

无线电爱好者丛书

**无线电爱好者读本**

(中 册)

宋东生等 编著

人民邮电出版社

## 内 容 提 要

《无线电爱好者读本》中册共分六章，前五章分别介绍了晶体管高频放大器、正弦波振荡器、调制与解调电路、混频器与变频器、晶体管开关电路的特点和工作原理，最后一章对比晶体管讲述了电子管器件的结构及电子管电路的性能。

本书适合无线电爱好者阅读。

无线电爱好者丛书  
**无线电爱好者读本**  
Wuxiandian Aihaozhe Duben  
中 册

宋 东 生 等 编 著  
责任编辑：高坦弟

人民邮电出版社出版  
北京东长安街27号  
北京印刷一厂印刷  
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 1984年5月第一版  
印张：9 页数：144 1984年5月北京第一次印刷  
字数：206千字 印数：1—154,000册

统一书号：15045·总2853-无6274

定价：0.76元

## 前 言

广大的业余无线电爱好者常常有这样的体会：在通过制作收音机等简单无线电设备积累了初步实践经验之后，缺乏比较系统的理论知识，就成了进一步探索无线电世界奥秘的一大障碍。换句话说，理论基础薄弱羁绊了长足进取。为了向具有初中文化程度的广大无线电爱好者比较系统地介绍无线电电子学方面的基础知识和实用知识，进一步提高他们的理论水平，指导他们更好地从事业余无线电制作活动，我们编写了这本《无线电爱好者读本》。

本书是中国电子学会组织编写的“无线电爱好者丛书”中的一种。为了避免和其它专册重复，本书不涉及某种设备的制作工艺、调试、维修方法等内容，而是从各种无线电设备的共性出发，比较深入地阐述电子元器件和各种无线电单元电路以及整机电路的基本工作原理和分析方法。在写法上侧重讲清物理概念，尽量避免数学推导，力求深入浅出，通俗易懂。在取材上注意针对性，既考虑到我国当前业余无线电活动的水平，又考虑到无线电技术日新月异的发展，对新型元器件、新颖电路等也作了浅显通俗的介绍。

《无线电爱好者读本》分上、中、下三册出版。上册内容包括无线电通信基础知识、电路基础和无线电元件、常用半导体器件、晶体管声频放大器和整流、稳压电路等；中册内容包括晶体管高频放大器、正弦波振荡器、调制与解调电路、混频器与变频器、晶体管开关电路和电子管等；下册内容包括收音机、

扩音机、磁带录音机、电视机、无线电遥控装置及天线等。

参加本书编写的同志是宋东生、王行国、李璜、张春元、赵锡禄、张序中，宋东生同志统编。由于我们水平有限，各章又是分别由几个同志执笔撰写的，在内容选取、体例风格等方面肯定会有不妥甚至错误之处，诚恳希望广大读者批评指正。

本书承中国电子学会科普读物编委会主编孟昭英教授审订，在此顺致诚挚的谢意！

编者

# 目 录

<b>第六章 晶体管高频放大器</b> .....	1
第一节 放大器的高频特性 .....	1
第二节 高频放大器的性能指标 .....	7
第三节 高频放大器的连接方式、负载方式和耦合方式 .....	10
第四节 非调谐放大器 .....	15
第五节 调谐放大器 .....	29
第六节 高频功率放大器 .....	54
第七节 高频放大器对元件的要求 .....	61
习题 .....	65
<b>第七章 正弦波振荡器</b> .....	68
第一节 正弦波振荡器的一般知识 .....	68
第二节 $LC$ 振荡器 .....	76
第三节 晶体振荡器 .....	87
第四节 陶瓷滤波器振荡器 .....	92
第五节 $RC$ 振荡器 .....	95
习题 .....	101
<b>第八章 调制与解调电路</b> .....	103
第一节 晶体管调幅电路 .....	104
第二节 晶体管振幅检波器 .....	119
第三节 晶体管调频电路 .....	130
第四节 频调波的解调电路——鉴频器 .....	142
习题 .....	149

