

电子电路知识总结

1 电路分析基础

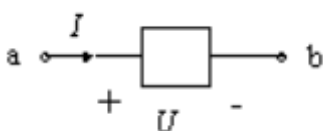
1.1 基本概念

1.1.1 参考方向

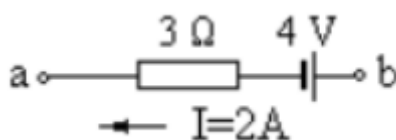
直流电源中，电动势方向是（从负极指向正极）

当电阻 R 上的 u, i 参考方向为关联参考方向时，欧姆定律的表达式应为 ($u = Ri$)

设电路的电压与电流参考方向如图所示，已知 $U < 0, I > 0$ ，则电压与电流的实际方向为(b点为高电位，电流由a至b)



在如图所示电路中， U_{ab} 为：(-10V)



1.1.2 耗能元件——电阻（略）

电阻的阻值读数

1.1.3 供能元件——理想电源

理想电压源：电源两端电压由电源本身决定，与外电路无关；通过电压源的电流由电源及外电路共同决定。

$$U = U_S - R_S I$$

相同的电压源才能并联，电源中的电流不确定。

理想电流源：电流源的输出电流由电源本身决定，与外电路无关；通过电流源的电压由电源及外电路共同决定。

$$I = I_S - \frac{U}{R_S}$$

相同的理想电流源才能串联，每个电流源的端电压不能确定

理想电压源和理想电流源间（没有等效变换关系）

电压源和电流源的等效变换：

$$\begin{cases} I_S = \frac{U_S}{R_S} \\ R_S = R'_S \end{cases}$$

1.1.4 储能元件——电容电感

电容

$$i(t) = \frac{dq(t)}{dt} \quad C = \frac{q(t)}{u(t)}$$

电容的串并联规律与电阻相反

电容的串联: $\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \cdots + \frac{1}{C_n}$

电容的并联: $C = C_1 + C_2 + \cdots + C_n$

储能公式: $w_C = \frac{1}{2}Cu^2(t)$

电感

$$u = \frac{d\Psi}{dt} = L \frac{di}{dt} \quad L = \frac{\Psi}{i} = \frac{N\Phi}{i}$$

电感的串并联规律与电阻相同

电感的串联: $L = L_1 + L_2 + \cdots + L_n$

电感的并联: $\frac{1}{L} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \cdots + \frac{1}{L_n}$

电感的储能公式: $w_L = \frac{1}{2}Li^2(t)$

例题: 在正弦交流电路中, 电感元件的瞬时值伏安关系可表达为 $u = L \frac{di}{dt}$

1.1.5 控能元件——受控电源

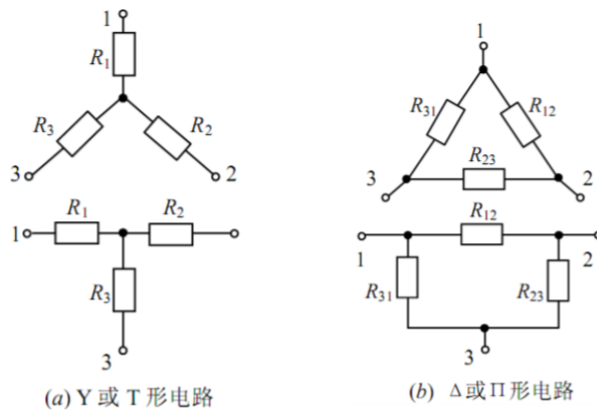
对于受控**电压源**来说, 其输出电阻为**零**, 输入电阻为**无限大**。

对于受控**电流源**来说, 其输出电阻为**无限大**, 输入电阻为**零**。

它们属于四端元件, 也叫耦合元件。

1.2 电阻电路

1.2.1 电阻的Y-Δ 等效变换



两个电路相互等效的条件是要求它们端点的伏安特性关系完全相同

变换公式如下：

$$(Y \Rightarrow \Delta) \quad \Delta \text{ 形连接电阻} = \frac{Y \text{ 形中各电阻两两乘积之和}}{\text{对面的 } Y \text{ 形电阻}}$$

$$(\Delta \Rightarrow Y) \quad Y \text{ 形连接电阻} = \frac{\Delta \text{ 形相邻两电阻之积}}{\Delta \text{ 形各电阻之和}}$$

题目：电阻均为 9Ω 的 Δ 形电阻网络，若等效为Y形网络，各电阻的阻值应为（全是 3Ω ）

解： $R = (9 \times 9) / (9 + 9 + 9) = 3\Omega$

反向求解则为： $R' = (9 \times 9 + 9 \times 9 + 9 \times 9) / (9) = 27\Omega$

1.2.2 网孔分析法

以网孔电流为未知量

1.2.3 节点分析法

以节点电压为未知量列写电路方程分析电路的方法.适用于节点较少的电路.

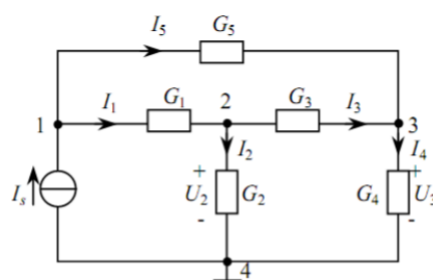


图 2-17 节点分析法用图

(1) 选定参考节点，标明其余 $n-1$ 个独立节点的电压

$$I_1 + I_5 = I_s$$

(2) 列KCL方程： $-I_1 + I_2 + I_3 = 0$

$$-I_3 + I_4 - I_5 = 0$$

$$I_1 = G_1 (U_1 - U_2)$$

$$I_2 = G_2 U_2$$

(3) 把支路电流用节点电压表示： $I_3 = G_3 (U_2 - U_3)$

$$I_4 = G_4 U_3$$

$$I_5 = G_5 (U_1 - U_3)$$

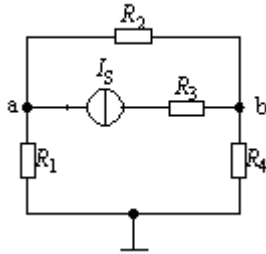
$$(G_1 + G_5)U_1 - G_1U_2 - G_5U_3 = I_s$$

