[英] J.K. Fidler & C. Nightingale 著

计算机辅助电路设计

张安邦 江泽佳 译

江泽佳 校

人民教育出版社

本书是作者根据在电路设计中有效地应用计算机的实际经验编写而成的。它系统地阐述了电子电路的计算机辅助分析和设计的基本理论和具体方法，并提供了不少子程序。全书共分七章：(1)绪论；(2)网络函数的计算；(3)线性电路的频域分析；(4)电路的直流分析；(5)暂态分析；(6)灵敏度；(7)电路优化。

本书可作为高等院校电气工程、电子工程系的高年级学生的教学参考书，也可供从事电子电路设计的工程技术人员参考。

责任编辑　陶思雨

J. K. Fidler & C. Nightingale

COMPUTER AIDED CIRCUIT DESIGN

Nelson 1978

计算机辅助电路设计

〔英〕J. K. Fidler & C. Nightingale 著

张安邦　江泽佳　译

江泽佳　校

*

人民教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

人民教育出版社印刷厂印装

*

开本 787×1092 1/16　印张 12.5 字数 270,000

1982年4月第1版　1983年6月第1次印刷

印数 00,001—11,500

书号 15012·0404　　定价 1.40 元

序　言

随着工业技术的发展，近几年来，计算机辅助方法在工程中得到了日益广泛的应用。现代数字计算机运算速度的提高和存储容量的增大，使得应用这种方法可以解决的问题的范围得以扩大。在电子工业领域工作的许多工程师发现，他们经常涉及计算机辅助电路设计(CACD)这个方面。同样，在电子工程的许多高等教育课程中也包含这一重要领域的一些课题。

本书是根据在电路设计中有效应用计算机的实际经验编写而成的。它的目的在于，为具有一定基础知识的大学生和在职工程师提供一本简明易懂的研究计算机辅助电路设计(CACD)的入门书。虽然 CACD 是一个活跃的研究领域，许多重要的问题还有待解决，但在编写本书时，充分照顾到这一领域的初学者，尽量避免使用在深入这一课题时会出现的那些难懂的概念和难懂的术语。显然，在实际应用所讨论的各种方法时，结果比术语更为重要。尽管如此，本书仍将为有志进一步学习的读者打下坚实的基础。

由于对电路性能产生影响的元件之间存在着强烈的相互作用，所以除了最简单的情况以外，实际上很少使用直接从最终电路的技术特性着手进行设计的方法。因此，很多电路设计是以分析为基础的。随着设计的展开，分析的结果使工程师可以去修改或扩充电路。即使从理论上讲"直接"设计是可能的场合，例如某些滤波网络的设计，工程师在初步完成设计之后也将面临需要估价非理想元件(如有损耗电感器、有限通频带放大器等)的影响这样的问题，从而根据他的观察去修改电路。

因此，计算机辅助设计方法主要与电路分析有关，它反映了工程师的需要。本书第一章介绍电路设计的基本指导思想，以及本书后面介绍的各种方法的内在联系。接着，第二章讨论时域和频域中的网络函数的计算，这在设计过程中常常是重要的先行工作。第三、四章和第五章集中讨论线性和非线性电路分析，这部分内容是计算机辅助设计的核心。灵敏度分析和优化法分别在第六、七章中讨论，将这些内容引入本书反映了它们在电路设计中日益增长的重要性。本书各部分提供的 FORTRAN 子程序，可供读者用来研究这些方法的应用。

电路理论和数值方法是计算机辅助电路设计的基础。虽然本书叙述了所需的全部结果和概念，但仍假定读者已熟悉了与这些方面有关的一些知识，特别是微分方程、拉普拉斯变换和矩阵表示法等。虽然本书主要以学电子工程的读者为对象，但对于在工程、科学和数学等其它领域的读者也是合适的。希望后一类读者，能够以产生计算机辅助电路设计的那样一种精神，积极地将其它领域中的有关技术引入到他们自己的学科中去。

J. K. F., C. N.

目　录

兵

第一章 绪 论

在初次研究电子学中计算机辅助设计的问题时，讨论一下计算机和设计者之间的关系是大有裨益的。一种最朴实而且可能是最可靠的看法是，高速数字计算机是一种工具。人毕竟是部分地以其使用工具的能力而和其它动物区别开来的。在人类及其祖先的早期文化遗物中，通常都发现了他们用以开始其征服世界的进程的原始工具。当使用像锯或锤这样的简单工具时，很容易看出工具使用者和工具之间的关系。工具使用者是有生命、有理智和善于思考的，他不断修改自己的行为以适应任务的需要，最后，毫无疑问，工作是由他完成的。工具则既无生命和智慧，也不能以任何方式修改它自己。这对计算尺，甚至简单的台式计算器都是合适的。因此，关于人类的技能和劳动创造财富的老观念看来大致是符合事实的。带领数千人使用铁锹可以开凿一个灌溉系统以为民族增加巨大的财富。两个人耕作几英亩土地所生产的食物是很少的。成千人的劳动就可以供几万人的需要。这种财富的增加与使用简单工具的人力成比例的田园式图景，可能会被在中西部(美国)谷物产地几千英亩土地上慢慢移动的二、三台巨大联合收割机无情地打破。似乎只需几个人就可以生产出数百万人所需的食物。在这种场合，人与工具的区别就稍为要模糊一点了。机器当然是无生命的，虽然它看起来远不象铁锹那样肯定如此。机器也是无智慧的，但它似乎做了许多需要智力才能胜任的工作。毫无疑问，一个野人初看到机器的时候会把它当作一个有感觉的活人。

