

21 世纪

普通高等教育规划教材

第 2 版

制造系统建模与仿真

Modeling and Simulation for Manufacturing System

苏 春 编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

014057268

TH16
206-2

21世纪普通高等教育规划教材

制造系统建模与仿真 第2版

苏 春 编著
李小宁 主审



TH16
206-2



机械工业出版社



北航

C1745909

系统建模与仿真是利用模型来分析、评价和优化系统性能的相关技术。目前,该技术已经在产品研发、制造系统规划设计、企业选址、车间布局、生产计划与调度、供应链管理等领域得到广泛应用。

本书以机械制造系统、物流系统等为对象,在分析系统和制造系统定义、组成与特点的基础上,介绍系统建模与仿真的基本概念及原理,阐述系统建模与仿真的基本元素、常用方法及其应用步骤,分析离散事件系统建模与仿真的关键技术,简要介绍主流制造系统仿真软件的功能、特点及其应用领域,并以 ProModel 软件为重点,介绍仿真软件的建模元素及其使用步骤。书中提供了大量制造(生产)系统建模和仿真的研究案例,并配有习题。

书中既有系统建模与仿真基本原理、概念和方法的阐述,也有典型仿真案例的构建与应用。本书可以作为工业工程、机械工程、物流工程、系统工程、管理工程等专业本科生及硕士研究生相关课程的教材,也可供从事制造系统设计、新产品研发、生产调度、物流设施规划等领域的技术及管理人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

制造系统建模与仿真/苏春编著. —2版. —北京:机械工业出版社, 2014. 7
21世纪普通高等教育规划教材
ISBN 978-7-111-47056-4

I. ①制… II. ①苏… III. ①机械制造—系统建模—高等学校—教材②机械制造—计算机仿真—高等学校—教材 IV. ①TH16

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第126949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:裴 泱 责任编辑:裴 泱 杨 茜 韩 冰
版式设计:赵颖喆 责任校对:丁丽丽
封面设计:张 静 责任印制:李 洋
北京瑞德印刷有限公司印刷(三河市胜利装订厂装订)
2014年9月第2版第1次印刷
184mm×260mm·18.5印张·452千字
标准书号:ISBN 978-7-111-47056-4
定价:37.00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

制造业是国民经济的支柱产业,制造系统是制造业的基本组成单元。从产业规模和产值等角度,我国已成为全球范围内的制造业大国。但是,由于在系统选型、参数配置以及生产运作等方面存在问题,导致制造系统运行效率低、经济效益差,已经成为制约我国由“制造业大国”向“制造业强国”转变的一个重要因素。

仿真是一种基于模型的活动,它通过对系统模型的试验以达到研究系统的目的。系统建模与仿真技术可以再现系统的状态和动态行为、分析系统配置是否合理、预测系统可能存在的缺陷、判断系统性能是否满足要求,为制造系统的设计和优化提供决策支持。目前,系统建模与仿真技术已广泛应用于制造企业选址、产品研发、车间调度和生产管理等过程中。

本书以机械制造系统和物流系统等为研究对象,在分析系统定义和特征的基础上,阐述制造系统建模与仿真的基本概念、原理和方法,介绍制造系统建模与仿真主流软件的功能、特点及其使用步骤。全书不仅注重理论体系的完整性,还在相关章节以制造系统、物流系统以及服务系统等为对象,给出大量建模与仿真的应用案例。

本书共分7章。第1章分析了系统和制造系统定义、组成与特点,介绍系统建模与仿真的基本概念和步骤,并给出应用案例;第2章在分析离散事件系统模型的分类和元素组成的基础上,介绍建立系统模型的常用方法;第3章介绍系统建模与仿真中的随机变量、随机分布和随机分布的数字特征等概念,论述随机数和随机变量的生成原理;第4章以制造系统为对象,介绍系统建模的主要方法,如马尔可夫过程、Petri网理论、排队系统模型以及库存模型等;第5章在分析仿真程序及仿真软件架构的基础上,分析常用的仿真调度策略和仿真时钟推进机制,介绍蒙特卡洛仿真和系统动力学仿真的基本原理,并给出应用案例;第6章简要介绍系统建模与仿真中校核、验证以及确认的概念和方法;第7章分析了仿真语言和仿真软件的发展历程,介绍主流制造系统仿真软件的功能、特点及应用领域,以ProModel软件为重点,介绍软件的界面组成、模型元素的功能以及使用步骤,并以板材加工柔性制造系统、汽车发动机再制造生产线等为例,给出仿真和优化案例。

本书由东南大学机械工程学院苏春教授编著,由南京理工大学李小宁教授主审。教材的编写工作得到东南大学教务处立项支持,部分研究内容受到国家自然科学基金以及江苏省“六大人才高峰”等项目的资助,研究生沈戈、王圣金、黄茁、卢山、王胜友、孙瑜、姜有海、程虎彪、张恒、安政、张烨、彭熠东、曹白雪等在项目研究及教材编写工作中作出了贡献,谨在此表示感谢。在教材编写过程中,作者参考了大量文献,在此谨向原文献作者表示感谢。

