有源网络计算机辅助设计

居 悌 编著

科 学 出 版 社

1 9 8 6

内 容 简 介

本书较为系统而简明地介绍了有源网络的计算机辅助分析和设计，编写的重点侧重于概念和算法。全书共分十二章：网络拓扑，线性网络分析，非线性网络分析，混合分析法，网络的瞬态分析，状态变量法，灵敏度分析，容差问题，稀疏矩阵技术，网络的符号分析法，电路的最优化技术和器件模型的建立。

本书可供高等院校电子工程、半导体器件和集成电路、自动控制以及计算机应用等专业的师生参考，并可供从事上述专业的科技人员阅读。

有源网络计算机辅助设计

居 悌 编著

责任编辑 那莉莉 乐嘉敏

科学出版社出版

北京朝阳门内大街137号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

1986年7月第一版 开本：787×1092 1/32

1986年7月第一次印刷 印张：14 3/4

印数：0001—4,600 字数：333,000

统一书号：15031·707

本社书号：4363·15—8

定价：3.45元

前　　言

随着大规模集成电路的发展，采用电路的实验板调试和手算方法已经无法实现精确而可靠的电路设计。由于用计算机辅助设计电路可以大大提高效率、降低成本、确保精度，所以自从一九六四年D．A．卡拉汉首次提出并证实了用计算机进行网络设计的可能性以来，不到二十年的时间，有源网络的计算机辅助分析和设计这门学科得到了迅速的发展，引起了目前电路设计的根本性变革。

近几年来，有源网络的计算机辅助分析和设计这门学科开始得到国内同行们的普遍重视，并在不同程度上取得了进展，各高等院校的有关专业也陆续开始或准备设置这方面的课程。但是目前还普遍存在这样的问题：熟悉电路理论的科技人员不懂计算机的应用，会使用计算机的人不熟悉电路理论。为了更好地将这门实用的边缘学科介绍给读者，也为了便于自学，本书的编写力求深入浅出、简单明了。初次接触本课题的读者，如果具备一些基本的电路理论、高等数学和计算机语言等方面的预备知识，通过本书的学习可以对有源网络的计算机辅助分析和设计有一个比较完整而深入的了解，并能根据这些知识编写一些自己所需要的专用程序。本书的编写希望能为高等院校电子工程、半导体器件和集成电路、自动控制以及计算机应用等有关专业的师生提供一本简明而系统的教学参考书，并为从事上述有关专业的科技人员提供一本既有普及又有深入指导作用的自学读物。

本书承蒙南京邮电学院院长郭祥沄教授的缜密审阅。中

国科学院半导体研究所夏武颖、计算技术研究所秦瑞祺和国防科学技术大学周堤基等同志也对本书的编写工作给予了热情的支持，并对初稿提出了宝贵的意见。在整个编写过程中，骊山微电子公司黄妙珍同志协助作者做了大量的工作。在此谨致以衷心的感谢。

限于水平，书中难免有不妥和错误之处，敬请读者批评指正。

居 悌

一九八三年元月

目　　录

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com

第一章 网络拓扑

网络拓扑是数学分支图论中的一个课题，它为计算机识别和记忆网络的结构提供了有力的数学工具，是用计算机建立克希霍夫方程的关键。所以，我们首先来介绍网络拓扑中的一些基本概念和性质。

1.1 基本概念

我们知道，绝大部分电路的分析模型都是由若干个二端元件所组成的网络。要完整地描述这样的网络，必须知道元件间是如何连接的，元件电流和电压的参考方向以及元件的特性。网络拓扑所要研究的对象只是与前两项有关的网络特性，而与元件的特性无关。在网络拓扑中，前两项是用一个与网络 N 有关的**有向图**来描述的，记为 G_d。G_d 的画法是：用一个点来代替二端元件的公共端点，称之为**节点**；用一条线段来代替二端元件，称之为**支路**，并按支路中假定的电流参考方向标上箭头，同时取支路电压参考极性的正端在箭尾。例如，图 1.1(a)为一网络 N，它是一个具有电流串联和电压并联负反馈的单级晶体管放大器分析模型。图 1.1(b) 就是网络 N 的有向图 G_d。当不考虑方向时，去掉 G_d 中的箭头所得到的图称为网络 N 的**无向图**，记为 G_n，如图 1.1(c) 所示。

下面再引入几个网络拓扑中常用的基本概念：

路 若在 G_n 的某一组支路序列中，(1)相继支路总是有公共的端点，(2)每个节点最多是该组支路序列中两条支路

的端点，(3)存在两个节点，它们分别只是该组支路序列中某一条支路的端点，则称这组支路序列为这两个节点间的一条路。例如，图1.2中的支路组($d\ \ h\ \ i\ \ b$)和($e\ \ g\ \ i\ \ b$)分别在节点 1 和 2 之间形成一条路，但由于支路组($e\ \ f\ \ h\ \ i\ \ c$)，($e\ \ g$

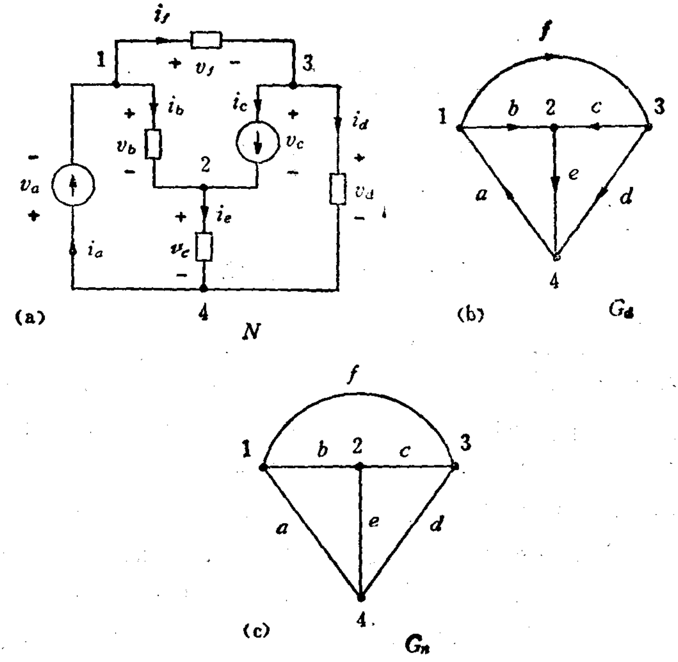

图 1.1 网络及其有关的图

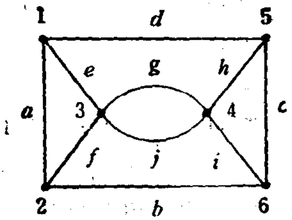

图 1.2 图的一些基本概念

$i\ f$)和($f\ g\ i\ b$)分别不满足条件(1),(2)和(3),因而都不形成路。

连通图 若 G_n 中任意两个节点间都有路存在，则称该 G_n 是连通的。若 G_n 是连通的，则相应的 G_d 和 N 也都是连通的。

子图 若图 G_s 是由 G_n 中的部分节点和支路所构成的，则称 G_s 为 G_n 的一个子图。

回路 若(1)G_n 的子图 G_s 是连通的，(2)G_s 的每个节点恰好是两条属于 G_s 的支路的端点，则称 G_s 为一条回路。例如，在图1.2中，支路组($a\ b\ c\ d$)和($f\ g\ i\ b$)分别形成一条回路，但由于支路组($a\ e\ f\ h\ i\ c$)和($a\ e\ f\ g\ i$)分别不满足条件(1)和(2)，因而都不形成回路。

树 若(1)连通图 G_n 的子图 G_s 是连通的，(2)G_s 中包含 G_n 的所有节点，(3)G_s 中无回路，则称 G_s 为一枝树，并记为T。例如，在图1.2中，支路组($a\ e\ d\ g\ i$)和($a\ f\ b\ c$)分别形成一枝树，但由于支路组($a\ e\ h\ c$)，($a\ b\ c\ h$)和($a\ b\ c\ d\ e\ g$)分别不满足条件(1)，(2)和(3)，因而都不形成树。

属于树T的支路称为该树的**树支**，且每枝树T必具有$n-1$条树支，这里 n 为 G_n 的节点总数。不属于树 T 的支路称为该树的**连支**。所有连支构成树 T 的**补树**，记为 T_c。

割集 若(1)从连通图 G_n 中移去一组支路(不包括它们的端点)后，得到一个非连通图，(2)恢复这组支路中的任意一条支路后，都会重新得到一个连通图，则称这组支路为一组割集。例如，在图1.2中，支路组($a\ e\ d$)和($d\ g\ j\ b$)分别形成一组割集，但由于支路组($e\ h\ g\ f\ b$)和($a\ e\ d\ c$)分别不满足条件(1)和(2)，因而都不形成割集。

下面分别介绍三个能完整描述有向图结构的拓扑矩

阵——关联矩阵、回路矩阵和割集矩阵，以及它们与克希霍夫方程的关系。

1.2 关联矩阵

虽然有向图可以完整地描述一个网络的拓扑结构，但计算机如何识别和记住它呢？网络拓扑告诉我们，一个有向图中所包含的全部信息可以用一个拓扑矩阵来表达，而矩阵在计算机中的存取是很方便的。最常用、最直观的拓扑矩阵是关联矩阵。

对于具有 n 个节点、b 条支路的有向图 G_d，我们定义它的**关联矩阵**为一个 $n\times b$ 的矩阵 $\mathbf{A}_a$，

$$\mathbf{A}_a=[a_{ij}]$$

其中，若支路 j 与节点 i 相关，且箭头背离节点 i，则 $a_{ij}=1$；若支路 j 与节点 i 相关，且箭头指向节点 i，则 $a_{ij}=-1$；若支路 j 与节点 i 无关，则 $a_{ij}=0$。

例如，图1.1(b)所示有向图的关联矩阵为：

$$\begin{array}{lc} \text{节点} & \begin{array}{cccccc} a & b & c & d & e & f \end{array} \quad \text{相关的支路} \\ \mathbf{A}_a= \begin{array}{c} 1\\2\\3\\4 \end{array} & \left[\begin{array}{cccccc} -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & -1 \\ 1 & 0 & 0 & -1 & -1 & 0 \end{array}\right] \begin{array}{c} (a\ b\ f) \\ (b\ c\ e) \\ (c\ d\ f) \\ (a\ d\ e) \end{array} \end{array}$$

如果网络 N 的支路电流用一个 $b\times 1$ 的列向量 $\mathbf{i}$ 来表示，而且 $\mathbf{i}$ 的行和 $\mathbf{A}_a$ 的列按照相同的支路次序排列，则作用于所有节点的克希霍夫电流定律（简称 KCL）就可以十分简洁地用一个矩阵方程来表达：

$$\mathbf{A}_a\mathbf{i}=0 \tag{1.1}$$

例如，在图 1.1(b) 中，作用于所有节点的 KCL 可以表达为矩阵方程：

$$\begin{array}{c} \\ 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \end{array}\begin{array}{c} \begin{array}{cccccc} a & b & c & d & e & f \end{array} \\ \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & 0 & -1 & -1 & 0 \end{bmatrix} \end{array} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ i_d \\ i_e \\ i_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

如果将此矩阵方程展开，就可以得到四个熟悉的、分别作用于节点1—4的 KCL 关系式。

可以证明，方程组(1.1)中只有 $n-1$ 个方程是线性无关的。所以，描述一个连通网络 N 的最大数目的 KCL 独立方程组为：

$$\mathbf{A}\mathbf{i}=0 \qquad (1.2)$$

其中 $\mathbf{A}$ 是从 $\mathbf{A}_a$ 中划去任意一行所得到的矩阵，称为**降阶关联矩阵**。因为网络分析中常用的只是 $\mathbf{A}$，所以也简称它为关联矩阵。注意，$\mathbf{A}_a$ 中划去行所对应的节点恰好是网络分析中的所谓**参考节点**。

下面用定理形式给出关联矩阵 $\mathbf{A}$ 的一个重要性质。

定理 1.1　关联矩阵 $\mathbf{A}$ 中的 $n-1$ 个线性无关的列，与且仅与形成树的那些支路相对应。

推论 1.1　若将关联矩阵 $\mathbf{A}$ 划分为：

$$\mathbf{A}=[\,\mathbf{A}_T \,\vdots\, \mathbf{A}_L\,]$$

其中 $\mathbf{A}_T$ 的列对应于所选树 T 的树支，$\mathbf{A}_L$ 的列对应于连支，则行列式 $|\mathbf{A}_T|\neq 0$，即 $\mathbf{A}_T$ 为一个非奇异方阵。

例如，在图 1.1(b) 中，若所选树 T 由支路组($d\ e\ f$)构成，$\mathbf{A}$ 是由 $\mathbf{A}_a$ 中划去对应于节点4的那一行所得到的降阶关

联矩阵，则我们有

$$\mathbf{A} = [\mathbf{A}_T \vdots \mathbf{A}_L]$$

$$= \begin{array}{c} \\ 1 \\ 2 \\ 3 \end{array}\begin{array}{c} \begin{array}{cccccc} d & e & f & a & b & c \end{array} \\ \left[\begin{array}{ccc:ccc} 0 & 0 & 1 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & -1 \\ 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 \end{array}\right] \end{array}$$

且有

$$|\mathbf{A}_T| = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & -1 \end{vmatrix} = -1 \neq 0$$

以后，凡是一个矩阵的列(或行)被划分为对应于树和补树的两部分，我们总是把对应于树的部分写在前面。

1.3 回路矩阵

如果要用一个矩阵方程来表达克希霍夫电压定律（简称KVL），就要引入另一个也能包含有向图中全部信息的拓扑矩阵——**回路矩阵**。

如果给有向图中的回路规定一个参考方向，并标上箭头，就称之为**定向回路**。

对于具有 b 条支路、n_l 个定向回路的有向图 G_d，我们定义它的回路矩阵为一个 $n_l \times b$ 的矩阵 $\mathbf{B}_a$，

$$\mathbf{B}_a = [b_{ij}]$$

其中，若支路 j 在回路 i 中，且方向一致，则 $b_{ij}=1$；若支路 j 在回路 i 中，且方向相反，则 $b_{ij}=-1$；若支路 j 不在回路 i 中，则 $b_{ij}=0$。

例如，在图 1.1(b) 所示的有向图中，可取七个定向回路

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com