

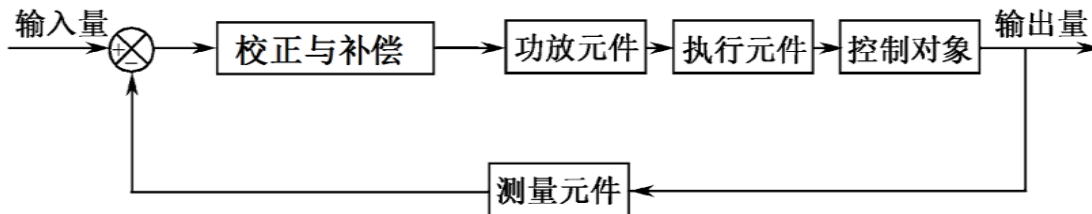
自动控制实践 A 笔记 (2): 电力电子技术与 PWM

2023.12.24 V1.0

内容琐碎，很难归纳。如有遗漏，欢迎补充！

电力电子技术与功放概述：（书第 14 章）（共 3 个问题）：

回顾与补充（绪论部分）：控制系统的硬件组成及各部分的作用



1. 执行元件：驱动控制对象，改变被控量（输出量）。
2. 测量元件：将被测量检测出来并转换成另一种容易处理和使用的量（例如电压）。
测量元件一般称为传感器，过程控制中又称为变送器。
3. 功放元件：将控制驱动信号幅值放大，输出较大功率以驱动执行元件动作。
4. 校正元件（补偿元件）：实现高精度输出量的硬件和算法。硬件一般是精密电位器；算法是对控制信号的运算，对功放元件输出驱动指令，确保系统稳定并达到规定的性能指标（超调量与响应时间等）

1. 电力电子技术概述

需求：功率放大模块

要求：能够输出期望的电压、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（能承受并吸收电机回馈的能量）；驱动运行中具有良好的效率（效率高）。

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。电力电子技术包括三个学科：电子学，即为电子信息学科，电路，模拟电路，数字电路等；电力学，即为电机学，功率放大理论；控制理论，即为各种控制算法。

可按照输入输出分为四类：

AC-DC：整流；AC-AC：交交变换；DC-DC：斩波；DC-AC：逆变

例子：一台手提电脑的电源供电系统，使用到的功放模块情况。

从电源 220V 交流电信号输入，经过整流桥模块后，输出比如 20V 的直流信号。

经过 DC-AC 的逆变，变成 120-200V 的交流信号，提供给显示器；

DC-DC buck 降压斩波，变成 3.3/5V 的直流电压，提供给 MCU，或其它芯片供电；

DC-DC boost 升压电路，变成 10V 左右的直流电压，提供给磁盘驱动器的读写数据。

2. 电力电子器件

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。

按照开关类型划分：

- ① 不可控器件——不能用控制信号来控制其通断，如电力二极管
- ② 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，器件的关断由其在主电路中承受的电压和电流决定。如晶闸管（Thyristor）

③ 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。常见的有以下几类：

(1) 大功率晶体管 GTR：属于**电流驱动型器件**。特性与模电中学的三极管类似。

(2) 电力场效应晶体管 P-MOSFET

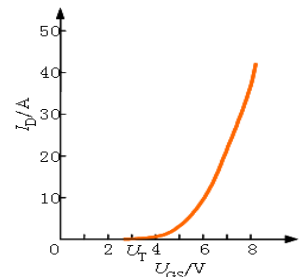
单极型(0V 电压以上驱动)，**电压驱动**，开关速度快(20ns)，热稳定性好，所需驱动功率小而且驱动电路简单，电容量小，耐压低。用于小功率场合（10kW 以下）。

常将续流二极管和 MOS 做成一个模块。

特性：

一 **转移特性**：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。

U_t 是开启电压。 I_D 较大时， I_D 与 U_{GS} 的关系近似线性。

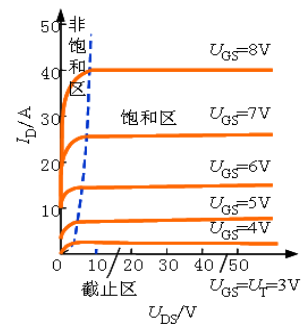


a)

二 **输出特性**：是 MOSFET 的漏极伏安特性。

截止区、饱和区、非饱和区三个区域，**饱和**是指漏源电压增加时漏极电流不再增加（对应于三极管的放大区），**非饱和**是指漏源电压增加时漏极电流相应增加（对应于三极管的**饱和区**[易错!]）。

工作在开关状态，即在**截止区**和**非饱和区**之间来回转换。



三 **动态特性**：

开通过程：开通延迟时间 $t_{d(on)}$ 电流上升时间 t_r 开通时间 $t_{on} = t_{d(on)} + t_r$

关断过程：关断延迟时间 $t_{d(off)}$ 电流下降时间 t_f 关断时间 $t_{off} = t_{d(off)} + t_f$

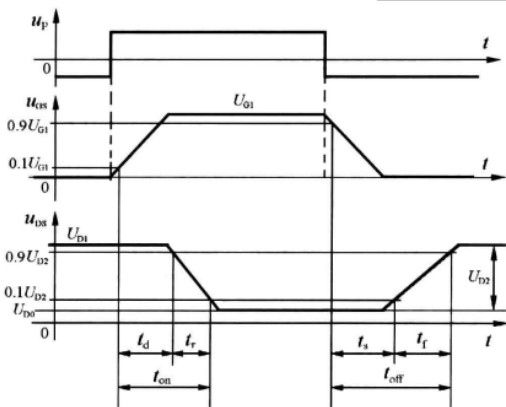


图 15-12 MOSFET 的开关特性

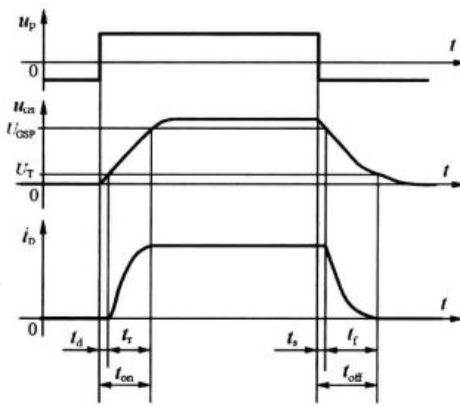
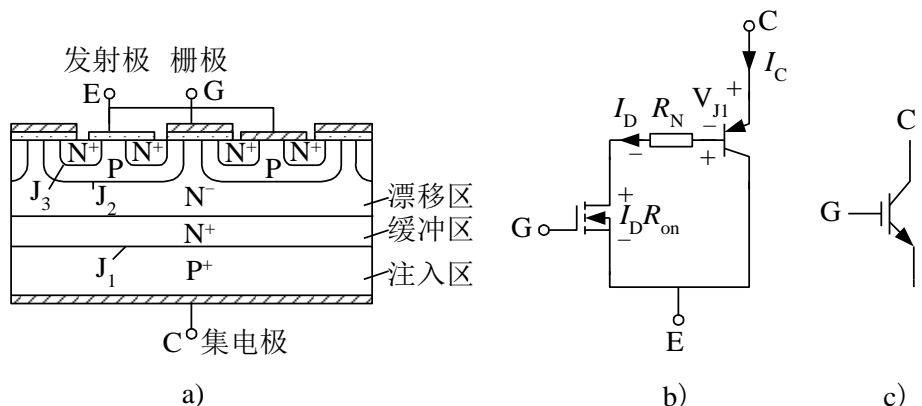


图 15-13 MOSFET 的开关特性

(3) 绝缘栅双极晶体管 IGBT

IGBT 其实是由一个 MOSFET 管，一个三极管组成。因此，IGBT 也属于**电压驱动型器件**，特性与 MOSFET 基本类似，包括开关特性，转移特性，伏安特性等。由栅极，集电极，发射极组成。

开关速度低于电力 MOSFET，但功率要高于 MOSFET。



(4) 门极可关断晶闸管 GTO (略)

按频率，从低到高分：SCR, GTO, GTR, IGBT, MOSFET;
 按功率，从低到高分：MOSFET, GTR, IGBT, GTO, SCR。

器件保护：过电压与过电流保护。缓冲电路 (Snubber, 书 15.6.4)：抑制过电压 (操作过电压、雷击过电压、关断过电压)、 du/dt ；过电流、 di/dt 。减小器件的开关损耗。主要分为：①关断缓冲电路 (du/dt 抑制电路) ——吸收器件的关断过电压和换相过电压，抑制 du/dt ，减小关断损耗；②开通缓冲电路 (di/dt 抑制电路) ——抑制器件开通时的电流过冲和 di/dt ，减小器件的开通损耗。将关断缓冲电路和开通缓冲电路结合在一起——复合缓冲电路
 其他分类法：耗能式缓冲电路和馈能式缓冲电路 (无损吸收电路)

3. 功率放大环节

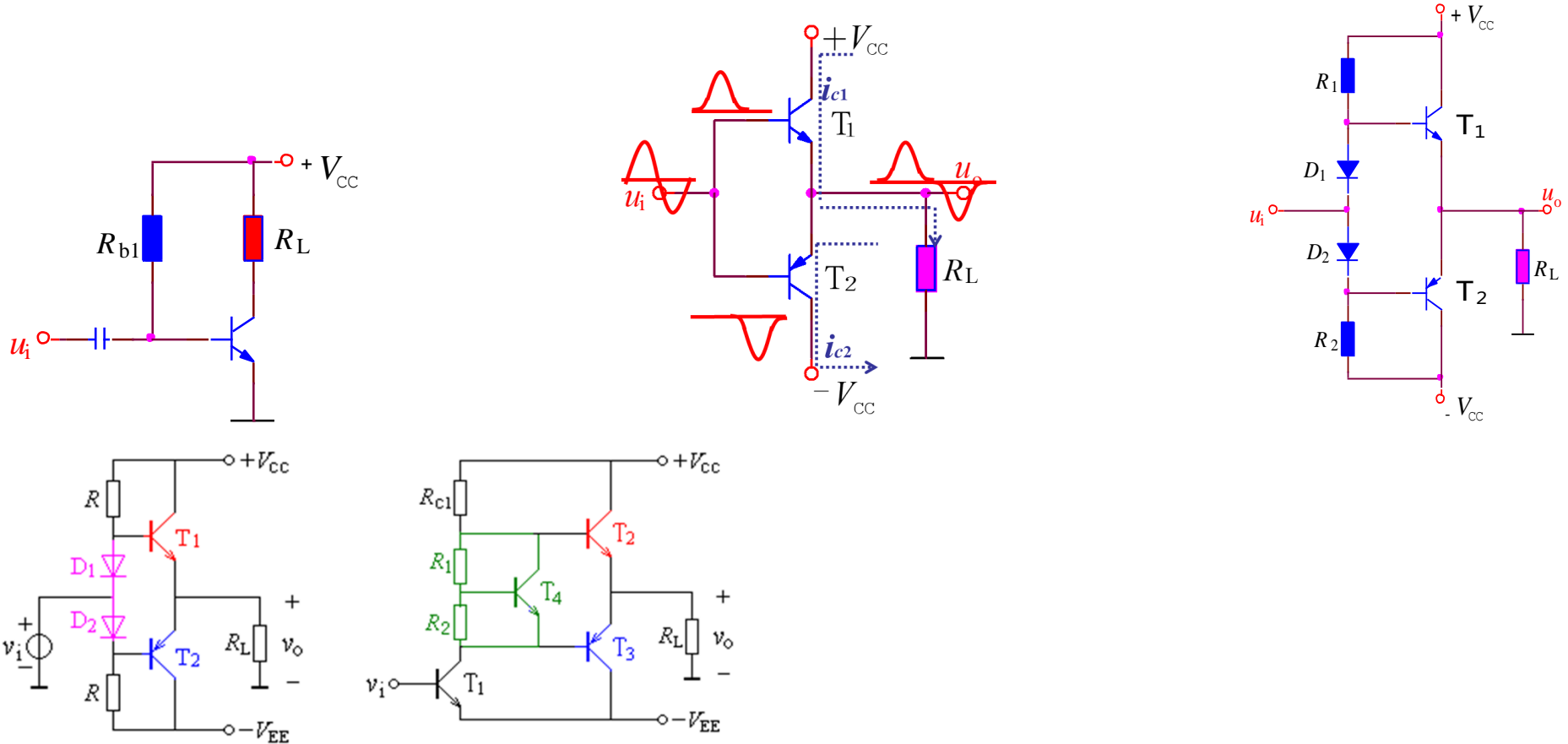
完整的功放环节一般包括：功放主电路；前置放大、隔离电路；传感检测与控制/保护电路。
 根据功率管运行区域 (截止区、饱和区/非饱和区、放大区/饱和区)，可分为线性功放 (功率管工作在放大区 [BJT、GTR] 或饱和区 [MOSFET、IGBT]) 和开关功放。下面主要是讲线性功放，也会涉及功放的一般问题。
 重要对比表格：

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

线性功放常见分类与结构：

按照静态工作点位置分类：甲类功放 (A 类)、乙类功放 (B 类，全称乙类互补对称功率放大电路)、甲乙类功放 (AB) 等。
 按照输出端特点分类：变压器耦合功放 (又分为单管甲类功放和乙类推挽功放)；无变压器耦合功放 (又分为 OTL、OCL、BTL 功放)

下面从左到右分别是：甲类功放：效率低；乙类功放：效率提高，双电源供电，存在交越失真；甲乙类功放：功率管静态时处于微导通状态，消除了交越失真（也有通过负反馈形式消除）。



利用二极管提供偏置电压

利用三极管恒压源提供偏置

消除交越失真的措施

从上到下，从左至右分别为：单电源/双电源供电的 BTL；OTL；OCL；推挽和桥式电路的常见形式。OCL 电路需要双电源供电，OTL 电路只需要单电源供电但需要大容量输出耦合电容。

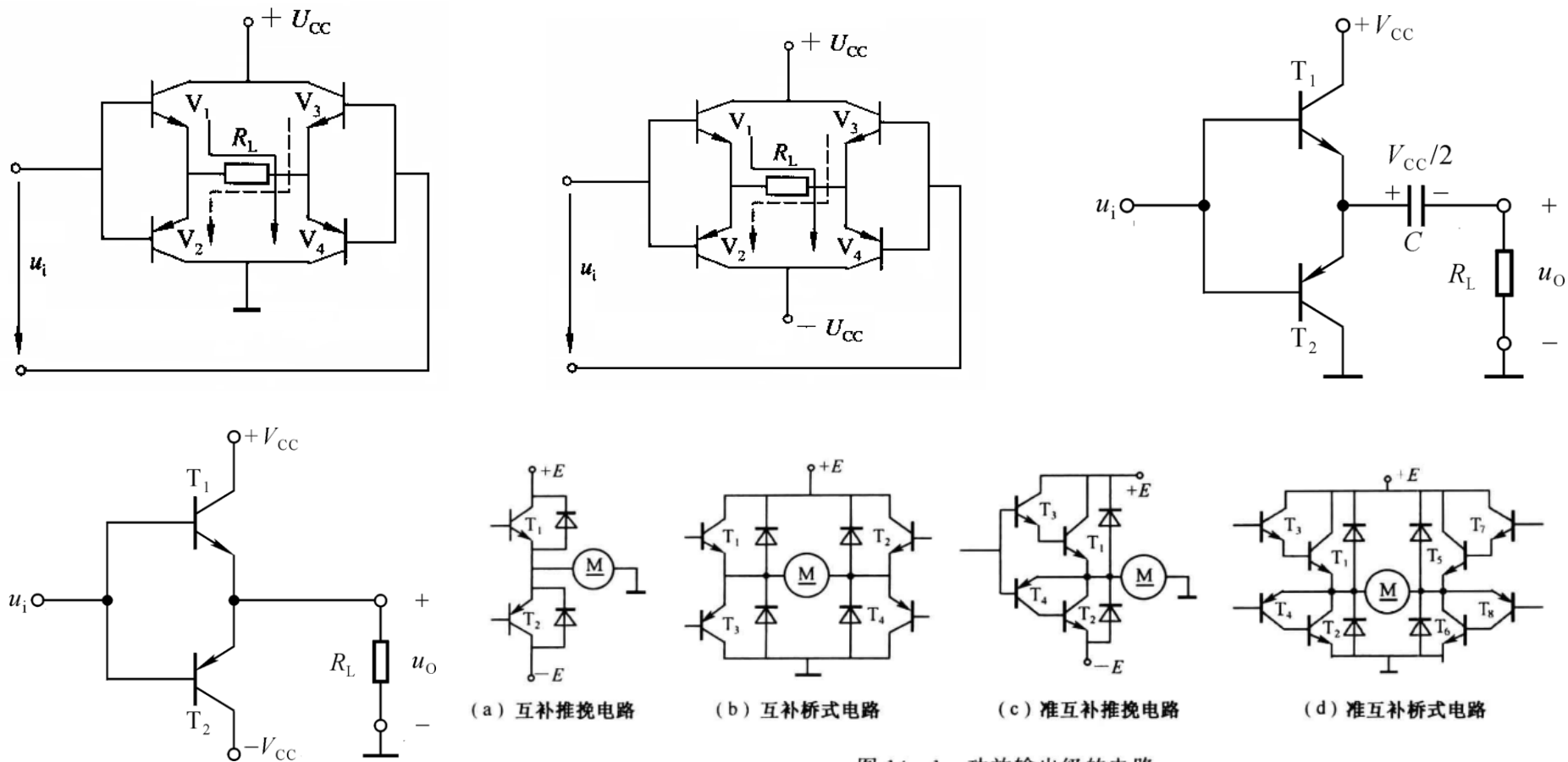


图 14-1 功放输出级的电路

桥式电路（b、d 图的互补/准互补桥式电路）和单边电路（a、c 图的互补/准互补推挽电路）的区别：

- 单边电路所用的功率管数目是桥式的一半；
- 单边电路中截止管承受的电压是桥式电路的 2 倍，所以单边电路对晶体管耐压要求高；
- 为了实现电机正反转运行，单边电路必须采用正负双电源供电，而桥式电路可以采用单电源。
- 单边电路容易得到电流负反馈端子，只要在电动机与地间串上反馈电阻即可；桥式电路的负载不接地，则不容易获取电流信号，可以从两侧分别接出取样电阻并用双极性运放来放大。

其他问题：（均见书 14.3.4 节）

1) 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。

2) 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。

3) 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。

4) 功放输出振荡的问题

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振荡。

5) 防止直通损坏（同侧短路）

由于晶体管的电容效应，其集电极电流滞后于基极信号，且一般来说从饱和到截止的关闭时间比从截止到饱和的开通时间要大，那么就可能出现原来导通的管还未关断时原来截止的管就已导通的现象，导致同侧短路。解决方法是**进行死区时间补偿（确保开通信号延迟于关断信号）**，采用二极管钳位的方法防止上下管的直通现象（上管导通时下管可靠截止）。

6) 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加装金属散热片时，需要采取绝缘防护。