



自动控制实践I

# PWM输出级工作原理

哈尔滨工业大学空间控制与惯性技术研究中心 解伟男

# 目 录

---

## 1 T形单边电路

## 2 H形桥式电路

2.1 双极性输出

2.2 单极性输出

2.3 有限单极性输出

## 3 H形桥式电路和升、降压斩波电路的关系

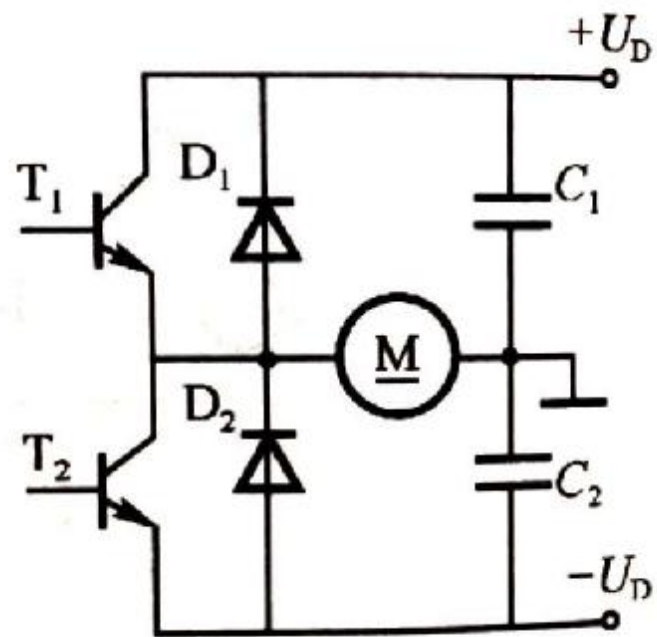
# 1 T形单边电路

## ○ T形单边电路工作原理

- n T1和T2的控制电压相位相反
- n 改变控制信号的占空比可以实现对电机的控制

## ○ T形单边电路特点

- n 为了电机正反旋转需要双电源
- n 晶体管承受两倍电源电压
- n 应用少

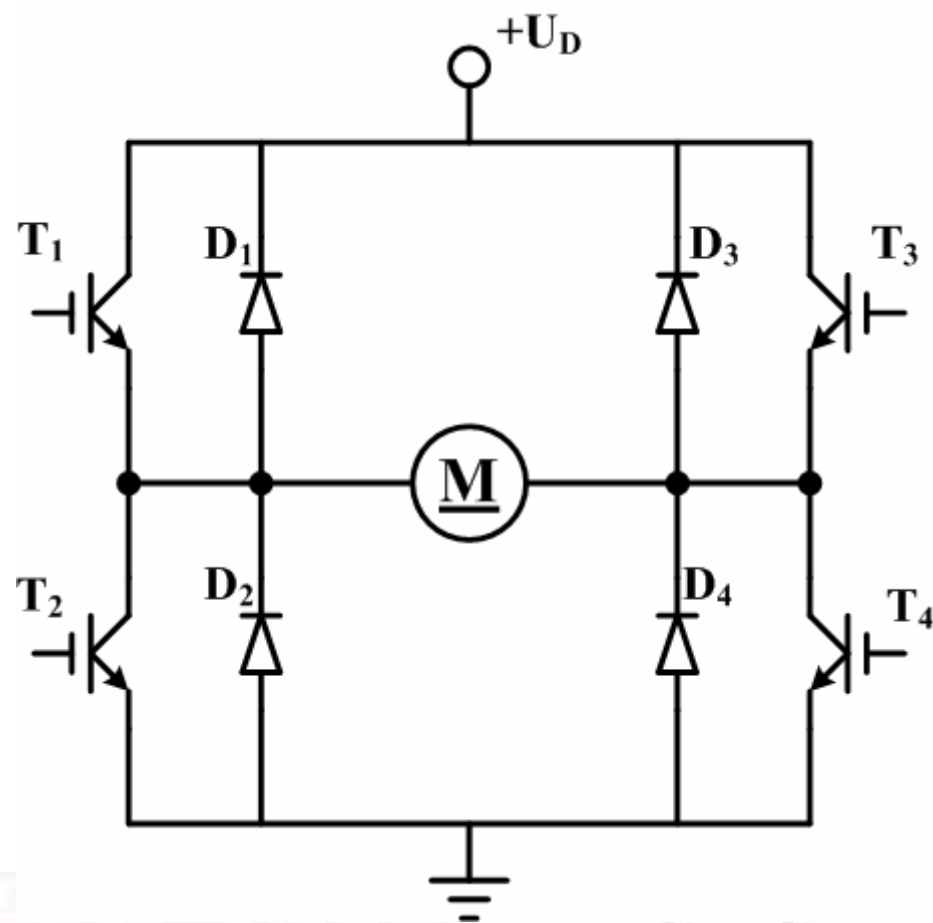


单极性or双极性？

## 2 H形桥式电路

### ○ H形桥式电路

- n 输入、输出信号的频率称为**开关频率**
- n 输入、输出信号的周期称为**开关周期**
- n 该电路三种控制方法：  
双极性输出、单极性输出和有限单极性输出



## 2 H形桥式电路

### ○ 假设条件

- n 开关器件是无惯性的元件，即忽略开关器件的开关过程
- n 电机用电阻 $R_a$ 、电感 $L_a$ 和电势 $E$ 来等效
- n 开关周期远小于电机的机电时间常数  $\tau_m$ ，认为一个开关周期内电机转速及反电动势 $E$ 为常值
- n 忽略电源内阻，电机回路的电磁时间常数  $\tau_e = L_a / R_a$
- n 当电磁转矩平均值 $T_{em} = K_t I_a$ 和负载转矩 $T_L$ 相平衡时，“开关放大器-电动机”工作在准稳定状态，这时电枢电流是周期变化

