

973670

电工基础

15.10.1

6377

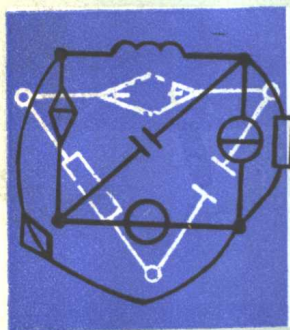
T.4



102

102

102



计算机辅助电路分析

哈尔滨船舶工程学院电工教研室 编



$$\begin{aligned} \sum I(s) &= 0 & \sum U(s) &= 0 \\ \sum i &= 0 & \sum \dot{U} &= 0 \\ \sum i &= 0 & \sum u &= 0 \end{aligned}$$

国防工业出版社

电 工 基 础

第 四 册

计算机辅助电路分析

哈尔滨船舶工程学院电工教研室 编

国防工业出版社

(京)新登字106号

内 容 简 介

本书可与已出版的《电工基础》第一、二、三册配套使用。

本书共分五章。内容有：电路稳态分析方程的建立；电路稳态分析方程的求解；稀疏矩阵技术；线性电路的瞬态分析；非线性电路分析。

本书较系统地阐述了计算机辅助电路分析的基本理论与方法，并配有八个教学程序和软盘。每章附有习题可供分析与上机演算。本书可作为高等工科院校电类专业的教材或教学参考书，也可供工程技术人员自学之用。

电 工 基 础

第 四 册

计算机辅助电路分析

哈尔滨船舶工程学院电工教研室 编

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路23号)

(邮政编码 100044)

新华书店经售

北京市飞龙印刷厂印刷

787×1092毫米 32开本 印张12³/₄ 282千字

1993年6月第一版 1993年6月第一次印刷 印数：0001—2000册

ISBN 7-118-01015-4/TM·32 定价：10.40元

前 言

在1979年我室编写的《电工基础》一书中，曾增加了一些近代电路理论知识。经过几年的教学实践，发现把这些内容集中放在几章内不太理想，内容显得有些庞杂。教学过程中，实验环节也有所削弱。因此，我们认为应该改革现行的《电工基础》的课程设置，拟设立《电路基础》、《网络分析导论》和《电路实验与量计》三门课，并增设《计算机辅助电路分析》、《非线性电路基础》和《网络综合基础》三门选修课。

这样的课程设置，各课程重点突出，体系较为合理。既能加强基础理论和实验环节，又能解决电工与物理，低频电路和信号分析等课程的衔接问题。同时还可适应各种专业的要求，选择所需课程组织教学。这个方案曾在我院电子工程系八一级和八二级试用过，效果较好。在此基础上，同时吸取广大读者对1979年版《电工基础》的意见，进行增订与改编。改编后的这套教材，沿用《电工基础》这一书名，但分三册和三本选修课教材，陆续予以出版。

在第二册《网络分析导论》中介绍了关于近代电路理论的基本内容，其中网络方程与矩阵分析及状态方程两章均涉及如何用计算机分析电网络的问题。在第三册《电路实验与量计》的实验部分中又介绍了电路的微机辅助分析实验，使读者对如何用计算机分析电路有了一些初步了解。为了进一步系统地介绍用计算机分析电路的理论与方法，我们编写了这本《计算机辅助电路分析》选修课教材作为《电工基础》

第四册出版。

本书主要内容包含线性稳态与瞬态电路分析、非线性电路分析和稀疏矩阵技术等三部分共五章。作为初学者的入门教材,为了简化内容,突出实用,满足更多读者自学需要,本书以单元件支路为支路定义,直接建立改进节点方程为主线贯穿各章;采用理论、方法与程序并重的指导思想,围绕程序阐述原理与方法;程序以BASIC语言写成,并以注释方式对程序中的变量,数组和程序各子段用英文给予说明。各程序的使用和运行结果均有举例说明,以便阅读。

本书由陈式据、张保郁主编,第一、二章由张保郁编写;第三章由李宇光编写;第四章由曲杰琳编写;第五章由苏晓红编写。在编写过程中,付勤、孙明海等同志对程序的调试做出了一定的贡献,在此表示衷心的感谢。本书虽经试用并吸取多方意见写成,但错漏之处在所难免,希望广大读者特别是使用本书的教师和同学给予批评指正。

程序的输入与调试是十分繁琐的事。为了方便广大读者更好地使用本教材,我们将提供含本书中八个教学程序的软盘(PC机或APPLE机用),需要的读者请与哈尔滨船舶工程学院809教研室曲杰琳联系。

编 者

1991年11月

目 录

绪论	1
第一章 电路稳态分析方程的建立	7
§ 1-1 改进节点法	8
§ 1-2 无源元件的处理	12
§ 1-3 独立源的处理	16
§ 1-4 受控源的处理	25
§ 1-5 互感的处理	47
§ 1-6 表格法	53
小结	65
习题	66
第二章 电路稳态分析的方程求解	76
§ 2-1 高斯消元法	76
§ 2-2 矩阵的求逆解法	95
§ 2-3 LU 分解法	101
§ 2-4 稳态分析的程序举例	107
小结	146
习题	146
第三章 稀疏矩阵技术	157
§ 3-1 稀疏矩阵的存储方式	158
§ 3-2 稀疏矩阵的求解方法	166
§ 3-3 稀疏矩阵技术的应用	184
小结	207
习题	208

第四章 线性电路的瞬态分析	212
§ 4-1 瞬态电路元件伴随模型的建立	213
§ 4-2 伴随模型方程的建立与求解	223
§ 4-3 状态方程的直接建立	234
§ 4-4 状态方程的时域解	252
小结	286
习题	286
第五章 非线性电路分析	291
§ 5-1 非线性元件的物理模型	291
§ 5-2 非线性电路的直流分析	299
§ 5-3 非线性电路的瞬态分析	334
§ 5-4 分段线性化分析法	344
小结	367
习题	368
附录 C语言的交流分析程序 CACAP 清单	373

绪 论

计算机辅助电路分析与设计 (Computer Aided Circuit Analysis And Design缩写为CACA与 CACD) 是20世纪60年代形成的一门新学科。它是研究以数字计算机为工具来处理电路的分析与设计问题。即分析与设计者预先提供电路的原始数据或设计方案, 然后让计算机自动完成分析与设计工作。随着电网络的规模越来越大, 对于技术要求高而周期要求短的设计, 如采用传统的分析与设计方法, 不仅费时多、精度低、效益差, 而且难以实现设计的合理性与最优化; 对于飞速发展的大规模和超大规模集成电路的设计, 如采用传统的方法, 则更显得无能为力了。自从有了数字计算机, 可以采用计算机辅助电路分析与设计, 从根本上改变了电路分析与设计的方式, 大大提高了计算电路的规模、速度与精度, 使分析与设计人员能在短时间内获得最佳结果。

目前计算机辅助电路分析与设计的内容已相当广泛。可用于对原理电路进行分析计算使之最优化; 可对印制板的制板与布线进行设计; 可完成对测量数据的处理与分析等。利用计算机来设计原理性电路, 可以采用如图 0-1 所示的过程来进行, 即先根据设计指标和要求, 草拟一个包括电路图形和元件参数的原始方案, 然后进行电路的特性分析, 即 CACA。如果分析结果表明电路的特性与设计要求相符, 则说明设计成功; 如果不符, 则需要对原始电路的结构和参数进行调整或修改, 然后继续分析。如此反复进行调整、分析,

直至最后取得满意结果为止。由图 0-1 的过程不难看出，CACA 是 CACD 的核心，为实现最佳设计，必须做大量和有效的分析计算。

CACA 最初只限于对人工列出的电路方程，编制出专用的程序用计算机求解，随后发展为将电路的结构和参数送入计算机，由计算机自动建立电路方程，自动求解并输出结果。进一步发展将是用光笔在计算机屏幕上草拟电路图，让计算机自动识图而建立方程，并求解输出。关于电路结构和参数等输入数据，一般采用高级语言所规定的

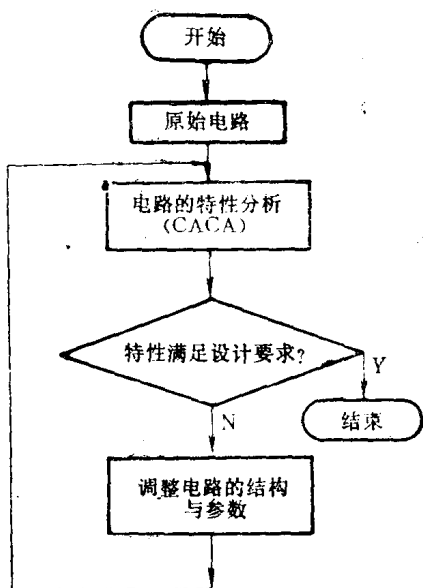


图 0-1

格式，依一定的顺序输入，常称为固定格式输入。这种输入格式在使用中不够灵活，但比较简单易于掌握。另一种常见的是自由格式输入，其输入数据规定用一种不同于高级语言要求而便于电路分析与设计的格式，在按这种格式输入后，程序再按高级语言的要求进行相应处理。这种输入格式较为灵活方便。本书作为初学者的教材，所列程序仍采用固定格式输入。

一般一个完整的 CACA 过程如图 0-2 所示。即首先应依据实际电路中元、器件的特性和使用条件，建立由理想元

件构成的电路图，然后选取电路变量和分析方法，列写电路方程即构造电路的数学模型。再据电路特点，选择合适的求解电路方程的算法，以求达到计算速度快、精度高和计算电路规模大的目的。只有在数学模型和算法确定后，才能用算法语言编制源程序。源程序完成后需送入计算机进行调试，只有在程序通过后才能将电路的结构和参数以数码形式输入，让计算机按程序进行运算，最后输出结果。

由上可见，学习本课程的目的在于使读者具有针对电路的特点，选择合适的算法，能读懂，会使用现有程序，进而具有编制符合要求的电路分析程序的能力。为了编制出优化的电路分析程序，必须了解程序编制的基本要求。现将其分述如下：

(一) 扩大程序的通用性

编制一个程序需要花费大量的精力与时间，因此针对一个具体电路编制一个专用程序的办法显然不如编制一个有广泛适用性的通用程序更能提高分析效率。

目前国内外正式投入使用的一些

程序，其功能都很强。例如有的既能做直流分析，又能做正

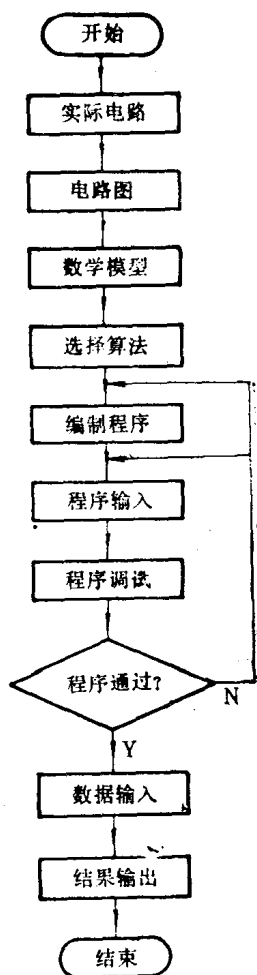


图 0-2

弦交流分析，既能做稳态分析，又能做瞬态分析；既能做线性电路分析，又能做非线性电路分析；既能对典型参数做分析计算，又能进行统计分析；有的还可做灵敏度和噪声分析等。需要指出的是，若程序的通用性越强，则越复杂，越难编制和读懂，运行需要的计算机也越大。本书所列各程序，主要按由简到繁，循序渐进的教学原则出发，适当照顾了通用性。

（二）提高运算精度

不能认为计算机的精度很高就可忽视程序中产生的计算误差。实际上，对于任何计算都存在计算误差和精度要求，其误差主要来自：

1. 计算机本身的固有误差

主要指输入计算机的数和计算机进行运算时都会因计算机字长有限而产生舍入误差。例如在完成十进制与二进制数的转换和在四则运算时都不可避免地会带来舍入误差。这些误差的影响，一般与手算时相似。因此，在手算时对数据处理中一些因舍入误差而造成结果出错的方法，在编制程序时也要尽量予以避免。

2. 元件模型与参数带来的误差

在CACA中，电路元件一般要用其等效电路模型和相应参数表示，因此电路模型的近似程度和所取参数的准确度是关系计算结果精度的重要因素。特别在处理非线性元件的近似模型与参数时，更应当注意，否则会产生较大误差。至于电路的分布参数的影响能否忽略，则应视计算电路的具体情况而定。

3. 计算方法带来的误差

首先应当注意算法的稳定性。例如在使用迭代法求解方

程时，需要考虑收敛条件是否满足和初值选取是否适当，否则有可能随着迭代次数的增加，误差的绝对值会不断地被扩大，从而产生不稳定的结果。其次应当注意算法的近似程度，要尽量选取较好的近似算法。

(三) 提高运算速度

决不能因为计算机的运算速度快而可忽视提高程序的运算速度。虽然目前已经有运算速度为每秒上亿次的计算机，但如果用它去完成一个大型电路瞬态特性的最优化设计，也需要几个或几十个甚至更多的机时，那么显而易见，加快程序的运算速度仍然是一个重要的研究课题。提高运算速度的途径，主要有合理地选择算法。例如求解线性代数方程组，通常采用高斯消元法而绝不使用计算行列式值的办法；采用合理的数据结构（将在本书第三章中讨论）以及在四则运算中尽量多用运算较快的加、减和乘法，少用运算较慢的除法等等。

(四) 节省计算机内存

计算机的内存容量是有限的。如果在程序中不注意节省内存，则解题规模就会缩小；如果借助外存，则又会降低计算速度。节省内存的途径有多种办法，例如在建立改进节点方程时，我们用一维数组作为其右端列向量，用以存储关联各节点的等效电流源和电压源的值，而在求解后，又用它来存储方程的解向量。这样就少开一个一维数组，从而节省了内存；又如如在求逆子程序中应用了就地存储的办法，即将变换后的新一列元素仍存放在原矩阵的同一列中，以节省内存；在第三章中还要介绍如何用一维数组来存储 $N \times M$ 阶矩阵的特殊技术。需要指出的是，加快运算速度和节省内存之间经常存在矛盾，因此，在编制程序时要根据具体情况分清主次，

适当处理，以求兼顾。

对编制程序除上述基本要求外，还要力求简捷，减少重复。要求读者建立编制程序的逻辑思维，学会用算法语言实现理论分析，掌握每一过程的意义，推敲每条语句的作用。经验说明，程序编制的失败，往往由于对整个计算过程缺乏周密分析和仔细考虑的结果。编制一个复杂的程序，往往需要多次反复的运算和修改才能获得成功，耐心和细致则是成功的秘诀。

本书共分五章。第一章为电路稳态分析方程的建立。主要论述用改进节点法直接建立直流网络和正弦稳态网络方程的依据及形成程序的方法；用表格法建立直流网络方程的依据及形成程序的方法。第二章为电路稳态分析方程的求解。主要介绍线性代数方程组的直接解法，其中包括高斯消元法，求逆解法及 LU 分解法。并介绍三个完整的稳态程序，即直流分析程序 DCAP、交流分析程序 ACAP 和表格法直流分析程序 DCTAP 及其应用。第三章为稀疏矩阵技术。主要论述稀疏矩阵的特点及存储格式；稀疏矩阵的求解以及如何应用稀疏矩阵技术求解表格法方程及改进节点方程的方法和程序 DCSMAP 介绍。第四章为电路的瞬态分析。主要介绍电路元件的瞬态伴随模型；如何用瞬态伴随模型建立改进节点方程和用迭代法求解。并介绍了完整的瞬态伴随模型法程序 TRAMAP 及其应用。对用状态变量法建立瞬态电路方程及求解也作了较详细的论述，并介绍了程序 TRSVAP。第五章为非线性电路分析。主要讨论非线性元件的物理模型；非线性电路的直流分析程序 NLD CAP 介绍；非线性电路的瞬态分析及分段线性化法等。本书的重点是第一、二、四章，即电路的稳态与瞬态分析。

第一章 电路稳态分析方程的建立

在计算机辅助电路分析中，最常采用的建立电路方程的方法是节点法、改进节点法和表格法。选用节点法的原因，在于其选取独立变量（即独立节点）简单、不受电路结构（平面或非平面网络）的限制以及适应近代大规模电路常具有支路多而节点少的特点。然而，当网络中出现仅含独立电压源或受控电压源的支路时，要系统地列写节点方程将会遇到困难。当然，也可以采用人为地给电压源串联一个实际上可以忽略的小电阻而构成一般支路或将电压源实行移位等方法来处理，然而更为适合的办法则是采用改进节点法。改进节点法只是对原来的节点法进行了某些改进，既保存了节点法的优点，又不改变原网络的结构，更适合于计算机工作，因而被广泛应用。近代国内外著名的大型通用电路分析程序大多采用这种方法。

表格法则是另一种常用的分析方法。它是以表格形式，按照 KCL、KVL 以及支路伏安关系来建立方程，因而较之节点法或改进节点法更为简便。但它形成的方程阶数较高，直接存储和求解，占用内存大而且解题速度慢。不过，在方程系数矩阵中的零元素较多，对非零元素而言，其所占位置则是稀疏的，可用近期发展起来的稀疏矩阵技术求解（详见第三章），因而使表格法也得到广泛应用。

本章以介绍改进节点法为主，对表格法也作适当介绍。本章仅限于对线性网络进行分析，至于非线性网络分析将

第五章中介绍。

本章本应以正弦稳态分析为主旋律进行分析，但考虑到由浅入深的认识规律，在某些情况下却适当地应用了先特殊（直流分析）后一般（交流分析）的方法。需要指出的是，直流分析即电阻电路分析是本课程的基础。由它不仅可导出正弦稳态分析的程序设计，而且以后的瞬态分析与非线性电路也都是将其化简为电阻电路再进行程序设计，可见直流分析虽然简单，但却是十分重要的。

§ 1-1 改进节点法

在《网络分析导论》一书中，对不含受控源的改进节点方程的建立已有论述，这里只作简要复习。而对含受控源的改进节点方程建立，将在本章 § 1-4 节中详细讨论。

应当指出的是，在节点法中我们通常采用一般支路的支路定义。在改进节点法中除电压源或受控压源采用单元件支路（即一个元件作为一条支路）外，其它支路通常仍采用一般支路的支路定义，以便增大网络的运算规模。但由于一般支路的参考方向应用时易于出错，因而本书对所有元件均统一采用单元件支路的支路定义。而所有支路的电压和电流的参考方向都采用关联参考方向。在单元件支路的定义下，KCL的一般矩阵形式可写成

$$AI_s = [A_v : A_v : A_t] \begin{bmatrix} \dot{I}_{Bv} \\ \dot{I}_{Bv} \\ \dot{I}_{Bt} \end{bmatrix} = 0$$

或

$$[A_v : A_v] \begin{bmatrix} \dot{I}_{Bv} \\ \dot{I}_{Bv} \end{bmatrix} = \dot{C}_s \quad (1.1)$$

式中, A_Y 、 A_V 和 A_I 是关联矩阵 A 的分块矩阵, $\dot{I}_{BY}$ 、 $\dot{I}_{BV}$ 和 $\dot{I}_{BI}$ 是支路电流 $\dot{I}_B$ (即元件复电流) 的分块矩阵, 它们分别对应于非电源支路 (下标 Y)、独立电压源支路 (或零阻抗支路, 下标 V) 和独立电流源支路 (下标 I); C_s 是 $A_I \dot{I}_{BI}$ 即电流源复电流的列向量。而 KVL 的矩阵形式将分别为

$$A_Y^T \dot{V}_N = U \quad (1.2)$$

及
$$A_V^T \dot{V}_N = \dot{V}_s \quad (1.3)$$

式中, $\dot{V}_N$ 为独立节点的复节点电压列向量; U 为非电源支路的复支路电压列向量; $\dot{V}_s$ 为独立电压源的复电压列向量。

再按照支路的伏安关系

$$\dot{I}_{BY} = Y_B U \quad (1.4)$$

式中, Y_B 为支路导纳矩阵。由以上诸式我们可得出下列方程组

$$A_Y Y_B A_Y^T \dot{V}_N + A_{I1} \dot{I}_{BI} = C_s$$

$$A_V^T \dot{V}_N = \dot{V}_s$$

或

$$\begin{bmatrix} Y_N & A_V^T \\ A_Y^T & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{V}_N \\ \dot{I}_{BV} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_s \\ \dot{V}_s \end{bmatrix} = \dot{I}_s \quad (1.5)$$

式中, $Y_N = A_Y Y_B A_Y^T$ 为节点导纳矩阵, $\dot{I}_s$ 为方程的右端列向量, 其上半部为电流源列向量 C_s , 下半部为电压源电压的列向量 $\dot{V}_s$ 。式 (1.5) 即为不含受控源时的改进节点方程的矩阵形式。显然方程 (1.5) 中的变量, 既有节点电压 $\dot{V}_N$, 又有流过电压源的电流 $\dot{I}_{BV}$, 因此式 (1.5) 又称为网络的混合型方程组。式中的系数矩阵共有四个分块, 即 Y_N 、 A_V^T 、 A_Y^T 和 0 。设独立节点数为 NN , 电压源的个数为 NV , 则它们的阶数分别为 $NN \times NN$ 、 $NN \times NV$ 、 $NV \times NN$ 及 $NV \times NV$, 而 C_s 及 $\dot{V}_s$ 的阶数则分别为 $NN \times 1$ 和 $NV \times 1$ 。该

式不仅是分析稳态电路的基本方程,也是分析瞬态和非线性电路的基本方程。换句话说,它是贯穿本书各章编制程序的基本依据。

必须指出,在计算机辅助分析中,为了扩大解题规模(即减少计算机内存)和提高运算速度,在方程建立中要尽量减少矩阵数目和矩阵运算。因此,对混合型方程(1.5)中的分块矩阵 Y_N 、 A_V 、 A^T 及 I ,常由计算机按电路输入的结构与参数的数据直接形成。例如 Y_N 矩阵,是按支路关联各节点的自导纳和各节点间的互导纳直接形成的,而不采用先分别建立 A 、 Y 、与 A^T 矩阵而后相乘而得的办法。下面以简单的电阻电路为例,说明式(1.5)的建立过程。

〔例1〕电阻如图1-1(a)所示,列写其改进节点方程。

〔解〕对节点和支路编号、确定参考节点,并设各支路参考方向如图中所示。按照单元件支路定义和支路参考方向画出电路(a)的有向图如图1-1(b)所示。按照节点电导矩阵 Y_N 的直接形成原则,即各节点的自电导位于主对角线位置,且均取正值;各节点间的互电导位于以主对角线为基准的对称位置,且均取负值,即

$$\begin{array}{c}
 \text{节点} \xrightarrow{\hspace{10em}} \\
 \begin{array}{ccc}
 \text{①} & \text{②} & \text{③} \\
 \text{①} \left[\begin{array}{ccc} 1+1 & -1 & 0 \\ \text{②} \left[\begin{array}{ccc} -1 & 1+0.5+1 & -1 \\ \text{③} \left[\begin{array}{ccc} 0 & -1 & 1 \end{array} \right] \end{array} \right] \end{array} \right] \\
 \\
 = \begin{bmatrix} 2 & -1 & 0 \\ -1 & 2.5 & -1 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix}
 \end{array}
 \end{array}$$