

电路分析与电子技术基础(II)

模拟电子技术基础

浙江大学电工电子基础教学中心 电子技术课程组 编

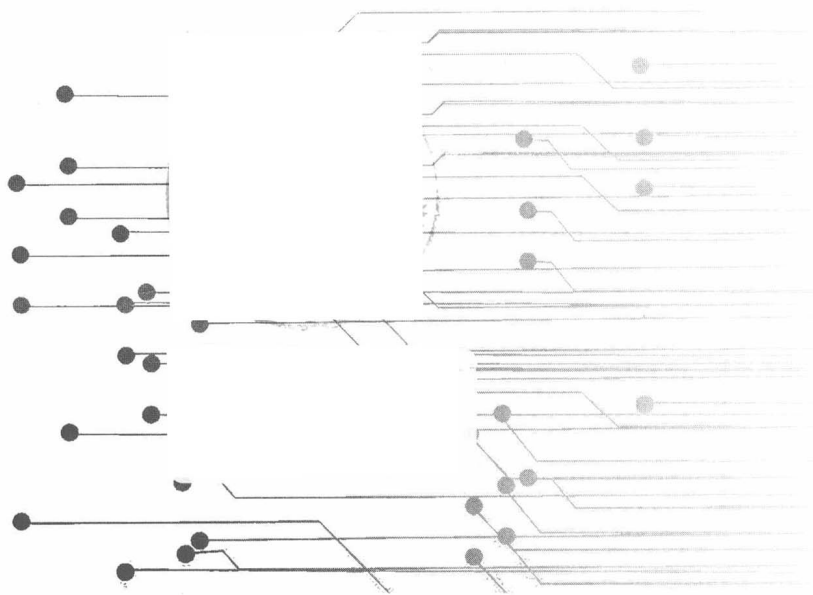
林平 沈红 周箭 张德华 主编

高等教育出版社

析与电子技术基础(II)

——模拟电子技术基础

浙江大学电工电子基础教学中心 电子技术课程组 编
林平 沈红 周箭 张德华 主编



高等教育出版社·北京

内容简介

本书为《电路分析与电子技术基础》系列教材的第2册。全书内容参照高等学校电子电气基础教程教学指导分委员会制定的教学基本要求,将原“电路原理”“模拟电子技术基础”和“数字电子技术基础”课程中最基本的知识点有机地融合在一起,突出工程背景与应用,强调基本原理与分析,使电气工程、自动化、电子信息工程、通信工程、生物医学工程与仪器、光电信息、机电一体化、计算机等涉电类专业的学生,能基本掌握电路原理与电子技术方面的基本知识与概念,并能为深入学习后续电类课程或相关专业课程奠定扎实的基础。

在第1册详细分析了半导体器件工作机理以及半导体器件不同工作状态下的线性模型基础上,本书共分5个章节,包括放大电路的建模与设计,放大电路的稳定性和性能改善分析,功率放大电路和基本AC/DC变换电路,信号发生电路,模拟信号处理电路。

本书可作为普通高等学校电子信息类、电气类、自动化类专业的基础教材,也可作为非电专业电工电子课程教材使用,并可供从事电子和电气工程专业的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电路分析与电子技术基础. II, 模拟电子技术基础/
浙江大学电工电子基础教学中心电子技术课程组编;林
平等主编. --北京:高等教育出版社,2018.11

ISBN 978-7-04-050826-0

I. ①电… II. ①浙… ②林… III. ①电路分析-高
等学校-教材②模拟电路-电子技术-高等学校-教材
IV. ①TM133②TN710

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第242792号

策划编辑 王勇莉

责任编辑 王楠

封面设计 王洋

版式设计 马云

插图绘制 于博

责任校对 刘丽娴

责任印制 尤静

出版发行 高等教育出版社
社址 北京市西城区德外大街4号
邮政编码 100120
印刷 廊坊十环印刷有限公司
开本 787mm×960mm 1/16
印张 20.5
字数 370千字
购书热线 010-58581118
咨询电话 400-810-0598

