



# 自动控制实践I

## 功率放大器概述

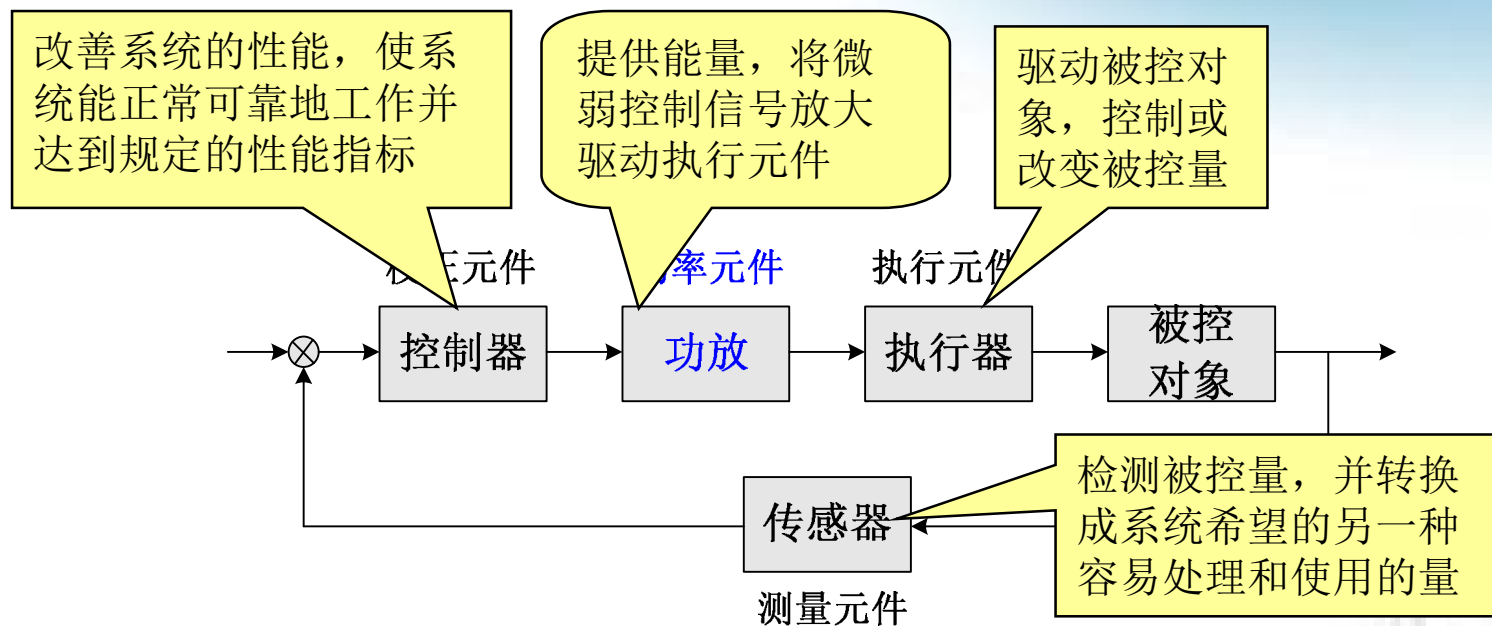
哈尔滨工业大学空间控制与惯性技术研究中心 解伟男

# 目 录

---

- 1 功率放大器的作用
- 2 功率放大器的类型与要求
- 3 线性功率放大器
- 4 常用功率开关器件原理与特性

# 1 功率放大器的作用



- 功率放大器：把具有固定电压的电源变成了由控制信号控制的能源，电压、电流或其他参数随控制信号而变化的电源。

## 2 功率放大器的类型与要求

- 功率放大器的类型
  - n 交流伺服功率放大器：交流负载
  - n 直流伺服功率放大器：直流负载
- 直流伺服功率放大器的类型
  - n 线性功率放大器(100W以下)
  - n 脉宽调制型功率放大器(25W~5000W)
  - n 晶闸管功率放大器(500W以上)

## 2 功率放大器的类型与要求

### ○ 直流功率放大器的基本要求

- n 能够输出足够的电压、电流和功率
- n 线性度好，输出信号失真小
- n 要有保护措施
  - 限流：保护电机、保护晶体管
  - 限压：感性负载时，电流突变，产生高电压，损坏晶体管
  - 过热
- n 能够吸收电动机的回输能量
  - 减速和制动时电机工作在发电机状态，要求放大器能够接受或承受从电机反馈回来的电能
- n 具备电流负反馈线路
  - 提高控制系统性能
  - 限制电枢电流

### 3 线性功率放大器

#### ○ 线性功率放大器的概念

- n 线性放大器：输出信号幅度与输入信号幅度成正比的放大器
- n 线性功率放大器：将输出信号放大到需要功率电平的线性放大器

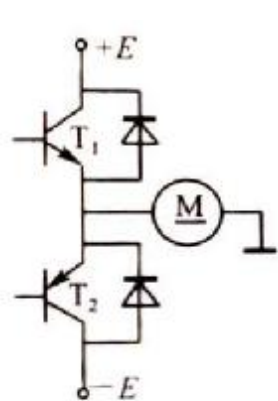
#### ○ 线性功率放大器的优缺点

| 线性功放   | 开关功放                  |
|--|-----------------------|
| 优点：<br>线性度好、失真小；<br>简单，适于低成本简单应用；<br>噪声和电磁干扰小。 | 优点：<br>效率高；<br>适合大功率。 |
| 缺点：<br>效率低，自身损耗大，输出功率小。                        | 缺点：<br>噪声和电磁干扰大。      |

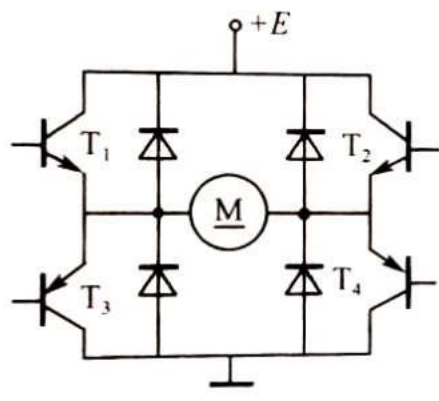
### 3 线性功率放大器

#### ○ 分立元件线性功放的基本结构

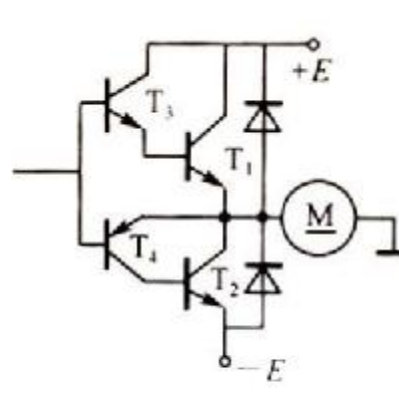
- n 前置放大、输出级和检测、反馈、保护电路
- n 前置放大：一般由运算放大器和晶体管放大电路组成，主要用于信号放大，包括电压及电流放大。
- n 输出级包括如下形式：



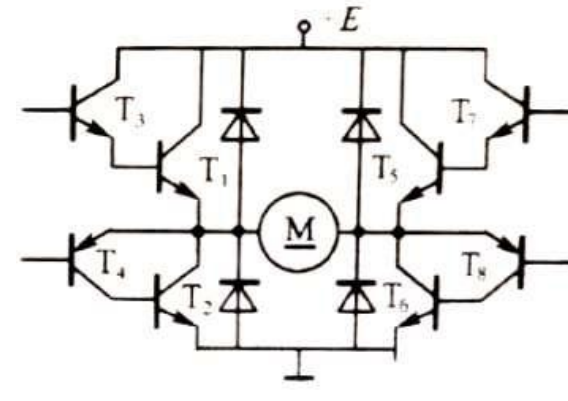
(a) 互补推挽电路



(b) 互补桥式电路



(c) 准互补推挽电路



(d) 准互补桥式电路

### 3 线性功率放大器

#### ○ 集成功率放大器

n 以LM1875为例

LM1875是美国国家半导体公司生产的高性能音频功率放大器。

LM1875在 $\pm 25\text{V}$ 电源， $4\Omega$ 负载时可获得20W的功率输出，在 $\pm 30\text{V}$ 电源， $8\Omega$ 负载时可获得30W的功率输出。

LM1875采用了先进的技术确保大输出功率下的低扭曲率，高增益、快转换率，宽带宽，大输出电压摆动，高电流输出能力，宽供电范围。放大器采用了内部补偿确保在放大倍数为10倍或更高时仍然稳定。



## LM1875

## 20W Audio Power Amplifier

### General Description

The LM1875 is a monolithic power amplifier offering very low distortion and high quality performance for consumer audio applications.

The LM1875 delivers 20 watts into a  $4\Omega$  or  $8\Omega$  load on  $\pm 25\text{V}$  supplies. Using an  $8\Omega$  load and  $\pm 30\text{V}$  supplies, over 30 watts of power may be delivered. The amplifier is designed to operate with a minimum of external components. Device overload protection consists of both internal current limit and thermal shutdown.

The LM1875 design takes advantage of advanced circuit techniques and processing to achieve extremely low distortion levels even at high output power levels. Other outstanding features include high gain, fast slew rate and a wide power bandwidth, large output voltage swing, high current capability, and a very wide supply range. The amplifier is internally compensated and stable for gains of 10 or greater.



