



哈爾濱工業大學

HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY



自动控制实践(A)-7

脉宽调制(PWM)技术1



哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



复习

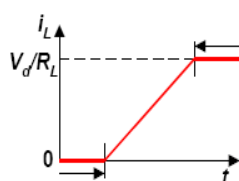
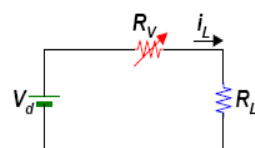
我们需要掌握的功率器件：

- 功率二极管/快恢复二极管(续流)
- MOSFET
- IGBT
- IPM

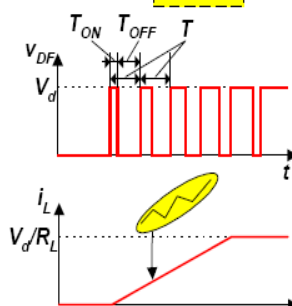
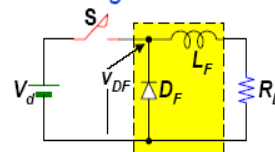


复习

• Current Control Using Variable Resistor



• Current Control Using Switching Device



哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



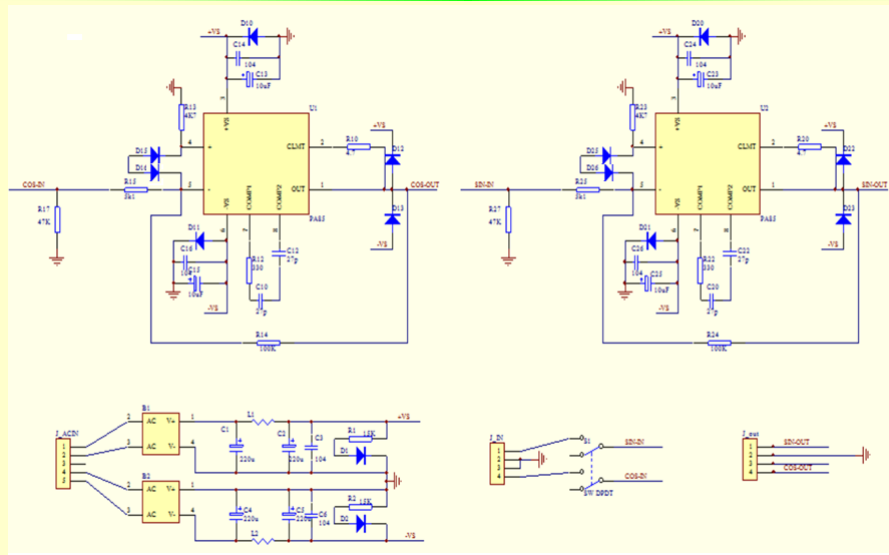
复习

| 线性功放 | 开关功放 |
|--|--|
| 优点: 电磁兼容性好; 电路简单, 适于低成本简单应用。 电压电流纹波小 | 优点: 效率高; 适合于数字化控制 适合于大功率驱动应用 |
| 缺点: 效率低, 仅用于小功率场合 | 缺点: 有可能产生电磁兼容性问题 |

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



复习



哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



目录

1. 脉冲调宽(PWM)驱动原理
2. H桥电路与PWM信号
3. 双极性PWM驱动
4. 单极性PWM与受限PWM驱动

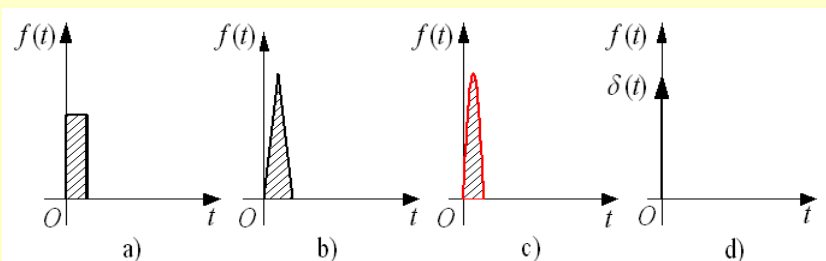
哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



