

Ji suan ji dian zixue

计算机电子学

(基 础)

下 册

于崇标 杨松龄 陈继纯 编

陕西科学技术出版社

内 容 简 介

本书是西北电讯工程学院计算机系电子学基础课程的教材。计算机电子学基础上册的内容有：半导体器件特性，数制与编码，逻辑代数和逻辑门，组合逻辑电路，时序逻辑电路等五章。下册的内容有：放大电路基础，负反馈放大电路，集成运算放大器及其应用，直流稳压电源，A/D及D/A转换等五章。书中每章均有基本要求和小结，并附有一定的例题和习题。

本书可作为大专院校计算机专业，计算机函授大学，计算机培训班和其他相近专业开设电子学基础课程的教材。本书也可供有一定电工知识的工程技术人员作为学习电子学基础的参考用书。

计 算 机 电 子 学 基 础

787毫米×1092毫米，16开本，15.75印张，369.0千字

印数：2,000—10,000册 定价：4.60元

目 录

第六章 放大电路基础

§6.1 共射基本放大电路组成及工作原理	(1)
6.1.1 电路组成原理	(1)
6.1.2 静态工作点的设置	(2)
6.1.3 放大电路的主要技术指标	(4)
§6.2 放大电路的基本分析方法	(5)
6.2.1 直流通路和交流通路	(5)
6.2.2 图解法	(7)
6.2.3 微变等效电路法	(13)
§6.3 放大电路的工作点稳定问题	(23)
6.3.1 温度对工作点的影响	(23)
6.3.2 稳定静态工作点的典型电路	(24)
§6.4 基本放大电路的三种接法及其性能比较	(27)
6.4.1 共集电极基本放大电路	(27)
6.4.2 共集基极基本放大电路	(29)
6.4.3 三种接法的比较	(32)
§6.5 多级放大电路	(33)
6.5.1 多级放大电路的一般问题	(33)
6.5.2 阻容耦合	(33)
6.5.3 多级放大电路计算	(33)
§6.6 放大电路频率特性	(35)
6.6.1 频率响应的概念	(35)
6.6.2 混合参数 π 型等效电路	(36)
6.6.3 半导体三极管的频率参数	(40)
6.6.4 对数频率特性—波特图	(43)
6.6.5 单级共射放大电路的频率响应	(44)
§6.7 多级放大电路的频率响应	(53)
6.7.1 多级放大电路的幅频特性和相频特性	(53)
6.7.2 多级放大电路的上限频率和下限频率 f_L 的估算	(54)
本章小结	(56)
思考题及习题	(57)

第七章 负反馈放大电路

§7.1 反馈的基本概念	(63)
--------------	------

7.1.1 什么叫反馈	(63)
7.1.2 反馈的分类	(64)
§7.2 负反馈放大电路的方框图及放大倍数的一般表达式	(70)
7.2.1 负反馈放大电路的方框表示法	(70)
7.2.2 负反馈放大电路放大倍数的一般表达式	(71)
7.2.3 方框图的画法	(73)
§7.3 负反馈对放大电路性能的影响	(76)
7.3.1 增益的敏感度	(76)
7.3.2 扩展频带	(77)
7.3.3 减小非线性失真	(79)
7.3.4 抑制放大电路内部的干扰和噪声	(79)
7.3.5 对输入电阻和输出电阻的影响	(80)
§7.4 负反馈放大电路的计算	(84)
7.4.1 单级反馈放大电路的计算	(85)
7.4.2 负反馈放大电路放大倍数的近似估计	(86)
7.4.3 利用方框图的计算法	(90)
§7.5 负反馈放大电路的稳定问题	(106)
7.5.1 产生自激振荡的条件	(107)
7.5.2 反馈放大电路的稳定判据	(108)
7.5.3 增益富裕度和相位富裕度	(109)
7.5.4 负反馈放大电路稳定性分析举例	(109)
7.5.5 常用的校正方法	(111)
本章小结	(116)
思考题和习题	(117)

第八章 线性集成运算放大器及其应用

§8.1 运算放大器的概述	(125)
§8.2 运算放大器的级间耦合方式与零点漂移	(127)
8.2.1 级间耦合方法	(127)
8.2.2 零点漂移	(128)
§8.3 差动式放大电路	(130)
8.3.1 差动电路基本形式	(130)
8.3.2 长尾电路	(132)
8.3.3 恒流源电路	(135)
8.3.4 差动放大电路的几种接法	(137)
§8.4 互补对称功率输出级电路	(138)
§8.5 集成运算放大器的典型电路介绍	(141)
8.5.1 F001型集成运算放大器的电路分析	(141)
8.5.2 F007型集成运放电路	(143)

§8.6 集成运放的主要技术指标及测量方法	(148)
8.6.1 集成运放主要技术指标的含义	(148)
8.6.2 集成运放主要技术指标的测量	(149)
§8.7 运算放大器的基本电路	(151)
8.7.1 反相输入电路	(152)
8.7.2 同相输入电路	(155)
8.7.3 差动输入运算放大器	(158)
§8.8 集成运算放大器的线性应用	(159)
8.8.1 加法器	(159)
8.8.2 减法器	(160)
8.8.3 积分器和微分器	(161)
8.8.4 对数和反对数运算放大器	(163)
8.8.5 乘法器	(165)
§8.9 电压比较器	(166)
8.9.1 最简单的电压比较器	(166)
8.9.2 施密特触发器	(168)
§8.10 集成运放使用中的一些实际问题	(171)
§8.11 集成运算放大器保护措施	(172)
本章小结	(174)
思考题和习题	(176)