### 3 线性功率放大器

#### 集成功率放大器

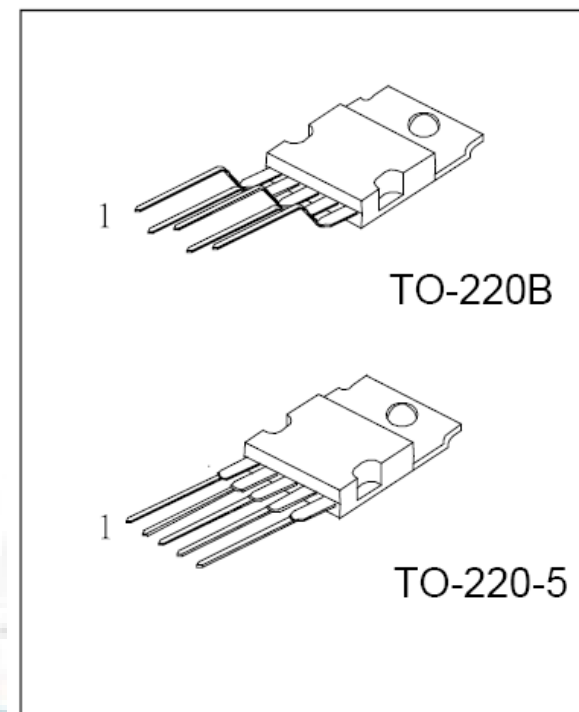
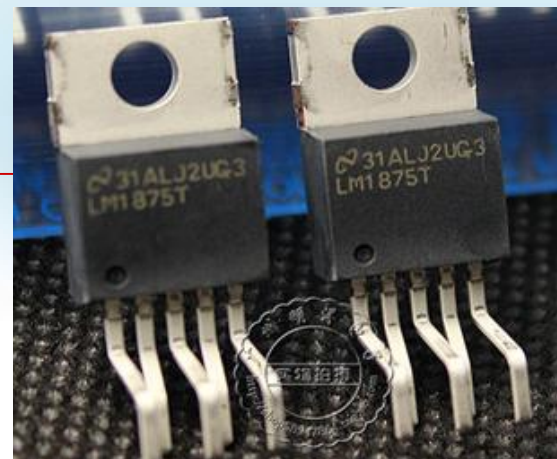
以LM1875为例

应用:

- 高性能音频系统
- 桥放大器
- 立体留声机
- 伺服放大器
- 仪器系统

#### APPLICATIONS

- \*High performance audio systems
- \*Bridge amplifiers
- \*Stereo phonographs
- \*Servo amplifiers
- \*Instrument systems



1: +IN      2: -IN      3: -VEE  
4: Output    5: Vcc

### 3 线性功率放大器

#### ○ 集成功率放大器

n 以LM1875为例

#### ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

| PARAMETER                              | SYMBOL           | RATING                             | UNIT |
|--|------------------|------------------------------------|------|
| Supply Voltage                         | Vs               | 60                                 | V    |
| Input Voltage                          | V <sub>IN</sub>  | -V <sub>EE</sub> ~ V <sub>CC</sub> | V    |
| Storage Temperature                    | T <sub>stg</sub> | -65 ~ +150                         | °C   |
| Junction Temperature                   | T <sub>J</sub>   | 150                                | °C   |
| Lead Temperature(Soldering,10 seconds) | T <sub>L</sub>   | 260                                | °C   |

#### THERMAL DATA

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

### 3 线性功率放大器

#### ○ 集成功率放大器

##### n 以LM1875为例

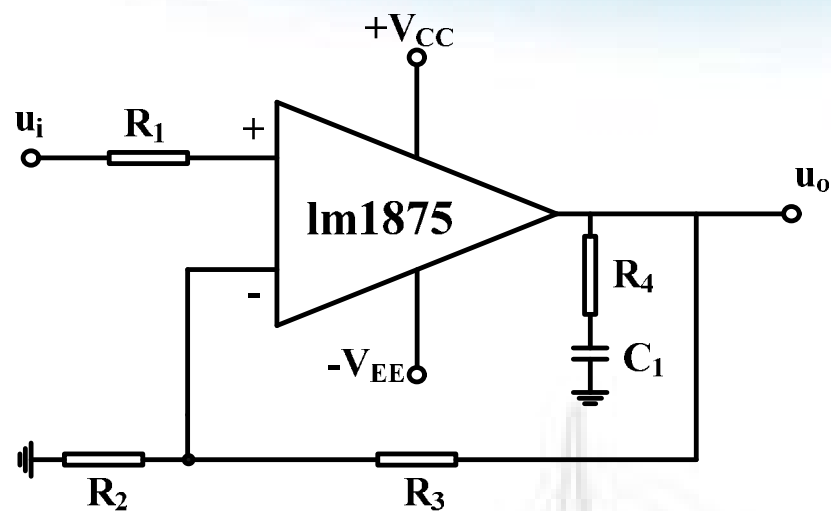
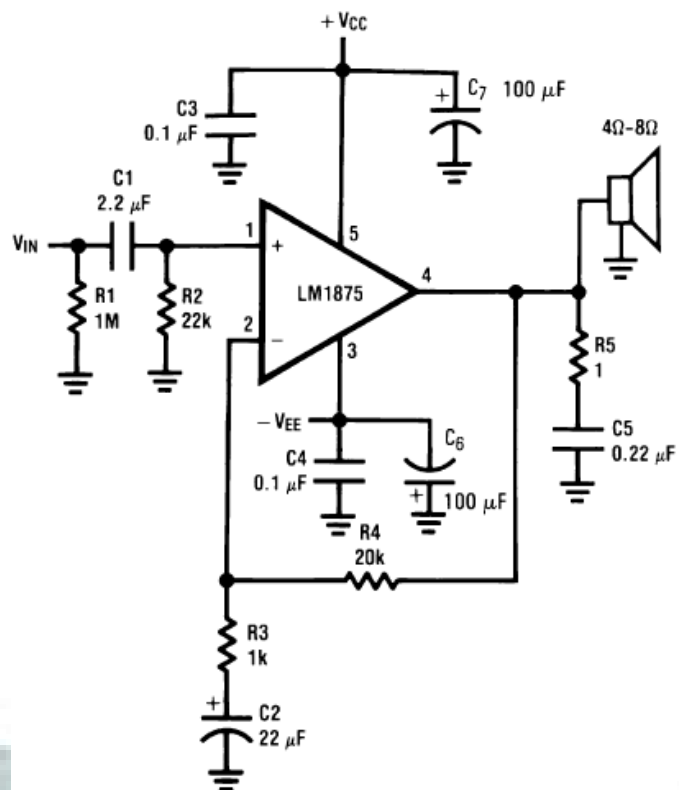
- 输出功率可达**30W**
- 供电范围**16V~60V**
- 峰值电流可达**4A**
- 芯片内部有短路保护电路
- 芯片内部有过热保护电路

#### Features

- Up to 30 watts output power
- $A_{VO}$  typically 90 dB
- Low distortion: 0.015%, 1 kHz, 20 W
- Wide power bandwidth: 70 kHz
- Protection for AC and DC short circuits to ground
- Thermal protection with parolc circuit
- High current capability: 4A
- Wide supply range 16V-60V
- Internal output protection diodes
- 94 dB ripple rejection
- Plastic power package TO-220

### 3 线性功率放大器

#### 集成功率放大器



$$\frac{u_o}{u_i} = \frac{R_2 + R_3}{R_2}$$

# 3 线性功率放大器

## ○ 集成功率放大器

### n 运算放大器LF353

#### LF353

#### Wide Bandwidth Dual JFET Input Operational Amplifier

##### General Description

These devices are low cost, high speed, dual JFET input operational amplifiers with an internally trimmed input offset voltage (BI-FET II™ technology). They require low supply current yet maintain a large gain bandwidth product and fast slew rate. In addition, well matched high voltage JFET input devices provide very low input bias and offset currents. The LF353 is pin compatible with the standard LM1558 allowing designers to immediately upgrade the overall performance of existing LM1558 and LM358 designs.

These amplifiers may be used in applications such as high speed integrators, fast D/A converters, sample and hold circuits and many other circuits requiring low input offset voltage, low input bias current, high input impedance, high slew rate and wide bandwidth. The devices also exhibit low noise and offset voltage drift.

##### Features

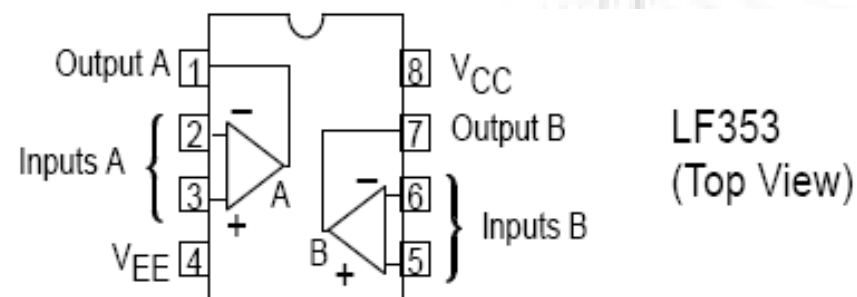
|                                      |                 |
|--------------------------------------|-----------------|
| ■ Internally trimmed offset voltage: | 10 mV           |
| ■ Low input bias current:            | 50pA            |
| ■ Low input noise voltage:           | 25 nV/√Hz       |
| ■ Low input noise current:           | 0.01 pA/√Hz     |
| ■ Wide gain bandwidth:               | 4 MHz           |
| ■ High slew rate:                    | 13 V/μs         |
| ■ Low supply current:                | 3.6 mA          |
| ■ High input impedance:              | $10^{12}\Omega$ |
| ■ Low total harmonic distortion :    | $\leq 0.02\%$   |
| ■ Low 1/f noise corner:              | 50 Hz           |
| ■ Fast settling time to 0.01%:       | 2 μs            |

### 3 线性功率放大器

#### ○ 集成功率放大器

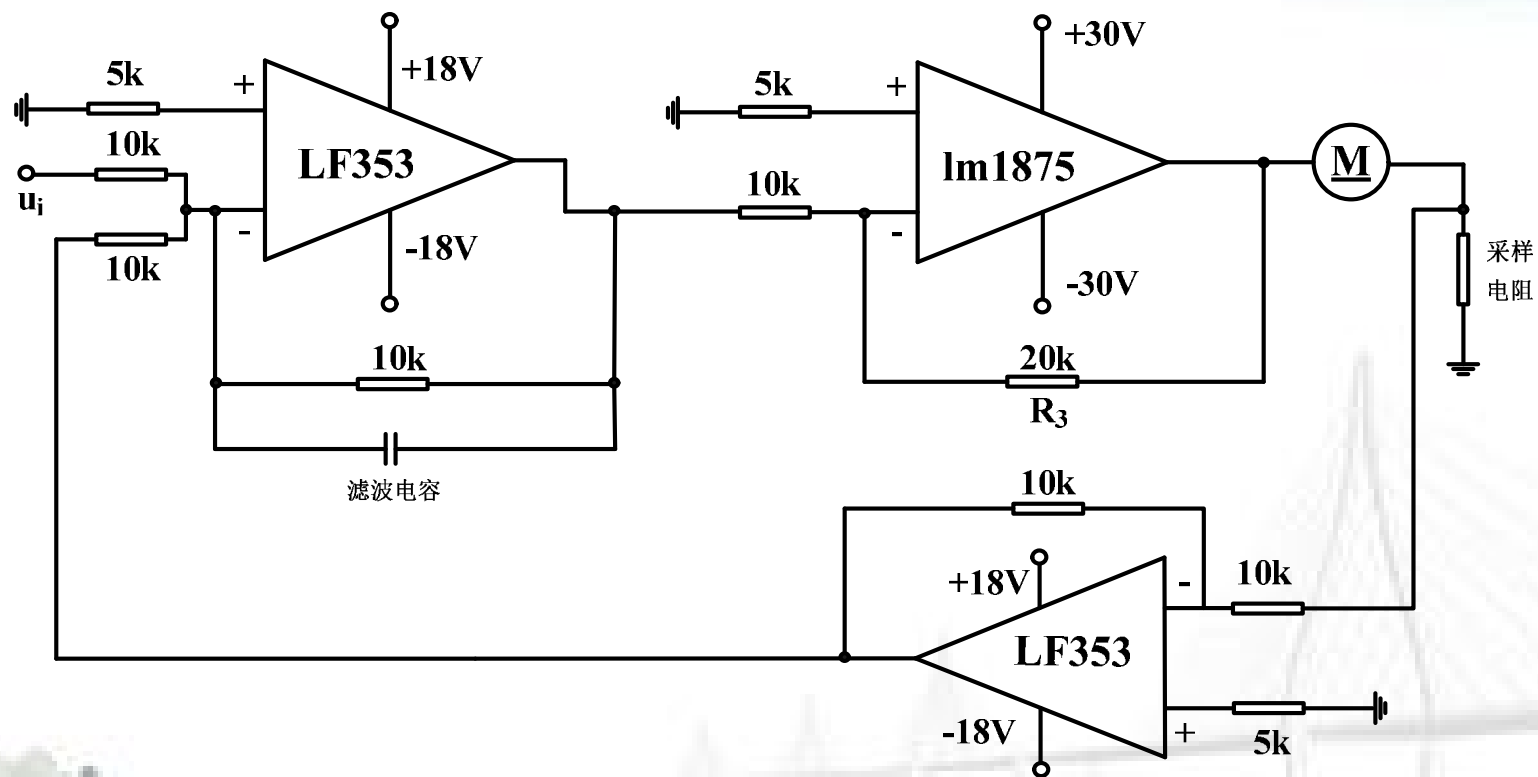
##### n 运算放大器LF353

- 供电电压 $\pm 18\text{V}$
- 输出电压 $\pm 13.5\text{V}$
- 输出短路电流 $40\text{mA}$



### 3 线性功率放大器

#### ○ 集成功率放大器





### 3 线性功率放大器

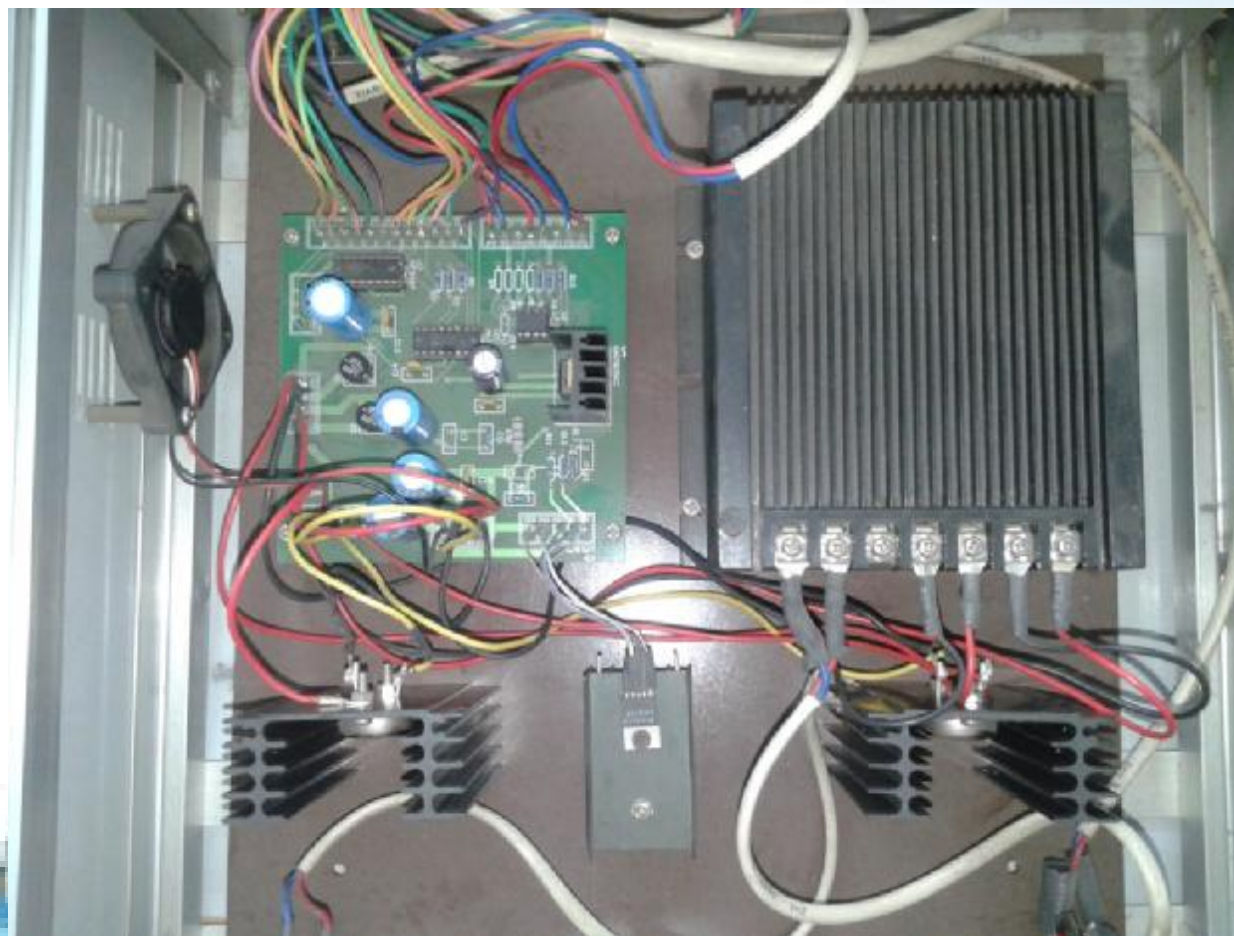
- 集成功率放大器





### 3 线性功率放大器

- 集成功率放大器



### 3 线性功率放大器

考虑：电源电压为**50V**，当要求电枢电压为**10V**，电枢电流为**20A**时，采用线性功率放大器。

则输送到电动机的功率为：

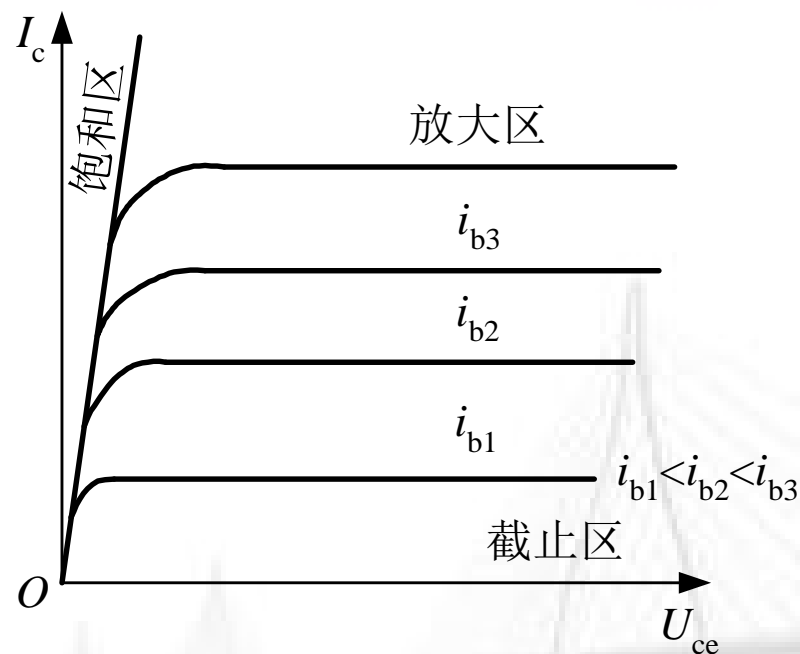
$$10V \times 20A = 200W$$

电源输出的功率为：

$$50V \times 20A = 1000W$$

放大器消耗的功率为：

$$40V \times 20A = 800W$$



## 4 常用开关器件的原理与特性

### ○ 开关器件概述

- n 开关式功率放大器里的晶体管主要工作在饱和和截止状态。
- n 饱和与截止，相当于把电路接通与断开，晶体管起开关作用，所以称为开关式功率放大器。
- n 可直接用于处理电能的主电路中，实现电能的变换或控制的电子器件叫**电力电子器件**。

