

电路的计算机辅助分析

J. 斯图海默 著

江善标等译

上海科学技术出版社

76

9

73.76
659

电路的计算机辅助分析

J. 斯图海默 著

江善标等 译



上海科学技术出版社

1116281

内 容 提 要

电路的计算机辅助分析与传统的电路分析相比,具有计算快速、准确,设计周期短,节省元件以及预测电路各种性能等优点。

全书共分七章,内容包括:电子计算机辅助分析电路的目的和应用;电子计算机上用的矩阵运算的数值方法,包括求解联立线性方程组与矩阵求逆;电子线路的稳态交、直流分析,瞬态分析,状态空间分析,容差分析和非线性网络的自动分析方法。

本书系统性强,内容深入浅出,文字通顺易懂,可供从事电子线路、通信工程和控制工程的科技人员和程序设计人员参考,亦可作为高等院校的仪表、信息处理以及自动控制等工程专业的大学生和研究生的课本。

电路的计算机辅助分析

J. 斯图海默 著

江善标等 译

上海科学技术出版社出版

(上海瑞金二路450号)

新华书店上海发行所发行 上海商务印刷厂印刷

开本 787×1092 1/16 印张 20.25 字数 484,000

1982年8月第1版 1982年8月第1次印刷

印数 1—10,800

统一书号: 15119·2196 定价: (科五) 2.30 元

译 者 的 话

作为电子技术近代成果的电子数字计算机,已经广泛地用于电子线路和电子计算机本身的辅助设计.应各方面的要求,我们翻译了J. 斯图海默著的 *Circuit Analysis by Digital Computer*, 以期对推动我国计算机辅助设计 CAD (Computer Aided Design) 技术的发展有所助益.

本书是 PRENTICE-HALL, INC. 出版的计算机应用丛书之一,可作为各大学仪表、通信、信息处理以及自动控制等工程专业的研究生和大学生的课本.因为本书的内容和计算机的应用有关,故要求读者具备计算机、计算数学和电子线路等方面必要的基础知识,最好会用 FORTRAN 语言编写程序.

对一个电子部件和系统的静态品质、动态品质、敏感度、元件的偏差和非线性对整体品质的影响等,本书将在各章分别论述如何利用电子计算机自动快速地确定这些品质的方法.众所周知,用人工计算三阶以上的线性方程组,不但运算工作量大,而且繁复易错,为避免这方面的困难,不得不限制所能分析的电路的规模.而利用电子数字计算机可以分析很大的电子网络,能快速而又精确地得出结果.因此,利用 CAD 技术可以对整个部件或系统进行各性能指标的反复优化分析,有助于缩短设计周期,节省元件,对各种性能事先作出预测,达到提高性能价格比的目的.

书中除了个别地方有所删节外,全部照原文译出,原文中有错的地方,以“译者注”指明.

参加本书翻译工作的有江善标、刘万勋、朱云生、于春生、冯伯培、何灿金、王家志、袁友祥等同志.江善标、王春华同志对全书的译文进行了校对和整理.熊明光同志对本书的若干译文提出了有益的意见,特此表示感谢.限于译者水平,书中缺点与错误难免,希望读者批评指正.

译 者

一九八一年三月

前 言

本书的目的在于介绍集中参数网络的系统分析。采用的方法是节点分析法。这类分析法基本上由两部分组成：先在网络每个节点处把电流相加，得出未知的节点电压满足的方程；然后解这个方程，得到节点电压。重点放在根据已知的网络的拓扑结构自动形成节点电压方程的过程。选择这种方法的原因是，在一个网络中，节点对地电压通常是唯一确定的，取每个节点处电流之和，列出足够数目的方程就可求出节点电压。相反，在一个网络中，独立回路不是唯一的，因此通过选择足够数目的独立回路来解给定的网络时就须慎重仔细；第二个原因是，在绝大多数网络中，列出的节点方程的数目要比回路方程少。因此，大多数自动电路分析程序都采用节点分析法。

本书作为电路分析过程的计算机化的一个导论，内容方面不着重探讨电路分析的理论基础，而是更多地描述电路分析各方面的问题与求解的思想。同样，也不讨论解的唯一性和存在性问题。不言而喻，我们总是假定要分析的电路是有解的。如果万一把所得的程序用到了没有解的电路上去，则将导致不合理的数值结果。对于生产和合理的设计过程中提出的电路，本书提出的方法将会通过程序给出有用的结果。

我们假定读者可以使用分时服务的计算机设备、成套设备或中规模的实验室计算机，并熟悉 FORTRAN 程序语言。我们打算在本书的前几章中采用基本 FORTRAN 语句，然后逐步引进高级 FORTRAN 程序语言。本书所给的程序均在 IBM 370/165 系统上用 WATFIV 和 FORTRAN-IV，G 级编译系统调试过。有些程序还在 CDC 6600 计算机上用扩充的 FORTRAN 编译系统，在 UNIVAC 1108 系统上用 FORTRAN-V，在 GE 分时服务、MARK II 和 ADAGE AGT/30 系统上用 FORTRAN-4 运行过。由于编译系统会产生一些差别，主要是 DO 语句的解释的差别及字长的差别，程序的考核应该用只有微小差别的所有 ASI FORTRAN-IV 编译系统来完成。我们打算从程序中去掉所有有争议的独特的内容。

现在多数情况是用 FORTRAN 语言编写计算机程序，有时也用 BASIC 语言编写一些程序，少数还用 PL/1 语言来编写。这些语言都各有优点，本书之所以采用 FORTRAN 语言，是因为它在工程实践中有着广泛的应用。

为了掌握本书的内容，读者应具备线性电路分析的基本知识，了解电路理论的术语，熟悉高级的程序语言，最好是 FORTRAN-IV 以及掌握基本的矩阵理论和数值方法。一般讲，在二年级的电工课程结束时，所有这些要求都能达到。第二章介绍了一些矩阵的数值方法。但是，认真的读者大概会要求更深的基础，例如，一个学期的线性代数课程。同样，一门通常在三年级讲授的线性系统分析课程将有助于更深地理解本书的内容。因此，读者的一般基础在三年级的电工、物理或系统工程课程结束时都能具备了。

本书内容涉及线性与非线性网络的自动分析方法。大部分篇幅是讨论线性电路。然后，推广到非线性电路，并指出怎样把非线性网络的分析化为一系列近似非线性作用的线

性电路的分析。

在第一章中将讨论方法的目的和应用,介绍本书中有关问题的背景。第二章是讨论计算机上用的简单的矩阵运算的数值方法,包括求解联立线性方程组与矩阵求逆。重点放在阐述这些方法的基本概念上,而不放在实现这些算法的程序上。因为每个计算中心都对这种程序进行过完备的考核。然而,由于这些程序常常需要修改,所以把最终的程序放在附录A中,以供解决以后各章中的问题时使用。

第三章到第六章讨论线性电路的分析方法。在第三章的前几节中,将导出适用于直流网络和交流稳态分析的节点分析法的基本方程。这个推导过程构成了本书所有分析方法的基础。第三章的后面几节叙述了这些方程在计算机上的实现。考虑了一些有关计算机存贮容量的利用以及数值计算上所遇到的问题,同时也提出了加快程序的执行速度的想法。这一章还讨论了利用一种简单的输入语言,使受过一般计算机训练的人也能够充分地利用这些分析程序。

然后在第四章中把这些内容推广到计算网络的时间变化响应与瞬态响应。这章叙述了一种在每个时间增量内用某种电压源和电流源来表示电容的积累电荷和电感的贮存能量的求解直流问题的方法。有关的矩阵关系式仍可照搬到计算机程序中去。还介绍了一些更有效的计算过程,使受过初步计算机训练的人也能方便地使用这些程序。在第五章中,对任意线性网络的极点与零点的计算也做了类似于第三章所做的基本内容的推广。所用的方法是对网络中的每个贮能元件及网络的每个输入,求解一个简单的直流电路。如果做得仔细,这个过程是很简单而且十分精确的。这个方法的实现为所有实用的网络提供了一个合适的程序。然后讨论了所得的方程的求解问题。这要求对线性代数有更深入的了解。因此,通过详细计算几个问题来引进矩阵数值特征值问题的解法。

围绕线性电路分析的最后一个论题是在第六章中讨论容差分析和元件微小变化的影响。通过对基本节点方程求导,最终的方程可机械地导出。这章还介绍了元件变化与元件值的统计特性所引起的问题。还讨论了一些预测特性函数变化的方法。最后用一个综合性的数值例子来概括这些方法。

在第七章中,基本电压方程被用作计算非线性网络节点电压的基础。所用的方法是采用线性元件与电压源来近似非线性电压-电流特性。因此,需要构造一个等效电路,使其电压和电流在近似点附近很好地逼近实际的电压和电流。于是,非线性分析就变成对一系列假定的工作点的分析。然后检查假定的点是否与实际的工作点一致,直到获得一个充分接近的结果为止。因此,非线性分析将化为第三章中讨论的那种直流分析的一个收敛序列。本书的最后内容是探讨建立一个可行的非线性分析程序包与求得半导体器件的实际数据的一些问题。书末还附有半导体器件模型库。

J. 斯图海默

目 录

译者的话

前 言

第一章 电路分析的任务	1
1.1 网络分析的性质	1
1.2 网络分析的工具	3
1.3 计算上的考虑	5
1.4 建立模型	7
1.5 非线性网络	9
1.6 对程序的要求	10
参考文献	11
第二章 线性代数基础知识	12
2.1 基本定义	12
2.2 列表矩阵乘法	14
2.3 联立线性方程组	16
2.4 高斯消去法程序	20
2.5 高斯-塞德尔法	23
2.6 矩阵求逆	25
2.7 舍入误差问题	27
2.8 主元原位求逆法	32
2.9 小结	33
参考文献	34
问题	34
第三章 网络的直流和交流分析	36
3.1 基本关系式	36
3.2 任意网络的分析	46
3.3 直流分析程序	52
3.4 线性网络的交流分析	61
3.5 一个简单的交流分析程序	64
3.6 互感模型	75
3.7 节点导纳矩阵的直接计算	76
3.8 稀疏矩阵分析	79
3.9 无阻电源	82
3.10 从属电压源	84
3.11 自由格式输入	89
3.12 小结	99
参考文献	99
问题	99

第四章 网络的瞬态分析	104
4.1 储能元件模型	104
4.2 一个初步的瞬态分析程序	109
4.3 一般方程	110
4.4 时变电源	115
4.5 一个基本瞬态分析程序	117
4.6 最终值解	126
4.7 分段线性网络	127
4.8 稀疏矩阵分析	129
4.9 对元件值改变的重复计算	130
4.10 小结	130
参考文献	131
问题	131
第五章 状态空间分析	133
5.1 一般关系式	133
5.2 反复直流分析法	135
5.3 多余变量的剔除	140
5.4 时域解	143
5.5 状态方程的形成及求解程序	153
5.6 极点和零点	175
5.7 频率响应	190
5.8 刚性微分方程	191
5.9 小结	197
参考文献	197
问题	198
第六章 容差分析	200
6.1 导数与敏感度	201
6.2 统计变量	211
6.3 最不利组合分析	216
6.4 一个简单的敏感度计算程序	220
6.5 相关参数	230
6.6 蒙特卡洛分析法	233
6.7 综合例题	237
6.8 小结	242
参考文献	242
问题	243
第七章 非线性分析	244
7.1 基本关系式	245

7.2 二极管等效电路.....	252	A.2 SUBROUTINE INVERT (子程序 INVERT)	296
7.3 晶体三极管大信号模型.....	259	A.3 子程序 SOLVX 的代码改变	298
7.4 分段线性晶体三极管模型.....	266	A.4 子程序 INVRX 的代码改变	298
7.5 方程的迭代.....	270	附录 B 绘图子程序	300
7.6 非线性程序的结构.....	272	B.1 绘图子程序使用说明	300
7.7 输入语言的考虑.....	273	B.2 子程序 PLOTXY	301
7.8 举例说明.....	277	B.3 子程序 PLT2F.....	302
7.9 自动建立模型.....	287	B.4 子程序 PLT4XY.....	304
7.10 小结.....	292	附录 C 半导体器件模型库	306
参考文献	293	C.1 二极管参数	306
问题	294	C.2 三极管参数	306
附录 A 计算机程序	295	参考文献	307
A.1 SUBROUTINE SOLVER (子程序 SOLVER).....	295		

第一章 电路分析的任务

在本书中,我们将讨论电子网络中电压和电流的计算方法。这些方法都是计算机化的,因此能有效、经济地确定网络的响应。我们需要知道,如何列出网络的方程,如何求解这些方程以及如何解释得到的结果。也想仔细了解网络分析工作中提出的数值问题以及网络方程的求解方法。术语“电路”和“网络”在全书中可交替使用。

本章主要是探讨分析工作的内容。对分析工作的性质有较深的了解,选用所得到的结果数据,提供分析所需的方法,这些都是很重要的。我们希望为详细研究一般的网络分析方法和推导计算机化的网络方程提供一个启发。并提供一些有关分析程序的主要结构以及适当地评价这些计算方法。

1.1 网络分析的性质

电子网络是由电的和(或)磁的积木块连接而构成。每块有两个或两个以上电气连接,它们的连接点称为网络的节点。网络中的电压就是这些节点的电压之间的差。流出节点的电流即支路电流将流过电路的元件,从而在节点之间产生电压差。本书的目的是介绍由实际的元件构成的网络的分析方法。这些元件是大家熟悉的二端元件(电阻、电容、电感、二极管、电压源和电流源)、三端元件(三极管)和多端元件(变压器)。在没有电源的情况下——无论是输入信号源还是直流源,在这些无源元件所构成的网络中将没有电流流过,各节点之间也没有电压差。

本书的主题是计算输入激励所引起的电子网络中的电压和电流及其它密切有关的问题。我们把这些计算称为网络分析。应当指出,分析电路的目的只是为了得出数据,以便能预先知道它的特性如何或者什么时候应当对电路进行修改。绝大多数分析工作都是设计师提出的,目的是为了检查他们的设计方案或者能预知电路变化所造成的影响。分析工作可从网络的数学模型开始,这个模型是由分析者根据实际网络的特性提出的。计算结果的准确度不可能超过模型近似实际网络的准确度。例如,线绕电阻主要呈现电阻,但在某些工作条件下(例如,高频),其电感和电容的影响可能成为主要的。工程中把电子线路想象为都是由服从某个简单的电压-电流特性的集中参数元件组成的。这种特性常常是一个方程,例如,电阻的欧姆定律。这些特性或特性方程是在忽视了电磁能传播速度是有限的这种假定下得出的,即比起波长来元件变得无限小了。

整个电路设计工作的框图如图 1.1 所示。工作过程中常须设计大量的电路。要实现某一目的电路可采取多种途径。近年来,由于电子元件的价格、可靠性、大小和速度稳定地得到改善,因此比起其它的机械的方法来,电子方法正被广泛地采用。本书研究的方法可以直接用于计算机辅助分析的方法。这些方法也可以在机械、热、流体和其它分析中使用。一般讲,先进行电模拟^[2],然后直接进行模拟分析。模拟计算机中求解非电量时就采用上述这种方法。这里,用数字进行电模拟分析要比直接求模拟解方便得多。

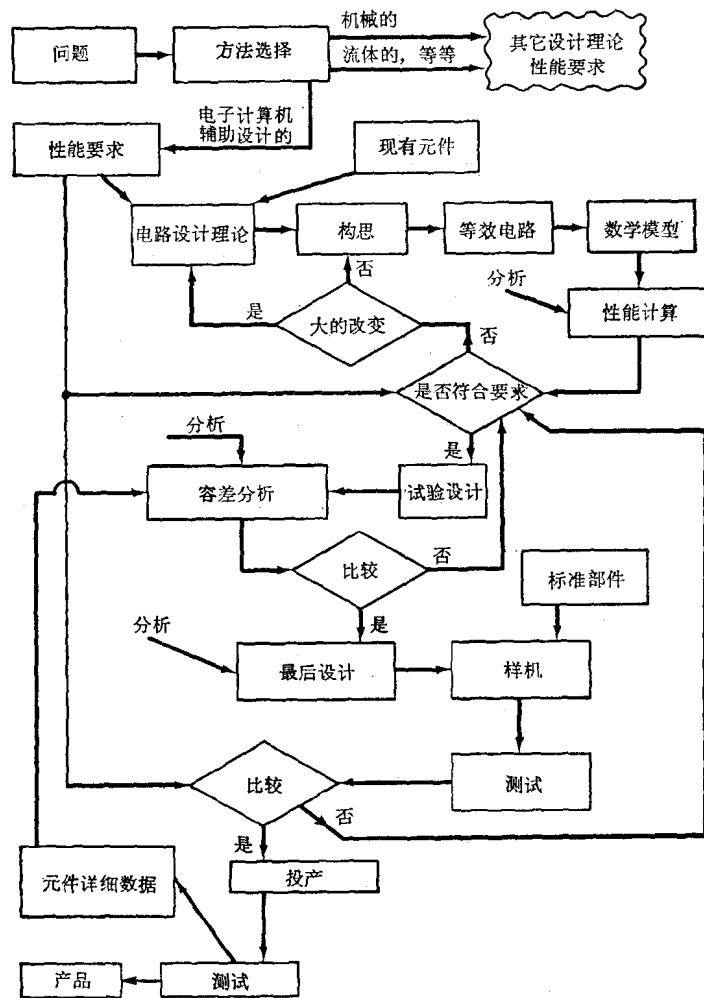


图 1.1 电路设计过程

当采用电子计算机解决问题时, 必须列出电路设计要求。设计者在构造电路时要考虑到这些要求, 首先根据实际需要进行构思, 然后画出草图。在设计这个阶段, 画出的草图常常是相当粗糙的。一般讲, 设计者为了得到电路的轮廓, 需要进行若干简单的性能计算。要对这种构思性质的设计进行详细的分析, 可以从建立电路的数学模型开始。正是在这一点上, 本书研究的方法可以第一次应用到设计工作中去。

检验计算结果并与所要求的性能进行比较。一般讲两者之间有差距。如果相差很小, 只需调整电路元件参数直至电路指标与计算结果相符合为止。如果相差较大, 就需要改变电路的结构或采用不同的电路。不论是哪种情况, 在得出一个可行的电路前, 都需要进行一些试验。在这个阶段, 用到的数据是比较粗糙的, 数学模型也是比较简单的, 常常只做“信封背面”式的计算*。然而当电路变得越来越复杂时, 即使在设计阶段, 也可以采用计算机辅助设计来进行改进。在忽略了元件的许多特性后得出的简单模型对于了解电路的工作是否有

* 意思是指计算很简单, 利用一个信封的背面即可进行。(译者注)

益并不清楚。但在设计这样的早期阶段,也可以说自动分析方法能给出电路工作的更准确的描述。

一旦电路确定后,就应该进行电路性能的详细分析以及元件变化影响的详细计算。分析可能会指出电路的响应和性能还不能满足要求。这时试验电路就需作进一步修改,因而要重新进行详细的分析。有时候甚至还不得不用其它电路来代替构思电路,甚至连构思这一步也要重做。

在分析的这个阶段,需要很多关于网络元件的特性变化的数据。这种数据常常是不足的或者根本没有,这时就需要做一些人为的假定。这些假定必须能正确地描述元件的变化。在大多数情况下,由于元件不是由一个厂提供的,结果造成元件值的分布差别很大,因而实际电路的性能与我们所设计的电路有很大差别。造成这种差别的原因与其说是由于这些元件的标称值不同,倒不如说是它们的特性函数的变化较大。然而,理想的设计方案能使元件参数变化时对电路性能的影响很小,因而会使分析工作变得很容易。

当通过几次试验和分析得出了一个满足要求的电路时,就要确定最后设计项目,并做出样机进行试验。对照原来的性能要求,检查这个样机。如果样机依旧不符合要求,则可能还要检查设计中的前面几步工作。实际的电路元件值与要求的值之间允许的变化量应该给出,然后才能把定型的电路投产。当生产过关后,新的测试数据就可作为元件数据的基础,这样就使以后的分析步骤简化。

对于小批量产品,显然不会麻烦地重复进行上述各个过程,图 1.1 中的很多分析步骤省略了或者合并成几步来做。但是,整个分析工作仍能预言对于给定的输入的性能。分析者须准备好一张定量的电路图,并完成一系列的数学运算,使其结果与性能要求符合。由于分析者和设计者常常是同一个人,因此设计和分析就很难截然分开。最好是让设计者——分析者用计算机对这两部分工作相互改进,以便得到最佳结果。

应当指出,虽然分析本身并没有多少用途,但不管怎样,它总是设计工作中的一个完整的部分。所以一个成功的分析方法应当是功能大,使用方便,对于设计来说是贴切的。以上的讨论扼要地提出了设计者应具备线性电路理论的扎实基础,以及有建立模型、优化、统计和计算机程序的知识。在本章中,我们将对其中的几个项目、它们相互之间、以及它们与本书的论题的关系展开进一步的讨论。

1.2 网络分析的工具

从图 1.1 所示的基本分析过程可以看出,有很多地方要用到解析处理,还要做不同类型的解析工作。在设计的前期,须简单的计算节点电压、电流和功率。这常常只考虑简单的偏置电路,确定步长和频率响应。其中大多数数学运算是求解联立方程。对于线性网络,这些方程是线性的,但对于其它类型的电路,它们就变成非线性的。一般讲,设计者常是从简单的关系开始考虑的,采用的电路也比较简单。对于这类电路来说,计算工具就是电路元件的基本电压-电流关系式,建立联立方程的规则以及求解这些方程的方法。

为了得出一个有效的计算机方法,手算中用的各种特殊方法应该用经过检验的一般方法来代替。因为手算代价高昂,所以有无数的方法来解决各种特殊的电路。例如,低频模型、中频和各种高频放大线路就是常用的。但是,用计算机计算时,使用模型比较方便,在模型中,所有元件都加以计算。类似地,虽然对于大多数放大器可以从输入到输出逐个节点

地进行系统的分析,但这要求我们必须会识别电路的构造和了解电路的作用。计算机能进行大量的详细的计算,但却不能轻易地识别电路的构造。因此计算机方法对于数值计算是有帮助的,但不能洞察问题。分析者宁愿写一个适用于一大堆问题的计算机程序,而不愿为了当时要解决的问题来设计他的程序。因此,使用通用的方法是计算机辅助分析工作的法则。当然,也可以对特殊问题编写特殊的程序以减小计算的代价,但这样将大大增加整个程序设计的代价。

通用的分析方法将联立地求解整个节点电压方程而不是象人工计算那样分段进行计算。这就允许节点之间有任何的相互关系,就象具有很多反馈通路的网络中的情况一样。一般的网络模型不包括弱反馈效应,例如晶体管电压反馈 b_r ,因为考虑它会引起计算上的困难。但在建立计算机的网络方程时,考虑它所费也甚微,因此这些问题都给予考虑。为了联立地处理网络方程,矩阵方法是必须使用的。矩阵确定了处理联立方程组的方式。希望本书的读者能熟悉矩阵代数的概念,也有运用简单矩阵方法的一定经验。对于大多数类型的分析,除了稳态交流分析得到的矩阵是复系数矩阵外,瞬时电压的联立节点电压方程都将导致实系数矩阵。对这两种情形用的是同样的法则,同样的计算机方法。因此,从概念上和计算上讲,直流和交流分析的差别是很小的[1]。

关于频率响应计算,可在每次提高频率时重复整个分析计算。

假定读者已熟悉基本的电路分析计算[3],进行这项工作所需要的工具包括使用线性变换。这在计算复数以求出变换区域中的奇点(极点)时是有用的。当一组方程被变换时,求不同的网络函数的极点相当于求网络微分方程的特征值。其方法可以从线性代数和微分方程理论中得到。其在计算机上的实现取决于恰当的使用先进的计算特征值的数值方法。因此,极点(和零点)的计算将取决于把简单的直流分析中用的线性方法和数值分析教程中一般介绍的先进的数值方法相结合。

分析者的任务还包括计算电路特性函数的变化,因为这与电路参数值的概率性质有关。一般讲,电路元件都是单独制造的,各个元件值的变化彼此无关。例如,电阻值与电容值无关。对于这种电路,可以成功地运用基本的统计方法。了解各个电路元件的变化就很容易算出其平均值和方差。但是,如果元件中有一个以上的参数对电路的工作有影响,则不仅要考虑各个参数各自的变化,而且还要考虑它们之间的统计相关性。例如,二极管可以用反向漏电流和反向偏置结电容来描述。这两个数是相关的,即漏泄低的二极管的结电容一般也比较小。处理这类变化所需的技巧可从现代的统计学中得到。因此成功的分析者大约需要一年的大学统计学课程来对付这些问题。当然,对于多数电路,参数变化是比较小的,因此一阶近似也已够用了。从电路方程来看,一阶近似意味着要计算导数。对于线性网络,这些导数是由一组线性方程得到的,因而是相当简单的。所要求的一切只是处理这些导数组的方法,这些导数组中的每个导数都是很简单的。

从图1.1描述的设计工作可以进一步看出,设计工作不仅是计算确定的电路结构对给定的输入的响应,而且还要对电路进行优化。在大多数情况下,需要以经济的参考系统进行优化。在设计过程中要进行几次修改和计算,这时就可以应用优化。在分析的这个阶段中使用的方法是从比较新的优化理论中获得的。本书将不讨论这个问题。读者要进一步研究可参考其它的书籍[5]。

从以上关于分析者的任务的广泛的讨论中可以清楚地看出,分析者除了要具备一般的

线性电路知识外,还要有线性代数、统计学和优化方面的知识。本书的内容除了优化外,还将对所有这些方面提供一些初步的论述。我们总是假定读者已经具备了线性电路分析的初步知识,也已做过简单的分析。本书将给出可用于任何电路系统的方法。

1.3 计算上的考虑

人工分析电路常常是从电路图开始的。通过分析电路的构造写出电路的一组方程。利用克希霍夫定律得出网络中的元件的电压和电流的关系式。对于线性网络,这些关系式是线性的。

人工分析时应通过扫视电路图及注视元件的连接位置和方式获得方程。然而对于计算机分析来说,这种方法不能使用。计算机不能识别电路图,也不能识别空间关系。计算机的信息必须是定量形式的。因此电路图必须用数值信息来代替。要做到这点,最方便的方法是把电路的节点和支路编号,并给出一个关联矩阵以表示这些支路是如何与这些节点连接起来的。

其次,还必须得出一种自动产生网络方程的方法。这种方法是通用的,并能用于分析所有的电路。在人工分析中,如果电路是特殊类型的,则可能有捷径可走。例如,梯状网络就很容易用毗连方法分析,譬如说用传递矩阵。但对于有反馈的网络,这种方法就变得非常繁琐。一个有经验的分析者将根据他要处理的电路类型来选择他的分析工具。由于用计算机计算代价甚低,因此希望得出一种通用的方法,哪怕这种方法包含很多的计算步骤。本书中讨论的方法目标就在于建立这样的通用算法。任何计算机方法的成功都与找到一个计算用的算法有着密切的关系:这种算法是用计算机能够理解的语言来实现的。在计算机内部,所有信息都必须表示成一组“是”或“否”的二进制信息。这种信息成组地存入计算机的存贮器中。计算机系统的一个特点就是把若干个二进位组合起来放入计算机的一个存贮单元中,一个存贮单元称为一个字。科学和工程计算用的大多数计算机的字长是16、32、36或60个二进位,也可能有其它的字长。计算机系统的价格部分地决定于机器中同时处理多少个二进位。显然,并行的操作越多,化费也就越大。机器的运算速度很大程度上决定于并行操作的数目。字长增大使同时处理的信息也增多,所以每个计算机字能存放更精确的信息。

很自然的会想到计算机差不多是一种精度、速度无限的计算工具。从工程的观点来衡量,计算中心中用的绝大多数计算机似乎确实是过分精确了。计算机中用整数和浮点数两种数进行计算。整数主要用于计数,浮点数用于计算。在计算中,整数是以二作为进位制的整数表示的。因此,能用的整数的大小是由对任何一个整数规定的二进位的数目决定的。这常常就是计算机的一个字。所以对于32个二进位的机器,最大的带符号整数是 $2^{31} \approx 2.14 \times 10^9$ (一个二进位规定为数的符号)。当要在机器中表示浮点数时,部分二进位用于表示特征,部分用于表示尾数。虽然机器中的所有数值都是二进制数,但把计算机内部的数想象为具有十进制的尾数和十进制的特征也是方便、正确的。可以使用的数的范围决定于对特征规定的二进位数目,而其精度则是由尾数的二进位数目决定的。

计算结果的精度一般与数的大小、计算顺序、计算中各步骤的性质有关,也与每个计算步骤的计数精度有关。如果使用浮点数,则每次运算的精度是计算机所用数制的函数。例如,尾数为24个二进位的计算机,数的精度是 $2^{24} \approx 1.68 \times 10^7$ 分之一。这好象是一个很高的精度,但事实上并非如此。如果很多个(10000个)小的数,譬如1,加到一个大的数上去,譬

如 10^8 , 达到 10^{-7} 的准确度的运算是:

$$\begin{array}{ll}
 (1) & 10^8 + 1 = 10^8 \quad (\text{加第 1 个数}) \\
 & \downarrow \\
 (2) & 10^8 + 1 = 10^8 \quad (\text{加第 2 个数}) \\
 & \vdots \\
 & \downarrow \\
 (10000) & 10^8 + 1 = 10^8 \quad (\text{加第 10000 个数})
 \end{array}$$

因此其结果将是 10^8 . 每个局部结果的概率误差是 $10 = (10^8 \times 10^{-7})$. 得到:

$$\text{总和} = 10^8 \pm 8$$

(即错误在于用 1.6×10^{-7} 的精度表示 10^8).

如果象下面那样把运算顺序改变一下:

$$\begin{array}{ll}
 (1) & 0 + 1 = 1 \quad (\text{加第 1 个数}) \\
 & \downarrow \\
 (2) & 1 + 1 = 2 \quad (\text{加第 2 个数}) \\
 & \vdots \\
 & \downarrow \\
 (10000) & 9999 + 1 = 10000 \quad (\text{加第 10000 个数}) \\
 & \downarrow \\
 (10001) & 10000 + 10^8 = 1.0001000 \times 10^8 \quad (\text{加 } 10^8)
 \end{array}$$

得到:

$$\text{总和} = (1.0001000 \pm 0.8 \times 10^{-7}) \times 10^8$$

后面这种情况用了重新排列的运算顺序, 即用是不同的算法. 很清楚, 打印的结果是不同的, 因而实际的结果也是不同的. 所以计算方案的结果与经你熟虑的计算过程的细节有着密切的关系.

如果在计算机上用具有较多二进位的浮点数进行运算, 则两种算法会得出相同的数值. 在上例中, 27 个二进位的尾数已足够了.

计算机用的指令必须是以该机的机器语言表示的. 机器语言是非常繁琐的, 并且用它来编写电路分析程序需要耗费大量的时间. 有很多似英语的语言可以用作计算机语言. 希望这些语言对于使用者来说尽可能的符合习惯, 而它们确定的运算是唯一的. 本书的算法中用的是 FORTRAN 语言. 各种计算机上用的程序先译成 FORTRAN 语句, 再译成机器指令. 由于在工程和科学计算中, FORTRAN 是使用最广泛的语言, 因此本书的程序将被广泛的应用.

但是, 各种 FORTRAN 编译系统之间有一些差别. 希望读者注意你所用的 FORTRAN 与这里的 FORTRAN 的差别. 这里的程序是用 ASI FORTRAN-IV 编写的, 并在 IBM 370/165 系统上用 FORTRAN-G 编译系统检验过. 由于字长的不同会引起数值上的差异, 但如果发现显著的误差, 就应该认真检查一下程序. 不熟悉 FORTRAN 的读者可参看 [6].

在计算网络函数的过程中, 将使用大的信息表. 本书的算法与电路的大小无关, 但数据的贮存在程序送入内存贮器时必须予以规定. 这是 FORTRAN 程序系统的一个缺点. 但

它做辅助工作所需的机时较少,因而 FORTRAN 程序的执行实际上是很有效的。在编写程序时必须说明各种表的大小。有人可能喜欢把表搞得很大,使它能分析可能遇到的任何问题,但由于计算机的价格部分地是由它的存贮器的大小来决定的,因此当要分析的电路并不大,也要化执行一个大程序的代价就变得不经济了。所以,必须在能分析尽可能大的电路所化的代价与对于大部分分析工作所化的代价之间进行权衡。本书提出的程序适用于中等规模的电路。处理对手算来说是过于复杂的问题。程序经修改后也可以处理大型电路。本书的程序可在 IBM360/370 的 100 千字节的内存贮器中运行。

本书对数值方法和计算方面的限制给予相当的重视。读者会发现大量的有关数值方法的详细叙述,这些方法都直接用于电子线路的分析中。然而,从本质上讲,这些内容不过是入门罢了。读者应当记住,这些课题都是目前的研究项目。虽然已有很多结果,但实际上并不知道最好的解决办法是哪个。当然,将来的成果会使分析工作更容易。本书的内容为读者将来能注意和评价这方面的研究成果打下基础。

1.4 建立模型

计算网络的响应是通过求解一组方程来实现的。这些方程在某种程度上描述了观察到的电路元件的端点特性。因此计算反映的不是网络预期的响应而是数学模型的响应。对于正在计算的响应来说,真正的内部电压和电流变化常常是无关紧要的。阻容耦合小信号放大器的频率响应计算就是一例。其中静止的元件电压和电流只有很小的直接影响。在这个例子中,我们可从已知的偏置电路来决定小信号参数,单独从这些参数中计算出非常准确的响应。如果对电路元件进行微小的改变,则小信号参数不一定要重新修正也能正确地算出修改过的电路的响应。

晶体管的小信号 h 参数就是广泛地用于计算网络函数模型的一个例子。这些参数描述的端点电压-电流变化对分析过程是适用的。注意模型必须是合适的。在上面这种情形下,用这些参数不能很好地描述电流和电压的绝对值,因为用的是电容耦合,所以对这方面也不是很感兴趣。如果要求的是电阻耦合的放大器的响应,则小信号 h 参数对分析可能就不合适。当然,我们也可以把模型修改成既适合于小参数也适合于绝对值端点电压和电流。欧伯斯-摩尔 (Ebers-Moll) 的晶体三极管模型就是一个广泛使用的模型,它把全部端点电压和电流联系起来,因而既可用于阻容耦合放大器的分析也可用于直流耦合放大器的分析。但是这个模型过于繁复,用起来需要进行大量的计算。

应当指出,模型的适用性不仅取决于模型中用的元件,而且还取决于外部电路和分析所要求的精度。例如,如果要求的是工作放大器所在的强反馈电路的近似特性,则完全可以把这个工作放大器看作具有零输出阻抗、无限的增益、有限的带宽和无限的输入阻抗。但是,如果电流增益的计算是对放大器本身而言,则必须寻找一个不同的模型。

寻找适当的计算模型的一种可能的方法首先是从一个比实际需要的模型更精密的模型出发,计算对网络函数有影响的各个项目,然后忽略那些对整个函数影响较小的项目。必须考虑元件的相互影响,只保留有意义的项目 [8]。虽然这个过程不会限制使用原模型中原有的内容,但在导出的模型中只需保留有意义的元件和有意义的影响。因此,以后使用这个模型时计算就比较简单了。

在电子网络的分析中,半导体器件在模型中具有最复杂的特性。特别是,如果用的不是

自动化的方法,为使计算方便,则模型一定要简单。大多数器件的模型是为人工计算导出的。由于计算机的收费很低,因此将自动化的方法用于详细的模型也是可取的。详细的模型的一个优点是可以用于很多不同的电路,而且可以不加改变地应用。建立一个简单模型的代价可能超过使用更复杂的模型所要求的外加的计算机费用。设法持有一个通用的晶体管模型库是很有吸引力的。因为随后就可把这些模型用于各种器件。但要注意,这些模型必须能对所有合理的和不合理的使用真实地模拟器件的端点特性。因此工作特性和失效说明都需放在模型中。要得到这种复杂模型的具有任意精度数据是很困难的。但是,对于一个正常连接的晶体管,建立模型还是可能的。这样的晶体管模型应能真实地再现小信号和大信号特性。晶体管的非线性特性将排除模型中只含有几个参数的可能性。第七章中给出的模型对每个晶体管都有约三十多个参数。要确定这些参数必须化费大量的工作,但一旦定出这些参数就可存放起来供以后使用。由于模型不需要比使用要求更准确,所以对于大多数的应用来说,只有几个参数的简单模型也可以用。附录C中的模型库列出了简单模型的参数数据,这种模型对于正常连接的晶体管能得到精确度约10%的结果。

只有一种可能真实地重演元件的特性:有一个与原来的元件完全一样的第二个元件,但无法保证有这种元件存在,因为制造时元件参数都不相同。因此模型必须是对可用于同类设计的差别不大的一组元件中有代表性的元件作出的。这种模型能在元件的允许容差范围内预测实际元件的特性。工作条件(频率范围、信号大小范围、温度等)为达到建立模型时的关键性近似提供了方向。虽然一般适用的模型可能不止一个,但常常是根据端点测量确定模型参数的方便与否来决定选用哪种模型。编制程序方面的考虑也是决定模型的因素。计算机辅助分析方法的趋势是采用比人工计算时用的模型更精密的电路元件模型。由于建立一个好的模型而节省的费用足可抵偿低廉的计算费用。因此总可把电容和电感考虑成具有并联和串联的电阻,如第七章所做的那样。为了使模型能在晶体管的所有一般的连接中使用,可以把晶体管的模型取得含有很多参数。

我们可以从仔细研究元件的端点特性而不考虑其内部过程来建立模型的形状和参数。这种“暗盒”式的方法是有用的,但是这只能在测量范围中模拟元件的性质。另一种方法是考虑元件内部的主要物理过程和元件内部的结构。详细描述这两个部分,并把与元件内部的结构相同的线路列出来。这样,就能得出一个集中参数模型,它以一一对应的方式反映有关的内部过程,并能在相当宽的条件变化范围中很好地近似外部观察到的特性。因此,例如在半导体结中,可以用二极管的电压-电流方程单独描述结特性的本身,单独考虑P区和N区的体电阻效应,包括引线的电感和电阻的影响,模拟表面漏泄效应,考虑结的存贮效应和元件装配的存贮效应。这些模型的每个元件都是确定的,它们的内部关系可由二极管结构得到简化。因此能够建立一个相当准确但可能有点过分繁复的模型。在不同的工作条件下,这些模型的每个元件将有更显著的效果。作为建立模型的副产品,模型元件的工作条件也可以同时建立,在这种条件下,可以对模型的元件进行测量。

对于任意的电路元件,不存在求其模型的一般方法。在某些要求很高的应用中,可能没有什么选择余地,只能按电路的实样使用它需要的元件。这里可以计算激励函数并应用于元件。然后用元件的响应计算元件外部的电路特性。这种电路分析模式要求复杂的混合计算机设备,它能方便地改变电路的参数。但是元件参数不能改变,所以只能对一个元件进行电路响应计算。

我们之所以需要模型,不仅在于利用它来预测元件的端点特性,还在于能用它来确定元件变化对整个电路特性造成的影响。例如,要研究晶体管的放大倍数变化的影响几乎是不可能的,因为几乎无法保证晶体管只在它们的放大倍数中变化。研究这样的参数变化只能在元件的允许容差范围内进行,因此这是分析者的责任。

适当的模型对于分析的成功是极为重要的。一位成功的分析者必定也是一位成功的模型构造者。同样,构造模型与透彻的了解元件中的物理过程又有密切的关系。所以研究元件的物理性质是非常重要的。在构造电子线路的模型时,研究半导体器件是取得成功的最主要因素。其它复杂的模型还包括饱和磁芯的效应,但是大多数电路分析只涉及半导体模型。第七章简要讨论了建立半导体器件模型。本书的其余部分是讨论实用的分析方法,这些方法对于任何由线性电路元件或分段线性电路元件构成的元件模型都是适用的。

1.5 非线性网络

读者对下述基本的电路元件是熟悉的:电阻、电容、电感和电源。每一种电路元件都是用—个与端点电压和电流有关的数来描述的。这些数并不限制可用的电压和(或)电流的范围。由这些元件构成的电路服从下述迭加原理。

如果网络中有电源 S_1 和 S_2 而使元件有电压 v_1 和 v_2 , 电源 S_2 可以在网络中的任何位置上也可以在 S_1 的位置上,则由于 S_1 和 S_2 的同时作用,电压是 $v_1 + v_2^*$ 。

这个原理使我们能把计算多个源的联合影响化成计算一系列单个源的影响,同时,也不需要考虑源强度的绝对值,因为强度为 KS_1 的源的响应就是强度为 S_1 的源的响应的 K 倍。注意 K 是无限制的。理论上,任何大小的电压和电流都应服从同一关系式。显然,实际上每个元件都有某个界限,超出这个界限线性就不成立。事实上,不存在真正的线性电路元件,但确实也能观察到在一定的工作范围内,元件是线性的(可以迭加)。大家最熟悉的是电阻:在它的正常工作范围内呈现出线性的电压-电流特性。把加在电阻上的电压加倍,流过它的电流也加倍。

有很多电子元件是没有线性特性的,即使是在其正常的工作范围中也是如此。或许半导体二极管是这类元件中最简单的一种。两个不同的源引起的流过二极管的电流不能用每个源单独引起的电流之和来得到。在元件必须当作严格的非线性元件的电路中,必须对每个激励函数组合分别计算其影响。有办法处理特定的非线性元件,但没有描述其特性和计算其响应的统一的方法[9]。唯一能取得某种程度的成功的方法是考虑网络中的电流和电压作微小的变化,把网络看作一个线性网络。这相当于对网络中的小信号变化进行分析,即在每次计算时用网络元件的特性曲线的斜率来代替这些元件。大信号变化可通过逐个计算大量的小信号变化来进行计算。因此非线性电路的响应可作为每步上元件值都在改变的一系列线性响应来计算。

这样,非线性电路的响应计算是用大量的单独的电路分析计算来描述的。为了在合理的计算机费用下完成这项工作,必须使用有效的线性分析方法。这就是本书为什么这样详细的讨论线性分析的原因之一。我们还想着重分析半导体电路,并在非线性电路分析的计算机程序中引进二极管和晶体三极管的某些简化方法(模型)。

* 在此可不加任何限制用电流来代替电压。(原注)