1. PWM驱动原理

➤ 基本原理

- 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



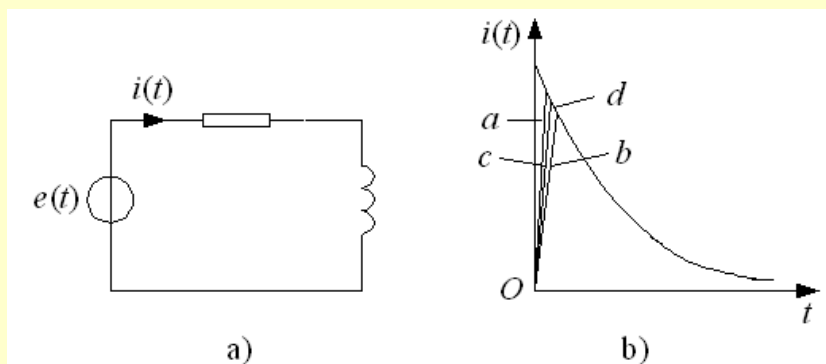
哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



1. PWM驱动原理

➤ 面积等效原理的一个实例

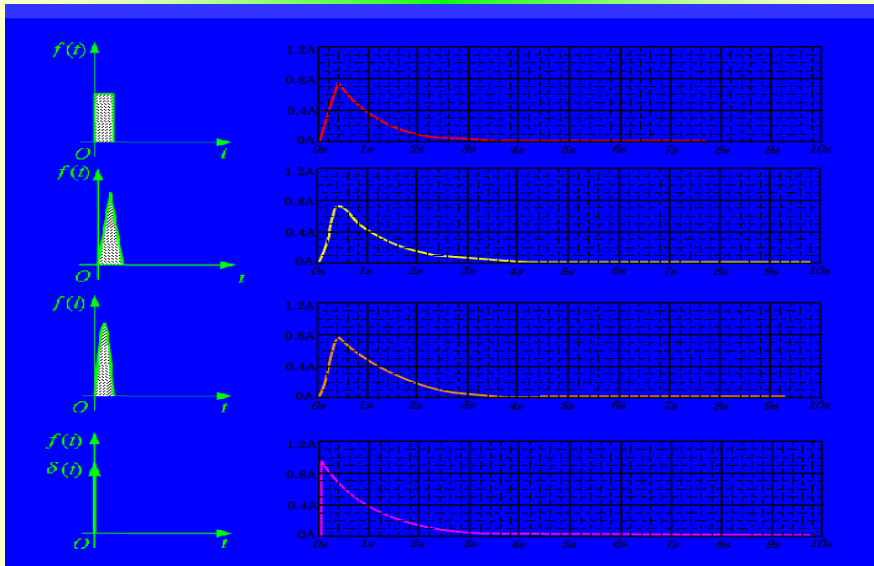
下图电路输入为前一图所示的窄脉冲，a、b、c、d，相应的电流响应为：



哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



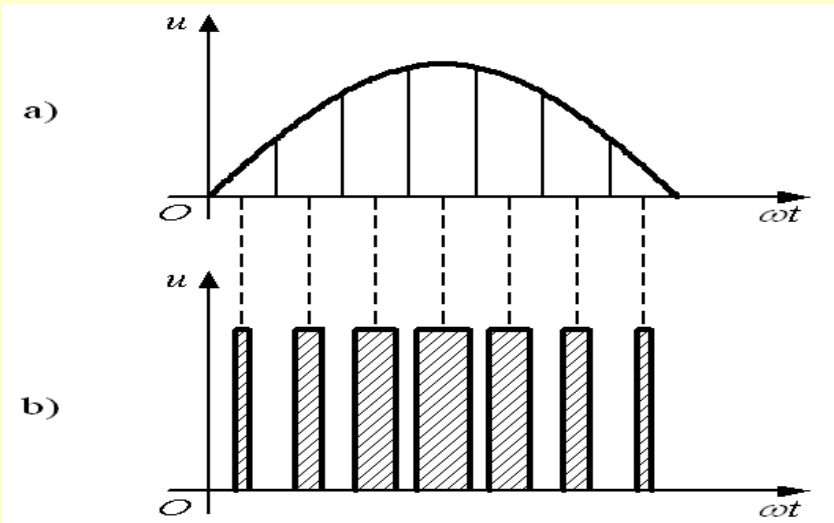
1. PWM驱动原理



哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



1. PWM驱动原理

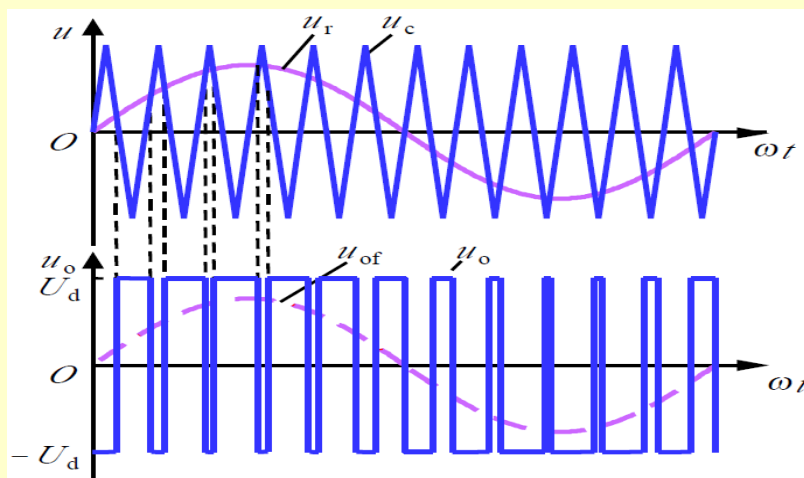


哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



1. PWM驱动原理

- PWM信号产生的基本原理



哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



1. PWM技术原理

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
- 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

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



1. PWM驱动原理

- PWM波形可等效的各种波形
 - 直流斩波电路：直流波形；SPWM波：等效正弦波形
 - 还可以等效成其它所需波形，如非正弦交流波形等，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。
- PWM实现策略：计算法；调制法；滞环法；



1. PWM驱动原理

- PWM控制的思想源于通信技术，1964年德国A.Schonung和H.stemmler首先提出把这项通讯技术应用到交流传动中，从此为交流传动的推广应用开辟了新的局面。进入上世纪80年代后，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，成为现代电力电子技术的代名词。