第九章 直流稳压电源

§9.1 直流稳压电源的方框图	(182)
§9.2 单项桥式整流电路	(183)
§9.3 滤波电路	(185)
9.3.1 电容滤波电路	(185)
9.3.2 其它滤波电路	(188)
§9.4 硅稳压二极管稳压电路	(190)
9.4.1 硅稳压二极管稳压电路的工作原理	(190)
9.4.2 硅稳压二极管稳压电路元件的选择	(191)
§9.5 串联型晶体管稳压电路	(193)
9.5.1 基本电路	(193)
9.5.2 稳压电源的主要技术指标	(196)
§9.6 集成稳压电路	(197)
9.6.1 WA7型集成稳压组件电路介绍	(197)
9.6.2 集成稳压组件的主要电参数	(200)
9.6.3 扩大集成稳压组件输出电流与输出电压的电路	(201)
思考题和习题	(202)

第十章 数—模及模—数转换

§10.1 概述	(205)
§10.2 D/A转换器	(205)
10.2.1 权电阻D/A转换器	(205)
10.2.2 T型电阻D/A转换器	(207)
10.2.3 权电流D/A转换器	(210)
10.2.4 电容型D/A转换器	(212)
10.2.5 D/A转换器中的模拟开关	(215)
10.2.6 具有双极性输出的D/A转换器	(217)
10.2.7 D/A转换器的主要技术指标	(219)
10.2.8 集成单元D/A转换器举例	(219)
§10.3 A/D转换器	(224)
10.3.1 A/D转换的一般步骤及采样原理	(224)
10.3.2 采样—保持电路	(226)
10.3.3 直接A/D转换器	(228)
10.3.4 间接A/D转换器	(235)
10.3.5 A/D转换器的主要技术指标	(237)
10.3.6 集成单元A/D转换器举例	(238)
本章小节	(240)
思考题和习题	(241)

第六章 放大电路基础

本章要求

学完本章后,应当能达到下列要求:

一、掌握放大电路的两种基本分析方法——图解法和微变等效电路法。会用来计算放大电路的 A 、 r_i 、 r_o 。

二、会区分三种不同组态的放大电路,并了解各自的应用场合。

三、掌握分析计算稳定静态工作点的典型电路。了解温度对工作点的影响及稳定工作点的物理概念。

四、熟悉RC耦合多级放大电路主要性能指标(A_v 、 r_i 、 r_o)的计算。熟悉RC耦合放大电路频率特性的分析方法,能够估算单级放大电路的 f_L 、 f_H 。

五、了解RC耦合多级放大电路的上限频率和下限频率与其单级放大电路的上、下限频率之间的关系。

晶体管有放大、振荡等用途,放大是晶体管最基本的应用。晶体管放大器不仅是雷达、通信、计算机、电视和测量仪表等电子设备不可少的重要组成部分,而且在工业生产、医学以及其它科学研究和生产部门中,几乎无一不用到各晶体管放大电路。

晶体管放大电路种类很多,有的电路比较简单,有的则十分复杂。不过许多复杂的放大电路都是由一些基本单元电路组成的。如果我们熟练地掌握了一些基本单元电路的工作原理和分析计算方法,那么对于很多复杂的放大电路的特性和分析计算也就容易掌握了。

在本章中,我们首先介绍简单的共射基本放大电路,说明放大电路的组成原则,提出设置静态工作点的必要性,尔后讨论分析电子电路的常用的三种分析方法。用它们来分析基本共射电路(包括工作点稳定电路在内)的静态工作点,电压放大倍数,输入电阻和输出电阻,频率响应及共基、共集两种电路的特点,并对三种电路进行比较。这些内容是以后各章的基础,必须很好掌握。

§ 6.1 共射基本放大电路组成及工作原理

为了了解放大电路工作原理,我们先从最基本的放大电路谈起。所谓基本放大电路,是指由一个放大器件(如半导体三极管或场效应管)所构成的简单放大电路,即单管放大电路。尽管使用了一个放大元件,也可以有多种形式的接法,在这一节中将介绍应用最广泛的共射极(简称共射)电路。

6.1.1 电路组成原则

在图6.1中,T是一个NPN型的三极管,担负着放大作用,是整个电路的核心, E_c 是集电极回路的电源,它为输出信号提供能量, R_c 是集电极负载电阻,通过它可以把电流的变

化转换成电压的变化反映在输出端。基极的电压 E_B 和基极回路电阻 R_b 、一方面为发射结提供正向偏置电压，同时也决定了 I_B 的大小，为了使三极管能工作在正常的放大状态，必须保证集电结为反向接法，发射结为正向接法，这就要求 E_c 、 E_B 、 R_c 、 R_b 之间有一定的配合。

电容 C_1 和 C_2 称为“隔直电容”，它们在电路中有两个作用：(1)隔断直流，使输入端、输出端与放大器的直流电压相隔离。(2)让交流信号畅通无阻。因此 C_1 和 C_2 也称为耦合电容。

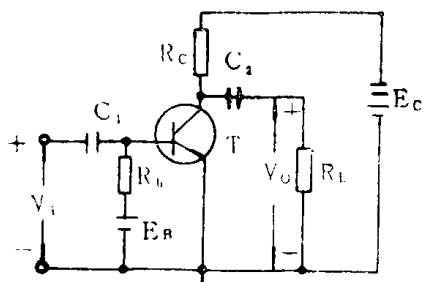


图 6.1 共射基本放大电路

经过上面的分析，我们列出几条组成放大电路时必须遵循的原则：

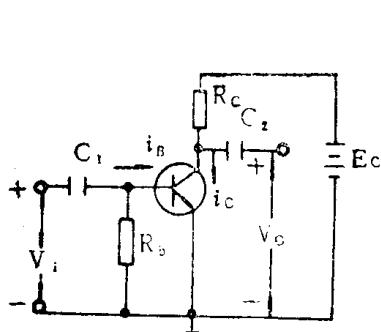
1. 三极管必须工作在放大状态，即发射结处于正向偏置而集电结处于反向偏置。而对于NPN型三极管应使 $V_{BE} > 0$ ， $V_{BC} < 0$ 。

