

# 第二十一讲

## PWM 跟踪技术

教师：孔祥新

地点：JA202

曲阜师范大学 电气信息与自动化学院



# PWM 控制技术· 引言

- **PWM (Pulse Width Modulation)** 控制就是**脉宽调制技术**：即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（含形状和幅值）。
- 第 3、4 章已涉及到 **PWM** 控制，第 3 章**直流斩波电路** 采用的就 **PWM** 技术；第 4 章的 4.1 **斩控式调压电路** 和 4.4 **矩阵式变频电路** 都涉及到了。

# PWM 控制技术· 引言

- 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。现在使用的各种逆变电路都采用了 PWM 技术，因此，本章和第 5 章（逆变电路）相结合，才能使我们对逆变电路有完整地认识。

# 21.1 PWM 控制的基本思想

## 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



窄脉冲的面积

效果基本相同



环节的输出响应波形基本相同

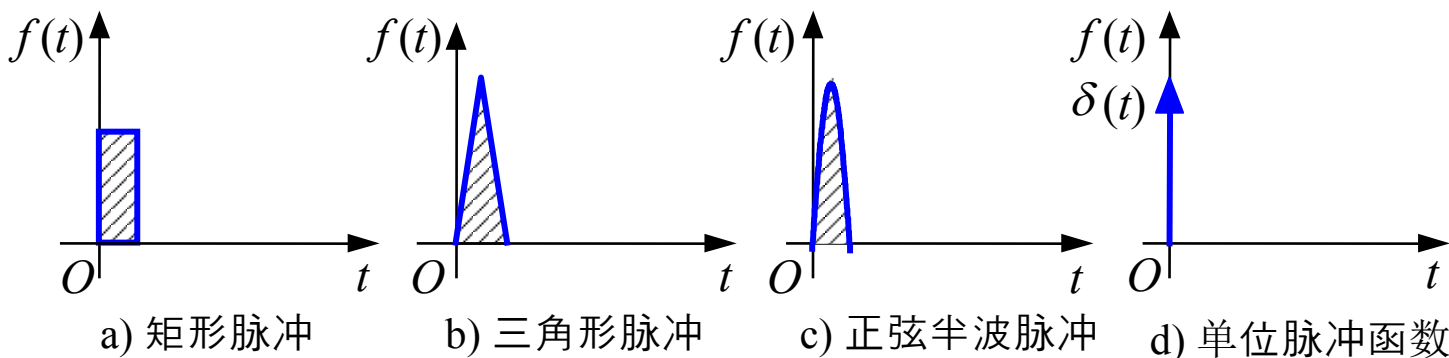


图 6-1 形状不同而冲量相同的各种窄脉冲

# 21.1 PWM 控制的基本思想

## 具体的实例说明 “面积等效原理”

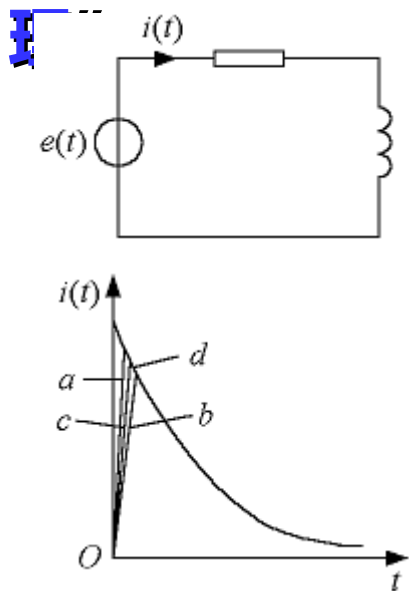
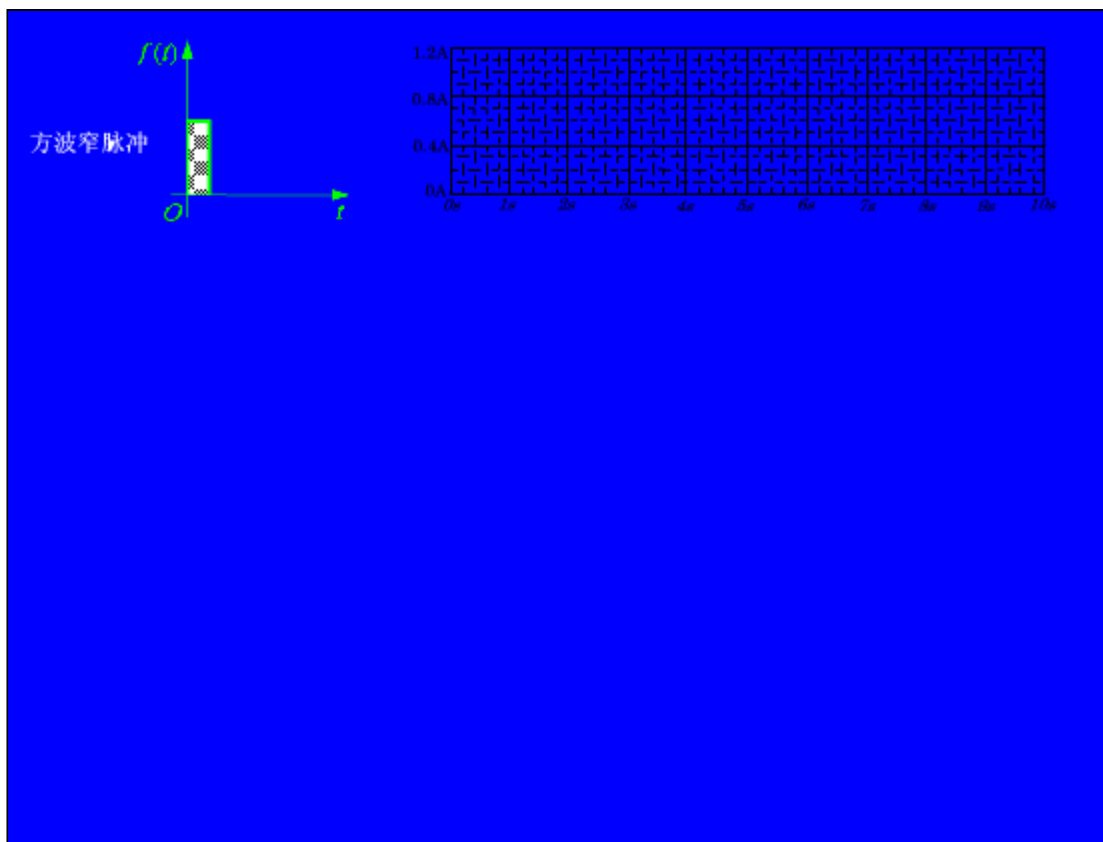


图 6-2 冲量相等的各种窄脉冲的响应波形

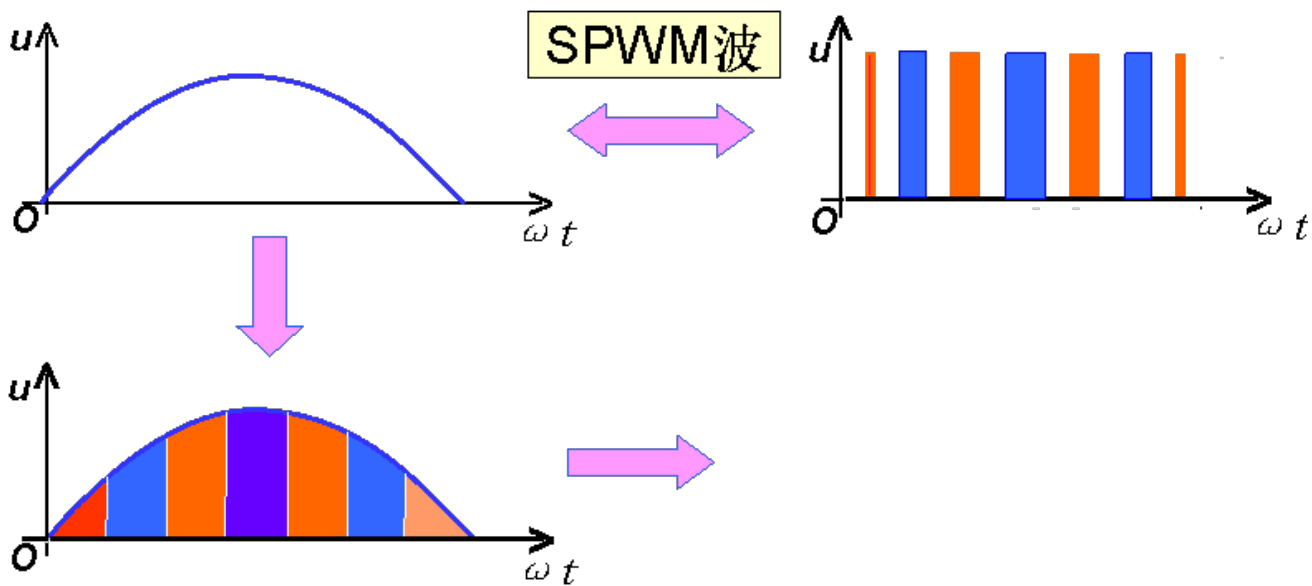
$u(t)$  — 电压窄脉冲，是电路的输入。

$i(t)$  — 输出电流，是电路的响应。



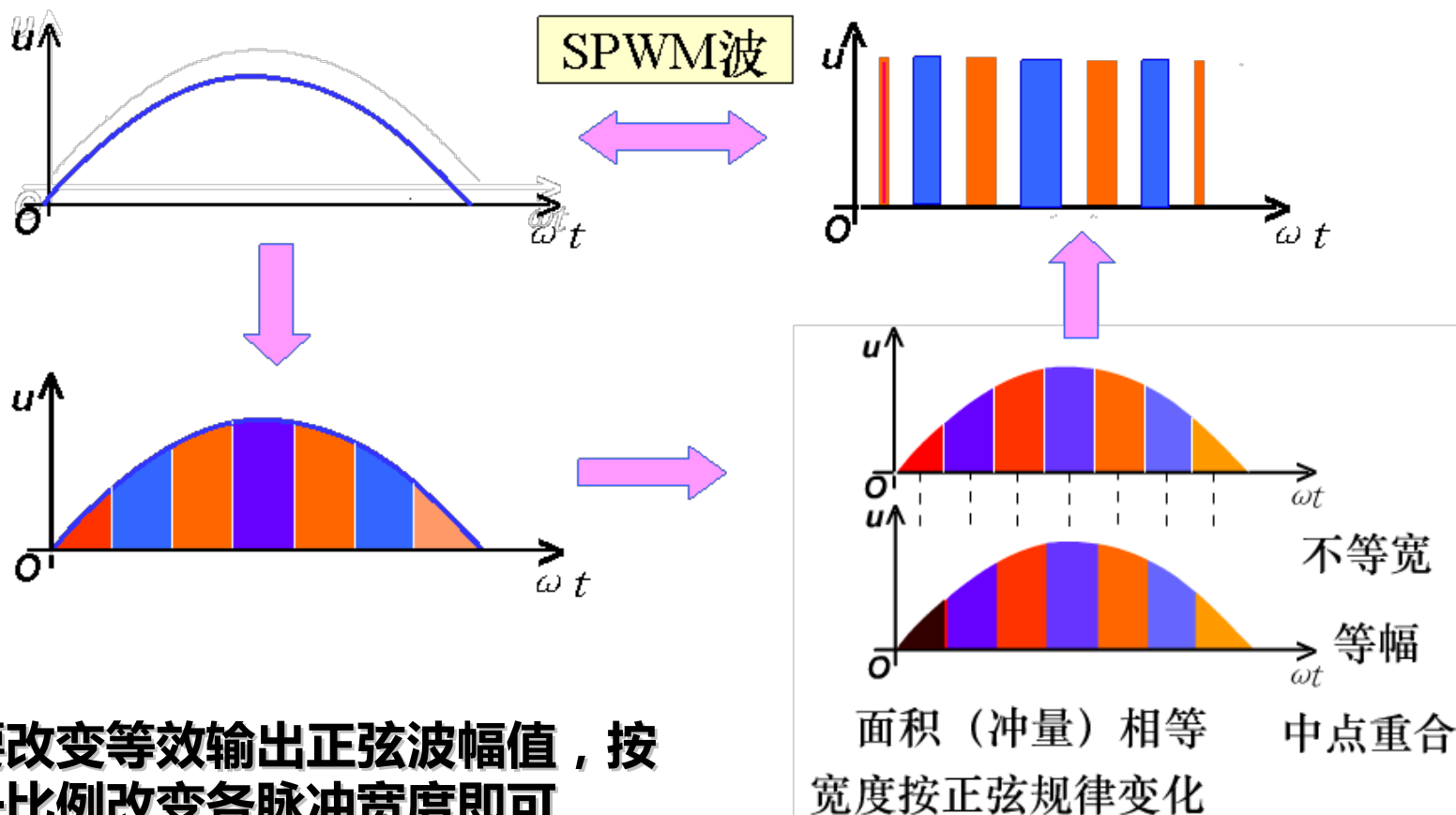
# 21.1 PWM 控制的基本思想

如何用一个系列等幅不等宽的脉冲来代替一个正弦半波



# 21.1 PWM 控制的基本思想

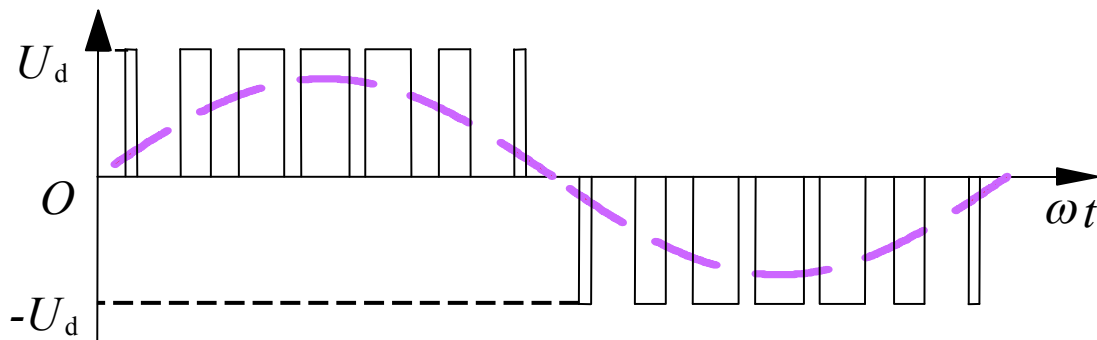
如何用一个系列等幅不等宽的脉冲来代替一个正弦半波



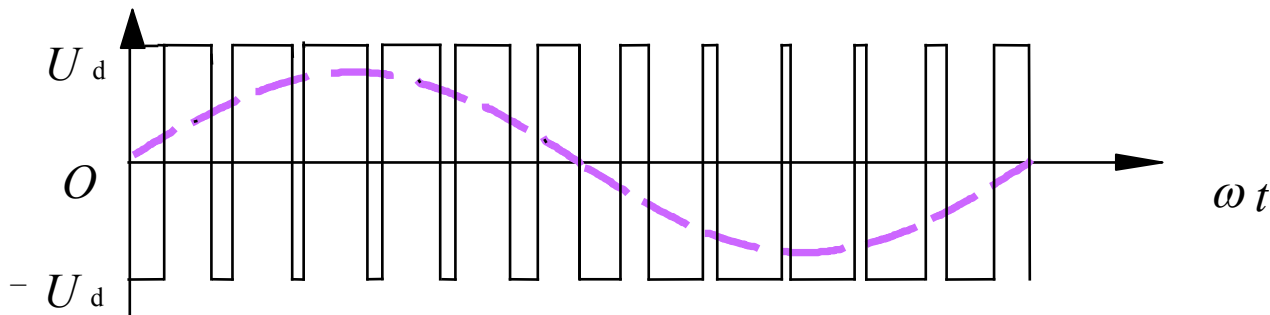
若要改变等效输出正弦波幅值，按同一比例改变各脉冲宽度即可。

# 21.1 PWM 控制的基本思想

- 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。





# 21.1 PWM 控制的基本思想

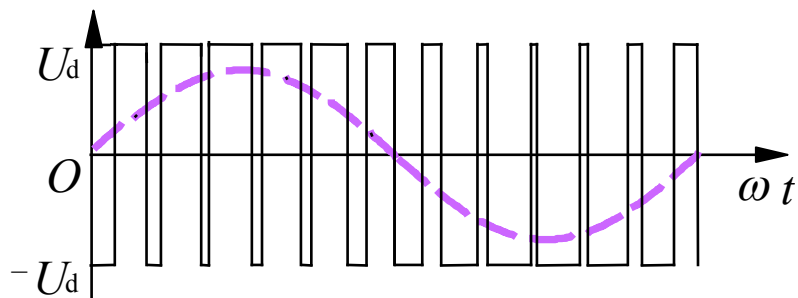
## ⊕ 等幅 PWM 波

➤ 输入电源是恒定直流

第 3 章的直流斩波电路

6.2 节的 PWM 逆变电路

6.4 节的 PWM 整流电路

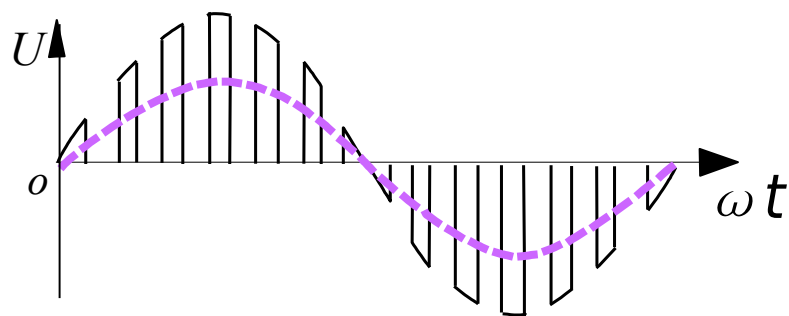


## ⊕ 不等幅 PWM 波

➤ 输入电源是交流或不是恒定的直流

4.1 节的斩控式交流调压电路

4.4 节的矩阵式变频电路



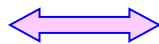
# 21.1 PWM 控制的基本思想

## 2) PWM 电流波

电流型逆变电路进行 PWM 控制，得到的就是 PWM 电流

