

# 自动控制实践

# PWM功率放大器

哈尔滨工业大学空间控制与惯性技术研究中心 伊国兴

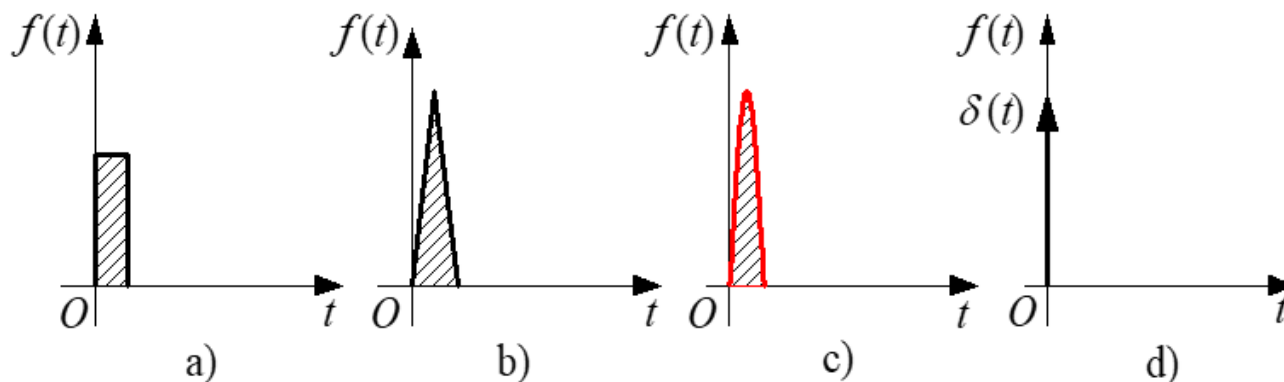




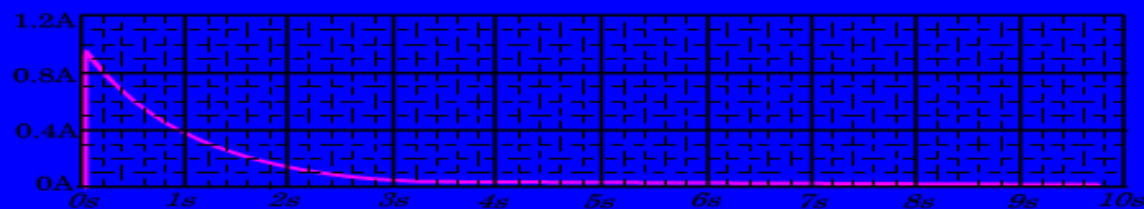
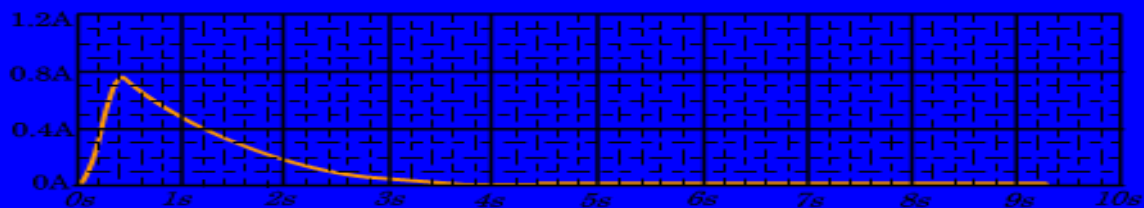
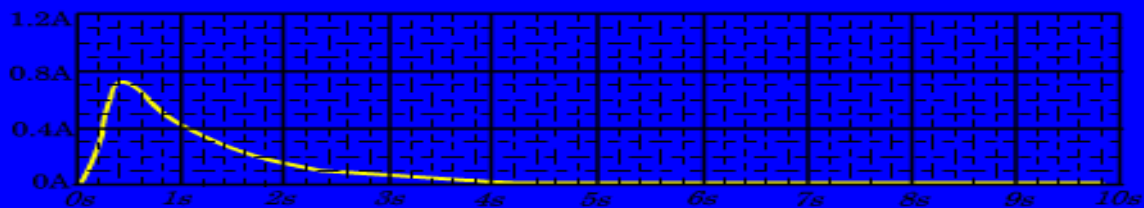
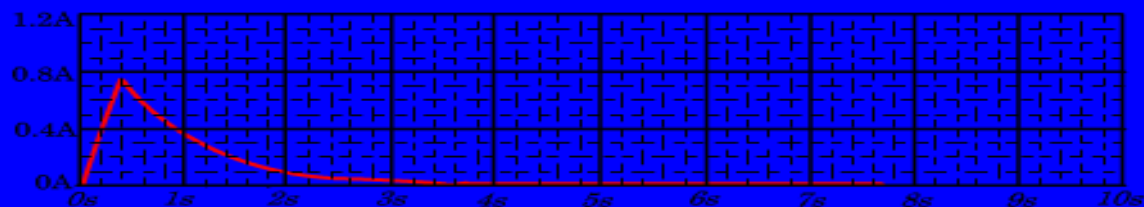
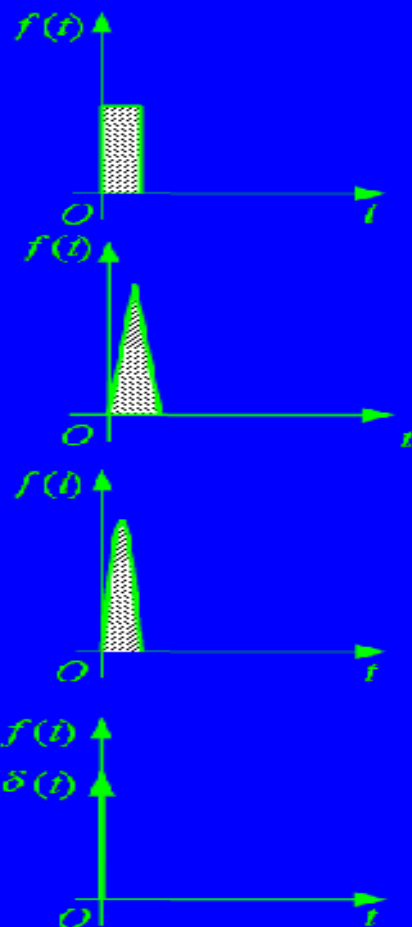
# PWM控制的基本原理

