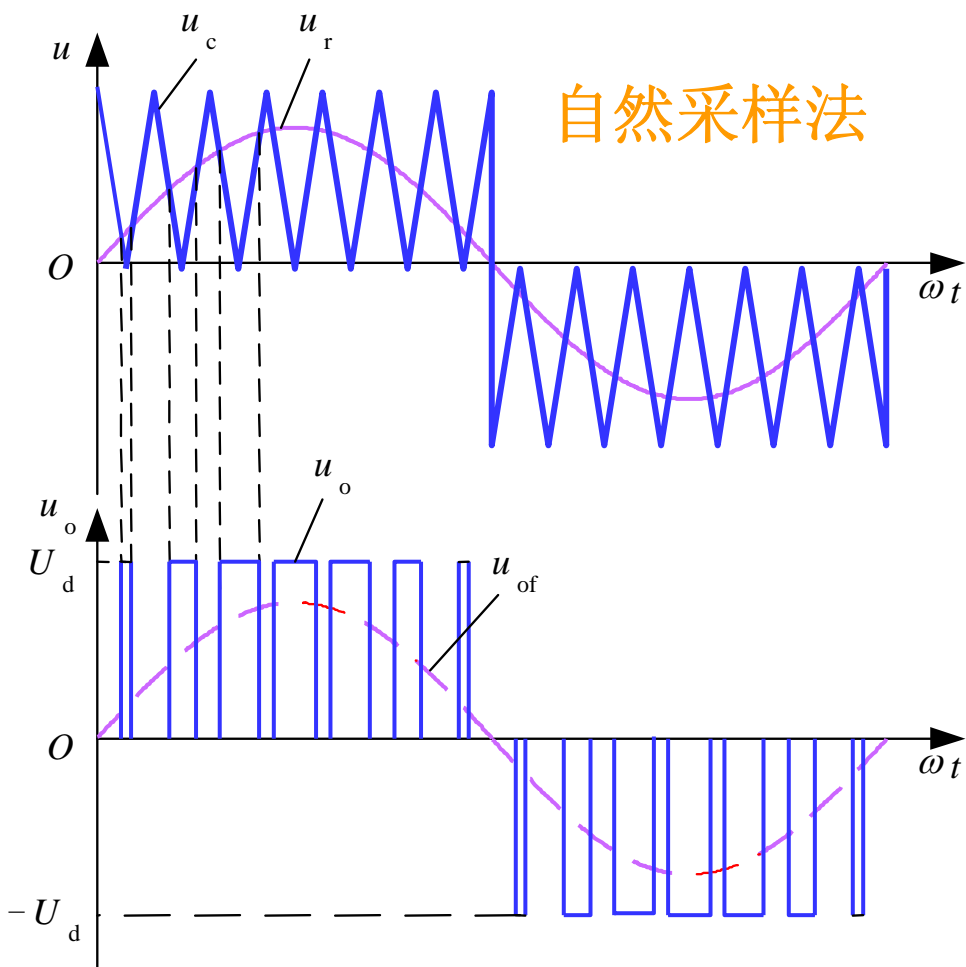
- 根据正弦波频率、幅值和半周期脉冲数，准确计算PWM波各脉冲宽度和间隔，据此控制逆变电路开关器件的通断，就可得到所需PWM波形
- 本法较繁琐，当输出正弦波的频率、幅值或相位变化时，结果都要变化

如：按照等面积原则  
计算开关时刻



# 2.2 SPWM逆变及其控制方法

## • 单极性调制法（单相）



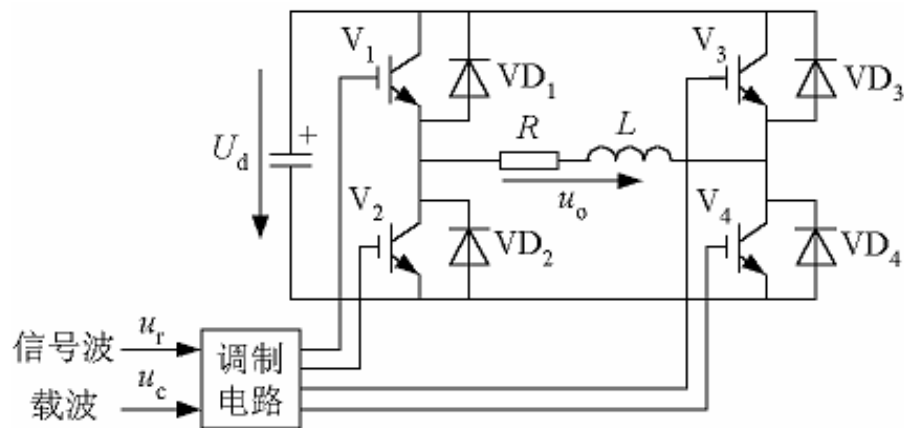
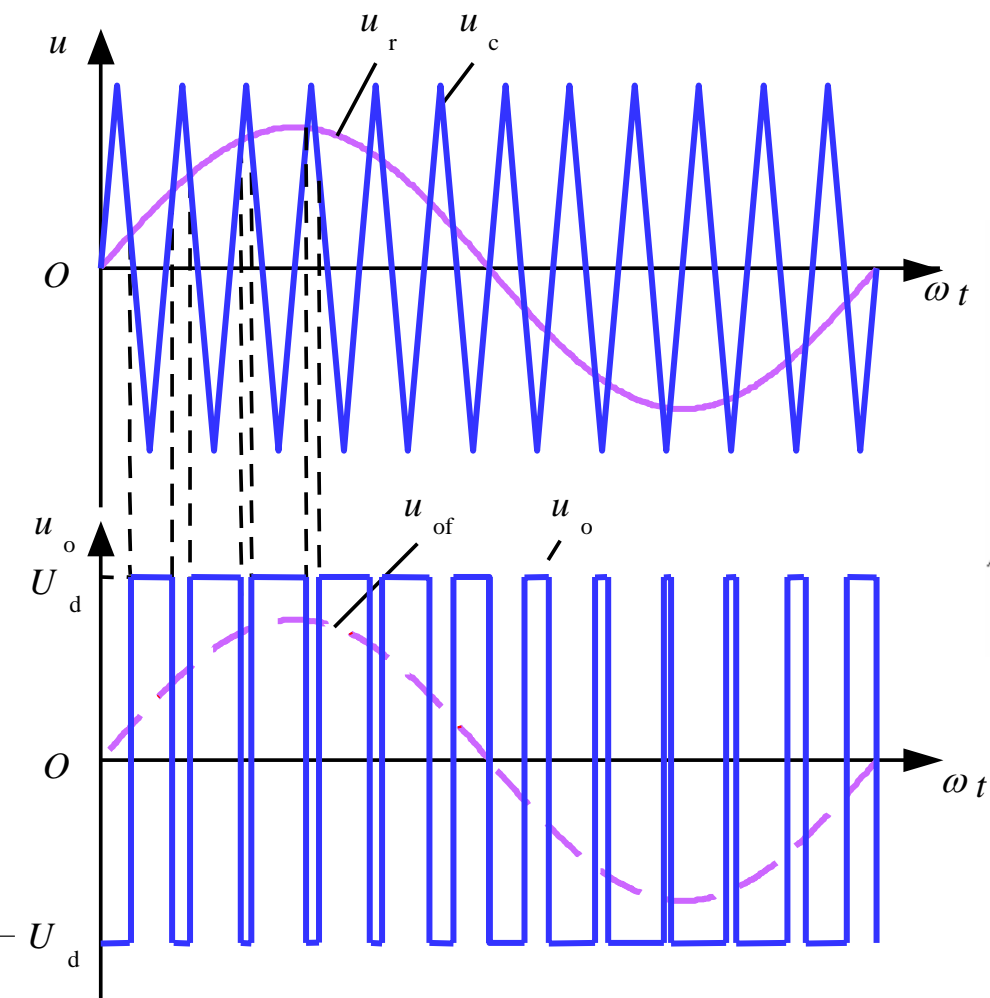
输出的宽窄不等方波的基波幅值、相位和频率与信号波相等

提问：

为何采用三角载波？

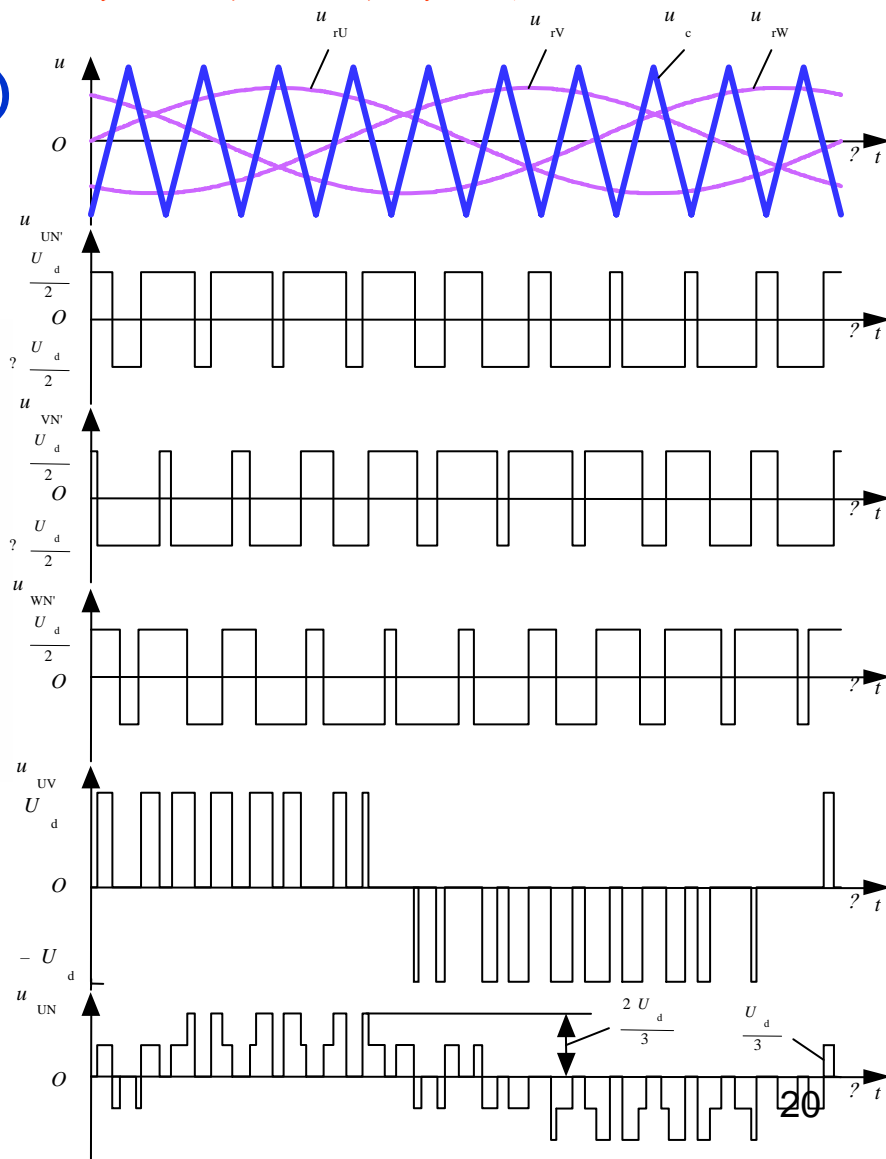
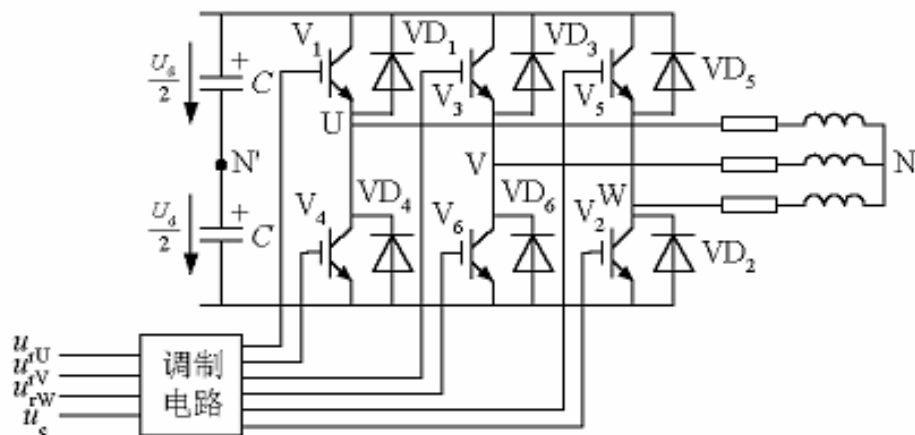
## 2.2 SPWM逆变及其控制方法

- 双极性调制法（单相）



# 2.2 SPWM逆变及其控制方法

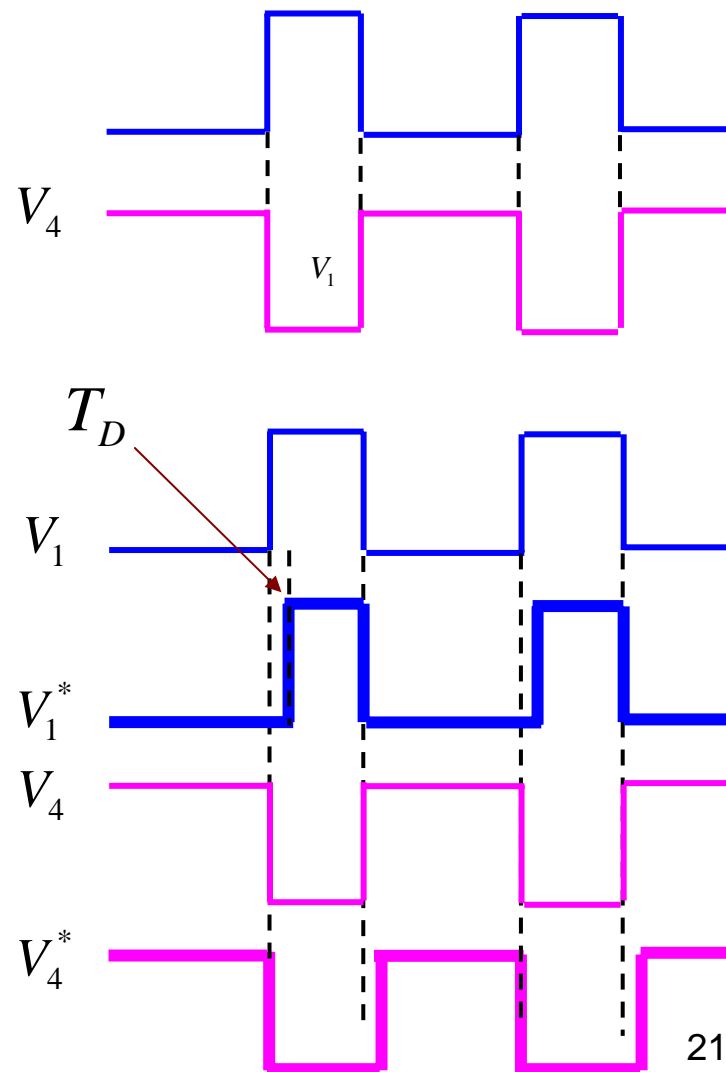
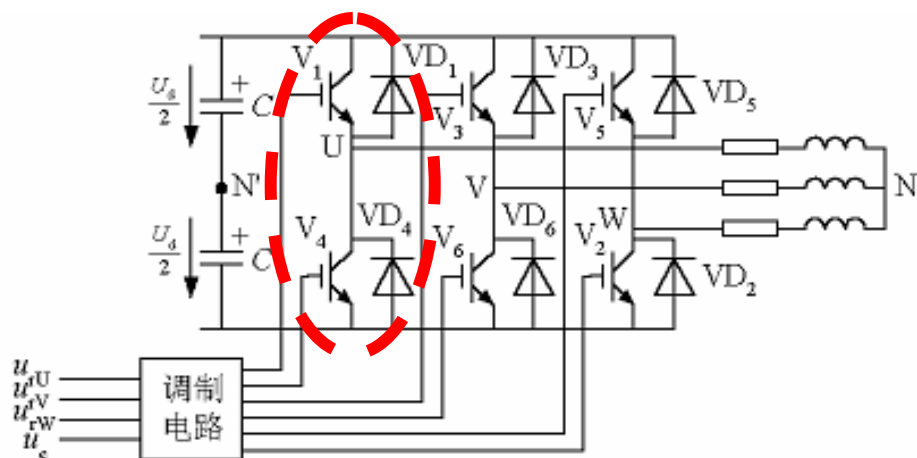
## • 双极性调制法（三相）



## 2.2 SPWM逆变及其控制方法

### • 防直通，死区时间问题

- 同一相上下两臂的驱动信号互补，为防止上下臂直通而造成短路，留一小段上下臂都施加关断信号的死区时间
- 长短主要由开关器件的关断时间决定
- 会给输出的PWM波带来影响，使其稍稍偏离正弦波，降低输出交流幅值

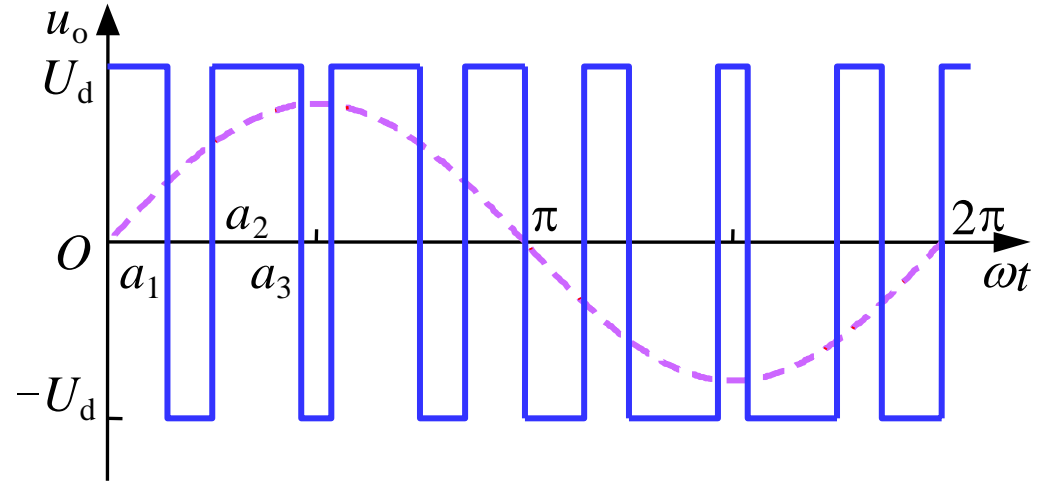


## 2.2 SPWM逆变及其控制方法

- 特定谐波消去法（计算法）

### Selected Harmonic Elimination PWM—SHEPWM

- ✦ 这是计算法中一种较有代表性的方法
- ✦ 输出电压半周期内，器件通、断各3次（不包括0和 $\pi$ ），共6个开关时刻可控
- ✦ 为减少谐波并简化控制，要尽量使波形对称



## 2.2 SPWM逆变及其控制方法

- 首先，为消除偶次谐波，使波形正负两半周期镜对称，即

$$u(\omega t) = -u(\omega t + \pi)$$

- 其次，为消除谐波中余弦项，应使波形在正半周期内前后1/4周期以  $\pi/2$  为轴线对称

$$u(\omega t) = u(\pi - \omega t)$$

- 同时满足上两式的波形称为四分之一周期对称波形，用傅里叶级数表示为

$$u(\omega t) = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} a_n \sin n\omega t$$

式中， $a_n$  为  $a_n = \frac{4}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} u(\omega t) \sin n\omega t d\omega t$

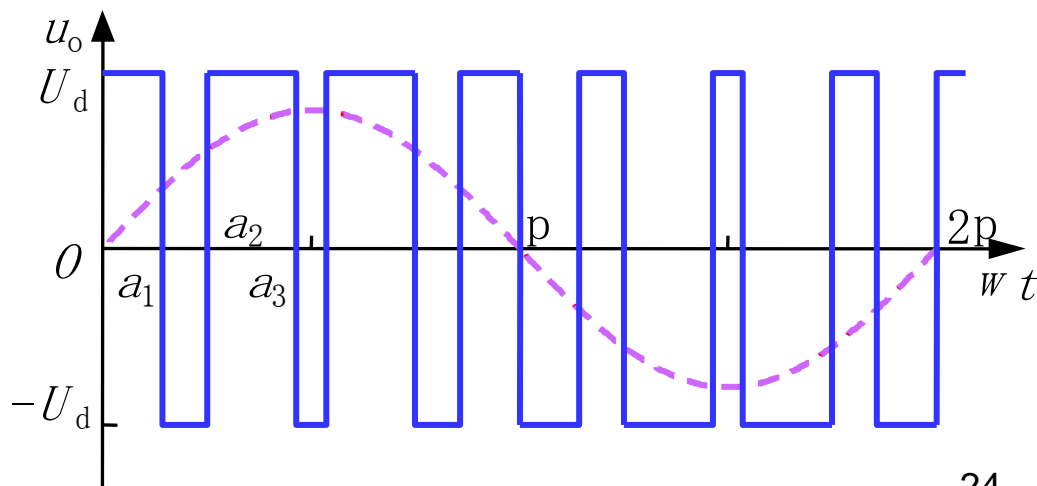
## 2.2 SPWM逆变及其控制方法

- 能独立控制 $a_1$ 、 $a_2$ 和 $a_3$ 共3个时刻。该波形的 $a_n$ 为

$$\begin{aligned}
 a_n &= \frac{4}{\pi} \left[ \int_0^{\alpha_1} \frac{U_d}{2} \sin n\omega t d\omega t + \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \left(-\frac{U_d}{2} \sin n\omega t\right) d\omega t \right. \\
 &\quad \left. + \int_{\alpha_2}^{\alpha_3} \frac{U_d}{2} \sin n\omega t d\omega t + \int_{\alpha_3}^{\frac{\pi}{2}} \left(-\frac{U_d}{2} \sin n\omega t\right) d\omega t \right] \\
 &= \frac{2U_d}{n\pi} (1 - 2\cos n\alpha_1 + 2\cos n\alpha_2 - 2\cos n\alpha_3)
 \end{aligned}$$

