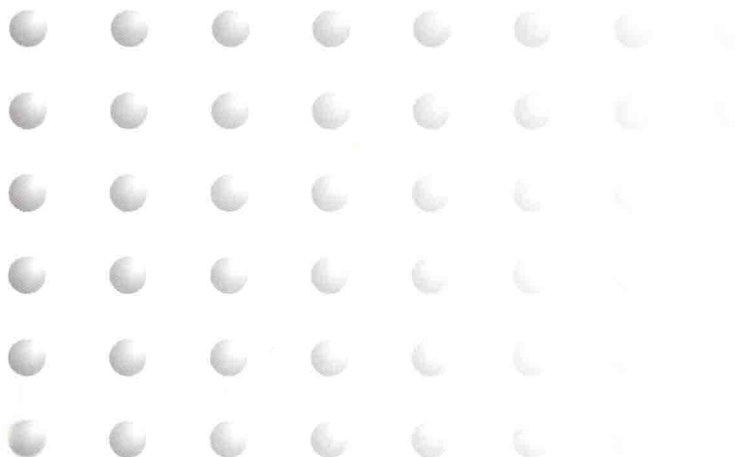




高等学校应用型“十二五”规划教材

# 生产系统建模 与仿真

武 福 李忠学  
雷 斌 王海涌 杨喜娟 编著



西安电子科技大学出版社  
<http://www.xduph.com>

高等学校应用型“十二五”规划教材

# 生产系统建模与仿真

武 福 李忠学

编著

雷 斌 王海涌 杨喜娟

西安电子科技大学出版社

## 内 容 简 介

本书以生产系统为研究对象,从系统建模的角度全面阐述了离散事件建模与仿真技术在生产系统分析中的应用,书中的介绍借助了软件工具和应用案例,以便于读者理解与掌握。本书主要内容包括:系统、模型和仿真的基本概念,生产系统及其建模分析;离散事件系统仿真方法;生产系统的仿真方法;随机数和随机变量的生成原理及方法;Witness 仿真软件及其在生产系统仿真中的应用等。

本书可作为高等院校工业工程、管理工程、机械设计制造及其自动化等专业本科生与硕士研究生相关课程的教材,也可作为生产系统设计与规划、生产计划与控制、物流设施规划等领域的工程技术人员的参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

生产系统建模与仿真/武福等编著. —西安:西安电子科技大学出版社,2014.8  
高等学校应用型“十二五”规划教材

ISBN 978-7-5606-3415-9

I. ① 生… II. ① 武… III. ① 生产管理—系统建模—高等学校—教材 ② 生产管理—系统仿真—高等学校—教材 IV. ① F273-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 163049 号

策 划 李惠萍

责任编辑 买永莲 李惠萍

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路 2 号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

网 址 www.xduph.com 电子邮箱 xdupfb001@163.com

经 销 新华书店

印刷单位 陕西华沐印刷科技有限责任公司

版 次 2014 年 8 月第 1 版 2014 年 8 月第 1 次印刷

开 本 787 毫米×1092 毫米 1/16 印 张 13

字 数 303 千字

印 数 1~3000 册

定 价 23.00 元

ISBN 978-7-5606-3415-9/F

**XDUP 3707001-1**

\*\*\* 如有印装问题可调换 \*\*\*

## 前言

工业工程(Industrial Engineering, IE)起源于 20 世纪初的美国,它以现代工业化生产为背景,在发达国家得到了广泛应用。现代工业工程是以大规模工业生产及社会经济系统为研究对象,在制造工程学、管理科学和系统工程等学科基础上逐步形成和发展起来的一门交叉的工程学科。它是将人、设备、物料、信息和环境等生产系统要素进行优化配置,对工业等生产过程进行系统规划与设计、评价与创新,从而提高工业生产率和社会经济效益的专门化的综合技术,且内容日益广泛。

本书以生产系统为研究对象,从系统建模的角度全面阐述了离散事件建模与仿真技术在生产系统分析中的应用原理和技术方法,并借助于软件工具和应用案例的介绍与分析,使学生能够全面认识和理解系统建模与仿真技术(尤其是计算机仿真技术)在生产系统工程中的应用,掌握利用某些工具对生产系统进行仿真分析的方法,并在掌握相关理论知识的同时,培养和提高其自身的实践能力。

本书共分 7 章。第 1 章分析了系统、模型和仿真的基本概念,生产系统及其基本特征,当前生产系统面临的主要问题以及生产系统建模与仿真的主要内容,并给出了应用案例;第 2 章以生产系统为研究对象,介绍了离散事件系统的基本概念以及离散事件系统建模的基础理论,重点介绍了离散事件系统建模的主要方法,如实体流图法、活动循环图法、Petri 网理论、面向对象的建模方法和统一建模语言(UML)等几种常见的离散事件系统建模方法,最后对典型生产系统中的库存系统的模型进行了分析;第 3 章分析了生产系统的仿真方法,内容包括仿真调度策略、仿真时钟推进机制以及消息驱动的仿真机制,介绍了蒙特卡罗仿真的基本原理,并给出了应用案例;第 4 章介绍了系统建模与仿真的随机数和随机变量的概念及生成原理和方法,最后作为特例介绍了 Witness 随机分布函数及其生成;第 5~7 章分析了仿真软件的发展历程,介绍了生产系统仿真软件的概念和特点,并以 Witness 软件为重点,介绍了仿真软件的功能、元素的定义和组成及其应用步骤,并以单排队加工系统、库存系统、

