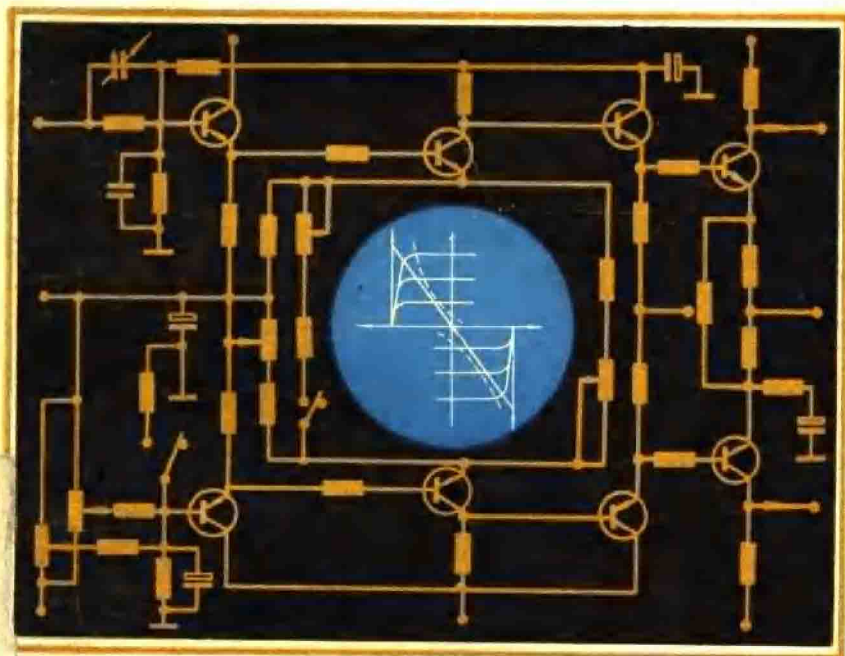


电子工业工人初级技术教材(七)

电子线路

电子工业工人技术教材编写组 编



国防工业出版社

前 言

为了适应电子工业青、壮年工人的专业技术培训的需要，按照部颁《电子工人初级技术理论教学计划、教学大纲》的要求，我们组织有关单位分别编写了《无线电知识》、《无线电识图与制图》、《无线电通用材料》、《无线电钳工装配工艺》、《无线电测量与仪器》、《电工》、《电子线路》、《脉冲技术》、《微波技术》、《机械制图》、《化学知识》等十一门工人初级技术基础理论课教材。

这套教材可作为电子工业四级工以下青、壮年技术工人培训用书，也适用于未经过专业培训，具有初中文化水平的干部、工人自学参考。

我们在编写《电子线路》的过程中，得到了南京无线电厂、1014研究所的大力支持，在此表示感谢。

本书第一、二章由吴兆元同志编写，第三、八章由李永光同志编写，第四、六章由傅其生同志编写，第五、七章由周锦渭同志编写，全书由张鸿玉同志负责审阅。

在编写过程中，我们力求在内容上适合电子工业工人技术培训的需要，在文字叙述上简明扼要、通俗易懂。但由于时间仓促，又缺乏经验，书中难免有不妥之处，我们诚恳希望读者提出宝贵意见。

电子工业工人技术教材编写组

目 录

第一章	低频电压放大器	1
第一节	低频电压放大器的组成和工作原理	1
第二节	低频电压放大器的常用分析方法和近似计算	12
第三节	三种放大电路的比较及元件选择的原则	34
第四节	低频电压放大器的偏置电路	37
第五节	多级低频电压放大器	50
第二章	负反馈放大器	63
第一节	负反馈放大器的基本概念	63
第二节	射极输出器	69
第三节	单级负反馈放大器电路	77
第四节	负反馈对放大器性能的影响	83
第五节	多级负反馈放大器	91
第三章	低频功率放大器	104
第一节	概述	104
第二节	单管甲类功率放大器	109
第三节	推挽功率放大器	124
第四节	无输出变压器的推挽功率放大器	141
第五节	功率管的选用与保护	149
第六节	低频功率放大器的调整 and 测试方法简介	154
第四章	其它低频放大器	165
第一节	直流放大器	165
第二节	集成运算放大器	187
第三节	场效应管放大器	200
第五章	小信号谐振放大器与宽带放大器	221

第一节	小信号谐振放大器	221
第二节	宽带放大器	256
第三节	测试方法	270
第六章	正弦振荡器	276
第一节	概述	276
第二节	RC 振荡器	279
第三节	LC 振荡器	285
第四节	石英晶体振荡器	296
第七章	调制、解调与混频	306
第一节	调幅器	307
第二节	调频器	322
第三节	检波器	330
第四节	鉴频器	340
第五节	自动增益控制和自动频率微调	351
第六节	混频器	359
第八章	直流稳压电源	369
第一节	整流电路与滤波电路	370
第二节	稳压电路	382
第三节	串联型稳压电源举例	393
第四节	稳流电源的一般概念	402

第一章 低频电压放大器

任何一台电子设备，都是由各种电子元件、器件所组成的电子线路和机械结构这两部分构成的。在电子线路中，低频电压放大器的应用最为广泛。

低频电压放大器的主要作用，是将频率在 $20\sim 200$ 千赫范围内的微弱电压信号加以放大，成为幅度较大的信号输出。它的输入、输出信号都是电压信号，而且其输入、输出电流又比较小，因此低频电压放大器一般作为末前级或前置放大级应用。

第一节 低频电压放大器的

组成和工作原理

一、共发射极电路

作为放大元件的半导体三极管，在电路中的基本连接方式有三种：共发射极接法、共基极接法和共集电极接法。在低频电压放大器中应用较多的是共发射极接法。下面我们从单管共发射极电路的分析，来说明电路的组成和工作原理。

1. 电路的组成和元件的作用

图 1-1 所示的共发射极放大电路由半导体三极管、电阻、电容及电源组成。下面我们分别来介绍一下，它们各自在电路中起些什么作用。

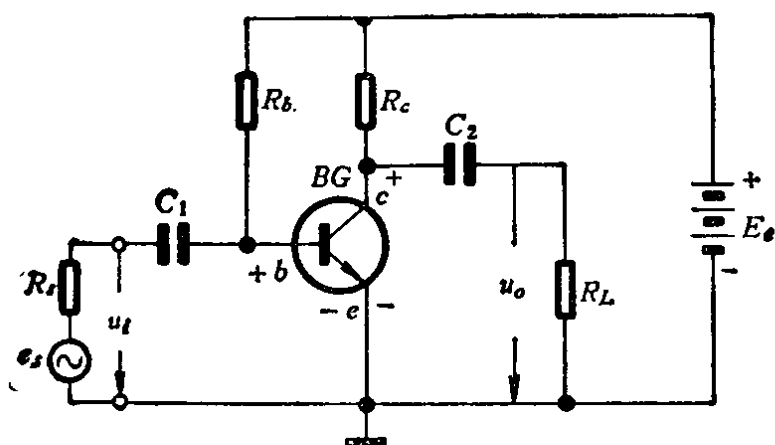


图1-1 共发射极放大电路

1) 半导体三极管 BG 它是一个放大元件。我们知道, 要使这只NPN型的半导体三极管具有放大作用, 必须使它的发射结处于正向偏置电压, 集电结处于反向偏置电压。

2) 直流电源 E_c 。它是整个放大器的能源供给者。电源 E_c 的正端通过基极偏流电阻 R_b 加至半导体三极管的基极 b 上, 同时这个电源 E_c 的正端, 又通过集电极电阻 R_c 加至半导体三极管的集电极 c 上。不过需要注意的是, 集电极电阻 R_c 的阻值比基极偏流电阻 R_b 的阻值要小, 因此, 集电极 c 的电位比基极 b 的电位要高, 即集电结处于反向偏置, 而电源 E_c 的负端加至半导体三极管的发射极 e 上, 使发射结处于正向偏置。常用的电源电压有 3 伏、6 伏、9 伏、12 伏、15 伏、20 伏等。

