



自动控制实践I

# 功率管的开关过程

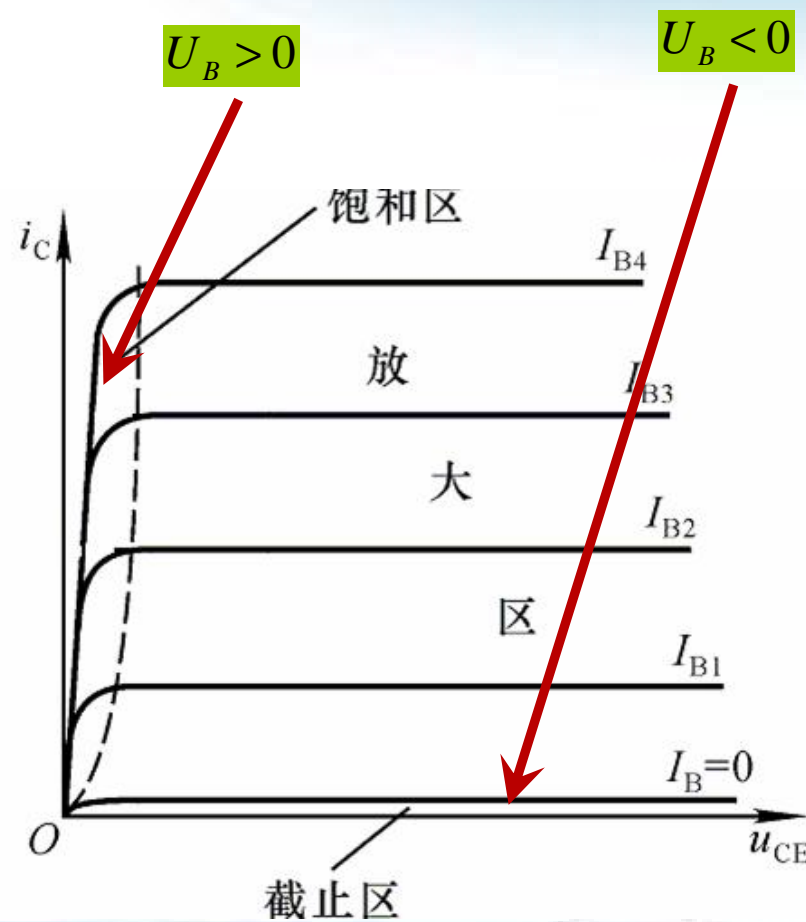
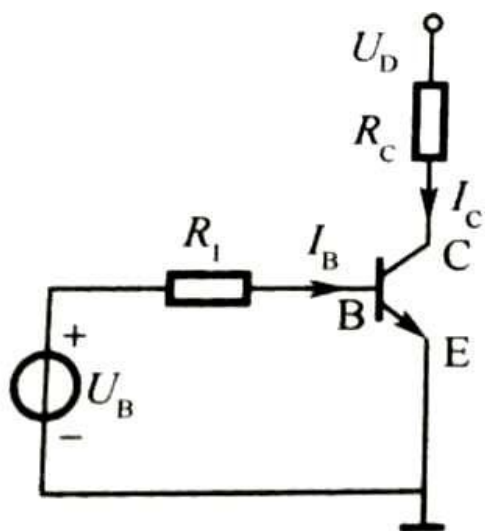
哈尔滨工业大学空间控制与惯性技术研究中心 解伟男

# 目 录

- 1 功率管的开关过程
  - 1.1 电阻负载开关过程
  - 1.2 电阻和电感负载开关过程
  - 1.3 有续流回路的电阻和电感负载开关过程
- 2 开关器件的发热与散热
  - 2.1 开关器件的发热计算
  - 2.2 开关器件的散热计算
- 3 开关器件的驱动
- 4 开关器件的保护
  - 4.1 关断缓冲电路
  - 4.2 开通缓冲电路

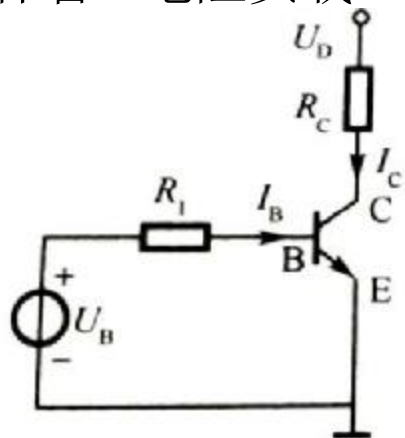
# 1.1 电阻负载的开关过程

○ 晶体管+电阻负载



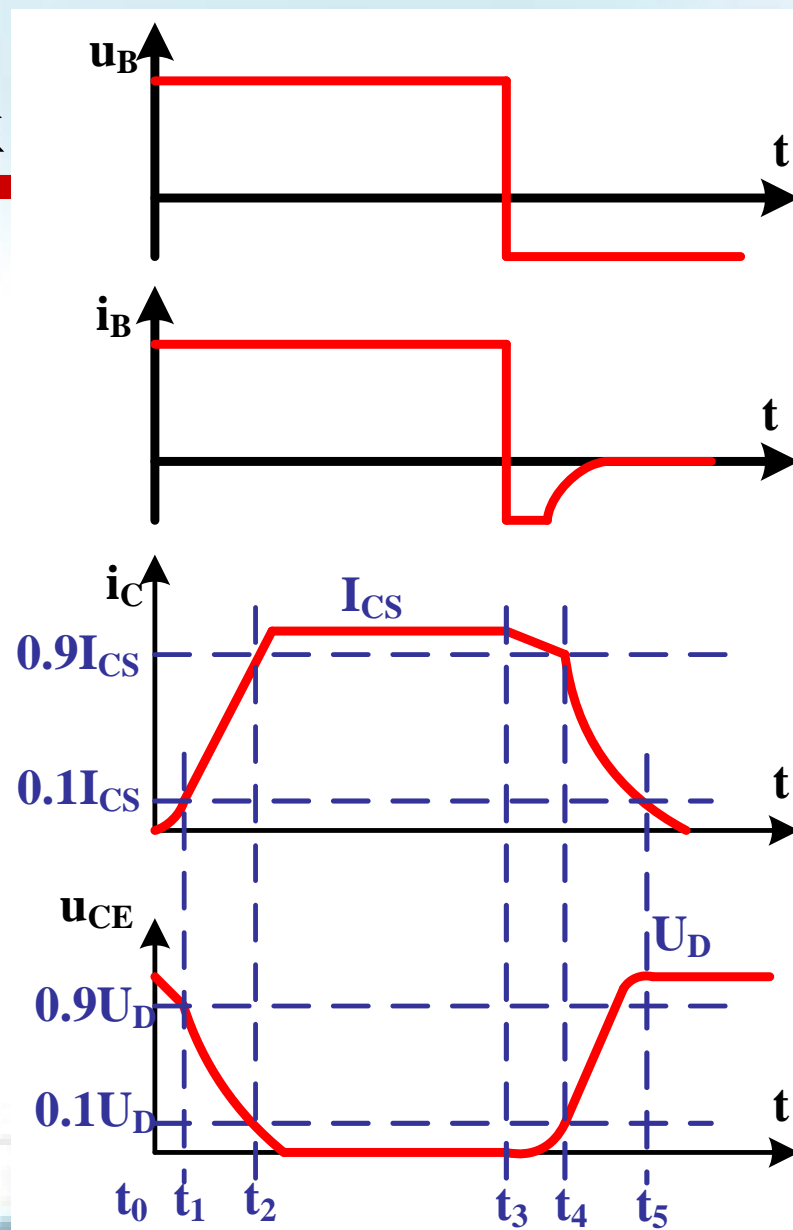
# 1.1 电阻负载的开关过程

○ 晶体管 + 电阻负载



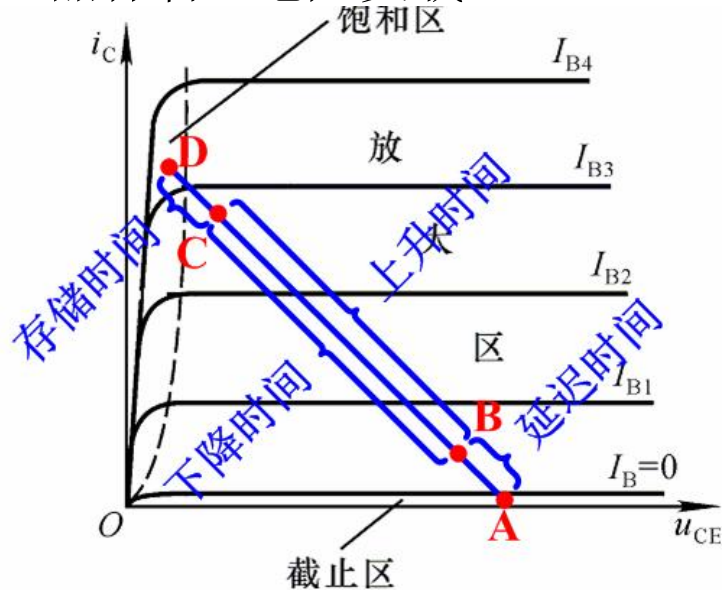
开通时间 { 延迟时间  $t_d = t_1 - t_0$   
上升时间  $t_r = t_2 - t_1$

关断时间 { 存储时间  $t_s = t_4 - t_3$   
下降时间  $t_f = t_5 - t_4$



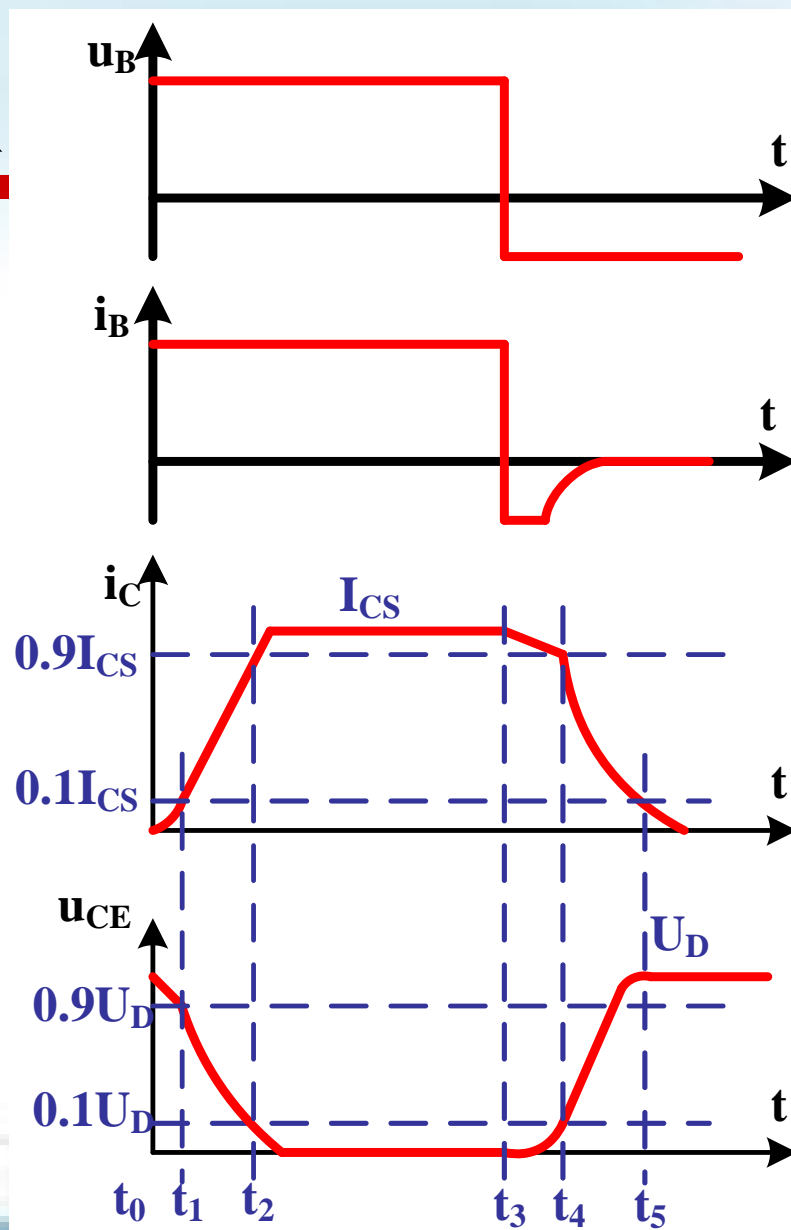
# 1.1 电阻负载的开关过程

○ 晶体管+电阻负载



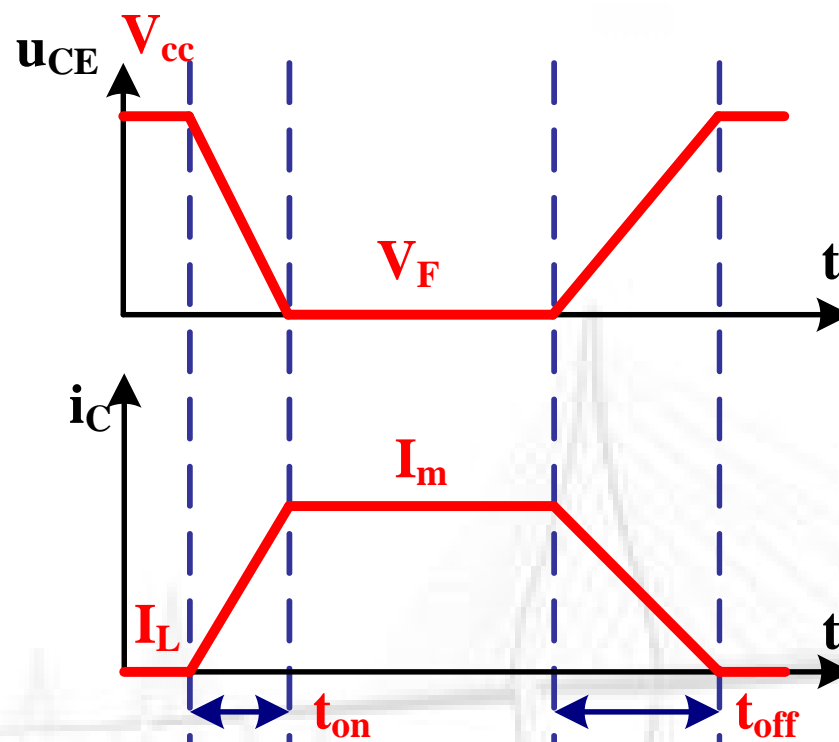
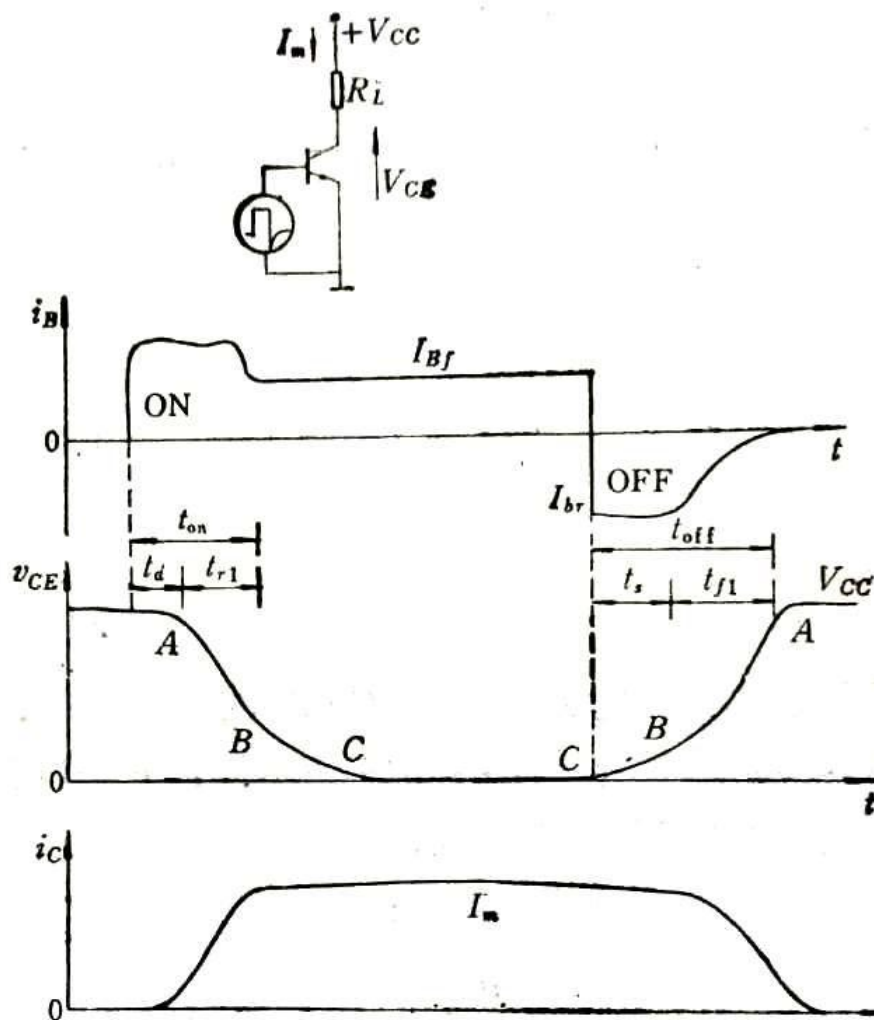
开通时间 { 延迟时间  $t_d = t_1 - t_0$ : A  $\rightarrow$  B  
上升时间  $t_r = t_2 - t_1$ : B  $\rightarrow$  C

关断时间 { 存储时间  $t_s = t_4 - t_3$ : D  $\rightarrow$  C  
下降时间  $t_f = t_5 - t_4$ : C  $\rightarrow$  B



# 1.1 电阻负载的开关过程

## ○ 晶体管+电阻负载

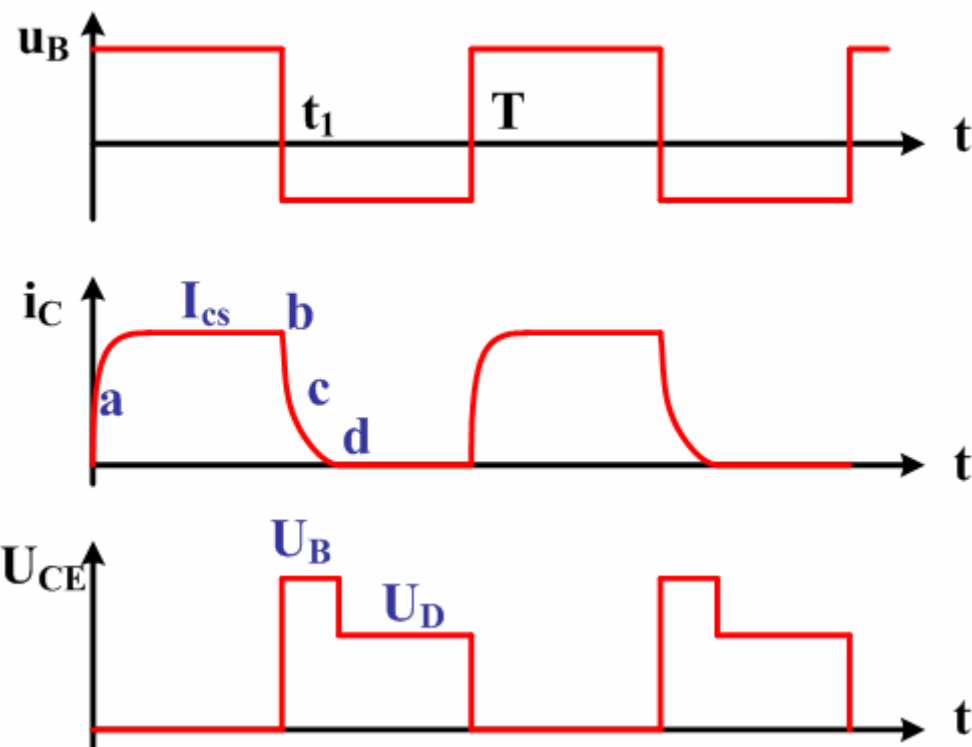
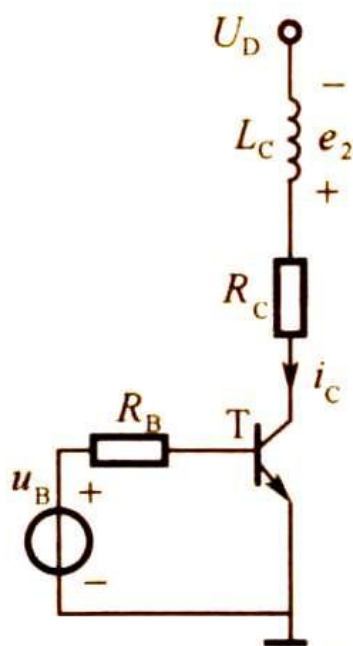


