

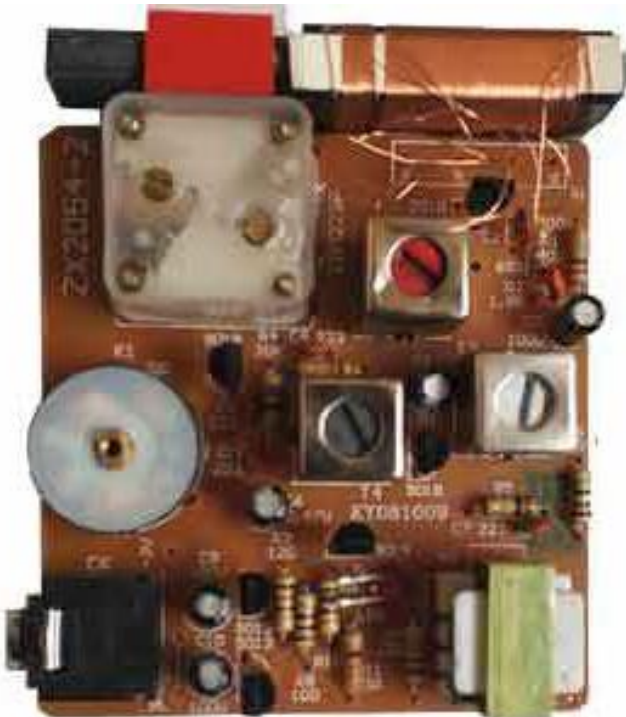
# 图解经典电路之六管调幅收音机

Chia-Chun Tsai, Nanhua University

<https://zhuanlan.zhihu.com/p/32082174>

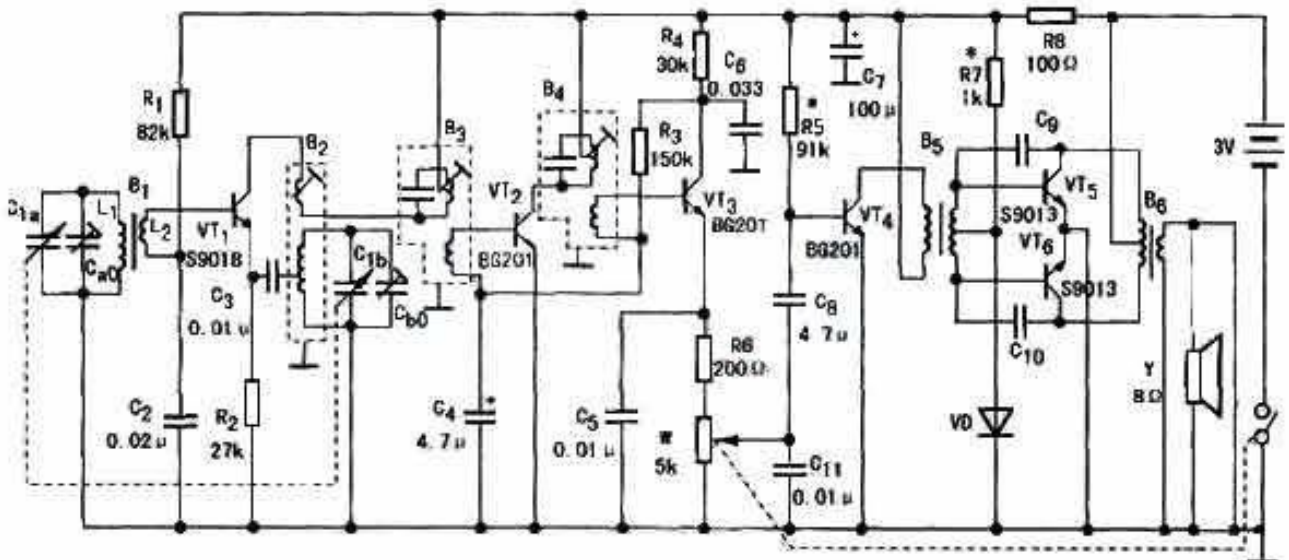
常用的收音机依照工作原理来说主要分为 **FM (调频)** 和 **AM (调幅)** 两种。AM 收音机最经典的电路要数六管调幅收音机。现在就来分析一下六管收音机的工作原理。

首先，拆开收音机，看看里面都有些啥。



图一 收音机拆解图

完整的电路图如下： 图二 完整电路图



首先回答几个问题：

### (1) 收音机是什么？

收音机是一个能够接收无线电台广播信号，并把节目内容通过扬声器播放出来的终端设备。

### (2) 收听广播电台需要什么条件？

首先，既然收音机是用来接收无线广播电台的设备，那么首先得有正常工作的无线广播电台，然后手里有一台工作正常的收音机。我们通过调频旋钮来选择我们要收听的电台。



图三 无线广播系统

### (3) 收音机的原理是什么？

首先，我们思考一下声音和电信号的关系。虽然声音和电信号是两种不同的东西，但是可以通过一定方式实现两者之间的相互转化。比如。

声音 ---> 电信号 (麦克风可以将声音震动的机械能转化成电能)

电信号 ---> 声音 (扬声器，俗名喇叭，可以将电信号转化成声音信号)

图四 电信号和声音信号相互转换

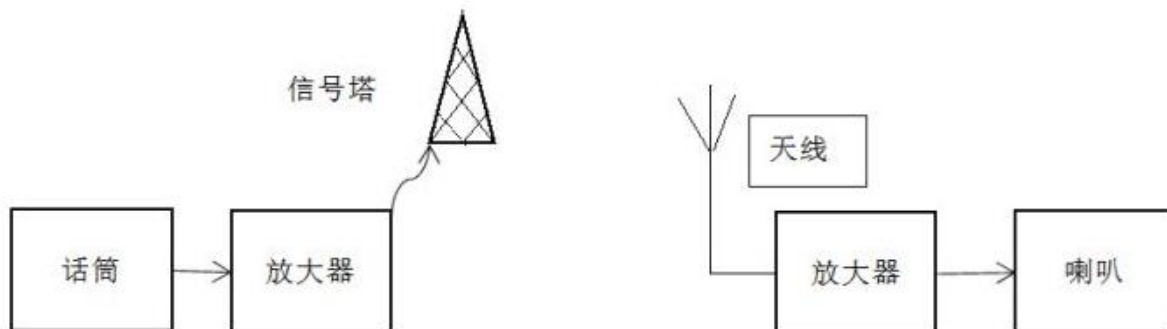


既然这样，如果电台到听众之间的距离很近的话，我们完全可以通过把麦克风产生的电信号通过电线传送到听众那里，然后使用放大器将电信号加以放大，推动喇叭发出声音。结构如下：



图五 有线传输电台信号

但是，一个广播电台不可能只服务于它周边的少数听众，且每个听众接根线收听电台实在是不方便。所以，无线电台出现了。无线和有线区别在哪里那？顾名思义，无线电台就是把电台原本需要通过电线传输的电信号，先转换成电磁波，发往空中，然后接收端通过天线接收到该电磁波，天线把接收到的电磁波转换成电信号，加以放大，推动扬声器发出声音。结构如下：



图六 无线传输电信号

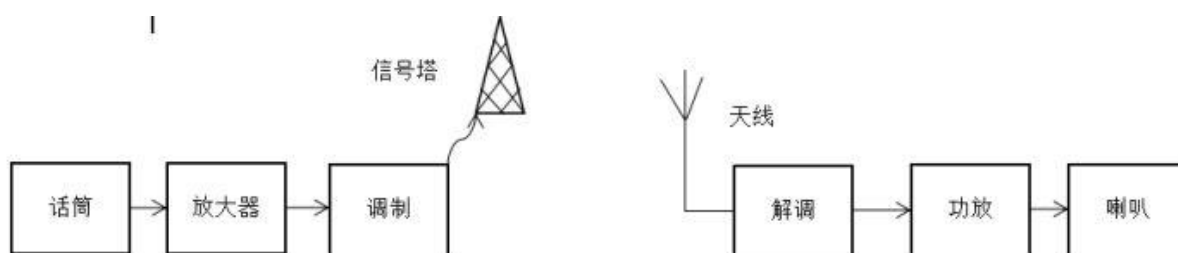
直接将声频发送出去，受天线长度限制：

然而，我们人类听觉范围只有 20Hz ~ 20KHz，多数人声的频率范围在 340Hz ~ 3.4KHz 之间。根据理论分析，电信号转换成电磁波的能力跟频率和天线长度有关系，即，频率越高，天线越长，电信号越容易转换成电磁波，通过天线发射出去。定量来看，固定频率下，天线的长度要大于该电信号波长的 1/4 时才能有效的发射出去。这样，如果我们直接把人声转化来的电信号发射出去需要的天线长度：

$$L = 1/4 * c / f = 1/4 * 3 * 10^8 / 340 = 220 \text{KM} \text{ (c 为光速, f 为人声下限)}$$

这么长的天线着实吓人，在地球上建造一根 220KM 的天线简直时开玩笑。

既然**天线长度有限制，那就提高频率嘛**。电信号转化成电磁波的能力跟频率和天线长度都有关系，就这样，伟大的人类选择了**将低频声音信号调制到高频载波上去，然后通过天线转换成电磁波发送出去**。所谓**载波**，顾名思义，就是**运载声音信号的高频电磁波**，它可以把有用的声音信号包含进去，发送到听众收音机上，然后收音机通过解调，把声音信号取出来，加以放大，最后推动扬声器发声。

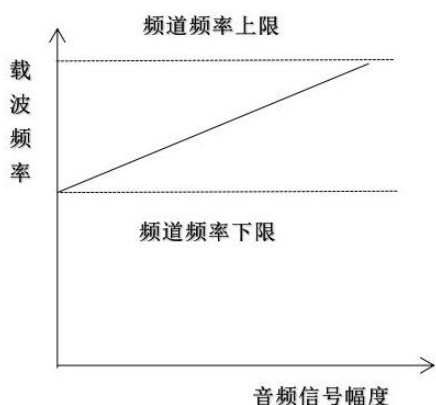


图七 高频载波无线传输系统

声音信号叠加到载波上的过程叫做**信号调制**，听众收音机把音频信号取出来的过程叫做**解调**。

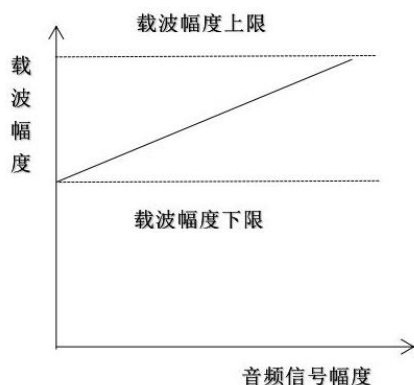
根据原理不同，调制分为 **FM（频率调制）** 和 **AM（幅度调制）** 两种模式。

