

# 第7章 PWM控制技术

7.1 PWM控制的基本原理

7.2 PWM逆变电路及其控制方法

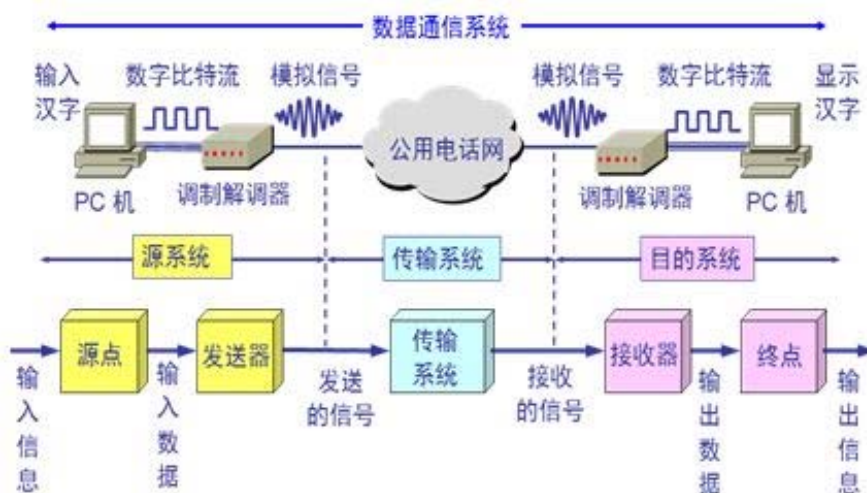
7.3 PWM跟踪控制技术

7.4 PWM整流电路及其控制方法

本章小结

- 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5、6章已涉及到PWM控制，第5章直流斩波电路采用的就PWM技术；第6章的6.1节斩控式调压电路和6.4节矩阵式变频电路都涉及到了。

- 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。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

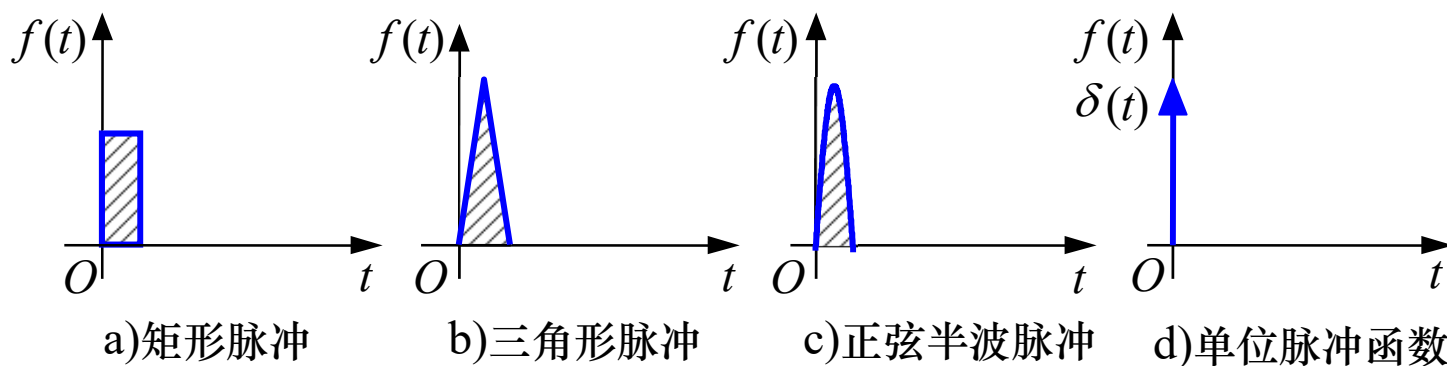


图7-1 形状不同而冲量相同的各种窄脉冲

### ● 用PWM波代替正弦半波

- ✦ 将正弦半波看成是由 $N$ 个彼此相连的脉冲宽度为 $\pi/N$ ，但幅值顶部是曲线且大小按正弦规律变化的脉冲序列组成的。
- ✦ 把上述脉冲序列利用相同数量的等幅而不等宽的矩形脉冲代替，使矩形脉冲的中点和相应正弦波部分的中点重合，且使矩形脉冲和相应的正弦波部分面积（冲量）相等，这就是PWM波形。

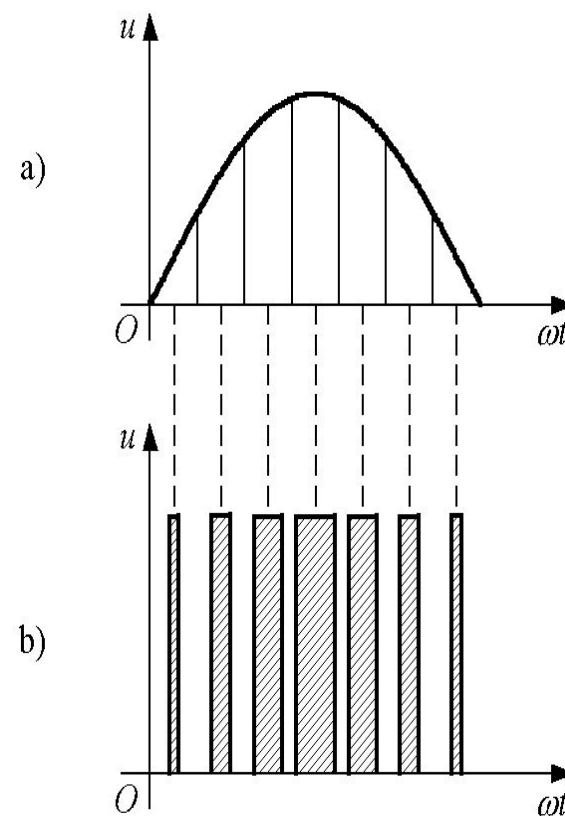


图7-3 用PWM波代替正弦半波

### ● 用PWM波代替正弦半波

- ✦ 脉冲的宽度按正弦规律变化而和正弦波等效的PWM波形，也称SPWM (Sinusoidal PWM) 波形。
- ✦ 波形可分为等幅PWM波和不等幅PWM波两种，由直流电源产生的PWM波通常是等幅PWM波。

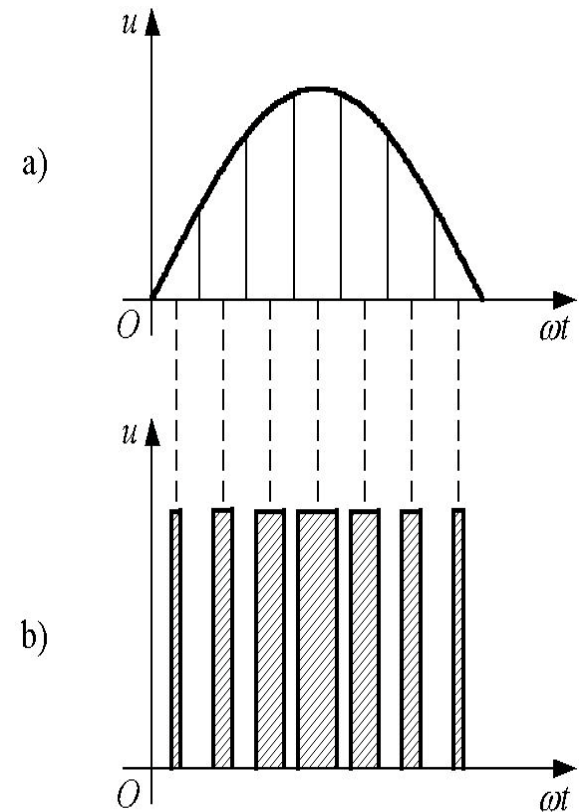
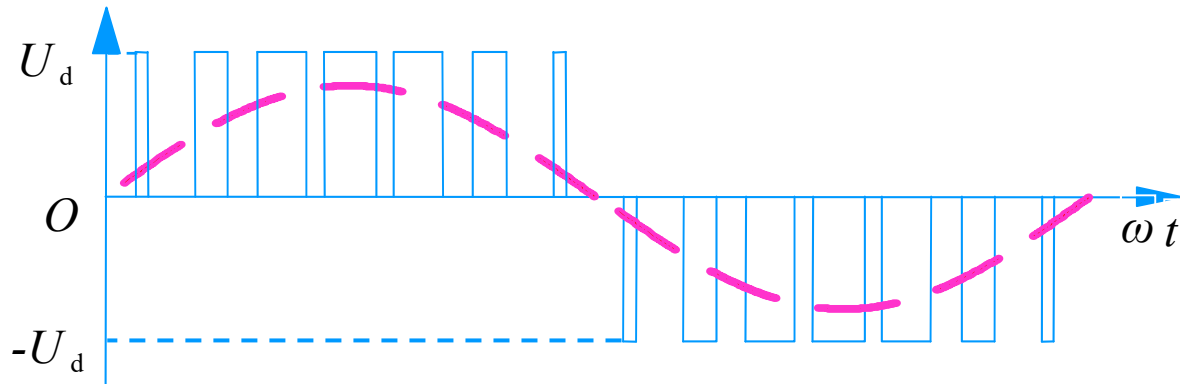


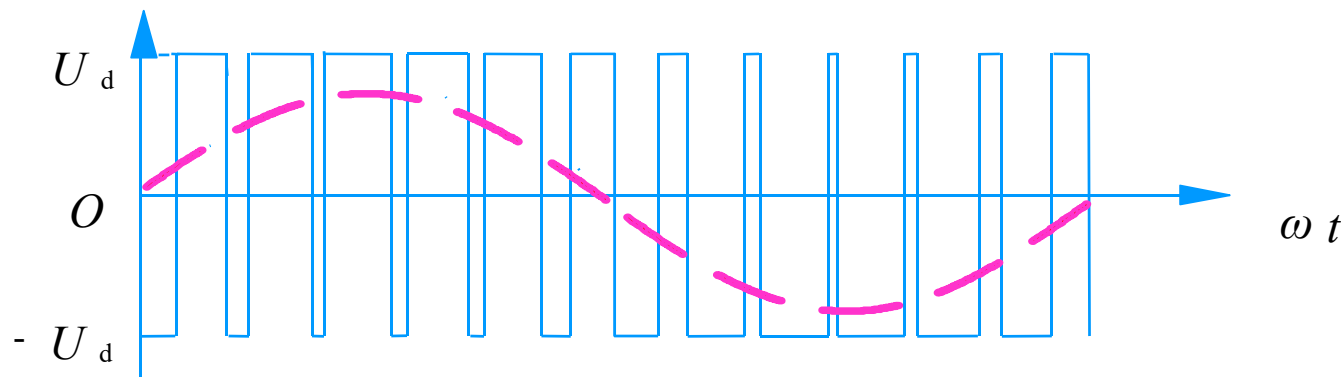
图7-3 用PWM波代替正弦半波

## 7.1 PWM控制的基本原理

- 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：

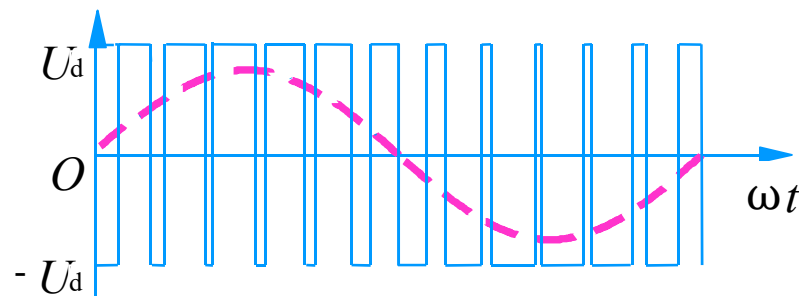


- 根据面积等效原理，正弦波还可等效为下图中的PWM波，而且这种方式在实际应用中更为广泛。



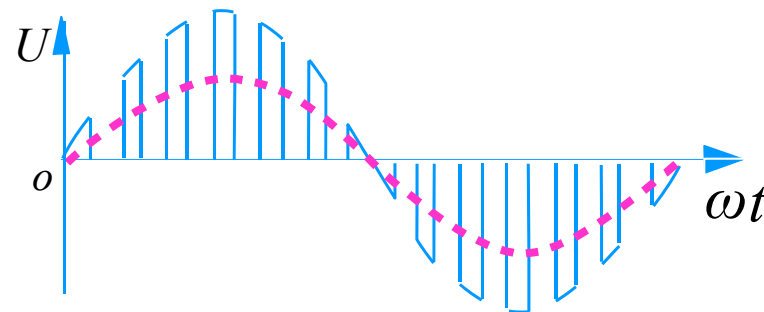
### ◆等幅PWM波

- 输入电源是恒定直流
  - 第5章的直流斩波电路
  - 4.2节的PWM逆变电路
  - 7.4节的PWM整流电路



### ◆不等幅PWM波

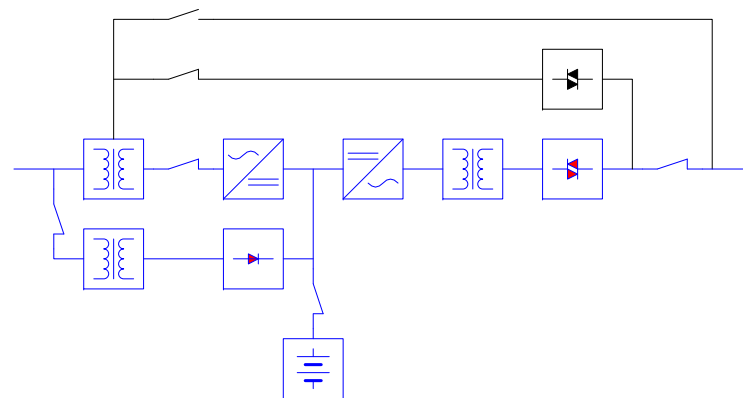
- 输入电源是交流或不是恒定的直流
  - 6.1节的斩控式交流调压电路
  - 6.4节的矩阵式变频电路



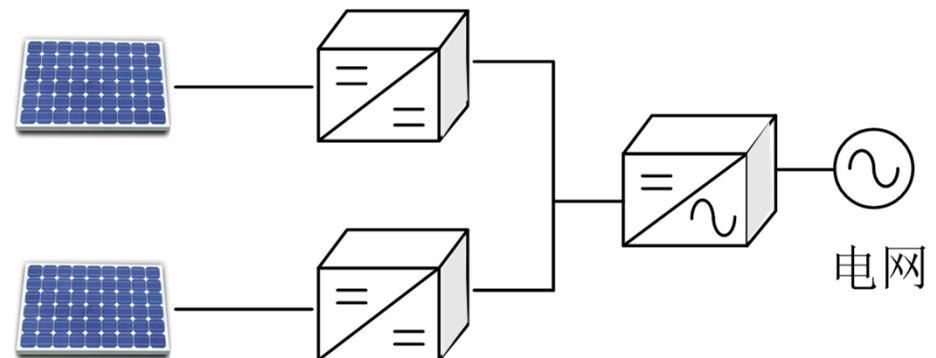


- PWM逆变电路也可分为**电压型**和**电流型**两种，目前实用的PWM逆变电路几乎都是电压型电路。

一般工业-- 不间断供电电源 (UPS)



### 新能源发电 -- 光伏并网逆变器



### 7.2.1 计算法和调制法

### 7.2.2 异步调制和同步调制

### 7.2.3 规则采样法

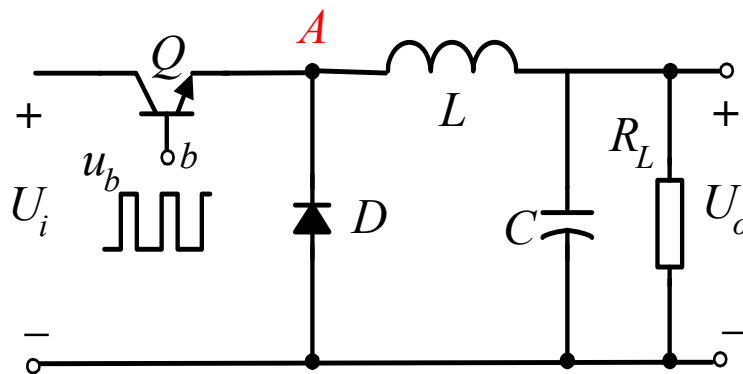
### 7.2.4 PWM逆变电路的谐波分析

### 7.2.5 提高直流电压利用率和减少开关次数

### 7.2.6 PWM逆变电路的多重化

### ● 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。



电流连续

$$U_o = DU_i$$

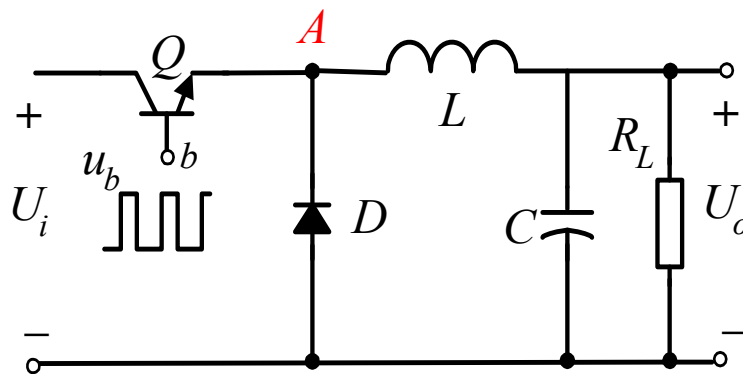
电流断续

$$\frac{U_o}{U_i} = \frac{1}{1 + I_o / (4I_{G\max} D^2)}$$

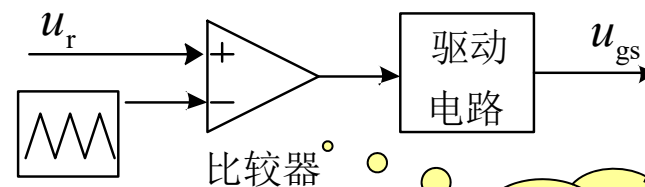
需考虑 $I_o$

### 调制法

- 把希望输出的波形作为**调制信号**，把接受调制的信号作为**载波**，通过信号波的调制得到所期望的PWM波形。
- 通常采用**等腰三角波**或**锯齿波**作为载波，其中等腰三角波应用最多。



**电流连续**  $U_o = DU_i$



电流断续?