❖ **PWM (Pulse Width Modulation) 控制**--脉冲宽度调制技术，通过对一系列脉冲的宽度进行调制，来等效地获得所需要波形（含形状和幅值）。

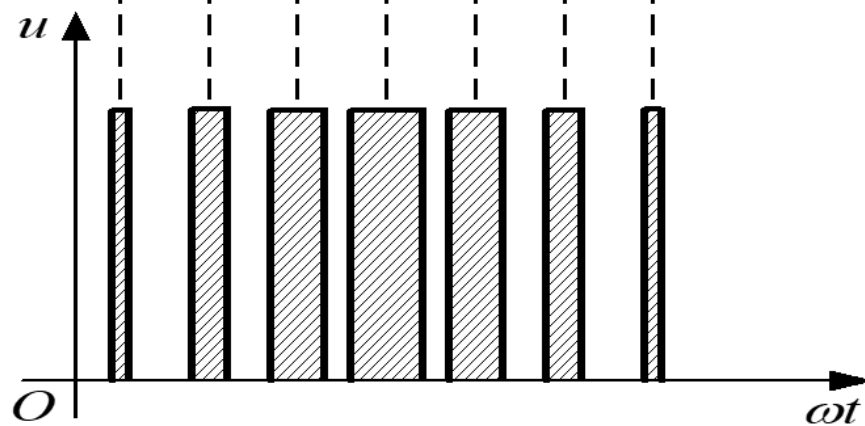
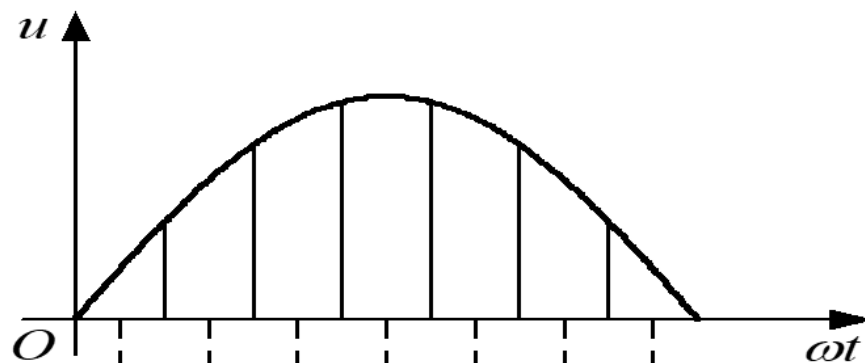
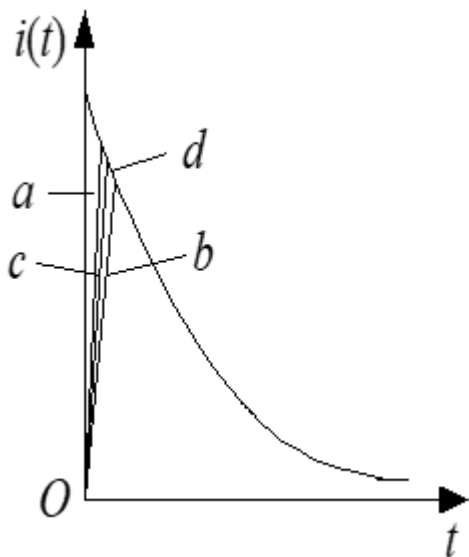
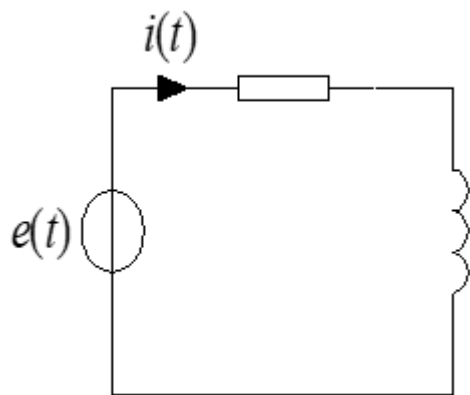
- 冲量相等而形状不同的窄脉冲加在具有惯性的环节上时，其效果基本相同
- 冲量指窄脉冲的面积
- 效果基本相同，是指环节的输出响应波形基本相同
- 低频段非常接近，仅在高频段略有差异



# PWM控制的基本原理

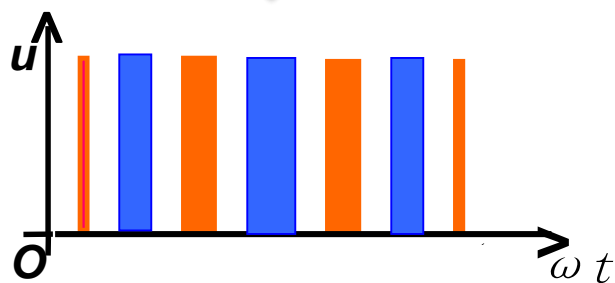
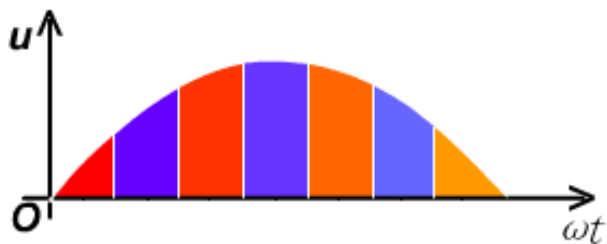


# PWM控制的基本原理



# PWM控制的基本原理

❖ 用一系列等幅不等宽的脉冲来代替一个正弦半波



- 正弦半波N等分，可看成N个彼此相连的脉冲序列，宽度相等，但幅值不等。
- 用矩形脉冲代替，等幅，不等宽，中点重合，面积（冲量）相等。
- 宽度按正弦规律变化。
- **SPWM**波形——脉冲宽度按正弦规律变化而和正弦波等效的**PWM**波形。
- 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。



