

载波通信放大器设计原理

蒋荣福 编著

内 容 提 要

本书主要介绍大容量载波通信放大器的一般设计原理并结合实际给出一些具体例子。本书虽偏重于设计原理及电路分析方法,但对生产、维护当中遇到的一些实际问题也进行了讨论。本书对放大器的噪声问题、稳定问题,反馈问题进行了系统的讨论。并对书中所用信号流图方法也作了简要介绍。本书可供从事载波通信工作的科研人员、工程技术人员及高等院校教师及高年级学生学习参考。

载波通信放大器设计原理

蒋荣福 编著

*

人民邮电出版社出版

北京东长安街27号

河北省邮电印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

*

开本: 787×1092 1/32 1980年3月 第 一 版

印张: 16 20/32 页数: 266 1980年3月河北第1次印刷

字数: 383 千字 印数: 1—20,800 册

统一书号: 15045·总2302—有5121

定价: 1.30 元

前 言

在党的十一大路线的指引下，目前一场向科学技术现代化进军的革命群众运动正在兴起。在有关同志的关怀和支持下，经过两年的努力，草成此书。提供通信工作的同志研究参考。

本书主要是根据二十余年来执笔者和同志们实际工作中的体会和心得编写而成的。对于目前一般书刊中容易找到的资料和普通知识，原则上不列入。但为了说明问题和叙述的连贯性和完整性，而不得不列入的，也尽量从简，以减少篇幅。

本书采用目前广泛使用的信号流图的分析方法，但在必要的地方也用普通的方法进行了类比和说明，使不懂信号流图的同志，也能阅读此书。

本书主要叙述载波通信用的放大器的一般设计原理，并结合实际给出一些具体例子。此书虽偏重于设计原理和计算方法，但对生产制造和维护使用过程中所碰到的许多实际问题，也进行了讨论。

在头二章中，叙述了载波通信放大器的特点，各种性能及一般的分析原则。第五章中分析了一些常用电路，给出了设计和计算公式。并以 $9MHz$ 线路放大器为例，说明计算过程和步骤。利用本章所介绍的分析方法和导出的公式，可引伸和得到其它许多电路结构和计算公式。

第六和七章介绍开环特性的校正，输入输出网络结构及其阻抗校正，以及选择反馈网络的若干原则。并以 $9MHz$ 线路放

大器为例，进行了计算。

第八章是放大器的稳定性和恒定性问题。特别关于空间和地线耦合对放大器的稳定性影响作了较详细的分析，也对各元件参数变化和不一致对放大器指标的影响进行了分析。并提出对放大器中各元件性能要求的依据。

第三章是讨论放大器的噪声，给出了各种反馈放大器噪声的简化计算方法，列出了常用电路的噪声计算公式。

第四章是讨论直流工作点的偏置和稳定。对工作电流和电压的稳定要求，各电路的稳定性能和计算方法进行了分析，给出了与目前一般方法不同的考虑原则和较简单而精确的设计方法。

附录一简单介绍信号流图的基本概念和实际应用。附录二是运用第五章的分析方法列举了30~40种目前常用的和到目前为止的在书刊杂志上曾经遇到过的电路结构和设计计算公式。其中包括若干值得研究而又有一定价值的电路形式及其计算公式，以供大家深入研究和探讨，并结合具体工作任务而选用。按照本附录的办法还可得到大量的其它电路和其设计公式，书中未一一列出。

附录三是9MHz线路放大器的实际制作例子及实测数据。

有关9MHz线路放大器的不少资料是由王焕新同志整理和提供的，高压保护是由马忠海同志设计的，反馈网络是由宋志坚同志设计的，此外还有许多同志参与了这一工作。

作者

1978.2.18

目 录

第一章 载波放大器的一般性能	(1)
1.1. 对放大器的要求.....	(1)
1.2. 反馈放大器的组成.....	(3)
1.3. 放大器性能简述.....	(8)
1.4. 放大器电路各部分的参数.....	(23)
第二章 电路分析方法	(35)
2.1. 单环路反馈放大器的增益.....	(35)
2.2. 回归比 T_K	(39)
2.3. 反馈对非线性失真及杂音的影响.....	(40)
2.4. 零回归差 F°	(42)
2.5. 灵敏度 S	(44)
2.6. 策动点阻抗.....	(46)
2.7. 输入电路部分的各参数与 K 电路输入阻抗 Z_T 的关系.....	(48)
2.8. 多环路反馈.....	(51)
2.9. 基本节.....	(52)
第三章 放大器的热噪声	(74)
3.1. 二端阻抗.....	(74)
3.2. 晶体管本身产生的噪声.....	(77)
3.3. 信号源内阻及匹配电阻产生的热噪声.....	(92)
3.4. 放大器噪声的原始计算方法.....	(95)

3.5.	放大器噪声简化计算方法	(98)
3.6.	若干典型反馈电路的噪声系数	(114)
3.7.	输入端附加网络对噪声系数的影响	(124)
第四章	直流偏置与稳定	(130)
4.1.	各极电流间的关系	(130)
4.2.	各极间电流变化关系	(131)
4.3.	工作点不稳定因素	(133)
4.4.	直流稳定系数 L	(134)
4.5.	固定电阻稳定法	(139)
4.6.	L 大小的确定	(145)
4.7.	集电极电流变化量 ΔI_c 的表示式	(146)
4.8.	工作电压的变化	(150)
4.9.	设计举例	(155)
4.10.	计及各种因素时的稳定系数 L_0	(158)
4.11.	直接耦合之一	(160)
4.12.	直接耦合之二	(164)
4.13.	热崩的防止及所需的供电电压	(173)
第五章	电路分析和设计举例	(182)
5.1.	串联反馈(C)电路	(182)
5.2.	并联反馈(B)	(189)
5.3.	混合反馈之一($1X$)	(194)
5.4.	组合型电路举例	(212)
5.5.	$1X$ 型电路设计问题	(215)
5.6.	设计示例	(227)
5.7.	二信号混合输入或输出	(237)
第六章	开环特性	(254)
6.1.	回归比	(254)

6.2.	K 电路的联接	(262)
6.3.	开环特性曲线形状	(264)
6.4.	过剩相移	(280)
6.5.	9MHz线路放大器所需管子的特征频率 f_T	(297)
6.6.	开环特性的校正	(300)
6.7.	9MHz线路放大器开环特性的校正	(309)
6.8.	开环特性曲线校正注意事项	(337)
第七章	输入输出及反馈网络	(342)
7.1.	输入输出电路形式及阻抗	(342)
7.2.	低频阻抗及校正	(344)
7.3.	高频阻抗及校正	(354)
7.4.	变压器结构	(369)
7.5.	反馈网络	(370)
第八章	稳定性和恒定性	(393)
8.1.	稳定性	(393)
8.2.	恒定性及一致性	(409)
附录一	信号流图基本概念	(420)
1.1.	信号流图表示方法	(420)
1.2.	基本规则	(421)
1.3.	简化方法	(422)
1.4.	马氏通用公式	(428)
1.5.	通用公式简化方法	(434)
附录二	各种反馈电路及公式	(443)
2.1.	基本型电路, 输入输出反馈型式相同者	(449)
2.2.	组合型电路	(478)

2.3. 二信号输入或输出.....	(502)
附录三 实验用线路放大器数据.....	(512)
3.1. 实验放大器预定指标.....	(512)
3.2. 实验结果.....	(514)
3.3. 实验电路结构元件表及各性能曲线.....	(515)
参考资料.....	(521)

第一章 载波放大器的一般性能

这一章只一般叙述载波放大器的基本要求和性能，若干原则与各参数的含义，主要公式的推导将在以后章节叙述。

1.1 对放大器的要求

载波通信用的放大器，特别是线路放大器，有它一系列的特殊和严格的要求：要求能精确地补偿电缆的衰耗（及其衰耗随温度的变化），有优良的信噪比并稳定可靠。具体说来，大致有如下一些要求：

- (1) 足够大的输出功率；
- (2) 噪声低；
- (3) 非线性失真小；
- (4) 增益 S 一般较高，且有一定的频率特性（ $s-f$ 特性）；
- (5) 增益频率特性（ $s-f$ ）的精度高，持恒度好，各个放大器间的一致性；
- (6) 频率高而频带宽，特别是深反馈大通路线路放大器，开环特性的控制频带相当宽；
- (7) 增益可以调节（人工和自动）且常具有一定的频率特性，并要求调节具有对称性；
- (8) 一定的阻抗要求，匹配良好；
- (9) 可靠性高，随着通路数的增加，增音段距离缩短，增

