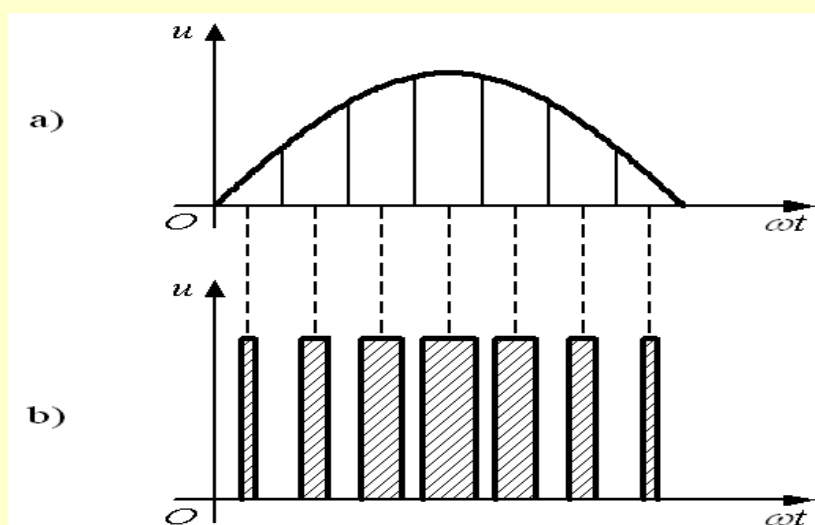


## 自动控制实践(A)-8

### 脉宽调制(PWM)技术2

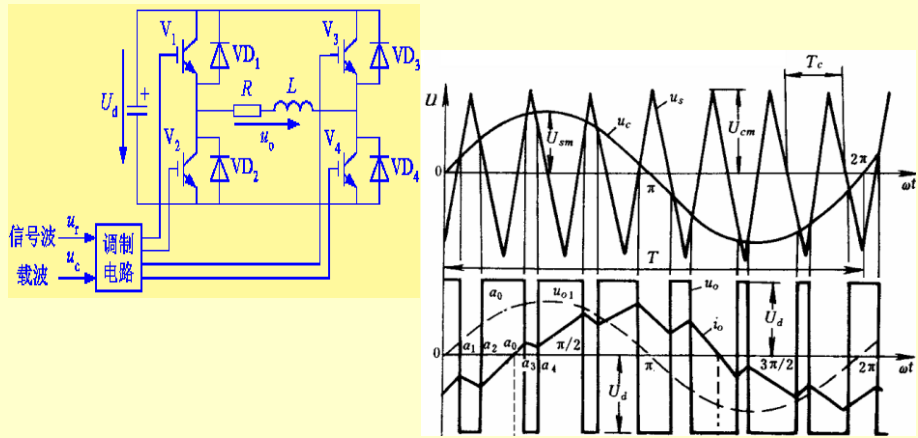


### 复习- PWM 驱动原理



# 复习- PWM 驱动实现

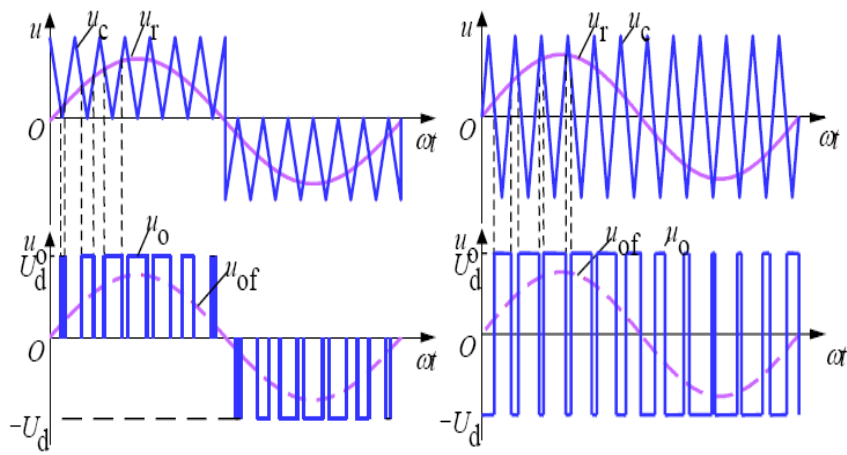
- H桥电路的直流斩波与单相逆变PWM信号：输入的PWM信号决定了H桥功率管的开关状态与导通宽度。



哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



# 复习- PWM 驱动实现



单极性PWM控制方式波形

双极性PWM控制方式波形

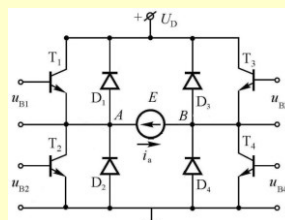
哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



## 复习- PWM 驱动实现

分析PWM驱动时的假设：

- 1) 忽略功率管开关过程。
- 2) 一个开关周期内电机转速及反电势为常值。
- 3) 电枢回路用电阻、电感和反电势等效。
- 4) 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。

