

第 1 章

绪 论

1.1 系统、模型和仿真

1.1.1 基本概念

“系统”一词最早见于古希腊著名的原子论创始人德谟克里特所著《世界大系统》一书。系统是指具有某些特点功能、按照某些规律结合起来、相互作用、互相依存的所有实体的集合或总和。

系统具有两个基本特征,即整体性和相关性。换言之,系统内各个部分是不可分割的,它们相互之间以一定的规律联系着,它们的特定关系形成了具有特定功能的系统。

系统的分类方法很多,按照不同的分类方法就可以得到很多类型的系统。按照系统的物理特征可分为工程系统和非工程系统,常见的电气、化学、热学、机械等系统都属于工程系统,而社会、经济、交通、生态等系统则属于非工程系统。按照状态变量是否连续分为连续系统、离散系统和连续/离散混合系统。连续系统又包括集总参数系统和分布参数系统,离散系统包括离散时间系统和离散事件系统,混合系统则是由连续系统和离散时间系统组成。

系统模型是对实际系统的一种抽象,是对系统本质的描述,是人们对客观世界反复认识、分析,经过多级转换、整合等类似过程而形成的最终结果。模型具有与实际系统相似的数学描述或物理属性,可以以各种直观的形式给出所研究系统的有用信息。

在实际应用中,根据模型和原型系统的关系可以将模型分为如下几类:

(1) 形象模型。保留原型的外观特征,仅对实际系统的规模进行放大或缩小。

(2) 模拟模型。又称类比模型,它根据描述不同物理系统(力学、电学和热学等)的物理规律之间的相似性,建立物理意义完全不同的类比模型。

为了说明上述概念,下面对相似性和相似系统加以介绍。图 1-1 所示为一个由质块、弹簧和阻尼器组成的机械系统和一个由电阻、电感和电容组成的电气系统。

描述上述两个系统的微分方程分别为

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + f \frac{dx}{dt} + kx = p \quad (1-1)$$

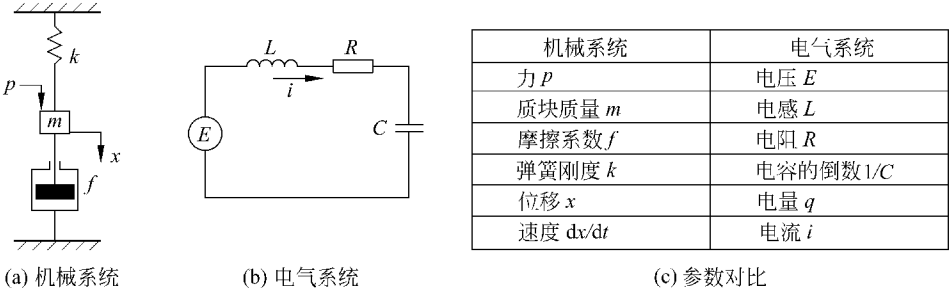


图 1-1 机械系统和电气系统的相似性

$$L \frac{d^2q}{dt^2} + R \frac{dq}{dt} + \frac{1}{C}q = E \quad i = \frac{dq}{dt}$$

(1-2)

显然，二者具有相似的数学描述，并且在参数上存在一一对应的关系，相应地，两者的响应具有相似的振荡特性。可以设想，假如比例尺选择适当，利用电气系统进行试验的结果在数值上和利用机械系统进行试验的结果将完全相同，因此可以将电气系统看做机械系统的一个模型。当描述两个不同动态系统的微分方程具有相似的形式时，这两个系统就互为相似系统；而在微分方程中占据相同位置的物理量，称为相似量。相似系统的概念在实践中十分有用，因为在研究不同类型的系统时，一种系统（比如电气系统），可能比另一种系统更容易通过试验进行研究，所以可以通过建立和研究一个与作为研究对象的复杂系统（如机械系统），相似的电气模拟系统来代替对原系统的制作和研究。一个系统可以用其相似系统在某种意义上加以近似，这是整个系统仿真实理论的基础。但由于实际系统多为非线性系统，所以相似性的成立是有条件的。对于宽范围的相似研究，往往需划分为若干个子区间分别建立相似系统来进行。

(3) 符号模型。借助文字、字母、符号、图表或数学表达式来描述实际系统的模型。其中，利用数学表达式来描述实际系统的模型称为数学模型。

仿真的概念在其发展过程中不断演变，具体如表 1-1 所示。

表 1-1 具有代表性的仿真定义

年份	人 物	仿 真 定 义
1961	G. W. Morgenthater	仿真指在实际系统尚不存在的情况下对系统或其活动本质的实现
1978	Korn	仿真就是用能代表所研究的系统的模型做实验
1982	Spriet	所有支持模型建立与模型分析的活动即为仿真活动
1984	Oren	仿真的基本概念框架是“建模—实验—分析”，仿真是一种基于模型的活动

G. W. Morgenthater 是最早对仿真给出技术性定义的，而 Oren 对仿真的定义则被认为是现代仿真技术的一个重要概念。无论哪种定义，仿真基于模型这一基本观点都是一致的，仿真就是通过对模型的实验达到研究系统的目的。

系统仿真以相似性原理、系统技术、信息技术以及应用领域的相关专业技术为基础，以计算机、仿真器和各种专用物理效应设备为工具，利用系统模型对真实的或设想的系统进行动态研究的一门多学科的综合技术。1946 年，电子微分分析器的诞生开创了系统仿真的

新阶段,系统仿真逐渐成为以相似论、系统科学、计算机科学、系统工程理论、概率论、数理统计和时间序列分析等多个学科为基础的新兴的综合性学科。

系统仿真有多种分类,下面做一简单介绍^[1]。

根据仿真使用的计算机分类,仿真可分为:

(1) 模拟计算机仿真。模拟机使用一系列运算放大器和无源器件相互连接成仿真电路。

(2) 数字计算机仿真。即将系统模型用一组程序语言来描述,并使它在数字计算机上运行。

(3) 模拟数字混合仿真。混合仿真有两种基本结构:一是在模拟机基础上增加一些数字逻辑功能;另一种是由模拟机、数字机及其接口组成,两台计算机之间通过 A/D 及 D/A 转换交换信息。

系统动态模型的时间标尺可以和实际系统的时间标尺不同,前者受仿真时钟控制,后者受实际时钟控制。因此,根据仿真时钟与实际时钟的比例关系分类,仿真可分为:

(1) 实时仿真。仿真时钟和实际时钟是完全一致的。

(2) 欠实时仿真。仿真时钟比实际时钟慢。

(3) 超实时仿真。仿真时钟比实际时钟快。

根据仿真系统的结构和实现手段分类,仿真可分为:

(1) 数学仿真。实际系统全部由数学模型代替,并把数学模型变成仿真模型,在计算机上对实际系统进行研究的过程。这也是目前电力电子系统进行仿真的主要方法,本书将只讨论这种类型的电力电子仿真。

(2) 物理仿真。指研制某些硬件结构(实体模型),使之可重现系统的各种状态,而不必采用昂贵的原型。

(3) 半实物仿真。在某些系统研究中,常把数学模型、实体模型(物理效应模型)和系统的实际设备(实物)联系在一起运行,组成仿真系统,这种仿真称为半实物仿真。

(4) 人在回路中仿真。这种仿真系统要着重解决人的感觉环境的仿真生成技术,其中包括视觉、听觉、动感、力反馈等仿真环境。

1.1.2 仿真的发展历史和发展趋势

仿真技术的发展是与控制工程、系统工程和计算机技术的发展密切相关的。控制工程和系统工程的发展促进了仿真技术的广泛应用,而计算机技术的发展则为仿真提供了非常有效的手段和工具。

20 世纪 50 年代初,连续系统仿真在模拟计算机上进行。50 年代中期,随着电子计算机技术的发展出现了数字仿真技术,此后计算机仿真技术就沿着模拟仿真和数字仿真两个方向发展。目前,数字仿真已经占据了绝对主导地位。

20 世纪 80 年代以来,随着信息技术、计算机技术、网络技术和图形图像处理技术等的高速发展,系统仿真技术又得到了一次迅猛发展的契机,先后出现了可视化仿真、多媒体仿真和虚拟现实仿真。

