

电力电子与 交流传动系统仿真

谢 卫 编著

电气自动化新技术丛书



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



电气自动化新技术丛书

电力电子与交流传动系统仿真

谢 卫 编著



机械工业出版社

本书在介绍系统仿真基本概念的基础上,从电力电子变换器和交流电动机两个方面分别建立通用的数学模型和仿真模型,从稳态分析和动态分析的角度探究系统运行的基本规律,并给出若干仿真实例。

本书侧重于电力电子变换器和交流传动系统的综合分析仿真,特别是强调数学模型的统一性和通用性,使读者通过学习可以做到举一反三。本书是作者多年科研成果的总结,同时也参考了大量国内外的文献资料,内容丰富、全面系统、实用性很强。

本书适合于电力电子与电力传动专业研究生、电气工程及其自动化专业本科生学习深造之用,也可供相关专业的高校师生、工程技术人员和其他人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电力电子与交流传动系统仿真/谢卫编著. —北京:机械工业出版社, 2009.6

(电气自动化新技术丛书)

ISBN 978-7-111-27222-9

I. 电... II. 谢... III. ①变换器—系统仿真②交流电机—系统仿真 IV. TN624 TM340.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第080761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:张俊红 责任编辑:林 楦

版式设计:张世琴 责任校对:陈延翔

封面设计:姚 毅 责任印制:李 妍

北京振兴源印务有限公司印刷

2009年8月第1版第1次印刷

169mm×239mm·13.5印张·260千字

0001—3000册

标准书号:ISBN 978-7-111-27222-9

定价:29.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

销售服务热线电话:(010)68326294

购书热线电话:(010)88379639 88379641 88379643

编辑热线电话:(010)88379764

封面无防伪标均为盗版

第5届电气自动化新技术丛书

编辑委员会成员

主 任：王志良

副主任：赵相宾 牛新国 王永骥 赵光宙

孙 跃 阮 毅 何湘宁 霍勇进

委 员：王永骥 王 旭 王志良 王 炎

牛新国 尹力明 许宏纲 孙 跃

孙流芳 李永东 李崇坚 陈伯时

陈敏逊 阮 毅 赵光宙 赵 杰

赵争鸣 赵相宾 张 浩 张承慧

张彦斌 徐殿国 何湘宁 彭鸿才

霍勇进 戴先中

秘 书：刘 娟 林春泉

电气自动化新技术丛书

序 言

科学技术的发展，对于改变社会的生产面貌，推动人类文明向前发展，具有极其重要的意义。电气自动化技术是多种学科的交叉综合，特别是在电力电子、微电子及计算机技术迅速发展的今天，电气自动化技术更是日新月异。毫无疑问，电气自动化技术必将在提高国民经济水平中发挥重要的作用。

为了帮助在经济建设第一线工作的工程技术人员能够及时熟悉和掌握电气自动化领域中的新技术，中国自动化学会电气自动化专业委员会和中国电工技术学会电控系统与装置专业委员会联合成立了电气自动化新技术丛书编辑委员会，负责组织编辑“电气自动化新技术丛书”。丛书将由机械工业出版社出版。

本丛书有如下特色：

一、本丛书是专题论著，选题内容新颖，反映电气自动化新技术的成就和应用经验，适应我国经济建设急需。

二、理论联系实际，重点在于指导如何正确运用理论解决实际问题。

三、内容深入浅出，条理清晰，语言通俗，文笔流畅，便于自学。

本丛书以工程技术人员为主要读者，也可供科研人员及大专院校师生参考。

编写出版“电气自动化新技术丛书”，对于我们是一种尝试，难免存在不少问题和缺点，希望广大读者给予支持和帮助，并欢迎大家批评指正。

电气自动化新技术丛书
编辑委员会

第5届电气自动化新技术丛书

编辑委员会的话

自1992年本丛书问世以来,在学会领导和广大作者的支持下,在前4届编辑委员会的努力下,至今已发行丛书48种50多万册,受到广大读者的欢迎,对促进我国电气传动自动化新技术的发展和传播起到了巨大作用。

许多读者来信,表示这套丛书对他们的工作帮助很大,希望我们再接再厉,不断地推出介绍我国电气传动自动化新技术的丛书。本届编委会决定选择一些大家所关心的新选题,继续组织编写出版,同时对受读者欢迎的已经出版的丛书,我们将组织一些作者进行修订再版,以满足广大读者的需要。为了更加方便读者阅读,我们对今后新出版的丛书进行了改版扩大了开本。

我们诚恳地希望广大读者来函,提出您的宝贵意见和建议,以使本丛书搞得更好。

在本丛书出版过程中,得到了中国电工技术学会、天津电气传动设计研究所等单位提供的出版基金支持,在此我们对这些单位再次表示感谢。

第5届电气自动化新
技术丛书编辑委员会
2007年12月18日

前 言

系统仿真是一门建立在系统工程、相似理论、控制理论、计算方法和计算机技术等学科基础上,以计算机和其他专用实验设备为工具,利用系统模型对真实的或假象的系统进行研究,对已经存在或尚不存在的系统进行分析的综合性学科。系统仿真技术不仅可以应用于电力工业、交通运输、航空航天和军事装备等工程领域,而且还可以应用于生态环境和生物医学等系统。特别是近 20 年来,随着计算机技术的迅猛发展,系统仿真技术已从传统的工程领域和生物领域扩展到了非工程领域和非生物领域,并在社会经济系统、教育培训系统中得到了广泛的应用。

本书着重介绍系统仿真技术在电力电子与交流传动系统中的应用。全书共分为 8 章,第 1 章阐述系统仿真的基本概念和电力电子与交流传动系统仿真的基本特点。第 2 章介绍状态变量法在系统仿真中的应用,主要讲解系统状态方程的稳态求解方法和动态求解方法。第 3 章简要介绍当前流行的系统仿真工具——MATLAB/SIMULINK 软件。第 4 章在分析交流传动系统中普遍使用的几种变频装置工作原理的基础上,进行电力电子变换器的建模与仿真。第 5 章和第 6 章分别介绍坐标变换与电机统一理论,建立具有代表意义的四种交流电机的数学模型,并分析相应的参数关系。第 7 章以异步电动机传动系统为例,介绍系统稳态仿真方法的具体应用。第 8 章列举系统动态仿真的若干实例。本书最后给出了所有系统仿真实例的 MATLAB 源程序,以飨读者。

本书适合于电力电子与电力传动专业研究生或电气工程及其自动化专业高年级本科生学习深造之用,也可供相关专业的高校师生、工程技术人员和其他人员参考。

本书系编著者多年科研成果的总结,也参考了国内外前辈和同行的大量文献资料,并得到了上海市教委重点学科建设项目(J50602)、上海市教委创新科研项目(08ZY108)和上海市科委登山行动计划项目(06DZ11202)的资助,在此一并致谢!

尽管编著者在编写过程中倾注了很多精力,终因水平有限,一定存在一些失误与不足之处,恳请广大读者批评指正。

编著者
2009 年 7 月

目 录

电气自动化新技术丛书序言

第5届电气自动化新技术丛书编辑委员会的话
前言

第1章 绪论	1
1.1 系统仿真的基本概念	1
1.1.1 系统与仿真	1
1.1.2 系统仿真的分类	3
1.1.3 系统仿真的工具	4
1.1.4 系统仿真技术的应用	5
1.1.5 系统仿真技术的发展	5
1.2 电力电子与传动控制系统简介	7
1.2.1 电力电子技术	8
1.2.2 传动控制技术	10
1.3 电力电子与交流传动系统仿真的特点	12
第2章 状态变量法在系统仿真中的应用	15
2.1 状态变量法简介	15
2.1.1 频域和时域的分析	15
2.1.2 状态变量法的基本概念	16
2.1.3 状态方程的建立方法	17
2.2 状态方程的解析解法——稳态分析	28
2.2.1 线性定常系统的求解	28
2.2.2 交流电路的稳态解	30
2.2.3 增广状态变量法	33
2.3 状态方程的数值解法——动态分析	38
2.3.1 数值积分法的基本原理	38
2.3.2 欧拉法及改进欧拉法	39
2.3.3 龙格-库塔法	41