## 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

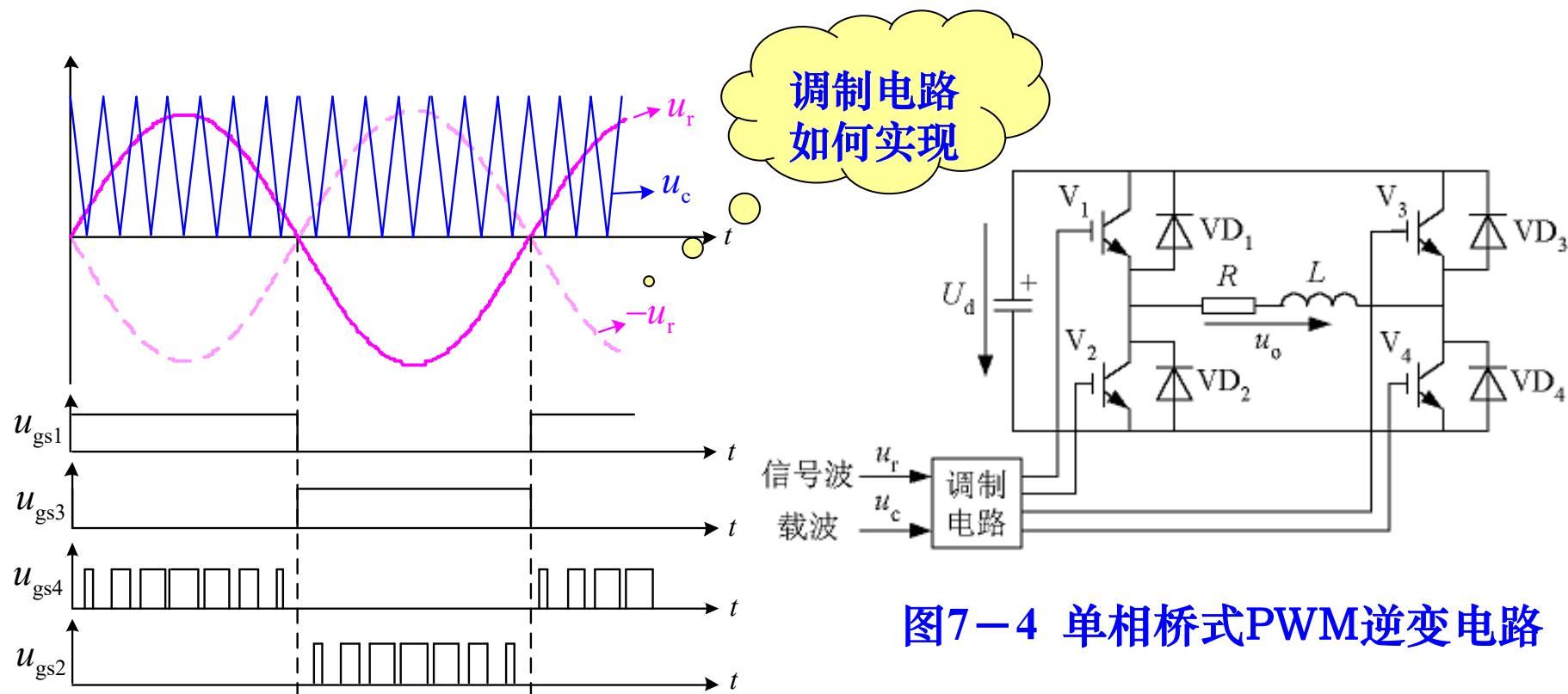


图7-4 单相桥式PWM逆变电路



## 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

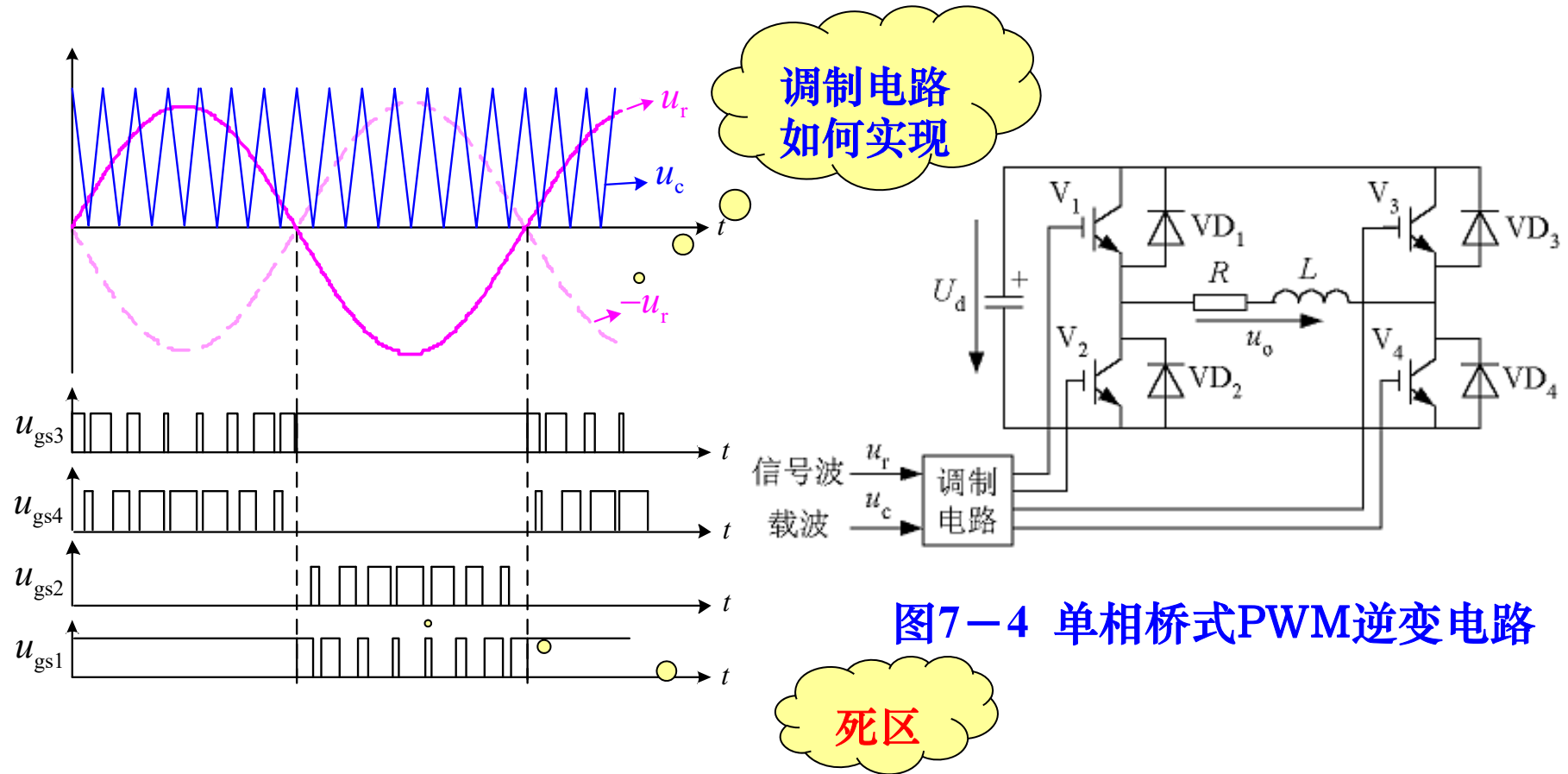
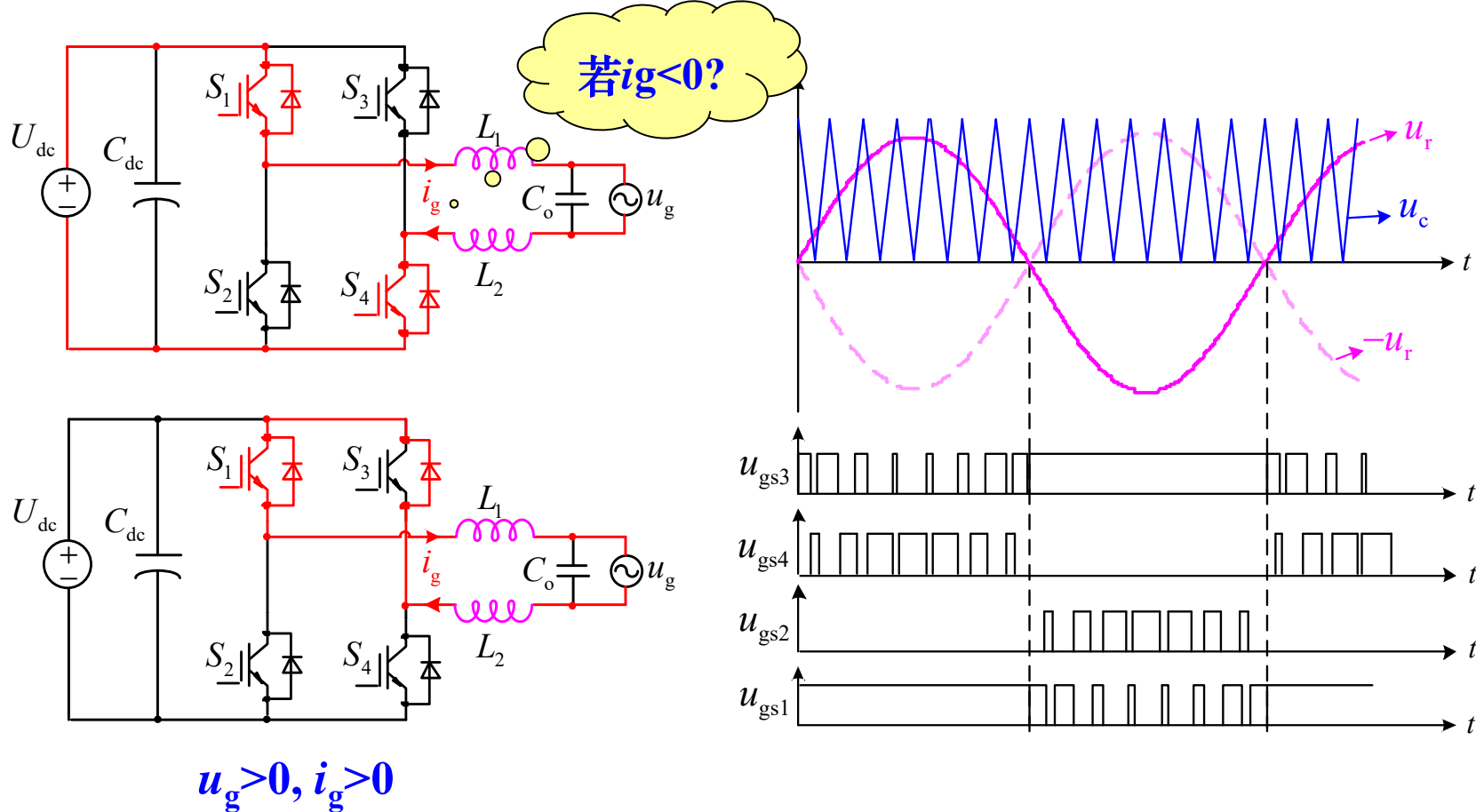


图7-4 单相桥式PWM逆变电路

## 调制法

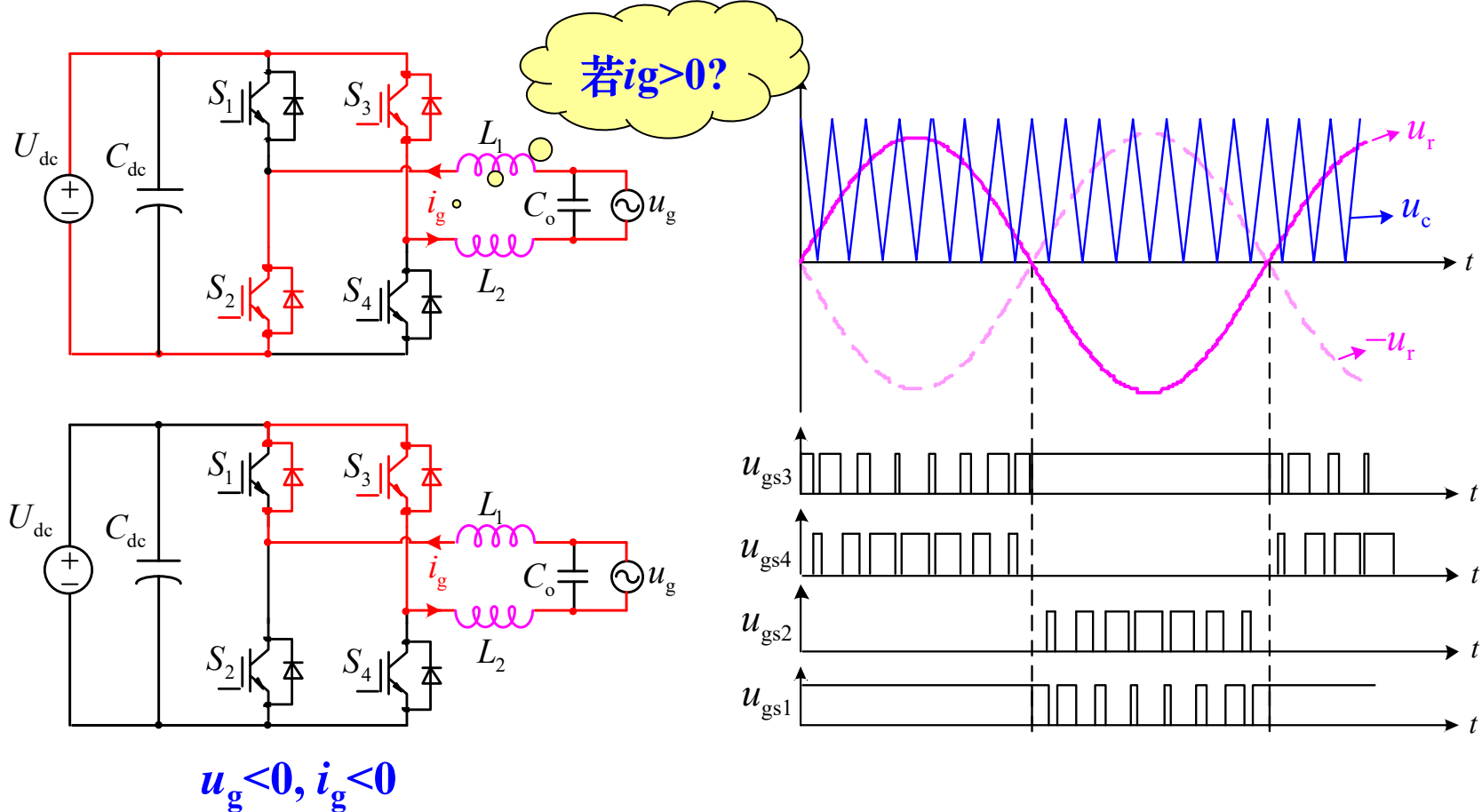
结合IGBT单相桥式电压型逆变电路对调制法进行说明





## 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



## ● 单极性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。

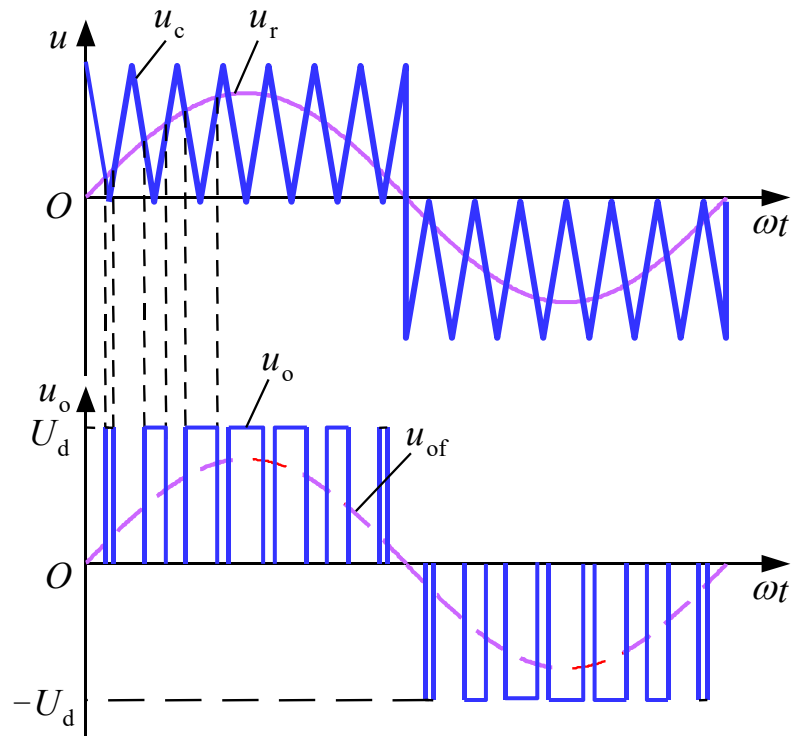
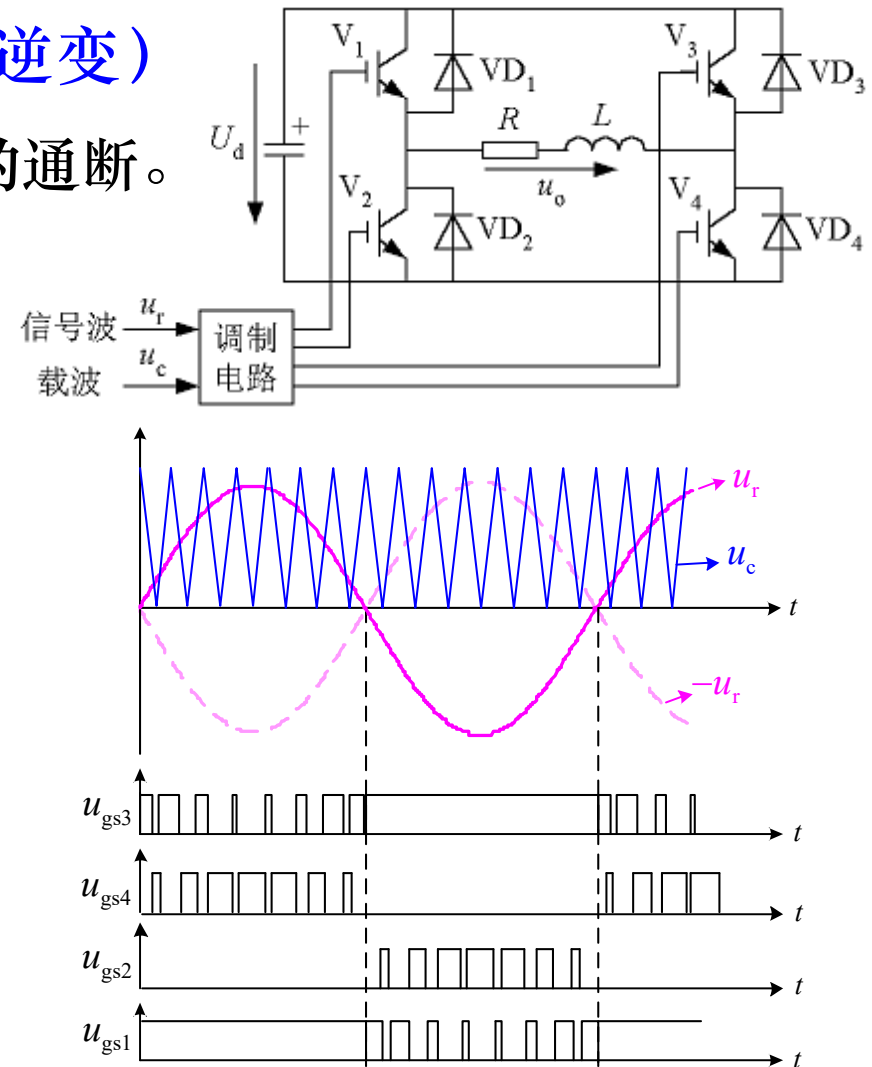


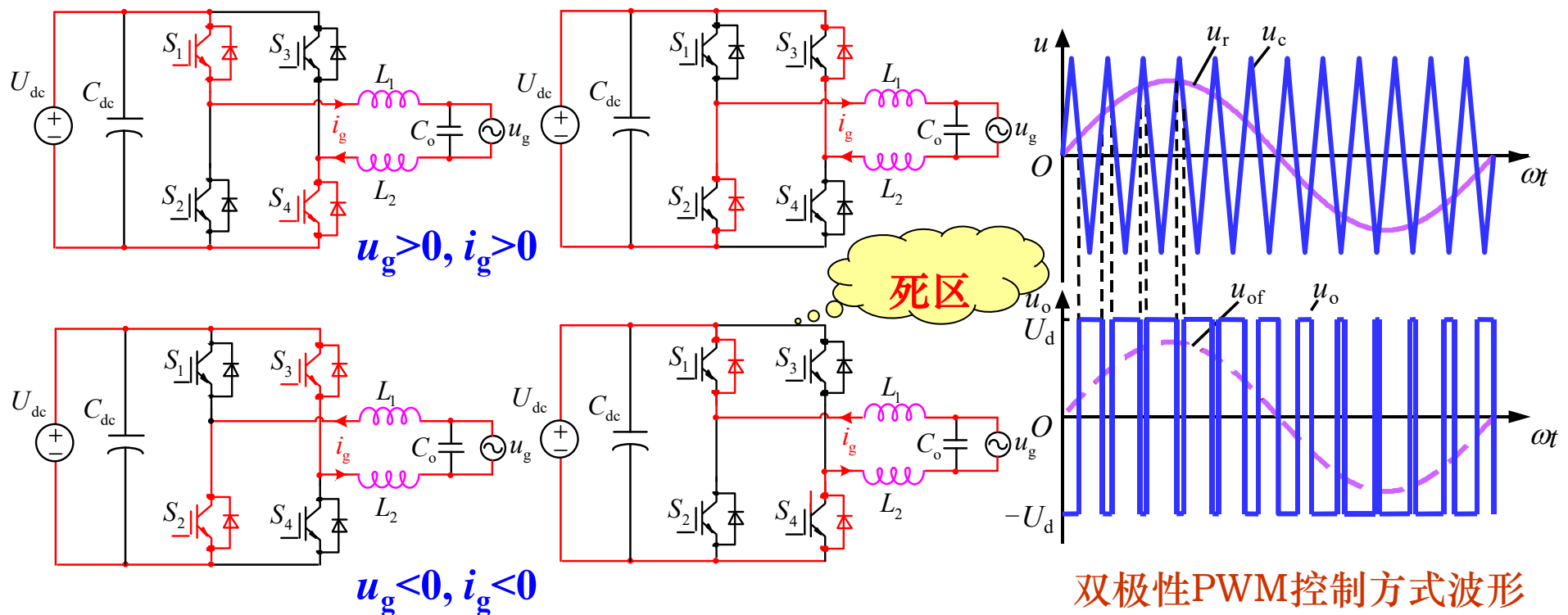
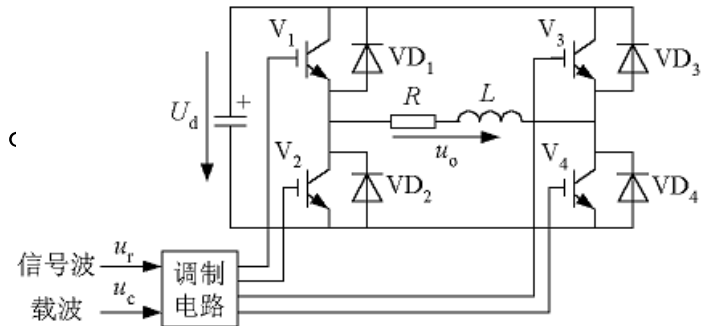
图7-5 单极性PWM控制方式波形



## ● 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。



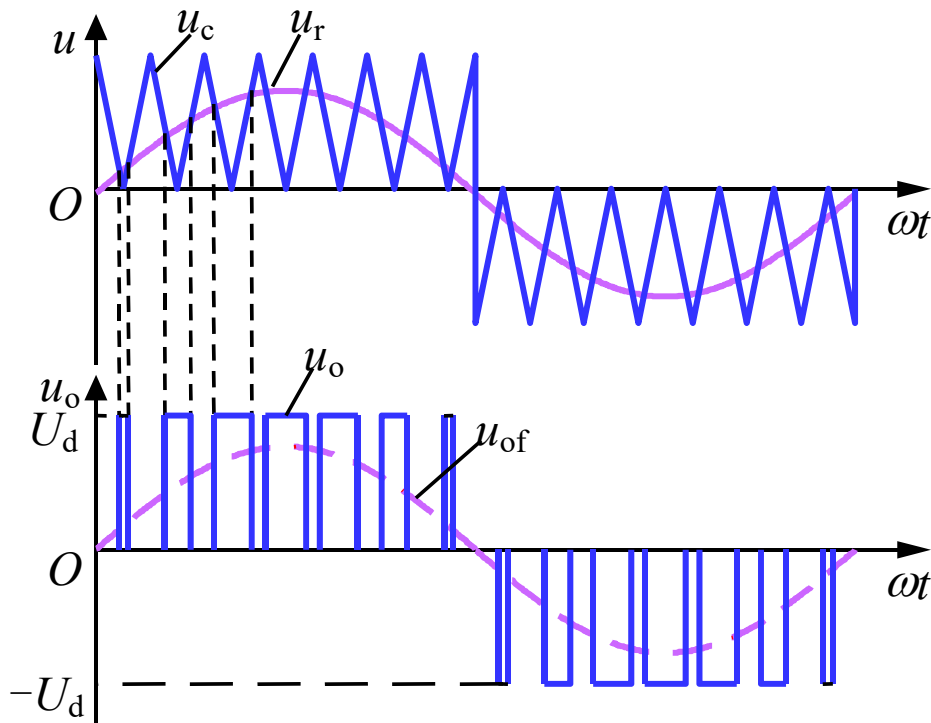


图7-5 单极性PWM控制方式波形

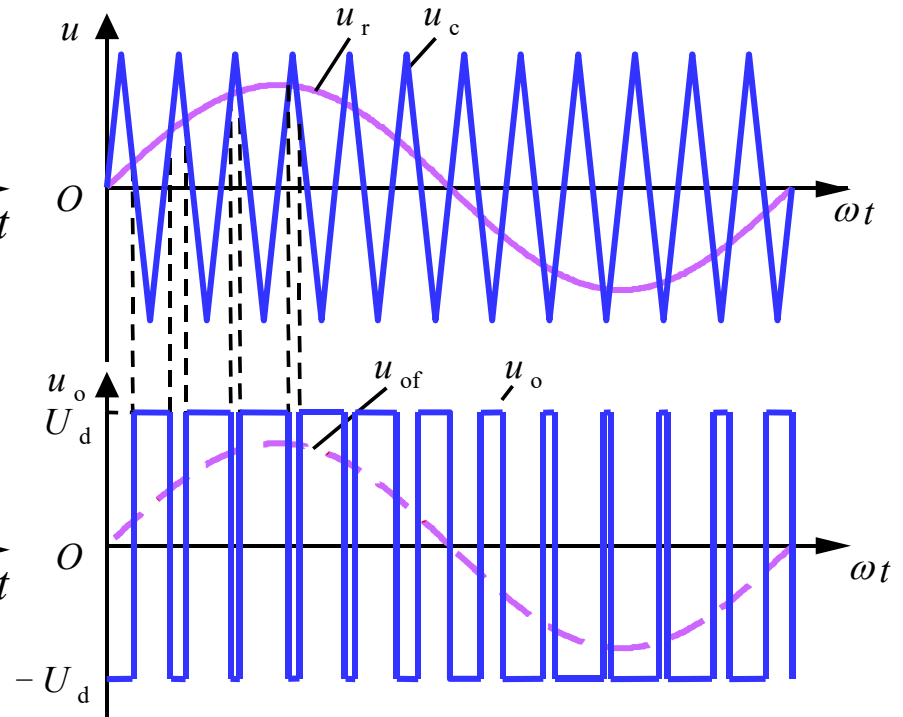


图7-6 双极性PWM控制方式波形

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。

**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**。

● **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

### ● 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。

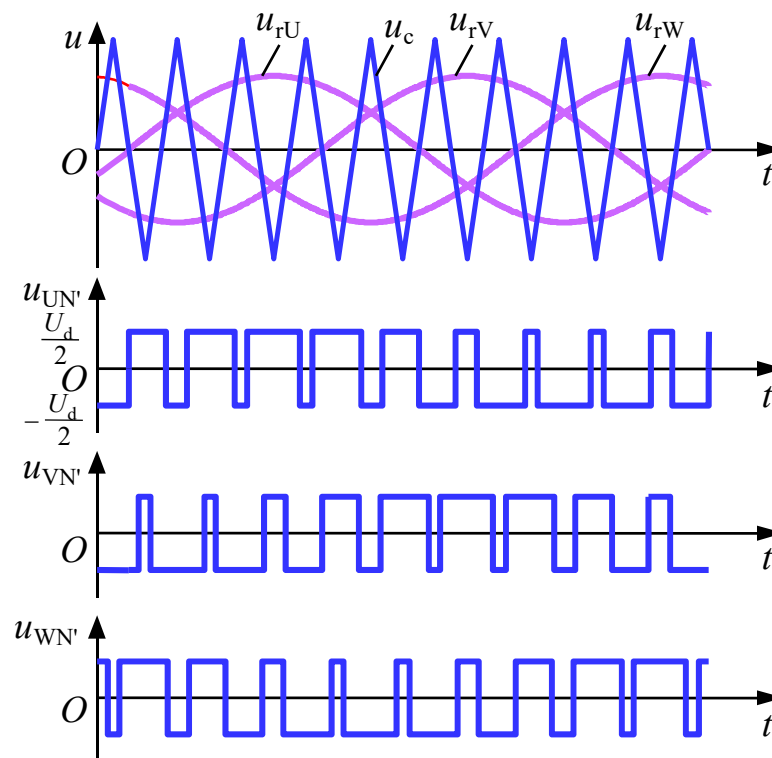


图7-10 同步调制三相PWM波形

### 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 $N$ 恒定，不同频段的 $N$ 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。

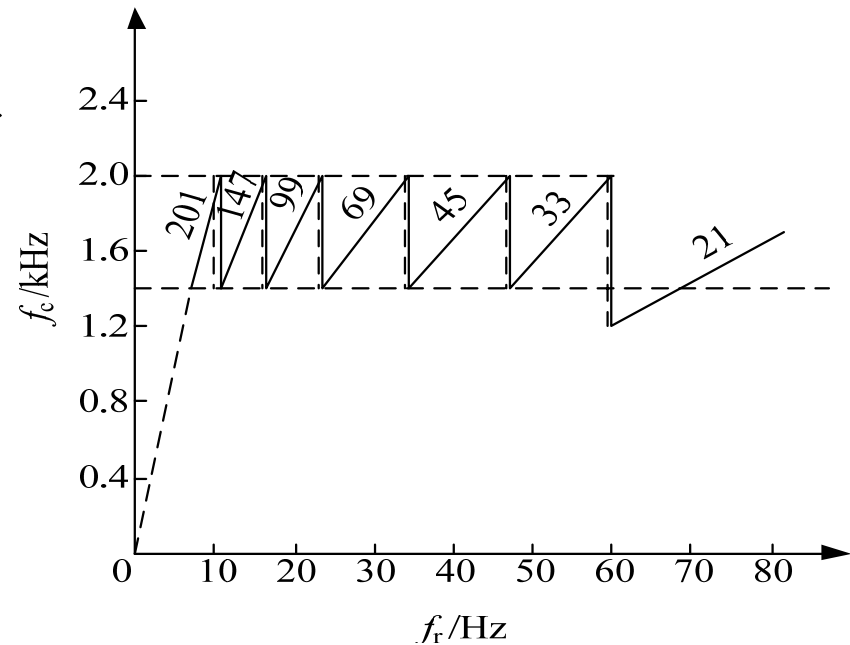


图7-11 分段同步调制方式举例

### 自然采样法

- 按照SPWM控制的基本原理产生的PWM波的方法，其求解复杂，难以在实时控制中在线计算，工程应用不多。

### 规则采样法

- 工程实用方法，效果接近自然采样法，计算量小得多。

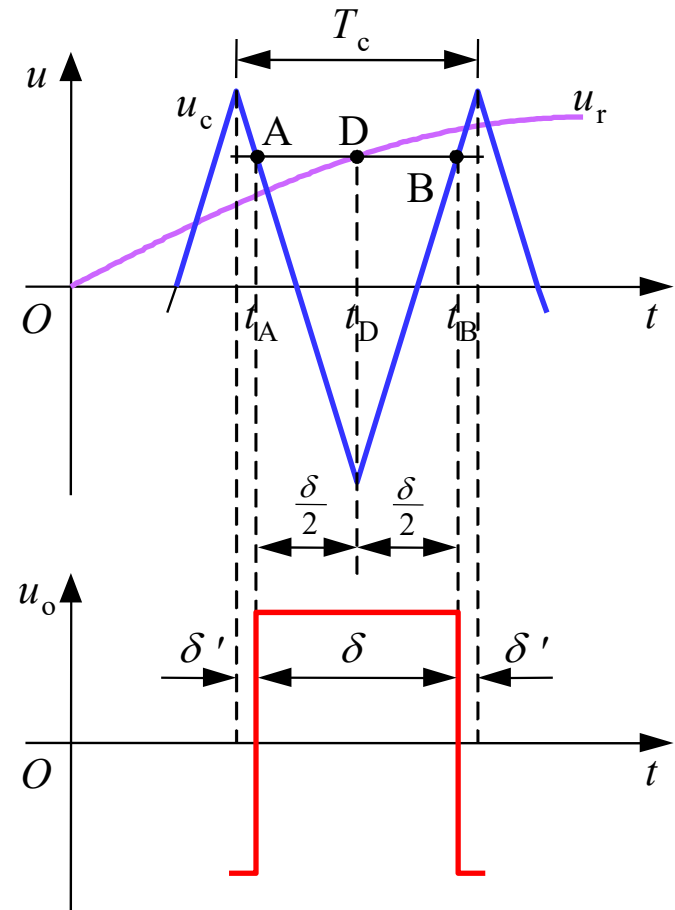


图7-12 规则采样法



### 规则采样法的原理

- 三角波两个正峰值之间的一个采样周期 $T_c$ 。
- 自然采样法中，脉冲中点不和三角波（负峰点）重合。
- 规则采样法使两者重合，使计算大为减化。
- 如图所示确定A、B点，在 $t_A$ 和 $t_B$ 时刻，控制开关器件的通断。
- 脉冲宽度和用自然采样法得到的脉冲宽度非常接近。

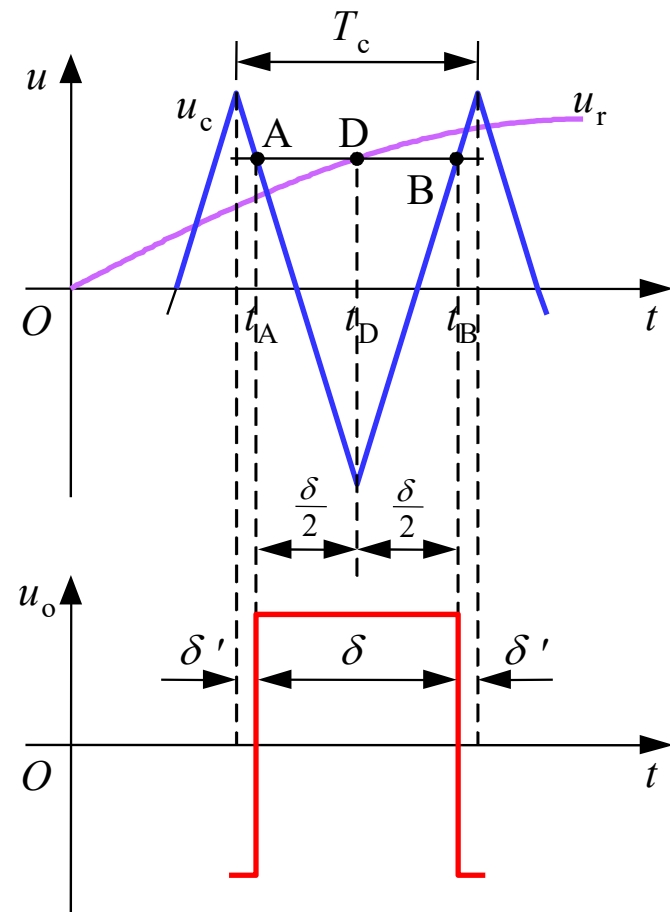


图7-12 规则采样法

## ● P184 习题3（1），习题5

- PWM波形生成的第三种方法——跟踪控制方法
- 把希望输出的波形作为指令信号，把实际波形作为反馈信号，通过两者的瞬时值比较来决定逆变电路各开关器件的通断，使实际的输出跟踪指令信号变化。
- 常用的有滞环比较方式和三角波比较方式。

### 7.3.1 滞环比较方式

### 7.3.2 三角形比较方式

## 7.3.1 滞环比较方式

- 跟踪型PWM变流电路中，电流跟踪控制应用最多。

### 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。
- $V_1$ （或 $VD_1$ ）通时， $i$ 增大
- $V_2$ （或 $VD_2$ ）通时， $i$ 减小
- 通过环宽为 $2\Delta I$ 的滞环比较器的控制， $i$ 就在 $i^*+\Delta I$ 和 $i^*-\Delta I$ 的范围内，呈锯齿状地跟踪指令电流 $i^*$ 。

### 参数的影响

- 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。
- $L$ 大时， $i$ 的变化率小，跟踪慢；
- $L$ 小时， $i$ 的变化率大，开关频率过高

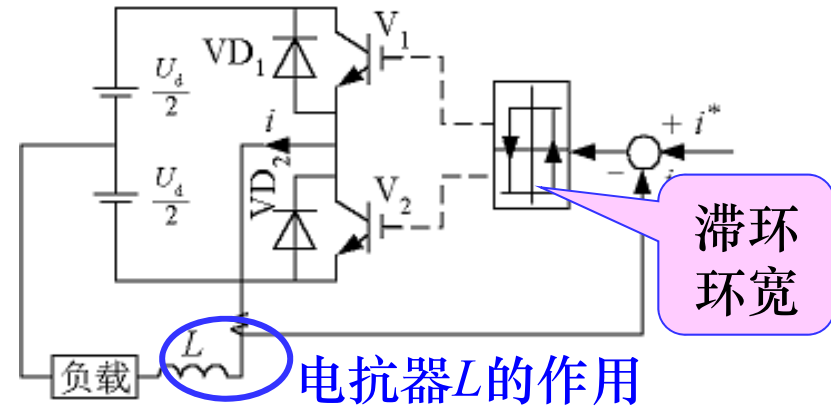


图7-24 滞环比较方式电流跟踪控制举例

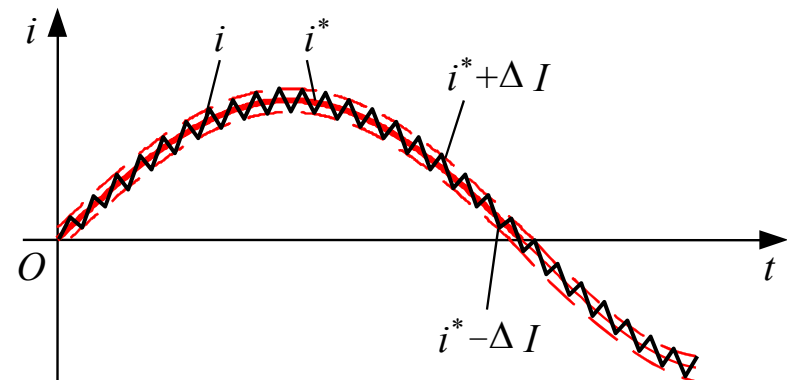


图7-25 滞环比较方式的指令电流和输出电流

● 采用滞环比较方式的电流跟踪型PWM变流电路有如下特点。

- ✦ 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。
- ✦ 和算法及调制法相比，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。

### 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。

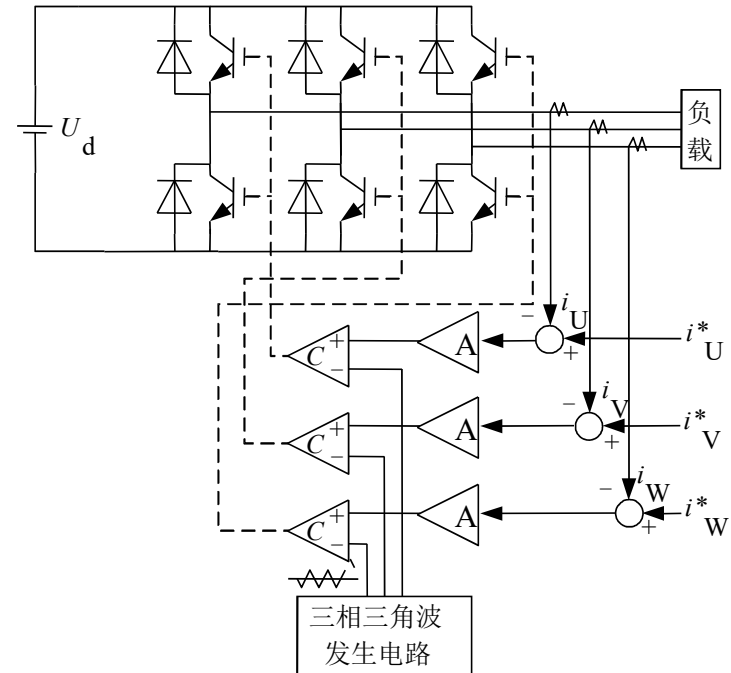


图7-29 三角波比较方式电流跟踪型逆变电路

### 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。

- ✦ 实用的整流电路几乎都是晶闸管整流或二极管整流。
- ✦ 晶闸管相控整流电路：输入电流滞后于电压，且其中谐波分量很大，因此功率因数很低。
- ✦ 二极管整流电路：虽位移因数接近1，但输入电流中谐波分量很大，所以功率因数也很低。
- ✦ 把逆变电路中的SPWM控制技术用于整流电路，就形成了**PWM整流电路**。
- ✦ 控制PWM整流电路，使其输入电流非常接近正弦波，且和输入电压同相位，功率因数近似为1，也称**单位功率因数变流器**，或**高功率因数整流器**。



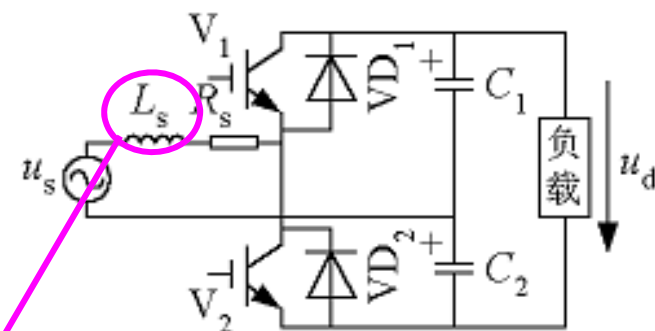
## 7.4 PWM整流电路及其控制方法

- PWM整流电路也可分为电压型和电流型两大类，目前电压型的较多。

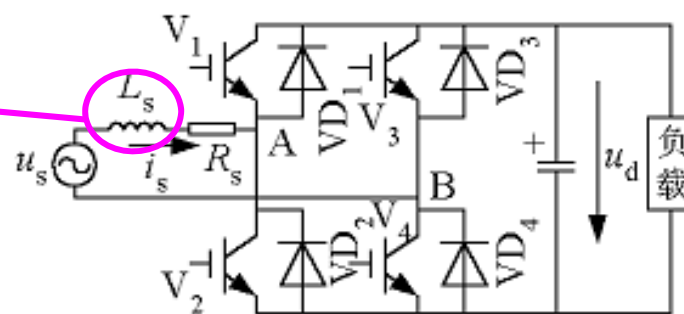
- 半桥电路直流侧电容必须由两个电容串联，其中点和交流电源连接。

- 交流侧电感 $L_s$ 包括外接电抗器的电感和交流电源内部电感，是电路正常工作所必须的。

- 全桥电路直流侧电容只要一个就可以。



a)  
单相半桥电路



b)  
单相全桥电路

图7-30 单相PWM整流电路

- PWM控制技术的地位

- ✦ PWM控制技术是在电力电子领域有着广泛的应用，并对电力电子技术产生了十分深远影响的一项技术。

- 器件与PWM技术的关系

- ✦ IGBT、电力MOSFET等为代表的全控型器件的不断完善给PWM控制技术提供了强大的物质基础。

- PWM控制技术用于直流斩波电路

- ✦ 直流斩波电路实际上就是直流PWM电路，是PWM控制技术应用较早也成熟较早的一类电路，应用于直流电动机调速系统就构成广泛应用的**直流脉宽调速系统**。

- PWM控制技术用于交流—交流变流电路
  - ✦ 斩控式交流调压电路和矩阵式变频电路是PWM控制技术在类电路中应用的代表。
  - ✦ 目前其应用都还不多。
  - ✦ 但矩阵式变频电路因其容易实现集成化，可望有良好的发展前景。

- PWM控制技术用于**逆变电路**

- ✦ PWM控制在逆变电路中的应用最具代表性。
- ✦ 正是由于在逆变电路中广泛而成功的应用，才奠定了PWM控制在电力电子技术中的突出地位。
- ✦ 除功率很大的逆变装置外，不用PWM控制的逆变电路已十分少见。
- ✦ 第4章因尚未涉及到PWM控制技术，因此对逆变电路的介绍是不完整的。学完本章才能对逆变电路有较完整的认识。

- PWM控制技术用于**整流电路**

- ✦ PWM控制技术用于整流电路即构成PWM整流电路。
- ✦ 可看成逆变电路中的PWM技术向整流电路的延伸。
- ✦ PWM整流电路已获得了一些应用，并有良好的应用前景。
- ✦ PWM整流电路作为对第3章的补充，可使我们对整流电路有更全面的认识。

## ● PWM控制技术与相位控制技术

- ✦ 以第3章相控整流电路和第6章交流调压电路为代表的**相位控制技术**至今在电力电子电路中仍占据着**重要**地位。
- ✦ 以PWM控制技术为代表的**斩波控制技术**正在越来越占据着**主导**地位。
- ✦ 相位控制和斩波控制分别简称**相控**和**斩控**。
- ✦ 把两种技术对照学习，对电力电子电路的控制技术会有更明晰的认识。