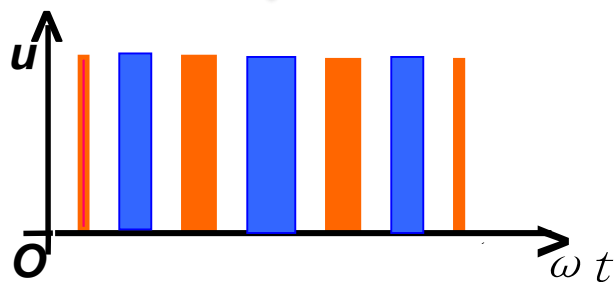
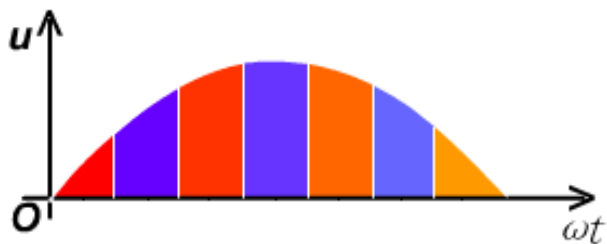
# PWM控制的基本原理

## ❖ 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波形可等效的各种波形

- 直流斩波电路：等效直流波形
- SPWM波：等效正弦波形
- 还可以等效成其他所需波形，如等效所需非正弦交流波形等，其基本原理和SPWM控制相同，也基于等效面积原理



# PWM的计算法和调制法

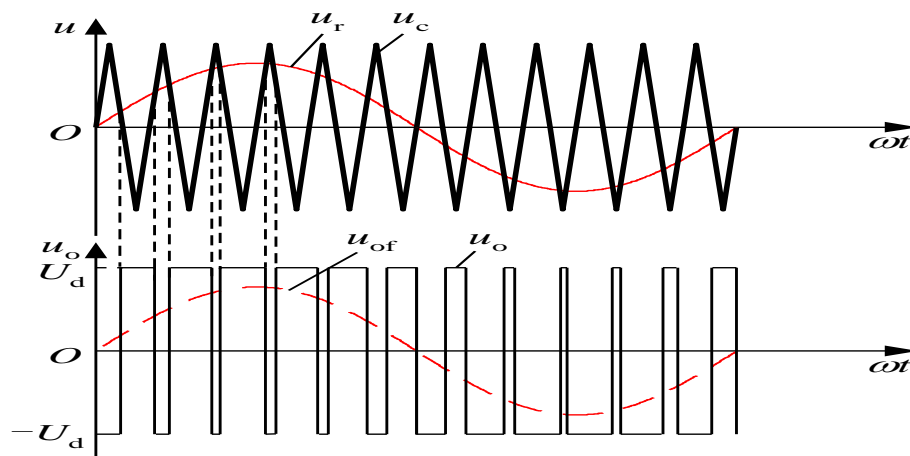
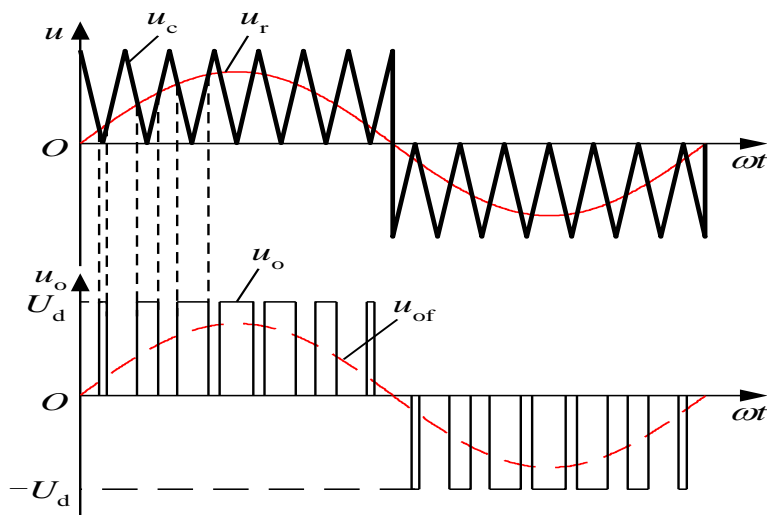
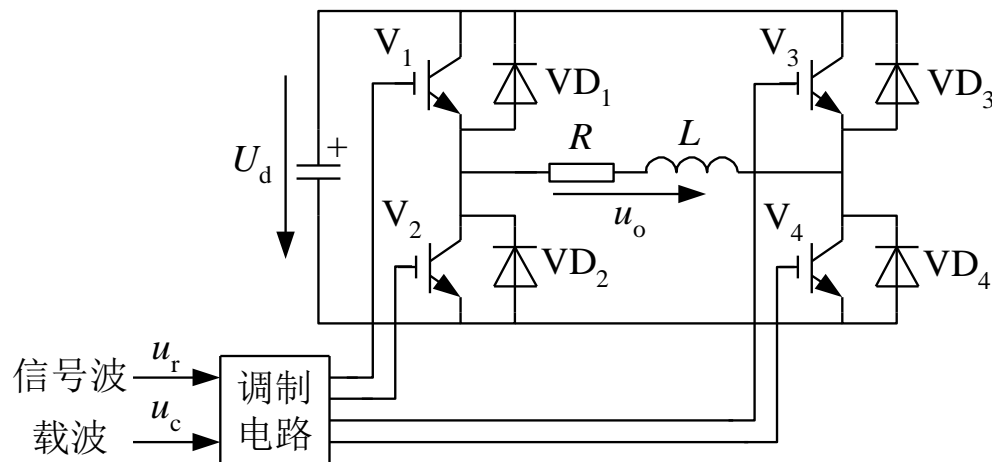
## ❖ 计算法

- 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。
- 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。