2. 信号能输入，即对于共射极电路，输入电压 v_i ，这个变化量一定应该引起相应基极电流 i_b 的变化。

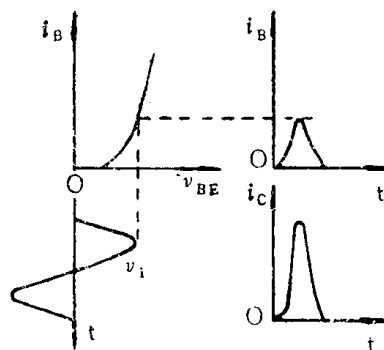
3. 信号能输出，即对于共射电路由于有一个变化的基极电流 i_b ，必然就应有一个变化的 i_c ，而且 i_c 的变化一定要能引起一个输出电压 v_o 的变化。还应尽量减少其它支路的分流作用，使 i_c 尽可能多地流到负载上去。

4. 波形基本不失真，即要求输出电压的波形与输入电压波形一一对应。这就要求放大电路在没有外加信号时，使放大管不仅处于放大状态，还要有一个合适的工作电压和电流。我们称之为合理地设置静态工作点。

下面我们以上四条原则来检查图6.2(a)所示放大电路。在图中发射极与基极间没有电源 E_B ，也就是说基极与发射极间没有电压， $V_{BE} = 0$ 。不满足 $V_{BE} > 0$ 的条件，尽管 $V_{BC} < 0$ ，从图6.2(b)可以看出，当我们在输入端加上一个正弦交流信号时，由于b—e结只能单向导通，而且输入特性开始一段的非线性很严重，就使得 i_b 不能按比例地跟着输入电压的大小而变化，结果 i_b 和 i_c 的波形就不是正弦波了。我们把这种失真称为“非线性失真”，可见，用这样的电路来实现放大作用是不行的。



(a) 零偏流电路



(b) 波形图

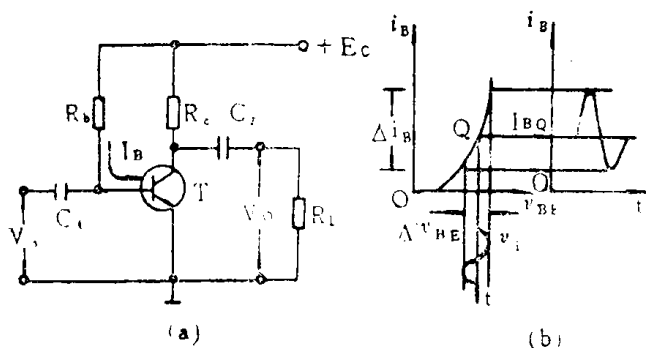
图6.2 放大电路在零偏流时的情况

6.1.2 静态工作点的设置

当放大电路没有信号($v_i = 0$)时，放大电路处于静止状态。但由于直流电源 E_c 已经接

通, E_c 通过 R_b 和 R_c 加到晶体管上如图 6.3 所示, 使晶体管产生直流的基极电流 I_B , 集电极电流 I_C 并呈现直流电压 V_{BE} 、 V_{CE} 。它们反映出静态时放大电路的直流工作情况。为了着重表明未加信号时 (即静态) 放大电路各处的电压, 电流值分别用 I_{BQ} 、 I_{CQ} 、 V_{BEQ} 、 V_{CEQ} 来表示。由于这一组数值代表着输入和输出特性上的一个点, 所以习惯上称它们为静态工作点。从以上分析知道, 不设置静态工作点 (亦即令 $I_{BQ} = 0$), 产生严重的失真现象, 这是我们所不希望的。

不设置静态工作点, 放大电路不能正常工作, 这一点清楚了。那么为什么设了静态工作点放大电路能正常工作呢? 看图 6.3(b) 就容易明白这个道理。如果对晶体管加上适当的直流偏置, 那么 v_i 未加入之前, 晶体管有静态基极电压 V_{BEQ} 及相应的 I_{BQ} , 在输入特性曲线上可以确定出工作点 Q 。加上输入电压 v_i 就迭加在 V_{BEQ} 上面, 使晶体管 b 和 e 间的电压发生变化。如果这时 V_{BEQ} 大于 v_i 的幅度, 则 V_{BE} 只有大小发生变化, 没有正、负极性的变化, 就是说无论在 v_i 的正半周还是负半周, 晶体管的发射结始终处于正向导通状态, i_B 都能随 v_i 的变化而变化。从图 6.3(b) 可以看出, 一个放大电路虽然目的是要放大交流信号, 但必须设置合适的静态工作点, 使晶体管处于一定的工作状态, 以保证放大电路的正常工作。



(a) 偏流的设置

(b) i_B 的波形图

图 6.3 放大电路设置静态工作点的情况

如上图 6.3 画出了静态工作点不为零的电路图和波形图。为简化电源标志, 有时只在电源正端标出 $+E_c$, 负端接共同端 (通常称接地) 而不画出电源符号。为减少电源种类一般都是 E_c 提供 I_{BQ} , 而不再另设电源 E_B (如图 6.1 那样)。由于 i_B 的变化始终是在输入特性的线性范围内, 所以它的波形基本上是正弦波。

图 6.4 示出了与 i_B 相对应的 i_C , v_{CE}

及输出电压 v_o 的波形图。观察这些波形 可得如下重要结论:

1. i_C 与 i_B 的波形基本一致体现了 i_B 对 i_C 的控制作用, 且 i_B 、 i_C 都随 v_i 的增加而增加, v_{CE} 也是正弦波, 它随 v_i 的增大而减小。因为 $V_{CE} = E_c - I_C R_c$ 当 i_C 增大时, 电源 E_c 是固定的, 所以 v_{CE} 必减小。 v_o 与 v_{CE} 的波形一样, 区别仅仅在于 v_o 的直流分量没有了。而从图中还可以看出, v_o 和 v_i 的相位是相反的, 或者说两者相位差 180° , 这种现象通常称为倒相。这也是共射基本放大电路的特点之一。

2. i_B 、 i_C 、 v_{CE} 以及 v_{BE} 都是由两个分量组成的, 一个是没加信号时的直流分量 (静态工作点的数值), 另一个是随着输入信号而变化的交流分量。

3. 这里我们所说的放大作用, 是指输出的交流分量和输入信号的关系, 而不包括直流成分。

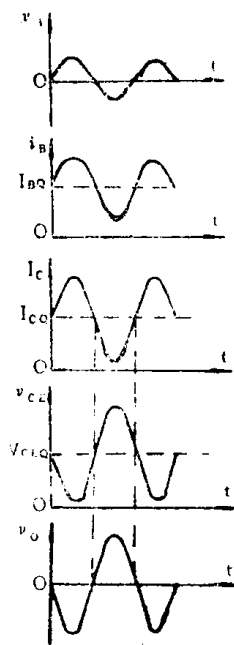


图 6.4 i_B 、 i_C 、 v_{CE} 、 v_o 波形图

6.1.3 放大电路的主要技术指标

放大电路是用来放大信号的，那么用什么指标来衡量放大电路的质量好坏或评价它的优劣呢？放大电路的主要技术指标是放大倍数、输入和输出电阻，频率响应和非线性失真等等。现简述如下：

1. 放大倍数

衡量一个放大电路放大微小信号的能力，可以用放大倍数来表示。当在放大电路的输入端加进需要放大的信号时，将在输入端处产生 V_i 及 I_i 。信号经过放大之后，在其输出端处则产生输出电压 V_o 及输出电流 I_o ，电路如图6.5所示。

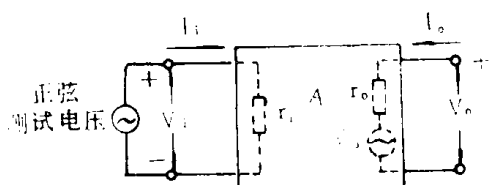


图6.5 放大电路的指标测试

(1) 电压放大倍数：我们规定输出电压与输入电压的变化量之比为电压放大倍数，用 A_v 表示（当考虑电路元件所产生的附加相移时， A_v 将为 V_o 与 V_i 的复数值之比。）即

$$A_v = \frac{V_o}{V_i} \quad (6-1)$$

其中 V_o 和 V_i 分别是输出电压和输入电压的正弦有效值。

(2) 电流放大倍数：规定输出与输入电流的变化量之比为电流放大倍数，即

$$A_i = I_o / I_i \quad (6-2)$$

其中 I_o 和 I_i 分别是输出电流和输入电流的正弦有效值。

注意：输出电压和输出电流基本上是正弦波，由上面两个公式得出的结果才有意义。这一点也同样适用于其它指标。

2. 输入电阻

当输入信号电压加到放大电路的输入端时，总要产生一个输入电流，二者同相时从等效的观点出发，我们可以想象，从输入端往里看进去，好象有一个电阻。这个电阻等于输入电压和输入电流的比值（如图6.5）即

$$r_i = \frac{V_i}{I_i} \quad (6-3)$$

3. 输出电阻

当信号电压加在放大电路的输入端时，如果改变负载，则 V_o 也要随着改变。这种情况就相当于从输出端看进去好象有一个具有内阻 r_o 的电源 V_o' （代文宁等效电路）如图6.5所示，我们把 r_o 称为输出电阻，它的求法有两种。

第一种方法是将输入信号电压短路（令 $V_i = 0$ 保留信号源内阻），在输出端去掉负载 R_L ，加上一个交流信号电压，这个信号电压以 V_o 表示，求出由它所产生的电流 I_o ，由定义可知：

$$r_o = \left. \frac{V_o}{I_o} \right|_{R_L = \infty, V_i = 0} \quad (6-4)$$

这种方法多用于理论分析。

第二种方法是在输入端加上一个固定的交流信号电压 V_i ，先测出负载开路时的输出电压

V_o' ，再测出接上阻值为已知的负载电阻 R_L 以后的输出电压 V_o ，根据二者的比值可以计算出

$$r_o = \left(\frac{V_o'}{V_o} - 1 \right) \quad (6-5)$$

在测量放大电路的输出电阻时，多采用这种方法。

4. 通频带

在放大电路中往往有电容元件，而且三极管本身有极间电容，放大电路的放大倍数将随着信号频率的不同而改变。当频率太高时或太低时，放大倍数都要大幅度下降，而在中间一段频率范围内，放大倍数基本上不变。通常把放大倍数在高频段和低频段分别下降到上述值的0.707倍的频效范围叫做放大电路的通频带，并记作 f_{bw} ，通频带在工程上是一个很重要的技术指标，它表明一个放大电路能够在多宽的频率范围内对信号中的各频率分量实现相同的放大。实践证明，放大电路的通频带 f_{bw} 只要等于或略大于信号频带，则它所产生的频率失真就没有多大影响了。

5. 非线性失真

非线性失真是由半导体三极管的特性曲线的非线性产生的，某一频率的正弦信号通过放大电路后，输出波形就再也不是正弦波了，而是含有许多谐波分量。谐波电压总量与基波分量之比叫做非线性失真系数，记作 r 即

非线性失真系数 r ，是用来检查放大电路的保真能力的。

$$r = \frac{\text{谐波总量}}{\text{基波分量}}$$

§ 6.2 放大电路的基本分析方法

在这一节里我们主要是讨论分析，计算放大电路时常用的方法，虽然仅就共射基本放大电路进行讨论，但是这些方法无论在分析其他接法的放大电路时，还是分析较复杂的电路时，都具有普通意义。

常用的分析方法有两种，即图解法和微变等效电路法。对一个放大电路进行定量分析时，要解决的问题不外乎是这样两个方面的工作：

(1) 确定静态工作点。即输入信号不加入时，电路中各处的直流电压和直流电流数值。

(2) 在放大电路的输入端有交流信号输入时，计算放大电路的放大倍数，输入电阻、输出电阻、通频带、最大输出功率等。

第一个问题讨论的对象是直流成份，而后一个问题讨论的对象则是交流成份。

6.2.1 直流通路和交流通路

1. 直流通路

在放大电路中由于存在着电抗性元件，所以直流成份的通路和交流成份的通路是不一样的。直流通路是指供给三极管正常放大所需的直流电压和电流的电路。对于直流通路来讲，电容可以视为开路，电感可以视为短路。具体到图6.3所示的放大电路，就是指能供给 I_{BQ} 、 I_{CQ} 和 V_{CEQ} 的电路。如图6.6所示。当我们计算放大电路的静态工作点时，必须按直流通路

来考虑。

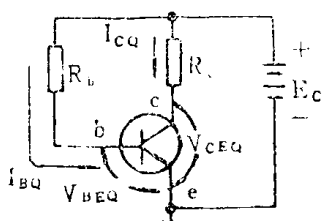


图6.6 直流通路

直流通路的计算，实质上是求解包含非线性器件的直流电路，因此严格的分析必须采用图解的方法，这将在下一节中介绍。

在这里介绍一种工程上实用的近似计算方法。首先说明有如下两方面的近似关系：

(1) 我们由三极管的输入特性上看到， V_{BE} 的变化是很小的，基本上是 $0.6 \sim 0.8V$ 之间（这是对硅管而言，锗管在 $0.1 \sim 0.3V$ 之间），所以计算静态工作点时，可以认为 V_{BE} 是已知的。

(2) 由第一章可知， $I_c = \beta I_B + I_{CE0}$ ，假定 β 是个常数，它代表工作区域内 β 的平均值，因而不受工作点位置的影响，而且 I_{CE0} 很小可以忽略。则上式简化为

$$I_c \approx \beta I_B \approx \beta I_B \quad (6-6)$$

即集电极电流和基极电流的直流量之比和变化量之比近似相等。

由图6.6可见

$$E_c = I_{BQ} R_b + V_{BEQ} \quad (6-7)$$

$$E_c = I_{CQ} R_c + V_{CEQ} \quad (6-8)$$

计算静态工作点时，式中 E_c ， R_b ， R_c ， β 为已知，取 V_{BEQ} 为 $0.6 \sim 0.8V$ （对硅管而言），由(6-7)、(6-8)式可算出 I_{BQ} 、 V_{CEQ} 。

$$I_{BQ} = \frac{E_c - V_{BEQ}}{R_b} \quad (6-9)$$

通常， $E_c \gg V_{BEQ}$ 是可以满足的，则上式可以写成

$$I_{BQ} \approx \frac{E_c}{R_b} \quad (6-10)$$

同时，根据(6-6)式知：

$$I_{CQ} \approx \beta I_{BQ}$$

$$V_{CEQ} = E_c - I_{CQ} R_c$$

$$= E_c - \beta \cdot \frac{E_c - V_{BEQ}}{R_b} \cdot R_c$$

$$\approx E_c - \beta \frac{E_c}{R_b} \cdot R_c \quad (6-11)$$

直流通路的这种近似算法（ $E_c \gg V_{BEQ}$ ）在工程上是足够准确的。

2. 交流通路

上面我们分析了直流通路及如何计算静态工作点的数值。在静态工作点的基础上，把交流信号加进去，显然这就是交流通路的问题。

我们仍从图6.3(a)所示的电路出发，由于直流电源 E_c 的交流内阻很小，对于交流信号可视为短路，假定隔直电容 C_1 和 C_2 充分大，其上的交流压降可略而不计，即也可视

为短路。所以，交流通路如图6.7所示。

6.2.2 图解法

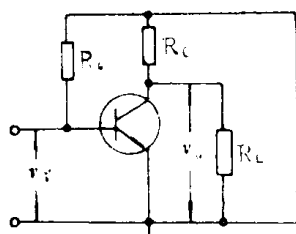


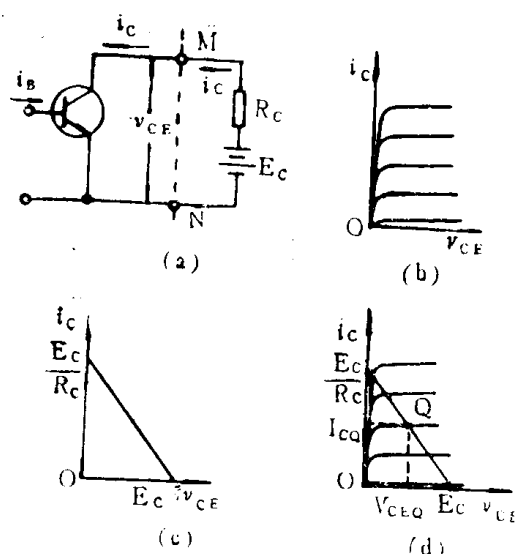
图6.7 电路的交流通路

图解法是以三极管的特性曲线为基础的，在第一章中讲述，一个三极管输入回路的电压和电流关系可以用输入特性曲线来表示，输出回路的电压和电流的关系则可以用输出特性曲线来表示。如果这两个特性是从所用三极管实际测量出来（一般情况下，特性曲线可在图示仪上显示，只能反映低频时各电量之间的关系），那么它们就能比较准确地反映这只管子的性质。这样，我们可以在输入、输出特性曲线上，直接用作图的方法来分析放大电路的工作情况。此方法也就是通常所说的图解法。

1. 作输出回路直流负载线

在基本放大电路的直流通路图6.8 (a) 上，画一条虚线M—N，将输出回路分成两部分，左边部分的 i_c 与 v_{CE} 的关系就是三极管的输出特性；右边部分是 R_c 和 E_c 串联，可由下式的线性关系来表示

$$v_{CE} = E_c - R_c i_c \quad (6-12)$$



(a) 直流通路 (b) 三极管输出特性
(c) 直流负载线 (d) 图解法求Q点

图6.8 输出回路负载线的作图法

2. 作输入回路直流负载线

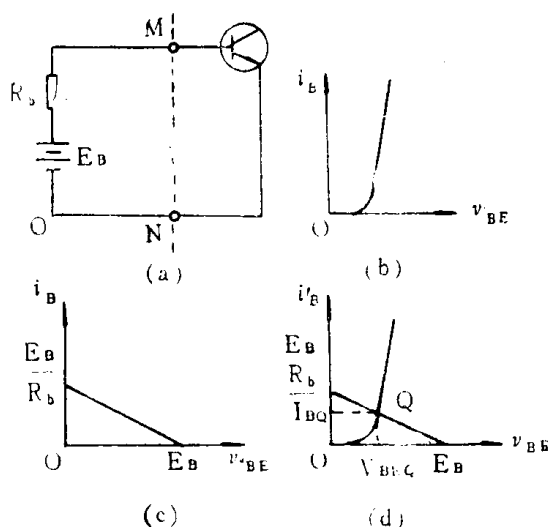
从图6.9 (a) 可以看到，用相类似的方法，把输入回路也分成左、右两个部分。而右边部分的电流、电压关系是三极管的输入特性曲线，左边部分的电流、电压关系是一条直线，该直线通过 $v_{BE} = 0$, $i_B = \frac{E_B}{R_b}$ 和 $i_B = 0$, $v_{BE} = E_B$ 两点。这条直线叫做输入回路的负载线。这条直线与输入特性的交点，就定出了静态工作点， I_{BQ} 的数值。根据 I_{BQ} 这个值就可以在输出特性上找到相对应的工作点Q。

式 (6-12) 表示一条直线，要画出它来最简便的方法是找出两个特殊点：令 $i_c = 0$,

$v_{CE} = E_c$ ；令 $v_{CE} = 0$, $i_c = -\frac{E_c}{R_c}$ 。连接这两点就得到线性部分的伏安特性，如图6.8 (c) 所示。

这条线的斜率和负载电阻 R_c 的大小有关，而且是由直流通路定出的。所以把这条直线叫做输出回路的直流负载线。

由于输出回路的两部分在M、N点实际上是串联在一起构成电路整体的， i_c 和 v_{CE} 都只能有一个，既要满足左边管子的输出特性曲线，又要满足右边电路的负载线，所以只能工作在两者的交点。它们的交点有很多个，这些点都是工作点。但是只有其中 $i_B = I_{BQ}$ 的那条曲线与直流负载线的交点，才是静态工作点。从而可求出回路的静态值 I_{CQ} 和 V_{CEQ} 。



(a) 直流通路 (b) 三极管的输入特性
(c) 输入回路的直流负载线 (d) 由交点出Q

图6.9 输入回路负载线的作图法

由于三极管的输入特性不易测得准确, 手册上经常不给出, 所以我们先用式 (6—10) 近似算出 I_{BQ} 来, 再到输出特性上去确定Q点。

〔例6.1〕 在图 6.10 电路中, 已知 $R_b = 300\text{K}\Omega$, $R_c = 4\text{K}\Omega$, 电源电压为 12V , 三极管的输出特性曲线如图 6.10 (b) 所示, 试用图解法确定静态工作点。

解:

第一步: 由式 (6—10) 算出静态工作点的 I_{BQ} , $I_{BQ} \approx E_c/R_b = 12\text{V}/300\text{K}\Omega = 40\mu\text{A}$ 。

第二步: 在输出特性曲线上作负载线, 令 $i_c = 0$ 时, $v_{ce} = 12\text{V}$ 。令 $v_{ce} = 0$ 时,

$$i_c = \frac{E_c}{R_c} = 3\text{mA}$$

连接这两点便得到直流负载线, 与 $i_B = 40\mu\text{A}$ 的一条特性曲线的交点, 就是静态工作点 Q。从曲线查出 $I_{cQ} = 1.5\text{mA}$, $v_{ceQ} = 6\text{V}$ 。

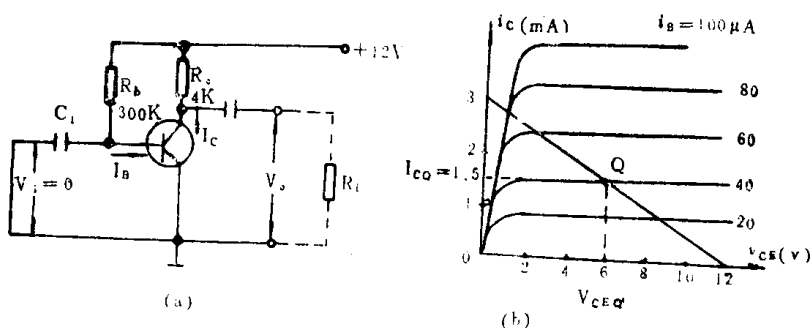
3. 输出回路的交流负载线:

求电压放大倍数时, 要考虑交流通路, 因此集电极的负载电路就必须包括 C_2 和 R_L 的支路。在此情况下负载线应如何画法, 下面就先来定性地进行分析: 从图 6.7 中可知, 输出回路的交流通路包括 R_c 和 R_L 并联 (设 C_2 很大, $\frac{2}{\omega C_2} \ll R_L$), 用 R'_L 来表示, 由图 6.11 所

示电流、电压正方向可知 $\Delta v_{ce} = \Delta i_c \cdot R'_L$ (其中 $R'_L = R_L // R_c$) 或 $\frac{\Delta i_c}{\Delta v_{ce}} = -\frac{1}{R'_L}$ 也就是

说这时的负载线的斜率将由 R'_L 决定 (而不是 R_L 决定)。其次, 这条直线应该通过Q点, 因为当输入信号 $v_i = 0$ 时, 不考虑 C_1 和 C_2 的影响, 则电路的外界条件和静态时相同, 即由信

