



哈尔滨工业大学

HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY



自动控制实践(I)-6

功率放大线路与电力电子技术概述




哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



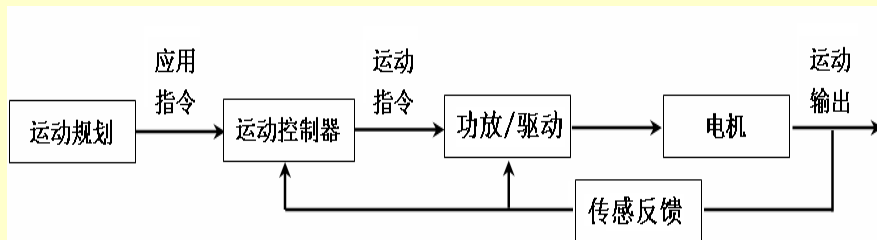
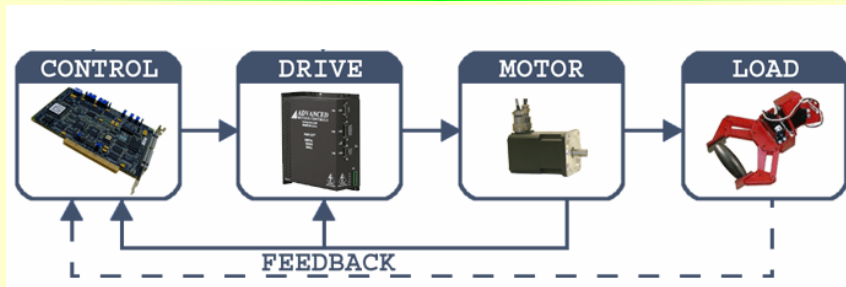
目 录

1. 功率放大环节的作用与特点
2. 电力电子技术概述
3. 电力电子器件简介
4. 线性功放简介
5. 集成线性功率放大芯片

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



1. 功率放大环节的作用与特点

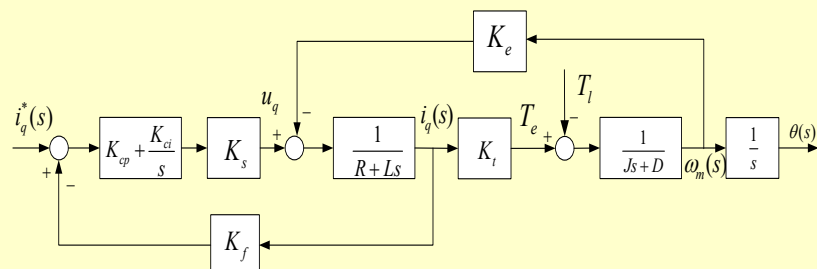
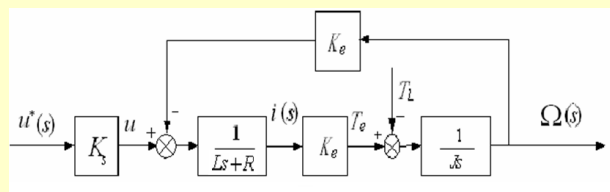


哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



1. 功率放大环节的作用与特点

电机的驱动功放



哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



1. 功率放大环节的作用与特点

对功率放大环节的要求

- 能够输出期望的电压，产生希望的电流（功率）；
- 输出信号的失真小，或称输出线性度好；
- 具备可靠的限压、限流、过热保护等安全保护功能；
- 根据应用特点可实现功率流向控制；
- 驱动运行中具有良好的效率。