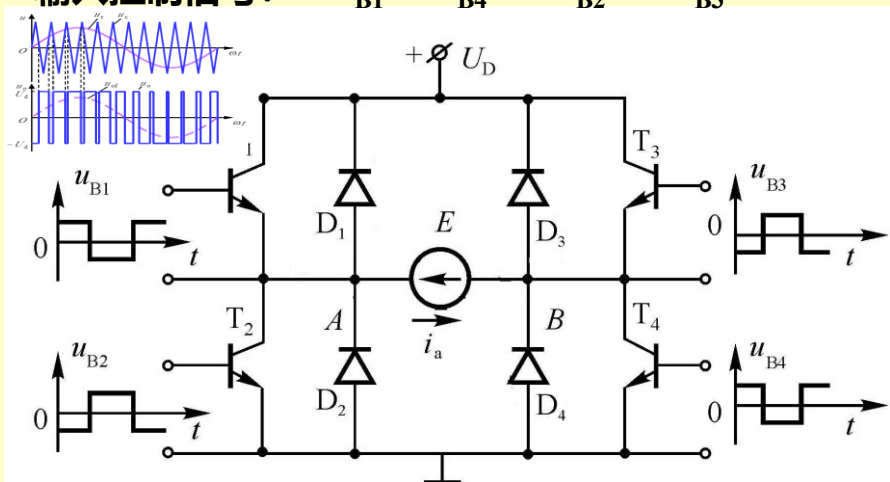


哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



## 复习- 双极性PWM驱动

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



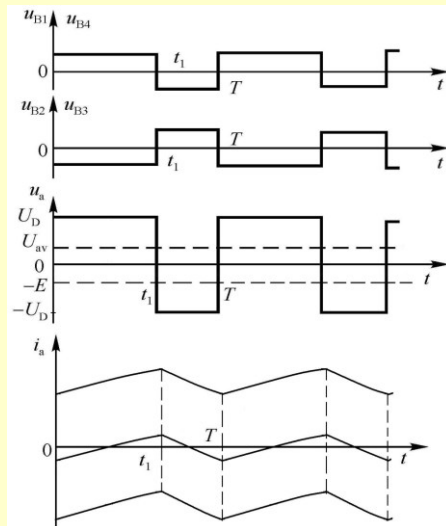
哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



## 复习- 双极性PWM驱动

- 双极性驱动总结:

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。



## 复习- 单极性PWM驱动

- 单极性PWM
- 受限单极性PWM



## 思考题

如何电路实现双极性PWM，单极性PWM和受限单极性PWM？它们驱动负载有什么差别？



## 思考题

若PWM功率放大器的负载是纯电阻，输出量是电功率或电阻产生的热量，它还能起到调节和放大器的作用吗？



## 目 录

1. PWM驱动特性
2. PWM驱动的微观过程与宏观特性
3. PWM 信号生成
4. PWM 功放应用相关事项



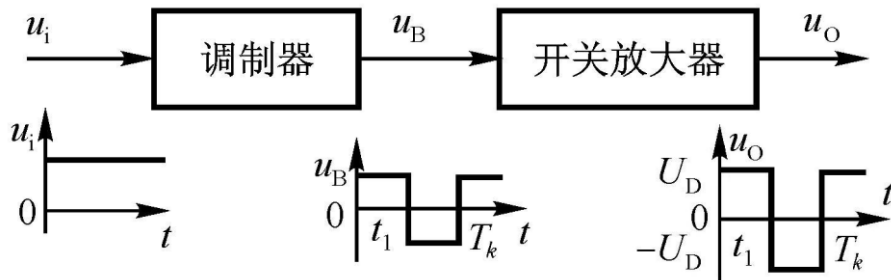
## 1. PWM驱动的特性

- 调制比 $\rho$
- 占空比  $D/\gamma$
- 单极性、双极性PWM的 $\rho$ 、 $D/\gamma$ 关系
- PWM 驱动的输出电压
- PWM 驱动的输出电流



## 1. PWM驱动的特性

PWM驱动的基本组成和内涵：



哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



## 1. PWM驱动的特性

脉宽调制器

把连续电压信号  $u_i$  变成PWM信号  $u_B$ ,  $u_B$  反应  $u_i$  大小与极性

。

- 信号系数: 调制比 
$$\rho = \frac{u_i}{|U_{im}|}$$

- PWM信号参数: 占空比

周期  $T_k$ , 正向电压宽度  $t_1$ , 占空比:

$$\gamma = D = \frac{t_1}{T_k}$$

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



## 1. PWM驱动的特性

- 静态特性

$t_1$  与  $\rho$  是线性关系:

- 双极性

$$t_1 = \frac{1}{2} T_k (1 + \rho) \quad \text{或} \quad D/\gamma = \frac{1}{2} (1 + \rho)$$

- 单极性

$$t_1 = |\rho| T_k \quad \text{或} \quad \rho = \pm \gamma$$



## 1. PWM驱动的特性

双极性PWM驱动:

$$U_d = \frac{t_{on}}{T} U_s - \frac{T - t_{on}}{T} U_s = \left( \frac{2t_{on}}{T} - 1 \right) U_s = \rho U_s$$

