

模拟电子技术基础

简明教程

● 清华大学电子学教研组 编

● 高等教育出版社

内 容 简 介

本书是在清华大学电子学教研组编,童诗白主编的《模拟电子技术基础》试用教材的基础上,根据“保证基础,精选内容,加强概念,面向更新,联系实际,利于自学”的原则改编而成,内容包括:基本放大电路和多级放大电路、放大电路中的反馈、正弦波振荡电路、直接耦合电路和集成运算放大器、直流电源、模拟电子电路的读图练习等六章。每章均有一定数量的例题,并有小结、复习思考题和练习题。本书和《数字电子技术基础简明教程》组成一套教材,两书内容是按照总授课时间为120学时左右(不包括实验)来安排的。

本书可作为高等工科院校本科有关专业以及电视大学有关专业开设“电子技术基础”课程的试用教材,也可供从事电子技术方面工作的工程技术人员作为学习参考用书。

责任编辑 张志军

模拟电子技术基础

简明教程

清华大学电子学教研组编

高等教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

北京印刷三厂印装

*

开本 787×1092 1/32 印张 19.5 插页1 字数 460,000

1985年10月第1版 1985年10月第1次印刷

印数 00,001—77,250

书号 15010·0685 定价 3.35 元

前 言

我们编写的《模拟电子技术基础》(童诗白主编)和《数字电子技术基础》(阎石主编)试用教材,自从1980和1981年分别出版以来,经过我校本科有关专业和中央广播电视大学讲授“电子技术基础”课程的试用,并得到了其他高等院校、企业部门的关心。在为84届中央广播电视大学准备教材时,由于讲课学时大幅度削减,原来的教材显得篇幅过于庞大,容易造成学生负担过重。同时为了适应我校本科各有关专业的需要,我们在上述两套教材的基础上,按照总授课时间为120学时(不包括实验)的教学大纲,改编了目前这套《数字电子技术基础简明教程》和《模拟电子技术基础简明教程》。

我们的编写原则是:“保证基础,精选内容,加强概念,面向更新,联系实际,利于自学”。目的是为了在保证基本内容学到手的前提下,努力培养学生处理实际问题和自学的能力,同时避免学习负担过重。考虑到目前电子技术的飞速发展,适当地加强了新技术的内容。例如在模拟电子技术部分,在保证基本概念、基本原理和基本分析方法的前提下,大幅度地压缩各种分立元件电路的设计和其他次要内容,加强以集成运放为主的模拟集成电路的功能和应用。在数字电子技术部分,以中、小规模集成电路为主,适当介绍大规模集成电路,分立元件部分基本删去。在教学方法上,我们力图多用物理概念来阐明问题的本质,避免大量地推导公式。

关于电子技术课程中模拟电路和数字电路的先后顺序问题,国内外各种教材中两种安排都有。在编写本教程时,主要为了处理好电路原理、电子技术基础和计算机原理几门课程之间的衔接

关系，便于安排教学计划，因此把数字电路安排在模拟电路之前，半导体器件的基本知识放在《数字电子技术基础简明教程》一书中。但是，采用本教程时也可以先讲授模拟电路，只要在开始讲模拟电路之前，先介绍半导体器件的基本知识一章即可。

这套教材的《模拟电子技术基础简明教程》部分由杨素行执笔，《数字电子技术基础简明教程》部分由余孟尝执笔。全部编写工作是在童诗白教授和阎石副教授的具体组织下进行的。童诗白教授不仅为改编工作提出了如上所述的基本原则，指导制订了编写大纲，而且与执笔的同志多次进行讨论，提出了许多指导意见，并且还详细地审阅和修改了模拟部分的全部初稿。

参加本教程大纲讨论的还有孙家圻、孙梅生、高扬、华成英、唐竞新、徐振英和胡尔珊等同志。其中孙家圻和孙梅生同志为本教程模拟电路部分提供了一些补充习题。武绪廉同志对书稿从内容到文字提出了许多改进意见，李桂莲同志协助绘制了部分插图。

在本教程编写过程中，主审单位北京工业大学自动化系陆培新副教授和虞光楣副教授认真审阅了全部初稿，指出了初稿中的错误和不妥之处，并提出了详细的修改意见。中央广播电视大学电子组的全体同志参加了教材大纲的讨论，提出了许多宝贵意见。谨对以上同志们的指导和帮助，表示诚挚的谢意。

由于我们水平有限，加之时间过于仓促，书中一定存在不少错误和不妥之处，敬请各方面的读者给予批评指正，以便今后不断改进。

清华大学自动化系电子学教研组

一九八五年春

模拟电子技术基础简明教程符号说明

一、基本符号

1. 电流和电压

i, v	电流、电压瞬时值
I, V	直流电流、电压值, 正弦电流、电压有效值, 直流电流、电压增量值
\dot{I}, \dot{V}	正弦电流、电压复数量
I_m, V_m	正弦电流、电压幅值
I_{\max}, V_{\max}	电流、电压最大值
I_{\min}, V_{\min}	电流、电压最小值
I_Q, V_Q	电流、电压静态值
E	直流电源电压
i_B	基极电流总瞬时值
i_b	基极电流交流分量瞬时值
I_B	基极直流电流
I_{BQ}	基极静态电流
I_b	基极正弦电流有效值, 基极直流电流增量值
E_B	基极回路中的直流电源电压
V_i	正弦输入电压有效值, 直流输入电压增量值
V_f	正弦反馈电压有效值, 直流反馈电压增量值
V_o	正弦输出电压有效值, 直流输出电压增量值
i_o, v_o	整流电路输出电流、输出电压瞬时值
\bar{i}_o, \bar{v}_o	整流电路输出电流、输出电压平均值
\bar{v}_i	滤波电路或稳压电路输入电压平均值

V_{o1m}	整流或滤波电路输出电压基波最大值
i_D, v_D	整流二极管电流、电压瞬时值
\bar{i}_D	整流二极管电流平均值
V_{RM}	整流二极管反向峰值电压

2. 功率

p	瞬时功率
P	功率通用符号
P_E	电源消耗的功率
P_o	输出交变功率
P_{omax}	最大输出功率

3. 频率

f	频率通用符号
ω	角频率通用符号
f_{bw}	通频带
f_{bwf}	有反馈时的通频带
f_h	放大电路的上限(下降 3dB)频率
f_{h1}	多级放大电路第一级的上限频率
f_{hn}	多级放大电路第 n 级的上限频率
f_l	放大电路的下限(下降 3dB)频率
f_{hf}	放大电路有反馈时的上限频率
f_{lf}	放大电路有反馈时的下限频率
f_o	振荡频率
f_a	共基接法下三极管电流放大系数的上限频率
f_β	共射接法下三极管电流放大系数的上限频率
f_T	三极管的特征频率, 即共射接法下三极管电流放大系数为 1 时的频率

4. 电阻、电导、电容、电感

r	微变电阻的通用符号
R	固定电阻的通用符号
g	微变电导的通用符号
G	固定电导的通用符号
r_i	输入电阻
r_{if}	有反馈时的输入电阻
r_o	放大电路输出电阻, 稳压电路内阻
r_{of}	有反馈时的输出电阻
R_b	接到基极的固定电阻
R_c	接到集电极的固定电阻, 余类推
R'_c	R_c 与 r_{ce} 的并联
R_L	负载电阻
R'_L	R_L 与 R_c 的并联
R_s	信号源内阻
R_s	接到场效应管源极的固定电阻
C	电容的通用符号
C_D	扩散电容
C_e	发射极旁路电容
C_D	结电容, 势垒电容
C_π	混合 π 等效电路中集电结的等效电容
C_n	混合 π 等效电路中发射结的等效电容
L	电感的通用符号

5. 增益或放大倍数

A	增益或放大倍数的通用符号
A_i	电流放大倍数的通用符号
A_v	电压放大倍数的通用符号 $= V_o/V_i$
A_{vf}	有反馈时的电压放大倍数

A_{vh}	高频电压放大倍数
A_{vl}	低频电压放大倍数
A_{vm}, A_m	中频电压放大倍数
A_{vo}	无反馈时的电压放大倍数
A_{vs}	考虑信号内阻时的电压放大倍数 = V_o/V_i
A_{vsf}	有反馈又考虑信号内阻时的电压放大倍数

在用方块图表示的反馈放大电路中

A_{ii}	基本放大电路的开环电流放大系数，其定义为输出电流与输入电流之比 = I'_o/I'_i
A_{iv}	基本放大电路的开环转移电导，其定义为输出电流与输入电压之比 = I'_o/V'_i
$A_{i\prime o}$	基本放大电路输出端短路(即 $R'_L=0$)时的 A_{iv}
A_{vi}	基本放大电路的开环转移电阻，其定义为输出电压与输入电流之比 = V'_o/I'_i
$A_{v\prime o}$	负载开路(即 $R_L=\infty$)时的 A_{vi}
A_{vv}	基本放大电路的开环电压放大倍数，其定义为输出电压与输入电压之比 = V'_o/V'_i

其中的 I'_i 、 I'_o 、 V'_i 、 V'_o 分别为单向化等效网络中基本放大电路的输入电流、输出电流、输入电压、输出电压。

F_{ii}	反馈网络的反馈电流与输出电流之比 = I'_f/I'_o
F_{iv}	反馈网络的反馈电流与输出电压之比 = I'_f/V'_o
F_{vi}	反馈网络的反馈电压与输出电流之比 = V'_f/I'_o
F_{vv}	反馈网络的反馈电压与输出电压之比 = V'_f/V'_o

二、器件参数符号

b	基极
c	集电极
e	发射极
g_m	跨导
$h_{11}, h_{12}, h_{21}, h_{22}$	三极管的混合参数(如无其他下角注则为共射接法)
$r_{bb'}$	基区体电阻
r_{be}	共射接法下基射极之间的微变电阻
$r_{b'e}$	发射结的微变电阻
r_{ce}	共射接法下集射极之间的微变电阻
r_D	场效应管漏极微变电阻
r_e	发射结微变电阻和发射区体电阻之和
r_{GS}	场效应管栅源之间的微变电阻
r_z	稳压管的微变电阻
A	晶闸管阳极
BV_{EBO}	集电极开路时 $e-b$ 间的击穿电压
BV_{CBO}	基极开路时 $c-e$ 间的击穿电压
BV_{DS}	场效应管漏源间的击穿电压
C	晶闸管阴极
D	二极管、场效应管的漏极
D_z	稳压管
G	场效应管的栅极、晶闸管控制极
I_{CBO}	发射极开路时 $c-b$ 间的反向饱和电流
I_{CBO}	基极开路时 $c-e$ 间的穿透电流
I_{CM}	集电极最大允许电流
I_D	二极管电流、漏极电流

I_{BSS}	转移特性上 $V_{GS}=0$ 时的 I_D
I_S	二极管的反向饱和电流
I_Z	稳压管电流
N	电子型半导体
P	空穴型半导体
P_{CM}	集电极最大允许耗散功率
P_{DM}	漏极最大允许耗散功率
S	场效应管的源极
T	晶体三极管、场效应管、晶闸管、单结晶体管
V_P	场效应管的夹断电压、单结晶体管的峰点电压
V_T	增强型场效应管的开启电压、温度的电压当量
V_V	单结晶体管的谷点电压
V_Z	稳压管的稳定电压
α	共基接法下集电极电流的变化量与发射极电流的变化量之比、即 $\alpha = \Delta I_C / \Delta I_E$
$\bar{\alpha}$	从发射极到达集电极的载流子的百分数
β	共射接法下集电极电流的变化量与基极电流的变化量之比、即 $\beta = \Delta I_C / \Delta I_B$
$\bar{\beta}$	共射接法下、不考虑穿透电流时、 I_C 与 I_B 的关系
η	单晶体管的分压比

三、其他符号

CMR	用分贝表示的共模抑制比 = $20 \lg \text{CMRR}$
CMRR	共模抑制比
K	绝对温度

L_A	反馈放大器中的 A 用对数表示, 以 dB 计
N_1	变压器原边绕组的匝数
N_2	变压器副边绕组的匝数
Q	静态工作点、 LC 回路的品质因数
S	整流电路中的脉动系数
S_r	稳压电路的稳压系数
T	周期、温度
Tr	变压器
α	可控整流电路中晶闸管的控制角
θ	可控整流电路中晶闸管的导电角
τ	时间常数
φ	相角差
η	效率

目 录

第一章 基本放大电路和多级放大电路	1
1.1 概述	2
1.1.1 放大电路的特点	2
1.1.2 放大电路中三极管的工作特点	3
1.2 基本放大电路的工作原理	6
1.2.1 基本放大电路的组成原则	7
1.2.2 静态工作点的设置	8
1.2.3 放大电路的性能指标	11
小结	13
1.3 放大电路的基本分析方法	14
1.3.1 交流通路和直流通路	14
1.3.2 静态工作点的估算	15
1.3.3 图解法	17
1.3.4 微变等效电路法	26
小结	39
1.4 工作点的稳定问题	40
1.4.1 温度变化对静态工作点的影响	40
1.4.2 基本工作点稳定电路	42
1.5 基本放大电路的三种组态	45
1.5.1 共基极基本放大电路	46
1.5.2 共集电极基本放大电路	48
1.5.3 三种基本放大电路的比较	51
1.6 场效应管基本放大电路	54
1.6.1 场效应管放大电路的特点和组成	54
1.6.2 静态工作点的分析	56
1.6.3 场效应管的微变等效电路及参数	61

1.7 多级放大电路	66
1.7.1 多级放大电路的耦合方式	66
一、阻容耦合	66
二、直接耦合	67
三、变压器耦合	71
1.7.2 多级放大电路的电压放大倍数和输入、输出电阻	74
1.8 放大电路的频率响应	77
1.8.1 频率响应的一般概念	77
1.8.2 共射基本放大电路的频率响应	79
1.8.3 多级放大电路的频率响应	100
本章小结	104
参考文献	107
复习思考题	107
练习题	109
第二章 放大电路中的反馈	123
2.1 反馈的基本概念	123
2.1.1 反馈概念的建立	123
2.1.2 反馈的分类	125
2.1.3 反馈的四种组态及其方框图表示法	128
一、电压串联式	129
二、电流串联式	131
三、电压并联式	133
四、电流并联式	136
2.1.4 反馈的一般表达式	138
2.2 负反馈对放大电路工作性能的影响	141
2.2.1 提高放大倍数的稳定性	142
2.2.2 减小非线性失真和抑制干扰	143
2.2.3 扩展频带	146
2.2.4 改变输入电阻和输出电阻	149
2.3 反馈放大电路的分析方法	159
2.3.1 深负反馈放大电路的近似估算	160

2.3.2 利用方框图的计算法	169
2.4 负反馈放大电路的自激振荡	177
2.4.1 产生自激振荡的条件	178
2.4.2 常用的校正措施	183
本章小结	190
参考文献	192
复习思考题	193
练习题	194
第三章 正弦波振荡电路	207
3.1 产生正弦波振荡的条件	207
3.2 正弦波振荡电路的组成部分和分析方法	210
3.3 RC 正弦波振荡电路	211
3.3.1 串并网络振荡电路	211
3.3.2 其他形式的 RC 振荡电路	219
3.4 LC 正弦波振荡电路	224
3.4.1 LC 并联电路的特性	224
3.4.2 变压器反馈式振荡电路	227
3.4.3 其他形式的 LC 振荡电路	228
一、电感反馈式(电感三点式)振荡电路	229
二、电容反馈式(电容三点式)振荡电路	231
三、电容反馈式改进型振荡电路	232
3.5 石英晶体振荡器	233
3.5.1 石英晶体的基本特性和等效电路	236
3.5.2 石英晶体振荡电路	238
本章小结	241
参考文献	243
复习思考题	243
练习题	244
第四章 直接耦合放大电路和集成运算放大器	251
4.1 直接耦合放大电路及其零点漂移现象	251

4.1.1	直接耦合放大电路的特点	251
4.1.2	产生零点漂移的主要因素	255
4.1.3	抑制零点漂移的措施	257
4.2	差动式放大电路	258
4.2.1	基本形式	258
4.2.2	长尾电路	262
4.2.3	恒流源电路	266
4.2.4	差动放大电路的几种接法	269
4.3	直接耦合式功率放大器	275
4.3.1	对功率放大电路的一般要求	275
4.3.2	互补对称式功率放大电路	276
	一、OTL 乙类互补对称输出级	276
	二、OTL 甲乙类互补对称输出级	277
	三、OCL 互补对称输出级	278
4.3.3	采用复合管的功率输出级	279
	一、复合管组成的互补输出级	279
	二、复合管组成的准互补输出级	280
4.3.4	功率放大实际电路	281
	小结	288
4.4	集成运放的特点和基本技术指标	290
4.4.1	集成运放的特点	291
4.4.2	集成运放的基本技术指标	292
4.5	集成运放的基本组成部分	298
4.5.1	偏置电路	298
4.5.2	输入级	305
4.5.3	中间级	307
4.5.4	输出级和过载保护	309
	小结	310
4.5.5	CMOS 集成运放	311
4.6	各类集成运放的特点与选择方法	314
4.6.1	各类集成运放的特点及主要技术指标	314
4.6.2	集成运放的选择	317

小结	320
4.7 集成运放的应用	321
4.7.1 概述	321
4.7.2 在信号运算方面的应用	325
一、比例运算放大电路	326
二、求和运算	340
三、积分和微分运算	343
四、对数和反对数运算	350
五、乘法和除法运算	354
4.7.3 在信号处理方面的应用	355
一、信号频率的有源滤波	356
二、信号幅度的采样保持	367
三、信号幅度的比较	370
四、信号幅度的选择	374
4.7.4 在波形发生方面的应用	375
一、产生正弦波的电路	376
二、产生矩形波的电路	379
三、产生锯齿波的电路	380
4.7.5 运放应用中的几个具体问题	382
一、集成运放参数的测试	383
二、集成运放性能的扩展	388
三、使用时可能出现的异常现象	392
四、集成运放的保护	397
本章小结	401
参考文献	404
复习思考题	405
练习题	407
附录	426
一、国标通用型集成运放的主要电参数(典型值)	426
二、国标特殊型集成运放的主要电参数(典型值)	427
三、集成运放电参数符号对照表	427
四、集成运放型号对照表	602

第五章 直流电源	428
5.1 直流电源的组成	428
5.2 单相整流电路	430
5.2.1 单相半波整流电路	430
5.2.2 单相全波整流电路	434
5.2.3 单相桥式整流电路	437
小结	439
5.3 基本滤波电路	440
5.3.1 电容滤波电路	441
5.3.2 $RC-\pi$ 型滤波电路	447
5.3.3 电感滤波电路和 LC 滤波电路	451
5.3.4 $LC-\pi$ 型滤波电路	454
小结	455
5.4 倍压整流电路	457
5.4.1 二倍压整流电路	457
5.4.2 多倍压整流电路	458
5.5 硅稳压管稳压电路	459
5.5.1 稳压电路的主要指标	459
5.5.2 硅稳压管的伏安特性	460
5.5.3 硅稳压管稳压电路	461
5.6 串联型直流稳压电路	466
5.6.1 串联型直流稳压电路的基本形式	466
5.6.2 具有放大环节的串联型稳压电路	468
5.6.3 采用辅助电源和差动放大的稳压电路	471
5.6.4 采用复合调整管的稳压电路	472
5.6.5 稳压电源的过载保护	474
5.6.6 串联型稳压电源举例	477
5.7 集成化稳压电源	481
5.7.1 5G14 的电路组成和工作原理	481
5.7.2 5G14 的基本接法和参数	484
5.7.3 5G14 扩大输出电流的电路	485