## ❖ 调制法

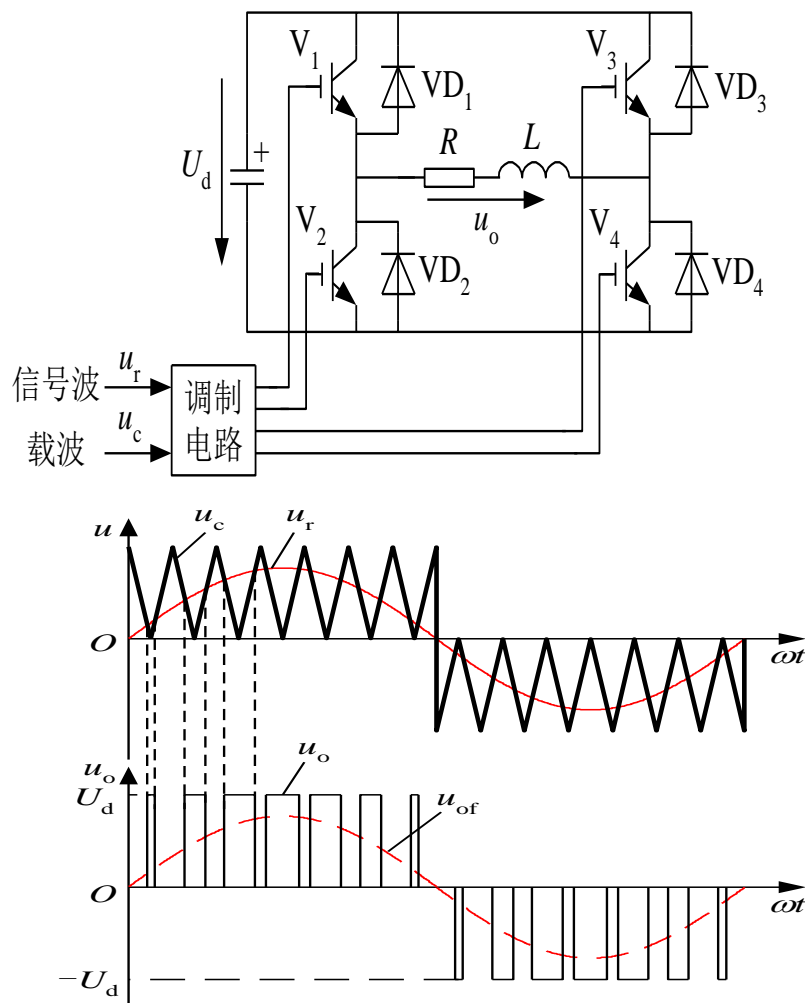
- 把希望输出的波形作为调制信号,把接收调制的信号作为载波通过信号波的调制得到所期望的PWM波形。
- 通常采用等腰三角波或锯齿波作为载波。
- 等腰三角波应用最多，其任一点水平宽度和高度成线性关系且左右对称。

# PWM的计算法和调制法





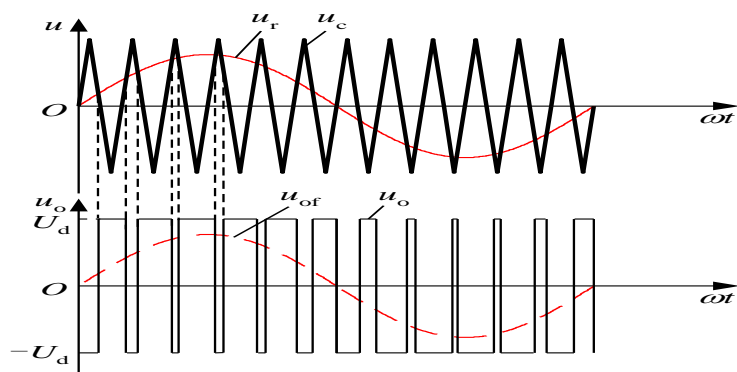
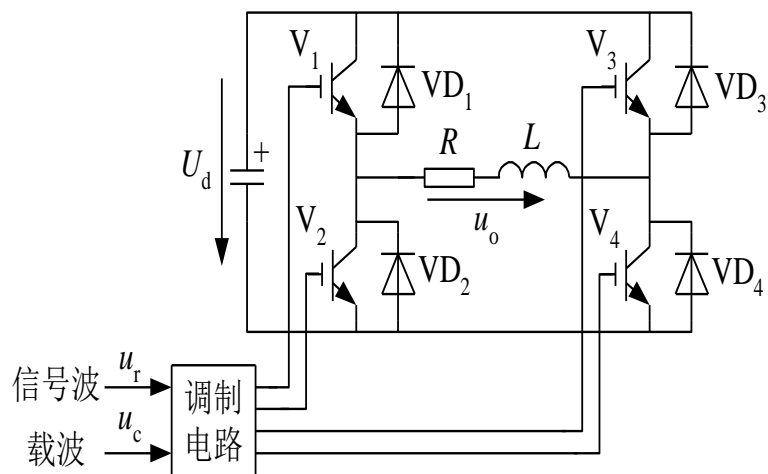
# PWM的计算法和调制法



## 单极性PWM控制方式

- 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,  $V_1$  保持断,  $V_2$  保持通
  - ✓ 当  $u_r < u_c$  时使  $V_3$  通,  $V_4$  断,  $u_o = -U_d$
  - ✓ 当  $u_r > u_c$  时使  $V_3$  断,  $V_4$  通,  $u_o = 0$
- 虚线  $u_{of}$  表示  $u_o$  的基波分量