1. 功率放大环节的作用与特点

功放根据功率器件的工作状态分为：

线性功放

开关功放

功放根据所驱动控制的电机类型，分为：

直流伺服功率放大器

交流伺服功率放大器

功放根据所采用的功率器件不同，可分为：

MOSFET功放、IGBT功放、SCR功放等



1. 功率放大环节的作用与特点

伺服驱动的功放环节一般包括：

功放主电路

器件驱动接口（前置放大、隔离）

传感检测与控制/保护电路



1. 功率放大环节的作用与特点

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



目 录

1. 功率放大环节的作用与特点

2. 电力电子技术概述

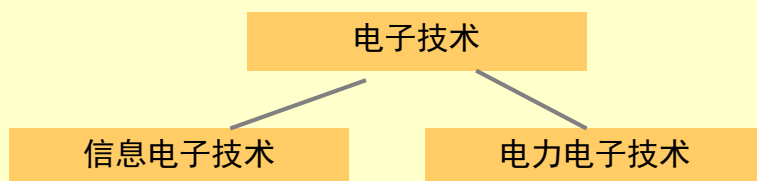
3. 电力电子器件简介

4. 线性功放简介

5. 集成线性功率放大芯片



2. 电力电子技术概述

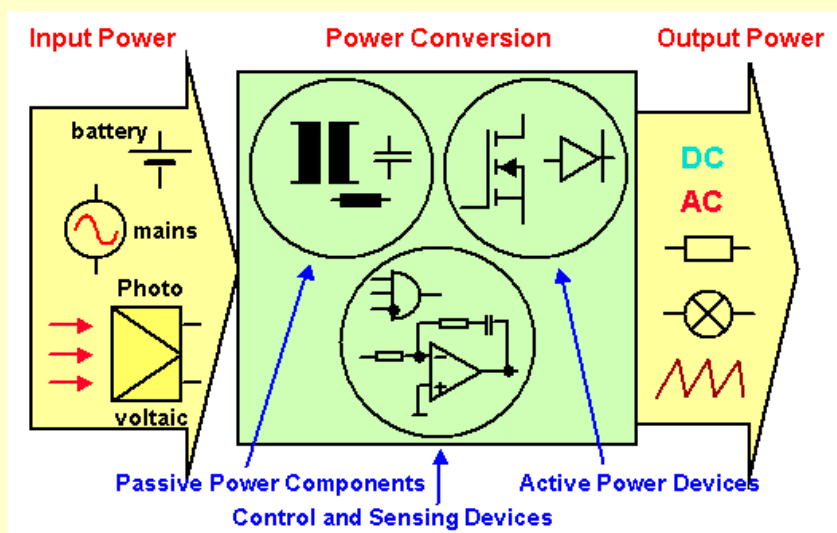


◇ 信息电子技术——模拟电子技术和数字电子技术,主要用于信息处理

◇ 电力电子技术——应用于电力领域的电子技术,使用电力电子器件对电能进行变换和控制的技术。



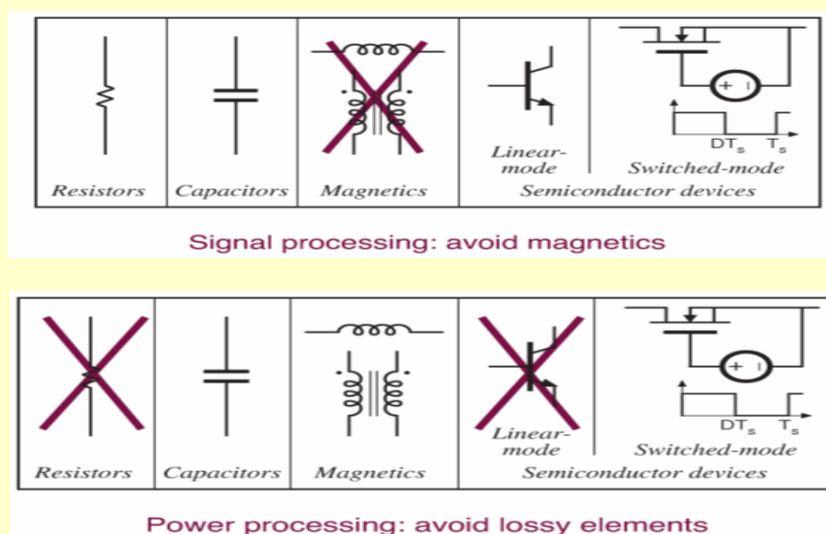
2. 电力电子技术概述



哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



2. 电力电子技术概述



哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



2. 电力电子技术概述

➤ 变流技术（电力电子器件应用技术）

用电力电子器件构成电力变换电路和对其进行控制的技术，及构成电力电子装置和电力电子系统的技术

电力电子技术的核心理论基础是电路理论

➤ 电力电子器件制造技术

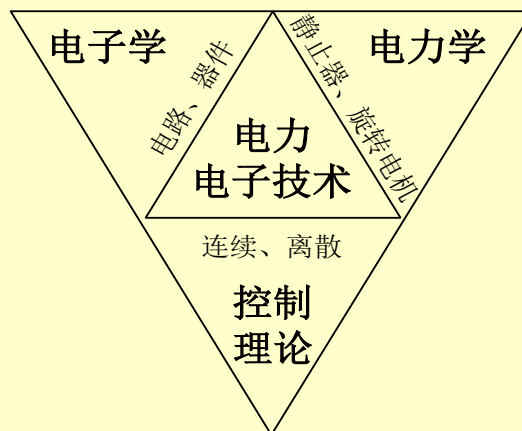
电力电子技术的理论基础是半导体物理



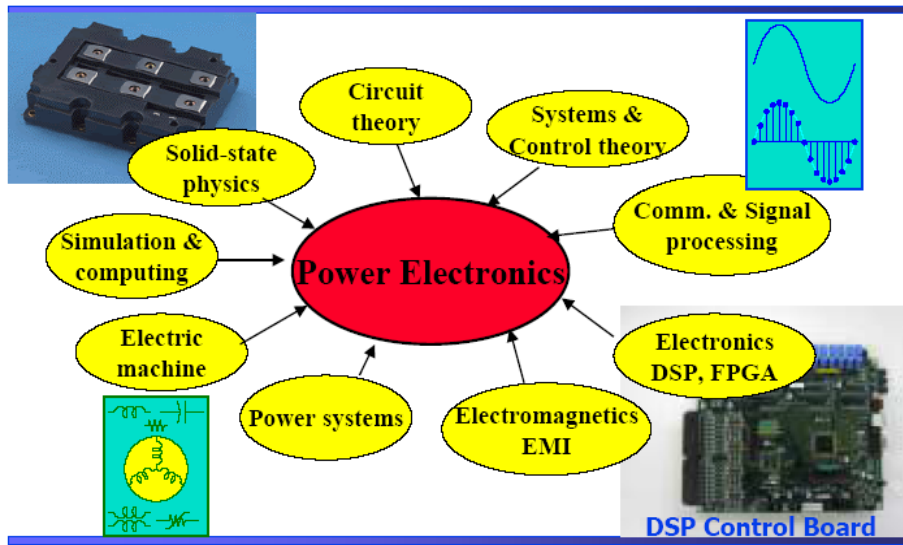
2. 电力电子技术概述

➤ 电力电子学 (Power Electronics) 名称60年代出现

➤ 1974年，美国的W. Newell用右图的倒三角形对电力电子学进行了描述，被全世界普遍接受。



2. 电力电子技术概述



哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



2. 电力电子技术概述

➤ 电力变流技术

AC-DC, AC-AC, DC-DC, DC-AC

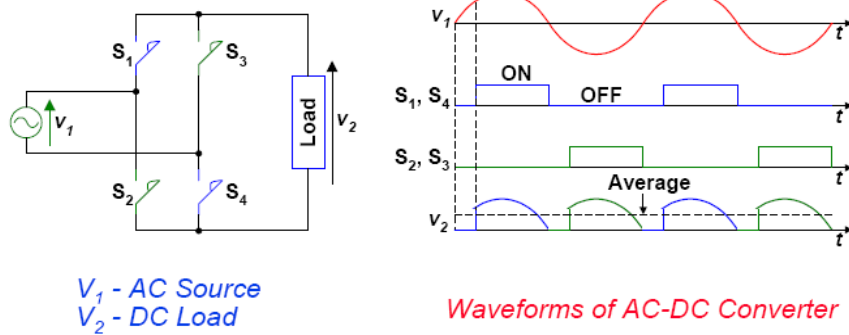
输出 \ 输入	交流	直流
	交流	直流
直流	整流 (Rectification)	直流斩波 (DC Chopping)
交流	交交变换 (AC-AC Conversion)	逆变 (Inversion)

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



2. 电力电子技术概述

Principle of AC-DC Converter (Rectifier)

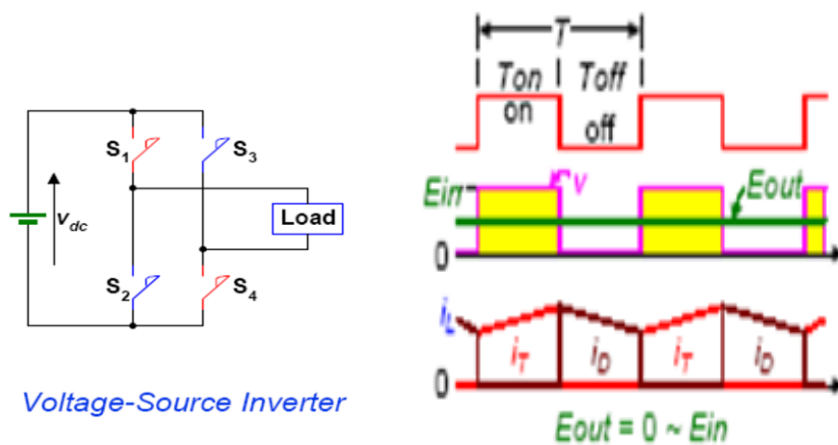


哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



2. 电力电子技术概述

DC/DC Converter



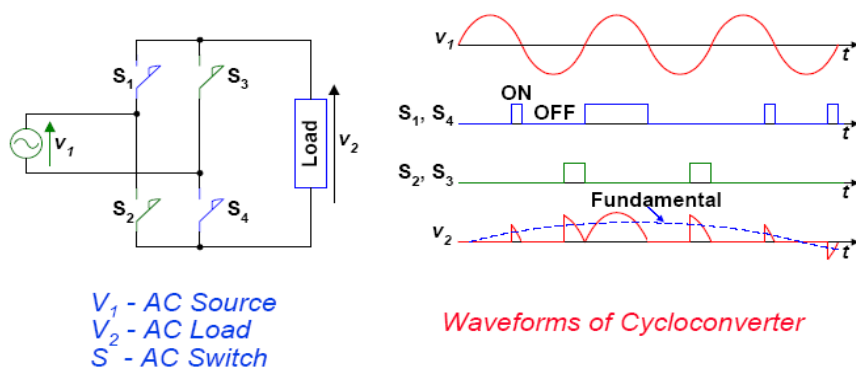
哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



2. 电力电子技术概述

Principle of AC-AC Converter

(Cycloconverter or Frequency Changer)

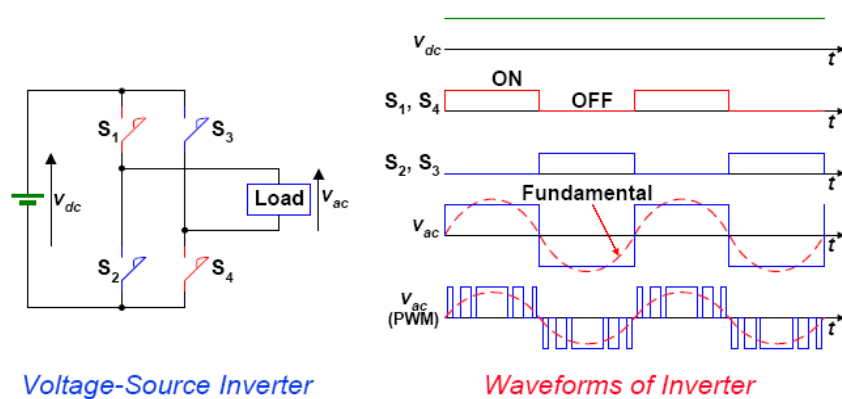


哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



2. 电力电子技术概述

Principle of DC-AC Converter (Inverter)