## 2.1 双极性输出

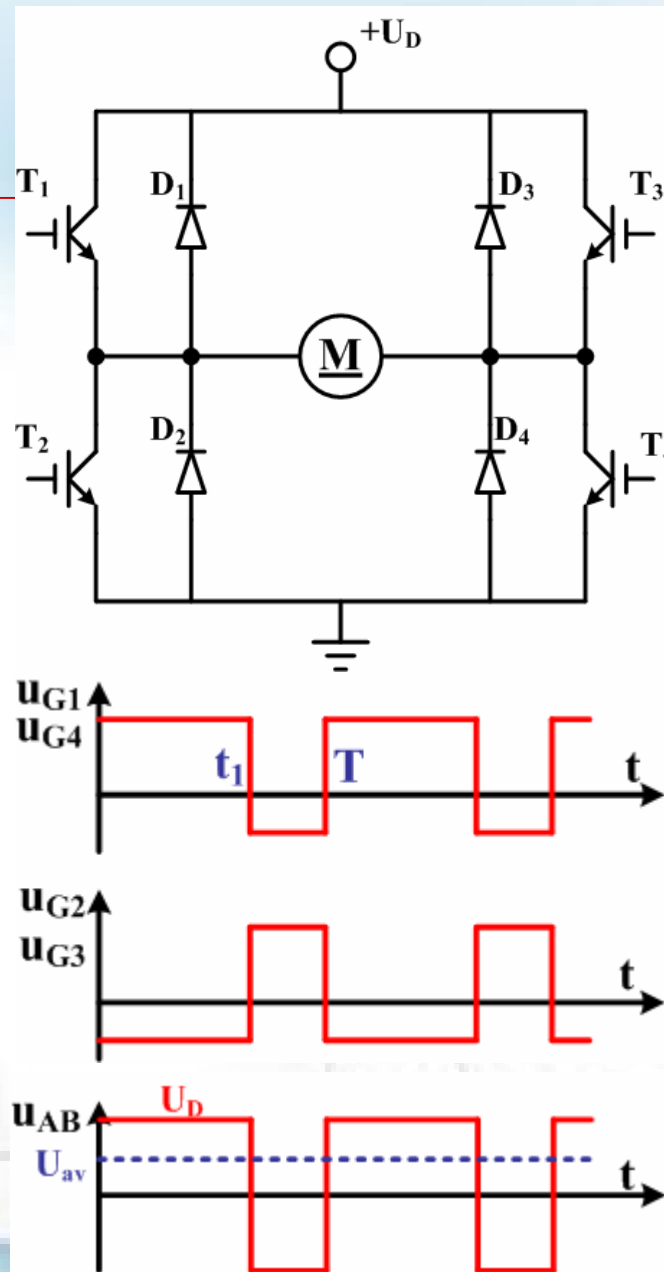
### ○ 控制方式

- n**  $T_1$ 和 $T_4$ 的栅极控制电压相同
- n**  $T_2$ 和 $T_3$ 的栅极控制电压相同
- n** 两组控制电压的相位相反

$$u_{G1} = u_{G4} = -u_{G2} = -u_{G3}$$

### ○ 输出电压

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



## 2.1 双极性输出

### 电动机状态

$$U_{av} > E$$

$$i_a: A \rightarrow B$$

### 当 $0 < t < t_1$ 时

$T_1$  和  $T_4$  导通

$u_A = U_D$ ,  $u_B$  为地,  $u_{AB} = U_D$

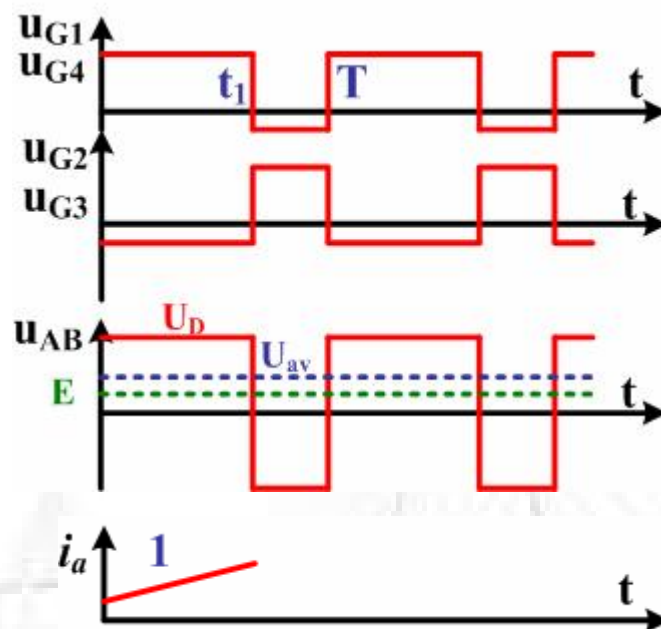
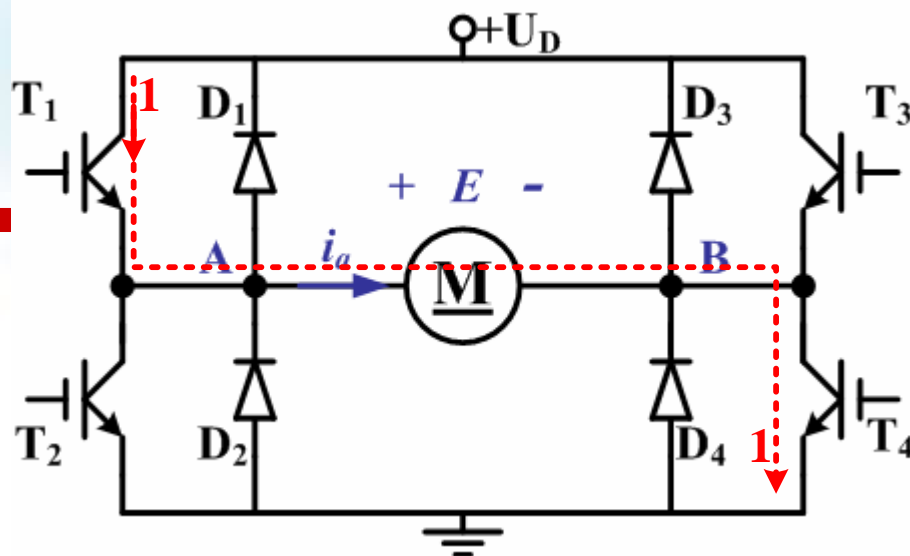
电枢电流

$i_a: T_1 \rightarrow \text{电机} \rightarrow T_4$

能量

电感: 储能; 电源: 输出能量;

电机: 电能转换为机械能



## 2.1 双极性输出

○ 当  $t_1 < t < T$  时

n  $D_2$  和  $D_3$  导通

n  $u_A$  为地,  $u_B = U_D$ ,  $u_{AB} = -U_D$

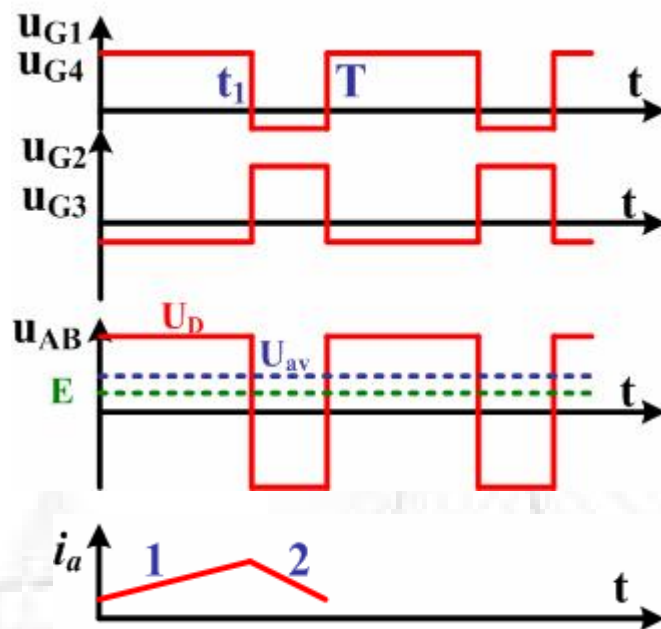
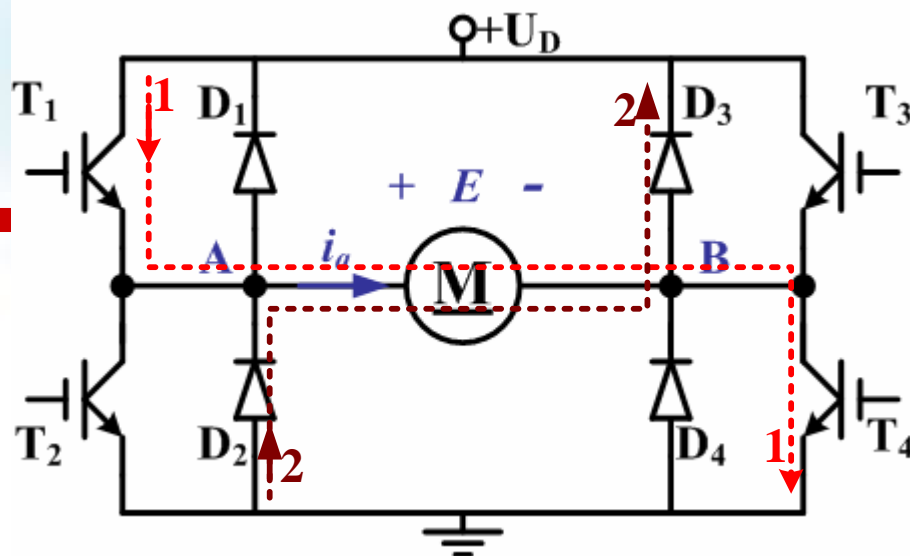
n 电枢电流