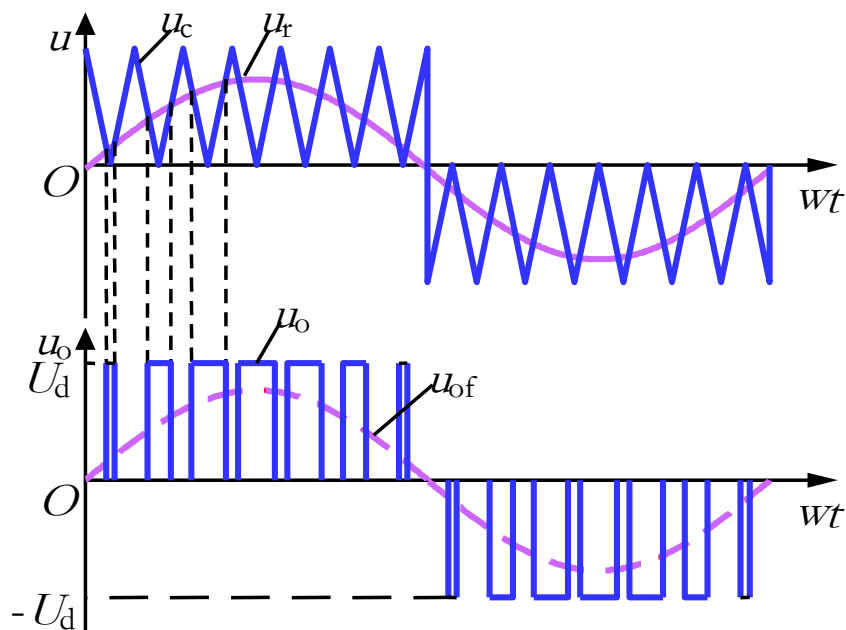
# PWM的计算法和调制法



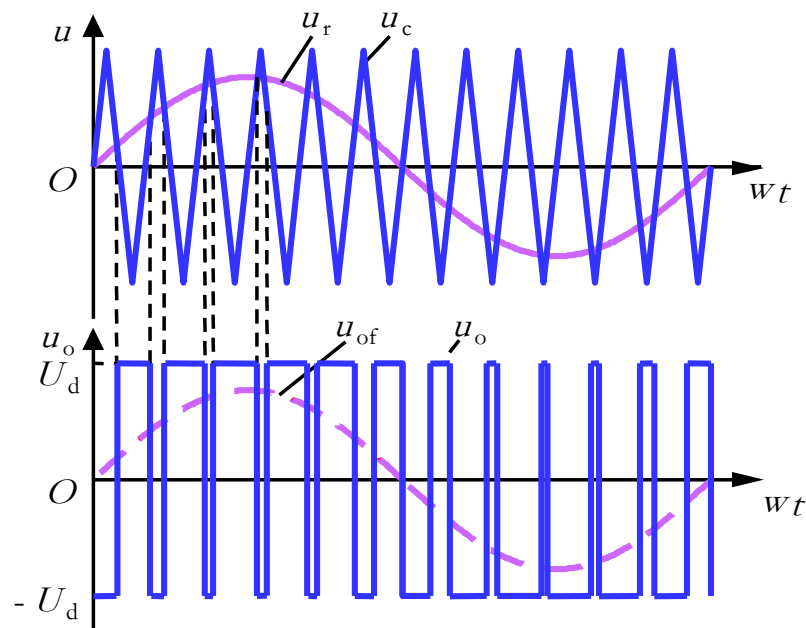
## 双极性PWM控制方式

- 输出PWM波有 $\pm U_d$ 两种电平
- 在调制信号 $u_r$ 和载波信号 $u_c$ 的交点控制器件的通断
- $u_r$ 正负半周，对各开关器件的控制规律相同
- 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
- 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

# PWM的计算法和调制法



单极性PWM控制方式波形

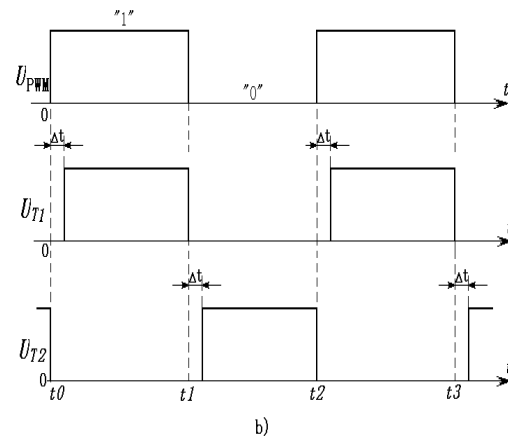
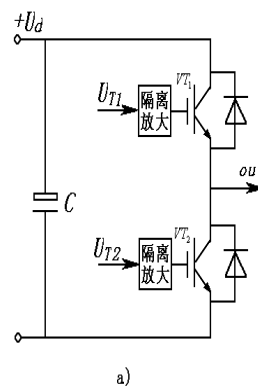
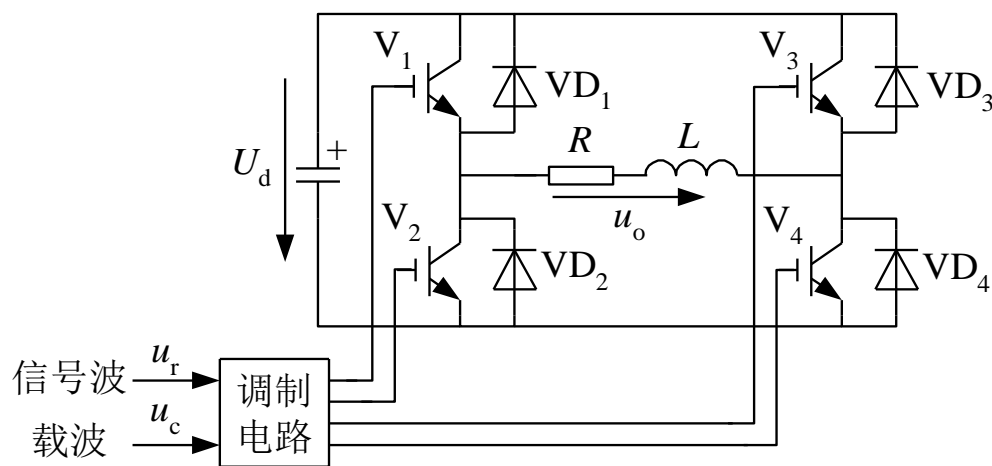