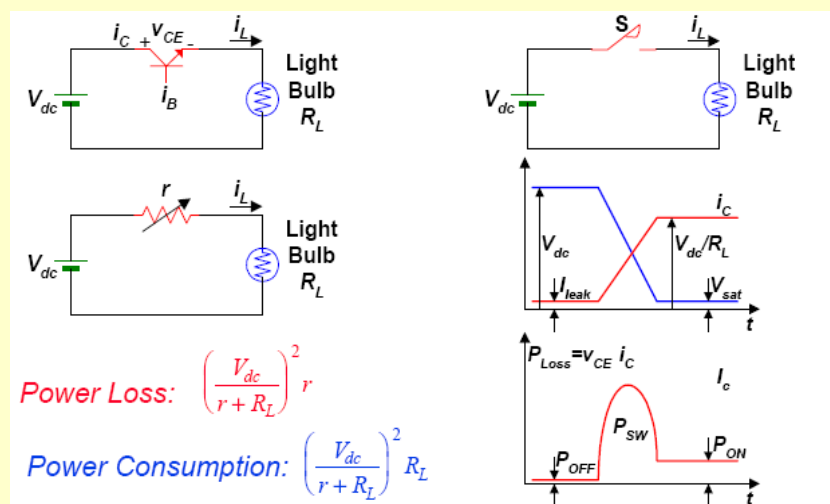


哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



2. 电力电子技术概述

电能变换--为什么使用开关技术？



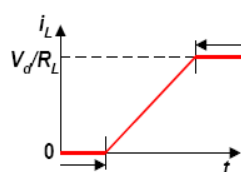
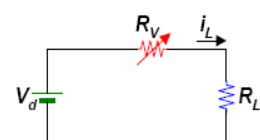
哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



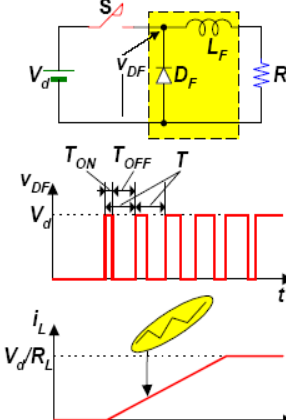
2. 电力电子技术概述

电能变换--为什么使用开关技术？

• 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



2. 电力电子技术概述



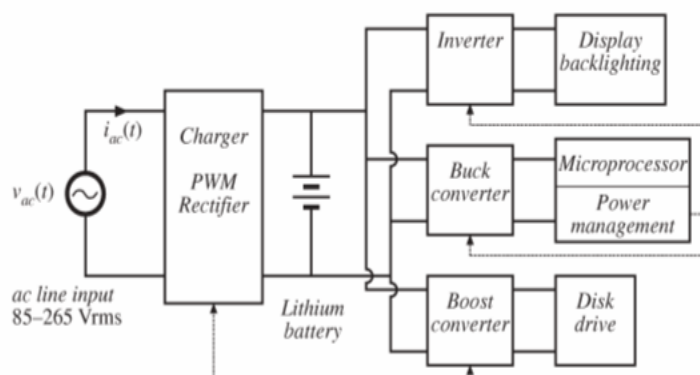
2. 电力电子技术概述

电力电子技术的应用：

- 一般工业：电源、冶炼、电化学.....
- 交通运输：电动车辆，航空航天，电梯.....
- 电力系统：输电，变电，电能质量管理.....
- 家用电器：照明，家电，数码娱乐设备.....
- 其它：工业与办公自动化、新能源应用.....

2. 电力电子技术概述

A laptop computer power supply system



哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



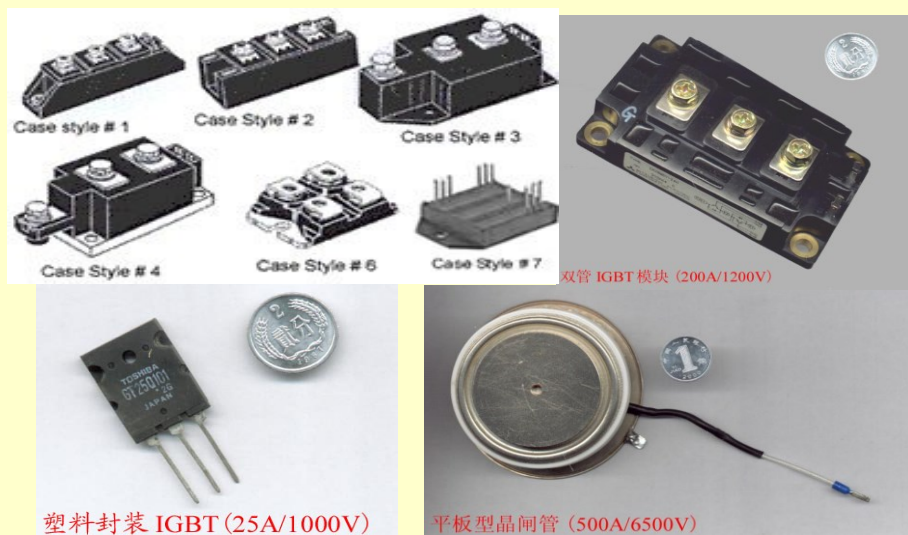
目 录

1. 功率放大环节的作用与特点
2. 电力电子技术概述
3. 电力电子器件简介
4. 线性功放简介
5. 集成线性功率放大芯片

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



3. 电力电子器件



哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



3. 电力电子器件-概述

- 电力电子器件 (power electronic device) ——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
- 主电路 (main power circuit) ——电气设备或电力系统中，直接承担电能的变换或控制任务的电路。
- 电力电子器件发展的目标是：大容量、高频率、易驱动、低损耗、小体积（高芯片利用率）、模块化。

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



3. 电力电子器件-特征

电力电子器件特征

- 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
- 一般都工作在开关状态
- 实用中，往往需要由信息电子电路来控制
- 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



3. 电力电子器件-分类

电力电子器件的分类

a. 按照开关类型划分

- ★ **不可控器件**——不能用控制信号来控制其通断
 - 电力二极管 (Power Diode)
 - 只有两个端子，器件的通和断是由其主电路中承受的电压和电流决定的



3. 电力电子器件-分类

- ★ **半控型器件**——通过控制信号可以控制其导通而不能控制其关断
 - 晶闸管 (Thyristor) 及其大部分派生器件
 - 器件的关断由其在主电路中承受的电压和电流决定
- ★ **全控型器件**——通过控制信号既可控制其导通又可控制其关断，又称自关断器件
 - 绝缘栅双极晶体管IGBT
 - 电力场效应晶体管P-MOSFET
 - 门极可关断晶闸管 GTO

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



3. 电力电子器件-分类

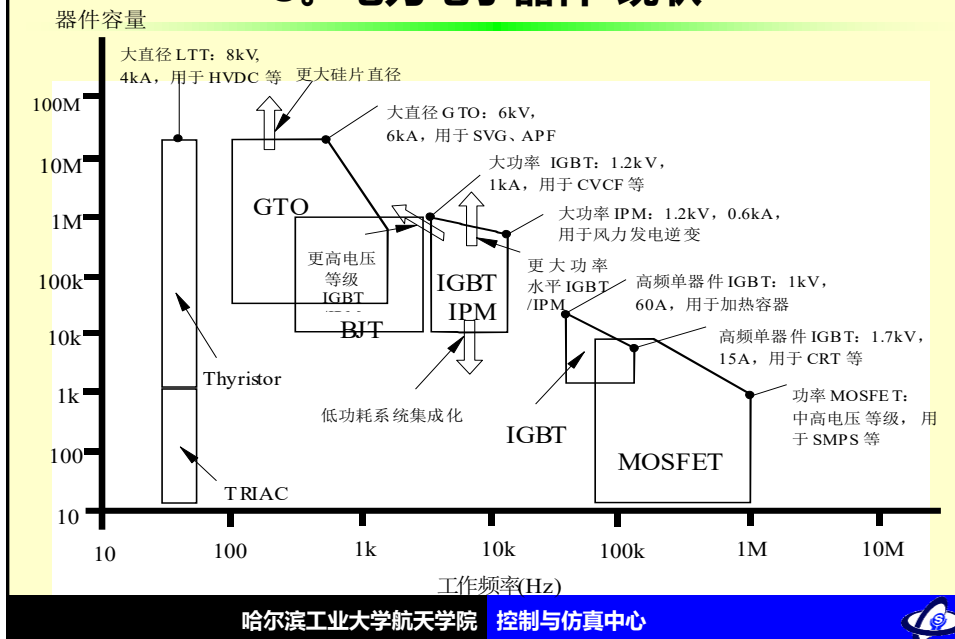
b. 按照驱动电路加在器件控制端和公共端之间信号的性质，分为两类：

- **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

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



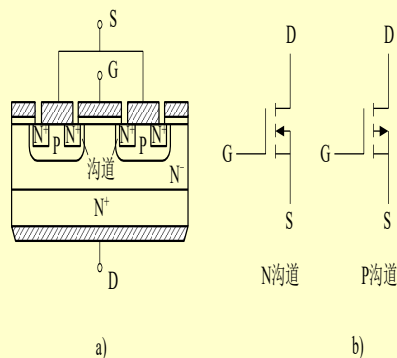
3. 电力电子器件-现状



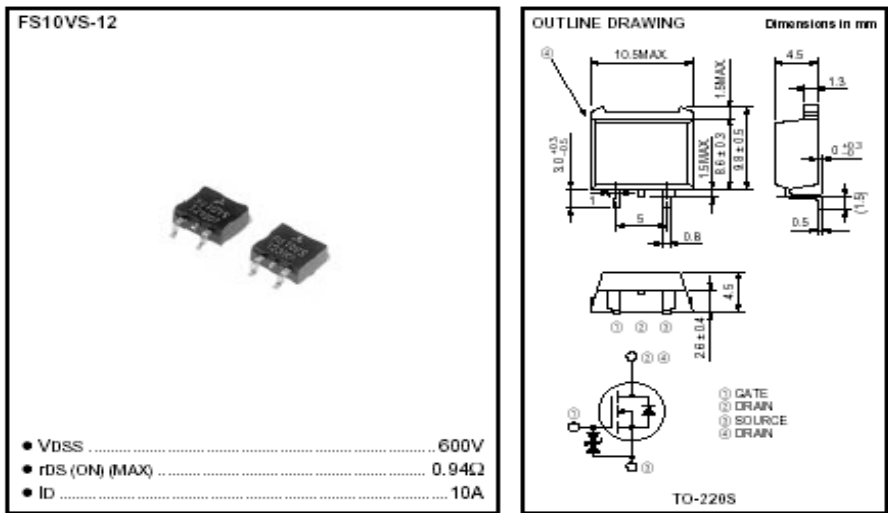
3. 电力电子器件-MOSFET

➤ MOSFET

单极型，电压驱动，
开关速度快，输入阻抗高，
热稳定性好，所需驱动
功率小而且驱动电路简单，
电流容量小，耐压低。
用于小功率场合（十千瓦
以下）。



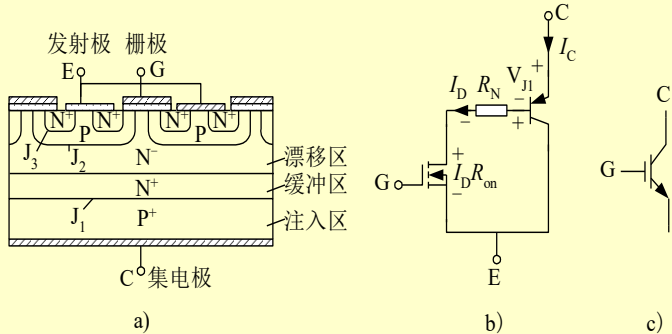
3. 电力电子器件-MOSFET



3. 电力电子器件-IGBT

IGBT

三端器件：栅极G、集电极C和发射极E



a) 内部结构断面示意图 b) 简化等效电路 c) 电气图形符号



3. 电力电子器件-IGBT

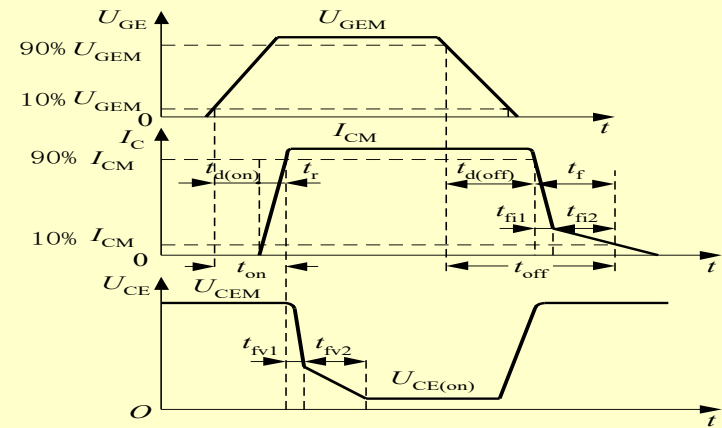


1700V/1200A , 3300V/1200A IGBT 模块



3. 电力电子器件-IGBT

IGBT的动态特性



3. 电力电子器件-IGBT

- IGBT的开关速度低于电力MOSFET
- IGBT的击穿电压、通态压降和关断时间需要折衷

IGBT的主要参数

- 最大集射极间电压 U_{CES} 击穿电压
- 最大集电极电流 1ms脉宽最大电流 I_{CP}
- 最大集电极功耗 P_{CM} 正常工作温度下允许的最大功耗



3. 电力电子器件-功率模块

- 20世纪90年代中后期开始，模块化趋势，将多个器件封装在一个模块中，称为功率模块
- 可缩小装置体积，降低成本，提高可靠性
- 对工作频率高的电路，可大大减小线路电感，从而简化对保护和缓冲电路的要求
- 将器件与逻辑、控制、保护、传感、检测、自诊断等信息电子电路制作在同一芯片上，称为功率集成电路 (Power Integrated Circuit——PIC)



3. 电力电子器件-功率模块

类似功率集成电路还有许多名称:

- 高压集成电路 (High Voltage IC——HVIC) 一般指横向高压器件与逻辑或模拟控制电路的单片集成
- 智能功率集成电路 (Smart Power IC——SPIC) 一般指纵向功率器件与逻辑或模拟控制电路的单片集成
- 智能功率模块 (Intelligent Power Module——IPM) 则专指IGBT及其辅助器件与其保护和驱动电路的单片集成。



3. 电力电子器件-功率模块

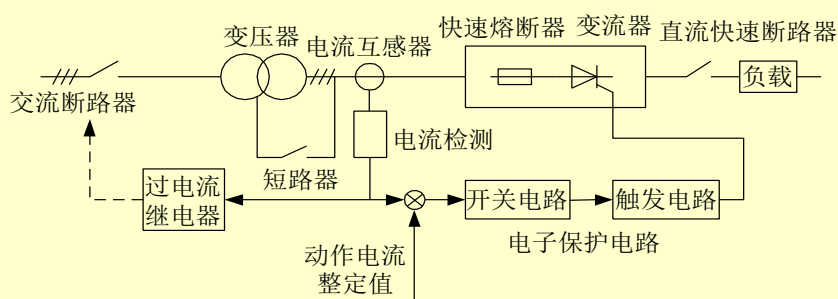
- 功率集成电路的主要技术难点：高低压电路之间的绝缘问题以及温升和散热的处理
- 功率集成电路的开发主要在中小功率应用场合
- 功率集成电路实现了电能和信息的集成，为机电一体化的理想接口



3. 电力电子器件-器件保护

➤ 过电流——过载和短路两种情况

同时采用几种过电流保护措施，提高可靠性和合理性。
电子电路作为第一保护措施，快熔仅作为短路时的部分区段的保护，直流快速断路器整定在电子电路动作之后实现保护，过电流继电器整定在过载时动作。



哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



目 录

1. 功率放大环节的作用与特点
2. 电力电子技术概述
3. 电力电子器件简介
4. 线性功放简介
5. 集成线性功率放大芯片

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



4. 线性功放简介

线性功率放大电路，是通过功率管（三极管或者场效应管）的电压、电流放大作用进行能量转换，将直流电源的能量转换为负载获得的能量。

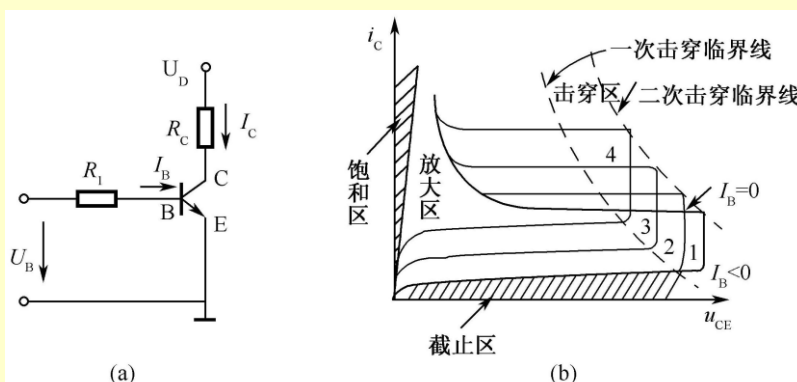
放大电路的组成原则是必须有电源，核心元件是功率管，要将功率管配置在合适的静态工作点，并保证放大电路在放大信号的整个周期，功率管都工作在其特性曲线的线性放大区。



4. 线性功放简介--功率管运行区域

1. 截止区

条件 $U_b \leq U_e + 0.5, U_b < U_c$
特点 $I_b = 0, I_c \approx 0, U_D \approx U_C, i_c$ 小。

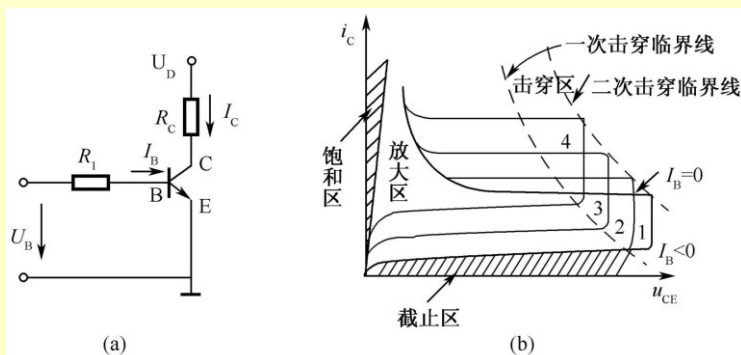


4. 线性功放简介--功率管运行区域

2. 放大区

条件 $U_b > U_e + 0.7$ $U_b < U_c$

特点 $i_c(t) = \beta I_b$ 功耗大, i_c 和 u_{ce} 都比较大。



哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



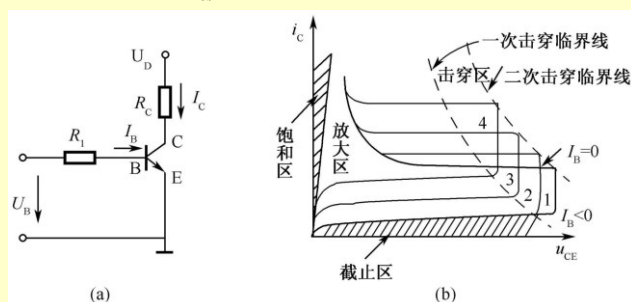
4. 线性功放简介--功率管运行区域

3. 饱和区

条件 $U_b > U_c + 0.7$ $I_{cs} = \frac{U_D}{R_C}$ $I_b \geq \frac{I_{cs}}{\beta}$

特点 $U_{ces} = 0.3$ $\Delta P_s = U_b I_b + I_{cs}^2 R_{eq} \approx I_{cs}^2 R_{eq} = I_{cs} U_{ces}$

功耗小, 饱和深度: $k_1 = \frac{\beta I_b}{I_{cs}}$



哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



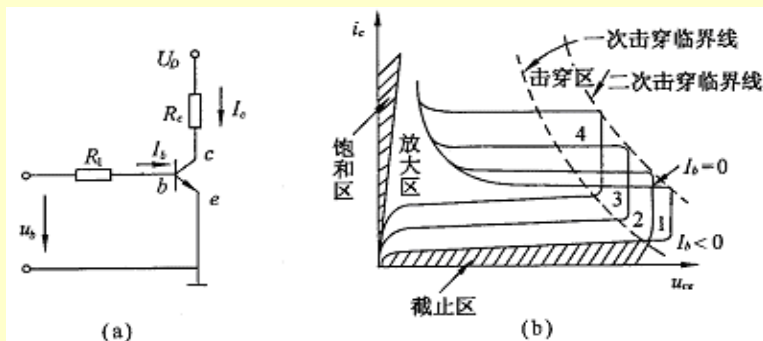
4. 线性功放简介--功率管运行区域

4. 击穿区

一次击穿: i_c 急剧增加, 电压 u_{ce} 基本不变, 晶体管可不损坏。

二次击穿: 电压迅速下降, 电流急剧增加, 晶体管将损坏。

电流大时容易发生二次击穿。



哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



4. 线性功放简介--分类与结构

1、以晶体管的静态工作点位置分类

线性功放 { 甲类功放
乙类功放
甲乙类功放
丙类功放

2、以功率放大器输出端的特点分类

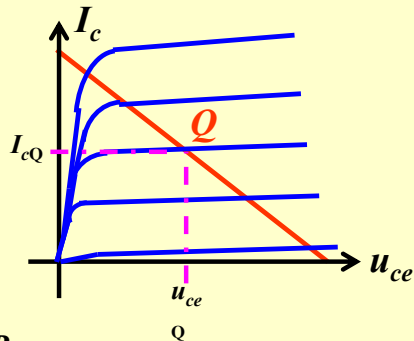
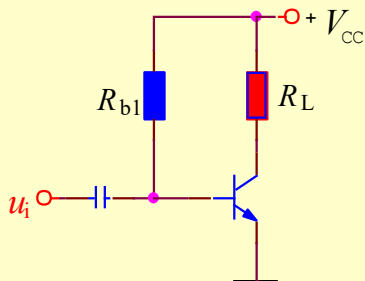
功放 { 变压器耦合功放 { 单管甲类功放
乙类推挽功放
无变压器耦合功放 { OTL功放
OCL功放
BTL功放

