

电子技术基础 常见问题答疑

罗钰涵

目 录

第 1 章	电路分析的基本方法	1
1.1	网孔分析与节点分析	1
1.1.1	网孔电流法	1
1.1.2	节点电压法	1
1.2	叠加方法	1
1.3	置换与等效	1
1.3.1	置换	1
1.3.2	等效	2
1.4	一阶电路	2
1.4.1	直接积分法	2
1.4.2	三要素法	2
1.5	相量法	2
第 2 章	BJT 电路的小信号模型	3
2.1	放大电路的性能指标	3
2.2	BJT 的常用参数	3
2.3	BJT 的 H 参数小信号模型	4
2.4	小信号模型分析法	4
2.5	例题 1: 共射放大电路	5
2.6	例题 2: 基极分压式射极偏置共射放大电路	6
2.7	例题 3	8
第 3 章	差分放大电路	9
3.1	差分放大电路的参数	9
3.2	差分放大电路动态分析	9
第 4 章	反馈的判断与计算	10
4.1	基本反馈的分类与判断	10
4.2	负反馈放大电路的四种组态及判断	11

4.2.1	串联反馈和并联反馈	11
4.2.2	电压反馈和电流反馈	11
4.3	为什么反馈信号只取决于输出信号?	11
4.4	例题	12
第 5 章	深度负反馈的计算	14
5.1	深度负反馈的概念	14
第 6 章	集成运算放大器	15
6.1	理想运算放大器	15
6.2	例题:含有 T 型网络的反相放大电路	15
参考文献	16

电路分析的基本方法

注意选择关联参考方向.

1.1 网孔分析与节点分析

1.1.1 网孔电流法

假想每个网孔中有一个电流,此时已经自动满足 KCL,只需要写出以网孔电流表示的 KVL 即可.(有电流源如何处理?)

1.1.2 节点电压法

先在电路中选择一个参考点(一般设该点电压为 0,即接地),然后各节点相对于参考点的电压就是节点电压,此时已经自动满足 KVL,只需要写出用节点电压表示的 KCL 即可.(有电压源如何处理?)

1.2 叠加方法

由线性电阻、线性受控源及独立源组成的电路中,每一元件的电流或电压可以看成是电路中每一个独立源单独作用于电路时,在该元件上产生的电流和电压的代数和.

当某一独立源单独作用时,其他独立源应为零值,即独立电压源用短路代替;独立电流源用开路代替.

1.3 置换与等效

1.3.1 置换

置换是一种基于工作点相同的替换.

1.3.2 等效

等效是指对任意的外电路等效(相同的 VCR).
戴维南定理、诺顿定理.

1.4 一阶电路

1.4.1 直接积分法

本质上来说就是直接解一阶微分方程, 围绕电容电压 u_C 和电感电流 i_L 展开, 即

$$i_C(t) = C \frac{du_C}{dt}, u_L(t) = L \frac{di_L}{dt} \quad (1.4.1)$$

零状态响应 + 零输入响应 = 全响应.

1.4.2 三要素法

$$y(t) = y(\infty) + [y(0_+) - y(\infty)]e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (1.4.2)$$

需要指出的是, 三要素法是一种技巧, **有一定局限性**. 当时间常数 τ 不够明晰的时候最好回到写微分方程的方法.

1.5 相量法

用于求解正弦稳态电路, 当把元件类比为阻抗后, 就可以用电阻电路的方法进行分析.

电阻 $Z = R$, 电感 $Z = j\omega L$, 电容 $Z = \frac{1}{j\omega C}$.

BJT 电路的小信号模型

2.1 放大电路的性能指标

一、放大倍数

由输出和输入参数的不同,可以定义四个放大倍数,即**电压增益** $A_v = v_o/v_i$, **电流增益** $A_i = i_o/i_i$, **互阻增益** $A_r = v_o/i_i$, **互导增益** $A_g = i_o/v_i$.

对于无量纲的电压增益和电流增益,一般会用**对数增益**表示,增益 $= 20 \log |A|$ dB. 注意,这里底数是 10. 比如强度衰减到原来的 1/10,就说增益是 -20 dB,而 -3 dB 就是衰减到原来的一半. 功率增益 $= 10 \log |A_p|$ dB.

二、输入电阻

输入电阻定义为 $R_i = v_i/i_i$. 定量分析时,一般会选择外加测试电压 v_t ,并产生相应的测试电流 i_t , $R_i = v_t/i_t$.

注意输入电阻中不会出现信号源内阻 R_i .

三、输出电阻

输出电阻定义为 $R_o = v_o/i_o|_{v_s=0, R_L=\infty}$. 定量分析时,要先将信号源 $v_s = 0$ 置零,负载 R_L 开路.

注意输出电阻中不会负载 R_L .

2.2 BJT 的常用参数

$$I_E = I_B + I_C, \quad (2.2.1)$$

$$\beta = \frac{I_C}{I_B}, \alpha = \frac{I_C}{I_E} = \frac{\beta}{1 + \beta}. \quad (2.2.2)$$

2.3 BJT 的 H 参数小信号模型

BJT 的 H 参数小信号模型如图2.1所示,其中

$$r_{be} = r_{bb'} + (1 + \beta) \frac{V_T}{I_{EQ}} \approx 200 \Omega + (1 + \beta) \frac{26 \text{ mV}}{I_{EQ}}, \quad (2.3.1)$$

其中 V_T 为电压当量.

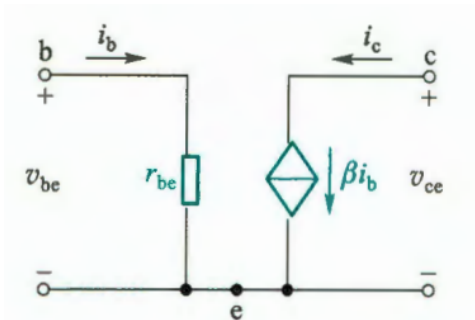


图 2.1: BJT 的简化小信号模型^[1]

2.4 小信号模型分析法

利用小信号模型分析放大电路的方法往往比较固定,一般情况下,按照固定的套路都能够解决问题.

1. 静态分析:

- 将电路中电容视为断路,交流电源置零;
- 将 BJT 的发射结按照恒压降模型计算(对于硅管 $V_B - V_E = 0.7 \text{ V}$);
- 寻找电压路径,使得该路径两端电压确定,且其中仅存在电阻和三极管(基极到发射极),并计算 I_{BQ} 或者 I_{CQ} ;
- 寻找电流路径,使得该路径两端电压确定,且其中仅存在电阻和三极管(集电极到发射极),并计算 V_{CEQ} (用于判断 BJT 是否工作在放大区).

2. 动态分析:

- 判断元件工作状态是否进入放大区;
- 利用三极管的 I_{EQ} 计算动态参数 r_{be} ;
- 将大电容(耦合电容和旁路电容)视为短路,直流信号源置零(即电压源短路,电流源开路)
- 将三极管替换为小信号模型,计算所需要的结果.

2.5 例题 1: 共射放大电路

题目: 基本共射放大电路如图2.2a所示, BJT 的 $\beta = 50$. 计算此时的电压增益、输入电阻、输出电阻.

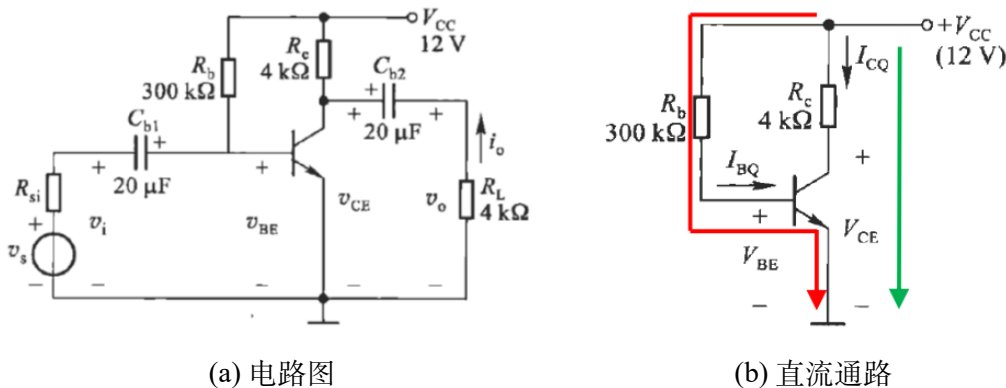


图 2.2: 共射放大电路

1. 静态分析:

断开 C_{b1} 、 C_{b2} 支路, 并将交流电源置零, 得到图2.2b. 选取“电压路径”, 计算 I_{BQ} , 如图中红线所示:

$$I_{BQ} = \frac{V_{CC} - V_{BEQ}}{R_b} = \frac{12\text{ V} - 0.7\text{ V}}{300\text{ k}\Omega} = 40\text{ }\mu\text{A} \quad (2.5.1)$$

选取“电流路径”, 计算 V_{CEQ} , 如图中绿线所示:

$$V_{CEQ} = V_{CC} - I_{CQ}R_c = V_{CC} - \beta I_{BQ}R_c = 4\text{ V} \quad (2.5.2)$$

可见, 此时工作在放大区.

2. 动态分析:

计算 r_{be} :

$$r_{be} = r_{bb'} + (1 + \beta) \frac{V_T}{I_{EQ}} = 200\text{ }\Omega + (1 + \beta) \frac{26\text{ mV}}{I_{EQ}} = 866\text{ }\Omega \quad (2.5.3)$$

将图中的 BJT 替换为小信号模型, 将直流信号源置零, 电容视为短路. 在替换的时候有一个小技巧: 将 b、e、c 三个点先画出来, 然后在 be 之间画上电阻 r_{be} , 在 ce 之间画上受控电流源 βi_b (注意电流方向). 然后分别看三个端口经过哪些元件连接到地上. 比如对于图2.2a中, 基极 b 经过 R_b 和信号源 v_s 连接到地上, 发射极 e 直接连接在地上, 而集电极 c 经过 R_c 和 R_L 连接到地上. 最后, 整理一下, 就能得到如图2.3所示.

现在, 其实就回到了电路分析上:

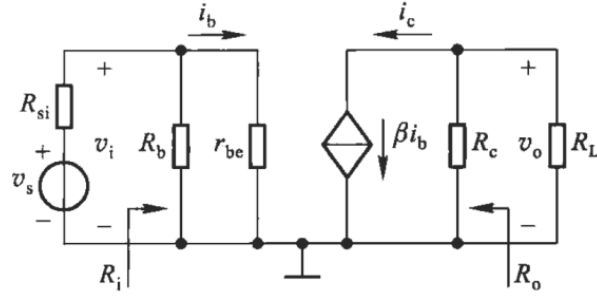


图 2.3: 共射放大电路的动态分析

电压增益为

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = -\frac{\beta i_b (R_c \parallel R_L)}{i_b r_{be}} = -\frac{\beta (R_c \parallel R_L)}{r_{be}} = -115 \quad (2.5.4)$$

对于输入电阻:

$$R_i = \frac{v_i}{i_i} = R_b \parallel r_{be} = 866 \Omega \quad (2.5.5)$$

对于输出电阻:

$$R_o = R_c = 4 \text{ k}\Omega \quad (2.5.6)$$

2.6 例题 2: 基极分压式射极偏置共射放大电路

题目: 如图2.4a所示, 其中参数的选取使得电路满足 $i_2 \gg i_B$, 因此 $i_1 \approx i_2$. 同时, 选取合适的 R_{b1} 、 R_{b2} 和 R_c 使得 BJT 工作在放大区. 计算电压增益、输入电阻、输出电阻.

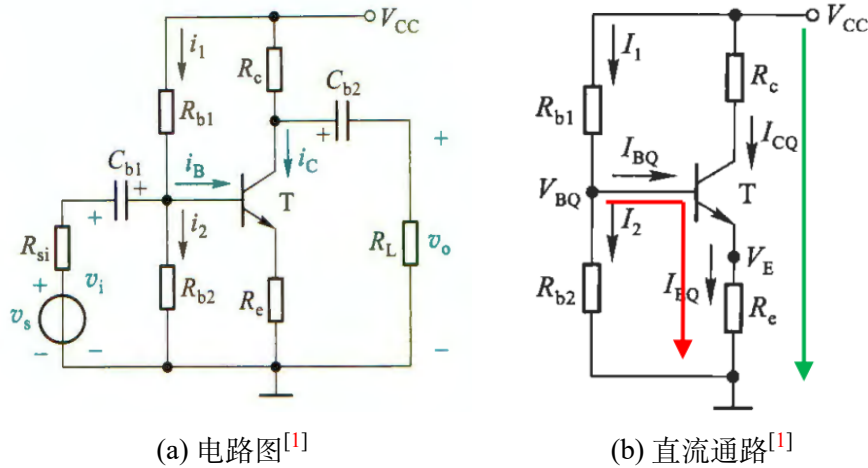


图 2.4: 基极分压式射极偏置共射放大电路

1. 静态分析:

断开 C_{b1} 、 C_{b2} 支路, 并将交流电源置零, 得到图2.4b. 由于 $i_1 \approx i_2$, 因此

$$V_{BQ} = \frac{R_{b2}}{R_{b1} + R_{b2}} V_{CC} \quad (2.6.1)$$

(注: 这里用两个电阻 R_{b1} 和 R_{b2} 分压是模电中一种常用的做法)

选取“电压路径”, 为红线所示, 可以计算出

$$I_{BQ} = \frac{V_{BQ} - V_{BEQ}}{(1 + \beta)R_e} \quad (2.6.2)$$

选取电流路径, 如绿线所示:

$$V_{CEQ} = V_{CC} - I_{CQ}R_c - I_{EQ}R_e = V_{CC} - I_{CQ}(R_c + R_e) \quad (2.6.3)$$

再代入2.3.1式, 就能计算出小信号模型中的 r_{be} .

2. 动态分析:

将所有电容短路, 直流信号源置零, 并将 BJT 替换为小信号模型 (自行尝试例题 1 中提到的技巧), 就能得到图2.5.

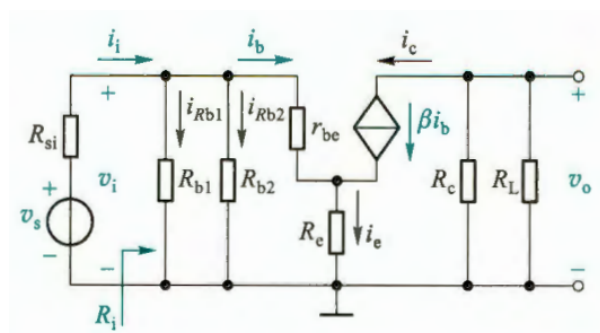


图 2.5: 例题 2 的交流通路^[1]

因为有

$$v_o = -\beta i_b (R_c // R_L) \quad (2.6.4)$$

$$v_i = (r_{be} + (1 + \beta)R_e) i_b \quad (2.6.5)$$

所以电压增益为

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = -\frac{\beta(R_c // R_L)}{r_{be} + (1 + \beta)R_e} \quad (2.6.6)$$

对于输入电阻

$$R_i = R_{b1} // R_{b2} // (r_{be} + (1 + \beta)R_e) \quad (2.6.7)$$

对于输出电阻

$$R_o = R_c \quad (2.6.8)$$

2.7 例题 3

题目:画出该电路的小信号等效模型.

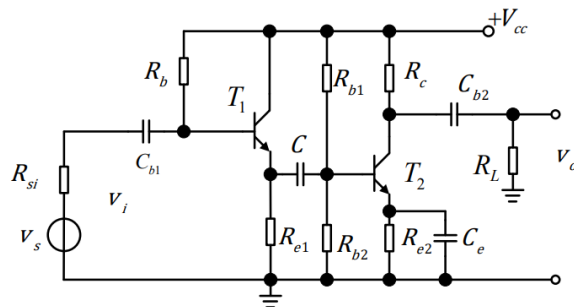


图 2.6: 小信号模型例题 3

方法: 首先将电容短路, 电压源接地 (即置零). 将 b, e, c 三个点先画出来, 然后在 be 之间画上电阻 r_{be} , 在 ce 之间画上受控电流源 βi_b (注意电流 i_b 和 βi_b 的方向). 然后分别看三个端口经过哪些元件连接在地上, 作出对应的电路.

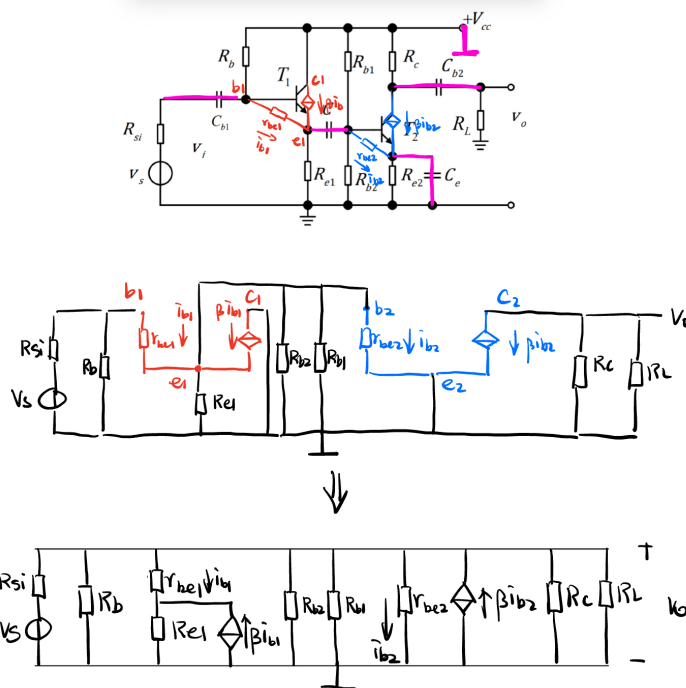


图 2.7: 小信号模型例题 3 解答

(没时间用电脑画了, 图有点丑, 将就看一下)

差分放大电路

3.1 差分放大电路的参数

信号有两个输入端:同相输入端 v_P 和反相输入端 v_N .

1. 差模信号: $v_{id} = v_P - v_N$.
2. 共模信号: $v_{ic} = (v_P + v_N)/2$.
3. 差模电压增益:即仅考虑差模信号输入时的电压增益 $A_{vd} = v_{od}/v_{id}$.
4. 共模电压增益:即仅考虑共模信号输入时的电压增益 $A_{vc} = v_{oc}/v_{ic}$.
5. 共模抑制比 $K_{CMR} = |A_{vd}/A_{vc}|$.

需要注意的是,这里讨论的输入信号都是交流小信号,而非直流信号.

3.2 差分放大电路动态分析

在动态分析的时候,通常需要将共模信号和差模信号分开讨论.实际上,对于以下这些结论,只要按照之前的动态分析方法,将 BJT 替换为相应的小信号模型就能直接算出来.

这部分内容务必动手过一遍,建议不要强记结论.

可以参考童诗白的《模拟电子技术基础(第五版)》3.3.2 节,那本书上的讨论较详细.童诗白的教材讨论的是长尾式的差分放大电路,即最下方接的是电阻.而课程所用教材讨论的是下方接的电流源的差分放大电路,注意二者在讨论共模信号时的差别.

相关结论已在习题课讲义上已经罗列,此处不再重复.

反馈的判断与计算

4.1 基本反馈的分类与判断

一、开环与闭环

二、级内反馈与级间反馈

三、直流反馈和交流反馈

存在于直流通路中的反馈称为**直流反馈**，存在于交流通路中的反馈称为**交流反馈**。(什么是直流通路？什么是交流通路？)

四、正反馈和负反馈

使净输入量变大的反馈称为**正反馈**，使净输入量变小的反馈称为**负反馈**。

常用方法为“瞬时极性法”：首先假设瞬时极性增加，用 (+) 标出，然后沿着信号传输的路径判断有关节点电压的瞬时值。若增强输入信号就为正反馈，否则为负反馈。

下图罗列了两种常用的正负反馈的判断。对于运算放大器，可以用 $v_O = A_{vo}(v_P - v_N)$ 来理解这张图；而对于 BJT 的理解可以参考本章例题。

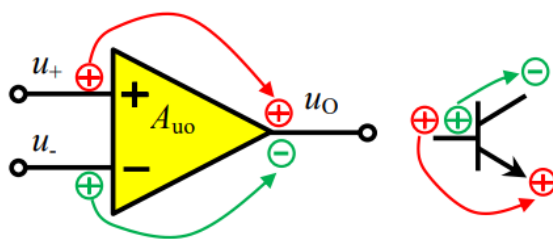


图 4.1: 常用元件反馈极性的判断

4.2 负反馈放大电路的四种组态及判断

本部分内容可以利用教材上的例题和习题进行练习.

4.2.1 串联反馈和并联反馈

反馈信号为电压, 为输入电压求差获得净输入电压, 为串联反馈. 若反馈信号为电流, 则与输入电流求差获得净输入电流, 为并联反馈.

也可以看反馈通路与输入端放大元件的交点. 若与输入信号 v_i 在同一段, 为并联反馈; 若与输入信号 v_i 不在同一段, 为串联反馈.

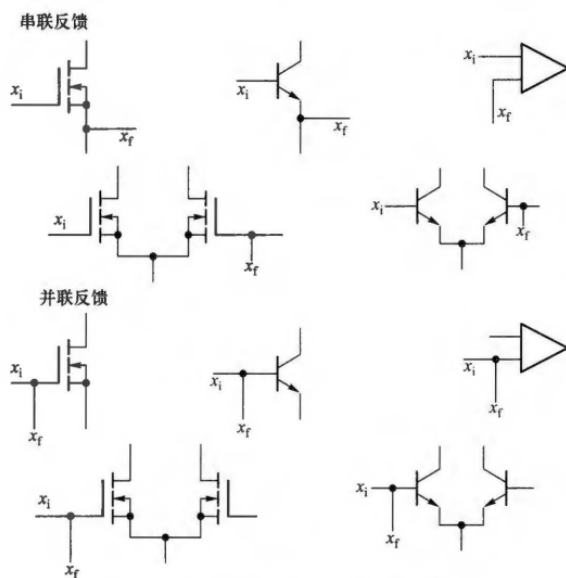


图 4.2: 串联反馈和并联反馈^[1]

4.2.2 电压反馈和电流反馈

常用方法为“负载短路法”: 短路后反馈消失, 为电压反馈; 短路后反馈仍然存在, 为电流反馈.

4.3 为什么反馈信号只取决于输出信号?

根据反馈的定义, 反馈量一般会表现为某一电阻上的电压或者电流, 但不是该电阻的实际电压或者电流, 而只是输出量作用的结果. 下面以一个例子来说明这一点.

如图4.3所示,该电路引入了串联负反馈. 则 R_{b2} 的实际电压为

$$v_{b2} = i_{b2}R_{b2} + \frac{R_{e3}i_{e3}}{R_{e3} + R_f + R_{b2}}R_{b2} \quad (4.3.1)$$

其中 i_{b2} 是 T_2 基极电流, 其中 i_{e3} 是 T_2 射极电流. 其中第一项为输入信号产生的电压, 而第二项才是输出信号所带来的反馈信号. 这样, 利用“负载短路法”, 就可以知道当 $v_o = 0$ 的时候, i_{e3} 仍然存在, 即反馈信号仍然存在(说明是什么类型的反馈?).

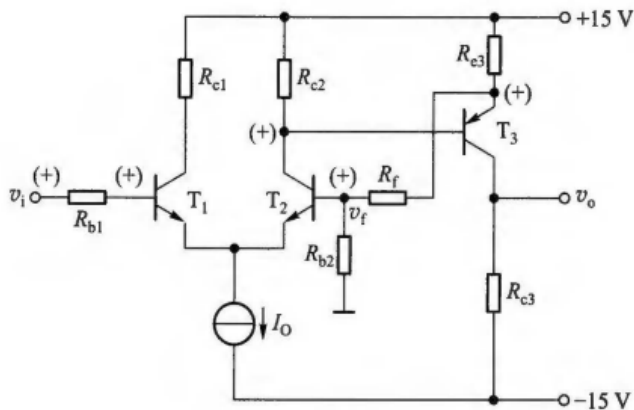


图 4.3: 为什么反馈信号只取决于输出信号?^[1]

4.4 例题

题目: 判断电路中的反馈.

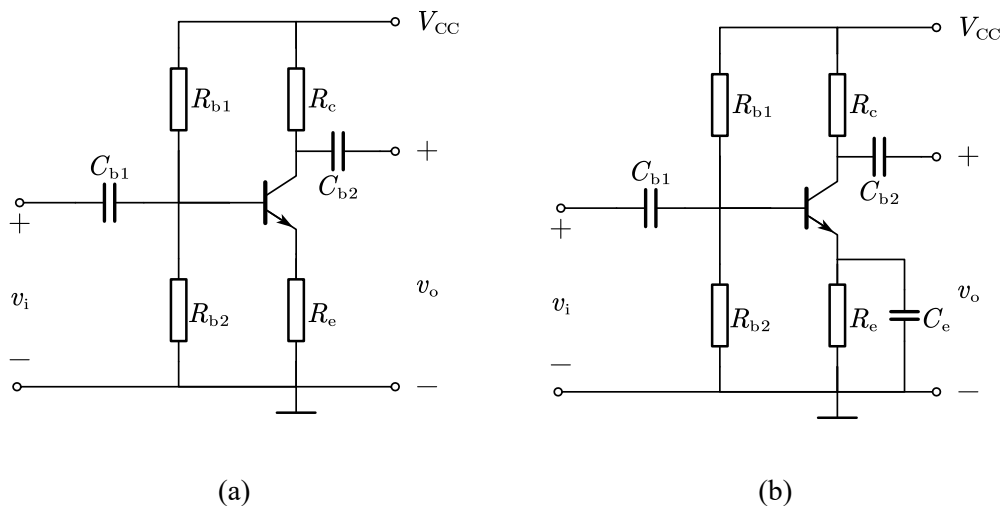


图 4.4: 反馈判断例题

(1)在图4.4a中:

R_e 既存在于输入回路中,又存在于输出回路中,构成反馈.

直流反馈和交流反馈均存在.

当 BJT 的基极电压升高,导致 be 之间的电压升高. 由于 be 之间为 PN 结,因此基极电流增加. 由于 R_e 的存在,发射极的电压被抬高,此时 be 之间的电压又减小,故为负反馈.

交流负反馈的组态:电流串联负反馈.

(2)在图4.4b中:由于旁路电容 R_e 的存在, R_e 没有交流反馈.

旁路电容的引入一般是为了改变电路的某些性能,如果利用小信号模型计算这两个电路的电压增益的话,可以发现引入旁路电容后的电压增益变大了.

深度负反馈的计算

5.1 深度负反馈的概念

当 $(1 + AF) \gg 1$ 时,称为深度负反馈,此时

$$A_f = \frac{1}{F}, \quad (5.1.1)$$

本质上,深度负反馈是将净输入量 x_{id} 忽略了,即有 $x_i = x_f$. 因此,在利用深度负反馈求解问题的时候,最重要的就是找到 x_i 和 x_f 究竟在哪里,可以用图5.1来判断这两个信号的具体位置,然后利用 $v_{id} = 0$ (虚短)和 $i_{id} = 0$ (虚断),求出负反馈电路的闭环增益.

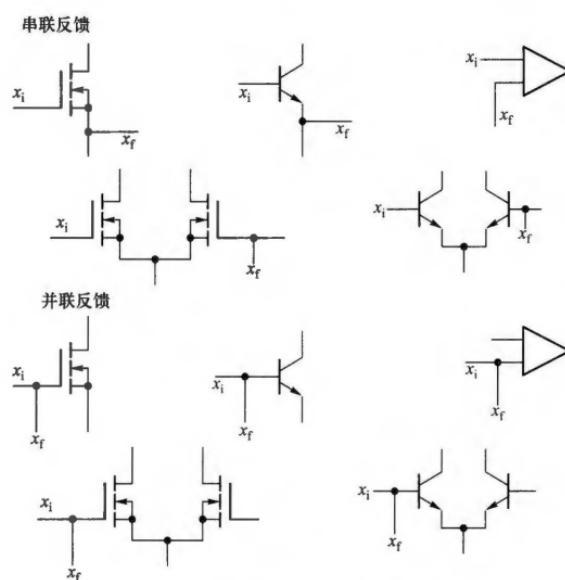


图 5.1: 输入端口的判断^[1]

集成运算放大器

6.1 理想运算放大器

对于理想的运算放大器,最重要的两个性质为:

1. 开环电压增益 $A_{vo} = \infty$, 但输出电压为有限值, 因此 $v_P = v_N$, 称为“虚短”.
2. 输入电阻 $r_i = \infty$, 此时 $i_P = i_N = 0$, 称为“虚断”.

6.2 例题:含有 T 型网络的反相放大电路

题目:如图6.1所示,计算闭环电压增益 A_v .

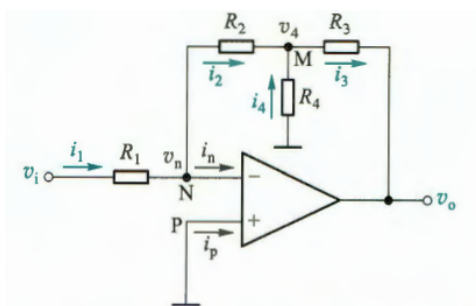


图 6.1: 含有 T 型网络的反相放大电路^[1]

由理想运放的特性,有 $v_P = v_N = 0$ 和 $i_P = i_N = 0$. 则由 KCL

$$i_1 = i_2, i_2 + i_4 = i_3 \quad (6.2.1)$$

即

$$\frac{v_i - 0}{R_1} = \frac{0 - v_4}{R_2}, \frac{0 - v_4}{R_2} + \frac{0 - v_4}{R_4} = \frac{v_4 - v_o}{R_3} \quad (6.2.2)$$

联立得到

$$A_v = -\frac{R_2}{R_1} \left(1 + \frac{R_3}{R_2} + \frac{R_3}{R_4} \right) \quad (6.2.3)$$

参考文献

- [1] 康华光, 张林. 电子技术基础: 模拟部分[M]. 7 版. 北京: 高等教育出版社, 2021.