

电子学基础系列  
ELECTRONICS



ANALOGUE ELECTRONICS  
FOUNDATION COURSE

# 模拟电子学基础

陈光梦 编著

2

 复旦大学出版社  
www.fudanpress.com.cn

TN710  
94

电子学基础系列  
ELECTRONICS




ANALOGUE ELECTRONICS  
FOUNDATION COURSE

# 模拟电子学基础

陈光梦 编著

北方工业大学图书馆  
  
00585847

 复旦大学出版社  
www.fudanpress.com.cn

## 图书在版编目(CIP)数据

模拟电子学基础/陈光梦编著. —上海:复旦大学出版社,2005.4  
(电子学基础系列)  
ISBN 7-309-04412-6

I. 模… II. 陈… III. 模拟电路-电子技术 IV. TN710

中国版本图书馆CIP数据核字(2005)第020384号

## 模拟电子学基础

陈光梦 编著

---

出版发行 复旦大学出版社

上海市国权路579号 邮编 200433

86-21-65118853(发行部) 86-21-65109143(邮购)

fupnet@fudanpress.com http://www.fudanpress.com

---

责任编辑 梁玲

总编辑 高若海

出品人 贺圣遂

---

印刷 上海第二教育学院印刷厂  
开本 787×960 1/16  
印张 20.25 插页 2  
字数 374千  
版次 2005年4月第一版第一次印刷  
印数 1—3 100

---

书号 ISBN 7-309-04412-6/T·281

定价 32.00元

---

如有印装质量问题,请向复旦大学出版社发行部调换。

版权所有 侵权必究

## 内容提要

本书是电子学基础课程中关于模拟电子学部分的教材。包含电路分析基础、半导体器件、基本放大器、集成放大器、反馈以及信号处理电路等内容。在内容安排上重点讨论模拟电子学中最基本的电路概念，尽量在原理上阐述各种基本电路的结构特点与工作特性，从基本模型或基本电路结构出发进行大量的分析。对于具体应用电路，只作典型电路的介绍。本书重点培养学生的基本分析能力，目的是使学生能够通过典型例子举一反三，完成对一般模拟电路的分析工作。

根据目前模拟集成电路的发展情况，本书还着重安排了场效应管、场效应管放大器以及集成放大器的内容。力图让学生建立关于场效应管放大器和集成放大器的基本概念，以使他们在以后的学习和工作中能够延拓和运用这些概念。

本书可以作为高等学校电子科学与技术类专业学生的教科书，也可以作为大学理科学生以及相关工程技术人员的参考书。

# 前 言

当今社会已经是一个高度信息化的社会,电子科学技术在信息化过程中充当了一个不可或缺的重要角色。电子学已经不仅仅是电子科学与技术类专业学生的专门课程,它日益成为所有理科大学生都应该通晓的基本知识。本书就是在复旦大学开始实行全面学分制改革以后,根据电子学基础课程的教学大纲要求编写而成。

考虑到兼顾电子类专业和非电子类理科学生的共同需要,本教材在内容安排上重点讨论模拟电子学中最基本的电路概念,尽量在原理上阐述各种基本电路的结构特点与工作特性,大量的分析从基本模型或基本电路结构出发进行。对于具体应用电路,只作典型电路的介绍。有些比较主要的应用电路则在习题中让学生自行分析。这样的考虑是希望学生能够掌握基本的分析手段,通过典型例子的分析举一反三,而不致被种类繁多的应用电路所困扰。全书共分 6 章:

第 1 章电路分析基础,介绍了本课程必须的关于电路分析的内容。

第 2 章半导体器件,介绍了半导体二极管、双极型晶体管和场效应管的结构、伏安特性以及各种等效模型。其中的重点是各种半导体器件的等效模型,是以下几章的基础知识。

第 3 章晶体管放大器和第 4 章集成放大器,是关于放大器的基础知识,也是本教材的重点内容之一。

自 20 世纪 90 年代以来,由于集成电路技术的发展,模拟集成电路正逐渐与数字集成电路相融合,典型的例证就是混合信号的片上系统(SOC)得到快速发展。由于目前在数字集成电路领域主要以 CMOS 技术为主,所以在频率不是很高的场合,模数混合集成电路中的放大器要求与 CMOS 工艺兼容。基于当前模拟电路的这一发展趋势,本书将场效应管放大器的内容与双极型放大器的内容相提并论,并单独安排了集成放大器一章。这样的教学安排是试图让大学一、二年级的学生建立起关于场效应管放大器和集成放大器的基本概念,以使他们在以后的学习和工作中能够延拓和运用这些概念。

第 5 章反馈,介绍了放大器中具有重要地位的反馈问题。重点分析基本的反馈原理、负反馈的组态以及负反馈电路的特点、负反馈对于放大器的影响、负反馈电路的近似估算等内容。同时引入正反馈及其主要应用电路。

第 6 章信号处理电路,主要介绍基于集成运放的运算电路、滤波电路等应用电路。没有列举过多的电路实例,而是在详细分析基本放大器的基础上,引入函数与

反函数电路、电路的传递函数等概念,并以此导出其他应用电路。

本课程的总体要求是学生应该掌握模拟电子学的基本概念,能够运用等效电路等基本手段分析晶体管放大器,掌握负反馈放大器的原理与特点,并对基于集成运放构成的信号处理电路进行分析。

为了使学生能够对课堂知识有更深刻的了解,在电子学课程设计中另外安排有配套的实验课程。学生可以在学完理论知识后,通过实验对课堂教学内容进行进一步的深入了解。

使用本教材的实际课时大约在 64 到 72 学时(不含实验),可以根据实际情况作适当的增删。如果在前修课程中已经包含有电路分析,则可以跳过第 1 章。如果教学时间紧凑而在后续的课程中有高频电路的课程,那么也可以适当压缩第 2、3、4 章中关于晶体管和放大器的高频特性的内容,将它们合并 in 高频电路课程中。如果教学时间充裕,也可以在第 6 章适当增加应用电路的实例。

在本书中符号使用的约定是:电阻、电容、跨导等一般符号与多数文献中的用法一致。电压或电位以字母  $V$  表示,电流以字母  $I$  表示,并且以小写字母  $v$ 、 $i$  作为交流小信号电压与电流的符号,以大写字母  $V$ 、 $I$  表示直流信号或者瞬时信号(即叠加了交流信号的直流信号)。下标的大小写根据上下文需要确定,可以与符号相同,也可以不同。凡是静态直流信号(工作点),一般均在其下标附加字母  $Q$ 。由于本书在试用期间经过多次改动,另外在有些场合也很难确定信号的性质,所以个别地方可能与上述约定不符。

在本书的编写与试用过程中,得到了院系领导的关心和同事们的热情支持与帮助。孙承绥和王勇老师一起参与了教材的试用工作,对于教材的内容安排和材料取舍提出了许多中肯的意见,对这本教材的定稿起了很大的作用。王勇老师在试用过程中不仅仔细阅读了全书,指正了书稿中的多处错误,并且对全部习题进行了校对与试解。宋万年和孔庆生老师等也对书中的内容提出了许多有益的建议。在此对他们致以诚挚的谢意。

另外,我很感激我的夫人石敏,在本书的编写过程中,她为我完成了包括录入在内的许多事务性工作。

本书的出版也离不开复旦大学出版社工作人员的辛勤劳动,尤其是范仁梅副编审和本书的责任编辑梁玲博士,在此对她们表示衷心感谢。

尽管在教材的试用过程中已经发现并改正了许多错误(其中有些问题是在试用期间由学生们发现的,在此致谢),但我相信书中还会存在谬误和不妥之处,所以我衷心希望广大读者一旦发现书中的问题请与我联系,以便能够及时改正错误。

陈光梦

2005 年 3 月于复旦大学

# 目 录

<b>第 1 章 电路分析基础</b> .....	1
§ 1.1 概述 .....	1
1.1.1 线性元件 .....	1
1.1.2 线性电路的分析方法 .....	4
1.1.3 线性元件在复频域中表示 .....	5
§ 1.2 基本定律与定理及其应用 .....	6
1.2.1 基尔霍夫定律 .....	7
1.2.2 等效电源定律 .....	9
1.2.3 叠加定理.....	11
1.2.4 节点电压法与回路电流法.....	12
§ 1.3 线性电路的分析方法.....	16
1.3.1 网络函数.....	16
1.3.2 稳态分析.....	21
1.3.3 瞬态分析.....	32
本章概要 .....	36
思考题与习题 .....	37
<b>第 2 章 半导体器件</b> .....	41
§ 2.1 半导体基础知识.....	41
2.1.1 半导体材料.....	41
2.1.2 载流子运动.....	46
2.1.3 PN 结 .....	47
§ 2.2 半导体二极管.....	56
2.2.1 二极管的结构与伏安特性.....	56
2.2.2 二极管等效模型.....	57
2.2.3 二极管的主要特性参数.....	64
2.2.4 其他类型的二极管.....	65
§ 2.3 双极型晶体管.....	70

2.3.1	晶体管的结构与工作原理	70
2.3.2	晶体管的伏安特性	73
2.3.3	晶体管模型	75
2.3.4	晶体管的主要特性参数	85
§ 2.4	场效应晶体管	87
2.4.1	绝缘栅型场效应管	87
2.4.2	结型场效应管	92
2.4.3	场效应管模型	93
	本章概要	98
	思考题与习题	99
<b>第3章</b>	<b>晶体管放大器</b>	<b>104</b>
§ 3.1	放大器概述	104
3.1.1	放大器的性能指标	104
3.1.2	线性放大器的一般形式	108
3.1.3	工程估算	109
§ 3.2	晶体管单管放大器	110
3.2.1	共射放大器	110
3.2.2	共源放大器	121
3.2.3	共集与共漏放大器	123
3.2.4	共基与共栅放大器	129
3.2.5	单管放大器的高频特性	133
3.2.6	单管放大器的比较与组合	145
§ 3.3	多级放大器	148
3.3.1	多级放大器的结构	148
3.3.2	多级放大器的小信号放大特性	151
3.3.3	多级放大器的频率响应	153
	本章概要	158
	思考题与习题	159
<b>第4章</b>	<b>集成放大器</b>	<b>164</b>
§ 4.1	集成电路	164
4.1.1	集成电路工艺简介	164



4.1.2 集成电路的特点 .....	168
§4.2 电流源与有源负载 .....	169
4.2.1 基本电流源电路 .....	169
4.2.2 电流源电路的改进 .....	171
4.2.3 有源负载放大电路 .....	177
§4.3 差分放大器 .....	179
4.3.1 差分放大器的工作原理 .....	179
4.3.2 差分放大器的直流传输特性 .....	188
4.3.3 采用有源负载的差分放大器 .....	192
4.3.4 差分放大器的输入失调 .....	195
§4.4 功率输出电路 .....	199
4.4.1 互补输出电路的工作原理 .....	200
4.4.2 乙类放大器的输出功率和电源利用效率 .....	203
4.4.3 实际的互补输出电路 .....	204
§4.5 集成运算放大器 .....	206
4.5.1 集成运算放大器的结构 .....	207
4.5.2 集成运放的等效模型和主要特性指标 .....	209
本章概要.....	213
思考题与习题.....	215
<b>第5章 反馈.....</b>	<b>219</b>
§5.1 反馈的基本概念 .....	219
5.1.1 反馈电路的基本结构 .....	219
5.1.2 负反馈电路的组态 .....	222
5.1.3 负反馈放大器的性能 .....	227
§5.2 负反馈放大器的分析 .....	233
5.2.1 深度负反馈放大器的近似估算 .....	233
5.2.2 负反馈放大器的一般分析 .....	238
5.2.3 负反馈放大器分析的例子 .....	241
§5.3 负反馈放大器的频率特性 .....	252
5.3.1 负反馈对放大器通频带的影响 .....	252
5.3.2 负反馈放大器的频率稳定性 .....	254
§5.4 正反馈和反馈振荡器 .....	257

5.4.1 正反馈 .....	258
5.4.2 反馈振荡器 .....	262
本章概要 .....	265
思考题与习题 .....	267
<b>第6章 信号处理电路</b> .....	<b>270</b>
§6.1 运算电路 .....	270
6.1.1 基本电路 .....	270
6.1.2 加减运算 .....	276
6.1.3 微分和积分运算 .....	279
6.1.4 对数与指数运算 .....	282
6.1.5 乘法器 .....	286
§6.2 有源滤波器 .....	288
6.2.1 滤波器基础知识 .....	288
6.2.2 有源低通滤波器分析 .....	289
6.2.3 其他有源滤波器 .....	291
§6.3 用集成运放构成的其他信号处理电路 .....	295
6.3.1 精密整流电路 .....	295
6.3.2 电压与电流的相互转换 .....	298
6.3.3 桥式功率放大器 .....	299
本章概要 .....	301
思考题与习题 .....	302
<b>附录</b> .....	<b>306</b>
附录1 拉普拉斯变换简介 .....	306
附录2 晶体管的网络参数模型 .....	312
<b>参考文献</b> .....	<b>315</b>

# 第1章 电路分析基础

电子学研究的基本内容可以用“信号——电路——系统”来说明。电子学的研究对象是电信号；实现对信号进行某种处理，例如放大、选择、变换等基本功能的单元就是电子电路；各种电路按照信号处理的要求，以一定的次序加以连接并完成特定的功能，就构成了电子系统。

信号可以按照它们的表现形式分为模拟信号(Analog Signal)与数字信号(Digital Signal)两大类，对应地就有模拟电路与数字电路、模拟系统与数字系统两大领域。模拟信号的特点是它无论在时间上还是空间上都是连续的，自然界中绝大部分信号是模拟信号。以连续的方式处理模拟信号的电路就是模拟电路，以模拟电路组成的系统就是模拟系统。

模拟电路还可以按照信号之间的相互关系分成线性电路和非线性电路两类。线性电路中输入输出信号的关系可以用线性方程进行描述，而非线性电路中输入输出信号之间的关系必须用非线性方程进行描述。

由于许多常用的电路在一定的近似条件下可以用线性电路来等效，所以线性电路的分析方法是分析电子电路的基础。本章将研究线性电路分析的一般问题：如何根据已知的电路结构列出描述其电压电流关系的电路方程；如何根据电路方程求解输入输出信号之间的关系，即电路的传递函数；如何根据传递函数讨论电路的各种特性。

## § 1.1 概 述

### 1.1.1 线性元件

由于电特性的区别，电路中的元件可以分为线性元件与非线性元件两大类。

线性元件(Linear Components)的特点是：元件参数不随外加电压、电流的变化而发生变化，可以用线性方程(代数方程、微分方程或积分方程)描述其电压电流关系。非线性元件(Non-linear Components)的特点是它的电压电流关系由一个非线性方程来描述。

若构成电路的所有元件均为线性元件,则该电路是线性电路。反之,只要在电路中存在非线性元件,则该电路就是非线性电路。

实际上,“线性”和“非线性”是相对的。所谓“线性元件”,总是针对某个特定的条件(电流电压范围、温度范围等)而言的,超出此范围,可能就是非线性元件了。而所谓的“非线性元件”,若能将其加在它上面的信号控制在某个特定的较小的范围内,也可以近似地将它作为线性元件处理。

为了能够在电路分析中使用数学的分析方法,通常将实际的电路加以抽象,用电路等效模型来代替实际的电路。所谓等效模型,就是用一些已知特性的元件模型来代替实际电路,以利于电路的分析。在规定的条件下,由这些元件模型构成的等效电路与被等效的实际电路具有相同的电学特性。

线性元件的模型有 9 种,它们是:电阻、电容、电感、电压源、电流源、压控电压源、流控电压源、压控电流源、流控电流源。

电阻(Resistance)的电压、电流关系可以用欧姆定律描述如下:

$$v_R(t) = R \cdot i_R(t) \quad (1.1a)$$

$$i_R(t) = G \cdot v_R(t) \quad (1.1b)$$

其中, $R$  是电阻值,单位为欧姆( $\Omega$ ); $G$  是电阻的倒数,称为电导(Conductance),单位为西门子(S)。

电容(Capacitance)的电压、电流关系可以用下式表示:

$$v_C(t) = \frac{1}{C} \int i_C(t) dt \quad (1.2)$$

其中, $C$  是电容值,单位为法拉(F)。

电感(Inductance)的电压、电流关系可以用下式表示:

$$v_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} \quad (1.3)$$

其中, $L$  是电感值,单位为亨利(H)。

其余的 6 种模型都是有源元件,前两种为独立源,后 4 种为相关源。

电压源(Voltage Source)和电流源(Current Source)都是理想的二端元件。电压源和电流源的电路符号如图 1-1 所示。

电压源两端的电压与流过它的电流无关,在图 1-1 所示的电压源电路中,无论负载网络如何,总有  $v(t) = v_s(t)$ 。

流过电流源的电流与电流源两端的电压无关,在图 1-1 所示的电流源电路中,

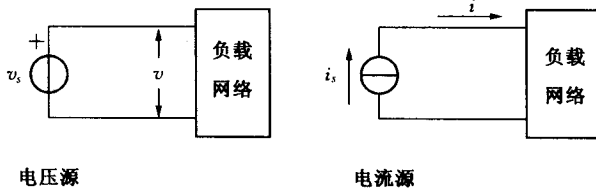


图 1-1 电压源和电流源的电路符号

无论负载网络如何,总有  $i(t) = i_s(t)$ 。

需要说明的是,尽管在电压源符号中标明了正负极性,在电流源符号中标明了电流方向,这并不意味着它们只能用来描述直流信号。它们只是表示在电路中的一个参考极性或参考方向。若实际的极性或方向与参考相反,则在表达式中可以用负值来描述。如果是一个交流源,则可以用一个时间的函数来描述源的数值。所以上述模型可以描述任意一个电压源或电流源。

实际的电压源在负载电流增加时,端电压会下降。实际的电流源在负载变化引起端电压上升时,输出电流会下降。引起这些变化的原因在于实际的电源总存在一定的内阻,所以实际的电源在负载变化时,两端的电压(或流过它的电流)会发生变化。在进行电路分析时,可以用图 1-2 的电路等效一个实际的电源,其中  $r_s$  表示实际电源中的内阻。

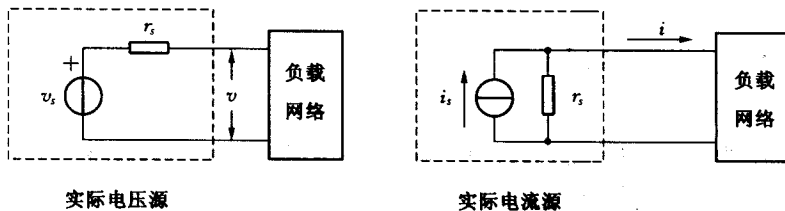


图 1-2 实际电压源和实际电流源的等效电路

压控电压源 (Voltage Control Voltage Source, 简称 VCVS)、流控电压源 (Current Control Voltage Source, 简称 CCVS)、压控电流源 (VCCS)、流控电流源 (CCCS) 都是相关源 (Dependant Source)。相关源是一种非独立电源,它们的源输出(电压或电流)受电路中其他部分的电压或电流的控制,所以也称它们为受控源。引入这 4 种非独立源的目的是为了用它们来描述电路中的晶体管等放大器件。它们在电路中的符号如图 1-3 所示。

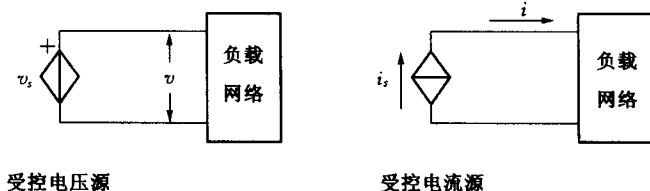


图 1-3 受控源的电路符号

必须指出,受控源与独立源是不同的。独立源的输出是电路中的激励信号的来源,它们不受电路中其他部分的影响(这就是“独立”的含义)。而受控源的输出受电路中其他部分(控制信号)的影响,一旦控制信号消失,受控源的输出也就消失。所以受控源只是反映电路中某处的电压或电流被另一处的电压或电流所控制,它本身并不是激励信号的源头。在电路上,受控源的数值往往用控制信号的函数来表达。例如,VCVS的源电压通常表达为

$$v_s = A_v v_c \quad (1.4)$$

其中  $v_c$  是控制电压,  $A_v$  是电压控制系数。

同样,CCVS的源电压通常表达为

$$v_s = R_m i_c \quad (1.5)$$

VCCS的源电流通常表达为

$$i_s = G_m v_c \quad (1.6)$$

CCCS的源电流通常表达为

$$i_s = A_i i_c \quad (1.7)$$

上面三式中的控制系数  $R_m$ 、 $G_m$ 、 $A_i$  分别为跨阻、跨导与电流控制系数。

实际的受控源也都存在源内阻,所以也都可以采用与独立源类似的方法用等效电路进行等效。

### 1.1.2 线性电路的分析方法

对于一个线性电路的分析,就是分析该电路在一定的电压或电流的激励下,具有何种响应。按照分析方法的不同,可以有时域分析和频域分析两种分析方法。

时域分析方法将激励与响应的电压、电流都表示为时间的函数,电路分析在时间域进行。即对网络施加一个随时间变化的激励,然后研究网络响应随时间的变

化规律。

通常情况下,时不变线性网络的响应对于激励来说,可以用一个常微分方程组来描述。研究网络响应随时间的变化规律,就是设法解出这个微分方程组。我们可以有两种方法解常微分方程组:一种是直接在时域求解微分方程组,得到响应对于激励的关系;另一种是将常微分方程组通过拉普拉斯变换,转换为复频域的代数方程组,然后解此代数方程组,最后将解通过拉普拉斯反变换返回到时域讨论它的物理意义。由于解复频域的代数方程组比直接解微分方程组容易,而且利用后面要讨论的方法,可以直接列出电路的复频域的代数方程组,所以通常用复频域的代数方程组进行电路分析,也称之为电路的复频域分析。

频域分析方法对系统施加一个频率变化的正弦激励信号,然后研究网络响应随激励信号的频率变化的变化规律。对于一个线性网络而言,若激励是一个简谐信号,则其响应也一定是一个简谐信号,只是响应信号与激励信号之间的幅度比以及相位差会随着激励的频率改变而变化。频域分析方法就是研究网络响应随激励信号的频率改变而产生幅度与相位变化的规律。

### 1.1.3 线性元件在复频域表示

由于复频域分析是电路分析中最常用的一个分析方法,所以有必要详细讨论一下在复频域中线性元件的电压电流关系。

将(1.1)式、(1.2)式和(1.3)式进行拉普拉斯变换,可以得到电阻、电容和电感的电压电流关系在复频域表示:

$$v_R(s) = R \cdot i_R(s) \quad (1.8)$$

$$v_C(s) = \frac{1}{C_S} i_C(s) \quad (1.9)$$

$$v_L(s) = L s i_L(s) \quad (1.10)$$

将上面的表示式加以变换,可以导出电阻、电容和电感在复频域的阻抗表达式:

$$Z_R(s) = \frac{v_R(s)}{i_R(s)} = R \quad (1.11)$$

$$Z_C(s) = \frac{v_C(s)}{i_C(s)} = \frac{1}{C_S} \quad (1.12)$$

$$Z_L(s) = \frac{v_L(s)}{i_L(s)} = L s \quad (1.13)$$

在电路分析中,有时要用阻抗(Impedance)的倒数进行运算。电阻的倒数称为电导(Conductance),电抗(Reactance,包括容抗和感抗)的倒数称为电纳(Susceptance)。电导与电纳合称导纳(Admittance)。

关于独立源在复频域的表示,只要将它们的自变量更换成复频率  $s$  即可。

相关源在复频域的表示可以通过对(1.4)式~(1.7)式进行拉普拉斯变换得到。除了改变它们的自变量以外,还要将它们的系数进行相应的变换。

另一方面,我们知道在正弦信号激励下,用复数表示的电阻、电容与电感上的电压电流关系为

$$v_R(j\omega) = R \cdot i_R(j\omega) \quad (1.14a)$$

$$i_R(j\omega) = G \cdot v_R(j\omega) \quad (1.14b)$$

$$v_C(j\omega) = \frac{1}{j\omega C} i_C(j\omega) \quad (1.15)$$

$$v_L(j\omega) = j\omega L i_L(j\omega) \quad (1.16)$$

比较(1.8)~(1.10)式与(1.14)~(1.16)式,我们可以发现,只要将复频域方程中的复变量  $s$  用  $j\omega$  代替,则这两组方程的形式完全一致。

实际上,时域分析的微分方程经过拉普拉斯变换,电压与电流将由自变量  $t$  的函数,变换为自变量  $s$  的函数。由于  $s$  具有频率的量纲( $s = \sigma + j\omega$ ),所以称之为复频率。将时域的微分方程进行拉普拉斯变换,就是将问题由时间轴转换到复频率  $s$  平面进行讨论,即复频域分析。若令复变量  $s$  中的实部为零,就成为频域分析,所以频域分析实际上是复频域分析的一个特例,它就是将问题局限到  $s$  平面的虚轴上进行讨论。

## § 1.2 基本定律与定理及其应用

在分析线性电路时,除了运用在上一节提到的欧姆定律、以及由(1.2)式、(1.3)式所表示的电容与电感的基本伏安特性以外,还经常用到基尔霍夫定律、等效电源定律和叠加定理。实际上,欧姆定律、电容与电感的伏安特性等是元件本身的特性。而本节要介绍的这些定律,是由于元件连接成电路后对于电路中的电流与电压的约束关系的体现。

本节将简单地叙述这些基本定律及其应用,至于它们的详细的讨论和严格的证明,可以参考有关电路理论的书籍。



### 1.2.1 基尔霍夫定律

基尔霍夫定律是描述复杂的线性电路中电压电流关系的一个基本定律,它由两个定律组成:基尔霍夫电流定律(Kirchhoff's Current Law,简称KCL)和基尔霍夫电压定律(Kirchhoff's Voltage Law,简称KVL)。

为了阐述这个定律,首先定义几个术语。

**支路(Branch):**电路中能通过同一电流的分支。支路一般由二端元件或二端元件的串联构成。

**节点(Node):**电路中3个或3个以上的支路的交点。

**回路(Loop):**电路中由支路构成的闭合路径。

例如,在图1-4中,共有2个节点, $a$ 与 $b$ ;3条支路,分别由 $v_{s1}$ 和 $R_1$ 、 $v_{s2}$ 和 $R_2$ 、以及单独的 $R_3$ 构成;还有3个回路, $v_{s1}$ 、 $R_1$ 、 $R_2$ 、 $v_{s2}$ 构成一个回路, $v_{s2}$ 、 $R_2$ 、 $R_3$ 构成另一个回路, $v_{s1}$ 、 $R_1$ 、 $R_3$ 构成第三个回路。

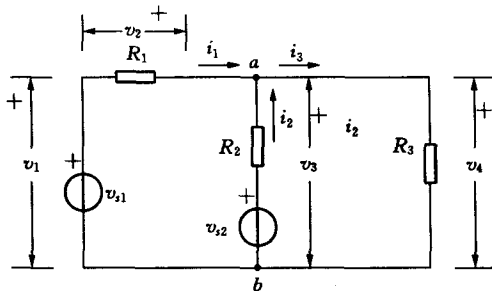


图1-4 电路的支路、节点与回路

#### 一、基尔霍夫电流定律

对于电路的任意一个节点,流入该节点的所有瞬时电流的代数和为零,即

$$\sum i(t) = 0 \quad (1.17)$$

注意在上述表述中,定义了电流的参考方向:流入该节点的为正,流出该节点的为负。所以也可以将它表述为:对于电路的任意一个节点,流入该节点的电流之和等于流出该节点的电流之和。它是电流连续性的直接体现。

**例 1-1** 列出图1-4中节点 $a$ 的电流方程。