3) 基极偏流电阻 R_b 。如上所述, 电源 $+E_c$ 经过基极偏流电阻 R_b 降压后, 加至半导体三极管的基极 b 上。当半导体三极管的基极 b 和发射极 e 之间的偏压确定后, 改变基极偏流电阻 R_b 的大小, 就意味着改变静态基极电流 I_b 。从而使静态集电极电流 I_c 随之改变, 引起集电极与发射极之间

的电压 U_{ce} 变化。

在没有信号输入 ($u_i = 0$) 时, 半导体三极管处于直流状态, 可用 I_b 、 I_c 、 U_{be} 、 U_{ce} 之间的关系来表示, 反映在特性曲线上为一个点, 即直流工作点。基极偏流电阻 R_b 对确定静态工作点, 是一个起关键作用的元件。一般基极偏流电阻 R_b 的阻值为几千欧至几百千欧。

4) 集电极电阻 R_c 。要使放大器输入的微弱信号 u_i 能够控制它的输出电压 u_o , 必须使基极电流 i_b 能够控制集电极电流 i_c 。而要使电流的变化转换成电压的变化, 集电极电阻 R_c 是必不可少的元件。一般集电极电阻 R_c 的阻值为几百欧至几十千欧。

5) 耦合电容 C_1 和 C_2 。电容器具有隔断直流信号, 保证交流信号基本畅通的特性。电容器 C_1 的作用是让输入的交流信号 u_i 通过, 加至半导体三极管的基极 b 和发射极 e 的两端, 由半导体三极管来加以放大, 而输入信号中的直流成分则被阻断。电容器 C_2 的作用是让经过放大了的交流信号通过, 送至下一级放大器或负载; 同时阻断输出信号中的直流成分, 这样就保证了半导体三极管的静态工作点不受输入、输出的影响。一般耦合电容 C_1 和 C_2 的数值为几微法至几十微法。

6) 负载电阻 R_L 。一般来说, 低频电压放大器是作为末前级或前置级来应用的, 在其输出端总是要带上一定的负载。不管负载的形式如何, 都可以用一个电阻 R_L 来表示, 这个电阻称为负载电阻。

2. 简化电路

在半导体三极管放大电路中, 习惯上把输入电压、输出电压和电源相连接的公共端称为“接地端”, 并且把接地端的

电位作为参考电位——零电位。因此，由《电工》中介绍过的知识可知，电路中其它各点的电位，如 U_e 、 U_b 、 U_c 等，实际上是指发射极 e 、基极 b 、集电极 c 与接地端

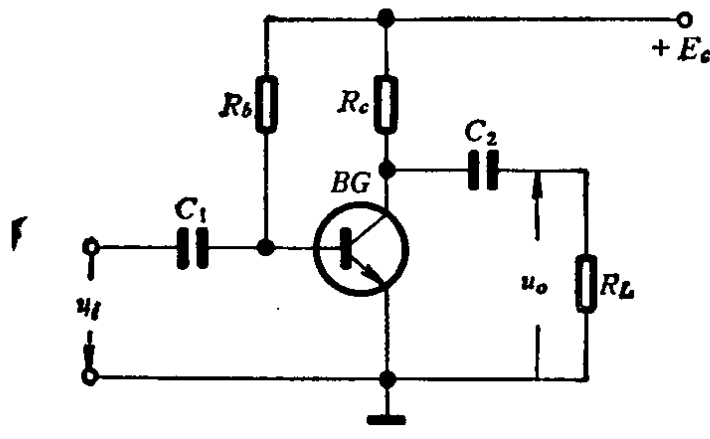


图1-2 简化的共发射极放大电路

之间的电位差。为了方便起见，在电路图中往往不再将电源 E_c 单独画出来，而用它对地的电位差和极性来表示。图 1-2 所示的电路，就是图 1-1 的简化电路。

二、低频电压放大器的基本工作原理

1. 静态工作状态和直流通路

所谓静态工作状态，是指放大器在没 有 信号 输入（即 $u_i = 0$ ）的情况下，处于直流工作状态。在此状态下，半导体三极管的各极电压和电流都具有一个恒定的数值，即处于相对静止状态，通常称为“静态”。由于耦合电容 C_1 和 C_2 是阻断直流的，所以在讨论“静态”时，可以将 C_1 和 C_2 省