<b>第九章 混频器与变频器</b> .....	150
第一节 混频器的一般知识 .....	152
第二节 对混频器的要求 .....	159
第三节 混频的失真和干扰 .....	161
第四节 二极管混频器 .....	164
第五节 三极管混频器和变频器 .....	166
习题 .....	174
<b>第十章 晶体管开关电路</b> .....	176
第一节 晶体管可以做开关元件 .....	176
第二节 门电路 .....	184
第三节 双稳态触发器 .....	192
第四节 单稳态触发器 .....	202
第五节 自激多谐振荡器 .....	206
第六节 锯齿波发生器 .....	209
习题 .....	215
<b>第十一章 电子管</b> .....	218
第一节 热电子发射和真空二极管 .....	219
第二节 真空三极管 .....	227
第三节 多极电子管简介 .....	239
第四节 复合管 .....	248
第五节 电子管电路的特点 .....	249
第六节 显象管和示波管 .....	256
习题 .....	279

## 第六章 晶体管高频放大器

在无线电发送与接收设备中，需要放大的电信号除了声频信号外，还有中心频率在几百千赫到几百兆赫的高频信号。用来放大这种高频信号的放大器称为高频放大器。它与前面介绍的声频放大器相比，具有许多不同的特点，对电路的元、器件也有一系列特殊的要求，因而电路的分析与计算也比声频放大器复杂得多。本章仅就无线电爱好者常用的高频晶体管放大器作简要的分析。

### 第一节 放大器的高频特性

#### 一、高频放大器与声频放大器有什么不同

大家知道，放大电路是由晶体管（电子管或场效应管）、电阻器、电感器和电容器等元器件组成的。在声频放大器中，由于信号频率很低（20~20千赫），上述元、器件都可以近似看作是理想元、器件。在高频放大器中，晶体管本身的频率参数以及各种元件的分布参数，都会直接影响电路的高频性能。下面分别说明它们在高频应用时的特点。

(1) 晶体管 一般晶体管有高频管和低频管之分，它们使用的频率范围是不同的。低频管只能工作在3兆赫以下的频率，而高频管则可工作在几十或几百兆赫的频率。第三章曾介绍过晶体管的高频参数（ $f_{\beta}$ 、 $f_T$ 、 $f_{max}$ 等），它们体现着晶体

管的频率特性，即电流放大系数  $\beta$  与工作频率  $f$  的关系。 $f$  增高至一定值后， $\beta$  随  $f$  的上升而下降，是由于晶体管在高频运用时内部状况与低频时不同造成的。后面将作专门分析。

(2) 电感线圈 一个实际的电感线圈，除了有电感特性外，还同时具有电阻及电容的特性。在低频工作时，线圈的有效电阻可以看作与其直流电阻相等。但在高频工作时，由于导体的趋肤效应（高频电流只沿导体表面流动的特性），线圈的有效电阻增大，且随工作频率变化。线圈的分布电容虽然很小，但在高频工作时，其影响也可能很大。图 6-1 a 绘出了在高频工作时电感线圈的等效电路。图中  $L$  为线圈的电感量， $R_e$  为有效电阻， $C_L$  为线圈的分布电容。

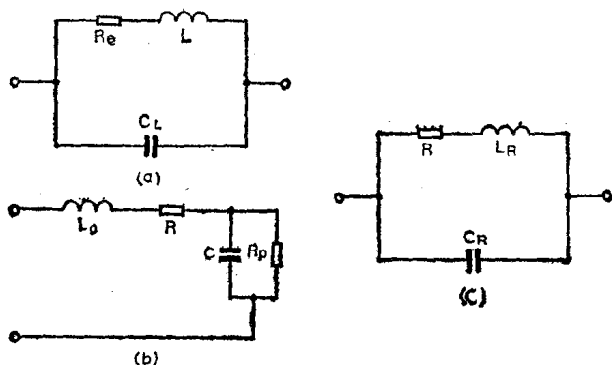


图 6-1 电感、电容、电阻的高频等效电路

(3) 电容器 电容器在高频工作时，介质损耗增加，工作稳定性变差。另外，一切电容器都有引线和接头，这些部分都有电阻。当频率较高因而趋肤效应显著时，这些电阻值可能变得较大。电容器还有固有电感，这个电感是由通过电容器的电流所生的磁通而引起的。图 6-1 b 绘出了电容器的高频等效电路。图中  $C$  为电容器的电容量， $R_p$  为介质损耗电阻， $R$  为引



