



哈尔滨工业大学

HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY

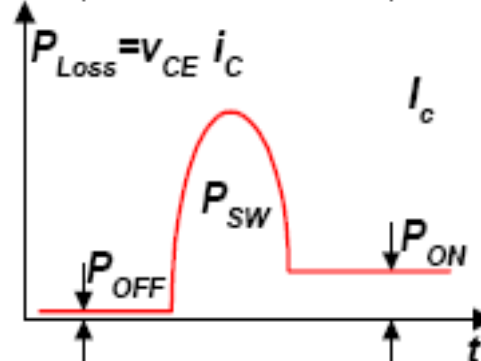
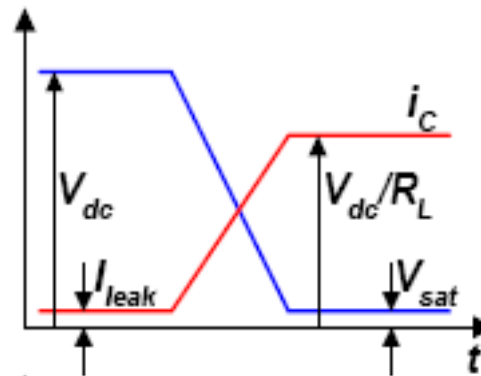
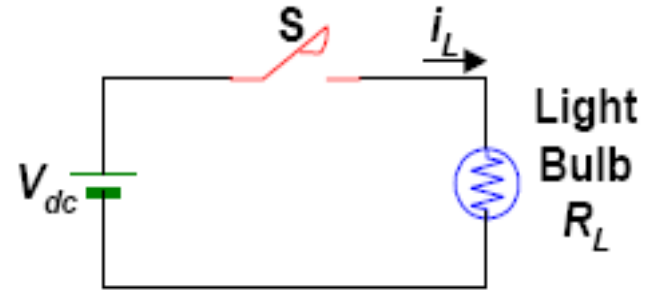
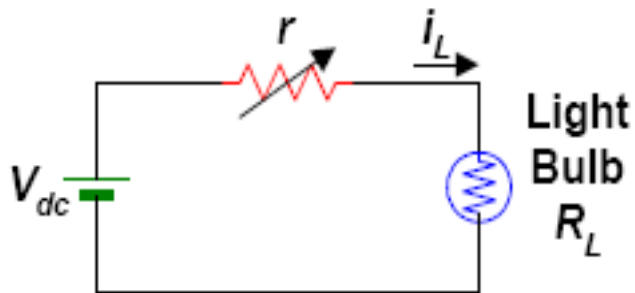
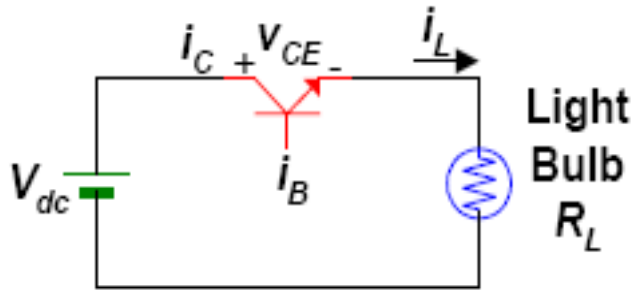


自动控实践A-7

脉宽调制 (PWM) 技术



复习



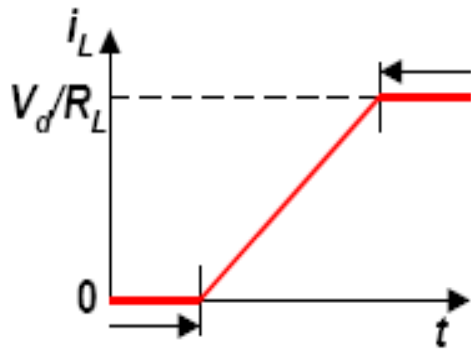
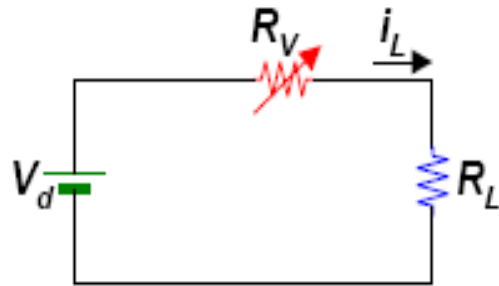
Power Loss: $\left(\frac{V_{dc}}{r + R_L}\right)^2 r$

Power Consumption: $\left(\frac{V_{dc}}{r + R_L}\right)^2 R_L$

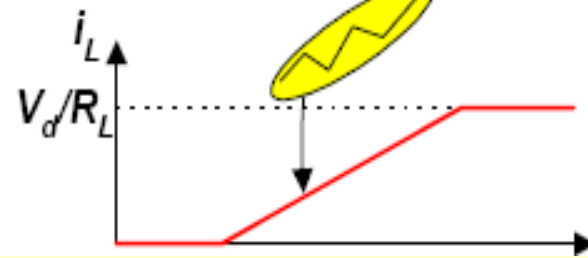
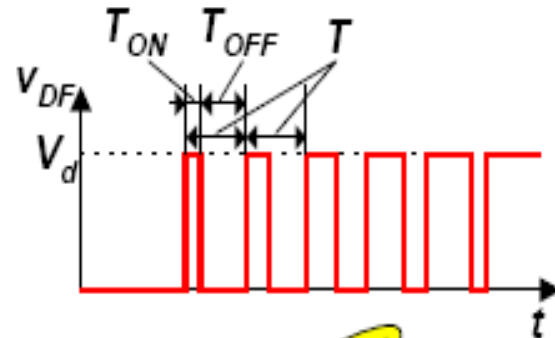
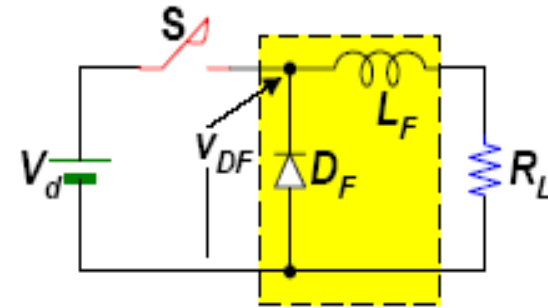


复习

- Current Control Using Variable Resistor



- Current Control Using Switching Device



复习

线性功放	开关功放
<p>优点:</p> <ul style="list-style-type: none">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	<p>优点:</p> <ul style="list-style-type: none">效率高;适合于数字化控制适合于大功率驱动应用
<p>缺点:</p> <ul style="list-style-type: none">效率低, 仅用于小功率场合	<p>缺点:</p> <ul style="list-style-type: none">有可能产生电磁兼容性问题



集成线性功率放大芯片

MIL-PRF-38534 CERTIFIED

MSK

M.S.KENNEDY CORP.

**POWER
OPERATIONAL AMPLIFIER**

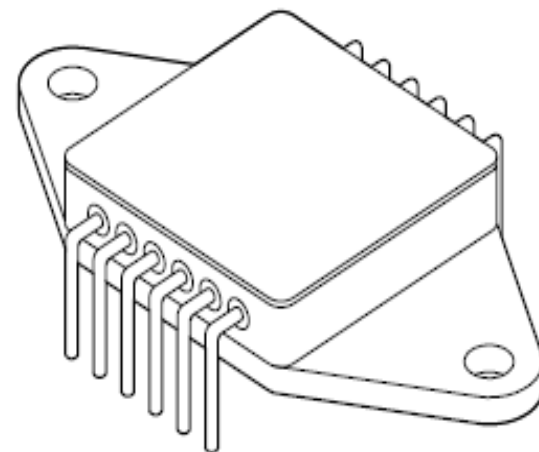
115

4707 Dey Road Liverpool, N.Y. 13088

(315) 701-6751

FEATURES:

- High Output Current - 15A peak
- Ultra Low Thermal Resistance - 0.43°C/W Typ.
- Excellent Linearity - Class A/B Output
- Wide Supply Range - $\pm 10V$ to $\pm 50V$
- High Output Power Dissipation Capability
- Output Short Circuit Protected
- User Programmable Current Limit
- Isolated Case Allows Direct Heat Sinking
- Low Quiescent Current - $\pm 22mA$. Typ.
- Contact MSK for MIL-PRF-38534 Qualification Status



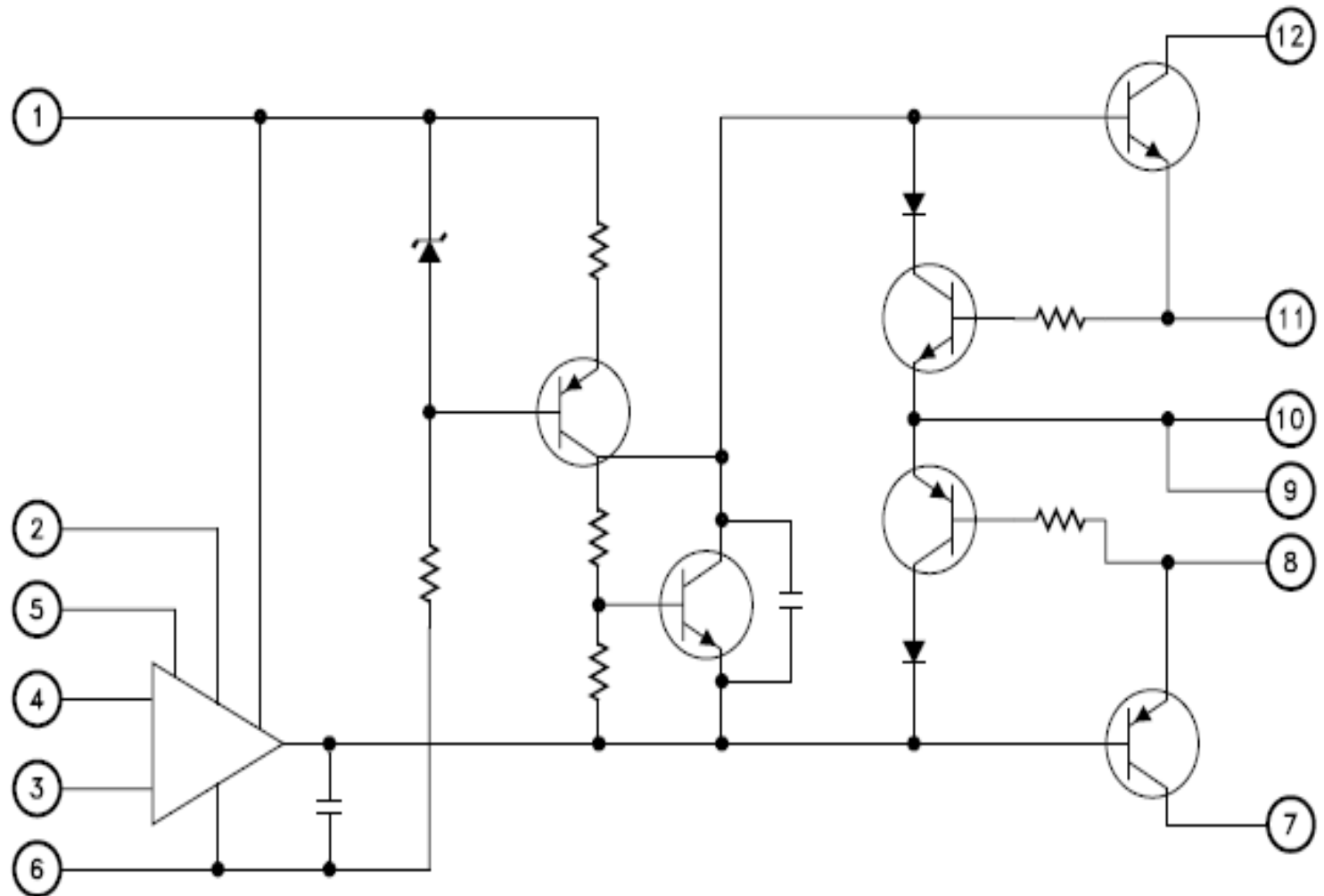
DESCRIPTION:

The MSK 115 is a High Power Operational Amplifier. Due to the extremely low thermal resistance from the transistor junctions to the case, the MSK 115 can dissipate extreme amounts of power at a case temperature of 125°C.



集成线性功率放大芯片

EQUIVALENT SCHEMATIC



集成线性功率放大芯片

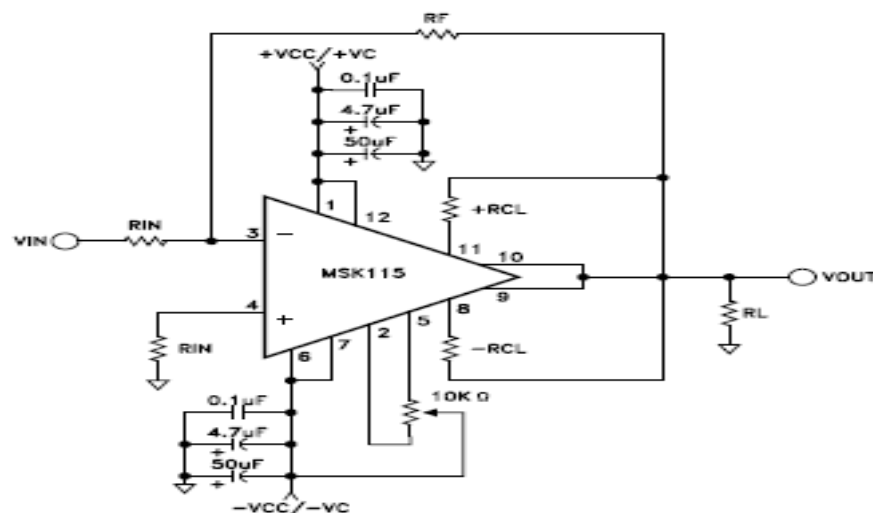
ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS ^⑧

$\pm V_{CC}$	Supply Voltage	$\pm 50V$
I_{OUT}	Output Current	15A
V_{IN}	Differential Input Voltage	$\pm 37V$
T_C	Case Operating Temperature Range	
	(MSK 115B/E)	$-55^{\circ}C$ to $+125^{\circ}C$
	(MSK 115)	$-40^{\circ}C$ to $+85^{\circ}C$

T_{ST}	Storage Temperature Range	$-65^{\circ}C$ to $+150^{\circ}C$
T_{LD}	Lead Temperature Range	$300^{\circ}C$
	(10 Seconds)	
P_D	Power Dissipation	See SOA Curve
T_J	Junction Temperature	$175^{\circ}C$

TYPICAL APPLICATIONS

- Magnetic Deflection Circuit Driver
- Programmable Power Supplies
- Motor, Valve and Actuator Control
- Audio Amplifier



集成线性功率放大芯片



Product Innovation From



CIRRUS LOGIC®

PA85 • PA85A

High Voltage Power Operational Amplifiers



FEATURES

- HIGH VOLTAGE — 450V (± 225 V)
- HIGH SLEW RATE — 1000V/ μ S
- HIGH OUTPUT CURRENT — 200mA

APPLICATIONS

- HIGH VOLTAGE INSTRUMENTATION
- PIEZO TRANSDUCER EXCITATION
- PROGRAMMABLE POWER SUPPLIES UP TO 430V
- ELECTROSTATIC TRANSDUCERS & DEFLECTION