单极性PWM驱动:

$$U_d = \frac{t_{on}}{T} U_s - \frac{T - t_{on}}{T} 0 = \frac{t_{on}}{T} U_s = \rho U_s$$





## 1. PWM驱动的特性

- 动特性

功率管存在开启时间和关闭时间。

延迟环节

$$G(s) = \frac{\Gamma(s)}{U_i(s)} = Ke^{-\tau s}$$

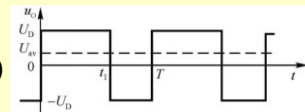
$\tau$  很小，上述延迟环节可近似成为比例环节。



## 1. PWM驱动的特性

### PWM驱动直流电机

$$u_o = U_{av} + \sum_{n=1}^{\infty} U_{an} \cos(2\pi n f_k t - \frac{1+\rho}{2} n\pi)$$



- 输出是直流电压与一系列高频电压之和。

$$U_{av} = \rho U_D = (2\gamma - 1)U_D$$

$$U_{an} = \frac{4U_D}{n\pi} \sin \frac{n\pi(1+\rho)}{2} = \frac{4U_D}{n\pi} \sin(n\pi\gamma)$$

- 直流电压由 $\rho$ 、 $\gamma$ 决定。
- 交流电压频率越高幅值越小。



## 1. PWM驱动的特性

$$u_o = U_{av} + \sum_{n=1}^{\infty} U_{an} \cos(2\pi n f_k t - \frac{1+\rho}{2} n\pi)$$

- 负载是直流电动机时，PWM功放输出电压

$$u_o = U_{av} = U_D \rho = \frac{U_D}{|U_{im}|} u_i = K u_i$$

**负载是直流电动机时，PWM功率放大器等效为比例环节。**



## 1. PWM驱动的特性

负载是电动机时：

PWM开关频率是电机运行频率的几百~上千倍，高频交流电压完全被电机感性负载特性衰减，电机驱动电流的纹波基本可忽略。

对电动机起作用的是直流分量和低频交流分量。



## 1. PWM驱动的特性

PWM驱动直流电机达到稳态时：

输出电流纹波

$$\Delta i = i_{\max} - i_{\min} = \frac{AU_D(1 - \rho^2)}{4L_a f}$$

PWM驱动的输出平均电流

$$I_{av} = \frac{U_{av} - E}{R_a} = \frac{\rho U_D - E}{R_a}$$



## PWM 技术2

1. PWM驱动特性

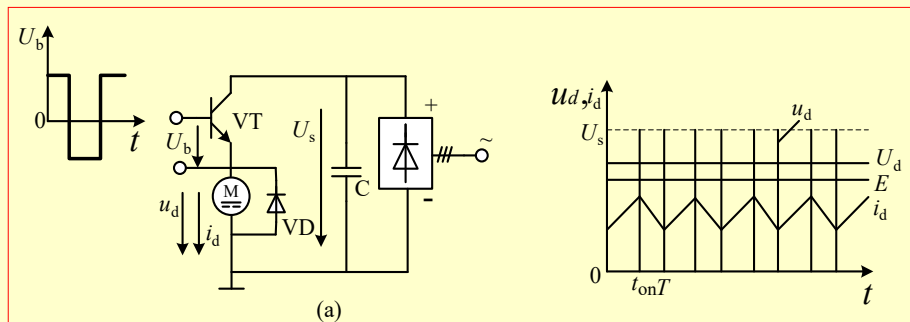
2. PWM驱动的微观过程与宏观特性

3. PWM 信号生成

4. PWM 功放应用相关事项



## 2. PWM驱动的微观过程与宏观特性

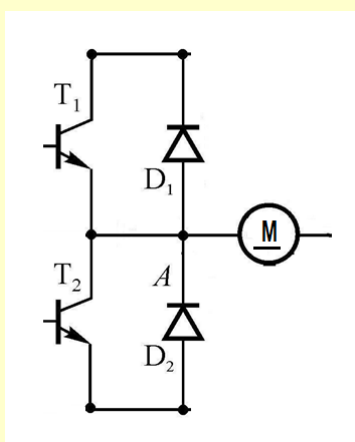


一象限驱动电路

$$U_d = \frac{t_{on}}{T} U_s = \rho U_s$$



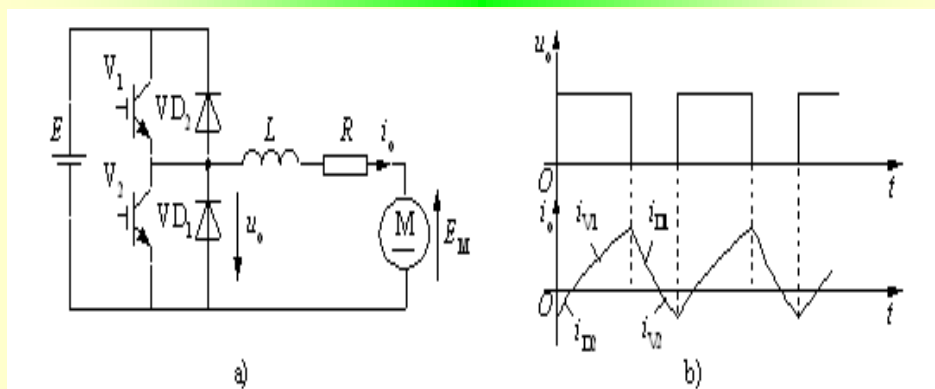
## 2. PWM驱动的微观过程与宏观特性



推挽式  
T型电路  
单臂电路



## 2. PWM驱动微观过程与宏观特性



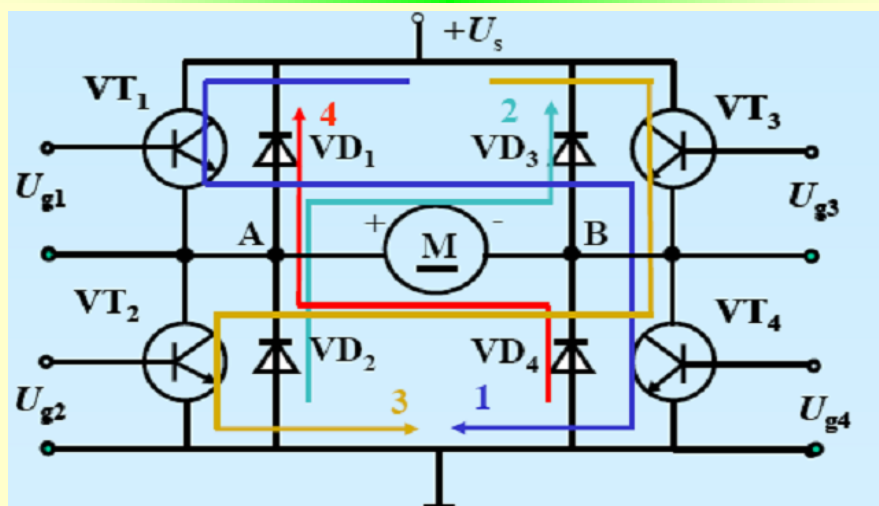
### 一、二象限驱动电路

$$U_d = \frac{t_{on}}{T} U_s = \rho U_s$$

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



## 2. PWM驱动微观过程与宏观特性

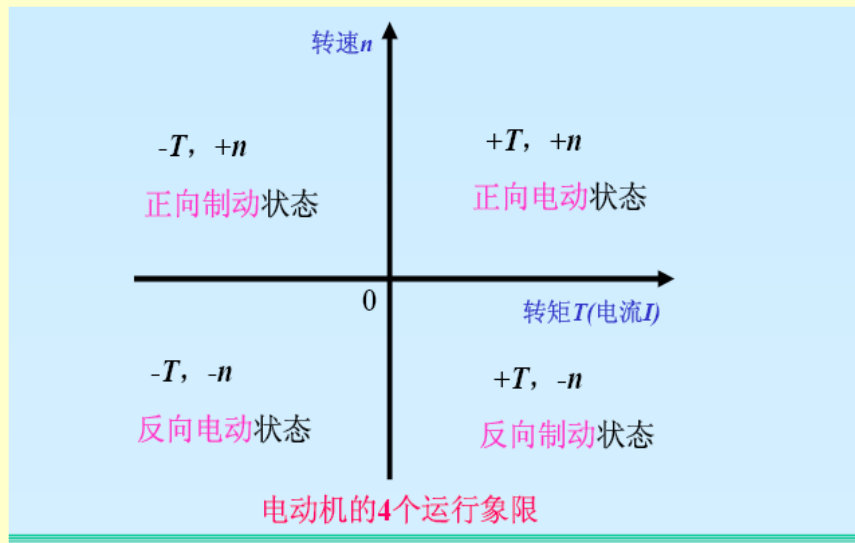


四象限驱动电路

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



## 2. PWM驱动的微观过程与宏观特性



哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



## PWM 技术2

1. PWM驱动特性

2. PWM驱动的微观过程与宏观特性

3. PWM 信号生成

4. PWM 功放应用相关事项

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



### 3. PWM信号生成

#### PWM的实现：调制法

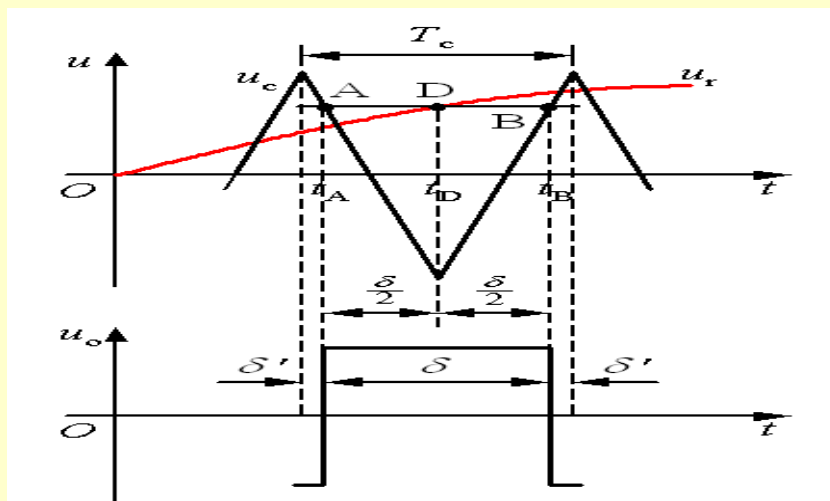
把指令电流  $i_u^*$ 、 $i_v^*$  和  $i_w^*$  和实际输出电流  $i_u$ 、 $i_v$ 、 $i_w$  进行比较，求出偏差，通过放大器A放大后，再去和三角波进行比较，产生PWM波形