线电阻， $L_0$  为固有电感。

(4) 电阻器 电阻器在高频工作时的等效电路如图 6-1 c 所示。当有电流通过电阻时，在它的四周产生磁场，可等效为电感  $L_R$ ；同时，当有电压加在电阻两端时，必将因存在电位差而引起电场，可用电容  $C_R$  等效。

由上可知，在高频电路中，晶体管、电感、电容和电阻的电气特性都与工作频率有关。第四章中曾讲过放大器“频率响应”的概念。放大器增益大小与频率的关系，称为“幅频特性”。一般地说，高频放大器要放大的信号不是正弦波。根据理论分析，非正弦信号具有复杂的频谱特性；任何非正弦信号（包括脉冲信号）都可以看成是由许多不同频率、不同振幅、不同相位的正弦波信号叠加而成的。放大这种信号，可以看成是在放大一个正弦频谱。如果放大器对不同频率的分量进行不等量的放大，必然要引起输出波形失真（频率失真）。因此，放大器的幅频特性在高频时具有重大的意义。为了减小输出波形失真，要求高频放大器的通频带足够宽。

此外，在高频放大器中还必须考虑不同频率的信号分量放大的“步调”不一致，引起输出波形畸变，产生“相位失真”的问题。这种输出与输入信号的相位偏移与频率的关系，称为“相频特性”。

总之，高频放大器的信号频率很高，由于电路的分布参数和晶体管高频特性的影响，不仅增益会降低，而且出现频率失真和相位失真。这一章将围绕高频放大器的上述特点展开讨论，并引出各种实用电路。

## 二、在高频运用时晶体管的内部状况

放大器在工作频率升高后，增益明显下降的主要原因，在

于晶体管高频运用时的物理过程和低频运用时有许多不容忽略的差别。为此，需要分析在高频运用时晶体管的内部状况。

晶体管在外加电压变化时，内部进行着复杂的物理过程。图 6-2 绘出了晶体管的物理模拟电路。可以看出，除构成晶体管的各极间存在体电阻外，在晶体管内部还存在着容抗随频率变化而变化的电容，分别用集电结电容  $C_{b'c}$ 、发射结电容  $C_{b'e}$  和集—射间电容  $C_{ce}$  表示。具体来说，图 6-2 中  $r_{bb'}$  是从基极引

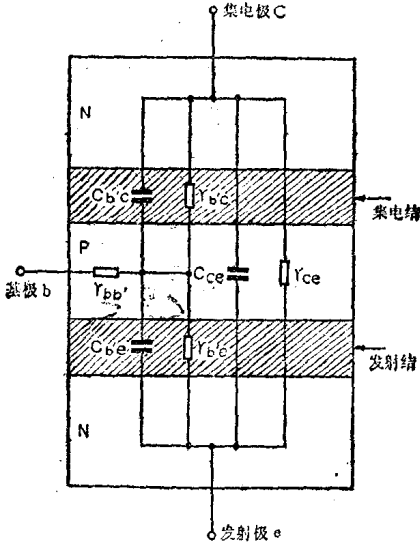


图 6-2 晶体管内部状况

线到实际起控制作用的基区  $b'$  之间的等效电阻，叫基区体电阻。高频晶体管  $r_{bb'}$  一般小于 150 欧姆。 $r_{b'e}$  是发射结的结层电阻折合到基极回路的电阻；由于发射结正向偏置， $r_{b'e}$  仅为几百欧姆。 $C_{b'e}$  是发射结电容，它的数值与晶体管特征频率  $f_T$  和发射极工作电流  $I_e$  有关。 $f_T$  越高、 $C_{b'e}$  越小； $I_e$  越大， $C_{b'e}$  越大。

高频管  $C_{b'e}$  通常在几十到几百皮法之间。 $C_{b'c}$  是集电结电容，它的数值很小，一般为 2~10 皮法。 $C_{b'c}$  值与集电结反向电压密切相关；反向电压越小， $C_{b'c}$  值越大。

上述晶体管内部的电阻、电容，在声频放大器中影响甚微，但高频运用时就不能忽略了。下面以共发射极高频放大器

为例，说明上述参数对高频放大性能的影响，请参看图 6-3。

$r_{bb'}$  的影响：当晶体管输入高频信号时， $i_b$  通过  $r_{bb'}$ ，会在其两端产生电压降；在共基极电路中， $r_{bb'}$  还会引起高频负反馈。

$C_{b'e}$  的影响： $C_{b'e}$  接在输入端，将分流输入信号。通俗地理解，就是  $C_{b'e}$  对信号起部分旁路作用。显然，频率越高，

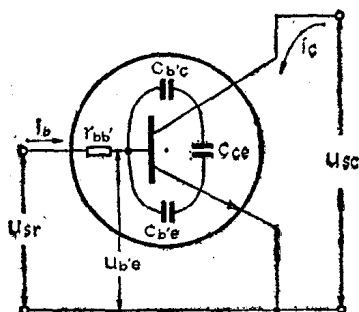


图 6-3  $C_{b'e}$ 、 $C_{b'c}$ 、 $r_{bb'}$  的作用

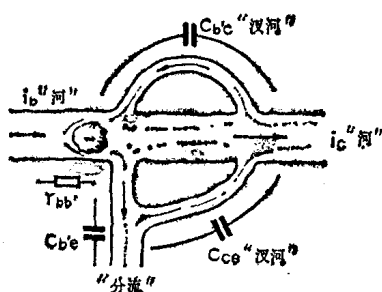


图 6-4 一个比喻

$C_{b'e}$  的容抗越小，晶体管输入的有效基极控制电压  $u_{b'e}$  就越小，从而降低高频增益。同理， $C_{c'e}$  并联在输出端，会旁路部分输出信号。

$C_{b'c}$  的影响：集电结电容  $C_{b'c}$  跨接在输出端和输入端之间。尽管数值很小，但在频率很高时， $C_{b'c}$  也会呈现很小的容抗，将输出信号的一部分反馈到输入端。当负载是电阻性时，形成负反馈，放大器增益下降；负载是电感性时，则形成正反馈，造成自激，破坏放大器稳定工作。

上述情况可以用河流的支流或港汊对主流的影响来比喻，参看图 6-4。图中  $r_{bb'}$  比做横在  $i_b$  “河”上游输入口的一块岩石，它降低了  $i_b$  “河”的“流速”； $C_{b'e}$  “分流”减少了“河”的“流量”，下游输出口的  $i_c$  “河”又通过  $C_{b'c}$  “汉河”回流到输入口。这个

比喻从科学性角度看是不十分确切的，但却可以帮助我们理解晶体管高频运用时的内部状况。

$r_{bb'}$ 、 $C_{b'e}$ 、 $C_{b'c}$  的存在对晶体管的高频运用十分不利。它们的值越小越好。

### 三、高频放大器的分布参数

任何两个导体之间都存在着电容。电路中导线之间，导线与大地之间，元件之间，线圈或变压器的层间、匝间等，都存在着电容。这些不定形的电容称为分布电容。此外，任何一根导线不论长短如何，都具有一定电感。元器件的引线、连接电路的导线以至印刷电路都存在着引线电感。这些潜在的电感称为分布电感。

分布电容、分布电感统称为杂散参数或分布参数。低频时可以忽略分布参数的影响，而在高频时，电路的分布参数和晶体管的电抗效应共同作用，在放大器的输入端和输出端形成输入电容和输出电容。工作频率越高，容抗越小，对信号的旁路作用越大，使高频增益下降越多。分布电容、分布电感存在于

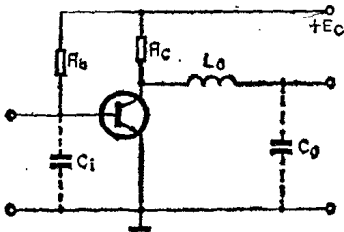


图 6-5 放大器的分布电容和分布电感

放大器输入端和输出端的示意图如图 6-5 所示。 $C_i$  表示输入端分布电容。 $C_o$  表示输出端分布电容。它们通常有十几皮法到几十皮法。对输入端来讲， $C_i$  旁路了部分输入信号，

使输入给基极的信号电流减小；对输出端来讲，高频时  $C_o$  容抗减小，其容抗与负载电阻并联，使交流负载减小。它们同时使放大器的高频增益下降。另外，高频输出信号将在分布电感  $L_o$  上产生压降，使实际输

出电压减小。

## 第二节 高频放大器的性能指标

### 一、高频放大器的增益

众所周知，放大器的输出电压(或功率)与输入电压(或功率)之比，称为放大器的增益或放大倍数。我们希望每级放大器的增益尽量大，以期用较少的级数满足总增益要求。增益大小决定于所用的晶体管、要求的通频带宽度、是否良好匹配和稳定工作等因素。

### 二、高频放大器的通频带

放大器的电压增益下降到最大值的 70.7% ( $1/\sqrt{2}$ ) 时, 所对应的频率范围, 称为放大器的通频带, 用  $2\Delta f_{0.7}$  表示, 如图 6-6 所示。高频放大器要有足够宽的通频带。

为什么高频放大器要有足够宽的通频带呢? 这是由于高频放大器所放大的一般都是已调制的信号, 它们都包含一定的边频, 放大器必须具有一定的通频带, 才能使必要的边频通过。

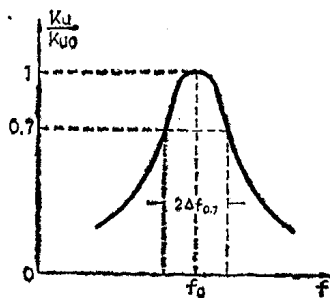


图 6-6 放大器的通频带

通频带  $2\Delta f_{0.7}$  也称为 3 分贝带宽, 因为电压增益下降 3 分贝即等于下降至  $1/\sqrt{2}$ 。根据用途不同, 放大器的通频带差异较大。例如收音机的中频放大器通频带约为 6~8 千赫, 而电视

机的中频放大器通频带为 6 兆赫左右。

需要指出，放大器的总通频带，随着级数的增加而变窄，并且一般来说，通频带越宽，放大器的增益越小。

### 三、高频放大器的选择性

放大器从各种不同频率的信号中选出有用信号并抑制干扰信号的能力，称为放大器的选择性。我们希望放大器能有图

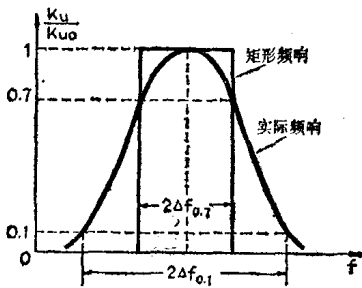


图 6-7 矩形频响曲线

6-7 所示的矩形频响曲线。它表示放大器通频带内各种频率信号都有相同的放大量，而对通频带外其它频率的信号增益都为零；但实际放大器不可能有如此理想的选择性。放大器的一般频响曲线是图 6-7 中粗线所示的形状，与矩形有较大的

差异。

放大器选择性好坏常以矩形曲线为标准，衡量实际曲线的形状接近理想矩形的程度。为此，引入“矩形系数”这个参数。

矩形系数的表达式是

$$K_{r,0.1} = \frac{2\Delta f_{0.1}}{2\Delta f_{0.7}}$$

它表示当相对增益  $\frac{K_u}{K_{u0}}$  下降到某一数值(式中指下降到 0.1)时的通频带( $2\Delta f_{0.1}$ )与通频带  $2\Delta f_{0.7}$  的比值。矩形系数  $K_r$  越接近 1，频响曲线越接近于矩形，选择性也就越好。例如：两个放大器的通频带都是 5 千赫，若甲放大器相对增益下降到 0.1 时的通频带为 15 千赫，而乙放大器为 10 千赫，则甲放大器的

矩形系数  $K_{r,0.1} = \frac{15}{5} = 3$ ；乙放大器的矩形系数  $K_{r,0.1} = \frac{10}{5} =$

2。显然，乙放大器的选择性优于甲放大器。

针对不同的干扰信号，放大器的选择性有不同表示方法。有些放大器也常用抑制比来表示选择性：

$$\text{抑制比} = \frac{\text{中心频率时的增益}}{\text{偏离中心频率时的增益}}$$

抑制比表示了放大器对干扰频率的衰减量；抑制比越大，选择性越好。抑制比通常用分贝表示。

#### 四、高频放大器的信噪比和噪声系数

高频放大器通常对微弱信号具有很高的放大能力。但是它不仅放大了有用信号，同时也把信号源夹带的噪声及晶体管内部噪声等放大了。当噪声功率过大时，可能把有用信号淹没，例如，收音机的背景流水声、电视机的“雪花”噪点干扰都是噪声的表现。

通常用信噪比来表示噪声对放大器放大性能的影响。信号功率和噪声功率之比，称为信噪比，即

$$\text{信噪比} = \frac{\text{信号功率}}{\text{噪声功率}}$$

显然，信噪比越高越好。

由于放大器本身有噪声，输出端的信噪比和输入端的信噪比是不同的。为此，常用噪声系数  $N_F$  来衡量放大器的噪声水平。 $N_F$  是输入端信噪比和输出端信噪比的比值，即

$$N_F = \frac{\text{输入端信噪比}}{\text{输出端信噪比}}$$

噪声系数随频率、信号源内阻、偏置电压和电流的变化而变化。高频放大器中选用特征频率  $f_T$  高、 $r_{bb'}$  小、电流放大

系数高的管子，对降低噪声有利。必要时还要选用专用的低噪声晶体管。

## 五、高频放大器的稳定性

晶体管内部的反馈、电路不必要的寄生耦合及高频辐射等因素，会使高频放大器无法稳定工作。不稳定现象主要表现在增益变化、中心频率偏移、通频带变窄、谐振曲线变形，甚至产生自激等方面。为使放大器稳定工作，要采取中和反馈措施，限制级数，减小每级增益及合理安排元件，合理布线，施加屏蔽等。在输入信号强弱变化较大而要求输出信号电平稳定不变的情况下，还要加接自动控制输出信号电平变化的自动增益控制电路。

以上所列高频放大器的主要性能指标，相互之间既有联系又有矛盾。例如增益和稳定性、通频带和选择性等都是这样。在实际工作中应根据具体情况决定主次，灵活处理。

## 第三节 高频放大器的连接方式、 负载方式和耦合方式

### 一、高频放大器的连接方式

#### 1. 基本连接方式

和低频放大器一样，高频放大器也有共基极、共发射极、共集电极三种连接方式，如图 6-8 所示。

如前所述，高频放大电路需要考虑晶体管内部电容与外电路分布参数等的影响，在分析电路时，可以认为放大器的输入



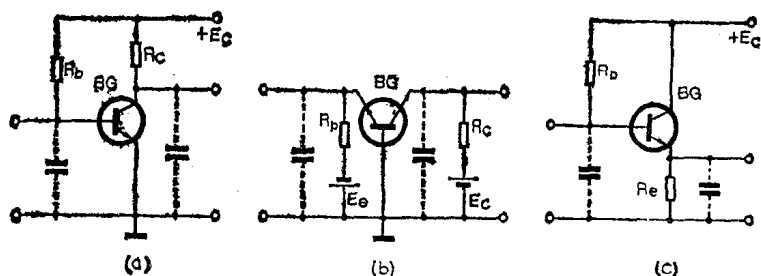


图 6-8 高频放大器的基本连接方式

端和输出端都存在着一个等效电容。共发射极电路中，由于晶体管  $b-c$  极间电容的影响，输入电容和输出电容都较大，上限工作频率低于晶体管的  $f_\beta$ ，通频带在三种连接方式中是最窄的。但因为共射电路的电压增益最高，还可以采用适当的负反馈展宽通频带，所以在高频放大中应用仍然十分广泛。在共基极电路中，晶体管的截止频率  $f_a = \frac{f_T}{\alpha}$  大于共发射极截止频率

率  $f_\beta = \frac{f_T}{\beta_0}$ 。因此，工作频率较高时，常采用共基极电路。

这种电路的通频带比共射电路宽得多。但共基电路没有电流放大作用，电压增益也较小。共集电极电路本身具有深度电压负反馈，当输出电容使高频输出电压下降时，负反馈电压相应减

表 6-1

性能 连接方式	电压增益	通频带	输入电容	输出电容对频率特性的影响
共射	最大	最窄	最大	较大
共基	中等	较宽	较大	较大
共集	最小	最宽	最小	最小