

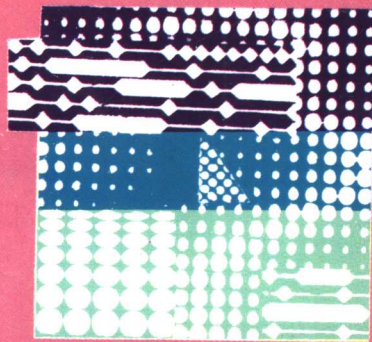


中央广播电视大学教材

模拟电子电路

MO NI DIAN ZI
DIAN LU

主编 杨素行



中央广播电视大学出版社

模拟电子电路

杨素行 主编

中央  社

(京)新登字 163 号

图书在版编目(CIP)数据

模拟电子电路/杨素行主编. —北京:中央广播电视大学出版社,1994.11

ISBN 7-304-00840-7

I. 模… II. 杨… III. 模拟电路:电子电路-电视大学-教材 IV. TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字(94)第 15208 号

模拟电子电路

杨素行 主编

中央广播电视大学出版社出版

社址:北京市复兴门内大街 160 号 邮编:100031

北京市德美印刷厂印刷 新华书店北京发行所发行

开本 787×1092 1/16 印张:32.25 千字 739

1994 年 11 月第 1 版 2003 年 6 月第 14 次印刷

印数:101501-106500

定价:34.10 元

ISBN 7-304-00840-7/TN·17

前 言

本书是参照《高等工程专科学校电子技术基础课程教学基本要求》，根据中央广播电视大学《电子技术基础》教学大纲进行编写的，可以作为电气、自动化、电子类各专业学习电子技术基础课程模拟电路部分的教材，也可供从事电子技术方面工作的工程技术人员参考。

在编写本书的过程中，认真贯彻了以下的指导思想：

首先，保证基本内容。这是由课程的性质决定的。电子技术基础课程是有关专业在电子技术方面入门性质的重要技术基础课，课程的任务是使学生获得电子技术方面的基本理论、基本知识和基本技能，培养学生分析问题和解决问题的能力，并为学习后续课程和今后在专业中应用电子技术打好基础。所以在本教材中十分重视讲清基本概念、基本原理和基本分析方法。

第二，力求加强新技术。由于电子技术的飞速发展，使新器件、新技术、新的应用领域等等层出不穷、日新月异。为了适应这种形势，在教材中尽量压缩阻容耦合、分立元件放大电路等比较陈旧的内容，加强集成运算放大器等模拟集成电路的应用。有关集成放大电路的内容从本书第二章就开始介绍，以便于随后的负反馈放大电路、运算电路、波形发生电路以及直流电源等内容能够尽量结合集成电路进行。在本书中还适当介绍了模拟乘法器、集成电压比较器、集成功率放大器、集成稳压器以及开关型稳压电路等内容。

第三，注重实践。电子技术是一门实践性很强的课程，而且，对于高等工程专科来说，培养目标的重点是面向基层，工作在生产第一线的应用型高级专门人才，因此，必须强调实践的重要性。在本教材中，阐明电路的原理时，着重讲清物理概念，删除繁琐的理论计算和推导，介绍比较实用的工程计算和近似估算方法；对于各种模拟集成电路，着重介绍电路的性能特点和正确使用方法，至于电路内部比较复杂的结构，只要求一般了解；结合各章内容，尽量介绍实际的应用电路；在最后一章，结合几个实用电路进行读图练习，培养初步的读图能力；有些章节，还以附录的形式给出实际器件的型号、性能及技术指标等等。

第四，便于自学。本书可供全日制普通高等专科学校、电视大学、职工大学、成人高等教育等有关课程作为教材。为了适应多种教学形式的需要，在编写过程中，尽量注意深入浅出，说理清楚，力求做到通俗易懂，便于自学。

本书内容包括放大电路的基本原理和分析方法、集成放大电路基础、负反馈放大电路、模拟信号运算电路、信号处理电路、波形发生电路、功率放大电路、模-数和数-模转换电路、直流电源和读图练习等共十章。每章开始均有内容提要，后面有本章小结。为了帮助读者进行复习、自我考核以及掌握基本要求，每章给出了若干自我检测题。各章最后的习题与思考题，大多数体现了教学的基本要求，也有少数内容比较深入，难度稍大的习题。

教材中带‘*’号的章节属于比较深入的内容，由于学时的限制，不列为教学的基本内

容，供读者自学时参考。

本书第一至第五章由杨素行编写，第六至第十章由任为民编写。杨素行担任主编，负责各章内容的修改与最后定稿。沈雅芬、郭淑珍、曹益政参加了教材大纲和各章内容的讨论。沈雅芬还协助编者完成了大量细致、具体的工作。

在本书编写过程中，清华大学童诗白教授，北京邮电学院谢沅清教授，北京工业大学陆培新教授，清华大学钱淑英副教授，中央广播电视大学牛振冬副校长，中央广播电视大学电气工程系李立群系主任，山东广播电视大学白衡教授，大连广播电视大学马逢援副教授，高等教育出版社李永和编审、姚玉洁编审，中央广播电视大学出版社曹葆华副编审等对本教材的大纲和书稿进行了认真的审定和讨论，提出了许多宝贵意见。贵州广播电视大学魏春珍副教授，杭州广播电视大学朱镇华副教授也多次参加了大纲和教材的讨论。对以上专家、领导们的指导和帮助，谨致深切的谢意。

由于编者水平的限制，以及时间比较仓促，书中必定存在不少错误和不妥之处，真诚希望读者批评指正。

编者

1994年3月

本书常用文字符号说明

本书所用文字符号尽量与国标一致。通常一个文字符号包括两部分：基本符号和下标。基本符号大都为一个字母（少数情况有多个字母），下标可由一个或多个字母组成。当基本符号或下标分别采用大写或小写时，各自表示不同的含义，一般规定如下：

(1) 电流和电压

- I_B 、 U_{BE} 大写字母、大写下标表示直流量
 I_b 、 U_{be} 大写字母、小写下标表示交流有效值
 I_B 、 U_{be} 大写字母上面加点、小写下标表示正弦复数量
 i_B 、 u_{BE} 小写字母、大写下标表示总瞬时值
 i_b 、 u_{be} 小写字母、小写下标表示交流分量瞬时值

(2) 直流电源电压

- V_{CC} 双极型三极管集电极直流电源电压
 V_{BB} 双极型三极管基极直流电源电压
 V_{EE} 双极型三极管发射极直流电源电压
 V_{DD} 场效应管漏极直流电源电压
 V_{GG} 场效应管栅极直流电源电压
 V_{SS} 场效应管源极直流电源电压

(3) 电阻

- R 大写字母表示电路中外接的电阻或电路的等效电阻
 r 小写字母表示器件的等效电阻

一、基本符号

1. 电流和电压

- I_i 、 U_i 输入电流、输入电压
 I_i' 、 U_i' 净输入电流、净输入电压
 I_o 、 U_o 输出电流、输出电压
 $U_{o(AV)}$ 输出电压平均值
 I_f 、 U_f 反馈电流、反馈电压
 I_Q 、 U_Q 静态电流、静态电压
 U_R 参考电压
 U_S 信号源电压

U_T	温度的电压当量
I_+ 、 U_+	集成运放同相输入端的电流、电压
I_- 、 U_-	集成运放反相输入端的电流、电压
u_s	采样信号电压
2. 功率	
P_o	输出交变功率
P_{om}	输出交变功率最大值
P_V	电源提供的直流功率
3. 频率	
f_{bw}	通频带
f_H	放大电路的上限（-3dB）频率
f_L	放大电路的下限（-3dB）频率
f_s	采样信号频率
f_0	振荡频率、谐振频率
ω	角频率的通用符号
4. 电阻、电容、电感、阻抗	
R_i 、 R_o	电路的输入电阻、输出电阻
R_{if} 、 R_{of}	有反馈时电路的输入电阻、输出电阻
R_L	负载电阻
R_s	信号源内阻
C	电容的通用符号
L	电感的通用符号
X	电抗的通用符号
Z	阻抗的通用符号
5. 增益或放大倍数、反馈系数	
A	增益或放大倍数的通用符号
A_c	共模电压放大倍数
A_d	差模电压放大倍数
A_i	电流放大倍数
A_u	电压放大倍数
A_{uf}	有反馈时的电压放大倍数
A_{us}	考虑信号源内阻时的电压放大倍数
F	反馈系数的通用符号

二、器件符号

1. 器件及引脚名称

A	晶闸管的阳极
C	晶闸管的阴极
D	二极管, 场效应管的漏极
Dz	稳压管
F	触发器
G	门电路, 场效应管的栅极, 晶闸管的控制极
S	场效应管的源极
T	双极型三极管, 场效应管, 晶闸管, 单结晶体管
ADC	模数转换器
DAC	数模转换器
b	双极型三极管的基极
c	双极型三极管的集电极
e	双极型三极管的发射极

2. 器件参数

A_{od}	集成运放的开环差模电压增益
$C_{b'c}$	集电结等效电容
$C_{b'e}$	发射结等效电容
I_{CBO}	集电极-基极之间的反向饱和电流
I_{CEO}	集电极-发射极之间的穿透电流
I_{CM}	集电极最大允许电流
$I_{D(AV)}$	整流二极管平均电流
I_{GT}	晶闸管控制极触发电流
I_H	晶闸管维持电流
I_{IB}	集成运放输入偏置电流
I_{IO}	集成运放输入失调电流
I_P	单结晶体管峰点电流
I_S	二极管反向饱和电流
I_T	晶闸管额定通态平均电流
I_V	单结晶体管谷点电流
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
R_{id}	集成运放差模输入电阻
S_R	集成运放转换速率
U_{BO}	晶闸管正向转折电压
$U_{(BR)CBO}$	发射极开路时集电极-基极之间的反向击穿电压

$U_{(BR)CEO}$	基极开路时集电极-发射极之间的反向击穿电压
$U_{(BR)EBO}$	集电极开路时发射极-基极之间的反向击穿电压
U_{CES}	集电极-发射极之间的饱和管压降
U_{DRM}	晶闸管断态重复峰值电压
U_{GT}	晶闸管控制极触发电压
U_{lcm}	集成运放最大共模输入电压
U_{ldm}	集成运放最大差模输入电压
U_{IO}	集成运放输入失调电压
U_P	单结晶体管峰点电压
U_{RRM}	晶闸管反向重复峰值电压
U_T	晶闸管额定通态平均电压
U_{TN}	N 沟道增强型 MOS 场效应管的开启电压
U_V	单结晶体管谷点电压
f_C	集成运放单位增益带宽
f_T	双极型三极管特征频率
f_α	共基截止频率
f_β	共射截止频率
g_m	跨导
$r_{bb'}$	基区体电阻
$r_{b'e}$	发射结微变等效电阻
$r_{b'e}$	共射接法下基极-发射极之间的微变等效电阻
r_{ce}	共射接法下集电极-发射极之间的微变等效电阻
r_{DS}	场效应管漏极-源极之间的微变等效电阻。
r_{GS}	场效应管栅极-源极之间的微变等效电阻
α	共基电流放大系数
$\bar{\alpha}$	共基直流电流放大系数
α_{IIO}	集成运放输入失调电流温漂
α_{UIO}	集成运放输入失调电压温漂
β	共射电流放大系数
$\bar{\beta}$	共射直流电流放大系数
η	单结晶体管分压比

三、其他符号

D	非线性失真系数
K	绝对温度
K_{CMR}	共模抑制比

M	互感系数
N_B	二进制数字量
Q	品质因数
S	整流电路的脉动系数
S_r	稳压系数
T	周期, 温度
CP	时钟脉冲
Δ	最小量化单位
α	可控整流电路中晶闸管的控制角
η	效率
θ	可控整流电路中晶闸管的导通角
τ	时间常数
φ	相位角

目 录

本书常用文字符号说明	(1)
绪论	(1)
0.1 模拟电路与数字电路的区别	(1)
0.2 三极管的放大特性	(2)
第一章 放大电路的基本原理和分析方法	(9)
1.1 概述	(9)
1.2 单管共射放大电路	(11)
1.2.1 单管共射放大电路的组成	(11)
1.2.2 单管共射放大电路的放大原理	(11)
1.3 放大电路的主要技术指标	(14)
1.4 放大电路的基本分析方法	(17)
1.4.1 直流通路与交流通路	(18)
1.4.2 图解法	(20)
1.4.3 微变等效电路法	(36)
1.5 静态工作点的稳定问题	(47)
1.5.1 温度对静态工作点的影响	(47)
1.5.2 分压式静态工作点稳定电路	(48)
1.6 单管放大电路的三种组态	(53)
1.6.1 共集电极放大电路	(53)
1.6.2 共基极放大电路	(60)
1.7 场效应管放大电路	(67)
1.7.1 共源极放大电路	(69)
* 1.7.2 分压-自偏压式共源极放大电路	(73)
1.7.3 共漏极放大电路	(77)
1.8 放大电路的频率响应	(79)
1.8.1 频率响应的一般概念	(80)
1.8.2 三极管的频率参数	(86)
1.8.3 单管共射放大电路的频率响应	(89)
1.9 多级放大电路	(99)
1.9.1 多级放大电路的耦合方式	(100)
1.9.2 多级放大电路的电压放大倍数和输入、输出电阻	(105)

1.9.3 多级放大电路的频率响应	(108)
本章小结	(110)
自我检测题	(111)
习题与思考题	(115)
第二章 集成放大电路基础	(128)
2.1 概述	(128)
2.2 集成运放的基本组成单元	(130)
2.2.1 偏置电路	(131)
2.2.2 差动放大输入级	(133)
2.2.3 中间级	(151)
2.2.4 输出级	(155)
2.3 集成运放的主要技术指标	(160)
2.4 集成运放的典型电路	(162)
2.4.1 F007	(162)
2.4.2 C14573	(166)
2.5 各类集成运放的特点和性能比较	(170)
2.6 集成运放使用注意事项	(173)
2.6.1 集成运放参数的测试	(173)
2.6.2 异常现象的分析和排除	(173)
2.6.3 集成运放的保护	(174)
本章小结	(175)
自我检测题	(176)
习题与思考题	(177)
第三章 负反馈放大电路	(184)
3.1 概述	(184)
3.2 反馈的分类和负反馈的四种组态	(185)
3.2.1 反馈的分类	(185)
3.2.2 负反馈的四种组态	(189)
3.3 反馈的一般表示法	(195)
3.4 负反馈对放大电路性能的影响	(197)
3.4.1 提高放大倍数的稳定性	(197)
3.4.2 改善非线性失真以及抑制干扰和噪声	(199)
3.4.3 展宽频带	(200)
3.4.4 改变输入电阻和输出电阻	(202)
3.5 负反馈放大电路的分析计算	(207)
3.5.1 利用关系式 $A_f \approx \frac{1}{F}$ 进行近似估算	(207)

3.5.2	利用关系式 $X_i \approx X_i$ 进行近似估算	(209)
3.6	负反馈放大电路的自激振荡及消振措施	(212)
3.6.1	负反馈放大电路的自激振荡	(213)
3.6.2	常用的校正措施	(216)
3.7	负反馈放大电路应用举例	(221)
	本章小结	(222)
	自我检测题	(223)
	习题与思考题	(225)
第四章	模拟信号运算电路	(235)
4.1	概述	(235)
4.2	比例电路	(238)
4.2.1	反相输入比例电路	(238)
4.2.2	同相输入比例电路	(240)
4.2.3	差动输入比例电路	(242)
4.2.4	实用电路举例	(245)
4.3	求和电路	(248)
4.3.1	反相求和电路	(249)
4.3.2	同相求和电路	(250)
4.4	积分与微分电路	(253)
4.4.1	积分电路	(253)
4.4.2	微分电路	(259)
* 4.5	对数与指数电路	(260)
4.5.1	对数电路	(261)
4.5.2	指数电路	(262)
4.6	模拟乘法器	(262)
4.6.1	对数式乘法器	(263)
4.6.2	变跨导式模拟乘法器	(264)
4.6.3	应用举例	(266)
	本章小结	(269)
	自我检测题	(271)
	习题与思考题	(274)
第五章	信号处理电路	(281)
5.1	有源滤波器	(281)
5.1.1	低通滤波器(LPF)	(282)
5.1.2	高通滤波器(HPF)	(287)
5.1.3	带通滤波器(BPF)	(288)

5.1.4 带阻滤波器(BEF)	(290)
5.2 电压比较器	(292)
5.2.1 过零比较器	(293)
5.2.2 单限比较器	(295)
5.2.3 滞回比较器	(296)
5.2.4 双限比较器	(300)
5.2.5 集成电压比较器	(301)
本章小结	(303)
自我检测题	(304)
习题与思考题	(308)
第六章 波形发生电路	(315)
6.1 概述	(315)
6.1.1 产生正弦波振荡的条件	(315)
6.1.2 正弦波振荡电路的组成和分析方法	(317)
6.2 <i>RC</i> 正弦波振荡电路	(318)
6.2.1 <i>RC</i> 文氏桥式振荡电路	(318)
6.2.2 <i>RC</i> 正弦波振荡电路的特点	(322)
6.3 <i>LC</i> 正弦波振荡电路	(323)
6.3.1 <i>LC</i> 并联回路的频率特性	(324)
6.3.2 变压器反馈式振荡电路	(326)
6.3.3 其他形式的 <i>LC</i> 振荡电路	(327)
6.4 石英晶体振荡电路	(333)
6.4.1 石英晶体的特性和等效电路	(333)
6.4.2 石英晶体正弦波振荡电路	(335)
6.5 非正弦波振荡电路	(335)
6.5.1 矩形波发生电路	(335)
6.5.2 三角波和锯齿波发生电路	(339)
* 6.5.3 集成多功能信号发生器	(342)
本章小结	(344)
自我检测题	(345)
习题与思考题	(348)
第七章 功率放大电路	(356)
7.1 概述	(356)
7.1.1 功率放大电路的功能和特点	(356)
7.1.2 提高输出功率和效率的途径	(357)
7.2 互补对称功率放大电路	(361)

7.2.1	OTL 乙类互补对称电路	(361)
7.2.2	OTL 甲乙类互补对称电路	(363)
7.2.3	OCL 互补对称电路	(365)
7.3	功率放大电路实例	(367)
7.3.1	OTL 互补对称功率放大器	(367)
7.3.2	OCL 互补对称功率放大器	(369)
7.4	集成功率放大器	(371)
7.4.1	8FY386 集成功率放大器	(371)
7.4.2	具有大功率输出的集成功率放大器	(373)
	本章小结	(375)
	自我检测题	(376)
	习题与思考题	(378)
第八章	模-数与数-模转换电路	(383)
8.1	概述	(383)
8.1.1	模-数 (A/D) 和数-模 (D/A) 转换器	(383)
8.1.2	A/D、D/A 转换器的主要性能指标和分类	(384)
8.2	D/A 转换器	(385)
8.2.1	D/A 转换的基本方法	(385)
8.2.2	倒 T 型电阻网络 D/A 转换器	(386)
8.2.3	实际的集成 D/A 转换器	(387)
8.2.4	D/A 转换器的主要技术指标	(390)
8.2.5	D/A 转换器的使用方法	(391)
8.3	A/D 转换器	(393)
8.3.1	A/D 转换的一般步骤	(393)
8.3.2	采样-保持电路	(396)
8.3.3	逐次渐近型 A/D 转换器	(398)
* 8.3.4	并联比较型 A/D 转换器	(404)
8.3.5	双积分型 A/D 转换器	(405)
8.3.6	A/D 转换器的主要技术指标	(411)
	本章小结	(412)
	自我检测题	(413)
	习题与思考题	(414)
第九章	直流电源	(418)
9.1	概述	(418)
9.2	单相整流滤波电路	(419)
9.2.1	单相桥式整流电路	(419)

9.2.2 滤波电路	(422)
* 9.2.3 倍压整流电路	(427)
9.3 稳压电路	(428)
9.3.1 硅稳压管稳压电路	(428)
9.3.2 串联型直流稳压电路	(431)
9.3.3 集成稳压电路	(434)
* 9.4 开关型稳压电路	(437)
9.4.1 串联开关型稳压电路	(437)
9.4.2 并联开关型稳压电路	(440)
* 9.5 可控整流电路	(443)
9.5.1 晶闸管的工作原理	(443)
9.5.2 单相桥式可控整流电路	(446)
9.5.3 单结管触发电路	(448)
本章小结	(451)
自我检测题	(452)
习题与思考题	(453)
第十章 读图练习	(460)
10.1 概述	(460)
10.2 读图的一般步骤	(460)
10.3 读图练习举例	(461)
10.3.1 双工对讲机电路	(461)
10.3.2 热敏电阻精密控制加热器	(463)
10.3.3 流量及转速测量仪电路	(465)
10.3.4 高保真扩音机电路	(469)
10.3.5 WY-302A 型直流稳压电源	(473)
附录	(477)
第二章附录	(477)
附录 2A 集成运算放大器国内外型号对照表	(477)
第七章附录	(485)
附录 7A 集成功率放大器简介	(485)
第八章附录	(486)
附录 8A 其他型号的 D/A 转换器	(486)
附录 8B 其他型号的采样-保持电路	(490)
附录 8C 其他型号的 A/D 转换器	(492)
参考文献	(497)

绪 论

电子技术课程的内容包括两大部分：数字电子电路（简称数字电路）部分和模拟电子电路（简称模拟电路）部分。这两大部分之间既有联系，又有区别。例如，组成数字电路和模拟电路最基本的元件都是半导体二极管、三极管（包括双极型三极管 BJT 和场效应三极管 FET）等，这是两种电子电路的共同之处。但是，二者之间又有明显的区别和各自的特点。

0.1 模拟电路与数字电路的区别

模拟电路与数字电路相比，主要有以下几点不同：

1. 电路的输入、输出信号的类型不同

数字电路的工作信号是二进制的数字量“1”或“0”，信号的幅度只有高电平或低电平两种状态，它们在数值上是离散的；而模拟电路的工作信号通常是与某些物理量对应的模拟量，例如正弦波信号，或者温度、压力等非电量通过传感器以后得到的相应的缓慢变化信号等等，它们在数值上是连续的。

2. 对电路的要求不同

对数字电路的要求是在输入与输出的数字量信号之间实现一定的逻辑关系，所以有时也将数字电路称为逻辑电路；而对模拟电路的要求通常是实现模拟信号的放大、变换、产生等等。

在数字电路中，当由于电路内部或外部的原因而使输出信号波动时，只要波动的幅度不超出一定的范围，不致改变信号原来“1”或“0”的状态，则不会影响电路的逻辑功能，即电路仍能正常工作。由此可见，数字电路对三极管的参数、电路元件参数、电源电压以及环境温度等的要求，相对来说不十分严格，允许有较大的误差。但是在模拟电路中，模拟信号的任何一个不同的数值，可能对应着某个物理量的各不相同的数值，因此，如果由于一些原因而使输出信号偏离规定的数值，则将使结果产生误差，甚至造成失真。为了保证模拟电路的精度和稳定性，对电路中三极管参数、电路元件、电源电压和环境温度等都提出了更为严格的要求，有时在一些精密的模拟电路中，甚至不得不采用比较复杂的电路结构。

3. 电路中三极管的作用和工作区域不同

在数字电路中，三极管往往相当于一个“开关”，它的作用是使信号“接通”或“断开”，因此，多数情况下三极管工作在截止区或饱和区。但在模拟电路中，三极管通常作为一个“放大元件”，将输入端微弱的模拟信号加以放大，而且要求输出信号如实重现输入信号的波形，尽量减小失真，为此，三极管必须工作在放大区，避免进入截止区或饱和区。

4. 所用的分析方法不同