### ○ 电力电子器件特征

- n 能处理电功率的大小，即承受电压和电流的能力，是最重要的参数
- n 为了减小本身的损耗，提高效率，电力电子器件一般都工作在开关状态
- n 实用中，电力电子器件往往需要由信息电子电路来控制
- n 为保证不致于因损耗散发的热量导致器件温度过高而损坏，不仅在器件封装上讲究散热设计，在其工作时一般都要安装散热器

## 4 常用开关器件的原理与特性

### ○ 应用电力电子器件的系统组成

n 由控制电路、驱动电路、检测电路和主电路组成。

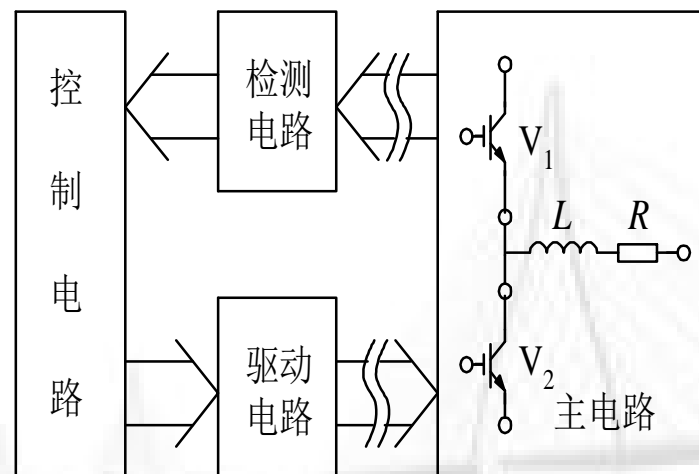
n 主电路：实现电力变换

n 控制电路：按照系统的工作要求形成控制信号

n 隔离：

○ 光隔离：光耦

○ 磁隔离：脉冲变压器



## 4 常用开关器件的原理与特性

### ○ 电力电子器件的分类

#### n 按照电力电子器件能够被控制电路信号所控制的程度

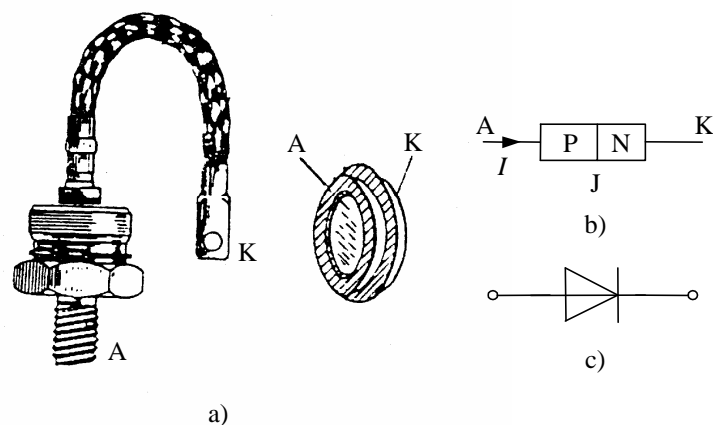
- 不可控器件：不能用控制信号来控制其通断的电力电子器件
- 半控器件：通过控制信号可以控制其导通而不能控制其关断的电力电子器件
- 全控器件：通过控制信号既能控制其导通又能控制其关断的电力电子器件，又称为自关断器件

#### n 按照驱动电路加在电力电子器件控制端和公共端之间信号的性质

- 电流驱动型：通过从控制端注入或者抽出电流来实现导通或者关断的控制
- 电压驱动型：仅通过在控制端和公共端之间施加一定的电压信号就可实现导通或者关断的控制

## 4 常用开关器件的原理与特性

### ○ 功率二极管(又称电力二极管, 不可控器件)



a) 外形 b) 结构 c) 电气图形符号

A阳极, K阴极

- n 基本结构和工作原理与信息电子电路中的二极管一样以半导体PN结为基础
- n 由一个面积较大的PN结和两端引线以及封装组成的
- n 从外形上看, 有螺栓型和平板型



## 4 常用开关器件的原理与特性

### ○ 功率二极管(又称电力二极管, 不可控器件)

- n 与信息电子电路中的二极管相比正向导通时可以流过很大的电流
- n 与信息电子电路中的二极管相比可以承受很大的反向电压



1600V  
100A, 200A, 300A



5000V, 1500A

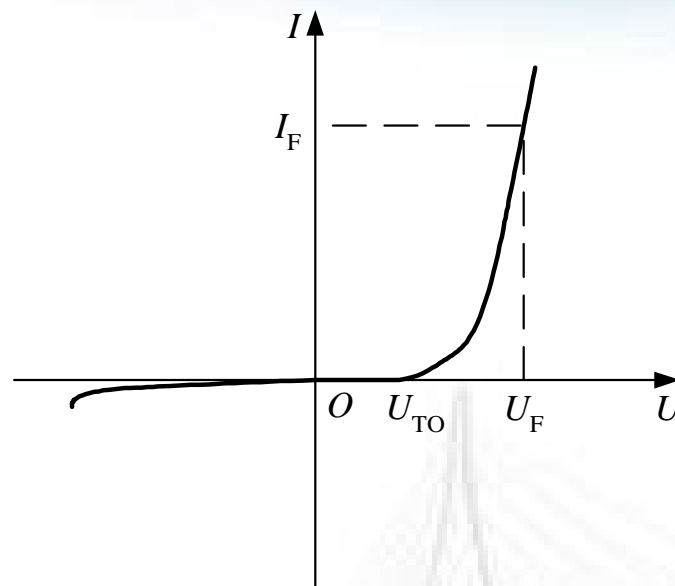


1600V, 70A

## 4 常用开关器件的原理与特性

### ○ 功率二极管静特性(伏安特性)

- n 当功率二极管承受的正向电压大到一定值（门槛电压 $U_{TO}$ ），正向电流才开始明显增加，处于稳定导通状态
- n 与正向电流 $I_F$ 对应的功率二极管两端的电压 $U_F$ 即为其正向电压降
- n 当功率二极管承受反向电压时，只有微小而数值恒定的反向漏电流

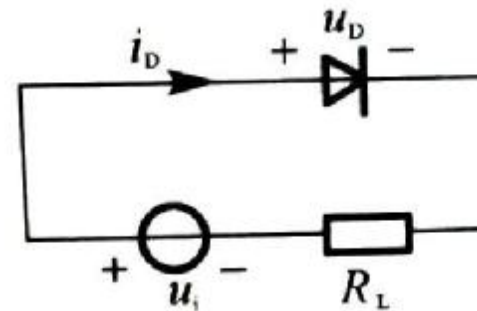
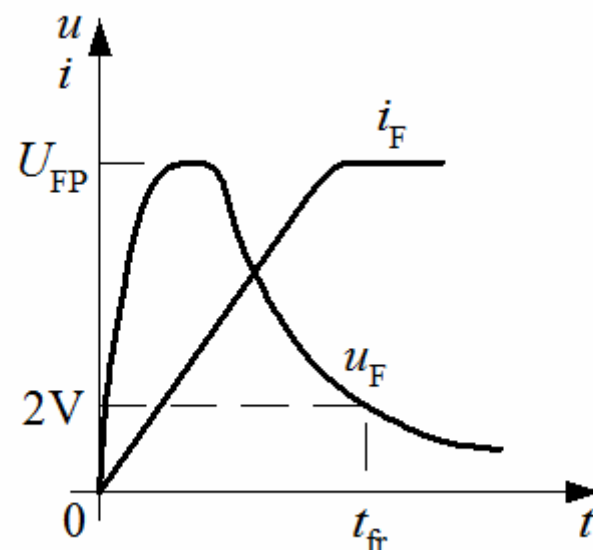




## 4 常用开关器件的原理与特性

### ○ 功率二极管开通

- n 功率二极管的正向压降先出现一个过冲  $U_{FP}$ ，经过一段时间才趋于接近稳态压降的某个值（如 2V）。
- n 这一动态过程时间被称为正向恢复时间  $t_{fr}$ 。



## 4 常用开关器件的原理与特性

### ○ 功率二极管关断

n 须经过一段短暂的时间才能重新获得反向阻断能力，进入截止状态

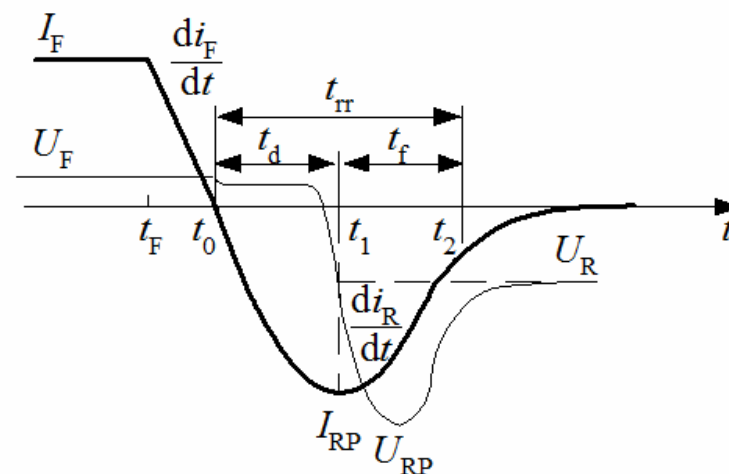
n 在关断之前有较大的反向电流出现，并伴随有明显的反向电压过冲

n 延迟时间:  $t_d = t_1 - t_0$

电流下降时间:  $t_f = t_2 - t_1$

反向恢复时间:  $t_{rr} = t_d + t_f$

n 由于反向恢复时间的存在，使二极管的关断速度收到限制，如果反向脉冲的持续时间比反向恢复时间短，则二极管在正、反向都可导通，起不到开关作用。该过程使二极管不能在快速连续脉冲下当做开关使用。



## 4 常用开关器件的原理与特性

### ○ 功率二极管的主要参数

#### n 正向平均电流 $I_F$ (A)

额定电流——在指定的管壳温度（简称壳温，用 **TC** 表示）和散热条件下，其允许流过的最大工频正弦半波电流的平均值

#### n 正向压降 $U_F$

指功率二极管在指定温度下，流过某一指定的稳态正向电流时对应的正向压降

#### n 反向重复峰值电压 $U_{RRM}$

指功率二极管所能重复施加的反向最高峰值电压。使用时，往往按照电路中电力二极管可能承受的反向最高峰值电压的两倍来选定

## 4 常用开关器件的原理与特性

### ○ 功率二极管的主要参数

#### n 最高工作结温 $T_{JM}$

结温是指管芯PN结的平均温度，用 $T_j$ 表示。最高工作结温是指在PN结不致损坏的前提下所能承受的最高平均温度

#### n 反向恢复时间 $t_{rr}$

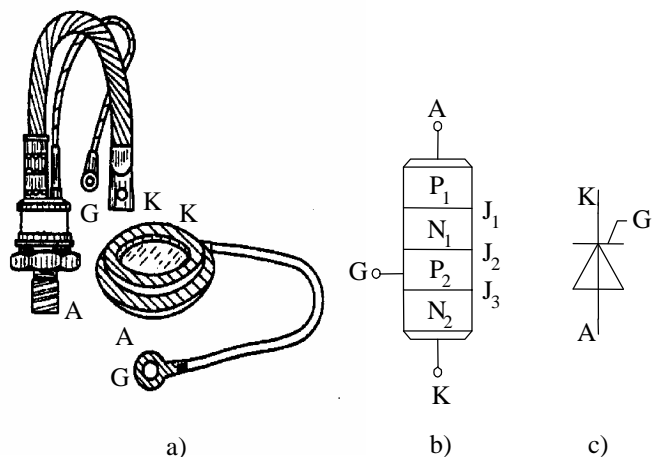
关断过程中，电流降到0起到恢复反向阻断能力止的时间

#### n 浪涌电流 $I_{FSM}$

指功率二极管所能承受最大的连续一个或几个工频周期的过电流

## 4 常用开关器件的原理与特性

### ○ 晶闸管(又称可控硅(SCR) ， 半控器件)



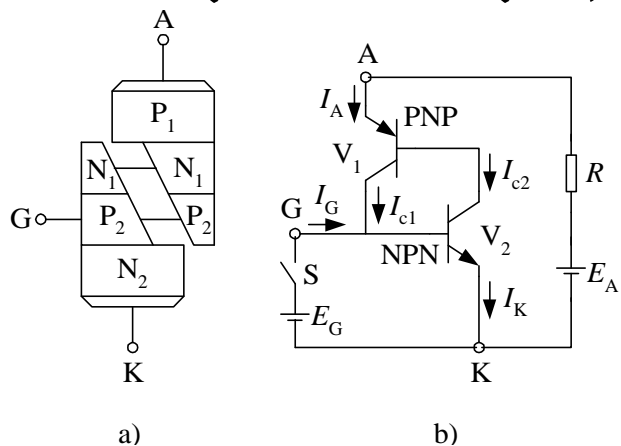
a) 外形 b) 结构 c) 电气图形符号

- n 外形有螺栓型和平板型两种封装
- n 阳极A、阴极K和门极（控制端）G三个联接端
- n 对于螺栓型封装，通常螺栓是其阳极，能与散热器紧密联接且安装方便
- n 平板型封装的晶闸管可由两个散热器将其夹在中间

- n 晶闸管的地位开始被各种性能更好的全控器件所取代，但由于其能承受的电压和电流容量仍然是目前电力电子器件中最高的，且工作可靠，因此在大容量应用场合仍然有较重要地位。

## 4 常用开关器件的原理与特性

### ○ 晶闸管(又称可控硅(SCR) ， 半控器件)



n 晶闸管内部是PNPN四层半导体结构

n 晶闸管的导通原理可以用双晶体管模型来解释



1600V, 20A



1000V, 2500A



1600V, 200A



## 4 常用开关器件的原理与特性

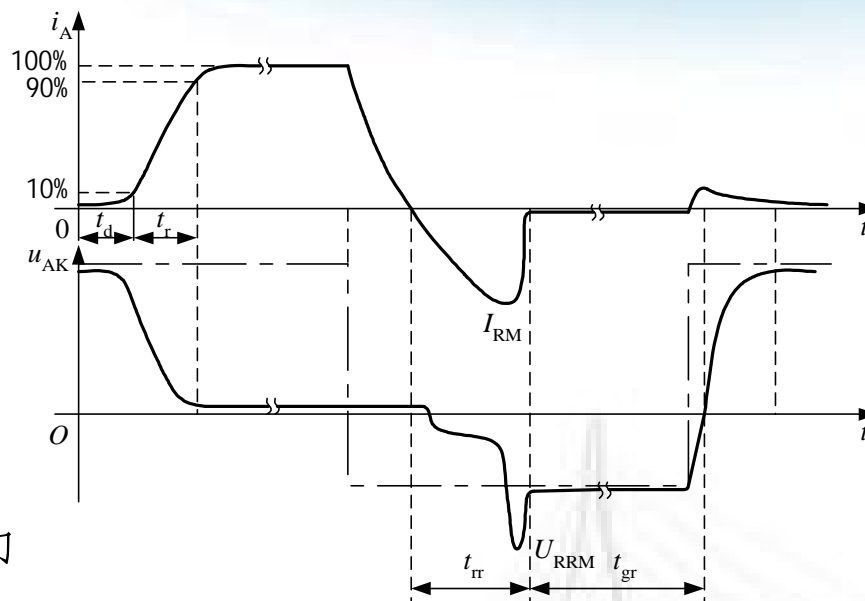
### ○ 晶闸管开通过程

**n** 延迟时间  $t_d$ : 门极电流阶跃时刻开始, 到阳极电流上升到稳态值的10%的时间

**n** 上升时间  $t_r$ : 阳极电流从10%上升到稳态值的90%所需的时间

**n** 开通时间  $t_{gt}$  以上两者之和, 即  
$$t_{gt} = t_d + t_r$$

**n** 普通晶闸管延迟时间为0.5-1.5ms, 上升时间为0.5-3ms

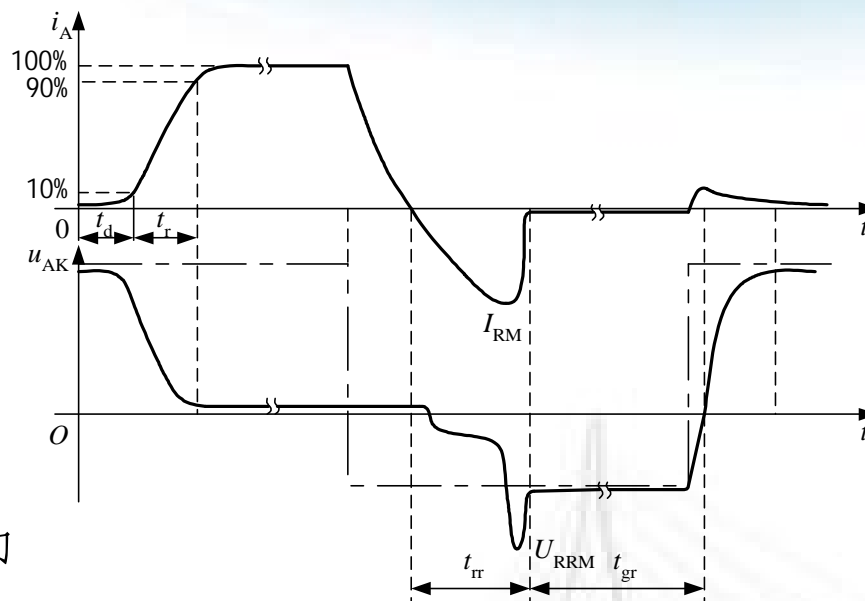




## 4 常用开关器件的原理与特性

### ○ 晶闸管关断过程

- n** 反向阻断恢复时间  $t_{rr}$ : 正向电流降为零到反向恢复电流衰减至接近于零的时间
- n** 正向阻断恢复时间  $t_{gr}$ : 晶闸管要恢复其对正向电压的阻断能力还需要的一段时间
- n** 关断时间  $t_q$ :  $t_{rr}$  与  $t_{gr}$  之和, 即
$$t_q = t_{rr} + t_{gr}$$
- n** 普通晶闸管的关断时间约几百微秒



## 4 常用开关器件的原理与特性

### ○ 晶闸管的主要参数——电压定额

- n 断态重复峰值电压  $U_{\text{DRM}}$ ——在门极断路而结温为额定值时，允许重复加在器件上的正向峰值电压。
- n 反向重复峰值电压  $U_{\text{RRM}}$ ——在门极断路而结温为额定值时，允许重复加在器件上的反向峰值电压。
- n 通态（峰值）电压  $U_{\text{TM}}$ ——晶闸管通以某一规定倍数的额定通态平均电流时的瞬态峰值电压。
- n 通常取晶闸管的  $U_{\text{DRM}}$  和  $U_{\text{RRM}}$  中较小的标值作为该器件的额定电压。选用时，额定电压要留有一定裕量，一般取额定电压为正常工作时晶闸管所承受峰值电压2-3倍

## 4 常用开关器件的原理与特性

### ○ 晶闸管的主要参数——电流定额

#### n 通态平均电流 $I_{T(AV)}$

额定电流-----晶闸管在环境温度为 $40^{\circ}\text{C}$ 和规定的冷却状态下，稳定结温不超过额定结温时所允许流过的最大工频正弦半波电流的平均值。选用时应留一定的裕量，一般取**1.5-2**倍

#### n 维持电流 $I_H$

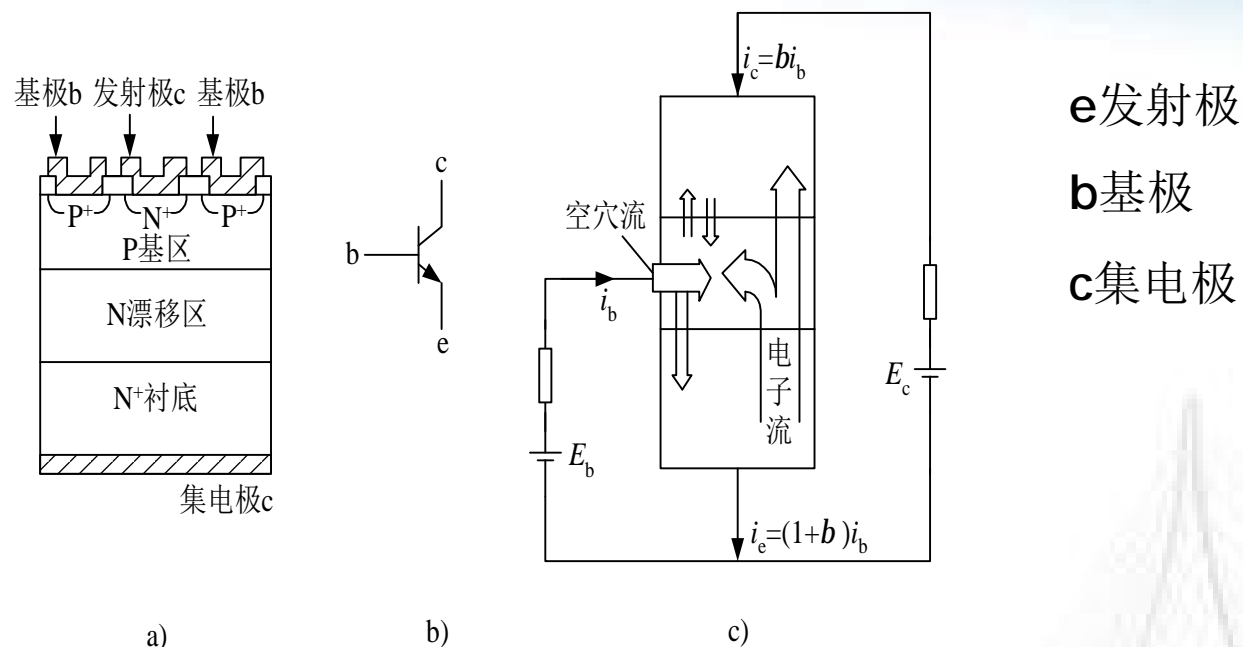
使晶闸管维持导通所必需的最小电流，一般为几十到几百毫安，与结温有关，结温越高，则 $I_H$ 越小

#### n 擎住电流 $I_L$

晶闸管刚从断态转入通态并移除触发信号后，能维持导通所需的最小电流。对同一晶闸管来说，通常 $I_L$ 约为 $I_H$ 的**2~4**倍

## 4 常用开关器件的原理与特性

### ○ 大功率晶体管(又称电力晶体管**GTR**，全控器件，电流驱动型)



n 与普通的晶体管基本原理是一样的

n 主要特性是耐压高、电流大、开关特性好

n 驱动电路复杂，其地位已被绝缘栅双极晶体管和功率场效应管所取代

## 4 常用开关器件的原理与特性

### ○ 大功率晶体管的伏安特性

#### n 截止区

- 基极控制电压应满足如下条件:

$$U_B \leq U_E + 0.7$$

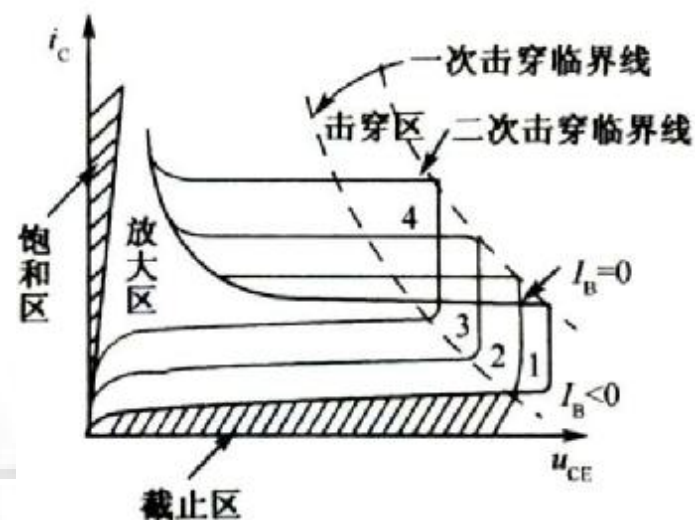
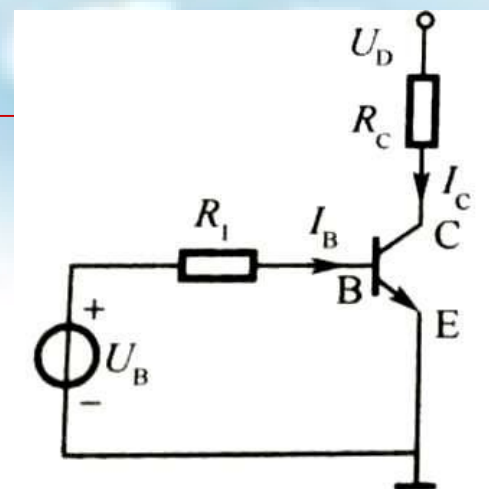
- 特点:

$$I_B \leq 0, I_C \approx 0 \quad \text{且} \quad U_C \approx U_D$$

- 损耗:

$$\Delta P_0 = U_D I_{CO} \quad (\text{较小})$$

其中  $I_{CO}$  为漏电流



## 4 常用开关器件的原理与特性

### ○ 大功率晶体管的伏安特性

#### n 放大区

○ 基极控制电压应满足如下条件:

$$U_B > U_E + 0.7 \quad \text{且} \quad U_B < U_C$$

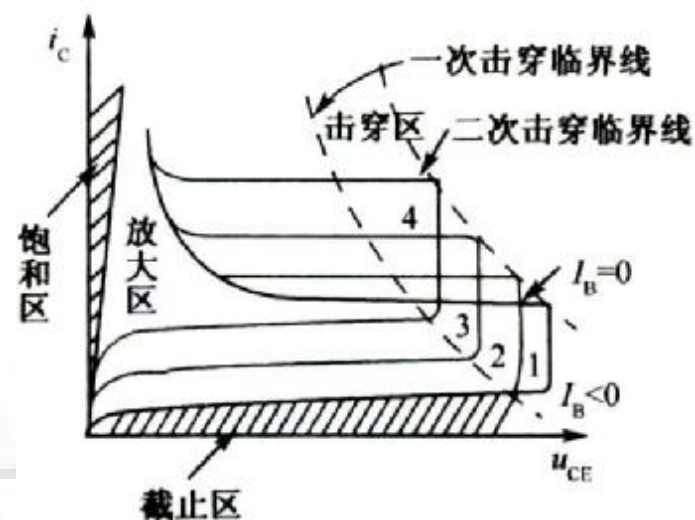
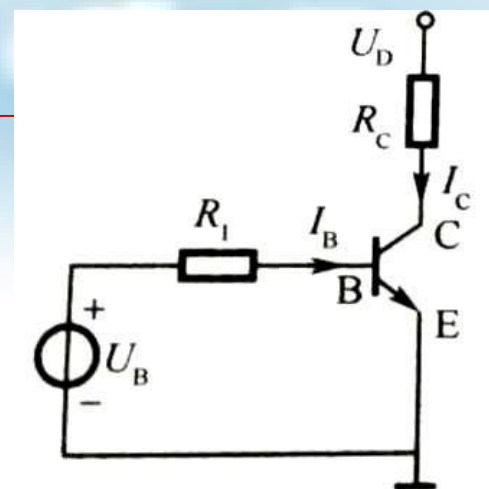
○ 特点:

$$I_C = \beta I_B$$

$I_C$  与电源电压和负载电阻无关

○ 损耗:

$$\Delta P_1 = I_C U_{CE} \quad (\text{较大})$$



## 4 常用开关器件的原理与特性

### ○ 大功率晶体管的伏安特性

#### n 饱和区

○ 基极控制电压应满足如下条件:

$$U_B > U_E + 0.7 \quad \text{且} \quad U_B > U_C$$

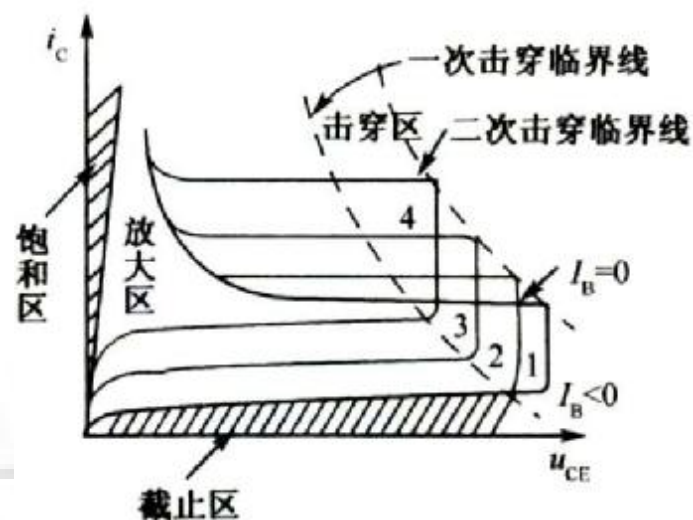
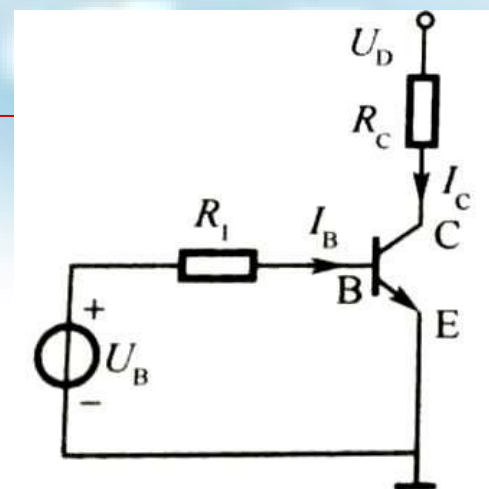
○ 特点:

$$I_B \geq \frac{I_{CS}}{\beta}$$

其中  $I_{CS} = U_D / R_C$  称为饱和电流。 $I_B$  大于  $I_{CS} / \beta$  的程度称为饱和深度, 用  $k_1 = \beta I_B / I_{CS}$  表示。 $k_1$  大饱和深,  $k_1$  小饱和浅。

○ 损耗:

$$\Delta P_s = I_{CS} U_{CE} \quad (\text{较小})$$





## 4 常用开关器件的原理与特性

### ○ 大功率晶体管的伏安特性

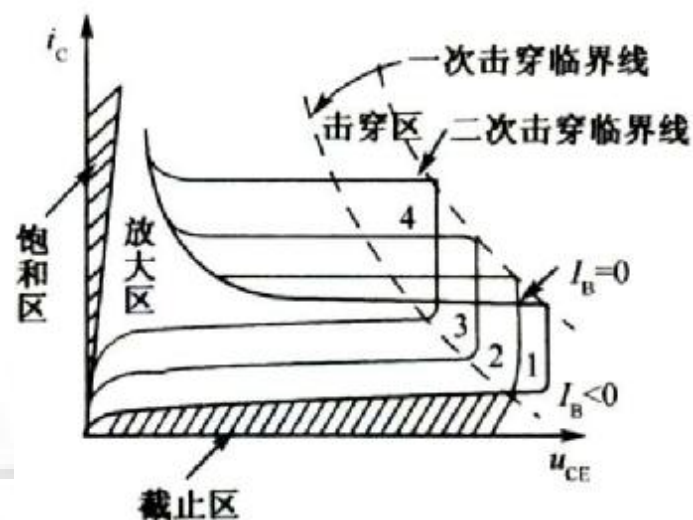
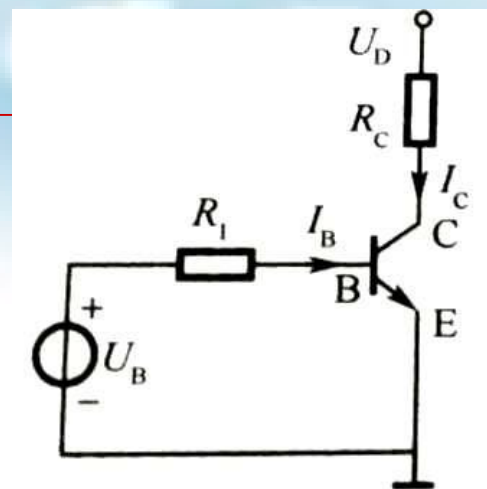
#### n 击穿区

##### ○ 一次击穿区:

当 $U_{CE}$ 升高时, 首先出现一次击穿现象, 此时 $I_C$ 急剧增加。如果外电路有限流装置, 并且在良好的散热条件下, 晶体管可多次进入一次击穿区而不损坏。

##### ○ 二次击穿区:

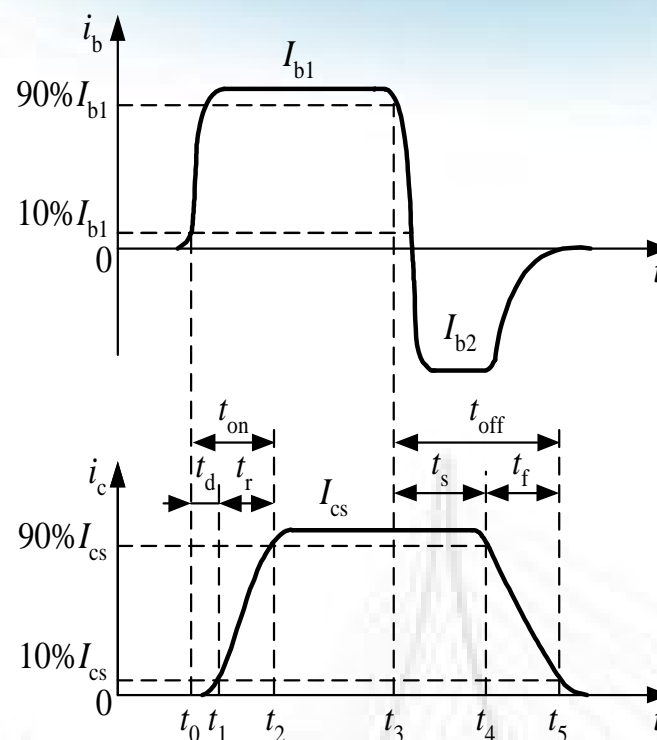
发生一次击穿后, 当 $I_C$ 增加到某个临界点后, 会进入二次击穿区, 此时 $U_{CE}$ 迅速下降, 电流急剧增加。进入二次击穿区, 管子性能会损坏。





## 4 常用开关器件的原理与特性

- 大功率晶体管开通与关断
  - n 延迟时间 $t_d$ 和上升时间 $t_r$ ，二者之和为开通时间 $t_{on}$
  - n 储存时间 $t_s$ 和下降时间 $t_f$ ，二者之和为关断时间 $t_{off}$
  - n GTR的开关时间在几微秒以内
  - n 晶体管的关断时间总是大于开通时间



## 4 常用开关器件的原理与特性

### ○ 大功率晶体管的主要参数——电流定额

#### n 最高工作电压

**GTR**上电压超过规定值时会发生击穿，击穿电压不仅和晶体管本身特性有关，还与外电路接法有关，实际使用时，为确保安全，最高工作电压要比最高工作电压低得多

#### n 集电极最大允许电流 $I_{cM}$

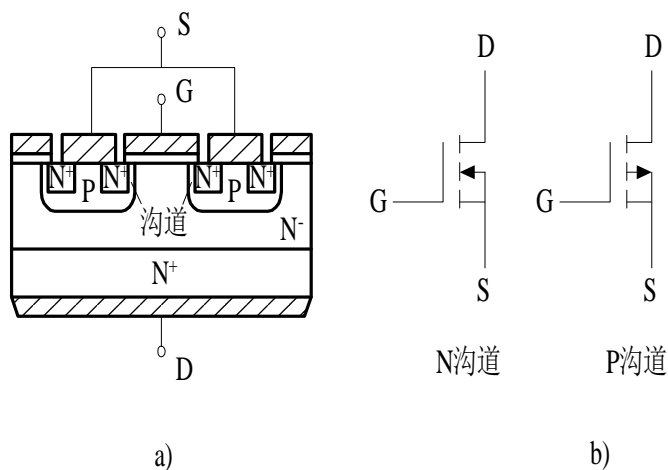
通常规定为直流电流放大系数下降到规定值的 $1/2 \sim 1/3$ 时所对应的 $I_C$ 。实际使用时要留有裕量，只能用到 $I_{cM}$ 的一半或稍多一点。

#### n 集电极最大耗散功率 $P_{cM}$

最高工作温度下允许的耗散功率。产品说明书中给 $P_{cM}$ 时同时给出壳温 $T_C$ ，间接表示了最高工作温度。

## 4 常用开关器件的原理与特性

○ 功率场效应管(电力场效应晶体管(MOSFET) ， 全控器件， 电压驱动型)



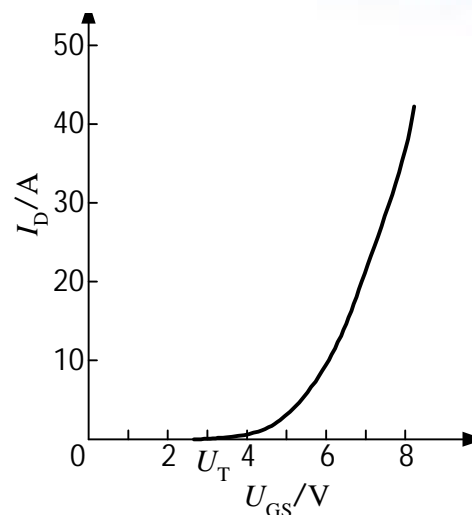
S源极， G栅极， D漏极

- n P沟道和N沟道； 耗尽型和增强型
- n 在功率MOSFET中， 主要是N沟道增强型
- n 驱动电路简单， 需要的驱动功率小
- n 开关速度快， 工作频率高
- n 电流容量小， 耐压低， 一般只适用于功率不超过10kW的装置。

## 4 常用开关器件的原理与特性

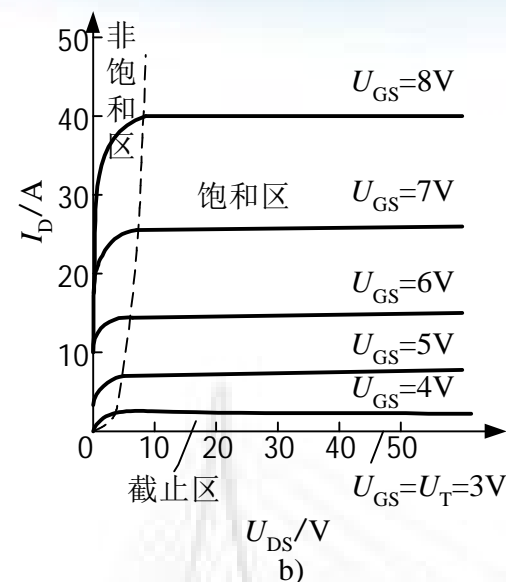
### ○ 功率场效应管的静特性

- n** 截止区：对应大功率晶体管的截止区
- n** 饱和区：对应大功率晶体管的放大区
- n** 非饱和区：对应大功率晶体管的饱和区



a)

a) 转移特性



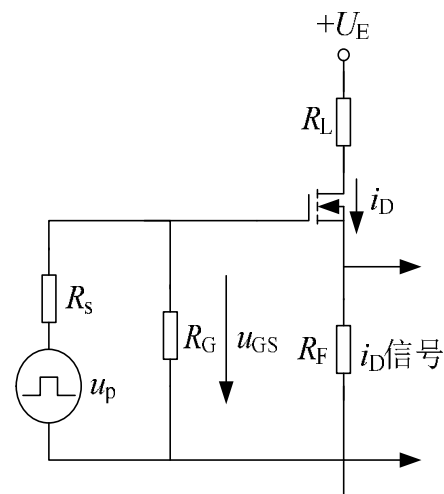
b)

b) 输出特性

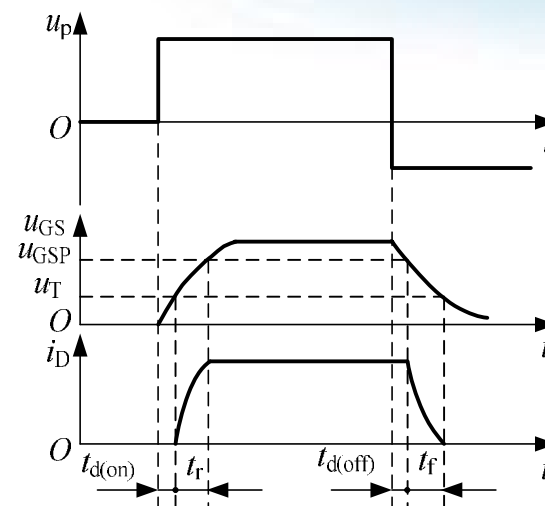
这里饱和与非饱和的概念与**GTR**不同，饱和是指漏源电压增加时漏极电流不再增加；非饱和是指漏源电压增加时漏极电流相应增加

## 4 常用开关器件的原理与特性

### ○ 功率场效应管开通与关断



a)



b)

**n** 开通延迟时间 $t_{d(on)}$ 和上升时间 $t_r$ ，二者之和为开通时间 $t_{on}$

**n** 关断延迟时间 $t_{d(off)}$ 和下降时间 $t_f$ ，二者之和为关断时间 $t_{off}$

**n** 开关时间在10~100ns之间，工作频率可达100kHz以上，是主要电力电子器件中最高的

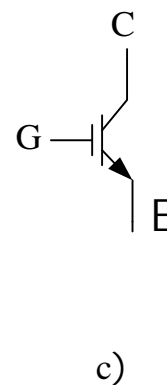
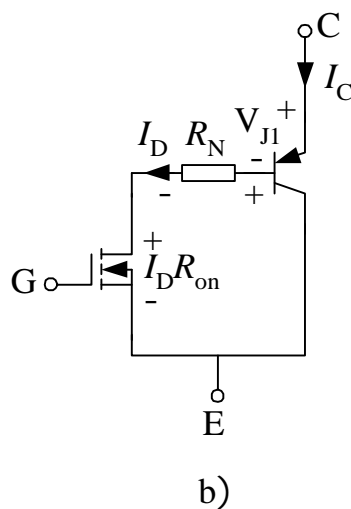
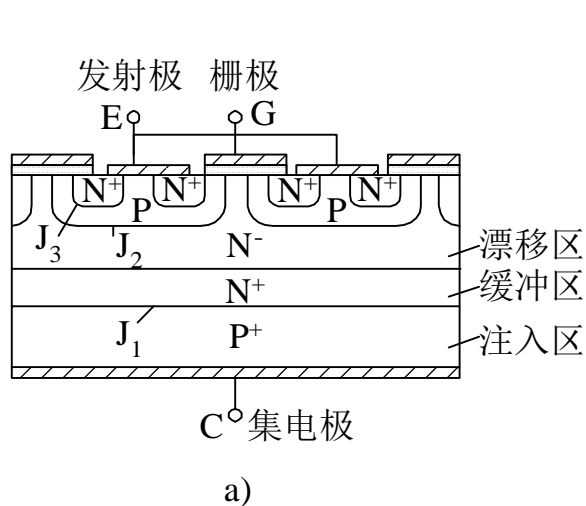
## 4 常用开关器件的原理与特性

### ○ 功率场效应管的主要参数

- n 漏极电压 $U_{DS}$ ——功率MOSFET电压定额。
- n 漏极直流电流 $I_D$ 和漏极脉冲电流幅值 $I_{DM}$ ——功率MOSFET电流定额。
- n 栅源电压 $U_{GS}$ ——栅源之间的绝缘层很薄， $|U_{GS}| > 20V$ 将导致绝缘层击穿。

## 4 常用开关器件的原理与特性

### ○ 绝缘栅双极型晶体管(IGBT，全控器件，电压驱动型)



- a) 结构图
  - b) 等效电路图
  - c) 电气符号
- E 发射极  
G 栅极  
C 集电极

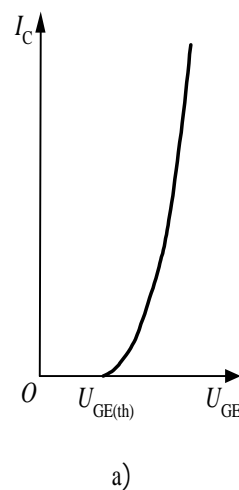
n GTR和MOSFET复合，结合二者的优点，具有更好的特性

n 1986年投入市场后，取代了GTR和一部分MOSFET的市场，中小功率电力电子设备的主导器件

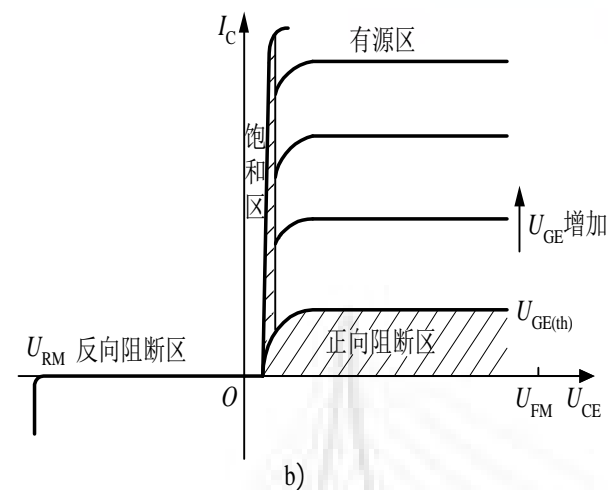
## 4 常用开关器件的原理与特性

### ○ 绝缘栅双极型晶体管的静特性

- n** 正向阻断区：对应大功率晶体管的截止区
- n** 有源区：对应大功率晶体管的放大区
- n** 饱和区：对应大功率晶体管的饱和区



a) 转移特性



b) 输出特性

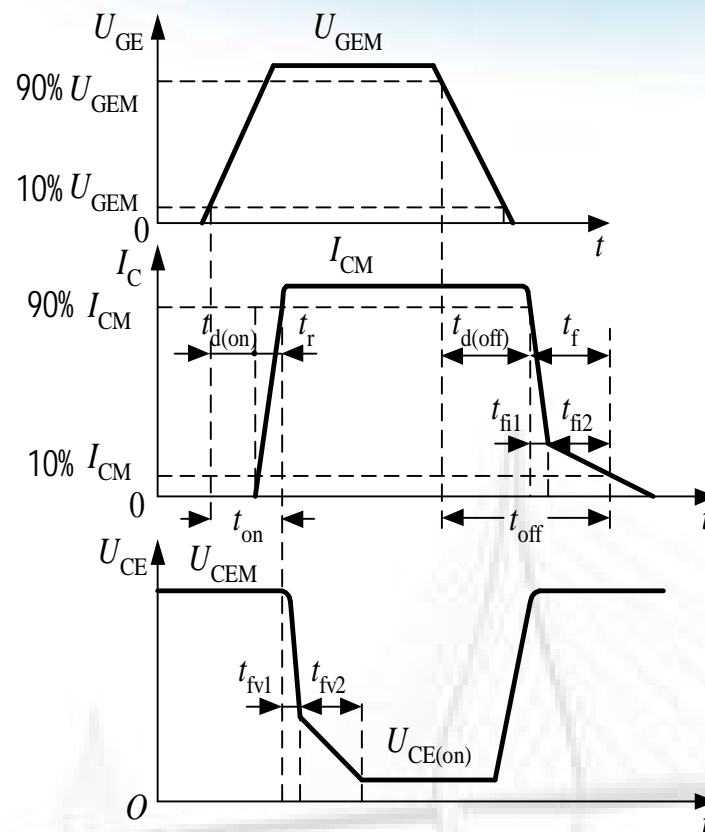


## 4 常用开关器件的原理与特性

### ○ 绝缘栅双极型晶体管的开通与关断

**n** 开通延迟时间 $t_{d(on)}$ 和上升时间 $t_r$ ,  
二者之和为开通时间 $t_{on}$

**n** 关断延迟时间 $t_{d(off)}$ 和下降时间 $t_f$ ,  
二者之和为关断时间 $t_{off}$



## 4 常用开关器件的原理与特性

### ○ 绝缘栅双极晶体管的主要参数

- n 最大集射极间电压 $U_{CES}$ ——由内部PNP晶体管的击穿电压确定。
- n 最大集电极电流——包括额定直流电流 $I_C$ 和1ms脉宽最大电流 $I_{CP}$ 。
- n 最大集电极功耗 $P_{CM}$ ——正常工作温度下允许的最大功耗。



1200V/300A



1700V/1200A , 3300V/1200A

## 4 常用开关器件的原理与特性