供应链系统为例，给出了仿真和优化案例。

参加本书编写的有武福(第1章)、李忠学(第2章)、雷斌(第3章、第4章)、王海涌(第5章、第6章6.1节)、杨喜娟(第6章6.2节、第7章)，武福对全书进行了统稿。此外，兰州交通大学的吴国祥，兰州理工大学的常蓬浩，兰州工业学院的刘瑞玲，参与了部分章节的撰写与校订工作，裴明高、崔丽婷、马超、张治娟、朱正凯、武乡等学生在文献检索、材料准备等方面做了大量工作，在此谨致谢意。

本书的编写得到了祁文哲教授自始至终的指导与帮助，在此，致以衷心的感谢。

本书的编写还引用和参考了许多专家、学者的研究成果，谨致谢意。

鉴于本书涉及的知识面非常广，加之编者水平所限，书中不可避免地存在着诸多的不足，恳请广大读者批评指正。

本书获甘肃省高等学校基本科研业务费专项资金项目(212085, 211124)资助。

编者

2014年1月

# 目 录

|                        |    |
|------------------------|----|
| 第 1 章 绪论               | 1  |
| 1.1 系统、模型与仿真的基本概念      | 1  |
| 1.1.1 系统、模型与仿真         | 1  |
| 1.1.2 系统建模与仿真的应用       | 4  |
| 1.2 系统建模与仿真的一般步骤       | 6  |
| 1.3 生产系统及其建模分析         | 9  |
| 1.3.1 生产系统的基本概念        | 9  |
| 1.3.2 生产系统的特性分析        | 10 |
| 1.3.3 当前生产系统面临的主要问题    | 10 |
| 1.3.4 生产系统建模与仿真的主要内容   | 11 |
| 思考与练习题                 | 12 |
| 第 2 章 离散事件系统建模方法       | 14 |
| 2.1 离散事件系统模型           | 14 |
| 2.1.1 离散事件系统的基本要素      | 14 |
| 2.1.2 离散事件仿真模型的部件与结构   | 16 |
| 2.2 实体流图法              | 18 |
| 2.2.1 实体流图             | 18 |
| 2.2.2 模型的人工计算运行        | 20 |
| 2.3 活动循环图法             | 22 |
| 2.3.1 活动循环图法的原理及建模方法   | 22 |
| 2.3.2 仿真分析规则和人工仿真运行    | 25 |
| 2.3.3 具有逻辑实体和到达活动的 ACD | 27 |
| 2.3.4 活动循环图法与实体流图法的比较  | 28 |
| 2.4 Petri 网建模方法        | 29 |
| 2.4.1 Petri 网的基本概念     | 29 |
| 2.4.2 条件/事件系统          | 35 |
| 2.4.3 库所/变迁网           | 37 |
| 2.5 面向对象的建模方法与统一建模语言   | 41 |
| 2.5.1 面向对象的概念          | 41 |
| 2.5.2 面向对象分析与设计        | 42 |
| 2.5.3 对象建模技术           | 43 |
| 2.5.4 统一建模语言           | 44 |
| 2.6 库存系统模型             | 49 |

|                               |            |
|-------------------------------|------------|
| 2.6.1 库存系统的基本概念.....          | 49         |
| 2.6.2 确定型库存模型.....            | 52         |
| 2.6.3 随机型库存模型.....            | 56         |
| 思考与练习题.....                   | 59         |
| <b>第3章 离散事件系统仿真方法</b> .....   | <b>61</b>  |
| 3.1 离散事件系统仿真基本策略.....         | 61         |
| 3.1.1 事件调度法.....              | 61         |
| 3.1.2 活动扫描法.....              | 63         |
| 3.1.3 三段扫描法.....              | 66         |
| 3.1.4 进程交互法.....              | 67         |
| 3.2 仿真时钟推进机制.....             | 71         |
| 3.3 消息驱动的仿真机制.....            | 76         |
| 3.4 蒙特卡罗方法.....               | 82         |
| 3.4.1 蒙特卡罗方法的基本思想.....        | 82         |
| 3.4.2 蒙特卡罗方法的应用.....          | 84         |
| 3.5 离散事件系统仿真的一般步骤.....        | 85         |
| 思考与练习题.....                   | 88         |
| <b>第4章 随机数与随机变量的生成</b> .....  | <b>89</b>  |
| 4.1 随机数的生成及其性质.....           | 89         |
| 4.2 几种常见的随机数发生器.....          | 90         |
| 4.2.1 平方取中发生器.....            | 90         |
| 4.2.2 线性同余发生器.....            | 91         |
| 4.2.3 组合发生器.....              | 94         |
| 4.3 随机变量的生成.....              | 94         |
| 4.3.1 反变换法.....               | 94         |
| 4.3.2 卷积法.....                | 97         |
| 4.3.3 组合法.....                | 98         |
| 4.3.4 舍选法.....                | 99         |
| 4.4 Witness 随机分布函数.....       | 101        |
| 4.4.1 伪随机数流 PRNS.....         | 101        |
| 4.4.2 随机分布函数.....             | 102        |
| 思考与练习题.....                   | 110        |
| <b>第5章 Witness 仿真基础</b> ..... | <b>111</b> |
| 5.1 常用生产系统仿真软件介绍.....         | 111        |
| 5.2 Witness 的工作环境.....        | 114        |
| 5.3 Witness 仿真基础.....         | 115        |
| 5.3.1 Witness 元素.....         | 115        |
| 5.3.2 Witness 规则.....         | 124        |
| 5.3.3 Witness 程序设计基础.....     | 130        |

|                                             |            |
|---------------------------------------------|------------|
| 5.3.4 Witness 常用系统函数 .....                  | 134        |
| 思考与练习题 .....                                | 141        |
| <b>第 6 章 基于 Witness 的生产系统可视化建模与仿真 .....</b> | <b>142</b> |
| 6.1 Witness 可视化建模与仿真的过程 .....               | 142        |
| 6.2 Witness 可视化建模与仿真过程应用实例 .....            | 147        |
| 6.2.1 定义元素(Define) .....                    | 148        |
| 6.2.2 元素可视化(Display)设置 .....                | 148        |
| 6.2.3 元素细节(Detail)设计 .....                  | 151        |
| 6.2.4 仿真运行(Run) .....                       | 153        |
| 6.2.5 报告(Report) .....                      | 153        |
| 思考与练习题 .....                                | 154        |
| <b>第 7 章 典型生产系统的 Witness 仿真应用实例 .....</b>   | <b>155</b> |
| 7.1 基于 Witness 单排队系统(加工系统)的仿真 .....         | 155        |
| 7.2 基于 Witness 库存系统的设计与优化 .....             | 161        |
| 7.3 基于 Witness 供应链系统的设计与优化 .....            | 171        |
| 7.4 液体灌装线的仿真设计 .....                        | 176        |
| 7.5 基于 Witness 混合流水线系统的设计与优化 .....          | 185        |
| 思考与练习题 .....                                | 194        |
| <b>参考文献 .....</b>                           | <b>196</b> |

# 第1章 绪 论

## 1.1 系统、模型与仿真的基本概念

### 1.1.1 系统、模型与仿真

#### 1. 系统

“系统”一词是随着美籍奥地利生物学家创立的“一般系统论”而开始流行起来的。系统论是指“从更一般的意义上制定出适用于各种系统的原理和模型，而不讨论它们的特殊种类、元素及其所包含的各种力”。

所谓系统，是一组对象的集合或总和，它们按照某些规律结合起来，相互作用、相互依存，来达到某种特定的目的。例如，我们可以将制造汽车的总装生产线定义为一个系统，各种汽车零部件按一定的节拍由传送带运输，经过一道道工序，操作人员(或机器人)将零部件按工艺流程要求进行装配，最终生产出各种汽车。工人、机器以及零部件等为生产高质量的交通工具而组织起来，一起在装配线上运作。在该系统中，操作人员与零部件相互作用，传送带的速度、零部件到达的节拍均影响着操作人员的忙闲状态和工作的紧张程度，而工艺的划分、零部件到达的及时性也影响着生产线的效率。

系统可以分为离散系统和连续系统两大类，如图 1.1 所示。离散系统是指状态变量只在某个离散的时间点集合上发生变化的系统；连续系统则是指状态变量随时间连续变化的系统。

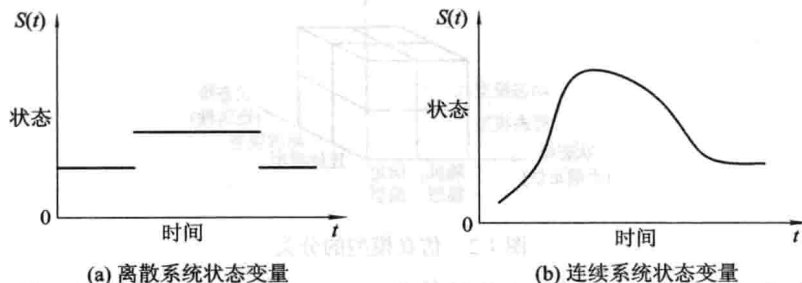


图 1.1 离散系统与连续系统

实际上很少有系统是完全离散或完全连续的，但对于大多数系统来说，由于某一类型的变化占主导地位，因此会将系统划分为离散的或连续的。

尽管世界上的事物是相互联系的，但当对某一对象进行研究的时候，总是要将该对象

与其所处的环境区别开来。因此，在定义一个系统时，首先要明确系统的边界。边界确定了系统的范围，边界以外对系统的作用称为系统的输入，系统对边界以外的环境的作用称为系统的输出。

