



普通高等教育电气工程与自动化(应用型)“十二五”规划教材

Power Electronic
Circuits Simulation
— MATLAB and PSpice Applications

电力电子电路仿真 ——MATLAB 和 PSpice 应用

◎ 魏艳君 等编著

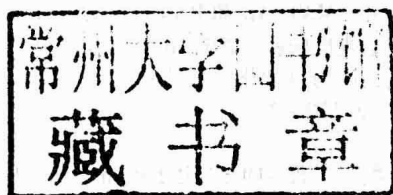


机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育电气工程与自动化（应用型）“十二五”规划教材

电力电子电路仿真—— MATLAB 和 PSpice 应用

魏艳君 李向丽 张迪 编著
漆汉宏 主审



机械工业出版社

本书从系统建模、仿真及寻优算法入手,在宏观介绍与计算机仿真技术相关的各种系统建模、系统仿真及系统寻优理论与方法的基础上,结合目前在电力电子研究领域广泛应用的 MATLAB 和 PSpice 仿真技术,介绍了 MATLAB 软件及其图形仿真界面 SIMULINK 的基础应用知识以及 PSpice 的仿真技术基础,通过电力电子器件及 DC-DC 变换、AC-DC 变换和 DC-AC 变换等应用实例,详细对比介绍了基于 MATLAB 和 PSpice 的电力电子电路仿真技术与方法。

本书的特点是:把握专业技术理论密切结合实践应用的教学原则,层次清晰地构建了电力电子电路仿真技术从理论分析到仿真软件辅助设计的完整体系。内容上注重精选、循序渐进、结合实际、突出实践。阐述上简明扼要、图文并茂、通俗易懂,便于教学和自学。

本书可作为高等理工科院校电力电子及其相关专业有关电力电子电路仿真的教材,也可供相关工程技术人员学习和参考。

本书配有免费电子课件,欢迎选用本书作教材的老师登录 www.cmpedu.com 注册下载。

图书在版编目 (CIP) 数据

电力电子电路仿真——MATLAB 和 PSpice 应用/魏艳君等
编著. —北京:机械工业出版社,2012.8
普通高等教育电气工程与自动化(应用型)“十二五”规划教材
ISBN 978-7-111-39130-2

I. ①电… II. ①魏… III. ①电力电子电路-计算机
仿真-应用软件-高等学校-教材 IV. ①TM13

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 155664 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)
策划编辑: 贡克勤 责任编辑: 贡克勤 任正一
版式设计: 霍永明 责任校对: 陈秀丽
封面设计: 张 静 责任印制: 杨 曦
北京京丰印刷厂印刷
2012 年 8 月第 1 版 · 第 1 次印刷
184mm × 260mm · 14 印张 · 340 千字
标准书号: ISBN 978-7-111-39130-2
定价: 28.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心: (010) 88361066

教材网: <http://www.cmpedu.com>

销售一部: (010) 68326294

机工官网: <http://www.cmpbook.com>

销售二部: (010) 88379649

机工官博: <http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线: (010) 88379203

封面无防伪标均为盗版

前 言

现代电力电子电路和系统已广泛应用在社会生活的各个领域，但其分析和设计较为复杂。现代计算机仿真是在计算机平台上虚拟实际的物理系统，为电力电子电路和系统的分析提供了崭新的方法，可以使复杂的电力电子电路、系统的分析和设计变得更加容易和有效，也是学习电力电子相关专业知识的重要手段。

目前有多种用于电力电子系统的仿真软件，其中最具影响的当推 MATLAB 和 PSpice，两者在电力电子系统仿真中各有特色，是科研、设计人员以及学生学习的必备工具和好助手。

本书共6章，第1章介绍仿真科学的发展和要求、主要概念、分类及进行仿真的步骤。第2、3、4章根据仿真每个步骤所涉及的工作内容，分别介绍了各种系统的数学模型及其建立过程、各种数学模型的分析求解方法，以及系统参数的优化方法。通过前4章的学习，掌握基本的仿真基础理论知识，从而对于仿真进行的实质内容建立基本的理论认识，了解仿真软件运行的本质。第5章和第6章对电力电子专业领域中应用最为广泛的 MATLAB 和 PSpice 软件的应用进行了详细介绍。针对本科生初次尝试使用专业仿真软件的特点，将软件使用的各种过程：系统的搭建、参数的设置、仿真数据及波形的处理及使用技巧等，尽量采取实时界面进行说明，更直观更形象。系统中的标识和参数力求详尽，书中所举仿真范例均为作者实际仿真的结果，并且参数完备，使得读者可以通过模仿本书的范例进行学习，方便理解。本书可以作为辅助工具，配合电气类专业课的讲解，可以达到加深课程理解，使学生对专业知识有更形象、直观的认识。

本书可作为高等学校电气信息类相关专业的本科生教材，也可供相关专业研究生和工程技术人员参考。

本书由燕山大学电气工程学院魏艳君编写第1、2、3、4、6章，李向丽编写第5章5.1~5.5节，张迪编写第5章5.6~5.9节。在本书的编写过程中，研究生苏伟、徐振庆、何宇、蔡保海等协助进行了部分仿真工作。

本书由燕山大学漆汉宏教授主审。肖莹、阚志忠老师提出了有益的意见和建议。在此表示衷心感谢！

由于编者水平有限，书中不足之处在所难免，敬请读者予以批评指正。

编 者

目 录

前言	
第1章 绪论	1
1.1 仿真的基本概念	1
1.1.1 系统	1
1.1.2 模型	2
1.1.3 仿真	4
1.2 仿真的分类	5
1.2.1 根据模型的种类分类	6
1.2.2 根据仿真计算机类型分类	6
1.2.3 根据仿真时钟与实际时钟的比例关系分类	7
1.2.4 根据系统模型的特性分类	7
1.3 计算机仿真	8
1.3.1 计算机仿真定义的分析	8
1.3.2 计算机仿真方法的特点	9
1.3.3 计算机仿真方法的作用	10
1.3.4 计算机仿真的步骤	10
1.4 计算机仿真技术在电力电子系统中的应用	11
第2章 系统建模方法	13
2.1 仿真建模的基本要求和途径	13
2.2 系统的数学模型	13
2.2.1 连续时间系统模型	14
2.2.2 离散时间系统模型	15
2.2.3 连续—离散混合模型	16
2.3 数学模型之间的相互转换	16
2.3.1 微分方程转换为状态方程	16
2.3.2 结构图转换为状态方程	19
2.3.3 传递函数转换为状态方程	20
2.3.4 状态方程转换为传递函数	21
2.4 电力电子电路的建模	21
2.4.1 电力半导体器件的仿真模型	21
2.4.2 主电路的仿真模型	26
第3章 系统仿真算法	42
3.1 数值积分法	42
3.1.1 数值积分法基本原理	42
3.1.2 龙格—库塔积分法	45
3.1.3 线性多步法	49
3.1.4 积分方法的选择	50
3.1.5 积分步长的确定	51
3.1.6 数值积分法稳定性分析	52
3.2 替换法	54
3.2.1 简单替换法	55
3.2.2 双线性替换法	56
3.3 离散相似法	58
3.3.1 离散相似概念	58
3.3.2 z 域离散相似法	59
3.3.3 时域离散相似法	60
3.3.4 离散相似模型的精度与稳定性分析	61
3.4 数字控制系统的仿真	64
3.4.1 数字控制系统的组成	64
3.4.2 数字控制系统的仿真方法	65
3.4.3 数字控制器采样周期的调整	67
3.4.4 差分方程的仿真	68
3.4.5 纯延迟环节的仿真	69
3.4.6 数字式PID调节系统的仿真	69
第4章 系统参数优化方法	71
4.1 系统参数优化的数字仿真	71
4.1.1 参数最优化的概念	71
4.1.2 寻优途径	71
4.2 各种寻优方法	71
4.2.1 单变量寻优	71
4.2.2 多变量寻优	76
第5章 电力电子电路的 MATLAB 仿真	83
5.1 MATLAB 的计算基础	84
5.1.1 常量和变量	84
5.1.2 数组和矩阵的表示和赋值	85
5.1.3 MATLAB 的算术运算	85
5.1.4 MATLAB 的关系运算	86
5.1.5 MATLAB 的逻辑运算	86
5.1.6 MATLAB 的特殊运算符	86
5.1.7 MATLAB 常用的函数	87

5.2	MATLAB 程序设计基础	88	5.8.2	单个 Simulink 仿真模块 Help 的使用	142
5.2.1	表达式、表达式语句和赋值 语句	88	5.9	电力电子电路的 MATLAB 仿真	143
5.2.2	控制语句	88	5.9.1	Simulink 电力电子相关模块 参数	143
5.2.3	MATLAB 常用的其他命令	90	5.9.2	基础电路仿真	147
5.3	MATLAB 的绘图功能	90	5.9.3	直流-直流变流器	150
5.3.1	直角坐标中的二维曲线	91	5.9.4	交流-直流变流器	154
5.3.2	多条曲线的绘制	92	5.9.5	直流-交流变流器	159
5.3.3	电力电子电路波形图的绘制	92	第 6 章 电力电子电路的 PSpice 仿真	163	
5.4	Simulink 环境和模型库	93	6.1	PSpice 的起源与发展	163
5.4.1	系统仿真环境	94	6.2	PSpice 的特点	163
5.4.2	Simulink 的工作环境	94	6.3	PSpice 可执行的仿真分析	164
5.4.3	模型库浏览器	95	6.3.1	基本分析	164
5.5	Simulink 的仿真实践基础	101	6.3.2	高级分析	165
5.5.1	Simulink 的仿真步骤	101	6.4	PSpice 的文件	166
5.5.2	仿真参数的设置	103	6.4.1	.SCH、.CIR、.NET 和 .ALS 文件	166
5.5.3	观察仿真结果	106	6.4.2	.OLB 和 .LIB 文件	166
5.5.4	基本仿真举例	107	6.4.3	.OUT 和 .DAT 文件	166
5.5.5	示波器的使用和数据保存	110	6.4.4	.PRB、.STL、.STM 和 .INC 文件	166
5.5.6	Simulink 的仿真算法	114	6.5	PSpice 仿真步骤	167
5.5.7	建立子系统和系统模型的 封装	115	6.5.1	PSpice 仿真基本步骤	167
5.6	Simulink 与 MATLAB 的接口设计	117	6.5.2	PSpice 常用分析类型参数 设置	170
5.6.1	由 MATLAB 工作空间变量设置 系统模块参数	117	6.5.3	PSpice Probe 波形显示及 处理	172
5.6.2	将信号输出到 MATLAB 工作 空间中	117	6.6	电力电子电路的 PSpice 仿真	174
5.6.3	使用工作空间变量作为系统 输入信号	119	6.6.1	常用的电源元件	175
5.6.4	MATLAB Function 与 Function 模块	120	6.6.2	基本分析举例及仿真波形的 处理	177
5.7	S 函数	121	6.6.3	电力电子电路 PSpice 仿真 实例	185
5.7.1	S 函数的基本概念	121	6.6.4	数字信号源的使用及数字电路 仿真	200
5.7.2	如何使用 S 函数	122	6.6.5	模块化和层次化设计	204
5.7.3	与 S 函数相关的一些术语	124	6.6.6	模拟行为模型	209
5.7.4	S 函数的工作原理	125	参考文献	215	
5.7.5	编写 M 文件 S 函数	128			
5.8	MATLAB demo (演示) 和 Help 文件的使用	136			
5.8.1	demo (演示) 的使用	136			

第1章 绪论

计算机仿真是建立待研究系统的模型，进而在计算机上对模型进行实验研究的过程。计算机仿真方法是以计算机仿真为手段，通过在计算机上运行模型来再现系统的运行过程，从而认识系统规律的一种研究方法。计算机仿真以计算机作为实验的平台，其产生和发展与计算机的发明和计算机技术的发展紧密相关。

计算机仿真技术是以计算机科学、系统科学、控制理论和应用领域有关的专业技术为基础，以计算机为工具，利用系统模型对实际的或设想的系统进行分析与研究的一门新兴技术。现代计算机仿真技术综合集成了计算机、网络、图形图像、多媒体、软件工程、信息处理、自动控制等多个高新技术领域的知识，是系统分析与研究的重要手段。计算机仿真技术具有良好的可控性、无破坏性、安全、可靠、不受外界条件的限制、可多次重复、高效和经济性等特点，近年来发展十分迅速，已经成为当今众多领域技术进步所依托的一种基本手段。

计算机仿真技术经历了模拟计算机仿真、混合计算机仿真、专用数字计算机仿真、通用数字计算机仿真等阶段，目前已进入基于网络的分布仿真阶段。计算机仿真在各种工程领域和非工程领域中有许多成功应用，其成效十分显著，影响也很大。

计算机仿真方法的成功应用，大大提高了这一方法在科学研究和技术开发中的地位，引起科学界和工业界的广泛关注与重视。人们逐步认识到，系统仿真已成为继理论分析和实物实验之后，认识客观世界规律性的强有力的手段。

计算机仿真是系统仿真学科的重要分支。本章首先讨论系统仿真涉及的3个基本概念和系统仿真的分类，在此基础上重点分析计算机仿真的定义、特点、作用与步骤，最后简要介绍仿真技术在电力电子系统分析中的应用。

1.1 仿真的基本概念

对“仿真”一词的含义，人们有不同的理解。一般认为仿真就是对系统模型的实验研究，对计算机仿真而言，就是程序的运行。该程序表示一个抽象的模型，用以研究真实系统中的一些特征。系统、模型和仿真是系统仿真的3个基本概念。

1.1.1 系统

仿真技术应用的对象是系统。系统通常定义为具有一定功能，按某种规律相互联系又相互作用着的对象之间的有机组合。仿真所关注的系统是广义的，它泛指人类社会和自然界的一切存在、现象与过程。

系统可分为生命与非生命系统、工程与非工程系统等。如电气、机械、机电、水力、声学等属于工程系统；经济、社会、交通等属非工程系统。

一般认为，系统是真实世界的一部分，是几个相互作用的分系统的集合。在这个描述

中，隐含了递归的概念：一个系统由若干个分系统组成，而每一个分系统又是另一些系统的集合，如此直至无穷。

任何系统的研究都需要关注 3 个方面的内容，即实体、属性和活动：

- 实体 组成系统的具体对象；
- 属性 实体所具有的每一项有效特性（状态和参数）；
- 活动 系统内对象随时间推移而发生的状态变化。

由于组成系统的实体之间相互作用而引起的实体属性变化，通常用“状态”的概念来描述。研究系统，主要就是研究系统状态的改变，即系统的进展或演化。

任何系统都具有一定的结构，没有无结构的系统。作为系统论的一个基本范畴的结构，指的是系统内部各组成实体之间在空间（包括数量比例）或时间方面的有机联系与相互作用的方式或顺序。系统有序性愈高，结构愈严密。所以，任何系统所具有的整体性，都是在一定结构基础上的整体性，仅有实体，还不能组成系统，必须在实体的基础上，以某种方式和关系相互作用，才能形成系统结构。

应注意的是，一次具体的研究不需要、也不太可能关注系统的所有实体、属性、活动及环境，而只需要关注与研究的目的有关的部分。

1.1.2 模型

模型一词源于拉丁文 *Modulus*，意思是尺度、样本、标准。在科学方法论中，把模型界定为人们为了特定的研究目的而对认识对象所做的简化描述。原型则是与模型相对应的被认识对象。就模型与原型的关系而言，可以把模型看做是原型物质的或观念上（如数学的）的类似物。据此可以把模型分为实物模型和抽象模型两大类。实物模型是以某种程度上相似的实物去再现原型。抽象模型则是原型在人们思想中理想化、纯化的抽象性再现。

模型方法是通过研究模型来揭示原型的形态、特征和本质的方法。在当代科学研究中，模型方法的重要性越来越为人们所认识，被看做是科学研究方法的核心。

要进行仿真，首先要寻找一个实际系统的“替身”，这个“替身”就是模型。它不是原型的复现，而是按研究的侧重面或实际需要进行了简化提炼，以利于研究者抓住问题的本质或主要矛盾。

1. 建模活动

实际上，科学研究的绝大部分工作就是建立形式化的模型。科学家企图通过观察和实验，建立抽象的表示方法和定律。这些方法和定律是对现实世界中已被证明的假设进行形式化。这些“形式化”模型，只有在概括了实际系统的基本性质时才有可能被用来进行推论、分析、设计，从而在某种意义上给人们提供控制能力。

人在抽象思维上的功能，使它有进行模式识别，进行综合、计算和记忆等。人所用的建模方法是各种能力特殊结合的结果。但是，对于建模活动，人的能力是有限的。人的局限性对建模研究的发展产生影响，这就促使人们有必要去探求一些有益于弥补这些局限性的方法和工具。例如，测量仪器可以扩展人的传感能力。特别是计算机，它可在模型建立和模型利用方面发挥重要的作用。计算机仿真是计算机在这方面作用的重要表现。

模型集中反映了系统的某些方面的信息。它是对相应的真实对象和真实关系中那些有用的和令人感兴趣的特性的抽象化。因此，模型描述可视为是对真实世界中的物体或过程相关

的信息进行形式化的结果。

模型是对系统某些本质方面的描述,可采用各种可用的形式提供被研究系统的信息。模型在所研究系统的某一侧面具有与系统相似的数学描述或物理描述。

应该着重强调的是,模型是按研究目的的实际需要和侧重面,寻找一个便于进行系统研究的“替身”。因此,在较复杂的情况下,对于由许多实体组成的系统,由于研究目的不同,对同一个系统可以产生相应于不同层次的多种模型,这就是多面性。例如:

1) 一些模型反映整个实际系统的部分属性,而另一些模型则提供系统更全面的描述。

2) 一些模型包括实际系统的全部组成实体,另一些模型则是强调系统的某些侧面,而忽略另外一些方面,从而只包括实际系统的部分组成实体。

这些现象表明,根据系统研究的实际需要,可对模型进行粗化(简化)或精化(详细化),也可以对模型进行分解或组合。

模型作为系统的原型在研究时的“替身”,在选择模型时,要以便于达到研究的目的为前提。虽然对特定的建模目标与模型构成之间的关系知道得很少,但对模型描述经常可以采用下述一些原则:

(1) **相似性** 模型与所研究系统在属性上具有相似的特性和变化规律,即“原型”与“替身”之间具有相似的物理属性或数学描述。

(2) **切题性** 模型只应该针对与研究目的有关的方面,而不是系统的一切方面。也就是对于一个系统,其模型不是唯一的,模型结构的选择应针对研究目的。

(3) **吻合性** 选择的模型结构,应尽可能对所利用的数据作合理的描述。通常,其实验数据应尽可能由模型来解释。

(4) **可辨识性** 模型结构必须选择可辨识的形式。若一个结构具有无法估计的参数,则此结构就没有实用价值。

(5) **简单化** 从实用的观点来看,由于在模型的建立过程中,忽略了一些次要因素和某些非可测变量的影响,因此,实际上的模型已是一个被简化了的近似模型。一般而言,在实用的前提下,模型越简单越好。

(6) **综合精度** 它是模型框架、结构和参数集合等项精度的一种综合指标。若有限的信息限制了模型的精度,最有效的模型就应是各方面精度的平衡和折衷。

若上述原则间出现冲突,则要寻求合理的折衷,但特定的折衷方案都依赖于模型的对象,因而没有固定的程式。

2. 模型描述的层次

模型可以在不同的抽象层次上来描述一个系统。一般来讲,存在着以下3种层次的描述:

(1) **行为层次** 在这个层次上描述系统,是将它看成一个黑盒,并且对它施加一个输入信号,然后对它的输出信号进行测量与记录。为此,至少需要一个“时间基”,它一般是一个实数的区间(连续时间),或者是一个整数的区间(离散时间)。一个基本的描述单位是“轨迹”,它是从一个时间基的区间到表示可能的观测结果的某个集合上的映射。一个“行为描述”是由这样一组轨迹的集合所组成。这种描述也可称为系统的“行为”。通常,在仿真概念上,加到黑盒上的以箭头表示的某个变量被看做是输入,它不受盒子本身的控制;而另一个是输出,它是指向表示系统边界以外的环境。因为对实际过程的实验是处于行

为层次上，所以在这个层次的描述是十分重要的。同时，这个层次上的描述比起下面所要介绍的结构描述要简单一些。

(2) **状态结构层次** 在这个层次上描述的系统，是将它看成一个已了解内部工作情况的机构。这种描述通过在时间上的递推足以产生一种轨迹，即行为。能产生这种递推的基本单位是“状态集”以及“状态转移函数”，前者表示任意时刻所有可能的结果，而后者则提供从当前给定状态计算未来状态的规则。在状态结构层次上的描述比在行为层次上的描述更具有完整性，状态集将足以计算出系统的行为。

(3) **分解结构层次** 在这个层次上描述系统，是将它看做由许多基本的黑盒互相连接起来而构成的一个整体。这种描述也可称为网络描述，其中的基本黑盒称为成分，它给出了一个系统在状态结构水平上的描述。另外，每个成分必须标明“输入变量”和“输出变量”，还必须给出一种“耦合描述”，它确定了这些成分之间的内部连接及输入与输出变量之间的界面。人们可以进一步分解系统，从而获得更深一层的描述。

涉及上述不同描述的一个基本规则是，如果给定一个在某种层次上的系统描述，那么人们至少可得到一个比它低的水平上的描述。因此，一个明确的分解结构描述具有唯一的状态结构描述（比如，它的状态集可通过对每个个别的成分的状态集施行某种集合运算而获得）；而状态结构描述本身又只有唯一的行为描述。