## 1.2 电阻和电感负载的开关过程

### ○ 晶体管+电阻和电感负载

n 假设控制信号周期变化， $T$ 为周期，电路时间常数为 $T_c=L_c/R_c$

n 当 $T$ 较大时，负载电流断续



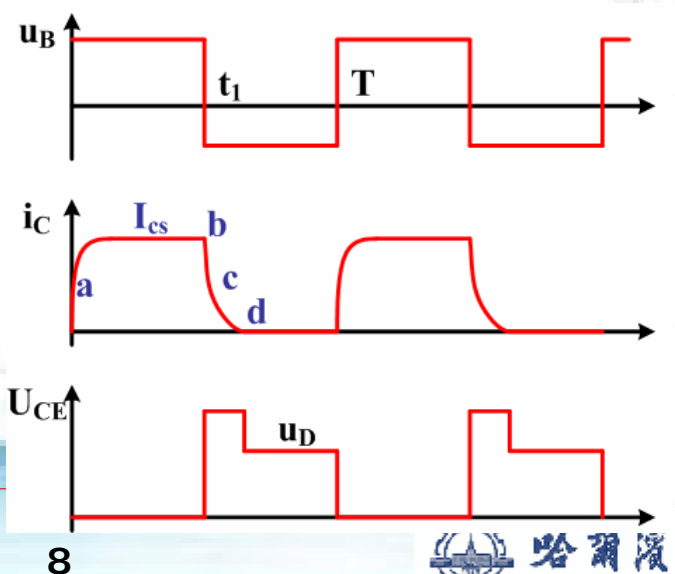
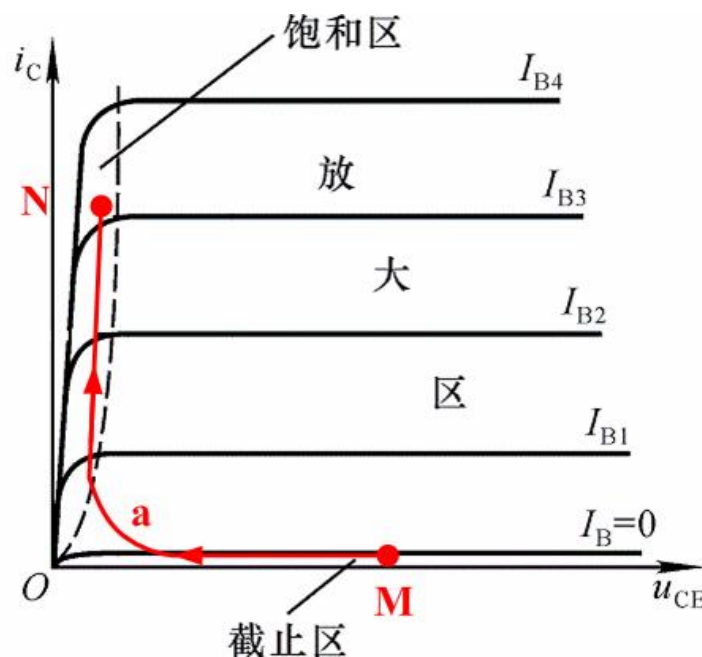
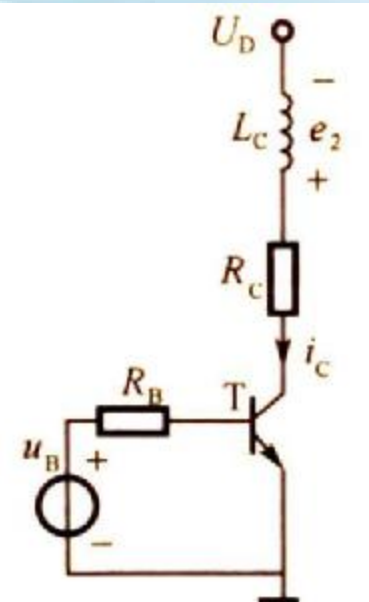
# 1.2 电阻和电感负载的开关过程

○ 当负载电流断续时

1.  $u_B$  使晶体管开通,  $u_{CE}$  迅速下降, 但由于电感的存在  $i_C$  缓慢上升

$$L_C \frac{di_C}{dt} + R_C i_C = U_D - u_{CE}$$

$i_C$  按指数曲线增加, 晶体管工作点沿 **MaN** 移动





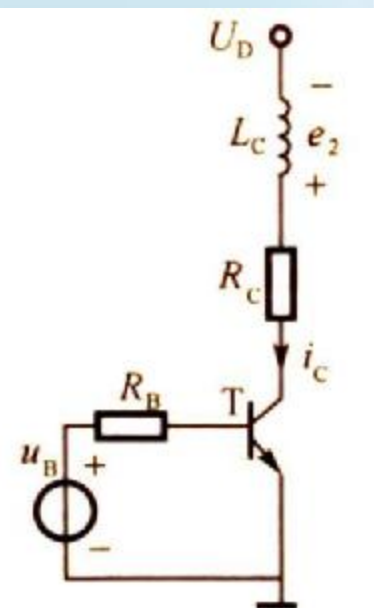
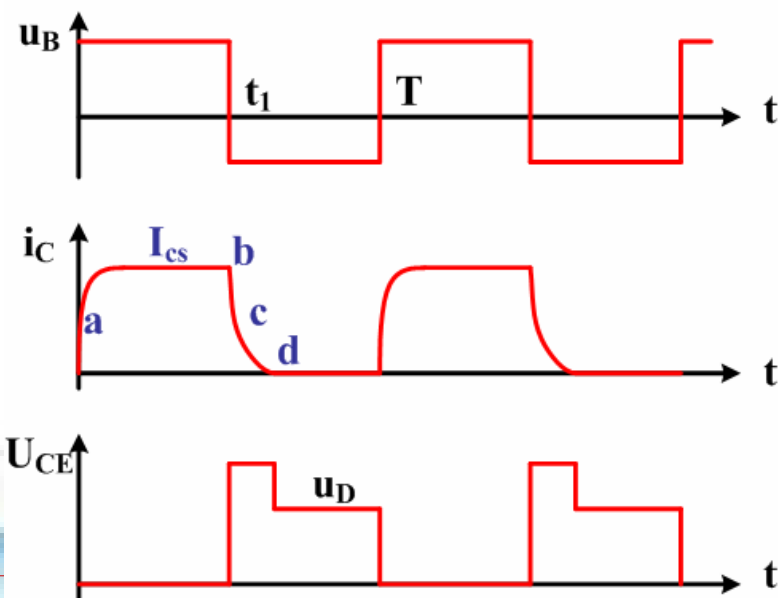
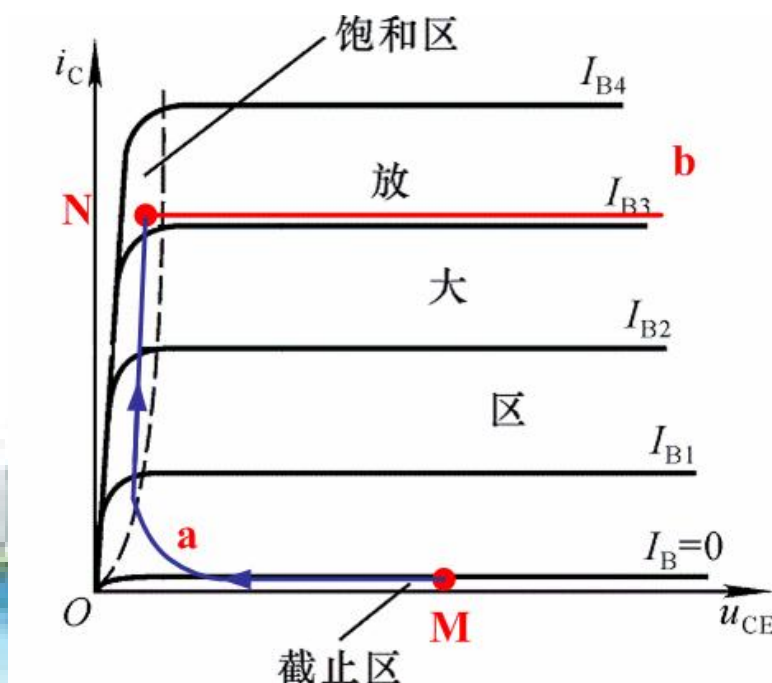
## 1.2 电阻和电感负载的开关过程

○ 当负载电流断续时

2.  $u_B$  使晶体管关断，由于电感的存在， $i_C$  减小产生的自感电动势使  $u_{CE}$  迅速升高，达到击穿区

$$u_{CE} = U_D + e_2 - i_C R_C$$

晶体管工作点沿 **Nb** 移动

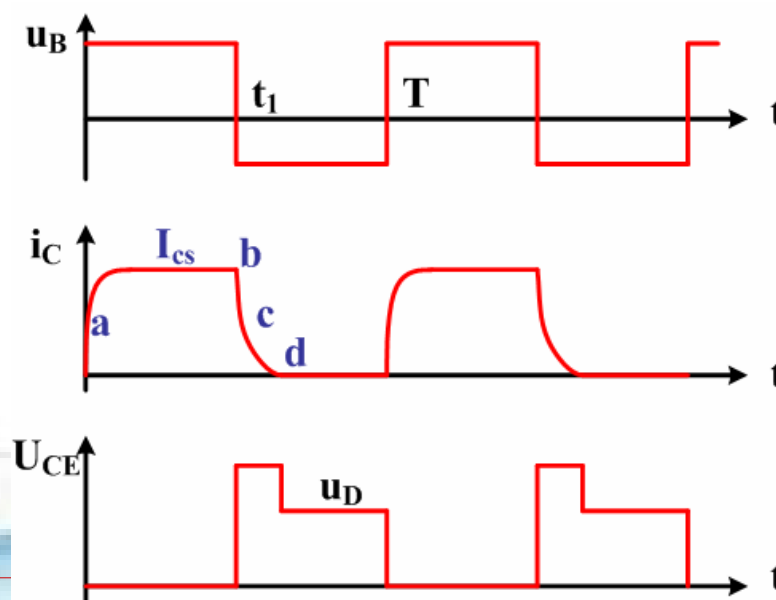
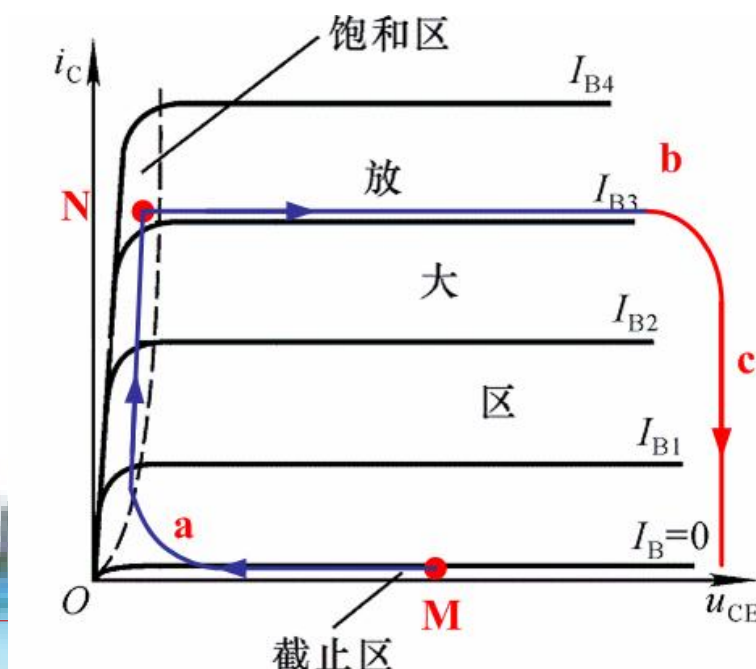
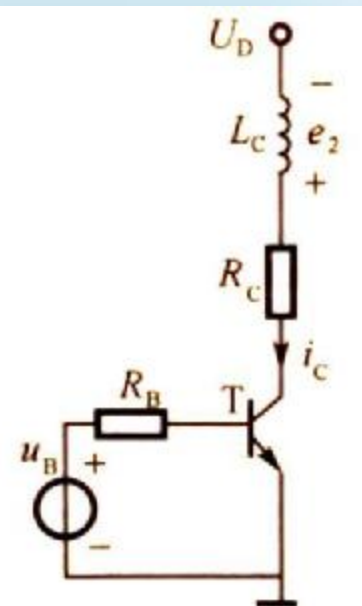


## 1.2 电阻和电感负载的开关过程

○ 当负载电流断续时

3. 晶体管击穿后，等效一个理想的放电电阻， $u_{CE}$ 保持在击穿电压，电流指数关系下降

晶体管工作点沿**bc**移动

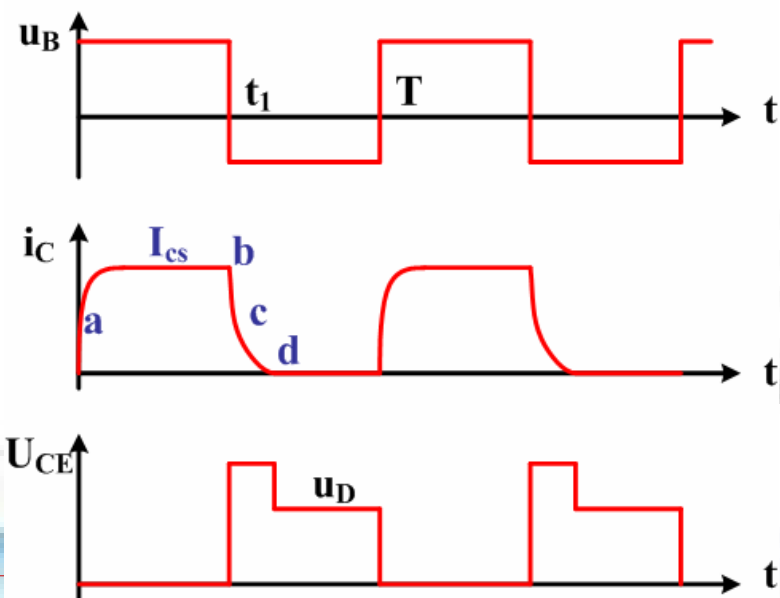
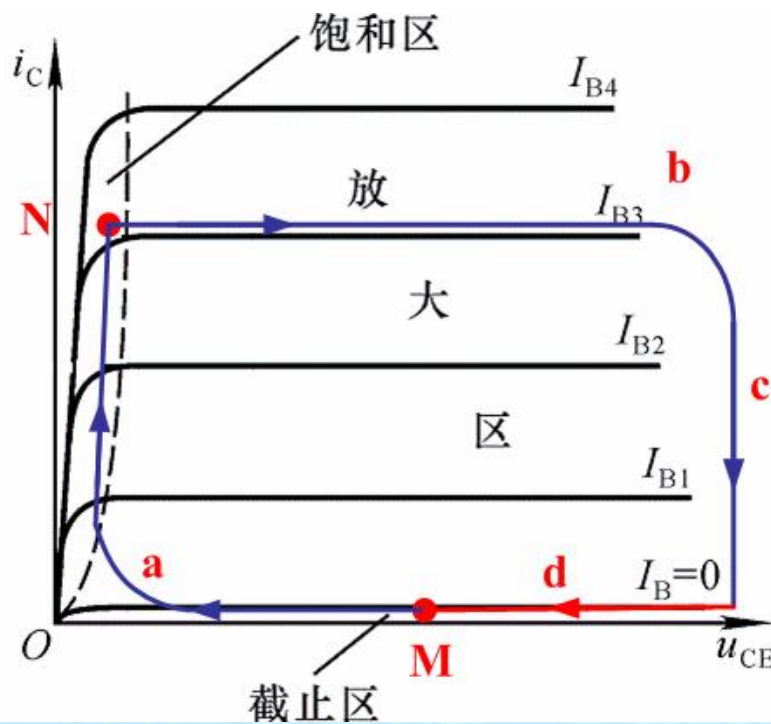
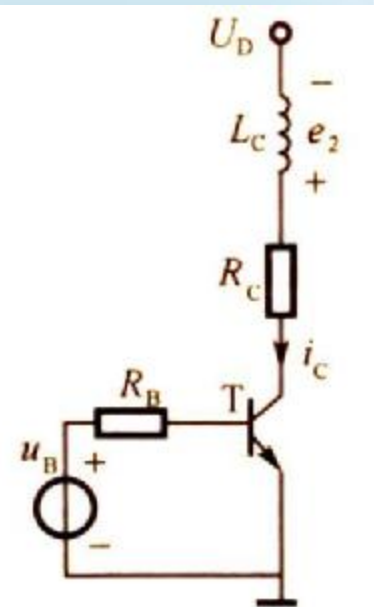


## 1.2 电阻和电感负载的开关过程

○ 当负载电流断续时

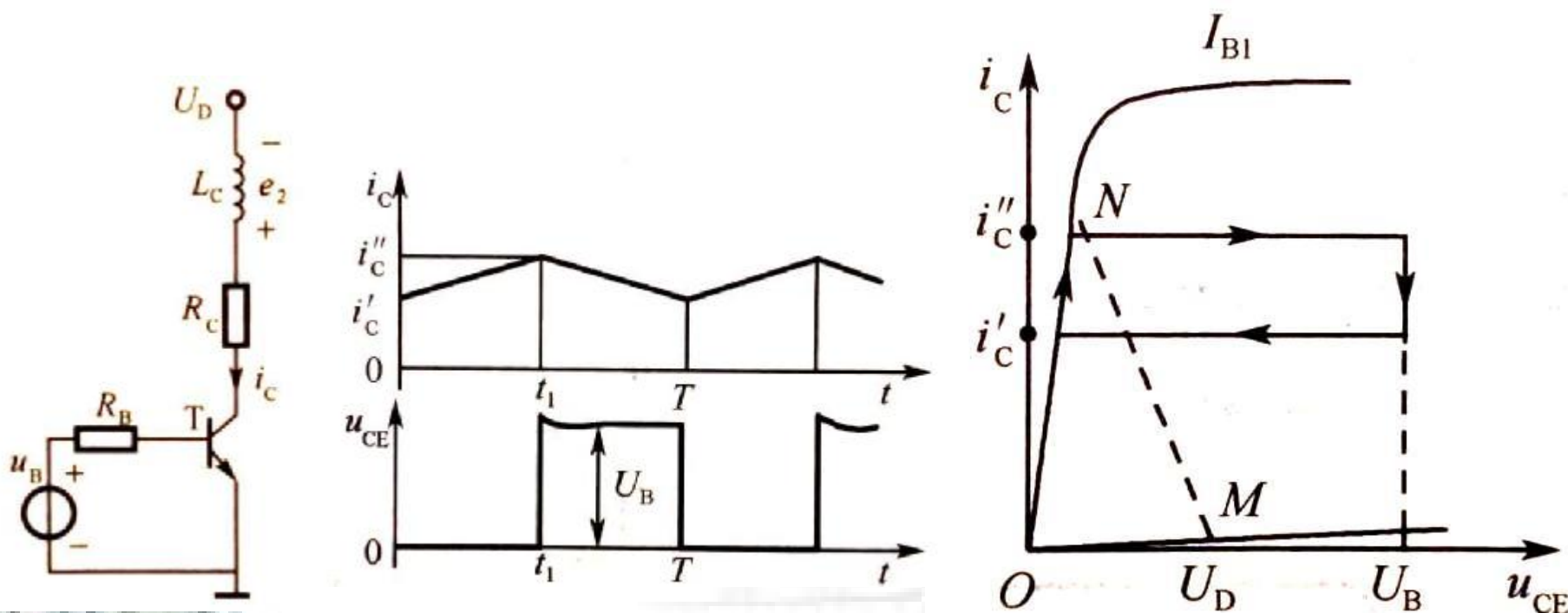
4. 当电流下降为0后，晶体管击穿后 $u_{CE}$ 由击穿电压下降为 $u_D$ ，晶体管关断