系统建模与仿真是一门快速发展的学科。由于作者水平所限,书中难免有不足和错误之处,敬请读者批评、指正。

编 者

目 录

前言		
第1章 绪论	1	
1.1 系统与制造系统	1	
1.1.1 什么是系统	1	
1.1.2 制造系统的组成与特点	2	
1.2 系统建模与仿真的基本概念	5	
1.2.1 系统、模型与仿真的关系	5	
1.2.2 系统建模与仿真技术的功用	7	
1.3 制造系统建模与仿真的基本概念	9	
1.3.1 制造系统建模与仿真的特点分析	9	
1.3.2 制造系统的建模元素及常用术语	10	
1.3.3 制造系统仿真研究的目的	12	
1.4 系统建模与仿真的步骤	14	
1.5 案例研究：连杆生产线的建模与仿真	16	
1.5.1 连杆生产线的组成与功能	16	
1.5.2 连杆生产线仿真模型的构建	16	
1.5.3 仿真逻辑定义	18	
1.5.4 仿真结果分析与系统优化	18	
习题	20	
第2章 系统建模与仿真的基本原理	23	
2.1 系统及其模型分类	23	
2.2 系统建模的基本元素	24	
2.3 系统仿真程序的基本结构	26	
2.4 建立系统模型的常用方法	27	
2.4.1 分析与综合	28	
2.4.2 抽象与概括	29	
2.4.3 归纳与总结	31	
2.4.4 演绎与推理	32	
2.4.5 比较与类比	34	
2.4.6 概率统计法	35	
2.4.7 层次分析法	38	
2.4.8 模糊综合评价	40	
习题	47	
第3章 随机变量和随机分布	49	
3.1 随机变量和随机分布概述	49	
3.1.1 离散型随机变量	49	
3.1.2 连续型随机变量	52	
3.1.3 随机变量的数字特征	54	
3.1.4 常用随机分布类型及其特性	58	
3.1.5 随机变量的经验分布	71	
3.1.6 随机分布的参数估计	74	
3.1.7 随机分布的假设检验	80	
3.2 随机数的生成方法	80	
3.2.1 随机数的特性	81	
3.2.2 随机数发生器的设计	82	
3.3 随机数发生器的检验	85	
习题	88	
第4章 制造系统的建模方法	93	
4.1 系统建模方法概述	93	
4.2 马尔可夫过程	94	
4.3 Petri 网建模理论	96	
4.3.1 Petri 网的基本概念	97	
4.3.2 Petri 网的扩展形式	101	
4.3.3 Petri 网中的事件关系分析	109	
4.3.4 基于 Petri 网的系统性能分析	111	
4.3.5 案例研究：基于 Petri 网的液压系统可靠性建模与评估	119	
4.4 排队系统模型	127	
4.4.1 排队系统的基本概念	127	
4.4.2 排队系统的分类符号	131	
4.4.3 排队系统的性能指标	132	
4.4.4 顾客到达时间间隔和服务时间分布	134	
4.4.5 案例研究：基于排队论的制造系统建模与手工仿真	138	
4.5 库存系统模型	141	
4.5.1 库存及库存系统的定义与功能	141	
4.5.2 库存系统模型	143	
4.5.3 案例研究：汽车 4S 店库存系统建模与仿真	148	

习题	152
第5章 制造系统的仿真方法	155
5.1 系统仿真的调度策略	155
5.1.1 事件调度法	156
5.1.2 活动扫描法	158
5.1.3 进程交互法	161
5.1.4 消息驱动法	163
5.2 仿真时钟推进机制	165
5.3 蒙特卡洛仿真	169
5.3.1 蒙特卡洛仿真的基本概念	169
5.3.2 案例研究：基于蒙特卡洛仿真的 系统动态可靠性评估	171
5.4 系统动力学仿真	187
5.4.1 系统动力学仿真的基本概念	187
5.4.2 系统动力学仿真的应用步骤	188
5.4.3 案例研究：基于系统动力学仿真 的供应链库存优化	189
习题	198
第6章 系统建模与仿真的校核、验证 与确认	199
6.1 校核、验证与确认概述	199
6.1.1 校核、验证与确认的基本概念	200
6.1.2 校核、验证与确认的基本原则	201
6.1.3 校核、验证与确认的实施过程	202
6.2 建模与仿真校核、验证的基本方法	203
6.2.1 建模与仿真的校核与验证技术	203
6.2.2 模型验证的常用方法	207
习题	213

第7章 面向制造系统的仿真软件与仿真 案例研究	214
7.1 仿真软件系统及其发展现状	214
7.2 面向制造系统的仿真软件简介	217
7.2.1 Arena	217
7.2.2 ProModel	219
7.2.3 Flexsim	220
7.2.4 Extend	222
7.2.5 Witness	223
7.2.6 AutoMod	225
7.2.7 SIMUL8	226
7.3 系统仿真软件的选择	227
7.4 ProModel 软件的模型元素及其使用 步骤	228
7.4.1 ProModel 软件的模型元素	228
7.4.2 ProModel 软件的使用步骤	250
7.5 制造系统建模与仿真的案例研究	251
7.5.1 板材加工柔性制造系统配置与参数 的优化	251
7.5.2 汽车发动机再制造生产线瓶颈工序 分析与性能优化	257
7.5.3 基于仿真和规则的多机并行作业 车间生产调度	270
7.5.4 考虑质量不确定性的再制造系统 动态瓶颈分析	275
习题	282
参考文献	287

第1章

绪论

1.1 系统与制造系统

1.1.1 什么是系统

在与自然界的交往中,人类逐步认识到客观世界的系统性,于是自发地产生了系统(System)的思想。古希腊哲学家德谟克利特(Democritus,约公元前460—公元前370年)在其著作《世界大系统》中就有关于系统的描述:“任何事物都是在联系中显现出来的,都存在于系统中,系统联系规定了每一个事物,而每一个联系又能反映系统联系的总貌。”

我国古代也有不少朴素的系统思想以及利用系统观点改造自然的活动。其中,都江堰工程就是系统思想的典型应用。公元前256年,蜀郡太守李冰及其儿子组织建造都江堰工程,它主要由“鱼嘴”“飞沙堰”和“宝瓶口”三个部分组成(图1-1)。“鱼嘴”因其形如鱼嘴而得名,是都江堰的分水工程。它将汹涌的岷江分隔成外江和内江。外江为岷江主流,主要用于排洪;内江主要用于灌溉,江水通过宝瓶口流入成都平原。“飞沙堰”具有泄洪和排沙功能。当内江水量超过宝瓶口流量的上限时,多余的水便从飞沙堰自行溢出;如遇特大洪水,飞沙堰还会自行溃堤,以便让内江的水回归岷江主流(外江)。此外,当江水超过堰顶时,洪水中夹带的泥沙便会流入外江,以避免内江和宝瓶口水道的淤塞。“宝瓶口”因形状酷似瓶口而得名,它是在玉垒山上人工开凿的一个山口,其主要功能是将内江的水引入成都平原以及控制内江的进水量。

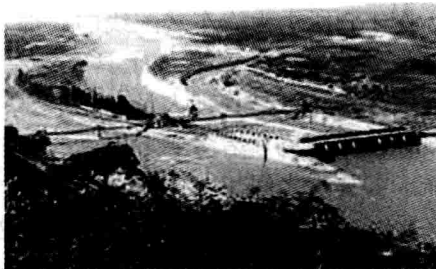


图1-1 都江堰工程

都江堰工程巧妙地利用地形,科学地解决了江水的自动分流、自动排沙和自动控制进水量等难题,起到了“行水灌田,防洪抗灾”的功效,使成都平原获得“天府之国”的美誉。据《史记》记载,都江堰工程使成都平原“水旱从人,不知饥馑,时无荒年,天下谓之‘天府’也”。都江堰是系统工程思想的典型应用,也成为世界水利工程史上的创举。

我国著名学者钱学森(1911—2009)指出:系统是由相互作用、相互依赖的若干组成部分结合而成、具有特定功能的有机整体,而这个有机整体又是它所从属的更大系统的组成部分。总体上,系统具有以下特点:

- 1) 系统是由两个或两个以上要素组成的整体。需要指出的是,要素和系统是一组相对

的概念，它取决于研究的具体对象及其范围。

2) 系统构成要素之间具有一定的联系和秩序，并且在系统内部形成特定的结构。结构就是组成系统的诸要素之间相互关联的方式。

3) 系统具有边界。边界确定了系统的范围，也将系统与周围环境区别开来。系统与环境之间存在物质、能量和信息的交流，通常将边界外部（即环境）对系统的作用称为系统的输入，而将系统对环境的作用称为系统的输出。

系统通常要受到外部环境的影响。例如，对于制造企业来说，采购计划、生产计划、车间调度以及物料配送等生产活动都受到订单到达规律的影响。与系统和要素之间的关系相似，系统和环境也是两个相对的概念。

4) 系统具有特定的功能，有存在的价值和作用，也有着具体的运作目标。

图 1-2 所示为汽车装配线的局部。汽车装配线是由零部件、装配工具、物流设备、操作工人、技术与管理人员、技术要领、操作规范、信息流等诸多要素构成的复杂制造系统。各要素之间相互影响、相互制约、密切相关，它们共同服务于汽车装配这一目标。任何一个系统要素故障或环境的波动变化都可能导致装配线性能的改变，甚至会导致系统瘫痪，造成重大的经济损失。显然，要保证装配线的高效运行，实现系统结构、参数和性能的优化，必须从全局高度分析和设定系统要素，并且要充分考虑对环境的要求以及来自环境的各种影响。



a)



b)

图 1-2 汽车装配线的局部

a) 局部之一 b) 局部之二

1.1.2 制造系统的组成与特点

根据系统状态是否随时间连续变化，可以将系统分为连续系统（Continuous System）和离散事件系统（Discrete Event System）。

连续系统是指系统状态与性能随时间发生连续性变化的一类系统。电厂的发电量、供电网络的负荷需求、炼油厂及自来水厂单位时间产量、河流的径流量、气温、生物体的生长与发育、化学反应等性能状态都具有连续性，相应的系统均为连续系统。常用的描述连续系统的数学方法包括常微分方

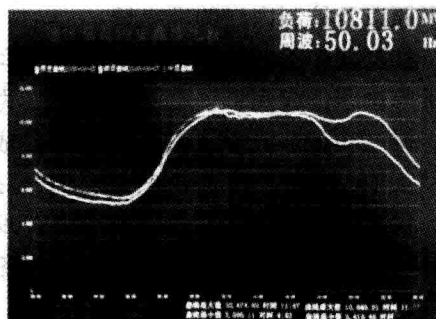


图 1-3 某地区用电负荷曲线

程、偏微分方程、状态空间方程以及脉冲响应函数等。图 1-3 所示为某地区的用电负荷曲线, 显然电力系统属于一类连续系统。

离散事件系统是指只有当在某个时间点上“事件 (Event)”发生时, 系统状态 (State) 才会发生改变的一类系统。也就是说, 系统状态的变化只发生在离散的时间点上, 并且状态通常会保持一段时间。此外, 系统状态的变化也会引发新的事件。例如, 在机械制造系统中, 毛坯到达、加工开始、设备故障等都是会引起系统状态改变的事件; 在超市、图书馆、理发店等服务系统中, 顾客到达、选择服务以及顾客离开等为此类系统中的事件。

对于大多数离散事件系统, 事件的发生具有随机性, 使得此类系统状态的变化具有随机性和动态性。因此, 此类系统也常被称为离散事件动态系统 (Discrete Event Dynamic System, DEDES)。根据事件及其发生次序的不同, 某一种系统状态可能会演变成多种新的状态。通常, 离散事件系统的状态难以用准确的函数加以描述, 但是通过统计分析, 我们可以获得系统处于不同状态下的概率等相关信息。

机电产品的生产车间、装配线、仓储系统、路口交通流量、车站/机场/码头客流量、电信网络的电话流量、理发店/商店/餐厅等服务系统都是典型的离散事件系统。图 1-4 所示为某车间待加工零件数量 (N) 与时间 (t) 的关系曲线, 显然待加工零件数量具有明显的离散特征。

制造业 (Manufacturing Industry) 是国民经济的支柱产业, 它与生产以及人们生活关系密切。科学技术进步和生产力水平的提高, 使得制造的内涵和外延不断得到拓展。广义的制造 (Manufacturing) 是指将可用的资源 (如物质、能量、信息等) 转化为可供人们利用和使用的工业产品或生活消费品的过程。它不仅指具体的工艺过程, 还包括市场分析、产品研发、设计、加工工艺、装配、检验、销售、售后服务以及报废产品回收等产品全生命周期过程。目前, 制造业涵盖机械、家电、通信、钢铁、汽车、轻工、食品、玩具、服装、军工等众多工业领域。

制造系统 (Manufacturing System) 是指以生产产品为目的, 由制造过程中的原材料、人员、能源、加工设备、物流设备、各类辅助装置以及设计方法、加工工艺、生产计划与调度、系统维护、管理规范等要素组成的具有特定功能的有机整体。制造系统具有以下特点:

- 1) 制造系统是由产品制造过程中相关软件、硬件以及人组成的有机整体。
- 2) 制造系统的输入为物质、能源、信息等资源, 输出为产品或半产品, 它是一个动态输入输出系统。
- 3) 制造系统涵盖产品制造的全过程, 包括市场分析、产品设计、工艺规划、加工、调度、装配、销售、售后服务以及回收处理等环节。

市场与客户需求、原材料供应、系统结构及其参数、资源配置规则、宏观经济环境等因素都会影响制造系统性能。近年来, 制造技术进步和经济全球化使得制造企业之间的竞争日趋激烈, 交货期 (Delivery)、产品质量 (Quality)、生产成本 (Cost)、服务 (Service) 以及环境保护 (Environment Protection) 等成为制造企业竞争力的主要表现形式, 也对制造系统的规划、设计与运营提出了更高要求。

机械制造是制造业的传统形式, 它是指利用机器制作或生产产品的过程。通常, 机械制

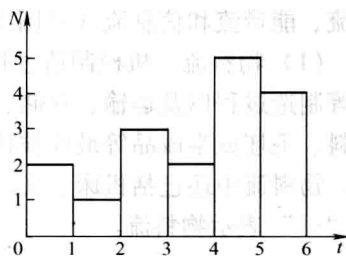


图 1-4 车间待加工零件数量与时间的关系

造系统包括机床、夹具、刀具、加工工艺、原材料、操作人员、管理人员、操作规范、技术要求等各类生产要素。单台加工设备 (Machining Equipment)、制造单元 (Manufacturing Cell)、制造车间 (Manufacturing Shop/Production Shop)、生产线/装配线 (Production Line/Assembly Line)、柔性制造系统 (Flexible Manufacturing System, FMS)、计算机集成制造系统 (Computer Integrated Manufacturing System, CIMS) 以及制造企业 (Manufacturing Enterprise) 等都可以视为不同层次、不同规模的机械制造系统。

机械制造业不仅为工业生产和人们生活提供产品, 也为其他制造业提供基础装备。因此, 机械制造业是国民经济的基础产业。实际上, 机械制造系统的技术水平与管理水平已经成为一个国家或地区工业化程度以及综合竞争力的重要标志。本书的主要研究对象是机械制造系统, 以下简称为制造系统。

制造系统是一类复杂的离散事件动态系统, 它的输入为各种制造资源 (如毛坯、半成品、能源、人力、信息等), 输出为零件、部件或产品。制造系统的运行过程始终伴随着物料流、能量流和信息流 (见图 1-5)。

(1) 物料流 机械制造过程是物质流动和状态变化的转化过程。通过加工、装配、检验等制造过程以及运输、存储、搬运、装夹、拆卸、包装、配送等物流环节, 输入系统的原材料、毛坯或半成品等最终被转换成产品或半成品等系统输出。除原材料、毛坯或半成品之外, 物料流中还包括机床、夹具、模具、刀具、量具以及物流设备等软硬件设备。图 1-5 中以 “ $\Rightarrow$ ” 表示物料流。

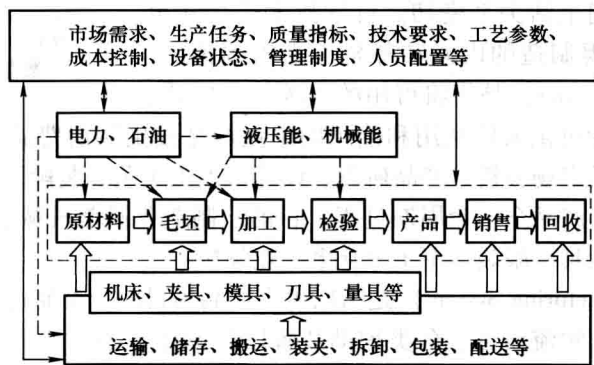


图 1-5 机械制造系统中的物料流、能量流和信息流

(2) 能量流 能量是驱动机械制造系统运行的动力源。机械制造系统也是一个能量转换系统, 机械加工和物流系统都需要能量驱动。通常, 驱动机械加工系统运动的原动力是电能, 通过电动机将电能转化为机械能, 完成切削加工动作, 使原材料 (或毛坯) 改变其形状或状态, 部分机械能再转化为液压能、气动能等形式以完成执行元件的特定动作。能量的其他形式还包括汽油或柴油燃烧产生的化学能等。图 1-5 中以 “- ->” 表示能量流。

(3) 信息流 信息是制造系统运行的基本条件。要使机械制造系统能够低成本、高质量、高效率地完成产品加工, 必须提供准确、及时和有效的信息, 包括市场需求、生产任务、产品质量指标、技术要求、加工工艺参数、加工设备及物流设备状态等。此外, 机械制造系统运行过程中, 各种信息参数是动态变化的, 信息必须及时地反馈与更新。因此, 与物料流和能量流有所不同, 信息流通常是双向的。图 1-5 中以 “ $\longleftrightarrow$ ” 表示信息流。

1.2 系统建模与仿真的基本概念

1.2.1 系统、模型与仿真的关系

为开发新系统或分析、研究已有系统的性能特征,通常需要进行试验。总体上,试验方法可以分为两类:一类方法是直接以实际系统为对象进行试验;另一类方法是先构造系统模型(Model of System),再通过对系统模型的试验来了解和验证系统的性能指标。

与直接的实物试验相比,基于模型的试验具有以下优点:①新系统还处于开发阶段,尚没有可供试验的真实系统,此时只能通过对模型的试验来分析、验证系统性能。例如,新型飞机、汽车、飞船等新产品的研制等。②对真实系统的试验可能会引起系统故障或破坏,给系统、环境、操作人员及其用户等带来危害或产生重大损失。例如,采用新技术的火箭、卫星以及载人飞船的发射,电力系统,铁路机车调度系统的操作培训等。③为得到真实的系统性能指标,往往需要进行多次试验,基于实物的试验周期长且成本高。④试验条件的一致性在保证试验结果准确性和可信性的重要条件,有时采用实物试验存在较大的难度。随着系统复杂性的增加和科学技术的进步,基于模型的试验方法得到越来越广泛的应用。

近几十年来,基于模型的试验受到人们重视。建立系统模型是开展模型试验的前提条件,这一过程称为系统建模(System Modeling)。模型(Model)是对实际或设计中系统的某种形式的抽象、简化与描述,通过模型可以分析系统的某些结构、状态、动态行为和能力。总体上,系统模型可以分为物理模型、数学模型以及物理—数学模型等类型。

物理模型(Physical Model)是采用特定的材料和工艺,根据相似性原则按一定比例制作的系统模型,以便通过试验对系统某些方面性能作出评估。例如,研制新型飞机时,一般先要对按比例缩小的飞机模型进行风洞试验,验证飞机的空气动力学性能;开发新型轮船时,一般先要在水池中对缩小的轮船模型进行试验,以便了解轮船的各种动力特性;工程建设或发电站选址时需要建立沙盘等模型,以便对项目在发电、防洪、生态、环境等方面的作用或效果作出评估;军事演习中通常采用沙盘模型完成交战双方军事运筹的推演;企业选址和车间布局时,通过建立企业或车间模型,以便进行多方案评估与论证。此外,建筑模型、城市规划模型等也属于物理模型。

数学模型(Mathematical Model)采用符号、数学方程、数学函数或数据表格等方法定义系统各元素之间的关系,再利用对数学模型的试验以获得现实系统的性能特征和运行规律。例如,国家或地区人口增长模型、经济增长预测模型、系统可靠性评估模型等。

除数学模型和物理模型外,还有物理—数学模型(Physical-mathematical Model),也称为半物理模型(Semi-physical Model)。物理—数学模型是一种混合模型,它有机地结合了物理模型和数学模型的优点。例如,航空、航天仿真训练器、发电厂调度仿真训练器等。

如前所述,建立系统模型的目的在于通过模型来分析系统性能。仿真(Simulation)是通过对系统模型的试验,研究已存在的或设计中的系统性能的方法与技术。简单地说,仿真就是一种基于模型的活动。

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,为系统设计提供决策支持和科学依据。根据仿真模

型的不同,仿真可以分为物理仿真、数学仿真以及物理—数学仿真。物理仿真是通过对实际存在的模型试验来研究系统性能,如飞机的风洞试验、建筑模型的抗震试验、新汽车研发中的碰撞试验等。数学仿真是利用系统的数学模型代替实际系统进行试验研究,以获得现实系统的特征和规律,如基于有限元分析和虚拟现实技术开展汽车碰撞试验等。物理—数学仿真是前两者的有机结合。显然,如果采用数学仿真可以研究实际系统性能,将能显著降低模型试验的时间及成本。

图 1-6 所示为几种系统仿真案例。其中,图 1-6d 为物理仿真试验,图 1-6a、1-6b 为物理—数学仿真试验,图 1-6c、图 1-6e 为数学仿真试验。它们分别适用于不同的研究对象。

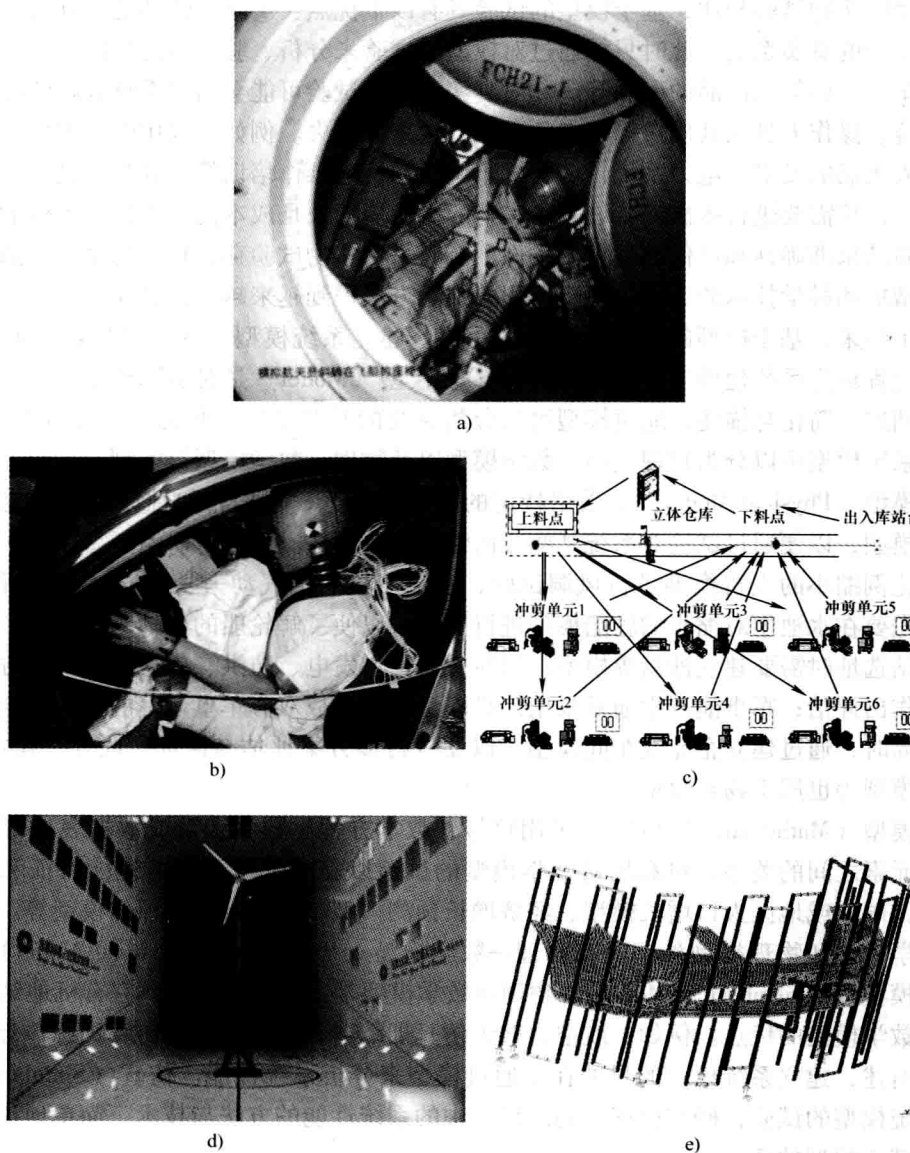


图 1-6 系统仿真案例

- a) 模拟航天员太空生存环境试验 b) 汽车碰撞试验中的模拟驾驶员
 c) 板材柔性制造系统 (FMS) 配置的仿真试验 d) 工程结构件的风洞试验 e) 汽车保险杠注塑成型工艺仿真

综上所述,系统、模型与仿真三者之间关系密切。其中,系统是要研究的对象,模型是系统在某种程度和层次上的抽象,而仿真则是通过对模型的试验,以便分析、评价和优化系统的一种技术手段。一般情况下,系统、模型与仿真三者之间关系;如图1-7所示。

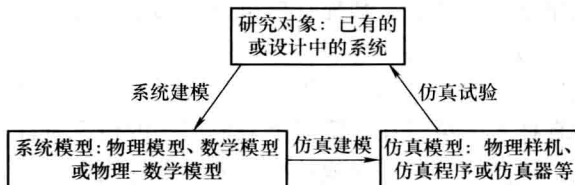


图 1-7 系统、模型与仿真之间的关系分析

随着计算数学的成熟和计算机软硬件技术的发展,人们越来越多地以数学模型和计算机技术来分析和优化系统,形成了计算机仿真(Computer Simulation)技术。计算机仿真属于数学仿真,它的实质是仿真过程的数字化,因而也称为数字化仿真(Digital Simulation)。

1.2.2 系统建模与仿真技术的功用

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的简化,能更加真实地反映系统的结构及其动态特性。此外,对于离散事件系统而言,仿真模型具有表达各类规则的能力,更加符合工程实际。

目前,数字化仿真已广泛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、参数以及性能优化研究的有效工具。表1-1给出了仿真技术在产品研发中的部分应用。

表 1-1 仿真技术在产品研发中的部分应用

阶 段	应用 内 容
概念性设计	对产品或制造系统的设计方案进行技术、经济分析和可行性论证
设计建模	建立零部件及制造系统模型,以判断产品造型、结构以及物理特性是否满足要求
设计分析	仿真分析零部件以及制造系统的运动学、静力学、动力学、可靠性(寿命)等性能
设计优化	优化系统的材料、结构、配置以及其他参数,实现系统性能优化
制造	通过对加工、装配以及生产工艺的仿真,评价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;通过调整系统结构和参数,改进及优化系统性能

对制造企业而言,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,产品以及系统全生命周期的综合性能(如交货期、质量、成本以及服务等)最优成为设计的核心准则。

但是,物理仿真往往难以复现产品或系统在全生命周期内可能经历的各种复杂工作环境,或因复现环境的代价太高而不易付诸实施。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可能表现,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。简单的计算分析难以准确地预测处于设计中的产品的实际性能,通常需要通过试制样机和对样机试验结果的分析,确定设计方案的优劣,以便修改和完善设计。因此,产品开发的繁复性大、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模拟,提高设计的一次成功率,缩短设计周期。

据报道,美国波音公司在 777 型飞机开发时就已经广泛采用数字化仿真技术,在计算机和网络环境中完成了飞机设计、制造、装配和试飞的全部过程,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。波音 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,能够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乘员的安全性。在传统的车身覆盖件开发中,每种车型都要进行碰撞试验,以验证车身的变形状况和对驾乘人员生命安全的保障性,多者需要毁坏十几辆车(图 1-8)。如果碰撞试验结果不符合相关技术规范,则需要对产品的设计、制造工艺以及模具等作出修改,由此会给企业造成巨大的经济损失。基于计算机软件的汽车碰撞仿真试验,可以减少碰撞试验的次数甚至取消碰撞试验,极大地降低了开发成本(图 1-9)。



图 1-8 汽车碰撞试验



图 1-9 汽车碰撞的仿真试验

目前,宝马、奔驰、福特等世界领先汽车制造企业的汽车新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环境下,传统的串行工程和物理样机开发模式已经被并行开发过程所取代,产品的概念设计、样机制造、样机性能试验以及改进、优化等所有环节都在计算机和网络环境中完成,极大地加快了新品开发速度、降低了开发成本,使企业在激烈的市场竞争中保持优势。

近年来,仿真技术在国内的汽车、飞机、船舶、家电等产品开发中得到广泛应用。例如,国产汽车自主品牌——奇瑞汽车重视数字化仿真技术,从海内外引进 100 多位专业技术

人员，建立了具有国际领先水平的汽车研发仿真平台，分析对象覆盖所有关键零部件、子系统以及整车，具备了从概念设计到样机制造的全过程仿真验证能力。高水平仿真平台的建立，有效地缩短了新品开发周期、提高了市场响应速度、降低了开发成本，对提高产品安全性、耐用性、综合性能发挥了重要作用。数字化仿真推动了奇瑞的自主研发和技术创新，成为奇瑞汽车研发、设计和生产中不可或缺的技术手段。2008年6月，奇瑞被国内计算机辅助工程领域权威机构——中国CAE组委会授予“2008年中国CAE领域杰出贡献奖”。

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），系统操作人员必须经过严格培训。若以真实产品或系统进行培训，成本极高，且存在很大风险。采用数字化仿真技术，可以再现系统的运行过程，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、商务、商业等领域。表1-2列举了建模与仿真技术的部分应用领域。

表 1-2 建模与仿真技术的部分应用领域

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、生产线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	半导体制造中在制品质量控制、晶圆生产工艺及参数优化、晶圆生产线调度优化
工程与项目管理	水电站选址、港口建设项目效益评价、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、项目技术可行性论证
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、载人航天发射全程仿真
物流及供应链管理	企业库存管理、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、运输企业效益评估、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

1.3 制造系统建模与仿真的基本概念

1.3.1 制造系统建模与仿真的特点分析

如前所述，制造系统是一类加工和处理系统。它通常由多个工位（Workstation）和多台设备（Equipment）构成，通过各工位一系列加工（Processing）和操作（Operation）活动，将输入的实体（Entity），如原材料（Raw Material）、零件（Component）或部件

(Subassembly) 等, 转变为成品 (Finished Product)。制造系统是仿真技术最重要的应用领域之一。

与其他类型系统相比, 制造系统建模与仿真具有以下特点: ①各工位的加工和操作时间为定值, 或服从一定分布。②输入实体 (如毛坯) 的到达时间和频率为确定值, 或服从一定分布。③实体 (如零件) 加工和操作的工序路径相对固定。但是, 由于冗余和并行设备的存在, 实体在系统中的流动路径通常具有柔性, 而不同加工路径意味着不同的系统性能。④加工和物流操作的对象可能是成批 (Batch) 的实体, 也可能是单个实体。⑤各工位和设备的可靠性 (Reliability)、故障停机时间 (Downtime) 以及班次 (Shift) 安排等对系统性能有重要影响。⑥物料搬运设备是制造系统的重要组成部分, 它们的性能、参数对制造系统有很大影响。⑦对高度机械化 (Mechanization) 和自动化 (Automation) 的制造系统而言, 建模与仿真中的操作人员 (Operator) 通常不是重点考虑的因素, 但是调度和控制规则对系统性能有显著影响。⑧建模与仿真技术主要关注制造系统的稳态 (Steady State) 行为和特征, 即统计意义上的系统特性。

仿真常用来评价系统设计方案、优化设计参数以及制定系统调度策略等, 成为制造系统性能持续改进的决策支持工具。例如, 仿真可以为新制造系统的规划、设计提供技术支持, 帮助工程师改进制造系统的物理布局 (Physical Layout), 优化物料搬运系统 (Material Handling System) 的设计与调度, 减少制造系统的占地面积, 提高系统的运行效率; 仿真还可以用于评价员工的工作效率、加工设备的运营状况, 提出合理的规则 (Rule)、决策 (Decision) 和算法 (Algorithm), 以改进生产运营、库存管理和物流搬运系统的效率; 仿真可以为仓库 (Warehouse)、配送中心 (Distribution Center) 等物流设施的优化提供技术支持; 仿真可以用来控制和减少在制品 (Work In Process, WIP) 数量, 降低库存水平, 减少库存成本, 以实现准时制生产 (Just In Time, JIT) 或按订单生产 (Make to Order, MTO); 仿真还可以用来发现制造系统的瓶颈 (Bottleneck) 工位, 寻找影响制造系统性能提升的约束条件 (Constraint Conditions), 并通过去除瓶颈或消除约束来改善制造系统的性能。

系统建模和仿真时, 首先要确定研究对象的范围 (Scope) 和详细程度 (Level of Details)。其中, 范围用来界定系统的组成和结构, 以决定系统模型中应包含哪些建模元素; 详细程度则是根据研究目标决定模型应描述到什么层次和深度, 需要输入哪些数据、数据类型、精度以及有关系统的先验知识 (Prior Knowledge) 等。

对于制造系统的短期决策问题 (如车间的实时控制、调度等), 通常需要建立较为详细的系统模型, 体现模型与系统的相似性, 以便更加准确地反映、乃至再现系统的实际状况。对于制造系统的长期决策问题, 由于决策的宏观性和数据的模糊性, 模型一般相对粗糙、分辨率较低, 不一定强调与实际系统的逐一对应。

此外, 对于设计中或尚不存在的系统, 由于先验知识和已知数据非常有限, 一般需要根据类似的或已有的系统作出假设。因此, 开始建模时, 模型应尽可能简单。随着对系统特性的逐步深入了解, 再不断地完善模型, 以便更加准确地反映系统实际。

1.3.2 制造系统的建模元素及常用术语

制造系统类型众多、性能要求各异, 使得制造系统建模与仿真研究的目标具有多样性。

表 1-3 分析了机械制造系统仿真研究目标及其建模元素。

表 1-3 机械制造系统仿真研究目标及其建模元素

系统类型	建模元素
车间布局 (Plant Layout)	车间, 面积, 距离, 加工设备类型及数量, 物流设备及数量, 成本, 时间
物料处理系统 (Material Handling System)	AGV, 堆垛机, 输送机, 存储装置, 托盘, 货架, 叉车, 小车, 行车, 距离, 速度, 停靠点, 存、取时间, 行驶时间
系统维修 (System Maintenance)	故障类型, 故障时间分布, 维修设备, 维修人员, 维修调度策略, 维修工具, 维修时间分布
产品制造 (Product Management)	产品名称、类型, 工艺流程及时间, 数量, 所需资源, 物料清单 (BOM)
生产调度 (Production Scheduling)	调度目标 (时间、成本、效益), 任务构成, 设备及其参数, 调度规则
生产控制 (Production Control)	加工任务, 加工设备, 操作人员, 任务分配, 控制规则
供应链 (Supply Chain)	供应商名称, 等级, 价格, 数量, 订单, 交货期, 交货方式
库存 (Storage)	库存容量, 库存成本, 备件数, 在制品, 产品, 货格数量
配送销售 (Distribution and Marketing)	配送中心, 批发商, 零售商, 订单, 距离, 运输方式, 运输时间, 成本

虽然制造系统仿真研究的目标众多, 但是在系统建模与仿真中还是存在一些共性的名词术语。以机械制造系统为例, 系统建模与仿真中的常用术语及其含义见表 1-4。

表 1-4 机械制造系统建模与仿真中的常用术语

术 语	含 义
操作 (Operation)	操作是指在一个工位对实体的一次作业活动。装夹、切削加工、装配、拆卸、检测等都是常见的操作。通常, 操作会改变实体的物理状态或结构
工位 (Workstation)	工位是完成操作的场所或区域。工位可以是一台或几台设备及相关的操作人员
加工设备 (Equipment 或 Machining Device)	加工设备是对加工对象完成指定操作 (如切削、检测、仓储、物流等) 的装备
操作人员 (Operator 或 Operating Personnel)	操作人员是制造系统中用于完成一定操作或决策的工人或技术员。它们常位于某个工位, 有时可完成“设备”的功能
工件 (Workpiece)	工件是设备、操作人员等加工的对象, 如毛坯、零件、元件、子装配体等
托盘 (Pallet)	托盘是用来收集、存放及运输工件的平板或箱体
主生产计划 (Master Production Scheduling, MPS)	主生产计划是一个产品在某一个给定时间段的生产计划, 通常为企业季度、半年度或年度拟生产或销售的产品数
生产计划 (Production Plan)	生产计划是以主生产计划为基础, 制定的针对具体产品及零部件的详细作业安排
物料清单 (Bill of Material, BOM)	物料清单也称为产品结构树。由主生产计划和物料清单, 可以确定零部件、原材料的采购及生产需求
路径 (Path)	路径是加工对象在制造系统中操作和流动的通道或运行轨迹。显然, 路径定义了设备之间的关系, 也影响车间布局
瓶颈 (Bottleneck)	瓶颈指制造系统中利用率最高的工位或加工时间需求与可用时间的比值最高的设备。也泛指影响系统性能改善的任何约束条件或限制性因素