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



4. 线性功放简介--分类与结构

一. 甲类功率放大器



此电路的最高效率： $\eta = \frac{P_{om}}{P_E} \approx 0.25$

甲类功率放大器存在的缺点：

- 1) 输出功率小；
- 2) 效率低

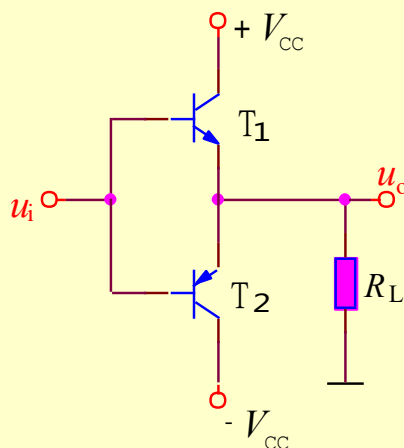


4. 线性功放简介--分类与结构

二、乙类互补对称功率放大电路

互补对称：

电路中采用两个晶体管：NPN、PNP各一支；
两管特性一致。组成互补对称式射极输出器。



4. 线性功放简介--分类与结构

静态时:

$u_i = 0V \rightarrow i_{c1}, i_{c2} \text{ 均} = 0$ (乙类工作状态) $\rightarrow u_o = 0V$

动态时:

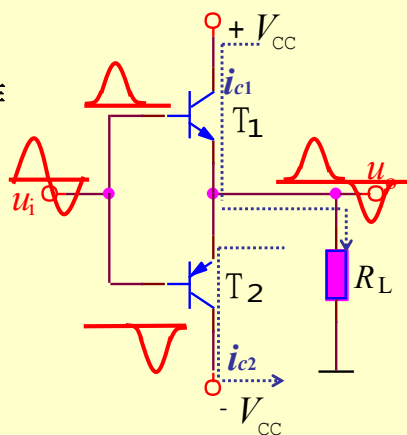
$u_i > 0V \rightarrow T_1 \text{ 导通, } T_2 \text{ 截止}$

$\rightarrow i_L = i_{c1}$;

$u_i < 0V \rightarrow T_1 \text{ 截止, } T_2 \text{ 导通}$

$\rightarrow i_L = i_{c2}$

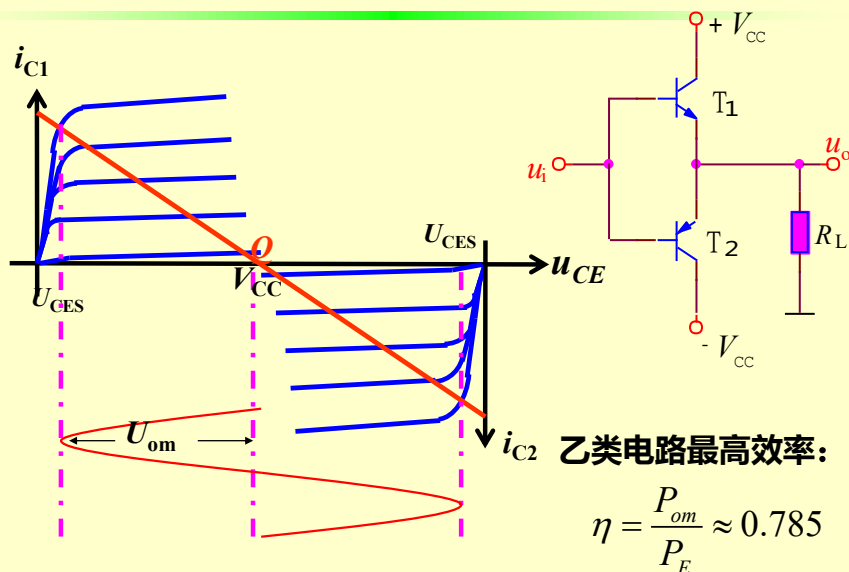
T_1, T_2 两个管子交替工作, 在负载上得到完整的正弦波。



哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



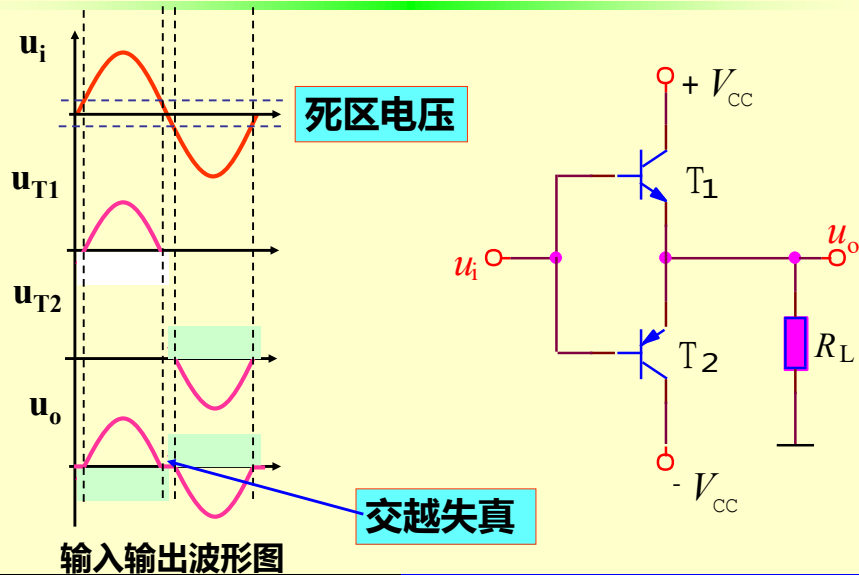
4. 线性功放简介--分类与结构



哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



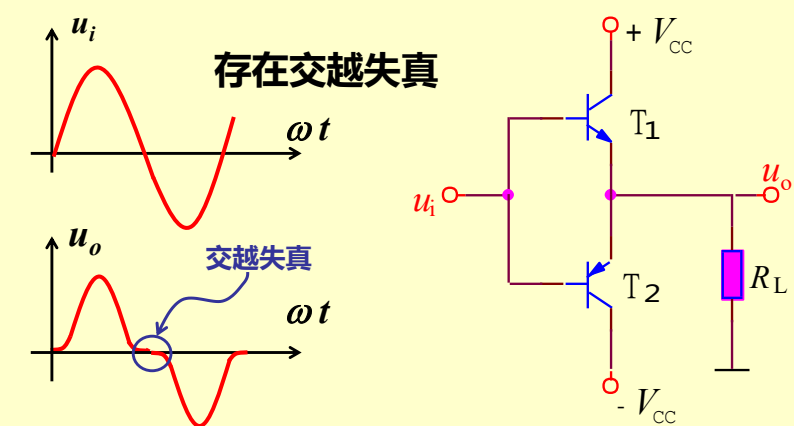
4. 线性功放简介--分类与结构



哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



4. 线性功放简介--分类与结构



改进型功率放大电路

消除交越失真——甲乙类互补对称功率放大电路

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



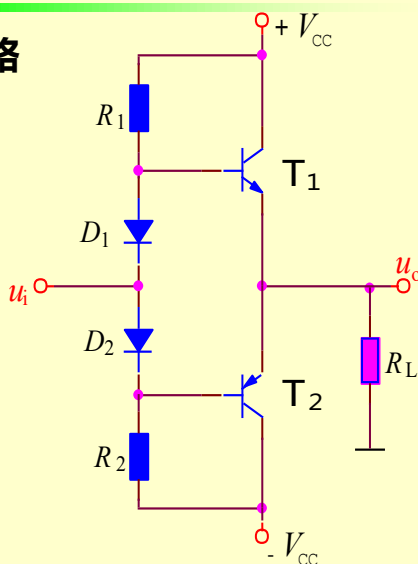
4. 线性功放简介--分类与结构

三、甲乙类双电源互补对称电路

电路中增加 R_1 、 D_1 、 D_2 、 R_2 支路

静态时： T_1 、 T_2 两管发射结电压分别为二极管 D_1 、 D_2 的正向导通电压降，致使两管均处于微弱导通状态——**甲乙类工作状态**

动态时： 设 u_i 加入正弦信号。正半周 T_2 截止， T_1 基极电位进一步提高，进入良好的导通状态；负半周 T_1 截止， T_2 基极电位进一步降低，进入良好的导通状态。



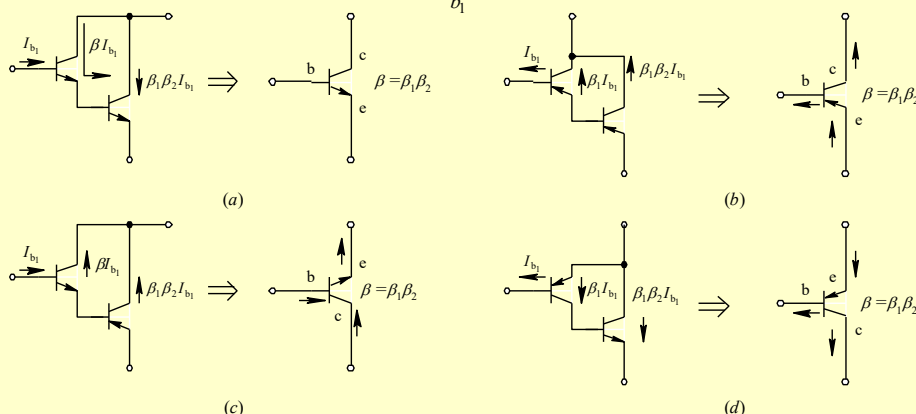
哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



4. 线性功放简介--分类与结构

四、用复合管组成互补对称电路

$$\beta = \frac{I_{c2}}{I_{b1}} \approx \beta_1 \beta_2$$



哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



4. 线性功放简介--分类与结构

完整的功率放大线路一般包括前置放大、输出级和检测、反馈、保护电路。现在功率放大线路的集成度进一步提高，以上三个主要组成部分大多集成为一个芯片，方便了控制系统的设计与实现。

输出级主要有两种：推挽输出与桥式输出。如果需要双向的驱动电流，对于推挽输出，需要双电源供电；而桥式电路在单电源下，可实现双向驱动电流。

电机驱动应用中，主要采用推挽/OCL功放，和桥式BTL功放形式。



4. 线性功放简介--线性功放特点

自动控制中，对直流和交流电机，包括特种电机，如：旋转变压器、感应同步器等，有时采用线性功率放大器进行驱动。

线性放大器频带宽、线性度好、电磁兼容性好；电流传感与反馈，以及限流实现简单可靠，适合于一些小功率应用场合的使用。

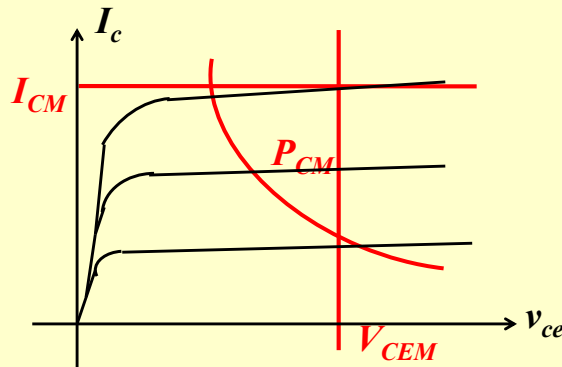
线性功率放大器一般采用乙类，或甲乙类工作状态；工作损耗大，效率低，限制了其只能用于小功率伺服控制应用。



4. 线性功放简介--应用注意事项

确保功率放大电路的安全工作

功放电路中电流、电压要求都比较大，必须注意电路参数不能超过晶体管的极限值： I_{CM} 、 V_{CEM} 、 P_{CM} 。



哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



4. 线性功放简介--应用注意事项

1) 输出级电路形式的选择

对推挽和桥式电路

- a) 电源极性要求和功率管耐压要求的差别；
- b) 电流采样的不同；
- c) 采用的晶体管数量和前置放大的需求；

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



4. 线性功放简介--应用注意事项

2) 对负载电感产生感生电势的防护

对感性负载必须加以钳位二极管或续流二极管，接至驱动电源或短路释放。

3) 输出大电流和减小死区影响

输出大电流：采用复合管推挽和功率管并联的形式。

减小死区影响：采用电阻、二极管、三极管设置偏压补偿死区；采用电压串联负反馈减小死区影响。



4. 线性功放简介--应用注意事项

4) 限流保护的实现

采用电流负反馈实现限流，如非线性电流负反馈，分流限流等等。在集成功放电路中，多采用分流限流的方法。许多集成功放在输出短路条件下，可以保证芯片的安全。

5) 功放输出震荡的问题

采用增加外部RC或C元件的方法，降低功放线路的回路带宽以抑制震荡。



4. 线性功放简介--应用注意事项

6) 防止直通损坏

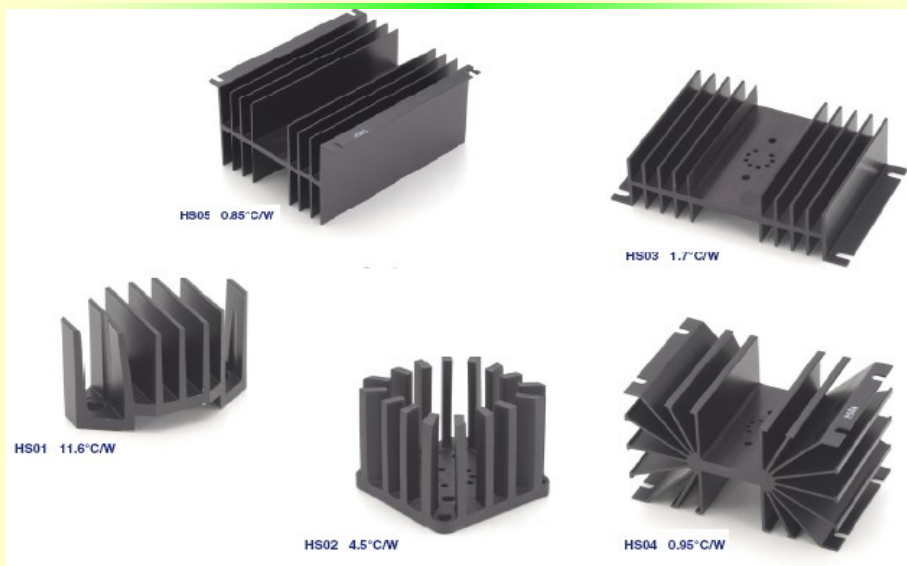
采用二极管钳位的方法防止上下管的直通现象。

7) 防止过热

集成功放或分立的功率晶体管，要根据输出电压和电流所决定的功率情况，一般加以散热片，防止过热导致的线路损毁。对集成功放芯片，注意有的芯片的金属封装直接于金属散热片是需要采取绝缘防护。



4. 线性功放简介--应用注意事项



5. 线性功放简介--应用注意事项

电流源和电压源功率放大器

除了专用的电流源功率放大芯片，对常见的功率放大器，采用电压负反馈控制即可构成电压源型功放，而采用电流负反馈控制即可构成电流源型功放。

调速伺服等应用，采用电压源功放更适合，转矩伺服应用，采用电流源型功放更适合。对液压、气动马达的电磁阀驱动控制，多采用电流源型的功放线路。



目 录

1. 功率放大环节的作用与特点
2. 电力电子技术概述
3. 电力电子器件简介
4. 线性功放简介
- 5. 集成线性功率放大芯片**



5. 集成线性功率放大芯片

MIL-PRF-38534 CERTIFIED



MSK
M.S.KENNEDY CORP.

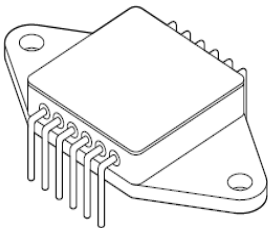
**POWER
OPERATIONAL AMPLIFIER 115**

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:

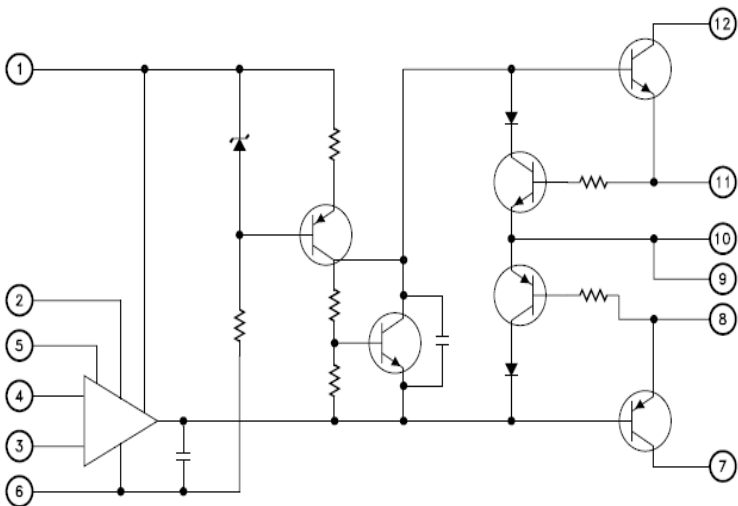
The MSK 115 is a High Power Operational Amplifier. Due to the extremely low thermal resistance from the transistor junctions to the case, the MSK 115 can dissipate extreme amounts of power at a case temperature of 125°C.

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



5. 集成线性功率放大芯片

EQUIVALENT SCHEMATIC



哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



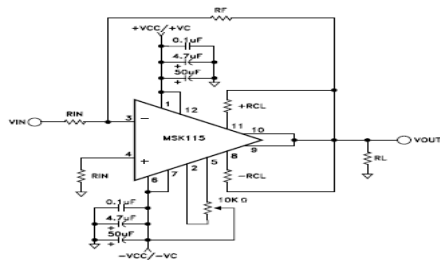
5. 集成线性功率放大芯片

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS^⑧

$\pm V_{CC}$	Supply Voltage	$\pm 50V$	T_{ST}	Storage Temperature Range	$-65^{\circ}C$ to $+150^{\circ}C$
I_{OUT}	Output Current	15A	T_{LB}	Lead Temperature Range	$300^{\circ}C$ (10 Seconds)
V_{IN}	Differential Input Voltage	$\pm 37V$	P_D	Power Dissipation	See SOA Curve
T_C	Case Operating Temperature Range		T_J	Junction Temperature	$175^{\circ}C$
	(MSK 115B/E)	$-55^{\circ}C$ to $+125^{\circ}C$			
	(MSK 115)	$-40^{\circ}C$ to $+85^{\circ}C$			

TYPICAL APPLICATIONS

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



5. 集成线性功率放大芯片

Product Innovation From

PA85 • PA85A

High Voltage Power Operational Amplifiers



FEATURES

- HIGH VOLTAGE — 450V ($\pm 225V$)
- HIGH SLEW RATE — 1000V/ μs
- HIGH OUTPUT CURRENT — 200mA

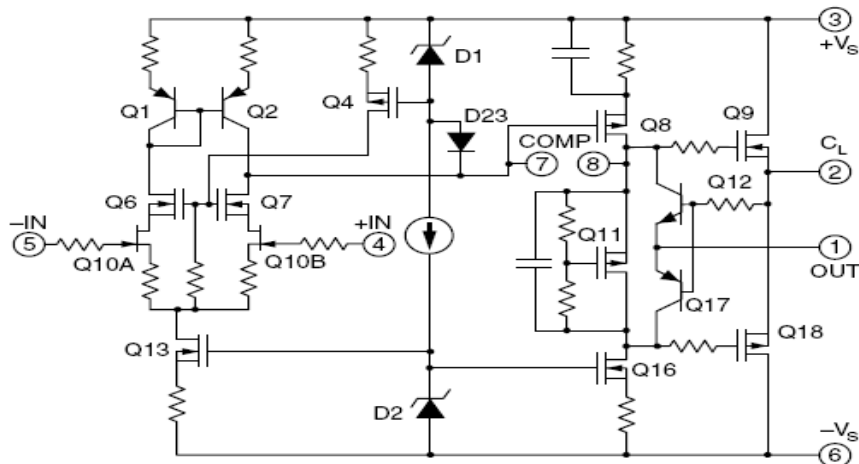
APPLICATIONS

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



5. 集成线性功率放大芯片

EQUIVALENT SCHEMATIC



哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



5. 集成线性功率放大芯片

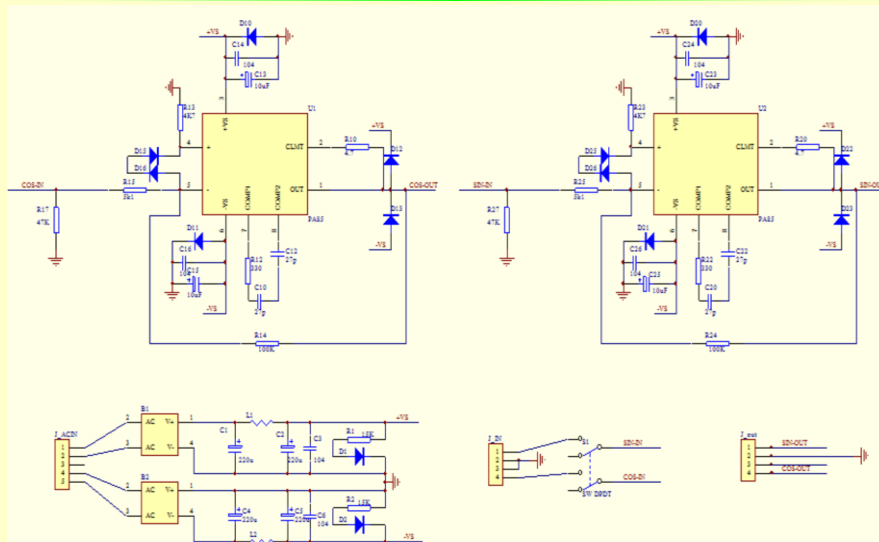
ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

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 $+125^\circ\text{C}$

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



5. 集成线性功率放大芯片

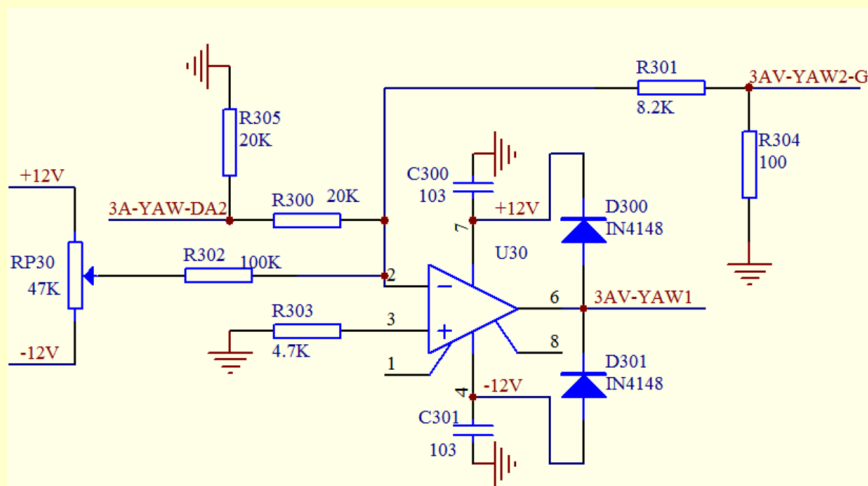


哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



5. 集成线性功率放大芯片

液压马达伺服阀的电流驱动



哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



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、网页等。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。