晶体管工作点沿 $cdM$ 移动



## 1.2 电阻和电感负载的开关过程

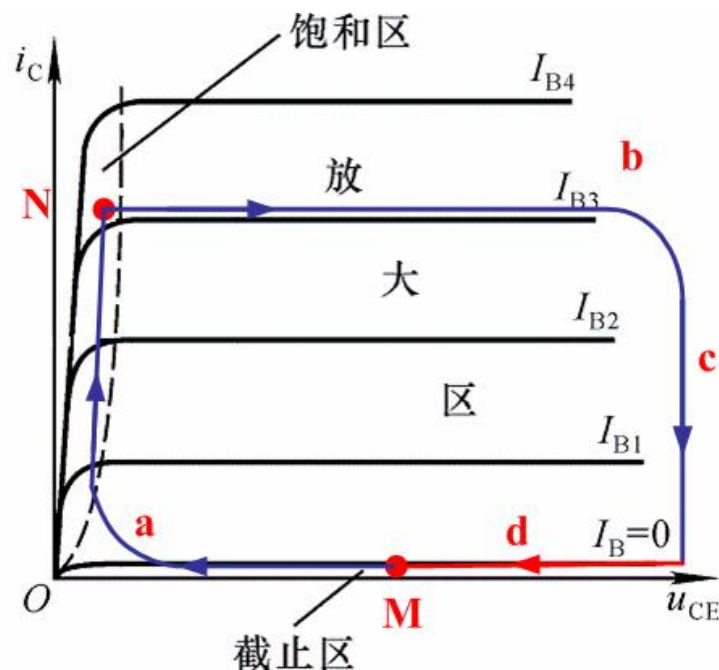
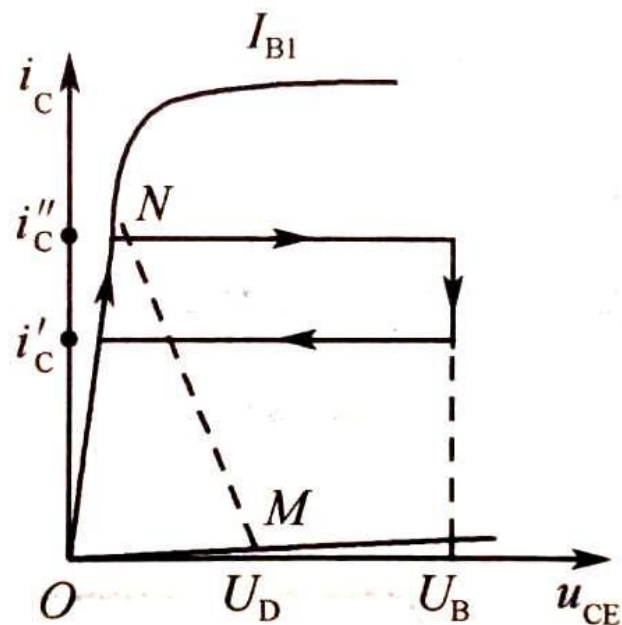
- 晶体管+电阻和电感负载
- n 当 $T$ 较小时，负载电流连续



## 1.2 电阻和电感负载的开关过程

○ 晶体管+电阻和电感负载

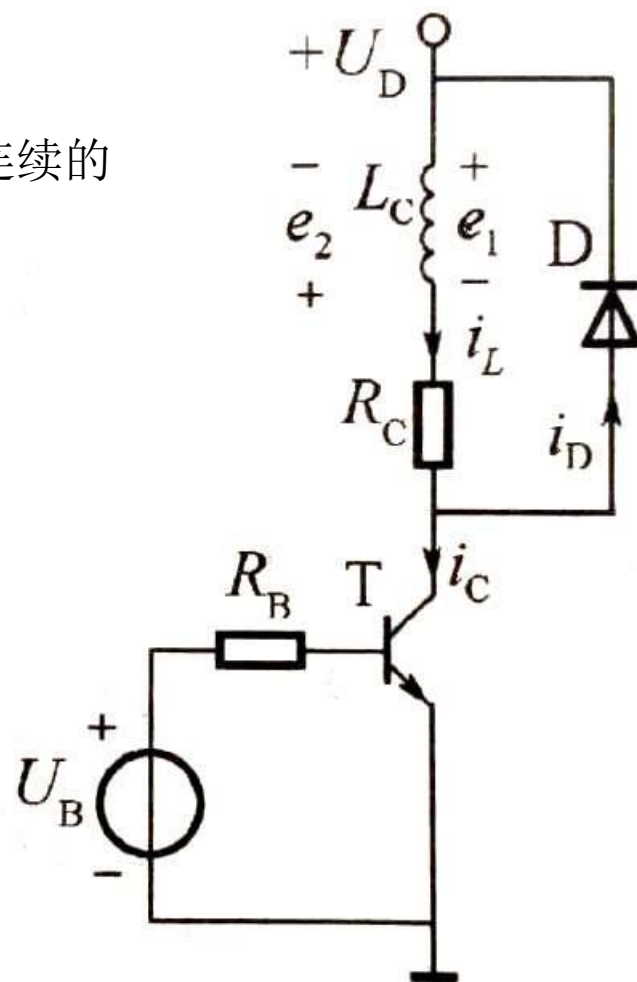
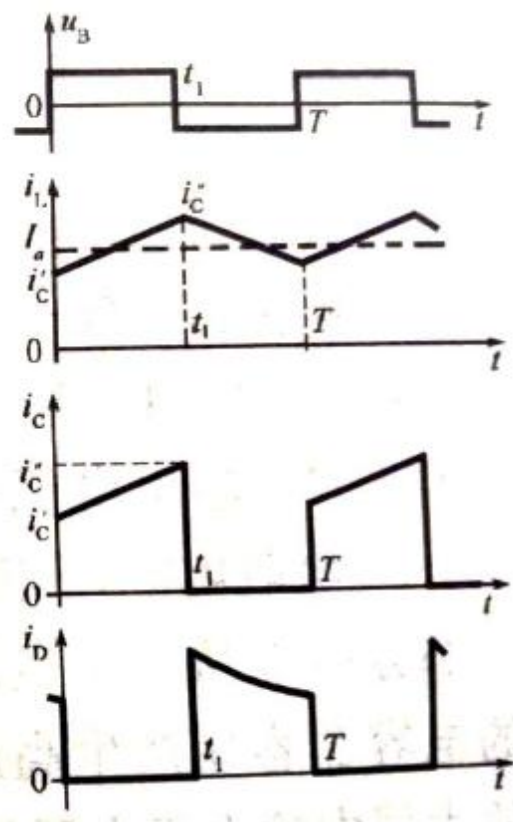
■ 无论电流连续还是电流断续，晶体管的工作区都进入了击穿区



## 1.3 有续流回路的电阻和电感负载开关过程

○ 晶体管+续流回路电阻和电感负载

■ 电流也分为连续和断续，但大多数情况是连续的

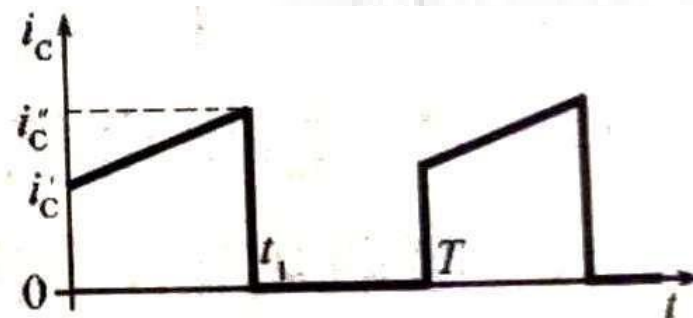
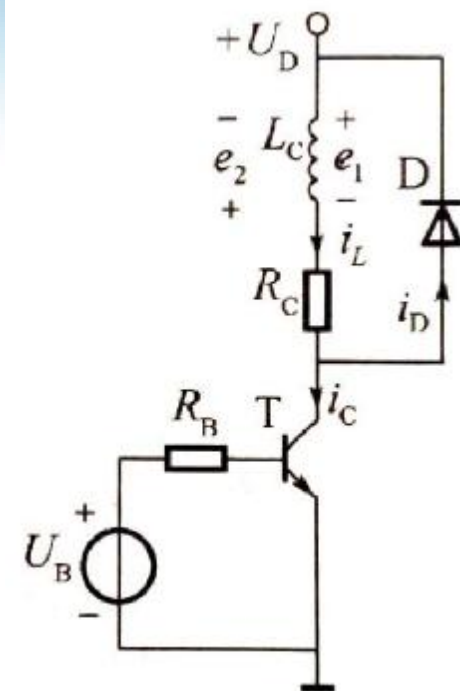
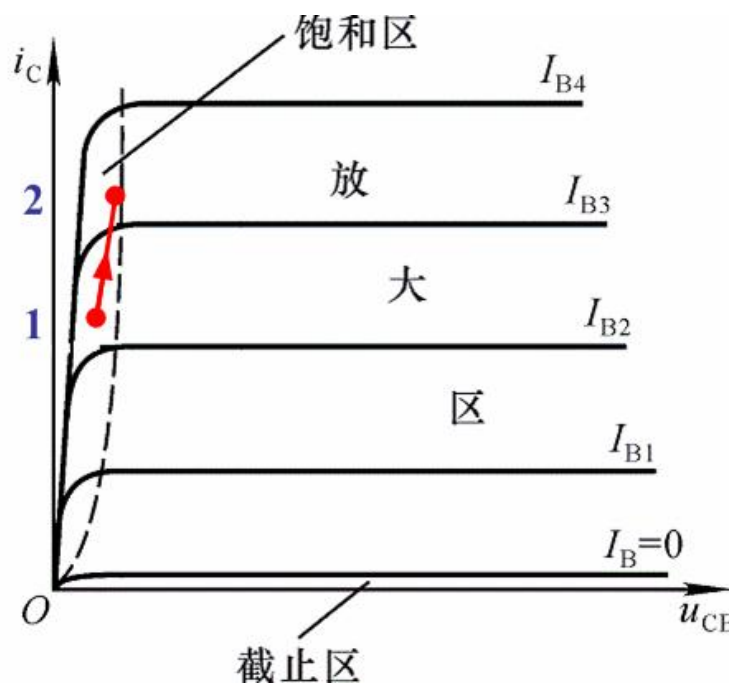


# 1.3 有续流回路的电阻和电感负载开关过程

## ○ 晶体管+续流回路电阻和电感负载

1.  $0 < t < t_1$ , 晶体管处于通态, 负载电流按指数增加由 $i'$ 到 $i''$ , 感应电动势为 $e_1$ , 二极管截止

晶体管工作点从1移动到2



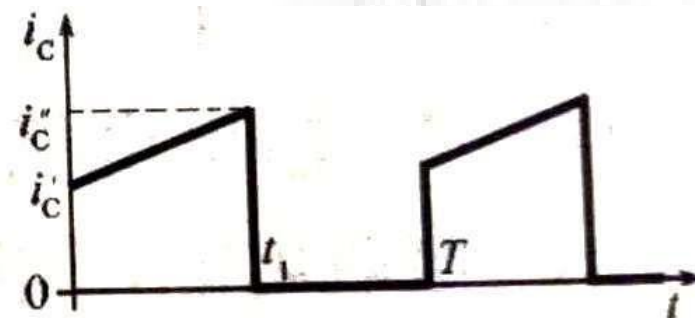
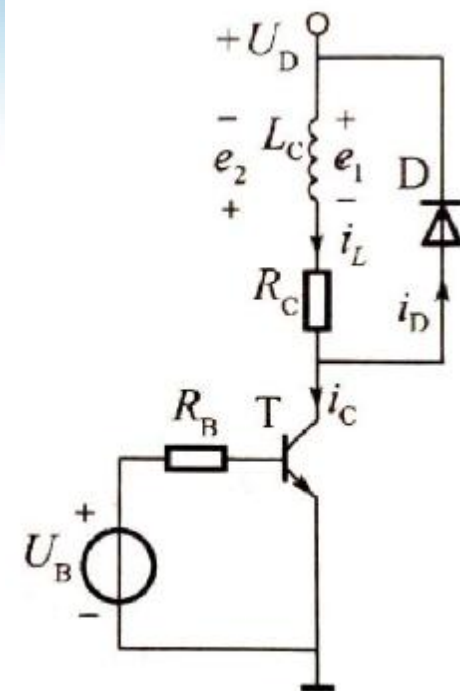
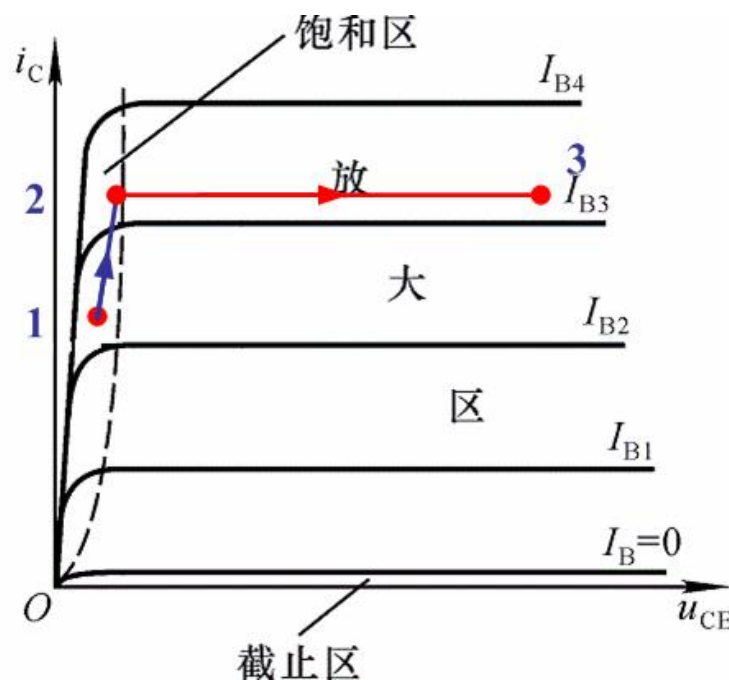


## 1.3 有续流回路的电阻和电感负载开关过程

### ○ 晶体管+续流回路电阻和电感负载

2.  $t=t_1$ , 晶体管关断过程中, 电流减小微弱, 感应电动势为  $e_2$ ,  $u_{CE}$  升高, 二极管截止

晶体管工作点从2移动到3



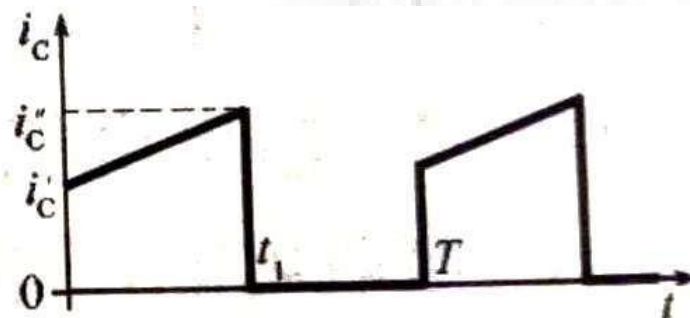
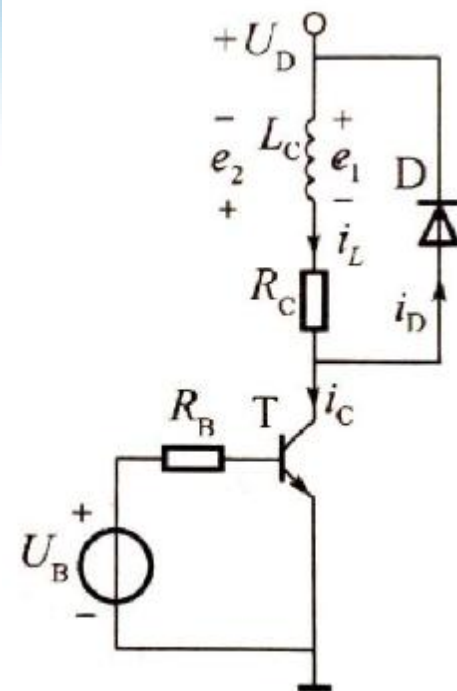
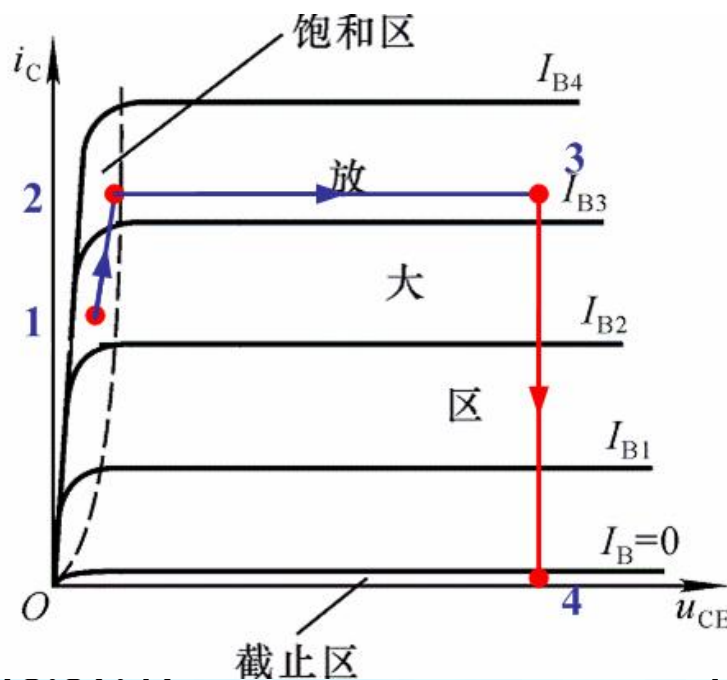


## 1.3 有续流回路的电阻和电感负载开关过程

### ○ 晶体管+续流回路电阻和电感负载

3. 当 $u_C > U_D + 0.7V$ 时, D 开通,  $u_C$  被钳制在  $U_D + 0.7V$ ,  $i_D$  增加,  $i_C$  减小到 0, 晶体管关断

晶体管工作点从3移动到4

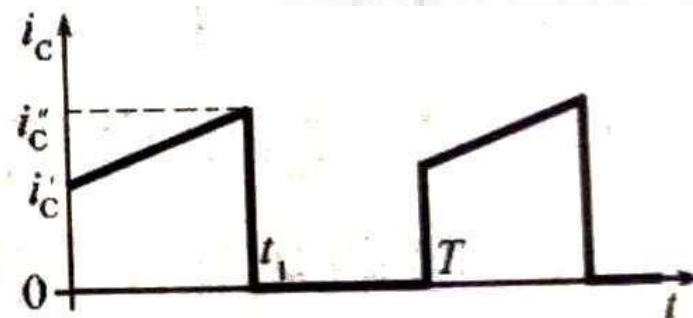
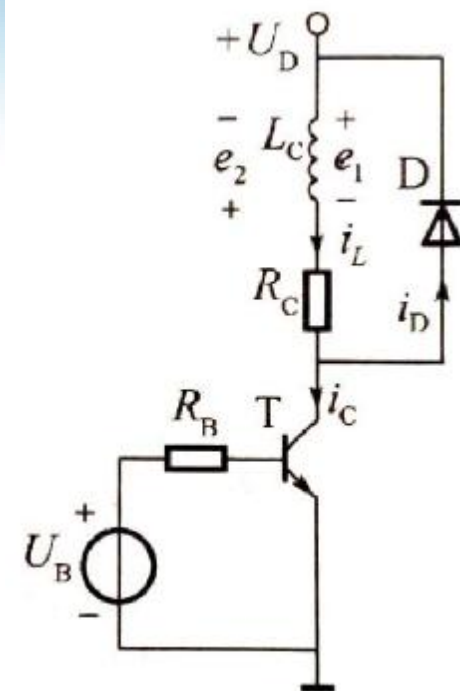
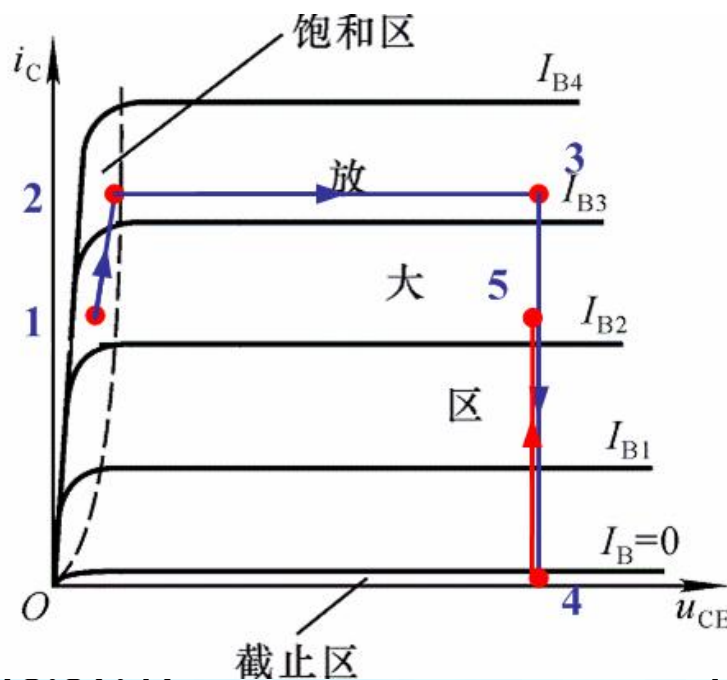