系统边界的选取，有时依赖于研究的目的。例如，在工厂系统中，控制订单到达的因素可以被认为是处于工厂的影响之外，因此属于环境的一部分。然而，如果考虑供应对需求的影响，则在工厂输出和订单到达之间将会存在一种关系，而这一关系被认为是系统的一个活动。

为了对系统进行描述，人们总结出系统的“三要素”，即实体、属性和活动。所谓的实体，是指组成该系统的具体对象，例如，某商品销售系统中的实体有经理、部门、商品、货币和仓库等。实体确定了系统的构成，也就确定了系统的边界。属性是指这些实体所具有的每一项有效特性，如部门的属性有人员数量、职能范围，商品的属性有生产日期、进货价格、销售日期、销售价格等。属性也称为描述变量，描述每一个实体的特征，其中系统的状态属性对研究对象在任意时刻的描述来说是必要的。活动是指随着时间的推移，在系统内部由于各种原因而发生的变化过程，如在该商品销售系统中库存商品数量的变化、零售商品价格的生长等。活动定义了系统内部实体之间的相互作用，从而确定了系统内部发生变化的过程。

## 2. 模型

模型被定义为“用于研究目的的系统的表示”，是对现实世界的一种抽象。它描述了现实世界中实际系统的某些主要特点或属性，具有以下三个方面的特征：

- (1) 它是对现实世界一部分的抽象或模仿。
- (2) 它由与分析问题有关的因素构成。
- (3) 它表明了有关因素间的相互关系。

一般来说，模型可以划分为图形与实物模型和数学(分析)模型两大类。数学模型是使用符号标记和数学方程来对系统进行描述的。仿真模型则是系统的一类特殊数学模型，它又可以划分为静态的或动态的、确定的或随机的、离散的或连续的，如图 1.2 所示。

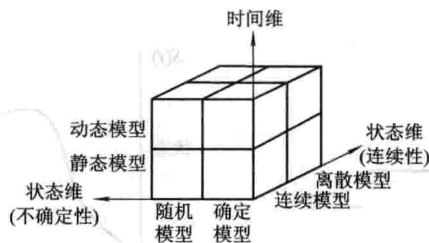


图 1.2 仿真模型的分类

从定义上看，一方面，模型是系统的简化；另一方面，又要求模型必须足够详细，以便能够对真实的系统得出有效的结论。开发模型的目的是将模型作为替代来帮助人们对原物进行假设、定义、探索、理解、预测、设计，或与原物的某一部分进行通信。为了研究、分析、设计和实现一个系统，需要进行实验。实验的方法基本上可分为两大类：一种是直接在真实系统上进行；另一种是先构造模型，通过对模型的实验来代替或部分代替对真实

系统的实验。传统上大多采用第一种方法,随着科学技术的发展,尽管第一种方法在某些情况下仍然是必不可少的,但第二种方法正逐渐成为人们更为常用的方法,其主要原因在于:

(1) 系统还处于设计阶段,真实的系统尚未建立,人们需要更准确地了解未来系统的性能,这只能通过对模型的实验来了解。

(2) 在真实系统上进行实验可能会破坏系统或引发故障。

(3) 需要进行多次实验时,难以保证每次实验的条件相同,因而无法准确判断实验结果的优劣。

(4) 实验后,系统难以复原。

(5) 实验时间太长或费用昂贵。

因此,用模型来进行实验已成为科学研究与工程实践中不可缺少的手段,日益为人们所青睐。

### 3. 仿真

1961年,摩根扎特(G.W.Morgenthater)首先对“仿真”进行了技术性定义,即“在实际系统尚不存在的情况下,对系统或活动本质的实现”。接着科恩(G.A.Korn)于1978年在其所著的《连续系统仿真》一书中将仿真定义为“用能代表所研究的系统的模型做实验”。1982年,斯普瑞特(J. Spriet)进一步将仿真概念的内涵加以扩充,将其定义为“所有支持模型分析的活动为仿真活动”。奥伦(Oren)于1984年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,这被认为是现代仿真技术的一个重要概念。

根据模型的类型(物理属性),系统仿真可以分成物理仿真、数学仿真和物理—数学仿真。物理仿真是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。数学仿真是按照真实系统的数学关系构造系统的数学模型,并在数学模型上进行实验。数学仿真的特点是经济、方便。计算机为数学模型的建立与实验提供了较大的灵活性,目前的数学仿真一般就是在计算机上建立系统的数学模型并进行实验。因此数学仿真通常也称为计算机仿真。物理—数学仿真就是把系统的一部分写成数学模型,而对另一部分则构造其物理模型,然后将它们连接成系统模型进行实验,也称为半实物仿真。

根据仿真中所用计算机的类型,系统仿真又可以分为模拟仿真、数字仿真和混合仿真。

根据仿真的研究对象,系统仿真可以分成连续系统仿真、离散事件系统仿真和混合系统仿真。

综上所述,系统、模型和仿真三者之间有密切的关系。系统是研究的对象,模型是系统的抽象,仿真通过对模型的实验以达到研究系统的目的。

从应用的角度来看,仿真是一个设计和建立实际系统或所设想系统的计算机模型的过程,以便通过数值实验来更好地理解系统在给定条件下的行为。仿真可以再现系统的状态、动态行为及性能特征,用于分析系统配置是否合理、性能是否满足要求,预测系统可能存在的缺陷,为系统的设计提供决策支持和科学依据。现代仿真技术大多是在计算机支持下进行的,因此,系统仿真也往往被称为计算机仿真,即借助于专门的计算机软件来模仿实际系统的运作或特征(通常随时间变化),进而来研究各种不同的系统模型。尽管也可以用

它来研究一些简单系统,但只有在研究复杂系统时,其威力才能真正地发挥出来。

计算机仿真包含了系统建模、仿真建模和仿真实验三个基本的活动。联系这三个活动的是系统仿真的三要素,即系统、模型和计算机(包括硬件和软件)。三者之间的关系可用图 1.3 来描述。

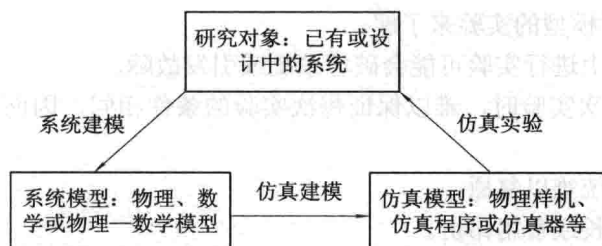


图 1.3 计算机仿真的要素与内容

### 1.1.2 系统建模与仿真的应用

仿真是分析、评价和优化系统性能的一种技术手段。与运筹学(优化)模型等相比,仿真模型无需对系统作过多简化,能更真实地反映系统的结构和性能特征。优化模型通常仅给出优化结果,而仿真可以再现系统的动态运行过程。

目前,数字化仿真已广泛应用于产品开发和制造系统研制过程中,成为系统方案论证、规划设计、参数及性能优化研究的有效工具。表 1.1 总结了仿真技术在新产品开发及制造系统中的应用。

表 1.1 仿真技术在新产品开发及制造系统中的应用

| 阶 段   | 应 用 内 容                                    |
|-------|--------------------------------------------|
| 概念化设计 | 对产品或制造系统的设计方案进行技术、经济分析及可行性论证               |
| 设计建模  | 建立零部件及制造系统模型,以判断产品造型、结构及物理特性是否满意           |
| 设计分析  | 仿真分析零部件及制造系统的运动学、静力学、动力学、可靠性等性能            |
| 设计优化  | 优化系统材料、结构、配置及参数,实现系统性能的优化                  |
| 制造    | 通过对加工、装配及生产工艺的仿真,评价系统的制造工艺和制造成本等           |
| 样机试验  | 通过虚拟样机试验,分析系统的动态性能指标,并调整系统结构及参数,实现性能的改进及优化 |

对制造企业而言,系统建模与仿真技术可以从以下几个方面提升企业的竞争力:

(1) 有利于提高产品及制造系统的开发质量。传统的机械产品或制造系统开发多以满足基本使用要求为准则。市场竞争的加剧和相关技术的发展,使得产品及系统全寿命周期的综合性能(如交货期、质量、成本以及服务等)最优成为设计的核心准则。

然而,物理仿真往往难以复现产品或系统在全寿命周期内可能出现的各种复杂工作环境,或因复现环境的代价太高而难以付诸实施。数字化仿真技术可以克服上述缺点,在产品或制造系统未实际开发出来之前,研究系统在各种工作环境下的表现,以保证系统具有良好的综合性能。

(2) 有利于缩短产品的开发周期。传统的产品开发遵循设计、制造、装配、样机试验的串行开发模式,而简单的计算分析难以准确地预测被设计产品的实际性能,通常需通过样机试制和样机试验结果,确定设计方案的优劣,以便修改、完善设计。因此,产品开发过程复杂、成功率低、周期长。采用数字化仿真技术,可以在计算机上完成产品的概念设计、结构设计、加工、装配以及系统性能的仿真,提高设计的一次成功率,缩短设计周期。

据报道,美国 Boeing 公司 777 型飞机的开发广泛采用了数字化仿真技术,在计算机和网络环境中完成飞机设计、制造、装配及试飞的全部过程,取消了传统的风洞试验、上天试飞等物理仿真及试验环节,使开发周期由原先的 9~10 年缩短为 4.5 年。Boeing 777 的全数字和无纸化生产,充分展现了数字化仿真的强大作用,开创了复杂制造系统开发的全新模式。

(3) 有利于降低产品及制造系统的开发成本。数字化仿真以虚拟样机代替实际样机或模型进行试验,能显著地降低开发成本。例如,汽车车身覆盖件的设计不仅要考虑运行阻力、外观造型等因素,还要考虑汽车受到碰撞时车上人员的安全性因素。在传统的车身覆盖件开发中,每种车型都要进行撞车试验,以验证车身的变形状况,多者需要毁坏十几辆车。基于计算机软件的撞车试验,可以减少碰撞试验的次数甚至取消撞车试验,从而极大地降低开发成本。

目前, Ford、BMW、FIAT、Volvo 等世界领先汽车制造企业的汽车新产品开发已经彻底摒弃了传统的开发模式。在基于网络系统的开发及制造环境下,传统的串行工程和物理样机的开发模式已经被并行开发过程所取代,从产品的概念设计、样机制造到样机性能试验及修改完善等所有环节都在计算机和网络环境中完成,从而极大地加快了新产品的开发速度,降低了开发成本,使企业在激烈的市场竞争中保持优势。

(4) 可以完成复杂产品或系统的操作培训。对于复杂产品或技术系统(如飞机、核电站)而言,系统操作人员必须经过严格培训。但是,若以真实产品或系统进行培训,成本高,且存在很大风险。采用数字化仿真技术,可以再现系统运行过程,模拟系统的各种状态,甚至可以设计出各种“故障”和“险情”,使操作人员接受全面而系统的训练,既降低了培训成本,也能取得很好的培训效果。

除制造系统外,系统建模与仿真技术还广泛应用于军事、工程建设、管理、物流、交通运输、商务、商业等领域。表 1.2 列举了系统建模与仿真技术的部分应用。

表 1.2 系统建模与仿真技术的应用领域

| 应用领域    | 应用 举 例                                                                                               |
|---------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 机械制造    | 切削加工车间生产调度、注塑模具制造与工艺仿真、汽车发动机加工工艺优化、FMS 生产平衡分析与参数优化、冲压件加工质量评估、机床传动系统可靠性评价、摩托车装配线瓶颈工序分析、轧钢厂生产流程优化、虚拟制造 |
| 半导体制造   | 半导体制造中的在制品控制、晶圆生产工艺及参数优化、晶圆生产线的调度优化                                                                  |
| 工程与项目管理 | 水电站选址、港口建设项目效益评估、机场建设调度优化、项目工期预测、项目管理优化、项目环境评估、项目成本预算、项目的技术可行性论证                                     |

续表

| 应用领域       | 应用举例                                                                     |
|------------|--------------------------------------------------------------------------|
| 军事         | 信息战环境模拟、武器效能仿真、新型装备操作培训、虚拟现实的三维作战环境构建、后勤保障系统评估、多兵种联合作战效果分析、载人航天飞船发射全过程仿真 |
| 物流及供应链管理   | 企业最佳库存分析、FMS 中物流瓶颈工序分析、企业供应链优化、车站进出站口规划、企业物资采购计划、图书馆及教学楼布局优化、汽车销售配送中心选址  |
| 交通运输       | 飞机航班调度、城市交通瓶颈预测、公交车辆调度、新机场选址、城市消防通道优化、铁路机车调度、运输企业效益评价、天然气管线优化、高速公路网规划    |
| 商业、服务及社会系统 | 超市收银台数量优化、114 查号台规模分析、自动取款机选址、医院急诊室布局、医院诊疗系统优化、银行网点布局、食堂布局、天气预报、区域人口数量预测 |

## 1.2 系统建模与仿真的一般步骤

本书的主要研究对象是制造系统，属于离散事件系统。如前所述，离散事件系统即在某个时间点上发生事件时，系统状态才会发生改变的模型。当采用数学模型研究此类系统的性能时，模型求解大致可分为两类方法，即解析法(Analytical Method)和数值法(Numerical Method)。

解析法采用数学演绎推理的方法求解模型。例如，采用 ABC 法优化库存成本；采用单纯形法求解最佳运输路线问题等。与解析法不同，数值法在对一定假设和简化的基础上建立系统模型，通过运行系统模型来“观测”系统的运行状况，通过采集和处理“观测”数据来分析和评价实际系统的性能指标。显然，采用离散事件系统仿真求解模型的方法可归类为数值法。图 1.4 分析了系统实验、模型以及数学模型求解方法之间的关系。

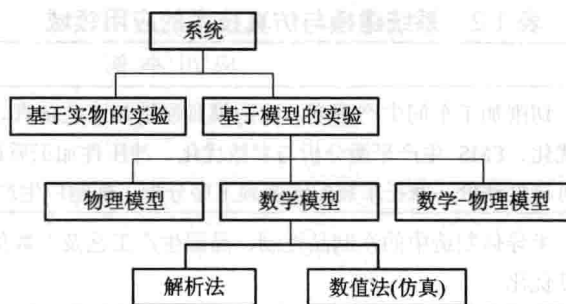


图 1.4 系统实验与模型求解之间的关系

系统建模与仿真的目的是分析实际系统的性能特征。图 1.5 给出了系统建模和仿真的应用步骤，总体上可分为系统分析、数学建模、仿真建模、仿真实验、仿真结果分析以及模型确认等步骤，以下简要分析各步骤的基本功能。

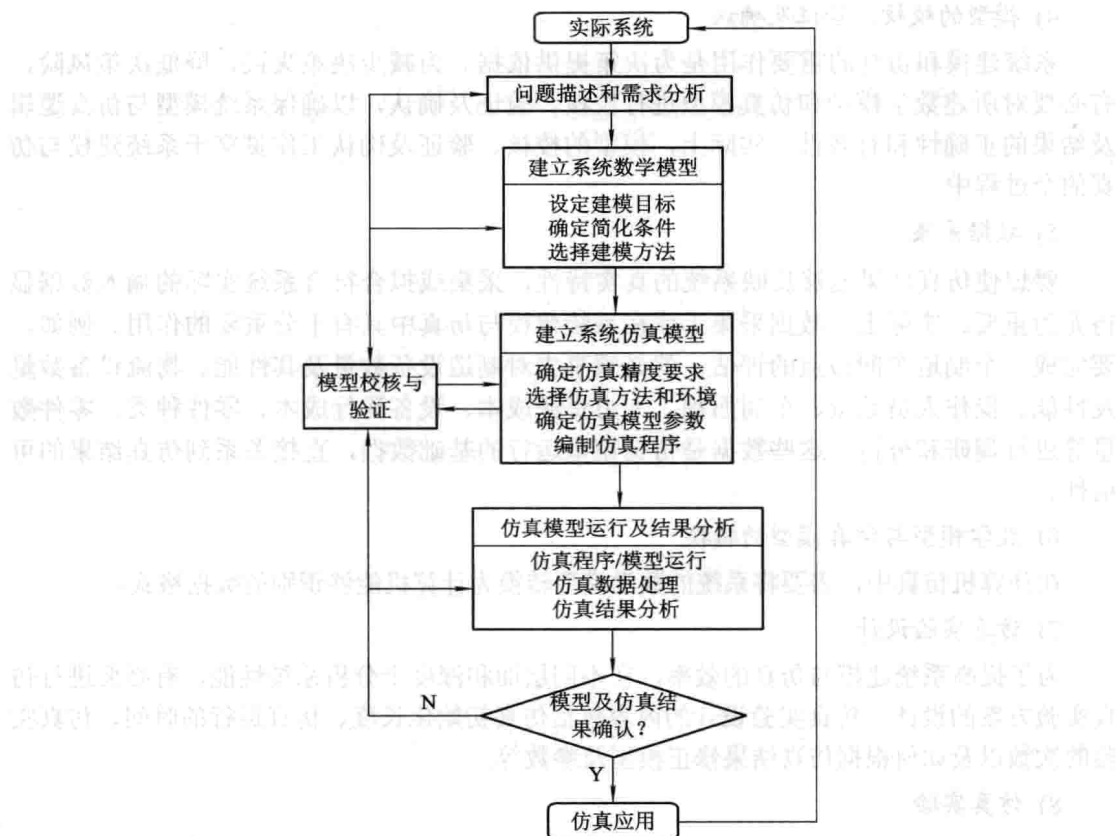


图 1.5 系统建模与仿真应用的基本步骤

### 1) 问题描述与需求分析

建模与仿真的应用源于系统研发需求，因此应首先明确被研究系统的组成、结构、参数和功能等，划定系统的范围和运行环境，提炼出问题的主要特征和元素，以便对系统建模和仿真研究作出准确的定位和判断。

### 2) 设定研究目标和计划

优化和决策是系统建模与仿真的目的。根据研究对象的不同，建模和仿真的目标包括性能最好、产量最高、成本最低、效率最高、资源消耗最小等。

根据研究目标，确定拟采用的建模与仿真技术，制定建模与仿真研究计划，包括技术方案、技术路线、时间安排、成本预算、软硬件条件以及人员配置等。

### 3) 建立系统的数学模型

为保证所建模型符合真实系统，反映问题的本质特征和运行规律，在建立模型时要准确把握系统的结构和机理，提取关键的参数和特征，并采取正确的建模方法。按照由粗到精、逐步深入的原则，不断细化和完善系统模型。需要指出的是，数学建模时不应追求模

型元素与实际系统的一一对应关系，而应通过合理的假设来简化模型，关注系统的关键元素和本质特征。此外，应以满足仿真精度为目标，避免使模型过于复杂，以降低建模和求解的难度。

#### 4) 模型的校核、验证及确认

系统建模和仿真的重要作用是为决策提供依据。为减少决策失误，降低决策风险，有必要对所建数学模型和仿真模型进行校核、验证及确认，以确保系统模型与仿真逻辑及结果的正确性和有效性。实际上，模型的校核、验证及确认工作贯穿于系统建模与仿真的全过程中。

#### 5) 数据采集

要想使仿真结果能够反映系统的真实特性，采集或拟合符合系统实际的输入数据显得尤为重要。实际上，数据采集工作在系统建模与仿真中具有十分重要的作用。例如，要完成一个制造车间效益的评估，就必须事先对制造设备数量及其性能、物流设备数量及性能、操作人员数量、车间面积、人力资源成本、设备运行成本、零件种类、零件数量等进行调研和分析。这些数据是仿真模型运行的基础数据，直接关系到仿真结果的可信性。