$$(4) \text{ 带入KCL方程求解: } -G_1U_1 + (G_1 + G_2 + G_3)U_2 - G_3U_3 = 0$$

$$-G_5U_1 - G_3U_2 + (G_3 + G_4 + G_5)U_3 = 0$$

例题：必须设立电路参考点后才能求解电路的方法是（节点电压法）

例题：图示电路中节点 a 的节点方程为（ ）



解：设经 R1 流入 a 点的电流为 I1，经 R2 从 a 点流向 b 点的电流为 I2. 那么 KCL 方程为

$$I_1 + I_S = I_2$$

把支路电流用节点电压表示：

$$I_1 = G_1(0 - U_a)$$

$$I_2 = G_2(U_a - U_b)$$

带入KCL方程得：

$$I_S = I_2 - I_1 = (G_1 + G_2)U_a - G_2U_b$$

1.3 几个定理

1.3.1 叠加定理

叠加原理：电流源为零——**断路**；电压源为零——**短路**；受控源保留。（**小心不要记错！**）

例题：利用戴维宁定律分析电路时，需要求解有源二端网络的等效电阻，通常要进行除源处理，具体方法是（电压源短路、电流源开路）

例题：如图1-6所示电路，则I为（ -2A ）

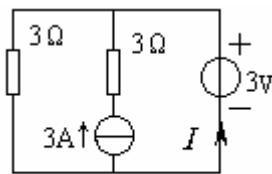


图1-6

解：电流源为零，断路，I1=1A；电压源为零，短路，I2=-3A；I=I1+I2= -2A

1.3.2 戴维南定理

戴维南定理（Thevenin's theorem）指出：对于**线性有源二端网络**，均可等效为一个**电压源与电阻串联**的电路。

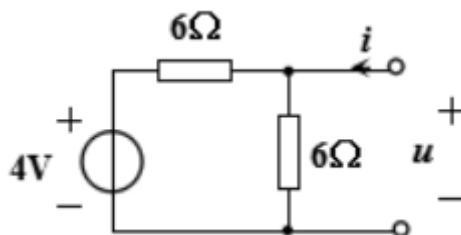
其中，求等效电阻的方法有两种：

- 外加电压法
- 开路电压、短路电流法

例题：具有两个引出端钮的电路称为（二端网络）

例题：戴维南等效电路是指一个电阻和一个电压源的串联组合，其中电阻等于原有源二端网络（除源后的入端电阻）

例题：图示单口网络，其端口的VCR关系是：（ $u=3i+2$ ）



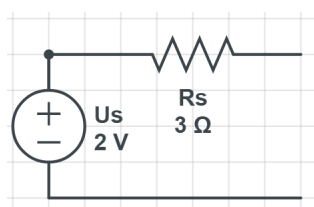
解：任何单口网络都可以进行戴维南等效图，此题分析如下

开路电压 $U=4V/(6+6)\times 6=2V$

短路电流 $I=4V/6\Omega=2/3A$

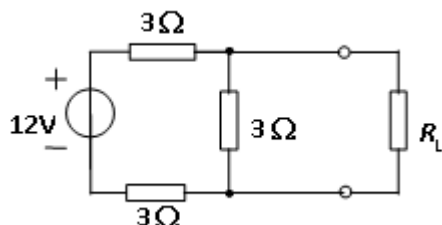
等效内阻 $R=U/I=3\Omega$

此时我们得到了电压为2V，内阻为3Ω的等效电压源



再加上一个外部电源，列KVL方程： $-2 - 3i + u = 0$ ，整理得 $u = 3i + 2$

例题：图示电路，求 R_L 上可获得的最大功率。（2W）



解：开路电压 4V，短路电流 2A，所以等效电阻 2Ω，所以 $R_L=2\Omega$ 时功率最大。

1.3.3 基尔霍夫定律

基尔霍夫电流定律（KCL）：在任意时刻流入一个节点的电流总和，等于从这个节点流出的电流的总和。 $\sum I = 0$

基尔霍夫电压定律（KVL）：在任意时刻沿闭合电路的电压降的代数和总等于0。 $\sum U = 0$

1.4 动态电路（一阶）

时间常数

$$\tau=RC$$

$$\tau=L/R$$

1.5 正弦稳态电路

电阻、电感、电容的伏安特性的相量形式为：

$$\text{有效值相量形式: } \dot{U} = R\dot{I}, \quad \dot{U} = j\omega L\dot{I}, \quad \dot{U} = \frac{1}{j\omega C}\dot{I}$$

$$\text{最大值相量形式: } \dot{U}_m = R\dot{I}_m, \quad \dot{U}_m = j\omega L\dot{I}_m, \quad \dot{U}_m = \frac{1}{j\omega C}\dot{I}_m$$

对于独立电压源和独立电流源其**正弦表示**为(U_S 和 I_S 为有效值)：

$$u_S(t) = \sqrt{2}U_S \sin(\omega t + \theta_u) \\ i_S(t) = \sqrt{2}I_S \sin(\omega t + \theta_i)$$

根据唯一性规则，可以用相量形式表示电压源和电流源。

$$u_S(t) = \sqrt{2}U_S \sin(\omega t + \theta_u) \leftrightarrow \dot{U}_S \\ i_S(t) = \sqrt{2}I_S \sin(\omega t + \theta_i) \leftrightarrow \dot{I}_S$$

基本元件R,L,C的**阻抗形式**为：

$$Z_R = R \\ Z_L = j\omega L = jX_L \\ Z_C = \frac{1}{j\omega C} = -j\frac{1}{\omega C} = jX_C$$

其中

$$X_L = \omega L \\ X_C = -\frac{1}{\omega C}$$

X_L 电感的电抗、简称感抗； X_C 电容的电抗、简称容抗

例题：314 μ F电容元件用在100Hz的正弦交流电路中，所呈现的容抗值为（5.1 Ω ）

解： $X_C = -1/(\omega C) = -1/(2\pi fC) = 5.1\Omega$

例题：交流电路中，计算得到某一无源二端网络复数阻抗为5+6j，则该二段网络对外呈（电感性）

解：当端电流与端电压同相时，电路呈现电阻性；

当端电流相位超前于端电压，电路呈现电容性；相当于一个理想的电阻与理想电容并联。

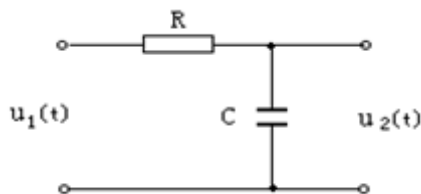
当端电流相位滞后于端电压，电路呈现电感性；相当于一个理想的电阻与理想的电感串联。

5+6j $\tan\phi=6/5$ $6/5>1$ $\phi>0$ 滞后

例题：在RLC串联电路中，已知R=30, $X_L=82$, $X_C=4$, 则电路的功率因数 $\cos \phi$ 等于（0.6）

解： $\phi = \tan^{-1} \frac{X_L - X_C}{R} = 37^\circ$ $\cos \phi = 0.6$

例题：移相电路如图，则下列结论正确的是（ u_2 滞后 u_1 ，角度不确定）



解：

$$\frac{u_2(t)}{u_1(t)} = \frac{Z_C}{Z_R + Z_C} = \frac{1/(j\omega C)}{R + 1/(j\omega C)} = \frac{1}{j\omega CR + 1}$$

例题： $i_1 = 10\sqrt{2} \cos(\omega t + 0^\circ) \text{A}$, $i_2 = -10\sqrt{2} \sin(\omega t - 30^\circ) \text{A}$, 则有如下相位关系: (i_2 超前 i_1 60°)

解： $i_1 = \cos(\omega t) = -\sin(\omega t - 90^\circ)$. $-90 - (-30) = -60$, i_1 滞后 i_2 60 度, 也即 i_2 超前 i_1 60 度.

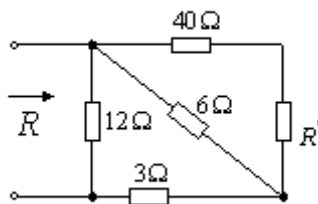
例题： 如图示电路, 元件A中, 当 $i = 5 \sin 100t \text{A}$ 时, $u = 10 \cos 100t \text{V}$, 则此元件为 (0.02H 电感元件)



1.6 计算题

1.6.1 题一

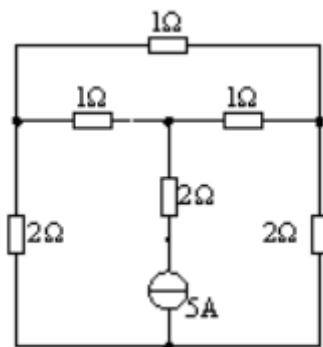
图示电路中, $R' \geq 0$, 若等效电阻为 R , 则 ($R < 12 \Omega$)



$$40 + R' > 0, (40 + R') // 6 \leq 6, (40 + R') // 6 + 3 \leq 9, [(40 + R') // 6 + 3] // 12 < 12$$

1.6.2 题二

图示电路中, 5A 电流源提供的功率为 (87.5W)



提示: 最上方 1Ω 电阻没有电流通过, 可等效为断路.

2 模拟电路

2.1 半导体器件

2.1.1 半导体

半导体中存在两种**载流子**：电子和空穴。

纯净的半导体称为**本征半导体**，它的导电能力很差。

掺有少量其他元素的半导体称为**杂质半导体**。杂质半导体分为两种：

N型半导体——多数载流子是**电子**，掺杂 5 价元素；

P型半导体——多数载流子是**空穴**，掺杂 3 价元素。

2.1.2 PN结

当把P型半导体和N型半导体结合在一起时，在二者的交界处形成一个**PN结**。

PN结中的P型半导体与N型半导体的交界处形成一个**空间电荷区**或**耗尽层**。当PN结外加**正向电压（正向偏置）**时，耗尽区变窄，有电流流过；而当外加**反向电压（反向偏置）**时，耗尽区变宽，没有电流流过或电流极小，这就是半导体二极管的**单向导电性**。

正向偏压：将电源的正极接**P端**，负极接**N端**。此时外界电压在阻挡层形成的电场与自建场方向相反，削弱自建场使阻挡层变窄。此时PN结处于导通状态，它所形成的电阻为正向电阻，其阻值很小，正向电压越大，正向电流越大。