# 1.3 有续流回路的电阻和电感负载开关过程

## ○ 晶体管+续流回路电阻和电感负载

4.  $t=T$ , 晶体管开通过程中,  $D$  电流减小,  $i_C$  电流增加,  $u_C$  依旧被钳制在  $U_D+0.7V$

晶体管工作点从4移动到5

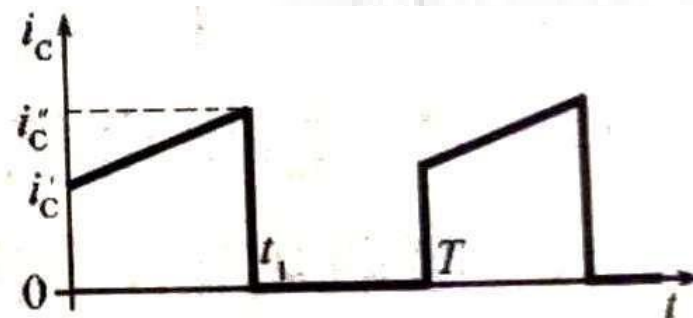
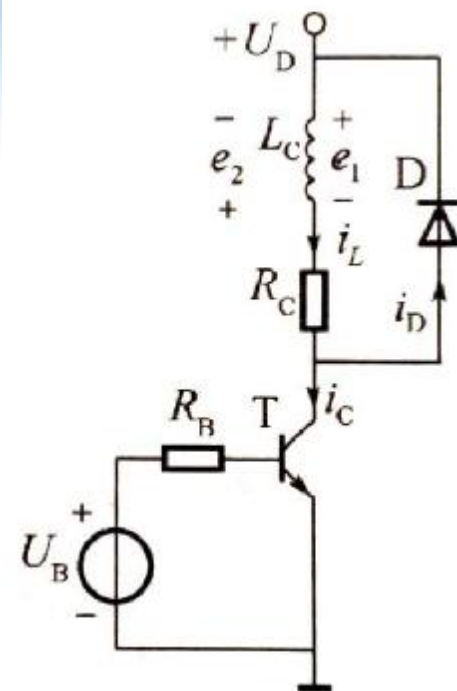
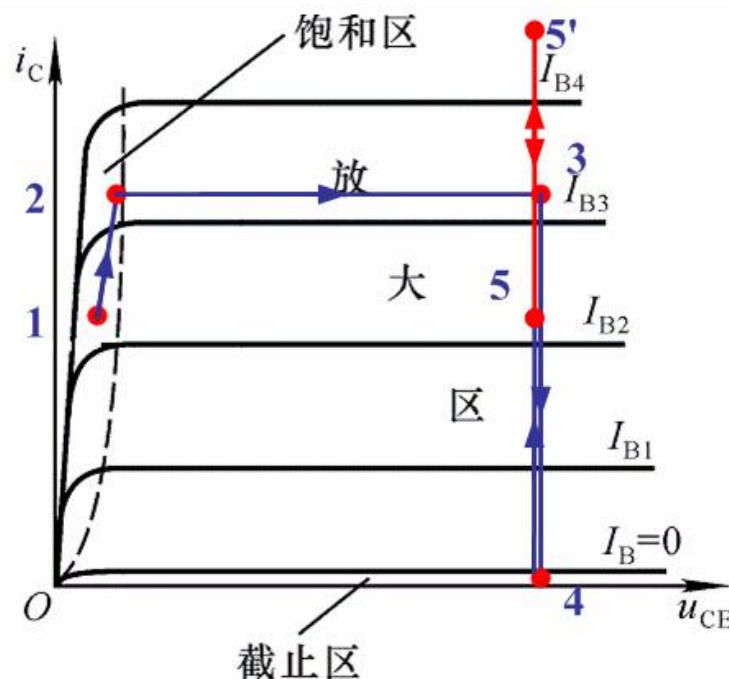


# 1.3 有续流回路的电阻和电感负载开关过程

## ○ 晶体管+续流回路电阻和电感负载

5. 当 $i_C = i'$ 时,  $i_D = 0$ , 二极管反向过冲电流也流入晶体管

晶体管工作点从5移动到5', 又返回至5

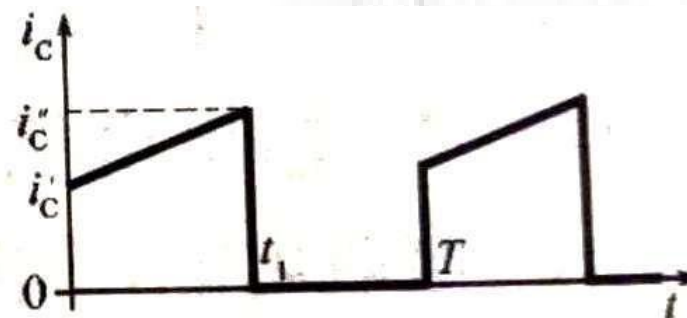
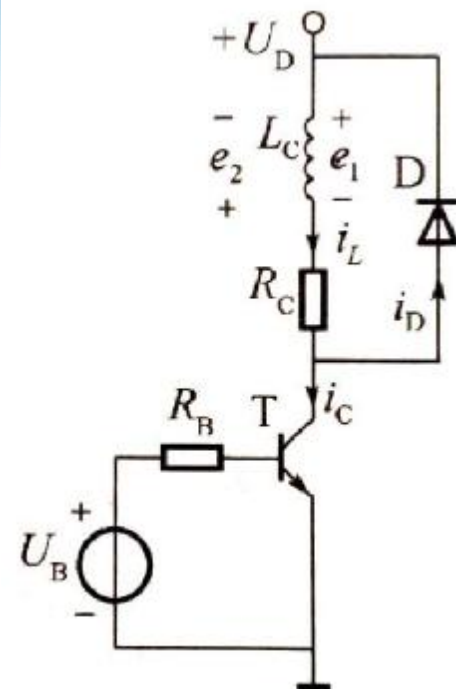
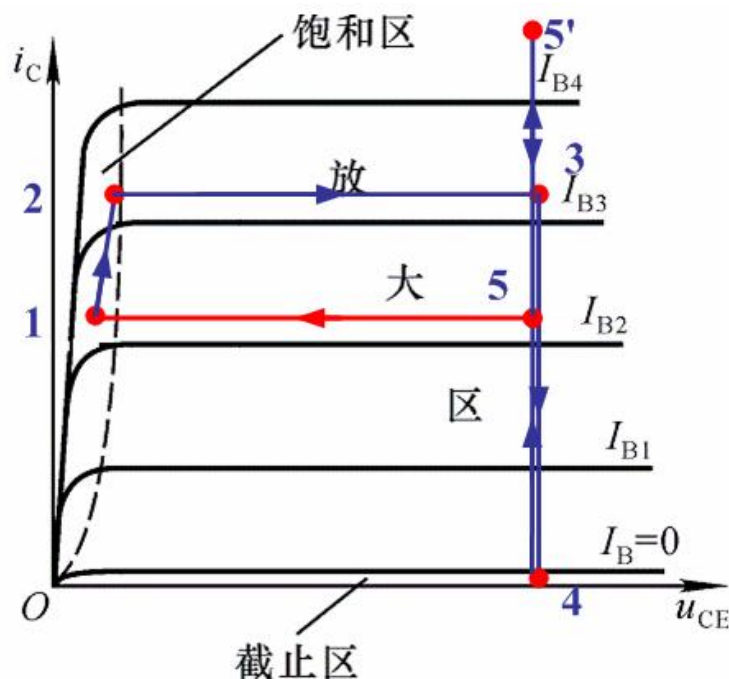


### 1.3 有续流回路的电阻和电感负载开关过程

## 晶体管+续流回路电阻和电感负载

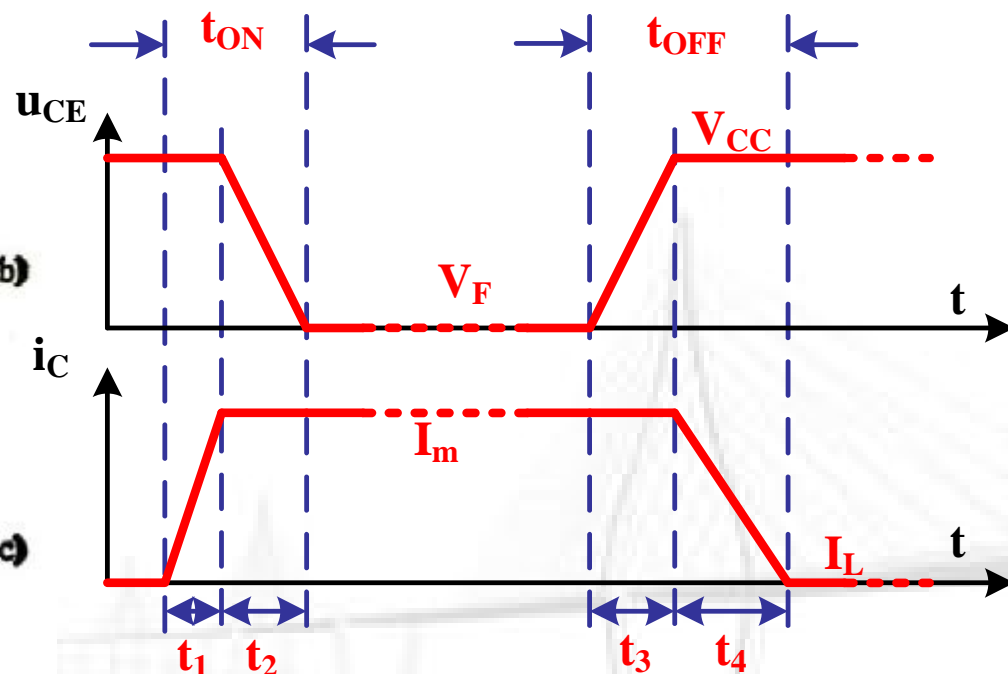
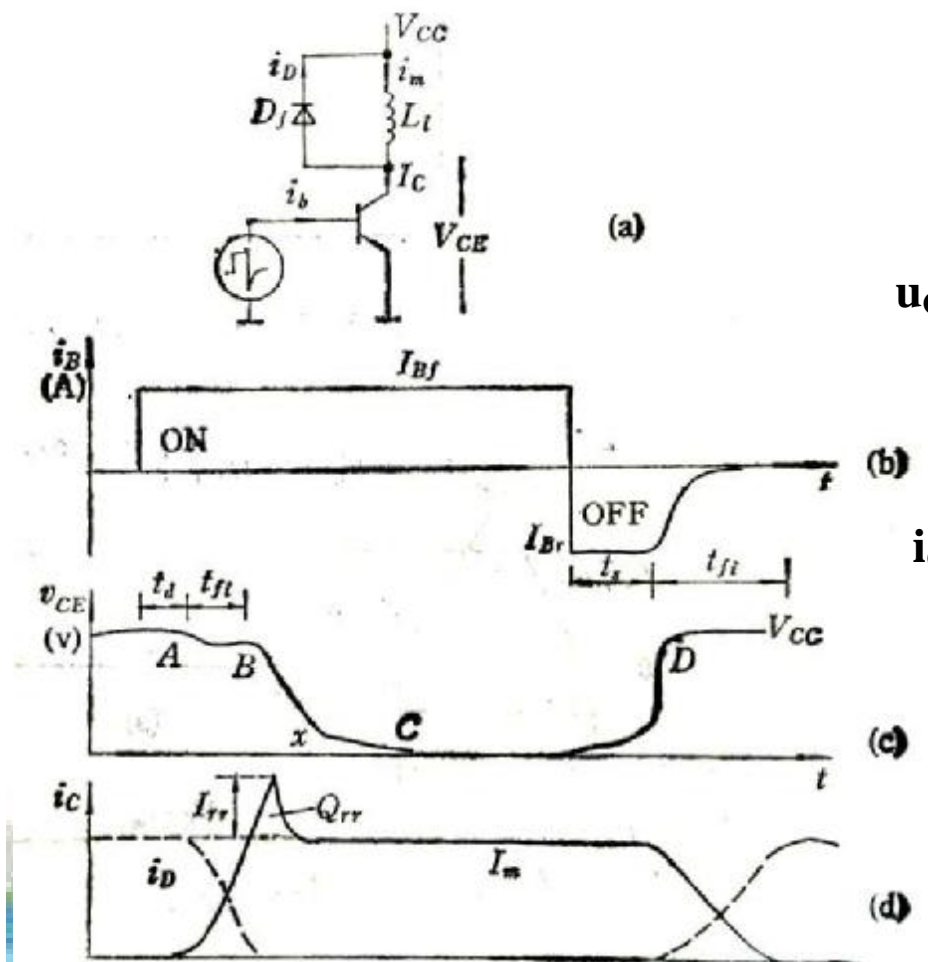
**6. 二极管反向过冲结束后，无二极管电压钳制， $u_{CE}$ 下降**

## 晶体管工作点从5移动到1



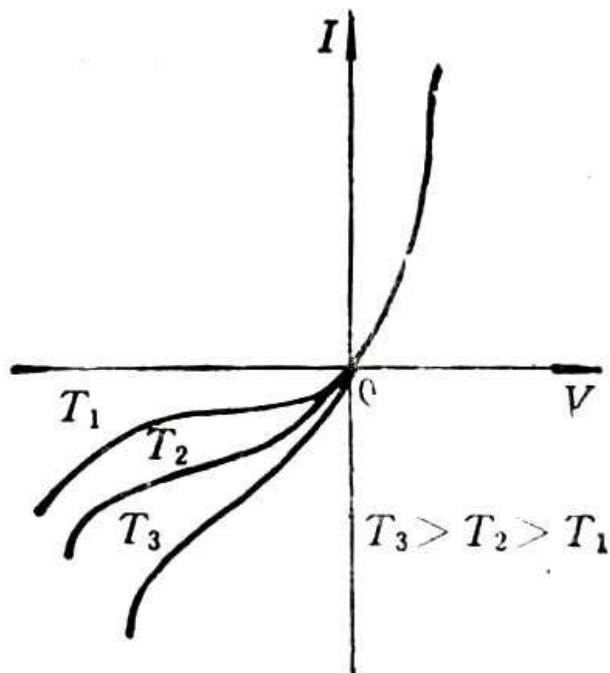
## 1.3 有续流回路的电阻和电感负载开关过程

○ 晶体管+续流回路电阻和电感负载

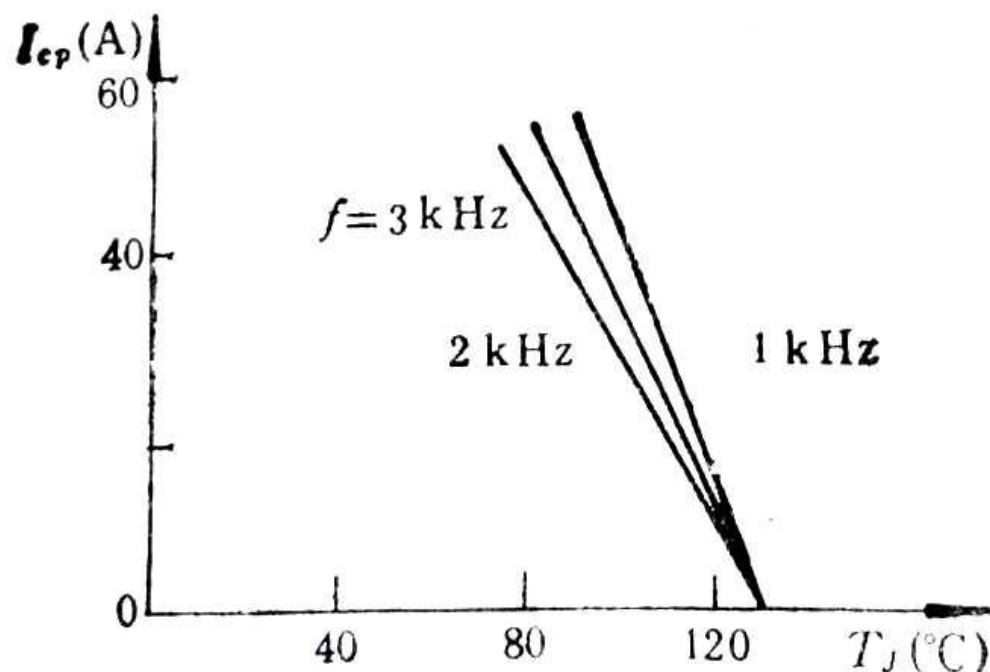


## 2 开关器件的发热与散热

- 发热与散热是功率放大器件必须考虑的问题
- 散热的重要性
  - n PN结特性受温度影响



GTO中PN结击穿示意图



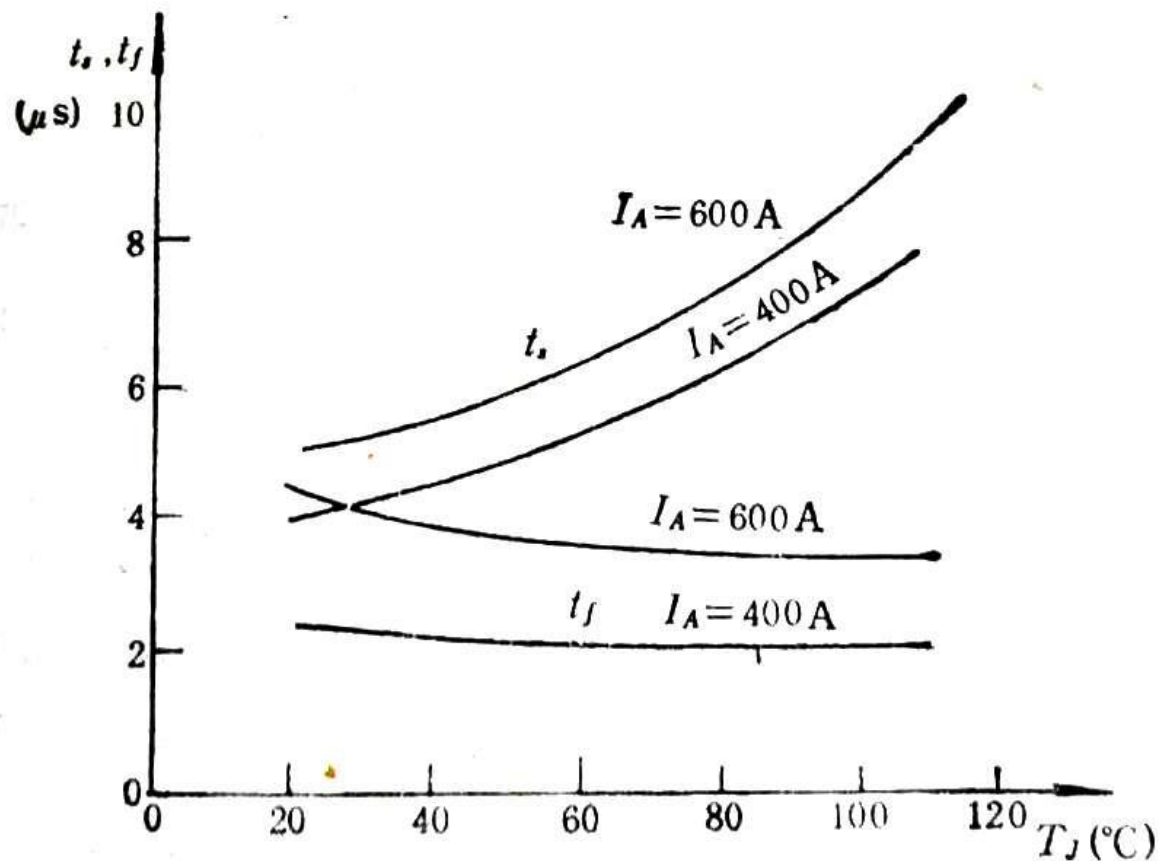
GTO平均阳极电流与结温关系

## 2 开关器件的发热与散热

○ 散热的重要性

n PN结特性受温度影响

关断时间 { 存储时间  $t_s$   
下降时间  $t_f$





## 2.1 开关器件的发热计算

### ○ 开关器件的总功率损耗

**n** 通态损耗

**n** 断态损耗

**n** 开通损耗

**n** 关断损耗

**n** 驱动损耗

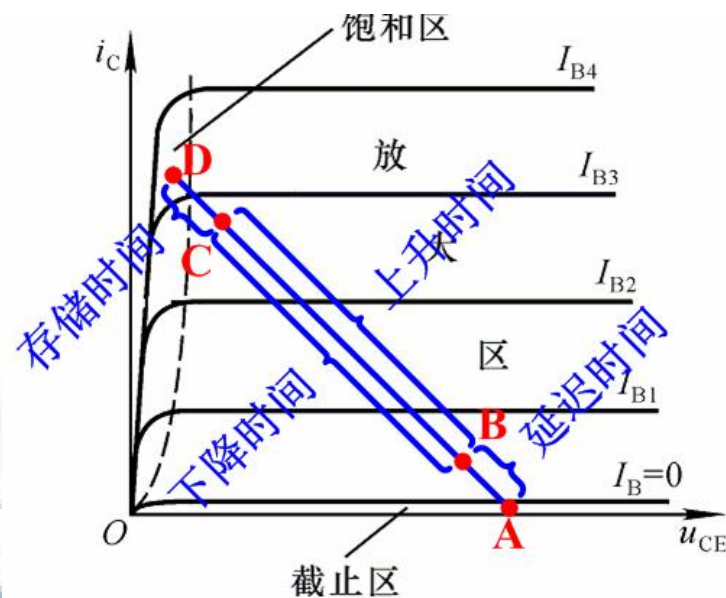
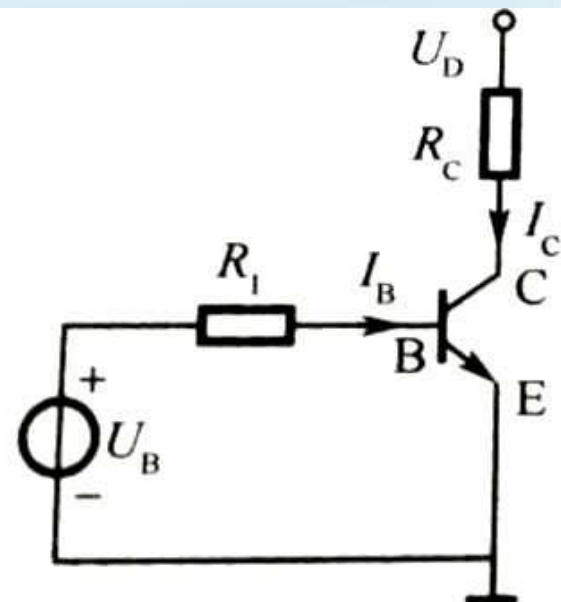
### ○ 除驱动损耗外，总的平均损耗

$$P_d = f \int_0^{1/f} u(t)i(t)dt$$

$f$ ——开关频率

$u(t)$ ——每周期内电压瞬时值

$i(t)$ ——每周期内电流瞬时值





## 2.1 开关器件的发热计算

### ○ 电阻负载时的开关损耗

#### n 开通功耗

$$W_{on} = \int_0^{t_{on}} V_{cc} \left(1 - \frac{t}{t_{on}}\right) I_m \frac{t}{t_{on}} dt = \frac{1}{6} V_{cc} I_m t_{on}$$