**频率调制**：即调制频率，也就是使用音频信号幅度按照线性关系控制高频载波的频率。假设，没有声音的时候，载波频率最低 1MHz，声音最大的时候，载波频率最大 1.1MHz。



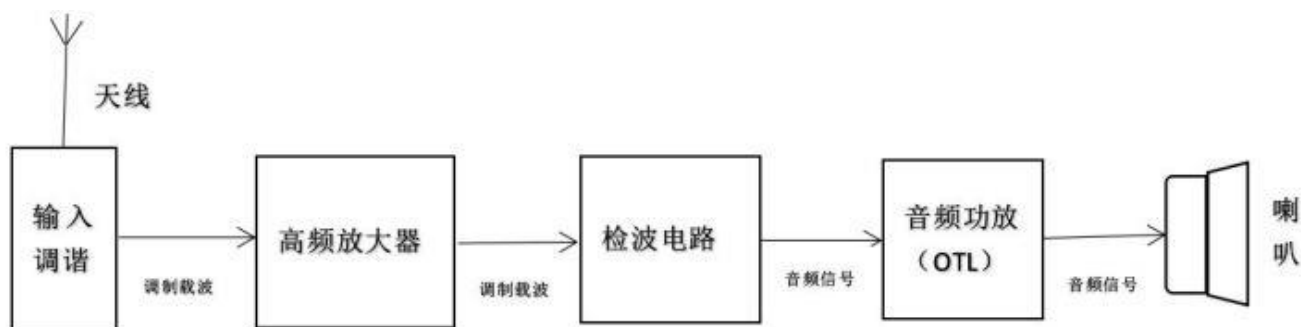
图八 调频方式

**幅度调制**：即调制幅度，也就是使用音频信号幅度按照线性关系控制高频载波的幅度。假设，没有声音的时候，载波的信号幅度为 1V，声音最大的时候，载波的幅度为 10V。两者的关系如下：



图九 调幅方式

本文主要讲述 AM 调幅收音机的工作原理，根据上述讨论结果，我们可以大体知道一台收音机的基本框架了。如图十描述，一台收音机包括：天线，输入调谐电路，放大器，解调器（检波），功放，喇叭等几大功能模块。



图十 AM 调频收音机基本功能框图

从原理上讲，以上模块已经可以实现接收电台的功能了，**但是因为电路要能够处理不同频道（载波频率不同），不同的信号强度（距离电台的远近，电台信号发射塔与接收者之间是否有障碍物）的情况，所以，实际电路设计中，增加了混频器和 AGC（自动增益控制）模块。**功能如下：

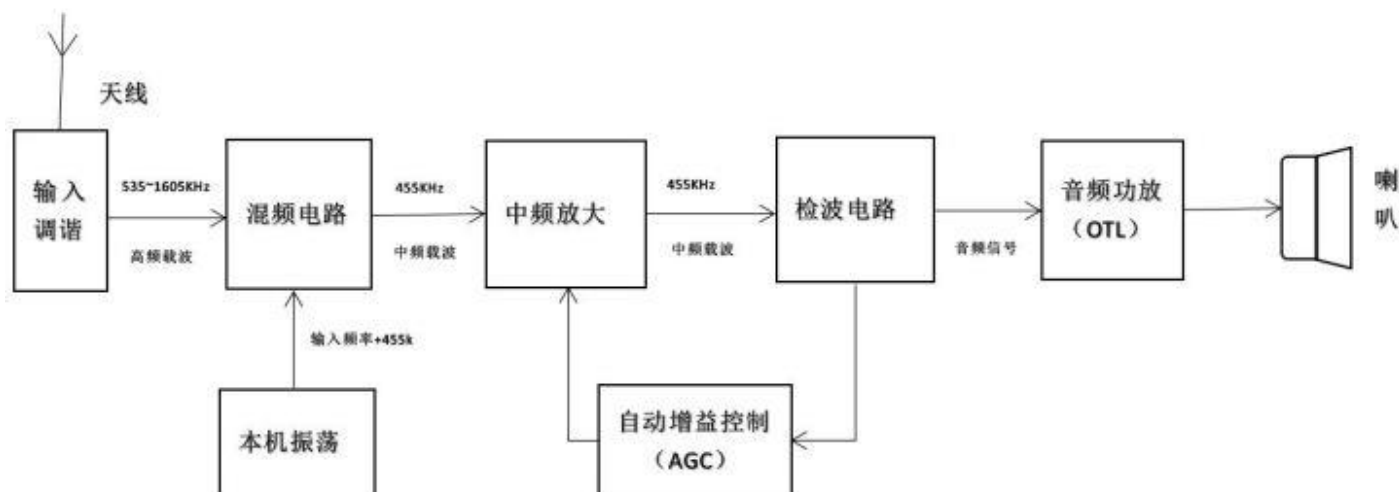
**混频器**：作用是通过把接收到的不同频率电台信号与本机振荡器产生的本振信号混合，然后通过选频电路把两者的差值频率信号选择出来，从而实现载波信号的频率迁移。**只要我们保证本机振荡频率始终比接收到的信号频率高**



一个固定值，就可以保证载波信号迁移到一个固定频率。这样，后续电路处理该固定频率的载波信号就会简单很多，大大简化了电路，此即为超外差式原理。在 AM 调频超外差式收音机中，这个固定频率值是 455KHz。我们把变频之后的这个 455kHz 载波调制信号叫做中频信号，后续的一级放大器叫做中频放大器。

**AGC 自动增益控制电路：**因为各种原因导致了收到的不同电台信号强度差异很大，为了避免这种问题，我们加入了 AGC 电路，当接收到的信号很弱时，AGC 自动提高中频放大电路的增益；相反，当收到的信号很强时，AGC 自动降低中频放大电路的增益。从而使得不同电台，不同场景下，电台音量保持稳定。

增加了上述功能后，整个系统框架基本就完善了，具体见图十一：

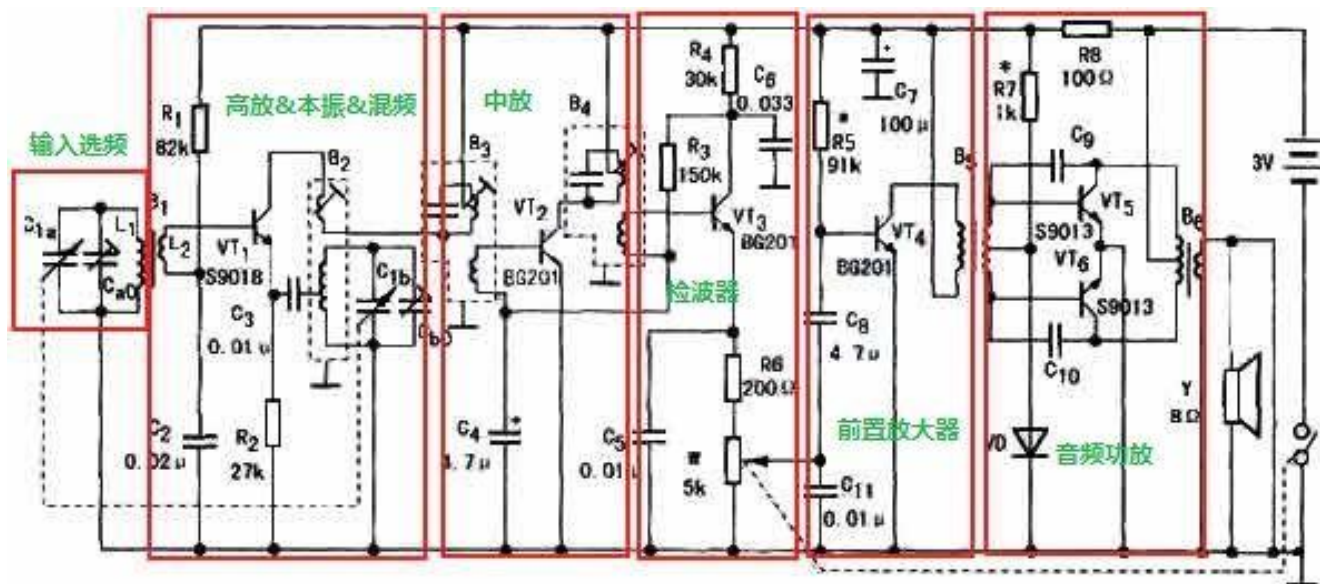


图十一 AM 调幅超外差式收音机完整功能框图

天线接收到各个电台的电磁波，转换成电信号，通过调节输入调谐电路（选频网络）选择出我们想要收听的电台频率，输入到混频单元，同时本机振荡器产生一个比输入电台频率高 455kHz 的信号也输入到混频电路，由于混频电路是通过使晶体管工作在非线性区域，产生两个信号之间的乘积项，该乘积项可以分解成多项式，其中包括两个输入信号的频率差信号（固定频率差值为 455kHz），从而实现载波频率转移（变频），该差值频率 455kHz 信号被称为中频信号。紧接着一级中频放大电路放大该中频信号，然后通过

检波电路检出需要的音频信号，送往音频放大电路进行功率放大，最终推动喇叭发出声音。AGC 电路根据检波出来的音频信号强度自动控制中频放大电路的增益，确保每个电台能够稳定工作。

那我们把开始的完整电路图于上述功能框图对应起来看下，如下图十二：



图十二 原理图的功能划分

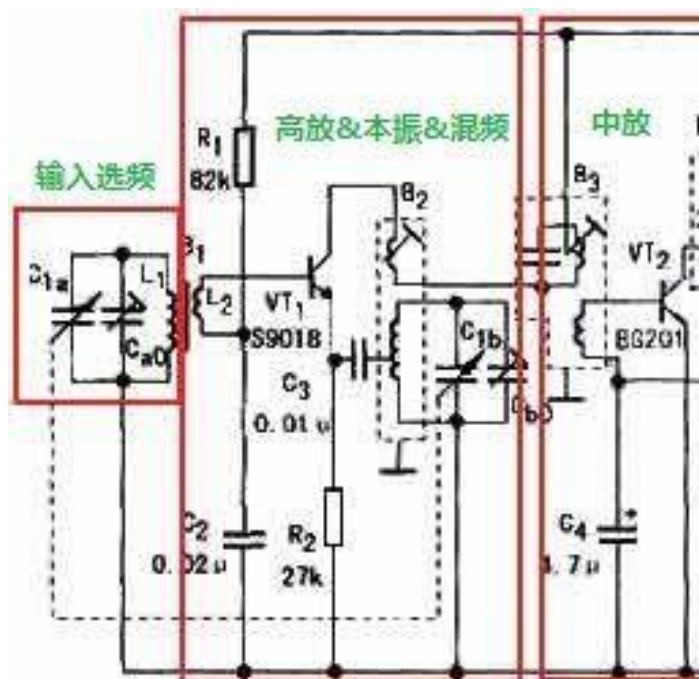
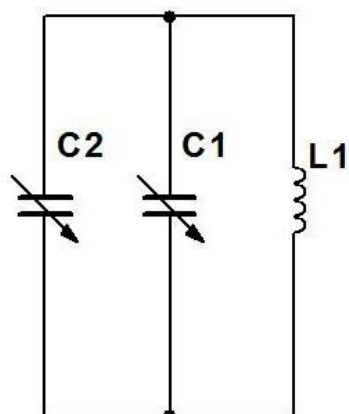
到这，你应该能够很清楚的明白整个 AM 调幅收音机的组成，以及每个模块的功能了，掌握了工作原理，你也就掌握了 80% 的内容，剩下的一件事情就是了解每个功能模块的具体电路实现。

下面带大家一起来研究下每个功能模块的电路实现。

### (1) 选频网络

如图十四，输入端采用 LC 选频网络来进行频道选择，C1 用作补偿电容，弥补实际电容误差。C2 容量调节选频网络的工作频率。

$$F_c = \sqrt{L(C1+C2)}$$

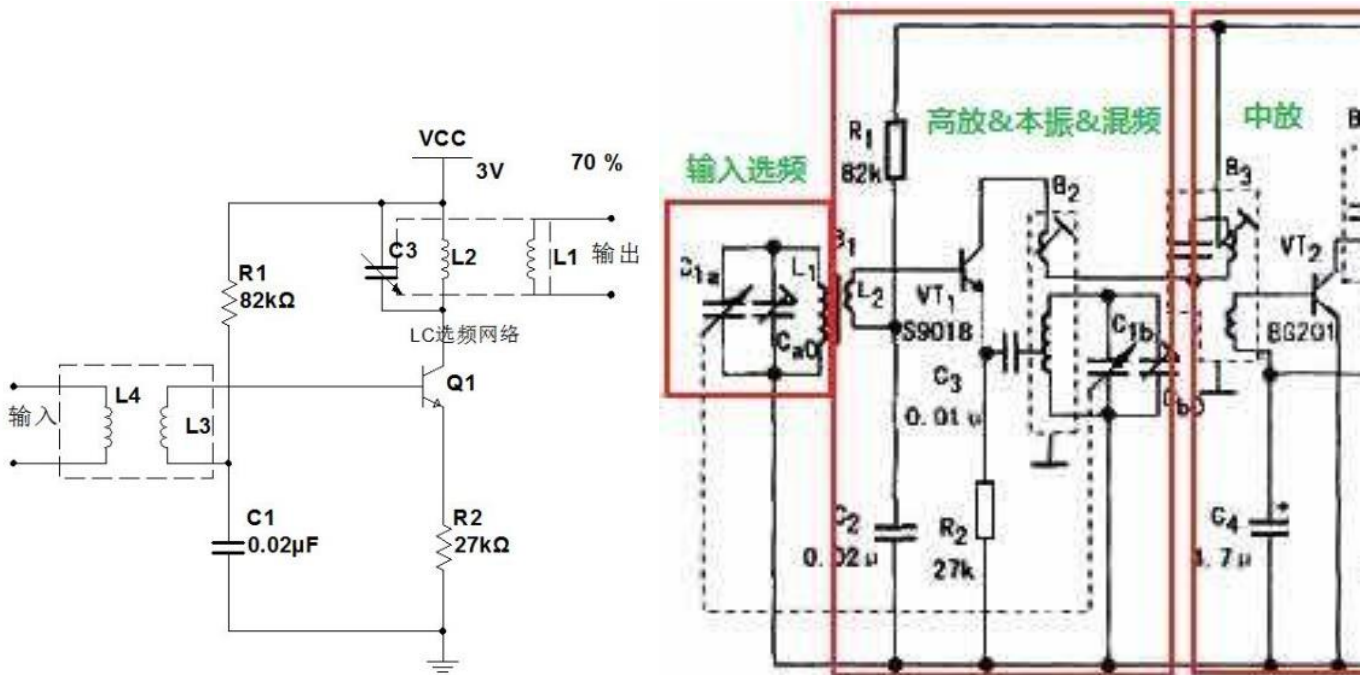


图十四 选频网络



## (2) 高频放大器

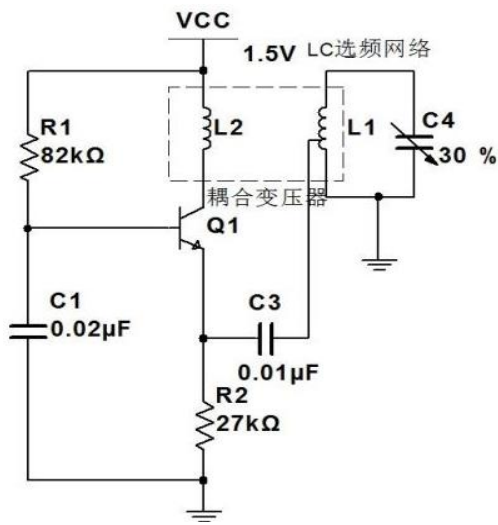
整机框图中可以看到高放，本振，混频是合在一起的，这里我们按照不同功能拆分开，如图十五就是其高频放大器。该电路采用共发射极放大器结构，输入信号通过变压器耦合到三极管 Q1 的基级，集电极的 LC 网络作为负载选择出固定频率的信号，提供足够的放大能力。然后通过变压器耦合到下一级。



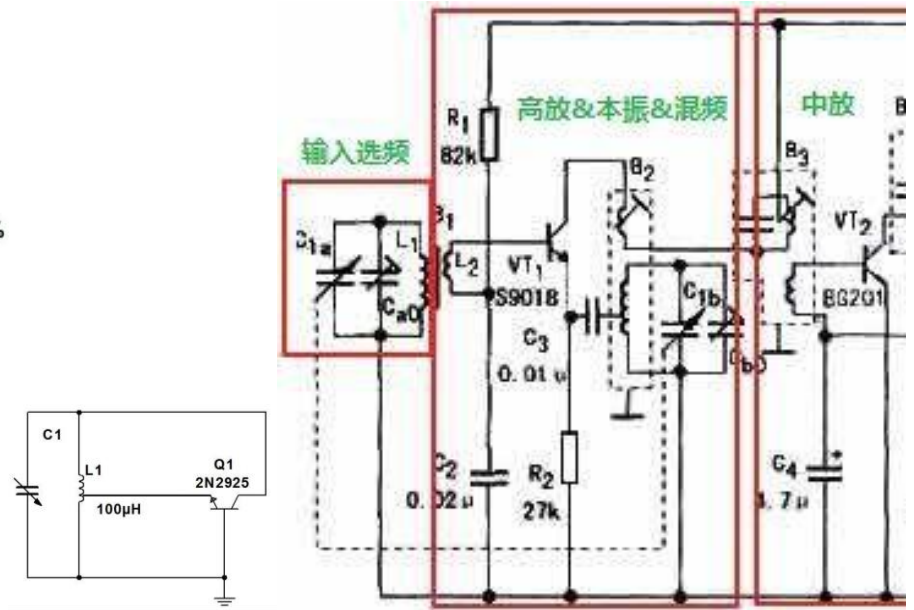
图十五 高频放大器

### (3) 本机振荡器

如下图十六，拆分出来的本机振荡器。交流等效电路如图十七。



图十六 本机振荡器



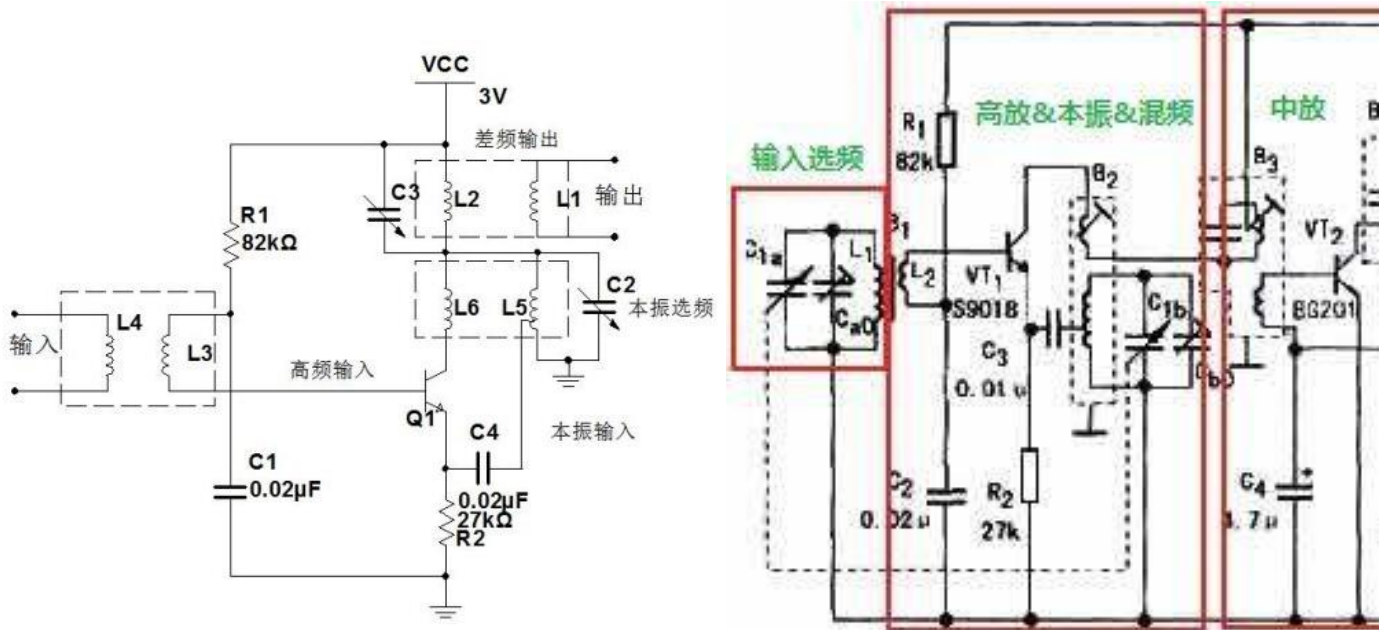
图十七 本振交流等效电路

首先，作为振荡器两个必要条件：（1）**正反馈**。（2）**环路增益足够大**。

整个电路基本结构是一个共基级放大器和一个 LC 选频网络，**信号从三极管 Q1 的发射级输入，通过集电极电感 L2 耦合到 LC 选频网络，LC 选择出需要的频率，通过 C3 送回输入端，构成正反馈**。合理设计 L1, L2 线圈的匝数比，以及 L1 中心抽头的位置可以提供**一个合适的环路增益，维持振荡器的稳定工作**。通过调节电容 C1 的值就可以调节振荡器的工作频率。通常**为了保证本机振荡器始终比输入信号频率高 455KHz，我们采用双联可调电容器来同步调节本振和选频网络的电容值，维持两者工作频率的差值**。

#### (4) 混频器

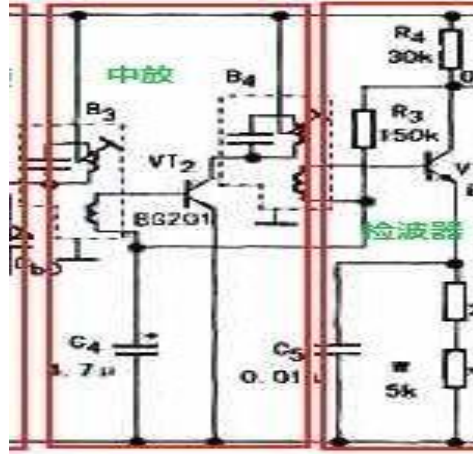
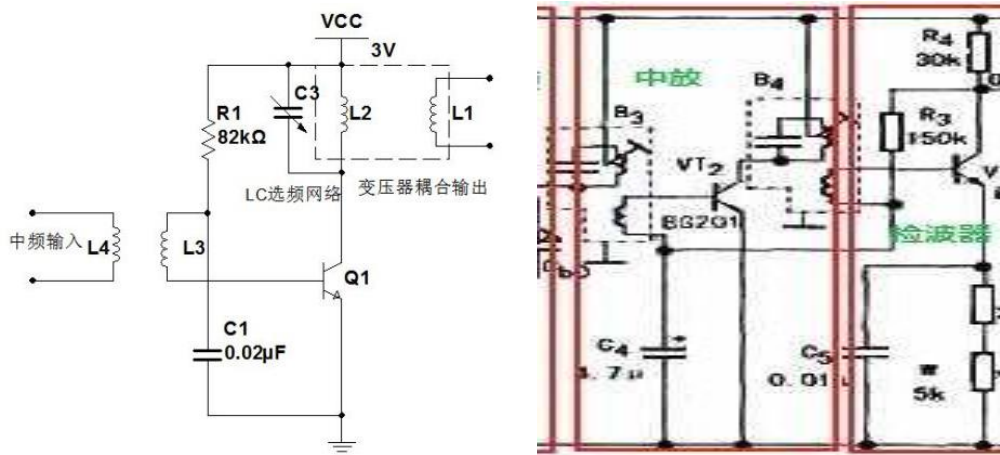
如图十八，电台信号通过基级输入放大器进行放大，本振信号通过发射级输入放大器。因为三极管工作在非线性区，两信号叠加的乘积项拆分出两者的差频信号，这里叫做中频信号，然后我们使用 L2C3 构成的选频网络选择出该中频信号，送往下一级中放电路进行放大。



图十八 混频电路

## (5) 中频放大

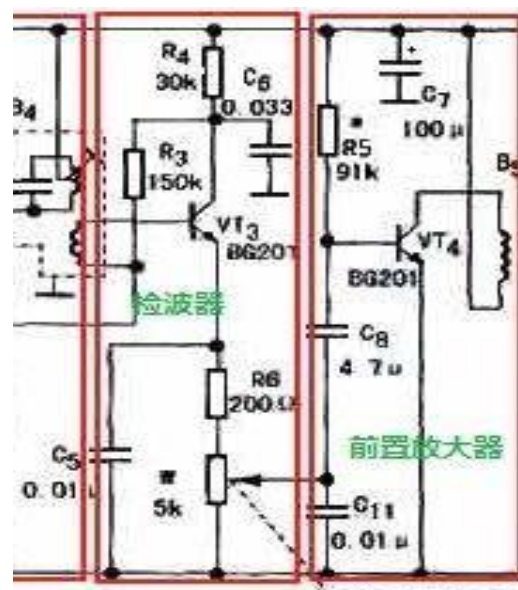
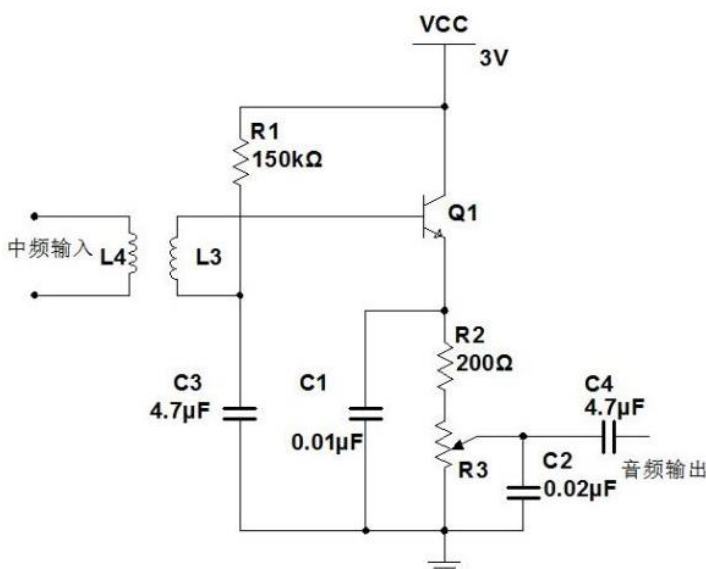
如图十九，中频放大电路。中频中矩的共射级放大结构，发射极直接接地，最大化增益。负载同样使用 LC 网路，可以充分发挥放大器的放大作用。输入输出使用变压器耦合。



图十九 中频放大电路

## (6) 检波电路

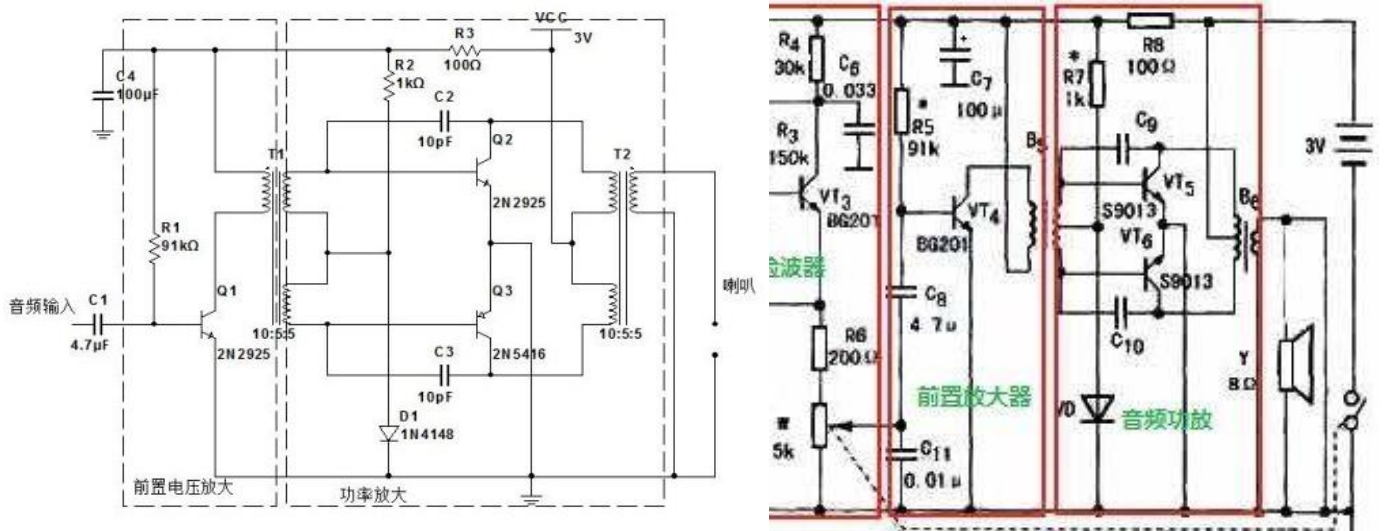
如图二十，检波电路其实是一个电压跟随器加上一个低通滤波器构成，中频信号从基级输入，经过跟随器进行电流放大，然后送到由 R2,R3,C1,C2 构成的低通滤波器。频率较高的载波被低通滤波器滤除，低频率的音频信号顺利输出，R3 是一个电位器，用来控制声音大小。