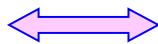
### 波 PWM 波可等效的各种波形

➤ 直流斩波电路



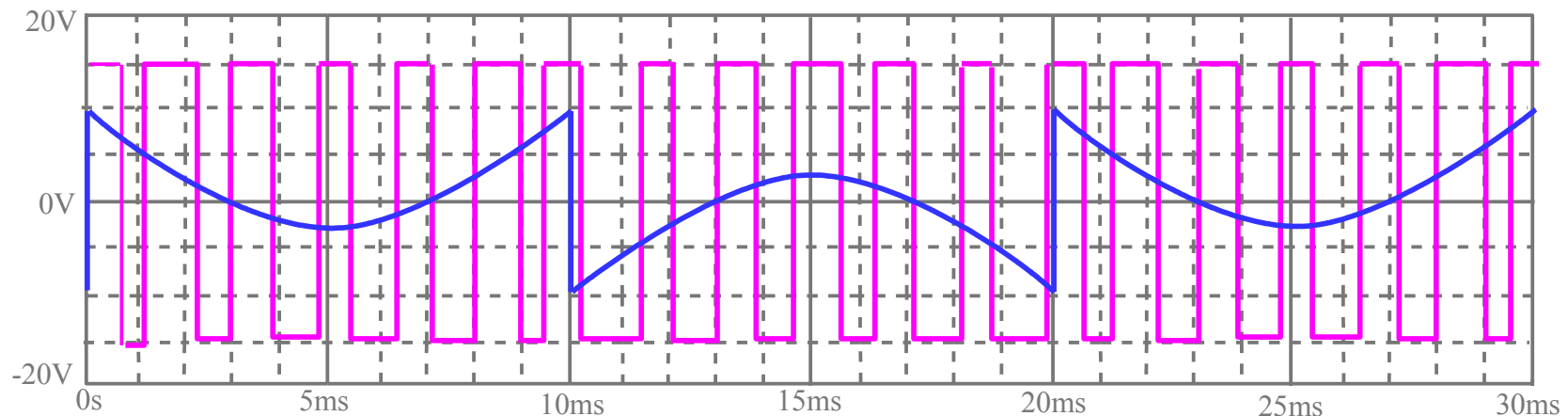
直流波形

➤ SPWM 波



正弦波形

➤ 等效成其他所需波形，如：



● 所需波形

● 等效的 PWM 波



## 21.2 PWM 逆变电路及其控制方法

---

- 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。
- 本节内容构成了本章的主体。
- 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。



# 21.3 PWM 逆变电路及其控制方法

---

21.3.1 算法和调制法

21.3.2 异步调制和同步调制

21.3.3 规制采样法

21.3.4 PWM 逆变电路谐波分析

21.3.5 提高直流电压利用和减少开关次数

21.3.6 PWM 逆变电路的多重化

## 21.3.1 计算法和调制法

### 1) 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。

# 21.3.1 计算法和调制法

## 2) 调制法

结合 IGBT 单相桥式电压型逆变电路对调制法进行说明

- 工作时  $V_1$  和  $V_2$  通断互补， $V_3$  和  $V_4$  通断也互补。
- 以  $u_o$  正半周为例， $V_1$  通， $V_2$  断， $V_3$  和  $V_4$  交替通断。
- 负载电流比电压滞后，在电压正半周，电流有一段区间为正，一段区间为负。