号电压变化所产生的 Δi_c 的轨迹必在某个时刻通过Q点。因此, 通过Q点作一条斜率为 $-\frac{1}{R'_L}$



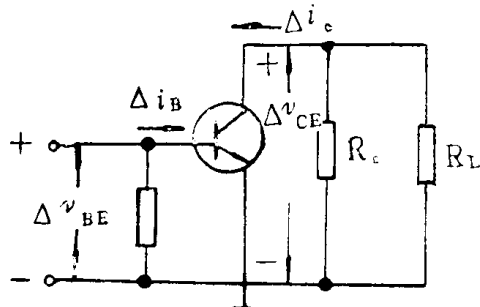


图6.11 交流通路

的直线，就是由交流通路得到的负载线，通称为交流负载线。（如果 C_2 的容抗不能忽略时，交流负载线不再是一条直线，将不通过Q点）

交流负载线以 $-\frac{1}{R'_L}$ 的斜率通过Q点，还可以从另一方向来证明。在正确选择静态工作点Q和输入信号比较小的情况下， i_b 、 i_c 、 v_{ce} 都是围绕Q点而变化，即瞬时总值

$$\begin{aligned} i_c &= I_{CQ} + i_c \\ v_{ce} &= V_{CEQ} + v_{ce} \end{aligned} \quad (6-13)$$

其中 i_c 和 v_{ce} 的正方向如图6.11所示。

$$v_{ce} = -i_c R'_L = -(i_c - I_{CQ}) R'_L \quad (6-14)$$

式中负号表示 v_{ce} 与 i_c 反相。将式(6-14)代入式(6-13)的第二式，得：

$$v_{ce} = V_{CEQ} - (i_c - I_{CQ}) R'_L \quad (6-15)$$

不难看出，式(6-15)表示的 $i \sim v_{ce}$ 关系是直线关系，其斜率为 $\frac{i_c - I_{CQ}}{v_{ce} - V_{CEQ}} = -\frac{1}{R'_L}$

若将(6-15)式画在 $i_c \sim v_{ce}$ 的坐标中，就是输出回路的交流负载线。

由式(6-15)又可知，当 $i_c = I_{CQ}$ 时， $v_{ce} = V_{CEQ}$ ，即交流负载线通过Q点。

当 i_b 随着信号电压变化时，输出回路的工作点将沿着交流负载线运动，而不是沿着直流负载线运动。所以，只有交流负载线才是放大电路的动态工作点的轨迹。只要有了交流负载线，就可以很方便地画出集电极电流和电压波形。为此，我们首先从输入特性来确定 v_i 作用下， v_{BE} 的变化，如图6.12(a)，由交流通路图6.11可知， $\Delta v_{BE} = v_i$ ，所以 v_{BE} 将以 V_{BEQ} 为基础随信号电压 v_i 而摆动。现在我们由输出特性来分析输出波形，对应于不同 i_b 值的输出特性曲线和交流负载线的交点就是放大电路的动态工作点，已知 i_b 的波形就不难画出集电极电流，电压波形，如图6.12(b)、(c)，从图中可以求出输出电压的振幅值 $V_{o\bullet} = V_{ce\bullet}$ ，比较输入信号电压波形和输出电压波形，它们在相位上相差 180° 。

4. 用图解法求电压放大倍数

为了求电压放大倍数，首先得从输入特性上找出对应于一个已知的 v_i (Δv_{BE}) 的 i_b ，如图6.12(a)所画出的那样，然后再从交流负载上找出与 i_b 相对应的 v_{ce} ，即 v_o 。如图

6.12(b)，则电压放大倍数 $A_v = \frac{V_o}{V_i}$ 其中 V_o 、 V_i 分别是输出电压和输入电压的正弦有效值。

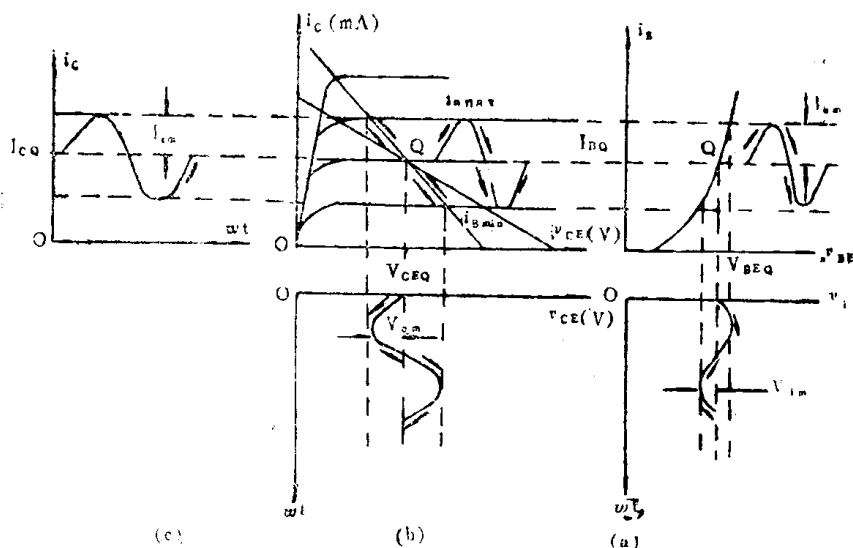


图6.12 图解法画交流波形

〔例6.2〕 在图6.13电路中,已知 $R_b = 280\text{K}\Omega$, $R_c = 3\text{K}\Omega$, $E_c = 12\text{V}$, $R_L = 3\text{K}\Omega$, 用图解法求电压放大倍数。

解:

(1) 首先根据式 (6—10)

计算出静态工作点的 I_{BQ} :

$$I_{BQ} = \frac{12 - 0.7}{280} \approx \frac{12\text{V}}{280\text{K}} \approx 0.04\text{mA}$$

然后在输出特性曲线上作直流负载线:

$$\text{令 } i_c = 0, v_{CE} = 12\text{V}$$

$$\text{令 } v_{CE} = 0 \text{ 时, } i_c = \frac{12}{3} = 4\text{mA}$$

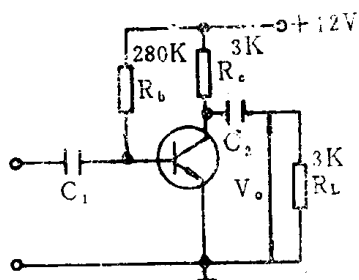


图6.13 电路图

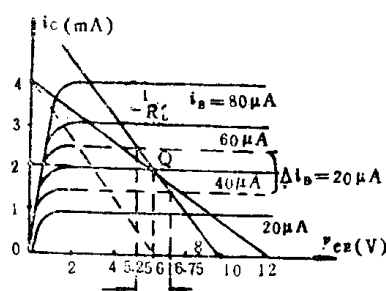


图6.14 交直流负载线

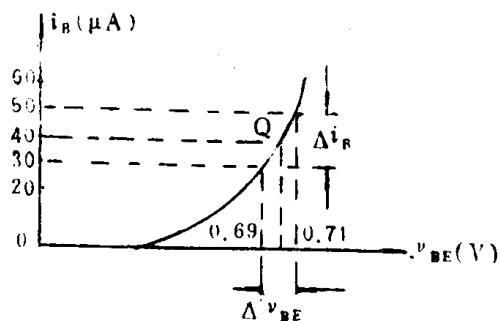


图6.15 求 Δi_B

连接这两点便得到负载线, 它与 $i_B = 40\mu\text{A}$ 的一条特性曲线的交点就是静态工作点Q。从曲线上查出 $I_{CQ} = 2\text{mA}$, $V_{CEQ} = 6\text{V}$ 。

(2) $R_L' = 3//3 = 1.5\text{k}$ 在图6.14中, 过Q点作斜率为 $-\frac{1}{R_L'}$ 的直线, 得交流负载线。作交

流负载线的具体方法是这样, 先给定一个 i_c 数值(例如 4mA), 然后定出 $i_c R_L' = 4 \times 1.5 = 6\text{V}$,

于 v_{CE} 轴连接 $\begin{matrix} i_c = 4\text{mA} \\ v_{CE} = 0 \end{matrix}$, $\begin{matrix} v_{CE} = 6\text{V} \\ i_c = 0 \end{matrix}$ 这两点的直线斜率为 $-\frac{1}{R_L'}$, 然后过Q点作该直线

的平行线，即为交流负载线。

(3) 从图 6.15 中，在 Q 点附近取 $\Delta i_B = 20\mu A$ ，查出相对应的 $\Delta v_{BE} = 0.02 V$ ，再从图 6.14 上查出当 $i_B = 20\mu A$ 时，故 $v_{CE} \approx 1.5V$ ，故

$$A_v = \frac{\Delta v_{CE}}{\Delta v_{BE}} \approx \frac{-1.5}{0.02} = -7.5$$

负号表示 v_{CE} 和 v_{BE} 的变化方向相反。（因为输入特性曲线的误差一般比较大，而且求 Δv_{BE} 的作图误差也比较大，所以用图解法求出的电压放大倍数是很近似的。

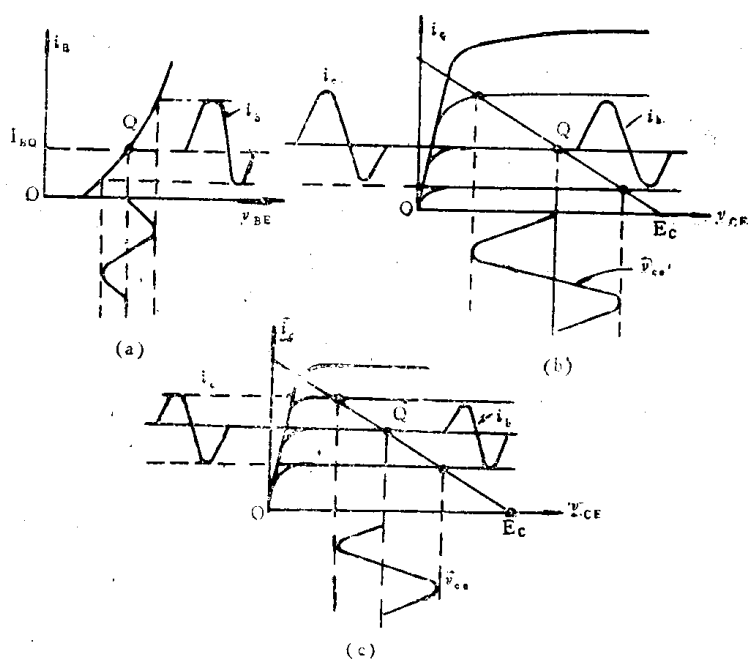
5. 用图解法分析非线性失真

前面我们应用图解法分析了基本放大电路的工作点、负载线、电流、电压波形和电压放大倍数。电路设计得比较合理，波形失真就不明显。但是放大电路中的波形失真问题，也是我们必须熟悉的课题，否则在设计和调整电路时，就不知道如何避免和减小波形失真。

引起波形失真的原因有两种，一种是由晶体管本身的非线性特性引起的；另一种是静态工作点 Q 的位置不合适，也会产生严重的失真，信号较大尤其如此。

① 晶体管的非线性引起波形失真

在放大区内，晶体管的非线性，表现在输入特性的弯曲和输出特性的间距不均匀，如果信号又比较大，将使 i_B 、 i_C 、 v_{CE} 正负半周不对称，产生了非线性失真，如图 6.16 所示（输出端不按 R_L ）。



(a) 输入特性弯曲引起的失真

(b) 输出特性上疏下密引起的失真

(c) 输出曲线族上密下疏引起的失真

图 6.16 由晶体管非线性引起的失真

② 静态工作点位置不合适而产生严重波形失真。

如果静态工作点选得太低，如图 6.17 所示，在输入特性上，信号电压的负半周有一部分进入截止区，使 i_B 的负半周被削掉一部分， i_B 已为失真的波形。结果 i_C 的负半周和 v_{CE} 的正半周也有相应的一部分被削掉，这种失真称为截止失真。

当静态工作点选得太高时，尽管 i_B 波形完好，在输出特性上，信号的摆动范围有一部分进入饱和区，结果使 i_C 的正半周和 v_{CE} 的负半周被削掉一部分，这种失真称为饱和失真，如图 6.18 所示。上述这类失真是因为管子各极电流、电压不能随输入信号的规律成线性比例变化。我们把这类失真称为非线性失真。