#### 6) 数学模型与仿真模型的转换

在计算机仿真中，需要将系统的数学模型转换为计算机能够识别的数据格式。

#### 7) 仿真实验设计

为了提高系统建模与仿真的效率，在不同层面和深度上分析系统性能，有必要进行仿真实验方案的设计。仿真实验设计的内容包括仿真初始化长度、仿真运行的时间、仿真实验的次数以及如何根据仿真结果修正模型及参数等。

#### 8) 仿真实验

仿真实验是运行仿真程序、开展仿真研究的过程，也就是对所建立的仿真模型进行数值试验和求解的过程。不同的仿真模型有不同的求解方法。离散事件系统的仿真模型通常是概率模型。因此，离散系统仿真一般为数值试验的过程，即测试当参数符合一定概率分布规律时系统的性能指标。值得指出的是，不同类型的离散事件系统具有不同的仿真方法。

#### 9) 仿真数据处理及结果分析

从仿真实验中提取有价值的信息，以指导实际系统的开发，是仿真的最终目标。早期仿真软件的仿真结果多以大量数据的形式输出，需要研究人员花费大量的时间整理、分析仿真数据，以便得到科学的结论。

目前，仿真软件中广泛采用图形化技术，通过图形、图表、动画等形式显示被仿真对象的各种状态，使得仿真数据更加直观、丰富和详尽，这也有利于人们对仿真结果的分析。另外，应用领域及仿真对象不同，仿真结果的数据形式和分析方法也不尽相同。

#### 10) 优化和决策

根据系统建模和仿真得到的数据和结论，改进和优化系统结构、参数、工艺、配置、布局及控制策略等，实现系统性能的优化，并为系统决策提供依据。

## 1.3 生产系统及其建模分析

### 1.3.1 生产系统的基本概念

从系统的角度来考察产品的生产过程,就得出生产系统的概念。按照国际生产工程科学院(CIRP)对生产系统所下的定义,生产系统即“生产产品的制造企业的一种组织体,它具有销售、设计、加工、交货等综合功能,并有提供服务的研究开发功能”。在这一定义的基础上,人们进一步地把供应商和用户也作为生产系统的组成部分纳入其中。

生产是一切社会组织的基本活动之一。作为企业系统的一个子系统,生产系统体现为一个有序的把各种生产要素的输入转换为产品的输出过程。它包括以下三个基本的组成部分:

- (1) 输入(或投入)。它主要是指加工对象及其他生产要素,如原材料、资料和能源等。
- (2) 转换过程(或生产过程)。它是指如何进行实体上的转换,如制造;如何进行位置上的转换,如运输;如何进行服务商的转换,如医疗及娱乐等。
- (3) 输出(或产出)。它是指系统通过转换过程形成并输出的结果,如一种有形的产品或者无形的服务。

生产系统的基本框图如图 1.6 所示,虚线方框内表示一个生产系统,大方框外表示生产系统所处的外界环境。

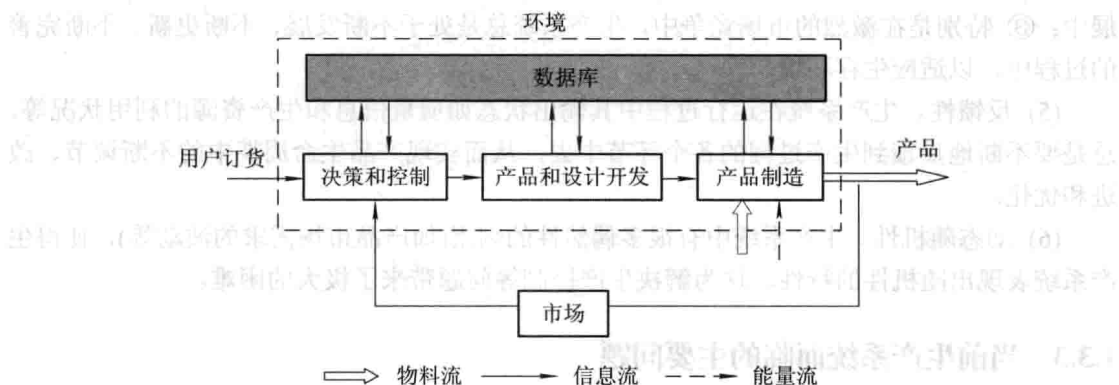


图 1.6 生产系统的基本框图

整个生产过程分为三个阶段:

① 决策和控制阶段,由工厂最高决策层根据生产动机、技术知识、经验以及市场情况,对所生产的产品类型、数量等作出决定,同时对生产过程进行指挥与控制。

② 产品设计和开发阶段。

③ 产品制造阶段,在此阶段必须从外部输入必要的能源和物质(如材料等)。

经过上述三个阶段的生产活动,系统最后输出所生产的产品。产品输出后,应及时地将产品在市场上的竞争能力、质量评价和用户的改进要求等信息反馈到决策机构,以便使