PN结的伏安特性：反向击穿区，反向特性区，正向特性区。

击穿按机理，分为雪崩击穿和齐纳击穿。

击穿不一定意味着PN结被破坏，但当反向电压过高，反向电流过大时，会导致PN结被热击穿，热击穿为破坏性击穿。

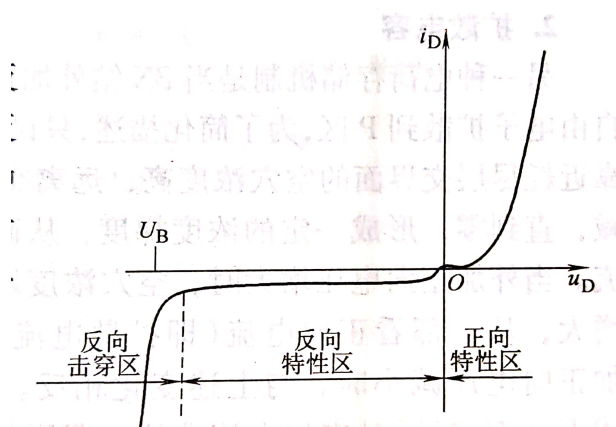


图 6-8 PN 结的伏安特性

2.1.3 半导体二极管

将PN结用外壳封装起来，并加上电极引线就构成了半导体二极管，简称**二极管**。

二极管的伏安特性与PN结的伏安特性相似。

稳压二极管（也称**齐纳二极管**）工作在**反向击穿区**。

材料	开启电压/V	导通电压/V	反向饱和电流/ μA
Si	约 0.5	0.6-0.8	<0.1
Ge	约 0.1	0.1-0.3	几十

2.1.4 半导体晶体管

双极型晶体管（BJT）又被称为半导体**三极管**，或**晶体管**。

三个区：**发射区、基区、集电区**；

三个电极：**发射极（e）、基极（b）、集电极（c）**

硅 NPN 型晶体管使用的最为广泛。

三极管的三种连接方式：

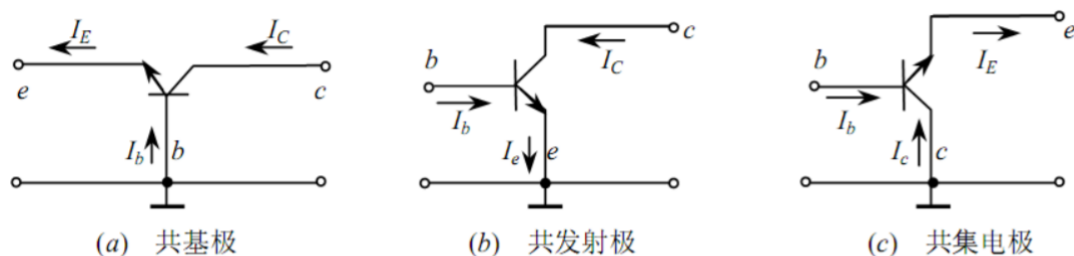


图 6-23 三极管的三种接法

为了使三极管能有效地起放大作用，要求三极管的发射区掺杂浓度**高**；基区宽度**薄**；集电结面积比发射结面积**大**。

工作在放大状态的三极管，流过发射结的电流主要是**扩散电流**，流过集电结的电流主要是**漂移电流**。

2.1.4.1 BJT放大电路三个电流关系

$$\begin{cases} I_E = I_C + I_B \\ I_C \approx \bar{\beta} I_B \\ I_E \approx (1 + \bar{\beta}) I_B \end{cases}$$

其中，共基极直流放大系数 $\bar{\alpha} \simeq I_C / I_E$ (0.9~0.999)；

共发射极直流放大系数 $\bar{\beta} \simeq I_C / I_B$ (几十~几百)；

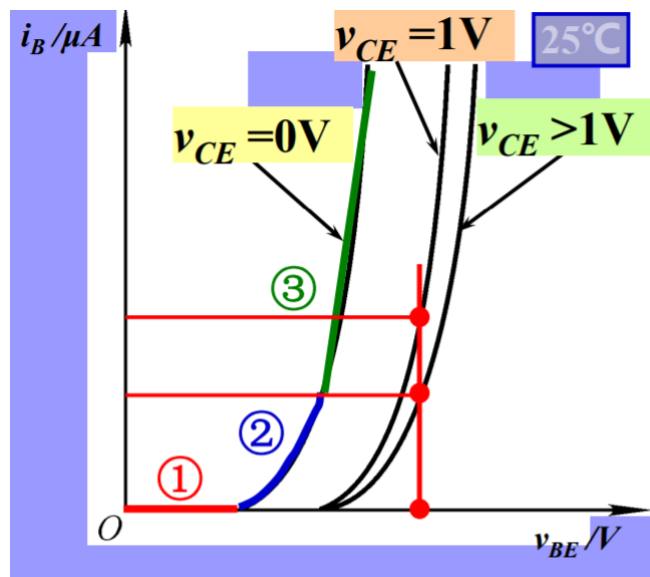
$$\bar{\beta} = \bar{\alpha} / (1 - \bar{\alpha}).$$

2.1.4.2 晶体管的共射特性曲线

(-)输入特性曲线 $I_B = f(U_{BE})|_{U_{CE} = \text{常数}}$

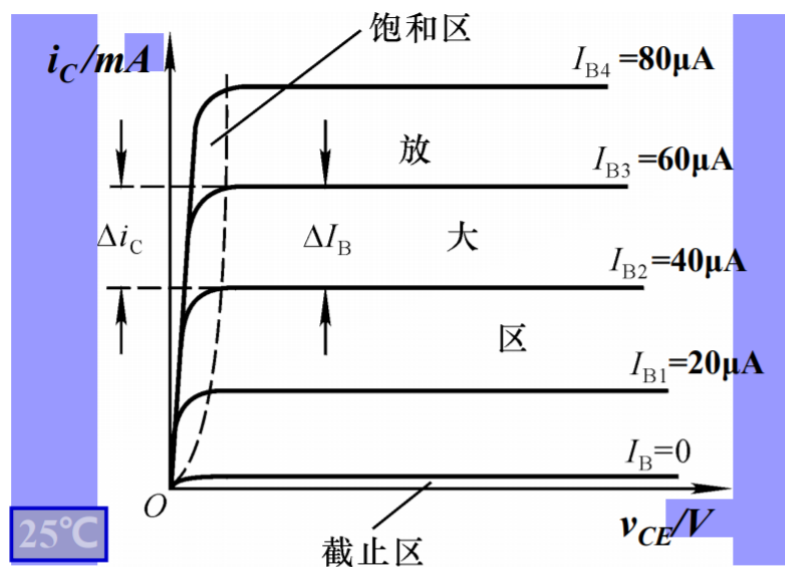
分三部分：①死区②非线性区③线性区

记住：①当 $U_{CE} > 1$ 时，各条特性曲线基本重合。②当 U_{CE} 增大时，特性曲线相应的右移。



(二)输出特性曲线 $i_C = f(v_{CE})|_{I_B = \text{const}}$

它是以 i_B 为参变量的一族特性曲线.



输出特性曲线可以划分为三个区域:

饱和区—— i_C 受 v_{CE} 显著控制的区域, 该区域内 v_{CE} 的数值较小, 一般 $v_{CE} < 0.7 \text{ V}$ (硅管). 此时 J_e 正偏, J_c 正偏或反偏电压很小.

放大区—— i_C 平行于 v_{CE} 轴的区域, 曲线基本平行等距. 此时 J_e 正偏, J_c 反偏. 电压大于 0.7 V 左右 (硅管).

截止区—— i_C 接近零的区域, 相当 $i_B = 0$ 的曲线的下方. 此时 J_e 反偏, J_c 反偏.

总结: 饱和区均正偏; 截止区均反偏; 放大区发射结正偏、集电结反偏.