总的来说,系统仿真方法学的发展大致可分为两个阶段:从 20 世纪 40 年代到 70 年代末,是传统系统仿真方法学的发展阶段;而从 80 年代至今是复杂系统仿真方法学的发展阶

段。前一阶段主要是面向工程系统仿真,这类系统具有充分可用的理论知识,可以进行比较精确的数学建模。后一阶段主要是面向社会、经济、生态等非工程系统,仿真这类系统的难点在于系统的病态定义和病态结构,以及无充分可用的理论和先验知识。当然面向工程系统的仿真技术在这一阶段也得到了长足的发展,主要体现在仿真过程更加简单和人性化、系统模型更加准确、仿真分析中所采用的数学方法更加快速和稳定。传统系统和复杂系统仿真的侧重点和难点是有区别的,前者侧重于对系统的形式化模型进行更加准确、快速的推理、实验和分析,这显然具有工程技术的特点;而后者则侧重于解决如何更加准确、全面地建立系统的形式化模型,用一种抽象的表示方法获得对客观世界或自然规律的更加深刻的认识,这显然是面向科学的。

近年来,随着系统仿真技术应用领域的不断扩展,对仿真技术的新要求也不断提出,如提高仿真的可靠性和准确性、提高仿真和建模的效率等。为了满足这些需求,各种新的解决方案应运而生,概括起来有如下几个方面。

1. 分布式交互仿真(distributed interactive simulation, DIS)

分布式交互仿真起源于美国国防高级研究计划局(DARPA,现更名为 ARPA)和美国陆军在 1983 年共同制订的 SIMNET 计划。分布式交互仿真技术是一种将分布在不同地点的、自治的单一仿真系统,采用协调一致的结构、标准、协议和/或数据库,通过计算机网络连接成一个集数学仿真、半实物仿真和人在回路中仿真为一体的、交互式的仿真技术。

从体系结构上说,DIS 的基础结构和实现方式有如下几个特点:①没有控制整个仿真演练的中心计算机;②使用一个标准协议传输底层真实数据;③平台级的大系统仿真。从技术特点上看,DIS 还具有互操作性(interoperability)、可伸缩性(scalability)和仿真的时空一致性(time-space coherence)三大特性。

2. 面向对象仿真(object-oriented simulation, OOS)

20 世纪 80 年代兴起的面向对象分析和设计方法对仿真技术的发展影响很大,产生了面向对象的仿真方法。OOS 强调模型的框架化、层次化和模块化,有利于提高模型的封装性、灵活性、重用性、可扩展性和可维护性,在国防、工业、交通运输等各个领域都得到了广泛的应用。国外面向对象仿真的典型系统有用于队列网络仿真的 PRISM、用于神经网络建模的 SESAME 以及用于超大规模集成电路系统仿真的 OPERAS 等。国内的典型系统有面向对象的多媒体仿真环境 SimStudio 和面向对象的连续系统建模仿真支撑环境 ICSL2++ 等。

面向对象的方法学认为,客观世界是由许多各种各样的对象组成,每个对象都有自己的内部状态和运动规律,不同对象间的相互作用和联系构成了各种不同的系统。这与人们认识世界的自然思维方式是一致的。

面向对象仿真在理论上突破了传统仿真方法的观念,它根据组成系统的对象及其相互作用关系来构造仿真模型,模型的对象通常表示实际系统中相应的实体,从而弥补了模型和实际系统之间的差距,因而增强了仿真研究的直观性和易理解性。

在面向对象的仿真中,建模的中心任务就是描述组成系统的对象及其相互作用关系。对象是一个封装起来的模块,对象中定义了一组属性和操作,建模就是把系统类库中提供的对象进行适当的修改与组合形成仿真模型。用户也可以根据系统的实际需要,自己构造适当的对象模块并保存在系统类库中,具有很大的灵活性和方便性。

面向对象仿真具有内在的可扩充性和可重用性,因而为复杂的控制系统仿真研究提供了极为方便的手段。

3. 可视化、多媒体和虚拟现实仿真

可视化仿真(visual simulation, VS)可以为数值仿真过程和仿真结果增加文本提示、图形、图像和动画表现,使仿真过程更加直观,结果更容易理解,又能验证仿真结果是否正确。

多媒体仿真(multimedia simulation, MS)是在可视化仿真的基础上再加入声音,从而得到视觉和听觉媒体组合的多媒体仿真。多媒体仿真利用系统分析的原理和信息处理技术,以更加接近自然的形式建立描述系统内在变化规律的模型,并在计算机上再现系统动态演变的过程,从而得到对系统的感性和理性认识。

虚拟现实(visual reality, VR),也称虚拟实境或灵境,是近年来出现的一种高新技术,是一项综合集成技术,涉及计算机图形学、人机交互技术、传感技术、人工智能等诸多领域。它利用计算机技术生成一个逼真的、具有视、听、触等多种感知的虚拟环境,用户通过使用各种交互设备,同虚拟环境中的实体相互作用,使之产生身临其境感觉的交互式视景仿真和信息交流,是一种先进的数字化人机接口技术。与传统的模拟技术相比,其主要特征是操作者能够真正进入一个由计算机生成的交互式三维虚拟环境中,并与之产生互动,进行交流。通过参与者与仿真环境的相互作用,并借助人本身对所接触事物的感知和认知能力,帮助启发参与者的思维,以全方位地获取虚拟环境所蕴涵的各种空间信息和逻辑信息。沉浸/临场感(immersion)、实时交互性(interaction)和构思(imagination)是虚拟现实的实质性特征,对时空环境的现实构想(即启发思维、获取信息的过程)是虚拟现实的最终目的。自诞生以来,虚拟现实技术已经在军事模拟、先进制造、城市规划/地理信息系统、医学生物等领域中显示出巨大的经济、军事和社会效益,与网络、多媒体并称为 21 世纪最具应用前景的三大技术。

4. 模型的校核、验证与确认(verification, validation & accreditation, VV&A)

仿真置信度评估是仿真过程的一个重要环节,其目的是提高仿真结果的正确性、精度、可靠性和可用性,从而更深入地分析仿真对象,有可能降低仿真系统的总投资,扩大仿真系统的应用范围。

美国计算机仿真学会(SCS)于 20 世纪 70 年代中期成立了模型可信性技术委员会(Technical Committee on Model Credibility, TCMS),其任务是建立与模型可信性相关的概念、术语和规范。

建模和仿真的校核、验证和确认技术是提高仿真精度和仿真置信度的有效途径。

1.2 电力电子电路的建模与仿真

电力电子技术是利用功率半导体器件的开关作用控制电功率的流动,从而实现对电能进行变换和/或控制的技术。作为连接弱电和强电的纽带,电力电子技术为用户提供了一个可以根据需要改变电能的形态,使电能的应用更加合理和有效,所以其应用范围不断地扩大:从日光灯镇流器、电视机电源等数瓦到数十瓦的家用电器,再到数千兆瓦的直流输电系统,电力电子装置的应用已经渗入国民经济的各个领域。据专家估计,目前发达国家所使用电能的 75%均经过电力电子技术的变换,在 21 世纪这个比例更将达到 90%以上。随着我国科技产业的发展和传统电力工业和传动产业降损节能改造的进展,电力电子技术在我

国的应用也日益得到普及和推广。

一个典型的电力电子系统通常是由电力电子器件构成的开关装置(执行机构)、模拟电路或数字电路(如计算机构成的控制电路)和由电动机或其他机电设备构成的负荷三部分组成而成。这样一个复杂的非线性的数模混合系统,再加上各个部分往往又遵循不同的物理法则,从而给其设计和分析均带来了巨大的困难,使得传统的利用硬件面包板对设计进行验证的方法变得越来越不可行。计算机硬件和软件技术的发展,使得用户可以利用已知的电路理论和计算方法,在计算机上利用软件建立一个虚拟的电路模型,并对其进行大量且快速的计算,“仿真”出接近真实的电路结果。这种利用软件面包板的形式对电路设计进行验证的方法可以克服上述硬件试验方法所面临的困难,使得设计人员可以将精力更多地集中在设计层面,从而大大地节省产品开发费用并缩短开发周期,因此得到电路设计工程师日益广泛的应用。

近年来,电子电路设计自动化(electronic design automation, EDA)已经渗入到电子电路设计的各个领域,如原理图设计、逻辑或模拟电路仿真、设计优化、最坏条件分析和印刷电路板设计等。20世纪70年代以来,一系列CAD软件的相继推出更为电子电路仿真创造了非常好的条件。与此同时,电力电子电路的EDA工具也得到了长足的发展。此类工具大体包括以下几类:一是在传统的电子电路设计软件中,引入新的电力电子器件模型,将其应用领域扩展到电力电子系统设计之中,如为我国电路设计人员所熟知的OrCAD/PSpice;二是在专用领域的仿真软件(如电力系统仿真软件EMTP和控制系统仿真软件MATLAB)中加入以理想开关模型为代表的电力电子器件模型,从而使其在原有研究领域中对采用电力电子装置的问题时仍可进行有效的仿真;三是开发新的电力电子系统专用仿真软件,如以开关电源设计为目的的SIMPLIS等。总之,在对电力电子系统的开发设计中,计算机仿真已经成为电路设计人员的一种基本手段。

电力电子系统属于工程系统,系统中各部分的特性以及它们相互之间的联系一般都有严格的数学描述。对于目前已有的各种电力电子仿真软件,它们对电力电子系统的建模方法无一例外采用的都是数学建模,得到系统的数学模型后再进行数字仿真。因此下面将对一般的数学建模方法和数字仿真方法做详细介绍。

1.2.1 数学建模

数学建模是根据研究对象的基本物理规律,写出描述其运动规律的数学方程(即数学模型),从而在物理系统和抽象的数学描述之间建立起对应关系的过程。

由于实际系统十分复杂,往往不可能对其做出无所不包的全部描述。比如实际系统往往是多方面的,电力电子器件本身的特性就包括其电特性、热特性以及机械特性等不同的方面,对由其构成的系统进行研究时既没有必要也不可能建立一个包括上述全部特性的统一模型,而往往是根据所研究的问题建立相应的某一方面的模型。又如实际系统往往又是多层次的,比如采用电力电子装置的电力系统中,可能同时包括以数百秒为周期的汽轮机的调节过程、毫秒级的电磁暂态过程以及微秒甚至纳秒级的雷电和电力电子器件的开关过程。这样一个大时标跨度的系统,在数学上对应一个病态方程,会导致求解过程中出现数值稳定性问题。

实际上,对于同一个系统,从不同角度观察会得到不同的认识,相应地在数学上就有不

同的描述。虽然最理想的是建立符合所有目的的数学模型,但实际中很少有人会这样做。因为此类模型可能过于复杂而难以求解,特别是对于我们通常关心的特定领域和特定时间的问题而言,其他现象与其之间很可能是弱相关的,可以忽略不计。比如,当研究电力系统的暂态稳定时,由于发电机的惯量很大,完全可以近似认为转速基本不变,所以其机械部分的影响可以忽略不计。所以在建模过程中,重要的是记住数学模型所代表的数学系统只不过是实际系统在概念轴上的投影,建模的本质在于将所研究的系统投影到适当的概念轴。换句话说,我们所建立的数学模型,实际上只是根据研究目的确定的关于系统某一方面本质属性的抽象描述。

数学建模的过程大体可以分为以下五个步骤:

(1) 系统分解。如前所述,针对所研究的问题,对系统进行层次分解,抽取研究对象中与研究目的相关的物理规律,即对模型加以简化,建立所谓的集总模型。

(2) 数学建模。根据集总模型的物理规律建立系统的数学模型,即抽象为相应的数学方程——微分方程组或差分方程组。

(3) 模型转换。由于计算机数字仿真的实现依赖于程序的运行,因此需将模型的数学描述变换为相应的计算机程序或排版板上的结构,也即是编程过程。

(4) 参数估计。根据实际系统决定方程中未确定的系数。

(5) 可信度检验。通过仿真试验的结果与实际系统的对比以验证模型的正确性。

应当指出,上述过程是一个十分复杂的过程,并没有一个固定的程式可以遵循。有人更指出建模是一门艺术,是逻辑、直觉、抽象、联想与技艺的融合。

1.2.2 数学仿真

数学仿真是利用数学模型与实际物理系统之间的相似性为基础的仿真,主要特点是利用数学模型代替实际系统进行试验,以研究实际系统的静动态特性。其主要优点在于它完全建立在软件的基础之上,可以根据研究对象的不同随时对模型加以变动,而不用像物理模拟那样需对硬件加以更动,因此十分经济快捷。但是相对于利用按比例缩小的模型进行的物理模拟而言,由于其模型的正确性基于对物理规律的把握、抽象的准确性和计算机的计算能力,所以可信度受到一定的限制。数学仿真的基本前提是任何一个动态系统,从根本上来说均是可以由状态方程——微分方程组来加以描述的。由于微分方程组均可以利用积分的方法加以求解,所以解上述问题的核心就是解决积分计算问题。在实际中通常采用的有两种方法,即模拟仿真和数字仿真。

1. 模拟仿真

模拟仿真是基于数学模型相似原理的一种方法。尽管客观事物千差万别,但是其物理量的变化规律在数学描述上却具有相似性,均可以用同样的状态方程加以描述,因此可以借助电特性的相似运算来实现对任意类型系统的状态方程的计算。注意到状态方程求解的关键在于求解微分方程,所以由一些基本模拟运算部件,包括由运算放大器构成的积分器在内,所组成的模拟计算机就成为模拟仿真的主要工具。

实际应用中为了提高运算精度,模拟运算部件均用运算放大器实现,其中积分器结构如图 1-2(a)所示。这种方法的特点是根据实际系统的数学模型,通过将基本运算部件(积分器、加法器等)相连接,进行排版;通过选择适当的幅度和时间比例尺,将实际系统中的物理

量,如距离、速度、角度和重量用按一定比例变换的电压来表示,此时系统某一物理量的变化规律和模拟机上与该物理量对应的电压变化规律是相似的,从而可以对原系统进行仿真。这种方法适用于对各种类型,包括时变和非时变、线性和非线性的连续系统进行仿真。由于运行时各运算放大器并行工作,所以解题速度与系统复杂程度无关,适于进行高速运算和实时仿真。以图 1-1 所示机械系统为例,假设基值电压为 $\pm 100\text{ V}$,对应各个变量的最大值。取 $m=1, f=2, k=4, p=0$,位移的初值为 5 cm ,速度初值为 0 。经过比例尺变换后的标度方程为

$$5 \frac{d^2 x}{dt^2} = -10 \frac{dx}{dt} - 20x \quad (1-3)$$

对应的仿真模型如图 1-2(b)所示。

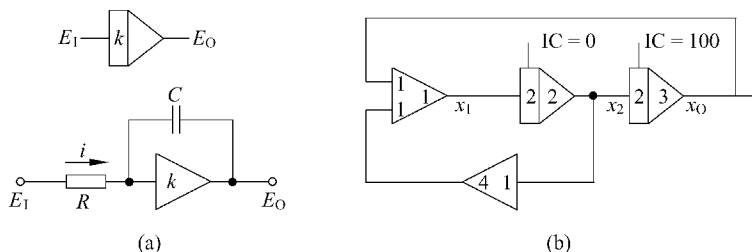


图 1-2 模拟计算机原理

通过记录相应变量的电压波形,即得到系统输出与输入间的关系。但是模拟计算机造价高,排题麻烦,计算精度较低,同时存在零漂等问题,所以除一些特定场合外,目前已经很少应用。

2. 数字仿真

数字仿真的工具是数字计算机。由于计算机的变量表现为离散的形式,所有连续的数学计算必须转换为离散形式才能进行,所以数字仿真模型的建立首先是将数学模型离散化,然后根据数值计算方法,将模型的运算编制成计算机所能识别的程序的过程。这里所谓的数值方法,即是求作为系统模型的微分方程在一系列离散的时间点 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 上的近似解,从本质上是利用差分方程的解来近似微分方程的解。

图 1-3 给出了利用仿真软件进行时域分析的一般步骤和使用的基本方法。

上述步骤说明如下:

1) 图形数据化

电连接网表是连接电路原理图和仿真软件之间的桥梁,只有将电路原理图翻译成仿真程序可以识别的描述电路中所有元器件性能和相互之间连接关系的文件,才能作为仿真软件的输入被调用。

2) 数学建模

常用的建模方法主要有状态方程法、改进节点法和拓扑法等。

3) 数值积分

为了利用数字计算机对连续系统进行求解,必须将所建立的描述系统的微分方程组利用数值积分方法进行离散化。表 1-2 中给出了几种典型的数值积分方法的计算公式。下面对应用最为广泛的欧拉法、龙格-库塔法和梯形法的基本原理做一简单介绍。



图 1-3 时域分析的一般顺序和方法

表 1-2 典型的数值积分方法和特征

名 称	计 算 公 式	特 征
FE: 向前欧拉法 R-K: 龙格-库塔法	$x_{n+1} = x_n + h x_n'$ $x_{n+1} = x_n + h x_n' + h^2 x_n''/2! + h^3 x_n^{(3)}/3! + h^4 x_n^{(4)}/4!$	显式, 1 步, 1 阶 显式, 4 步, 4 阶
BE: 向后欧拉法 TR: 梯形法 G2: 吉尔法	$x_{n+1} = x_n + h x_{n+1}'$ $x_{n+1} = x_n + h/2(x_n' + x_{n+1}')$ $x_{n+1} = (4x_n - x_{n-1} + 2h x_{n+1}')/3$	隐式, 1 步, 1 阶 隐式, 1 步, 2 阶 隐式, 2 步, 2 阶

(1) 欧拉法

欧拉法又称折线法,其基本原理如图 1-4 所示。

假定描述系统的状态方程可以用微分方程 $y' = f(x,y)$ 加以描述,则由 (x_0, y_0) 出发,可得到 $y=y(x)$ 在该点 (x_0, y_0) 切线的斜率,以该斜率经 (x_0, y_0) 作切线与 $x = x_1$ 相交于 y_1 ,当步长 $\Delta h = x_1 - x_0$ 较小时,即可以近似地以 y_1 作为 $y(x_1)$ 近似值得到: $y_1 = y_0 + h f(x_0, y_0)$ 。

这种方法中由于求解 y_{n+1} 的值仅需了解 y_n 的值,故称为单步法。由于该算法简单,所以计算速度快,但计算精度不高。特别是其数值稳定性不好,由于其解仅依赖于前一个点的值,故各步的舍入误差有可能会恶性传播,使得后面的误差越来越大,所以这种向前欧拉法在仿真软件中通常不用。但由于其计算简单、物理概念明确,所以对于理解数值积分方法的基本原理是十分重要的。

(2) 龙格-库塔法

为了减轻计算时对前一个点的计算值的依赖性和提高计算精度,一个可行的方法就是利用多步法,在每一步计算时利用前面若干个点的值的线性组合,即

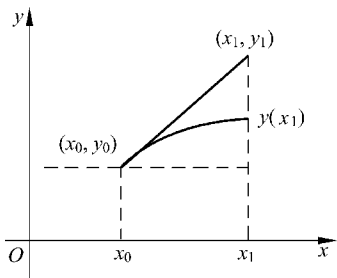


图 1-4 欧拉法的几何意义

$$y_{k+1} = y_k + \sum_{i=1}^N \omega_i k_i$$

这种方法的基本思想是基于泰勒展开式,即

$$y(t+T) = y(t) + T \cdot y'(t) + \frac{1}{2!} T^2 y''(t) + \frac{1}{3!} T^3 y'''(t) + \dots$$

引入的截断误差为

$$\epsilon_n = \frac{1}{n!} T^n y^{(n)}(t) + \dots$$

即截断误差的阶次 n 越高,计算结果越精确。采用线性内插的方法增加计算次数,求出等效斜率是 R-K 法的基本思路,其中最常用的是四阶的 R-K 法:

$$y_{k+1} = y_k + \frac{1}{6} (k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4)$$

其中

$$k_1 = hf(x_k, y_k)$$

$$k_2 = hf\left(x_k + \frac{h}{2}, y_k + \frac{k_1}{2}\right)$$

$$k_3 = hf\left(x_k + \frac{h}{2}, y_k + \frac{k_2}{2}\right)$$

$$k_4 = hf(x_k + h, y_k + k_3)$$

这种方法的精度比欧拉法高,同时具有较高的稳定性,并可以自行启动,因此广泛应用在系统仿真软件中。但是由于它要求所求解的函数一阶以上的导数连续,而欧拉法则没有该要求;同时由于每一积分步需要进行 4 次右函数计算,所以计算速度约为欧拉法的 $\frac{1}{4}$ 。实际上这两种方法均是基于在初值附近泰勒展开的原理,所不同的是取多少项,欧拉法仅取两项,而四阶龙格-库塔(R-K4)法取前 5 项。随着所取的项数增多,计算精度也增高;但计算公式随之变得复杂,计算工作量增大。实际中采用哪种方法需根据问题需要选择。

(3) 梯形法

$k=2$ 的隐式 Adams 方法称为梯形法。虽然它的仿真精度不如 R-K4 方法高,但是对于任意大的仿真步长,由梯形法建立的数字仿真模型具有与原系统相同的稳定性品质,因此在很多仿真软件(如 PSCAD/EMTDC)中得到了广泛应用。

梯形法的计算公式为

$$y_{n+1} = y_n + \frac{h}{2} [f(x_n, y_n) + f(x_{n+1}, y_{n+1})]$$

梯形法是隐式的,可用迭代法进行求解,利用欧拉法提供迭代初值。梯形法的迭代公式为

$$\begin{cases} y_{n+1}^{(0)} = y_n + hf(x_n, y_n) \\ y_{n+1}^{(k+1)} = y_n + \frac{h}{2} [f(x_n, y_n) + f(x_{n+1}, y_{n+1}^{(k)})] \end{cases}$$

为了控制计算量,通常只迭代一两次就转入下一步的计算。

直接使用梯形法的一个很大缺点是收敛速度慢。为了提高收敛速度,可以采用复化梯形法、辛普森法或外推加速法,有兴趣的读者可阅读参考文献[1]。

数值积分法除了存在上述单步与多步的区别外,实际计算中根据 y_{k+1} 的求解算式中是否隐含其本身又分为显式和隐式两种方法。显式方法采用直接计算,每步计算次数少,易于编程;但在求解病态方程时稳定性差,必须用很小的步长。隐式方法则通过迭代方式求解,

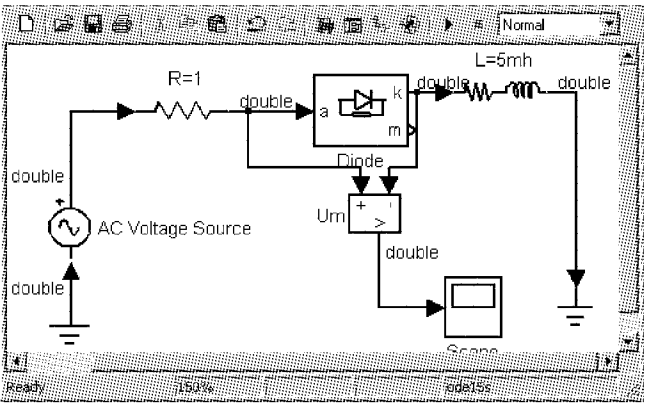
可以改善截断误差,稳定性好,对于病态方程求解可用较大步长,但每步计算次数多。表 1-2 中给出了常用数值积分法及特征。可以看到,隐式算法中的梯形法由于容易计算,数值稳定性好,同时具有适当的精度,所以在电路仿真软件中得到最广泛的应用,而除了向前欧拉法外其他方法也均在仿真软件中得到了应用。

在电力电子电路中,周期性开关过程会引起系统状态的突变,在数值计算中会带来如下问题:①步长选择的两难境地。如采用定步长计算可能会导致计算误差的积累,而采用变步长一方面周期性状态变量的突变将导致大量的计算时间被浪费在寻找适当的步长上;另一方面也可能导致过小的计算步长,总之会增大仿真计算所需的时间。②由于算法不收敛引起计算终止。③由于数值积分方法的原因引起开关动作时刻的数值振荡。为了解决上述问题,日本电气学会报告中指出:①可以通过在开关器件两端引入专门为改善计算稳定性所用的吸收回路(数字吸收回路),并且适当调整计算步长来改善计算稳定性。②引入插值算法。在电力电子开关时刻状态变量会发生突变,而仿真结果却是通过在一系列离散时刻求解网络方程实现的,假定电力电子器件开关时刻与计算时刻不重合,将可能导致较大的计算误差。利用插值的方法可以有效地消除由于算法所引起的振荡。

图 1-5(a)给出了基于 MATLAB 实现的一个简单二极管整流电路,输入电压的有效值为 100 V,频率为 50 Hz,采用变步长算法。当二极管吸收电路参数不适当时,关断过程出现强烈的振荡,如图 1-5(b)所示。这种现象虽然部分原因是由于关断过程引起的,但更主要的是由于数值算法造成的振荡。加上适当的数值吸收回路之后振荡明显消除,如图 1-5(c)所示。对比图 1-5(d)在没有吸收回路条件下采用详细器件模型的 OrCAD 的仿真结果,可以知道对于采用理想开关模型的仿真软件中开关过程出现的振荡进行分析时应当十分谨慎。实际上不应该用理想开关模型来分析电力电子电路的开关过程。

(4) 线性化

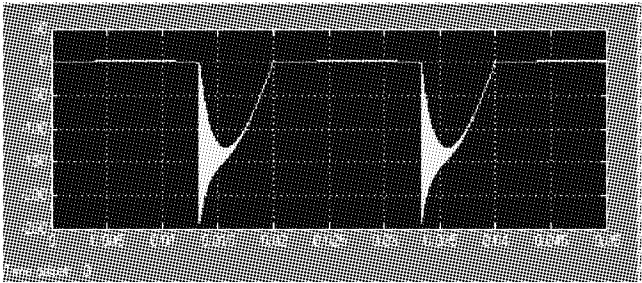
由于利用数值积分方法对系统状态方程进行离散化所得到的方程往往是非线性的代数



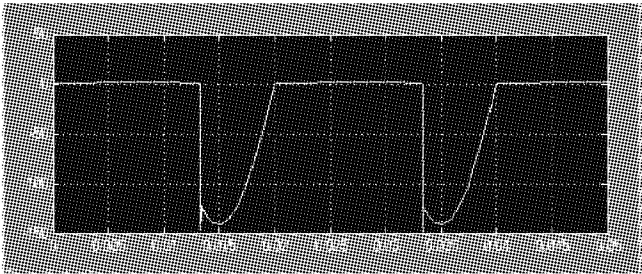
(a) MATLAB 构成的电路原理图^①

图 1-5 二极管整流电路的 MATLAB 和 OrCAD 仿真结果对比

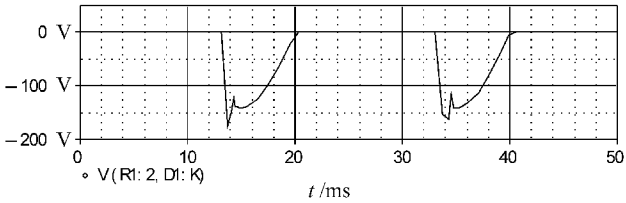
① 本书的电路图及波形图大多由软件自动生成,对由软件自动生成的电路图,为保持与软件图形一致,对其中的电阻、电感、二极管等的图形符号未做标准化处理。图中的单位符号也不全是标准符号。其中,h 等同于 H;u 等同于 μ 。



(b) 吸收回路参数不当二极管两端电压



(c) 采用适当数值吸收回路时的电压波形



(d) OrCAD仿真结果

图 1-5(续)

方程组,而为了求解必须转换为线性代数方程组。电路仿真通常是利用牛顿-拉夫逊(Newton-Raphson)等方法进行上述转换。

(5) 求解

仿真中数值计算的最后一步是利用高斯消去法、LU 分解或其他方法对生成的线性代数方程组进行求解,从而完成数值计算的整个过程。

表 1-3 列出了电力电子系统仿真常用的一些软件,包括它们采用的数值积分方法、开关器件模型以及各自的特点等。

表 1-3 电力电子技术常用仿真软件

	仿真器							
	EMTP	Spice	SABER	SIMPLIS	SCAT	Simplorer	PSIM	MATLAB
数值积分法	梯形法	梯形法(默认) GEAR	GEAR(默认)梯形法	转移矩阵的泰勒级数近似	梯形法	梯形法和欧拉法	梯形法	R-K 法(默认)
电路的建模	节点分析	改进节点法	改进节点法	状态变量分析	状态变量分析	状态变量分析	节点分析	状态变量分析

续表

	仿真器							
	EMTP	Spice	SABER	SIMPLIS	SCAT	Simplorer	PSIM	MATLAB
计算步长	固定步长 (用户指定)	可变步长 (自动)	可变步长 (自动)和 固定步长	可变步长 (自动)	可变步长 (自动)	可变步长 (自动)	固定步长 (自动)	固定和可 变可选择
开关模型	理想开关	理想开关 和详细器 件模型	理想开关 和详细器 件模型	理想开关 (双电阻模 型)	理想开关 (双电阻模 型)	理想开关 (双电阻模 型)	理想开关 (双电阻模 型)	可变电阻 + 串联电 感
开关时刻的 确定	零点校正 (具有插值 功能)	通过对计 算误差的 判断调整 步长	对过零点前 后值插值, 其后返回再 次计算	根据前后 值进行插 值	通过牛顿法 和二分法计 算状态变化 时刻	根据前后 值进行插 值	零点校正	不明
开发的 目的	系统扰动 分析	集成电路 设计	系统设计	开关电源 设计	开关电源 设计	通用电路 仿真软件	电力电子 电路	控制系 统设计
特长	包括电机 和系统的 电力电子 系统分析	包括详细器 件模型的电 力电子电路 分析	电气系统和 机械系统和 热力系统综 合分析	开关电源 分析	开关电源 分析	电力电子 电路分析	电力电子 电路分析	控制系 统设计 与分 析
其他	各种不同 版本共存 包括研究 开关理论 的 GIFU 开关	具有大量 用户教育 用书并具 有功率器 件模型	利用 MAST 语言建模 具有与 Spice 通用 的器件库	具有周期 性定常状 态分析功 能并可于 该点进行 频域分析	具有周期 性定常状 态分析功 能	可以利用 电路,框图 和状态图 进行仿真	具有电力 电子模型	SimPower- Systems 具 有包括开 关模型的 电力系统

1.3 OrCAD/PSpice

1.3.1 仿真工具概述

电子系统设计从传统上分为两个分支,即硬件和软件设计,设计人员因此而分为硬件和软件设计人员两类。传统上计算机仿真作为计算机辅助设计的一个组成部分属于软件设计的范畴。由于计算机仿真就是利用计算机程序对所设计的系统进行实验的过程,因此软件设计人员的任务首先就是借助适当的软件工具将所建数学模型转换为在一定软件环境下计算机可以操作的仿真模型,即编程。早期的仿真大多是用户利用通用的程序设计语言(如 Fortran,C 等)自己编制程序进行的,而所编程序的核心部分就是上述数值解法。这种方法的一个明显优点就是使用人由于同时往往是程序编制人,所以应用上灵活,便于根据需要随时加以改动。缺点是工作量大,并且对使用人的要求较高;随着研究对象的日益复杂,编程工作变得十分困难。

随着计算机技术的发展和研究对象的日益复杂,20 世纪 50 年代开始,出现了一些专门设计的各种通用的或专用的编程语言。最初的研究重点是将用户所熟悉的模拟计算机的编程方法移植到数字仿真中,推出了一系列具有框图描述功能的连续系统仿真语言,如早期的 CSSL 和当前流行的 MATLAB 等。这些语言允许用户以更方便、直接的方式将问题公式

化,并以更简洁的语言进行编程,所以大大地减少了编写和调试程序的困难和时间,加快了仿真速度。但由于仿真软件本身的局限,仿真结果通常仍需通过硬件设计人员的再设计,即根据系统要求,细化电路设计,进行功能调试,最后完成电路原理图和印刷板的设计。而相应的硬件电路 CAD 软件(如 Tango 等)也仅是解决了电路设计和印刷板布线自动化的问题。在这个阶段,采用软硬件设计结合的方法进行的一个典型的电力电子装置的设计流程如图 1-6 所示。

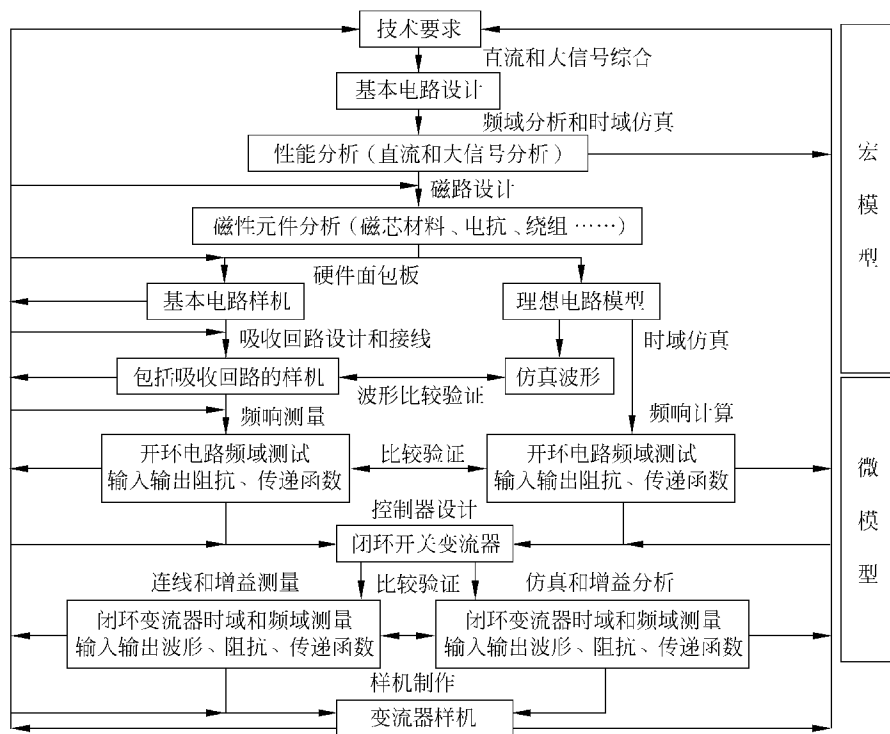


图 1-6 电力电子装置设计流程

近年来随着计算机技术的发展和人机交互性的改善,出现了一种完全新型的 CAD 语言,即所谓硬件描述语言 HDL(hardware description language,也称电路描述语言)。其基本思路是将实际应用的硬件与程序库中的模型之间建立一一对应的关系,从而可以不借助于中间的函数关系,直接建立系统模型。特别是随着计算机人机界面技术的进展,通过在软件中引入图形用户界面(GUI),使用户可以利用 GUI 在仿真软件上通过绘制电路图来直接建立数学模型。

利用该类语言进行设计的基本特点是采用自上而下(top-down)的设计方法,直接面向用户需要。首先从整体出发,根据所研究系统的行为和功能要求,利用数学模型进行行为描述,并通过对系统行为描述的仿真来发现设计中的问题。此时设计人员并不考虑实际的操作与算法实现,而仅研究所设计的系统结构及工作过程能否达到系统设计的要求。在功能设计完成之后再转入具体的电路实现,即通过选择适当的电路和器件实现电路设计。由于此时利用软件模型所进行的原理图设计和利用硬件面包板进行实际的组装是一致的,所以使用人无需具有深入的计算机知识即可以进行操作,有效地简化了仿真过程。而采用软

件面包板的方法对电路进行分析研究不仅可以大大地节约硬件的开发费用,还可加快系统的开发时间,从而为电路仿真的推广应用提供了有利的条件。

由于这种设计理念将每一步的设计均与仿真结合,可以尽早发现设计中的问题,所以日益得到电路设计人员的重视和应用。在数字电路设计领域,常用的硬件描述语言包括 VHDL, Viewlogic, Verilog HDL 和 Altera 公司的 AHDL 等。这些语言具有可以多层次描述硬件电路的功能,国际上越来越多的电子设计自动化(EDA)软件开始接受上述 HDL 语言作为设计输入,进而完成从系统的高层次行为描述到直接生成 ASIC 器件的全面设计功能,因此它们得到了日益广泛的应用。

在模拟电路设计领域则以 Analogy 公司于 1986 年推出的所谓模拟电路硬件描述语言(AHDL)MAST 为代表。该语言的主要特点是对以 Spice 类型的电路网表为代表的电路描述模式进行了扩充,从而可以支持行为描述。此时设计人员不需要知道具体的电路结构,只需了解所设计系统的行为和输入输出特性即可对电路进行设计。其中 MAST 更进一步将仿真程序和建模分离,从而使用户可以自己创建新的器件模型并将其与软件中已有的模型相结合,对系统进行仿真。虽然模拟电路硬件描述语言已经显示出其巨大优点,但由于种种原因,在模拟电路设计领域传统的 Spice 系列的仿真软件仍占据主导地位。

目前在电力电子设计领域所使用的仿真软件大体可以分为以下几类:一类是通过将通用电路仿真软件如 Spice, SABER 中原有的小功率器件的详细模型加以改造,引入大功率器件模型,使其应用领域扩展到电力电子电路仿真;另一类是在现有的专用仿真软件,如电力系统仿真软件 EMTP, 控制系统仿真软件 MATLAB 中加入以理想开关为模型的电力电子器件模型,从而将仿真领域扩展到包括电力电子装置的系统分析中;还有一些专门为电力电子系统设计的仿真软件,如为开关电源设计用的 SIMPLIS 等。本节以及以后的两节中将对国内电力电子领域中常用的 OrCAD/PSpice, PSCAD 和 MATLAB 几种仿真软件的发展历史、性能特点、各自在电力电子电路仿真中的适用范围以及它们相互间的接口进行简单的介绍。

1.3.2 OrCAD/PSpice 的发展历史及特点

OrCAD 是美国 OrCAD Systems 公司于 20 世纪 80 年代推出的通用逻辑电路设计软件包,它包括电路原理图设计组件 OrCAD/SDT(schematic design tool)、逻辑电路仿真组件 OrCAD/VST(verification and simulation tool)、可编程逻辑电路设计组件 OrCAD/PLD(programmable logic device)和印刷电路板版图设计组件 OrCAD/PCB(printed circuit board)。设计人员可以首先借助 SDT 对电路原理图进行设计,经过后处理生成相应的电路连接网表文件;该文件随后作为 VST 的输入,在用户设置的输入信号作用下,根据电路的拓扑关系、各单元的功能和延迟特性进行仿真,通过分析电路中各节点的逻辑状态变化来确定所设计的电路是否满足预定的要求;在电路设计完成后,即可直接调用 PCB 组件,根据设计好的电路原理图进行印制版图的设计,从而完成逻辑电路计算机辅助设计的全过程。

Spice(simulation program with IC emphasis)是一种通用的电子电路仿真软件包。1972 年由美国加州大学伯克利分校计算机辅助集成电路设计小组开发的,主要用于大规模集成电路的计算机辅助设计,是应用最为广泛的一个电子电路设计软件。它利用设计人员易于掌握和应用的电路描述语言来对电路的结构、参数以及希望分析的电路特性进行描述,

然后根据用户设置的条件对电路进行仿真,并根据仿真结果验证所设计电路的可行性。PSpice 则是一个由美国 MicroSim 公司于 1984 年在 2G 版本的基础上加以改进以适合 PC 机使用的 Spice 版本,该软件在 PSpice6.0 及以后的版本中采用了图形界面,进一步方便了用户的使用。

1998 年,OrCAD 公司并购了 MicroSim 公司,经过重新集成的 OrCAD/PSpice 软件的环境如图 1-7 所示,主要包括作为前处理的 OrCAD Capture 组件,用于电路原理图的设计,仿真参数的设置以及产生电网络连接表(Netlist);仿真器 OrCAD PSpice 用于根据上述网络连接表对电路进行仿真验证。一旦设计的原理图通过验证,就可以进入后续的 Layout Plus 程序进行印刷电路板版图的设计,或进入 Express 进行可编程逻辑元件(PLD)的设计。OrCAD10.5 版本的启动界面如图 1-8 所示。

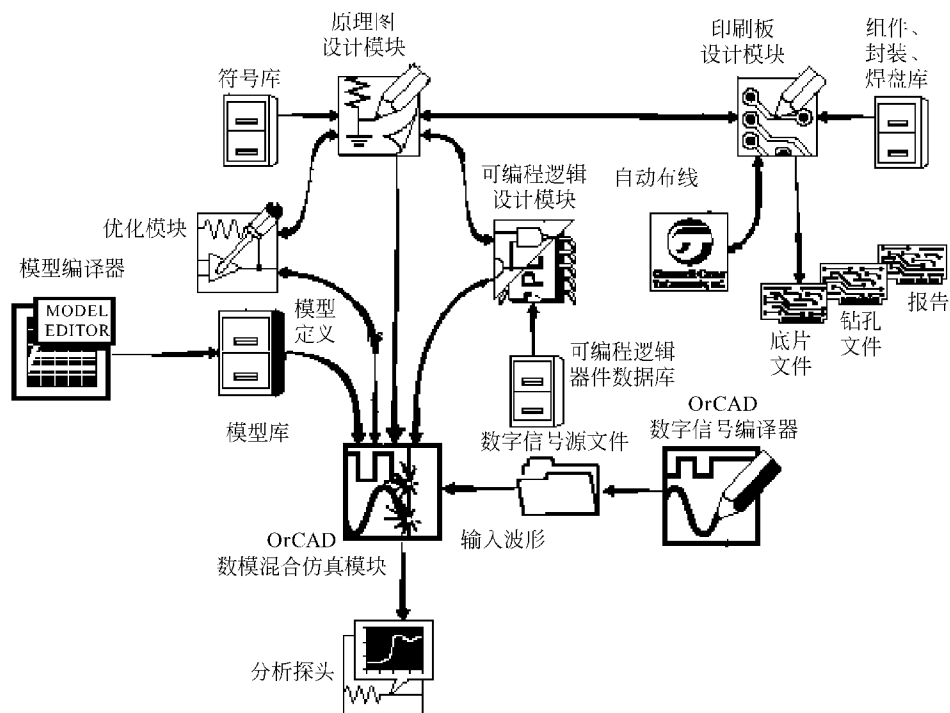


图 1-7 OrCAD 软件系统结构图

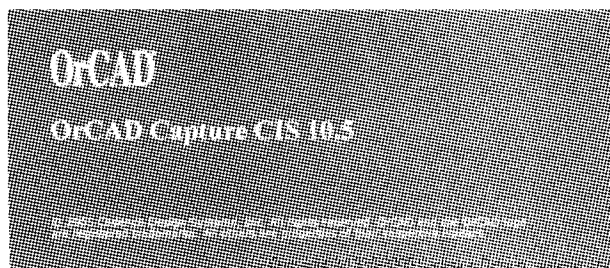


图 1-8 OrCAD 10.5 主界面

作为 PSpice 8 的改进,OrCAD 引进了 Top-Down 的设计理念,为设计者提供了一个由基于原理图或 VHDL 文件的电路设计,FPGA 和 CPLD 综合设计,到数字、模拟、数模混合仿真,直到印刷板设计的整体解决方法。

PSpice 的主要优点如下:

(1) 具有模拟/数字混合仿真功能,可以利用文本和原理图两种输入形式进行由数字和模拟元件构成的混合系统设计,这是大多数仿真器不能做到的。采用原理图作为输入时,该软件在电路设计中的作用相当于一个软件面包板,从而大大提高设计效率和节约开发成本。

(2) 现在提供的仿真模型库包括常用的模拟器件、数字器件的模型以及包括精确的传输线、磁芯模型在内的总数达 3 万以上的内建模型。此外它还可以通过其 CIS 组件从互联网站点上下下载新的器件模型,从而帮助用户有效地改进设计和降低成本,用更少的时间设计出更好的电路。

(3) PSpice 具有大量的模拟功能模型和系统分析功能。其中模拟功能模型使用户可以用类似于传递函数框图的方法来对复杂的电路进行时域或频域分析;其电路基本分析功能,如直流、交流和瞬态分析,蒙特卡洛,最坏情况/灵敏度分析,参数扫描以及优化和波形分析等功能,使用户可以从不同的角度对所设计的电路进行分析和研究,从而优化设计。

(4) 允许用户通过使用参数、拉普拉斯函数和状态方程等建立用户自己的模型。

所有上述功能为其在电力电子电路仿真中的应用提供了可能。但是,当应用于电力电子领域时其缺点也是明显的:

(1) 它是为信息电子电路设计用的,因此器件的模型均是针对小功率电子器件的。对于模拟电力电子电路中所用的大功率电力电子器件中存在的高电压、大注入现象等不尽适用,有时甚至可能会导致错误的结果。

(2) 收敛问题是将该软件用于电力电子电路仿真的主要问题。通常为了改善计算结果的收敛性需要修改仿真条件,如降低仿真结果的相对精度 (RELTOL),加大迭代次数 (ITL_n) 即以加大仿真时间为代价来提高计算的稳定性。尽管如此,但由于它性能价格比较高,故在我国的电力电子仿真中仍是应用最广泛的软件。

为了便于对不同仿真软件在对电力电子电路进行时域仿真时的特点进行比较,以图 1-9(a) 所示的零电流准谐振变流器为例进行研究。其中开关频率为 1 MHz,占空比为 0.3,电路中续流二极管和功率 MOS 管分别用 PSpice 内建的 D1N4148 和 IRF150 详细模型描述。电路中 Cr 和 Lr 分别为谐振电容和电感,电流源则用来模拟输出滤波电路和负载电阻。图 1-9(b) 显示了 PSpice 的仿真结果。

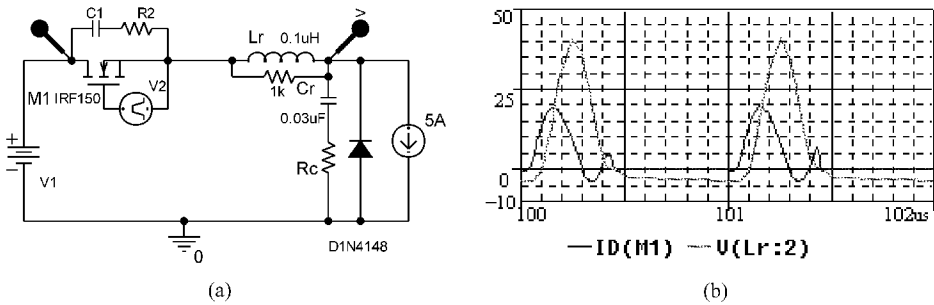


图 1-9 准谐振变流器仿真原理图和仿真结果

1.3.3 OrCAD 仿真软件主要模块

1. Capture——电路原理图设计软件

Capture 的主要功能是生成各种类型的电路原理图。图 1-10 所示为 Capture 的电路图编辑(Page Editor)视窗,通过选择 Place 中 15 条子命令或窗口右侧的绘图工具按钮调用所需的元器件,并按一定的方位放置在电路图的适当位置,然后通过连线即可生成所设计的电路原理图。同时在需要观测的地方可以设置电压、电流和功率探头,在程序运行的同时(或其后)观察该点相应变量的波形。图 1-10 所示为一个采用升压斩波器的高功率因数直直变换器电路。

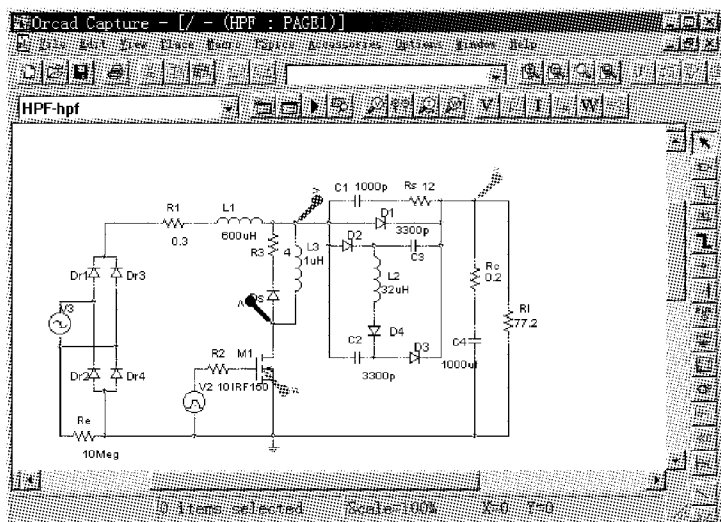
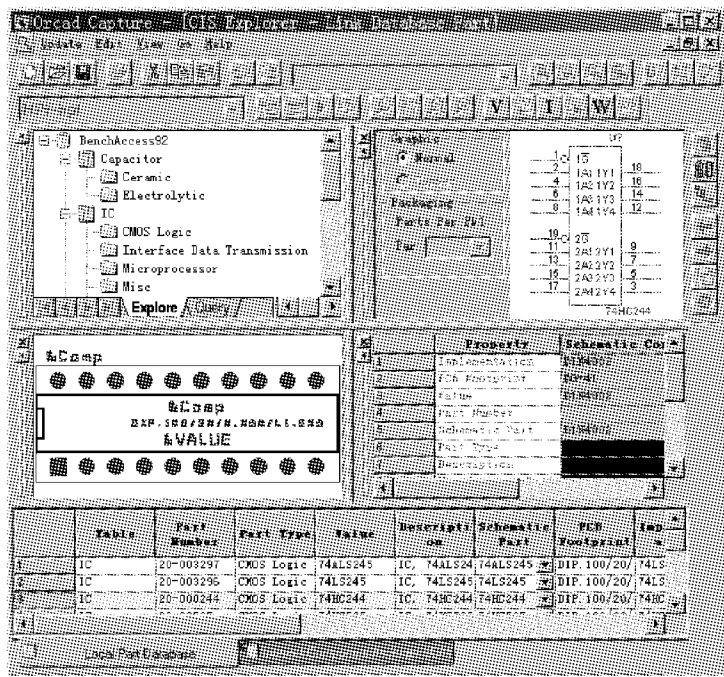


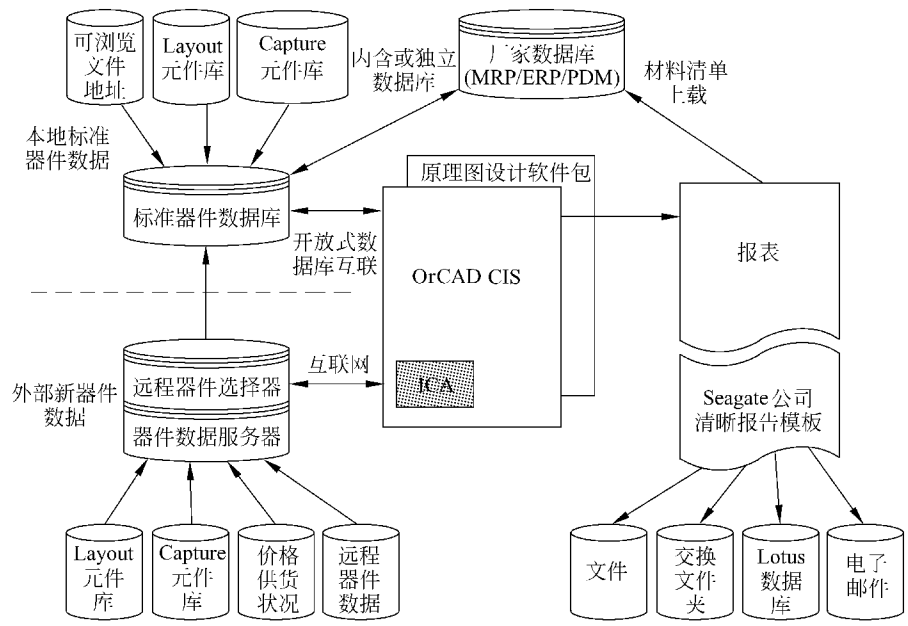
图 1-10 Capture 的电路图编辑(Page Editor)视窗

Capture 与其他电路图绘制软件的一个明显区别就是它包括一个元器件信息系统 CIS (component information system),应用时可以通过原理图编辑器中的“Place/Database Part”子菜单或“Edit/Link Database Part”子菜单进入。该模块不但可以对元器件的使用和存储进行管理,同时还具有互联网元器件辅助服务(internet component assistant, ICA)功能,可以通过 Internet 从指定网点提供的数据库中查阅各种元器件信息,并根据需要 will 所查到的元器件模型应用到电路设计中或添加到 OrCAD 的元器件库中。图 1-11(a)所示为一个典型的 CIS 浏览器视窗,包括元器件类型浏览窗、元器件图形符号窗、元器件封装外形图窗、元器件属性浏览窗和器件数据服务器窗。通过窗口底部的按钮可以选择连接本地元器件数据库(local part database)或是互联网元器件辅助服务 CIS 模块,切换到 CIS 时软件将自动与 Internet 连接。其中器件数据服务器(component data server, CDS)表中包含器件的分类、零件号、类型、数值、性能描述、封装形式、厂家、供应商、价格、供货状况和联系网址等。一旦用户采用新的器件,除可从本地数据库中选择外,还可以从网上直接下载器件模型,进行仿真研究,以及联系订货。

电路图绘制完成后,通常需要进行包括元器件自动命名(annotate),设计规则检查 DRC(design rules check),生成供不同 CAD 软件(包括仿真软件 PSpice)和印刷板设计软件 Layout 调用的电网络连接表(netlist)等后处理。上述电路的电网络连接表见表 1-4。



(a)



(b)

图 1-11 CIS 的浏览器窗口和系统结构图

表 1-4 电网络连接表清单

* source HPF	
D_D2	N00141 N00081 D1N4002
C_C2	N00141 N00077 3300p
R_R2	N00139 N000110 10
V_V3	N00087 N00119 DC 0 AC 0
+SIN 0 84.8v 50Hz 0 0 0	
R_R1	N00123 N03423 0.3
C_C3	N00081 N00093 3300p
D_D3	N00077 N00093 D1N4002
L_L1	N03423 N00141 600uH
M_M1	N00185 N000110 0 0 IRF150
V_V2	N00139 0 DC 0 AC 0
+PULSE -15v 15v 0 25ns 25ns 15us 25us	
R_R3	N01761 N00141 4
D_Dr2	0 N00087 D1N4002
L_L3	N00141 N00185 1uH
C_C1	N00141 N00085 1000p
R_Rc	N03067 N00093 0.2
R_Rs	N00085 N00093 12
C_C4	0 N03067 1000uF
R_Rl	0 N00093 77.2
L_L2	N00081 N000711 32uH
D_Dr3	N00119 N00123 D1N4002
R_Re	N00119 0 10Meg
D_Ds	N00185 N01761 D1N4002
D_Dr4	0 N00119 D1N4002
D_D4	N000711 N00077 D1N4002
D_D1	N00141 N00093 D1N4002
D_Dr1	N00087 N00123 D1N4002

上述电网络连接表通过描述电路中采用的所有元器件的种类、属性、参数及相互之间的连接关系,为 Capture 和其他 CAD 软件之间的数据交换提供了接口。

实际应用中由于 PSpice 已与 Capture 集成在一个统一的 OrCAD 软件包中,因此在完成电路图设计后可以直接调用 PSpice 进行系统仿真,上述后处理在调用过程中自行完成。

2. PSpice A/D——数模混合电路仿真器

混合电路仿真程序 PSpice A/D 的主要功能是利用 Capture 所产生的电路原理图文件或是文本形式的电路文件 .cir 作为程序输入进行仿真,并将仿真计算结果存为 .dat 文件或/和利用波形观察程序 Probe 进行显示。

在完成电路图进行仿真之前需确定分析目的,此时通过选择仿真参数文件“PSpice\ Edit Simulation Profile”,打开如图 1-12 所示的参数设置(Setting)视窗,以确定计划进行的仿真类型。电力电子电路仿真中常用的仿真类型包括:交流扫描,即通过扫频研究频响特性;灵敏度分析,即寻找对电路直流偏置影响最大的元件,减小其对电路影响;蒙特卡洛和最坏条件分析,用于对电路参数进行统计分析;参数扫描,用于对模型参数对系统响应的影响