

模拟电子技术基础

王文吉 编



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

URL: <http://www.phei.com.cn>

模拟电子技术基础

王文吉 编

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

DX/0 102
内 容 简 介

本书系电子技术基础课程的一部分。主要内容包括基本放大电路、频率特性和多级放大电路、模拟集成电路、负反馈放大电路、集成运放的应用、直流电源等。每章后均配有习题和思考题。书末附有习题参考答案,便于学生参考和自检。

本书可作为计算机类、管理类和其他相近专业的教材,也可供有关工程技术人员自学参考。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,翻版必究。

书 名: 模拟电子技术基础

著 者: 王文吉

责任编辑: 吴金生

特约编辑: 吴维迪

排版制作: 电子工业出版社计算机排版室

印 刷 者: 北京市顺义兴华印刷厂

出版发行: 电子工业出版社出版、发行 URL: <http://www.phei.com.cn>

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

经 销: 各地新华书店

开 本: 850×1168 1/32 印张: 8.75 字数: 226 千字

版 次: 1998 年 9 月第一版 1998 年 9 月第一次印刷

书 号: ISBN 7-5053-4868-X
TN·1180

定 价: 15.00 元

凡购买电子工业出版社的图书,如有缺页、倒页、脱页、所附磁盘或光盘有问题者,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系调换。电话

68279077

前 言

本书系根据我院信息管理系、计算机科学与工程系各专业多年试用的《电子技术基础》讲义编写的。

通过《电路分析与器件基础》的学习,已经掌握了电路和器件的基本概念、基本理论和基本分析方法。从电路的分析和计算看,模拟电路除含有电子器件外,与一般电路没有多大区别,因此,我们只要把电子器件的模型建立后,就完全可以利用电路分析中网络理论的一套分析方法来分析和计算模拟电子电路。

在教材编写中,力求在内容取舍上,既包含必需的基础知识,又加强模拟集成电路和集成稳压电源应用等新技术内容。全书共有六章,内容是:基本放大电路,频率特性和多级放大电路,模拟集成电路,负反馈放大电路,集成运放的应用,直流电源。每章中配有习题,为便于读者参考和自检,书末还附有部分习题答案。全书授课学时约为 54 学时。

本书和《电路分析与器件基础》配套。若在教学安排中,已学过电路与器件知识,则即可转入该教材的学习。此外,由于本书与《电路分析与器件基础》配套,因此本书中所用的符号尽可能与前者一致,以免给读者带来麻烦,但可能与国家的有关标准不完全相同,请读者谅解。

本书可作为计算机、管理类和其他相近专业的教材,也可供有关技术人员自学和参考。

由于编者水平有限,书中难免有缺点和不妥之处,恳请读者批评和指正。

编者

1998 年 5 月

• ■ •

目 录

第一章 基本放大电路	(1)
§ 1-1 共射基本放大电路	(1)
一、共射基本放大电路的组成	(1)
二、共射基本放大电路的工作原理	(3)
三、放大电路的主要性能指标	(5)
§ 1-2 放大电路的基本分析方法	(9)
一、图解分析法	(9)
二、微变等效电路分析法	(19)
§ 1-3 具有稳定工作点的偏置电路	(33)
一、温度对静态工作点的影响	(33)
二、稳定静态工作点的电路	(36)
§ 1-4 共集电极基本放大电路(射极输出器)	(43)
一、静态分析	(43)
二、动态分析	(44)
§ 1-5 共基极基本放大电路	(46)
一、静态分析	(47)
二、动态分析	(47)
§ 1-6 三种基本放大电路性能的比较	(49)
§ 1-7 场效应管基本放大电路	(49)
一、FET 偏置电路与静态分析	(51)
二、FET 的微变等效电路和动态分析	(55)
(一)FET 的微变等效电路	(55)
(二)FET 的动态分析	(57)
习题一	(61)
第二章 频率特性和多级放大电路	(73)
§ 2-1 放大电路的频率特性	(73)
一、频率特性的基本概念	(73)

