



第八章 反馈放大电路

梁福田 ftliang@ustc.edu.cn

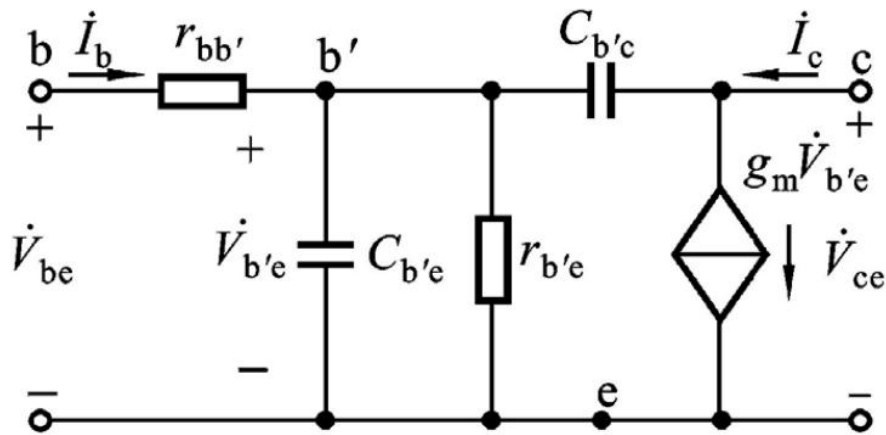
2025.5.16





前情提要

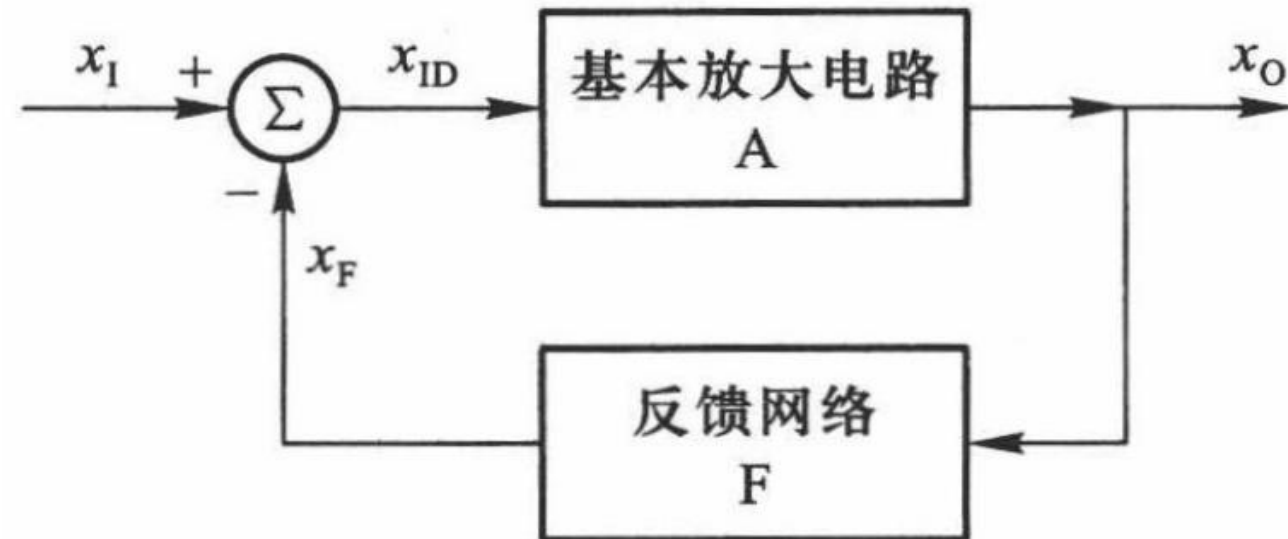
- MOSFET、BJT (α , β , $i_e = i_c + i_b$)
 - 3个电极, 3种组态 (放大电路)
 - 小信号模型, 交流通路, 直流通路
- 静态工作点, Q点 (V_{CE} , I_C , I_B)
- 集成电路
 - (镜像) 电流源
 - 差分式放大电路
 - 集成电路放大器
 - 变跨导式模拟乘法器
 - 增益带宽(积)
- 噪声与干扰





§ 8-1 反馈的基本概念与分类

- 反馈就是在电子系统中把输出回路的电压或电流馈送到输入回路的过程。
 - 在电子技术领域里，反馈现象是普遍存在的。
- 存在于器件内部的反馈，称为内部反馈或寄生反馈。
- 通过外接电路元件来实现反馈，称为外部反馈。

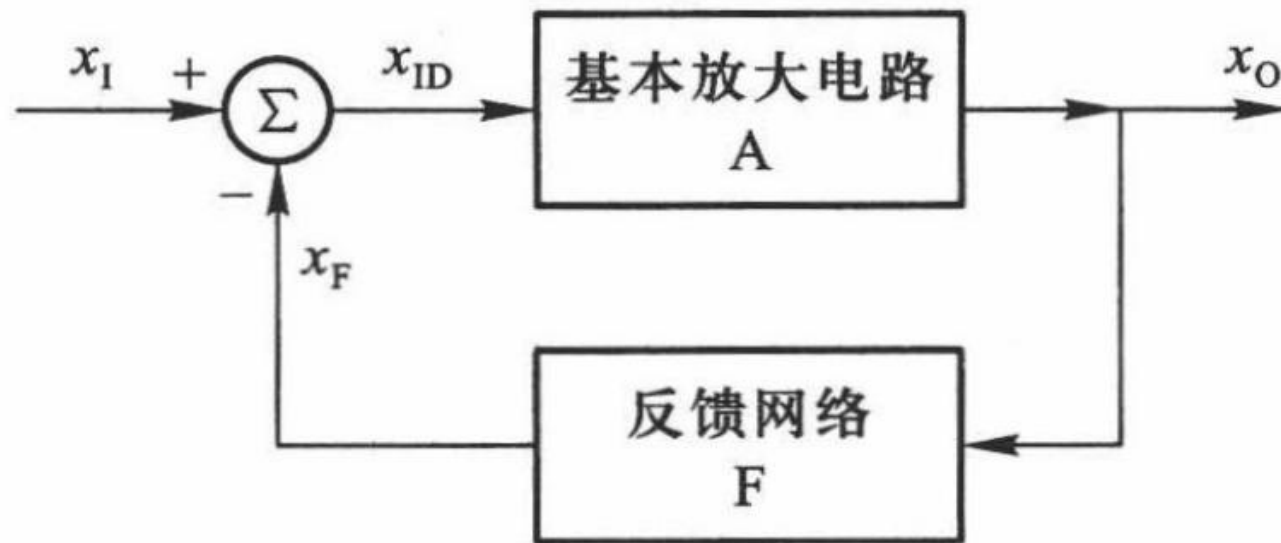




基本概念



- 反馈通路：信号反向传输的渠道
- 开环：无反馈通路
- 闭环：有反馈通路
- 输入信号 x_I 、反馈信号 x_F 、净输入信号 x_{ID} 、输出信号 x_O
- 放大增益 A
- 反馈系数 F

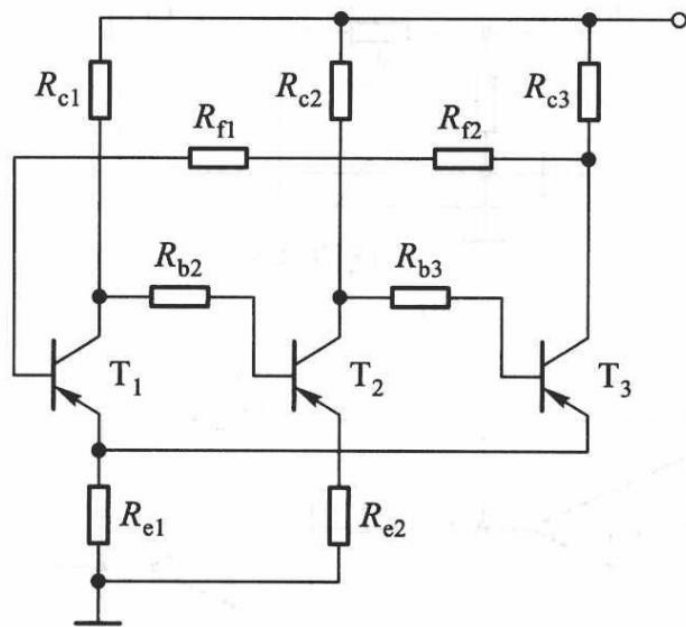




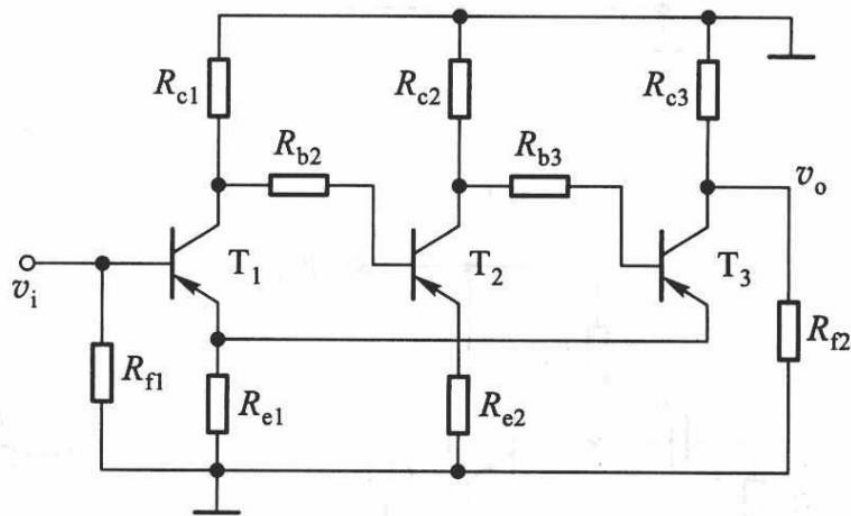
基本概念



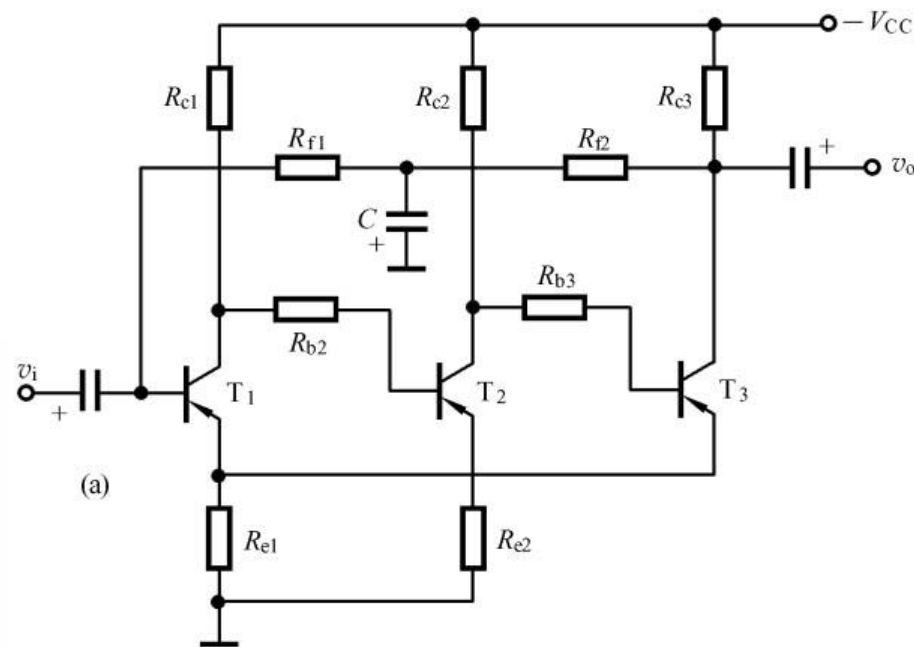
- 直流/交流反馈
- 存在于直流通路/交流通路里的反馈



(a)



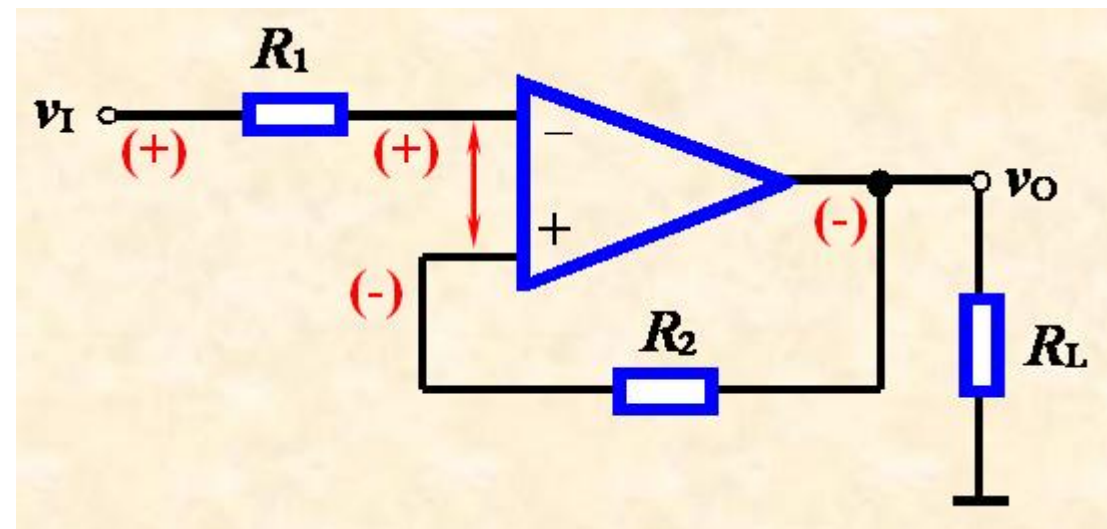
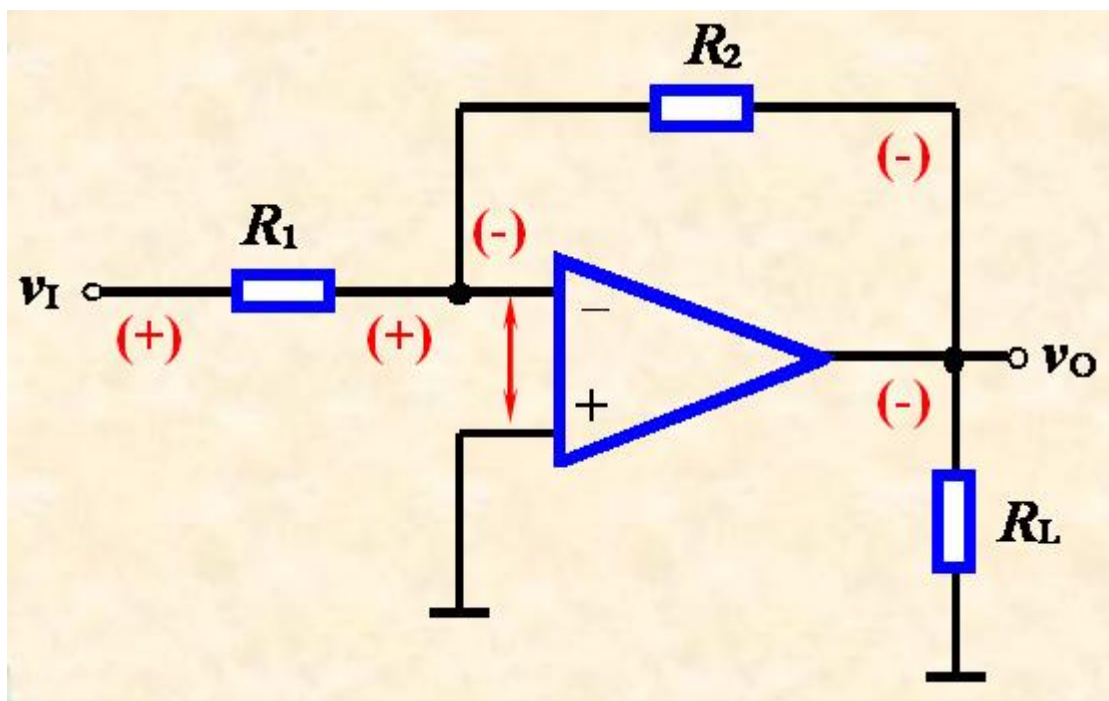
(b)



(a)

基本概念

- 正反馈、负反馈
- 瞬时极性法：即在电路中，从输入端开始，沿着信号流向标出某一时刻有关节点电压变化的斜率（正斜率或负斜率，用“+”、“-”号表示）。

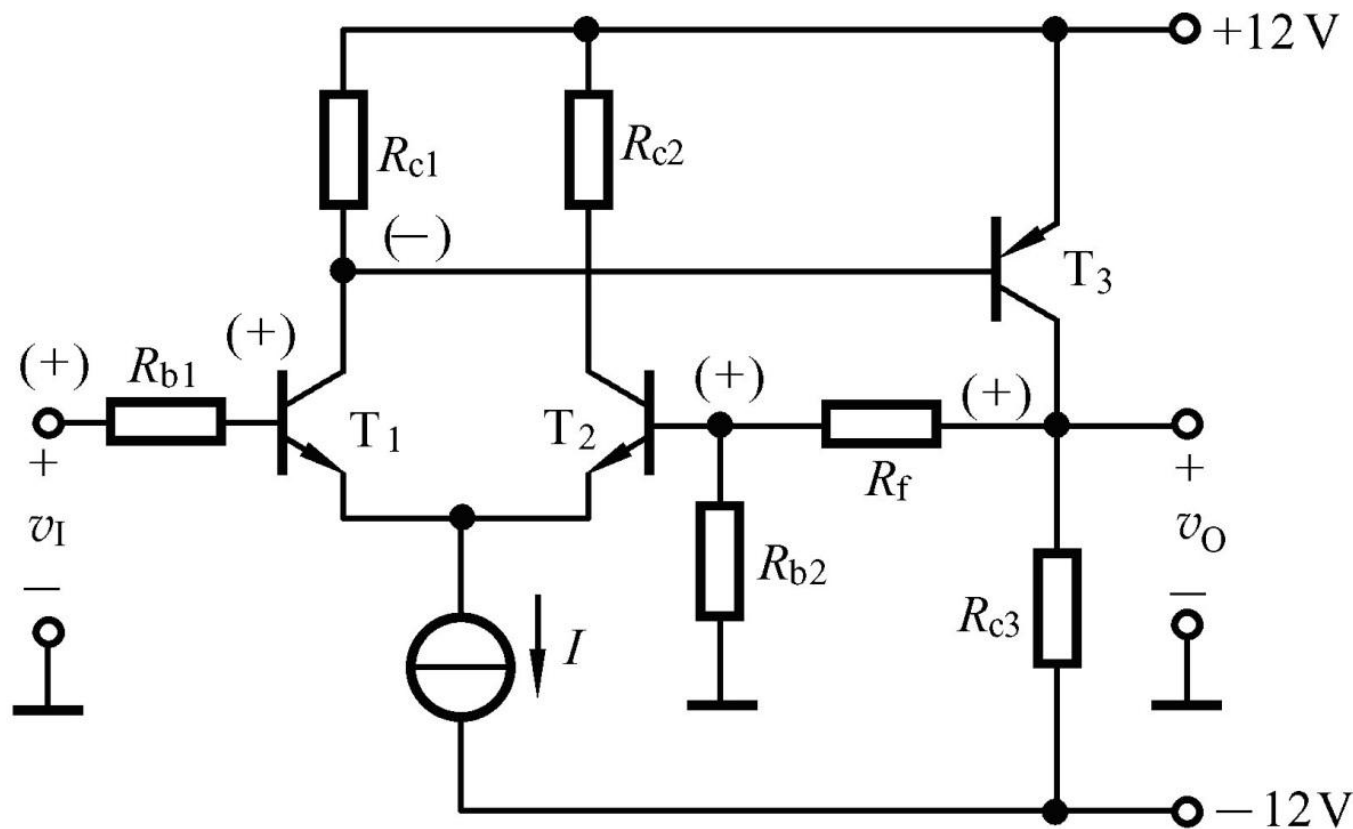
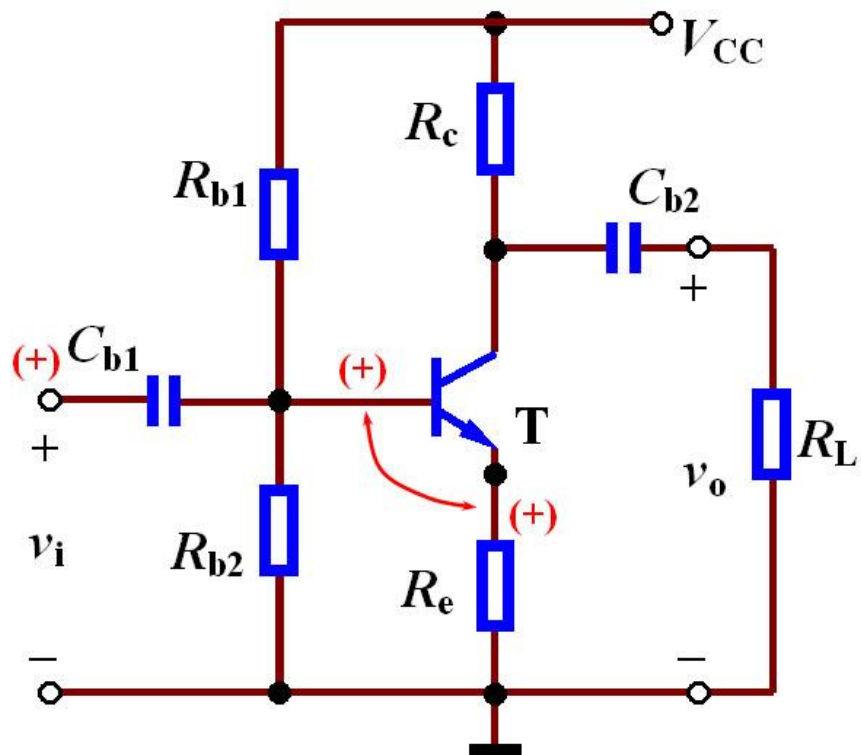




基本概念



- 级间反馈、本级(局部)反馈

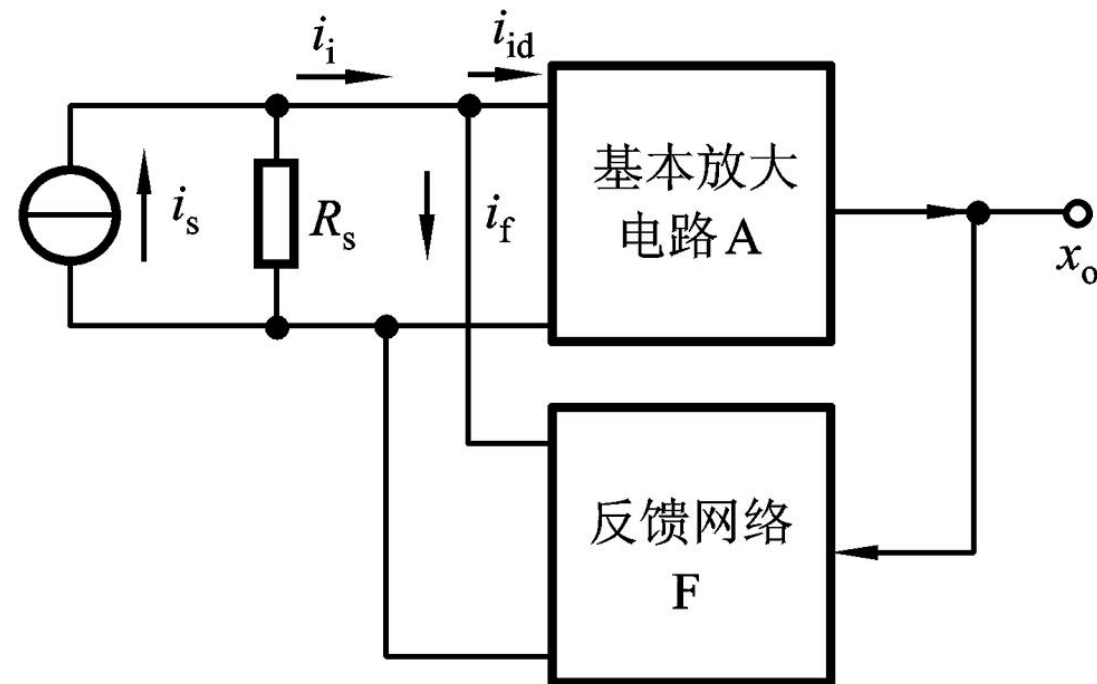
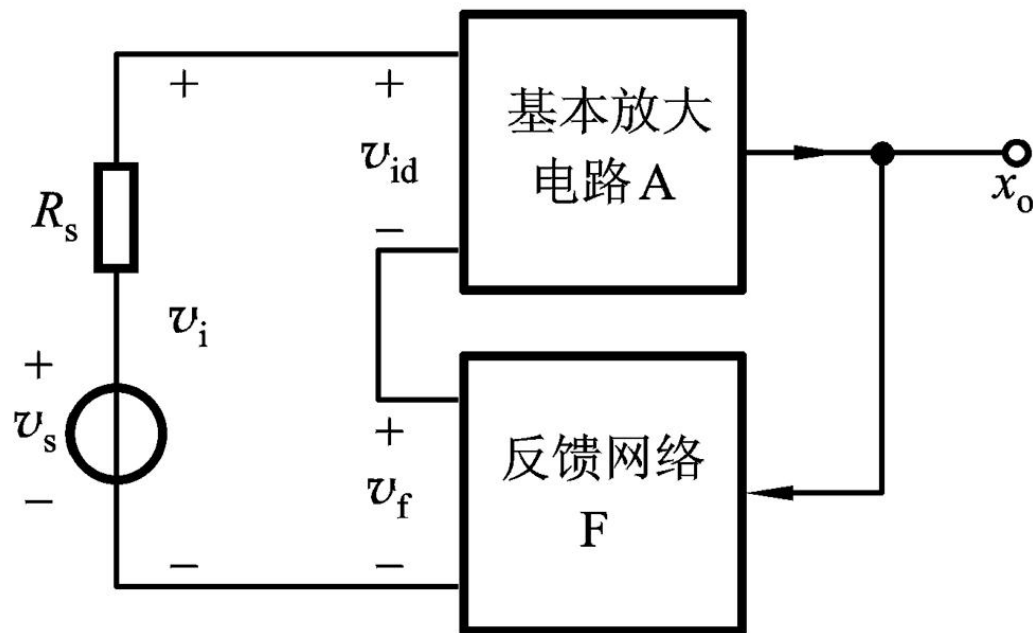




基本概念



- 串联反馈，并联反馈



串联：输入以电压形式求和 (KVL) $-v_i + v_{id} + v_f = 0$ 即 $v_{id} = v_i - v_f$

并联：输入以电流形式求和 (KCL) $i_i - i_{id} - i_f = 0$ 即 $i_{id} = i_i - i_f$

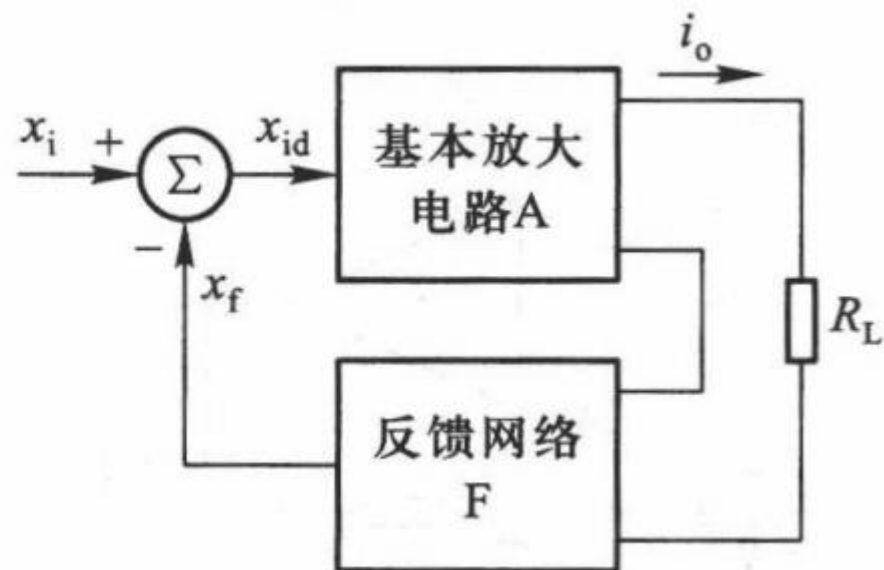
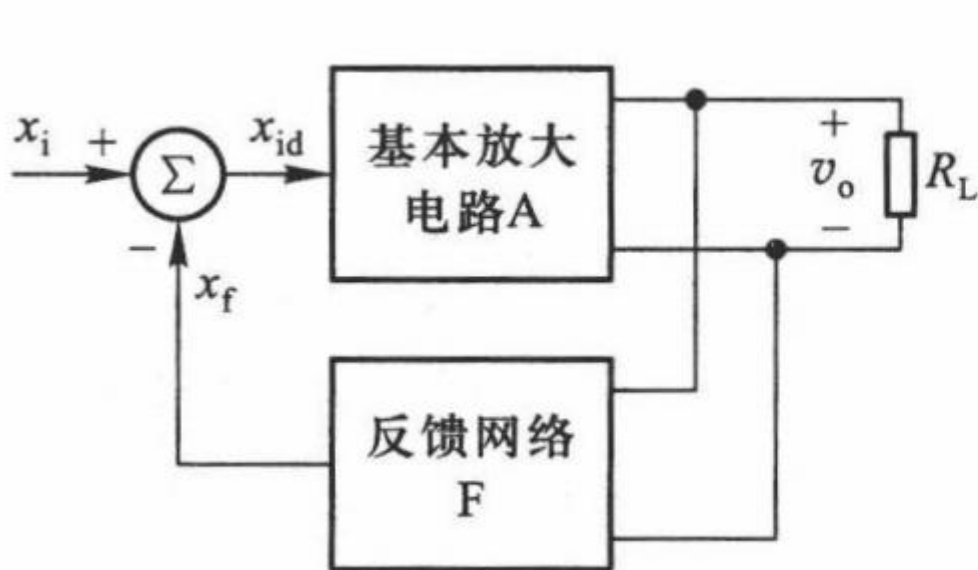
快捷方式：看反馈信号接入哪个输入端



基本概念



- 电压反馈、电流反馈
- 输出短路法，令 $V_o=0$ 或 $R_L=0$ ，若反馈信号不存在了，则为电压反馈。





第八章 反馈放大电路

梁福田 ftliang@ustc.edu.cn

2025.5.23

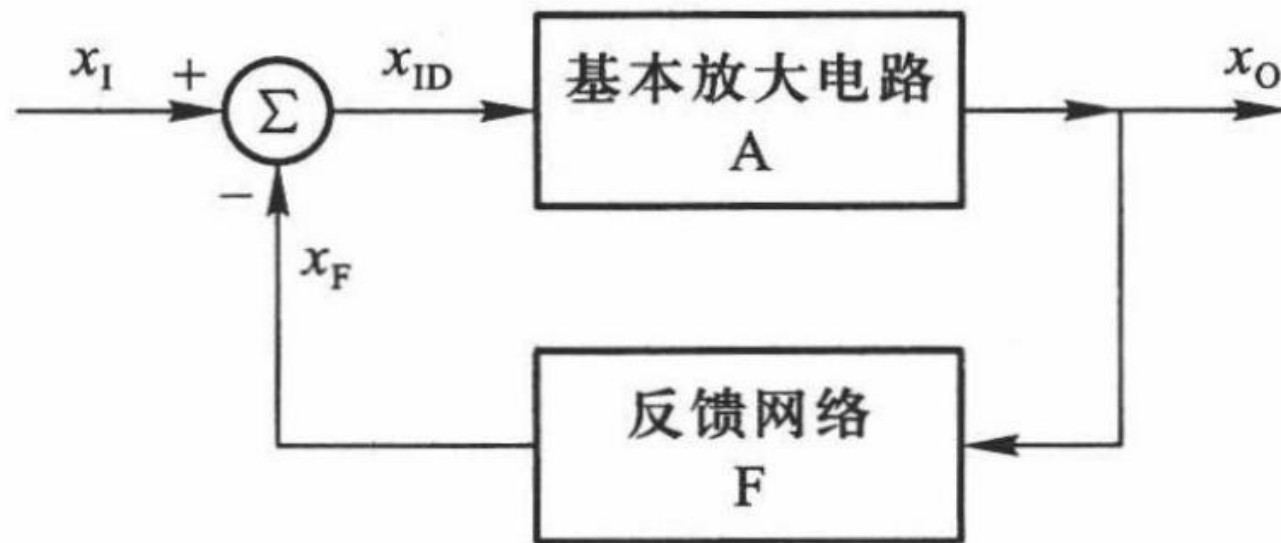
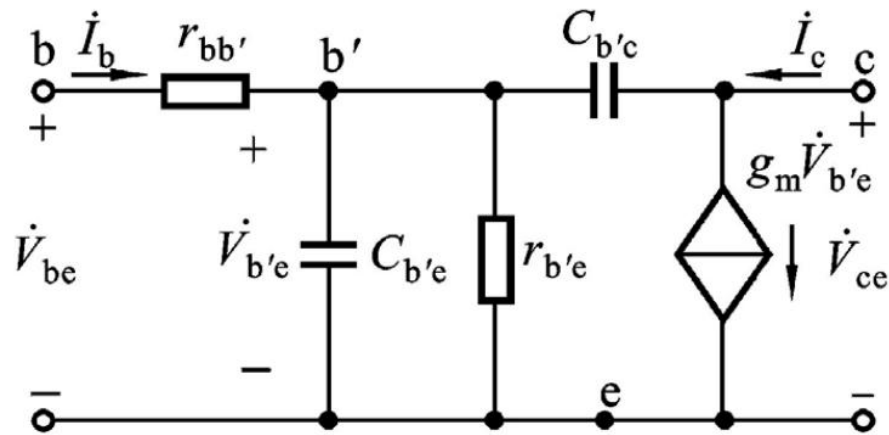




前情提要



- MOSFET、BJT (α , β , $i_e = i_c + i_b$)
 - 3个电极, 3种组态 (放大电路)
 - 小信号模型, 交流通路, 直流通路
- 静态工作点, Q点 (V_{CE} , I_C , I_B)
- 集成电路、噪声与干扰
- 反馈放大电路
 - 直流/交流, 正/负, 内/外
 - 瞬间极性法
 - 电压/电流, 串联/并联
 - 放大电路4种类型
 - 反馈4种组态
 - ~~负反馈对放大电路的影响~~
 - ~~反馈深度、环路增益~~



串联: 输入以电压形式求和 (KVL) $-v_i + v_{id} + v_f = 0$ 即 $v_{id} = v_i - v_f$

并联: 输入以电流形式求和 (KCL) $i_i - i_{id} - i_f = 0$ 即 $i_{id} = i_i - i_f$

快捷方式: 看反馈信号接入哪个输入端, 同端为并联

电压、电流反馈:

输出短路法, 令 $V_o = 0$ 或 $R_L = 0$,
若反馈信号不存在了, 则为电压反馈



四种类型的反馈组态

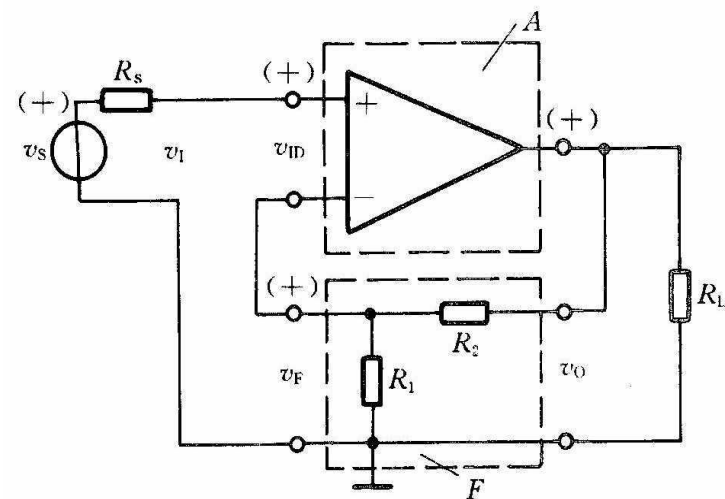
- 放大电路有四种类型，即电压放大、电流放大、互阻放大和互导放大等四种。
- 将这四种基本放大电路与适当的反馈网络相结合，根据输出取样和输入比较方式的不同，可以构成四种类型的反馈组态，即：
 - (1) 电压串联负反馈；
 - (2) 电流并联负反馈；
 - (3) 电压并联负反馈；
 - (4) 电流串联负反馈。



电压 串联 负反馈



- 基本放大电路为一个集成运放A，反馈网络是 R_1 和 R_2 组成的分压器，用F表示。
- 设想在放大电路的同相输入端接入一变化的信号电压 v_s ， v_o 与 v_s 同极性。
- 由于 v_o 经反馈网络产生的反馈电压 v_F 与 v_o 亦同极性，即与 v_i 同极性， v_F 抵消了 v_i 的一部分，致使运放两输入端之间的净输入电压 $v_{id} = v_i - v_F$ 比无反馈时减小了，输出电压 v_o 亦减小，整个放大电路的电压增益将降低，因此，反馈是**负反馈**。
- 由于 v_F 和 v_i 在输入回路中彼此串联，所以是**串联反馈**。

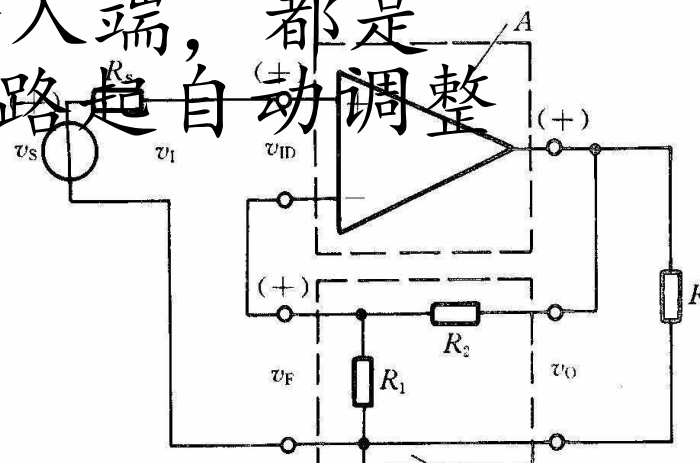




电压串联负反馈



- 反馈电压 v_F 是经 R_1 和 R_2 组成的分压器由输出电压 v_O 取样得来，反馈电压 v_F 是 v_O 的一部分，即反馈电压与输出电压成比例，故是电压反馈。综上，电路是电压串联负反馈电路。
- 在判断电压反馈时，根据反馈信号与输出电压所成的比例关系，设想将放大电路的负载 R_L 两端短路，短路后如使 $v_F = 0$ （或 $i_F = 0$ ），就是电压反馈。
- 电压负反馈的重要特点是电路的输出电压趋向于维持恒定，因为无论反馈信号以何种方式引回到输入端，都是利用输出电压 v_O 本身通过反馈网络对放大电路起自动调整作用，这就是电压反馈的实质。



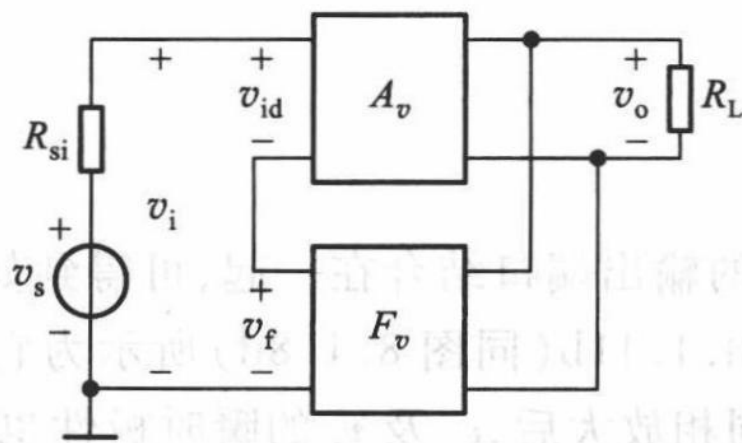
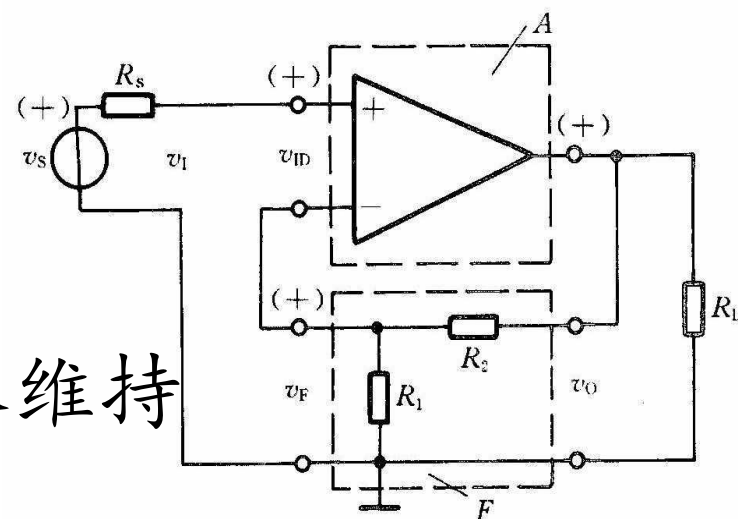


电压串联负反馈

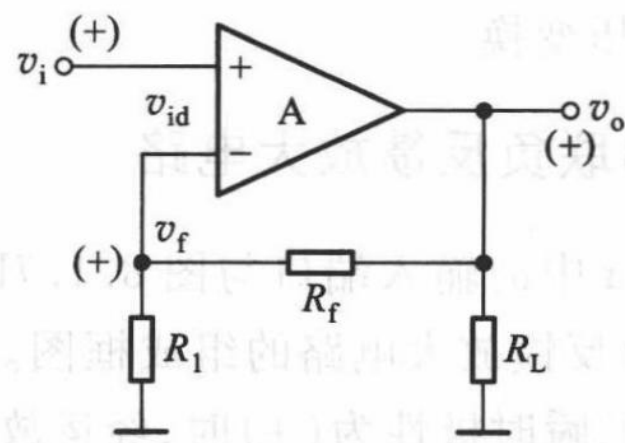
- 当 v_i 一定时，若负载电阻 R_L 减小而使输出电压 v_o 下降，则电路将进行如下的自动调整过程：

$$R_L \downarrow \rightarrow v_o \downarrow \rightarrow v_F \downarrow \rightarrow v_{ID} \uparrow \rightarrow v_o \uparrow$$

- 反馈的结果牵制了 v_o 的下降，从而使 v_o 基本维持恒定。



(a)



(b)



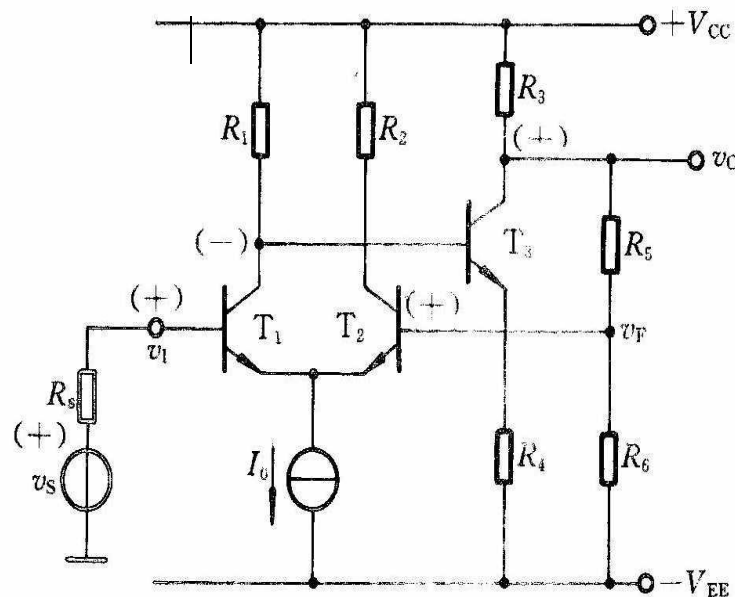
例



- 由三只硅BJT T_1 、 T_2 和 T_3 所组成的反馈放大电路，试分析该电路所存在的反馈，并判断其反馈组态。

解：(1) 为两级直接耦合放大电路。第一级为带恒流源 I_0 的差分式放大电路，既作为电路的输入级，又作为引入反馈的比较环节。

第二级由 T_3 组成共射极放大电路，直接从 T_1 的集电极输入，由集电极输出。由 R_5 、 R_6 组成的分压器就是反馈网络，从它们的抽头端联接到 T_2 的基极输入端。

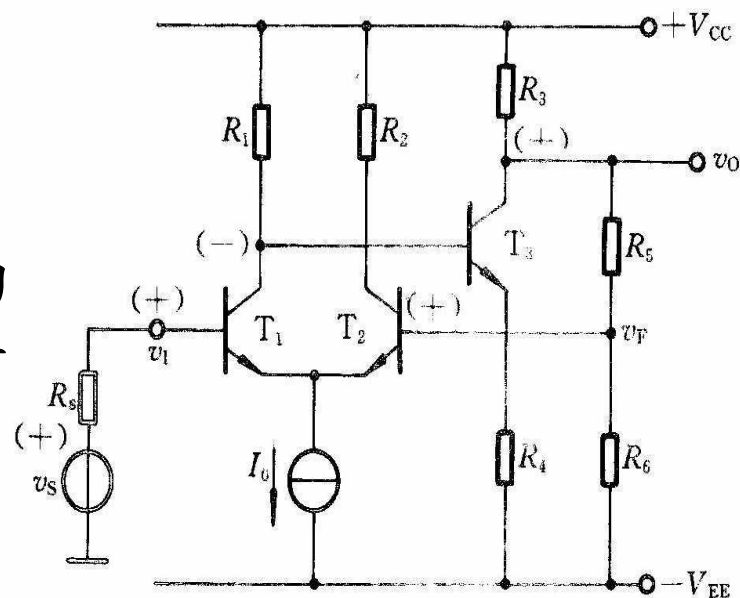




解答-静态情况分析



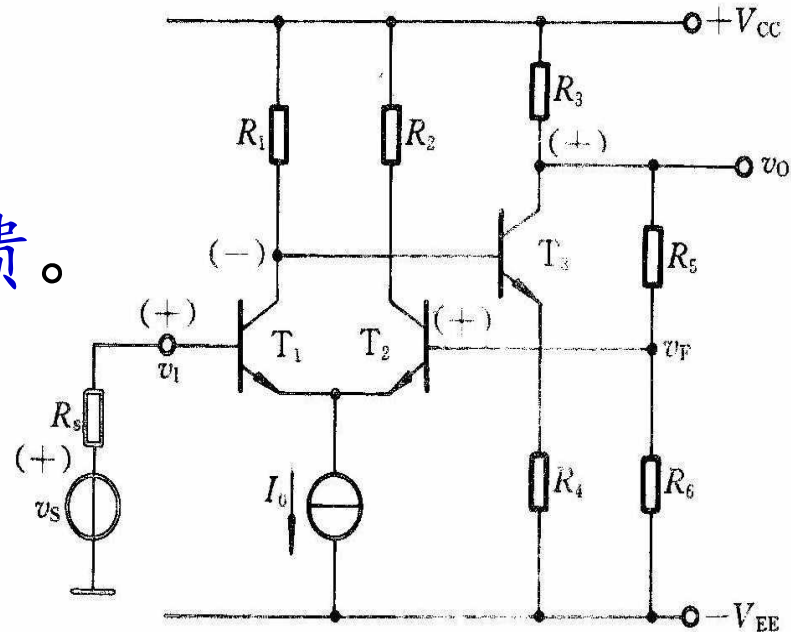
- 由于电路为直接耦合放大电路，而且通过反馈网络形成闭环系统。可从分析电路在静态情况下的直流反馈入手，了解反馈能否稳定电路的Q点。
- 当 $v_s=0$ 时，各节点电压和支路电流均为静态值。假设由于温度的升高致使 I_{C1} 升高，则 V_{C1} 下降， V_{C3} 上升，通过反馈网络使 V_F 亦上升，相当于在 T_2 的基极输入端加一正值的信号电压。
- 此信号电压作用于 T_1 和 T_2 的be结，而 T_1 的be结所加的是反向信号电压，故 I_{C1} 减小，使 T_1 的Q点得到稳定。
- 温度的变化，对于差分式放大电路来说，其影响相当于共模信号，而差分式放大电路对共模信号具有较强的抑制能力，因而它对稳定电路的Q点亦有很好的作用，这也是一种直流负反馈作用。





解答-反馈组态的判断

- 用瞬时极性法可以判断该电路的反馈极性。
- 假设在电路的输入端加一信号电压 v_s ，其瞬时变化极性如图中的 v_s 上端的(+)号所示，由它所引起的电路各节点的电位的瞬时极性亦如图中(+)、(-)号所示。
- 在差分式放大电路的两输入端所加入的是同极性的信号。反馈信号 v_F 削弱了输入信号 v_I ，使电路的电压增益下降，故该电路所引入的是**负反馈**。
- 反馈信号 v_F 通过 T_1 、 T_2 两管的发射结与 v_I
- 在输入回路中彼此串联，因此属**串联反馈**。
- 所以电路的反馈组态为电压串联负反馈。

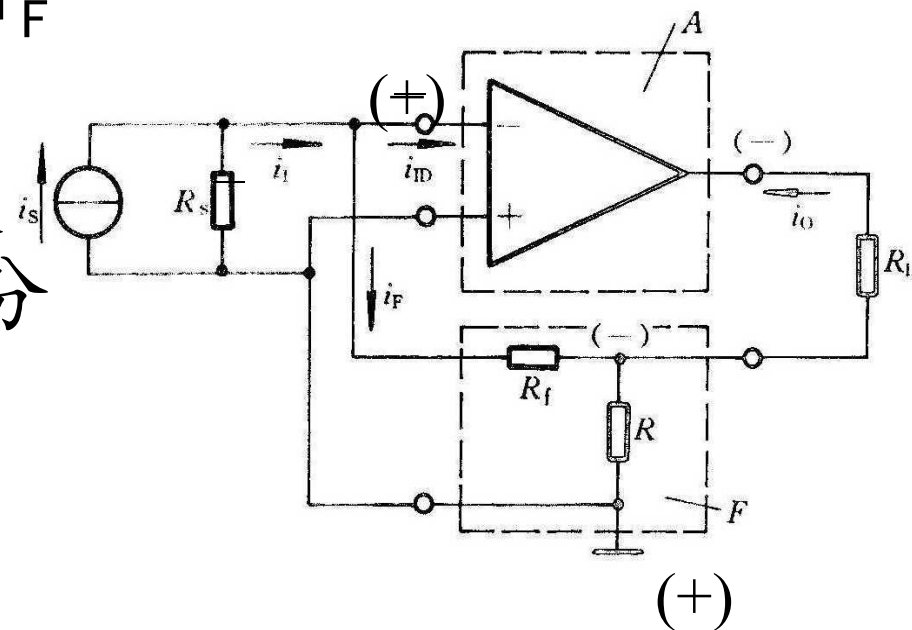




电流 并联 负反馈



- 设在电路的输入端外加一信号电流 i_s ，其瞬时流向如图中的箭头所示，由此而引起电路中各支路的电流 i_i 、 i_{ID} 及 i_F 的流向亦如图中的箭头所示。
- 反馈电阻 R_f 与取样电阻 R 的联接点亦处于负电位，故输入电流 i_i 中的绝大部分 i_F 流向反馈网络。
- 因 i_s (或 i_i) 是接到运放的反相输入端，运放输出端对地的电位为负极性 (-)，输出电流 i_o 的流向如图中的箭头所示。

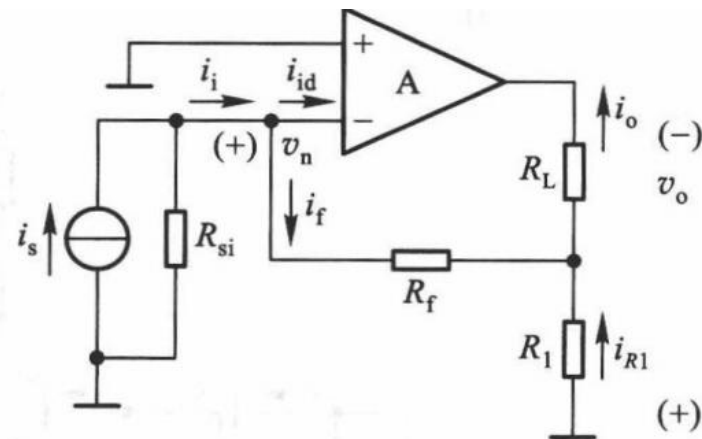
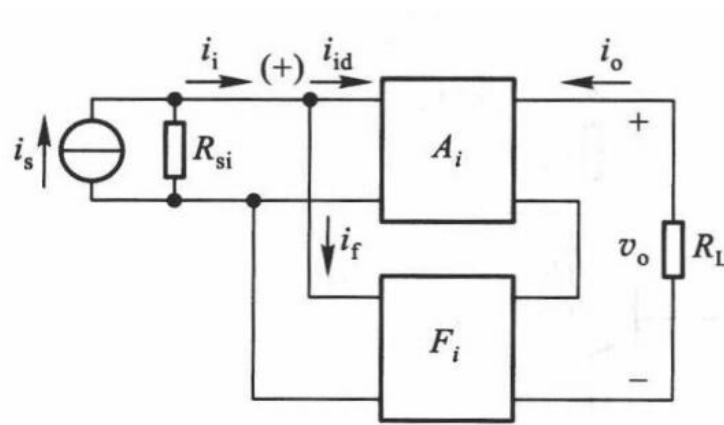




电流并联负反馈

- 流进反相输入端的电流 $i_{ID} = i_i - i_F$ ，与未接反馈网络相比， i_{ID} 减小，电路的输出电流 i_o 亦减小，电流增益下降，所以是 **负反馈**。
- 因反馈信号 i_F 是从输出电流 i_o 取样，所以是 **电流反馈**。
- 比较简便的判断方法就是将负载 R_L 开路，致使 $i_o = 0$ ，从而使 $i_F = 0$ ，即由输出引起的反馈信号消失了，从而确定为电流反馈。
- 反馈电流 i_F 与输入电流 i_i 是以并联的方式进行比较，从而以差值电流 i_{ID} 供给运放，所以是 **并联反馈**。
- 电流负反馈的重要特点是趋向于维持输出电流 i_o 恒定，在 i_i 一定的条件下，不论何种原因，使 i_o 减小时，负反馈的作用将引起如下的自动调整过程：

$R_L \uparrow \rightarrow i_o \downarrow \rightarrow i_F \downarrow \rightarrow i_{ID} \uparrow \rightarrow i_o \uparrow$





例



- 由硅BJT T_1 和 T_2 组成的反馈电路如图，试分析电路结构和其中存在的反馈，并判断其反馈组态。

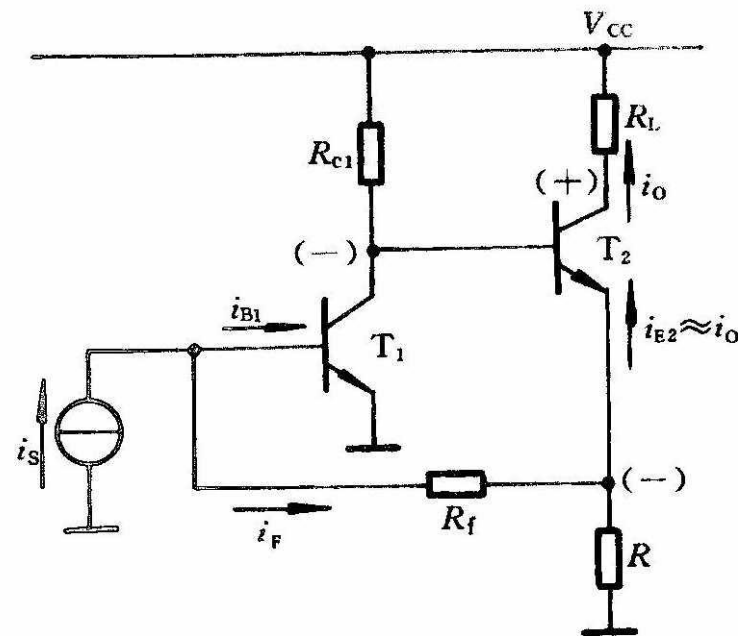
解：

(1) 电路结构分析：

电路为两级直接耦合放大电路，
输入信号为电流源 i_s ；

输出量为电流 i_o 。

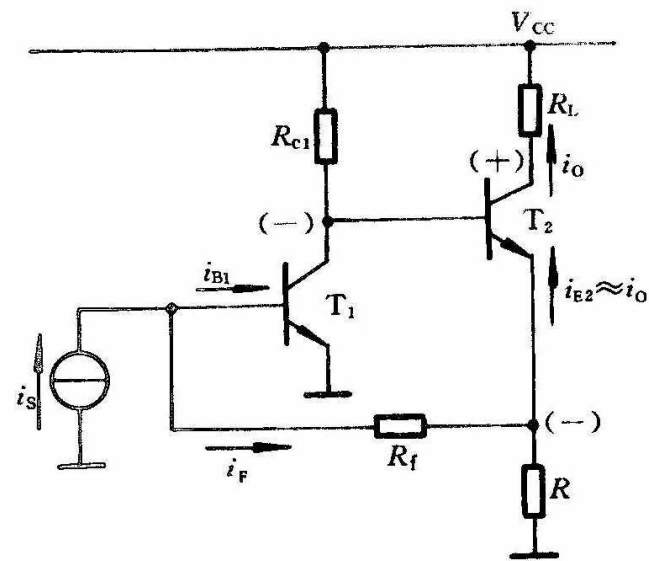
因而它是电流放大电路。





解答--直流反馈分析

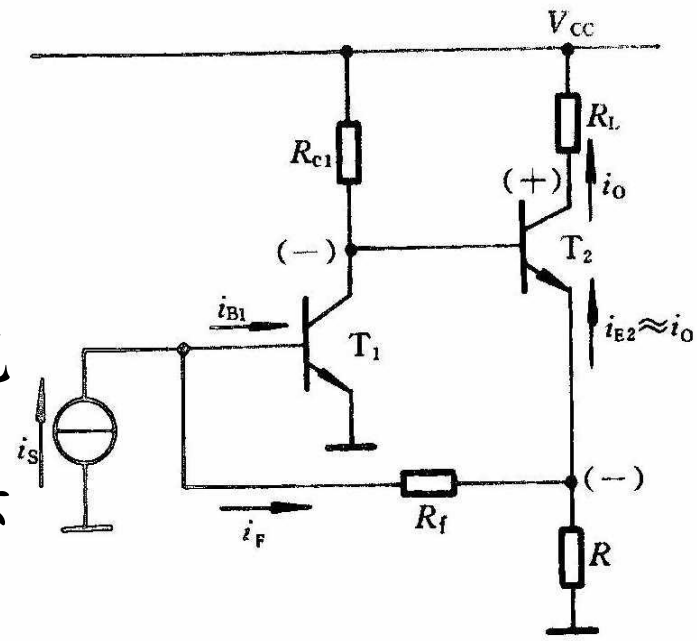
- 当输入信号电流 $i_s=0$ (开路) 时, 电路处于直流工作状态。电路中的节点电位和支路电流均为静态值。
- 若 T_1 和 T_2 以及电路各元件参数选择恰当, 两管均可得到合适的Q点。由于整个电路处于闭环状态, 电路中任何节点的电位或任一支路的电流发生变化, 必将相互影响而达到自稳平衡。
- 当温度升高时, T_1 的集电极电流 I_{C1} 增加, V_{C1} 下降, 从而 I_{C2} (I_{E2}) 和 V_{E2} 亦减小, 显然 I_{B1} 也减小, 结果牵制了 I_{C1} 的增加。
- 由于反馈网络 (R 和 R_f 组成) 的接入, 形成闭环自动调整作用, 导致两管的Q点均能趋于稳定。





解答——交流反馈组态判断

- 当电路的输入端接入电流信号 i_s 时，其瞬时流向如图中的箭头所示，则由它而引起的电流路中各支路电流的瞬时极性分别如图中的箭头和 (+)、(-) 号所示。
- 电路由两只分立的BJT构成的基本放大电路，属电流并联负反馈电路。
- 电压串联和电流并联两种负反馈电路是从它们的取样对象(电压 v_o 或电流 i_o) 和反馈信号(电压 v_F 和电流 i_F) 与输入信号的比较方式来看。

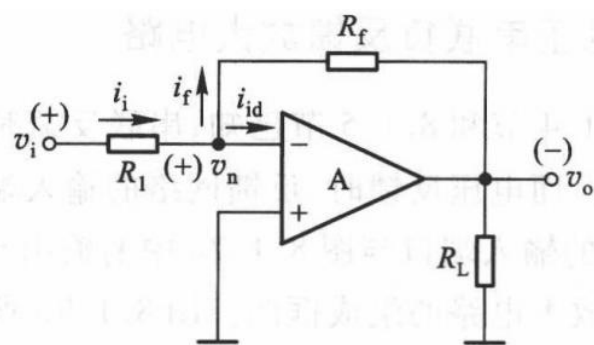
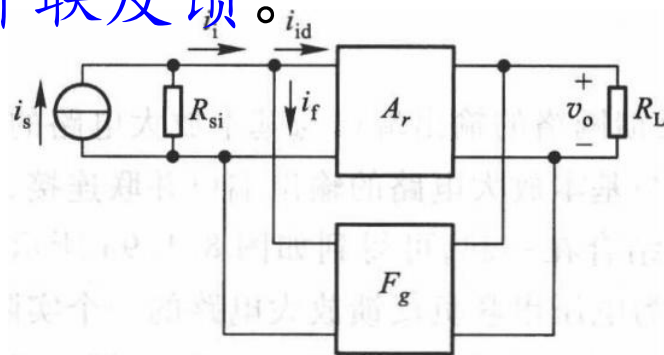
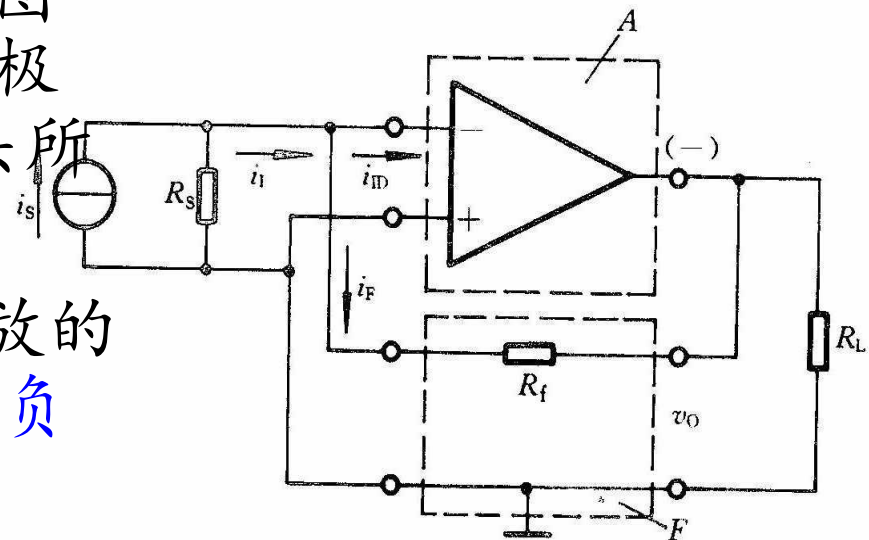




电压 并联 负反馈



- 假设在输入端所加的信号电流 i_s 的瞬时流向如图中箭头所示，则由于运放的反相作用，得 v_o 的极性为 $(-)$ ，此时 i_{ID} 、 i_I 、 i_F 的流向如图中的箭头所示。
- 在相同 i_s 值的作用下，因 i_F 的分流而使流入运放的电流 i_{ID} 减小， v_o 亦减小，互阻增益下降，故为 **负反馈**。
- 输出端的取样对象为 v_o ，故是 **电压反馈**。
- 又因在输入端 i_I 和 i_F 以并联的方式进行比较，并以差值电流 i_{ID} 供给运放，所以是 **并联反馈**。





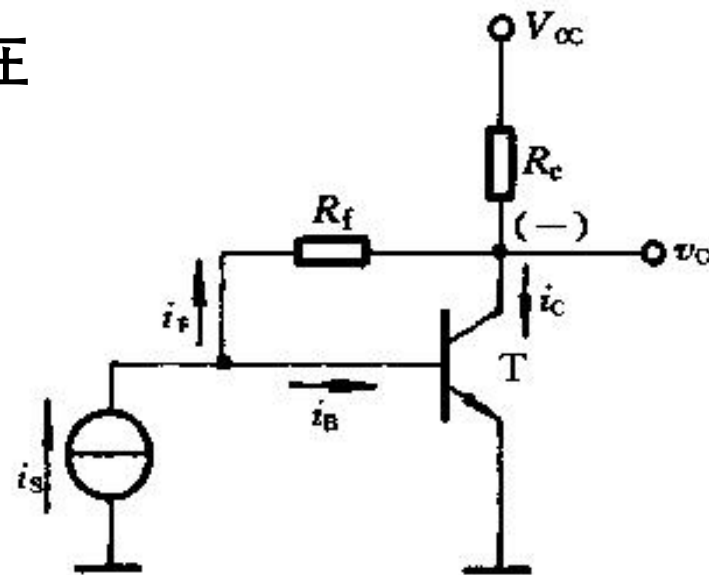
例



- 由NPN型硅BJT组成一反相电压放大电路(通常称为集电极-基极偏置电路)，集电极与基极之间用电阻 R_f 联接，一方面可以给电路提供合适的Q点，同时亦有反馈作用。
- 试分析它能稳定Q点的原理，并判断它的交流反馈组态。

解：(1) 信号为电流源 i_s ，假设内阻 R_s 很高，故略去。在静态情况下， $i_s=0$ (开路)。此时电路中的节点电位和支路电流均为静态值：

$$I_B = \frac{V_{CE} - V_{BE}}{R_f} \approx \frac{V_{CE}}{R_f}$$

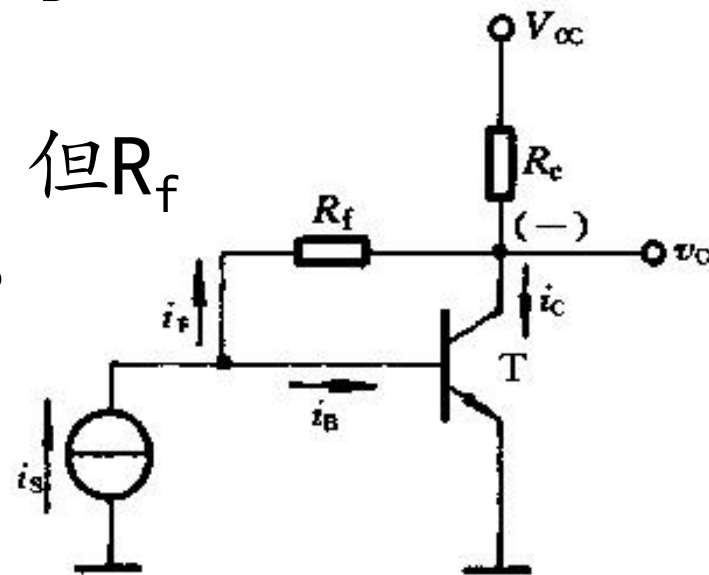




解答



- 当 R_f (反馈电阻) 选定后, I_B 与 V_{CE} 成正比。
- 该电路能稳定Q点的原理可分析如下:
 - 当温度升高时, I_C 增加, V_{CE} 减小, I_B 相应地减小, 从而牵制了 I_C 的增加。
- 该电路能够稳定Q点的实质在于, 利用 V_{CE} 的变化, 通过反馈电阻 R_f 回送到输入回路控制 I_B 来克服 I_C 的变化。
- R_C 的值越大, R_f 越小, 稳定性能则愈好。但 R_f 数值的选择还须考虑电路有一合适的Q点。

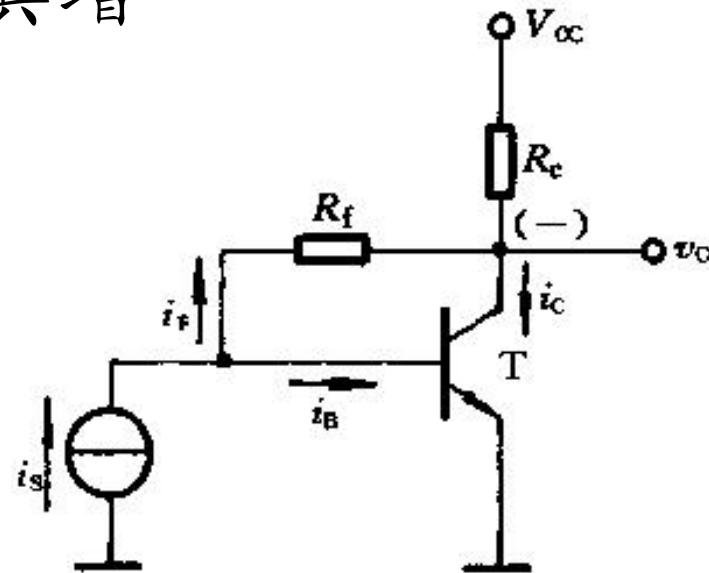




解答



- (2) 关于该电路的反馈组态
- 本电路亦属电压并联负反馈电路。
- 电压并联负反馈电路常用于输入为高内阻的电流源信号，而要求输出为低内阻的电压信号の場合，常称之为电流-电压变换器，其增益的量纲为V/A，故称为互阻放大电路。

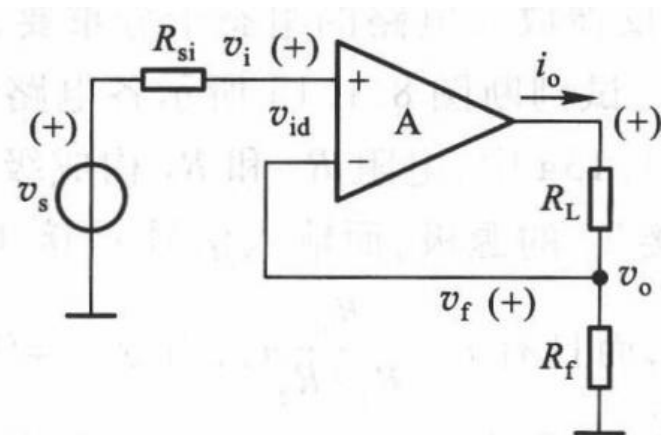
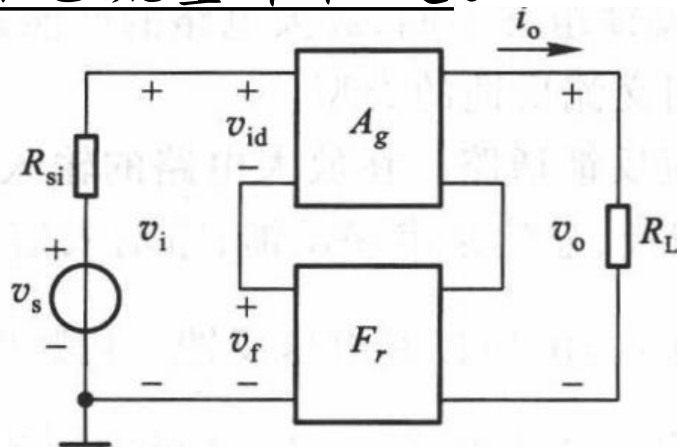
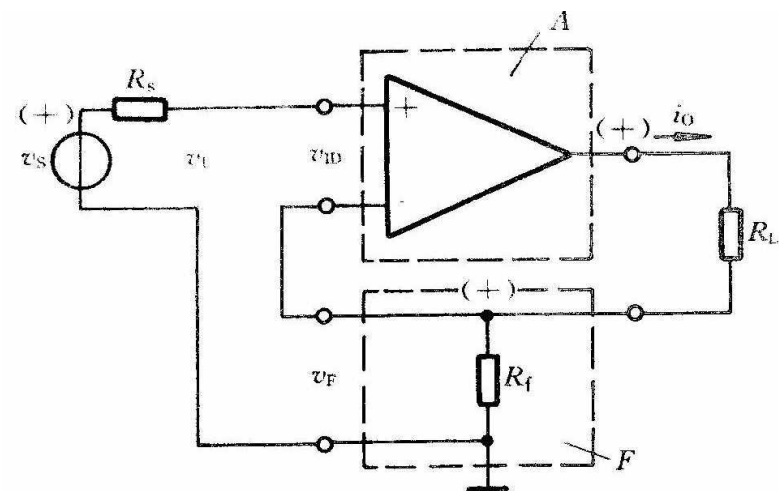




电流 串联 负反馈



- 当在输入端施加一信号电压 v_s ，瞬时极性如图中的(+)号所示，输出电流 i_o 的瞬时流向如图中所示。当 i_o 流过 R_L 和 R_f 时，在 R_f 两端产生反馈电压 V_F 。
- 在输入回路中， v_F 抵消了 v_s (或 v_i)的一部分，所以基本放大电路的净输入电压 v_{id} 减小， i_o 亦减小，其互导增益下降，故所引入的是**负反馈**。
- 由于在电路中采取输出**电流取样**、输入**串联比较**，故电路为电流串联负反馈电路。电流负反馈电路的特点是能维持输出电流基本恒定。





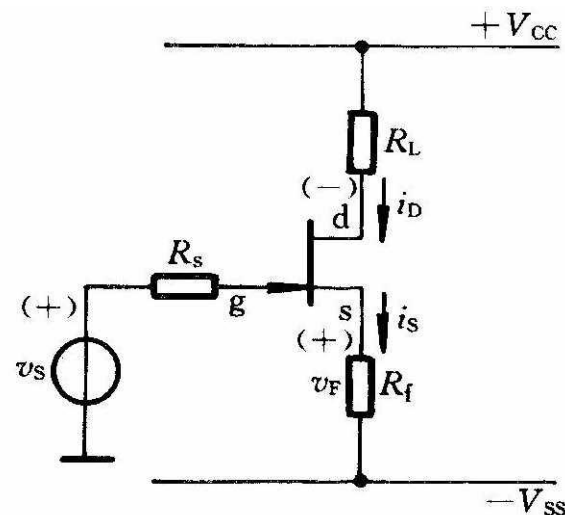
例



- 由JFET组成的互导放大电路，试分析该电路中存在的反馈，并判断其反馈组态。

解：(1)该电路实际上是源极偏置电路。在 $v_s=0$ 时,由于源极电阻 R_f 的直流电流反馈作用，能建立并稳定电路的 Q 点。

- (2)当输入端接入信号电压 v_s ，其瞬时变化极性为(+)时，引起的漏极电位为(-)，源极电位为(+)。在输入回路中，作用于 g 、 s 两极间的信号电压 $v_{GS}=v_G-v_F$ ，即净输入信号电压被削弱，互导增益下降，属负反馈。互导放大电路的反馈组态是**电流串联负反馈**。



串联： 输入以电压形式求和 (KVL) $-v_i + v_{id} + v_f = 0$ 即 $v_{id} = v_i - v_f$

并联： 输入以电流形式求和 (KCL) $i_i - i_{id} - i_f = 0$ 即 $i_{id} = i_i - i_f$

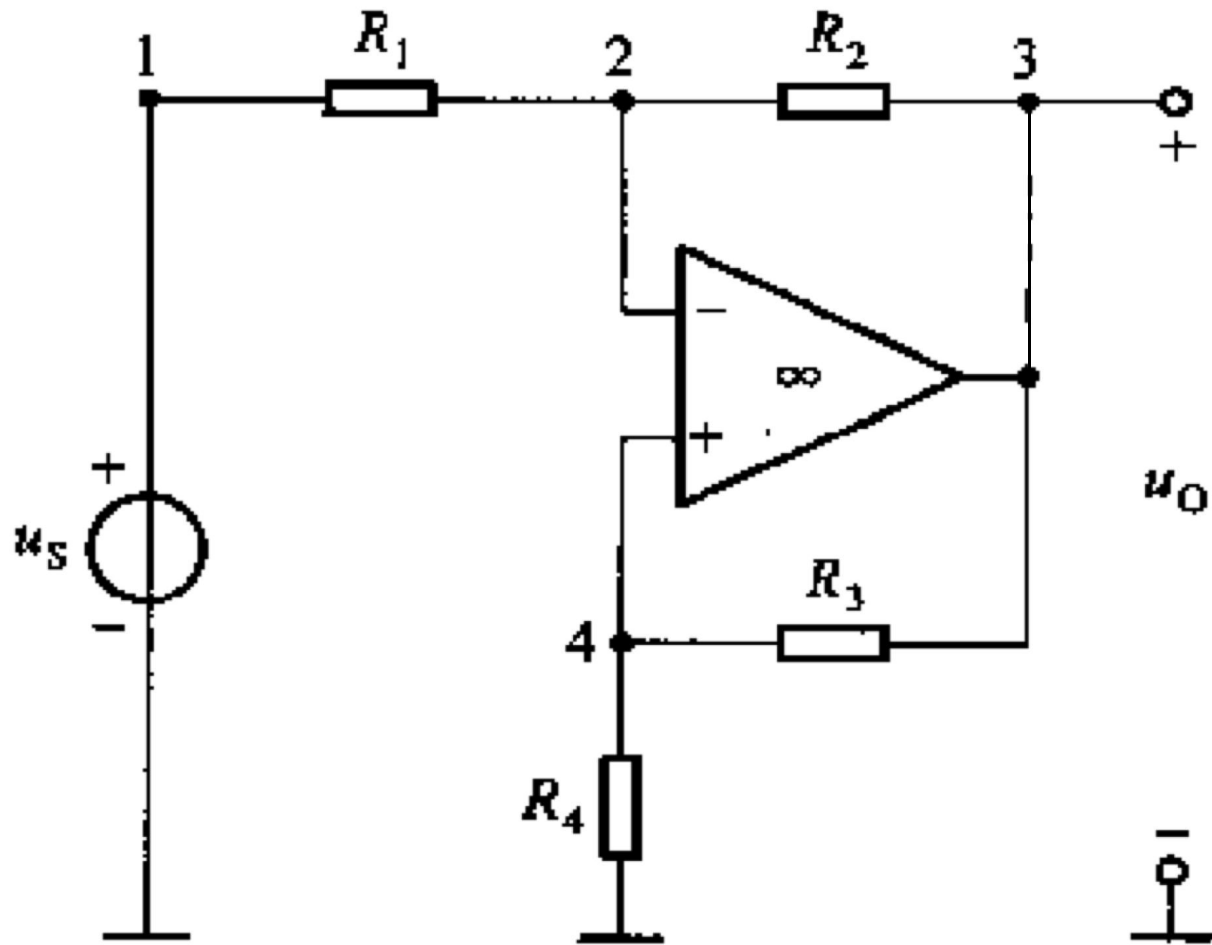
快捷方式：看反馈信号接入哪个输入端，同端为并联

电压、电流反馈：

输出短路法，令 $V_o=0$ 或 $R_L=0$ ，
若反馈信号不存在了，则为电压反馈



反馈状态判断





§ 8-2 负反馈放大电路增益的一般表达式

- 负反馈放大电路的方框图由基本放大电路和反馈网络组成。
- 闭合环路叫做反馈环，由一个反馈环组成的放大电路叫做单环反馈放大电路。
- 基本放大电路的信号传输方向为自左至右，而反馈网络则相反，实际情况略有出入。

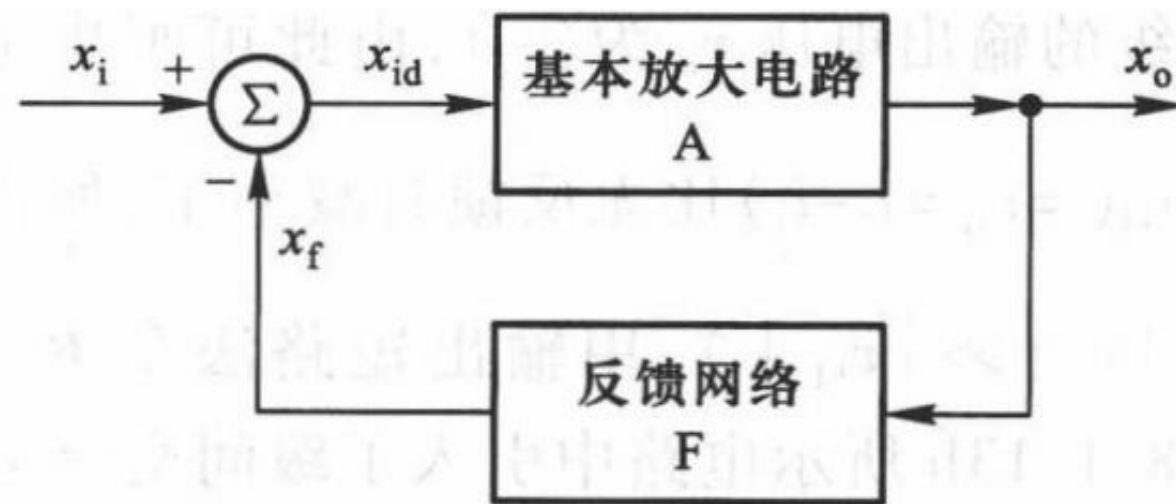


图 8.2.1 负反馈放大电路的组成框图

负反馈放大电路增益的一般表达式

- 由一般方框图可知，各信号量之间有如下的关系：

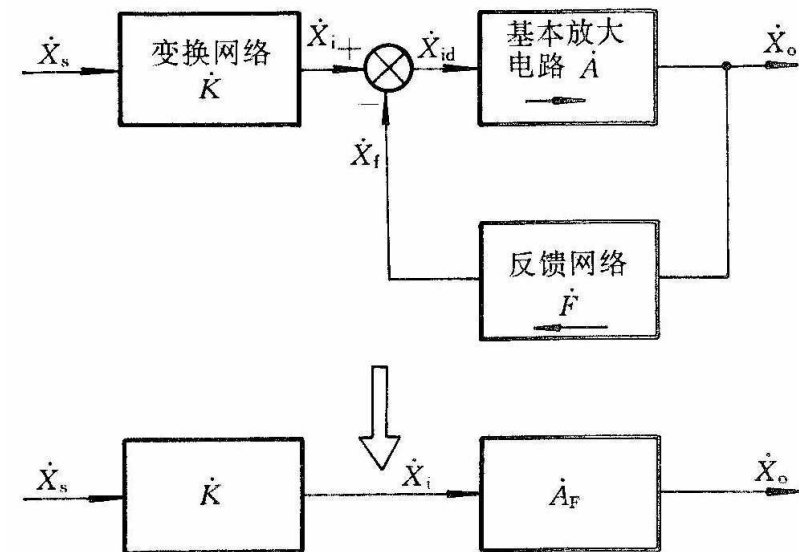
$$\begin{aligned}\dot{X}_o &= \dot{A} \dot{X}_{id} & \dot{X}_f &= \dot{F} \dot{X}_o \\ \dot{X}_{id} &= \dot{X}_i - \dot{X}_f & \dot{X}_i &= \dot{K} \dot{X}_s\end{aligned}$$

- 其中， $\dot{A}$ 为基本放大电路的增益， $\dot{F}$ 为反馈网络的反馈系数， $\dot{K}$ 为变换网络的变换系数，它们可能是正负实数，但一般来说，它们都是信号频率的复函数。

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

$$\dot{A}_{FS} = \frac{\dot{X}_o}{\dot{X}_s} = \dot{K} \dot{A}_F$$

负反馈放大电路的基本方程式





说明



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

- ❖ 若 $\left| 1 + \dot{A} \dot{F} \right| > 1 \Rightarrow \left| \dot{A}_F \right| < \left| \dot{A} \right|$ 即引入反馈后，增益减小了，这种反馈一般称为**负反馈**。
- ❖ 若 $\left| 1 + \dot{A} \dot{F} \right| < 1 \Rightarrow \left| \dot{A}_F \right| > \left| \dot{A} \right|$ 即引入反馈后，增益增大了，这种反馈一般称为**正反馈**。
- ❖ 若 $\left| 1 + \dot{A} \dot{F} \right| = 0 \Rightarrow \left| \dot{A}_F \right| = \infty$ 放大电路在没有输入信号时，也有输出信号，叫做放大电路的**自激**。

反馈深度

- 负反馈放大电路 $|1 + \dot{A} \dot{F}|$ 愈大，放大电路的增益减小愈多
- 因此， $|1 + \dot{A} \dot{F}|$ 的值是衡量负反馈程度的一个重要指标，称为**反馈深度**。
- 负反馈对放大电路性能的改善与反馈深度有关。

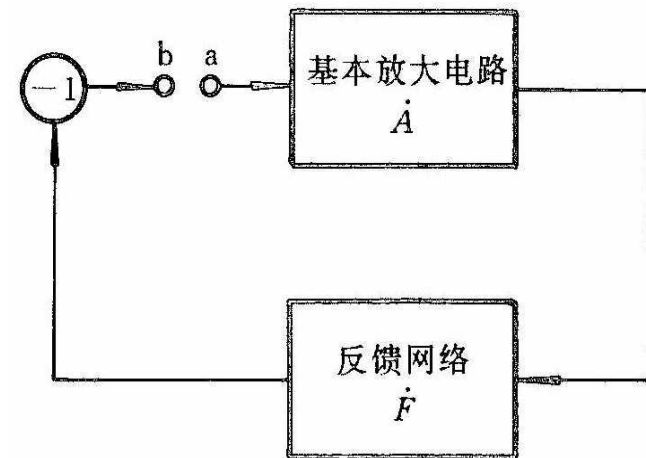


环路增益

- 将输入信号短接，即 $\dot{X}_i = 0$
- 将反馈环在某一点处断开，例如在比较环节与基本放大电路输入端之间断开，则可得到开环方框图，其中符号-1表示反相的意思，因为当 $\dot{X}_i = 0$ 时，

$$\dot{X}_{id} = \dot{X}_i - \dot{X}_f = -\dot{X}_f$$

- 信号从基本放大电路输入端(a点)输入，按箭头方向绕行一周到b点，则得



$$\begin{aligned}\dot{V}_a &= \dot{V}_o / \dot{A} \\ \dot{V}_b &= -\dot{F} \dot{V}_o\end{aligned}$$

$$\text{环路增益} = \frac{\dot{V}_b}{\dot{V}_a} = -\dot{A} \dot{F}$$



表 8.2.1 负反馈放大电路中各种信号量的含义

信号量或 信号传递比	反馈类型			
	电压串联	电流并联	电压并联	电流串联
x_o	电压	电流	电压	电流
$x_i \setminus x_f \setminus x_{id}$	电压	电流	电流	电压
$A = x_o / x_{id}$	$A_v = v_o / v_{id}$	$A_i = i_o / i_{id}$	$A_r = v_o / i_{id}$	$A_g = i_o / v_{id}$
$F = x_f / x_o$	$F_v = v_f / v_o$	$F_i = i_f / i_o$	$F_g = i_f / v_o$	$F_r = v_f / i_o$
$A_f = x_o / x_i = \frac{A}{1 + AF}$	$A_{vf} = v_o / v_i = \frac{A_v}{1 + A_v F_v}$	$A_{if} = i_o / i_i = \frac{A_i}{1 + A_i F_i}$	$A_{rf} = v_o / i_i = \frac{A_r}{1 + A_r F_g}$	$A_{gf} = i_o / v_i = \frac{A_g}{1 + A_g F_r}$
功能	v_i 控制 v_o , 电压放大	i_i 控制 i_o , 电流放大	i_i 控制 v_o , 电流转换为电压	v_i 控制 i_o , 电压转换为电流



§ 8-3 负反馈对放大电路性能的改善

- 负反馈虽然使放大电路的增益下降，但能从多方面改善放大电路的性能。
 - 提高增益的恒定性
 - 减少非线性失真
 - 抑制反馈环内噪声
 - 对输入电阻和输出电阻的影响
 - 扩展频带



提高增益的恒定性

- 当反馈很深，即 $|1 + \dot{A} \dot{F}| \gg 1$ 时

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

- 即，引入深度负反馈后，放大电路增益只决定于反馈网络，而与基本放大电路几乎无关。反馈网络一般是由一些性能比较稳定的无源线性元件（如R、C等）所组成，因此引入负反馈后增益恒定。

- 若不考虑相位 $A_F = \frac{A}{1 + AF} \Rightarrow dA_F = \frac{dA}{(1 + AF)^2}$

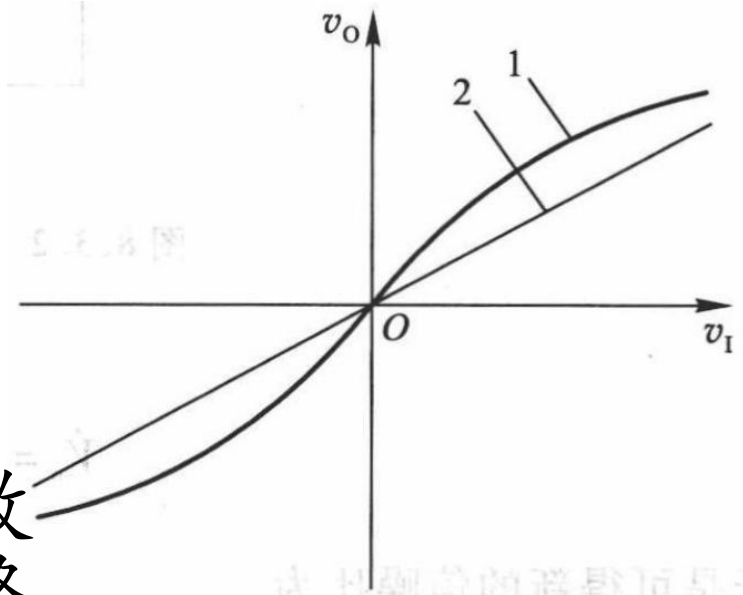
$$\frac{dA_F}{A_F} = \frac{1}{(1 + AF)} \cdot \frac{dA}{A}$$

- 闭环增益变化是开环增益变化的 $1/(1+AF)$ 倍



减少非线性失真

- 在动态过程中，放大器件可能工作到它的传输特性的非线性部分，因而使输出波形产生非线性失真。引入负反馈后，可使这种非线性失真减少。
- 在深度负反馈的条件 $|1 + \dot{A} \dot{F}| \gg 1$ 下，反馈放大电路的增益近似为 $1/\dot{F}$ ，与基本放大电路（开环）的增益几乎无关，电压放大电路的闭环传输特性曲线可近似为一条直线。
- 负反馈减少非线性失真所指的是反馈环内的失真。





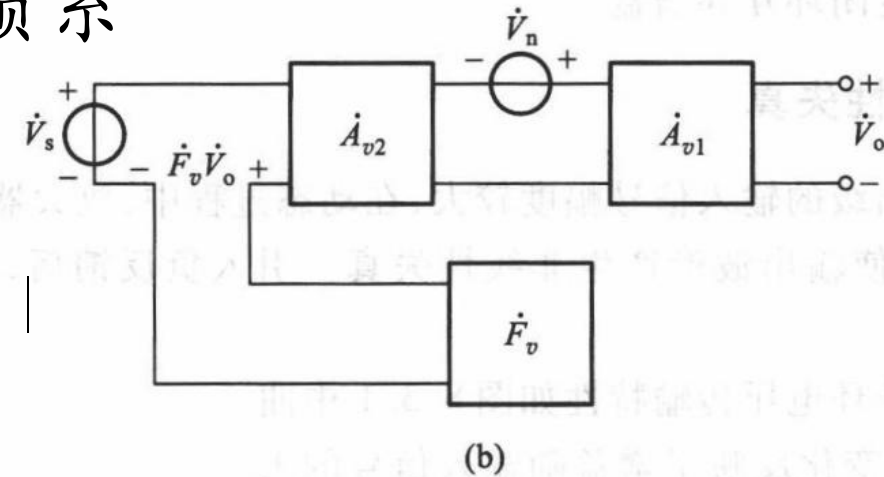
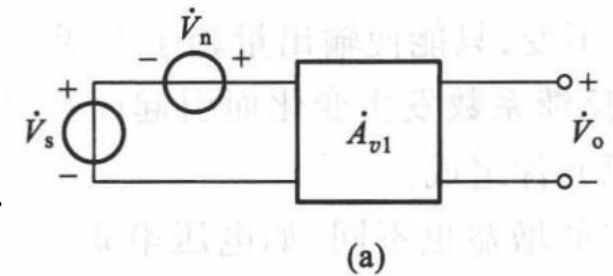
抑制反馈环内噪声

- 设增益为 $\dot{A}_{v1}$ 的放大电路的输入端存在输入信号 $\dot{V}_s$ 和噪声或干扰电压 $\dot{V}_n$ 。电路的信(号)噪(声)比为

$$\frac{S}{N} = \frac{|\dot{V}_s|}{|\dot{V}_n|}$$

- 为了提高电路的信噪比，增加一无噪声的增益为 $\dot{A}_{v2}$ 的前置级，整体电路加一反馈系数为 $\dot{F}_v$ 的反馈网络，则

$$\dot{V}_{os} = \dot{V}_s \frac{\dot{A}_{v1} \dot{A}_{v2}}{1 + \dot{A}_{v1} \dot{A}_{v2} \dot{F}_v}; \dot{V}_{on} = \dot{V}_n \frac{\dot{A}_{v1}}{1 + \dot{A}_{v1} \dot{A}_{v2} \dot{F}_v} \Rightarrow \frac{S}{N} = \frac{|\dot{V}_s|}{|\dot{V}_n|} \cdot |\dot{A}_{v2}|$$





对输入电阻的影响

- 在反馈电路中，不论取样对象 ($\dot{v}_o$ 或 $\dot{i}_o$) 如何，其输入电阻取决于反馈网络与基本放大电路输入端的连接方式。
- 串联负反馈的情况下，由于 $\dot{v}_f$ 与 $\dot{v}_i$ 在输入回路中彼此串联，且极性相反，其结果导致输入电流 i_i 的减小，从而引起输入电阻 R_{i_f} 比无反馈时的输入电阻 R_i 增加。反馈愈深， R_{i_f} 增加愈甚。 $R_{i_f} = (1 + AF) R_i$
- 并联负反馈的情况下，由于输入电流 i_i 的增加，致使 R_{i_f} 减小。反馈愈深， R_{i_f} 减小愈多。 $R_{i_f} = R_i / (1 + AF)$



对输出电阻的影响

- 电压串联负反馈能维持闭环电压增益 $|\dot{A}_{VF}|$ 基本恒定,
- 电压并联负反馈能维持闭环互阻增益 $|\dot{A}_{RF}|$ 基本恒定。
- 当输入电压 $|\dot{u}_i|$ 或电流 $|\dot{i}_i|$ 一定时, 它们的输出电压都趋向于维持恒定。
- 输出电阻 R_{of} 比无反馈时的输出电阻 R_o 小。反馈愈深, 输出电阻减小愈多
 - 电流串联负反馈能维持闭环互导增益 $|\dot{A}_{GF}|$ 基本恒定;
 - 电流并联负反馈能维持闭环电流增益 $|\dot{A}_{IF}|$ 基本恒定。
 - 当输入电压 $|\dot{u}_i|$ 或输入电流 $|\dot{i}_i|$ 一定时, 它们的输出电流趋向于维持恒定。
- 输出电阻 R_{of} 比无反馈时的输出电阻 R_o 大。反馈愈深, 输出电阻将增加愈多。



扩展频带



- 频率响应是放大电路的重要特性之一，频带宽度是放大电路的重要技术指标，引入负反馈是展宽频带的有效措施之一。
- 设放大电路的高频响应应用下面的单极点函数来表示

$$A(j\omega) = \frac{A_M}{1 + j\omega/\omega_H}$$

- 式中 A_M 为放大电路的中频增益， ω_H 为上限角频率。
- 当引入负反馈，并假设反馈网络的反馈系数与频率无关的实数 F 时，则有

- $$A_F(j\omega) = \frac{A(j\omega)}{1 + FA(j\omega)} = \frac{A_M/(1 + A_M F)}{1 + j\omega/[\omega_H(1 + A_M F)]}$$

扩展频带

- 反馈放大电路的中频增益为 $A_M/(1+A_MF)$
- 上限角频率变为 $\omega_{HF} = \omega_H(1+A_MF)$ ，这说明引入负反馈之后，放大电路的上限频率增加了，增加的程度与反馈深度有关。
- 同理，若放大电路的开环增益具有下限角频率 ω_L ，则引入负反馈之后，其下限角频率变为

$$\omega_{LF} = \frac{\omega_L}{(1+A_MF)}$$

- 增益带宽积？

负反馈对放大电路性能的影响

表 8.3.1 负反馈对放大电路性能的影响

反馈类型	放大类型	稳定的增益	输入电阻 R_{if}	输出电阻 R_{of}	通频带
电压串联	电压	A_{vf}	$(1+A_v F_v) R_i$ 增大	$R_o / (1+A_{vo} F_v)$ 减小	增宽
电压并联	互阻	A_{rf}	$R_i / (1+A_r F_g)$ 减小	$R_o / (1+A_{ro} F_g)$ 减小	增宽
电流串联	互导	A_{gf}	$(1+A_g F_r) R_i$ 增大	$(1+A_{gs} F_r) R_o$ 增大	增宽
电流并联	电流	A_{if}	$R_i / (1+A_i F_i)$ 减小	$(1+A_{is} F_i) R_o$ 增大	增宽

注:这里所列的 R_{if} 和 R_{of} 是指反馈环内的输入和输出电阻表达式。



§ 8-4 负反馈放大电路的分析方法

- 反馈放大电路是一个带反馈回路的有源线性网络。利用电路理论中的节点电位法、回路电流法或双口网络理论均可求解。但是，当电路较复杂时，这类方法使用起来很不方便。
- 从工程实际出发，先讨论在深度负反馈的条件下，近似计算反馈电路的增益，然后用小信号模型分析法分析。
- 在深度负反馈的条件下，放大电路的增益表达式可近似为

$$\dot{A}_F = \frac{\dot{X}_o}{\dot{X}_i} = \frac{\dot{A}}{1 + \dot{A} \dot{F}} \approx \frac{1}{\dot{F}} \quad \left| 1 + \dot{A} \dot{F} \right| \gg 1$$



例



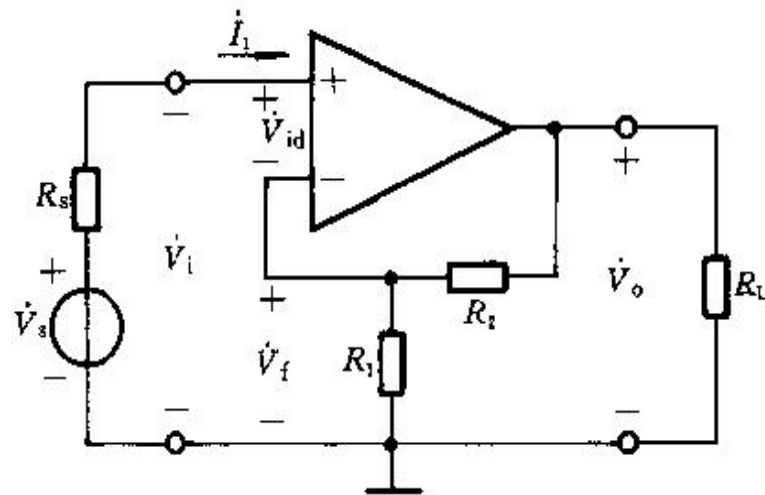
- 试近似计算它的电压增益并对它的输入电阻和输出电阻作定性分析。

解：电路为电压串联负反馈电路，其反馈系数为

$$\dot{F}_V = \frac{\dot{V}_f}{\dot{V}_o} = \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

当 $\left| 1 + \dot{A}_V \dot{F}_V \right| \gg 1$ 时，有

$$\dot{A}_{VF} \approx \frac{1}{\dot{F}_V} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$



在深度负反馈的条件下， $\dot{V}_f$ 与 $\dot{V}_i$ 接近相等，致使 $|I_i|$ 减小。故 R_{if} 比运放的输入电阻 r_i 提高很多倍，根据电压反馈的特点，其输出电阻 R_{of} 远比运放的输出电阻 r_o 为低。



第八章 反馈放大电路

梁福田 ftliang@ustc.edu.cn

2025.5.30

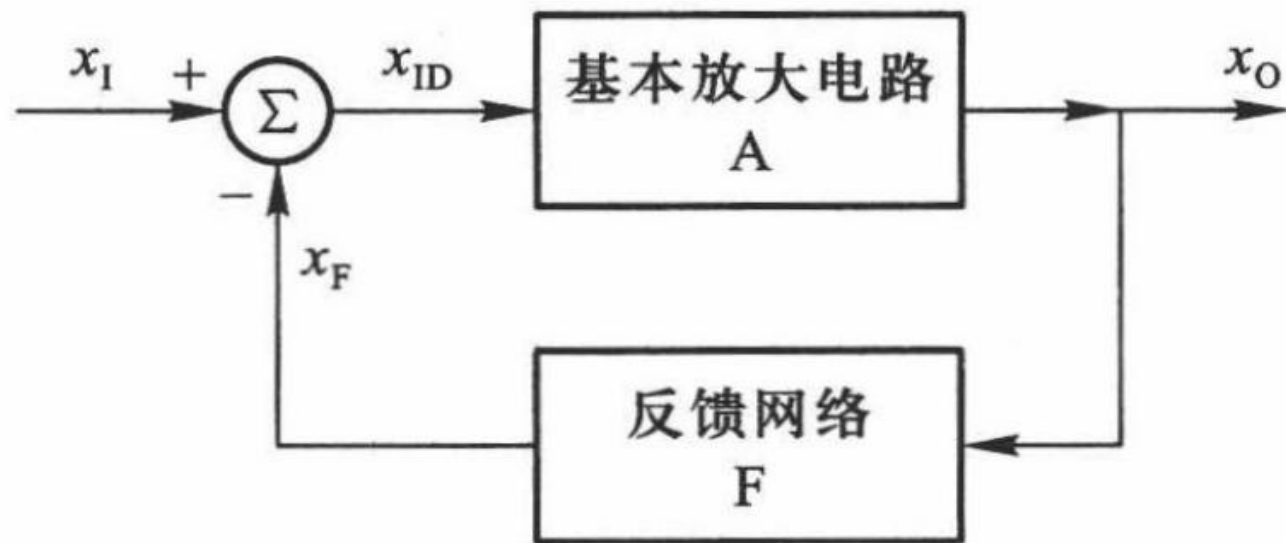
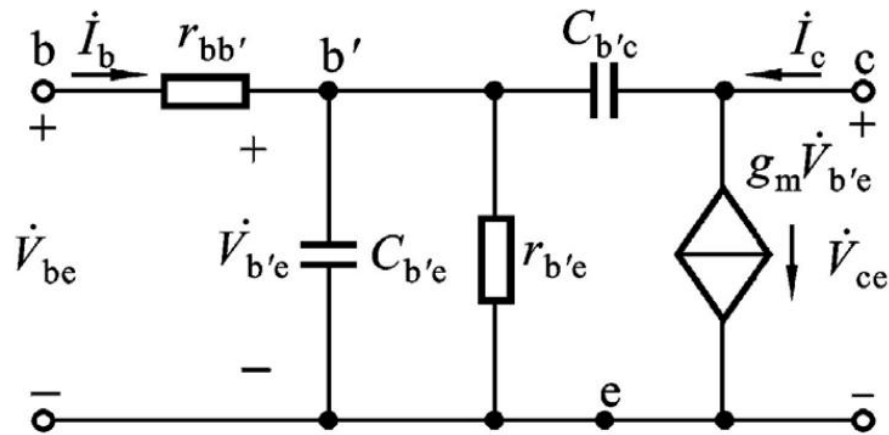




前情提要



- MOSFET、BJT (α , β , $i_e = i_c + i_b$)
 - 3个电极, 3种组态 (放大电路)
 - 小信号模型, 交流通路, 直流通路
- 静态工作点, Q点 (V_{CE} , I_C , I_B)
- 集成电路、噪声与干扰
- 反馈放大电路
 - 直流/交流, 正/负, 内/外
 - 瞬间极性法
 - 电压/电流, 串联/并联
 - 放大电路4种类型
 - 反馈4种组态
 - 负反馈对放大电路的影响
 - 反馈深度、环路增益



串联: 输入以电压形式求和 (KVL) $-v_i + v_{id} + v_f = 0$ 即 $v_{id} = v_i - v_f$

并联: 输入以电流形式求和 (KCL) $i_i - i_{id} - i_f = 0$ 即 $i_{id} = i_i - i_f$

快捷方式: 看反馈信号接入哪个输入端, 同端为并联

电压、电流反馈:

输出短路法, 令 $V_o = 0$ 或 $R_L = 0$,
若反馈信号不存在了, 则为电压反馈



虚短概念的运用

- 在深度负反馈的条件下，有

$$\dot{A}_F = \frac{\dot{X}_o}{\dot{X}_i} = \frac{\dot{A}}{1 + \dot{A}\dot{F}} \approx \frac{1}{\dot{F}} \quad \left(\left| 1 + \dot{A}\dot{F} \right| \gg 1 \right)$$
$$\dot{F}\dot{X}_o \approx \dot{X}_i \Rightarrow \dot{X}_f \approx \dot{X}_i$$

- 上式表明，在深度负反馈的条件下，反馈信号与输入信号接近相等，或者说基本放大电路净输入信号减小到几乎为零：

$$\dot{X}_{id} = \dot{X}_i - \dot{X}_f \approx 0$$

- 称做运放两输入端的**虚假短接或称虚短**，同时因运放的输入电阻很高(如 $1\text{M}\Omega$ 以上)，则有 $I_{id} \approx 0$ ，叫做运放两输入端的**虚假断路或称虚断**。



例



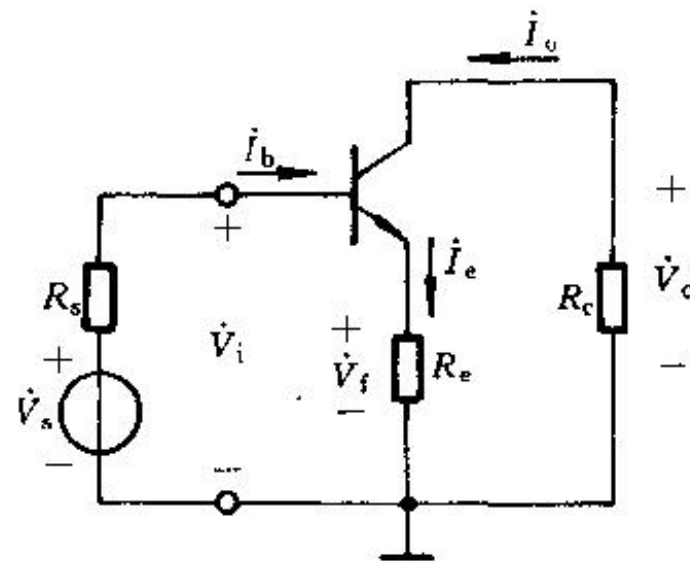
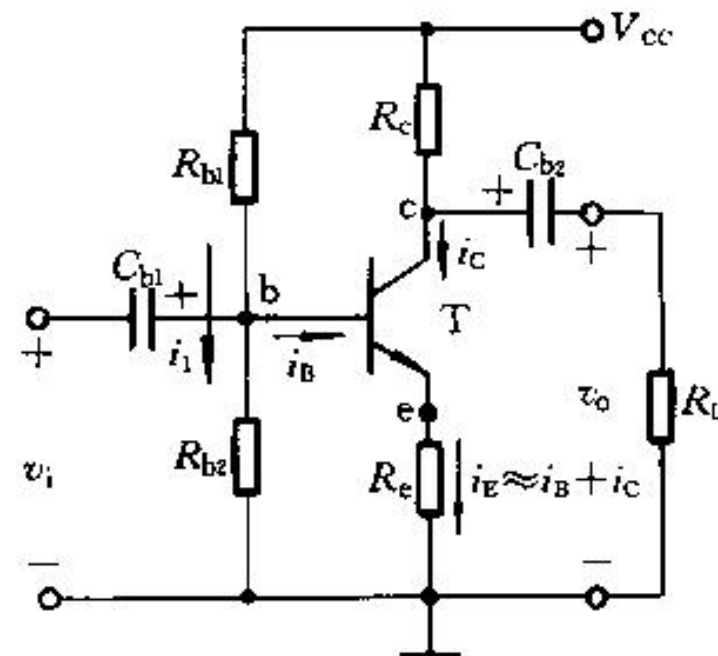
- 试近似计算它的电压增益 $\dot{A}_{VF} = \dot{V}_o / \dot{V}_i$

解：(1) 电路为射极偏置电路，利用电路中的直流反馈以稳定 Q 点。放大电路为电流串联负反馈电路。

(2) 根据交流通路，利用虚短的概念可直接计算其电压增益。按照图中各电压、电流的假定正向。

$$\dot{V}_{be} \approx 0 \quad \dot{V}_i \approx \dot{V}_f \approx \dot{I}_o R_e \quad \dot{V}_o \approx -\dot{I}_o R_c$$

$$\dot{A}_{VF} \approx \frac{\dot{V}_o}{\dot{V}_i} = \frac{-\dot{I}_o R_c}{\dot{I}_o R_e} = -\frac{R_c}{R_e}$$

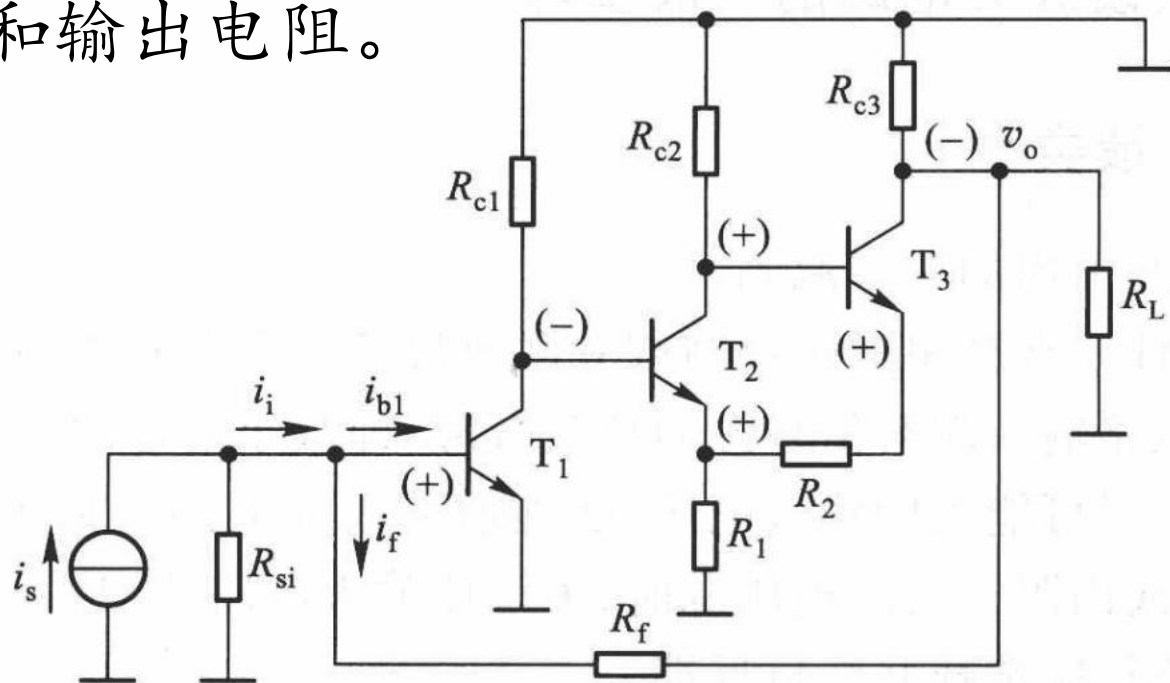




例



- T_1 、 T_2 和 T_3 组成一个三级直接耦合放大电路，从电路的电压输出端通过电阻 R_f 与输入端相联，形成大环反馈。
- (1) 试判断电路中大环反馈的组态；
- (2) 判断基本放大电路中 T_2 和 T_3 所引入的反馈极性；
- (3) 求大环反馈的闭环增益的近似表达式；
- (4) 定性分析该电路的输入电阻和输出电阻。

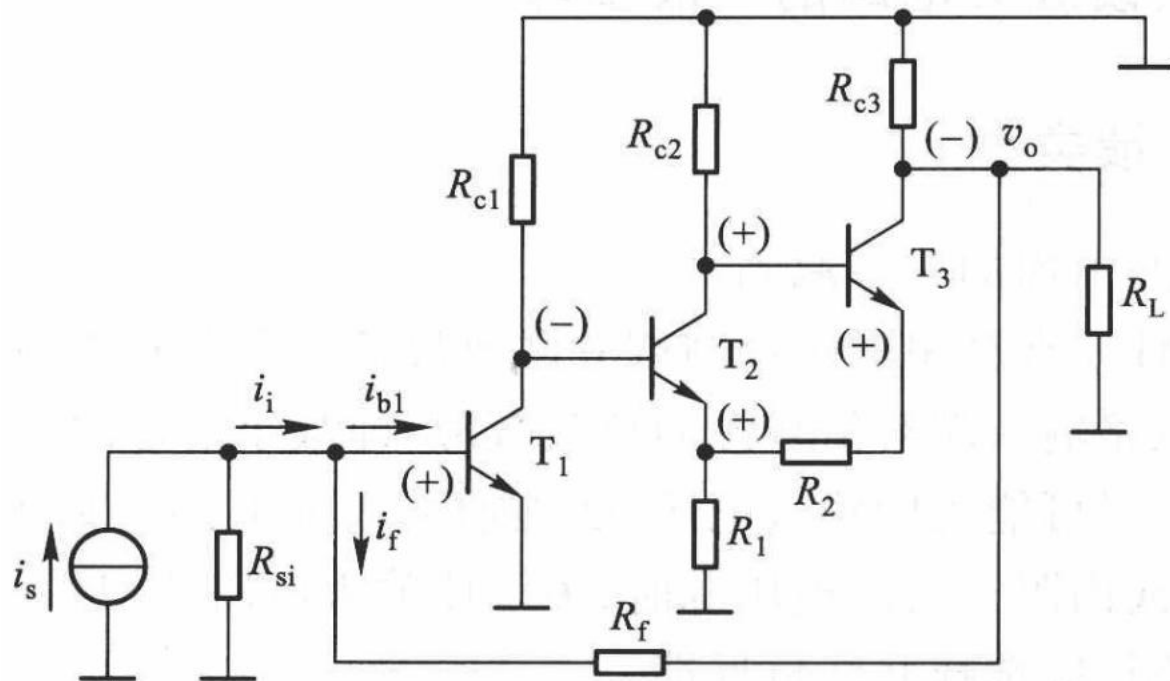




解答



- (1) 大环反馈的组态：先用瞬时极性法判断电路的极性。设在电路的输入端加入一电流源信号 i_s ，其瞬时流向如图中的箭头，而各节点的电位极性如图中的 (+)、(-) 号所示，可见输出电压 v_o 的极性为 (-)。
- 电路为电压并联负反馈电路。



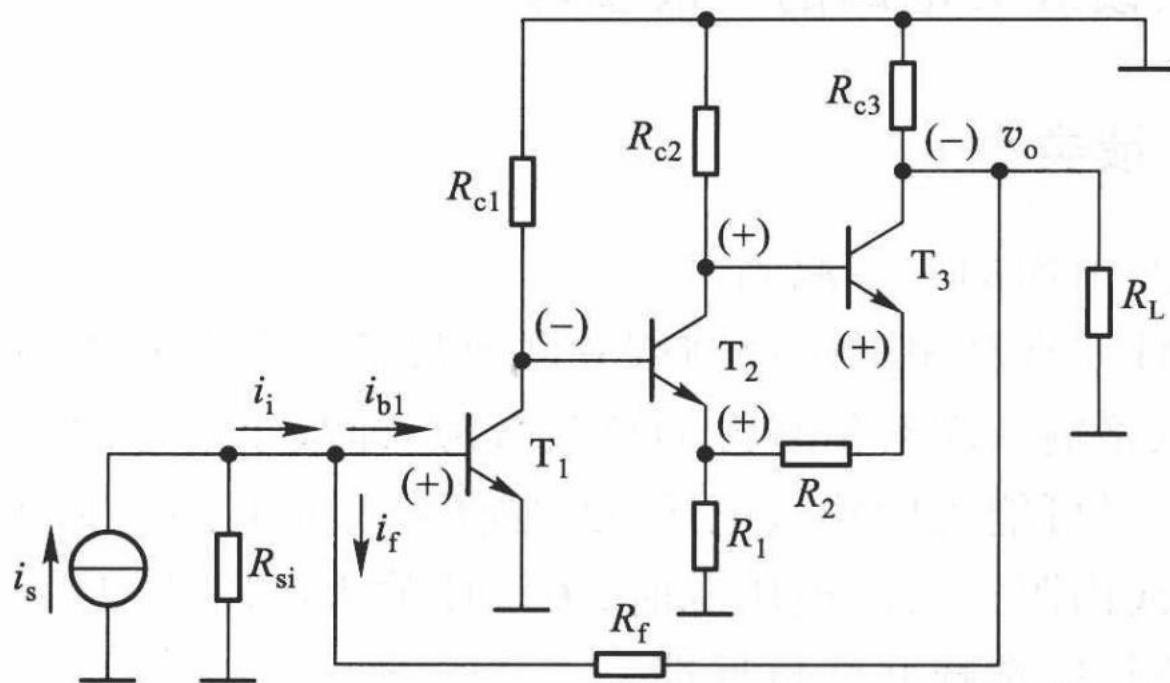


解答



- (2) 第二、三级电路局部反馈极性:

•





解答



- (3) 求大环闭环互阻增益 $\dot{A}_{RF}$: 由于电路的开环互阻增益很高, 较易实现深度负反馈;

$$\dot{I}_s \approx \dot{I}_f = -\frac{\dot{V}_o}{R_f}$$

$$\dot{A}_{RF} = \frac{\dot{V}_o}{\dot{I}_s} \approx \frac{\dot{V}_o}{\dot{I}_f} \approx -R_f$$

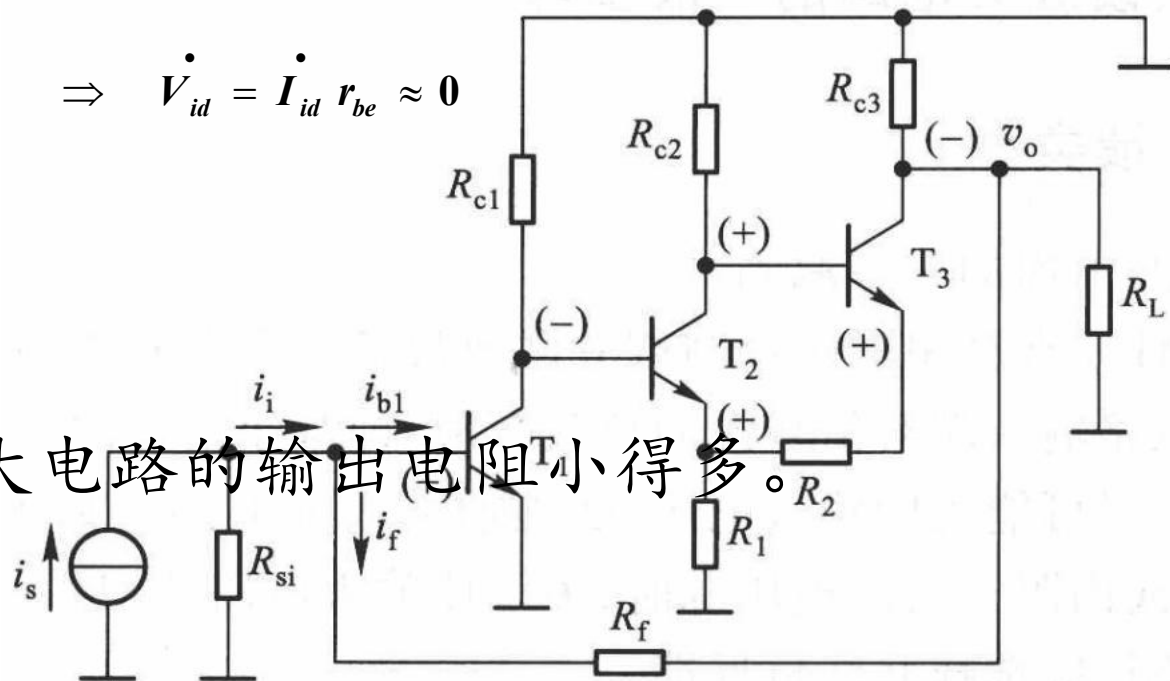
- (4) 输入电阻和输出电阻:

$$\dot{I}_{id} = \dot{I}_s - \dot{I}_f \approx 0 \quad \Rightarrow \quad \dot{V}_{id} = \dot{I}_{id} r_{be} \approx 0$$

$$R_{if} = \frac{\dot{V}_{id}}{\dot{I}_s} \approx 0$$

- 输入电阻

- 由于电压反馈的特点, R_{of} 比基本放大电路的输出电阻小得多。

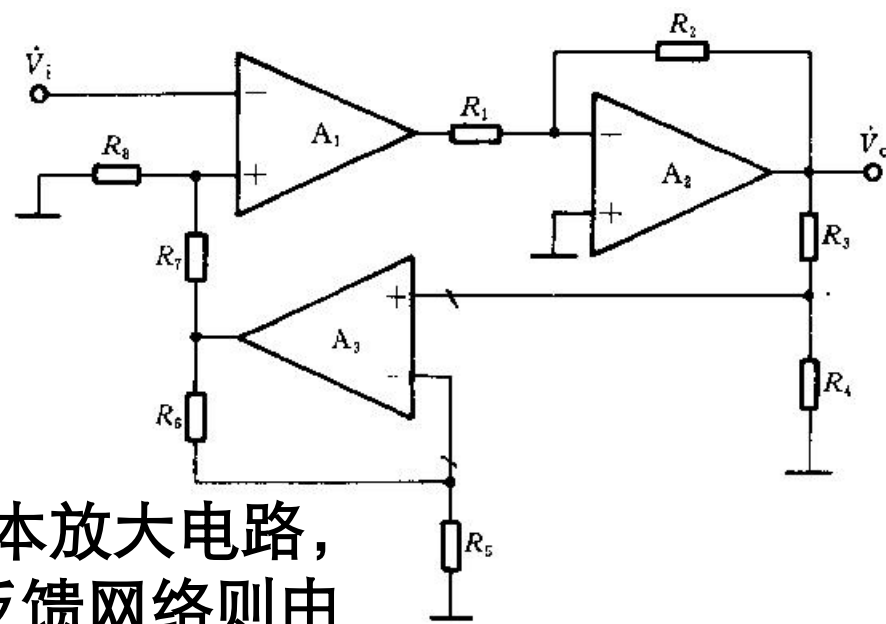




例



- 由运放 A_1 、 A_2 和 A_3 组成的反馈放大电路。试判断电路中存在何种反馈组态，导出其闭环电压增益 A_{VF} 的表达式。设运放是理想的。



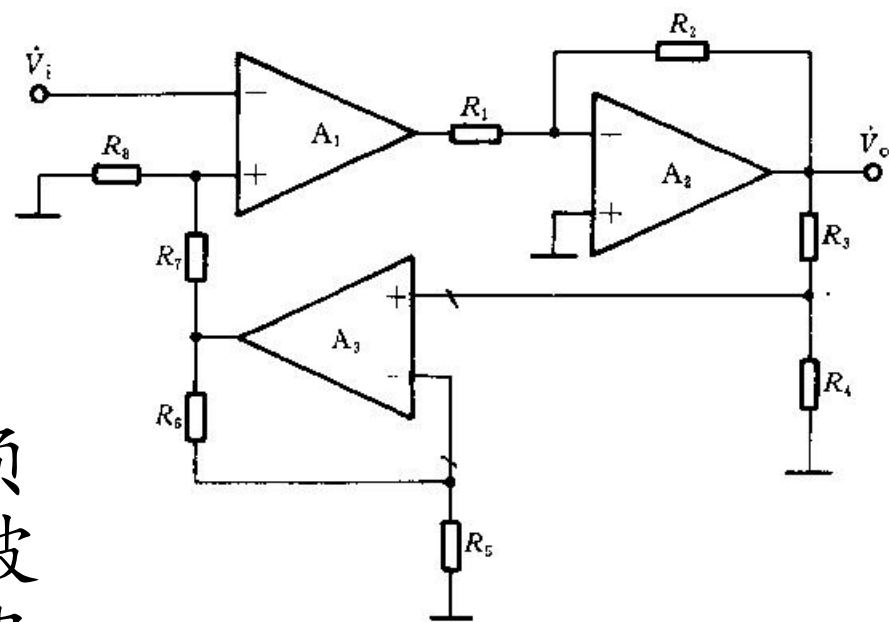
解：(1)判断电路的反馈组态：由运放 A_1 和 A_2 组成基本放大电路，输入电压为 V_i ，输出电压为 V_o ，属电压放大电路。反馈网络则由分压器(R_3 、 R_4)、运放 A_3 和 R_5 、 R_6 组成的同相放大电路以及第二分压器(R_7 、 R_8)所组成，属有源反馈网络。



解答



- 设想在放大电路的输入端，加入一正极性的信号电压 $\dot{v}_i$ ，则因经两级反相电压放大，在输出端得 $\dot{v}_o$ 与 $\dot{v}_i$ 同相。
- 输出电压 $\dot{v}_o$ 反馈网络 R_8 上的反馈电压与 $\dot{v}_f$ 和 $\dot{v}_o$ 同相。
- 因而 $\dot{v}_f$ 削弱了输入信号 $\dot{v}_i$ ，故电路是负反馈电路。而且 $\dot{v}_i$ 与 $\dot{v}_f$ 在输入回路中彼此串联，所以电路的反馈组态为电压串联负反馈。





解答

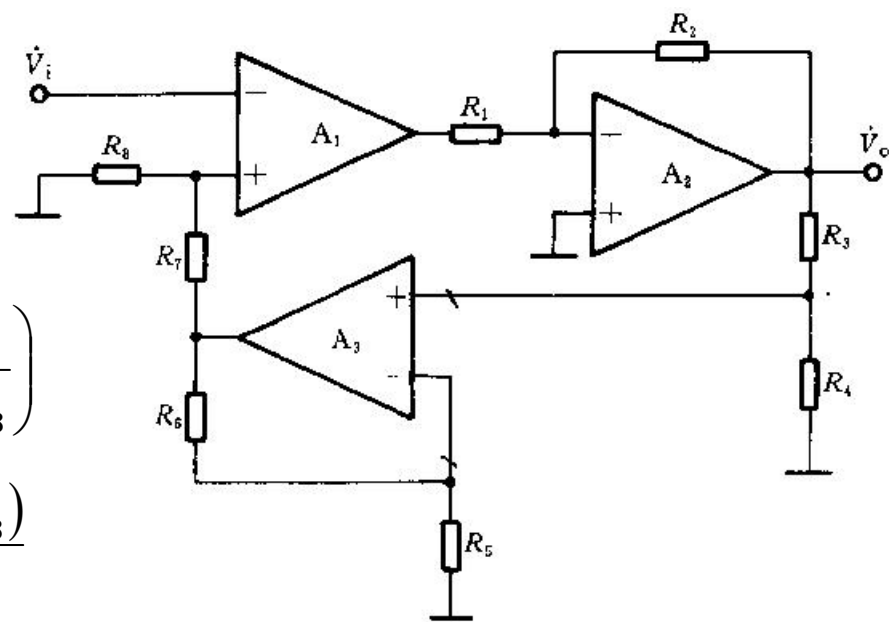


- (2) 求闭环电压增益 A_{VF} : 各运放均是理想的, 即由运放组成的电路均处于深度负反馈的情况, 大环反馈亦处在深度负反馈的状态;

$$\dot{V}_f = \dot{V}_i$$

$$\dot{V}_f = \dot{V}_o \left(\frac{R_4}{R_3 + R_4} \right) \left(\frac{R_5 + R_6}{R_5} \right) \left(\frac{R_8}{R_7 + R_8} \right)$$

$$A_{VF} = \frac{\dot{V}_o}{\dot{V}_i} = \frac{\dot{V}_o}{\dot{V}_f} = \frac{(R_3 + R_4)R_5(R_7 + R_8)}{R_4(R_5 + R_6)R_8}$$





§ 8-5 负反馈放大电路的稳定问题



- 负反馈对放大电路性能的改善取决于反馈深度 $|1 + \dot{A}\dot{F}|$ 或环路增益 $|\dot{A}\dot{F}|$ 的大小, $|\dot{A}\dot{F}|$ 值越大, 放大电路的性能越优良。
- 然而反馈过深, 有时放大电路也不能稳定地工作, 将产生振荡现象, 称为放大电路的自激。这时, 即使不加任何输入信号, 放大电路也会产生一定频率的信号输出。
- 这种现象破坏了放大电路的正常工作, 应该尽量避免并设法消除。



自激振荡现象



- 在中频范围内，负反馈放大电路有 $\varphi_a + \varphi_f = 2n \times 180^\circ$, $n=0, 1, 2, \dots$, (φ_a, φ_f 分别为 $\dot{A}$ 和 $\dot{F}$ 的相角)，使 $\dot{x}_i$ 与 $\dot{x}_f$ 同相，则 $|\dot{x}_{id}| = |\dot{x}_i| - |\dot{x}_f|$ ，所以必有 $|\dot{x}_{id}| < |\dot{x}_i|$ 。
- 这样，反馈放大电路的输出信号 $|\dot{x}_o|$ 就减小，使负反馈作用正常地体现出来。
- 在高频和低频情况下， $\dot{A}\dot{F}$ 将产生附加相移，使 $\dot{x}_i$ 和 $\dot{x}_f$ 间出现一个相位差， $\dot{x}_{id}$ 的大小则由 $\dot{x}_i$ 和 $\dot{x}_f$ 的相量差来决定。
- 若在某一频率下， $\dot{A}\dot{F}$ 附加相移达到 180° ，则 $\dot{x}_i$ 和 $\dot{x}_f$ 必然会由同相变为反相，使 $|\dot{x}_{id}| > |\dot{x}_i|$ 。



自激振荡现象

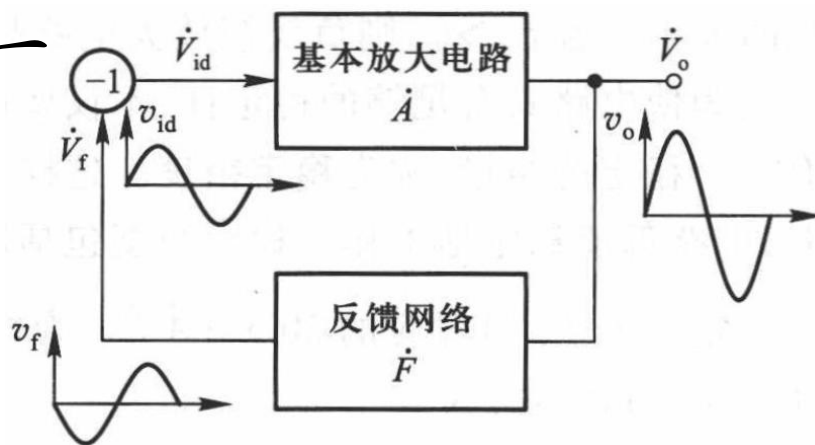


- 假设没有外加信号， $\dot{x}_o$ 经反馈网络 and 比较电路后，得

$$\dot{x}_{id} = 0 - \dot{x}_f = -\dot{F} \dot{x}_o$$

- 送到放大电路的输入端再放大后，得到一个增强了的信号

$$\dot{x}_o = \dot{A} \dot{x}_{id} = -\dot{A} \dot{F} \dot{x}_o$$



如果 $-\dot{A} \dot{F} = 1$ 放大电路将产生自激振荡。 x_0 可以是任意值。
其他情况，若等式成立，需要 x_0 恒等于 0，与外部输入相同。

虽然结构和极性是负反馈，但受到相位的影响，负反馈也可以变为正反馈甚至产生自激振荡



说明



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

- ❖ 若 $\left| 1 + \dot{A} \dot{F} \right| > 1 \Rightarrow \left| \dot{A}_F \right| < \left| \dot{A} \right|$ 即引入反馈后，增益减小了，这种反馈一般称为**负反馈**。
- ❖ 若 $\left| 1 + \dot{A} \dot{F} \right| < 1 \Rightarrow \left| \dot{A}_F \right| > \left| \dot{A} \right|$ 即引入反馈后，增益增大了，这种反馈一般称为**正反馈**。
- ❖ 若 $\left| 1 + \dot{A} \dot{F} \right| = 0 \Rightarrow \left| \dot{A}_F \right| = \infty$ 放大电路在没有输入信号时，也有输出信号，叫做放大电路的**自激**。



稳定工作条件

- 当环路增益等于1时，即 $-\dot{A}\dot{F}=1$ 负反馈放大电路产生自激振荡，上面的式子可以改写为

$$|\dot{A}\dot{F}|=1$$

$$\varphi_a + \varphi_f = \pm(2n+1) \times 180^\circ, \quad n = 0, 1, 2, \dots$$

- 分别称为自激振荡的幅值条件和相位条件。
- 两者同时成立，产生自激。（起振条件）
- 为了使负反馈放大电路稳定地工作，必须设法破坏上述两个条件。
- 这个条件也是判别负反馈放大电路稳定性的条件。



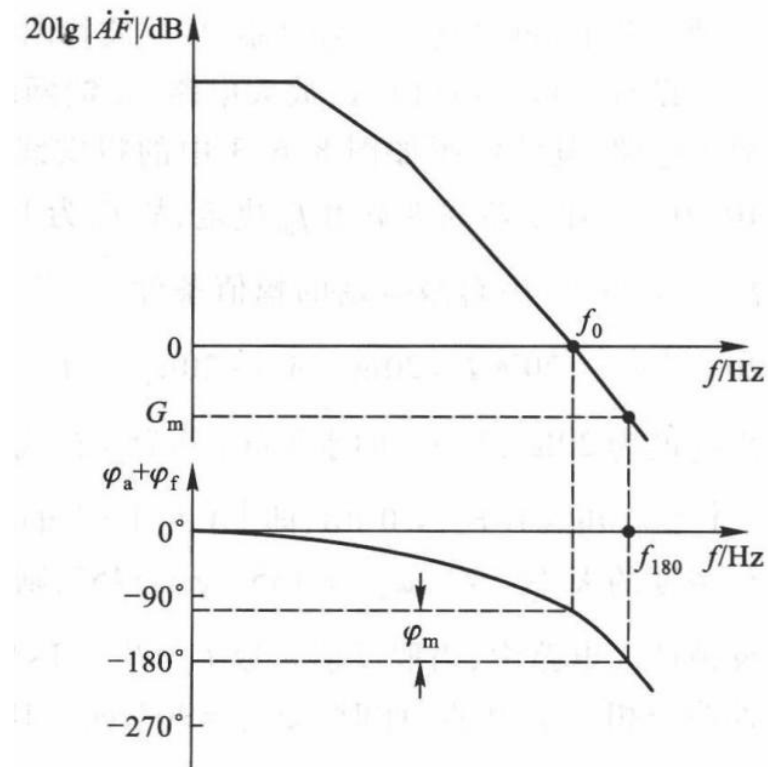
稳定工作条件

- 在工程上、为了直观地运用这个条件，通常采用 $\dot{A}F$ 的频率响应来进行分析。
- 上图为幅频响应，下图为相频响应。假设反馈网络是电阻性的， $\varphi_f = 0$ 。这时系统的相频响应仅是放大电路的相移 φ_a 。

$$\text{当 } f = f_{180^\circ} \text{ 时 } \quad \varphi_a = -180^\circ \quad 20\lg |\dot{A}F| < 0$$

$$\text{当 } f = f_0 \text{ 时 } \quad 20\lg |\dot{A}F| = 0 \quad |\varphi_a| < 180^\circ$$

f_0 是增益为0时的 f ， f_{180} 是相位为-180时的 f
后文或教材多以 ω 表示频率居多。





稳定裕度

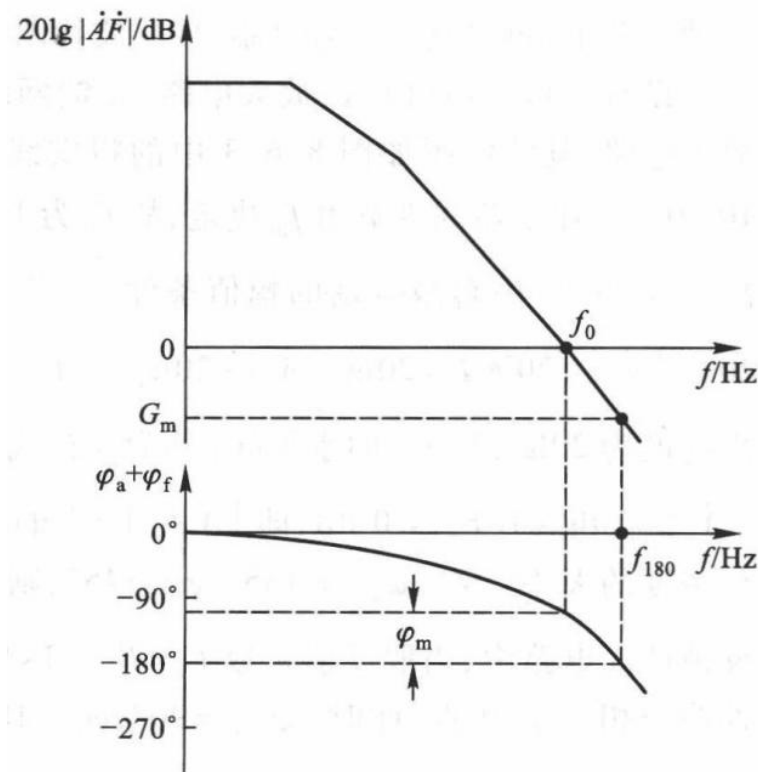
- 增益裕度 G_m (一般要求 $G_m < -10\text{dB}$)

$$G_m = 20 \lg \left| \dot{A} \dot{F} \right|_{f=f_{180}} \quad (\text{dB})$$

- 相位裕度 φ_m (一般要求 $\varphi_m > 45^\circ$)

$$\varphi_m = 180^\circ - \varphi_a(\omega_0)$$

- 若 φ_m 为正, 表明相移 φ_a 到达 -180° 之前, $20 \lg |AF|$ 已衰减为 0dB , 反馈电路是稳定的;
- 若 φ_m 为负, 表明相移 φ_a 到达 180° 之后, $20 \lg |AF|$ 才衰减为 0dB
 - 意味着在 $\omega = \omega_{180}$ 时, $|AF| > 1$, 因而反馈电路不稳定。



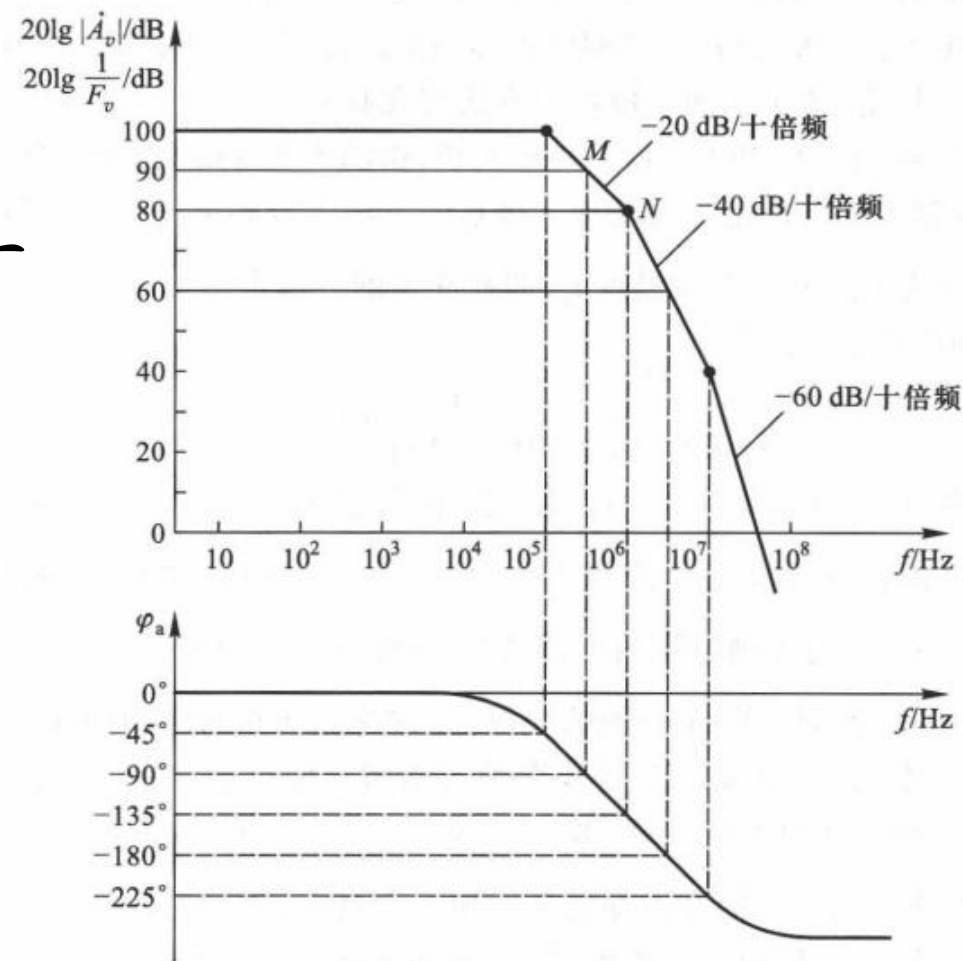
负反馈放大电路稳定性分析

- 在分析反馈放大电路的稳定性时，往往利用基本放大电路开环增益的波特图。假设反馈网络是电阻性的，此时

- $\varphi_f = 0 \quad \dot{F} = F$

- 在 $20\lg|\dot{A}|$ 的同一坐标平面上，绘出一条水平线 $20\lg 1/F$ ，两曲线之差为

$$20\lg|\dot{A}| - 20\lg\frac{1}{F} = 20\lg|\dot{A}F|$$





频率补偿技术（拓展内容）

- 可在基本放大电路A或在反馈网络F中，增加一些元件(如R、C等)以改变反馈放大电路的开环频率响应，使得在保证一定的增益裕度或相位裕度的前提下获得较大的环路增益。这种作用称为频率补偿，构成的电路称为补偿网络。
- 人为地将电路的各个极点的间距拉开，特别是使主极点及其相近的极点的间距远大，从而可以按预定的目标改变相频响应并有效地增加环路增益。



频率补偿技术



- 上述补偿概念可以在基本放大电路的内部或外部增加一补偿极点来实现。设基本放大电路的开环传递函数为：

$$A_{v1}(j\omega) = \frac{A_{vo}}{(1 + j\omega/\omega_1)(1 + j\omega/\omega_2)(1 + j\omega/\omega_3)}$$

式中 $\omega_1 < \omega_2 < \omega_3$ 。这个三极点传递函数的相位在 ω_1 与 ω_3 之间达到 -180° 。若在此放大电路的传递函数中增加一补偿极点 ω_c ，则在分母中增加一二项式因子：

$$\begin{aligned} A_{v2}(j\omega) &= A_{v1}(j\omega) \frac{1}{1 + j\omega/\omega_c} \\ &= \frac{A_{vo}}{(1 + j\omega/\omega_1)(1 + j\omega/\omega_2)(1 + j\omega/\omega_3)(1 + j\omega/\omega_c)} \end{aligned}$$



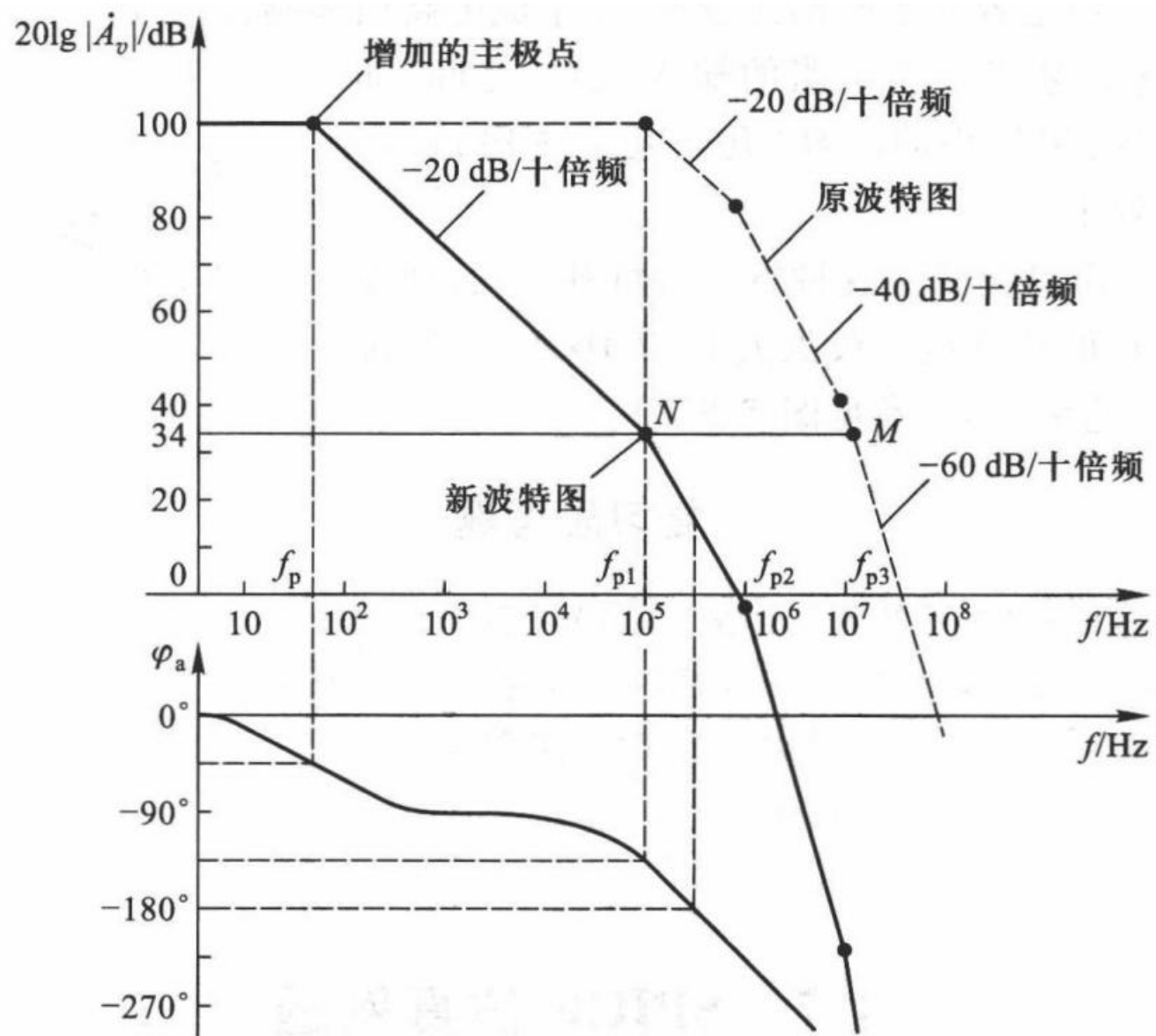
频率补偿技术



- 如 ω_c 选择的比补偿前 ω_{90} (φ_a 为 -90° 时的角频率)低, 则因补偿极点对附加相移的贡献, 使电路在达到新的 ω_{180} 之前使环路增益 $|A_v F_v| < 1$, 从而使电路稳定地工作, 并可获得有较高的低频环路增益。
- 例8.6.3说明了极点频率 ω_c 的确定方法。



频率补偿技术





作业



- 第七版 习题八
- 8.2.1, 8.2.3, 8.3.1, 8.4.1, 8.4.3
- 预习第十章