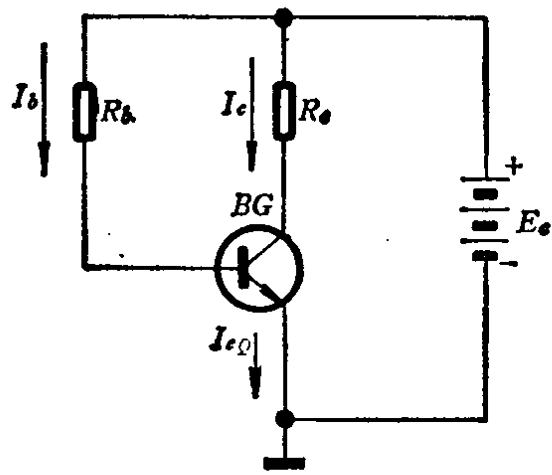


图1-3 低频电压放大器的直流通路

去，不画在直流通路电路图中。如图 1-3 所示的就是直流通

路。画直流通路必须遵循两个原则：电容器开路；电感及交流信号源短路。

从图 1-3 所示的直流通路电路中可以看到，整个电路由两个回路组成：一个是由基极偏流电阻 R_b 、电源 E_c 、半导体三极管的基极 b 和发射极 e 所构成的基极回路（习惯上称为输入回路）；另一个是由集电极电阻 R_c 、电源 E_c 、半导体三极管的集电极 c 和发射极 e 所构成的集电极回路（习惯上称为输出回路）。

当电路中的电源电压 E_c 、基极偏流电阻 R_b 和集电极电阻 R_c 确定之后，就可以根据基尔霍夫第二定律列出这两个回路的电压方程式。

对于基极回路，有

$$E_c = I_b R_b + U_{be} \quad (1-1)$$

即

$$I_b = \frac{E_c - U_{be}}{R_b} \quad (1-2)$$

由于半导体三极管的发射结处于正向偏置状态， U_{be} 很小（硅管为 0.6~0.8 伏，锗管为 0.1~0.3 伏）。与电源电压 E_c 相比， U_{be} 可以忽略不计。因此式 (1-2) 可以近似表达为

$$I_b \approx \frac{E_c}{R_b} \quad (1-3)$$

式 (1-3) 表明，放大器在静态工作状态下，基极电流 I_b 的大小基本上取决于电源电压 E_c 和基极偏流电阻 R_b 。

当静态基极电流 I_b 确定后，根据半导体三极管的电流分配关系，可以近似地求出静态的集电极电流 I_c ，即

$$I_c \approx \beta I_b \quad (1-4)$$

对于集电极回路, 有

$$E_c = I_c R_c + U_{ce} \quad (1-5)$$

即

$$U_{ce} = E_c - I_c R_c \quad (1-6)$$

式(1-4)表明, 如果给定了基极电流 I_b , 我们就可以在半导体三极管的输出特性曲线族中找到一条对应于 I_b 的输出特性曲线。这时, I_c 与 U_{ce} 间的关系也就确定了。因为它们之间的关系是由半导体三极管的内部特性所决定的, 所以称为“内部条件”, 它与外电路的参数无关。

式(1-6)表明, 在外电路参数 E_c 、 R_c 给定后, U_{ce} 对 I_c 的依附关系, 通常称为“外部条件”。

由于 I_c 、 U_{ce} 既是半导体三极管两端的电流和电压, 又是 E_c 、 R_c 串联电路的电流和端电压, 因此, 要同时满足“内部条件”与“外部条件”才能确定 I_c 和 U_{ce} 。

2. 交流工作状态和交流通路

耦合电容 C_1 和 C_2 对于交流信号形成通路, 同时直流电源 E_c 的交流内阻很小, 相当于短路。基于上述原因, 我们就可以将图 1-1 所示电路, 用图 1-4 那样的交流通路来进行分析。

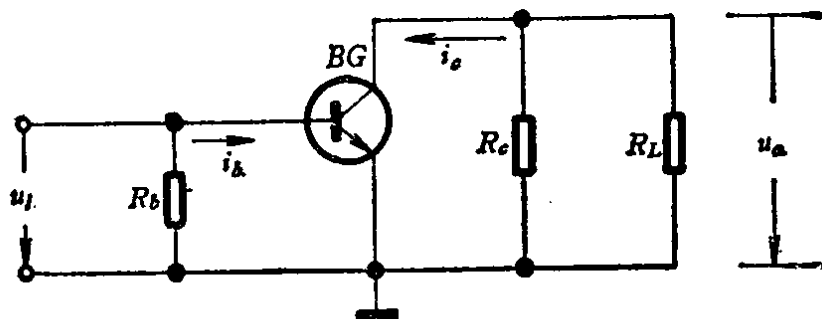


图1-4 低频电压放大器的交流通路

在一个低频电压放大器的输入端加上一个交流信号 u_i ，通过耦合电容 C_1 加至半导体三极管的基极 b 和发射极 e 的两端时，输入回路中便会产生一个同一频率的交流基极电流 i_b 。这个交流基极电流 i_b 经过半导体三极管的放大，在集电极 c 上就可以得到一个较大的集电极电流 $i_c \approx \beta i_b$ 。集电极电流 i_c 流过集电极电阻 R_c 和负载 R_L ，由此而产生电压降 u_o ，即输出电压。这样一来，我们就可以用输入信号 u_i 来控制输出信号 u_o 。

3. 倒相作用

当一个低频电压放大器的输入回路两端加上如图 1-5 所示的交流电压 u_i 后，在半导体三极管的发射结上，除了有直流分量 U_{be} 外，还要叠加上与 u_i 变化规律相同的交流分量 u_{be} ，这时发射结上的总电压应为

$$u_{BE} = U_{be} + u_{be}$$

在电压 u_{BE} 的作用下，输入回路中的电流 i_B 同样是由直流分量 I_b 和交流分量 i_b 两部分叠加而成，即

$$i_B = I_b + i_b$$

输入回路中的基极电流 i_B 经过半导体三极管的放大，在输出回路中就可以得到一个放大的，随着基极电流 i_B 的变化而变化的交流电流 i_c 。这个交流电流 i_c 同样是由直流分量 I_c 和交流分量 i_c 叠加而成，即

$$i_c = I_c + i_c$$

或

$$i_c = I_c + \beta i_b$$

当集电极电流 i_c 流过集电极电阻 R_c 时，会产生电压降 $u_{R_c} = i_c R_c$ 。这个电压降 u_{R_c} 同样是由直流分量 U_{R_c} 和交流分

量 u'_{R_c} 叠加而成, 即

$$u_{R_c} = U_{R_c} + u'_{R_c}$$

因此, 在半导体三极管的集电极 c 和发射极 e 之间的电压是

$$u_{CE} = E_c - u_{R_c}$$

或
$$u_{CE} = E_c - (I_c R_c + i_c R_c) = E_c - I_c R_c - i_c R_c$$

从直流工作状态的分析已知

$$U_{ce} = E_c - I_c R_c$$

因此

$$u_{CE} = U_{ce} - i_c R_c$$

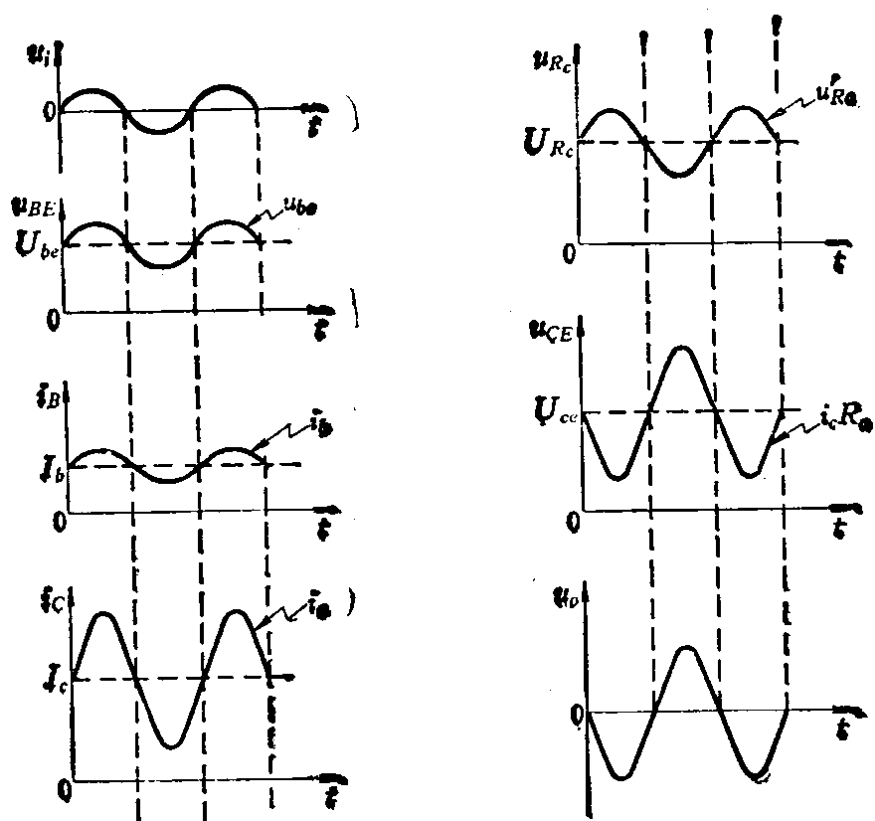


图1-5 低频电压放大器电路中各部分的波形图

可见在交流工作状态时, 半导体三极管的集电极 c 和发射极 e 之间的电压 u_{CE} 也是由直流分量 U_{ce} 和交流分量 $-i_c R_c$ 。

两部分叠加而成的。从图 1-2 所示的电路中可见，由于耦合电容 C_2 对直流的阻断作用，电压 u_{CE} 中的直流分量 U_{ce} 被阻断，因此，在负载 R_L 上的输出电压 u_o 是一个与 u_{CE} 变化规律相同的交流量。电路中各部分的电压、电流波形如图 1-5 所示。

归纳起来，从图 1-5 中可见，当 u_i 上升时，引起 u_{BE} 增加， i_B 增加， u_{R_c} 增加， u_{CE} 减小， u_o 减小。因为输出电压 u_o 的变化同输入电压 u_i 的变化刚好相反，在相位上恰好是相差 180° ，所以称为反相（即倒相）。

三、主要性能指标

1. 输入电阻和输出电阻

1) 输入电阻 R_i ：当信号源接到低频电压放大器的输入端时，在放大器的输入回路中就会有电流流动，因此，放大器要消耗功率，这个功率由信号源提供。换句话说，放大器的输入端对信号源来说，相当于一个等效负载电阻，称为输入电阻，即 $R_i = u_i / i_i$ 。

2) 输出电阻 R_o ：放大器的输出端可以看成是一个等效信号源，这个等效信号源的内阻就可以看成是输出电阻 R_o ，即 $R_o = u'_o / i_r$ 。等效信号源的电压 u'_o 与短路电流 i_r 可以通过等效电源原理（戴维宁定理）来求得。

2. 增益

所谓增益，实际上就是放大倍数。对低频电压放大器来说，主要是指电压增益，即输出电压与输入电压之比 u_o / u_i ，它表示放大器放大信号的能力。

在实际应用中，由于放大倍数可以高达几十甚至几千，

数值上差别很大，而人耳对音响的听觉与音响强度的关系呈对数规律；又因为计算多级放大器的增益时，要把各级放大倍数连乘，而从数学上已知乘积的对数等于各分量对数之和，因此用放大倍数的对数值来表示放大器的增益更为方便一些，单位用分贝：

$$\text{电压增益 } G_v = 20 \lg K_v \text{ [分贝]}$$

$$\text{电流增益 } G_i = 20 \lg K_i \text{ [分贝]}$$

$$\text{功率增益 } G_p = 10 \lg K_p \text{ [分贝]}$$

式中， K 表示放大倍数。

3. 频率响应

放大倍数与频率之间的关系叫做放大器的频率响应。一般用曲线来表示时，就称为放大器的频率响应特性或频率特性曲线。图 1-6 就是放大器的频率响应特性。

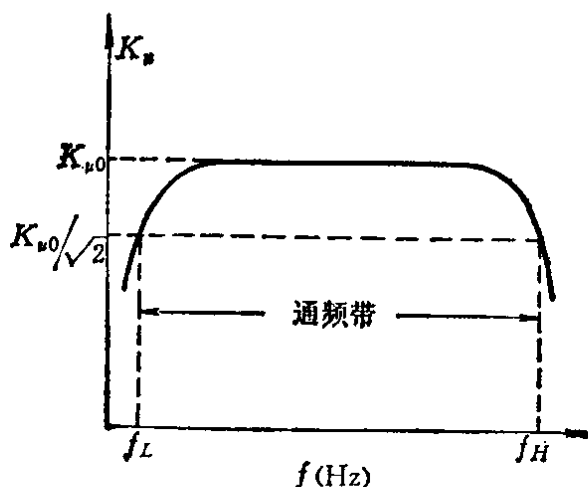


图1-6 频率响应特性

图 1-6 中，横坐标表示信号的频率，纵坐标表示各种不同频率与中间频率的放大倍数的比值。通常将放大倍数下降到中频值的 $1/\sqrt{2}$ (0.707) 时的频率范围，称为该放大器的通频带。它表示放大器适应不同频率信号的能力。通频带的低频端 f_L 称为下限频率；高频端 f_H 称为上限频率。

一个低频电压放大器的通频带若要包含整个音频范围 (20~200 千赫)，已属于高保真度的音频放大器，不仅不易制造，而且价格高、体积大。实际上要视不同的场合而对放

大器的频率响应有不同的要求。例如通信设备中的低频电压放大器一般频率范围在300~3400赫；一般的收音机中的低频电压放大器的频率范围在200~5000赫；对电视机中的音频放大器，其频率范围至少应在150~6000赫，才能基本上满足传递信号的要求。

从图 1-6 频率响应特性曲线中可见，放大倍数在低、高频端都有所降低，这是什么原因呢？

放大倍数在低频段降低的原因，主要是耦合电容 C_2 的影响。前面在分析电路工作原理时，忽略了 C_2 上的压降。实际上容抗 $1/(\omega C_2)$ 在低频段增大， C_2 不能看成是对交流短路，其上总有一定的压降，这就造成了输出电压降低。

放大倍数在高频段下降的原因，主要是半导体三极管本身的放大作用在高频段下降。我们知道，随着频率的增高，半导体三极管中空穴或电子的运动跟不上信号的变化，有一部分来不及到达集电极，使 β 下降。另外，半导体三极管的集电极电容 C_c 的旁路作用也会造成 β 下降。

4. 失真

对放大器的要求之一，是输出的波形要尽可能地保持同输入端的信号波形相同，即要具有“保真”的能力。对于低频电压放大器的工作原理，是以小信号状态、线性化来进行分析的。但实际上，由于半导体三极管是一非线性元件，输入信号经过半导体三极管的放大，输出波形总会有一定程度的畸变，这称为非线性失真。失真的程度常用符号 γ 来表示。

第二节 低频电压放大器的常用 分析方法和近似计算

知道了低频电压放大器的基本工作原理以后, 还需要进一步地进行分析和计算, 怎样才能使低频电压放大器在正常工作状态下有效地工作。常用的分析方法有: 图解法、解析法和等效电路法。下面分别介绍这几种分析方法。

一、图 解 法

图解法是分析低频电压放大器的一种基本方法。我们知道, 半导体三极管都有输入特性曲线和输出特性曲线。根据电路中各元件的参数值和电源电压的大小, 利用作图的方法, 在特性曲线上确定工作点来分析输入、输出电压、电流的波形并确定放大倍数, 就是图解法的过程。下面我们就以图1-1 的电路为例来进行图解分析。

1. 特性曲线和波形

半导体三极管是一种非线性元件。对于不同的输入电压 u_i , 会产生不同的基极电流 i_b 和集电极电流 i_c 。它们之间的关系是非线性的, 这一点可从半导体三极管的输入、输出特性曲线中看出来。

对一个低频电压放大器来说, 有一个输入回路、一个输出回路。在分析输入回路时, 将应用到半导体三极管的输入特性曲线; 而分析输出回路时, 则需应用半导体三极管的输出特性曲线。

1) 从输入特性曲线看波形 前面我们已介绍过, 一个

低频电压放大器里必须要有直流偏置。假如不设置直流偏置，即把图 1-1 中的基极偏流电阻 R_b 去掉（如图 1-7 所示），这时输入交流信号电压将直接加至半导体三极管的基极 b 和发射极 e 的两端。从图 1-8 半导体三极管的输入特性曲线上可见，无直流偏置（即 $I_b = 0$ ， $U_{be} = 0$ ）时，输入的交流信号电压 u_{i1} 有相当大的部分处于半导体三极管的截止区内，只有 u_{i1} 正半周的一小部分大于半导体三极管的导通电压，使半导体三极管短时导通，产生基极电流 i_{b1} 。从图 1-8 中可见，尽管 u_{i1} 是一个很大的正弦波形，但是 i_{b1} 却只是正弦波中的一小部分，造成了波形的严重畸变。这就是通常所说的失真。为了避免失真，就要设置适当的直流偏置电压。

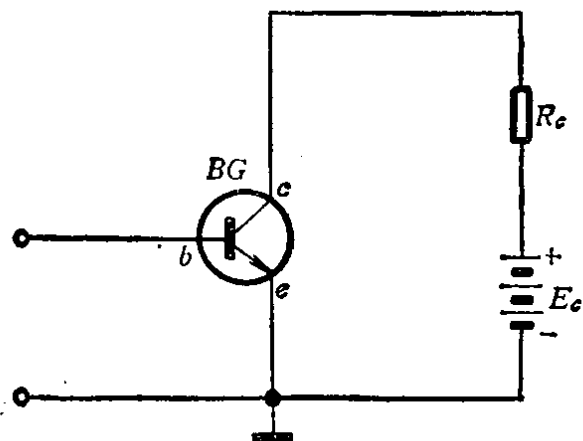


图1-7 无直流偏置放大电路

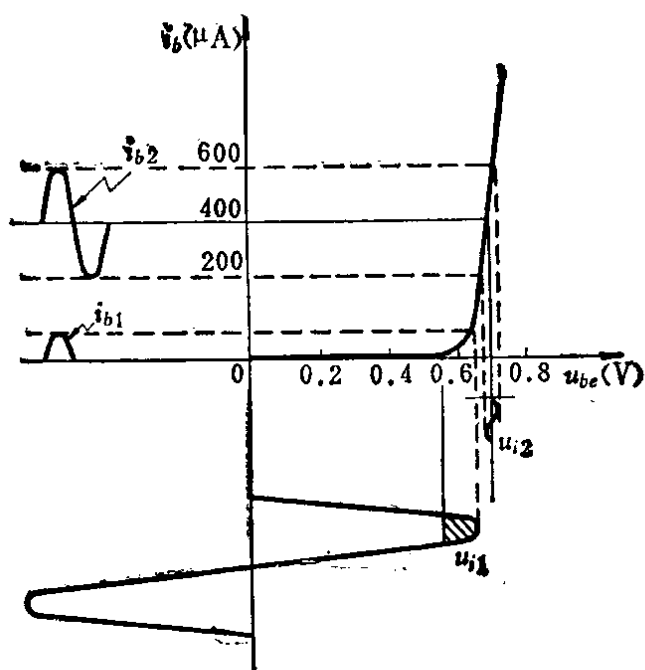


图1-8 输入特性曲线与波形

设置的直流偏置电压一般应高于半导体三极管的导通电压（对于硅管约大于 0.5 伏，锗管约大于 0.1 伏），即发射结