

清华大学电气工程系列教材

# 电力电子电路的计算机仿真 (第2版)

The Application of Computer  
Simulation in Power Electronics  
(Second Edition)

朱桂萍 陈建业 编著

Zhu Guiping Chen Jianye

清华大学出版社

清华大学电气工程系列教材

# 电力电子电路的计算机仿真 (第2版)

## The Application of Computer Simulation in Power Electronics (Second Edition)

朱桂萍 陈建业 编著

Zhu Guiping 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,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

## 图书在版编目(CIP)数据

电力电子电路的计算机仿真/朱桂萍,陈建业编著. —2版. —北京:清华大学出版社, 2008.11

(清华大学电气工程系列教材)

ISBN 978-7-302-17422-6

I. 电… II. ①朱…②陈… III. 电力系统—电子电路—计算机仿真—高等学校—教材  
IV. TM7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 123110 号

责任编辑:张占奎

责任校对:刘玉霞

责任印制:何 芊

出版发行:清华大学出版社

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

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

邮 编:100084

社 总 机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, [c-service@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:c-service@tup.tsinghua.edu.cn)

质 量 反 馈:010-62772015, [zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn)

印 装 者:北京鑫海金澳胶印有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185×260

印 张:18

字 数:430 千字

版 次:2008 年 11 月第 2 版

印 次:2008 年 11 月第 1 次印刷

印 数:1~4000

定 价:33.00 元

本书如存在文字不清、漏印、缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请与清华大学出版社出版部联系调换。  
联系电话:010-62770177 转 3103 产品编号:027577-01

## 第2版前言

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也得到了日益广泛的重视。但迄今还没有一个电路设计的软件能对大功率电子器件中所存在的复杂的物理效应进行足够精确的描述。目前一系列可以用于电力电子电路仿真的软件,多是由某个领域的专业软件扩展而来,因此其中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,对电力电子电路仿真的基本理论、方法和思路进行了系统的介绍。

第1章对 OrCAD、MATLAB 和 PSCAD 三种目前我国应用最为广泛的电力电子仿真软件以及它们相互之间的接口实现方法做了简单介绍。OrCAD 是进行小功率电子器件仿真最权威的软件,它带有丰富的详细器件模型;MATLAB 具有非常丰富的控制功能工具箱;而 EMTP/PSCAD 是目前电力系统仿真领域公认的权威软件。随着电力电子系统的结构和控制日益复杂,将这三种软件通过接口实现相互之间的有限调用,可以充分发挥它们各自的长处,使得电力电子仿真更加快速、准确。

第2章根据电力电子器件的特点介绍了大功率器件建模的基本原理、方法和实用模型。器件是构成装置和系统的基本单元,电力电子器件的常用模型包括基本模型和子电路模型,该章对于每一种模型,又分单极型器件和双极型器件进行了介绍。

第3章首先根据电力电子装置的最本质的特点——开关非线性,介绍了对其进行建模的理论和常用方法,给出了电力电子装置的五种常用模型:详细器件模型、理想开关模型、状态平均模型、开关周期平均模型和电源周期平均模型。接着分别详细介绍了两大类常见的电力电子装置,即矩阵型和非矩阵型变流器的建模与仿真方法。最后特别介绍了非矩阵型变流器在电流不连续条件下的两种仿真方法,即状态方程递推法和节点电压递推法。该章介绍的所有方法都可以用于第4章中介绍的电力电子系统主电路的仿真。

第4章着重讨论了如何利用仿真软件进行电力电子系统控制器的设计。该章以 SVC、

STATCOM、直流调速系统、高功率因数变流器等常见的电力电子系统为例介绍了利用相应的仿真软件进行控制器设计的基本方法,还介绍了一些专用仿真软件和仿真平台,如myPOWER 在线设计中心、dSPACE、MAX+PLUS II、Hypersim 等,并且对仿真稳定性作了简要分析。

鉴于本书的读者定位是大学本科高年级的学生和从事电力电子电路设计的技术人员,并要求读者对 EDA 基本理论有所了解,因此本书的讨论重点放在如何根据计算机仿真的基本原理,去解决在进行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,已有许多书对此进行了详细介绍。

本书第1版自2003年出版以来,受到了广大读者的厚爱和支持,在此一并表示感谢。近年来由于硬件技术的突飞猛进和仿真软件的日新月异,笔者深感有必要对本书的相关内容加以更新和修订,把电力电子仿真领域的最新进展和成果介绍给读者,使本书更具有时代感和使用参考价值。在本书的修订过程中,笔者把书中相关的仿真例程在目前主流的机器配置上重新做了一遍,并列出相应的用时,供读者参考、比较。结合新检索到的文献,在第3章中增加了对矩阵型变流器中开关时间控制方法的介绍;在第4章中介绍了最新的开关电源在线设计平台 myPOWER,简单介绍了其功能和使用步骤;第4章还增加了电压闪变的概念,新增了对 dSPACE 和 Hypersim 两种仿真软件的介绍,帮助读者拓宽眼界。

本书多年来一直作为清华大学电机系的教材对高年级同学进行讲授,并多次进行修改。由于作者水平有限,书中难免存在错误和不当之处,欢迎广大读者批评指正。联系方式:朱桂萍,清华大学电机系电力系统国家重点实验室,100084,010-62794878, gpzhu@tsinghua.edu.cn; 陈建业,清华大学电机系电力系统国家重点实验室,100084,010-62794702, cjianye@tsinghua.edu.cn。

作者

2008年7月于清华园



# 第1版前言



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教材,并多次进行修改。在本书的编写和修改过程中一直得到赵良炳教授及其他老师的指教,特此表示感谢。

限于作者的水平,书中难免存在错误和不当之处,希望得到读者的批评指正。

陈建业

2003 年 2 月于清华园

# 目 录

|                                    |    |
|------------------------------------|----|
| 第 1 章 绪论                           | 1  |
| 1.1 系统、模型和仿真                       | 1  |
| 1.1.1 基本概念                         | 1  |
| 1.1.2 仿真的发展历史和发展趋势                 | 3  |
| 1.2 电力电子电路的建模与仿真                   | 5  |
| 1.2.1 数学建模                         | 6  |
| 1.2.2 数学仿真                         | 7  |
| 1.3 OrCAD/PSpice                   | 13 |
| 1.3.1 仿真工具概述                       | 13 |
| 1.3.2 OrCAD/PSpice 的发展历史及特点        | 15 |
| 1.3.3 OrCAD 仿真软件主要模块               | 18 |
| 1.3.4 OrCAD/PSpice 在电力电子电路仿真中的局限   | 26 |
| 1.3.5 OrCAD 在仿真中的收敛性               | 28 |
| 1.4 EMTF/EMTDC/PSCAD               | 33 |
| 1.4.1 EMTF/EMTDC 的发展历史及特点          | 33 |
| 1.4.2 EMTDC/PSCAD 的典型应用            | 36 |
| 1.5 基于 MATLAB 的电力电子系统仿真            | 39 |
| 1.5.1 MATLAB 的发展历史及特点              | 39 |
| 1.5.2 SimPowerSystems 中典型电力电子器件的模型 | 42 |
| 1.5.3 SimPowerSystems 的典型应用        | 48 |
| 1.5.4 MATLAB 与 OrCAD 的接口           | 50 |
| 1.5.5 MATLAB 与 PSCAD 的接口           | 55 |
| 1.6 电力电子电路的计算机辅助设计                 | 58 |
| 参考文献                               | 59 |

|                                 |     |
|---------------------------------|-----|
| 第2章 电力电子器件的仿真 .....             | 61  |
| 2.1 引言 .....                    | 61  |
| 2.2 基本模型 .....                  | 65  |
| 2.2.1 双极型器件 .....               | 65  |
| 2.2.2 单极型器件 .....               | 71  |
| 2.3 子电路模型 .....                 | 72  |
| 2.3.1 原理性模型 .....               | 72  |
| 2.3.2 功能(行为)性模型 .....           | 84  |
| 2.4 数学模型 .....                  | 94  |
| 参考文献 .....                      | 96  |
| 第3章 电力电子装置的仿真 .....             | 97  |
| 3.1 建模 .....                    | 100 |
| 3.1.1 精确的器件级模型 .....            | 104 |
| 3.1.2 理想开关模型 .....              | 108 |
| 3.1.3 平均模型 .....                | 112 |
| 3.1.4 开关周期平均模型—— $T_s$ 模型 ..... | 114 |
| 3.1.5 电源周期平均模型—— $T_L$ 模型 ..... | 117 |
| 3.2 矩阵型变流器的建模与仿真 .....          | 118 |
| 3.2.1 开关函数与变换模式 .....           | 121 |
| 3.2.2 二电平开关 .....               | 121 |
| 3.2.3 三电平开关 .....               | 130 |
| 3.2.4 基频开关函数 .....              | 135 |
| 3.2.5 开关时间控制 .....              | 140 |
| 3.3 非矩阵型变流器的建模与仿真 .....         | 146 |
| 3.3.1 分段线性化状态方程 .....           | 146 |
| 3.3.2 符号法 .....                 | 148 |
| 3.3.3 状态平均法 .....               | 154 |
| 3.3.4 PWM 开关模型 .....            | 162 |
| 3.3.5 离散时域法和采样数据法 .....         | 167 |
| 3.4 电流不连续条件下的仿真 .....           | 171 |
| 3.4.1 状态方程的递推解法 .....           | 172 |
| 3.4.2 节点电压的递推分析 .....           | 174 |
| 参考文献 .....                      | 175 |
| 第4章 电力电子系统的仿真 .....             | 176 |
| 4.1 电气元件的建模 .....               | 176 |
| 4.1.1 变压器的建模 .....              | 177 |



|                       |     |
|-----------------------|-----|
| 4.1.2 电机模型.....       | 181 |
| 4.2 变流器简化模型 .....     | 186 |
| 4.2.1 时延模型.....       | 187 |
| 4.2.2 传递函数法.....      | 193 |
| 4.2.3 电纳模型.....       | 193 |
| 4.2.4 等效受控电源模型.....   | 195 |
| 4.2.5 开关电源的建模与设计..... | 199 |
| 4.3 稳定性分析 .....       | 209 |
| 4.3.1 状态平面法.....      | 210 |
| 4.3.2 数字仿真法.....      | 215 |
| 4.3.3 简化模型的稳定性分析..... | 247 |
| 4.3.4 数字控制器设计.....    | 252 |
| 4.4 专用仿真软件 .....      | 258 |
| 4.4.1 温度分析软件.....     | 258 |
| 4.4.2 电磁兼容.....       | 261 |
| 4.4.3 数模混合仿真.....     | 262 |
| 4.4.4 实时仿真器.....      | 268 |
| 参考文献.....             | 274 |

# 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

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

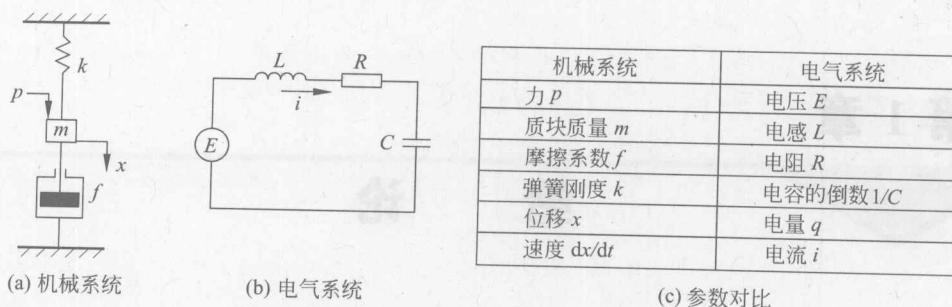


图 1-1 机械系统和电气系统的相似性

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

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<sup>[1]</sup>。

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 and 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概念,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合而成。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,其他现象与之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,从根本上来讲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  $5\text{ cm}$ ,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。

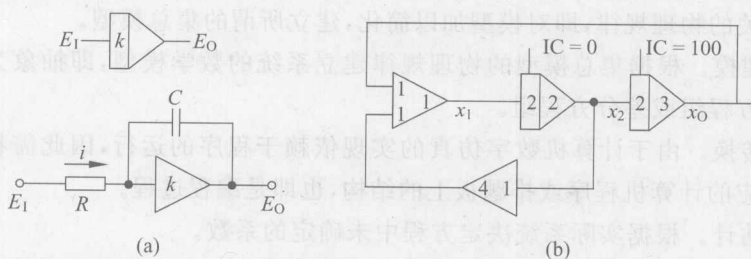


图 1-2 模拟计算机原理

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,排版麻烦,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。