式中 $n=1, 3, 5, \dots$

确定 $a_1$ 的值，再令两个不同的 $a_n=0$  ( $n=1, 3, 5, \dots$ )，就可建三个方程，求得 $a_1$ 、 $a_2$ 和 $a_3$





## 2.2 SPWM逆变及其控制方法

### ✦ 消去两种特定频率的谐波

在三相对称电路的线电压中，相电压所含的3次谐波相互抵消。

可考虑消去5次和7次谐波，得如下联立方程：

$$\left. \begin{aligned} a_1 &= \frac{2U_d}{\pi} (1 - 2 \cos \alpha_1 + 2 \cos \alpha_2 - 2 \cos \alpha_3) \\ a_5 &= \frac{2U_d}{5\pi} (1 - 2 \cos 5\alpha_1 + 2 \cos 5\alpha_2 - 2 \cos 5\alpha_3) = 0 \\ a_7 &= \frac{2U_d}{7\pi} (1 - 2 \cos 7\alpha_1 + 2 \cos 7\alpha_2 - 2 \cos 7\alpha_3) = 0 \end{aligned} \right\}$$

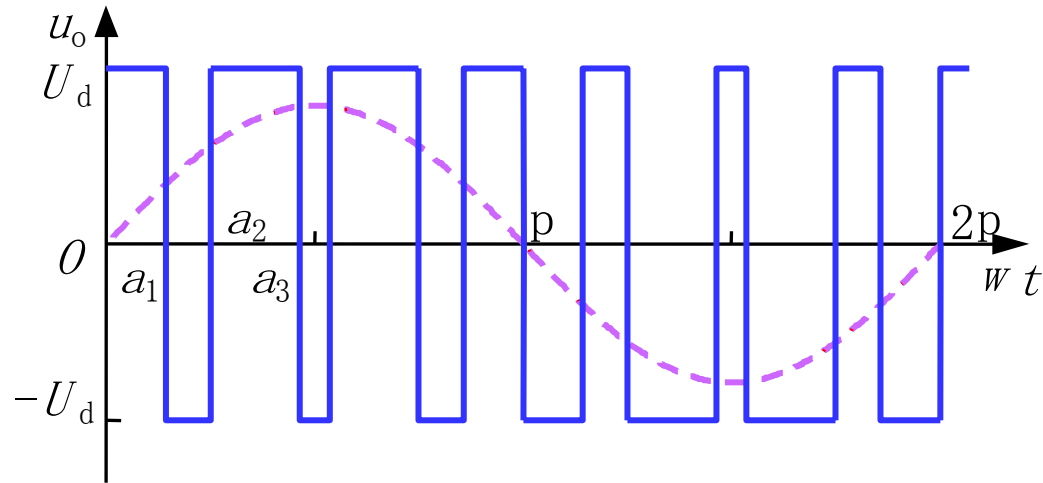
给定 $a_1$ ，解方程可得 $a_1$ 、 $a_2$ 和 $a_3$ 。 $a_1$ 变， $a_1$ 、 $a_2$ 和 $a_3$ 也相应改变。

## 2.2 SPWM逆变及其控制方法

- ◆ 一般在输出电压半周期内，器件通、断各 $k$ 次，考虑到PWM波四分之一周期对称， $k$ 个开关时刻可控，除用一个自由度控制基波幅值外，可消去 $k-1$ 个频率的特定谐波
- ◆  $k$ 的取值越大，开关时刻的计算越复杂

## 2.2 SPWM逆变及其控制方法

- 智能优化方法思路



开关时刻自由度很大，理论上可以任意选取，自由选取原则：

- 保证基波与要求的相等
- 保证低次谐波幅值很小或接近0
- 保证总谐波幅值（**THD**）最小

其它方法比较难以取得很好的优化效果，人工智能方法很适合

## 2.2 SPWM逆变及其控制方法

### • 异步调制和同步调制

载波比  $\longrightarrow$

载波频率  $f_c$  与调制信号频率  $f_r$  之比,  $N = f_c / f_r$

- 根据载波和信号波是否同步及载波比的变化情况, PWM调制方式分为异步调制和同步调制。

1) 异步调制  $\longrightarrow$

载波信号和调制信号不同步的调制方式

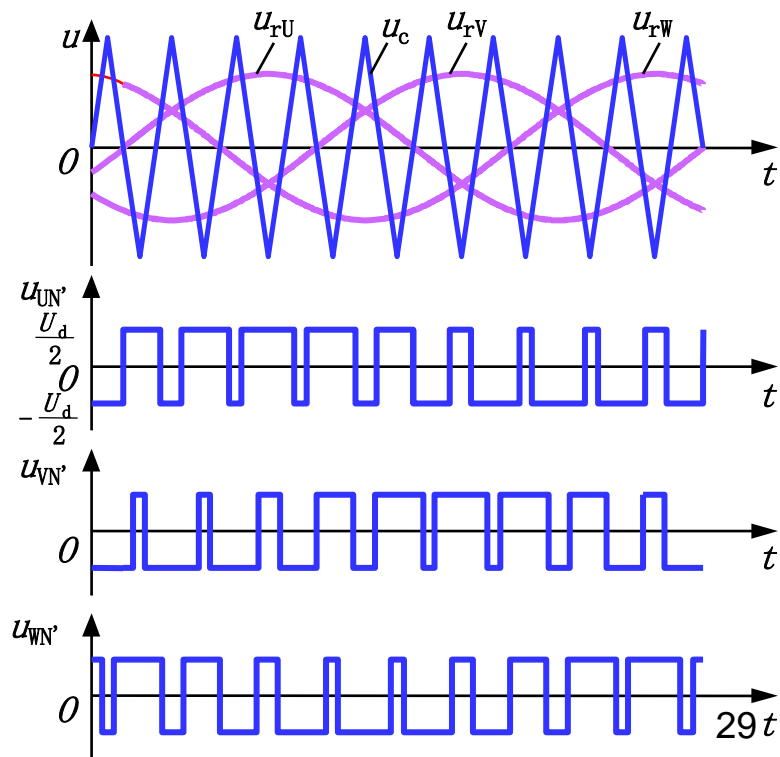
- 通常保持  $f_c$  固定不变, 当  $f_r$  变化时, 载波比  $N$  是变化的
- 在信号波的半周期内, PWM波的脉冲个数不固定, 相位也不固定, 正负半周期的脉冲不对称, 半周期内前后  $1/4$  周期的脉冲也不对称
- 当  $f_r$  较低时,  $N$  较大, 一周期内脉冲数较多, 脉冲不对称产生的不利影响都较小
- 当  $f_r$  增高时,  $N$  减小, 一周期内的脉冲数减少, PWM脉冲不对称的影响就变大

## 2.2 SPWM逆变及其控制方法

### 2) 同步调制

——载波信号和调制信号保持同步的调制方式，当变频时使载波与信号波保持同步，即 $N$ 等于常数。

- 基本同步调制方式， $f_r$ 变化时 $N$ 不变，信号波一周期内输出脉冲数固定
- 三相电路中公用一个三角波载波，且取 $N$ 为3的整数倍，使三相输出对称
- 为使一相的PWM波正负半周镜对称， $N$ 应取奇数
- $f_r$ 很低时， $f_c$ 也很低，由调制带来的谐波不易滤除
- $f_r$ 很高时， $f_c$ 会过高，使开关器件难以承受

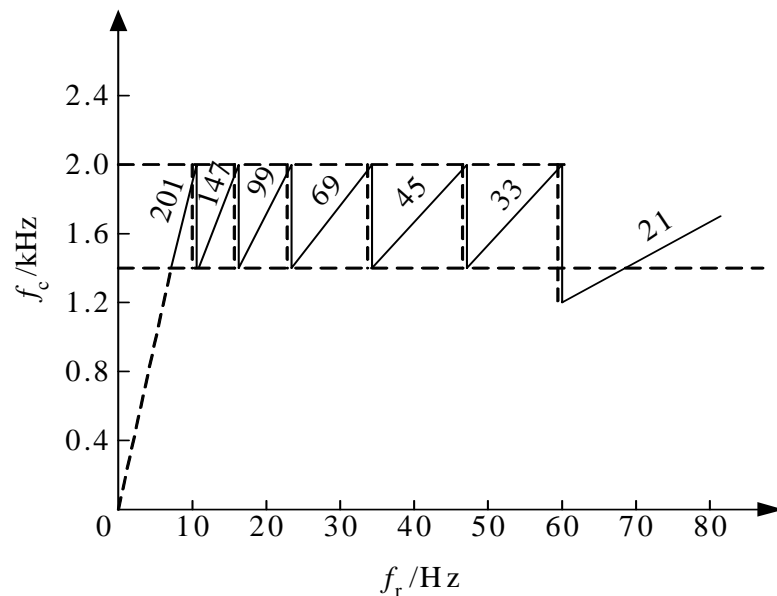


## 2.2 SPWM逆变及其控制方法

### 3) 分段同步调制——

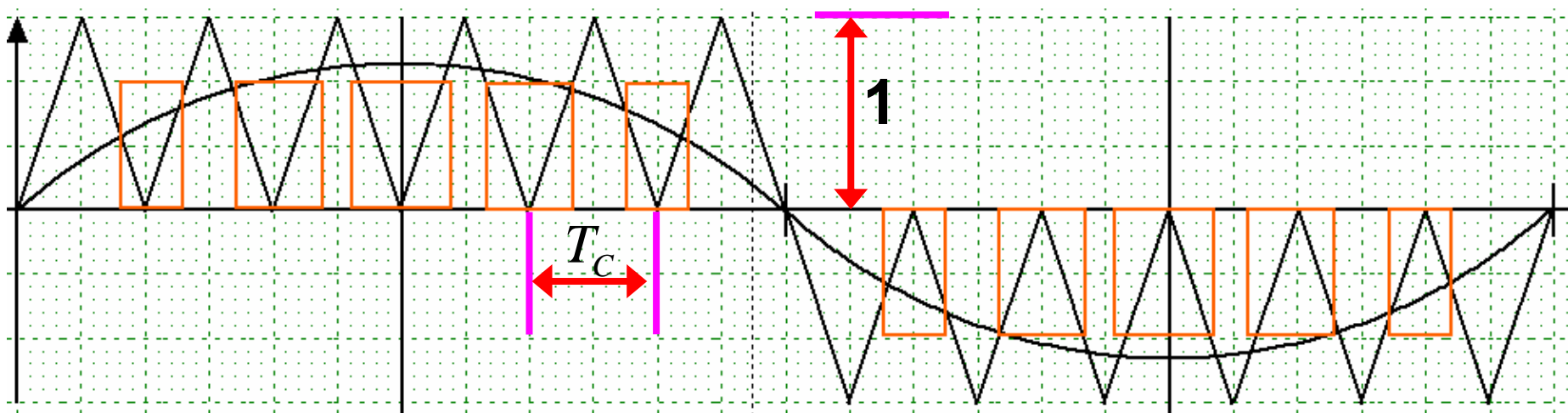
#### 异步调制和同步调制的综合应用

- 把整个  $f_r$  范围划分成若干个频段，每个频段内保持  $M$  恒定，不同频段的  $M$  不同
- 在  $f_r$  高的频段采用较低的  $N$ ，使载波频率不致过高；在  $f_r$  低的频段采用较高的  $N$ ，使载波频率不致过低
- 为防止  $f_c$  在切换点附近来回跳动，采用滞后切换的方法
- 同步调制比异步调制复杂，但用微机控制时容易实现
- 可在低频输出时采用异步调制方式，高频输出时切换到同步调制方式，这样把两者的优点结合起来，和分段同步方式效果接近



## 2.2 SPWM逆变及其控制方法

- 自然采样法



为简单起见，在计算机内部一般进行标称化，假定三角波最大值为1

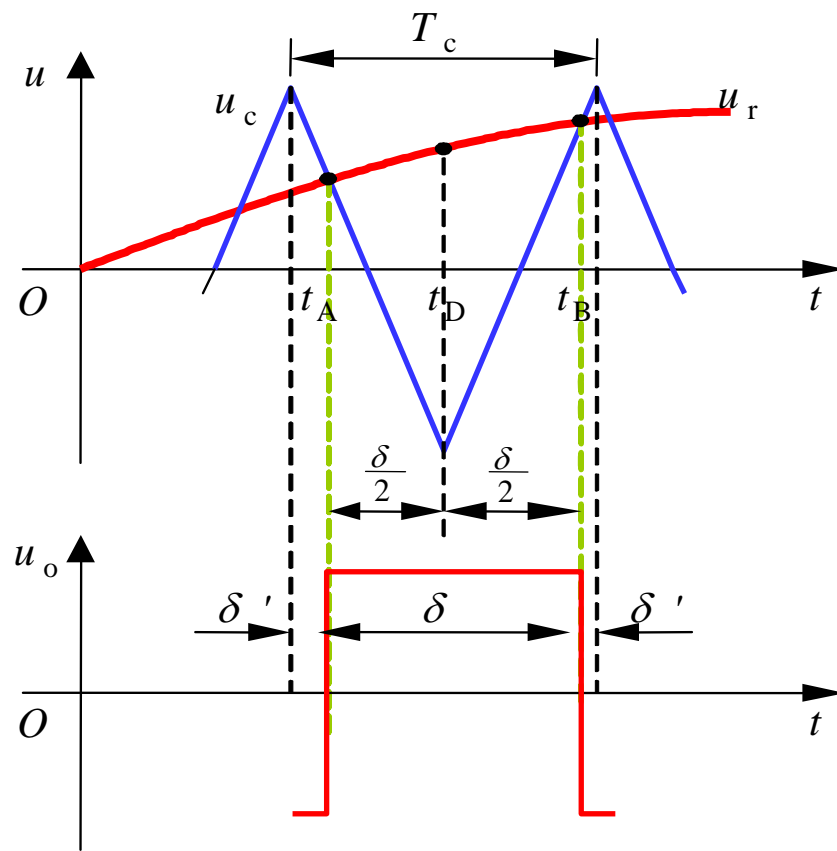
$$u_s = M \sin \omega t$$

$M$  称为调制比，也可理解为输出交流电压幅值与直流电压幅值之比

## 2.2 SPWM逆变及其控制方法

### • 自然采样法

- 正弦波（调制波）与三角波（载波）的交点确定脉冲宽度
- 交点求解涉及到多次三角函数计算和迭代多次，计算量很大。早期实时控制计算机速度较慢，难以实时完成，故自然采用法使用较少。或者离线计算出来，实时查表，但如果对象运行工况较多或运行范围较宽，表格需要内存很多
- 现代数字信号处理（**DSP**）单元计算速度越来越快，现在也已开始逐步采用

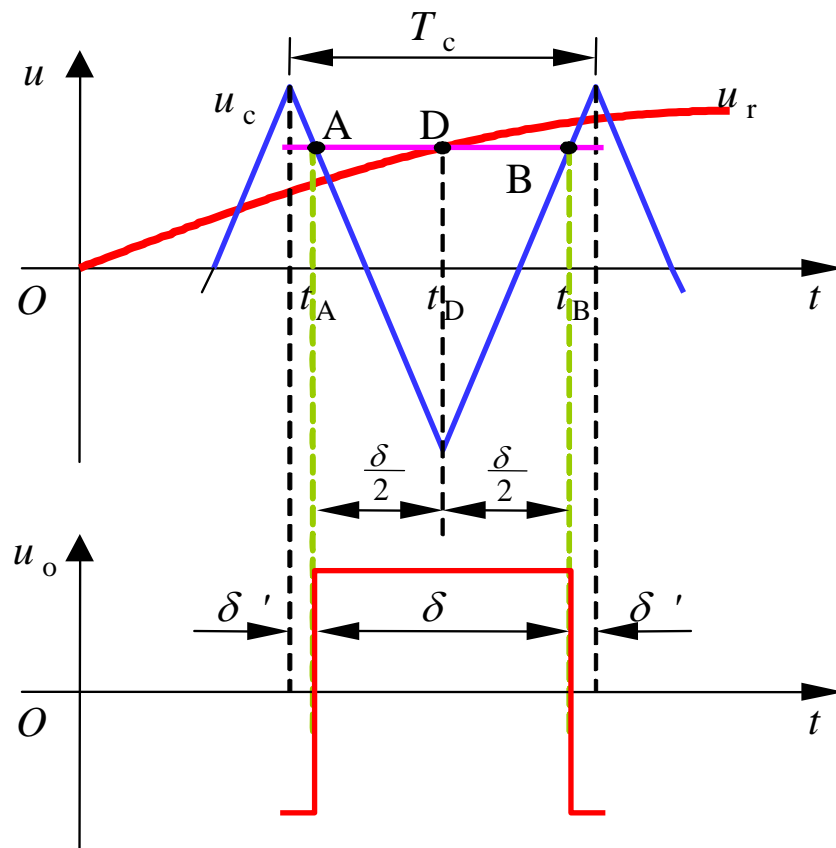




## 2.2 SPWM逆变及其控制方法

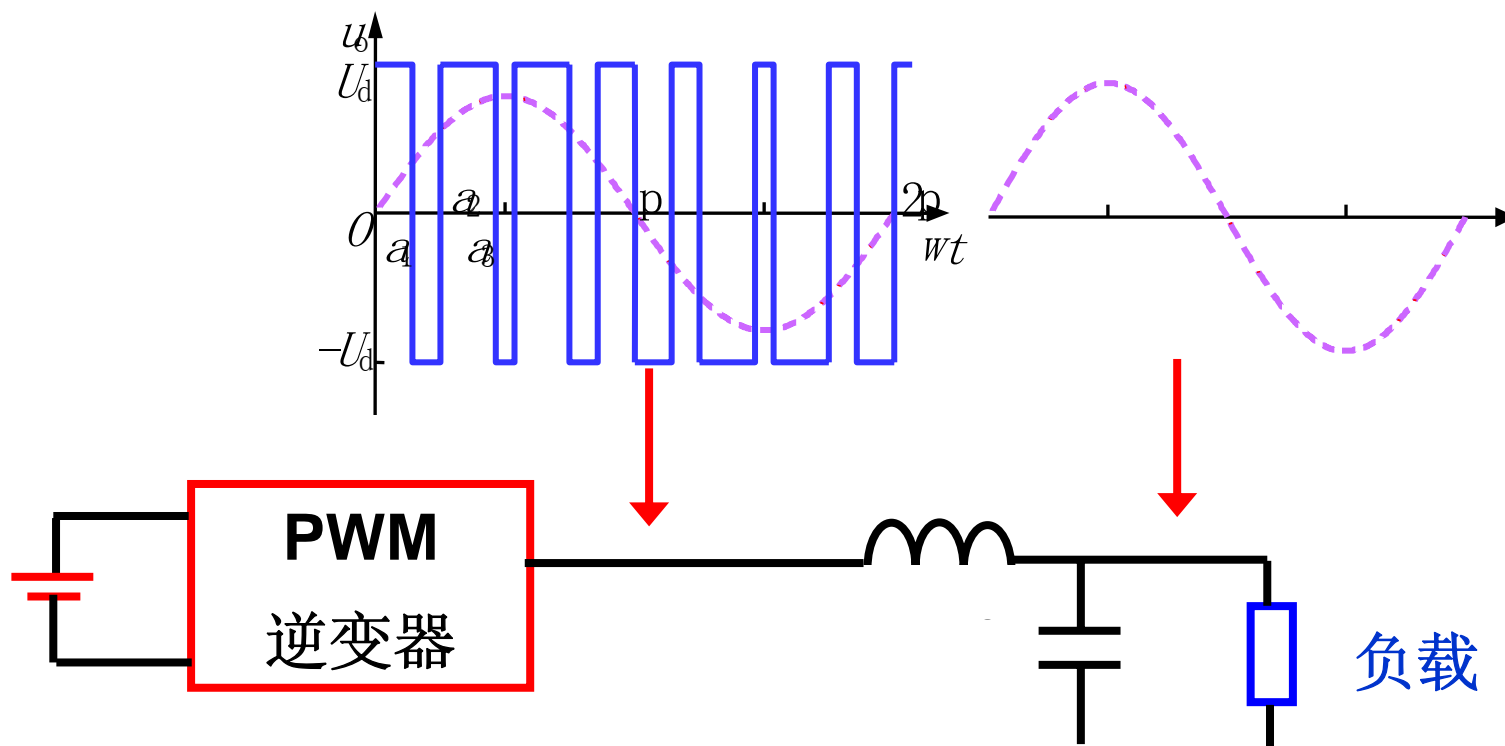
### • 规则采样法

- 载波周期中点与正弦波（调制波）的交点所作的水平线与三角波（载波）的交点确定脉冲宽度
- 交点求解只需计算一次三角函数计算，且无需迭代运算，计算量很小。在早期以及现在实时控制中规则采样法得到广泛应用
- 规则采样法得到的**SPWM**波与自然采样法接近，谐波会略微大一点