- 负载电流为正的区间， $V_1$  和  $V_4$  导通时， $u_o$  等于  $U_d$ 。

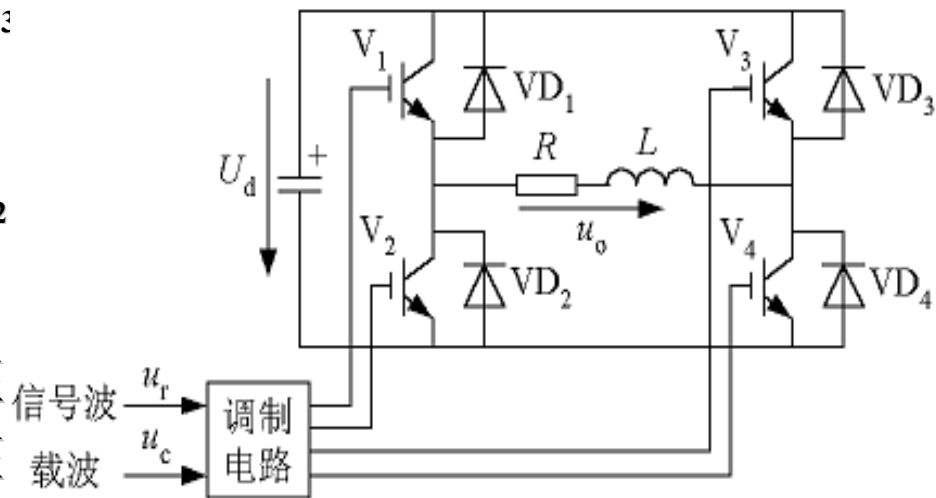


图 6-4 单相桥式 PWM 逆变电路

# 21.3.1 计算法和调制法

## 2) 调制

- 法 关断时，负载电流通过  $V_1$  和  $VD_3$  续流， $u_o=0$
- 负载电流为负的区域， $V_1$  和  $V_4$  仍导通， $i_o$  为负，实际上  $i_o$  从  $VD_1$  和  $VD_4$  流过，仍有  $u_o=U_d$ 。
- $V_4$  关断  $V_3$  开通后， $i_o$  从  $V_3$  和  $VD_1$  续流， $u_o=0$ 。
- $u_o$  总可得到  $U_d$  和零两种电平。
- $u_o$  负半周，让  $V_2$  保持通， $V_1$  保持断， $V_3$  和  $V_4$  交替通断， $u_o$  可得  $-U_d$  和零两种电平。

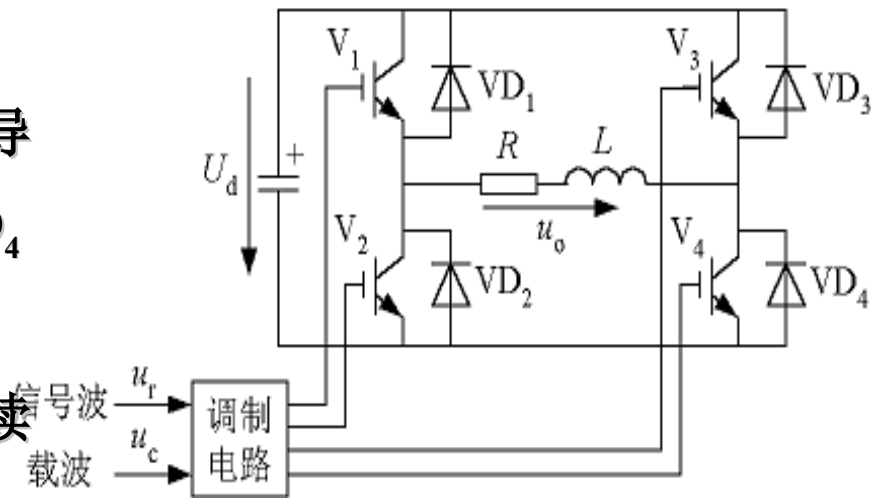


图 6-4 单相桥式 PWM 逆变电路

# 21.3.1 计算法和调制法

3) 单极性 PWM 控制方式 (单相桥)  
在  $u_r$  和  $u_c$  的交点时刻控制 IGBT 的通断。

- ⊕  $u_r$  正半周,  $V_1$  保持通,  $V_2$  保持断。
- ⊕ 当  $u_r > u_c$  时使  $V_4$  通,  $V_3$  断,  $u_o = U_d$ 。
- ⊕ 当  $u_r < u_c$  时使  $V_4$  断,  $V_3$  通,  $u_o = 0$ 。
- ⊕  $u_r$  负半周, 请同学们自己分析。

表示  $u_o$  的基波分量

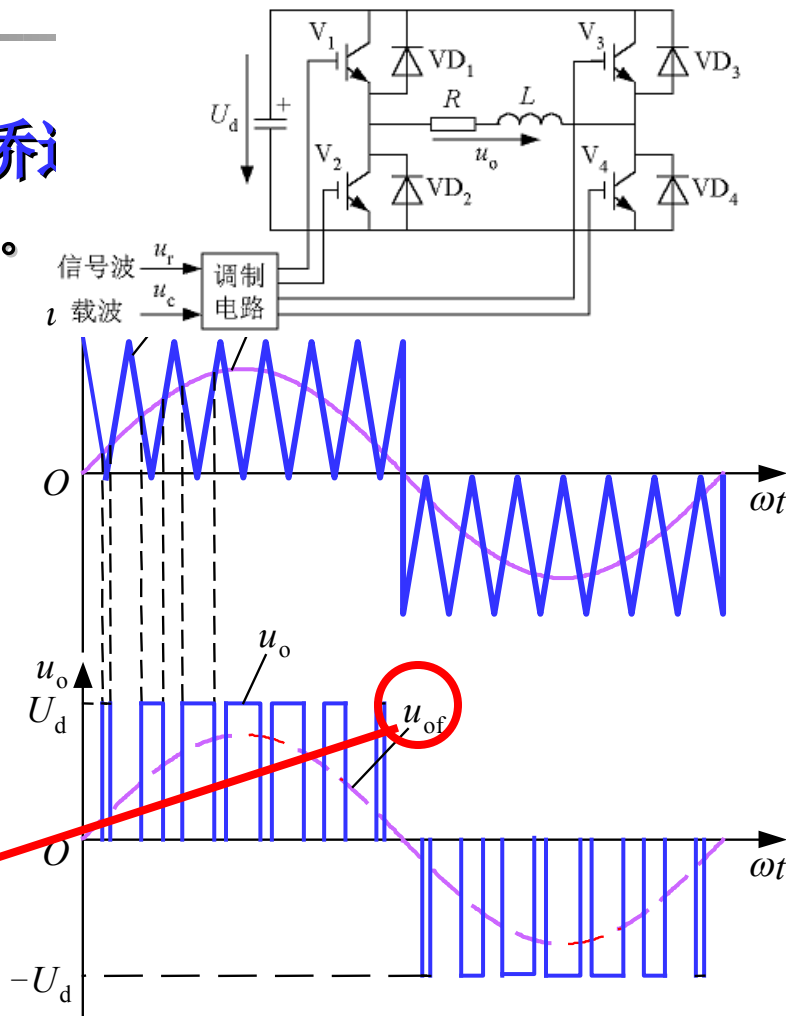


图 6-5 单极性 PWM 控制方式波形



# 21.3.1 计算法和调制法

## 3) 双极性 PWM 控制方式 (单相桥逆变)

在  $u_r$  和  $u_c$  的交点时刻控制 IGBT 的通断。

在  $u_r$  的半个周期内，三角波载波有正有负，所得 PWM 波也有正有负，其幅值只有  $\pm U_d$  两种电平。

同样在调制信号  $u_r$  和载波信号  $u_c$  的交点时刻控制器件的通断。

当  $u_r > u_c$  时，给  $V_1$  和  $V_4$  导通信号，给  $V_2$  和  $V_3$  关断信号。

如  $i_o > 0$ ， $V_1$  和  $V_4$  通，如  $i_o < 0$ ， $VD_1$  和  $VD_4$  通， $u_o = U_d$ 。

当  $u_r < u_c$  时，给  $V_2$  和  $V_3$  导通信号，给  $V_1$  和  $V_4$  关断信号。

如  $i_o < 0$ ， $V_2$  和  $V_3$  通，如  $i_o > 0$ ， $VD_2$  和  $VD_3$  通。

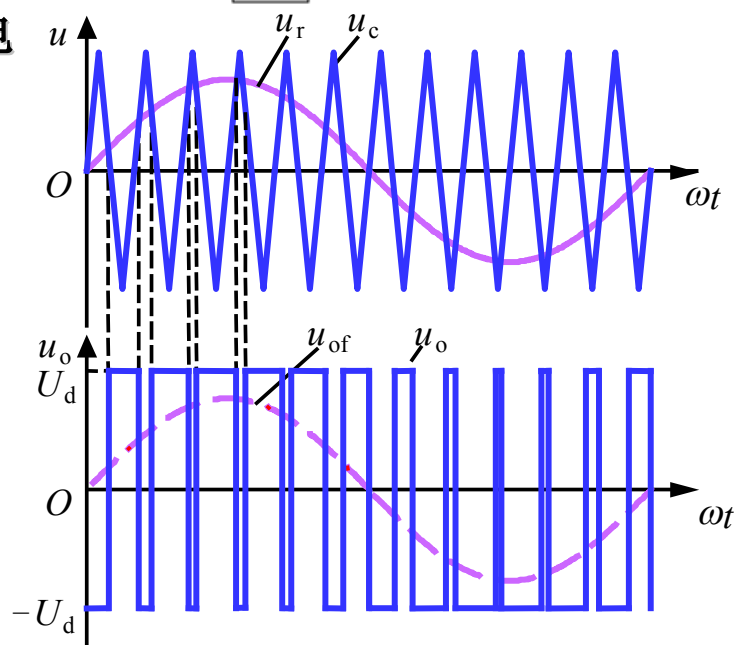
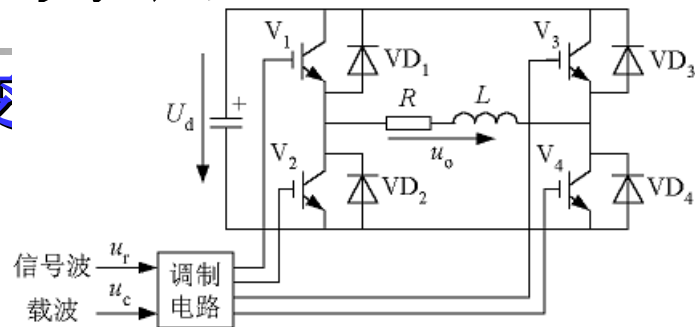


图 6-6 双极性 PWM 控制方式波形

# 21.3.1 算法和调制

## 法

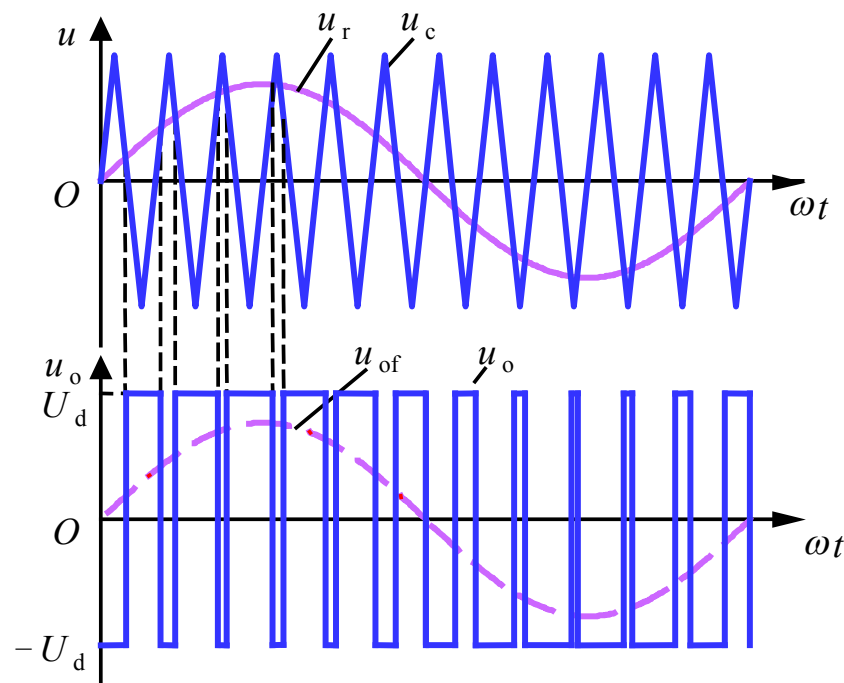
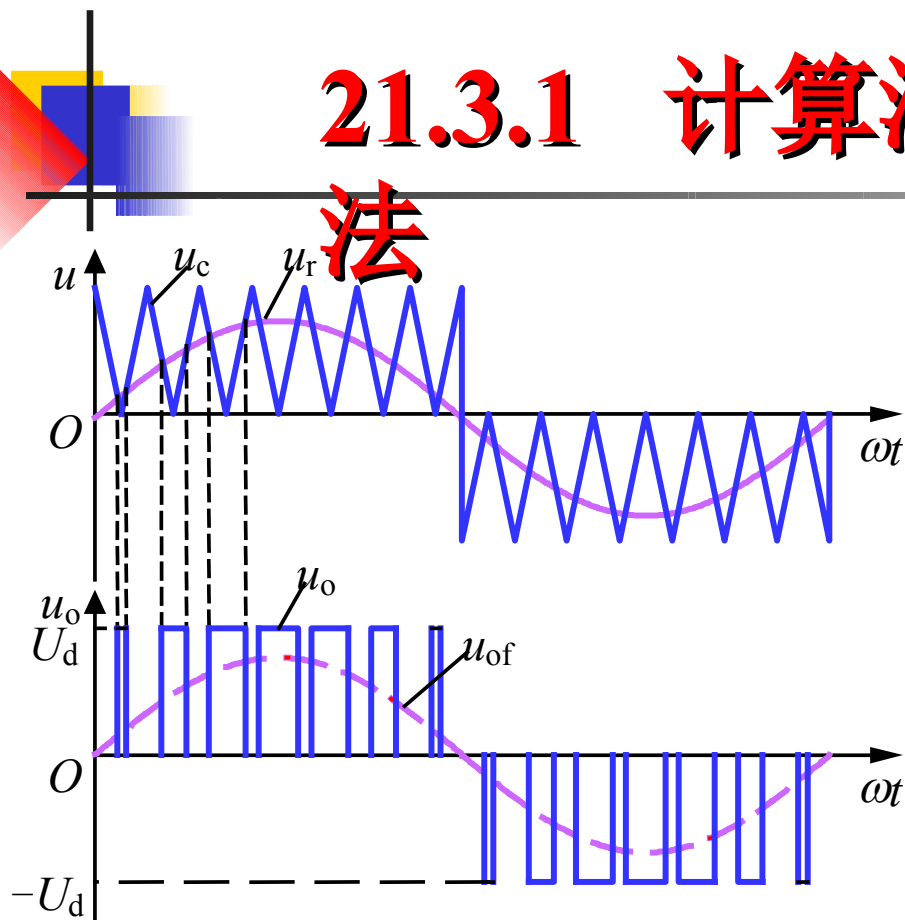


图 6-5 单极性 PWM 控制方式波形

图 6-5 双极性 PWM 控制方式波形

对照上述两图可以看出，单相桥式电路既可采取单极性调制，也可采用双极性调制，由于对开关器件通断控制的规律不同，它们的输出波形也有较大的差别。

# 21.3.1 计算法和调制法

## 4) 双极性 PWM 控制方式 (三相桥逆变)

- 三三相的 PWM 控制公用三角波载波  $u_c$
- 三三相的调制信号  $u_{rU}$ 、 $u_{rV}$  和  $u_{rW}$  依次相差  $120^\circ$

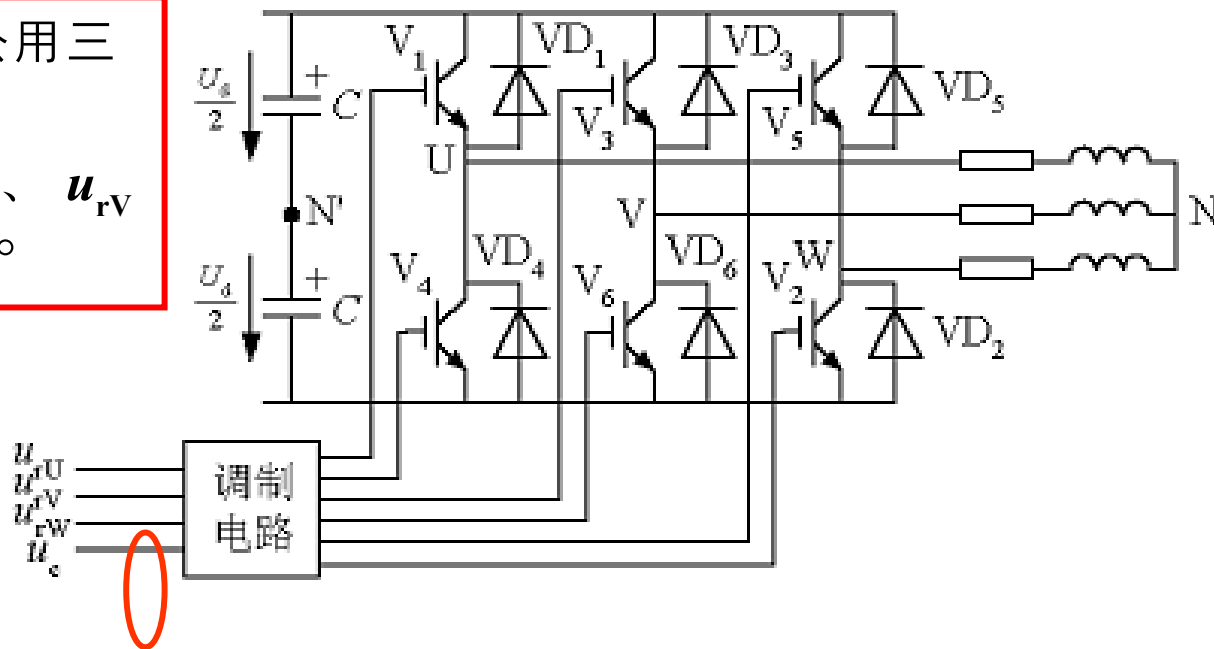


图 6-7 三相桥式 PWM 型逆变电路

# 21.3.1 计算法和调制法

下面以 U 相为例分析控制规律:

- ✦ 当  $u_{rU} > u_c$  时, 给  $V_1$  导通信号, 给  $V_4$  关断信号,  $u_{UN'} = U_d/2$ 。
- ✦ 当  $u_{rU} < u_c$  时, 给  $V_4$  导通信号, 给  $V_1$  关断信号,  $u_{UN'} = -U_d/2$ 。
- ✦ 当给  $V_1(V_4)$  加导通信号时, 可能是  $V_1(V_4)$  导通, 也可能是  $VD_1(VD_4)$  导通。
- ✦  $u_{UN'}$ 、 $u_{VN'}$  和  $u_{WN'}$  的 PWM 波形只有  $\pm U_d/2$  两种电平。
- ✦  $u_{UV}$  波形可由  $u_{UN'} - u_{VN'}$  得出, 当 1 和 6 通时,  $u_{UV} = U_d$ , 当 3 和 4 通时,  $u_{UV} = -U_d$ , 当 1 和 3 或 4 和 6 通时,  $u_{UV} = 0$ 。

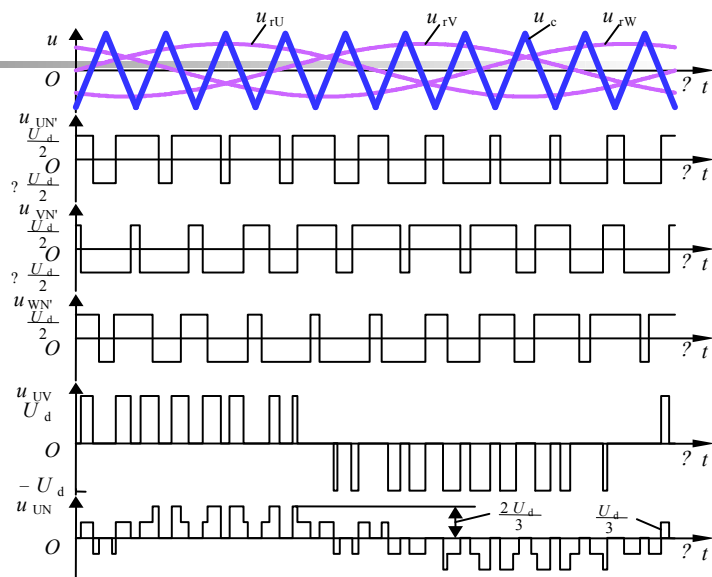


图 6-8 三相桥式 PWM 逆变电路波形

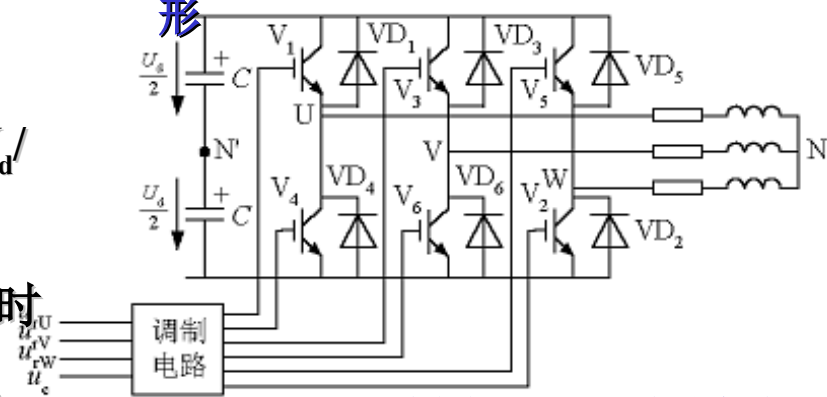


图 6-7 三相桥式 PWM 型逆变电

# 21.3.1 计算法和调制法

## 法

- 输出线电压 PWM 波由  $\pm U_d$  和 0 三种电平构成
- 负载相电压 PWM 波由  $(\pm 2/3)U_d$ 、 $(\pm 1/3)U_d$  和 0 共 5 种电平组成。
- 防直通的死区时间
  - 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。
  - 死区时间的长短主要由开关器件的关断时间决定。
  - 死区时间会给输出的 PWM 波带来影响，使其稍稍偏离正弦波。

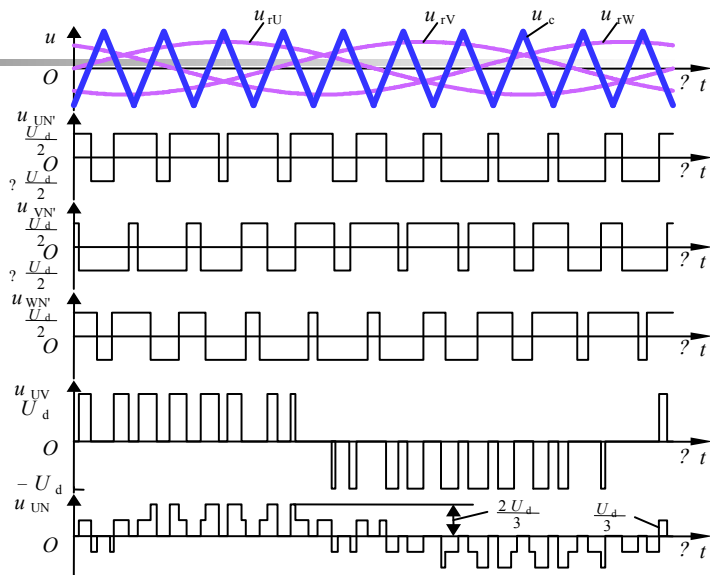


图 6-8 三相桥式 PWM 逆变电路波形

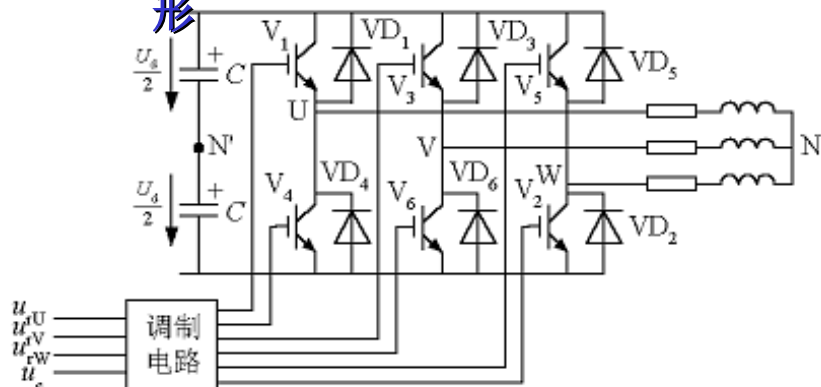


图 6-7 三相桥式 PWM 型逆变电路

# 21.3.1 算法和调制法

## 5) 特定谐波消去法

### (Selected Harmonic Elimination PWM—SHEPWM)

- ⊕ 这是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。

### (Selected Harmonic Elimination PWM—SHEPWM)

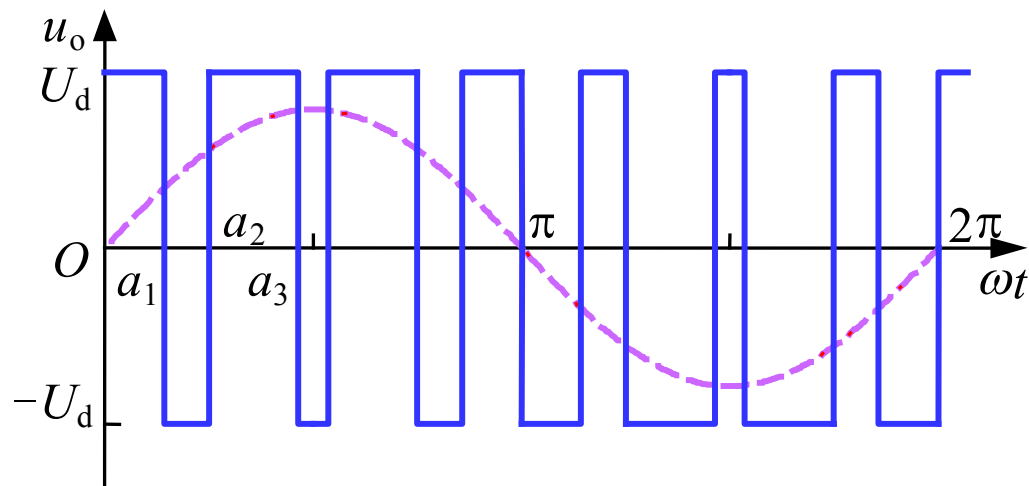


图 6-9 特定谐波消去法的输出 PWM 波形

## 21.3.1 计算法和调制

### 法

- 首先，为消除偶次谐波，使波形正负两半周期镜对称，即

$$u(\omega t) = -u(\omega t + \pi) \quad (6-1)$$

- 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

$$u(\omega t) = u(\pi - \omega t) \quad (6-2)$$

- 同时满足式 (6-1)、(6-2) 的波形称为四分之一周期对称波形，用傅里叶级数表示为

$$u(\omega t) = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} a_n \sin n\omega t \quad (6-3)$$

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

## 6.2.1 计算法和调制法

图 6-9，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  $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$  和  $\alpha_3$ 。

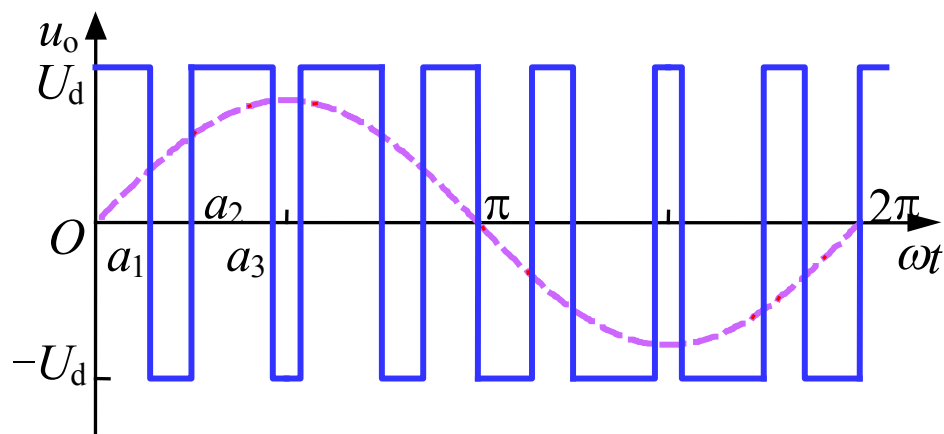


图 6-9 特定谐波消去法的输出 PWM 波形



## 21.3.1 计算法和调制法

### ✦ 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：

$$\left. \begin{aligned} a_1 &= \frac{2U_d}{\pi} (1 - 2 \cos \alpha_1 + 2 \cos \alpha_2 - 2 \cos \alpha_3) \\ a_5 &= \frac{2U_d}{5\pi} (1 - 2 \cos 5\alpha_1 + 2 \cos 5\alpha_2 - 2 \cos 5\alpha_3) = 0 \\ a_7 &= \frac{2U_d}{7\pi} (1 - 2 \cos 7\alpha_1 + 2 \cos 7\alpha_2 - 2 \cos 7\alpha_3) = 0 \end{aligned} \right\} (6-5)$$

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

## 21.3.1 算法和调制法

- ✦ 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。
- ✦ 除算法和调制法外，还有跟踪控制方法，在 6.3 节介绍。