网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.hepmall.com.cn>
<http://www.hepmall.com>
<http://www.hepmall.cn>
版 次 2018年11月第1版
印 次 2018年11月第1次印刷
定 价 38.20元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换
版权所有 侵权必究
物料号 50826-00



前 言

《电路分析与电子技术基础》系列教材(含3个分册)总结了浙江大学多年来实施的全校性电类系列核心课程教学改革的成果。将原有的“电路原理”“模拟电子技术基础”和“数字电子技术基础”课程中最基本的知识点,有机地融合在一起。系列教材体现了电类基础课程优化整合的教学改革发展新需要,在保证课程教学基本要求的前提下,压缩电类基础课程的教学时数,提高后续专业课程的教学起点,为电气信息类高素质创新型科技人才培养创建新的教学平台。

本书为系列教材的第2册。在教材编写过程中,我们反复讨论了教材体系如何和实际教学课程紧密联系,希望能充分体现电类系列核心课程教学改革的成果。新教材不仅覆盖了原有传统模拟电子技术的内容,又形成了自己独特的特点:

(1) 将原有的传统的基本半导体器件的工作机理和模型构建放到了系列教材的第1册,使得学生在学习线性电路的基本原理和分析方法的基础上,针对半导体器件的非线性特性,学习并建立“线性化建模”的基本理念。

(2) 强调了在模拟电子技术应用中的电路模型的描述。第1章即以“放大电路的建模与分析”来阐述基本放大电路的特性,以建模的思路,帮助学生进一步理解在电子技术应用中的电路模型就是实际半导体器件在不同工作状态下的电气性质的数学描述的理念。

(3) 强化了电子技术工程应用的背景。第2章从“放大电路的稳定性和性能改善”的角度,阐述基本应用放大电路功能。第3章从功率角度分析信号的功率放大以及实际应用中的功率变换电路。第4、5两章则着重从信号的发生和信号处理进行基本功能电路的分析。教材内容脉络清晰,同时,在每一章的最后一节均给出了实际应用案例,突出了课程的工程背景与实际应用。

本系列教材的策划得到了浙江大学电气工程学院和学校本科生院的大力支持。本教材的编写过程中得到了电气学院电子技术课程组全体教师的大力支持。参加编写的教师分工如下:林平、周箭、张德华编写了第1、3、4、5章,沈红编写了第2章。感谢王小海教授、陈隆道教授在教材编写过程中给予的大力支持

和宝贵意见。感谢电子科技大学何松柏教授提出的宝贵的修改意见。

由于编者的水平和时间有限,对于教材中存在的不足和错误,欢迎专家和读者批评指正。编者邮箱:linping@zju.edu.cn。

编者

2018年9月

第 1 章 放大电路的建模与分析	1
1.1 放大电路的基本概念	1
1.1.1 放大电路的基本组成	1
1.1.2 放大电路的输入信号源和输出负载	2
1.1.3 放大电路中静态和动态关系	3
1.1.4 放大电路基本放大原理	6
1.1.5 放大电路的性能指标	8
1.2 单管放大电路的分析	12
1.2.1 放大电路的直流通路和静态模型	12
1.2.2 放大电路的交流通路和小信号模型	21
1.3 CMOS 放大电路	32
1.4 多级放大电路的分析	34
1.4.1 多级放大电路的级间耦合方式	34
1.4.2 多级放大电路的分析计算	36
1.5 放大电路的频率特性分析	40
1.5.1 利用波特图分析放大电路的频率特性	41
1.5.2 半导体器件的高频小信号模型	43
1.5.3 放大电路的分频段分析法	45
1.5.4 多级放大电路的频域分析	50
1.6 差分放大电路	53
1.6.1 差分放大电路基本结构和分析	53
1.6.2 差分放大电路在单端输入方式下的电路分析	62
1.6.3 集成运算放大器输入级的电路形式	64
1.7 互补对称共集电路	67

1.7.1	互补对称式共集电路的基本形式	67
1.7.2	甲乙类互补对称式共集电路的分析	68
1.8	集成运算放大器	70
1.8.1	集成运放基本特性	70
1.8.2	集成运放的基本参数	71
1.8.3	集成运放中电流源电路	77
1.8.4	集成运放的频率响应特性	80
1.8.5	集成运放应用时的注意事项	81
1.9	应用案例解析	84
习题 1	91
 第 2 章 放大电路的稳定性和性能改善分析		106
2.1	反馈的基本概念	106
2.1.1	负反馈原理框图及基本概念	106
2.1.2	负反馈放大电路的基本分类	110
2.2	负反馈对放大电路性能的改善	119
2.2.1	提高闭环增益的稳定性	119
2.2.2	改善放大器的非线性	120
2.2.3	抑制放大器内部的温漂、噪声和干扰	122
2.2.4	扩展通频带	123
2.2.5	负反馈对输出电阻的影响	124
2.2.6	负反馈对输入电阻的影响	126
2.3	集成运放的负反馈放大电路的分析	128
2.3.1	比例运算电路的分析	129
2.3.2	求和运算电路的分析	130
2.3.3	单运放差分放大器	131
2.3.4	积分和微分运算电路	132
2.3.5	电流/电压和电压/电流变换电路	134
2.3.6	运放与非线性器件构成的应用电路	135
2.3.7	跨导运算放大器	138
2.4	深度负反馈放大电路的分析	139
2.5	负反馈放大电路的稳定性	143
2.5.1	产生自激振荡的原因和条件	143

2.5.2 利用波特图判定放大电路的稳定性	145
2.5.3 消除自激振荡的方法	148
2.6 应用案例解析	150
习题 2	152
第 3 章 功率放大电路和基本 AC/DC 变换电路	159
3.1 功率放大电路	159
3.1.1 功率放大电路基本概念	159
3.1.2 甲类单管功率放大电路	160
3.1.3 乙类双管功率放大电路	162
3.1.4 功率放大电路的基本计算	163
3.1.5 集成功率放大器	166
3.1.6 应用案例解析	169
3.2 基本 AC/DC 变换电路	170
3.2.1 整流和滤波电路	170
3.2.2 稳压电路	173
3.2.3 应用案例解析	180
习题 3	182
第 4 章 信号发生电路	189
4.1 产生正弦振荡的条件	189
4.2 RC 正弦波振荡器	191
4.3 LC 正弦波振荡器	195
4.3.1 变压器反馈式振荡器	197
4.3.2 三点式振荡器	198
4.4 石英晶体振荡器	201
4.5 非正弦波的产生与变换	204
4.5.1 电压比较器	204
4.5.2 集成电压比较器	208
4.5.3 方波与三角波发生器	212
4.6 压控振荡器	216
4.7 应用案例解析	218

习题 4	221
第 5 章 模拟信号处理电路	229
5.1 模拟信号处理电路概述	229
5.2 仪用放大器	230
5.2.1 仪用放大器原理	230
5.2.2 集仪用放大器	232
5.3 可编程增益放大器	234
5.3.1 可编程增益放大器简介	234
5.3.2 集成可编程增益放大器	236
5.4 隔离放大器	237
5.4.1 隔离放大器基本原理	237
5.4.2 集成隔离放大器	241
5.5 模拟乘法器	243
5.5.1 模拟乘法器的主要类型	244
5.5.2 模拟乘法器的主要参数	247
5.5.3 模拟乘法器的应用	248
5.5.4 集成模拟乘法器	251
5.6 有源滤波器	252
5.6.1 滤波器基本原理	252
5.6.2 低通滤波器(LPF)	254
5.6.3 三种典型的基本滤波器特性	261
5.6.4 不同特性滤波器之间的转换	261
5.6.5 开关电容滤波器	269
5.6.6 滤波器的发展	273
5.7 放大电路中的噪声和干扰及其抑制措施	273
5.8 应用案例解析	278
习题 5	279
部分习题参考答案	283
符号说明	302

