

高等学校教学用书

现代电路 时域分析

胡健栋 江淑倩 编著



北京邮电学院出版社

内 容 简 介

本书讨论了大规模电路计算机模拟的算法基础。全书共分九章,前五章讨论电路方程的列出和求解方法,采用了分离的电压图和电流图以减少方程的维数。第六、七章讨论分段线性电阻电路的分析,分别采用了单形插值表示、状态模型表示和规范型表示。最后两章讨论电路的分裂分析法。本书借鉴并反映了近年来现代电路分析研究的新成果。

本书可作为电子类和通信类本科生和研究生的教材,也可供有关工程技术人员参考。

现代电路时域分析

编著 胡健栋 江淑倩

责任编辑 郑 捷

*

北京邮电学院出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

北京邮电学院出版社印刷厂印刷

*

850×1168毫米 1/32 印张 13.25 字数 329,28 千字

1989 年 2 月第一版 1989 年 2 月第一次印刷

印数: 1—3500 册

ISBN 7-5635-0017-0/TP·4 定价: 3.15 元

前 言

电子电路的计算机模拟是现代电路分析和设计的基础。它给电路分析方法带来了革命性的开拓动力，这些动力推动电路分析向系统化、数值化、程序化发展。它促使电路分析采用图论的方法列写电路方程，采用牛顿迭代解非线性微分方程和稀疏高斯消去法解代数方程。这些方法过去在电路分析理论中是没有出现的，是现代分析手段引起分析方法的变化。

在近几十年来，微电子电路发展十分迅速。它的集成从小规模到中规模、大规模，现在已经达到超大规模。因此，一个芯片所含的电路有很大的规模，分析这样大规模的电路是一般计算机所不能承受的。为了解决这个问题，电路分析应向宏模型和分块分析的方向发展。

电路规模增大也带来电路的复杂性提高，最突出的是模拟电路和数字电路的混合。这两种电路采用不同的数据和计算方法，为了统一这种所谓数模混合式电路的分析方法，促使了分段线性分析方法的开发。所以，近代电路分析方法融合了图论、数值计算法、宏模技术、分块分析技术和分段线性分析技术等，比传统方法有了很大的变化。但是，能反映这些问题的书籍还是很贫乏的。已经有的书，一般只讨论了图论的应用和数值方法。这些方法是六、七十年代发展起来的。近期发展起来的一些技术，如宏模型技术、分块分析技术和分段线性技术等，还没有一本書籍完整的加以系统讨论。本书填补了这方面的空隙，反映了现代电路分析的方法。本书着重讨论电路分析的基本方法，作为电路的计算机模拟和分析的基础。

本书共有九章。第一至五章比较系统而精练地阐述了现代电路分析的基本概念、系统化建立电路方程及其求解的方法。第六、七章系统地讨论了适用于数字与模拟混合电路的方法，即分段线性分析法。第八、九章讨论大规模电路模拟的分解技术和原理。

本书与现有的同类书比较，在内容方面有下列特点：

(1) 系统讨论了电路的分隔图形表示和与之相应的列方程方法，推广了电路方程的表示范围。

(2) 加强了 n 端口混合分析法。

(3) 阐述了解非线性代数微分方程的 PBD 法，它系统地解决了不等步长的多步积分方法。

(4) 系统地讨论了分段线性分析方法，它的各种表示方法和求解方法。

(5) 详细讨论了电路的分块分析，包括电路的最优分块。

这些内容在国内还是首次在教材中出现。

本书可供通信和电子系统、微电子电路与系统、计算机应用、自动控制和电路与系统等专业的本科生和研究生用的教材，也可作有关专业的工程技术人员的参考书。

本书的前五章由江淑倩副教授编写，后四章由胡健栋教授编写，并由胡健栋教授审阅全书。

由于编写时间仓促和编著者水平有限，在选材和内容的叙述上，都会有不妥和错误，恳请读者指正。

编著者

一九八八年九月

目 录

第一章 电路图形和基本定律

§ 1-1 电路的基本变量.....	(1)
1-1-1 一般说明.....	(1)
1-1-2 电流参考方向和电压参考极性.....	(2)
§ 1-2 电路、图形和矩阵.....	(4)
1-2-1 节点和网孔.....	(4)
1-2-2 电路的图形.....	(5)
1-2-3 基本割集和基本回路.....	(8)
1-2-4 图形的关联矩阵.....	(9)
1-2-5 图形的基本割集矩阵.....	(10)
1-2-6 图形的基本回路矩阵.....	(12)
§ 1-3 图形的基尔霍夫定律.....	(13)
1-3-1 电流图节点的 KCL 方程.....	(14)
1-3-2 电流图的 KCL 方程.....	(14)
1-3-3 电压图回路的 KVL 方程.....	(18)
1-3-4 电压图的 KVL 方程.....	(19)
1-3-5 独立的 KCL 方程和 KVL 方程.....	(21)
§ 1-4 电路电压图与电流图的统一.....	(23)
1-4-1 电压图与电流图合一的条件.....	(23)
1-4-2 合一图形的拓扑矩阵.....	(26)
1-4-3 A、B、D、矩阵间的关系.....	(28)
参考文献.....	(30)

第二章 线性电阻电路的分析

§ 2-1 电阻元件·····	(31)
2-1-1 一般定义·····	(31)
2-1-2 线性二端电阻元件的特性·····	(32)
2-1-3 非线性二端电阻元件的特性·····	(34)
2-1-4 多端电阻元件的特性表示法·····	(37)
2-1-5 运算放大器的外部特性·····	(38)
2-1-6 线性受控源·····	(40)
§ 2-2 线性电路的性质·····	(43)
2-2-1 线性·····	(43)
2-2-2 线性电路的主要定理·····	(44)
§ 2-3 n 端口线性电阻网络方程·····	(47)
2-3-1 意义·····	(47)
2-3-2 n 端口线性电阻网络端口方程的一般形式·····	(48)
2-3-3 $\hat{H}$ 及 $\hat{S}$ 矩阵的确定·····	(50)
2-3-4 系统消去法确定 $\hat{H}$ 和 $\hat{S}$ ·····	(53)
§ 2-4 用分离图形分析法建立电路方程·····	(58)
2-4-1 一般说明·····	(58)
2-4-2 分离图形分析法的要点·····	(59)
2-4-3 列表法(表格法)·····	(60)
2-4-4 改进节点法·····	(64)
2-4-5 割集法·····	(70)
2-4-6 分离图形法的特例——常规方法·····	(74)
参考文献·····	(82)

第三章 线性电阻电路方程的解

§ 3-1 电阻电路方程的解·····	(83)
---------------------	------

3-1-1	概述	(83)
3-1-2	线性代数方程的两种解法	(83)
3-1-3	高斯消去法	(84)
3-1-4	LU 分解	(87)
§ 3-2	求解方程的问题	(91)
3-2-1	病态方程的计算不稳定性	(91)
3-2-2	选主元	(91)
3-2-3	高斯消去法和 LU 分解法的运算量	(92)
§ 3-3	稀疏矩阵的存贮	(93)
3-3-1	稀疏矩阵技术的意义	(93)
3-3-2	稀疏矩阵的存贮方式	(94)
3-3-3	新非零元素的产生——填入元	(94)
3-3-4	双链表存贮格式	(96)
§ 3-4	稀疏矩阵的算法	(100)
3-4-1	方程排序对减少填入元的意义	(101)
3-4-2	马尔科威茨 (Markowitz) 准则	(102)
3-4-3	从填入元和精度考虑选主元准则	(104)
§ 3-5	稀疏矩阵的分解技术基础	(105)
3-5-1	双分图	(105)
3-5-2	图的邻接矩阵	(106)
3-5-3	矩阵的图形表示	(108)
参考文献		(110)

第四章 非线性电阻电路的分析

§ 4-1	非线性电阻电路的基本概念	(111)
4-1-1	非线性电阻电路	(111)
4-1-2	非线性电阻电路的分析方法	(111)
4-1-3	非线性电阻电路的多解	(114)

4-1-4	非线性电阻电路方程的形式	(118)
§ 4-2	列写非线性电阻电路方程	(118)
4-2-1	建立电路方程的一般方法	(118)
4-2-2	n 端口法	(123)
4-2-3	非线性电阻的线性化模型	(127)
4-2-4	用线性化模型电路列写方程	(129)
§ 4-3	非线性方程的解	(132)
4-3-1	定点迭代及其收敛	(132)
4-3-2	牛顿-拉普逊 (Newton-Raphson) 迭代及其收敛	(135)
4-3-3	一阶泰勒模型与定点迭代的关系	(141)
4-3-4	二阶泰勒模型与 N-R 迭代的关系	(142)
4-3-5	用线性化模型时非线性电阻电路方程的意义	(143)
§ 4-4	迭代法的改进	(144)
4-4-1	迭代法的收敛	(144)
4-4-2	收敛与起始点的选择	(146)
4-4-3	N-R 法的改进	(148)
4-4-4	延拓法	(149)
4-4-5	二维迭代法	(151)
参考文献		(153)

第五章 动态电路的分析

§ 5-1	基本概念	(154)
5-1-1	动态元件	(154)
5-1-2	典型激励函数	(160)
5-1-3	非零初始状态与等效激励源	(164)
5-1-4	冲激响应	(165)

5-1-5	卷积积分求电路的零状态响应·····	(168)
§ 5-2	非线性动态电路方程的建立·····	(170)
5-2-1	非线性动态方程的分类·····	(170)
5-2-2	电路的改进节点方程·····	(174)
5-2-3	规范型状态方程的列写·····	(176)
5-2-4	动态元件的离散模型和电路方程·····	(181)
5-2-5	非线性动态电路方程综述·····	(194)
§ 5-3	非线性动态电路方程的数值解·····	(195)
5-3-1	数值解的基本问题·····	(195)
5-3-2	最简单的方法·····	(197)
5-3-3	多步法公式·····	(203)
5-3-4	Gear公式·····	(205)
5-3-5	刚性方程和刚性稳定性·····	(207)
5-3-6	PBD法·····	(209)
5-3-7	等步长公式·····	(215)
5-3-8	PBD 法的截断误差·····	(215)
参考文献	·····	(216)

第六章 非线性电阻电路的分段线性分析

§ 6-1	非线性元件的分段线性模型·····	(218)
6-1-1	非线性函数的分段线性逼近·····	(218)
6-1-2	线性插值逼近的误差·····	(220)
6-1-3	极大极小逼近·····	(221)
6-1-4	分段线性电路模型·····	(225)
6-1-5	基本节的串联或并联·····	(228)
§ 6-2	电路空间的划分和剖分·····	(230)
6-2-1	电路空间的划分·····	(230)
6-2-2	正负序列矢量·····	(232)

6-2-3	空间划分的格型结构.....	(233)
6-2-4	空间的单形剖分.....	(235)
6-2-5	单形的点的表示.....	(238)
§ 6-3	分段线性函数.....	(242)
6-3-1	单纯映射.....	(242)
6-3-2	分段线性映射.....	(243)
6-3-3	分段线性映射的连续性.....	(244)
6-3-4	同胚的意义.....	(247)
6-3-5	多值分段线性函数.....	(247)
6-3-6	带跳跃的分段线性函数.....	(249)
§ 6-4	分段线性函数的表示方法.....	(250)
6-4-1	空间的单形剖分.....	(250)
6-4-2	非线性映射的单形插值表示.....	(252)
6-4-3	非线性多端口的单形插值表示.....	(254)
6-4-4	线性电阻多端口与两极管负载.....	(255)
6-4-5	分段线性映射的状态模型.....	(257)
6-4-6	状态模型的结构.....	(261)
6-4-7	分段线性函数的规范式.....	(264)
6-4-8	常用分段线性函数的规范式.....	(266)
参考文献		(271)

第七章 分段线性电阻电路的解

§ 7-1	分段线性电路的数学模型.....	(273)
7-1-1	综合方程的单形插值表示.....	(273)
7-1-2	综合方程的规范模型.....	(275)
7-1-3	改进节点方程的单形插值表示.....	(276)
7-1-4	改进节点方程的规范式.....	(283)
7-1-5	混合方程的规范式.....	(285)

7-1-6	分段线性状态模型的连接	(289)
§ 7-2	分段线性电路的解	(294)
7-2-1	Katzenelson 法	(295)
7-2-2	过境的充分条件	(297)
7-2-3	没有再入境的必要条件	(299)
7-2-4	求解曲线的逆扫描	(300)
§ 7-3	求解中的问题	(303)
7-3-1	角点问题	(303)
7-3-2	奇异 Jacobi 矩阵问题	(304)
7-3-3	多解问题	(307)
§ 7-4	单形插值表示的求解	(309)
7-4-1	求解曲线	(309)
7-4-2	起始点的确定	(311)
7-4-3	过境点的计算	(313)
7-4-4	相邻单形顶点的计算	(314)
§ 7-5	规范式表示的求解	(318)
7-5-1	过境问题	(319)
7-5-2	相邻区域的 Jacobi 矩阵	(320)
7-5-3	n 的确定	(321)
7-5-4	举例	(322)
§ 7-6	状态模型的求解	(325)
7-6-1	互补主元法	(326)
7-6-2	Lemke 法的具体过程	(327)
7-6-3	举例说明	(328)
	参考文献	(331)

第八章 系统矩阵的分块

§ 8-1	引言	(332)
-------	----	-------

8-1-1	矩阵结构与分裂	(332)
8-1-2	矩阵的双分图	(334)
§ 8-2	撕裂法	(335)
8-2-1	块下三角阵	(335)
8-2-2	镶边矩阵	(336)
8-2-3	镶座下三角阵	(337)
8-2-4	镶座块对角阵	(338)
8-2-5	撕裂法的意义	(339)
§ 8-3	镶边矩阵与电路	(341)
8-3-1	混合分析的镶边块对角格式	(341)
8-3-2	支路撕裂的节点方程	(345)
8-3-3	节点撕裂的节点方程	(348)
§ 8-4	镶边矩阵的最优分块	(350)
8-4-1	SMW 公式	(350)
8-4-2	SMW 公式的应用	(352)
8-4-3	最优排序	(353)
§ 8-5	镶边块对角阵的构造	(354)
8-5-1	引言	(355)
8-5-2	试探法	(356)
8-5-3	顶点的选择准则	(358)
§ 8-6	镶边下三角阵的对称生成	(362)
8-6-1	最优置换	(362)
8-6-2	有向图的本质集	(363)
8-6-3	求图形的环路	(365)
§ 8-7	镶边下三角阵的不对称生成	(368)
8-7-1	双分图的性质	(369)
8-7-2	双分图与镶边下三角格式	(371)
8-7-3	寻找极小本质哑铃集的方法	(373)

参考文献.....	(375)
-----------	-------

第九章 瞬时分解法

§ 9-1 线性方程组的迭代法求解.....	(376)
9-1-1 迭代法的基本概念.....	(377)
9-1-2 雅可比迭代法.....	(377)
9-1-3 高斯赛德尔迭代.....	(380)
9-1-4 逐次超松弛 (SOR) 法.....	(382)
9-1-5 对称超松弛 (SSOR) 法.....	(382)
9-1-6 对称高斯赛德尔法.....	(383)
§ 9-2 微分方程组的时间松弛去耦法.....	(384)
9-2-1 雅可比积分算法.....	(385)
9-2-2 高斯赛德尔积分算法.....	(388)
9-2-3 对称高斯赛德尔积分算法.....	(389)
9-2-4 应用.....	(392)
§ 9-3 波形松弛去耦法.....	(393)
9-3-1 波形松弛去耦法.....	(394)
9-3-2 波形松弛法的收敛.....	(395)
9-3-3 划分问题.....	(397)
9-3-4 MOS 集成电路的时域分析.....	(398)
§ 9-4 分段线性常微分方程组的波形松弛求解.....	(402)
9-4-1 分段线性函数.....	(402)
9-4-2 分段线性微分方程组.....	(402)
9-4-3 分段线性常微分方程组的波形松弛 法求解.....	(404)
参考文献.....	(406)

第一章 电路图形和基本定律

应用拓扑学的理论和方法进行电路及系统的分析，在现代电路理论中占有重要的地位。本书各章所论述的分析方法，皆以电路基本定律及网络图论为理论根据。为了叙述的方便，首先介绍有关电路定律与线图的基本概念。

§ 1-1 电路的基本变量

1-1-1 一般说明

确定电路分析的基本描述量，这是对电路进行定量分析必不可少的。在电路理论中，感兴趣的六个变量是：电荷 q （库仑）、电流 i （安培）、电压 v （伏特）、磁链 φ （韦伯）、功率 p （瓦）和能量 w （焦耳）。电压和电流变量用的最多，也为读者所熟悉。电荷变量 q ，在近代电路分析中日益被重视。在模拟电路中陆续出现的开关电容滤波器、电荷分配器、PCM 编译码器，自调零斩波式运放等电路，它们的工作状况是按着工作电荷在电容上的积累、传递和重新分配来进行分析的。所以电路分析的变量必须是电荷和电压。习惯上把变量 v 、 i 、 q 、 φ 称为基本变量，因为这四个物理量是电路中发生的各种电的和磁的现象的特定体现者。而把功率 p 和能量 w 这两个变量称为复合变量，因为它们可以用基本变量来表征。

在任一时刻 t ，上述变量之间的普遍关系是

$$i(t) = \frac{dq}{dt} \quad (1-1-1)$$

$$v(t) = \frac{dw}{dq} \quad (1-1-2)$$

对于线圈两端的电压，可简单表示成

$$v(t) = \frac{d\varphi}{dt} \quad (1-1-3)$$

$$p(t) = v(t)i(t) = \frac{dw(t)}{dt} \quad (1-1-4)$$

由式 (1-1-4)、(1-1-1) 及 (1-1-3) 可得到一组与其对应的积分关系式

$$w(t) = \int_{-\infty}^t p(\tau) d\tau \quad (1-1-5)$$

$$q(t) = \int_{-\infty}^t i(\tau) d\tau \quad (1-1-6)$$

$$\varphi(t) = \int_{-\infty}^t v(\tau) d\tau \quad (1-1-7)$$

式中 τ 为积分变量。

一般地说，电路元件的特性是一条或一组联系某些电变量间关系的曲线。例如，电阻元件的特性是联系电压变量与电流变量的关系曲线；电容元件的特性是联系电压变量和电荷变量的关系曲线；而电感元件的特性则是联系电流变量和磁链变量的关系曲线。细分起来，电路元件还有线性与非线性、时变与非时变之分。不同性质的电路元件与相应变量间有特定的制约关系。将分别在以后有关章节中深入讨论。

1-1-2 电流参考方向和电压参考极性

在自然科学的研究中，任何一个物理量，总是相对于某个“假设的”参考系来测量的。在电路中，参考系所取的形式，就是电流的参考方向和电压的参考极性。为叙述方便，我们将电流的参考方向和电压的参考极性统称为参考方向，并且把同一支路

的电流与电压取相同参考方向的情况，称为关联参考方向。

采用假设“参考方向”的方法。在列写电路方程之前，可以任意标定电路中各支路电压和电流的参考方向，按标定的参考方向确定电路方程中各量的正负号。在规定参考方向的前提下，电路方程解的正负号就有了确切的含义。当解出某支路电流在某时刻 t_1 的值 $i(t_1) > 0$ 时，该支路电流的实际方向即为所标定的参考方向。当 $i(t_1) < 0$ 时，此电流的实际方向与所标定参考方向相反。在应用假设“参考方向”方法分析电路时，应注意两点：第一，参考方向的标定是人为的、任意的。但参考方向标定以后就不能随意变动，否则电路分析的结果无意义；第二，在使用上述几种变量间的关系式时，必须根据标定的参考方向，在式中冠以正负号。例如，一个线性电容支路，假设两种不同的参考方向，见图 1-1-1(a) 和图 1-1-1(b)。对于图 1-1-1(a) 关联参考方向情况，有

$$i = C \frac{dv}{dt} \quad (1-1-8)$$

对于图 1-1-1(b) 非关联参考方向情况，有

$$i = -C \frac{dv}{dt} \quad (1-1-9)$$

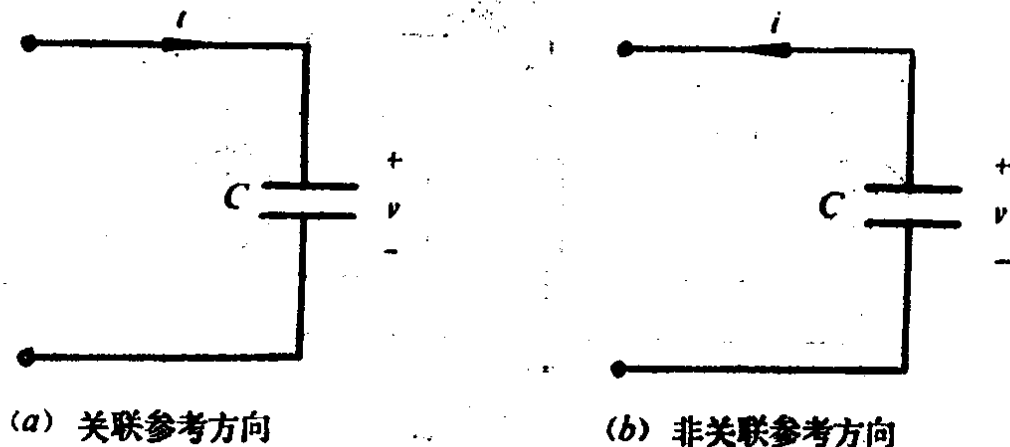


图 1-1-1 电流和电压的参考方向

假设“参考方向”对于线性和非线性电路分析，都是必要的。

§ 1-2 电路、图形和矩阵

1-2-1 节点和网孔

定义 1-1 电路中两个或两个以上支路的连接点，称之为电路的节点。

电路元件中的二端元件，由于其流入和流出电流相同，可用一个电流变量表示，视为一个支路电流。这样，二端元件在电流图（见 1-2-2 节）上不作为一个节点。三端及三端以上的多端元件在电流图中看作一个节点，称之为宏节点。

按上述定义，图 1-2-1 所示电路，具有五个节点，其中节点 1, 2, 3 和 4 是支路的连接点， N_1 是一个三端元件，构成一个宏节点。

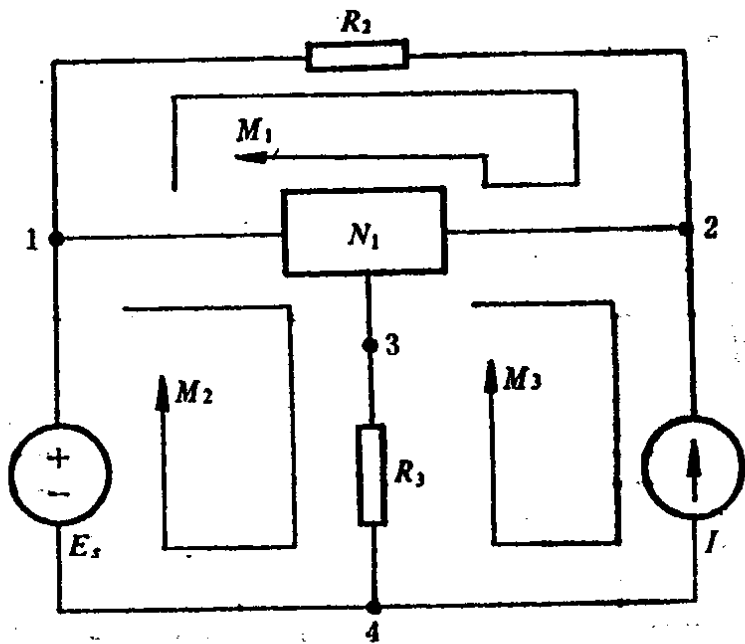


图 1-2-1 电路、节点和网孔

定义 1-2 在电路中由支路组成、并且其起点和终点均在同