

清华大学电气工程系列教材

电力电子电路的计算机仿真

The Application of Computer
Simulation in Power Electronics

陈建业 编著

Chen Jianye

清华大学出版社

清华大学电气工程系列教材

内容简介

78/82

T M 1769

电力电子电路的计算机仿真

The Application of Computer Simulation in Power Electronics

陈建业 编著

Chen Jianye

清华大学出版社

北 京

内 容 简 介

本书针对电力电子电路的特点,对器件、装置和系统3个层次阐述了电力电子电路计算机辅助设计中各种数学模型的基本原理、分析方法和应用实例。本书注重将理论分析和实际应用相结合,通过大量的应用实例,对不同类型仿真软件在电力电子技术仿真计算中的适用性进行了详细的讨论,以期对进行电力电子电路分析设计的读者起到帮助和指导作用。

本书可以作为高等学校应用电子技术和相关专业高年级学生和研究生教材,也可供从事电力电子电路和系统分析与设计的科技工作者参考。

版权所有,翻印必究。

本书封面贴有清华大学出版社激光防伪标签,无标签者不得销售。

图书在版编目(CIP)数据

电力电子电路的计算机仿真/陈建业编著. —北京:清华大学出版社,2003
(清华大学电气工程系列教材)

ISBN 7-302-06949-2

I. 电… II. 陈… III. 电力电子学—计算机仿真—高等学校—教材 IV. TM769

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 066197 号

出 版 者:清华大学出版社

<http://www.tup.com.cn>

社 总 机:010-62770175

地 址:北京清华大学学研大厦

邮 编:100084

客户服务:010-62776969

组稿编辑:陈国新

文稿编辑:马幸兆

印 刷 者:北京嘉实印刷有限公司

装 订 者:三河市新茂装订有限责任公司

发 行 者:新华书店总店北京发行所

开 本:185×260 印张:16.25 字数:373千字

版 次:2003年10月第1版 2003年10月第1次印刷

书 号:ISBN 7-302-06949-2/TP·5134

印 数:1~4000

定 价:25.00元

前言

电子设计自动化(electronic design automation, EDA)是电子信息技术发展的一个重要成果,它的应用已经渗入到电子电路,特别是大规模集成电路设计的每一个阶段,引发了电子工业设计领域的革命,成为推动电子技术进步和产品更新换代的不可缺少的有力工具。随着电力电子技术的迅速发展和推广应用,利用计算机仿真与计算机辅助设计方法对电力电子电路进行分析研究得到了日益广泛的重视。但是由于迄今还没有哪一个电路设计的软件能对大功率电子器件中存在的复杂的物理效应进行足够精确的描述,所以尽管目前存在一系列可以用于电力电子电路仿真的软件,但这些软件多是由某个领域的专业软件扩展而来,所建立的电力电子器件的模型的精度和应用领域均受到一定的限制。针对上述问题,本书结合目前国内常用的仿真软件,对电力电子电路设计人员进行仿真计算时所需了解的基本理论、方法和思路进行系统的介绍。值得指出的是,由于本书的主要读者对象是大学本科高年级学生和从事电力电子电路设计的技术人员,并假定读者对EDA 基本理论已有所了解,所以本书的讨论重点放在如何根据计算机仿真的基本原理解决电力电子系统设计中遇到的问题,而不是系统地对EDA 的基本理论进行讨论,因为对此已有许多书进行了很好的介绍。

本书根据电力电子系统本身的特点,按器件、装置和系统 3 个级别进行介绍。其中,第 1 章介绍电力电子电路 CAD 技术的基本原理和发展概况;第 2 章根据电力电子器件的特点介绍大功率器件建模的基本原理、方法和实用模型;第 3 章根据电力电子装置的最本质的特点——开关非线性,重点介绍对电力电子装置进行建模的理论和常用方法;第 4 章着重讨论如何利用仿真软件进行电力电子系统控制器的设计。

本书的主要内容多年来一直作为清华大学电机工程与应用电子技术系高年级学生的

目录

第1章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 建模与仿真	2
1.2.1 系统建模	3
1.2.2 数学仿真	5
1.3 仿真工具	10
1.3.1 通用电路仿真软件	12
1.3.2 基于理想开关模型的专用仿真软件	14
1.4 ORCAD/PSpice	23
1.4.1 ORCAD 的历史和基本特点	23
1.4.2 ORCAD 的主要仿真软件模块	24
1.4.3 ORCAD/PSpice 在电力电子电路仿真中的局限性	37
1.4.4 ORCAD 在仿真中的收敛性	39
1.5 电力电子电路的计算机辅助设计	44
第2章 电力电子器件的仿真	46
2.1 引言	46
2.2 基本模型	49
2.2.1 双极型器件	49
2.2.2 单极型器件	56
2.3 子电路模型	57
2.3.1 原理性模型	57
2.3.2 功能(行为)性模型	67

2.4 数学模型	79
第3章 电力电子装置的仿真	82
3.1 建模	85
3.1.1 精确的器件级模型	90
3.1.2 理想开关模型	94
3.1.3 平均模型	98
3.1.4 开关周期平均模型—— T_s 模型	100
3.1.5 电源周期平均模型—— T_L 模型	103
3.2 理想开关模型	104
3.2.1 开关函数与变换模式	107
3.2.2 二电平开关	108
3.2.3 三电平开关	117
3.2.4 基频开关函数	123
3.3 非矩阵变流器的建模与仿真	128
3.3.1 分段线性化状态方程	128
3.3.2 符号法	130
3.3.3 状态平均法	136
3.3.4 PWM 开关模型	145
3.3.5 离散时域法和采样数据法	149
3.4 电流不连续条件下的仿真	153
3.4.1 状态方程的递推解法	154
3.4.2 节点电压的递推分析	156
第4章 电力电子系统的仿真	158
4.1 电气元件的建模	158
4.1.1 变压器的建模	159
4.1.2 电机模型	164
4.2 变流器简化模型	169
4.2.1 时延模型	170
4.2.2 传递函数法	176
4.2.3 电纳模型	176
4.2.4 等效受控电源模型	178
4.2.5 开关电源的建模	183
4.3 稳定性分析	188
4.3.1 状态平面法	189
4.3.2 数字仿真法	194

4.3.3	简化模型的稳定性分析.....	224
4.3.4	数字控制器设计.....	229
4.4	专用仿真软件	235
4.4.1	温度分析软件.....	235
4.4.2	电磁兼容.....	238
4.4.3	数模混合仿真.....	240
4.4.4	实时仿真器.....	243
结束语.....		248
参考文献.....		250

1 引 言

电力电子技术是应用功率半导体器件的开关作用控制功率的流动,从能量转换或进行变换的技术。作为开关的电力强电的电路,电力电子技术为用户提供了—个可任意调节或改变电路的手段,使电路的应用更加广泛和有效,所以其应用范围不断扩大。从直流电动机调速、电话机电源等数千例到数十兆瓦的家用电器,到数千兆瓦的直流输电系统,电力电子技术的应用已渗透到国民经济各个领域。据专家估计,目前发达国家所使用电能的一半均依靠电力电子技术实现,预计21世纪这个比例将达到80%以上。随着我国科技产业的不断发展和电力工业的持续高速增长,电力电子技术在我国的应用将日益广泛和深入。

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),由模拟电路或数字电路(控制电路)组成的控制电路以及由电动机或其他机电负载组成的负载部分构成,这样一个复杂的非线性控制混合系统,其各个部分涉及及遵循不同的物理原理,其理论设计和计算均面临着巨大的困难,使得传统的利用硬件面包板对设计进行验证的方法越来越不适用。随着计算机硬件和软件技术的发展,使得只要用户能建立适当而精确的电路模型,就可以利用相应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,并对其运行大量复杂的模拟计算,“仿真”出接近真实的电路效果。这种利用软件而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,使得设计人员可以较精确地掌握电路在软件面上,从而大大地节省了从几元的价格,克服了其局限。因此利用电力电子电路设计工程软件日益广泛的应用。近年来,电力电路设计自动化(electronic circuit automation)技术已渗透到电力电路设计的各个领域,例如,原理图设计,逻辑或模拟电路仿真,简化设计,最优条件分析,参数优化设计等。20世纪70年代以来,一系列CAD软件的出现为电力电子电路CAD的推广应用创造了良好的条件。与此相适应,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:一是传统的电子电路设计软件,通过对大量的电力电子器件模型的可变参数的应用模拟,将电力电子系统的设计之中,例如美国电路设计人员所熟知的ORCAD/PSpice等至今国际领域中

第 1 章

绪 论

1.1 引 言

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可以根据需要改变电能的形态,使得电能的应用更加合理和有效,所以其应用范围不断扩大,从日光灯镇流器、电视机电源等数瓦到数十瓦的家用电器,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统产业降损节能改造的进展,电力电子技术在我国的应用会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),由模拟电路或数字电路,例如计算机构成的控制电路以及由电动机或其他机电设备构成的负荷部分组成。这样一个复杂的非线性数模混合系统,其各个部分往往又遵循不同的物理法则,从而给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。而计算机硬件和软件技术的发展,使得只要用户能建立适当而精确的电路模型,就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,并对其进行大量且迅速的计算,“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中面临的困难,使得设计人员可以将精力更多地集中在设计层面上,从而大大地节省产品开发的费用,缩短开发周期,因此得到电力电子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,例如,原理图设计,逻辑或模拟电路仿真,优化设计,最坏条件分析,印刷电路板设计等。而 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 CAD 的推广应用创造了无比良好的条件。与之相适应,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:①是传统的电子电路设计软件,通过引入新的电力电子器件模型可将软件的应用领域扩展到电力电子系统的设计之中,例如为我国电路设计人员所熟知的 ORCAD/PSpice; ②在专用领域中

的仿真软件,例如在电力系统仿真软件 EMTP 和控制系统仿真软件 MATLIB 中加入以理想开关模型为代表的电力电子器件模型,从而使软件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;③开发新的电力电子系统专用仿真软件,例如以开关电源设计为目的 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个基本手段^[2]。

1.2 建模与仿真

所谓仿真(simulation)指的是利用模型再现实际系统中发生的本质过程,并且通过对上述模型的实验来研究已存在的或计划中的系统。换句话说,仿真就是利用模型对实际系统进行实验研究的过程。

在历史上,物理仿真,也即利用缩小的物理模型对系统进行试验是一个广为人知的方法。例如研究电力系统的动态过程时,往往利用由缩小了容量的同步电机、异步电机、变压器、电感、电容等组成的一个模拟系统作为其模型,然后在这个系统上设置各种运行条件和故障进行分析研究。但是在上述物理仿真方法中存在两个问题:一是系统的建立牵涉到设备购置、安装、接线与调试工作,需耗费大量的人力物力;二是实践中有时由于条件限制很难或不可能进行某种具体试验,比如为了保证核电站的运行安全,通常需要对操作人员进行处理各种不可预料行为的培训,但实践中不可能建立一个相应的物理系统来进行模拟。随着计算机技术的发展,可以利用计算机在虚拟域中建立对象系统的软件模型,并据此对实际系统进行仿真。此时由于系统的建模与试验均是借助于软件进行,从而可以有效地解决上述问题,因此计算机仿真在对实际系统的设计研究过程中往往起着不可替代的作用,成为设计工作中不可缺少的步骤,因而得到日益广泛的关注。比如,在美国 1992 年推出的 22 项国家关键技术报告中,计算机仿真被列为第 16 项;而在 1993 年推出的 21 项国防关键技术报告中,计算机仿真被列为第 6 项。由此可见,在 21 世纪大力推进和发展计算机仿真技术在科研、设计等领域的应用,对于我国国民经济的发展将起到重要的作用。

根据上述定义,计算机仿真可以分为两个过程:

(1) 建模

根据研究对象的基本物理规律,对物理系统写出描述其运动规律的数学方程,即数学模型的过程。

由于实际系统十分复杂,往往不可能对其进行全部的描述。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电特性、热特性以及机械特性等不同方面,对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。又如实际的系统是多层次的,比如在采用电力电子装置的电力系统中,可能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和微秒以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的方程,会导致求解过程中的数值稳定性问题。

实际上,对于同一个系统,从不同角度观察时会产生各不相同的概念,在数学上会有互不相同的描述方法。虽然最理想的方法是建立符合所有目的的数学模型;但实际中很少有人想去研究这类问题,因为此类模型可能过于复杂而难以求解,特别是对于通常关心

的特定领域和特定时间的问题而言,其他现象是弱相关的,可以忽略不计。比如,当研究电力系统的暂态稳定问题时,由于发电机的惯性很大,所以完全可以近似认为转速基本不变,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,记住数学模型代表的数学系统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上。换句话说,所建立的数学模型,实际上只是根据研究目的确定的模型,是对系统某一方面本质属性的抽象描述。

(2) 实验

仿真的过程是利用模型对系统方程进行求解,即实验的过程。对于数学仿真而言,其过程就是利用适当的程序语言将所研究的物理系统的数学模型编制成程序,并向其输入不同的条件进行计算的过程。

仿真与通常的数值计算之间的根本区别在于,它首先是作为一种实验技术,利用所建的模型,在给定条件下使程序运行的过程;其次它通常用于不能得到解析解的复杂系统的研究中。

综上所述,仿真指的是利用虚拟模型对所研究的系统进行试验的过程。但随着计算机多媒体技术和人机交互技术的发展,目前根据应用领域不同,仿真技术大体可分为两类:一类是以过去的电网仿真器等为代表的培训仿真技术,此类技术已成为“虚拟现实技术”的一个重要应用领域。该项技术通过使用户浸入到虚拟环境中,成为虚拟现实的一部分,并通过实时交互,使用户亲身体验到现实生活中体验不到的经历。目前的主要应用范围包括互动式影视娱乐、教育培训、建筑设计等。例如在地面和室内利用模拟飞机和汽车训练驾驶员不仅可以提高安全性,还可以大大地节约训练时间和成本;又如法国电力公司建立的反应堆大楼内部的虚拟环境模型,用户戴上头盔就可进入内部活动,计量受到的辐射量,并据此制定安全有效的维护行动计划。所以仿真技术应用不仅具有重要的实际意义,同时具有很高的经济效益。另一类则属于计算机辅助设计和制造领域,即研究人员根据所研究系统的物理规律建立该系统的数学模型,然后通过输入各种不同条件来预测系统的特性和外来作用的影响,进而研究系统的结构和控制策略,并据此优化设计。这正是电力电子系统设计人员希望学习和掌握的方法,也是本书介绍的内容。

1.2.1 系统建模

建立模型是系统仿真的基础,其本质是依据系统之间的相似性原理,在一对系统之间建立一种对应的关系,从而可以利用模型对实际系统进行研究。

为了说明上述概念,首先对相似性和相似系统进行介绍。图 1-1(a)为一个由质量、弹簧和阻尼器组成的机械系统,图 1-1(b)为一个由电阻、电感和电容组成的电气系统。

描述上述系统的微分方程分别为

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + f \frac{dx}{dt} + kx = P \tag{1-1}$$

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

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,两者的响应也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,其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作机

械系统的一个模型。实际上,当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;而在该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机械系统的制作和研究。一个系统可以用模型在某种意义上对其加以近似,这是整个系统仿真实理论的基础。但在实际应用中由于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,往往需通过划分若干个子区间,分别建立相似系统来进行。

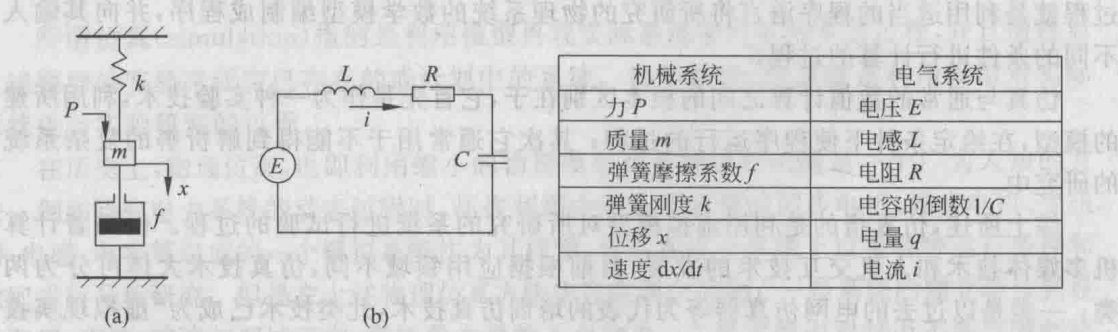


图 1-1 机械系统和电气系统的相似性

在实际应用中,根据模型和原型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(类比)模型
根据描述不同物理系统(力学,电学,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。
- (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,利用数学表达式描述现实系统的模型称为数学模型。数学建模即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——数学模型,从而在物理系统和其抽象的数学描述之间建立起对应关系的过程。这种关系的建立大体可以分为 5 个步骤:

- ① 系统分解。如前所述,针对研究的问题,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,即将模型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,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序可以遵循。有人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

数学仿真以数学模型与实际物理系统之间的相似性为基础的仿真,其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;而主要优点在于它完全是建立在软件的基础之上的,可以根据研究对象的不同特性随时对模型进行变动,而不用像物理模拟那样需对硬件进行更动,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在于任何一个动态系统,从根本上来说均是可以由状态方程,即微分方程组来加以描述的。而由于微分方程组均可以利用积分的方法来求解,所以解上述问题的核心就是解决积分计算问题。在实际中采用的方法通常有两种。

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,尽管客观世界上的事物千差万别,但是其物理量的变化规律在数学描述上却具有相似性,即均可以用同样的状态方程进行描述。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组成的模拟计算机就成为模拟仿真的主要工具。

在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(b)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,进行排队;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,例如距离、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。这种方法适于对各种类型的系统,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。以前述机械系统为例,假设基值电压为±100 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

$$5 \frac{d^2x}{dt^2} = -10 \frac{dx}{dt} - 20x$$

(1-3)

对应的仿真模型如图 1-2(a)所示。

通过记录所需变量的电压波形,即得到系统输入输出间的关系。

但是模拟计算机造价高,接线麻烦,计算精度较低,同时存在零漂等问题,所以除一些

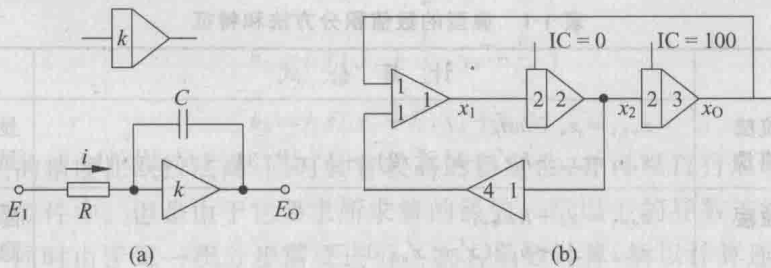


图 1-2 模拟计算机原理

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能识别的程序。这里所谓的数值方法,是求作为系统模型的微分方程在一系列离散的时间点 $x_0, x_1, \dots, x_n$ 上的近似解,从本质上即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。

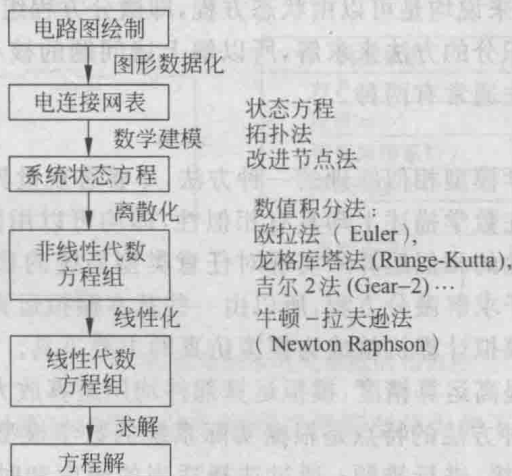


图 1-3 时域分析的一般顺序和方法

上述步骤可以说明如下:

(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、反映电路中所有元器件性能和相互之间连接关系的文件,电路原理图才能作为仿真软件的输入被调用。

(2) 数学建模

建模的方法主要有状态方程法、改进节点法和拓扑法。

(3) 数值积分

为了利用数字计算机对于连续系统进行求解,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。典型的数值积分方法和特征列于表 1-1 中。

表 1-1 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	$x_{n+1} = x_n + h x'_n$	显式, 1 步, 1 阶
RK: 龙格库塔法	$x_{n+1} = x_n + h x'_n + h^2 x''_n / 2! + h^3 x^{(3)}_n / 3! + h^4 x^{(4)}_n / 4!$	显式, 4 步, 4 阶
BE: 向后欧拉法	$x_{n+1} = x_n + h x'_{n+1}$	隐式, 1 步, 1 阶
TR: 梯形法	$x_{n+1} = x_n + h / 2 (x'_n + x'_{n+1})$	隐式, 1 步, 2 阶
GZ: 吉尔法	$x_{n+1} = (4x_n - x_{n-1} + 2h x'_{n+1}) / 3$	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 $y' = f(x, y)$ 来描述,则由 (x_0, y_0) 出发,代入右函数 $f(x, y)$,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) 做切线与 $x = x_1$ 相交于 y_1 ,当步长 $\Delta h = x_1 - x_0$ 较小时,可以近似地以 y_1 作为 $y(x_1)$ 的近似值,得到 $y_1 = y_0 + hf(x_0, y_0)$ 。

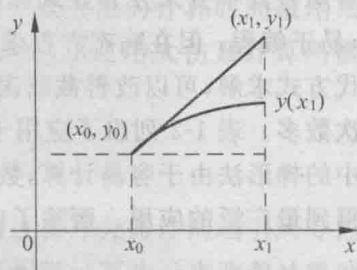


图 1-4 欧拉法的几何意义

这种方法由于求解 y_{n+1} 的值时仅需了解 y_n 的值,故称为单步法,又由于算法简单,所以计算速度快,但计算精度不高。特别是数值稳定性不好,即由于其解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(RK)法

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

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

这种方法的基本思想是基于泰勒展开式,即

$$y(t+T) = y(t) + T \cdot \dot{y}(t) + \frac{1}{2!} T^2 \ddot{y}(t) + \frac{1}{3!} T^3 \dddot{y}(t) + \dots$$

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。而采用线性内插的方法增加计算次数,求出的等效斜率是 RK 法的基本思路,其中最常用的是 4 阶 RK 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 4 倍。实际上这两种方法均是基于在初值附近展开泰勒级数的原理,所不同的是取多

少项。欧拉法仅取两项；四阶龙格库塔法取前 5 项。随着取的项的增多，计算精度增高；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进行选择。

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，由于直接计算，每步计算次数少，易于编程；但在病态方程求解时，稳定性差，必须用很小的步长计算。隐式方法通过迭代方式求解，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 列出了应用于电力电子电路的常用仿真软件和特点，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，其他方法均在仿真软件中得到应用。

表 1-2 电力电子技术常用仿真软件

仿真器	EMTP	Spice	SABER	SIMPLIS	SCAT	Simplorer	PSIM	MATLIB
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	RK 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
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）	通过对计算的误差判断调整步长	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带有功率器件模型	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	具有电力电子模型库	Power System Blockset 具有包括开关模型的电力系统

电力电子电路中周期性开关过程所引起的系统状态的突变,在数值计算中会带来如下问题:

- 步长选择进入两难境地: 若采用定步长计算,则可能导致计算误差的积累;而采用变步长算法,一方面周期性的状态变量的突变将导致大量的计算时间被用来寻找适当的步长;另一方面也可能导致过小的计算步长,总之增大仿真计算所需的时间。
- 算法不收敛将引起计算的终止。
- 由数值积分方法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: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的稳定性。引入插值算法:电力电子开关时刻状态变量会发生突变,而仿真结果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 给出利用 MATLAB 构成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,关断过程二极管两端电压会出现强烈的振荡,如图 1-6(a)所示。振荡虽然部分是由于关断过程引起的,但更多的是由于数值算法造成的。加以适当的数吸收回路之后振荡明显消除,如图 1-6(b)所示。对比图 1-7,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,对在采用理想开关模型的仿真软件条件下开关过程出现的振荡进行分析时,应当十分谨慎。实际上不应当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时得到的方程往往是非线性的代

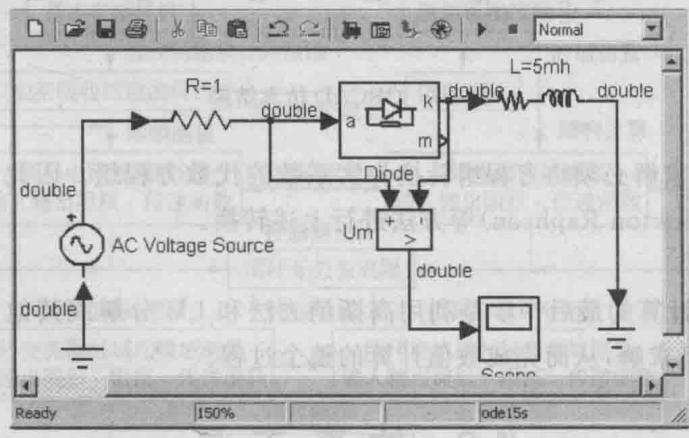


图 1-5 MATLAB 构成的电路原理图^①

注: 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 。