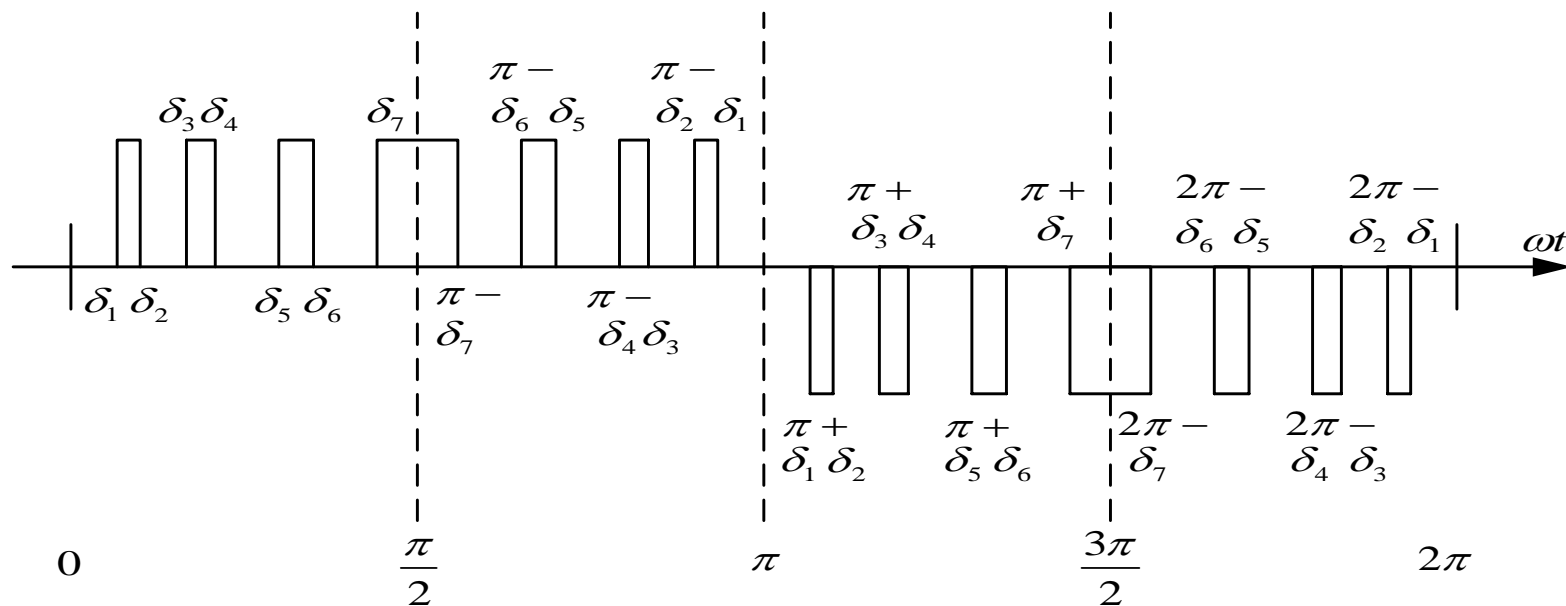
## 2.2 SPWM逆变及其控制方法

- PWM逆变电路的谐波分析



## 2.2 SPWM逆变及其控制方法

- PWM逆变电路的谐波分析（单相）



$$f(\delta) = \sum_{k=1,3,5,\dots}^{\infty} V_{o_k} \sqrt{2} \times \sin k\omega t$$

$$V_{o_k} = \frac{4V_{dc}}{\sqrt{2}k\pi} \sum_{i=1}^{N_2} \left( (-1)^{i-1} \times \cos k \delta_i \right)$$

$$k = 1, 3, 5, \dots \quad \delta_i = \omega t_i$$

傅里叶变换：

- 波形正负半波对称
- 波形1/4对称

$\delta_i$  开关角度

$t_i$  开关时刻

## 2.2 SPWM逆变及其控制方法

- PWM逆变电路的谐波分析（三相）

对于三相系统，线电压中不含的三次及其倍数谐波：

$$V_{O_{Lk}} = \frac{4\sqrt{3}V_{dc}}{\sqrt{2k\pi}} \sum_{i=1}^{N_2} \left( (-1)^{i-1} \times \cos k\omega t_i \right)$$

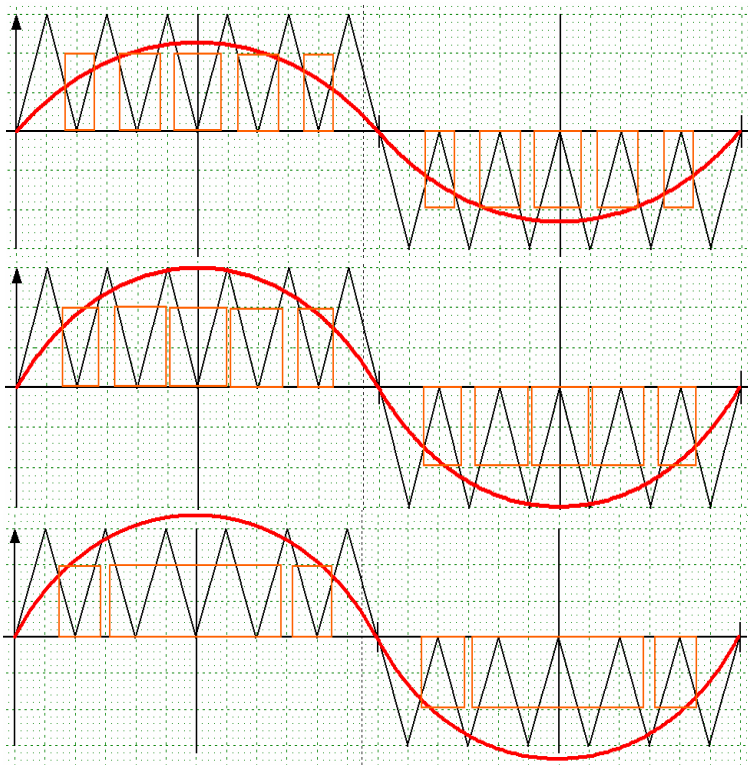
$$k = 1, 6m \pm 1 \quad m = 1, 2, 3, \dots$$

$$\text{THD} = \sqrt{\sum_{n=2}^{n=50} V_{m_{Ln}}^2} / V_{m_{L1}}$$

电力电子器件工作的开关频率越高，低次谐波越小，但开关器件的开关损耗也越大，带来散热问题同时也会使电能变换效率降低。高压大功率电力电子器件工作频率一般不高于**1kHz**

## 2.2 SPWM逆变及其控制方法

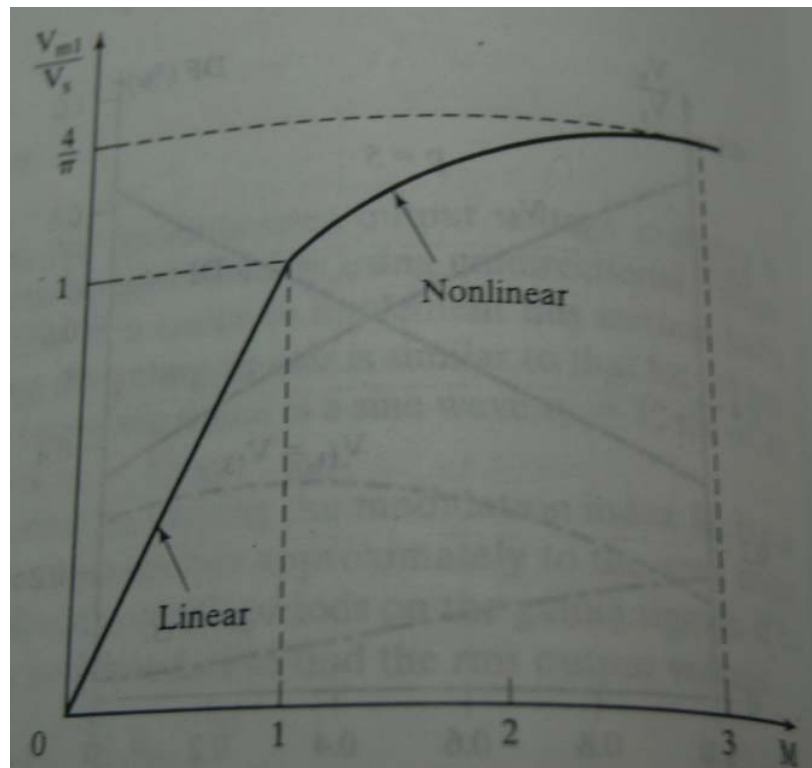
- 提高直流电压利用率



调制比  
较小

调制比=1  
有窄脉冲  
出现

调制比>1  
脉冲数减小  
谐波加大



## 2.2 SPWM逆变及其控制方法

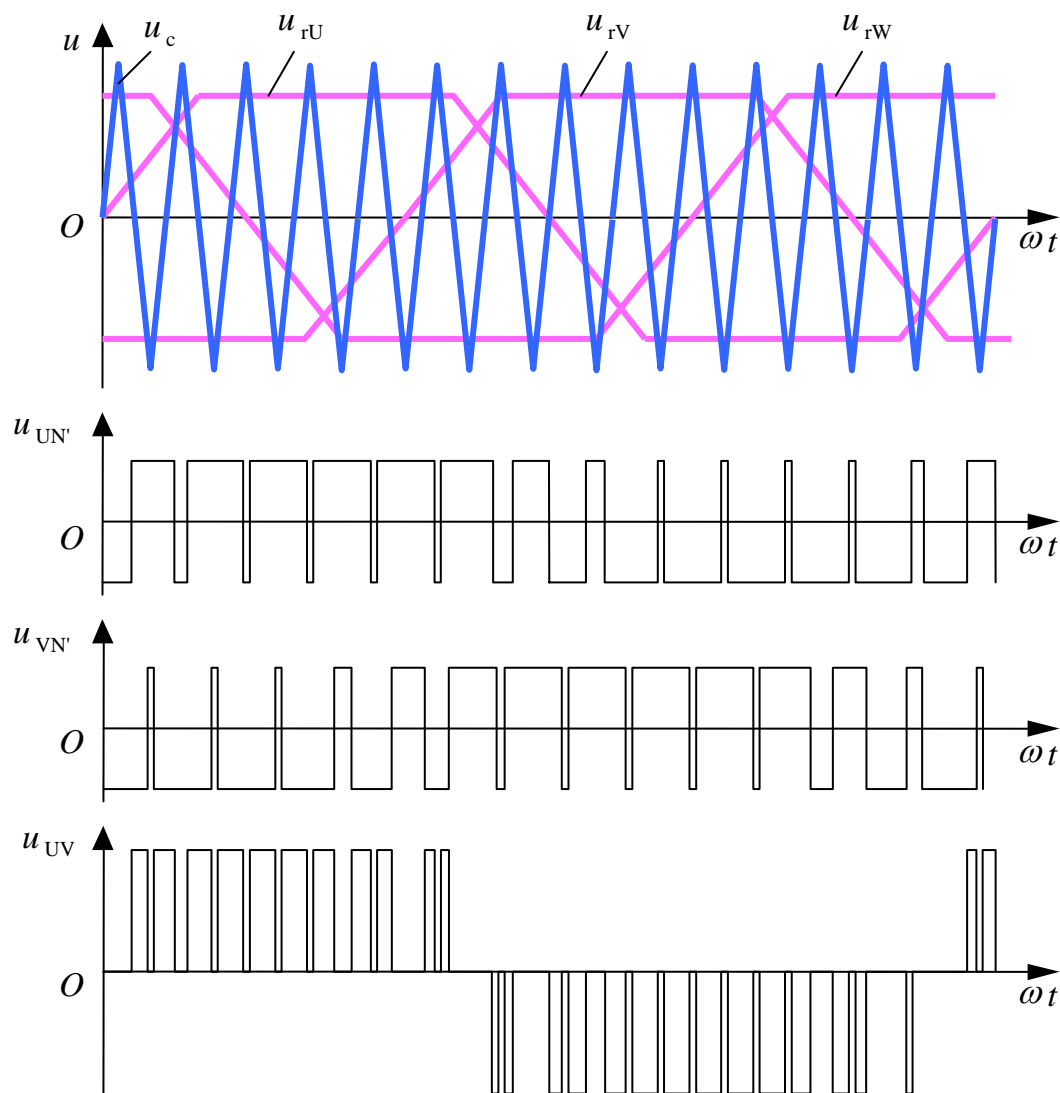
- 提高直流电压利用率
  - 直流电压利用率——逆变电路输出交流电压基波最大幅值 $U_{1m}$ 和直流电压 $U_d$ 之比。
  - 提高直流电压利用率可提高逆变器的输出能力。
  - 减少器件的开关次数可以降低开关损耗。
  - 正弦波调制的三相PWM逆变电路，调制度 $a$ 为1时，输出线电压的基波幅值为 $0.866U_d$ ，直流电压利用率为0.866，实际还更低。

## 2.2 SPWM逆变及其控制方法

### • 梯形波调制方法

优点：在相同直流电压幅值情况下可以较大的交流基波。直流电压利用率可以到1以上。

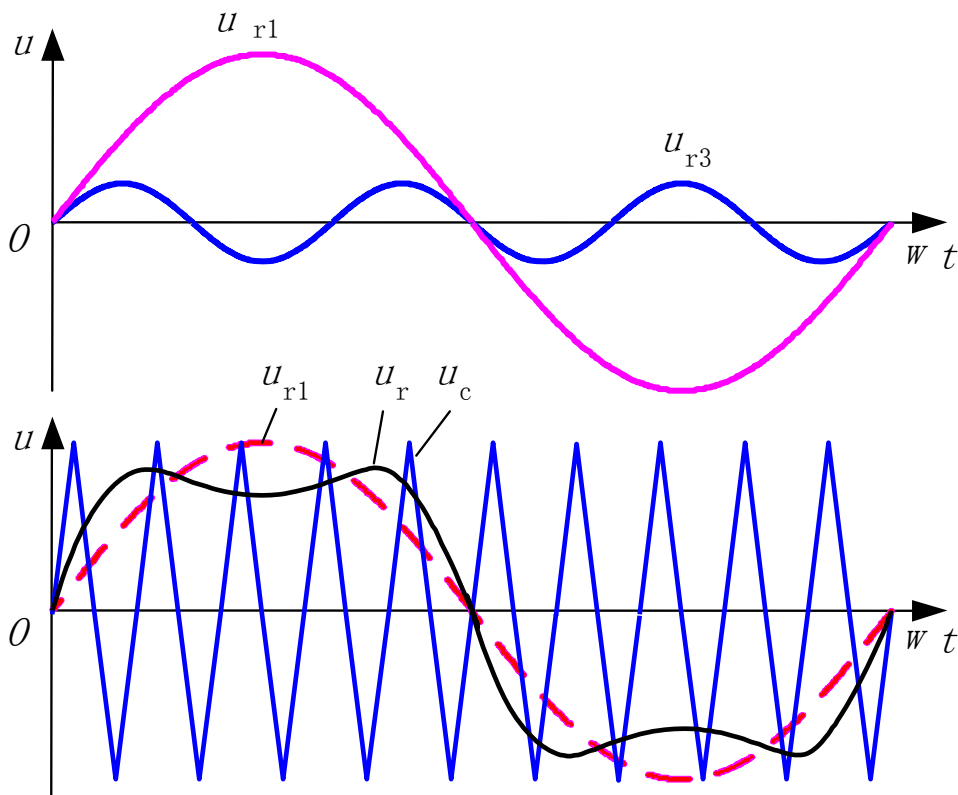
缺点：输出波形中含5次、7次等低次谐波



## 2.2 SPWM逆变及其控制方法

- 叠加3次谐波调制法

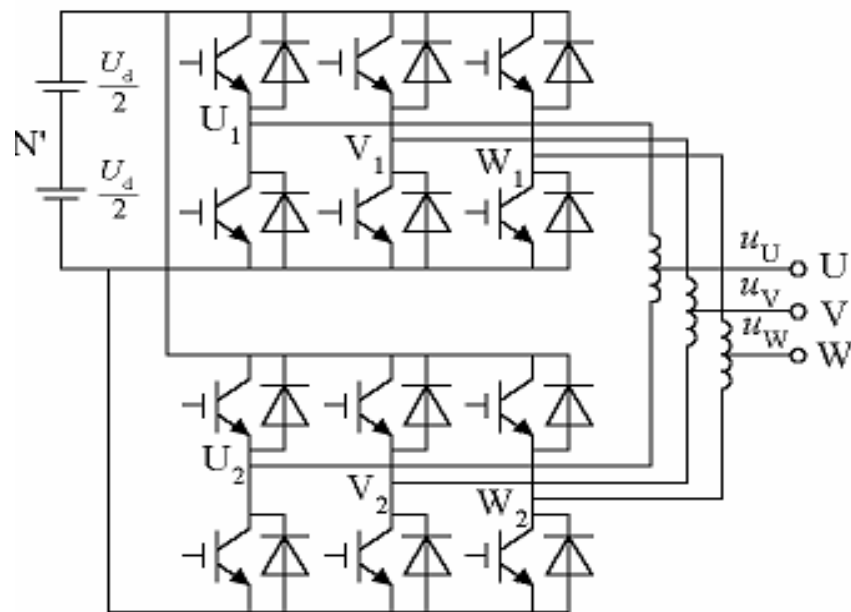
在相电压调制信号中叠加3次谐波，使之成为鞍形波，输出相电压中也含3次谐波，且三相的3次谐波相位相同。合成线电压时，3次谐波相互抵消，线电压为正弦波。





## 2.2 SPWM逆变及其控制方法

- PWM逆变电路的多重化
  - PWM多重化逆变电路，一般目的：提高等效开关频率、减少开关损耗、减少和载波有关的谐波分量
  - PWM逆变电路多重化联结方式有变压器方式和电抗器方式



两个单元逆变电路的载波信号相互错开 $180^\circ$

## 2.2 SPWM逆变及其控制方法

- 输出线电压共有0、 $(\pm 1/2)U_d$ 、 $\pm U_d$ 五个电平，比非多重化时谐波有所减少
- 电抗器上所加电压频率为载波频率，比输出频率高得多，只要很小的电抗器就可以了
- 输出电压所含谐波角频率仍可表示为 $n\omega_c + k\omega_r$ ，但其中 $n$ 为奇数时的谐波已全被除去，谐波最低频率在 $2\omega_c$ 附近，相当于电路的等效载波频率提高一倍

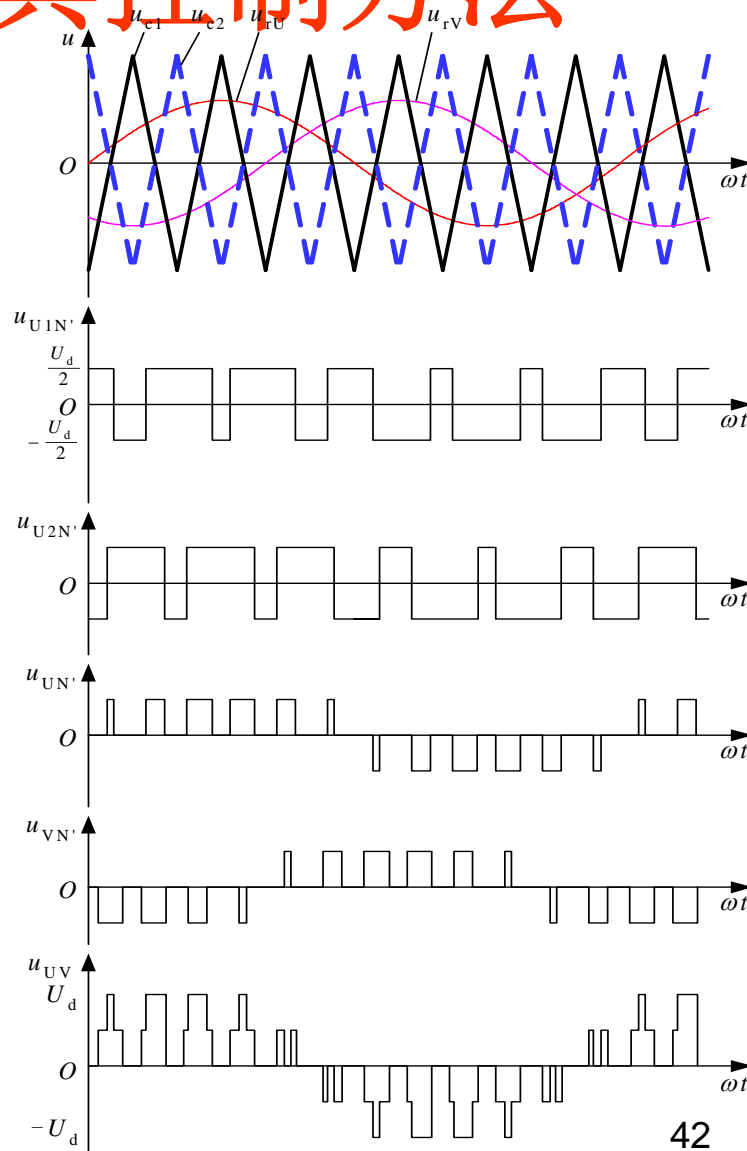


图 6-21

## 2.2 SPWM逆变及其控制方法

- PWM跟踪控制技术
  - 滞环比较方式
  - 三角形比较方式

跟踪型PWM变流技术， 电流跟踪控制应用最多

## 2.2 SPWM逆变及其控制方法

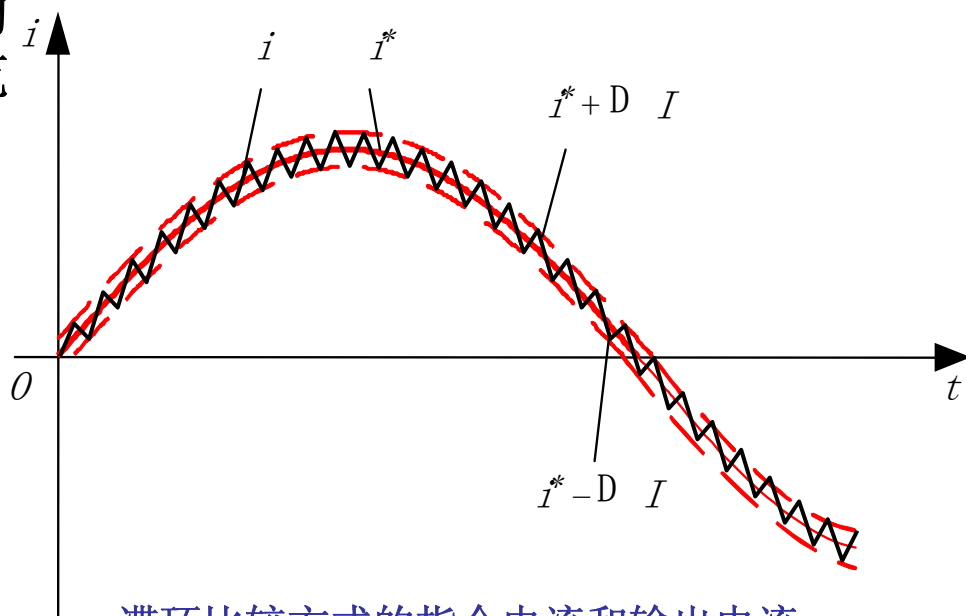
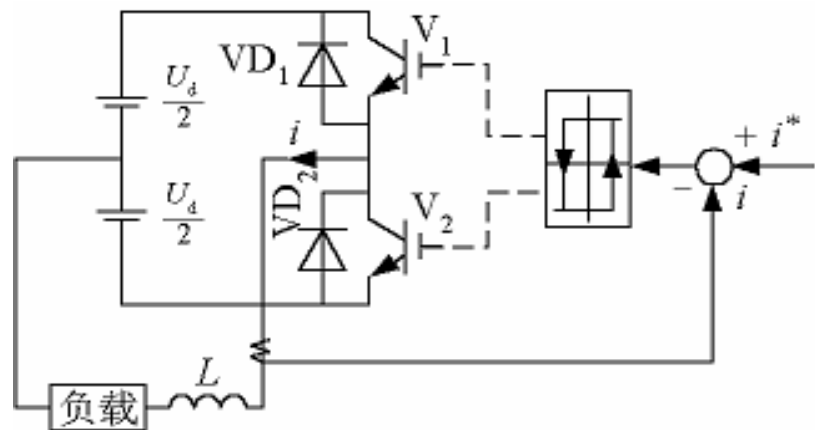
### • 滞环比较方式