1. PWM驱动原理

自学与思考：

自学教材15.3一节，掌握电阻电感负载的开关过程，掌握续流这一关键概念。



PWM 技术1

1. 脉冲调宽(PWM)驱动原理

2. H桥电路与PWM信号

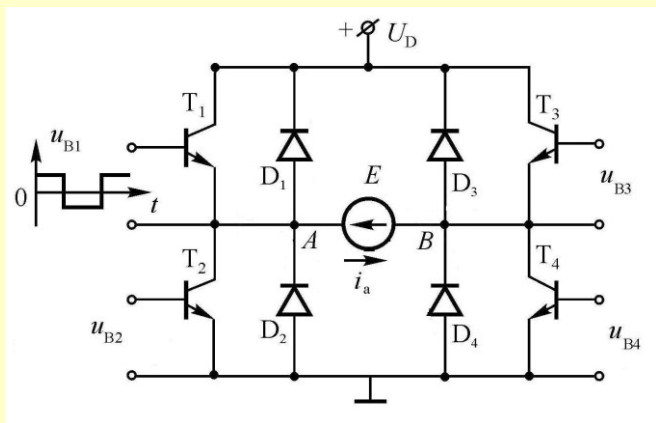
3. 双极性PWM驱动

4. 单极性PWM与受限PWM驱动



2. H桥电路与PWM信号

- H型桥式电路：由四个功率管和四个续流二极管组成。 A 、 B 是电路的输出端。以直流电动机为负载进行原理分析。

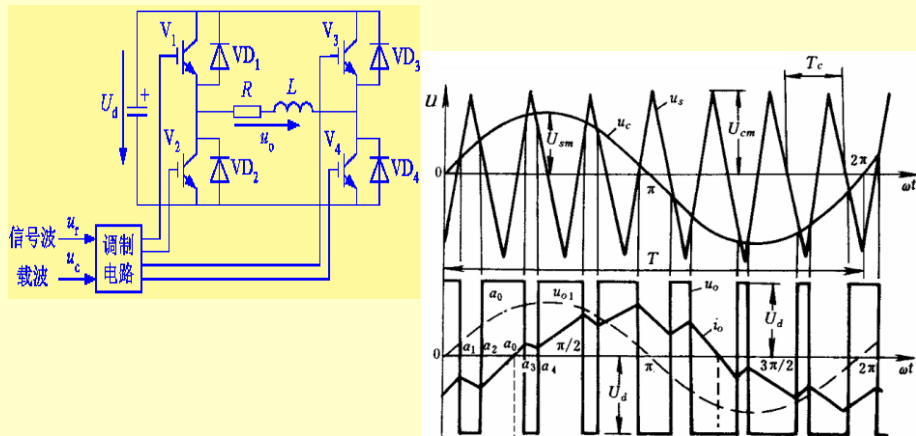


哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



2. H桥电路与PWM信号

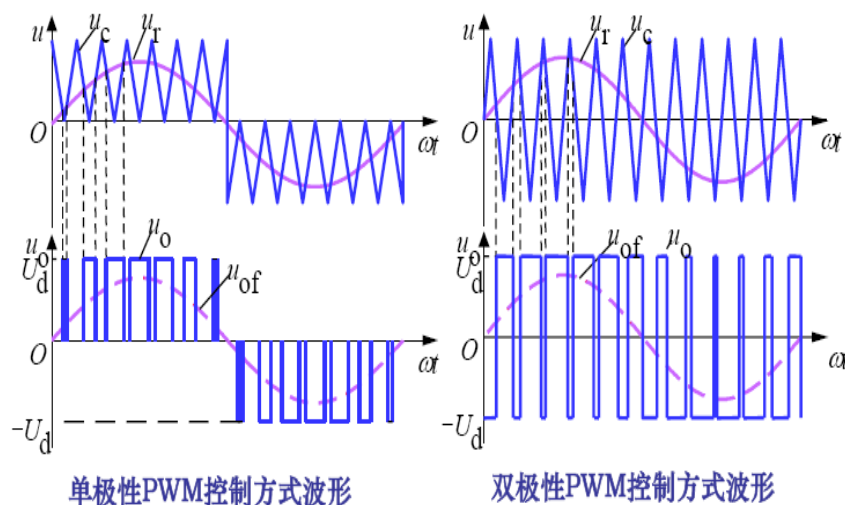
- H桥电路的直流斩波与单相逆变PWM信号：输入的PWM信号决定了H桥功率管的开关状态与导通宽度。



哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



2. H桥电路与PWM信号



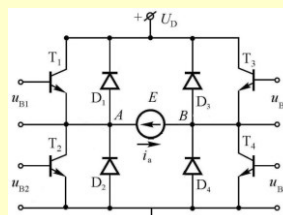
哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



2. H桥电路与PWM信号

为了方便分析，H桥PWM驱动工作时假设：

- 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



PWM 技术1

1. 脉冲调宽(PWM)驱动原理

2. H桥电路与PWM信号

3. 双极性PWM驱动

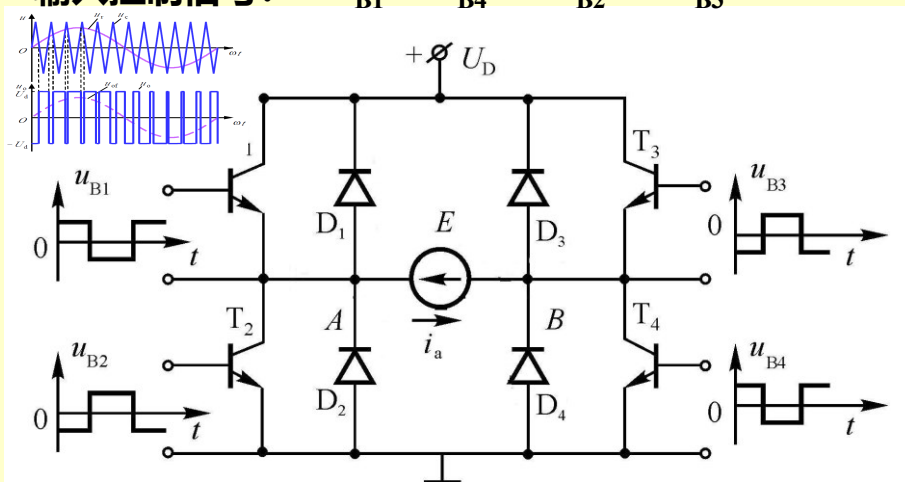
4. 单极性PWM与受限PWM驱动

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



3. 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

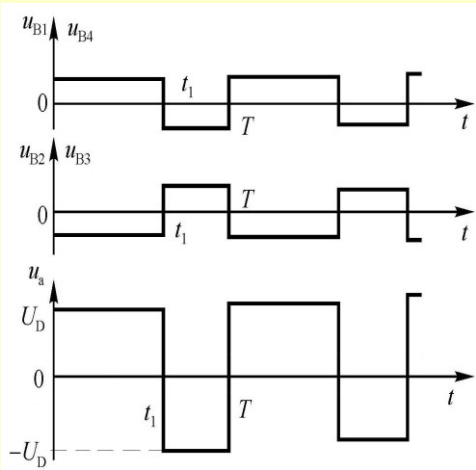


3. 双极性PWM驱动

输出电压:

$$U_{av} = \frac{1}{T} \int_0^{t_1} U_D dt - \frac{1}{T} \int_{t_1}^T U_D dt$$

$$= U_D (2 \frac{t_1}{T} - 1)$$



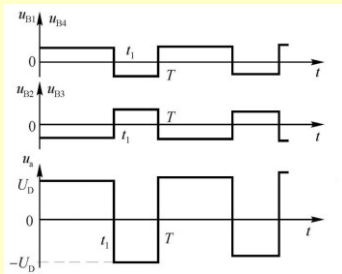
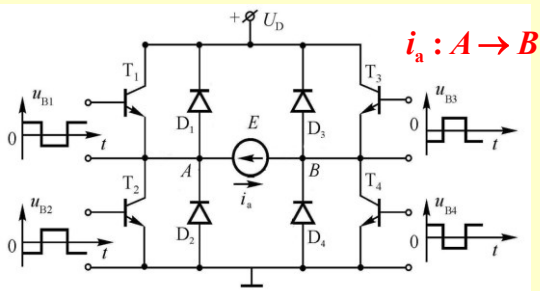
3. 双极性PWM驱动

1. 电动机状态 电流与电动势反向

$$i_a > 0 \quad U_{av} > E$$

1) $0 < t < t_1$ T_1 、 T_4 饱和, T_2 、 T_3 截止。

电流: $U_D \rightarrow T_1 \rightarrow A \rightarrow B \rightarrow T_4 \rightarrow \text{地} \rightarrow U_D$



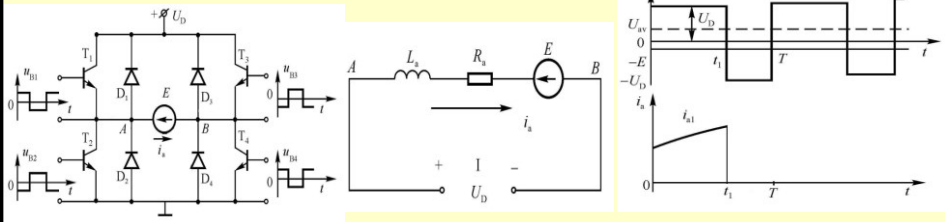
3. 双极性PWM驱动

$0 < t < t_1$ 电流: $U_D \rightarrow T_1 \rightarrow A \rightarrow B \rightarrow T_4 \rightarrow \text{地} \rightarrow U_D$

$$u_{AB} = R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + E = U_D \Rightarrow i_a(t) = \frac{U_D - E}{R_a} - \left(\frac{U_D - E}{R_a} - I_0 \right) e^{-\frac{R_a}{L_a} t}$$

$$i_a(t) \uparrow: I_0 \rightarrow \frac{U_D - E}{R_a}$$

电源输出电能，电流增加，磁场能增加。

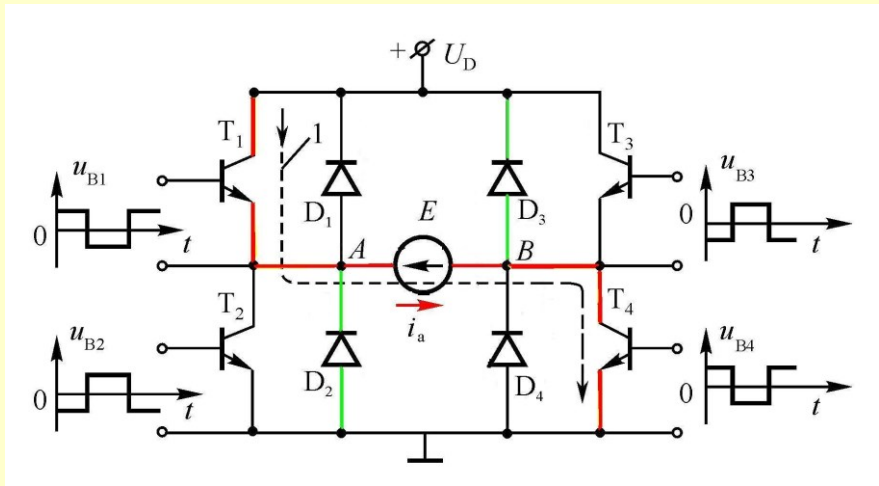


哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



3. 双极性PWM驱动

电动机状态: $0 < t < t_1$



哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



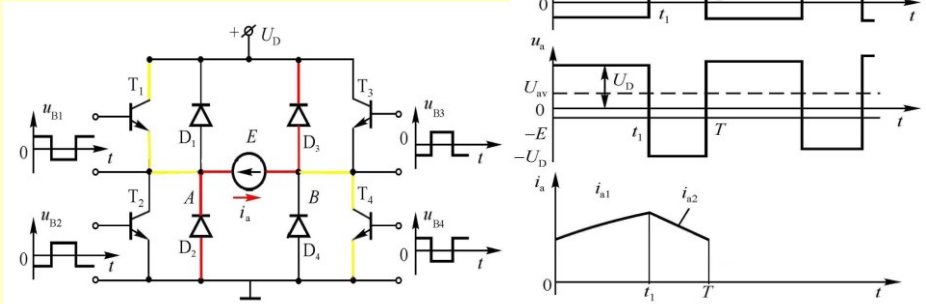
3. 双极性PWM驱动

$t_1 < t < T$ 只有 D_2 和 D_3 正常导通

i_a : 地 $\rightarrow D_2 \rightarrow A \rightarrow B \rightarrow D_3 \rightarrow U_D \rightarrow$ 地

T_1 、 T_4 截止, $i_a(t)$ 减小。

i_a : $A \rightarrow B$

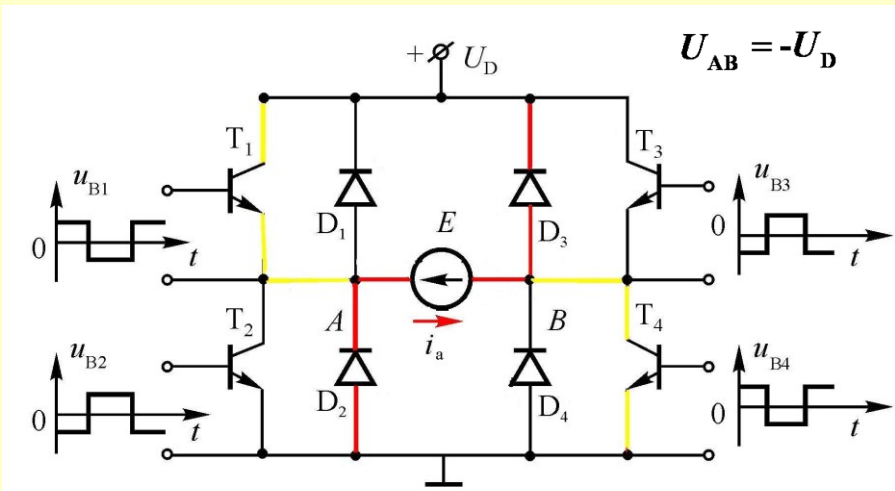


哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



3. 双极性PWM驱动

电动机状态: $t_1 < t < T$



哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



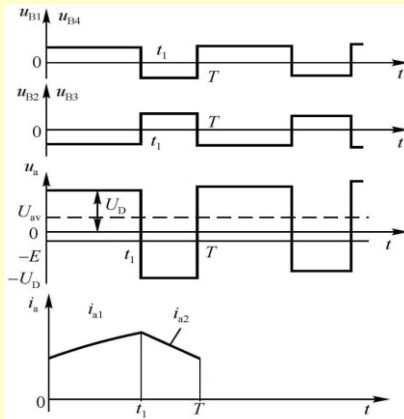
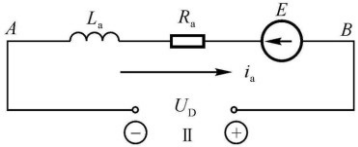
3. 双极性PWM驱动

$t_1 < t < T$ i_a : 地 $\rightarrow D_2 \rightarrow A \rightarrow B \rightarrow D_3 \rightarrow U_D \rightarrow$ 地

$$u_{AB} = R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + E = -U_D \Rightarrow i_a(t) = -\frac{U_D + E}{R_a} + \left[\frac{U_D + E}{R_a} + I(t_1) \right] e^{-\frac{R_a}{L_a}(t-t_1)}$$

$$i_a(t) \downarrow: I(t_1) \rightarrow -\frac{U_D + E}{R_a}$$

电源吸收电能，电流减小，
磁场能减小。



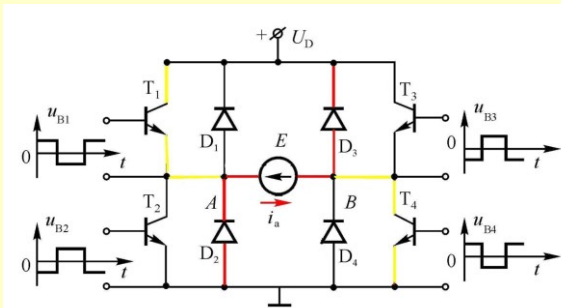
哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



3. 双极性PWM驱动

说明:

- (1) $t_1 < t < T$ 时段, T_2 、 T_3 虽然接收导通信号, 但 $U_{CE} = -0.7V$, 故不导通。
- (2) 若无 D_2 、 D_3 , T_1 、 T_4 截止时将被击穿。



哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



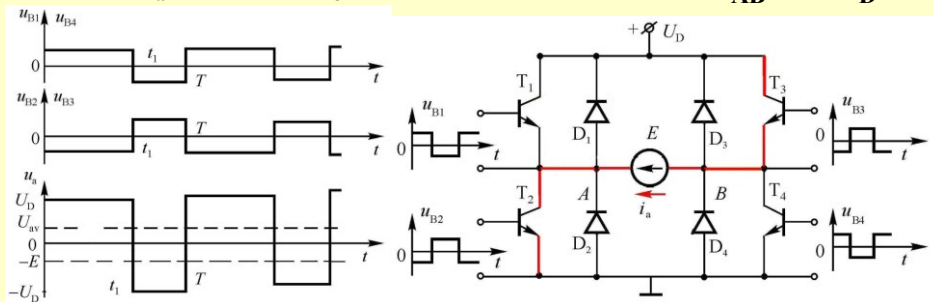
3. 双极性PWM驱动

2. 发电机状态 电流与电势同向。 $B \rightarrow A$

$$i_a < 0 \quad U_{av} < E$$

1) $t_1 < t < T$ T_2 、 T_3 饱和， T_1 、 T_4 截止

$$i_a(t): U_D \rightarrow T_3 \rightarrow B \rightarrow A \rightarrow T_2 \rightarrow \text{地} \quad U_{AB} = -U_D$$



哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



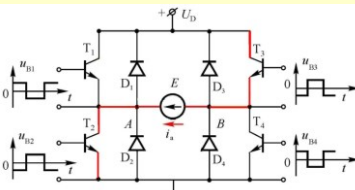
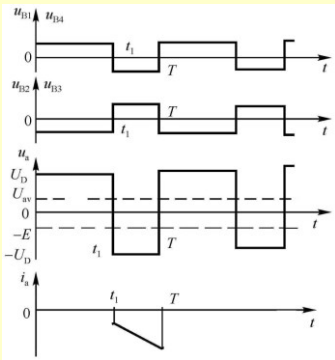
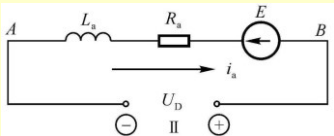
3. 双极性PWM驱动

$$u_{AB} = R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + E = -U_D \Rightarrow$$

$$i_a(t) = -\frac{U_D + E}{R_a} + \left[\frac{U_D + E}{R_a} + I(t_1) \right] e^{-\frac{R_a}{L_a}(t-t_1)}$$

$$|i_a(t)| \uparrow: I(t_1) \rightarrow -\frac{U_D + E}{R_a}$$

电源输出电能，电流增加，
磁场能增加。



哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



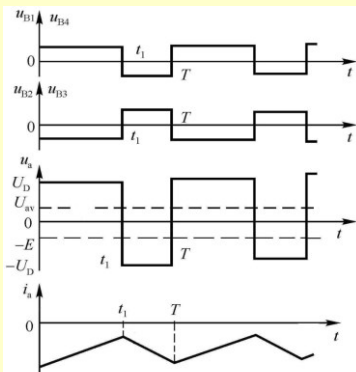
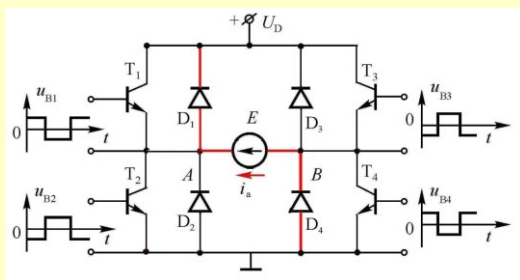
3. 双极性PWM驱动

2) $0 < t < t_1$ ($T < t < T + t_1$) $i_a : B \rightarrow A$

- T2、T3 截止，电流减小，只有D₁、D₄ 正常导通。

$i_a(t) : \text{地} \rightarrow D_4 \rightarrow B \rightarrow A \rightarrow D_1 \rightarrow U_D$

输出电压 $u_{AB} = U_D$



哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



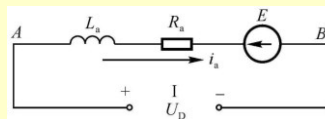
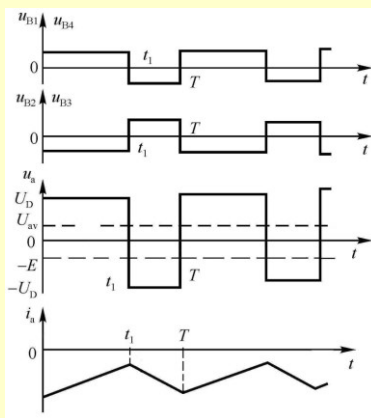
3. 双极性PWM驱动

$$u_{AB} = R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + E = U_D \Rightarrow$$

$$i_a(t) = \frac{U_D - E}{R_a} - \left(\frac{U_D - E}{R_a} - I_0 \right) e^{-\frac{R_a}{L_a} t}$$

$$|i_a(t)| \downarrow: I_0 \rightarrow \frac{U_D - E}{R_a}$$

电源吸收电能，电流减小，
磁场能减小。



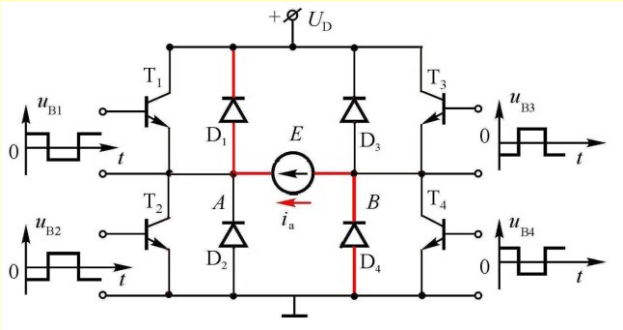
哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



3. 双极性PWM驱动

说明:

- (1) $0 < t < t_1$ ($T < t < T + t_1$), T_1 、 T_4 虽然接收导通信号, 但 $U_{CE} = -0.7V$, 故不导通。
- (2) 若无 D_1 、 D_4 , T_2 、 T_3 截止时将被击穿。



哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心

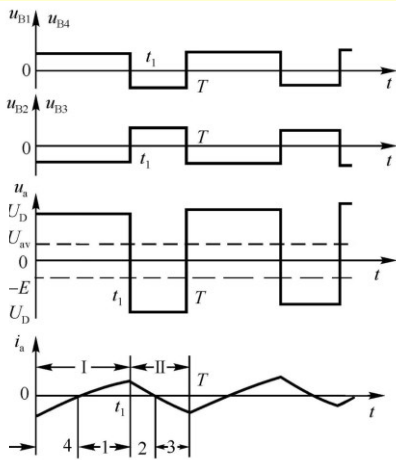
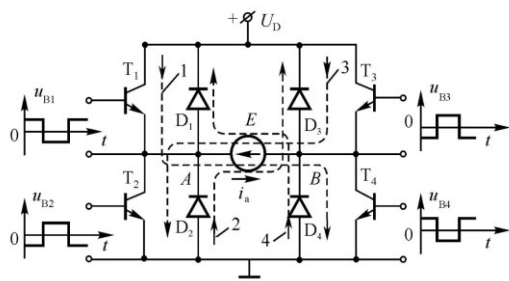


3. 双极性PWM驱动

3. 轻载状态

$$T_{em} \approx 0, i_a(t) \approx 0, I_{av} \approx 0, U_{av} \approx E。$$

电流有正有负, 上述两个状态中的四种情况, 在一个周期内交替出现。



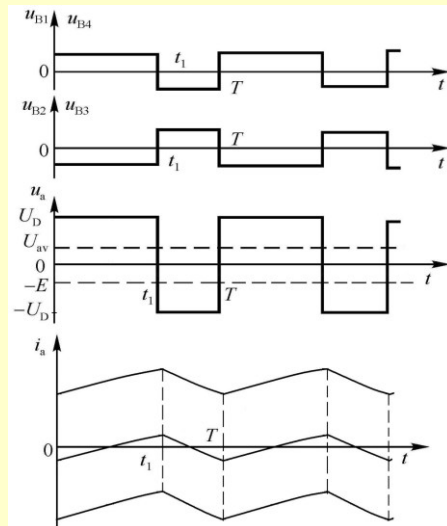
哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



3. 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 技术1

1. 脉冲调宽(PWM)驱动原理

2. H桥电路与PWM信号

3. 双极性PWM驱动

4. 单极性PWM与受限PWM驱动



4. 单极性PWM与受限单极性PWM驱动

- 单极性PWM
- 受限单极性PWM



哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



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？

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



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？



本节参考资料

- 秦继荣.现代直流伺服控制技术及其控制系统设计.机械工业出版社（第N版）。
- 王兆安、黄俊.电力电子技术.机械工业出版社（第N版）。

