

电路分析 与设计 的 计算机方法

朱鸿鹄 王修才 著

上海科技教育出版社



电路分析与设计的计算机方法

朱鸿鹄 王修才 著

上海科技教育出版社

用 户 提 要

本书是一本电路分析与设计的计算机方法的普及读物,强调基础理论的阐述,侧重于操作方法的讨论。叙述深入浅出,对具有较大实用价值的电路频域分析、时域分析、非线性分析、灵敏度计算与容差分配以及稀疏矩阵技术均进行了较详细的讨论,并给出了具体的程序和流程框图,所有程序均使用普及的 BASIC 语言编写。因此,可在国内拥有量较大的 Apple II 和 IBM-PC 微机上运行。

本书指导读者动手实践,详细叙述了如何把电路数据送入计算机;如何编写电路分析和优化设计的程序;如何打印计算结果等具体操作方法。

本书适用于广大电子和计算机爱好者,可作为理工科大中专院校教学参考书,尤其适用于使用计算机进行电路设计的入门者。

电路分析与设计的计算机方法

朱鸿鹄 王修才 著

上海科技教育出版社出版、发行

(上海延安西路 601 号)

经销 上海东方印刷厂印刷

开本 850×1156 1/32 印张 12.5 字数 314,000

1987 年 8 月第 1 版 1987 年 8 月第 1 次印刷

印数 1—2,500 本

统一书号: 7487·46 定价: 3.15 元

前 言

电路分析与设计的计算机方法是随着计算机的发展而兴起的一门新学科,它把“电路理论”、“计算数学”和“计算机程序设计”三者有机地结合在一起,为电路设计工作者提供了强有力的分析和设计手段,它把传统设计中对试验电路反复凑试的方式改变为主要通过计算机进行分析和优化的科学方式,尔后,辅之以实验验证。采用这种方式不仅加快了设计进程,而且能获得传统方法难以实现的高质量设计。因此,一些技术先进的国家广泛采用这一新技术,理工院校也都普遍开设了这门课程。

当前,我国人民正在为实现四个现代化而奋斗,计算机在各个领域的应用必将迅速发展,开设这类课程,造就既懂理论,又会用计算机解决实际问题的科技人员,是十分重要的。为顺应新形势发展的需要,我们编写了《电路分析与设计的计算机方法》。

顾名思义,本书侧重于方法的讨论,即如何用计算机对电路进行分析和设计。它告诉人们:如何把电路数据送入计算机;如何编写分析电路和电路优化设计的计算机程序以及如何打印计算结果等。根据我们的教学实践,本书对具有较大实用意义的电路频域分析、时域分析、非线性分析和灵敏度计算、容差分析都进行了较详细的讨论。尤其对电路优化设计给予较多的介绍,以引起人们的注意。强调基础与实用是本书的重要特点。采用计算机进行分析和设计的方法,并不仅限于电路网络,也可以推广到其它学科

中去。

本书的另一特点是书中各种程序均用 BASIC 语言编写,并全部在普及型微机 Apple-II 和 IBM-PC 上运行通过,并给出应用实例,这对绝大多数理工科院校、工厂企业、单位和个人都是不难实现的有利条件,尤其对计算机编程还不太熟悉的电路设计工作者是颇为适宜的。

我们希望这本书的问世,对我国推广电路的计算机辅助设计技术能起个铺路石的作用。

本书在定稿过程中,承蒙复旦大学电子工程系凌燮亭教授审阅,并提出许多宝贵意见,谨在此表示感谢。

由于我们水平有限,书中难免有不妥之处,恳切期望读者提出宝贵意见。

朱鸿鹄 王修才 于上海师范大学

1985 年 4 月

目 录

第一章 概论	1
§1 用计算机对电路进行辅助分析与设计的意义及过程	1
§2 电路的计算机辅助分析举例	5
第二章 理论基础与基本方法	20
§1 电路拓扑中的若干基本概念	20
§2 计算机辅助电路分析的常用方法	33
§3 线性代数方程组的几种常用计算机解法	43
第三章 线性电路的计算机频域分析法	77
§1 线性电路的直流分析及计算机程序	78
§2 线性电路的频率域分析及计算机程序	117
§3 改进节点法	138
第四章 非线性电路的计算机分析法	143
§1 晶体管的非线性模型	143
§2 非线性直流电路的迭代解法	149
§3 非线性电路的线性化伴随模型解法	175
第五章 电路的计算机时域分析法	186
§1 电路微分方程的数值解法	186
§2 时间离散化伴随模型法	196
§3 含有非线性电阻的动态网络时域分析	226
第六章 电路的灵敏度计算与容差分配	237

§1	导数法	239
§2	差商法	240
§3	伴随网络法	242
§4	电路灵敏度的应用	267
第七章	稀疏矩阵技术	274
§1	方程组重新排序的两种算法	274
§2	稀疏矩阵的存贮技术与编程考虑	286
§3	稀疏矩阵的 LU 分解	298
§4	用 L 、 U 矩阵解三角形方程	305
§5	稀疏表格法	312
第八章	电路优化设计的计算机方法	316
§1	优化设计的一些基本概念	317
§2	单变量函数的最优化方法——一维寻优方法	324
§3	多变量函数的最优化方法	339
§4	直接搜索法	354
§5	频域最优化设计程序举例	363

第一章 概 论

§1 用计算机对电路进行辅助分析与设计的意义及过程

电子线路的设计过程大致是这样的：第一步是根据实际问题的需要提出性能指标，如果设计的是一个放大器，就要知道它需要的增益、频带宽度、输出功率、输入的要求等等；第二步是设计人员根据指标要求和自己的经验，参照有关资料提出初步的电路方案；第三步是在这个初步的电路方案上加工，进行参数设计和性能计算；第四步是用算得的数据搭成试验电路，进行调试及测量，看它是否和原定的指标符合，假如测得的数据跟指标差距不大，只需适当调整参数，以适应指标的要求，如果实测的结果跟指标要求差距很大，就需要改变电路结构或采用不同的电路，重复第三步；第五步是由于元件存在容差，须进行小批量生产，以检验设计中存在的问题，如果这一步也通过了，就可以投入大批量生产。在设计的过程中，以往由于受到计算工具的限制，因此一般都只进行比较简单的计算。例如图 1-2 是一个简单的有反馈的两级放大器，电路并不太复杂，电路工作在低频范围时，我们可以用一个简单的等效电路来代替晶体管 T_1 和 T_2 进行计算，如果频率比较高，需要用较为复杂的等效电路来代替 T_1 和 T_2 时，计算就变得相当复杂，即使计算一个频率点也相当困难，更不要说是在一个频带范围进行计算了。假如电路更加复杂，则计算也相应更复杂了。因此，在实

际工作中,对于电路往往分段进行简单的计算,或参照现成的电路结合实验以确定电路元件的参数。对于复杂的电路,用这种方式来设计必然带来设计周期长,难以确定最后的参数,导致产品更新速度变慢,成本相应提高等缺点。由于电子线路在设计中可以比较容易地更换元件,依靠实验来确定元件参数。因此,计算就相对地处于比较次要的地位,也就是上述第三步往往只作简单的计算,而第五步却显得十分必要了,这是因为人们无法知道由于元件的容差引起对产品性能指标的偏离程度,于是不得不借助于小批量试生产(实质上是用不同元件进行大量的重复试验)来检验因不可避免的元件参数的偏差对性能的影响。即使这样仍然难以确定每个元件的容差,甚至对每个元件,不论它在电路中的重要性如何,一律提出了过高的要求,因此提高了产品的成本。

近年来,由于当代工业的飞速发展,电子系统日益复杂,规模越来越大,对它们的准确度、可靠性和各种指标要求也越来越高,用传统的方法进行设计,已经不能适应要求。例如,大规模集成电路的设计,就根本不可能用传统的分立元器件来模拟,必须借助电子计算机,采用计算机辅助设计(Computer-Aided Design 简称 CAD)的方法才能解决。

计算机的广泛应用和日益普及,计算技术的迅速发展,提供了有力的计算工具和方法。计算机具有存储容量大、运算速度快,处理数据能力强等一系列优点,使以往复杂繁重的计算工作变得轻而易举,使电子线路的设计发生了新的变化,它大大地缩短了设计周期,提高了设计质量,并形成了新的学科。

利用计算机辅助设计的过程大致如图 1-1 所示。首先要根据提出的问题确定电路的各项性能指标,并由设计人员初步选定电路方案和确定电路参数。在电路参数确定以后,根据选用的元器件和电路的结构建立数学模型并通过计算机求解,看解出的结果

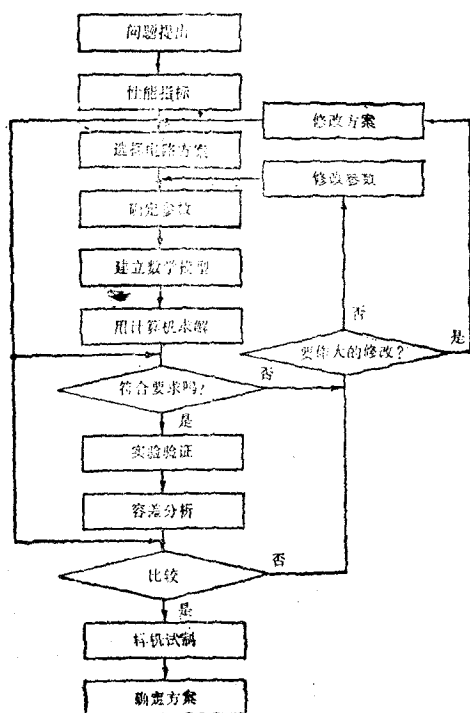


图 1-1

是否符合指标要求。如果不符合要求,那么可以根据不同情况,或者修改部份参数,或者根本改变电路结构,进一步计算,直到性能符合指标为止。这一步,弥补了过去只作简单计算或估算的不足,由于计算机运算速度极快,因此可以根据元器件不同的特性及其数值的变化来进行计算,使元件的变化对性能的影响减至最小。这步完成之后就可以进行实验验证,只要选择的元器件的模型正确,性能是不会偏离指标的。然后,考虑元器件的各种容差对性能的影响,利用计算机可以极其方便地求得各个元器件对性能指标的灵敏度,即求出其偏差对性能影响的程度。也可以求得在各个元器件的参数都处于最差的情况下,性能指标最差的程度,可以模拟

在实际生产中元器件的容差所产生的指标的容差,从而确定各个元器件应有的容差。这样,可以代替大量重复的小样试验或多次小批量试生产。对各个元器件容差的明确选择,可避免优质低用、大材小用等不良情况,从而大大地缩短试制周期,提高经济效益。

利用计算机还可以对电路进行优化设计,使电路在确定的指标下进一步提高经济指标和可靠性。在这些计算完成之后就可以试生产并最后确定方案。

利用计算机还可以自动绘制图纸和印刷板,使工作效率大大提高,试制周期缩短。

电路的最基本的计算是对各个节点的电压、各支路的电流和功率进行计算。对一般的线性网络来说,由于方程是线性的,一般都是求解联立方程组。对于某些电路或某些工作状态来说如果是非线性的,则需要用各种不同的方法来求解。手算时,根据不同的电路可以采用不同的方法,同一个电路也可以根据它工作在高频段、中频段或低频段而采用不同的简化进行计算。但是用计算机来进行计算时,对不同的问题写出不同的计算程序将会大大增加程序设计的代价。因此,宁愿使用一种比较通用的计算程序,以求解整个电路。考虑到电路各部份之间的相互联系,而不是象手算那样,把电路分成若干段来进行处理。例如反馈网络的计算,在手算时必须作各种简化处理,否则将引起计算上的困难,而计算机则可以进行全局的考虑,对于频率响应,只要对不同频率进行重复计算。这也是利用了计算机容量大,计算快的特点。

由于电路是从整体来考虑的,它将解变量很多的联立方程。因此,必须使用矩阵来处理。又由于计算机无法识别电路图,我们必须把电路的各节点,支路进行编号,并把它们怎样联接的方式记录在一个关联矩阵之中,然后根据其结构建立一种通用的算法。

目前,计算机已应用于电路设计的许多阶段中,从对所给电路

特性的分析计算、电路灵敏度计算、容差分析、电路参数优化,到印刷电路板的布局与布线、电路故障的检测与分析。但由于电路种类千变万化,现在还远没有达到完全自动化设计电路的地步,还需要电路设计人员提供原始的设计方案(电路的拓扑结构及元件参数),然后用计算机完成上述各项工作。因此,上述设计过程还只能称为电子线路的计算机辅助设计。

为了说明电路分析与设计的计算机方法,让我们先来看一下下面的例子。

§2 电路的计算机辅助分析举例

例 1-1 试计算图 1-2 所示的两级电压负反馈电路的反馈系数 F 、开环放大倍数 A_0 和闭环放大倍数 A_F 。

首先,我们研究一下传统的计算方法。根据定义,这个电路闭环放大倍数 A_F 、开环放大倍数 A_0 和反馈系数 F 分别是:①

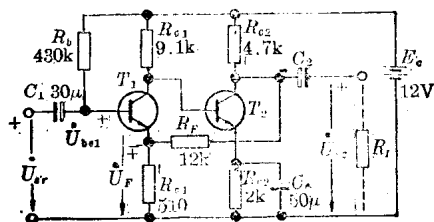


图 1-2

$$\left. \begin{aligned} A_F &= \frac{U_{sc}}{U_{sr}} \\ A_0 &= \frac{U_{sc}}{U_{be1}} \\ F &= \frac{U_F}{U_{so}} \end{aligned} \right\} \quad (1-1)$$

① 上述推导请参见“晶体管电路”第一册 p.374~377 清华大学电子工程系 科学出版社出版

根据电路理论可以算出

$$A_0 = \frac{U_{sc}}{U_{be1}} = \frac{\beta_1 \beta_2 R_{c1} R_{c2} (R_{e1} + R_F)}{r_{be1} (R_{c1} + r_{be2}) (R_{e1} + R_F + R_{c2})} + \frac{(1 + \beta_1) R_{c1} R_{c2}}{r_{be1} (R_{e1} + R_F + R_{c2})} \quad (1-2)$$

根据叠加原理算出 $U_{sr} = 0$ 时, U_{sc} 在 R_{e1} 上产生的电压

$$U_F' = \frac{R_{e1}}{R_{e1} + R_F} U_{sc} \text{ 和 } U_{sc} = 0 \text{ 时, } U_{sr} \text{ 在 } R_{e1} \text{ 上产生的电压}$$

$$\begin{aligned} U_F'' &= I_{e1} \frac{R_{e1} R_F}{R_{e1} + R_F} = (1 + \beta_1) I_{b1} \times \frac{R_{e1} R_F}{R_{e1} + R_F} \\ &= \frac{R_{c1} R_F}{R_{c1} + R_F} (1 + \beta_1) \frac{U_{be1}}{r_{be1}} \\ &= \frac{R_{c1} R_F}{R_{e1} + R_F} \frac{1 + \beta_1}{r_{be1} A_0} \cdot U_{sc} \end{aligned}$$

所以总的反馈电压

$$U_F = U_F' + U_F'' = \left(\frac{R_{c1}}{R_{e1} + R_F} + \frac{R_{e1} R_F}{R_{e1} + R_F} \cdot \frac{1 + \beta_1}{A_0 r_{be1}} \right) U_{sc}$$

放大器的反馈系数

$$F = \frac{U_F}{U_{sc}} = \frac{R_{c1}}{R_{e1} + R_F} + \frac{R_{e1} R_F}{R_{e1} + R_F} \cdot \frac{1 + \beta_1}{A_0 r_{be1}} \quad (1-3)$$

放大器的闭环放大倍数

$$\begin{aligned} A_F &= \frac{U_{sc}}{U_{sr}} = \frac{U_{sc}}{U_{be1} + U_F} = \frac{U_{sc}/U_{be1}}{1 + U_F/U_{be1}} \\ &= \frac{A_0}{1 + A_0 F} \end{aligned} \quad (1-4)$$

如把(1-2)式中 A_0 , (1-3)式中 F 代入(1-4)式, 其表达式将是十分冗长的。

将图 1-2 中元件参数值及有关晶体管参数分别代入 (1-2)、(1-3)、(1-4)式, 经过相当繁杂的运算可得

$$A_0 = 6904.21 \quad F = 4.44 \times 10^{-2} \quad A_F = 22.428$$

如果不采用叠加原理, 而直接根据节点电压法或回路电流法来求解, 那么首先要将图 1-2 中的晶体管用其等效电路来代替, 然

后根据节点数或回路数列出方程,至少要解一组七元的联立方程,假如电路稍微复杂一点,计算将更加困难。那么,用计算机来求解又是怎样进行的呢?

首先对图 1-2 中的节点和元件进行编号,为了便于区别,节点号用 Δ 表示,元件号用 $\textcircled{\text{M}}$ 表示(见图 1-3)。

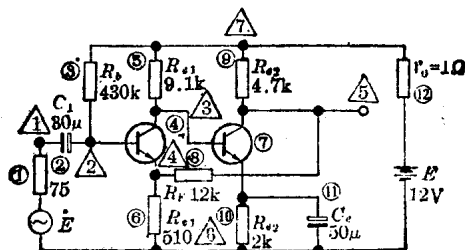


图 1-3

为了把这个电路的结构、元件类型和数值输入计算机,让它自动建立节点方程,我们可以按表 1-1 所示的数据输入格式,用 DATA 语句逐个将各元素的参数置好,然后由程序中的 READ 语句逐个读入计算机。

表 1-1 图 1-3 电路的输入数据

9500	DATA 12, 7
9601	DATA 1, -4, 0, 1, 1, 0, 75
9602	DATA 2, 2, 1, 2, .00003
9603	DATA 3, 1, 2, 7, 430000
9604	DATA 4, 13, 2, 3, 4, 1, 80, .65, -5
9605	DATA 5, 1, 3, 7, 9100
9606	DATA 6, 1, 4, 0, 510
9607	DATA 7, 13, 3, 5, 6, 1, 80, .65, -5
9608	DATA 8, 1, 4, 5, 12000
9609	DATA 9, 1, 5, 7, 4700
9610	DATA 10, 1, 6, 0, 2000
9611	DATA 11, 2, 6, 0, .00005
9612	DATA 12, 4, 0, 7, 12, 1
9613	DATA 10000, 9, 0

表 1-1 中 9600 句中 12,7 说明电路中有 12 个元件 7 个节点。9601 到 9612 各句说明各元件的编号, 类型, 起、止节点及元件的数值, 例如 9602 句中 2(第二个元件), 2(类型号, 2 表示电容), 1(起始节点), 2(终止节点), .00003(元件值, 单位法拉)。9613 句中 10000 说明电路在 10 千赫频率下进行计算。需要指出, 为了使用方便, 在电路分析程序中建立了常用晶体二极管、三极管的参数数据库, 使用者只要在输入数据中输入该管 b 、 c 、 e 电极连接的节点号及晶体管代号等几个简单的数据, 而不必输入大批模型参数就可以进行计算了。该电路中晶体管 T_1 、 T_2 的编号分别是 4 和 7, 它们的参数在 9604 和 9607 两句中输入。譬如 9604 句中, 4 代表第 4 个元件; 13 代表元件类型号(13 表示晶体三极管); 2 代表该晶体三极管基极所在节点号; 3 代表集电极所在节点号; 4 代表发射极所在节点号; 1 代表小功率晶体三极管; 80 代表晶体管电流放大系数 β ; 0.65 代表晶体管 be 结电压(可任取); -5 代表晶体管 cb 结电压(可任取)。9607 句作了类似处理。

在数据输入之后, 计算机立刻可以算出如表 1-2 所示的各节点的直流工作电压, 而且还给出了表 1-3 所示的晶体管 T_1 和 T_2 所使用的交流模型的参数。如果你觉得这些参数与你实际使用的参数不符合, 要修改这些参数也很方便, 修改后可以立刻重行计算。电路数据怎样填写, 这里只是先示一下, 以后将陆续介绍。

算得的各个节点的交流电压的模和相位分别示于表 1-4 中, 根据表中的数据及式(1-1)中三个公式, 计算机将立刻给出电路的开环增益 A_0 , 反馈系数 F 和闭环增益 A_1 。

$$A_0 = 5521.63 \quad F = 4.46816 E - 2 \quad A_1 = 22.2902$$

由于使用了比较精确的晶体管模型参数, 因此算得的结果比用(1-2)、(1-3)、(1-4)式算得的结果准确。这说明计算机辅助分析计算结果是可信的, 而所用的时间是极短的。值得指出的是用

表 1-2

ALL NODE VOLTAGES (所有节点电压)

NUMBER (节点号)	VOLTAGE (电压)	NUMBER (节点号)	VOLTAGE (电压)
1	0	2	1.57779
3	1.00418	4	.936505
5	8.19991	6	.407933
7	11.998		

表 1-3

PRINT AC MODEL

MODEL PARAMETERS

```

4 Q RBB=50          RBE=1563.14 RCE=61729
    CBE=1.80148 E-11 CBC=4.76683 E-12
                        GM=5.11787 E-2
7 Q RBB=50          RBE=9455.04 RCE=61729
    CBE=7.36029 E-12 CBC=5.71679 E-13
                        GM=8.46101 E-3

```

表 1-4

F=10000

NUMBER (节点号)	VOLTAGE-MAG (交流电压-模)	VOLTAGE-PHA (交流电压-相位)
1	.999633	-1.13664 E-4
2	.999633	1.37415 E-3
3	.817151	178.591
4	.995498	3.84809 E-3
5	22.2798	6.48905 E-2
6	2.10034 E-2	90.1578
7	0	0

手算时,不同电路要采用不同的方程,相应地具有不同的解法,而用计算机分析所使用的方法是通用的,不论电路结构如何,都可以采用同样的形式输入数据,这给用户带来了极大的方便。如果用上述参数的元件搭成电路,测试的结果也跟计算基本上是一致的。