名词术语英汉对照	305
参考文献	316

第 1 章 放大电路的建模与分析

1.1 放大电路的基本概念

1.1.1 放大电路的基本组成

在第一册的基本半导体元器件的分析中,我们知道利用半导体晶体管和场效应管可以构成基本的放大电路,实现对输入信号的线性不失真放大。一个基本的放大系统可以认为由输入信号源、基本放大电路(包括供电电源和半导体器件)和输出负载构成。图 1.1.1 给出放大系统的基本构成。

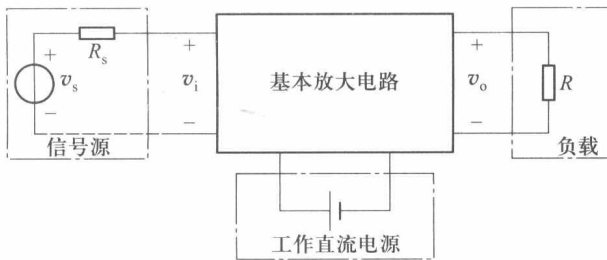


图 1.1.1 放大系统的基本构成

图中的信号源以电压源的形式表示,可以认为是自然界的各种非电量信号经过传感器转变后得到的电信号,例如声音信号经过话筒后转换得到的音频电压信号。输出负载可以是各种执行元件或电阻,例如电压表、电流表、扬声器、伺服电机等。工作直流电源提供了基本半导体器件正常工作的偏置保证。

大家熟悉的音频功放就是一个典型的放大系统,通过话筒把语音信号转换为电信号,其输出电压大约为几毫伏到几十毫伏,经功放内的放大电路放大后输出给扬声器,扬声器又将放大电路输出的电信号还原为语音信号。功放电源提供的电能转化为扬声器输出时增加的信号功率。很显然,我们都希望扬声器发出的声音与送入到话筒的声音信号保持一致,即输出的信号中包含的信息应保

持与输入信号完全一致,也就是所谓的没有失真,改变的只是信号的幅度或功率的大小。可见,作为基本放大系统应该具有不失真放大电信号的功能。

本章主要内容就是介绍基本放大电路的工作原理、基本放大电路的工作条件和分析设计,实现对输入信号的不失真的线性放大,并将放大后的信号传输给负载。

1.1.2 放大电路的输入信号源和输出负载

1. 输入信号源

在人类自然环境中,存在着各式各样的信号,比如温度、压力、光强、声音、图像、速度等,当我们需要对这些信息进行检测、分辨以及处理时,首先需要把这些非电量信号通过传感器转变为基本电路能进行分析处理的电信号。

通常为了分析方便,可以把电信号分为模拟信号和数字信号两大类。把时间上是连续变化的、幅值上也是连续取值的信号称为模拟信号。把时间离散、数值也离散的信号称为数字信号。分析和处理模拟信号的电子电路称为模拟电路,本册书主要就是分析讨论模拟电子电路的基本概念、基本原理、基本分析和设计电路的方法以及基本应用。

根据电路理论的知识,我们知道电路中的电信号可以有两种等效的模型形式,一种表示为理想电压源和内阻 R_s 串联的戴维宁等效电路形式,一种表示为理想电流源和内阻 R_s 并联的诺顿等效电路形式,分别如图 1.1.2(a)(b)所示。

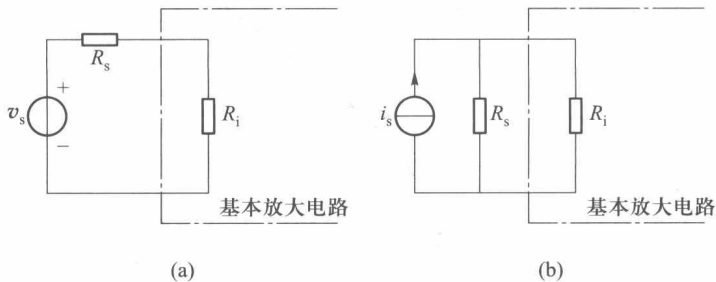


图 1.1.2 信号源的等效电路

由信号分析的基本知识,实际应用中的任何周期性的非正弦信号都可以分解表示为不同频率的正弦信号(基波和各次谐波)的叠加,所以在基本线性放大电路的分析中通常采用正弦波信号作为基本的输入信号源。

