

## 第5章

## 反馈放大电路

电子电路中的反馈有很多种类型,常用的负反馈电路有电压串联负反馈、电压并联负反馈、电流串联负反馈和电流并联负反馈四种类型。本章首先介绍反馈的基本概念,接着重点讨论电路反馈类型的判断方法,然后归纳出反馈的一般表达式,在此基础上深入探讨负反馈对放大电路性能的影响,最后介绍深度负反馈放大电路的估算。

## 5.1 反馈的基本概念与反馈类型的判断

反馈是一种普遍的现象,广泛存在于自然界和工程技术领域中。反馈应用于放大电路,构成了反馈放大电路。放大电路引入反馈后,可以从多方面改善放大电路的性能,得到很好的效果。因此,负反馈放大电路得到了广泛应用。

### 5.1.1 反馈的基本概念

#### 1. 认识“反馈”

反馈是指在电子线路中,把输出量(电压或电流)的全部或者一部分以某种方式返送回输入回路,与输入量(电压或电流)进行比较,并对电路产生影响的过程。

按照各部分电路功能不同,可将反馈放大电路分为基本放大电路和反馈网络两部分,图 5.1.1 是反馈放大电路的示意框图。图中, $\dot{X}_i$  是整个反馈电路的输入信号(输入量), $\dot{X}_o$  是电路的输出信号(输出量)。基本放大电路是断开了与反馈网络的联系,但仍考虑反馈网络的负载影响的放大电路,放大倍数用  $\dot{A}$  表示,其输入信号称为净输入信号,用  $\dot{X}_d$  表示,故  $\dot{A} = \dot{X}_o / \dot{X}_d$ 。反馈网络将输出信号  $\dot{X}_o$  返送到输入回路,其输出  $\dot{X}_f$  称为反馈信号(反馈量),通常用  $\dot{F}$  表示返送到输入回路的信号与输出信号之比,称为反馈系数,即  $\dot{F} = \dot{X}_f / \dot{X}_o$ 。“ $\oplus$ ”环节是比较环节,输入量  $\dot{X}_i$  和反馈量  $\dot{X}_f$  在比较环节进行比较后,产生净输入信号  $\dot{X}_d$ ,加到基本放大电路的输入端。 $\dot{X}_i$ 、 $\dot{X}_o$ 、 $\dot{X}_f$ 、 $\dot{X}_d$  可分别为电压或电流信号。需要指出的是,框图中的“基本放大电路”只是表示放大电路是反馈放大电路的基本组成单元,并不仅仅是指第 2 章所述的基本放大电路。

例如,在第 2 章所讲述的稳定静态工作点的共射放大电路中,如图 5.1.2 所示,静态时的  $U_B$  为输入信号,  $I_C$  为输出信号,利用  $I_E$  ( $I_E \approx I_C$ ) 在发射极电阻  $R_e$  产生的压降返送到输入回路,  $U_E$  为反馈信号,  $U_{BE}$  ( $U_B - U_E$ ) 为净输入信号。

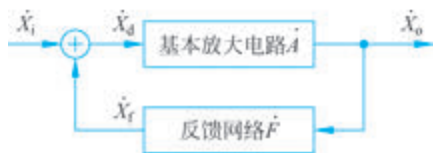


图 5.1.1 反馈放大电路的示意框图

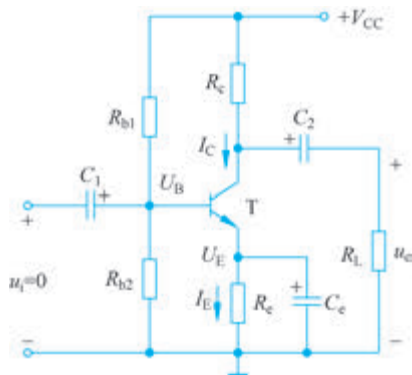


图 5.1.2 共射放大电路

## 2. 开环状态与闭环状态

在电子线路中,信号是从电路的输入端传到输出端,称为信号的**正向传输**;信号从输出端传到输入端,称为信号的**反向传输**。在电路中,信号只有正向传输,没有反向传输,就称为**开环状态**,如图 5.1.3 所示电路为开环状态;既有正向传输又有反向传输,就称为**闭环状态**,在图 5.1.4 所示电路中,既有正向传输又有反向传输,电路处于闭环状态。

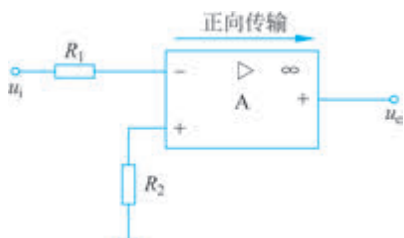


图 5.1.3 开环状态

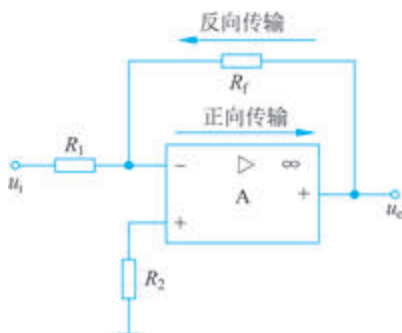


图 5.1.4 闭环状态

## 3. 本级反馈与级间反馈

在电子线路中,反馈放大电路往往是由多级放大电路组成的。反馈只存在于某一级放大电路中,称为**本级反馈**;反馈存在于两级或两级以上的放大电路中,称为**级间反馈**。例如,在图 5.1.5 所示两级放大电路中, $R_{e1}$ 、 $R_{e2}$  引入本级反馈,只影响本级电路的性能; $R_f$  引入级间反馈,影响整个电路的性能。本章重点研究级间反馈。

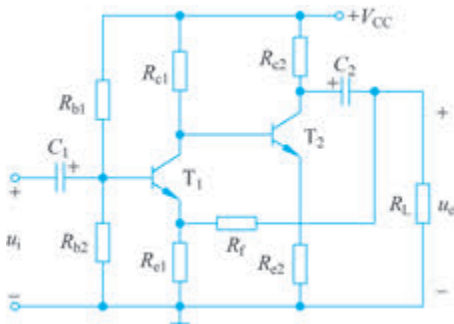


图 5.1.5 本级反馈与级间反馈

## 5.1.2 反馈类型及其判断方法

### 1. 直流反馈与交流反馈

如果反馈只对直流量起作用,那么称为**直流反馈**。直流反馈影响电路的直流工作状态,例如,图 5.1.6 所示电路中的  $R_e$ , 存在于直流通路中,引入直流反馈,可以稳定静态工作点。如果反馈只对交流量起作用,那么称为**交流反馈**。交流反馈影响电路的交流工作性能,如放大倍数、输入电阻、输出电阻和带宽等。如果反馈对交流量和直流量都起作用,那么称为**交直流反馈**。交直流反馈会同时影响电路的交流和直流工作状态。例如,在图 5.1.6 所示电路的  $R_e$  两端接入电容  $C_e$ , 则只存在直流反馈而无交流反馈,故对交流性能指标没有影响;若  $R_e$  两端去掉电容  $C_e$ ,  $R_e$  也存在于交流通路中,则存在交直流反馈,因此不仅能够稳定静态工作点,而且影响交流性能指标的大小。由此可见,判断直流反馈与交流反馈时,要特别注意电容具有“隔直通交”这一特性。

需要指出的是,本章重点研究交流负反馈,故使用正弦交流信号的相量表示电路中

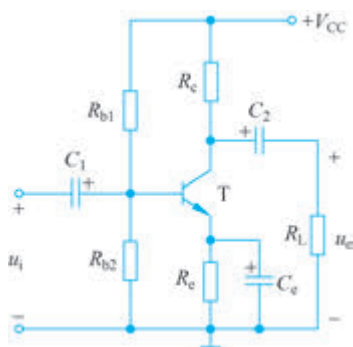


图 5.1.6 共射放大电路

的参数。

## 2. 负反馈与正反馈

在图 5.1.1 中,输入信号  $\dot{X}_i$  与反馈网络送回的反馈信号  $\dot{X}_f$  要进行比较,产生加到基本放大电路输入端的净输入信号  $\dot{X}_d$ 。按照比较的结果,或者说按照反馈信号的极性,可以分为负反馈和正反馈两种。引入反馈信号  $\dot{X}_f$  后,使净输入信号  $\dot{X}_d$  减小,则反馈信号极性为负,称为**负反馈**;引入反馈信号  $\dot{X}_f$  后,使净输入信号  $\dot{X}_d$  增大,则反馈信号极性为正,称为**正反馈**。

判断是正反馈还是负反馈可以采用**瞬时极性法**,具体方法:首先假设输入信号在某一时刻对地的极性,一般为正(用“+”表示),然后按照信号正向传输的方向逐级向后推断,确定输出信号的极性;再由输出端通过反馈网络返回输入回路,确定反馈信号的极性;最后依照正、负反馈极性的定义做出判断。

## 3. 串联反馈和并联反馈

对于反馈放大电路来说,按照基本放大电路和反馈网络在输入端的连接方式分,可以分为串联反馈和并联反馈两种,如图 5.1.7 所示。

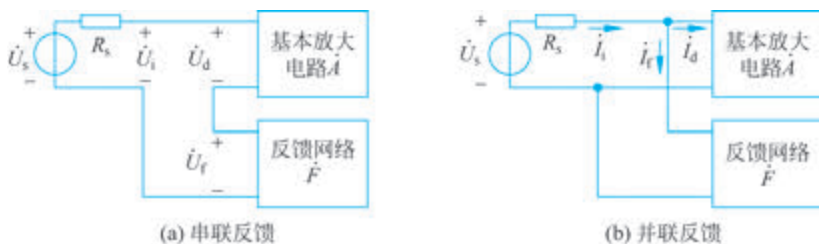


图 5.1.7 反馈放大电路的两种输入连接方式

图 5.1.7(a)中,基本放大电路和反馈网络相互串联,输入量  $\dot{U}_i$ 、反馈量  $\dot{U}_f$  和净输入量  $\dot{U}_d$  构成一个回路。 $\dot{U}_i$  与  $\dot{U}_f$  在输入回路进行电压比较,产生净输入电压  $\dot{U}_d$ 。因此,在输入回路中,串联反馈的各个量是以电压的形式进行比较的。

图 5.1.7(b)中,基本放大电路和反馈网络相互并联,输入量  $\dot{I}_i$  和净输入量  $\dot{I}_d$ 、反馈量  $\dot{I}_f$  连在输入端的同一个节点上, $\dot{I}_i$  和  $\dot{I}_f$  在输入节点上进行电流比较,产生净输入电流  $\dot{I}_d$ 。因此,在输入回路中并联反馈的各个量是以电流的形式进行比较的。

上述分析可知,采用**输入端观察法**可以很容易地判别反馈是串联反馈还是并联反馈。如果反馈元件与输入信号连在同一节点上,那么必然进行电流比较,该反馈是并联反馈;如果反馈元件与输入信号连在两个不同的节点上,那么必然进行电压比较,该反馈是串联反馈。

#### 4. 电压反馈与电流反馈

反馈放大电路按照输出量的取样方式可以分为电压反馈和电流反馈,如图 5.1.8 所示。

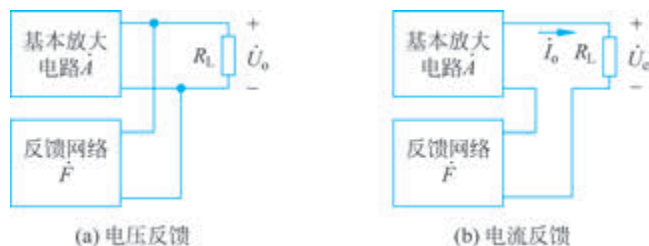


图 5.1.8 反馈放大电路的两种输出取样方式

在图 5.1.8(a)所示电路中,输出电压  $\dot{U}_o$  通过反馈网络产生反馈量,反馈量正比于输出电压  $\dot{U}_o$ ,称为**电压反馈**。在图 5.1.8(b)电路中,输出电流  $\dot{I}_o$  流过反馈网络产生反馈量,反馈量正比于输出电流  $\dot{I}_o$ ,称为**电流反馈**。

