



全国高等师范专科学校教材

模拟电路与无线电技术

(电子技术基础及实验II)

李仲先 编

高等教育出版社

内 容 提 要

本书是国家教委选定的师专配套教材之一,在1988年长春会议上被列为全国师专教材。

本书是为高等师范专科学校物理专业电子技术课程编写的一套教材,全套教材包括两册:《数字电路和微型计算机》(电子技术基础及实验 I)和《模拟电路与无线电技术》(电子技术基础及实验 II)。

本册为《模拟电路与无线电技术》,其中包括模拟电子学和无线电技术两部分。模拟电子学有小信号交流放大器、电路中的反馈、直流放大器和功率放大器、模拟集成电路、CRT 显示器等五章,讲授 42 学时,实验 18 学时;无线电技术包括无线电广播、电视等两章,讲授 26 学时,实验 14 学时。

本书可作为高等师范专科学校物理专业的教材,也可作为教育学院、高师函授、电大理科教师进修班、中学师资进修班和中等专业学校的试用教材。

责任编辑 郭玉凤

全国高等师范专科学校教材
模拟电路与无线电技术
(电子技术基础及实验 II)

李仲先 编

*

高等教育出版社出版
新华书店上海发行所发行
上海市印刷三厂印装

*

开本 787×1092 1/16 印张 24.25 插页 3 字数 550 000

1989 年10月第1版 1989 年10月第1次印刷

印数 0001—1,200

ISBN7-04-002317-2/TN·124

定价 5.50 元

说 明

本书是国家教委选定的师专配套教材之一,在1988年长春会议上被列为全国师专正式教材。

本书为高等师范专科学校物理专业电子技术课程教材。全书包括《数字电路和微型计算机》(电子技术基础及实验 I)和《模拟电路与无线电技术》(电子技术基础及实验 II),可分别在一、二年级开设。此教材可按“先数字、后模拟”的顺序讲授,也可按“先模拟、后数字”的顺序讲授。

本册为《模拟电路与无线电技术》,包括模拟电子学和无线电技术两部分。其中模拟电子学为前五章,即:小信号交流放大器、电路中的反馈、直流放大器和功率放大器、模拟集成电路和 CRT 显示器等。如果是按“先模拟、后数字”的顺序讲授,则应先讲授本书《数字电路和微型计算机》的第一、二章(二极管及其应用、三极管和反相器),作为模拟电子学的器件基础。这部分内容讲授约需 42 学时,实验 18 学时。无线电技术部分包括无线电广播和电视等两章,讲授约需 26 学时,实验 14 学时。在电视一章中,由于目前正处于分立元件电视机向集成电路电视机的过渡时期,因而书中对两者都做了介绍,各校可根据实际情况,选择一种为主进行讲授。

本册中介绍了很多复杂的集成电路内部电路以及电视机整机电路,上课时可采用投影仪,将电路图投射在屏幕上,以提高课堂效率。

本书由东北师范大学物理系郝会新和袁永昇副教授、李庆禹和张振明讲师主审。七年来,本书初稿曾请华东师范大学翁默颖教授、陈康宏、王凯副教授和山东师范大学袁祖华副教授主审,得到上海师范大学朱鸿鹄教授的热情指导和帮助。颜世科、李桂芬、吴延祺、罗宁、罗厚兹、徐松森诸位也给予了指导和帮助。编写中,还得到兄弟院校任课教师尹国樑、高璘、梁其文、胡燕月、张宪魁、邹培源、于学厚、郭利明、韩庆义、李希海、周良弼、赵志仁、刘后秦、马桂江、董玉祥、李良波、王志辉、石景环等同志的支持和帮助。山东省教育厅、本校(系)及许宝笃、刘星南、韩义华、梅玉初、楚安夫、张培谦、李秋儒、刘康、孙明、张越、吕文海、乔贵红、刘洪东等同志都给予了支持和帮助,在此深表感谢。

由于编者业务水平的限制,书中一定还有许多缺点和错误,恳请读者批评指正。

编 者

1988. 3. 于泰安师专

目 录

第1章 小信号交流放大器	
1.1 三极管的小信号近似模型.....1	
一、三极管的简化 h 参数等效电路.....1	
二、共射放大器的性能分析.....3	
三、h 参数的测量方法.....6	
1.2 放大器的三种组态.....7	
一、共基放大器.....7	
二、共集放大器(射极输出器).....9	
三、放大器三种组态的性能比较.....11	
1.3 实验 射极输出器.....12	
1. 测量放大器输入电阻的方法.....12	
2. 测量放大器输出电阻的方法.....13	
3. 带有自举电路的射极输出器.....13	
1.4 三极管的小信号精确模型.....15	
一、三极管的输出电阻.....15	
二、三极管的 h 参数等效电路.....16	
三、三极管的混合 π 形等效电路.....18	
*四、单向化混合 π 形等效电路.....19	
1.5 放大器的频率特性.....20	
一、幅频特性和相频特性.....21	
二、耦合电容对频率失真的影响.....24	
三、三极管的高频特性对频率失真的影响.....25	
1.6 实验 多级阻容耦合放大器.....27	
1. 多级放大器的级间耦合.....27	
2. 多级阻容耦合放大器的放大倍数.....28	
3. 多级阻容耦合放大器的频率特性.....29	
1.7 单调谐放大器的频率特性.....31	
一、部分接入式调谐回路.....31	
二、单调谐放大器的选频特性.....34	
三、单调谐放大器的调整.....36	
1.8 实验 双调谐放大器和多级调谐放大器.....37	
1. 同步调谐.....37	
2. 参差调谐.....39	
思考题和习题一.....44	
制作练习一.....47	
1. 光控开关.....47	
2. 声控开关.....47	
第2章 电路中的反馈	
2.1 实验 对反馈的认识.....49	
1. 反馈的概念.....49	
2. 单级反馈电路.....50	
3. 两级反馈电路.....51	
2.2 负反馈放大器的分类和判别.....53	
一、串联电压负反馈.....55	
二、串联电流负反馈.....55	
三、并联电压负反馈.....56	
四、并联电流负反馈.....57	
2.3 负反馈对放大器性能的影响.....58	
一、降低放大能力,但使放大器稳定性提高.....58	
二、使输入电阻和输出电阻变化.....60	
三、使失真程度降低.....62	
2.4 负反馈在直流稳压电源中的应用.....63	
一、单管串联式稳压电源.....64	
二、带放大环节的串联式稳压电源.....64	
2.5 实验 直流稳压电源安装.....66	
1. 稳压电源的性能指标.....66	
2. 实验电路.....67	
2.6 正弦波发生器.....68	
一、产生正弦振荡的条件.....69	
二、桥式正弦波发生器.....71	
三、RC 移相正弦波发生器.....72	
*2.7 放大器中的自激振荡及其消除.....73	
一、由电源内阻引起的自激振荡.....74	
二、负反馈放大器中的自激振荡.....75	
三、调谐放大器中的自激振荡.....76	
思考题和习题二.....76	
制作练习二.....78	
1. 可调直流电源.....78	
2. 收音机稳压电源.....78	

第3章 直流放大器和功率放大器

3.1 直流放大器	79
一、直流放大器的级间耦合和零点漂移	79
二、差动式直流放大器	81
3.2 实验 差动放大器	86
1. 差动放大器的传输特性	86
2. 差动放大器的应用	87
3.3 功率放大器	89
一、OTL 功率放大器	90
*二、变压器耦合式功率放大器	95
3.4 实验 OTL 功率放大器安装	99
3.5 实验 扩音机与喇叭配接	102
1. 定阻式扩音机的配接原则	102
2. 定阻式扩音机的几种配接方法	103
3. 定压式扩音机的配接	106
思考题和习题三	107
制作练习三	108
1. 演示电流计的附加放大器	108
2. 实验电话	109
3. 双工对讲机	109
4. 录音机声控开关	110

第4章 模拟集成电路

4.1 集成电路及其分类	111
4.2 集成运算放大器	114
一、典型运放 F004(5G23) 分析	114
二、运放的两种基本电路	116
4.3 实验 集成运放的特性参数及其测量	119
1. 开环差模特性	119
2. 输入失调特性	121
3. 共模特性	123
4. 输出瞬态特性	123
4.4 实验 集成运算放大器的线性应用	127
1. 比例运算、变号运算和恒等运算	127
2. 加减运算	128
3. 微积分运算	128
4. 乘法运算	129

*4.5 集成运算放大器的非线性应用	131
一、比较器	132
二、多谐振荡器	133
三、锯齿波发生器	134
四、施密特触发器	134
4.6 集成运算放大器的改进型电路	135
一、镜像恒流源	136
二、微电流恒流源	136
三、改进型恒流源	137
四、有源负载	138
五、横向 PNP 三极管	138
六、典型运放 F007(5G24) 分析	139
4.7 集成稳压电源	140
一、典型集成稳压器 SW117 分析	141
二、应用举例	143
4.8 音响电视集成电路	144
一、典型音响电路 LA4100、LB1405 分析	145
二、集成电路录音机	148
三、立体声电唱机	152
*4.9 制作实验 集成电路低频信号发生器	156

思考题和习题四

制作练习四	161
1. 立体声功率接续器	161
2. 实验稳压电源	161
3. 高保真集成功放 TDA2030	162
4. 厚膜集成功放 STK 系列	163
5. 音调控制电路	165
6. 等响度音量控制电路	167
7. 万用表附加高阻电压表	168
8. IC 毫伏表	169
9. 电压-频率变换器	169

第5章 CRT 显示器

5.1 显示成象原理	170
一、电子显示器件的种类	170
二、扫描成象原理	171
三、摄像管	173
四、全电视信号	175
五、视频信号的频谱分析	176
六、显象管和偏转线圈	178

七、锯齿波形成原理	183
八、间歇振荡器	185
5.2 单色显示器	188
一、视频放大电路	189
二、同步分离电路	190
三、行扫描电路	194
四、场扫描电路	205
五、整机分析	210
5.3 实验 扫描电路测试	211
5.4 实验 示波器安装	214
1. 示波管的构造	214
2. 示波器的波形显示原理	216
3. 示波管的供电电路	216
4. 示波器的组成	217
5. 单结管扫描电路和同步原理	218
思考题和习题五	222
制作练习五	223
1. 万用表高阻档电源	223
2. 周期和脉宽单独可调的脉冲信号发生器	224
3. 电池点亮日光灯	224

第6章 无线电广播

6.1 概述	226
一、无线电广播的组成	226
二、非线性频率变换和选频滤波电路	228
6.2 实验 振荡和调制	230
1. LC正弦波发生器	230
2. 幅度调制现象的观测	234
6.3 AM调制原理	236
一、调幅波方程	236
二、调幅波的频谱	238
三、无线电波的发射与传播	239
6.4 实验 接收与检波	240
1. 输入调谐回路	241
2. AM解调器——检波电路	243
6.5 超外差AM收音机	247
一、超外差原理——变频	247
二、自动增益控制(AGC)电路	250
6.6 实验 AM收音机调试	251
1. 三点统调原理	252
2. 分立元件AM收音机	254

3. 高性能单片集成电路AM收音机	255
6.7 FM收音机	257
一、FM波的产生——FM无线话筒的实验	257
二、FM波的解调——鉴频器	263
三、分立元件FM收音机	267
四、单片集成电路FM收音机	268
*6.8 FM立体声广播	269
思考题和习题六	273
制作练习六	275
1. 电子门铃	275
2. 电子鸟	276
3. 实验高放式收音机	276
4. 单片直放式收音机	277
5. 实验无线话筒	277
6. 单管调频收音机	277
7. 无线电遥控装置	278
8. TTL中低频信号发生器	279
9. 信号寻迹器	279

第7章 电视

7.1 高频电视信号的产生和传送	281
一、图象信号调幅	281
二、伴音信号调频	282
三、残留边带发送	283
四、电视信号的传播	285
五、电视接收天线	285
7.2 黑白电视机的组成和频率特性	289
一、黑白电视机的组成	289
二、电视机信号通道的频率特性	290
三、集成电路电视机的发展及其组成	292
7.3 高频调谐器	293
一、VHF调谐器	293
二、UHF调谐器	297
三、电子调谐器	298
7.4 图象中频通道	302
一、对图象通道的性能要求	302
二、分立元件图象中频通道	304
三、图象中放集成电路D7611分析	309
7.5 伴音通道	318
一、对伴音通道的性能要求	318
二、分立元件伴音通道	319

三、伴音集成电路 D7176 分析.....	319	3. 典型故障分析举例.....	350
7.6 实验 电视机信号通道测试.....	324	思考题和习题七.....	357
7.7 单片集成电路电视机.....	326	制作练习七.....	358
一、MC13007 LSI 信号处理电路.....	326	1. 电视机兼作计算机显示器.....	358
二、TDA4500 LSI 信号处理电路.....	328	2. 电视伴音接收机.....	359
7.8 彩色电视.....	331	3. 集成稳压器用于电视机.....	360
一、光和彩色的基本知识.....	331	附录.....	361
二、彩色图象的摄制和再现.....	332	附录1. LC 并联谐振回路.....	361
三、彩色电视的制式.....	334	附录2. XFG-7 型高频信号发生器.....	367
四、彩色电视机的结构原理.....	340	附录3. BT-3 型频率特性测试仪	
7.9 实验 电视机的故障分析和检修...342		(扫频仪).....	370
1. 用分段检查法判断故障的可能部位.....	343	参考文献.....	377
2. 具体电路的检查方法.....	344		

注：目录中用黑体标出的章节为基本讲授及实验内容。

第1章 小信号交流放大器

本章介绍放大器在小信号工作状态时的基本分析方法——微变等效电路法。首先介绍适合于分析低频电路的 h 参数等效电路,利用它分析放大器的增益、输入电阻、输出电阻和低频特性;然后介绍适合于分析高频电路的混合 π 形等效电路,利用它分析放大器的高频特性和调谐放大器的选频特性。

1.1 三极管的小信号近似模型

由三极管的输入特性曲线和输出特性曲线可以看出,从整体来说,三极管是一个非线性元件。这使三极管的分析问题趋于复杂。但是我们发现,当三极管在小信号工作状态时(输入信号在毫伏数量级),其电压与电流的变化关系近似为线性关系,也就是说,在静态工作点附近的小范围内,可以用直线段近似地代替三极管的特性曲线。这样,就能把用非线性元件三极管组成的放大电路等效为一个线性电路,也就是把三极管线性化。由此就可用处理线性电路的方法来处理三极管放大电路。本节讨论三极管在小信号工作状态时的近似线性模型,即三极管的简化 h 参数等效电路。

一、三极管的简化 h 参数等效电路

1. 三极管输入回路的等效电路

在本书《数字电路和微型计算机》第2章讨论三极管的参数时,曾经指出,在共射组态三极管的输入端存在着一个输入电阻 r_{be} 。本节对此再做进一步说明。

当在三极管的输入端(即在基极 b 和发射极 e 之间)加上一个微变信号电压 $v_i = v_{be}$ 时,则在输入端将产生一个相应的基极变化电流 i_b ,如图 1.1-1(a)所示。

由于输入交流信号很小,可以把静态工作点 Q 附近的一段输入特性曲线当作直线,即可以近似地认为输入信号电流 i_b 正比于输入信号电压 v_{be} ,则三极管的 b 、 e 极之间就相当于一个线性电阻 r_{be} ,称为三极管的输入电阻,记作 r_{be} ,即

$$r_{be} \equiv \frac{v_{be}}{i_b} \quad (1.1-1)$$

r_{be} 也可以在三极管输入特性曲线上求得,如图 1.1-1(b)所示,在工作点 Q 处作切线,则

$$r_{be} = \frac{\Delta V_{BE}}{\Delta I_B}$$

由此可见,三极管的输入电阻 r_{be} 在数值上等于输入特性曲线在 Q 点切线的斜率的倒数。这里要注意,由于输入特性曲线的非线性,在工作点 Q 不同时,求得的 r_{be} 是不同的。

① 符号“ \equiv ”表示是定义式。

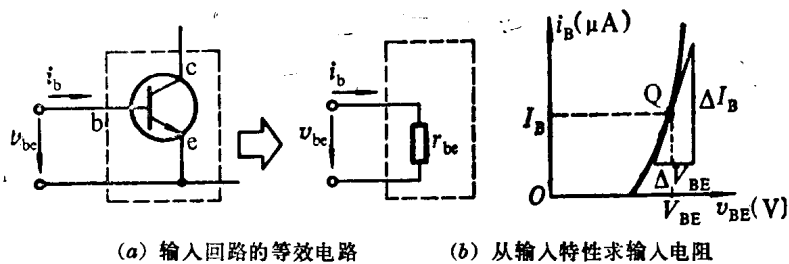


图 1.1-1 三极管输入回路的等效电路

r_{be} 还可以由半导体物理的理论推出计算公式

$$r_{be} = r_{b'b} + (1 + \beta) \frac{26 \text{ (mV)}}{I_E \text{ (mA)}} \quad (1.1-2)$$

其中, $r_{b'b}$ 表示三极管的基区电阻, 对于一般小功率管, $r_{b'b} \approx 300\Omega$ 。

例如, 设三极管 $\beta = 100$, $I_E = 3 \text{ mA}$, $r_{b'b} = 300\Omega$,

则
$$r_{be} = 300 + (1 + 100) \times \frac{26}{3} \approx 1.2 \text{ k}\Omega$$

一般三极管的输入电阻 r_{be} 约几百欧姆至几千欧姆。由式(1.1-2)可见, 当三极管的静态电流 I_C 改变时, r_{be} 的值也跟随改变。

2. 三极管输出回路的等效电路

在输出回路, 三极管的输出电压 v_{ce} 和输出电流 i_c 之间的数量关系, 反映在三极管的输出特性曲线簇里。我们先来看理想的情况, 即假设输出特性曲线簇是一组与横轴平行的直线, 如图 1.1-2(a) 所示。

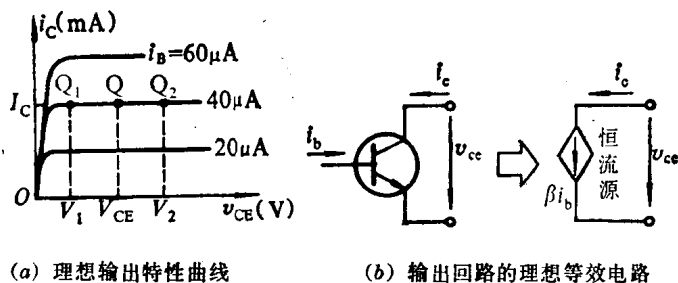


图 1.1-2 三极管输出回路的等效电路

由图可见, 在特性曲线的放大区, 只要 I_B 不变, 例如 $I_B = 40\mu\text{A}$, 则 I_C 近似不变, 即 I_C 的大小与 V_{CE} 的大小无关。例如, 当 Q 左右移到 Q_1 和 Q_2 时, 尽管相应的三极管集-射间电压 V_{CE} 由 V_1 变化到 V_2 , 但这时流过三极管集电极的电流 I_C 始终等于定值。当 I_B 有一个确定的微变量 $i_b = \Delta I_B$ 时, I_C 也会有一个确定的微变量 $i_c = \Delta I_C = \beta \Delta I_B = \beta i_b$, 且 i_c 的大小与 $\Delta V_{CE} = v_{ce}$ 无关。

从电路理论来看, 这时从三极管的输出端 c、e 向三极管内看进去, 三极管的输出端(c、e 之间)就等效为一个恒流电源 i_c , 它的大小与端电压 v_{ce} 无关, 只决定于 i_b , 即 $i_c = \beta i_b$ 。这样, 三

极管输出端的等效电路就如图 1.1-2(b) 所示。

综上所述,用输入电阻 r_{be} 来表达三极管的输入特性,用电流源 βi_b 来表达三极管的输出特性,就可得到三极管的简化 h 参数等效电路,如图 1.1-3 所示。又由于等效电路是在小信号时得到的,因而也叫做微变等效电路

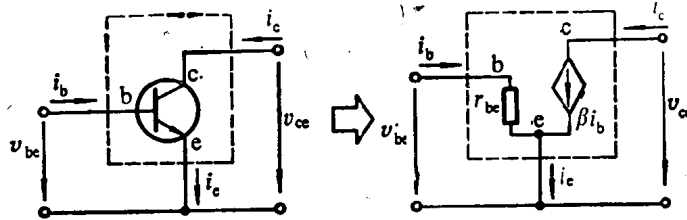


图 1.1-3 三极管的简化 h 参数等效电路

这里应当指出,在图 1.1-3 中所标出的电压和电流,其方向为假定的正方向。其中 i_b 和 i_c 的正方向为流进管子,而 i_e 为流出管子。如果在它们的正半周时是这样的方向,则在负半周时其方向相反^①。这个规定在后面的分析中经常要用到。

电路。

二、共射放大器的性能分析

如果用上面得到的三极管的简化 h 参数等效电路,来分析放大器在小信号工作状态时的各项性能,在一般情况下,计算所得结果已能达到足够精确的程度。这个简化等效电路可以用于任何组态(共射、共基或共集),只须将适当的端点接地。下面首先用它分析共射放大器。

设共射放大器的电路如图 1.1-4(a) 所示。为了使用微变等效电路分析放大器的性能,应当先将它画成 h 参数等效电路。具体方法如下:

第一步,先将图 1.1-4(a) 画成交流通路,如图(b)所示。画交流通路时,只须将电容和电源短路即可得到。这是因为在微变等效电路中,只考虑变化量,因此在电路中的任何固定不变的电压源都可以认为是交流短路,任何固定不变的电流源都可以认为是交流开路。

第二步,在交流通路上确定 e、b、c 三个电极后,b 和 e 之间用 r_{be} 代替,c 和 e 之间用电流源 βi_b 代替,就可得到图 1.1-4(c) 所示的 h 参数等效电路。

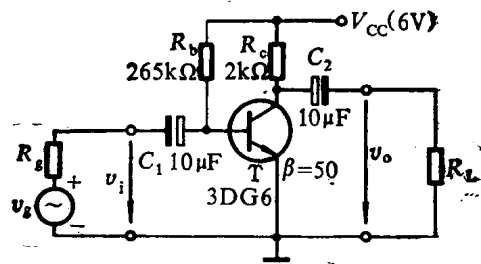
下面利用 h 参数等效电路来分析共射放大器的电流增益 A_i 、电压增益 A_u 、输入电阻 R_i 和输出电阻 R_o 。

1. 电流增益(即电流放大倍数) A_i

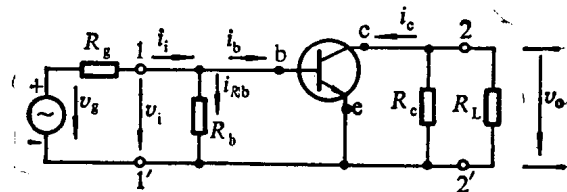
放大器的 A_i 定义为输出电流与输入电流之比。由 h 参数等效电路(图 1.1-4c)可见,输出电流 $i_c = \beta i_b$,输入电流 $i_i = i_b + i_{R_b}$ 。但由于 $R_b = 265 \text{ k}\Omega$,而 r_{be} 只有 $1 \sim 3 \text{ k}\Omega$,即 $r_{be} \ll R_b$,因而 $i_{R_b} \ll i_b$,则 $i_i \approx i_b$ 。这样即可得到

$$A_i \equiv \frac{i_c}{i_i} \approx \frac{\beta i_b}{i_b} = \beta \quad (1.1-3)$$

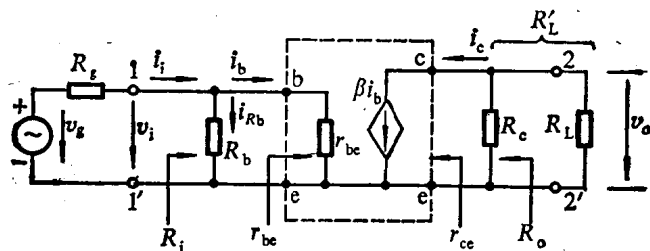
^① 对于总电压 v_{BE} 、 v_{CE} 和总电流 i_b 、 i_c 来说,只有大小的变化,而方向是不变的。



(a) 实际电路



(b) 交流通路



(c) h 参数等效电路

图 1.1-4 共射放大器的简化 h 参数等效电路

2. 输入电阻 R_i

放大器的 R_i 定义为从输入端 1-1' 之间看进去的等效电阻, 即

$$R_i \equiv \frac{v_i}{i_i} \approx \frac{v_i}{i_b} = r_{be} \quad (1.1-4)$$

可见, 放大器的输入电阻 R_i 近似等于三极管的输入电阻 r_{be} 。这里忽略了 R_b 的影响。如果考虑 R_b 的影响, 则放大器的输入电阻为

$$R_i \equiv \frac{v_i}{i_i} = \frac{v_i}{i_b + i_{Rb}} = \frac{v_i}{\frac{v_i}{r_{be}} + \frac{v_i}{R_b}} = \frac{r_{be} R_b}{r_{be} + R_b} = r_{be} \parallel R_b \quad (1.1-5)$$

3. 电压增益 (即电压放大倍数) A_v

放大器的 A_v 定义为输出电压与输入电压之比。由图 1.1-4(c) 可见, 根据 v_o 和 i_o 的假定正方向, 输出电压 $v_o = -i_c(R_c \parallel R_L) = -i_c R'_L$ 。而输入电压 $v_i = i_b r_{be}$ 。因而

$$A_v \equiv \frac{v_o}{v_i} = \frac{-i_c R'_L}{i_b r_{be}} = -\frac{\beta R'_L}{r_{be}} \quad (1.1-6)$$

如果考虑信号源内阻 R_g 的影响, 即求输出电压 v_o 对信号源电压 v_g 的电压增益 A_{vg} , 则由

图 1.1-4(c) 可见, 由于 $R_b \gg r_{be}$, 因而 $i_i \approx i_b$, $R_i = R_b // r_{be} \approx r_{be}$, 这样就得到

$$A_{v_g} = \frac{v_o}{v_g} = \frac{-i_c R'_L}{i_i (R_g + R_i)} \approx \frac{-i_c R'_L}{i_b (R_g + r_{be})} = -\frac{\beta R'_L}{R_g + r_{be}} \quad (1.1-7)$$

上式表明, 在信号源电压 v_g 一定的情况下, 信号源的内阻 R_g 越小, 则放大器输入端分到的有用电压 $v_i = \frac{R_i}{R_g + R_i} v_g$ 越大, 因而放大器的电压增益 A_{v_g} 就越高。相反, 当信号源电压 v_g 和内阻 R_g 都一定时, 放大器的输入电阻 $R_i = R_b // r_{be}$ 越大, 则输入端从信号源分到的有用电压 $v_i = \frac{R_i}{R_g + R_i} v_g$ 越大, 因而放大器的电压增益 A_{v_g} 就越高。由此可见信号源内阻和放大器的输入电阻对于放大器增益是有影响的。

4. 输出电阻 R_o 。

任一放大器对于负载(或者对后级放大器)来说, 是一个信号源, 该信号源的内阻就是该放大器的输出电阻。按照信号源(电源)的一般表示方法, 它可以表示为一个电动势 v'_o 和内阻 R_o 的串联电路, 如图 1.1-5(a) 所示。由图可见, 负载 R_L 上的电压(即放大器的有载输出电压) $v_o = \frac{R_L}{R_o + R_L} v'_o$ 。在电动势 v'_o 一定的情况下, R_o 越小, 则负载上得到的输出电压越大。或者说, R_o 越小, 则当负载变化时, 输出电压的变化越小, 也就是放大器带负载的能力越强。这正象在 220 V 交流电源线上并联灯泡, 并联灯泡越多(负载越重), 而 220 V 电压的变化越小才好。

根据电路理论, 放大器的输出电阻可在信号源短路($v_g = 0$)和输出端开路($R_L = \infty$)的条件下求得。如图 1.1-4(c) 所示的放大器, 当 $v_g = 0$ 时, $i_b = 0$, $i_c = \beta i_b = 0$, 这说明恒流源 βi_b 开路, 因此这时从三极管的 c 和 e 之间向左看进去的等效电阻 r_{ce} (叫做三极管的输出电阻) 为无穷大: $r_{ce} = \infty$ 。这样, 从放大器的输出端 2-2' 之间向左看进去的等效电阻 R_o 应是 r_{ce} 和 R_c 的并联值, 即放大器的输出电阻

$$R_o = r_{ce} // R_c = \infty // R_c = R_c \quad (1.1-8)$$

所以, 图 1.1-5(a) 中的 $R_o = R_c$ 。那么, 图 1.1-5(a) 中的电动势 v'_o 等于什么呢? 这只需将 R_L 开路, 如图 1.1-5(b) 所示, 则此时放大器输出端的空载电压就应当是 v'_o 。对于图 1.1-4(c) 所示放大器来说, 当 R_L 开路时, 空载输出电压为 $v'_o = -i_c R_c$ 。它就是图 1.1-5(a) 中的电动势 v'_o 。

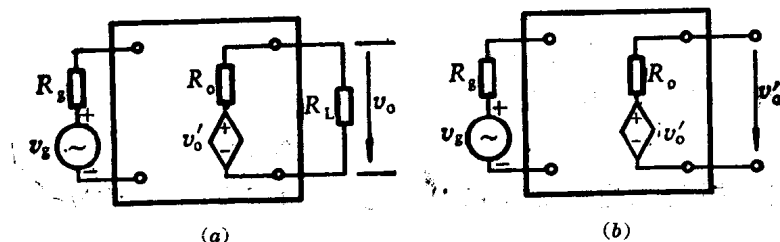


图 1.1-5 放大器的输出电阻和空载输出电压

例 设在图 1.1-4(a) 所示的放大器中, 三极管的 $\beta = 60$, $r_{be} = 1.4 \text{ k}\Omega$, 信号源内阻 $R_g = 600 \Omega$, 信号源电压 v_g 的有效值 $V_g = 10 \text{ mV}$, $R_c = 2 \text{ k}\Omega$, $R_L = 1 \text{ k}\Omega$ 。试求放大器的空载输出电压 v'_o 和有载输出电压 v_o 。

解 在 R_L 开路的情况下, 放大器(考虑信号源内阻时)的电压增益为

$$A_{v_g} = -\frac{\beta R_c}{R_g + r_{be}} = -\frac{60 \times 2}{0.6 + 1.4} = -60$$

测放大器的空载 ($R_L = \infty$) 输出电压 v'_o 的有效值为

$$V'_o = A_{v_g} \cdot V_g = -60 \times 10 = -600 \text{ mV}$$

有载输出电压 v_o 的有效值为 (由图 1.1-5a)

$$V_o = \frac{R_L}{R_c + R_L} \cdot V'_o = \frac{1}{2+1} \times (-600) = -200 \text{ mV}$$

可见, 放大器带上负载后的输出电压下降为空载时的 1/3。这表明共射放大器带负载的能力较差。

三、 h 参数的测量方法

在工程应用中, β 和 r_{be} 可以用专门的三极管 h 参数测试仪器测出。为了加深对 β 和 r_{be} 的理解, 我们也可以用下面介绍的简易测试电路测出。

在图 1.1-6 所示的测试电路中, 电位器 R_w 用来调整三极管的静态工作电流 I_C , 以便测出在任何指定的 I_C 值时的 β 和 r_{be} 值。

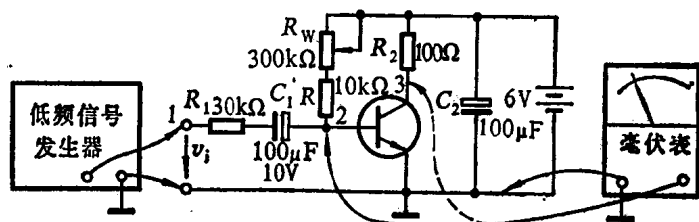


图 1.1-6 h 参数的简易测试电路

测试步骤:

1. 调整电位器 R_w , 使被测三极管的静态电流为规定值, 例如, 规定 $I_C = 1 \text{ mA}$ 。
2. 低频信号发生器输出 1000 Hz 的信号, 信号强度有效值为 $V_i = 0.3 \text{ V}$ (有效值), 送入测试电路输入端, 则这时流入被测三极管基极的交流信号电流有效值为

$$I_b = \frac{V_i}{R_1 + r_{be}} \approx \frac{V_i}{R_1} = \frac{0.3}{30 \times 10^3} = 10^{-5} \text{ A}$$

3. 由毫伏表测得基极 (测试点 2) 对地电压为 V_{be} V (有效值), 则被测三极管的输入电阻为

$$r_{be} = \frac{V_{be} (\text{V})}{I_b (\text{A})} = V_{be} \cdot 10^5 (\Omega)$$

例如, 假设测得 $V_{be} = 10 \text{ mV}$, 则

$$r_{be} = 10 \times 10^{-3} \times 10^5 = 1000 \Omega$$

4. 用毫伏表测出集电极 (测试点 3) 对地交流电压为 V_{ce} V (有效值), 则被测管的交流放大系数为

$$\beta = \frac{I_c}{I_b} = \frac{V_{ce}}{I_b R_2} = \frac{V_{ce}}{100 \times 10^{-5}} = V_{ce} \cdot 10^3$$

例如, 设测得 $V_{ce} = 65 \text{ mV}$, 则

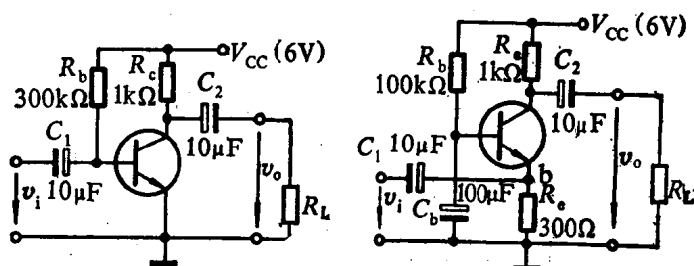
$$\beta = 65 \times 10^{-3} \times 10^3 = 65$$

1.2 放大器的三种组态

在上节用微变等效电路法分析了共射放大器的放大倍数和输入、输出电阻。在本节,继续用微变等效电路法分析共基和共集放大器的性能。

一、共基放大器

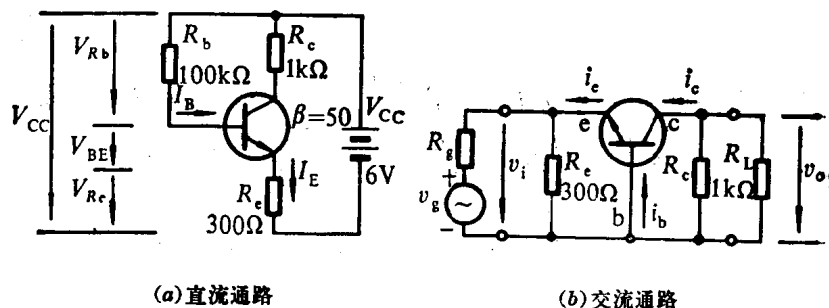
图 1.2-1(a) 示出了共射放大器, 输入信号在基极与地之间接入。能否将输入信号改在射极与地间输入呢? 这是可以的, 只须在基极与地之间加一个大容量的电容 C_b , 使基极对地交流短路; 同时在射极与地之间串入一个电阻 R_e , 接成如图 1.2-1(b) 所示的电路。它的直流通路和交流通路分别如图 1.2-2(a)、(b) 所示。由图可见, 从直流关系看, 它与共射电路相似; 从交流关系看, 它是共基电路。



(a) 共射放大器

(b) 共基放大器

图 1.2-1 共射与共基放大器的不同输入方式



(a) 直流通路

(b) 交流通路

图 1.2-2 共基放大器

静态工作点: $V_{BE} \approx 0.7 \text{ V}$ 。

可用下式求 I_B :

$$\begin{aligned} I_B &= \frac{V_{CC} - V_{BE} - V_{R_e}}{R_b} = \frac{V_{CC} - V_{BE} - I_E R_e}{R_b} \\ &= \frac{V_{CC} - V_{BE} - (1 + \beta) I_B R_e}{R_b} \end{aligned}$$

整理后, 得

$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_b + (1 + \beta)R_e}$$

代入已知数值,得

$$I_B = \frac{6 - 0.7}{100 \times 10^3 + (1 + 50) \times 300} = 46 \mu\text{A}$$

$$I_C = \beta I_B = 50 \times 46 = 2.3 \text{ mA}$$

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C(R_c + R_e) = 6 - 2.3 \times (1 + 0.3) = 3 \text{ V}$$

确定了静态工作点的数值后,就可利用特性曲线或仪器测算出三极管的 r_{be} 、 β 等值,以便下面利用这些共射极电路的参数,讨论共基极电路的各项性能。

按照画 h 参数等效电路的一般步骤,先在图 1.2-2(b) 所示的交流通路上确定 e、b、c 三个电极, b 和 e 之间用 r_{be} 代替, c 和 e 之间用电流源 βi_b 代替,就可得到图 1.2-3 所示的 h 参数等效电路。

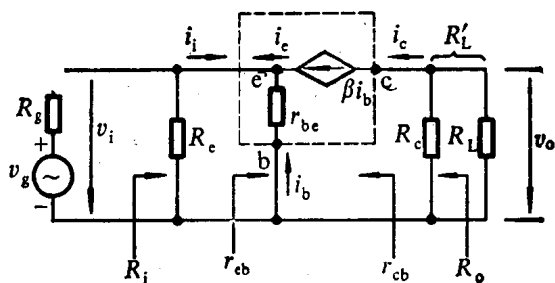


图 1.2-3 共基电路的 h 参数等效电路

1. 电流增益 A_i

由 h 参数等效电路可知,在不考虑 R_e 的影响时, $i_i = -i_o$, $i_c = \beta i_b$, 因而

$$A_i \equiv \frac{i_c}{i_i} = \frac{\beta i_b}{-i_o} = \frac{\beta i_b}{-(1 + \beta) i_b} = -\frac{\beta}{1 + \beta} = -\alpha \quad (1.2-1)$$

式中 $\alpha = \frac{\beta}{1 + \beta}$ 叫做共基电路三极管的电流放大系数。当 β 较大时, $\alpha \approx 1$ 。

2. 输入电阻 R_i

当不考虑 R_e 的影响时,即从三极管的 e 和 b 之间看进去的输入电阻为

$$R_i' \equiv \frac{v_i}{i_i} = \frac{-i_b r_{be}}{-i_o} = \frac{r_{be}}{1 + \beta} = r_{eb} \quad (1.2-2)$$

可见,与共射电路相比,共基电路中三极管的输入电阻减小为共射电路输入电阻的 $1/(1 + \beta)$, 因而共基电路中三极管的输入电阻 r_{eb} 只有几欧姆至十几欧姆。

共基放大器的输入电阻为

$$R_i = R_i' \parallel R_e = r_{eb} \parallel R_e \approx r_{eb} \quad (1.2-3)$$

由此可见在上面的分析中,不考虑 R_o 的影响是合理的。

3. 电压增益 A_v

由图 1.2-3 可见

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = \frac{-\beta i_b (R_c \parallel R_L)}{-i_b r_{be}} = \frac{\beta R'_L}{r_{be}} \quad (1.2-4)$$

上式说明,共基的 A_v 与共射的 A_v 相同,但 v_o 与 v_i 同相位。

4. 输出电阻 R_o

为求输出电阻,可先将图 1.2-3 中的 R_L 去掉,令 $v_g = 0$,因而 $i_b = 0, i_c = \beta i_b = 0$,这相当于 c 和 e 之间开路。从三极管 c 和 b 之间看进去的等效电阻 r_{cb} (叫做共基接法条件下三极管的输出电阻) 为无穷大: $r_{cb} = \infty$ 。这样,共基放大器的输出电阻 $R_o = r_{cb} \parallel R_c = \infty \parallel R_c = R_c$ 。

二、共集放大器(射极输出器)

共集放大器(射极输出器)的电路如图 1.2-4(a) 所示,其交流通路如图(b) 所示。

由图 1.2-4(a) 可以看出,它的直流通路与前面共基放大器的直流通路是一样的,因而,它的静态工作点可以用同样的公式来计算,即

$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_b + (1 + \beta) R_e}$$

$$I_E = (1 + \beta) I_B$$

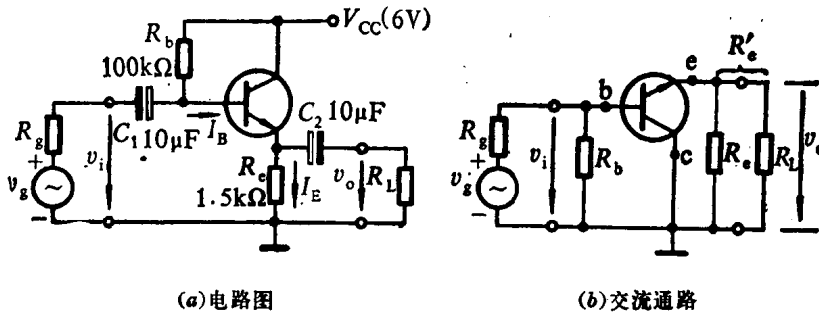


图 1.2-4 共集放大器

由此可以利用特性曲线求出三极管在共射接法时的 h 参数 r_{be} 、 β , 用它再来求出共集放大器的各种性能。

首先根据图 1.2-4(b) 所示的交流通路画出 h 参数等效电路,如图 1.2-5 所示。下面分析共集放大器的各项性能。

1. 电流增益 A_i

由图 1.2-5 可见,当不考虑 R_b 的影响时 $i_i = i_b$, 输出电流 $i_o = -i_e$, 因而

$$A_i \equiv \frac{i_o}{i_i} = \frac{-i_e}{i_b} = -(1 + \beta) \quad (1.2-5)$$

2. 输入电阻 R_i

由图 1.2-5 可见,输入电压 v_i 等于 r_{be} 上的电压与 $R'_e = R_e \parallel R_L$ 上的电压之和,即

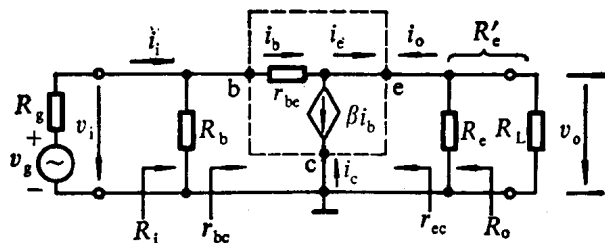


图 1.2-5 共集放大器的 h 参数等效电路

$$v_i = i_b r_{bc} + i_e R'_e = i_b [r_{bc} + (1 + \beta) R'_e]$$

因而从三极管的 b 和 c 之间看进去的等效电阻 r_{bc} 为

$$r_{bc} = \frac{v_i}{i_b} = r_{bc} + (1 + \beta) R'_e \quad (1.2-6)$$

可见三极管在共集接法条件下的输入电阻 r_{bc} 远远大于它在共射接法时的输入电阻 r_{be} 。

共集放大器的输入电阻

$$R_i = r_{bc} \parallel R_b = [r_{bc} + (1 + \beta) R'_e] \parallel R_b \quad (1.2-7)$$

由上式可见,由于共集放大器中三极管的输入电阻很大,因而其偏置电阻 R_b 对放大器输入电阻 R_i 的影响不可忽略。

3. 电压增益 A_v

由图 1.2-5 可见,从 b 和 c 之间看进去的等效电阻是 $r_{bc} = r_{be} + (1 + \beta) R'_e$, 因而 $v_i = i_b r_{bc}$ 而 $v_o = i_e R'_e$, 则共集放大器的电压增益

$$A_v \equiv \frac{v_o}{v_i} = \frac{i_e R'_e}{i_b r_{bc}} = \frac{(1 + \beta) R'_e}{r_{bc}}$$

由于 $r_{bc} = r_{be} + (1 + \beta) R'_e$, 可见上式分子为 $r_{bc} - r_{be}$, 由于 $r_{be} \ll r_{bc}$, 因此

$$A_v = 1 - \frac{r_{be}}{r_{bc}} \approx 1 \quad (1.2-8)$$

可见共集放大器(射极输出器)的电压增益接近于 1, 且略小于 1。

4. 输出电阻 R_o

根据求输出电阻的一般方法, 先将图 1.2-5 所示放大器的负载开路 ($R'_e = \infty$)、信号源短路 ($v_g = 0$), 就可得到如图 1.2-6(a) 所示电路。

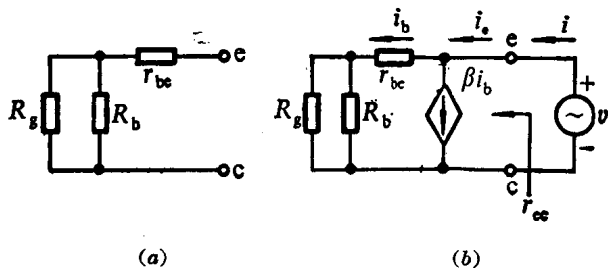


图 1.2-6 求共集放大器的输出电阻

为了求出这时从 e 和 c 之间看进去的等效电阻 r_{cc} (即三极管在共集接法时的输出电阻), 可