2. 输出负载

输出负载可以是各种执行元件或电阻,例如电压表、电流表、扬声器、伺服电

机、后级放大电路等。负载对放大电路的要求一般可分为三类：

(1) 需要放大电路有足够大的输出信号电压,而对输出信号的电流没有要求。例如放大电路的输出是为了驱动高内阻的电压表或连接较高输入电阻的后级放大电路。

(2) 需要放大电路有足够大的输出信号电流,而对输出信号的电压没有要求。例如放大电路的输出是为了驱动电流型负载,如继电器线圈等。

(3) 需要放大电路有足够大的输出信号功率,即要求放大电路的输出信号电压和输出信号电流都应该有足够大的动态范围,如音箱负载等。

1.1.3 放大电路中静态和动态关系

放大电路的基本功能就是不失真地放大“变化”的信号,只有变化的信号才包含有相关的信息,也就是前面提到的通常用正弦信号来表示需要放大的变化信号,可以理解为这是一种动态(交流)的分析过程。为了实现这个目标,需要为放大电路提供合适的直流偏置,也就是说放大电路必须有合适的静态工作条件。

为了更好地分析放大电路中静态与动态的关系、各动态分量之间的关系,并且为了区别各种不同量的含义,对电路中各个电量的符号写法进行规范:

(1) 电量的基本符号用大写字母并辅以大写下标来表示直流(静态)电量,如 I_B 、 I_C 、 I_D 、 V_{BE} 、 V_{CE} 、 V_{GS} 。另外,本册教材中的基本电量“电压”通常用 V 表示,直流电源电压通常表示为 V_{CC} 、 V_{DD} 。

(2) 用小写字母辅以小写下标来表示交流(动态)变量的瞬时值,如 v_i 、 v_o 、 i_b 、 i_c 。如果交流量为正弦波,则用大写字母并辅以小写下标来表示其有效值,如 V_i 、 I_i 。若是为了表示其峰值,可在其有效值下标中增加 m 标志,如 V_{im} 、 I_{im} 。书中也以 \dot{V}_i (或 \dot{I}_i) 表示交流相量值(复数)。

(3) 用小写字母辅以大写下标来表示直流与交流叠加后的瞬时总量,如 i_B 、 i_C 、 i_D 、 v_{BE} 、 v_{CE} 、 v_{DS} 。

下面以基本共射极放大电路为例,利用“图解分析法”(也简称图解法)对放大电路的“静态”和“动态”进行分析,阐述基本放大电路的工作原理。

图 1.1.3 是基本共射极放大电路

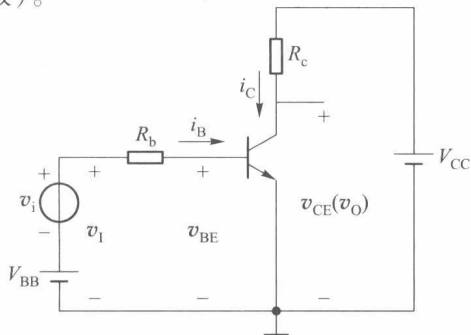


图 1.1.3 基本共射极放大电路原理图

原理图。其中半导体晶体管是放大器件,直流电压 V_{BB} 通过串联电阻 R_B 为晶体管的发射结提供正偏电压,产生基极偏置电流 I_B ,同样电压源 V_{CC} 和电阻 R_C 也作为偏置电路为晶体管的集电结提供反偏电压,保证晶体管工作在放大区。电阻 R_C 的另外一个作用是将集电极电流的变化转换为电压的变化,作为放大电路的输出。 v_i 为待放大的交流小信号,可以表示为 $v_i = V_{im} \sin \omega t$,输出信号从集电极-发射极间输出。可见,放大电路中的电压和电流都既包含直流成分也包含交流成分,这是一个交直流共存的放大电路。对这类电路进行分析时,可以将直流和交流分开处理,在进行直流(静态)分析时,认为交流信号为零,在进行交流(动态)分析时,认为直流电源变化量为零。