双极性PWM控制方式波形

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。



# 桥式PWM



## ❖ 防直通死区时间

- 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。

## ❖ 每个功率开关反并续流二极管

- 保证负载储能的泄放

# 异步调制和同步调制

- ❖ 载波比——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

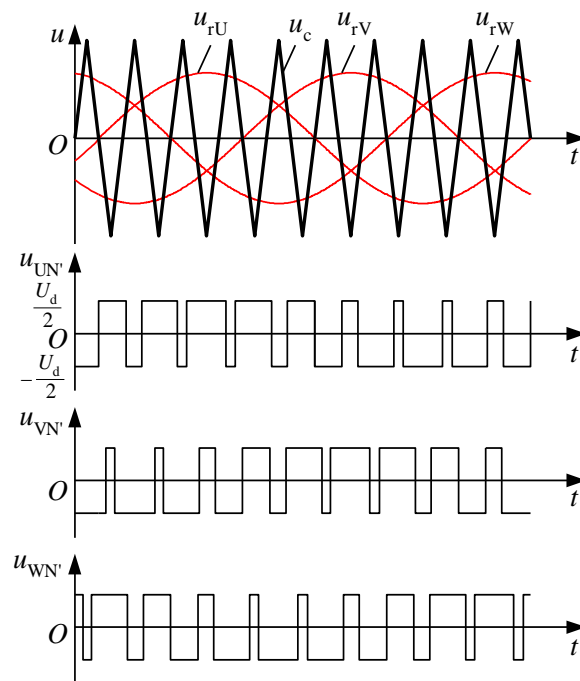
异步调制——载波信号和调制信号不同步的调制方式

- ✓ 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

# 异步调制和同步调制

➤ 同步调制—— $N$ 等于常数，并在变频时使载波和信号波保持同步

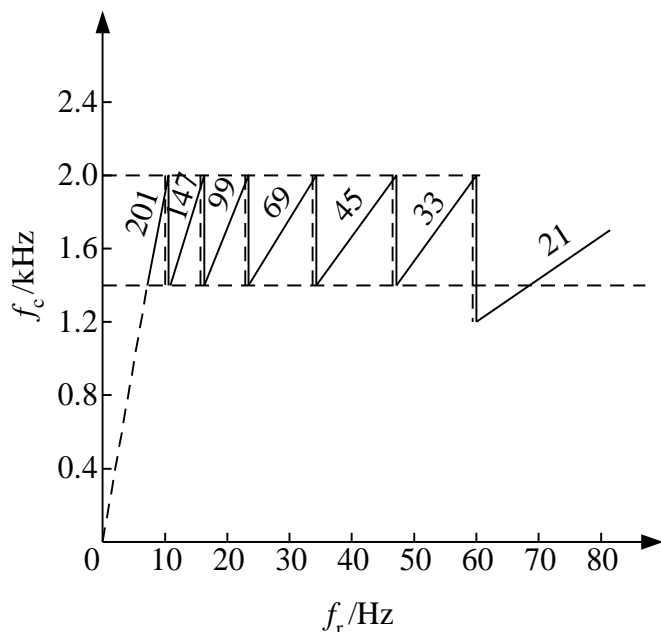
- ✓ 基本同步调制方式， $f_r$ 变化时 $N$ 不变，信号波一周期内输出脉冲数固定
- ✓ 三相电路中公用一个三角波载波，且取 $N$ 为3的整数倍，使三相输出对称
- ✓ 为使一相的PWM波正负半周镜对称， $N$ 应取奇数
- ✓  $f_r$ 很低时， $f_c$ 也很低，由调制带来的谐波不易滤除
- ✓  $f_r$ 很高时， $f_c$ 会过高，使开关器件难以承受





# 异步调制和同步调制

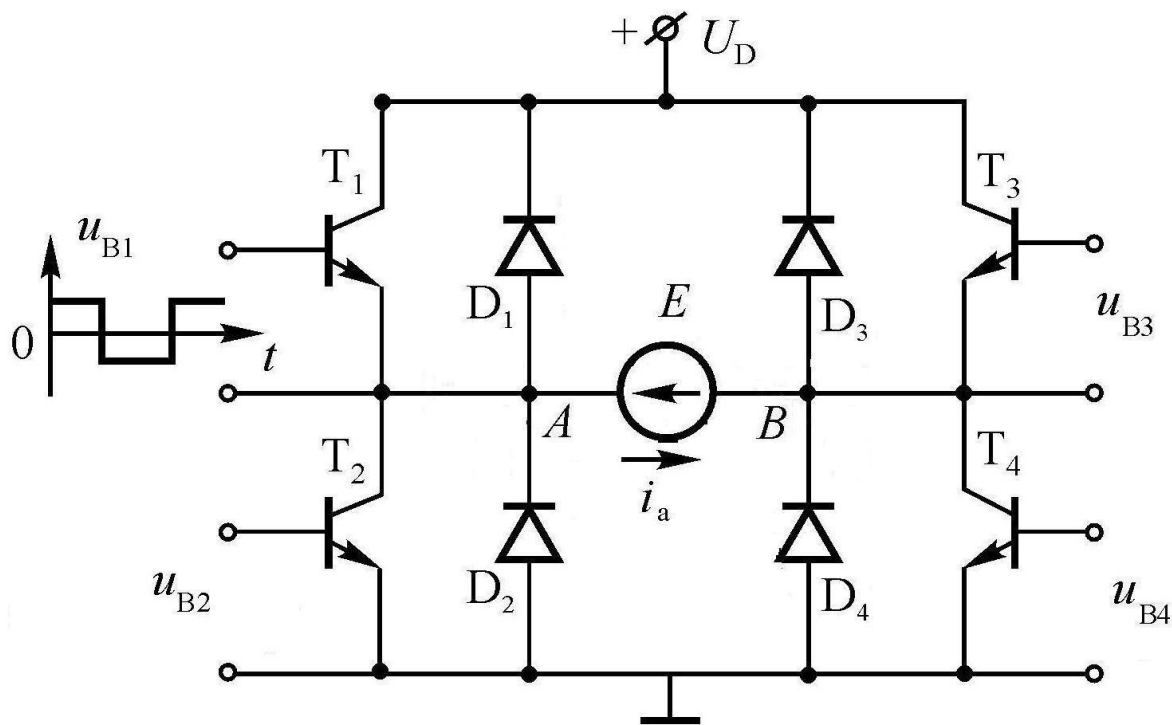
## 分段同步调制



- ✓ 把 $f_r$ 范围划分成若干个频段，每个频段内保持 $N$ 恒定，不同频段 $N$ 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

# 开关电路PWM驱动分析

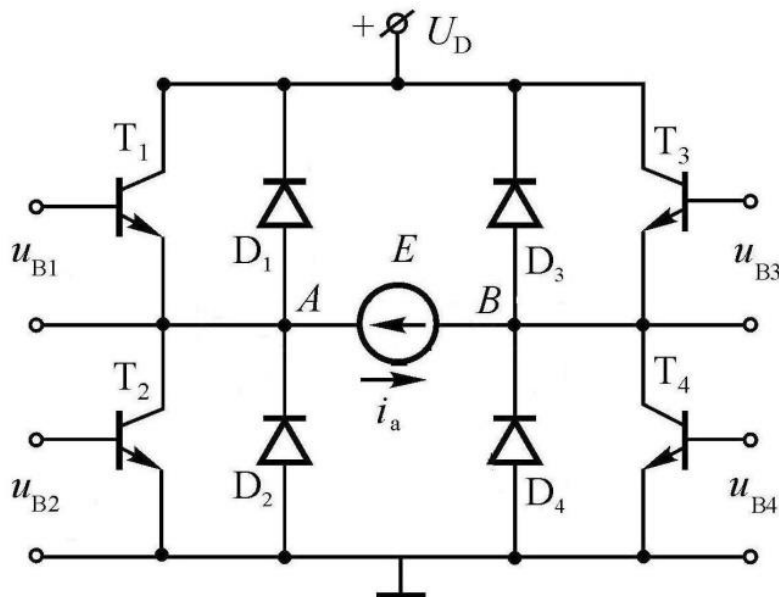
- ❖ H 型桥式电路，四个晶体管和四个续流二极管。 $A$ 、 $B$ 是电路的输出端。以直流电动机为负载进行原理分析。
- ❖ 输入PWM信号，它的频率和周期就是开关频率和开关周期。