#### 基本原理

- 把指令电流  $i^*$  和实际输出电流  $i$  的偏差  $i^* - i$  作为滞环比较器的输入
- V1 (或VD1) 通时,  $i$  增大
- V2 (或VD2) 通时,  $i$  减小
- 通过环宽为  $2DI$  的滞环比较器的控制,  $i$  就在  $i^* + DI$  和  $i^* - DI$  的范围内, 呈锯齿状地跟踪指令电流  $i^*$

#### 参数影响

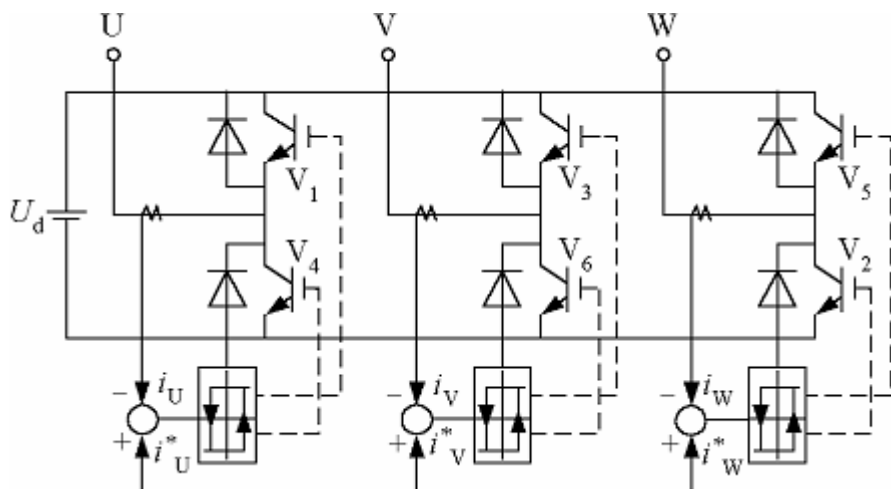
- 环宽过宽时, 开关频率低, 跟踪误差大; 环宽过窄时, 跟踪误差小, 但开关频率过高, 开关损耗增大
- $L$  大  $i$  变化率小, 跟踪慢
- $L$  小  $i$  变化率大, 开关频率过高



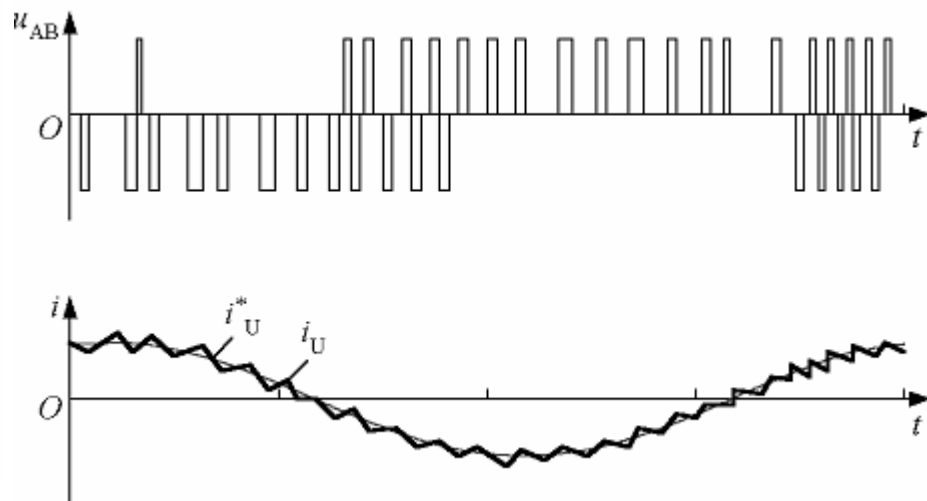
滞环比较方式的指令电流和输出电流

## 2.2 SPWM逆变及其控制方法

- 滞环比较方式（三相）



三相电流跟踪型PWM  
逆变电路



三相电流跟踪型PWM逆变电  
路输出波形

## 2.2 SPWM逆变及其控制方法

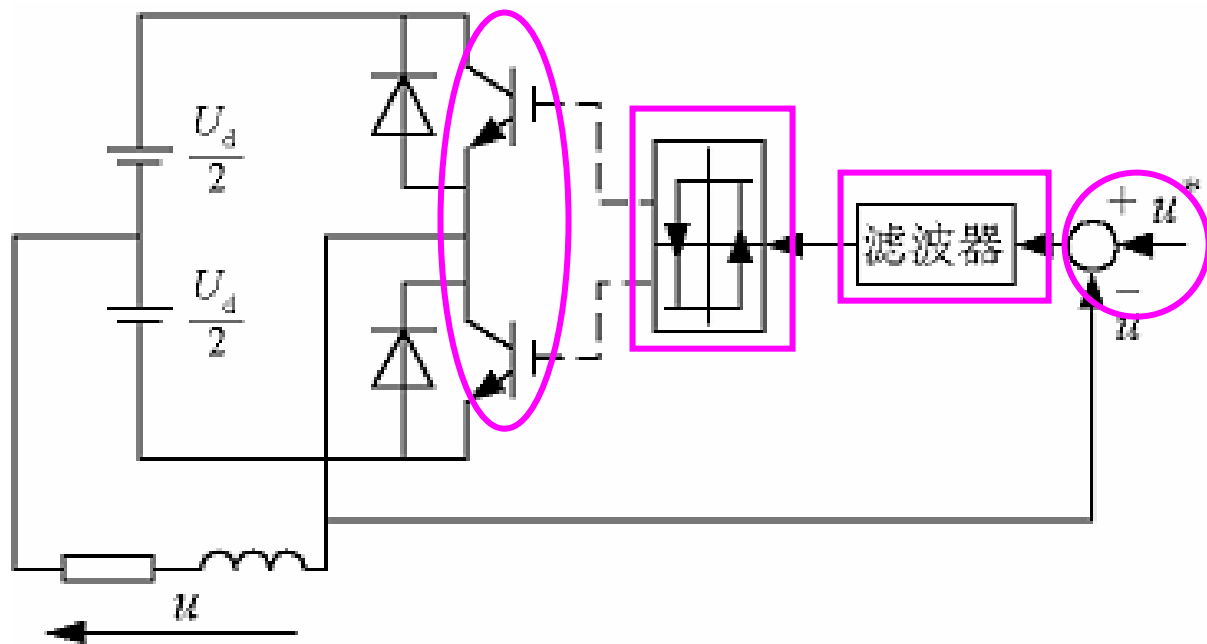
滞环比较方式电流跟踪型PWM变流技术特点：

- 硬件电路简单
- 实时控制，电流响应快
- 不用载波，输出电压波形中不含特定频率的谐波
- 与计算法及调制法相比，相同开关频率时输出电流中高次谐波含量多
- 闭环控制，是各种跟踪型PWM变流电路的共同特点

## 2.2 SPWM逆变及其控制方法

### ● 滞环比较方式电压跟踪控制

把指令电压  $u^*$  和输出电压  $u$  进行比较，滤除偏差信号中的谐波，滤波器的输出送入滞环比较器，由比较器输出控制开关器件的通断，从而实现电压跟踪控制



## 2.2 SPWM逆变及其控制方法

### ● 滞环比较方式电压跟踪控制

- 和电流跟踪控制电路相比，只是把指令和反馈信号从电流变为电压
- 输出电压PWM波形中含大量高次谐波，要用适当的滤波器滤除
- $u^*=0$ 时，输出电压 $u$ 为频率较高的矩形波，相当于一个自励振荡电路
- $u^*$ 为直流信号时， $u$ 产生直流偏移，变为正负脉冲宽度不等，正宽负窄或正窄负宽的矩形波
- $u^*$ 为交流信号时，只要其频率远低于上述自励振荡频率，从 $u$ 中滤除由器件通断产生的高次谐波后，所得的波形就几乎和 $u^*$ 相同，从而实现电压跟踪控制



# 2.2 SPWM逆变及其控制方法

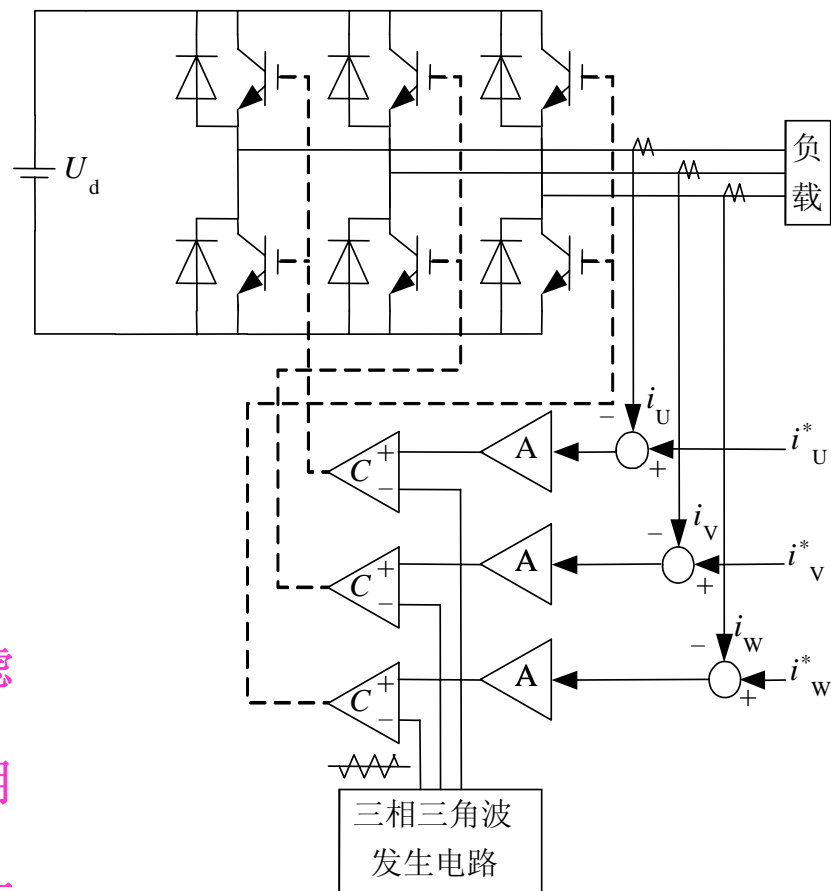
- 三角形比较方式

- 基本原理

- 不是把指令信号和三角波直接进行比较，而是通过闭环来进行控制
- 把指令电流  $i^*U$ 、 $i^*V$ 和  $i^*W$ 和实际输出电流  $i_U$ 、 $i_V$ 、 $i_W$ 进行比较，求出偏差，通过放大器A放大后，再去和三角波进行比较，产生PWM波形
- 放大器A通常具有比例积分特性或比例特性，其系数直接影响电流跟踪特性

- 特点

- 开关频率固定，等于载波频率，高频滤波器设计方便
- 为改善输出电压波形，三角波载波常用三相三角波载波
- 和滞环比较控制方式相比，这种控制方式输出电流所含的谐波少



## 2.2 SPWM逆变及其控制方法

- 电压空间矢量PWM控制

三相交流相电压可以由一个空间电压矢量或其两个分量代替

$$u_{an}(\omega t) = U \cos \omega t$$

$$u_{bn}(\omega t) = U \cos(\omega t - 120^\circ)$$

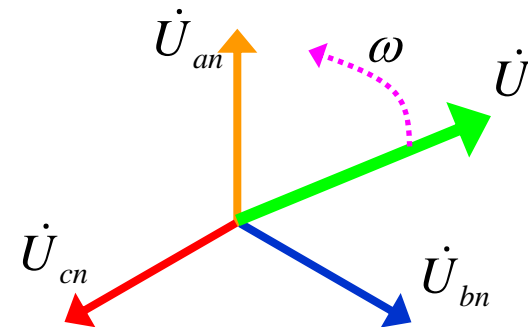
$$u_{cn}(\omega t) = U \cos(\omega t + 120^\circ)$$

假定一个新的电压空间矢量

$$U_d = U \cos \omega t \quad U_q = U \sin \omega t$$

$$\dot{U} = U_d + jU_q$$

可以推导出新电压空间矢量与三相交流相电压之间的关系



$$u_{an}(\omega t) = U \cos \omega t = U_d$$

$$u_{bn}(\omega t) = U \cos(\omega t - 120^\circ)$$

$$= U_d \cos 120^\circ + U_q \sin 120^\circ$$

$$= -\frac{1}{2}U_d + \frac{\sqrt{3}}{2}U_q$$

$$u_{bn}(\omega t) = U \cos(\omega t + 120^\circ)$$

$$= U_d \cos 120^\circ - U_q \sin 120^\circ$$

$$= -\frac{1}{2}U_d - \frac{\sqrt{3}}{2}U_q$$

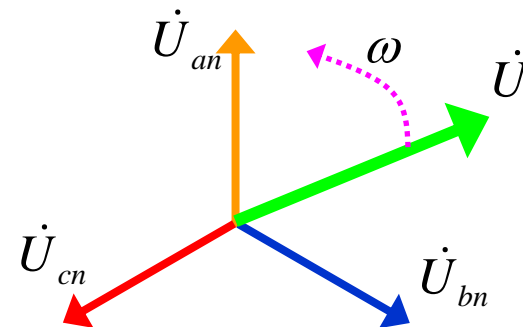
## 2.2 SPWM逆变及其控制方法

- 电压空间矢量PWM控制

矩阵表示新电压空间矢量与三相交流相电压之间的关系，即为：

$$\begin{bmatrix} u_{an}(\omega t) \\ u_{bn}(\omega t) \\ u_{cn}(\omega t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/2 & \sqrt{3}/2 \\ -1/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_d \\ U_q \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} U_d \\ U_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{an}(\omega t) \\ u_{bn}(\omega t) \\ u_{cn}(\omega t) \end{bmatrix}$$



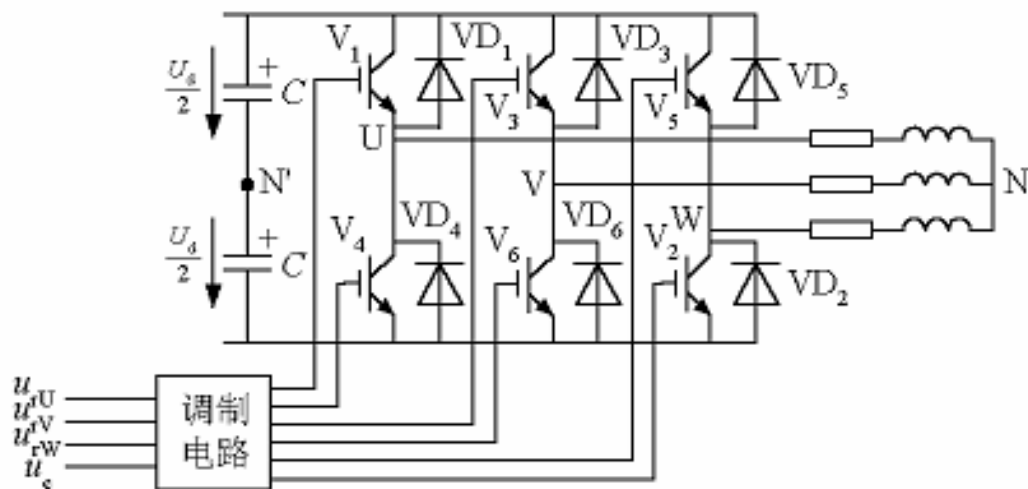
表明：新电压空间矢量与三相交流相电压矢量之间可以相互转换

## 2.2 SPWM逆变及其控制方法

### • 电压空间矢量PWM控制

再来看三相逆变器情况

假定：



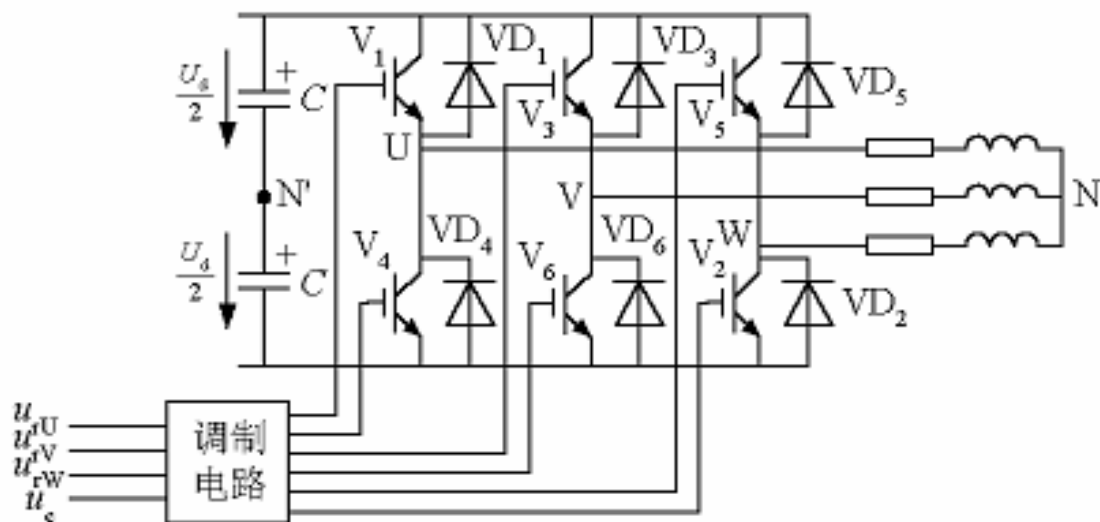
开关管导通为**1**，关断为**0**

因防直通，故上下桥臂开关管导通情况互补，即：  
上桥臂导通，下桥臂则关断，反之亦然

这样三相**6**个开关管的全部开关状态，共有也只有**8**种组合

## 2.2 SPWM逆变及其控制方法

### • 电压空间矢量PWM控制

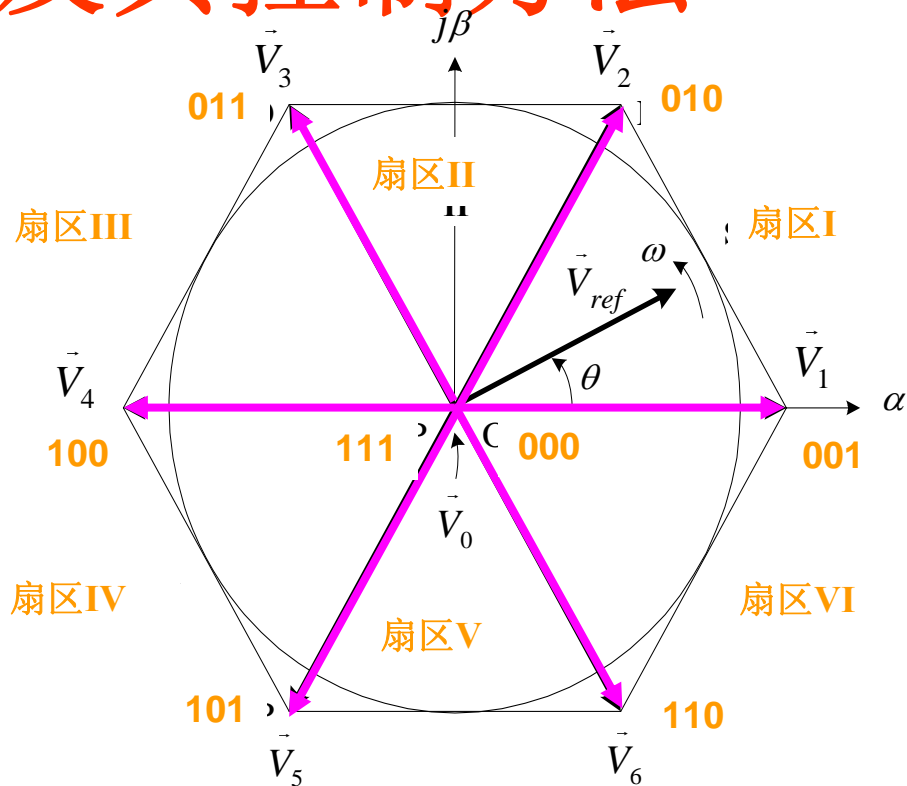
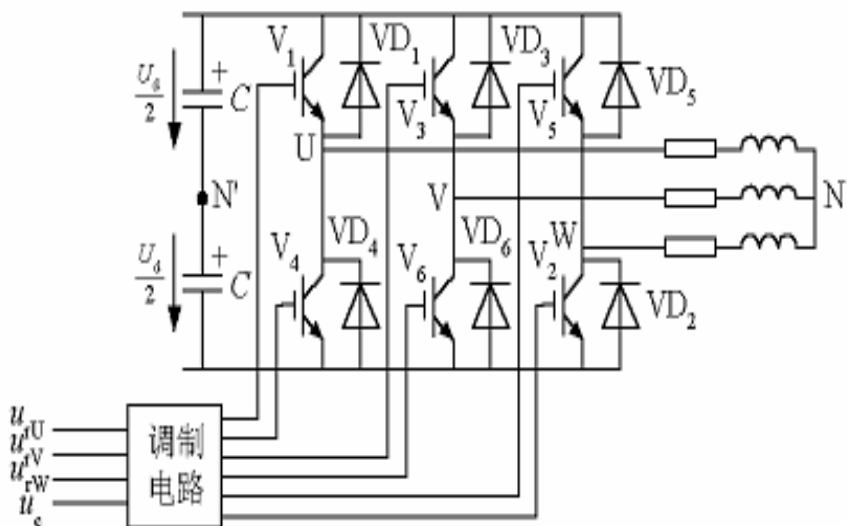


状态	$S_a S_b S_c$
0态V0	0 0 0
1态V1	0 0 1
2态V2	0 1 0
3态V3	0 1 1
4态V4	1 0 0
5态V5	1 0 1
6态V6	1 1 0
7态V7	1 1 1

由于**0态**是三相的上面**3管**全部关断下面**3管**全部开通，**7态**是三相的上面**3管**全部开通下面**3管**全部关断，此时三相输出电压均为**0**，故称为**0矢量**，其余**6种**称为非**0矢量**。空间矢量**PWM**控制就是利用**6种非0矢量**和**2种0矢量**的组合实现三相正弦交流电压输出

# 2.2 SPWM逆变及其控制方法

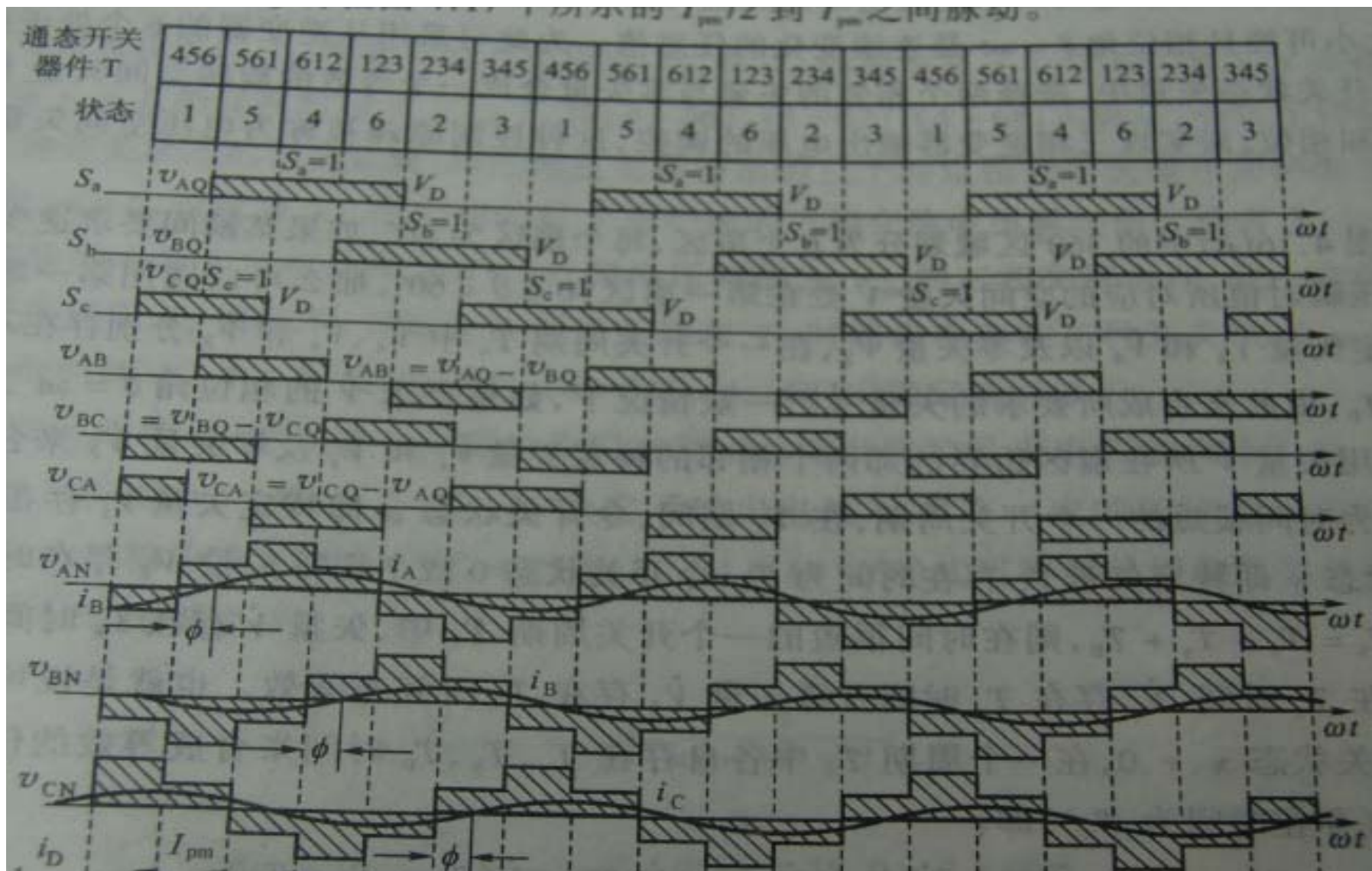
## • 电压空间矢量PWM控制



可以验证：6个非0矢量所处的角度， $0^\circ$ ， $60^\circ$ ， $120^\circ$ ， $180^\circ$ ， $240^\circ$ ， $300^\circ$ 时三相逆变桥输出的三相交流电压瞬时值与三相正弦交流相电压的瞬时值相同。因此，只要按时切换6个非0矢量就可以模拟出三相正弦交流相电压。

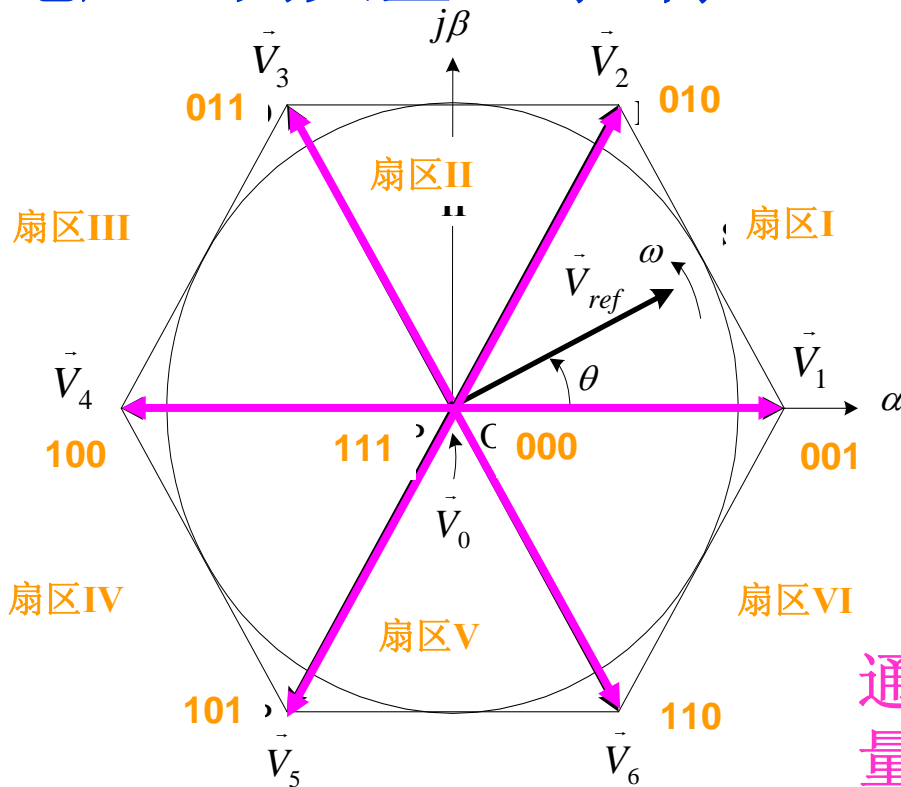
# 2.2 SPWM逆变及其控制方法

## • 电压空间矢量PWM控制

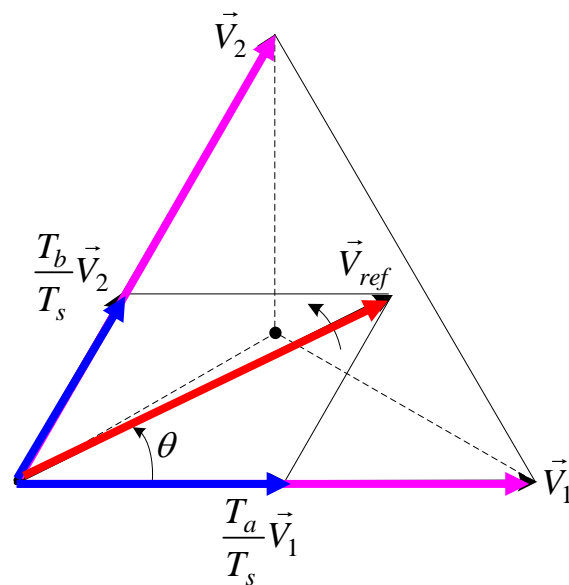


## 2.2 SPWM逆变及其控制方法

### • 电压空间矢量PWM控制



不过这样模拟出的三相正弦交流相电压，其幅值和相位不可控



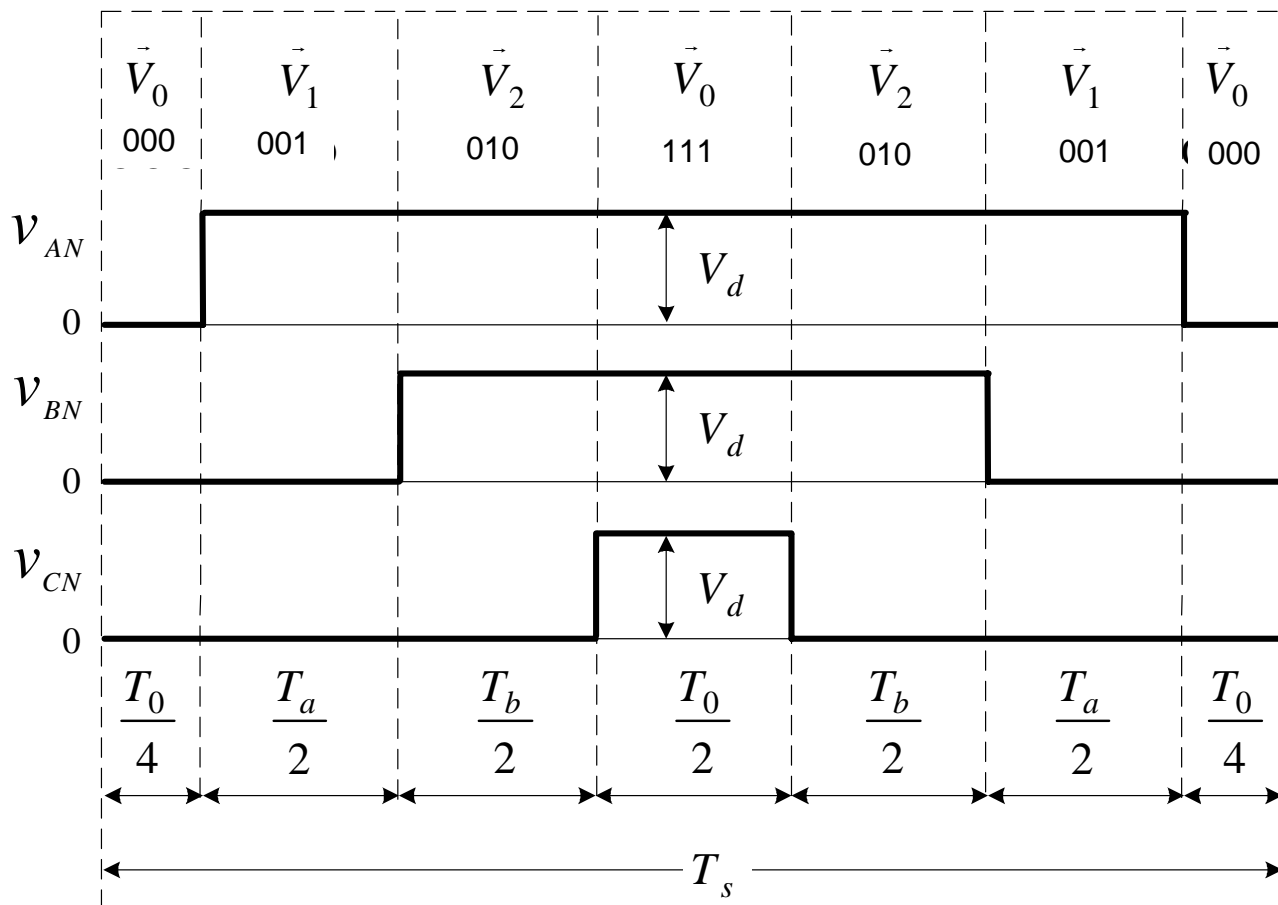
通过控制相邻两个矢量以及0矢量在60°扇区中的各自作用时间长短来实现两个非0矢量的等效幅值大小，达到其合成矢量的幅值和相位均可控目的



## 2.2 SPWM逆变及其控制方法

### • 电压空间矢量PWM控制

#### 7段切换法

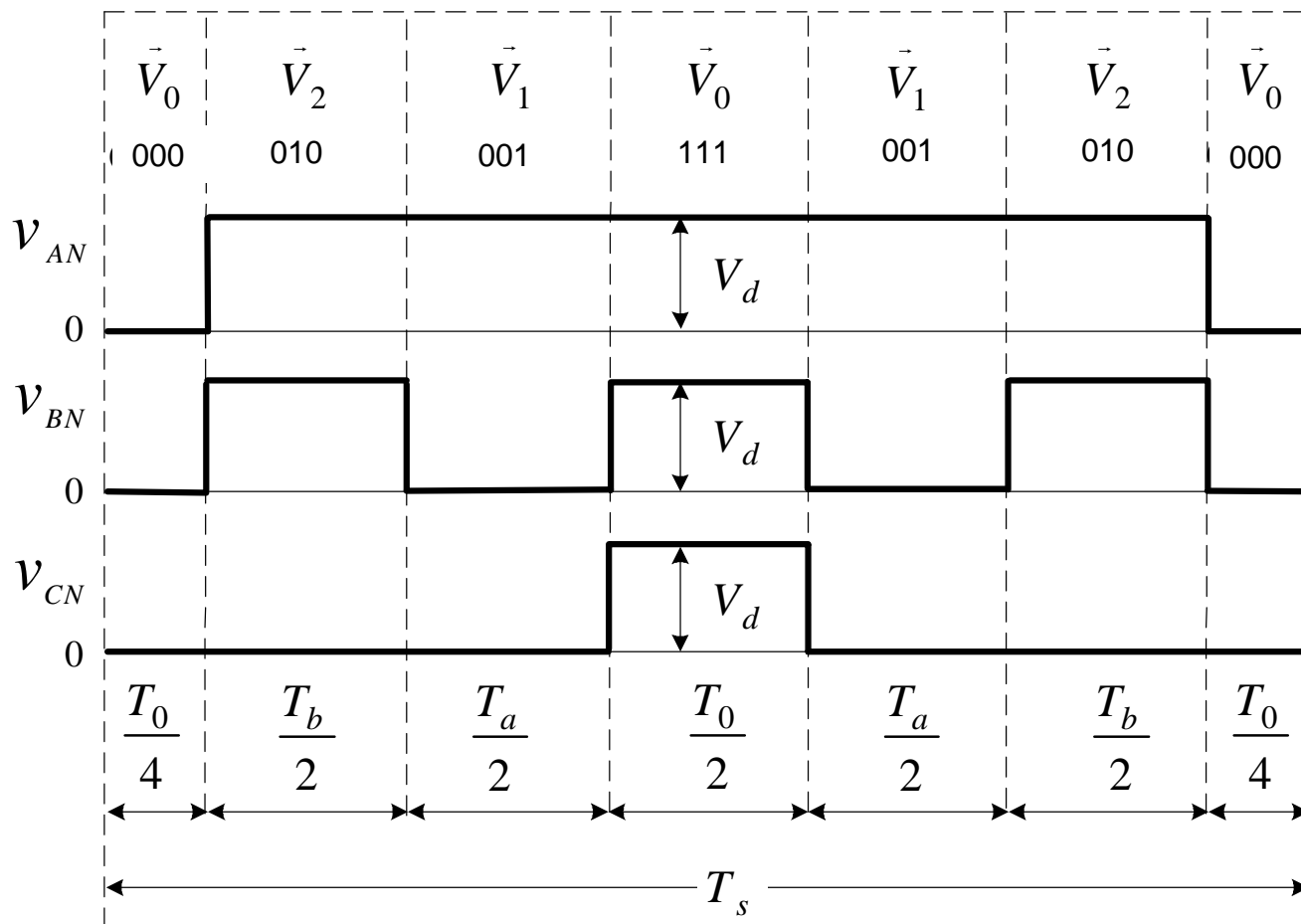


开关次数为6

## 2.2 SPWM逆变及其控制方法

### • 电压空间矢量PWM控制

交替切换法

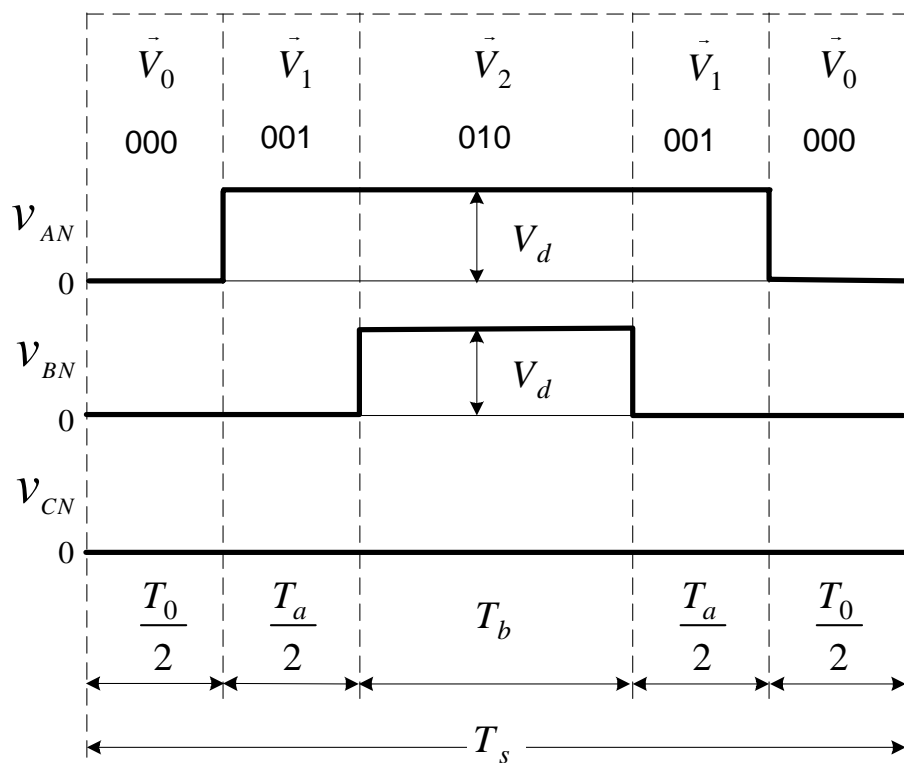


开关次数为10

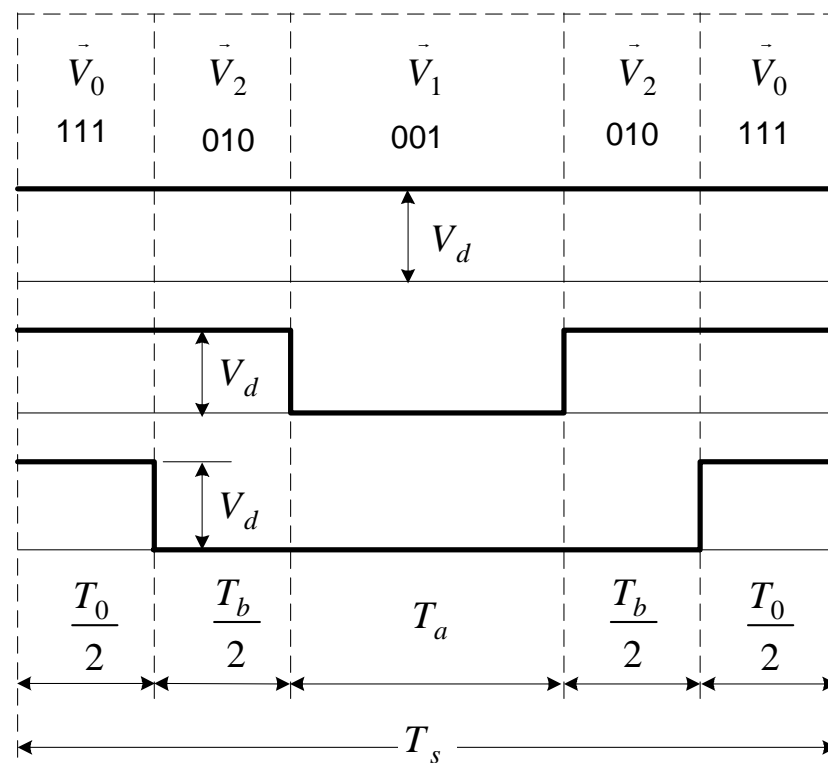
# 2.2 SPWM逆变及其控制方法

## • 电压空间矢量PWM控制

### 5段切换法



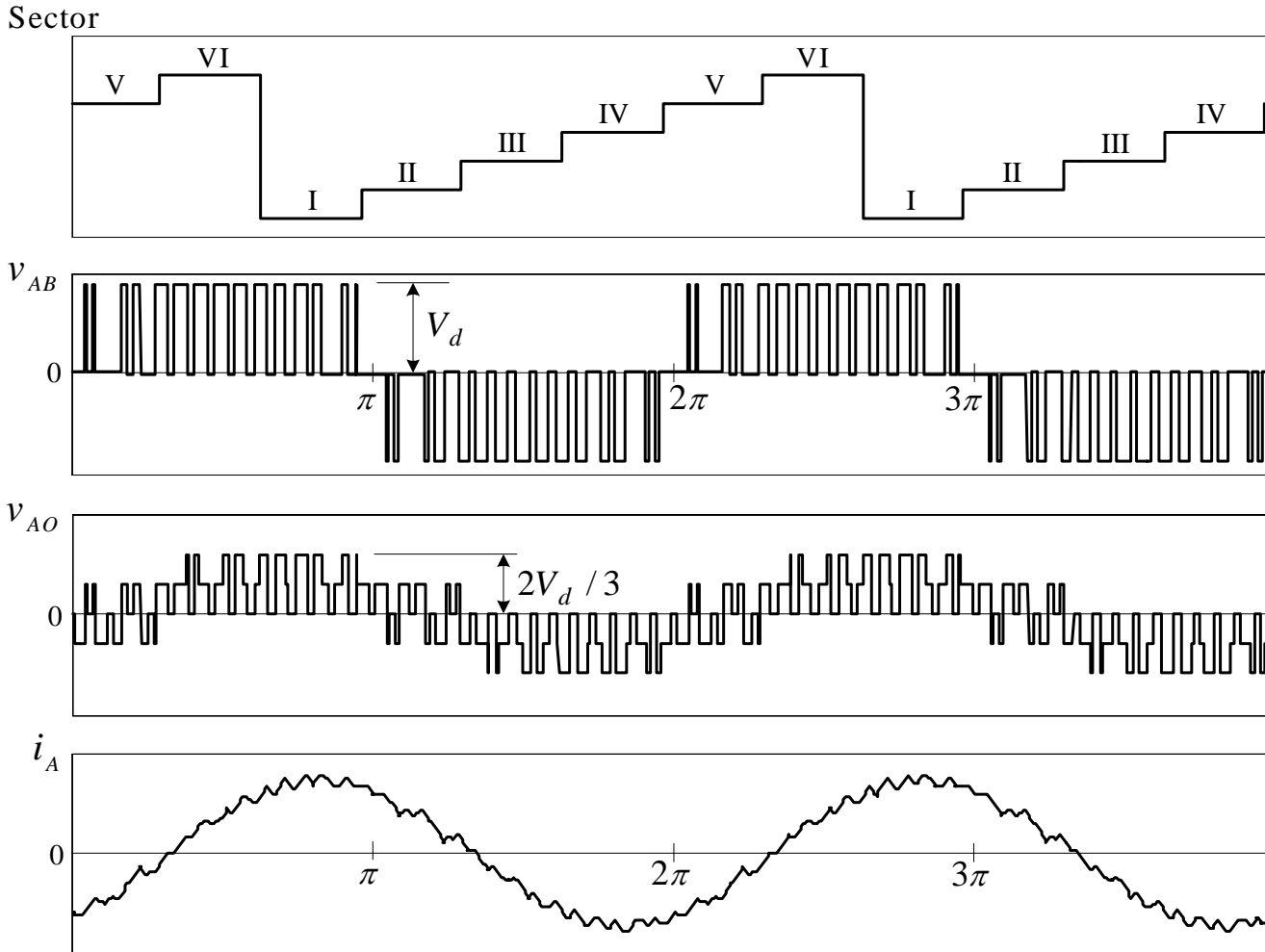
(a) Sequence A



(b) Sequence B

# 2.2 SPWM逆变及其控制方法

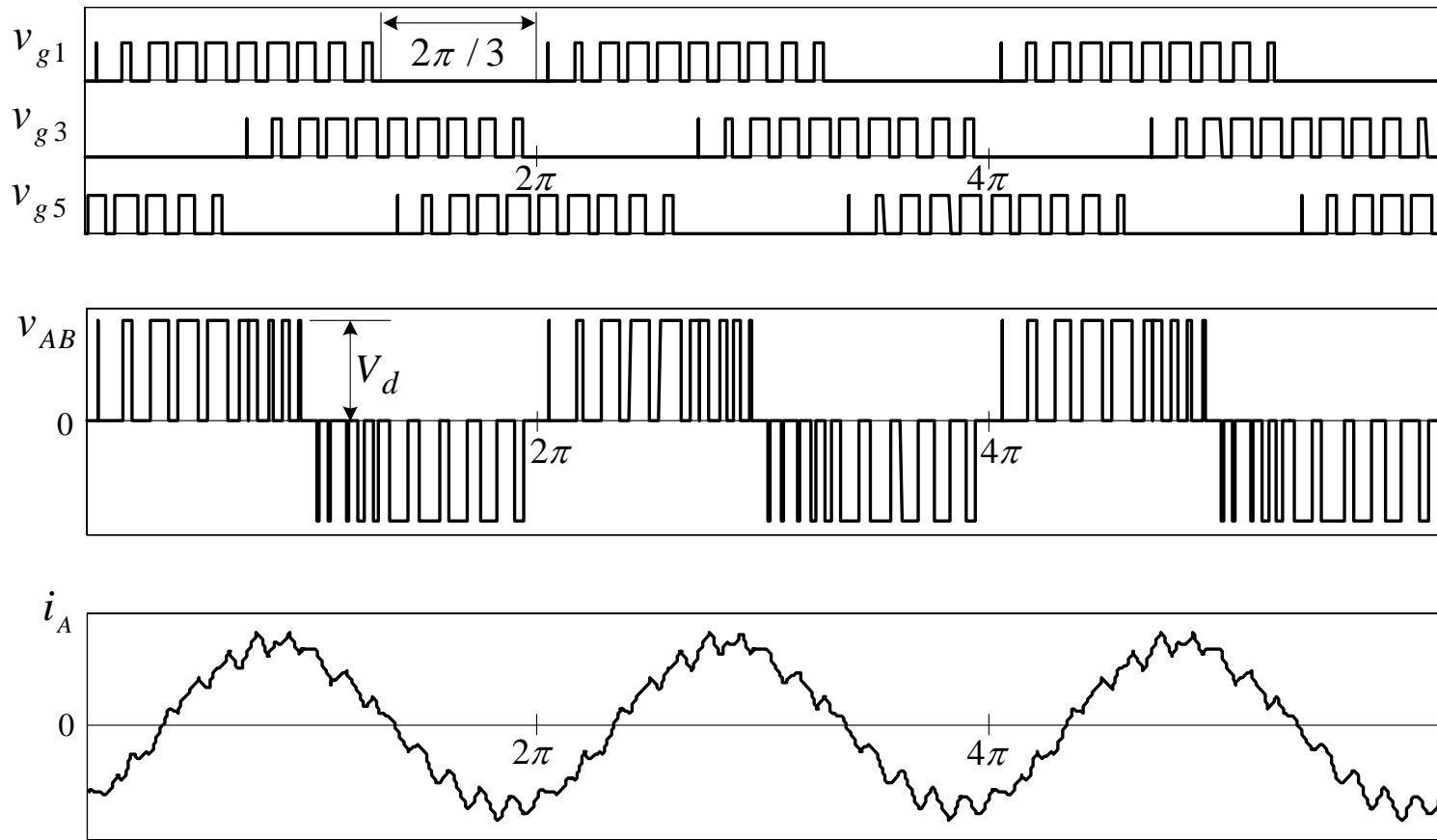
## • 电压空间矢量PWM控制 7段切换法



$f_1 = 60\text{Hz}, f_{sw} = 900\text{Hz}, m_a = 0.696, T_s = 1.1\text{ms}$

## 2.2 SPWM逆变及其控制方法

### • 电压空间矢量PWM控制 5段切换法



- $f_1 = 60\text{Hz}$ ,  $f_{sw} = 600\text{Hz}$ ,  $m_a = 0.696$ ,  $T_s = 1.1\text{ms}$

## 2.2 SPWM逆变及其控制方法

### 电压空间矢量PWM控制

特点:

- 提高直流电压利用率
- 降低开关次数，可减少开关损耗
- 计算量小
- 因两电平 $360^\circ$ 之内只有6个非0矢量，故输出频率比较低时，谐波比较大

## 2.2 SPWM逆变及其控制方法

- 多电平逆变技术

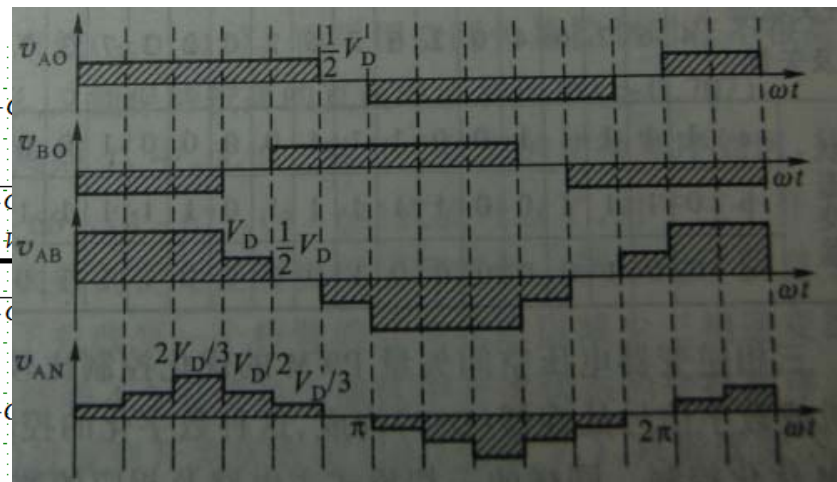
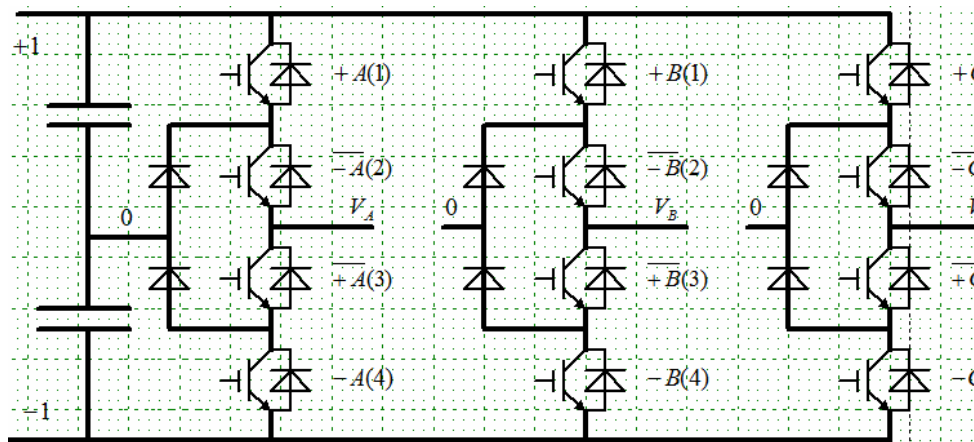
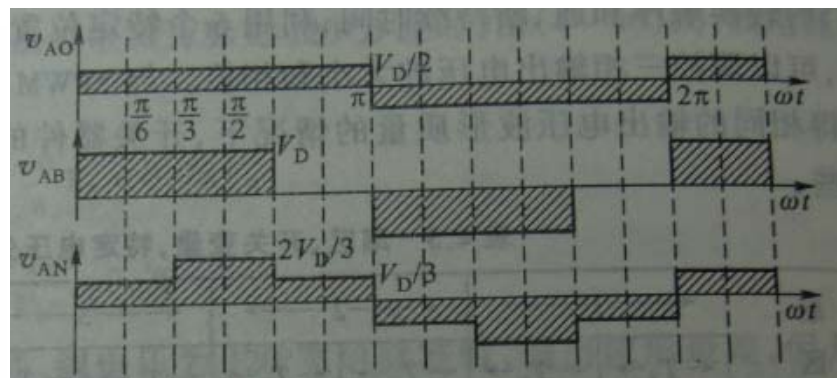
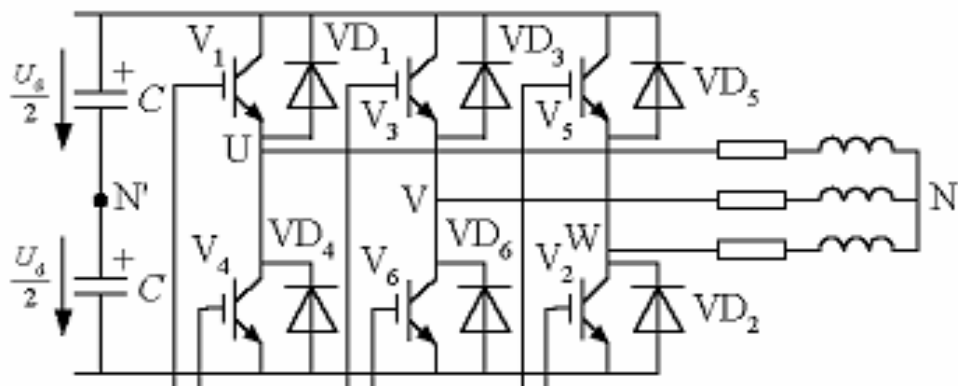
- 大容量应用场合需要，单个逆变器容量难以满足要求
- 高压应用场合要求，单管耐压不够
- 高性能谐波要求，单个逆变器的滤波器负担很重

不过，多电平逆变问题：

结构复杂、电力电子器件数很多、控制复杂，还有可能存在多管的静态和动态均压均流等

# 2.2 SPWM逆变及其控制方法

## • 多电平逆变技术

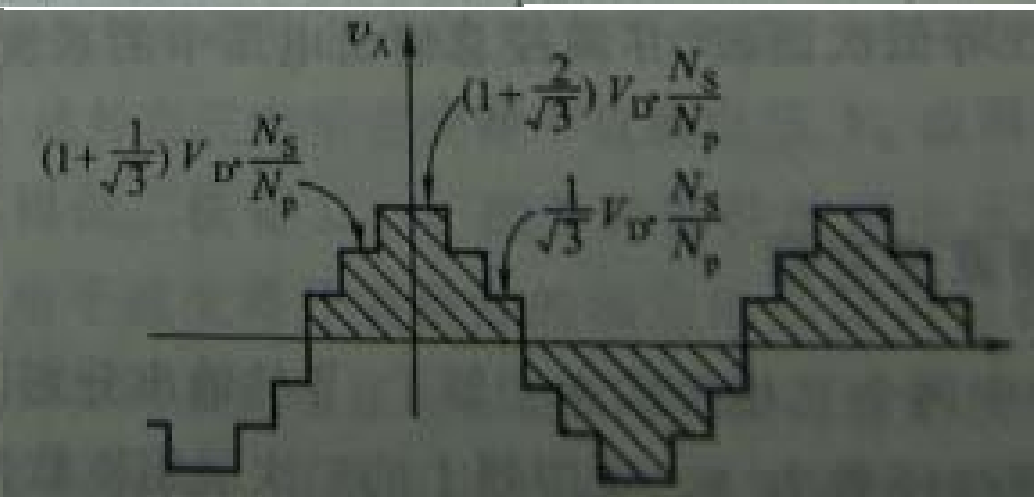
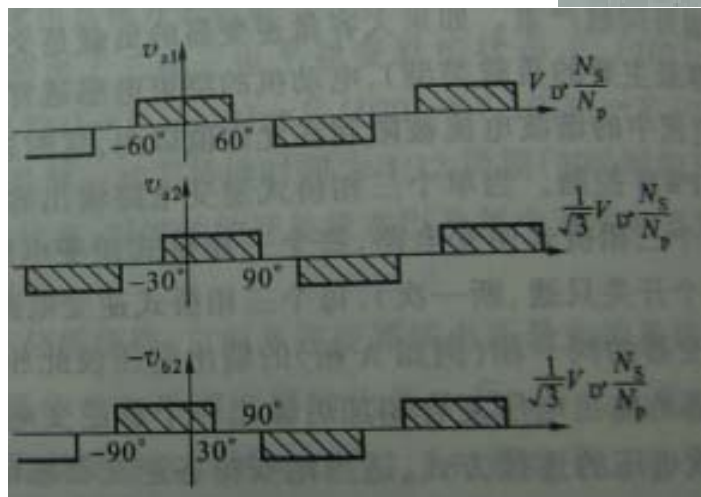
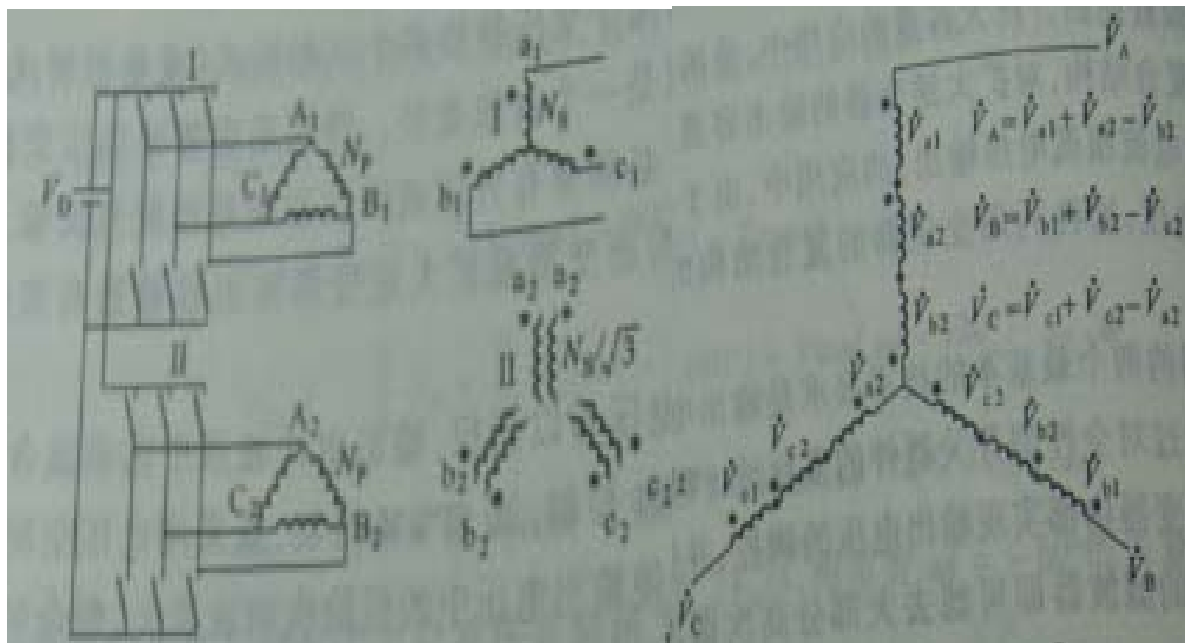




# 2.2 SPWM逆变及其控制方法

- 多电平逆变技术

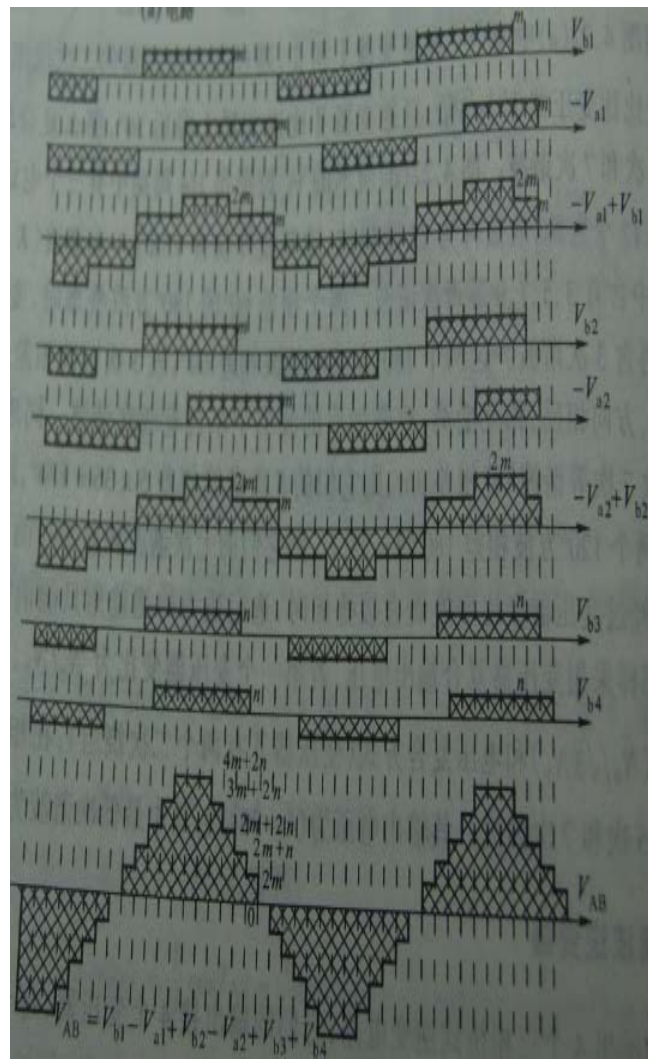
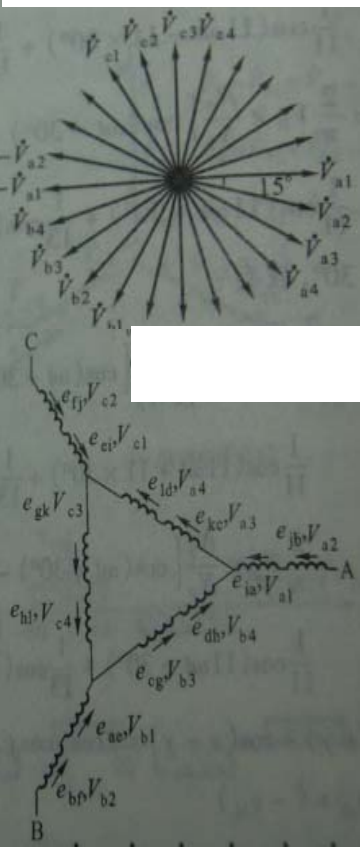
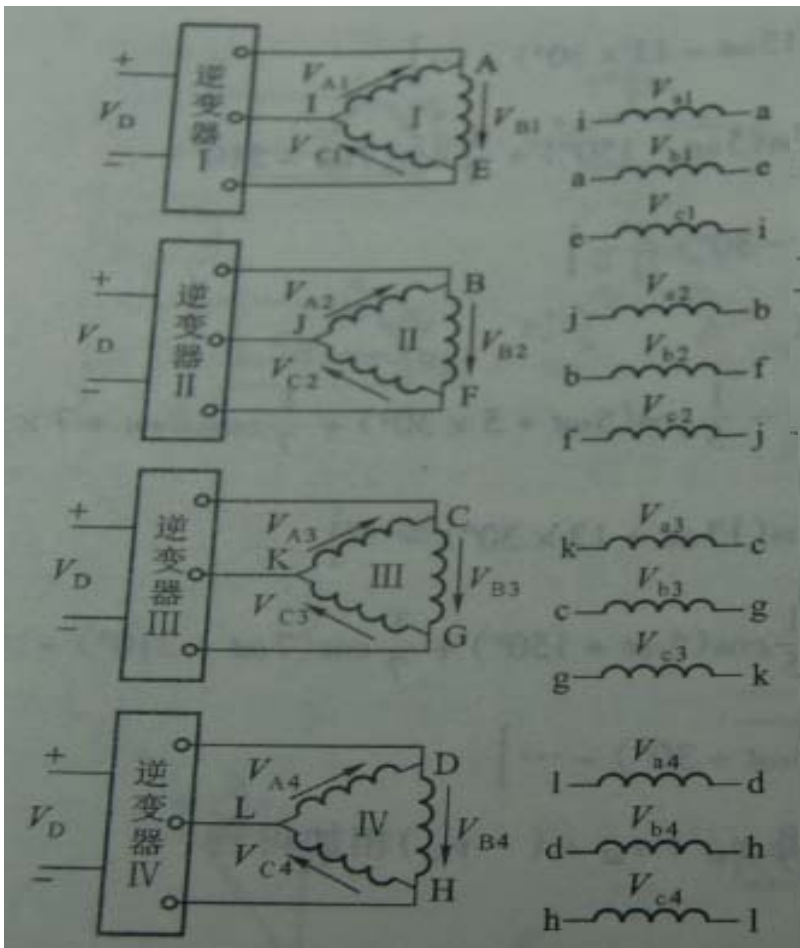
## 12阶梯波逆变器



# 2.2 SPWM逆变及其控制方法

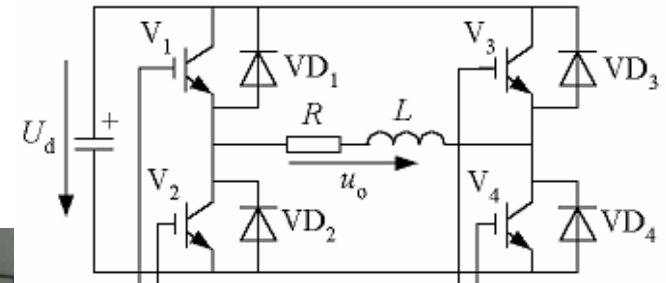
- 多电平逆变技术

## 24阶梯波逆变器

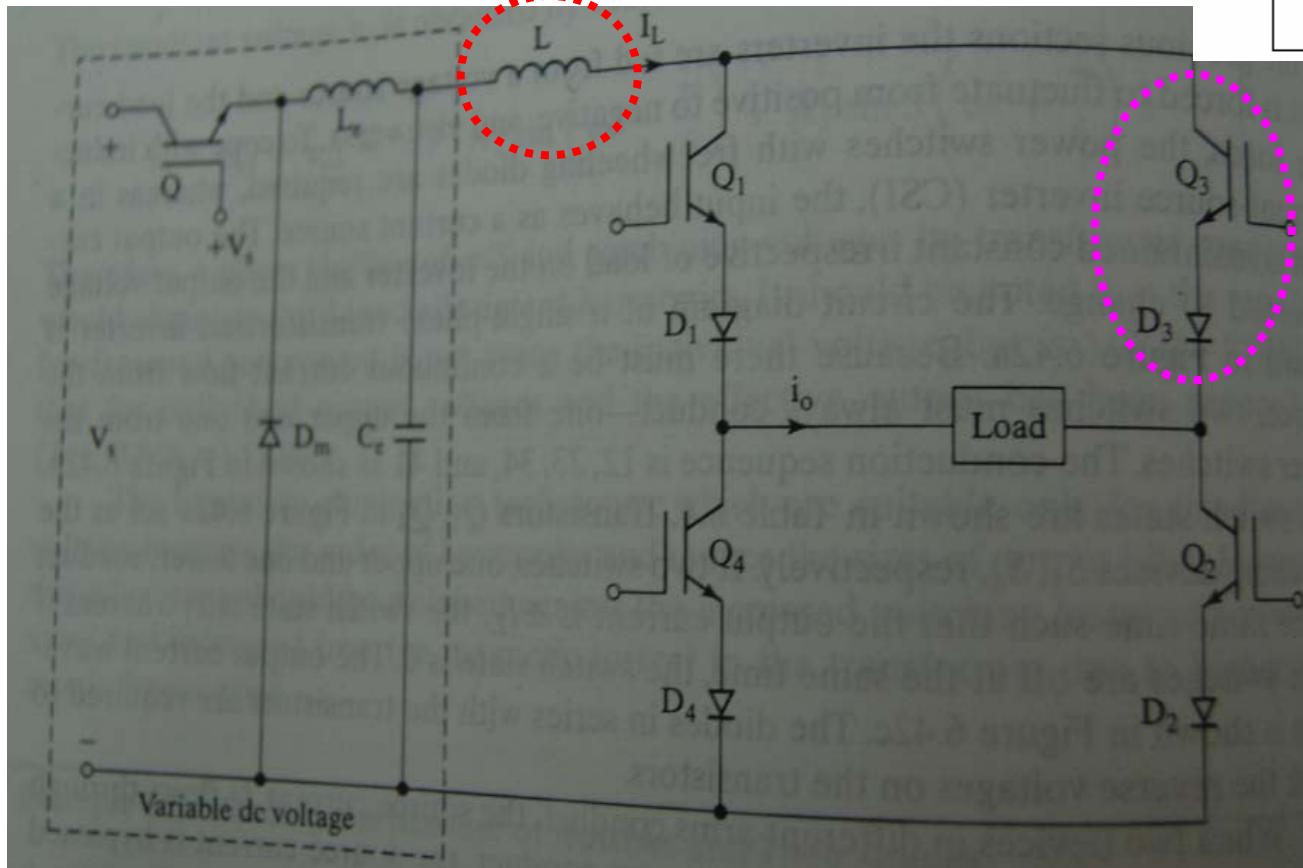


# 2.2 SPWM逆变及其控制方法

- 电流源型逆变器（单相）



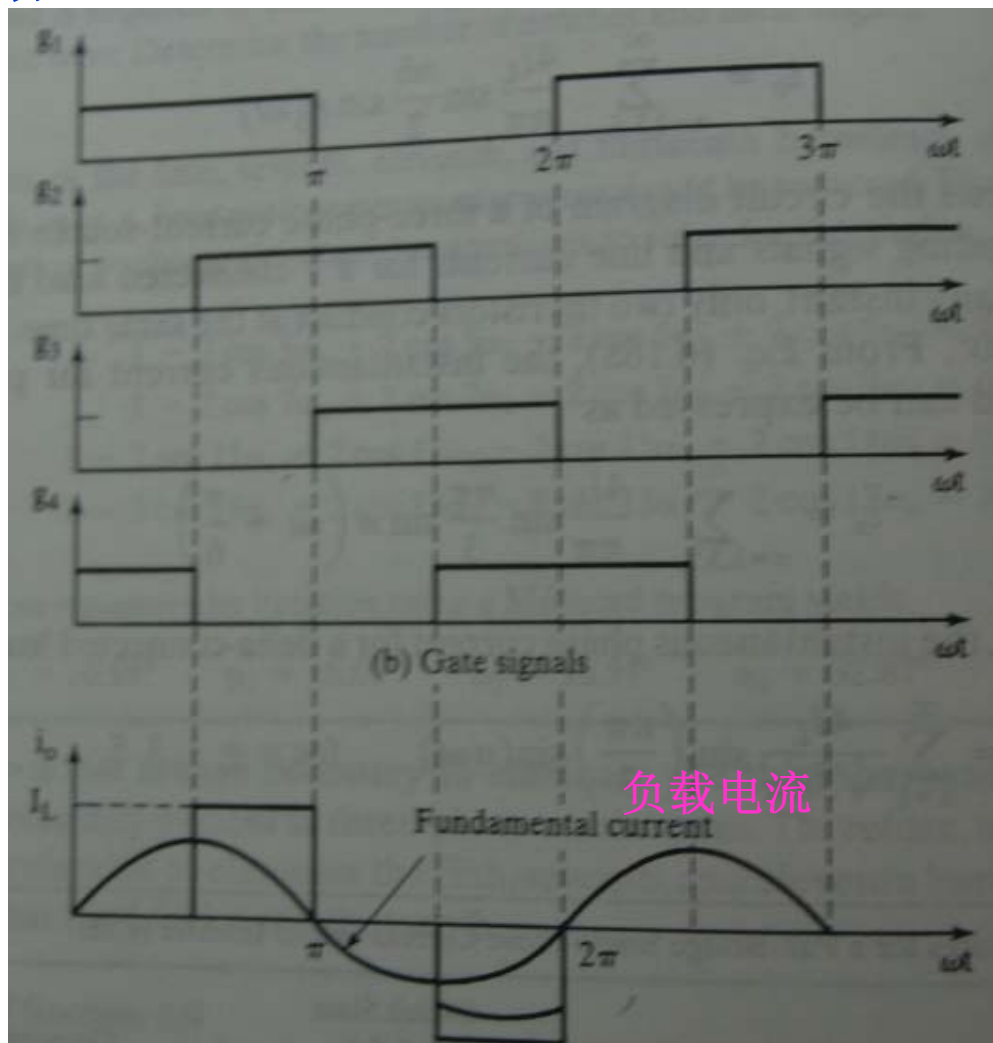
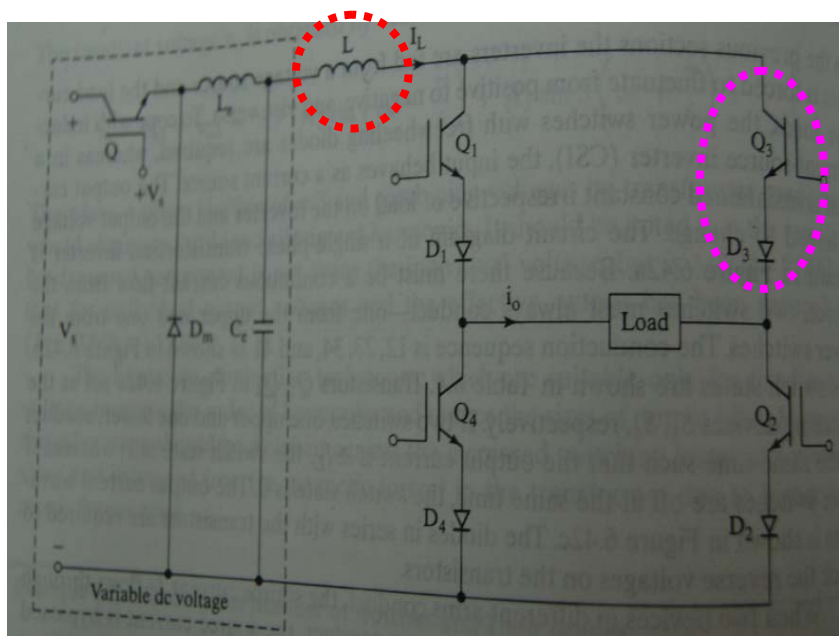
Voltage Source Inverter (VSI)



Current Source Inverter (CSI)

## 2.2 SPWM逆变及其控制方法

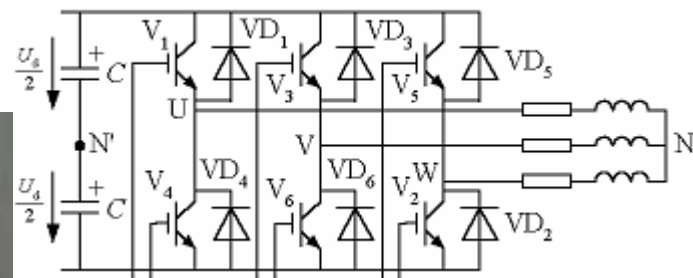
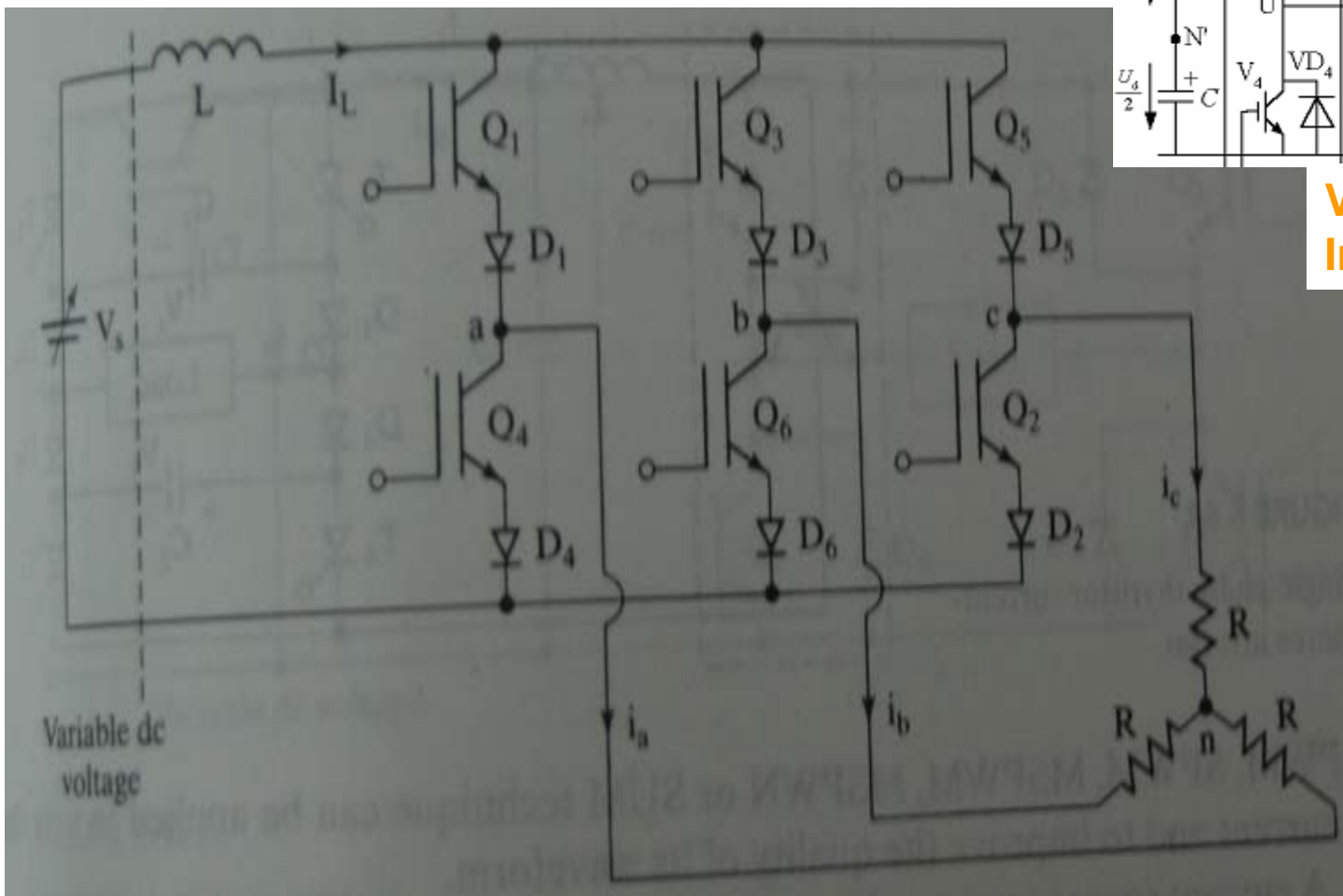
- 电流源型逆变器（单相）



电流源谐波较大，应用场合不多，研究也较少

## 2.2 SPWM逆变及其控制方法

- 电流源型逆变器（三相）

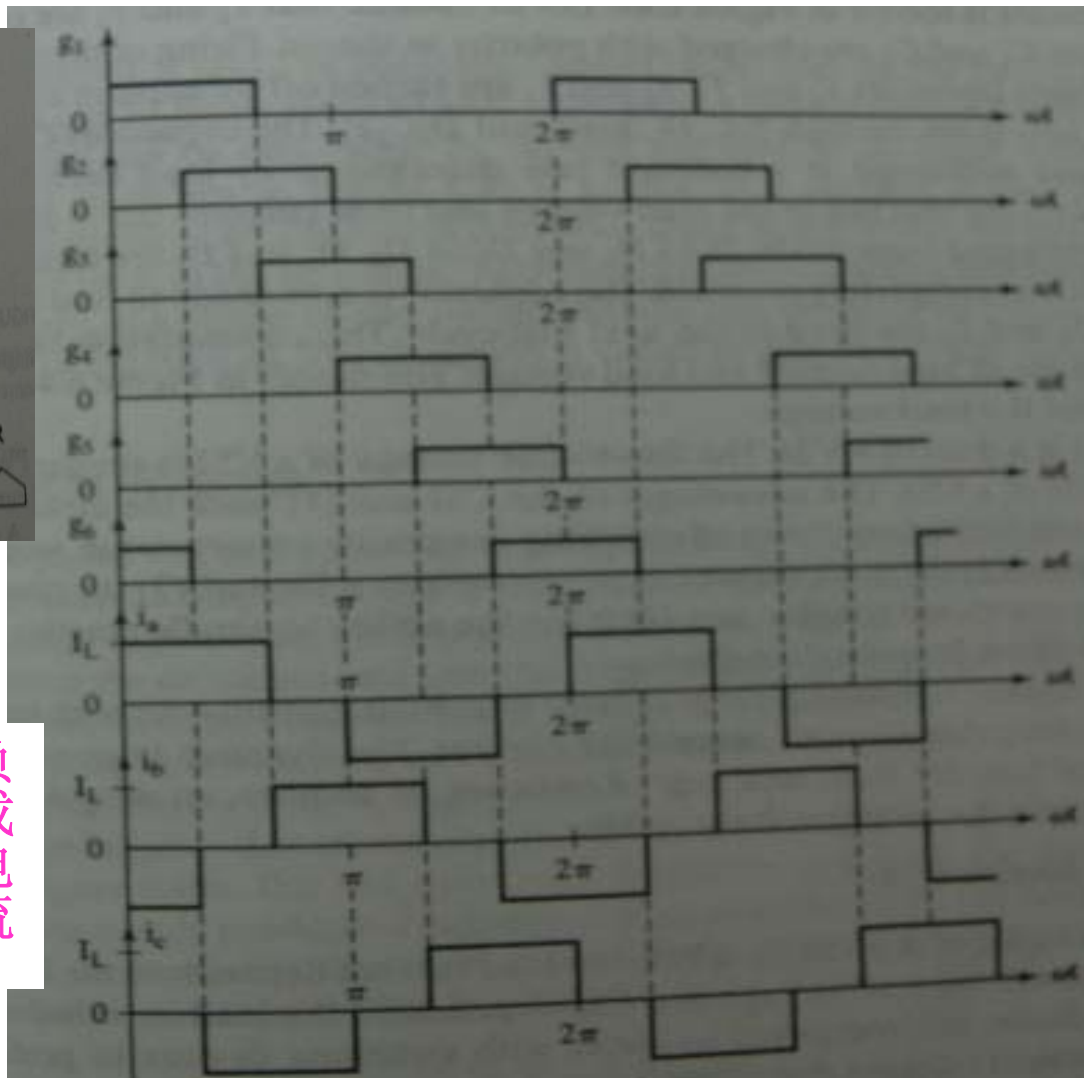
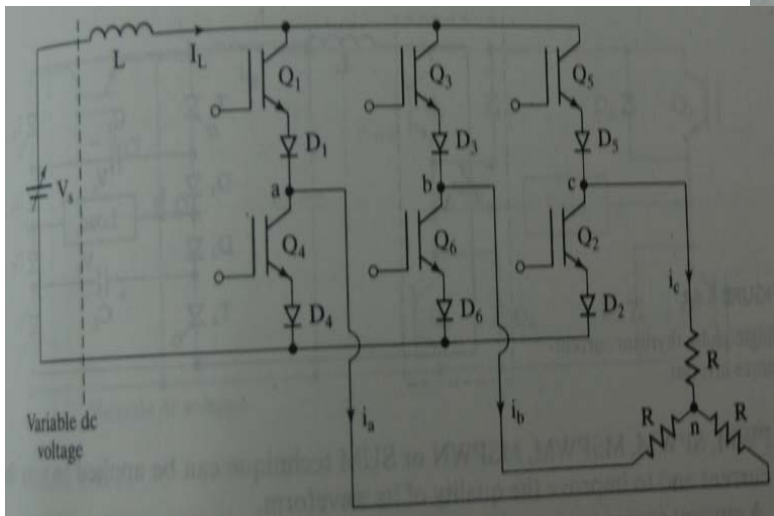


Voltage Source Inverter (VSI)

Current Source Inverter (CSI)

# 2.2 SPWM逆变及其控制方法

- 电流源型逆变器（三相）



负载电流

## 2.2 SPWM逆变及其控制方法

### 逆变器输出波形性能指标

- 谐波系数**HF** (Harmonic Factor)  $HF_n = \frac{V_n}{V_1}$
- 总谐波系数**THD** (Total Harmonic Distortion Factor)  $THD = \frac{1}{V_1} \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2}$
- 畸变系数**DF** (Distortion Factor), 考虑**LC**滤波  $DF = \frac{1}{V_1} \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{V_n}{n^2}\right)^2}$
- 其它指标  
最低次谐波、逆变效率、单位重量（体积）输出功率、可靠性指标、直流电流交流分量及脉动频率、电磁干扰**EMI**、电磁兼容**EMC**等

## 2.2 SPWM逆变及其控制方法

- 软开关技术简介

- 实际电力电子器件并非理想器件，在其导通过程以及开通与关断过程中均有损耗，损耗一方面使变换效率降低，更重要的是带来发热问题，当管芯温度大于**150°**之后，器件性能迅速变差并可能损坏。
- 导通过程中的损耗一般决定于器件的通态压降，主要由器件特性决定，用户难以减小
- 开通与关断过程中的损耗可以考虑采用软开关技术大幅度降低
- 目前，软开关技术主要应用在低压变换电路



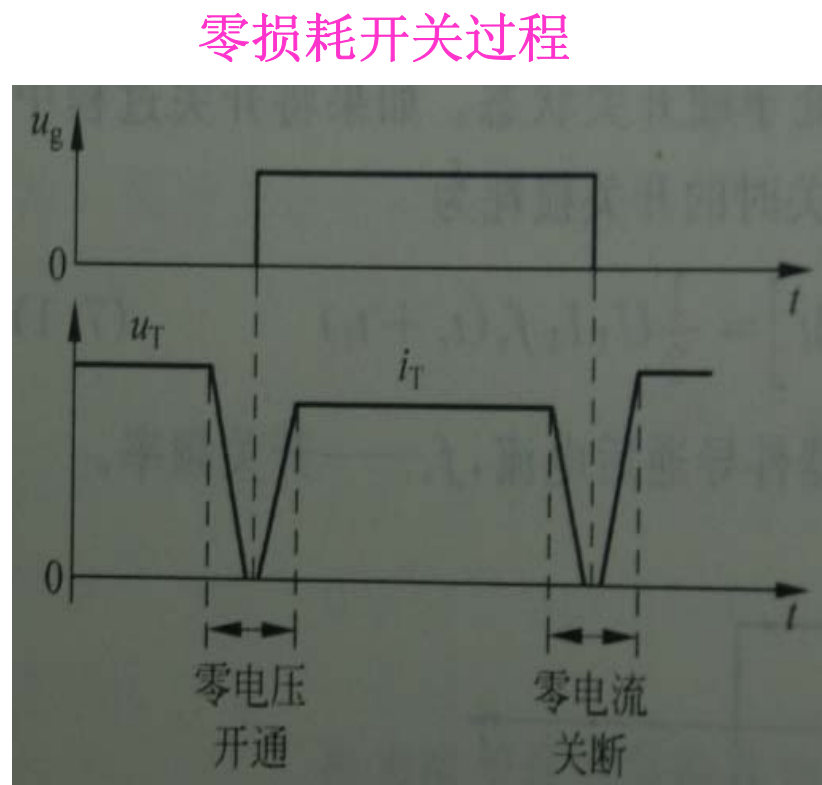
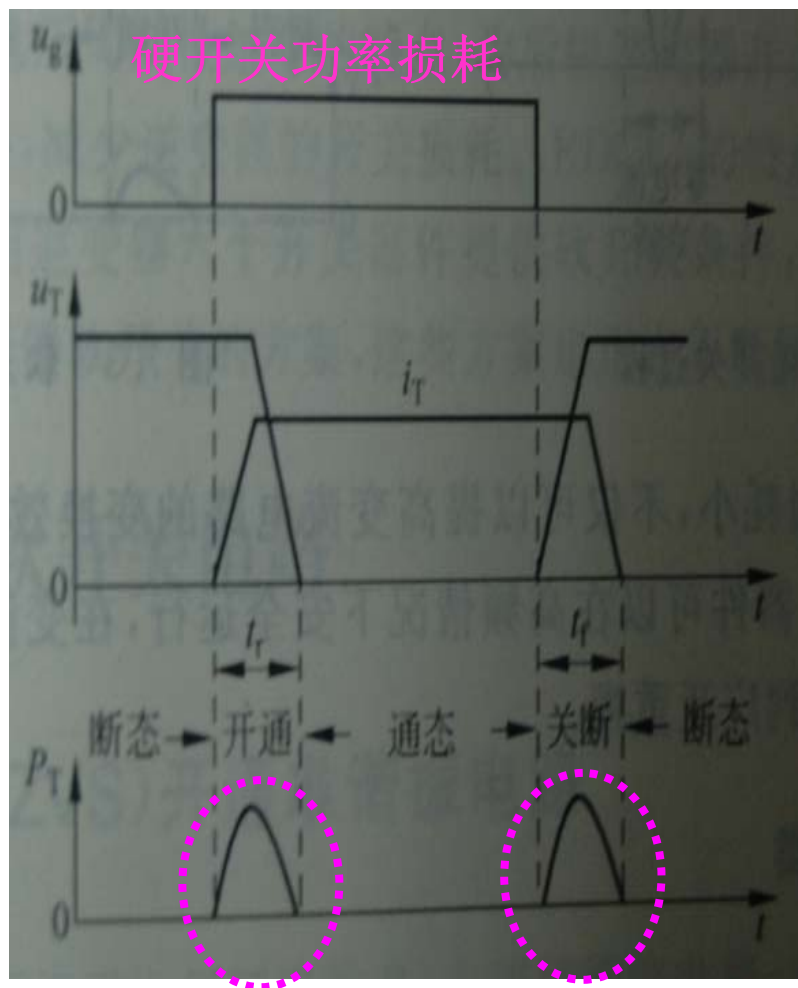
## 2.2 SPWM逆变及其控制方法

- 软开关技术简介
- 所谓软开关技术就是让电力电子器件在其端电压为**0**时开通，流过其电流为**0**时关断。与之对应的称为硬开关。
- 常规变换电路中不能满足软开关条件，故需要另外增加辅助电路，一般采用**LC**振荡实现。

## 2.2 SPWM逆变及其控制方法

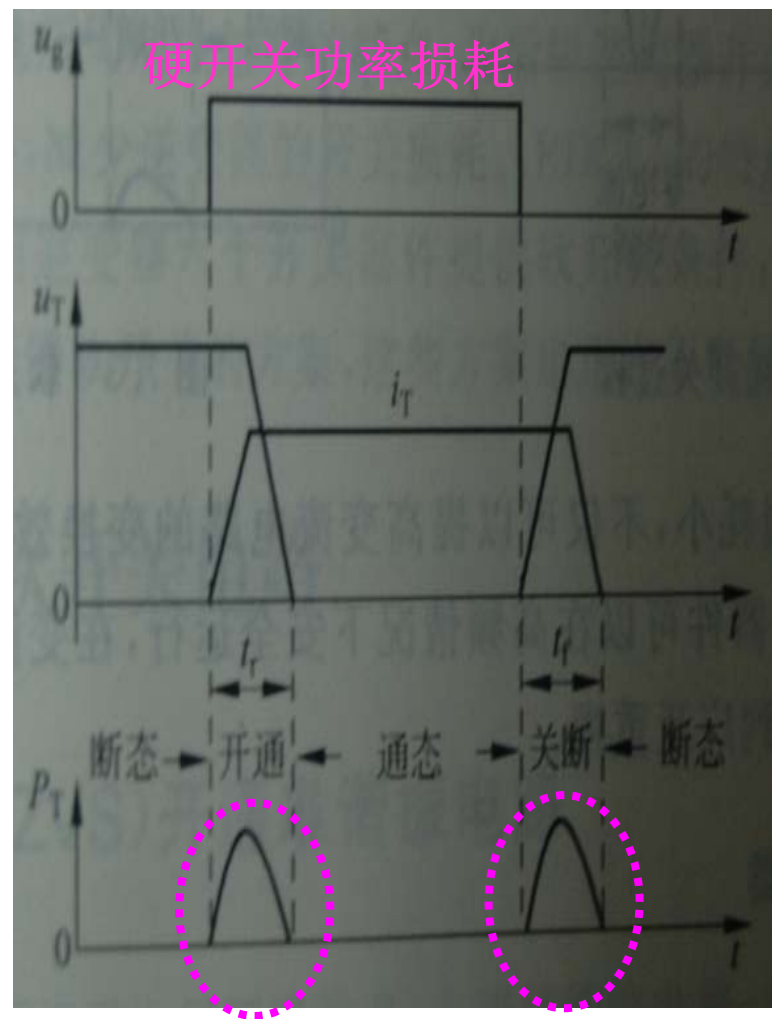
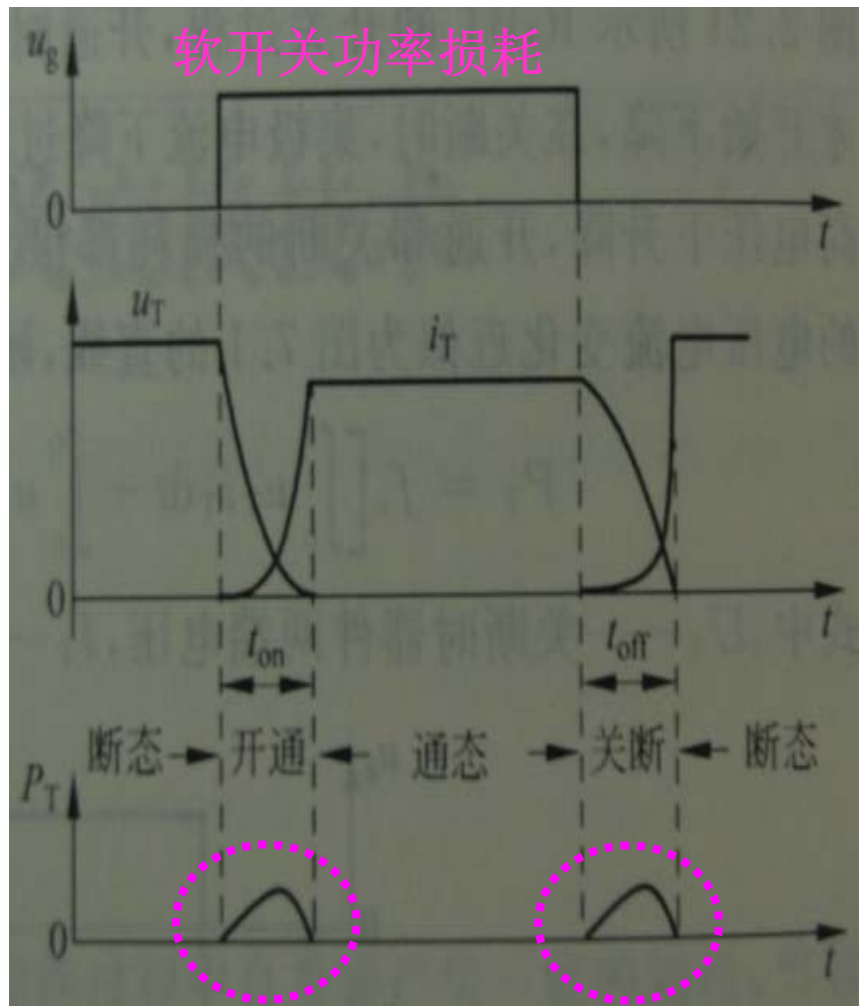
- 软开关技术简介

器件功率损耗=器件端电压×流过器件的电流



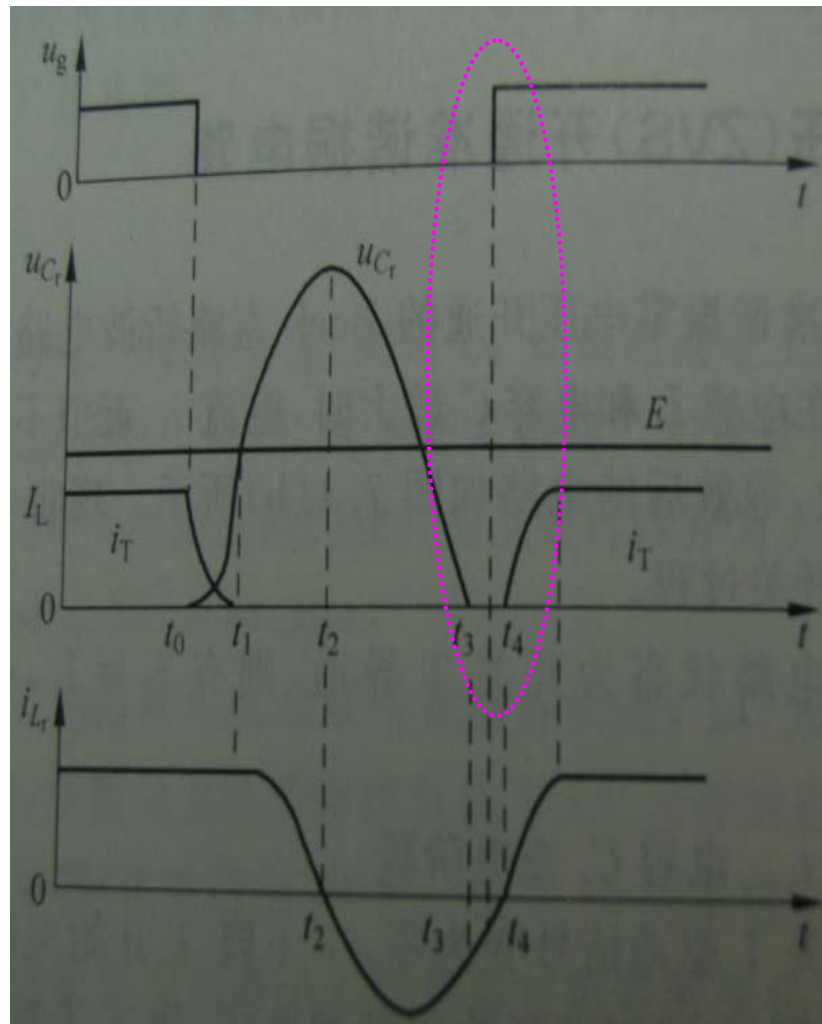
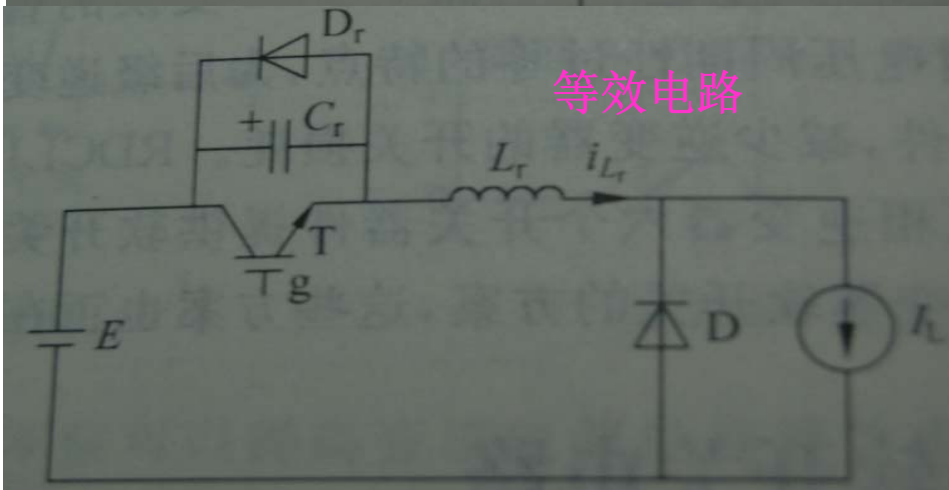
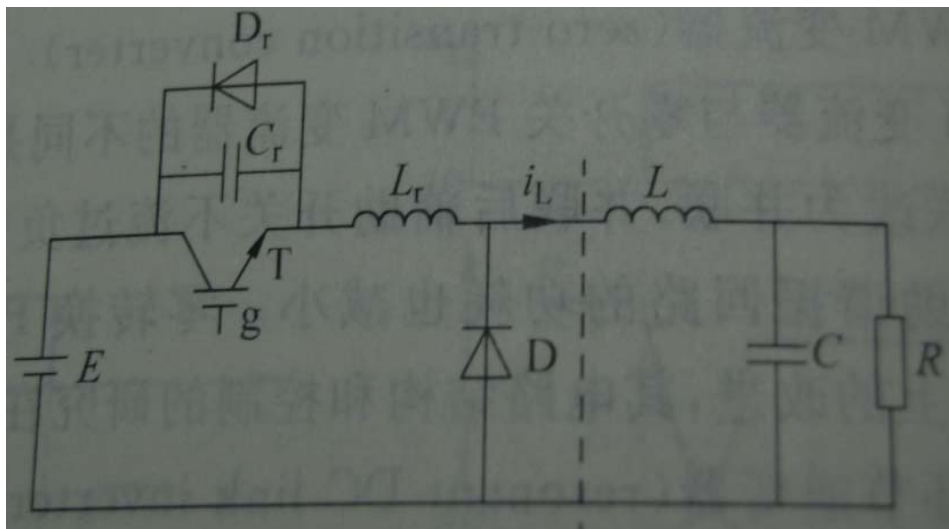
## 2.2 SPWM逆变及其控制方法

- 软开关技术简介



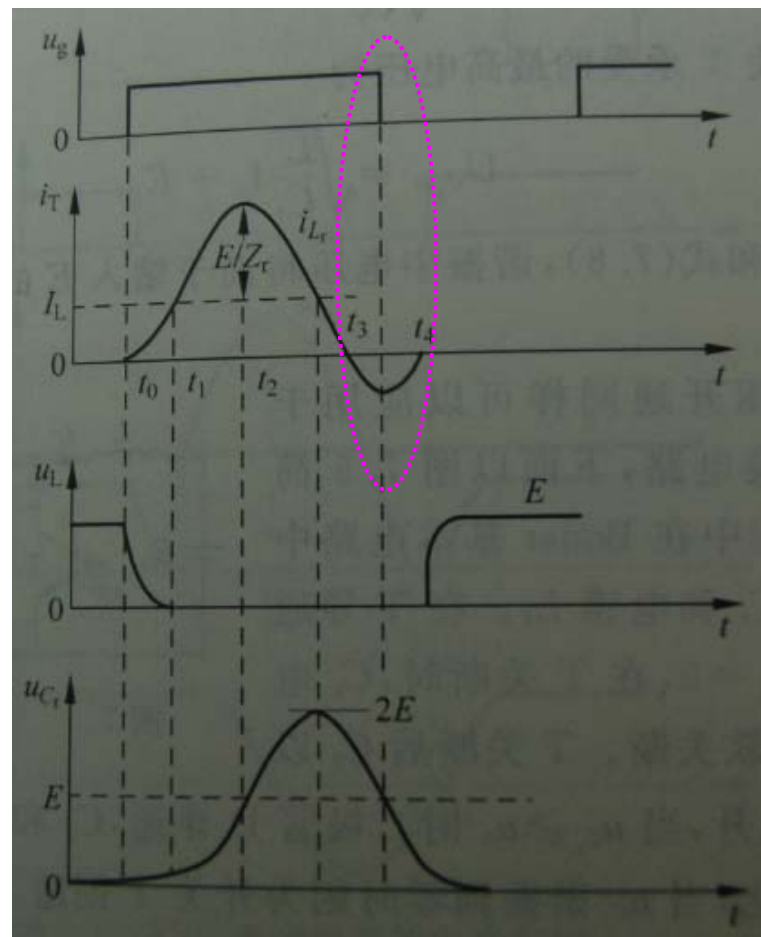
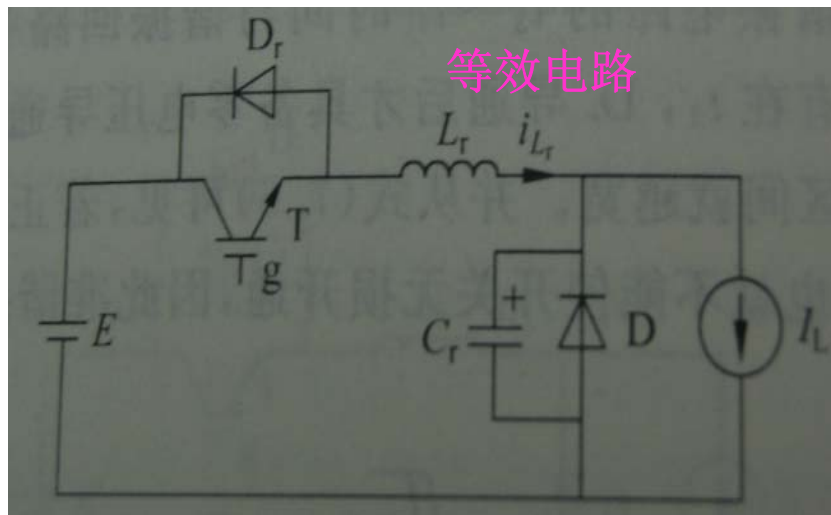
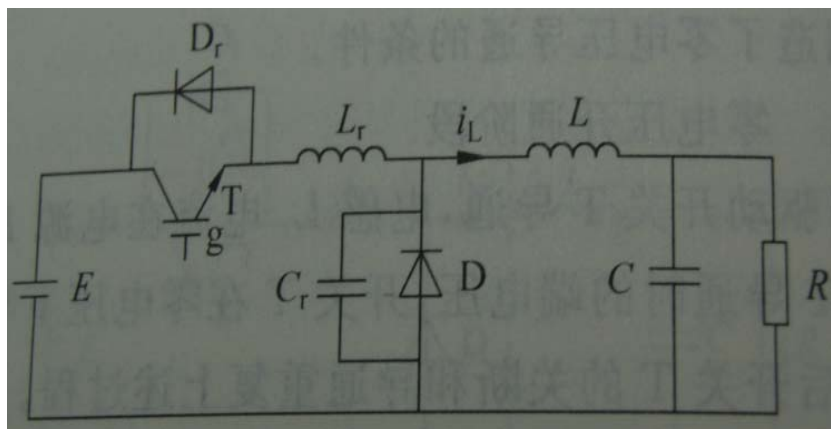
## 2.2 SPWM逆变及其控制方法

- 软开关技术简介--零电压开通准谐振电路ZVS



## 2.2 SPWM逆变及其控制方法

- 软开关技术简介--零电流关断准谐振电路ZCS



# 2.1和2.2 小结

- **2.1 SPWM基本原理**

简述通过电力电子器件开通和关断实现电能**DC**和**AC**之间相互转换的思路

- **2.2 SPWM逆变及其控制方法**

- 调制法（自然采样、规则采用）
- 计算法（等面积、特定谐波消除、智能优化）
- 谐波分析
- 提高直流电压利用率方法（梯形调制、**3**次谐波注入）
- **PWM**跟踪控制（滞环比较、三角形比较）
- 矢量控制
- 多重化结构
- 电流源型逆变器简介
- 软开关技术简介