第 3 章 基于 MATLAB 的建模与仿真	45
3.1 MATLAB/SIMULINK 简介	45
3.2 基于 M 文件的程序设计	47
3.2.1 M 文件的特点与形式	47
3.2.2 命令式文件	48
3.2.3 函数式文件	48
3.3 SIMULINK 的建模方法	49
3.3.1 SIMULINK 模块库简介	49
3.3.2 仿真建模与运行	51
3.3.3 子系统的生成与封装	52
3.4 S-函数	55
3.4.1 S-函数的基本概念	55
3.4.2 S-函数的工作原理	56
3.4.3 基于 M 文件的 S-函数	57
3.5 仿真举例	58
第 4 章 电力电子变换器的数学模型及仿真	65
4.1 电力电子变换器的分类及特点	65
4.2 变压变频调速系统中的脉宽调制技术	67
4.2.1 正弦波脉宽调制技术	68
4.2.2 电流滞环跟踪 PWM 技术	69
4.2.3 电压空间矢量 PWM 技术	71
4.3 SPWM 电压型逆变器的建模与仿真	73
4.3.1 数学模型	73
4.3.2 仿真算例	75
4.4 基于 SIMULINK 的 PWM 逆变器通用模型	76
4.4.1 PWM 逆变器的通用数学模型	76
4.4.2 SIMULINK 模块化实现	77
4.4.3 SPWM 逆变器的仿真	78
4.4.4 CHBPWM 逆变器的仿真	78
4.4.5 SVPWM 逆变器的仿真	80
第 5 章 坐标变换与电机统一理论	88
5.1 坐标变换理论	88

5.1.1	线性变换简介	88
5.1.2	坐标空间的确定	89
5.1.3	坐标变换的一般方法	91
5.1.4	坐标变换的性质及约束	94
5.1.5	常用的坐标系统	95
5.2	电机统一理论	99
5.2.1	统一理论的要点	99
5.2.2	d-q 原型电机	99
5.2.3	α - β 原型电机	103
5.3	直流电动机模型	105
5.4	交流异步电动机模型	106
5.5	交流同步电动机模型	108
第 6 章	交流电机的数学模型及参数关系	111
6.1	三相异步电动机的数学模型	112
6.2	三相同步电动机的数学模型	114
6.3	永磁同步电动机的数学模型	117
6.4	无刷直流电动机的数学模型	123
6.5	交流电机的参数计算	125
6.5.1	笼型绕组的多回路模型	125
6.5.2	电感参数的解析计算	127
6.5.3	磁路饱和问题的处理	132
第 7 章	系统稳态仿真实例	134
7.1	$\alpha\beta$ -dq 坐标系中的状态方程及求解	134
7.2	静止三轴坐标系中的状态方程及求解	141
7.3	增广状态变量法的应用	144
7.4	仿真计算实例	146
第 8 章	系统动态仿真实例	147
8.1	方波电压源供电异步电动机传动系统的仿真	147
8.2	电流型逆变器供电异步电动机传动系统的仿真	148
8.3	电压型逆变器供电同步电动机传动系统的仿真	152
8.4	电压型逆变器供电永磁同步电动机传动系统的仿真	156
8.5	无刷直流电动机传动系统的仿真	159

附录 MATLAB 源程序及 S-函数 163

附录 A SPWM.m 163

附录 B IM_STEADY1.m 165

附录 C IM_STEADY2.m 168

附录 D IM_STEADY3.m 172

附录 E IM_DYNAMIC.m 176

附录 F IM_CIS.m 179

附录 G SM_VIS.m 182

附录 H PMSM.m 187

附录 I BLDC.m 191

附录 J BLDC.mdl 194

参考文献 199

第1章 绪 论

1.1 系统仿真的基本概念

1.1.1 系统与仿真

1. 系统

目前在各个不同领域中广泛使用着一个相同的术语，这就是“系统 (System)”。系统的概念可以是具体的，也可以是抽象的。一台机器是一个系统，一辆汽车是一个系统，一架飞机是一个系统，一个生物体是一个系统，一条生产线是一个系统，一个企业是一个系统，一项科学技术工程也是一个系统，等等。就系统属性而言，有物理的和生物的；就工程观点而言，有工程的和非工程的；就运动状态而言，有静态的和动态的；就数学描述而言，有线性的和非线性的。总之，在自然界和人类社会中，“系统”是无处不在的，大的，大到太阳系，乃至银河系；小的，小到组成物质的分子，乃至原子。更广泛地说，我们可以把所要研究或处理的一个事物作为一个系统，甚至可以把自然界和人类社会中各种错综复杂的事物联系起来看成一个系统。

由于“系统”这个术语已应用得如此广泛，所以很难给它一个足以概括其各种应用的确切定义，但是我们可以做一简洁而容易理解的说明。所谓系统，就是按照某些规律结合起来，互相作用、互相依存、互相制约的某些部件（或元件）的集合，其中部件是系统的独立职能单位，具有一定的属性。

图 1-1a、b 分别表示一个简单的机械系统和电气系统。在机械系统中，弹簧 k 、质量块 m 和阻尼器 f 是组成系统的三个部件，其中弹簧的职能是存储势能，质量块的职能是存储动能，而阻尼器的职能是消耗这些机械能。在电气系统中，电源 E 、电感 L 、电容 C 和电阻 R 是组成系统的四个部件，其中电源的职能是存储电

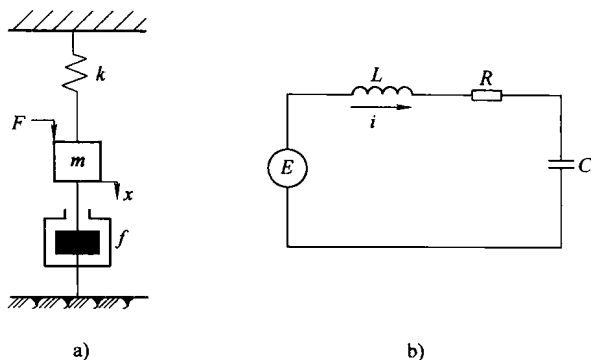


图 1-1 简单的机械系统和电气系统

a) 机械系统 b) 电气系统

能，电感的职能是存储磁场能，电容的职能是存储电场能，而电阻的职能是消耗电能。

如图 1-2 所示的是一个制造零件，并把零件装配成产品的工厂系统，其部件包括接受用户订货、负责对各车间分配工作的生产管理部门，负责原料供应的采购部门，生产零件的制造车间，生产成品的装配车间和发送成品的装运部门。这些部件的名称各自表明了它们的职能，其相互关系在图中用箭头表示。

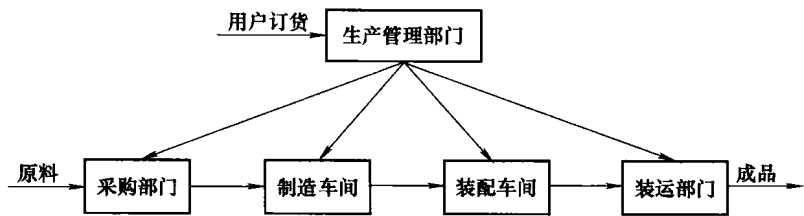


图 1-2 一个工厂系统

随着人类社会的进步和科学技术的发展，在 20 世纪 40 年代末形成了控制论这门学科。控制论是研究系统各部件如何进行组织和协调，使系统稳定和有序工作的理论，所以控制论的研究对象就是“系统”。控制论的发展和成熟，使其理论已成功地应用于工程系统和生物系统，又推广到非工程系统和非生物系统——经济系统，甚至是社会系统。这应该是“系统”这个术语之所以应用得十分广泛的又一种缘由。

2. 仿真

仿真又称为模拟（Simulation），就是用模型来代替实际的系统，该模型与所替代的实际系统之间存在某些相对应的量，并能在某些范围内重现实际系统的特征。从一般意义上说，系统仿真就是指用某种方法反映或再现实际的系统，以便研究其中的客观规律。

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，在一对系统之间建立某种对应的关系，从而可以利用模型对实际系统（原型）进行研究。例如，图 1-1a 是一个由弹簧、质量块和阻尼器组成的机械系统，图 1-1b 是一个由电源、电阻、电感和电容组成的电气系统。描述这两个系统的微分方程分别为

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

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

显然，两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，假如比例尺寸选择适当，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，当两个不同系统的微分方程具有相似性时，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，就称为相似量，见表 1-1。

表 1-1 机械系统和电气系统的相似量

机 械 系 统	电 气 系 统
力 F	电压 E
质量块 m	电感 L
弹簧摩擦因数 f	电阻 R
弹簧刚度因数 k	电容的倒数 $1/C$
位移 x	电量 q
速度 dx/dt	电流 i

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三类：

1) 形象模型。保留原型系统的外观特征，仅对实际系统的规模进行放大或缩小。如通过对小型船舶运行特性的研究，在一定范围内可以达到了了解大型船舶运行特性的目的。

2) 类比模型。根据不同物理系统（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模型。如上述电气系统，一般比机械系统更容易进行试验研究，所以可以通过对电气系统的研究来代替对机械系统的研究。

3) 符号模型。借助文字、字母、符号、图表或数学表达式来描述系统的模型。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。数学建模就是根据研究对象的基本物理规律，写出描述其运动过程的数学方程，从而在物理系统和其抽象的数学描述之间建立对应的关系。

1.1.2 系统仿真的分类

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有：根据模型的种类分类；根据仿真所采用的工具类型分类；根据仿真的用途分类；根据仿真时钟与实时时钟的比例关系分类等^[9]。

在上述三类模型的基础上，系统仿真的方法可以分为两大类：

(1) 物理仿真 用物理性质相同或相近的模型（物理模型）来代替原型系统而进行研究的一种仿真方法。物理仿真可以替代对复杂系统显得特别有价值的试

验研究，并能在保持其物理本质基本不变的情况下研究原型系统中所发生的现象。基于形象模型和类比模型的仿真即属于此类。

(2) 数学仿真 当物理模型不便建立，但可用数学方程（数学模型）来描述原型系统的基本特性时，可以采用数学仿真的方法，这就是基于符号模型或数学模型的仿真。相比于物理仿真，数学仿真简便易行，值得推广应用。

数学仿真大体上可以分为以下 5 个步骤：

1) 系统分解：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，即将模型抽象为相应的数学方程——微分方程或差分方程。

3) 参数估计：根据实际系统决定数学方程中未确定的系数。

4) 模型转换：由于数学仿真的实现依赖于计算机程序的运行，因此需将模型的数学描述变换为相应的计算机程序，这就是所谓的编程过程。

5) 结果分析：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，并分析相关参数对系统性能的影响。

应当指出，上述步骤是一个比较复杂的过程，并没有一个固定的程序可以遵循。可以说，建模是一门艺术，是逻辑、直觉、抽象、联想与技艺的融合。

1.1.3 系统仿真的工具

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，其主要优点在于它完全是建立在计算机软件基础之上的，可以根据研究对象的不同特性随时对模型和程序进行改动，而不用像物理仿真那样需要对硬件进行更改，因此简单易行，经济快捷。

按照工作原理的不同，数学仿真的基本工具——计算机可以分为以下 3 种：

1) 模拟计算机 (Analog Computer)。这是一种基于连续运算的计算机，由加法器、乘法器、积分器、反相等模拟电路运算部件组成，操作方便，不仅解题简单明了，而且由于采用并行方式，运算速度快。但是它的精度不太高，通用性较差。

2) 数字计算机 (Digital Computer)。这是一种基于离散运算的计算机，由数字电路组成，计算精度高，通用性较强。又以软件编程为基础，调试与维护比较方便。以往因采用串行方式而使运算速度较慢，目前随着数字技术的发展，应用已十分广泛。

3) 混合计算机 (Hybrid Computer)。这是模拟计算机和数字计算机的结合，不但运算速度快，而且精度高，然而造价较高，只在特定领域使用。

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，因为当时的数字计算机只

有一个中央处理单元（CPU），计算机指令只能逐条执行。为了发挥模拟计算机快速的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 ~ 70 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，两种计算机之间利用模/数和数/模转换装置交换信息。

随着数字计算机技术的快速发展，其计算速度和并行处理能力得到了极大的提高，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所取代。因此，今天的计算机仿真一般指的就是数字计算机仿真。

1.1.4 系统仿真技术的应用

系统仿真技术不仅可以应用于电力工业、交通运输、航空航天和军事装备等工程领域，而且还可以应用于生态环境系统和生物医学系统等。特别是近 20 年来，随着系统工程与科学的迅速发展，系统仿真技术已从传统的工程领域和生物领域扩展到非工程领域和非生物领域，在社会经济系统、教育培训系统中也得到了广泛的应用。总的来说，系统仿真技术的应用可以归结为以下两大类：

（1）在复杂产品研制中的应用 通过系统仿真，可以发现系统原型中存在的问题，确定最优参数，从而增加样机首次运行成功的可能性。还可以设定多组参数组合来优化系统各项性能指标，并集中研究系统特定部分的性能，或系统特定过程或时段的性能。另外，在实验室由于安全原因或是由于成本问题而不能进行的破坏性实验，可以很容易通过仿真来完成，对故障和异常情况下的响应也可以进行全面的分析。

（2）在人员教育培训中的应用 对于复杂系统的操作，需要事先对操作人员进行教育和培训。早期的培训大都在实际系统上进行。随着系统规模的扩大，复杂程度的提高，特别是系统造价的提高，训练时有可能因操作不当而造成较大的损失。为了解决这些问题，需要有这样的系统，它能模拟实际系统的运行环境和工作状况，又可以避免采用实际系统时可能带来的危险及高昂的代价，这就是训练仿真系统，它属于前面提及的基于形象模型或类比模型的物理仿真。另外，通过系统仿真，能很好地为教学目的服务，使设计或使用人员较快地熟悉系统的工作机理。

另外，基于现代计算机及其网络的系统仿真技术，不但可以提高工作效率，缩短研发周期，减少训练时间，而且不受环境和气候限制，在安全性、经济性和可靠性等方面均具有突出的作用。

1.1.5 系统仿真技术的发展

系统仿真作为一门独立的学科已经有 60 多年的发展历史，其基础理论的形成、建模方法的更新、仿真技术的提升均与计算机技术的发展水平密切相关。

1. 面向过程的仿真

这是最基本的仿真技术，就是通过分析系统的工作原理，以及组成系统的各部件在不同阶段的行为特征，建立相应的数学模型，并采用合适的求解算法和程序设计语言，通过计算机编程和调试，完成系统工作过程和工作特性的分析。

面向过程的仿真可以按照以下步骤来实现：

- 1) 系统建模，针对实际系统及其组成部件建立相应的数学模型，得到计算机仿真所要求的数学描述。
- 2) 仿真建模，根据实际系统的特点，选择合适的算法，以满足计算精度、计算速度和计算稳定性的需要。
- 3) 程序设计，将仿真模型用计算机能执行的程序设计语言来描述。
- 4) 模型运行，在计算机上执行所编制的仿真程序，并进行相应的调试。
- 5) 仿真分析，通过仿真试验，分析并处理仿真结果。

2. 面向对象的仿真

面向对象的方法是一种在分析和设计阶段独立于程序设计语言的概念化过程，它不仅仅是一种程序设计技术，更重要的它是一种新的思维方式。它认为客观世界是由各种对象所组成的，每一个对象都有自己的内部状态和运动规律，不同对象的组合及相互作用就构成了不同的系统。对象是静态数据和动态行为的封装，属于某个类，这些类具有某种层次化的结构。对象之间通过消息传递来实现系统的各种功能。这些观点与“系统”的基本定义是一致的，可以为复杂大系统的建模与仿真提供新的思路。

面向对象的仿真可以按照以下步骤来实现：

- 1) 明确所建系统要实现的目标，对系统进行对象和类的划分，建立系统的描述框架。
- 2) 针对每个对象定义其内部组织、静态结构和动态行为模型，输入/输出接口，以及对象之间的连接关系。
- 3) 采用面向对象的计算机编程语言开发仿真软件。
- 4) 对模型及软件进行校核与验证。
- 5) 运行仿真软件，对仿真结果进行评估。

3. 分布式交互仿真

采用协调一致的结构、标准和协议，通过局域网或广域网，将分布在各地的仿真系统互连，构造一个时空一致，人也参与其中，并实现动态交互的分布式仿真环境。

分布式交互仿真系统具有如下特点：

- 1) 在结构上没有中心计算机节点对仿真过程的控制，采用分布式对等的体