对于输出取样方式的判别可以采用**输出短路法**。假设输出端交流短路( $R_L=0$ ),则  $\dot{U}_o=0$ 。若反馈信号也变为 0,则反馈量正比于输出电压  $\dot{U}_o$ ,是电压反馈。若反馈信号不为 0,则为电流反馈。注意,输出端短路时,是将  $R_L$  短路,不一定是输出端对地短路。

## 5.2 负反馈放大电路的四种类型

负反馈能够改善放大电路的性能,在放大电路中得到广泛应用;而正反馈使放大电路的性能变差,放大电路中一般不采用正反馈。对于负反馈放大电路而言,不同的输入连接方式和输出取样方式相互组合,可以得到电压串联负反馈、电压并联负反馈、电流并联负反馈和电流串联负反馈四种基本类型。

### 5.2.1 电压串联负反馈

图 5.2.1(a)所示是由分立元件构成的反馈电路。首先判断该电路有无反馈。从图 5.2.1(a)中可以看出,信号  $\dot{U}_i$  由三极管  $T_1$  的基极输入,经  $R_f$  将输出信号  $\dot{U}_o$  返送到三极管  $T_1$  的发射极,故该电路存在反馈。

其次,采用瞬时极性法判断该反馈是正反馈还是负反馈。如图 5.2.1(a)所示,假设输入信号  $\dot{U}_i$  对地的瞬时极性为正,图中用“(+)”符号表示,经  $T_1$  管组成的共射放大电路反相后加入到  $T_2$  管的基极,又经  $T_2$  管组成的共射放大电路反相,故  $\dot{U}_o$  与  $\dot{U}_i$  是同相的,即  $\dot{U}_o$  的瞬时极性为正,再经  $R_f$  将输出信号  $\dot{U}_o$  返送到三极管  $T_1$  的发射极,因此反馈电压  $\dot{U}_f$  的瞬时极性与  $\dot{U}_i$  相同,使净输入量  $\dot{U}_d$  (此处即为  $T_1$  的  $\dot{U}_{be}$ ) 减小,所以是负反馈。

下面判断该电路是哪一种负反馈。反馈电压  $\dot{U}_f$  与输入电压  $\dot{U}_i$  串联作用于基本放

大电路的输入端,输入电压  $\dot{U}_i$  和反馈电压  $\dot{U}_f$  在输入回路中进行比较,三极管  $T_1$  的净输入电压  $\dot{U}_{be} = \dot{U}_i - \dot{U}_f$ ,因而该反馈是串联反馈。通常采用输出短路法判断该反馈是电压反馈还是电流反馈,在图 5.2.1(a)中,若输出短路,使  $\dot{U}_o = 0$ ,这时反馈电压  $\dot{U}_f = 0$ ,反馈作用消失,因此这是电压反馈,同时,反馈电压  $\dot{U}_f = \dot{U}_o R_{e1} / (R_{e1} + R_f)$ ,正比于输出电压  $\dot{U}_o$ ,也可以看出该电路引入的是电压反馈。综合上述判断结果,图 5.2.1(a)所示电路的反馈类型是电压串联负反馈。

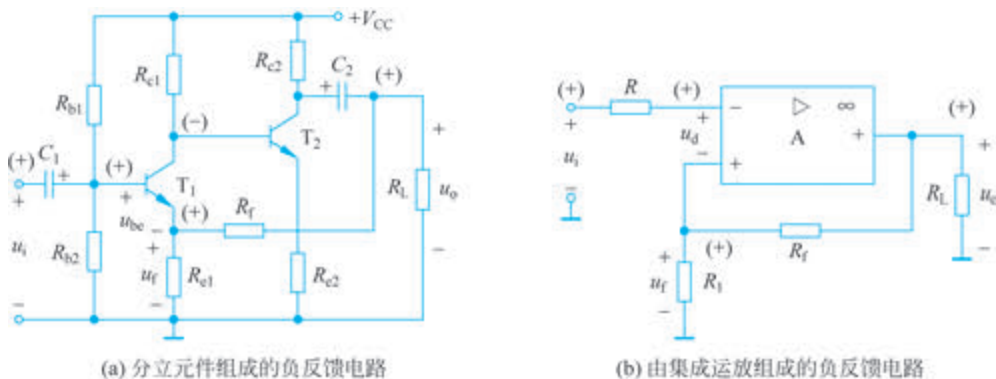


图 5.2.1 电压串联负反馈

图 5.2.1(b)所示是由运放构成的反馈电路。在电路中,基本放大电路由集成运放构成, $R_f$  是连接电路输入端与输出端的反馈元件, $R_f$  和  $R_1$  组成反馈网络。首先判断该电路有无反馈。电路中,输入信号  $\dot{U}_i$  经过电阻  $R$  加到运放的同相端,运放的反相端通过电阻  $R_1$  接地,运放的输出端与反相端之间跨接了反馈电阻  $R_f$ ,将输出信号  $\dot{U}_o$  返送到输入回路,故该电路存在反馈。

下面采用瞬时极性法判断该反馈是正反馈还是负反馈。假设输入信号  $\dot{U}_i$  对地的瞬时极性为正,图中用“(+)”符号表示,则输出信号  $\dot{U}_o$  也为正,反馈信号  $\dot{U}_f$  的极性同样为正,在输入回路中有  $\dot{U}_d = \dot{U}_i - \dot{U}_f$ ,故引入反馈后使净输入信号  $\dot{U}_d$  减小了,所以是负反馈。

再判断该电路是负反馈的哪一种。电路中,反馈电压  $\dot{U}_f$  与输入电压  $\dot{U}_i$  串联作用于运放的两个输入端,输入电压  $\dot{U}_i$  和反馈电压  $\dot{U}_f$  在输入回路中进行比较,  $\dot{U}_d = \dot{U}_i - \dot{U}_f$ ,因而该电路引入的是串联反馈。图中,采用输出短路法,若输出短路,使  $\dot{U}_o = 0$ ,这时反馈电压  $\dot{U}_f = 0$ ,反馈作用消失,因此这是一个电压反馈,同时,反馈电压  $\dot{U}_f = \dot{U}_o R_1 / (R_1 + R_f)$ ,正比于  $\dot{U}_o$ ,也可以判断该电路引入的是电压反馈。综上所述,图 5.2.1(b)所示电路的反馈类型是电压串联负反馈。

电压负反馈的特点是稳定输出电压。在图 5.2.1(a)电路中,当外加输入电压  $\dot{U}_i$  一



定时,若某种情况(如负载波动或温度变化使 $\beta$ 变化等)导致 $\dot{U}_o$ 发生变化,例如, $R_L$ 增大,使输出电压 $\dot{U}_o$ 增大,则反馈电压 $\dot{U}_f$ 也增大,结果使净输入电压 $\dot{U}_{be}$ 减小,从而使 $\dot{U}_o$ 减小,这个调节过程使得 $\dot{U}_o$ 保持基本不变。

同理,在图 5.2.1(b)电路中,集成运放的输出信号 $\dot{U}_o$ 通过反馈网络送回输入端, $\dot{U}_f$ 与 $\dot{U}_i$ 进行比较,极性相同,抵消掉很大一部分,真正送到运放输入端的净输入信号 $\dot{U}_d = \dot{U}_i - \dot{U}_f$ 。输出量 $\dot{U}_o$ 的变化,会引起反馈量 $\dot{U}_f$ 与之相同极性的变化,使得净输入信号 $\dot{U}_d$ 发生相反极性的变化,从而导致了输出量 $\dot{U}_o$ 也发生相反极性的变化。这一系列变化是一个自动进行的反馈调节过程,它可以使输出电压 $\dot{U}_o$ 保持基本不变。

电压负反馈能够稳定输出电压,从另一个角度考虑,当输入电压一定时,负载变化而输出电压稳定,也就意味着电压负反馈使电路的输出电阻减小。

对于电压串联负反馈,根据图 5.2.1 可以定义这种负反馈放大电路的放大倍数为

$$\dot{A}_{uu} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_d} \quad (5.2.1)$$

$\dot{A}_{uu}$  称为**电压放大倍数**。定义反馈系数为

$$\dot{F}_{uu} = \frac{\dot{U}_f}{\dot{U}_o} \quad (5.2.2)$$

$\dot{F}_{uu}$  称为**电压反馈系数**。 $\dot{A}_{uu}$  和  $\dot{F}_{uu}$  均没有量纲。

### 5.2.2 电压并联负反馈

电路如图 5.2.2(a)所示,首先判断有无反馈。从图中可以看出,电阻 $R_f$ 从输出端(T的集电极)连接到输入端(T的基极),使输出信号反馈到输入回路,故该电路存在反馈。

下面判断该反馈是正反馈还是负反馈。假设输入信号 $\dot{U}_i$ 对地的瞬时极性为正,则输出信号 $\dot{U}_o$ 对地的瞬时极性为负,可以看出,输入电流 $\dot{I}_i$ 、反馈电流 $\dot{I}_f$ 和净输入电流 $\dot{I}_d$ (此处即为T的基极电流 $\dot{I}_b$ )的瞬时方向与图 5.2.2(a)中标出的参考方向一致,输入端有 $\dot{I}_b = \dot{I}_i - \dot{I}_f$ ,故引入反馈的结果使净输入信号 $\dot{I}_b$ 减小了,所以是负反馈。

在电路中,反馈电流 $\dot{I}_f$ 与输入电流 $\dot{I}_i$ 并联作用于基本放大电路的输入端, $\dot{I}_i$ 与 $\dot{I}_f$ 进行比较, $\dot{I}_b = \dot{I}_i - \dot{I}_f$ ,因此该电路引入的是并联反馈。输出端的反馈方式可用输出短路法来判断。当 $R_L$ 短路时, $\dot{U}_o = 0$ ,这时没有输出电压返送到输入回路,因此反馈作用消失,表明该反馈是电压反馈。另外,反馈电流 $\dot{I}_f = (\dot{U}_i - \dot{U}_o)/R_f$ ,且 $\dot{U}_i \ll \dot{U}_o$ ,故 $\dot{I}_f \approx$

$-\dot{U}_o/R_f$ 。由此也可以看出,反馈量取之于输出电压  $\dot{U}_o$ ,且转换为反馈电流  $\dot{I}_f$ ,该反馈是电压反馈,判断结果与输出短路法相同。由此可见,该电路的反馈类型是电压并联负反馈。

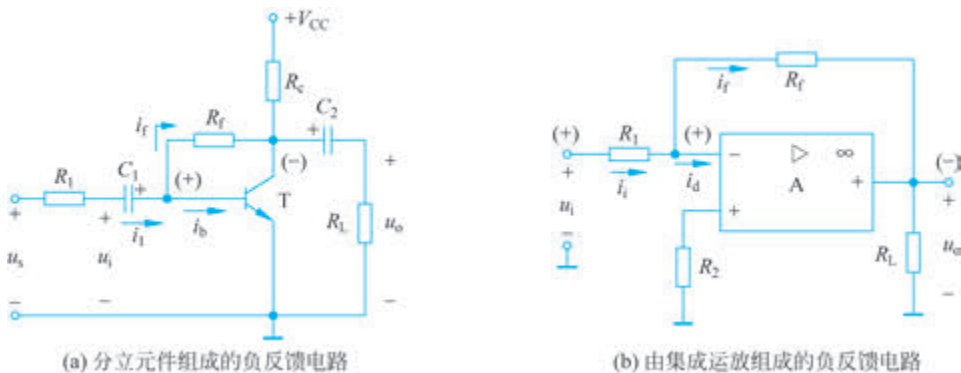


图 5.2.2 电压并联负反馈

图 5.2.2(b)是运放构成的电压并联负反馈放大电路。电路中,输入信号  $\dot{U}_i$  经过电阻  $R_1$  加到运放的反相端,运放的同相端经电阻  $R_2$  接地。运放的输出端与反相端之间跨接了电阻  $R_f$ 。

首先判断该电路是否存在反馈。从图中可以看出,  $R_f$  是反馈元件,它将输出电压返送到输入回路,故电路存在反馈。

下面采用瞬时极性法判断该反馈是正反馈还是负反馈。设  $\dot{U}_i$  对地的瞬时极性为正,则  $\dot{U}_o$  对地的瞬时极性为负,可以看出  $\dot{I}_i$ 、 $\dot{I}_f$  和  $\dot{I}_d$  的瞬时方向与图中标出的参考方向一致,则在运放的反相端有  $\dot{I}_d = \dot{I}_i - \dot{I}_f$ ,故引入反馈的结果使净输入信号  $\dot{I}_d$  减小了,所以是负反馈。

在电路中,反馈信号与输入信号并联作用于运放的输入端,因此该反馈是并联反馈。在第 4 章中提到,工作在负反馈条件下,运放具有“虚短”特性。电路中,运放的同相端电位为零,所以反相端的电位也为零。但是,由于反相端并没有真正接地,因此称为“虚地”。这样,可知反馈电流为

$$\dot{I}_f = \frac{\dot{U}_- - \dot{U}_o}{R_f} = -\frac{\dot{U}_o}{R_f}$$

由此可见,反馈电流  $\dot{I}_f$  正比于输出电压  $\dot{U}_o$ ,故该反馈是电压反馈,采用输出短路法也可以获得相同的判断结果。综上所述,图 5.2.2(b)所示电路的反馈类型是电压并联负反馈。

下面再来分析电压负反馈稳定输出电压的过程。在图 5.2.2(a)所示电路中,假设输入电流  $\dot{I}_i$  一定时,若增大  $R_L$ ,则输出电压  $\dot{U}_o$  将增大,  $\dot{I}_f$  也将增大,从而使净输入电流  $\dot{I}_b$  ( $\dot{I}_b = \dot{I}_i - \dot{I}_f$ ) 减小,  $\dot{I}_c$  也减小,所以  $\dot{U}_o$  减小,这个调节过程使输出电压稳定。需要指



出的是,电路的输入回路中串接了一个电阻  $R_1$ ,它对于并联反馈来说是必不可少的。如果没有电阻  $R_1$ ,那么  $\dot{U}_s = \dot{U}_i$ ,这时净输入电流为

$$\dot{I}_b = \frac{\dot{U}_s}{r_{be}}$$

上式说明净输入电流的大小取决于输入电压,与反馈电流  $\dot{I}_f$  无关,也就是没有反馈作用了。因此,在采用并联反馈时,总要有一个较大的电阻  $R_1$  串联于输入回路,使输入端近似为一个电流源( $\dot{I}_i \approx \dot{U}_s/R_1$ ),这样净输入电流受反馈电流的影响更加明显,从而提高反馈效果。

图 5.2.2(b)所示电路中,净输入电流  $\dot{I}_d$  经过运放放大后,产生输出电压  $\dot{U}_o$ ,经  $R_f$  转换为反馈电流  $\dot{I}_f$ 。在电路输入端, $\dot{I}_i$ 、 $\dot{I}_f$  比较, $\dot{I}_d = \dot{I}_i - \dot{I}_f$ 。若输出电压  $\dot{U}_o$  变化,必然会使  $\dot{I}_f$  产生相同极性的变化,导致  $\dot{I}_d$  产生相反极性的变化,从而  $\dot{U}_o$  也发生相反极性的变化,最终起到稳定输出电压的作用。

对于电压并联负反馈,根据图 5.2.2 可以定义这种负反馈放大电路的放大倍数为

$$\dot{A}_{ui} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{I}_d} \quad (5.2.3)$$

$\dot{A}_{ui}$  称为互阻放大倍数,其量纲是电阻的量纲。定义反馈系数为

$$\dot{F}_{iu} = \frac{\dot{I}_f}{\dot{U}_o} \quad (5.2.4)$$

$\dot{F}_{iu}$  的量纲是电导的量纲,称为互导反馈系数。

### 5.2.3 电流并联负反馈

图 5.2.3(a)是由分立元件构成的电流并联负反馈放大电路。图中, $R_f$  将输出回路与输入回路连接起来,构成了反馈。用瞬时极性法判断反馈极性,假设  $\dot{U}_i$  对地的瞬时极性为正,则  $T_2$  的发射极为负。可以看出,输入电流  $\dot{I}_i$ 、反馈电流  $\dot{I}_f$  和净输入电流  $\dot{I}_d$ (此处即为  $\dot{I}_b$ )的瞬时方向与图 5.2.3(a)中标出的参考方向一致,输入端有  $\dot{I}_b = \dot{I}_i - \dot{I}_f$ ,故引入反馈的结果使  $\dot{I}_b$  减小了,所以是负反馈。反馈信号与输入信号并联作用于同一输入端, $\dot{I}_i$  与  $\dot{I}_f$  进行比较,因此电路引入的是并联反馈。取样电流  $\dot{I}_{e2} \approx \dot{I}_{c2}$ ,反馈电流  $\dot{I}_f$  与输出端三极管  $T_2$  的集电极电流  $\dot{I}_{c2}$  成比例,因此电路引入的是电流反馈。若用输出短路法,当  $R_L$  短路时, $\dot{U}_o = 0$ ,这时依然有反馈电流存在,也表明该反馈是电流反馈,判断结果相同。可见,图 5.2.3(a)所示电路的反馈类型是电流并联负反馈。

需要指出的是,在由分立元件三极管组成的电流负反馈电路中,反馈信号来源于输

出级的集电极电流,通常定义电路的输出电流为输出级的集电极电流。例如,图 5.2.3(a)所示电路的输出电流  $\dot{I}_o = \dot{I}_{c2}$ 。

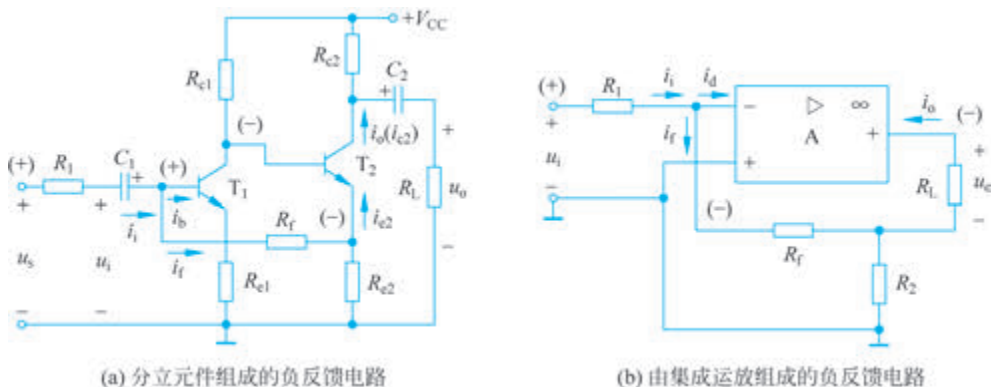


图 5.2.3 电流并联负反馈

图 5.2.3(b)是由运放构成的电流并联负反馈放大电路。在电路中, $R_f$ 是连接输入回路和输出回路的反馈元件,因此电路存在反馈。用瞬时极性法判断反馈极性,设信号输入端,即运放反相端的瞬时极性为正,则输出端的瞬时极性为负。可以看出, $\dot{I}_i$ 、 $\dot{I}_f$ 和 $\dot{I}_d$ 的瞬时方向与图中标出的参考方向是一致的,可以得到 $\dot{I}_d = \dot{I}_i - \dot{I}_f$ ,表明该反馈是负反馈。经 $R_f$ 的反馈信号与输入信号都连接到运放的反相输入端,输入电流 $\dot{I}_i$ 、反馈电流 $\dot{I}_f$ 并联作用于运放同一输入端,因此该反馈是并联反馈。如果运用输出短路法判断输出的取样类型,将 $R_L$ 短路时,会发现 $\dot{I}_f$ 依然存在,因此是电流反馈。由于运放输入端存在“虚短”,因而反馈电流 $\dot{I}_f = R_2 / (R_2 + R_f) \dot{I}_o$ ,正比于输出电流 $\dot{I}_o$ ,这也说明该电路引入的是电流反馈。综上所述,图 5.2.3(b)所示电路的反馈类型是电流并联负反馈。

电流负反馈的特点是稳定输出电流。在图 5.2.3(a)电路中,当输入电流 $\dot{I}_i$ 一定时,若某种情况使得输出电流 $\dot{I}_{c2}$ 减小,则 $\dot{I}_f$ 也将减小,而净输入电流 $\dot{I}_b$ 增大,从而使 $\dot{I}_{c2}$ 增大。可见,这个反馈调节过程使输出电流 $\dot{I}_{c2}$ 保持基本稳定。

同理,在图 5.2.3(b)中,集成运放对净输入信号 $\dot{I}_d$ 放大,得到输出电流 $\dot{I}_o$ ,通过反馈网络得到反馈电流 $\dot{I}_f$ , $\dot{I}_d = \dot{I}_i - \dot{I}_f$ 。输出量 $\dot{I}_o$ 的变化,会引起反馈量 $\dot{I}_f$ 与之相同极性的变化,也会使 $\dot{I}_d$ 产生相反极性的变化,从而导致输出量 $\dot{I}_o$ 发生相反极性的变化。这个反馈调节过程自动进行,维持输出量 $\dot{I}_o$ 保持基本不变。

电流负反馈能够稳定输出电流,从另一个角度考虑,当输入信号一定时,负载变化而输出电流稳定,也就意味着电流负反馈使电路的输出电阻增大。

对于电流并联负反馈,根据图 5.2.3 可以定义这种负反馈放大电路的放大倍数为

$$\dot{A}_{ii} = \frac{\dot{I}_o}{\dot{I}_d} \quad (5.2.5)$$

$\dot{A}_{ii}$  称为**电流放大倍数**。定义反馈系数为

$$\dot{F}_{ii} = \frac{\dot{I}_f}{\dot{I}_o} \quad (5.2.6)$$

$\dot{F}_{ii}$  称为**电流反馈系数**。 $\dot{A}_{ii}$  和  $\dot{F}_{ii}$  都是电流之比,没有量纲。

### 5.2.4 电流串联负反馈

前面介绍的共射放大电路是一个典型的电流串联负反馈放大电路,如图 5.2.4(a)所示。图中,  $R_e$  将输出电流  $\dot{I}_c$  反馈到输入回路,转换为反馈电压  $\dot{U}_f$ ,若输入信号  $\dot{U}_i$  对地的瞬时极性为正,则  $\dot{U}_f$  的瞬时极性也为正,使净输入信号  $\dot{U}_d$  (此处即为  $\dot{U}_{be}$ ) 减小,故该反馈是负反馈。在电路中,  $\dot{U}_i$  与  $\dot{U}_f$  串联作用于输入回路,  $\dot{U}_{be} = \dot{U}_i - \dot{U}_f$ , 因此电路引入的是串联反馈。由  $\dot{U}_f = \dot{I}_c R_e$  可知该反馈是电流反馈,同样也可以用输出短路法很容易判断出相同的结果。所以,图 5.2.4(a)所示电路的反馈类型是电流串联负反馈。

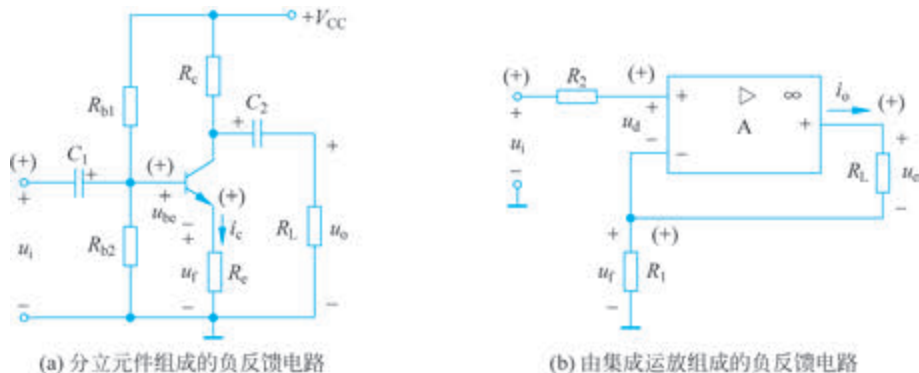


图 5.2.4 电流串联负反馈

图 5.2.4(b)是由运放组成的电流串联负反馈放大电路。电路中,输入信号加到运放的同相端,运放的反相端通过电阻  $R_1$  接地。负载电阻  $R_L$  一端接运放的输出端,另一端加到运放的反相端,电阻  $R_1$  将输入回路与输出回路连接起来。用瞬时极性法判断这个电路是正反馈还是负反馈,设  $\dot{U}_i$  对地的瞬时极性为正,则输出电压  $\dot{U}_o$  的瞬时极性为正,那么反馈量  $\dot{U}_f$  的瞬时极性也为正,可见引入反馈后使净输入电压  $\dot{U}_d$  减小了,故该反馈为负反馈。 $\dot{U}_i$  与  $\dot{U}_f$  串联作用于输入端,在输入回路中  $\dot{U}_i$  和  $\dot{U}_f$  进行比较,有  $\dot{U}_d = \dot{U}_i - \dot{U}_f$ , 因此该反馈为串联反馈。集成运放对输入信号进行放大,得到输出电流  $\dot{I}_o$ ,  $\dot{I}_o$  流过电阻  $R_1$ , 产生反馈电压  $\dot{U}_f$ ,  $\dot{U}_f = \dot{I}_o R_1$ , 故该反馈是电流反馈。如用输出短路法,将  $R_L$

短路,  $\dot{I}_o$  电流和反馈电压  $\dot{U}_f$  仍存在, 也可以看出该反馈是电流反馈。所以, 图 5.2.4(b) 所示电路的反馈类型是电流串联负反馈。

电流负反馈能够稳定输出电流。在图 5.2.4(a) 电路中, 当输入电压  $\dot{U}_i$  一定时, 若某种情况使得输出电流  $\dot{I}_o$  减小, 则  $\dot{U}_f$  也将减小, 而净输入电压  $\dot{U}_{be}$  增大, 从而使  $\dot{I}_o$  增大, 可见, 电流负反馈调整的结果使输出电流保持基本稳定。同理, 图 5.2.4(b) 所示电路能够稳定输出电流, 其分析过程与前相同, 不再赘述。

对于电流串联负反馈, 根据图 5.2.4 可以定义这种负反馈放大电路的放大倍数为

$$\dot{A}_{iu} = \frac{\dot{I}_o}{\dot{U}_d} \quad (5.2.7)$$

$\dot{A}_{iu}$  称为互导放大倍数, 量纲是电导的量纲。定义反馈系数为

$$\dot{F}_{ui} = \frac{\dot{U}_f}{\dot{I}_o} \quad (5.2.8)$$

$\dot{F}_{ui}$  的量纲是电阻的量纲, 称为互阻反馈系数。

### 5.3 负反馈放大电路的一般表达式和关于反馈深度的讨论

#### 5.3.1 负反馈放大电路一般表达式

由基本放大电路  $\dot{A}$  和反馈放大电路  $\dot{F}$  组成闭合回路称为反馈环路。本章研究的主要是具有一个反馈环路的负反馈放大电路, 称为单环放大电路。上述四种负反馈放大电路的框图可以抽象为图 5.3.1 所示的一般形式。图中,



图 5.3.1 负反馈放大电路框图

$\dot{X}_i$ 、 $\dot{X}_o$ 、 $\dot{X}_f$ 、 $\dot{X}_d$  分别为输入信号、输出信号、反馈信号和净输入信号, 箭头表示信号的传递的方向, 输入信号只通过基本放大电路到达输出端而不通过反馈网络, 反馈信号只通过反馈网络到达输入端而不通过基本放大电路。“ $\oplus$ ”表示输入信号  $\dot{X}_i$  和反馈信号  $\dot{X}_f$  在此叠加, “+”和“-”表示它们之间有如下关系

$$\dot{X}_d = \dot{X}_i - \dot{X}_f \quad (5.3.1)$$

从图 5.3.1 可以看出, 电路的开环放大倍数也就是基本放大电路的放大倍数, 即

$$\dot{A} = \frac{\dot{X}_o}{\dot{X}_d} \quad (5.3.2)$$

反馈系数为

$$\dot{F} = \frac{\dot{X}_f}{\dot{X}_o} \quad (5.3.3)$$

电路的闭环放大倍数为

$$\dot{A}_f = \frac{\dot{X}_o}{\dot{X}_i} \quad (5.3.4)$$

由式(5.3.2)和式(5.3.3)可得

$$\dot{A}\dot{F} = \frac{\dot{X}_f}{\dot{X}_d} \quad (5.3.5)$$

$\dot{A}\dot{F}$  称为**环路放大倍数**。由式(5.3.1)和式(5.3.5)可知,  $\dot{A}\dot{F} > 0$ 。

对于四种负反馈放大电路,  $\dot{A}$ 、 $\dot{F}$  和  $\dot{A}_f$  所表示的物理意义是不同的, 量纲也是不同的, 但  $\dot{A}\dot{F}$  总是无量纲的。四种负反馈放大电路的比较如表 5.3.1 所示。

表 5.3.1 四种负反馈放大电路的比较

反馈组态	$\dot{X}_i \dot{X}_f \dot{X}_d$	$\dot{X}_o$	$\dot{A}$	$\dot{F}$	$\dot{A}_f$	功能
电压串联	$\dot{U}_i \dot{U}_f \dot{U}_d$	$\dot{U}_o$	$\dot{A}_{uu} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_d}$	$\dot{F}_{uu} = \frac{\dot{U}_f}{\dot{U}_o}$	$\dot{A}_{uuf} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i}$	$\dot{U}_i$ 控制 $\dot{U}_o$ 。 电压放大
电压并联	$\dot{I}_i \dot{I}_f \dot{I}_d$	$\dot{U}_o$	$\dot{A}_{ui} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{I}_d}$	$\dot{F}_{iu} = \frac{\dot{I}_f}{\dot{U}_o}$	$\dot{A}_{uif} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{I}_i}$	$\dot{I}_i$ 控制 $\dot{U}_o$ 。 电流转换成电压
电流并联	$\dot{I}_i \dot{I}_f \dot{I}_d$	$\dot{I}_o$	$\dot{A}_{ii} = \frac{\dot{I}_o}{\dot{I}_d}$	$\dot{F}_{ii} = \frac{\dot{I}_f}{\dot{I}_o}$	$\dot{A}_{iif} = \frac{\dot{I}_o}{\dot{I}_i}$	$\dot{I}_i$ 控制 $\dot{I}_o$ 。 电流放大
电流串联	$\dot{U}_i \dot{U}_f \dot{U}_d$	$\dot{I}_o$	$\dot{A}_{iu} = \frac{\dot{I}_o}{\dot{U}_d}$	$\dot{F}_{ui} = \frac{\dot{U}_f}{\dot{I}_o}$	$\dot{A}_{iuf} = \frac{\dot{I}_o}{\dot{U}_i}$	$\dot{U}_i$ 控制 $\dot{I}_o$ 。 电压转换成电流

由式(5.3.1)~式(5.3.4)可以推导出负反馈放大电路的闭环放大倍数表达式为

$$\dot{A}_f = \frac{\dot{X}_o}{\dot{X}_i} = \frac{\dot{A}}{1 + \dot{A}\dot{F}} \quad (5.3.6)$$

式(5.3.6)是负反馈放大电路闭环放大倍数的一般表达式。从式中可以看出, 因为  $\dot{A}\dot{F} > 0$ , 所以引入负反馈后, 闭环放大倍数  $\dot{A}_f$  小于开环放大倍数  $\dot{A}$ ,  $\dot{A}_f$  是  $\dot{A}$  的  $1/(1 + \dot{A}\dot{F})$  倍。 $1 + \dot{A}\dot{F}$  对负反馈放大电路的性能有很大影响, 定义  $|1 + \dot{A}\dot{F}|$  为**反馈深度**。在中频段,  $\dot{A}$  和  $\dot{F}$  均为实数, 因此闭环放大倍数可以写为  $A_f = A/(1 + AF)$ , 反馈深度可以写为  $1 + AF$ 。

### 5.3.2 关于反馈深度的讨论

引入负反馈后, 反馈深度  $|1 + \dot{A}\dot{F}|$  的大小对负反馈放大电路的性能影响很大, 简单讨论如下:

- (1) 当  $|1+\dot{A}\dot{F}|>1$  时,  $|\dot{A}_f|<|\dot{A}|$ , 闭环放大倍数下降, 电路引入的是负反馈。
- (2) 当  $|1+\dot{A}\dot{F}|\gg 1$  时,  $\dot{A}_f=\dot{A}/(1+\dot{A}\dot{F})\approx 1/\dot{F}$  是深度负反馈。从这个表达式看,  $\dot{A}_f$  与  $\dot{A}$  似乎无关, 但这个表达式成立的前提是  $\dot{A}\dot{F}$  的值很大, 其中主要是  $\dot{A}$  很大, 大多数负反馈放大电路都满足深度负反馈的条件。
- (3) 当  $|1+\dot{A}\dot{F}|<1$  时,  $|\dot{A}_f|>|\dot{A}|$ , 电路引入的是正反馈。正反馈虽然使放大倍数提高了, 但稳定性很差, 所以很少单独采用。
- (4) 当  $|1+\dot{A}\dot{F}|=0$  时,  $|\dot{A}_f|\rightarrow\infty$ 。从物理概念上说, 放大倍数不可能无穷大。这时对应的物理现象是, 电路虽然没有输入信号  $\dot{X}_i$ , 但由于存在干扰和噪声, 经放大后仍然有输出信号  $\dot{X}_o$ , 这种现象称为自激振荡。放大电路一旦出现了自激振荡, 自激振荡信号和放大后输出的信号叠加在一起, 无法分辨, 放大电路就不能正常工作了, 这种现象是必须设法避免的。

## 5.4 负反馈对放大电路性能的影响

从上一节的介绍中可知, 引入负反馈之后, 闭环放大倍数小于开环放大倍数。实际上, 负反馈放大电路正是以放大倍数的下降为代价换得其他方面性能的改善。

### 5.4.1 提高放大倍数的稳定性

在放大电路中, 环境温度、电源电压、电路元器件参数发生变化都会引起放大倍数的波动, 这种现象对于放大电路的工作是不利的。引入了负反馈后, 就可以稳定输出电压或输出电流, 也就是放大倍数比较稳定。尤其是在深度负反馈条件下, 只考虑幅值大小时, 有  $A_f=A/(1+AF)\approx 1/F$ , 由于  $A_f$  只与  $F$  有关, 因而  $A_f$  更加稳定。

为了进一步说明放大倍数稳定的程度, 还可以对这一问题进行定量讨论。在中频段范围内, 负反馈放大电路的一般表达式为

$$A_f = \frac{A}{1+AF} \quad (5.4.1)$$

上式对  $A$  求导, 则有

$$\frac{dA_f}{dA} = \frac{1}{(1+AF)^2}$$

即

$$dA_f = \frac{dA}{(1+AF)^2}$$

上式两边同时除以  $A_f$ , 可得

$$\frac{dA_f}{A_f} = \frac{1}{1+AF} \cdot \frac{dA}{A} \quad (5.4.2)$$

上式表明, 引入负反馈后, 闭环放大倍数  $A_f$  的相对变化量只相当于开环放大倍数相



对变化量的  $1/(1+AF)$ , 因而  $A_f$  很稳定。

还应指出, 不同类型的负反馈组态, 放大倍数稳定性的含义是不同的。电压串联负反馈稳定闭环电压放大倍数, 即稳定输出电压。电流并联负反馈稳定闭环电流放大倍数, 即能稳定输出电流, 而输出电压却不一定能够稳定。

### 5.4.2 改善放大电路的非线性失真

由于组成放大电路的半导体器件均具有非线性特性, 例如, BJT 的输入特性是非线性的, 在输入信号较大时, 将引起基极电流波形的失真, 从而使放大电路输出的波形也产生失真。假设放大电路的输出信号和输入信号同相, 输出波形的负半周产生失真, 正半周幅值大, 负半周幅值小, 如图 5.4.1(a) 所示。引入反馈后, 由于反馈网络是线性网络 (通常由电阻组成), 不会引起失真, 故引入反馈后的输出信号与反馈信号也同相, 如图 5.4.1(b) 所示。

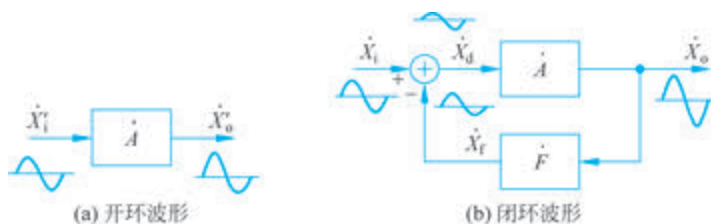


图 5.4.1 负反馈改善非线性失真

在图 5.4.1(a) 开环情况下, 若输入信号为正弦波时输出信号产生非线性失真, 其正半周幅值大于负半周幅值, 则闭环情况下的反馈信号必然产生同样的失真。由于净输入信号等于输入信号与反馈信号之差, 因而其正半周幅值小于负半周幅值, 经过放大电路非线性的校正, 使得输出信号正负半周趋于对称, 近似为正弦波, 即改善了输出波形的非线性失真, 波形如图 5.4.2(b) 所示。

### 5.4.3 扩展放大电路的通频带

前面已经介绍过, 负反馈放大电路可以提高闭环放大倍数的稳定性。因此, 当信号频率变化引起放大倍数变化时, 负反馈同样可以起到稳定作用, 使放大倍数基本保持不变。这样, 当频率变化时, 闭环放大倍数的变化减小, 也就是扩展了通频带。下面定量分析这一问题。

设无反馈时, 基本放大电路在中频段的放大倍数为  $A_m$ , 其上限频率为  $f_H$ , 高频时的放大倍数为

$$\dot{A}_H = \frac{A_m}{1 + j \frac{f}{f_H}} \quad (5.4.3)$$

引入负反馈后, 有

$$\begin{aligned}
 \dot{A}_{\text{Hf}} &= \frac{\dot{A}_{\text{H}}}{1 + \dot{A}_{\text{H}}\dot{F}} = \frac{\frac{A_{\text{m}}}{1 + \text{j}f/f_{\text{H}}}}{1 + \frac{A_{\text{m}}}{1 + \text{j}f/f_{\text{H}}}\dot{F}} = \frac{A_{\text{m}}}{1 + A_{\text{m}}\dot{F} + \text{j}f/f_{\text{H}}} \\
 &= \frac{\frac{A_{\text{m}}}{1 + A_{\text{m}}\dot{F}}}{1 + \text{j}\frac{f}{(1 + A_{\text{m}}\dot{F})f_{\text{H}}}} = \frac{A_{\text{mf}}}{1 + \text{j}\frac{f}{f_{\text{Hf}}}}
 \end{aligned} \quad (5.4.4)$$

式中:  $f_{\text{Hf}}$  为负反馈放大电路的上限频率,  $f_{\text{Hf}} = (1 + A_{\text{m}}\dot{F})f_{\text{H}}$ 。可以看出, 负反馈使放大电路的上限频率提高了  $1 + A_{\text{m}}\dot{F}$  倍。

同理, 可以推出

$$f_{\text{Lf}} = \frac{f_{\text{L}}}{1 + A_{\text{m}}\dot{F}} \quad (5.4.5)$$

式中:  $f_{\text{Lf}}$  为负反馈放大电路的下限频率;  $f_{\text{L}}$  为基本放大电路的下限频率。负反馈使放大电路的下限频率降低为原来的  $1/(1 + A_{\text{m}}\dot{F})$ 。

由上述分析可知, 负反馈放大电路的上限截止频率提高到开环时的  $1 + A_{\text{m}}\dot{F}$  倍, 下限截止频率降低到开环时的  $1/(1 + A_{\text{m}}\dot{F})$ , 从而扩展了通频带。由于通常  $f_{\text{Lf}} \ll f_{\text{Hf}}$ , 因此负反馈放大电路的通频带  $f_{\text{BW}} = f_{\text{Hf}} - f_{\text{Lf}} \approx f_{\text{Hf}}$ , 故通频带近似扩展了  $1 + A_{\text{m}}\dot{F}$  倍。一般而言, 放大电路的增益带宽积为常数。如果没有更换器件, 只是引入负反馈使通频带扩展了  $1 + A_{\text{m}}\dot{F}$  倍, 其放大倍数则要下降为原来的  $1/(1 + A_{\text{m}}\dot{F})$ 。

#### 5.4.4 负反馈对输入电阻和输出电阻的影响

引入负反馈后, 由于在输入回路中反馈信号接入方式的不同和在输出回路中稳定信号的不同, 这必然使负反馈放大电路的输入电阻和输出电阻有不同的改变。

##### 1. 负反馈对输入电阻的影响

负反馈对输入电阻的影响取决于反馈信号在输入端的接入方式。

##### 1) 串联负反馈使输入电阻增大

在图 5.4.2(a) 所示的串联负反馈放大电路的输入回路中, 根据输入电阻的定义可知, 基本放大电路的输入电阻  $R_{\text{i}} = \dot{U}_{\text{d}} / \dot{I}_{\text{i}}$ , 而负反馈放大电路的输入电阻为

$$R_{\text{if}} = \frac{\dot{U}_{\text{i}}}{\dot{I}_{\text{i}}} = \frac{\dot{U}_{\text{d}} + \dot{U}_{\text{f}}}{\dot{I}_{\text{i}}} = \frac{\dot{U}_{\text{d}} + \dot{A}\dot{F}\dot{U}_{\text{d}}}{\dot{I}_{\text{i}}} = (1 + \dot{A}\dot{F}) \frac{\dot{U}_{\text{d}}}{\dot{I}_{\text{i}}}$$

所以, 在中频段, 有

$$R_{\text{if}} = (1 + AF)R_{\text{i}} \quad (5.4.6)$$

可见, 引入串联负反馈后, 输入电阻将增大为原来的  $1 + AF$  倍。

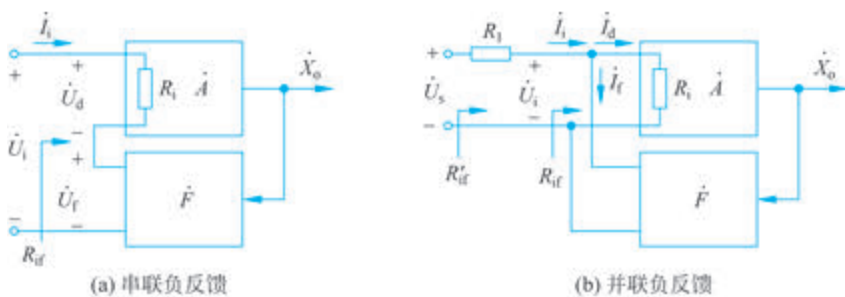


图 5.4.2 负反馈对输入电阻的影响

## 2) 并联负反馈使输入电阻减小

在图 5.4.2(b)所示的并联负反馈放大电路的输入回路中,基本放大电路的输入电阻  $R_i = \dot{U}_i / \dot{I}_d$ ,而负反馈放大电路的输入电阻为

$$R_{if} = \frac{\dot{U}_i}{\dot{I}_i} = \frac{\dot{U}_i}{\dot{I}_d + \dot{I}_f} = \frac{\dot{U}_i}{\dot{I}_d + \dot{A}\dot{F}\dot{I}_d} = \frac{1}{1 + \dot{A}\dot{F}} \frac{\dot{U}_i}{\dot{I}_d} = \frac{1}{1 + \dot{A}\dot{F}} R_i$$

所以,在中频段,有

$$R_{if} = \frac{1}{1 + AF} R_i \quad (5.4.7)$$

可见,引入并联负反馈后,输入电阻将减小为原来的  $1/(1+AF)$ 。

若考虑电阻  $R_1$ ,则整个电路的输入电阻为

$$R'_{if} = R_1 + \frac{1}{1 + AF} R_i \quad (5.4.8)$$

## 2. 负反馈对输出电阻的影响

负反馈对输出电阻的影响取决于反馈网络在输出端的连接方式。

## 1) 电压负反馈使输出电阻减小

电压负反馈能够稳定输出电压,即在负载变化时能够使输出电压保持不变,这就近似为内阻很小的恒压源,因而输出电阻很小。

定量分析输出电阻的框图如图 5.4.3(a)所示,从电路的输出端看,反馈网络与基本放大电路是并联的,  $R_o$  是基本放大电路的输出电阻,  $\dot{A}_o$  是输出端开路时 ( $R_L = \infty$ ) 的开环放大倍数。因为在基本放大电路中已经考虑了反馈网络对放大电路输出端的负载效应,所以不能重复考虑反馈网络的影响,因而不考虑反馈网络对电流  $\dot{I}$  的分流作用。由图 5.4.3(a)可得

$$\dot{U} = \dot{I}R_o + \dot{A}_o\dot{X}_d = \dot{I}R_o - \dot{A}_o\dot{F}\dot{U}$$

从而可得

$$R_{of} = \frac{\dot{U}}{\dot{I}} = \frac{R_o}{1 + \dot{A}_o\dot{F}}$$

在中频段,有

$$R_{of} = \frac{R_o}{1 + A_o F} \quad (5.4.9)$$

可见,加入反馈网络后,不管是串联还是并联,电压负反馈使输出电阻减小到开环时的  $1/(1+A_o F)$ 。

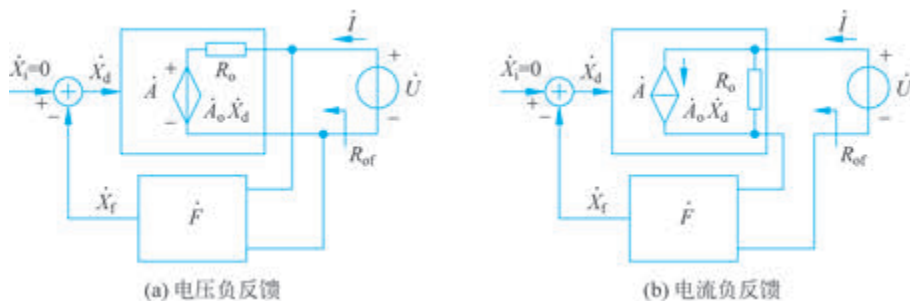


图 5.4.3 负反馈对输出电阻的影响

## 2) 电流负反馈使输出电阻增大

电流负反馈可以使放大电路的输出电流稳定,即在负载变化时能够使输出电流保持不变,这就近似于内阻很大的恒流源,因而输出电阻很大。

如图 5.4.3(b)所示,从电路的输出端看,反馈网络与基本放大电路是串联的,  $R_o$  是基本放大电路的输出电阻,  $\dot{A}_o$  是输出端短路时 ( $R_L=0$ ) 的开环放大倍数。因为在基本放大电路中已经考虑了反馈网络对放大电路输出端的负载效应,所以可认为电流  $\dot{I}$  在反馈网络上的压降为零。由图 5.4.3(b)可得

$$\dot{I} = \dot{U}/R_o + \dot{A}_o \dot{X}_d = \dot{U}/R_o - \dot{A}_o \dot{F} \dot{I}$$

从而可得

$$R_{of} = \frac{\dot{U}}{\dot{I}} = (1 + \dot{A}_o \dot{F}) R_o$$

在中频段,有

$$R_{of} = (1 + A_o F) R_o \quad (5.4.10)$$

可见,加入反馈网络后,不管是串联还是并联,电流负反馈使输出电阻增大到开环时的  $1+A_o F$  倍。

在理想情况下,即  $1+AF$  趋于无穷大时,电压负反馈放大电路的输出电阻趋于零,电流负反馈放大电路的输出电阻趋于无穷大。负反馈对输入电阻、输出电阻的影响,如表 5.4.1 所示,深度负反馈条件下的数值如括号内所示。

表 5.4.1 负反馈放大电路的输入电阻、输出电阻

反馈类型	电压串联	电压并联	电流串联	电流并联
输入电阻	增大( $\infty$ )	减小(0)	增大( $\infty$ )	减小(0)
输出电阻	减小(0)	减小(0)	增大( $\infty$ )	增大( $\infty$ )

必须指出,负反馈对输入电阻和输出电阻的影响只限于影响反馈环内的电阻,如果反馈环外还有电阻,还要考虑这些电阻对电路输入、输出电阻的影响。

综上分析可知,负反馈对电路性能有显著的影响,故可以在电路设计中有意识地引入负反馈,改善电路的性能。引入负反馈时,一般应遵循以下原则:

(1) 需要稳定静态工作点时,应该引入直流负反馈;需要稳定交流量时,应该引入交流负反馈;需要同时稳定直流和交流量时,应该引入交直流负反馈。

(2) 需要稳定输出电压或提高带负载能力,应该引入电压负反馈;需要稳定输出电流,应该引入电流负反馈。

(3) 希望放大电路从信号源中索取的电流小,应该增大电路的输入电阻,引入串联负反馈;希望减小电路的输入电阻,应引入并联负反馈。

(4) 信号源内阻较小时,可看成电压源,引入串联负反馈,可增大电路的输入电阻,提高负反馈的效果;信号源内阻较大时,可看成电流源,引入并联负反馈,可减小电路的输入电阻,提高负反馈的效果。



综合举例1

## 5.5 负反馈放大电路的估算

负反馈放大电路形式多种多样,而且电路中存在反馈环节,这给电路的分析计算造成了一定的困难。对于负反馈放大电路,常用的分析方法有估算法、直接电路分析法、方框图法等。

直接电路分析法就是根据电路的结构直接画出等效电路,通过列电压电流方程的方法对电路进行分析求解,在第2章中稳定静态工作点的共射极放大电路就是这样处理的。很明显,这种方法适合于结构较为简单的电路,复杂电路就不太适用了。

方框图法是先把反馈放大电路分成基本放大电路和反馈网络两部分,再计算基本放大电路的放大倍数、输入电阻、输出电阻等指标,最后应用  $1 + \dot{A}\dot{F}$  倍的关系求出负反馈闭环放大电路的相应性能指标。这种方法物理概念清晰,计算规范,结果准确;但分析过程较为烦琐,不够简明实用。

实际应用中,放大电路的放大倍数一般比较大,因此大多数负反馈放大电路都满足  $|1 + \dot{A}\dot{F}| \gg 1$  的条件,是深度负反馈放大电路,所以通常用深度负反馈放大电路的估算法来进行分析和计算。这种分析方法物理概念清晰、简单明了,具有很强的实用价值,本节将重点介绍这种分析方法。

### 5.5.1 估算的依据

在工程计算中,一般来说,当  $|1 + \dot{A}\dot{F}| \geq 10$  时,就可以认为满足深度负反馈的条件,从而可得闭环放大倍数为

$$\dot{A}_f = \frac{\dot{A}}{1 + \dot{A}\dot{F}} \approx \frac{1}{\dot{F}} \quad (5.5.1)$$

即放大电路的闭环放大倍数等于反馈系数的倒数。

另外,在负反馈放大电路中,有

$$\dot{X}_i = \dot{X}_d + \dot{X}_f = (1 + \dot{A}\dot{F})\dot{X}_d$$

当满足深度负反馈条件时,上式可写成

$$\dot{X}_i \approx \dot{X}_f \quad (5.5.2)$$

式(5.5.1)和式(5.5.2)深刻反映了负反馈放大电路中输入量  $\dot{X}_i$ 、输出量  $\dot{X}_o$ 、反馈量  $\dot{X}_f$  和净输入量  $\dot{X}_d$  之间的关系,是进行深度负反馈放大电路估算时的基本依据。

对于由分立元件组成的深度负反馈放大电路,放大倍数可以依据式(5.5.1)来估算,其步骤是先求反馈系数  $\dot{F}$ ,再求闭环放大倍数  $\dot{A}_f$ ,最后计算闭环电压放大倍数。对于由运放构成的深度负反馈电路,放大倍数可以主要使用式(5.5.2)进行推导估算,其实,式(5.5.2)刚好就是运放“虚短”和“虚断”概念的准确表达,在串联负反馈电路中有  $\dot{U}_i = \dot{U}_f$ ,在并联负反馈电路中有  $\dot{I}_i = \dot{I}_f$ 。当然,式(5.5.1)和式(5.5.2)也可以交叉使用。

输入电阻和输出电阻采用表 5.4.1 所示深度负反馈条件下的数值进行估算。

### 5.5.2 负反馈放大电路的近似估算

#### 1. 电压串联负反馈

由分立元件组成的反馈放大电路如图 5.5.1(a)所示。分析可知,反馈电压为

$$\dot{U}_f = \dot{U}_o \frac{R_{e1}}{R_{e1} + R_f}$$

故反馈系数为

$$\dot{F}_{uu} = \frac{\dot{U}_f}{\dot{U}_o} = \frac{R_{e1}}{R_{e1} + R_f} \quad (5.5.3)$$

因此,闭环电压放大倍数为

$$\dot{A}_{uf} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} \approx \frac{1}{\dot{F}_{uu}} = \frac{R_{e1} + R_f}{R_{e1}} \quad (5.5.4)$$

在计算输入电阻时,为了使其物理概念清晰,将输入电阻分为两部分;从输入信号  $\dot{U}_i$  向后看的电阻,记为  $R_{if}$ ;从基极电阻  $R_{b1}$  向后看的电阻,记为  $R'_{if}$ 。根据上一节的讨论,串联负反馈提高输入电阻,对于深度负反馈,可以认为  $R'_{if} \approx \infty$ ,基极电阻  $R_{b1}$  没有包括在反馈环之内,所以电路的输入电阻  $R_{if} = R_{b1} // R'_{if} \approx R_{b1}$ 。又知,电压负反馈减小输出电阻,深度负反馈下可以认为  $R_{of} \approx 0$ 。

由运放组成的电压串联负反馈电路如图 5.5.1(b)所示。根据运放“虚短”和“虚断”的概念,有  $\dot{U}_i \approx \dot{U}_f$ 。因此,可得



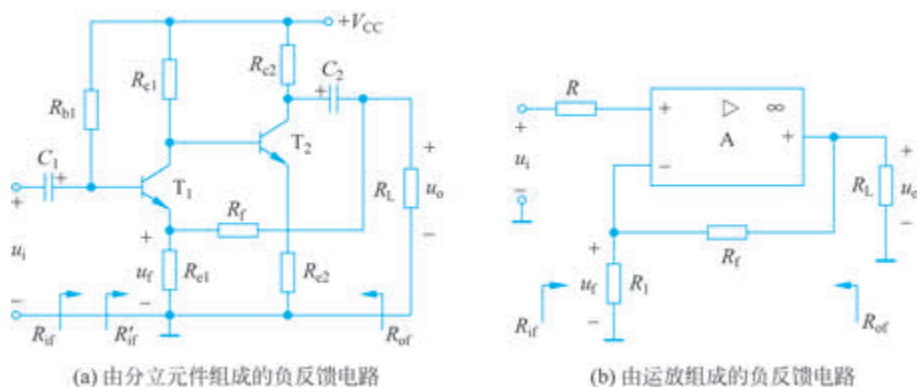


图 5.5.1 电压串联负反馈

$$\dot{A}_{uf} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} \approx \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_f} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_o \frac{R_1}{R_1 + R_f}} = 1 + \frac{R_f}{R_1} \quad (5.5.5)$$

电路的输入电阻  $R_{if} \approx \infty$ , 输出电阻  $R_{of} \approx 0$ 。

在电路分析中往往需要求解闭环电压放大倍数  $\dot{A}_{uf}$ 。由式(5.5.5)可知, 对于电压串联负反馈电路来说, 闭环放大倍数就是闭环电压放大倍数。而其他三种负反馈放大电路则不同, 求出闭环放大倍数后, 还要进行相应的转换计算, 再求出闭环电压放大倍数。

## 2. 电压并联负反馈

由分立元件组成的电压并联负反馈电路如图 5.5.2(a)所示。由上一节可知, 并联负反馈的闭环输入电阻  $R'_{if}$  很小, 因而电流  $\dot{I}_i$  流过  $R'_{if}$  产生的交流电压  $\dot{U}_i$  也很小, 可以近似为 0。因此, 反馈电流为

$$\dot{I}_f = \frac{\dot{U}_i - \dot{U}_o}{R_f} \approx -\frac{\dot{U}_o}{R_f}$$

故反馈系数为

$$\dot{F}_{iu} = \frac{\dot{I}_f}{\dot{U}_o} = -\frac{1}{R_f} \quad (5.5.6)$$

因此, 闭环放大倍数为

$$\dot{A}_{uif} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{I}_i} \approx \frac{1}{\dot{F}_{iu}} = -R_f \quad (5.5.7)$$

闭环电压放大倍数为

$$\dot{A}_{usf} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_s} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{I}_i (R_1 + R'_{if})} \quad (5.5.8)$$

由于并联负反馈的输入电阻  $R'_{if}$  很小,深度负反馈下近似为 0,即  $R'_{if} \approx 0$ ,从而有

$$\dot{A}_{usf} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{I}_i R_1} = -\frac{R_f}{R_1} \quad (5.5.9)$$

电路的输入电阻  $R_{if} = R_1 + R'_{if} \approx R_1$ , 输出电阻  $R_{of} \approx 0$ 。

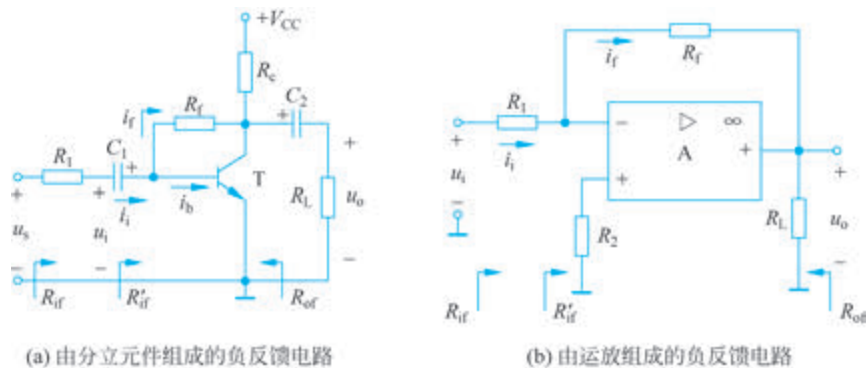


图 5.5.2 电压并联负反馈

由运放组成的电压并联负反馈放大电路如图 5.5.2(b)所示。对运放而言,利用“虚短”和“虚断”可得

$$\begin{aligned} \dot{I}_i &= \dot{I}_f \\ \dot{U}_+ &= \dot{U}_- = 0 \end{aligned}$$

由上式可知,运放反相输入端为“虚地”。因此,闭环电压放大倍数为

$$\dot{A}_{uf} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{-\dot{I}_f R_f}{\dot{I}_i R_1} = -\frac{R_f}{R_1} \quad (5.5.10)$$

因为并联负反馈时  $R'_{if} \approx 0$ ,所以输入电阻  $R_{if} = R_1 + R'_{if} \approx R_1$ , 输出电阻  $R_{of} \approx 0$ 。

### 3. 电流并联负反馈

由分立元件组成的电流并联负反馈放大电路如图 5.5.3(a)所示。由前面分析可知,并联负反馈的闭环输入电阻  $R'_{if}$  很小,因而电流  $\dot{I}_i$  流过  $R'_{if}$  产生的交流电压  $\dot{U}_i$  也很小,可以近似为 0。因此有

$$\dot{I}_f \approx \dot{I}_o \frac{R_{e2}}{R_{e2} + R_f}$$

故反馈系数为

$$\dot{F}_{if} = \frac{\dot{I}_f}{\dot{I}_o} = \frac{R_{e2}}{R_{e2} + R_f} \quad (5.5.11)$$

因此,闭环放大倍数为

$$\dot{A}_{iif} = \frac{\dot{I}_o}{\dot{I}_f} \approx \frac{1}{\dot{F}_{if}} = \frac{R_{e2} + R_f}{R_{e2}} \quad (5.5.12)$$

闭环电压放大倍数为

$$\dot{A}_{\text{usf}} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_s} = \frac{\dot{I}_o R'_L}{\dot{I}_i (R_1 + R'_{\text{if}})} \approx \frac{R_{\text{e2}} + R_f}{R_{\text{e2}}} \cdot \frac{R'_L}{R_1} \quad (5.5.13)$$

式中:  $R'_L = R_{\text{c2}} // R_L$ 。

由前面的分析可知, 并联负反馈时  $R'_{\text{if}} \approx 0$ 。电阻  $R_1$  没有包括在反馈环之内, 且  $R'_{\text{if}} \ll R_1$ , 因此电路的输入电阻  $R_{\text{if}} = R_1 + R'_{\text{if}} \approx R_1$ 。

在计算输出电阻时, 为了使其物理概念清晰, 也将输出电阻分为两部分: 从  $R_L$  以前向前看的电阻, 记为  $R_{\text{of}}$ ; 从集电极电阻  $R_{\text{c2}}$  以前向前看的电阻, 记为  $R'_{\text{of}}$ 。根据上一节讨论, 电流负反馈提高输出电阻  $R'_{\text{of}}$ , 深度负反馈时  $R'_{\text{of}} \approx \infty$ ,  $R_{\text{c2}}$  没有包括在反馈环之内, 所以输出电阻  $R_{\text{of}} = R_{\text{c2}} // R'_{\text{of}} \approx R_{\text{c2}}$ 。

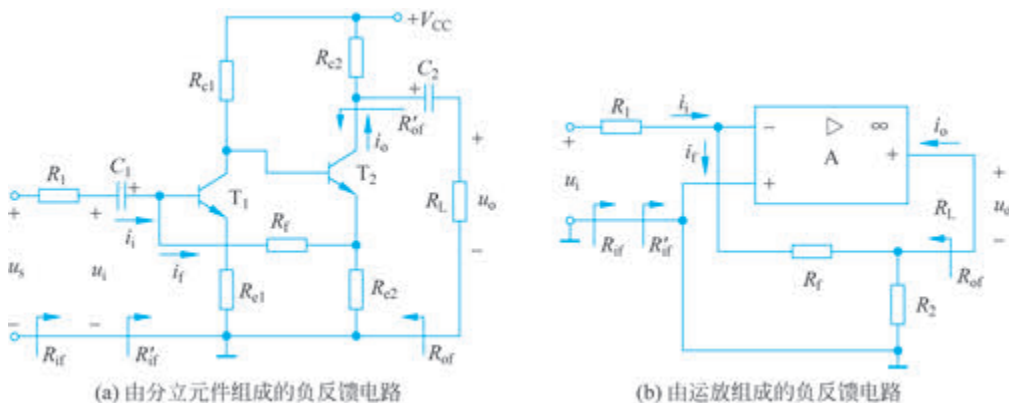


图 5.5.3 电流并联负反馈

由运放组成的电流并联负反馈电路如图 5.5.3(b) 所示。由“虚短”可知,  $\dot{U}_+ = \dot{U}_- = 0$ , 又有

$$\dot{I}_i = \dot{I}_f, \quad \dot{I}_f = \frac{R_2}{R_2 + R_f} \dot{I}_o$$

故电路的闭环电压放大倍数为

$$\dot{A}_{\text{uf}} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{-\dot{I}_o R_L}{\dot{I}_i R_1} = \frac{-\dot{I}_o R_L}{\dot{I}_o \frac{R_2}{R_2 + R_f} R_1} = - \left( 1 + \frac{R_f}{R_2} \right) \frac{R_L}{R_1} \quad (5.5.14)$$

并联负反馈时  $R'_{\text{if}} \approx 0$ , 故电路的输入电阻  $R_{\text{if}} = R_1 + R'_{\text{if}} \approx R_1$ , 输出电阻  $R_{\text{of}} \approx \infty$ 。

#### 4. 电流串联负反馈

由分立元件组成的电流串联负反馈放大电路如图 5.5.4(a) 所示。在电路中, 有  $\dot{U}_f = \dot{I}_o R_e$ , 故反馈系数为

$$\dot{F}_{\text{ui}} = \frac{\dot{U}_f}{\dot{I}_o} = R_e \quad (5.5.15)$$

因此,闭环放大倍数为

$$\dot{A}_{\text{uif}} = \frac{\dot{I}_o}{\dot{U}_i} \approx \frac{1}{\dot{F}_{\text{ui}}} = \frac{1}{R_e} \quad (5.5.16)$$

闭环电压放大倍数为

$$\dot{A}_{\text{uf}} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{-\dot{I}_o(R_c // R_L)}{\dot{U}_i} = -\frac{R_c // R_L}{R_e} \quad (5.5.17)$$

根据第2章的内容可知,该电路的电压放大倍数可以准确求得

$$\dot{A}_{\text{u}} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = -\frac{\beta(R_c // R_L)}{r_{\text{be}} + (1 + \beta)R_e}$$

式中:  $r_{\text{be}} \ll (1 + \beta)R_e$ ,  $\beta$  与  $1 + \beta$  非常接近。因此,上式与式(5.5.17)的结果是近似相同的。

由于并联负反馈时  $R'_{\text{if}} \approx \infty$ , 故输入电阻  $R_{\text{if}} = R_{\text{b1}} // R_{\text{b2}} // R'_{\text{if}} \approx R_{\text{b1}} // R_{\text{b2}}$ ; 由于电流负反馈时  $R'_{\text{of}} \approx \infty$ , 故输出电阻  $R_{\text{of}} = R'_{\text{of}} // R_c = R_c$ 。

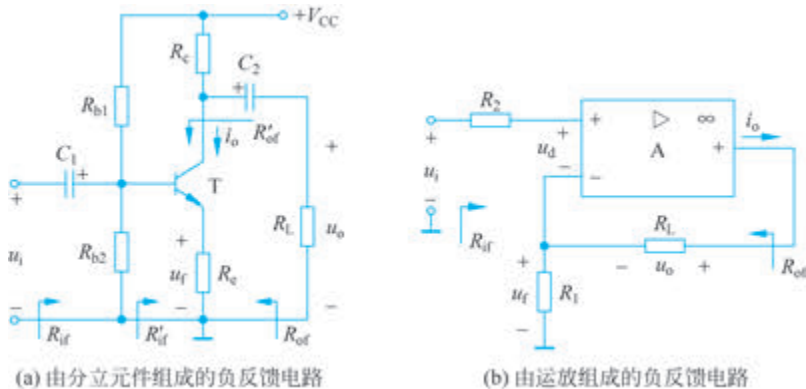


图 5.5.4 电流串联负反馈

由运放组成的电流串联负反馈放大电路如图 5.5.4(b)所示。在电路中,由“虚短”可知,  $\dot{U}_i = \dot{U}_+ = \dot{U}_- = \dot{U}_f$ , 故闭环电压放大倍数为

$$\dot{A}_{\text{uf}} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_f} = \frac{\dot{I}_o R_L}{\dot{I}_o R_1} = \frac{R_L}{R_1} \quad (5.5.18)$$

输入电阻  $R_{\text{if}} \approx \infty$ , 输出电阻  $R_{\text{of}} \approx \infty$ 。

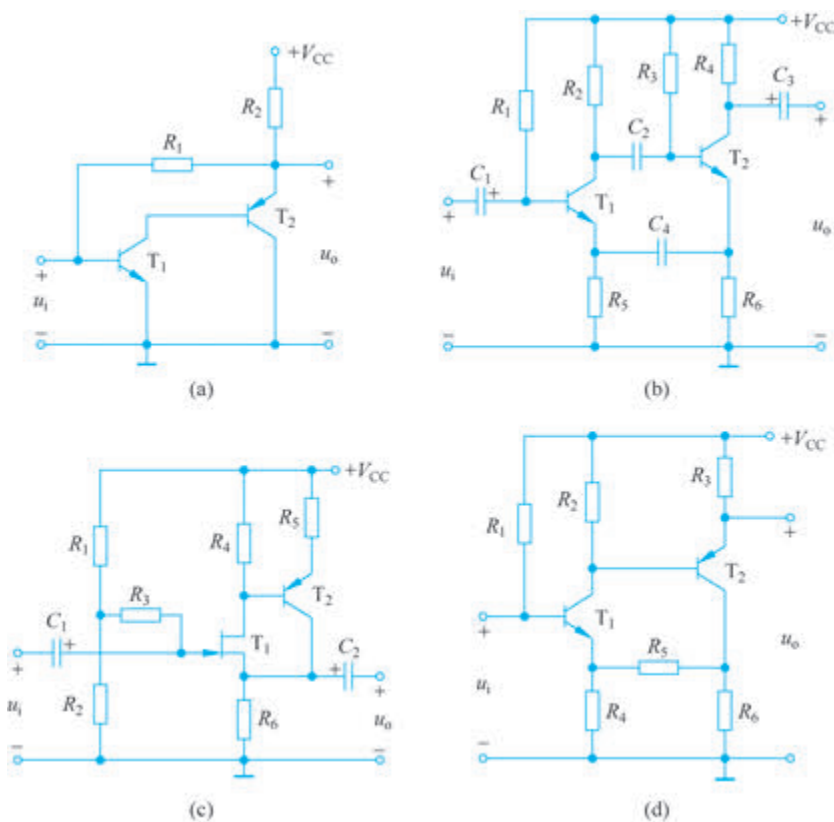


综合举例 2

## 习题

5.1 对于题图 5.1 电路,判定反馈类型。如果是负反馈,指出哪些能够提高输入电阻。哪些能够降低输出电阻? 哪些能够稳定输出电压? 哪些能够稳定输出电流?

5.2 一个电压串联负反馈放大器,在开环工作时,输入信号为 8mV,输出信号为 1.2V。闭环工作时,输入信号为 30mV,输出信号为 1.5V。试求电路的反馈深度和反馈系数。



题图 5.1

5.3 由运放组成的反馈电路如题图 5.3 所示。试判断电路的反馈类型。如果是负反馈,说明其对电路输入电阻和输出电阻以及输出电压和输出电流的影响。

5.4 一个电压串联负反馈放大器,  $\dot{A}_u = 10^3$ ,  $\dot{F}_u = 0.01$ , 求闭环放大倍数  $\dot{A}_{uf}$ 。如果  $|\dot{A}_u|$  下降了 20%, 此时的闭环放大倍数是多少?

5.5 反馈放大电路如题图 5.5 所示。已知  $V_{CC} = 12\text{V}$ ,  $R_1 = 30\text{k}\Omega$ ,  $R_2 = 20\text{k}\Omega$ ,  $R_3 = 360\Omega$ ,  $R_4 = 3\text{k}\Omega$ ,  $R_5 = 1\text{k}\Omega$ ,  $R_6 = 20\text{k}\Omega$ ,  $R_7 = 1\text{k}\Omega$ 。

(1) 指出电路中存在的反馈的类型;

(2) 计算反馈系数;

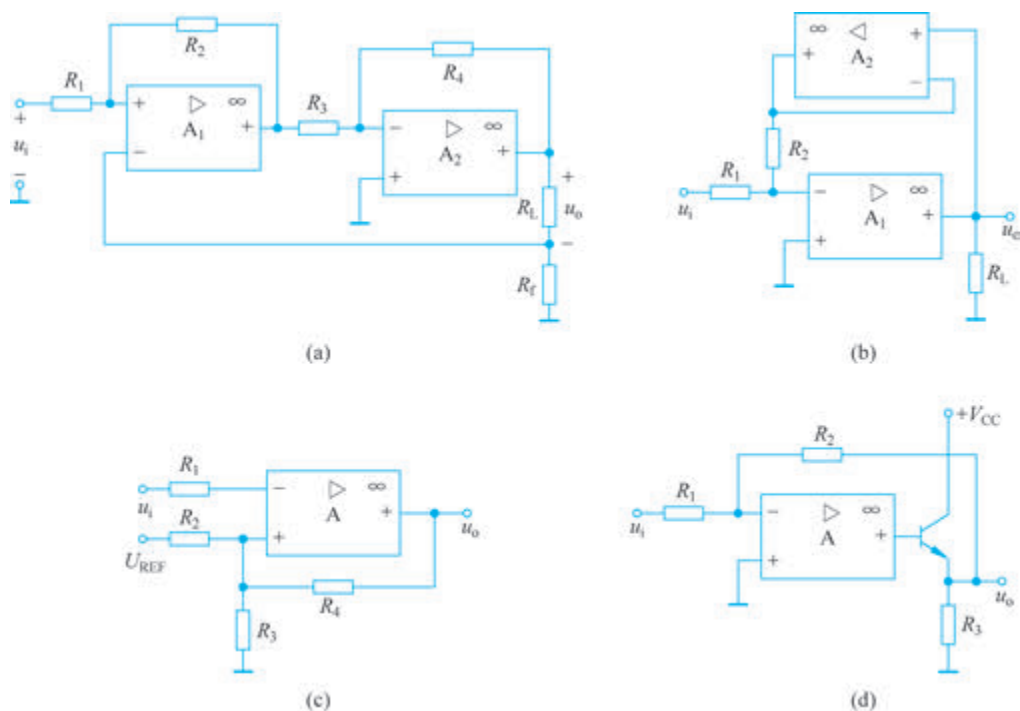
(3) 计算闭环电压放大倍数  $\dot{A}_{uf}$ ;

(4) 计算输入电阻  $R_{if}$  和输出电阻  $R_{of}$ 。

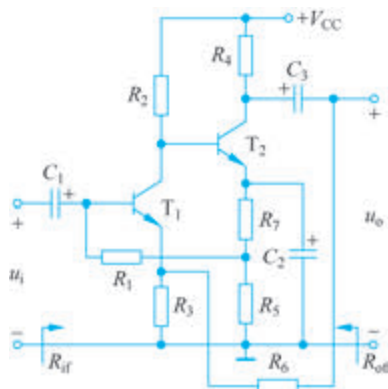
5.6 负反馈放大电路如题图 5.6 所示。

(1) 电阻  $R_f$  引入了什么类型的反馈?

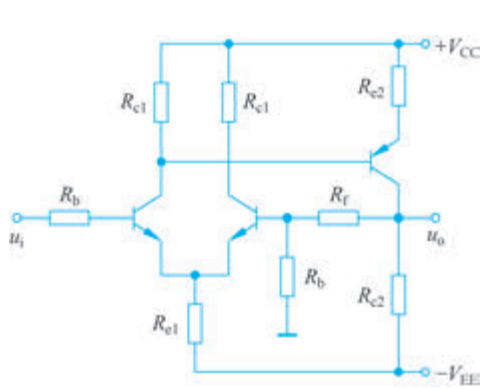
(2) 试求电路的闭环电压放大倍数  $\dot{A}_{uf}$ 。



题图 5.3



题图 5.5



题图 5.6

5.7 负反馈放大电路如题图 5.7 所示, 已知  $V_{CC}=12V$ ,  $R_1=10k\Omega$ ,  $R_2=100k\Omega$ ,  $R_{e1}=110\Omega$ ,  $R_{c1}=12k\Omega$ ,  $R_{c2}=1k\Omega$ ,  $R_{e2}=110\Omega$ ,  $C_1$ 、 $C_2$  和  $C_e$  足够大。

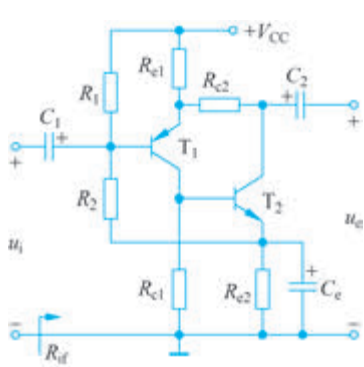
- (1) 判断电路的反馈类型;
- (2) 试求电路的闭环电压放大倍数  $\dot{A}_{uf}$ ;
- (3) 计算电路的输入电阻  $R_{if}$ 。

5.8 电路如题图 5.8 所示。

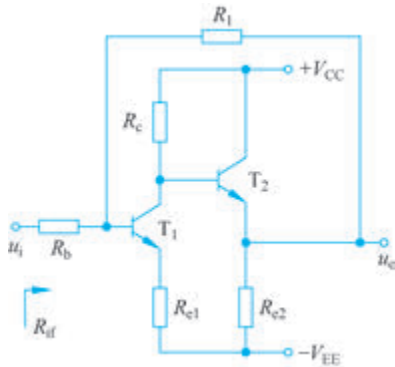
- (1) 判断电路的反馈类型;



- (2) 试求电路的闭环电压放大倍数  $\dot{A}_{uf}$ ；  
 (3) 计算电路的输入电阻  $R_{if}$ 。



题图 5.7

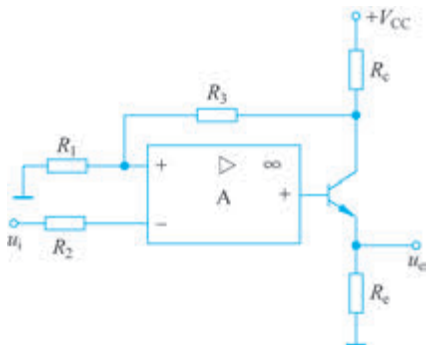


题图 5.8

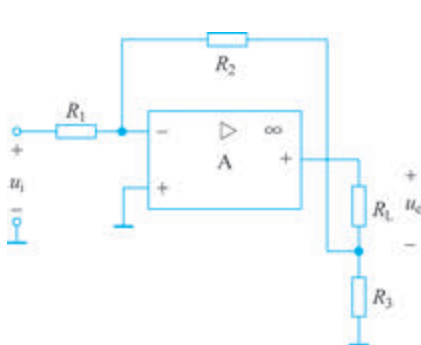
5.9 运放组成的反馈电路如题图 5.9 所示,试判断电路的反馈类型,计算电路的闭环电压放大倍数  $\dot{A}_{uf}$ 。

5.10 负反馈电路如题图 5.10 所示。

- (1) 判断电路的反馈类型；  
 (2) 计算其闭环电压放大倍数  $\dot{A}_{uf} = \dot{U}_o / \dot{U}_i$ ；  
 (3) 估算输入电阻  $R_{if}$  和输出电阻  $R_{of}$ 。



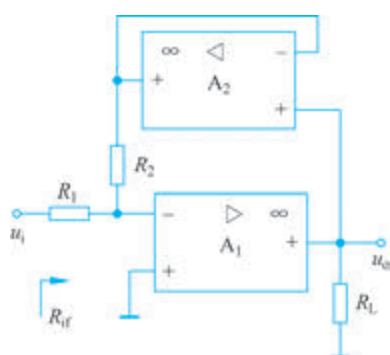
题图 5.9



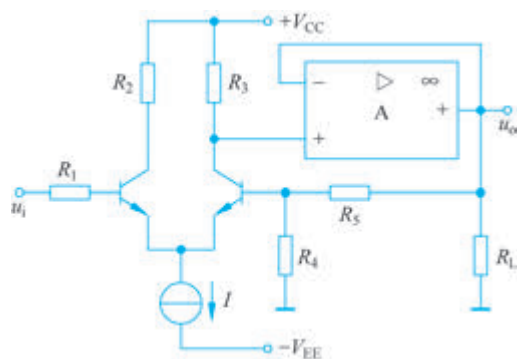
题图 5.10

5.11 运放构成的反馈电路如题图 5.11 所示,  $R_1 = 20\text{k}\Omega$ ,  $R_2 = 60\text{k}\Omega$ ,  $R_L = 10\text{k}\Omega$ , 试估算电路的闭环电压放大倍数  $\dot{A}_{uf}$  和输入电阻  $R_{if}$ 。

5.12 差动放大器和运放组成的电路如题图 5.12 所示。找出电路中的反馈元件；电路采用了什么类型的反馈？估算电路的闭环电压放大倍数  $\dot{A}_{uf}$ 。



题图 5.11



题图 5.12



第 5 章参考答案