

漫谈的负反馈

胆机 (上)

秋叶

在科学技术高速发展的21世纪，古老的胆机却仍能在音响世界占据一席之地。尽管其频响、信噪比、失真度等技术指标与同档次的晶体管机不能相比，但由于采用了各种负反馈技术，巧妙地掩盖了它的缺点而将温柔迷人的音色展现在人们面前。

那么，“负反馈”这种在音响技术中既被大量采用又逐渐遭人垢病的东西到底是什么呢？

原则上讲，凡是把放大器输出的电压或电流用一定方式送回到输入端，这种现象就叫“反馈”（亦叫“回授”）。这个反馈量如果与输入信号同相，则增强了输入信号，使放大器增益提高，叫做“正反馈”；如果反馈量与输入信号反相，则削弱了输入信号，使放大器增益下降，这就是“负反馈”。

正反馈虽然能提高放大器的增益，但会使其他性能指标变坏，故主要应用于脉冲和振荡电路中，在音频放大电路中用得极少；负

反馈虽然降低了放大器的增益，但由于它能起到稳定工作点、降低失真和噪音、拓宽频率响应、改变输入输出阻抗等作用，故而在无线电与电子、电工与仪表、家电与音响等各方面得到广泛的应用。

下面就谈谈负反馈及其在电子管音频放大器中的应用。

一、负反馈的主要类型

图1是最常见的三极管共阴极放大电路。我们先简单回顾一下它的基本概念。

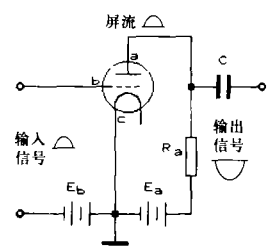


图1 常见的三极管共阴极放大电路

(1) 电子管在正常工作状态下，栅极需要加一个相对阴极为负的偏压——栅负压（极少数特殊的功率管除外）。在输入信号作用下，栅负压发生微小变化就会引起屏流较大的变化，从而在屏极负载电阻 R_a 上产生较大的电压变化（其相位与输入信号相反），这就是电子管的放大作用。

(2) 在阴极与地之间串联一个电阻 R_k ，取消负电源 E_b 就变成图2所示。电子管工作时屏流在阴极电阻 R_k 上产生一个电压降，其极性是上端为正、下端为负，将负端通过电阻 R_g 与栅极相连，则给栅极加上一个负的栅偏压。这个偏压是电子管自己的工作电流所产生的，所以叫“阴极自给栅偏压”。

静态时如果某些因素导致栅

负压升高，则屏流增大，阴极电阻 R_k 上电压降也增大，使栅负压下降，屏流下降，电路恢复平衡，反之亦然。就是说 R_k 除了产生栅负压外，还能自动稳定电路的直流工作点。

(3) 正常工作时，输入的交变信号电压使屏流在阴极电阻上产生与信号电压同相的交变栅负压，使放大器的增益也随之变化。很多情况下人们在阴极电阻上并联一个大容量的电容器 C_k （图2中虚线），使交流信号旁路，以此来稳定放大器的增益。

多极（四、五极）电子管与三极管的放大作用完全一样，故以下均用三极管为例。

1. 串联电流负反馈

再看图2，当电路增益足够大时，人们往往取消阴极旁路电容，用牺牲部分增益的方法来换取其他性能指标的提高。这就是一个简单的电流负反馈电路。

这种反馈电路在胆机中应用最广，几乎所有电路中都可以看到它的身影。

其作用机理为：交变信号电压使屏流在阴极电阻上产生的交变栅负压与信号电压同相，如信号为正半波，则 U_g 和 U_k 均为上正

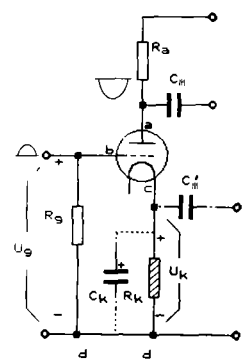


图2 串联电流负反馈电路

下负。栅负压是指栅极对阴极的电压(而不是对地的电压),沿 $b-d-c$ 的电压方向是正-负-负-正,是反相串联的,即 $U_{bc} = U_g - U_k$, 这里 U_k 起抵消输入信号、降低放大器增益的作用,故为负反馈。由于反馈电压 U_k 是由屏流产生并且是与输入信号串联的,故称为串联电压负反馈。

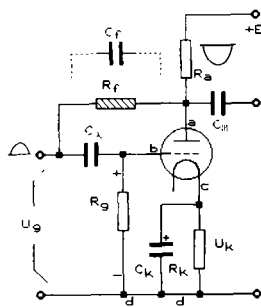


图 3 并联电压负反馈电路

一般情况下, R_a 远大于 R_k , 则 U_a 远大于 U_k , 即反馈对输出电压的影响是有限的。

如 R_a 逐渐减小, R_k 逐渐增加, 则反馈逐渐增加、输出逐渐减小。

当 R_a 与 R_k 相等时, 可从 R_a 、 R_k 分别输出幅值相等相位相反的信号电压, 这就变成屏阴分割倒相电路。

当 R_a 减小为零时, 信号全都从 R_k 输出, 则变成阴极输出器, 它由共阴极电路变成共阳极(屏极)电路。由于输出电压就是反馈电压, 即输出电压 100% 地反馈到输入端, 其反馈的性质也由串联电流负反馈变为串联电压负反馈。

阴极输出器的电压增益接近于 1 而小于 1, 即没有电压放大作用, 却有电流放大和功率放大作用。此外, 由于它能提高输入阻抗、降低输出阻抗, 从而在音频放大器中得到广泛的应用。

2. 并联电压负反馈

如图 3 所示, 这里 R_f 是反馈电阻, 由于共阴极放大电路屏极输出信号与栅极输入信号反相, 这个反相电压通过 R_f 回输到输入端, 使输入信号减小, 是负反馈。这里反馈信号与输出电压成正比, 并与输入信号并联共同对栅极发生作用, 故称为并联电压负反馈。一般情况下, R_f 远大于 R_a , 即反馈对输出电压的影响也是有限的。

有些电路中, 人们用反馈电容 C_f 取代了反馈电阻(图中虚线), 其作用机理是一样的。但由于电容器对高频信号的阻抗小、对低频信号的阻抗大, 因此高频信号的反馈量比低频要大, 即衰减了高频、突出了低频, 起到了改变频率特性的作用。

并联电压负反馈在晶体管电路中应用较广, 人们往往将 R_f 直接接到晶体管的基极, 使其既是反馈电阻, 又是提供直流工作点的偏置电阻。像图 3 这样简单地用于胆共阴极放大电路中是比较少的, 但在较复杂的音调控制电路和频率补偿电路(如唱片放大器的 RIAA 网络)中通常能找到它的踪迹。

3. 并联电流负反馈和串联电压负反馈

这两种反馈一般发生在两级(或多级)放大器之间, 图 4 是并联电流负反馈, 图 5 是串联电压负反馈。

在图 4 所示的两级共阴放大电路中, 反馈电压通过 R_f 从第二级的阴极输出, 它的大小与输出电流成正比; 它输入到第一级的栅极, 与输入信号并联, 并因其反相而起着削弱输入信号的作用, 所以它是并联电流负反馈。这个电路在晶体管放大器中也应用很

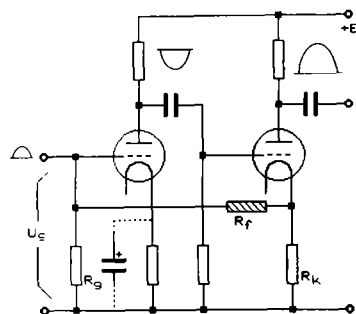


图 4 并联电流负反馈电路

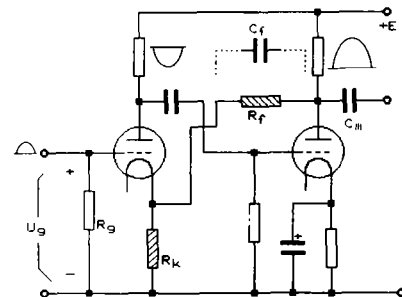


图 5 串联电压负反馈电路

广, 通常 G_1 、 G_2 管直接耦合, R_f 同时起 G_1 管的直流偏置作用。

在图 5 中, 反馈电压通过 R_f 从第二级的屏极输出, 它的大小与输出电压成正比; 它输入到第一级的阴极, 即它与输入信号串联作用在第一级的阴栅之间, 所以它是串联电压负反馈。有时候反馈电阻(或电容)是接在输出电容之后, 其道理是一样的。请注意, 图 4 中第二级和图 5 中第一级的阴极电阻都没有并联旁路电容, 它们同时还起着本级电流负反馈的作用, 所以这两种电路实际上也都是混合型负反馈电路。

二、负反馈对电路放大倍数的影响

我们知道, 电子管放大器的放大倍数取决于管子的放大系数 μ 、内阻 r 和负载电阻 R_a (实际上负载阻抗还包括下一级放大器的

栅极电阻, 但因其一般远大于 R_a , 故在此忽略不计)。

在三极管阻容耦合放大器中, 放大倍数为

$$K = \mu R_a / (R_a + r) \dots\dots(1)$$

图 6 中, 若阴极旁路电容 C_k 接入, 电路无负反馈。

从公式(1)可计算出, 用高 μ 管 6N2 时, $K = 65.5$; 用中 μ 管 6N1 时, $K = 28.4$ 。

若取消阴极旁路电容, 引入本级电流负反馈, 我们再看看电路的放大倍数发生了什么变化。

由于反馈电压与输出电压绝对值的大小成正比(都是屏流产生的), 可写成 $U_f = f \cdot U_{sc}$, 其中 f 为反馈系数, 所以 $f = U_f / U_{sc} = I_a R_k / (I_a R_a) = R_k / R_a$ 。

可见反馈系数 f 也是阴极电阻与负载电阻之比。

同理, 在图 5 所示的串联电压负反馈中: $f = R_k / (R_k + R_i)$ 。

电压放大倍数就是输出电压与输入电压之比, 即

$$K = U_{sc} / U_{sr} \dots\dots(2)$$

在有反馈时, 输入信号电压被反馈电压 U_f 部分抵消,

$$U'_{sr} = U_{sr} - U_f$$

此时的放大倍数为

$$K_f = U_{sc} / (U_{sr} - U_f)$$

通过移项和等式变换, 最后变成

$$K_f = K_0 / (1 + K_0 \cdot f) \dots\dots(3)$$

如果 $K_0 \cdot f \gg 1$, 即放大器具有深度负反馈时 $K_f = 1 / f$, 这说明当放大器的反馈很深时, 放大器的增益可以认为与电路性质和电子管本身参数没有太大关系, 仅取决于反馈电路的参数。

图 6 中, 6N2 的负载电阻取 $100k \Omega$, 阴极电阻分别取 $1k \Omega$ 、 $5k \Omega$ 、 $10k \Omega$ 时, 反馈系数分别为 0.01 、 0.05 和 0.1 ; 用 6N1 时取括号内的数值, f 同样为 0.01 、 0.05 、 0.1 , 用公式(3)计算出放大倍数 K_f 如附表所示。

附表 放大倍数 K_f 与反馈系数 f 的关系

反馈系数 f	0	0.01	0.05	0.1
K_f 6N2	65.5	39.6	15.3	8.7
6N1	28.4	22.1	11.7	7.4

可见无反馈时 6N2 放大倍数为 6N1 的 2.3 倍, 随着反馈量的加大, 放大倍数都变小但两管的差距也变小; 当反馈系数提高到 0.1 时, 放大倍数大致与 R_a/R_k 的比值(10倍)差不多, 而与用什么管子已关系不大。这在实用中有很大的意义。

我们知道即使是同型号的管子, 不同厂家、不同时期甚至不同批号生产出来的性能都会有些差异, 双三极管内的两只管也有差异。用于无反馈放大器中就会造成性能差异, 用于立体声放大器中就会造成两声道的差异。有了负反馈后, 工厂批量生产放大器时就可以避免挑选管子的麻烦, 发烧友 DIY 立体声音响时, 在选管配对方面也可以不必太苛求和计较了。

三、经典名机电路中的负反馈

1. 红灯 711 型电子管收音机

20 世纪 60 年代问世的红灯 711 型电子管收音机, 曾红遍神州大地并历经二三十年而不衰, 社会保有量也极大。图 7 是该机低放部分的电路图。图中共用了 3 种负反馈:

(1) G3、G4 两管阴极电阻 R9、R16 无旁路电容——如前所述这是本级电流负反馈。

(2) G4 屏极通过电阻 R14 ($390k \Omega$) 接到 G3 屏极——将 G3、G4 之间的音调控制部分忽略, 可认为 R14 是将反馈电压输回 G4 栅极, 即与图 3 一样是本级

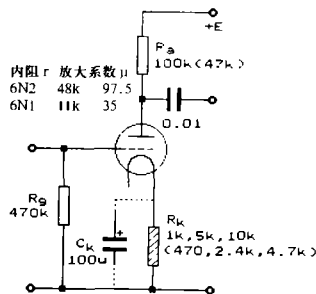


图 6 三极管阻容耦合放大器

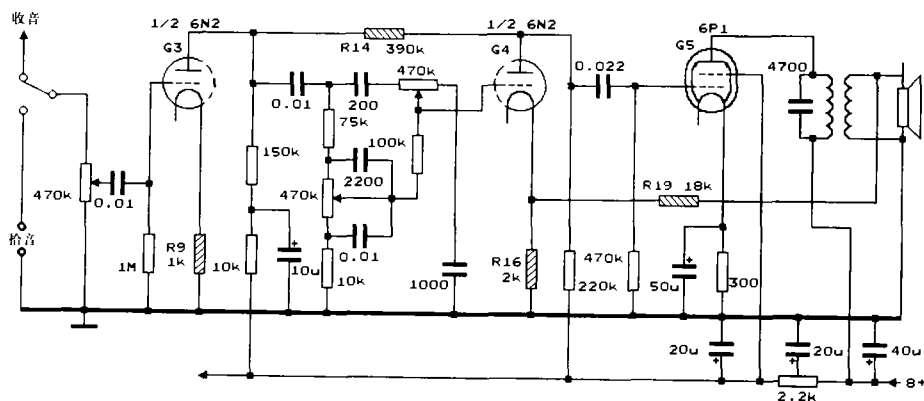


图 7 红灯 711 型电子管收音机

的并联电压负反馈。

(3) 从输出变压器二次侧将信号通过电阻R19回输到G3阴极——输出变压器二次侧的信号相位与G5屏极相同(若不同则将一次侧线头对调), 则与图5一样, 是两级间的串联电压负反馈。

2. 和田茂氏前级

这是一个虽无成品厂机却在音响发烧友中广泛流传的优秀前级电路。见图8所示, G1、G2是两级共阴极放大器, G3接成变形的SRPP电路, G3的下管作为恒流源, 实际上是上管的交流阻抗很大的阴极电阻, 故G3可看作是阴极输出器, 其输出信号相位与G2屏极相同, 所以:

(1) G1、G2两管阴极电阻R1、R2无旁路电容——本级电流负反馈。

(2) 从G2屏极通过电容C1接到G1阴极——与图5一样是串联电压负反馈。

(3) 从输出端通过10 μF电容和R3(25 kΩ)接G1阴极——也是串联电压负反馈。

由此可见, G1阴极电阻上除了本级电流负反馈外, 还有同时

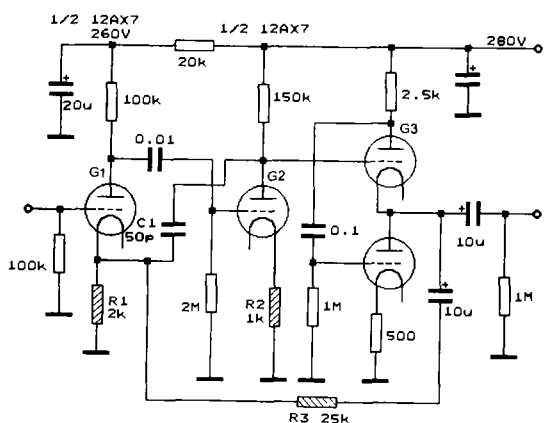


图8 和田茂氏前级

来自G2屏极和G3(上管阴极)输出的串联电压负反馈。由于10 μF大电容对音频信号的阻抗极小, 可以认为通过R3反馈的是全频信号; 而C1为50pF, 仅能通过人耳几乎听不到的超高频, 该反馈直接由G2屏极输出, 起着限制通频带上限和防止高频自激的作用(不知为什么现在传抄的电路中已经没有这个反馈电容了)。

3. 马兰士-7前级

一代名器马兰士-7在音响发烧友中几乎无人不晓, 其柔美的中频音色令多少人为之倾倒, 这当然也得益于电路中的负反馈。将原图中繁复的高低频切除电路、音调控制中的低音控制部分去掉(置于平直位置), 高音控制由11档简化为3档(高音提升、平直、高音衰减), 则其线路放大部分改如图9所示。

G1、G2是两级共阴极放大器, 与和田茂氏相似, G3为普通的阴极输出器。

它的反馈方式也是R1、R2两级电流负反馈和从G2屏极通过

0.22 μF电容及电阻R3到G1阴极的串联电压负反馈。不同的是, 在混合型负反馈中加入了音调控制网络, 见图中虚线框内。

(1) 当高音控制开关K1在中位(平直)时, 音调控制网络不起作用, 从G2屏极输出的反馈电压经电阻R3到G1阴极, 是与和田茂氏相似的串联电压负反馈; 但由于阴极电阻R1上并联了R4、R5和C2, 使本级和来自G2的混合反馈信号中的中高音部分少量的对地旁路(R5高达1MΩ, 旁路掉的信号是很少的), 中高频得到稍稍提升, 听感更明快饱满些。

(2) 当K1向上(高音衰减)时, R4、C1与反馈电阻R3并联, 因C1较小(1000pF), 对高音阻抗小、低音阻抗大, 而R4也很小, 所以高频可以绕过R3, 经C1直接到R1, 中低频仍需经R3(82kΩ)到R1, 即高频的反馈量要大大高于中低频的反馈量, 使放大器的高频大幅衰减。

(3) 当K1向下(高音提升)

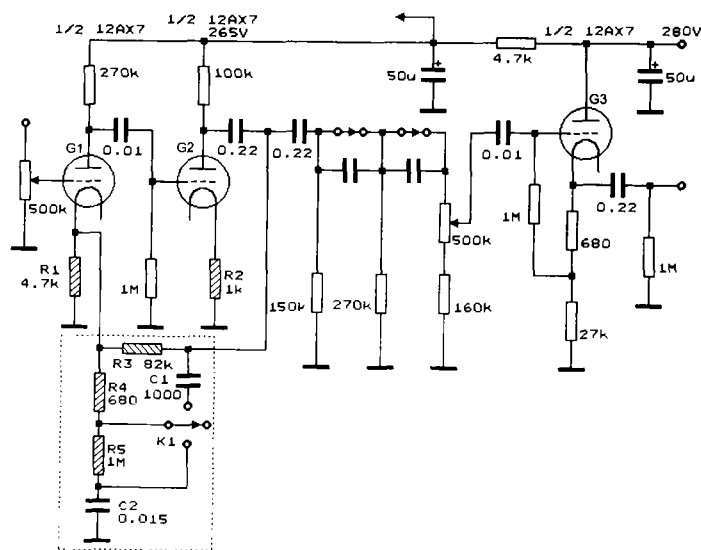


图9 Marantz-7前级

时, R5 被短路, 因 R4 很小, 相当于 R1 上并联了 C2, 又因 C2 较大(0.015 μ F), 使混合反馈信号中相当一部分高频对地旁路, 即高频的反馈量要大大小于中低频的反馈量, 使放大器的高音频大幅提升。

顺便说一句, 现在传抄的 Marantz-7 电路中, 往往把反馈电阻 R3 写成 8.2 k Ω , 显然是错误的。

4. DYNACO 前级

人称“火凤凰”的功放 DYNACO 是有口皆碑的, 国内大极典、关氏等均有仿制, 但很多人未必知道 DYNACO 还有一款有名的前级 CDV-1 (还有 CDV-2, 只部分元件数值略有不同), 见图 10 所示。

该机仅一级共阴放大和一级阴极输出, 电路相当简洁。除了 R4 电流负反馈, 就是第二级阴极输出反馈到第一级的栅极, 样子与图 4 相似, 但它不是并联电流负反馈, 实质上是图 3 那样的并联电压负反馈 (读者可自行分析), 而且不用反馈电阻, 反馈量的大小取决于 R2、R3 的分压比。

图 11 是笔者自制的一台迷你掌上胆前级电路, G1 用了前苏联

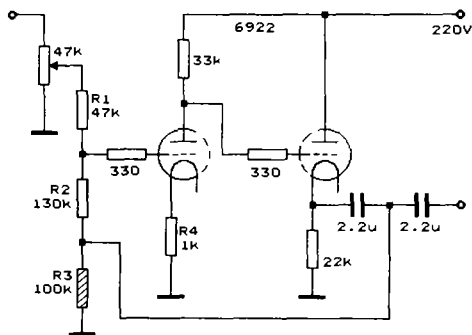


图 10 DYNACO 的 CDV-1

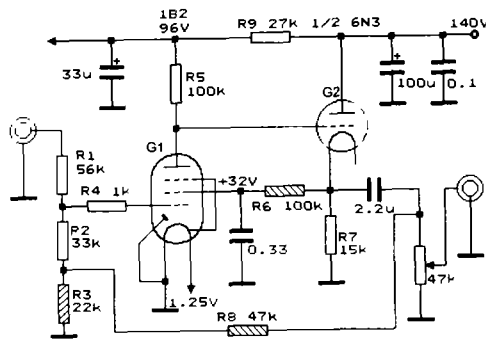


图 11 笔者自制的迷你掌上胆前级电路

低压低功耗直流五极管 1B2 Π (国内型号 1B2), 其灯丝就是阴极, 通常直接接地而不用阴极电阻, 无法施加本级电流负反馈, 故只好参照 CDV-1 将环路反馈也接到栅极分压电阻上。这里五极管的帘栅极没有接到 B+, 而是通过 R6 接到 G2 的阴极, 即帘栅压是随输出电压波动的。当栅极有正信号时 \rightarrow G1 屏流上升、屏压下降 (反相) \rightarrow G2 管阴极输出电压下降 \rightarrow G1 帘栅极电压下降 \rightarrow G1 屏流下降, 可见这里引入帘栅极负反馈。

5. QUAD- II 功率放大电路

这是英国早年著名的一款单声道功率放大器, 其电路十分简

洁, 音质却令人叹为观止。电路见图 12 所示, 两只五极管 EF86 作一级放大和一级分压式倒相, 两只 KT66 按束射四极管常规接法。这里也应用了 3 种负反馈:

- (1) 两只 EF86 共用的阴极电阻 R1、R2 加有本级电流负反馈。
- (2) 从输出变压器次级取出部分信号 (抽头) 经 R3 反馈到 R2, 这是串联电压负反馈, 即 R2 上是混合负反馈。
- (3) 末级功率管的阴极采用独特的通过输出变压器中专设的线圈后再接阴极电阻的方法, 从而引入特殊的负反馈。

大名鼎鼎的麦景图 275 功放也采用了多种负反馈方式, 其中末级两只 KT88 的阴极与地之间也是串了一个电感线圈, 但该线圈是独立于输出变压器的, 所以仅起一种负反馈作用。而 QUAD- II 机功率管阴极的电感是做在输出变压器中, 无信号时, 它对功率管起电流负反馈作用; 有信号时, 它从变压器一次侧耦合得到的信号电压也加到功率管阴极, 即同时起电压负反馈作用。
(未完待续)

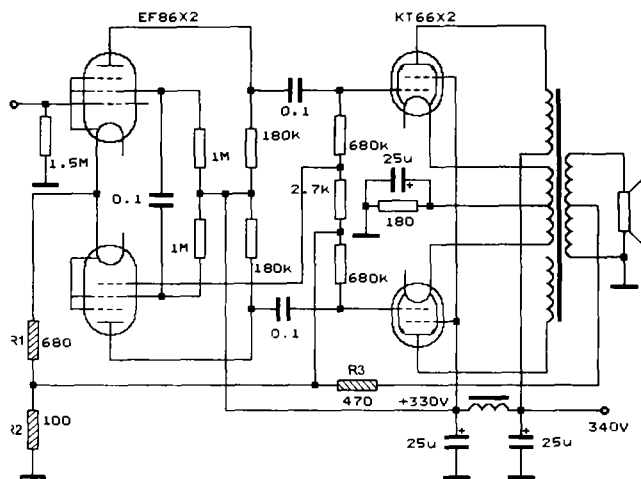


图 12 QUAD- II 功率放大电路