# 开关电路驱动原理

❖ 假设：

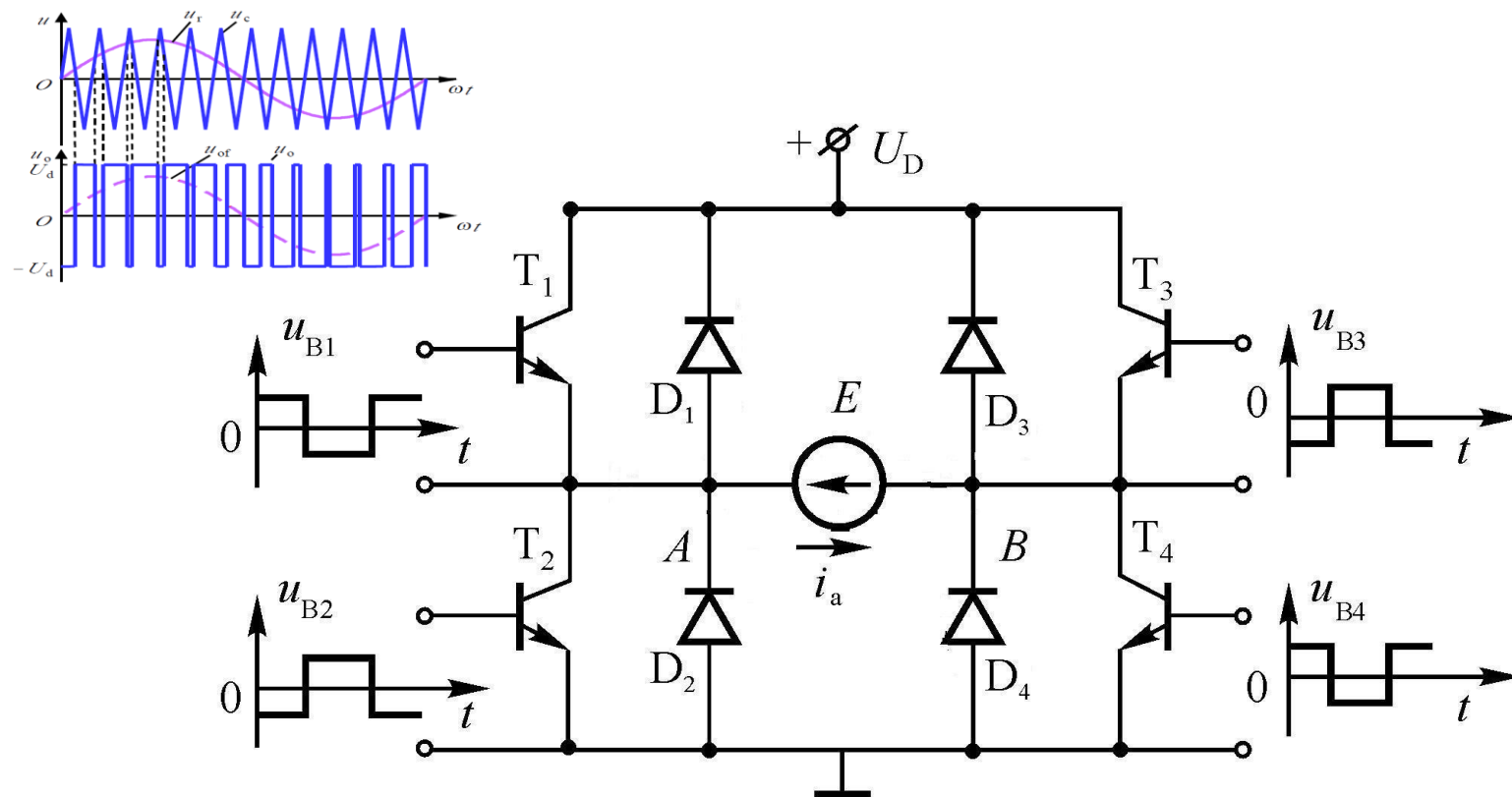
- 忽略晶体管开关过程。
- 一个开关周期内电机转速及反电势为常值。
- 电枢回路用电阻、电感和电势等效。
- 电磁转矩平均值和负载转矩相平衡时，是准稳定状态，电枢电流周期性变化。





# 双极性PWM驱动

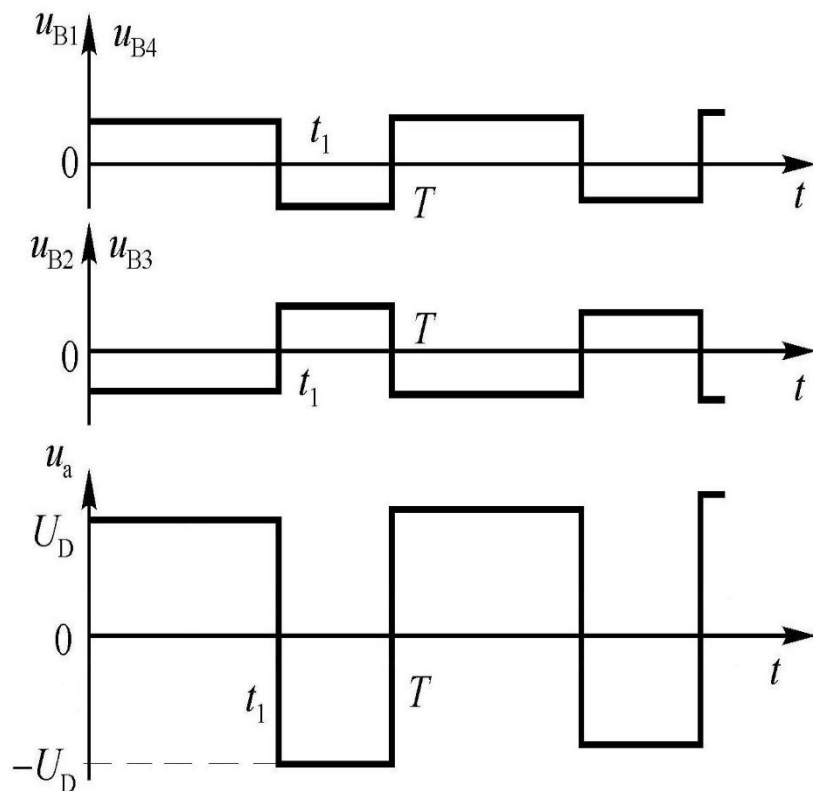
❖ 输入控制信号:  $u_{B1} = u_{B4} = -u_{B2} = -u_{B3}$



# 双极性PWM驱动

❖ 输出电压:

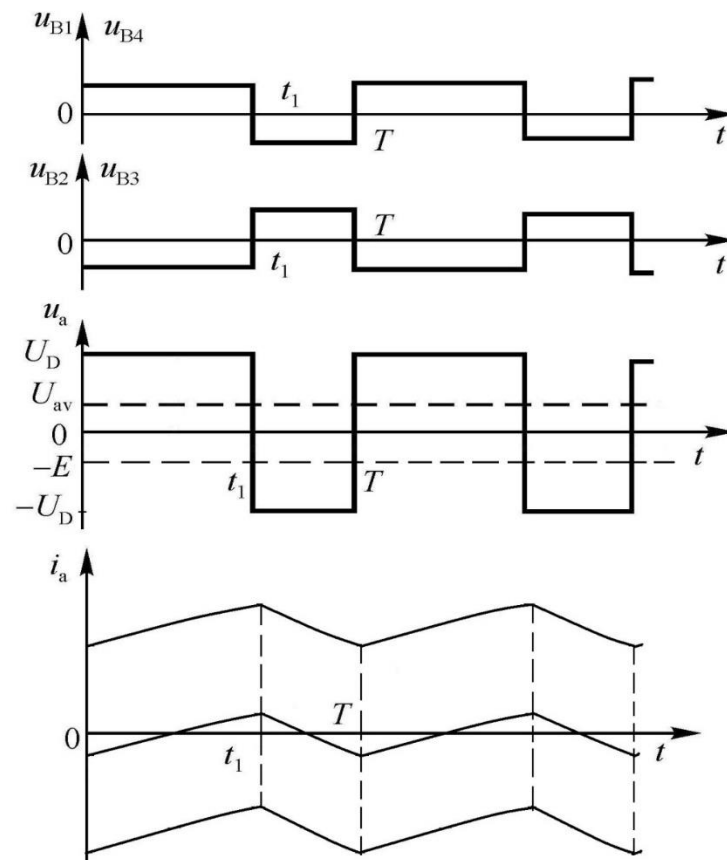
$$\begin{aligned} U_{av} &= \frac{1}{T} \int_0^{t_1} U_D dt - \frac{1}{T} \int_{t_1}^T U_D dt \\ &= U_D \left( 2 \frac{t_1}{T} - 1 \right) \end{aligned}$$



# 双极性PWM驱动

## ❖ 双极性输出总结：

- 在一个开关周期中，输出电压是方波，有正、负两个极性，电源交替地输出电能和吸收电能。电源输出电能时电流值增加，吸收电能时电流减小。电流方向取决于电机工作状态。





# PWM 驱动应用的注意事项



## 1) 功率管的功率损耗

A)静态损耗： 断态损耗，通态损耗

B)动态损耗： 不同负载下的开通瞬时损耗、关断瞬时损耗。

# PWM 驱动应用的注意事项



## 2) 功率管的正确选用

- MOSFET和IGBT应用选型中，一般选择其额定耐受电压和额定电流为实际应用电压和电流的两倍。

如：220V交流整流母线，一般选择额定耐压600V的IGBT，380V交流整流母线，选择额定耐压1200V的IGBT。28V直流母线，选择额定耐压不低于60V的MOSFET等。

# PWM 驱动应用的注意事项



## 3) 功率管的安全使用

### \* 防直通设定死区时间

- 同一相上下两臂的驱动信号互补，为防止直通短路，需要设置一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
- 死区时间给输出**SPWM**波带来影响，使其稍偏离正弦波

### \* 每个功率开关反并续流二极管

- 以保证感性负载储能的泄放。



# PWM 驱动应用的注意事项

## 4) PWM实现中的栅极驱动问题

- ❖ 栅极驱动电路必须与逻辑电路、PWM控制电路绝缘和隔离，具有足够高的共模电压抑制能力；
- ❖ 桥臂上管栅极驱动一般由浮动电源供电，栅极驱动要尽量降低栅极驱动隔离电源的容量和功率损耗。
- ❖ 栅极驱动电路要有过流或晶体管进入放大区工作的保护功能，保证开关速度，又保证晶体管工作在饱和状态；
- ❖ 栅极驱动电路应尽量不使PWM波形的脉宽受到限制，并能适应输出量的通断比可能的任意数值。

# PWM 驱动应用的注意事项



## 5) PWM实现中的保护问题

### ❖ 过电流的防止与保护

- 电流传感式的电子保护措施
- 半导体保护用快速熔断器

### ❖ 过电压的防止与保护

- 缓冲电路的应用
- 泵升电压的泄放

# PWM 驱动应用的注意事项



- ❖ 缓冲电路：抑制过电压、 $du/dt$ 、过电流和 $di/dt$ ，减小器件的开关损耗
  - 关断缓冲电路（ $du/dt$ 抑制电路）——吸收器件的关断过电压和换相过电压，抑制 $du/dt$ ，减小关断损耗
  - 开通缓冲电路（ $di/dt$ 抑制电路）——抑制器件开通时的电流过冲和 $di/dt$ ，减小器件的开通损耗
  - 将关断缓冲电路和开通缓冲电路结合在一起——复合缓冲电路



# PWM 驱动应用的注意事项

## 7) PWM 开关频率的选择

- ❖ 开关管的功耗
- ❖ 静音工作的需求

现代 PWM 型电机驱动器的开关频率一般在 2kHz-20kHz, 中、小功率的驱动器一般实现 16kHz 或以上驱动, 而大功率应用中, 开关频率随功率的增加逐渐降低。

# PWM技术小结

## ❖ 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技术小结

## ❖ 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控制技术在这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技术小结



## ❖ 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
- 不用PWM控制的逆变电路已十分少见

# PWM技术小结

## ❖ 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



# Thank You!

伊国兴

ygx@hit.edu.cn