#### n 开通损耗(功率)

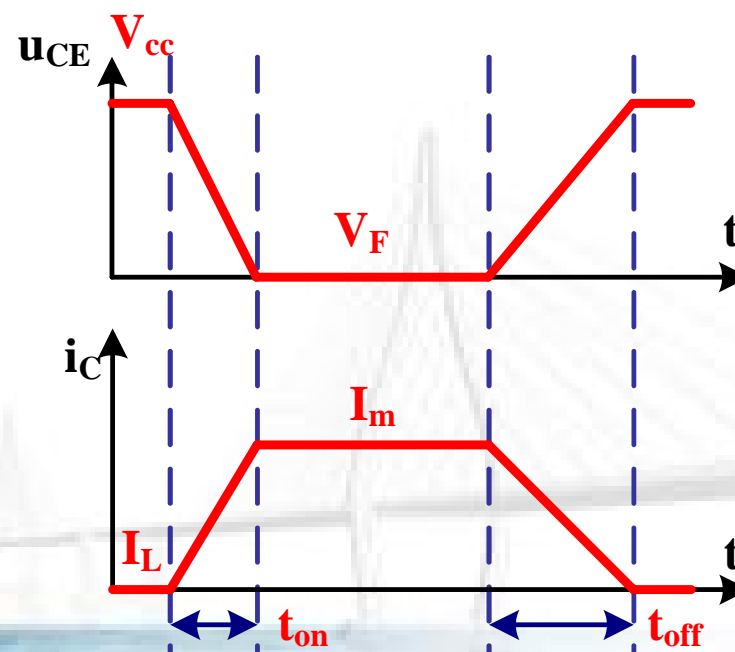
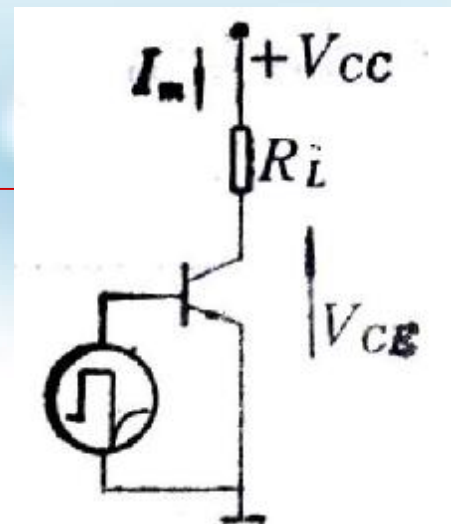
$$P_{on} = f W_{on} = \frac{1}{6} f V_{cc} I_m t_{on}$$

#### n 关断功耗

$$W_{off} = \int_0^{t_{off}} V_{cc} \frac{t}{t_{off}} I_m \left(1 - \frac{t}{t_{off}}\right) dt = \frac{1}{6} V_{cc} I_m t_{off}$$

#### n 关断损耗(功率)

$$P_{off} = f W_{off} = \frac{1}{6} f V_{cc} I_m t_{off}$$



## 2.1 开关器件的发热计算

○ 电阻负载时的开关损耗

n 通态损耗(功率)

$$P_{\text{通}} = V_F I_m d$$

$\delta$  ——控制信号的占空比

n 断态损耗(功率)

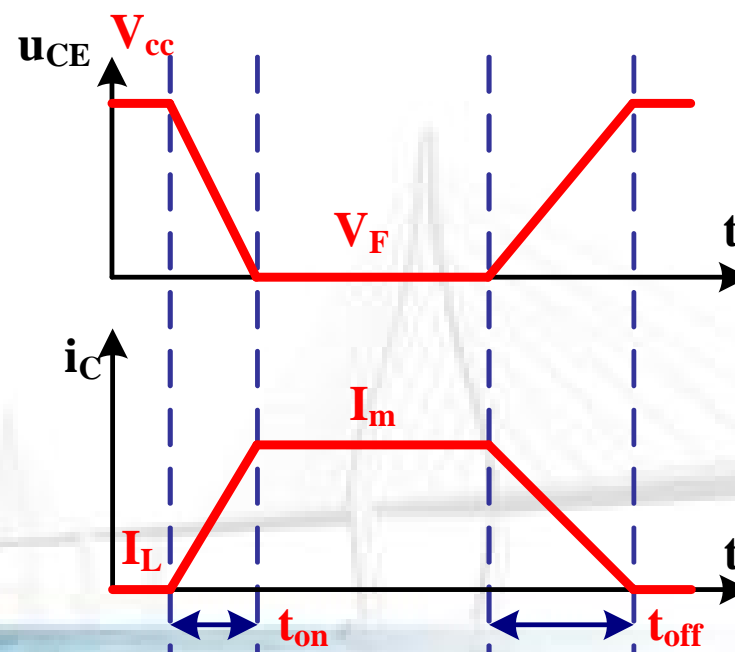
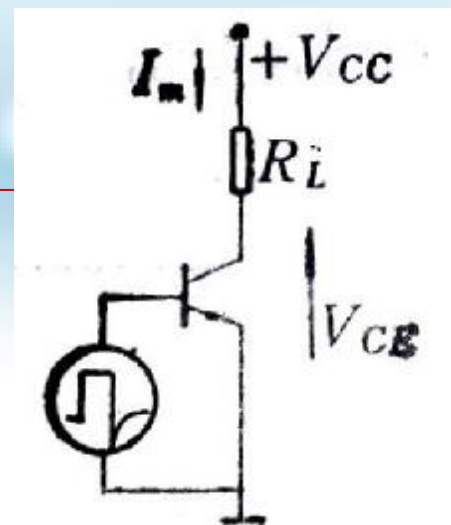
$$P_{\text{断}} = V_{CC} I_L (1-d)$$

n 驱动损耗(功率)

$$P_{\text{驱动}} = V_{BE} I_B d$$

$I_B$  ——基极驱动电流

$V_{BE}$  ——基射极电压



## 2.1 开关器件的发热计算

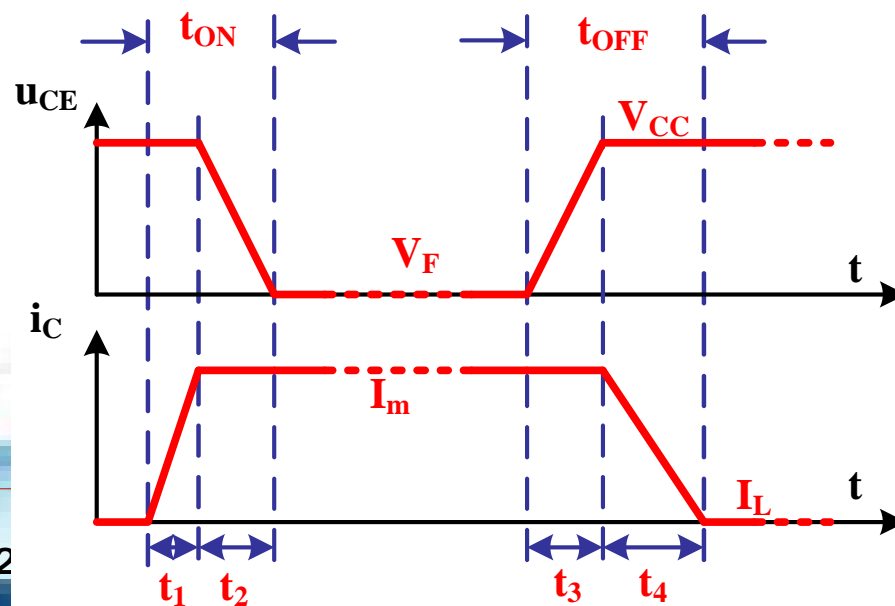
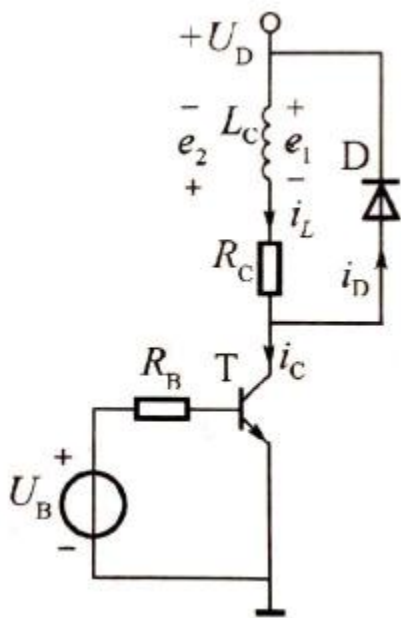
### ○ 电阻电感负载时的开关损耗

#### n 开通功耗

$$W_{on} = \int_0^{t_1} V_{CC} I_m \frac{t}{t_1} dt + \int_0^{t_2} V_{CC} (1 - \frac{t}{t_2}) I_m dt = \frac{1}{2} V_{CC} I_m t_{on}$$

#### n 开通损耗(功率)

$$P_{on} = f W_{on} = \frac{1}{2} f V_{cc} I_m t_{on}$$



## 2.1 开关器件的发热计算

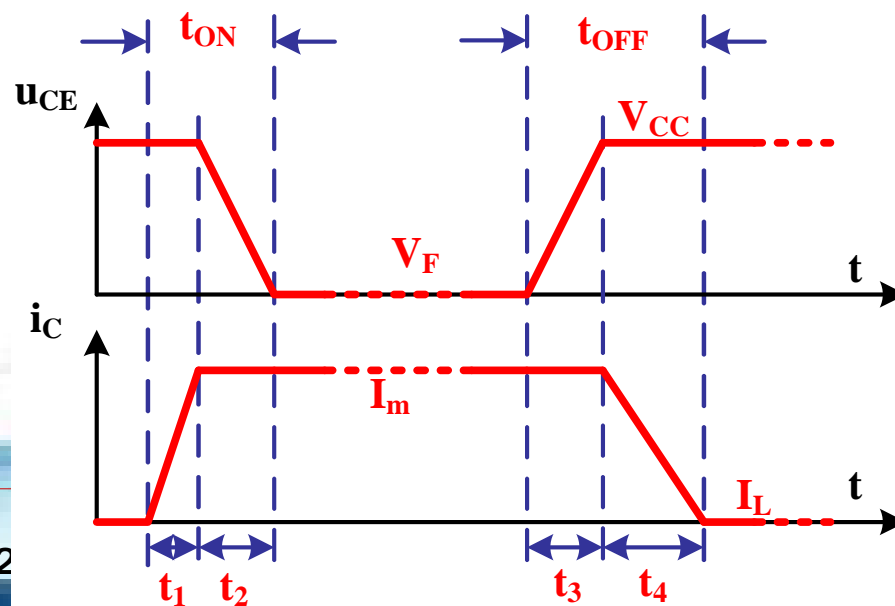
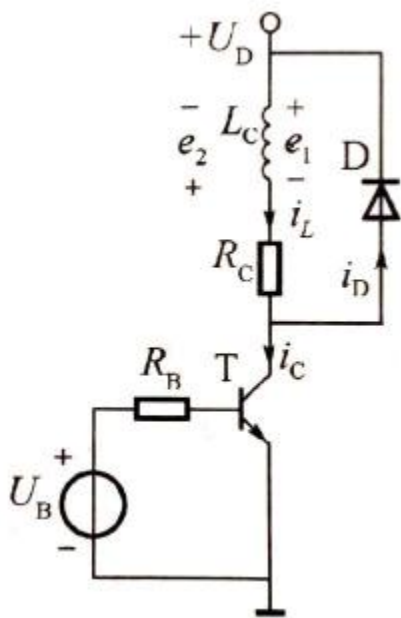
### ○ 电阻电感负载时的开关损耗

#### n 关断功耗

$$W_{off} = \int_0^{t_3} V_{CC} \frac{t}{t_3} I_m dt + \int_0^{t_4} V_{CC} I_m (1 - \frac{t}{t_4}) dt = \frac{1}{2} V_{CC} I_m t_{off}$$

#### n 关断损耗(功率)

$$P_{off} = f W_{off} = \frac{1}{2} f V_{CC} I_m t_{off}$$



## 2.1 开关器件的发热计算

### ○ 电阻电感负载时的开关损耗

n 通态损耗、断态损耗、驱动损耗与电阻负载时相同

$$P_{\text{通}} = V_F I_m d$$

$$P_{\text{断}} = V_{CC} I_L (1-d)$$

$$P_{\text{驱动}} = V_{BE} I_B d$$

### ○ 总损耗和总损耗(功率)

$$P_{\text{总}} = P_{\text{on}} + P_{\text{off}} + P_{\text{通}} + P_{\text{断}} + P_{\text{驱}}$$

$$W_{\text{总}} = P_{\text{总}} / f$$

## 2.2 开关器件的散热计算

○ 对开关器件来说，散热途径主要采用热传导方式

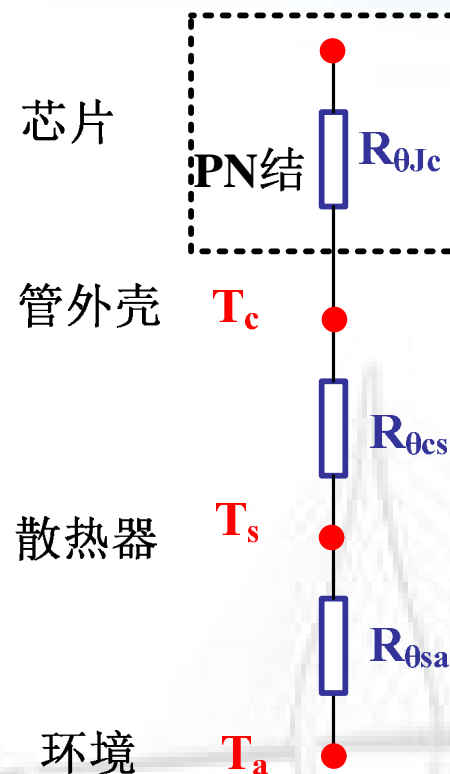
○ 稳态热路图与热阻

n 管芯内温度最高的部分在PN结上

n PN结的温度通过管壳、散热器传至环境介质

n 当管芯上每秒消耗功率产生的热量与每秒散发出去的热量相等时，管芯的温度就达到**稳定状态**，结温不再升高。

n **热阻**指的是当有热量在物体上传输时，在物体两端温度差与热源功率之间的比值。单位为K/W或℃/W



## 2.2 开关器件的散热计算

### ○ 稳态热路图与热阻

$T_J$ ——PN结的结温

$T_c$ ——管外壳温度

$T_s$ ——散热片温度

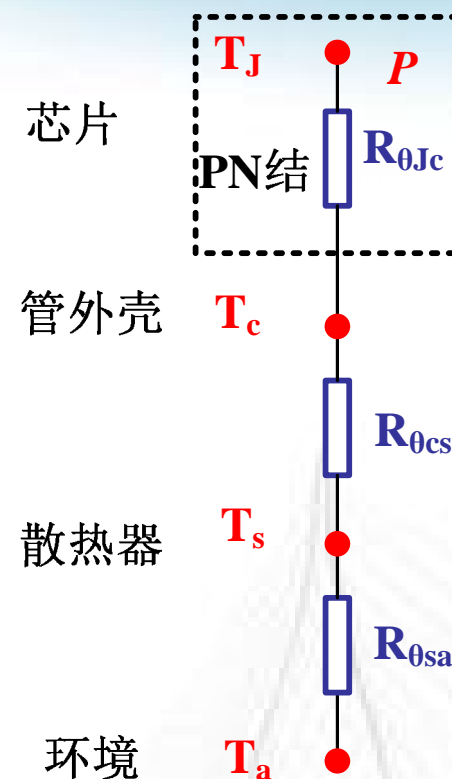
$T_a$ ——环境温度

$P$ ——芯片的功率

$R_{\theta Jc}$ ——PN结和管外壳之间的热阻

$R_{\theta cs}$ ——管外壳和散热器之间的热阻

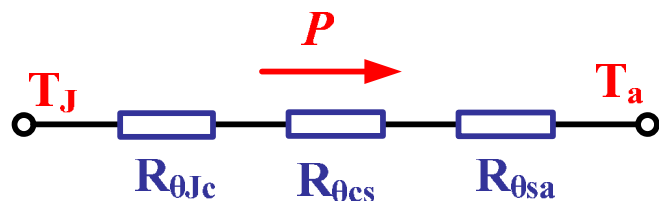
$R_{\theta sa}$ ——散热器和环境之间的热阻



## 2.2 开关器件的散热计算

### ○ 稳态热路图与热阻

#### n 稳态等效热路图



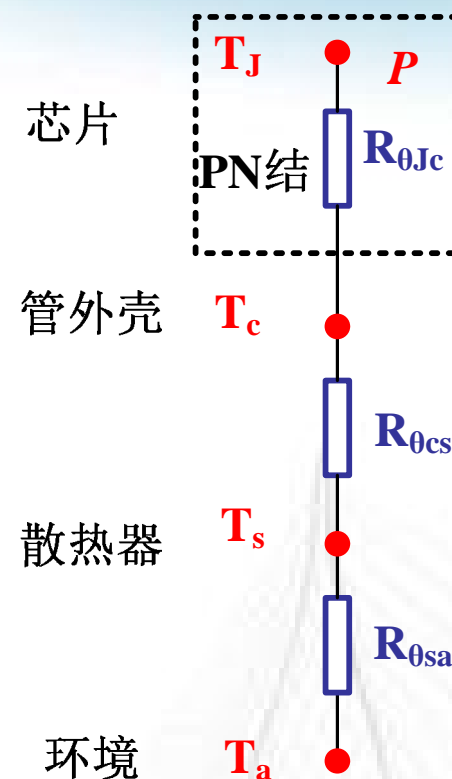
$$P = \frac{\Delta T}{R_{qJa}} \quad \text{或} \quad \Delta T = PR_{qJa}$$

$R_{\theta Ja}$ ——PN结和环境之间的热阻

$$R_{qJa} = R_{qJc} + R_{qcs} + R_{qsa}$$

$\Delta T$ ——PN结和环境之间的温度差

$$\Delta T = T_J - T_a$$



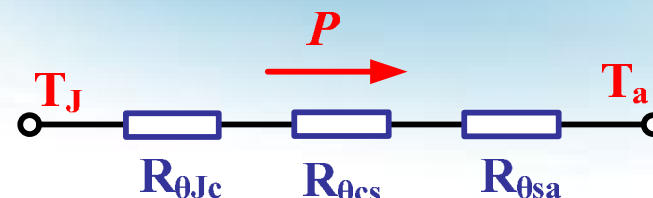
稳态时热阻的概念才适用!!!



## 2.2 开关器件的散热计算

### ○ 稳态热路图与热阻

#### n 稳态等效热路图与电路图的对应关系



电路		稳态等效热路
电压差 $\Delta U$	单位: 伏特(V)	温度差 $\Delta T$ 单位: 摄氏度( $^{\circ}\text{C}$ )
电流 $I$	单位: 安培(A)	热流(功率) $P$ 单位: 瓦特(W)
电阻 $R$	单位: 欧姆( $\Omega$ )	热阻 $R_{\theta}$ 单位: 摄氏度/瓦( $^{\circ}\text{C}/\text{W}$ )
欧姆定律	$\Delta U=RI$	$\Delta T=R_{\theta}P$



如何才能减小PN结温度?

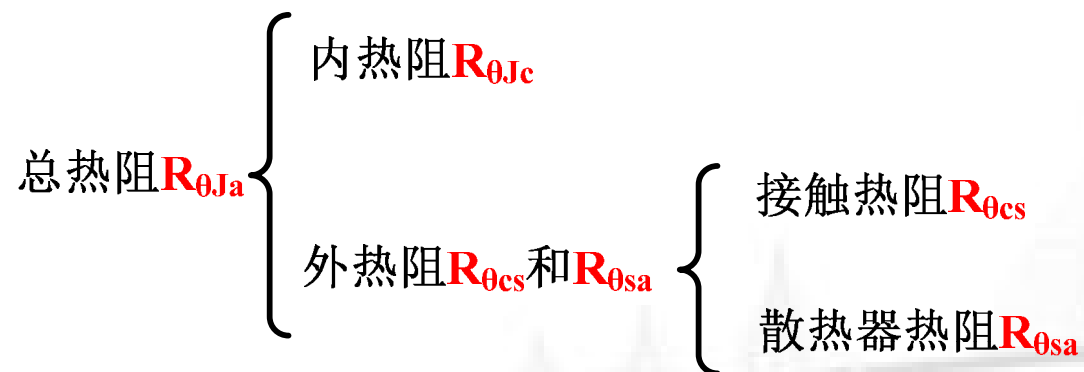
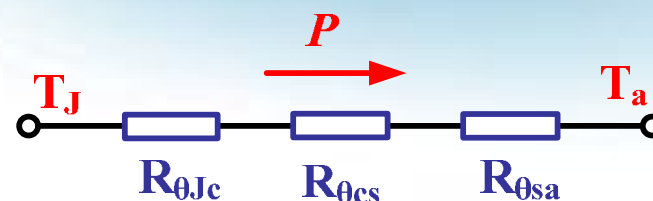
## 2.2 开关器件的散热计算

### ○ 热阻的组成与分类

n  $R_{\theta Ja}$  为器件散热时的**总热阻**

$$R_{qJa} = R_{qJc} + R_{qcs} + R_{qsa}$$

n  $R_{\theta Jc}$  也称为**内热阻**； $R_{\theta cs}$  称为**接触热阻**和 $R_{\theta sa}$  称为**散热器热阻**



## 2.2 开关器件的散热计算

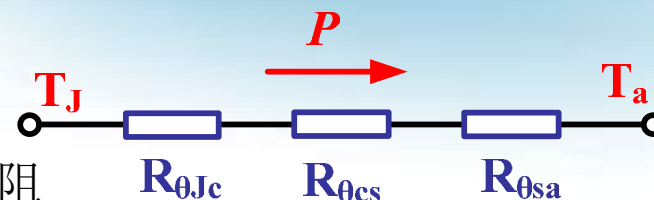
### ○ 内热阻

n  $R_{\theta_{Jc}}$  也称为**内热阻**，PN结和管壳之间的热阻

n 内热阻由器件的结构、工艺和材料决定

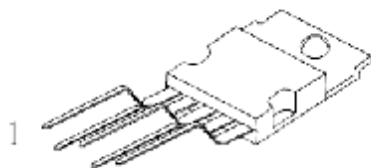
n 减小内热阻是器件设计者的任务。当选定某器件后，内热阻无法改变

n LM1875热阻数据

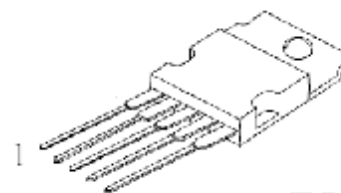


### THERMAL DATA

DESCRIPTION	SYMBOL	RATING	UNIT
Thermal Resistance, Junction-case	$\theta_{JC}$	3	$^{\circ}\text{C/W}$
Thermal Resistance, Junction-ambient	$\theta_{JA}$	73	$^{\circ}\text{C/W}$

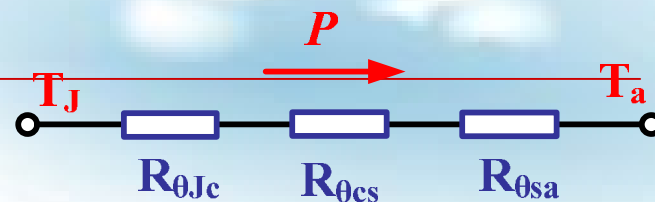


TO-220B



TO-220-5

## 2.2 开关器件的散热计算



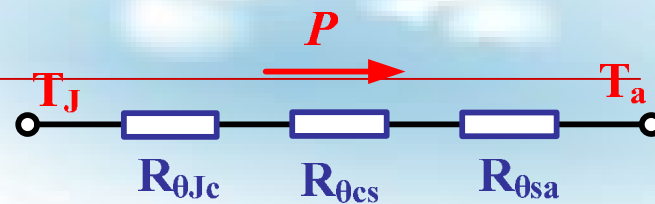
### ○ 接触阻

**n**  $R_{\theta cs}$  也称为**接触热阻**，管壳和散热器之间的热阻

**n** 接触热阻与器件的封装形式有关。与器件和散热器之间是否有垫圈，是否涂有硅油有关

封装形式	绝 缘 垫 圈	$R_{\theta_{cs}} (^{\circ}\text{C}/\text{W})$	
		有硅油	无硅油
TO-3	无绝缘垫圈	0.10	0.30
	聚四氟乙烯	0.70—0.80	1.25—1.45
	云母 (50—100 $\mu\text{m}$ )	0.50—0.70	1.20—1.50
TO-66	无绝缘垫圈	0.15—0.20	0.40—0.50
	云母 (50—100 $\mu\text{m}$ )	0.60—0.80	1.20—2.00
	聚脂薄膜 (50—100 $\mu\text{m}$ )	0.60—0.80	1.20—1.40
TO-220AB	无绝缘垫圈	0.30—0.50	1.50—2.00
	云母 (50—100 $\mu\text{m}$ )	2.00—2.50	4.0—6.0
TO-3P(L)	无绝缘垫圈	0.1—0.2	0.4—1.0
	云母 (50—100 $\mu\text{m}$ )	0.5—0.7	1.2—1.5

## 2.2 开关器件的散热计算



### ○ 接触阻

- n 接触热阻与器件的封装形式有关。与器件和散热器之间是否有垫圈，是否涂有硅油有关



TO-3



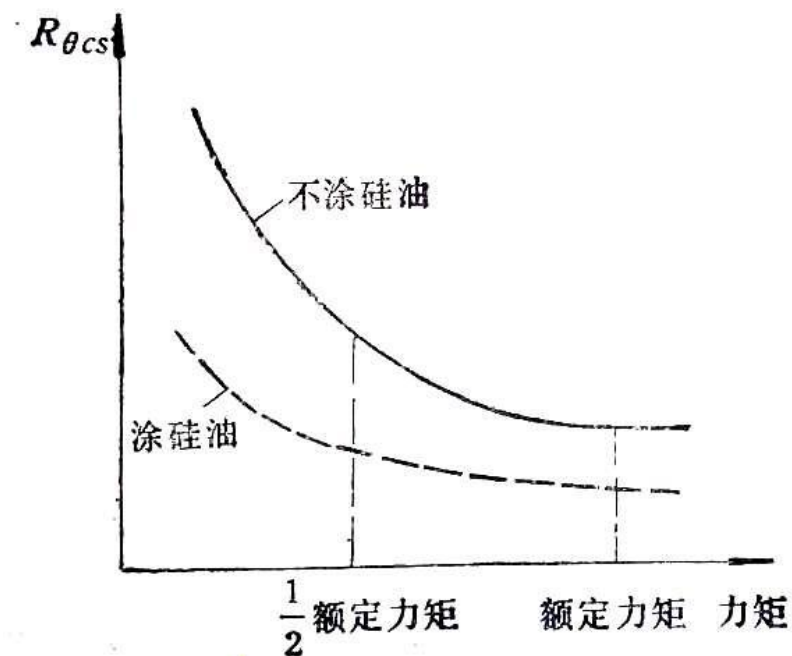
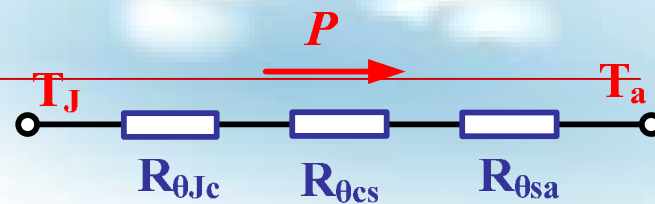
TO-220

- n 器件与散热器表面要平整、光洁

## 2.2 开关器件的散热计算

### ○ 接触阻

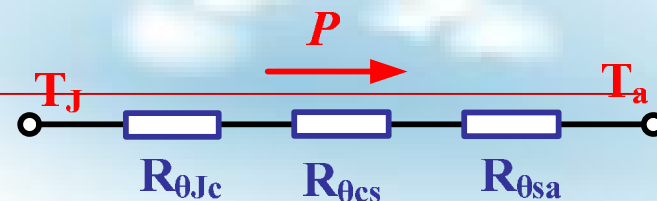
n 接触热阻与安装力有关



安装力或安装力矩  
越大越好？

螺栓型器件接触热阻与锁紧力矩关系

## 2.2 开关器件的散热计算



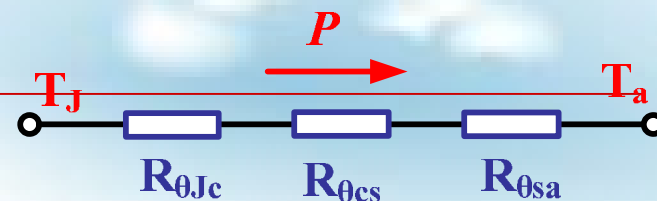
### ○ 散热器热阻

- n  $R_{\theta sa}$  也称为**散热器热阻**，散热器和环境之间的热阻
- n 开关器件一般功率较大，都需要加散热器
- n 散热器热阻与散热器的材质、结构、表面颜色、安装位置以及环境冷却方式有关
- n 散热器的材质有紫铜和工业铝



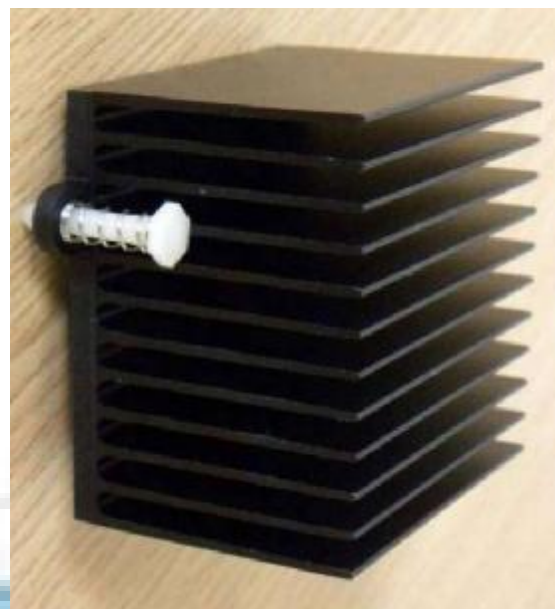


## 2.2 开关器件的散热计算



### ○ 散热器热阻

- n 自冷散热器表面最好是黑色，借以提高辐射系数，黑色散热器比光亮散热器可减小**10—15%**的热阻
- n 散热器多为翼片形状以增加散热面积，因为气流向上流动，垂直位置比水平位置可减小热阻**15—20%**

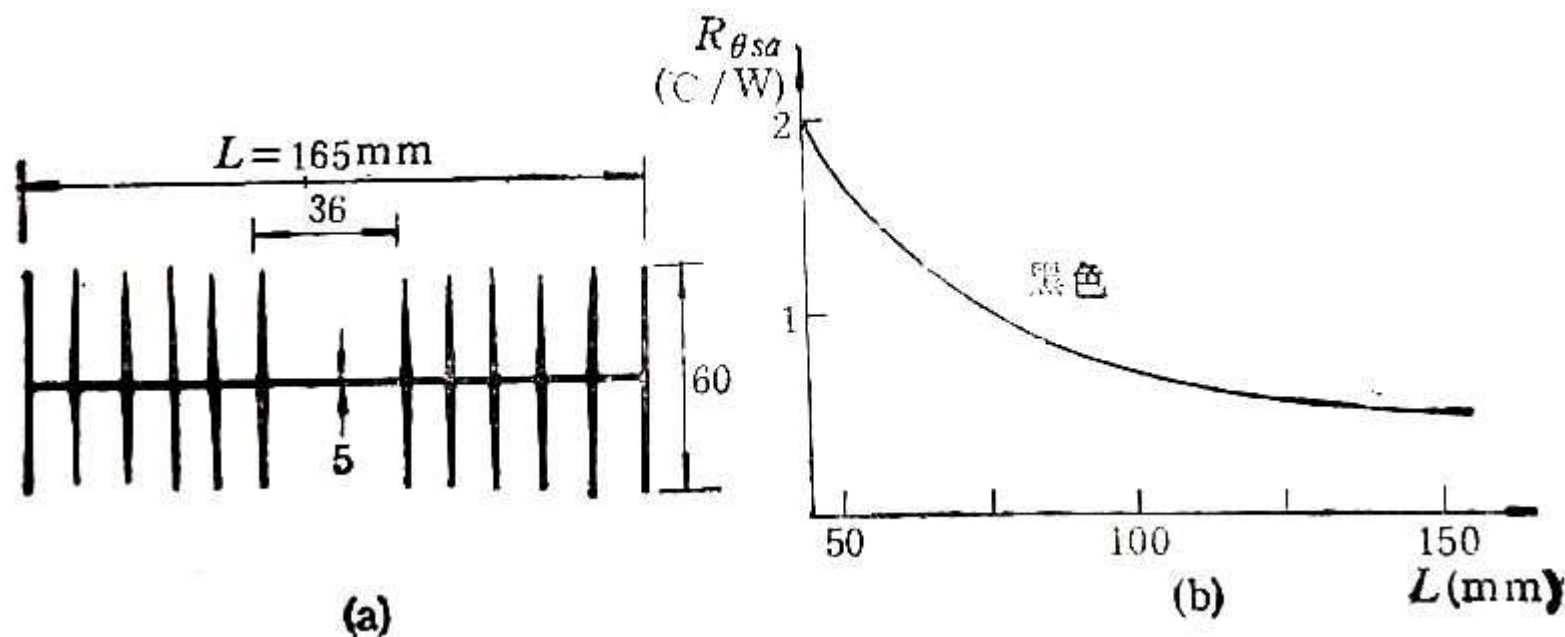
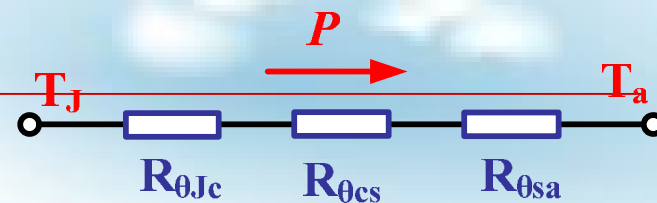




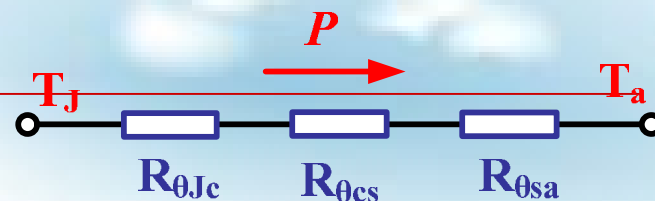
## 2.2 开关器件的散热计算

○ 散热器热阻

n 散热器的大小(长度)与热阻有关



## 2.2 开关器件的散热计算



### ○ 散热器热阻

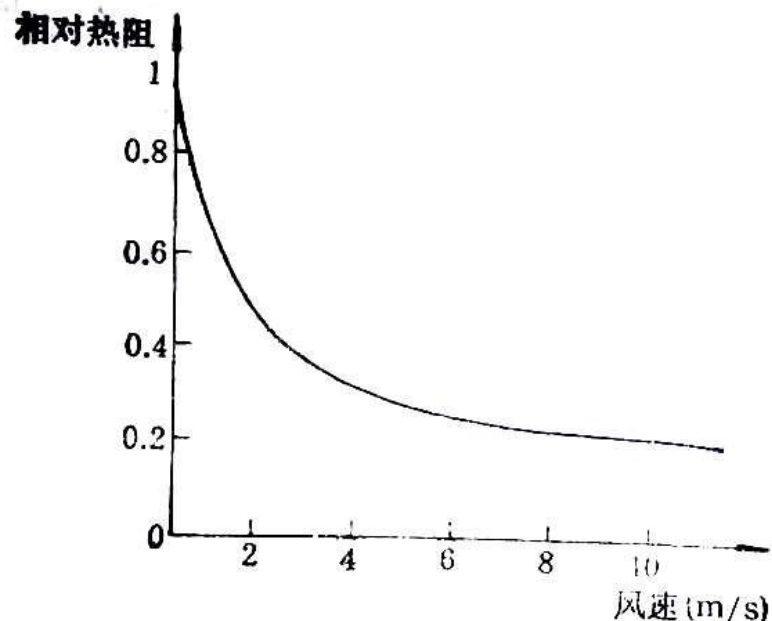
n 散热器的冷却方式有四种：自冷、风冷、水冷、沸腾冷却

n 自冷是通过自然对流和辐射带走热量，适用于小功率

n 风冷应用于额定电流**50-500A**，散热效率为自冷的**2-4倍**

n 水冷应用于额定电流**500A**以上，散热效率为自冷的**150倍**以上

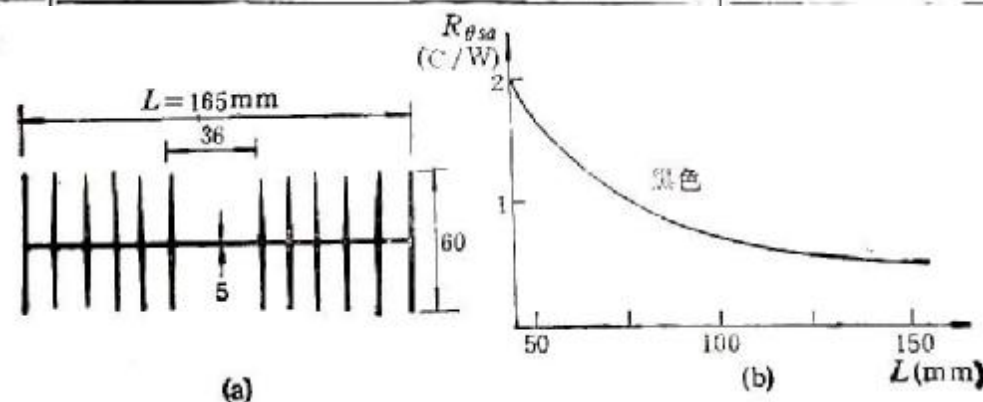
n 沸腾冷却通过冷却媒质(氟利昂、液氮等)的挥发带走热量



## 2 开关器件的发热与散热

**例：** 设GTR的工作条件：开关电流为**20A**，工作电压为**100V**，工作频率为**10kHz**，占空比为**90%**，电阻电感负载，器件的内热阻 $R_{\theta JC}$ 为**0.7℃/W**，通态电压箝位在**1V**，开通时间为**1 μs**，关断时间为**2 μs**，环境温度为**35℃**，结温不得超过**125℃**，封装形式为**TO-3**，并直接与散热器装配，涂有硅油。依据上述条件，设计所需最小散热器的尺寸。（忽略驱动损耗和断态损耗）