二、对数的频率特性——波特图	(75)
三、晶体管的混合参数 π 型等效电路(高频等效模型)	(82)
四、晶体管的频率参数	(84)
五、基本共射放大电路的频率特性	(87)
§ 2-2 多级放大电路	(97)
一、多级放大电路的级间耦合方式	(97)
二、多级放大电路的动态分析	(102)
三、多级放大电路的频率响应	(106)
习题二	(108)
第三章 模拟集成电路	(116)
§ 3-1 概述	(116)
一、什么是模拟集成电路	(116)
二、集成运放的特点	(117)
§ 3-2 差动放大电路	(117)
一、差动放大电路的工作原理	(118)
二、射极耦合差动放大电路(长尾式差动放大电路)	(121)
三、恒流源差动电路	(125)
四、差动放大电路的四种接法	(127)
§ 3-3 集成运算放大器	(131)
一、集成运放的基本单元电路	(131)
(一)偏置电路	(132)
(二)中间级	(134)
(三)输出级	(138)
二、集成运放典型电路简介	(140)
三、集成运放的主要技术指标	(142)
习题三	(145)
第四章 负反馈放大电路	(151)
§ 4-1 概述	(151)
一、反馈的基本概念	(151)
二、反馈的分类及其判断方法	(152)
§ 4-2 负反馈放大电路的四种组态	(154)
一、电压串联负反馈	(155)
二、电压并联负反馈	(155)

三、电流串联负反馈	(156)
四、电流并联负反馈	(157)
§ 4-3 负反馈放大电路的方框图及一般表达式	(157)
一、方框图表示法	(157)
二、一般表达式	(158)
§ 4-4 负反馈对放大电路性能的影响	(160)
一、提高放大倍数的稳定性	(160)
二、减小非线性失真以及抑制内部的干扰和噪声	(161)
三、扩展频带	(162)
四、改变输入电阻和输出电阻	(163)
§ 4-5 负反馈放大电路的分析计算	(166)
一、负反馈放大电路的分析计算方法	(166)
二、具有深负反馈放大电路的近似估算	(167)
§ 4-6 负反馈放大电路的自激振荡及消振方法	(171)
一、产生自激振荡的原因及条件	(172)
二、稳定性判别和稳定裕度	(172)
三、常用的消振方法	(175)
习题四	(178)
第五章 集成运放的应用	(185)
§ 5-1 信号运算电路	(185)
一、比例运算电路	(186)
二、加减运算电路	(188)
三、积分和微分电路	(193)
四、对数和指数电路	(196)
五、乘、除运算电路	(200)
§ 5-2 信号处理电路	(205)
一、有源滤波电路	(205)
(一)低通滤波电路(LPF)	(206)
(二)高通滤波电路(HPF)	(209)
(三)带通滤波电路(BPF)	(210)
(四)带阻滤波电路(BEF)	(212)
二、电压比较电路(比较器)	(214)
(一)单限电压比较电路(单限比较器)	(214)

(二) 滞回比较电路	(217)
(三) 双限比较器(窗口比较器)	(220)
§ 5-3 波形发生电路(振荡器)	(221)
一、正弦波振荡器	(221)
二、非正弦波振荡器	(226)
(一) 矩形波发生器	(226)
(二) 三角波发生器	(229)
(三) 锯齿波发生器	(230)
习题五	(231)
第六章 直流电源	(243)
§ 6-1 直流电源构成	(243)
一、电源变压器	(243)
二、整流电路	(243)
三、滤波电路	(244)
四、稳压电路	(244)
§ 6-2 单相桥式整流电路	(244)
一、工作原理	(245)
二、主要参数	(245)
§ 6-3 滤波电路	(247)
一、电容滤波电路	(247)
二、电感滤波电路	(250)
§ 6-4 稳压电路	(252)
一、稳压电路的性能指标	(252)
二、硅稳压管稳压电路	(253)
三、串联型直流稳压电路	(255)
四、集成稳压电路	(258)
习题六	(262)
部分习题参考答案	(265)
参考文献	(268)

第一章 基本放大电路

利用晶体管的放大作用可以组成各种类型的放大电路。应用一个放大器件(BJT 或 FET)所构成的放大电路称为基本放大电路,而任何复杂的放大电路均可由基本放大电路组成。

本章以共射基本放大电路为例介绍放大电路的基本工作原理、基本概念和基本分析方法,并利用基本分析方法——图解法和等效电路法来分析、计算放大电路的静态工作点、电压放大倍数、输入电阻和输出电阻等。另外,还简单介绍共基、共集基本放大电路的性能指标,并对三种接法的基本放大电路进行性能比较。最后介绍 FET 基本放大电路的特点和分析方法。

§ 1-1 共射基本放大电路

一、共射基本放大电路的组成

图 1-1 是共射接法的基本放大电路。

在图中,T 是一个 NPN 型的三极管。利用三极管基极电流对集电极电流的控制作用,可以实现电路的放大作用(能量控制作用),因此,T 是放大电路的核心元件。

集电极电源 V_{CC} 一方面为三极管 T 集电结提供反向偏置,保证三极管工作在放大状态,另一方面又为输出信号提供能量。 V_{CC} 一般为几伏到几十伏。

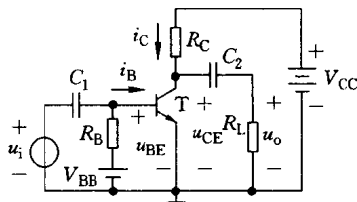


图 1-1 共射极基本放大电路

集电极负载电阻 R_C 主要是将三极管集电极电流 i_C 的变化转变为集电极电压 u_{CE} 的变化。 R_C 一般为几千欧到几十千欧。

基极电源 V_{BB} 和基极电阻 R_B ，一方面为三极管 T 发射结提供正向偏置，保证三极管工作在放大状态，另一方面给基极提供一个合适的基极电流 I_B 。

耦合电容 C_1 和 C_2 起着隔断直流、耦合交流的作用。对直流来讲，稳态时，电容相当于开路，即 C_1 隔断基极直流偏置电路和信号源 u_i 之间的直流通路， C_2 隔断了集电极输出端和负载之间的直流通路。对交流电来讲，若电容量选的足够大，则可在一定的频率范围内，使其容抗很小，相当于短路，即 C_1 将信号源 u_i 直接耦合到基极， C_2 将放大的交流信号直接耦合到负载。在低频信号放大电路中， C_1 和 C_2 的电容量一般为几个微法到几十微法。用电解电容时，要注意其极性，且在电路中不能接反。

图 1-1 所示电路中，用了两个直流电源 V_{CC} 和 V_{BB} ，使用起来很不方便。实际上只要把 R_B 接 V_{BB} 的正端改接成电源 V_{CC} 的正端，就可以省掉一个电源 V_{BB} ，如图 1-2(a) 所示。

另外，在电子电路中，通常把公共端称为“地”，用符号“ $\perp$ ”表示，并设其电位为零（参考电位点），这时，电路中其它各点的电位就是它们与“地”之间的电压。所以，在实际电路图中，经常把输入、输出电压画成电位的形式，如图 1-2(b) 所示。

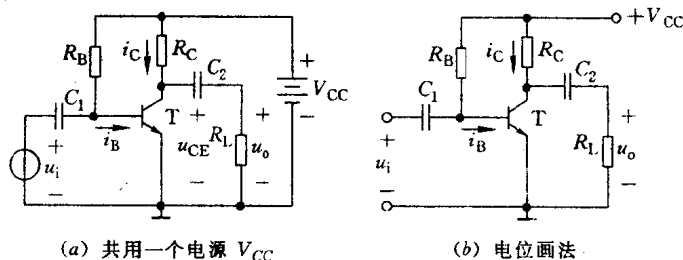


图 1-2 共射基本放大电路简化画法

如果采用的 T 是 PNP 型三极管，则必须注意电源 V_{CC} 和 V_{BB} 以及电解电容 C_1 和 C_2 的极性。

二、共射基本放大电路的工作原理

1. 静态分析

当放大电路没有输入信号,即 $u_i=0$ 时,电路中各处的电压、电流都是直流量,其值即为静态值。此时电路的工作状态称为静态。

静态时,三极管各电极的直流电压和直流电流的数值称为三极管的静态工作点。其值分别用 I_{BQ} 、 U_{BEQ} 、 I_{CQ} 、 U_{CEQ} 来表示。

静态时电压电流的分析和计算,必须由图 1-2(b)所示放大电路的直流通路来进行。画直流通路时,由于 C_1 和 C_2 对直流可视作开路,于是图 1-2(b)所示电路的直流通路可用图 1-3

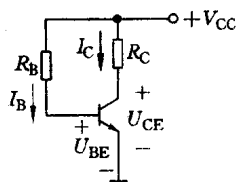


图 1-3 共射基本放大电路的直流通路

静态工作点的近似估算如下:

由基极回路可知基极电流

$$I_B = I_{BQ} = \frac{V_{CC} - U_{BE}}{R_B} \quad (1-1)$$

其中, U_{BE} 对于硅管约为 (0.6~0.8) 伏, 对于锗管约为 (0.2~0.3) 伏。

当 $V_{CC} \gg U_{BE}$ 时, (1-1) 式可近似写为

$$I_B = I_{BQ} \approx \frac{V_{CC}}{R_B} \quad (1-2)$$

集电极电流 I_C 为

$$I_C = I_{CQ} = \beta I_{BQ} + I_{CEO} \approx \beta I_{BQ} \approx \beta I_B \quad (1-3)$$

由集电极回路可知

$$U_{CE} = U_{CEQ} = V_{CC} - I_{CQ} R_C \quad (1-4)$$

静态工作点选择的合适与否, 对于放大电路工作性能影响很

大,一般通过调整 R_B 的阻值来改变 I_{BQ} ,从而改变 I_{CQ} 和 U_{CEQ} ,以达到合适的静态工作点。这方面问题在后面要详述。

2. 动态分析

当放大电路输入信号,即 $u_i \neq 0$ 时,电路中各处的电压,电流都将随输入信号电压的变化而变化,此时电路的工作状态称为动态。

动态时,交流电压和电流的分析和计算,必须由图 1-2(b) 所示放大电路的交流通路来进行。画交流通路时,由于耦合电容 C_1 和 C_2 的电容量足够大,其容抗足够小,对交流电来讲,可视其为短路。直流电源 V_{CC} 为理想电压源,其内阻极小,对交流变化量来讲,也可视为短路。于是图 1-2(b) 所示放大电路的交流通路可用图 1-4(a) 表示,也可进一步画为图 1-4(b) 所示的形式。

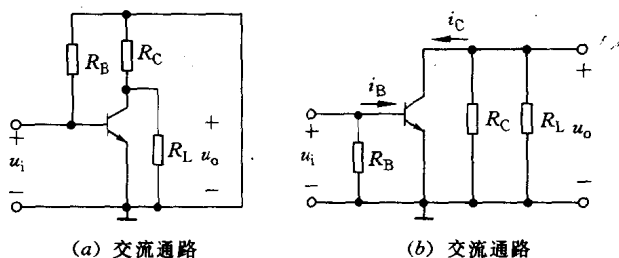


图 1-4 共射基本放大电路的交流电路

电压放大倍数 A_u 的计算法如下:

$$A_u = \frac{U_o}{U_i}$$

由图 1-4(b) 可知

$$U_o = -I_C R'_L \quad (1-5)$$

其中, $R'_L = R_C // R_L$

$$I_C = \beta I_b \quad (1-6)$$

$$I_b = \frac{U_i}{r_{be}} \quad (1-7)$$

其中 r_{be} 为三极管输入端等效电阻, 即

$$r_{be} = \frac{\Delta u_{BE}}{\Delta i_B} \quad (1-8)$$

r_{be} 可以从三极管的输入特性上求出。

把(1-6)、(1-7)两式代入(1-5)式, 得

$$U_o = -\beta \frac{U_i}{r_{be}} R'_L$$

$$\therefore A_v = \frac{U_o}{U_i} = \frac{-\beta R'_L}{r_{be}} \quad (1-9)$$

其中式(1-5)到(1-9)中的电压和电流均指有效值。

由上面分析可知, 估算放大电路的静态工作点时, 必须根据其直流通路, 而计算放大电路的放大倍数等动态参数时, 则必须根据其交流通路。

三、放大电路的主要性能指标

和三极管的性能可由其参数表示一样, 衡量一个放大电路的性能, 也可用一些技术指标来表示。不同用途的电路, 其指标侧重点也有区别。下面介绍几个放大电路的主要性能指标和它们的定义。

1. 放大倍数

为了衡量放大电路的放大能力, 常用两种指标来表示, 即电压放大倍数和电流放大倍数。

任何一个放大电路均可用图 1-5 所示的有源四端网络来表示。

图中 R_i 为放大电路输入电阻, R_o 为放大电路输出电阻, U_{oc} 为负载开路时

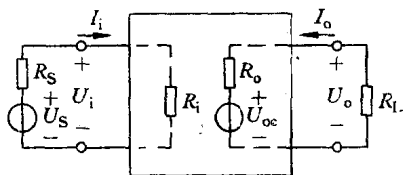


图 1-5 放大电路等效框图

输出电压有效值, U_s 为输入信号源的电压有效值, R_s 为信号源内阻, R_L 为负载电阻。

(1) 电压放大倍数

输出电压有效值 U_o 和输入电压有效值 U_i 之比称为放大电路的电压放大倍数。即

$$A_u = \frac{U_o}{U_i} \quad (1-10)$$

当考虑电抗元件产生附加相移时,

$$\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} \quad (1-11)$$

其中, $\dot{U}_o$ 为输出电压有效值相量, $\dot{U}_i$ 为输入电压有效值相量。

下面其它性能指标也类同,但本节暂不考虑附加相移,均以有效值表示。

如果考虑信号源的内阻,则其电压放大倍数为

$$A_{us} = \frac{U_o}{U_s} = \frac{U_i}{U_s} \frac{U_o}{U_i} = \frac{R_i}{R_s + R_i} A_u \quad (1-12)$$

(2) 电流放大倍数

输出电流有效值 I_o 和输入电流有效值 I_i 之比称为放大电路的电流放大倍数。即

$$A_i = \frac{I_o}{I_i} \quad (1-13)$$

2. 最大输出幅度

它表示放大电路所能提供的最大输出电压或输出电流的幅值。一般用有效值表示,也有用峰—峰值表示的。一个正弦信号电压或电流的峰—峰值是其有效值的 $2\sqrt{2}$ 倍。

3. 输入电阻 R_i

输入电压有效值 U_i 和输入电流有效值 I_i 之比称为放大电路

的输入电阻,即

$$R_i = \frac{U_i}{I_i} \quad (1-14)$$

4. 输出电阻 R_o

输出电阻 R_o ,即放大电路的内阻,常用的测试方法为:

(1)加压法:

将负载 R_L 开路,输入信号电压 U_s 短路(保留其内阻 R_s),在输出端加一正弦电压 U 。于是产生一相应的正弦电流 I_o ,则放大电路的输出电阻 R_o 为

$$R_o = \left. \frac{U_o}{I_o} \right|_{\substack{R_L = \infty \\ U_s = 0}} \quad (1-15)$$

(2)两次电压测量法

第一次测量负载开路时放大电路的输出电压 U_∞ ,第二次测量接上阻值已知的负载电阻 R_L 后的输出电压 U_o ,则输出电阻 R_o 为

$$R_o = \left(\frac{U_\infty}{U_o} - 1 \right) R_L \quad (1-16)$$

5. 非线性失真系数 D

由于放大管输入、输出特性的非线性,输入信号为单一频率正弦波 u_i 时,其输出波形为非正弦波,即输出波形除了基波频率外,还包含有输入波形中所没有的二次谐波、三次谐波……等谐波频率。所以,这种由放大管的非线性所引起的波形失真叫非线性失真。

非线性失真的大小通常用非线性失真系数 D 来表示。其定义是负载上各次谐波电压振幅平方的总和与基波电压振幅平方之比再取平方根,即

$$D = \sqrt{\frac{U_{om2}^2 + U_{om3}^2 + \dots}{U_{om1}^2}} \times 100\% \quad (1-17)$$

式中, $U_{om1}, U_{om2}, U_{om3}, \dots$ 分别为各次谐波电压振幅, D 通常用百分数来表示。

6. 通频带 f_{bw}

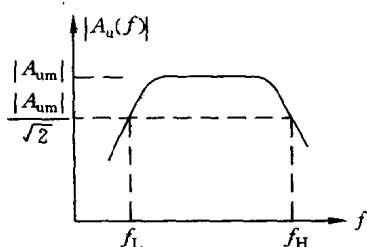


图 1-6 放大倍数与频率关系

由于放大电路中存在的电抗元件以及三极管的极间电容等它们的阻抗均是频率的函数, 因此放大电路的放大倍数也将随着信号频率的变化而变化。一般情况下, 放大电路在中间较宽的频率范围内, 其放大倍数基本上不随频率而变, 该

中频段放大倍数用 A_m 表示。在中频段外, 随着信号频率的增加或减小, 其放大倍数都要下降。当放大倍数下降到中频段放大倍数 $|A_m|$ 的 $1/\sqrt{2}$ 时, 所对应的上、下端频率, 称为放大电路的上限频率 f_H 和下限频率 f_L (见图 1-6 所示)。我们把 f_L 到 f_H 这一段频率范围叫放大电路的通频带, 用 f_{bw} 表示, 即

$$f_{bw} = f_H - f_L \quad (1-18)$$

7. 最大输出功率和效率

放大电路的最大输出功率 P_{om} 表示能向负载提供的最大不失真交变功率。

最大输出功率 P_{om} 和直流电源消耗功率 P_v 之比, 称为放大电路的效率 η , 即

$$\eta = \frac{P_{om}}{P_v} \quad (1-19)$$

此外, 根据不同使用场合和要求, 放大电路还有一些其它性能指标, 如信杂比、抗干扰能力、重量、工作温度等。

§ 1-2 放大电路的基本分析方法

在掌握基本放大电路的组成和工作原理的基础上,就可对放大电路进行定量分析。放大电路的基本分析方法主要有两种,即图解法和等效电路法。

一、图解分析法

在三极管的输入、输出特性曲线上,直接用作图的方法来分析放大电路工作情况的方法,叫做图解分析法。

由于放大电路中直流和交流信号同时作用于电路,故电压和电流中有直流分量、交流分量、有效值、总量等之分,其符号不同,含义也不同。

图 1-7 以基极到发射极的电压为例,示出了各种符号的含义和相互关系。

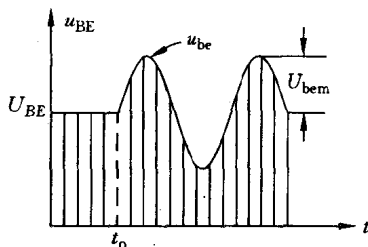


图 1-7 基极到发射极的电压波形

U_{BE} (字母大写,下脚注字母大写)——基极到发射极的直流电压。

u_{BE} (字母小写,下脚注字母大写)——基极到发射极的总瞬时电压值(总量)。

u_{be} (字母小写,下脚注字母小写)——基极到发射极的交流电压瞬时值。

U_{be} (字母大写,下脚注字母小写)——基极到发射极交流电压的有效值。

U_{bem} (字母大写,下脚注字母小写)——基极到发射极交流电压的振幅(最大值)。

这些电压的关系,可写为