PATENTED

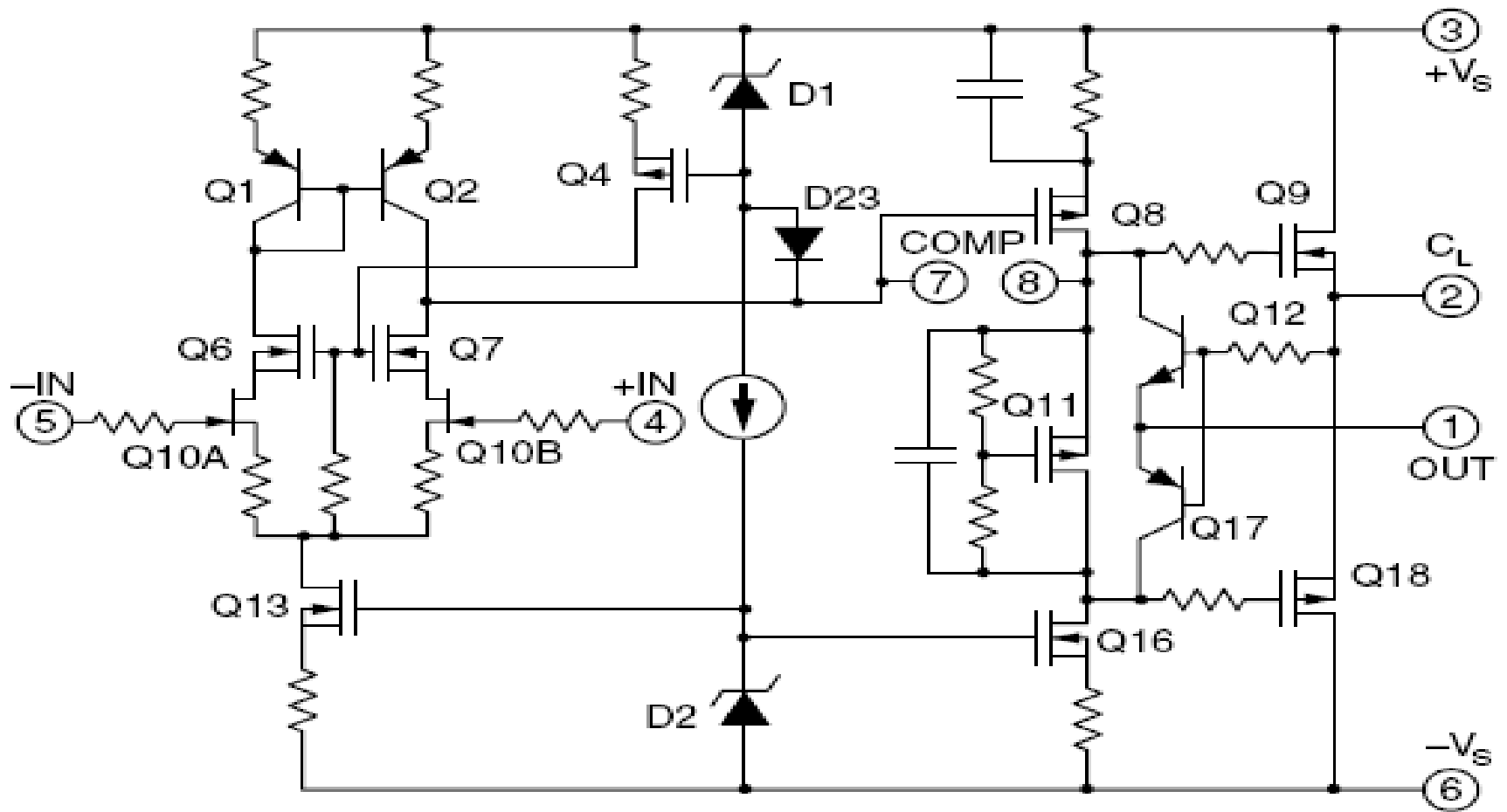


8-PIN TO-3
PACKAGE STYLE CE



集成线性功率放大芯片

EQUIVALENT SCHEMATIC



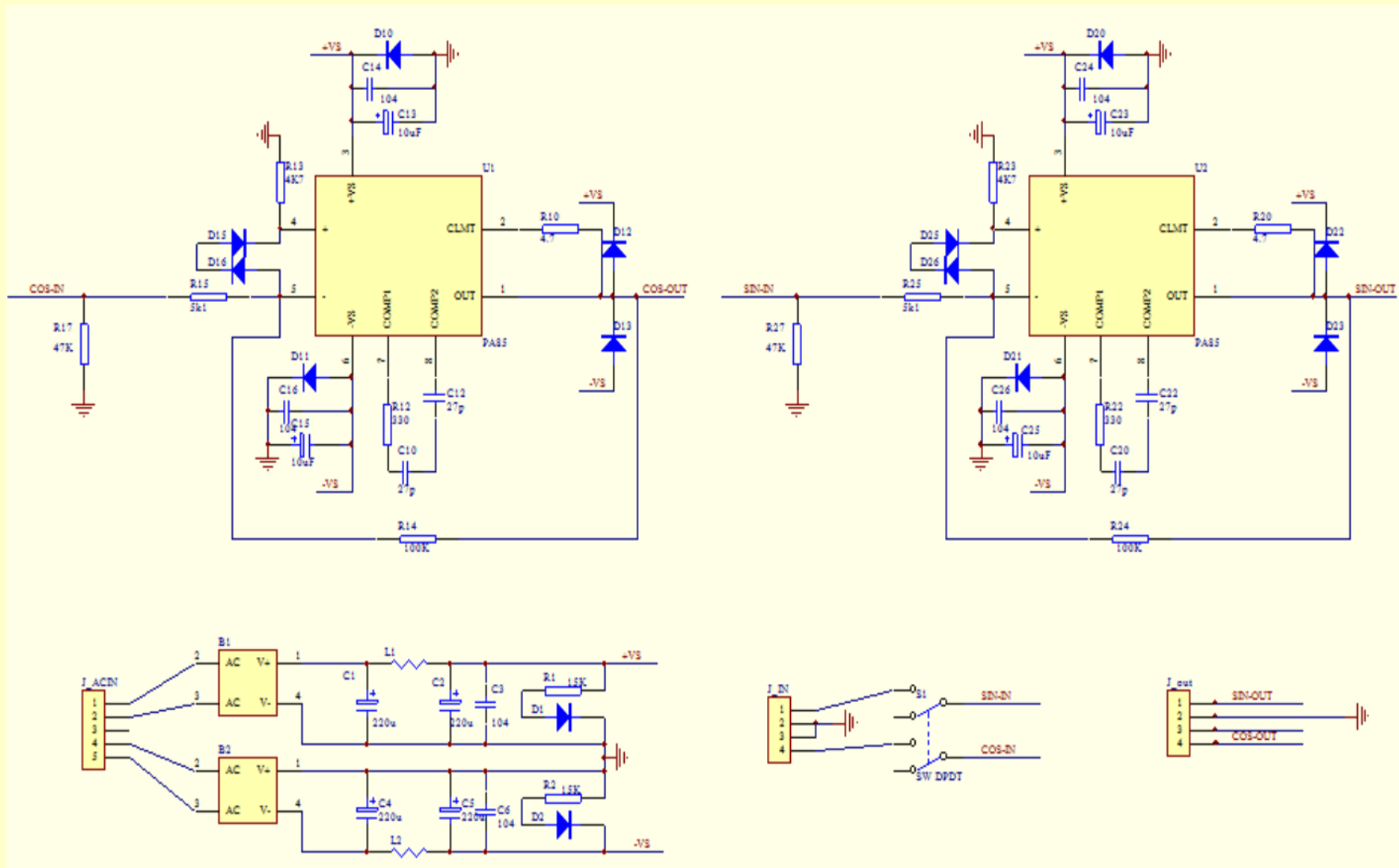
集成线性功率放大芯片

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

SUPPLY VOLTAGE, $+V_s$ to $-V_s$	450V
OUTPUT CURRENT, continuous within SOA	200mA
POWER DISSIPATION, continuous @ $T_c = 25^\circ\text{C}^2$	30W
INPUT VOLTAGE, differential	$\pm 25\text{V}$
INPUT VOLTAGE, common mode	$\pm V_s$
TEMPERATURE, pin solder - 10s max	300°C
TEMPERATURE, junction ²	150°C
TEMPERATURE, storage	-65 to $+150^\circ\text{C}$
OPERATING TEMPERATURE RANGE, case	-55 to $+125^\circ\text{C}$

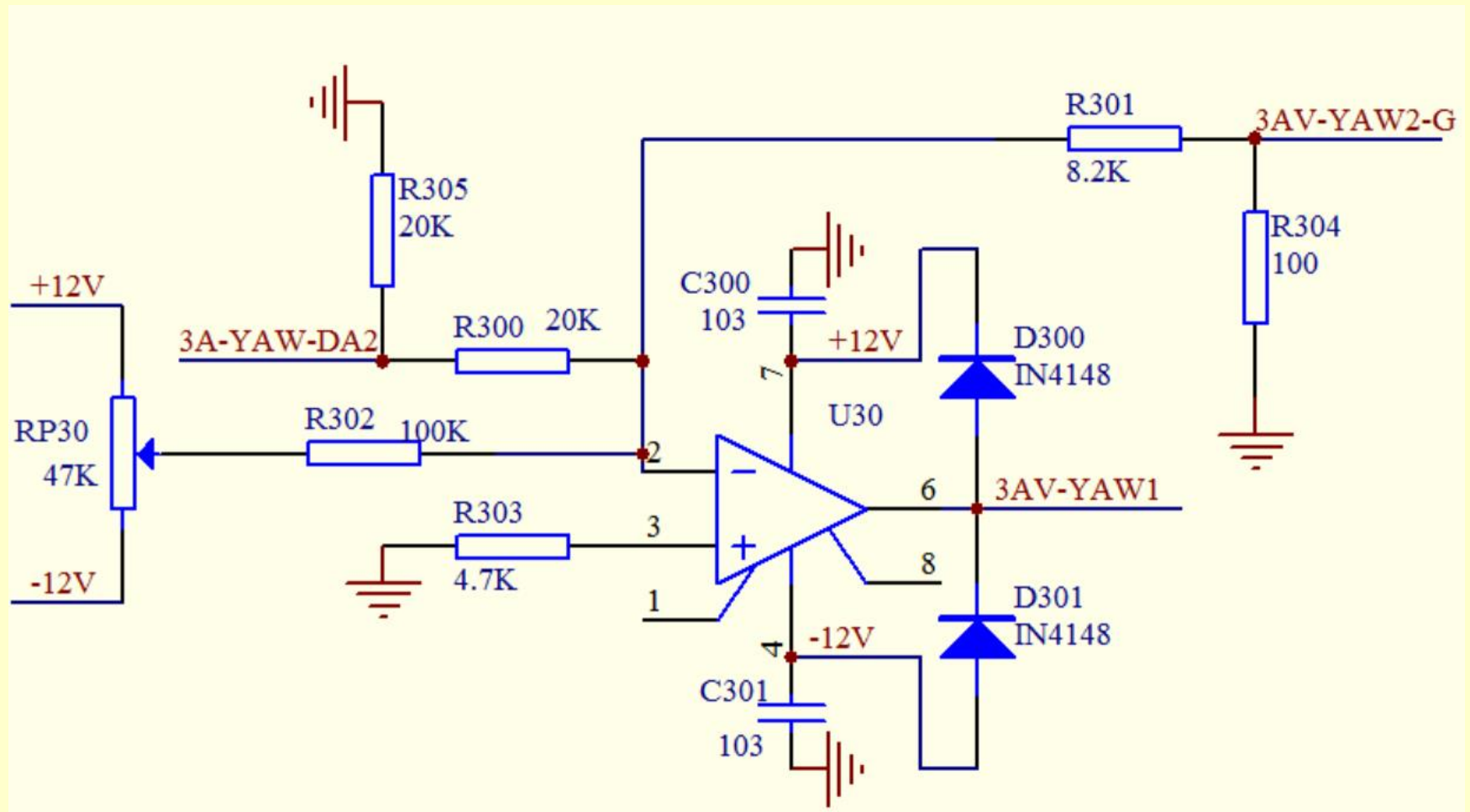


集成线性功率放大芯片



集成线性功率放大芯片

液压马达伺服阀的电流驱动



自 习 任 务

电阻电感负载的开关过程（自学）



PWM 技术1

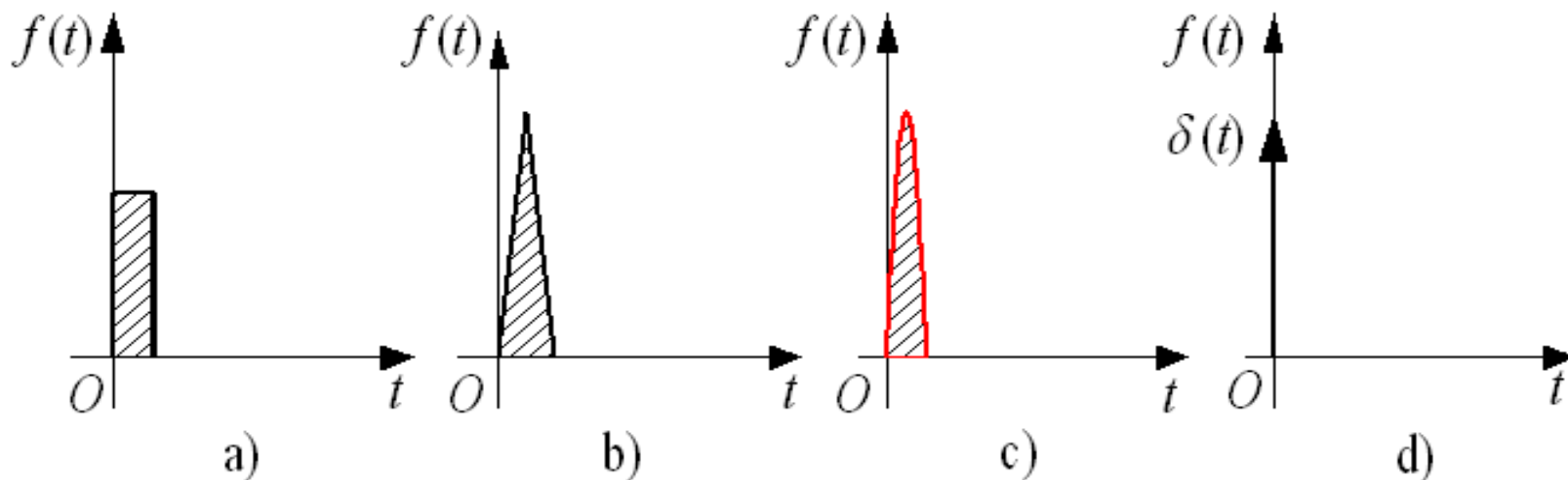
1. PWM驱动基本原理
2. H 桥与PWM信号
3. 双极性PWM驱动
4. 单极性PWM与受限PWM驱动
5. PWM驱动特性



PWM技术基本原理

➤ 基本原理

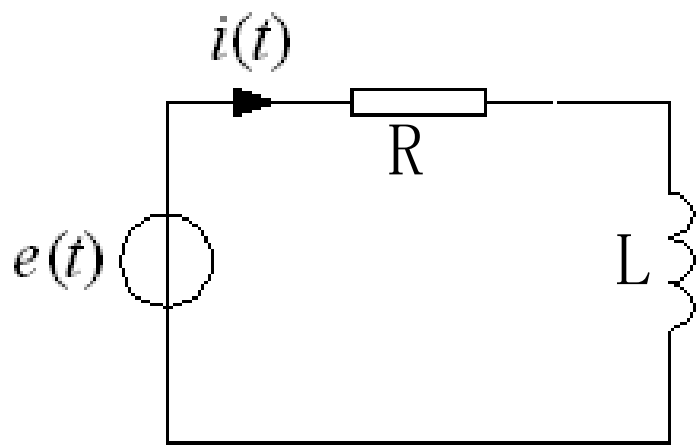
- 冲量相等而形状不同的窄脉冲加在具有惯性的环节上时，其（响应）效果基本相同
- 冲量指窄脉冲的面积
- 效果基本相同，是指环节的输出响应波形基本相同
- 低频段非常接近，仅在高频段略有差异



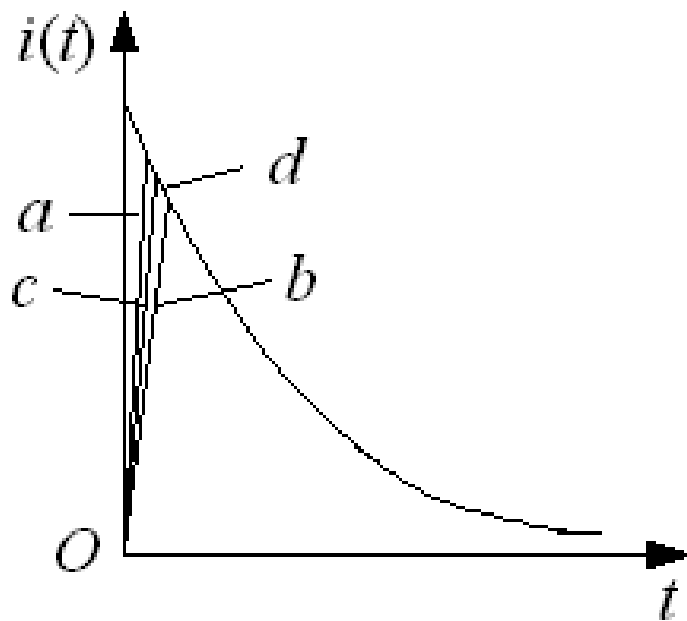
PWM技术基本原理

➤ 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：

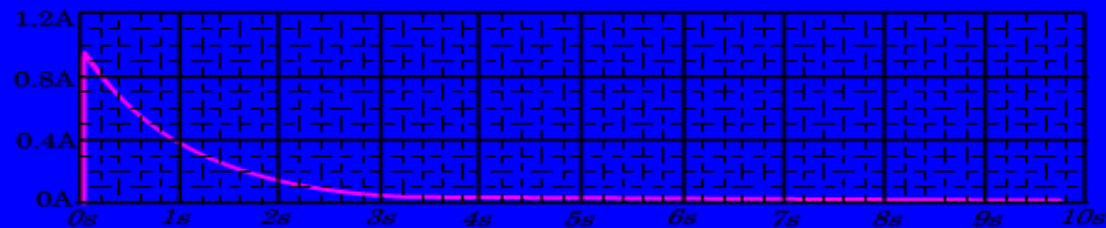
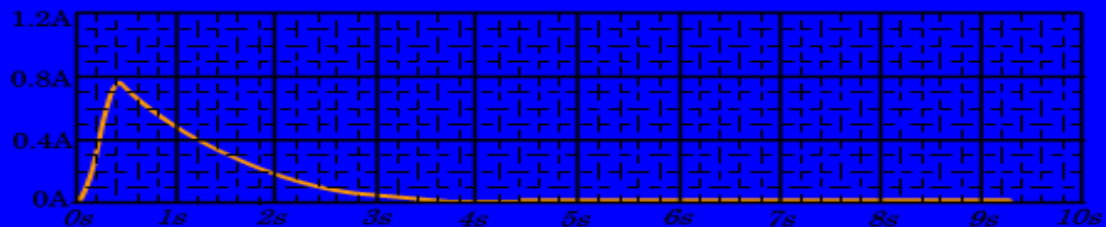
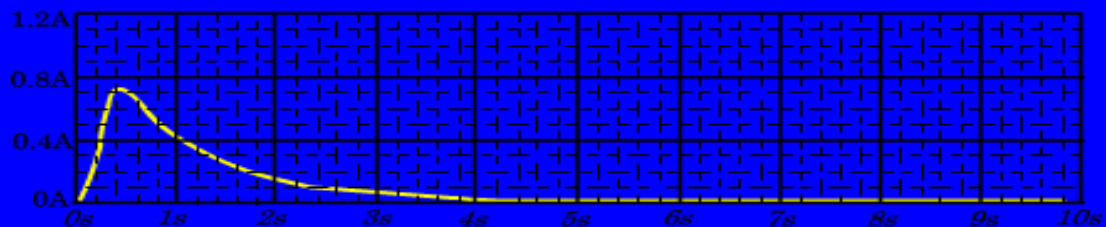
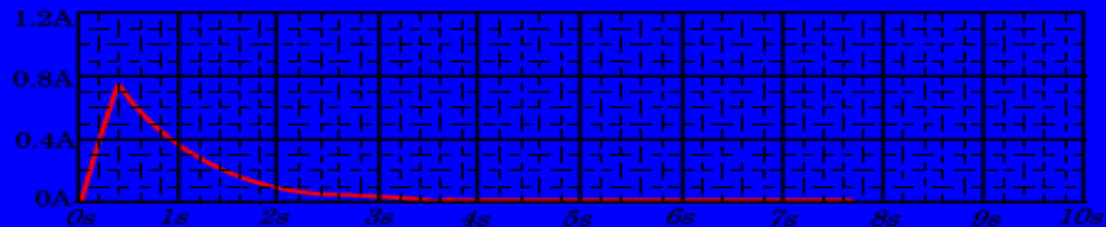
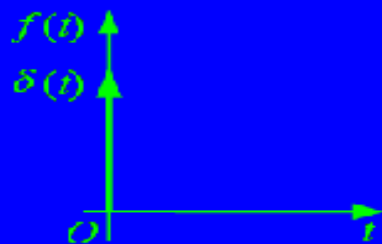
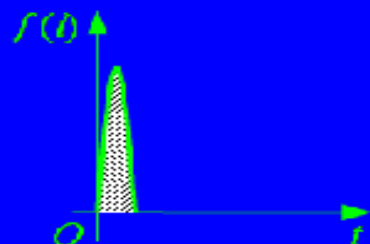
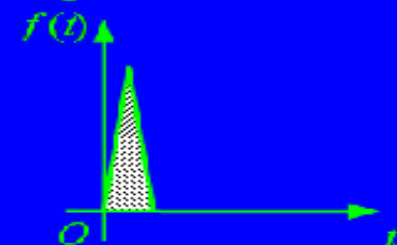
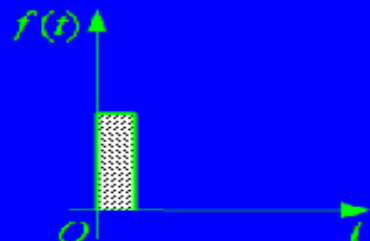


a)

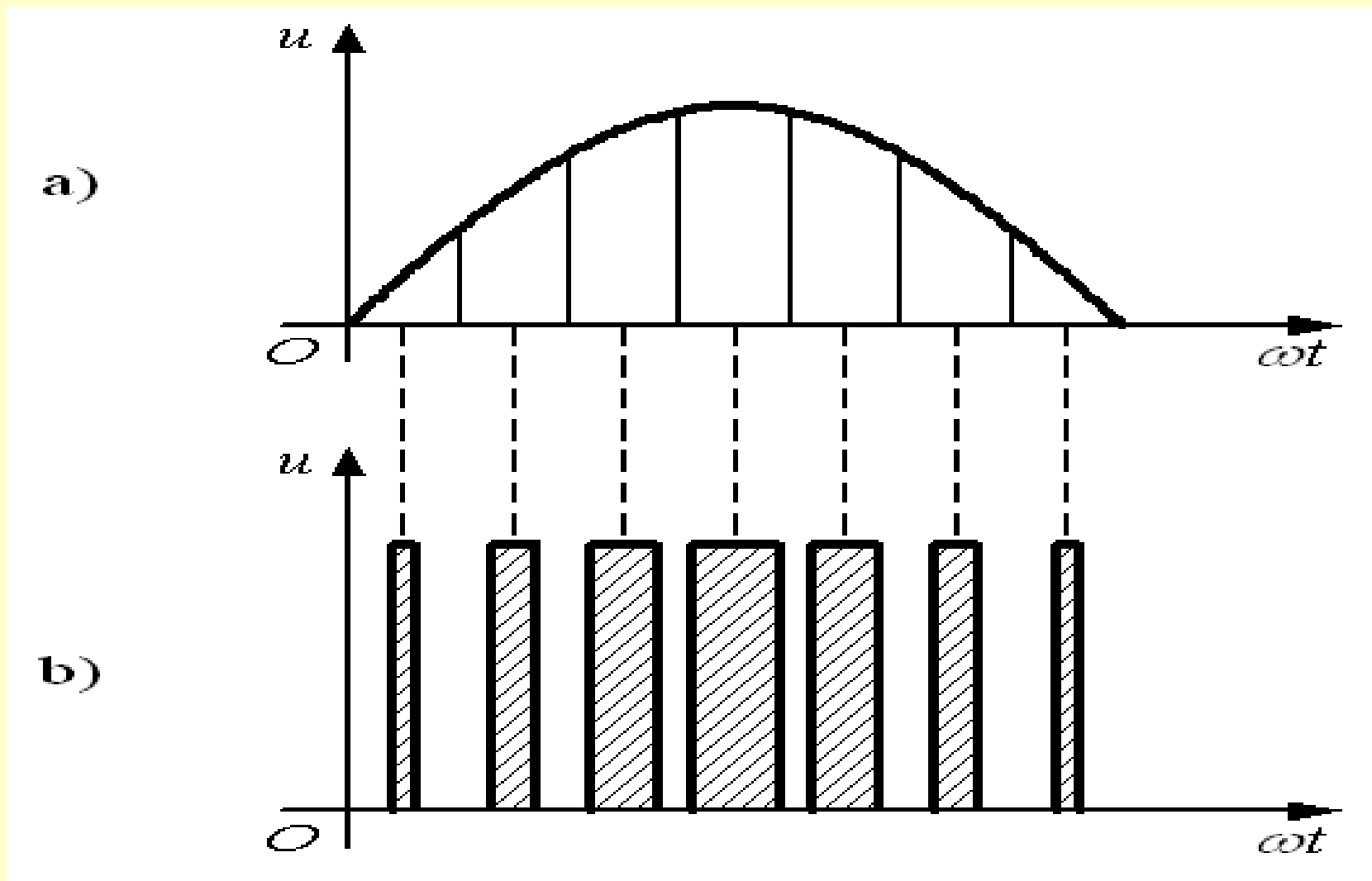


b)

PWM技术基本原理

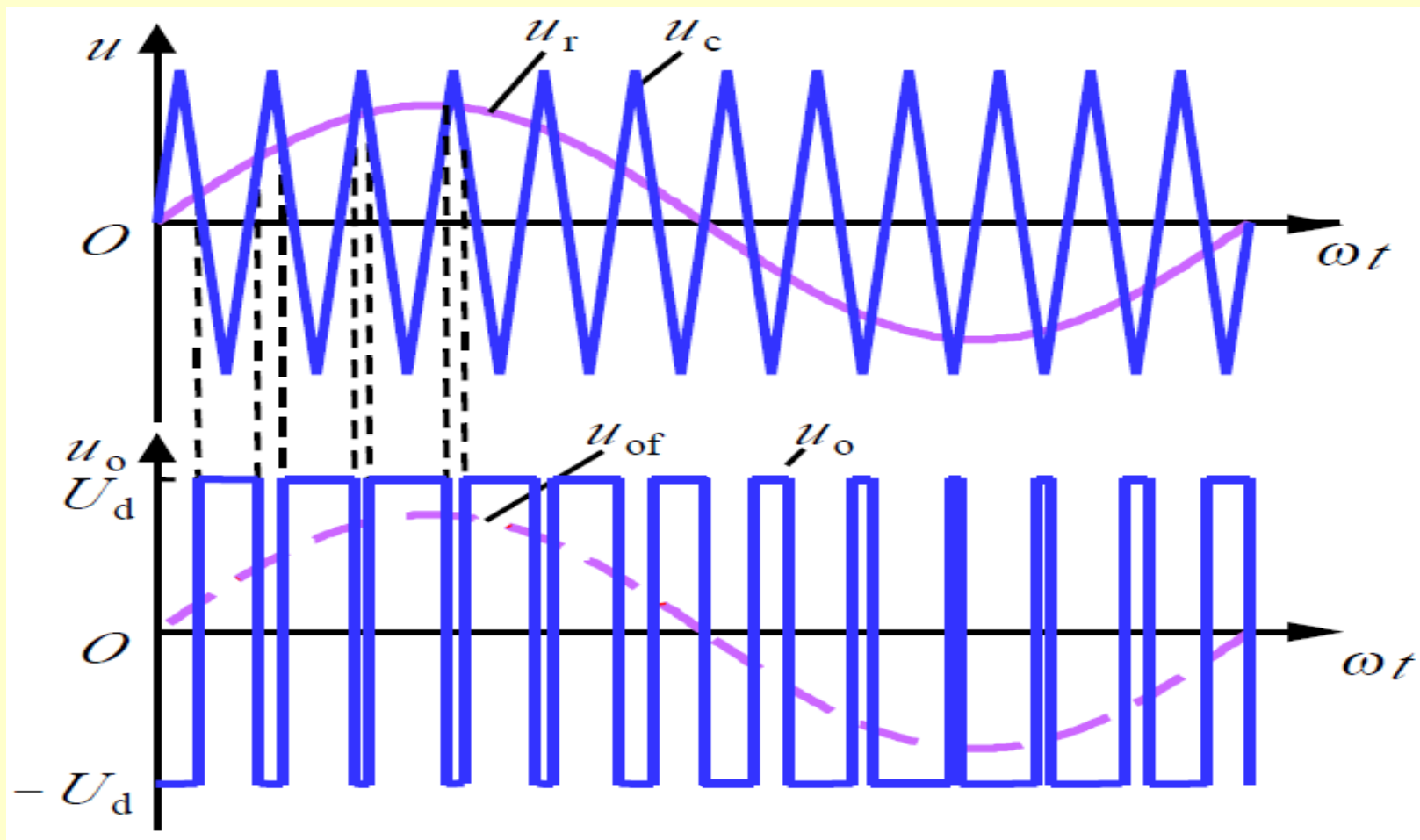


PWM技术基本原理



PWM技术基本原理

- PWM信号产生的基本原理



PWM技术基本原理

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（不等宽）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