3. 数学模型

计算机仿真中采用的模型是数学模型。“数学模型”是根据物理概念、变化规律、测试结果和经验总结，用数学表达式、逻辑表达式、特性曲线、实验数据等来描述某一系统的表现形式。数学模型的本质，是关于现实世界一小部分和几个方面抽象的数学“映像”。这种系统观允许对现实世界中的过程在不同的详尽程度上进行数学描述。这样，便可将各种不同的模型彼此联系起来，并将相互之间的关系隐含于数学之中。

数学模型用符号和数学方程式来表示一个系统。其中，系统的属性用变量表示，而系统的活动则用相互关联的变量间的数学函数关系式来描述。也就是说，一个系统的数学模型，是由某种形式语言对该系统的描述。由于任何数学描述都不可能是全面的和完全精确的，所以系统的数学模型不可能对系统作完全真实的描述，而只能根据研究目的对它作某种近似简化的描述。

在以物理为基础的科学中，数学模型方法的实质是：首先对所研究的实体进行观察（特别重要的是实验观察），充分地占有观察材料，分析观察材料的各种发展形式，探讨这些形式的内在联系，利用研究者的知识、经验和见识，演绎出以假说形式提出的说明实体规律的理论；用数学语言陈述这个理论，建立实体的数学模型。数学模型一般是数学方程组（微分方程、积分方程或代数方程），它的解提供了实体运动规律的说明；通过新的观察来证实、修改或否定这种假说；经过证实的假说就成为严格的科学理论，它能普遍地、正确地说明实体的运动变化规律。在这类科学研究中，实验观察条件是极为严格的。由于观察过程以纯粹形态进行，因此，观察过程和观察结果具有重复性。如果实验观察结果与数学模型的解相一致，那么数学模型的唯一性和正确性就得到证实。

1.1.3 仿真

系统仿真是建立系统的模型（数学的，物理效应的或数学-物理效应的模型），并在模型

上进行实验。系统仿真技术实质上就是建立仿真模型和进行仿真实验的技术。“仿真”的含义有不同的理解和解释。通常认为，系统仿真是用能代表所研究系统的模型，结合环境（实际的或模拟的）条件进行研究、分析和实验的方法。它作为一种研究方法和实验技术，直接应用于系统研究，是一种利用相似和类比的关系间接研究事物的方法。

系统仿真的过程可通过图 1-1 所示的三要素间的 3 个基本活动来描述。

模型建立是通过对实际系统的观测或检测，在忽略次要因素及不可检测变量的基础上，用物理或数学的方法进行描述，从而获得实际系统的简化近似模型。这里应该注意模型的实验性质，即模型同实际系统的功能与参数之间应具有某种相似性和对应性，这一点应尽可能不被数学演算过程所掩盖。否则，仿真研究就成为一种数值求解方法。



图 1-1 计算机仿真三要素和 3 个基本活动

仿真模型反映了系统模型（简化模型）与仿真器或计算机之间的关系，它应能为仿真器或计算机所接受，并能进行运行。例如，计算机仿真模型，就是对系统的数学模型进行一定的算法处理，使其在变成合适的形式（如将数值积分变为迭代运算模型）之后，能在计算机上进行数字仿真的“可计算模型”。显然，由于采用的算法引进了一定的误差，所以仿真模型对实际系统来讲是一个二次简化模型。

仿真实验是指对模型的运行。例如，计算机仿真，就是将系统的仿真模型置于计算机上运行的过程。仿真是通过实验研究实际系统的一种技术，通过仿真活动可以弄清系统内在结构变量和环境条件的影响。因此，为了使模型能够运行，需要设计一个合理的、方便的、服务于系统研究的实验步骤和软件。

微分方程的数字解法、离散相似法是数字仿真的基础。

系统仿真可以追溯到两千多年以前人类在建筑、造船等行业中对系统比例模型的应用，直至今天在许多工业系统实验研究中仍屡见不鲜。但系统仿真学科的形成是在 20 世纪 40 年代出现电子计算机以后，在此以前仿真归属不同技术领域或学科。随着电子计算机应用的发展，利用电子计算机进行模型实验方法也应运而生，使应用不同领域的仿真技术有了共同的理论基础、工程方法和技术。

多年来，随着系统仿真技术的飞速发展，系统仿真的概念已大大拓展。中国系统仿真学会对系统仿真的定义为：“建立系统模型（数学模型、物理模型或数学/物理模型），在模型上进行实验称为系统仿真”。

系统仿真是建立系统、过程、现象和环境的模型（物理模型、数学模型或其他逻辑模型），在一段时间内对模型进行操作，应用于系统的测试、分析或训练。系统可以是真实系统或由模型实现的真实和概念系统。

1.2 仿真的分类

可以从不同的角度对系统仿真加以分类。比较典型的分类方法是：根据模型的种类分类；根据仿真所采用的计算机类型分类；根据仿真时钟与实时时钟的比例关系分类；根据系

统模型的特性分类。

1.2.1 根据模型的种类分类

根据模型的种类不同,系统仿真可分为3种:物理仿真、数学仿真和半实物仿真。

按照真实系统的物理性质构造系统的物理模型,并在物理模型上进行实验的过程称为物理仿真。在计算机问世以前,基本上是物理仿真,也称为“模拟”。物理仿真要求模型与原型有相同的物理属性,其优点是直观、形象、模型能更真实全面地体现原系统的特性;缺点是模型制作复杂、成本高、周期长、模型改变困难、实验限制多、投资较大。

对实际系统进行抽象,并将其特性用数学关系加以描述而得到系统的数学模型,对数学模型进行实验的过程称为数学仿真。计算机技术的发展为数学仿真创造了环境,使得数学仿真变得方便、灵活、经济,因而数学仿真亦称为计算机仿真。数学仿真的缺点是受限于系统建模技术,即系统的数学模型不易建立。

第三类称为半实物仿真,是将一部分实物接在仿真实验电路中,用计算机和物理效应设备实现系统模型的仿真,即将数学模型与物理模型甚至实物联合起来进行实验。对系统中比较简单的部分或对其规律比较清楚的部分建立数学模型,并在计算机上加以实现;而对比较复杂的部分或对规律尚不十分清楚的系统,其数学模型的建立比较困难,则采用物理模型或实物。仿真时将两者连接起来完成整个系统的实验。

1.2.2 根据仿真计算机类型分类

仿真技术是伴随着计算机技术的发展而发展的。在计算机问世以前,基于物理模型的实验一般称为“模拟”,它一般附属于其他相关学科。自从计算机特别是数字计算机出现以后,其高速计算能力和巨大的存储能力使得复杂的数值计算成为可能,数字仿真技术得到了蓬勃的发展,从而使仿真成为一门学科——系统仿真学科。

按所使用的仿真计算机类型也可将仿真分为3类:模拟计算机仿真、数字计算机仿真和数字模拟混合仿真。

模拟计算机本质上是一种通用的电气装置,是20世纪60年代普遍采用的仿真设备。将系统数学模型在模拟计算机上加以实现并进行实验称为模拟计算机仿真。

模拟计算机的突出特点是当用它进行仿真时,结算结果在外观上非常接近于实际情况。因此,用它来描写连续系统的动态过程就显得特别自然、逼真,和真实系统在测试设备上观察到的情况几乎完全相同。人机联系极为方便,此外还可以考虑各种非线性因素的影响。模拟计算机的另一个特点是运算速度快,这是由于它采用并行计算方式所决定的。它的每一个运算部件都能够独立完成一种运算,因此,所有的运算都同时、并行地进行,这在电力电子系统实时仿真中具有十分重要的意义。模拟计算机的主要缺点是计算精度不高,由于模拟计算机采用机器电压来表示被模拟的量,因而,存在被模拟的量与机器电压之间的比例关系,使模拟仿真中易于混淆,并带来不便。信息的存储和逻辑判断功能差,模拟复杂非线性环节时电路复杂,精度难于保证。

数字计算机仿真是将系统数学模型用计算机程序加以实现,通过运行程序来得到数学模型的解,从而达到系统仿真的目的。

数字计算机的情况与模拟计算机相反。从计算方式上来说,它的运算速度比模拟计算机

低,限制了它在实时仿真中的应用。然而,数字计算机的优越性还是十分明显的。运算精度高,只要增加字长就可以把数值表达达到所需的精度。由于数字计算机的硬件具有浮点运算功能,所表达的数值范围极大。逻辑运算及存储能力功能强,在进行仿真中,改变题目只需更换程序中的语句。在求解电力电子系统的数学模型中,要用数值计算方法将其转换成计算机能够实现运算的仿真模型,依据仿真模型编写仿真程序,输入给数字计算机,由计算机逐条执行程序所规定的内容,完成系统仿真的任务。

本质上,模拟计算机仿真是一种并行仿真。即仿真时,代表模型的各部件是并发执行的。早期的数字计算机仿真则是一种串行仿真,在20世纪60年代,由于当时计算机只有一个中央处理器,计算机指令只能逐条执行。为了发挥模拟计算机并行计算和数字计算机强大的存储记忆及控制功能,以实现大型复杂系统的高速仿真,20世纪60年代,在数字计算机技术还处于较低水平时,产生了数字模拟混合仿真,即将系统模型分为两部分,其中一部分放在模拟计算机上运行,另一部分放在数字计算机上运行,两个计算机之间利用模数和数模转换装置交换信息。

随着数字计算机技术的发展,其计算速度和并行处理能力的提高,模拟计算机仿真和数字模拟混合仿真已逐步被全数字仿真取代。因此,今天的计算机仿真一般指的就是数字计算机仿真。

1.2.3 根据仿真时钟与实际时钟的比例关系分类

计算机上或实验室里展示天文时间的时钟称为实际时钟,而系统仿真时模型所采用的时钟称为仿真时钟。根据仿真时钟与实际时钟推进的比例关系,系统仿真分类如下:

(1) **实时仿真** 即仿真时钟与实际时钟完全一致,也就是仿真中模型推算的速度与实际系统运行的速度相同。在被仿真的系统中存在物理模型或实物时,必须进行实时仿真,例如各种训练仿真器,有时也称在线仿真。

(2) **亚实时仿真** 即仿真时钟慢于实际时钟,也就是仿真中模型推算的速度慢于实际系统运行的速度。在对仿真速度要求不苛刻的情况下可以采用亚实时仿真,例如大多数系统的离线仿真研究与分析,有时也称离线仿真。

(3) **超实时仿真** 即仿真时钟快于实际时钟,也就是仿真中模型推算的速度快于实际系统运行的速度。例如大气环流的仿真、交通系统的仿真等。

1.2.4 根据系统模型的特性分类

仿真基于模型,模型的特性直接影响着仿真实现。从仿真实现的角度来看,系统模型特性可分为两大类:一类称为连续系统;另一类称为离散事件系统。由于这两类系统固有运动规律不同,因而描述其运动规律的形式就有很大的差别。相应地,系统仿真技术也分为两大类:连续系统仿真和离散事件系统仿真。

(1) **连续系统仿真** 连续系统是指系统状态随时间连续变化的系统。

连续系统的模型按其数学描述可分为

1) 集中参数系统模型,一般用常微分方程(组)描述,如各种电路系统、机械动力学系统、生态系统等。

2) 分布参数系统模型,一般用偏微分方程(组)描述,如各种物理和工程领域内的

“场”问题。

需要说明的是，离散时间变化模型中的差分模型可归为连续系统仿真范畴。原因在于，当用数字仿真技术对连续系统仿真时，其原有的连续形式的模型必须进行离散化处理，并最终也变成差分模型。

(2) 离散事件系统仿真 离散事件是指系统状态在某些随机时间点上发生离散变化的系统。

它与连续系统的主要区别在于：状态变化发生在随机时间点上。这种引起状态变化的行为称为“事件”，因而这类系统是由事件驱动的。而且，“事件”往往发生在随机时间点上，亦称为随机事件，因而离散事件系统一般都具有随机特性，系统的状态变量往往是离散变化的。例如，电话交换台系统，顾客呼号状态可以用“到达”或“无到达”描述，交换台状态则要么处于“忙”状态，要么处于“闲”状态；系统的动态特性很难用人们熟悉的数学方程形式（如微分方程或差分方程等）加以描述，而一般只能借助于活动图或流程图，这样，无法得到系统动态过程的解析表达。对这类系统的研究与分析的主要目标是系统行为的统计性能，而不是行为的点的轨迹。

1.3 计算机仿真

计算机仿真是一种在计算机上“复现”真实系统的活动。它依赖间接相似原则，将系统模型通过一定的算法，建立能为计算机所接受和能够在计算机上运行的仿真模型。为了达到某个研究目的，这个仿真模型可以在计算机上方便地修改和反复运行。计算机仿真系统不同于普通数值计算，它具有专门配置的软件系统，具备良好的人机界面，能为系统的研究和最优方案的搜索创造良好的条件。

利用现代计算机仿真技术，可以在通用的计算机环境下，对物理属性截然不同的各种系统模型进行准确、可靠、灵活的研究，使仿真实验进入新的应用水平。因而有人将这种在计算机上建立的仿真模型称为“活的数学模型”。

1.3.1 计算机仿真定义的分析

仿真的概念自 1961 年被首次提出后，一直进行着演变。对“仿真”进行的第一次技术性定义是：仿真意指在实际系统尚不存在的情况下对于系统或活动本质的实现。随后将仿真定义为“用能代表所研究的系统的模型做实验”、“所有支持模型建立与模型分析的活动即为仿真活动”。20 世纪 80 年代在给出了仿真的基本概念框架“建模—实验—分析”的基础上，提出了“仿真是一种基于模型的活动”的定义，被认为是现代仿真技术的一个重要概念。随后无论哪种定义，仿真基于模型这一基本观点是共同的。计算机仿真的定义在仿真的一般定义上，限定了模型是计算机上能够运行的数学模型。实际上，随着科学技术的进步，特别是信息技术的迅速发展，“计算机仿真”的技术含义不断地得以发展和完善。上面这些定义从各种不同的角度对仿真的含义进行了阐述。针对计算机数字仿真，这些定义从以下一些方面描述了“仿真”的概念：

1) 对象：仿真针对的对象是系统，包括客观存在的系统与设计中的系统。有的定义将过程与系统并列为仿真的对象，但实际上过程总是属于系统的过程，因此，系统即可以概括

被仿真的对象。这表明，系统是仿真活动的出发点。

2) 目的：获得系统的动态行为。这是仿真的直接目的。由此而分析系统、设计系统或进行决策是仿真活动的间接目的。早期仿真更关注的是仿真的直接目的，而后则逐渐转向间接目的。实现间接目的需要对仿真获得的行为进行分析，以友好的方式提交给用户。

3) 方法：通过展开系统的模型来获得系统的行为或特性。使用模型是仿真活动的一个重要特征，这表明获得系统的行为不是直接对系统进行操作，而是对系统的模型进行操作。为此首先要建立系统的模型。

4) 方法的实现：应用数值计算的方法来展开模型，获得模型在一定输入下的输出。这是仿真与其他基于模型分析方法的主要区别。

5) 设施：计算机。数值计算是在计算机上进行的。

6) 方式：一些定义提到使用模型来获得系统的行为是通过实验的方式来进行的。这类定义强调了仿真的实验特征。仿真实验是一系列有目的、有计划的数值计算。也就是说，展开模型是在一定的方案控制下进行的。

综合起来，可以归纳为：计算机（数字）仿真是在计算机上建立形式化的数学模型，然后按一定的实验方案，通过数值计算的方法展开系统的模型来获得系统的（动态）行为，从而研究系统的过程。

从上述定义可看出，计算机仿真要涉及两步重要的工作：①必须建立系统的模型；②要在计算机上对模型进行数值计算。前者称为建模，后者称为展模。

1.3.2 计算机仿真方法的特点

由前述对计算机仿真方法的有关论述，可以看出它有如下显著的特点：

(1) **模型参数任意调整** 模型参数可根据要求通过计算机程序随时进行调整、修改或补充，使人们能掌握各种可能的仿真结果，为进一步完善研究方案提供了极大的方便。这正是计算机仿真被称为“计算机实验”的原因。这种“实验”与通常的实物实验比，具有运行费用低、无风险以及方便灵活等优点。

(2) **系统模型快速求解** 借助于先进的计算机系统，人们在较短时间内就能知道仿真运算的结果（数据或图像），从而为人类的实践活动提供强有力的指导。

(3) **运算结果准确可靠** 只要系统模型、仿真模型和仿真程序是科学合理的，那么计算机的运算结果一定准确无误（除非机器有故障）。因此，人们可毫无顾虑地应用计算机仿真的结果。

(4) **仿真的结果形象直观** 计算机仿真的结果易于通过图形图像来形象直观地表现。把仿真模型、计算机系统和物理模型及实物联结在一起的实物仿真（有些还同时是实时仿真），形象十分直观，状态也很逼真。

因而计算机仿真在一些工程技术领域（如宇宙航行、核电站控制等）发挥了独特的作用。

在计算机仿真方法中，尽管其系统模型建立的原则与数学方法中数学模型的建立原则基本相同，但由于有计算机的参与，因而还需设计仿真模型，编制仿真程序，最后实施仿真实验。由此可见，计算机仿真方法要比单纯的数学方法复杂得多。

随着计算机技术的产生和发展，计算机仿真方法在科学研究和技术开发中的独特作用愈

益突显。国外有些学者将其看做介于实验方法和理论方法之间的第三类研究方法，这颇有道理。

1.3.3 计算机仿真方法的作用

计算机仿真方法的独特作用主要表现为以下 4 个方面：

(1) **优化系统设计** 对于复杂系统的研究，一般要求达到最优化，为此必须对系统的结构和参数反复进行修改和调整。这只有借助计算机仿真方法才能方便、快捷地实现。

(2) **降低实验成本** 对于复杂的工程系统，如果直接进行实物实验，则费用会很高。而用计算机仿真手段就可大大降低相关费用。

(3) **减少失败风险** 对于一些难度高、危险大的复杂工程系统，为了减少风险，必须先进行计算机仿真实验，以提高成功率。

(4) **提高预测能力** 对于各种非工程复杂系统，如经济、军事和社会等系统，几乎不可能进行直接实验研究，因而也很难准确预测其发展趋势。但计算机仿真实验却可以在给定的边界条件下，推演出此类系统的变化趋势，从而为人们制定对策提供可靠的依据。

计算机仿真方法将在未来的科学研究和技术开发中发挥越来越大的作用。

1.3.4 计算机仿真的步骤

正如前面所述，仿真是基于模型的活动，首先要针对实际系统建立其模型。建模的任务是：根据研究和分析的目的，先确定模型的边界（因为任何一个模型都只能反映实际系统的某一部分或某一方面，也就是说，一个模型只是实际系统的有限映像）。另一方面，为了使模型具有可信性，必须具备对系统的先验知识及必要的实验数据，再按物理等客观规律，建立物理模型。特别是，还必须对模型进行形式化处理，以得到计算机仿真所要求的数学描述。模型可信性检验是建模阶段的最后一步，也是必不可少的一步。只有可信的模型才能作为仿真的基础。

然后在上述模型的基础上进行仿真建模。仿真建模的主要任务是：根据系统的特点和仿真的要求选择合适的算法，当采用该算法建立仿真模型时，其计算的稳定性、计算精度、计算速度应能满足仿真的需要。

下一步程序设计即将仿真模型用计算机能执行的程序来描述。程序中还要包括仿真实验的要求，如仿真运行参数、控制参数、输出要求等。早期的仿真往往采用高级语言编写仿真程序，随着仿真技术的发展，一大批适用不同需要的仿真语言被研制出来，大大减轻了程序设计的工作量。

有了正确的仿真程序，就可以对模型进行实验，这是实实在在的仿真活动。它根据仿真的目的对模型进行多方面的实验，相应地得到模型的输出。

最后要对仿真输出进行分析。以往输出分析的方法未能引起人们的足够重视。实际上，输出分析在仿真活动中占有十分重要的地位，特别是对离散事件系统来说，其输出分析甚至决定着仿真的有效性。输出分析既是模型数据的处理（以便对系统性能做出评价），同时也是对模型的可信性进行检验。

可见，计算机仿真方法中的仿真程序，不同于一般的科学计算程序（仅完成单纯的数值计算），而是在人的参与下反复修改和运行的一个搜索过程。因此，计算机仿真要求具有

友好的人机界面,这个支持仿真研究的计算机环境对计算机的硬件体系和软件系统都有它特殊的要求。

为了方便地进行各种系统的仿真工作,摆脱复杂的建模、编程工作,出现了很多针对不同领域使用的仿真语言,极大地方便了仿真编程工作。随着计算机及网络技术的发展,为更好地适应普通用户对计算机仿真的需求,针对计算机的仿真步骤,开发出了很多面向普通用户的计算机仿真软件。软件中集成了计算机仿真的全部步骤,只需用户输入或搭建基本的仿真系统及必要的参数,即可自动完成从系统建模、仿真模型到输出分析的过程。并且软件允许用户方便地对所仿真的系统结构和参数进行修改。

目前一般各专业所指的计算机仿真,通常是借助一定的专业仿真软件进行的。

1.4 计算机仿真技术在电力电子系统中的应用

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一个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。从荧光灯镇流器、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到国民经济的各个领域。一个典型的电力电子系统通常是由电力电子器件、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。随着电力电子技术研究领域及深度不断拓宽和加深,对某些电力电子系统的分析、设计和综合研究的工作强度和复杂性越来越高,成本也随之增加。并且考虑到安全性、经济性及进行实验研究的可能性等,在现场实验中往往不易做到,甚至根本不允许这样做。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,并对其大量迅速的计算,“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实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。

目前,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、印制电路板设计等。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PSpice;②专用领域仿真软件。例如在控制系统仿真软件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的SIMPLIS、PSIM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