

放大电路中的负反馈

反馈在电子电路中得到极为广泛的应用。正反馈应用于各种振荡电路,可产生各种波形的信号(将在第 6 章中介绍);负反馈可用来改善放大电路的性能。前面章节介绍的放大电路虽然能够起到放大信号的作用,但其静态及动态的性能指标会受到环境、温度、电源电压及负载变化等因素的影响,往往不能满足实际应用的要求,因此在放大电路中引入负反馈以改善电路性能十分必要。本章以分立元件构成的放大电路为例介绍反馈的含义、反馈的分类、负反馈的四种类型及深度负反馈的含义。负反馈在集成电路的应用将在集成运算放大器所构成的线性电路应用中介绍。

3.1 反馈

3.1.1 反馈的基本概念

1. 反馈的概念

将放大电路输出回路的信号(电压或电流)的一部分或全部通过某一电路或元件送回输入回路的过程,称为反馈,具有反馈的放大器称为反馈放大器。连接输出与输入,实现将输出信号反送到输入回路的这一电路称为反馈支路。从输出端反送到输入端的信号称为反馈信号。如图 3-1 所示, R_f 为连接输入与输出的元件,并将输出信号反送到输入回路。

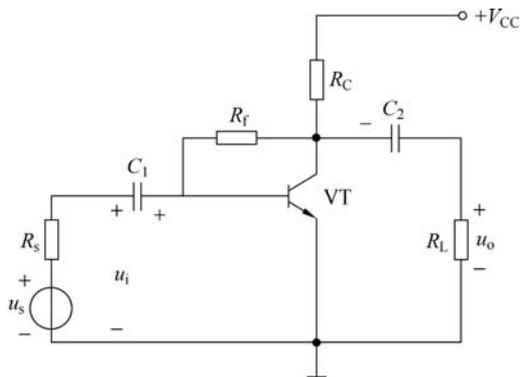


图 3-1 反馈电路

含有反馈网络的放大电路称为反馈放大电路。图 3-2 为反馈放大电路框图,由基本放大器和反馈网络两部分组成。

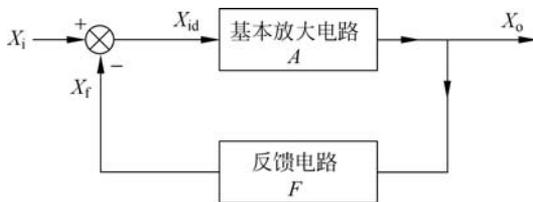


图 3-2 反馈放大电路框图

图 3-2 中 A 表示没有反馈的放大电路(基本放大电路,也称开环放大电路)。 F 表示反馈网络,反馈网络一般由电阻或电阻电容元件组成。放大电路引入反馈后构成闭环放大器。符号 \otimes 代表比较环节。 X_i 、 X_f 、 X_{id} 和 X_o 分别表示电路的输入量、反馈量、净输入量和输出量,它们可以是电压,也可以是电流。 X 若为正弦量,还可以用相量表示。

2. 反馈的极性

反馈的极性分为正反馈和负反馈。如图 3-2 所示,在反馈放大电路中,如果反馈量使净输入量得到增强,称为正反馈;若反馈量使净输入量减弱,则称为负反馈。

正反馈与负反馈的区别在于反馈信号是起增强还是起削弱净输入信号的作用。一般正反馈起增强输入信号的作用,主要用于振荡电路;而负反馈则起削弱原输入信号的作用,主要用于放大电路。

通常采用瞬时极性法判断反馈的极性。具体方法是:先假定输入信号在某一瞬时对地极性为正,并用“+”标示,然后顺着信号的传输方向,逐级推出电路各点的瞬时极性,得出输出信号和反馈信号的瞬时极性,并用“+”或“-”标示,最后判断反馈信号是增强还是减弱输入信号,如果是增强则为正反馈,反之则为负反馈。

现以图 3-3 所示电路为例进行判断。首先假设放大电路的输入端输入信号的瞬时极性为正,如图中“+”号所示,由于共射放大电路输入与输出的倒相关系,所以输出端的输出信号也为正,使反馈信号由输出端流向输入端,在 R_{E1} 上产生反馈电压 u_f ,显然,反馈电压 u_f 在输入回路与输入电压 u_i 共同作用使输入电压 $u_{id} = u_i - u_f$ 比无反馈时减小了,所以是负反馈。

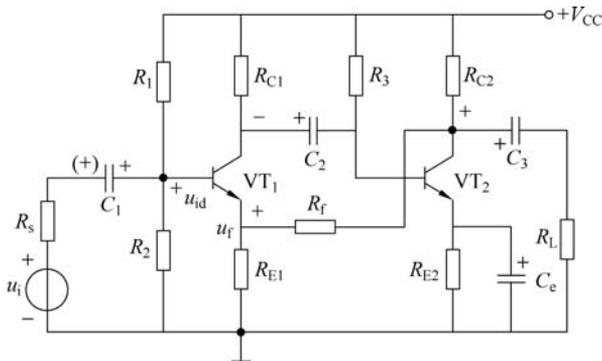


图 3-3 用瞬时极性法判断反馈的极性

图 3-3 中两级放大电路间的反馈为级间反馈,可改善放大电路总的性能指标;每级放大电路的反馈为本级反馈,只调整本级的性能指标。一般在有级间反馈时,只讨论级间反馈。

3. 交流反馈和直流反馈

反馈还有交流和直流之分。若反馈信号是交流量,则称为交流反馈,它影响电路的交流性能(如电压放大倍数、输入电阻和输出电阻等);若反馈信号是直流量,则称为直流反馈,它影响电路的直流性能(如静态工作点);若反馈信号中既有交流量,又有直流量,则反馈对电路的交、直流性能都有影响。可根据反馈元件出现的电流通路进行判断。若出现在交流通路中,则该元件起交流反馈作用,若出现在直流通路中,则起直流反馈作用。

如图 3-4(a)所示,由于反馈支路中串有电容 C_4 ,只有交流信号通过,因此为交流反馈;如图 3-4(b)所示,由于在反馈信号 u_f 两端并联电容 C_4 ,交流信号被旁路,因此为直流反馈;图 3-3 在反馈支路中无电容,因此为交直流反馈。

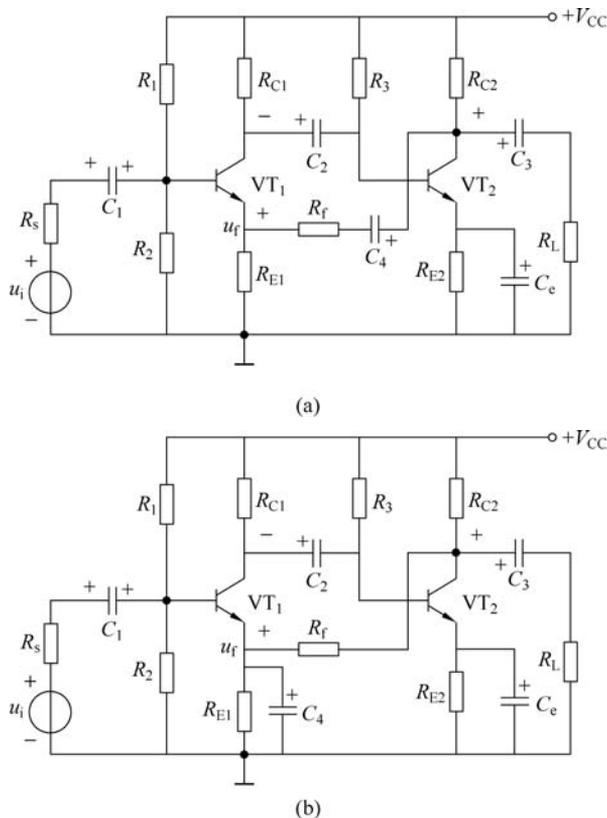


图 3-4 交流反馈和直流反馈

3.1.2 反馈电路的类型

反馈除了可分为正反馈、负反馈、交流及直流反馈外,根据反馈信号在输出端的取样

和在输入端的连接方式,放大电路可以组成四种不同类型的负反馈: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。对于直流反馈与交流正反馈,一般不分类。判断方法如下。



动画: 反馈类型的判断

1. 电压反馈和电流反馈

电压反馈还是电流反馈是按照反馈信号在放大器输出端的取样方式来分类的。若反馈信号取自输出电压,即反馈信号与输出电压成比例,称为电压反馈;若反馈信号取自输出电流,即反馈信号与输出电流成比例,称为电流反馈。常采用负载电阻 R_L 短路法进行判断。若 R_L 短路使输出电压为零,此时若反馈量为零,则为电压反馈;否则为电流反馈。也可根据反馈支路与输出端的接法进行判断,若反馈支路与输出端接在同一节点,则为电压反馈,不接在同一节点则为电流反馈。

如图 3-5 所示,在反馈支路 R_{f2} 中, C_2 接在放大电路输出端,所以为电压反馈;在反馈支路 R_{f1} 中,接在三极管的发射极能取到输出电流,所以为电流反馈。

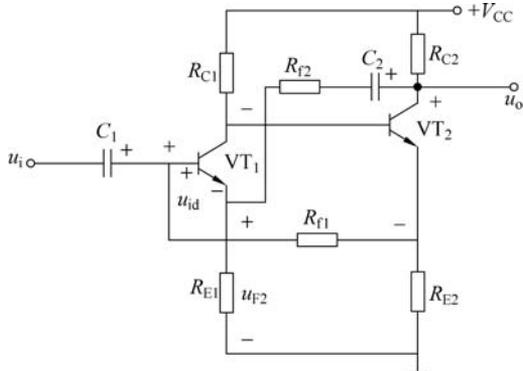


图 3-5 电压反馈和电流反馈

2. 串联反馈和并联反馈

串联反馈和并联反馈是按照反馈信号在放大器输入端的连接方式来分类的。若反馈信号在放大器输入端以电压形式出现,即与输入信号串联,则为串联反馈;若反馈信号在放大器输入端以电流形式出现,即与输入信号并联,则为并联反馈。它们与输出端取样的形式无关。

判断方法:在输入端可以根据反馈信号与输入信号引入的节点不同来判断是串联反馈还是并联反馈。如果反馈信号与输入信号是在输入端的同一个节点引入,反馈信号与输入信号必为电流相加减,所以为并联反馈;如果它们不在同一个节点引入,即为串联反馈。如图 3-5 所示,在反馈支路 R_{f2} 中, C_2 接在放大电路输入回路三极管 VT_1 的发射极,而输入信号接在 VT_1 的基极,两信号接在不同端,所以为串联反馈;反馈支路 R_{f1} 接在放大电路输入回路三极管 VT_1 的基极,与输入信号接在同一节点,所以为并联反馈。

这样,负反馈放大器就有四种基本组态:电压串联负反馈、电压并联负反馈、电流串联负反馈、电流并联负反馈。

【例 3-1】 电路如图 3-6 所示,判断反馈类型。

解 假定输入信号对地瞬时极性为正“+”,经两级共射放大电路反相后, u_o 为正“+”,反馈电压 u_f 也为正“+”。因净输入量 $u_{id} = u_{be} = u_i - u_f$ 减少,故电路为负反馈。

在输入端,输入信号与反馈信号分别加在三极管 b、e 两端,故为串联反馈。在输出端,若将负载电阻处短路,则输出信号通地,反馈信号随之消失,故为电压反馈。

综上所述,该电路为电压串联负反馈。

【例 3-2】 电路如图 3-1 所示,判断反馈类型。

解 假定输入信号对地瞬时极性为正“+”,经共射放大电路倒相后输出信号 u_o 为负“-”,反馈电流 i_f 为正“+”,因净输入量 $i_{id} = i_i - i_f$ 减少,故电路为负反馈。

在输出端,由于反馈信号接在输出端,取自输出电压,故为电压反馈;在输入端,由于输入信号与反馈信号均加在三极管 b 端,故为并联反馈。因此该电路为电压并联负反馈。

【例 3-3】 如图 3-7 所示,判断反馈类型。

解 假定输入信号对地瞬时极性为正“+”,电阻 R_E 上的电压也为正“+”,净输入信号 u_{BE} 减小,因此电路为负反馈。

由于反馈信号取自发射极电阻 R_E 的电压,并没有接在输出端,或将输出端接的 R_L 短接,反馈信号依然存在,因此为电流反馈;在输入端由于输入信号与反馈信号分别接在 B、E 两端,为不同节点,故为串联反馈。综上所述,该电路为电流串联负反馈。

如图 3-5 所示电路中反馈支路 R_{f1} 对应的反馈电流并联负反馈,读者可按上述方法进行分析。

3.2 负反馈对放大器性能的影响

3.2.1 负反馈对电路的影响

1. 负反馈放大电路中的物理量与基本关系

图 3-8 所示为负反馈放大器框图,按图中各物理量极性和传输方向,可得放大器的开环增益、反馈系数和净输入量分别为

$$A = \frac{x_o}{x_{id}} \quad (3-1)$$

$$F = \frac{x_f}{x_o} \quad (3-2)$$

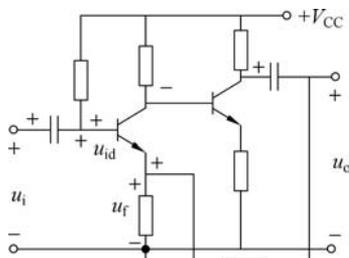


图 3-6 例 3-1 图



动画: 瞬时极性法判别反馈

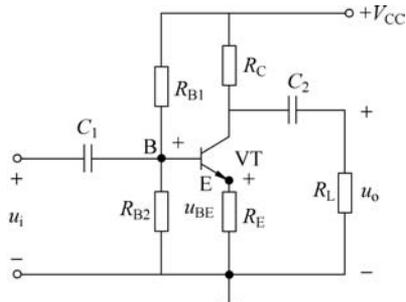


图 3-7 例 3-3 图



仿真: 多级放大电路

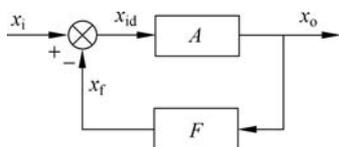


图 3-8 负反馈放大器框图

$$x_{id} = x_i - x_f \quad (3-3)$$

由此可得放大电路闭环电压放大倍数为

$$A_f = \frac{x_o}{x_i} = \frac{x_o}{x_{id} + x_f} = \frac{\frac{x_o}{x_{id}}}{1 + \frac{x_f}{x_o} \times \frac{x_o}{x_{id}}} = \frac{A}{1 + AF} \quad (3-4)$$

式(3-4)表明放大电路引入负反馈后,闭环放大倍数 A_f 减小到开环放大倍数 A 的 $\frac{1}{1+AF}$, 式中 $1+AF$ 称为反馈深度,其值越大,负反馈越深。工程中,通常把 $(1+AF) \gg 1$ 时的反馈称为深度负反馈,此时

$$A_f = \frac{A}{1 + AF} \approx \frac{A}{AF} = \frac{1}{F} \quad (3-5)$$

式(3-5)中的 AF 也常称为环路增益。

2. 负反馈对放大器性能的影响

放大器引入负反馈后,放大倍数有所下降,但其他性能却得到改善。

(1) 提高电路及其增益的稳定性

直流负反馈可以稳定直流量,起到稳定静态工作点的作用;交流负反馈可以改善交流指标。无反馈时,由于负载和环境温度的变化、电源电压的波动以及元器件老化等原因,放大电路的放大倍数也将随之变化。引入负反馈后,由式(3-5)可见,电路的闭环增益仅取决于反馈系数 F ,也即电路参数,而与外界因素的变化无关,因此可以提高放大倍数的稳定性。可以证明,引入负反馈后,放大倍数下降了 $(1+AF)$ 倍,但放大倍数的稳定性却提高了 $(1+AF)$ 倍。

假设由于某种原因,放大器增益加大(输入信号不变),使输出信号也加大,从而使反馈信号加大。由于负反馈的原因,使净输入信号减少。从而抑制了输出信号的加大,实际上是使增益保持稳定。电压负反馈稳定输出电压,电流负反馈稳定输出电流。

(2) 减小非线性失真

由于三极管、场效应管等元件的非线性,会造成输出信号的非线性失真,引入负反馈后可以减小这种非线性失真,其原理如图 3-9 所示。

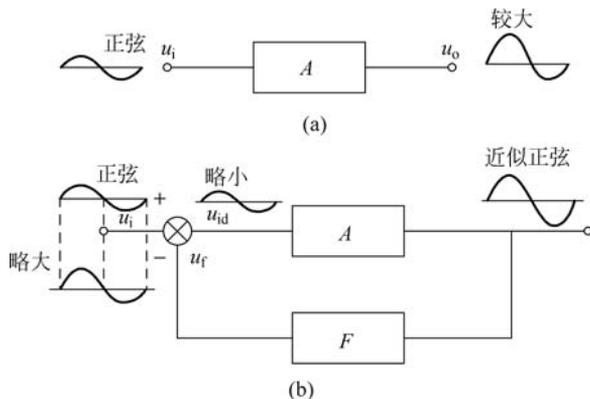


图 3-9 负反馈减小非线性失真

设输入信号为正弦波,无反馈时,放大电路的输出信号产生了正半周幅度比负半周幅度大的波形失真;引入负反馈后,反馈信号也为正半周幅度略大于负半周幅度的失真波形。由于 $u_{id}=u_i-u_f$,因此 u_{id} 波形变为正半周幅度略小于负半周幅度的波形。即通过负反馈使净输入信号产生预失真,这种预失真正好补偿放大电路的非线性失真,使输出波形得到改善。

必须指出,负反馈只能减小放大电路内部引起的非线性失真,对于信号本身固有的失真则无能为力。此外,负反馈只能减小而不能完全消除非线性失真。

(3) 改善了放大电路的频率响应

由于电路中电抗元件的存在,如耦合电容、旁路电容,以及三极管本身的结电容等,放大器的放大倍数会随频率发生变化。实验证明,放大电路在高频区和低频区的电压放大倍数比中频区低。当输入等幅不同频的信号时,高、低频段的输出信号比中频段的小。因此,反馈信号也小,所以高、低频段的放大倍数减小程度比中频段的小,类似于频率补偿作用。引入负反馈后,放大电路的幅频特性变得比较平坦,相当于扩展了通频带。

(4) 改变输入电阻和输出电阻

根据不同的反馈类型,负反馈对放大器的输入电阻、输出电阻有不同的影响。

负反馈对输入电阻的影响取决于反馈信号在输入端的连接形式。在串联负反馈电路中,反馈信号与输入信号串联,反馈信号电压抵消了输入信号电压,导致信号源提供的电流减少,从而引起输入电阻增大,且是无负反馈时的输入电阻的 $(1+AF)$ 倍。

而在并联负反馈电路中,反馈信号电流对输入信号电流进行分流,导致信号源提供的电流增大,从而使输入电阻减小,且是无反馈时的输入电阻的 $\left(\frac{1}{1+AF}\right)$ 倍。

负反馈对输出电阻的影响取决于反馈信号在输出端的取样方式。因电压负反馈可稳定输出电压,提高了输出端带负载的能力,即电压负反馈使输出电阻降低,且是无负反馈时的输出电阻的 $\left(\frac{1}{1+AF}\right)$ 倍。

因电流负反馈可稳定输出电流,具有恒流特性,电流负反馈使输出电阻变大,且是无反馈时的输出电阻的 $(1+AF)$ 倍。

综上所述,可归纳出各种反馈类型、定义、判别方法和对放大电路的影响,如表 3-1 所示。

表 3-1 放大电路中的反馈类型、定义、判别方法和对放大电路的影响

序号	反馈类型	定义	判别方法	对放大电路的影响
1	正反馈	反馈信号使净输入信号加强	反馈信号与输入信号作用于同一个节点时,瞬时极性相同;作用于不同节点时,瞬时极性相反	使放大倍数增大,电路工作不稳定
	负反馈	反馈信号使净输入信号减弱	反馈信号与输入信号作用于同一个节点时,瞬时极性相反;作用于不同节点时,瞬时极性相同	使放大倍数减小,且改善放大电路的性能

续表

序号	反馈类型	定义	判别方法	对放大电路的影响
2	直流负反馈	反馈信号为直流信号	反馈信号两端并联电容	能稳定静态工作点
	交流负反馈	反馈信号为交流信号	反馈支路串联电容	能改善放大电路的性能
3	电压负反馈	反馈信号从输出电压取样,即与输出电压成正比	反馈信号通过元件连线从输出电压端取出,或使负载短路,反馈信号消失	能稳定输出电压,减小输出电阻
	电流负反馈	反馈信号从输出电流取样,即与输出电流成正比	反馈信号与输出电压无关,或使负载短路,反馈信号依然存在	能稳定输出电流,增大输出电阻
4	串联负反馈	反馈信号与输入信号在输入端以串联形式出现	输入信号与反馈信号在不同节点引入	增大输入电阻
	并联负反馈	反馈信号与输入信号在输入端以并联形式出现	输入信号与反馈信号在同节点引入	减小输入电阻

3.2.2 深度负反馈的分析

1. 深度负反馈的特点

当电路满足深度负反馈的条件,即 $1+AF \gg 1$ (一般取 10 以上) 时,负反馈放大电路的一般表达式为

$$A_f = \frac{x_o}{x_i} = \frac{x_o}{x_{id} + x_f} = \frac{Ax_{id}}{x_{id} + AFx_{id}} = \frac{A}{1 + AF} = \frac{1}{F}$$

则

$$\frac{x_o}{x_i} = \frac{x_o}{x_f} \quad (3-6)$$

即

$$x_i = x_f \quad (3-7)$$

式(3-7)表明,在深度负反馈条件下,反馈信号 x_f 与外加输入信号 x_i 近似相等,则净输入信号 $x_{id} = 0$ 。对于串联负反馈, $u_i = u_f, u_{id} = 0$; 并联负反馈, $i_i = i_f, i_{id} = 0$ 。

在深度负反馈情况下,由负反馈对输入输出电阻的影响可知,串联负反馈的输入电阻 $R_{if} \rightarrow \infty$, 并联负反馈的输入电阻 $R_{if} \rightarrow 0$, 电压负反馈的输出电阻 $R_{of} \rightarrow 0$, 电流负反馈的输出电阻 $R_{of} \rightarrow \infty$ 。

2. 深度负反馈放大电路的估算

(1) 电压串联负反馈

如图 3-10 所示是电压串联负反馈电路,在深度负反馈条件下,根据电路分压有

$$u_f = \frac{R_{E1}}{R_{E1} + R_f} u_o$$

根据 $u_i = u_f$, 得电路电压放大倍数

$$A_{uf} = \frac{u_o}{u_i} = \frac{u_o}{u_f} = \frac{R_f + R_{E1}}{R_{E1}} = 1 + \frac{R_f}{R_{E1}} \quad (3-8)$$

式(3-8)表明,在深度负反馈条件下,电压串联负反馈电路的电压放大倍数只取决于反馈电路的电阻值,与放大电路元件及参数无关,电路性能指标非常稳定。

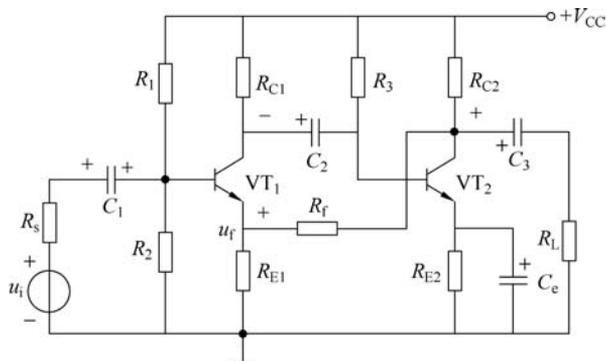


图 3-10 电压串联负反馈电路

(2) 电压并联负反馈

如图 3-11 所示, R_f 跨接在放大管的基极与集电极之间,从而交直流电压并联负反馈。该反馈使输入电阻减小,使输出电阻也减小。

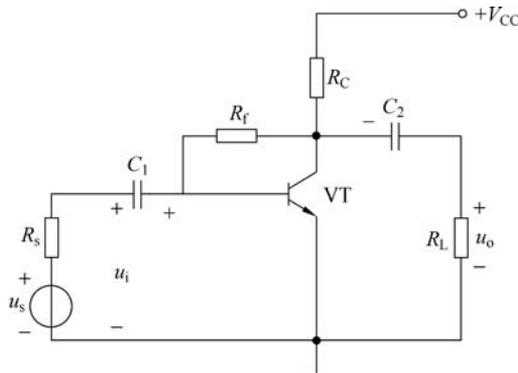


图 3-11 电压并联负反馈电路

由于一般 $u_o \gg u_{be}$, 因此有

$$i_f = -\frac{u_o}{R_f}$$

又由于并联负反馈使输入电阻 R_i 很小, 故有 $R_s \gg R_i$, 则有

$$i_i = \frac{u_s}{R_s + R_i} \approx \frac{u_s}{R_s}$$

由于是深度负反馈, 故有 $i_f = i_i$, 则有

$$A_{uf} = \frac{u_o}{u_s} = -\frac{R_f}{R_s} \quad (3-9)$$

本章小结

反馈是通过反馈支路将输出信号的全部或部分输送到输入回路,与外加输入信号相作用决定加在放大器上的净输入信号,从而控制输出。反馈的目的是改善放大电路的某些性能。使净输入信号加强,为正反馈;反之则为负反馈。它们可用瞬时极性法来判别。在放大电路中广泛采用的是负反馈电路。

反馈可分为正反馈和负反馈。正反馈可使放大倍数增大,但不能改善放大电路其他性能,还可能引起不稳定,故放大电路一般不引入正反馈。负反馈可使放大倍数减小,从而改善放大电路性能,如稳定放大倍数,展宽通频带,减小非线性失真,改变输入、输出电阻等。放大电路一般引入负反馈。正负反馈的判别方法是采用瞬时极性法。

直流反馈和交流反馈。直流反馈可稳定静态工作点,交流负反馈可改善放大电路的交流指标。交、直流反馈判别可根据反馈支路中有无电容及电容的位置决定。

串联反馈和并联反馈。串联反馈的反馈信号与输入信号在输入回路以电压形式相比较,以调整净输入电压。并联反馈的反馈信号与输入信号在输入回路以电流形式相比较,以调整净输入电流。串、并联反馈的判别方法可根据电路连接情况而定。反馈信号加到信号输入端的是并联反馈,加到非信号输入端的是串联反馈。串联负反馈可提高放大电路的输入电阻,要求信号源内阻越小越好。并联负反馈可降低放大电路输入电阻,要求信号源内阻越大越好。

电压反馈和电流反馈。反馈信号取自输出电压,与输出电压成正比的是电压反馈。反馈信号取自输出电流,与输出电流成正比的是电流反馈。判别方法:将负载短接,反馈信号依然存在的是电流反馈,反之是电压反馈。电压负反馈可稳定输出电压,降低放大电路输出电阻。电流负反馈可稳定输出电流,提高放大电路的输出电阻。

负反馈在放大电路中经常采用,虽然它会降低放大电路的放大能力,但它可以改善放大电路的其他性能。负反馈不同的组态的判断及其特点应重点掌握。

本章能力模块

通过本章的学习及典型习题练习,学生应理解反馈的含义,掌握正负反馈的判别、负反馈的类型判别方法及负反馈对放大电路的影响,能判别单级及多级负反馈放大电路。

掌握负反馈放大电路的实践操作能力。能按要求测试负反馈放大电路的静态工作点及应用毫伏表、示波器等电子仪器测试、观察动态指标,如放大倍数、输入电阻、输出电阻及频带宽度,并与开环放大电路的相应指标比较,进一步理解负反馈对放大电路的影响。

操作上可以按图正确接线;能分析排除一般性故障;能正确读取实验数据;能对实验数据进行分析处理并得出正确结论等。

本章建议做的实验如下。

(1) 两级阻容负反馈放大电路实验。观察电路板的构成,反馈支路的位置及连接。