状态	电流关系	条 件
放大	$I_C = \beta I_B$	发射结正偏，集电结反偏
饱和	$I_C \neq \beta I_B$	两个结正偏
临界	$I_{CS} = \beta I_{BS}$	集电结零偏
截止	$I_B < 0, I_C = 0$	两个结反偏

状态	电 流 关 系	条 件
放大	$I_C = \beta I_B$	发射结正偏 集电结反偏
饱和 临界	$I_C \neq \beta I_B$ $I_{CS} = \beta I_{BS}$	两个结正偏 集电结零偏
截止	$I_B < 0, I_C = 0$	两个结反偏

例题：测量某NPN型BJT各电极对地的电压值如下，试判别管子工作在什么区域？

(1) $V_C = 6V$ $V_B = 0.7V$ $V_E = 0V$ (2) $V_C = 6V$ $V_B = 4V$ $V_E = 3.6V$ (3) $V_C = 3.6V$ $V_B = 4V$ $V_E = 3.4V$

解： (1) 放大区 (2) 截止区 (3) 饱和区

对NPN管而言，放大时 $V_C > V_B > V_E$

对PNP管而言，放大时 $V_C < V_B < V_E$

例题：工作在放大区的某个三极管，当 I_B 从 $20\mu A$ 增大到 $40\mu A$ 时， I_C 从 $1mA$ 变成 $2mA$ 。它的 β 值约为多少？

解：根据动态放大倍数的定义得：

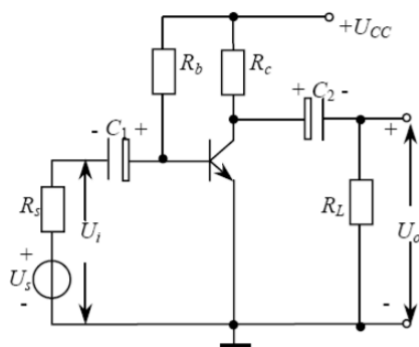
$$\beta = \frac{\Delta I_c}{\Delta I_b} = \frac{2000 - 1000}{40 - 20} = \frac{1000}{20} = 50$$

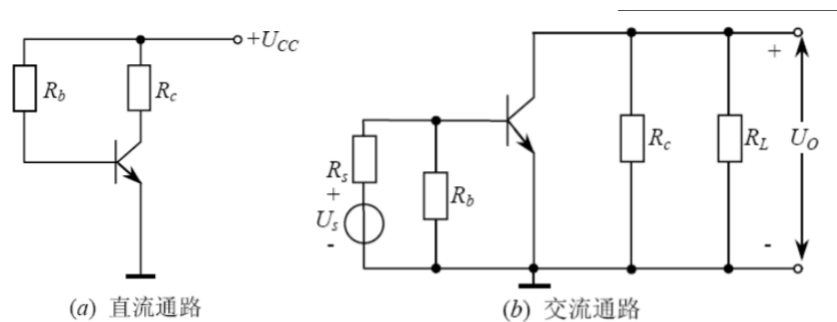
2.2 晶体管放大电路

2.2.1 放大电路的组成

直流通路：是在直流电流作用下直流电流流经的通路 1. 电容开路 2. 电感短路（电阻忽略） 3. 交流信号源短路（保留其内阻）

交流通路：是在输入信号作用下交流信号（电流）流经的通路 1. 耦合电容对交流相当于短路、电感视为开路 2. 无内阻的直流电源为短路





2.2.2 放大电路的静态分析

所谓“静态”是指：当放大电路没有输入信号 ($v_i = 0$) 时，电路中各处的电压、电流都是不变的直流。

直流工作点（又称静态工作点—quiescent point），简称Q点。

(待补充)

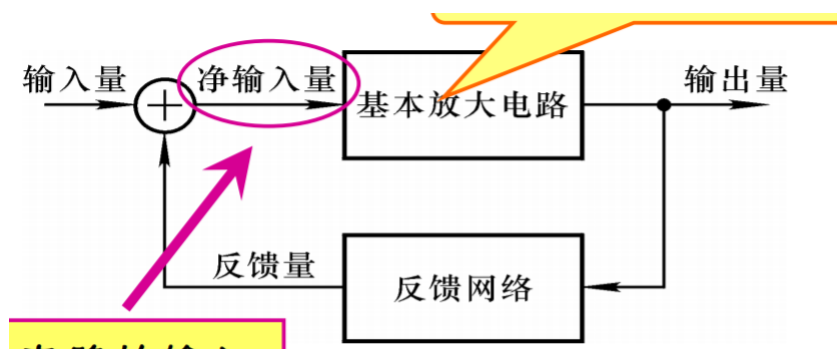
2.2.3 波形的失真

饱和失真：由于放大电路的工作点达到了三极管的**饱和区**而引起的非线性失真。对于NPN管，输出电压表现为**底部失真**。

截止失真：由于放大电路的工作点达到了三极管的**截止区**而引起的非线性失真。对于NPN管，输出电压表现为**顶部失真**。

注意：对于PNP管，由于是负电源供电，失真的表现形式，与NPN管正好相反。

2.3 负反馈放大电路



交流负反馈使电路的放大能力下降。

2.3.1 反馈的分类

2.3.1.1 正反馈和负反馈

负反馈：反馈信号削弱了外加净输入信号，使放大电路的放大倍数降低

正反馈：反馈信号增强了外加净输入信号，使放大电路的放大倍数提高

反馈极性的判断方法：瞬时极性法。（当然，正反馈并不常见。）

2.3.1.2 直流反馈和交流反馈

直流反馈：反馈量中只含有直流量，或者说，只在直流通路中存在的反馈。

交流反馈：反馈量中只含有交流量，或者说，只在交流通路中存在的反馈。

在很多放大电路中，常常是交、直流反馈都有。

电容观察法：反馈通路如果存在**隔直电容**，就是**交流反馈**；反馈通路存在**旁路电容**，则是**直流反馈**；如果**不存在电容**，就是**交直流反馈**。

2.3.1.3 电压反馈和电流反馈

电压反馈：反馈信号的取样对象是输出电压。

电流反馈：反馈信号取样对象为输出电流

判断方法

电压反馈：将反馈负载**短路**，反馈量为**零**，即电压为零。

电流反馈：将反馈负载短路，反馈量**仍然存在**。

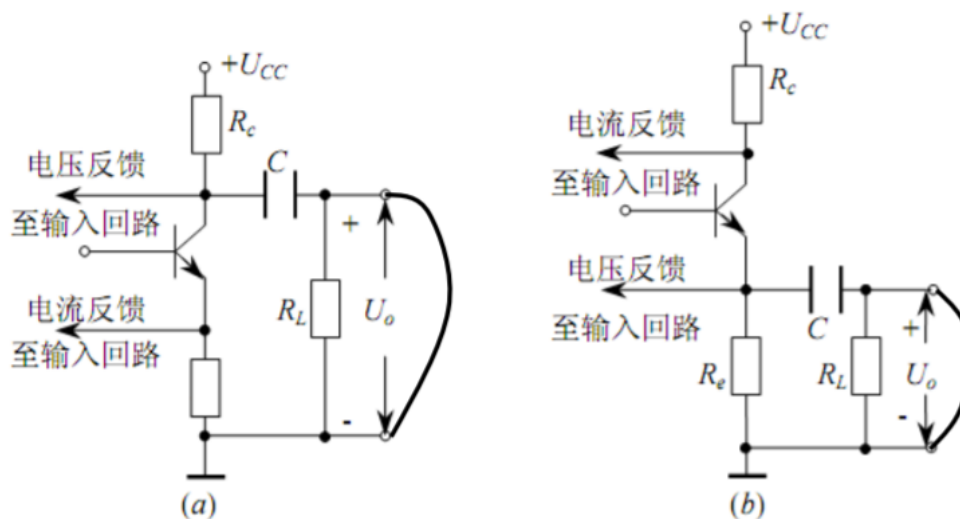
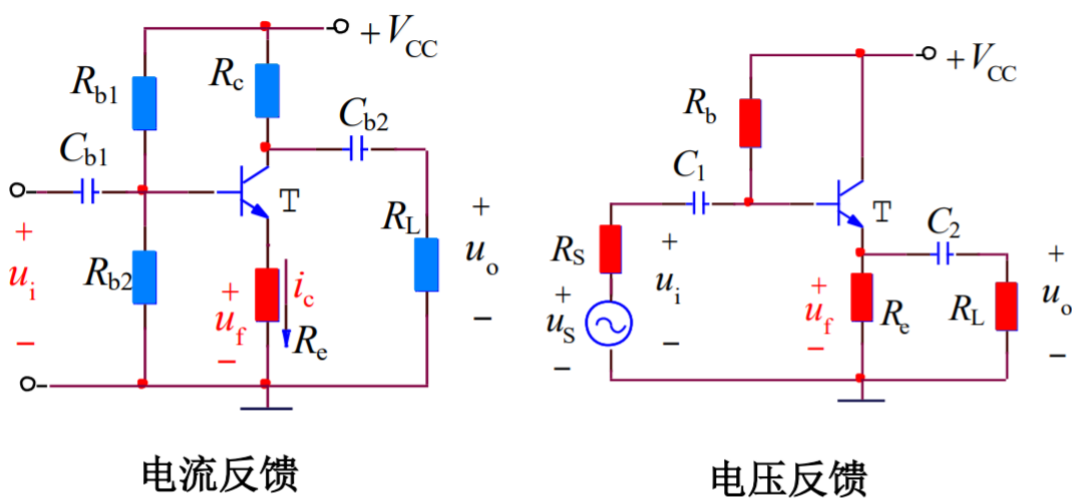


