

模拟 电子 线路



李东林
杨基海
刘同怀

编著



中国科学技术大学出版社

TN710

429124

L73

模拟电子线路

刘同怀 杨基海 李东林 编著



中国科学技术大学出版社

1999·合肥



图书在版编目(CIP)数据

模拟电子线路/刘同怀等编著.-合肥:中国科学技术大学出版社,1999年3月
ISBN 7-312-01055-5

I. 模… II. 刘… III. 模拟电路 IV. TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字(98)第 40837 号

中国科学技术大学出版社出版发行
(安徽省合肥市金寨路 96 号,邮编:230026)
中国科学技术大学印刷厂印刷
全国新华书店经销

开本:787×1092/16 印张:20.25 字数:493 千
1999 年 3 月第 1 版 1999 年 3 月第 1 次印刷
印数:1—4000 册
ISBN 7-312-01055-5/TP·220 定价:25.00 元

DL52/2822
内 容 摘 要

本书系统地介绍模拟电子线路,内容包括线性电路基础、半导体器件、放大电路基础、负反馈放大器、集成运算放大器及其应用、模拟乘法器及其应用、直流电源等。书中着重基本概念、基本原理和基本分析方法的论述,使学生能增强分析问题和解决问题的能力。在内容安排上,增大了模拟集成电路的比重,并介绍了它们多方面的应用。

本书可供高等院校非电类专业作为教材,也可以作为有关工程技术人员的参考书。



前 言

本书是为高等学校非电类专业编写的“模拟电子线路”课程的教材。全书共分十章,主要包括线性电路基础、半导体器件、放大电路基础、负反馈放大器、集成运算放大器及其应用、模拟乘法器及其应用、直流电源等。

随着电子技术的迅速发展,对“模拟电子线路”课程的要求越来越高。鉴于此,本书在内容的选取和安排上,适当减少了分立元件电路方面的内容。对于集成运算放大器及由集成运算放大器组成的各类应用电路方面,则大大加强。同时,还增加了模拟乘法器及模拟乘法器在模拟运算和信号处理等方面的应用,以及有源滤波器、开关电源等方面的内容。

在编写过程中,编者认真总结了多年来的教学实践经验,并学习参考了国内外许多同类教材和有关文献。以培养学生分析问题和解决问题的能力为目标,着重基本概念、基本原理和基本分析处理方法的论述,并注意使学生既能打好基础,又能开阔视野。在文字叙述方面,力求简明扼要、深入浅出、概念清楚、思路明晰。

使用本书的读者不必先修电路分析基础方面的课程。对已修过电路分析基础方面课程的读者,可略去第一章的内容,直接从第二章开始。

本书也可以作为从事电子技术方面工作的工程技术人员的参考用书。

本书第一、二、三、九章由刘同怀编写,第四、六、七章由李东林编写,第五、八、十章由杨基海编写。在编写过程中,得到了中国科技大学电子线路教研室的大力支持和帮助。戴蓓倩教授审阅了本书的编写大纲和部分书稿,提出了许多指导性的意见。陈力生老师、邢根柳老师和周平同学、陈香同学为本书的出版做了许多工作。在此,一并致以衷心的感谢。

由于编者的水平有限,书中难免有许多缺点和错误,恳请广大读者批评和指正。

编 者

一九九八年八月于合肥

目 录

前言	I
1. 线性电路基础	1
1.1 电路与电路模型	1
1.2 电流、电压及其参考方向	1
1.2.1 电流	1
1.2.2 电压	2
1.3 基本电路元件	3
1.3.1 电阻	3
1.3.2 电容	4
1.3.3 电感	5
1.3.4 独立电压源和独立电流源	6
1.3.5 受控电源	7
1.4 基尔霍夫定律	8
1.4.1 基尔霍夫电流定律	8
1.4.2 基尔霍夫电压定律	9
1.5 简单电路	10
1.5.1 等效单口网络的概念	10
1.5.2 实际电源的模型	10
1.5.3 含受控源的单口网络	12
1.6 线性电路的一般分析方法	12
1.6.1 支路电流法	12
1.6.2 回路电流法	14
1.6.3 节点电位法	15
1.7 线性电路的几个定理	18
1.7.1 叠加定理	18
1.7.2 代文宁定理	19
1.7.3 诺顿定理	20
1.7.4 密勒定理	21
1.8 一阶 RC 电路	22
1.8.1 一阶 RC 电路的零输入响应	22
1.8.2 一阶 RC 电路的零状态响应	24
1.8.3 一阶 RC 电路的全响应	25
1.9 正弦稳态分析	25
1.9.1 正弦电压和电流	25

1.9.2	正弦信号激励下线性电路的全响应	26
1.9.3	相量	27
1.9.4	有效值和有效值相量	28
1.9.5	电阻、电容和电感元件伏安关系的相量表示	29
1.9.6	相量模型与正弦稳态电路分析	31
1.9.7	阻抗和导纳的性质	33
1.9.8	正弦稳态功率	35
1.9.9	正弦稳态功率的最大传输	36
1.10	双口网络	37
1.10.1	双口网络的 Y 参数和 Y 参数方程	38
1.10.2	双口网络的 h 参数和 h 参数方程	39
1.10.3	双口网络的等效电路	40
1.10.4	有载双口网络	41
1.11	复频域分析	43
1.11.1	复频域分析法	44
1.11.2	网络函数及其零极点	45
1.11.3	网络频率响应特性	46
1.11.4	波特图	49
	习题	54
2	半导体器件	64
2.1	半导体基础知识	64
2.1.1	本征半导体	64
2.1.2	N 型半导体和 P 型半导体	65
2.1.3	PN 结	66
2.2	半导体二极管	68
2.2.1	二极管的伏安特性	68
2.2.2	二极管的等效电阻	69
2.2.3	二极管模型	69
2.2.4	二极管电路的图解分析	71
2.2.5	解析法分析二极管电路	72
2.2.6	二极管的几个主要参数	73
2.3	硅稳压管	73
2.3.1	稳压管的稳压作用	73
2.3.2	稳压管的主要参数	74
2.3.3	简单稳压管电路	74
2.4	几种特殊二极管	75
2.4.1	变容二极管	75
2.4.2	光敏二极管	75

2.4.3	发光二极管	76
2.4.4	隧道二极管	76
2.4.5	肖特基二极管	76
2.5	双极型晶体管	76
2.5.1	晶体管的结构	77
2.5.2	晶体管的载流子运动情况	77
2.5.3	晶体管电流分配关系	78
2.5.4	晶体管的交流电流放大系数	79
2.5.5	晶体管的共射极特性曲线	80
2.5.6	晶体管的主要参数	81
2.5.7	温度对晶体管特性的影响	82
2.6	场效应管	82
2.6.1	N 沟道增强型 MOS 管	83
2.6.2	N 沟道耗尽型 MOS 管	85
2.6.3	P 沟道 MOS 管	86
2.6.4	结型场效应管	86
2.6.5	场效应管的主要参数	87
2.6.6	场效应管与双极型晶体管的比较	88
	习题	89
3	放大电路基础	92
3.1	单级晶体管共射放大电路	92
3.1.1	单级共射放大电路的组成	92
3.1.2	单级共射放大电路的直流分析	93
3.1.3	共射放大电路的图解法交流分析	95
3.2	放大电路交流分析的等效电路法	97
3.2.1	放大电路的交流通路	97
3.2.2	晶体管的小信号交流模型	98
3.2.3	放大电路的等效电路分析法	100
3.3	工作点稳定的偏置电路	104
3.4	共基放大电路	105
3.5	共集极放大电路	108
3.6	场效应管放大电路	110
3.6.1	场效应管的偏置电路	110
3.6.2	场效应管交流小信号模型	112
3.6.3	共源极放大电路	113
3.6.4	共漏极放大电路	114
3.7	放大电路的频率特性	116
3.7.1	共射放大电路的低频响应特性	116

3.7.2	共射放大电路的高频响应特性	120
3.7.3	共射放大电路的频率响应	122
3.8	多级放大电路	123
3.8.1	级间耦合方式	123
3.8.2	多级放大电路的中频特性	126
3.8.3	多级放大电路的高频响应和低频响应	127
习题		129
4	集成运算放大器	134
4.1	集成电路的特点	134
4.2	参数补偿式集成运算放大器的基本结构	134
4.3	电流源电路	135
4.3.1	基本镜像电流源	135
4.3.2	比例电流源	136
4.3.3	微电流源	136
4.3.4	精密镜像电流源	137
4.4	差动放大电路	138
4.4.1	差动放大电路的直流分析	139
4.4.2	差动放大电路对差模信号的放大作用	140
4.4.3	差动放大电路对共模信号的抑制作用	141
4.4.4	差动放大电路对任意输入信号的作用	143
4.4.5	单端输出的差动放大电路	144
4.4.6	具有恒流源的差动放大电路	145
4.4.7	共集-共基差动放大电路	146
4.5	直流电位移动电路	147
4.6	互补对称功率放大电路	147
4.6.1	互补对称功率放大电路工作原理	148
4.6.2	互补对称功率放大电路的分析	148
4.6.3	乙类推挽功放电路的交越失真	150
4.7	复合管结构	152
4.8	典型集成运算放大器电路举例	153
4.9	集成运算放大器的主要参数	157
4.9.1	输入直流参数	157
4.9.2	差模特性参数	157
4.9.3	共模特性参数	158
4.9.4	其他参数	158
4.10	集成运算放大器的电路模型	159
4.10.1	集成运放的开环电压传输特性	159
4.10.2	集成运放线性工作下的低频模型	160

4.10.3 集成运放的理想化模型	160
习题	162
5 负反馈放大电路	165
5.1 反馈的基本概念	165
5.1.1 反馈放大电路的一般表达式	165
5.1.2 负反馈放大电路的分类	167
5.2 负反馈对放大电路的影响	173
5.2.1 提高增益稳定性	173
5.2.2 展宽通频带	174
5.2.3 减小非线性失真	175
5.2.4 改变输入电阻和输出电阻	177
5.3 深度负反馈放大电路增益的近似估算	180
5.3.1 利用近似公式对闭环增益的估算	181
5.3.2 利用虚短虚断概念的近似计算	183
5.4 负反馈放大电路的自激振荡问题	184
5.4.1 产生自激振荡的原因分析	185
5.4.2 自激振荡的条件和消除方法	185
习题	187
6 模拟运算电路	191
6.1 比例运算电路	191
6.1.1 反比例运算电路	191
6.1.2 同比例运算电路	192
6.2 加减运算电路	193
6.2.1 加法运算电路	193
6.2.2 减法运算电路	194
6.3 积分和微分电路	197
6.3.1 积分电路	197
6.3.2 微分电路	199
6.4 求解微分方程的电路	200
6.5 对数与反对数运算电路	201
6.5.1 对数运算电路	201
6.5.2 反对数运算电路	202
6.6 电容耦合放大电路	202
6.7 实际运放电路的运算误差分析	203
6.7.1 有限开环增益的影响	204
6.7.2 有限输入阻抗及有限开环增益的影响	205
6.7.3 非零输出阻抗及有限开环增益的影响	207

6.7.4	有限共模抑制比的影响	208
6.7.5	失调电压和失调电流的影响	209
	习题	211
7	信号处理电路	214
7.1	RC 有源滤波电路	214
7.1.1	低通滤波电路	215
7.1.2	高通滤波电路	218
7.1.3	带通滤波电路	219
7.1.4	带阻滤波电路	221
7.1.5	全通滤波电路	222
7.2	电压比较器	223
7.2.1	简单比较器	223
7.2.2	反馈箝位比较器	225
7.2.3	迟滞比较器	225
7.2.4	窗口比较器	227
7.3	采样保持电路	228
7.4	集成运放使用中的几个实际问题	229
7.4.1	调零	229
7.4.2	相位补偿	230
7.4.3	集成运放的保护措施	231
7.4.4	提高集成运放的带负载能力	232
7.4.5	提高集成运放的输出电压幅度	232
7.4.6	提高集成运放的差模输入电阻	233
	习题	234
8	信号发生电路	236
8.1	正弦波振荡器的基本原理	236
8.1.1	产生正弦振荡的条件	236
8.1.2	正弦振荡的建立和稳定过程	237
8.2	LC 正弦波振荡器	238
8.2.1	LC 并联谐振回路	238
8.2.2	变压器反馈式 LC 振荡电路	240
8.2.3	三点式 LC 振荡电路	241
8.3	石英晶体正弦波振荡器	245
8.3.1	石英晶体谐振器的特性	245
8.3.2	石英晶体正弦振荡电路	246
8.4	RC 正弦波振荡器	248
8.4.1	文式电桥振荡电路	249

8.4.2	RC 移相式振荡电路	251
8.5	非正弦波形发生器	253
8.5.1	方波和三角波发生电路	253
8.5.2	矩形波和锯齿波发生器	255
	习题	257
9	模拟乘法器	261
9.1	模拟相乘的基本概念	261
9.2	对数——反对数模拟乘法器	262
9.3	晶体管可变跨导型乘法器	264
9.4	集成模拟乘法器 MC1595 及其外部元件的选择	266
9.5	乘法器的参数	269
9.6	模拟乘法器在模拟运算中的应用	270
9.6.1	除法运算	270
9.6.2	平方和平方根运算	271
9.6.3	均方根运算	272
9.6.4	函数发生电路	272
9.7	模拟乘法器在通信电路中的应用	273
9.7.1	振幅调制	274
9.7.2	同步检波	275
9.7.3	鉴相器	276
9.7.4	变频器	278
9.7.5	倍频	278
9.8	模拟乘法器的其他应用	279
9.8.1	可控增益放大器	279
9.8.2	绝对值电路	279
9.8.3	压控方波三角波发生器	279
9.8.4	可调频带的低通滤波器	279
	习题	281
10	直流稳压电源	282
10.1	整流和滤波电路	282
10.1.1	整流电路	282
10.1.2	滤波电路	284
10.1.3	倍压整流电路	287
10.2	稳压管稳压电路	288
10.2.1	稳压电源的性能指标	288
10.2.2	稳压管稳压电路的工作原理和性能分析	289
10.2.3	限流电阻 R 的选择	290

10.3 线性串联型稳压电路.....	291
10.3.1 电路组成和工作原理.....	291
10.3.2 典型串联型晶体管稳压电路分析.....	293
10.3.3 集成运算放大器构成的串联型稳压电路.....	295
10.4 集成稳压电路.....	295
10.4.1 多端式 5G14 集成稳压器	296
10.4.2 三端式集成稳压器的应用.....	298
10.5 开关型稳压电路.....	300
10.5.1 基本型开关稳压器.....	301
10.5.2 集成开关稳压器.....	302
习题.....	307
参考文献	310

1 线性电路基础

1.1 电路与电路模型

电路是由各种电路元件相互连接而构成的电流的通路。电路的功能一般有二个方面,一是电能的传输和分配;二是电信号的产生、处理和传送。

为了便于对实际电路进行研究,我们用理想化的电路模型来描述实际电路。理想化的电路模型则由一些理想化的元件组合而成。所谓理想化元件本身也是一些简单的模型,它用来表达一些简单的实际元件或简单的物理现象的性质。例如,理想电阻元件表征实际元件中所发生的电能消耗现象。电阻器、电灯和电炉等都可以用理想化电阻元件来近似描述它们。虽然理想化元件只是近似描述实际元件或物理性质,但是理想化元件本身是由数学关系式精确地加以定义的。在一定的条件下,由理想化元件所组成的实际电路模型反映了实际电路的主要性能。通过分析电路模型我们能够了解实际电路,并设计出更好的电路。

理想电路元件主要有电阻元件、电容元件、电感元件、电流源元件和电压源元件等。这些都是二端元件。此外,还有多端元件,如理想变压器、受控源等。

1.2 电流、电压及其参考方向

电流和电压是描述电路的两个基本物理量。

1.2.1 电流

电荷有规则地定向运动形成电流。我们把单位时间内通过导体横截面的电量定义为电流强度,用以衡量电流的大小。电流强度简称电流,用符号 i 表示,即

$$i = \frac{dq}{dt}$$

习惯上规定正电荷运动的方向为电流的方向。但在分析电路时,电流的实际方向却难以在电路图中标示。例如,交变电流的方向随时间而变化,显然无法用一个箭头来标示其方向。即使电路中电流的方向恒定不变,当电路比较复杂时,也往往很难事先判断各个电流的实际方向。为了解决上述难题,在电路分析中我们引入参考方向的概念。参考方向可以任意设定,并在电路图中用箭头标示。按照这些任意假设的电流参考方向去分析和计算电路。如果最后求得的结果中某电流为正值,则表示该电流的实际方向与其参考方向一致;若电流为负值,则表示实际方向与参考方向相反。可见,电流的实际方向是利用电流值的正负结合参考

方向一起来表示的。所以,在未标明参考方向的情况下,电流的正负毫无意义。

例 图 1.2.1 电路中,求流过电阻 R 的电流的实际方向。

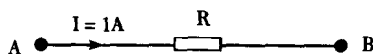


图 1.2.1 电流参考方向

解 因为 I 为正值,所以电流的实际方向与图中所标参考方向一致,即由 A 流向 B 。

1.2.2 电压

电压是衡量电场力对电荷做功能力的物理量,也称电位差,用符号 u 表示。 A 、 B 两点的电压在数值上等于单位正电荷从 A 移至 B 时电场力所做的功,即

$$u = \frac{dw}{dq}$$

如果正电荷由 A 移到 B ,获得了能量,则 A 点为低电位, B 点为高电位。反之,如果正电荷由 A 移到 B 失去能量,则 A 点为高电位, B 点为低电位。正电荷在电路中转移时电能的得与失,体现为电位的升高与降低,即电压升与电压降。

与电流规定参考方向一样,也需要规定电压的参考极性(或称电压的参考方向)。电压的参考方向在电路图上用“+、-”号表示。“+”表示高电位端,“-”表示低电位端。当电压值为正时,该电压的实际极性与参考极性相同;电压值若为负,该电压的实际极性与参考极性相反。电压的参考方向配合电压值的正负,表示该电压的实际方向。在不标参考方向的情况下,电压的正负毫无意义。

例 图 1.2.2 电路中,求电阻 R 两端电压的实际极性。

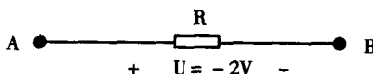


图 1.2.2 电压参考方向

解 因电压值为负,所以电压的实际极性与图中所示参考极性相反。即 A 点实际电位低于 B 点。

如上所述,在分析电路时,要为通过元件的电流以及该元件两端的电压分别假定参考方向。电流的参考方向和电压的参考方向均可以任意选取,彼此之间独立无关。但为了方便,有时选电流的参考方向与电压参考极性由“+”到“-”的方向一致。如图 1.2.3 所示。参考方向的这种选取方式,称关联的参考方向。

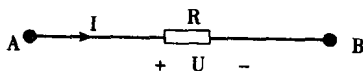


图 1.2.3 关联的参考方向

电路分析中常用到的另一个物理量是功率,用符号 P 表示。设图 1.2.4 所示方框为电路的一部分,它可能是电阻,也可能是其他元件,或是若干元件的组合。如果方框两端的电压与

流过方框的电流采用的参考方向如图所示,则该方框所代表的电路吸收的功率为

$$P = IU$$

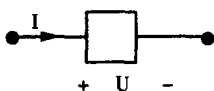


图 1.2.4 吸收功率

若算得的功率为正值,表示吸收功率;若算得的功率为负值,表示产生功率。

1.3 基本电路元件

1.3.1 电阻

电阻是两端元件,其电路符号如图 1.3.1 所示。电阻元件两端所加电压 $u(t)$ 与流过电阻的电流 $i(t)$ 之间的关系,由 $i(t)$ - $u(t)$ 平面上的一条曲线所确定。这条曲线称为电阻元件的伏安特性曲线。

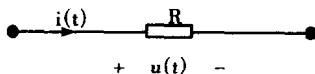


图 1.3.1 电阻元件

如果一个电阻元件的伏安特性曲线是一条过原点的直线,如图 1.3.2 所示,则称之为线性电阻元件。线性电阻元件的端电压 $u(t)$ 和流过该元件的电流 $i(t)$,若采用关联的参考方向,它们之间的关系可用下式表示:

$$u(t) = Ri(t)$$

这就是欧姆定律。式中的 R 是表征电阻元件特性的一种参数,称为电阻。电阻元件的特性也可以用另外一个参数 G 来表示,称为电导。电阻与电导的关系为:

$$R = \frac{1}{G}$$

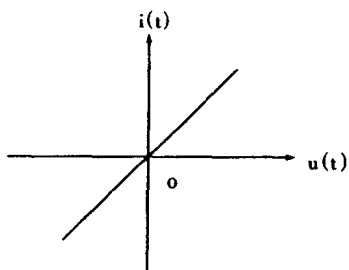


图 1.3.2 线性电阻伏安特性曲线

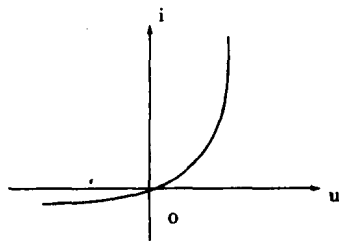


图 1.3.3 非线性电阻二极管伏安特性曲线

对于线性电阻元件而言, R 和 G 都是与电压、电流无关的常数。电阻的单位为欧姆(Ω)和千欧($k\Omega$), 电导的单位为西门子(S)。

如果一个电阻元件的伏安特性不是过原点的直线, 则称之为非线性电阻元件。半导体二极管就是非线性电阻元件的一个例子, 其伏安特性如 1.3.3 所示。显然, 非线性电阻元件的电阻随电压或电流的大小而变, 不是常数。因此, 非线性电阻元件的特性要用整条曲线来表征。

1.3.2 电容

电容是具有存贮电荷作用, 从而在其内部建立起电场的二端元件。电容元件的电路符号如图 1.3.4 所示。对于电容元件, 在任一时刻它所存贮的电荷 $q(t)$ 与其端电压 $u(t)$ 之间的关系, 由 $q(t)$ - $u(t)$ 平面上的一条曲线所确定, 称为电容元件的特性曲线。如果一个电容元件的特性曲线是 $q(t)$ - $u(t)$ 平面上的一条过原点的直线, 如图 1.3.5 所示, 则称该电容元件为线性电容元件。对于线性电容元件有

$$q(t) = Cu(t)$$

式中, C 是与 $q(t)$ 、 $u(t)$ 均无关的常数, 称为线性电容元件的电容。电容的单位是法拉(F)、微法(μF)或微微法(pF)。

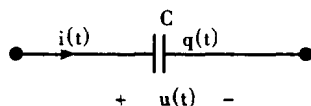


图 1.3.4 电容元件

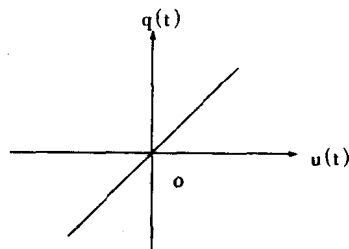


图 1.3.5 线性电容元件的特性曲线

虽然电容元件是根据 q - u 关系定义的, 但在电路分析中, 我们更感兴趣的却是电容元件的伏安关系。当电容元件两端的电压发生变化时, 所存贮的电荷也相应地变化, 这时将有电荷在电路中流动而形成电流。因此, 线性电容元件的端电压 $u(t)$ 和电流 $i(t)$, 若采用关联的参考方向, 它们之间的关系式为

$$i(t) = \frac{dq(t)}{dt} = C \frac{du(t)}{dt} \quad (1.3.1)$$

上式表明, 在任一时刻流过线性电容元件的电流与其端电压的变化率成正比, 而与端电压的值无关。端电压变化越快, 电流就越大。但端电压只能连续变化而不能发生跃变。因为端电压的跃变意味着要求电流无限大, 无限大的电流实际上是不存在的。

我们也可以把线性电容元件的端电压 $u(t)$ 表示成电流 $i(t)$ 的函数。对式(1.3.1)积分得:

$$\begin{aligned} u(t) &= \frac{1}{C} \int_{-\infty}^0 i(\xi) d\xi + \frac{1}{C} \int_0^t i(\xi) d\xi \\ &= u(0) + \frac{1}{C} \int_0^t i(\xi) d\xi \end{aligned} \quad (1.3.2)$$