图二十 检波电路

## (7) 音频前置放大和功放电路

如图二十一，前级使用共发射极结构作为电压放大，电容耦合输入，变压器耦合输出，送到后级功放电路。后级采用对称推挽结构进行功率放大，该放大器属于乙类放大器，功率管 Q2, Q3 分别导通半周期。输入输出均采用变压器结构。当输入信号处于正半周期时，T1 上变压器感应出正电压，Q2 导通，给变压器 T2 上边线圈加电，通过变压器耦合输出到喇叭，Q3 输入负向电压截至。相反，当输入信号处于负半周期时，Q3 加正电压导通，给 T2 下边线圈加电，通过变压器耦合到喇叭，Q2 因为加了负电压截至。就这样，Q2, Q3 交替导通，构成完整输出信号。该电路没有考虑三极管 Q2, Q3 基级导通电压，所以输出存在交越失真，但是，普通用户不会太在意这一点，所以为了降低成本和电路复杂度，该功放电路在收音机中被广泛使用。

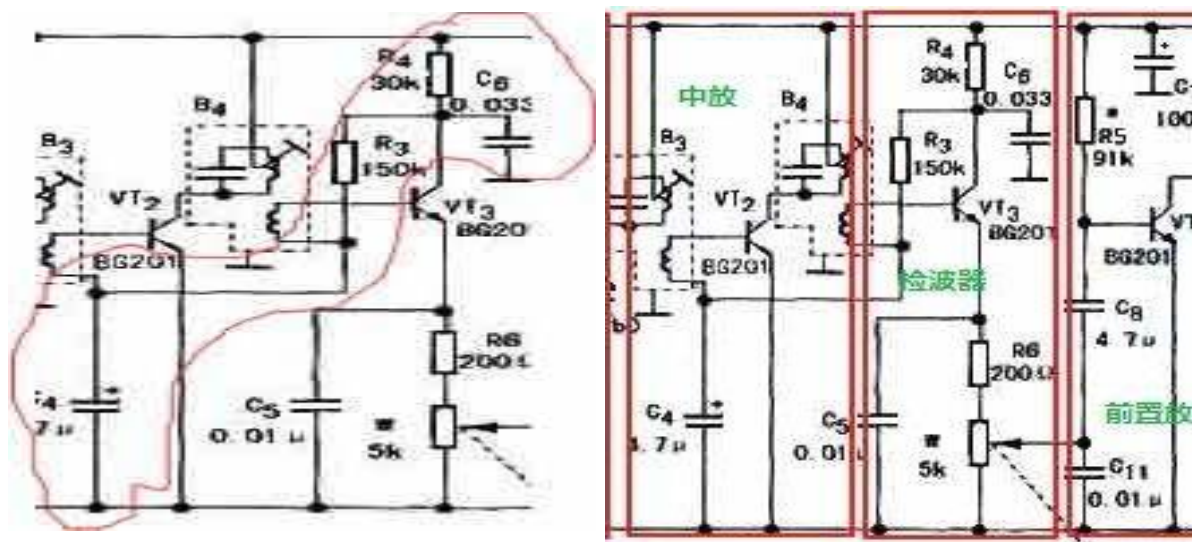


图二十一 前置放大&功率放大



## (8) AGC-自动增益控制

讲到这里，仿佛整个电路已经分析完了。但是，你是否意识到我们前面提到的 AGC 电路好像自始至终都没有出现过？好像也没看到有多余的电路了。那到底 AGC 在哪里那？来，我们再仔细看一下如图二十二。



图二十二 AGC 电路

看图中红色笔迹圈起来的部分，表面上看只是用  $R_4, C_5, R_3, C_4$  构成 RC 退耦电路，用来滤除电电源和功放电路对前级的干扰，其中， $R_4, C_5$  退耦给检波放大器集电极供电， $R_3, C_4$  退耦给中放和检波电路提供基极偏置电压。没错，这部分功能是对的。但是还有一个重要的功能，那就是控制中放的增益 (AGC 功能)，实现的关键是  $R_4$  比较大的阻值和中放取自电容  $C_5$  的电压。

因为中放采用的是共发射极放大器结构，基极偏置电压的大小会直接影响其放大倍数。具体是，在一定范围内，偏置电压越大，电压放大能力越大。试想一下，当收音机接收到的信号非常强时，检波输出的音频电流就会比较大，这时  $R_4$  上的压降相应的增大， $C_5$  两端电压减小，意味着中放偏置电压减小，中放增益就会较弱。最终达到一个平衡。从而实现自动增益控制。