封装形式	绝 缘 垫 圈	$R_{\theta_{JA}} (°C/W)$	
		有硅油	无硅油
TO-3	无绝缘垫圈	0.10	0.30
	聚四氟乙烯	0.70—0.80	1.25 1.45
	云母 (50—100 μm)	0.50 0.70	1.20 1.50



## 2 开关器件的发热与散热

**例：** 设GTR的工作条件：开关电流为**20A**，工作电压为**100V**，工作频率为**10kHz**，占空比为**90%**，电阻电感负载，器件的内热阻 $R_{\theta JC}$ 为**0.7℃/W**，通态电压箝位在**1V**，开通时间为**1 μs**，关断时间为**2 μs**，环境温度为**35℃**，结温不得超过**125℃**，封装形式为**TO-3**，并直接与散热器装配，涂有硅油。依据上述条件，设计所需最小散热器的尺寸。(忽略驱动损耗和断态损耗)

**解：** 器件的通态功率为

$$P_{\text{通}} = V_F I_m d = 1V \times 20A \times 0.9 = 18W$$

器件的开关功率为

$$\begin{aligned} P_{\text{on+off}} &= P_{\text{on}} + P_{\text{off}} = \frac{1}{2} V_{CC} I_m (t_{\text{on}} + t_{\text{off}}) f \\ &= \frac{1}{2} \times 100V \times 20A \times (1ms + 2ms) \times 10kHz \\ &= 30W \end{aligned}$$

## 2 开关器件的发热与散热

**例：** 设GTR的工作条件：开关电流为**20A**，工作电压为**100V**，工作频率为**10kHz**，占空比为**90%**，电阻电感负载，器件的内热阻 $R_{\theta JC}$ 为**0.7℃/W**，通态电压箝位在**1V**，开通时间为**1 μs**，关断时间为**2 μs**，环境温度为**35℃**，结温不得超过**125℃**，封装形式为**TO-3**，并直接与散热器装配，涂有硅油。依据上述条件，设计所需最小散热器的尺寸。(忽略驱动损耗和断态损耗)

**解：** 器件的总功率为

$$P_d = P_{\text{通}} + P_{\text{on+off}} = 18W + 30W = 48W$$

系统要求的最大热阻为

$$R_{qJa} = \frac{\Delta T}{P} = \frac{125^{\circ}\text{C} - 35^{\circ}\text{C}}{48W} = 1.875^{\circ}\text{C/W}$$

封装形式为**TO-3**，并直接与散热器装配，涂有硅油，可得

$$R_{qcs} = 0.1^{\circ}\text{C/W}$$

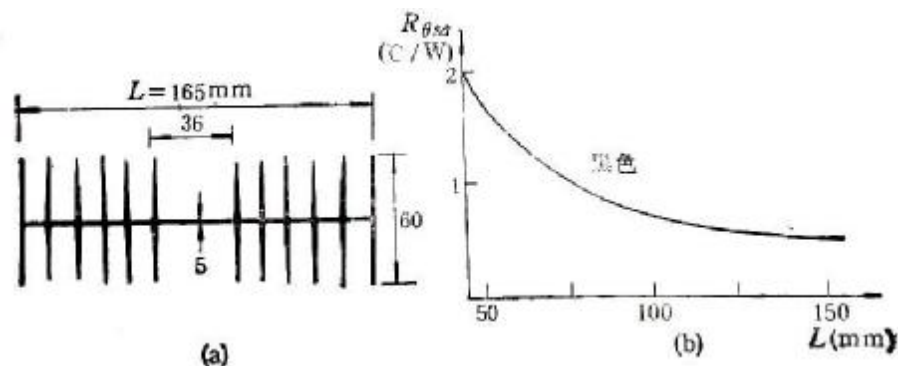
## 2 开关器件的发热与散热

**例：** 设GTR的工作条件：开关电流为**20A**，工作电压为**100V**，工作频率为**10kHz**，占空比为**90%**，电阻电感负载，器件的内热阻 $R_{\theta Jc}$ 为**0.7℃/W**，通态电压箝位在**1V**，开通时间为**1 μs**，关断时间为**2 μs**，环境温度为**35℃**，结温不得超过**125℃**，封装形式为**TO-3**，并直接与散热器装配，涂有硅油。依据上述条件，设计所需最小散热器的尺寸。(忽略驱动损耗和断态损耗)

**解：** 器件的散热器热阻最大值为

$$\begin{aligned} R_{qsa} &= R_{qJa} - R_{qJc} - R_{qcs} \\ &= 1.875^{\circ}\text{C/W} - 0.7^{\circ}\text{C/W} - 0.1^{\circ}\text{C/W} = 1.075^{\circ}\text{C/W} \end{aligned}$$

根据图查得所需散热器长度为**75mm**



开关时间很短，但  
开关功耗却不小，  
为什么？  
提高开关频率后会  
有什么问题？



### 3 开关器件的驱动

#### ○ 开关器件的驱动概述

- n 驱动电路是主电路和控制电路的接口
- n 目的：**1**信号的放大；**2**使器件工作在理想的开关状态；**3**缩短开关时间；**4**提供一定的保护措施

#### ○ 隔离

- n 驱动电路需要提供控制电路和主电路的电气隔离
- n 主要采用光隔离和磁隔离
- n 光隔离：光耦(快速性较差)
- n 磁隔离：脉冲变压器(快速性较好)

### 3 开关器件的驱动

#### ○ 隔离

n 光耦

n 输出特性和三极管相似，但有如下区别：

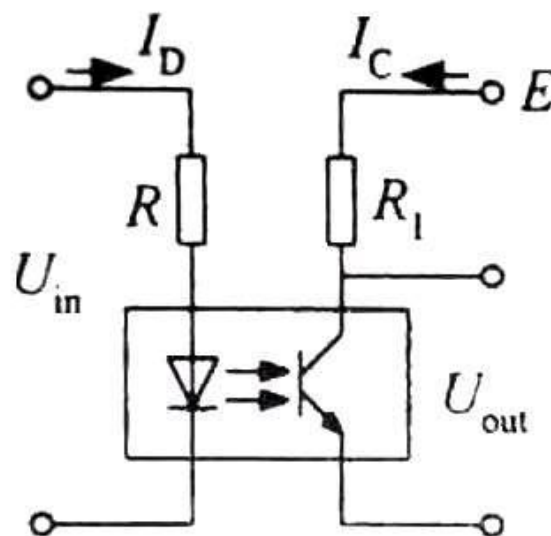
1 传输比小：

$$b = \frac{I_C}{I_D} \approx 0.1 \sim 0.3$$

2 传输速度慢

普通光耦响应时间约为 $10\mu\text{s}$

高速光耦响应时间可达 $100\text{ns}$

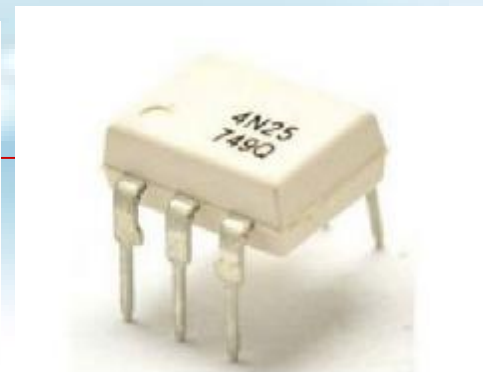
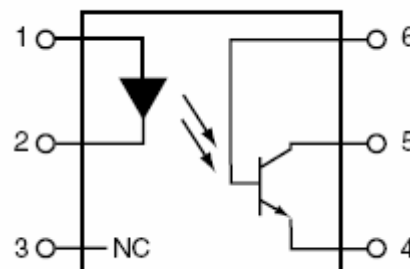




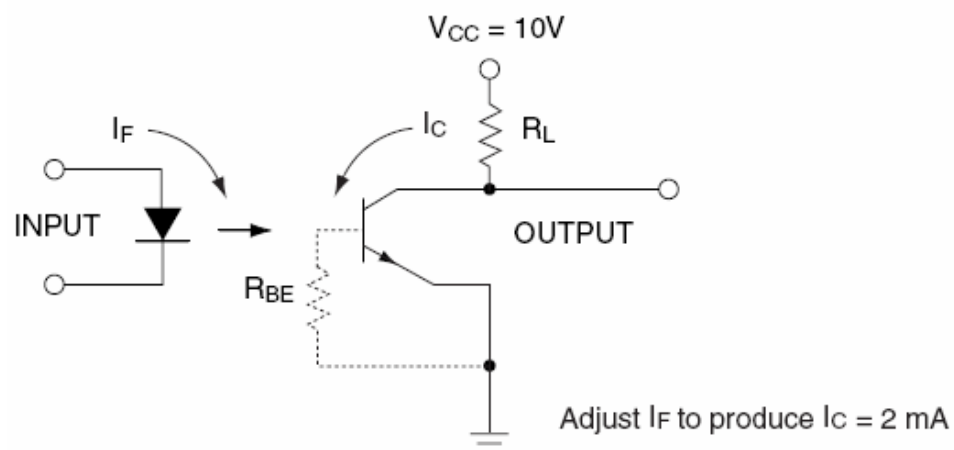
### 3 开关器件的驱动

○ 隔离

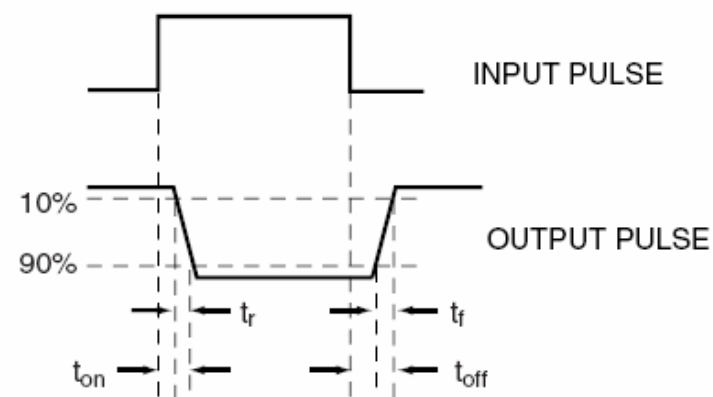
n 光耦——4N25



TEST CIRCUIT



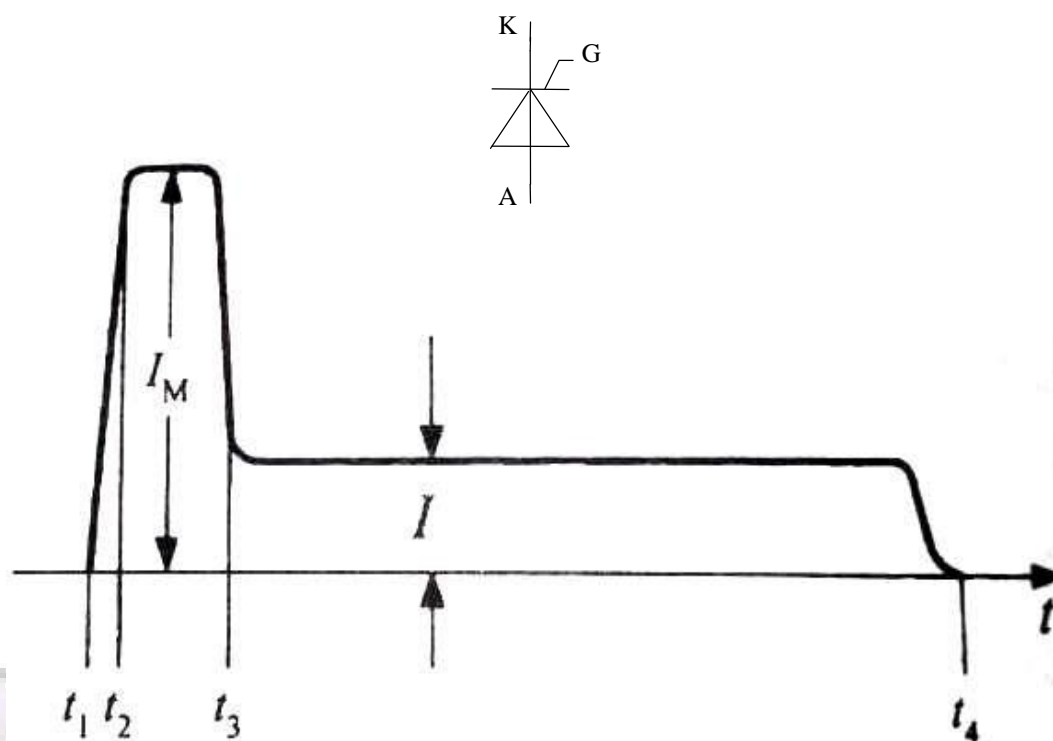
WAVE FORMS



当  $I_F = 2\text{mA}$ ,  $V_{CC} = 10\text{V}$ ,  $R_L = 100\Omega$  时,  $t_{on}$  为  $2\mu\text{s}$ ,  $t_{off}$  为  $2\mu\text{s}$

### 3 开关器件的驱动

#### ○ 理想晶闸管触发电流波形



n  $t_1-t_2$ ——小于 $1\mu s$

n  $I_M$ ——幅值为 $3I_{GT}-5I_{GT}$

n  $t_3-t_4$ ——保证晶闸管可靠导通

n  $I$ ——幅值为 $1.5I_{GT}-2I_{GT}$

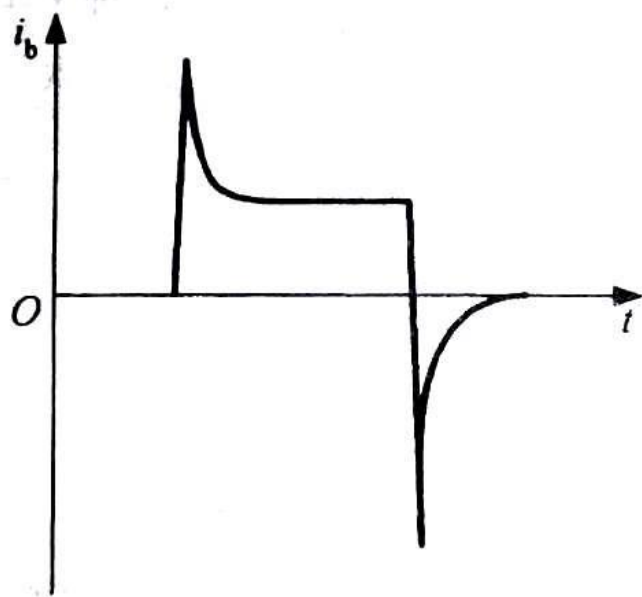
$I_{GT}$ 为晶闸管额定直流触发电流

强脉冲保证晶闸管快速导通

宽脉冲保证晶闸管可靠导通

### 3 开关器件的驱动

#### ○ 理想GTR驱动电流波形

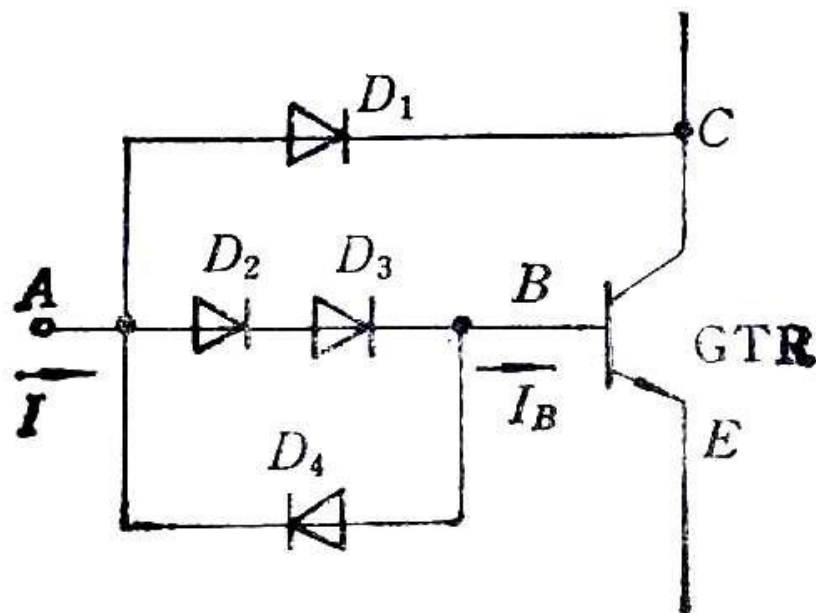


- n 正尖脉冲减小GTR开通时间
- n 负尖脉冲减小GTR关断时间
- n GTR关断后要保证基极有一定的负偏压

### 3 开关器件的驱动

#### ○ 贝克箝位电路

- n 为了减小GTR关断时间，应使GTR工作在临界饱和状态
- n 对于GTR而言，当 $V_{CE}$ 在0.7-3V范围内即为临界饱和状态



- n 导通时

$$V_{BE} + V_{D2} + V_{D3} = V_{CE} + V_{D1}$$

若认为二极管压降均为0.7V，则有

$$V_{CE} = 1.4V$$

- n 关断时，D4为反向抽走基极载流子提供了电流通路

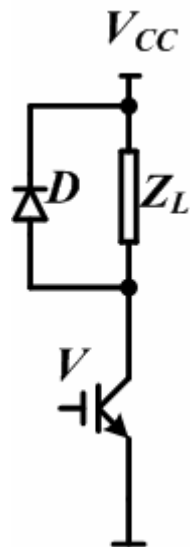
## 4 开关器件的保护

- 开关器件应采用合适的过电压保护、过电流保护、**du/dt**保护和**di/dt**保护
- **缓冲电路**又称为**吸收电路**，其作用是抑制电力电子器件的内因过电压、**du/dt**或者过电流和**di/dt**，减小器件的开关损耗。
  - n 缓冲电路可分为关断缓冲电路和开通缓冲电路
  - n 关断缓冲电路用于抑制器件关断时的过电压和**du/dt**，减小器件的关断损耗。
  - n 开通缓冲电路用于抑制器件开通时的过电流和**di/dt**，减小器件的开通损耗

## 4.1 关断缓冲电路

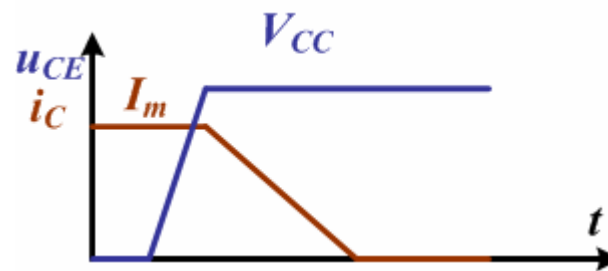
### ○ 关断缓冲电路

n 无关断缓冲时



(1) 开关管 $V$ 关断过程中,  $i_{ZL}=i_C$ 微弱减小, 感应电动势使 $u_{CE}$ 升高

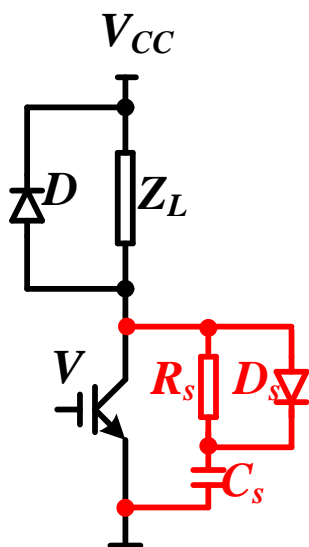
(2) 当 $u_{CE}$ 升高于 $V_{CC}+0.7V$ 时, 二极管 $D$ 导通,  $u_{CE}$ 被钳制在 $V_{CC}+0.7V$ ,  $i_{ZL}=i_C+i_D$ ,  $i_D$ 增加,  $i_C$ 减小, 当 $i_C$ 减小为零时, 器件 $V$ 关断



## 4.1 关断缓冲电路

### ○ 关断缓冲电路

n 有关断缓冲时

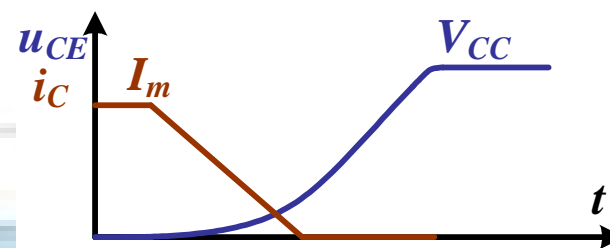
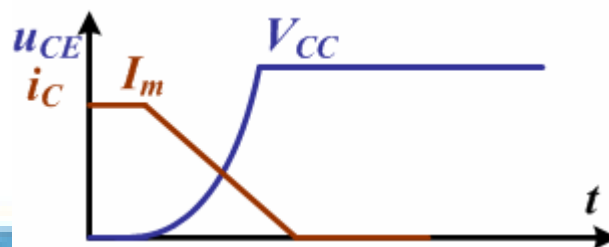
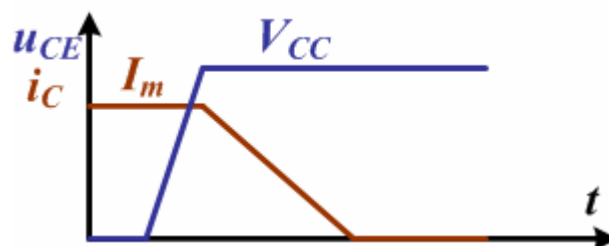


