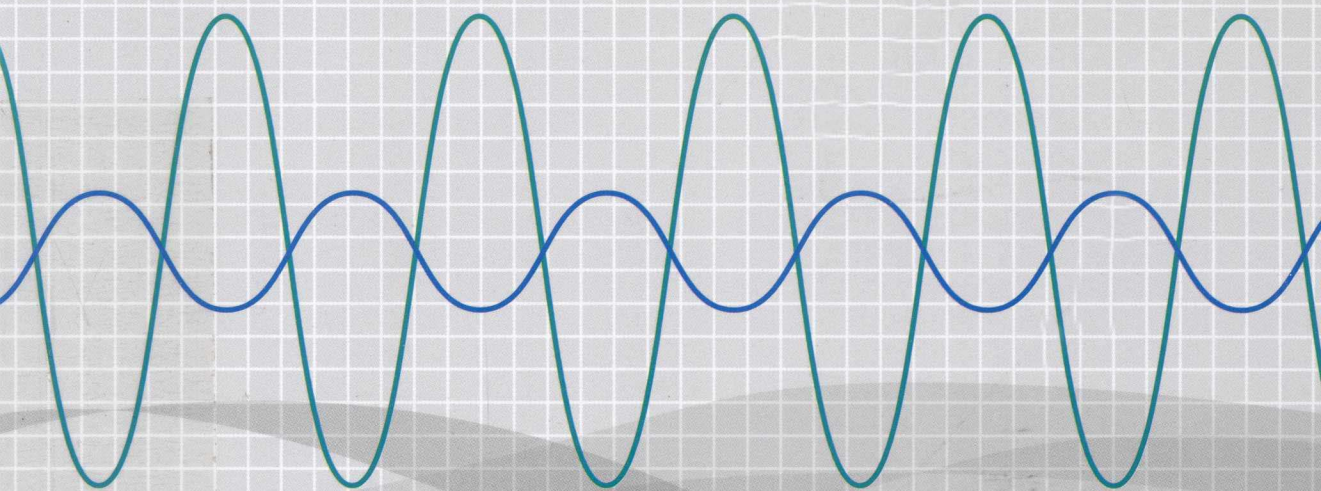


模拟电路

分析计算与应用设计

张浩风 编著



化学工业出版社

模拟电路 分析计算与应用设计

张浩风 编著



化学工业出版社

·北京·

图书在版编目 (CIP) 数据

模拟电路分析计算与应用设计/张浩风编著. —北京:
化学工业出版社, 2012. 4
ISBN 978-7-122-13466-0

I. 模… II. 张… III. ①模拟电路-电路分析②模拟
电路-电路设计 IV. TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 021407 号

责任编辑: 刘 哲
责任校对: 宋 玮

文字编辑: 高 震
装帧设计: 关 飞

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)
印 刷: 北京永鑫印刷有限责任公司
装 订: 三河市万龙印装有限公司
787mm×1092mm 1/16 印张 22 $\frac{3}{4}$ 字数 602 千字 2012 年 9 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899
网 址: <http://www.cip.com.cn>
凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 56.00 元

版权所有 违者必究

前 言

模拟电子电路由于使用了晶体管等非线性元器件，所以其实质是非线性电路，而分析计算方法是建立在直流静态工作点计算和交流小信号分析计算的基础上的。

对于直流静态工作点或称为大信号特性的分析计算，应该使用图解法来得到较为精确的结果，因为晶体管电路的准确模型不容易得到，但实验测试的特性曲线往往是比较容易得到的。然而图解法只适用于参数较少的电路，这样可以得到比较直观的结果。如果电路的参数多，图解法的优势就不存在了，因为图解法所涉及的通常只有坐标系中的 X 轴、 Y 轴，即两个参数或未知数。但是，电路计算就是解方程组的过程，对于电子电路来说，更多的是解非线性方程组，既然电子计算机已经出现并且具有很强的运算功能，将电路计算交给计算机来进行，无论如何都是正确的选择。只要将电路元器件参数输入计算机，使用相应的模型，用编制好的程序进行计算，就能得到比手工近似计算精度更高的结果，这样得到的结果与实际电路的测试结果应该是很接近的。虽然如此，模拟电子电路的设计依然需要人们的经验和灵感，仿真只是作为一种检查设计是否达到预期要求的工具。

对于电子电路的建立，在直流工作点基础上的交流小信号分析计算，从理论上来说则要简单得多，因为它不涉及非线性电路的问题，只有线性电路的分析计算。然而对于电路高频特性的计算，即使不是很复杂的电路，其计算过程与结果都有可能是很复杂的，所以一般来说，人们并不是直接计算这些电路的精确表达式，而是按照不同频率分别计算，最后得到一种综合的结果，这当然是一种近似的计算，而且是电路的元器件较少时适用，但是从使用的角度来看，其结果与精确的计算结果是比较接近的。对于元器件较多的电路，人们通常使用开路时间常数法来得到电路的近似频率特性，当然这也是一种近似的计算。在本书中这两种方法都会有使用。

本书中将会对模拟电路的大小信号分析予以同样的重视，特别是在本书的第 1 章和第 2 章的晶体管放大电路部分，这是因为小信号的分析计算一般并不考虑输入输出电压的范围，而实际的电路则显然是受制于电源电压的限制，所以如何选择直流静态工作点以使得输入输出电压能够在合理的设计范围内，是一个重要问题，本书对此进行了较为深入的讨论。

本书中将电路的分析与计算分开，主要是考虑到对于电路首先要有定性的分析，在定性分析的基础上再进行小信号电路计算以得到精确的结果，之后给出设计实例并进行仿真验证。这也是本书讨论模拟电路的一个基本方式，本书会对大部分电路进行推导计算。在一般相关书籍资料中通常将计算包括在电路的分析之中，而本书之所以突出计算内容，主要是想达到“知其然且知其所以然”的目的。

对于模拟电子电路的分析，在本书中笔者提出了用反证法来定性分析电路的方法，以使得一些不容易分析的电路从工作原理上有一个正确的定性解释。

在模拟电子电路中，一个主要的内容就是输入信号电压的放大，对于晶体管来说，其本身的特性是很适合完成这项功能的。本书第1章、第2章主要讨论电压放大的内容。第3章是使用运算放大器的放大电路。当然模拟电路中还包括滤波、振荡、稳压电源等内容，本书会对这些内容进行较深入的讨论。

第1章较为全面地讨论了双极性三极管放大电路，其中包括共射极、共集电极、共基极、反馈放大电路、电流源电路以及运算放大器电路等的分析计算。其中对于实用的电路进行了较深入的讨论，例如发射极反馈的共射极放大电路，并给出了图解设计法。三极管负反馈电路是很重要且实用的电路，第1章中会对三极管负反馈放大电路进行较深入的分析与计算，并给出设计实例。第1章还对有源负载放大电路进行较深入的分析，对于这些电路的小信号放大倍数的计算给出了图解法的计算方法，当然其中只使用了初中几何学中的简单方法，这种图解法也适用于使用电容“自举”的某些放大电路。对于典型运算放大器电路进行小信号电路的分析与计算，以及对电流源的输出电阻的计算也是本书的特色。之所以电流源的输出电阻很重要，是因为基于有源放大电路的运放电路放大倍数的计算离不开电流源内阻的计算。

第2章是场效应管放大电路，同第1章的内容基本相对应。其中包括分立式 MOSFET 共源极、共漏极、共栅极放大电路及其有源放大电路、运算放大器电路以及结型场效应管放大电路等内容。

第3章讨论运算放大器应用电路，其中包括基本的运放放大电路、差动放大电路、电流源电路、电流-电压变换电路、运算电路、非线性电路以及电压比较器电路等内容。第3章是运放常用的应用电路，侧重于电路分析与计算。由于运放作为放大电路来使用时，都是工作在负反馈状态，所以电路的稳定性能必须得到保证，这是通过其开环电路的特性决定的，所以第3章中会有开环特性的分析与计算内容。对于运放的参数，例如失调电流、失调电压等对输出电压的影响进行了较深入的分析计算，对于差动放大电路也是如此。使用运放的电流源电路是常用且重要的电路，第3章会对各种常用的电流源电路进行分析与计算。

第4章讨论功率放大电路，包括甲类、乙类、甲乙类功率放大电路的分析计算并给出仿真设计实例。电路经过电压放大后，最后输出电路就是功率放大电路。第4章讨论的是常用功率放大电路。

第5章讨论隔离放大电路，包括光耦隔离放大电路、飞电容隔离放大电路、变压器隔离放大电路以及电容隔离放大电路。

第6章讨论开关电容电路，包括积分电路、放大电路以及开关电容等效电阻等内容。第6章中对于运算电路都给出了其 z 变换的传递函数或差分方程。对于开关电容等效电阻，都给出了其等效电阻的计算方法及结果。

第7章讨论滤波电路，包括巴特沃思型、切比雪夫型等的低通、高通、带通、带阻滤波电路的分析计算和仿真设计实例。第7章讨论了这些滤波电路理论上的计算方法并给出仿真设计实例。值得一提的是，由于这些滤波电路的参数计算几乎都是在解非线性的高阶方程组，所以本书使用 VBA 程序设计方式计算高阶方程组的解。

第8章讨论振荡电路，包括 RC、LC 振荡电路以及方波和三角波振荡电路。第8章中对于振荡原理与电路参数的计算进行了详细讨论并给出设计实例。

第9章讨论稳压电源电路，包括线性稳压电源、开关电源以及电荷泵等内容。第9章的重点是进行电源电路的小信号分析计算。在开关电源电路的小信号分析计算中，笔者使用简单的原创方法进行分析与计算，其结果与现今相关资料中的结果是一致的。对于常用的线性 LDO 稳压电源电路进行了详细的分析与计算，并给出仿真设计实例。第9章还包括电荷泵稳压电源电路内容并进行了详细的分析计算，给出了仿真设计实例。对于电源电路中电流电

压保护电路的设计方法也予以讨论，并给出了类似断路器或熔断器功能的过流断电型保护电路的设计方法。对于如何将单电源变为正负电源的设计，也给出了笔者的原创电路。

第 10 章主要讨论晶体管开关电路。这一章的内容偏向数字电路的某些功能，然而众所周知数字电路的本质依然是模拟电路，只不过是不工作在放大状态而工作在饱和或截止状态，当然这是对于双极型晶体管来说的，对于 MOSFET 也是同样的道理。所以第 10 章讨论的内容仍然属于模拟电路之功能，其中包括三极管以及 MOSFET 的开关电路，例如反相器电路、与或非等门电路等内容。第 10 章最后还将讨论功率驱动电路内容，并以 LED 数码管的动态驱动电路为例进行讨论。

本书设计实例中输出电压波形图或小信号的频率特性波特图，主要由 MultiSim 和 Tina 这两款基于 PSPICE 的仿真软件得到，这些软件功能强大，是优秀的电路仿真软件。当然本书设计实例中只用到了其中非常少的功能，所以不讨论软件的使用方法。

本书中电路符号没有特别的规定，基本上对于直流电压或电流使用大写符号，例如直流偏置电压 V_B 、偏置电流 I_B 等；对于交流电压或电流使用大小写方式，代表相量形式，但不在上面标注圆点，例如输入交流电压用 V_s 表示，这是因为这里的交流电压或电流是在不考虑电路高频特性，即不考虑电容等效应时的低频电路，所以不会有相位问题；对于电路的高频交流特性，使用拉氏变换，例如输入交流电压的拉氏变换为 $V_s(s)$ 。对于交流电阻使用大小写形式并兼顾人们的习惯用法，例如电流源的内阻为 r_o ，基极交流电阻 R_π 。直流偏置电路的电阻一般来说用大写，例如偏置电阻 R_B ，但是也遵从人们常用的方式，即使用小写的下标，例如对于反馈电阻使用 R_f 。

本书适用于电子技术应用开发工程技术人员，电子技术、自动化等专业在校师生，电子技术爱好者等。

虽然笔者对书中电路的分析与计算均进行了多次检验，但疏忽在所难免，欢迎读者提出自己的宝贵意见。

张浩风
2012 年 4 月

目 录

第1章 双极型三极管放大电路

1

1.1	三极管放大电路基础	1
1.2	共射极放大电路	5
1.2.1	基本共射极放大电路	5
1.2.2	单电源共射极放大电路	6
1.2.3	集电极反馈的共射极放大电路	7
1.2.4	分压式共射极放大电路	8
1.2.5	带有集电极和发射极反馈的共射极放大电路	10
1.2.6	两级共射极放大电路	12
1.2.7	两级共射极放大电路的直接耦合	14
1.2.8	共射极放大电路设计方法	15
1.2.9	共射极放大电路频率响应	18
1.3	共集电极放大电路	20
1.3.1	共集电极放大电路	20
1.3.2	共集电极放大电路的频率响应	21
1.4	共基极放大电路	22
1.4.1	基本共基极放大电路	22
1.4.2	发射极反馈的共基极放大电路	23
1.4.3	共基极放大电路的频率响应	24
1.5	共射-共基放大电路	24
1.6	复合管放大电路	26
1.7	差动放大电路	27
1.8	三极管负反馈放大电路	34
1.8.1	电压串联负反馈	34
1.8.2	电压并联负反馈	37
1.8.3	电流串联负反馈	39
1.8.4	电流并联负反馈	40
1.9	三极管电流源电路	42
1.9.1	最简单的电流源	42

1.9.2	双晶体管电流镜像电流源	43
1.9.3	威尔逊电流源	46
1.9.4	维德勒电流源	46
1.9.5	共射-共基电流源	47
1.10	三极管有源负载放大电路	50
1.11	运算放大器电路	54
1.11.1	运放输入级	54
1.11.1.1	基本差动放大电路输入级	54
1.11.1.2	共集-共基式差动电路输入级	56
1.11.2	双极型运放中间放大级	58
1.11.3	双极型运放输出级	59
	参考文献	60

第2章 场效应管放大电路

61

2.1	MOSFET 工作原理	61
2.2	MOSFET 放大电路	63
2.2.1	共源放大电路	63
2.2.1.1	基本共源放大电路	64
2.2.1.2	带有源极反馈电阻的共源放大电路	66
2.2.1.3	共源放大电路频率响应	68
2.2.2	共漏放大电路	68
2.2.2.1	共漏放大电路	68
2.2.2.2	共漏放大电路频率响应	70
2.2.3	共栅放大电路	70
2.2.3.1	共栅放大电路	70
2.2.3.2	共栅放大电路频率响应	72
2.2.4	差动放大电路	72
2.3	MOSFET 电流源电路	75
2.3.1	最简单的电流源	76
2.3.2	双 MOSFET 电流镜像电流源	76
2.3.3	威尔逊电流源	77
2.3.4	维德勒电流源	78
2.3.5	共源-共栅电流源	78
2.3.6	宽输出电压摆幅电流镜像	79
2.3.7	多路电流镜像	81
2.4	MOSFET 有源负载放大电路分析	83
2.4.1	有源负载共源放大电路	83
2.4.2	有源负载共漏放大电路	85
2.4.3	有源负载共栅放大电路	86
2.4.4	CMOS 反相器放大电路	87

2.4.5	二极管连接方式放大电路	88
2.4.6	共源-共栅有源放大电路	89
2.4.7	折叠式共源-共栅有源放大电路	91
2.4.8	差动放大电路	92
2.5	MOSFET型运算放大器	96
2.5.1	两级运算放大器	96
2.5.2	共源-共栅套筒式运算放大器	102
2.5.3	折叠式共源-共栅运算放大器	106
2.6	结型场效应管放大电路	109
2.6.1	共源放大电路	110
2.6.2	共漏放大电路	113
2.6.3	共栅放大电路	113
	参考文献	114

第3章 运算放大器应用电路

115

3.1	运放基本应用电路	115
3.1.1	电压串联负反馈电路	115
3.1.2	电压并联负反馈电路	116
3.1.3	电流串联负反馈电路	117
3.1.4	电流并联负反馈电路	118
3.2	运放基本参数	119
3.3	运放的频率补偿	121
3.3.1	输入端电容的频率补偿	121
3.3.2	输出端电容的频率补偿	122
3.4	差动放大器	131
3.4.1	单运放差动放大器	132
3.4.2	仪表放大器	135
3.4.3	电流反馈型差动放大器	137
3.5	电压-电流变换电路	139
3.6	电流-电压变换电路	145
3.7	单电源运放电路	146
3.8	运算电路	148
3.8.1	加法运算电路	148
3.8.2	多输入加法运算电路	150
3.8.3	减法运算电路	151
3.8.4	多输入加减法运算电路	152
3.8.5	积分和微分运算电路	153
3.8.6	比例-积分-微分运算电路	154
3.8.7	对数运算电路	154
3.8.8	指数运算电路	156

3.8.9 乘法运算电路	156
3.8.10 除法运算电路	157
3.9 电荷放大电路	157
3.10 电桥放大电路	159
3.11 功率放大电路	160
3.12 非线性电路	160
3.12.1 限幅电路	161
3.12.2 精密整流电路	163
3.12.3 峰值检测电路	165
3.13 运放电路带宽分析	166
3.14 使用运放的电压比较器电路	168
3.14.1 电压比较器	168
3.14.2 施密特触发器	169
3.14.3 窗口比较器	171
参考文献	172

第4章 功率放大电路

173

4.1 甲类功率放大电路	173
4.2 乙类功率放大电路	174
4.3 甲乙类功率放大电路	174
参考文献	179

第5章 隔离放大电路

180

5.1 隔离放大电路原理	180
5.2 光耦隔离放大电路	181
5.3 飞电容隔离放大电路	182
5.4 变压器隔离放大电路	184
5.5 电容隔离放大电路	185
参考文献	186

第6章 开关电容电路

187

6.1 开关电容电路	187
6.2 开关电容积分电路	188
6.3 开关电容放大电路	191
6.4 MOSFET 开关	192
6.5 开关电容等效电阻	195
参考文献	198

7.1 滤波电路的种类	199
7.2 常用滤波电路	204
7.2.1 巴特沃思型滤波电路	204
7.2.2 切比雪夫型滤波电路	210
7.2.3 贝塞尔型滤波电路	216
7.2.4 椭圆函数型滤波电路	216
7.3 低通滤波电路	219
7.3.1 一阶低通滤波电路	219
7.3.2 二阶低通滤波电路	220
7.3.3 高阶低通滤波电路	226
7.3.3.1 三阶巴特沃思型低通滤波电路	226
7.3.3.2 三阶切比雪夫型低通滤波电路	229
7.3.3.3 四阶巴特沃思型低通滤波电路	231
7.3.3.4 四阶切比雪夫型低通滤波电路	234
7.4 高通滤波电路	237
7.4.1 二阶高通滤波电路	237
7.4.2 高阶高通滤波电路	240
7.4.2.1 三阶巴特沃思型高通滤波电路	240
7.4.2.2 三阶切比雪夫型高通滤波电路	243
7.5 带通滤波电路	246
7.5.1 二阶带通滤波电路	246
7.5.2 高阶带通滤波电路	248
7.5.2.1 三阶巴特沃思型带通滤波电路	249
7.5.2.2 三阶切比雪夫型带通滤波电路	250
7.6 带阻滤波电路	250
7.7 全通滤波电路	254
参考文献	255

8.1 振荡电路原理	256
8.2 RC 正弦波振荡电路	257
8.2.1 文氏 RC 振荡电路	257
8.2.2 超前型移相式 RC 振荡电路	260
8.2.3 滞后型移相式 RC 振荡电路	263
8.2.4 积分式 RC 振荡电路	265
8.3 LC 正弦波振荡电路	267
8.3.1 变压器反馈振荡电路	272
8.3.2 电感反馈式振荡电路	274

8.3.3	电容反馈式振荡电路	275
8.3.4	石英晶体振荡电路	277
8.4	方波振荡电路	278
8.5	三角波振荡电路	282
	参考文献	284

第9章 稳压电源电路

285

9.1	线性稳压电源电路	285
9.1.1	并联型稳压电源电路	285
9.1.2	串联型稳压电源电路——使用 N 型晶体管	286
9.1.3	串联型稳压电源电路——使用 P 型晶体管	289
9.2	电源保护及辅助电路设计	298
9.2.1	过流保护电路设计	299
9.2.2	过压和欠压保护电路设计	302
9.2.3	双电源切换电路设计	303
9.2.4	单电源变为正负电源电路设计	303
9.3	开关电源电路设计	306
9.3.1	Buck-降压型开关电源	306
9.3.2	Boost-升压型开关电源	315
9.3.3	Buck-Boost 反极性开关电源	322
9.3.4	隔离式 Buck 开关电源	325
9.3.5	隔离式 Flyback 开关电源	326
9.4	电荷泵电路设计	327
9.4.1	电荷泵增压电路	327
9.4.2	电荷泵倍压电路	328
9.4.3	电荷泵反极性电路	332
	参考文献	332

第10章 晶体管开关电路

333

10.1	三极管开关电路	333
10.1.1	基本三极管反相器电路	333
10.1.2	互补输出电路	336
10.1.2.1	反相器电路	336
10.1.2.2	与非门电路	338
10.1.2.3	或非门电路	339
10.1.3	TTL 电路	339
10.1.3.1	TTL 反相器	339
10.1.3.2	TTL 与非门	340
10.1.3.3	TTL 或非门	341
10.2	场效应管开关电路	342

10.2.1	NMOS 反相器电路	342
10.2.2	互补输出的 COMS 反相器	343
10.2.3	CMOS 与非门	343
10.2.4	CMOS 或非门	344
10.3	功率驱动电路	344
10.3.1	功率三极管驱动电路	344
10.3.2	功率 MOSFET 驱动电路	345
10.3.3	LED 数码管驱动电路	346
10.3.3.1	电压驱动型电路	348
10.3.3.2	电流驱动型电路	348
10.3.3.3	电流镜像驱动型电路	349
参考文献	350

第 1 章

双极型三极管放大电路

双极型三极管（以下简称三极管）放大电路是模拟电路设计中的主要内容。本章内容主要包括单级的放大电路、两级放大电路、负反馈两级放大电路、差动放大电路以及运算放大器电路的分析计算以及仿真设计实例。

1.1 三极管放大电路基础

三极管放大电路可分为共射极放大电路、共集电极放大电路、共基极放大电路等，这里所谓的共某极，实际上是指哪一极交流接地。如图 1-1 所示，其中图 (a) 为共射极放大电路，输入电压经偏置电阻 R_B 接到基极，输出电压为集电极电压。图 (b) 为共集电极放大电路，输入接到基极，输出为发射极电压。图 (c) 为共基极放大电路，输入电压接到发射极

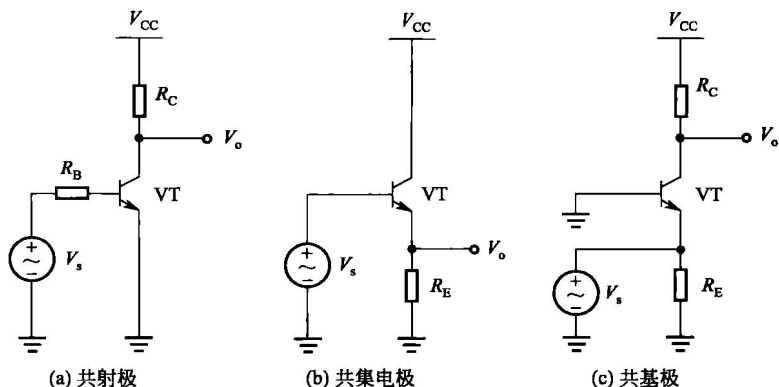


图 1-1 三极管交流放大电路

极，输出电压为集电极电压。这里的输入和输出电压均为交流电压。三极管放大电路需要直流偏置，即所谓的直流偏置点，以使得交流电压或电流能够在静态工作点的基础上变化。图 1-1 中省略了直流偏置部分电路。

为了说明三极管放大电路工作原理，这里以图 1-1(a) 所示的共射极放大电路为例。对于三极管放大电路来说，由于三极管等半导体器件的非线性，使用图解法来进行分析与计算是比较适合的方式，否则电路方程式会包含较多的超越方程式（组）而很难求解。

带有直流偏置的共射极放大电路如图 1-2 所示，这是最基本的共射极放大电路。其中 V_B 为基极偏置电压。

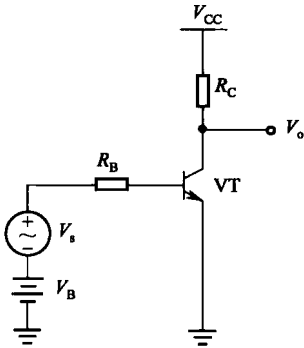


图 1-2 基本共射极放大电路

三极管的基极与发射极之间电压与基极电流存在如图 1-3 (a) 所示的曲线关系，一般称之为基极电流电压 ($I-V$) 特性曲线（简称为基极 $I-V$ 特性曲线），其方程式可写为

$$I_B = f(V_{BE}) \Big|_{V_{CE}=\text{常数}} \quad (1-1)$$

式中， I_B 为基极电流； V_{BE} 为基极与发射极之间的电压； V_{CE} 为集电极与发射极之间的电压。显然基极电路满足如下电路方程式：

$$I_B = \frac{V_B + V_s - V_{BE}}{R_B} \quad (1-2)$$

式(1-1)、式(1-2) 联立，使用图解法如图 1-3(b) 所示。其

中①、②、③为满足式(1-2) 的直线，其斜率为 $-\frac{1}{R_B}$ 。①表示

V_s 为 0 时的直线，与式(1-1) 所示曲线的交点为静态工作点。设静态基极电流为 I_{BQ} ，基极与发射极之间的静态电压为 V_{BEQ} 。显然如果将静态工作点处附近当作是线性关系，则当输入电压 V_s 呈正弦变化时是在 V_{BEQ} 的上下摆动，基极输出电流 I_B 作为输出也呈现正弦变化（这里需要指出的是图 1-3 中所示输入电压和输出电流正弦波形状省略了时间轴，并且不表示相位关系，只是说明输入和输出的大小关系）。

在图 1-3(a) 中，当基极与发射极电压足够高时，基极与发射极电阻可近似看做是一个交流电阻，其大小由基极发射极电压和电流决定。在本章中使用 R_π 表示这个电阻，基极与发射极电压用 V_π 表示。

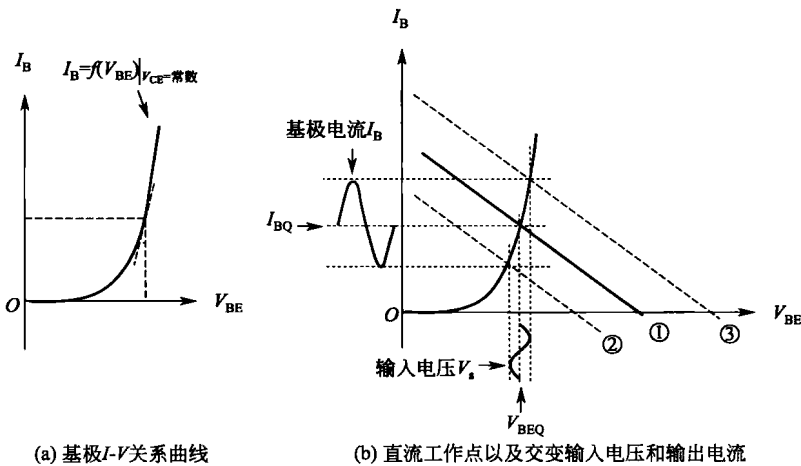


图 1-3 基本共射极放大电路基极 $I-V$ 关系曲线图和直流工作点及交流输入与输出

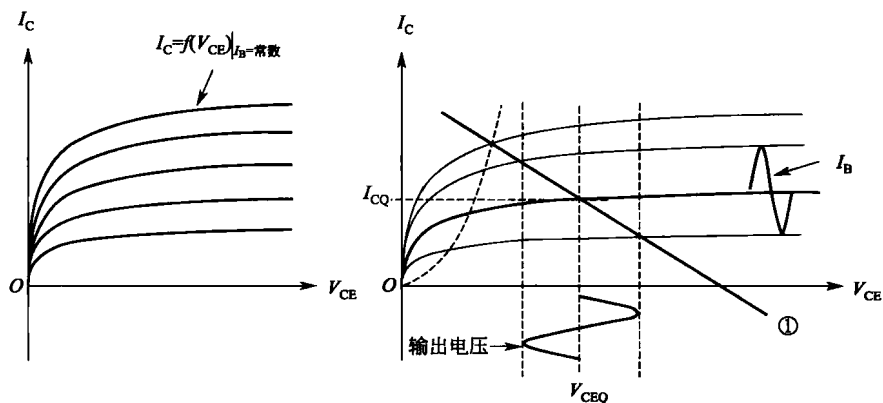
三极管的集电极与发射极之间电压与集电极电流存在如图 1-4(a) 所示的曲线关系，一般称之为集电极与发射极电流电压 ($I-V$) 特性曲线 (简称为集电极与发射极电流电压 $I-V$ 特性曲线)，其方程式可写为

$$I_C = f(V_{CE}) \Big|_{I_B = \text{常数}} \quad (1-3)$$

式中， I_B 为基极电流，为常数； V_{CE} 为集电极与发射极之间的电压。显然电路满足如下电路方程式：

$$I_C = \frac{V_{CC} - V_{CE}}{R_C} \quad (1-4)$$

式(1-3)、式(1-4) 联立，使用图解法如图 1-4(b) 所示。其中①为满足式(1-4) 的直线，一般称之为负载线，其斜率为 $-\frac{1}{R_C}$ 。与式(1-3) 所示曲线的交点为静态工作点。设静态集电极电流为 I_{CQ} ，其满足 $I_{CQ} = \beta I_{BQ}$ 。静态集电极与发射极之间的电压为 V_{CEQ} 。显然当基极电流呈正弦波形状变化时，集电极与发射极之间的电压即输出电压也呈正弦变化。当然输出电压的相位与基极电流或基极电压反相 (图 1-4 中所示输入电压和输出电流正弦波形状省略了时间轴，并且不表示相位关系，只是说明输入和输出的大小关系)。



(a) 集电极与发射极 $I-V$ 关系曲线

(b) 直流工作点以及交变输入电流和输出电压

图 1-4 基本共射极放大电路集电极与发射极 $I-V$ 关系曲线图和直流工作点及交流输入与输出

可见在直流静态工作点附近，如果交流信号的变化幅度不是很大，则电路可近似看做是线性电路，就可以使用线性电路的分析计算方法，这样的电路称为交流小信号等效电路。

当三极管工作在放大状态 (恒流区) 时，满足如下方程式 (其中， I_S 为反向饱和电流， V_T 为温度电压当量，在室温下为 26mV)：

$$I_C = I_S (e^{\frac{V_\pi}{V_T}} - 1)$$

I_C 对 V_π 求导得到跨导 g_m 为

$$g_m = \frac{dI_C}{dV_\pi} = I_S e^{\frac{V_\pi}{V_T}} \frac{1}{V_T} = \frac{I_C}{V_T}$$

由于 $R_\pi = \frac{dV_\pi}{dI_B}$ ，所以得到

$$R_\pi = \frac{dV_\pi}{dI_B} = \frac{\beta dV_\pi}{dI_C} = \frac{\beta}{g_m}$$

不难看出，为了获得最大输出电压的摆动范围， V_{CEQ} 应该设置在电源电压减去三极管饱和电压 [图 1-4(b) 中虚线曲线为临界饱和曲线] 的一半处。当然这由集电极电阻 R_C 和静态集电流决定。

对于共集电极与共基极放大电路来说，与共射极放大电路原理是一样的。下面讨论这些放大电路的分析计算并给出应用设计实例。

在本章中使用的三极管为 2N3904，其基极与发射极电流电压 ($I-V$) 特性曲线在 Tina 仿真软件中可使用图 1-5(a) 所示电路来进行仿真测试， V_B 为加到基极的可变电压，对 V_B 进行 0~1V 的直流扫描，集电极电压 V 为 5V，结果如图 1-6(a) 所示。

集电极与发射极电流电压 ($I-V$) 特性曲线在 Tina 中可使用图 1-5(b) 所示电路来进行仿真测试，其中 I_S 为基极输入电流源， V_1 为加到集电极的可变电压。将 V_1 从 0~5V 进行直流扫描，得到的结果如图 1-6(b) 所示，其中基极电流为 $2.5\mu A$ ， $5\mu A$ ， $7.5\mu A$ ， $10\mu A$ ， $12.5\mu A$ ， $15\mu A$ ， $17.5\mu A$ 以及 $20\mu A$ 。可以看出当集电极电流约为 1mA 时，基极电流为 $7.5\mu A$ ，即 $\beta \approx 1mA/7.5\mu A \approx 133$ 。

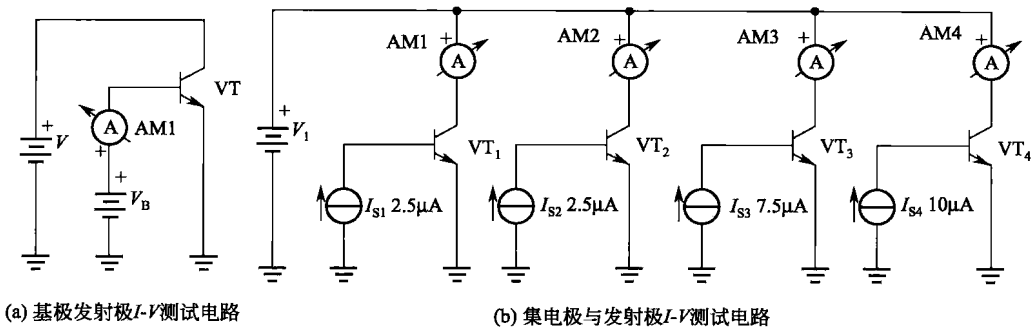


图 1-5 三极管 2N3904 的 $I-V$ 曲线仿真测试电路

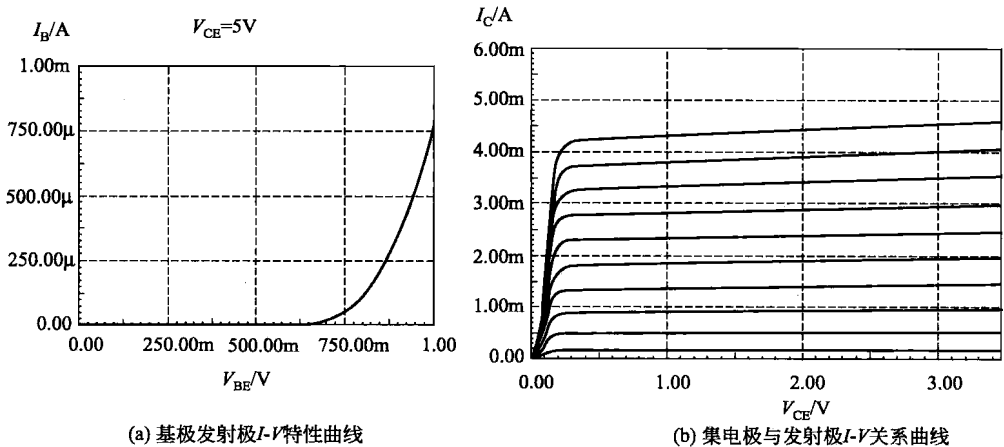


图 1-6 三极管 2N3904 仿真特性曲线

在 1-6(b) 中可以看出，集电极电流即使在放大区也不完全是理想的电流源，如果将放大区的集电极电流曲线向左沿伸，则所有曲线都会在 V_{CE} 的负半轴交于一点，此处的电压被称为 V_A (这是由于厄尔效应引起的，也叫做厄尔电压)。所以放大区的集电极电流可看做是理想电流源与一个电阻 r_o 并联，显然电阻 r_o 的倒数就是 $I-V$ 曲线中放大区集电极电流曲线的斜率。