音机数量增多，可靠性要求就愈高；

(10)能承受高压冲击（高压雷击保护）；

(11)此外还要考虑50Hz干扰，空间、地线耦合，温度变化，电源变化对放大器性能的影响。

为保证非线性失真小，增益和阻抗保持恒定，放大器要有足够的反馈深度，反馈深度最好能达到3N(26dB)。

由于反馈深，开环特性的控制频带很宽，放大器的稳定就成为关键问题。为保证放大器稳定，对元件和工艺的要求就很严格。

为保证增益精度（包括其调节精度），一致性和恒定性，相应地对元件精度，温度性能和经时变化的要求也提高了，特别是对 β 网络的元件。

为保护放大器免受高压冲击而损坏，大通路线路放大器还加有耐高压冲击的保护系统。

为保证放大器的可靠性和恒定性，放大器所用的元件应经过筛选和老化。

综合以上所述可见，载波放大器，特别是线路放大器确是一种高精度、高可靠性、高恒定性、低失真、低噪声、高频宽带深负反馈的放大器。如附录三中给出的实验放大器预定指标就是一种同轴电缆无人增音机中用的放大器指标。而对一般的放大器，不一定都具有上述的要求。

9MHz线放的指标要求如下。

- | | |
|-------------------|--------------|
| 1. 频带：信号 | 0.308~8.5MHz |
| 遥测 | 8.9~9MHz |
| 2. 额定增益 | |
| 8.5MHz处： | 5.1N(44dB) |
| 包括前置均衡器(8.5MHz处)： | 4.961N(43dB) |

3. 增益斜度(前置均衡器除外): $2N(17.5\text{dB})$
4. 输入端固有噪声 $-15.3N(-133\text{dB})$
5. 最大不失真输出功率 $+2.4N(+21\text{dB})$

1.2 反馈放大器的组成

负反馈放大器是1934年布莱克提出的。当时是用来减小音频放大器的非线性失真。四十年代波特又有所发展,解决了一系列的设计和实际制作问题。直至目前,在设计原理上并没有很大的变化,但在使用频带、制造工艺和质量上都大大发展了。负反馈放大器不仅可以减小放大器的非线性失真,也可稳定增益和阻抗,使之与易变的放大元件(K 电路中的管子)的参数无关。这样就可做到即使晶体管参数改变(如大批生产,维护中的换管、或管子衰老),也不致影响整个放大器的参数。早在反馈放大器原理提出之前的1928年,布莱克还提出了前馈放大的原理,用来减小非线性失真。但前馈放大器用的元件太多,一直未得到应用。目前随着通路数的增多、频率的增高,深负反馈放大器对管子的要求也提高了,其稳定性也难控制了。另一方面,由于晶体管及固体组件的出现,使用元件的多少已无多大意义,因此又有人想到了前馈原理,并作出了一些放大器。但用于载波线路放大器的还不多见,还存在着一些需要解决的问题。

一个无反馈的放大器如图1.1。设 V_i 为输入信号, V_o 为输出信号, K 为放大器增益。由于放大器存在着非线性失真,输出信号 V_o 中,除 KV_i 外,还存在着非线性产物 V_n 。利用前馈原理〔文献16〕,可将 V_n 抵消掉。其过程如图1.2所示。输入信号 V_i 经增益为 K 的主放大器(简称主放)放大,在主放

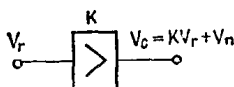


图 1.1 无反馈放大

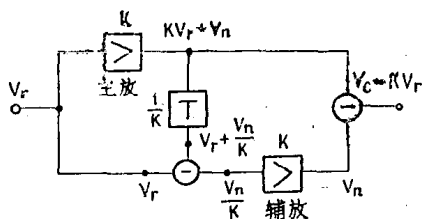


图 1.2 前馈放大

输出得到 $KV_r + V_n$ ，再经衰减为 K 的衰减器，在衰减器输出得到的信号和非线性产物为 $V_r + \frac{V_n}{K}$ 。它在辅助放大器（简称辅放）的输入端与输入信号 V_r 相减， V_r 被抵消，于是加到辅放输入端的只有 V_n/K 。辅放的增益也为 K ，故在辅放的输出获得 V_n 。再与主放的输出相减，消除了非线性产物 V_n 。这样，整个放大器的输出信号 V_c 中，只有 KV_r ，是被放大了 K 倍的输入信号 V_r ，而无非线性产物。同理，主放产生的杂音也被抵消。当然辅助放大器也可能产生非线性失真，不过辅放的输入和输出，只有主放产生的非线性产物，功率极低，故辅放产生的非线性失真极小。若均衡得很好，前馈放大器的非线性失真和杂音，只决定于辅放。

由图1.2可看出，前馈放大器是一种开环系统，没有反馈放大器那样的振荡问题，但其增益恒定性不好。为补偿这一缺点，常将负反馈和前馈混合使用。另外，为使失真抵消得好，幅度和相位都必须均衡得好，这对大通路放大器来说还是个难题。此外因要用一只辅助放大器，故元件增多了一倍。由于这些原因，目前的大通路线放，尚未广泛采用前馈原理。

前馈放大是将主放产生的非线性失真产物送到另一只放大器中放大，再与主放产生的非线性产物相抵消。而反馈放大器则是将非线性产物送回本放大器的输入，去降低非线性失真，如图1.3所示。其中 V_n 为非线性失真产物。

$$\because V_c = KV_i + V_n$$

$$V_i = V_r + \beta V_c$$

$$\therefore V_c = \frac{KV_r}{1-K\beta} + \frac{V_n}{1-K\beta} \quad (1.1)$$

反馈放大器是一个闭环系统，它将无反馈时的增益 KV_r 降低成 $1-K\beta$ 倍。非线性产物 V_n 也被降低 $1-K\beta$ 倍。在 $1=K\beta$ 时， $V_c \rightarrow \infty$ ，放大器自激。要使非线性产物小，反馈量 $K\beta$ 必须很大， $K\beta$ 愈大，放大器的稳定性也愈难控制。

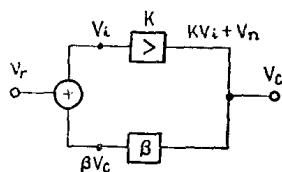


图 1.3 反馈放大

载波系统的放大器，一般皆采用只有一条公共反馈途径的反馈放大器。但可以存在(有时也不可避免地存在)不同大小的局部反馈(见第八章)。一般的单环路反馈放大器多由四部分组成，如图1.4。

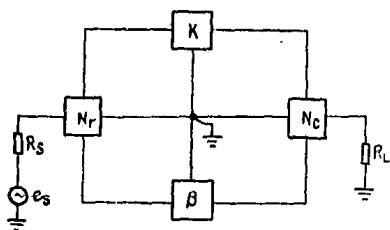


图 1.4 单环路反馈放大器

(1) K — K 电路或称 μ 电路：即放大电路，用来获得足够大的开环增益。开环特性的校正网络主要都在 K 电路中。 K 电路中还可能存在不同深度、不同大小和形式的局部反馈。 K 电路的结构，根据所需

开环增益大小即所要求的放大器指标高低等确定。

(2) β — β 网络：即反馈网络，用以获得所需的增益和增益频率特性。 β 网络结构也与开环特性有关，其形式不能任意选择(见第七章)。

(3) N_r —输入网络：其中包括输入阻抗匹配元件及阻抗

校正元件。输入网络的结构决定于反馈形式。输入端反馈形式，主要决定于所需的噪声性能。不同反馈形式对噪声的影响也不同（见第五章）。

（4） N_c —输出网络：其中包括输出阻抗匹配元件及阻抗校正元件。输出网络的结构也决定于反馈形式。而输出端的反馈形式又决定于输出功率大小和非线性失真的要求（见第五章）。

N_i 和 N_c 网络可能是复杂的网络，也可能是简单的匹配阻抗的电阻，或一无所有。这要根据对放大器的具体要求而定。

对晶体管放大器来说， K 电路的晶体管一般都用共发射极联结，以保证最大的放大倍数。只有在特殊情况下，才考虑用其它联结（如为了减少过剩相移，而用共基极）。

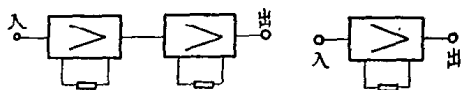
一个反馈环的 K 电路，可以包括一级，二级或三级晶体管放大电路。这要根据增益和对非线性失真的要求而定。目前还没有超过三级的。我们这里所指的一级，经常是意味着输入和输出信号经过倒相，并且在高频（有时还有低频）带来 90° 相移的一级。如共基极就不算一级。二个复合管也只算一级，变压器也算一级。但这些并非统一规定，仅仅是为了免于混乱作的一种约定。由于一级是 90° 相移，二级是 180° ，三级为 270° 。大家知道，相移超过 180° 的放大器不是绝对稳定的。因此三级放大器远比二级放大器难以制作。这也是放大器不超过三级的原因之一。

增益较高，指标要求亦较高的放大器，或为了避免三级放大器制作的困难，将放大器作成二段，每段反馈环包括的级数较少（如二级），两个独立的反馈放大器级联使用，如图1.5所示。

二段二级与一段三级放大器相比，二段二级的优点是容易

稳定，设计和制作简单，对管子的要求（ h_{fe} 和 f_T 等）较低。

其缺点是指标较差（杂音，非线性和增益恒定性），有时元件较多。



a) 二段

b) 一段

图 1.5 放大器段数

一般通路不十分大的放大器，用一段三级的较多。如附录三中实验用 $9MHz$ 线路放大器也用一段三级。在通路很大时，由于稳定性问题，有时不得不用二段二级放大器。

输入和输出端的反馈形式一般有三种。即：（1）串联反馈，即电流反馈，以下用C代表；（2）并联反馈，即电压反馈，以下用B代表；（3）混合反馈，以下用X代表。混合反馈本身的形式又很多，在附录二中列举了9种形式的混合反馈，分别以 $1X$ ， $2X$ ， $3X$ …… $9X$ 区分。其中 $1X$ 型用得较多。

每个放大器的输入和输出可具有相同的或不相同的反馈形式。即以上C，B， $1X$ ， $2X$ …… $9X$ 可以任取二种进行组合。这样一来，反馈放大器的形式就极多了。何况同一种反馈形式又有一级，二级和三级的区别，且同种形式，同样级数的放大器联结方法也可不同，所以放大器的结构，确实是千变万化的。我们虽然不能逐个加以分析，甚至逐个地画出结构，但便于查阅起见，在附录二中，列出了一些。对若干基本的典型电路，应该熟悉，掌握它们的性能，才能结合具体工作，选择适当的结构型式。

以下我们将输入输出反馈形式相同的放大电路叫作基本电路。输入输出反馈形式不同的电路（包括不同的X型）叫作组合电路。组合电路由基本电路进行积木式组合而成。其性能和计算公式皆可由所组成的基本电路得出。我们只要对若干基本

电路的性能有所了解，对几十种组合电路的性能也就了解了，而无需对每个电路分别进行研究。

1.3 放大器性能简述

1.1节简单列举了放大器性能。现以实验用9MHz线路放大器为例，再补充说明影响这些性能要求的若干因素。

1. 频带

放大器的信号和遥测信号的频带为0.308~9MHz。由于反馈较深，为保证稳定起见，放大器开环增益的控制频带很宽。低频区由0.308MHz向下延伸到1KHz，高频区由9MHz向上延伸到250MHz，开环增益为零的频率在40~60MHz之间。

由于控制频率高达250MHz，在此频带内各元件的性能要保证良好一致。一旦选用了某种型号的元件之后，就不应再变，以保证高频性能一致。并要保证在使用期限内，性能不变。对关键性元件，尤应如此。如晶体管；除 f_T 、 h_{fe} 要一致，且变化甚小外，其它参数如 C_{oe} 和 r_{be} 等也应一致，变化甚小。

2. 增益

放大器的外部增益，在9MHz处约为5.2N(45dB)。K电路的增益则更高。由于放大器的频率高，增益也高，高低电平相差悬殊，空间耦合（元件与元件，元件与地线间），地线耦合都较强烈，这就要求各元件的相对位置固定，地线接触良好，长度固定，排妥的印制板，不宜轻易变更。

3. 增益频率特性斜度

为改善低频信噪比，放大器反馈网络中，加有高低频增益差 $2N(17\text{dB})$ 的预斜网络。反馈网络衰耗斜度愈大，放大器的制作愈困难，也使放大器的起始增益降低。若放大器的起始增益过低，将使输入网络的噪声系数增大，使整个工作频带的噪声增加。线路放大器的增益斜度，目前一般是 10dB ，也有 17dB 的。

反馈网络中，还有增益随土壤温度变化的调节网络，在 8.5MHz 处的调节范围为 $\pm 1\text{dB}$ 。但热敏电阻的开路短路，可使高频增益变化 $\pm 3.5\text{dB}$ 。在此情况下，放大器也应保证稳定。

增音段调节网络（假线），没有放在反馈网络中，以免放大器增益变化过大，影响放大器的指标和稳定性。

预斜网络和土壤温度调节网络在 9MHz 线路放大器中原是分离的，如此设计比较简单一些，但使用元件较多。在改进时已将二者合在一起。

4. 放大器最大不失真输出功率

9MHz 线路放大器的最大不失真输出功率的指标要求为 $+2.4N(+21\text{dB})$ 。在正常供电时，可达 $2.6\sim 2.7N(22\sim 23\text{dB})$ 。

所需放大器最大输出功率，决定于制式设计。放大器的过荷能力，决定于工作点的选择和反馈形式。此外与变压器的效率，管子的输出特性也有关。

还没有统一的衡量最大不失真输出功率的方法。目前有以下几种办法：