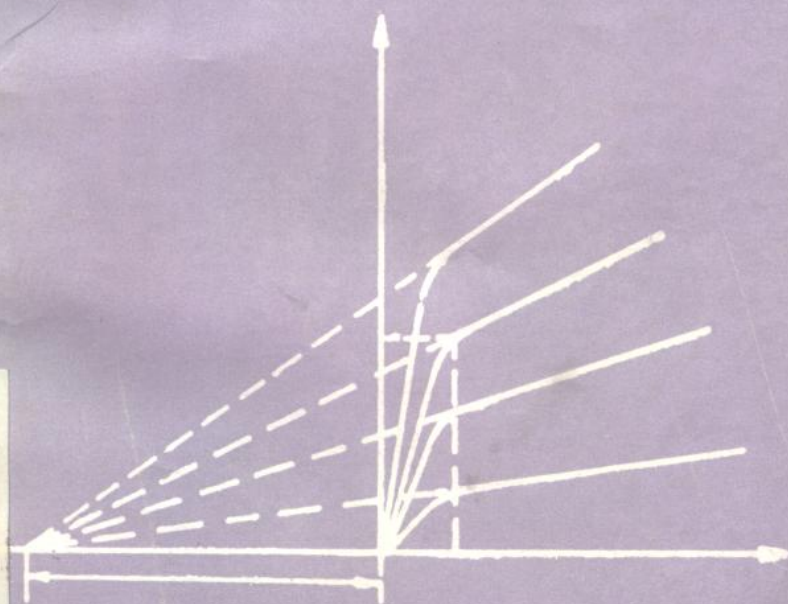


机械工业自动化技术丛书

计算机 辅助电路 分析

孙林根
洪远丰 编著



机械工业出版社

机械工业自动化技术丛书

计算机辅助电路分析

孙林根 洪远丰 编著



机械工业出版社

本书系“机械工业自动化技术丛书”之一，主要介绍在设计电子网络时如何利用计算机对电路各种性能进行分析。全书共分七章，第一章说明计算机辅助电路分析的特点和基本内容，第二章扼要介绍电路元器件模型，第三章到第七章较详细分析了网络方程的建立方法以及线性、非线性网络的主要性能，在分析过程中并给出实例以帮助理解。

本书主要供设计电路的工程技术人员阅读，高等院校有关专业的师生也能参考。

计算机辅助电路分析

孙林根 洪远丰 编著

*

机械工业出版社出版 (北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业登记证出字第 117 号)

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 $787 \times 1092^{1/32}$ · 印张 $9^{1/4}$ · 字数 201 千字

1985年12月北京第一版·1985年12月北京第一次印刷

印数 0,001—5,500 · 定价 2.20 元

*

统一书号: 15023·5872

出版者的话

随着我国社会主义工业的发展，自动化技术在机械工业中的应用范围已由机械加工过程扩展到设计、生产准备、工艺准备、检验试验、装配及生产管理等各个方面，涉及到计算机应用、人工智能、现代控制理论和系统工程等许多领域。

为适应机械工业自动化技术飞速发展的需要，满足从事机械工业自动化的工程技术人员、管理干部知识更新的迫切要求，我们决定出版这套《机械工业自动化技术丛书》。

本丛书各分册书名分别为：《机械工业自动化》、《机械加工自动化》、《热加工自动化》、《物料搬运自动化》、《计算机辅助电路分析》、《计算机辅助企业管理》、《自动化装置及其应用》、《工业机器人及其应用》、《微型计算机及其应用》、《计算机网络及其应用》、《图象识别技术及其应用》、《系统辨识技术及其应用》等，将陆续出版。

本丛书主要由机械自动化学会和机械工业自动化情报网共同组织，并得到中国机械工程学会和北京机械工业自动化研究所领导和有关同志的大力支持。

本丛书编委会对丛书的列选、组稿、审稿付出了辛勤劳动，还有不少单位对审稿工作给予了热情帮助，在此一并表示感谢。

由于组织出版这类丛书是初步尝试，缺点和错误在所难免，希批评指正。

机械工业出版社

编委会成员

主任委员：王良楣

副主任委员：严筱钩 顾绳谷

蔡福元 段扬泽

委员（按姓氏笔划序）：

刘兆新	卢庆熊	朱逸芬	阳含和
吕林	李仁	李忠德	陈家彬
杜祥瑛	严蕊琪	周斌	季瑞芝
张岫云	张弟元	唐璞山	章以钧
裘为章			

前 言

利用计算机对电子网络进行辅助性分析与设计是最近20年中发展起来的新技术。这一新技术的开发，不仅发展了经典的电路理论，而且将计算机的高速运算、优良的数据处理能力与人的创造性思维有机地联系起来，改变了传统的电路设计方式，提高了设计质量，缩短了设计周期。

计算机辅助电路分析（也称计算机电路模拟）是实现网络计算机辅助设计和自动设计的基础，本书就计算机辅助电路分析的主要方面作了较系统的阐述。为了掌握本书内容，读者应具备电路基本理论、线性代数、计算数学、计算机算法语言等基础知识

本书第一章由孙林根、洪远丰同志合写，第二、四、六章由孙林根编写，第三、五、七章由洪远丰编写。

在编写过程中得到系、教研室领导的支持，唐璞山、王春华、洪先龙等同志进行了仔细的审阅，章倩苓同志曾给予热情帮助和具体指导，在此一并表示感谢！

由于水平所限，书中难免有错误和不妥之处，恳请读者批评指正。

编 者

目 录

第一章 绪论	1
第一节 计算机辅助电路分析的特点	3
第二节 计算机辅助电路分析的基本内容	6
第三节 电路分析程序解剖	8
第二章 电路元器件模型	12
第一节 电路基本构件	12
第二节 几种常见多端口器件模型	17
第三节 晶体二极管模型	21
第四节 双极型晶体三极管模型	23
一、EM ₁ 模型	24
二、EM ₂ 模型	30
三、EM ₃ 模型	34
第五节 结型场效应晶体管模型	40
第六节 绝缘栅场效应晶体管模型	44
一、 n 沟绝缘栅场效应管的直流全局模型	45
二、 n 沟绝缘栅场效应管的交流增量模型	47
第三章 网络方程及其建立方法	49
第一节 网络拓扑矩阵	49
一、基本定义	50
二、关联矩阵和克希霍夫电流定律	54
三、回路矩阵和克希霍夫电压定律	57
四、割集矩阵和克希霍夫电流定律	60
五、各拓扑矩阵之间的关系	63
六、支路变量间的基本关系	70
第二节 网络方程的建立	73

一、网络方程的拓扑公式	73
二、节点分析方程的直接建立	79
第四章 线性网络分析	87
第一节 线性代数方程组的求解	87
一、高斯消去法	91
二、 Lu 分解法	106
第二节 线性网络的稳态分析	114
一、复系数线性代数方程组的求解	116
二、交流小信号分析程序举例	119
第五章 非线性阻性网络的节点分析	133
第一节 非线性阻性网络方程的处理	133
一、数值迭代解法	134
二、牛顿-拉夫森迭代伴随模型法	141
三、分段线性法	149
第二节 FD直流分析程序简介	156
一、部分非线性元件的迭代伴随模型及其对节点导纳 方程的提供值	156
二、加速迭代收敛的措施	158
三、程序框图	160
第六章 动态网络的瞬态分析	163
第一节 线性动态网络的瞬态分析	164
一、线性动态网络状态方程的建立	164
二、线性网络状态方程的求解	172
第二节 非线性动态网络的瞬态分析	179
一、状态方程的数值积分解法	180
二、数值积分算法的稳定性问题	192
三、步进迭代伴随模型	199
四、FD-Ⅱ程序应用举例	219
第七章 网络的灵敏度计算	223

VI

第一节 引言	223
第二节 灵敏度的增量网络分析法	225
一、增量网络	225
二、增量网络法计算灵敏度	227
第三节 灵敏度的伴随网络分析法	238
一、德律根定理	238
二、灵敏度伴随网络	242
三、灵敏度一般计算式的推导	249
第四节 FD型灵敏度分析程序简介	255
一、FD-Ⅰ直流灵敏度分析程序简介	255
二、FD频率域灵敏度分析程序简介	266
第五节 网络的最坏情况分析	271
一、最坏情况分析	271
二、利用灵敏度预示最坏情况	274
附录 灵敏度计算实例	278
1. 稳压电源分析举例	278
2. 运算放大器分析举例	281
参考文献	286

第一章 绪 论

利用电子计算机实现电网络的设计,按其发展的顺序,大体上可分成计算机辅助电路分析(简称CAA)、计算机辅助电路设计(简称CAD)、电路的全自动设计三个阶段。计算机辅助电路分析(也称计算机模拟)是电路设计的初级阶段,其主要任务是:根据给定的具体网络(包括网络的拓扑结构和元件参数两个方面),分析计算在激励信号作用下网络的输出响应。若网络的输出响应满足原设计的要求,分析计算过程即可终止;反之,则需更改元件参数或网络的拓扑结构,然后重新计算,直到满足设计要求为止。而计算机辅助电路设计(也称最优化设计)则是根据一个给定的网络结构及设定的输出响应,反过来确定满足这一输出要求时的元件参数。电路的全自动设计(也称网络的综合)和前二者不同,它只需设定输出响应要求,机器即能自动给出满足这一输出要求的具体网络形式和构成这一网络的元件参数。网络设计的最终理想形式应该是完全的自动设计,但就目前状况来看,这一条件还不具备,因为这不仅牵涉到许多基础理论和必备的数学工具,而且要具有硬件和软件的条件以及它们相互间的密切配合。因此,目前大多数设计领域还只能停留在辅助设计阶段。即在辅助设计过程中,计算机根据设计人员的指令,执行各种数值分析和模拟试验;而对于设计方案的拟定和修改,计算结果的分析、判断、裁决等还必须由设计人员本身来承担。也就是说,计算机仅仅作为设计人员的一种先进的

辅助工具来使用。在电子电路的设计领域,计算机辅助电路分析是CAD技术中发展得最早、最完善和最成熟的部分。计算机辅助电路设计目前正处在逐步推广、不断完善的阶段,它已在某些领域(如滤波器的设计等)取得了一定的成效。

计算机辅助电路分析虽然是电子网络设计的初级阶段,但它是网络辅助设计和全自动设计的基础,因而它是计算机辅助网络设计中必不可少的一个组成部分。计算机应用于电子网络的设计,其历史还不到二十年,但由于改变了传统的设计方式,并在许多方面已卓有成效,因此正日益受到世界各国的重视。

六十年代初,美国、日本等国已开始着手计算机辅助电路分析方面的研究。1962年,美国国际商业机器公司(IBM)首先研制出TAP程序,继TAP程序后不久,大约在六十年代中期,加州大学的NET-I、IBM公司的ECAP-I等著名程序也相继问世。到了六十年代末,已有各种商用程序出现。这些早期的通用电路分析程序,从现在角度来看,尽管在允许分析的电路规模、所采用的数值分析方法以及面向用户的输入语言等方面尚存在着许多不足之处,但在当时,这些程序起了很大的推动作用,它的许多突出优点得到世界各国的承认。计算机辅助电路分析作为电子电路设计的有力工具而显示出极强的生命力。

六十年代末,七十年代初研制的通用电路分析程序,由于采用了一系列新技术(如稀疏矩阵技术),因此在很大程度上克服了早期程序的一些局限性,使可分析的电路规模达到了上千个节点,几千条支路的水平。这些程序除了在可分析的电路规模上有很大的突破外,和早期程序比较还具有如下特点:在使用的器件模型和所采用的数值分析方法上,体现

了更高的精确性和严密性；在输入数据的方式和修改电路参数上，体现了更大的简便性和灵活性；就程序的功能来说，具有更大的适用性。如 IBM 公司的 ASTAP，加州大学的 SPICE-Ⅱ 等程序均是七十年代研制成功的。据报导，SPICE-Ⅱ 程序能分析直流、交流、瞬态、灵敏度、失真等十种类型的电路问题。近二十年来，由于世界各国都在研制电路分析程序，各种类型的电路分析程序竞相发表，使计算机辅助电路分析在这时期获得了迅速发展，电路分析程序也日趋完善。这些程序的研制不仅发展了经典的电路理论，使之适合于计算机的数值求解，并为尔后电子电路的计算机辅助设计奠定了基础。

第一节 计算机辅助电路分析的特点

CAA 与 CAD 的发展是与集成电路，特别是大规模集成电路的迅速发展密切相关的，不少电路分析程序都以集成电路的设计为主要目标。

传统上大多数电路的设计都是根据实际需要提出设计指标，由设计人员根据经验及参考有关图表资料，初步确定电路形式和元件参数。然后，对这一初步拟定的设计方案进行理论计算或进行实验模拟，看其性能是否达到原设计指标。如果达不到，则修改元件参数值，甚至电路形式，再进行理论计算或实验模拟。如此反复循环，直至达到设计指标为止。这一过程示于图1-1。其中电路性能的理论计算或电路指标的模拟实验是一个关键的组成部分。

大多数电路的分析计算分两步进行：第一步根据克希霍夫电流律、电压律以及元件特性以适当的形式建立电路方程；第二步用适当的解析或数值方法求解这些方程。在计算机尚

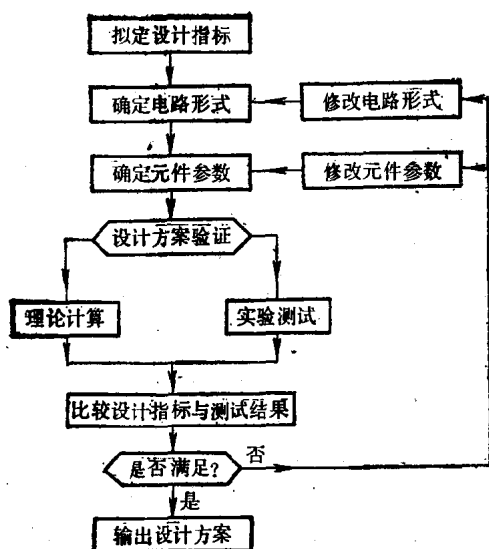


图1-1 电子电路的传统设计方法

未应用到电网络的设计中之前，这些方程通常采用解析方法求解。然而，人工所能分析的电路类型及电路规模极其有限，例如对于仅包含几十个节点的线性电路或更小的非线性电路很少能精确地进行分析的。习惯上总是针对问题的主要方面对电路先行简化，然后分析，得到的结果只能在主要方面具有指导意义。很多具体的电路特性分析往往通过对实验电路的测量来进行。然而随着电子技术的发展，尤其是集成电路工艺水平的提高，电路的规模越来越大，结构越来越复杂，品种越来越多，对电路的要求也越来越高，使得对电路的分析、设计任务日趋繁重。通常采用分立元件搭成实验电路进行测试的方法，以及用一些经验公式手算的近似方法已不能

胜任，因为电路规模太大，要手算几百甚至上千个联立方程是不现实的，而且分立元件无法精确地模拟集成电路的分布效应和集成器件之间的元件匹配特性。又由于几乎不能改变器件的参数，因而不能通过实验电路板进行容差和最坏情况的分析。

计算机模拟程序可以代替实验电路的模拟而自动进行电路的分析计算。由于在电路分析程序中，器件可以用电路模型来模拟，它比用分立的物理元件进行模拟更为方便。同时由计算机模拟所得结果通常比实验电路模拟所得结果要精确得多，而所化的代价却要小得多。总之，用计算机辅助分析有以下几个主要的优点：

1) 由于计算机的高速计算与优良的数据处理能力，代替了人工无法完成的大量繁复计算，大大缩短了设计周期；

2) 可方便地模拟各种实际情况，例如集成电路中的各种寄生效应，元件之间的匹配特性等。这在实验测试中几乎是无法精确模拟的；

3) 可以避免测量仪器分布参数引进的测试误差，即可以实现无探头测试。同时也可方便地模拟各种测试条件；

4) 可以避免外界的干扰以及器件的噪声，即可作无屏蔽室的屏蔽测试和理想化分析；

5) 可方便地进行非破坏性的极限分析，例如过电压、过电流、高低温分析等；

6) 在交流分析中，可以十分方便地进行任意幅度、任意频段的分析；而在实验测试中，往往随着频段的改变需要不断更换信号源和测量仪器，十分麻烦，并且在高频段由于外界的干扰很难进行精确的测量；

7) 计算机辅助电路分析不必购买很多实验电路用的器

件, 因此费用少, 成本低。

利用计算机对电子电路进行辅助性分析计算还有许多其他方面的优点, 这里就不一一列举了。

第二节 计算机辅助电路分析的基本内容

计算机辅助电路分析的内容十分丰富, 这里仅就它的主要方面列于表 1-1 中。

表1-1 计算机辅助电路分析的基本内容

电路类型	求解的电路问题
线性网络	1) DC分析 (求解线性阻性网络的直流工作点) 2) AC分析 (求解线性网络的频率响应) 3) 瞬态分析 (求解线性动态网络的瞬态响应) 4) 噪声分析 (以噪声源为输入的AC或瞬态分析) 5) 容差分析 (或进行灵敏度和最坏情况分析) 6) 传递函数的零极点分析 7) 产生符号形式的网络函数
非线性阻性网络	1) DC分析 (求解非线性阻性网络的直流工作点) 2) 确定驱动点特性 (找出驱动点电流电压间的关系) 3) 确定传输特性 (找出输出电压电流和输入电压电流间的关系)
非线性动态网络	1) 初始条件、偏置或静态分析 (所有电容开路、电感短路时的直流分析) 2) 稳态分析 (找出有输入或无输入时的稳态周期解) 3) 瞬态分析 (在一定初始条件下, 找出有输入或无输入时的输出响应) 4) 非线性失真分析 (找出谐波、调制和交叉调制失真)

实际上, 电路的分析问题还不止表中这些, 例如在集成电路中, 还有器件参数的统计分析、成品的可靠性分析以及各种极限分析等等。典型的电路分析问题如此之多, 因而不可能由一个通用电路分析程序来解决所有类型的电路分析问

题。因此编制一个电路分析程序时，只能针对某几类电路问题进行设计。一个分析程序能求解的电路问题愈多，则表示程序的功能愈完善，但编制程序也愈困难，程序所占用的计算机存储单元也愈多。因此在实际编制程序的过程中，必须根据具体情况作折衷考虑。随着大型计算机的出现，电路分析程序的规模越来越大，它的质量不断提高，功能也日趋完善。

下面举一个简单的例子，介绍应用电路分析程序来解表 1-1 中的问题。

例 求解图 1-2 所示单级晶体管放大器的直流工作点及其幅频、相频特性。我们采用交流小信号分析程序 FD-I 来求解。使用 FD-I 程序，首先要对电路依次标上节点编号，按第四章第二节 FD-I 程序简介中介绍的规则填写输入数据表，上机计算时，先将 FD-I 程序输入机器，待机器编译结束后，输入电路的数据，计算机计算完毕即能打印出如下结果：

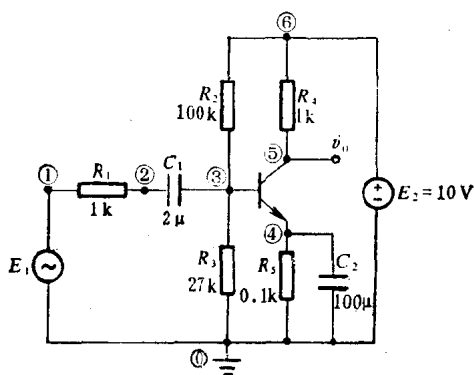


图 1-2 单级晶体管放大器

1. 直流分析数据

1) 晶体管的基极电流和发射极电流:

$$IB[1] = 0.4513392 \phi - 01$$

$$IE[1] = 0.4774823 \phi 01$$

2) 节点电压:

$$V[1] = 0.0000000 \quad V[2] = 0.0000000$$

$$V[3] = 1.1663417 \quad V[4] = 0.4774823$$

$$V[5] = 5.2698285 \quad V[6] = 9.9995181$$

2. 幅频、相频特性 (节点 5 对 1)

f (MHz)	K (dB)	φ
0.0000010	- 1.9	85.2
0.0000100	14.9	64.3
0.0001000	29.9	52.0
0.0010000	35.1	8.1
0.0100000	35.1	0.3
0.1000000	35.1	- 1.4
1.0000000	34.1	-17.0
10.0000000	25.0	-72.0
100.0000000	5.5	-89.3

上面列出的数据仅是部分结果, 放大器的幅频和相频特性如图 1-3 所示。

第三节 电路分析程序解剖

大部分通用电路分析程序包含五个组成部分:

- 1) 输入部分;
- 2) 器件模型的建立和处理;
- 3) 网络方程的建立;