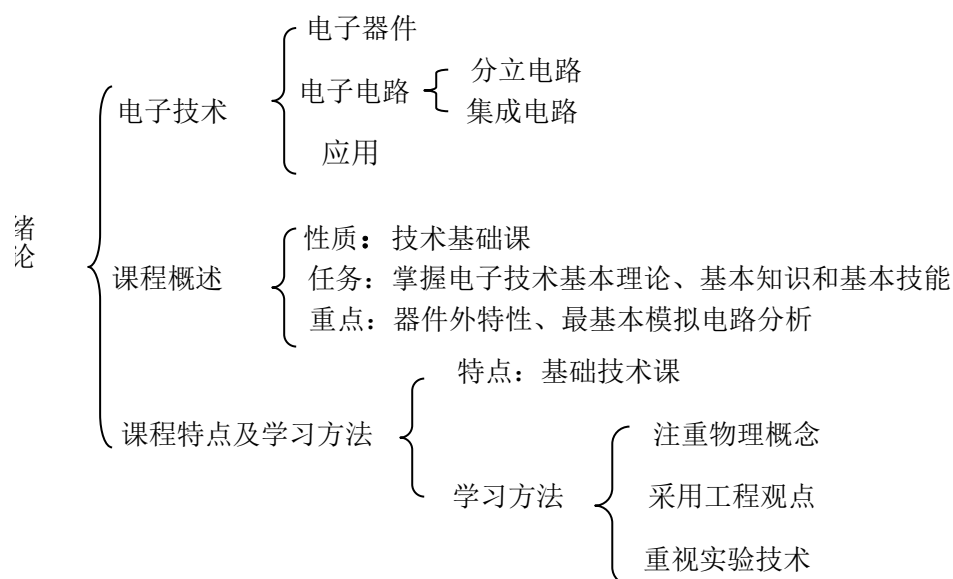


0 绪论（文字材料）

本章概要

本章主要介绍了电子技术的基本概念，课程的性质、任务及重点教学内容，阐述了课程的特点及学习时需要注意事项。

内容的组成及结构（知识点）



学习目标：

- (1) 熟练掌握电子技术相关的基本概念；
- (2) 理解电子技术的主要应用；
- (3) 理解课程的特点及学习方法。

重难点指导

重点：

- (1) 电子器件的发展；
- (2) 电子电路的组成；
- (3) 分立电路与集成电路的概念。

难点：

- (1) 电子电路与普通电路的区别；
- (2) 工程的思想。

本章导学：

1. 电子技术基础知识

电子技术是研究电子器件、电子电路及其应用的科学技术。

电子器件：第一代—电子管，也称真空管

第二代—晶体管，也称半导体器件或固体器件

电子电路：电子器件与电阻器、电感器、电容器、变压器及开关等元件适当连接而组成的电路。可以分成分立电路及集成电路。

分立电路：把许多元件和器件焊接在印刷电路板上组成的电路。特点：焊点多、故障多、体积大。

集成电路：晶体管与电阻等元件一起制作在同一块硅晶片上的电路。特点“体积小、重量轻、功耗低、焊点少、故障低、可靠性高。

电子技术应用：通讯、测控、计算机、自动控制、电力系统等领域都有应用。

2.课程的性质、任务和重点内容

性质：高等学校电类专业入门性质的基础技术课。

任务：使学生获得电子技术方面的基本理论、基本知识及基本技能，培养学生分析问题和解决问题的能力，为以后深入学习电子技术某些领域的内容，以及电子技术专业中的应用打好基础。

2. 课程内容的重点

- 1) 课程涉及最初步、最基本和最共性的知识，包括基本电路及电路组合分析；
- 2) 电子器件重点掌握外部特性，从应用的角度出发，掌握器件的伏安特性和主要参数；
- 3) 分立电路是基础，集成是重点，分立为基础服务；
- 4) 重点是模拟电路分析，器件均工作在放大状态下。

3. 课程特点及学习方法

- 1) 注重物理概念，克服“入门难”的学习过程；
- 2) 采用工程观点，误差不超过 10%可以采用估算方法分析；
- 3) 重视实验技术，将理论与实践结合，提高学生动手能力。

本章小结：

1. 电子技术是研究电子器件、电子电路及其应用的科学技术。电子器件分为两代：电子管和晶体管。电子电路是包含电子器件的电路，可以分为分立元件电路和集成电路。电子技术在多项领域都广泛应用。

2. 课程涉及最初步、最基本和最共性的知识，电子器件主要分析外特性。

3. 注重物理概念，采用工程思想，重视实验。

思考题

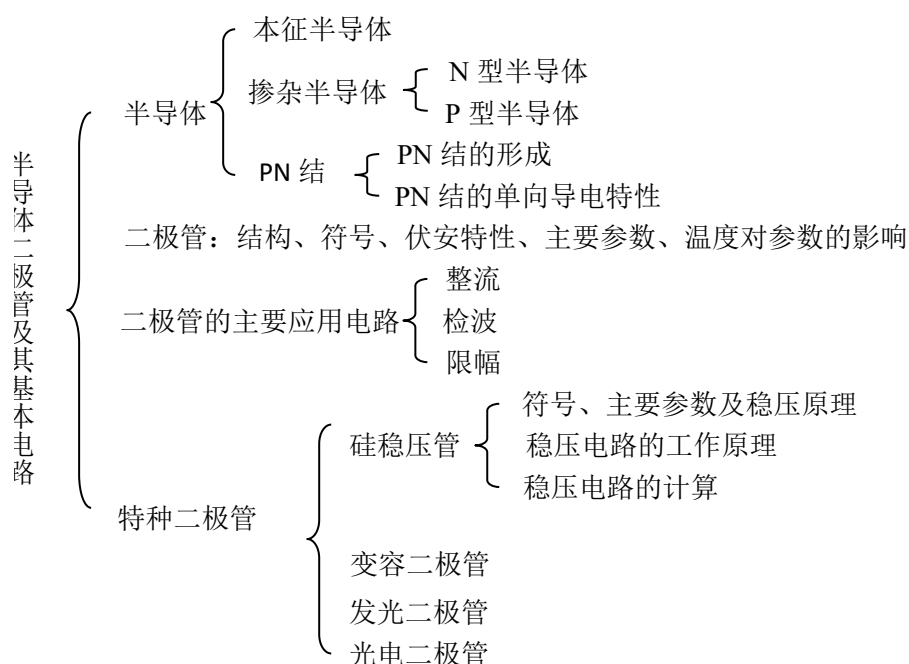
1. 什么是电子技术？什么是电子器件？
2. 电子电路与普通电路有哪些区别与联系？集成电路与分立元件电路有哪些区别？
3. 课程的性质是什么？课程不同于其它课程的特点是什么？重点需要掌握哪些内容？

1. 半导体二极管及其应用 （文字材料）

本章概要

本章以 PN 结的形成作为起点, 讨论了半导体二极管的单向导电性、伏安特性、主要电参数, 分析了半导体二极管在模拟电子电路中的主要应用。此外, 本章还讨论了特种二极管(硅稳压管) 及其应用电路。

内容的组成及结构(知识点)



学习目标

- (1) 理解 PN 结的形成;
- (2) 熟练掌握 PN 结及二极管的单向导电性;
- (3) 熟练掌握二极管及稳压管的伏安特性;
- (4) 熟练掌握二极管及硅稳压管组成电路的特性分析;

重难点指导

重点:

- (1) PN 结的单向导电性;
- (2) 二极管的伏安特性及电路分析;
- (3) 硅稳压管的特性及电路分析。

难点:

- (1) PN 结单向导电性机理;
- (2) 二极管及硅稳压管电路的特性分析。

本章导学

1. 半导体基础知识

(1) 本征半导体: 完全纯净、结构完整的半导体晶体称为本征半导体。其特点:

- a. 在外部能量激励下产生本征激发, 成对产生电子和空穴;
- b. 电子和空穴均为载流子, 空穴是一种带正电的粒子;
- c. 温度越高, 电子和空穴对的数目越多。

(2) 两种掺杂半导体

a. N 型半导体: 又称电子型半导体。它是在本征半导体中掺入少量五价施主杂质, 如砷(As)或磷(P)后形成的。自由电子是多数载流子(简称多子), 空穴是少数载流子(简称少子), 半导体内还存在不能自由移动的正离子。

b. P 型半导体: 又称空穴型半导体。它是在本征半导体中掺入少量三价受主杂质, 如硼(B)或铟(In)后形成的。空穴是多子, 自由电子是少子, 半导体内还存在不能自由移动的负离子。

(3) 掺杂半导体中的多子浓度取决于掺杂浓度; 当掺杂浓度一定时, 少子浓度随温度升高而增大。

(4) PN 结: 通过一定工艺将 N 型半导体和 P 型半导体结合在一起时, 在 N 区和 P 区界面附近形成的一个极薄的空间电荷层, 称为 PN 结。当没有外加电压时, 经过交界面的由多子扩散形成的扩散电流与少子漂移形成的漂移电流大小相等、方向相反, 动态平衡, 净电流为零。

(5) PN 结的单向导电性: 当外加直流电压使 PN 结外部, P 型半导体一端的电位高于 N 型半导体一端的电位时, PN 结正向偏置(简称正偏), PN 结变窄, 流过大的正向电流, PN 结呈现为低电阻, 处于导通状态; 当外加直流电压使 PN 结外部, P 型半导体一端的电位低于 N 型半导体一端的电位时, PN 结反向偏置(简称反偏), PN 结变宽, 流过很小的反向电流, PN 结呈现为高电阻, 处于截止状态。这就是 PN 结的单向导电性。

2. 半导体二极管

(1) 半导体二极管以 PN 结为核心, 所以也具有单向导电性。

(2) 半导体二极管的击穿: 当外加到半导体二极管的反向电压超过某一数值时, 流过半导体二极管的反向电流急剧增大, 这种现象称为击穿。

击穿根据可逆性分为电击穿和热击穿。

- a. 电击穿: 击穿时反向电流被限制在一定范围时, 则不会损坏管子。
- b. 热击穿: 击穿时反向电流超过这个范围时, 使管子损坏。

按击穿的机理不同, 又分为齐纳击穿及雪崩击穿。

a. 齐纳击穿: 击穿电压低于 4V, 其击穿电压具有负的温度系数(温度提高, 击穿电压下降);

b. 雪崩击穿: 击穿电压高于 6V, 其击穿电压具有正的温度系数(温度提高, 击穿电压上升)。

3. 特种二极管

(1) 硅稳压二极管: 简称硅稳压管, 在稳压电路中一般工作于反偏电击穿状态。这时当流过它的反向电流有较大变化时, 它两端的电压几乎维持不变。

(2) 变容二极管: 利用 PN 结的电容效应制成, 其两端的电容值与所加的反向电压成反比。

(3) 光电二极管：是一种将光信号转换为电信号的常用器件，一般工作于反偏，这时其反向电流与光的照度成正比。

(4) 发光二极管：常用砷化镓、磷化镓制成，当电流流过时将发光，发光二极管常用作显示器件。

相关电路分析与计算

1. 二极管电路的计算

1) 流过二极管的电流 i_D 和二极管两端电压 u_D 的关系可以用下式近似计算：

$$i_D \approx I_S(e^{u_D/U_T} - 1) \quad (1.1)$$

式中的 I_S 为反向饱和电流； U_T 为热电压，也称为温度电压当量， $U_T = KT/q$ ，其值与 PN 结的绝对温度 T 和玻耳兹曼常数 K 成正比，与电子电量 q 成反比，始终为正值。应用式(1.1)时， u_D 和 i_D 的参考方向均从二极管的正极指向负极。

2) 小功率硅二极管正常导通时，其正向电压降约为 $0.6 \sim 0.8V$ ，锗二极管正常导通时，其正向电压降约为 $0.2 \sim 0.3V$ 。正向电压降随温度升高而降低，温度每升高 $1^\circ C$ 时，正向电压降将降低 $2 \sim 2.5mV$ 。

3) 二极管的反向饱和电流随温度升高而增大。通常，温度每升高 $10^\circ C$ 左右，就会使反向饱和电流增加一倍。设温度为 T_0 时的反向饱和电流为 $I_S(T_0)$ ，则当温度升高到 T 时的反向饱和电流 $I_S(T)$ 近似为：

$$I_S(T) = I_S(T_0) 2^{\frac{T-T_0}{10}} \quad (1.2)$$

2. 硅稳压管稳压电路计算

硅稳压管稳压电路如图 1.1 所示。

当硅稳压管两端电压 $U_I \cdot \frac{R_L}{R + R_L} > U_Z$ 时，稳压管被击穿。则

$$U_O = U_Z \quad (1.3)$$

当硅稳压管两端电压 $U_I \cdot \frac{R_L}{R + R_L} < U_Z$ 时，稳压管只反偏未被击穿，

$$U_O = U_I \cdot \frac{R_L}{R + R_L} \quad (1.4)$$

则输出电压不稳定，会随着 U_I 或者 R_L 的变化而波动。

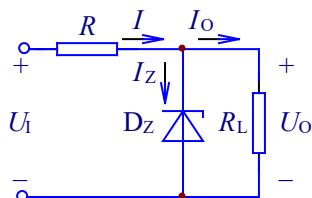


图 1.1 硅稳压管稳压电路

学习中注意的问题

1. 半导体的导电特性

半导体存在两种载流子（自由电子和空穴），这两种载流子都参与导电，这与金属导电（只

有自由电子一种载流子)有着本质的区别。

本征半导体的导电能力差且易受温度的影响,故而发明了掺杂半导体。掺入少量其它元素杂质形成的掺杂半导体,导电能力不仅可以大幅提高而且还减弱了温度的影响力。

3. 二极管的工作状态

二极管最重要的特性是单向导电性。判断二极管的工作状态需要首先断开二极管,确定其两侧的对地电压值。忽略死区电压时,只要二极管的正极电压大于负极电压,则二极管为“导通”状态;而正极电压小于负极电压的二极管为“截止”状态。

本章小结

1. 利用半导体的掺杂性可以制成 P 型和 N 型半导体,在两种半导体的结合处将形成 PN 结。当 PN 结加正向电压时,其正向电阻很小,呈现导通状态;当 PN 结加反向电压时,其反向电阻很大,呈现截止状态,这就是 PN 结的单向导电性。

2. 二极管本质上就是一个 PN 结,实际中常利用二极管的单向导电性构成整流、限幅、钳位等电路。

3. 稳压管是工作在反向击穿区的一种特殊二极管,在实际应用中必须在电路中串联一限流电阻以限制流过稳压管中的反向电流。

思考题

1. 常用的半导体材料有哪两种? 半导体导电与金属导电有什么不同之处?
2. 本征半导体与掺杂半导体有哪些不同之处? P 型与 N 型半导体的特性是什么?
3. PN 结是如何形成的? PN 结最重要的特点是什么?

二极管的特性是什么? 硅管和锗管的伏安特性有何不同之处?

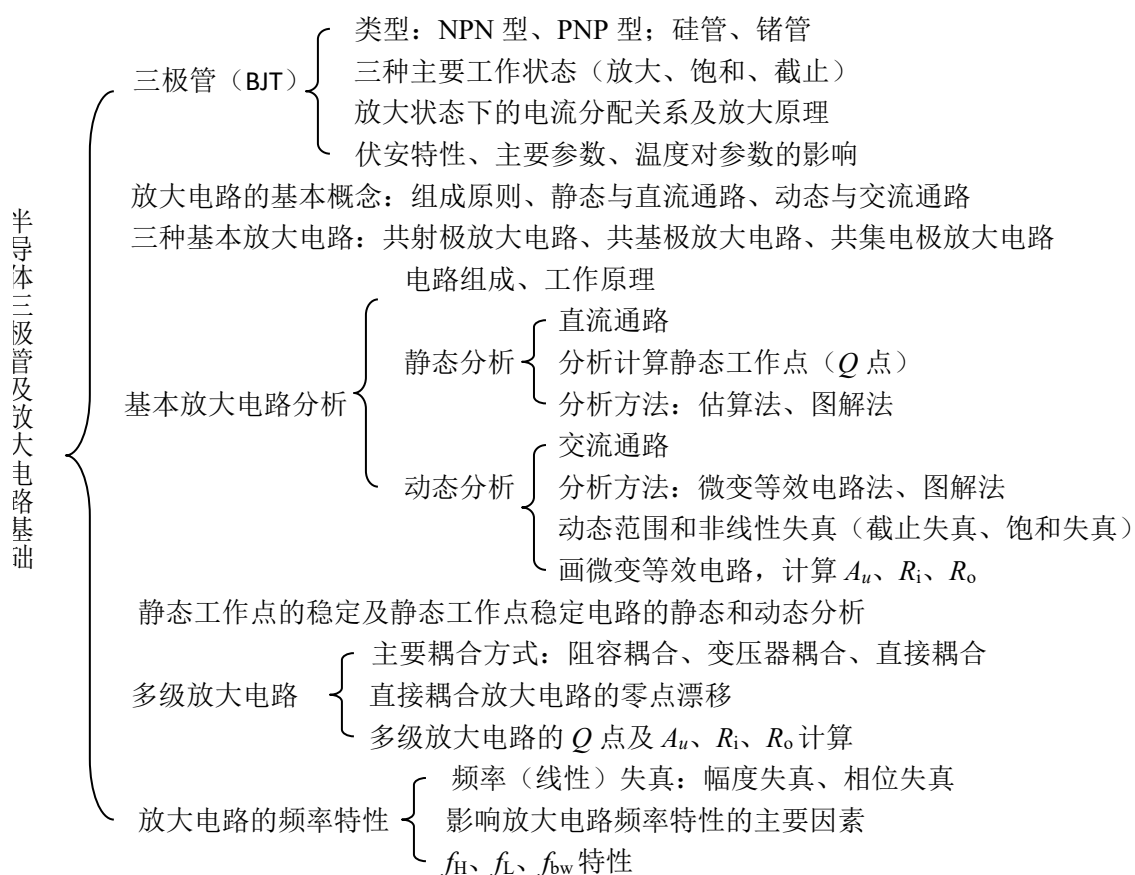
4. 为什么二极管的反向饱和电流受环境温度的影响比较大? 硅管和锗管相比较,哪种管子的反向电流受温度影响更大?
5. 什么是稳压管? 稳压管的工作条件是怎样的? 限流电阻的大小可以任意选取吗?

2. 晶体管及放大电路 （文字材料）

本章概要

本章首先讨论了晶体管的结构、放大原理、输入和输出特性以及主要电参数，然后介绍了晶体管组成的共发射极、共集电极和共基极三种基本放大电路，分析了电路组成、信号的静态及动态特性。本章还阐述了温度对晶体管特性及放大电路静态工作点的影响，放大电路的耦合方式、多级放大电路以及放大电路频率特性等相关知识。

本章内容的组成及结构



学习目标

- (1) 熟练掌握晶体管的伏安特性及电流放大作用;
- (2) 熟练掌握晶体管组成的三种基本放大电路静态及动态分析;
- (3) 掌握多级放大电路动态指标分析;
- (4) 理解三种放大电路的组成、工作原理、特点及应用场合

- (5) 理解放大电路的频率响应及线性失真
- (6) 了解多级放大电路的耦合方式及特点。

重难点指导

重点

- (1) 晶体管伏安特性;
- (2) 放大电路的静态和动态分析;
- (3) 共射极和共集电极放大电路动态参数计算;
- (4) 多级放大电路的动态参数计算。
- (5) 放大电路频率失真的原因。

难点

- (1) 晶体管的非线性失真;
- (2) 共射极和共集电极放大电路的动态参数计算及动态范围;
- (3) 阻容耦合多级放大电路的动态参数计算;

本章导学

1. 半导体三极管

1. 半导体三极管：简称为三极管或晶体管，由三个电极、两个 PN 结组成，按结构区分，有 NPN 型和 PNP 型；按使用的材料不同分为硅管和锗管。

晶体管的结构特点：发射区掺杂浓度高、基区很薄、集电结面积大。

三种工作状态与直流偏置：

- a. 放大状态——发射结正向偏置、集电结反向偏置；
- b. 饱和状态——发射结和集电结均正向偏置；
- c. 截止状态——发射结和集电结均反向偏置；

2. 放大状态时的电流分配与放大原理：发射结正向偏置，且发射区掺杂浓度高，使大量多子从发射区扩散到基区（形成发射极电流 i_E ）；因为基区很薄，只有少量扩散到基区的多子，又称为非平衡少子在基区复合（形成基极电流 i_B ）；大多数非平衡少子因为集电结反向偏置，且集电结面积大而漂移到集电区（形成集电极电流 i_C ）。基区和集电区里的少子互相漂移形成 I_{CBO} ，硅管的 I_{CBO} 很小，对 i_C 的影响可以忽略。

当外部信号改变发射结正向偏置电压的大小时，从发射区扩散到基区的多子数量、在基区复合的非平衡少子的数量及漂移到集电区的非平衡少子的数量都发生改变，使 i_E 、 i_B 、 i_C 均有增量 Δi_E 、 Δi_B 、 Δi_C 。且 $\Delta i_C = \beta \Delta i_B$ ，通常 $\beta \gg 1$ 。这说明晶体管有电流放大能力，这也就是晶体管的放大原理。

3. 常用来表征晶体管性能的有共射极输入特性和共射极输出特性。由输出特性可见，改变基极电流可以控制集电极电流（因而半导体三极管是一个电流控制器件）；晶体管有三个工作区：

- a. 放大区——晶体管工作于放大状态， $i_C = \beta i_B$ ，有放大作用；
- b. 饱和区——晶体管工作于饱和状态， i_C 主要受 u_{CE} 的影响，无放大作用；
- c. 截止区——晶体管工作于截止状态， $i_C \approx 0$ ，无放大作用。

4. 晶体管的主要参数

a. 直流参数——共射极直流电流放大系数 $\bar{\beta}$ ($\bar{\beta} = \frac{I_C}{I_B} \Big|_{I_{CBO}=0}$)，共基极直流电流放大系数 $\bar{\alpha}$ ($\bar{\alpha} = \frac{I_C}{I_E} \Big|_{I_{CBO}=0}$)，集电极——基极间反向饱和电流 I_{CBO} 、集电极——发射极间反向饱和电流（也称穿透电流） I_{CEO} 。

b. 交流参数——共射极交流电流放大系数 β ($\beta = \frac{\Delta i_C}{\Delta i_B}$)，共基极交流电流放大系数 α ($\alpha = \frac{\Delta i_C}{\Delta i_E}$)。

c. 极限参数——集电极最大允许耗散功率 P_{CM} ，集电极最大允许电流 I_{CM} ，极间反向击穿电压 $U_{(BR)CBO}$ 、 $U_{(BR)CEO}$ 、 $U_{(BR)EBO}$ 等。

晶体管的一些参数受温度影响：温度升高时 β 及 I_{CBO} 增大而在基极电流相同情况下的 u_{BE} 减小。

2. 基本放大电路

1. 基本放大电路的组成原则

- 直流偏置：发射结正向偏置而集电结反向偏置，使晶体管处于放大状态。
- 信号的输入和输出：信号源及负载接入放大电路时，应不影响晶体管原有的直流偏置，始终保持发射结正偏而集电结反偏。为此，在信号源与放大电路之间、放大电路与负载之间的耦合，一般要求既能“隔直”，又能使信号顺利传输。在图 2.1 所示的共射极放大电路中， C_1 、 C_2 为耦合电容，这种耦合方式称为阻容耦合。

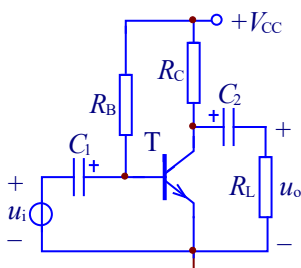


图 2.1 共射极放大电路

2. 放大电路的主要性能指标：电压放大倍数 A_u 、输入电阻 R_i 、输出电阻 R_o 、频带宽度 f_{bw} 、全谐波失真度 D 、动态范围 U_{op-p} 等。

3. 三种基本放大电路：共射极放大电路、共基极放大电路、共集电极放大电路。在放大电路中以那个电极作为输入、输出回路的公共端，就以此电极命名相应的电路。也可以按表 2.1 判断放大电路的组态。

4. 放大电路的两种工作状态：静态和动态

a. 静态：放大电路的输入为零 ($U_i = 0$ 或 $I_i = 0$) 时，电路中晶体管各个电极的电流及电极之间的电压只含有恒定的直流分量，其瞬时值不变，这时的工作状态称为静态。静态时的等效电路称为直流通路，通过直流通路可以求解放大电路的静态工作点值，即 Q 点值 (I_{BQ} 、 I_{CQ} 、 U_{BEQ} 、

U_{CEQ})。

画直流通路的原则是：将放大电路里的耦合电容及旁路电容开路。图 2.2 (a) 是图 2.1 所示放大电路的直流通路。

表 2.1 三种基本组态的判别

电路组态	输入信号所接电极	输出信号所接电极
共射极	基极 (b)	集电极 (c)
共基极	发射极 (e)	集电极 (c)
共集电极	基极 (b)	发射极 (e)

b. 动态：放大电路有信号输入时 ($U_i \neq 0$ 或 $I_i \neq 0$) 的工作状态称为动态。动态时，放大电路中直流电源和交流信号同时作用，晶体管各极电流和极间电压既有直流分量，又有交流分量。当放大电路的输出没有非线性失真时，直流分量值就是静态工作点值，已在静态分析中已经求得，所以动态分析只是分析交流分量之间的关系，即分析放大电路的动态指标 A_u 、 R_i 、 R_o 、 f_{bw} 等。动态分析要借助于放大电路的交流通路。

画交流通路的原则是：将直流电源接地且耦合电容及旁路电容 (电容容量足够大) 视作短路。根据这一原则可画得图 2.1 所示放大电路的交流通路如图 2.2 (b)。

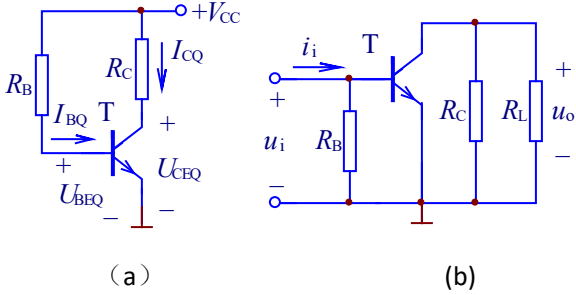


图 2.2 直流通路和交流通路

(a) 直流通路 (b) 交流通路

5. 电路的三种基本分析方法

a. 图解法——既可用于静态分析，求解静态工作点值；也可用于动态分析。由于作图麻烦、小信号时难以作图等缺点，在实际分析中很少使用。

b. 估算法——也称近似计算法，用于静态工作点的计算。

分析过程为：画直流通路，由直流通路列输入回路和输出回路的直流负载线方程，并设 U_{BEQ} 值 (硅管为 0.6V 或 0.7V、锗管为 0.2V 或 0.3V)，代入方程，求出静态工作点值。

c. 微变等效电路法——用于放大电路小信号工作时的动态分析。

分析过程为：先画出电路的交流通路，再将交流通路中的晶体管用它的 H 参数微变等效电路代替，即得放大电路的微变等效电路。根据放大电路性能指标的定义，计算放大电路的微变等效电路，即可求得放大电路的 A_u 、 R_i 及 R_o 等动态指标。

6. 放大电路的非线性失真

若 Q 点设置不合理或输入信号过大，动态时工作点将进入饱和区产生饱和失真、或进入截止区产生截止失真。饱和失真和截止失真统称为非线性失真，它使输出波形畸变，甚至出现输出波

形的顶部或底部被削平。

7. 三种基本放大电路性能比较：如表 2.2 所示。

表 2.2 三种基本放大电路性能比较

性能	共射极	共基极	共集电极
u_o 与 u_i 相位关系	反相	同相	同相
电压放大能力	有	有	无
电流放大能力	有	无	有
输入电阻 R_i	中等	小	大
输出电阻 R_o	大	大	小

3. 静态工作点的稳定

- 1) 稳定静态工作点的原因： Q 点改变会影响放大电路的性能指标。
- 2) 影响静态工作点稳定的因素：主要是温度改变引起晶体管参数的变化。
- 3) 稳定静态工作点的方法：选用温度特性好的元器件；用负反馈稳定 Q 点。

4. 多级放大电路

1. 主要耦合方式：

- a. 阻容耦合——各级静态工作点互相独立，只能放大交流信号。
- b. 变压器耦合——各级静态工作点互相独立，只能放大交流信号，有笨重的变压器，频率特性较差，但能传输较大功率，还有阻抗变换作用和电隔离功能。
- c. 直接耦合——各级静态工作点互相关联，既能放大交流信号，也能放大直流信号和缓变信号。

2. 直接耦合放大电路的两个特殊问题

- a. 耦合问题：常用的方法有垫高后一级射极电位；电平移位；NPN 型管和 PNP 型管互补；用正、负两种电源。
- b. 零点漂移：简称零漂，由温度变化和元器件老化引起，但主要是温度。零漂大小用折合到输入端的零点漂移电压大小来衡量。抑制零漂的方法与静态工作点稳定的方法相似，在直接耦合放大电路中常采用差动放大电路，它能有效地抑制零漂。

3. 多级放大电路的前一级放大电路为后一级放大电路提供放大的信号，相当于后一级放大电路的信号源。因此，前一级放大电路的输出电阻，相当于后一级放大电路的信号源内阻。从另一个角度看，后一级放大电路的输入电阻相当于前一级放大电路的负载电阻。

5. 放大电路的频率特性

1. 放大电路频率特性包括幅频特性和相频特性。反映放大电路频率特性的性能指标是放大电路的频带宽度 f_{bw} 。

$$f_{bw} = f_H - f_L \quad (2.1)$$

式中： f_H 是放大电路的上限截止频率，是放大电路在高频区工作时，放大倍数下降到中频放大倍数值 $1/\sqrt{2}$ 时的工作频率； f_L 是放大电路的下限截止频率，是放大电路在低频区工作时，放大倍数下降到中频放大倍数值 $1/\sqrt{2}$ 时的工作频率。

2. 频率失真：当放大电路放大非正弦波信号且不产生非线性失真时，因为放大电路对不同频

率信号的放大倍数不同而引起的波形失真称为幅度失真；因为放大电路对不同频率信号产生的相移不同而引起的波形失真称为相位失真。它们统称为频率失真，也称为线性失真。

3. 影响放大电路频率特性的主要是电路存在电抗元件，即耦合电容、旁路电容、结电容、负载电容和分布电容等。

低频区：电路的频率特性主要由耦合电容和旁路电容这些大电容影响。

高频区：电路的频率特性主要由结电容、负载电容和分布电容等这些小电容影响。

中频区：放大电路等效为纯电阻电路。耦合电容和旁路电容这些大电容视为短路，结电容、负载电容和分布电容等这些小电容视为开路。

相关电路分析与计算

1. 半导体三极管的偏置与电流分配

1) 当晶体管工作在放大区时

a. 电极的电位特点：NPN 型的 $U_C > U_B > U_E$ ；PNP 型的 $U_C < U_B < U_E$ 。基极电位总是居中。

b. 小功率硅管的 $|U_{BE}|$ 约为 0.6V 或 0.7V；小功率锗管的 $|U_{BE}|$ 约为 0.2V 或 0.3V。

2) 晶体管的直流分配关系（忽略饱和电流）

$$I_E = I_C + I_B \quad (2.2)$$

3) r_{be} 的估算

$$r_{be} = r_{bb'} + (1 + \beta) \frac{U_T}{|I_{EQ}|} \quad (2.3)$$

低频小功率晶体管的 $r_{bb'}$ 可取为 300Ω ，室温（ 25° ）下的 $U_T \approx 26\text{mV}$ 。

2. 基本放大电路的计算

1) 放大电路中常用四种偏置电路（如图 2.3）的静态计算

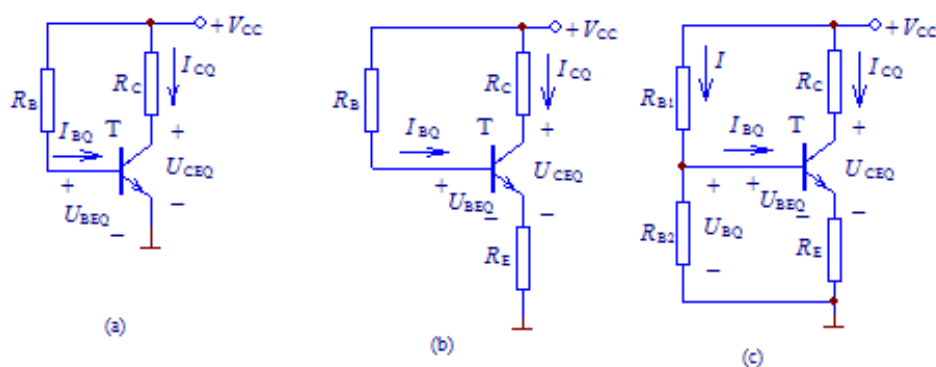


图 2.3 四种常用偏置电路

(a) 固定偏置($R_E=0$) (b) 固定偏置($R_E \neq 0$) (c) 分压反馈式偏置

(a) 固定偏置($R_E=0$): 电路如图 2.3(a)所示

$$I_{BQ} = \frac{V_{CC} - U_{BEQ}}{R_B} \quad (2.4a)$$

$$I_{CQ} = \beta I_{BQ} \quad (2.4b)$$

$$U_{CEQ} = V_{CC} - I_{CQ} R_C \quad (2.4c)$$

(b) 固定偏置($R_E \neq 0$): 电路如图 2.3(b)所示

$$I_{BQ} = \frac{V_{CC} - U_{BEQ}}{R_B + (1 + \beta) R_E} \quad (2.5a)$$

$$I_{CQ} = \beta I_{BQ} \quad (2.5b)$$

$$U_{CEQ} \approx V_{CC} - I_{CQ}(R_C + R_E) \quad (2.5c)$$

(c) 分压反馈式偏置: 电路如图 2.3 (c)所示, 当 $I \gg I_{BQ}$ 时

$$U_{BQ} \approx \frac{R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}} \cdot V_{CC} \quad (2.6a)$$

$$I_{EQ} = \frac{U_{BQ} - U_{BEQ}}{R_E} \quad (2.6b)$$

$$U_{CEQ} \approx V_{CC} - I_{CQ}(R_C + R_E) \quad (2.6c)$$

2) 三种基本放大电路的动态计算

a. 共射极放大电路 (放大电路及其微变等效电路如图 2.4 所示)

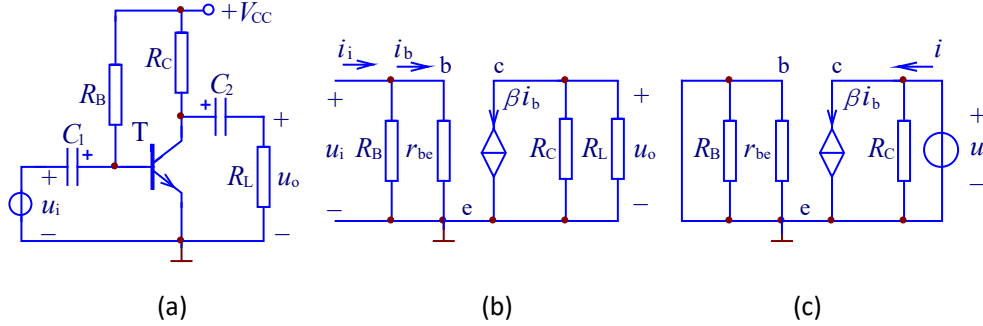


图 2.4 共射极放大电路的动态分析

(a) 固定偏置共射极放大电路 (b) 微变等效电路 (c) 求 R_o 的等效电路

$$A_u = \frac{U_o}{U_i} = -\frac{\beta(R_C // R_L)}{r_{be}} = -\frac{\beta R'_L}{r_{be}} \quad (2.7a)$$

$$R_i = \frac{U_i}{I_i} = R_B // r_{be} \approx r_{be} \quad (2.7b)$$

$$R_o = \frac{U}{I} \Big|_{\substack{U_i=0 \\ R_L=\infty}} = R_C \quad (2.7c)$$

b. 共集电极放大电路(放大电路及其微变等效电路如图 2.5 所示)

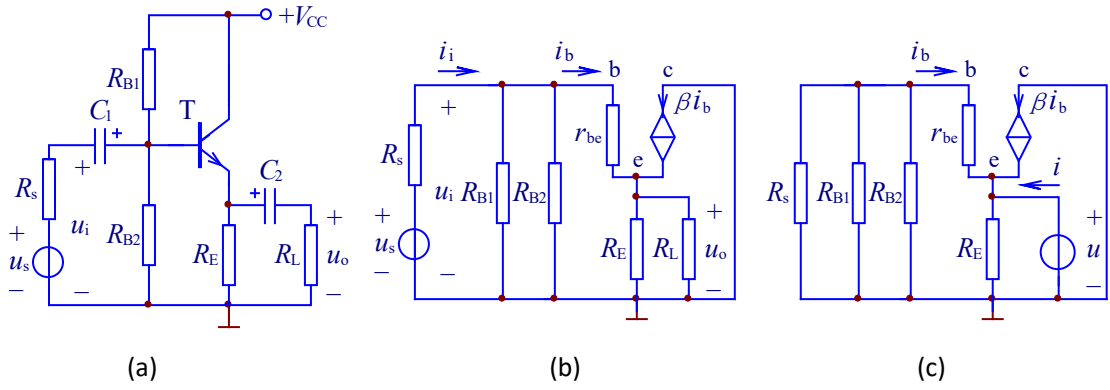


图 2.5 共集电极放大电路的动态分析

(a) 共集电极放大电路 (b) 微变等效电路 (c) 求 R_o 的等效电路

$$A_u = \frac{U_o}{U_i} = \frac{(1+\beta)(R_E // R_L)}{r_{be} + (1+\beta)(R_E // R_L)} = \frac{(1+\beta)R'_L}{r_{be} + (1+\beta)R'_L} \quad (2.8a)$$

$$R_i = \frac{U_i}{I_i} = R_{B1} // R_{B2} // [r_{be} + (1+\beta)R'_L] \quad (2.8b)$$

$$R_o = \frac{U}{I} \bigg|_{\substack{U_s=0 \\ R_L=\infty}} = R_E // \frac{(R_s // R_{B1} // R_{B2}) + r_{be}}{1+\beta} \quad (2.8c)$$

c. 共基极放大电路(放大电路及其微变等效电路如图 2.6 所示)

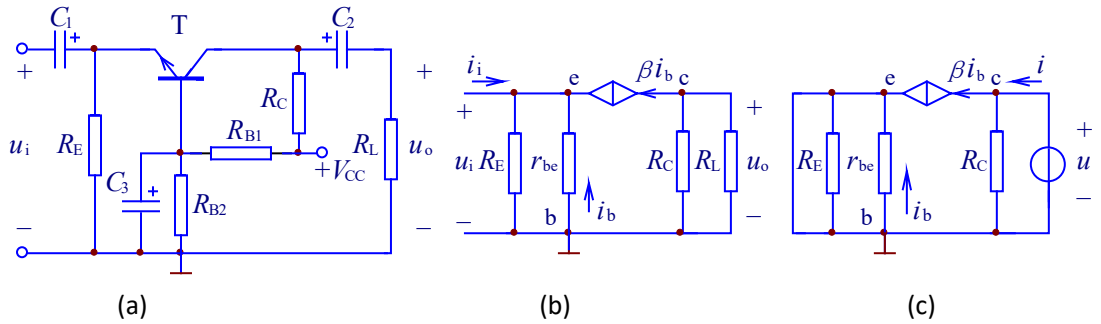


图 2.6 共基极放大电路的动态分析

(a) 共基极放大电路 (b) 微变等效电路 (c) 求 R_o 的等效电路

$$A_u = \frac{U_o}{U_i} = \frac{\beta(R_C // R_L)}{r_{be}} = \frac{\beta R'_L}{r_{be}} \quad (2.9a)$$

$$R_i = \frac{U_i}{I_i} = R_E // \frac{r_{be}}{1+\beta} \quad (2.9b)$$

$$R_o = \frac{U}{I} \bigg|_{\substack{U_i=0 \\ R_L=\infty}} = R_C \quad (2.9c)$$

表 2.3 是晶体管基本放大电路类型及参数计算图。

表 2.3 晶体管基本放大电路的类型及其参数计算

	基本电路	微变等效电路	静态参数	动态参数
固定偏置放大电路			$I_B = \frac{U_{CC} - U_{BE}}{R_B}$ $I_C = \beta I_B$ $U_{CE} = U_{CC} - R_C I_C$	$A_u = -\frac{\beta(R_C // R_L)}{r_{be}}$ $R_i = R_B // r_{be} \approx r_{be}$ $R_o = R_C$
共集电极放大电路			$I_B = \frac{U_{CC} - U_{BE}}{R_B + (1 + \beta)R_E}$ $I_E = (1 + \beta)I_B$ $U_{CE} = U_{CC} - R_E I_E$	$A_u = \frac{(1 + \beta)(R_E // R_L)}{r_{be} + (1 + \beta)(R_E // R_L)} \approx 1$ $R_i = R_B // [r_{be} + (1 + \beta)R_E // R_L]$ $R_o = R_E // \frac{(R_S // R_B) + r_{be}}{1 + \beta}$
共基极放大电路			$V_B = \frac{R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}} U_{CC}$ $I_C \approx I_E = \frac{V_B - U_{BE}}{R_E}$ $U_{CE} = U_{CC} - (R_C + R_E)I_C$	$A_u = \frac{\beta(R_C // R_L)}{r_{be}}$ $R_i = R_E // \frac{r_{be}}{1 + \beta}$ $R_o = R_C$
分压式偏置放大电路			$V_B = \frac{R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}} U_{CC}$ $I_C \approx I_E = \frac{V_B - U_{BE}}{R_E}$ $U_{CE} = U_{CC} - (R_C + R_E)I_C$	$A_u = -\frac{\beta(R_C // R_L)}{r_{be} + (1 + \beta)R_{E1}}$ $R_i = R_{B1} // R_{B2} // [r_{be} + (1 + \beta)R_{E1}]$ $R_o = R_C$

3. 多级放大电路计算

设多级放大电路由 n 级基本放大电路组成。

$$A_u = A_{u1} A_{u2} \dots A_{un} \quad (2.10a)$$

$$R_i = R_{i1} \quad (2.10b)$$

$$R_o = R_{on} \quad (2.10c)$$

4. 只考虑一个电容影响时的频率特性计算

1. f_L 计算：当放大电路在低频区工作，并只考虑一个电容影响时，首先将所考虑的电容所在回路经过等效后，等效成图 2.7(a)所示的一阶高通电路。则

$$f_L = \frac{1}{2\pi RC} \quad (2.11)$$

2. f_H 计算：当放大电路在高频区工作，并只考虑一个电容影响时，首先将所考虑的电容所在回路经过等效后，等效成图 2.7(b)所示的一阶低通电路。则

$$f_H = \frac{1}{2\pi RC} \quad (2.12)$$

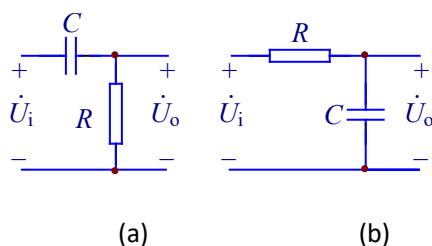


图 2.7 一阶高通电路和低通电路
(a) 一阶高通电路 (b) 一阶低通电路

学习中注意的问题

1. 放大器件特性—非线性

晶体管是非线性器件，若 Q 点设置不合理或输入信号幅度过大，动态时工作点将进入饱和区产生饱和失真、或进入截止区产生截止失真。饱和失真和截止失真统称为非线性失真，它使输出波形畸变，甚至出现输出波形的顶部或底部被削平。

2. 放大信号基本条件—不失真

放大电路的基本功能是将输入的小信号不失真地放大到负载所需要的数值。以此，一定要注意输出信号不得产生失真现象。失真包括线性失真（幅度失真和相位失真）和非线性失真（饱和失真和截止失真）。

3. 信号特点—交直流共存

放大电路中的电压及电流信号一般既有直流成分又有交流成分，信号将在交流通路和直流通路分别进行分析和计算。

在直流通路中，大电容（耦合电容和旁路电容）可以视为开路，直流通路用于分析电路的静态工作点；而在交流通路中，大电容（耦合电容和旁路电容）容抗小可以视为短路。交流通路用于分析信号的交流成分，求得放大电路的 A_u 、 R_i 及 R_o 等动态指标。

4. 微变等效电路使用条件—小信号

晶体管是非线性器件，当输入信号比较小时，可以用近似的线性电路（微变等效电路）替代非线性的晶体管。但当输入信号幅度较大时，只能采用图解法分析电路。

5. 旁路电容 C_E 的作用—隔直通交

采用图 2.3 (c) 中分压式偏置的共射极或者共基极放大电路，其射极电阻 R_E 的旁边会有一个电容 C_E 。静态时，电容 C_E 视为开路，直流电流 I_E 通过电阻 R_E 形成负反馈的作用，从而稳定电路的静态工作点；动态时，交流电流 i_e 流过电容 C_E ，电容 C_E 容抗小可视为短路，则射极电位交流接地。所以，一定注意放大电路有无旁路电容 C_E ，因为电路的交流通路不同则计算的动态参数会有差异。

本章小结

1. 三极管在结构上由两个 PN 结组成，它有放大、截止、饱和三种工作状态。当发射结处于正向偏置，集电结处于反向偏置时，三极管工作在放大状态，此时集电极电流 I_C 受基极电流 I_B 的控制，即 $I_C \approx \beta I_B$ ；当发射结和集电结都处于反向偏置时，三极管工作在截止状态，此时 $I_C \approx 0$ ，集电极和发射极之间相当于开路；当发射结和集电结均处于正向偏置时，三极管工作在饱和状态，

此时 $U_{CE} \approx 0$ ，集电极和发射极之间相当于短路， I_C 不再受 I_B 控制，而是由外电路来决定。三极管按结构分为 NPN 型和 PNP 型，两者使用时偏置电源的极性和三极管内电流方向相反。在三极管中，空穴和电子两种载流子都参与了导电，是双极型器件，在这种双极型器件中，由于少数载流子数目受温度影响较大，其参数往往受温度影响较大，稳定性差。

2. 为了对信号进行不失真地放大，必须为放大电路设置合适的静态工作点以使三极管工作在放大区。如果静态工作点设置的过高或过低，将有可能引起输出信号发生饱和或截止失真。

3. 放大电路的分析包括静态和动态两个方面。静态分析可以采用图解法和估算法，动态分析也可以采用图解法和微变等效电路法，图解法形象、直观地反映了电路参数对静态工作点的影响以及非线性失真与静态工作点的关系。但图解法作图麻烦费时，无法用来分析放大电路的某些动态指标，如输入和输出电阻，对于较复杂的反馈放大电路也无法用图解法分析。所以一般用图解法分析放大电路处于大信号工作状态下的非线性失真和动态工作范围。直流估算法和交流微变等效电路法采用电路分析的方法对放大电路的直流和交流小信号工作状态进行分析，是分析放大电路的主要方法。用微变等效电路法分析放大电路的动态性能指标简单方便，其缺点是不能分析大信号状态下的放大电路。

4. 三极管的参数易受温度影响，当环境温度变化时会引起静态工作点的改变，所以在实际中常采用具有稳定静态工作点作用的分压式偏置放大电路。

5. 在低频电子线路中，放大电路常采用共发射极和共集电极两种形式。共发射极放大电路的电压放大倍数大，但输入电阻小，输出电阻大。共集电极放大电路的输入电阻大，输出电阻小，但没有电压放大能力。在实际电路中，常将这两种电路组合应用，以发挥它们各自的优势。共基极放大电路的特点是输入电阻小，分布电容和三极管结电容对电压放大倍数的影响较小，因而有较好的高频特性，所以主要用于高频放大电路。

6. 多级放大电路的级间耦合方式有直接耦合、阻容耦合和变压器耦合三种形式。变压器耦合方式目前已很少采用，直接耦合方式各级静态工作点互相有影响，存在零点漂移现象，阻容耦合方式各级静态工作点互相没有影响。多级放大电路总的电压放大倍数是各级电压放大倍数之积，但计算时要考虑后级对前级的负载效应。

7. 放大电路的频率特性包括放大电路的幅频特性和相频特性。反映放大电路频率特性的性能指标是放大电路的频带宽度 f_{bw} 。当放大电路放大非正弦波信号且不产生非线性失真时，因为放大电路对不同频率的信号有不同放大倍数引起的波形失真称为幅度失真；因为放大电路对不同频率的信号产生的相移不同而引起的波形失真称为相位失真。它们统称为频率失真，也称为线性失真。影响放大电路频率特性的主要是电路存在电抗元件，即耦合电容、旁路电容、结电容、负载电容和分布电容等。不同的电容对放大电路的影响不同，需要分别讨论中频区、低频区和高频区的频率特性。影响放大电路下限截止频率的主要是旁路电容，而影响电路上限截止频率的是结电容或负载电容。

思考题

1. 晶体管的结构是怎样的？晶体管的四种工作状态是什么？为什么晶体管会完成电流放大作用？
2. 共射极放大电路的组成有什么特点？信号是如何被放大的？
3. 什么是放大电路的静态和动态？静态分析应采用哪种电路？而动态分析需要借助哪种电路？

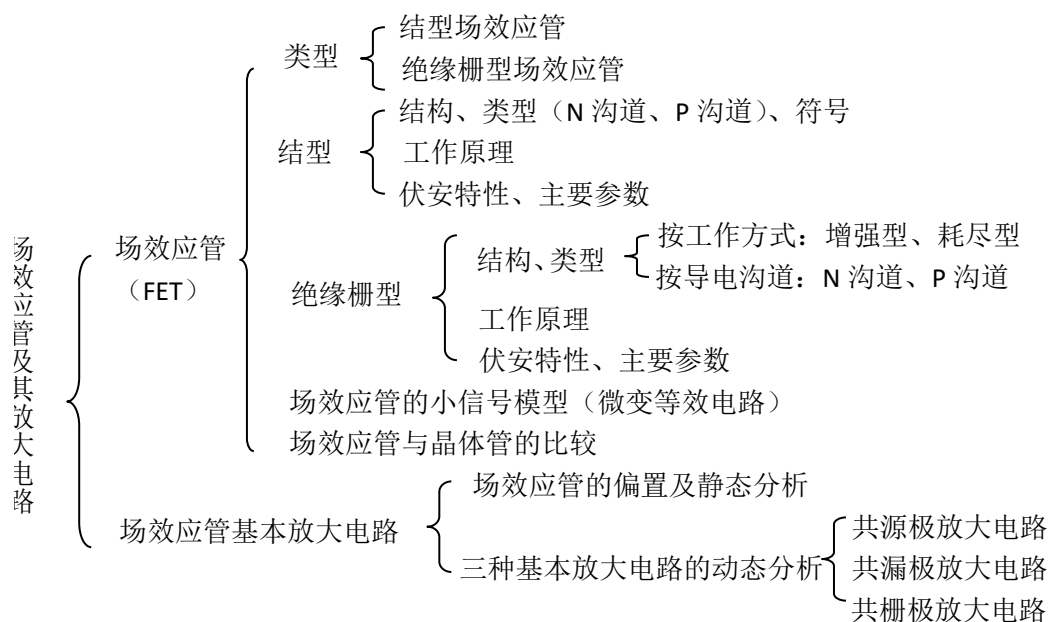
4. 什么是非线性失真？包括哪两种类型？如何克服非线性失真？
5. 共射极放大电路的特性及主要动态指标如何计算？
6. 共集电极放大电路和共基极放大电路的特性是什么？如何计算动态指标？
7. 多级放大电路耦合方式有哪几种？各自有哪些特点？如何计算多级放大电路的静态和动态指标？
8. 什么是频率失真？与放大电路的非线性失真有区别吗？放大电路的上限截止频率与下限截止频率都受电路哪些参数影响？

3. 场效应管及其放大电路 （文字材料）

本章概要

本章首先介绍结型场效应管和绝缘栅型场效应管的结构、放大原理、伏安特性以及主要电参数，然后讨论了场效应管的微变等效电路，分析了场效应管和晶体管的特点，并讨论了场效应管组成的共源极、共漏极和共栅极三种基本放大电路的工作原理、特性分析及参数计算。

本章内容的组成及结构



学习目标

- (1) 熟练掌握场效应管的伏安特性；
- (2) 熟练掌握场效应管的微变等效电路；
- (3) 熟练掌握场效应管组成的三种基本放大电路的组成、工作原理及静态和动态分析；
- (4) 了解三种放大电路的各自特点及应用场合；
- (5) 了解场效应管与双极型三极管的异同点。

重难点指导

重点：

- (1) 结型及 MOS 型场效应管的工作原理及伏安特性；

(2) 共源极和共漏极放大电路的静态及动态参数计算;

难点:

- (1) 场效应管跨导的概念以及微变等效电路;
- (2) 场效应管放大电路的静态与动态主要指标计算。

本章导学

1. 场效应管

1. 场效应管 (FET) 有结型场效应管 (JFET) 和绝缘栅型场效应管 (IGFET) 两大类型。它们都有 N 沟道和 P 沟道两类。IGFET 又分为增强型和耗尽型; JFET 只有耗尽型。IGFET 大多制成金属—氧化物—半导体结构, 简称为 MOSFET。

2. 场效应管与半导体三极管的区别

1. 半导体三极管 (晶体管) 是一种电流控制器件, 有两种载流子参与导电, 属于双极型器件, 因此又常称半导体三极管为双极型晶体管; 场效应管只靠一种载流子 (多数载流子) 导电, 属于单极型器件, 因此又常称场效应管为单极型晶体管, 它是一种电压控制器件, $i_G \approx 0$, 具有输入电阻高的特点。

3. 场效应管的工作原理

a. 控制漏极电流的基本原理: 通过控制电压的变化改变场效应管导电沟道的宽度, 以改变其电阻的大小来控制漏极电流。

b. JFET 和 MOSFET 在控制漏极电流方式上的区别: JFET 通过控制电压的变化改变耗尽层的宽度来控制漏极电流; MOSFET 利用半导体表面的电场效应, 直接改变作为导电沟道的反型层宽度, 以达到控制漏极电流的目的。

4. 场效应管的伏安特性

由于 FET 的 $i_G \approx 0$, 所以只给出输出特性和由它派生的转移特性。各类 FET 的输出特性曲线如表 3.1 中所示。

a. 输出特性 $i_D = f(u_{DS}) | u_{GS} \text{ 一定}$ 由输出特性曲线可见, FET 有三个工作区:

可变电阻区——沟道尚未出现予夹断, 管子可看作是一个由电压控制的可变电阻。在不同的 u_{GS} 下, 曲线上升的斜率不同, 电阻值也不同。

恒流区——沟道出现予夹断, i_D 只受 u_{GS} 控制, 几乎不随 u_{DS} 的改变而变化, 输出特性曲线几乎成为水平的直线。恒流区又称饱和区或放大区。

夹断区——管子处于沟道完全夹断的情况, $i_D \approx 0$, 夹断区也称为截止区。

b. 转移特性: $i_D = f(u_{GS}) | u_{DS} \text{ 一定}$ 它描述了场效应管的 u_{GS} 对 i_D 的控制能力。

5. 场效应管的主要参数

a. 直流参数: 开启电压 $U_{GS(th)}$ (适用于增强型 MOSFET); 夹断电压 $U_{GS(off)}$ 、零偏漏极电流 I_{DSS} (适用于耗尽型 FET)。

b. 交流参数: 极间电容 C_{gs} 、 C_{ds} 、 C_{gd} ; 跨导 g_m (也称互导), 它是管子在保持 U_{DS} 一定时, 漏极电流微变量 di_D 与栅源极间电压微变量 du_{GS} 的比值, 即:

$$g_m = \left. \frac{di_D}{du_{GS}} \right|_{U_{DS}=\text{一定}} \quad (3.1)$$

c. 极限参数:漏极最大允许耗散功率 P_{DSM} ,相当于双极型晶体管的 P_{CM} ;最大漏极电流 I_{DSM} ,是管子在工作时允许的漏极电流最大值,相当于双极型晶体管的 I_{CM} ;栅源击穿电压 $U_{(BR)GS}$ 及漏源击穿电压 $U_{(BR)DS}$ 。

6. 场效应管的小信号模型: 场效应管的小信号模型,即微变等效电路如图 3.1 所示。

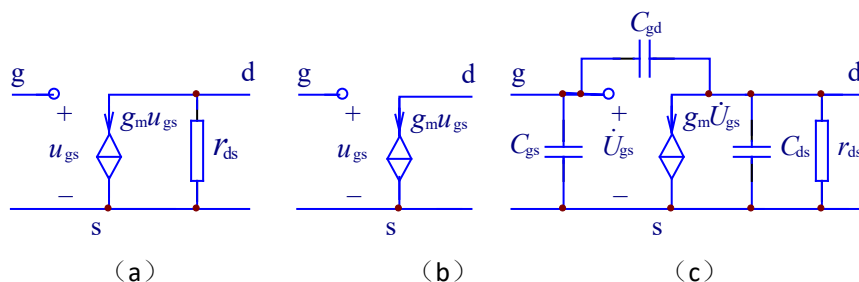


图 3.1 场效应管的小信号模型

(a) FET 的微变等效电路 (b) FET 简化的微变等效电路 (c) FET 的高频小信号模型

2. 基本放大电路

(1) 场效应管的直流偏置

a. 自给偏置: 由于耗尽型场效应管在 $U_{GS}=0$ 时就有漏极电流 I_D 流过管子, 利用这一电流在源极电阻 R_S 上的电压降就可以给管子提供直流偏置电压。称这种直流偏置方式为自给偏置, 产生的偏置电压称为自给偏压。自给偏置只适用于结型或耗尽型场效应管, 即 JFET 和耗尽型 FET。

b. 分压式偏置: 在源极电阻 R_S 上产生自给偏压的基础上, 再通过栅极电阻分压提供一定的栅极电位, 使 U_{GSQ} 有可能小于零、也有可能大于零, 以适合不同类型场效应管对直流偏置的要求, 使之工作于恒流区, 称这种直流偏置方式为分压式偏置。产生的偏置电压称为分压式自给偏压。分压式偏置既适用于耗尽型 FET, 也适用于增强型 FET。

(2) 三种基本放大电路: 场效应管基本放大电路也有三种基本组态: 共源极、共漏极及共栅极。它们的组态判别和特点分别如表 3.2 和表 3.3。

表 3.2 场效应管三种基本组态的判别

电路组态	输入信号所接电极	输出信号所接电极
共源极	栅极 (g)	漏极 (d)
共漏极	栅极 (g)	源极 (s)
共栅极	源极 (s)	漏极 (d)

表 3.3 场效应管三种基本放大电路性能比较

性 能	共源极	共漏极	共栅极
u_o 与 u_i 相位关系	反相	同相	同相
电压放大能力	有	无	有
输入电阻 R_i	大	大	小
输出电阻 R_o	较大	小	较大

表 3.1 场效应管的符号和伏安特性（表中 FET 符号中的“B”称为衬底）

类 型		符 号	输出特性	转移特性	电压极性	
结构类型	工作方式				$U_{GS(off)}$ 或 $U_{GS(th)}$	u_{DS}
绝缘栅型 N 沟道	耗尽型				—	+
	增强型				+	+
绝缘栅型 P 沟道	耗尽型				+	—
	增强型				—	—
结型 N 沟道	耗尽型				—	+
结型 P 沟道	耗尽型				+	—

学习中注意的问题:

1. 不同类型场效应管导电特性的差异

耗尽型场效应管（包括 JFET 和耗尽型 MOSFET）的工作特点：N 沟道的 $u_{DS} > 0$ 、P 沟道的 $u_{DS} < 0$ 时，若 $u_{GS} = 0$ ，沟道已经导通，流过沟道的电流为 I_{DSS} ，称为零偏漏极电流；若 $u_{GS} = U_{GS(off)}$ ，流过沟道的电流几乎为零，沟道完全夹断。称 $U_{GS(off)}$ （或记作 U_P ）为夹断电压，N 沟道耗尽型 FET 的 $U_{GS(off)} < 0$ ，P 沟道耗尽型 FET 的 $U_{GS(off)} > 0$ 。

增强型 MOSFET 的工作特点： $u_{GS} = 0$ 时，导电沟道尚未形成；只有当 u_{GS} 达到一定值时，在漏极和源极之间才出现反型层，形成导电沟道，相当于管子开启，故称这一电压为开启电压，记作 $U_{GS(th)}$ （或 U_T ）。N 沟道增强型 MOSFET 的 $U_{GS(th)} > 0$ ，P 沟道增强型 MOSFET 的 $U_{GS(th)} < 0$ 。

2. u_{GS} 和 u_{DS} 对导电沟道的影响

场效应管当 $u_{DS} = 0$ 时， u_{GS} 的变化使导电沟道的宽度改变，但各处宽度相等；当 $u_{DS} \neq 0$ 时，导电沟道呈楔形，靠近漏极处的宽度较窄。

当 u_{GS} 值一定（耗尽型管没有夹断或增强型管已经开启），且 N 沟道的 $u_{DS} > 0$ 、P 沟道的 $u_{DS} < 0$ 时， u_{DS} 值从零开始增加， i_D 值几乎随之线性增大； u_{DS} 值增大到一定数值时，靠近漏极处的沟道出现夹断（称为预夹断）， i_D 值几乎不再随 u_{DS} 的增大而改变。出现预夹断时的 u_{DS} 值称为预夹断电压， u_{GS} 值不同时对应的预夹断电压也不同。

3. 场效应管的非线性

场效应管是非线性器件，若 Q 点设置不合理或输入信号幅度过大，动态时工作点将进入可变电阻区或进入截止区，也会产生非线性失真将使输出波形畸变，甚至出现输出波形的顶部或底部被削平。

4. 场效应管的小信号模型

场效应管是非线性器件，当输入信号比较小时，可以用近似的线性电路（微变等效电路）替代非线性的场效应管。但当输入信号幅度较大时，只能采用图解法分析电路。

场效应管的微变等效电路与第 2 章学习的晶体管微变等效电路不同，它是电压控制电流源，输入回路的 u_{gs} 的控制输出电流 i_d 值。

相关电路分析与计算

1. 场效应管

1) FET 预夹断轨迹的函数表达式

a. 耗尽型

$$u_{DS} = u_{GS} - U_{GS(off)} \quad (3.2)$$

b. 增强型

$$u_{DS} = u_{GS} - U_{GS(th)} \quad (3.3)$$

它们是判断 FET 工作于可变电阻还是恒流区的依据。

2) FET 工作于恒流区时，转移特性的数学表达式

a. 耗尽型

$$i_D = I_{DSS} \left[1 - \frac{u_{GS}}{U_{GS(off)}} \right]^2 \quad (3.4)$$

b. 增强型

$$i_D = I_{D0} \left[\frac{u_{GS}}{U_{GS(th)}} - 1 \right]^2 \quad (3.5)$$

式中的 I_{D0} 为 $u_{GS}=2U_{GS(th)}$ 时的 i_D 值。

3) 跨导: FET 工作于恒流区时, 跨导可通过对转移特性数学表达式的求导得到。

a. 耗尽型

$$g_m = -\frac{2I_{DSS}}{U_{GS(off)}} \left[1 - \frac{U_{GSQ}}{U_{GS(off)}} \right] = \frac{2}{|U_{GS(off)}|} \sqrt{I_{DSS} \cdot I_{DQ}} \quad (3.6)$$

b. 增强型

$$g_m = \frac{2}{|U_{GS(th)}|} \sqrt{I_{D0} I_{DQ}} \quad (3.7)$$

2. 场效应管两种直流偏置电路的静态计算

场效应管两种常用的直流偏置电路如图 3.2 所示。

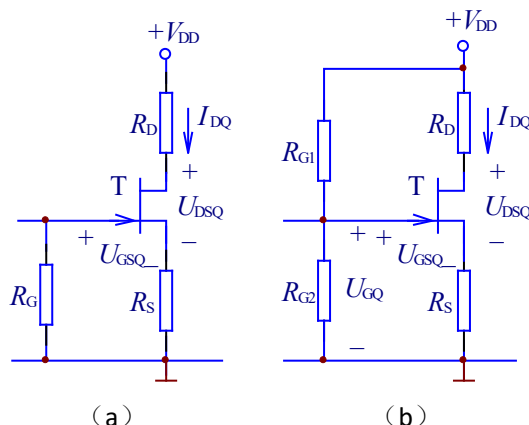


图 3.2 场效应管的直流偏置电路

(a) 自给偏置 (b) 分压式偏置

1) 自给偏置: 解方程组

$$\begin{cases} I_{DQ} = I_{DSS} \left[1 - \frac{U_{GSQ}}{U_{GS(off)}} \right]^2 \\ U_{GSQ} = -I_{DQ} R_S \end{cases} \quad (3.8a) \quad (3.8b)$$

可得两组解, 舍去其中不合实际的一组解, 即可求得 I_{DQ} 、 U_{GSQ} ; 再求

$$U_{DSQ} = V_{DD} - I_{DQ} (R_D + R_S) \quad (3.9)$$

2) 分压式偏置

a. 耗尽型: 解方程组

$$\begin{cases} I_{DQ} = I_{DSS} \left[1 - \frac{U_{GSQ}}{U_{GS(off)}} \right]^2 \end{cases} \quad (3.10a)$$

$$U_{GSQ} = \frac{R_{G2}}{R_{G1} + R_{G2}} V_{DD} - I_{DQ} R_S \quad (3.10b)$$

可得两组解，舍去其中不合实际的一组解，即可求得 I_{DQ} 、 U_{GSQ} 。

b. 增强型：解方程组

$$\begin{cases} I_{DQ} = I_{D0} \left[\frac{U_{GSQ}}{U_{GS(th)}} - 1 \right]^2 \\ U_{GSQ} = \frac{R_{G2}}{R_{G1} + R_{G2}} V_{DD} - I_{DQ} R_S \end{cases} \quad (3.11a)$$

$$U_{GSQ} = \frac{R_{G2}}{R_{G1} + R_{G2}} V_{DD} - I_{DQ} R_S \quad (3.11b)$$

可得两组解，舍去其中不合实际的一组解，即可求得 I_{DQ} 、 U_{GSQ} 。

分压式偏置电路的 U_{DSQ} 计算与自给偏置电路相同，可用公式 (3.9) 进行。

3. 场效应管基本放大电路的动态计算

1) 共源极放大电路(放大电路及其微变等效电路如图 3.3 所示)

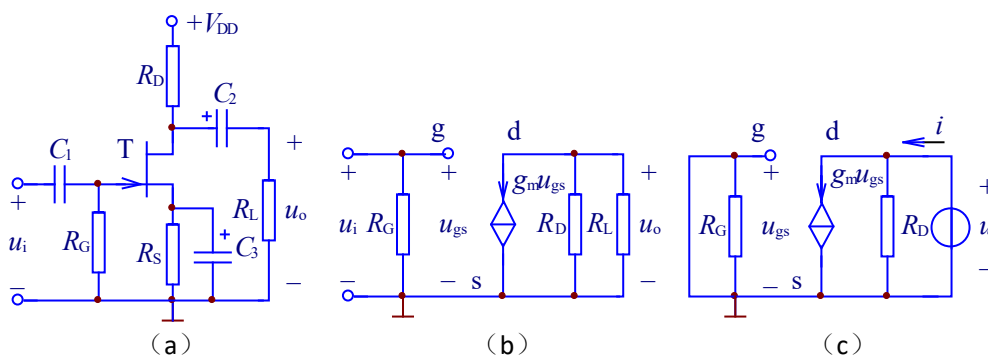


图 3.3 共源极放大电路动态分析

(a) 共源极放大电路 (b) 微变等效电路 (c) 求 R_o 的等效电路

$$A_u = \frac{U_o}{U_i} = -g_m (R_D // R_L) = -g_m R'_L \quad (3.12a)$$

$$R_i = \frac{U_i}{I_i} = R_G \quad (3.12b)$$

$$R_o = \frac{U}{I} \bigg|_{U_i=0, R_L=\infty} = R_D \quad (3.12c)$$

2) 共漏极放大电路(放大电路及其微变等效电路如图 3.4 所示)

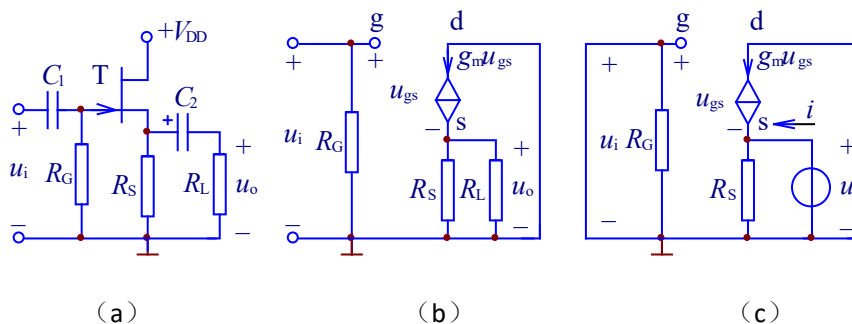


图 3.4 共漏极放大电路动态分析

(a) 共漏极放大电路 (b) 微变等效电路 (c) 求 R_o 的等效电路

$$A_u = \frac{U_o}{U_i} = \frac{g_m(R_S // R_L)}{1 + g_m(R_S // R_L)} = \frac{g_m R'_L}{1 + g_m R'_L} \quad (3.13a)$$

$$R_i = \frac{U_i}{I_i} = R_G \quad (3.13b)$$

$$R_o = \frac{U}{I} \bigg|_{U_i=0, R_L=\infty} = R_S // \frac{1}{g_m} \quad (3.13c)$$

3) 共栅极放大电路(放大电路及其微变等效电路如图 3.5 所示)

$$A_u = \frac{U_o}{U_i} = g_m(R_D // R_L) = g_m R'_L \quad (3.14a)$$

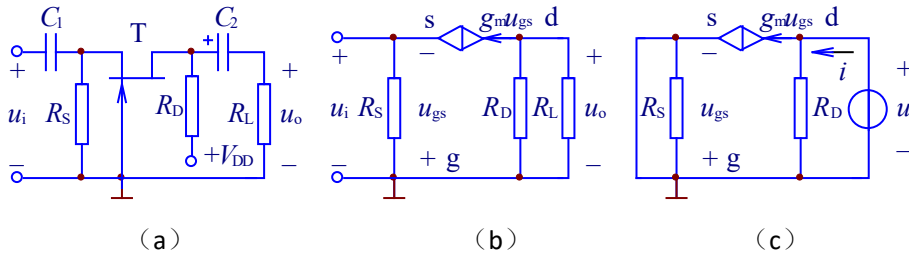


图 3.5 共栅极放大电路动态分析

(a) 共栅极放大电路 (b) 微变等效电路 (c) 求 R_o 的等效电路

$$R_i = \frac{U_i}{I_i} = R_S // \frac{1}{g_m} \quad (3.14b)$$

$$R_o = \frac{U}{I} \bigg|_{U_i=0, R_L=\infty} = R_D \quad (3.14c)$$

本章小结

1. 场效应管是一种电压控制器件，输入电阻大。它是利用栅源电压 U_{GS} 的大小来改变感生沟道的电阻以达到控制漏极电流 I_D 的目的。根据结构不同，场效应管分为结型和绝缘栅型（简称 MOS 管）。绝缘栅型又可以分为耗尽型和增强型。各类场效应管按结构分为 P 沟道和 N 沟道两类，两者使用时的电源极性不同。场效应管中只有多子参与导电，故属于单极型器件，其参数几乎不受温度影响，稳定性较好，但它的放大能力没有三极管强。

2. 结型场效应管和耗尽型 MOS 管在 U_{GS} 为零时已存在原始导电沟道，而增强型 MOS 管只有在 $|U_{GS}|$ 大于一定值时才会建立起导电沟道。

3. 场效应管可以组成三种放大电路：共源极放大电路、共漏极放大电路和共栅极放大电路。放大电路的静态偏置电路有自给偏压式和分压式两种。其微变等效模型为一电压控制的电流源。

对场效应管放大电路的动态分析仍以微变等效电路法为主。

思考题

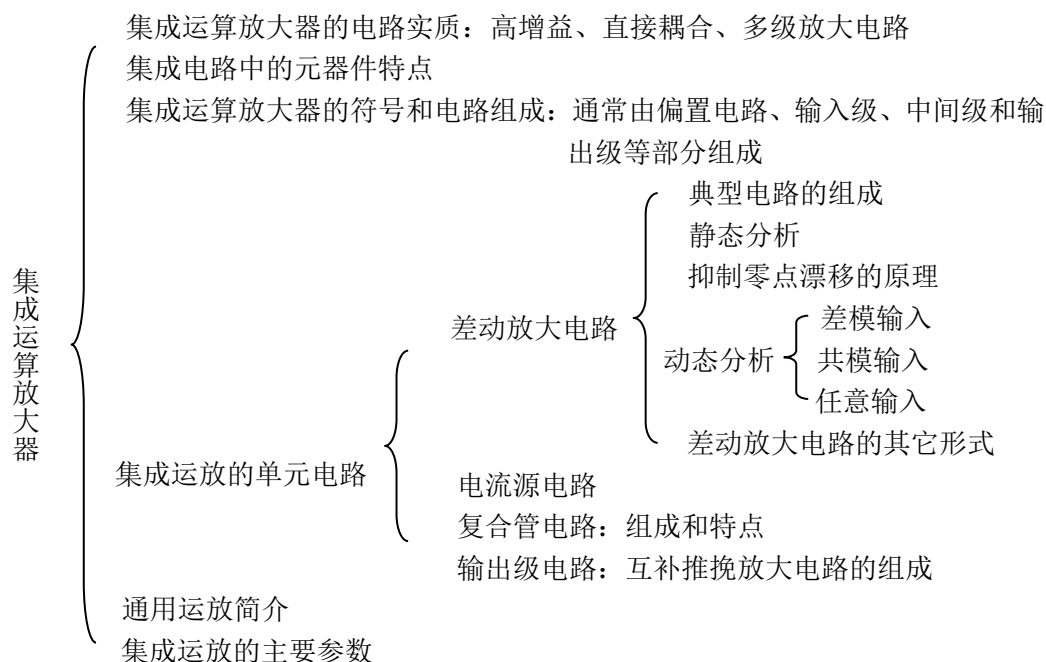
1. 场效应管有哪些类型？它们在结构和特性上各有什么特点？
2. 为什么场效应管导电沟道出现预夹断后，其漏极电流达到恒定？
3. 场效应管放大电路有哪些偏置方式？不同类型的场效应管的偏置一样吗？
4. 场效应管放大电路有哪三种类型？各自的特点和动态特性？
5. 比较场效应管放大电路与晶体管组成的基本放大电路各有什么特点？

4. 集成运算放大器 （文字材料）

本章概要

本章首先介绍集成电路中元器件的特点及运算放大器的典型结构，然后分别讨论了双极型差分放大电路的组成及静态特性，详细讨论了电路动态特性（差模信号和共模信号），最后总结了运放的主要参数及简化低频等效电路。

本章内容的组成及结构



学习目标

- (1) 了解集成电路各元器件的特点及集成运放的典型结构；
- (2) 熟练掌握差分放大电路分析计算方法；
- (3) 熟练掌握集成运放的主要参数及简化低频等效电路；
- (4) 理解差分电路的电路类型与特点，以及大信号传输特性。

重难点指导

重点：

- (1) 差分放大电路的静态分析与计算。
- (2) 差分放大电路的小信号动态特性分析与计算。

难点：

- (1) 差模信号与共模信号的区别；
- (2) 差分放大电路射极电阻 R_E 在静态、差模信号及共模信号下的不同特性；
- (3) 任意信号的差模成分与共模成分如何分解。

本章导学

1. 集成运放

1) 集成运算放大器简称为集成运放，是线性模拟集成电路的一种，在模拟电子电路中广泛应用。集成运放实质上是一个高增益直接耦合的多级放大电路。

2) 模拟集成电路中元器件的特点

a. 元器件参数精度较低，误差较大，但误差的一致性较好。有利于制成对称性好的电路，如差动放大电路。

b. 制作大电容困难，所以一般采用直接耦合的电路。

c. 制作管子比制作电阻更容易，因此常用晶体管或场效应管组成恒流源电路，为各级提供偏置电流或作有源负载。

d. 集成电路中制造三极管比较方便，常利用发射结制作普通的二极管；用反偏的集电结作为稳压管。

3) 电路组成：主要组成部分有输入级、中间放大级、输出级和偏置电路。此外还有单端化电路、偏差调整电路、相位校正电路、电平移位电路、输出保护电路等。

2. 差分放大电路

由半导体三极管组成的典型的差分放大电路如图 4.1 (a) 所示。这一电路也称为长尾型差动放大电路。

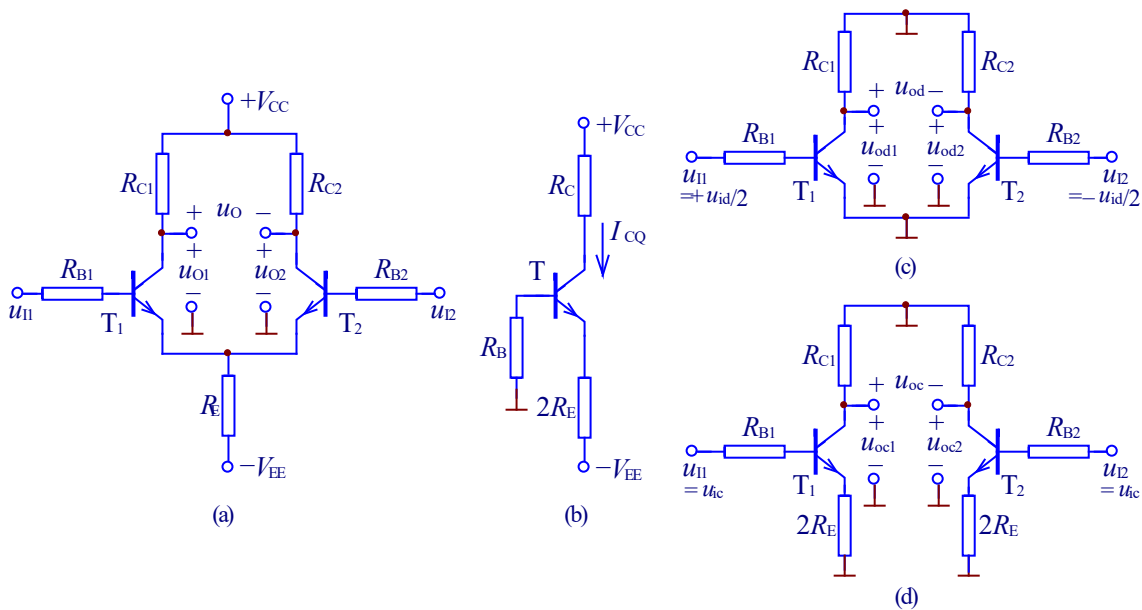


图 4.1 典型的差动放大电路

(a) 典型的差动放大电路 (b) 直流通路
(c) 差模输入时的交流通路 (d) 共模输入时的交流通路

1) 电路结构特点

电路具有对称的结构特点, $R_{C1}=R_{C2}=R_C$, $R_{B1}=R_{B2}=R_B$, T_1 和 T_2 的特性一致, $\beta_1=\beta_2=\beta$, $r_{bb'1}=r_{bb'2}=r_{bb'}$ 。由于结构对称, 静态时的 $u_O=u_{O1}-u_{O2}=0$, 可以克服零漂。

2) 差模和共模的概念

a. 差模: 当 $u_{I1}=-u_{I2}$ 时, 差动放大电路两个输入端的输入信号大小相等、极性相反, 称为差模输入。电路的差模输入电压为

$$u_{Id}=u_{I1}-u_{I2} \quad (4.1)$$

$$u_{I1}=+u_{Id}/2 \quad (4.2a)$$

$$u_{I2}=-u_{Id}/2 \quad (4.2b)$$

差动放大电路对差模输入信号有放大作用, 放大能力用差模电压放大倍数 A_{ud} 来表示, 定义为差模输出电压和差模输入电压之比。差模输入时的交流通路如图 4.1 (c)。

b. 共模: 当 $u_{I1}=u_{I2}=u_{Ic}$ 时, 差动放大电路两个输入端的输入信号大小相等、极性相同, 称为共模输入。 u_{Ic} 就是电路的共模输入电压。

差动放大电路利用电路对称及公共发射极电阻 R_E 对共模信号的负反馈作用能有效的抑制共模信号和零点漂移。差动放大电路对共模输入信号的放大能力用共模电压放大倍数 A_{uc} 来表示, 定义为共模输出电压和共模输入电压之比。共模输入时的交流通路如图 4.1 (d)。

c. 共模抑制比 K_{CMR} : 差动放大电路应该具有大的差模电压放大倍数和尽可能小的共模电压放大倍数, 因此用它们之比——“共模抑制比”来综合衡量差动放大电路的这种能力, 因此共模抑制

$$K_{CMR} = \frac{|A_{ud}|}{|A_{uc}|} \quad (4.3a)$$

或

$$K_{\text{CMR}} = 20 \lg \frac{|A_{ud}|}{|A_{uc}|} \text{ dB} \quad (4.3b)$$

3) 其它形式的差分放大电路

a. 任意输入：当差分放大电路两个输入端的输入电压大小不相等 ($|u_{i1}| \neq |u_{i2}|$) 时的输入形式称为任意输入，这时既有差模信号输入，又有共模信号输入。

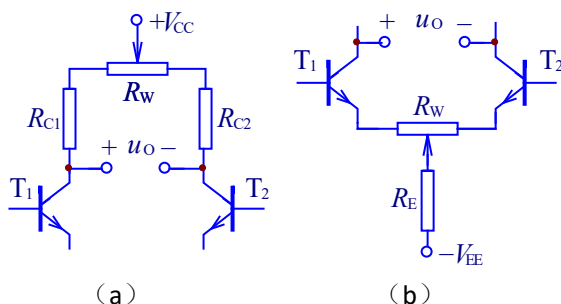
b. 单端输出：信号从一个管子 (T_1 或 T_2) 的集电极与公共端“地”之间输出。

c. 单端输入：信号从一个输入端与“地”之间输入，另外一个输入端接“地”，这种输入形式一般用在差分放大电路作输入级的场合。

d. 带调零电位器的差分放大电路：为了使差分放大电路的静态输出为零，也为了提高共模抑制比，希望电路左右完全对称，但这并不容易，因此常接入调零电位器予以调整，以调零电位器 R_W 滑动端左右两边电阻不相等，来抵消差分放大电路左右两边实际参数的不对称。常用的调零方式有：集电极调零和发射极调零两种。

集电极调零的接法如图 4.2 (a) 所示， R_W 接在集电极回路，它使差分放大电路的输出电阻 R_o 和差模电压放大倍数 A_{ud} 增大。

发射极调零的接法如图 4.2 (b) 所示， R_W 接在发射极回路，有负反馈作用，能改善性能，却使 A_{ud} 下降。



(a)

(b)

图 4.2 差分放大电路的调零

(a) 集电极调零 (b) 发射极调零

e. 带恒流源的差分放大电路：由于公共射极电阻 R_E 对共模信号有负反馈作用， R_E 越大，共模电压放大倍数越小，共模抑制比就越大，抑制共模信号的能力越强。但 R_E 的增大会使发射极电流 I_{EQ} 减小， r_{be} 增大，使 A_{ud} 减小；若在增大 R_E 的同时保持 I_{EQ} 不变，就必须增大发射极电源电压，这就要提高管子的耐压、增加电源的功耗。另一方面，在集成电路中也不易制作较大阻值的电阻，因此常用恒流源（交流等效电阻大，直流电阻小）代替 R_E ，组成带恒流源的差分放大电路。

具体的恒流源电路结构域分析略。

3. 其它部分电路

1) 复合管

目的：利用几个管子的复合，增大电流放大系数 β 。在集成运放内部电路中应用时，可提高集成运放的开环差模电压放大倍数、差模输入电阻等性能指标。

组成原则：在实际应用时，组成它的每一个管子都能工作于放大状态，即发射结正偏、集电结反偏。

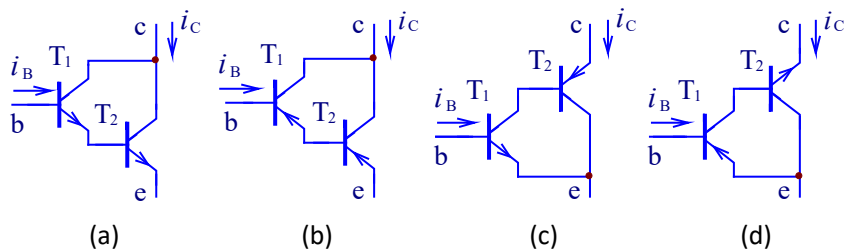


图 4.6 复合管的四种接法

(a) 等效为 NPN 型 (b) 等效为 PNP 型 (c) 等效为 NPN 型 (d) 等效为 PNP 型

电路形式：有四种接法，如图 4.6 所示。其中 (a)、(b) 两种为同类型管子复合，(c)、(d) 两种为不同类型管子复合。无论那一种接法，等效后管子的类型均与前一个管子（基极外引的）类型相同。当多级放大电路的输出级使用复合管时，复合管的 T_1 一般选用 P_{CM} 小的管子，而 T_2 选用 P_{CM} 大的管子。

2) 输出级电路

输出级电路需要有较强的驱动负载的能力，输出电阻要小。在集成运放中，输出级常采用互补推挽放大电路（将在第 9 章功率放大电路中讨论）。

4. 集成运放的特性

1) 集成运放的符号：如图 4.7 所示。

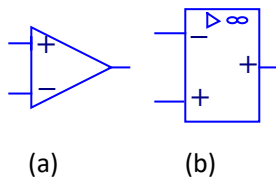


图 4.7 集成运放的符号

(a) 惯用符号 (b) 国家标准符号

2) 主要参数

a. 交流参数：开环差模电压增益 A_{ud} 、共模抑制比 K_{CMR} 、开环带宽（-3dB 带宽） f_{bw} 、单位增益上升速率（也称压摆率） S_R 、最大差模输入电压 U_{idM} 、最大共模输入电压 U_{icM} 、最大输出电流 I_{oM} 、输出电压峰-峰值 U_{opp} 。

b. 直流参数：输入失调电压 U_{IO} 、输入偏置电流 I_{IB} 、输入失调电流 I_{IO} 、失调电压温漂 $\Delta U_{IO}/\Delta T$ 、失调电流温漂 $\Delta I_{IO}/\Delta T$ 。

3) 理想运放的概念：为了简化由集成运放组成的电路分析过程，往往把集成运放性能理想化，即认为 A_{ud} 、 K_{CMR} 、 f_{bw} 、 S_R 等参数趋向于无限大，而 U_{IO} 、 I_{IO} 、 I_{IB} 、 $\Delta U_{IO}/\Delta T$ 、 $\Delta I_{IO}/\Delta T$ 、 R_o 等参数趋向于零，这就是理想运放。

相关电路分析与计算

1. 典型差动放大电路的计算

电路如图 4.1(a)

1) 静态计算（分析每个管子静态的直流通路如图 4.1b）

$$U_{B1Q}=U_{B2Q}=U_{BQ}=-I_{BQ}R_B\approx 0 \quad (4.10a)$$

$$I_{E1Q}=I_{E2Q}=I_{EQ}\approx \frac{V_{EE}-U_{BEQ}}{2R_E} \quad (4.10b)$$

$$U_{C1Q}=U_{C2Q}=U_{CQ}\approx V_{CC}-I_{CQ}R_C \quad (4.10c)$$

2) 动态计算

a. 双端输入、双端输出

差模电压放大倍数

$$A_{ud}=\frac{U_{od}}{U_{id}}=-\frac{\beta(R_C//\frac{R_L}{2})}{R_B+r_{be}}=-\frac{\beta R'_L}{R_B+r_{be}} \quad (4.11)$$

差模输入电阻

$$R_{id}=2(R_B+r_{be}) \quad (4.12)$$

输出电阻

$$R_o=2R_C \quad (4.13)$$

共模电压放大倍数

$$A_{uc}=\frac{U_{oc}}{U_{ic}}=0 \quad (4.14)$$

共模输入电阻

$$R_{ic}=\frac{U_{ic}}{I_{ic}}=\frac{1}{2}[R_B+r_{be}+2(1+\beta)R_E] \quad (4.15)$$

共模抑制比

$$K_{CMR}=\frac{|A_{ud}|}{|A_{uc}|}=\infty \quad (4.16)$$

b. 单端输入、双端输出：设 $u_{i2}=0$ ，这种情况下的 A_{ud} 、 R_{id} 、 R_o 、 A_{uc} 、 R_{ic} 、 K_{CMR} 均与双端输入、双端输出差动放大电路的相同。

c. 双端输入、单端输出

从 T_1 的集电极输出

$$A_{ud1}=\frac{U_{o1}}{U_{id}}=-\frac{\beta(R_C//R_L)}{2(R_B+r_{be})}=-\frac{\beta R'_L}{2(R_B+r_{be})} \quad (4.17)$$

$$A_{uc1}=\frac{U_{o1}}{U_{ic}}=-\frac{\beta(R_C//R_L)}{R_B+r_{be}+2(1+\beta)R_E}=-\frac{\beta R'_L}{R_B+r_{be}+2(1+\beta)R_E} \quad (4.18)$$

从 T_2 的集电极输出

$$A_{ud2} = \frac{U_{o2}}{U_{id}} = + \frac{\beta(R_C // R_L)}{2(R_B + r_{be})} = + \frac{\beta R'_L}{2(R_B + r_{be})} \quad (4.19)$$

$$A_{uc2} = \frac{U_{o2}}{U_{ic}} = - \frac{\beta(R_C // R_L)}{R_B + r_{be} + 2(1 + \beta)R_E} = - \frac{\beta R'_L}{R_B + r_{be} + 2(1 + \beta)R_E} \quad (4.20)$$

$$R_o = R_C \quad (4.21)$$

$$K_{CMR1} = \frac{|A_{ud1}|}{|A_{uc1}|}, \quad K_{CMR2} = \frac{|A_{ud2}|}{|A_{uc2}|} \quad (4.22)$$

d. 单端输入、单端输出：设 $u_{i2}=0$ ，这种情况下的 A_{ud1} 、 A_{ud2} 、 R_o 、 A_{uc1} 、 A_{uc2} 、 K_{CMR} 均与双端输入、单端输出差动放大电路的相同。

e. 任意输入： $u_{i1} \neq u_{i2}$ ，这时既有差模信号输入，又有共模信号输入。它们分别为

$$u_{id} = u_{i1} - u_{i2} \quad (4.23)$$

$$u_{ic} = \frac{1}{2}(u_{i1} + u_{i2}) \quad (4.24)$$

2. 带恒流源的差分放大电路

带恒流源的差分放大电路，估计静态工作点从恒流管开始，计算出射极总电流 I_{C3} ，则每只晶体管的电流 $I_{C1} = I_{C2} = 1/2 I_{C3}$ ，然后在分别计算静态工作点的其它参数。

无论长尾式或恒流源式的差分放大电路，其中长尾电阻 R_E 和恒流管都引入一个共模负反馈，因此在交流通路中长尾电阻和恒流管都相当于短路，晶体管的射极“虚地”。

3. 带调零电位器的差动放大电路计算

1) 集电极调零：电路如图 4.2 (a)。调零电位器滑动端调在中点时，用 $(R_C + \frac{R_w}{2})$ 代替典型差分放大电路各计算式中的 R_C ，所得的就是这种差分放大电路四种输入、输出形式时的计算公式。

2) 发射极调零：电路如图 4.2 (b)，当调零电位器滑动端调在中点时，用 $[r_{be} + (1 + \beta)\frac{R_w}{2}]$ 代替典型差分放大电路各计算式中的 r_{be} ，所得的就是这种差分放大电路四种输入、输出形式时的计算公式。

4. 复合管电路计算

1. 同种类型的管子组成复合管

$$\beta = \frac{I_c}{I_b} = \beta_1 + \beta_2 + \beta_1 \beta_2 \approx \beta_1 \beta_2 \quad (4.24a)$$

$$r_{be} = \frac{U_{be}}{I_b} = r_{be1} + (1 + \beta_1)r_{be2} \quad (4.24b)$$

2. 不同类型的管子组成复合管

$$\beta = \frac{I_c}{I_b} = \beta_1 + \beta_1\beta_2 \approx \beta_1\beta_2 \quad (4.25a)$$

$$r_{be} = \frac{U_{be}}{I_b} = r_{be1} \quad (4.25b)$$

学习中注意的问题

1. 注意学习期间的外特性

和前几章内容一样，本章学习注意掌握集成运算放大器的电路的外特性，不需要深入研究集成运算放大器的内部电路。此外，差分放大电路特性分析是本章的重点内容。

2. 差分放大电路的结构和静态分析

差分放大电路的特点：对称性，双晶体管、双电源。电路对称的目的：克服零漂。

首先需要掌握差分电路静态分析。差分电路的静态分析采用估算法，首先需要计算两只晶体管射极电流 I_{EQ} 的大小，注意射极流过两只晶体管电流，故每只管子的集电极电路是射极电流的一半，即 $I_{c1Q} = I_{c2Q} = 1/2 I_{EQ}$ ，从而获得电路的直流参数。差分电路静态分析有可能不是计算管子的 U_{CEQ} ，而是电压 U_{CQ} ， $U_{CQ} = V_{CC} - I_{CQ} R_C$ 。

3. 差分放大电路的动态特性

对差分电路进行动态分析，一定要注意信号的类型不同（差模信号或共模信号），差分电路会有不同的交流通路。差模信号是实际测量系统真正有用的信号，而共模信号模拟的是测量系统中的干扰信号。差分放大电路就需要能放大真正有用的信号而抑制或者消除干扰。

差模信号下，直流电源接地，晶体管射极流过的交流电流大小相等方向相反，故射极电阻 R_E 上无交流电流流过，可视为断路，则晶体管的射极“虚地”。因此交流通路无射极电阻 R_E ；而共模信号下，射极流过两份大小相同且方向相同的电流，因此单管交流通路射极电阻需要等效为两个 $2R_E$ 电阻的并联。

差分电路的输入和输出方式比较复杂，由此由于任意信号可以分解为差模成分和共模成分，故电路的“单入”形式可以看成“双入”的特例，差分电路分析主要区别在“双出”或“单出”，电路的输出电阻及电压放大倍数不同。

输出电阻：双出时，电路的输出电阻 $R_o = 2R_C$ ；单出时， $R_o = R_C$ 。

差模信号下：差模信号源 U_{id} 是一个信号源，其两个端子分别接入管子 T_1 及 T_2 的基极（ u_{i1} 和 u_{i2} ），这一信号源分解为两个大小相同而方向相反的信号 u_{id1} 和 u_{id2} ，见图 4.1（a）。

双出时，差分放大电路的差模电压放大倍数和单管相同，但注意“负载减半”，即等效电阻为 $1/2 R_L$ ，见式（4.11）；单出时，差分放大电路的差模电压放大倍数是单管电压放大倍数的一半，即“增益减半”，见式（4.17）及（4.19），单出位置不同（ T_1 或 T_2 输出），差模电压放大倍数的极性不同。差模信号下的输入电阻是从一个信号源 U_{id} 后看进去的等效电阻，由于此时 T_1 和 T_2 电路相当于串联，故输入电阻 $R_{id} = 2(R_B + r_{be})$ 。

共模信号下：共模信号源 U_{ic} 是两个信号源（测量系统的干扰是独立的），各自分别接入管子

T_1 及 T_2 的基极 (u_{i1} 和 u_{i2})，这一点与差模信号源不同，其输入电阻和电压放大倍数计算都是 T_1 和 T_2 电路各自分析。因为电路对称，电路参数一致，信号又是大小相同方向相同的，则结果一致。

双出时，由于电路对称则输出电压也是大小相等方向相同的信号，故共模输出电压 $U_{Oc}=U_{Oc1}-U_{Oc2}=0$ ，共模电压放大倍数为 0；单出时，电路的共模电压放大倍数大小和极性相同，见式 (4.18) 和 (4.20)。注意射极电阻是 $2R_E$ ，因为射极电流是两份大小相同方向相同的信号，故 R_E 等效为 2 个 $2R_E$ 电阻的并联。共模输入电阻是两个信号源各自看进去的等效电阻。

本章小结

1. 集成运算放大器简称为集成运放，是线性模拟集成电路的一种，是一个高增益直接耦合的多级放大电路。主要组成部分有输入级、中间放大级、输出级和偏置电路。

2. 运算放大器的输入级采用差分放大电路，由于电路结构的对称以及发射极电阻 R_E 的直流负反馈作用，差分放大电路能有效地抑制零点漂移。发射极电阻 R_E 对差模输入信号不产生影响，但对于共模干扰信号具有极强的抑制作用。单端输入的差分放大电路在理想条件下等效于双端输入，单端输出的差分放大电路利用 R_E 的负反馈作用在抑制零漂和共模干扰。

3. 差分放大电路对差模输入信号有放大作用，放大能力用差模电压放大倍数 A_{ud} 来表示，定义为差模输出电压和差模输入电压之比。差分放大电路对共模输入信号的放大能力用共模电压放大倍数 A_{uc} 来表示，定义为共模输出电压和共模输入电压之比。差分放大电路应该具有大的差模电压放大倍数和尽可能小的共模电压放大倍数，即共模抑制比尽可能大。

4. 运算放大器采用恒流源组成偏置电路；运用复合管组成的共射极放大电路组成高电压增益的中间级放大电路；采用互补推挽功率放大电路组成输出级。

思考题

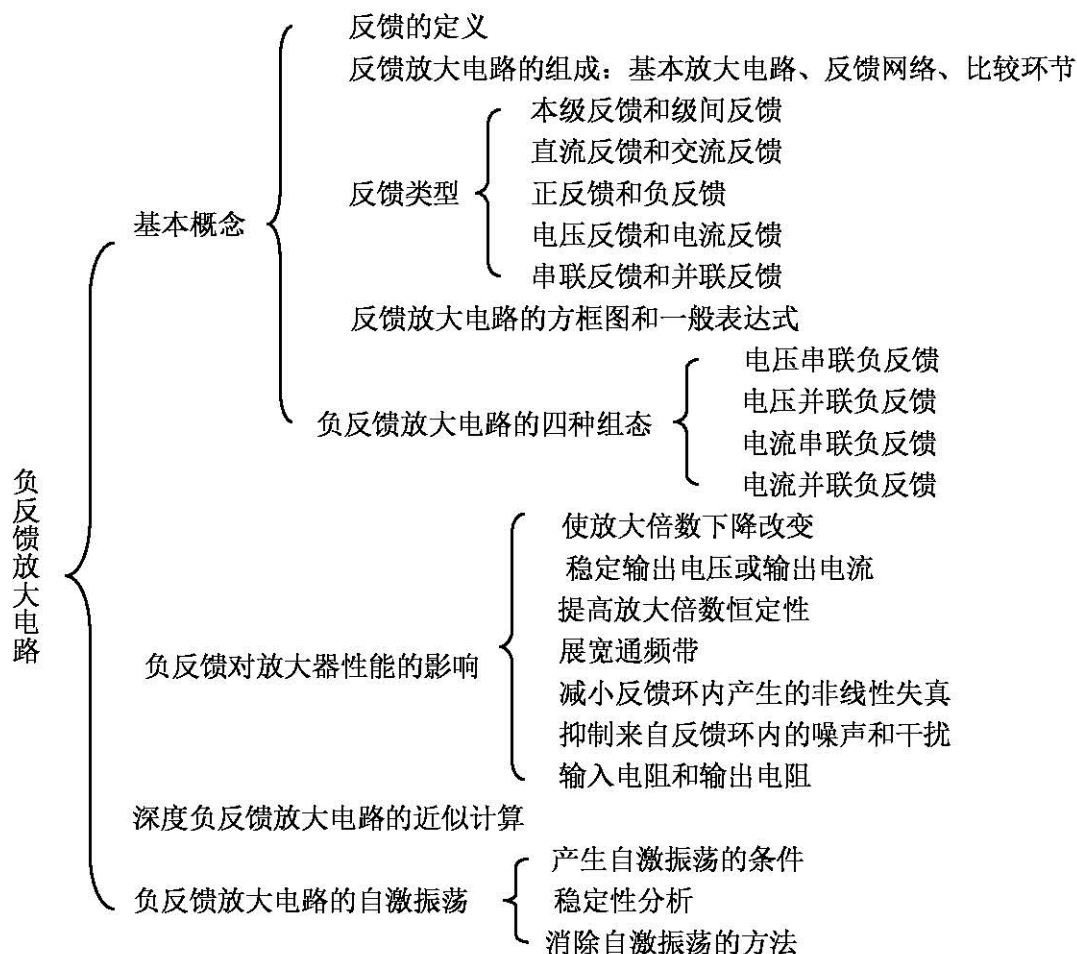
1. 集成运算放大器为什么要采用直接耦合放大电路？直接耦合放大电路最大的问题是什么？
2. 零点漂移产生的主要原因是什么？如何克服零点漂移？
3. 差模信号和共模信号有什么区别？差分放大电路为什么可以抑制共模信号而放大差模信号？
4. 怎样把任意输入信号分解为差模分量和共模分量？
5. 差分放大电路有哪几种输入和输出方式？它们的静态和动态参数计算方法有何异同？
6. 典型差分放大电路中，发射极公共电阻 R_E 的作用是什么？是否此电阻可以无限增大？
7. 集成运放由哪几个部分组成？各部分的作用是什么？

5. 反馈和负反馈放大电路 （文字材料）

本章概要

本章首先介绍反馈的基本概念、分类、负反馈放大电路的四种基本类型及判别方法，然后介绍了负反馈对放大电路各种性能的影响，分析了各种负反馈电路的特点及近似计算。最后，讨论了负反馈放大电路的自激振荡及消除。

本章内容的组成及结构



学习目标

- (1) 熟练掌握负反馈放大电路的基本类型及判断方法；
- (2) 熟练掌握放大电路深度负反馈的近似计算
- (3) 理解负反馈放大电路的一般表达式；
- (4) 理解负反馈对放大电路性能的影响；
- (5) 了解负反馈放大电路自激振荡的原因。

重难点指导

重点

- (1) 负反馈放大电路的基本类型及判断方法;
- (2) 深度负反馈放大电路的近似计算。

难点

- (1) 反馈不同类型的判别;
- (2) 深度负反馈的近似计算。
- (3) 负反馈的正确引入。

本章导学

1. 反馈基本概念

1) 反馈的基本概念

反馈：在电子电路中，把输出回路输出量（电压或电流）的一部分或全部通过一定的网络（称为反馈网络）返送回输入回路并与输入量比较（以串联或并联的方式），以影响电子电路性能的技术称为反馈。

2) 反馈放大电路的组成和方框图

a. 反馈放大电路由基本放大电路、反馈网络及比较环节三个部分组成。

b. 反馈放大电路的方框图如图 5.1 所示，图中 \dot{X}_o （ \dot{U}_o 或 \dot{I}_o ）——反馈放大电路的输出信号，也是基本放大电路的输出信号，又是反馈网络的输入信号，称为“输出量”（输出电压或输出电流）； \dot{X}_i （ \dot{U}_i 或 \dot{I}_i ）——反馈放大电路的输入信号，称为“输入量”（输入电压或输入电流）； \dot{X}_{id} （ \dot{U}_{id} 或 \dot{I}_{id} ）——基本放大电路的输入信号，称为“净输入量”（净输入电压或净输入电流）； \dot{X}_f （ \dot{U}_f 或 \dot{I}_f ）——

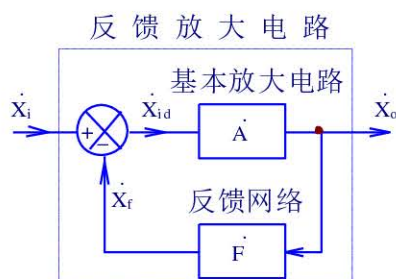


图 5.1 反馈放大电路的方框图

反馈网络的输出信号，称为“反馈量”（反馈电压或反馈电流）。比较环节完成输入量和反馈量的比较从而得到净输入量，在规定这些量的正方向时应满足下述关系：

$$\dot{X}_i = \dot{X}_{id} + \dot{X}_f \quad (5.1)$$

3) 反馈类型

a. 本级反馈和级间反馈：反馈网络连接在同一级放大电路输出回路和输入回路之间，只影响这一级性能的称为本级反馈；在多级放大电路中，反馈网络连接在几级放大电路输出回路和输入回路之间，影响这几级放大电路性能的称为级间反馈。

b. 直流反馈和交流反馈：画放大电路直流通路，在直流通路存在的反馈称为直流反馈，直流负反馈能使放大电路的静态工作点稳定；画放大电路交流通路，在交流通路存在的反馈称为交流反馈，交流负反馈能改善放大电路的动态性能。

c. 正反馈和负反馈：根据反馈极性不同，反馈分为正反馈和负反馈，反馈网络将输出量返回输入回路与输入量比较后，若使净输入量削弱、放大倍数减小，引入的是负反馈；若使净输入量增强、放大倍数提高，引入的是正反馈。正反馈和负反馈可用瞬时极性法判断。

d. 电压反馈和电流反馈：根据反馈网络在放大电路输出回路取样对象不同来区分，若反馈网络从基本放大电路的输出电压中取得信号，即反馈量与输出电压成正比的为电压反馈；若反馈网络从基本放大电路的输出电流中取得信号，即反馈量与输出电流成正比的为电流反馈。

e. 串联反馈和并联反馈：根据反馈信号在放大电路输入回路的连接方式不同来区分。若信号源的两个输出端、反馈网络的两个输出端和基本放大电路的两个输入端互相串联为串联反馈，串联反馈的反馈信号和输入信号在输入回路以电压形式叠加；若信号源的两个输出端、反馈网络的两个输出端和基本放大电路的两个输入端互相并联为并联反馈，并联反馈的反馈信号和输入信号在输入回路以电流形式叠加。因此，

对串联反馈在输入回路有

$$\dot{U}_{id} = \dot{U}_i - \dot{U}_f \quad (5.2)$$

对并联反馈在输入回路有

$$\dot{I}_{id} = \dot{I}_i - \dot{I}_f \quad (5.3)$$

4) 反馈放大电路的一般表达式

在图 5.1 所示的反馈放大电路方框图中，定义开环放大倍数

$$\dot{A} = \frac{\dot{X}_o}{\dot{X}_{id}} \quad (5.4)$$

反馈系数

$$\dot{F} = \frac{\dot{X}_f}{\dot{X}_o} \quad (5.5)$$

闭环放大倍数

$$\dot{A}_f = \frac{\dot{X}_o}{\dot{X}_i} \quad (5.6)$$

则有反馈放大电路的一般表达式：

$$\dot{A}_f = \frac{\dot{A}}{1 + \dot{A}\dot{F}} \quad (5.7)$$

其中 $|1 + \dot{A}\dot{F}|$ 的大小反映了反馈程度的强弱，称为反馈深度。根据反馈深度的大小可以判断电路的状态：

a. 当 $|1 + \dot{A}\dot{F}| = 1$ 时， $|\dot{A}_f| = |\dot{A}|$ ，电路无反馈；

b. 当 $|1 + \dot{A}\dot{F}| > 1$ 时， $|\dot{A}_f| < |\dot{A}|$ ，电路引入负反馈；

c. 当 $|1 + \dot{A}\dot{F}| \gg 1$ 时， $\dot{A}_f \approx \frac{1}{\dot{F}}$ ，电路引入深度负反馈，简称为深反馈；

d. 当 $|1 + \dot{A}\dot{F}| < 1$ 时， $|\dot{A}_f| > |\dot{A}|$ ，电路引入正反馈；

e. 当 $|1 + \dot{A}\dot{F}| = 0$ 时， $|\dot{A}_f| = \infty$ ，电路产生自激振荡，这是电路有正反馈，且满足一定条件下产生的。

5) 负反馈放大电路的四种组态

根据反馈网络在放大电路输出回路取样对象不同来区分，有电压反馈和电流反馈；根据反馈信号在放大电路输入回路的连接方式不同来区分，有串联反馈和并联反馈。采取不同的组合，负反馈放大电路就有四种组态：电压串联负反馈，电压并联负反馈，电流串联负反馈，电流并联负反馈。

由于反馈信号在输出回路取样对象不同、在输入回路的连接方式不同，因此对应于反馈放大电路方框图的 \dot{X}_i 、 \dot{X}_{id} 、 \dot{X}_f 、 \dot{X}_o 和对应于一般表达式中的 \dot{A} 、 \dot{F} 、 \dot{A}_f 含义也不同，表 5.1 给出了这四种负反馈组态的这些参数定义，图 5.2 是它们各自的方框图。

表 5.1. 负反馈放大电路参数的意义

类型 参数	电压串联反馈	电压并联反馈	电流串联反馈	电流并联反馈
$\dot{A} = \frac{\dot{X}_o}{\dot{X}_{id}}$	$\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_{id}}$ 开环电压放大倍数	$\dot{A}_r = \frac{\dot{U}_o}{\dot{I}_{id}} \quad (\Omega)$ 开环互阻放大倍数	$\dot{A}_g = \frac{\dot{I}_o}{\dot{U}_{id}} \quad (S)$ 开环互导放大倍数	$\dot{A}_i = \frac{\dot{I}_o}{\dot{I}_{id}}$ 开环电流放大倍数

$\dot{F} = \frac{\dot{X}_f}{\dot{X}_o}$	$\dot{F}_u = \frac{\dot{U}_f}{\dot{U}_o}$ 电压反馈系数	$\dot{F}_g = \frac{\dot{I}_f}{\dot{U}_o}$ (S) 互导反馈系数	$\dot{F}_r = \frac{\dot{U}_f}{\dot{I}_o}$ (Ω) 互阻反馈系数	$\dot{F}_i = \frac{\dot{I}_f}{\dot{I}_o}$ 电流反馈系数
$\dot{A}_f = \frac{\dot{X}_o}{\dot{X}_i}$	$\dot{A}_{uf} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i}$ 闭环电压放大倍数	$\dot{A}_{gf} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{I}_i}$ (Ω) 闭环互阻放大倍数	$\dot{A}_{gf} = \frac{\dot{I}_o}{\dot{U}_i}$ (S) 闭环互导放大倍数	$\dot{A}_{if} = \frac{\dot{I}_o}{\dot{I}_i}$ 闭环电流放大倍数

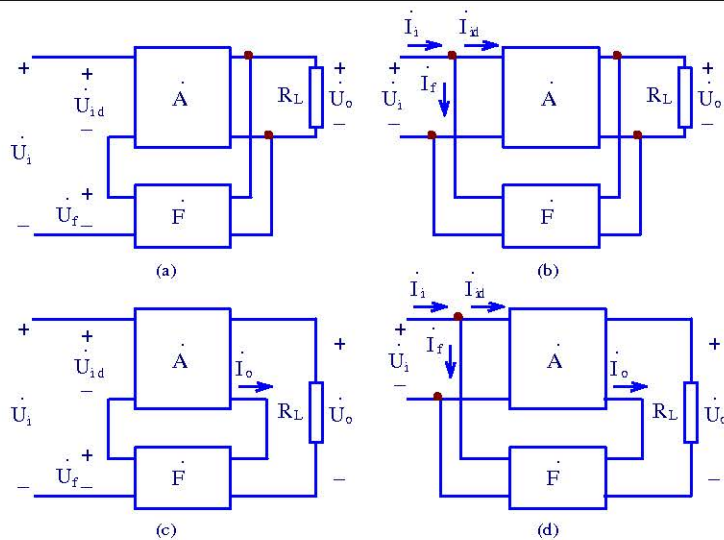


图 5.2 负反馈放大电路的四种组态

- (a) 电压串联负反馈 (b) 电压并联负反馈
(c) 电流串联负反馈 (d) 电流并联负反馈

2. 负反馈对放大电路的影响

1) 提高放大倍数的恒定性: 当基本放大电路的开环放大倍数有大小为 dA/A 的相对变化时, 负反馈放大电路闭环放大倍数的相对变化为

$$\frac{dA_f}{A_f} = \frac{1}{1 + AF} \cdot \frac{dA}{A} \quad (5.8)$$

由于不同组态负反馈放大电路的反馈信号在输出回路取样对象不同、在输入回路的连接方式不同, 对应于一般表达式的 A 、 F 和 A_f 的含义不同, 因此通过负反馈后它们所稳定的闭环放大倍数也不同。电压串联负反馈稳定的是闭环电压放大倍数; 电压并联负反馈稳定的是闭环互阻放大倍数; 电流串联负反馈稳定的是闭环互导放大倍数; 电流并联负反馈稳定的是闭环电流放大倍数。

- 2) 扩展放大电路的通频带: 负反馈使上限截止频率提高, 下限截止频率降低, 通频带扩展。
- 3) 减小反馈环内产生的非线性失真。
- 4) 抑制来自反馈环内的噪声和干扰。
- 5) 改变电路的输出电阻和输入电阻:

- a. 电压负反馈能够稳定输出电压，使输出电阻减小；
- b. 电流负反馈能够稳定输出电流，使输出电阻增大；
- c. 串联负反馈使输入电阻增大；
- d. 并联负反馈使输入电阻减小。

6) 负反馈放大电路性能的改善以降低放大倍数为代价。

3. 正确引入负反馈

了解负反馈对输出电阻和输入电阻的影响，有利于我们正确引入负反馈。当要求输出电压稳定、驱动 R_L 小的负载时，应引入电压负反馈；当要求输出电流稳定时，应引入电流负反馈；当信号源输出电流很小时，要求放大电路有比较大的输入电阻，应引入串联负反馈；如果希望有较小的输入电阻或输入的是电流信号，应引入并联负反馈。

值得一提的是：引入串联负反馈的放大电路要求信号源的内阻尽可能小，且不能用恒流源驱动；引入并联负反馈的放大电路要求信号源的内阻尽可能大，且不能用恒压源驱动。

4. 负反馈放大电路的计算方法

简单的负反馈放大电路（一般由一级基本放大电路组成）常用微变等效电路法计算；由集成运算放大器组成的负反馈放大电路和满足深度负反馈条件的由分立元件组成的负反馈放大电路，按深反馈电路计算。如果需要计算电路的反馈电压增益，则需要根据电路参数进一步计算。

分析计算步骤如下：

首先，判断负反馈的基本类型，然后进一步计算电路的反馈增益或反馈电压增益。

$$1) \text{ 写出电路反馈系数表达式 } \dot{F} = \frac{\dot{X}_f}{\dot{X}_o} \quad (5.9)$$

$$2) \text{ 计算电路的反馈增益 } \dot{A}_f = \frac{\dot{X}_o}{\dot{X}_i} \approx \frac{1}{\dot{F}} \quad (5.10)$$

$$3) \text{ 计算电路的反馈电压增益 } \dot{A}_{uf} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = k \dot{A}_f \quad (5.11)$$

5. 负反馈放大电路的自激振荡及消除

1) 负反馈放大电路产生自激振荡的条件：负反馈放大电路的自激振荡条件是 $\dot{A}\dot{F} = -1$ ，它包含了自激振荡的幅度平衡条件和相位平衡条件，它们可分别用下面两个式子表示：

$$|\dot{A}\dot{F}| = 1 \quad (5.12)$$

$$|\Delta\varphi_A + \Delta\varphi_F| = 180^\circ \quad (5.13)$$

式中的 $\Delta\varphi_A$ 和 $\Delta\varphi_F$ 分别是基本放大电路和反馈网络的附加相移。

根据负反馈放大电路产生自激振荡的条件及含一个惯性环节放大电路的幅频特性和相频特性分析，当负反馈放大电路的基本放大电路和反馈网络共含有三个或三个以上惯性环节时，才有可能产生自激振荡。

2) 负反馈放大电路是不是稳定用幅度裕度 G_m 和相位裕度 φ_m 判断。

3) 消除自激振荡的方法：为了防止含三个或三个以上惯性环节的负反馈放大电路产生自激振荡，常采用相位补偿方法予以抑制。通常在放大电路中加入 RC 补偿网络，改善放大电路的频率特性，使负反馈放大电路有足够的幅度裕度 G_m 和相位裕度 φ_m 。

相关电路分析与计算

1. 反馈类型的判别

1) 电压反馈和电流反馈的判断：用输出短路法判断。具体做法是将负载电阻交流短路，即令 $U_o=0$ ，若反馈消失 ($X_f=0$)，引入的是电压反馈；若反馈仍存在 ($X_f \neq 0$)，引入的是电流反馈。

如图 5.3 所示，电压、电流反馈也可以通过观察反馈电路在输出端的连接方式而直观地判断，若反馈信号直接从输出端引出，或与负载 R_L 并联一分压器对输出电压分压后再引出反馈信号，则为电压反馈；若与负载之间串联一取样电阻后再引出反馈信号，则为电流反馈。

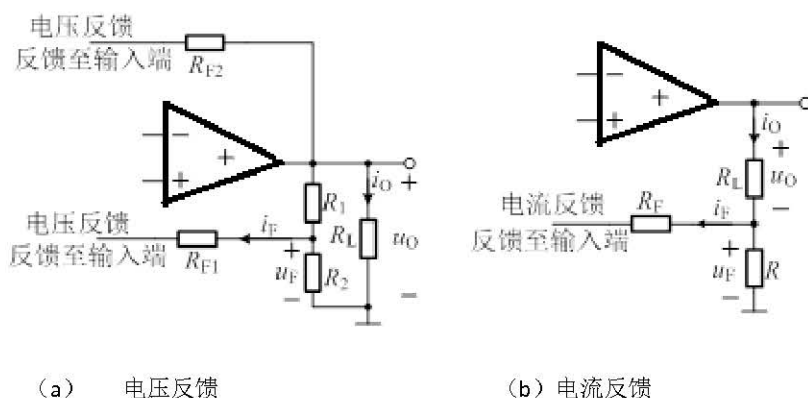


图 5.3 运放组成的放大电路中电压反馈与电流反馈的取样形式

分立元件放大器组成的放大电路中电压反馈与电流反馈的取样形式如图 5.4 所示。需要指出的是：在图 5.4 中电流反馈的取样对象是集电极电流 i_c 而不是 R_L 中的电流 i_o ，在图 5.4(a)中放大电路的交流负载电阻是 $R'_L = R_C // R_L$ ，在图 5.4(b)中放大电路的交流负载电阻是 $R'_L = R_E // R_L$ 。

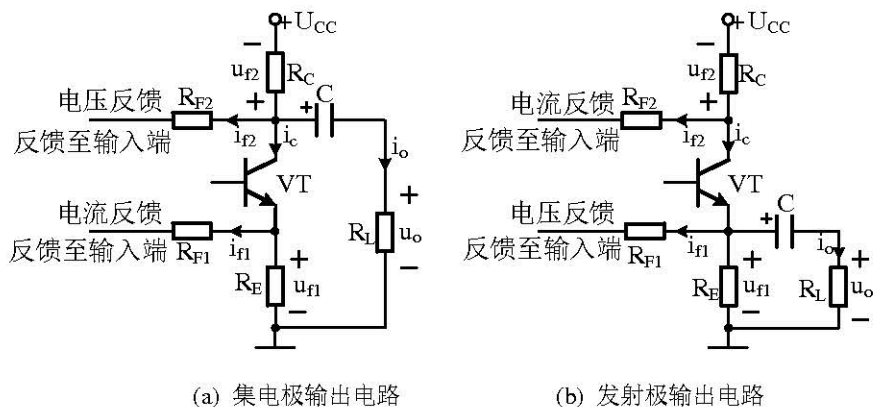


图 5.4 分立元件放大电路中电压反馈与电流反馈的取样形式

2) 串联反馈和并联反馈的判断:

串联、并联反馈也可以根据输入信号和反馈信号在放大电路输入端的连接方式来直观地判断。在输入信号和反馈信号都有一端接“地”的条件下,如果输入信号和反馈信号的另一端分别连接到基本放大电路的两个输入端则是串联反馈;如果输入信号和反馈信号的另一端连接到基本放大电路的同一个输入端则是并联反馈。串联反馈与并联反馈的连接形式如图 5.5 所示。

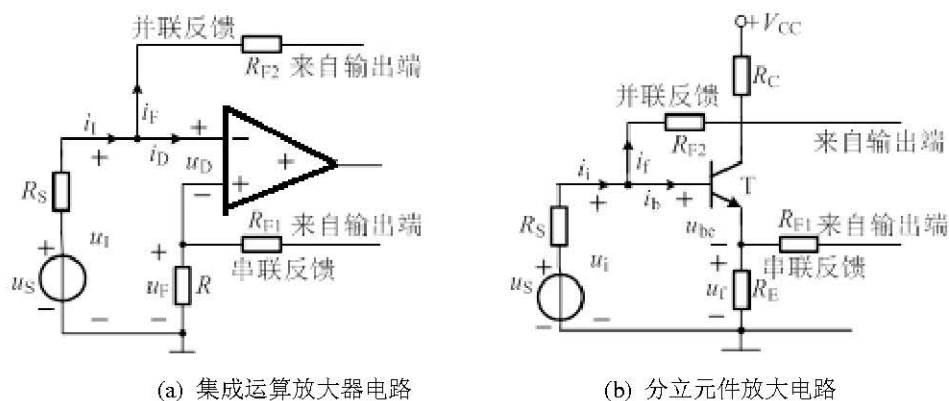


图 5.5 串联反馈与并联反馈的连接形式

3. 正反馈和负反馈的判断: 用瞬时极性法判断。具体做法是在反馈放大电路的输入端加一个瞬时极性(相对于“地”)为正的信号,并在电路上标上符号“+”,并按各级放大电路及反馈网络输出与输入的相位关系,逐一判断各输出节点的瞬时极性,并在电路上标上“+”或“-”的符号,最后根据反馈信号的瞬时极性判别出引入的反馈极性,判别方法是:

- a. 串联反馈若反馈信号的瞬时极性为“+”(与输入信号瞬时极性相同),引入的是负反馈;反馈信号的瞬时极性为“-”(与输入信号瞬时极性相反),引入的是正反馈;
- b. 并联反馈若反馈信号的瞬时极性为“-”(与输入信号瞬时极性相反),引入的是负反馈;反馈信号的瞬时极性为“+”(与输入信号瞬时极性相同),引入的是正反馈。

2. 深反馈电路的计算方法

1) 利用式 $\dot{A}_f \approx \frac{1}{\dot{F}}$ 进行计算

对于电压串联负反馈该式的形式为:

$$\dot{A}_{uf} \approx \frac{1}{\dot{F}_u} \quad (5.14)$$

对于电压并联负反馈该式的形式为:

$$\dot{A}_{uf} \approx \frac{1}{\dot{F}_g} \quad (5.15)$$

对于电流串联负反馈该式的形式为:

$$\dot{A}_{gf} \approx \frac{1}{\dot{F}_r} \quad (5.16)$$

对于电流并联负反馈该式的形式为:

$$\dot{A}_{if} \approx \frac{1}{\dot{F}_i} \quad (5.17)$$

若引入的不是电压串联负反馈, 还要根据具体电路找出 \dot{A}_r 和 \dot{A}_{uf} 的关系, 求出 \dot{A}_{uf} 。

2) 利用式 $\dot{X}_i \approx \dot{X}_f$ 进行计算

对于串联负反馈该式的形式为:

$$\dot{U}_i \approx \dot{U}_f \quad (5.18)$$

对于并联负反馈该式的形式为:

$$\dot{I}_i \approx \dot{I}_f \quad (5.19)$$

再根据 \dot{U}_o 与 \dot{U}_f 的关系代入式 (5.18)、根据 \dot{U}_i 与 \dot{I}_i 、 \dot{U}_o 与 \dot{I}_f 的关系代入式 (5.19), 求得 \dot{A}_{uf} 。

同时, 式 (5.18) 说明引入深度串联负反馈后, $U_{id} \approx 0$, 它表示基本放大电路的输入电压近似为零, 称为“虚短”; 式 (5.19) 说明引入深度并联负反馈后, $I_{id} \approx 0$, 它表示基本放大电路的输入电流近似为零, 基本放大电路的输入端为“虚断”。

本章小结

1. 反馈是指在放大电路中通过反馈网络将输出信号的一部分或全部反馈到输入端从而影响到输出量的调节过程。若反馈量削弱了输入量并使输出量趋于稳定则为负反馈, 反之, 则为正反馈。对正、负反馈常用瞬时极性法进行判断。

3. 对电压、电流反馈的判断常采用输出短路法, 即将负载短路后, 如果反馈消失, 则为电压反馈; 否则为电流反馈。也可以通过观察反馈电路在输出端的连接方式而直观地判断电压与电流反馈, 若反馈信号直接从输出端引出, 或与负载 R_L 并联一分压器对输出电压分压后再引出反馈信号, 则为电压反馈; 若与负载之间串联一取样电阻后再引出反馈信号, 则为电流反馈。

对串联、并联反馈的判断常采用输入短路法, 即假设输入信号源支路短路后, 如果净输入为零, 则为电流反馈; 否则为电压反馈。也可以根据输入信号和反馈信号在放大电路输入端的连接方式来直观地判断串联与并联反馈。在输入信号和反馈信号都有一段接“地”的条件下, 如果输入信号和反馈信号的另一端分别连接到基本放大电路的两个输入端则是串联反馈; 如果输入信号和反馈信号的另一端连接到基本放大电路的同一个输入端则是并联反馈。

4. 不同类型的负反馈对放大器性能的影响不同。负反馈可以稳定放大倍数, 展宽通频带, 改善非线性失真。电压负反馈能稳定输出电压, 减小输出电阻。电流负反馈能稳定输出电流, 增加输出电阻。串联负反馈增加输入电阻, 并联负反馈减小输入电阻。

5. 反馈放大电路有四种基本类型，根据实际需要基本放大电路可以正确引入负反馈，组成负反馈放大电路。简单的负反馈放大电路（一般由一级基本放大电路组成）常用微变等效电路法计算；由集成运算放大器组成的负反馈放大电路和满足深度负反馈条件的由分立元件组成的负反馈放大电路，按深反馈电路计算。如果需要计算电路的反馈电压增益，则需要根据电路参数进一步计算。

6. 负反馈放大电路产生自激振荡的条件：负反馈放大电路的自激振荡条件是 $\dot{A}\dot{F} = -1$ ，它包含了自激振荡的幅度平衡条件和相位平衡条件。当负反馈放大电路的基本放大电路和反馈网络共含有三个或三个以上惯性环节时，才有可能产生自激振荡。

学习中注意的问题

1. 引入负反馈的意义

基本放大电路可以完成信号的不失真放大，但增益的稳定性或者输入电阻或输出电阻等性能不一定满足要求，存在各种缺陷，故引入负反馈可以改善电路的性能。

2. 重点学习的内容

本章学习时，首先要熟练掌握反馈类型的判别，因为反馈类型不同则反馈系数、反馈增益等参数表达式将有差异，必将影响电路深反馈计算的结果，也就是所谓“判错则算错”。

在正确判断反馈类型基础上，再需要熟练掌握深度负反馈的近似计算，即根据电路结构，写出反馈系数的表达式，进而获得电路的反馈增益和反馈电压增益。

思考题

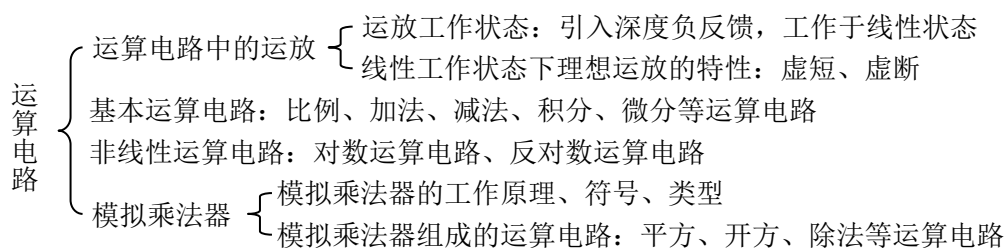
1. 什么是反馈、正反馈、负反馈、交流反馈与直流反馈？
2. 如何用瞬时极性法判断反馈极性？
3. 什么是电压反馈、电流反馈、串联反馈与并联反馈？如何判断反馈的类型？
4. 什么是深度负反馈？负反馈对放大电路的性能有哪些影响？
5. 如何计算深度负反馈放大电路的反馈增益或反馈电压增益？

6. 集成运放组成的运算电路 （文字材料）

本章概要

本章首先介绍了由集成运算放大器（简称“运放”）组成的加法、减法、积分、微分、对数和反对数运算电路，然后分析了模拟乘法器的基本原理及其应用电路，最后介绍了运算放大器的选型、调零、消振和保护等使用中的一些问题。

本章内容的组成及结构



学习目标

- （1）熟练掌握比例、求和、减法及积分运算电路的工作原理和输入、输出关系；
- （2）理解理想运放的概念，及“虚短”和“虚断”的分析方法；
- （3）理解对数运算、反对数运算电路、及对数模拟乘法器的工作原理；
- （4）了解微分电路、对数与反对数电路的原理及应用
- （5）了解运放在使用中应注意的问题。

重难点指导

重点：

- （1）反相输入加法电路及同相输入加法电路的电路组成及分析；
- （2）减法运算及积分运算电路的电路组成及分析；
- （3）模拟乘法器组成的应用电路的电路组成及分析。

难点：

- （1）理想运算放大器的特性；
- （2）运放负反馈电路的“虚断”与“虚短”的分析方法。
- （3）运放组成的复杂线性放大电路输入输出关系的分析。

本章导学

1. 理想运放及集成运放的工作状态

随着集成电路工艺及设计水平的不断提高，集成运算放大器的许多性能指标都非常接近于理想状态，所以在实际中一般都是把集成运算放大器当作理想运算放大器来处理，这样就可以使分析过程大大简化。理想集成运算放大器的条件如下：

- (1)开环电压增益 $A_{ud} \approx \infty$;
- (2)输入电阻 $R_{id} \approx \infty$;
- (3)输出电阻 $R_o \approx 0$;
- (4)共模抑制比 $K_{CMR} \approx \infty$;
- (5) 带宽 $f_{BW} \approx \infty$ 。

此外，集成运放的输入失调电压 U_{IO} ，输入失调电流 I_{IO} 均为零。

集成运放的工作状态：

1) 运算电路中集成运放通常引入深度负反馈，工作于线性工作状态。

2) 理想运放在线性工作状态下的特性：

- a. 集成运放两个输入端之间的电压为零，称为“虚短”。
- b. 集成运放两个输入端的输入电流为零，称为“虚断”。
- c. 当信号从集成运放反相输入端输入，且同相输入端的电位为零时，反相输入端的电位也为零，称为“虚地”，它实际上是“虚短”的一种特殊表现。

在线性工作状态下，理想运放的“虚短”和“虚断”普遍适用，而“虚地”的运用则有条件。

3) 集成运放的三种基本输入形式

- a. 同相输入：信号只从集成运放的同相输入端输入。
- b. 反相输入：信号只从集成运放的反相输入端输入。
- c. 差动输入：集成运放的两个输入端均有信号输入。

4) 集成运放组成的运算电路类型

a. 线性运算电路：运算电路的输出信号和输入信号成线性关系，比例、加法、减法、积分、微分等运算电路就属这一类。

b. 非线性运算电路：集成运放本身虽工作于线性工作状态，但运算电路的输出信号和输入信号成非线性关系，对数和反对数运算电路就属这一类。

2. 基本运算电路

1. 比例运算电路

a. 同相输入比例运算电路：典型电路及传递函数如表 6.1 中所示，实质上这是一个由集成运放组成的电压串联深度负反馈放大电路，运放的两个输入端有“虚短”和“虚断”的特性。具有输入电阻高、两个输入端有大小等于 u_I 共模输入电压的特点。

b. 反相输入比例运算电路：典型电路及传递函数如表 6.1 中所示，实质上这是一个由集成运放组成的电压并联深度负反馈放大电路，运放的两个输入端为“虚断”，反相输入端为“虚地”。具有输入电阻低；两个输入端的共模输入电压几乎为零的特点。

2. 加法运算电路：也有同相输入的加法运算电路和反相输入加法运算电路之分，它们的典型电路及传递函数如表 6.1 中所示。其中反相输入加法运算电路由于反相输入端为“虚地”，各输入信号电流互不影响，因此电路设计中参数的选择比较方便。

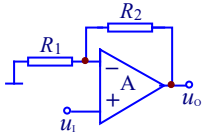
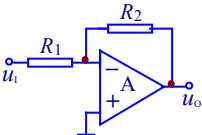
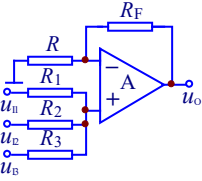
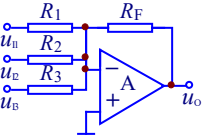
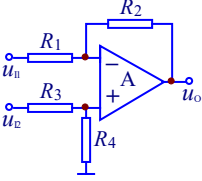
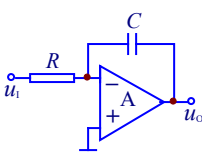
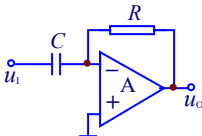
3. 减法运算电路：减法运算电路实际上是运放差动输入的典型电路，它可以被看成是反相输入比例运算电路和同相输入比例运算电路的结合。在分析减法运算电路时，可以使用迭加原理，它的输出是反相输入比例运算电路和同相输入比例运算电路输出之和。其典型电路及传递函数如表 6.1 中所示。

4. 积分运算电路：用电容代替反相输入比例运算电路中的反馈电阻，可构成积分运算电路，其典型电路及传递函数如表 6.1 中所示。积分运算电路在波形产生和变换、电压测量、模数变换

等方面有非常广泛的应用。

5. 微分运算电路：将积分运算电路中的 R 和 C 位置互换，可构成微分运算电路。微分运算电路的典型电路及传递函数如表 6.1 中所示。由于电容容抗与频率成反比，电容容抗随频率提高而下降，电路的闭环电压放大倍数增大，容易产生自激振荡，为此常用一个小阻值电阻与 C 串联。

表 6.1 基本运算电路及其传递函数

电路名称		原理电路	传递函数
比例运算电路	同相输入型		$u_o = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) u_i$
	反相输入型		$u_o = -\frac{R_2}{R_1} u_i$
加法运算电路	同相输入型		$u_o = \frac{R + R_F}{R} (K_1 u_{i1} + K_2 u_{i2} + K_3 u_{i3})$ $K_1 = R_A / R_1, \quad K_2 = R_A / R_2, \quad K_3 = R_A / R_3$ $R_A = R_1 // R_2 // R_3$
	反相输入型		$u_o = -(K_1 u_{i1} + K_2 u_{i2} + K_3 u_{i3})$ $K_1 = R_F / R_1, \quad K_2 = R_F / R_2, \quad K_3 = R_F / R_3$
减法运算电路			$u_o = \frac{R_1 + R_2}{R_1} \cdot \frac{R_4}{R_3 + R_4} u_{i2} - \frac{R_2}{R_1} u_{i1}$ 当 $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$ 时: $u_o = u_{i2} - u_{i1}$
积分运算电路			$u_o(t) = -\frac{1}{RC} \int u_i(t) dt$
微分运算电路			$u_o(t) = -RC \frac{du_i(t)}{dt}$

3. 对数和反对数运算电路

对数和反对数运算电路分别如图 6.1(a)、(b) 所示。由于晶体管电流和电压成非线性关系，所以它们的输出电压和输入电压也有非线性关系。因为对数和反对数运算电路均引入深度负反馈，因此集成运放仍工作于线性状态。

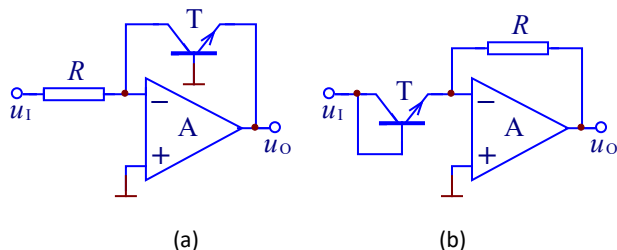


图 6.1 对数和反对数运算电路

(a) 对数运算电路 (b) 反对数运算电路

4. 模拟乘法器

1) 基本概念

a. 符号和功能：模拟乘法器的符号如图 6.2 所示。输出电压 u_o 正比于两个输入电压 u_x 、 u_y 的乘积。

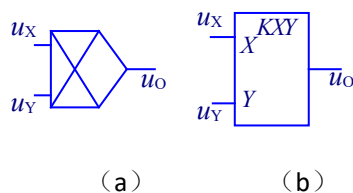


图 6.2 模拟乘法器的符号

(a) 惯用符号 (b) 国标符号

b. 类型及组成方法：类型有对数型模拟乘法器和变跨导式模拟乘法器等。前者由对数和反对数运算电路构成，要求输入信号为单一极性，属单象限乘法器；后者利用在带电流源的差动放大电路中，晶体管的跨导 g_m 正比于电流源的输出电流这一原理构成，它的两个输入端输入电压既可“正”，也可“负”，属四象限乘法器

2) 模拟乘法器组成的运算电路

除了组成乘法运算电路外，还有平方运算电路、开方运算电路、除法运算电路等，它们的典型电路如图 6.3 所示。

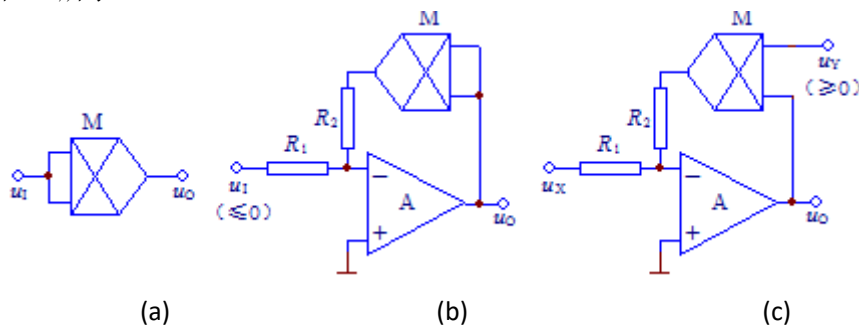


图 6.3 模拟乘法器组成的运算电路

(a) 平方运算电路 (b) 开方运算电路 (c) 除法运算电路

相关电路分析与计算

1. 理想集成运放组成的运算电路

1) “虚短”、“虚断”及“虚地”在分析计算中的表达形式：图 6.4 是基本运算电路的两种输入形式，其中运放的反相输入端用“N”表示，同相输入端用“P”表示。

a. 同相输入型

“虚短”：

$$u_N = u_P \quad (6.1)$$

“虚断”：

$$i_1 = i_2 \quad (6.2)$$

b. 反相输入型

“虚短”：

$$u_N = u_P \quad (6.3)$$

“虚地”：

$$u_N = 0 \quad (6.4)$$

“虚断”：

$$i_1 = i_2 \quad (6.5)$$

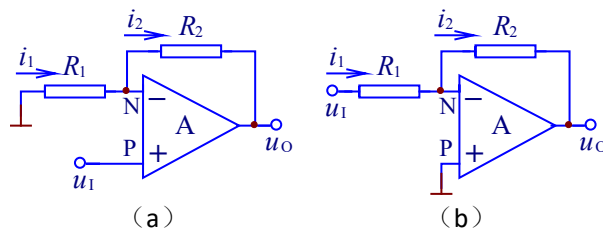


图 6.4 基本运算电路中的两种输入形式

(a) 同相输入型 (b) 反相输入型

2) 叠加原理在线性运算电路分析中的应用：在理想运放组成的线性运算电路分析中，可以应用线性电路分析中的一些方法，如叠加原理和戴维南定理等。对于如图 6.5(a)所示的基本运算电路差动输入形式，其输出电压 u_O 是 u_{11} 、 u_{12} 分别单独作用产生的输出电压 u_{O1} 、 u_{O2} 之和。当 u_{11} 单独作用时，令 u_{12} 为零，等效电路如图 6.5 (b) 所示，实际上这是一个反相输入比例运算电路，其输出

$$u_{O1} = -\frac{R_2}{R_1} u_{11}$$

当 u_{12} 单独作用时，令 u_{11} 为零，等效电路如图 6.5 (c) 所示，实际上这是一个同相输入比例运算电路，其输出

$$u_{O2} = \frac{(R_1 + R_2)R_4}{R_1(R_3 + R_4)} u_{12}$$

应用叠加原理可求得图 6.5(a)所示电路的输出电压

$$u_O = u_{O1} + u_{O2} = \frac{(R_1 + R_2)R_4}{R_1(R_3 + R_4)}u_{I2} - \frac{R_2}{R_1}u_{I1} \quad (6.6)$$

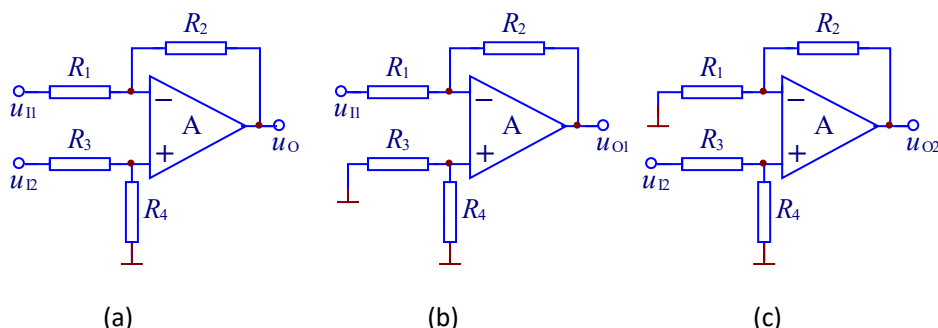


图 6.5 叠加原理的应用

(a) 减法器——运放的差动输入形式 (b) u_{I1} 单独作用 (c) u_{I2} 单独作用

2. 模拟乘法器组成的运算电路

1) 模拟乘法器的基本运算功能

$$u_O = Ku_X u_Y \quad (6.7)$$

式中的 K 称为比例因子，单位为 $1/V$ ，通常 $K > 0$ 。

2) 运放和模拟乘法器组成的各种运算电路引入的反馈极性往往与输入信号的极性有关，所以在分析这类电路时，要注意对输入信号极性的要求。

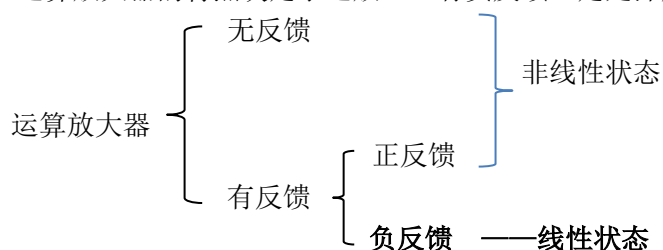
学习中注意的问题

1. 判断运算放大器的工作状态

运算放大器的工作状态分为：线性与非线性

判断原则：有无负反馈

运算放大器的特点决定了运放一旦有负反馈一定是深度负反馈。



只有线性工作状态下理想运放的特性：“虚短”及“虚断”

而当运放工作非线性状态时，则“虚短”不成立，即运放的两个输入端“+”和“-”的电压不再时时相等。由于运算放大器的输入电阻很大，故“虚断”仍然成立，即运放的净输入电流近似为 0。

2. 理想运放和“虚短”、“虚断”的概念

理想运放（见图 6.6）指集成运放的各项指标达到理想化，例如：开环差模电压增益 A_{ud} 、差模输入电阻 R_{id} 、共模抑制比 K_{CMR} 近似于无穷大，输出电阻 R_o 近似于 0。运用理想运放可以简化

分析，抓住电路主要特性。

“虚短”和“虚断”是集成运放工作在深度负反馈时的主要特性。

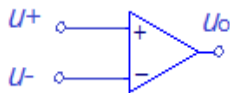


图 6.6 理想运放

已知理想运放的开环差模增益 $A_{ud} \approx \infty$ ，当理想运放工作在线性区时，输出电压与输入电压存在线性关系，

$$U_o = A_{ud}(u_+ - u_-)$$

则

$$u_+ - u_- = U_o / A_{ud} \approx 0$$

故

$$u_+ \approx u_-$$

说明运放的同相端电压与反相端电压近似相等，仿佛有导线短接了两个端子，故称为“虚短”。由于理想的运放差模输入电阻 $R_{id} \approx \infty$ ，则流入个输入端子的电流近似为 0，即 $i_+ \approx i_- \approx 0$ ，故称之为“虚断”。注意“虚短”和“虚断”不是真正的短路和断开，否则没有信号输入运放是无法工作放大信号的。

3. 运算电路的分析方法

正确理解理想运放的“虚短”、“虚断”及“虚地”，这时运算电路的主要分析方法。各种运算电路在运放处于线性工作的条件下，列出含反馈支路的节点电流方程，反复运用“虚短”和“虚断”，可以正确求解出输出与输入信号的关系式。在理想运放组成的线性运算电路分析中，可以应用线性电路分析中的一些方法，如叠加原理和戴维南定理等。

4. 运放组成的级联电路分析

由于运算放大器理想，即输入电阻 R_{id} 近似于无穷大，输出电阻 R_o 近似于 0。因此，由运放组成的级联电路可以断开前级和后级，只计算含一只运放的运算电路，并将输出结果作为下一级电路的输入信号。

本章小结

1. 实际中一般都是把集成运算放大器当作理想运算放大器来处理，这样就可以使分析过程大大简化。集成运放的工作状态可以分为线性和非线性。只有加入深度负反馈，运放的工作状态才是线性的。

2. 根据理想运算放大器得出的“虚短”和“虚断”概念是分析运放线性应用的基础。反相比例器、同相比例器、减法器是运放线性应用的三种基本电路结构形式。反相比例器是并联电压负反馈电路，它的反相输入端电位与参考地近似相等，即“虚地”。

3. 集成运放组成的运算电路主要包括比例器、加法器、减法器、积分器、微分器以及对数和反对数电路。由于这些运算电路都存在深度负反馈，集成运放的工作状态是线性的。电路可以采用“虚短”和“虚断”的分析方法推导出信号的输入和输出关系式。

4. 模拟乘法器可以实现两路输入信号相乘运算，可以组成平方、除法、开方等运算电路，并可以用于信号的调制与解调。

5. 集成运放在使用时要注意选型、调零、消振和保护等问题。

思考题

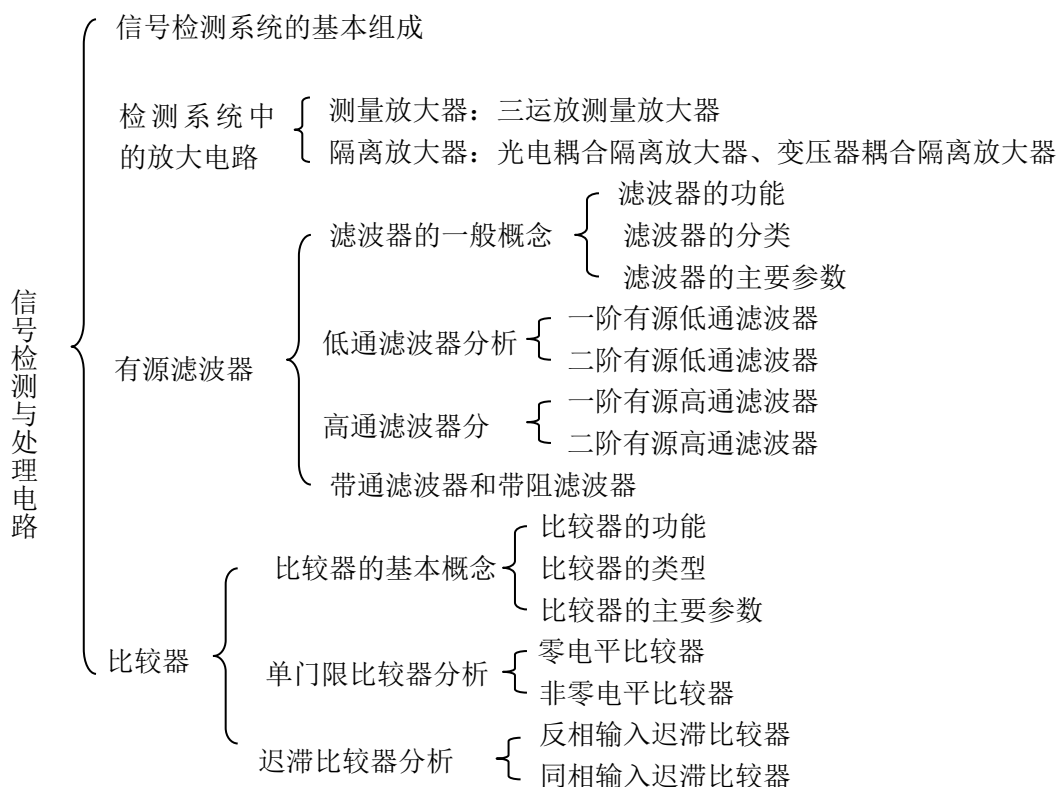
1. 反相输入加法电路与同相输入加法电路有什么区别，各有什么优点？
2. 实现减法运算有几种方案可供选择？
3. 在实际应用中，使用积分运算和微分运算电路时需要注意哪些问题？
4. 如何用对数和反对数运算电路构成模拟乘法器？你能用乘法器和运算放大器构成哪些应用电路？
5. 集成运算放大器选型和使用时要注意哪些问题？

7. 信号检测与处理电路 （文字材料）

本章概要

本章首先介绍了信号检测系统的基本原理及信号检测与处理电路在系统中的作用，然后分别介绍了系统中常用的测量放大器、隔离放大器、RC 有源滤波器和电压比较器的工作原理。

本章内容的组成及结构



学习目标

- (1) 熟练掌握测量放大器的电路结构及工作原理；
- (2) 熟练掌握滤波器的基本知识；
- (3) 熟练掌握一阶有源低通及高通滤波器的特性分析；
- (4) 熟练掌握电压比较器的特性和分析方法；
- (5) 理解隔离放大器的结构及基本工作原理；
- (6) 了解信号测量系统的基本组成。

重难点指导

重点：

- (1) 三运放测量放大器的电路结构及工作原理;
- (2) 一阶有源低通及高通滤波器的特性分析;
- (3) 电压比较器的组成和特性分析。

难点:

- (1) 运算放大器的非线性分析方法;
- (2) 如何绘制比较器电路的传输特性。

本章导学

1. 信号检测系统

基本组成: 传感器(或电极、互感器等)、放大器、滤波器、采样-保持器和 A/D 转换器等
自然界的信号分成两大类: 电类和非电类

电类: 如心电信号、脑电信号, 微弱信号可以通过电极引入测量系统。而电力系统的信号都是大电压和大电流, 必须通过互感器(电压互感器或电流互感器)转化为小信号再引入测量电路。

非电类: 如压力、速度、温度等, 这些信号需要通过传感器将非电信号转化为电信号, 引入测量系统。

在信号处理电路中, 后续测量系统应根据实际情况合理选择电路组成。

2. 检测系统中的放大电路

1) 测量放大器

测量放大器又称仪表放大器, 具有高增益、高输入阻抗、高共模抑制比、直接耦合放大电路。电路采用三运放放大电路, 用于热电偶、应变电桥、流量计、生物电测量等有交大共模干扰的直流缓变信号的检测。

2) 隔离放大器

隔离放大器是一种特殊的测量放大电路, 器输入回路和输出回路是电气绝缘的, 但信号相通。隔离的目的: 安全性和抗干扰

3. 有源滤波器

- 1) 滤波器的功能: 允许一部分频率的信号顺利通过, 而对另一部分频率的信号进行抑制。
- 2) 滤波器性能的描述方法: 滤波器的性能常用传递函数、幅频特性和一些参数来描述。
- 3) 滤波器的分类

- a. 按被处理信号是连续的还是离散的, 可分为模拟滤波器和数字滤波器。
- b. 按滤波器中有无使用有源器件, 可分为无源滤波器和有源滤波器两种。

无源滤波器: 只使用无源元件(R 、 L 、 C)组成。它主要利用电感或电容的电抗随信号频率变化而改变来设计。这种滤波器的优点是电路简单、可靠; 可以在大电流或高电压下使用; 不需要工作电源。缺点是对通带内的信号有损耗; 负载对滤波特性影响较大, 所以不容易通过级连获得更好的滤波特性; 当使用电感组成滤波器时还有体积大、重量重、容易产生电磁干扰等问题。

有源滤波器: 由无源的滤波网络(一般是 RC 网络)和有源器件(如集成运算放大器)组成。这种滤波器的优点是可以对通带内的信号进行放大; 负载对滤波特性影响小, 容易通过级连获得更好的滤波特性; 体积小、重量轻。但这种滤波器需要直流电源供电, 可靠性也比无源滤波器低; 不适合在大电流、高电压和高频场合下使用。

c. 按滤波器的频率特性区分,可分为低通滤波器 (LPF)、高通滤波器 (HPF)、带通滤波器 (BPF)、带阻滤波器 (BEF) 和全通滤波器 (APF)。

低通滤波器: 允许信号中的直流和低频分量通过,抑制高频分量或高频干扰和噪声。

高通滤波器: 允许信号中的高频分量通过,抑制信号中的低频分量、低频干扰及直流分量。

带通滤波器: 只允许信号中的某一频段通过,抑制高于和低于这一频段的信号、干扰及噪声。

带阻滤波器: 只抑制某一频段的信号,允许高于和低于这一频段的信号通过。常用来抑制某些特定频率的干扰,如工频 50Hz 或整流电路产生的 100Hz 交流干扰。

全通滤波器: 没有阻带,允许所有频率分量信号通过,但它的相移随频率而变。

在理想情况下各种滤波器的幅频特性如图 7.1 所示。在滤波器的幅频特性中,通常把能够通过的频率范围称为“通带”,而被衰减或被阻止通过的频率范围称为“阻带”。实际的幅频特性在通带和阻带之间还有“过渡带”,以低通滤波器为例,它的实际幅频特性如图 7.2。

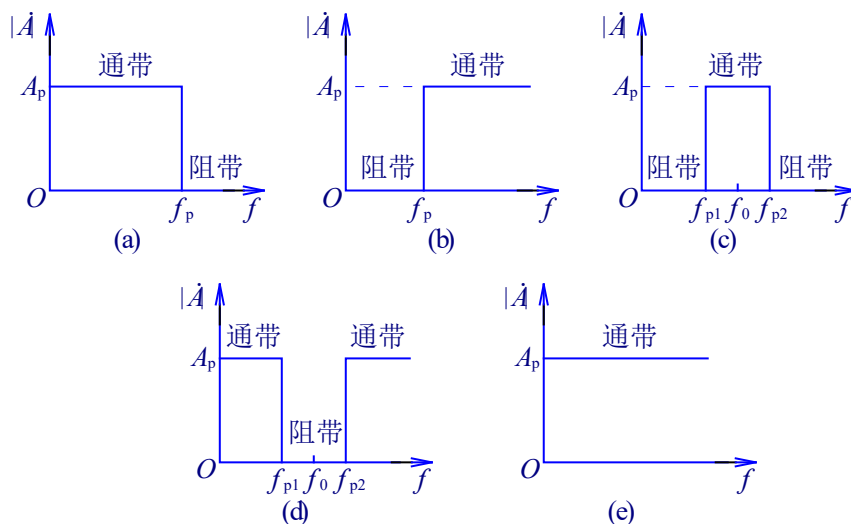


图 7.1 各种滤波器的理想幅频特性

(a) 低通滤波器(LP) (b) 高通滤波器(HP) (c) 带通滤波器(BP)
(d) 带阻滤波器(BE) (e) 全通滤波器(AP)

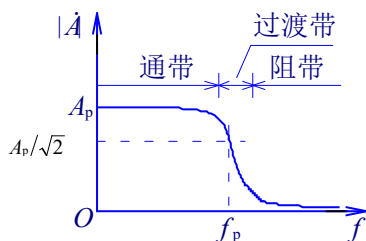


图 7.2 低通滤波器的实际幅频特性

d. 按传递函数分母中“s”的最高次幂区分: s 最高次幂是一次的为一阶滤波器; s 最高次幂是二次的为二阶滤波器; $s \geq 2$ 的统称为高阶滤波器。

4) 滤波器的主要参数

- a. A_{up} (或用 A_0 表示): 称为通带电压放大倍数或通带电压增益。
- b. f_p (或用 f_c 表示): 称为通带截止频率, 是 A_{up} 下降到 $A_p/\sqrt{2}$ 时的工作频率。带通和带阻滤波器都有两个通带截止频率。
- c. f_0 : 它是一个只与起滤波作用的 R 、 C 值有关的参数。在 LPF 和 HPF 中称为特征频率, 有的教材用 f_n 表示特征频率; 对于带通 (带阻) 滤波器称为通带 (阻带) 中心频率, 是带通 (带阻) 滤波器通带 (阻带) 中电压放大倍数最大 (最小) 时的频率。
- d. f_{bw} : 带通滤波器中称为通带宽度; 带阻滤波器中称为阻带宽度。都是两个通带截止频率的差, 即 $f_{bw}=f_{p2}-f_{p1}$ 。
- e. Q : 称为品质因数。

4. 电压比较器

1. 比较器的功能

- a. 电压比较: 比较两个输入电压的相对大小。
- b. 电平鉴别: 当参与比较的两个电压中, 一个为参考电压 U_R , 另一个为被鉴别的输入电压 u_I 时, 可以鉴别 u_I 的电平等于 U_R 的时刻。
- c. 整形: 比较器的输出只有高电平和低电平两种状态, 所以它可以将输入的模拟信号整形为矩形波, 常用来进行模——数转换。

2. 运放组成的比较器

运放的工作状态: 一般引入正反馈或开环, 运放工作于非线性状态。所以在分析运放组成的比较器电路时不能使用“虚短”或“虚地”, 但由于运放的输入电阻极大, 输入电流几乎为零, 所以仍可使用“虚断”。

3. 比较器的主要性能指标

- a. 阈值电压 U_{th} : 也称门坎电压或门限电压, 是比较器输出发生跃变时的输入电压值。
- b. 输出高电平 U_{OH} 、输出低电平 U_{OL} 。

4. 比较器的类型

- a. 串联型和并联型: 输入电压 u_I 和参考电压 U_R 接入运放不同输入端的为串联型; u_I 和 U_R 接入运放同一输入端的为并联型。
- b. 同相型和反相型: u_I 接入运放同相输入端的为同相型; u_I 接入运放反相输入端的为反相型。
- c. 单门限比较器和多门限比较器: 在比较器工作过程中, 阈值电压始终不变的为单门限比较器; 在比较器工作过程中, 有两个或两个以上阈值电压的为多门限比较器。但多门限比较器中的每一运放, 在某一瞬时的阈值电压仍是单一的。
- d. 集成比较器: 是一种为比较器而专门设计制造的模拟集成电路。具有速度高、输出电平一般可以与 TTL 等数字电路兼容、性能稳定、带负载能力强等优点。

相关电路分析与计算

1. 有源滤波器

1) 一般分析方法: 根据电路原理图在复频域利用拉氏变换列电路方程, 即可求得有源滤波器传递函数的复频域表达式。再以 $j\omega$ 代替传递函数中的 s , 就可以得到传递函数的频域表达式, 如表 7.1 所示。

2) 理想运放组成的有源滤波器, 引入深度负反馈, 所以分析时可以使用“虚短”、“虚断”、“虚

地”。

表 7.1 常用有源滤波器传递函数的一般表达式

滤波器类型	传递函数	通带电压放大倍数
一阶低通滤波器	$A(s) = \frac{a_0}{s + \omega_0}$	$A(0) = \frac{a_0}{\omega_0}$
一阶高通滤波器	$A(s) = \frac{a_1 s}{s + \omega_0}$	$A(\infty) = a_1$
二阶低通滤波器	$A(s) = \frac{a_0}{s^2 + \frac{\omega_0}{Q}s + \omega_0^2}$	$A(0) = \frac{a_0}{\omega_0^2}$
二阶高通滤波器	$A(s) = \frac{a_2 s}{s^2 + \frac{\omega_0}{Q}s + \omega_0^2}$	$A(\infty) = a_2$
带通滤波器	$A(s) = \frac{a_1 s}{s^2 + \frac{\omega_0}{Q}s + \omega_0^2}$	$A(\omega_0) = \frac{a_1 Q}{\omega_0}$
带阻滤波器	$A(s) = \frac{a_2(s^2 + \omega_0^2)}{s^2 + \frac{\omega_0}{Q}s + \omega_0^2}$	$A(\infty) = A(0) = a_2$

重点需要掌握的是一阶低通与一阶高通有源滤波器的特性与分析。

3) 有源滤波器的功能判别

a. 由电路中无源 RC 网络的形态来判别：在滤波器中常见的 RC 网络有图 7.3 所示的几种。其中带通网络由低通和高通网络串联组成；带阻网络是由低通和高通 T 形网络并联组成的双 T 网络。

b. 通过传递函数表达式来判别：当电路比较复杂时，可将推导出的传递函数与表 7.1 进行比较，确定有源滤波器的类型。

4) 求通带增益 A_{up}

- 低通滤波器： A_{up} 为 $f=0$ 时的输出电压和输入电压之比。
- 高通滤波器： A_{up} 为 $f \rightarrow \infty$ 时的输出电压和输入电压之比。
- 带通滤波器： A_{up} 为 $f=f_0$ 时的输出电压和输入电压之比。
- 带阻滤波器： A_{up} 为 $f=0$ 时的输出电压和输入电压之比。

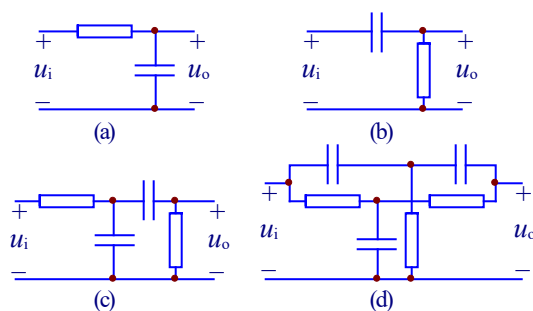


图 7.3 几种常见的 RC 网络

(a) 低通 (b) 高通 (c) 带通 (d) 带阻

2. 电压比较器

1) 比较器的输出电压计算 (参阅图 7.4)

a. $u_N > u_P$ 时

$$u_O = U_{OL} \quad (7.1)$$

b. $u_N < u_P$ 时

$$u_O = U_{OH} \quad (7.2)$$

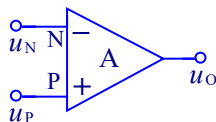


图 7.4 电压比较器

2) 比较器的阈值电压计算

写出运放两个输入端电压 u_N 和 u_P 的表达式, 并用 U_{th} 代替式中的 u_1 。根据比较器的特性, 当两个输入端电压相等的瞬间, 比较器将翻转一次。故令 $u_N = u_P$, 解此方程, 即可得 U_{th} 的表达式或电压值, 这就是比较器的阈值电压。单门限比较器 (运放是开环状态) 阈值电压只有一个值; 而迟滞比较器 (运放接入正反馈), 则阈值电压是两个值。

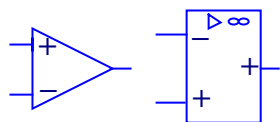
3) 传输特性曲线

比较器的传输特性是其输入和输出电压的关系图, $u_O = f(u_1)$, 它反映了比较器的翻转特性。传输特性曲线包括坐标轴、阈值电压、输出结果和翻转方向。

4) 翻转方向

电压比较器根据输入信号的不同端子 (运放的同相端或反相端), 可以分成同相输入比较器或者反相输入比较器, 其翻转方向有差异。例如: 反相输入迟滞比较器的传输特性翻转方向是顺时针的; 而同相迟滞比较器的传输特性翻转方向是逆时针的。

集成运放的符号: 如下图所示。表 7.2 列出了各类电压比较器的电路结构、电压传输特性及阈值电压。



(a) 惯用符号 (b) 国家标准符号

集成运放的符号

表 7.2 常用基本电压比较器电路

名称	电路结构	电压传输特性	说明
开环型单门限电压比较器	反相输入串联型 		反相输入 运放工作于饱和区 $U_T = U_R$
	同相输入串联型 		同相输入 运放工作于饱和区 $U_T = U_R$
	反相输入并联型 		反相输入 运放工作于饱和区 $U_T = -\frac{R_1}{R_2} U_R$
	同相输入并联型 		同相输入 运放工作于饱和区 $U_T = \frac{R_1}{R_2} U_R$
迟滞比较器	反相输入串联型 		反相输入 运放工作于非线性状态 $U_{TL} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U_R - \frac{R_1}{R_1 + R_2} U_Z$ $U_{TH} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U_R + \frac{R_1}{R_1 + R_2} U_Z$
	同相输入串联型 		同相输入 运放工作于非线性状态 $U_{TL} = (1 + \frac{R_1}{R_2}) U_R - \frac{R_1}{R_2} U_Z$ $U_{TH} = (1 + \frac{R_1}{R_2}) U_R + \frac{R_1}{R_2} U_Z$

学习中注意的问题

1. 集成运放的工作状态与分析手段

集成运放除广泛应用在线性电路中外, 在非线性电路中也起着重要作用。集成运放在非线性电路中有两种工作状态: 一类是运算放大器处于开环或正反馈状态, 本身工作在非线性区, 这时

对运放不能用“虚短”概念分析,但仍可用“虚断”概念分析。另一类是电路中有其它的非线性元件,如二极管、稳压管等,使得输出 u_o 与输入 u_i 不再是线性关系,但运放本身仍然工作在线性区。这时对运放就可以用“虚短”和“虚断”概念分析。

2. 测量放大器分析

虽然是三只运算放大器构成的测量放大器电路,但要注意电路一定要分两级来分析。前两只运放构成都是电压串联负反馈,可以增大电路的输入电阻(串联负反馈增大输入电阻);第三只运放构成的是减法电路(也称运放的差分输入),目的是克服共模干扰,增大电路的共模抑制比。

3. 滤波器电路分析

一阶低通有源滤波器电路与第 6 章的积分器改进电路类似。同一个电路有两个不同的分析思路:时域和频域。积分器研究的是时域问题,即输出电压与输入电压随时间的变化规律,

$u_o(t) = -\frac{1}{RC} \int u_i(t) dt$ 。滤波器研究的是频域问题,分析电路是为了确定通过滤波器的信号频率范围,其输入和输出关系式:

$$A(jf) = \frac{A_0}{1 + jf/f_c}$$

4. 电压比较器分析

运算放大器组成电路不一定是电压比较器,有可能是放大电路。所以,首先要判断运放的工作状态。只有运放工作在开环或者正反馈条件下,电路才构成比较器。

确定电路是电压比较器后,可以按以下步骤分析:

- 1) 分析比较器类型(单门限 or 迟滞比较器)
- 2) 同相输入 or 反相输入比较器(确定翻转的方向)
- 3) 分析比较器的翻转点(U_L 与 U_H)
- 4) 画出传输特性(坐标轴、阈值电压、输出电压、翻转方向,传输特性中心点)
- 5) 其它分析(若给出输入信号,画出输出波形等)

本章小结

1. 检测系统的主要包括传感器(或电极、互感器等)、放大器、滤波器、采用-保持器和 A/D 转换器等几个部分。测量放大器具有高输入阻抗、高共模抑制比等特点,广泛应用于信号检测系统中。隔离放大器的输入和输出侧在电器上是绝缘的,信号传输过程没有公共的接地点,用于高电压、强电磁干扰等检测系统,或者用于医疗系统中,避免人身伤害。

2. 在滤波器的幅频特性中,通常把能够通过的频率范围称为“通带”,而被衰减或被阻止通过的频率范围称为“阻带”。实际的幅频特性在通带和阻带之间还有“过渡带”。有源滤波器具有性能稳定、负载效应小、设计与调整方便等优点,在检测系统中可以根据系统需要选择低通、高通、带通和带阻有源滤波器。有源滤波器的功能判别可以采用两种方法,一是由电路中的无源 RC 网络的形态来判别;二是通过传递函数表达式来判别。

3. 电压比较器可以比较两个输入电压的相对大小,其输出状态是高或低电平。根据信号加入集成运放电极位置的不同,比较器分为同相输入和反相输入两种,其输出电平翻转的方向不同。根据翻转电平(或称阈值电平)数目的不同,比较器又可以分为单门限比较器和多门限比较器(主要是迟滞比较器)。在电压比较器中,集成运算放大器工作在非线性状态,因而比较器输入的是模拟信号,输出的是数字信号,它是模拟电路与数字电路之间的接口电路。单门限比较器(集成运放开环,一个翻转电平)电路简单,使用方便但抗干扰能力差;而迟滞比较器(集成运放加入正

反馈，有两个翻转电平）有较强的抗干扰能力，但存在不灵敏区域。

思考题

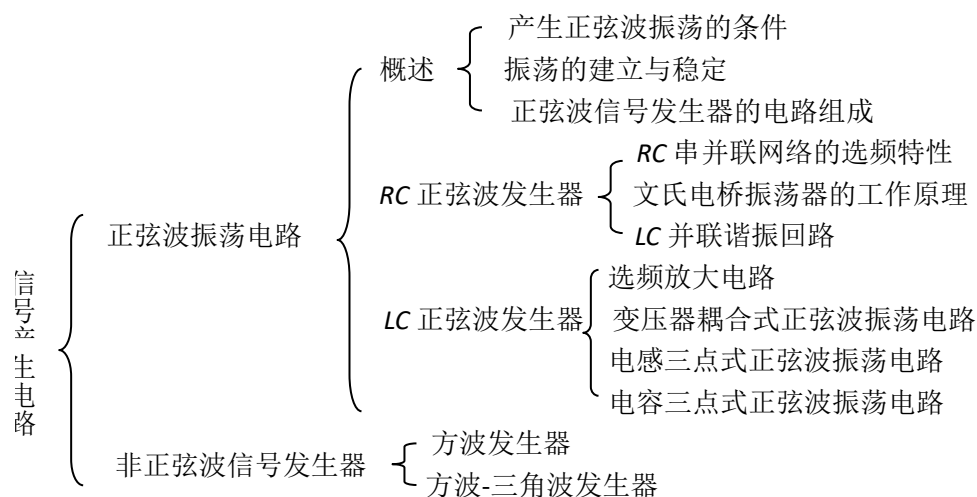
1. 测量放大器与一般的放大器相比有哪些特点？
2. 隔离放大器的作用是什么？应用于哪些测量？
3. 滤波器的功能是什么？什么是有源滤波器？低通和高通有源滤波器的电路结构和幅频特性是什么？
4. 理想运放工作于线性区和非线性区各有何特点？分析方法有何不同。
5. 电压比较器的输出有几个状态？迟滞比较器和任意电平比较器相比有哪些优点？
6. 在电压比较器中，运算放大器工作在什么状态？如何分析比较器电路特性？

8. 信号发生器 （文字材料）

本章概要

本章首先介绍了正弦波自激振荡的基本原理，接着分析了 RC 和 LC 正弦波信号发生器的工作原理，然后介绍了由集成运放构成的非正弦信号发生器，包括方波信号发生器、方波-三角波信号发生器。

本章内容的组成及结构



学习目标

- (1) 熟练掌握产生正弦波振荡的幅度和相位平衡条件；
- (2) 熟练掌握文氏振荡电路的工作原理、振荡频率、起振条件和电路特点；
- (3) 熟练掌握非正弦信号发生器的分析方法；
- (4) 理解方波、三角波发生器的电路组成及工作原理；

重难点指导

重点：

- (1) 熟练掌握产生正弦波振荡的幅度和相位平衡条件；
- (2) 熟练掌握文氏振荡电路的工作原理、振荡频率、起振条件和电路特点；
- (3) 熟练掌握非正弦信号发生器的分析方法；
- (4) 理解方波、三角波和锯齿波发生器的电路组成及工作原理。

难点：

- (1) 文氏振荡电路的特性分析；
- (2) 方波及三角波电路的特性分析。

本章导学

1. 正弦波振荡电路

1) 功能：产生正弦波信号输出。

2) 正弦波振荡的建立：正弦波振荡电路可用图 8.1 所示的方框图示意。其中放大环节 A 的电压增益为 \dot{A} 、正反馈网络 F 的反馈系数为 \dot{F} ，在外部无输入电压，即 $\dot{U}_i = 0$ 情况下，当反馈环内产生的干扰或噪声中频率为 f_0 的分量 \dot{U}_{id} 输入放大环节，经放大后输出为 $\dot{U}_o = \dot{A}\dot{U}_{id}$ ，同时 \dot{U}_o 又经正反馈网络反馈，并将反馈电压 $\dot{U}_f = (\dot{F}\dot{U}_o = \dot{A}\dot{F}\dot{U}_{id})$ 返送到放大环节的输入端，若 $\dot{U}_f > \dot{U}_{id}$ ，则可使电路的输出逐渐增大，电路产生振荡（增幅振荡）。当输出电压幅度足够大时，若电路能够自行改变电压增益，使 $\dot{U}_f = \dot{U}_{id}$ ，电路结束起振过程，由增幅振荡转变为等幅振荡，正弦波振荡建立。

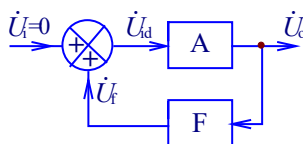


图 8.1 正弦波振荡电路示意框图

3) 产生正弦波振荡的条件

a. 相位平衡条件：

$$\varphi_A + \varphi_F = \pm 2n\pi \quad (n = 0, 1, 2, \dots) \quad (8.1)$$

b. 幅度平衡条件：

$$|\dot{A}\dot{F}| > 1 \quad (\text{起振时}) \quad (8.2)$$

$$|\dot{A}\dot{F}| = 1 \quad (\text{产生等幅振荡时}) \quad (8.3)$$

4) 电路组成：由正弦波振荡建立过程可知，正弦波振荡电路除了有放大电路和正反馈网络外，还应该选频（或移相）网络和稳幅环节。放大电路和稳幅电路、正反馈网络和选频网络往往合而为一。

5) 正弦波振荡电路的分类（按选频网络区分）

a. RC 正弦波振荡电路：文氏电桥（或称 RC 串并联式）正弦波振荡器——用 RC 串并联网络选频。

b. LC 正弦波振荡电路：变压器耦合式、电感三点式及电容三点式正弦波振荡器。

6) 稳幅方法： RC 正弦波振荡电路一般通过放大电路引入负反馈来稳幅，为了满足起振过程和等幅振荡对放大倍数的不同要求，在反馈网络中往往接有非线性元件（热敏电阻、灯泡、半导体二极管）； LC 正弦波振荡电路往往利用放大电路中放大器件的非线性特性来稳幅。

2. 非正弦波信号发生器

1) 电路组成：通常由迟滞比较器和 RC 定时电路（包括有源 RC 定时电路，如积分运算电路）组成。

2) 电路形态特点：迟滞比较器和 RC 定时电路中，任一电路的输出是另一电路的输入；由于是信号产生电路，所以没有外部信号输入。

3) 常见电路：方波（或矩形波）发生器和三角波（或锯齿波）发生器。

相关电路分析与计算

1. 振荡条件判别

判别的依据是电路能不能同时满足幅度平衡条件和相位平衡条件，即

- 1) 放大电路能不能正常工作；
- 2) 用瞬时极性法判断有没有引入正反馈；
- 3) 放大倍数与反馈增益是否满足起振和平衡条件。

2. RC 正弦波振荡电路

1) 常用选频网络的频率特性：电路及频率特性如表 8.1 所示。

表 8.1 常用选频特性

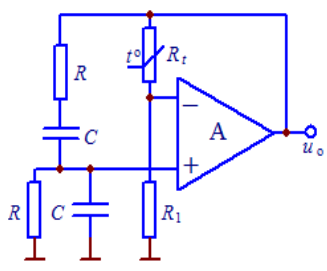
	RC 串并联网络	LC 谐振回路
电 路		
频 率 特 性		
主 要 参 数	$f_0 = \frac{1}{2\pi RC}$ <p>当 $f = f_0$ 时：</p> $ F = F_{\max} = \frac{1}{3}$ $\varphi = 0^\circ$	$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ <p>当 $f = f_0$ 时：</p> $\varphi = 0^\circ$

2) 常用正弦波振荡电路：文氏电桥正弦波振荡器，它们的典型电路及 f_0 计算如表 8.2 所示。

3. LC 正弦波振荡电路

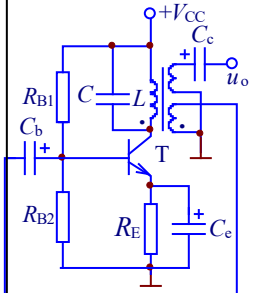
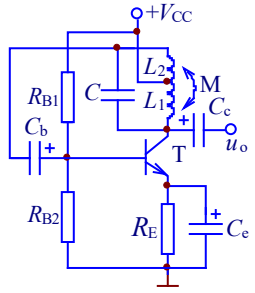
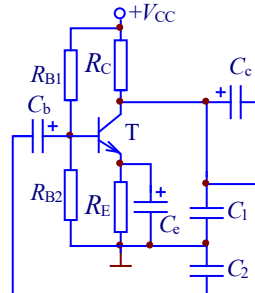
1) LC 并联谐振回路：电路及频率特性如表 8.1 所示。

表 8.2 RC 正弦波振荡电路

	文氏电桥正弦波振荡器	计 算
电 路		$f_0 = \frac{1}{2\pi RC}$ <p>起振时: $R_t > 2R_1$</p> <p>等幅振荡时: $R_t = 2R_1$</p>

2) LC 正弦波振荡电路：典型电路、电路特点 及 f_0 计算如表 8.3 所示。

表 8.3 LC 正弦波振荡电路

	变压器耦合式	电感三点式	电容三点式
电 路			
计 算	$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$	$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ $L = L_1 + L_2 + 2M$	$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ $C = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}$
电 路 特 点	容易起振, f_0 调节容易且调节范围宽, 但 f_0 不容易做得很高	容易起振, f_0 调节容易且调节范围宽, 但输出波形中含有高次谐波	输出波形失真小, 但 f_0 的调节范围小, 常用于对波形要求高、振荡频率固定的电路

3. 非正弦波信号发生器

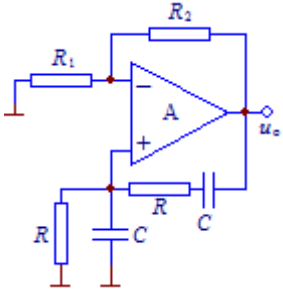
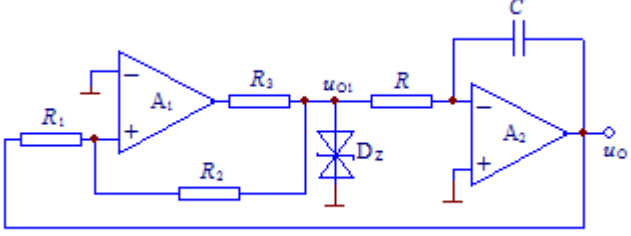
1) 能否产生振荡的判别:

- 电路是不是同时有迟滞比较器和 RC 定时电路, 并引入反馈;
- 通过 RC 定时电路引入的反馈能不能使迟滞比较器翻转。

- 2) 振荡幅度：通常等于比较器的输出电压或与阈值电压（翻转电平）相关。
- 3) 重复周期：一般通过求出比较器翻转所需时间就可求得重复（振荡）周期。

方波-三角波信号发生器的电路及主要参数如表 8.4 所示。

表 8.4 方波、三角波信号发生器主要指标

	电 路	参 数
方 波 发 生 器		频率： $f_0 = \frac{1}{2RC \ln(1 + 2R_1 / R_2)}$ 幅度： $U_O = \pm U_Z$
方 波 - 三 角 波 发 生 器		频率： $f_0 = \frac{1}{T} = \frac{R_2}{4R_1RC}$ 幅度： $U_{O1} = \pm U_Z$ $U_O = \pm \frac{R_1}{R_2} U_Z$

如果改变方波-三角波发生器的 RC 回路，让充电时间常数和放电时间常数不相等，则电路可以转换为矩形波-锯齿波发生器。

学习中注意的问题

1. 正弦波信号发生器

正弦波信号发生器的核心电路是放大电路，在放大电路能正常工作的前提下接入正反馈网络，组成了振荡电路。正弦波振荡与负反馈电路自激振荡相比，输出结果都是产生了正弦波信号，但注意振荡条件是有差异的。原因是，正弦波振荡电路按正反馈条件推导出相位平衡条件即 $\varphi_A + \varphi_F = \pm 2n\pi$ ($n = 0, 1, 2, \dots$)。而负反馈放大电路要能自激振荡条件是 $\varphi_A + \varphi_F = \pm (2n+1)\pi$ ($n = 0, 1, 2, \dots$)，二者相差了 180° 。这是因为负反馈放大电路如果自激振荡，首先要有 180° 相移才能转为正反馈。因而起始条件差异，造成两种电路振荡条件的表达式有 180° 相移。

正弦波信号发生器能否产生振荡主要是分析电路是否满足正弦波信号的相位平衡条件和幅度平衡条件。注意，相位条件是必要条件，而幅度条件是充分条件。

只有正反馈才能满足电路振荡的相位平衡条件,而振荡的幅度条件相对比较容易满足。因此,只要判断出电路是正反馈,就可以得到结论--“有可能振荡”。而如果判断电路是负反馈,则可以断定电路不满足相位平衡条件,此时无需再分析幅度平衡条件是否满足,可以得到结论--“无法振荡”。

振荡电路的特点是有输出的波形而没有输入信号。正弦波振荡电路通过正反馈网络将输出信号返送至输入端,替代原输入信号。在分析电路能否振荡时,需要通过瞬时极性法对反馈类型进行判别,振荡电路都是并联反馈因此需要断开反馈,在输入端加一个交流瞬时极性为“+”的信号,观察输出信号极性和反馈极性,若反馈极性与输入极性相同都是“+”,可以判定是正反馈;而若判别反馈后极性是“-”,则电路是负反馈。

如何判断一个放大电路输入端?这需要知道电路的类型,即观察电路的交流通路,哪一个电极是交流接地的?例如,射极 e 交流接地的是共射极放大电路,则输入端是基极 b,输出端是集电极 c,且输入和输出信号同反相;而如果电路是集电极 c 交流接地,则断定电路是一个共基极电路,输入端是射极 e,输出端是集电极 c,且输入和输出信号是同相位。

2. 非正弦信号发生器

非正弦信号发生器的振荡原理与正弦波信号发生器有明显区别,分析方法也完全不同。非正弦信号发生器电路的核心部分是迟滞比较器而不是放大器。迟滞比较器电路的输出电压使 RC 回路充放电(或通过积分电路积分)使其电压随时间周期性变化,再将这一电压反馈到迟滞比较器的输入端,从而使比较器的输出电平产生周期性变化。因此,分析这一类电路要重点放在迟滞比较器部分的分析上。根据第 7 章迟滞比较器的特性,分析出电路的输出信号幅度(与翻转电平相关)和信号周期。

本章小结

1. 正弦波信号发生器是由放大器、正反馈网络、选频网络和稳幅环节四个部分组成。振荡的幅度平衡条件是 $AF=1$, 相位平衡条件是 $\varphi_A + \varphi_F = \pm 2n\pi$ ($n=0,1,2,\dots$), 起振时需要的幅度条件是 $AF > 1$ 。分析电路是否能够振荡,需要首先判断放大器件是否在放大状态,其次用瞬时极性法判断电路是否满足相位平衡条件(即是否构成正反馈),必要时再分析电路是否满足起振条件。

2. 按照选频网络的元件不同,正弦波信号发生器有 RC、LC 和石英振荡电路之分。常用的 RC 振荡电路是文氏电桥振荡器,其振荡频率 ($f_0 = \frac{1}{2\pi RC}$) 一般不超过 1MHz。LC 振荡电路的振荡

频率可以比较高,分为变压器耦合式、电感三点式和电容三点式三种,其振荡频率 $f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}}$ 。

3. 非正弦信号发生器产生振荡的条件是:比较器的输出电压经过 RC 延时电路后,反馈到比较器的输入端,使比较器输出状态发生变化,即产生振荡。其核心电路是比较器,而不是放大器。振荡条件与正弦波信号发生器不同。

4. 利用比较器和 RC 延时电路了可以构成方波、三角波和锯齿波等非正弦信号发生器,一般通过调节 RC 时间常数来改变振荡频率,通过改变比较器的阈值电压来改变三角波的幅值。当 RC 回路充放电时间常数不等时,三角波可变为锯齿波。

思考题

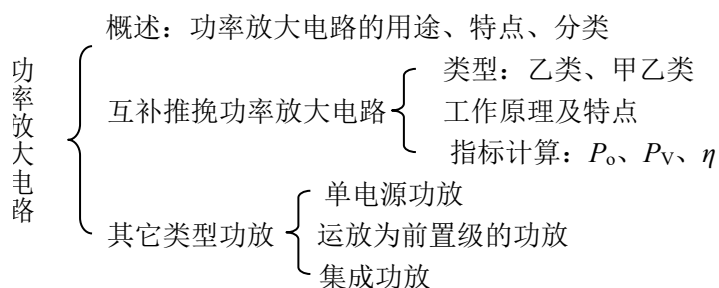
1. 正弦波振荡电路产生自激振荡的平衡条件是什么？与负反馈放大电路自激振荡的平衡条件有什么区别？
2. 正弦波振荡器由哪几个部分构成？电路的起振条件与平衡条件有什么不同？
3. 如何判断正弦波信号发生器能否产生输出波形？
4. 非正弦信号发生器由哪几个部分组成？各自的功能是什么？如何计算输出信号的幅值和频率？

9. 功率放大电路 （文字材料）

本章概要

本章首先介绍了功率放大电路的特点、晶体管的工作状态分类以及几种常用的功率放大电路。重点分析了互补推挽功率放大电路的工作原理和指标计算，最后介绍了功率管的选择和集成功率放大电路等。

本章内容的组成及结构



学习目标

- （1）了解功率电路的特点及晶体管工作状态的分类；
- （2）熟练掌握乙类功率放大电路的工作原理及主要性能指标计算；
- （3）熟练掌握甲乙类功率放大电路的工作原理；
- （4）熟练掌握运放为前置级功率放大电路的工作原理；
- （5）理解单电源功率放大电路特性及功率管的选择。

重难点指导

重点：

- （1）晶体管工作状态的分类判别及功率放大电路交越失真的克服；
- （2）乙类及甲乙类功率放大电路的主要指标计算；
- （3）以运放为前置级的功率放大器分析。

难点：

- （1）功率放大电路的参数计算及功率放大电路交越失真的克服；
- （2）输出功率、电源功率及效率的最大值与一般值的区别与联系。

本章导学

1. 功率放大电路概述

1) 功率放大电路的用途：功率放大电路简称为“功放”，常在多级放大电路中作输出级，用来向负载提供负载所需的功率。

2) 功率放大电路的实质：功率放大电路在前级信号的驱动下，将直流电源提供的电能转换成电压、电流波形与输入信号相同的电能输出给负载，所以说功率放大电路实际上是一种能量转换器。

3) 功率放大电路的主要特点及技术要求

a. 能输出足够大的功率 $P_o (=U_o I_o)$ 。故要求功率放大电路既有足够大的电压动态范围 U_{op-p} ，也有足够大的电流动态范围 I_{op-p} 。

b. 应该有尽可能高的能量转换效率 η 。它定义为

$$\eta = \frac{P_o}{P_V} \times 100\% \quad (9.1)$$

式中的 P_o 为功率放大电路的输出功率， P_V 为直流电源相应消耗的功率。由于功放的 P_o 较大，提高 η 可以降低直流电源的能耗。

c. 非线性失真应该尽可能小。

d. 功放电路中的功放管在大信号下工作，所以功放电路的分析已不能用微变等效电路法，应该使用图解法。

e. 功放电路中的功放管要输出大的电压和大的电流，往往处于尽限工作状态，所以要注意它们的保护和散热。

4) 分类

a. 按耦合方式分类：直接耦合功放、变压器耦合功放、阻容耦合功放。

b. 按功放管类型分类：电子管功放、晶体管功放、场效应管功放、集成功放。

c. 按电路形态分类：单管功放、推挽式功放、桥式功放。

d. 按功放管的工作状态分类：甲类（也称 A 类）功放、乙类（也称 B 类）功放、甲乙类（也称 AB 类）功放。它们各自的工作点设置如图 9.1 所示。

通常将一个信号周期中管子导通时间对应的电角度称为导通角，记作 θ 。甲类功放的功放管在信号一个周期中始终导通， $\theta=360^\circ$ ，静态电流始终大于电流交流分量的幅值。虽然有输出电压的非线性失真小的优点，但是直流电源的静态功耗大（等于动态时功耗），能量转换效率低，在理想情况下，变压器耦合甲类功放的 η_{\max} 只有 50%，所以很少使用。目前常用的是直接耦合的乙类或甲乙类功放。

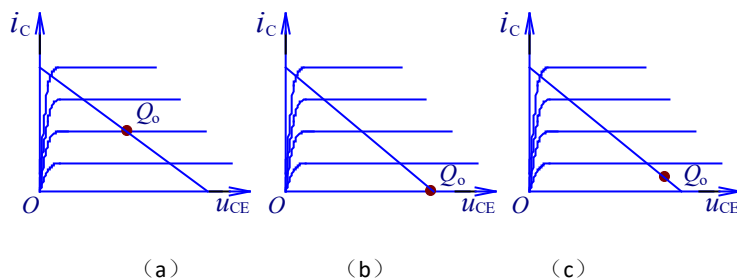


图 9.1 功放电路的 Q 点设置

(a) 甲类 (b) 乙类 (c) 甲乙类

2. 互补推挽功率放大电路

1) 乙类互补推挽功率放大电路

a. 电路形态：由 NPN 型和 PNP 型晶体管互补组成，两管参数相同，基极互连，发射极也互连；信号从发射极输出，使电路具有共集电极电路输出与输入同相、 A_u 小于“1”但接近于“1”的特点；用对称的正、负两个电源供电。典型电路如图 9.2 (a) 所示。由于电路采用 NPN 型和 PNP 型两管推挽互补，又是共集电极组态，所以也称为互补推挽射极输出器；还因为电路与负载之间采用直接耦合，没有耦合电容，所以又称这种电路为 OCL 电路，即无输出电容电路。为了增大输出功率，常用复合管代替电路中的 T_1 、 T_2 。

b. 静态：静态时的集电极电流、输出电压、管子的静态功耗均为零。

c. 动态：当 $u_i > 0$ 时， T_1 导通、 T_2 截止，电路可用图 9.2 (b) 等效，此时， $u_o \approx u_i$ 、 $i_o = i_{c1} = u_o/R_L$ ；当 $u_i < 0$ 时， T_1 截止、 T_2 导通，电路可用图 9.2 (c) 等效，此时输出为“负”、 i_{c2} 实际流向与图中的规定正方向相反， $u_o \approx u_i$ 、 $i_o = i_{c2} = u_o/R_L$ 。

由于要使 T_1 或 T_2 导通，输入电压必须大于管子的死区电压，所以在一个信号周期中，每个管子实际导通时间略小于半个周期，即导通角 θ 略小于 180° 。这使输出电压在信号正、负半周交替时出现失真，称为“交越失真”。当 u_i 为正弦波时，电路的工作波形如图 9.3 所示。

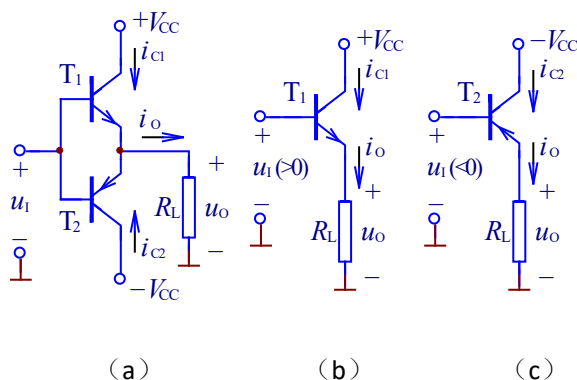


图 9.2 乙类互补推挽功率放大电路

(a) 典型电路 (b) $u_i > 0$ 时的等效电路

(c) $u_i < 0$ 时的等效电路

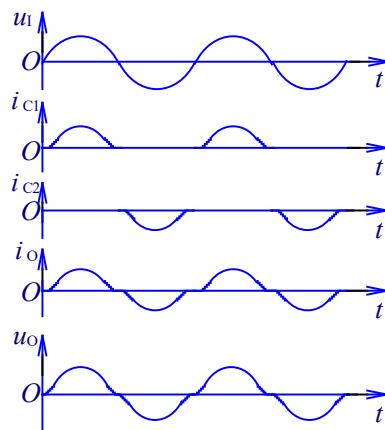


图 9.3 乙类功放的工作波形

2) 甲乙类互补推挽功率放大电路

为了克服“交越失真”，采用甲乙类互补推挽功率放大电路。

a. 电路形态：与乙类互补推挽功率放大电路相似，仅增加了由 R_1 、 R_2 ($=R_1$)、 D_1 、 D_2 组成的电路，通过 D_1 、 D_2 上产生的电压降为 T_1 、 T_2 提供小的偏置电压。典型电路如图 9.4 (a) 所示。

b. 静态：静态时的 T_1 、 T_2 集电极电流和静态功耗略大于零， $u_o = 0$ 。

c. 动态：设输入电压 u_i 为正弦电压。由于 $u_i = 0$ 时的 T_1 、 T_2 均已导通，所以当 u_i 过零进入正半周后， T_1 继续导通、 T_2 经过很短一段时间导通后就截止； u_i 过零进入负半周时， T_2 继续导通、 T_1 经过很短一段时间导通后就截止。每个管子的导通角略大于 180° ，所以不再需要克服晶体管的死区电压，输出不会产生交越失真。工作波形如图 9.4 (b) 所示。注意静态时两只二极管始终有静态直流电流通过，管子处于导通状态。动态时，因为接入信号幅度小于电源电压，故二极管仍始终导通。

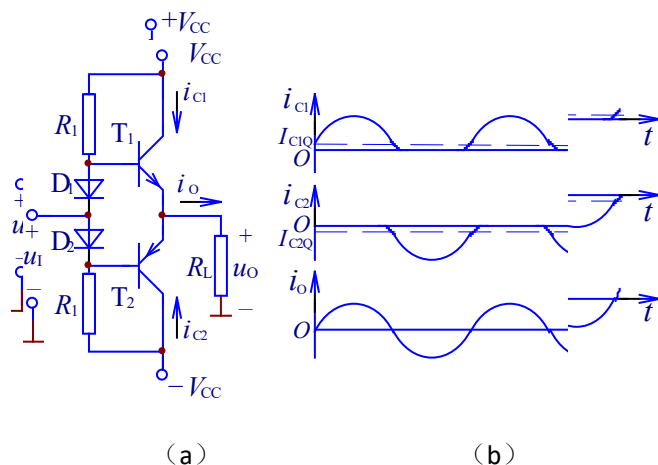


图 9.4 甲乙类互补推挽功率放大电路

(a) 典型电路 (b) 工作波形

3. 其它类型功放

1) 单电源互补推挽功率放大电路：由于这种功率放大电路与负载之间采用阻容耦合，有耦合电容，但没有耦合变压器，所以又称这种电路为 OTL 电路，即无输出变压器电路。这种电路的主要优点是只用一个电源，但不能放大直流信号。OTL 电路按工作状态区分，也有乙类和甲乙类。

乙类 OTL 电路的典型电路如图 9.5 所示，静态时， C_2 两端电压 $u_c = V_{CC}/2$ 。动态时，在信号正半周， T_1 导通，电源既通过 T_1 向负载 R_L 提供电流，又同时向电容 C_2 充电；当输入信号为负半周时， T_2 导通， C_2 通过 T_2 向负载放电，电容起着图 9.2 (a) 中 $-V_{CC}$ 的作用。由于 C_2 的电容量足够大，在信号的一个周期中， C_2 两端的电压几乎不变等于 $V_{CC}/2$ ，这使每只管子的等效的工作电压不是 $\pm V_{CC}$ ，而变成了 $\pm V_{CC}/2$ 。

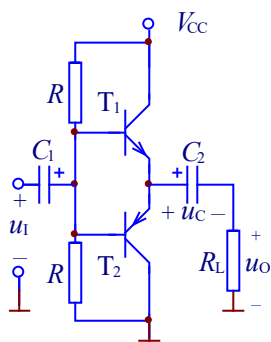


图 9.5 单电源功率放大电路

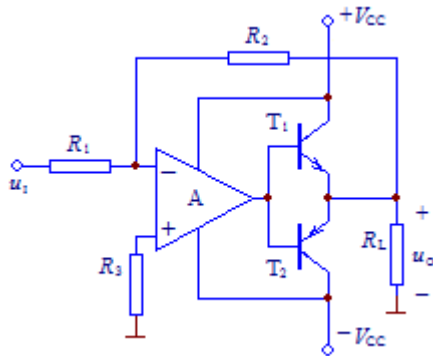


图 9.6 运放为前置级的功率放大电路

2) 具有集成运放为前置放大的功放：由于互补推挽功放实质上是共集电极放大电路，没有电压放大能力，必须先对信号电压进行放大。通常将几级基本放大电路或集成运放与互补推挽功放组成多级放大电路，并引入负反馈组成具有前置放大的功放。典型电路如图 9.6 所示。这样既可以有足够的信号电压和电流驱动功放电路，又能够改善整个电路的性能。

此外还有集成功放、场效应管功放、桥式推挽功放（也称为 BTL 电路）等电路。

相关电路分析与计算

1. 乙类互补推挽功率放大电路

电路如图 9.2 (a) 所示

1) 静态工作点计算: $U_{BIQ} = U_{BIQ}=0$ 、 $I_{CIQ} = -I_{C2Q}=0$ 、 $U_{CE1Q}=V_{CC}$ 、 $U_{CE2Q}=-V_{CC}$ 、 $u_o=0$ 。

2) 输出电压幅值为 U_{om} 时的输出功率 P_o 、电源消耗功率 P_V 、能量转换效率 η 、每只管子消耗的功率 P_T 分别为:

$$P_o = \frac{(U_{om})^2}{2R_L} \quad (9.2)$$

$$P_V = \frac{2V_{CC}U_{om}}{\pi R_L} \quad (9.3)$$

$$\eta = \frac{P_o}{P_V} \times 100\% = \frac{\pi U_{om}}{4V_{CC}} \times 100\% \quad (9.4)$$

$$P_T = \frac{1}{2}(P_V - P_o) \quad (9.5)$$

3) 最大输出时的指标计算 (极限值)

a. 管子的 U_{CES} 可以忽略 (即 $U_{CES}=0$): $U_{om}=U_{om(max)} \approx V_{CC}$ 时输出功率最大。只要用 $U_{om}=V_{CC}$ 代入 (9.2) ~ (9.5) 各式, 所得的就是最大输出功率 P_{oM} 及相应的电源消耗功率 P_V 、能量转换效率 η 及每个管子消耗的功率 P_T 。在这种理想情况下的 η 最大, 为

$$\eta_{(max)}=78.5\% \quad (9.6)$$

b. 管子的 U_{CES} 不可以忽略 (即 $U_{CES} \neq 0$): $U_{om}=U_{om(max)} \approx (V_{CC}-U_{CES})$ 时输出功率最大。只要用 $U_{om}=(V_{CC}-U_{CES})$ 代入 (9.2) ~ (9.5) 各式, 所得的就是最大输出功率 P_{oM} 及相应的电源消耗功率 P_V 、能量转换效率 η 及每个管子消耗的功率 P_T 。

功率电路主要指标计算见表 9.1。

9.1 功率放大电路参数计算

	一般情况	极限值
输出电压幅值	$U_{om} = A_u U_{im}$	$U_{om(max)} \approx (V_{CC} - U_{CES})$ 或 $U_{om(max)} \approx V_{CC}$
输出功率 P_o	$P_o = \frac{(U_{om})^2}{2R_L}$	$P_o = \frac{(V_{CC} - U_{CES})^2}{2R_L} \approx \frac{V_{CC}^2}{2R_L}$
电源功率 P_V	$P_V = \frac{2V_{CC}U_{om}}{\pi R_L}$	$P_V = \frac{2V_{CC}(V_{CC} - U_{CES})}{\pi R_L} \approx \frac{2V_{CC}^2}{\pi R_L}$

效率 η	$\eta = \frac{P_o}{P_V} \times 100\% = \frac{\pi U_{om}}{4V_{CC}} \times 100\%$	$\eta = \frac{\pi(V_{CC} - U_{CES})}{4V_{CC}} \times 100\%$ $\approx \frac{\pi}{4} \times 100\% = 78.5\%$
-----------	---------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------

4) 功率管的最大功耗计算：功放管功耗最大时的输出电压和功耗（每只管）分别为

$$U_{om} = \frac{2V_{CC}}{\pi} \quad (9.7)$$

$$P_{T(max)} \approx 0.2P_{oM} = \frac{(V_{CC})^2}{10R_L} \quad (9.8)$$

5) 功放管的选择：

$$U_{(BR)CEO} \geq 2V_{CC} \quad (9.9)$$

$$I_{CM} \geq \frac{V_{CC}}{R_L} \quad (9.10)$$

$$P_{CM} \geq P_{T(max)} = \frac{(V_{CC})^2}{10R_L} \quad (9.11)$$

2. 甲乙类互补推挽功率放大电路

甲乙类功率放大电路由于静态电流很小，各种特性接近乙类功放，通常用计算乙类互补推挽功率放大电路的各公式进行近似估算。

3. 单电源功率放大电路

对于如图 9.5 所示的单电源功率放大电路，式（9.2）～（9.5）中的 V_{CC} 用 $V_{CC}/2$ 代替后，所得的公式就可用来计算这一电路的性能指标。

4. 运放为前置级功率放大电路

对于如图 9.6 所示的运放为前置级的功率放大电路，需要首先根据深度负反馈计算电路的电压放大倍数。电路采用的是电压并联负反馈， $A_U = -R_2/R_1$ ，这样根据输入电压 u_i 计算出输出电压 u_o ，得到输出电压的幅值 U_{om} ，再根据式（9.2）～（9.5），计算功率电路的性能指标。

学习中注意的问题

1. 功率放大电路与电压放大电路的异同点

“放大”的本质是实现能量的控制，功率本身不能被“放大”。由于输入信号功率小，不能驱动负载，于是功率放大电路利用直流电源提供能量，用小功率信号来之控制能量输出，向负载提供大功率的驱动信号。因此，电压放大电路与功率放大电路虽然同属放大电路，但功率放大电路有着不同于电压放大电路的特性和指标参数，如表 9.2 所示。

表 9.2 电压放大电路与功率放大电路比较

	电压放大电路	功率放大电路
电路功能	小信号放大，为负载提供足够幅度的电压信号，具有高的电压增值	给负载提供足够的输出功率，具有高效率，和尽可能小的非线性失真。
三极管状态	小信号状态	大信号状态
主要分析方法	微变等效电路	图解法
性能指标	电压放大倍数 A_U 输入电阻 R_i 输出电阻 R_o	输出功率 P_o 、电源消耗功率 P_V 、能量转换效率 η 、每个管子消耗的功率 P_T

2. 交越失真及晶体管工作状态判别

课程涉及的失真有两大类：非线性失真（饱和失真和截止失真）和线性失真（幅度失真和相位失真），相关知识见第 2 章。这两类失真存在于各种电压放大电路中。而交越失真本质是一种特殊的非线性失真（截止失真），是特指互补推挽电路在两只晶体管 T_1 和 T_2 交替导通过程中产生的失真现象，是由于晶体管死区电压造成的失真，是乙类互补推挽电路特有的失真现象。

乙类功率放大电路存在“交越失真”现象，故为了克服这一失真，电路采用甲乙类互补推挽形式，使每只晶体管工作在微导通（甲乙类）状态。因此，判别晶体管的工作状态需要观察电路，如果两只晶体管（ T_1 和 T_2 ）直接用导线相连的，可以判定是“乙类”状态；而如果两只晶体管之间有电阻、二极管或者加入第三只晶体管等措施的，能使晶体管处于微导通状态的，则晶体管一定是“甲乙类”工作状态

3. 功率电路的参数计算

功率放大电路分析与计算其实非常简单，只要得到电路输出电压的幅值 U_{om} ，就可以分别计算电路的输出功率 P_o 、电源消耗功率 P_V 、能量转换效率 η 、每个管子消耗的功率 P_T ，见式（9.2）-（9.5）。注意要分清楚是计算某一输入电压下的指标，还是计算功放电路最大输出（极限）时的参数，两者有明显区别。极限参数计算，不需要知道具体输入或输出电压的大小，只要将输出电压的最大值 $U_{om(max)}=(V_{CC}-U_{CES})$ 或者 $U_{om}=V_{CC}$ 带入各计算公式，就可以获得功率放大电路的极限值，详见表 9.1 所示。

本章小结

1. 根据静态工作点的不同，晶体管的工作状态可以分为甲类、乙类和甲乙类等，各自的特点不同。电压放大电路静态管一般工作在甲类，而为了提高效率，功率放大电路一般工作在乙类或者甲乙类。

2. 功率放大电路由于晶体管工作在大信号下，通常采用图解法进行分析，研究的重点是如何在不失真的条件下尽可能提高输出功率和效率。

3. 乙类互补推挽功率放大电路可以获得高输出效率（78.5%），但会出现交越失真。采用甲乙类功率放大电路可以有效改善交越失真，分析计算与乙类放大电路一致。选择功率管时，器件的参数必须保证极限参数的要求，并留有一定裕量。

4. 在互补推挽功率放大电路的计算中应分清楚输出功率、效率与电路最大输出功率、最大效率的区别。计算单电源互补推挽电路的性能指标时，可以利用双电源乙类补推挽电路的公式，但要用 $V_{CC}/2$ 代替原公式的电源电压 V_{CC} 。
5. 在以运放为前置级的功放电路中引入负反馈，很容易满足深度负反馈条件，它不仅可以输出较大的功率，又有很高的稳定性。集成功率放大电路具有体积小、效率高及增益可调等优点，在现代电子技术领域广泛应用。

思考题

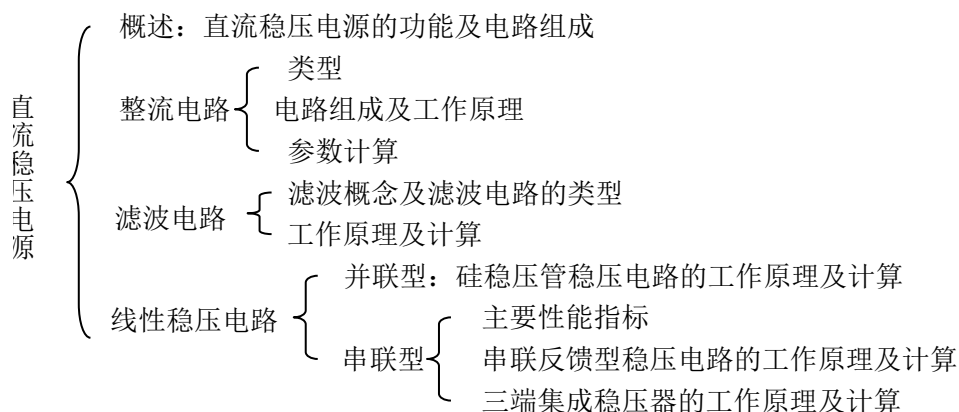
1. 功率放大电路与电压放大电路有什么区别？
2. 晶体管按工作状态可以分为哪几类？各有什么特点？
3. 你会估算乙类互补推挽功率放大电路的最大输出功率和最大效率吗？在已知输入信号、电源电压和负载电阻的情况下，如何估算电路的输出功率和效率？
4. 什么是交越失真？怎样克服交越失真？
5. 在乙类互补推挽功放中，晶体管耗散功率最大时，电路的输出电压是否也最大？
6. 以运放为前置级的功率放大电路有什么特点？
7. 常用的功率器件有哪些，各有什么特点？选择功率器件要考虑哪些因素？

10. 直流稳压电源 （文字材料）

本章概要

本章首先介绍了直流稳压电源的组成，接着介绍了单相整流和电容滤波电路的工作原理及其性能分析，重点阐述了串联反馈型线性稳压电路的工作原理及参数计算，最后简介了集成三端稳压器的组成及应用电路。

本章内容的组成及结构



学习目标

- (1) 熟练掌握单相桥式整流的工作原理及主要性能指标计算；
- (2) 熟练掌握滤波的工作原理及主要性能指标计算；
- (3) 熟练掌握串联反馈型稳压电路的组成及工作原理；
- (4) 理解集成三端稳压器的应用。

重难点指导

重点：

- (1) 单相整流及滤波电路的特性及指标计算；
- (2) 串联反馈型稳压电路的组成及输出电压极大值与极小值的计算。

难点：

- (1) 不同直流稳压电路的输出平均电压值计算；
- (2) 串联反馈型稳压电路的最大及最小输出电压计算。

本章导学

1. 直流稳压电源概述

1) 应用背景：电子电路的工作需要电压稳定的直流电源为其提供能量，虽可用各种电池作直流电源，但它们成本高、容量有限、有的还需要特殊的维护。将电网交流电源经过变换后稳压组成直流稳压电源，具有价廉、容量范围大、性能优良等优点，已成为大多数电子电路的工作用直流电源。

2) 直流稳压电源的组成：直流稳压电源由电源变压器、整流电路、滤波电路及稳压电路等组成。

- a. 电源变压器：将交流电网电压变换为大小大致与所需直流电压相当的交流电压。
- b. 整流电路：将不含直流分量的交流电压变换为含直流分量的单向脉动电压。
- c. 滤波电路：滤除或衰减整流电路输出电压中的交流分量。
- d. 稳压电路：使输出直流电压稳定。

2. 整流和滤波电路

1) 整流电路的类型

- a. 按输入的交流电源相数区分：单相整流、三相整流、多相整流。
- b. 按输出电压与输入交流电压关系区分：不可控整流、可控整流。前者当输入交流电压和负载一定以后，输出电压也就确定；后者的输出电压可通过对整流元件的控制而改变。

在小型电子设备中一般使用单相不可控整流，所以在“模拟电子技术基础”课程中只讨论这类整流电路，教材中的“整流电路”也是指这类整流电路。

2) 单相整流电路的类型：有半波整流、全波整流、桥式整流，它们的典型电路及性能比较如表 10.1 所示。

3) 单相小功率直流稳压电源中常用的滤波电路

a. 电容滤波电路：是最常用的一种滤波电路，电路简单，在整流电路的输出端并联一只容量足够大的电容（一般选用电解电容器）构成，图 10.1(a)是其典型电路。这种滤波电路的直流输出电压大小受负载变化的影响比较大，即电源的外特性（ U_o — I_o 特性）较差，这一缺点可以通过在滤波电路和负载之间接入稳压电路予以克服。

b. π 形滤波电路：又分 π 形 RC 滤波电路和 π 形 LC 滤波电路，它们的典型电路分别如图 10.1(b)、(c) 所示。 π 形滤波的滤波效果比电容滤波好，但 π 形 RC 滤波电路在滤波电阻上有一定的直流电压降，所以只在输出电流比较小的情况下使用； π 形 LC 滤波电路可以在输出电流较大时使用，但是这种滤波电路中的滤波电感体积大、重量重、容易产生电磁干扰。

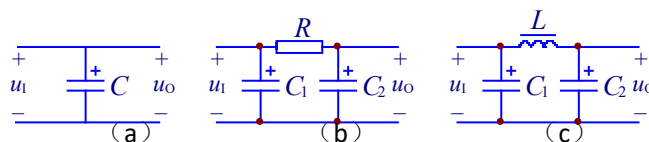
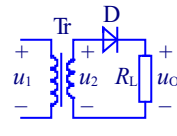
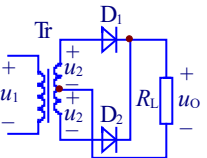
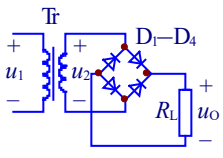
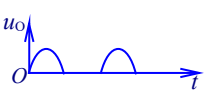
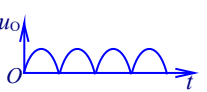
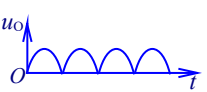


图 10.1 常用的几种滤波电路

(a) 电容滤波 (b) π 形 RC 滤波 (c) π 形 LC 滤波

表 10.1 几种整流电路的计算及性能比较

	半 波 整 流	全 波 整 流	桥 式 整 流
电 路			
输出 波形			
计 算	$U_O = 0.45U_2$ $I_D = I_O = \frac{0.45U_2}{R_L}$ $U_{DRM} = \sqrt{2}U_2$	$U_O = 0.9U_2$ $I_D = \frac{I_O}{2} = \frac{0.45U_2}{R_L}$ $U_{DRM} = 2\sqrt{2}U_2$	$U_O = 0.9U_2$ $I_D = \frac{I_O}{2} = \frac{0.45U_2}{R_L}$ $U_{DRM} = \sqrt{2}U_2$
电 路 特 点	使用的整流元件少；输出电压纹波大；变压器利用率低；接纯电阻负载时输出电压的直流分量 U_O (即 $U_{O(AV)}$) 较小。这种电路只在小功率且对纹波要求不高的场合使用。	输出电压纹波小； U_O 是半波整流的两倍；需要付边带中心抽头的变压器，这种变压器利用率低、绕制也比较麻。	既具有全波整流的各种优点，使用的变压器又不需要带中心抽头，虽需四个整流元件，但由于半导体元件的成本下降，已不是什么缺点。这种电路目前使用最普遍。

3. 并联型稳压电路

在稳压电路中，凡调整元件与负载并联的为并联型稳压。硅稳压管组成的稳压电路是最典型，也是最常用的一种并联型稳压电路。

硅稳压管稳压电路的工作原理：第 1 章图 1.1 是硅稳压管稳压电路的典型电路。在电路中硅稳压管工作于反向电击穿状态。由于硅稳压管的动态电阻 r_z 很小，当流过它的电流有较大变化时，其两端电压变化极小，几乎稳定。当环境条件一定时，引起电源输出电压改变的原因有两个：一是未经稳定的直流输入电压 U_i 大小发生改变（由电网电压变化引起）；另一是负载的变化。当未经稳定的直流输入电压或负载变化引起输出电压改变时，如 U_i 或负载电阻 R_L 增大，使输出电压 U_O 有增大趋势，这引起了 I_z 剧增，使限流电阻 R 上的电压降增大，抑制了输出电压的增加，使 U_O 几乎不变，达到稳压目的。这种稳压电路的输出电压由稳压管的稳压值决定，不可调节，且稳压电路对的输出电流不能过大，限制了其用途。

4. 串联反馈型线性稳压电路

1) 电路组成：串联反馈型线性稳压电路（以下简称为串联型稳压电路）的方框结构如图 10.2 所示。主要组成部分有

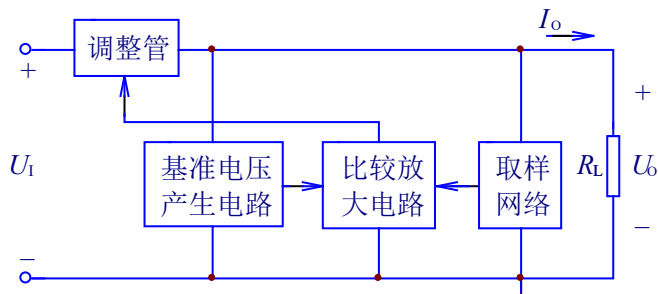


图 10.2 串联反馈型线性稳压电路方框图

a. 基准电压产生电路：通常是一硅稳压管稳压电路，其负载电流非常小，仅仅是比较放大电路的输入电流，对于硅稳压管稳压电路，这个电流在工作过程中的变化又几乎可以忽略，所以基准电压产生电路提供的基准电压 U_R 非常稳定。

b. 取样网络：并接在稳压电路的两个输出端，即与负载并联。取样网络能将负载两端电压变化量的全部或一部分返送（即反馈）到比较放大电路的另一个输入端。

c. 比较放大电路：用来对输入的基准电压和来自取样网络的取样电压进行比较，它们的差值被放大，并去控制调整管。

d. 调整管：其作用是在比较放大电路输出信号的驱动下，通过自身电压降的变化，使稳压电路的输出电压稳定。串联型线性稳压电路的调整管与负载串联。

2) 工作原理：串联型稳压电路的调整管和比较放大器件都工作在线性区，实际上，它是一个以基准电压为输入电压、取样电压为反馈电压、以整流滤波后得到的未经稳定的直流电压为工作电源的电压负反馈放大电路。

3) 主要优缺点：串联型稳压电路具有输出电压可调、输出电流范围大、输出电阻小、驱动负载能力强、稳压性能好、输出纹波（即交流分量）小等优点，在直流稳压电源中得到广泛的应用。但由于调整管需要工作在线性区有较大管压降，又流过很大的负载电流，其功耗较大，所以这种稳压电路的功率转换效率比开关型稳压电路低。

5. 集成三端稳压器

集成稳压器是一种集成化的串联反馈型线性稳压电路，种类较多。目前最常用的是三端集成稳压器。三端集成稳压器又分为固定输出（输出电压固定）和输出电压可调两大类，每一类又有输出电压为“正”和为“负”的两类。常用的是

a. 三端固定正输出集成稳压器：W78××系列；

b. 三端固定负输出集成稳压器：W79××系列；

其中 W78××和 W79××系列中的“××”是两个数字，代表输出电压的额定值。

相关电路分析与计算

1. 整流和滤波电路

1) 整流电路计算：常用的三种整流电路计算式如表 10.1 所示。

2) 桥式（或全波）整流、电容滤波电路

a. 接纯电阻负载 R_L 时滤波电容 C 的选择

$$C \geq (3 \sim 5) \frac{T}{2R_L} \quad (10.3)$$

式中的 T 为交流电源的周期，中国的交流电源是 50Hz，故 $T = 0.02s$ 。

b. 输出直流电压的估算

$$U_O = (0.9 \sim 1.4) U_2 \quad (10.4)$$

通常可按下式估算

$$U_O \approx 1.2U_2 \quad (10.5)$$

2. 硅稳压管稳压电路

1) 硅稳压管稳压电路（电路如图 1.1）输出电压计算：参见第一章“1.3.2”。

2) 限流电阻计算

$$\frac{U_{I(\max)} - U_Z}{I_{O(\min)} + I_{ZM}} \leq R \leq \frac{U_{I(\min)} - U_Z}{I_{O(\max)} + I_{Z(\min)}} \quad (10.6)$$

式中的 $U_{I(\max)}$ 、 $U_{I(\min)}$ 分别是输入直流电压的最高值和最低值， $I_{O(\max)}$ 和 $I_{O(\min)}$ 分别是最大和最小输出电流， $I_{Z(\min)}$ 是硅稳压管的最小稳定电流（约为 1mA）。

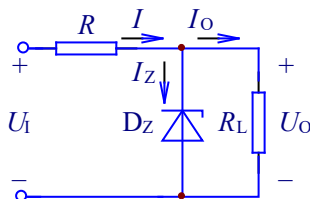


图 10.3 硅稳压管稳压电路

3. 串联反馈型线性稳压电路

1) 串联型稳压电路如图 10.4 所示。

输出电压 U_O 计算：比较放大环节引入深度负反馈，根据“虚短”原则，故运放同相端电压“+”与反相端“-”电压相等，即 $U_F = U_R$ 。 U_R 电压近似是稳压管两端的稳压值 U_Z 。

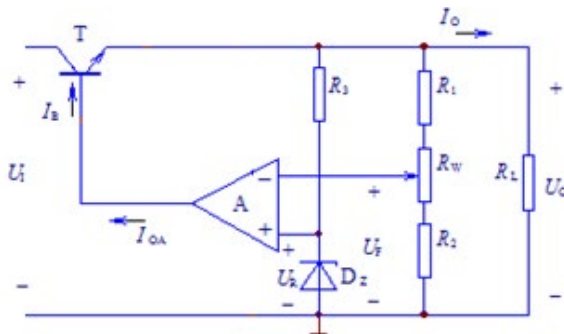


图 10.4 串联反馈型线性稳压电路

当电路稳定时，有以下关系式：

$$U_Z = \frac{R_W'' + R_2}{R_1 + R_W + R_2} U_O \quad (10.9)$$

R_W 电阻的滑端位置可以上下变化，故输出电压 U_O 存在最大值和最小值。

$$U_{O(\min)} = \frac{R_1 + R_W + R_2}{R_W + R_2} U_Z \quad (10.10)$$

$$U_{O(\max)} = \frac{R_1 + R_W + R_2}{R_2} U_Z \quad (10.11)$$

2) 三端固定输出集成稳压器

(a) 当输入电压足够大时，三端固定输出集成稳压器的输出电压（输出端与公共端之间的电压） U_O 等于该集成稳压器型号中的后两位数字“ $\times\times$ ”。

(b) 当三端固定输出集成稳压器的公共端不直接接“地”时，应考虑它的静态工作电流（即公共端的电流） I_W 的影响。

学习中注意的问题

1. 整流后电压与电流信号

整流后电路的信号是脉动的直流（见表 10.1 输出波形），虽然信号的大小仍随时间的变化而变化，但相位不会改变，故是直流。注意它不是平直的直流，需要通过后面的滤波电路和稳压电路，直流稳压电源才能获得电子设备需要的平直直流。

2. 学习要点

本章教学内容涉及前面章节，如第 1 章的半导体二极管和硅稳压管，需要首先掌握这些知识才能学好这部分内容。此外，本章内容繁多，应重点掌握整流、滤波及稳压三个环节的基本电路。

本章小结

1. 电子电路需要直流电源供电，直流稳压电源实现交流电源到直流电源的转换，它包括以下四个环节：变压、整流、滤波及稳压。

2. 利用二极管的单向导电性可以构成各种形式的不可控整流电路把交流电转换为单向脉动的直流电，单相桥式整流电路具有输出电压平均值高，脉动小，变压器利用率高等优点，在小功率电源中应用最为广泛。

3. 采用电容滤波可以滤除整流后直流中的高频成分，减小纹波。

4. 串联型稳压电路由调整环节、采样环节、基准环节和比较放大环节构成，是一个电压串联负反馈系统。集成三端稳压器的核心电路是串联型稳压电路。固定式集成三端稳压器它包括 78XX 系列和 79XX 系列，分别输出稳定的正负直流电压。

思考题

1. 直流稳压电源由哪些单元电路组成？简述各部分电路的功能。
2. 整流二极管接反或者短路，则整流电路输出电压有何不同？
3. 具有电容滤波的整流电路，当负载一定时，增大或者减小滤波电容值，则输出电压平均值有何不同？
4. 串联反馈型稳压电路有哪几个环节构成？每部分的作用是什么？
5. 集成三端稳压器如何实现稳压作用？