图 8-3 电流反馈与电压反馈

例题：试判断下列电路中引入的反馈是电压反馈还是电流反馈。



2.3.1.4 并联反馈和串联反馈

串联反馈：反馈信号以电压形式串接在输入回路中。从电路结构上看，反馈端与输入端**不在**三极管同一极。

并联反馈：反馈信号以电流形式并接在输入回路中。从电路结构上看，反馈电路与输入端**在**极管同一极。

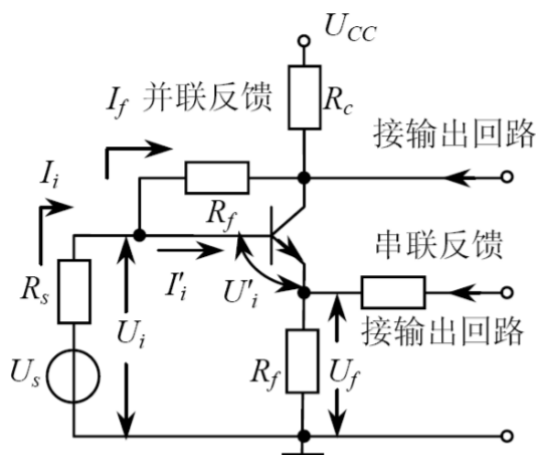
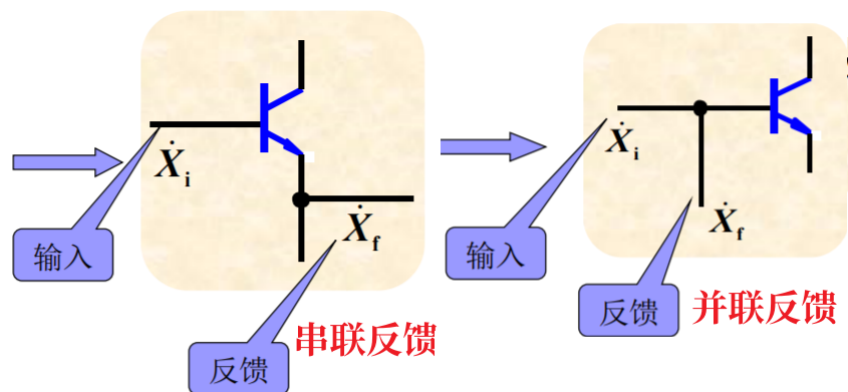


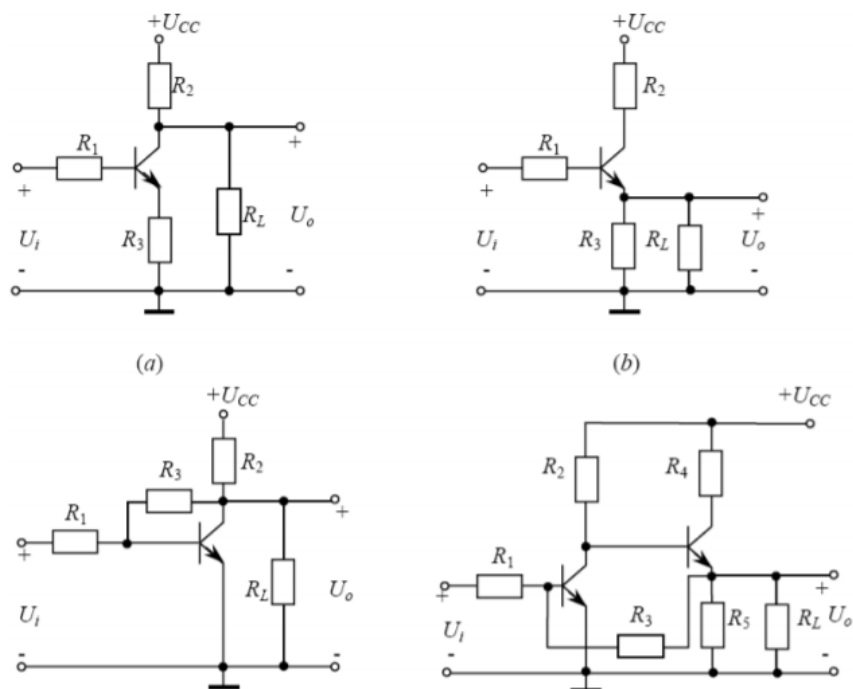
图 8-4 串联反馈与并联反馈

对于三极管电路：

若反馈信号与输入信号同时加在三极管的基极或发射极，则为并联反馈。

若反馈信号与输入信号一个加在基极一个加在发射极 则为串联反馈。

例题：电路如题图8-1所示。判断电路引入了什么性质的反馈（包括局部反馈和级间反馈：正、负、电流、电压、串联、并联、直流、交流）。



解：图(a)，直流/交流、电流、串联负反馈。图(b)，直流/交流、电压、串联负反馈。图(c)，直流/交流、电压、并联负反馈。

图(d)，该反馈网络是一个直流/交流、电压、并联负反馈。R3是级间反馈，而R5是本级内的反馈，它在级内产生一个直流/交流、电压、串联负反馈。

2.3.2 负反馈放大电路的方框图及一般表达式

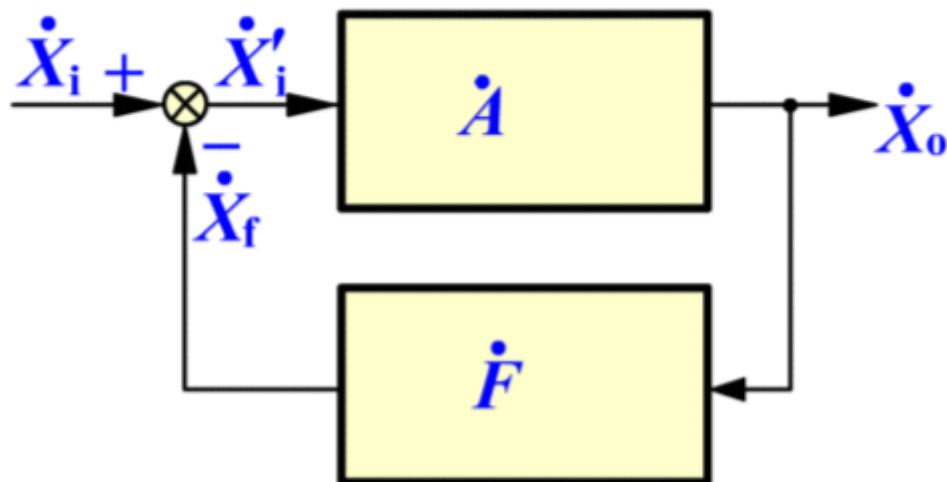


图8.1 反馈放大电路方框图

\dot{X}_i , \dot{X}_o , \dot{X}_f 为输入信号、输出信号和反馈信号; \dot{F} 为反馈系数.

\dot{A} : 开环放大倍数 (基本放大电路放大倍数)

$$\dot{A} = \frac{\dot{X}_o}{\dot{X}'_i} \quad \dot{F} = \frac{\dot{X}_f}{\dot{X}_o} \quad \dot{X}'_i = \dot{X}_i - \dot{X}_f$$

$$\dot{X}_o = \dot{A} \dot{X}'_i = \dot{A} (\dot{X}_i - \dot{X}_f) = \dot{A} (\dot{X}_i - \dot{F} \dot{X}_o)$$

\dot{A}_f : 闭环放大倍数 (反馈放大电路放大倍数)

$$\dot{A}_f = \frac{\dot{X}_o}{\dot{X}_i} = \frac{\dot{A}}{1 + \dot{A}\dot{F}}$$

电路的环路放大倍数为 $\dot{A}\dot{F}$

$$\dot{A}\dot{F} = \frac{\dot{X}_f}{\dot{X}'_i}$$

2.3.3 反馈对输入/输出电阻的影响

不同类型的负反馈，对输入电阻、输出电阻的影响不同。

串联负反馈增大输入电阻，并联负反馈减小输入电阻。

电压负反馈减小输出电阻，减小到 $r_o / (1 + AF)$; **电流负反馈增大输出电阻**，增大到 $(1 + AF)r_o$

2.4 集成运算放大器

共模抑制比：用来表征电路对共模信号的抑制能力，以及对差模信号的放大能力的电路参数. 其表达为：

$$\text{CMRR} = \left| \frac{A_{ud}}{A_{uc}} \right|$$

对数形式共模抑制比： 单位为分贝 (dB)

$$\text{CMR} = 20 \lg \left| \frac{A_{ud}}{A_{uc}} \right| = 20 \lg |A_{ud}| - 20 \lg |A_{uc}|$$

例题： 图9-5电路中，已知差模增益为 48dB, 共模抑制比为 67dB, $U_{i1} = 5 \text{ V}$, $U_{i2} = 5.01 \text{ V}$, 试求输出电压 U_o 。

解： 因为 $20 \lg |A_{ud}| = 48 \text{ dB}$, 故 $A_{ud} \approx -251$

而 $\text{CMR} = 67 \text{ dB}$, 故 $\text{CMRR} \approx 2239$, 所以

$$A_{uc} = \frac{A_{ud}}{\text{CMRR}} = \frac{251}{2239} \approx 0.11$$

则输出电压为

$$U_o = A_{ud}U_{id} + A_{uc}U_{ic} = -251 \times (5 - 5.01) + 0.11 \times \left(\frac{5 + 5.01}{2} \right) = 3.06 \text{ V}$$

2.4.1 理想运算放大器

2.4.1.1 理想运算放大器的性能指标

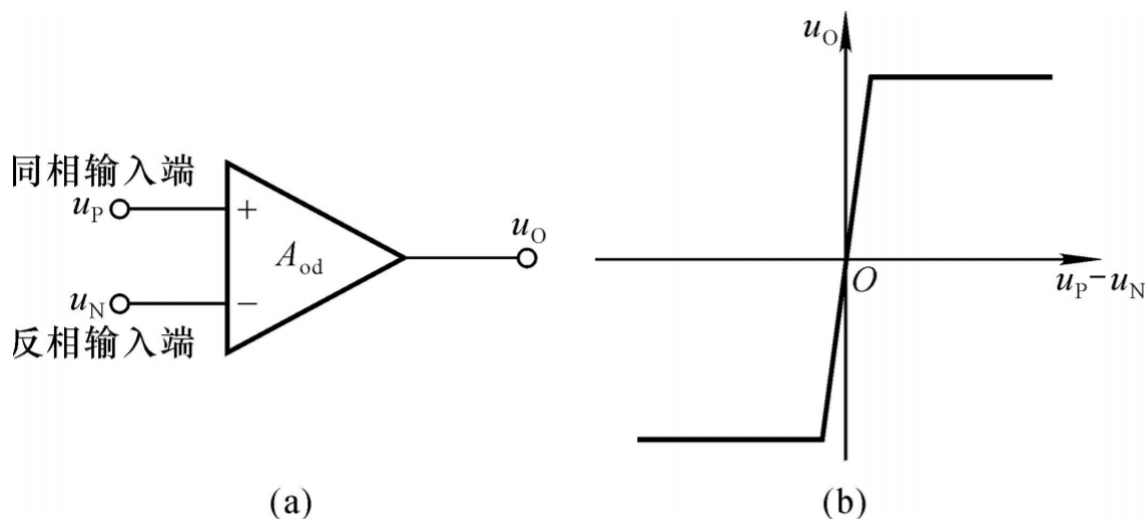
开环电压放大倍数: $A_{od} = \infty$

差模输入电阻: $R_{id} = \infty$

输出电阻: $R_o = 0$

共模抑制比: $K_{\text{CMR}} = \infty$

理想运放工作在线性区的条件： 电路中有负反馈. 开环或者工作在正 反馈中均不工作在线性区



2.4.1.2 “虚短”和“虚断”

理想运放工作于线性区: $u_o = A_{od} (u_+ - u_-)$

而 $A_{od} \rightarrow \infty$, u_o 为有限值, 所以, $(u_+ - u_-) \rightarrow 0$, 故

$$\boxed{u_+ \approx u_-}$$

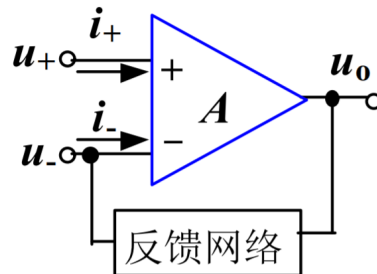
“虚短”：运放的同相输入端和反相输入端的电位“无穷”接近，好象短路一样，但却不是真正的短路。

因为 $R_{id} \rightarrow \infty$, $u_i = u_+ - u_-$ 为有限值, 所以,

$$i_+ = i_- \approx 0$$

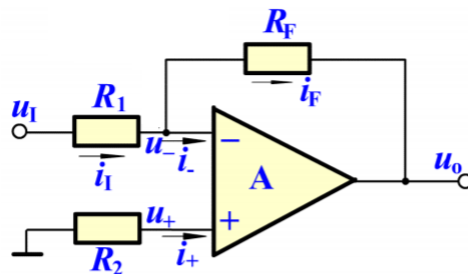
“虚断”：运的同相输入端和反相输入端的电流趋于0，好象断路一样，但却不是真正的断路。

理想运放工作于线性区，因其放大倍数趋于无穷大，所以在输入端只要加一个非无穷小的电压，其输出就会超出其线性工作区，因此，只有电路引入负反馈，才能使其工作于线性区。



2.4.2 信号基本运算电路

2.4.2.1 反相比例运算电路



电压并联负反馈

由于“虚断”， $i_+ = i_- = 0$

由于“虚短”和接地， $u_+ = u_- = 0$

由 $i_1 = i_F$ 得 $\frac{u_1 - u_-}{R_1} = \frac{u_- - u_o}{R_F}$

$$A_{uf} = \frac{u_o}{u_1} = -\frac{R_F}{R_1}$$

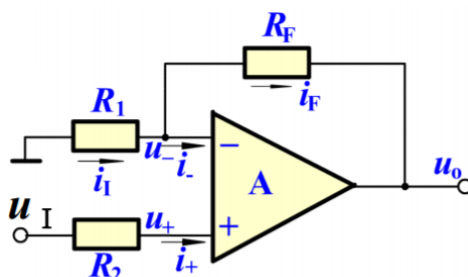
反相输入端“虚地”，电路的输入电阻为 $R_{if} = R_1$

引入深度电压并联负反馈，电路的输出电阻为 $R_{of} = 0$

特点：共模输入电压=0；

缺点：输入电阻小（ $R_i = R_1$ ）

2.4.2.2 同相比例运算电路



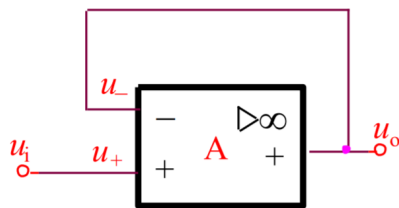
$$A_{uf} = \frac{u_o}{u_1} = 1 + \frac{R_F}{R_1}$$

由于该电路为电压串联负反馈，所以输入电阻很高。

特点：输入电阻高；

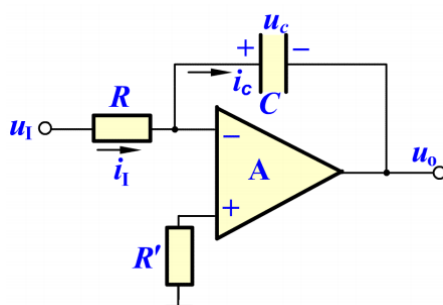
缺点：共模输入电压 $\neq 0$

2.4.2.3 电压跟随器



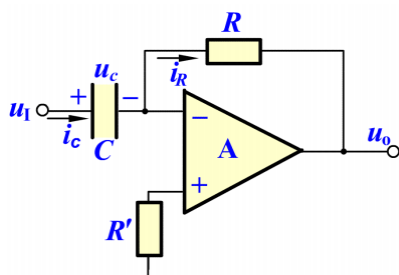
$$u_o = u_i \quad A_{uf} = 1$$

2.4.2.4 积分运算电路



$$u_o = -u_C = -\frac{1}{C} \int i_C dt = -\frac{1}{RC} \int u_i dt$$

2.4.2.5 微分运算电路



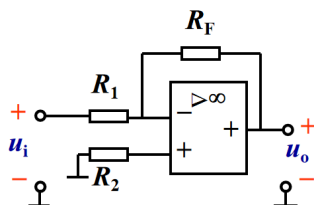
$$u_o = -i_R R = -i_C R = -RC \frac{du_C}{dt}$$

微分电路的作用：

微分电路的作用有**移相**功能

实现波形变换，如将方波变成双向尖顶波。

例题：一个运算放大器电路如下图所示，已知 $R_1 = 10 \text{ k}$ ， $R_F = 50 \text{ k}$ ，则电路的放大倍数 $A_{uf} = u_o/u_i$ 为（-5）



解：反相输入的比例放大器， $A_u = -R_f / R_1 = -50 \div 10 = -5$

3 数字电路

3.1 数制、编码、逻辑代数

3.1.1 数制与数制转换

(1) 二进制、八进制、十六进制 转化为十进制

$$(1011.01)_2 = 1 \times 2^3 + 0 \times 2^2 + 1 \times 2^1 + 1 \times 2^0 + 0 \times 2^{-1} + 1 \times 2^{-2} = (11.25)_{10}$$

(2) 十进制数转换为二进制、八进制、十六进制

①先讨论整数的转换：除 n 取余

$$\begin{array}{r} 2 \overline{) 23} \cdots \cdots \cdots \text{余} 1 \quad b_0 \\ 2 \overline{) 11} \cdots \cdots \cdots \text{余} 1 \quad b_1 \\ 2 \overline{) 5} \cdots \cdots \cdots \text{余} 1 \quad b_2 \\ 2 \overline{) 2} \cdots \cdots \cdots \text{余} 0 \quad b_3 \\ 2 \overline{) 1} \cdots \cdots \cdots \text{余} 1 \quad b_4 \end{array}$$

$$\begin{array}{c} 0 \\ \uparrow \\ \text{读取次序} \end{array}$$

则 $(23)_D = (10111)_B$

②其次讨论小数的转换：乘 n 取整

$$\begin{array}{r} 0.8125 \\ \times \quad 2 \\ \hline 1.6250 \\ 0.6250 \\ \times \quad 2 \\ \hline 1.2500 \\ 0.2500 \\ \times \quad 2 \\ \hline 0.5000 \\ 0.5000 \\ \times \quad 2 \\ \hline 1.0000 \end{array}$$

$$\begin{array}{l} \text{整数部分}=1=k_{-1} \\ \text{整数部分}=1=k_{-2} \\ \text{整数部分}=0=k_{-3} \\ \text{整数部分}=1=k_{-4} \end{array}$$

故 $(0.8125)_{10} = (0.1101)_2$

(3) 二进制 - 八进制相互转换

对整数和小数分别转换，每三位一组，不足补零

101 011 011 . 110 101 110

5 3 3 . 6 5 6

(4)二进制-十六进制相互转换

同理，每四位一组，不足补零

$$\begin{array}{ccccccccc} (& 8 & & F & & A & . & C & & 6)_{16} = \\ \Downarrow & & & \Downarrow & & \Downarrow & & \Downarrow & & \Downarrow \\ (& 1000 & & 1111 & & 1010 & . & 1100 & & 0110)_2 \end{array}$$

3.1.1.1 8421BCD码

8421码就是四位二进制权码，有16个码（0000-1111）表示十进制的0-15

而8421BCD码只有10个码（0000-1001）表示十进制的0-9

（BCD码：用一个四位二进制代码表示一位十进制数字的编码方法。）

3.1.1.2 余三码

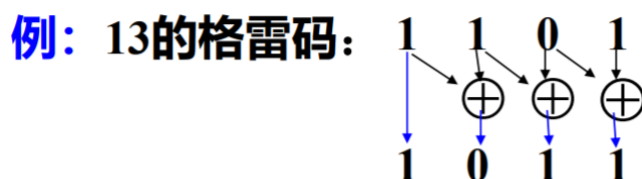
余3码是由8421码加3（0011）得来的.余3码 每位无固定的权，因此它是一种无权码.

3.1.1.3 格雷码

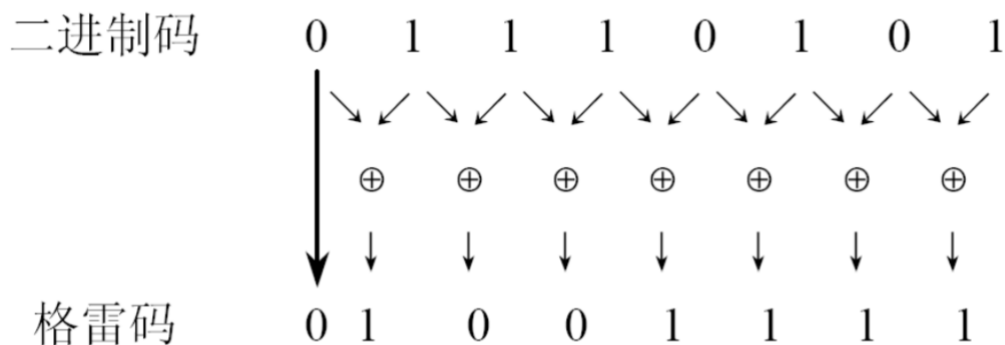
在一组数的编码中，如果任意相邻的代码只有一位二进制数不同，即为格雷码.又称循环码.

典型二进制格雷码编码规则：

$$\begin{cases} G_{n-1} = B_{n-1} \\ G_i = B_{i+1} \oplus B_i \end{cases}$$



例11-10 已知二进制数1110101，求其格雷码。



3.1.1.4 ASCII码

美国信息交换标准代码（ASCII）是一组七位二进制代码，共128个

3.1.1.5 奇偶校验码

一位奇偶校验码就可以用来检测一位错误，双向奇偶校验码可以发现两位错误，纠正一位错误。

3.1.1.6 几种常见十进制代码

十进制	8421码	余3码	2421码	5211码	余3循环码
0	0000	0011	0000	0000	0010
1	0001	0100	0001	0001	0110
2	0010	0101	0010	0100	0111
3	0011	0110	0011	0101	0101
4	0100	0111	0100	0111	0100
5	0101	1000	1011	1000	1100
6	0110	1001	1100	1001	1101
7	0111	1010	1101	1100	1111
8	1000	1011	1110	1101	1110
9	1001	1100	1111	1111	1010

3.1.2 逻辑函数的化简

基础逻辑代数

序号	公 式	序号	公 式
		10	$\overline{1} = 0; \overline{0} = 1$
1	$0 \cdot A = 0$	11	$1 + A = 1$
2	$1 \cdot A = A$	12	$0 + A = A$
3	$A \cdot A = A$	13	$A + A = A$
4	$A \cdot \overline{A} = 0$	14	$A + \overline{A} = 1$
5	$A \cdot B = B \cdot A$	15	$A + B = B + A$
6	$A(BC) = (AB)C$	16	$A + (B + C) = (A + B) + C$
7	$A(B + C) = AB + AC$	17	$A + B \cdot C = (A + B)(A + C)$
8	$\overline{A \cdot B} = \overline{A} + \overline{B}$	18	$\overline{A + B} = \overline{A} \cdot \overline{B}$
9	$\overline{\overline{A}} = A$		

序 号	公 式
21	$A + A \cdot B = A$
22	$A + \overline{A} \cdot B = A + B$
23	$A \cdot B + A \cdot \overline{B} = A$
24	$A \cdot (A + B) = A$
25	$A \cdot B + \overline{A} \cdot C + B \cdot C = A \cdot B + \overline{A} \cdot C$ $A \cdot B + \overline{A} \cdot C + B \cdot C \cdot D = A \cdot B + \overline{A} \cdot C$
26	$A \cdot \overline{A \cdot B} = A \cdot \overline{B}; \quad \overline{A \cdot \overline{A \cdot B}} = \overline{A}$

“与或型”表达式： $F = ABC + AB\bar{C} + \bar{A}BC + \bar{A}\bar{B}C$

3.2 集成逻辑门电路

3.2.1 半导体二极管与晶体管

3.2.2 TTL『与非』门电路

3.2.3 三态TTL门（TSL门）

所谓三态门，是指输出不仅有**高电平**和低电平 两种状态，还有第三种状态——**高阻**输出状态。

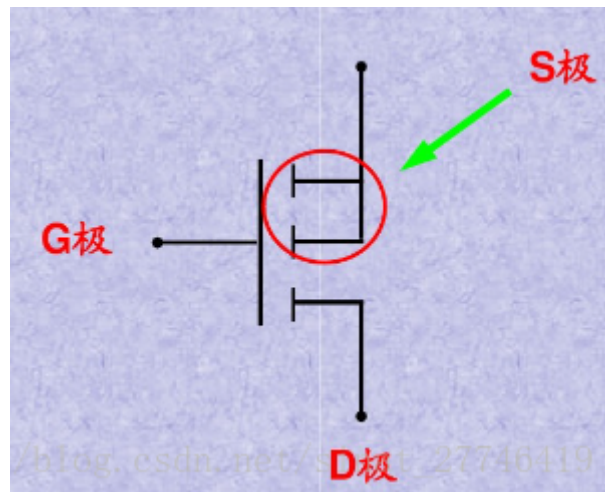
3.2.4 场效应管与MOS管

3.2.4.1 理想开关元件

一个**理想的开关元件**应具备三个主要特点：

- ①在接通状态时，**导通电阻为零**
- ②在断开状态下，**阻抗为无穷大**，流过开关的电流为零
- ③断开和接通之间的转换能在瞬间完成，即开关时间为零。

3.2.4.2 MOS管三个极的判定

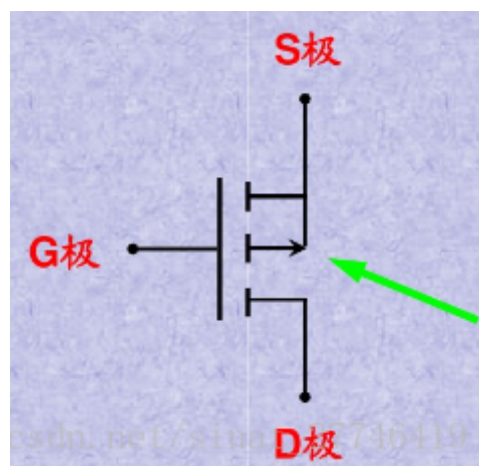


G极(gate)—栅极，不用说比较好认

S极(source)—源极，不论是P沟道还是N沟道，两根线相交的就是

D极(drain)—漏极，不论是P沟道还是N沟道，是单独引线的那边

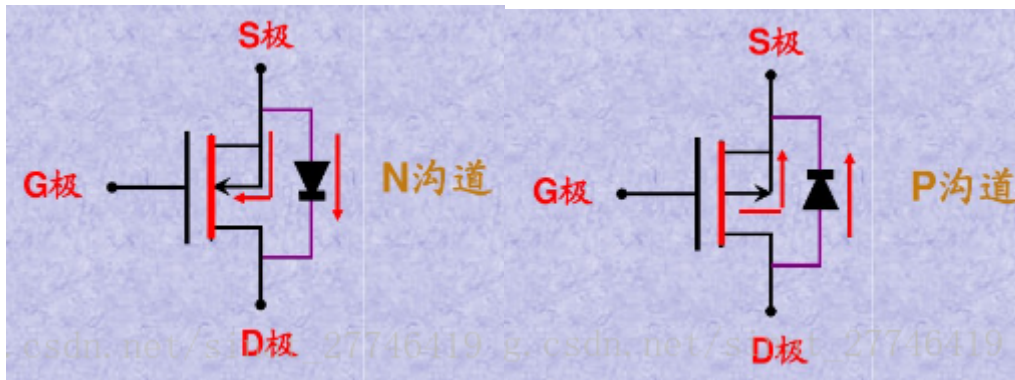
3.2.4.3 MOS管N沟道与P沟道判别



箭头指向G极的是N沟道

箭头背向G极的是P沟道

3.2.4.4 寄生二极管方向判定

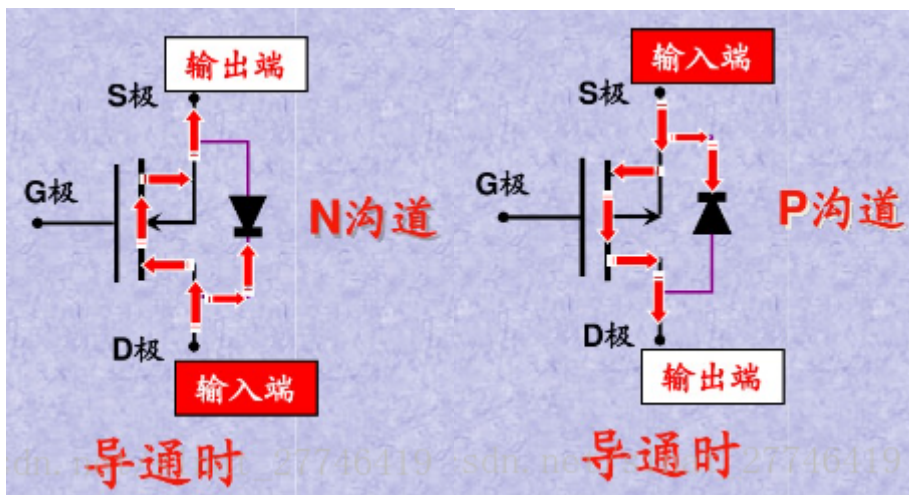


不论N沟道还是P沟道MOS管，中间衬底箭头方向和寄生二极管的箭头方向总是一致的：
要么都由S指向D，要么都由D指向S

3.2.4.5 MOS开关实现的功能

- 1>信号切换
- 2>电压通断

3.2.4.6 MOS管用作开关时在电路中的连接方法



NMOS: D极接输入, S极接输出

PMOS: S极接输入, D极接输出

3.2.4.7 MOS管的开关条件

N沟道—导通时 $U_g > U_s, U_{gs} > U_{gs(th)}$ 时导通

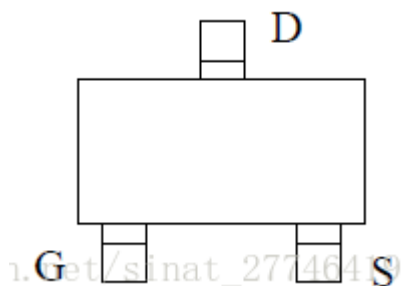
P沟道—导通时 $U_g < U_s, U_{gs} < U_{gs(th)}$ 时导通

总之，导通条件: $|U_{gs}| > |U_{gs(th)}|$

3.2.4.8 MOS管重要参数

- ①封装
- ②类型 (NMOS、PMOS)
- ③耐压 V_{ds} (器件在断开状态下漏极和源极所能承受的最大的电压)
- ④饱和电流 I_d
- ⑤导通阻抗 R_{ds}
- ⑥栅极阈值电压 $V_{gs(th)}$

3.2.4.9 从MOS管实物识别管脚



无论是NMOS还是PMOS

按上图方向摆正，中间的一脚为D，左边为G，右边为S。

或者这么记：单独的一脚为D，逆时针转DGS。

这里顺便提一下三极管的管脚识别：同样按照上图方向摆正，中间一脚为C，左边为B，右边为E。

3.2.4.10 用万用表辨别NMOS、PMOS

借助寄生二极管来辨别。将万用表档位拨至二极管档，红表笔接S,黑表笔接D，有数值显示，反过来接无数值，说明是N沟道，若情况相反是P沟道。

3.2.5 二极管、三极管、场效应管

二极管的结构：PN结 + 引线 + 封装构成

工作在截止区的三极管的两个PN结（均反偏）

当发射结（正向偏置）、集电结（反向偏置），该三极管就工作在（放大状态）；当其发射结和集电结（都是正向偏置）时，该三极管就工作在（饱和状态）；当其发射结和集电结（都是反向偏置）时，该三极管就工作在（截止状态）

共发射极三极管输出特性曲线是（ I_C 与 U_{CE} ）之间的关系

3.2.6 其他

电路等效变换时，如果一条支路的电流为零，可按（断路）处理。

以客观存在的支路电流为未知量，直接应用KCL定律和KVL定律求解电路的方法，称为（支路电流法）

3.3 组合逻辑电路

分析方法：组合逻辑电路、逻辑表达式、最简表达式、真值表、逻辑功能

3.4 触发器

3.5 时序逻辑电路

3.5.1 组合/时序逻辑电路的区别

组合逻辑电路	时序逻辑电路
仅取决于输入	取决于输入+历史状态
无存储单元	有（逻辑+存储）
编码器、译码器、数据选择器、加法器、数值比较器	计数器、寄存器、移位寄存器

4 参考文献

[MOS管基本认识（快速入门） JiYuee Note-CSDN/博客mos管](#)

[组合逻辑电路和时序逻辑电路比较 - 乔 木 - 博客园](#)