1. 直流分析

在进行直流分析时,输入信号 $v_i = 0$,电路中只包含直流分量,输入回路中的直流静态工作点 $Q(I_{BQ}, V_{BEQ})$ 应位于晶体管的输入特性曲线 $i_B = f(v_{BE}) \Big|_{v_{CE} \geq 1 \text{ V}}$ 上,同时静态电流 I_{BQ} 、电压 V_{BEQ} 也应同时满足输入回路方程 $I_B R_B + V_{BE} = V_{BB}$,即静态工作点也应位于由这个回路方程决定的直线上,这样可以在晶体管输入特性上做出这条直线,其与晶体管的输入特性曲线的交点就是所求的静态工作点 $Q(I_{BQ}, V_{BEQ})$,如图 1.1.4(a) 所示。

在输出回路中,静态工作点应该位于由 $i_B = I_{BQ}$ 确定的那条晶体管输出特性曲线 $i_C = f(v_{CE}) \Big|_{I_B = I_{BQ}}$ 上,同时静态电流 I_{CQ} 、电压 V_{CEQ} 也应同时满足输出回路方程 $I_C R_C + V_{CE} = V_{CC}$,即静态工作点也应位于由这个回路方程决定的直线上,这样可以在晶体管输出特性上做出这条直线,它与输出特性曲线 $i_C = f(v_{CE}) \Big|_{I_B = I_{BQ}}$ 的交点 Q 就是所求的静态工作点 $Q(I_{CQ}, V_{CEQ})$,如图 1.1.4(b) 所示。

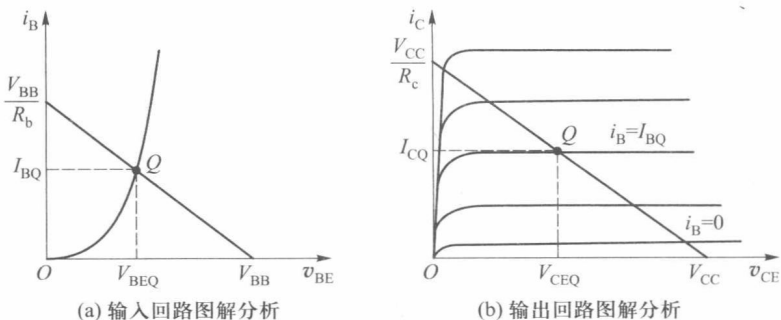
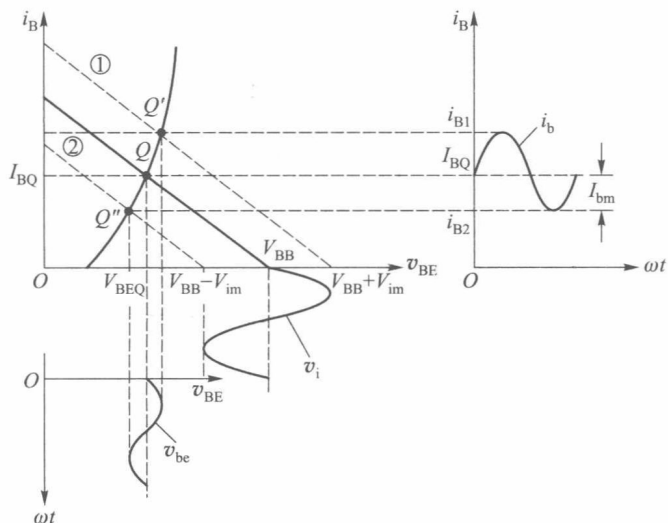


图 1.1.4 图解分析法中的静态工作点

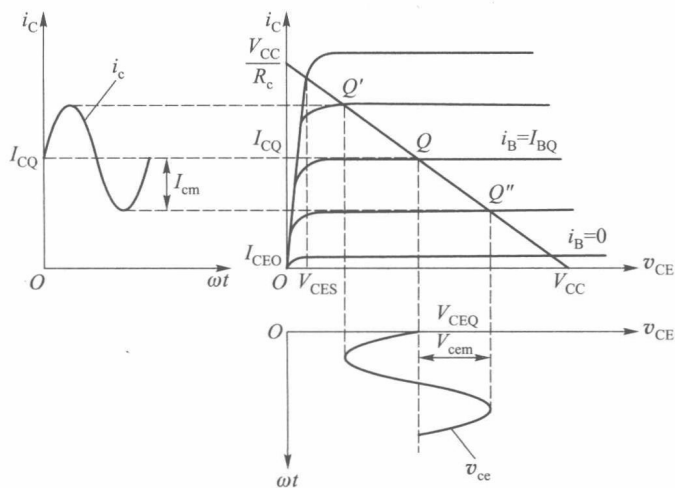
2. 交流分析

在以上直流分析中,我们知道,当外加的变化信号还没有加到基本放大电路时,电路中的半导体器件工作在线性放大区。在此基础上,我们分析当加入输入

信号 v_i 时的电路工作状态。假设 $v_i = V_{im} \sin \omega t$, 可以在半导体晶体管的输入特性曲线上分析并画出 i_B 和 v_{BE} 波形, 如图 1.1.5(a) 所示。在 V_{BB} 和 v_i 共同作用下, 输入回路的方程变为 $i_B R_B + v_{BE} = V_{BB} + v_i$, 那么此时的负载线变为随着输入 v_i 变化而平行移动的直线, 直线的斜率保持为 $-1/R_B$ 不变。图 1.1.5(a) 中两条虚线①、②表示 v_i 达到其峰值 $\pm V_{im}$ 时对应的负载线, 与放大器自身固有的输入特性分别相交于 Q' 和 Q'' , 对应地可以画出输入的电流 i_B 和电压 v_{BE} 的波形。



(a) 输入回路中动态波形



(b) 输出回路中动态波形

图 1.1.5 图解分析法中的动态工作波形

加入输入信号 v_i 后,放大电路的输出回路方程 $i_c R_c + v_{CE} = V_{CC}$ 保持不变,可见在输出特性图上的负载线保持不变,根据在输入特性图上得到的电流 i_b 的波形,在图 1.1.5(b) 中可以得到 i_c 和 v_{CE} 波形。 v_{CE} 波形中的交流量 v_{ce} 就是放大电路的输出电压 v_o ,它是与输入信号 v_i 同频率的正弦波形,是对 v_i 不失真放大的波形,其相位与 v_i 相差 180° 。

上面的“图解分析法”阐明了放大电路的基本工作原理,可以看出,为了实现输入信号不失真地线性放大的功能,必须设置良好的静态工作点“ Q ”,静态工作点的设置直接影响到基本放大电路的动态放大特性。

如果选取的静态工作点“ Q ”过高,则交流输出信号将会在 i_b 的正半周进入饱和区,导致 i_c 和 v_{CE} 波形失真,如图 1.1.6(a) 所示,这种由于器件进入饱和区而产生的失真称为饱和失真。

如果选取的静态工作点“ Q ”过低,则交流输出信号将会在 i_b 的负半周进入截止区,导致 i_c 和 v_{CE} 波形失真,如图 1.1.6(b) 所示,这种由于器件进入截止区而产生的失真称为截止失真。

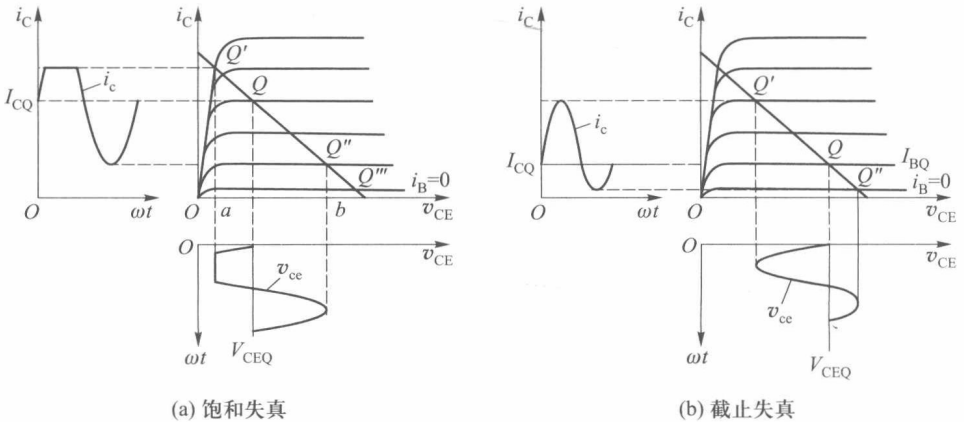


图 1.1.6 饱和失真和截止失真波形

即使可以假设我们设置了理想的静态工作点“ Q ”,但如果由于输入信号的幅度过大,也会导致输出的 i_c 和 v_{CE} 波形失真,这时可以认为是饱和失真和截止失真同时出现。

饱和失真和截止失真都是由于半导体器件特性的非线性引起的,通常也被称为非线性失真。

1.1.4 放大电路基本放大原理

从上面的图解分析法的分析讨论我们知道,对于基本放大电路中的半导体

器件,不论是晶体管还是场效应管,外加的偏置电路都必须保证其工作在线性放大区,工作在线性区的半导体器件其输出特性可以认为是受控电流源的特性。对于晶体管器件,可以看作是电流控制电流源特性,而对于场效应管,可以看作是电压控制电流源特性。这样,基本放大电路的输出部分可以用如图 1.1.7 所示的简化模型来表示。

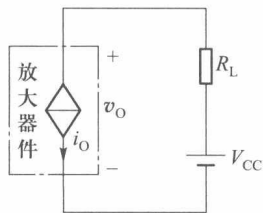


图 1.1.7 放大电路模型

可见,当放大电路加上信号 $v_i = V_{im} \sin \omega t$ 后,只要半导体放大器件工作在线性放大区,则图中的受控电流源可以表示为

$$i_o = I_{OQ} + I_{om} \sin \omega t$$

即可以认为受控电流源是在静态 I_{OQ} 基础上叠加一个正弦变化的交流变化信号。可以得到:

$$\begin{aligned} v_o &= V_{CC} - i_o R_L = V_{CC} - (I_{OQ} + I_{om} \sin \omega t) R_L \\ &= (V_{CC} - I_{OQ} R_L) - I_{om} R_L \sin \omega t \\ &= V_{OQ} - V_{om} \sin \omega t \end{aligned}$$

所以放大器件上的电压 v_o 也是在静态 V_{OQ} 的基础上叠加一个正弦变化的信号, V_{om} 是放大的信号幅值。这些原理都可以在前面图解分析法中直观体现。

我们也可以从功率的角度分析放大过程的基本原理:

在对输入信号不失真的放大过程中,工作电源 V_{CC} 提供的平均功率为

$$P_V = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} V_{CC} i_o d\omega t = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} V_{CC} (I_{OQ} + I_{om} \sin \omega t) d\omega t = V_{CC} I_{OQ} \quad (1.1.1)$$

放大器件上消耗的平均功率为

$$\begin{aligned} P_T &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} v_o i_o d\omega t = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} (V_{OQ} - V_{om} \sin \omega t) (I_{OQ} + I_{om} \sin \omega t) d\omega t \\ &= V_{OQ} I_{OQ} - \frac{1}{2} I_{om}^2 R_L \end{aligned} \quad (1.1.2)$$

负载上获得的平均功率为

$$P_L = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} i_o^2 R_L d\omega t = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} (I_{OQ} + I_{om} \sin \omega t)^2 R_L d\omega t = I_{OQ}^2 R_L + \frac{1}{2} I_{om}^2 R_L \quad (1.1.3)$$

由以上三个式子可知: