

胡翔骏 编著

计算机辅助 电路分析

Computer Aided
Circuit Analysis



CHEP

高等教育出版社



Springer

施普林格出版社

计算机辅助电路分析

Computer Aided Circuit Analysis

胡翔骏 编著

ND19/20



CHEP
高等教育出版社



Springer
施普林格出版社

(京) 112 号

图书在版编目 (CIP) 数据

计算机辅助电路分析 / 胡翔骏编著. - 北京: 高等教育出版社; 海德堡: 施普林格出版社, 1998.8 (1999 重印)

ISBN 7-04-006855-9

I. 计… II. 胡… III. 电路分析-计算机辅助分析 IV. TM133

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (98) 第 17244 号

书 名 计算机辅助电路分析

作 者 胡翔骏 编著

出版发行 高等教育出版社 施普林格出版社

社 址 北京市东城区沙滩后街 55 号 邮政编码 100009

电 话 010-64054588 传 真 010-64014048

网 址 <http://www.hep.edu.cn>

经 销 新华书店北京发行所

印 刷 北京外文印刷厂

开 本 880×1230 1/32

印 张 3.75 版 次 1998 年 8 月第 1 版

字 数 88 000 印 次 1999 年 6 月第 2 次印刷

定 价 22.00 元 (附软盘)

©China Higher Education Press Beijing and Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1999

版权所有 侵权必究



内 容 简 介

本书是配合计算机辅助教学软件《电路分析 CAI——演示·解答系统》的推广使用而编写的。该软件是按照国家教育部颁布的高等学校电路课程的基本要求研制的,供学生学习电路课程时使用。该软件 1997 年获得第二届全国普通高等学校优秀计算机辅助教学软件二等奖。

本书简单地介绍了计算机分析电路的基本方法,提供了一个简单的电阻电路分析程序,较详细地介绍获奖软件中直流电路分析程序 DCAP 和正弦稳态分析程序 ACAP 的使用,用各种类型的例题说明如何运用该程序来解算电路习题,并附有较多的练习和习题供学生使用。

与本书配套的教学软件,从研制到试用已有多年的时间,学生上机机时已超过上万小时,因此系统的内容正确性和运行稳定性得到充分验证。现在提供的版本是学生版,它包括电路分析的**重难点演示系统**和两个学生使用的**电路分析程序**。本软件主要侧重于教学,提供完整的电路分析程序给学生,让学生在学习电路课程时,能够解决复杂的计算问题,把繁琐的计算留给电脑,让我们有更多的时间做更重要的分析工作。

本书连同配套的软件可供高等学校电气、电子等专业的学生学习“电路”、“电路分析基础”、“电路基础”、“电路及磁路”、“电工学”等电路理论课程使用,也可供职工大学、电视广播大学、函授大学和成人教育学院有关专业使用。

目 录

第 1 章 线性电路的计算机辅助分析	(1)
1-1 引言	(1)
1-2 电路模型的矩阵表示方法	(2)
1-3 电阻电路的表格方程	(4)
1-4 线性代数方程的求解	(6)
1-5 线性电路的计算机分析程序	(7)
第 2 章 直流电路的计算机分析	(12)
2-1 直流电路分析程序 DCAP	(12)
2-2 电路方程的建立和求解	(14)
2-3 电路的电压电流和功率	(18)
2-4 单口网络的等效电路	(22)
2-5 双口网络的参数和等效电路	(27)
2-6 用叠加定理分析线性电阻电路	(30)
2-7 直流一阶电路分析	(34)
2-8 电路参数的设计与计算	(39)
2-9 电路解答的存在与唯一性	(42)
2-10 计算机分析电路的常见错误	(43)
习题	(46)
第 3 章 正弦电路的计算机分析	(60)
3-1 正弦电路分析程序 ACAP	(60)
3-2 节点方程的建立与求解	(62)
3-3 电压电流相量和吸收功率	(66)
3-4 单口网络相量模型的等效电路	(70)
3-5 双口网络相量模型的网络参数	(75)

3-6 用叠加定理分析正弦电流电路	(80)
3-7 正弦电流电路的频率特性曲线	(84)
3-8 非正弦电流电路分析	(90)
习题	(97)
参考书目	(105)
附录 软件介绍	(106)

第 1 章 线性电路的计算机辅助分析

1-1 引言

在计算机没有出现以前,电路的分析计算只有依靠人工完成,由人工建立电路方程,并借助一些原始的计算工具完成计算。对于规模较大的电路,要花费大量的时间和人力。随着大规模集成电路和计算机的普遍使用,电路分析和设计的大部分工作已经由计算机完成,出现了很多实用的计算机辅助电路分析和设计的程序,供电气工程人员使用。对计算机辅助电路分析和设计方法的研究,也使电路理论得到了较大的发展。这些变化必然会对电路理论课程的教学内容和教学方法产生影响。计算机这个工具可以用来辅助电路分析(CAA),解算各种电路习题,也可以用来辅助电路课程的教学工作(CAI)。

近年来,我们在将计算机引入电路理论课程的教学方面作了一些工作,编制了几个教学用的计算机分析电路的程序,研制出电路课程重点、难点演示系统和题库系统。经过几年的教学实践证明,这些计算机辅助电路课程软件的使用对提高学生的学习兴趣和使用计算机的能力,学习计算机分析电路的方法和掌握电路的基本理论都有很大帮助。现将编写线性电路分析程序的思路和使用方法介绍如下,供读者参考使用。

研究电路的方法是将实际电路抽象为电路模型,用电路理论对电路模型进行分析计算,得出表示电路特性的电压、电流和电功率等计算结果,电气工程人员根据这些理论分析计算的结果来改进实际电路的电气特性和设计出新的电路。电路模型由一些理想的电路元件连接而

成,分析电路模型的基本方法是用基尔霍夫电流定律(KCL)、基尔霍夫电压定律(KVL)和电路元件的电压电流关系(VCR)建立一组电路约束方程并求解。只要将电路模型中各元件的类型、连接关系、参数以及电压、电流参考方向等信息告诉计算机,计算机就能按照电路分析程序的要求,自动地建立电路方程并求解得到所需要的电压、电流和电功率等计算结果。

1-2 电路模型的矩阵表示方法

分析电路模型(以下简称电路)时,必须知道组成电路的各元件的类型、参数、连接关系和支路参考方向等信息。人们通常用观察电路图的方法来获取这些信息,而一般的计算机还不善于识别这种电路图。用计算机分析电路时,需要将这些信息转换为一组数据,按照一定方式存放在一个矩阵或表格中,供计算机建立电路方程时使用。例如图 1-1(a)所示电路可以用图 1-1(b)的一组数据表示。

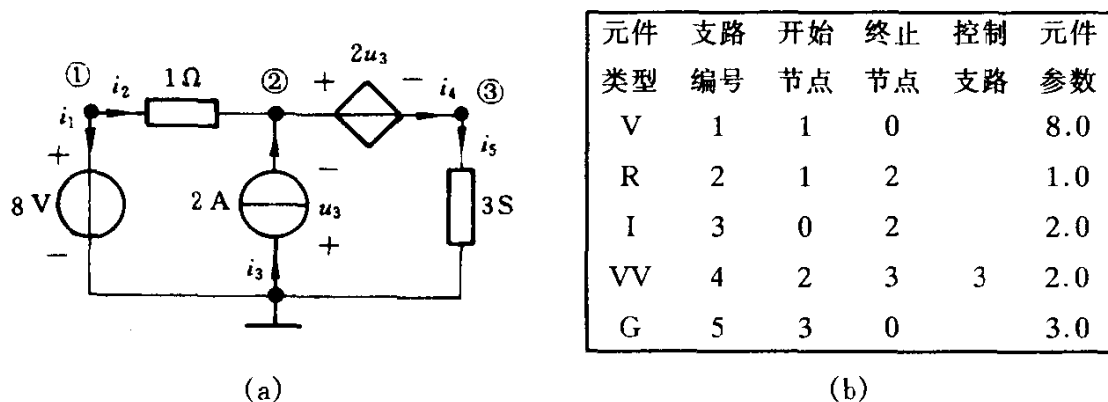
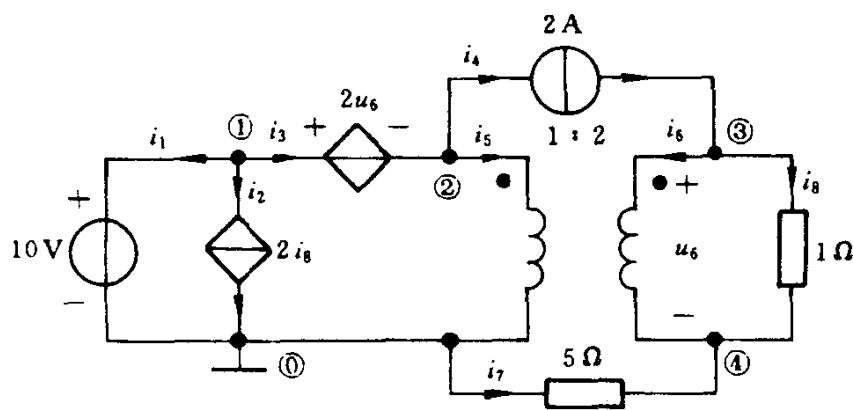


图 1-1 电路的矩阵表示

矩阵中的每一行表示一条支路的相关信息,对于受控源,还要说明控制支路的编号。元件类型用一个或两个大写英文字母表示,例如电压源、电流源、电阻和电导分别用 V、I、R、G 表示,电压控制电压源(VCVS)用 VV 表示。支路参考方向规定为从开始节点指向终止节点。各种元件参数均用 SI 单位表示,即电压用伏特(V),电流用安培(A),电阻用欧姆(Ω),电导用西门子(S)。图 1-2(a)电路的数据如图

(b)所示。



(a)

元件 类型	支路 编号	开始 节点	终止 节点	控制 支路	元件 参数
V	1	1	0		10.0
CC	2	1	0	8	2.0
VV	3	1	2	6	2.0
I	4	2	3		2.0
T	5	2	0		1.0
	6	3	4		2.0
R	7	4	0		5.0
R	8	3	4		1.0

(b)

图 1-2 电路的矩阵表示

电路中的理想变压器(Transformer)是一种双口电阻元件,它有两条支路,用两行数据表示,元件类型用英文字母 T 表示,元件参数 1.0 和 2.0 表示它的变比为 1:2。电路中电流控制电流源(CCCS)用英文字母 CC 表示。

用计算机程序分析电路时,应根据电路图写出这些电路数据,在程序运行时,从键盘将这些数据输入计算机,或者将这些数据先存入到某个数据文件(例如 D.DAT)中,令计算机从这个文件中自动读入这些数据。

1-3 电阻电路的表格方程

根据 KCL、KVL 和 VCR, 以 b 个支路电压和 b 个支路电流作为未知量建立的一组电路方程称为 $2b$ 方程, 它适用于任何集总参数电路。由 $2b$ 方程导出的支路电流方程、网孔和回路电流方程以及节点电压方程减少了未知量, 便于手算求解。人们可以根据不同的电路采用不同的方程来分析电路, 以减少计算的工作量。而在用计算机分析电路时, 从便于建立电路方程和程序的通用性等因素考虑, 常常采用表格方程 (Tableau Equation) 和改进的节点方程 (Modified Node Equation)。从电路课程教学的角度考虑, 宜采用表格分析方法, 它的优点是: 1. 对电路元件的类型没有限制; 2. 容易建立电路方程; 3. 求解表格方程可直接得到全部节点电压、支路电压、电流和吸收功率。表格方程的缺点是方程数目多, 这在用计算机分析小规模电路时并不突出。

表格方程是以节点电压、支路电压和支路电流作为未知量, 用表格或矩阵形式列出的 KCL、KVL 和 VCR 方程。现以图 1-1(a) 电路为例, 说明表格方程的建立过程。

1. 用矩阵形式列出 $n-1$ 个节点的 KCL 方程

支路→	1	2	3	4	5	
节点						
①	$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \\ i_4 \\ i_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$				
②	$\begin{bmatrix} 0 & -1 & -1 & 1 & 0 \end{bmatrix}$					
③	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & -1 & 1 \end{bmatrix}$					

简写为

$$\mathbf{AI} = \mathbf{0}$$

其中

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 1 \end{bmatrix}$$

称为关联矩阵,它表示支路与节点的关联关系,其元素为

$$a_{ik} = \begin{cases} 1, & \text{如果支路 } k \text{ 离开节点 } i \\ -1, & \text{如果支路 } k \text{ 进入节点 } i \\ 0, & \text{如果支路 } k \text{ 不与节点 } i \text{ 相连} \end{cases}$$

2. 用矩阵形式列出支路电压与节点电压关系的 KVL 方程

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \\ u_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \end{bmatrix}$$

简写为

$$U = A^T V$$

其中 A^T 表示关联矩阵 A 的转置矩阵, V 表示该节点的电位。

3. 以 $mu + ni = u_s$ 形式列出矩阵形式的 VCR 方程

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -2 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \\ u_5 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \\ i_4 \\ i_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 8 \\ 0 \\ 2 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

简写为

$$MU + NI = U_s$$

4. 将 KCL、KVL 和 VCR 方程放在一起,得到以下方程

$$\begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{A} \\ -\mathbf{A}^T & \mathbf{1} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{M} & \mathbf{N} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{V} \\ \mathbf{U} \\ \mathbf{I} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{U}_s \end{bmatrix}$$

简写为

$$TW = E_s$$

其中 T 称为表格矩阵,由于矩阵中大部分系数为零,又称为稀疏表格矩阵。表格方程可用高斯消去法求解,若 T 矩阵的行列式不为零,即 $\det T \neq 0$,则该电路有唯一解。

1-4 线性代数方程的求解

计算机求解线性代数方程常用的方法是高斯消去法。高斯消去法是用行初等变换的方法将下三角形元素变为零,再用回代方法求出各变量的值。现以下列方程为例加以说明。

$$4x_1 + 2x_2 + 1x_3 = 12$$

$$2x_1 + 3x_2 + 2x_3 = 15$$

$$1x_1 + 1x_2 + 4x_3 = 12$$

将方程写成增广矩阵的形式

$$\begin{bmatrix} 4 & 2 & 1 & 12 \\ 2 & 3 & 2 & 15 \\ 1 & 1 & 4 & 12 \end{bmatrix}$$

用主对角线元素 $a_{11}=4$ 除第一行各元素,将主元变为 1,再用 $a_{21}=2$ 除第二行各元素并与第一行各元素相减,令 $a'_{21}=0$ 。用类似方法令 $a'_{31}=0$ 。得到以下矩阵

$$\begin{bmatrix} 1 & 0.5 & 0.25 & 3 \\ 0 & 1 & 0.75 & 4.5 \\ 0 & 0.5 & 3.75 & 9 \end{bmatrix}$$

对第二行和第二列以下子矩阵重复以上过程,最后可得到主对角线元素为 1 的上三角形矩阵,如下所示

$$\begin{bmatrix} 1 & 0.5 & 0.25 & 3 \\ 0 & 1 & 0.75 & 4.5 \\ 0 & 0 & 1 & 2 \end{bmatrix}$$

完成消去过程后,得到 $x_3 = 2$, 将它代回第二行中求出 $x_2 = 3$ 。再将 $x_3 = 2$ 和 $x_2 = 3$ 代回第一行中求出 $x_1 = 1$ 。具体回代过程如下:

$$x_3 = 2$$

$$x_2 = 4.5 - 0.75x_3 = 4.5 - 1.5 = 3$$

$$x_1 = 3 - 0.25x_3 - 0.5x_2 = 3 - 0.5 - 1.5 = 1$$

1-5 线性电路的计算机分析程序

用计算机分析电路时,必须有一个电路分析程序,可以利用现成的通用电路分析程序,也可以自己动手编制一个电路分析程序。为了使读者对编制电路分析程序的全过程有所了解,下面给出一个用 FORTRAN 语言编写的电路分析程序,它可以用来分析由直流电压源、直流电流源、电阻和四种受控源构成的电阻电路,得到节点电压、支路电压电流和吸收功率的计算结果。该程序由一个主程序和四个子程序组成。程序运行时,从一个数据文件 DD.DAT 中读入电路数据,调用子程序 FORMT 建立表格方程,再调用子程序 GAUSS 求解方程,最后调用子程序 OUTPUT 输出各电压、电流和吸收功率。下面给出源程序 DD.FOR 的清单,它需要用 FORTRAN 编译软件产生可执行文件 DD.EXE 后,才能用来分析电路。

```

PROGRAM MAIN
COMMON TYP(10),NO(10),NFO(10),NTO(10),NCO(10),VAL(10)
COMMON /B1 /T(29,30),NOD,NBR,M,N
OPEN(3,FILE='DD.DAT',STATUS='OLD')
READ(3,*)
READ(3,*) NBR
WRITE(*,*)'  元件 支路 开始 终止 控制 元件'
WRITE(*,*)'  类型 编号 节点 节点 支路 参数'
DO 10 I=1,NBR
  READ(3,2) TYP(I),NO(I),NFO(I),NTO(I),NCO(I),VAL(I)
  WRITE(*,4) TYP(I),NO(I),NFO(I),NTO(I),NCO(I),VAL(I)
  NOD=MAX0(NOD,NFO(I),NTO(I))
10  CONTINUE
2   FORMAT(A2,4I3,G10.3)
4   FORMAT(5X,A2,3X,3(I3,2X),I3.0,G12.4)
M=NOD+2*NBR
N=M+1

```

```

CALL FORMT
CALL GAUSS
CALL OUTPUT
END

```

```

SUBROUTINE FORMT
COMMON TYP(10),NO(10),NFO(10),NTO(10),NCO(10),VAL(10)
COMMON /B1 /T(29,30),NOD,NBR,M,N
DO 10 J=1,NBR
  NF=NFO(J)
  NT=NTO(J)
  MI=NOD+NBR+J
  MJ=NOD+J
  NI=MI
  NJ=MI

```

C KCL : $A_i = 0$ and KVL : $u = AT * v$

```

  IF (NF.NE.0) THEN
    T(NF,MI) = 1.
    T(MJ,NF) = -1.

```

```

  END IF

```

```

  IF (NT.NE.0) THEN
    T(NT,MI) = -1.
    T(MJ,NT) = 1.

```

```

  END IF

```

```

  T(MJ,MJ) = 1.0

```

C VCR : $Mv + Ni = u$

```

  IF (TYP(J).EQ.'R'.OR.TYP(J).EQ.'V') THEN
    T(MI,MJ) = 1.
    IF(TYP(J).EQ.'R') T(NI,NJ) = -VAL(J)
    IF(TYP(J).EQ.'V') T(NI,N) = VAL(J)
  END IF

```

```

  IF (TYP(J).EQ.'G'.OR.TYP(J).EQ.'I') THEN
    IF(TYP(J).EQ.'G') T(MI,MJ) = -VAL(J)

```

```

      IF(TYP(J).EQ.'I') T(MI,N)=VAL(J)
      T(NI,NJ)=1.
    END IF
    IF (TYP(J).EQ.'VV'.OR. TYP(J).EQ.'VC') THEN
      IF(TYP(J).EQ.'VV') T(MI,MJ)=1.
      IF(TYP(J).EQ.'VC') T(NI,NJ)=1.
      T(MI,NOD+NCO(J))=-VAL(J)
    END IF
    IF (TYP(J).EQ.'CC'.OR. TYP(J).EQ.'CV') THEN
      IF(TYP(J).EQ.'CC') T(NI,NJ)=1.
      IF(TYP(J).EQ.'CV') T(MI,MJ)=1.
      T(NI,NOD+NBR+NCO(J))=-VAL(J)
    END IF
10  CONTINUE
    END

```

```

SUBROUTINE GAUSS
COMMON /B1 /T(29,30),NOD,NBR,M,N
DO 10 K=1,M
  L=K
  DO 20 I=K+1,M
20   IF(ABS(T(I,K)).GT. ABS(T(L,K))) L=I
    IF(ABS(T(L,K)).LT. 1.E-30) STOP '电路无唯一解'
    IF(L.NE.K) THEN
      DO 30 J=K,N
        T1=T(K,J)
        T(K,J)=T(L,J)
30    T(L,J)=T1
      END IF
      DO 40 I=K,M
        C=T(I,K)
        IF(C.NE.0.0) THEN
          DO 50 J=K,N

```

```

      T(I,J) = T(I,J) / C
50    IF(I.GT.K) T(I,J) = T(I,J) - T(K,J)
      END IF
40    CONTINUE
10    CONTINUE
      DO 60 I = M-1, 1, -1
          DO 60 J = M, I + 1, -1
60    T(I,N) = T(I,N) - T(I,J) * T(J,N)
      END

SUBROUTINE OUTPUT
COMMON TYP(10), NO(10), NFO(10), NTO(10), NCO(10), VAL(10)
COMMON /B1 /T(29,30), NOD, NBR, M, N
WRITE(*,2)
2  FORMAT(/5X,'节点电压')
   WRITE(*,4) (J,T(J,N),J=1,NOD)
4  FORMAT(5X,4(:, 'V', I2, ' = ', G12.4, 1X))
   WRITE(*,6)
6  FORMAT(/5X,'支路电压',9X,'支路电流',9X,'支路功率')
   DO 10 J = 1, NBR
       P = T(NOD + J, N) * T(NOD + NBR + J, N)
10  WRITE(*,12) J, T(NOD + J, N), J, T(NOD + NBR + J, N), J, P
12  FORMAT(5X, 'U', I2, ' = ', G12.4, ' I', I2, ' = ', G12.4, ' P', I2, ' = ', G12.4)
   END

```

用以上程序来分析图 1-1(a) 的电路的数据文件 DD.DAT 如下所示:

Fig. 1-1(a) Circuit					
5					
V	1	1	0		8.0
R	2	1	2		1.0
I	3	0	2		2.0
VV	4	2	3	3	2.0
G	5	3	0		3.0

其中的第一行是注释行,第二行是支路数目,其余各行数据与图 1-1 (b)相同,但格式必须符合 FORTRAN 语言的规定的 A2,4I3,G10.3 的要求,实数还必须有小数点。所计算的结果如下:

节 点 电 压

V 1 = 8.000 V 2 = 1.000 V 3 = 3.000

支路电压

支路电流

支路功率

U 1 = 8.000 I 1 = -7.000 P 1 = -56.00

U 2 = 7.000 I 2 = 7.000 P 2 = 49.00

U 3 = -1.000 I 3 = 2.000 P 3 = -2.000

U 4 = -2.000 I 4 = 9.000 P 4 = -18.00

U 5 = 3.000 I 5 = 9.000 P 5 = 27.00

(注:在中文操作系统下才显示汉字。)

以上这个程序太简单,适用的电路元件类型还不够多,分析计算功能也不强,对数据文件的格式要求太严格,又没有侦错功能,对计算机语言比较熟悉的人员才能正常使用,还必须加以改进提高才能供学生使用。近年来,我们已经研制出能够投入实际使用的几个计算机分析程序,它们是直流电路分析程序 DCAP、正弦电流电路分析程序 ACAP、动态电路分析程序 DNAP 和符号网络分析程序 SNAP。这些程序使用简单方便,对计算机的要求不高,可以用来解算电路课程中的大部分习题,对学习电路理论课程很有帮助。为了满足计算机辅助电路课程教学的需要,我们将直流电路分析程序和正弦电路分析程序提供给广大学生使用,下面两章分别介绍这两个程序的具体使用方法。