- 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，三角波载波常用等腰三角波载波
- 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



### 3. PWM信号生成

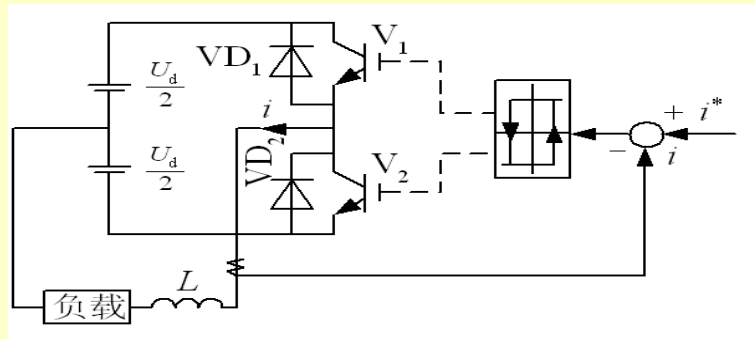
#### PWM的实现：规则采样法



### 3. PWM信号生成

#### PWM实现方法：滞环法

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



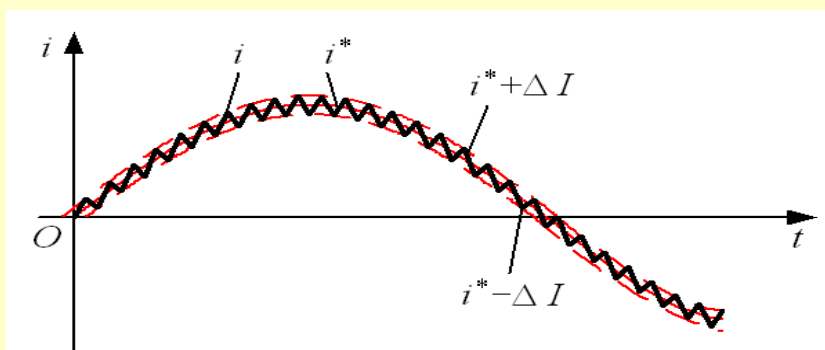
哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



### 3. PWM信号生成

#### ❖ 参数对滞环PWM的影响

滞环环宽  
负载电感  $L$   
反电动势



哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心





### 3. PWM信号生成

采用滞环比较方式的电流跟踪型PWM变流电路的特点

- (1) 硬件电路简单
- (2) 实时控制，电流响应快
- (3) 不用载波，输出电压波形中不含特定频率的谐波
- (4) 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
- (5) 闭环控制，是各种跟踪型PWM变流电路的共同特点



### PWM 技术2

- 1. PWM驱动特性
- 2. PWM驱动的微观过程与宏观特性
- 3. PWM 信号生成
- 4. PWM 功放应用相关事项



## 4. PWM 功放应用相关事项

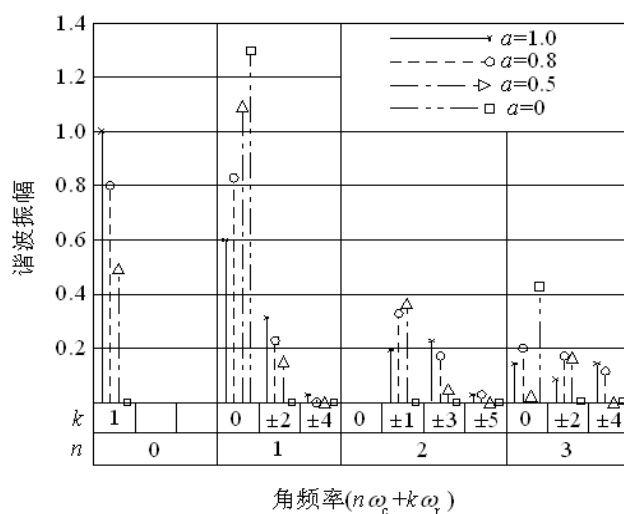
### 1) PWM波形谐波分析

- ❖ 使用载波对正弦信号波调制，产生和载波有关的谐波分量
- ❖ 谐波频率和幅值是衡量PWM逆变电路性能的重要指标之一

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心

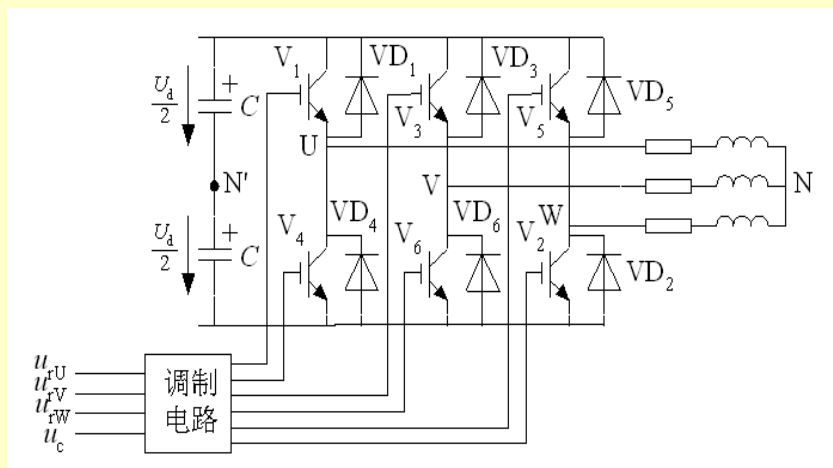


## 4. PWM 功放应用相关事项



## 4. PWM 功放应用相关事项

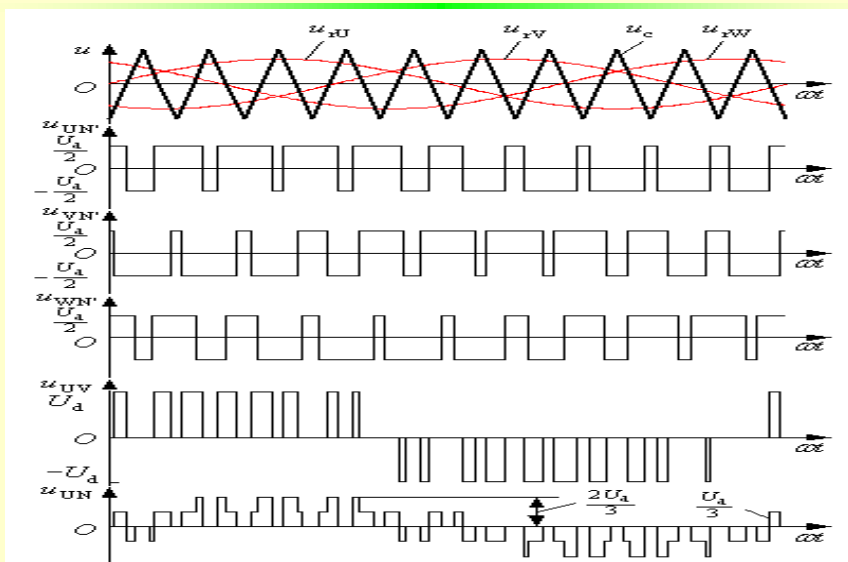
### 三相桥逆变



哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



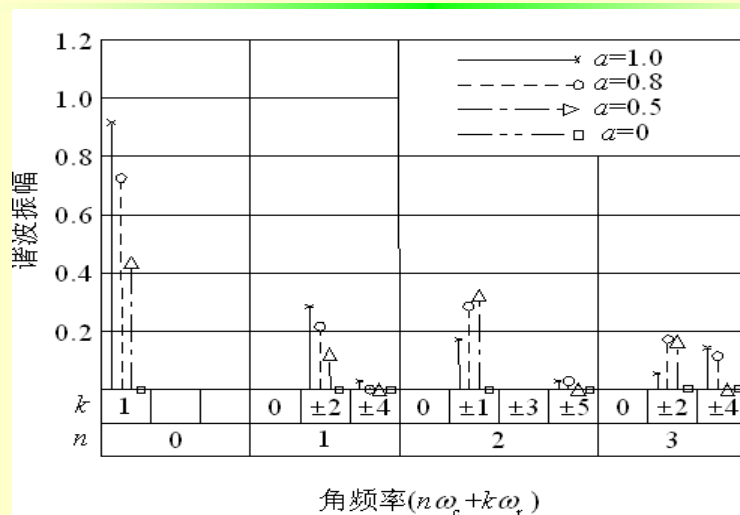
## 4. PWM 功放应用相关事项



哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



## 4. PWM 功放应用相关事项



三相SPWM谐波分布

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



## 4. PWM 功放应用相关事项

- SPWM波中谐波主要是角频率为  $\omega_c$ 、 $2\omega_c$  及其附近的谐波，很容易滤除
- 当调制信号波不是正弦波时，谐波由两部分组成：一部分是对信号波本身进行谐波分析所得的结果，另一部分是由于信号波对载波的调制而产生的谐波。后者的谐波分布情况和SPWM波的谐波分析一致

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



## 4. PWM 功放应用相关事项

### 2) PWM驱动中功率器件的损耗

#### \* 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驱动下的电机功耗增加



## 4. PWM 功放应用相关事项

### 3) 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。



## 4. PWM 功放应用相关事项

### 3) 功率管的安全使用

#### \* 防直通设定死区时间

- 同一臂上下两管的驱动信号互补，为防止直通短路，需要上下管都施加导通死区时间
- 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。



## 4. PWM 功放应用相关事项

### 4) PWM实现中的栅极驱动问题

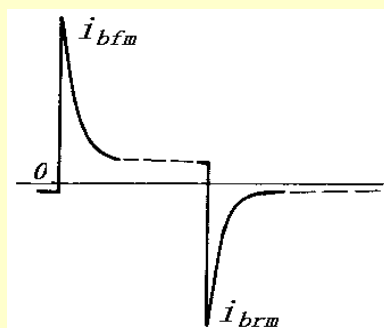
- \* 栅极驱动电路必须与PWM控制电路绝缘和隔离;
- \* 桥臂上管栅极驱动一般由浮动电源供电。
- \* 栅极驱动电路要有过流或晶体管进入放大区工作的保护功能, 保证开关速度, 又保证晶体管工作在饱和状态;
- \* 栅极驱动电路应尽量不使PWM波形的脉宽受到限制, 并保证不同输出占空比的准确传输。



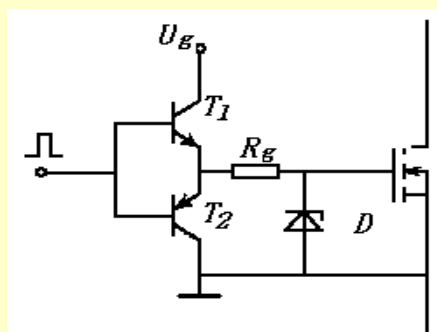
#### 4. PWM 功放应用相关事项

#### 4) PWM实现中的栅极驱动问题

## MOSFET/IGBT驱动需求



### 理想的栅极驱动电流波形



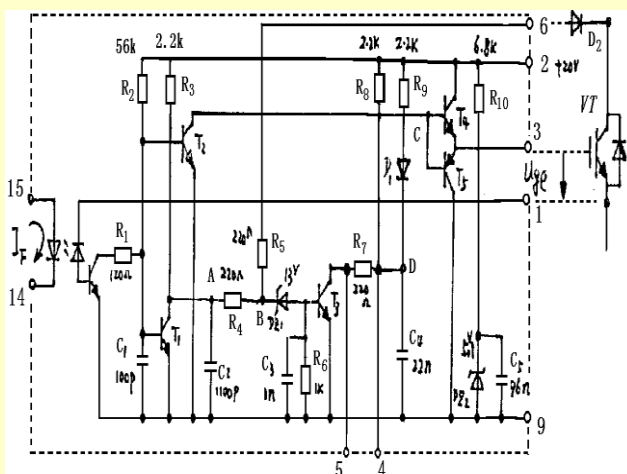
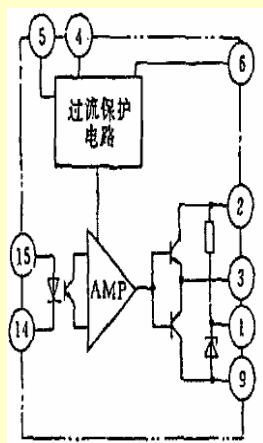
## 基本的栅极驱动电路

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



## 4. PWM 功放应用相关事项

#### 4) 集成栅极驱动芯片举例



哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



## 4. PWM 功放应用相关事项

### 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

snubber电路的应用

泵升电压的泄放



## 4. PWM 功放应用相关事项

### \* 缓冲电路 ( Snubber ) : 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

其他分类法: 耗能式缓冲电路和馈能式缓冲电路 (无损吸收电路)





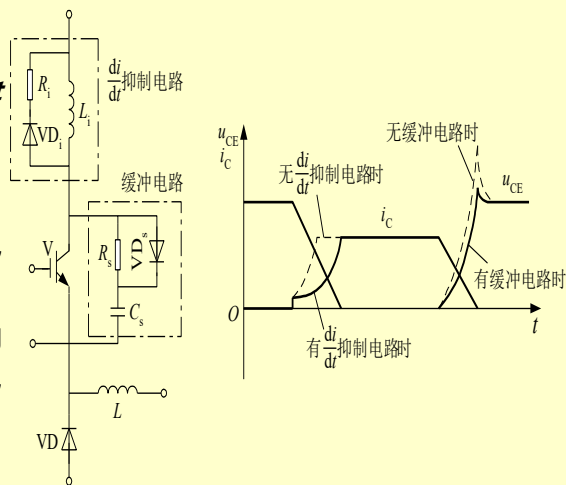
## 4. PWM 功放应用相关事项

### ➤ 无缓冲电路

开通 $di/dt$ 大, 关断时 $du/dt$ 大, 过电压

### ➤ 有缓冲电路

\* 开通时:  $C_s$ 通过 $R_s$ 向V放电, 以后因有 $L_i$ ,  $i_c$ 上升速度减慢  
\* 关断时: 负载电流通过 $VD_s$ 向 $C_s$ 分流, 抑制了 $du/dt$ 和过电压



