

电路的 计算机辅助分析

叶金官 编

高等教育出版社

电路的计算机辅助分析

叶金官 编

高等教育出版社

内 容 提 要

本书经高等学校工科电工教材编委会电路理论及信号分析编审小组评选审定,同意作为高等学校教学参考书出版。

全书共五章:线性电路的频率分析、线性电路的时域分析、非线性电路分析、稀疏矩阵技术、灵敏度分析和电路的最优化设计简介。前三章给出较完整的通用程序例子;各章均有应用例题及经过筛选的习题。书末附录中还给出 LU、STATE、POWS 三个通用程序及例题。

本书叙述简明,概念清楚。

本书可作为工科电类高年级学生、研究生学习电路的计算机辅助分析的教学参考书或教材,也可供有关教师及科技人员参考。

本书责任编辑 姚玉洁

2584/29

电路的计算机辅助分析

叶金官 编

*

高等教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

二二〇七厂印装

*

开本 787×1092 1/16 印张 13.5 字数 307,000

1983年11月第1版 1984年8月第1次印刷

印数 00,001—12,360

书号 15010·0549 定价 2.20 元

序 言

计算机辅助设计(简称 CAD)是随着计算机的发展而兴起的一门新技术,是计算机应用的一个重要分支。采用 CAD 技术既提高了设计效率 and 设计质量,又缩短了设计周期。因此 CAD 技术得到了日益广泛的应用。为适应我国四个现代化的需要,必须大力推广 CAD 技术。为此,我们编写了本书。本书侧重阐述计算机辅助电路分析的基本理论和方法,但也介绍一些关于优化设计的概念,同时还注意到反映国外在这方面的最新技术。为了使读者便于将书中介绍的各种方法应用于实际电路分析,本书还提供了若干例题及完整的通用程序(采用 FORTRAN IV 语言),以供参考。为了适用于教学参考,在有些章后面附有少量习题。

全书共分五章。第一章介绍线性电路的频率分析,包括线性电路的直流和正弦稳态分析,同时还介绍了求解线性代数方程的算法。第二章介绍线性电路的时域或暂态分析,包括用系统化方法形成电路方程及微分方程数值解两部分。第三章介绍非线性电路分析,包括用系统化方法形成电路方程及求解非线性方程的方法两部分。第四章介绍在求解线性代数方程方面的新技术——稀疏矩阵技术。第五章介绍电路的灵敏度分析及简单地介绍电路最优化设计的基本概念。

本书可作为高等工科院校的教学参考用书,也可作为电路设计方面的工程技术人员的参考读物。阅读本书需要具备一定的电路理论知识和数学基础,并对计算机语言 FORTRAN IV 有一定的了解。

在本书编写过程中曾得到西安交通大学邱关源教授的指导和帮助,对于邱关源教授在审阅初稿过程中所提的不少宝贵意见,以及在最后定稿时给予的大力协助谨致以衷心的感谢。另外,西安交通大学的黄东泉老师试用了本书初稿,在教学实践的基础上提出了一些宝贵意见,对此编者也致以衷心的感谢。

限于编者的水平,书中难免有不妥和错误之处,望读者指正。

编者

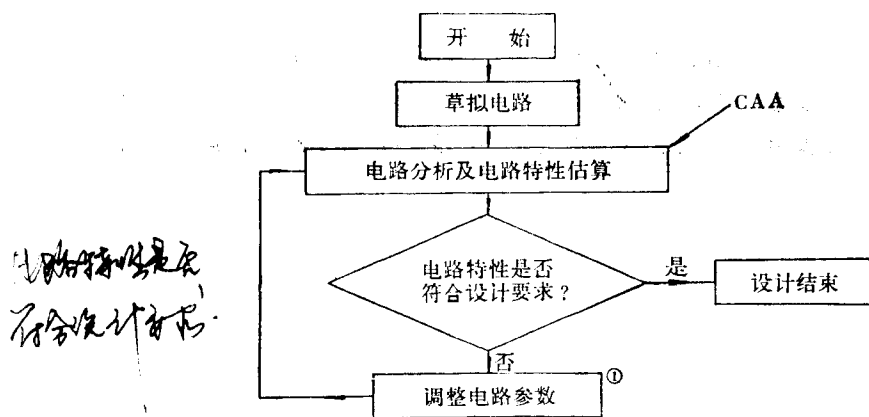
1982 年 6 月于西安交通大学

前言 CAD 概述

电路的计算机辅助设计(Computer-Aided Design, 简称 CAD)是近年来迅速发展起来的一门新技术。它给电路的设计和分析带来了新的生命力;它也是计算机应用的重要方面之一。用计算机来辅助电路设计虽然历史不长,但效果显著,成果累累。可以毫不夸张地说,没有 CAD 技术的发展,大规模和超大规模集成电路的设计是不可能的。近年来,世界各国就此技术纷纷发表文章,汇编专辑,出版书籍,同时还在大学中开设有关课程。目前在一些技术先进的国家内,可以说没有不懂 CAD 技术的电路设计人员。当前,我国人民正在为实现四个现代化而奋斗,计算机在各个领域内的应用必将迅速发展。在大学中开设有关课程迫在眉睫,懂得 CAD 技术,并能发展 CAD 技术,必将成为对我国科技人员的一个基本要求。

[1] CAD 从根本上改革了电路的设计方式。传统的电路设计很大程度依赖于设计人员的经验。设计时,设计者首先拟好电路,然后备齐元件,搭成试验电路板,经过反复调试,最后确定设计方案。这样做,不仅设计过程的时间很长,耗费人力和物力,而且还很难保证设计方案的合理性,更不用说最优化了。对于大规模集成电路的设计而言,采用传统的设计方式简直是不可能实现的。CAD 从根本上改革了电路的设计方式,它使设计人员的主要精力从“搭试验板”转到与计算机的“纸上谈兵”上来,通过“纸上谈兵”,计算机能在短时间内向设计人员提供一个实现设计目标的最优方案,根据这样的方案制成的电路,往往能收到“十拿九稳”的效果。

前图-1 为一般电路设计的流程图。图中第二框——草拟电路,即根据设计要求先草拟一个电路结构。这一工作目前基本上还依赖于设计人员的经验和已有的资料,也就是说,还不能实现由计算机自动地来确定电路结构。这是因为这一步工作实质上是一个电路的综合问题,目前只



前图-1 电路设计流程图

① 必要时还需调整电路结构。

有在滤波器电路的综合方面有比较成熟的理论。从流程图还可看出, 计算机辅助电路分析 (Computer-Aided Analysis, 简称 CAA) 是整个电路设计的重要环节。没有有效的电路分析方法和与之对应的计算机程序, 计算机辅助电路设计就是一句空话。目前在技术先进的国家内, 新的电路分析程序不断出现, 而且一个比一个有效、多功能。美国的 SPICE、ASTAP 以及丹麦的 NAP2 就是几个著名的电路分析程序。如果在调整电路参数这一框中采用最优化 (Optimization) 技术, 则可以获得最优化的设计结果。

[2] CAD 技术能更好地发挥电路理论在解决实际问题中的作用。众所周知, 节点电压法是进行电路分析计算的一个很有效的方法。从理论上讲, 不论电路的规模有多大, 不论电路多么复杂, 这种方法总是可行的。然而在实用中, 欲求解具有 10 个节点的小规模电路的节点电压, 计算量已经很大, 更何况许多实际电路的节点数往往远比 10 大, 例如, 由运算放大器组成的 RC 有源滤波器的节点数可为几十个; 小规模集成电路的节点数约为几百个; 大规模集成电路的节点数为上千个; 电力系统网络的节点数可达 10^4 以上。因此应用节点电压法用人工来手算上述电路实际上是不可能的, 所以随着实际电路越来越复杂, 在理论与实际之间逐渐形成了一条“鸿沟”。CAD 技术在理论与实际之间架起了一座桥梁, 因为上述电路的分析计算问题, 对于现代计算机而言是轻而易举的事。反过来, 计算机的使用也大大地促进了电路理论的深入发展, 目前, CAD 技术已发展成为电路理论方面的一个重要分支。

[3] 用计算机来辅助电路分析在程度上可以有所不同。最低程度的要求是: 分析者用手工写出电路方程, 然后用计算机来求解方程; 中等程度的要求是: 分析者将电路的拓扑结构及元件的参数值转化为计算机的输入数据, 然后由计算机形成电路方程, 并求解之; 高等程度, 即所谓自动分析方法的要求是: 分析者在计算机显示设备上作图, 由计算机自动识图、形成电路方程, 并求解之, 然后再在显示设备上显示计算结果, 或在别的输出设备上输出结果。本书的内容是根据中等程度的要求而安排的。至于计算机辅助电路设计问题, 在实际应用中, 设计目标是多种多样的, 这里不可能也不必要一一列举。本书只是一般介绍一些优化理论在电路设计中的应用。

需要说明的是, 本书所提到的“电路”系指一般电路。近年来国外又发展了各种对开关电容电路和超大规模集成电路的计算机辅助分析方法, 由于篇幅所限, 本书不准备介绍有关内容。但是可以预言, 读者只要掌握了本书的基本内容, 学习那些特殊电路的计算机分析方法也就不难了。

目 录

前言 CAD 概述	i
第一章 线性电路的频率分析	1
§ 1-1 实际电路元件的模型化	1
§ 1-2 输入数据结构	6
§ 1-3 电路方程的形成	11
§ 1-4 线性代数方程组的求解	23
[1] 高斯消去法(Gaussian Elimination)	23
[2] LU 分解法	26
§ 1-5 一个线性电路的直流分析程序	34
§ 1-6 一个线性电路的频率分析程序	40
第二章 线性电路的时域分析	51
§ 2-1 电路方程的形成	54
[1] 状态变量法	54
[2] 混合法	61
[3] 稀疏表格法(Sparse tableau approach)	64
§ 2-2 常微分方程的数值解法	66
[1] 前向欧拉法(Forward Euler Method)	67
[2] 后向欧拉法(Backward Euler Method)	67
[3] 梯形法	68
[4] 基尔法	68
[5] 龙格-库塔法	69
[6] e^{At} 幂级数求和法	70
§ 2-3 一个线性电路的时域分析程序	75
§ 2-4 采用暂态伴随模型(Transient Companion Model)的时域分析方法	86
§ 2-5 应用举例——计算分压器对阶跃激励的响应	94
第三章 非线性电路分析	99
§ 3-1 非线性器件的模型	99
§ 3-2 非线性电路的直流分析	104
§ 3-3 一个非线性电路的直流分析程序	114
§ 3-4 非线性电路的时域分析	124
第四章 稀疏矩阵技术	130

§ 4-1 方程顺序在稀疏矩阵技术中的重要性——廷奈-沃克(Tinney-Walker)算法与 马克威兹(Markowitz)算法.....	130
§ 4-2 稀疏矩阵的数据结构.....	141
§ 4-3 稀疏矩阵的 LU 分解.....	144
§ 4-4 解三角形方程.....	147
第五章 灵敏度分析和电路的最优化设计简介.....	153
§ 5-1 灵敏度分析.....	153
§ 5-2 电路的最优化设计简介.....	166
附录	
A-1 列主元 LU 分解求解线性代数方程组程序(LU).....	175
A-2 系统地建立电路状态方程的程序(STATE).....	179
A-3 用 $e^{A'h}$ 的幂级数求和法求解电路状态方程的数值解程序(POWS).....	198

第一章 线性电路的频率分析

用计算机来辅助电路分析,一般说来,不论对于线性电路还是非线性电路,不论是稳态分析还是暂态分析,其步骤大体如下:

- (1) 将实际电路元件模型化 (Modelling), 即将实际电路元件表示为若干理想电路元件的组合;
- (2) 将电路拓扑结构及元件值编写为计算机的输入数据;
- (3) 电路方程的形成或编写 (Formulation of circuit equations);
- (4) 电路方程的数值解;
- (5) 输出结果。

其中第(1)、(2)两步由分析者依靠手工来完成[第(2)步也可以由计算机来完成],第(3)、(4)步则由计算机来完成,但是采用何种方法来形成电路方程,以及采用何种算法来求解方程,却要分析者选择决定,并以程序(Program)的形式“告诉”计算机。图 1-1 概括了上述分析步骤。

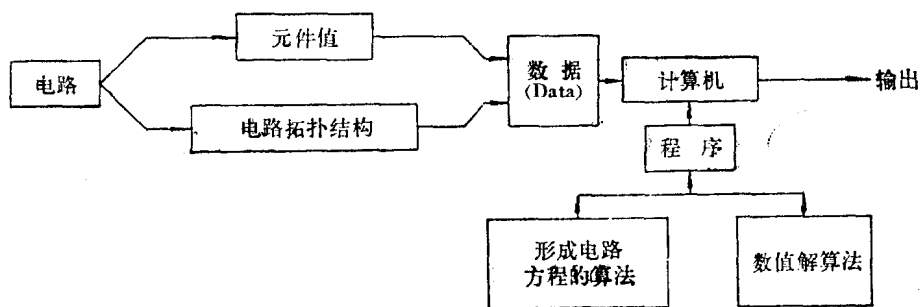


图 1-1

线性电路的频率分析实际上包括线性电路的直流稳态分析 ($\omega=0$) 和正弦交流稳态分析 ($\omega \neq 0$)。下面, 将按上述步骤来详细说明线性电路频率分析的方法。

§ 1-1 实际电路元件的模型化

任何实际电路元件, 根据其中所发生的物理过程, 往往可以用理想电路元件的组合来等效地表示, 这种方法称为实际电路元件的模型化。必须指出, 在采用这种等效表示时, 要注意抓住主要矛盾, 突出反映那些取支配地位的物理过程。因此, 同一实际电路元件, 在不同的条件下 (例如, 电路激励的频率不同), 可以用不同的理想电路元件的组合来等效地表示。虽然, 这种等效表示带有某种近似性质, 但是, 实践证明, 它是足够准确的, 而且还可以说是一种比较科学的方法。下面, 对电子线路中一些常见的实际元件, 举出它们的某些等效电路 (或称为模型), 并示于图 1-2 至图 1-12。

1. 电阻器: 其模型如图 1-2 所示。

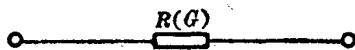
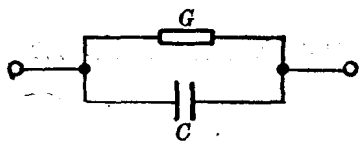
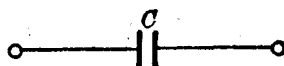


图 1-2 电阻器的模型

2. 电容器: 其模型如图 1-3(a)或(b)所示。



(a)



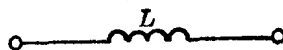
(b)

图 1-3 电容器的模型

3. 电感线圈: 其模型如图 1-4(a)或(b)所示。



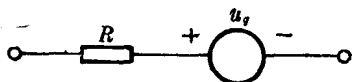
(a)



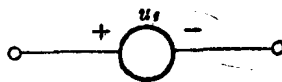
(b)

图 1-4 电感线圈的模型

4. 独立电压源: 其模型如图 1-5(a)或(b)所示。



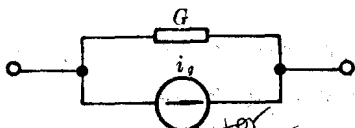
(a)



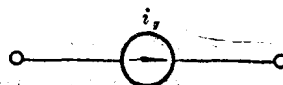
(b)

图 1-5 独立电压源的模型

5. 独立电流源: 其模型如图 1-6(a)或(b)所示。



(a)



(b)

图 1-6 独立电流源的模型

6. 晶体三极管(Bipolar transistor): 晶体三极管是一种三端元件, 分 PNP 型和 NPN 型两类。图 1-7(a)和 (d) 分别为 PNP 型和 NPN 型晶体三极管的元件符号; 图 1-7(b)和(c)为 PNP 型晶体三极管的小信号模型, 其中(c)为简化模型; 图 1-7(e)和(f)为 NPN 型晶体三极管的小信号模型, 其中(f)为简化模型。

7. MOS 三极管: MOS 三极管也是一种三端元件, 分 NMOS、PMOS 和 CMOS 三类。图 1-8(a)和(b)分别为 NMOS 三极管的元件符号及其小信号模型。

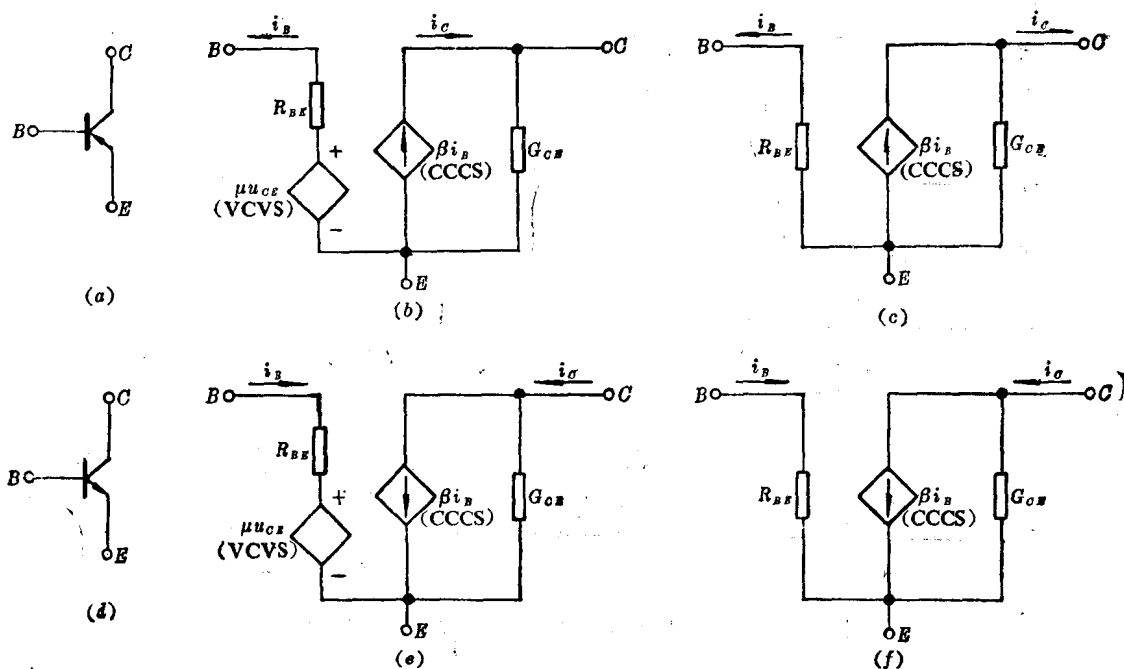


图 1-7 晶体三极管的小信号模型

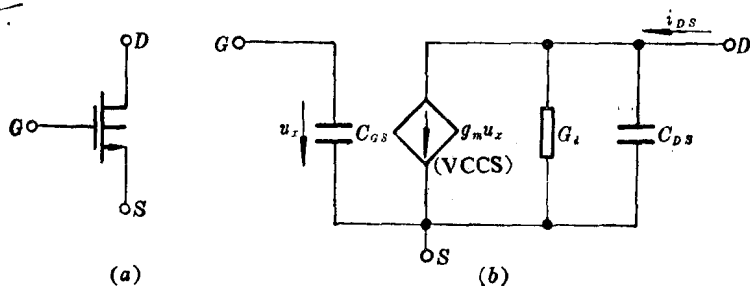
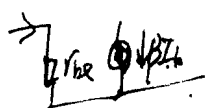


图 1-8 NMOS 三极管的小信号模型

8. 理想变压器: 理想变压器[其元件符号示于图 1-9(a)]的元件方程为

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \end{bmatrix} &= 0 & n_1 i_1 + n_2 i_2 &= 0 & \text{或} & i_1 = -\frac{n_2}{n_1} i_2 \\ \frac{u_1}{u_2} &= \frac{n_1}{n_2} & & & \text{或} & u_2 = \frac{n_2}{n_1} u_1 \end{aligned} \quad (1-1)$$

$I_1 = Y_{11}U_1 + Y_{12}U_2$
 $U_1 = Y$

图 1-9 理想变压器的元件符号及其模型

它的模型如图 1-9(b)所示。

9. 具有互感耦合的电感线圈：在电路图中，具有互感耦合并已知其同名端的电感线圈可用图 1-10(a)所示的元件符号来表示。它们的电压电流关系为

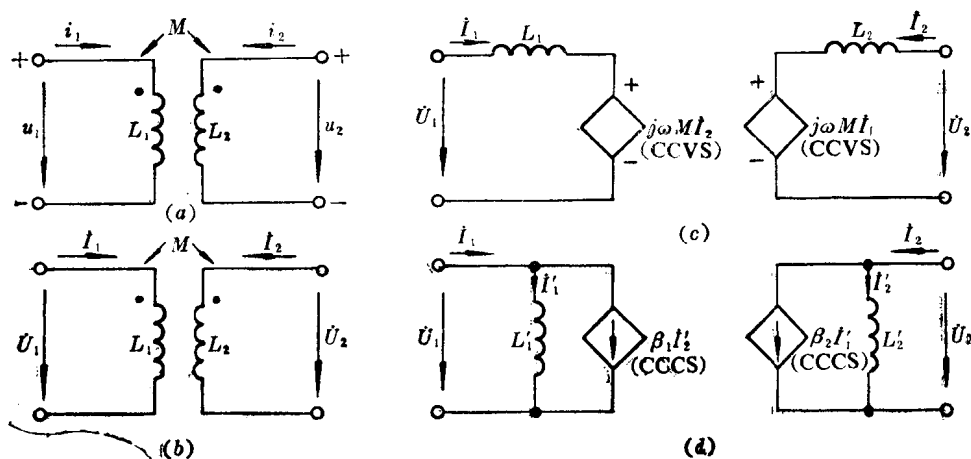


图 1-10 具有互感耦合的电感线圈的元件符号及其模型

$$\begin{cases} u_1 = L_1 \frac{di_1}{dt} + M \frac{di_2}{dt} \\ u_2 = M \frac{di_1}{dt} + L_2 \frac{di_2}{dt} \end{cases} \quad (1-2)$$

在正弦电流的情况下，若电压、电流用相量来表示，则式(1-2)又可改写为

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = j\omega L_1 \dot{I}_1 + j\omega M \dot{I}_2 \\ \dot{U}_2 = j\omega M \dot{I}_1 + j\omega L_2 \dot{I}_2 \end{cases} \quad (1-3a)$$

或

$$\begin{cases} \dot{I}_1 = \frac{1}{j\omega L_1} \cdot \frac{L_1 L_2}{L_1 L_2 - M^2} \dot{U}_1 - \frac{1}{j\omega L_2} \cdot \frac{M L_2}{L_1 L_2 - M^2} \dot{U}_2 \\ \dot{I}_2 = -\frac{1}{j\omega L_1} \cdot \frac{M L_1}{L_1 L_2 - M^2} \dot{U}_1 + \frac{1}{j\omega L_2} \cdot \frac{L_1 L_2}{L_1 L_2 - M^2} \dot{U}_2 \end{cases} \quad (1-3b)$$

若令 $L'_1 = L_1(1-K^2)$, $L'_2 = L_2(1-K^2)$ ，其中 K 为耦合系数，即 $K = M/\sqrt{L_1 L_2}$ ，则式(1-3b)又可改写为

$$\begin{cases} \dot{I}_1 = \frac{1}{j\omega L'_1} \dot{U}_1 - \frac{M}{L_1} \cdot \frac{1}{j\omega L'_2} \dot{U}_2 = \dot{I}'_1 + \beta_1 \dot{I}'_2 \\ \dot{I}_2 = -\frac{M}{L_2} \cdot \frac{1}{j\omega L'_1} \dot{U}_1 + \frac{1}{j\omega L'_2} \dot{U}_2 = \beta_2 \dot{I}'_1 + \dot{I}'_2 \end{cases} \quad (1-3c)$$

具有互感耦合的电感线圈可以用两类不同的模型来表示：包含受控电源的和不包含受控电源的。基于式(1-3a)，可以导出只采用理想电路元件互感 M 的等效模型，如图 1-10(b) 所示。若将式(1-3a)中由互感耦合产生的电压项用电流控制电压源(CCVS)来表示，则可导出如图 1-10(c)所示的等效模型。基于式(1-3c)，又可导出采用电流控制电流源(CCCS)的等效模型，如图

1-10(d)所示。显然,在含有电流控制电压源 C CVS 的模型中,控制系数与电源频率有关;而在含电流控制电流源 CCCS 的模型中,控制系数与电源频率无关,因此在实际应用中常采用后者。

10. 运算放大器(OP-AMP): 图 1-11(a)所示的为运算放大器的元件符号,其中 u_1 和 u_2 分

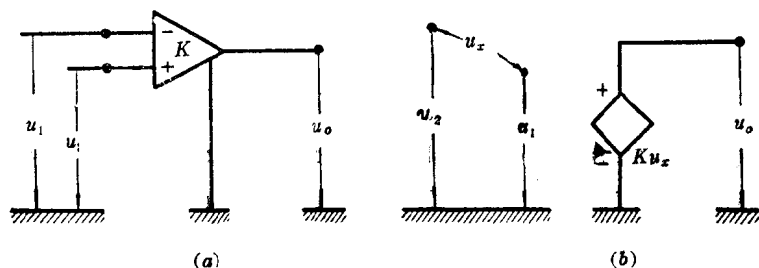


图 1-11 运算放大器的元件符号及其模型

别为负、正两输入端的输入电压, u_o 为输出电压, K 为开环放大倍数。图 1-11(b)为运算放大器的模型。

11. 传输线: 图 1-12(a)所示的为一段长度为 l 的传输线,其元件方程为

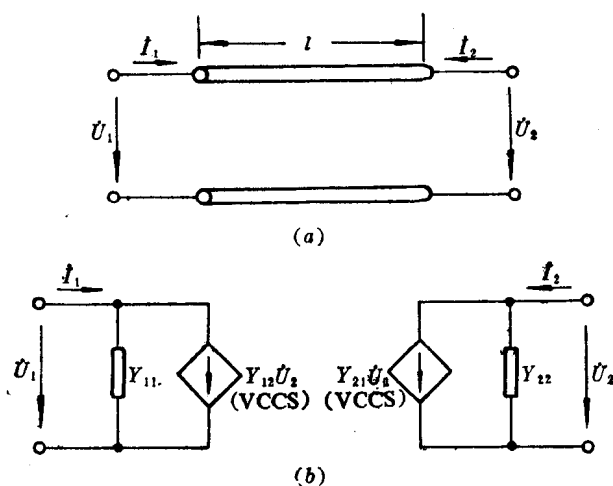


图 1-12 传输线及其模型

$$\begin{cases} I_1 = Y_{11}U_1 + Y_{12}U_2 \\ I_2 = Y_{21}U_1 + Y_{22}U_2 \end{cases} \quad (1-4)$$

其中

$$Y_{11} = Y_{22} = Y_c \operatorname{cth} \gamma l;$$

$$Y_{12} = Y_{21} = -Y_c \frac{1}{\operatorname{sh} \gamma l};$$

$Y_c (=1/Z_c)$ ——传输线的特性导纳;

γ ——传输线的传播常数。

基于式(1-4),可以导出含有电压控制电流源(VCCS)的模型,如图 1-12(b)所示。

综合上述模型可看出,在这些实际电路元件的模型中所包含的理想电路元件不外乎下列 10

种①:

- (1) 电阻 R (或电导 G);
- (2) 电感 L ;
- (3) 电容 C ;
- (4) 电压源 u_s ;
- (5) 电流源 i_s ;
- (6) 电流控制电流源 (Current Controlled Current Source, 简称 CCCS);
- (7) 电压控制电流源 (Voltage Controlled Current Source, 简称 VCCS);
- (8) 电流控制电压源 (Current Controlled Voltage Source, 简称 CCVS);
- (9) 电压控制电压源 (Voltage Controlled Voltage Source, 简称 VCVS);
- (10) 互感 M 。

因此, 在进行线性电路频率分析时, 我们只要考虑处理上述 10 种理想电路元件即可。例如, 对于图 1-13(a) 所示的有源低通滤波器, 我们可以用图 1-13(b) 所示的电路模型来表示。

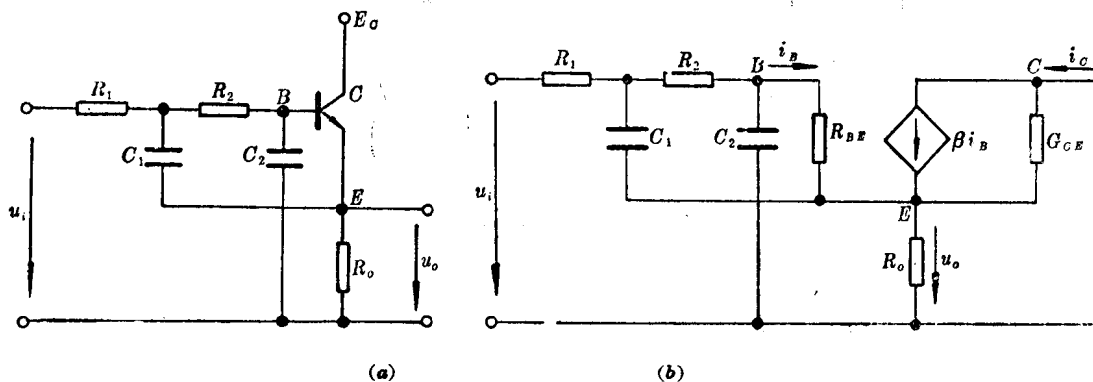


图 1-13

§ 1-2 输入数据结构

用计算机辅助电路分析时, 对于未附有特殊的能读图的外围设备的计算机来说, 分析者必须把电路图转换为计算机所能识别的数据。各分析者所采用的数据结构可以互不相同, 但是它们都必须符合节省计算机内存和便于计算机处理的原则。本节将说明如何根据给定的具体电路图来编写输入数据, 同时还介绍一种适用于频率分析的数据结构方案。

[1] 复合支路的定义②

在具体介绍编写输入数据的方法之前, 必须首先规定一条复合支路的内容, 也即只有定义了复合支路, 才能数出电路图的支路数。图 1-14 所示的部分电路定义为一条复合支路。从图中看出, 一条复合支路最多可以包含 5 个电路元件; 当然, 如果缺少若干电路元件, 则仍算是一条支

① 若用受控电源表示具有耦合的线圈, 则只有 9 种。

② 见参考资料[1]第十、十四章。

路。本书中规定：在复合支路中，支路电流 i_b 与支路电压 u_b 的参考方向一致；独立电压源 u_s 和独立电流源 i_s 的参考方向分别与 u_b 和 i_b 的参考方向相反；受控电压源的电压 u_d 及无源元件的元件电压 u_e 的参考方向与支路电压 u_b 的参考方向一致；受控电流源的电流 i_d 及无源元件中的电流 i_e 与支路电流 i_b 的参考方向一致。在编写输入数据时，必须注意上述关于参考方向的规定，如遇某个支路中的电源电压或电流的方向与上述规定不一致时，则相应的值应取负值。

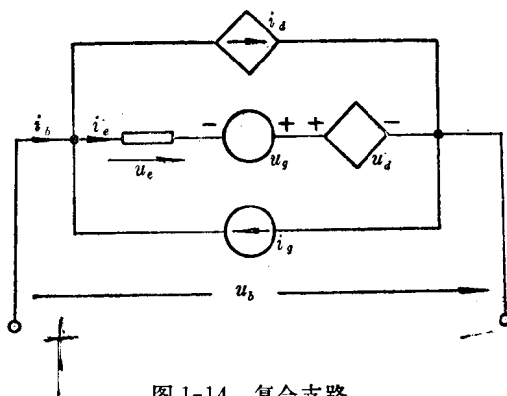


图 1-14 复合支路

[2] 编写输入数据的方法

下面通过一些实例来具体说明怎样根据给定的电路图来编写输入数据。需要说明的是这里所采用的数据结构只不过是一种方案而已，它并非唯一的。

例 1-1

图 1-15(a) 所示为一个无受控源的直流电路，根据复合支路的定义可知该电路具有四条支路，图 1-15(b) 是它的有向图，试编写出该电路的输入数据。

对于这种电路，可以用 3 个变量 M 、 N 和 L 分别表示电路的支路数、独立节点数和元件数，再用两个数组 $TOPLOG$ 和 $VALUE$ 来分别描述该电路的拓扑结构和电路元件值。这时，这 3 个变量和两个数组应能唯一地确定一个电路。为此，可以这样来设计这两个数组：首先让 $TOPLOG$ 为一个 L 行 4 列的数组，每一行中的 4 个数必要而充分地描述某一个元件的元件类型以及在电路中的连接情况。在这里规定：位于第 1 列的数表示该元件所在支路的号数；位于第 2 列的数表示该元件所在支路始节点（支路电流自该节点流入支路）的号数；位于第 3 列的数表示该元件所在支路终节点（支路电流自该节点流出支路）的号数；位于第 4 列的数表示该元件的类型。其次让数组 $VALUE$ 为一个 L 行 1 列的数组，且每个数组元素就是每个元件的参数值。必须指出，在组织 $TOPLOG$ 和 $VALUE$ 的数据时，电路元件的排列次序必须相同，即在 $TOPLOG$ 和 $VALUE$ 两数组中，位于相同行的数必须对应于同一元件的数据。这样， $TOPLOG$

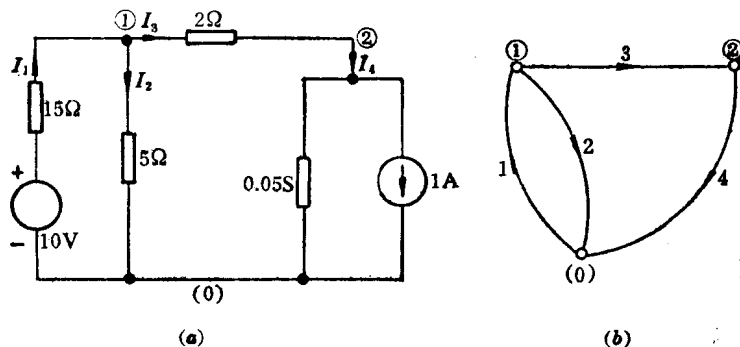


图 1-15 例 1-1 图

和 VALUE 两数组的结构形式如下:

TOPLOG

元件 顺序	支路 号数	始节点 号 数	终节点 号 数	元件 类型
1	·	·	·	·
2	·	·	·	·
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
L	·	·	·	·

VALUE

元件顺序	元件值
1	·
2	·
⋮	⋮
L	·

为使数据结构简单起见,用数而不用文字来代表元件的类型。在本书中约定:“0”代表电导 G ;“1”代表电阻 R ;“2”代表电容 C ;“3”代表电感 L ;“4”代表独立电压源 u_s ;“5”代表独立电流源 i_s ;“6”代表电流控制电流源 CCCS;“7”代表电压控制电流源 VCCS;“8”代表电流控制电压源 CCVS;“9”代表电压控制电压源 VCVS;“10”代表互感 M 。现在,试根据上述规定来编写图 1-15 所示电路的输入数据。首先,选定参考点(0),并编好其余节点的号数如图,数出独立节点数 $N=2$;其次,根据复合支路定义,数出支路数 $M=4$,并标出各支路电流的参考方向(电流 i 的下标即表示支路号数);再数出电路的元件数 $L=6$ 。然后,根据构成 TOPLOG 和 VALUE 的原则,写出 TOPLOG 和 VALUE 两数组如下:

$$\text{TOPLOG:} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 1 \\ 2 & 1 & 0 & 1 \\ 3 & 1 & 2 & 1 \\ 4 & 2 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 4 \\ 4 & 2 & 0 & 5 \end{bmatrix} \quad \text{VALUE:} \begin{bmatrix} 15.0 \\ 5.0 \\ 2.0 \\ 0.05 \\ 10.0 \\ -1.0 \end{bmatrix}$$

例 1-2

图 1-16(a)所示为一具有受控源的直流电路,图 1-16(b)是它的有向图。与上例相比,本例多了一种新元件——受控源。因此,只要选择一种用数来描述受控源的方法,即可写出该电路的输入数据。对于一个受控源,需要说明的是:受控源所在的支路号数、控制支路的号数、受控源的类型和控制系数值这 4 个数据。当受控源的数目较少时,为了方便,仍将有关受控源的数据安排在数组 TOPLOG 和 VALUE 中。具体地说,在数组 TOPLOG 中,位于第 2 列的数表示控制支路的支路号数;位于第 3 列的数表示受控源所在支路的支路号数;位于第 4 列的数仍表示元件的类型。这样,该行的第 1 列元素就成为多余存储单元,可补零处理之。显然,这种方法虽很简单,但浪费了计算机的内存。因此,若电路中具有较多个受控源时,可以采用另一种节约内存的

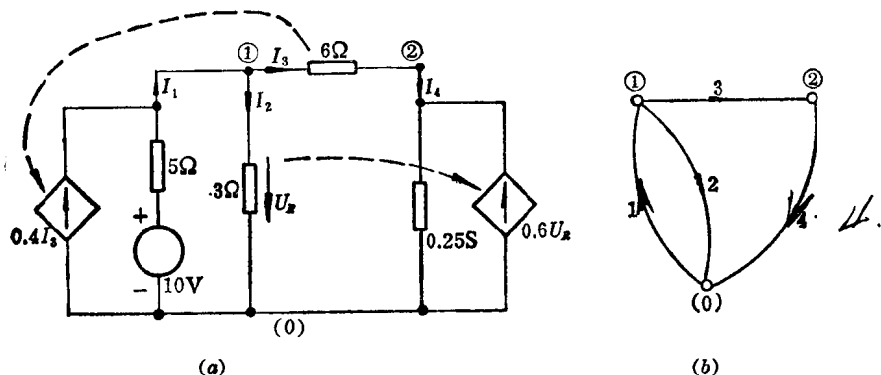


图 1-16 例 1-2 图

方法, 比如说, 将数组 TOPLOG 一分为二: TOPLG 1 和 TOPLG2, 且让 TOPLG1 存放对应于除受控源以外的电路元件的数据, 而让 TOPLG2 存放对应于受控源的数据。这样, TOPLG1 的列数为 4, 而 TOPLG2 的列数为 3, 它们的行数则分别对应于两类电路元件的个数。下面给出用第一种方法写出的图 1-16 所示电路的输入数据。至于用第二种方法写出图 1-16 所示电路的输入数据, 则留给读者作为练习。

$M=4, N=2, L=7$ (元件数)

TOPLOG:	$ \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 1 \\ 2 & 1 & 0 & 1 \\ 3 & 1 & 2 & 1 \\ 4 & 2 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 4 \\ 0 & 3 & 1 & 6 \\ 0 & 2 & 4 & 7 \end{bmatrix} $	VALUE:	$ \begin{bmatrix} 5.0 \\ 3.0 \\ 6.0 \\ 0.25 \\ 10.0 \\ 0.4 \\ -0.6 \end{bmatrix} $
---------	---	--------	--

例 1-3

图 1-17(a) 所示为一个具有互感的正弦电流电路, 图 1-17(b) 是它的有向图。若要计算该电路的频率特性, 则应怎样编写输入数据?

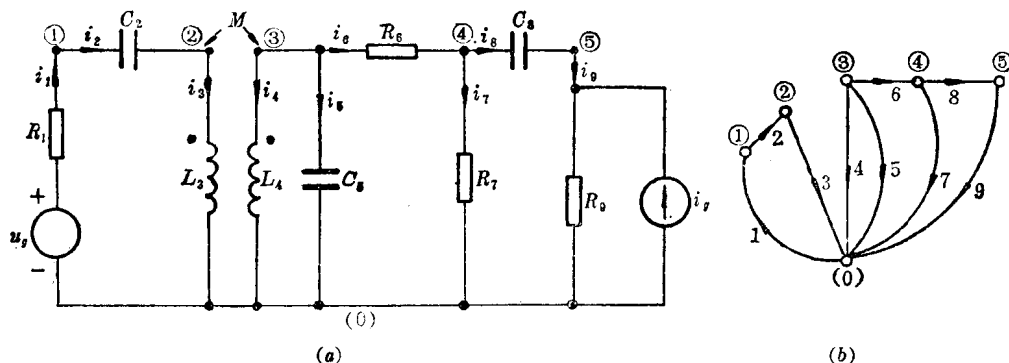


图 1-17 例 1-3 图

首先, 分析者应规定频率特性的频率范围, 即规定下限频率 f_l 和上限频率 f_h ; 而且, 还必须规定频率特性上各点的频率按什么规律递增, 以及增量是多少。常用的递增规律有: