

第 6 章 负反馈技术

反馈在电子电路中应用非常广泛,工程应用中的放大电路往往需要引入负反馈来改善放大电路的各项性能。引入负反馈后,可以改善放大电路的输入电阻和输出电阻、稳定放大倍数、展宽频带等,因此,几乎所有实用放大电路都是带反馈的电路。本章通过引入反馈的概念,归纳出反馈的一般表达式,并介绍反馈放大电路的四种基本组态,主要讨论负反馈对放大电路性能的改善作用和负反馈电路的一般分析方法,并对负反馈电路的自激现象和校正措施进行介绍。

6.1 概 述

将放大电路的输出信号 $X_o(s)$ (电压或电流)的一部分或全部,通过一定形式的反馈网络 $F(s)$ 取样后,再以一定方式回送到放大电路的输入端,与输入量混合,一起控制放大电路的过程,称为反馈。带有反馈的放大器称为反馈放大器。

反馈放大器的基本组成方框图如图 6-1 所示,图中基本放大器和反馈网络构成一个反馈环路, $X_i(s)$ 代表外加的输入信号, $X_o(s)$ 表示输出信号, $X_f(s)$ 表示输出信号通过反馈网络取样回送到输入端的信号, $X_d(s)$ 表示由输入信号与反馈信号求和后得到的净输入信号。

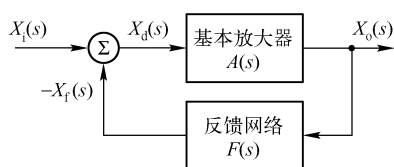


图 6-1 反馈放大器的基本组成方框图

反馈的类型很多,一般可以按照反馈的极性不同,分为正反馈和负反馈;也可以根据反馈信号本身的交、直流性质,分为交流反馈和直流反馈等;对于多级放大电路,还可以划分为局部反馈和级间反馈等。

1. 正反馈和负反馈

在放大电路中,如果引入的反馈信号增强了外加输入信号的作用,从而使放大电路的放大倍数得到提高,这样的反馈称为正反馈;反之,如果引入的反馈信号减弱了外加输入信号的作用,使放大电路的放大倍数降低,就称为负反馈。

特别应注意的是,不论放大电路引入了何种极性的反馈,放大电路本身的开环放大倍数不会发生变化。所谓放大倍数的增大或减小是指在保持外加输入信号 $X_i(s)$ 不变的条件下,输出信号 $X_o(s)$ 相应的增大或减小。

在实际应用中,一般可以通过瞬时极性法来判断反馈的极性:设在放大器的输入端加入某一极性的瞬时信号(一般指正极性瞬时电压),然后沿反馈环路逐级推出电路中其他相关各点的瞬时信号极性,直至判断反馈到输入端信号的瞬时极性,最后进行比较;如果反馈的效果是增强了输入信号的作用,则为正反馈,否则为负反馈。

【例 6-1】 如图 6-2 所示为两级直接耦合电路,讨论 VT_3 的基极 B_3 分别接 C_2 和 C_1 接点时的反馈极性。

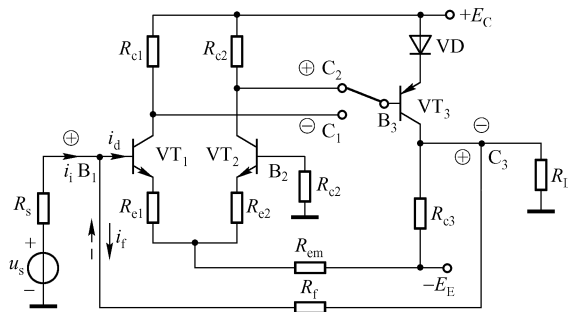


图 6-2 例 1 的电路

解: (1) 当 B_3 接 C_2 时, 设加在 VT_1 的 B_1 极上的输入电压的瞬时极性为“+”(用 \oplus 表示), 同时, 电流 i_i 的流向如图 6-2 所示。则此时 VT_2 集电极 (C_2 点) 输出的电压极性应为“+”, 而 VT_3 集电极 (C_3 点) 输出电压的瞬时极性与 C_2 点的相反, 即应为“-”(用 \ominus 表示), 和输入电压的极性相反, 表示反馈电阻 R_f 两端的电位差增加, 反馈电流 i_f 的流向与假设的流向相同 (i_f 的流向用实线箭头表示), 从而减弱了外加输入电流的作用, 即净输入电流信号 $i_d = i_i - i_f$ 将减小, 故为负反馈。

(2) 当 B_3 接 C_1 时, 同样设加在 VT_1 的 B_1 极上的输入电压的瞬时极性为上“+”, 输入端口电流的流向与上相同, 由于 VT_1 集电极 (C_1 点) 输出电压与基极输入电压极性相反, 所以 C_1 点的电压瞬时极性为“-”, 故 VT_3 集电极 (C_3 点) 的输出电压为“+”, 即 VT_3 的输出电压的瞬时极性与输入电压极性相同, 表示反馈电阻 R_f 两端的电位差反向增加, 则 i_f 与假设的电流流向相反 (i_f 的流向用虚线箭头表示), 表示引入的反馈信号增强了外加输入电流的作用, 即净输入电流信号 $i_d = i_i + i_f$, 因此为正反馈。

2. 直流反馈和交流反馈

放大电路中通常存在交、直流两种信号, 如果反馈信号中只包含直流成分, 则称为直流反馈; 如果反馈信号中只含有交流成分, 则称为交流反馈。

3. 局部反馈和级间反馈

在多级放大电路中, 通常把每级放大电路自身的反馈称为局部反馈或本级反馈, 而把多级放大电路的末级向输入级回送的反馈称为级间反馈或主反馈。

在如图 6-2 所示的电路中, 电阻 R_f 将输出电压 u_o 以电流 i_f 的形式反馈到输入回路中 VT_1 的基极, 因此构成了级间反馈; 而电阻 R_{e1} 和 R_{e2} 在第一级电路中对差模信号形成负反馈, 为局部反馈。另外, R_{cm} 也构成第一级电路对共模信号的局部反馈。

6.2 反馈放大器的单环理想模型

6.2.1 单环放大器的理想模型

反馈放大器是一个闭合系统 (或称反馈环路), 由基本放大电路和反馈网络构成。我们把只含有一个反馈环路的放大电路, 称为单环反馈放大电路, 用一个单环模型来表示其基本组成

方框图,如图 6-3 所示。

图 6-3 中的输入信号 $X_i(s)$ 、净输入信号 $X_d(s)$ 、输出信号 $X_o(s)$ 和反馈信号 $X_f(s)$ 可以是电压量,也可以是电流量。图中,上面一个方框代表基本放大电路,在无反馈时放大电路的增益用 $A(s)$ 表示,通常称为开环增益;下面一个方框表示反馈网络,其反馈系数也称为反馈传输函数,用 $F(s)$ 表示。

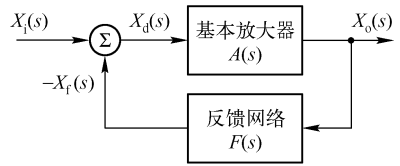


图 6-3 反馈放大器的单环理想模型

在单环理想反馈放大器的模型中,信号传输应满足**单向化条件**:

① 信号在基本放大电路中为正向传递,即基本放大电路只能将输入信号 $X_d(s)$ 正向传送到输出端,不会将输出信号反向传送到输入端。

② 在反馈网络中为反向传递,即反馈网络只能将输出信号反向传送到输入端,不会将输入信号正向传送到输出端,即信号只能按图 6-3 中的箭头方向流动。

利用反馈放大器的理想模型,外加输入信号 $X_i(s)$ 与反馈信号 $-X_f(s)$ 经过求和后得到净输入信号 $X_d(s)$,再送到基本放大电路,且有 $X_d(s) = X_i(s) - X_f(s)$ 。根据图 6-3 所示反馈放大器的理想单环模型,可定义以下参数

$$A(s) = X_o(s) / X_d(s) \quad (6-1)$$

表示反馈放大电路在无反馈时的放大倍数,称为开环增益或开环放大倍数。

$$F(s) = X_f(s) / X_o(s) \quad (6-2)$$

表示反馈网络的反馈系数(传输函数)。

$$A_f(s) = X_o(s) / X_i(s) \quad (6-3)$$

表示反馈放大电路引入反馈后,输出信号与外加输入信号之间的放大倍数,称为闭环增益或闭环放大倍数。

6.2.2 基本反馈方程

根据前面几个定义式,可以得到以下关系:

$$\text{由式(6-1)可得} \quad X_o(s) = A(s) X_d(s) \quad (6-4)$$

根据式(6-2),可将反馈信号表示为

$$X_f(s) = F(s) X_o(s) = A(s) F(s) X_d(s) \quad (6-5)$$

由 $X_d(s) = X_i(s) - X_f(s)$,可得 $X_i(s) = X_d(s) + X_f(s)$,将其代入到式(6-3)中,可以得到分析理想单环反馈电路的重要公式

$$A_f(s) = \frac{X_o(s)}{X_i(s)} = \frac{X_o(s)}{X_d(s) + X_f(s)} = \frac{A(s) X_d(s)}{X_d(s) + F(s) A(s) X_d(s)} = \frac{A(s)}{1 + A(s) F(s)} \quad (6-6)$$

式(6-6)表明,引入负反馈后,放大电路的放大倍数是无反馈时放大倍数的 $\frac{1}{1 + A(s) F(s)}$ 倍。

在式(6-6)中,将 $A(s) F(s) = T(s)$ 定义为环路增益,表示在反馈放大电路中,信号沿着放大器 and 反馈网络组成的环路传递一周以后所得到的增益函数。于是可将闭环放大倍数用环路增益表示为

$$A_f(s) = \frac{A(s)}{1 + T(s)} \quad (6-7)$$

另外,式(6-6)的分母 $1 + A(s) F(s) = B(s)$ 也称为反馈深度。反馈深度是一个十分重要的参数,表示引入反馈后放大电路的放大倍数与无反馈时相比所变化的倍数,可以看到,引入

负反馈后,闭环增益降低为无负反馈时的 $1/B$ 倍。

在式(6-6)所示的基本反馈方程 $A_r(s) = \frac{A(s)}{1 + A(s)F(s)}$ 中,若 $|1 + A(s)F(s)| > 1$, 则 $A_r(s) < A(s)$, 说明引入反馈后使放大倍数比原来减小了,这种反馈就是前面介绍的负反馈;反之,若 $|1 + A(s)F(s)| < 1$, 则 $A_r(s) > A(s)$, 表明引入反馈后使放大倍数比原来增大了,这种反馈即是正反馈。

一般把反馈深度 $1 + A(s)F(s) \gg 1$ 时的负反馈,称为深度负反馈,此时

$$A_r(s) = \frac{A(s)}{1 + A(s)F(s)} \approx \frac{A(s)}{A(s)F(s)} = \frac{1}{F(s)} \quad (6-8)$$

可见,在深度负反馈条件下,闭环放大倍数 $A_r(s)$ 为反馈系数 $F(s)$ 的倒数,而与基本放大电路的放大倍数 $A(s)$ 无关。由于在深度负反馈放大电路中,闭环放大倍数主要取决于反馈网络的反馈系数,因此,只要反馈系数 $F(s)$ 一定,即使外界温度变化等因素使开环增益 $A(s)$ 发生改变,而电路的闭环增益却可以几乎保持不变。所以,集成电路放大器常常引入深度负反馈,以提高电路工作的稳定性。

6.2.3 四种基本负反馈组态

实际放大电路中的反馈形式多种多样,分类的方法也很多,本节主要介绍负反馈放大器在电路结构上的基本连接组态。为了便于分析引入反馈后负反馈放大器的一般组成规律,常常利用方框图来表示各种类型负反馈在电路中的接入方式,从网络的观点看,可以将负反馈放大电路分为四种基本组态。

从放大电路的输出端看:如果反馈信号的取样对象为电压,即基本放大器和反馈网络在输出端口采用并联连接,称这种连接方式构成的负反馈为电压负反馈;如果反馈信号的取样对象为电流,亦即基本放大器和反馈网络在输出端口为串联连接,称为电流负反馈。输出端的取样方式如图 6-4 所示。

另外,从放大电路的输入端口看:如果基本放大器和反馈网络串联连接,称为串联负反馈;当基本放大器和反馈网络在输入回路并联连接,称为并联负反馈。输入端的连接方式如图 6-5 所示。

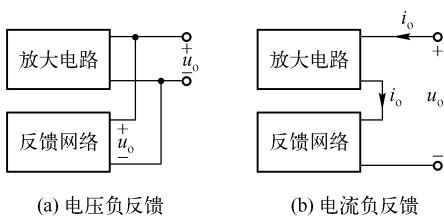


图 6-4 输出端的取样方式

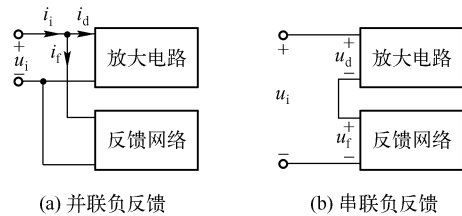


图 6-5 输入端的连接方式

所以概括起来,综合反馈信号在输出端的采样方式,以及在输入回路中的连接方式,通常将负反馈放大电路分为四种基本组态: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。下面对四种负反馈组态的特点进行分析。

1. 电压串联负反馈

(1) 电路结构框图

电压串联负反馈的连接方式如图 6-6 所示, $A_u(s)$ 代表基本

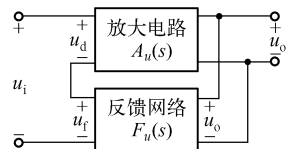


图 6-6 电压串联负反馈

放大器的开环增益, $F_u(s)$ 表示反馈网络的反馈系数。电压串联负反馈的主要特点:从输入端口看,基本放大器与反馈网络为串联形式;从输出端口看,基本放大器和反馈网络相并联,反馈电压从放大电路输出端对输出电压取样获得。

(2) 电路参数

在输入回路中,由于基本放大电路与反馈网络为串联关系,反馈网络对输入信号电压有分压作用,因此输入端口各信号一律取电压,即 $X_i(s)$ 、 $X_d(s)$ 、 $X_f(s)$ 分别代表 $u_i(s)$ 、 $u_d(s)$ 、 $u_f(s)$, 并且反馈电压与输入电压满足: $u_d = u_i - u_f$; 在输出回路中,输出信号取电压,即 $X_o(s) = u_o(s)$; 反馈信号取样输出电压,即 $u_f = F_u(s)u_o$ 。

由于基本放大电路的输入信号是净输入电压 u_d , 输出信号为输出电压 u_o , 均为电压信号, 故电路的开环增益为

$$A_u(s) = X_o(s)/X_d(s) = u_o/u_d \quad (6-9)$$

称为放大电路的开环电压增益。

对于反馈网络,输入信号是放大电路的输出电压 u_o , 输出信号是反馈电压 u_f , 则反馈网络的反馈系数为两者之比, 表示为

$$F_u(s) = X_f(s)/X_o(s) = u_f/u_o \quad (6-10)$$

称为反馈网络的电压传输函数。

另外,闭环增益表示为

$$A_{uf}(s) = \frac{X_o(s)}{X_i(s)} = \frac{u_o}{u_i} = \frac{A_u(s)}{1 + A_u(s)F_u(s)} \quad (6-11)$$

称为放大电路的闭环电压增益。

(3) 实用电路

图 6-7 所示为一个两级电压串联负反馈放大电路的交流通路(利用瞬时极性法,读者可自行判断其反馈极性)。电路中,电阻 R_f 和 R_{e1} 构成反馈网络,在输出端,反馈网络取样输出电压 u_o , 故为电压反馈;它将输出电压 u_o 以电压 $u_f = \frac{R_{e1}}{R_{e1} + R_f}u_o$ 的形式反馈到输入端,在输入端,反馈网络与放大电路为串联关系,即有 $u_d = u_i - u_f$ 。

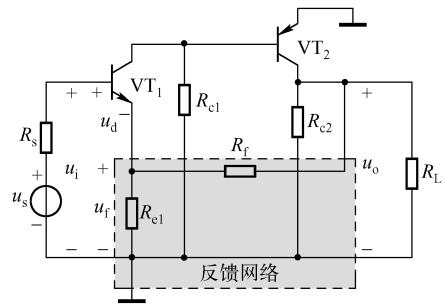


图 6-7 两级电压串联负反馈电路的交流通路

2. 电压并联负反馈

(1) 电路结构框图

电压并联负反馈的连接方式如图 6-8 所示。电路的主要特点:在输入端口,基本放大器与反馈网络为并联连接形式;从输出端口看,基本放大器和反馈网络也为并联关系,反馈信号取自放大电路输出端口的输出电压 u_o 。

(2) 电路参数

在输入回路中,基本放大电路与反馈网络为并联关系,反馈网络对输入信号电流有分流作用,因此输入端口的信号一律取电流,即取 i_i 、 i_d 、 i_f , 且反馈电流与输入的电流满足 $i_d = i_i - i_f$ 。在输出回路中,反馈信号为电压取样方式,则输出信号取电压,即 $X_o(s) = u_o$ 。

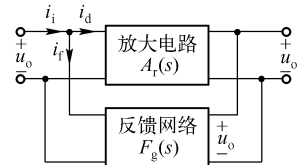


图 6-8 电压并联负反馈

由于基本放大电路的输入信号是净输入电流 i_d , 输出信号是放大电路的输出电压 u_o , 电路的开环增益为

$$A_r(s) = X_o(s)/X_d(s) = u_o/i_d \quad (6-12)$$

开环增益具有电阻的量纲, 称为基本放大电路的开环跨阻增益, 单位为 Ω 。

而反馈网络的输入信号是放大电路的输出电压 u_o , 输出信号是反馈电流 i_f , 则反馈系数为

$$F_g(s) = X_f(s)/X_o(s) = i_f/u_o \quad (6-13)$$

称为反馈网络的跨导传输函数, 具有电导的量纲, 单位为 S。

其闭环增益表示为

$$A_{df} = \frac{X_o(s)}{X_i(s)} = \frac{u_o}{i_i} = \frac{A_r(s)}{1 + A_r(s)F_g(s)} \quad (6-14)$$

称为闭环跨阻增益, 具有电阻的量纲, 单位为 Ω 。

(3) 实用电路

图 6-9 为电压并联负反馈放大电路的交流通路(读者可自行判断其反馈极性)。电路的反馈网络由电阻 R_f 构成, 并将输出电压以电流的形式反馈到输入端口。

在输出端口, R_f 取样输出电压 u_o , 为电压反馈; 在输入端口, 反馈网络与放大电路为并联关系, 即为并联反馈, 且净输入电流 $i_d = i_i - i_f$ 。

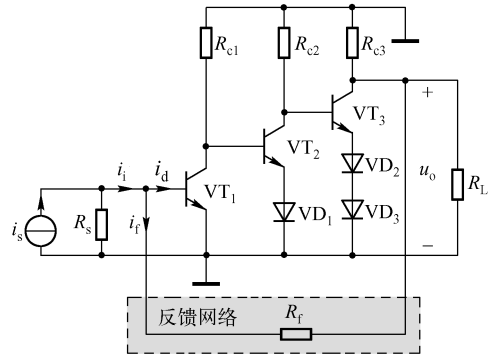


图 6-9 电压并联负反馈电路

3. 电流串联负反馈

(1) 电路结构框图

电流串联负反馈的连接方式如图 6-10 所示, 电路的主要特点: 在输入端口, 基本放大器与反馈网络串联; 从输出端口看, 基本放大器和反馈网络也为串联方式, 反馈信号取样输出端口电流 i_o 。

(2) 电路参数

在输入回路中, 基本放大电路与反馈网络为串联关系, 所以各信号均取电压, 分别为 u_i 、 u_d 、 u_f , 且反馈电压与输入电压满足 $u_d = u_i - u_f$; 在输出回路中, 反馈信号取样输出端口电流, 即 $X_o(s) = i_o$ 。

由于基本放大电路的输入信号是净输入电压 u_d , 输出信号为 i_o , 电路的开环增益为

$$A_g(s) = X_o(s)/X_d(s) = i_o/u_d \quad (6-15)$$

称为放大电路的开环跨导增益, 具有电导的量纲, 单位为 S。

由于反馈网络的输入信号取自放大电路输出端口的电流 i_o , 输出信号是反馈电压 u_f , 反馈系数可表示为

$$F_r(s) = X_f(s)/X_o(s) = u_f/i_o \quad (6-16)$$

称为反馈网络的跨阻传输系数, 具有电阻的量纲, 单位为 Ω 。

另外, 闭环增益表示为

$$A_{gf}(s) = \frac{X_o(s)}{X_i(s)} = \frac{i_o}{u_i} = \frac{A_g(s)}{1 + A_g(s)F_r(s)} \quad (6-17)$$

称为闭环跨导增益, 具有电导的量纲, 单位为 S。

(3) 实际电路

图 6-11 为电流串联负反馈电路的交流通路。电路的反馈网络为 VT_1 的发射极电阻 R_e 。

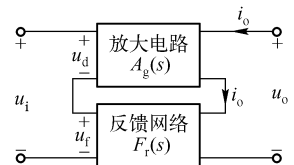


图 6-10 电流串联负反馈

在输出端口, R_e 取样输出电流 i_o , 为电流反馈; 并且, 在输入端口, 反馈电阻 R_e 与放大电路的连接关系为串联关系, 即为串联反馈, 且 $u_d = u_i - u_f$ 。

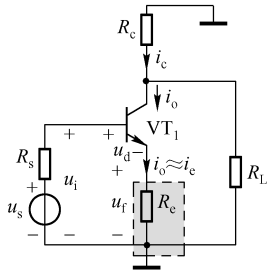


图 6-11 电流串联负反馈电路

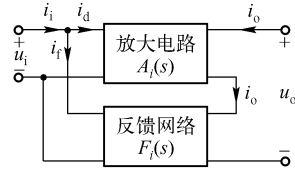


图 6-12 电流并联负反馈

4. 电流并联反馈

(1) 电路结构框图

电流并联负反馈的连接方式如图 6-12 所示。电路的主要特点: 在输入端口, 基本放大器与反馈网络并联; 而在输出端口, 基本放大器和反馈网络为串联方式, 反馈信号取样输出端口电流 i_o 。

(2) 电路参数

由于在输入回路中, 基本放大电路与反馈网络为并联关系, 各信号应取电流, 分别为 i_i 、 i_d 、 i_f , 反馈电流与输入端的电流满足 $i_d = i_i - i_f$; 在输出回路中, 反馈信号为电流取样方式, 即 $X_o(s) = i_o$ 。

由于基本放大电路的输入信号是净输入电流 i_d , 输出信号是放大电路输出端口电流 i_o , 可得放大电路的开环增益为

$$A_i(s) = X_o(s) / X_d(s) = i_o / i_d \quad (6-18)$$

称为基本放大电路的开环电流增益。

由于反馈网络的输入信号取自放大电路输出端的电流 i_o , 而输出信号为反馈电流 i_f , 则反馈系数可表示为

$$F_i(s) = X_f(s) / X_o(s) = i_f / i_o \quad (6-19)$$

称为反馈网络的电流传输函数。

另外, 闭环增益可表示为

$$A_{if} = \frac{X_o(s)}{X_i(s)} = \frac{i_o}{i_i} = \frac{A_i(s)}{1 + A_i(s)F_i(s)} \quad (6-20)$$

称为反馈放大电路的闭环电流增益。

(3) 实际电路

图 6-13 为实际的电流并联负反馈电路的交流通路。电阻 R_f 和 R_{e2} 构成电路的反馈网络。在输出端, R_{e2} 取样输出电流 i_o , 为电流反馈; 而在输入端, 反馈电阻 R_f 与放大电路为并联关系, 即为并联反馈, 且 $i_d = i_i - i_f$ 。

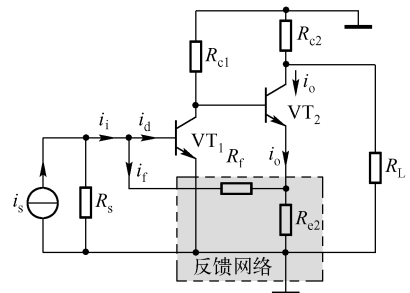


图 6-13 电流并联负反馈电路

根据以上讨论可知, 对于不同组态的负反馈放大电路来说, 其中基本放大电路的开环增益、反馈网络的反馈系数和闭环增益的物理意义和量纲都各不相同。为了便于比较, 现将四种负反馈组态的开环增益、反馈系数和闭环增益等分别列于表 6-1 中。

表 6-1 四种负反馈组态的负反馈放大器的参数比较

信号及传输关系	四种负反馈组态			
	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
输出信号 $X_o(s)$	u_o	u_o	i_o	i_o
输入信号 $X_i(s)$	u_i	i_i	u_i	i_i
反馈信号 $X_f(s)$	u_f	i_f	u_f	i_f
净输入信号 $X_d(s)$	u_d	i_d	u_d	i_d
开环增益 $A(s)$	$A_u(s) = \frac{u_o}{u_d}$ 电压增益	$A_r(s) = \frac{u_o}{i_d} (\Omega)$ 跨阻增益	$A_g(s) = \frac{i_o}{u_d} (S)$ 跨导增益	$A_i(s) = \frac{i_o}{i_d}$ 电流增益
开环电压增益 $A_u(s)$	与上相同	$A_u(s) = \frac{u_o}{u_d} = \frac{u_o}{i_d R_i} = \frac{A_r}{R_i}$	$A_u(s) = \frac{u_o}{u_d} = \frac{i_o R'_L}{u_d} = A_g R'_L$	$A_u(s) = \frac{u_o}{u_d} = \frac{i_o R'_L}{i_d R_i} = \frac{A_i R'_L}{R_i}$
反馈系数 $F(s)$	$F_u(s) = \frac{u_f}{u_o}$ 电压传输函数	$F_g(s) = \frac{i_f}{u_o} (S)$ 跨导传输函数	$F_r(s) = \frac{u_f}{i_o} (\Omega)$ 跨阻传输函数	$F_i(s) = \frac{i_f}{i_o}$ 电流传输函数
闭环增益 $A_f(s)$	$A_{uf}(s) = \frac{u_o}{u_i} = \frac{A_u(s)}{1 + A_u(s)F_u(s)}$	$A_{rf}(s) = \frac{u_o}{i_i} (\Omega) = \frac{A_r(s)}{1 + A_r(s)F_g(s)}$	$A_{gf}(s) = \frac{i_o}{u_i} (S) = \frac{A_g(s)}{1 + A_g(s)F_r(s)}$	$A_{if}(s) = \frac{i_o}{i_i} = \frac{A_i(s)}{1 + A_i(s)F_i(s)}$
闭环电压增益 $A_{uf}(s)$	与上相同	$A_{uf}(s) = \frac{u_o}{u_i} = \frac{u_o}{i_i R_{if}} = \frac{A_{rf}}{R_{if}}$	$A_{uf}(s) = \frac{u_o}{u_i} = \frac{i_o R'_L}{u_i} = A_{gf} R'_L$	$A_{uf}(s) = \frac{u_o}{u_i} = \frac{i_o R'_L}{i_i R_{if}} = \frac{A_{if} R'_L}{R_{if}}$

由于人们习惯上更愿意用电压增益来表示上述四种不同组态负反馈放大电路的增益,那么除电压串联负反馈放大器之外的其他三种不同组态负反馈放大电路的电压增益也分别列于表 6-1 中,请读者自行验证。

思考与练习

6.2-1 填空题

(1) 负反馈的基本形式从输入端可以分为____、____两种负反馈。从输出端可以分为____、____两种负反馈。若把输入端短路后,反馈消失,则为____反馈;否则,则为____反馈。若把输出端短路后,反馈消失,则为____反馈;否则,则为____反馈。

答案:串联,并联,电压,电流,并联,串联,电压,电流

(2) 一个电压串联负反馈放大器,无反馈时电压增益为 80 dB,为使有反馈时电压增益为 20 dB,则反馈深度 $1 + AF$ 为____dB。反馈系数 F 约等于____。

答案:60, 1/10

(3) 已知电压放大器在输入为 1 mV 时,输出为 1 V;引入负反馈后,为获得同样的输出,需要的输入信号为 10 mV。则该放大器的开环增益为____,闭环增益为____。

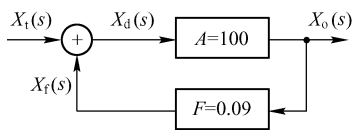
答案:1000, 100

6.2-2 负反馈放大电路方框图如图所示,其环路增益 $T =$ ____,其闭环增益 $A_f =$ ____。

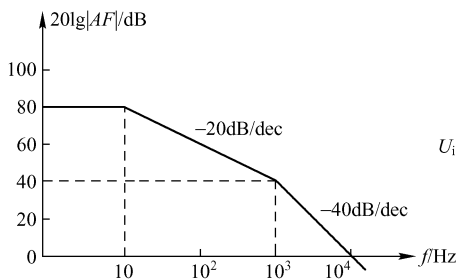
答案:9, 10

6.2-3 一个反馈放大电路环路增益的对数幅频特性如图所示,且反馈系数 $F = 0.1$ 。则其基本放大电路的放大倍数 $|A|$ 为____,接入反馈后闭环放大倍数 $|A_f| = |U_o/U_i|$ 为____。

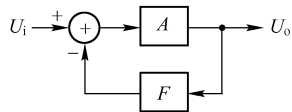
答案: 10^5 , 10



思考与练习 6.2-2 图



思考与练习 6.2-3 图



6.3 负反馈对放大器性能的影响

6.3.1 提高闭环增益的稳定性

在放大电路中引入负反馈后,最直接、最显著的作用就是提高了电路闭环增益的稳定性。

对于放大电路,在输入信号一定的情况下,由于外界因素变化,如温度、电路和器件的参数发生改变、电源电压波动或负载发生变化时,会使放大电路的输出信号随之改变,而通过引入负反馈,可以使放大电路输出信号的波动大大减小,使增益的稳定性得到提高。增益稳定性提高的程度与反馈深度有关,下面将做进一步的分析。

在放大电路引入负反馈以后,其闭环增益可以表示为

$$A_f(s) = \frac{A(s)}{1 + A(s)F(s)}$$

如果设信号频率为中频,即放大电路工作中频范围,且反馈网络为纯电阻性电路,则上式中的 A 和 F 均为实数,在此条件下,上式可进一步表示为

$$A_f = \frac{A}{1 + AF} \quad (6-21)$$

对上式的变量求微分,可得

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

上式两边同时除以 A_f ,可得

$$\frac{dA_f}{A_f} = \frac{dA}{(1 + AF)^2 A_f} = \frac{dA}{(1 + AF)A} = \frac{1}{1 + AF} \frac{dA}{A} \quad (6-22)$$

式中, $\frac{dA_f}{A_f}$ 表示负反馈放大电路闭环增益的相对变化量, $\frac{dA}{A}$ 代表无反馈时放大电路开环增益的相对变化量。式(6-22)表明,引入负反馈后,闭环增益的相对变化量 $\frac{dA_f}{A_f}$ 是无反馈时开环增益

相对变化量 $\frac{dA}{A}$ 的 $\frac{1}{1 + AF}$ 倍,即放大倍数的稳定性提高了 $(1 + AF)$ 倍,但放大倍数却为原来的

$\frac{1}{1 + AF}$ 倍。因此,引入负反馈,对放大电路稳定性的改善是以降低放大倍数为代价获得的。

另外,对于深度负反馈放大电路,由于 $1 + AF \gg 1$,故

$$A_f = \frac{A}{1 + AF} \approx \frac{1}{F} \quad (6-23)$$

可见,深度负反馈放大电路的放大倍数只与反馈系数 F 有关。由于 F 与放大电路的器件参数、电源电压或负载等外界因素的变化无关,所以,深度负反馈放大电路的放大倍数很稳定。

6.3.2 扩展闭环增益的通频带

由于放大电路对不同频率的输入信号呈现出不同的放大倍数,使放大电路的通频带受到一定限制,但可以通过引入负反馈,来展宽放大电路的通频带。

通过前面的分析可以看到,当放大电路的放大倍数发生变化时,可以通过负反馈使放大倍数的相对变化量减小,因此,对于因信号频率不同而引起的放大倍数的下降,也可以利用负反馈进行改善。

首先进行定性分析:设反馈系数 F 是一固定常数(通常反馈网络由电阻性电路构成,反馈系数与频率无关),且在输入信号幅度不变的条件下,随着输入信号频率的升高或降低,输出信号的幅度将减小,从而引起开环增益降低;同时,回送到放大电路输入回路的反馈信号的幅度也会按比例减小,结果使得净输入信号的幅度增大,闭环放大倍数随之增大,其结果使放大电路输出信号的相对减小量比无反馈时小,因此,使放大电路的频带展宽了。

实际中引入负反馈对放大电路频带展宽的程度与反馈深度有关,下面进行定量分析。

设无反馈时,放大电路的中频增益为 A_o ,上、下截止频率分别为 f_H 和 f_L ,则高频段的开环增益函数为

$$A_H(s) = \frac{A_o}{1 + jf/f_H} \quad (6-24)$$

若引入负反馈的反馈系数为 F (设与频率无关),则此时高频段的闭环增益函数将变为

$$A_{Hf}(s) = \frac{A_H(s)}{1 + A_H(s)F} = \frac{\frac{A_o}{1 + jf/f_H}}{1 + \frac{A_o}{1 + jf/f_H}F} = \frac{A_o}{1 + A_oF + jf/f_H} = \frac{\frac{A_o}{1 + A_oF}}{1 + j \frac{f}{[1 + A_oF]f_H}} = \frac{A_{of}}{1 + j \frac{f}{f_{Hf}}} \quad (6-25)$$

比较式(6-24)和式(6-25)可看出,引入负反馈后的中频闭环增益变为

$$A_{of} = \frac{A_o}{1 + A_oF} \quad (6-26)$$

而上限截止频率则变为

$$f_{Hf} = (1 + A_oF)f_H \quad (6-27)$$

可见引入负反馈后,放大电路的中频放大倍数减小为无反馈时的 $\frac{1}{1 + A_oF}$ 倍,而上限截止频率却增大到了无反馈时的 $(1 + A_oF)$ 倍。

同理,设无反馈时,放大电路的低频开环增益函数为

$$A_L(s) = \frac{A_o}{1 - jf_L/f} \quad (6-28)$$

引入负反馈后,低频段的闭环增益函数将变为

$$A_{Lf}(s) = \frac{A_L(s)}{1 + A_L(s)F(s)} = \frac{\frac{A_o}{1 - jf_L/f}}{1 + \frac{A_o}{1 - jf_L/f}F} = \frac{\frac{A_o}{1 + A_oF}}{1 - j \frac{f_L}{[1 + A_oF]f}} = \frac{A_{of}}{1 - j \frac{f_{Lf}}{f}} \quad (6-29)$$

对式(6-28)和式(6-29)进行比较,可得引入负反馈后的下限截止频率变为

$$f_{Lf} = \frac{f_L}{1 + A_o F} \quad (6-30)$$

表示引入负反馈后,下限截止频率减至无反馈时的 $\frac{1}{1 + A_o F}$ 倍。

根据以上分析可知,引入负反馈后,放大电路的上限截止频率提高了 $(1 + A_o F)$ 倍,而下限截止频率降低到原来的 $\frac{1}{1 + A_o F}$ 倍,可见,总的通频带得到了展宽。引入负反馈后通频带和中频放大倍数的变化情况如图 6-14 所示。

对于一般阻容耦合放大电路来说,通常有 $f_H \gg f_L$;而对于直接耦合放大电路,由于 $f_L = 0$,所以通频带可以近似地用上限截止频率表示,即无反馈时的通频带表示为

$$BW = f_H - f_L \approx f_H$$

引入负反馈后的通频带为

$$BW_f = f_{Hf} - f_{Lf} \approx f_{Hf}$$

而

$$f_{Hf} = [1 + A_o F] f_H$$

则有

$$BW_f \approx [1 + A_o F] BW$$

上式表明,尽管引入负反馈后频带展宽了 $(1 + A_o F)$ 倍,

但由于中频放大倍数下降为无反馈时的 $\frac{1}{1 + A_o F}$,因此,

中频放大倍数与通频带的乘积基本保持不变,即

$$BW \cdot A_o \approx BW_f \cdot A_{of} \quad (6-31)$$

由此可见,负反馈的深度越深,则频带扩展得越宽,但同时中频放大倍数也下降得越多。

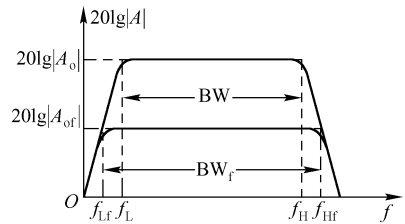


图 6-14 负反馈对通频带和放大倍数的影响

6.3.3 减小非线性失真

由于放大电路中晶体管等有源器件的伏安特性曲线为非线性曲线,当输入信号为正弦波时,其输出波形往往不再是一个真正的正弦波,从而使输出信号产生非线性失真。

图 6-15 示出了由于三极管输入特性曲线的非线性,当 u_{be} 为正弦波时, i_b 波形出现的非线性失真现象。可见,如果输入信号幅度较大或电路的工作点设置的不合适,非线性失真的现象更为明显。

如果在放大电路中引入负反馈,通过反馈信号对净输入信号的补偿作用,可以使非线性失真得到一定程度的改善,而且反馈程度越深,对非线性失真的补偿作用越大,非线性失真就越小。

下面就负反馈对放大器非线性失真的补偿作用进行定性分析。

如图 6-16 所示,设输入信号 x_i 为正弦波,无反馈时, $x_d = x_i$,由于放大器件的非线性特性,设经过放大后所输出信号 x_o 产生非线性失真的波形为正半周大,负半周小,如图 6-16(a)所示。

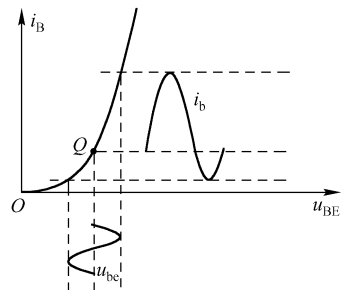


图 6-15 晶体管器件的非线性失真

引入负反馈后,在反馈系数 F 为常数的情况下,反馈信号 $x_f = Fx_o$,其波形也为正半周大,负半周小,由于净输入信号 x_d 为输入信号 x_i 和反馈信号 x_f 的差值,即 $x_d = x_i - x_f$,因此,得到净输入信号 x_d 的波形变成了正半周小,负半周大,即净输入信号的失真与放大器的非线性引起的失真极性相反,结果在一定程度上补偿了放大器件对信号非线性失真的影响,使输出信号的正负半周的幅度趋于一致,从而改善了输出波形。

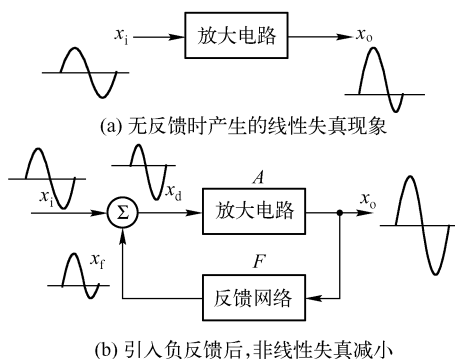


图 6-16 负反馈对非线性失真的改善作用

理论上可以证明,在非线性失真不太严重

时,负反馈对放大器输出波形中的非线性失真近似减小为原来的 $\frac{1}{1 + A(s)F(s)}$,即相当于将非线性失真改善了 $[1 + A(s)F(s)]$ 倍。

另外,在放大电路受到干扰时,有时也可以利用负反馈进行抑制。但是,如果干扰信号与输入信号是同时混入的,则无法通过引入负反馈进行抑制,只能采用滤波或屏蔽等其他方法削弱干扰信号。

6.3.4 改变放大器的输入电阻

为了满足实际应用中的一些特定要求,常常利用不同形式的负反馈来改变输入、输出电阻的数值,以此实现电路的阻抗匹配。下面分别介绍放大电路引入不同组态的负反馈后,对输入电阻和输出电阻的影响。

从输入端看,反馈信号与外加输入信号在负反馈放大电路输入回路中的连接方式不同,将对输入电阻产生不同程度的影响。定性来看,串联负反馈将增大输入电阻,而并联负反馈将减小输入电阻。下面进行具体的分析。

1. 串联负反馈使输入电阻增大

图 6-17 为串联负反馈放大电路的示意图,图中,放大电路与反馈网络在输入端口为串联方式。由于负反馈对输入电阻的影响只与输入端的连接方式有关,而与输出端的连接方式无关,故未具体画出放大电路输出端的连接组态,仅标出输出信号 x_o 来代替。

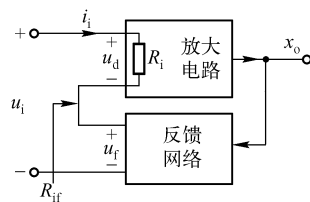


图 6-17 求串联负反馈放大器的输入电阻

由于引入串联负反馈,则反馈电压与输入电压的关系为 $u_d = u_i - u_f$,表示反馈电压将削弱输入电压的作用,使净输入电压减小。可见,在相同的外加输入电压作用下,输入电流将比无反馈时小,因此输入电阻将增大。

根据输入电阻的定义,在图 6-17 中,无反馈时的输入电阻为

$$R_i = u_d / i_i \quad (6-32)$$

而引入串联负反馈后,则输入电阻变为

$$R_{if} = u_i / i_i = (u_d + u_f) / i_i \quad (6-33)$$

式(6-33)中的反馈电压 u_f 是净输入电压经放大电路放大,再经反馈网络以后得到的,即有 $u_f = Fx_o = AFu_d$,因此可得

$$R_{if} = \frac{u_d + AFu_d}{i_i} = [1 + AF] \frac{u_d}{i_i} = [1 + AF] R_i \quad (6-34)$$

式(6-34)说明:引入串联负反馈后,放大电路的输入电阻将增大,成为无反馈时的 $[1 + AF]$ 倍,且与输出端的取样方式无关。同时,可以看出,反馈越深,即 $[1 + AF]$ 越大,则输入电阻也越大。

对于电压串联负反馈: $R_{if} = (1 + A_u F_u) R_i$

对于电流串联负反馈: $R_{if} = (1 + A_g F_r) R_i$

2. 并联负反馈使输入电阻减小

在图 6-18 所示的并联负反馈放大电路的示意图中,放大电路与反馈网络在输入端以并联方式连接,同样,电路中未具体画出放大电路输出端的连接组态,仅标出输出信号 x_o 。

由反馈电流与输入电流的关系式: $i_d = i_i - i_f$, 可得 $i_i = i_d + i_f$, 由此可以定性地看出,在相同输入电压的作用下,输入电流将比无反馈时大,因此输入电阻将减小。

在图 6-18 中,无反馈时的输入电阻为

$$R_i = u_i / i_d \quad (6-35)$$

引入并联负反馈后,输入电阻变为

$$R_{if} = u_i / i_i = u_i / (i_d + i_f) \quad (6-36)$$

同样可得,反馈电流 $i_f = Fx_o = AFi_d$, 将其代入到式(6-36)中,有

$$R_{if} = \frac{u_i}{i_d + i_f} = \frac{u_i}{i_d + AFi_d} = \frac{u_i}{[1 + AF]i_d} = \frac{1}{1 + AF} R_i \quad (6-37)$$

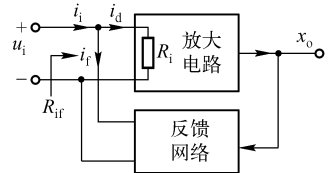


图 6-18 求并联负反馈放大器的输入电阻

综上所述,采用并联负反馈后,放大电路的输入电阻将减小,成为无反馈时的 $\frac{1}{1 + AF}$ 倍,且与输出端的取样方式无关。显然有,反馈越深,输入电阻也越小。

对于电压并联负反馈: $R_{if} = \frac{R_i}{1 + A_r F_g}$

对于电流并联负反馈: $R_{if} = \frac{R_i}{1 + A_i F_i}$

因此,在设计负反馈放大电路时,如果要求提高输入电阻,则应采用串联负反馈;反之,如果要求降低输入电阻,则必须采用并联负反馈。另外需注意,并联负反馈电路降低了放大电路的输入电阻,将会影响源电压增益。

6.3.5 改变放大器的输出电阻

上面讨论了负反馈放大电路输入回路的连接方式不同对输入电阻的影响。在放大电路的输出端,如果负反馈的取样方式不同,将会对放大电路的输出电阻产生不同程度的影响:电压负反馈将减小输出电阻,而电流负反馈将增大输出电阻。

1. 电压负反馈使输出电阻减小

放大电路的输出电阻是从电路的输出端口向电路方向看进去的戴维南等效电阻,其定义

为,在输入信号置零、并使负载电阻开路的情况下,在输出端外加一个交流电压与所得的输出电流之比,表示为

$$R_o = \frac{u_o}{i_o} \Big|_{\substack{X_i=0 \\ R_L=\infty}} \quad (6-38)$$

下面根据输出电阻的定义,具体讨论电压负反馈对输出电阻的影响。

求电压负反馈放大器输出电阻的框图如图 6-19 所示。按照输出电阻的定义,在计算输出电阻时,要求输入信号取零值,即输入信号 $X_i = 0$ 。此时,在无反馈的条件下,从放大电路的输出端看进去,利用戴维南定理,可以将其等效为电阻 R_o 与一个电压源 $A_o X_d$ 相串联的形式,其中, R_o 是无反馈时放大电路的输出电阻, A_o 是当负载电阻 R_L 开路时放大电路的开环放大倍数, X_d 为放大电路的净输入信号。

当加入反馈后,由于外加输入信号 $X_i = 0$,故可得 $X_d = X_i - X_f = -X_f$ 。对于电压负反馈,反馈信号 X_f 取样输出电压,即

$$X_f = F u_o \quad (6-39)$$

如果忽略反馈网络对输出端电流的分流作用,由图 6-19 可知, $u_o = i_o R_o + A_o X_d = i_o R_o - A_o F u_o$,整理后,可以求得引入电压负反馈后,电路的输出电阻为

$$R_{of} = \frac{u_o}{i_o} = \frac{R_o}{1 + A_o F} \quad (6-40)$$

该式表明:只要引入电压负反馈,放大电路的输出电阻都将减小,成为无反馈时的 $\frac{1}{1 + A_o F}$ 倍。

我们知道,输出电阻越小,表明反馈放大电路的输出端口越接近恒压源,电路输出电压越稳定,带负载能力越强。因此,对于电压负反馈电路,在输入信号幅度不变的情况下,即使负载的阻值在较大范围内变化,输出电压幅值也可以基本上保持稳定。也就是说,电压负反馈能稳定输出电压。

对于电压串联负反馈:

$$R_{of} = \frac{R_o}{1 + A_{uo} F_u}$$

对于电压并联负反馈:

$$R_{of} = \frac{R_o}{1 + A_{ro} F_g}$$

注意上面两式中的 A_{uo} 和 A_{ro} 表示基本放大电路输出端口负载开路时 ($R_L = \infty$) 的开环增益。

2. 电流负反馈使输出电阻增大

图 6-20 是求电流负反馈放大电路输出电阻的示意图。同样,在计算电路的输出电阻时,应令输入信号 $X_i = 0$ 。在无反馈的条件下,从基本放大电路的输出端看进去,利用诺顿定理,可以将其等效为电阻 R_o 与一个等效电流源 $A_s X_d$ 并联的形式,其中 A_s 是当负载电阻 R_L 短路时放大电路的开环增益。

当加入反馈后,由于外加输入信号 $X_i = 0$,而且电流负反馈的反馈信号 X_f 取自输出电流,故有

$$X_d = X_i - X_f = -X_f = -F i_o$$

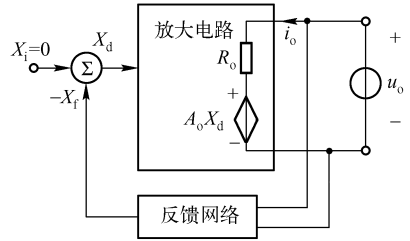


图 6-19 求电压负反馈放大器的输出电阻

在输出端口,如果忽略 i_o 在反馈网络输入端的压降,列方程可得

$$i_o = \frac{u_o}{R_o} + A_s X_d = \frac{u_o}{R_o} - A_s F i_o$$

整理后,可得电流负反馈放大电路的输出电阻为

$$R_{of} = u_o / i_o = [1 + A_s F] R_o \quad (6-41)$$

式(6-41)表明:无论输入端是串联负反馈或并联负反馈,只要引入电流负反馈,放大电路的输出电阻都将增大,成为无反馈时的 $[1 + A_s F]$ 倍。

由于输出电阻越大,输出端越接近于恒流源。因此,电流负反馈电路可以在负载变化的情况下,获得稳定的输出电流,使输出电流接近恒流。

对于电流串联负反馈: $R_{of} = (1 + A_{gs} F_r) R_o$

对于电流并联负反馈: $R_{of} = (1 + A_{is} F_i) R_o$

注意上面两式中的 A_{gs} 和 A_{is} 表示基本放大电路输出端口负载短路时 ($R_L = 0$) 的开环增益。

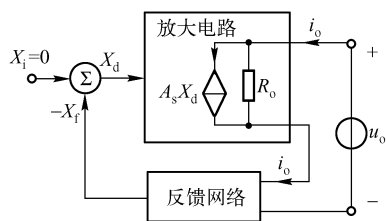


图 6-20 求电流负反馈放大器的输出电阻

6.3.6 引入负反馈的一般原则

从以上分析看出,引入负反馈可以改善和影响放大电路的性能。在电路设计中为获得高性能指标的放大电路,在引入负反馈时应按照以下基本原则进行:

- (1) 如果需要稳定静态工作点等直流量,应该在放大电路中引入直流负反馈。
- (2) 同理,如果需要稳定放大电路的交流性能,应该引入交流负反馈。
- (3) 如果需要稳定输出电压,应该在放大电路中引入电压负反馈;如果需要稳定输出电流,应该引入电流负反馈。
- (4) 如果需要提高输入电阻,应该引入串联负反馈;而如果需要减小输入电阻,应该引入并联负反馈。

需要注意的是,负反馈对放大电路性能的改善或改变都与反馈深度 $[1 + A(s)F(s)]$ 有关。但由于 $A(s)$ 是频率的函数,故 $A(s)F(s)$ 也是频率的函数。因此,并非反馈深度越大越好。对有的电路,在一些频率下 $A(s)F(s)$ 产生的附加相移可能会使原来的负反馈变为正反馈,甚至可能产生自激振荡,使放大电路无法正常进行放大,也就完全失去了改善性能的意义。

另一方面,改善放大电路的性能有时也可以通过施加正反馈来实现,利用正反馈不仅可以提高放大倍数,还能提高输入电阻和减小输出电阻等,但却是以降低电路的性能稳定性为代价的。

思考与练习

6.3-1 填空题

(1) 为了充分提高负反馈的效果,串联反馈要求信号源内阻____,并联反馈要求信号源内阻____,电流反馈要求负载电阻____,电压反馈要求负载电阻____。 答案:小,大,小,大

(2) 电流串联负反馈放大器是一种输出取样为____,输入端比较量为____的负反馈放大器,能使输入电阻____,输出电阻____。电压并联负反馈放大器是一种输出取样为____,输入端比较量为____的负反馈放大器,能使输入电阻____,输出电阻____。 答案:电流,电压,增大,增大,电压,电流,减小,减小

(3) 若要减小放大器从信号源索取电流,应引入___反馈,若要提高电压放大器带负载能力,应引入___反馈。
答案:串联,电压

(4) 若要求某电流串联负反馈放大电路由开环增益的相对变化量 $dA_g/A_g = 10\%$ 下降为闭环增益相对变化量 $dA_{gf}/A_{gf} = 1\%$,又要求其闭环增益 $A_{gf} = 9 \text{ mS}$,则开环增益 $A_g = \underline{\hspace{2cm}}$,此时的反馈系数 $F_f = \underline{\hspace{2cm}}$ 。

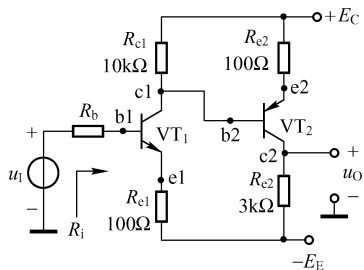
答案:90 mS, 0.1 kΩ

6.3-2 放大电路如图所示,为使输入电阻 $R_i \approx R_b$,可以在___极和___极之间接入一个反馈电阻 R_f 来实现。为了在 R_{c2} 变化时仍能得到稳定的输出电压 u_o ,可通过在___极和___极之间接入一个反馈电阻 R_f 来实现。为了在 R_{c2} 变化时仍能得到稳定的输出电压 u_o ,但不影响 VT_1 、 VT_2 的静态工作点,可在___极和___极之间接入一条反馈支路,该反馈支路应由___构成。

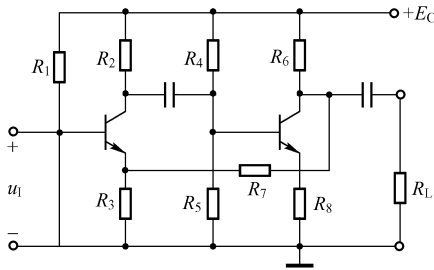
答案: $e_2, b_1, c_2, e_1, c_2, e_1$, 一个反馈电阻 R_f 和一个电容元件串联

6.3-3 如图所示电路中,反馈元件 R_f 构成级间负反馈,其组态为___;其作用是使输入电阻___。

答案:电压串联负反馈,增大



思考与练习 6.3-2 图



思考与练习 6.3-3 图

6.3-4 选择题

(1) 放大器引入电压串联负反馈后,下列说法错误的是() 答案:B

- A. 调整的净输入量是电压
- B. 适合用高阻信号源激励
- C. 可以是减小输出信号的非线性失真
- D. 可以实现稳定的电压输出

(2) 引入反馈系数为 0.1 的电流并联负反馈,放大器的输入电阻由 1 kΩ 变为 100Ω,则该放大器的开环和闭环电流增益分别为() 答案:D

- A. 100,10
- B. 90,10
- C. 100,9
- D. 90,9

(3) 某放大器电压增益为 -1000,当环境温度变化 1℃时,电压增益相对变化 0.5%。若要电压增益相对变化减小至 0.05%,引入负反馈的反馈系数应为() 答案:C

- A. -0.09
- B. 0.99
- C. -0.009
- D. 1.001

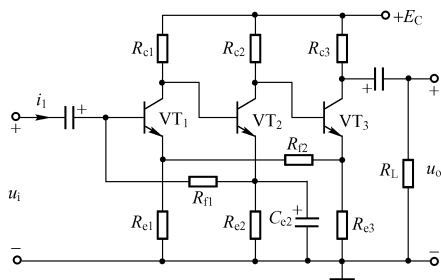
6.3-5 反馈放大电路如图所示,试就以下各种故障,选择正确答案填空:

- (1) R_{b1} 虚焊,则电路___。(A. 仍能正常放大 B. 不能放大)
- (2) R_{b1} 短路,则电路___。(A. 仍能正常放大 B. 不能放大)
- (3) R_{b2} 虚焊,则电路的输入电阻___。(A. 增大 B. 减小 C. 不变)
- (4) R_{b2} 虚焊,则电路的输出电阻___。(A. 增大 B. 减小 C. 基本不变)
- (5) R_{b2} 短路,则电路的输入电阻___。(A. 增大 B. 减小 C. 不变)

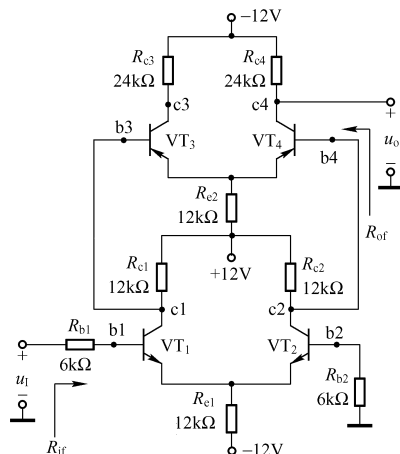
答案:(1)A (2)B (3)B (4)C (5)A

6.3-6 图示电路为单端输入、单端输出的两级直接耦合差分放大电路,若要求降低输出电阻,而输入电阻约等于 R_{b1} 。应引入什么类型的反馈?并在图上画出。

答案:应引入电压并联负反馈,反馈电阻 R_f 接在 c_4 和 b_1 之间

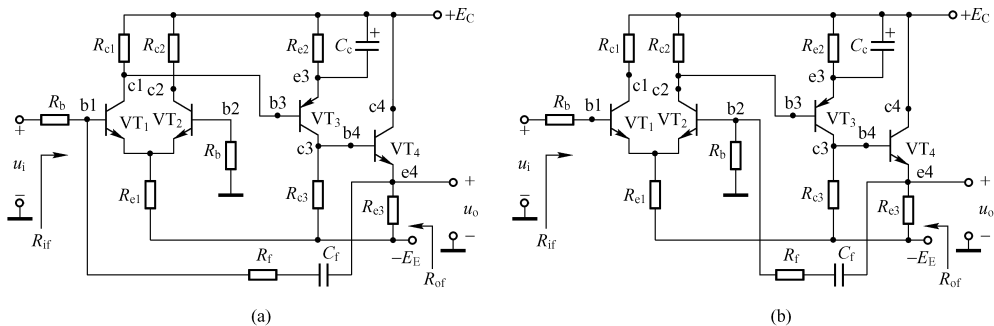


思考与练习 6.3-5 图



思考与练习 6.3-6 图

6.3-7 在图示的放大电路中,为了使电路成为输出电阻低,输入电阻约等于 R_b 的负反馈电路,电路是否需要改接? 如不需要,试简述理由;如需要,请在图上画出改动的部分,但不要增减元器件。



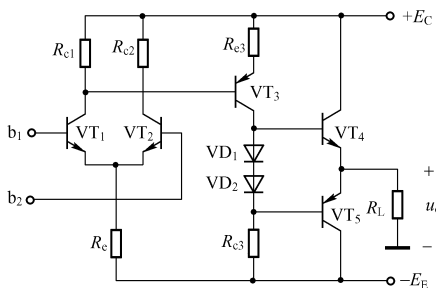
思考与练习 6.3-7 图

答案:应改为电压并联负反馈。图(a)将 VT_3 的基极 b_3 由 VT_1 的集电极 c_1 改接到 VT_2 的集电极 c_2 。图(b)将 R_f 的左端由 VT_2 的基极 b_2 改接到 VT_1 的基极 b_1 。

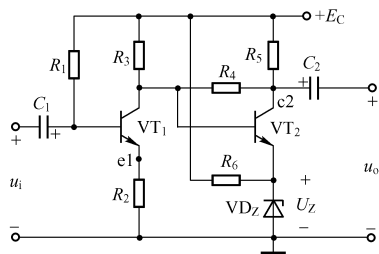
6.3-8 三级直接耦合放大电路如图所示。为减小输出电阻,增大输入电阻,试问应引入什么样的反馈? 请在原电路图上画出反馈支路。

答案:应引入电压串联负反馈,即在输出端和 b_2 之间接一反馈电阻 R_f ,同时在 b_2 和地之间接一电阻。

6.3-9 反馈放大电路如图所示,在不影响 VT_1 、 VT_2 静态工作点的情况下,为减小电路的输出电阻,应引入何种级间反馈? 如何连接?



思考与练习 6.3-8 图



思考与练习 6.3-9 图

答案:电压串联负反馈,将 C_f 、 R_f 串联支路接在 e_1 和 c_2 之间

6.4 负反馈放大电路的分析与计算

在放大电路中引入负反馈后,可改善放大电路的各项性能指标。下面对负反馈电路的电压放大倍数、输入电阻和输出电阻等指标的计算进行具体介绍。

6.4.1 深度负反馈放大电路的参数估算

在深度负反馈的条件下,电路的闭环增益的估算比较简单,通常可利用关系式 $A_f(s) \approx 1/F(s)$ 估算闭环增益。

在深度负反馈情况下,电路满足 $|1 + A(s)F(s)| \gg 1$,故闭环增益 $A_f(s) \approx 1/F(s)$,表明深度负反馈放大电路的闭环增益 $A_f(s)$ 近似等于反馈系数 $F(s)$ 的倒数。因此,只要求出 $F(s)$,就可以得到 $A_f(s)$ 。

但是,需要注意的是, $A_f(s)$ 是广义的增益,其含义和量纲因反馈组态的不同而不同(见表 6-1),因此,运用 $A_f(s) \approx 1/F(s)$ 进行闭环电压增益的估算是有条件的,只有在负反馈的组态为电压串联负反馈时,才能使用。此时,利用 $A_{uf}(s) \approx 1/F_u(s)$ 来直接估算出深度负反馈放大电路的闭环电压增益。

对于除电压串联负反馈以外的电压并联负反馈、电流串联负反馈、电流并联负反馈三种组态,其闭环增益 $A_f(s)$ 依次为 $A_{uf}(s)$ 、 $A_{gf}(s)$ 、 $A_{if}(s)$,分别代表负反馈放大电路的闭环跨阻增益、闭环跨导增益和闭环电流增益。因此,不能直接求解闭环电压增益 $A_{uf}(s)$,但可利用表 6-1 中的相关表达式,通过增益之间的变换求解出闭环电压增益。

6.4.2 利用方框图法进行分析计算

方框图法就是首先把一个实际的负反馈放大电路分解成基本放大器 A 和反馈网络 F 两部分,即所谓的“AF 分离法”。然后通过计算基本放大器的开环增益 $A(s)$ 及反馈网络的反馈系数 $F(s)$,利用公式 $A_f(s) = \frac{A(s)}{1 + A(s)F(s)}$ 求解出负反馈放大电路的闭环增益。然而,在实际的负反馈放大电路中,反馈网络对基本放大电路的输入和输出端口都有一定的负载效应,因此,在利用方框图法分离基本放大器 A 时,一般要把反馈网络的输入阻抗(或导纳)折合到基本放大器的输出回路中,使其成为基本放大电路输出回路的组成部分;同理把反馈网络的输出阻抗(或导纳)折合到基本放大电路的输入回路中,使其成为基本放大电路输入回路的组成部分。

观察图 6-6、图 6-8、图 6-10 和图 6-12 四种基本组态负反馈放大电路的方框图,可以看出,放大器 A 和反馈网络 F 都采用了二端口模型。考虑到反馈放大器理想模型的单向传输条件,A、F 两个方框图的输入端口只能含有输入电阻(R_{iA} 或 R_{iB})。而 A、F 两个方框图的输出端口如何等效,取决于负反馈的组态。如果负反馈环路的输入端口采用串联连接方式,由于在输入回路中,A、F 两个方框图端口的电压能够进行叠加,为了分析方便,应该利用戴维南模型来等效反馈网络 F 的输出端口,即等效成电压源和电阻的串联形式,如图 6-21(a)和(c)所示。同理,如果输入端口采用并联连接方式,由于 A、F 两个方框图端口的电流能够进行叠加,应该利用诺顿模型来等效反馈网络 F 的输出端口,即等效成电流源和电阻并联的形式,如