(1) 开关管V关断过程中,  $i_{ZL}=i_C+i_{DS}$ , 由二极管 $D_s$ 给电容 $C_s$ 充电,  $i_C$ 减小,  $i_{DS}$ 增加, 由于电容 $C_s$ 两端电压不能突变,  $u_{CE}$ 被限制, 电容越大,  $du/dt$ 越小

(2) 当 $i_C$ 减小到零时, 器件V关断

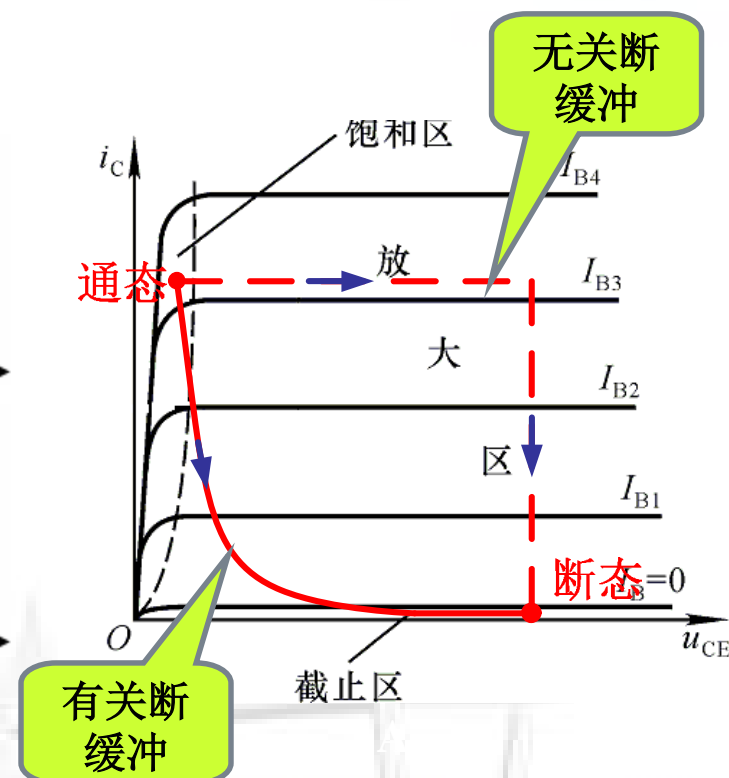
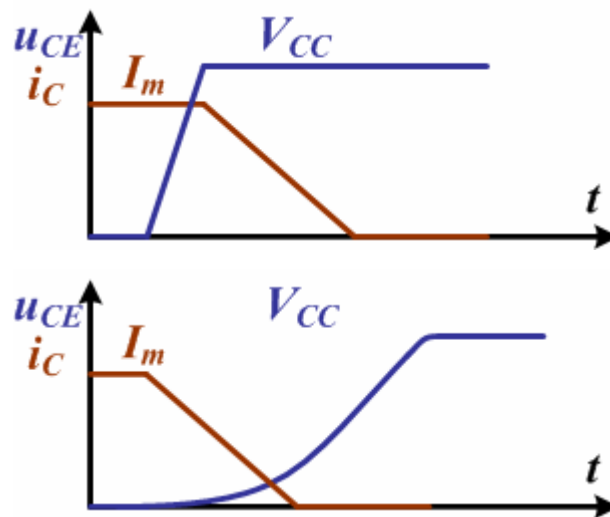
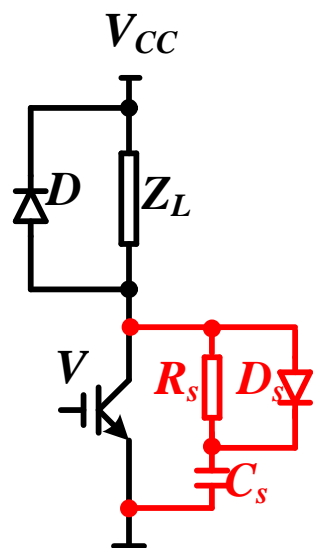
(3) 当 $u_{CE}$ 升高于 $V_{CC}+0.7V$ 时, 二极管D导通,  $u_{CE}$ 被钳制在 $V_{CC}+0.7V$

(4) 当开关管V导通后,  $C_s$ 充的电通过 $R_s$ 释放掉



## 4.1 关断缓冲电路

### ○ 关断缓冲电路

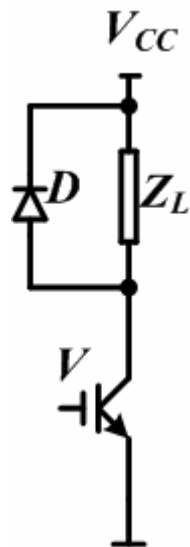




## 4.2 开通缓冲电路

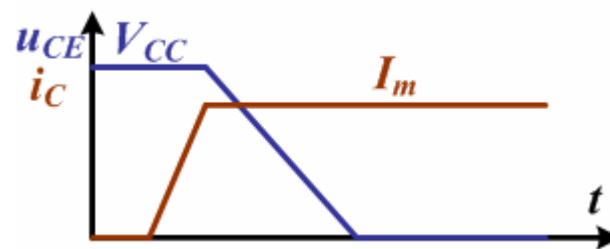
### ○ 开通缓冲电路

n 无开通缓冲时



(1) 开关管V开通过程中,  $i_{ZL}=i_C+i_D$ ,  $i_D$ 减小,  $i_C$ 增大, 由于二极管D导通,  $u_{CE}$ 被钳制在  $V_{CC}+0.7V$

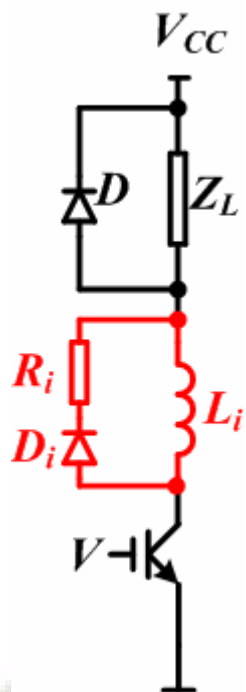
(2) 当  $i_D=0$  时,  $i_{ZL}=i_C$ , 二极管D关断, 无钳制电压的作用,  $u_{CE}$ 下降, 当  $u_{CE}$ 减小为零时, 器件V关断



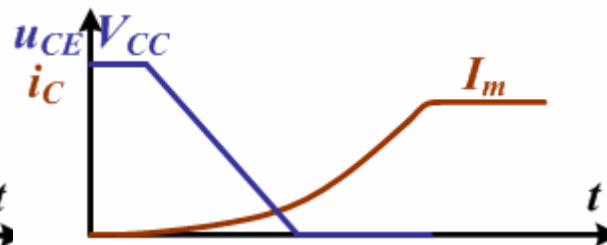
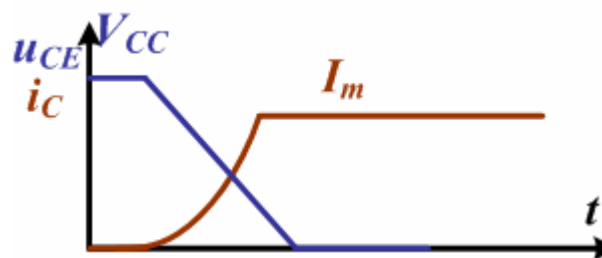
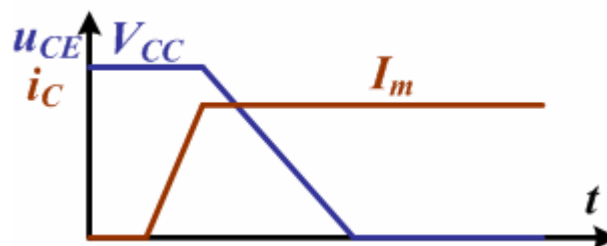
## 4.2 开通缓冲电路

### ○ 开通缓冲电路

n 有开通缓冲时



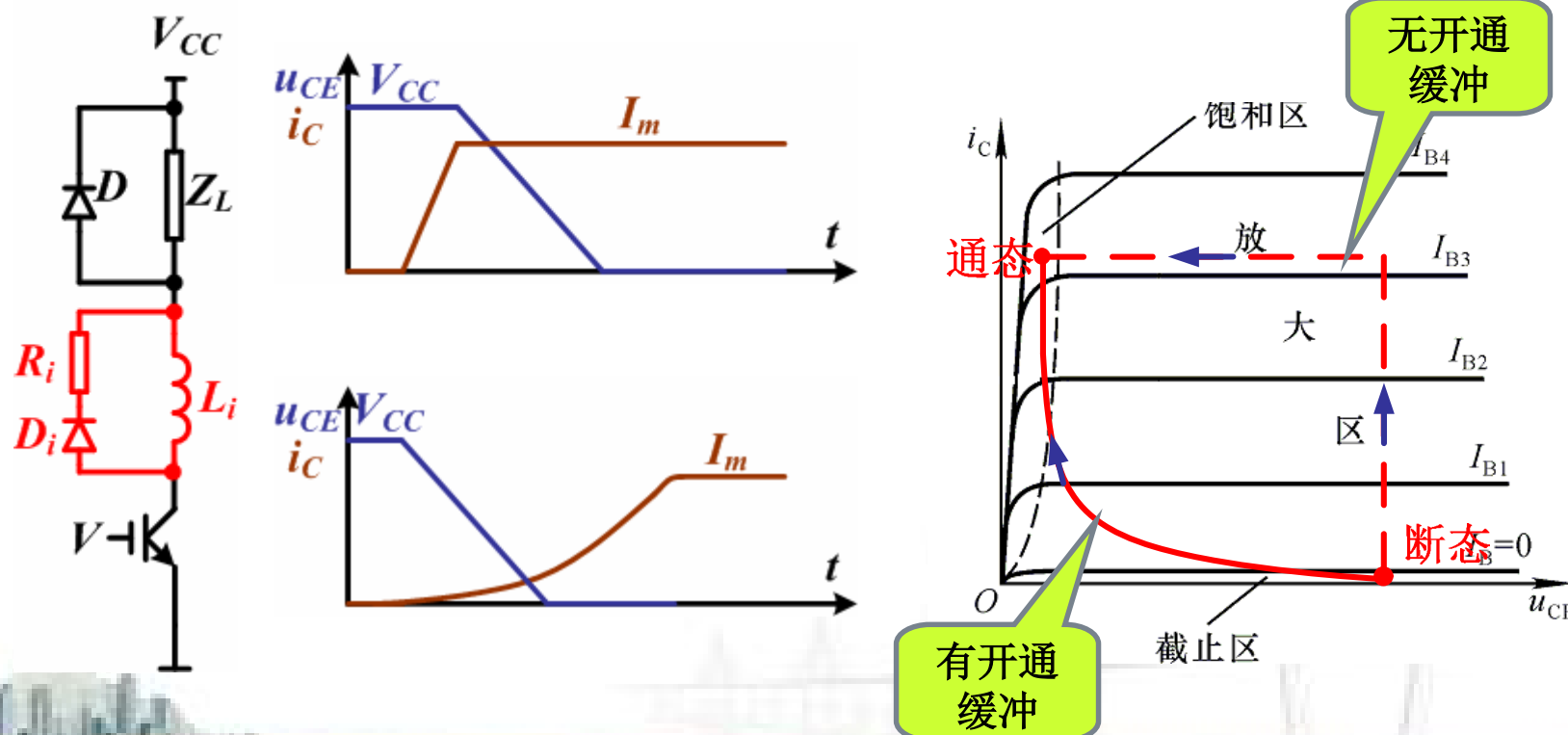
- (1) 开关管V开通过程中,  $i_{ZL}=i_{L_i}+i_D$ , 由于流过电感 $L_i$ 的电流不能突变,  $i_{L_i}=i_C$ 缓慢增加, 电感越大,  $di/dt$ 越小, 由于电感 $L_i$ 的存在, 其两端有电压,  $u_{CE}$ 不能被钳制, 逐渐减小
- (2) 当 $u_{CE}$ 减小为零时, 器件V开通
- (3) 当 $i_{ZL}=i_{L_i}$ 时,  $i_D=0$ , 二极管D关断
- (4) 当开关V管关断后,  $L_i$ 充的电通过 $R_i$ 释放掉



## 4.2 开通缓冲电路

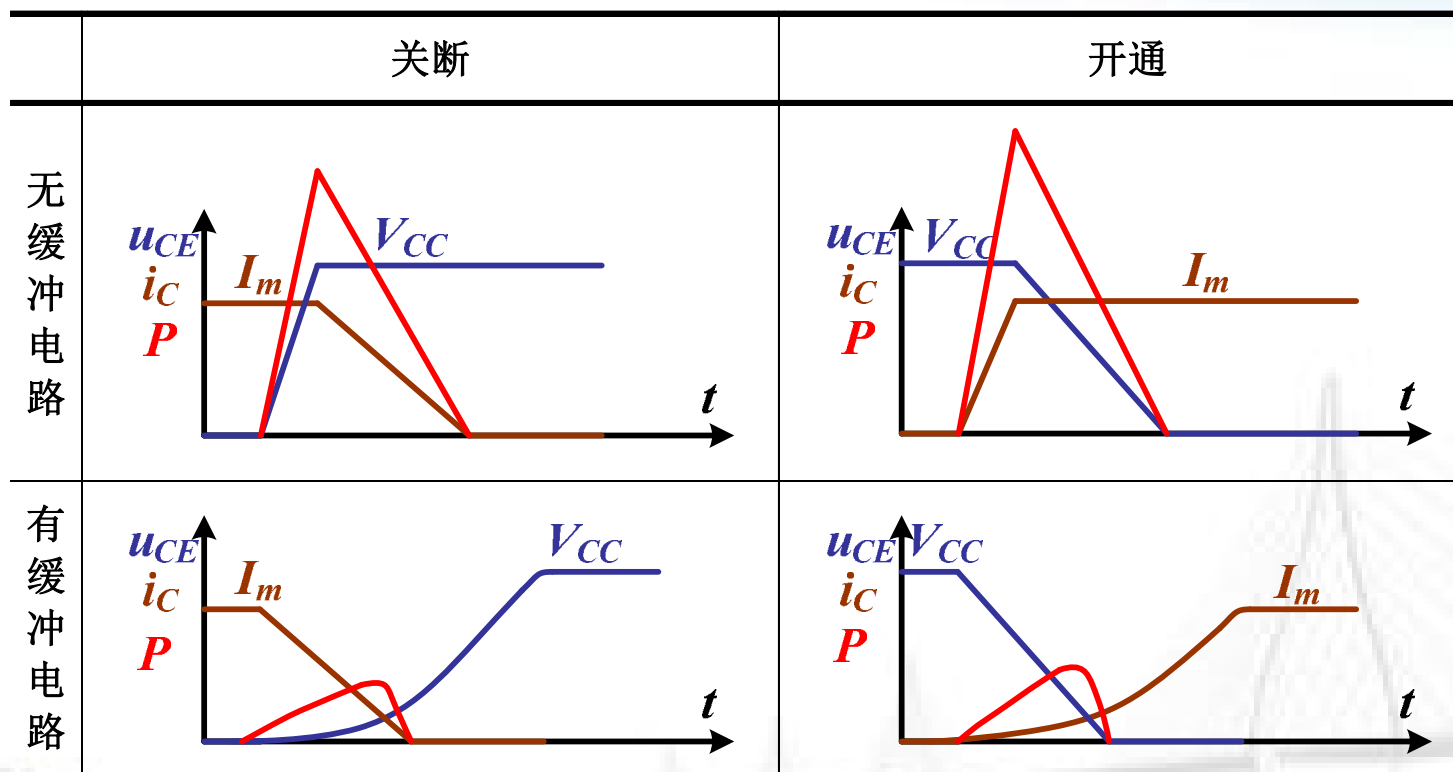
### ○ 开通缓冲电路

n 有开通缓冲时



## 4 开关器件的保护

### ○ 开关器件的能量损耗



减小的损耗哪里去了？



13:39:49

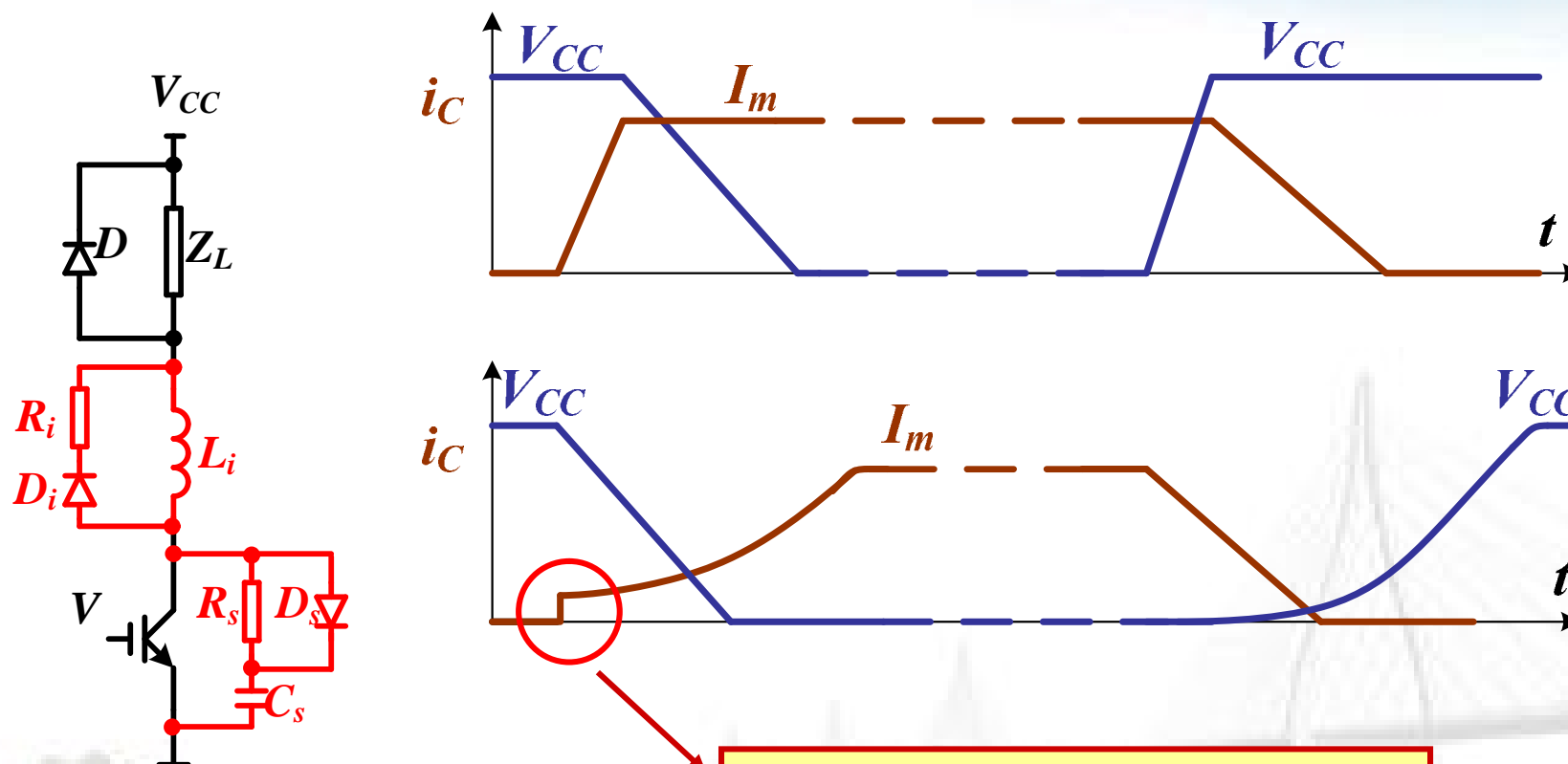
60



哈尔滨工业大学  
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY

## 4 开关器件的保护

### ○ 关断缓冲+开通缓冲



$V$  开通时缓冲电容  $C_s$  先通过  $R_s$  向  $V$  放电，使电流  $i_c$  先上一个台阶

## 4 开关器件的保护

### ○ 实际电路