$i_a$ :  $D_2 \rightarrow$  电机  $\rightarrow D_3$

n 能量

电感: 释放能量; 电源: 吸收能量;

电机: 电能转换为机械能



二极管的作用?



## 2.1 双极性输出

### ○ 发电机状态

$$U_{av} < E$$

$$i_a: B \rightarrow A$$

### ○ 当 $t_1 < t < T$ 时

**n**  $T_3$  和  $T_2$  导通

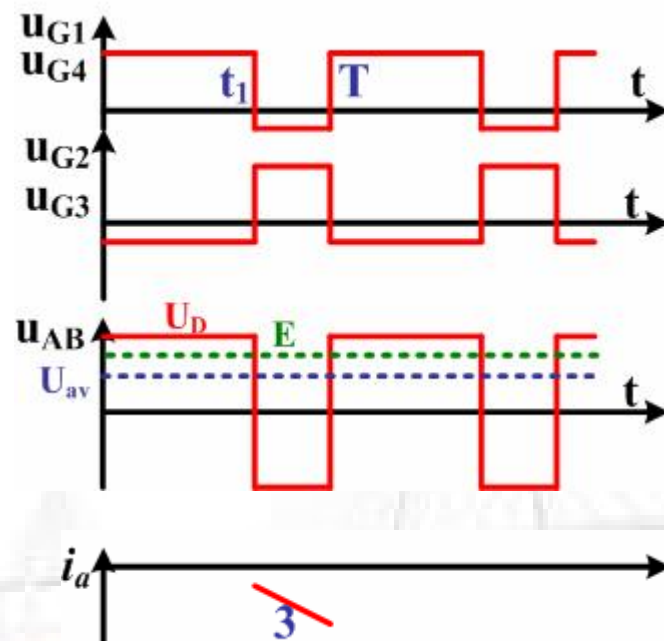
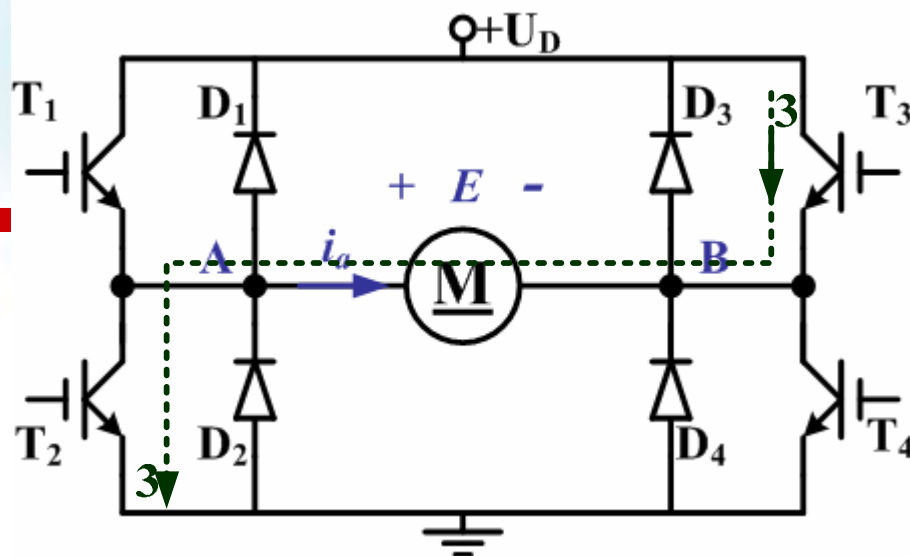
**n**  $u_A$  为地,  $u_B = U_D$ ,  $u_{AB} = -U_D$

**n** 电枢电流

$i_a$ :  $T_3 \rightarrow$  电机  $\rightarrow T_2$

**n** 能量

电感: 储能; 电源: 输出能量;  
电机: 机械能转换为电能



## 2.1 双极性输出

○ 当  $0 < t < t_1$  时

n  $D_1$  和  $D_4$  导通

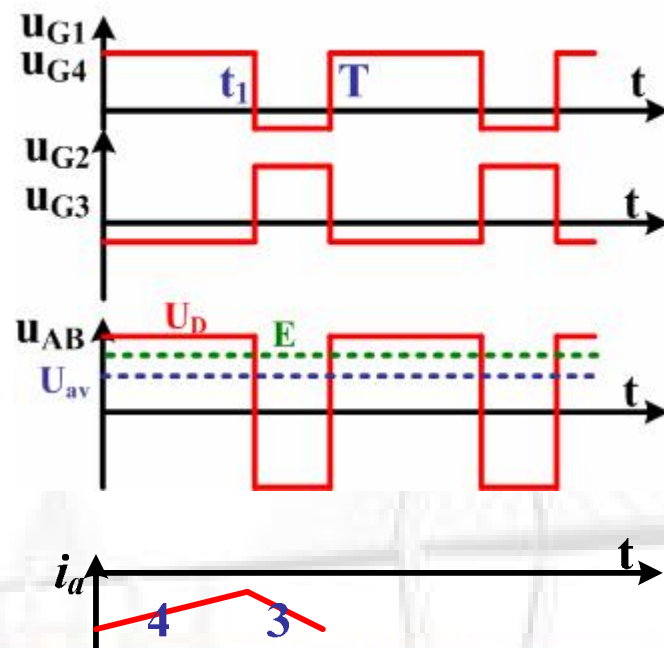
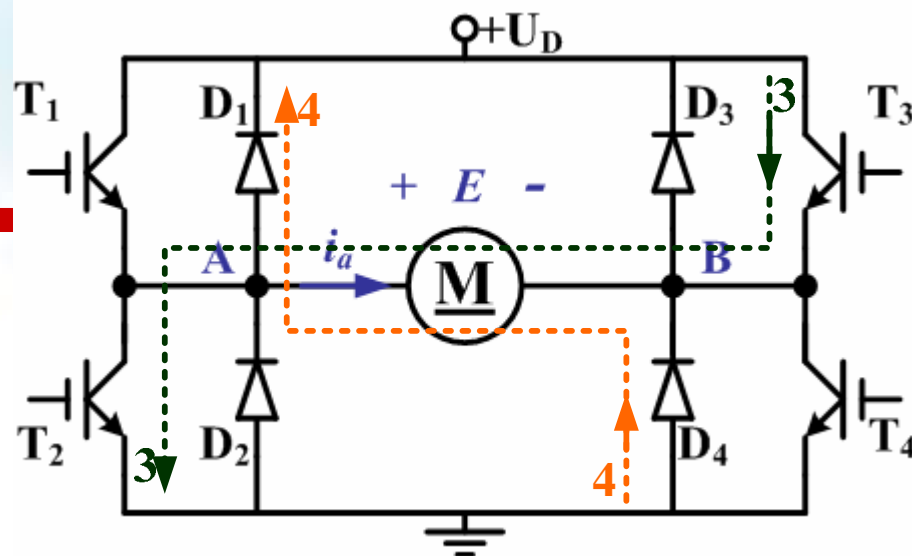
n  $u_A = U_D$ ,  $u_B$  为地,  $u_{AB} = U_D$

n 电枢电流

$i_a$ :  $D_4 \rightarrow$  电机  $\rightarrow D_1$

n 能量

电感: 释放能量; 电源: 吸收能量;  
电机: 机械能转换为电能



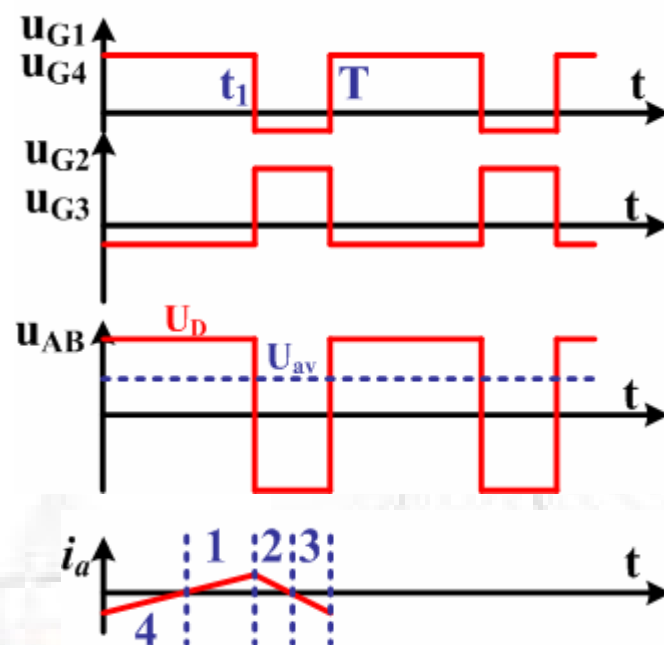
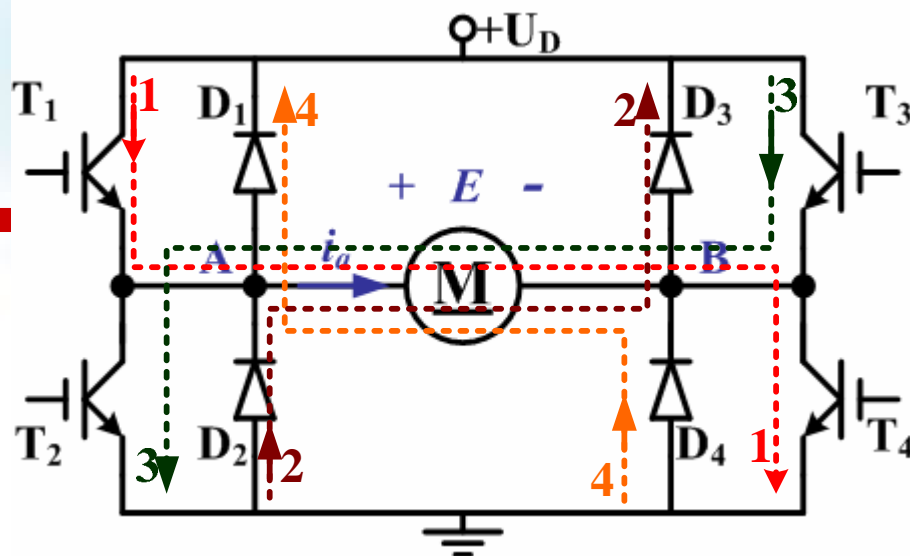
## 2.1 双极性输出

### ○ 轻载状态

$$T_{em} \approx 0$$

$$i_a \approx 0$$

- n 回路4,  $D_4 \rightarrow$  电机  $\rightarrow D_1$ , 发电机, 电感释放能量, 电源充电
- n 回路1,  $T_1 \rightarrow$  电机  $\rightarrow T_4$ , 电动机, 电感吸收能量, 电源放电
- n 回路2,  $D_2 \rightarrow$  电机  $\rightarrow D_3$ , 电动机, 电感释放能量, 电源充电
- n 回路3,  $T_3 \rightarrow$  电机  $\rightarrow T_2$ , 发电机, 电感吸收能量, 电源放电



## 2.2 单极性输出

○ 输出正方波电压时

n  $T_1$ 和 $T_2$ 的控制电压相位相反

n  $T_3$ 一直加关断电压

n  $T_4$ 一直加开通电压

n 输出电压

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

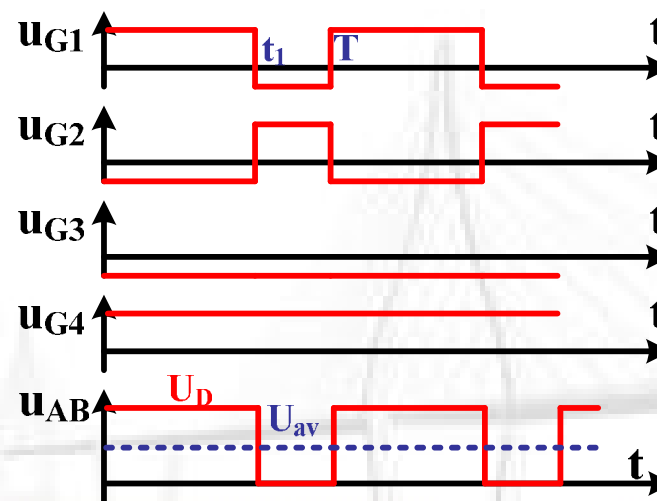
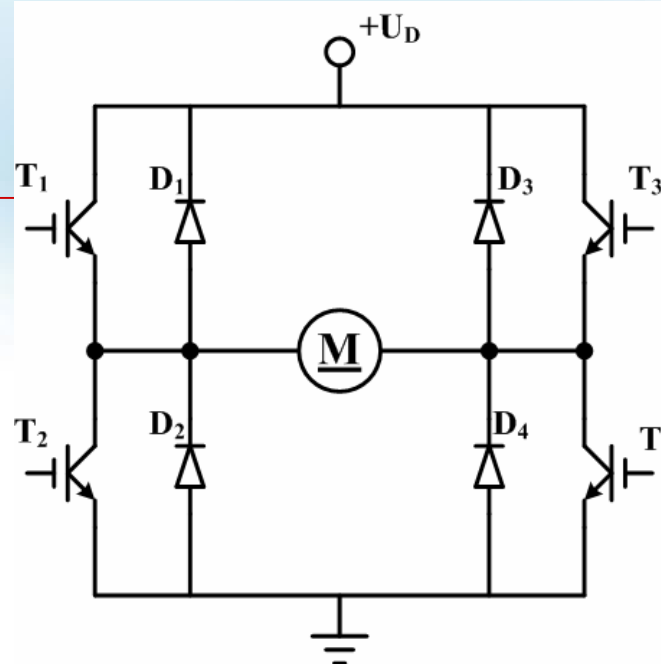
○ 输出负方波电压时

n  $T_3$ 和 $T_4$ 的控制电压相位相反

n  $T_1$ 一直加关断电压

n  $T_2$ 一直加开通电压

○ 特点：电流波动小，控制复杂



## 2.2 单极性输出

### 电动机状态

$$U_{av} > E$$

$$i_a: A \rightarrow B$$

### 当 $0 < t < t_1$ 时

$T_1$  和  $T_4$  导通

$u_A = U_D$ ,  $u_B$  为地,  $u_{AB} = U_D$

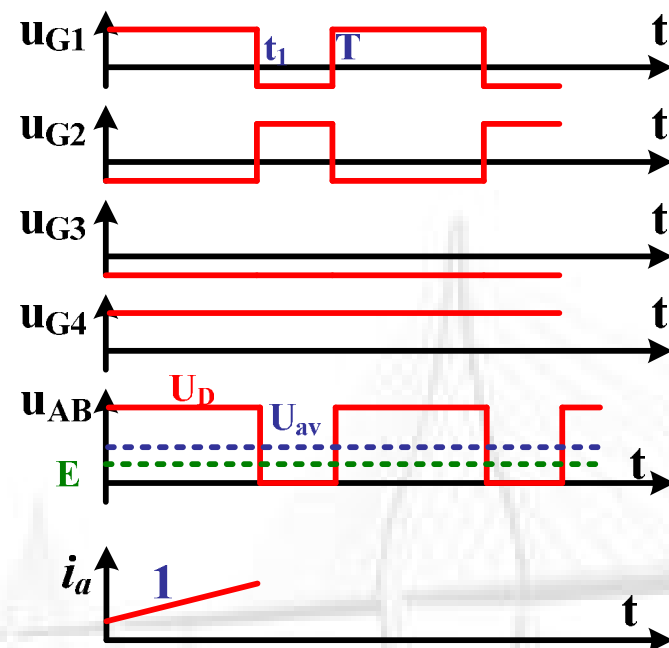
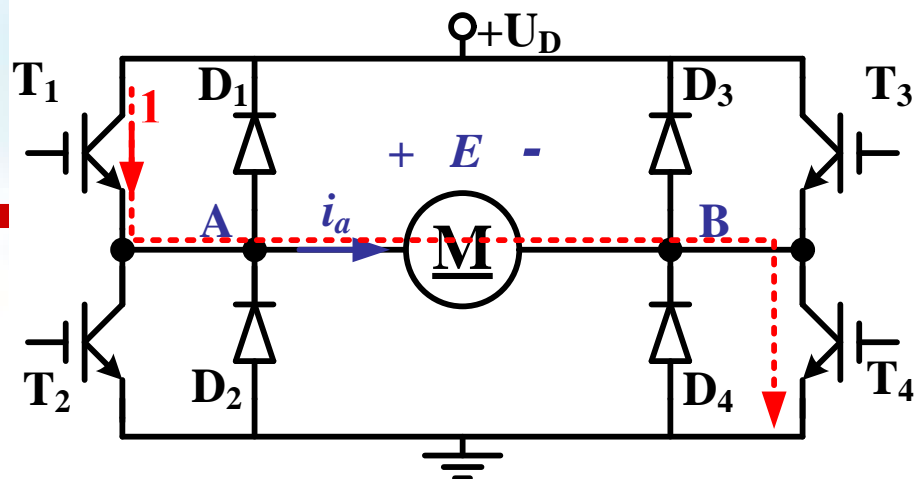
电枢电流

$i_a: T_1 \rightarrow \text{电机} \rightarrow T_4$

能量

电感: 储能; 电源: 输出能量;

电机: 电能转换为机械能



## 2.2 单极性输出

### 电动机状态

$$U_{av} > E$$

$$i_a: A \rightarrow B$$

### 当 $t_1 < t < T$ 时

**n**  $D_2$  和  $T_4$  导通

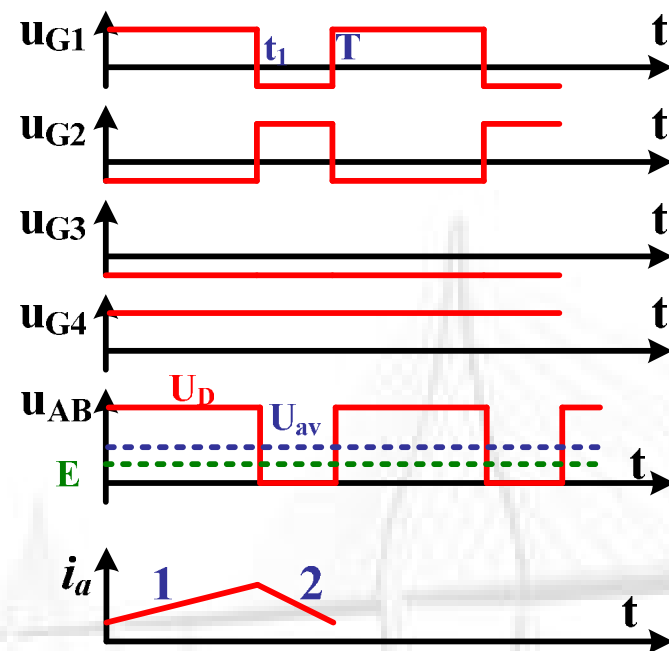
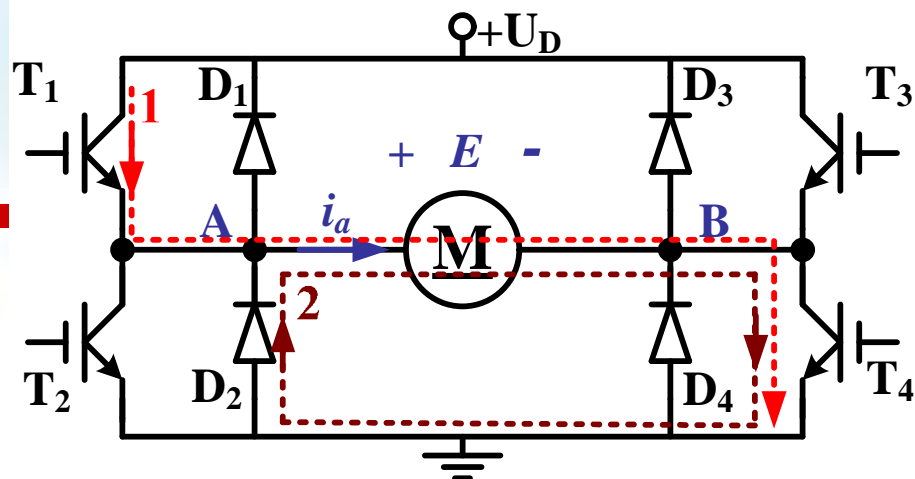
**n**  $u_A$  为地,  $u_B$  为地,  $u_{AB} = 0$

**n** 电枢电流

$i_a$ :  $D_2 \rightarrow$  电机  $\rightarrow T_4$

**n** 能量

电感: 释放能量; 电源: 无能量交换;  
电机: 电能转换为机械能



## 2.2 单极性输出

### ○ 发电机状态

$$U_{av} < E$$

$$i_a: B \rightarrow A$$

### ○ 当 $t_1 < t < T$ 时

**n**  $D_4$  和  $T_2$  导通

**n**  $u_A$  为地,  $u_B$  为地,  $u_{AB} = 0$

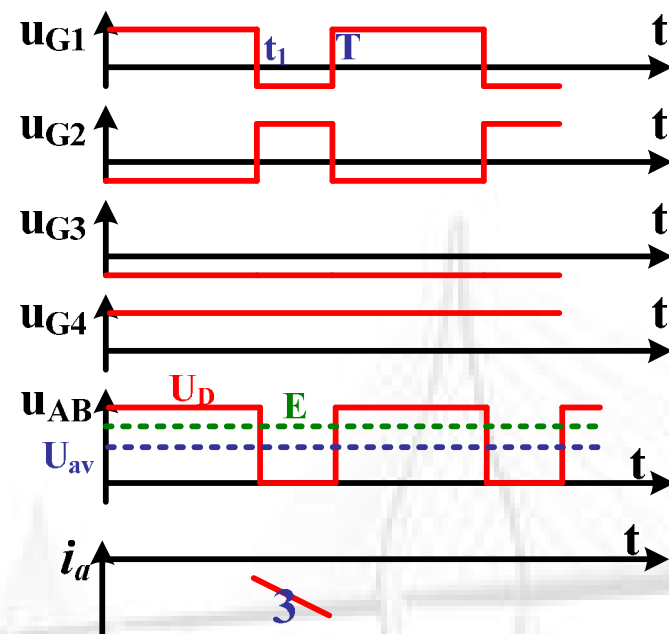
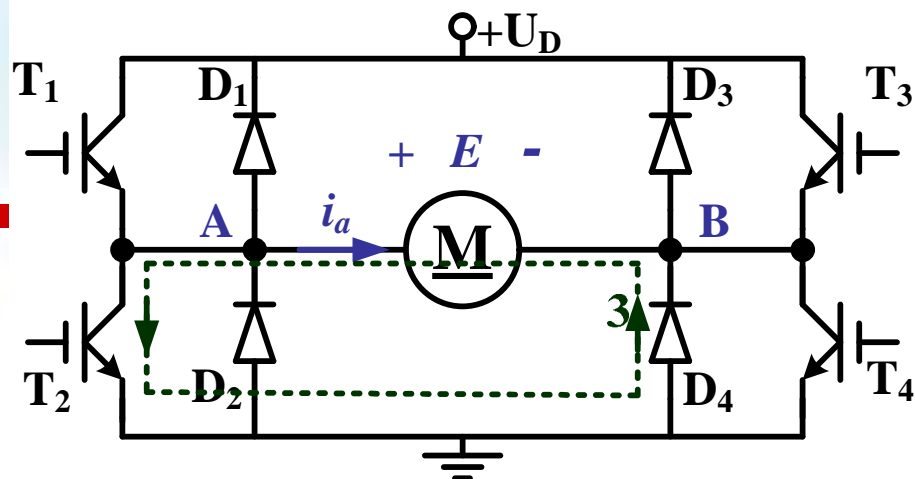
**n** 电枢电流

$i_a: D_4 \rightarrow \text{电机} \rightarrow T_2$

**n** 能量

电感: 储能; 电源: 无能量交换;

电机: 机械能转换为电能



## 2.2 单极性输出

### ○ 发电机状态

$$U_{av} < E$$

$$i_a: B \rightarrow A$$

### ○ 当 $0 < t < t_1$ 时

**n**  $D_4$  和  $D_1$  导通

**n**  $u_A = U_D$ ,  $u_B$  为地,  $u_{AB} = U_D$

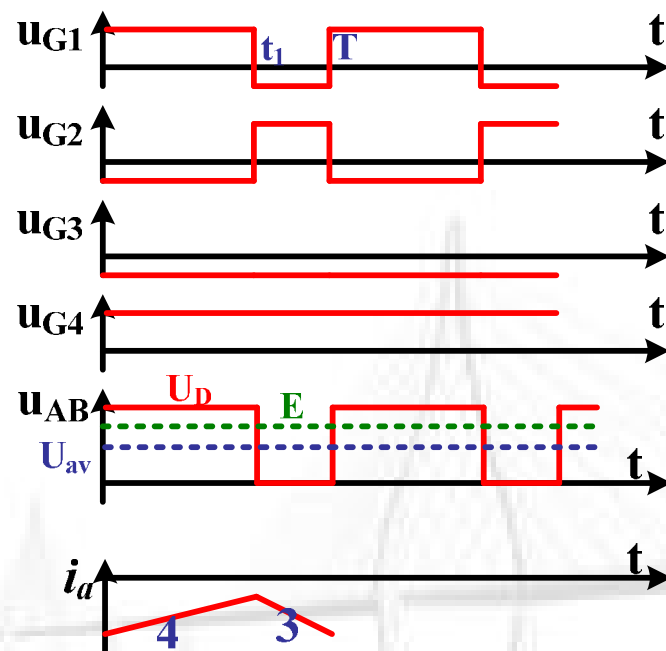
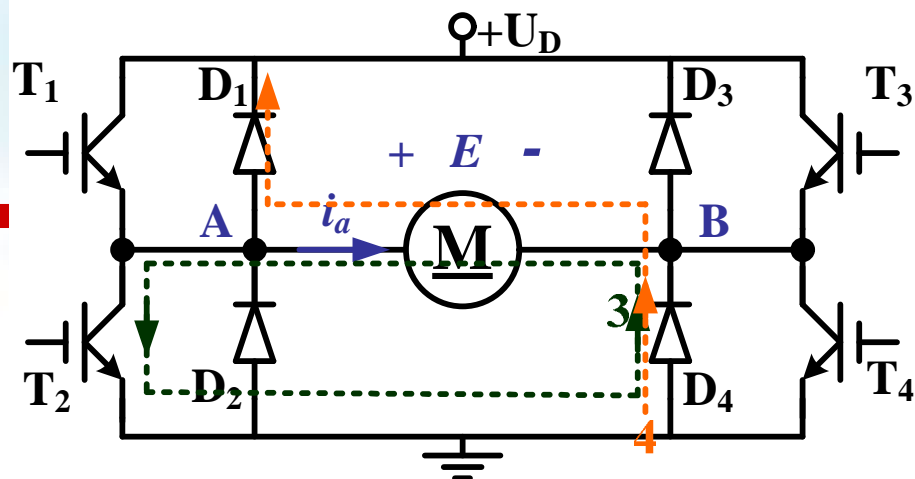
**n** 电枢电流

$i_a$ :  $D_4 \rightarrow$  电机  $\rightarrow D_1$

**n** 能量

电感: 释放能量; 电源: 吸收能量;

电机: 机械能转换为电能





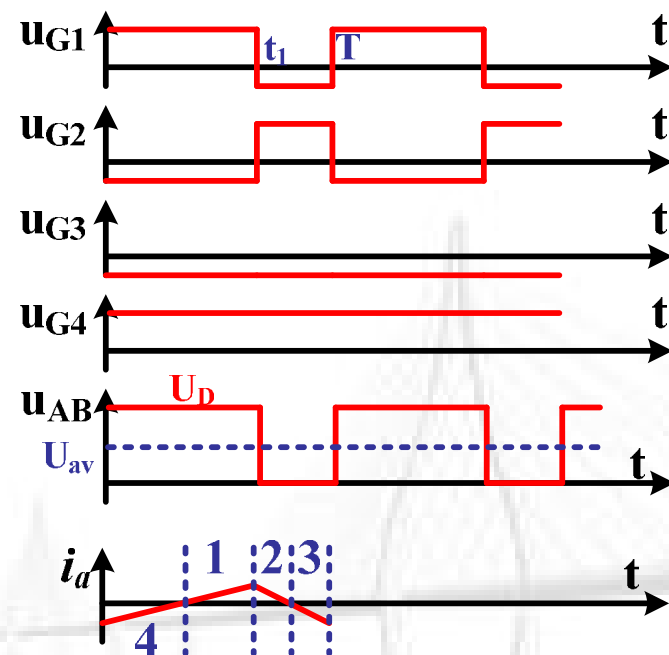
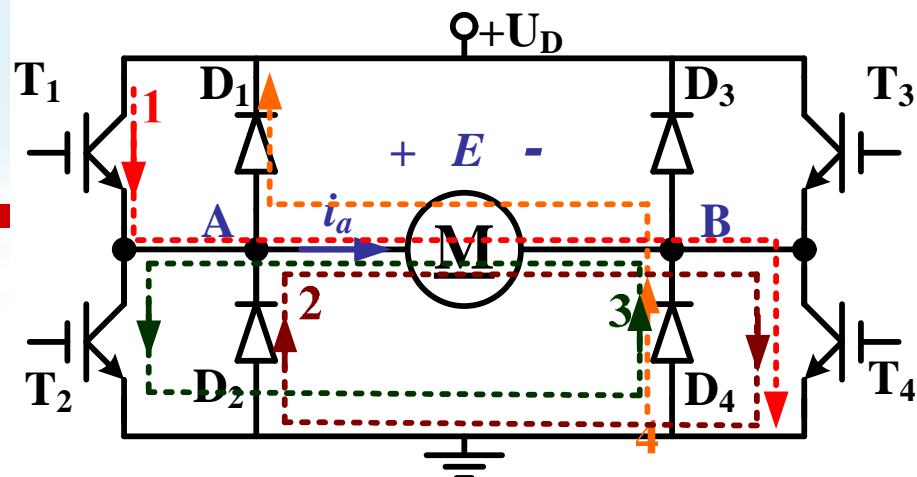
## 2.2 单极性输出

### ○ 轻载状态

$$T_{em} \approx 0$$

$$i_a \approx 0$$

- n 回路4,  $D_4 \rightarrow$  电机  $\rightarrow D_1$ , 发电机, 电感释放能量, 电源充电
- n 回路1,  $T_1 \rightarrow$  电机  $\rightarrow T_4$ , 电动机, 电感吸收能量, 电源放电
- n 回路2,  $D_2 \rightarrow$  电机  $\rightarrow T_4$ , 电动机, 电感释放能量, 电源无能量交换
- n 回路3,  $D_4 \rightarrow$  电机  $\rightarrow T_2$ , 发电机, 电感吸收能量, 电源无能量交换



## 2 特性总结

### ○ 开关管导通情况

n 电流方向+管子通电情况

n 电流特性：高电压流向低电压

n 哪个桥臂施加导通信号，哪个桥臂导通，具体导通器件根据电流方向判断

### ○ 电枢电压确定

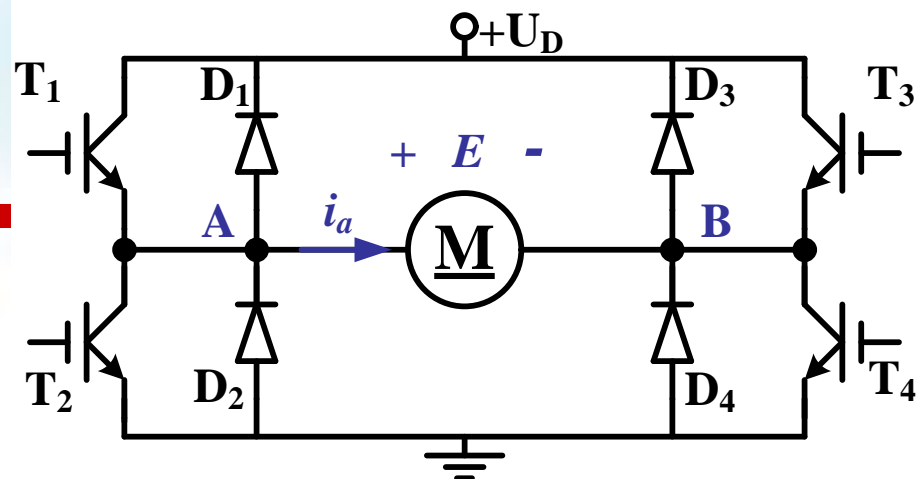
n 与电流判断相同，理想情况下，某桥臂导通，该桥臂两端电压为零

n 哪个桥臂施加导通信号，哪个桥臂导通，其两端电压为零

### ○ 电流变化趋势确定

n 根据电压方向和电流方向判断电流会变大还是变小

n 电压包括外部电压和反电动势



## 2 特性总结

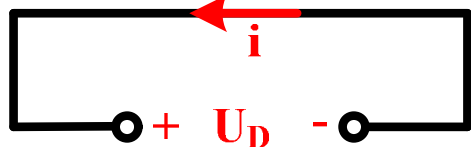
### ○ 电感充放电情况

n 电流绝对值变大, 电感充电

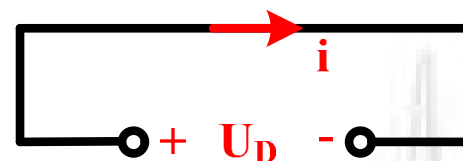
n 电流绝对值变小, 电感放电

### ○ 外部电源充放电情况

n 电源吸收能量

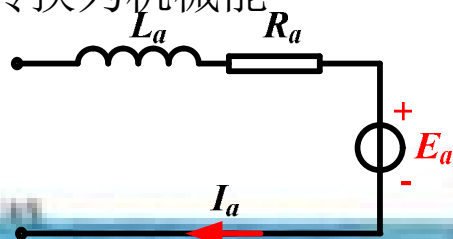


n 电源释放能量

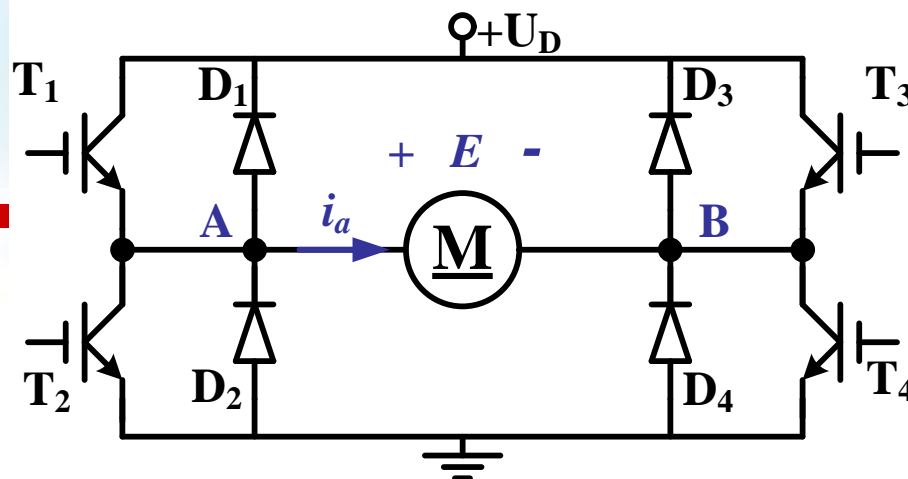
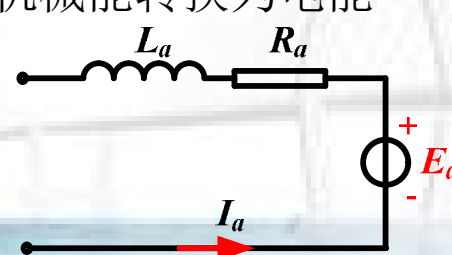


### ○ 电机能量转化情况

n 电能转换为机械能



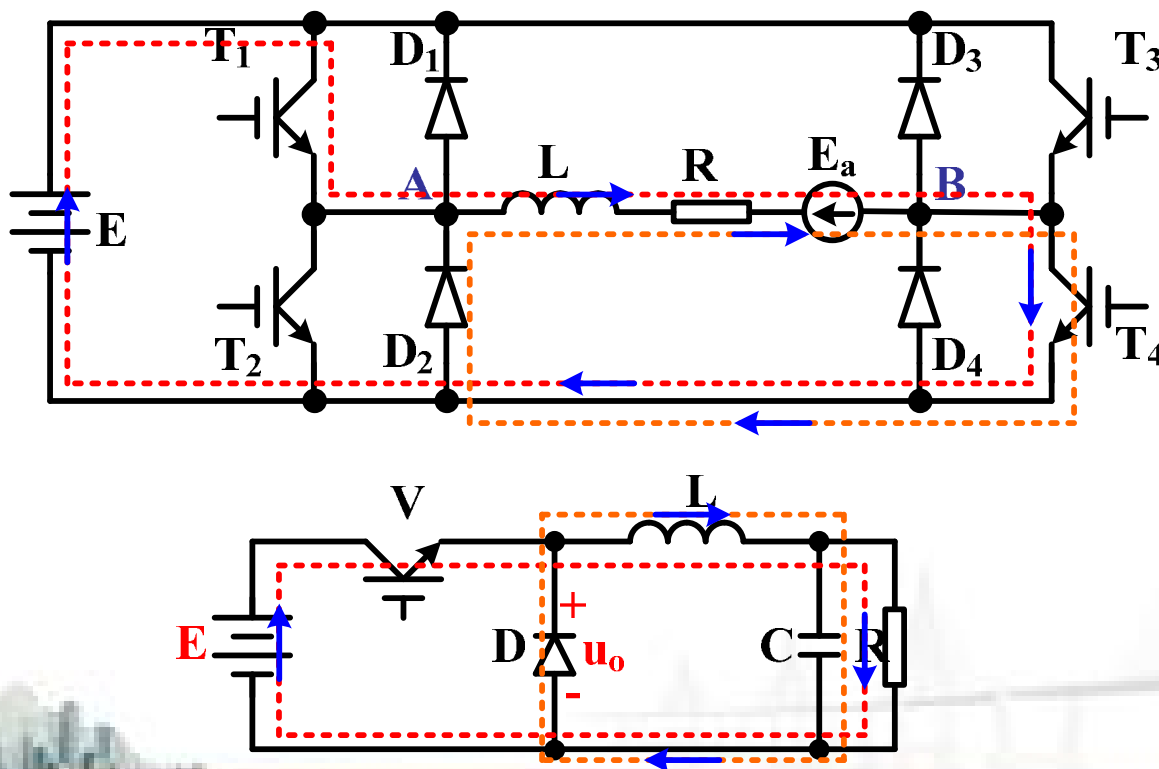
n 机械能转换为电能



### 3 H型桥式电路和升、降压斩波电路的关系

○ 单极性输出 + 电动机工作状态

$u_{G1}$  和  $u_{G2}$  交替变化,  $u_{G3} < 0$ ,  $u_{G4} > 0$

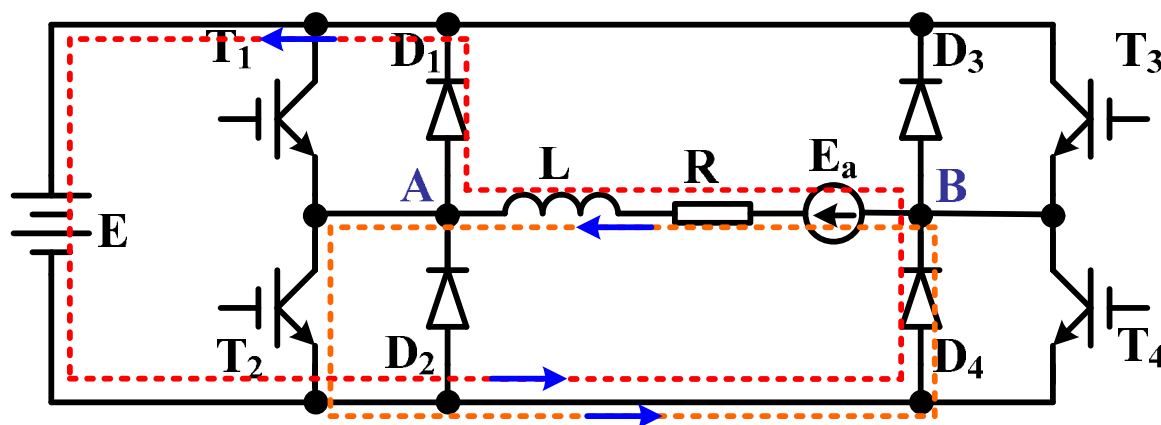


单极性输出电动机状态等效为降压斩波电路, 通过调整控制信号占空比改变电枢电压, 达到控制电动机转速的目的

### 3 H型桥式电路和升、降压斩波电路的关系

○ 单极性输出 + 发电机工作状态

$u_{G1}$  和  $u_{G2}$  交替变化,  $u_{G3} < 0$ ,  $u_{G4} > 0$



单极性输出发电机状态等效为升压斩波电路, 发电机产生的电能需要回馈电源或者消耗掉