许多工业部门，特别是电子工业，都是以类似的方式发展起来的。计算机，像联合收割机一样，完成了许多任务，将它归为工具这一类似乎是不太合理的，不论在什么场合，要把它当作一件死东西是不容易的。有时，当我们在寻求在它出现之前还不能解决的问题的答案时，它看起来也不是无智能的。但是，最突出的还是它能在适当的时候修改自己的行为这一点。为了看看这种工具类比能否成立，让我们考虑一台编有一个特定电路设计程序的计算机。一位设计工程师输入他所要求的条件，几秒钟之后，电路建立起来了，并且输出了。这位设计者——不像锤的使用者——对此设计并不感到负有特别的责任，他只不过输入了技术数据。可以提出这样的论点，真正对这件任务负责的是计算硬件或软件的设计者。但是，如果我们记起人-锤类比，我们问问自己，举例说，一位锤和凿的设计者在多大程度上被认为是一件雕刻品的作者呢？应当承认，在计算机辅助设计中，设计者和工具的作用是不易分开的。在这种情况下，计算机已超过了工具的功能，执行除开始运行时外不受用户控制的指定任务。随着时间的推移，计算机的用途会更加广泛。恐怕更加使人激动的是，它变得一年比一年重要。本章的其余部分将力求说明为什么在电子学领域尤其会是如此。

关于近年来世界经历了一场技术革命的议论几乎使人听得厌烦了。但是，对于电子学这样的领域来说，正以日益增长的速度取得重大的进步和成就，这却是事实。今天的工程师感到他们

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com

是在日益严厉的技术约束下工作，而这些要求是和采用近代电子系统时所必须严格遵守的条件有关的。例如，在无线电和电话通讯系统内可用频带的有效使用就反映出对于具有极强的锐截止特性的高性能滤波器的需要。电子设备的尺寸已经成为一个重要的设计因素，从而促进了集成电路工艺、特别是中规模和大规模集成电路制造的发展。对于低的能源消耗(例如人造卫星设备)和极端电路信号灵敏度(例如卫星地面站)的需要，又使设计者面临困难的技术问题。

可以举出很多读者也可能会遇到的例子来进一步说明现代电子学中许多问题的尖锐性和复杂性。由于今天的电子工程师所处的技术环境，主要的工程研究不可避免地需要由数以十计(甚至是以百计)的工程师和科学家组成的队伍来进行。简言之，个人发明者的日子似乎已经消失。这只要考虑近年来具有极大社会影响的一些事件，如美国的登月活动或大型复杂的计算机系统的制造等，就可观察到，这样的成就是由许多工程师和科学家共同研究取得的，而不是象无线电、电视和电话这些重大发明那样大多出自个体研究者之手。

在考虑现代工程师所面临的问题的复杂性时，不足为奇的是数字计算机在其工作中经常处于显著的地位。电气工程和电子工程一直是与数学密切相关的领域。在概念上，数学有助于对系统及其运行的理解；在实际上，为电路和系统的具体设计提供数值方法。因此，由于计算机使得多年来建立起来的许多复杂的数学方法得到实际运用，不可避免地，它正在设计过程中起着重要的作用。

高等学校电子学及有关学科的课程总是包含有电路理论这类课程，因为它们对透彻理解电路工作起着基础的作用。这一理解是通过例如对拉普拉斯变换法的应用、电路特性的矩阵分析等等建立起来的。在过去，在数字计算机还未出现之前，这些分析方法因其计算速度太慢而妨碍了它们的应用。但是，现在数字计算机为这类实际应用提供了方便，因此，在经典工程学科中的许多理论方法和概念变成了重要的实际设计方法。

更进一步，现代计算机对大型复杂问题实现快速计算的能力，促使近来对过去不曾考虑过的计算方法的研究。因此，计算机的使用不仅可以使大家早已知道的数值方法得到应用，而且也推动了对于工程师有用的、新的、更强有力的方法的研究。

1.1 计算机在电子工程中的应用

为了讨论计算机在现代电子工程设计中发挥作用的较明显的方面，研究一下电子电路从设计到生产的各个阶段是有益的。这一过程的典型流程图如图 1.1.1 所示。

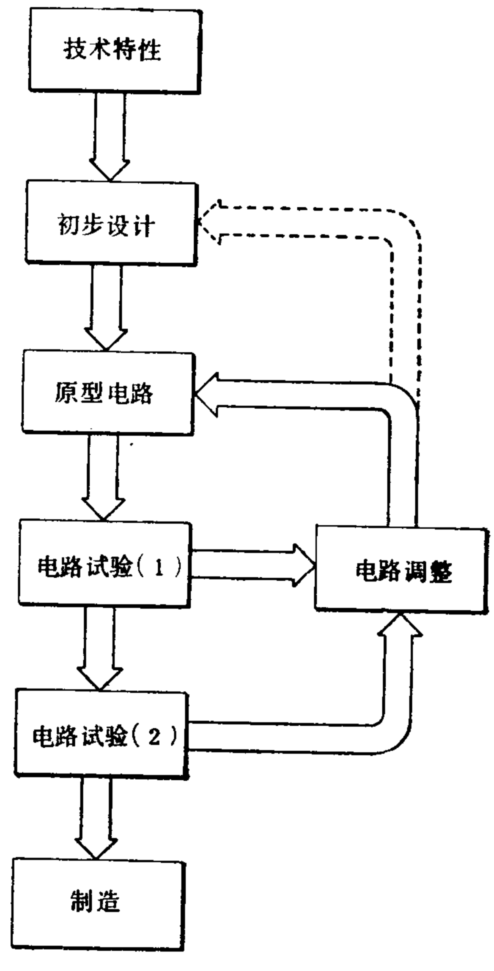


图 1.1.1

我们将讨论研制电子电路从设计到生产的每一阶段，指出计算机能够减轻设计劳动的范围。

1.1.1 技术特性

电路的技术特性常常是以不可能直接适合于设计方法的形式提供给工程师的。例如，放大器的时域特性指标可能是以上升时间、过冲、延迟时间和与阶跃响应有关的其它因数给出的。在某些情况下，可能需要将这些时域特性指标转换成等效的频域特性指标，例如通频带和中心频率，然后才能开始设计。

在设计滤波器电路时，往往要求网络具备某种标准型式的频率响应，例如椭圆函数型或捷别雪夫函数型。设计的部分问题就是将给定的技术特性移植到这类著名函数的一个中去。在标准函数不能满足要求的情况下，可以选择一组频率，给定相应的衰减值，然后利用内插法藉计算机去生成可实现的转移函数。

1.1.2 初步电路设计

在某种程度上来说，电路设计是设计者运用其经验和智慧而进行的一项创造性活动。在某些情况下(例如滤波器设计)，设计过程可以通过一些明确的综合步骤来进行——这是一件很适合于计算机的任务。然而，在大多数晶体管电路设计中，最后形成的电路的具体形式与其应用紧密相关，这就很难让计算机来担任这样一桩具有创造性的任务。在这种情况下，计算机只能在研制的不同阶段分析被研究的电路时发挥有效的作用，这就是下面将要讨论的可以通过分析来设计的方法。一般说来，这种方法需要由设计者提出初步的电路设计。

1.1.3 原型电路

初步电路设计是在作了某些简化假定的基础上完成的，例如，可以假定在其特性曲线的有效区域内工作的硅晶体管的基-射极电压大约为0.6～0.7伏。同样地，可以假定集成电路运算放大器具有无限大的增益、无限大的输入阻抗和零输出阻抗。常常要建立一个原型电路，然后对它进行试验，以观察当器件的特性偏离假定的特性时将会产生的影响。近年来，原型电路的建立或电路设计的模拟板试验已变得困难了，这是由于现代电路制造中经常使用新工艺的缘故。例如，要为集成电路建立一个原型电路就是极其困难的。建立制造少量电路的车间所需的费用排除了这种方法。另一最实际的方法是，使用常用的晶体管和无源元件建立分立的原型电路，这种方法的可行性显然由这些分立元件模型与其集成电路相似的程度来反映。

正是在这里计算机将发挥其作用，因为电子器件的数学或等效模型可能被设计到非常完善的程度，所以用数学方法表示这些元件的联接和工作状态，计算机就能模拟电路的运行情况。正因为如此，近几年来，在寻求在广阔的工作范围内使用的整个系列的电子器件的模型方面作了大量努力。

1.1.4 电路试验(1)

电路的初步计算或试验的目的是确保电路满足严格的电气特性。这一阶段实际上是通过输入试验信号,观测电路输出、功耗和损耗等等来实现的。从计算的角度来说，模拟板试验和电路试验阶段均可用电路分析来代替。分析是采用上段所述的数学或电路基本模型来进行的，具体采用的方法将随所关心的电路特性的具体方面而变。

使用的电路分析方法分为三个主要类别,即

(i) 线性交流分析

(ii) 非线性直流分析

(iii) 非线性暂态分析

(i) 线性交流分析

线性分析法可适用于具有叠加性和比例性的电路，因而这种方法也适用于按线性假定而设计的放大器电路、滤波器电路和其它电路。这些假定通常只对电路的小信号工作状态才是正确的,但是如果能作出这种假定，就可使分析任务得以简化。因为这样就可以采用线性矩阵代数、拉普拉斯变换法和类似的方法,从而减轻了分析时的计算负担。

因此,线性交流分析可用来计算其电路元件已为小信号模型代替后的电路在各种交流(即正弦)信号情况下的特性。

(ii) 非线性直流分析

非线性直流分析法与电路的偏置状态(即静态或无信号状态)的计算有关。例如，在晶体管放大器或逻辑门电路中,可能需要求晶体管的基极、发射极和集电极上的直流电压，这些电压和其它的电压可借解非线性代数方程来求得。

一切实际的电子器件的工作状态均由其不同参变数间的非线性关系来决定（对于这些参变数的微小变化,可以近似看作线性关系，这说明上述的小信号线性分析是正确的)。因为我们关心的是直流分析,时间导数将从这些关系中消去，因此,非线性直流分析是通过求解按电路元件代数特性所建立的非线性电路方程组来实行的。一般说来，这个非线性方程组的解是不能用解析法求得的,因此,必须求助于数值迭代法。

(iii) 非线性暂态分析

在许多应用(例如,晶体管放大器电路的分析)中,将上面两种分析方法结合起来就可完满地表达出电路的特性。具体说，线性交流分析将详细提供围绕由直流分析得到的静态工作状态的小信号偏移。

但是,在某些情况下,电路经受大信号偏移时，就需要不同的分析方法。这种方法称为非线性暂态分析。它是通过求解描述电路特性的非线性时域微分方程来完成的。它可以特殊地研究正弦输入信号,如象线性交流分析一样,此外,还可以处理一般情况的时域输入信号。于是,逻辑门电路、电源、解调器、振荡器和一大群其它电路的特性,可以应用非线性暂态分析法来研究。

上述的“暂态分析”和“时域”等名词起着强调用非线性暂态分析法求得之解表现出电路参变

数随时间变化的作用。电路元件的非线性特性排除了频域概念的应用。结果发现，非线性暂态分析是在电路的计算机分析时出现的最难解决的问题。人们清醒地认识到，甚至使用供工程师解决这类问题的最有成效的方法，使用最强有力的计算机，得到结果所需要的时间往往比直接由电路提供结果所需的长得多。但是，如果这种方法比建立我们所需要的电路并进行试验来求得结果要经济得多，我们就会看到，非线性暂态分析程序可以为设计工程师提供一种有用的辅助手段。

总结上述，可以看到，原型电路的实际试验可以用电路的计算机分析来代替。线性交流分析提供有关电路对正弦输入信号的小信号响应的信息，非线性直流分析可以计算电路的直流静态，非线性暂态分析用以确定大信号偏移电路状态。后两者考虑了许多实际电路元件的固有非线性特性。

1.1.5 电路调整

工程师常常发现，初步电路试验阶段的结果，并不完全满足其电路特性的要求。在实际情况下，有各种可能调整电路的方案存在。例如，首先，可以试行改变原型电路，集成电路的晶体管可用具有更好性能的晶体管代替，电感、电容、甚至电阻可用在应用频率或电压等级下具有较好特性的不同类型代替。简言之，可以不断对原型电路进行修改，每作一次修改后都要对电路进行试验。

可以期望，围绕原型电路—试验—调整这一循环反复地进行下去，最终将得到满意的解答，即满足给定特性的电路。但是，如果不存在这种情况，也许需要对初步电路设计作某些调整，换句话说，电路或电路的某一部分需要重新设计。然后，建立原型电路、试验和进一步调整这一整套要重新进行。在这一阶段的失败可能导致修改或放宽对电路特性的要求，显然，这一步骤只有在和用户协商之后才能采用。然后，工程师应当再应用修改后的电路特性开始设计过程。

人们也许要问：计算机怎样参与电路设计的调整？为了研究这个问题，我们应当重新研究手边的问题。实质上，我们是通过调整电路参数力图减小给定的技术特性和电路性能之间的误差（注意，这里还可以包含改变电路图形的意思，因为电路中元件的移去或嵌入可以分别看作是将元件之值调整到零或从零开始调整）。用我们使用的计算技术的术语来说，我们是设法在技术特性的范围内优化电路。这就要求确定一个误差函数，它能将电路实际性能对所要求的特性之间的偏差用数学式表示出来。然后采用求函数极小值的优化办法，通过调整电路，即调整全部或部分电路元件，来使误差函数为最小。求函数的极小值是初等微积分中为求单变量函数极小值所提供的方法的推广。但是，在处理多变量函数的求极小值问题时，并不总是应用微积分的方法，因为其它的方法更为有效。

总之，为了将电路性能纳入给定技术特性范围内而对电路进行的调整可以用计算机优化来代替，从而使电路的误差函数通过在求函数极小值方法指导下调整电路元件而趋于最小。

1.1.6 电路试验(2)

在进行了电路试验的第一阶段之后，成功的设计通常应该进行进一步的试验。虽然这个试验的许多方面可能与用户提供的技术特性有关，同样地也可能有些方面与制造厂家有关。特别是电路对温度变化和对元件容差的灵敏度必须加以考虑。此外，制造者希望知道在大批制造这种电路时可能产生多少不合格产品(这种信息的经济意义是很明显的)。在实际情况下，要进行环境循环温度试验、老化和小批量试生产来评价电路。这是计算机又可发挥作用的范围，因为元件的变化对电路性能的影响可以利用电路分析的方法求得。产品分散性的模拟可以通过分析一批从元件的已知容差范围内随机选择元件值制成的模拟电路来实现。在电路优化的过程中，有时还可以再对电路设计作进一步调整。

1.1.7 制造

只要电路满足了在设计过程中所加的一切限制条件，人们就可以进行电路制造。在这里，制造这一术语指的是设计的非电方面。例如，在制造过程中必须研究电路的布线。实际上，布线是近几年受到极大注意的一个最使人感兴趣的领域。具体的布线问题要随所用的工艺而变。例如，在集成电路和单面印刷电路板的情况下，会出现联接线交叉的问题。在双面印刷电路板的情况下，这样的问题就会得到克服，但常常是以增加联接路径长度为代价的。受到交叉、联接路径长度及总体尺寸等限制的布线问题，是一个在某种情况下可以使用根据图论或网络拓扑的数学方法编写的计算机程序完全解决的问题。这一方面的计算机辅助设计在本书中将不作进一步讨论，因为到目前为止它还没有一套标准的方法。在任何情况下，人的智慧是无法代替的，计算机只能被当作在工程师控制下的“超级制图员”。因此，元件在电路底板上或集成电路中的位置可以在计算机上模拟，工程师通过使用某种计算机绘图器件(参阅有关内容)和计算机程序相互对话以求得满意的布线。然后，让受计算机控制的绘图设备绘出一组完整布线图是不太困难的。

最后还要指出，计算机在实际制造过程中也要起一部分作用。机床可用微型计算机进行数字控制，计算机还在制造过程的某些方面的实时控制中得到了应用。

1.2 计算机辅助电路设计

由上述可见，计算机可以相当有效地应用于设计过程的各个方面。但是，在目前，计算机本身能够实现完全的电路设计还是很少见的，除非设计的细目特别简单并有很详细的说明。通常，设计方法的创造性仍然有赖于人的参与，因此，计算机在这个方面的应用被称为计算机辅助电路设计(CACD)。因为绝大多数带通用性质的 CACD 方法都执行电路分析，我们看到，计算机辅助电路设计方法适用于通过分析进行的电路设计(甚至优化方法也是通过重复分析所研究的电路来实现的，参阅 1.1.5 节和本书的以后部分)。

于是，我们可以说，“计算机辅助设计”是一种设计电路的方法，在这种方法中为计算机提供了实现电路设计方法的程序。如果没有有力的数字计算机，这种方法的数值计算是难以进行的。

CACD 程序是将数值方法应用到对电路特性的理论研究所建立的方法上而发展起来的。因此，电路理论和数值方法是促进形成 CACD 方法的主要因素。

本书将研究 CACD 中较易于应用的一些方法。对它们的研究既不停留于表面的论述，也不会使之变得太深。相反，本书打算通过研究和证明电路理论和数值方法的一些课题起到计算机辅助电路设计课程的导论的作用，并指出这些课题的结合可以得到简单而有效的电路设计方法。我们希望研究本书的这些材料，将有助于激励读者对其进行的电路设计问题应用这些方法，而且也为进一步阅读杂志上较深的内容作好准备。书中在适当地方提供了 FORTRAN-IV* 子程序，用以说明所讨论的方法，同时也可供读者使用。

在这里依次介绍一下各章的内容是有益处的。第二章讨论了网络函数计算法。网络函数包含了对电路设计的技术特性的考虑。通过网络函数（它是拉普拉斯算子或复频率变量的函数）的计算，可以得到频域中关于振幅、相位、相延迟和群延迟响应的信息。另一方面也可计算冲激、阶跃和广泛的其它时域响应。虽然以网络函数形式表示的技术特性常常只在某些特定的情况下应用（例如，滤波器设计和控制系统设计），但网络函数概念的作用和重要性是特别值得研究的。

第三章介绍了交流分析法。这种方法可以用来计算线性电路或应用小信号近似简化而得的线性电路的频域特性。这种方法是以求解对被研究的电路应用克希霍夫定律列出的线性方程为基础的。这种方程的求解是通过应用特别适于处理电路节点导纳矩阵的矩阵数值计算法来进行的。此外还讨论了双口参数在交流分析中的应用。

第四章讨论了直流偏置电压或静态工作电压的计算。这里介绍了一些特别方法，用以处理电路中含有非线性元件（如象电路中含有的晶体管和二极管这类器件）时所遇到的困难。应当指出，非线性直流分析问题很少使用解析法求解，而宁可使用迭代法求解，即首先猜测一个解，然后应用从电路方程得到的信息逐渐改善这个猜测值。

第五章研究非线性暂态分析问题。前已指出，非线性分析问题是极其复杂且难于求解的，但是，在第五章中用两种方法来使问题达到一些简化。其一，将许多初始考虑与线性电路时域分析联系起来（这并不失一般性）。其二，应用节点方程去建立通常所称的状态方程。使用这种方法，熟练掌握线性电路和节点分析法就会减轻因将它们推广到非线性电路而出现的概念上的困难。此外还要指出，在需要对非线性电路特性进行计算的每个时间点，非线性暂态分析问题就化为一个直流分析问题，因此，可以引用第四章所研究的方法。

在第六章，电路灵敏度的计算受到了注意，这些计算涉及到有关元件的容差对电路性能方面影响的处理。灵敏度计算需要计算电路中的任一元件发生变化时所引起的电路响应的变化。乍看起来，这一任务似乎是需要进行一些冗长的重复的电路分析，但是，在很多情况下，可以设计出

* FORTRAN-IV 程序在执行时允许使用复数运算和阵列的零下标。在使用其它 FORTRAN 编译系统时，应对子程序作相应的修改。

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com

计算电路元件作有限变化和无限小变化时的灵敏度特性的十分有效的方法。

电路灵敏度和电路元件容差影响的研究,促使我们去研究估算产品分散性的统计方法,这一课题也在第六章处理。

最后,第七章涉及到电路的计算机优化问题。如果没有优化,则把计算机对电子电路的应用看作是模拟而不是设计才是合理的。在交流和直流条件下的电路分析,以及对灵敏度和容差的研究,就其本身来说,并不是设计过程。当优化出现时,计算机辅助电路设计才有希望成为计算机电路设计,而且计算机也才能成为超过工具的某种东西。因此,第七章中的方法在了解和发展计算机辅助电路设计时是极其重要的。

优化法基本上分为两大类。在第七章中对每一类问题都加以举例说明。第一类包含直接搜索法,它对不同组元件值对应的特性误差顺次加以比较,以求得误差的极小值。虎克(Hooke)-基甫(Jeeves)法和单纯形法被用作这类方法的例子,后者一般被认为可能是最强有力的通用的直接搜索法。

第二类是梯度法。这类方法是利用偏导数以求信息极小值的策略。通常,这个方法能以较快的速度收敛于极小值。在第七章中讨论被认为是现有最佳方法之一的由佛勒切(Fletcher)-鲍威尔(Powell)创造的一种梯度法,还有一些与之有关的常用的单变量搜索法。

同时,还讨论了建立误差函数的方法,研究了这些函数在优化中作为目标函数的适用性。

1.3 CACD 方法的实现

世界各地不少工业和学术机构为设计 CACD 程序库已作了许多人-年的工作。其中的一些程序是与一个特别类型的电路的分析或优化有关的专用程序。另一方面,已经写出了若干可以广泛应用于各种电路设计的通用程序。但是,两种程序都各有其优缺点。专用程序通常占用的存贮量比通用程序少得多。在大多数情况下,通用程序的运行速度较慢,而且比为特殊电路所写的专用程序的精度低,因为后者可以利用电路的特点以减少编程的工作量,还可针对具体要解决的问题选择适当的算法。例如,一般都认为对于梯形电路使用一般的节点法进行分析是不经济的,因为它将导出一般说来不能为程序(除非使用专门的方法)检出的非常稀疏的矩阵。稀疏矩阵意味着计算机要多余处理一些信息,这些多余的信息处理又表现为计算机运行时间和存贮量的增加,以及在执行计算时精度的降低。为此,在这种情况下,通常使用特别适于梯型网络的其它分析法。

但是,如果数值精度的稍为降低是可以容许的,运行时间的增长(当然,这反映费用的增加)又是可以接受的,则电路设计的通用程序可以更有效地利用编制程序的成果,因为一个这样的程序可以适用于各种不同类型的电路。

于是,在应用 CACD 方法时,一方面必须决定是为当前的任务编写通用程序还是编写专用程序,一方面要照顾到将来的需要。

为了有用起见，由 CACD 程序所得之结果应该以适当的精度反映被研究电路的实际特性。按 CACD 方法的程序设计所得到的精度，一般说来，是与提供结果所需的数值运算次数有关的。实际上，一般假定乘、除运算比加、减运算产生更大的误差。这个误差是因为数字计算机所使用的是有限字长而引起的。于是，如果我们要知道计算机内的二进制表示式的等效数字，我们希望看到，把两个 d 位数相乘将得到一个 $2d$ 位数的结果。但是，为了以机器的有限字长接纳这一结果，这个积通常是使之舍入到与真实结果接近的 d 位数。可以得出执行乘法时的误差估计值，它依赖于所用的数的表示法(即为定点数或浮点数)。对其它算术运算也可以作出类似的估算。估算中不可避免的不精确性意味着最终结果的误差很少达到 CACD 方法的误差分析可能建议的程度。按一般经验可以假定，需要 N 次乘法和除法的数值方法的误差为进行一次这样的运算可能引起的误差的 $\sqrt{N}$ 倍。因此，研究一个特定方法所需要的数值运算的次数的重要性是明显的，它可以用作不同方法间进行比较的依据。还要指出，在某些情况下，减法可能引起精度极其严重的降低。为了看出这点，兹研究在计算机内以六位数运算的下列简单公式

$$E=10^6\times(A-B)$$

如果先设 $A=4.2381413$、$B=2.5130648$，则有 $E=1725076.5$ 作为正确答案。计算机将截断 A、B 两个数. 从而得到 $E=1725070$，答案仍是相当合理的。如果将 B 取为 4.2381411，正确答案是 $E=0.2$。此时，如果再在计算机内计算，则将因截断而得到 $E=0$ 的答案。于是，在作减法时，有关 E 的一切信息已完全丧失。因此，两个几乎相等之数的相减应当总被认为是误差的潜在根源。

现代先进的计算机为实现 CACD 方法提供了极大的方便。在最低级的水平上，程序可以提供成批处理的方便，从而在几小时，甚至可能要在几天以后得到结果。这种方法的缺点是明显的，因为它几乎没有为工程师影响设计过程提供条件。交互式计算，顾名思义，解决了这一问题。这种方法经常使用分时系统计算机，允许工程师坐在远处电传打字机旁和计算机对话，从而改变 CACD 程序的运行，极其迅速地求得程序的结果，因而为电路设计提供了创造性的工具。

近来，对于交互式计算最令人振奋的扩充在于电路设计的交互式图示法的应用。在这里，计算机的外围设备包含阴极射线管(CRT)和连带的键盘。CRT 可以显示被研究的电路图形，以及经分析所得响应的图形。光笔或类似的器件，常常用来与荧光屏上的信息对话。交互式图示法为工程设计提供最大的方便。这类装置的研制，毫无疑问，将受到极大的注意。

1.4 结　　语

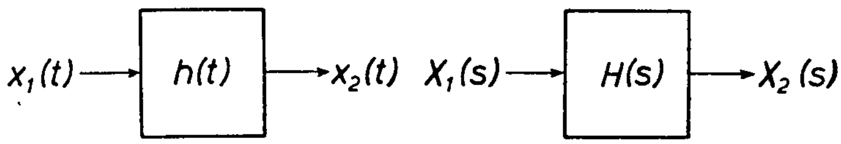
在象计算机辅助设计一样正在发展的领域中，提出与科学最终达到的成就有关的任何初步结论都是不恰当的。似乎完全不妨说，在可以预见的未来，工程师仍将是电路的主要设计者，计算机是它的尖端武器。为了进一步改善他在这方面的工作，人—机对话型程序的研制是使用计算机的有关电路设计者的主要目标。好的分析程序仍然是这类方法的核心。

此外，在较远的未来，作为完全自动过程的设计远景已是依稀可辨的。在这种情况达到之前，优化法需要有较大的发展。

记住这两点，读者将会发现，本书的余下部分是作了适当安排的。在掌握数字计算机这个复杂工具时，他可能有希望使自己成为一个更有才能的工程师，同时，又避免犯过分依赖通用自动化设计程序的毛病。

第二章　网络函数的计算

任何一个线性电网络的特性都可用一个网络函数来表示，该网络函数描述网络的某些响应函数或输出与激励函数或输入之间的关系。这种关系通常表成复频率变数 s 的函数，由描述时域内输出与输入关系的微分方程经过拉普拉斯变换而给出。这种情况如图 2.1 所示。



(a) 时域　　(b) 频域

图 2.1

图 2.1(a)中，用 $x_1(t)$表示的时域信号是网络的输入，$x_2(t)$是由之产生的时域输出。如果对输入和输出进行拉普拉斯变换，定义

$$\mathrm{L}[x_1(t)]=X_1(s) \qquad \mathrm{L}[x_2(t)]=X_2(s)$$

则如图 2.1(b)所示，有

$$X_2(s)=H(s)X_1(s) \tag{2.1}$$

式中 $H(s)$称为网络函数或系统函数，且

$$\mathrm{L}[h(t)]=H(s)$$

$h(t)$这个量是系统的冲激响应，它通过卷积

$$x_2(t)=\int_0^t h(\tau)x_1(t-\tau)d\tau$$

将时域中的输入和输出联系起来。为了说明 $h(t)$ 是个冲激响应，我们假定在 $t=0$ 秒时有一单位冲激 $\delta(t)$作用于网络的输入端。

由于

$$\mathrm{L}[\delta(t)]=1$$

如令 $x_1(t)=\delta(t)$，则方程(2.1)变为

$$X_2(s)=H(s)$$

对此方程进行拉普拉斯反变换，则得

$$x_2(t)=h(t)$$

所以输出在数值上等于 $h(t)$，而且是系统的冲激响应。

网络函数 $H(s)$通常以电压或电流转移函数、策动点或转移导抗(阻抗或导纳)函数给出的。在有限(非分布)网络的情况下，$H(s)$是复变数 s 的实有理函数，即两个具有实系数的 s 的多项式之比

$$H(s)=\frac{N(s)}{D(s)}$$

式中 $N(s)$和 $D(s)$分别为 $H(s)$的分子多项式和分母多项式。分子多项式和分母多项式均可进行因式分解，因而 $H(s)$就可写成如下形式

$$H(s)=G\frac{(s-z_1)(s-z_2)\cdots(s-z_n)}{(s-p_1)(s-p_2)\cdots(s-p_m)}$$

$$=G\frac{\prod_{i=1}^{n}(s-z_i)}{\prod_{j=1}^{m}(s-p_j)} \tag{2.2}$$

式中 $N(s)$的根 z_i 称为 $H(s)$的零点，$D(s)$的根 p_j 称为 $H(s)$的极点，而G是增益常数。z_i 和 p_j 两者均可为复数。

电气工程师在研究线性电路时经常会遇到网络函数。例如，在分析晶体管小信号等效电路或对选频滤波器所需响应进行数学逼近时，就会引用网络函数。不管网络函数是在什么情况下导出的，它在电路设计中的重要性是无可非议的，因为对它作适当的处理，就可用来提供有关振幅和相位响应、相延迟和群延迟、冲激响应、阶跃响应和对许多时域输入的响应等方面的信息。

本章将在时域和频域这两个方面处理网络函数的计算。前者对于网络暂态响应的研究是很重要的，而后者提供通常在正弦输入时与网络稳态特性有关的信息。

2.1 暂态响应的计算

计算网络时域响应的经典方法是将网络输出的拉普拉斯变换式分解成部分分式。利用这种公式，则有

$$X_2(s)=H(s)X_1(s)=\frac{K_1}{s-p_1}+\frac{K_2}{s-p_2}+\cdots+\frac{K_r}{s-p_r}$$

$$=\sum_{i=1}^{r}\frac{K_i}{s-p_i} \tag{2.1.1}$$

式中 r 个量 $s-p_i$ 包含网络函数的极点和输入函数的拉普拉斯变换式的极点，K_i 是第 i 个这种极点的留数，仍要由 $H(s)$和$X_1(s)$ 来计算。当然，在讨论中已隐含假定$X_2(s)$ 可以表示为 r 项的有限和。

对方程(2.1.1)进行拉普拉斯反变换，就得到标准的表示式

$$x_2(t)=\sum_{i=1}^{r}K_i\exp(p_i t)$$

这样，对任意时刻 t 计算这个方程的右边，就得到对输入 $x_1(t)$的暂态响应。

为了求得留数 K_i，可应用如下的"覆盖"规则：例如，要求 K_1 时，将方程(2.1.1)两边同乘以 $s-p_1$，即

$$X_2(s)(s-p_1)=K_1+\frac{K_2}{s-p_2}(s-p_1)+\cdots+\frac{K_r}{s-p_r}(s-p_1)$$

如令 $s=p_1$，则有

$$[X_2(s)(s-p_1)]_{s=p_1}=K_1$$

从而求得所需的留数。在一般情况下，有

$$K_i=[X_2(s)(s-p_i)]_{s=p_i} \tag{2.1.2}$$

式中的因子 $(s-p_i)$ 用来消去 $X_2(s)$ 的分母中所含的与之相同的因子。

这样，求解第 i 个留数的方法，就归结为消去因子 $(s-p_i)$，计算在 $s=p_i$ 时 $H(s)$ 和 $X_1(s)$ 的乘积。这种方法就是以对 $s-p_i$ 的消去或"覆盖"而得名。

上述方法，只有当网络函数和输入函数都具有单极点时才适用。否则，$X_2(s)$ 的分母中至少包含一个 $(s-p_i)^k$ 型因子，这里的 k 是极点 p_i 的重数。在含有多重极点的情况下，计算方法如下：

令

$$X_2(s)=\frac{A(s)}{(s-p_i)^k B(s)} \tag{2.1.3}$$

式中 p_i 是所研究的多重极点，$B(s)$ 包含分母的其余各项，$A(s)$ 是 $X_1(s)$ 的分子和 $H(s)$ 的分子之积。将方程(2.1.3)特别针对极点 p_i 写成部分分式展式，则有

$$X_2(s)=\frac{K_{i,k}}{(s-p_i)^k}+\frac{K_{i,k-1}}{(s-p_i)^{k-1}}+\cdots+\frac{K_{i,1}}{(s-p_i)}+R(s) \tag{2.1.4}$$

式中 $R(s)$ 表示关于 $B(s)$ 的因子的部分分式展式。现将方程(2.1.4)的两端同乘 $(s-p_i)^k$，则得

$$X_2(s)(s-p_i)^k=K_{i,k}+K_{i,k-1}(s-p_i)+\cdots+K_{i,1}(s-p_i)^{k-1} +(s-p_i)^k R(s) \tag{2.1.5}$$

从而

$$K_{i,k}=[X_2(s)(s-p_i)^k]_{s=p_i}$$

如将方程(2.1.5)对 s 求导，则得

$$\frac{d}{ds}\left\{X_2(s)(s-p_i)^k\right\}=K_{i,k-1}+2K_{i,k-2}(s-p_i)+\cdots +(k-1)K_{i,1}(s-p_i)^{k-2}+k(s-p_i)^{k-1}R(s) +(s-p_i)^k\frac{dR(s)}{ds}$$

可见

$$K_{i,k-1}=\left[\frac{d}{ds}X_2(s)(s-p_i)^k\right]_{s=p_i}$$

进一步求导表明，在一般情况下，有

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com