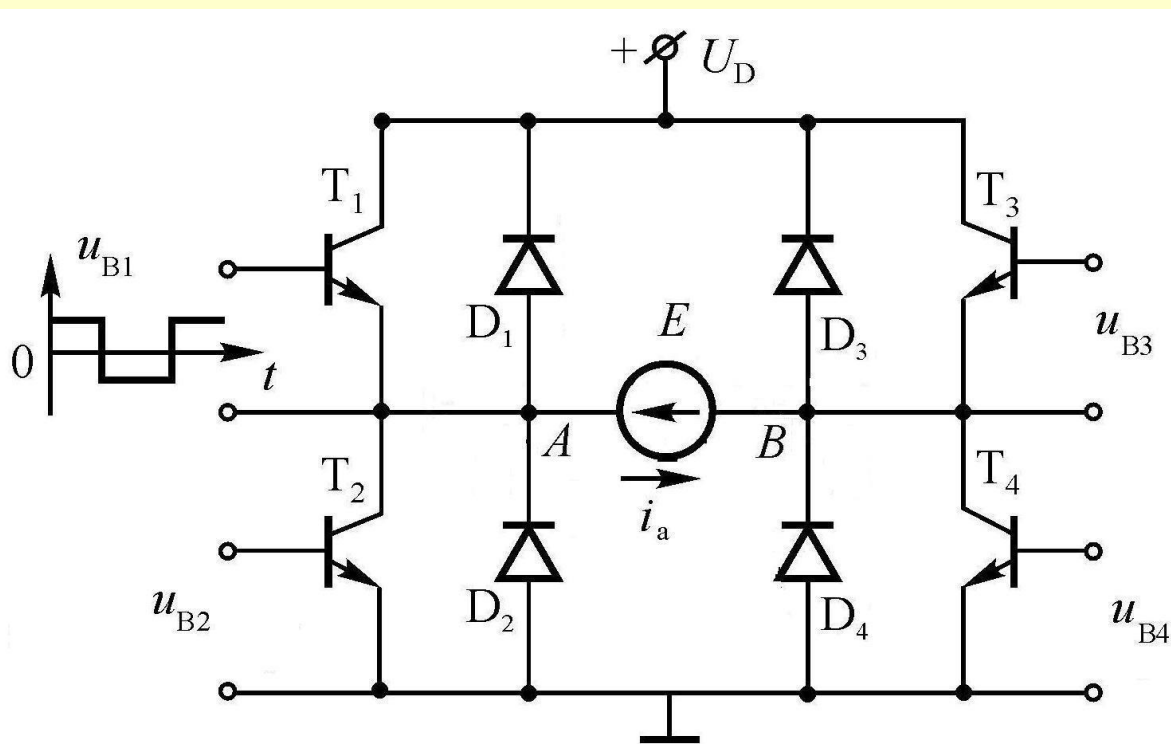
PWM技术基本原理

- 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。



开关电路PWM驱动分析

- H 型桥式电路，四个晶体管 and 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

为了方便分析，假设：

1) 忽略晶体管开关过程，只讨论其稳态阶段。

但要分析晶体管开关时，电路中电压电流的瞬态与稳定响应。

2) 一个开关周期内电机转速及反电势为常值。

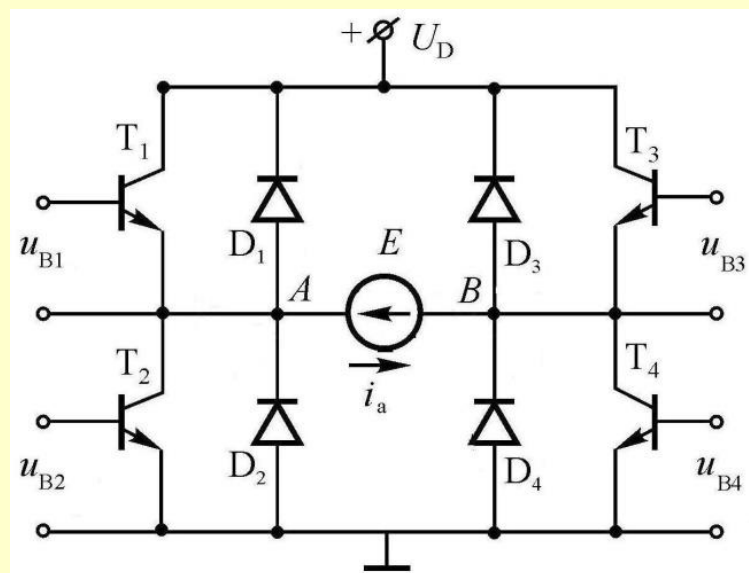
3) 电枢回路用电阻、电感和电势等效。

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。

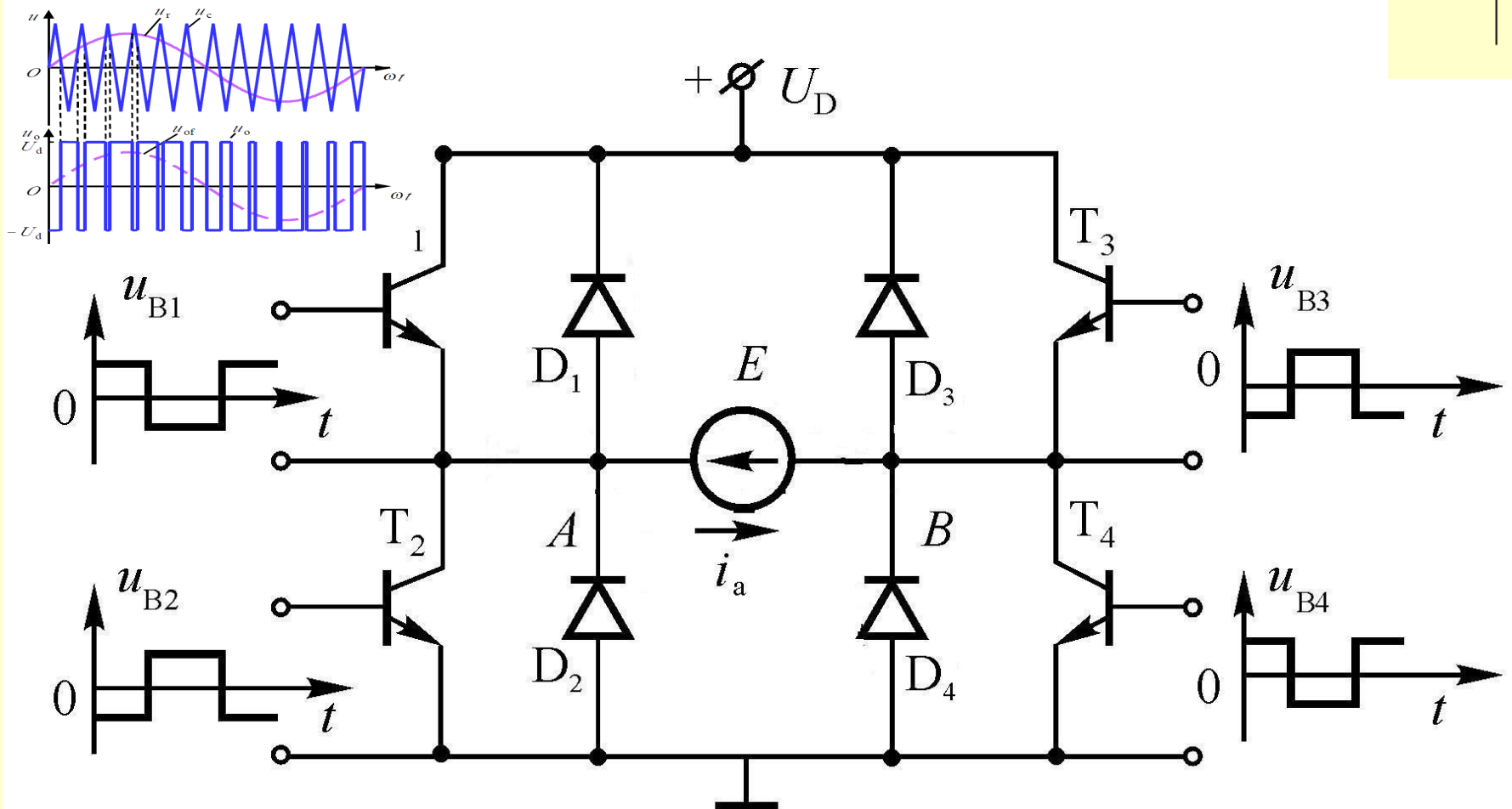
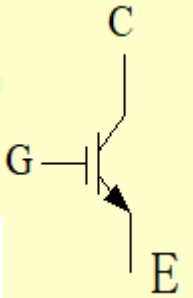
5) 电机默认为正向转动；

6) 电流A到B为正向。



双极性PWM驱动

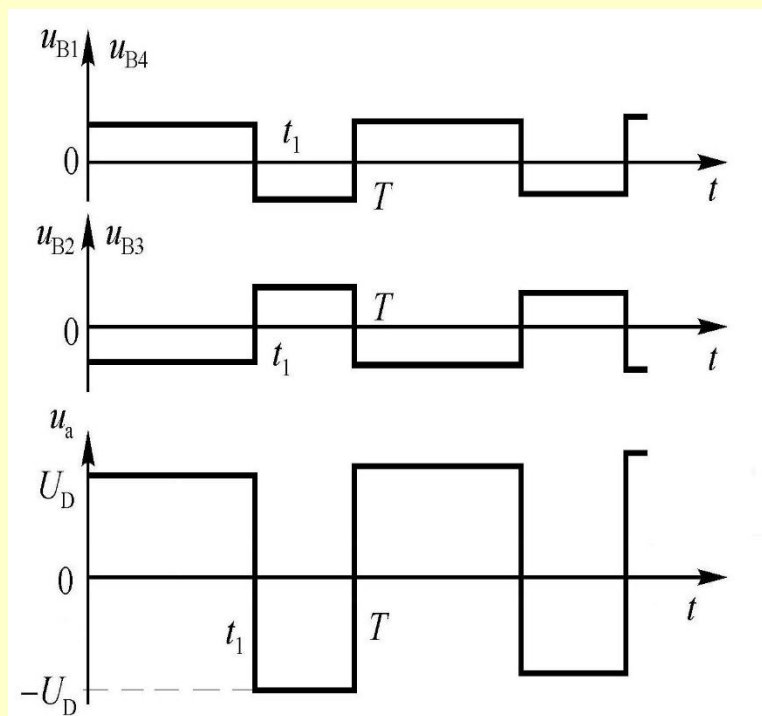
输入控制信号: $u_{B1} = u_{B4} = -u_{B2} = -u_{B3}$



双极性PWM驱动

输出电压:

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



由此可知, 当 $t_1 > T/2$ 时, 输出电压的平均值 U_{av} 为正。当 $t_1 < T/2$ 时, 平均电压 U_{av} 为负。当 $t_1 = T/2$ 时, U_{av} 为零。根据平均电压 U_{av} 和反电势 E 的大小不同, 电路的工作可分为两个状态四种情况。



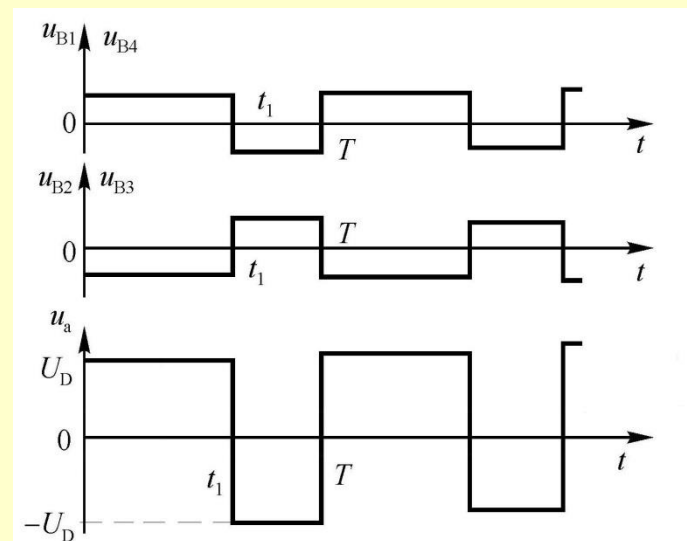
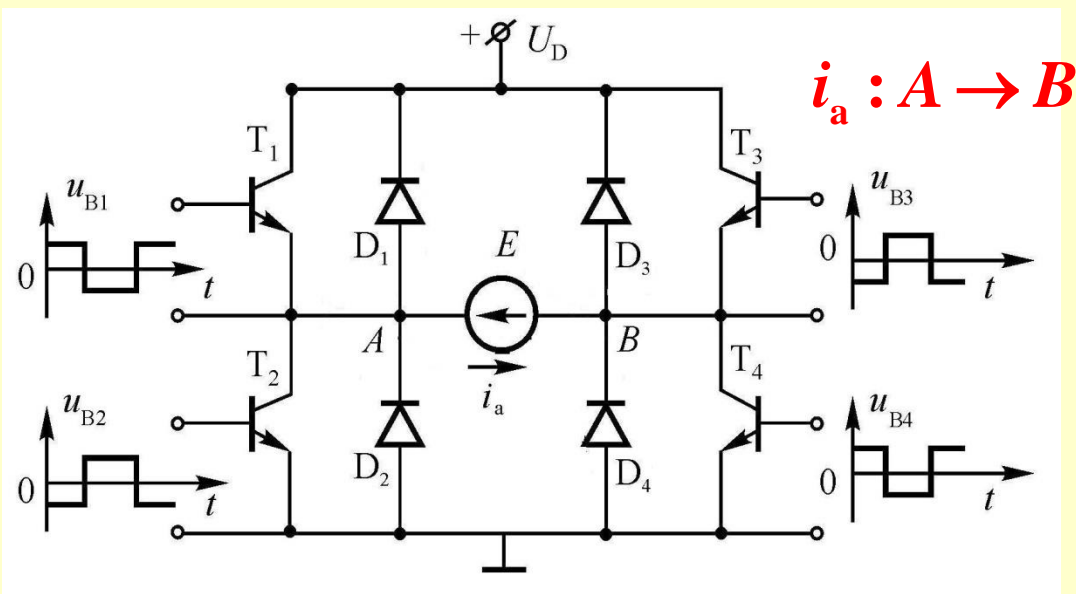
双极性PWM驱动

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 饱和导通， T_2 、 T_3 截止断开。

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



双极性PWM驱动

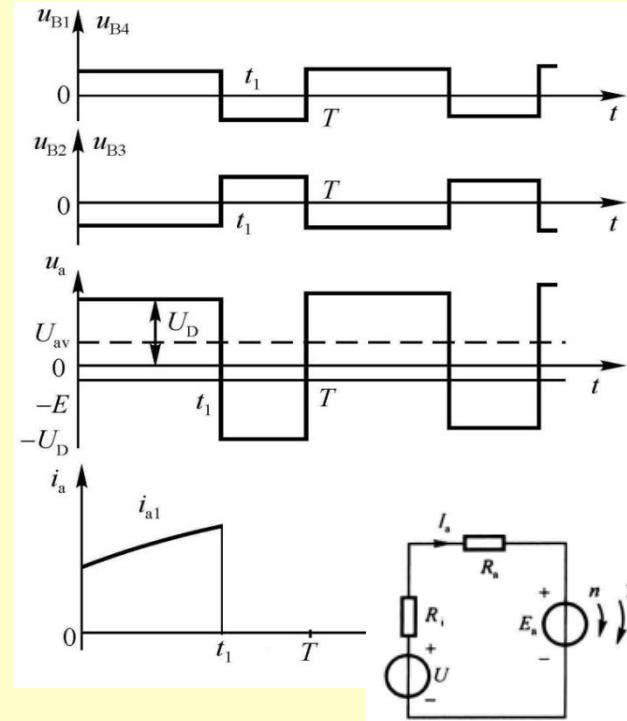
$0 < t < t_1$ 电流: $U_D \rightarrow T_1 \rightarrow A \rightarrow B \rightarrow T_4 \rightarrow \text{地} \rightarrow U_D$

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

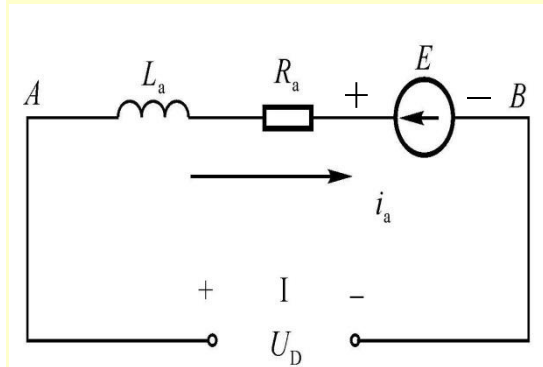
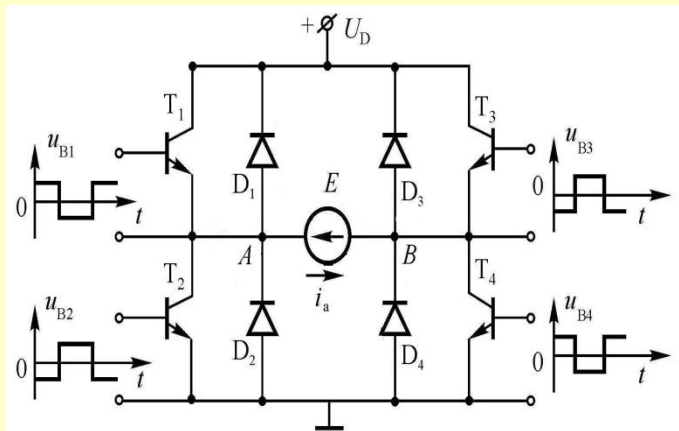
$$i_a(t) \uparrow: I_0 \rightarrow \frac{U_D - E}{R_a}$$

电源输出电能，电流增加，磁场能增加。
电能转化机械动能。

转速n正向，与 T_{em} 同向
 $U_{av} > E$ ，电流从A到B
(E电流从B到A，
 U_d 电流从A到B)

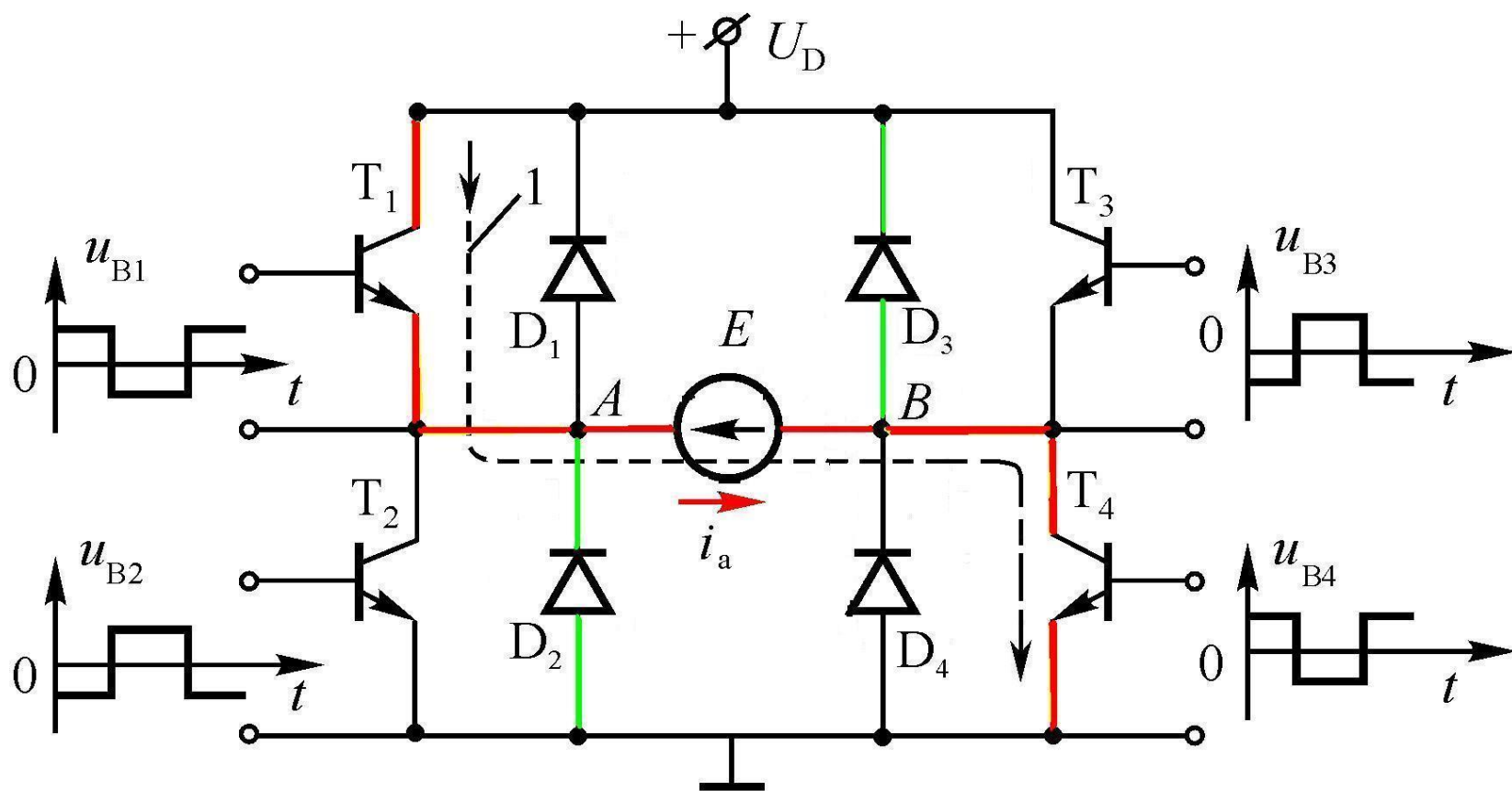


(a)电动机工作状态



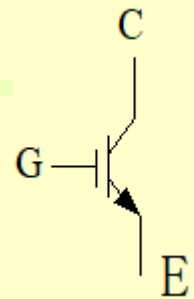
双极性PWM驱动

电动机状态： $0 < t < t_1$



双极性PWM驱动

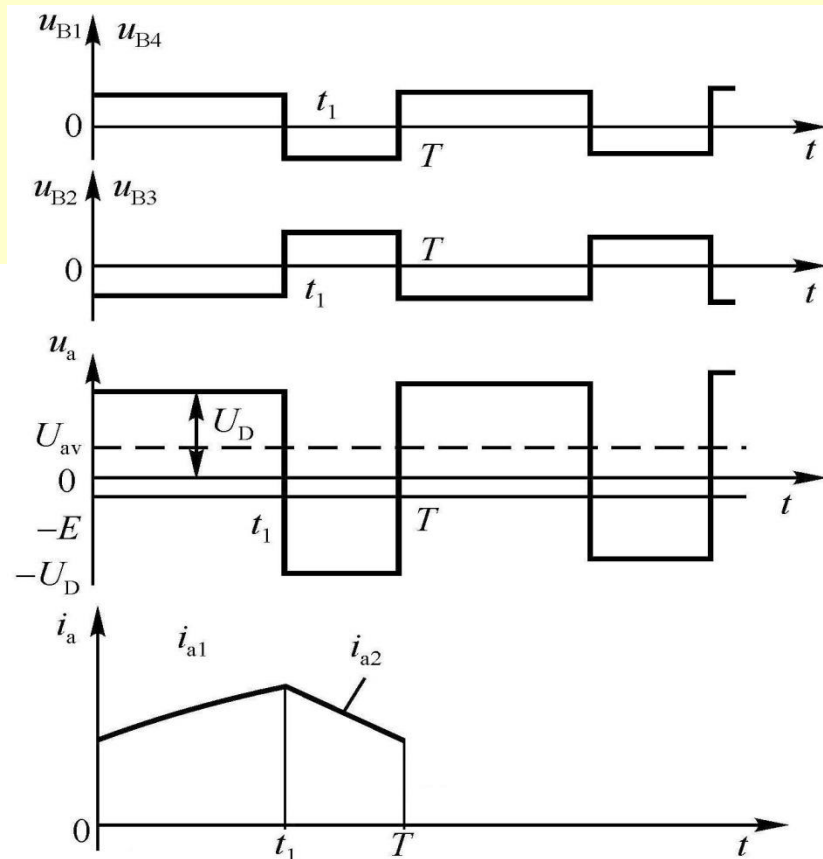
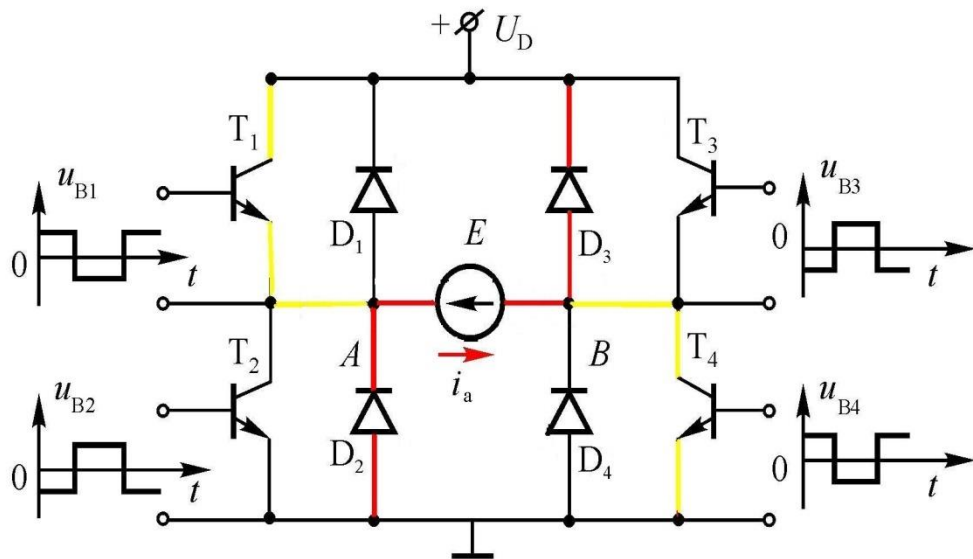
$t_1 < t < T$ 只有D₂和D₃正常导通 $i_a > 0$ $U_{av} > E$



i_a : 地 \rightarrow D₂ \rightarrow A \rightarrow B \rightarrow D₃ \rightarrow U_D \rightarrow 地

T₁、T₄截止, $i_a(t)$ 减小。

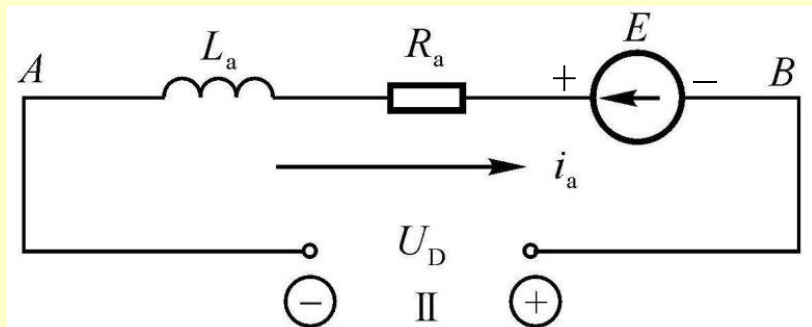
i_a : A \rightarrow B



双极性PWM驱动

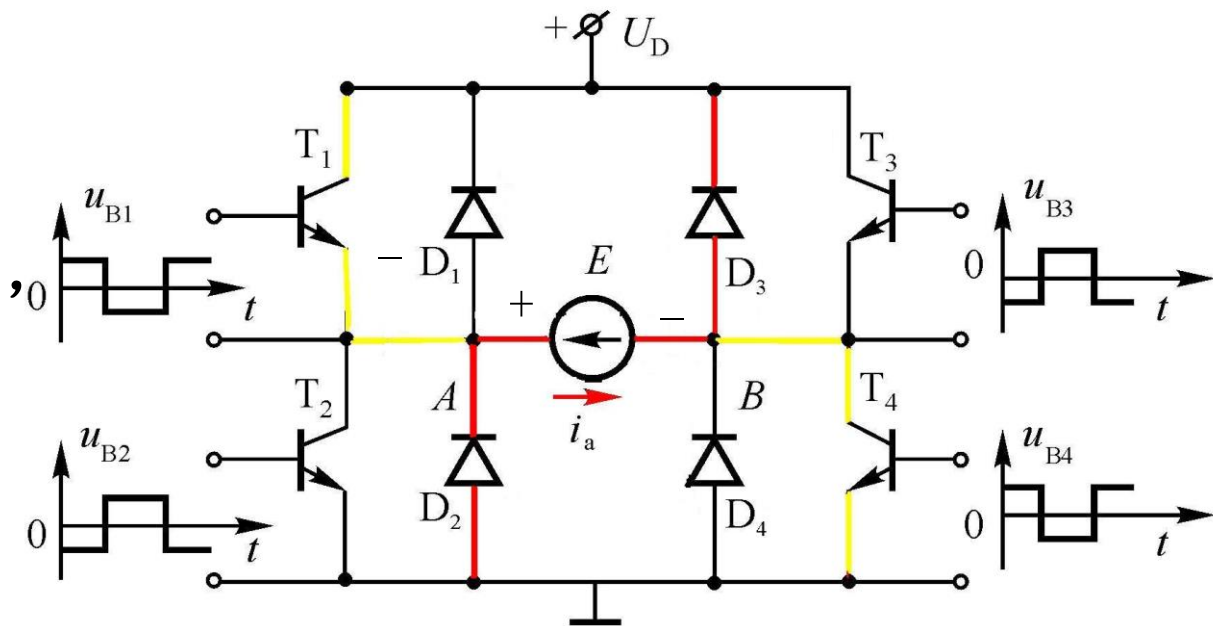
电动机状态: $t_1 < t < T$

$$U_{AB} = -U_D$$



电枢电感释放能量，
维持整个电流 i_a 向右，
 I_a 给 U_d 充电 (U_d 极性左-右+)，
电源吸收电能。

满足: $T_{em} = K_t * I_a$
 $E_a = K_e * n$



双极性PWM驱动

$$t_1 < t < T$$

$$i_a : \text{地} \rightarrow D_2 \rightarrow A \rightarrow B \rightarrow D_3 \rightarrow U_D \rightarrow \text{地}$$

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

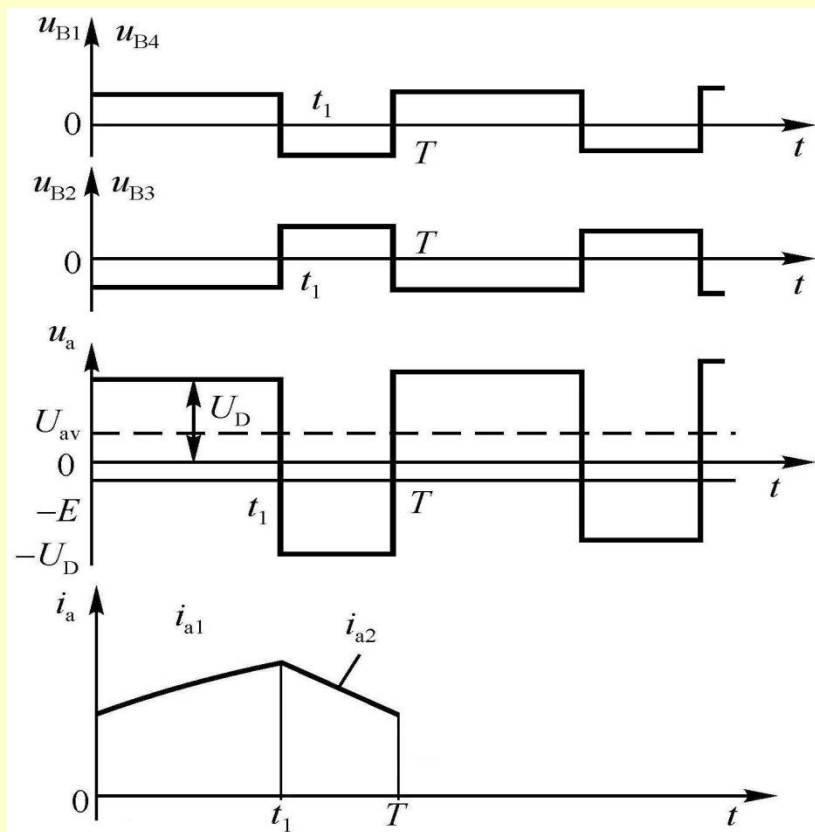
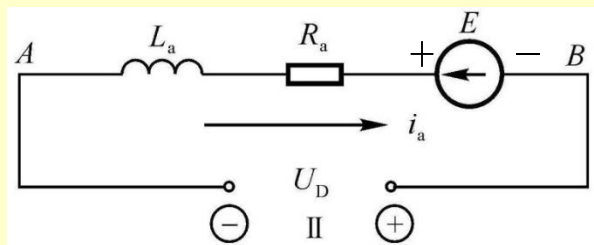
$$i_a(t) \downarrow: I(t_1) \rightarrow -\frac{U_D + E}{R_a}$$

电源吸收电能，电流减小，磁场能减小。

转速n正向，与Tem同向

Ea给Ud充电，电流从A到B。

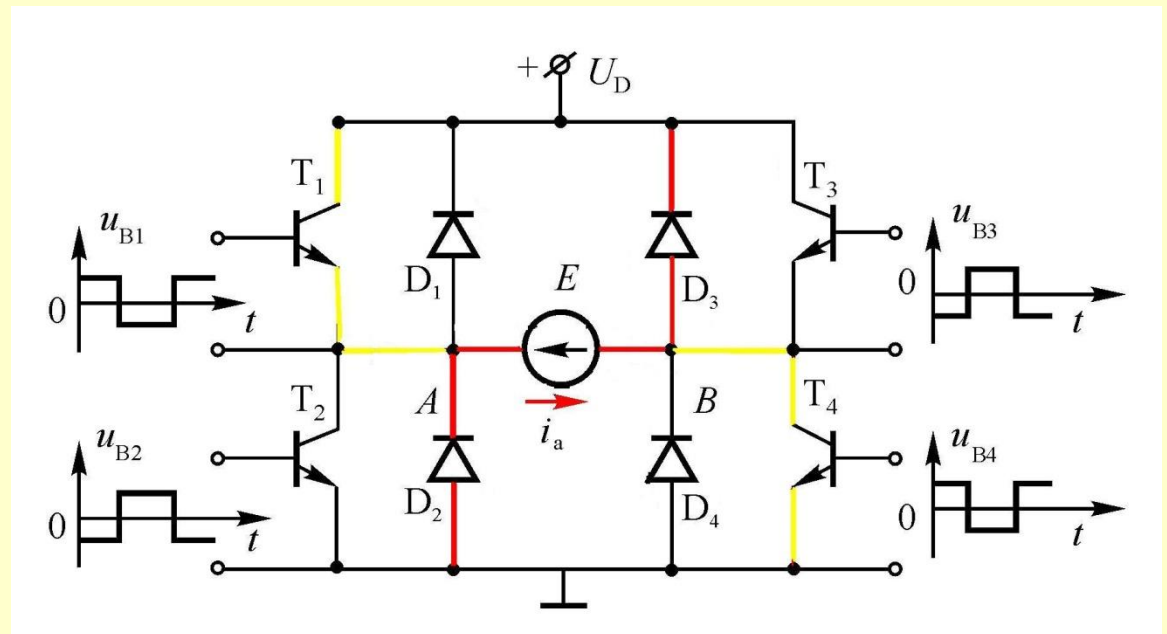
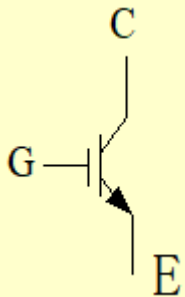
磁场能变成机械能与电能。



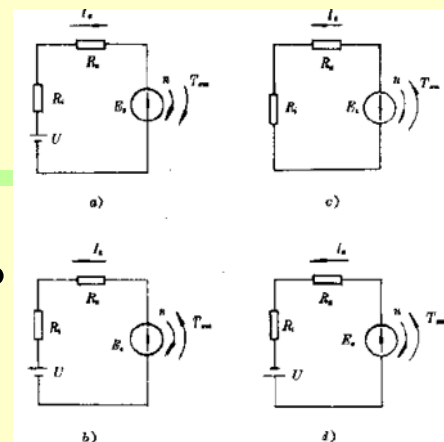
双极性PWM驱动

说明：

- (1) $t_1 < t < T$ 时段， T_2 、 T_3 基极正向偏压，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。



双极性PWM驱动



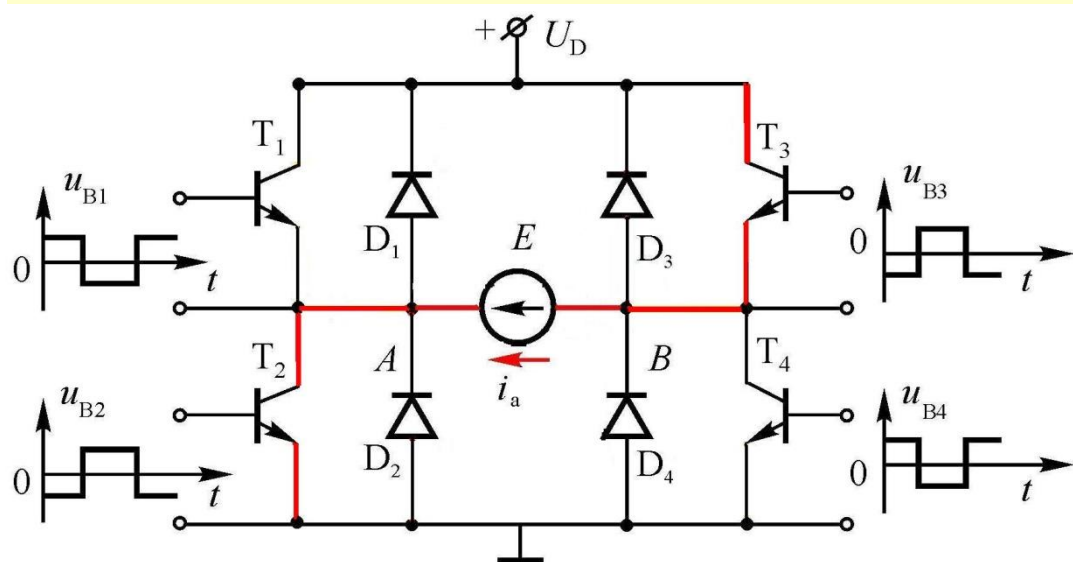
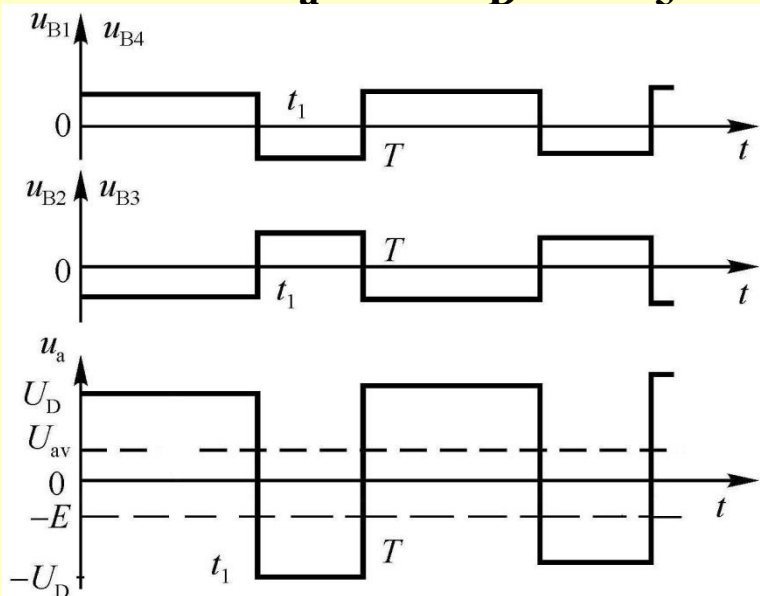
2. 发电机状态

电流与电势同向。

$$i_a < 0 \quad U_{av} < E \quad B \rightarrow A$$

1) $t_1 < t < T$ T_2 、 T_3 饱和导通， T_1 、 T_4 截止断开

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



双极性PWM驱动

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

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

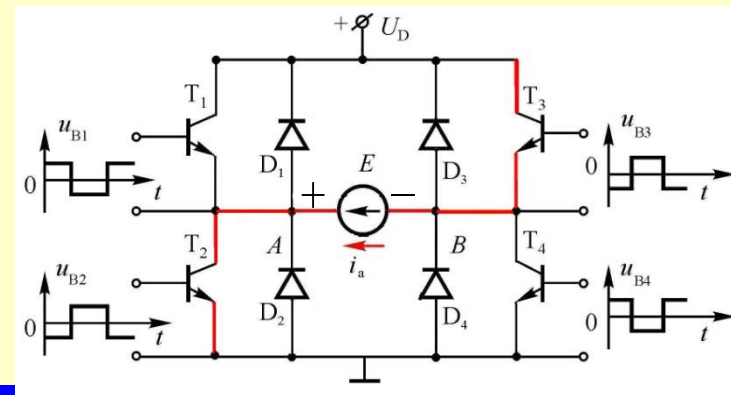
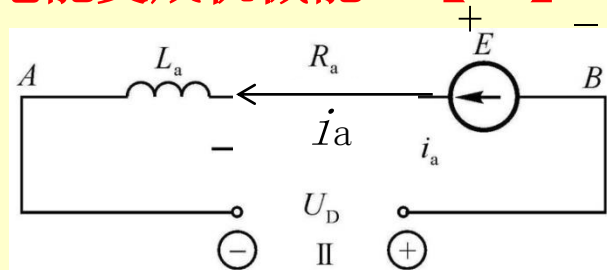
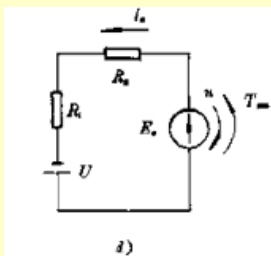
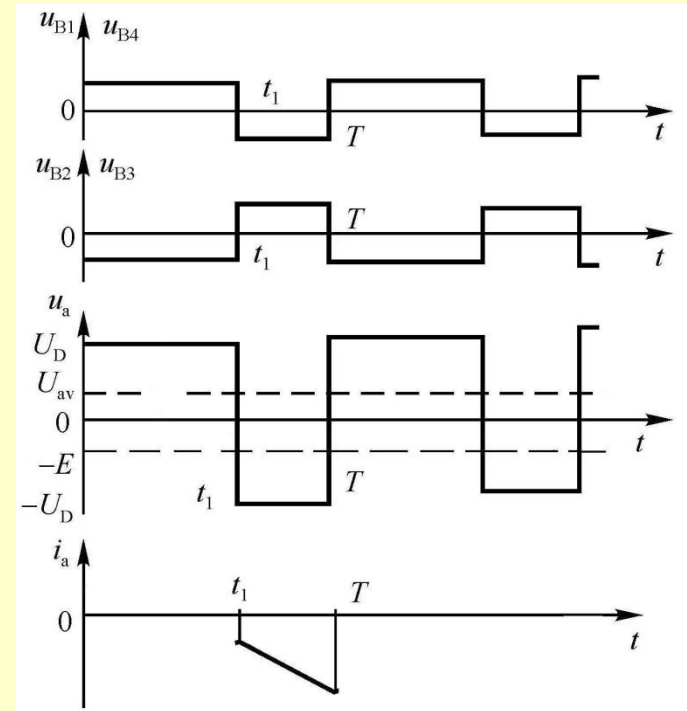
$$|i_a(t)| \uparrow: I(t_1) \rightarrow -\frac{U_D + E}{R_a}$$

电流增加，磁场能增加。

转速n正向，与Tem反向（制动）

Uav < E，且同向，电流从B到A

发电机制动状态，电能变成机械能。【?】



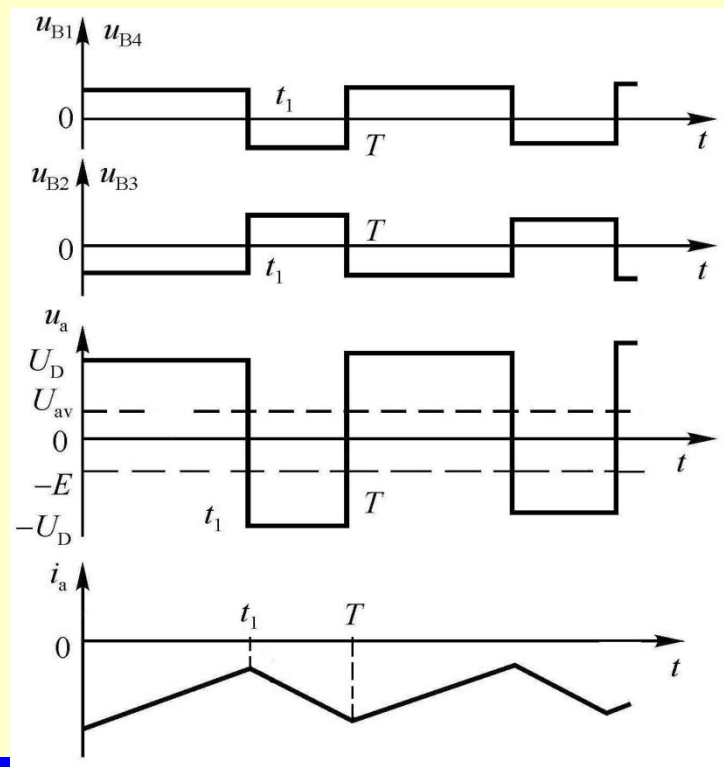
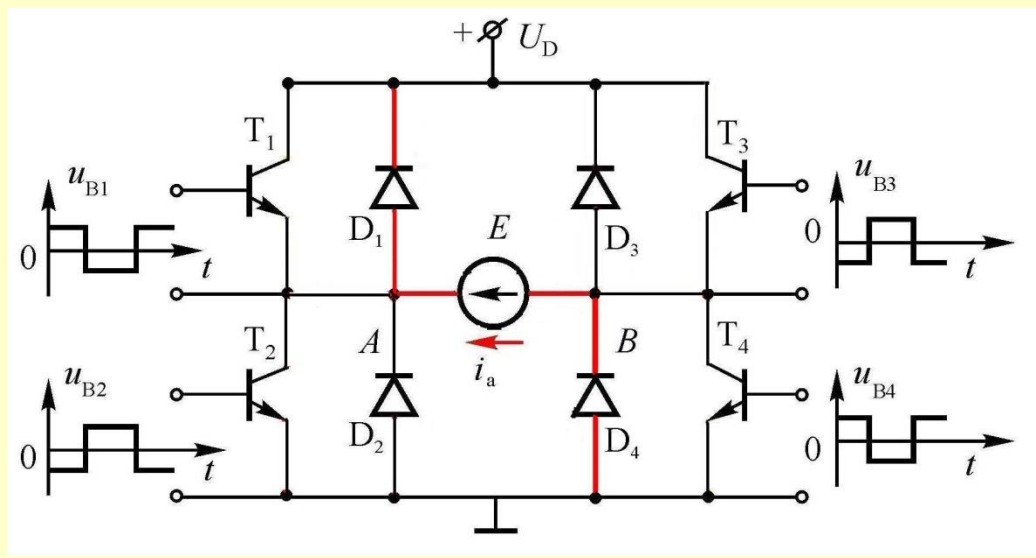
双极性PWM驱动

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 $u_{AB} = U_D$



双极性PWM驱动

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

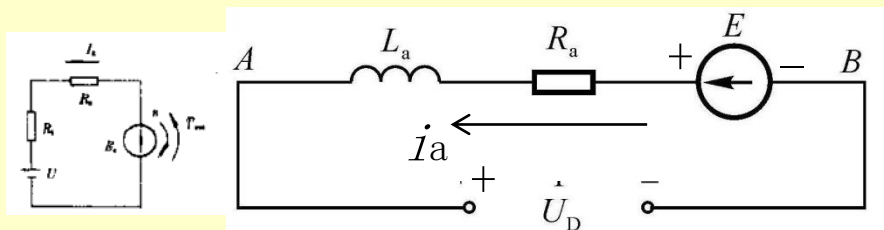
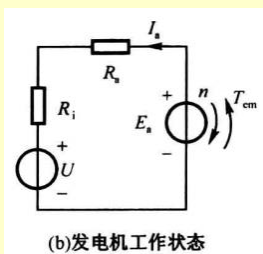
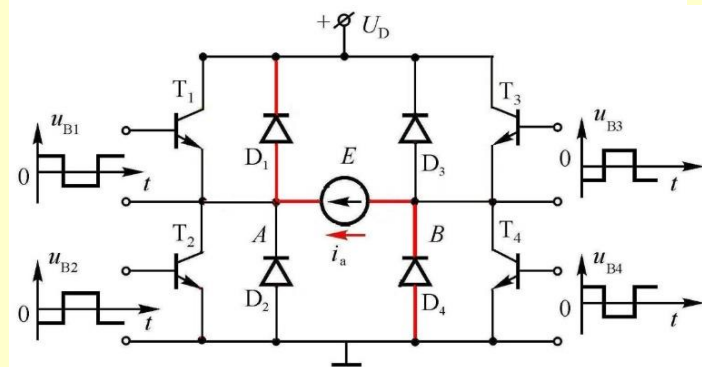
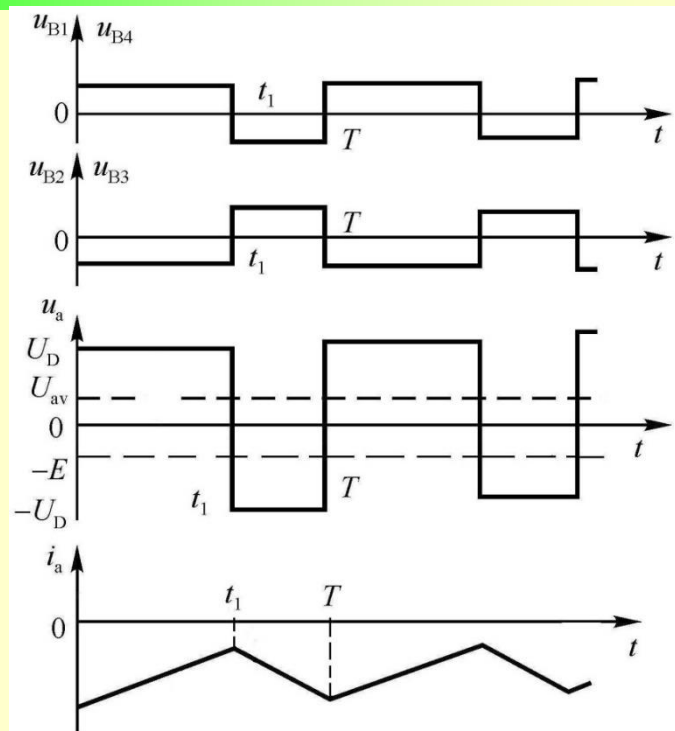
$$i_a(t) = \frac{U_D - E}{R_a} - \left(\frac{U_D - E}{R_a} - I_0 \right) e^{-\frac{R_a}{L_a} t}$$

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

电枢电感释放能量，磁场能减小，电流减小，电源吸收电能。

转速n正向，与Tem反向（制动）

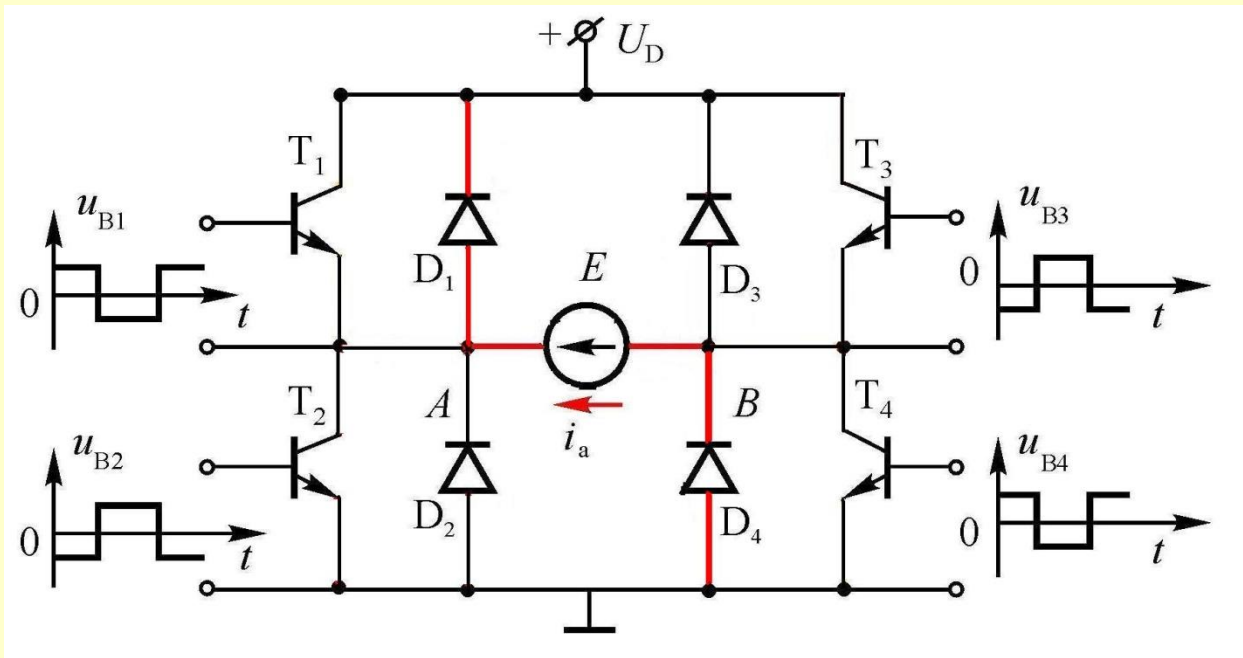
$U_{av} < E$ ，电流从B到A（与E电流同向）。



双极性PWM驱动

说明:

- (1) $0 < t < t_1$ ($T < t < T + t_1$), T_1 、 T_4 基极正向偏压, 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。

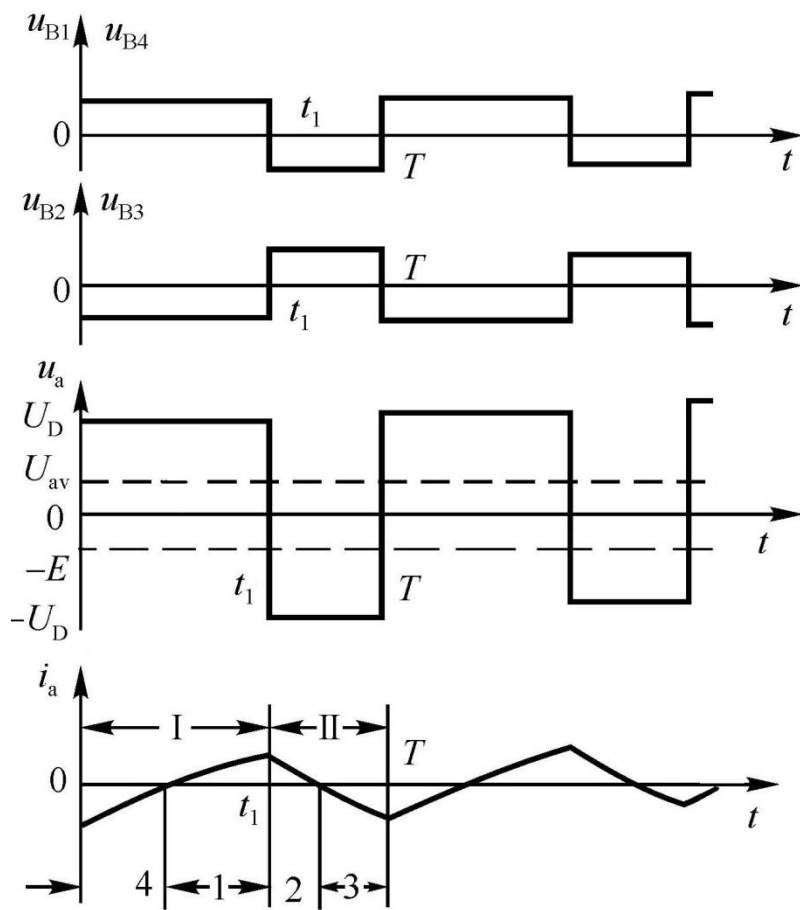
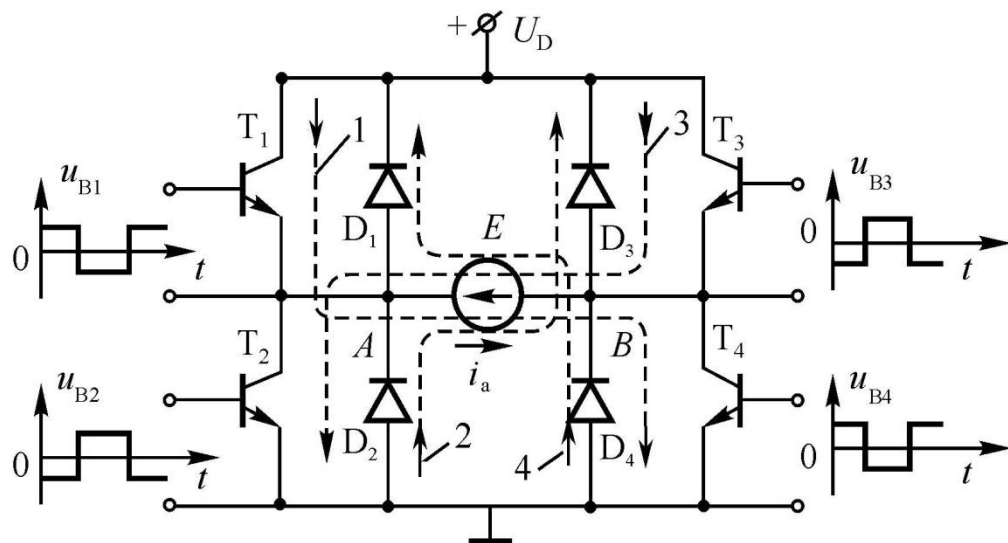


双极性PWM驱动

3. 轻载状态

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

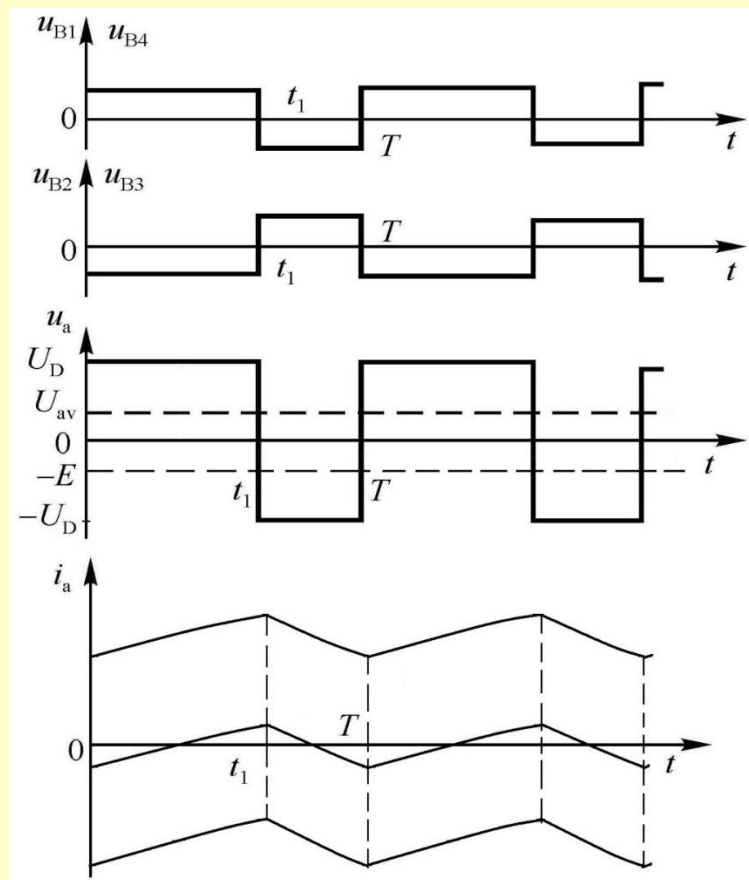
电流有正有负，上述两个状态中的四种情况，在一个周期内交替出现。



双极性PWM驱动

- ✓ 在一个开关周期中，输出电压 U_{av} 是方波，有正、负两个极性，电源交替地输出电能和吸收电能（但电动机状态以输出电能为主，发电机状态以吸收能量为主）。
- ✓ 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。当为电动机时，电流为正向；当为发电机时，电流为负向。
- ✓ 当为电动时， T_{em} 与 n 同向，电能变机械能；当为发电时， T_{em} 与 n 反向，机械能变电能。

双极性输出总结：



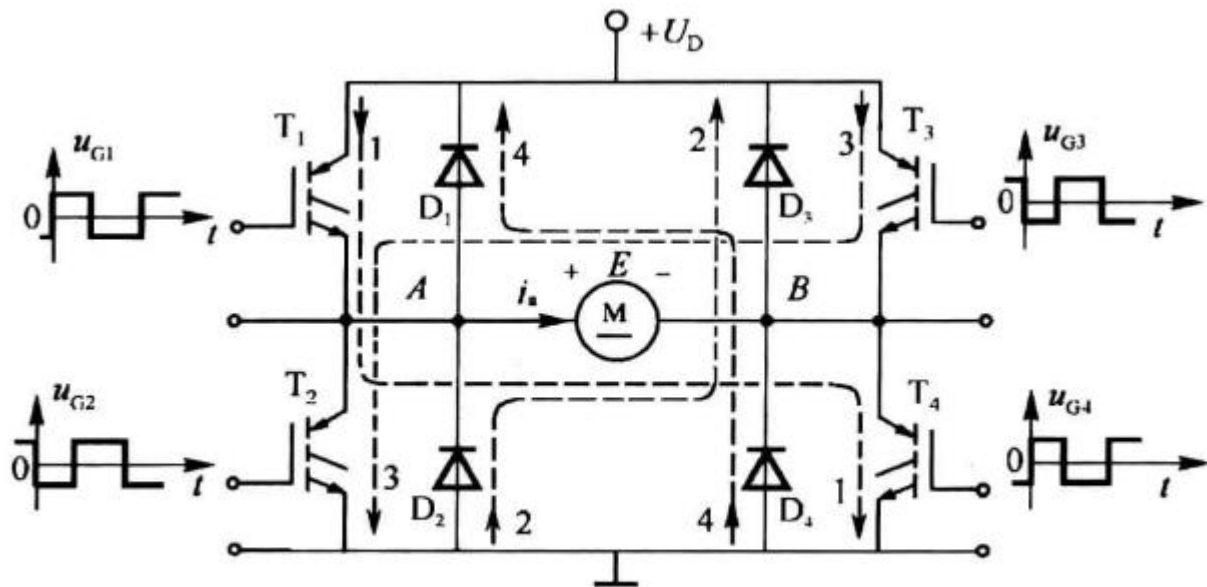


图 15-23 H 形桥式电路

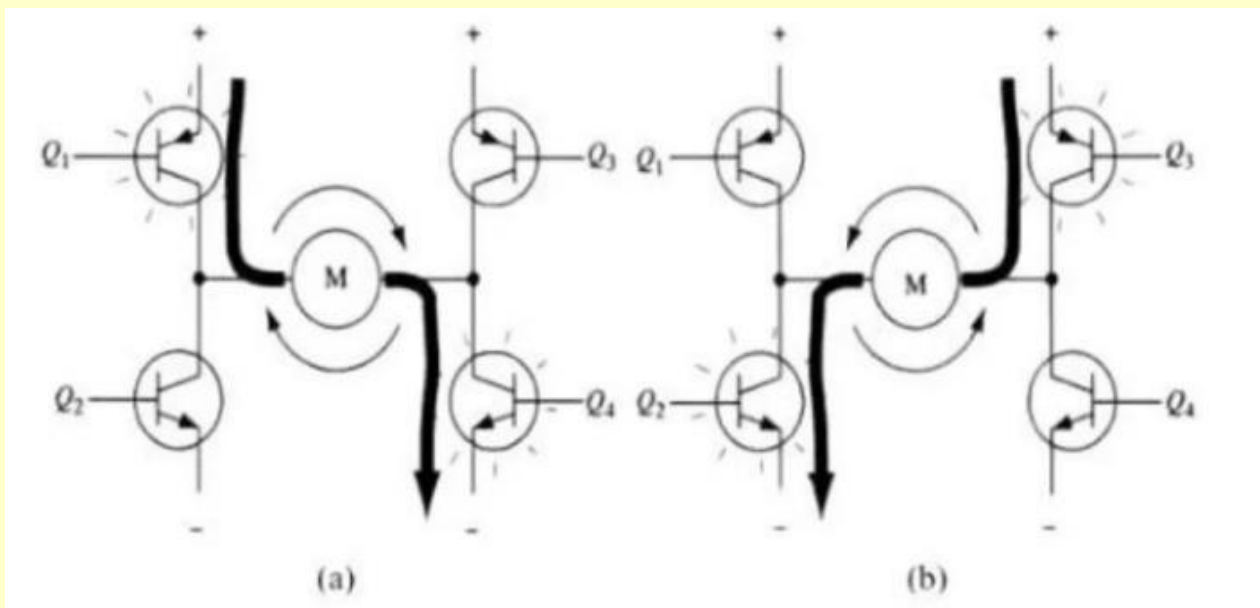
- 微观状态下， I_a ， T_{em} ， n ， E_a 都有增加/减少，但变化极小可认为不变。
- 针对方向，定义从左到右是+，反之为-。
- 当占空比为50%时，电机不转， $U_{av}=0$ ，开始 n 不为0，但最终为0，此阶段为能耗制动。

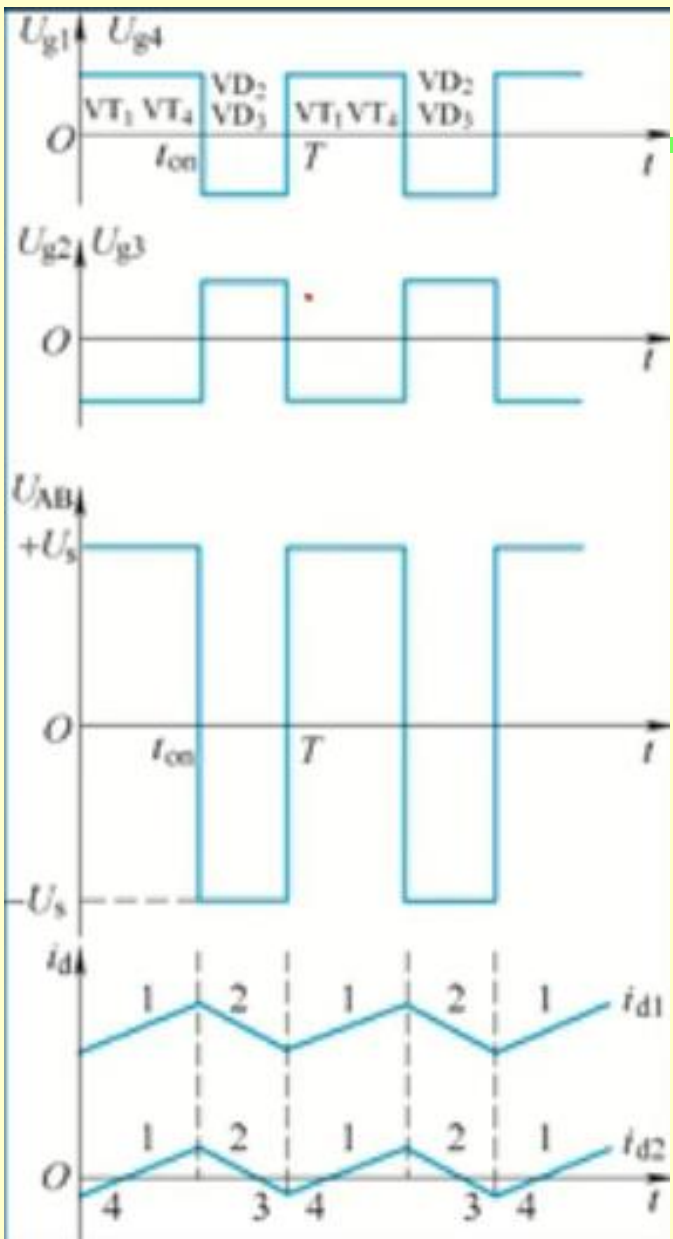
回路	占空比	U_d	E_a	U_{av}	I_a	T_{em}	n	电机状态	象限	充/放电，能量关系	导通器件
1	>50 %	+ / -	-	> E_a	+	+	+	电动	1	电源 U_d 释放能量，电机存储能量，电能变成机械能，磁场能增加。	T1, T4
2	>50 %	- / +	-	> E_a	+	+	+	电动	1	电源 U_d 吸收能量，电机释放能量，磁场能变成电能，磁场能减小。	D2, D3
3	<50 %	- / +	-	< E_a	-	-	+	制动 (反接)	2	电源 U_d 释放能量，电机存储能量，电能变成机械能，磁场能增加。	T2, T3
4	<50 %	+ / -	-	< E_a	-	-	+	制动 (发电)	2	电源 U_d 吸收能量，电机释放能量，磁场能变成电能，磁场能减小。	D1, D4



直流电机的转向控制

- 电机驱动主要采用N沟道MOSFET构建H桥驱动电路，要使电机运转，必需使对角线上的一对开关导通，经过不同的电流方向来控制电机正反转。
- Q1 Q4导通，电机正转，按以上分析其电动与发电状态。
Q3 Q2导通，电机反转，按以上分析其电动与发电状态。
- 上表只是讨论其正转时，其工作象限在1或2。当电机为反向工作时，其工作象限对称为2, 4，电路控制回路是由正转1变成反转3，正转2变成反转4。即电机反转时，回路3为其电动状态，回路2为其制动状态。





当 $\rho > 1/2$ 时, γ 为正, 电动机正转;
 当 $\rho < 1/2$ 时, γ 为负, 电动机反转;
 当 $\rho = 1/2$ 时, $\gamma = 0$, 电动机停止。

- ### 双极式控制的桥式可逆PWM变换器优点
- (1) 电流一定连续;
 - (2) 可使电动机在四象限运行;
 - (3) 电动机停止时有微振电流, 能消除静摩擦死区;
 - (4) 低速平稳性好, 系统的调速范围大;
 - (5) 低速时, 每个开关器件的驱动脉冲仍较宽, 有利于保证器件的可靠导通。



单极性PWM与受限单极性PWM驱动

- 单极性PWM

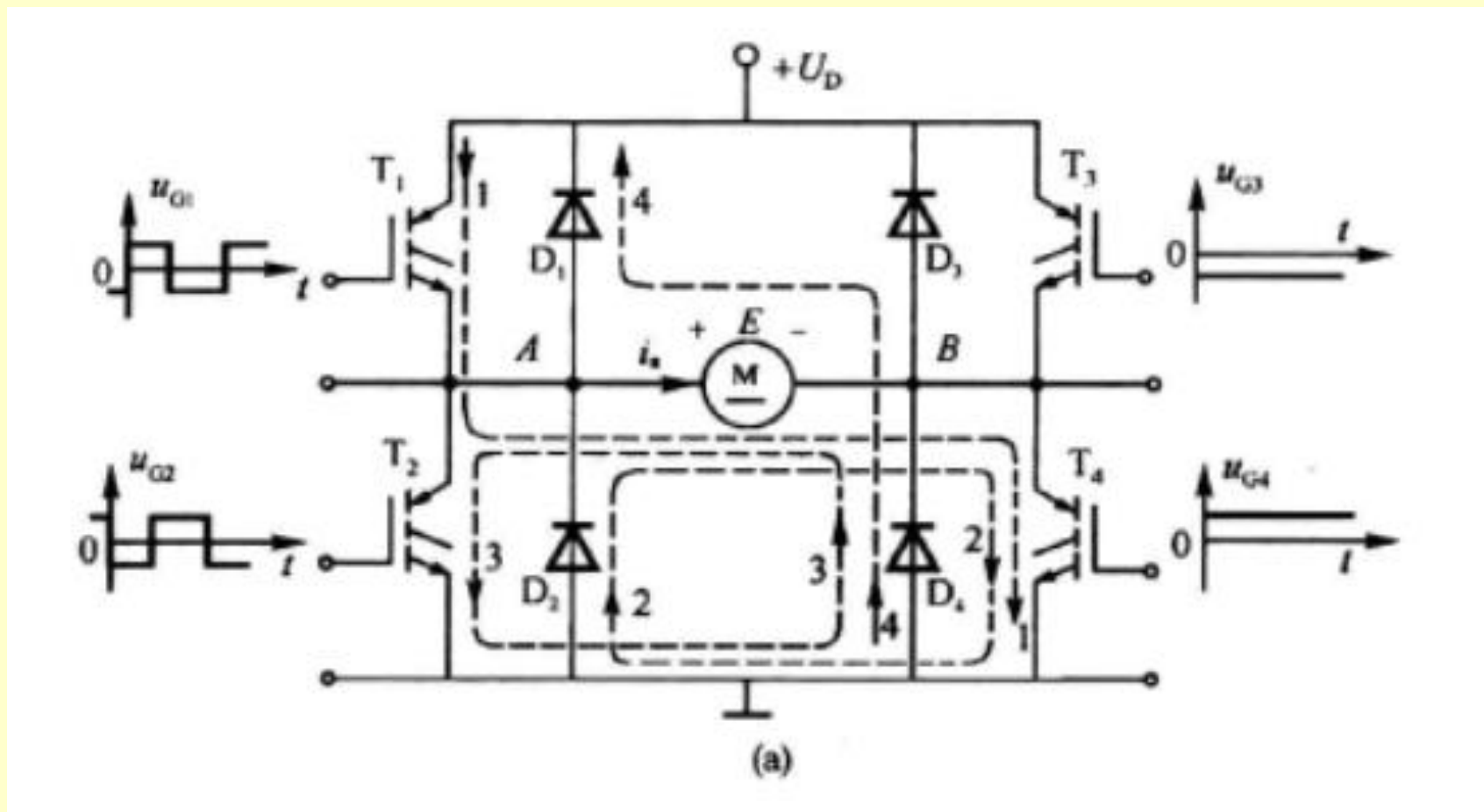
优点：减少开关管导通次数，增加其寿命

缺点：控制复杂。

- 受限单极性PWM（自学）



单极性PWM驱动



PWM驱动的特性

- 调制比 ρ
- 占空比 D
- 单极性、双极性PWM的 ρ 、 D 关系
- PWM 驱动的输出电压
- PWM 驱动的输出电流

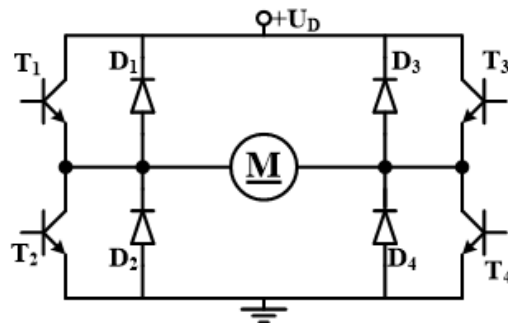


每日1题

2.5 功率器件是电机驱动重要的元件，以下说法正确的是_____。

- A. 绝缘栅双极晶体管 IGBT、电力场效应晶体管 P-MOSFET、晶闸管都是全控型器件
- B. MOSFET 器件工作在开关状态时，在截止区和饱和区之间来回转换
- C. 一般来说，相比于 IGBT 器件，MOSFET 器件开关速度更快，输出功率更高
- D. 对于 MOSFET 器件，漏极电流 I_d 和栅源间电压 U_{GS} 的关系，反映了输入电压和输出电流的关系，当漏极电流 I_d 和较大时， I_d 与 U_{GS} 的关系近似线性。

3.3 如下所示的 H 形桥式驱动电路，其中四个二极管称为续流二极管，它们是 PWM 功率放大器输出级中不可缺少的组成部分。以下说法正确的是_____。



- A. 二极管 D_3 的作用是为了避免开关器件 T_4 工作于击穿区
- B. 双极性 PWM 驱动时，当为电动机状态时，电源输出电能，电流增加，磁场能增加。
- C. 电源输出电能时电流值增加，吸收电能时电流减小
- D. 当为电动机状态时，电磁力矩 T_{em} 与转速 n 同向，电能变成机械能；当为发电机状态时，电磁力矩 T_{em} 与转速 n 反向，机械能变成电能。



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。