$di/dt$ 抑制电路和充放电型RCD缓冲电路

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心

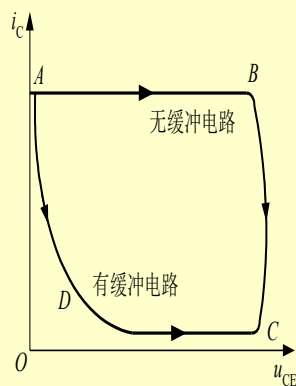


## 4. PWM 功放应用相关事项

### ➤ 关断时的负载曲线

无缓冲电路时:  $L$ 感应电压使 $VD$ 通,  $u_{CE}$ 迅速升, 负载线从A移到B, 之后 $i_c$ 才下降到漏电流的大小, 负载线随之移到C

有缓冲电路时:  $C_s$ 分流使 $i_c$ 在 $u_{CE}$ 开始上升时就下降, 负载线经过D到达C。负载线ADC安全, 且经过的都是小电流或小电压区域, 关断损耗大大降低

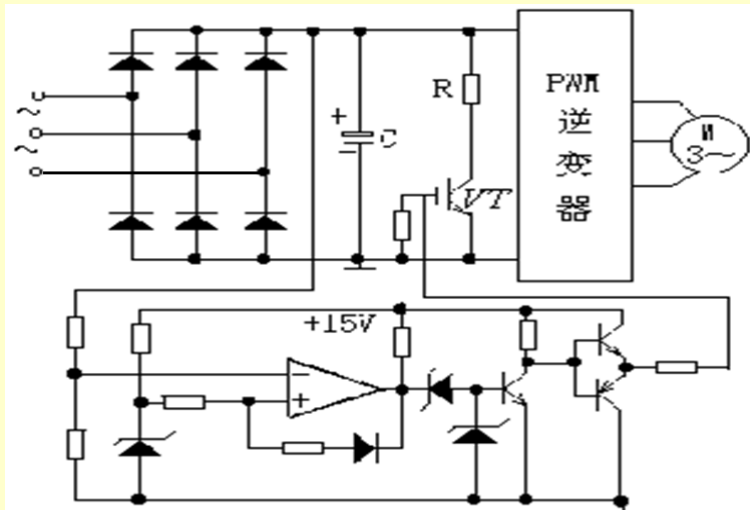


哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



## 4. PWM 功放应用相关事项

### 6) 泵升电压的泄放



哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



## 4. PWM 功放应用相关事项

### 7) PWM 开关频率的选择

- \* 开关管的功耗
- \* 电机电缆的功耗
- \* 静音工作的需求

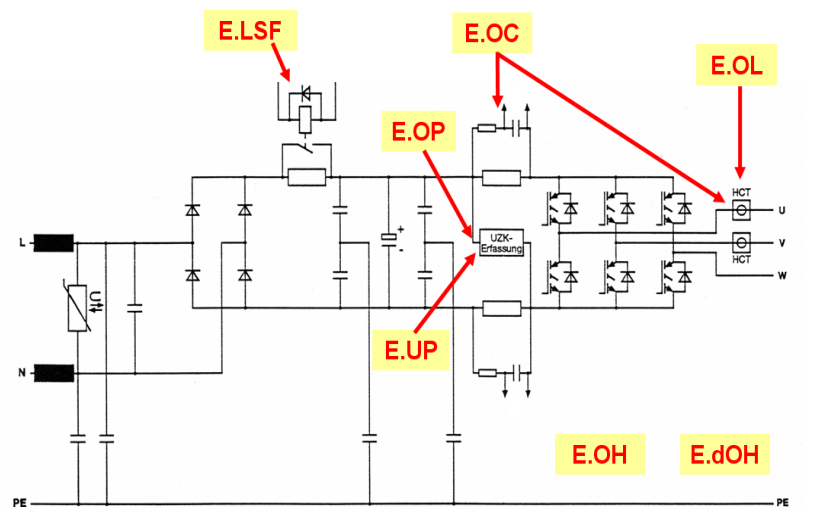
现代PWM型电机驱动器的开关频率一般在2kHz-20kHz,中、小功率的驱动器一般实现16kHz或以上驱动,而大功率应用中,开关频率随功率的增加逐渐降低。

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



## 4. PWM 功放应用相关事项

### 常见PWM驱动电路的保护



哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



## 思考

- 1、推挽结构、H桥电路中主电路功率器件中为什么要反并联二极管？这种二极管应有何种特性？
- 2、若PWM功率放大器的负载是纯电阻，输出量是电功率或电阻产生的热量，它还能起到调节和放大器的作用吗？
- 3、以H桥电路为例,说明PWM驱动的双极性、单极性和受限单极性三种工作方式。三种PWM控制方式下哪种出现电流断续现象？

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



## 致 谢

本文档所引用的许多素材，来源于互联网上国内外的课件、科技论文、文章等。本文引用只是为了给学生提供更好的教学素材，非商业目的。对这些所引用素材的原创者，在此表示深深的谢意。

